발 간 등 록 번 호
11-1360000-100068-14

OPEN 공공누리 출처표시 상업용금지 변경금지 공공저작물 자유이용허락

겨울예보 사례분석

Why? How!

4

2025. 6.

예 보 국
재해기상대응팀

ISBN 979-11-6988-574-4(95450)

CONTENTS

1. 온난이류형 강수 ····· 1

1-1. 2017년 12월 9일 사례 ····· 1

1-2. 2017년 12월 10일 사례 ····· 5

1-3. 2017년 12월 29일 사례 ····· 10

1-4. 2018년 1월 30일 사례 ····· 14

1-5. 2018년 2월 14일 사례 ····· 18

1-6. 2021년 1월 12일 사례 ····· 23

1-7. 2021년 1월 18일 사례 ····· 26

1-8. 2024년 1월 9일 사례 ····· 29

1-9. 2025년 1월 5일 사례 ····· 35

2. 발해만 기압골 강수 ····· 43

2-1. 2017년 11월 25일 사례 ····· 43

2-2. 2017년 12월 18일 사례 ····· 47

2-3. 2019년 12월 19일 사례 ····· 50

2-4. 2020년 1월 14일 사례 ····· 53

2-5. 2021년 1월 6일 사례 ····· 55

2-6. 2022년 1월 19일 사례 ····· 58

2-7. 2023년 12월 30일 사례 ····· 62

3. 서해안형 강수 ····· 71
3-1. 2017년 11월 18일 사례 ····· 71
3-2. 2018년 1월 10일 사례 ····· 76
3-3. 2018년 1월 23일 사례 ····· 81
3-4. 2018년 1월 24일 사례 ····· 86
3-5. 2018년 12월 8일 사례 ····· 90
3-6. 2018년 12월 28일 사례 ····· 93
3-7. 2021년 12월 26일 사례 ····· 96
3-8. 2022년 12월 22~23일 사례 ····· 100
3-9. 2024년 11월 27~28일 사례 ····· 106

4. 동해안형 강수 ····· 116
4-1. 2018년 2월 24일 사례 ····· 116
4-2. 2018년 3월 4일 사례 ····· 121
4-3. 2018년 3월 15일 사례 ····· 127
4-4. 2019년 1월 31일 사례 ····· 132
4-5. 2019년 2월 14일 사례 ····· 136
4-6. 2023년 2월 14~15일 사례 ····· 140

5. 중층기압골 강수 ····· 148
5-1. 2019년 12월 26일 사례 ····· 148
5-2. 2022년 1월 5일 사례 ····· 154
5-3. 2025년 2월 12일 사례 ····· 156
5-4. 2025년 3월 2~3일 사례 ····· 162

6. 습구온도를 활용한 강수형태 판별 ····· 170
6-1. 2018년 2월 8일 사례 ····· 170
6-2. 2018년 11월 24일 사례 ····· 175
6-3. 2021년 1월 28일 사례 ····· 179
6-4. 2022년 1월 10일 사례 ····· 181
6-5. 2023년 1월 6일 사례 ····· 184
6-6. 2024년 1월 17일 사례 ····· 190
6-7. 2024년 2월 21일 사례 ····· 196

7. 실황분석 ····· 202
7-1. 2019년 1월 12일 사례 ····· 202
7-2. 2019년 12월 3일 사례 ····· 204

8. 그 외 유형 ····· 210
8-1. 2018년 2월 22일 사례 ····· 210
8-2. 2018년 1월 15일 사례 ····· 215
8-3. 2018년 1월 16일 사례 ····· 219
8-4. 2018년 1월 22일 사례 ····· 224
8-5. 2018년 3월 8일 사례 ····· 228
8-6. 2019년 1월 30일 사례 ····· 234
8-7. 2019년 2월 27일 사례 ····· 237
8-8. 2020년 1월 18일 사례 ····· 240
8-9. 2023년 1월 26일 사례 ····· 244
8-10. 2025년 3월 18일 사례 ····· 250

1. 온난이류형 강수

1-1. 2017년 12월 9일 사례

최하층(925hPa) 온난이류에 의한 중부지방 강수?

850hPa 이류가 없고, 중층 하강류 있다면 강수량 급감!

1. 예보와 실황은?

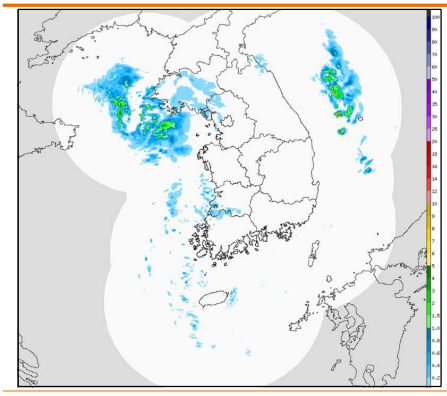
예보 (12월 8일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 경기남부, 충청도, 전북: 5mm 내외 - 서울, 강원영서남부, 전남: 5mm 미만 ▸ 예상적설 - 충청도: 1~5cm - 전북: 1~3cm - 경기남부, 서울, 강원영서남부, 전남: 1cm 내외	▸ 강수량 - 충남서해안, 전북 5mm 미만 ▸ 적설 - 충남 1cm 미만, 전북 1cm 내외

최심신적설 (cm)

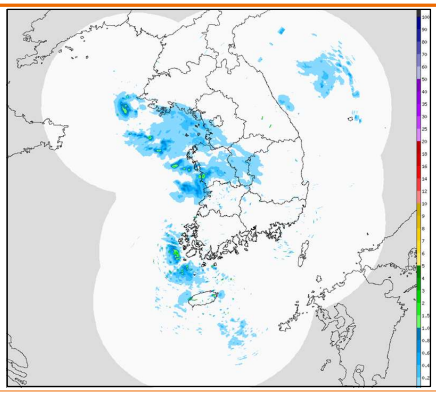
충청 단양 0.4 태안 0.5 홍성 0.3 보령 0.5

전북 새만금 1.0 줄포 0.4

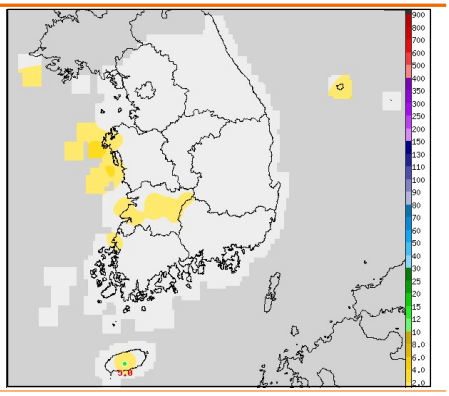
- 8일 오후부터 백령도 인근 해상으로 온난이류에 의하여 발달된 구름대 형성
- 강수대는 남동진하면서 세력이 점차 약화됨



12월 8일 18시 레이더 영상



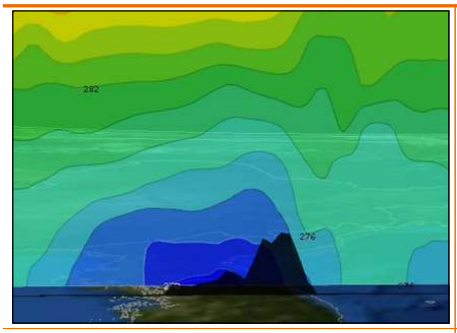
12월 9일 00시 레이더 영상



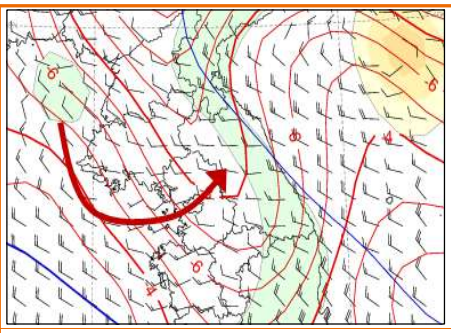
12월 9일 일강수량 분포

2. 강수 메커니즘은?

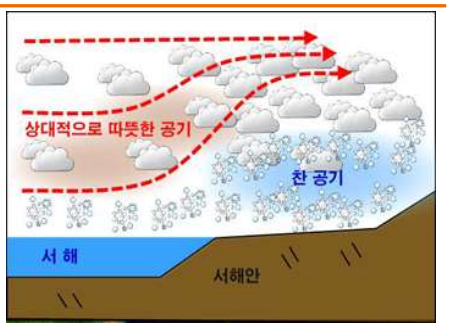
- **(한기축적)** 한반도 지역은 12월 7~8일 사이에 cP(시베리아고기압)의 영향을 받아 한기가 축적됨
- **(하층 난기이류)** 서해상으로 점차 난기이류가 형성되며 경압성이 높아지지만 전체적으로 풍속이 약하고 하층(925hPa)에서만 난기이류가 나타남
- 다만, cold pool이 강한 가운데 지상 저기압이 발달하며 서풍류가 남서류로 휘는 형태이기 때문에 강수 강도가 5mm 내외는 가능할 것으로 예측



12월 8일 21시 중부지방 cold pool



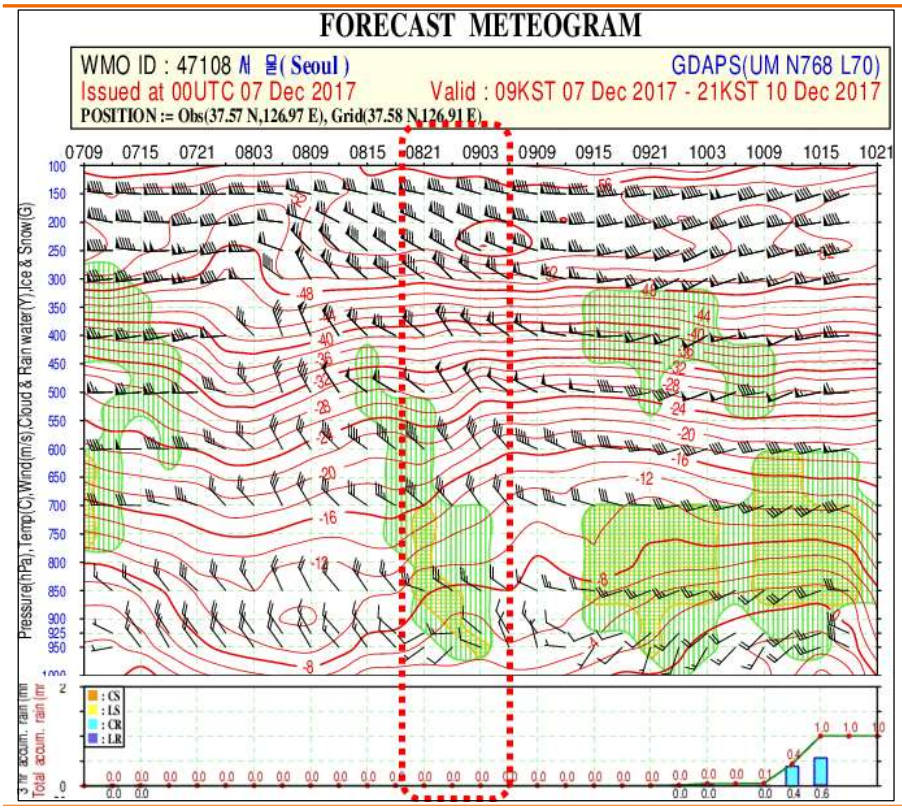
12월 8일 21시 925hPa 상세 바람장



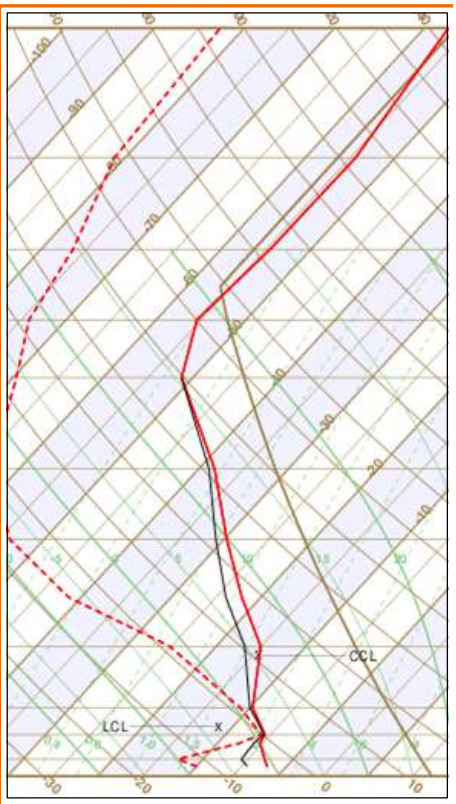
메커니즘 모식도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- 서울, 대전 등 해안에서 거리가 떨어진 곳은 0.2mm 내외의 매우 약한 강수를 모의하였고 보령·서산 등 충남해안을 중심으로 2~3mm의 강수를 모의
- 내륙은 하층(925hPa 이하) 대기를 건조하게 예측, 해안은 지상부터 포화되는 것으로 모의

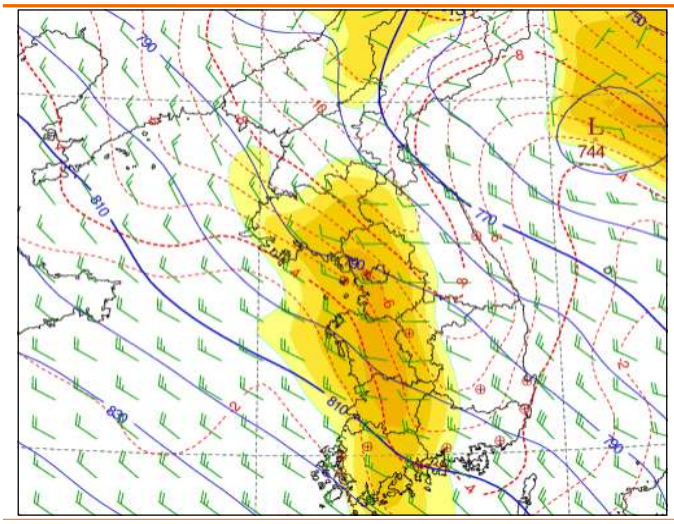


12월 7일 09시 서울 연직시계열

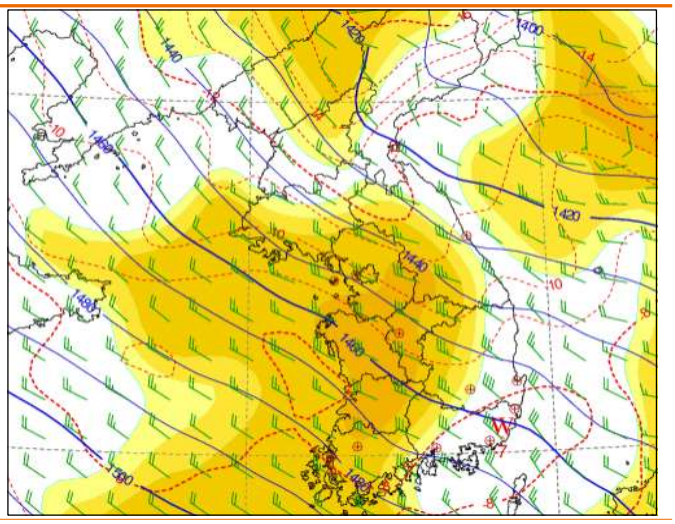


12월 9일 00시
서울 예상단열선도

- 925hPa 고도에서는 동서(서해안에서 내륙 방향)로 강한 온도경도가 나타나고 기류도 내륙 쪽으로 휘어 들어가면서 충분한 온난이류가 발생하는 것으로 모의
- 850hPa에서도 북서~남동 방향으로 기울어진 온도선들이 경도를 이루고 있지만 풍향이 온도선과 나란한 형태를 보이며 1.5km 부근에서 이류가 단절된 형태를 보임



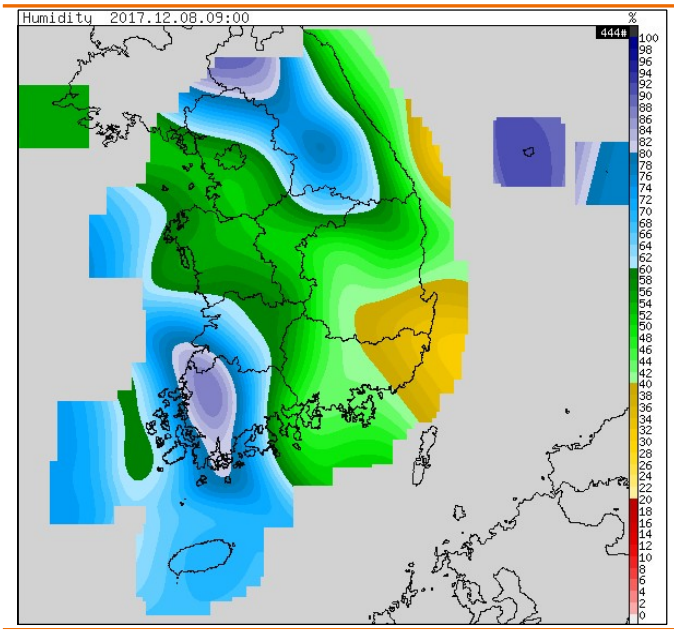
9일 00시 925hPa 상세바람 예상장



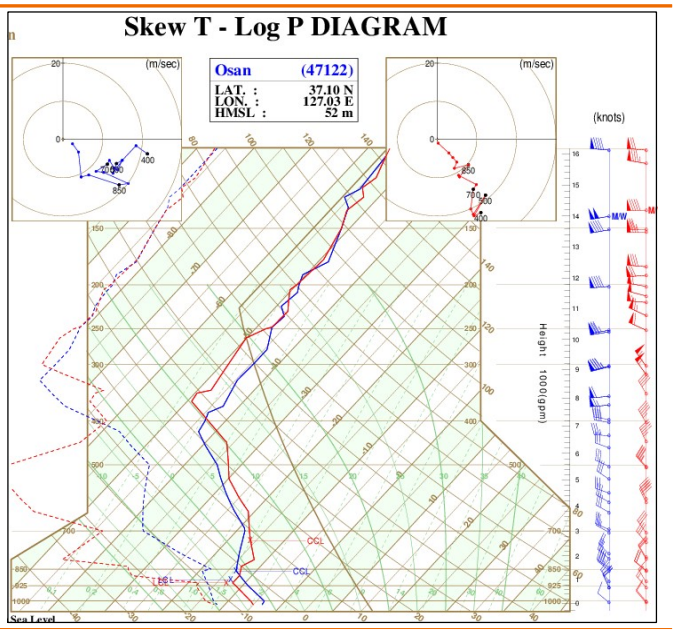
9일 00시 850hPa 상세바람 예상장

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **해상에서 발달한 구름대가 내륙에서도 세력 유지가 가능할지 검토했더라면**
  - 전일(12월 8일) 09시 925~850hPa 층이 매우 건조한 점, 수도권의 지상 습도가 약 50%인 점 등 대기 하층의 건조도를 확인했더라면
    ⇨ **하층의 건조함을 포화시키기 위해서는 구름대가 3km 이상 발달해야 함**

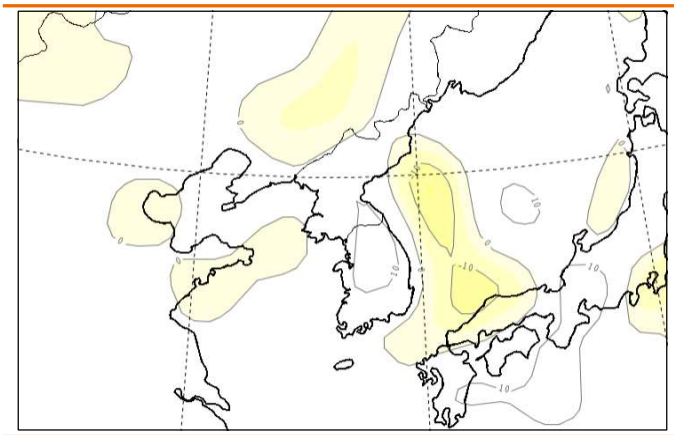
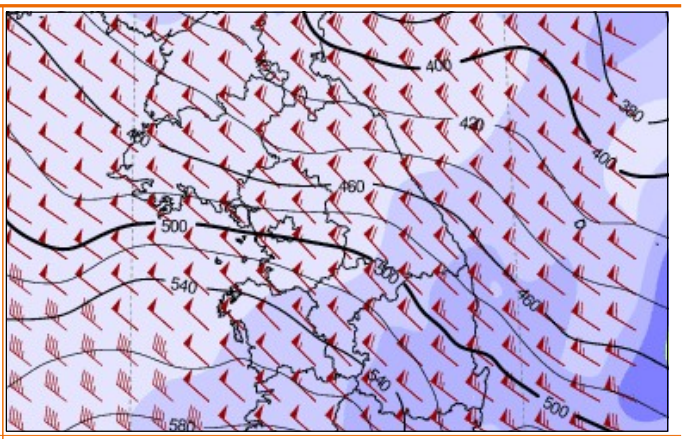


8일 09시 지상 습도 분포도



8일 09시 오산 단열선도

- **중층에 구름 발달을 방해하는 요인이 있는지 확인했더라면**
  - 850hPa에 온난이류에 의한 상승역이 있는지 또는 중층에 하강류가 있는지를 확인해야 함

	
8일 21시 850hPa 상승속도	**09일 03시 300K 등온위면**

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- **온난이류 강수는 하층에서 작동하지만, 중층 지원 여부가 강수량의 관건!**
  - 850hPa 상승류와 직결되는 850hPa 온난이류 유무 점검
    ⇨ **925hPa의 온난이류만으로는 구름대가 높게 발달하기 어렵고, 내륙 유입도 약함**
  - 상층골 이동에 따른 중층 하강류 유무 점검
    ⇨ **골 후면의 침강역에서는 구름의 상승을 억제하여 강수 강도가 약해짐**

1-2. 2017년 12월 10일 사례

발해만 저기압에 의한 수도권 예상보다 많은 적설

아침기온이 하강하는 추세 + 예상보다 약한 저기압

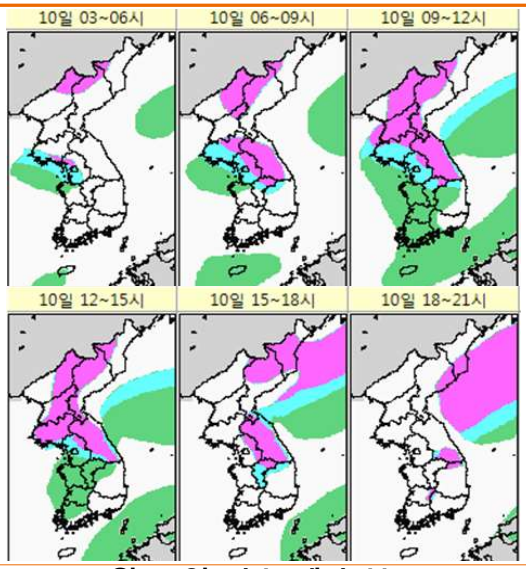
1. 예보와 실황은?

예보 (12월 9일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 서울, 경기도, 강원영서: 5~10mm - 강원영동, 충청도, 전라도, 경상도(동해안 제외), 제주도: 5mm 내외 ▸ 예상 적설 - 경기동부, 강원영서: 3~10cm, - 충북북부, 경북북부내륙, 제주산지: 1~5cm - 서울, 경기도(동부 제외), 전북동부내륙, 경남북서내륙: 1cm 내외	- 10일 새벽~오전에 난기가 이류 되면서 서울의 강수형태를 눈/비로 예상하였으나, 눈으로 시작하면서 예상보다 적설 증가

최심신적설 현황(cm)

서울.경기 서울 4.3 동두천 11.0 양평 9.5 하면 7.0 의정부 6.5 파주 5.3 구리 3.5 이천 2.5
강원영서 화천 11.5 양구 7.5 인제 6.5 북춘천 6.3 대화 5.0 철원 3.6 홍천 3.0 원주 1.4 영월 0.4
강원영동 미시령 7.0 진부령 4.5 어흘리 0.5 대기리 0.5 태백 0.0
충북북부 제천 1.5 단양 0.0 음성 0.0 수안보 0.0
전북내륙 남원 1.0 **경북북동** 석포 0.5

- 12월 10일 04시경 중부 서해안부터 저기압 전면에서 온난이류에 의해 강수 시작
- 온난이류 강수대가 남동진하고 저기압 후면에서 한기가 남하하면서 전선에 의한 강수대가 다시 발달하여 15시경 중부지방 통과



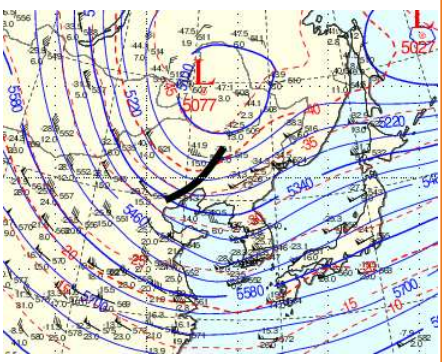
12월 10일 강수 예상 분포도

일.시:분	현재일기	ww	시정 km	전운량 1/10	중하운량 1/10	운형	현재기온 ℃
10.18:00	맑음		20	1	1	500	2.0
10.17:00	구름많음		10.61	8	8	500	3.6
10.16:00	비 끝남	21	6.22	9	9	500	5.4
10.15:00	약한비 단속	60	7.15	10	7	52/	6.7
10.14:00	박무	10	3.25	4	4	500	4.2
10.13:00	박무	10	2.3	8	8	500	3.3
10.12:00	비 끝남	21	2.45	10	7	51/	2.3
10.11:00	약한비 계속	61	1.37	10	8	72/	0.9
10.10:00	약 진눈깨비	68	1.43	10	8	72/	0.5
10.09:00	약한눈 단속	70	3.05	10	8	52/	0.2
10.08:00	약한눈 단속	70	3.78	10	8	52/	-0.2
10.07:00	약한눈 계속	71	1.21	10	7	72/	-0.4
10.06:00	보통눈 계속	73	0.91	10	7	72/	-0.5
10.05:00	약한눈 계속	71	1.78	10	7	72/	0.3

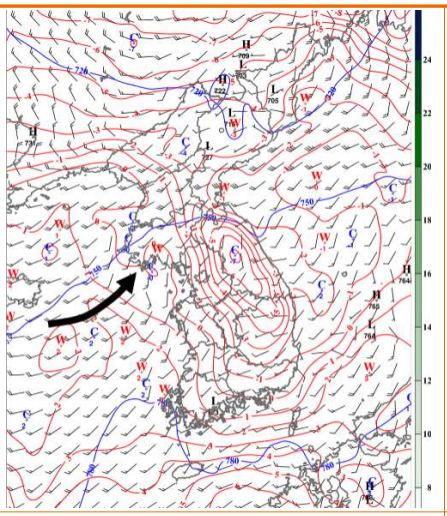
12월 10일 서울 관측소 기상 실황

2. 강수 메커니즘은?

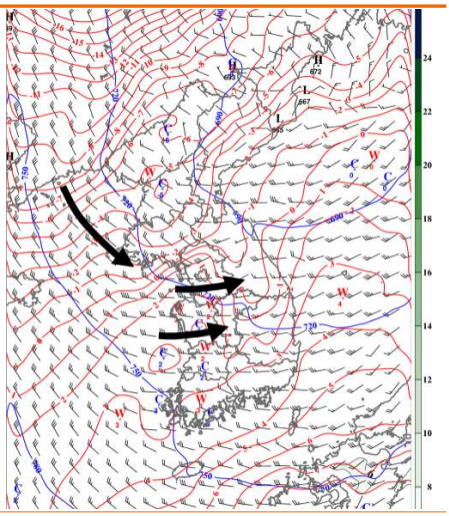
- **(발해만 저기압 전면 온난이류)** 500hPa 상층 기압골의 지원을 받아 발해만에서 지상 저기압이 발달하고 저기압 전면에서 남서풍의 난기 유입. 발해만 저기압과 일본 남동쪽 고기압 사이에서 남서풍 강화됨(850hPa 30kts, 925hPa 30kts)
- **(내륙 cold pool 형성)** 밤사이 내륙을 중심으로 기온이 하강한 가운데 난기 유입(해안선을 따라 온도 조밀역 형성). 찬 공기 위를 따뜻한 남서풍이 타고 오르며 강수대 발달
- **(저기압 후면 한기 남하)** 저기압이 발해만에서 북한지방을 지나 동해북부해상으로 이동하고 그 후면에서 북서풍을 타고 한기 남하. 상대적으로 따뜻한 공기를 찬 공기가 파고들면서 한랭전선에 의한 강수 발생



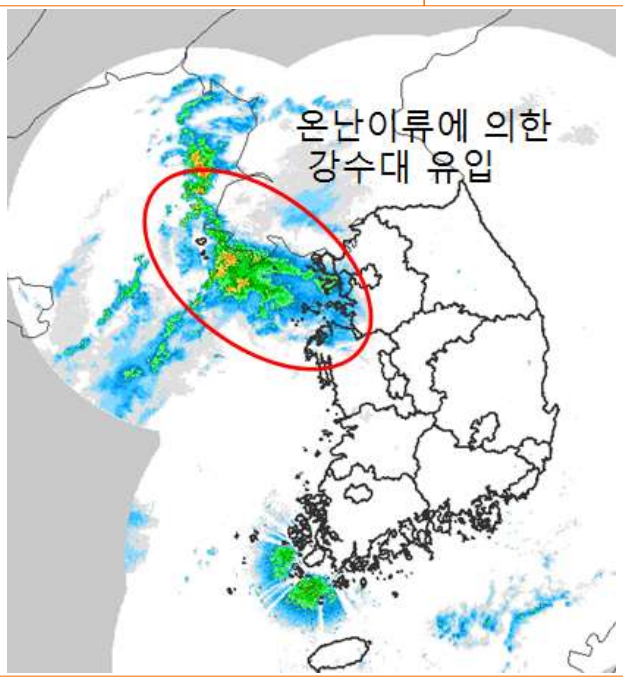
12월 10일 09시 500hPa 분석장



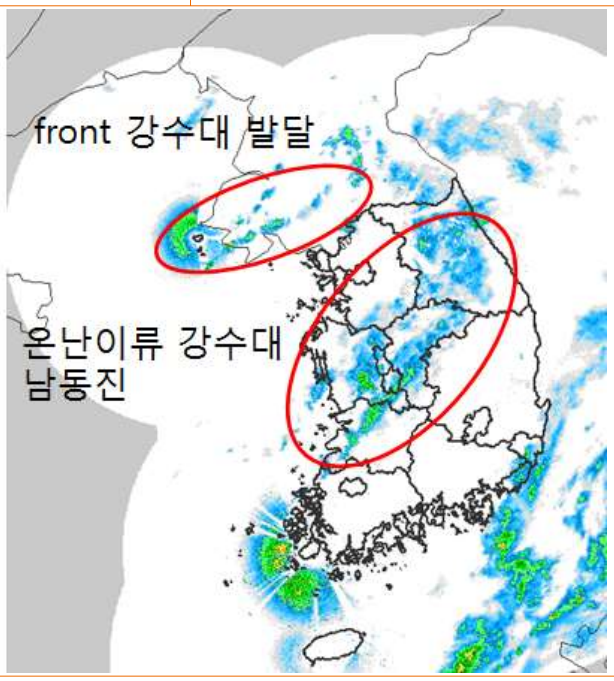
12월 10일 03시 925hPa VDAPS 고도, 기온, 비습, 바람



12월 10일 15시 925hPa VDAPS 고도, 기온, 비습, 바람



12월 10일 04시 레이더 영상

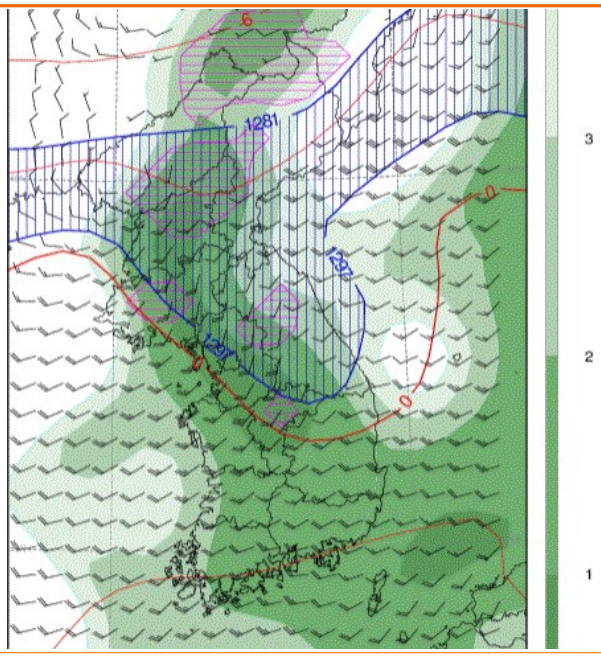


12월 10일 12시 레이더 영상

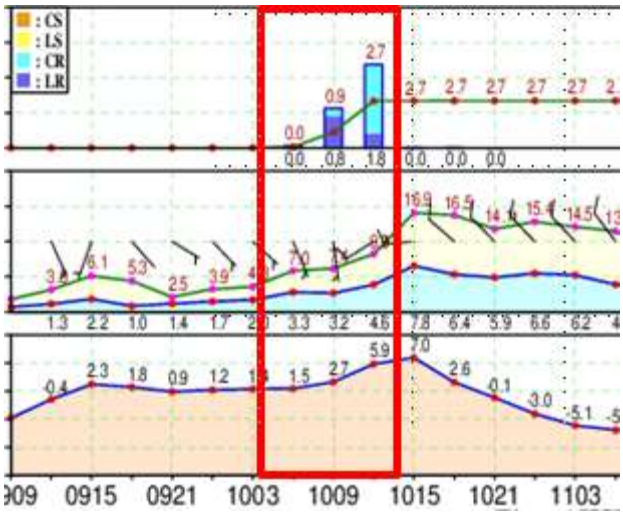
- **(강수피크)** 저기압 후면 한기이류가 예상보다 약하게 나타남. 오히려 내륙의 cold pool이 예상보다 강하게 형성되면서 온난이류에 의한 강수가 더 발달

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- 발해만 저기압 전면에서 온난이류로 인해 발생하는 강수와 저기압 후면에서 남하하는 한기에 의한 강수를 잘 모의함. 강수 피크는 온난이류에 의한 강수보다 저기압 후면 한기가 남하하면서 전선이 형성될 때 발생할 것으로 예상
- 눈비 판별을 위한 1000-850hPa 층후 예상장에서 강수가 시작될 것으로 예상되는 10일 06시(9일 09시 모델 기준)에 눈/비 혼재 구역 경계선인 1297선이 서울 북동쪽에 걸치면서 경기 북부와 동부, 강원도는 눈/비, 서울을 비롯한 경기 남부는 비 형태로 모의
- 925hPa 0℃ 등온선은 경기남부와 충북북부에 위치하지만, 낮까지 난기이류(925hPa 남서풍 30kts)가 지속되면서 기온이 상승하여 서울에는 적설이 쌓이기 힘들 것으로 예상. 기온이 낮고 산맥에 의한 강제 상승효과가 있는 강원영서를 중심으로 적설 모의



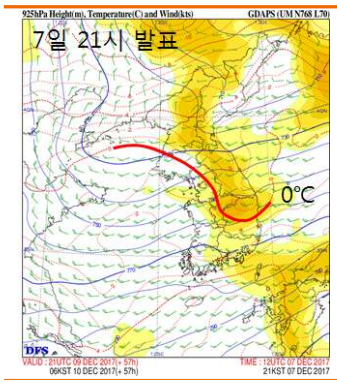
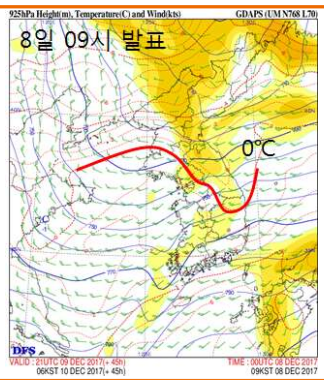
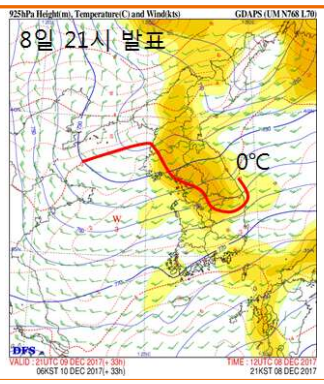
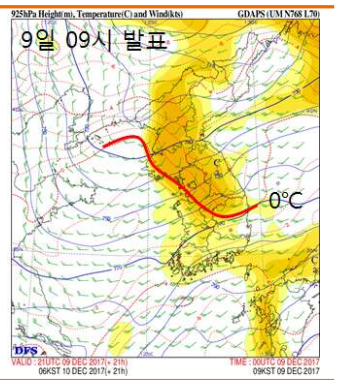
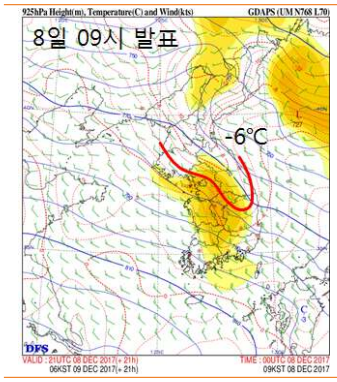
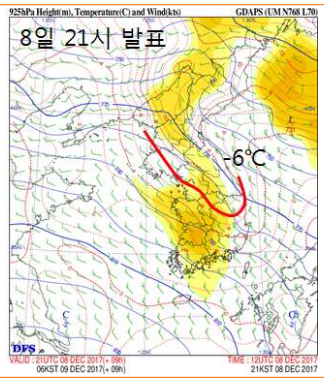
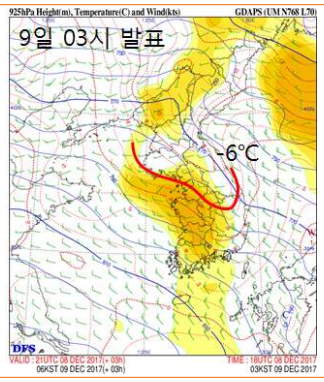
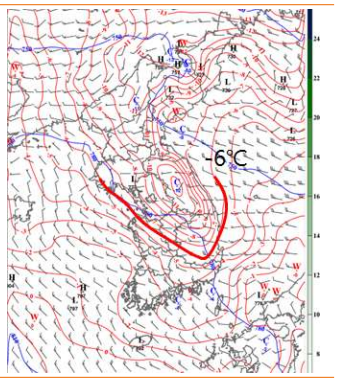
12월 10일 06시 1000-850 층후 예상장



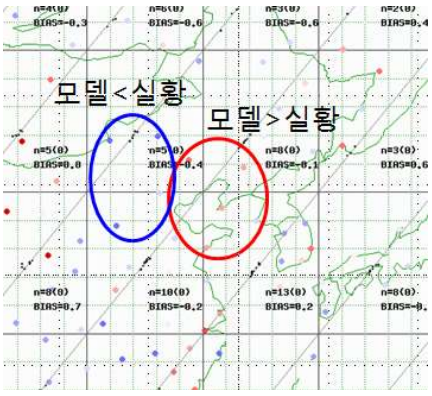
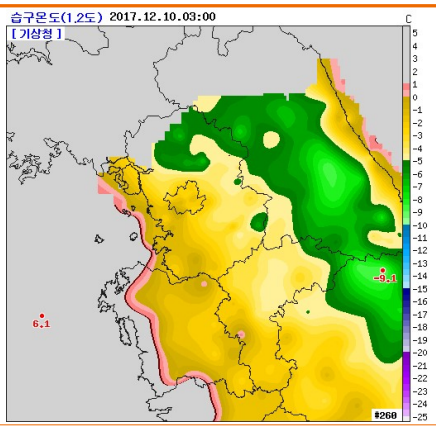
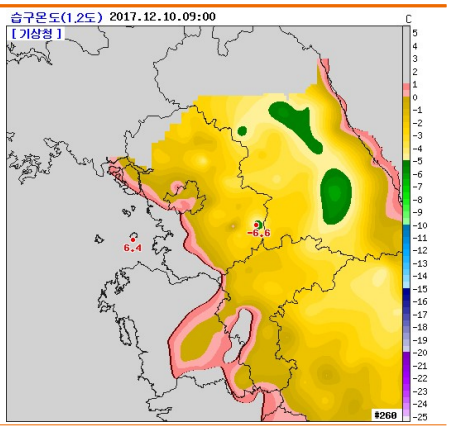
12월 9일 09시 서울 연직시계열 예상장

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **cold pool이 강화되는 경향을 놓치지 않았더라면**
  - 10일 06시 925hPa의 0℃ 선 위치가 전 모델에 비해 점차 남하하는 경향을 보이고 있었음
  - 특히, 전일(9일) 아침 최저기온이 모델 예상보다 낮게 형성되었고 최근(12월 3일, 12월 6일)에 발생한 온난이류 강수 사례에서도 모델이 하층의 cold pool을 잘 모의하지 못하는 경향이 나타남
    - ⇨ **아침최저기온에 대한 모델의 warm bias가 존재하고 온난 이류에 의한 강수를 잘 모의하지 못하는 경향**
    - ⇨ **10일 아침최저기온도 모델 예상보다 낮게 나타나면서 cold pool이 예상보다 강하게 형성됨**

			
12월 10일 06시 925hPa 상세바람 예상장(+57h)	**12월 10일 06시 925hPa 상세바람 예상장(+45h)**	**12월 10일 06시 925hPa 상세바람 예상장(+33h)**	**12월 10일 06시 925hPa 상세바람 예상장(+21h)**
			
12월 9일 06시 925hPa 상세바람 예상장(+21h)	**12월 9일 06시 925hPa 상세바람 예상장(+09h)**	**12월 9일 06시 925hPa 상세바람 예상장(+03h)**	**12월 9일 06시 VDAPS 925hPa 고도,기온,비습,바람**

- **저기압 전면 난기 유입 강도**
  - 발해만 북서쪽에 있던 기압골이 예상보다 약하게 발달하였음(850hPa을 기준으로 기압골 전면의 온난이류와 후면의 한랭이류가 모델 예상보다 약함)
  - 9일 09시를 기준으로 850hPa 기온에 대해 GDAPS 예상장과 GTS 분석장을 비교해보면, 기압골 전면의 온난이류가 예상보다 약하고(실황 기온이 모델 예상보다 낮음) 기압골 후면의 한기이류도 모델에서 모의하는 것보다 약한(실황 기온이 모델 예상보다 높음) 것을 알 수 있음
    - ⇨ **아침 최저기온이 예상보다 낮은 상태에서 저기압 전면 난기 유입도 약해 지상 기온 상승에 한계**
    - ⇨ **저기압 후면의 한기이류도 약해 한랭전선 강수도 예상보다 약할 가능성 시사**
- **습구온도 실황을 놓치지 않았더라면**
  - 눈/비 판별에 기준이 되는 습구온도 1.2℃ 선의 분포를 통해 강수형태와 적설의 초단기적 실황 대처 가능
  - 강수 시작 직전인 10일 03시 습구온도 1.2℃ 선이 서해안에 위치하고 내륙은 대부분 습구온도 0℃ 이하의 분포를 보이면서 서울, 경기도에는 눈으로 시작될 가능성 있었음
  - 09시 이후에 기온이 오르면서 습구온도도 1.2℃ 이상 영역 확장하기 시작

		
12월 9일 09시 850hPa 기온 (GDAPS-GTS)	**12월 10일 03시 습구온도 분포도**	**12월 10일 09시 습구온도 분포도**

5. 향후 유사유형 시 고려해야할 것은?

- 이번 사례는 아침 최저기온, 저기압 전면의 난기이류 및 후면의 한기이류 강도에 대해 과대모의 하면서 강수형태와 강수 피크 시점에 오차를 보였음
- 저기압에 의한 강수 예상 시 실황과 모델의 비교를 통해 저기압의 발달 정도와 이동 속도 및 경로 등의 변동 가능성을 유추할 수 있으므로 최근 사례를 통한 모델의 경향과 실황 분석을 통하여 모델의 오차를 분석하는 것이 중요함

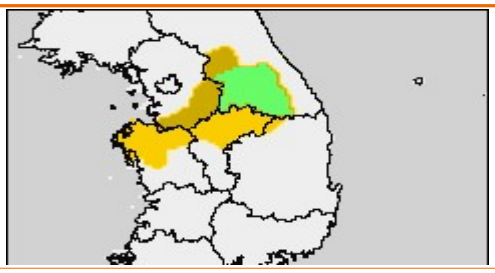
1-3. 2017년 12월 29일 사례

발달하지 못하고, 내륙 깊이 유입되지 못한 온난이류 강수

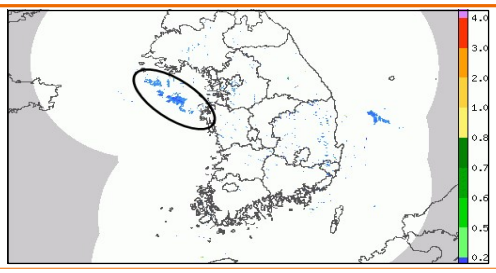
기압골 발달 여부와 기류 상승 억제 요인을 고려했다면

1. 예보와 실황은?

예보 (12월 28일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 경기남부, 강원영서, 충청북부, 경북북부내륙 : 5mm 미만 ▸ 예상 적설 - 경기남부, 강원영서, 충청북부, 경북북부내륙 : 1~3cm	▸ 일부 충남서해안을 제외한 중부지방과 전라북도에 빗방울 또는 눈 날림 - 수도권, 강원영서 눈 날림. 충남 태안군 0.5mm 강수량 기록. 그 밖 빗방울 ▸ 주 강수대는 경기만 서쪽에 위치. 남동진하면서 점차 약화



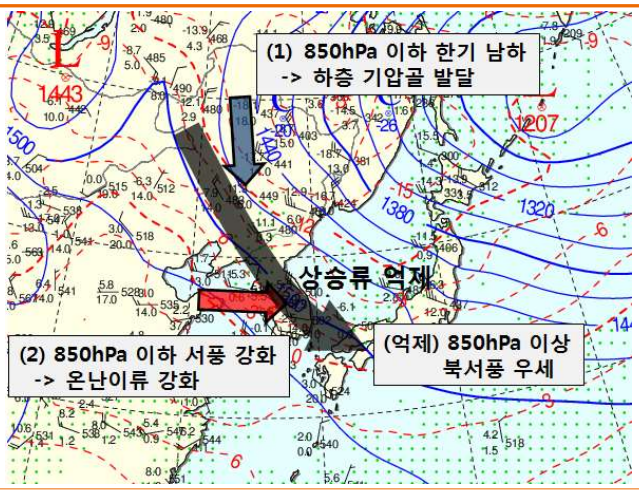
29일 00~06시 예상 적설



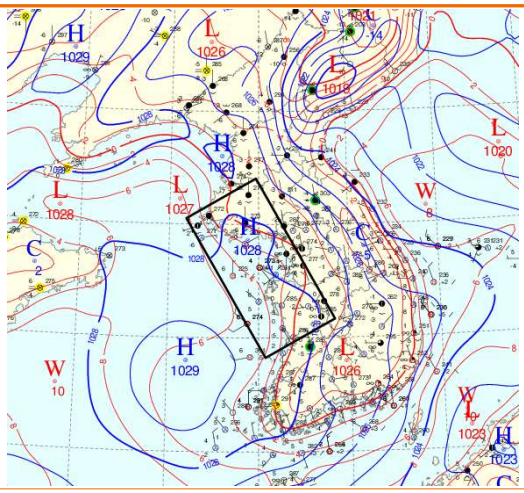
29일 00시 레이더 강설 영상

2. 강수 메커니즘은?

- **(하층 기압골 형성)** 우리나라 북쪽으로 상층 기압골이 통과하면서 850hPa –12℃ 이하의 하층 찬 공기가 남하하여 약한 하층 기압골이 형성됨
- **(온난이류 강화)** 북쪽에 하층 기압골이 형성되면서 중부지방에는 서풍이 20kts 이상으로 강화되고 내륙에 있는 찬 공기의 영향으로 온도경도가 강화됨. 즉 온난이류 강화로 인해 상승기류가 발생
- **(온도경도구역 해상에 위치)** 구름대가 28일 밤늦게 유입되면서 내륙에 cold pool이 형성되기에 충분. 하층 온도경도 구역이 경기만 부근에 위치하면서 주 강수역도 해상에 위치함

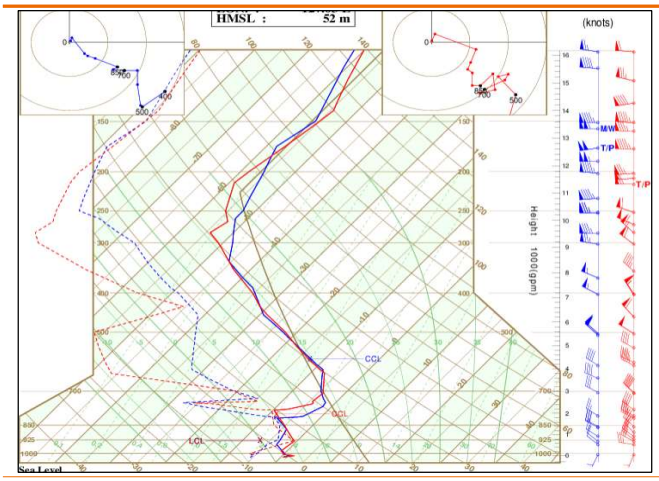


12월 28일 21시 850hPa 일기도와 주변 기류 모식도

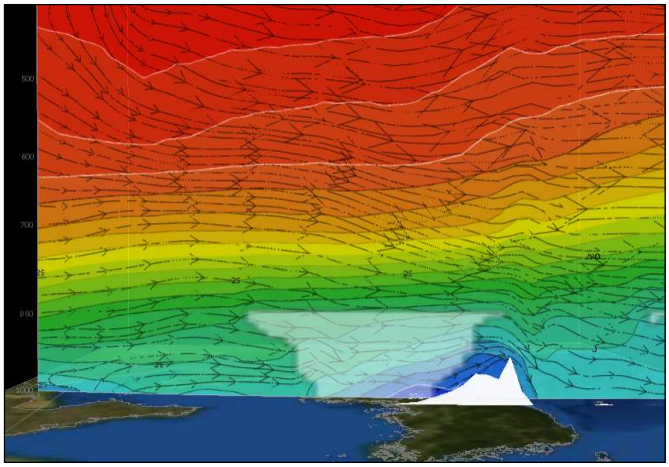


12월 29일 03시한반도 분석장

- **(한반도 주변 상승류 억제)** 850hPa 이상 상층으로 북서풍의 하강류가 지배하고 온위가 급격하게 상승하는 열적으로도 매우 안정된 대기
- **(낮은 수상당량비)** 오산의 850hPa 기온 –5.3℃, 습윤층의 기온 –10~0℃의 분포로 빙정이 성장하기에 다소 불리한 조건



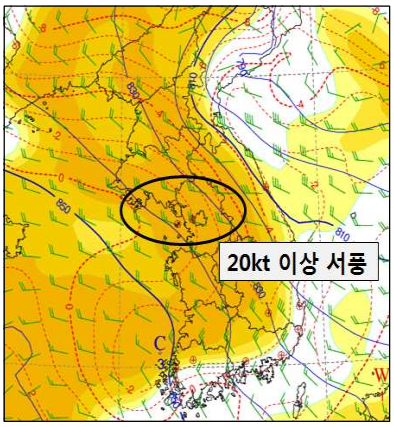
12월 29일 03시 오산 단열선도



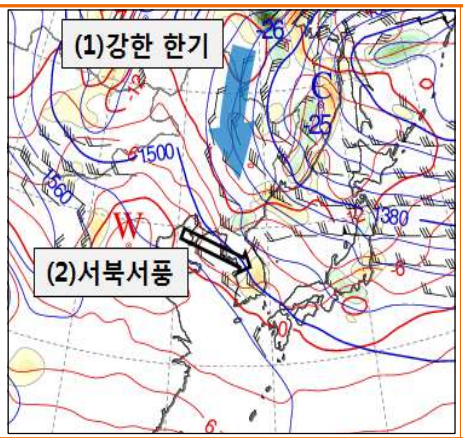
12월 29일 03시
온위+유선+습수 연직단면(초기장)

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

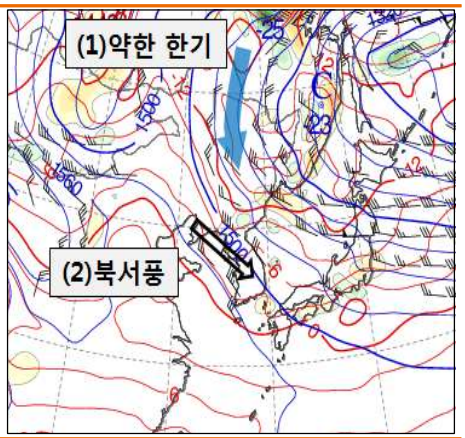
- **(모델 예상)** 상세바람장을 보면 925hPa 부근으로 서풍에 가까운 풍계 모의. 내륙까지 925hPa 25kts 이상의 서풍류의 강풍대를 모의하면서 내륙까지 온난이류 예상
- **(실황)** 실제 오산 단열선도에서 925hPa 부근에는 **북서풍에 가까운 풍계로 나타남**
- **(원인)** 북쪽에서 남하하는 한기가 예상보다 약해 중부지방의 하층 풍계가 북서풍에서 서풍으로 크게 눕지 못함. 850hPa 예상장과 초기장을 비교해보면 한기 이류의 강도에 따라 중부지방의 풍계가 다르게 나타남을 알 수 있음
- 주 강수대는 해상에 위치하고 내륙에는 약화된 구름대가 유입되면서 눈 날림



12월 29일 03시 925hPa 상세바람장(+18H)



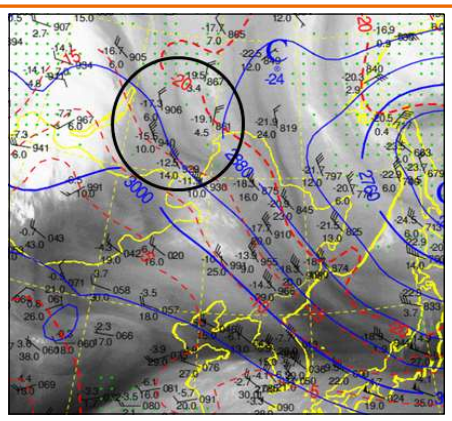
12월 29일 03시 850hPa 예상장(+18H)



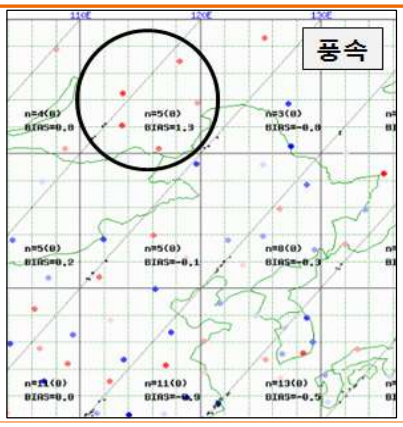
12월 29일 03시 850hPa 초기장

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **수치모델과 실황을 비교하여 오차를 반영했더라면**
  - 전일(28일) 09시 바이칼호 동쪽에는 건조역(수증기영상)이 위치하고 700hPa 층으로 찬 공기가 남하하면서 풍속이 강해지고 있었음
  - 당일(29일) 바이칼호 동쪽 지역의 700hPa 기온과 풍속을 각각 모델 초기장과 GTS 실황 자료로 비교해보면 기온은 음의 편차, 풍속은 양의 편차가 나타나는데 이는 모델이 실황보다 더 기온이 낮고, 풍속은 강한 상태로 모의를 시작하고 있는 것임
    ⇨ **실제 한기 남하는 예상보다 약해질 수 있음을 고려**
    ⇨ 따라서 **하층 기압골 형성이 어려워져 중부지방의 풍계가 서풍으로 강화되기 어려울 가능성을 고려해야 함**



12월 28일 09시 700hPa 분석장

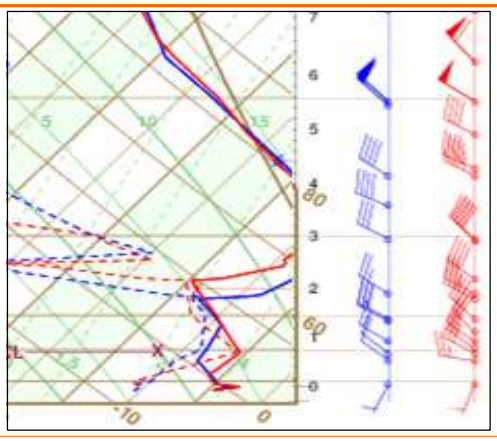
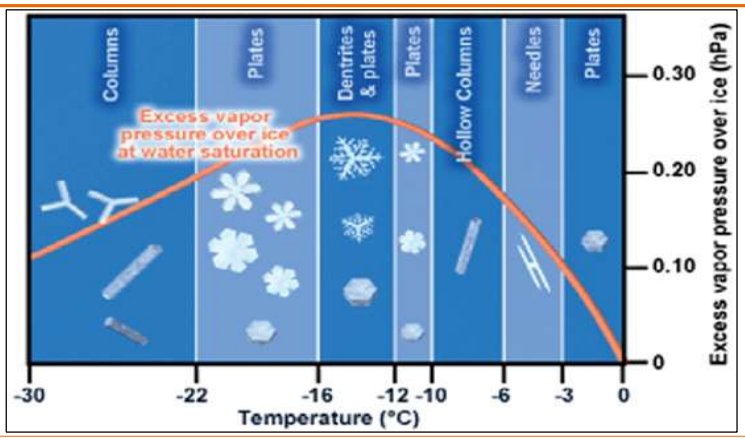


12월 29일 09시 700hPa GDAPS(초기장)vsGTS 편차

- **구름의 미세물리 과정을 고려했더라면**
  - 눈 구름대의 기온 분포에 따라 눈 결정체의 모양과 크기가 달라질 수 있고, 이에 따라 수상당량비와 적설에 차이가 나타나게 됨
  - 구름층의 기온이 -20℃~-10℃ 사이에 분포할 경우 빙정이 가장 활발히 함박눈 형태로 성장할 수 있음

- 이번 사례의 경우 구름층이라 할 수 있는 단열선도 상의 포화층이 800~2000m 부근에 존재하고, 기온은 –10℃~0℃ 사이에 분포하고 있어 눈 결정체의 크기와 모양이 상대적으로 작은 형태로 성장하는 조건

  ⇨ **적설 예보 시 수상당량비가 작을 수 있음을 고려해야 함**

	
12월 29일 03시 오산 단열선도	**기온별 얼음에 대한 수증기압 초과값과 눈 결정체 모양**

1-4. 2018년 1월 30일 사례

『낮 시간 동안 온난이류』에 의한 수도권 강수?

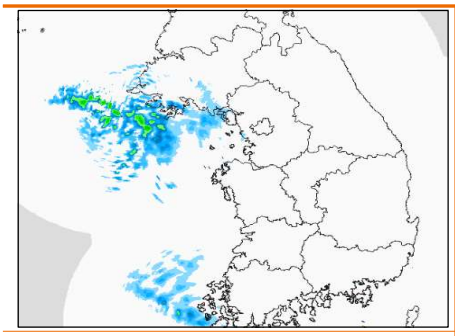
cold pool 해소, 건조역 발달 등 실황감시가 필수!

1. 예보와 실황은?

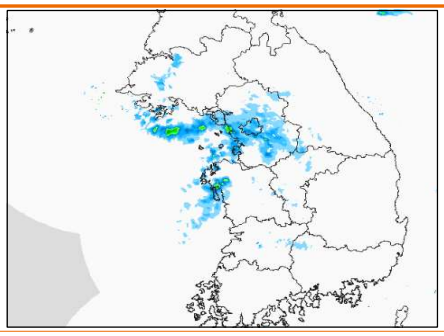
예보 (1월 30일 05시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 강원영동, 경북동해안: 5mm내외 ▸ 예상 적설 - 강원영동: 3~10cm - 경북동해안: 1~5cm	▸ 강수량: 5mm미만 ▸ 적설: 서울.경기 · 강원영서 1~5cm

최심신적설 (cm)	
서울경기	서울 3.5 남양주 5.0 구리 3.8 양평 3.0 양주 2.0 하남 2.0 과천 1.9 광릉 1.7 인천 1.6
강원영서	인제 4.5 양구 4.0 대화 4.0 북춘천 3.6 면온 3.5 화천 3.4 기린 3.3 홍천 3.0 대관령 2.5
강원영동	미시령 1.0 대기리 1.0 임계 0.5
충청북도	제천 2.5 단양 0.0
경상북도	석포 3.5 금강송 2.1 봉화 0.5 수비 0.5

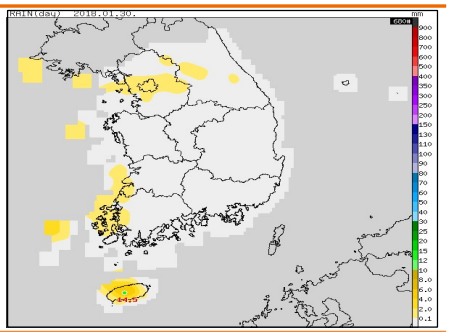
- 새벽부터 아침까지는 전형적인 온난이류의 형태로 경기만 중심 강수대 형성
- 낮 동안 이 강수대는 건조역 침투에 따른 풍속 강화로 점차 수도권으로 유입



1월 30일 09시 레이더 영상



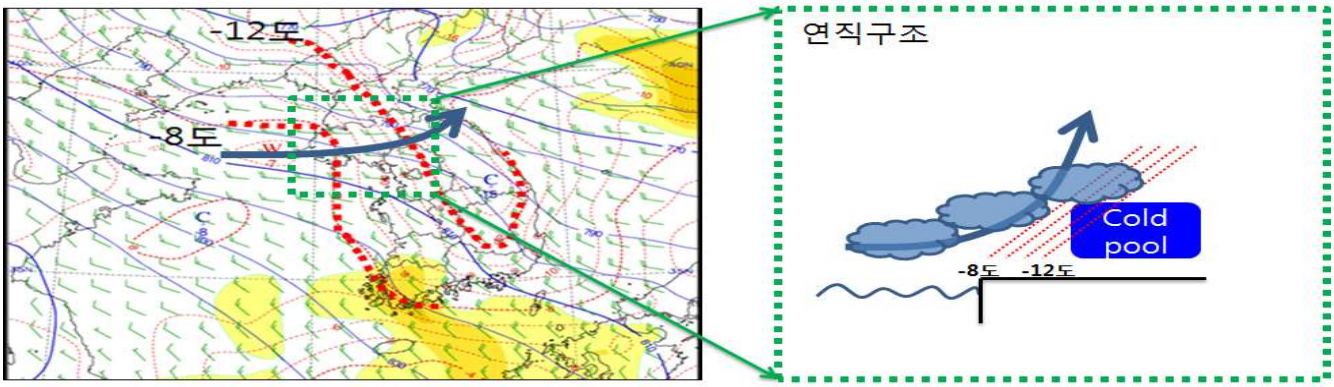
1월 30일 15시 레이더 영상



1월 30일 누적강수량

2. 강수 메커니즘은?

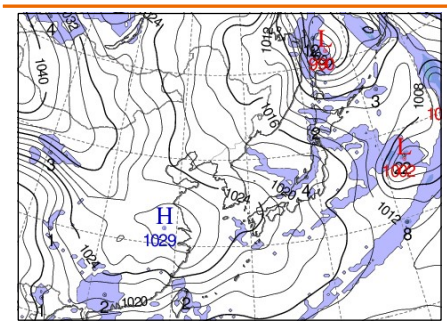
- **(cold pool 형성)** 23일부터 서울의 아침 최저기온이 -10℃ 이하로 떨어질 만큼 내륙에 매우 강한 cold pool이 형성되어 있었음
- **(하층 난기 이류)** 지상 고기압이 우리나라 남쪽으로 배를 내밀면서 난기가 해상에서 내륙으로 이류
- **(상층 한기 남하+하층 풍향 변화)** 925hPa에서 850hPa까지 폭넓게 난기 이류가 있는 가운데 상층 한기가 발해만으로 남하할 때(30일 12시) 925hPa 풍계가 남서로 바뀌면서 서울까지 강수가 가능한 구조를 보임



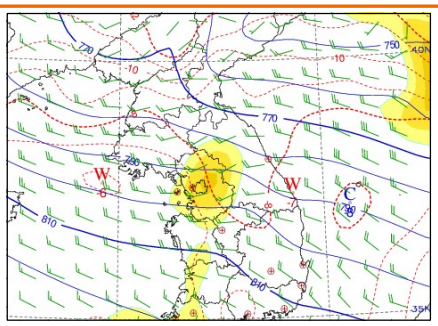
백령도 인근의 강수 메커니즘 분석 → 925hPa 온난이류(30일 09시)와 연직운동 모식도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

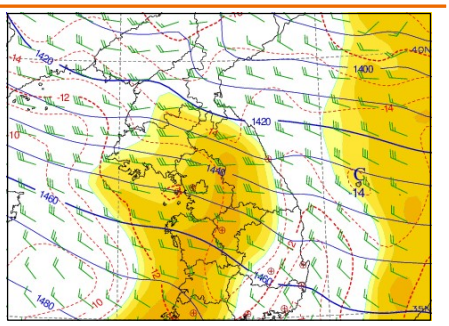
- 925hPa 서남서풍 20kts, 850hPa 서풍 30kts가 불 것으로 모의하며 두 층에서 모두 온난이류가 발생할 것으로 예상. 이는 온난이류 강수 조건을 만족함(온난이류 강수 조건은 아래 참고 설명을 참조)
- 그러나 낮이 되면서 cold pool이 무너져 강수가 내리기 불가능한 구조가 될 것으로 예상
- 수치모델은 30일 오후 강수를 모의하지 않음



1월 30일 15시
해면기압, 누적강수량



1월 30일 15시
925hPa 상세바람장



1월 30일 15시
850hPa 상세바람장

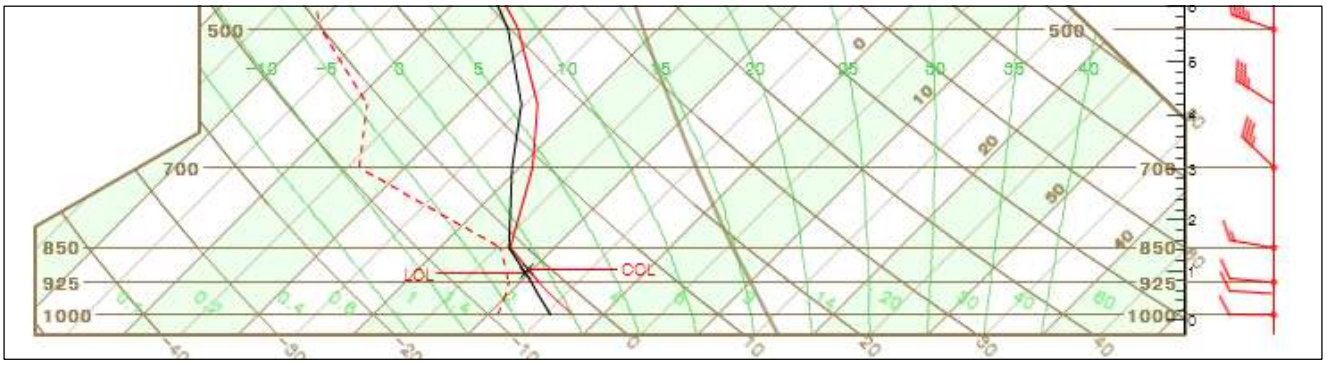
※ 모델은 왜 강수를 모의하지 못했을까?

겨울철에 전형적인 온난이류 강수가 발생하기 위해서는 ①하층 고도(약 1.5km 이상의 난기 이류와 ②해상에서의 수증기 공급, 그리고 ③내륙의 cold pool, 이 세 가지 조건이 필요한데, 이 조건이 모두 만족될 때 1~5cm 가량의 적설을 보인다. 특히 경기만 인근에 925hPa 남서풍이 예측된다면 수도권 지역에도 적설이 관측되는 것이 일반적이다.

그러나 이번 사례의 경우 모델에서 ①의 조건은 충분히 예측되었으나, ②와 ③의 조건 예측이 미흡했던 것으로 보인다.

조건 ②의 경우 백령도와 경기만 인근의 해수온도(1~2℃)가 낮으므로 해상으로부터 수증기 공급이 원활하지 못할 것으로 모델이 예측한 것으로 추측되나 실제 해상에서는 강수대가 원활히 발생하였음을 알 수 있다.

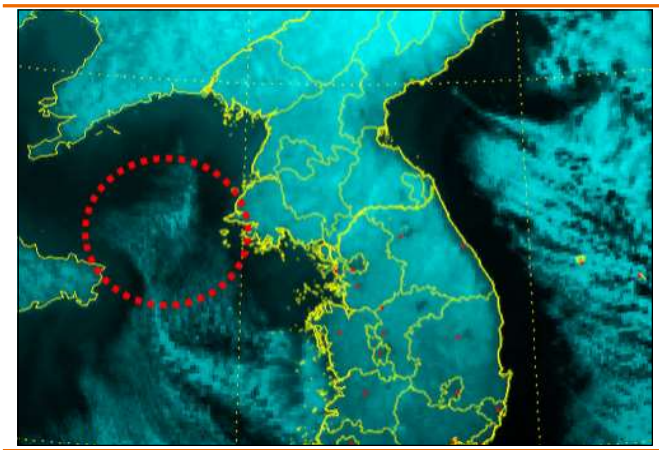
조건 ③cold pool의 경우 낮 시간이 되면서 기온이 오르기 때문에 급격히 약화가 되는데, 특히 모델에서는 cold pool을 실제보다 약하게 모의하는 경향이 있기 때문에 낮 시간대 온난이류 강수에 대해서는 더욱 모델에서 시그널을 주지 못하는 특징을 보인다.



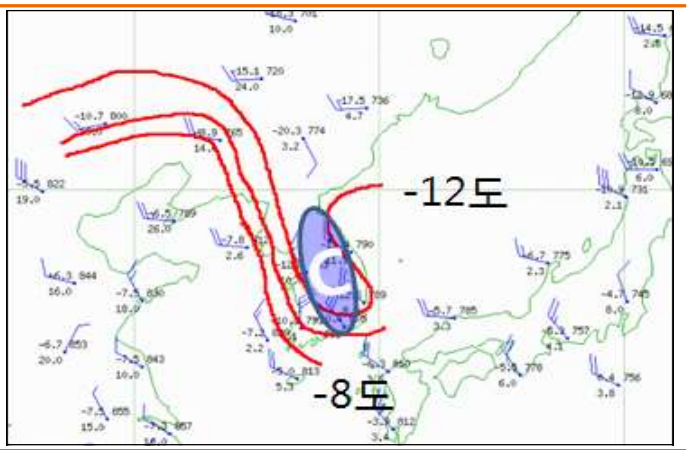
< 백령도 앞바다 인근의 단열선도 (30일 09시) >

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **백령도 인근 해상에서 이미 강수대가 매우 발달한 상황을 감지했어야**
  - 30일 03시경 동한만 인근에서 하층운대 발달 시작. 모델은 925hPa이 건조한 것으로 예측하였으나 이미 포화 된 상태였음
  - 하강류가 강하지 않은 이상 발달한 눈 구름대는 내륙으로 진입할 수 있음을 고려
- **모델보다 cold pool이 매우 강해 해안가 온도 조밀역이 매우 강했음!**
  - 오산, 면온(강원영서)의 고층 관측자료를 보면 925hPa 기온이 모델보다 2℃ 낮음
  - 이로 인하여 서해안지역 온도장이 모델보다 매우 조밀하였음

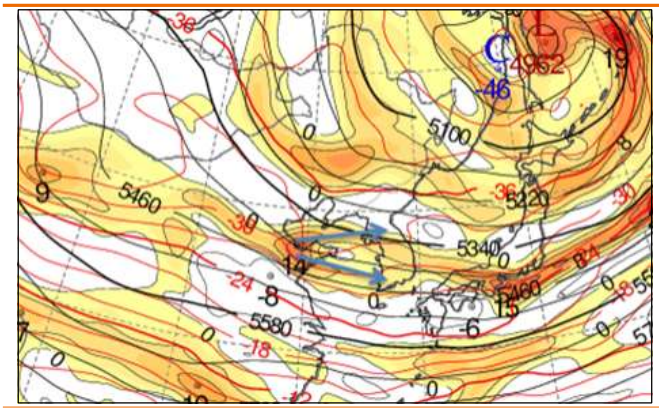


1월 30일 03시 위성 합성영상

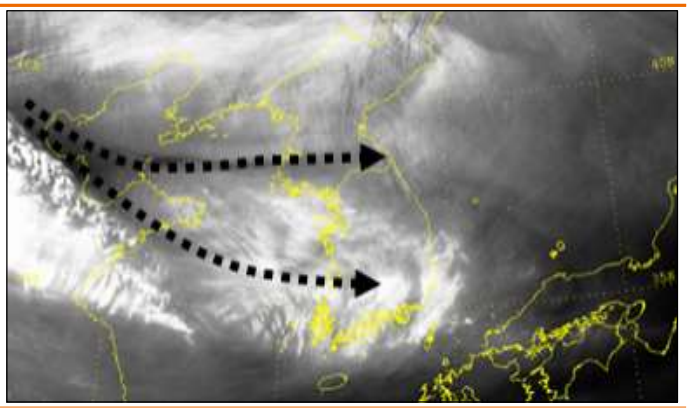


1월 30일 09시 925hPa GTS분석

- **Vorticity streak에 동반된 건조역을 추적하여 하층 시스템 강화를 예측했더라면**
  - 분리된 건조역이 침투하면서 불안정이 커져 강수대를 강화하였음
  - 이 건조역은 vorticity streak과 잘 일치, 면밀한 감시 추적이 필요했음



1월 30일 09시 500hPa 기온과 상대와도



1월 30일 15시 히마와리 수증기 영상

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- **모델이 예측하지 않은 온난이류 강수, 실황을 확인하고 또 확인하고**
  - 해상의 하층운을 추적 및 감시, 모델의 하층 포화도 예측은 틀리는 경우가 많음!
  - 건조역 침투에 따른 강수 활성화 여부를 검토해야 함

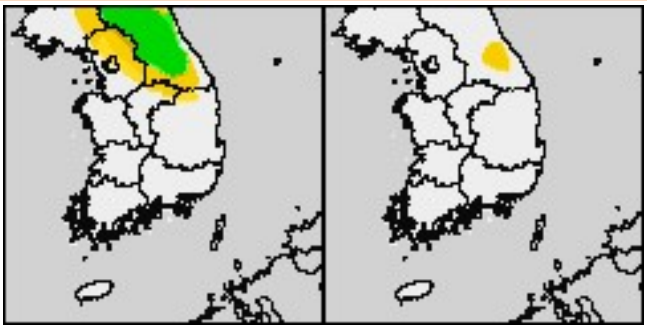
1-5. 2018년 2월 14일 사례

매우 강했던 남서풍과 온난이류? 하지만 강수는 없었다

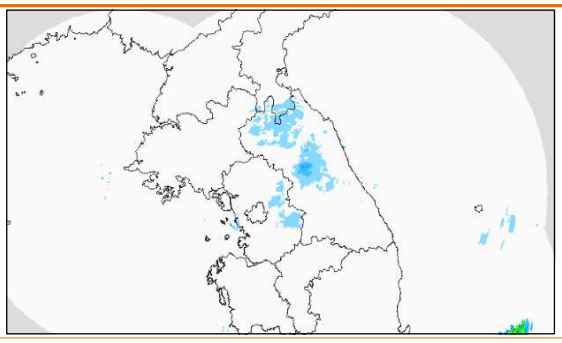
대기의 건조도와 역전층을 고려했더라면

1. 예보와 실황은?

예보 (2월 13일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 강원산지: 5mm 내외 - 서울.경기도(남부 제외), 강원도(산지 제외), 충북북부, 경북북부내륙: 5mm 미만 ▸ 예상 적설 - 강원산지: 2~7cm - 강원도(산지 제외): 1~5cm - 경기도(남부 제외), 충북북부, 경북북부내륙: 1~3cm	▸ 강원영서 눈날림, 그 외 지역 강수 없음 (13일 17시 예보보다 매우 약함) - 14일 06시 경기만으로 약한 에코가 유입되었으나, 강원영서에 유입되며 약화



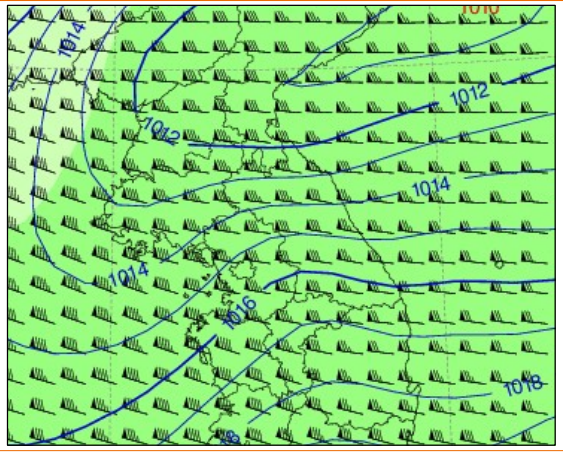
2월 15일 예상강수량 (좌)06~12시, (우)12~18시



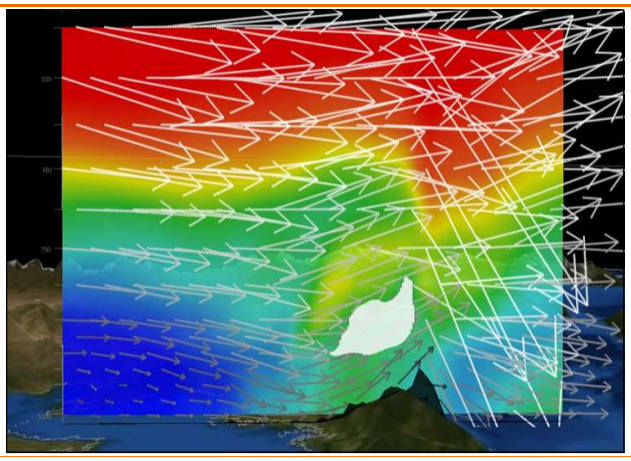
2월 14일 09시 실황 레이더 영상

2. 강수 메커니즘은?

- 우리나라 남쪽에 이동성 고기압이 정체한 가운데 북쪽 저기압이 PV역을 따라 발달하며 기압경도가 강화됨, 이에 따라 강한 남서풍이 불면서 활발한 온난이류가 나타남
- 중부지방의 가강수량(TPW)이 5~10mm로 나타남. 이 가강수량 대부분이 온난이류와 지형에 의한 강제상승으로 강원산지에서 대부분 탈락되어 강수량으로 연결 예상



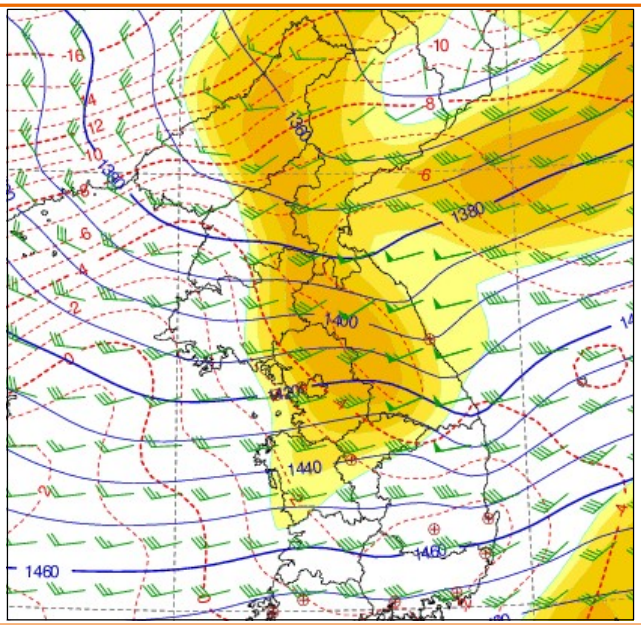
2월 14일 09시 가강수량



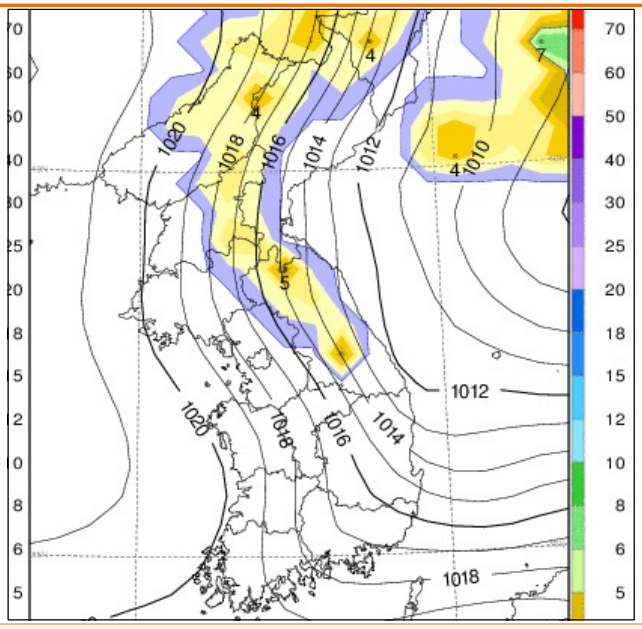
2월 14일 06시 중부지방 연직단면 분석장

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- 925~850hPa에서 남서류가 강원도 지역에서 40~60kts로 매우 강할 것으로 예측
- 강원영서와 산간을 중심으로 1~3cm의 적설을 예측

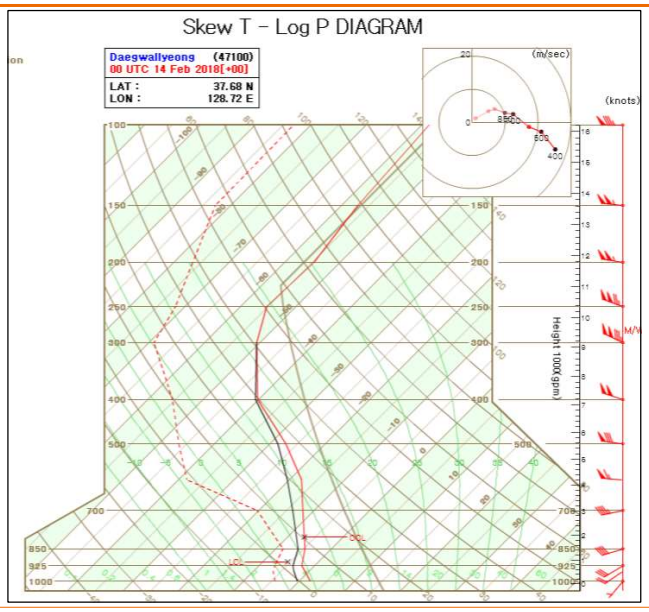


2월 14일 09시 850hPa 상세바람장

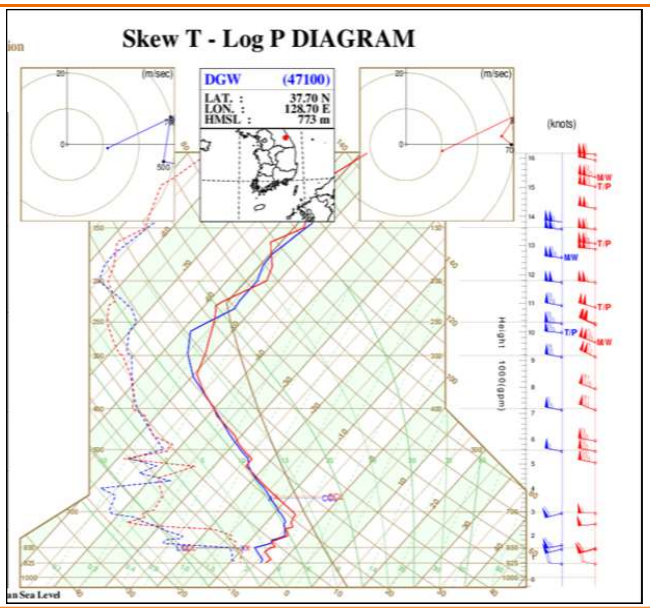


2월 14일 수상당량비 적용 총 누적적설

- 14일 09시 대관령 단열선도의 분석장과 실제 관측자료를 비교해보면 두 가지 큰 차이점이 있음. 첫 번째로 관측자료의 대기 상태가 매우 건조하다는 것, 두 번째로 700hPa 기온이 분석장보다 높아(분석장 -12℃, 관측자료 -6℃) 강한 안정층이 형성되어 있다는 점



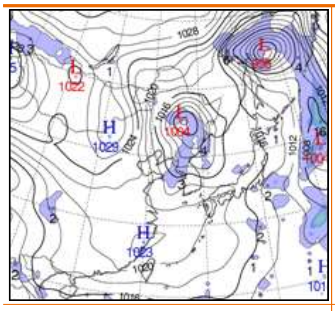
2월 14일 09시 대관령 단열선도 분석장 (위도 37.7 경도 128.7)



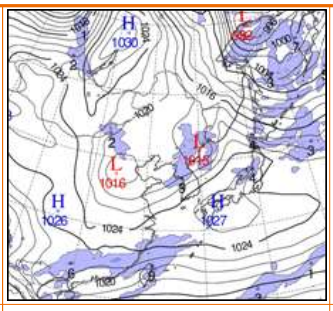
2월 14일 09시 대관령 단열선도 관측자료

※ 예보 당시, 강원산간에 10cm까지의 대설을 예측한 근거는?

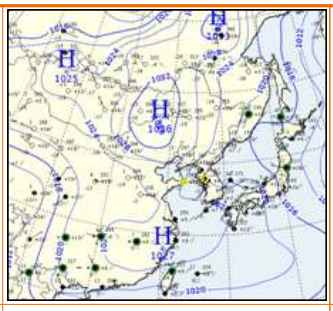
모델에서 1mm 미만의 강수를 예측하였음에도 불구하고 강원산간에 10cm의 적설을 예측했던 이유는 유사사례 분석 결과 때문이었다. 남서류가 매우 강하게 불었던 사례를 찾기 위해 오산 고층관측자료를 이용하여 925hPa 남서풍 30kts 이상, 500hPa 서~서북서풍 60kts 이상의 조건으로 검색하였다. 유사사례로 선정한 사례일은 11월 사례 2가지(2010.11.27., 2017.11.25.), 2월 사례 2가지(2000.2.27., 2016.2.8.)였다. 11월 사례의 경우 해상에서부터 강수대가 발달하는 형태를 보였고, 2월 사례는 주로 내륙에서 발달하는 형태를 보였다. 그리고 모든 사례에서 강원산간에 최대 10cm의 적설을 기록한 것으로 나타났다.



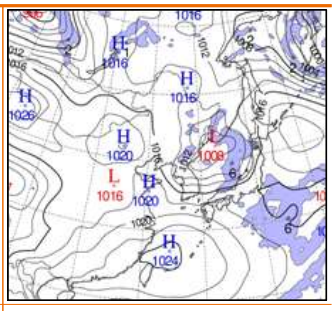
2010. 11. 27.
강원산간 3~8cm



2017. 11. 25.
강원산간 5~15cm



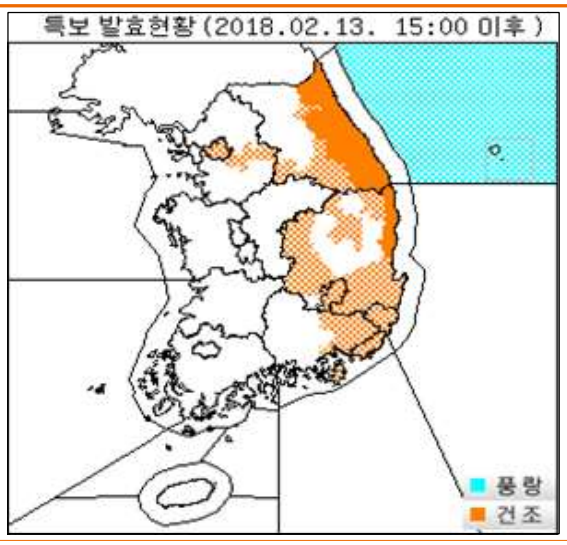
2000. 2. 27.
강원산간 5~10cm



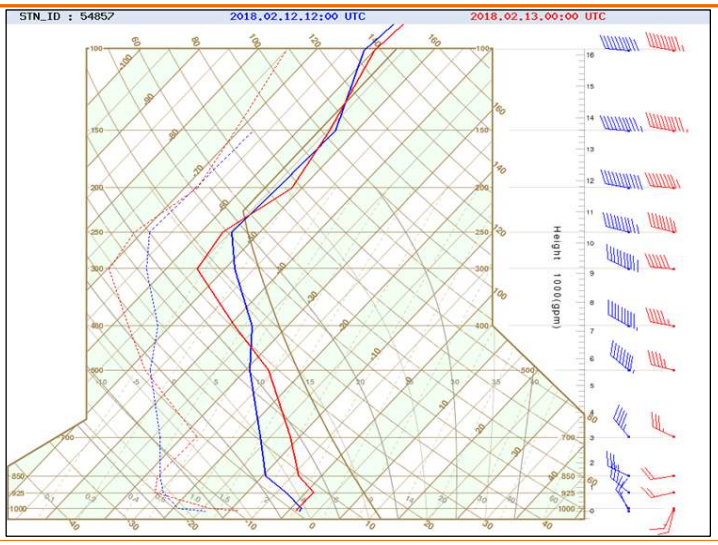
2016. 2. 8.
강원산간 5~10cm

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **수증기 공급원이 어디 있나요? 대기 건조도를 확인하였다면**
  - 인천, 덕적도 부이 관측자료를 보면 해수 온도가 1~2℃로 매우 낮은 상태(해상에서의 잠열 방출이 극히 제한적)로 최하층의 수증기 공급이 어려운 조건에서 내륙은 이미 건조 경보가 발표되어 있을 정도로 건조한 상태였음
  - 강풍대가 유입되는 중국지역의 단열선도를 살펴보면 폭넓게 건조역이 위치하고 있음을 알 수 있음. 따라서 수증기가 우리나라로 공급되지 못하는 형태였음

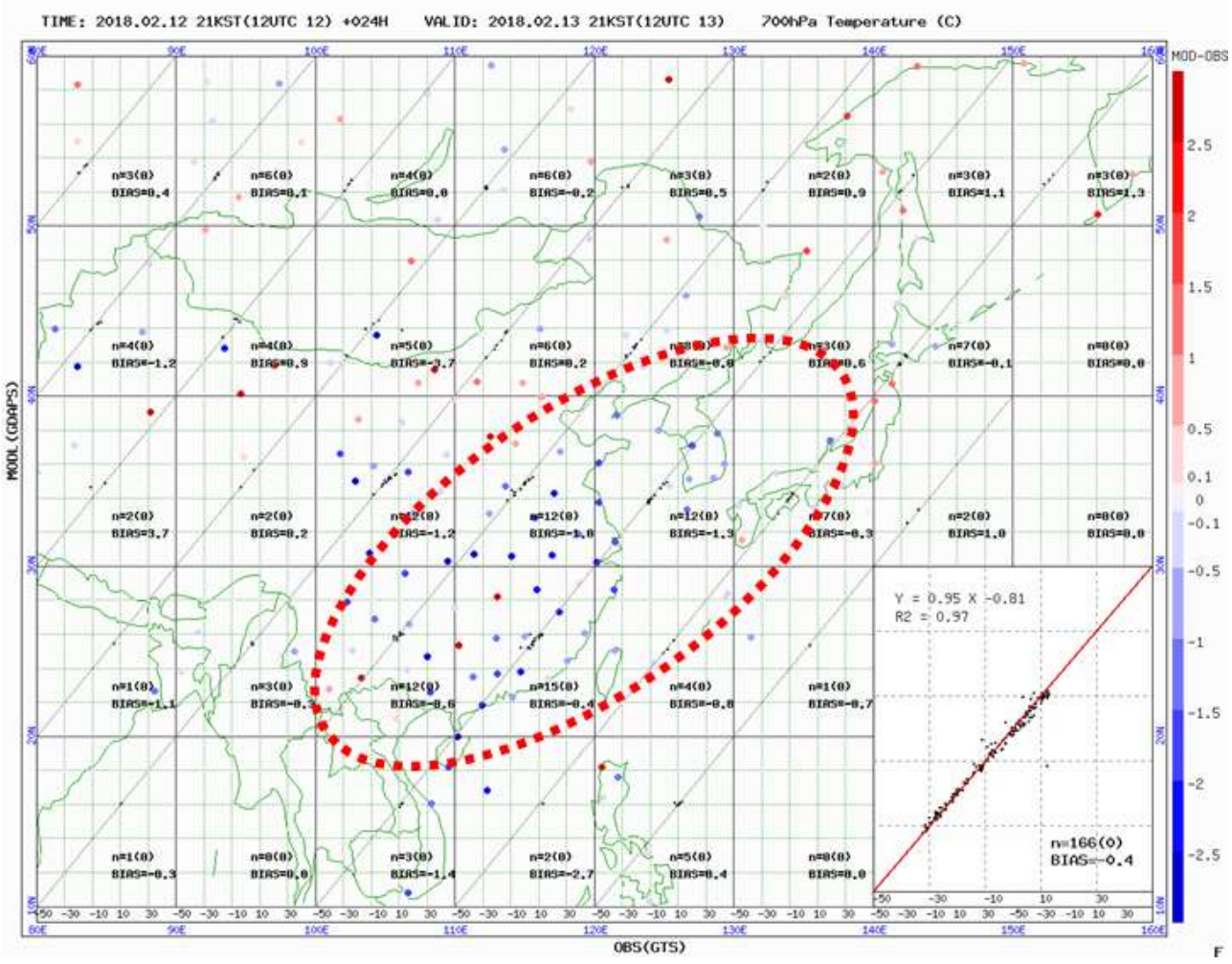


2월 13일 15시 특보 실황



2월 13일 09시 칭다오 단열선도 분석

- **수치모델과 실황 기온 오차를 고려하여 대기구조를 고려했더라면**
  - 700hPa의 기온에 대해 모델 예측이 실황보다 매우 낮은 형태를 보였음. 즉 중국내륙에서부터 우리나라로 유입되는 중층 대기가 모델 예상보다 더 온난하고 강하게 유입되었음. 이는 대관령 단열선도 실황에서 확인 가능함.



700hPa의 12일 12UTC 모델예측과 13일 00UTC 실황과의 오차

- 700hPa에서 모델이 예상한 것보다 난기가 강하게 들어온 상태에서 850hPa 이하의 고도에서는 오히려 강제 상승에 의한 단열과정으로 기온이 더 낮은 형태가 나타남. 이로 인해 발생한 강력한 안정층은 구름대의 발달을 저지하였음.

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- **강제상승으로 인한 강수는 하층 수증기의 실황 감시가 중요**
  - 중국으로부터의 수증기 유입 여부, 해상에서의 수증기 공급 여부, 육상의 건조도 실황 등 하층 수증기 면밀한 검토 필요
- **대기 중층의 역전층 형성 가능성 검토**
  - 모델과 실황의 오차를 분석해 역전층 강화 가능성 확인 필요

1-6. 2021년 1월 12일 사례

오후 시간 온난이류에 의한 수도권 대설

(key word) 하층제트, 수도권, 온난이류, 오후, 대설

1. 예보와 실황은?

적설 예보	실황
(11일 17시) 서울 눈날림 (12일 11시) 수도권 1~3cm	수도권 0.3~8cm, 기상청 8.1cm

2. 핵심 논의

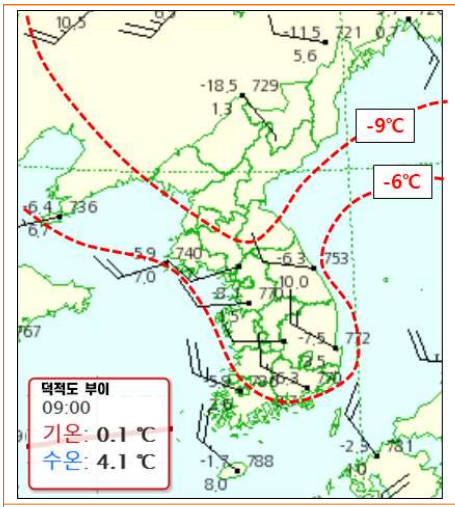
- **기존 대설 개념모델에서 온난이류는 새벽~오전에 주로 발생, 이번 사례는 오후**
- **뚜렷한 저기압 없이 온난이류 패턴에서 하층제트가 동반될 경우 오후에도 대설이 가능한가?**

3. 실황전개

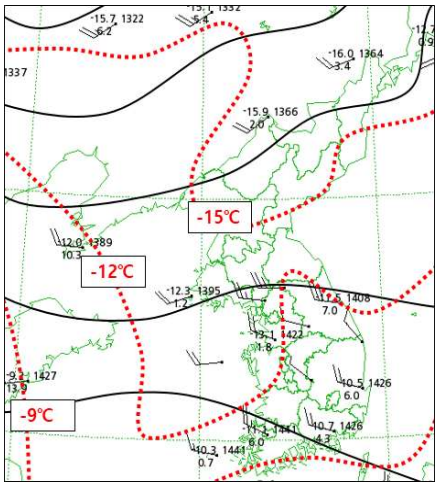
- **15시부터 강수 시작, 16시 피크, 21시 강수 종료**

4. 주요 분석

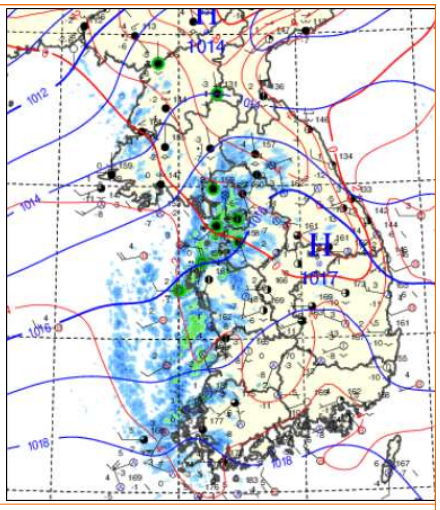
- **강수 구름의 씨앗인 해상의 해기차 조건은 만족, 온난이류 강수 조건은 불만족**
  - 09시 덕적도 부이에서 관측한 수온과 925hPa 기온은 각각 4.1℃와 –7℃로 해기차는 약 11℃로 나타나 강수 구름의 발생 조건은 만족함(온난이류 강수 해기차 기준: 8~15℃).
  - 그러나 백령도와 서울 동쪽까지의 925hPa의 온도경도가 2℃/150km로 온난이류에 의한 적설이 가능한 구름 발달 조건에는 들지 않음(1cm 이상의 적설 가능 기준: 3℃/150km).
  - 2000년대 이후, 오후 시간의 온난이류에 의한 대설 사례는 없었음.



09시 925hPa 온도 및 덕적도 부이값

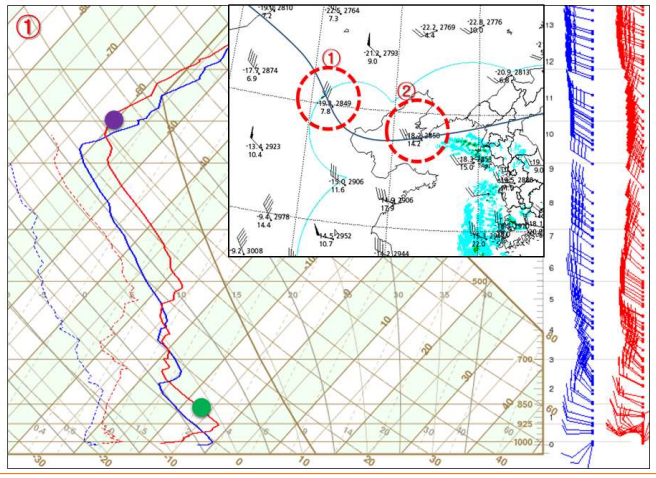


09시 850hPa 온도장

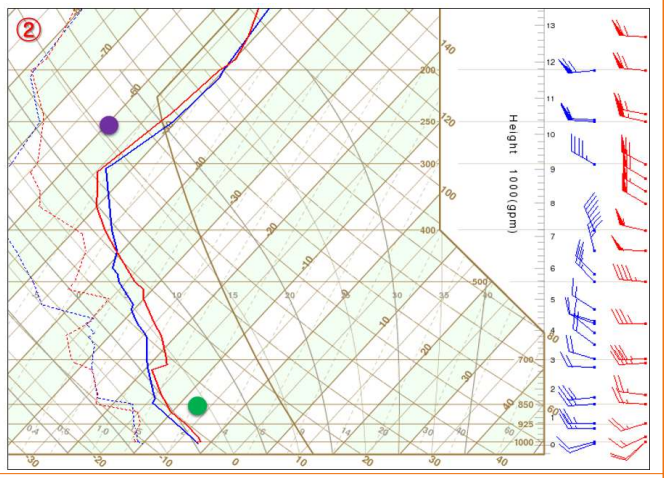


15시 한반도 기압/온위 및 레이더 중첩

- **700hPa 고도에 찬 공기를 가진 기압골과 850hPa 남서풍의 하층제트가 견인**
- 12일 09시 700hPa에서 기압골과 온도골이 발해만에 위치하였고, 우리나라는 오후부터 불안정이 강화될 수 있는 조건을 만족함.
- 09시 700hPa 기압골의 동쪽과 서쪽에 위치한 '베이징'과 '다롄' 지역의 단열선도를 비교하면 베이징의 700hPa 이하에는 온난이류가 있으며, 베이징의 850hPa의 기온이 다롄보다 대략 5℃ 정도 높게 나타남(녹색 점). 그리고 다롄의 대류권계면 고도가 베이징보다 낮게 나타나는데(보라색 점), 이는 골의 동쪽인 다롄 지역에 이미 상층 기압골이 통과하였음을 보여줌.

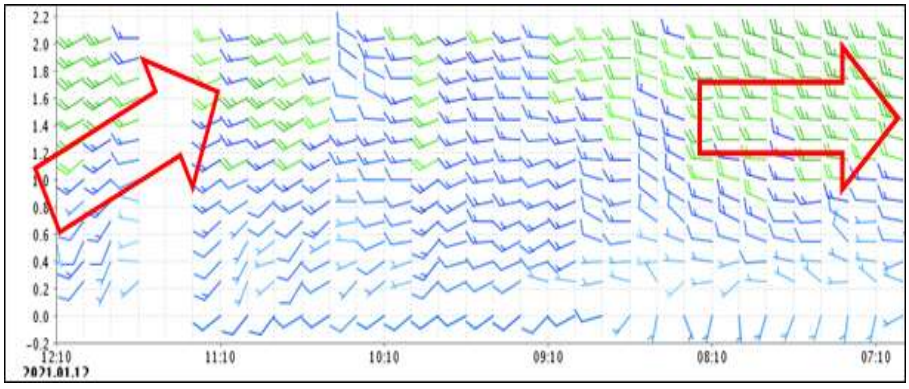


12일 09시 베이징 단열선도 및 09시 700hPa 일기도(좌상)

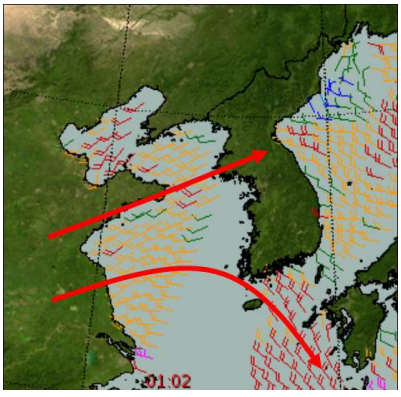


12일 09시 다롄 단열선도

- 북격렬비도의 수직측풍 장비 관측 자료와 해상풍 자료를 통해 점차 남서풍이 들어오는 것을 볼 수 있으며, 12시 이후로 서해남부해상까지 풍계가 남서로 전환됨.

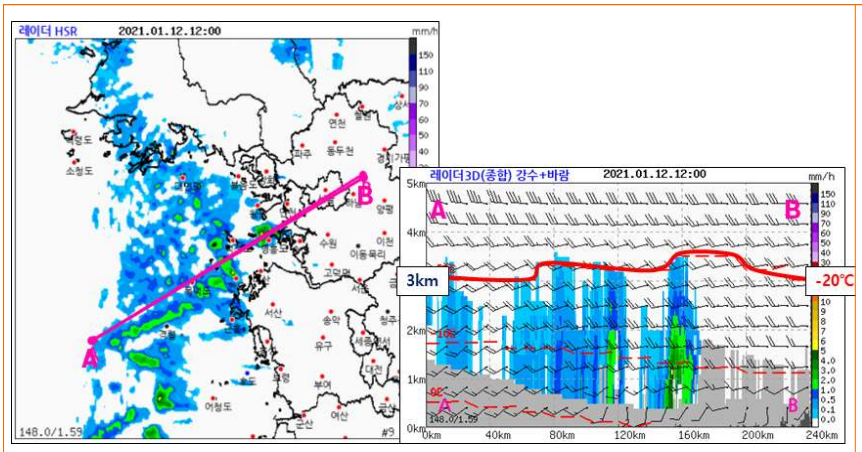


북격렬비도 수직측풍 장비 관측 자료

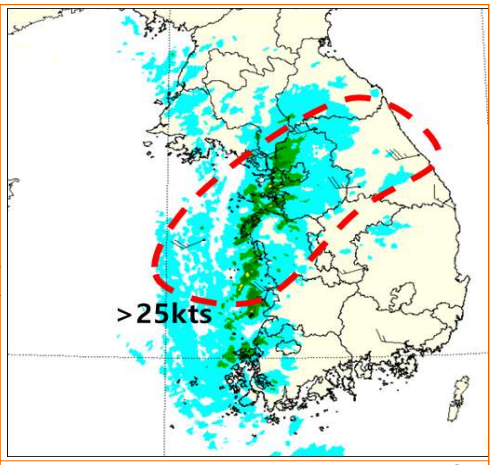


12일 10시 OSCAT 해상풍 자료

- 12시 레이더 영상에서 경기만에 3km까지 발달한 구름대가 위치하며, 15시 850hPa 고도의 고층 관측자료에서 강수대 주변으로 25kts 이상의 하층제트가 형성되어 있음. 따라서 이번 사례는 상층 골이 통과하며 대기 불안정도가 높아진 상태에서 상대적으로 따뜻한 하층제트가 강하게 들어오며 강수를 만듦.

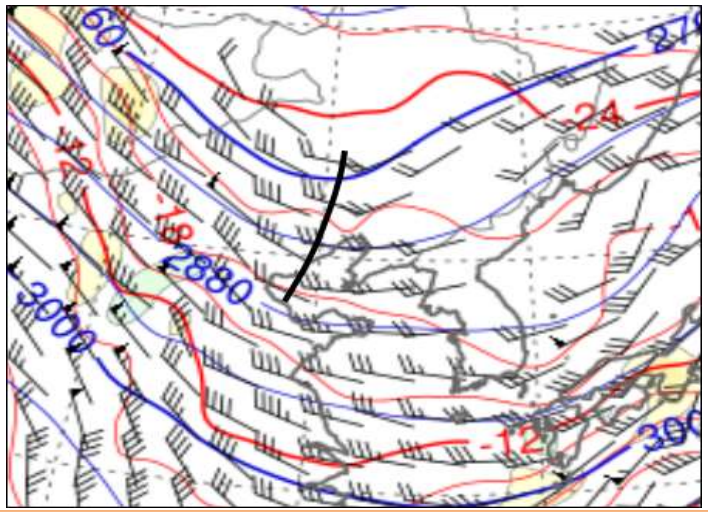


12일 12시 레이더 영상 및 강수 단면도

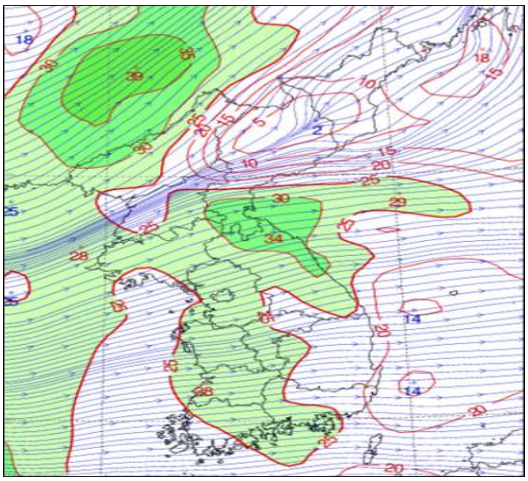


12일 15시 850hPa gts + 레이더 영상 중첩

- **모델에서 예상한 강수 메커니즘**
  - 11일 21시 UM 모델은 09시 발해만 부근에서 기압골과 온도골이 통과하고, 18시 850hPa 바람장에서 25kts 이상의 강풍대가 우리나라 서쪽 지역 및 중부지방에 위치할 것으로 예상함. 따라서 700hPa 골이 우리나라를 통과한 오후부터 불안정이 강화된 실황을 잘 모의하였음.



12일 09시 700hPa UM모델 예상장(11일 21시 예측)



12일 18시 850hPa 유선 풍속 UM 모델 예상장 (11일 21시 예측)

5. 하층제트가 동반된 오후 시간 온난이류 강수 시 고려사항

- **이번 사례와 같이 이례적인 경우, 아래의 엄격한 조건을 만족해야 적설 가능**
  - 700hPa 고도에서 기압골(온도골)이 통과하며, 불안정에 의한 상승이 충분히 일어날 수 있는 기온 조건에 해당해야 함.
  - 해기차에 의해 서해상에서 구름 씨앗을 만들 수 있는 해기차 조건 만족 필요
  - 850hPa 바람 방향은 270도 이하의 서~남서풍, 25kts 이상의 하층제트 동반 필요.

- **단기·초단기 분석 및 실황분석을 위한 고층 관측자료 필요**
  - 서울을 기준으로 그 북서쪽(상층골 이동경로)인 백령도, 남서쪽(하층제트 유입)인 덕적도에서 동시 고층관측이 요구됨.

1-7. 2021년 1월 18일 사례

발해만기압골이 동반된 온난이류에 의한 수도권 눈

(key word) 발해만기압골, 수도권, 눈, 온난이류

1. 예보와 실황은?

적설 예보	실황
(17일 17시) 중부지방 3~10cm (18일 05시) 중부지방 3~8cm	수도권 0.2~2cm, 노원 1.8cm

2. 핵심 논의

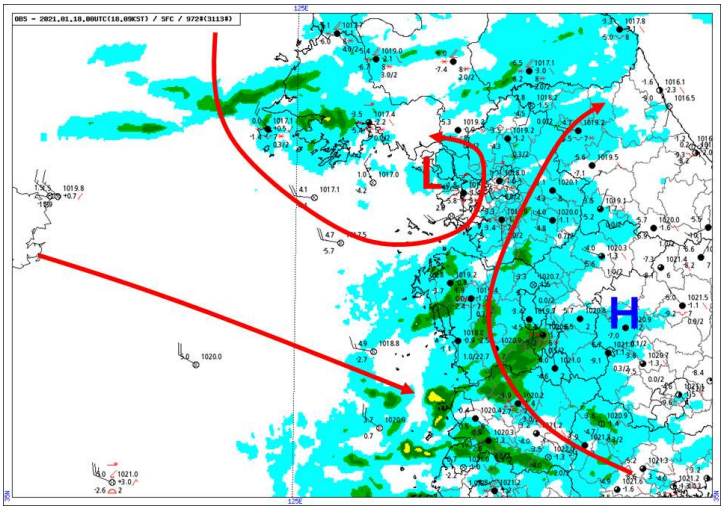
- **발해만 기압골에 동반된 온난이류 적설로서, 적설량을 최대치(5cm)보다 높게 예상**
- **최저기온이 나타나는 새벽 시간대부터 눈이 시작될 것으로 예상하였으나, 새벽~아침을 지난 오전부터 강수가 시작되어 예상보다 적은 적설 기록**

3. 실황전개

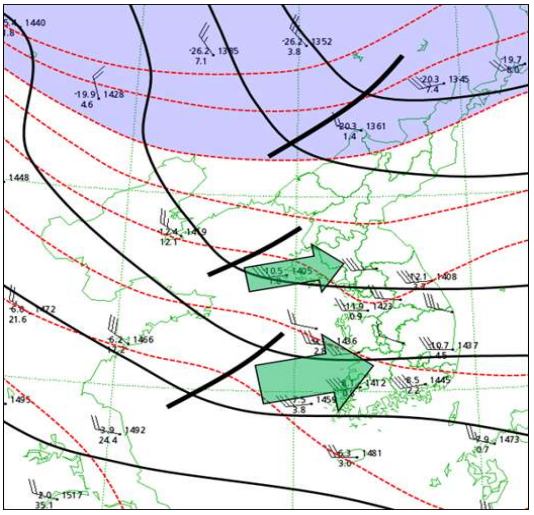
- **10시부터 강수 시작, 11시 종료**

4. 주요 분석

- 18일 09시부터 강화도 부근에 중규모의 저기압성 회전이 발생하고, 서한만과 서해남부해상에서 단파골에 의한 온난이류가 강화되기 시작함.



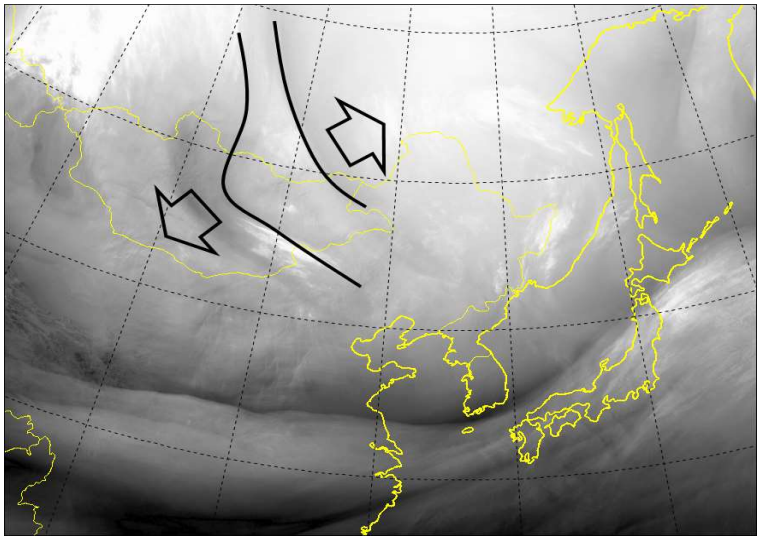
18일 09시 지상 일기도 및 레이더 합성



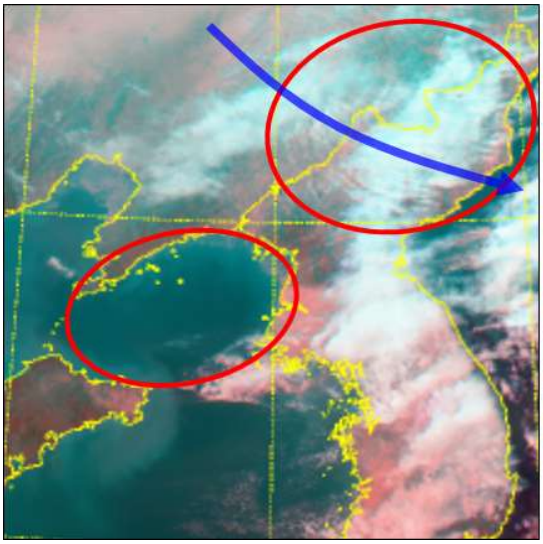
18일 09시 850hPa 일기도

- **그러나, 예상보다 약하고 늦어진 발해만 기압골**
  - 17일 12시 상층 수증기 영상에서 건조역이 두 갈래로 나뉘어 들어오는 모습을 볼 수 있음. 위쪽 건조역이 우리나라 북쪽으로 남하하면서 경기만에서의 기압골 발달에 기여하지 못함. 실제로 18일 12시 위성 영상에서 한기가 북한 북부로 남하하고, 서한만에는 한기열 구름이 전혀 없음.

- 강수대가 예상보다 3시간 정도 늦어졌고, 온난이류 강수에 유리한 새벽~아침 시간대를 지난 오전 시간대에 유입되어 적설이 적었음.

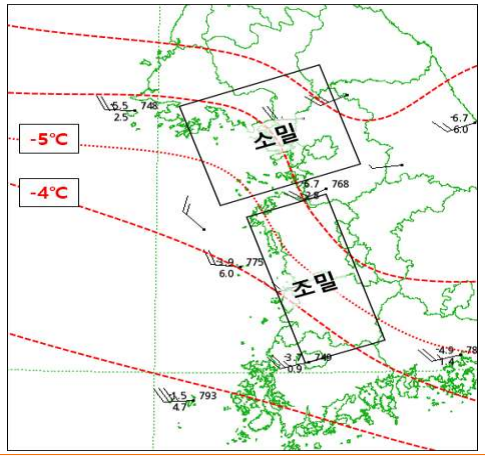


17일 12시 수증기영상

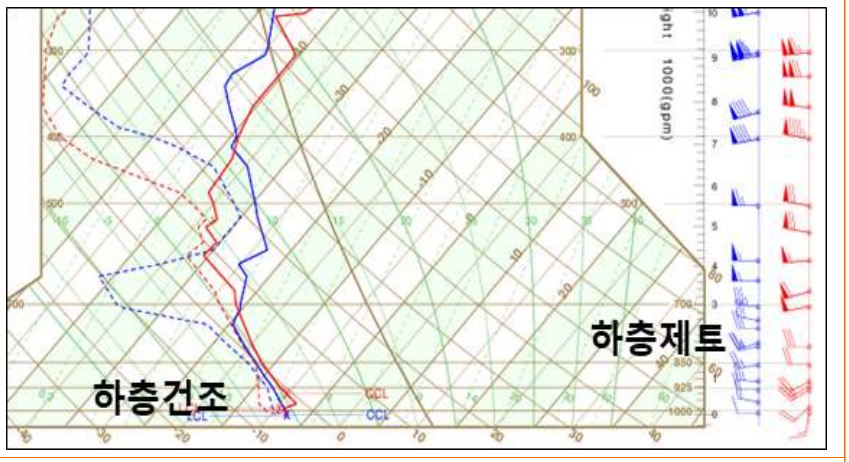


18일 12시 위성 영상

- **부족한 해기차 & 남쪽에 형성된 강풍대**
  - 09시 경기만의 925hPa 해기차는 9℃(자월도 파고부이 수온: 4℃, 925hPa 기온: -5℃)이고, 백령도에서 서울동쪽까지 온도경도가 강하지 않음(약 2℃/150km). 따라서 하층이 건조한 상태로 구름 발달에 유리한 조건이 아님.
  - 2021년 1월 12일 사례는 저기압 발달에 따른 강한 남서풍이 서해상에서 서울로 유입되어 많은 적설이 있었지만, 이번 사례는 해상에서 형성된 강풍대가 주로 충청도 이남 지역에 위치하였음.



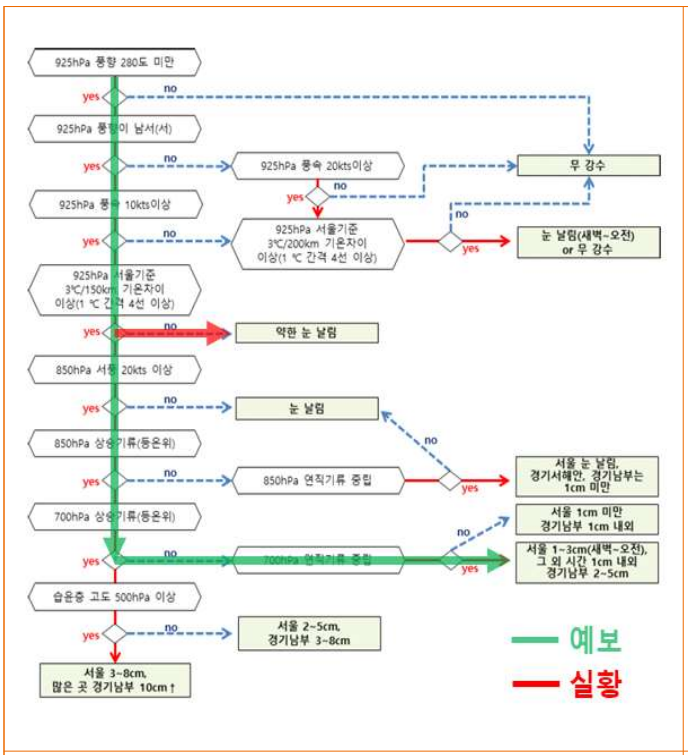
18일 09시 925hPa 기온 분석



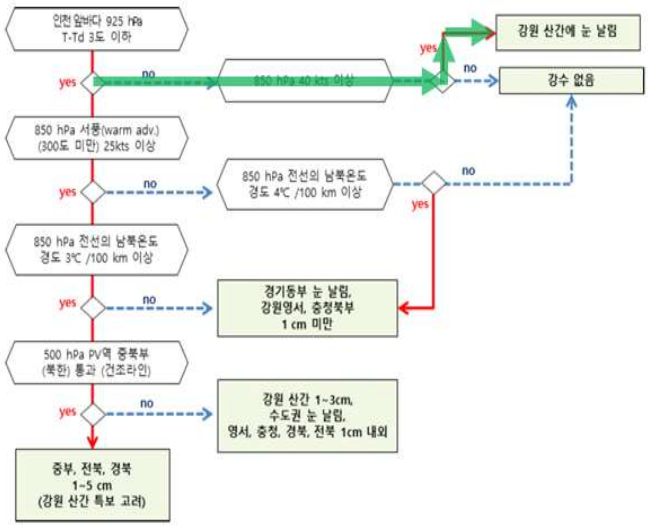
18일 09시 오산 단열선도

- **『Why?How! 겨울예보('20.12.)』 가이던스 판단 흐름도를 통한 예보와 실황 비교**
  - 예보 당시 온난이류에 의한 적설(서울 1~3cm, 경기남부 2~5cm)과 발해만기압골에 의한 적설(수도권 1cm 내외)을 합쳐 3~8cm를 예보하였음.
  - 그러나 실제로는 해기차가 충분치 않았고, 남서풍의 강풍대가 남쪽에 형성되면서 온난이류형 강수에서는 예상보다 강수가 오지 못함.

- 발해만기압골에 의한 강수는 북쪽 건조역이 늦게 갈라져 내려오면서 발해만기압골이 충분히 발달하지 못하며 기존 예상대로 적은 강수가 왔음.



온난이류형 강수 예보 흐름도



발해만기압골에서의 예보 흐름도

5. 일반적인 온난이류에 의한 적설에서 고려할 사항

- **강수 집중 시간에서 벗어난 시간대에 내리는 적설의 양은 적음**
  - 내륙에 최저 기온이 나타나는 새벽~아침에 해상과의 동서 온도 차이가 가장 크므로 온난이류에 의한 눈 구름대 발달이 유리함. 이 시간대를 벗어나면 온난이류 메커니즘이 약화되므로 눈 구름 발달이 저하됨.

- **겨울철 예상보다 늦어지는 강수 시스템은 강수 구름대의 발달을 약화시킴**
  - 상층 대기를 동반하는 강수 시스템의 접근이 늦어지면, 상층의 기압골이 먼저 통과해 버리게 되어 대기 불안정도는 감소하고, 하층 강수 시스템 발달을 약화시킴.
  - 또한 구름 발달이 약화되므로, 상대적으로 낮은 대기층의 구름에서 강수가 나타나 강수량이 적음.

- **실황분석의 중요성과 메커니즘에 기반한 적설 예보 필요성 부각**
  - 강수가 나타나기 전일 중국북부에서 상층 기압골이 분리되어 이동하는 형태가 갖추어졌고, 이를 반영한 정확한 실황분석이 이루어져야 했음. ⇒ 실황분석의 중요성
  - 온난이류가 강하지 않고, 상층 찬공기가 강하게 내려오는 경우도 아니었음.
    ⇒ 가이던스의 판단 흐름도를 따랐을 경우 5cm 이상의 적설이 나타날 수 없는 상황

1-8. 2024년 1월 9일 사례

과거 통계를 수도권 적설 예보에 활용한다면?

온난이류 적설 최대치는 서울 3cm!, 남쪽저기압 최대치는 경기남부 5cm!

1. 예보와 실황은?

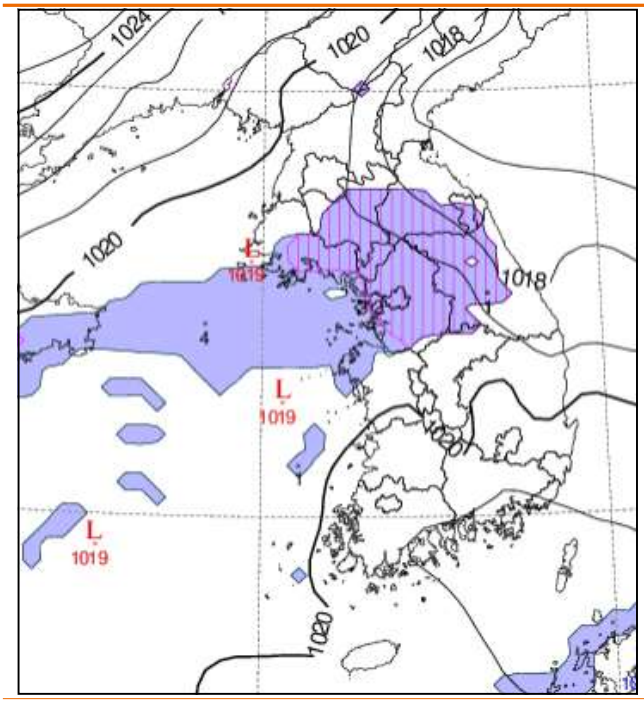
예보(1월 5일 17시 발표)	실황
▸ 예상 적설 - 경기내륙: 5~10cm(많은 곳 15cm 이상) 서울.인천.경기서해안: 3~8cm(많은 곳 10cm 이상)	▸ 신적설 현황 - 서울.인천.경기도 1~4cm

2. 쟁점사항은?

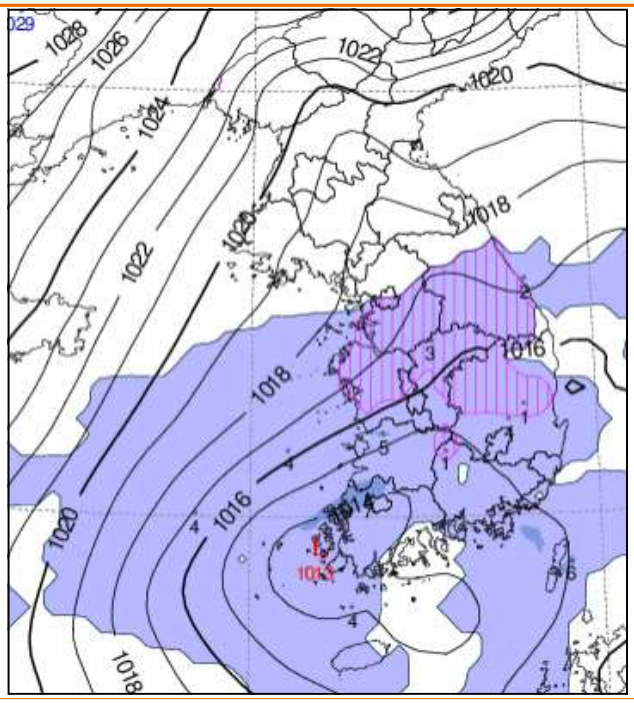
- **(쟁점 1) 강수 메커니즘은 무엇인가?**
- **(쟁점 2) 단순 온난이류와 남쪽골의 수도권 적설 통계는 어떠했는가?**

3. 주요 분석내용

- **(쟁점 1) 강수 메커니즘은 무엇인가?**

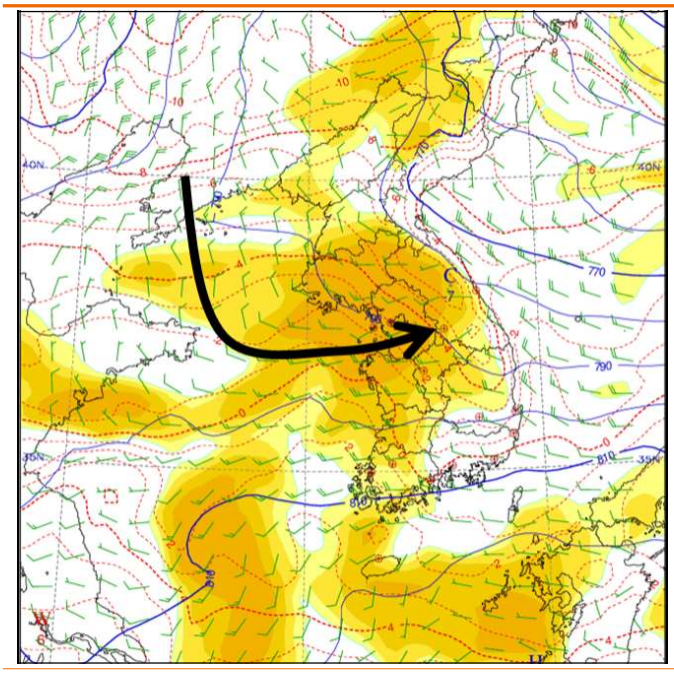


9일 12시 강수 예상도(온난이류 강수)

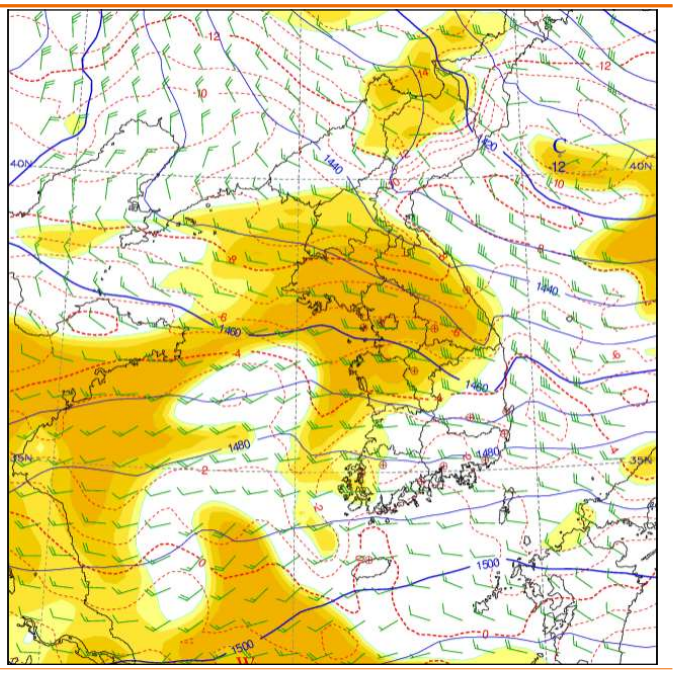


10일 00시 강수 예상도(남쪽골+중층강수)

- 처음 강수 시작은 온난이류형 강수로 시작하고, 이후 남하하면서는 남쪽골+중층강수 형태로 서서히 바뀌어 나가는 구조를 보임

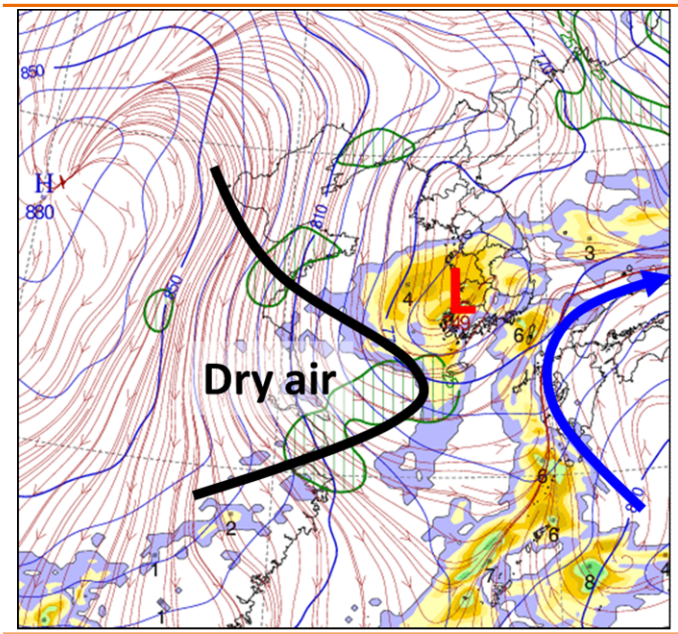


9일 09KST 925hPa 상세바람(UM)

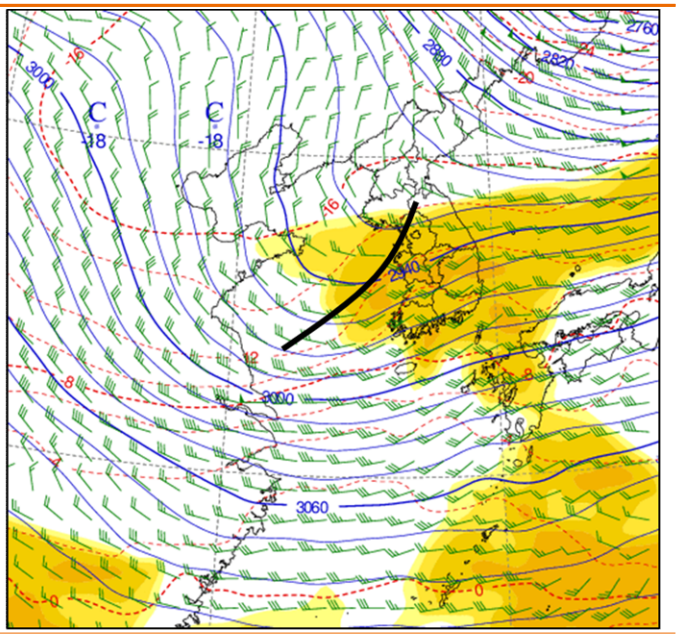


9일 09KST 850hPa 상세바람(UM)

- 온난이류 시간대의 하층 바람구조를 보면 925hPa에서는 난기유입과 경압구역이 모두 존재하지만 850hPa에서는 북서류가 유입되는 경압성(기압골 지원) 형태가 나타나지 않음
- 850hPa 한랭이류 구역의 남북 온도경도가 3℃/150km 이상 되어야 기압골이 지원되는 형태로 분류 가능함, 현재는 925hPa에서만 한랭이류역이 약하게 있으므로 기압골 지원 없는 단순 온난이류형으로 분류할 수 있음

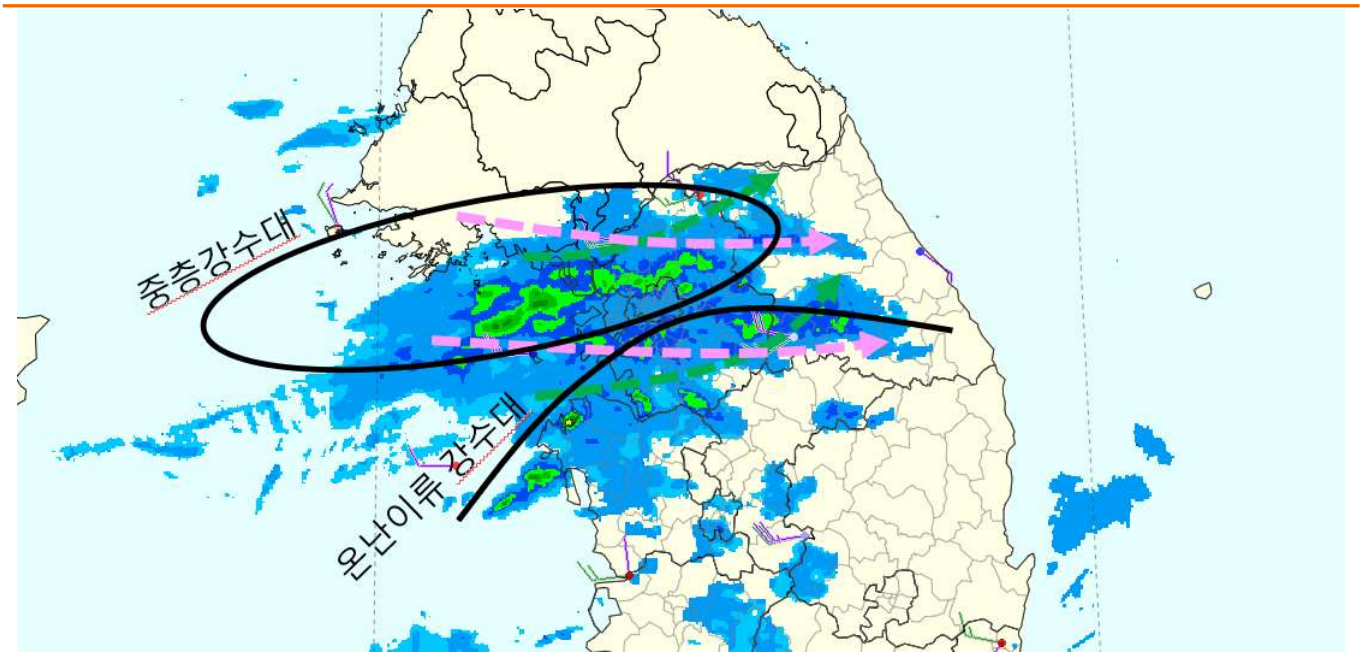


10일 00시 925hPa 유선장+ 강수예상



10일 00시 700hPa 상세바람

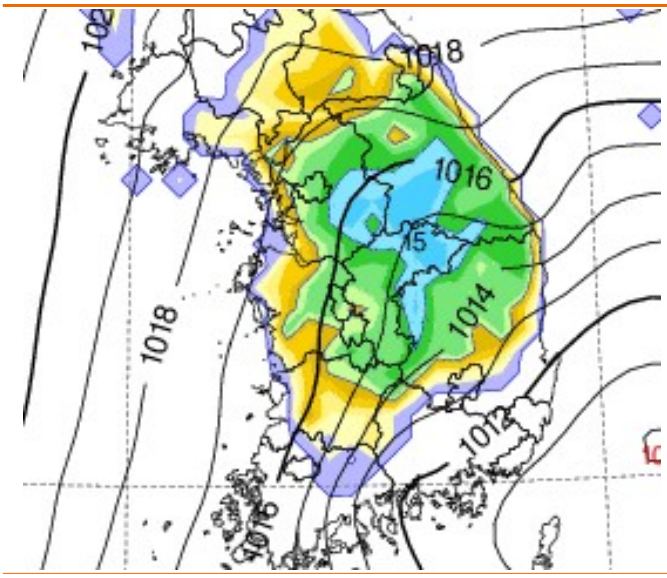
- 오전시간대 온난이류 강수 이후에는 남쪽저기압이 남해안 부근을 통과하고, 그 후면에서 건조역 지원이 있으면서 저기압이 발달하는 형태가 나타나고 동시에 700hPa에서는 중층 기압골이 통과하며 남쪽저기압 + 중층기압골 강수 예상
- 남쪽저기압이 통과할 때는 저기압의 위상에 따라 중부지방의 강수량에 큰 차이 발생



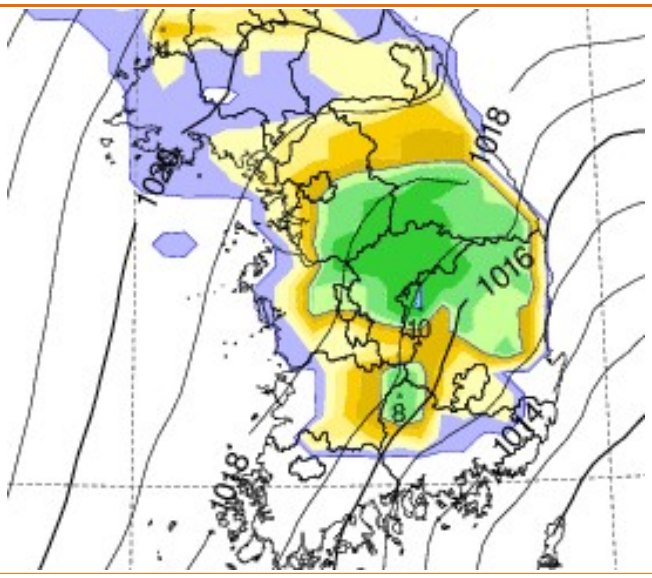
9일 12시 925hPa 풍속 bias

- 실제 진행된 강수의 레이더 영상을 보면 하층에 서풍이 들어가는 온난이류형 강수와, 하층에 북서풍이 유입되는 중층강수 형태가 거의 동시에 진행되었음을 확인 가능

- **(쟁점 2) 단순 온난이류와 남쪽골의 수도권 적설 통계는 어떠했는가?**

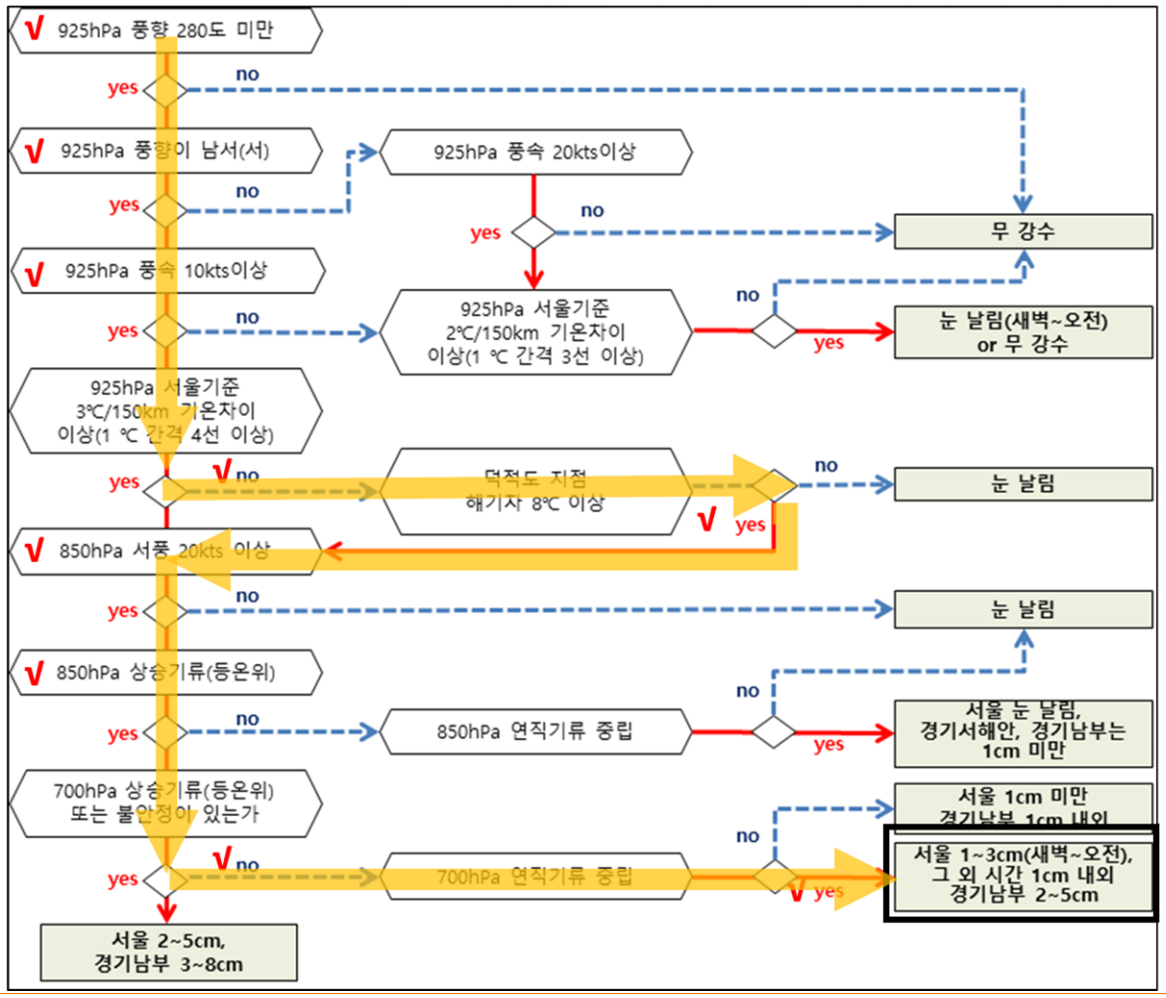


8일 09시 UM 누적적설(8일 09시~10일 06시)



8일 09시 ECM 누적적설(8일 09시~10일 06시)

- 온난이류와 중층강수 모두 모델에서 잘 예측되지 않는 형태이며, 통계적 예보기법이 더 잘 맞는 강수유형임
- 당시 UM과 ECM 모두 수도권 누적적설을 약 10cm까지 예상한 상황이었음



온난이류 가이던스를 따른 예상 적설

- 기압골의 지원이 없는 경우에는 온난이류 가이던스를 따라 판단하면 되는데, 대류에 의한 강한 상승이 없는 경우라면 모든 조건이 호조건이더라도, 서울에 적설 상한은 1~3cm에 불과함
- 또한 최근 10여년의 모든 유사사례를 보아도 3cm를 넘어간 사례는 존재하지 않았음

9일 09KST 오산 단열선도

- 하층 난기가 강하게 유입되면서 최하층에 영상권이 존재하여 수상당량비를 떨어뜨렸고, 낮 시간대로 이어지기 때문에 cold pool의 지원을 받을 수 없는 약점도 존재했음

[최심 신적설 (cm) 최고순위]

• 119 수원 2000.01.08~2024.01.08

순위	년.월.일	극값
1	2006.12.17	20.5
2	2010.01.04	19.5
3	2001.02.15	15.1
4	2000.01.19	11.7
5	2004.03.04	11.3
6	2012.12.05	10.5
7	2001.01.07	9.8
8	2021.01.06	9.4
9	2011.01.23	9.2
10	2003.12.08	8.5
11	2015.12.03	8.2
12	2006.02.07	8.1
13	2013.02.04	7.8
14	2009.01.24	7.2
15	2017.01.20	7.1
16	2021.02.03	6.6
17	2023.12.16	6.5
18	2013.12.19	6.5
19	2013.01.01	6.5
20	2010.03.17	6.4
21	2013.12.12	6.1
22	2022.12.15	6.0
23	2010.12.28	6.0
24	2010.03.09	6.0
25	2015.11.26	5.8

저기압 충청이북 통과사례

하층 제트

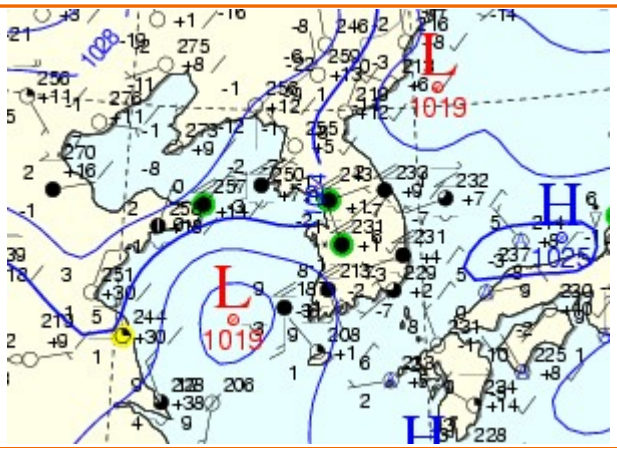
Westerly+ cutoff low

북쪽골

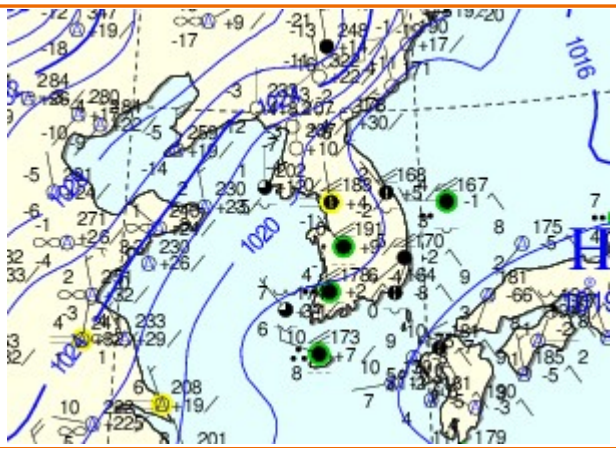
남쪽 저기압 통과사례

수원 지점 2000년 이후 적설 순위와 기압계 분류

- 또한 남쪽저기압의 경우 저기압의 남북 위상과 수도권 적설은 밀접한 관련이 있음
- 2000년대 이후 수원을 기준으로 적설이 가장 많았던 사례의 대부분은 저기압이 충청부근으로 통과하였고, 남쪽저기압 통과의 경우는 20위에 불과하였으며 당시 적설은 6.4cm이었음
- 같은 날 서울의 적설은 1cm 내외에 불과하였음
- 이러한 과거 사례들을 고려해본다면 남쪽저기압+중층기압골에 의한 적설 증가는 서울의 경우는 매우 미미하고, 경기남부보다 남쪽으로는 최대 5cm까지만 고려해 볼 수 있음

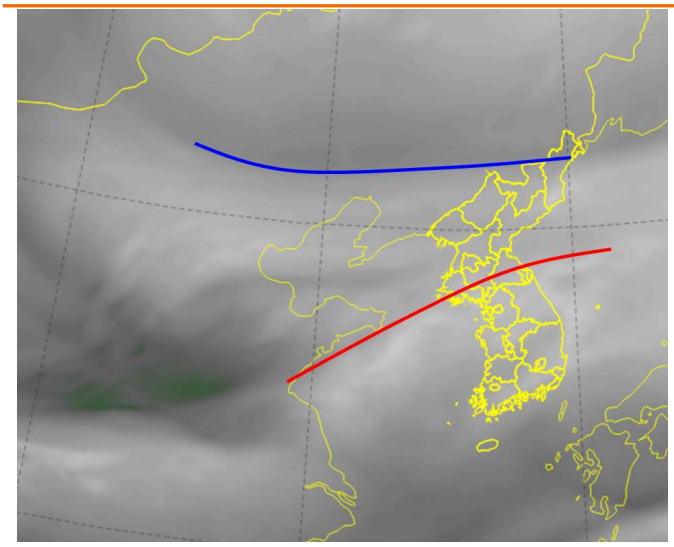


2010년 3월 17일 21시 지상일기도

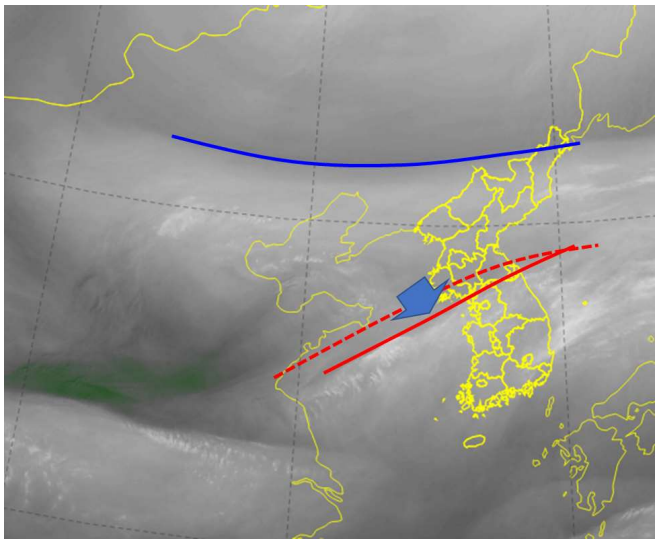


2024년 1월 09일 21시 지상일기도

※ 다만 이 사례는 2010.03.17. 사례보다 저기압이 발달하지 못함



9일 12KST 수증기 예상(UM)



9일 12KST 수증기 실황

- 북쪽에서 남하하는 건조역과 남쪽에서 버티는 난기의 경계의 폭을 모델과 실황을 비교해 보면 실황에서 남북의 압축도도 완만해서 중층강수대 자체도 강하기는 어려웠음
- 종합적으로 온난이류 강수는 1~3cm, 중층강수도 서울은 1cm, 경기남부 3cm 정도 추가만 가능했던 상황으로 보임

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **단순 온난이류 강수의 적설 한계점을 고려했더라면**
  - 850hPa 이상 고도에서 기압골의 지원이 없는 단순 온난이류로 분류되며, 이러한 경우 과거사례와 온난이류 가이던스에서 서울의 적설이 3cm를 넘길 수 없음을 나타내고 있음
  - cold pool과 수상당량비 조건도 좋지 않았던 점을 고려했어야 함

- **남쪽저기압의 위상에 따른 수도권 적설 분포를 고려했더라면**
  - 수원의 2000년 이후 적설 순위에서 남해안 남쪽저기압 통과의 경우 최대 약 6cm였음
  - 저기압이 과거 사례보다 약하고, 실황에서 중층골의 압축 정도도 약했던 점 고려 필요

온난이류의 약화로 오히려 적설은 증가

약한 온난이류와 융해냉각으로 기온 상승 늦어지며 서울 적설 증가

1. 예보와 실황은?

예보(1월 3일 17시 발표)	실황(1월 5일 00시~5일 24시)
▶ 예상 강수량 - 서울, 경기도, 강원영서, 충남서해안, 충남중.북부내륙, 충북북부: 5~10mm - 충남남부내륙, 충북중남부, 전라권: 5mm 내외 ▶ 예상 적설 - 강원영서: 3~10cm - 경기동부, 경기북서내륙: 3~8cm - 서울, 충북북부: 1~5cm	▶ 적설 - 서울 6.7cm, 인천 5.2cm, 강화 11.0cm, 도라산 12.0cm, 북춘천 7.0cm

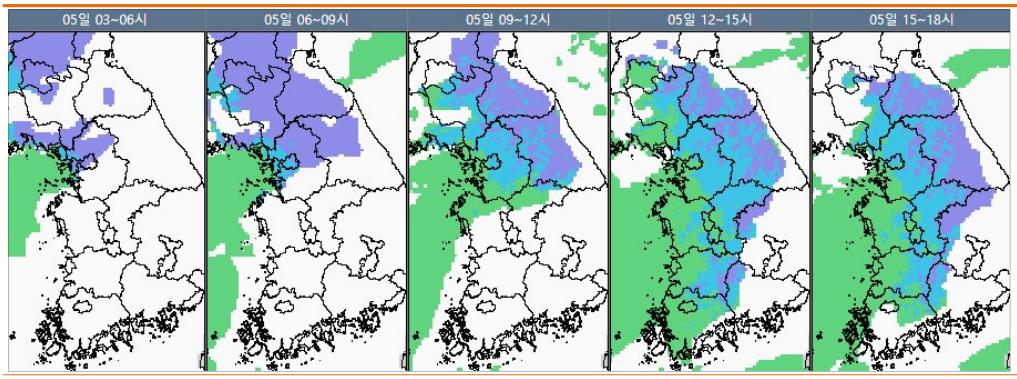
실황 전개 상황

▶ 제주도남쪽해상에서 동진하는 이동성고기압 가장자리와 산둥반도 북쪽에서 동진하는 골 전면 온난이류

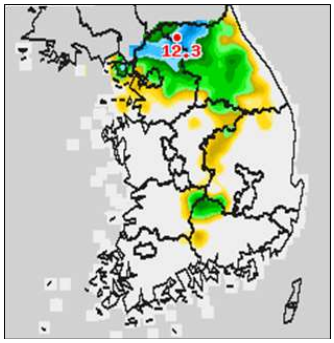
▶ 4일 밤~5일 새벽 내륙 콜드풀로 강수대 해안 수렴되며 서해안 운정고도 4km 이상 구름대 영향, 내륙은 1km 내외에서 떠 있는 구름대에 의한 눈

▶ 지속적인 난기 유입에 의한 수도권 서쪽 지역 콜드풀 약화로 07시 이후 강수대 서울 유입, 08~09시 사이 시간당 3.2cm의 눈이 내리며 지상기온과 습구온도 상승 저지되면서 영하권 지속

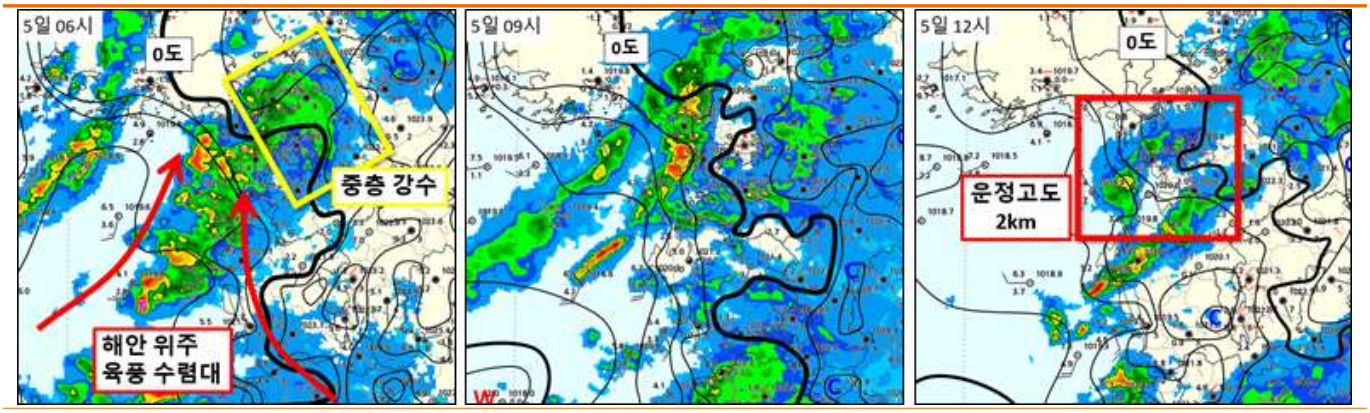
▶ 09시 이후 0.5cm/h 이하의 약한 강수 지속되었으나, 강수가 끝나가는 12시 이후가 되어서야 습구온도가 영상을 회복하면서 서울은 낮까지 눈으로 내렸음



1월 5일 강수형태 분포도



1월 5일 신적설



1월 5일 06시, 09시, 12시 지상기온+레이더

2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 하층의 온난이류가 예상보다 약했던 원인은 무엇인가?**
- **쟁점2) 눈에서 비로 바뀌는 시점이 더욱 늦어진 원인은 무엇인가?**

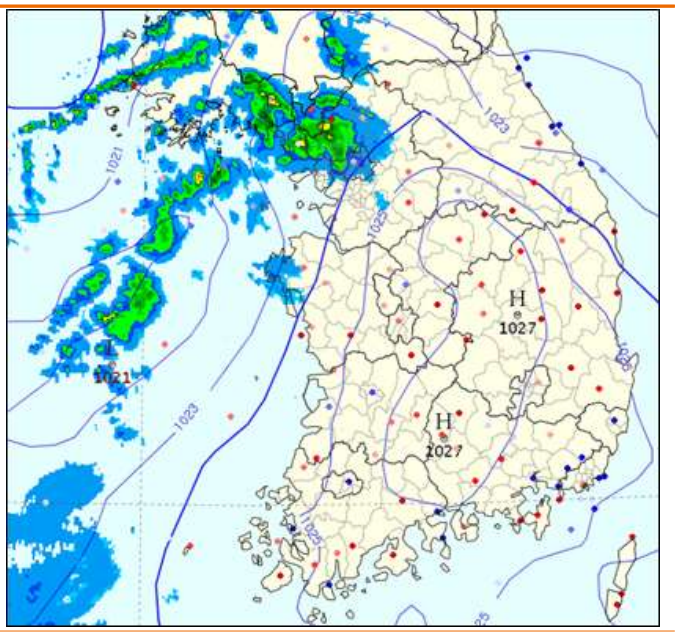
3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 하층의 온난이류가 예상보다 약했던 원인은 무엇인가?**

- 먼저, 강수가 시작되기 전인 5일 03시 925hPa 풍속 편차를 보면 서해중부해상을 거쳐 경기 서부로 유입되는 남서풍이 모델보다 더 남풍에 가깝게 형성된 상태에서 풍속도 약했다. 따라서 우리나라 남쪽의 이동성고기압이 예상보다 빠르게 이동하면서 온난이류가 약했던 것으로 분석되었다.

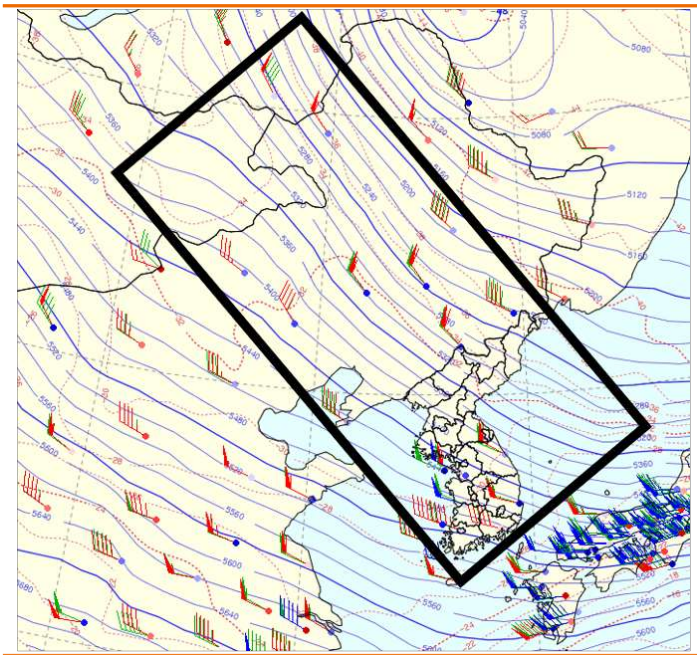
- 여기에 내륙의 기온이 예상보다 약 2~3도 더 내려가면서 콜드풀에 의한 내륙의 국지고압부가 강하게 발달해 수렴대가 서쪽으로 밀려났고, 따라서 아침 시간의 강한 강수대는 서해안에 더 영향을 주고 내륙은 떠서 들어오게 되었다.

1월 5일 03시 925hPa 풍속 bias(ECM, +18h)

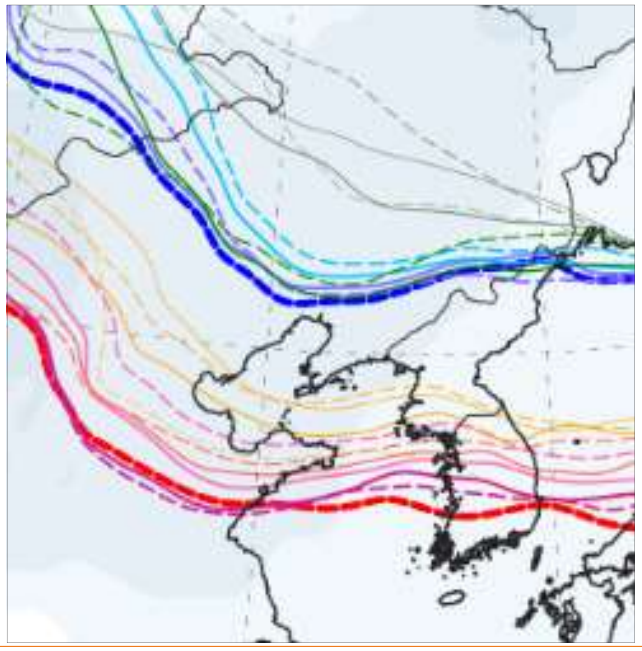


1월 5일 03시 지상기온 bias(ECM, +18h)

- 이틀 전인 3일 오후부터 고기압이 빨라질 가능성을 예상할 수 있었는데, 먼저 중국북동부에서부터 우리나라까지의 500hPa 풍속이 음의 bias를 보이며 상층 흐름이 실황에서 빠르게 나타났다. 이는 모델의 경향성에도 반영되어 전반적인 기압계가 남쪽으로 쳐지는 경향을 보였고, 특히 북쪽보다 남쪽 시스템의 남하 경향이 더 뚜렷하게 나타나면서 고압부의 남하 가능성을 지속적으로 모의하였다.

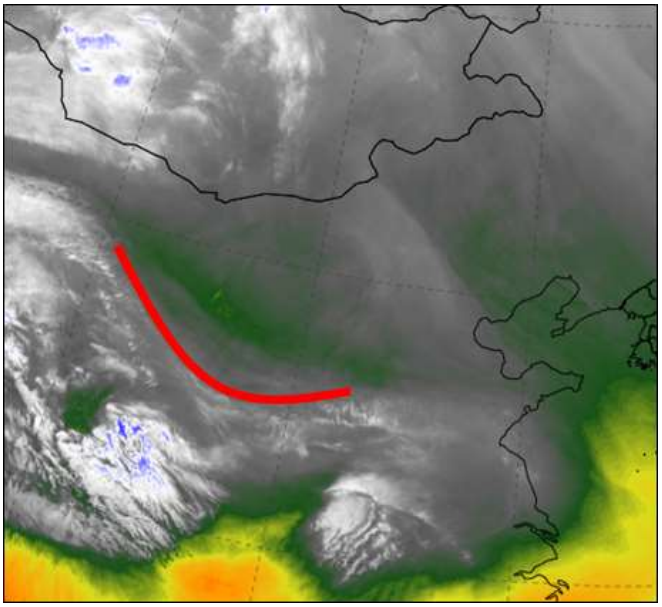


1월 3일 21시 500hPa 풍속 bias(ECM, +00h)

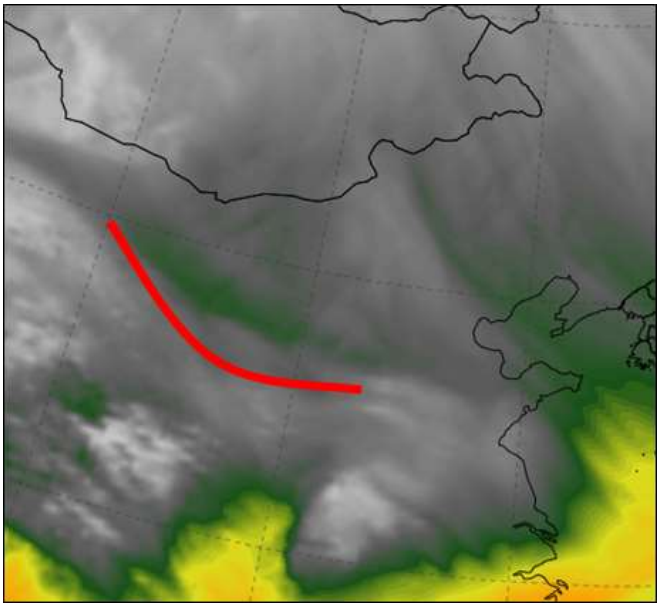


1월 4일 21시 850hPa 예측경향

- 여기에 제주 남쪽 이동성고기압의 위상에 영향을 미치는 중국북부의 건조역이 모델보다 깊고 빠르게 형성되면서 빠른 이동속도와 함께 침강역이 더 남쪽으로 형성되며 고기압의 남하 가능성이 더 커졌다. 따라서, 전반적인 기압계가 빠른 상태에서 고기압이 남쪽으로 쳐지며 그 가장자리를 따라 유입되는 온난이류가 약해진 것으로 분석된다.



1월 3일 21시 중층수증기 실황

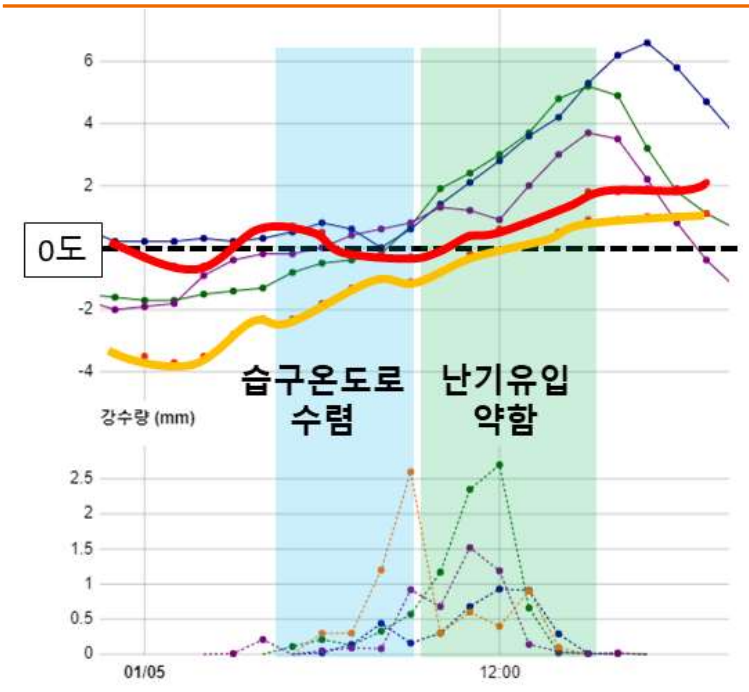


1월 3일 21시 중층수증기 예상(ECM, +00h)

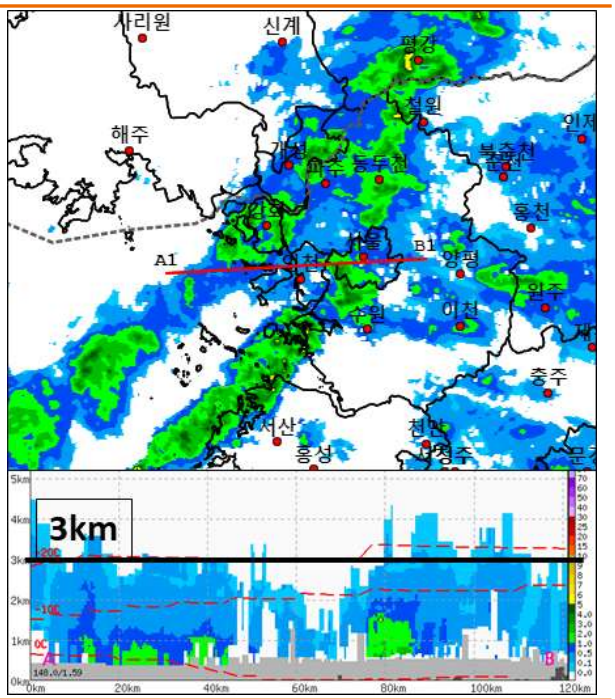
- **쟁점2) 눈에서 비로 바뀌는 시점이 더욱 늦어진 원인은 무엇인가?**

- 강수 시작 전 새벽부터 온난이류에 의해 기온과 함께 습구온도가 상승하기 시작해 모델의 예상과 비슷한 경향을 보였다. 하지만, 기압계가 빠르게 진행되면서 낮 동안 올 것으로 예상되었던 강수가 약 3시간 빠르게 시작해 기온이 본격적으로 오르기 전인 07~09시 사이에 집중되었고, 운정고도가 4km까지 발달한 구름대에서 시간당 3.2cm의 눈(시간당 강수량 최대 2.6mm)이 내리며 지상기온이 더 이상 오르지 못하고 영하권으로 하강해 습구온도로 수렴되었다.

- 강한 강수대가 지나가고 난 09시 이후부터 운정고도 2~3km의 구름대가 유입되며 13시까지 약 4시간 동안 2.4cm의 눈이 기록되었다. 이때 난기 유입이 약해 기온과 습구온도의 상승이 다시 저지되면서 기온은 10시 이후, 습구온도는 강수가 종료되어가는 12시 이후에 영상으로 회복되며 낮까지도 강수 형태가 눈으로 지속되었다.

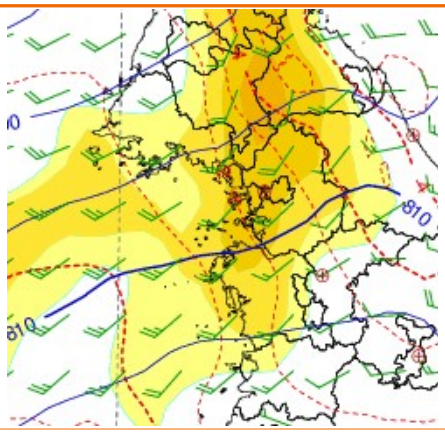


1월 5일 서울 지상기온 모델과 실황(빨간색 선), 습구온도(노란색 선), 강수량

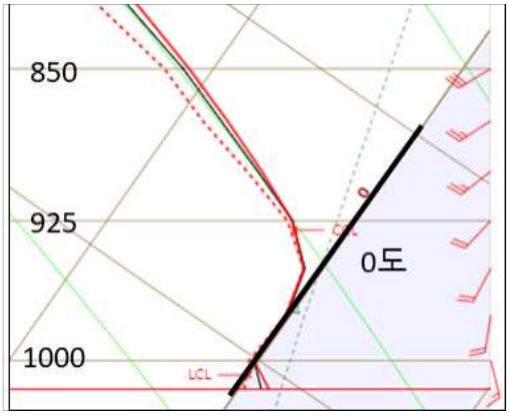


1월 5일 10시 30분 레이더 연직단면

- 이날 새벽부터 온도경도가 약한 상태에서 온난이류에 의한 기온상승을 기대하기는 어려웠다. 또한, 5일 09시 단열선도를 보면 925hPa 이하 고도에서의 비교적 깊이가 얕은 포화층이 0도선에 나란하게 위치하고 있었는데, 하층의 약한 풍속으로 인해 12시까지도 925hPa 이하의 기온이 0도를 넘지 못하면서 낮까지도 강수 형태가 눈으로 지속되는 결과를 가져온 것으로 판단된다.



1월 5일 03시 925hPa 상세바람기온



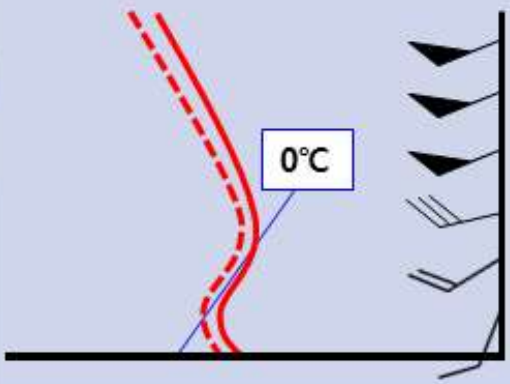
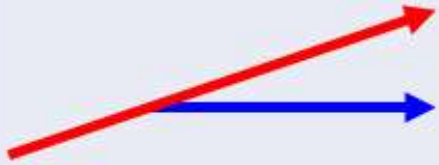
1월 5일 09시 서울 단열선도

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **융해에 의한 냉각 효과를 고려해야 한다.**

- 강수형태를 판단할 때 하층이 포화되어 있다면, 녹는 효과에 의한 융해열 작용을 고려할 수 있다. 강수 과정에서 융해 잠열(열 흡수)에 의해 0도선의 등온층이 발생할 수 있고, 약한 강수가 예상되는 경우 액체상은 증발할 수 있으나, 고체상은 증발하려면 더 많은 에너지가 필요하기 때문에 증발하지 않고 지상에 눈으로 내리기 쉽다.

- 따라서, 이번 사례처럼 하층이 포화된 상태에서 새벽부터 0도의 등온층이 예상되고, 여기에 지상과 하층으로 온난이류의 강도가 약한 상황에서 강수가 지속된다면 융해에 의한 냉각 효과 또한 지속되면서 강수 형태가 눈에서 비로 바뀌는 시점이 늦어질 수 있다. 따라서 이러한 융해에 의한 냉각 효과를 고려하여 적설이 늘어날 가능성을 판단하는 것도 중요하다.

	특징	연직 기온 구조
주 강수 유형	중층+하층 강수	
하층 건조도	습윤	
기온 변화 경향	기온 상승 저지	
		

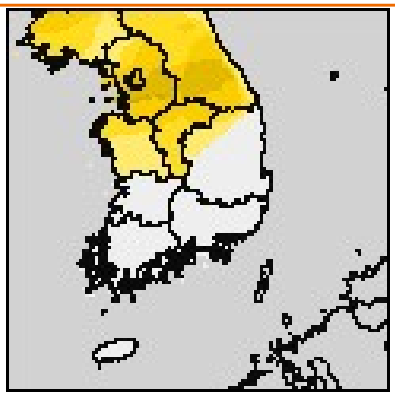
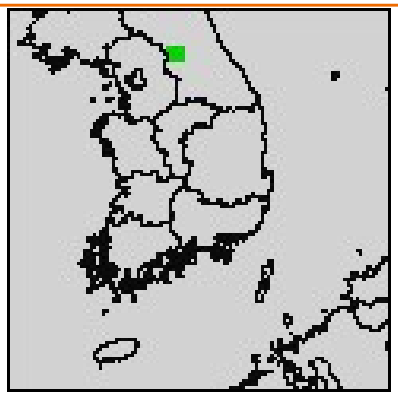
융해에 의한 냉각

2. 발해만 기압골 강수

초겨울 이례적인 스콜라인 형성
남쪽 고기압 버티는지 분석했으면

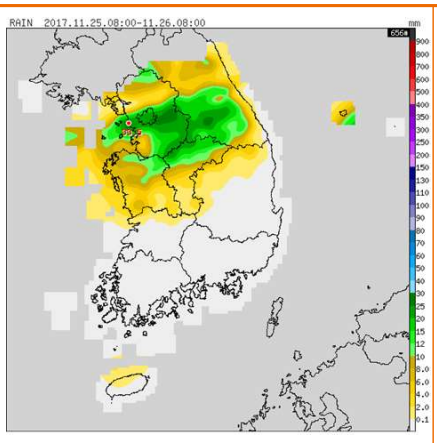
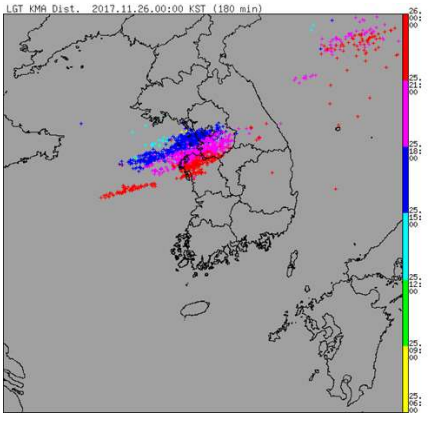
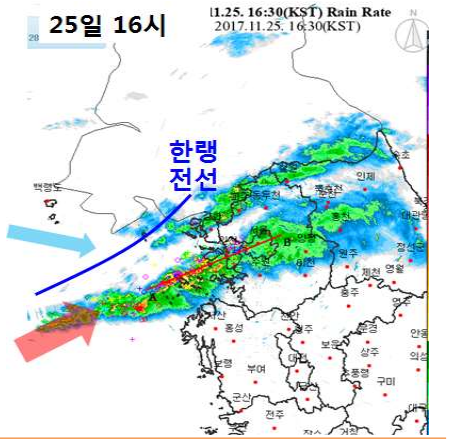
1. 예보와 실황은?

- **예보(24일 17시 발표)**

예상강수량	예상적설
	
- 서울. 경기도, 강원영서: 5~10mm - 강원영동, 충청도, 경북북부: 5mm 내외	- 강원산지: 3~10cm - 강원영서: 1cm 내외

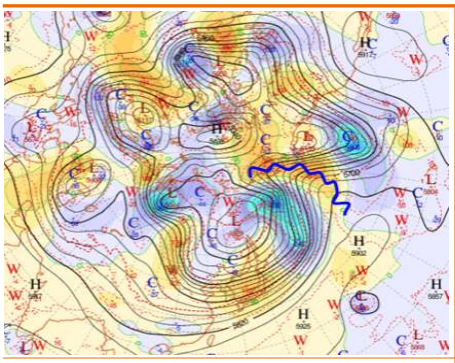
- **실황**
  - **중부지방 5~30mm(인천33.5mm, 서초32.5mm, 광명32.0mm)**
  - 25일 오전 중부지방 5mm 미만 약한 강수 시작
  - 25일 오후 서해상에서부터 스콜라인형태의 대류셀 강수에코(에코탑 8km) 시간당 10km로 느리게 동남동진, 인천 시간당 20mm(16시 43분)
  - 서해상에서부터 서울, 경기지역의 라인형태 강한 낙뢰

최심신적설 현황(cm)
경기 신서 0.5 하면 0.5 의정부 0.0
강원 대관령 17.6 스키점프 15.8 사북 9.4 대화 9.0 내면 6.0 면온 5.5 진부령 2.5 미시령 2.5

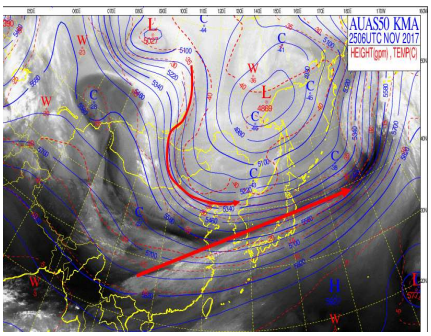
		
1월 23일 21시 레이더 영상	1월 23일 21시 위성 영상(합성)	1월 23~24일 신적설 분포

2. 강수 메커니즘은?

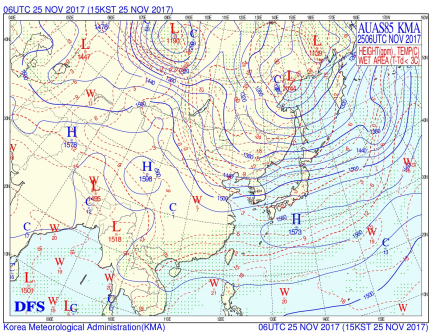
- **(500hPa북반구 대기 정체)** 베링해 블로킹(180°E)이 위치해 있어 그 후면으로 대기 정체. 발해만부근 기압골 남하
- **(극제트 남하)** 몽골 서쪽에서 남부지방 아열대제트 아래로 건조역 침투(온도조밀, 시어와도 발달)한 상황에서 시베리아에서부터 바이칼호, 몽골, 발해만을 따라 극제트(한기) 남하. 500hPa –30℃ 위치
- **(하층제트 형성)** 일본 남쪽해상에 위치한 고기압 가장자리에서 남서류 강화되면서 중부지방으로 50kts의 강한 서남서풍 유입



25일 15시
500hPa북반구

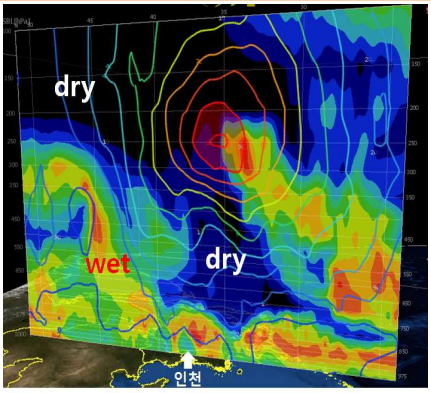


25일 15시
500hPa분석장+수증기영상

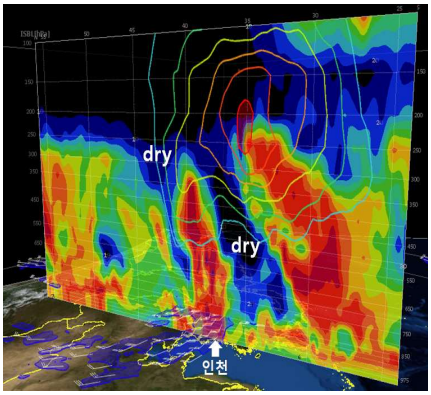


25일 15시 850hPa 분석장

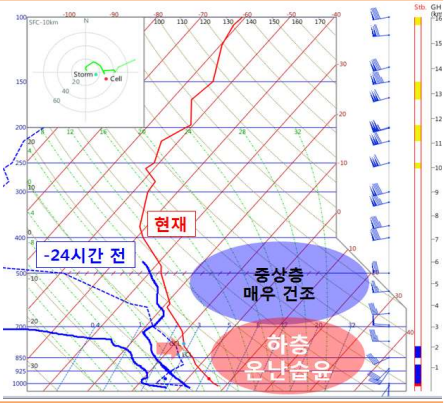
- **(연직불안정 강화)** 24일 21시 아열대 제트 아래로 건조공기 침강. 중부 지방 매우 건조한 상태에서 25일 15시 극제트 남하. 남쪽 건조역 버티면서 그사이에 하층제트(50kts) 강화
  - 850hPa 기온 24일 15시 –11.5℃ → 25일 15시 –3.1℃
  - 8℃ 상승(Td 10℃ 상승) ⇨ 불안정도 강화



24일 21시 등풍속, 상대습도
연직단면 분석장



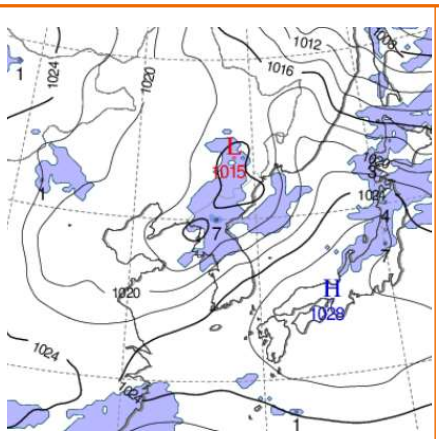
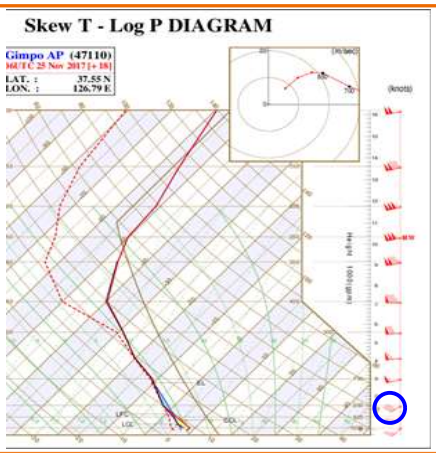
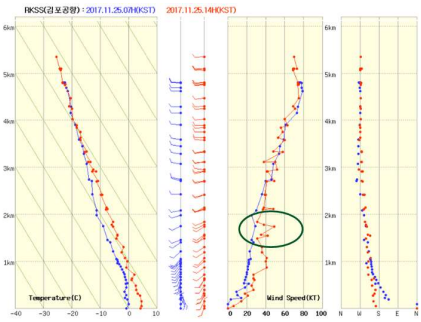
25일 15시 등풍속, 상대습도
연직단면 분석장



25일 15시 오산 단열선도
(-24시간과 비교)

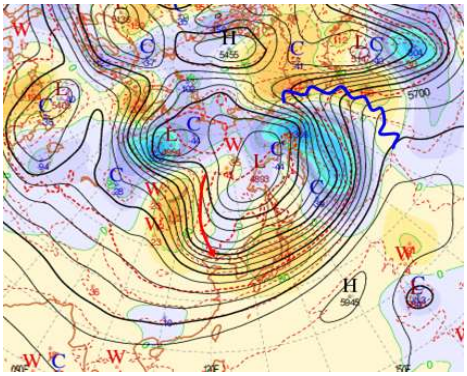
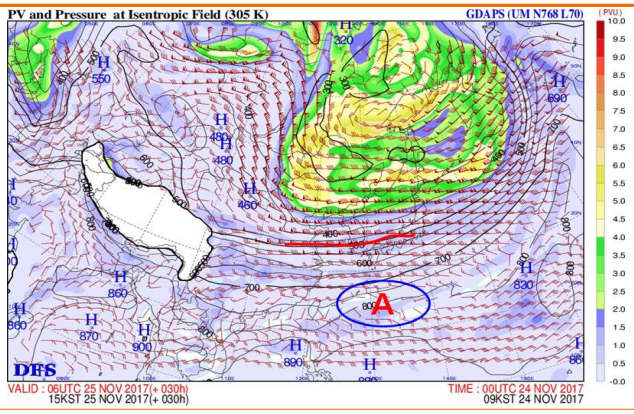
3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- **(모델예상)** 한랭전선 전면 온난구역에서 5mm미만의 약한 강수 모의. 15시 김포공항 850hPa 40kts 예상
- **(김포 AMDAR)** 14시 850hPa 50kts로 4km 이하에서 온난이류가 강해지며 불안정도 증가

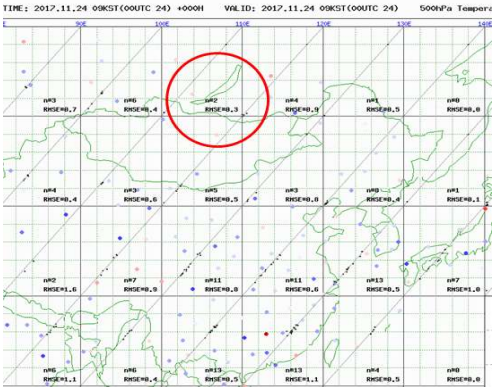
		
25일 15시 예상지상일기도	25일 15시 김포공항 예상단열선도	25일 14시 김포공항 AMDAR

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

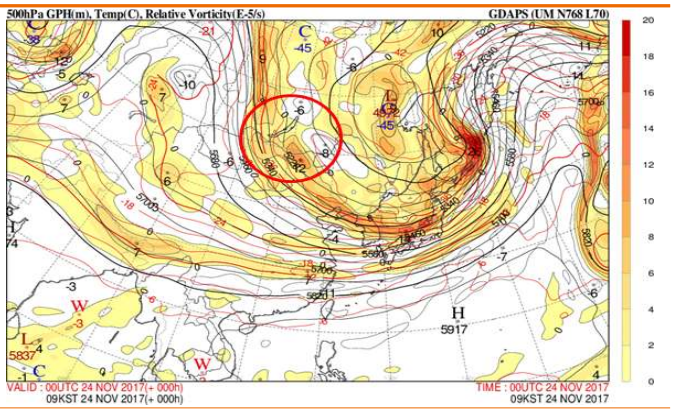
- **남쪽고기압 강화**
  - 25일 15시 극제트 남하함에도 남쪽 고도장 상승
  - 산둥반도 남쪽에서 동중국해쪽으로 하강류 형성되면서 고기압성 순환 강화, 남쪽 고기압 가장자리에서 남서류 강화되면서 고도장 북상
    ⇨ **하층제트 강화 및 강수지속시간 길어짐**

	
25일 15시 500hPa북반구 예상장	25일 15시 305K 등온위면 예상장

- **수치모델과 실황 오차**
  - 500hPa 바이칼호 부근 기온 모델이 기온을 더 높게 모의하여 실제로는 기온이 더 낮음 이에 따라 상층기온이 더 낮게 형성
    ⇨ **상하층 불안정**에 의한 강수량이 많아짐

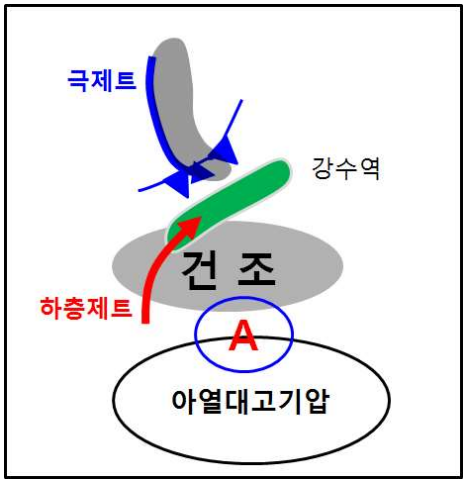


500hPa UM전구모델과 관측자료 기온 차

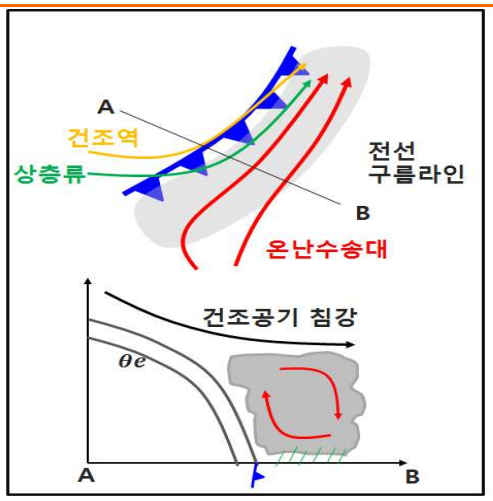


UM전구 500hPa 예측 초기장

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?



500hPa UM전구모델과 관측자료 기온 차



UM전구 500hPa 예측 초기장

- 수치모델에서 하층제트 강도를 약하게 모의. 또한 500hPa온도를 모델이 실황보다 높아 불안정이 약했으며, 이에 따라 강수량을 적게 모의
- 몽골 서쪽에서 남부지방 아열대제트 아래로 건조역이 침투하면서 남쪽고기압 강화 유지 + 극제트 남하에 따른 한기 유입으로 중부지방 불안정에 의한 지속적인 강수 발생.
  ⇨ 남쪽고기압 강화 여부 분석 필요

2-2. 2017년 12월 18일 사례

온난이류 강수만 고려하면 안 된다고?

온난이류 강수 + 발해만 저기압의 영향

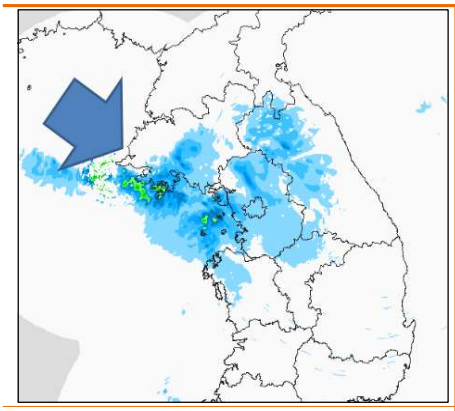
1. 예보와 실황은?

예보 (12월 17일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 중부지방(강원동해안 제외), 전북북부, 경북북부 : 5mm 내외 ▸ 예상 적설 - 경기동부, 강원영서: 2~7cm - 서울.경기서부, 충북북부: 1~5cm - 전북북부, 경북북부: 1cm 내외	▸ 강수량: 5mm 내외 ▸ 적설: 서울경기 4~10cm, 강원영서, 충청 1~5cm

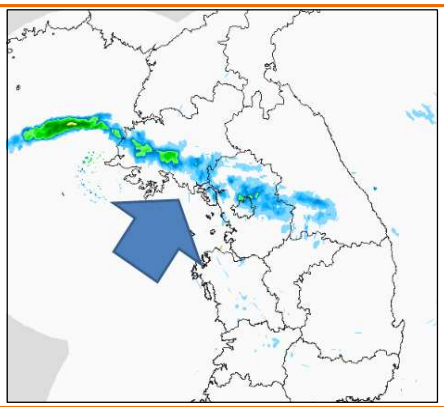
최심신적설 (cm)

서울경기 양평 10.5 남양주 5.9 서울 5.1 인천 4.1
강원영서 문막 5.0 평창 3.5
충청북부 제천 4.0

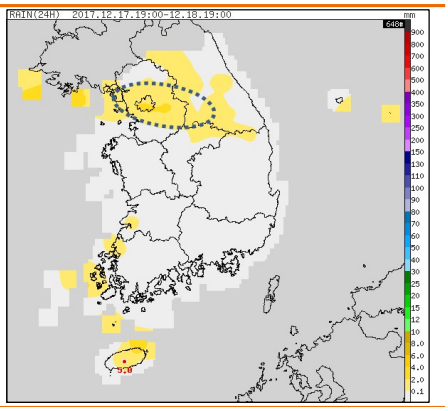
- 새벽부터 아침까지는 전형적인 온난이류의 형태로 강수가 시작되었음
- 10~12시 발해만 저기압의 영향으로 강수밴드는 전선대로 변환되고 저기압성 회전을 보이면서 서울.경기 지역에서 강수가 정체하는 형태를 보임



12월 18일 03시 레이더 영상



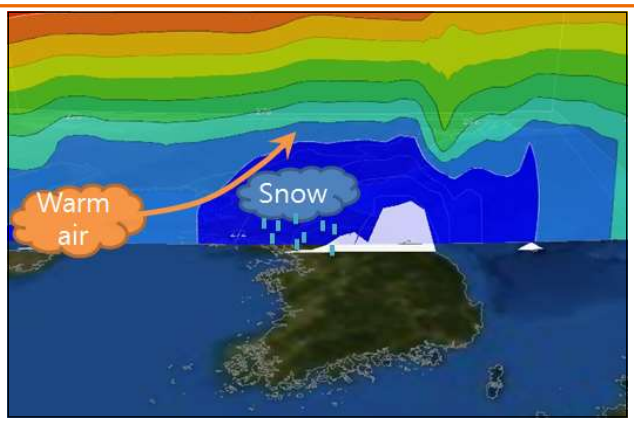
12월 18일 12시 레이더 영상



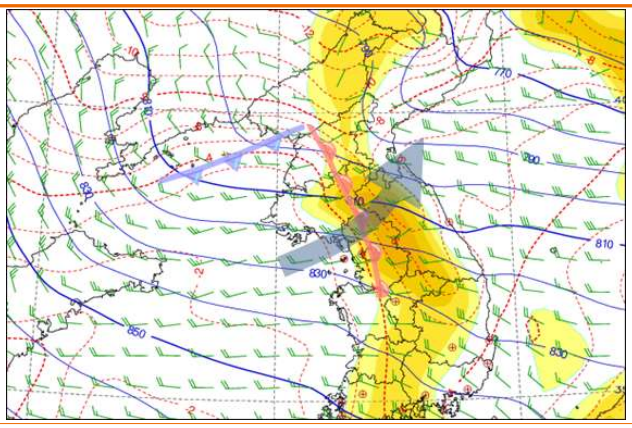
12월 18일 누적강수량

2. 강수 메커니즘은?

- **(925hPa 온난이류)** 한반도 지역에 한기가 강하게 축적된 가운데, 우리나라 남쪽으로 고기압이 배를 내밀면서 그 가장자리로 925hPa에서 온도조밀역인 서해안으로 난기가 유입
- **(850hPa 강한 서풍)** 850hPa 난기이류는 약하나, 서풍이 강하게 불면서 경기북부까지 강수대 유입
- **(발해만 저기압 발달)** 강수대는 동남동진(온난이류의 유형임)하였으나 발해만에 지상 저기압이 발달하면서 온난이류형 강수대는 점차 전선대의 형태로 변하여 얇은 띠 모양이 되었음. 남쪽에는 고기압이 버티고 있었기 때문에 발해만 저기압이 회전하며 강수대가 다시 북상하였고 이는 일반적 온난이류 유형에서는 나타나지 않음.



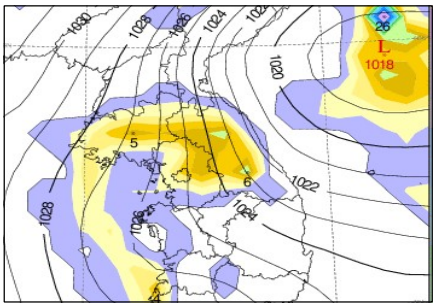
중부지방에 강하게 형성된 cold pool(17일 21시)과
하층에서 유입되는 난기이류 충돌에 의한 강수메커니즘



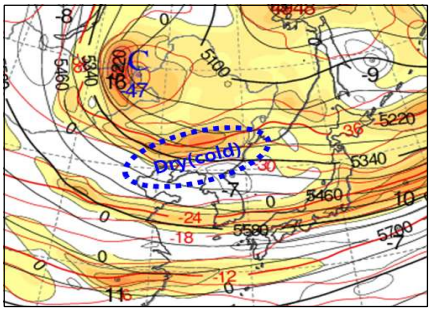
12월 18일 03시
발해만 저기압에 의해 발달한 전선대

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

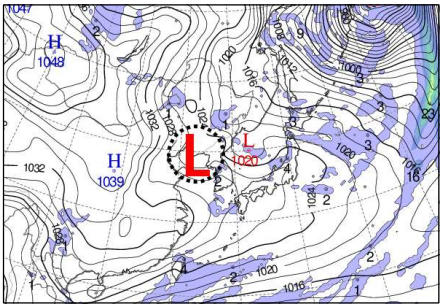
- 중부지방의 강설량은 1~5mm(환산 값) 예측, 경기동부와 강원영서에 집중
- 500hPa에서 건조역을 동반한 vorticity streak 남쪽으로 발해만 저기압이 발달함과 동시에 남쪽 고기압은 버티는 형태를 보임



총 누적 강설량(18일 까지)

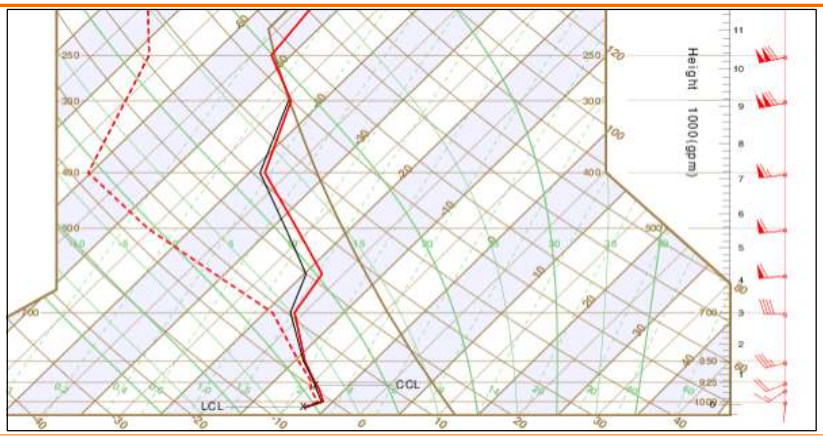


12월 18일 06시
500hPa 기온과 상대와도

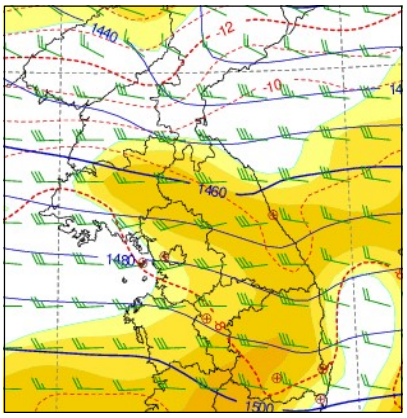


12월 18일 06시 지상
해면기압/강수 예상도

- 춘천 예상단열선도에 나타나는 포화층의 온도가 –10℃ 이하로, 과냉각수적이 발달할 수 있는 구조를 모의
- 850hPa 상세바람예상장도 서남서풍의 바람이 25~30kts로 불 것으로 예측하였음



12월 18일 15시 춘천 예상단열선도



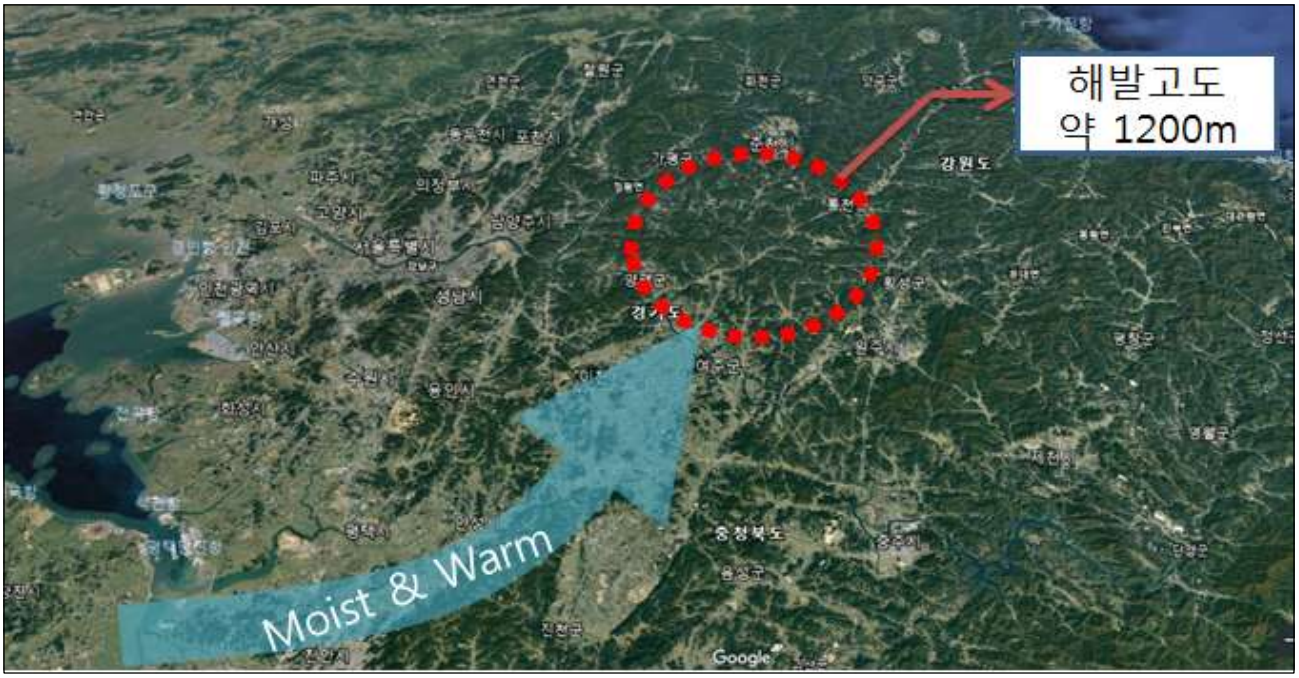
12월 18일 15시
850hPa 상세바람장

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **상층 한기 남하로 인한 발해만 저기압의 발생과 그 영향을 고려하였는가**
  - 온난이류에 의한 강수 이후 상층 한기 남하에 따른 발해만 저기압의 영향이 바로 이어지는 형태
  - 남쪽의 하층 고기압이 버티면서 발해만 저기압이 회전, 온난 강수대가 오히려 북동진하여 중부지방에서 정체됨
- **온도 연직구조에 따른 수상당량비를 고려했는가**
  - 포화층의 온도가 –10℃ 이하로 떨어지며 수상당량비가 커질 수 있는 점을 고려

※ 양평지역에 많은 적설이 기록된 이유는?

겨울철 수도권 지역에서 바람이 휘면서 남서류가 유입되는 경우에는 경기만 또는 서해로부터 따뜻하고 습윤한 공기가 고도가 낮은 지형을 타고 유입되기에 유리하며 양평지역 북동쪽에 위치한 용문산(1,157m)에 기류가 부딪히면서 강수량이 증폭된다.



5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- **발해만에 한기를 동반한 단파골이 통과하는지 면밀히 검토**
  - 12월 해수온도 조건(7~8℃)에서는 500hPa의 단파골 통과시 발해만 저기압이 잘 형성
  - 발해만 저기압이 영향을 주게 되면 저기압성 회전에 의해 강수밴드가 북동진하며 중부지방에 강수 집중
- **지형에 따른 강수 집중구역 발생과 수상당량비 고려**
  - 850hPa에서 남서류가 불 때 경기동부 지역의 풍상측으로 강수량이 집중
  - 발해만 저기압형 강수는 단열선도의 구조에 따라 수상당량비가 20 이상으로 크게 나타날 수 있음을 고려

12월 19일 발해만 기압골에 의한 온난이류 강수

강수대 유입을 도와주는 요소를 찾아라!

1. 예보와 실황은?

적설 예보(19일 17시 발표)	실황
경기남부서해안, 충남, 충북남부, 전북, 서해5도: 1cm 내외	서해안에만 적설 충남내륙, 충북, 전북 내륙에 적설 없음

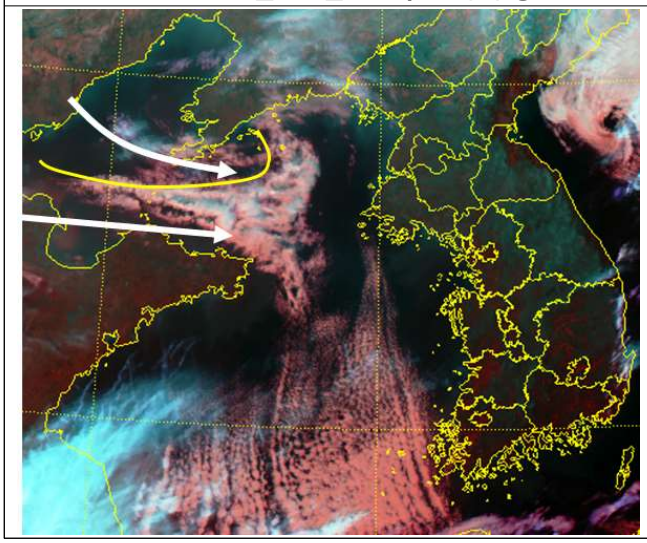
2. 쟁점사항은?

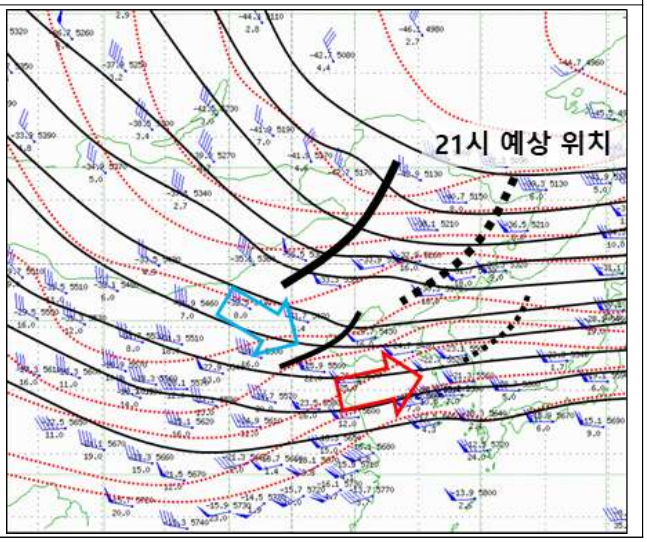
- **쟁점1) 발해만의 구름대의 발생 메커니즘은?**
- **쟁점2) 강수대가 내륙까지 유입될 것인가?**

3. 주요 분석내용

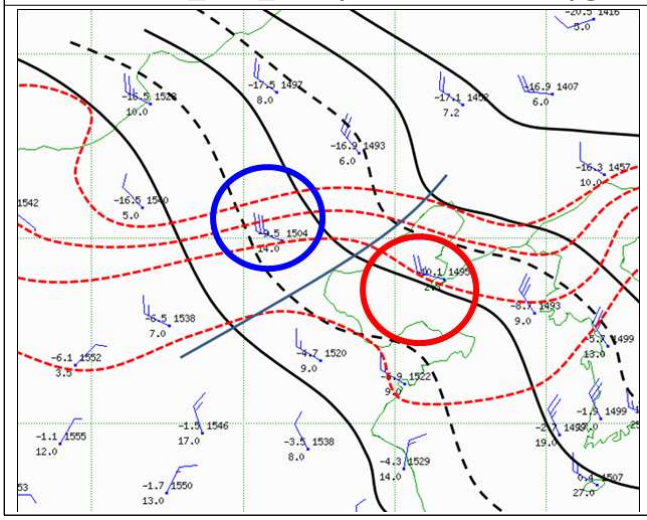
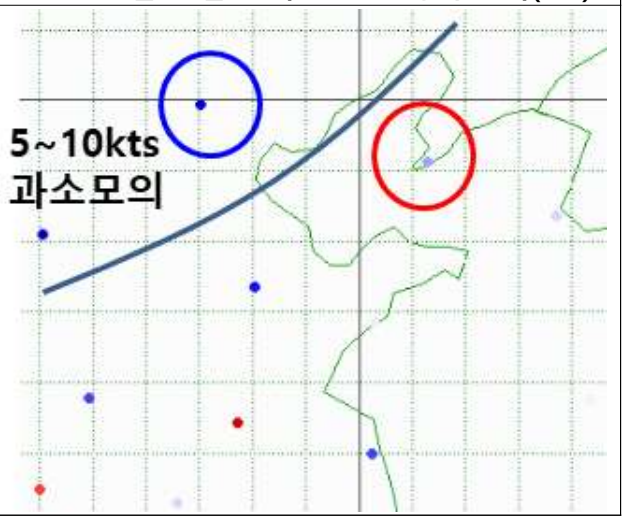
- **쟁점1) 발해만의 구름대의 발생 메커니즘은?**

2019년 12월 19일 12시 합성영상	2019년 12월 19일 09시 500hPa GTS 분석장



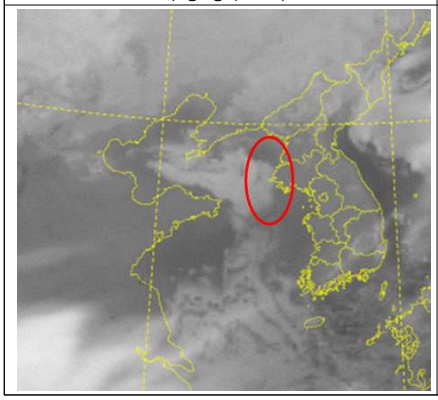
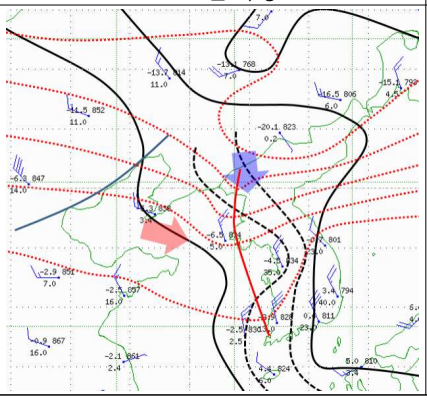
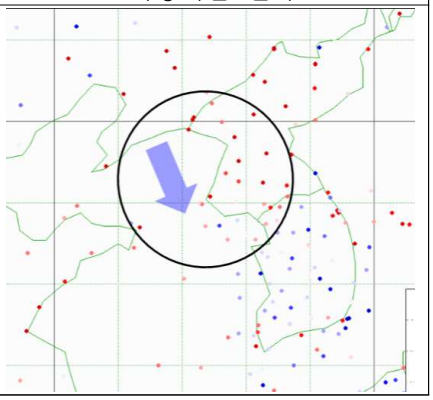


- 2019년 12월 19일 12시 위성 합성영상을 보면 발해만과 산둥반도 이남 서해상에 각각 다른 형태의 구름대가 관측됨
- 발해만의 구름대는 서풍과 북서풍이 수렴하여 형성된 것으로 약 4km 고도까지 분포하고 있음
- 19일 09시 500hPa GTS 전문을 이용하여 일기도를 그려보면, 발해만과 몽골 동쪽에 각각 기압골이 분석됨. 즉, 상층 기압골이 하층 기압골 발달을 지원한 것임을 알 수 있음
- 산둥반도 이남 서해상의 구름대는 찬공기가 북풍을 타고 남하하면서 상대적으로 따뜻한 해수면을 지나 형성된 구름대임. 19일 09시에 관측된 칠발도 수온은 11.2℃, 흑산도의 850hPa 기온 –2.7℃로 850hPa 해기차는 13.9℃ 나타남

2019년 12월 19일 09시 850hPa GTS 분석장	2019년 12월 19일 09시 850hPa 풍속 편차(UM)
	

- 19일 09시 850hPa GTS 분석장을 통해 상층의 지원을 받은 발해만 기압골을 확인할 수 있음. 기압골 전면에는 난기이류, 후면에는 한기이류가 나타나 잘 발달한 구조
- 그러나 850hPa 풍속 편차를 보면 UM 예상보다 기압골 전.후면의 풍속이 5~10kts 강함. 즉, 예상보다 기압골이 강하게 발달한 상태임을 알 수 있음

● **쟁점2) 강수대가 내륙까지 유입될 것인가?**

2019년 12월 12시 적외영상 예상장(UM)	2019년 12월 19일 09시 925hPa GTS 분석장	2019년 12월 19일 09시 UM 지상기온 편차
		

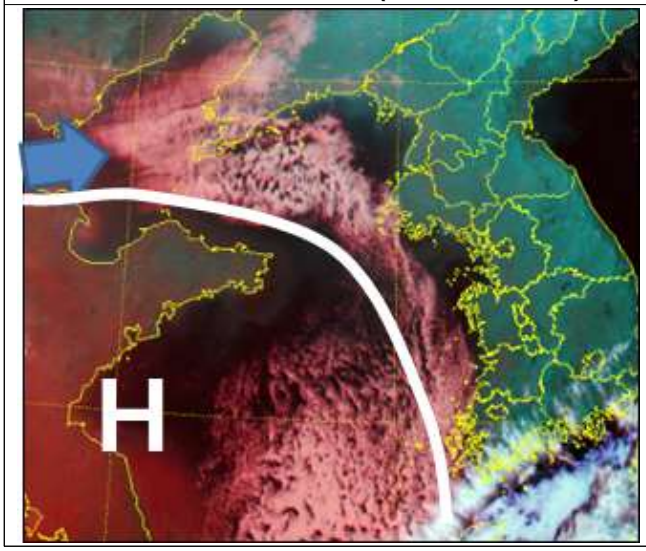
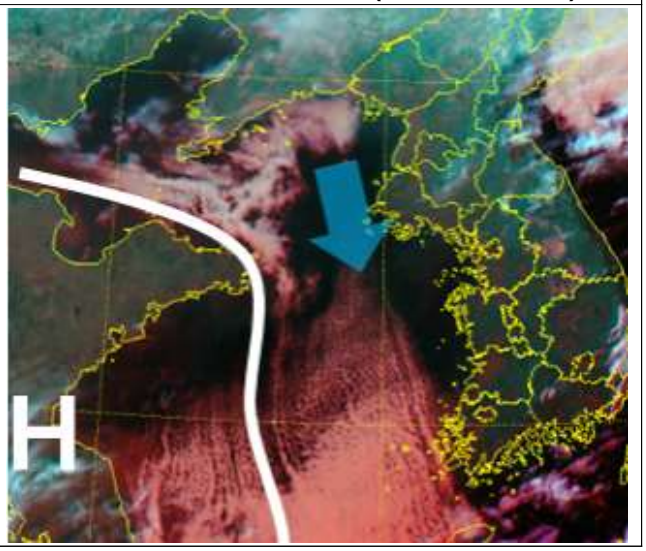
- 19일 12시 UM 적외영상 예상장(18일 21시 발표)에는 서한만까지 온난이류 구름대가 퍼져 있는 것으로 모의되어 있으나 12시 합성영상에서 볼 수 있듯이 실제로는 구름이 유입되지 못하였음
- 이것은 한기가 서해상으로 강하게 남하(북풍)하면서 발해만에서 유입되는 온난이류 구름대를 막는 역할을 하였기 때문임
- 19일 09시에 관측된 북한지방과 서한만의 지상 기온 편차(UM 기준)는 warm bias로 모델 예상보다 지상의 기온이 더 낮다는 것을 보여줌. 즉, 한랭이류가 예상보다 강함

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

● 온난이류 구름대의 발생 메커니즘이 상층 기압골과 관련 있는 것을 확인할 수 있었음. 즉, 12시간 전(18일 21시) 500hPa 기압골 위치와 이동 속도를 고려하였을 때 19일

21시에는 기압골이 동해상으로 빠져나가는 것을 예측할 수 있음

- 발해만 기압골에 의한 온난이류 강수가 예상되는 시점에 상층 기압골은 이미 우리나라를 통과 한 상태이므로 하층을 지원하는 요소가 존재하지 않음
- 기압골이 통과할 때 온난이류 강수가 내륙까지 기록되었던 2019년 12월 7일 사례와 비교해보면 19일에는 산둥반도 남쪽 고기압이 12월 7일 사례에 비해 확장하지 못함. 즉 구름대를 내륙까지 밀어주는 힘(서풍)이 약하였음

12월 6일 16시 합성영상(강수 10시간 전)	12월 19일 10시 합성영상(강수 10시간 전)
	

2-4. 2020년 1월 14일 사례

발해만 기압골 강수, 충남서해안은 무조건 온다?

국지고기압에 의한 강수대 유입 저지

1. 예보와 실황은?

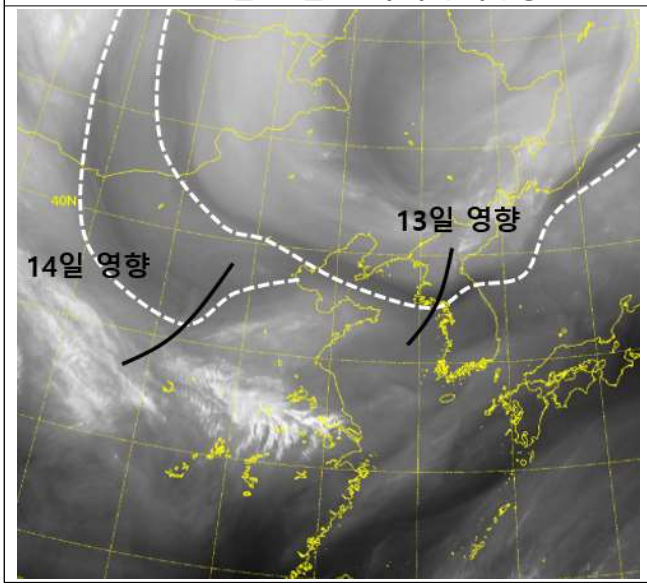
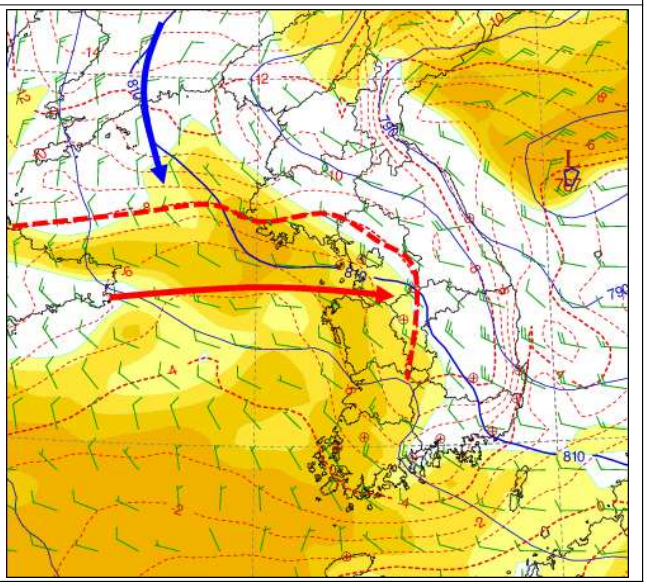
적설 예보(13일 17시 발표)	실황
충남서해안 : 1cm 내외	충남서해안 적설 없었음

2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 서해상에서 강수 구름대가 발달하는가?**
- **쟁점2) 강수대가 유입 가능한 조건인가?**

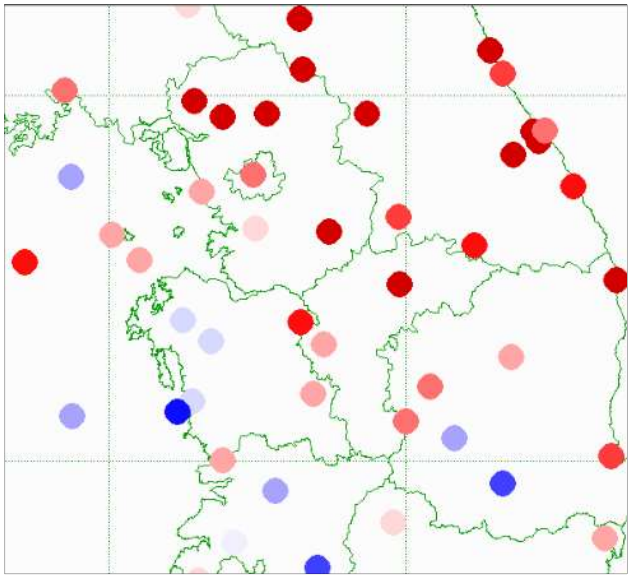
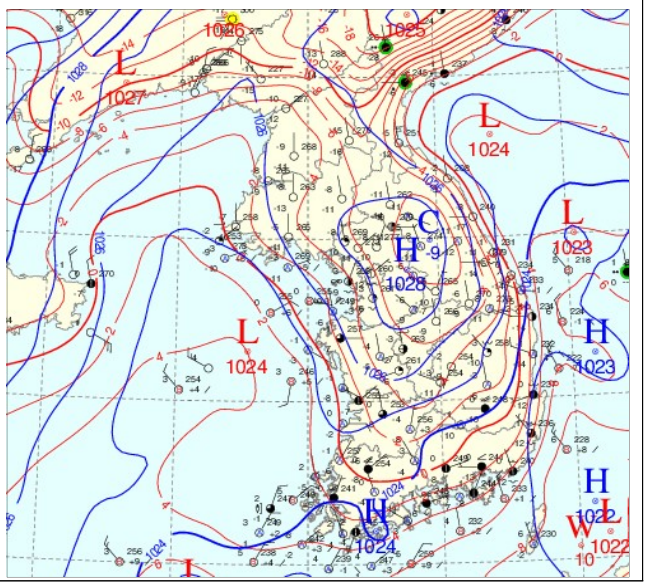
3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 서해상에서 강수 구름대가 발달하는가?**

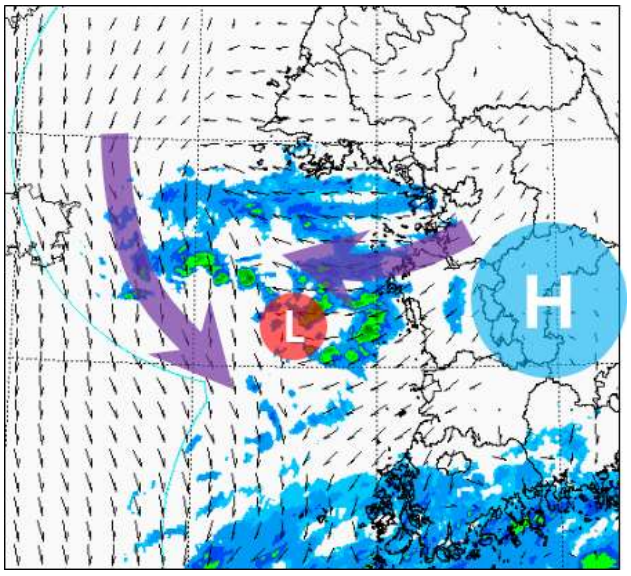
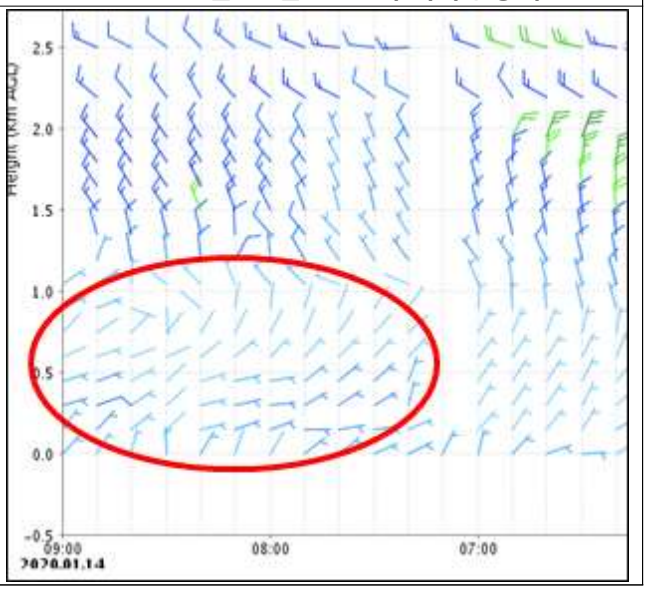
2020년 1월 13일 09시 수증기영상	925hPa 2020년 1월 14일 00시 예상장
	

- 13일 영향을 주는 기압골은 점차 빠져나가고 14일 영향을 줄 기압골이 점차 접근하고 있음. 산둥반도 서쪽으로 돌아 내려오므로 서해상 국지저기압 발달 지원
- 하층에서는 서한만 인근으로 한랭이류역 형성. 그 전면으로 서북서풍 10kts의 온난이류가 형성되면서 강수 구름대가 형성될 수 있는 조건임
- 따라서 서해상에서는 충분한 눈구름이 발달할 수 있고, 건조역이 동반된 기압골에 의해 하층 저기압이 더 발달하며 강수대는 더 강화될 수 있음
- 하층에서 북서류 또는 서북서풍이 예상되면서 강수대 일부가 충남서해안에 유입될 것으로 예상

- **쟁점2) 강수대가 유입 가능한 조건인가?**

2020년 1월 14일 09시 지상기온 bias	2020년 1월 14일 09시 한반도기압/온위
	

- 전(前)일 한기가(925hPa -8℃) 강하게 내려왔으며, 13일 밤에 난기이류로 전환
- cold에서 warm으로 바뀌는 패턴에서는 지상에 복사냉각으로 인하여 일반적으로 warm bias가 크게 나타남. 이번 사례도 지상에 냉각이 강하게 나타나면서 국지고기압이 발달하였음

2020년 1월 14일 09시 레이더영상	2020년 1월 14일 군산 수직측풍장비
	

- 14일 아침 실황을 보면 서해상으로 강수대는 잘 발달하였음. 내륙에 cold가 쌓이면서 육풍에 의해 서해상 중규모 저기압 순환이 만들어짐
- 서해상에서 발달한 국지저기압은 내륙의 고기압에 의해 동진하지 못하였음. 군산의 바람도 하층에서 고기압이 강화되면서 동풍계열의 바람이 관측되었음

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **건조역이 동반된 기압골이 서해상 저기압을 발달시킬 것을 예상하였다면**
- **내륙 Warm bias를 고려하여 국지고기압이 발달, 저기압 저지를 고려하였다면**

2-5. 2021년 1월 6일 사례

발달한 저기압에 의한 수도권 대설

(key word) 발해만 저기압, 발해만 기압골, 수도권, 대설, 온난이류, 해기차

1. 예보와 실황은?

적설 예보	실황
(5일 17시) 수도권 1~5cm (6일 17시) 수도권 3~10cm	수도권 1~15cm, 서초 13.7cm, 과천 15.6cm

2. 핵심 논의

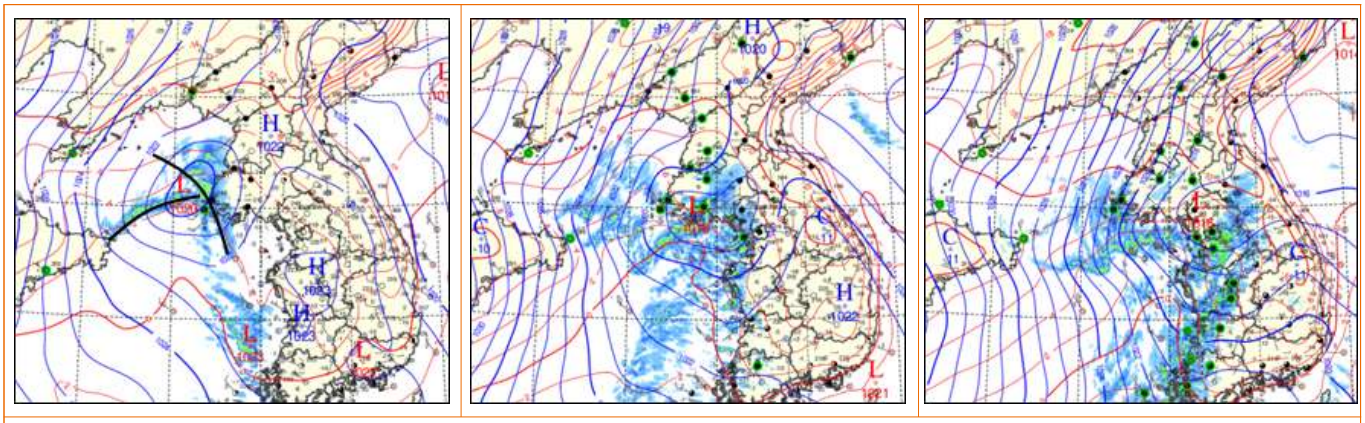
- **(적설 메커니즘) 발해만 기압골인가? vs 발달한 저기압인가?**
- **(적설량) 발해만 기압골일 경우 5cm 미만, 발달한 저기압일 경우 5cm 이상(대설 가능)**

3. 실황전개

- **강수 시작(19시)과 동시에 강한 강도로 내려 쌓임(강수 피크: 19~21시, 종료: 24시)**

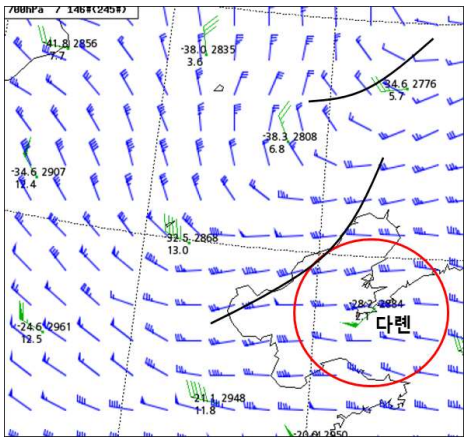
4. 주요 분석

- **이슈 1) 발해만 기압골이 아닌, 발달한 저기압 통과**
  - 수치 모델은 18시 이후부터 지상 저기압이 약해져 골 형태로 통과하는 것으로 모의하였으나, 실제로는 발달한 저기압 형태로 통과함.

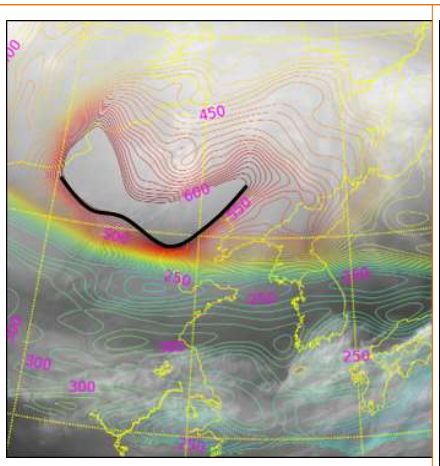


한반도 기압/온위 및 레이더 중첩(왼쪽부터 15시, 18시, 21시)

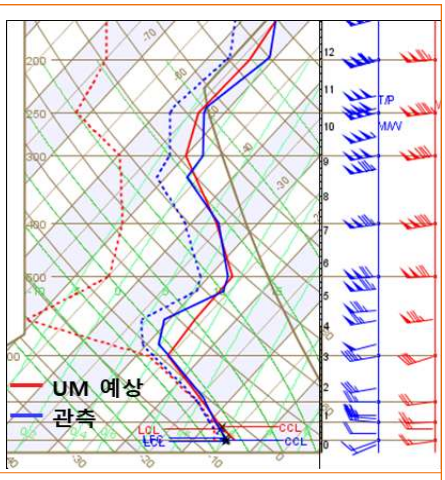
  - 상층 건조역이 급격히 남하하면서 골이 깊어져 발달하는 모습이 나타났고, 강수가 시작되기 약 12시간 전인 오전 9시 발해만에 위치한 골 전면의 '다롄' 지역에서 700hPa 바람이 모델 예상보다 15kts 더 강한 남서풍으로 나타남.
  - 12시 1.5PVU 잠재와도에서 권계면으로부터 공기가 침강하는 모습이 뚜렷하게 나타나며, 이는 기압골이 더욱 깊게 발달할 수 있는 조건을 형성함.
  - 21시 오산 단열선도에서 모델은 구름이 3km까지 발달할 것으로 예상하였으나, 실제로는 4.5km까지 발달함.



6일 9시 700hPa 모델 예상
바람장(파란깃), GTS 바람(초록깃) 비교

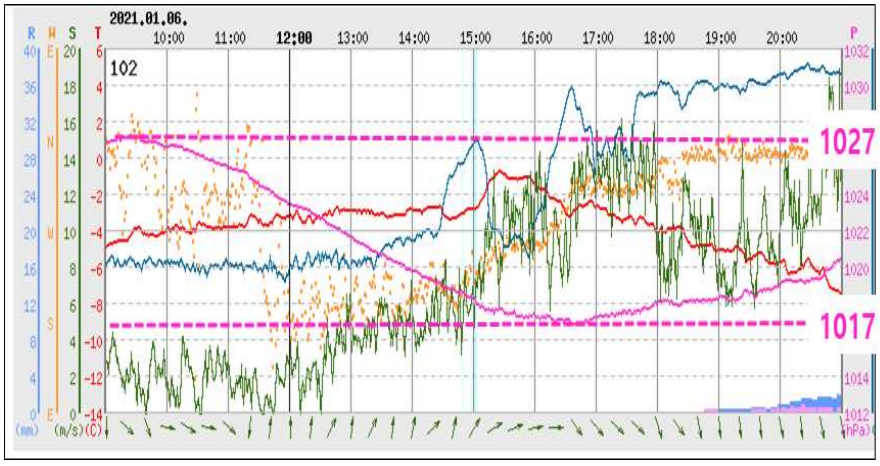


6일 12시 1.5PVU Potential Vorticity

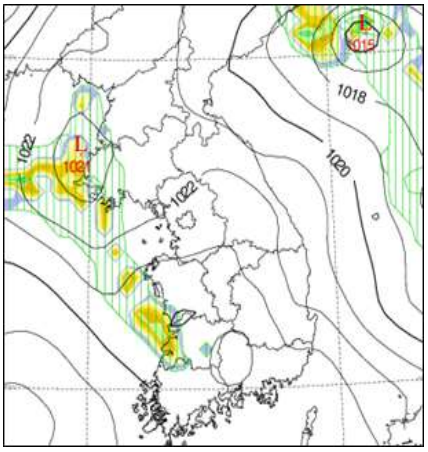


6일 21시 오산 단열선도

- 6일 10시부터 16시까지 백령도의 기압이 10hPa 감소하였으며, 15시 모델은 백령도의 기압값을 1021hPa로 예상하였으나 실제로는 1018hPa이 관측되며 저기압이 모델 예상보다 더 발달한 상태를 보임.

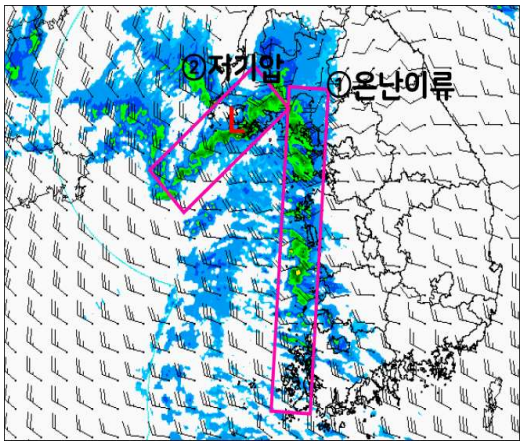


6일 백령도 기상요소 시계열(자주색: 기압)

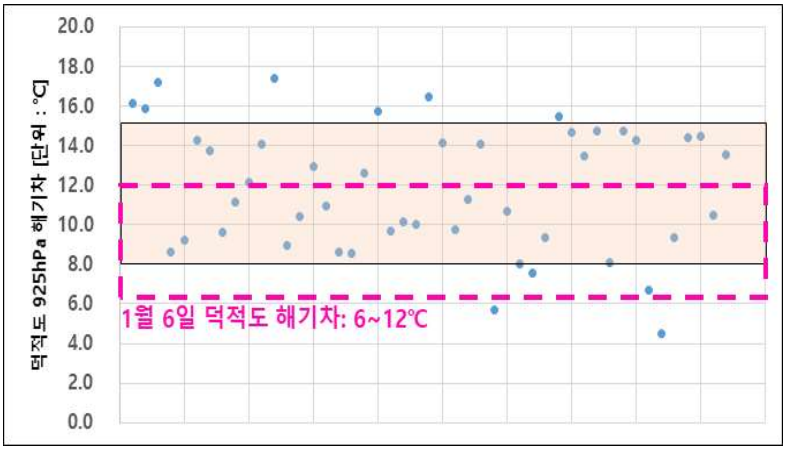


6일 15시 UM 모델 지상 일기도

- **이슈 2) 강수 메커니즘: 1차 강수(온난이류) + 2차 강수(저기압)**
- 저기압이 발달함에 따라 저기압의 동쪽으로 강한 남서풍이 불어들며 온난이류에 의한 1차 강수대 발달함. 그 후 저기압에 의한 2차 강수대가 통과함.
- 온난이류 강수대 발달의 주요 요인:
  ① 찬 내륙에 수평적으로 따뜻한 공기가 유입되며 포화에 이르러 구름생성. 이 구름대가 찬 공기를 타고 상승하며 발달하게 됨.
  ② 해상에 연직적으로 따뜻한 공기가 유입되는 상황에서 큰 해기차로 강수 구름대 발달. 『Why?How! 겨울예보』 가이던스에 따르면 통계적으로 925hPa의 해기차가 8~15℃ 일 때 온난이류형 강수의 발달 빈도가 높은 것으로 나타남. 본 사례의 덕적도 925hPa 해기차는 6~9.5℃로 나타나 온난이류가 발달할 수 있는 조건에 해당함.



17시 30분 레이더 영상



'17~'20년 11월~2월 온난이류 강수 사례의 925hPa 해기차 분포
(분홍색 점선: 1월 6일 덕적도 해기차 범위)

5. 발달한 저기압 통과 시 눈 예보 고려사항

- **발해만 기압골과 발해만 저기압의 명확한 구분 필요**
  - 본 사례와 같이 700hPa 기압골이 뚜렷하고, 발달할 경우 발해만 저기압으로 구분해야 함.
  - 『Why?How! 겨울예보('20.12.)』의 '발해만 기압골' 가이던스는 700hPa 고도 이상으로 발달한 강수 시스템에는 적용이 어려움으로, 지상에서 700hPa 고도까지 뚜렷하게 발달한 기압골은 발해만 저기압으로 분류하여 '발해만 저기압' 가이던스를 따라 예상 적설 산출 필요
  - 추후 이러한 강수 시스템을 고려한 가이던스 개선 필요

- **저기압이 발달할 때 기압경도력이 강화되면서 저기압 접근 전 강한 온난이류가 발생할 수 있음을 유의해야 함. 단, 이 경우 해기차 고려 필요**

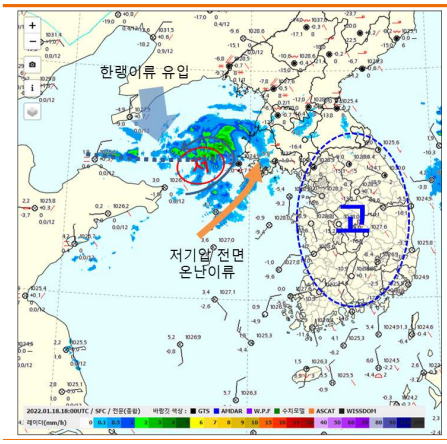
2-6. 2022년 1월 19일 사례

새벽 시간대 발해만 기압골 강수 예상보다 저기압이 발달한다면

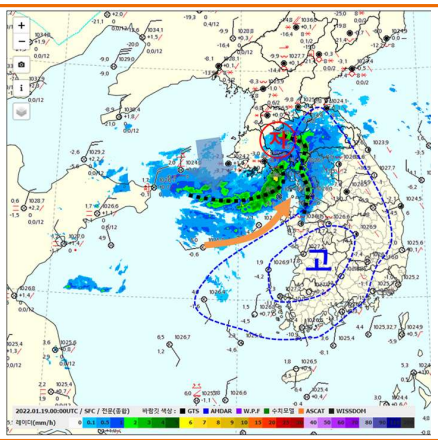
저기압 강수 + 온난이류형 강수 + 기압골 강수 모두 고려

1. 예보와 실황은?

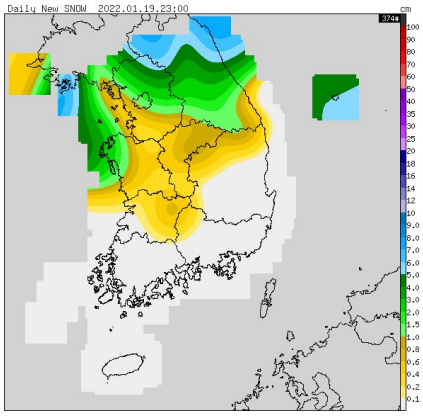
예보 (1월 19일 05시 발표)	실황
▸ 예상 적설 - 수도권, 강원영서, 충청권, 경북남부동해안: 1~5cm (수도권과 충남북부 7cm 이상) - 전라권, 경북내륙, 경남서부내륙, 제주도: 1~3cm	▸ 적설 - **서울경기** 서울 3.5 포천 5.0 가평 4.4 파주 3.5 남양주 3.2 - **강원영서** 외촌 9.0 철원 8.6 춘천 2.7 인제 2.4 - **충청도** 대산 6.0 태안 5.2 수안보 3.4 제천 1.6 - **경상북도** 석포 3.5 금강송 2.1 봉화 0.5 수비 0.5



19일 03시 레이더 영상



19일 09시 레이더 영상



19일 신적설

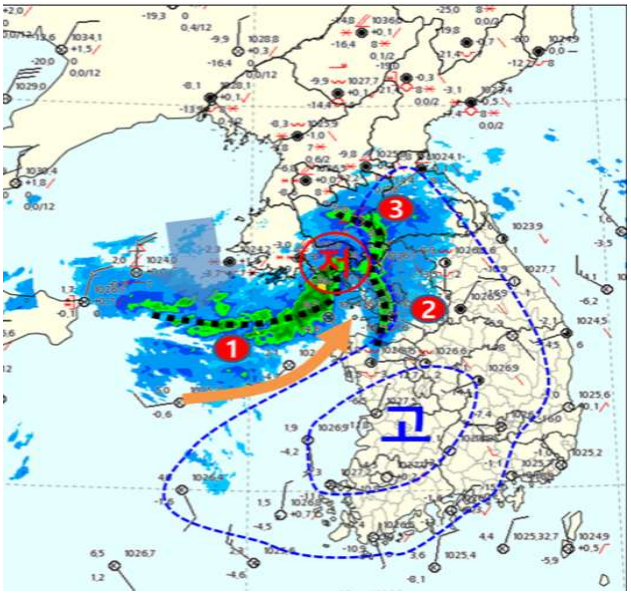
- 03시 서한만에 저기압이 위치하며 그 후면으로 한기이류에 의한 강수대와 저기압 전면의 온난이류에 의한 강수대가 형성
- 09시 저기압이 서해5도에서 황해도로 이동하며 전면의 온난이류에 의한 강수대에 의해 중부지방 1~3cm 적설을 기록함. 이후 저기압 중심이 수도권 북부로 통과하며 경기북동부와 강원영서 북부에 5~10cm의 적설을 기록함
- 한랭이류가 유입되며 충남북부서해안에 5cm 내외의 짧고 강한 적설을 기록하며 남쪽으로 남하함

2. 쟁점사항은?

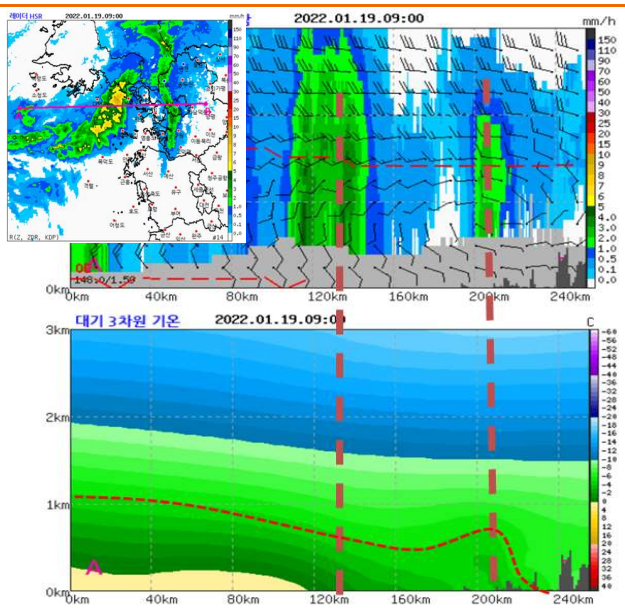
- **쟁점 1) 강수 메커니즘은 무엇인가?**
- **쟁점 2) 예상했던 강수 구조와 달랐던 원인은?**

3. 주요 분석내용

- **쟁점 1) 강수 메커니즘은 무엇인가?**

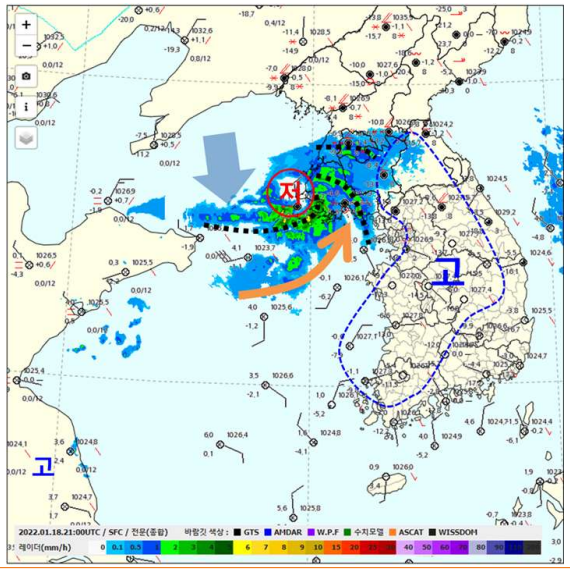


19일 09시 GTS 지상 일기도와 레이더 중첩

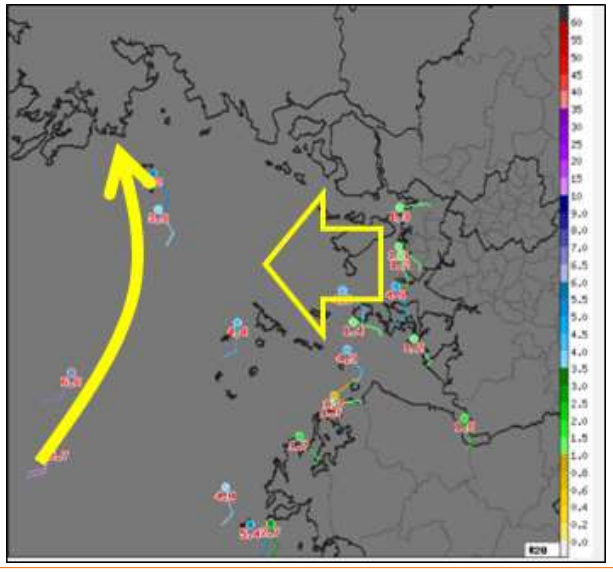


19일 09시 레이더 강수대가 나타나는 영역(A~B)의 연직 단면도
(상) 레이더 강수대 및 바람
(하) 3km 고도까지의 연직 기온 분포도

- **(기압골 ①)** 저기압의 후면에서 유입되는 차고 건조한 공기에 의해 한랭전선 형태의 강수 구조
- **(온난이류형 ②)** 저기압의 전면에서 유도되는 온난한 공기가 내륙의 Cold Pool을 타고 상승하여 발달하는 강수 구조
- **(저기압 ③)** 저기압 중심 부근의 강한 회전력에 의해 형성된 대류성 강수 구조



19일 06시 GTS 지상 일기도와 레이더 중첩



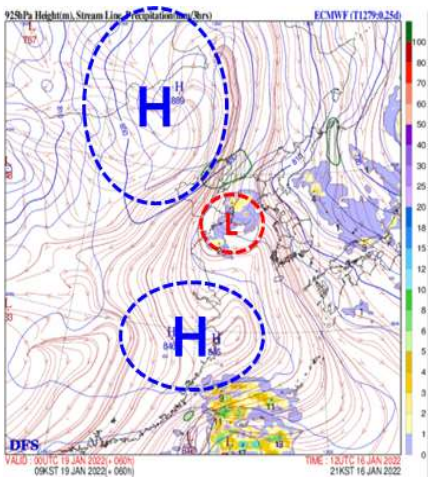
19일 06시 AWS 해상풍

- 06시부터 저기압 중심을 기준으로 후면에는 기압골 강수대가 동서로 형성되어 있고, 전면에는 온난한 남서풍이 유입되며 경기만 부근에 남북으로 길게 온난이류 형태의 강수가 나타남

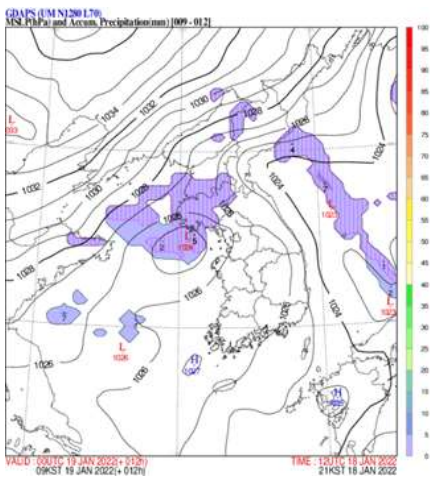
- 내륙의 국지 고기압에서 불어 나가는 육풍과 저기압 전면의 기류가 수렴 형태로 나타나며 온난이류 형태의 강수대를 강화시키는 역할을 함
- 저기압은 서해5도에서 남북경계선을 따라 동쪽으로 이동하며, 저기압 중심 부근에 발달한 구름대의 영향으로 수도권을 비롯한 경기북부와 강원북부에 영향을 줌

- **쟁점 2) 예상했던 강수구조와 달랐던 원인은?**

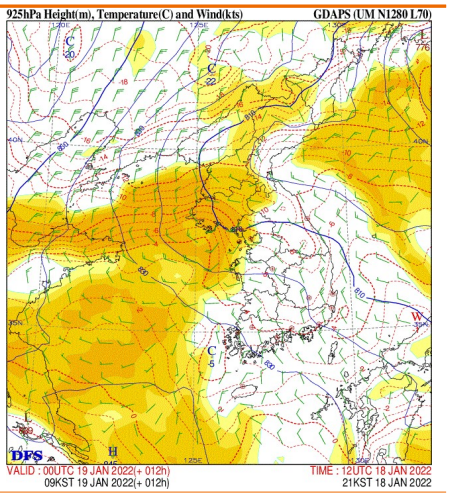
① 수치모델은 온난이류 강수 모의 X



19일 09시 ECMWF 925hPa 유선, 누적 강수량



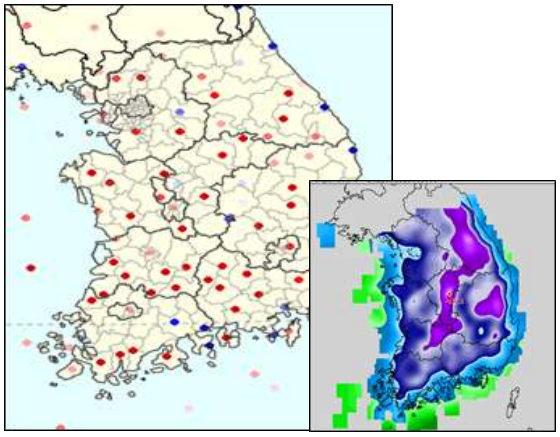
19일 09시 GDAPS 해면기압, 누적 강수량



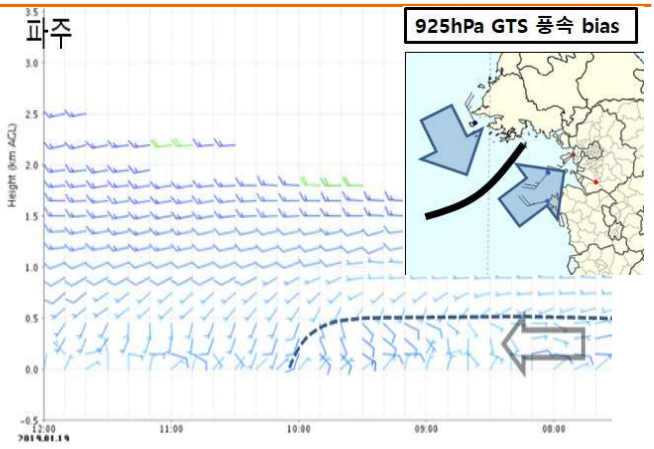
19일 09시 GDAPS 925hPa 상세 바람장

- 수치모델에서는 상해 부근에 위치한 변질된 고기압과 중국 북동쪽에 한기를 동반한 대륙 고기압의 사이에 형성된 저기압은 남쪽에 고기압이 강하게 버티는 형태가 아니라 동쪽으로 흘러가는 형태로 저기압과 고기압 사이의 기압경도를 강하게 유지 시켜줄 요인은 없는 것으로 모의
- 09시 GDAPS 예상장에서 주 강수대는 북쪽에서 유입되는 한기이류에 의해 모의되었으며, 저기압 전면에서 유입되는 온난이류에 의한 강수는 모의하지 못함
- 지상 저기압은 발달하지 못하고 서해안을 따라 남진하며 강수가 약화되는 것으로 모의

② 새벽 시간대 국지 고기압이 강해짐



19일 09시 기온 bias(UM) 및 최저기온 분포도

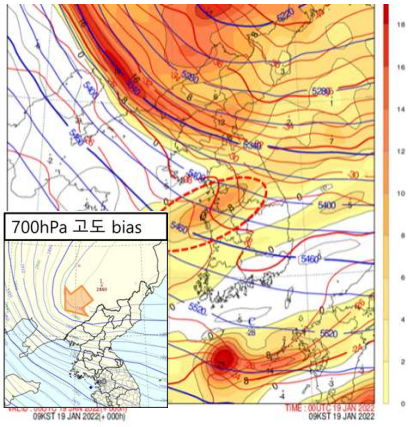


19일 파주 연직바람관측장비의 수평바람(07~12시) 및 925hPa 풍속 bias

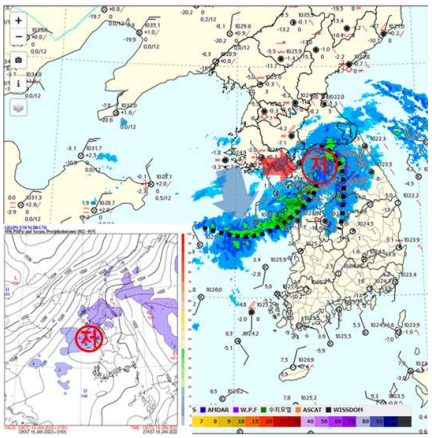
- 새벽 시간대 대부분의 관측 지점에서 수치모델 상의 기온이 실제 기온보다 높게 예상하여 밤 사이 지표가 냉각되어 기온이 하강된 지역을 과소 모의하고 있음

- 내륙에 발달한 국지 고기압과 지상 저기압 사이에 기압경도가 강해지며, 저기압 전면에서 유입되는 온난이류의 강도가 예상보다 강하게 나타남(925hPa 기압골 전·후면의 풍속은 음의 bias 경향)
- 내륙의 기온 하강으로 인해 국지 고기압이 강화되고, 대기 하층 기류는 내륙에서 불어나가는 육풍(동풍 계열)을 강화시켜 온난이류 형태의 강수를 강화시킴

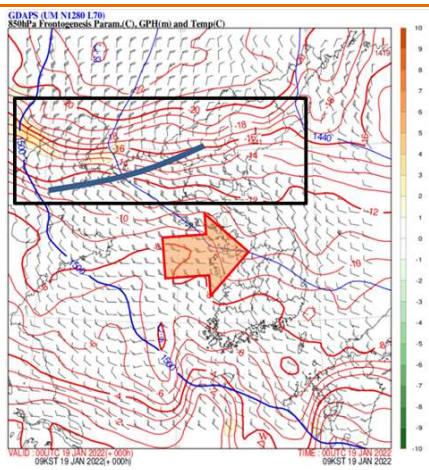
③ 예상보다 강한 저기압 발달



19일 09시
(상) 500hPa 기온과 상대와도
(하) 700hPa 고도 bias
(관측: 파란색 실선, 모델: 하늘색 파선)



(상) 19일 12시 GTS 지상 일기도와 레이더 중첩
(하) UM(-12h) 해면기압



19일 09시 850hPa
상세바람 및 기온(분석장)

- 중국 북동쪽의 상층 절리저기압이 예상보다 큰 곡률로 서쪽으로 깊게 돌아나가며 500hPa PV역이 수도권을 통과함
- 상층 지원을 받은 지상 저기압이 발달하며, 예상보다 동진하여 내륙으로 이동함
- 850hPa 온도경도가 높은 지역은 서한만에 위치하고, 기압골 전면에서 계속해서 온난한 서풍 기류가 유입되며 19일 낮 동안에도 온난이류형 구름대가 지속됨

4. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

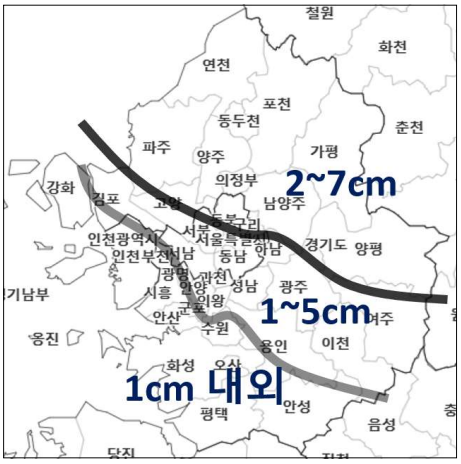
- **실황에서 나타나는 모델이 예측하지 못한 강수 구조에 대한 다각적인 분석 필요**
- **지상 저기압 발달을 지원하는 상층 기압골의 위상과 강도, 하층 바람의 강도를 고려**
- **지상 저기압 발달 및 위상 변화에 따른 강수 고려**
- **겨울철 새벽 시간대 내륙의 국지고기압(Cold Pool)은 모델이 과소 모의하는 경향 고려**

예상보다 낮은 기온에서 시작된 기압골 강수
난기 유입이 늦어지며 서울 12월 대설 12.2cm

1. 예보와 실황은?

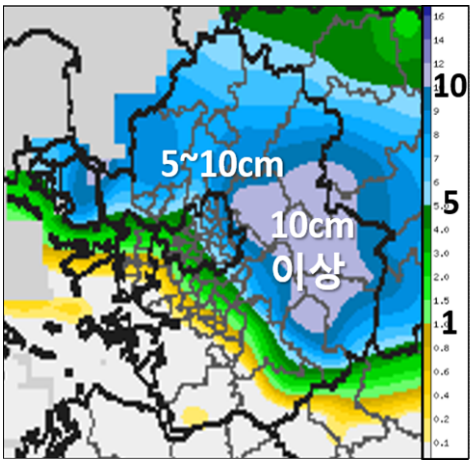
적설 예보(29일 17시 발표)

- 예상 적설(30~31일)
  - 서울(동북권).경기동부: 2~7cm
  - 서울(서북권, 서남권, 동남권).경기서부: 1~5cm
  - 인천.경기서해안: 1cm 내외



적설 실황(30일)

- 일최심신적설(30일, 단위: cm)
  - **서울 12.2**, 노원 10.8, 동대문 10.7, 중랑 9.5, 마포 6.4, 양천 4.1, 강서 3.4
  - 용문산(양평) 14.4, 이천 11.5, 강화 10.6



서울 집계표

[기상실황표] 108 서울 / 2023.12.30.19:00

일.시:분	날씨						기온				강수			
	현재일기	ww	시정 km	전운량 1/	중하운량	운형	현재기온 ℃	이슬점온도 ℃	체감온도 ℃	열지수	일강수 mm	최대강수강도 mm/h	신적설(일) cm	적설 cm
30.19:00	약한 비 단	60	3.65	1			1.2	0.6	-2.8	-	11.2		11.3	11.3
30.18:00	약한 비 단	60	3.64	1			1.1	0.5	-3.0	-	11.0		11.5	11.5
30.17:00	약한 비 단	60		1			1.0	0.4	-2.9	-	11.0		11.9	11.9
30.16:00	약한 비 연	61		1			0.9	0.4	-2.7	-	11.0		12.0	12.0
30.15:00	강한 진눈깨	69	1.73	10	9	72/	0.8	0.3	-1.4	-	10.5		12.2	12.2
30.14:00	보통 눈 연	73	0.65	10	9	72/	0.6	0.1	-2.4	-	9.2		11.4	11.4
30.13:00	보통 눈 연	73	0.93	10	9	72/	0.5	0.0	-1.4	-	6.9		9.0	9.0
30.12:00	보통 눈 연	73		1			0.3	-0.2	-3.1	-	4.7		7.3	7.3
30.11:00	약한 눈 연	71		1			0.2	-0.5	-3.1	-	2.8		4.3	4.3
30.10:00	약한 눈 연	71	1.02	1			0.0	-0.8	-3.4	-	1.6		2.7	2.7
30.09:00	약한 눈 연	71	1.58	1			0.1	-1.5	-3.0	-	0.3		0.5	0.5
30.08:00	약한 눈 단	70	8.56	1			0.4	-2.9	-1.6	-	0.0			
30.07:00	박무	10	9.66	10	5	52/	0.3	-3.0	-2.7	-				
30.06:00	박무	10	9.88	10	10	02/	0.0	-3.2	-2.8	-				
30.05:00	박무	10	9.12	8	8	030	-0.5	-3.0	-3.2	-				
30.04:00	박무	10	9.13	3	3	030	-0.6	-3.2	-2.6	-				
30.03:00	박무	10	8.71	6	6	030	-0.9	-3.4	-3.1	-				
30.02:00	맑음		9.94	0	0	///	-0.6	-3.4	-2.9	-				
30.01:00	맑음		11.3	0	0	///	-0.4	-3.6	-2.2	-				
30.00:00	맑음		12.64	0	0	///	0.0	-3.3	-2.2	-				

비로 바뀐 실제 시점 -> 12.2cm

15시

12시

비로 바뀔 예상 시점 -> 7.3cm

SLR 10 이하

SLR 15 이상

하늘상태 맑음

2. 쟁점사항은?

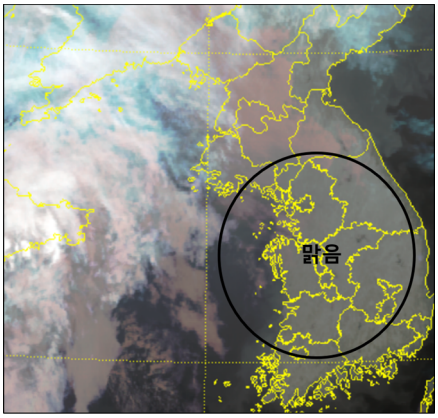
- **낮 시간대에도 기온이 오르지 못한 원인은?**
- **기압골이 빠르고 강하다는 것을 난기 유입이 빠르다는 것과 연관 지을 수 있을까?**

3. 주요 분석내용

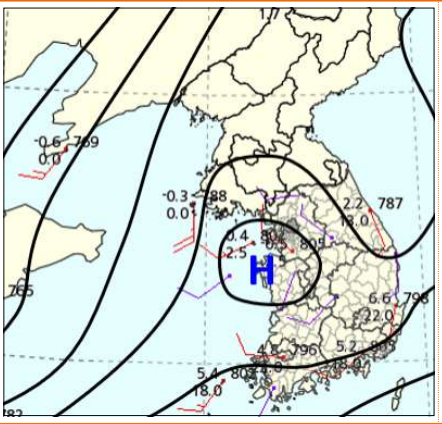
- **낮 시간대에도 기온이 오르지 못한 원인은?**

- 이번 강수는 발해만에서 기압골이 접근하며 아침부터 눈으로 내리다가 난기가 유입되면서 낮(12시경)에 강수 형태가 비로 바뀔 것으로 예상되었던 사례로 하층 기온에 따른 강수 형태의 변화 시점이 중요하였음

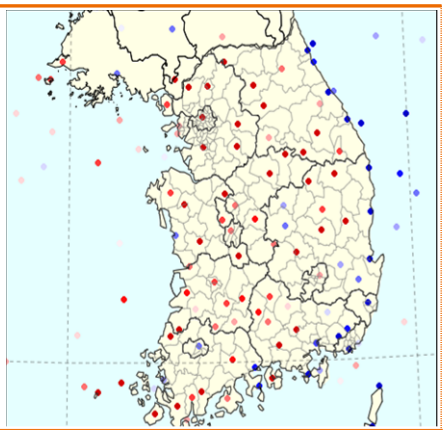
- 서울은 고기압 가장자리에서 하층운이 남아있는 가운데 영상권에서 강수가 시작될 것으로 예상하였으나 실황은 고기압권에서 맑았으며 복사냉각에 의해 내륙에 cold pool이 형성되어 0도 부근에서 강수가 시작되었음



30일 00시 위성

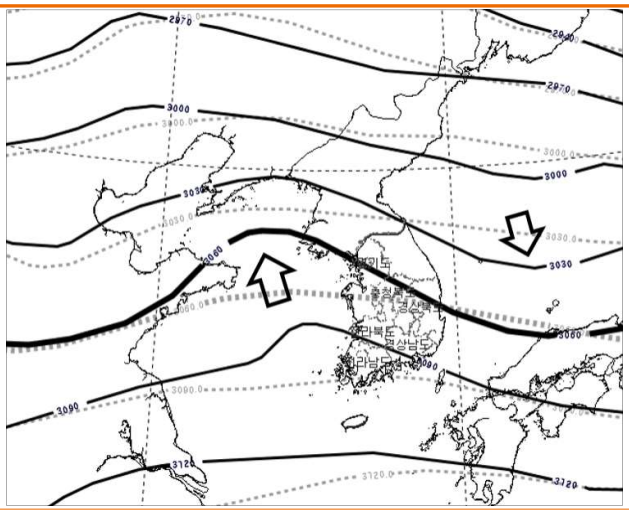


30일 09시 925hPa

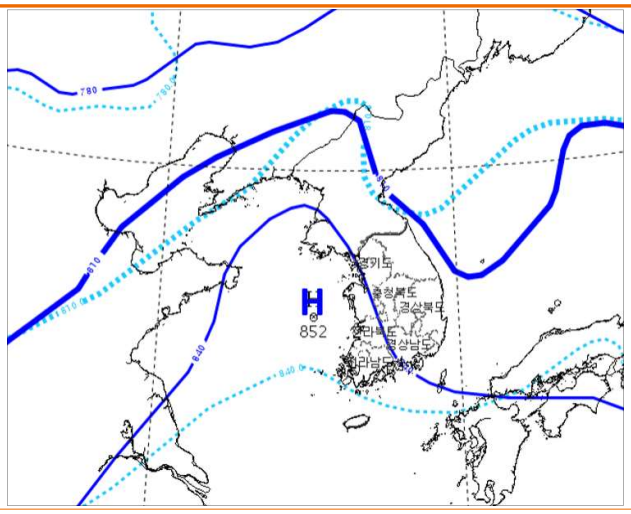


30일 09시 지상기온 편차

- 전일(29일) 예측에서는 서해상에 기압능이 위치하다가 점차 약해질 것으로 예상하였으나, 21시 GTS 실황을 보면 오히려 능이 강화되어 야간에 구름을 소산시켰음

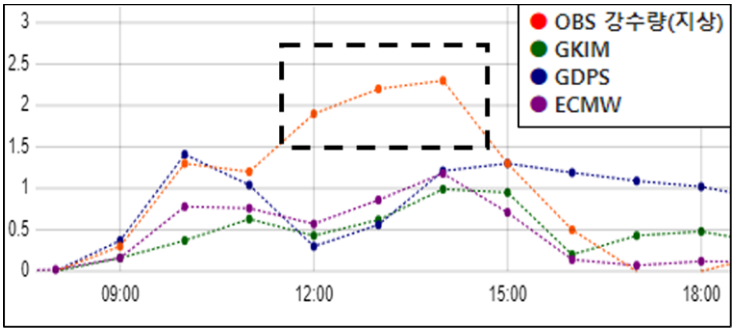


29일 21시 700hPa 고도
관측(검정 실선), 21일 09시 예측(검정 점선)

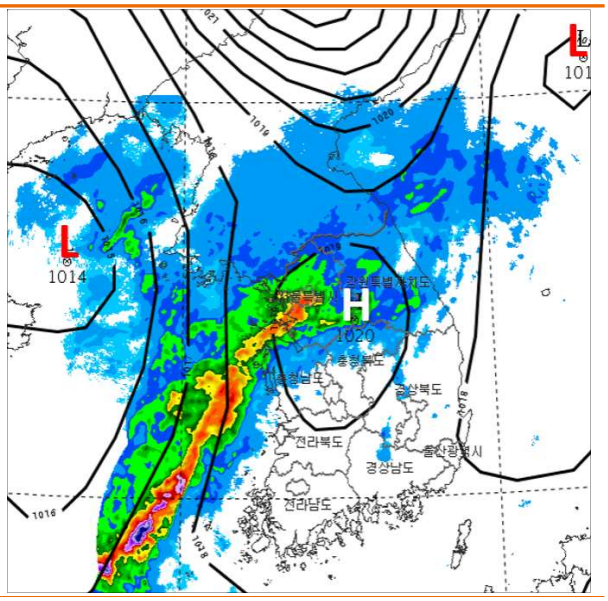


29일 21시 925hPa 고도
관측(파란 실선), 21일 09시 예측(하늘색 점선)

- 따라서 지상 기온이 예상보다 하강(지상 기온 전날 모델 대비 편차 1~5도)하여 내륙에 cold pool이 형성되었고, 낮은 기온에서 시작된 강수로 인해 서울은 강수 초반(08~12시) 수상당량비가 15 이상으로 커서 적설 효율이 좋았음

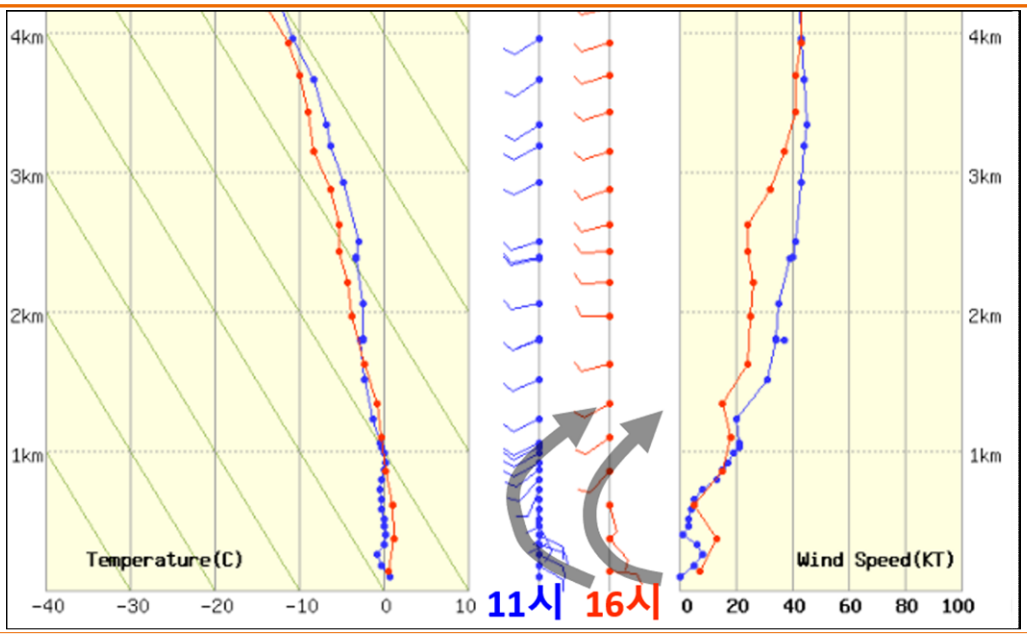


30일 강수량 실황과 모델별 예측



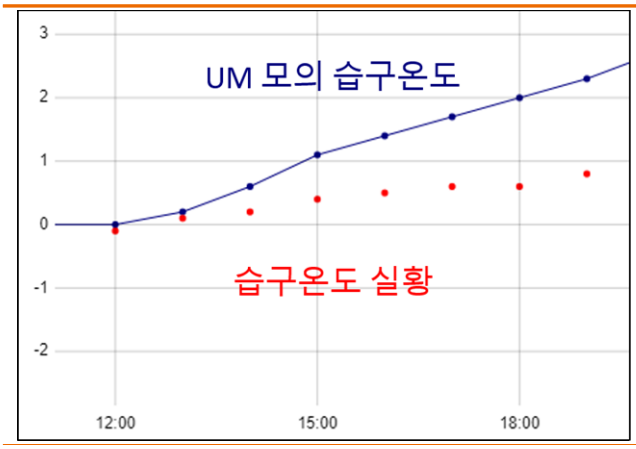
30일 12시 레이더 + 해면기압

- 30일 강수량 예측과 실황 그래프를 보면 낮(12~15시) 동안 서울은 시간당 2mm 내외로 모델보다 2배 많은 강수량을 보이며 5cm가량의 적설을 기록함, 30일 12시 레이더 영상과 GTS 해면기압(2hPa 간격)을 중첩해보면 수도권에는 고기압이 남아있는 상태에서 기압골이 접근하며 강수 강도가 강해지는 것을 알 수 있음

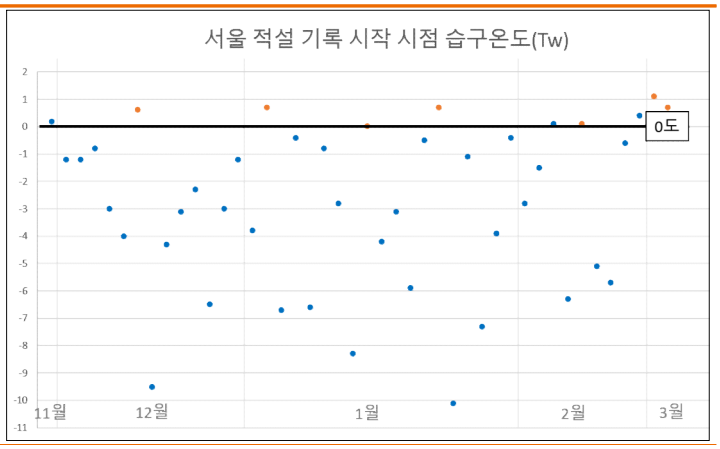


30일 11시/16시 김포공항 AMDAR(기온, 바람)

- 11시와 16시 김포공항 AMDAR 자료에서 최하층 바람은 남동풍, 500m 이상에서는 남~남서풍으로 이는 내륙의 고기압을 타고 난기가 유입되는 것을 보여줌, 또한 850hPa 이하 층이 0도 부근의 등온층 구조로 기온의 변화가 매우 적은 것으로 나타나는데 이는 난기 유입의 지연과 함께 강수 강도가 강해 기온이 빠르게 회복되지 못한 것을 의미함



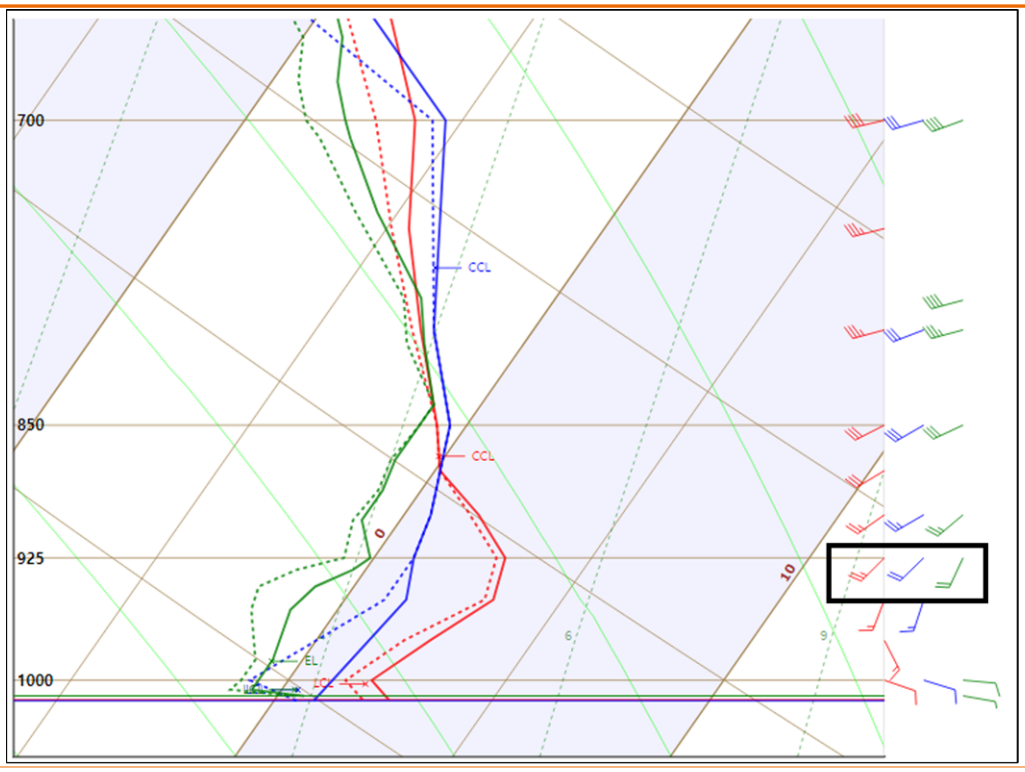
30일 서울 습구온도(예상과 실황)



서울 적설과 습구온도(2018~2023년, 44건)

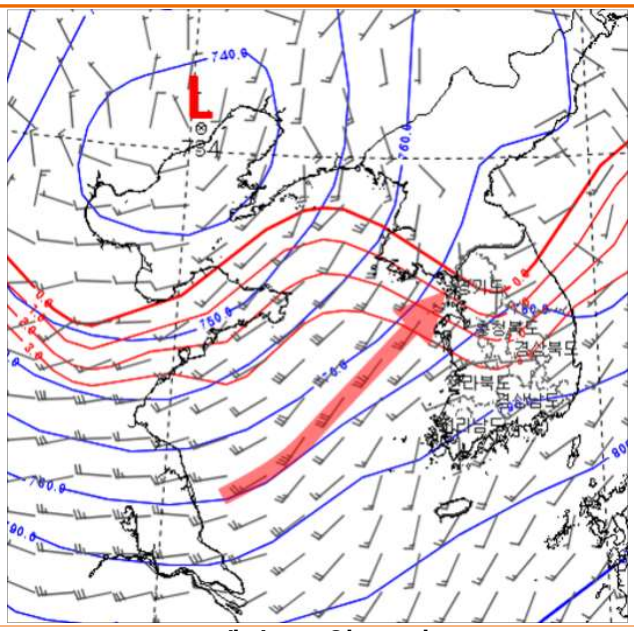
- 한편, 난기 유입이 지연되고 강수 강도가 강해 습구온도도 예상보다 낮게 진행되었는데, 최근(2018~2023년) 서울에 적설이 기록된 사례의 습구온도를 보면, 비에서 눈으로 강수형태가 바뀌는 사례(주황색 점)를 제외하고 습구온도 0도 이하일 때 적설이 기록되는 것으로 나타남 이번 사례는 30일 15시 전후까지 습구온도 0도 부근을 기록하며 예상보다 적설 가능 시간이 증가하였음

- **기압골이 빠르고 강하다는 것을 난기 유입이 빠르다는 것과 연관 지을 수 있을까?**

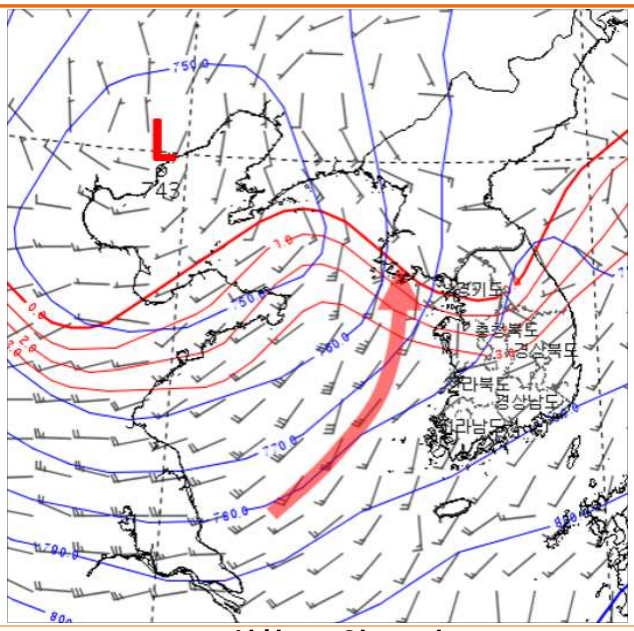


30일 15시 오산 단열선도 중첩(UM/ECMWF/관측)

- 30일 15시 오산의 예상(빨간색, 파란색)과 관측 단열선도(녹색)를 보면 모델은 남서풍으로 난기가 강하게 유입되면서 대기 하층을 영상권으로 모의하였으나, 실황은 풍향이 남풍 계열로 유입되며 난기의 영향을 덜 받으면서 전 층 영하권을 보였음, 이와 같은 상황을 기압계로 분석해보면,



(예상) 30일 12시
925hPa 고도, 바람, 기온(0~3도, 빨간 실선)



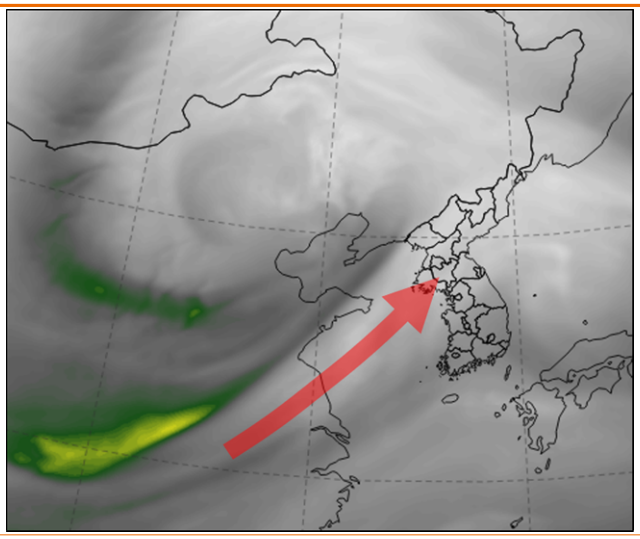
(실황) 30일 12시
925hPa 고도, 바람, 기온(0~3도, 빨간 실선)

- 당초 925hPa 바람은 남서풍으로 0도선도 점차 수도권 북동쪽으로 이동하면서 낮부터 서울은 난기의 영향을 받을 것으로 보았으나, 실황에서는 내륙에 고기압이 남아 있는 상황에서 기압골이 빨라지며 925hPa 바람이 남풍 계열로 바뀌어 내륙에 난기가 유입되기 쉽지 않았고 925hPa 0도선 또한 서울 남쪽에 위치하여 기온 회복도 느렸음

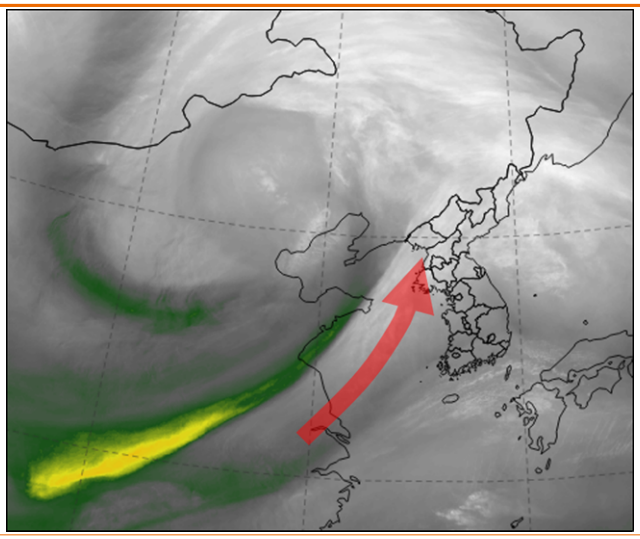
- 따라서 기압골이 깊어졌다는 것이 반드시 기압골의 진행이 빨라지면서 난기 유입이 용이해진다는 해석보다는 기압골이 깊어진 원인(이번 사례의 경우 내륙의 기압능) 분석이 선행되어야 함

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **강해진 기압골을 빨라진 난기 유입으로 연결하지 않았더라면**



(예상) 30일 09시 수증기 영상



(실황) 30일 09시 수증기 영상

- 30일 09시 수증기 영상(실황)을 보면 예상보다 건조역이 깊게 파고 들면서 기압골이 강했음, 이런 상황에서 난기 유입도 빨라질 것이라고 생각할 수 있겠으나, 내륙에 남아있던 고기압의 강도와 접근하는 기압골에 의한 풍향의 변화까지 고려하여 난기 유입이 지연되는 것도 생각해봐야 함
- 또한, 기온 변화에 민감한 적설 측면에서 예상보다 낮은 기온에서 강수가 시작되었던 상황을 인지하고 기압골 강도와 강수 강도에 의해 기온 회복 속도가 느려질 수 있다는 점도 고려해야 함

3. 서해안형 강수

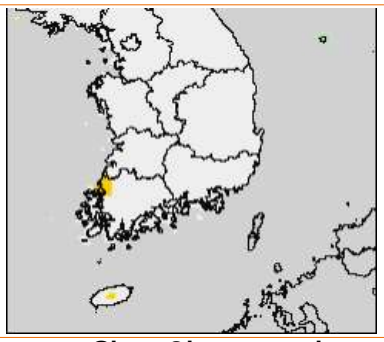
2017년 겨울철 서해안 첫 적설 도입 실패

해기차 뿐만 아니라 이류 약화와 안정도도 고려했어야

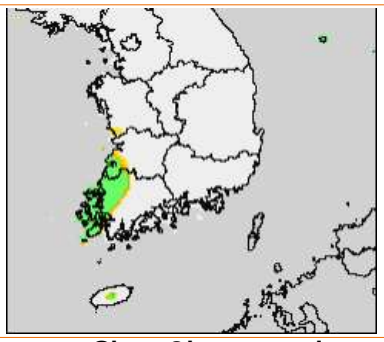
1. 예보와 실황은?

예보 (11월 18일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 울릉도.독도: 5~10mm - 전라서해안, 제주도, 서해5도, 충남해안, 전남내륙: 5mm 미만 ▸ 예상 적설 - 울릉도.독도: 2~5cm - 전라서해안, 제주도산지: 1~3cm - 서해5도, 충남해안, 전남내륙: 1cm 내외	▸ 23일 밤부터 24일 새벽사이 서해안 지역에 눈 또는 진눈깨비 날림 - 서해남부해상으로 약한 강수에코 나타났으나 해안과 내륙으로 접근하면서 약화 - 목포 실황을 보면 눈 또는 진눈깨비가 산발적으로 날렸으며, 지상기온이 2~4℃로 다소 높았음

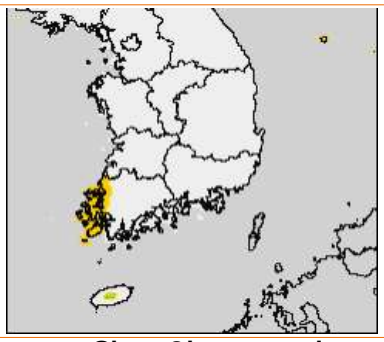
예상 적설



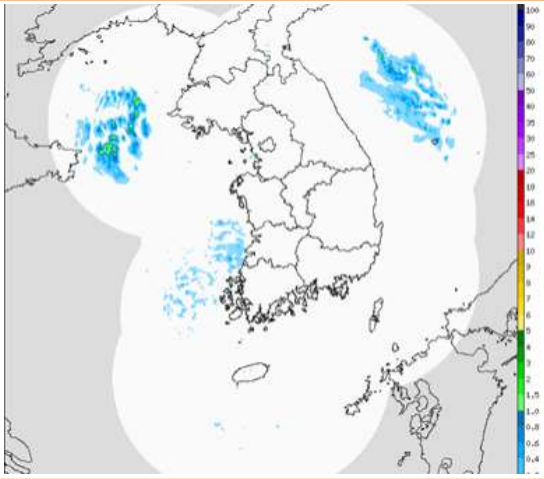
11월 18일 18~24시



11월 19일 00~06시



11월 19일 06~12시



11월 19일 03시 레이더 합성 영상

일.시:분	날씨						
	현재일기	ww	시정 km	전운량 1/10	중하운량 1/10	운형	현재기온 ℃
19.09:00	맑음		20	0	0	///	2.3
19.08:00	구름많음		20	8	8	500	1.4
19.07:00	구름조금		20	5	5	500	1.3
19.06:00	진눈깨비끝	23	20	9	9	500	1.4
19.05:00	싸락눈/약	87	20	9	9	500	1.7
19.04:00	진눈깨비끝	23	20	9	9	500	2.3
19.03:00	진눈깨비끝	23	20	9	9	500	2.6
19.02:00	싸락눈/약	87	20	9	9	500	2.9
19.01:00			20		9	///	3.6
19.00:00	진눈깨비끝	23	20	9	9	500	4.3
18.23:00			20		/	///	4.2
18.22:00			20		9	///	3.8
18.21:00	진눈깨비끝	23	20	9	9	500	3.5
18.20:00			20		9	///	3.5

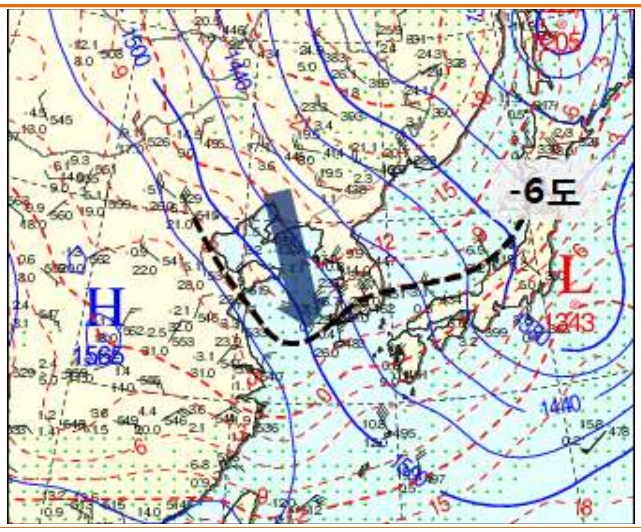
11월 18~19일 목포 기상실황표

2. 강수 메커니즘은?

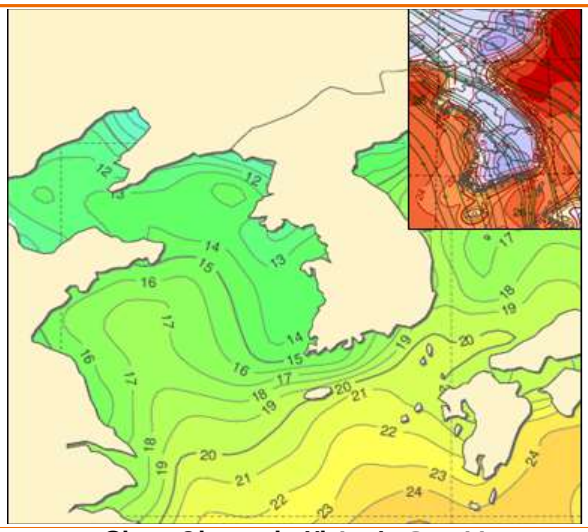
- **(큰 해기차)** 850hPa 분석장을 보면 서해상으로 북북서풍 20kts 이상의 강풍대와 함께 온도골 형성되면서 한기 남하. 한기 자체가 크게 강하진 않았으나 시기적으로 수온이 높아 서해남부해상의 해기차가 22℃ 이상으로 크게 나타남. 큰 해기차로 불안정한 기온감률이

형성되고 해상으로부터 열과 수증기가 공급되면서 대류 활성화

- **(풍속)** 서해상으로 850hPa 20kts 이상의 강풍대와 함께 등온선을 가로지르는 한랭이류가 나타나면서, 하층 대기를 혼합시켜 해상으로부터 열과 수증기 공급을 더욱 활발하게 촉진시킴

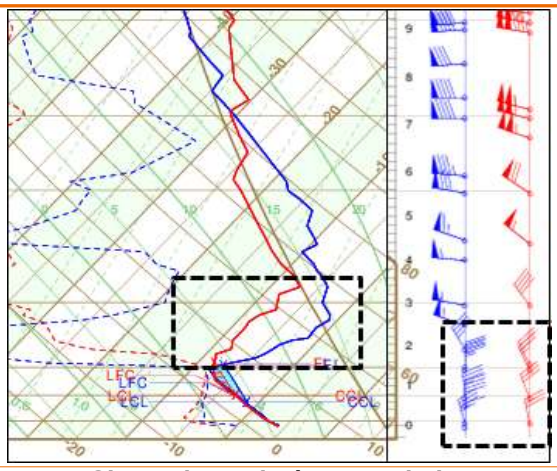


11월 18일 21시 850hPa 분석장

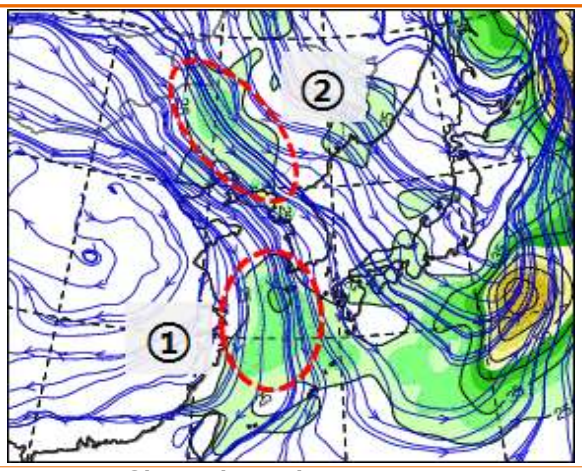


11월 18일 09시 해수면 온도분포
11월 18일 21시 850hPa 해기차

- **(큰 안정도)** 흑산도 단열선도를 보면 850hPa 이하로는 큰 해기차와 강풍에 의한 혼합으로 불안정하나 850hPa 이상에는 강한 역전층이 존재하여 안정된 대기가 형성되면서 대류를 억제하는 효과
- **(풍향)** 850hPa 유선에서 서해남부해상의 강풍대(①)에 동반되는 풍향이 북풍에 가깝게 형성되어 있어 발달한 대류운들이 내륙까지 들어오기는 어려운 조건. 중국북동지방 부근의 강풍대(②)를 따라 다시 한기가 남하하나 강풍축이 내륙을 향하고 있어 해상에서 구름대를 다시 발달시키기 어려운 형태



11월 18일 21시 흑산도 단열선도



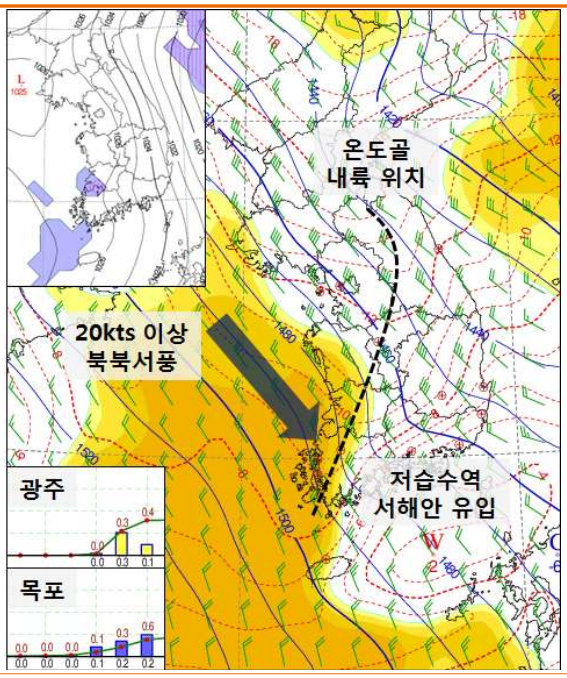
11월 18일 21시 850hPa 유선

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

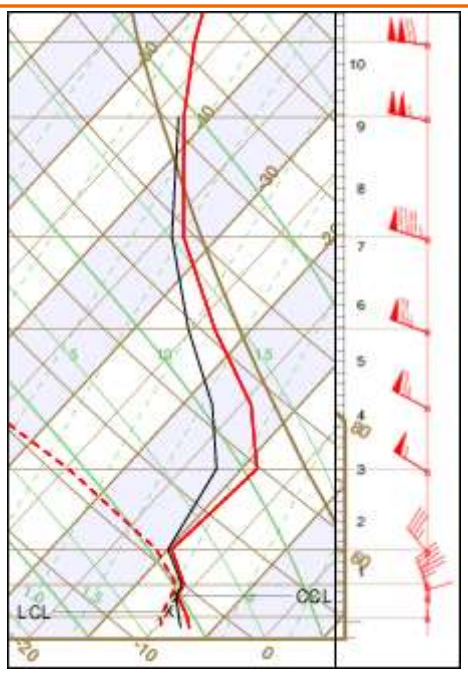
- **(모델 예상)** 19일 새벽 전라서해안으로 1mm 이하의 강수를 광주는 눈, 목포는 비로 모의함. 850hPa 20kts 이상의 북북서풍 바람과 함께 저습수역도 내륙까지 유입되는 것으로 모의함. 다만 중국북동지방에서 다시 남하하는 한기의 축이 북한으로 향하면서

850hPa의 온도골이 내륙으로 형성되어 상대적으로 해상의 한랭이류 강도는 약하게 나타남

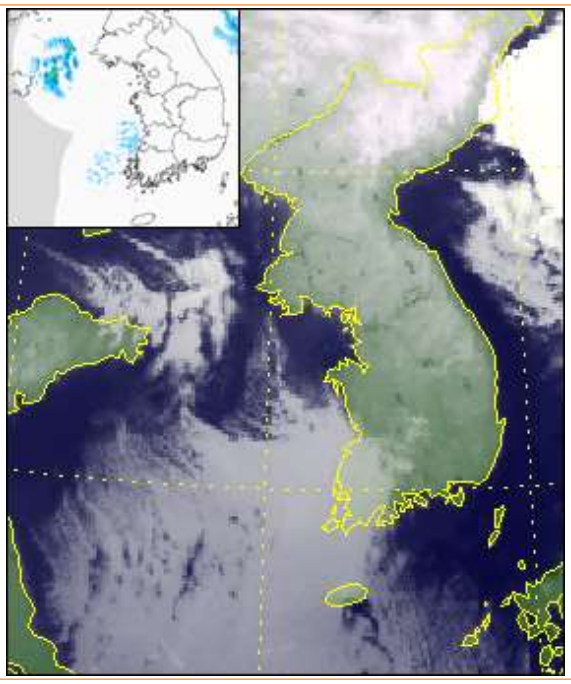
- **(실황)** 모델의 예상대로 하층의 풍계가 북북서풍으로 조금 기울면서 구름대는 전라내륙까지 유입되었으나 위성영상에서의 구름대를 보면 대류운열의 형태가 무너지고 약화된 형태로 유입. 결국 강수는 약화되고 산발적인 강수로만 감지됨
- **(원인)** 850hPa의 온도골 축이 내륙으로 이동하면서 해상의 한랭이류 강도가 약해지고 대류운 발달도 급격하게 약화되면서 해안과 내륙으로는 구름대만 흘러서 유입됨. 더불어 850hPa 이상의 강한 역전층으로 인해 대류는 더욱 억제되었고, 내륙의 한기 영향으로 해안으로는 지상에 북동풍이 불어 대기가 건조해져 구름대를 더욱 약화시킴



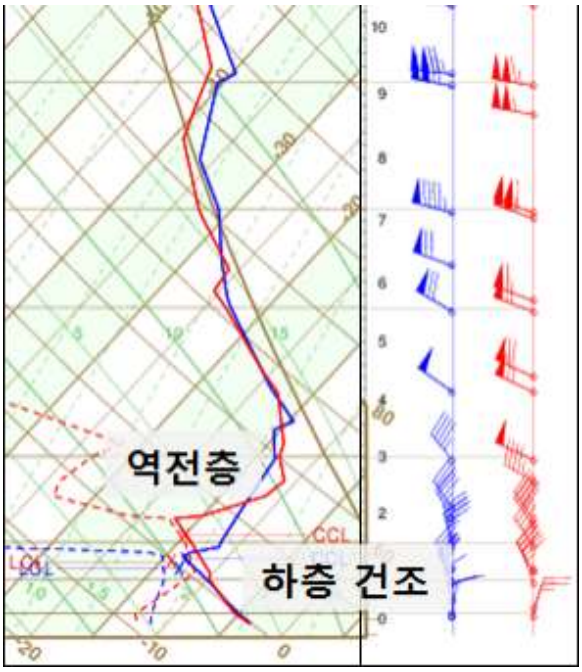
11월 19일 03시 850hPa 상세바람장+강수량



11월 19일 03시 광주예상단열선도



11월 19일 03시 위성 적외영상



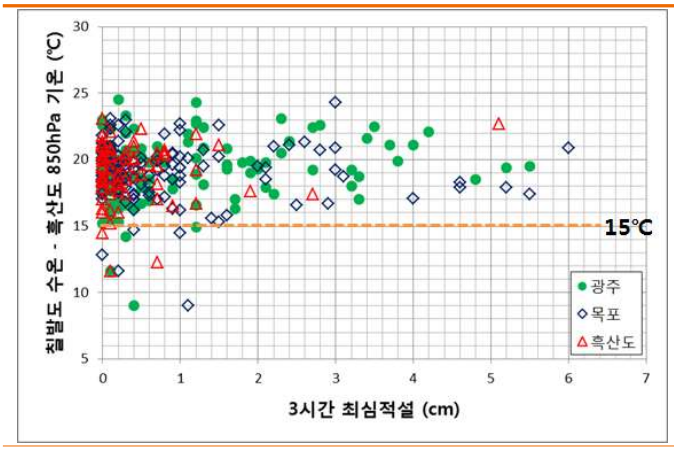
11월 19일 03시 광주 단열선도

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

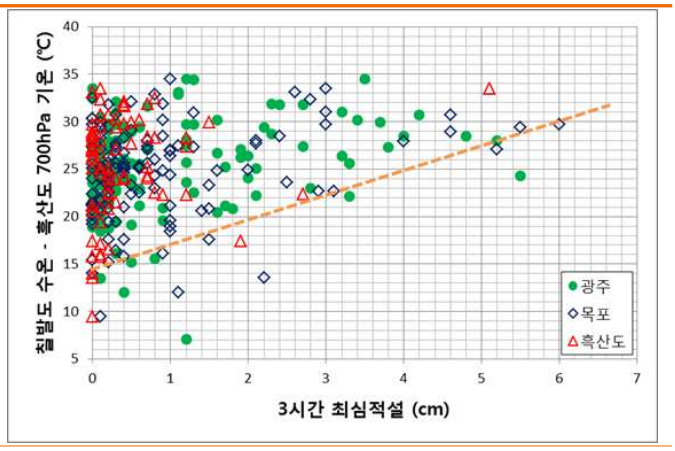
- **강한 역전층 효과를 고려했더라면**
  - 호수 효과 강설 과정에서 capping inversion(참모역전)의 형태의 역전층이 존재하는 것은 일반적인 현상이지만 그 강도가 하층까지 강하게 형성될 경우 상승하는 공기를 억제하는 효과가 생기게 됨
  - 많은 양의 적설이 기록되려면 850hPa 보다 더 높이 대류운이 발달해야하므로 결국 그 이상(850hPa 이상) 고도의 기온분포가 안정도를 결정한다고 볼 수 있음
  - 아래 그림에서 보듯이 850hPa 해기차보다 발달하는 대류운을 고려한 700hPa 해기차에서 적설과의 상관성이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있음

  ⇨ 따라서 **850hPa 이상으로 역전층이 매우 강하게 예상되는 경우 대류 억제에 의해 강수가 약화될 수 있음을 고려해야함**
- **서해안에 북동풍 강화에 따른 강수 약화 가능성을 고려했더라면**
  - 18일 서해상에 위치했던 온도골이 19일 새벽에는 중국북동지방에서 다시 남하하는 한기 영향으로 내륙에 위치하게 됨
  - 내륙에는 야간 복사냉각 효과까지 겹쳐 한기가 쌓이고 국지적으로 고압대가 형성되면서 내륙에서 해상으로 불어나가는 육풍 성분이 강해져 서해안에서 북동풍으로 나타남
  - 결국 지상부근의 대기를 건조하게 만들어 유입되는 구름대를 더욱 약화시킴

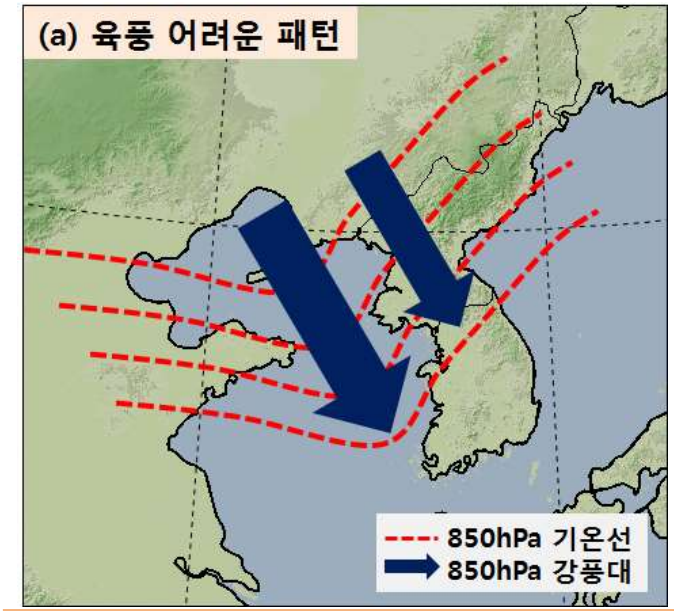
  ⇨ **내륙으로 온도골이 강화되는 유형에서는 해안의 강수 약화 가능성을 고려해야함**

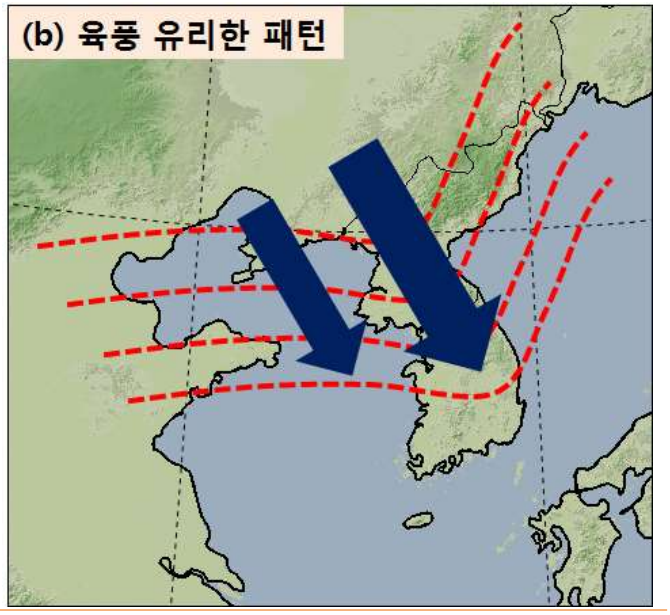


서해안형 강설 사례 중
850hPa 해기차와 3시간 최심적설 분포



서해안형 강설 사례 중
700hPa 해기차와 3시간 최심적설 분포





850hPa 강풍대(온도골) 위치에 따른 유형 차이

3-2. 2018년 1월 10일 사례

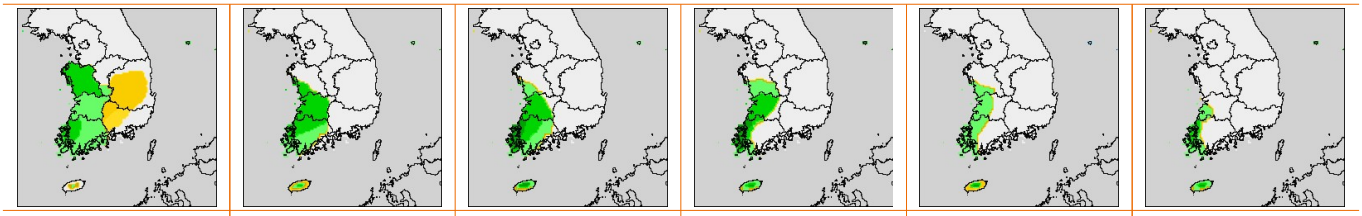
기류 수렴 영향으로 20cm 이상 기록한 서해안 대설

10cm 이상 서해안 대설에 반드시 필요한 기류 수렴 효과

1. 예보와 실황은?

예보 (1월 10일 05시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 울릉도·독도, 제주도: 5~30mm - 충남, 전라도: 5~10mm - 서해5도, 충북남부, 경상내륙: 5mm 내외 ▸ 예상 적설 - 울릉도·독도, 제주도산지: 10~30cm (많은 곳 50cm 이상) - 충남, 전라도: 5~15cm (많은 곳 전북, 전남서해안 20cm 이상) - 제주도(산지 제외): 2~7cm - 서해5도, 충북남부, 경상내륙: 1~3cm	▸ 10~11일 계속해서 서해안과 일부 내륙으로 강수대 영향 - 한기가 지속적으로 남하하면서 서해상에 대류운이 계속 발달하여 서해안과 전라내륙에 영향 - 기류가 수렴되는 곳에 강한 강수대가 발달하였고 내륙까지 많은 적설을 기록함 ▸ 전라서해안에 20cm 이상의 적설 기록, 일부 내륙에도 많은 적설 기록 - 강수 구역과 강수량 모두 모델에서 잘 예측됨

예상 적설

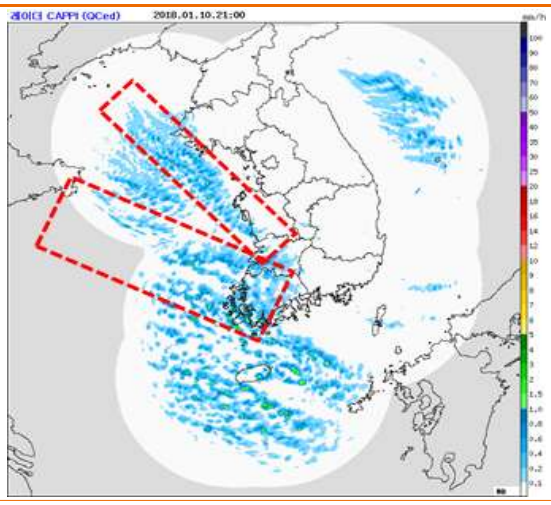


10일 06~12시	10일 12~18시	10일 18~24시	11일 00~06시	11일 06~12시	11일 12~18시

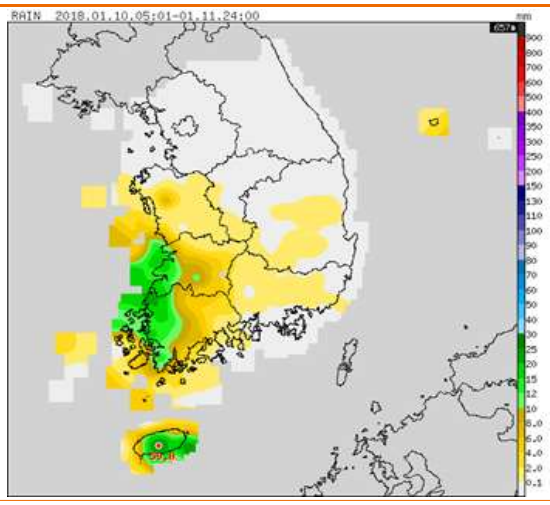
최심신적설 현황(cm)

전라북도 새만금 27.7 부안 19.0 고창 18.0 김제 14.8 전주 9.5

전라남도 영광 22.0 함평 20.2 무안 17.8 목포 16.9 광주 13.6 해남 9.5



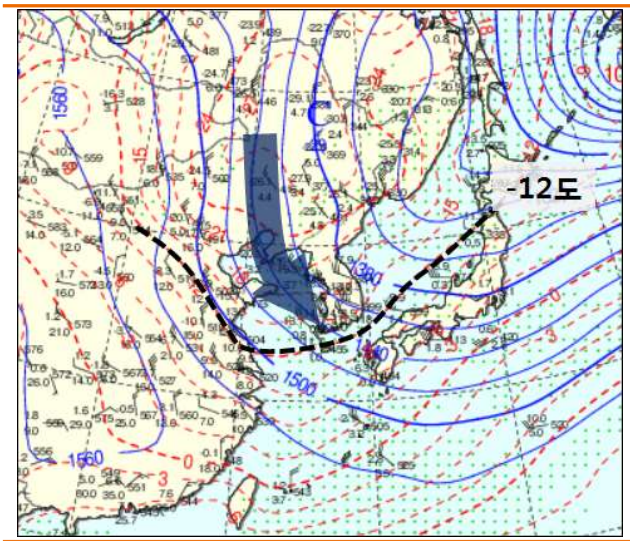
1월 10일 21시 레이더 합성영상



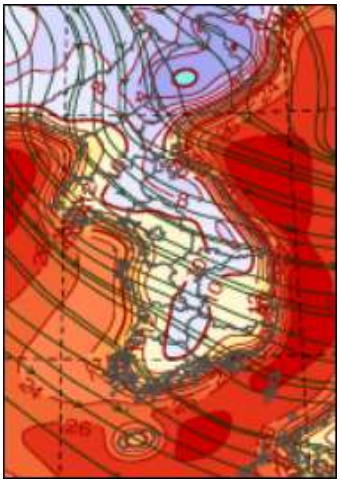
1월 10일 05시~11일 누적 강수량

2. 강수 메커니즘은?

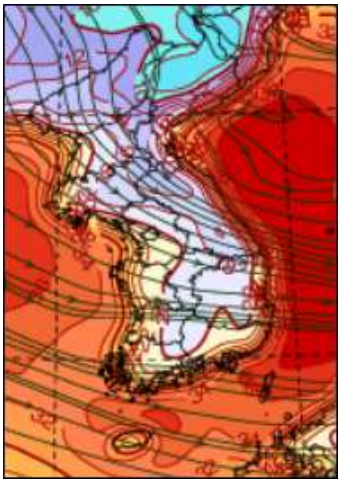
- **(큰 해기차와 강한 풍속)** 1월 10일 21시 850hPa 분석장을 보면 한기가 강하게 남하하여 전일(9일) 21시에는 중부지방에 있던 –12℃ 선이 제주도에 위치하면서 서해남부해상의 850hPa 해기차가 22℃ 이상을 보이며 하층 대기가 불안정해짐. 서해상으로 북서풍 30kts 이상의 강풍대가 광범위하게 형성되고 해상으로부터 열과 수증기가 활발하게 공급되면서 대류 혼합층이 강화되어 대류운 발달에 유리
- **(불안정)** 연해주 부근으로 상층 절리저기압이 정체하면서 상층까지 강한 한기의 영향을 받아 불안정이 큼. 서해남부해상으로 700hPa 해기차가 32℃ 이상 나타나면서 850hPa 이상의 고도에서 대류 억제 효과가 적어 대설이 발생할 가능성이 높음. 광주 단열선도에서 역전층이 약하고 대류 혼합층이 4km로 매우 깊게 나타남
- **(기류 수렴)** 아래 모식도와 같이 우리나라 북쪽으로 상층 절리저기압이 정체할 경우 저기압 후면을 따라 한기가 주기적으로 남하를 하게 되며, 1차 한기 남하 후 2차 한기가 남하하면서 상층 단파골이 발달하고 하층에는 시어역이 형성되어 기류의 수렴이 발생
  - 10일 15시와 21시 광주 단열선도의 하층 바람을 보면 전 시간에 비해 서풍에서 북서풍으로 풍향 변화가 생겨 시어역이 통과했음을 알 수 있음. 이러한 기류 수렴은 상승류를 강화시켜 더욱 강한 강수로 이어지고, 시어역 전면의 서풍류가 강화되면서 수렴대가 내륙으로 유입되어 적설이 늘어나는 경우가 빈번하게 나타남



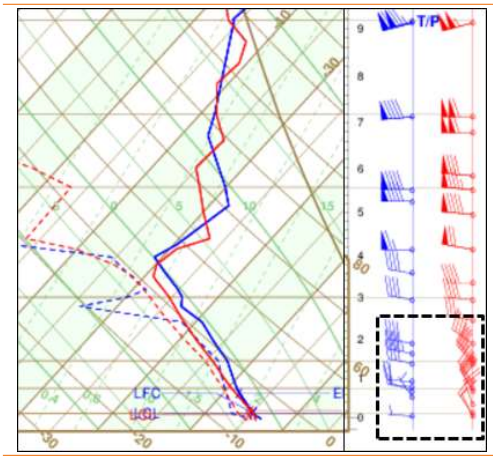
1월 10일 21시 850hPa 분석장



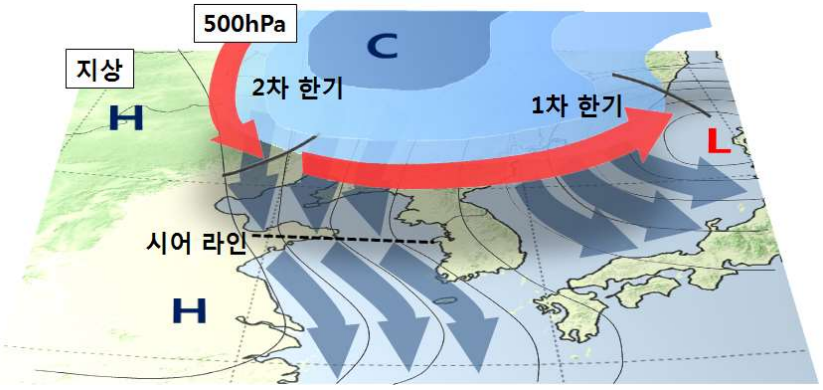
1월 10일 850hPa 해기차



1월 10일 700hPa 해기차



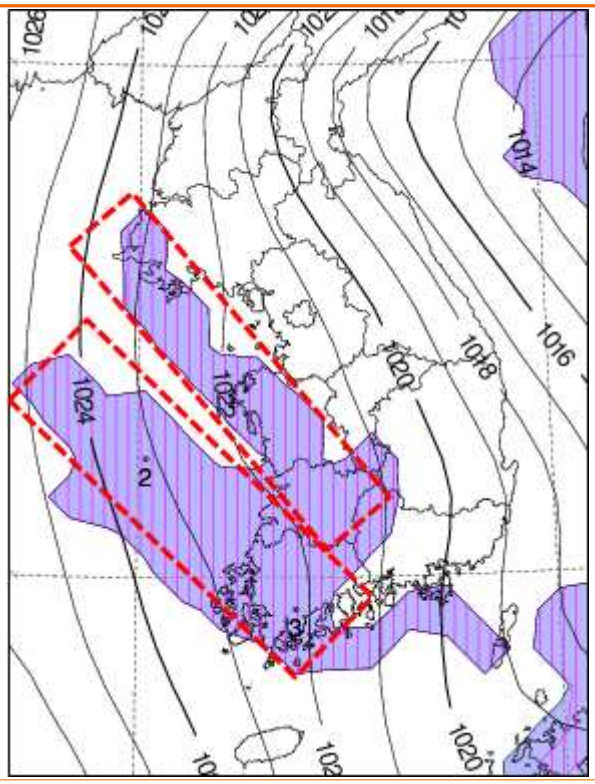
1월 10일 15시/21시 광주 단열선도



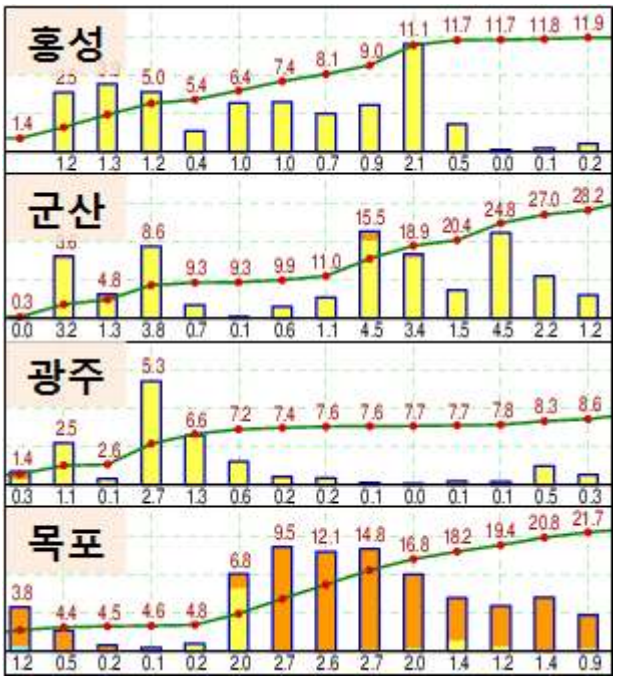
2차 한기 남하로 서해상의 기류 수렴 형성 모식도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

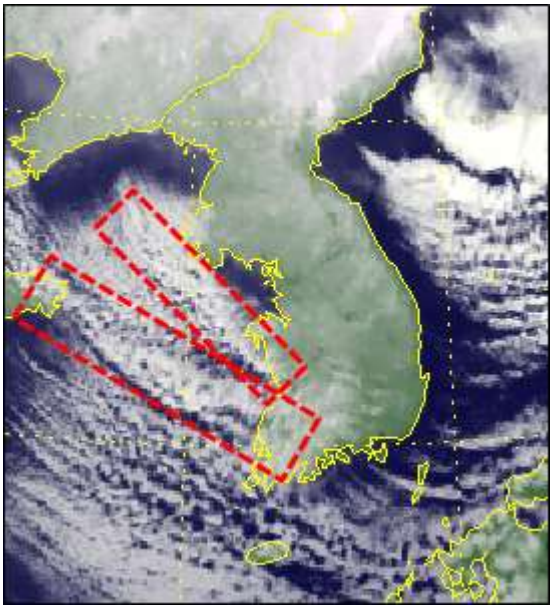
- **(모델 예상)** 9일 12UTC 발표된 모델의 강수 예상도를 보면 기류 수렴으로 예상되는 서해상에서 내륙으로 긴 두 개의 밴드형 강수대를 모의함. 지점별 강수량을 보면 대부분 10cm 이상의 강수량을 예상하고 있으며 전라서해안 지역으로는 20cm 이상의 많은 눈을 모의함
- **(실황)** 모델에서 기류 수렴으로 보았던 두 개의 밴드형 강수대가 위성에서도 비슷한 위치에 두 개의 강한 구름대로 나타났으며 내륙까지 유입. 강수량 분포에서도 나타나듯이 강수량과 강수 지역도 모델에서 예상했던 범위를 크게 벗어나지 않은 것을 알 수 있음
- **(원인)** 모델에서 강수분포의 형태나 강수량의 특징들이 잘 표현이 된 것으로 판단되며, 2차 한기에 의한 기류의 수렴 효과로 강수가 강화되는 효과를 전구모델이 잘 모의하는 것으로 볼 수 있음



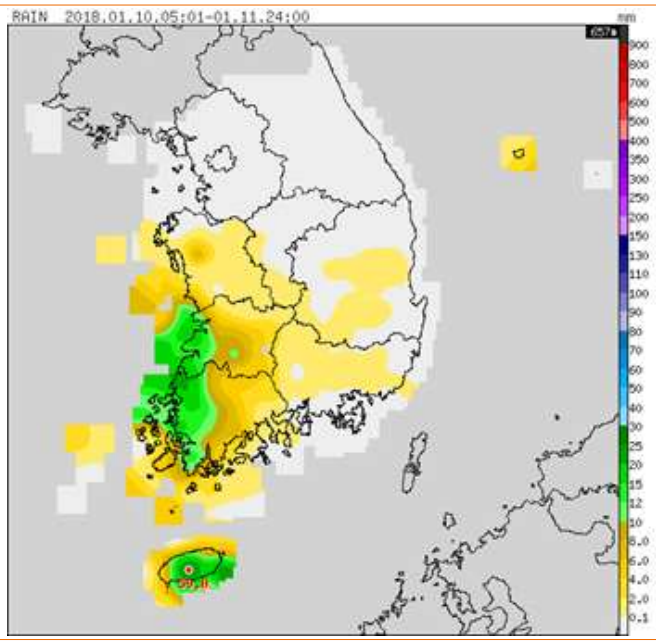
1월 10일 21시 한반도 강수예상도



1월 10일~11일 지점별 강수량 시계열



1월 10일 21시 위성 적외영상

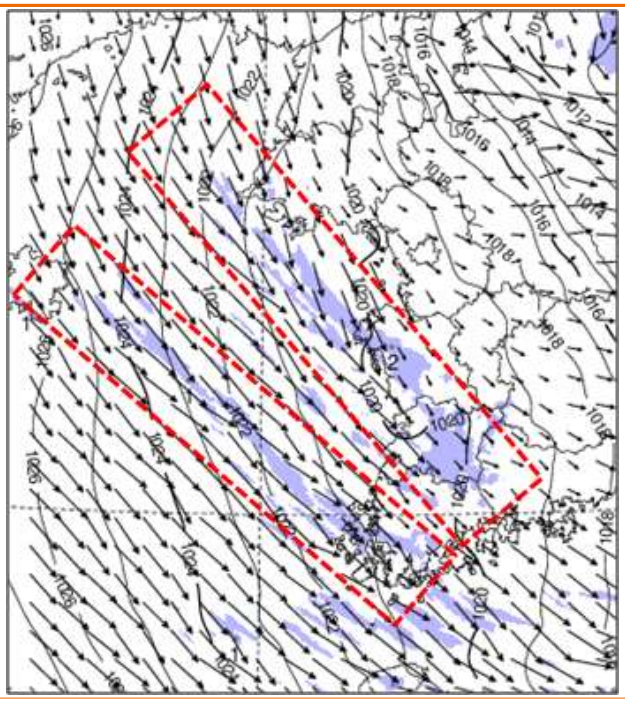


1월 10일 05시~11일 일강수량 분포

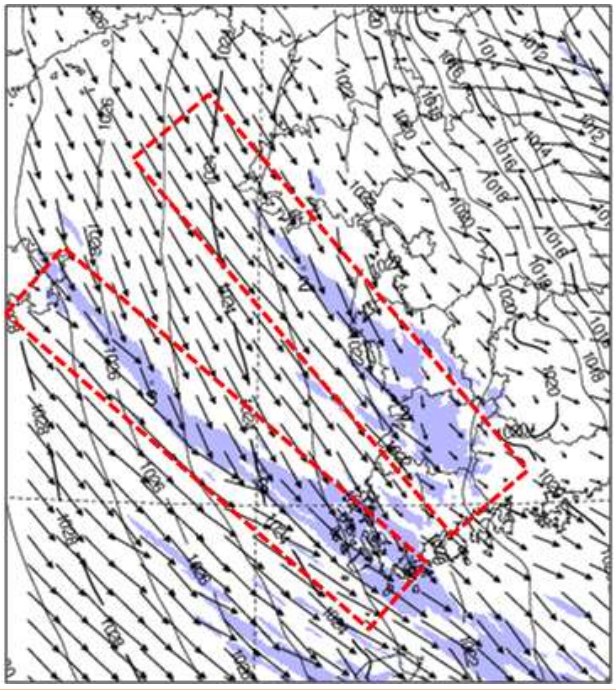
4. 그 때 이것이 중요했다…!

- **2차 한기가 남하할 가능성 고려**
  - 우리나라 북쪽으로 상층 절리저기압이 정체하는 종관적인 기압계가 예상될 시 2차 한기가 남하할 가능성을 염두
  - 2차 한기의 규모와 강도가 강하다면 전면으로 기류 수렴이 발생할 가능성이 높음
  - 이러한 기류의 흐름과 강수의 발달이 수치모델에서 어느 정도 모의가 되므로 참고가 필요함

- **수치모델을 참고하자**
  - 아래 그림은 기류 수렴으로 전라서해안에 20cm 이상 적설이 기록되었던 대설 사례에서의 국지모델 강수예상장(24시간 전)임. 두 사례 모두 기류 수렴에 의한 두 개의 밴드형 강수대를 모의하고 기류의 수렴도 잘 나타나고 있음
  - 따라서 기류 수렴의 발생 가능성은 수치모델을 통해 어느 정도 판단이 가능하다고 볼 수 있음. 다만 강수의 양적인 측면에서는 모델의 정확성이 낮으므로 해기차, 풍속, 안정도 등을 참고하여 예상 적설을 산정할 필요가 있음



2018년 1월 10일 21시(+24h) LDAPS 강수 예상도



2014년 12월 17일 09시(+24h) LDAPS 강수 예상도

3-3. 2018년 1월 23일 사례

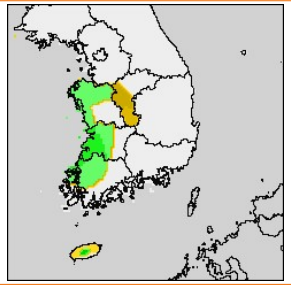
큰 해기차에도 불구하고 예상보다 적었던 서해안 강설

수치모델이 과소모의 하는 육풍 영향 고려했으면

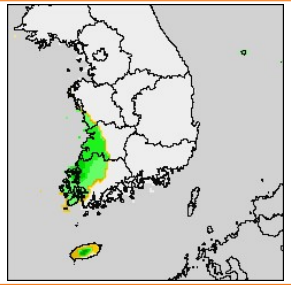
1. 예보와 실황은?

예보 (1월 23일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 제주도, 울릉도.독도: 5~10mm - 충청도, 전라도(남해안 제외), 서해5도: 5mm 내외 ▸ 예상 적설 - 제주도산지, 울릉도.독도: 5~15cm - 전라서해안: 2~7cm(많은 곳 10cm 이상) - 충남서해안, 전라내륙, 제주도(산지 제외), 서해5도 : 1~5cm - 충청내륙: 1cm 내외	▸ 24일 새벽 전라서해안 위주 적설, 아침에는 강수대 해상으로 빠져나감 - 군산 3.4 고창 1.0 영광 5.0 무안 5.0 목포 2.3 등 전라서해안 위주 적설 - 24일 새벽 서해안에 북동풍(육풍)에 의한 수렴대 형태로 강수대 발달함. 점차 북동풍이 우세해지면서 04시 이후로는 강수대가 해안에서 해상으로 빠져나감 - 24일 오후까지 예상했던 전라서해안의 강수는 새벽부터 빠르게 종료

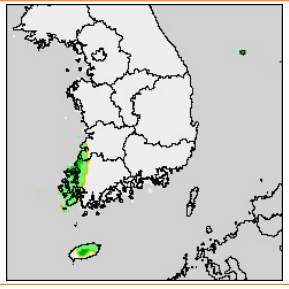
예상 적설



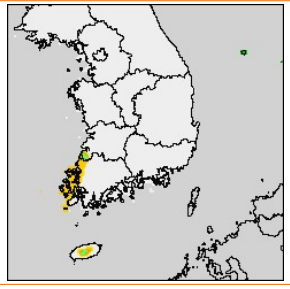
1월 23일 18~24시



1월 24일 00~06시



1월 24일 06~12시



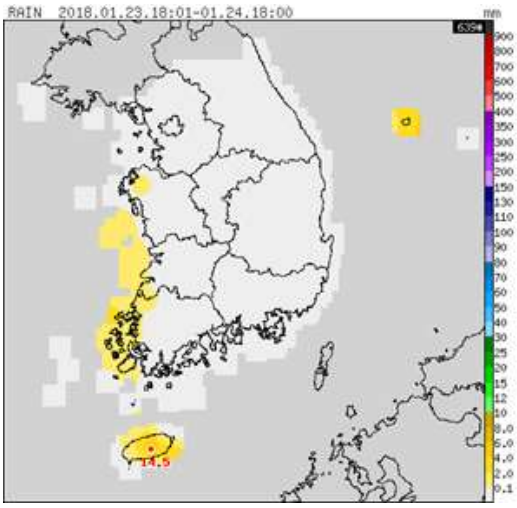
1월 24일 12~18시

최심신적설 현황(cm)

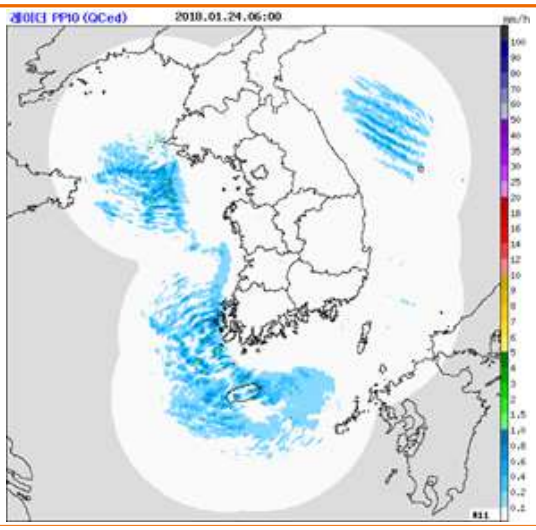
전라북도 새만금 3.2 고창 1.0

전라남도 흑산도 5.2 영광 5.0 해제 5.0 무안 3.5 진도 3.3 목포 2.3 함평 1.1

충청남도 아산 3.1 서산 1.8 홍성 1.0 예산 0.9 태안 0.5 당진 0.5



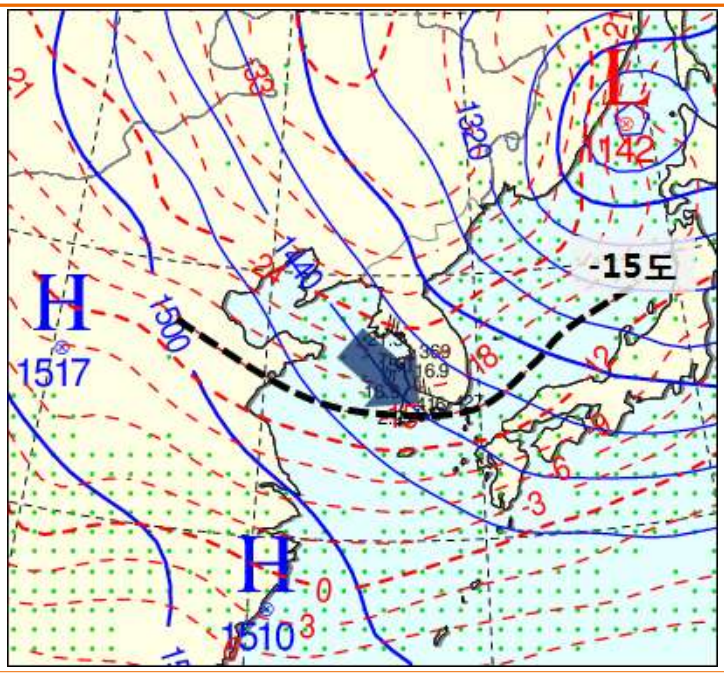
1월 23일 18시~24시 누적 강수량



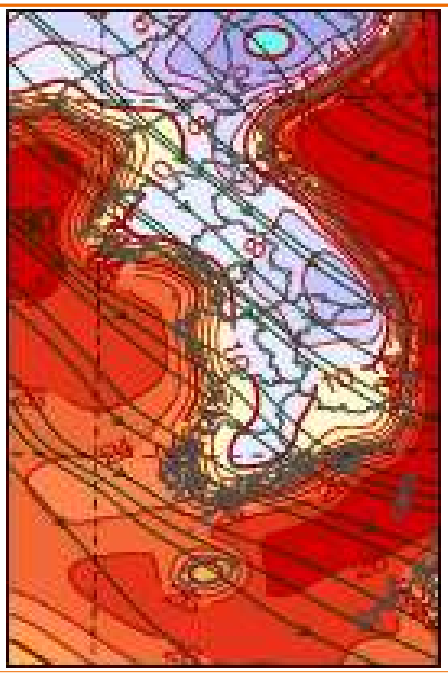
1월 24일 06시 레이더 합성영상

2. 강수 메커니즘은?

- **(강한 한기 남하와 해기차)** 전일(23일) 03시에는 중부지방에 있던 850hPa –15℃ 선이 남해안까지 남하하면서 서해중부해상에 22℃ 이상의 해기차 구역이 광범위하게 형성. 해수면으로부터 현열과 수증기가 활발히 공급되면서 하층의 불안정 강화
- **(충분한 바람)** 서해안 지역에 850hPa 20kts 이상의 북서풍이 지속되면서 강수 발생 가능성이 높은 상태. 일부 내륙으로도 강수대 영향 줄 수 있는 종관적인 조건 만족



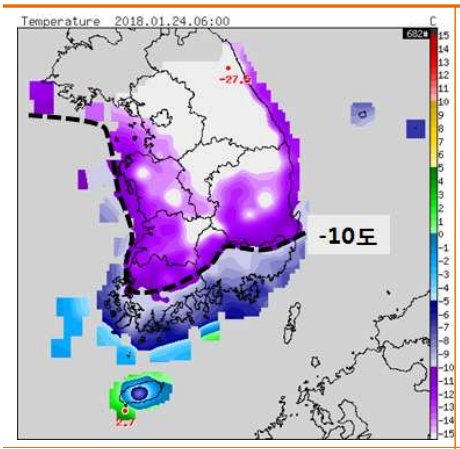
1월 24일 03시 850hPa 분석장



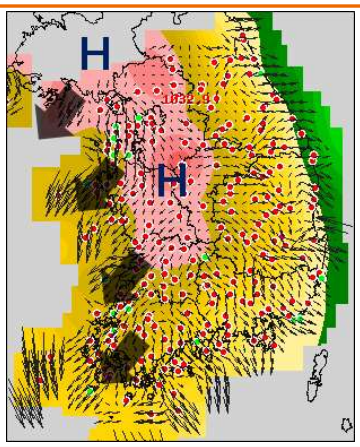
1월 24일 03시 850hPa 해기차

- **(국지풍과 수렴대 형성)** 밤사이 내륙에는 복사냉각으로 인해 -15℃ 이하 구역이 광범위하게 나타나고 남부지방과 서해안지역도 –10℃ 선 이하의 분포를 보임. 강한 cold pool 영향으로 내륙에 국지고기압이 형성되면서 서해안에는 북서풍의 종관풍이 아닌 북동풍의 국지풍(육풍)이 강화되어 해안 근처에 수렴대 형태의 강수대가 형성

- **(국지풍 강화)** 북동풍이 강하게 불고 수렴대가 점차 해상으로 물러나며 강수 종료



1월 24일 06시 기온 분포

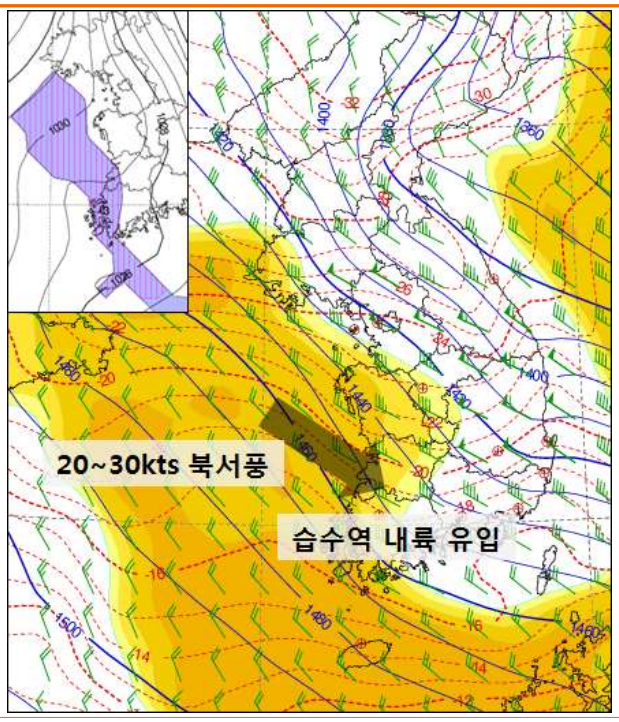


1월 24일 06시
해면기압+바람벡터

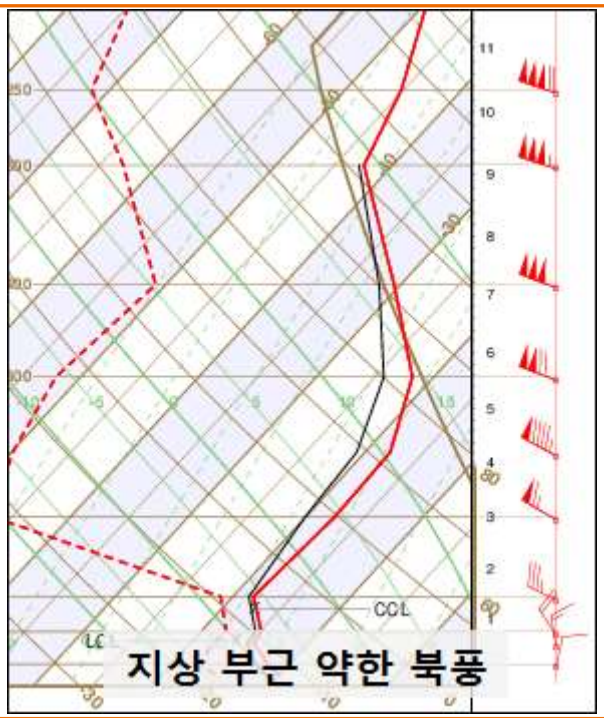
1월 24일 06시 단파적외영상

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- **(모델 예상)** 전라서해안에 지속적인 강수 모의. 850hPa 20kts 이상이고 330° 이하인 북서풍과 습수역을 내륙까지 모의. 다만 온도골이 내륙에 위치하면서 경압성은 약화. 광주 예상 단열선도는 지상 부근으로 15kts 이하의 약한 북풍 성분을 모의함
- **(실황)** 850hPa 층에는 모델 예상대로 북서풍이 탁월하게 나타났으나 925hPa 이하 층에서는 예상보다 북동풍 성분이 강하게 나타나 수렴대가 해상으로 빠르게 빠짐
- **(원인)** 내륙의 복사냉각으로 인해 강화된 국지고기압 세력을 모델이 과소 모의. 즉 925hPa 이하의 북동풍을 약하게 모의하면서 모델은 강수 구역과 저습수역이 서해안뿐만 아니라 일부 내륙까지도 영향을 줄 것으로 예측

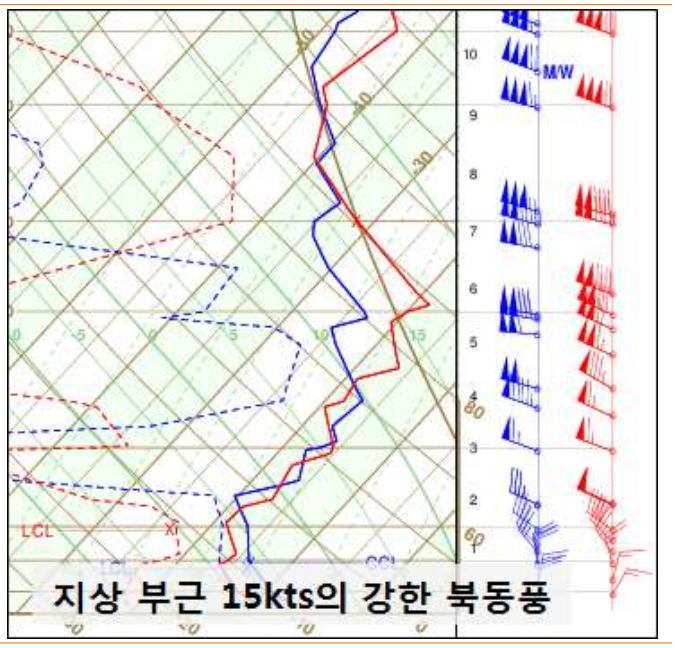


1월 24일 09시(+24h) 850hPa 상세바람장+강수량



1월 24일 09시(+24h) 광주 예상단열선도

1월 24일 09시 합성위성영상

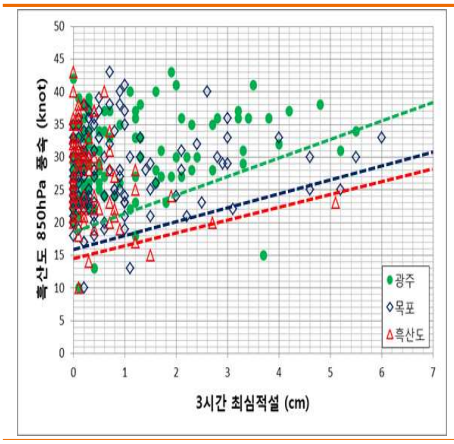
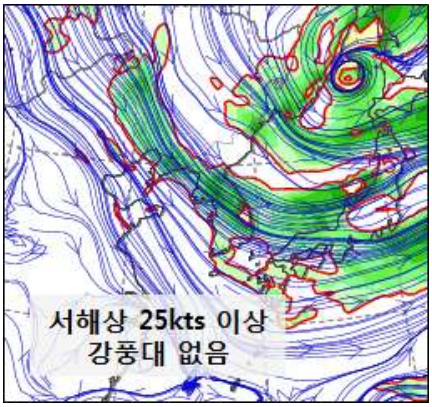
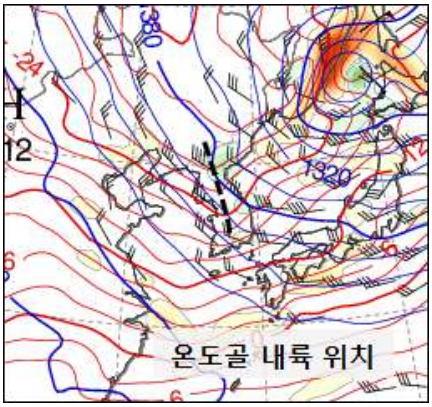


1월 24일 09시 광주단열선도

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **충분히 강한 풍속이 필요하다는 것을 알았더라면**
  - 호수 효과 강설에서 강한 바람은 대류 혼합 과정에 필요한 필수적인 요소
  - 아래 통계 그래프와 같이 해상에 850hPa 풍속이 20kts 이상으로 불어야 강수가 발생하는 데에 유리하며 서해안 대설로 이어지기 위해서는 25kts 이상, 내륙까지 대설이 발생하려면 30kts 이상이 서해상에 불어야 함
  - 이번 사례에서는 24일 새벽에 850hPa 25kts 이상의 강풍대가 내륙에 형성되고 서해상에는 강풍대가 존재하지 않아 풍속이 약해 활발한 대류 혼합이 어려워 대설로 이어지기 힘든 조건이었음

- **온도골의 위치와 그에 따른 북동풍 강화 여부를 고려했더라면**
  - 850hPa의 강풍대가 내륙에 위치함에 따라 온도골도 해상이 아닌 내륙에 형성됨
  - 상대적으로 내륙에 더 강한 한기가 쌓이고 야간 복사냉각 효과까지 더해져 지상 고압대가 발달. 내륙에서 해상으로 불어나가는 육풍 성분이 가미되면서 북동풍이 강화
    ⇨ 해상에 강풍대가 없어 해상에서 육지로 불어 들어가는 바람이 상대적으로 강하지 않고 온도골이 내륙에 위치할 경우에는 서해안에 육풍으로 인한 북동풍이 강화되면서 강수대가 해상으로 물러날 가능성이 있음을 고려해야 함

		
서해안형 강설 사례에서 850hPa 풍속과 적설 관계	**24일 03시 850hPa 유선 예상**	**24일 03시 850hPa 기온 예상**

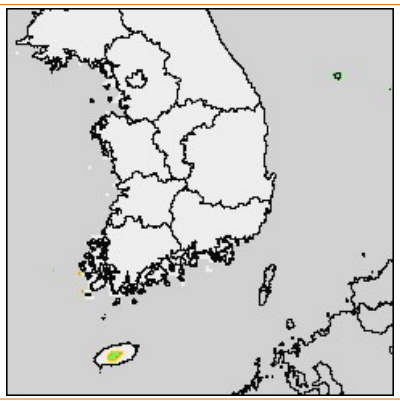
북풍의 풍계에서 예상하지 못한 전남서해안 대설

강설 발생 기본 조건인 큰 해기차와 강한 풍속

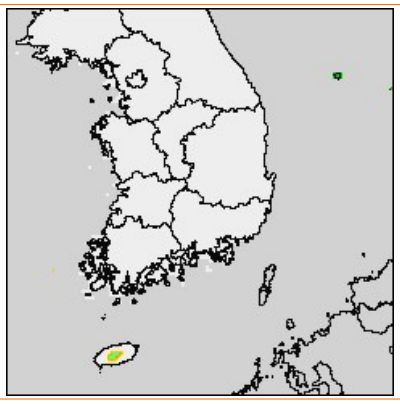
1. 예보와 실황은?

예보 (1월 24일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 울릉도.독도: 5~10mm - 제주도산지: 5mm 내외 ▸ 예상 적설 - 울릉도.독도: 5~15cm - 제주도산지: 1~5cm - 충남서해안과 전라서해안 25일 아침까지 눈 날림	▸ 전라서해안으로 5cm 이상의 적설 기록되면서 24일 밤 대설주의보 발표

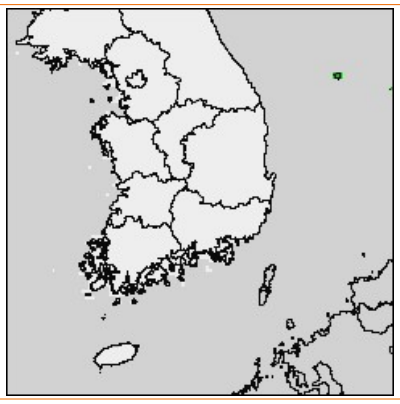
예상 적설



1월 24일 18~24시



1월 25일 00~06시

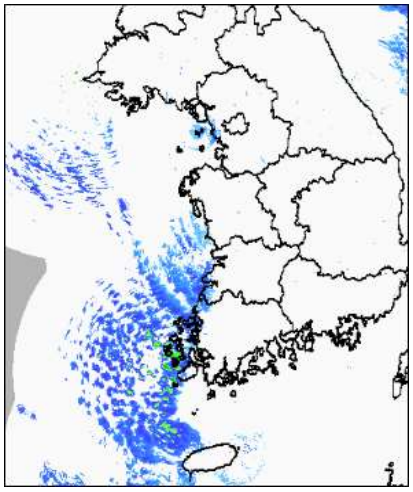


1월 25일 06~12시

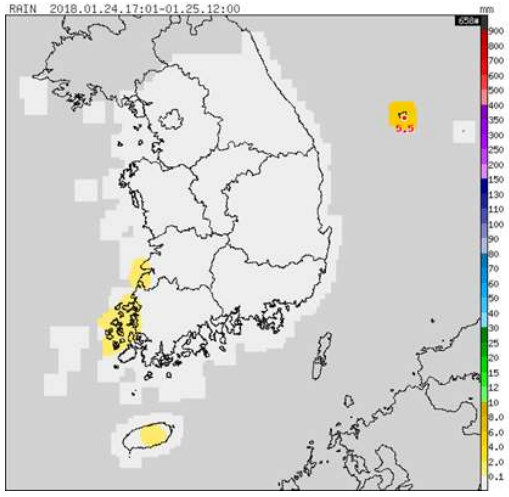
최심신적설 현황(cm)

전라서해안 영광군 7.5 압해도 5.9 해제 4.5 목포 2.6 진도군 2.2 새만금 1.2 고창 0.5 흑산도 0.5

- 서해상의 대류운 약해지지 않고 25일 아침까지 전라서해안에 영향



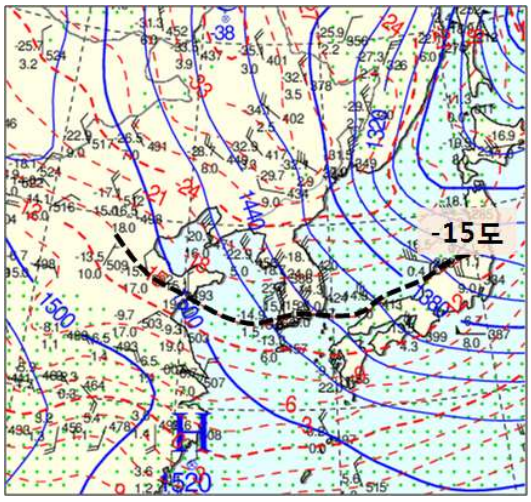
1월 25일 00시 레이더 강설영상



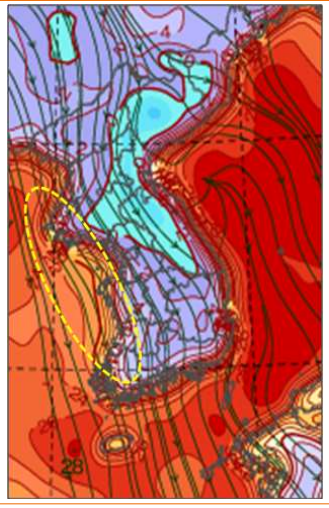
1월 24일 17시~25일 12시 누적강수량

2. 강수 메커니즘은?

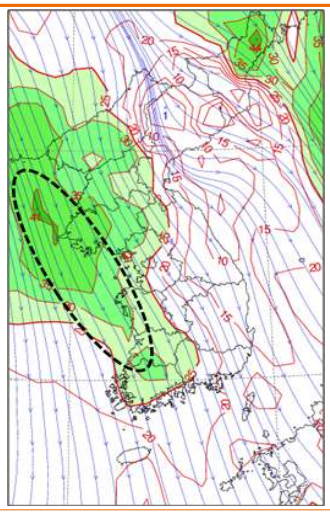
- **(큰 해기차)** 850hPa –15℃ 선이 남해안까지 남하할 정도로 강한 한기가 내려오면서 서해상에 22℃ 이상의 해기차 형성. 충남앞바다 부근도 20℃ 이상의 해기차가 나타나면서 불안정 강화
- **(강한 풍속)** 해기차 20℃ 이상으로 충분한 가운데 해안 근처로 850hPa 30kts 이상의 강풍대축 형성. 비록 북북서풍의 풍계에서 옹진반도 남쪽은 상대적으로 취주거리가 짧게 나타나지만 큰 해기차에 강한 풍속까지 받쳐주면서 대류운이 발달할 수 있는 충분한 열과 수증기가 공급되고 대류 혼합이 활발하게 일어남



1월 24일 21시 850hPa 분석장

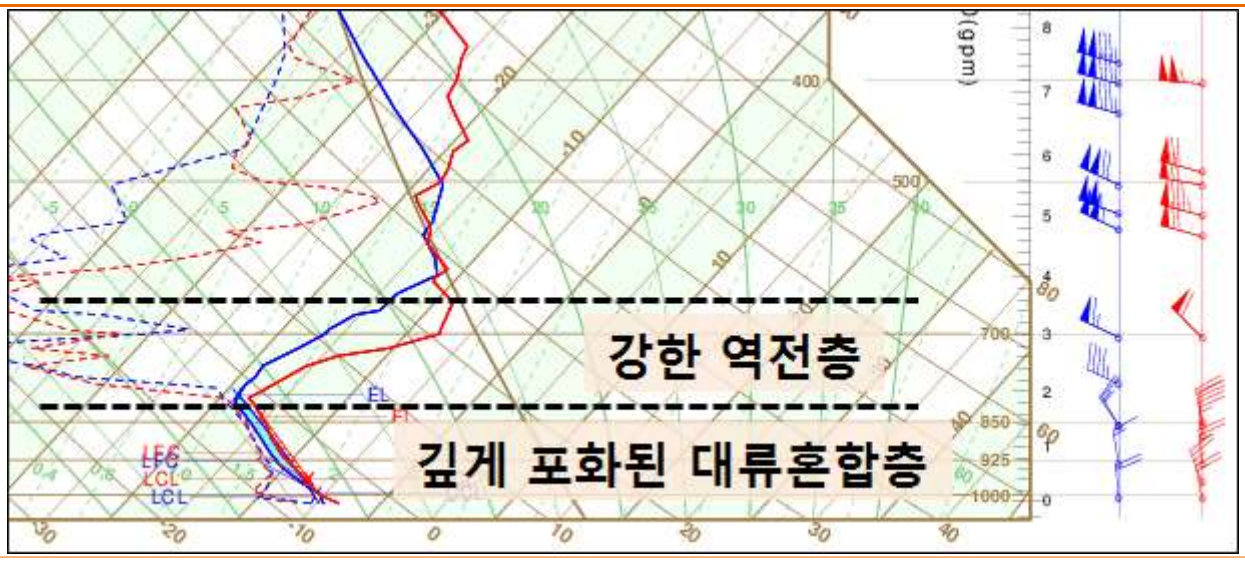


1월 24일 21시 850hPa 해기차



850hPa 유선(강풍대)

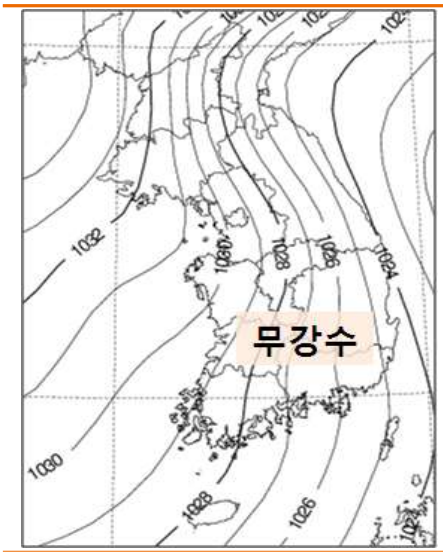
- **(강한 안정층)** 흑산도 단열선도를 보면 850hPa 이상에 강한 역전층이 존재해 대류를 억제하기 좋은 조건이나 역전층 아래 고도에서 깊게 포화된 형태의 대류 혼합층이 매우 뚜렷하게 나타남. 결국 대류 억제가 강한 조건임에도 불구하고 큰 해기차와 강한 풍속의 영향으로 제한된 하층 안에서 활발한 대류가 일어나면서 강설로 이어짐



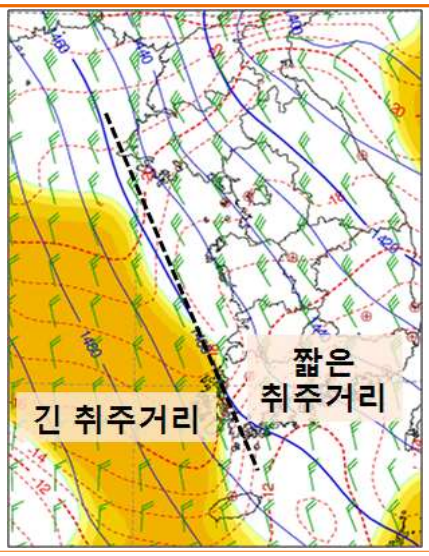
1월 24일 21시 흑산도 단열선도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

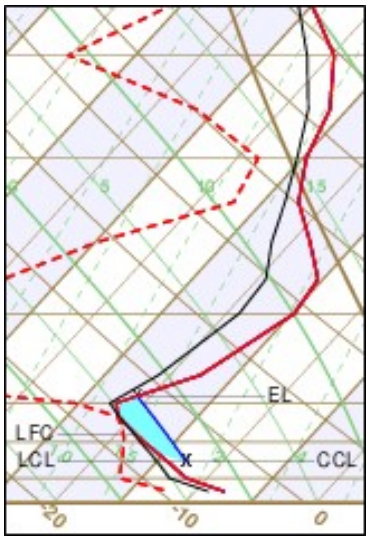
- **(모델 예상)** 24일 00UTC 발표 모델에서 24일 밤부터 25일 아침 사이 일부 전남서해안에 약한 강수를 모의. 그 외 서해안 지역에는 강수를 모의하지 못함. 850hPa 상세바람장에는 북북서풍의 풍계에서 취주거리가 긴 일부 전남서해안에만 저습수역의 경계가 걸리고, 상대적으로 취주거리가 짧은 옹진반도 아래 구역은 건조한 상태로 나타남
- **(실황)** 위성영상에서 보면 광범위한 구름대의 긴 취주거리 구역이 예상보다 동쪽까지 나타났고, 특히 짧은 취주거리 구역에서 대류운열이 발달하여 전북서해안까지 직접적으로 영향을 줌
- **(원인)** 짧은 취주거리 구역에도 강설 발생에 충분히 큰 해기차와 강한 풍속, 160km 이상의 취주거리를 모두 충족하여 강설로 이어지게 됨. 흑산도 단열선도를 비교해보면 모델 예상에서도 불안정에 대한 조건은 충분히 만족했으나 실황과는 다르게 대류 혼합층의 형태로 나타나지 않은 차이점이 있음



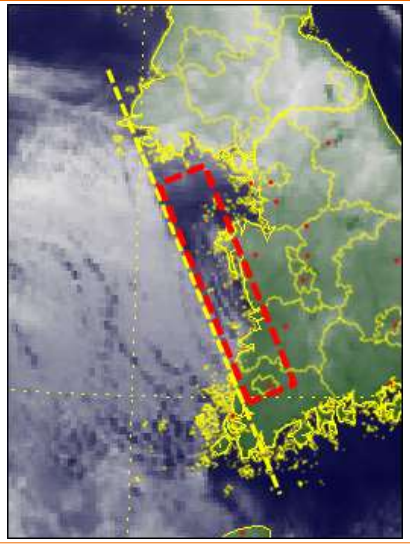
1월 25일 00시
한반도 강수예상도



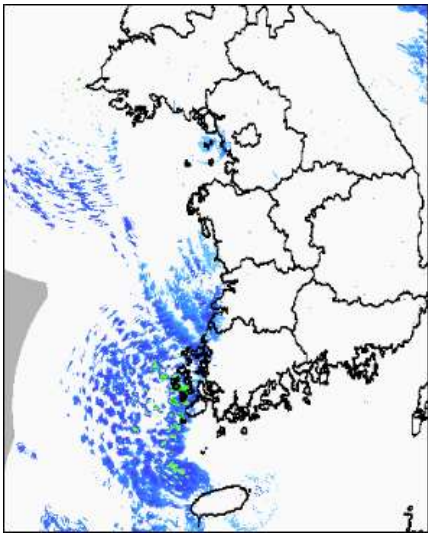
1월 25일 00시
850hPa 상세바람 예상장



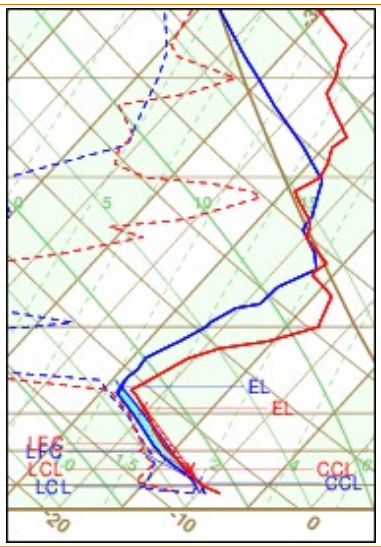
1월 24일 21시
흑산도 예상단열선도



1월 25일 00시 위성 적외영상



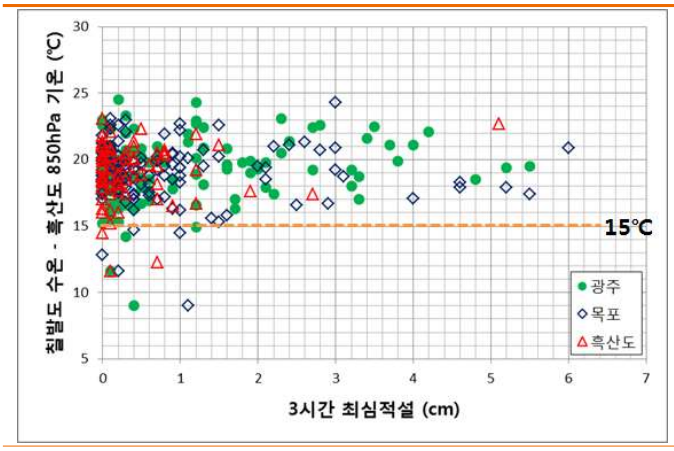
1월 25일 00시 레이더 강설영상



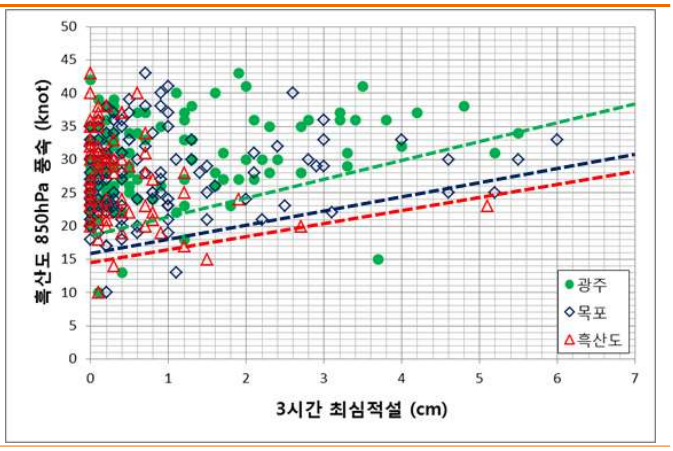
1월 24일 21시 흑산도 단열선도

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **강설 발생의 기본 요소를 충족하는지 판단했더라면**
  - 아래 그림은 서해안형 강설 발생에 필요한 기본 요소인 해기차와 풍속에 대한 적설 분포임. 850hPa 해기차가 15℃ 이상이고 풍속이 20kts 이상일 경우 강설 발생 가능성이 있음
  - 이번 사례와 같이 해기차가 20℃ 내외이고 풍속이 30kts 이상일 경우 많은 적설이 발생할 가능성이 크다는 것을 알 수 있음
  - 일반적인 강설 발생 취주거리 조건은 160km 이상
    ⇨ **모든 조건을 충족하므로 강수 도입을 고려해야 할 필요**
- **철저한 실황감시가 중요**
  - 24일 16시 위성영상을 보면 취주거리가 짧은 경기만에서도 대류운이 나타나고 있어 해기차가 매우 크고 풍속이 충분히 강한 상황임을 짐작할 수 있음
  - 이러한 실황을 보이는 상황에서 850hPa 유선 예상도에 나타나는 강한 한기의 강풍축이 취주거리가 짧은 구역에 형성되는 점을 고려한다면 대류운이 계속 유지되거나 좀 더 발달할 가능성이 있으므로 강수 도입 고려해야 할 필요

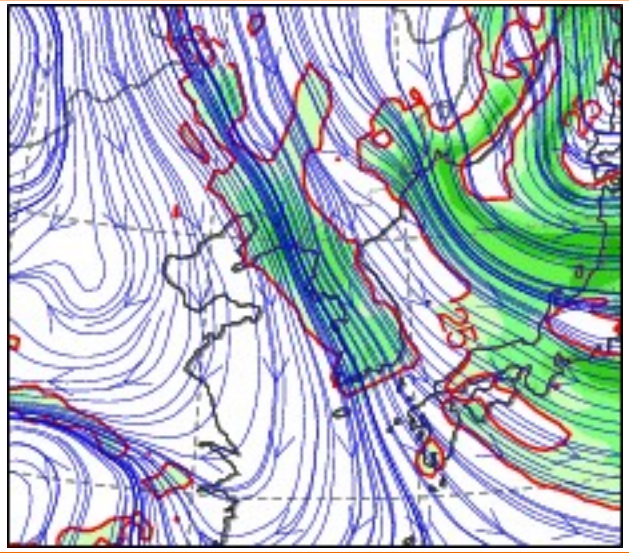


850hPa 해기차와 적설 분포



850hPa 풍속과 적설 분포

1월 24일 16시 천리안 위성 가시영상



1월 25일 00시 850hPa 유선 예상장

3-5. 2018년 12월 8일 사례

서해안형 강설

야간 육풍 강화로 해안 위주의 대설, 내륙은 강수 어려움

1. 예보와 실황은? → 눈과 비가 섞이면서 적설이 적을 것

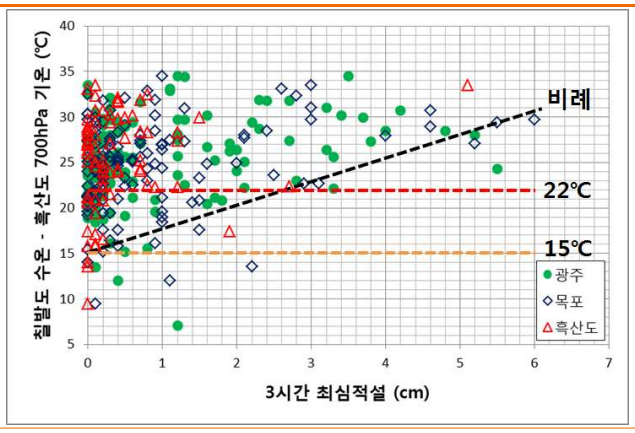
예보(12월 7일 17시 발표)	실황(12월 7~8일)
- 충남서해안, 전라서해안 : 2~7cm(많은 곳 전북서해안과 전남북부서해안 10cm 이상) - 충남내륙, 전라내륙 : 1~5cm	- 충남서해안, 전라서해안 : 2~7cm(많은 곳 새만금 14.6cm) - 충남내륙, 전라내륙 : 눈 날림

2. 쟁점 사항은?

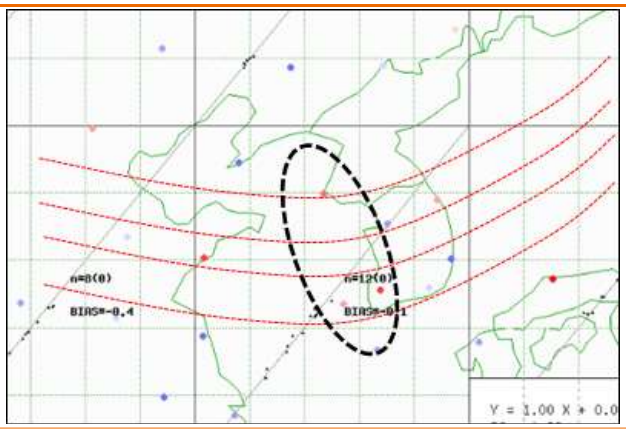
- **쟁점1)** 700hPa 한기가 강하다. 강수는 예상보다 더 발달할 수 있다.
- **쟁점2)** 콜드풀이 강하다. 야간 육풍 강화로 내륙은 강수가 어려울 것이다.

3. 주요 분석내용

- **쟁점1)** 700hPa 한기가 강하다. 강수는 예상보다 더 발달할 수 있다.



700hPa 해기차와 적설 통계 자료



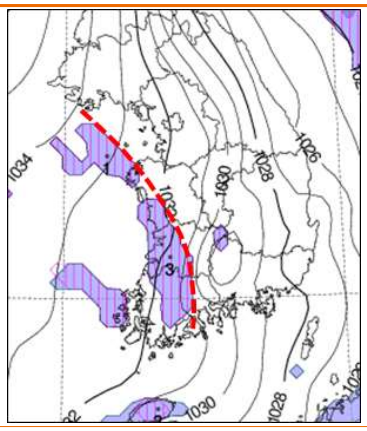
7일 09시 700hPa 기온 편차(모델-실황)

- 서해안형 강설의 경우 대류를 억제하는 역전층의 고도가 850hPa 이상에서 형성되므로 강수의 강도는 700hPa 해기차와 상관성이 있음
- 모델에서 예상하는 서해상의 700hPa 해기차는 22도 이상으로 대설 가능성 있음
- 700hPa 실황에서 서해상으로 남하한 한기의 강도가 모델보다 강하게 나타남
- **따라서, 모델 예상보다 700hPa 해기차가 커 강수가 더 발달할 수 있겠음**

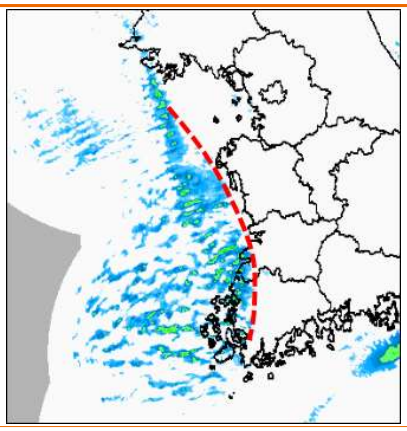
▶ **실제 육풍과의 수렴에 의한 강수대가 강하게 발달했다.**

- 고창, 군산, 무안, 영광 등 전라서해안 지역으로 5cm 이상의 대설 기록
- 특히, 군산(새만금)에는 육풍과의 수렴대가 정체하면서 14.6cm의 적설 기록

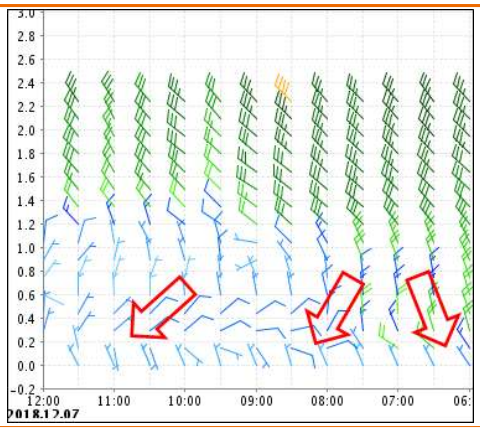
● **쟁점2)** 콜드풀이 강하다. 야간 육풍 강화로 내륙은 강수가 어려울 것.



7일 12시 강수 예상장(+15H)

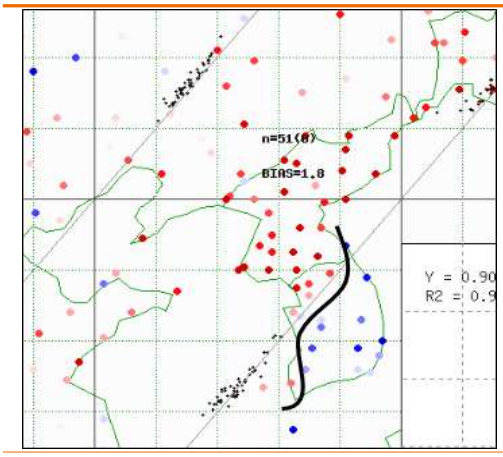


7일 12시 레이더영상

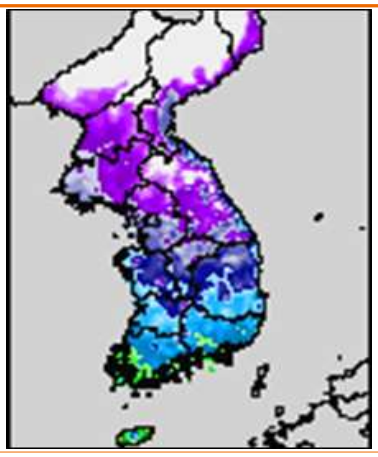


7일 06~12시 군산 연직바람관측

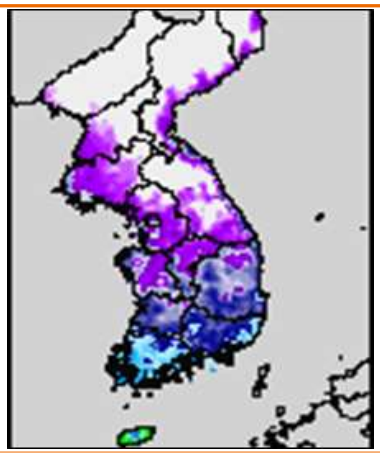
- 분석 당일이었던 7일 오전에도 해기차에 의한 서해안에 강설이 나타나고 있었으나 당초 모델의 예상보다 강수역이 서쪽으로 많이 밀려나있었음
- 군산 연직바람관측 자료를 보면 아침부터 북서풍이 북동풍으로 전환, 육풍 강화
- 해상에 한랭이류가 약화되거나 내륙에 한기가 축적될 시 육풍의 영향 고려 필요



7일 09시 지상기온 편차(모델-실황)



7일 예상 최저기온 분포

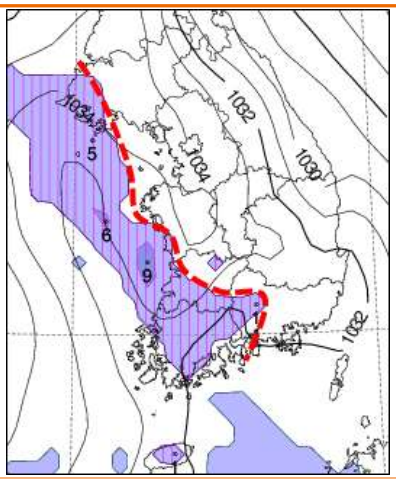


8일 예상 최저기온 분포

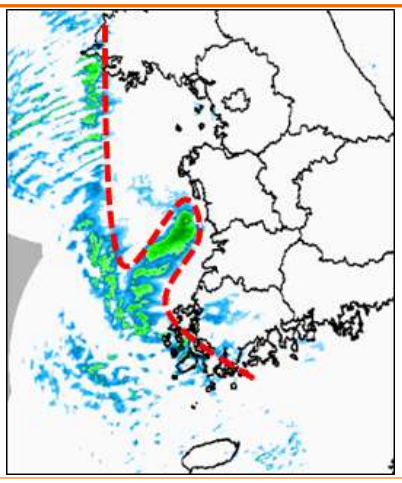
- 7일 아침에는 지상기온이 중부지방까지 양의 편차를 보이며 실제 한기가 강했음
- 8일 예상되는 최저기온이 7일보다 더 크게 하강하면서 더 강한 콜드풀이 예상됨
- 콜드풀이 강화되는 8일 새벽부터 오전에는 모델 예상보다 강수대가 서쪽으로 축소될 가능성 높음
- 육풍이 강화되면서 수렴에 의한 강수대가 주로 해안으로 형성되고 빠져나가겠음
- **따라서, 내륙은 해안보다 강수 가능성이 낮아 강수역과 적설 축소 필요**

▶ **실제 내륙에는 적설이 없었고 눈 날림만 관측됐다.**

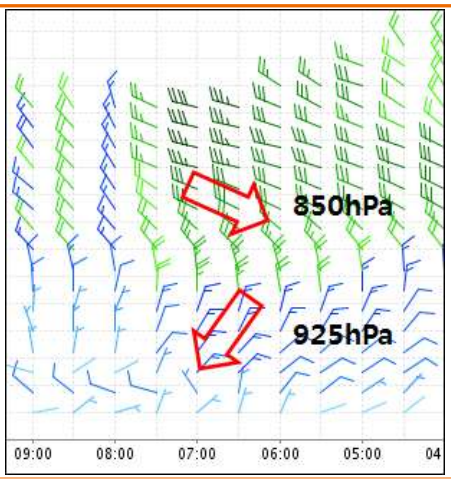
- 8일 새벽~아침 모델에서는 내륙까지 강수영역을 모의했으나 실황에서는 해안에만 영향을 주었고, 09시에는 해상으로 빠져나감
- 군산 연직바람관측 자료에서 850hPa에서는 북서풍이 강하게 불었으나 925hPa 고도 이하에서는 북동풍이 강하게 불면서 수렴대는 더욱 서쪽으로 밀려나게 됨
- 결국, 적설은 해안지역으로만 기록이 됐고, 내륙은 눈 날림만 관측되었음



8일 09시 강수 예상장(+24H



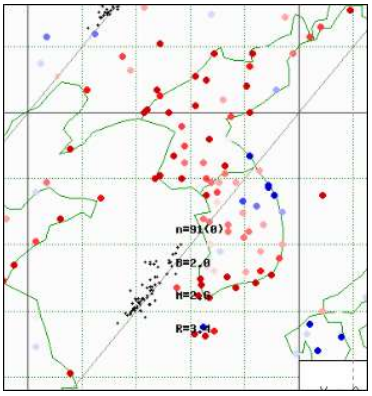
8일 09시 레이더영상



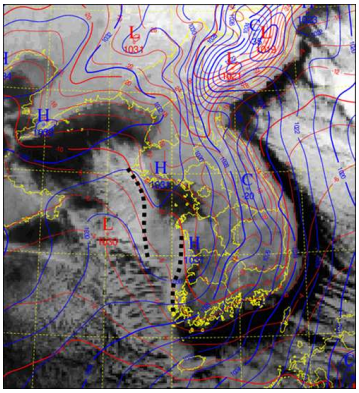
8일 04~09시 군산 연직바람관측

▶ **콜드풀이 강할 때, 내륙은 강수 가능성이 낮다.**

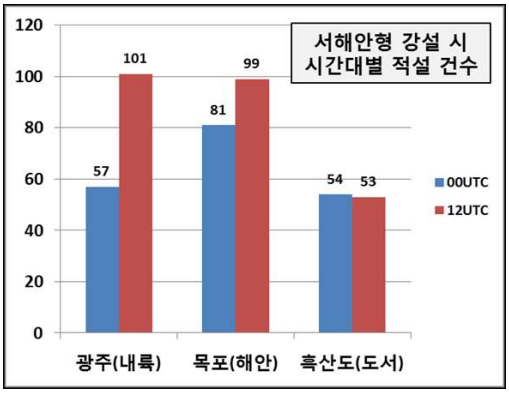
- 예상했던 대로 전날(7일)보다 8일의 최저기온은 더 하강했으며, 모델에서의 09시 지상기온 오차는 전날보다 더 광범위하게 남부지방까지 나타남
- 해상은 점차 온난하게 변질되면서 온도능이, 내륙은 야간 복사냉각 효과까지 더해지면서 온도골이 강화, 내륙에 국지고기압 발달, 육풍 성분인 북동풍 강화
- 결국, 육풍 영향이 예상될 때 내륙은 강수 가능성이 낮으며, 통계 자료에서도 광주(내륙)의 경우 콜드풀이 약한 12UTC보다 콜드풀이 강한 00UTC에 강수 빈도가 절반 가까이 낮은 것을 알 수 있음



8일 09시 지상기온 편차
(모델-실황)



8일 09시 한반도
지상분석장



서해안형 강설 시
시간대별 적설 건수

서해안형 강설

강한 한랭이류와 불안정, 그리고 지형수렴에 의한 대설

1. 예보와 실황은?

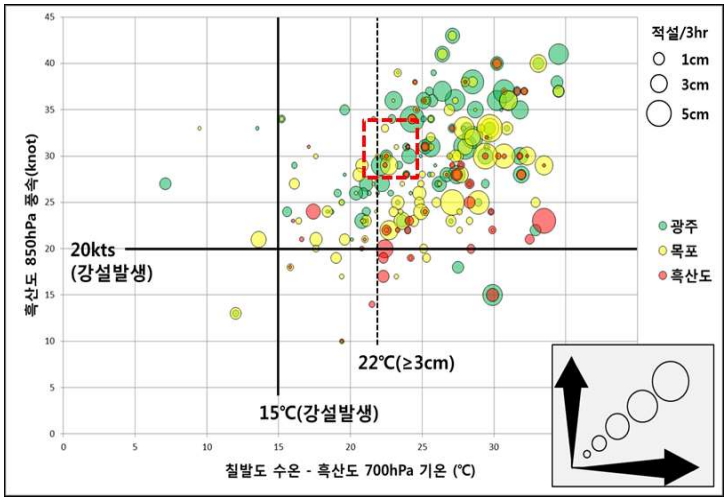
예보(12월 27일 17시 발표)	실황(12월 27~28일)
- 전라서해안 : 2~7cm - 충남서해안, 전라내륙 : 1~3cm	- 전라서해안 : 3~10cm(많은 곳 고창 24.5cm) - 충남서해안, 전라내륙 : 2~7cm

2. 쟁점사항은?

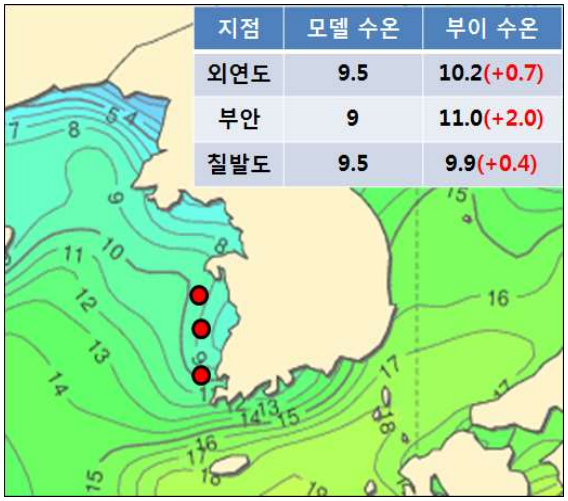
- **쟁점1) 700hPa 해기차와 850hPa 풍속이 강하다. 대설 가능성 매우 높아진다.**
- **쟁점2) 하층의 이류가 매우 강하다. 지형적인 영향과 내륙까지도 적설 늘어난다.**

3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 700hPa 해기차와 850hPa 풍속이 강하다. 대설 가능성 매우 높아진다.**



700hPa 해기차와 850hPa 풍속 통계 자료



지점	모델 수온	부이 수온
외연도	9.5	10.2(+0.7)
부안	9	11.0(+2.0)
칠발도	9.5	9.9(+0.4)

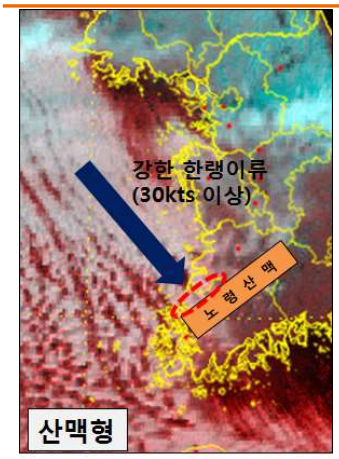
27일 09시 모델과 부이 수온 비교

- 700hPa 해기차는 역전층의 대류 억제와 관련이 있고, 850hPa 풍속은 하층 수증기 공급으로 불안정도와 관련이 있어, 값이 클수록 대설 가능성은 높아짐
- 모델에서 예상하는 700hPa 해기차는 22도 이상, 850hPa 풍속은 30kts 이상으로 통계적으로 광주까지 대설의 가능성이 매우 높음(빨간색 박스 범위에 해당)
- 특히, 모델에서 분석된 서해상의 수온보다 부이의 수온이 0.5~2.0도 정도로 더 높게 나타나 실제 700hPa 해기차는 더 커질 수 있음
- 따라서, 대설 조건을 충분하게 만족시키므로 예상 적설 상향 필요

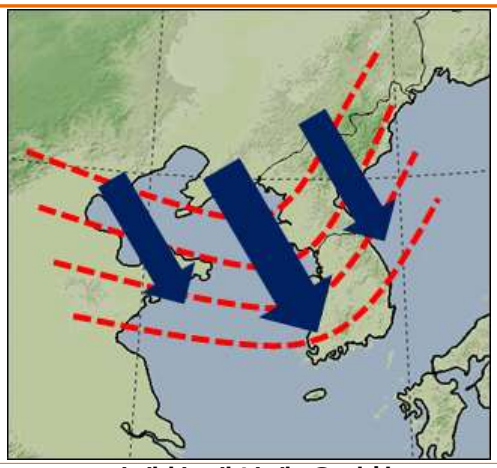
▶ **실제 예상 적설보다 많은 양의 적설을 기록했다.**

- 전라서해안 뿐만 아니라 전라내륙과 충남으로도 5cm 이상 대설이 나타난 지역이 많았으며, 일부 내륙(광주, 나주)에는 10cm 이상의 적설 기록

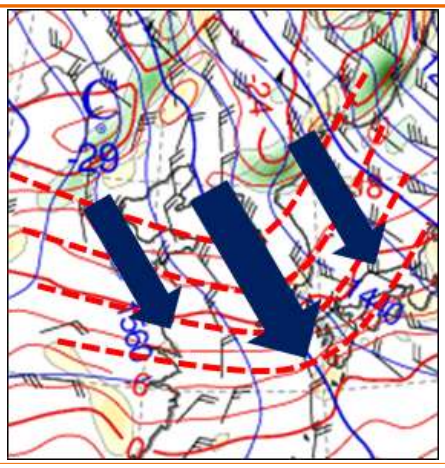
● **쟁점2) 하층의 이류가 매우 강하다. 지형적인 영향과 내륙까지도 적설 늘어난다.**



산맥형 대설 모식도

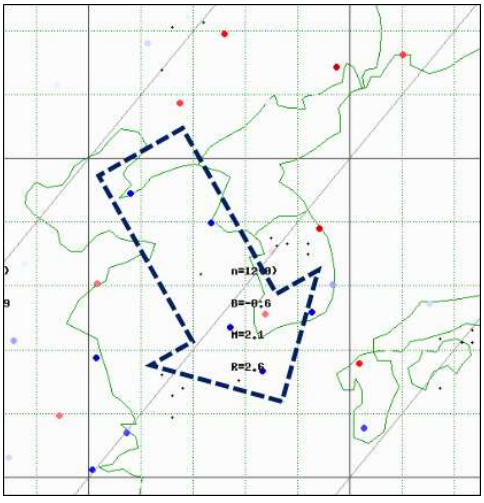


산맥형 대설에 유리한 850hPa 구조

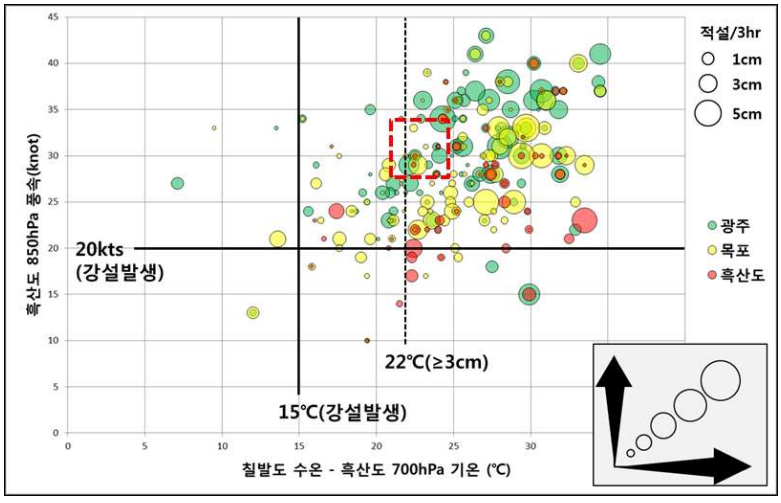


28일 03시 850hPa 예상장

- 28일은 서해상에서 전라서해안으로 강한 한랭이류가 나타나는 유형으로 노령산맥 풍상측의 지형적 강제상승으로 인한 산맥형 대설(10cm 이상)을 고려해야 함
- 또한, 강풍축과 온도골이 서해상에서 서해안을 축으로 나타나는 경우에 한랭이류형 강설과 산맥형 대설의 발생이 유리해짐(육풍의 영향이 없음)
- 모델에서 예상되는 850hPa의 강풍축과 온도골은 모두 서해상에서 서해안으로 형성되어 있고, 풍속도 30kts 이상으로 산맥형 대설에 최적화된 조건임



27일 09시 850hPa 모델 풍속 편차

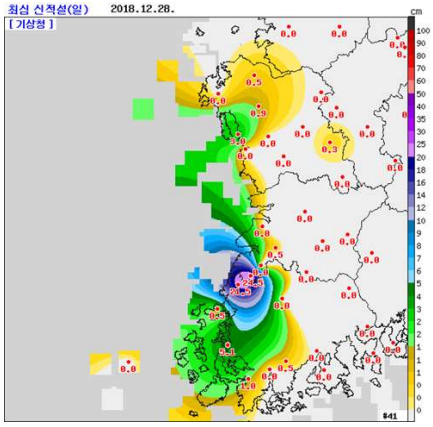


700hPa 해기차와 850hPa 풍속 통계 자료

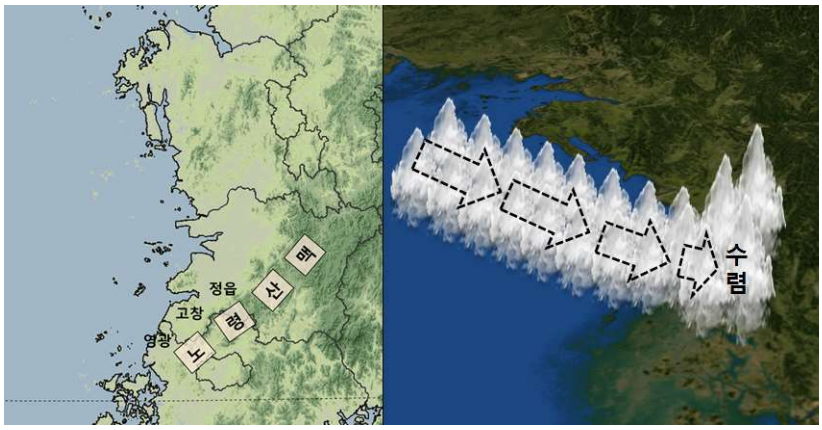
- 하층의 강풍대가 형성된 서해상 관측 지점들(다롄, 백령도, 흑산도)의 27일 09시 850hPa 모델 풍속 편차가 음의 편차로 나타나, 실제 하층 풍속이 더 강한 상황
- 산맥형 대설의 영향을 받는 지역(고창, 영광)으로는 10cm 이상의 대설 가능성 매우 높아, 예상 적설 상향 필요

- 한편, 통계 자료를 보면 내륙인 광주의 경우 30kts 이상의 풍속에서 대설 가능성이 매우 높아지는 것을 알 수 있음
- 따라서, 내륙 지역까지도 대설 가능 구역을 확대할 필요

▶ **실제 풍상측 지역으로 20cm가 넘는 적설 기록, 내륙에도 10cm 이상 기록됐다.**



28일 최심신적설 분포



노령산맥의 분포와 지형수렴 모식도

- 산맥 풍상측 지역인 고창과 영광에 각각 24.5cm, 21.5cm의 적설을 기록하면서 전형적인 산맥형 대설 유형의 결과로 나타남
- 또한, 광주(광산)와 나주에도 10cm 이상의 적설을 기록하면서 강한 풍속이 내륙까지 발달한 구름대를 유입시킨 것을 알 수 있음

육풍 수렴에 의한 대설 경보

강하게 발달한 육풍 수렴대 정체, 전남서해안 30cm 이상 적설

1. 예보와 실황은?

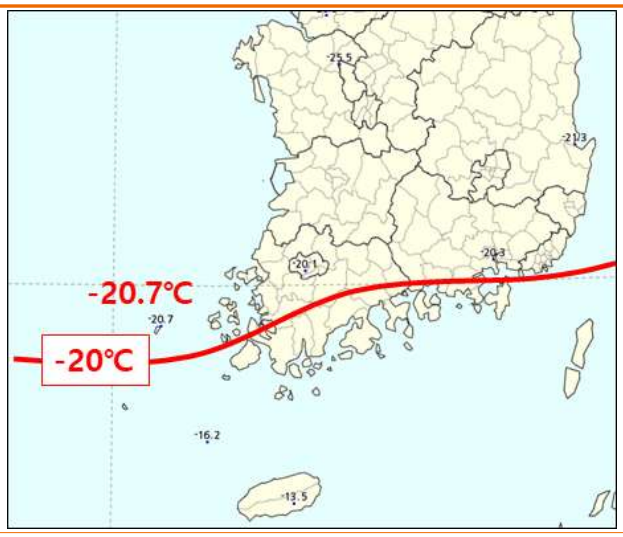
예보(12월 25일 17시 발표)	실황(12월 25~26일)
▸ 전라서해안 : 5~15cm(많은 곳 20cm 이상)	▸ 26일 최심적설(cm) - 해제(무안) 33.0 무안 21.0 염산(영광) 21.9

2. 쟁점사항은?

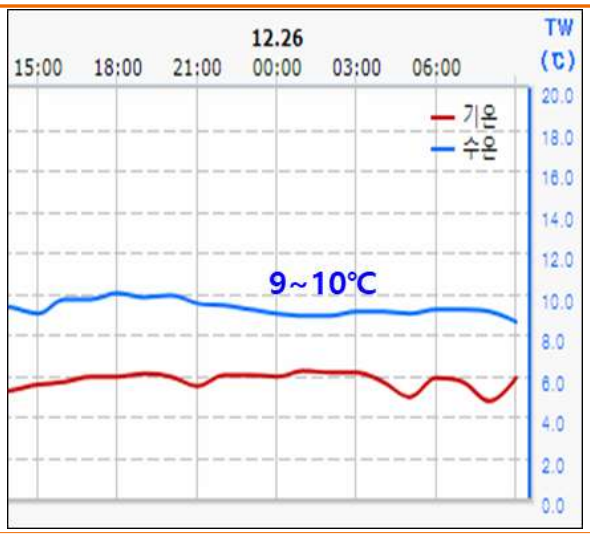
- **쟁점 1) 500hPa 기온이 –35℃ 이상일 때에도 30cm 이상 적설이 가능할까?**
- **쟁점 2) 육풍과 종관풍이 모두 강해 수렴대가 정체한다면 더욱 많은 적설로 이어진다.**

3. 주요 분석내용

- **쟁점 1) 500hPa 기온이 –35℃ 이상일 때에도 30cm 이상 적설이 가능할까?**



12월 26일 09시 700hPa GTS 기온 실황



12월 25~26일 칠발도 부이 수온 시계열

적설	850hPa 해기차	850hPa 기온	700hPa 해기차	700hPa 기온	500hPa 기온
1~5cm	≥15℃	≤-8℃	<22℃	>-20℃	>-35℃
5~10cm			≥22℃		
10~20cm				≤-20℃	
20~30cm			≥30℃		
> 30cm					≤-35℃

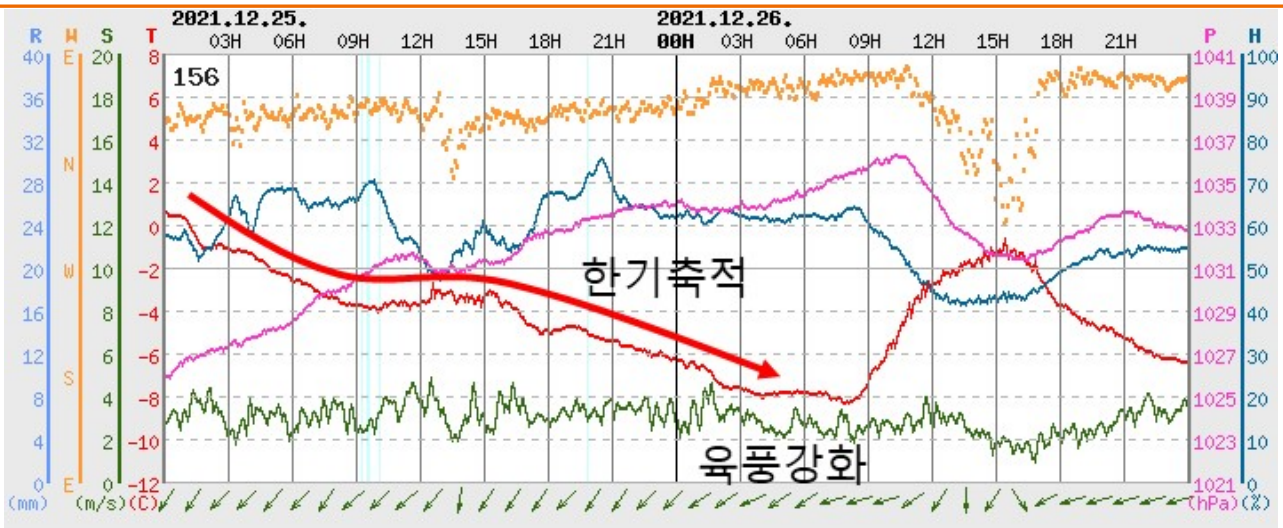
호수 효과에 의한 강설 시 기온과 해기차 조건에 따른 적설 분포

- 700hPa –20℃ 선이 남해안 부근까지 남하하여, 전라서해안은 10cm 이상의 대설이 나타날 수 있는 조건을 만족함
- 흑산도의 700hPa 기온과 칠발도 부이의 수온 차인 700hPa 해기차가 30℃ 내외로 나타나 20cm 이상 대설경보 수준의 적설이 가능함
- 30cm 이상의 적설에 필요한 500hPa의 기온은 조건(–35℃ 이하)을 충족하지 못했음

▶ **가이던스의 적설 분포표 조건보다 많은 적설이 기록됐다.**

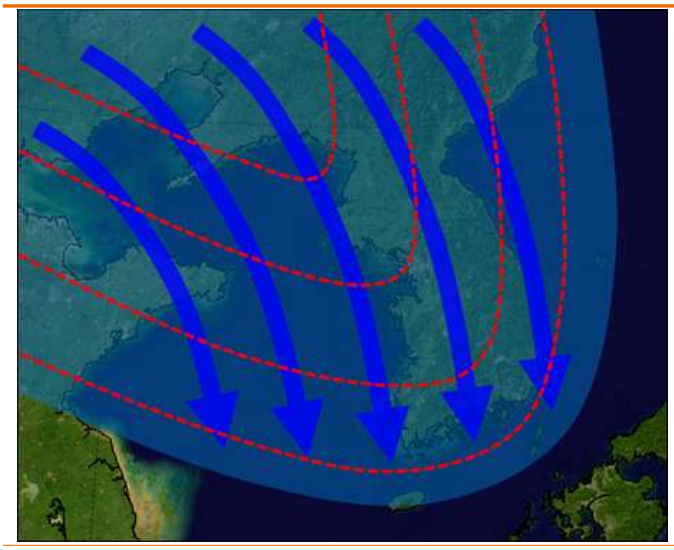
- 가이던스를 적용한 결과 전라서해안 지역으로 많은 곳 20cm 이상 적설의 조건을 대부분 만족하였으나, 일부 지점인 해제(무안)에는 국지적으로 수렴이 지속되면서 가이던스 조건을 초과하는 30cm 이상의 적설이 기록됨

● **쟁점 2) 육풍과 종관풍이 모두 강해 수렴대가 정체한다면 더욱 많은 적설로 이어진다.**

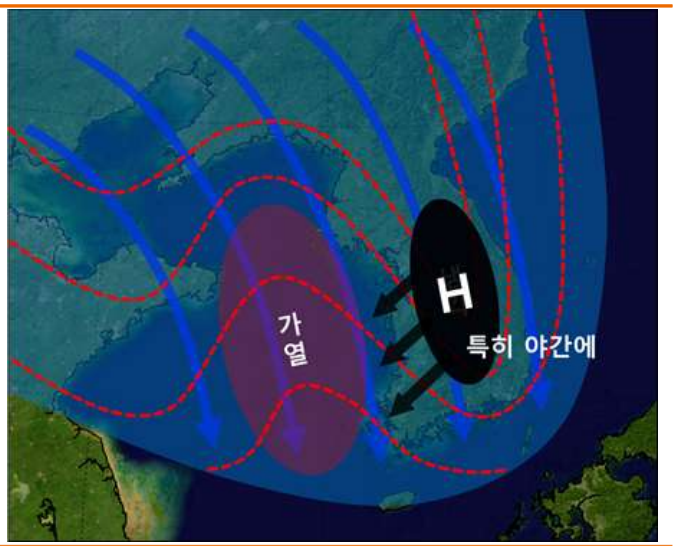


12월 25~26일 광주 AWS 시계열

- 25일부터 북쪽에서 한기가 남하하기 시작하여, 광주의 25일 낮최고기온이 영상을 회복하지 못한 채 26일까지 한기가 축적되면서 전라권서부 지역으로 북동풍의 육풍이 강화되기 시작함



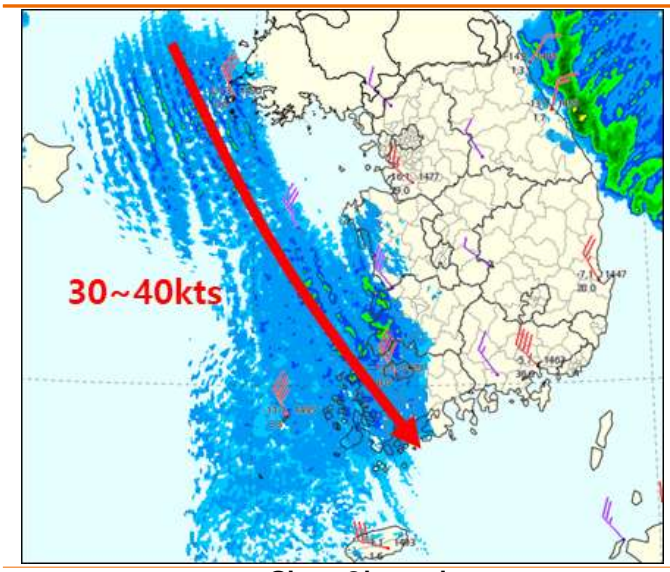
대륙고기압 확장기의 기류와 하층 등온선



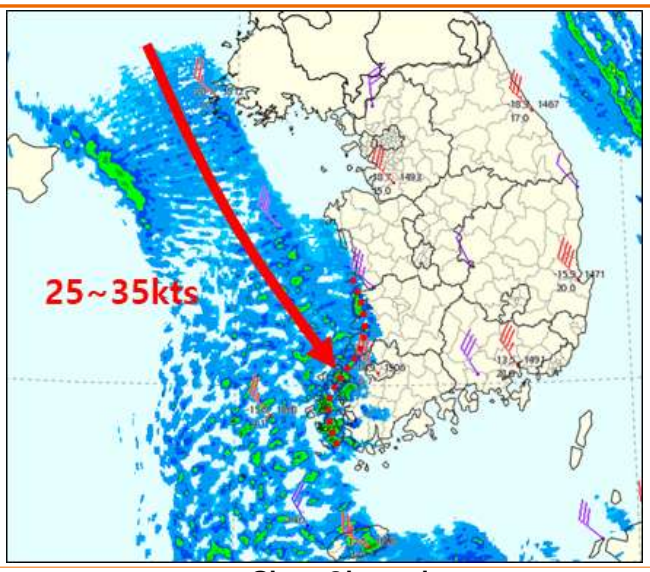
대륙고기압 변질기의 기류와 하층 등온선

- 한기가 강하게 남하하는 시기인 대륙고기압의 확장기에는 종관풍인 북서풍이 우세하게 나타나나, 어느 정도 시간이 지나 한기의 남하가 약해지는 변질기가 되면 내륙에는 이류 된 한기의 축적 및 복사냉각에 의해 국지 고압부가 발달하게 되고, 그로 인하여 육풍이 불어 종관풍인 북서풍과의 수렴을 하게 되어 수렴대가 발생하게 됨
- 일반적으로 대륙고기압 변질기에는 서해상의 종관풍의 강도가 약해지고 육풍이 강화되면서 육풍 수렴대는 내륙에서 해상으로 이동하게 되고, 수렴대에 동반된 강설의 강도는 매우 강하지만 지속시간이 짧아 대설경보 수준의 20cm 이상의 적설 기록은 어려움

▶ **한기 남하의 지속시간이 길어지면 육풍수렴대의 정체 가능성을 고려해야 한다.**

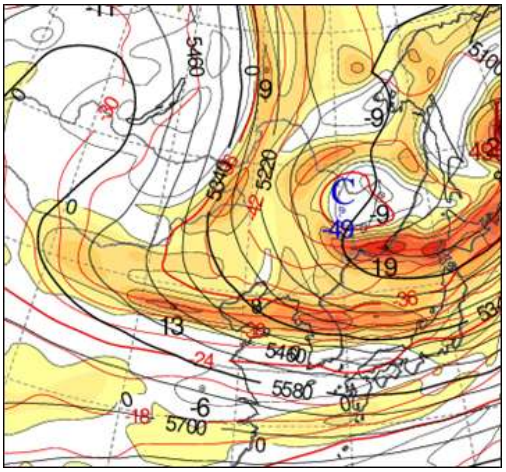
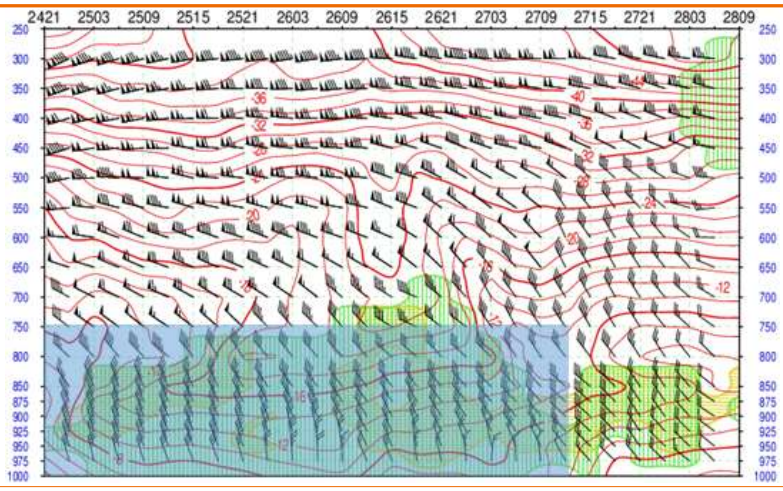


12월 25일 09시
850hPa GTS 바람과 레이더 중첩



12월 26일 09시
850hPa GTS 바람과 레이더 중첩

- 한기가 남하하는 첫째 날인 25일은 서해상으로 850hPa 30~40kts 풍속의 강한 한랭이류가 있었으며, 둘째 날에도 서해상에 25~35kts의 강한 한랭이류가 지속되면서 종관풍과 육풍의 수렴대가 해상으로 이동하지 않고 전라서해안에서 정체하면서 무안 지역에 33.0cm의 매우 많은 적설이 기록되었음

	
12월 25일 21시 500hPa 예상장	**12월 24일 21시 이후 광주 연직시계열 예상도**

- 500hPa 상층에서 장파 형태의 기압골이 우리나라 북쪽으로 지나가는 형태를 예상하여 북쪽 한기의 남하 영향을 오랜 기간 받을 수 있는 기압계 패턴을 보였으며, 연직시계열 예상도에서도 700hPa 이하 하층으로 강한 북서풍과 함께 한기 영향을 받는 기간이 48시간 이상으로 25~26일 모두 강한 한랭이류가 예상되었으므로 육풍 수렴대의 정체 가능성을 고려할 수 있는 상황이었음
- 수렴대가 정체한 대부분 지역으로 가이던스를 적용한 최대 적설인 20cm 이상을 보였으나, 일부 한 지역에서 30cm 이상이 나타난 상황으로 전체적으로 가이던스 적용과 예보는 적절했다고 판단됨
- 하지만 이번 사례와 같이 오랜 시간 육풍 수렴대의 정체가 예상될 시 가이던스 상의 해기차와 기온 조건보다 일부 지점에서는 한 단계 많은 적설이 나타날 수 있음을 고려할 필요가 있겠음

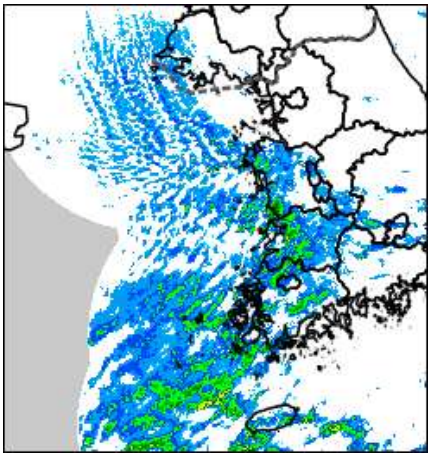
3-8. 2022년 12월 22~23일 사례

상층 절리저기압 정체로 강설 지속시간 증가

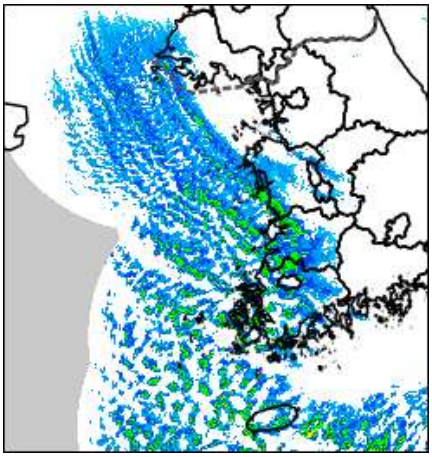
기압골지원형 전라내륙 50cm 이상 적설(광주 신적설 극값 2위)

1. 예보와 실황은?

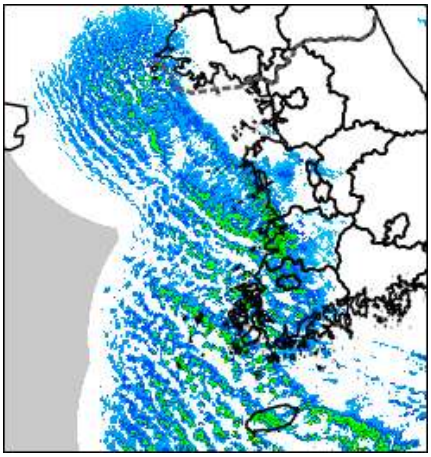
예보(12월 21일 17시 발표)	실황(12월 22~23일)
- (22~24일) 많은 곳 전북, 전남권서부 30cm 이상	- 복흥(순창) 63.7cm, 강진면(임실) 57.2cm - 정읍 45.6cm, 광주 40cm



12월 22일 09시 레이더 영상



12월 23일 03시 레이더 영상



12월 23일 12시 레이더 영상

2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 내륙까지 광범위하게 많은 눈이 내리게 된 원인은 무엇인가?**
- **쟁점2) 절리저기압 본체에 의한 기압골지원형 대설 시 지속시간은 왜 길어지는가?**

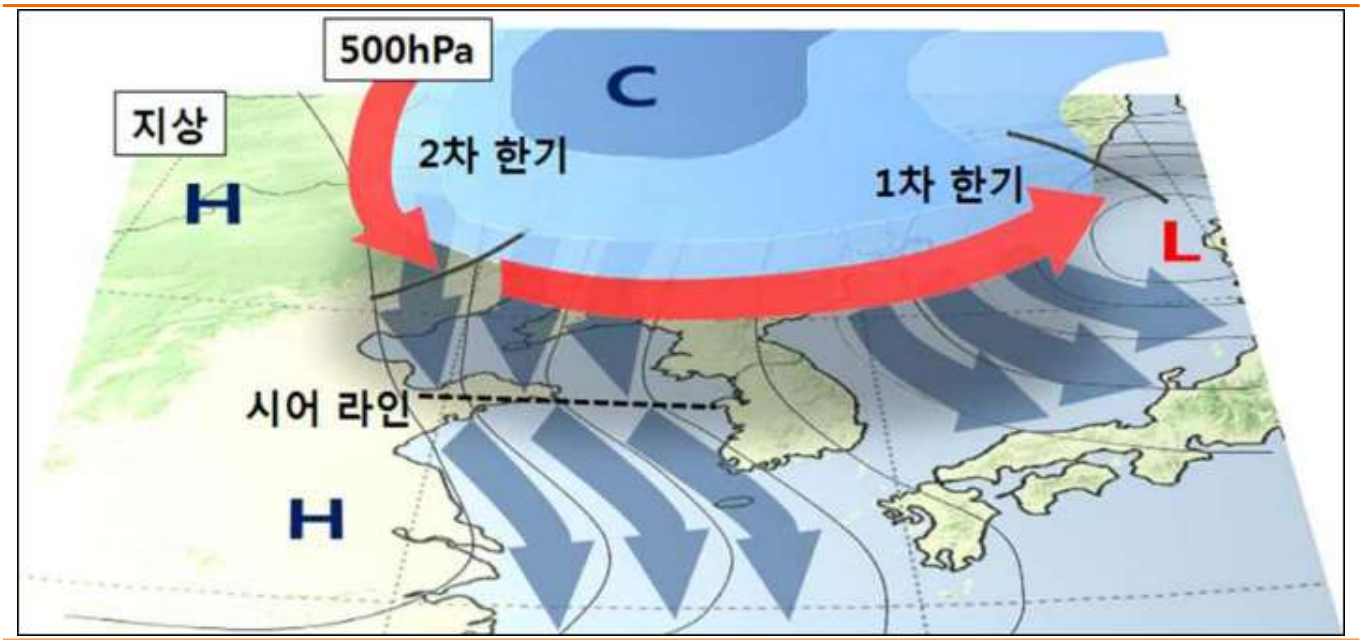
3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 내륙까지 광범위하게 많은 눈이 내리게 된 원인은 무엇인가?**

- 서해안형 대설 유형 중 구름의 발달이 국지적인 수렴에 의해 강화되는 지형수렴형과 육풍수렴형과는 다르게 **기압골지원형의 경우** 서해상에서 강하게 발달한 해기차 구름대가 상층 기압골의 도움을 받아 그대로 내륙으로 유입되는 유형이기 때문에, **내륙을 포함한 광범위한 지역으로 대설을 유발**하는 유형임

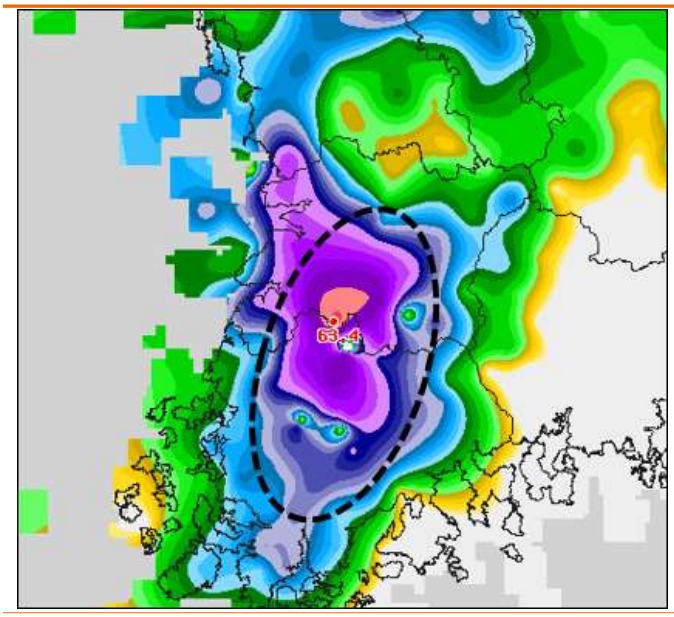
- 기압골지원형 대설 유형의 기압계 모식도를 보면 우리나라 북쪽에 상층 절리저기압이 위치한 가운데 절리저기압에 동반된 기압골이 여러 차례 돌아가면서 지속적으로 북쪽의 찬 공기를 남하시키게 되는데, 이 과정에서 서해상으로 2차 기압골의 유입 시 기압골의

도움을 받아 서해상의 해기차 구름이 내륙으로 유입되게 됨. 또한 기압골지원형의 경우 모식도에서도 알 수 있듯이 일반적으로 상층의 기온이 낮아, 불안정이 크므로 구름이 더 강하게 발달하여 많은 눈을 내릴 수 있음

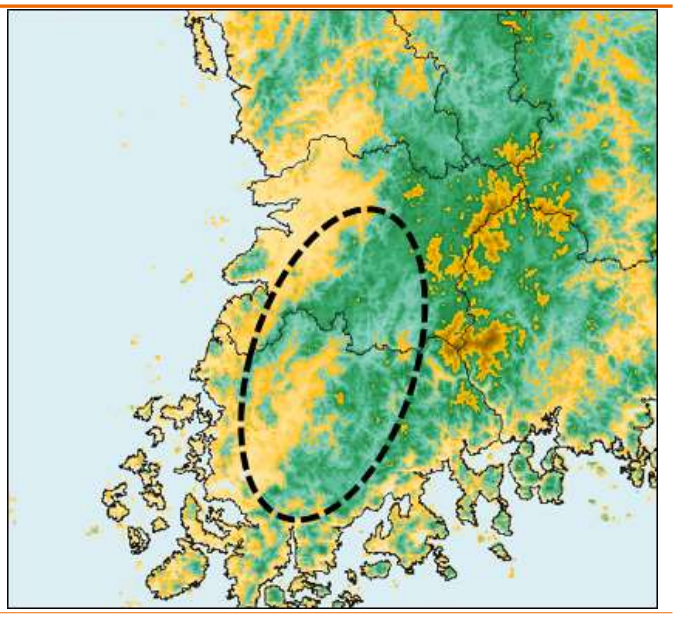


기압골지원형 대설 유형의 기압계 모식도

- 이번 사례에서도 상층 기압골의 지원을 받으면서 서해상에서 발달한 해기차 구름대가 전라내륙까지 깊게 유입이 되었는데, 23일 최심적설 분포도와 지형고도 그림을 보면 **전라내륙을 위주로 많은 적설**이 나타난 것을 알 수 있고, 특히 소백산맥과 노령산맥의 영향으로 지형 효과가 크게 나타나는 지역에서 적설이 많아진 것을 알 수 있음



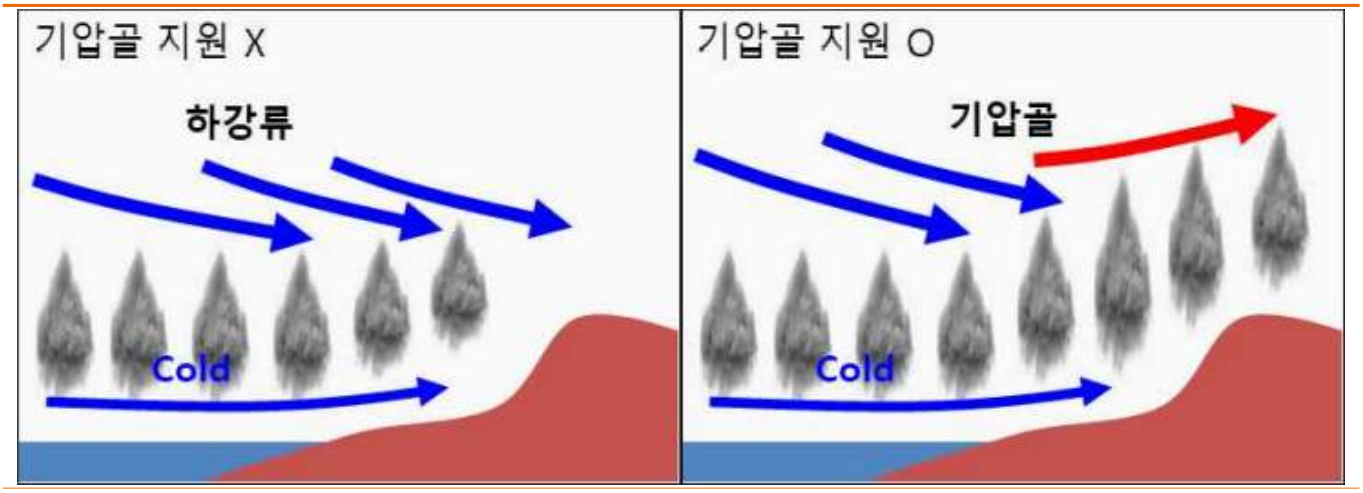
12월 23일 최심적설 분포도



지형고도

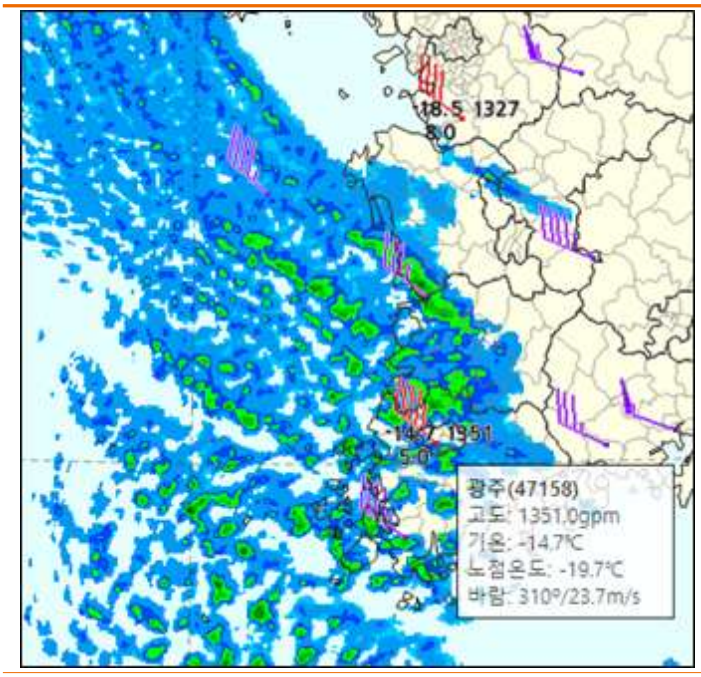
- 기압골의 지원을 받는 경우 모식도 그림과 같이 서해상에서 발달한 구름대가 내륙으로 유입되더라도 상층에서 대류를 억제하는 힘이 약하기 때문에 내륙에서도 구름이 높게 발달하여 세력을 유지할 수 있음. 또한 **하층으로 유입되는 바람의 풍속이 강하면 강할**

수록 산지가 많은 내륙에서는 지형 효과가 탁월하게 나타나면서 오히려 해상에서보다 구름이 더 발달하여 많은 눈이 내릴 수 있음

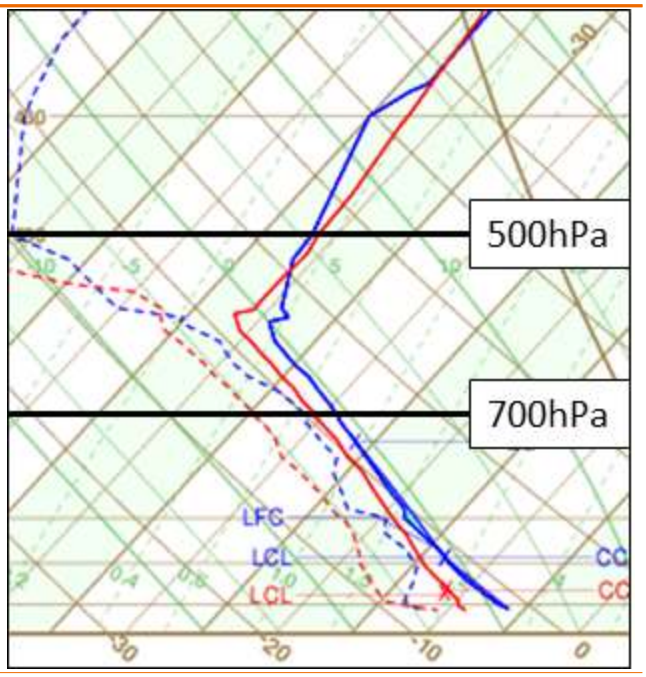


기압골 지원 여부에 따른 구름의 발달과 유입의 모식도

- 23일 03시 850hPa GTS 관측자료를 보면 광주 지점의 **850hPa 풍향이 310˚로 내륙으로 유입되기 좋았고, 풍속도 45kts 이상으로 매우 강하게** 나타난 것을 알 수 있음. 일반적으로 850hPa 풍속이 30kts 이상이면 내륙으로 유입될 수 있으나 이번 사례는 그보다 더욱 강한 바람이 유입되면서 내륙의 산맥 부근에서 **지형 효과까지 탁월하게 나타난 것**으로 분석할 수 있음



12월 23일 03시 850hPa GTS + 레이더 영상



12월 22일 21시 광주 단열선도

- 구름의 발달을 확인하기 위해 22일 21시 내륙 지역인 광주에서 관측된 단열선도를 확인해 보면 700hPa 고도의 기온은 –25.9℃, 500hPa 기온은 –36.5℃로 나타나 상층으로 찬 공기가 남하하여, 불안정한 구조를 보여주면서 **포화층의 고도가 4km 이상으로 높게 발달**한 것을 알 수 있음

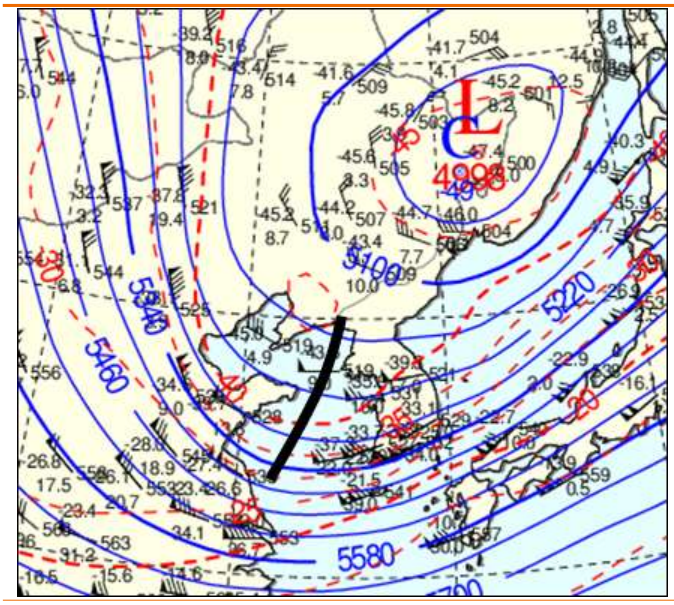
<table>
<tr><th>적설</th><th>850hPa
해기차</th><th>850hPa
기온</th><th>700hPa
해기차</th><th>700hPa
기온</th><th>500hPa
기온</th></tr>
<tr><td>1~5cm</td><td rowspan="4">≥15℃</td><td rowspan="4">≤-8℃</td><td><22℃</td><td rowspan="2">>-20℃</td><td rowspan="4">>-35℃</td></tr>
<tr><td>5~10cm</td><td rowspan="2">≥22℃</td></tr>
<tr><td>10~20cm</td><td rowspan="2">≤-20℃</td></tr>
<tr><td>20~30cm</td><td rowspan="2">≥30℃</td></tr>
<tr><td>〉30cm</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>≤-35℃</td></tr>
</table>

호수 효과에 의한 강설 시 기온과 해기차 조건(6시간 이상 지속)에 따른 적설 분포

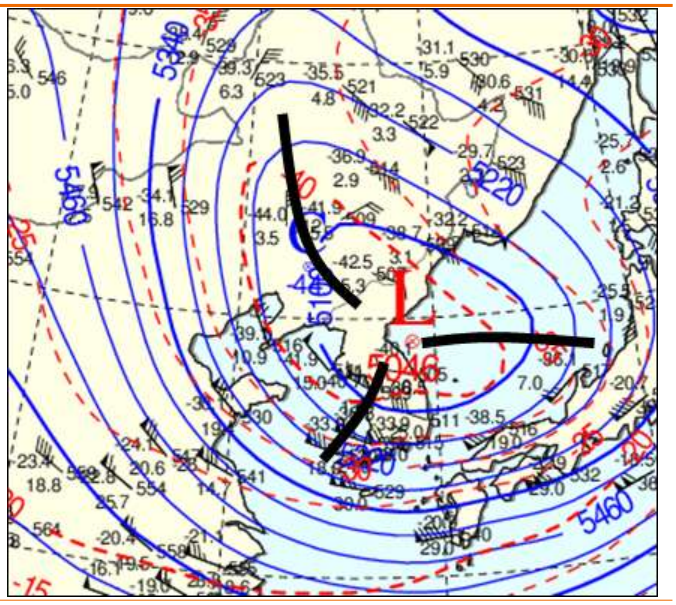
- 광주 지점에서 관측된 고층 자료를 서해안형 강설 가이던스의 기온과 해기차 조건에 대입해보면 가장 높은 범주인 30cm 이상의 조건에 해당하게 되어, 해기차에 의한 서해안형 강설 중 **가장 많은 눈이 올 수 있는 잠재력을 가지고 있었음**을 알 수 있음

- **쟁점2) 절리저기압 본체에 의한 기압골지원형 대설 시 지속시간은 왜 길어지는가?**

- 기압골지원형 대설 유형은 기압계 모식도에서 보았듯이 상층 절리저기압의 영향을 받기 때문에 기압계가 정체하게 되고, 북쪽의 찬 공기를 오랜 시간 남하시키게 되면서 강설의 지속시간도 길어져 적설이 많아질 수 있음

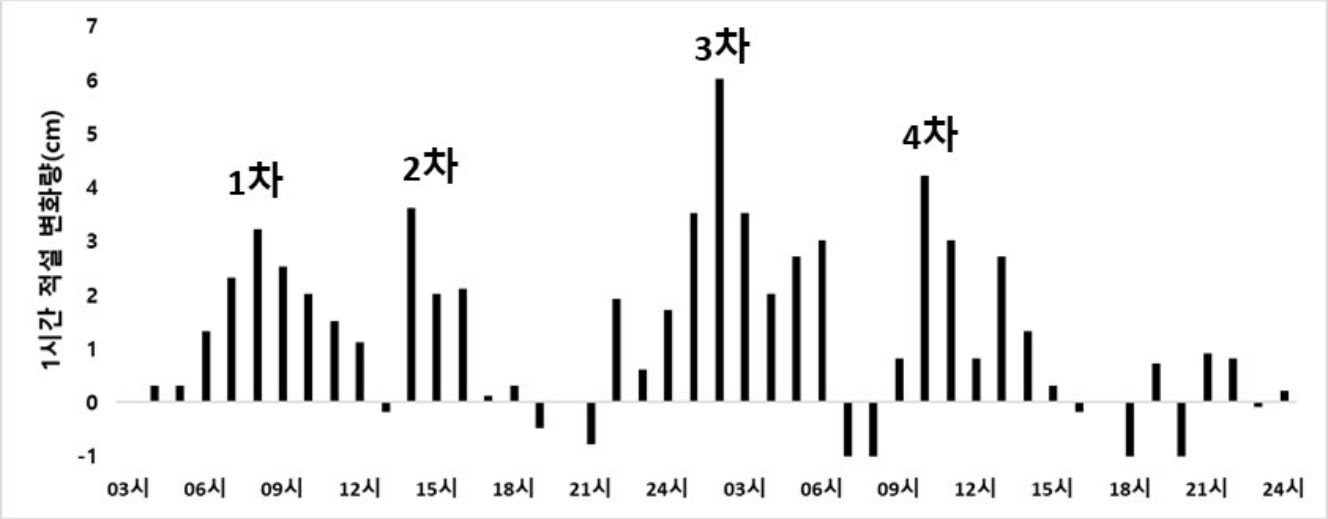


2022년 12월 17일 21시 500hPa 일기도



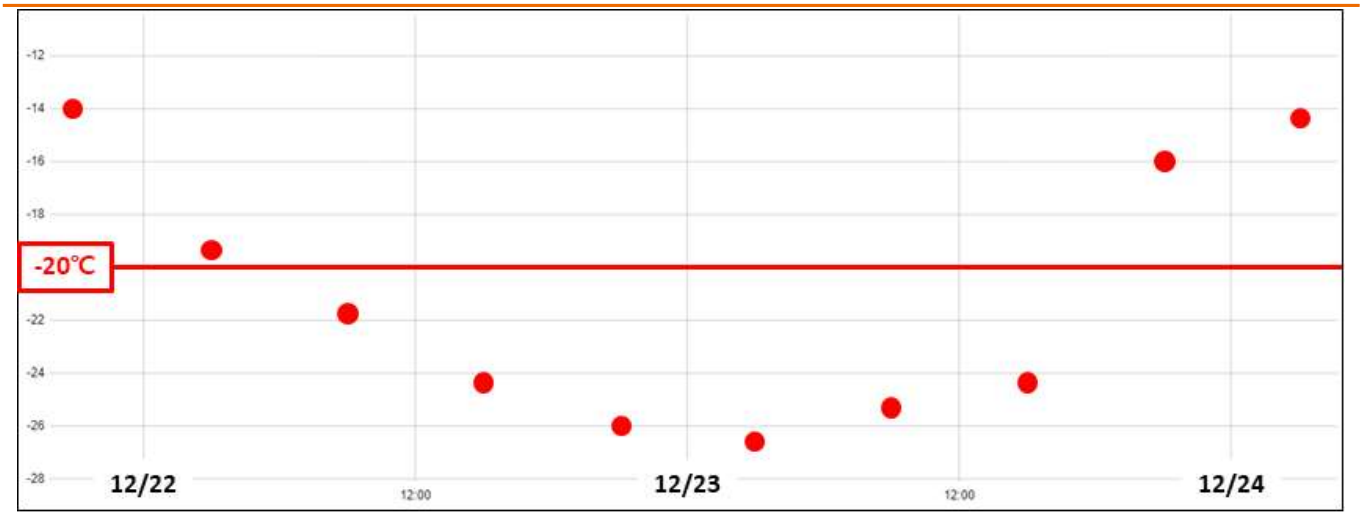
2022년 12월 22일 21시 500hPa 일기도

- 이렇게 긴 지속시간이 특징인 기압골지원형 대설 유형 안에서도 상층 절리저기압의 위치에 따라 지속시간에 차이를 보일 수 있는데, 2022년 12월 17일 사례와 같이 500hPa 일기도에서 상층 절리저기압이 우리나라 북쪽에 위치하면서 단발적으로 2차 기압골을 남하시키는 경우보다 이번 사례와 같이 **절리저기압의 본체가 우리나라에 위치하면서 기압골이 여러 차례 돌아가는 경우 강설 지속시간이 더욱 길어질 수 있음**, 실제 2022년 12월 17일 사례에서도 강하고 많은 눈이 내렸지만 강설 지속시간이 24시간을 넘지는 않아 이번 사례보다는 적은 양의 눈이 내렸음



2022년 12월 22~23일 복흥(순창) 지점 적설계의 1시간 적설 변화량 시계열

- 이번 사례에서 가장 많은 적설이 기록된 복흥(순창) 지점의 1시간 적설 변화량을 살펴보면 **총 4번의 강설 피크**가 나타났는데, 절리저기압에 의한 기압골이 총 4번 영향을 준 것으로 분석할 수 있음. 이렇게 상층 기압계가 정체되면서 **강설 지속시간이 무려 48시간에 가깝게** 길게 나타나면서 매우 많은 양의 적설을 기록하게 됨



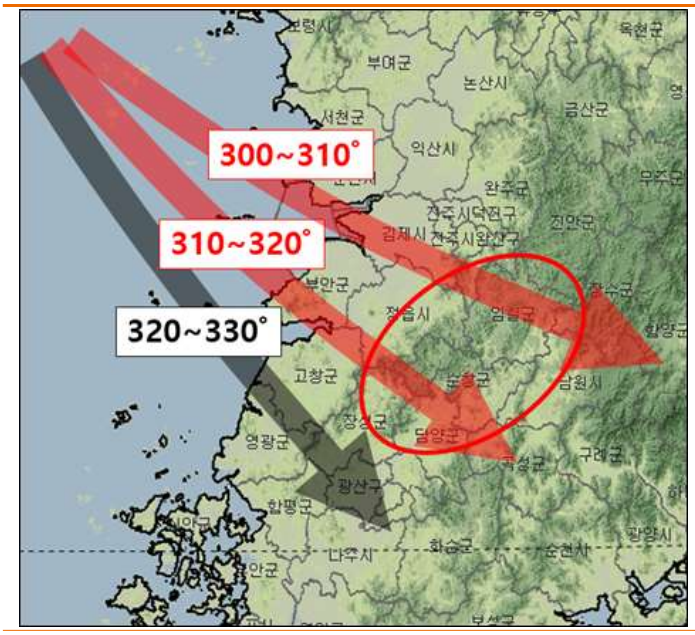
2022년 12월 22~23일 광주 지점 700hPa 기온 관측값 시계열

- 또한, 서해안형 강설 가이던스에서 대설을 판단하는 지표 중 하나인 700hPa 기온(-20℃ 이하일 경우 10cm 이상 적설)을 광주 고층 실황 자료에서 시계열로 확인해보게 되면 길었던 **강설 지속시간의 대부분이 -20℃ 이하**의 매우 낮은 상태로 유지되면서, 강설 시간의 대부분이 매우 강한 강도의 눈으로 내릴 수 있는 조건이었음을 알 수 있음

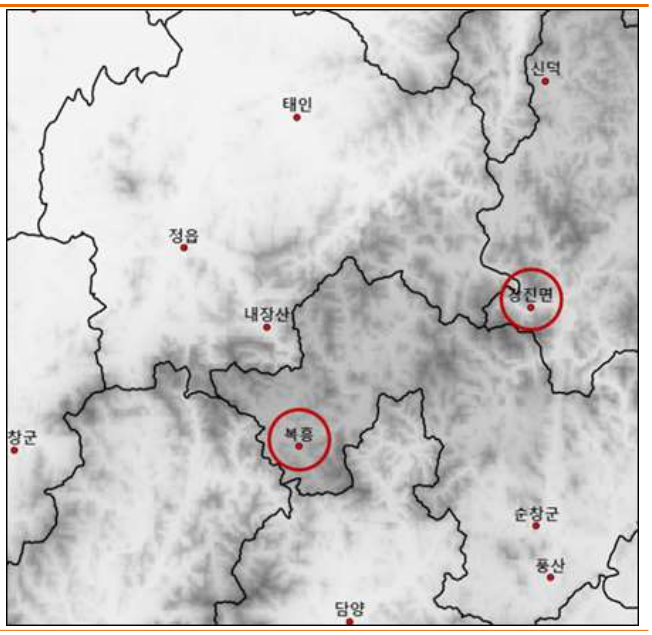
4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **신규 설치된 적설 관측 지점의 지형 효과를 고려했어야 한다.**

- 이번 사례에서 적설 예보는 전라도 지역으로 최대 30cm 이상의 충분히 많은 양의 적설을 예보했으며, 대부분 지역에서의 적설은 예보를 크게 벗어나지 않았음, 하지만 순창(복흥), 강진면(임실)과 같은 일부 지점에서 **60cm에 육박하는 기록적인 적설**이 기록되었는데, 이 지점들은 최근에 설치된 신규 적설 관측 지점으로 서해상에서 해기차 구름대가 강하게 유입될 시 **지형 효과가 극대화될 수 있는 위치**에 설치되었음



850hPa 풍향에 따른 강설 집중구역 모식도



지형지도에서 복흥과 강진면 지점 위치

- 이번 사례는 850hPa의 풍향이 310° 내외로 장시간 유지될 것으로 예상했었기 때문에 강설 집중구역 모식도 그림에서 알 수 있듯이 순창과 임실 지역을 비롯한 전북내륙에 강설이 집중될 수 있는 상황이었고, 특히, 40kts 이상의 강한 풍속을 동반하고 구름이 높게 발달할 수 있는 조건이었기 때문에 소백산맥 풍상측 뿐만 아니라 산맥의 풍하측까지도 많은 눈이 내릴 수 있는 상황이었음

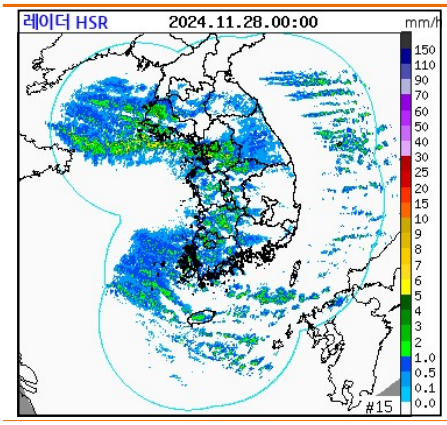
- 이러한 상황에서 복흥과 강진면 지점의 경우 지형지도에서 위치를 확인해보면 **소백산맥 자락 한 가운데 위치를 하고 있기 때문에 지형효과가 극대화되기 좋은 조건**임을 알 수 있음. 그동안은 적설 지점들이 대부분 풍상측이나 풍하측에 위치를 하고 있었으나 최근 추가되는 지점들은 산지 부근에 설치되는 경우가 있으므로, 과거 발생했던 유사사례들의 적설보다 지형 효과에 의한 적설이 더욱 늘어날 가능성이 높으므로 예보 분석 시 이에 대한 유의가 필요하겠음

11월 절리저기압에 의한 해기차 강설 이틀 동안 지속
서울을 비롯한 중부지방 40cm 이상 기록적인 대설

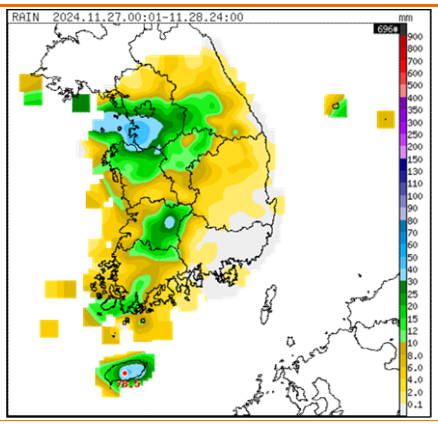
1. 예보와 실황은?

예상 적설(11월 26일 17시 발표)	실황(11월 27일~28일)
- (26~28일) 수도권 많은 곳 20cm 이상 강원도 많은 곳 30cm 이상 충청권 많은 곳 15cm 이상	- 백암(용인) 47.5cm 관악(서울) 41.5cm 위성센터(진천) 40.6cm 대화(평창) 29.4cm

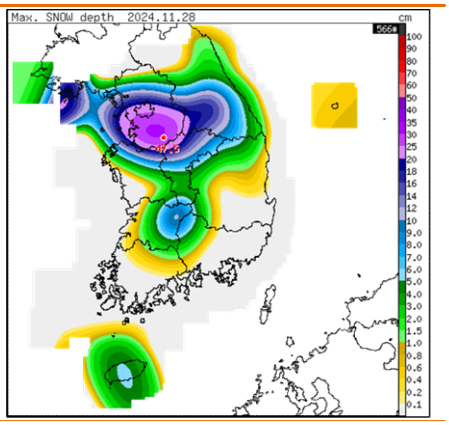
< 11월 일최심적설(cm) 극값 1위 경신 : 서울 28.6(기존 12.4), 수원 43.0(기존 8.5), 인천 26.0(기존 8.0) >



11월 28일 00시 레이더



11월 27~28일 누적강수량



11월 28일 최심적설

- 중부지방을 중심으로 해기차 강수가 이틀 동안 지속적으로 유입되면서 50mm 이상의 많은 강수량과 함께 11월에는 상상할 수 없었던 40cm 이상의 기록적인 적설이 기록되었다. 기존 11월 적설 극값을 뛰어넘는 충분히 많은 적설을 예보했으나 40cm 이상의 적설은 다시 돌아봐도 예상하기 어려운 수치이다.

2. 쟁점사항은?

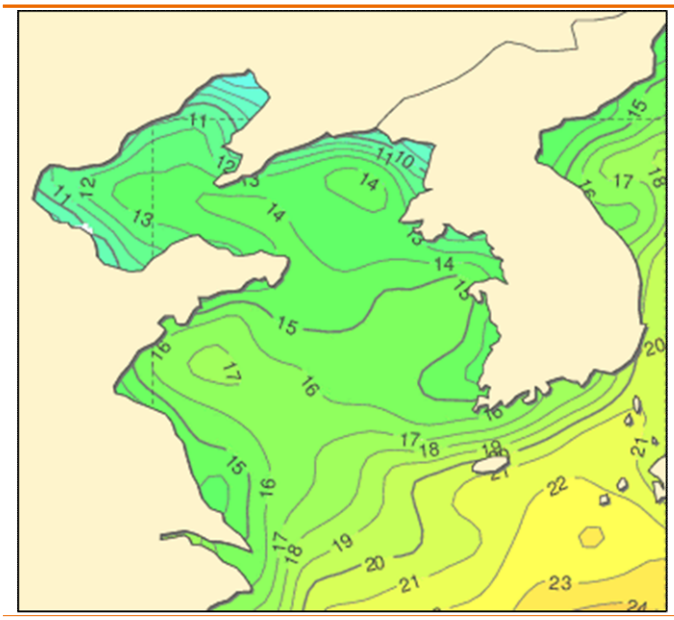
- **쟁점1) 해기차 강수인데 강수량이 많았던 원인은 무엇인가?**
- **쟁점2) 해기차 강수인데 왜 전라권이 아닌 수도권에 집중되었는가?**

3. 주요 분석내용

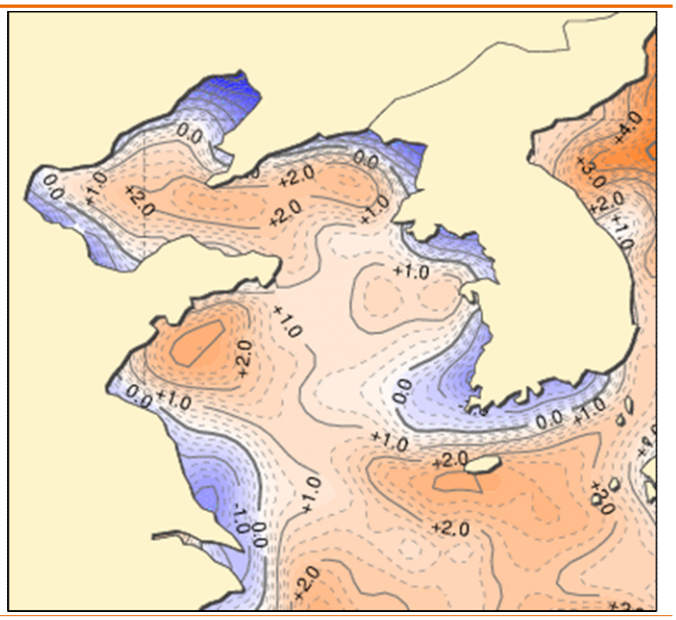
- **쟁점1) 해기차 강수인데 강수량이 많았던 원인은 무엇인가?**

- 강수량은 강수강도와 강수 지속시간의 곱으로 정해진다. 해기차 강수에서 강수강도는 700hPa 해기차의 크기로 분석할 수 있으며, 여기에 지속시간을 고려하여 강수량을 예보할 수 있다. 여기서 해기차는 해수면온도와 700hPa 대기 중층의 기온 차이를 말한다.

즉, 해수면 온도가 높고 700hPa의 기온이 낮을수록 강수강도는 강해지게 된다.

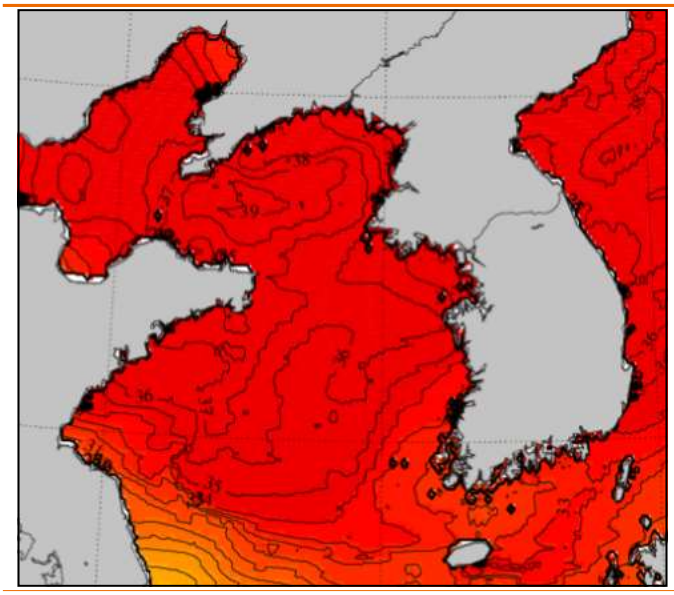


11월 27일 09시 해수면 온도

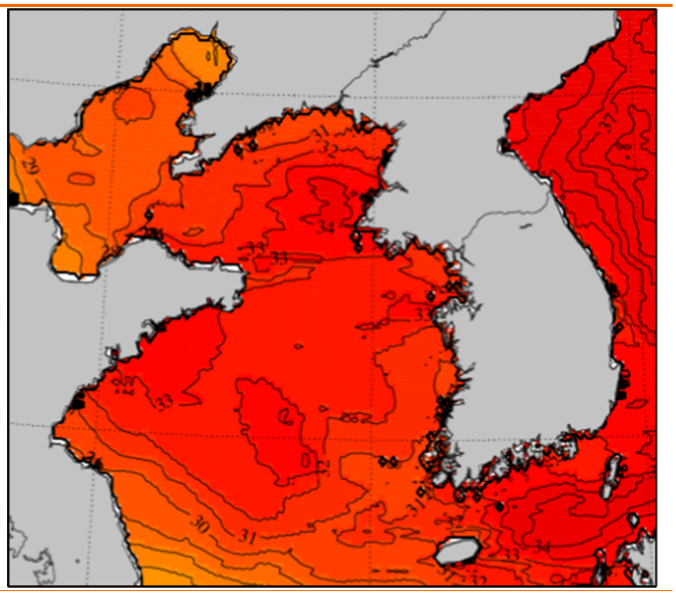


11월 27일 09시 해수면 온도 편차

- 일반적으로 서해상에서 해기차 강수가 발생하는 시기인 11월~3월 중 11월의 해수면 온도가 가장 높은 것은 당연한 사실이다. 해기차 강수가 발달할 때 해수면 온도가 높으면 해상에서부터 많은 수증기를 공급받을 수 있고, 같은 강도의 찬 공기가 내려온다고 하면 해기차의 크기도 더 커질 수밖에 없다. 특히, 2024년은 해수면온도가 유난히 높았던 해라 위 그림의 11월 27일 해수면 온도 분포도와 편차 분포도를 보게 되면 평년 대비 해수면 온도가 1~2도 정도 더 높았음을 알 수 있다. 따라서, 이번 사례는 높은 수온으로 많은 수증기를 머금을 수 있었으며, 해기차가 커지기에도 유리한 조건을 가지고 있었다.



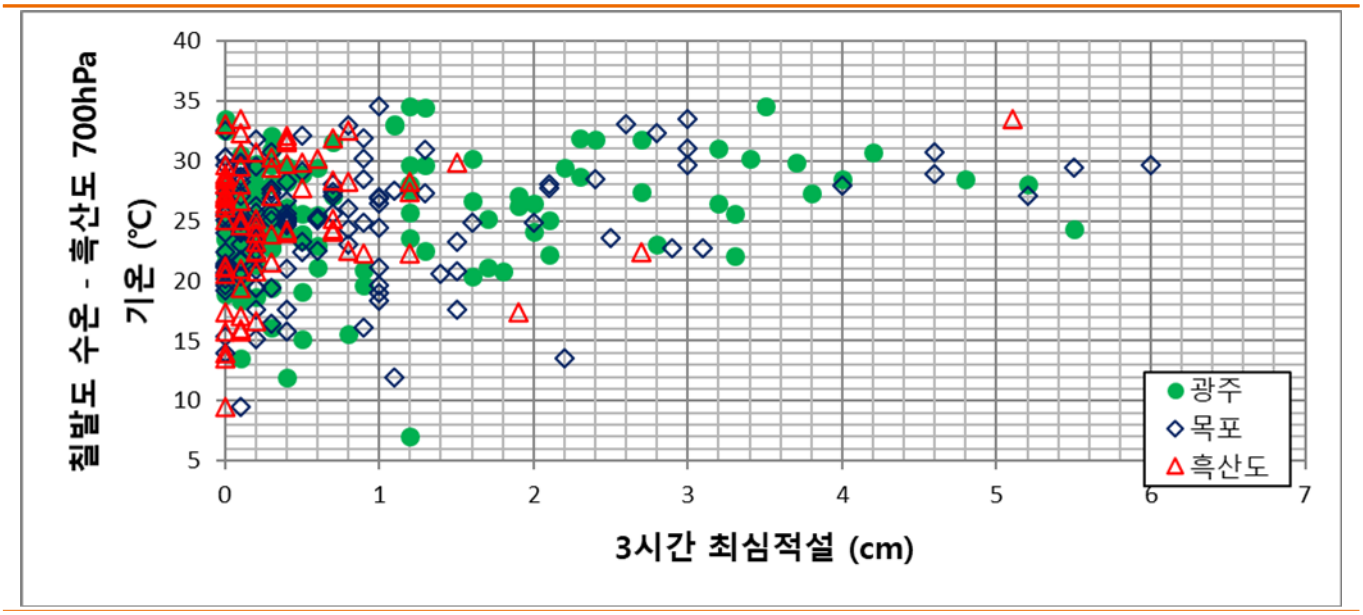
11월 27일 09시 700hPa 해기차



11월 28일 03시 700hPa 해기차

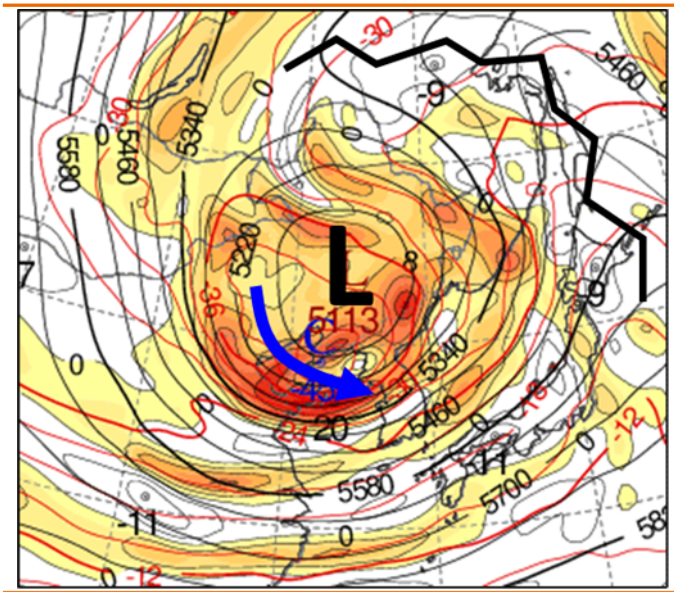
- 이러한 이유로 이번 27일과 28일의 700hPa 해기차는 매우 높게 나타났는데, 이것이 이번 사례에서 강수량이 많을 수 있었던 첫 번째 원인이다. 위 그림의 27일과 28일의

700hPa 해기차 분포도를 보면 서해상 전역이 30도 이상의 빨간색 영역으로 뒤덮여 있으며, 특히 서해중부해상에는 27일에 36도 이상, 28일에 33도 이상으로 매우 높은 해기차가 나타났다. 아래 그림에서 과거 14년 동안 전라권의 해기차 강설 시 700hPa 해기차가 35도를 초과한 적이 전혀 없었던 것을 고려하면, 이번 사례의 서해중부해상의 해기차는 이례적으로 높은 수치였음을 알 수 있다.

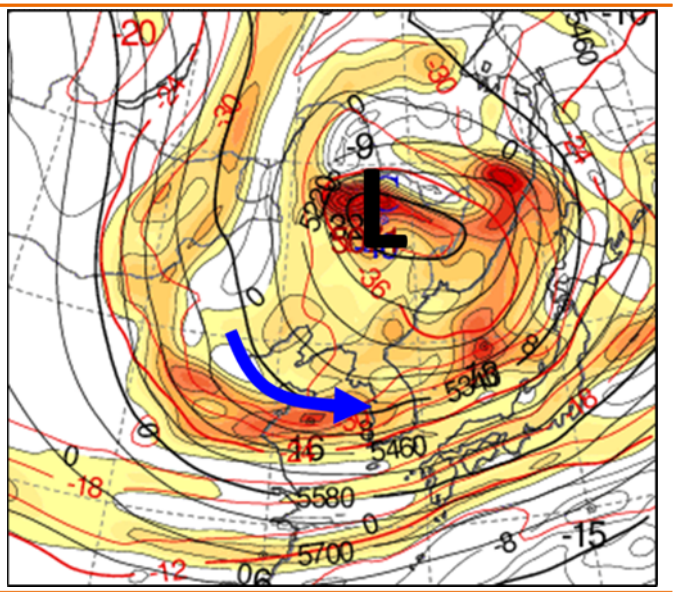


2003~2017년 전라권 해기차 강설 사례의 700hPa 해기차와 3시간 최심적설 분포(327건)

- 이번 30도 이상의 700hPa 해기차는 기존 가이던스에서도 전라권 기준으로 12시간 동안 20cm 이상의 가장 많은 눈이 내릴 수 있는 해기차 조건이기 때문에 이번에도 강수량과 적설에 대한 포텐셜은 무한한 상황이었음을 알 수 있다. 실제로 이번 사례에서 강수량이 많았던 지역들은 12시간 강수량이 20~30mm를 기록할 정도로 겨울철 해기차 강수치고는 매우 강한 강도를 보여주었다.

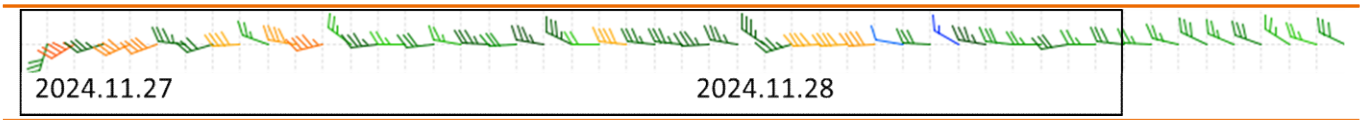


11월 27일 03시 500hPa 일기도



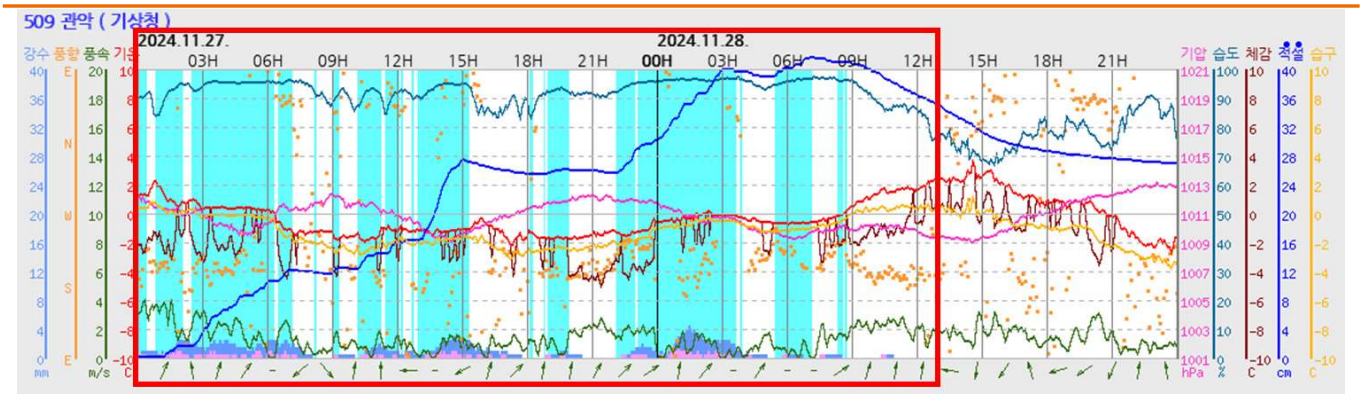
11월 28일 03시 500hPa 일기도

- 이번 사례에서 강수량이 많았던 두번째 원인은 이틀간 지속된 강수 지속시간이다. 위 그림을 보면 27일과 우리나라 북쪽으로 상층의 절리저기압이 위치한 가운데, 전면에는 강한 기압능이 가로막고 있어 저기압이 빠져나갈 길이 없는 모습이다. 28일은 이러한 기압능에 막혀 저기압은 빠져나가지 못하고 계속 우리나라 북쪽에 머물면서 서해중부해상으로 강한 찬 공기를 지속적으로 남하시키게 되었다.



11월 27~28일 덕적도 연직바람관측 시계열(1.4km 고도)

- 위 그림은 경기만에 위치한 덕적도 지점의 27~28일 연직바람관측 시계열 자료이며, 관측 고도는 850hPa 고도와 가까운 1.4km이다. 중부지방으로 해기차 강수가 유입되기 좋은 조건인 30kts 이상 서풍 계열의 바람이 27일부터 28일 오전까지 경기만에 지속적으로 유입된 것을 확인할 수 있다. 아래 그림의 서울 관악 AWS 지점의 27~28일 시계열 자료에서도 27일부터 28일 오전까지 특별한 소강상태 없이 강수가 지속된 것을 알 수 있으며, 이 기간 동안 관악 지점에는 41.5cm의 매우 많은 적설이 기록되었다.

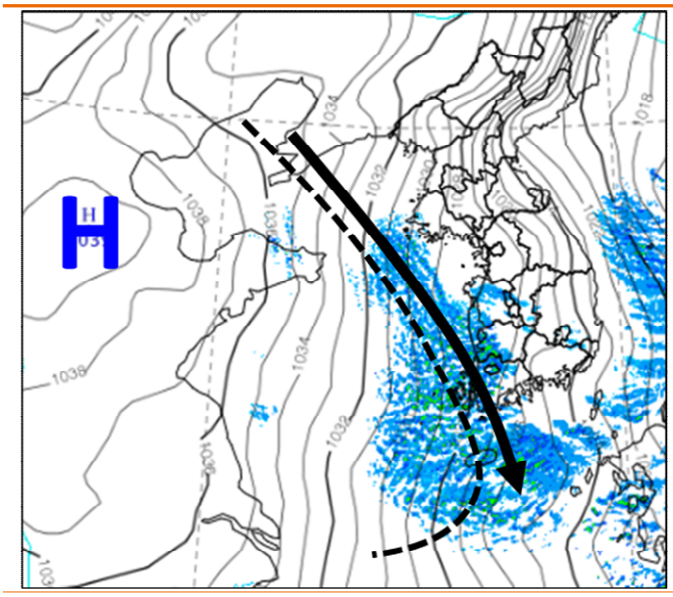


11월 27~28일 관악(서울) AWS 시계열

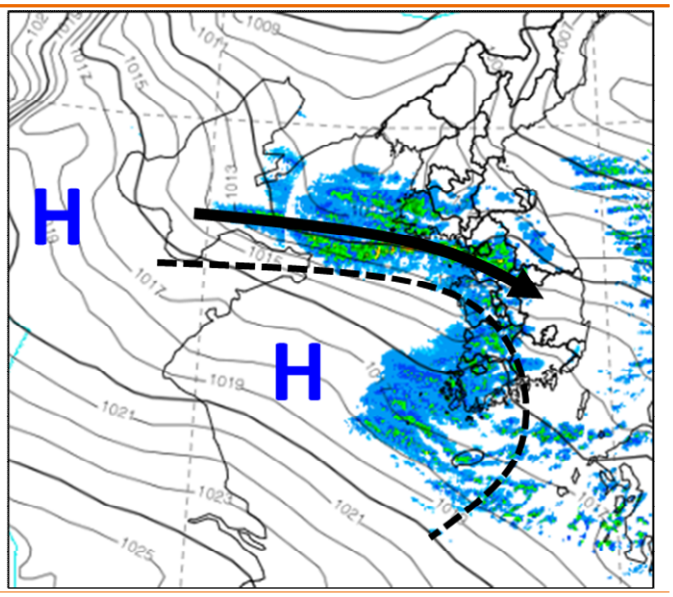
- 다시 정리하면 이번 사례에서 많은 강수량을 기록할 수 있었던 이유는 서해중부해상의 높은 수온과 그에 따른 30도 이상의 매우 큰 700hPa 해기차로, 강수대가 강한 강도로 발달하기 너무나도 좋은 조건이었다. 더불어 기압계가 정체하면서 중부지방으로 해기차 강수대가 이틀 동안 지속적으로 유입될 수 있었던 것이 원인이었다고 분석할 수 있다.

- **쟁점2) 해기차 강수인데 왜 전라권이 아닌 수도권에 집중되었는가?**

- 일반적으로 서해상에서 해기차 강설이 발생하는 경우 북서풍을 타고 전라권으로 강수가 유입된다. 하지만 이번 사례는 서해중부해상으로 서풍이 지속되면서 전라권이 아닌 수도권과 일부 충청권을 중심으로 해기차 강수대가 지속적으로 유입된 것이 특이한 점이었다.



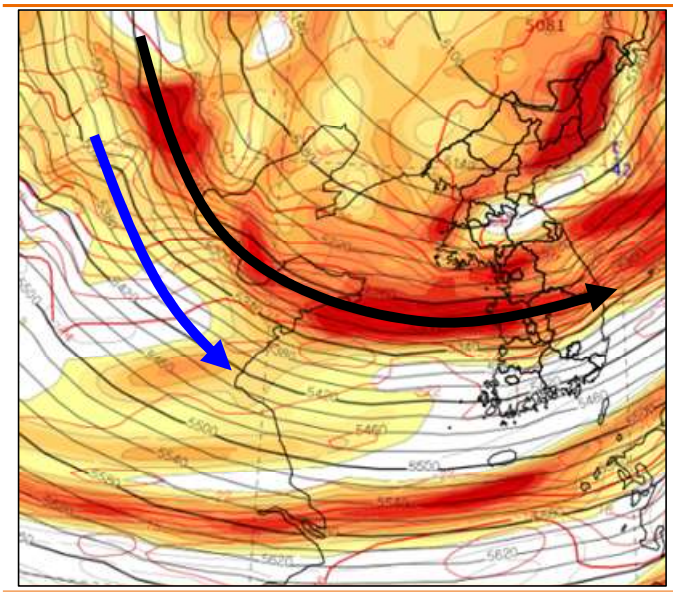
2025년 1월 9일 18시 지상 일기도+레이더



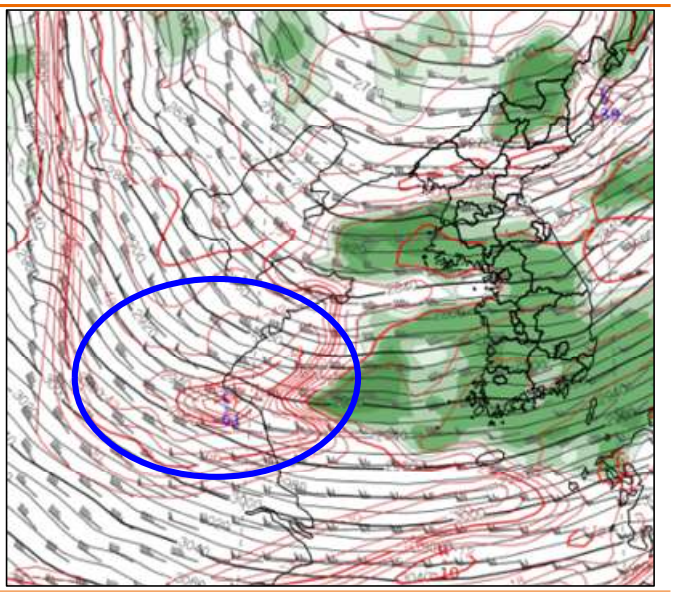
2024년 11월 28일 00시 지상 일기도+레이더

- 위 그림의 왼쪽 사례는 2025년 1월 9일 사례로 전형적인 전라권 해기차 강설 사례의 지상 일기도와 레이더의 모습을 보여주고 있다. 전형적인 서고동저 기압계로 찬 대륙 고기압 중심은 중국 내륙에 위치하면서 그 가장자리에 위치한 서해상으로는 북서풍이 불어 드는 것을 알 수 있다. 하지만 오른쪽의 이번 사례는 중국 내륙의 고기압과는 별개로 서해남부해상으로 고기압이 강하게 배를 내민 모습이다. 이러한 기압계 형태가 유지된 것이 서해중부해상으로 서풍의 기류가 지속적으로 유입된 주요 원인이었다.

- 이러한 특이한 기압계가 나타날 수 있었던 원인은 상층 기압계에서 찾을 수 있다. 찬 대륙 고기압은 대륙의 냉각으로 발달하지만, 이 고기압이 세력을 유지하면서 남쪽으로 이동하기 위해서는 상층의 침강역이 동반되어야 한다. 즉, 상층 침강역의 위치나 강도에 따라 대륙 고기압의 위치나 강도가 달라질 수 있다. 이번 사례는 산둥반도 남쪽으로 강한 침강이 지속되면서 배를 내민 형태의 고기압이 유지될 수 있었다.



27일 09시 500hPa 일기도



27일 09시 700hPa 습수+이슬점온도

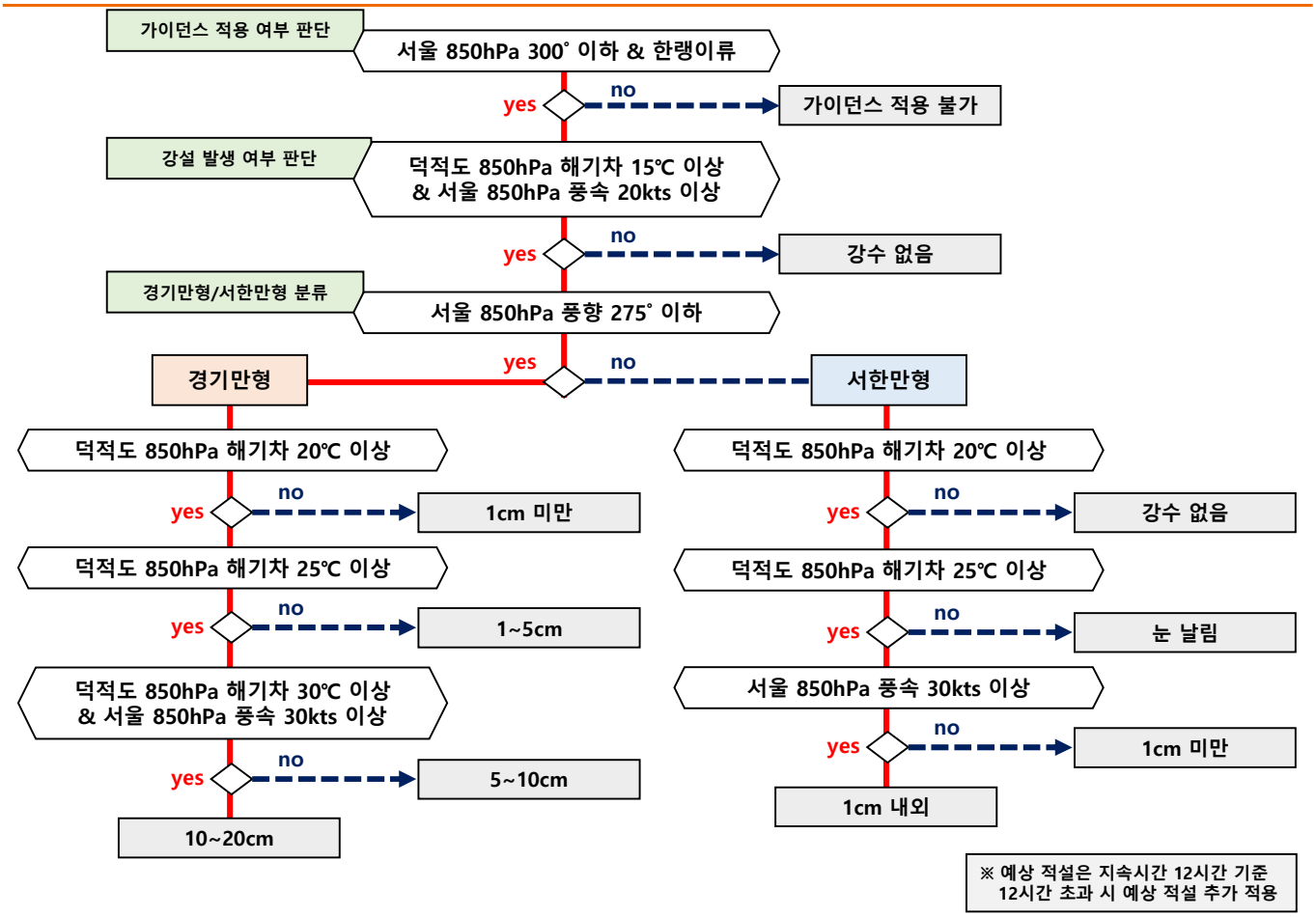
- 위 그림에서 이번 사례의 500hPa 일기도를 보면 절리저기압의 강한 회전 영역(검정색

화살표)의 후면으로 온도선을 강하게 가로지르는 하강류 영역(파란색 화살표)이 나타나는데, 700hPa 습수와 이슬점온도 분포와 함께 비교해보면 이 영역에서 강한 하강류에 의해 건조한 영역이 강화되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 상층 기압계의 흐름이 27일부터 28일 오전까지 이어지면서 지상의 고기압이 서해남부해상에서 배를 내미는 형태가 유지되어 수도권을 중심으로 집중구역이 나타날 수 있었다.

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

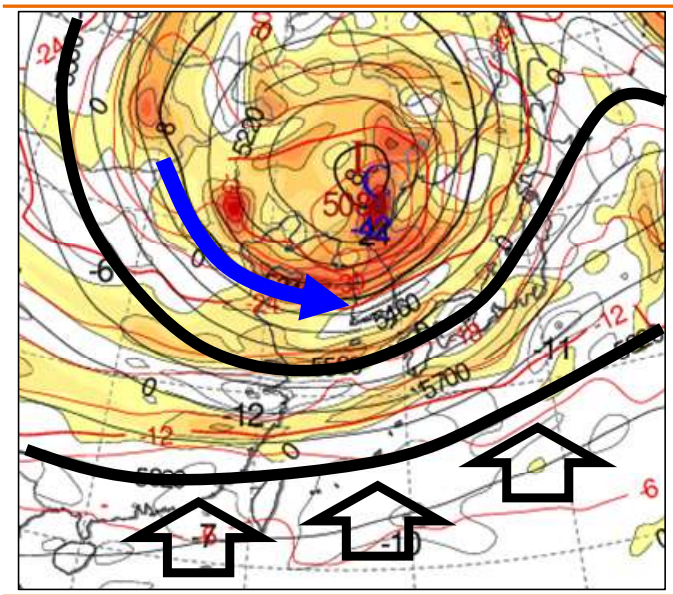
- **수도권도 해기차에 의한 대설이 가능하다. 가이던스를 활용하자.**

- 기존의 서울과 수원의 11월 최심신적설 극값은 각각 12.4cm, 8.5cm에 불과했고, 그동안 해기차 메커니즘에 의해 서울에 대설이 발생한 사례는 거의 없었기 때문에 대설경보 수준의 예보를 하는 것은 매우 어려운 도전이었다. 결국은 해기차와 기류의 유입, 이 두 가지 조건만 충족한다면 적설은 충분히 늘어날 수 있다는 것을 증명해준 사례였다. 따라서 이번 사례를 포함한 과거 서울의 해기차 강설 사례들을 조사하였고, 서울의 해기차 강설 가이던스를 신규 개발하였다. (「Why? How! 지역특화예보」 – 호수 효과에 의한 서울 강설 가이던스 참고) 아래 그림은 가이던스 내용 중 적설 판단을 위한 플로 차트를 나타낸 것으로 앞으로는 해기차에 의한 서울 적설 예보 시 가이던스를 활용한다면 도움이 될 것이다.

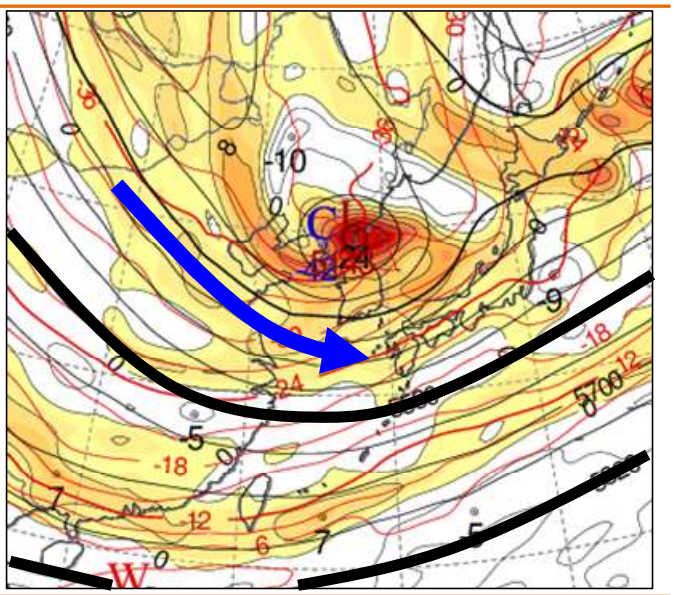


서울 호수 효과에 의한 적설 판단을 위한 플로 차트

- **11월 절리저기압에 의한 해기차 강설은 'L자형' 기압계를 조심해야 한다.**



2024년 11월 27일 09시 500hPa 일기도



2025년 1월 28일 03시 500hPa 일기도

- 위 그림의 왼쪽은 이번 사례의 500hPa 일기도이고, 오른쪽은 다음 해 1월 28일의 500hPa 일기도이며, 모두 절리저기압에 의해 중부지방에도 해기차 대설이 발생하였던 사례들이다. 차이점이 있다면 왼쪽은 수도권 중심의 대설, 오른쪽은 충청권 중심의 대설 사례로 집중구역의 남북 차이가 있었다. 이러한 차이의 원인은 그림의 500hPa 일기도에서 찾을 수 있는데, 왼쪽은 11월에 발생한 절리저기압 사례로 남쪽의 고도장이 아직 버티고 있는 시기이다. 따라서, 오른쪽 일기도의 흐름과는 다르게 절리저기압의 남하하려는 흐름을 남쪽에서 강하게 막으면서 서해상에서 흐름이 남쪽으로 흐르지 못하고 'L자형'의 형태로 꺾이는 것을 알 수 있다.

- 이렇게 'L자형'의 기압계 형태가 지속되면서 앞서 서술한 지상 일기도에서의 서해남부해상으로 배를 내미는 기압계가 나타날 수 있었다. 이번 사례와 같이 남쪽의 기압계가 아직 강하게 유지되고 있는 상황에서 절리저기압에 의한 해기차 강설이 예상된다면 'L자형' 기압계가 나타나 수도권에 많은 눈이 내릴 수 있음을 유의해야 한다.

4. 동해안형 강수

4-1. 2018년 2월 24일 사례

저기압 통과 후 약한 북동풍에 의한 강원영동지방 강수

북동기류 방해받지 않으면 약해도 강수 내려

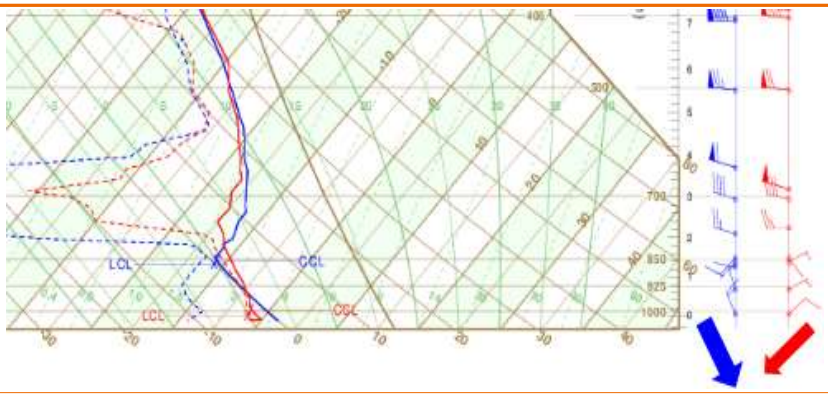
1. 예보와 실황은?

예보(2월 23일 17시 발표)	실황(12월 27~28일)
강원영동지역 강수예보 없었음	- 강수량: 강원영동 5mm 내외, 경북북서 1mm미만, - 적설: 강원영동 5cm내외

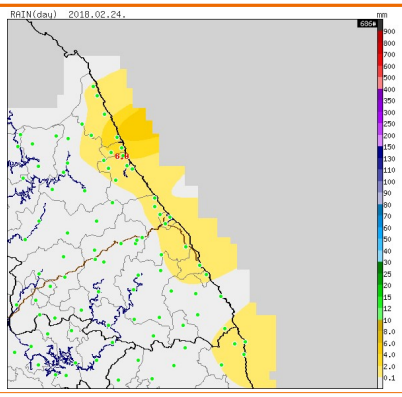
최심신적설 현황(cm)

강원영동 설악동(L) 3.2, 미시령(C) 6.5 속초(L) 4.7 청호(L) 4.8 양양(C) 2.5 북강릉 0.6

- 강한 cP(대륙고기압)가 중국북동부로 확장하는 전형적인 영동 강수유형은 아님
- 해안 전선이 형성되면서 동풍을 타고 해안과 태백산맥 동쪽 사면 위주로 강수 기록



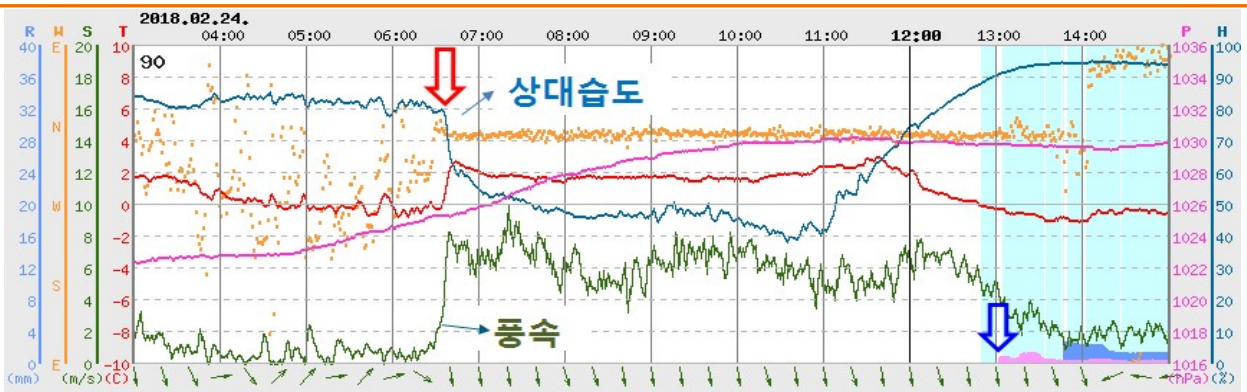
2월 24일 15시 속초 단열선도(푸른색 12시, 붉은색 15시)



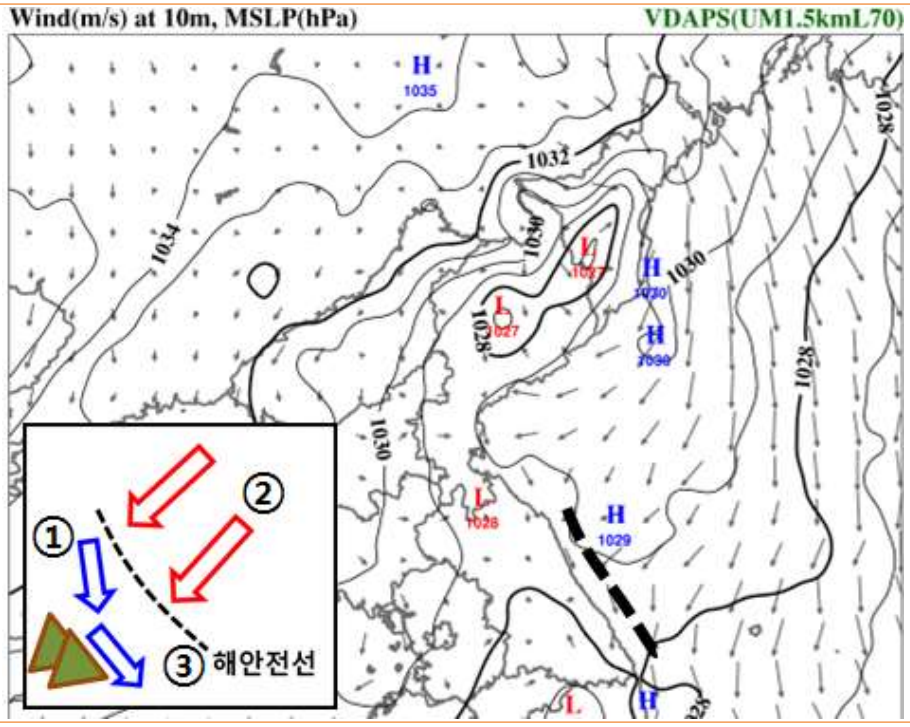
강수분포 모식도

2. 강수 메커니즘은?

- **(강수전)** 저기압 후면으로 북쪽의 건조 공기가 해안선을 따라 남하(①) 이 때 동해안 지상 바람은 북북서풍, 개마고원 남동쪽으로 고기압 가장자리를 따라 한기 남하(②)
- **(구름발달)** 해기차에 의해 해상에서 구름 발생 + ① 기류와 ② 기류가 수렴하는 동해안 근처에서 구름대 발달함(해안전선,③)



2월 24일 속초 AWS 시계열

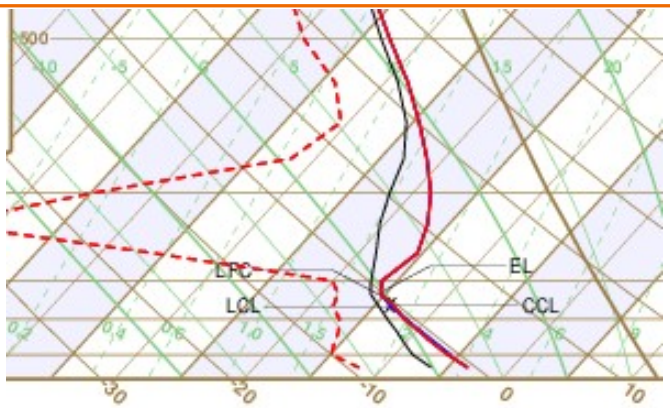


2월 24일 11시 VDAPS 해면기압, 바람, 해안전선 형성과정 모식도

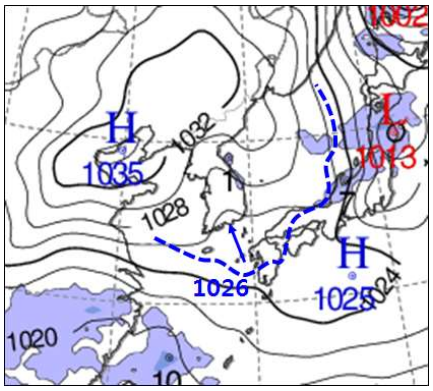
- **(강수시)** 해안의 북북서풍은 점차 약화되고 기압능이 남하하면서 해상의 발달한 구름대는 동풍(북동에서 동풍으로 시계방향 회전)을 타고 해안과 태백산맥 동쪽 사면에 강수를 기록함. 이때 동해안의 지상 바람은 약한 북풍~동풍
- **(강수종료)** 고기압이 확장하면서 강한 바람 축이 남하하는 방향으로 강수 구름도 남하하지만 해기차와 풍향 시어도 점점 줄어들어 구름은 강수를 기록할 정도로 발달하지 못함

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

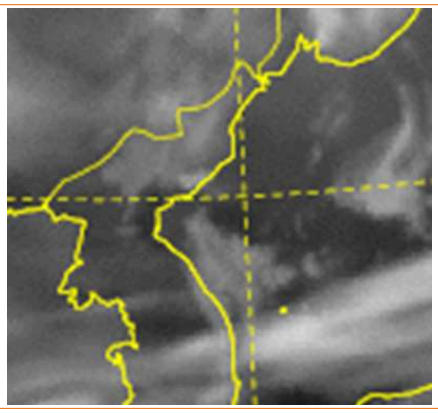
- GDAPS 해면기압 예상장에서 발해만과 중국북동부에 위치한 대륙고기압의 위치는 모의하고 있으나 남쪽 기압골이 버티는 것과 북쪽 고기압의 강도는 과소 모의함
- 속초 예상단열선도의 850hPa 부근까지 기온이 건조단열적으로 상승하는 것으로 보아 해기차에 의해 대기가 혼합되면서 발생된 구름은 적외 모의영상에서 모의가 되고 있으나, 해상에서 발생하는 수렴대는 모의하지 못하고 있어 하층은 건조하고 강수는 없는 것으로 모의



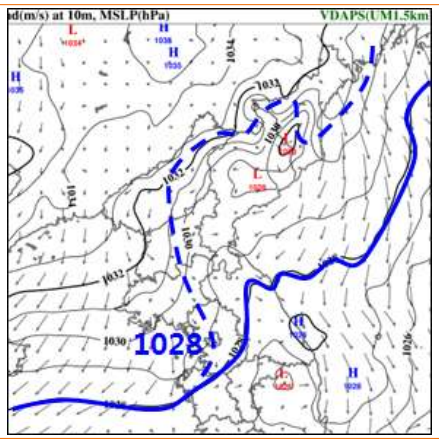
2월 24일 15시 LDAPS 속초 예상단열선도(23일 21시 발표)



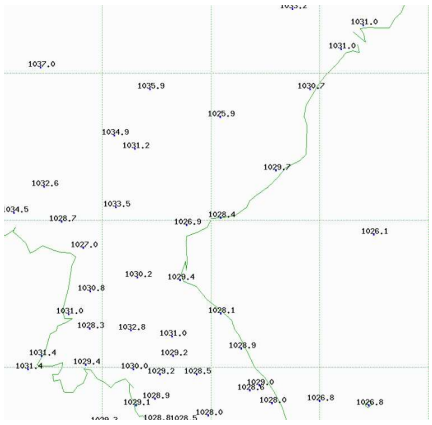
2월 24일 15시 해면기압 분석장
(푸른색 점선은 –18h 1026hPa등압선 예상)



2월 24일 15시 RDAPS 적외 모의영상



2월 24일 9시 VDAPS 해면기압,바람
(푸른색 점선 –18h 예상 1028hPa등압선)

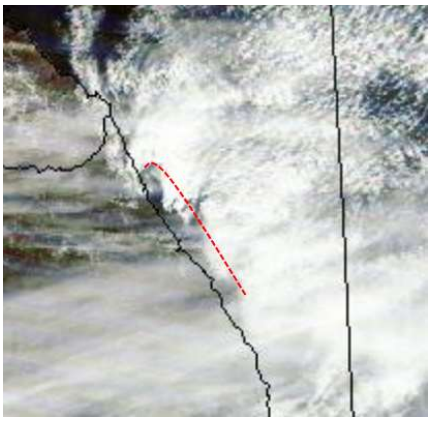
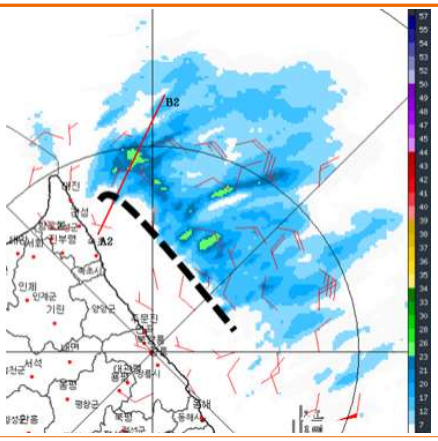
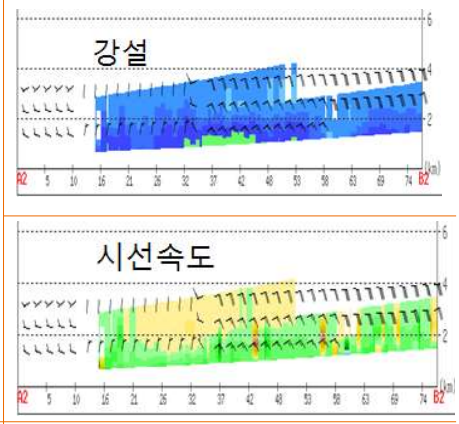


2월 24일 9시 GTS 지상 해면기압

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

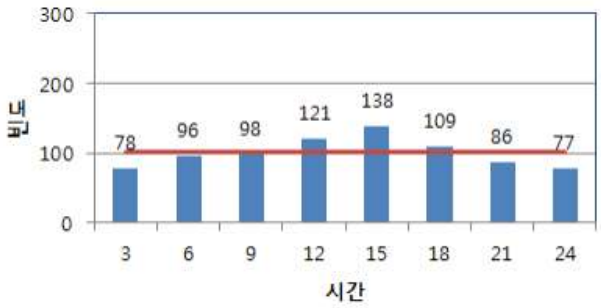
- **개마고원 동쪽 해상으로 확장하는 고기압의 강도를 확인 했는가**
  - 중국 북동쪽에 위치한 고기압의 강도에 따라 해상으로 확장하는 북동기류(한기이류)의 방향과 강도가 결정됨
  - GTS 자료와 VDAPS 분석장을 바탕으로 중국북동쪽에서 동해상으로 확장하는 고기압을 모델이 과소 모의하는 것을 분석할 수 있음
  - 고기압의 강도가 강화되면서 해상에서 구름대가 더욱 발달할 수 있었고, 동풍을 따라 해안으로 접안할 수 있었음

- **동해상에서 발달한 구름대의 이동 추이를 파악 했었더라면**
  - MODIS RGB 컬러영상에서 해상의 구름이 콤마 형태로 수렴 라인(해안전선)이 형성되어 있음을 확인
  - CAPPI 레이더영상에서도 해상의 바람 시어역 부근에서 구름이 발달했음을 볼 수 있음
  - 레이더 연직단면에서 눈 구름은 2~3km까지 발달했으며 시선속도에서 2km 이하는 해안가로 접근(연두색은 시선속도<0, 노란색 시선속도>0)하고 그 위층은 멀어지는 것을 확인할 수 있는데, 동풍 바람벡터를 따라 구름대는 해안으로 점차 접근할 것으로 분석할 수 있음
  - 24일 15시 해면기압 분석장을 보면 북쪽 고기압은 W형태로 분포하고 있고 기압골은 한반도 중심에 위치해 서풍의 영향은 적을 것으로 판단하여 해상의 구름대가 접근하는 것을 방해하는 요인은 적음

		
2월 24일 11시 35분 컬러영상(MODIS)	**2월 24일 11시 20분 강릉 레이더영상(A1-B1)**	**레이더 연직단면(A1-B1) 강설(上), 시선속도(下)**

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- **겨울철 동해안 육풍의 일주기를 고려했다면**
  - 지난 30년간(1987년~2016년) 강릉(105)의 3시간 강수빈도를 통계분석 해보면 시간대별(3시간 간격)로는 비슷하나 북동류가 유입될 때는 주간(9~18시)에 강수빈도가 높고, 야간에는 강수빈도가 낮음을 알 수 있음
  - 겨울철 육지는 기온이 낮고 해상은 기온이 높아 여름철과 반대로 밤에는 육풍이 강하고, 낮에는 온도경도가 줄어들어 육풍이 약함
  - 특히 강원영동은 해상과 산지가 수십 km 이내에 붙어 있어 육풍이 산곡풍의 일주기와도 결합되어 복합적인 중규모 순환이 발생
    - ⇨ **주간에 육풍이 약화 되면서 해상에서 발생된 눈 구름대가 해안으로 접근하기 용이하므로, 동해안 강수 시 주간에 강수 가능성이 높을 수 있음을 유의**

	
30년(1987~2016) 겨울철 강릉(105)지점 3시간 강수 빈도	**30년(1987~2016) 겨울철 강릉(105)지점 NW~E 유입시 3시간 강수 빈도**

4-2. 2018년 3월 4일 사례

저기압 남부지방 통과 시 강원영동지방에 많은 비(눈)이 온 사례

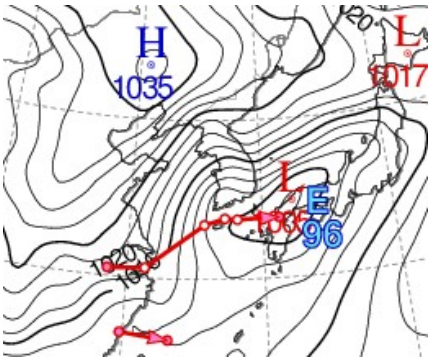
태백산맥 동쪽 사면에 한기 축적 시 강원영동지역 강수량 증가

1. 예보와 실황은?

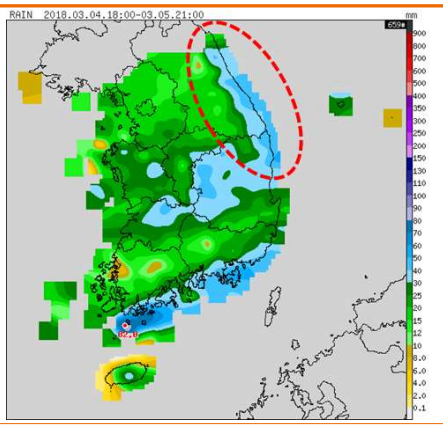
예보(3월 3일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 강원영동, 충청도, 남부지방, 제주도: 20~60mm (제주도산지와 남부 80mm이상) - 서울.경기도, 강원영서, 서해5도: 10~40mm ▸ 예상 적설 - 강원영동, 경북북동산지: 5~20cm(강원산지 30cm이상) - 강원영서, 경북북부(산지 제외), 울릉도.독도: 2~7cm - 경기동부, 충북북부: 1~3cm	▸ 강수량 강릉 50.0 북강릉 41.5 속초 38.0 울진 46.3 진부령 41.5 설악동 46.0 대관령 26.8 삽당령 45.5

최심신적설 (cm)	
강원산지	진부령 33.0 미시령 28.0 대관령 18.1 설악동 15.4 오색 12.6
강원동해안	북강릉 8.0 속초 6.4 간성 6.0 현내 6.0 청호 4.6 임계 5.0

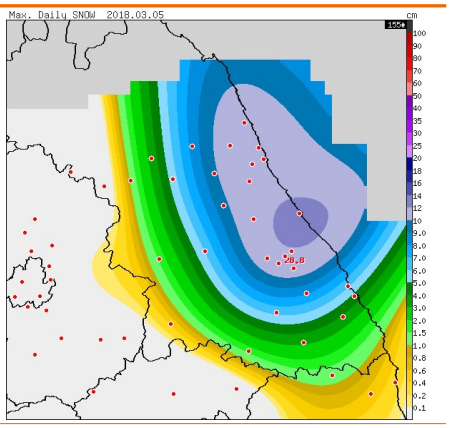
- 4일 밤부터 5일 낮까지 강수는 이어졌지만 적설은 5일 00시에서 09시 사이에 집중되었음. 특히 해안가는 9시 이후로 적설이 없었음



3월 5일 9시 저기압 이동경로



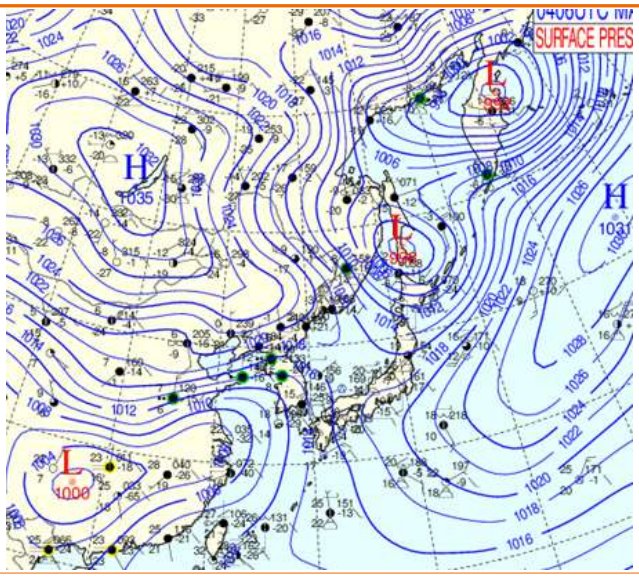
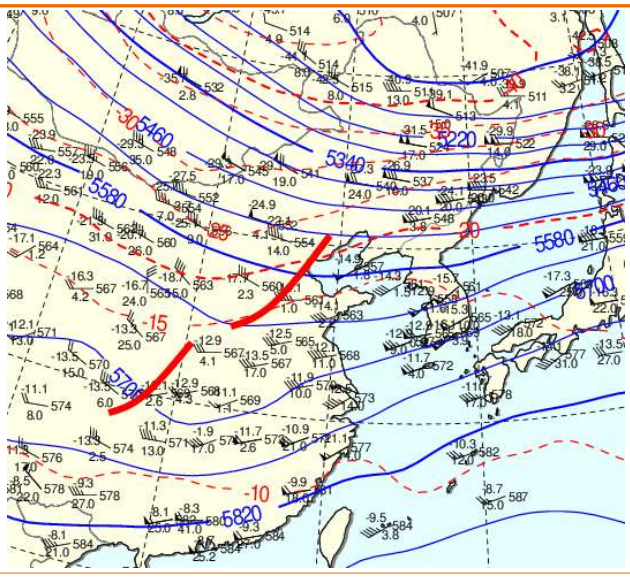
3월 4~5일 누적강수량



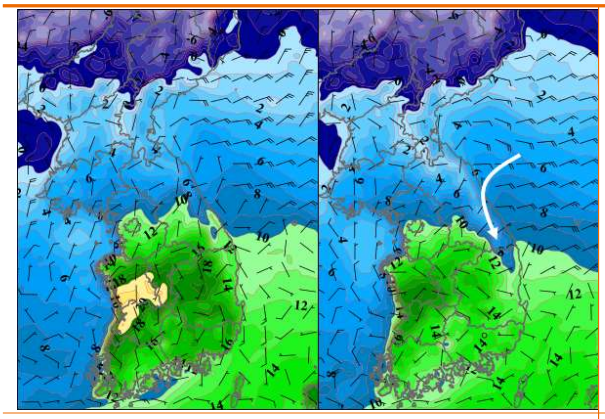
3월 4일 최심신적설

2. 강수 메커니즘은?

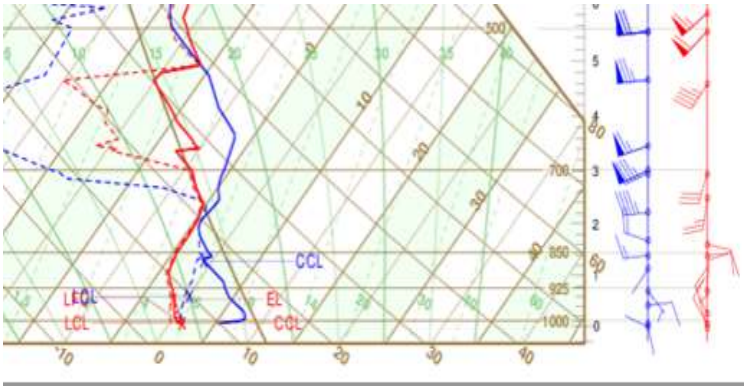
- **(북고남저)** 일본 동쪽해상에 위치한 고기압과 대륙고기압 사이에서 기압골이 발달. 상층골의 지원을 받으면서 상해 북동쪽 해상을 거쳐 동중국해를 지나 우리나라 남부지방으로 진출. 한반도는 점차 북고남저형 기압배치 하에서 기압경도 강화
- **(한기축적)** 지상저기압의 북동쪽으로 중국북동지방에서 확장하는 고기압으로부터 한기가 이류. 태백산맥 동쪽 사면에 막히면서 한기가 쌓이기 시작(CAD: Cold Air Damming)하고 산맥을 타고 기류가 상승하면서 단열냉각효과로 인해 cold pool은 점차 강화
  - 속초, 북강릉 AWS 시계열 자료에서 북풍이 불면서 습도가 높아지고 기온이 떨어지는 시각부터 CAD 시작

	
3월 4일 18시 해면기압(2hPa)	**3월 4일 21시 500hPa 일기도**

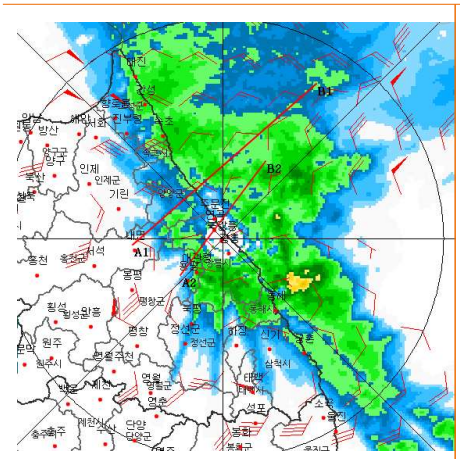
- **(강수시작)** 산맥과 평행한 바람(북북서)과 동해상에서 불어오는 북동류 사이에서 형성된 해풍전선이 하층 지향류(북동류)를 타고 해안으로 밀려오면서 강수가 시작됨
  - 4일 21시 북강릉 단열선도를 보면 925hPa 이하 고도에는 북북서풍이 불고 있고 3km 고도까지는 포화되어 있지만 3~5km 사이에 구름이 없어 하층운과 상층운이 연계되지 않음을 알 수 있음
  - 4일 22시 20분 레이더 영상에서 해상에 구름대가 있는 것을 확인할 수 있음. 높이 5~6km까지 발달한 구름이 분포하고 있으며 시선속도나 강수에코 단면에서 붉은색 파선을 경계로 2km 이하 고도에서 발달한 구름대가 해안으로 접근하고 있음. 강릉 AWS 시계열을 보면 21시 이후로 본격적인 강수가 시작되는 것을 알 수 있음



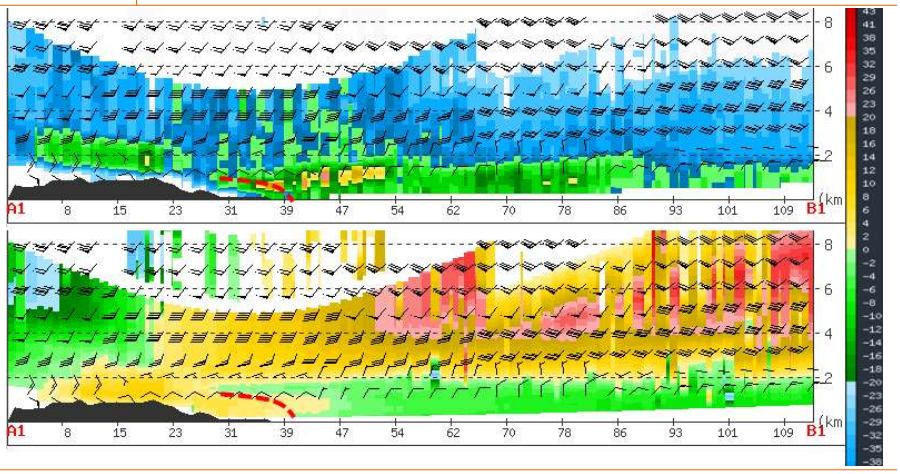
VDAPS 바람,기온 분석장
(좌) 3월 4일 15시, (우) 4일 18시



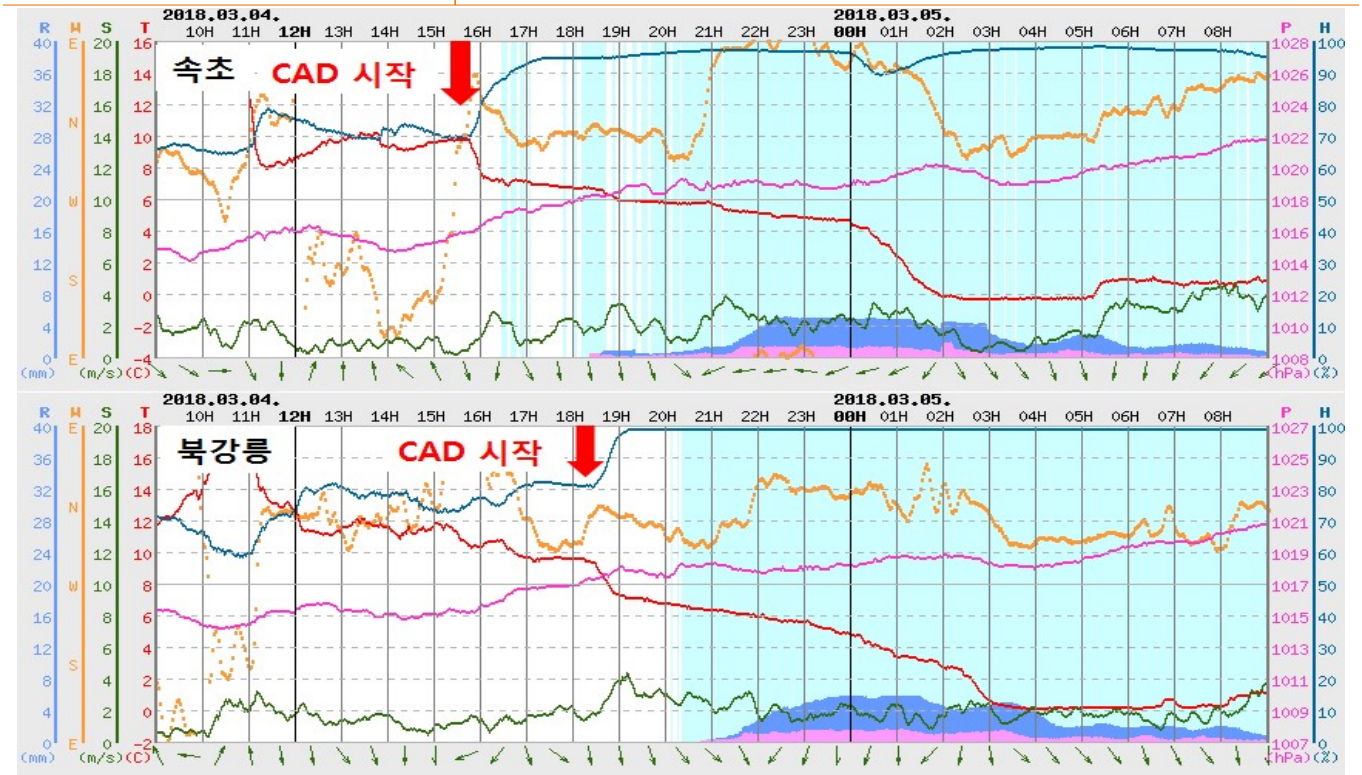
3월 4일 21시 북강릉 단열선도



3월 4일 22시 20분
강릉 레이더영상(A1-B1)



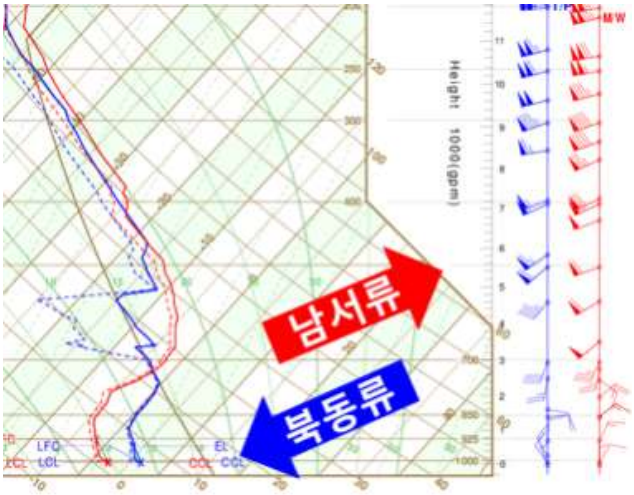
3월 4일 22시 20분
(상)강수에코 단면, (하)시선속도 단면, (좌)시선속도 범례



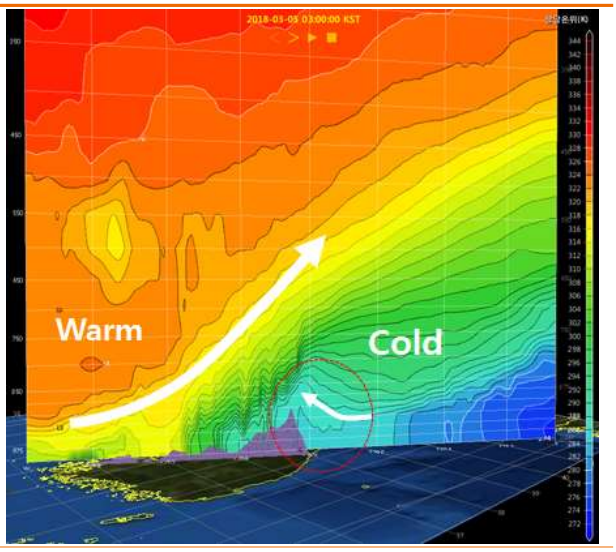
3월 4~5일 AWS 시계열 (상)속초, (하)북강릉

- **(강수집중)** 남부지방에 위치한 온난벨트를 타고 상승하는 구름대와 해상에서 유입된 저온 다습한 공기가 cold pool을 타고 상승하면서 결합해 강하게 발달함

- 5일 3시 북강릉 단열선도에서 3km를 경계로 6시간 전에 비해 한기이류와 난기 이류가 뚜렷하게 나타나고 있어 CAD가 강할 때 나타나는 전형적인 연직프로파일을 보여주고 있음. SRH도 1024로 매우 높게 나타나 연직 시어에 의한 강한 상승류가 존재함을 알 수 있음
- KLAPS 상당온위 연직단면을 보면 습윤공기가 등온위면을 타고 남부지방에서 북동쪽으로 급격히 상승하고 태백산맥 동쪽 사면에 있는 cold pool 위로 북동기류가 상승해 coupling이 일어나는 것을 알 수 있음

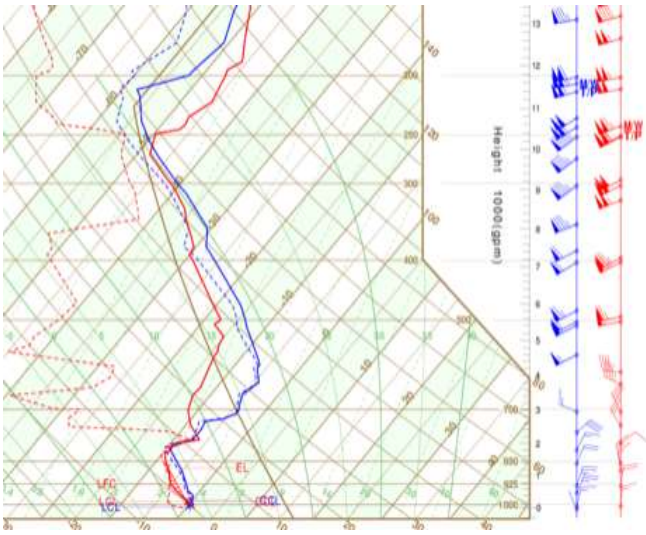


3월 5일 3시(푸른색 선 4일 21시)
북강릉 단열선도

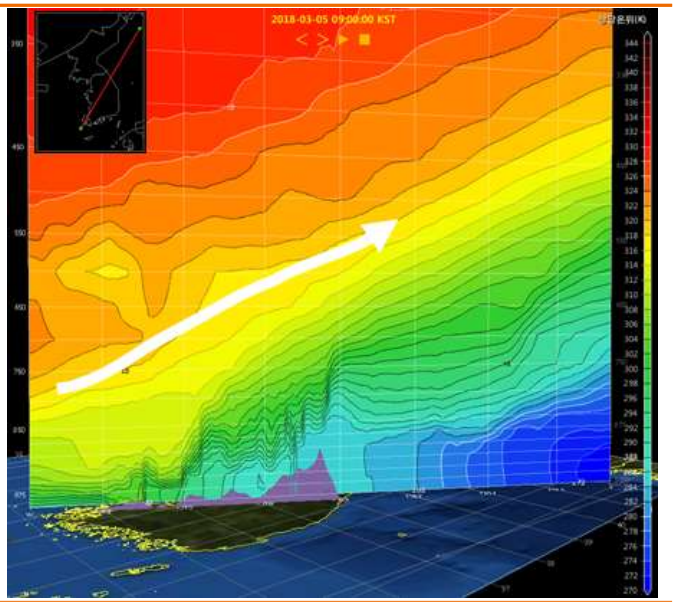


3월 5일 3시 KLSPS 분석장
상당온위 연직단면도

- **(강수약화)** 저기압 통과 후 한기이류가 약화되면서 cold pool은 점차 해소되고 해기차에 의해 발생한 구름에만 영향을 받기 때문에 강수는 강하지 않음
  - 5일 15시 KLAPS 분석장 850hPa 이하 고도에서 해기차에 의해 발생한 구름대(상당온위가 연직으로 일정한 층)가 해안가로 유입되면서 강도는 강하지 않고 강수형태는 비와 눈이 혼재되어 내림



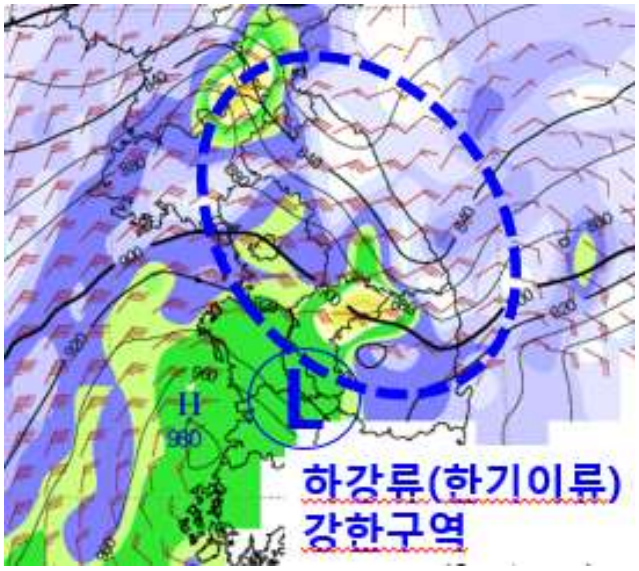
3월 5일 15시(푸른색 선 5일 9시)
북강릉 단열선도



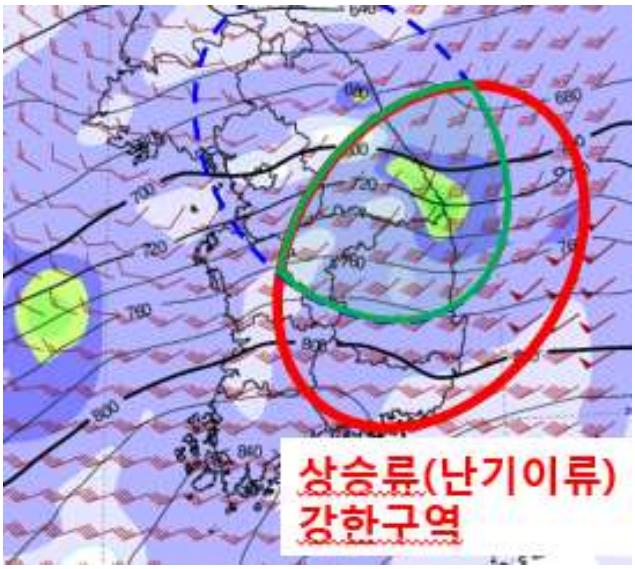
3월 5일 15시 KLSPS 분석장
상당온위 연직단면도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

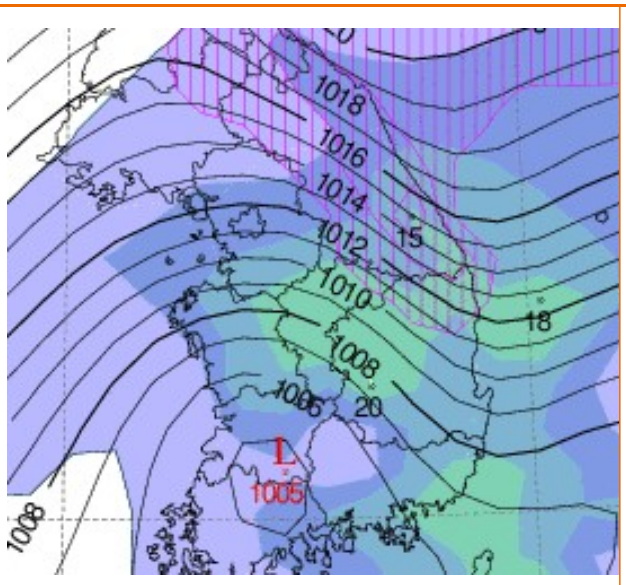
- 285K 등온위면 분석장에서 한기이류가 강한 구역과 300K 등온위면에 나타나는 난기이류가 강한 구역이 중첩되는 지역에 강수가 많이 모의되었고 실황도 강수가 많이 왔음
- 종관규모 운동에서는 비교적 CAD와 관련된 강수가 잘 모의됨



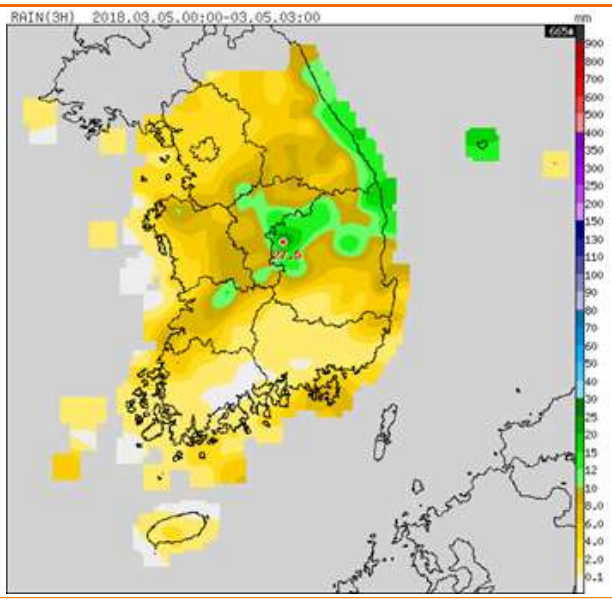
3월 5일 3시 등온위면 285K



3월 5일 3시 등온위면 300K



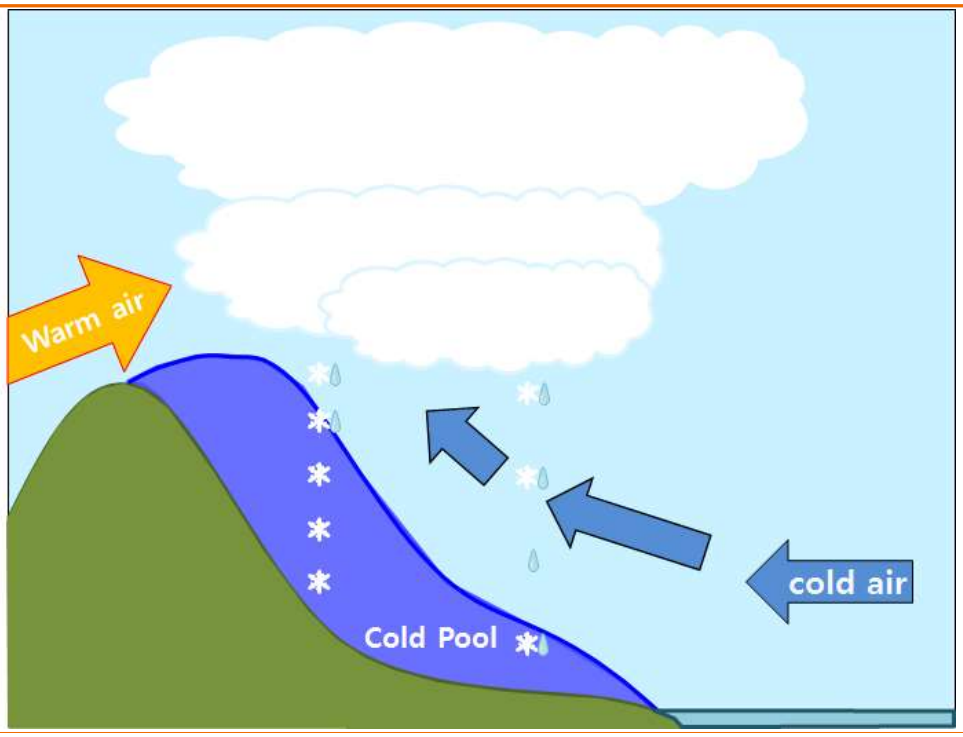
3월 5일 3시 3시간 누적강수량(+18h)



3월 5일 3시 3시간 누적강수량

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **cold pool의 깊이에 따른 강수형태를 고려했다면**
  - 온난다습한 공기가 상승하면서 만들어진 과냉각수적과 빙정이 섞인 강수입자가 태백산맥 동쪽 사면에 떨어지면서 CAD 구역을 통과하기 때문에 강수 형태가 눈과 비로 혼재되어 내림. 고도가 높은 지역(한기 축적이 깊은)에는 강수가 대부분 눈으로 내리지만 고도가 낮은 해안으로 갈수록 눈과 비가 혼재되어 내릴 수 있음



cold pool이 가장 강할 때 구름이 발달과 고도에 따른 강수형태(강수집중)

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- **강수 메커니즘 분석을 통해 규모에 맞게 분석하며 수치모델 자료를 적용해야 함**
  - 강수 시작 시 중규모 해안전선에서 발생한 구름대에 의해 강수가 내렸고 한기이류가 시작되는 단계이기 때문에 비로 내렸음
  - 강수 집중 시에는 저기압 중심이 남부지방을 지나면서 종관 강제에 의해 발달한 구름들과 cold pool 위로 흐르는 난기 활승에 의한 구름이 결합되면서 강수량이 늘어났음. cold pool을 지나면서 눈으로 올 가능성도 높아짐(seeder-feeder 현상, 종관규모 운동과 결합 시 전구모델이 모의를 잘 함)
  - 강수가 약화 시에는 주로 북동기류에 의한 강수로 기온선은 남하하지만 해상에서 대류 혼합에 의해 발생한 낮은 구름으로 인해 강수 형태가 눈으로 내리기는 어려웠음(국지모델이 모의를 잘 함)
    ⇨ 종관규모 시스템에 따른 CAD는 정확도가 비교적 높지만 강수 메커니즘에 따라 국지모델과 전구모델을 활용하여 정확도를 높일 수 있고, 규모에 따라 강수의 발달과 형태가 달라질 수 있음

4-3. 2018년 3월 15일 사례

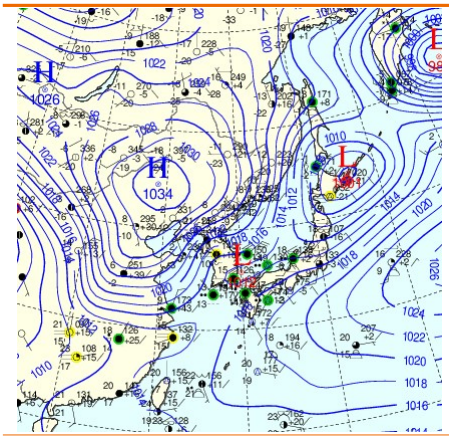
북동기류에 의해 기온 급감하면서 영동지방에 내린 강수

6시간 만에 기온 17℃ 하강하면서 산간에 눈, 동해안 비

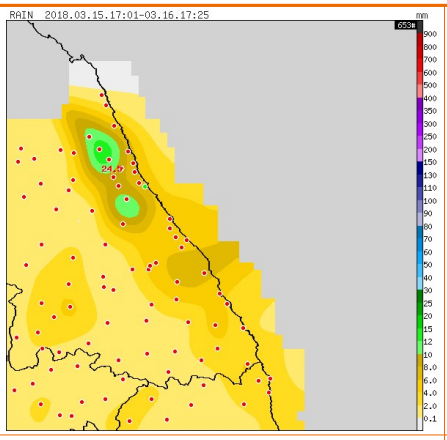
1. 예보와 실황은?

예보(3월 15일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 강원영동: 5~20mm - 경북: 5mm 내외 ▸ 예상 적설 - 강원산지: 2~7cm - 강원동해안, 경북북부: 1~3cm	▸ 강수량 (17시 이후) 북강릉 5.5 속초 2.8 울진 3.4 미시령 24.0 진부령 10.0 대관령 5.9 삽당령 5.5 임계 3.5
최심신적설 (cm)	
강원산지 미시령 8.0 대관령 7.4 진부령 6.1 스키점프 4.1 용평 3.5 대기리 3.5 임계 2.5	

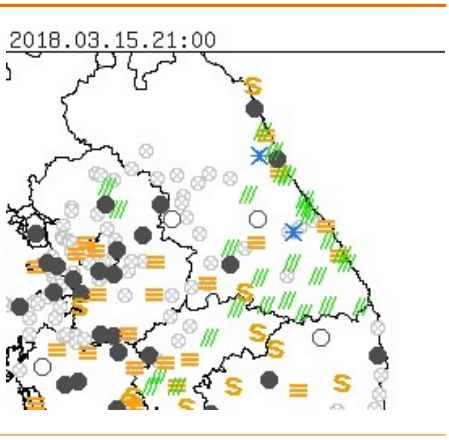
- 강수량은 예상범위 내로 왔지만, 강수지속시간과 강수형태에서 예보와 달랐음
- 15일 21~16일 3시에 강수가 집중되었으며 산간에는 눈, 해안에는 비로 내림



3월 15일 21시 해면기압(2hPa)



3월 15일 저녁 ~ 16일 낮 누적강수량

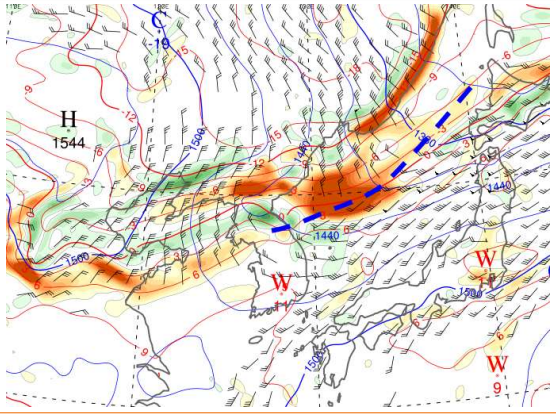


3월 15일 21시 시정계 일기관측

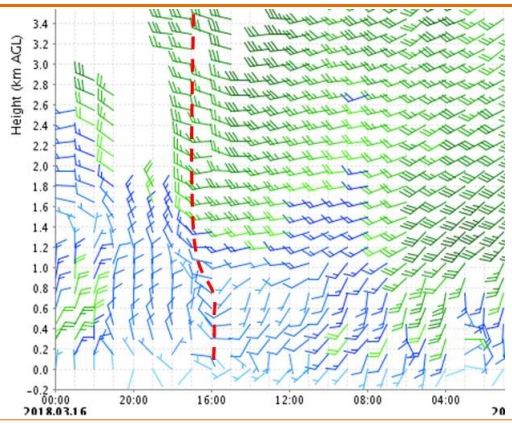
2. 강수 메커니즘은?

- **(강수시작)** 해안전선이 유입되기 전 종관강제력(단파골, 한랭전선)에 의해 강수가 시작됨
  - AWS 시계열에서 15일 18시 전후로 속초, 북강릉, 대관령(강수 지속)에 강수가 시작됨을 알 수 있음
  - 15일 파주 수직측풍장치에서 16시 전후로 전선이 통과하는 것을 볼 수 있고, 18시 LDAPS 850hPa 전선강도 자료에서 한반도에서 홋카이도까지 길게 늘어진 한랭전선이 통과하는 것을 확인할 수 있음
  - 레이더 영상(16시 30분, 18시 30분)을 통해 전선과 관련된 강수 구름이 동남동진하는 것을 확인함으로써 강원영동의 강수는 단파골이 통과하면서 전선상에서 시작된 것임을 알 수 있음

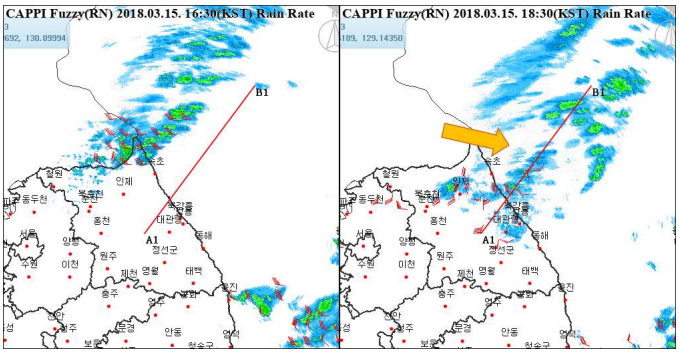
- **(한기축적)** 낮 동안 지속되었던 남서류가 급격히 북동기류로 바뀌면서 태백산맥의 동쪽 사면으로 강한 한기가 이류되었고, 동시에 한랭전선면에서 강수가 내리기 시작하면서 강수입자가 증발하고 빙정이 녹는 비단열 냉각에 의해 CAD(Cold Air Damming, 한기축적)가 일어남
  - 속초, 북강릉, AWS 시계열 자료에서 서풍 계열의 바람이 불다가 북풍으로 풍향이 바뀌면서 기온이 급격히 떨어지고 습도가 높아지는 시각부터 CAD가 시작되며 온도차에 의해 풍속이 증가함을 알 수 있음. 대관령은 고도가 높아 마찰력에 의한 풍향의 변화가 적어 18시 이후에 동풍으로 바뀜



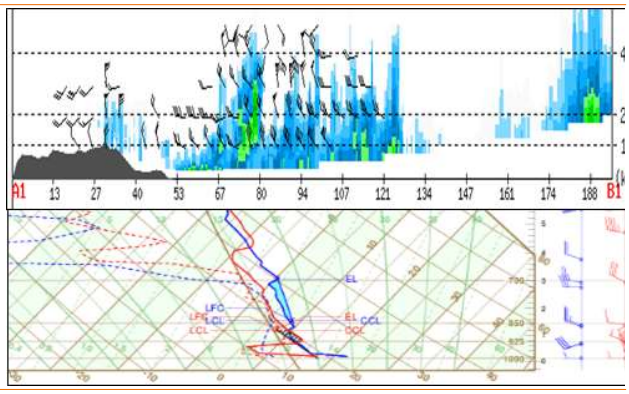
3월 15일 18시 850hPa 전선, 바람,기온 예상장



3월 15일 파주 수직측풍장치

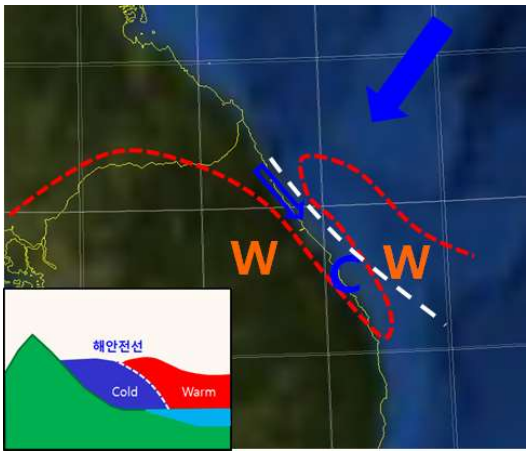


3월 15일 레이더 CAPPI 합성영상
(좌)16시 30분, (우)18시 30분

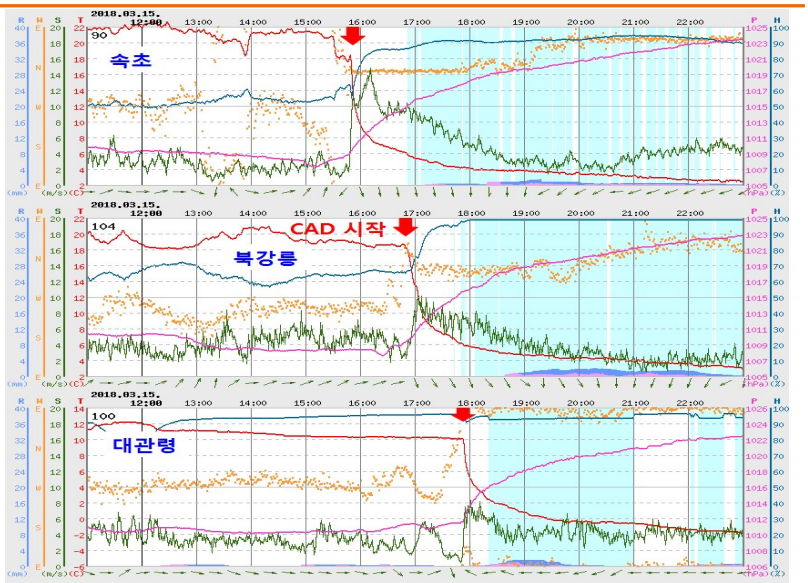


(상)3월 15일 18시 30분 A1-B1 단면도,
(하)3월 15일 18시 강릉시 보광리 단열선도

- **(해안전선 강화)** 태백산맥 동쪽 사면에 축적된 한기와 해상의 온난한 공기 사이에서 해안전선이 형성되며, 이는 지상이나 925hPa 온도능 서쪽에 위치함

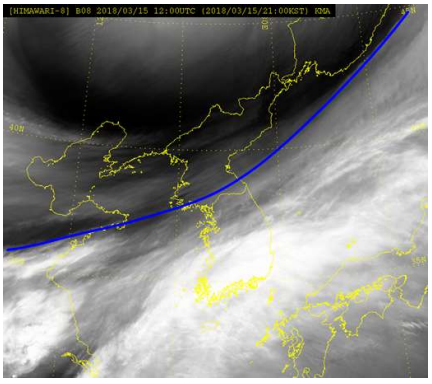


동해안 CAD 형성시 해안전선 평면 모식도와 단면도(하)

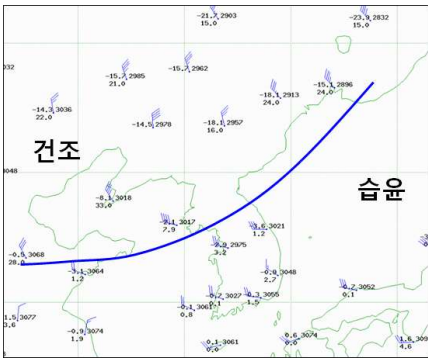


3월 15일 AWS 시계열 (상)속초, (중)북강릉, (하)대관령

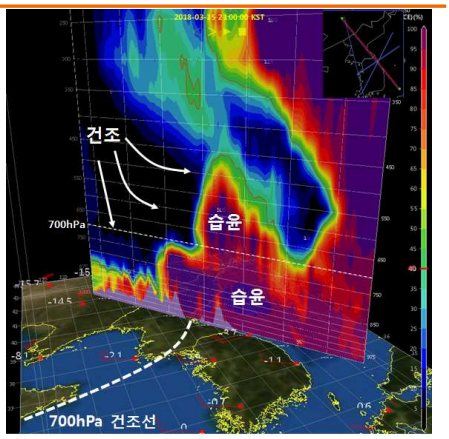
- **(강수집중)** 종관적인 강제(중층 단파골, 건조역 침강)력이 지원하고 해안전선이 접안하면서 구름대가 발달, 해안>산간을 순서로 많은 강수량을 기록함
  - 15일 21시 수증기영상과 GTS 700hPa 분석장에서의 건조라인과 LDAPS 상대습도 연직단면의 건조역이 중국북동부에서 강원영동 쪽으로 남동진하면서 전면의 상승을 지원하고 있음
  - LDAPS 상당온위를 중첩한 연직 흐름과 상대습도 80%이상 연직단면 자료에서 해안전선이 접안하여 해안 근처에서 상승 흐름이 강했고, cold pool 위를 온난한 공기가 상승하면서 상층과 이어져 풍상측 산맥에서 많은 강수를 기록함. AWS 60분 누적 분포도에서도 해안에서 강했던 강수가 점차 산맥으로 이동하는 것을 볼 수 있음



3월 15일 21시 수증기영상 (히마와리 CH8)

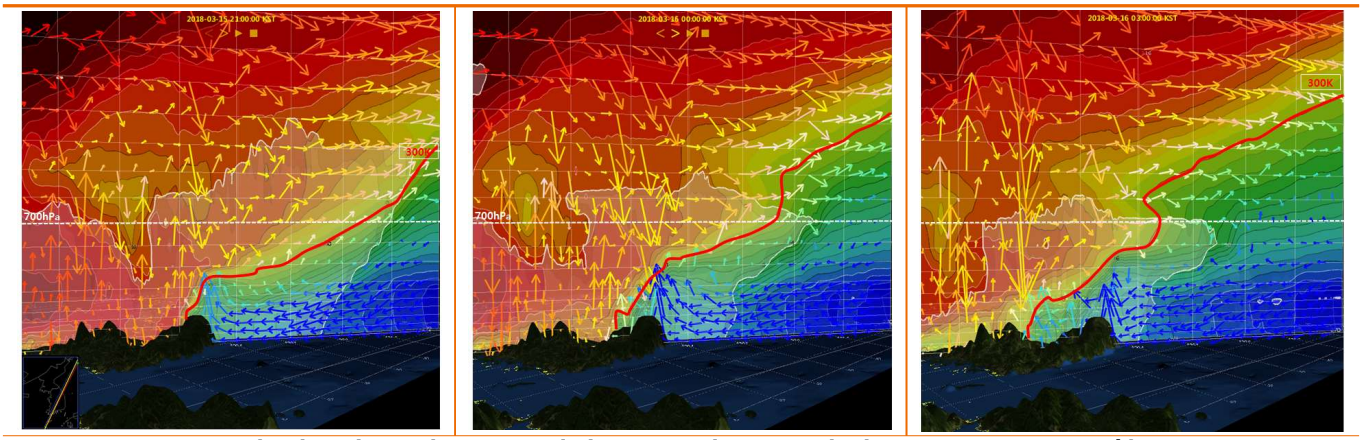


3월 15일 GTS 700hPa 분석장

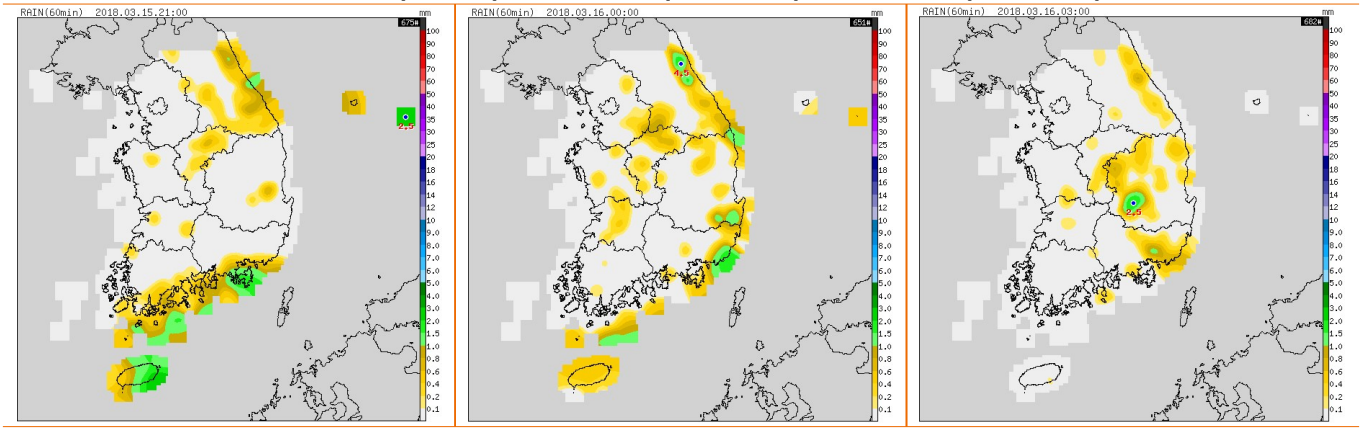


3월 15일 21시 LDAPS 상대습도 연직단면, GTS 700hPa

- **(강수약화)** 상층의 지원이 약화되고 건조역이 오히려 강수를 억제하는 역할을 하게 되면서 한기 이류가 점차 약해지고 CAD가 해소, 강수는 약화됨
  - 16일 03시 LDAPS 상당온위를 중첩한 연직흐름과 상대습도 80% 이상 연직단면 자료에서 상당온위선이 산 정상과 나란하게 나타나고 해안가에는 대류 혼합으로 인해 상당온위선이 2km까지 일정. cold pool은 약화되고 있음



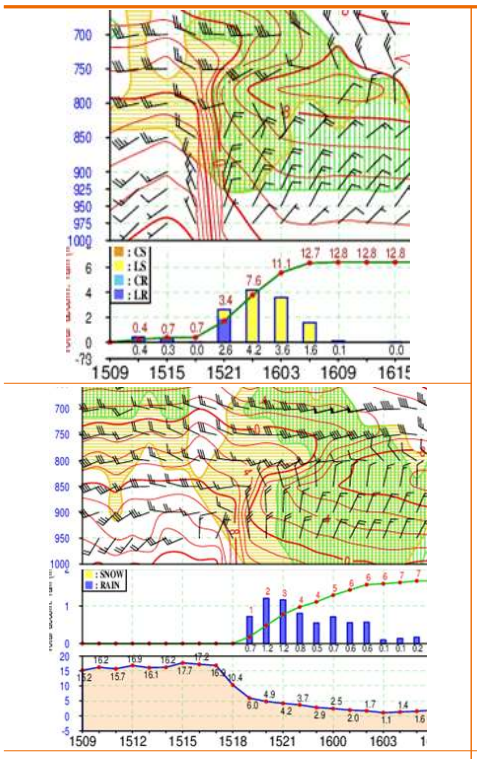
LDAPS 분석장/예상장 상대습도 연직단면(80%이상), 연직 흐름도(상당온위 중첩), 상당온위 연직단면
15일 21시(분석장), 16일 00시(+3예상장), 16일 03시(+6예상장)



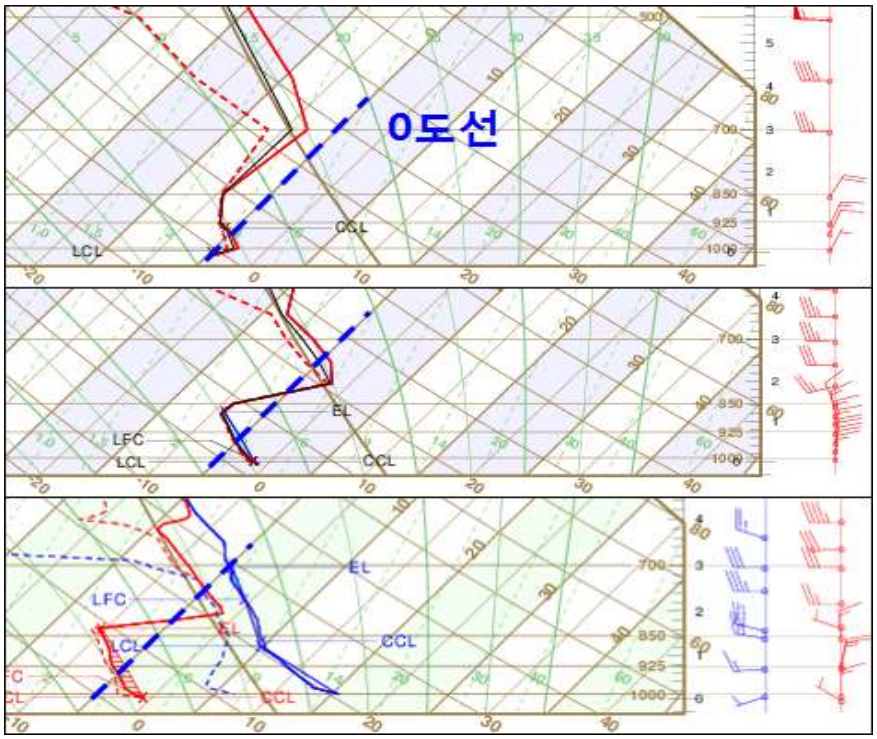
AWS 60분 누적강수 분포도 15일 21시, 16일 00시, 16일 03시

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- 북강릉 연직시계열에서 풍향이 북동풍으로 바뀌면서 기온이 급격히 떨어지고 강수가 시작되는 것으로 모의하고 있음
- GDAPS에서는 21시부터 강수형태가 비에서 눈으로 바뀌는 것으로 모의되고 있지만 LDAPS는 계속 비를 모의하고 있음
- 15일 9시에 예상한 21시 북강릉 단열선도를 보면 GDAPS에 비해 LDAPS가 2km 부근과 지상 부근에 기온이 영상으로 나타나는 온도 프로파일과 바람을 잘 모의하고 있음



북강릉 연직시계열(15일 9시 발표)
(상)GDAPS, (하)LDAPS



3월 15일 21시 북강릉 예상/실황 단열선도(15일 9시 발표)
(상)GDAPS, (중)LDAPS, (하)실황

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **극단적인 역전층을 뚫을 수 있을까**
  - 중층의 한기 지원이 없는 상태에서 850hPa 이하 고도에서 급격히 한기가 이류되면서 1.5km~3km까지 극단적인 역전층을 이루고 있음
  - 강수량이 늘어나기 위해서는 해기차에 의한 구름대가 1.5km 이상으로 발달하거나 상층 지원이 강해야함. 16일 00시를 기준으로 전 시간에는 상층 지원이 강했고 이후에는 해기차(850hPa 해기차)가 커지긴 했지만, 해기차가 겨울철만큼 크지 않은 상황에서 대류가 강하지 않아 주 강수는 16일 00시에 왔음

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- **해안과 산악의 강수 메커니즘에 따른 강수형태 판별**
  - 해안의 강수 메커니즘은 해안 전선이 접안하면서 내린 강수와 상층의 지원이 결합되어 발생 됨. 따라서 강수 집중 시간일 때는 강수량이 많지 않고 해안에서 불어오는 공기의 영향을 받는 구간이 존재하므로 눈보다는 비가 내릴 가능성이 높음
  - 산악에서의 강수 메커니즘은 CAD 영역 위쪽으로 해상에서 유입되는 비교적 온난한 공기의 상승과 상층의 지원이 결합되어 발생됨. 따라서 해풍의 영향을 적게 받고 공기의 상승으로 인해 단열냉각효과가 발생하고 떨어지는 강수입자가 cold pool을 통과하므로 강수형태는 눈으로 내릴 가능성이 높음

4-4. 2019년 1월 31일 사례

동해안형 강수

남쪽골통과 후 바로 cP 확장될 때 동해안은 대설 주의

1. 예보와 실황은?→ 예보와 분석보다 적설이 많았던 사례

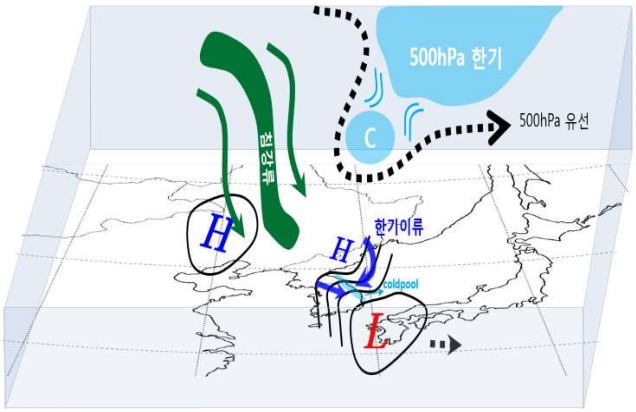
1월 30일 17시 예보	실황
- 강원영동,경북: 5~10mm(3~8cm) - 강원영서남부: 5mm 미만(1cm내외) - 경북북부내륙: 5mm 미만(1~5cm)	▸ 적설 - 강원동해안 5~20cm, 경북 1cm미만 ▸ 강수량 5~20mm, 경북 5mm미만 - 주문진 17.8, 양양 17.4, 북강릉 17.1, 설악동 9.2, 동해 4.1, 삼척 6.8, 미시령 11.3, 진부령 2.1, 금강송 0.2

2. 쟁점사항은?

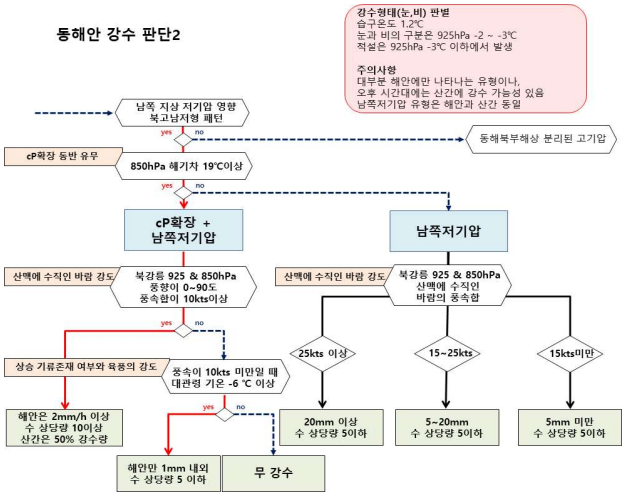
- **쟁점1) 강수메커니즘은 무엇인가?**
- **쟁점2) 강수량은 왜 많이 내렸을까?**
- **쟁점3) 강수 집중 구역은 해안인가 산간인가?**

3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 강수 메커니즘은 무엇인가?**



강수메커니즘 모식도

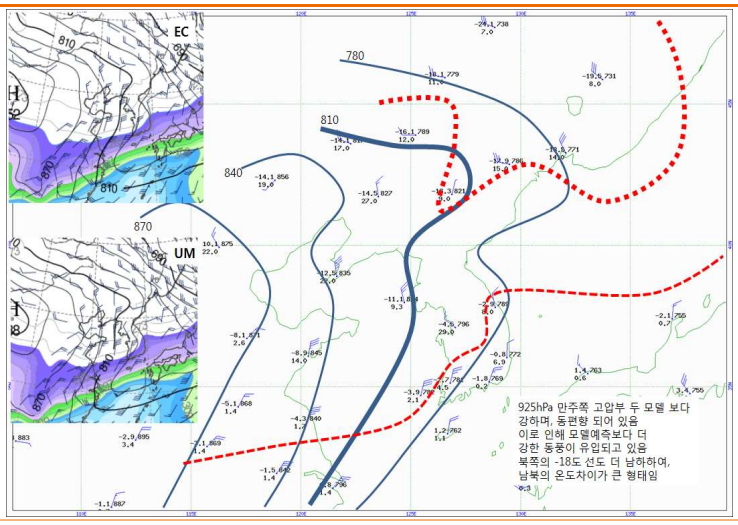


동해안 강수 판단 II 흐름도

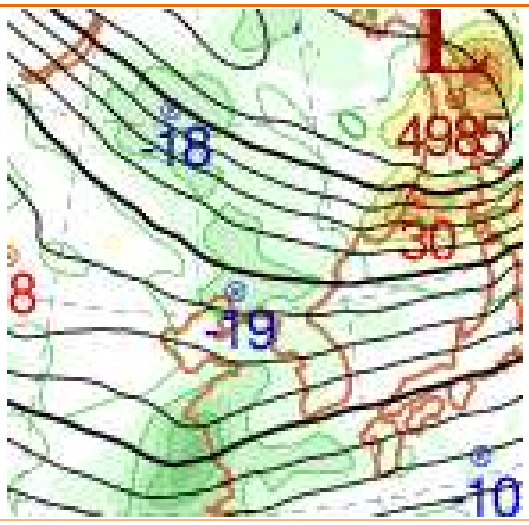
- 상층의 한기 축은 만주에서 동쪽으로 빠져 있고 중국북동부에서 동해안으로는 상층 침강류에 의해 하층 고압부가 발달할 때
- 동시에 상해에서 규슈지방으로 저기압이 통과하면 우리나라는 북고남저형(또는 북서고남동저형)의 기압배치가 됨

- 동해안은 기압경도력이 강화되어 북동류에 의해 한기이류가 강화됨
- 저기압의 영향을 강하게 받을 때는 850hPa까지 북동기류가 유입되면서 산맥에 수직으로 부는 바람의 강도에 따라 많은 강수량 기록될 수 있음
- 바람이 약할 때에도 925hPa 이하로 한기이류가 나타나지만 925~850hPa은 남쪽 저기압의 영향으로 북동에서 남동풍으로 veering 일어나면서 한기 위로 난기가 활승하여 강수가 나타날 수 있음

- **쟁점2) 강수량은 왜 많이 내렸을까?** (부분적중)
  - 1월 31일 09시 북반구 500hPa 고도 증분에서 24시간 전 모델이 예상한 것보다 중국 북동부지역으로 고도장이 하강하였음
  - 함경산맥 북쪽으로 쏟아지는 중상층 침강류가 예상보다 강해 하층(925hPa)의 고기압이 모델보다 강하게 발달하였음

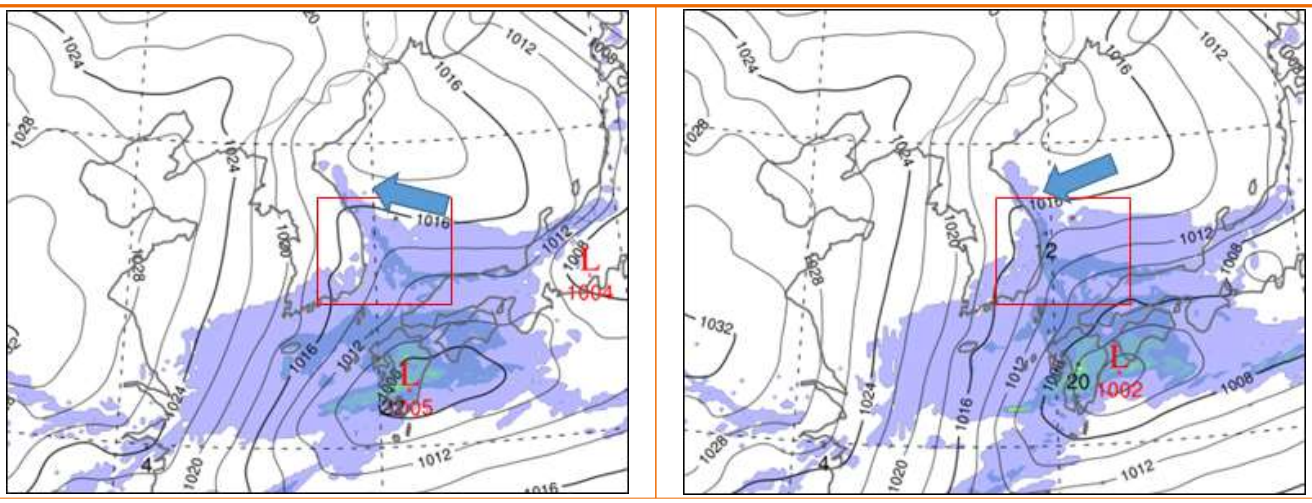


1월 31일 09시 925hPa GTS 묘화, GDAPS와 ECMWF 925hPa 예상

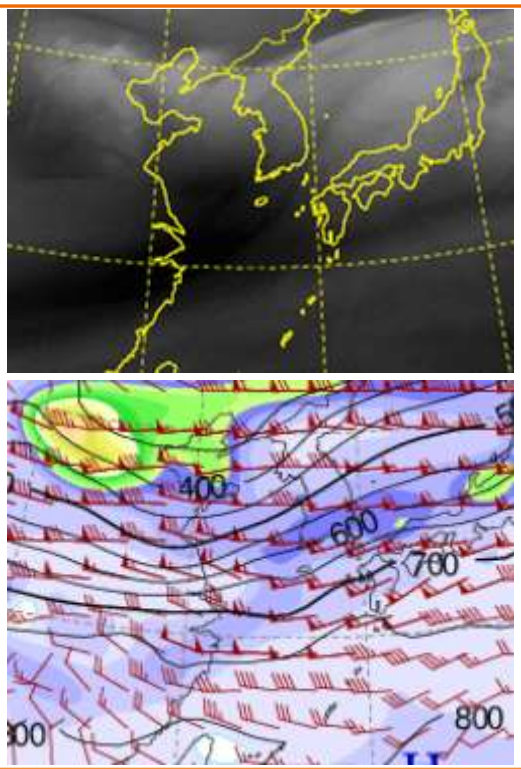


1월 31일 09시 500hPa 고도증분

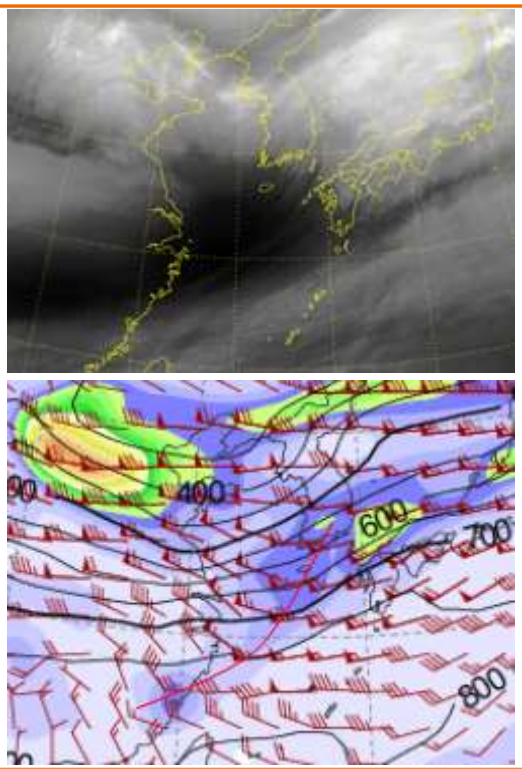
▶ **북고남저형일때는 남쪽저기압의 발달도 고려되어야...**
- 북고남저형의 유형에서는 남쪽골의 발달과 위치에 따라 동해안으로 남하하는 한기의 강도와 산맥에 수직되어 부는 바람의 방향이 결정됨
- 31일 15시 수증기영상에서 제주도 남쪽으로 암역 라인이 모델에 비해 뚜렷이 나타남
- 300K 등온위면 분석장에서 상해 동쪽으로 침강류가 강화되면서 골이 깊어지고 양의 잠재와도가 증가해(중상층의 저기압성 회전 증가) 지상 저기압 발달을 지원함
- 남쪽 저기압이 예상보다 발달(1005hPa=>1002hPa)하고 북상함에 따라 남북으로 기압경도력이 강화되어 북동기류는 더 강하게 유입됨



1월 31일 18시 LDAPS 해면기압, 누적강수 예상장(+33h/+03h)

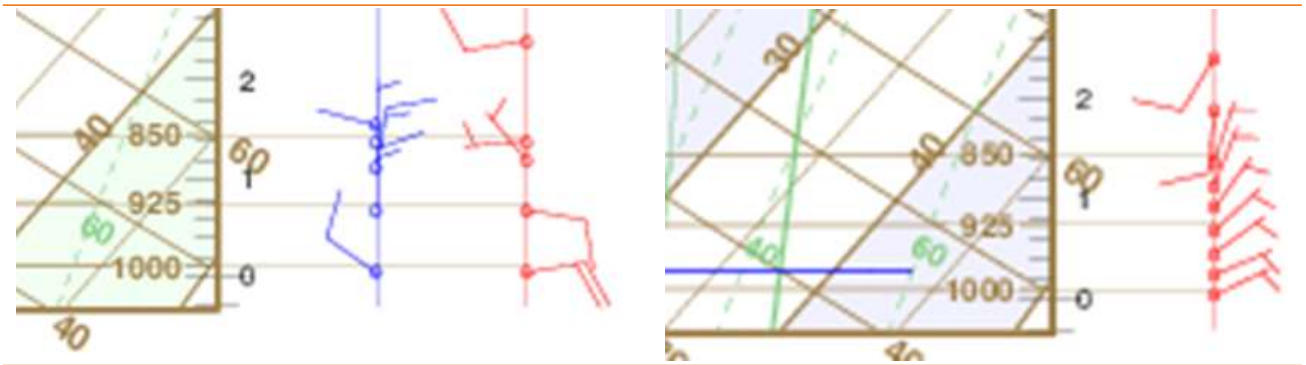


1월 31일 15시 GDAPS 수증기 구름모의영상과 등온위면 300K 예상장(+30h)



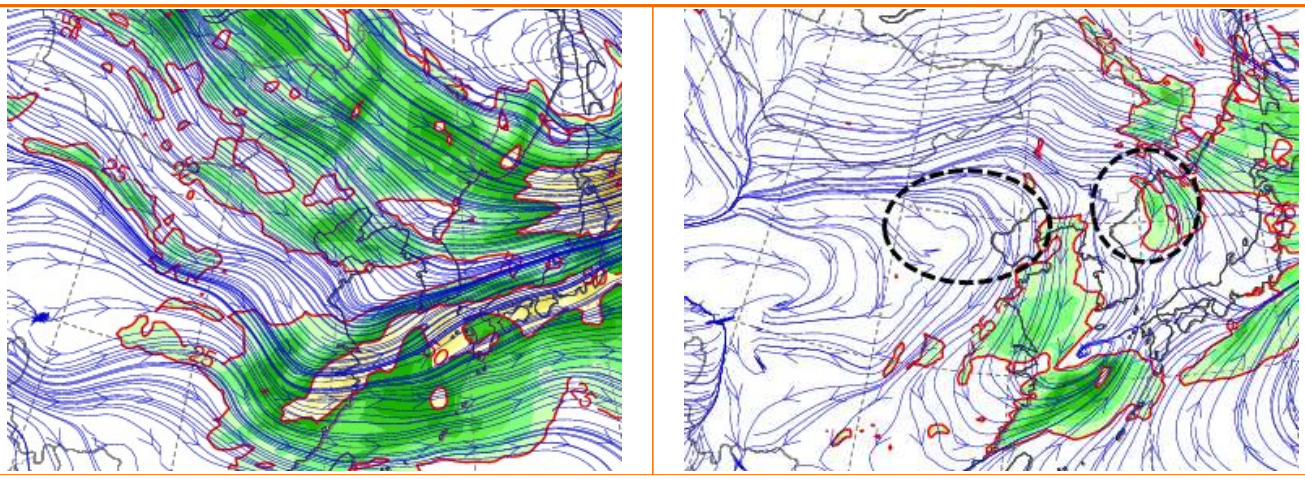
1월 31일 15시 수증기영상과 등온위면 300K 분석장(+00h)

- 실황에서 속초 고층자료 1000hPa 바람의 풍속이 20kts로 모델보다 10kts 이상 강하게 나타났음

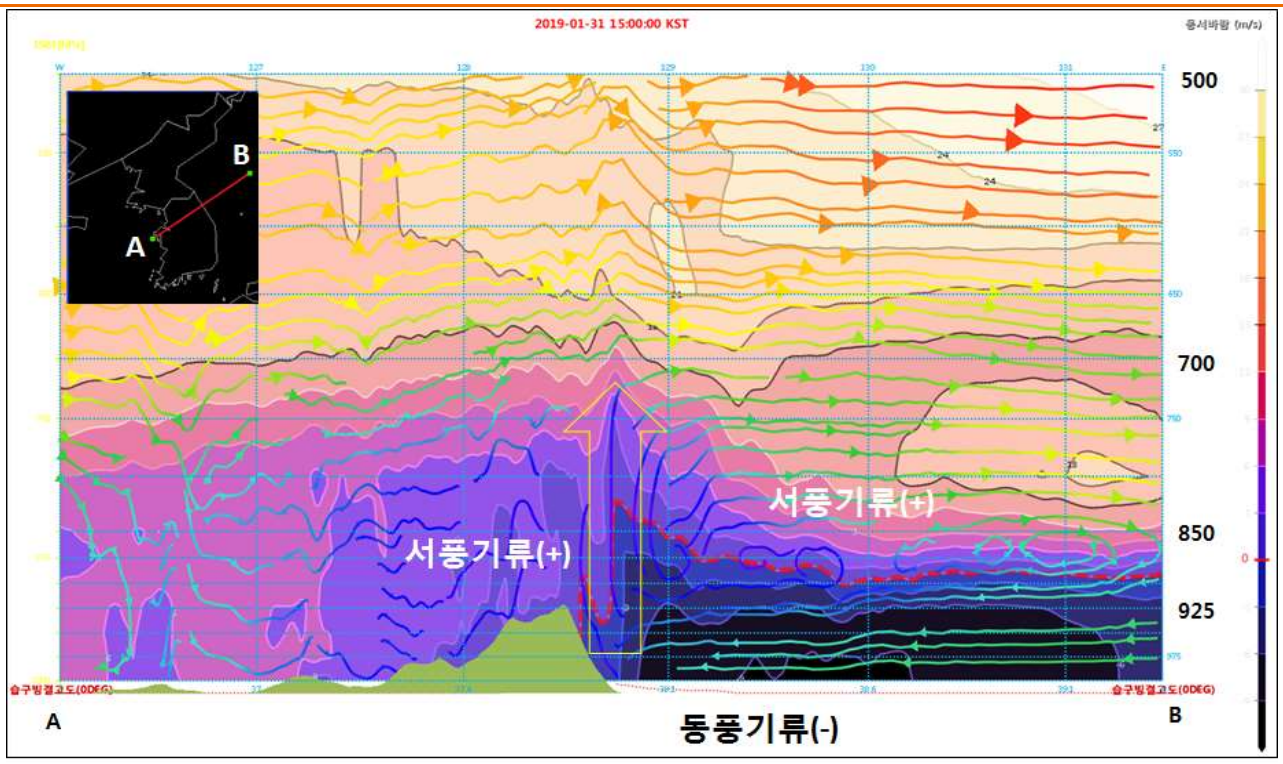


1월 31일 12시 속초 단열선도(모바일관측) / 속초 예상단열선도 (+3hr)

- **쟁점3) 강수 집중 구역은 해안인가 산간인가?**
  - cP 확장할 경우 상층의 침강류에 의해 하층 고압부가 발달할 때는 강한 침강류의 위치에 따라 하층 고압부 발달 경로가 달라짐
  - 700hPa 북서풍의 강풍대가 있는 곳의 하층인 발해만 서쪽과 개마고원 북동쪽으로 하층 고압부 형성되면서 강한 북풍기류가 동해안과 서해안으로 남하함
  - 지상 기압계는 P자 형태로 수렴역이 해안에 형성되는 해안형 강수 형태가 나타남
  - 남쪽저기압으로 인해 북서류와 북동기류가 만나는 골이 깊어지면서 수렴지역 중심으로 강수가 강하게 나타남



1월 31일 09시 700hPa과 925hPa 분석장



1월 31일 15시 동서바람, 동서/남북바람 연직흐름도 연직단면 분석장(+00h)

  - 연직단면에서 빨간색 점선을 기준으로 검정색 계열의 동풍기류와 보라색 계열의 서풍기류가 동해안에서 수렴하면서 산악지역보다 해안(양양,북강릉,주문진)에 강수가 더 강했음

동해안형 강수

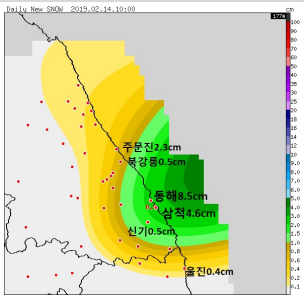
단순한 cP 확장의 경우 강수시간과 육풍 강도가 중요

1. 예보와 실황은? → 예보와 분석보다 적설이 적었던 사례

2월 13일 17시 예보

- 강수량
  - 강원동해안과 산지: 5~10mm
  - 경북북동산지, 경북북부동해안 5mm 미만
- 적설
  - 강원동해안과 산지: 5~10cm 많은곳 15cm이상
  - 경북북동산지, 경북북부동해안 1~5cm

14일 실황



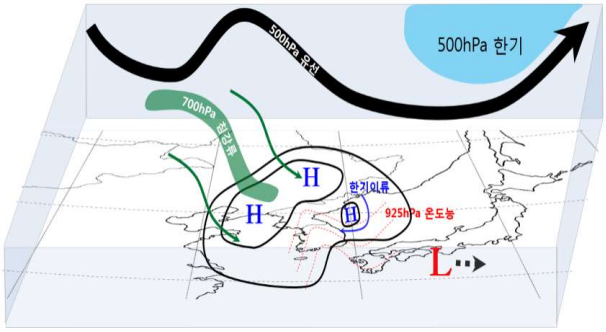
- 적설
  - 동해 8.5cm
  - 삼척 4.6cm
  - 주문진 2.3cm
  - 북강릉 0.5cm
  - 울진 0.4cm

2. 쟁점사항은?

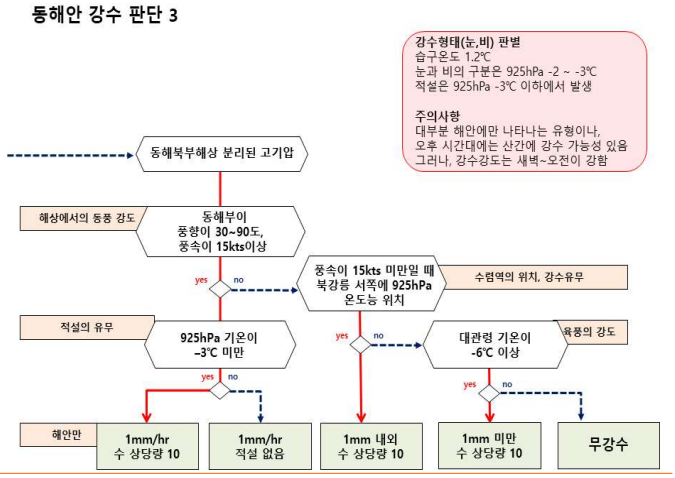
- **쟁점1) 강수 메커니즘은 무엇인가?**
- **쟁점2) 수렴대는 어디에 형성될까?**

3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 강수 메커니즘은 무엇인가?**



강수 메커니즘 모식도(단순 고기압 확장형)

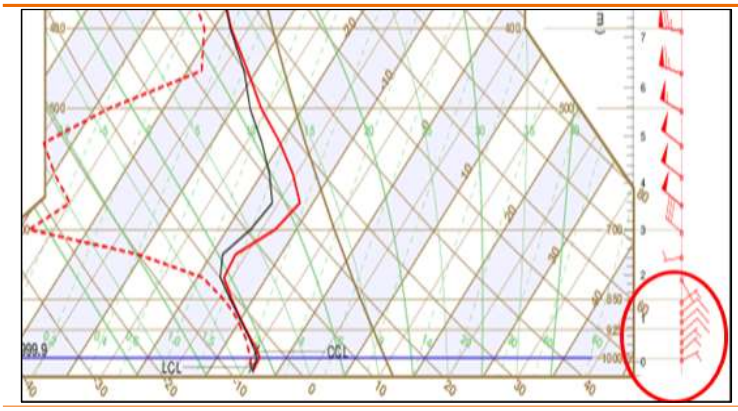


동해안 강수 판단 III 흐름도

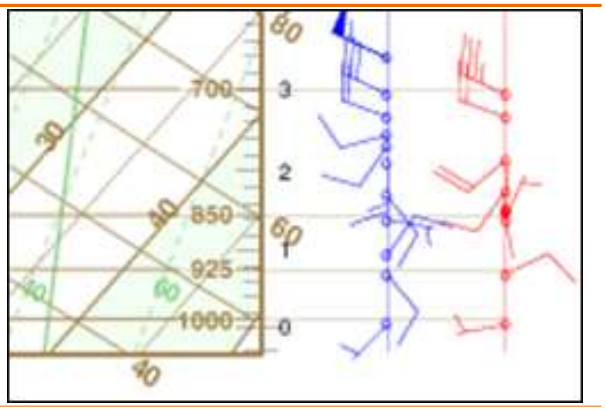
- 상층의 한기 축은 동쪽으로 빠져 있고, 남쪽 저기압도 빠져나간 후 우리나라 북서쪽에서 고압부가 확장될 때,
- 상층 기압골 후면으로 침강류에 의해 고압부의 강도가 결정되나, 남쪽에 저기압이 없어서 단순히 cP 확장만으로는 북동기류가 강하지 않음
- 주로 해안에서의 수렴역에서 강수가 내리고 산간까지 많은 강수가 내리기 어려움

- 북동기류가 약할 때에는 강수 시점에 따라 내륙에서 산풍과 결합된 육풍이 불어 강수가 해안에 붙지 못하는 경우가 있음
- **북동기류의 강도와 육풍의 강도에 따른 수렴대 위치 분석이 중요**

- **쟁점2) 수렴대는 어디에 형성될까?**
  - 2월 14일 06시 북강릉 예상 단열선도에서 하층의 850hPa까지 북동기류가 유입되는 것으로 예상되었고, 풍향은 60도로 태백산맥에 수직하게 바람이 불어 수렴이 형성되어 내륙으로 유입될 것으로 분석함. 기온도 낮아 수상당량비도 적지 않을 것으로 판단하여 적설이 많을 것으로 예상함
  - 실제로 1000hPa에서는 서풍이 관측되었고 925hPa 바람도 예상보다 시계방향으로 돌았음



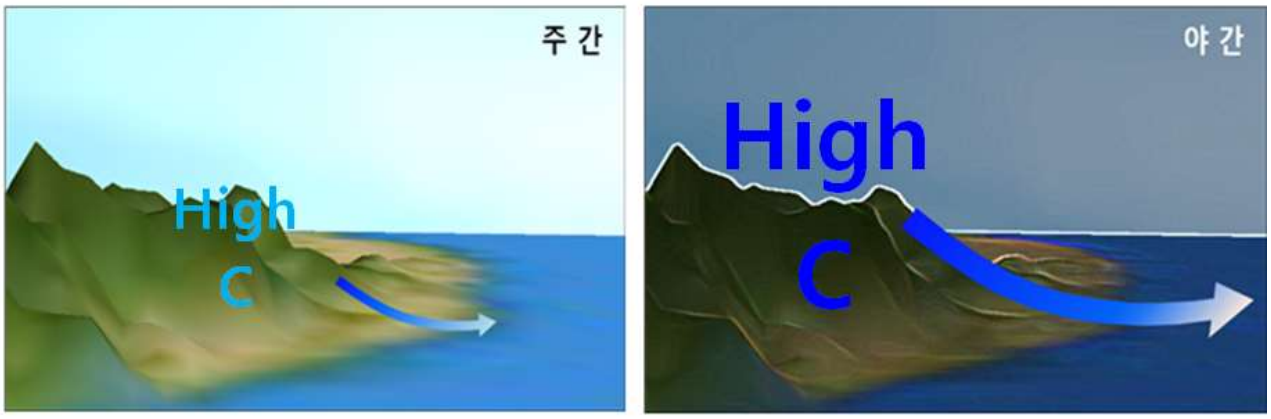
2월 14일 06시 GDAPS 북강릉 예상단열선도(+21h)



2월 14일 09시 북강릉 단열선도

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **내륙에 기온이 많이 떨어질 때는 육풍의 강도를 고려해야 함**
  - 단순히 고기압 확장형의 경우 한반도는 고기압권에서 한기이류와 복사냉각에 의한 기온 하강이 크며, 특히 새벽 시간의 경우에는 산풍과 육풍이 더해져 비교적 강한 서풍류의 바람(태백산맥에서 해안으로 불어나가는 바람)이 지상 부근에서 해상으로 불어 나감

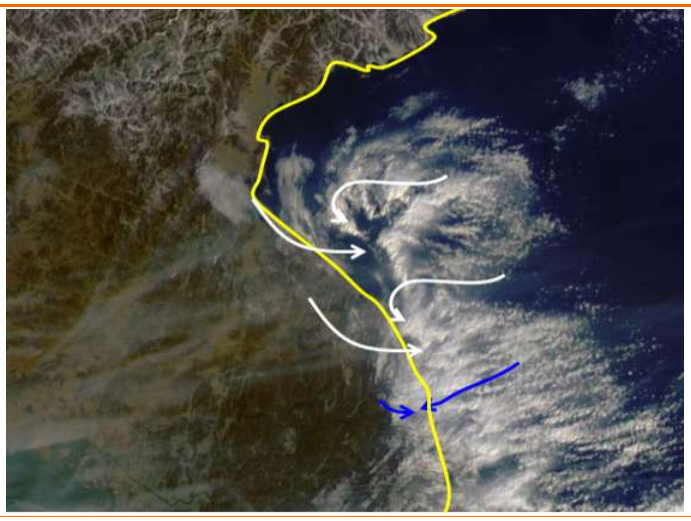


겨울철 강원영동 육풍의 일변화

- 14일 10시 천리안 고시(GOCI)영상에서 원산만과 강릉 앞바다에서 저기압성으로 구름이 수렴하고, 남쪽으로는 구름이 내륙으로 유입되어 눈이 내리는 것을 확인할 수 있음
- 상대적으로 기온하강이 큰 북쪽산맥에서는 해상으로 불어나가는 바람이 더 강해 동풍류와의

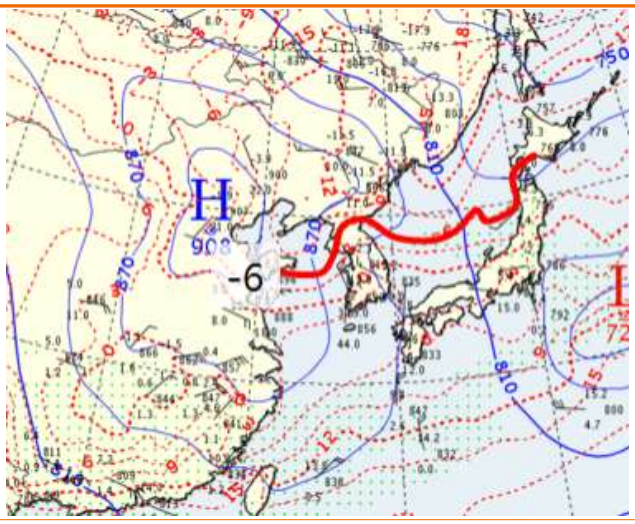
수렴대가 내륙으로 유입되지 못하지만,

- 남쪽(동해 부근)은 그 반대로 북동기류가 북쪽보다 약간 강하고 육풍은 더 약해 수렴대가 해안으로 유입될 수 있어 적설이 발생함

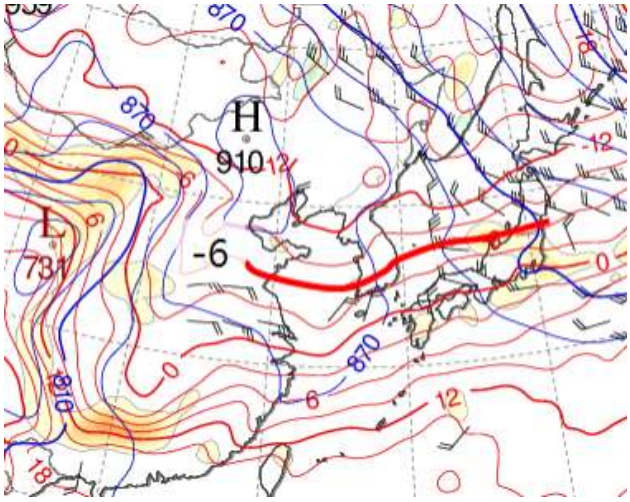


2월 14일 10시 천리안 GOCI 영상

- **유사사례는 육풍이 강하지 않았음**
  - 2009년 3월 1~2일 사례는 이번 사례와 마찬가지로 단순히 고기압이 확장하면서 동해상으로 북동기류가 유입된 사례임
  - 해수면기온은 크게 차이 나지 않는 상황에서 대관령(내륙)의 기온이 –2.5도로 이번보다 10도가량 높았고, 동서 간에 기온차이가 크지 않아 해안에서 북동기류가 그대로 유입됨
  - 유사사례에서는 북동기류가 내륙까지 유입되면서 하층수렴으로 인해 강수대가 발달



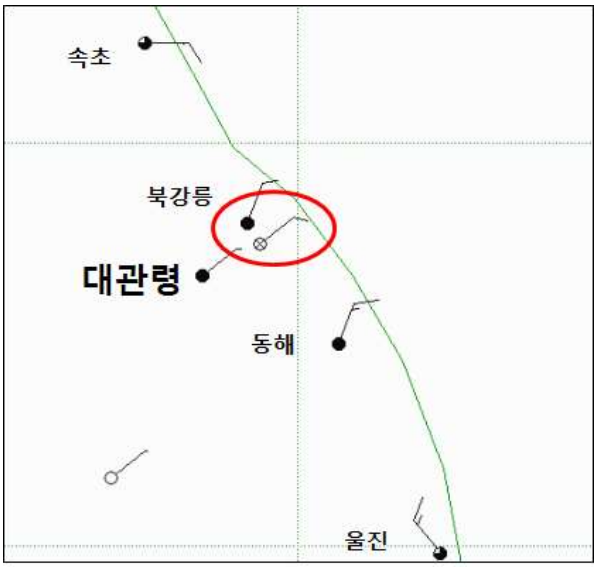
2009년 3월 1일 21시 925hPa 분석일기도



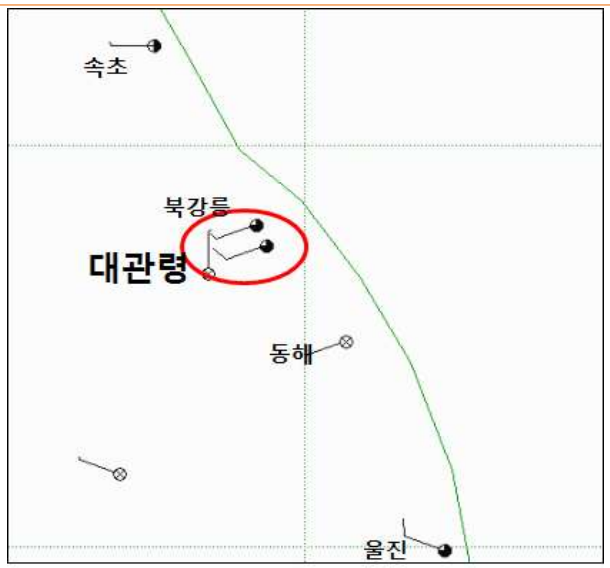
2019년 2월 13일 21시 925hPa 분석장(+0h)

2009년 3월 2일 00시 지상기온

20019년 2월 14일 00시 지상기온



2009년 3월 2일 00시 지상바람



20019년 2월 14일 00시 지상바람

- **하층 수렴대가 유입되지 않은 상황에서 925hPa 북동기류 유입은 약한 강수만**
  - 14일 새벽에는 육풍이 강해 수렴대가 해상에서만 머물렀고, 낮이 되면서 육풍이 약화되었으나 약한 수렴대는 여전히 해안가에 위치함. 고기압이 떨어져 나가면서 925hPa 고도에서 동풍이 불기 시작할 때 태백산맥의 풍상측에 구름이 약하게 발달하면서 적설이 기록됨

북동기류가 약하고 육풍이 강할 때 해안에 붙지 못하는 수렴대

하층 수렴대는 유입되지 못할 때 925hPa이상 고도에서 북동기류가 유입될 때

4-6. 2023년 2월 14~15일 사례

침강류가 한반도로 내리꽂는 형태의 동풍 강수

제주도까지 강수대가 형성된 강한 동풍 유입으로 동해안 대설

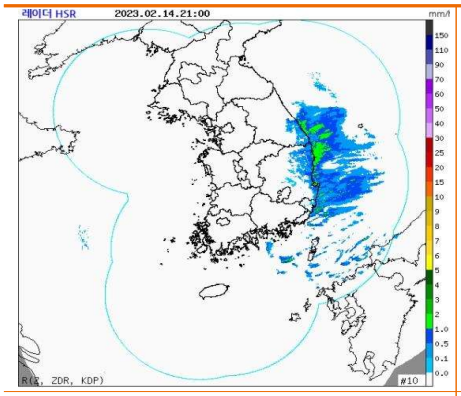
1. 예보와 실황은?

예보(2월 13일 17시 발표)	실황(2월 14~15일)
▸예상 강수량(14일~15일) - 강원영동, 경북북부동해안, 경북북동산지: 5~10mm ▸예상 적설(14일~15일) - 많은 곳 강원영동 10cm 이상 경북북부동해안, 경북북동산지 3~8cm	▸누적 강수량(14일~15일) - 궁촌(삼척) 47 울진 21.8 주문진(강릉) 26 하조대(양양) 13 울기(울산) 13

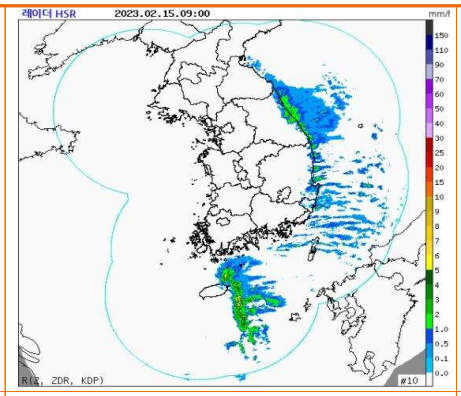
최심신적설 (cm)	
강원산지	미시령 9.4 진부령 7 대관령 4.8 용평 2.7 임계 1.1
강원동해안	북강릉 24.2 삼척 22.3 동해 20.2 연곡 16.2 속초 5.5
경북동해안 / 경북북동산지	울진 21.8 영덕 11.3 / 수비 5.2 석포 3.3

- 강원영동과 경북북부동해안에 적설이 20cm 이상 기록되면서 예보보다 두배 이상 많은 강수량과 적설을 기록함

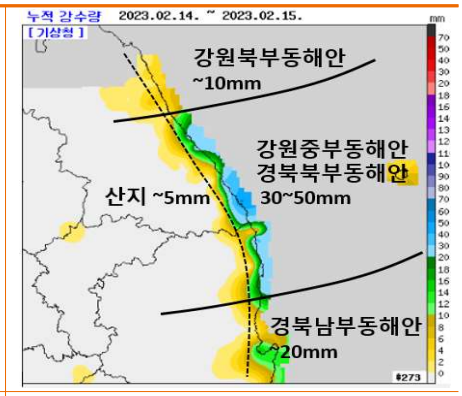
- 한기가 동해상을 통해 북동쪽에서 남동쪽으로 길게 돌아 남하해 제주도 부근까지 북동기류가 유입되었고 서쪽기류와의 수렴으로 제주도 동쪽해상에 강수에코가 남북으로 서있는 형태를 보임



2월 14일 21시 레이더 영상



2월 15일 09시 레이더 영상



2월 14~15일 누적강수량

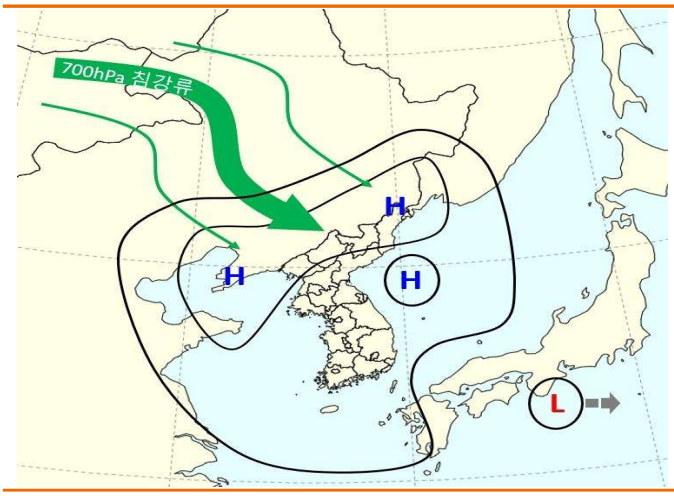
2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 강수 메커니즘과 침강류가 한반도로 내리꽂는 형태에서의 산지 적설 강도는?**
- **쟁점2) 하층 북동풍이 강하게 유입되는 구역과 지속시간은?**
- **쟁점3) 경북동해안과 강원동해안의 강수 차이점은?**

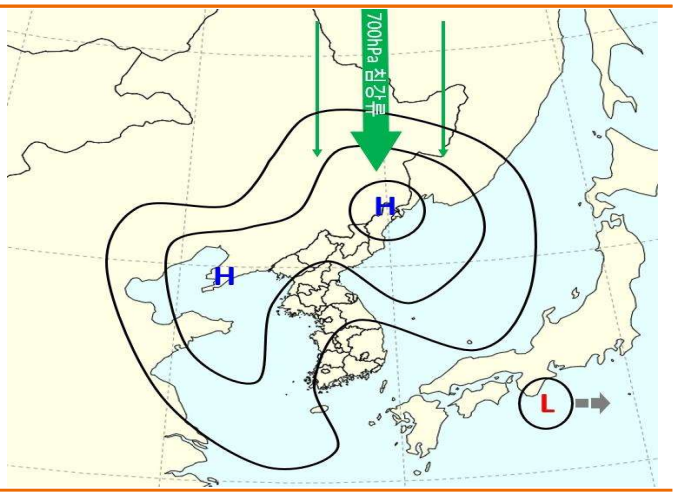
3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 강수 메커니즘과 침강류가 한반도로 내리꽂는 형태에서의 산지 적설 강도는?**

- 일반적인 단순 cP확장형 강수에서는 700hPa 침강류가 북서풍으로 유입되며 고기압이 동쪽으로 이동하는 반면, 이번 사례에서는 **700hPa 침강류가 북풍으로 유입됨에 따라 만주에서 한반도로 내리꽂는 기류 형태**로 고기압이 동쪽으로 이동하기보다는 남쪽으로 남하하게 됨



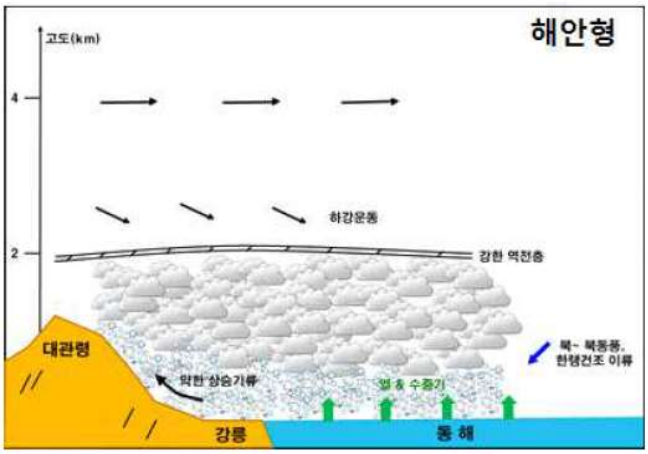
단순 cP 확장형 강수 메커니즘 모식도



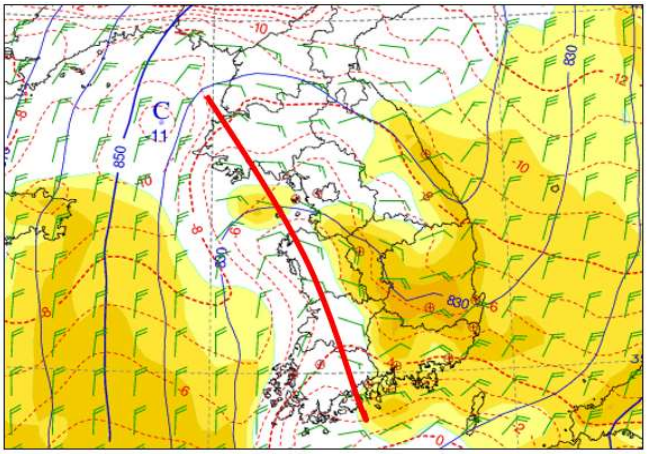
2월 14~15일 강수 메커니즘 모식도

- 단순 cP확장형 강수의 경우 주로 해안형의 특징을 보이는데, 이번 사례는 중국북동부에서 강하게 발달한 고기압의 영향으로 동풍이 내륙 깊숙이 유입되면서 **925hPa 온도능이 서쪽 내륙까지 들어가는 형태**로 해안형 강수의 특징과 거리를 보임. 해안을 중심으로 강한 강수대가 형성되었으며, 산지까지도 강수대가 유입되었음. **중상층 기압골의 지원이 없었지만 강원산지에 10cm, 경북북동산지에 5cm 가까이 적설을 기록**하였음

- 단순 cP확장형 강수와 다르게 침강류가 한반도로 강하게 내리꽂는 형태의 동풍 강수에서는 중상층 기압골 지원이 없이 산지에 5~10cm까지 적설이 가능함



영동지방 해안형 강수 유형 모식도



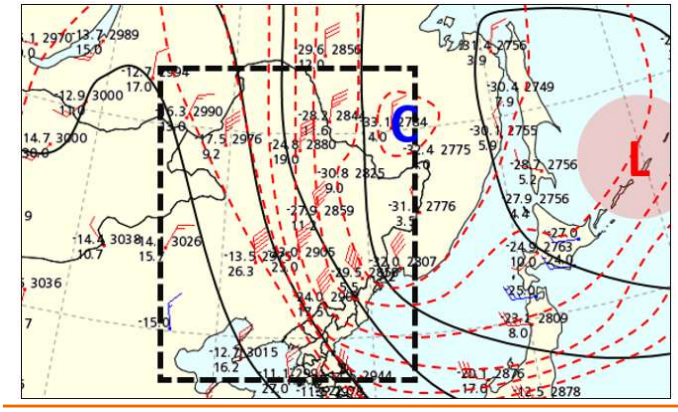
15일 03시 925hPa 상세바람/기온

- **쟁점2) 하층 북동풍이 강하게 유입되는 구역과 지속시간은?**

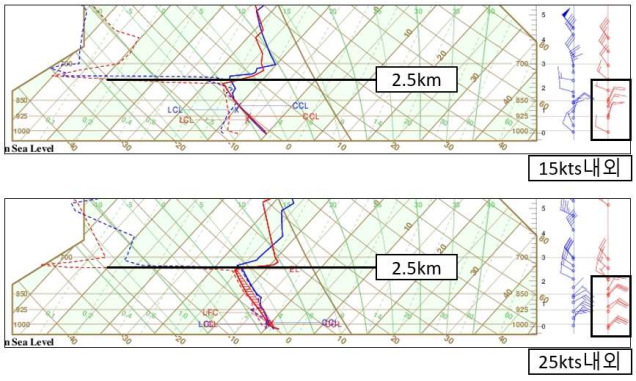
- 700hPa 침강류가 만주에서부터 우리나라로 강하게 유입되어 중국북동부의 하층 고기압 발달을 지원하였음

- 북강릉, 포항의 단열선도를 보면 구름대 top은 약 2.5km까지 발달하였고 북동풍은 850hPa 고도까지 유입됨. 하층 북동풍의 강도는 북강릉 15kts 내외, 포항 25kts 내외로 **강풍대는 북부동해안보다 남부동해안에 위치**한 것을 알 수 있음

- 동해안의 850hPa 해기차는 20℃ 이상으로 크게 나타남. 단순 cP확장형 강수의 경우 강수량이 해기차와 비례하여 증가하지 않고, **동해안으로 유입되는 종관풍 강도가 강할수록 강수량이 증가하기 때문에 하층 북동풍의 강도가 더 중요**함



14일 09시 700hPa GTS 일기도



15일 03시 단열선도 북강릉(상), 포항(하)

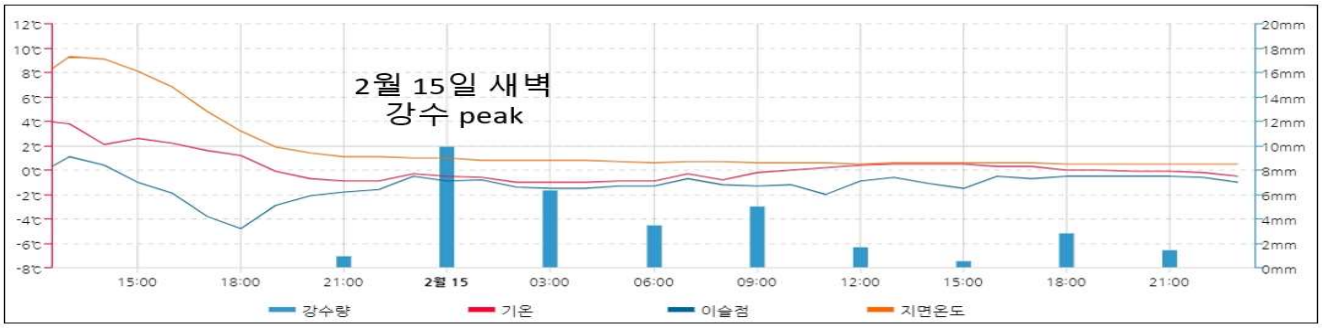
- 동해 부이로 관측된 해상의 북동풍 강도는 **14일 밤부터 15일 밤까지 15kts 이상을 기록함.** cP확장형 강수 가이던스를 적용해보면 해안을 기준으로 시간당 1mm, 수상당량 10에 해당하는 강수 강도가 24시간 지속되면서 **20cm 이상의 적설도 가능한 조건**이었음

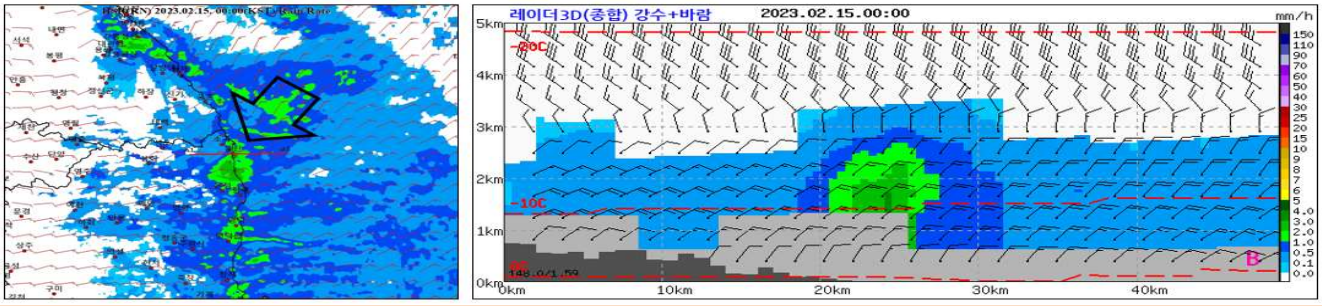
동해 부이 바람 시계열(2월 14일 21시 ~ 15일 21시)

- **쟁점3) 경북동해안과 강원동해안의 강수 차이점**

- 동해상에 강한 한기가 남하하며 북동풍이 유입되는 2월 14일 밤부터 15일 새벽에는 경북동해안을 중심으로 강수가 집중됨. 강수 에코 top은 3km 부근까지 발달하였고, 주로 1~2km 고도에서 강한 에코가 나타남. 북동풍은 2.5km 고도까지 15kts 내외로 유입됨

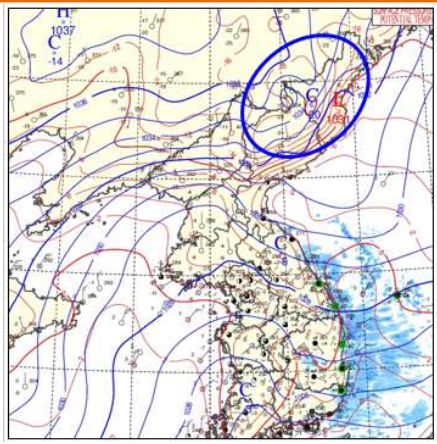
- 경북동해안의 경우 강수 강도의 차이는 있지만, **해상에서 15kts 이상의 하층 북동풍이 계속해서 유입되면서 강수 지속시간이 24시간으로 길게 나타남**



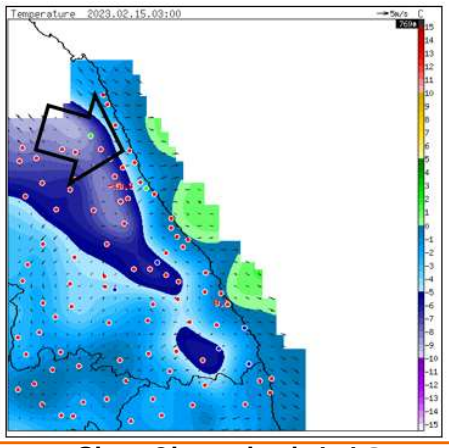


2월 14~15일 울진 지상 관측 시계열(상), 2월 15일 00시 레이더 영상 및 울진 부근 연직 단면(하)

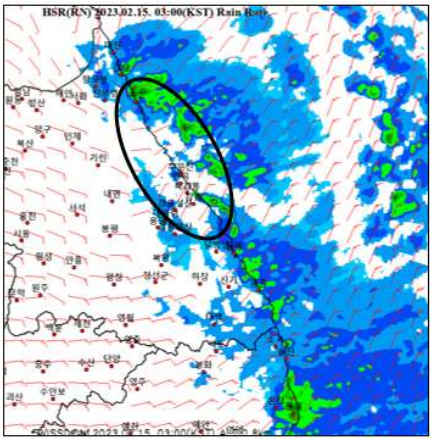
- 2월 15일 새벽 동한만 부근의 기온이 –20℃까지 떨어지면서 **강한 Cold Pool 에 의한 국지 고기압이 형성되었음. 국지 고기압의 영향으로 강원동해안에 북동풍이 유입**되었지만, 강원 산지도 –8도 정도로 강한 Cold Pool이 형성되어 육풍이 강함에 따라, 강수대가 육지까지 유입되지 못하고 해상에 머물렀음



2월 15일 03시 해면기압 + 레이더 영상



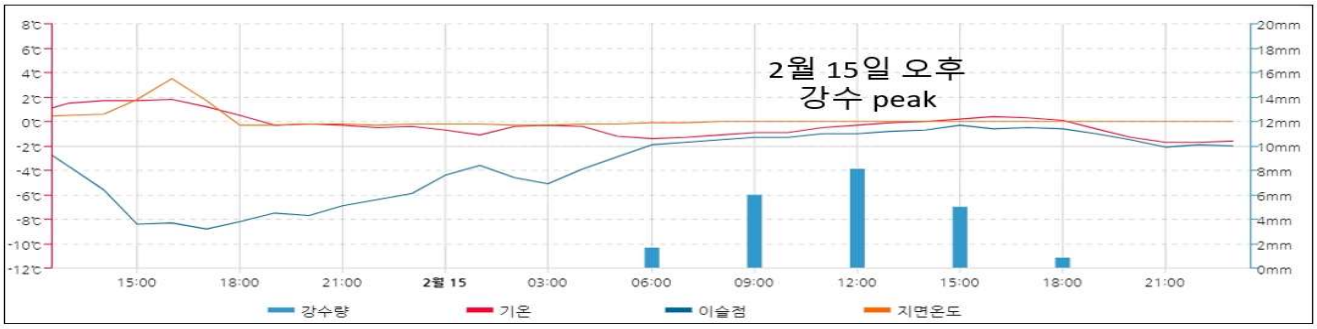
2월 15일 03시 지상기온 +바람벡터

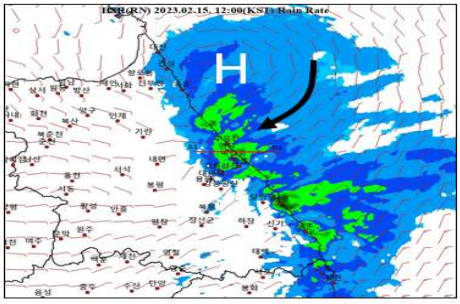


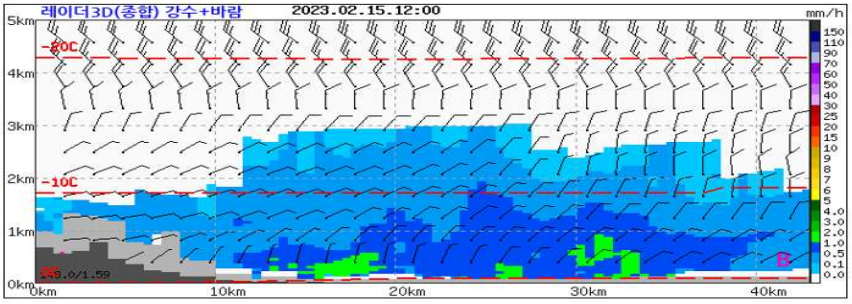
2월 15일 03시 레이더 영상 + 800m 바람

- 육풍이 약해지는 **15일 아침부터 강수대가 해안에서 강원동해안으로 유입되면서 오후 시간에 강수가 집중**됨. 강수 지속시간은 12시간 정도로, 북동풍이 강하고 길게 유지된 경북동해안에 비해 짧았음

- 레이더 영상을 보면 강원북부해상의 고기압성 순환에 의해 강수대가 유입됨. 약한 북동풍이 계속해서 유입되는 가운데 국지 고기압의 영향이 더해지면서 강수 에코 top은 3km 부근까지 발달함. 경북동해안과 다르게 주로 1km 이하 고도에서 강한 에코가 나타났고, 하층 북동풍의 강도는 경북동해안보다 약한 10kts 내외로 약 3km까지 유입됨







2월 14~15일 북강릉 지상 관측 시계열(상), 2월 15일 12시 레이더 영상 및 북강릉 부근 연직 단면(하)

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **하층 북동풍이 강하게 유입되는 강수 집중구역과 강수 지속시간을 고려했어야 한다.**

  - 이번 사례는 강원영동 많은 곳 10cm, 경북북부동해안, 경북북동산지 3~8cm의 적설을 예보하였으나, 강원중부·경북북부동해안에 20cm 이상으로 많은 양의 적설을 기록함

  - **하층 북동풍이 강하고 지속시간이 24시간 가까이 유지되는 경북북부동해안에는 20cm 이상 적설이 가능한 조건으로 하층 북동풍 유입 강도, 지속시간까지 고려**했어야 함

- **동한만 부근의 국지 고기압에 의한 강수를 고려했어야 한다.**

  - 강원중부동해안의 경우 북동풍의 강도는 경북동해안보다 약하지만 북동풍이 계속해서 유지되는 가운데 동한만 부근의 국지 고기압의 영향으로 2월 15일 오후 강수가 집중됨

  - 국지 고기압의 영향이 없었다면 북강릉에 20cm 넘는 적설을 기록하기 어려웠음. 동한만 부근의 Cold Pool의 강도를 분석해 국지 고기압의 발달 가능성을 고려했어야 함

5. 중층기업골 강수

12월 26일 중부내륙 중층 기압골에 의한 대설

북쪽 기압골에 의한 중층 강수의 강화로 대설 기록

1. 예보와 실황은?

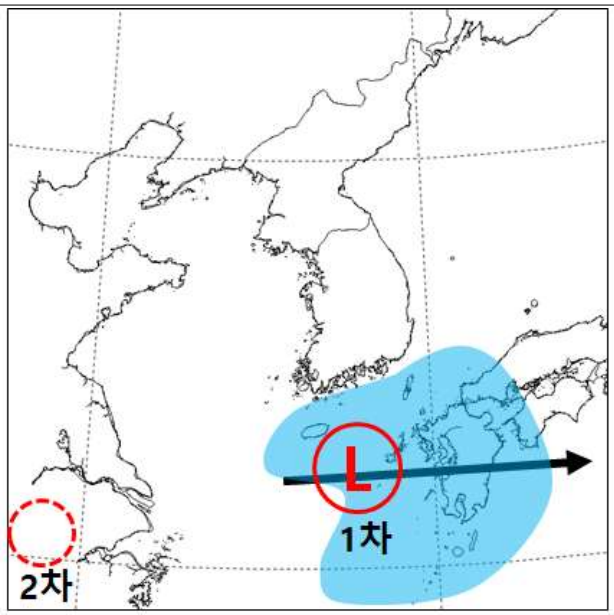
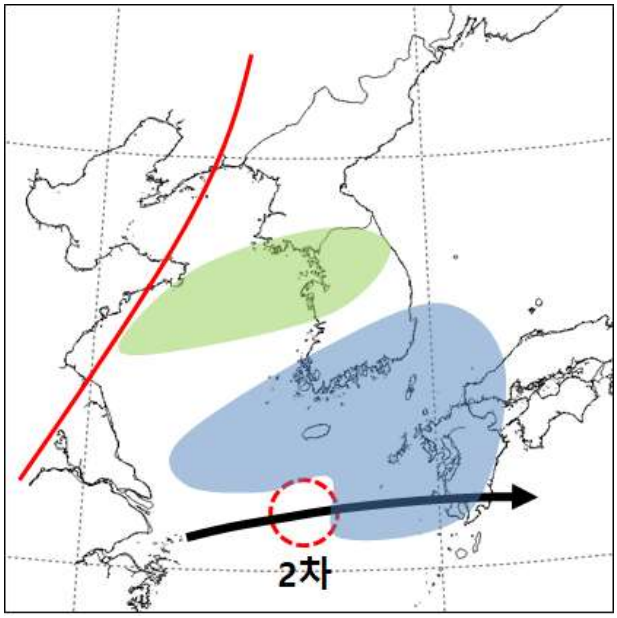
적설 예보(26일 05시 발표)	실황
충청내륙, 전북동부, 경북내륙, 경남북서내륙 : 1cm 내외 **그 밖의 중부지방 빗방울 또는 눈 날림**	강원영서남부, 충북북부: 5cm 이상 경기동부: 1~3cm

2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 강수 시스템을 확실하게 이해하는 것이 중요하다.**
- **쟁점2) 기압골 강수의 경우 당연히 기압골의 실황분석이 중요하다.**
- **쟁점3) 습구온도를 활용하면 빠른 특보 발표와 실황 대응이 가능하다.**

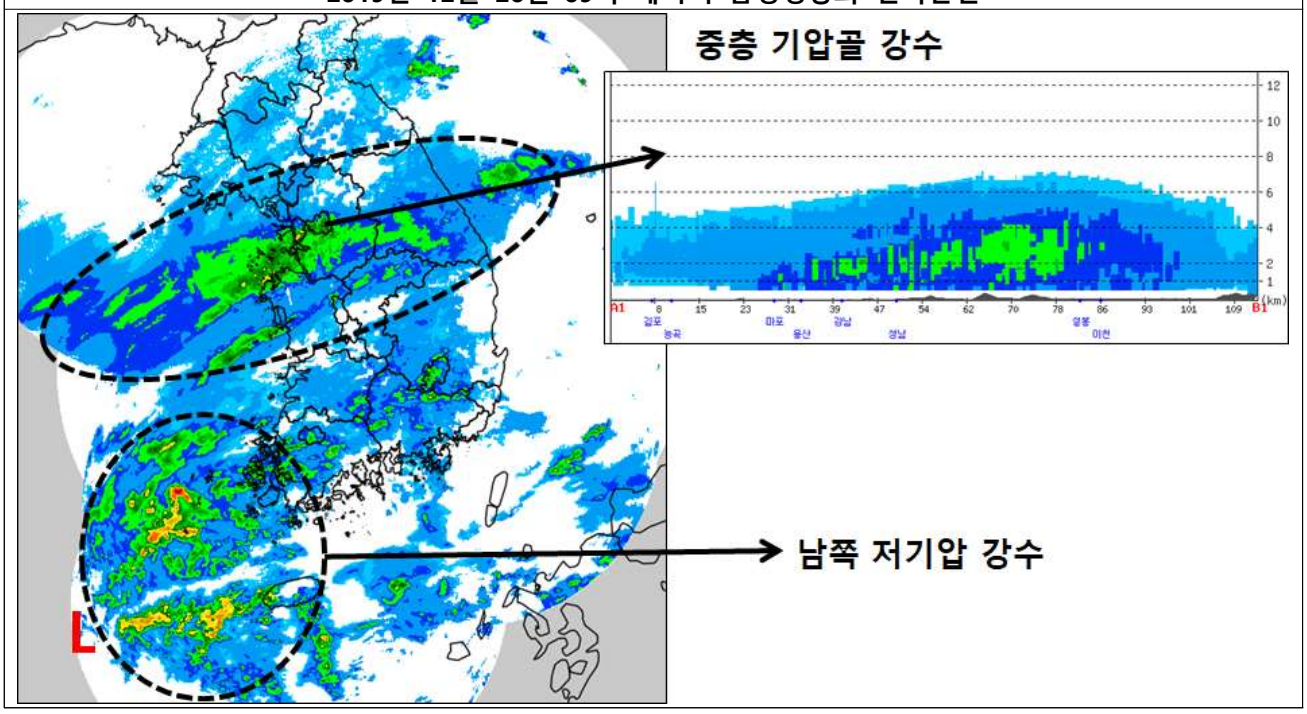
3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 강수 시스템을 확실하게 이해하는 것이 중요하다.**

2019년 12월 25일 오후 강수 메커니즘	2019년 12월 26일 새벽~오전 강수 메커니즘
	

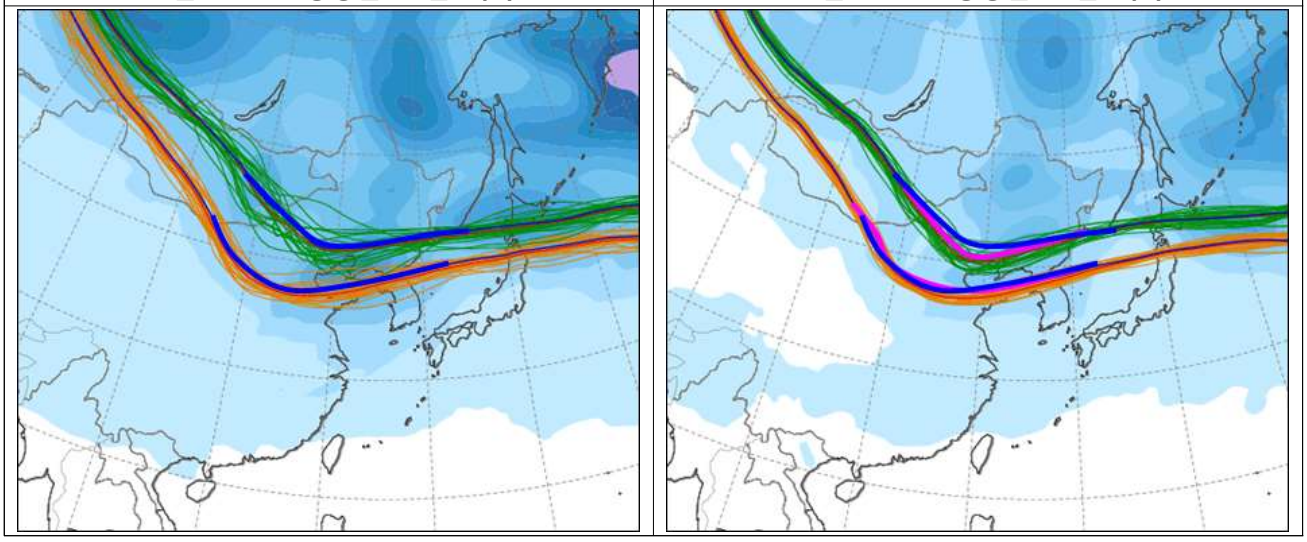
- 25일 오후부터 남쪽 기압골의 영향으로 강수가 예상되며, 26일에는 남쪽골과 북쪽골이 동시에 통과하면서 강수대가 이분화
- **중부지방은 남쪽 기압골이 아닌 북쪽 기압골 영향을 받는 강수 시스템이므로 남쪽의 저기압 분석보다는 북쪽 상층 기압골의 강도 분석이 무엇보다 중요**
- **녹색 영역의 중부지방 강수를 강화하게 만드는 북쪽 기압골의 강도를 실황에서 계속 추적하는 것이 필요했음**

2019년 12월 26일 09시 레이더 합성영상과 연직단면



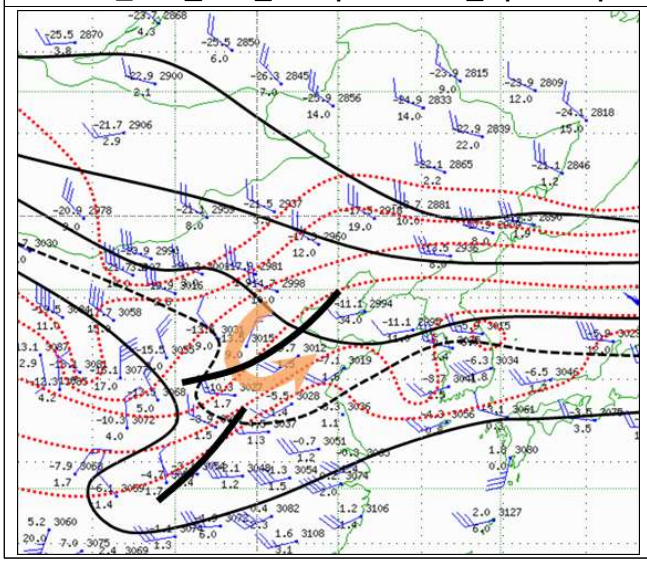
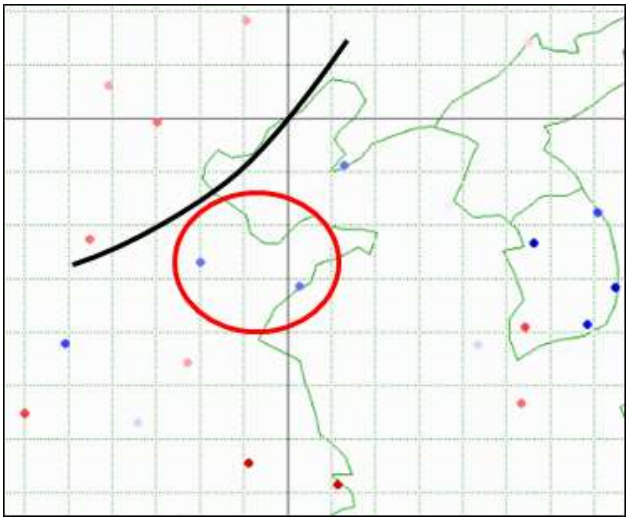
- 전개된 실황을 보면 남쪽 저기압에 의한 강수와는 다른, 북쪽 기압골에 의한 강수대가 중부지방에 발달한 것을 알 수 있음
- 특히, 중부지방의 강수는 연직단면을 보면 지상에서부터 떠 있는 형태로 중상층 기압골에 의한 중층 강수 형태임을 알 수 있음
- **따라서, 북쪽 기압골의 강도가 중부지방의 강수를 강하게 할 수 있는 상황임을 알 수 있음. 과거 사례에서도 중층 강수로 인해 강수량이 기록된 사례 많았음**

22일 12UTC 앙상블 모델 예측	23일 12UTC 앙상블 모델 예측

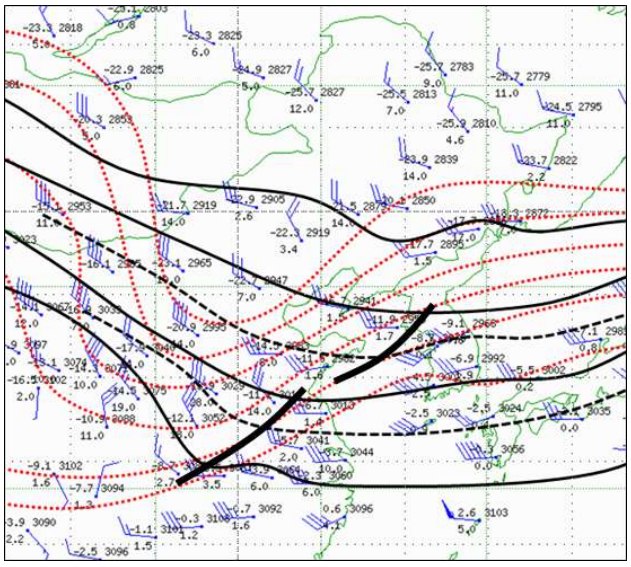
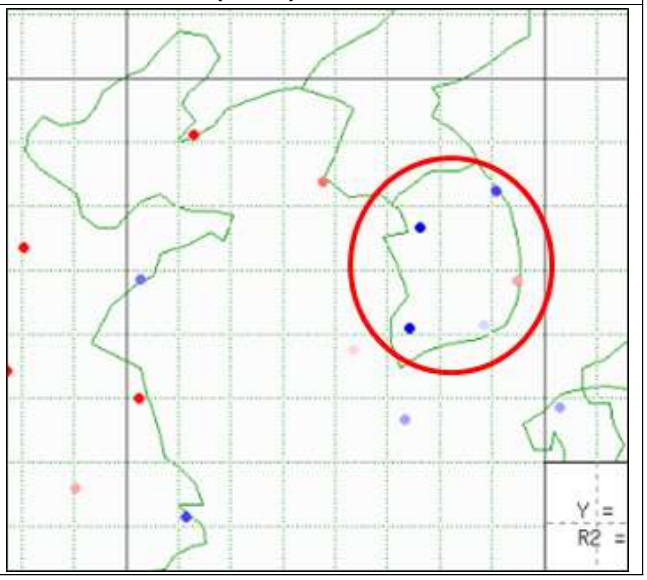


- 앙상블 모델의 예측 경향도 계속해서 북쪽 기압골의 강도가 깊어지는 경향을 보여주고 있었음
- 결정 모델인 파란선 보다 평균장인 빨간선이 더 남쪽에 있어, 점차 기압골이 깊어질 가능성이 크다는 것을 알 수 있음
- **중부지방의 강수가 강해질 수 있는 가능성을 모델 경향에서도 나타내고 있었음**

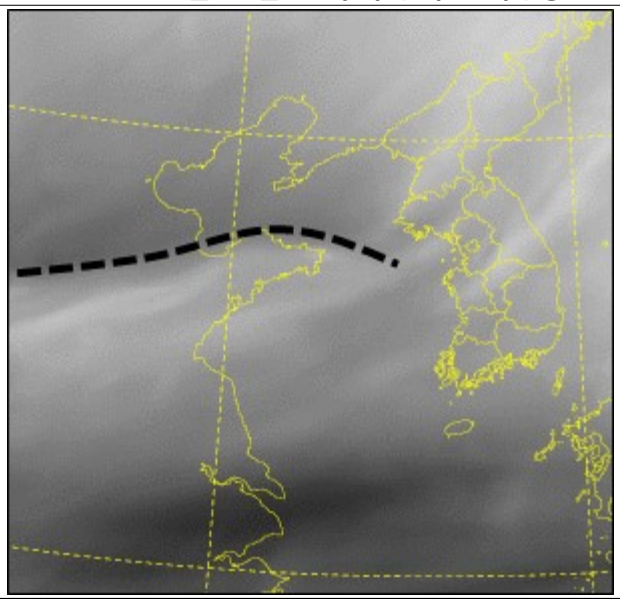
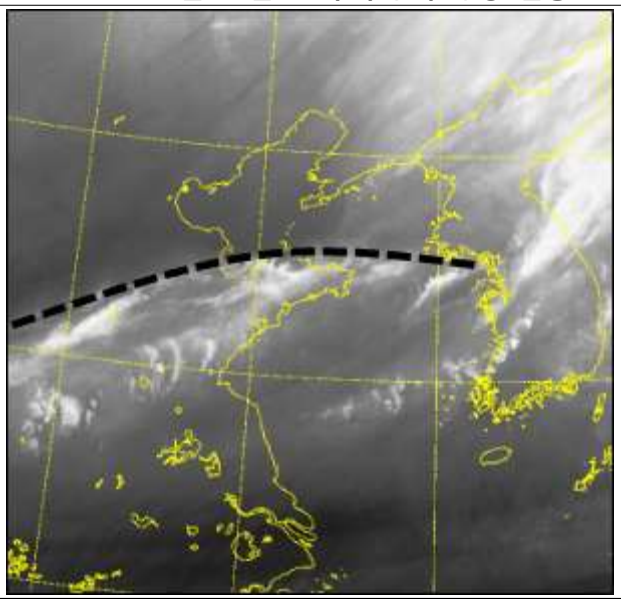
● **쟁점2) 기압골 강수의 경우 당연히 기압골의 실황분석이 중요하다.**

2019년 12월 25일 21시 700hPa 일기도 묘화	UM 초기장의 700hPa 풍속 편차
	

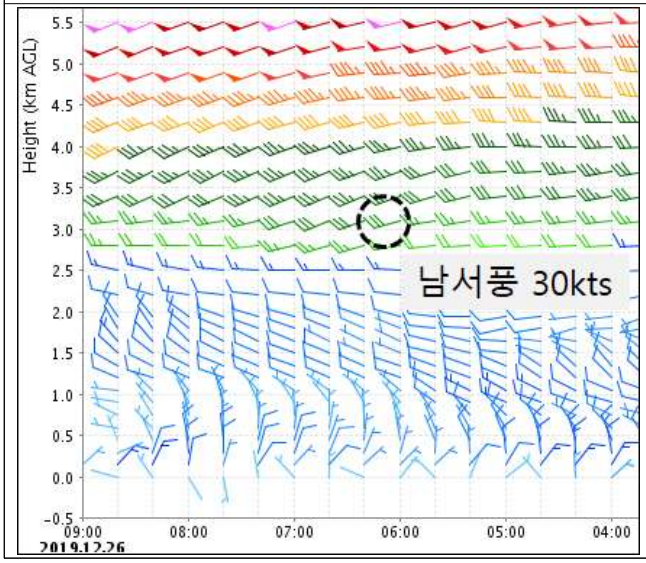
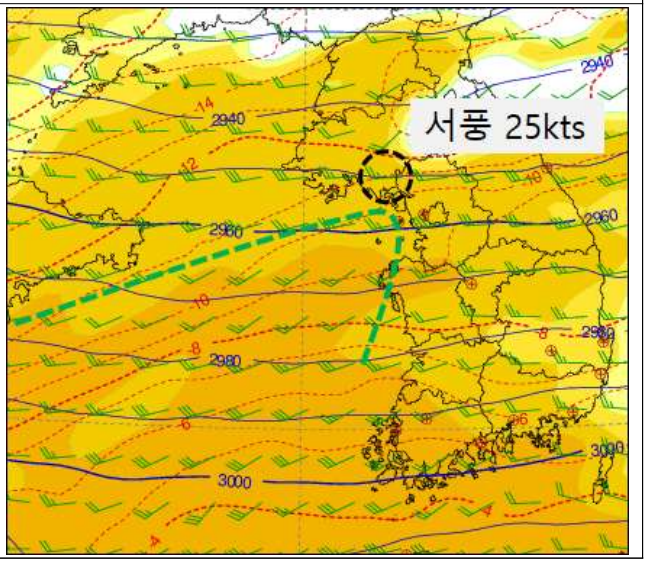
- 전날 밤이었던 25일 21시의 GTS 자료를 활용하여 700hPa 일기도를 직접 묘화해보면 산둥반도 서쪽으로 기압골이 저기압성 순환을 보일 정도로 강하게 발달
- 기압골 전면으로 남서풍이 강화되고 있었으며, 이 남서풍의 구역을 UM 모델의 초기장은 과소 모의 하고 있었으므로 실제 강수는 더 강해질 수 있음
- **이 시점에서 중부지방 북쪽 기압골에 의한 강수량이 더 늘어날 수 있음을 실황 분석을 통해 파악 가능**

2019년 12월 26일 09시 700hPa 일기도 묘화	UM 예상장(+12H)의 700hPa 풍속 편차
	

- 사례 당일인 26일 09시도 700hPa의 일기도를 묘화해보면 한기를 동반한 기압골이 서해상으로 위치하고 전면으로 남서풍이 30kts 이상으로 강화된 것을 알 수 있음
- 마찬가지로 남서풍 구역의 풍속은 UM 모델이 과소 모의한 결과로 나타나면서 실제 강수가 모델의 예상보다 강하게 발달하여 나타났음

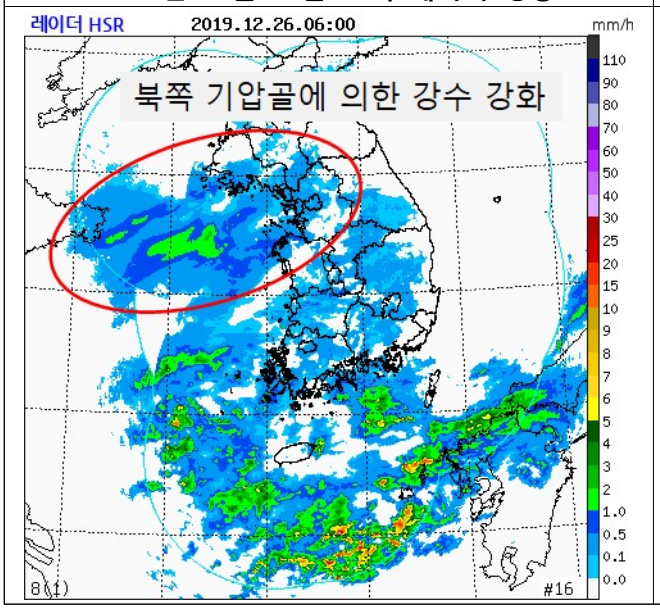
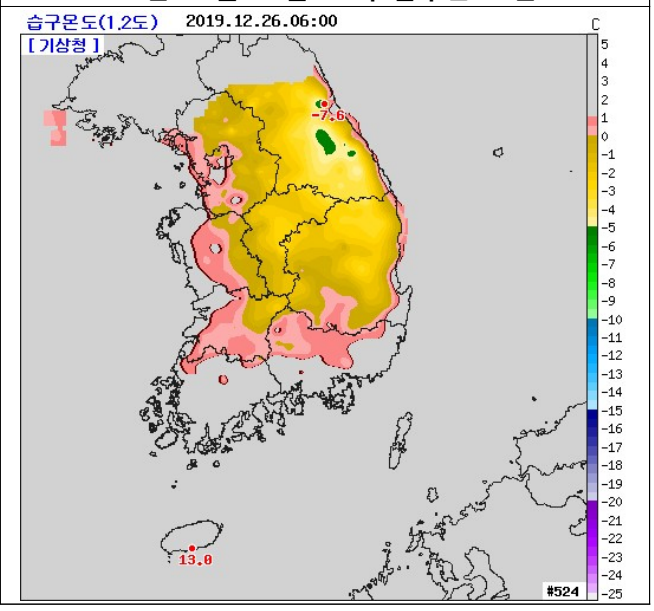
2019년 12월 26일 06시 수증기 모의영상	2019년 12월 26일 06시 수증기 영상 실황
	

- 수증기 영상에서도 그 차이는 잘 나타났는데, 26일 06시 모델이 예상하는 수증기 모의영상에서 기압골 전면 난역의 북상 위치보다 실제 실황에서 나타난 위치가 더 북상해 있는 것을 알 수 있음
- **06시에는 강수대가 해상에 있으므로 가용할 수 있는 관측 자료가 제한적인 상황이었으나 위와 같이 위성영상을 활용하여 비교하는 것도 방법이 될 수 있음**

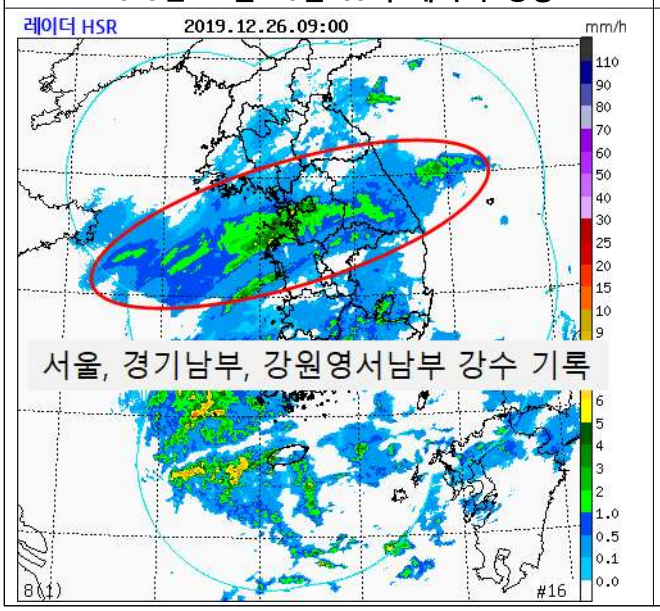
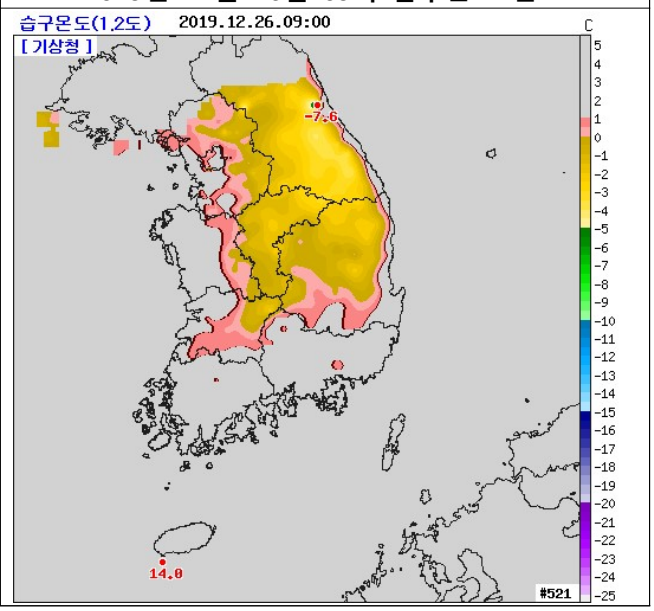
2019년 12월 26일 파주 연직바람관측	2019년 12월 26일 06시 UM 700hPa 예상
	

- 또한, 파주의 연직바람관측 자료를 보면 700hPa 고도인 약 3km 부근으로 30kts의 남서풍이 부는 것을 확인할 수 있음. 하지만 전날 밤 UM 모델은 파주에 25kts의 서풍을 예상하였고, 결국 그림과 같이 난역이 더 남쪽으로 쳐지는 것으로 예상함
- 만약 덕적도나 연평도처럼 경기만의 전방 지역에 연직바람관측 장비가 있다면 초단기 대응에 더욱 도움을 줄 수 있는 상황이었음

● **쟁점3) 습구온도를 활용하면 빠른 특보 발표와 실황 대응이 가능하다.**

2019년 12월 26일 06시 레이더 영상	2019년 12월 26일 06시 습구온도 분포
	

- 사례 당일인 26일 06시의 레이더 영상을 보면 본격적으로 강수대가 유입되기 직전으로 이때의 습구온도 분포를 보면 눈 가능 구역인 1.2도 이하 구역이 서울을 제외한 중부지방 대부분 지역에 나타나고 있음
- 특히, 경기동부와 강원영서, 충북북부지역의 경우 습구온도가 0도 이하로 분포하고 있어, 강수가 있다면 눈으로 내려 모두 적설로 이어질 수 있는 상황이었음

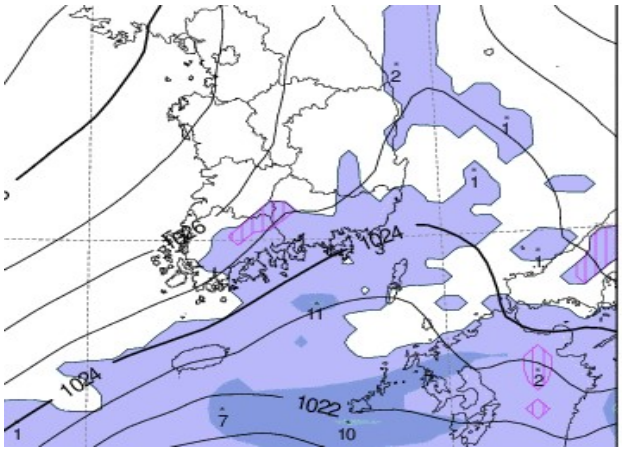
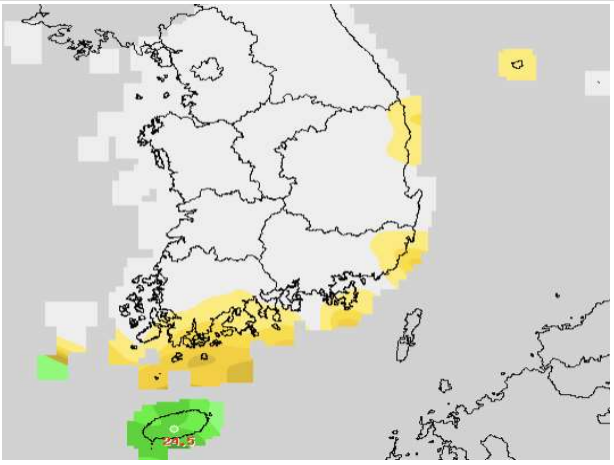
2019년 12월 26일 09시 레이더 영상	2019년 12월 26일 09시 습구온도 분포
	

- 09시의 레이더 영상을 보면 강수대가 발달하면서 본격적으로 중부지방으로 유입된 것을 알 수 있으며, 이때 서울은 습구온도가 1.2도 이상의 분포를 보여 눈이 아닌 비의 형태로 내렸음
- 여기서 중요한 것은 06시에서 09시로 오면서 습구온도의 변화가 거의 없었으며, 경기동부와 강원영서남부지역으로는 강수가 모두 눈으로 내려 적설로 이어졌음

- 기온이 낮은 새벽~아침 시간대이고, 구름대 유입으로 09시 이후에도 일사의 영향을 받을 수 없어 습구온도는 상승하지 못하고 유지되는 경향이었음. 중부내륙으로는 전부 눈으로 내려 쌓였으며, 강수량이 5mm까지 기록된 강원영서남부와 충북북부지역으로는 5cm 이상의 적설이 기록되며 대설 특보가 발표됨
- **따라서, 습구온도의 보존성을 이해하고 강수가 예상보다 강해질 것으로 분석을 했다면 내리는 강수가 모두 적설로 이어질 것으로 판단하여 빠른 예보 변경과 신속한 특보 발표가 가능했을 것으로 보임**

700hPa부터 발달한 중층 강수, 하층 건조도가 관건
중층기압골에 의한 강수량 기록 여부 경계값 판단

1. 모델의 예측과 실황은?

모델 예측(5일 24시 예측, UM+27h)	실황(5일 일강수량)
	

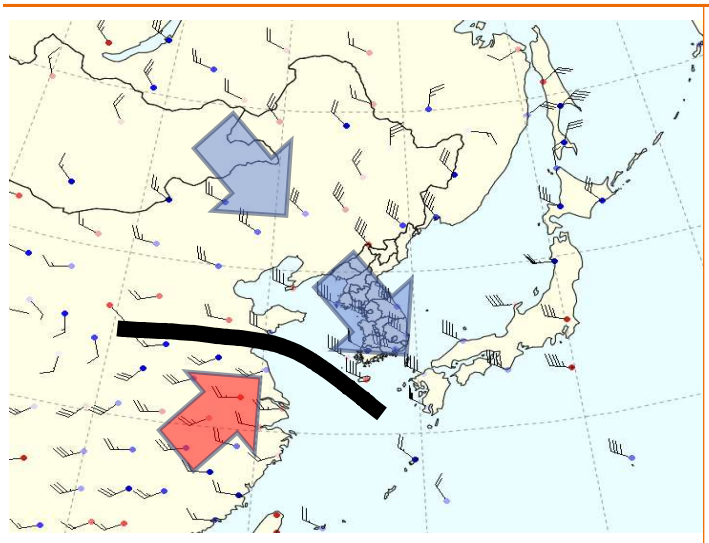
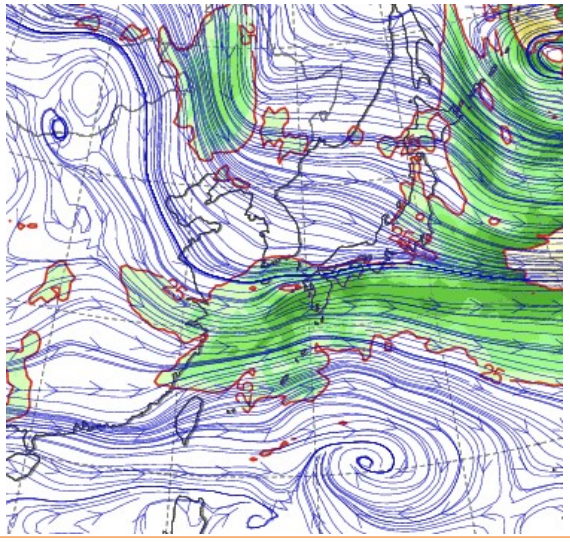
- 모델의 예측보다 강수 범위가 좁게 나타났었음

2. 쟁점사항은?

- **쟁점 1) 700hPa 부근에서 북서 기류가 우세한가, 남서 기류가 우세한가?**
- **쟁점 2) 하층의 건조도와 강수 기록 여부 판단 기준은?**

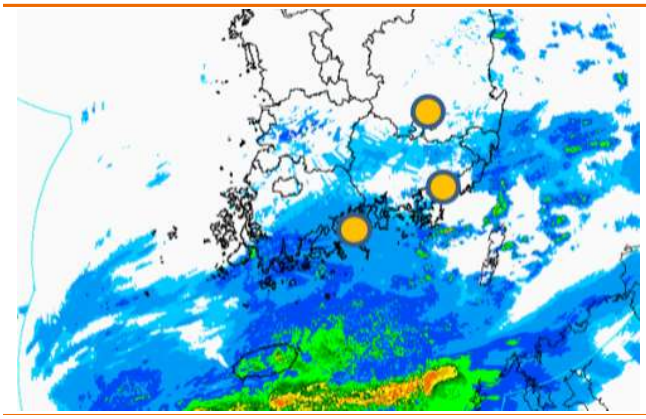
3. 주요 분석내용

- **쟁점 1) 700hPa 부근의 기류가 북서가 우세한가, 남서가 우세한가**

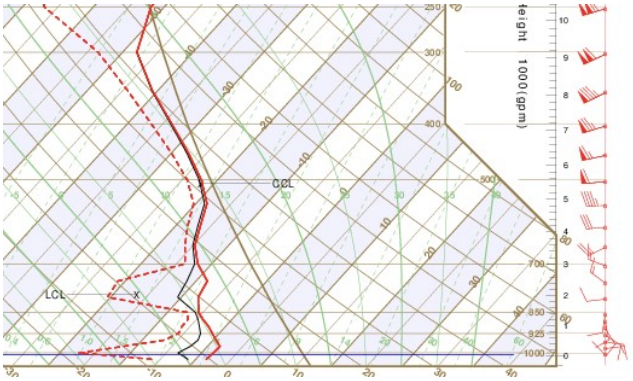
	
1월 4일 09시 700hPa 풍속 편차(UM, +12h)	1월 5일 21시 700hPa 유선장

- 4일 09시 700hPa GTS를 분석하면 몽골에서 우리나라까지 폭넓게 북서류가 지배하고 있고, 중국 남부에서 기압골에 의한 남서류가 형성되어 있으나 북서류가 더 지배적임
- 북서류가 내려오는 곳의 풍속이 음의 bias로서, 수치모델보다 실황에서 풍속이 더 강하게 나타남
- 이러한 실황을 감안하고, 5일 밤 700hPa의 유선 예측장을 보면 남서류의 축이 북서류에 의해 저지되어 북상하지 못하는 모양새가 나타남. 따라서 중층 강수 영역이 모델보다 축소될 가능성의 검토가 필요함

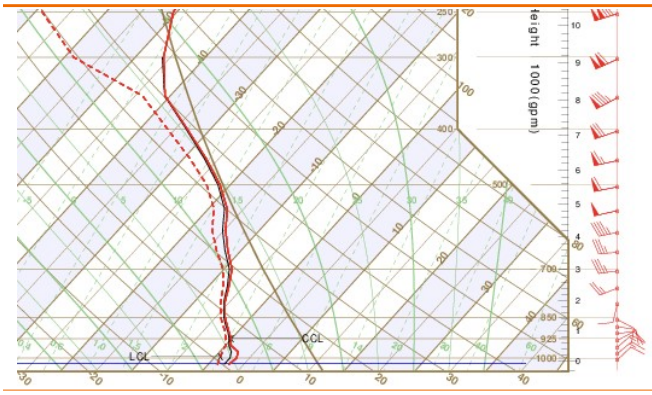
- **쟁점 2) 하층의 건조도와 강수 기록 유무 여부 기준은?**



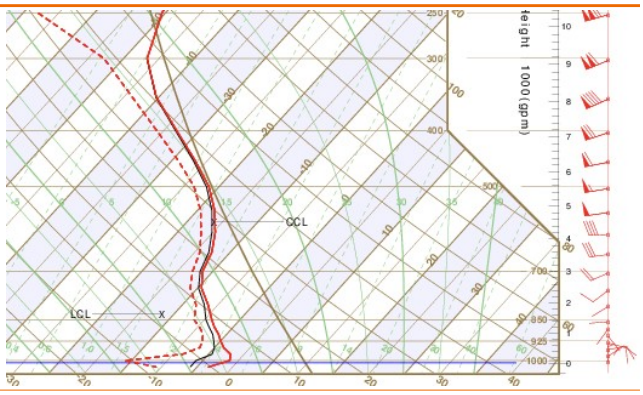
1월 5일 21시 레이더 합성 영상



대구 단열선도(분석장)



여수 단열선도(분석장)



창원 단열선도(분석장)

- 위 그림은 강수 시점의 레이더 영상과 노란색 원으로 표시된 각 지점의 단열선도임. 세 지점 모두 대기 중상층(700~300hPa)이 포화되어 응결된 강수가 낙하함에 따라, 하층의 건조도가 조금씩 다른 형태를 보이고 있음
- 각 지점의 연직 구조를 분석해보면, 대구는 1000~700hPa 사이가 큰 건조도를 보이며 강수가 없었음. 창원은 1000~925hPa 부근이 건조한 상태로 빗방울을 보였고, 여수는 전 층이 대부분 포화되었음
- 따라서 세 지점의 하층 건조도 정도를 참고하여 강수 예보에 참고할 수 있으며, 향후 중상층의 강수량과 하층의 건조도를 정량화하는 추가적인 연구가 필요함

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **700hPa 북서류의 강도와 실황을 분석할 때 모델 bias를 고려**
- **단열선도 상에서 하층 건조도를 과거 사례와 비교하여 점검**

5-3. 2025년 2월 12일 사례

예상보다 저기압 약화되며 서울 적설 감소

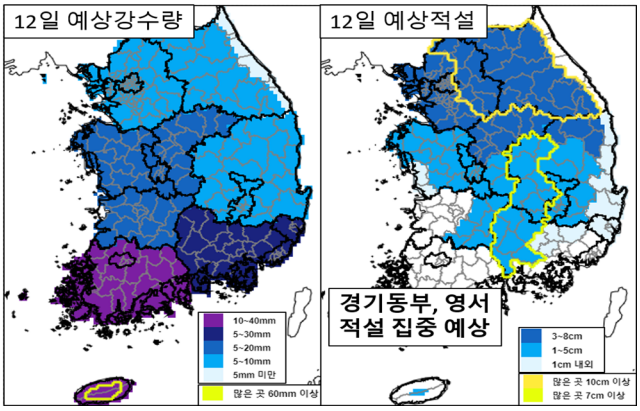
중층골이 강해지면서 오히려 하층 저기압을 발달시키지 못했다

1. 예보와 실황은?

예보(2월 11일 17시 발표)

▸ **예상 강수량/ 적설(12일)**

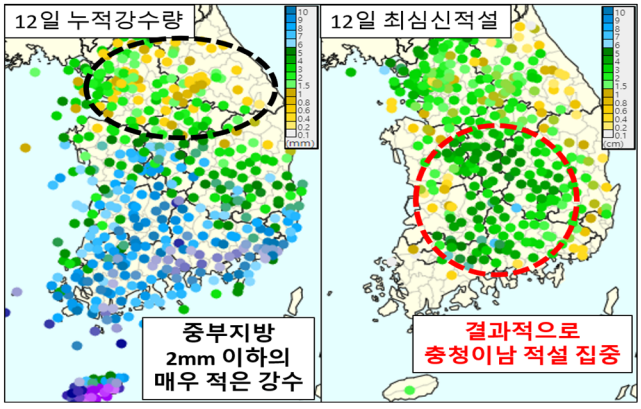
- **수도권, 강원내륙.산지: 5~10mm/ 3~10cm**
- 충남권내륙, 충북남부, 전북동부: 5~20mm/ 1~5cm
- 충북중.북부: 5~20mm/ 3~8cm
- 경북북동내륙.산지: 5~30mm/ 3~8cm
- 광주.전남: 10~40mm



실황(2월 12일)

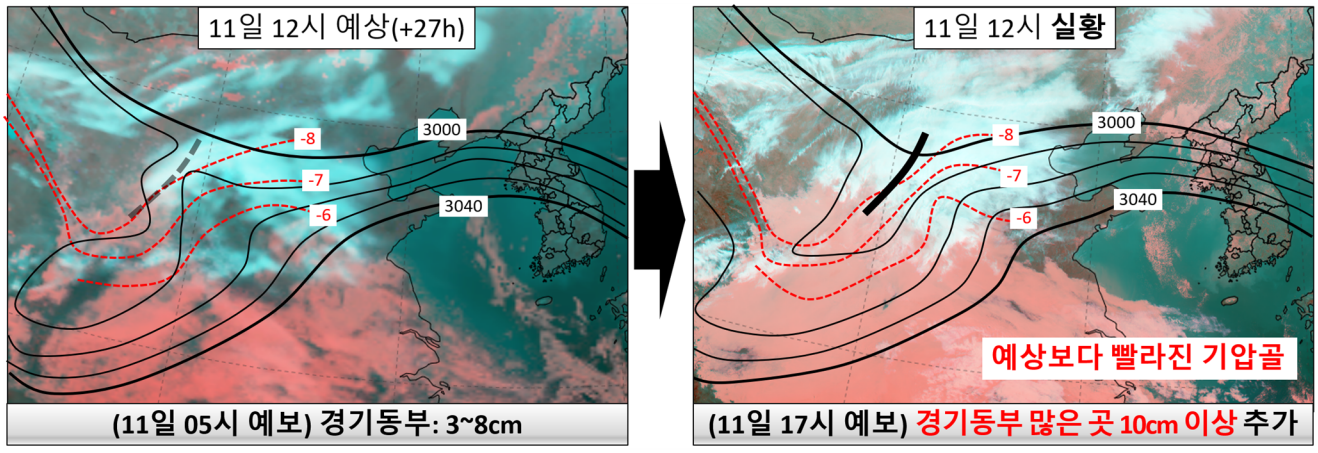
▸ **일최심신적설(12일)**

- **(수도권)** 강화 5.4cm, 파주 2.0cm, 서울 2.1cm
  (강원내륙.산지) 평창 3.2cm, 철원 2.2cm
- **(충청권)** 추풍령 5.1cm, 세종 3.9cm, 대전 3.7cm
- **(전라권)** 순천 5.7cm, 장수 4.3cm
- **(경북권)** 상주 4.4cm, 진주 3.9cm, 부산(레) 0.4cm



- 서해상을 통과하는 저기압의 영향으로 남부지방은 30mm 이상, 중부지방은 10~20mm를 예상했고, 기온이 낮고 적설 효율이 높을 중부지방에 적설이 집중될 것으로 예보했었지만, 중부지방에 5mm 미만의 매우 적은 강수량이 기록되면서 서울에 2.1cm만 기록되었다.

전날(11일) 실황 분석 상황



- 당시 전날(11일) 실황분석을 통해 중층골의 경압성이 더 커지고 빨라진 것을 확인했었고, 12일에 저기압이 더 발달할 것으로 예상하여 경기동부 지역 적설을 '많은 곳 10cm'까지 도입하면서 중부지방에 예비특보까지 발표했었던 사례이다.

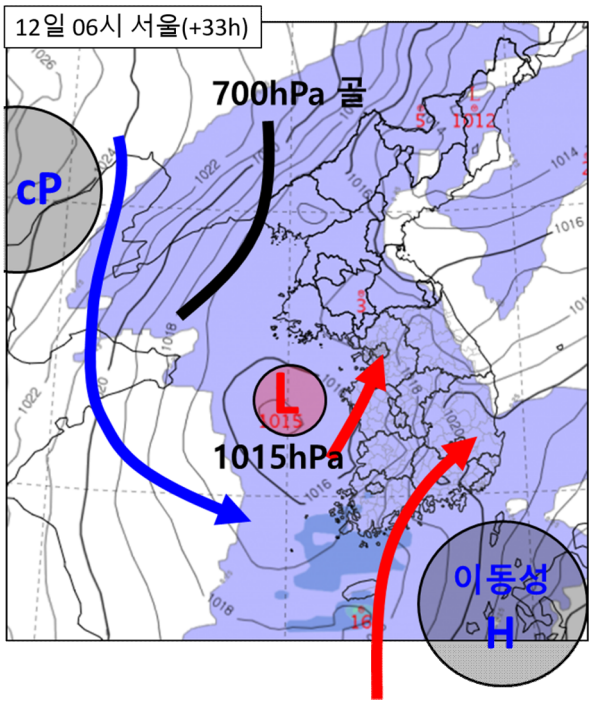
2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 중층골이 강해졌음에도 왜 중부지방에 적설이 많지 않았을까?**
- **쟁점2) 중·하층이 분리된 M자형 단열선도가 예상될 때 유의할 점은 무엇인가?**

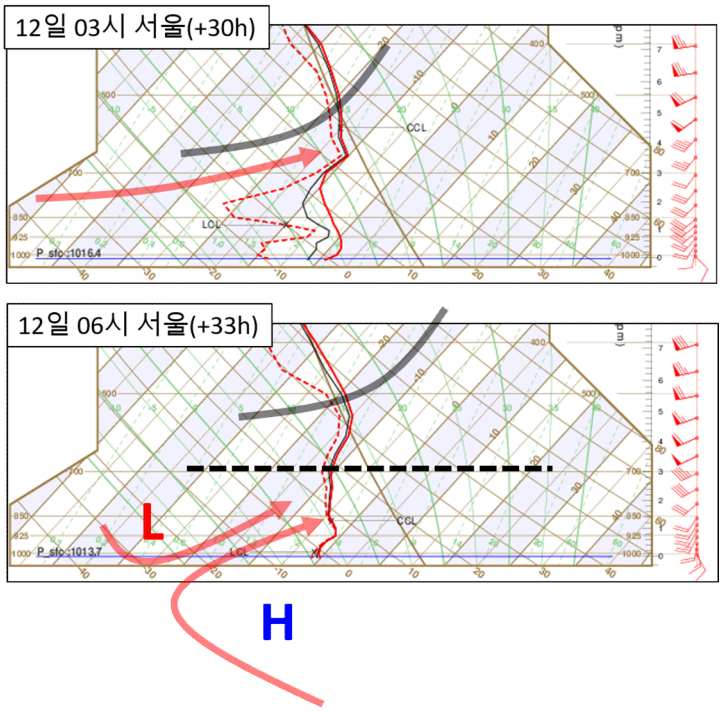
3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 중층골이 강해졌음에도 왜 중부지방에 적설이 많지 않았을까?**

- 당시 강수 메커니즘을 돌이켜보면 중층골에 의해 하층에서부터 저기압이 체계적으로 발달하는 시스템이 아닌, 중층골의 영향과 함께 하층 고기압 사이에서의 상대적인 저기압도 같이 영향을 주는 강수 시스템이었다.



2025년 2월 12일 지상강수 예상

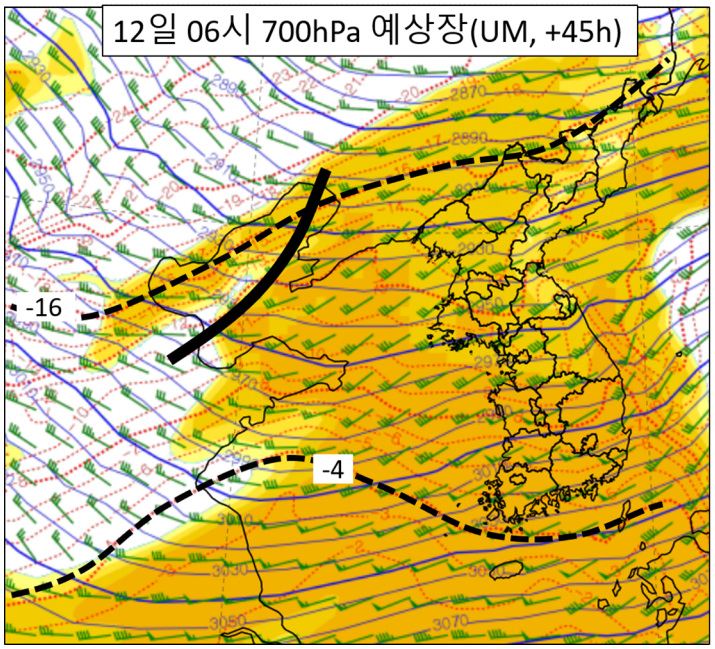


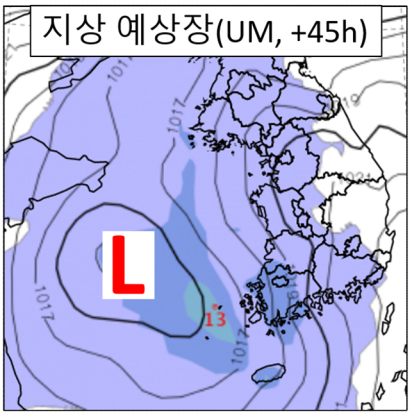
2025년 2월 12일 03~06시 서울 단열선도 예상

- 하지만, 당시 모의되었던 저기압의 중심 기압이 1015hPa으로 일반적으로 발달한 저기압이라고 보기에는 높은 기압이었고, 중층골이 접근하면서 12일이 되어서야 산둥반도 남쪽에서부터 뒤늦게 저기압이 표현되기 시작한 점 등을 고려했을 때, 하층부터 발달하는 체계적인 저기압 시스템이 아니라는 것을 알 수 있다.

- 단순히 단열선도(12일 06시 서울 단열선도)를 봤을 때, 포화층 높이가 지상부터 500hPa까지 높게 형성되어 있어 높게 발달한 하나의 구름대로 오해할 수 있는데, 기온구조를 자세히 보면 습윤단열선을 따라 상승하는 불안정한 형태가 아닌 특정 고도에서 기온선이 꺾이는 대기 중하층이 분리된 'M자형' 구조를 보이고 있다.

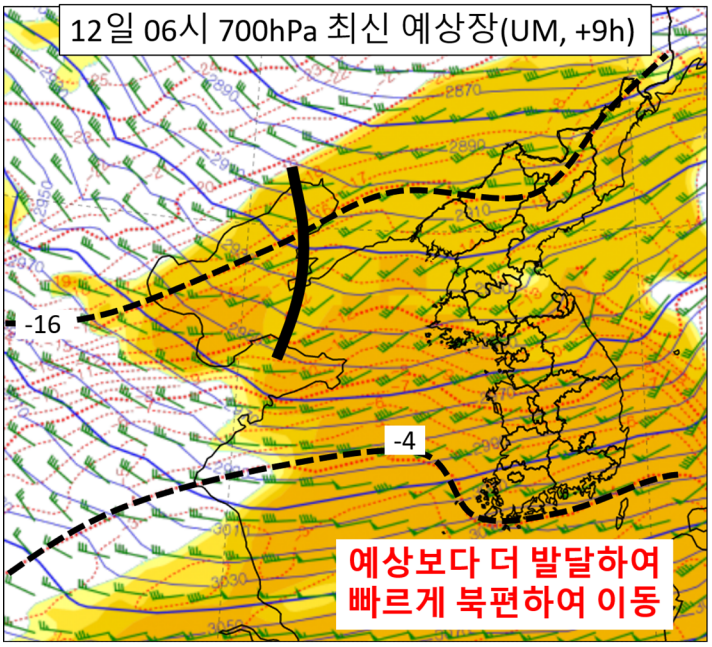
- 'M자형' 구조임에도 강수 시간대가 적설에 유리한 새벽에 발생한다는 점과 전일(11일) 실황분석에서 중층골이 더 발달된 것을 반영하여, 당시 강수량과 적설을 상향 조정했지만, 실황은 아래 그림과 같이 저기압이 덜 발달하는 결과가 되었다.

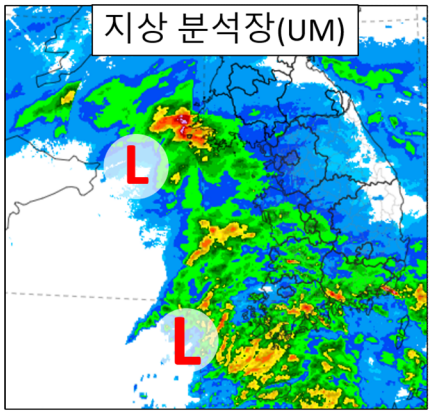




(예상)

중층골 강하게 영향받으며 지상 저기압 발달 예상





(결과)

짧은 시간동안 저기압 충분히 발달 못 하고, 남북으로 분리되어 진행

(상, 예상) 당초 예상했던 시나리오 → 하층 저기압까지 발달
(하, 실황) 중층골 발달하면서 빠르게 이동 → 하층 저기압 발달 시간 부족

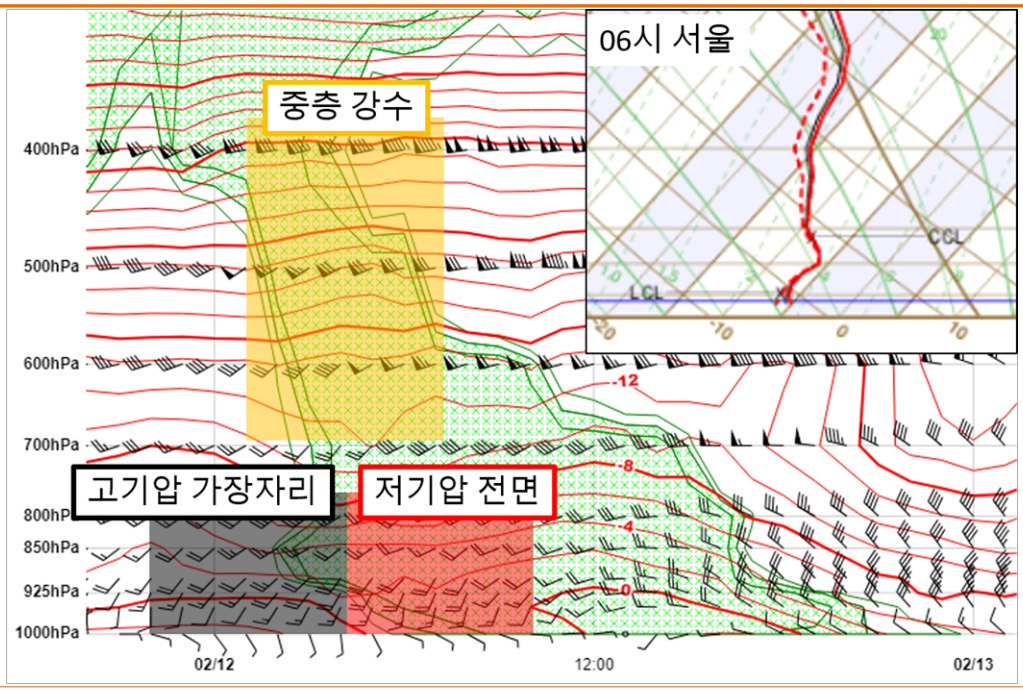
- 예상보다 발달했던 중층골이 오히려 산둥반도 부근에서 빠르게 북쪽으로 이동하면서 하층 저압부를 충분히 발달시키지 못했다. 오히려 북쪽의 일부 저압부만 강하게 발달시켰고, 남쪽의 일부 저압부는 강화되지 못하고 남쪽으로 처지면서, 저기압이 남북으로 갈라지는 형태가 되었다. (북서쪽으로 강화 5.4cm, 남쪽으로 순천 5.7cm 기록)

- 결국, 강수가 집중될 것으로 보았던 중부내륙(경기동부, 영서) 대부분 지역에는 2mm 미만의 강수량이 기록되었다. (서울 2.1cm, 파주 2.0cm 기록)

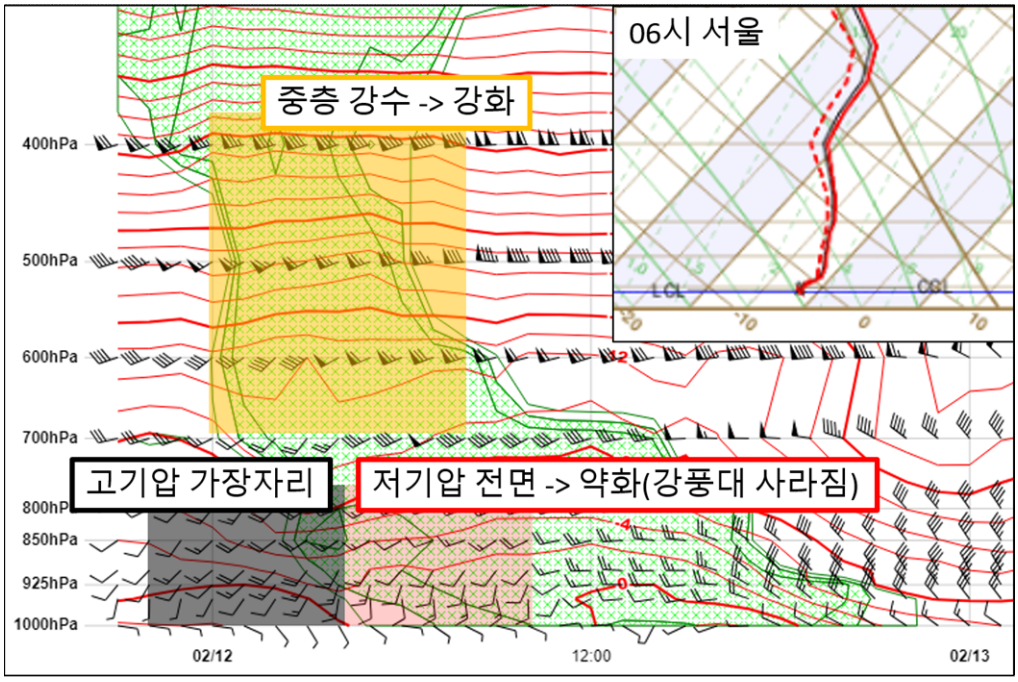
- **쟁점2) 중·하층이 분리된 M자형 단열선도가 예상될 때 유의할 점은 무엇인가?**

- 'M자형' 기온구조가 단열선도에서 보인다면 중층골에 의한 강수와 더불어 하층 저기압 전면의 난기 및 수증기에 의한 강수가 동시에 영향을 주는 시스템으로 볼 수 있다.

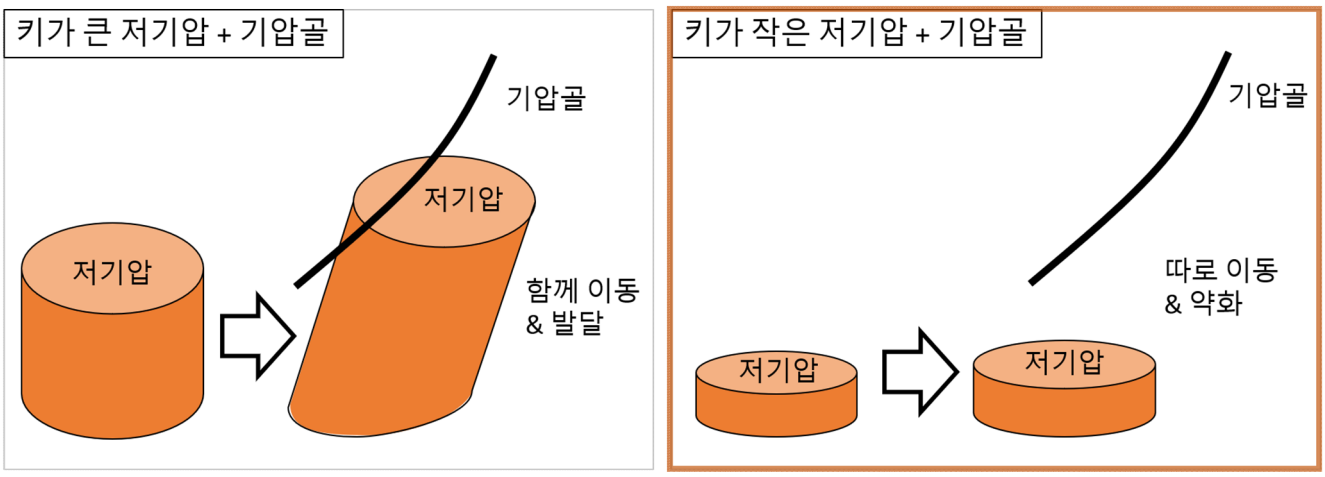
- 하지만, 이런 분리된 구조는 중·하층의 종관적인 상황에 따라 크게 바뀔 수가 있다. 아래 그림처럼 당초 12일 06시에 뚜렷한 'M자형' 구조를 예상하고 대설을 예상했었지만, 실제로는 중층골이 강화되고 하층 저기압의 영향이 줄어들면서 서울 지역은 중층강수 영향만 받게 된 것을 확인할 수가 있다.



(당초 예상) 12일 06시 서울 연직시계열 - 뚜렷한 M자형 단열선도 구조

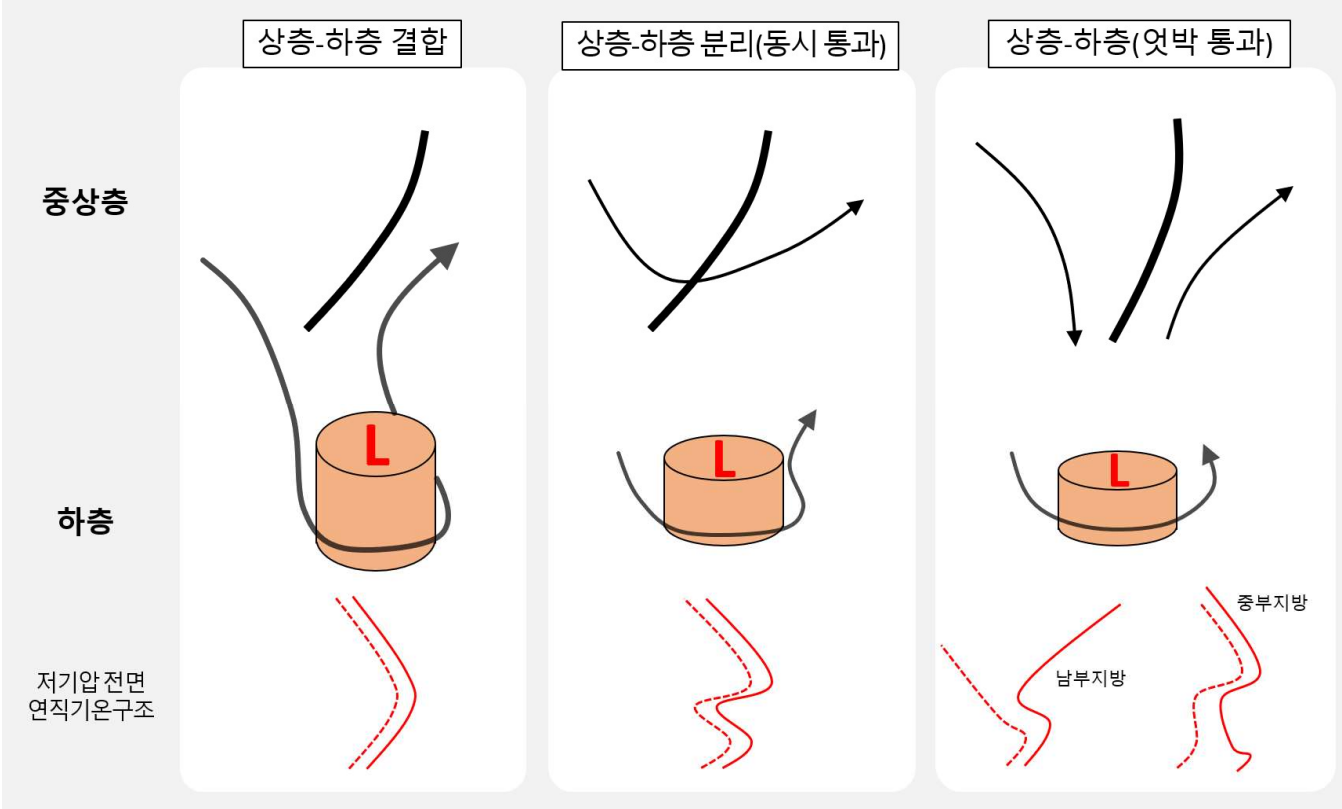


(실황) 12일 06시 서울 연직시계열 – 중층 강수만 존재



(좌) 일반적인 기압골에 의한 저기압 발달 모식도 (우) 상하층이 분리된 기압골 저기압 모식도

- 일반적으로 기압골이 접근하면서 저기압이 발달하는 형태는 왼쪽 그림처럼 진행이 되지만, 이번 사례처럼 고기압 사이의 상대적인 저기압으로서 아직 발달하지 않은 키가 작은 저기압은 오른쪽 그림처럼 기압골과 연계되어 발달하기 어려울 가능성이 크다.



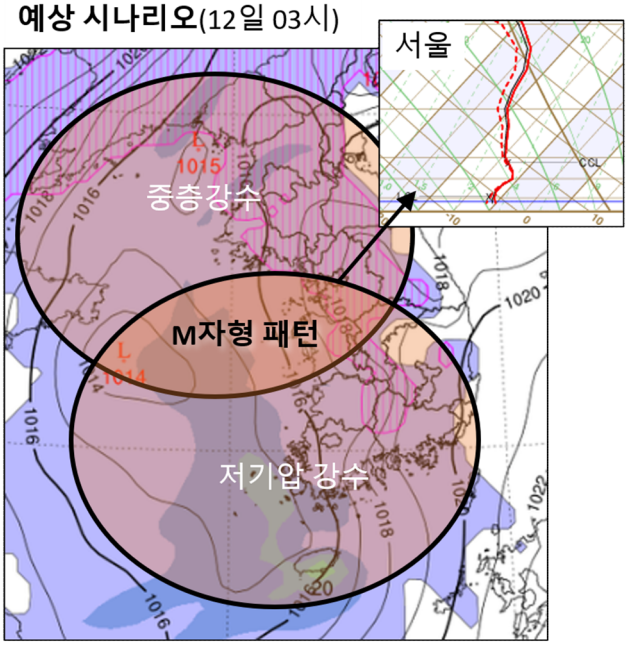
기압골과 하층 저기압과의 관계 및 단열선도 모식도

- 특히, M자형 연직기온구조와 함께 키가 작은(덜 발달한 저기압)이 예상되는 경우에는 위의 가운데 그림과 같이 동시에 통과하는 모양으로 강수량이 많아질 수 있겠지만, 위의 오른쪽 그림처럼 동시에 통과하지 않는다면, 지역별로 강수량은 크게 달라질 수 있다.

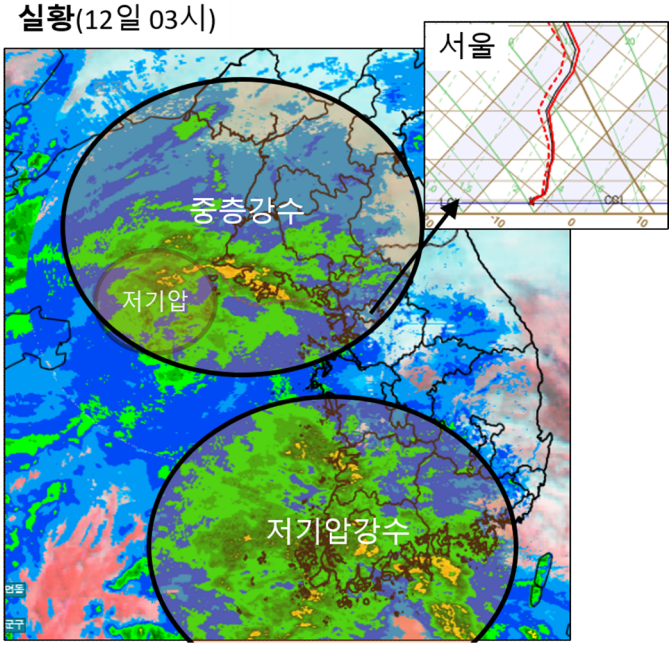
4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **'M자형' 기온 구조가 보인다면, 종관적인 상황이 달라질 가능성을 염두에 두어야 한다.**

예상 시나리오(12일 03시)



실황(12일 03시)



- 이번 사례는 기온 조건이나 강수 형태 등으로 적설이 달라진 것이 아니라 기압골의 속도가 빨라지는 종관적인 상황의 변화 때문에 하층 저기압이 발달하지 못했고, 위 그림처럼 우리나라 남북으로 메커니즘이 분리되어 서울을 포함한 중부지방에 적은 강수량이 기록되었다. 결국, 어느 지역에도 중층 기압골 강수와 저기압 강수의 영향을 동시에 받는 곳은 없었던 것이다.

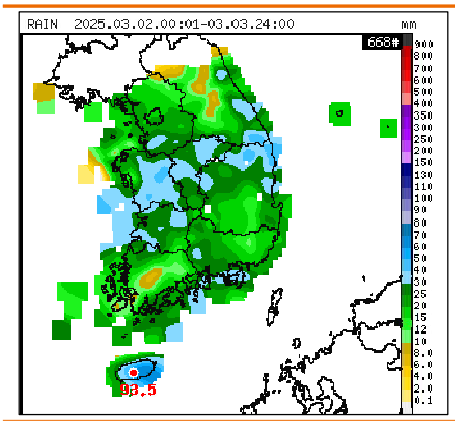
- 향후, **단열선도 상에 'M자형' 연직 기온구조가 보이는 강수 시스템일 경우에 상·하층이 분리된 강수 시스템인 것을 염두에 두어야 하며,** 기압골의 속도에 따라서 종관적인 상황이 달라질 수 있는 변동성을 꼭 체크하고 지속적인 실황분석을 통해 이번 사례처럼 비슷한 시나리오가 진행될 수 있다는 점을 유의할 필요가 있다.

상·하층 분리 시스템에서의 적설 예보

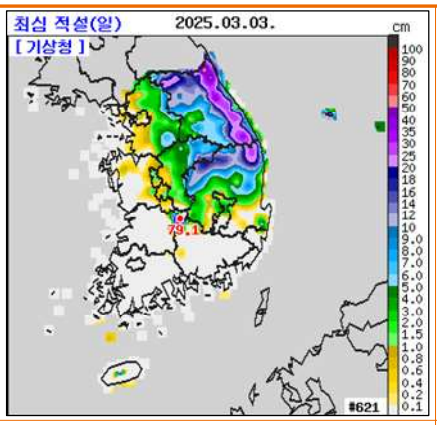
상·하층 조건이 모두 약해지면서 수도권 적설 감소

1. 예보와 실황은?

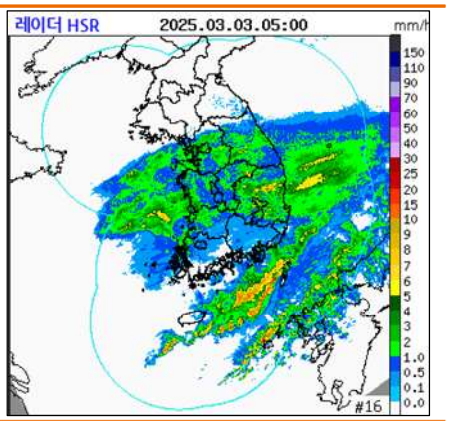
예상 적설(3월 2일 05시 발표)	실황(3월 2~3일 최심신적설)
- (2~3일) 경기내륙 5~20cm - (2~3일) 서울.인천.경기서해안 3~10cm	- 가평북면(가평) 10.2cm 이천 7.0cm - 남현(서울) 1.9cm 서울 1.1cm



3월 2~3일 누적강수량



3월 3일 최심 적설



3월 3일 05시 레이더

- 수도권은 중층 기압골 강수의 영향으로 10~40mm의 다소 많은 강수량이 기록되었으나, 비가 눈으로 바뀌어 내리는 과정에서 눈으로 내린 양이 적어 예상보다 적은 적설이 기록되었다. 특히 서울을 포함한 수도권 서쪽 지역에는 3~10cm의 적설을 예상했으나 가장 많은 적설은 서울 남현 지점에 기록된 1.9cm에 불과했다.

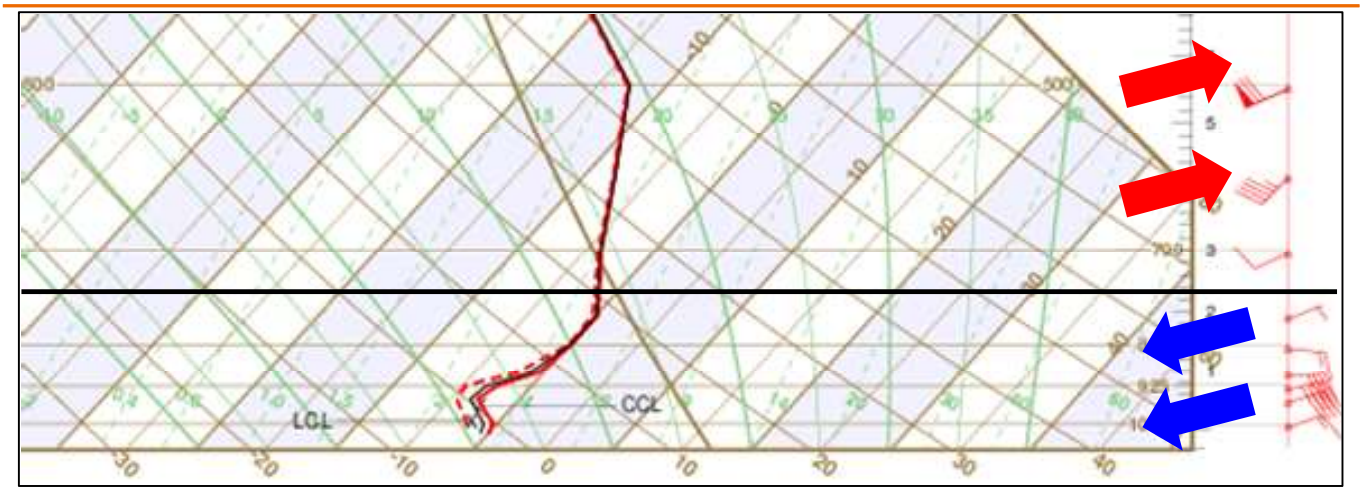
2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 상·하층이 분리된 시스템에서 고려해야 할 점은 무엇인가?**
- **쟁점2) 적설이 예상보다 적었던 결정적인 요인은 무엇인가?**

3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 상·하층이 분리된 시스템에서 고려해야 할 점은 무엇인가?**

- 이번 사례에서 수도권에 영향을 준 강수 메커니즘은 중층 기압골에 의한 강수였다. 중층 기압골에 의한 강수는 일반적으로 3km 이상의 중·상층 고도에서 기압골에 의해 발달하는 강수 메커니즘으로 하층의 기압계 흐름과는 별개로 발달하게 된다. 즉, 하층과 중·상층이 각각 분리된 구조이므로 각각의 기압계를 구분하여 분석하는 것이 중요하다.



3월 3일 06시 서울 예상 단열선도

- 위 그림은 서울에 눈이 내릴 것으로 예상됐던 시점인 3일 06시의 서울 예상 단열선도이다. 바람의 연직 분포를 보면 약 2.5km 고도를 기준으로 위에는 남서풍이, 아래는 북동풍이 뚜렷하게 구분되어 나타나고 있다. 중·상층에는 기압골 전면에서 따뜻한 남서풍이 불고 있고, 하층에는 북쪽 cP에 의한 차가운 북동풍이 불고 있는 상황으로 해석할 수 있다. 여기서 강수량은 중·상층의 기압골 영향으로 결정이 되고, 강수 형태는 하층의 cP 영향으로 결정이 되므로 적설의 증가와 감소는 두 기압계의 영향 정도에 따라 총 4가지의 경우의 수를 따져야 한다.

	cP 강함	cP 약함
기압골 느림	강수량 ↑ 적설시간 ↑	강수량 ↑ 적설시간 ↓
기압골 빠름	강수량 ↓ 적설시간 ↑	강수량 ↓ 적설시간 ↓

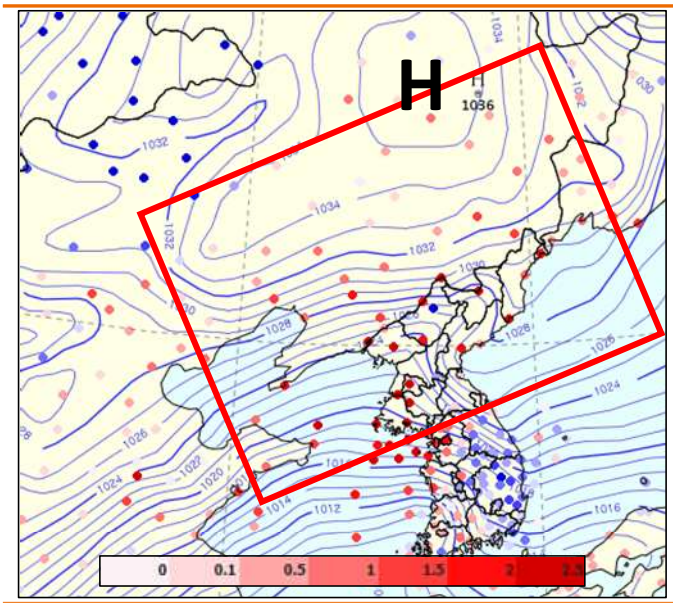
기압골과 cP 영향에 따른 적설 증가와 감소 시나리오

- 이번 사례와 같이 비가 눈으로 바뀌는 과정에서 적설이 많아지기 위해서는 눈으로 내리는 강수량이 많아야 하는데, 위 그림의 표와 같이 총 4가지의 경우로 구분하여 각각 적설의 증가와 감소 시나리오를 생각할 수 있다. 여기서 가장 많은 적설을 기대할 수 있는 시나리오는 기압골이 늦게까지 영향을 주어 강수량이 늘어남과 동시에 cP가 강하게 영향을 주면서 하층의 기온을 빠르게 낮추어 강수 형태가 눈으로 빠르게 바뀌어 내리는 경우이다. 반대로 기압골이 빨라 영향이 약하고 cP의 강도도 약하다면 강수량도 적고 눈으로 바뀌는 시간도 늦어지면서 적설은 가장 감소할 것이다.

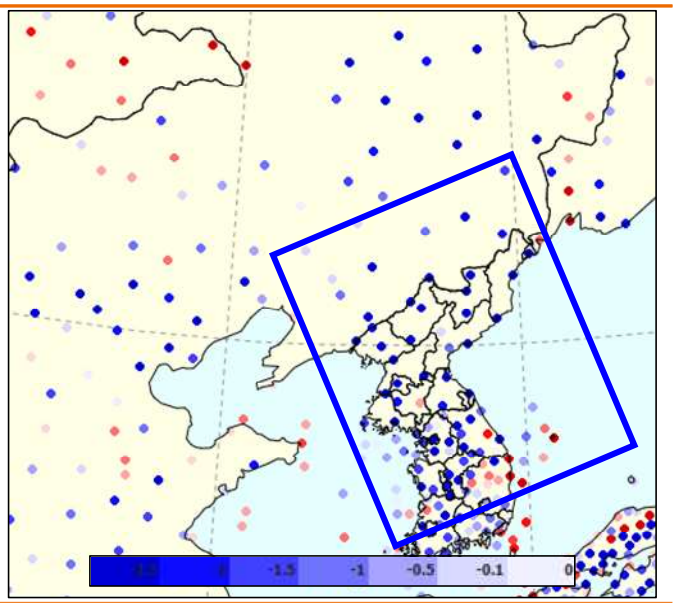
- 이와 같이 상·하층이 분리된 시스템에서는 중층의 기압골과 하층의 cP의 기압계를 각각 분리하여 분석하는 것이 중요하다. 이번 사례에서 예상보다 적설이 적었던 이유는 기압골의 영향 또는 cP의 강도가 약해지는 시나리오로 전개됐을 것으로 판단할 수 있다. 혹은 두 가지 모두가 약해졌을 수도 있다.

- **쟁점2) 적설이 예상보다 적었던 결정적인 요인은 무엇인가?**

- 먼저 하층 cP 강도의 확인을 위해 북쪽 고기압의 강도와 그 가장자리에서 유입되는 찬 공기의 강도를 모델의 예상과 비교를 해보았다. 아래 그림은 cP가 우리나라로 확장하고 난 후의 시점인 2일 21시의 지상 해면기압과 기온의 예상과 실황을 비교한 자료로 24시간 전 ECMWF 모델의 편차를 나타내고 있다.

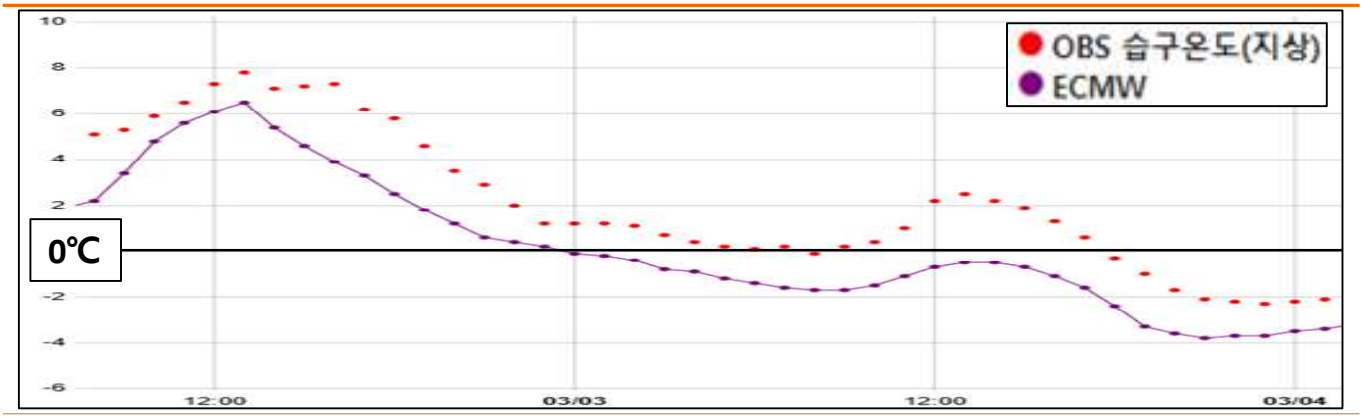


2일 21시 ECMWF 지상 해면기압 편차(+24H)



2일 21시 ECMWF 지상 기온 편차(+24H)

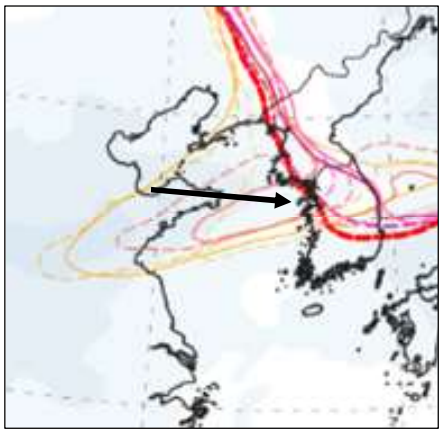
- 왼쪽 그림에서 우리나라 북쪽으로 cP 고기압의 중심이 위치하고 있고, 북한과 우리나라 중부지방으로 고기압의 가장자리에 들어 있는 모습이다. 하지만 고기압의 중심부와 남쪽 가장자리에서의 해면기압은 빨간색의 양의 편차로 나타나면서 실제 고기압의 세력은 모델의 예상보다 약하게 전개되고 있음을 알 수 있다. 그로 인해 고기압 가장자리에서 유입되는 찬 공기의 강도도 약했는데, 오른쪽 그림과 고기압 가장자리에 해당하는 북한과 중부지방을 중심으로 지상의 기온이 파란색의 음의 편차로 나타나면서 실제 찬 공기의 유입도 약했음을 확인할 수 있다.



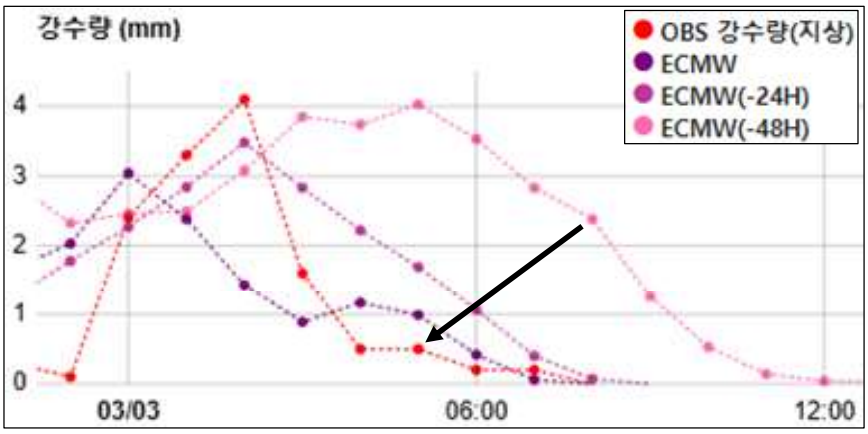
3월 2~3일 서울 지점 ECMWF 지상 습구온도 예상 및 실황 시계열 비교

- 적설 여부를 판단할 수 있는 지표인 지상 습구온도도 모델의 예상과는 다르게 전개되었

다. 위 그림은 3월 2~3일 서울 지점의 지상 습구온도 예상과 실황의 시계열 비교 자료인데, 이미 2일 오후부터 습구온도의 실황은 모델 예상보다 높게 전개되고 있었고, 강수가 있는 시점에도 이 편차는 그대로 지속되었다. 지상 습구온도가 0도 이하로 나타나야 적설 가능성이 높아지는데, 모델의 예상은 3일 00시부터 0도 이하로 하강하는 것으로 예상하며 적설 가능성을 높게 보았으나, 실제로는 0도 부근에서 일시적으로 머무는 수준으로 적설이 늘어나기는 어려운 조건이었다.



3일 03시 700hPa ECMWF 지위고도 예측 경향



3일 ECMWF 예상 강수량 시계열 예측 경향 및 관측 실황

- 중층 기압골의 상황도 점차 적설에는 불리한 상황으로 전개되었다. 위 왼쪽 그림은 3일 03시 중층 기압골이 중부지방을 통과하는 시점의 ECMWF 모델의 700hPa 지위고도 예측 경향을 중첩하여 나타낸 자료이다. 노란색에서 보라색, 빨간색 선으로 올수록 가장 최근의 예측 모델을 의미하는 자료인데, 그림과 같이 예측 시간이 가까워질수록 기압골의 강도는 약해지고 빠르게 동쪽으로 이동해나가는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 오른쪽 그림의 ECMWF 모델의 강수량 예측 경향에서도 예측 시간이 가까워질수록 강수가 빠르게 종료되는 경향으로 나타났고, 관측 실황에서는 이보다 더 빠르게 종료되면서 결국 눈으로 내려야 할 시간이 계속해서 줄어든 결과로 나타났다.

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **상·하층이 분리된 구조에서는 다양한 경우의 수를 고려하여 분석해야 한다.**

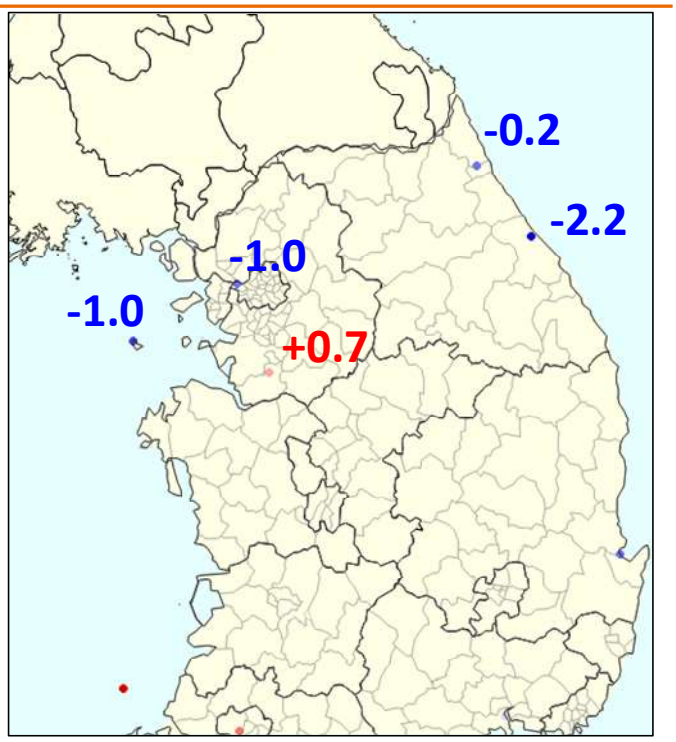
- 강수 시스템이 상층까지 강하게 발달하는 여름철과는 다르게, 겨울철의 경우 하층에서부터 상층까지 연계되어 강수 시스템이 발달하는 경우는 잘 없다. 따라서 겨울철은 상층과 하층으로 모두 구름이 유입되는 경우라 하더라도 상·하층은 분리되어 움직이게 되는 경우가 많다. 즉, 각 층의 기압계의 발달과 약화가 다른 층의 기압계 발달에 직접적인 영향을 주지 않으므로, 이럴 때는 각 층의 기압계 분석을 분리하여 수행해야 한다.

- 이번 사례는 상층은 강수량을 담당, 하층은 기온을 담당하는 기압계였고, 이러한 상황에서 적설의 증가와 감소는 강수량과 기온의 증감에 따라 결정되므로, 각각의 분석이 중요한 상황이었다.

- **전날 하층의 cP 확장이 약했던 실황의 적극적인 반영이 필요했다.**

- 이번 사례에서 상층을 담당하는 중층 기압골의 경우 모델의 예측 경향에서도 보았듯이 점차 빨라지는 경향을 뚜렷하게 보여주었기 때문에, 강수의 빠른 종료의 시나리오는 어느 정도 예상할 수 있었다. 하지만 하층의 담당하는 cP 확장에 의한 기온의 하강은 최소한 2일 09시 실황 자료가 나와야만 확인을 할 수 있는 상황이어서 이미 결정된 예보에서 실황을 반영하기는 쉽지 않은 상황으로 생각할 수 있다.

2일 09시 925hPa GTS 관측 바람



2일 09시 ECMWF 925hPa 기온 편차(초기장)

- 위 그림은 2일 09시의 GTS 관측 자료로 이번 사례에서 강수 예보를 마지막으로 조정하기 위해 참고할 수 있었던 하층의 실황 자료이다. 왼쪽 그림은 925hPa 고도의 GTS 관측 바람으로 중부지방으로 북동풍이 유입되기 시작한 것을 알 수 있다. 즉, cP의 확장이 시작된 시점으로 해석할 수 있고, 오른쪽 그림은 같은 시각 ECMWF 모델의 실황 대비 925hPa 예상 기온의 편차를 나타낸 자료이다. cP 확장이 시작된 중부지방에서 하층 기온이 대부분 지역에서 모델의 예상보다 높게 나타난 것을 알 수 있다. 결론적으로 당시 실황 자료에서 기온의 하강이 모델 예상보다 약했던 것을 고려하여 예보에 적극 반영이 필요했던 상황으로 판단된다.

6. 습구온도를 활용한 강수형태 판별

6-1. 2018년 2월 8일 사례

제주도 강수 눈비 판별 오차에 따른 대설

상층 기압골의 빠른 이동을 고려했다면

1. 예보와 실황은?

예보(2월 7일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 전남해안, 제주도: 5mm 미만 ▸ 예상 적설 - 전남해안, 제주도산지: 1~5cm - 제주도(산지 제외): 1cm 내외	▸ 서해남부해상에서 연직으로 4km까지 발달한 강수대가 남동진하면서 전남해안과 제주도에 유입되어 새벽부터 오전까지 강수를 내림

최심신적설 현황(cm)

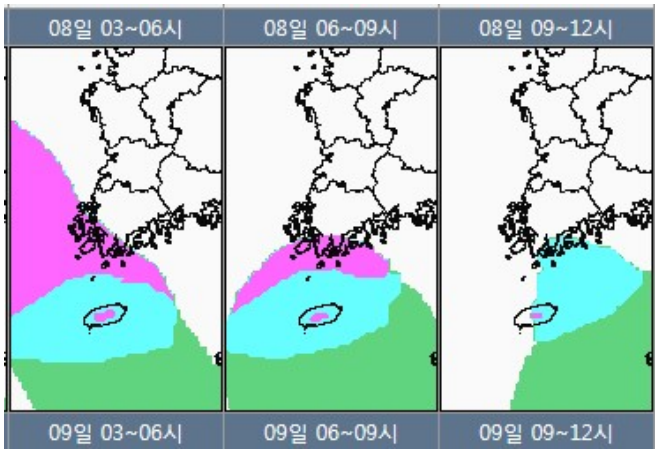
전남 흑산도 1.0

제주 유수암 11.2 제주 5.4 서귀포 5.0 아라 4.3

- 대설주의보: 제주도산지, 제주도남부, 제주도북부(2월 8일 7시 30분 발표/발효) 제주도동부, 제주도서부(2월 8일 8시 발표/발효)
- 강수시종 시간은 잘 예보되었음, 산지를 제외한 제주도의 강수형태를 비/눈으로 예상하였으나 눈으로 내리면서 예상 적설보다 많은 적설이 발생함

일.시:분	날씨						기온		
	현재일기	ww	시정 km	전 운량 1/10	중하 운량 1/10	운형	현재 기온 ℃	노점 온도 ℃	체감 온도 ℃
08.12:00	진눈깨비끝	23	15.3	7	7	500	4.2	0.6	1.5
08.11:00	약 진눈깨비	68	7.61	9	9	200	3.1	1.4	0.6
08.10:00	약한눈 단속	70	6.02	9	9	200	1.5	0.6	-0.5
08.09:00	보통눈 계속	73	5.84	9	9	200	1.1	0.2	-1.4
08.08:00	보통눈 계속	73	1.1	9	9	200	0.6	-0.4	-1.5
08.07:00	약한눈 단속	70	11.25	9	9	200	0.7	-2.0	-1.4
08.06:00	소낙눈 끝	26	20	10	10	52/	0.7	-3.5	-1.7
08.05:00	소낙눈/약	85	17.77	8	8	200	0.6	-2.9	-0.9
08.04:00	소낙눈/약	85	12.09	8	8	200	0.2	-3.3	-3.0
08.03:00	구름조금		20	3	3	500	-0.7	-4.0	-3.0

2월 8일 제주 기상 실황표



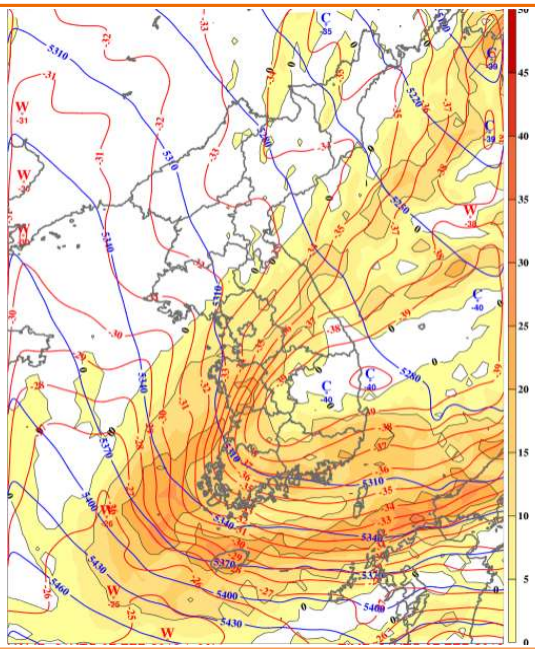
2월 8일 예상 강수형태(2월 7일 17시 발표)

2. 강수 메커니즘은?

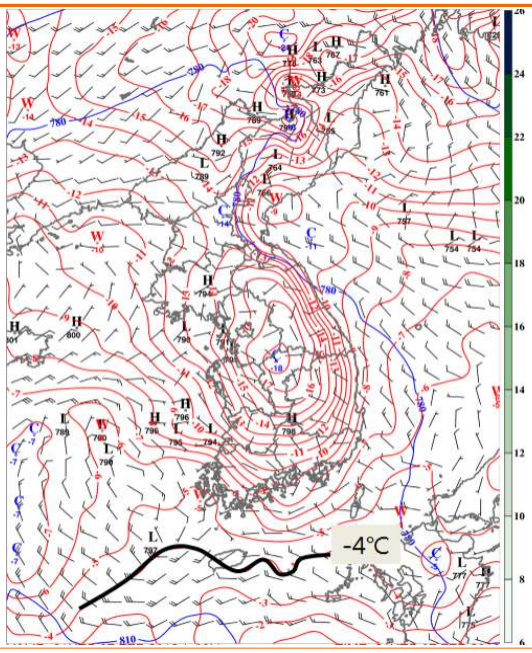
- **(상층 한기 지배)** 중국북동지방에 중심을 둔 500hPa 절리저기압이 2월 3일(D-5)부터 정체하며 역회전하면서 계속해서 상층 한기(남해안 –35℃ 등온선 위치)를 끌어내리고 있었음
- **(찬 공기 내에서 더 찬 공기 남하)** 2월 7일(D-1) 500hPa 절리저기압의 중심이 중국북동지방에서 연해주 부근으로 이동하면서 발해만 북서쪽에 있던 한기 중심이 –40℃ 이하인 온도골을 동반한 기압골이 전남서해안으로 남하. 절리저기압에 의한 상층 한기가 빠져

나가지 못한 상태에서 더 차가운 공기가 남하하면서 불안정을 더욱 강화시킴

- **(상층 기압골 빠른 이동)** 상층 기압골 북쪽에 기압능이 발달하면서 기압골은 쐐기모양으로 발달. 기압골 후면의 한기이류가 강해 이동 속도가 빠르고 회전력이 강함. 지상 저기압보다 빨리 남하하면서 제주도 부근에 근접했을 때는 이미 폐색전선이 발달하는 단계
- **(제주도 부근 약한 난기이류)** 폐색전선이 발달하면서 온난역이 축소되어 남서풍이 925hPa 10~20kts, 850hPa 10~20kts로 약함. 따라서 제주도는 저기압의 온난역에서 제한적으로 남서류가 유입되면서 하층의 기온이 크게 오르지 못함



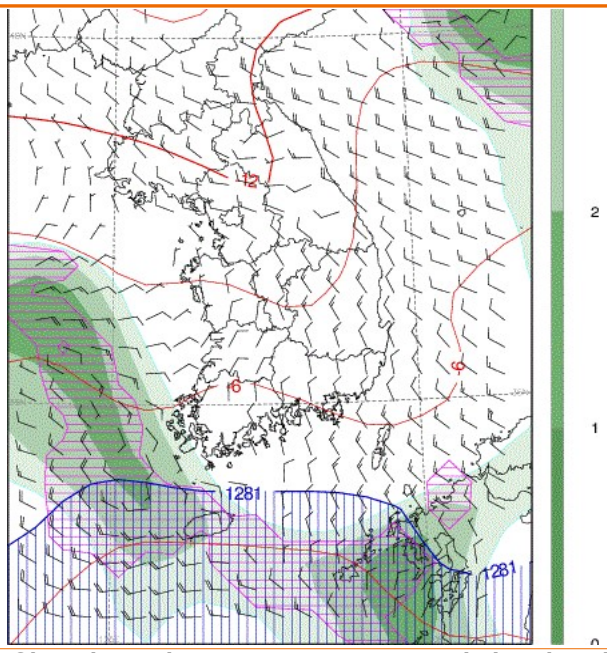
2월 8일 06시 500hPa VDAPS 분석장



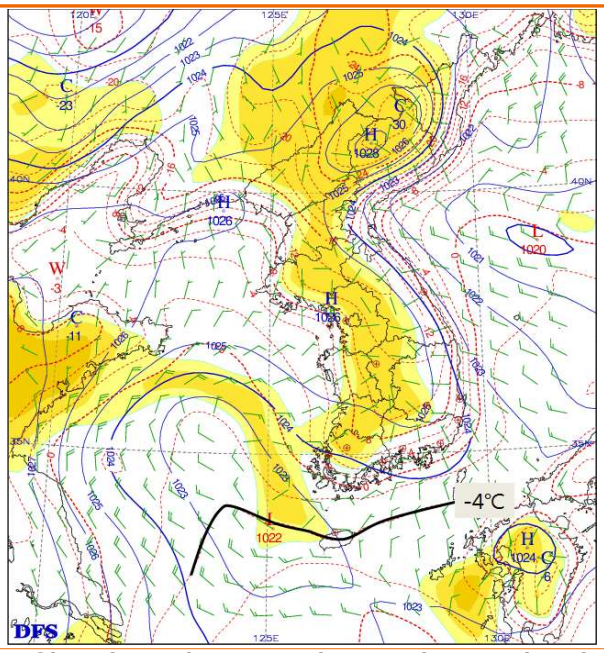
2월 8일 06시 925hPa VDAPS 분석장

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- **(강수형태 판별)** 눈비 판별을 위한 1000-850hPa 층후 예상장에서 눈/비 경계선(1281-1297)의 북쪽 한계인 1281선이 제주남쪽해상에 위치해 있다가 저기압이 점차 접근하면서 저기압 전면의 난기 이류로 인해 전남해안까지 북상하면서 눈비 혼재 구역에 계속 들어있는 것으로 모의

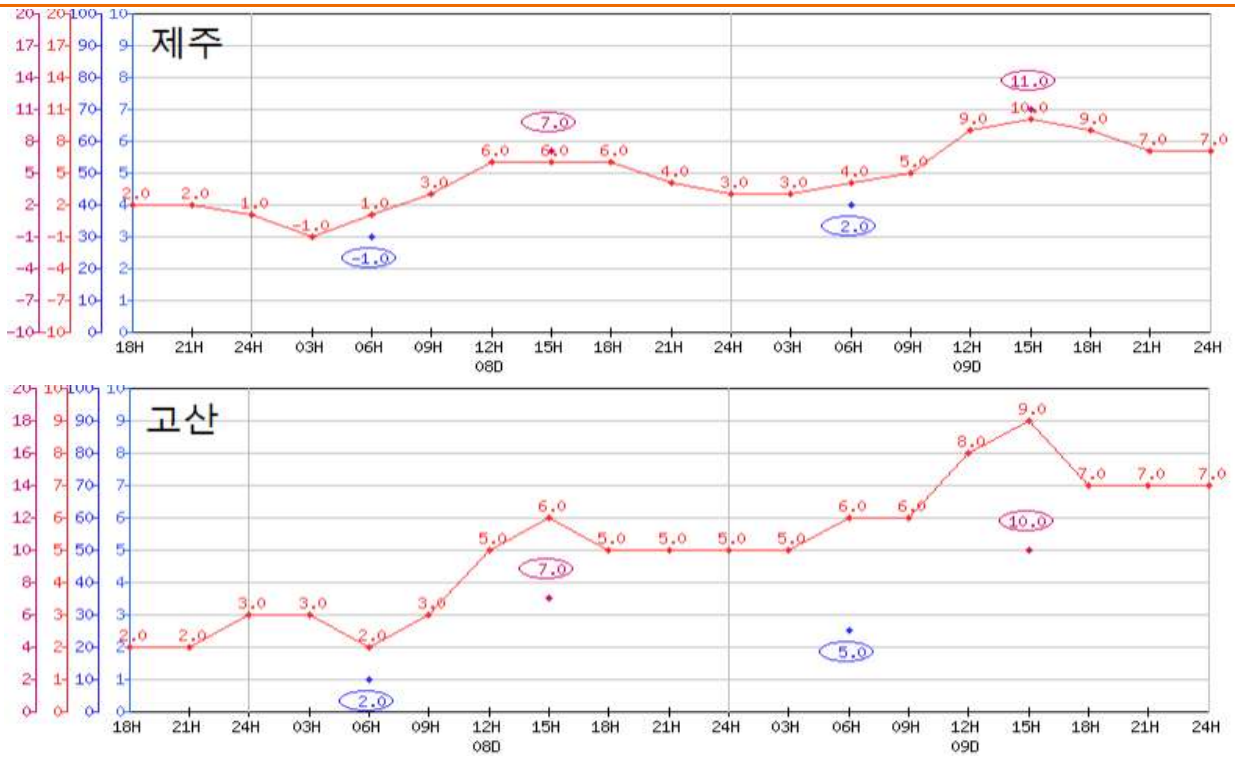


2월 8일 06시(+21h) 1000-850hPa층후 예상장



2월 8일 06시(+21h) 지상 상세바람 예상장

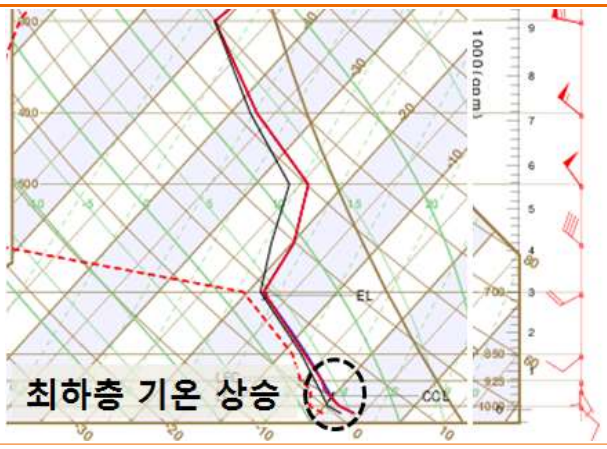
- **(GDAPS 하층 기온)** 2월 7일(D-1) 500hPa 절리저기압이 연해주로 이동하고 대륙고기압의 중심이 중국 상해부근으로 남하하면서 하층에 난기가 유입되어 기온이 상승할 것으로 예상. 제주도의 925hPa의 기온은 –2℃~–4℃ 사이의 분포를 보이나 925hPa 이하에서 난기가 유입되면서 지상기온이 영상권으로 상승할 것으로 예상하였음(925hPa의 기온선은 7일 21시에 –4℃선이 제주도에 걸쳐 있다가 8일 12시 저기압 전면에서 –2℃이 제주 남부해안까지 북상)
- **(MOS 아침최저기온)** 전일 17시 BEST MOS가 생산한 제주지역의 8일 아침최저기온 가이던스는 제주 –1.0℃, 고산 2.0℃, 유수암 –3.0℃, 선흘 –3.0℃, 한림 –1.0℃ 등 제주서부 일부 지역을 제외하고 영하권을 모의하고 있었음



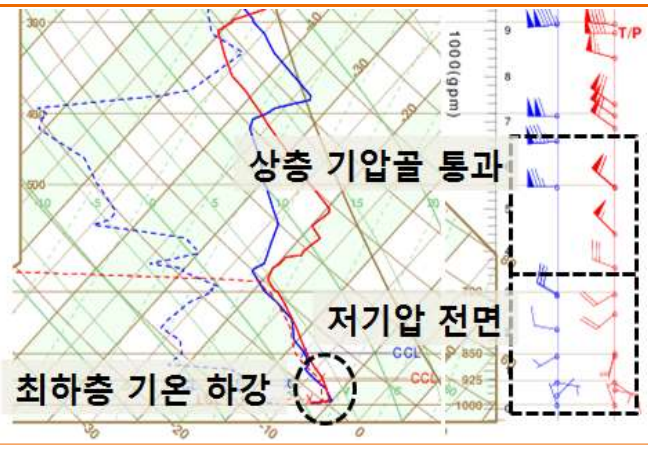
2월 7일 17시 가이던스 BEST MOS 예상 8일 아침최저기온(상 제주, 하 고산)

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **저기압 전면 하층 온난이류의 강도**
  - 상하층이 한기에 갇힌 상태에서 더 차가운 공기가 남하하며 저기압이 발달한 구조로 이미 상하층의 기온이 낮은 상태였음
  - 남쪽에 고기압이 받치고 있지 않아 중국내륙에서부터 강한 난기가 유입되거나 저기압 전면에서 남서풍을 강화시킬 수 있는 기압배치가 아닌 오로지 저기압성 회전에 의해서만 남서풍이 유입되었던 구조
  - 단열선도에서 볼 수 있듯이 상층 기압골은 이미 통과한 뒤에 중층 이하 기압골이 뒤따르는 상태로 저기압이 더 이상 발달하지 못하고 온난역이 축소되고 있었음
    ⇨ **저기압 전면에서 유입되는 남서풍의 취주거리가 짧고 풍속이 약해(850hPa, 925hPa 10~20kts) 온난이류로 기온을 상승시키기에 한계가 있었음**



2월 8일 09시 제주 태풍 센터 예상단열선도

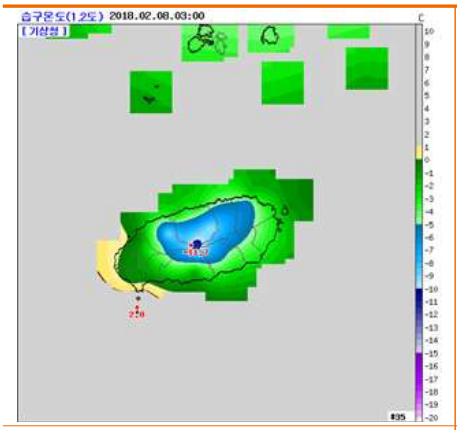


2월 8일 09시 제주 태풍 센터 단열선도

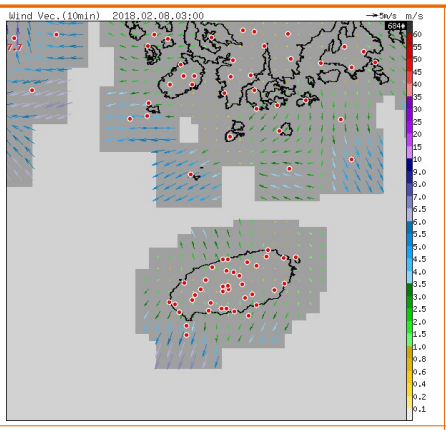
- **아침최저기온 모의 경향**
  - 제주 예상단열선도에 나타나는 기온의 연직구조는 925hPa 이하에서 기온이 증가하는 형태로 FL고도가 315m에서 나타날 것으로 모의하였으나 2월 8일 09시에 태풍센터에서 관측된 단열선도에는 최하층에서 기온이 오히려 하강하는 구조를 보이며 영하권을 유지하였음
  - 지면 근처에서 기온이 하강한 것은 3~7일 사이 내린 적설이 남아있어(제주 7.6cm) 밤사이 지표 근처에 한기역을 형성하였고 이를 해소할 정도로 남풍이 강하게 불지 않았기 때문임
  - 또한 BEST MOS는 제주지역의 아침최저기온을 영상권으로 모의하다가 사례일에 다가올수록 영하권으로 내려가는 경향을 보였음. 실제 아침최저기온도 BEST MOS보다 낮게 나타남
    ⇨ **지면에 적설이 남아 있고, 저기압 전면에서 난기이류를 모의할 때 warm bias가 존재하는 점은 하층 기온을 높게 예측하는데 마이너스 요인으로 작용**
- **습구온도를 이용한 초단기 실황 대처**
  - 강수대가 제주도로 접근할 무렵 습구온도 실황을 통해 초단기적 대처가 가능했음
  - 8일 02시 습구온도 분포를 보면 제주도는 습구온도 1.2℃ 이하를 보이고 있었으며

강수대가 서쪽 해안에 접근한 03시에도 습구온도는 오르지 않고 1.2℃ 이하를 유지하고 있었음. 이 때는 저기압 전면의 남서풍이 유입되기 전, 육풍이 불고 있었으므로 습구온도가 오르기 쉽지 않은 상태였고 낮은 습구온도로 인해 강수형태는 눈이 될 것임을 알 수 있음

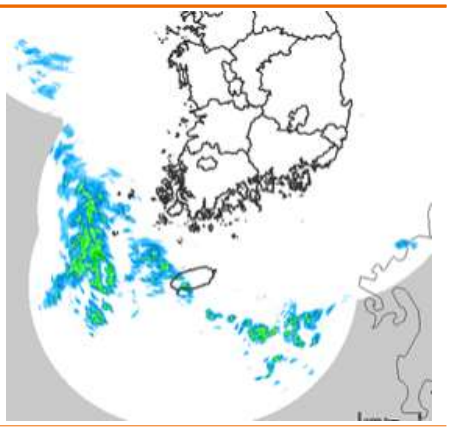
- 남서풍이 본격적으로 유입되는 06시에 난기의 영향을 직접적으로 받는 제주도 남서쪽 일부지역에만 습구온도가 1.2℃ 이상으로 오름



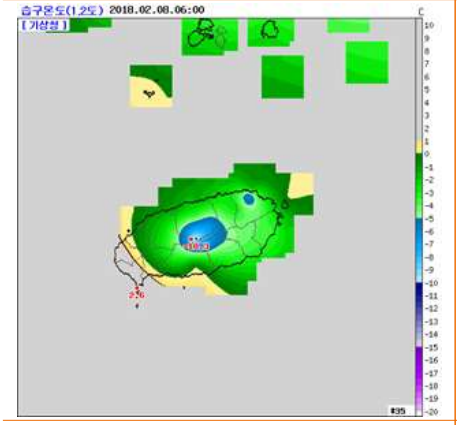
2월 8일 03시 습구온도



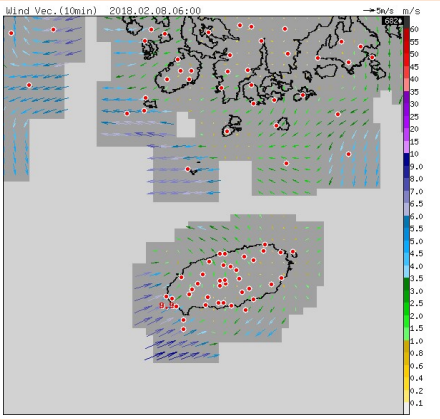
2월 8일 03시 AWS 바람



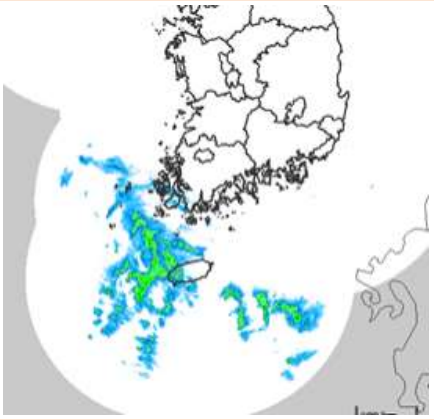
2월 8일 03시 레이더 영상



2월 8일 06시 습구온도



2월 8일 06시 AWS 바람



2월 8일 06시 레이더 영상

온난이류 강수의 눈비 구분의 실패

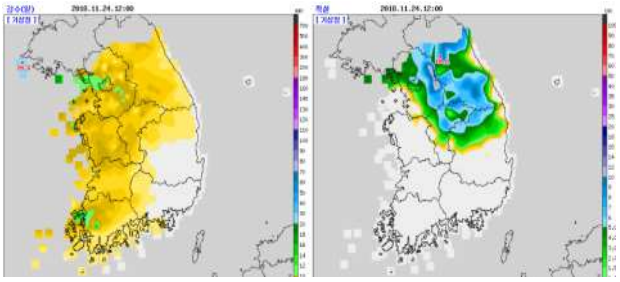
습구온도 변화에 대한 이해 필수

1. 예보와 실황은? → 눈과 비가 섞이면서 적설이 적을 것

23일 17시 발표 예보

- ▸ 예상 적설(24일)
  - 강원영서와 산지, 북한: 3~8cm
  - 경기동부, 경북북부: 2~5cm
  - 서울, 경기도(경기동부 제외), 충북북부: 1~3cm
- ▸ 예상 강수량(24일)
  - 중부지방(강원동해안 제외), 경북북부, (23일부터)서해5도, 북한: 5~15mm
  - 강원동해안, 남부지방(경북북부 제외), 울릉도, 독도: 5mm 내외

24일 실황



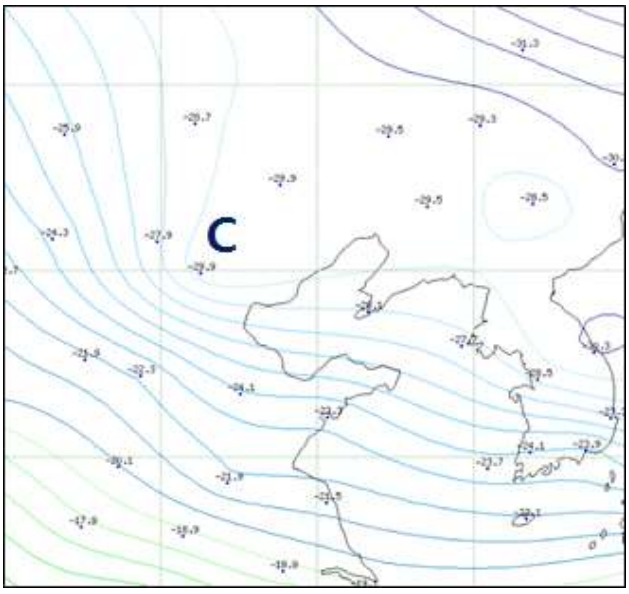
- 강수량 5~15mm, 적설 5~15cm

2. 쟁점사항은?

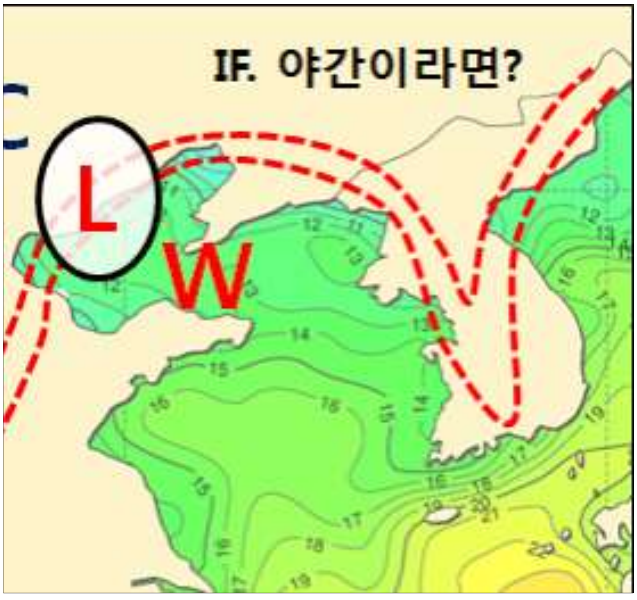
- **쟁점1)** 단순 온난이류형 강수의 강도를 보이는가, 극저기압 형태를 보이는가?
- **쟁점2)** 눈비를 어떻게 구분할 것인가?

3. 주요 분석내용

- **쟁점1)** 단순 온난이류형 강수의 강도를 보이는가, 극저기압 형태를 보이는가?



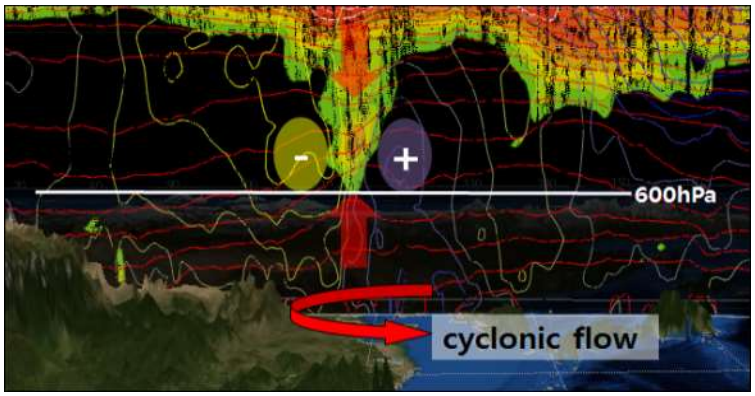
23일 21시 500hPa GTS 기온



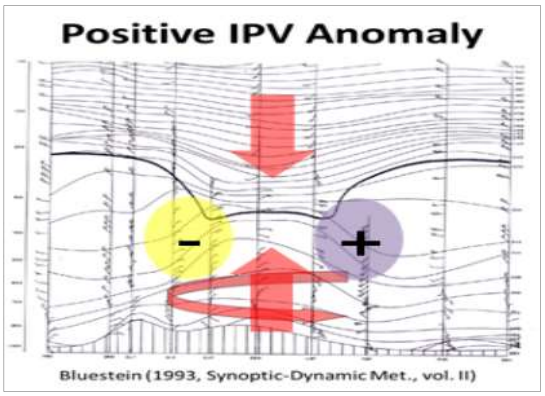
23일 09시 해수면온도

- 소용돌이의 규모는 작았으나 중심의 한기는 500hPa -30도로 낮은 상태 유지
- 발해만과 서해상의 수온이 12도 이상으로 500hPa과의 기온차가 40도 이상 차이

- 특히 야간에는 냉각에 의해 발해만과 그 주변 육지의 온도차이로 하층 경압성 발생
  ⇨ **열적으로 해상에 극저기압 발달에 유리한 조건**



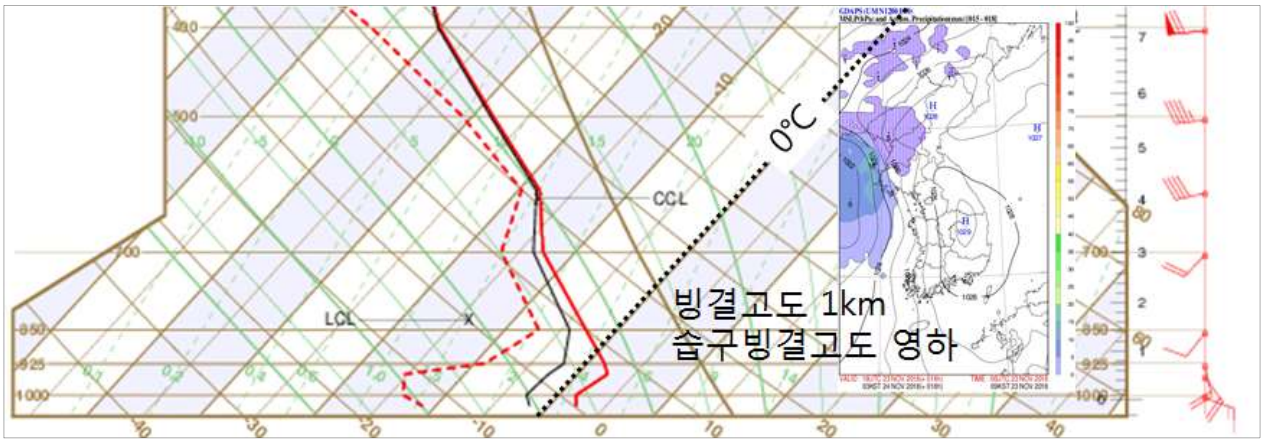
23일 21시 예상장(+12H),
PVU(>2.0,채색)+온위(빨간색)+남(노란색)북(보라색)풍속



PV아노말리 개념모델

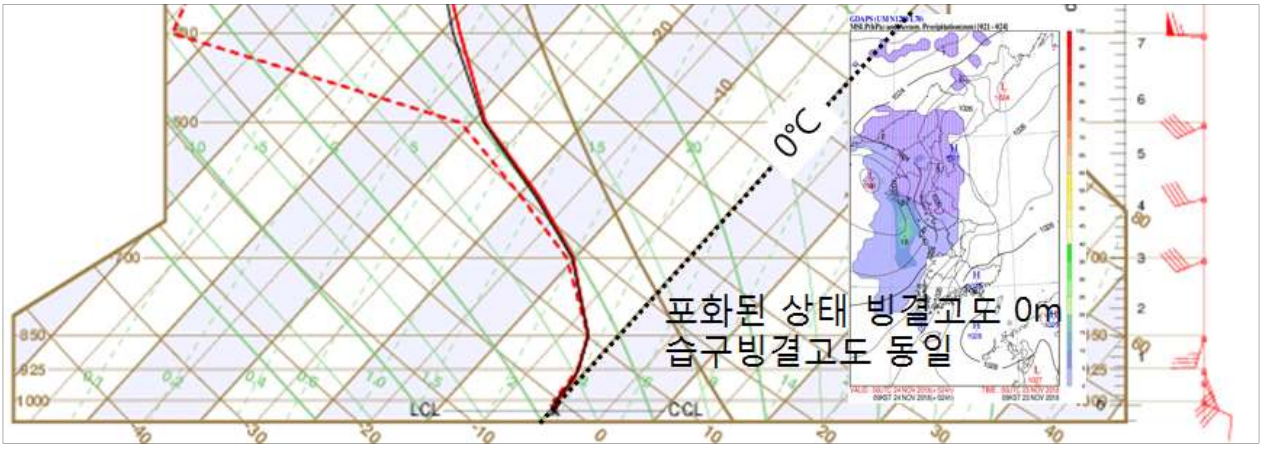
- PVU 2.0 이상이 600hPa 까지 혀를 내밀듯이 하강
- PVU 전면의 강한 북풍, 후면에 강한 남풍 ⇨ **강한 저기압성 소용돌이**
- 상층의 높은 온위(성층권) 하강, 하층은 온위면 팽창 불안정
  ⇨ **극저기압 형태로 발달, 일반적인 온난이류형 강수보다 강수량과 강수강도 강함**

● **쟁점2)** 눈비를 어떻게 구분할 것인가?
① 온난이류형 유형에서 빙결고도를 눈비 구분에 활용할 수 없는 이유



23일 09시 모델이 예측한 24일 03시(강수시작 전) 단열선도

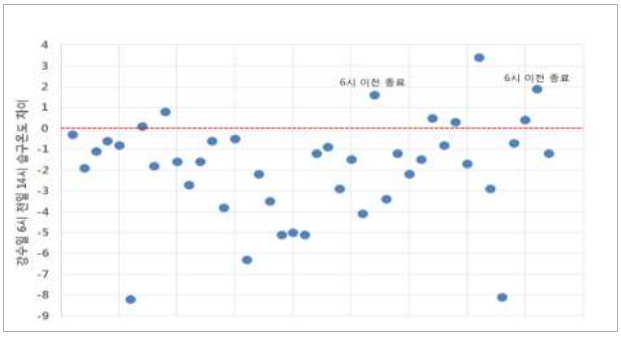
- 전일 모델에서 예측한 서울의 단열선도를 보면 빙결고도가 1km 이상으로 높아 눈으로 보기 어려운 구조이나, 이것은 포화가 되기 전의 상태이며, 포화도에 따라 기온 값이 달라지므로, 실황 대처 측면에서는 눈비 구분에 활용이 어려움



23일 09시 모델이 예측한 24일 09시(강수시작 시) 단열선도

- 강수가 시작되고 난 이후에는 포화된 상태를 보이면서 빙결고도 및 습구 빙결고도가 동일하게 0m로 나타나는 것을 확인 가능
- 하층에는 동풍이 부는 등 상층공기와 혼합되지 않으면서 등온층의 역전층을 보임 따라서 층후를 활용하는 것도 눈비 구분에 적합하지 않음
- 눈 미세물리과정을 고려하면 대기 상층부에서는 deposition과 accretion이 잘 일어날 수 있는 온도 구조를 보이고 있으므로 함박눈 형성 가능

② 그렇다면 실황에서 습구온도를 눈비에 어떻게 활용할 것인가?



- 낮 시간 이후 23일 밤까지 기온 하강으로 인해 습구온도 하강(서울 약 –2.5℃)
- 지표 부근이 건조한 상태에서 24일 아침에 강수가 시작되고, 시작단계에서 수증기가 공급되며 일시적으로 습구온도 상승(+2~+3℃)하여 0도 내외 유지
- 6시 이후 강수가 지속되는 10시까지 습구온도가 유지되면서 계속해서 눈 구역(습구온도 0℃ 내외) 유지
- **통계적으로 전일 14~15시 습구온도보다 다음날 아침 습구온도가 더 낮음**
- **강한 강수가 있으면 상층 한기 남하로 인해 0.5~1도의 습구온도 하강할 수 있음**
- **따라서 이 사례에서는 23일 예보 시점 당시 습구온도가 영하였음을 감안하면, 새벽부터 오는 강수의 형태가 눈일 것임을 예상 가능함**

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- 극저기압 형태로 발달 여부 고려
  - 상층(500hPa)의 찬공기와 따뜻한 해수온도의 열적조건(40도 이상)과 PVU 2.0이상 구간의 남하로 극저기압 형태로 발달, **일반적 온난이류 보다 강수량 급증**
- 하층의 대기구조와 습구온도 특성 이해
  - 난기가 강하지만 하층은 찬 공기가 갇혀있는 등온대기 형태이므로, **빙결고도 보다는 습구빙결고도 또는 습구온도를 활용하여 눈비 구분**을 하여야 함
  - 내륙의 경우 **전날 14시의 습구온도 보다 다음날 아침시간에 습구온도가 더 높기 어려우며, 강수가 강할 경우 0.5~1도의 습구온도 하강이 발생**함을 고려해야 함

6-3. 2021년 1월 28일 사례

한랭전선에 의한 수도권 눈

(key word) 한랭전선, 수도권, 눈, 육풍

1. 예보와 실황은?

적설 예보	실황
(27일 17시) 수도권 1~5cm (28일 05시) 서울 2~7cm, 경기동부 3~10cm, 인천, 경기서부 1~5cm	수도권 1~5cm, 서울 3.6cm, 파주 5.5cm

2. 핵심 논의

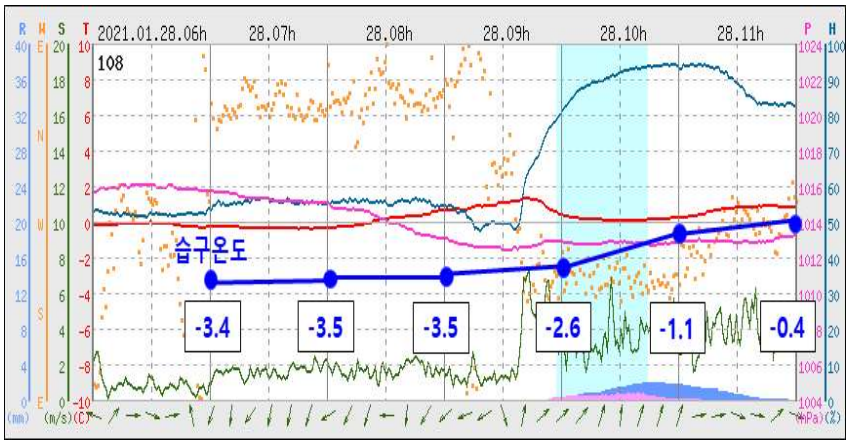
- **한랭전선 접근 전 온난역에서 기온상승으로 언제부터 눈으로 내릴 것인가?**
- **한랭전선으로 적설이 나타나는 경우는 드물어 강수의 형태, 양 등 예측 난이도 높은 사례**

3. 실황전개

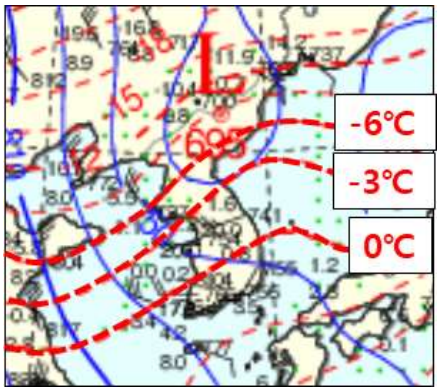
- **전일 분석 결과 서울 기준 강수 시작은 10~11시, 강수 피크는 12시 전후**
- **실황은 9시 넘어서 시작 10시 피크, 11시 종료로 2시간 정도 빠른 전개**
- **이른 강수 시작으로 기온 상승 없이 시작부터 눈으로 내림**

4. 주요 분석

- **내륙의 냉각으로 강수 시작 전 새벽 시간대의 지상 기온 상승 제한**
  - 한랭전선 접근 전, 일반적으로 나타나는 종관풍은 남서풍이지만, 본 사례는 내륙의 냉각 과정으로 인해 지상에 남서풍이 관측되지 않음(서울 기준 북풍 우세)
  - 28일 08시부터 강수대가 유입되기 시작했으며, 28일 09시 서울의 925hPa 기온은 약 –1.5℃, 지상 습구온도는 –2.6℃로 바로 눈이 내리기 시작함.
    ⇒ 내륙의 냉각으로 지상과 925hPa 기온이 거의 비슷한 형태의 등온 구조를 보임. 일반적으로 한랭전선 접근 시 남서풍이 유입되어 지상의 기온이 상승해 상층의 낮은 기온과 연직적으로 불안정한 대기구조를 만드는 것과 대조적인 모습.

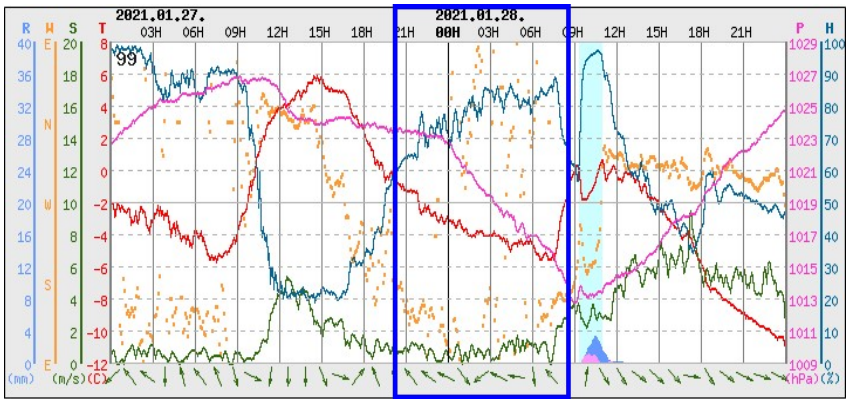


1월 28일 05시~11시 서울 AWS 시계열 자료

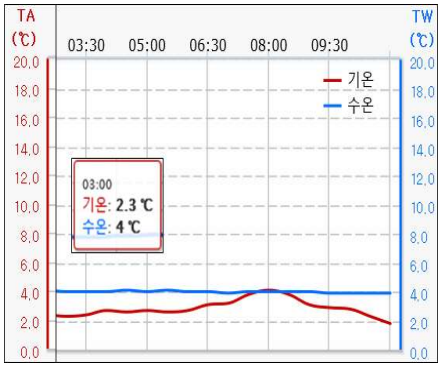


28일 09시 925hPa 일기도

- **내륙에 육풍이 우세한 원인**
  - (호천) 27일 오후부터 28일 아침까지 하층운이 없어 육지의 복사 냉각이 활발히 일어남. 파주에서 27일 15시 낮 최고기온이 나타난 후 점차 기온이 떨어져 20시부터 28일 08시까지 지상에 0~-4℃ 사이의 영하의 기온이 나타남.
  - (수평 온도차) 28일 03시 덕적도의 수온은 4℃이며, 파주와 서울의 지상 기온은 각각 –4℃와 0℃로 관측됨. 육지가 점점 냉각되면서 상대적으로 따뜻한 해수면과 큰 수평 온도차가 나타남.

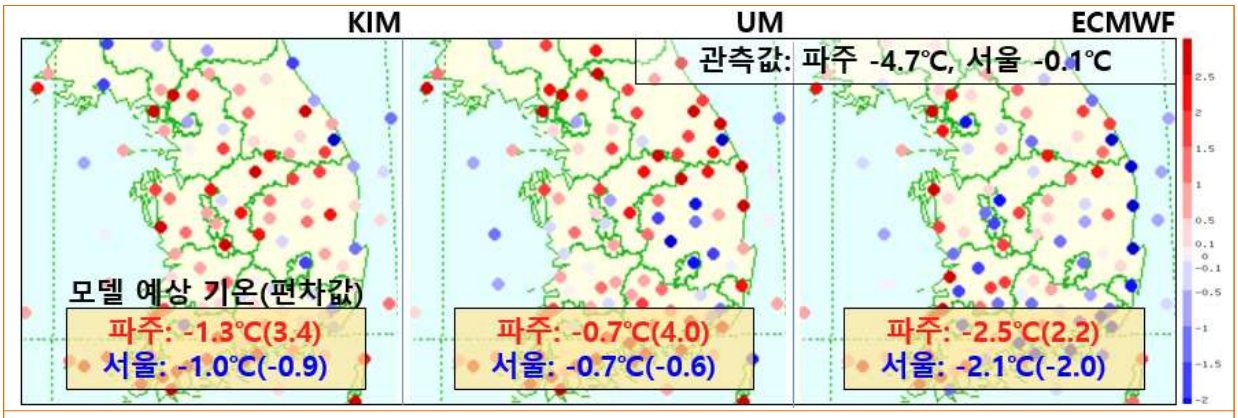


1월 27~28일 파주 AWS 시계열 자료



28일 덕적도 수온

- **수치모델은 지상 기온을 잘 예측하였는가?**
  - 27일 09시 KIM, UM, ECMWF 수치모델이 예측한 28일 06시 지상 기온장에서 세 모델 모두 파주, 강화, 인천의 기온을 실제보다 높게 예측해 양의 편차가 나타났다. 서울 지역은 모델이 실제보다 낮은 온도를 예상하였으나, 파주 및 수도권 북부 지역의 편차보다 크지 않고, 도심지의 열섬효과를 고려하면 그 편차는 더 줄어들 것.
  - 따라서 모델이 예상 적설을 실제보다 적게 모의한 원인은, 강수대가 통과한 수도권 지역의 야간~새벽 사이 육지 냉각 효과를 실제보다 약하게 모의하였기 때문.



1월 28일 06시 지상 온도 편차 분포(모델 예상장- 관측값)

5. 겨울철 한랭전선에 의한 적설에서 고려할 사항

- 지상과 925hPa의 기온이 비슷한 상황에서 눈이 내린 이번 경우처럼 지상 냉각이 강하고, 남풍에 의한 온난이류가 거의 없는 상황에서는 강수 형태 예보에 주의가 필요함.

6-4. 2022년 1월 10일 사례

중층 기압골의 적은 강수량, 지상 습구온도 bias 체크 필수

습구온도의 실황분석을 통한 적설 효율 조정

1. 예보와 실황은?

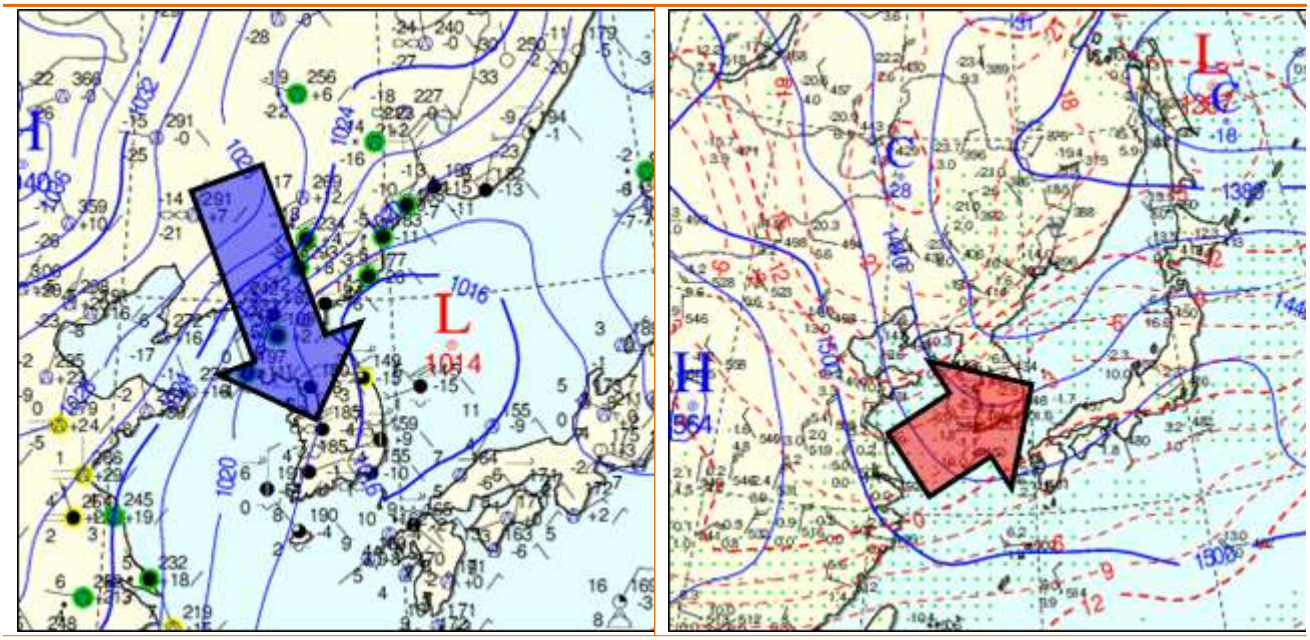
적설 예보(10일 17시 발표)	실황
▸10~11일 수도권: 1~3cm	▸ 최심신적설(cm) - **(10일)** 서울 0.9 파주 1.3 양주 1.1 가평조종 1.1 - **(11일)** 포천이동 1.1

2. 쟁점사항은?

- **쟁점 1) 강수의 메커니즘은?**
- **쟁점 2) 지상의 습구온도에 따른 적설 효율은 어떨까?**

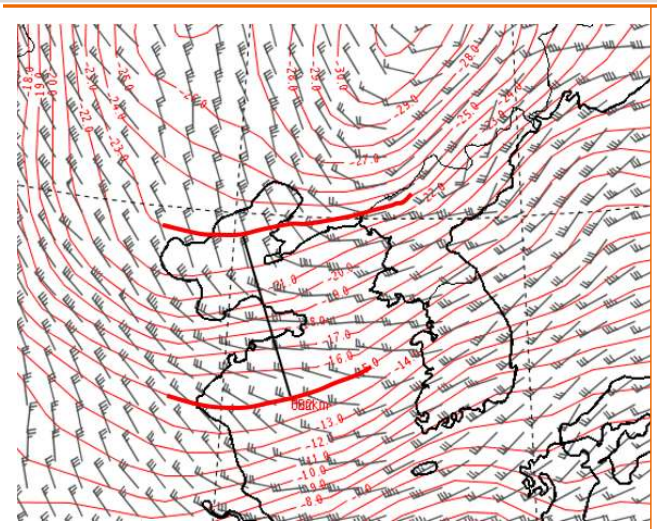
3. 주요 분석내용

- **쟁점 1) 강수의 메커니즘은?**

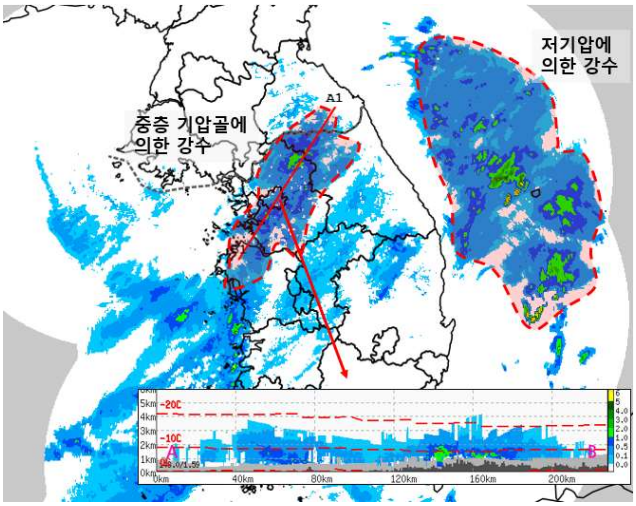


10일 21시의 지상(좌)과 700hPa(우) 일기도

- 하층에서는 북서류가 지배하고 있어 대기가 대체로 건조한 형태를 보이지만, 700hPa 이상에서는 기압골의 전면에 위치하고 있어 전형적인 중층 기압골 강수 패턴을 보임
- 하층에 건조한 공기가 지속적으로 유입되므로, 중층에서 경압성이 충분히 강해야 강수량을 기록할 수 있음



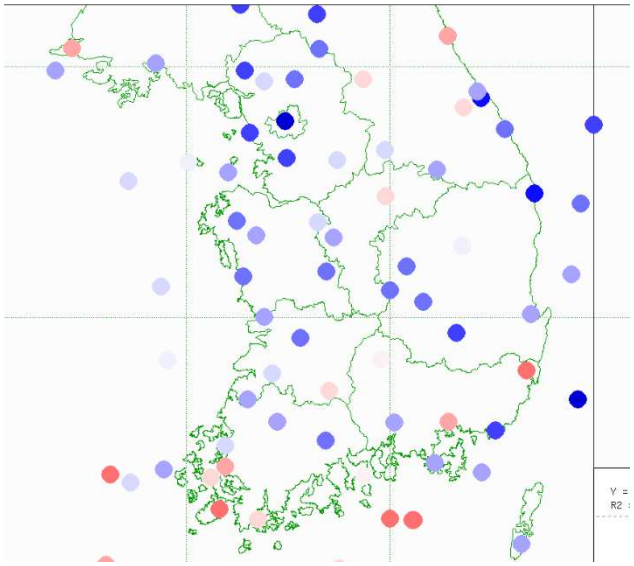
10일 21시 700hPa 등온선과 바람



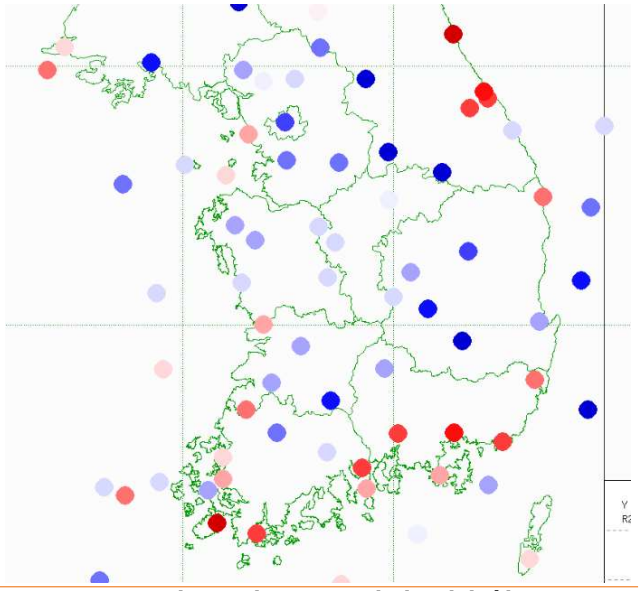
11일 00시 레이더 강수대 영상

- 산둥반도 부근의 700hPa에서 북서류와 등온선이 교차하는 구역의 경압성은 500km에 8℃의 큰 온도경도를 보이므로, 하층 대기가 건조하더라도 1mm 정도의 약한 강수가 기록될 가능성이 높을 것으로 판단함
- 중층에서 내리는 강수로 레이더 강수대가 지상에서 약 500m 상공에 떠 있는 형태를 보임
- 하층 대기가 건조할 때에는 눈·비를 판별할 때에 습구온도의 분석이 더욱 중요함

- **쟁점 2) 지상의 습구온도에 따른 적설 효율은 어떨까?**

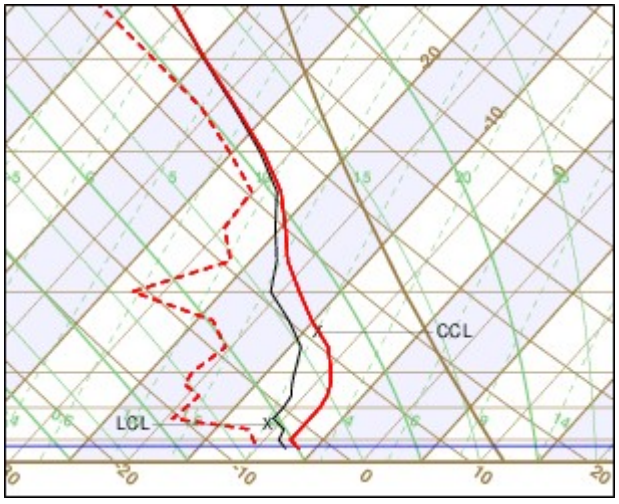


10일 09시 UM모델이 예측한
10일 12시의 습구온도 bias

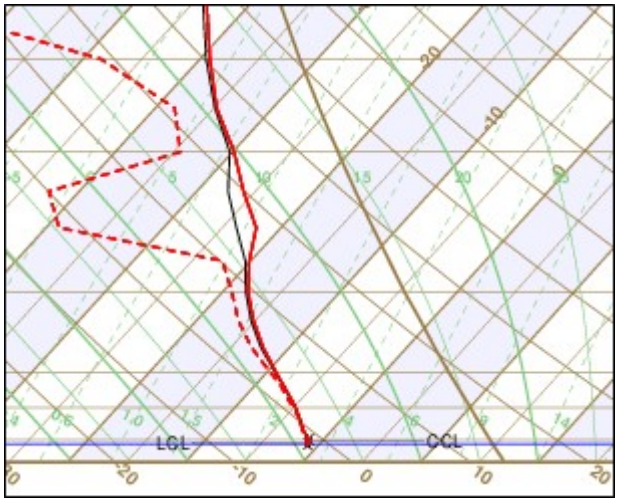


10일 09시 UM모델이 예측한
10일 24시의 습구온도 bias

- 수치모델에서 예측하는 습구온도의 정확도는 떨어지나, 실황에서 변동성이 적은 변수로서 당일의 실황 분석이 중요
- 수도권, 특히 서울 부근으로는 12시 습구온도에 대하여 음의 bias가 뚜렷하게 나타났음. 즉, 실황의 습구온도가 예상보다 높게 나타남(서울 12시 기준, 습구온도의 예측값은 –2.2℃, 관측값은 0.4℃)
- 기온이 크게 떨어지는 새벽 전까지는 2℃ 정도의 습구온도 bias가 유지될 것으로 예상됨 (서울 24시 기준, 습구온도의 예측값은 –1.3℃, 관측값은 0.3℃)



10일 09시 UM모델이 예측한
10일 12시 서울 예상 단열선도



10일 09시 UM모델이 예측한
10일 24시 서울 예상 단열선도

- 10일 09시 모델에서 예측한 12시의 서울 예상 단열선도를 보면 지상 부근의 습구온도가 영하권에 머물고 있음. 24시에는 습구온도가 어느 정도 증가하지만, 여전히 영하권에 머무는 것으로 예측됨. 해당 패턴의 연직 구조가 유지된다면 수상당량비 20이상이 가능하므로 2cm의 적설이 가능함
- 실황에서 습구온도는 약 2℃ 음의 bias가 존재함. bias가 어느 정도 유지되면서 진행된다면, 습구온도가 영상권을 보이는 구역들이 있을 것으로 분석이 가능함
- 따라서 습구온도와 하층 건조도 정도를 고려한다면, 수상당량비는 10을 초과하기는 어려울 것으로 분석할 수 있으므로 적설은 1cm 내외가 적절함

일.시:분	날씨						기온				강수			
	현재일기	ww	시정 km	전운량 1/10	중하운량 1/10	운형	현재기온 ℃	체감온도 ℃	노점온도 ℃	불쾌지수	일강수 mm	최대강수강도 mm/h	신적설(일) cm	적설 cm
11.00:00	약한 눈 연속적	71	2.46	10	8	72/	0.3	-3.0	-0.8	-	0.9		0.9	0.9
10.23:00	약한 눈 연속적	71	2.58	10	8	72/	0.3	-2.0	-2.4	-	0.3		0.2	0.2
10.22:00	약한 눈 단속적	70	15.6	10	7	52/	1.0	-1.5	-4.6	-	0.0			
10.21:00	눈 끝	22	19.75	10	6	51/	1.4	-0.7	-5.9	-	0.0			
10.20:00	약한 눈 단속적	70	20	10	7	52/	1.8	-0.8	-7.0	-	0.0			
10.19:00	약한 눈 단속적	70	11.89	10	8	52/	2.0	-0.5	-6.1	-	0.0			

10일 19시~24시 서울의 지상 관측자료

- 실제 강수량은 0.9mm, 적설은 0.9cm 정도로 수상당량비 10정도를 보이며 모델의 예상보다 적은 적설을 기록하였음

4. 사례 분석 시사점

- **중층 기압골 강수는 강수량이 1mm로 적기 때문에 수상당량비 산정이 중요**
- **지상에서 기온이 0℃ 부근으로 예상될 때에는 지상 습구온도의 bias 분석이 필수**

6-5. 2023년 1월 6일 사례

서울을 동서로 나누어 적설을 예보?

비단열냉각과 모델의 습구온도 예측경향 특징을 고려했더라면

1. 예보와 실황은?

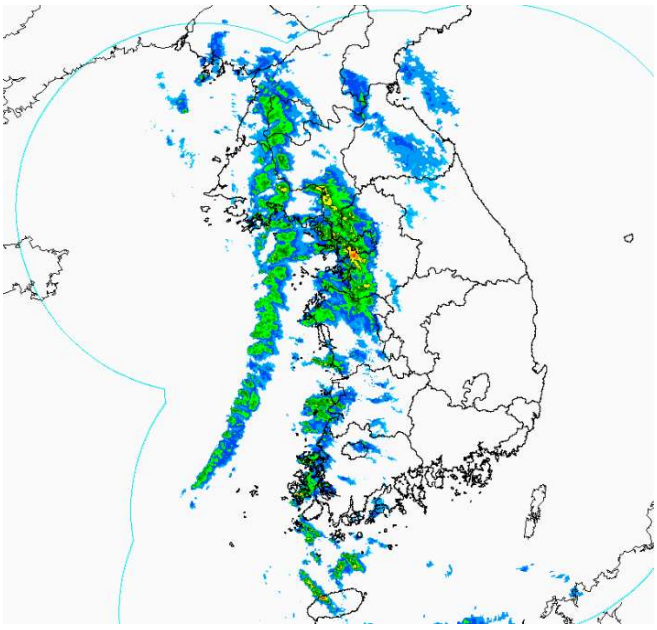
예보(1월 5일 17시 발표)	실황(1월 6일)
▸ 예상 적설 - 서울 동부 : 1~5cm, 서울 서부 1cm내외	▸ 적설 현황 - 노원(동북권) 3.7cm, 서울(서북권) 3.6cm

2. 쟁점사항은?

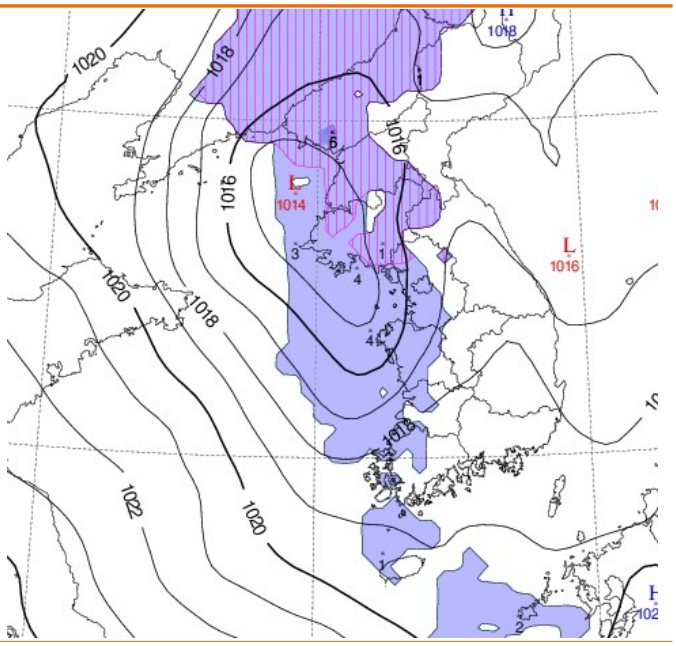
- **(쟁점 1) 강수 메커니즘과 그에 따른 기온 하강은 고려되었나?**
- **(쟁점 2) 모델의 습구온도 예측 경향은 어떠한가?**
- **(쟁점 3) 최하층 난기의 유입 방향이 어떠했는가?**

3. 주요 분석내용

- **(쟁점 1) 강수 메커니즘과 그에 따른 기온 하강은 고려되었나?**

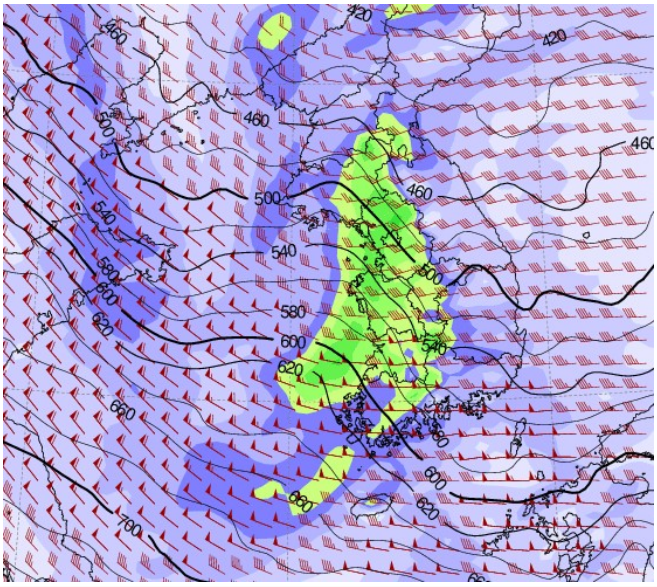


1월 6일 20시 레이더 영상

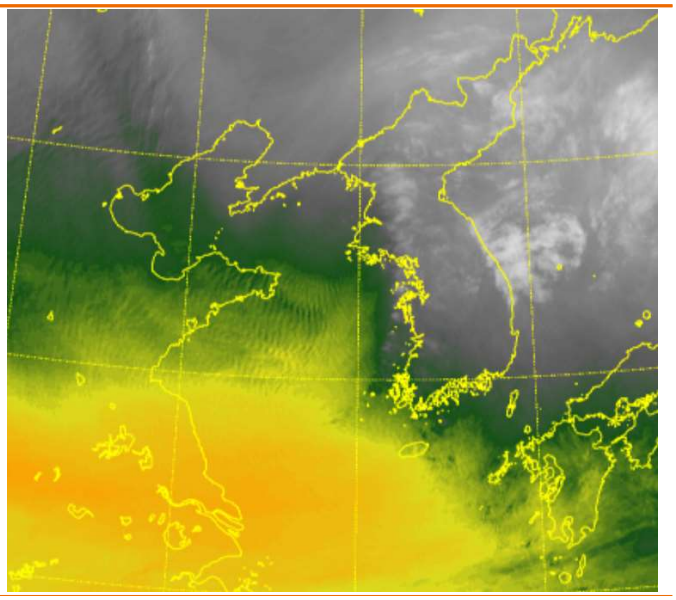


1월 6일 21시 지상 강수 예상도(UM 초기장)

- 모델에서 예상하는 강수영역을 보면 황해도 부근에 위치한 저기압 남쪽의 영역에서 난기가 유입되는 지역을 따라 하나의 층운형 강수대처럼 표현되고 있어서 넓은 지역에서 약한 강수대가 유입되는 것으로 보임



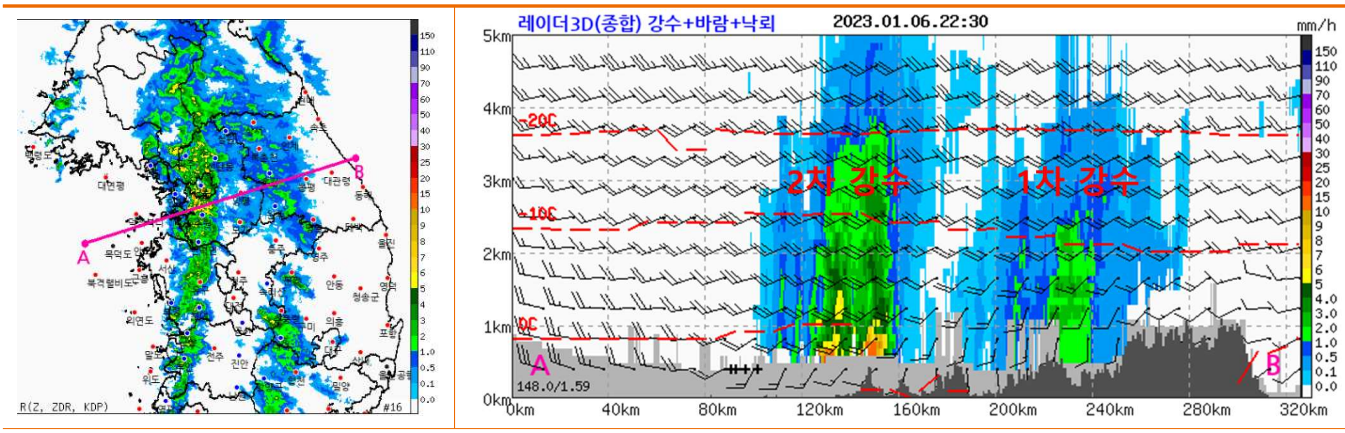
1월 6일 24시 295K 등온위면



1월 6일 21시 중층수증기 강조영상

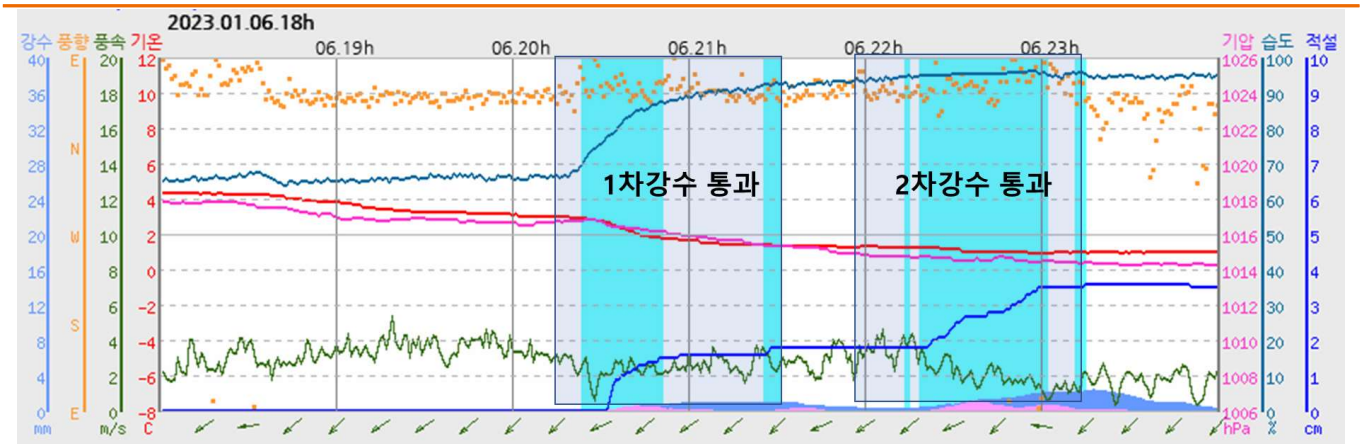
- 하지만 상층을 같이 중첩해서 살펴보면, 500hPa에서 강한 양의 와도역이 유입되고 등온위면에서도 4~5km 부근에서 성층권 공기가 침강하는 형태를 뚜렷하게 보여주고 있음. 이는 위성에서 건조역이 침강하는 영역과 잘 일치하는 것으로 보아, 건조공기 전단에서 발달하는 대류 형태의 강수대도 존재하는 것을 의미함

- 6일 레이더 영상에서 강수 형태를 살펴보면 저기압 전단의 하층에서 난역이 유입되는 곳을 중심으로 1차 강수 에코가 나타났으며, 그 뒤쪽에서 건조역이 유입되는 전단에 발달하는 2차 강수 에코가 나타나 이원화된 강수 구조를 보였음. 특히 2차 강수 에코의 경우 시간당 5mm 이상의 강한 강수강도를 보이는 등 대류성 강수의 특징을 보임



1월 6일 22시 30분 레이더 합성영상 및 단면도

- 강수대의 연직 단면을 살펴보면 1차 강수대(오른쪽)의 경우는 대체로 떠있는 형태를 보이고 있으며 구름의 top도 낮아 강수강도가 약한 형태이고, 2차 강수대(왼쪽)의 경우 건조역의 지원을 받아 지표 부근에서부터 발달하는 형태로 구름의 top이 5km 이상으로 높게 나타나고 있음

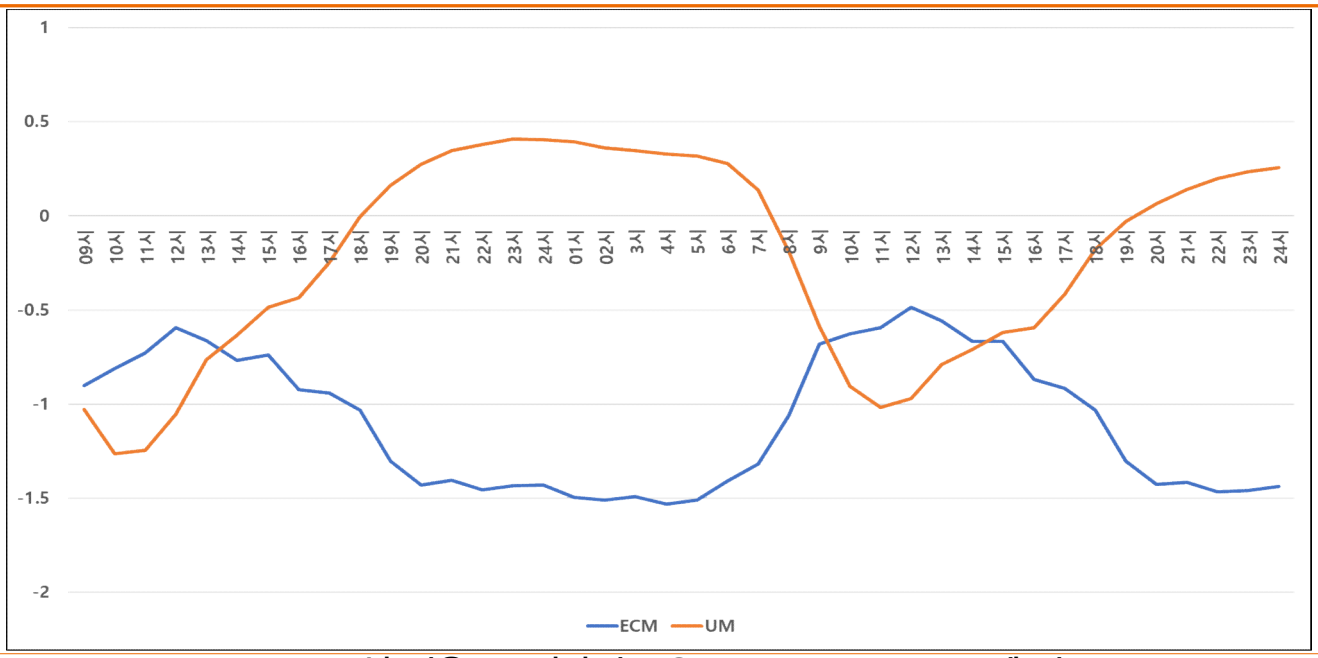


1월 6일 18시 ~ 24시 서울 지점 ASOS 시계열 자료

- 1차 강수대가 통과할 때 상대습도는 60~70%로 급격히 증가하고, 기온은 증발에 의해 하강하며 점차 습구온도로 수렴하는 형태를 보임
- 이후 2차 강수대가 통과할 때는 이미 습도가 높은 상태에서 강수강도가 강해지며 기온이 계속 하강하는 형태를 보이는데 이는 강수강도에 의한 비단열냉각 효과로 보임
- 따라서, 증발에 의한 냉각과 강수가 끌어내리는 공기에 의한 냉각 모두 반영되면서 모델에서는 비 형태의 강수를 보는 곳이 많았지만, 실제로는 서울 전역에 눈 형태의 강수가 가능한 상황이 나타남

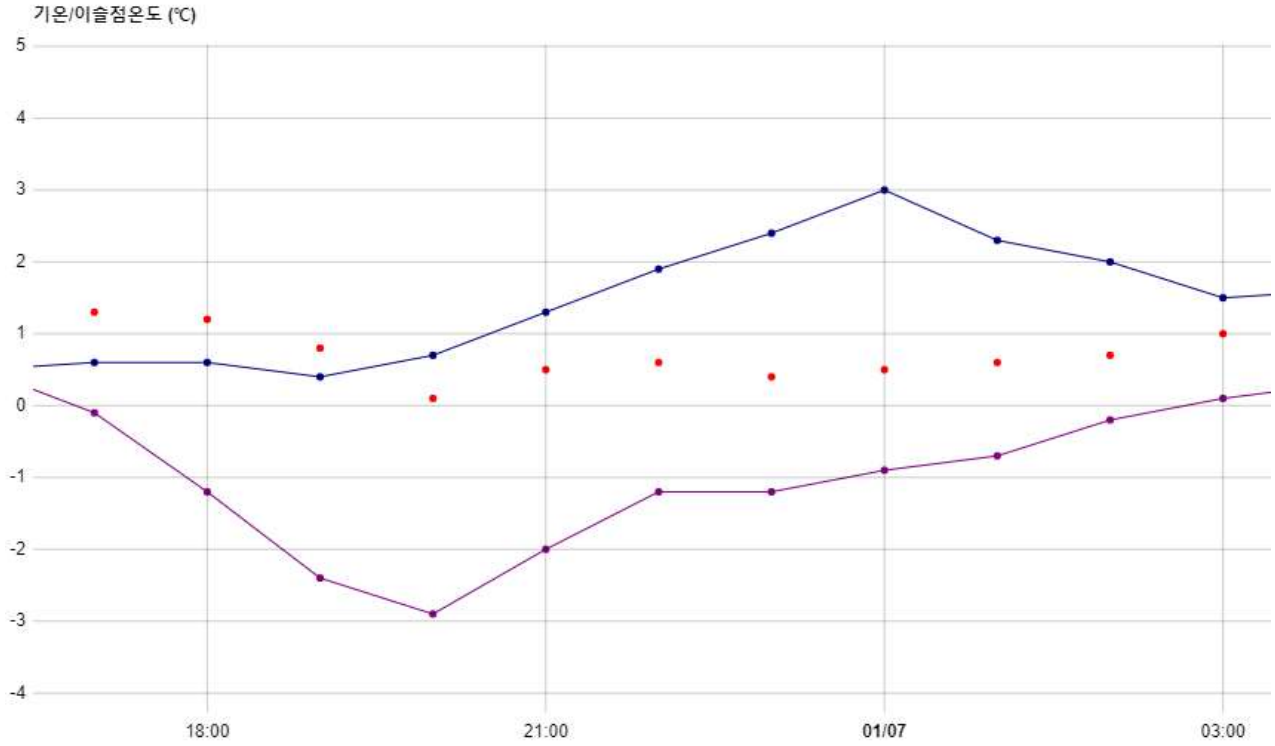
- **(쟁점 2) 모델의 습구온도 예측 경향은 어떠한가?**

- 습구온도는 눈비 구분에 가장 중요한 요인이지만, 지형의 특징, 낮과 밤의 일중 변화 등에 많은 영향을 받으므로 모델에서 정확하게 예측하기에 어려움이 있음. 따라서, 모델의 특징을 고려하지 않고 습구온도를 눈비 판별에 적용하면 예보가 빗나갈 수 있으므로, 모델별로 가지는 습구온도의 bias 특징을 파악하는 것이 중요함



2021~2022년 서울(108)지점 습구온도(TW) bias(00UTC 모델 기준)

- 서울(108) 지점의 2년동안 습구온도의 모델별 bias를 살펴보면 UM과 ECM이 서로 반대 경향을 보이는데, 특히 이번에 강수가 나타났던 저녁~밤 시간대를 보면 UM은 과대하게 예측하는 경향, ECM의 경우는 과소하게 예측하는 경향을 보임



서울(108)지점의 습구온도 관측값(빨간점)과 모델값(5일 09시 모델, 파란색 UM 보라색 ECM)

- 당시 서울 지점 예보에 활용했던 5일 09시 발표된 모델자료를 보면 과거 통계자료와 마찬가지로 UM은 밤 시간대에 습구온도 값이 계속 증가하는 형태를 보이고, ECM은 낮은 값을 보이지만 실제로 관측값은 그 중간 정도로 진행되어, 모델이 통상적으로 보여주는 bias와 일치되는 특징을 보였음

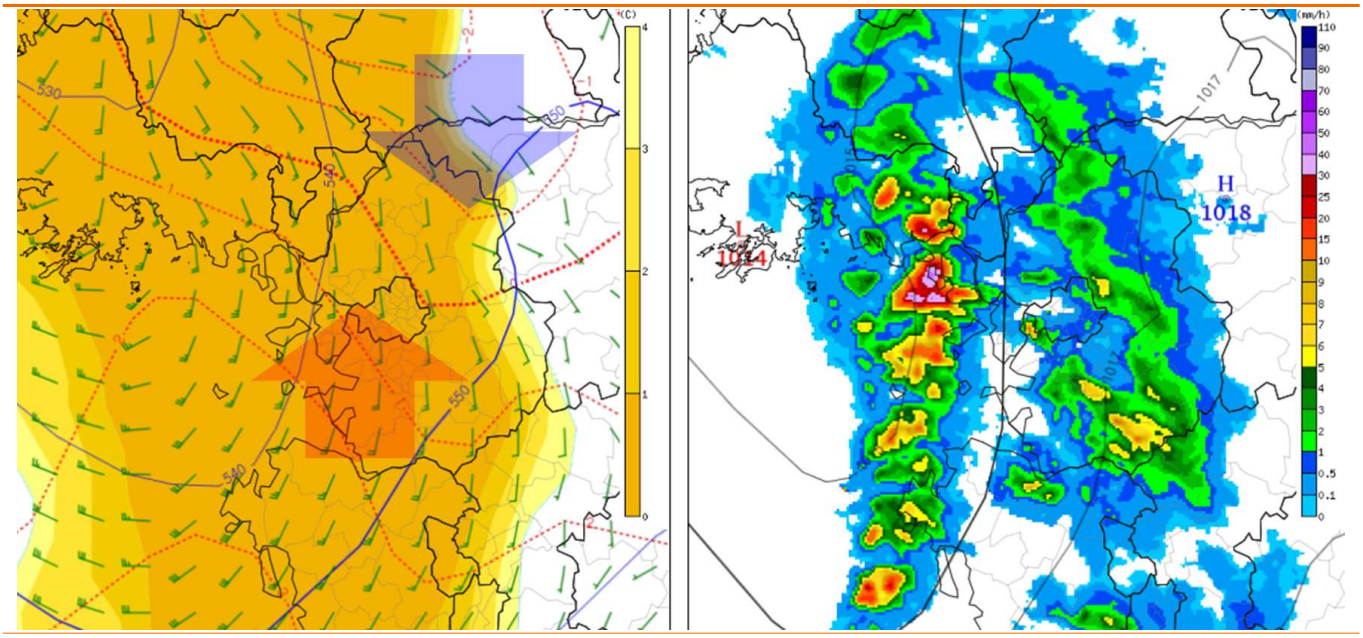
- 따라서 습구온도의 모델 bias가 엇갈리는 밤 시간대에 눈비 구분 예보를 할 때는 습구온도의 관측값이 UM보다는 낮고 ECM보다는 높은 특징을 감안하여 예보하여야 함

- 단 지점별로 bias 특징이 다르게 나타나기도 하므로, 지역에 맞는 bias 경향을 조사하여 반영하여야 함

- **(쟁점 3) 최하층 난기의 유입 방향이 어떠했는가?**

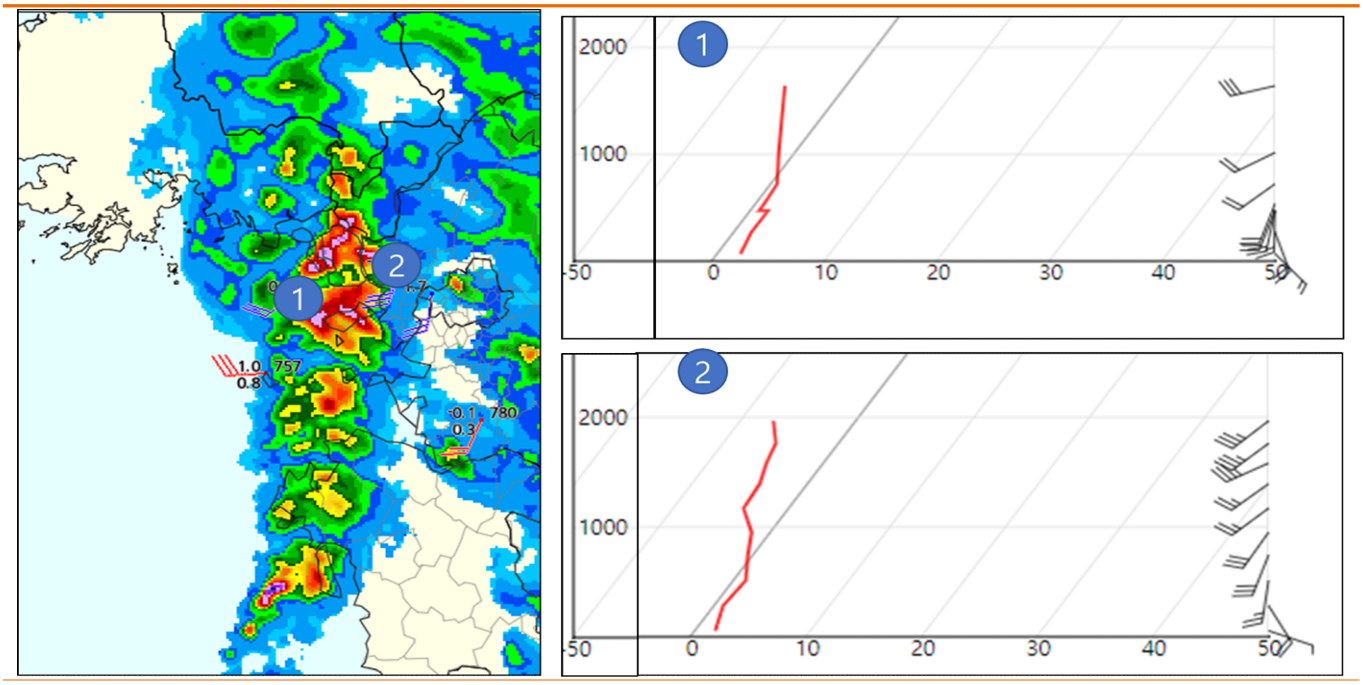
- 이번 사례의 경우 서쪽에서부터 난기가 유입되기 때문에 서울 서부지역은 적은 적설(1cm 내외), 서울 동부지역은 많은 적설(1~5cm) 예보하였음

- 그러나 실제로는 남쪽 지역은 거의 적설이 없고, 북쪽 지역은 동서 구분없이 1~5cm의 적설을 기록함



1월 6일 21시 950hPa 상세바람장과 레이더 합성영상

- FL 아래 고도인 950hPa의 기온과 바람을 살펴보면 저기압 전면에서 정남풍의 바람이 불면서 강수 에코가 형성된 방향과 마찬가지로 난기가 서쪽에서 동쪽으로 흘러가기보다는 서쪽에서 동쪽으로 확장되는 형태를 보이고 밤이 되면서 시작되는 냉각도 북한 부근에서 남쪽으로 내려오는 형태를 보이므로, 기온의 동서 차이 경향 보다는 남북경향이 좀 더 뚜렷하게 나타났음



1월 6일 21시~22시 부근 레이더 합성영상과 AMDAR 관측자료

- 2차 에코가 유입되기 직전에 강수대의 동쪽과 서쪽에서 AMDAR 자료가 관측되었는데, 양쪽 하층의 기온분포가 거의 유사하게 나타났음
- 따라서 강수대를 기준으로 동서 보다는 남북의 온도 차가 컸을 것을 추정할 수 있음

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **강수 메커니즘과 그에 따른 기온 하강을 고려했더라면**
  - 강수 메커니즘이 온난역에 의한 강수대, 건조역 전단에서 나타나는 강수대 두 개의 형태로 나타나면서, 기온을 지속적으로 하강시킬 수 있는 요인이 있음을 고려
  - 특히 건조역 전단에서 발생하는 강수의 경우 구름의 연직 두께도 두텁고 발달 강도도 강하므로 비단열 냉각의 효과가 더욱 활발히 나타날 수 있음
- **모델에서의 습구온도 bias 특징을 사전 이해했더라면**
  - 습구온도는 눈비 판별에 좋은 지표이지만 모델의 예측 성능이 떨어짐
  - 지점마다 모델의 bias가 다르게 나타나지만, 서울의 경우 밤 시간대에 습구온도가 UM 보다는 낮게 나타나고, ECM보다는 높게 형성되는 점을 감안 필요
- **최하층 난기의 유입 방향을 고려했더라면**
  - 하층 바람과 강수 에코의 모양, 내륙의 냉각 등 수평적 온도분포를 고려해, 적설 예보를 동서로 나누기보다는 남북으로 나누거나 적설 카테고리를 통합하는 등 적설예보 구간을 나눔에 있어 좀 더 다각적 접근이 필요

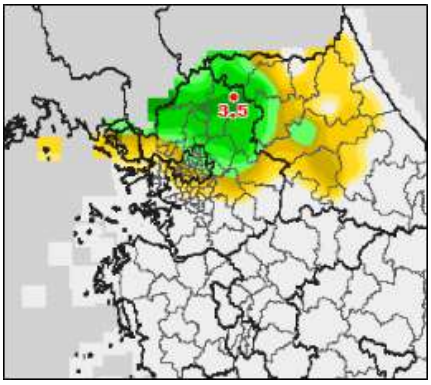
6-6. 2024년 1월 17일 사례

하층 습구온도를 고려한 중층강수 시 눈비 판단

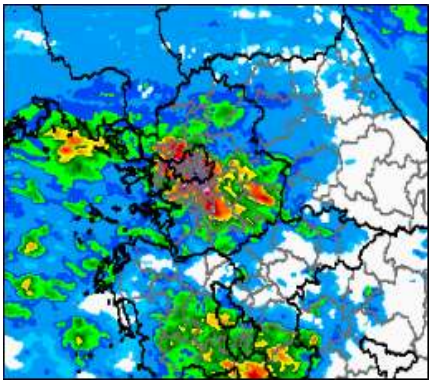
비 보다는 눈으로 내리며 수도권 적설 증가, 경기북부는 대설

1. 예보와 실황은?

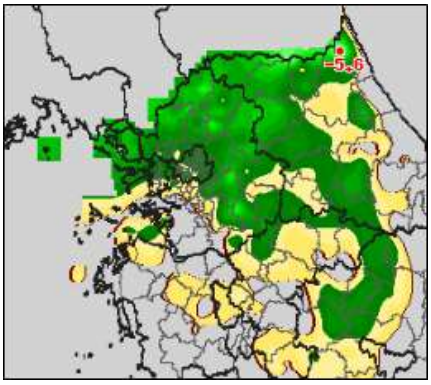
예보(1월 17일 05시 발표)	실황(1월 17일)
- (17~18일) 경기북부 1~3cm 서울.인천.경기남부 1cm 미만	- 가평북면(가평) 6.9cm, 일동(포천) 6.6cm - 강북(서울) 3.7cm, 서울 2.3cm



17일 15시 신적설(일)



17일 15시 레이더



17일 15시 지상 습구온도

- 오전부터 시작된 수도권 강수는 15시인 오후 시간대에도 시간당 1mm 내외의 강도로 강수가 지속됐으며, 오후에도 서울과 경기북부의 지상 습구온도가 영하권으로 나타나며 예상보다 많은 적설이 기록되었음

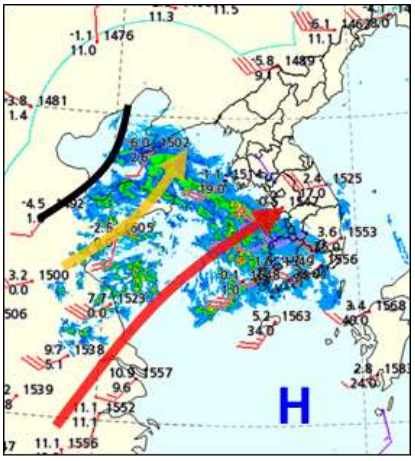
2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 강수 메커니즘은 무엇이며, 적설이 가능한 구조인가?**
- **쟁점2) 왜 비보다는 눈으로 내리며 적설이 늘어났는가?**

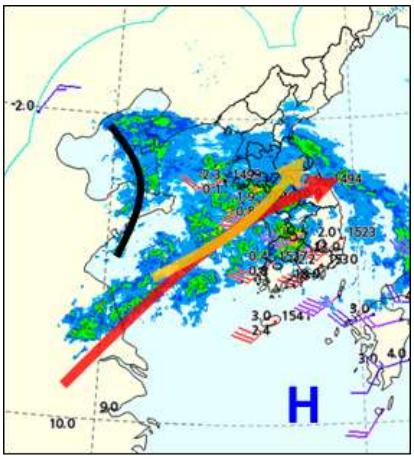
3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 강수 메커니즘은 무엇이며, 적설이 가능한 구조인가?**

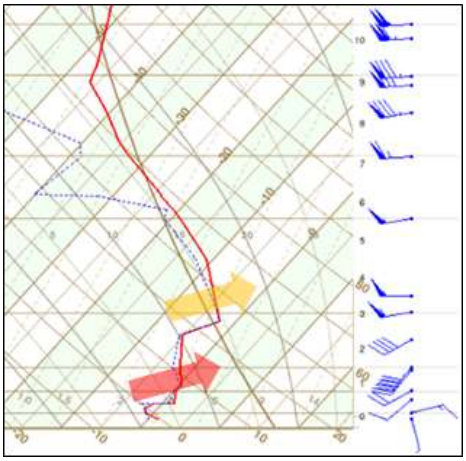
- 아래 그림의 700hPa 관측자료와 레이더를 보면 17일 09시에는 우리나라 남쪽에 위치한 고기압의 가장자리에서 온난이류에 의한 대기 중층의 강수대가 서해상에서 우리나라로 유입되기 시작한 것을 알 수 있으며, 15시에는 북서쪽의 기압골이 접근하면서 고기압 가장자리의 기류와 합류하여 수도권으로 유입되는 온난이류의 풍속을 증가시켜 강수대가 더 강하게 발달하면서 영향을 준 것을 확인할 수 있음



17일 09시 700hPa+레이더

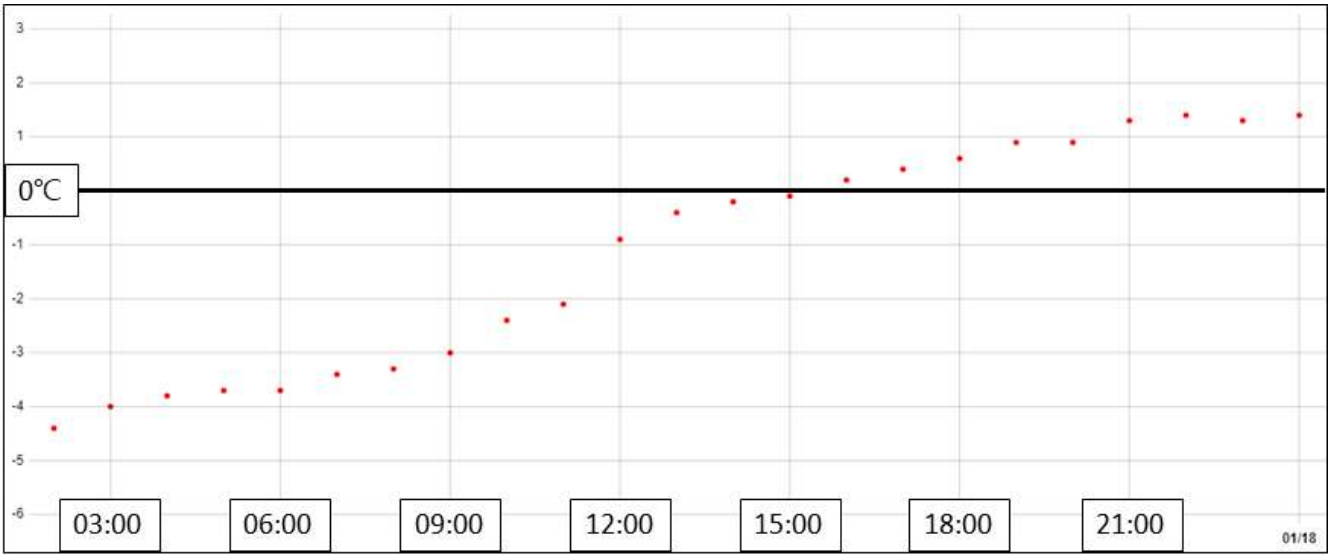


17일 15시 700hPa+레이더

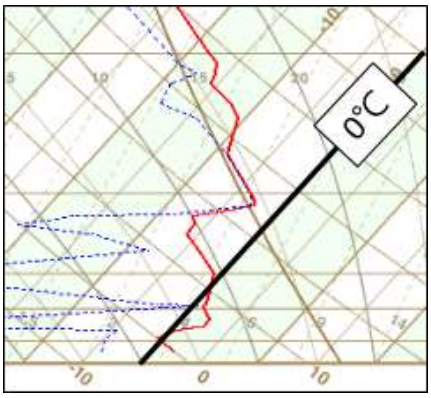


17일 15시 덕적북리 단열선도

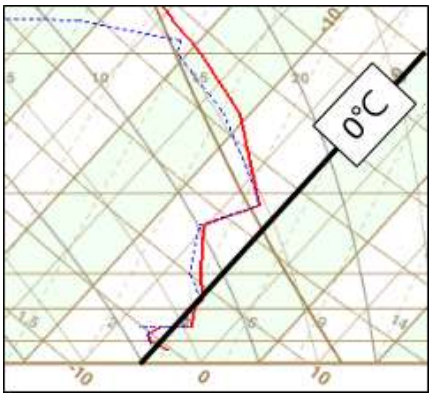
- 위 그림의 오른쪽 덕적북리에서 관측된 단열선도를 보면 하층에서부터 중층까지 전부 포화된 형태로 구름대가 발달한 것을 알 수 있는데, 연직 기온 구조를 보면 대기 중층과 하층에 각각 배가 부른 형태로 나타나 중층에서 발달한 강수대에 더불어 하층에서도 난기 유입에 의한 포화가 일어나면서 시간당 1mm 내외의 중층강수 치고는 강한 강도의 강수가 내렸음



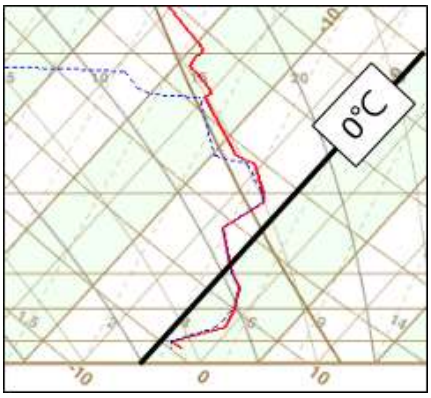
17일 서울 지점 지상 습구온도 시계열



17일 09시 덕적북리 단열선도



17일 15시 덕적북리 단열선도



17일 21시 덕적북리 단열선도

- 위 그림의 17일 서울 지점의 지상 습구온도 시계열 실황 자료를 보면 본격적인 난기가 유입되기 전인 15시까지는 습구온도가 0℃ 이하로 나타나면서 적설이 가능한 조건을 유지하였음. 따라서 지상 습구온도의 조건만 본다면 서울은 15시까지는 적설이 유지될 수 있는 조건으로 판단할 수 있음

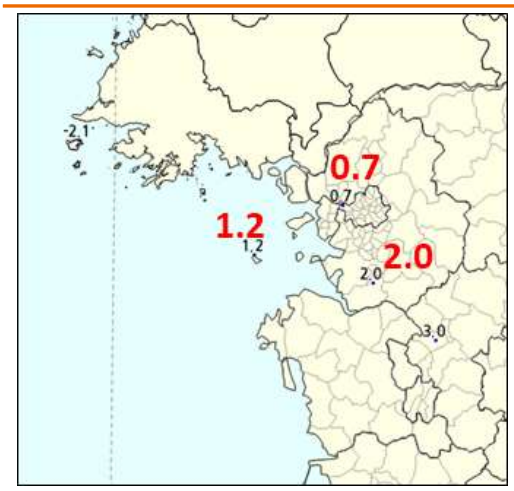
  하지만 17일 09시부터 21시까지 서울의 남서쪽에 위치한 덕적북리 단열선도 관측 자료를 보면 하층 925hPa 고도 부근으로 영상층의 면적이 약하게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 형태일 경우 지상이 영하의 기온이더라도 눈이 아닌 어는 비 형태로 내리거나, 눈으로 내리더라도 적설 효율이 낮게 나타날 가능성이 높음

일.시:분	날씨						기온				강수				
	현재일기	ww	시정 km	전 운량 1/10	중하 운량 1/10	운형	현재 기온 ℃	이슬점 온도 ℃	체감 온도 ℃	열 지수	일 강수 mm	최대 강수 강도 mm/h	신 적설 (일) cm	적설 cm	상대 습도 %
17.21:00	약한 비 연·	61	3.48	10	8	72/	1.7	1.2	-1.7	-	7.0		1.4	1.4	97
17.20:00	약한 비 연·	61	2.69	10	8	72/	1.5	0.7	-1.2	-	6.8		1.4	1.4	95
17.19:00	약한 비 연·	61	4.58	10	8	72/	1.4	0.6	-1.7	-	6.2		1.4	1.4	95
17.18:00	약한 비 연·	61	5.49	10	8	72/	1.2	0.3	-1.9	-	5.7		1.8	1.8	94
17.17:00	약한 비 연·	61	6.99	10	8	72/	1.1	0.0	-2.3	-	5.4		1.9	1.9	93
17.16:00	강한 진눈깨	69	4.66	10	6	72/	0.9	-0.1	-2.5	-	4.9		2.3	2.3	93
17.15:00	강한 진눈깨	69	4.49	10	6	72/	0.7	-0.4	-2.4	-	3.3		2.0	2.0	92
17.14:00	약한 진눈깨	68	2.89	10	6	72/	0.8	-0.6	-2.6	-	2.3		2.1	2.1	90
17.13:00	약한 눈 연·	71	2.55	10	8	72/	0.7	-1.0	-1.3	-	1.4		1.3	1.3	88
17.12:00	약한 눈 연·	71	2.66	10	7	72/	1.0	-2.5	-0.9	-	0.1		0.1	0.1	77
17.11:00	약한 눈 단·	70	22.74	10	7	52/	1.3	-7.0	1.3	-	0.0				54
17.10:00	흐림		23.33	10	5	52/	0.9	-7.1	-2.1	-					55
17.09:00	흐림		24.75	9	9	020	0.2	-7.3	-2.8	-					57

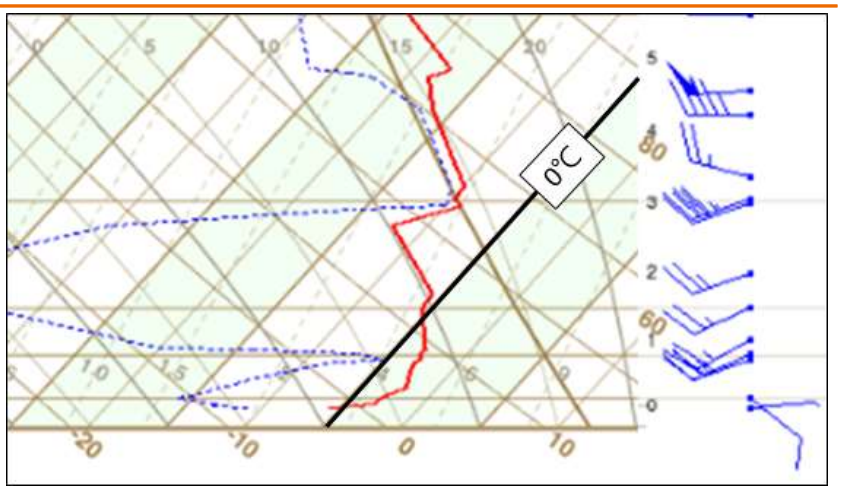
17일 09~21시 서울 지점 지상관측 집계표

- 위 그림의 실제 17일 서울 지상관측 집계표 자료를 확인해보면, 16시까지는 진눈깨비의 강수 형태를 유지하면서 적설이 2.3cm까지 증가한 것을 알 수 있음. 기온이 더 낮았던 경기북부에는 적설 시간이 더 길어지면서 5cm 이상의 적설을 기록해 대설주의보가 발표되면서 많은 눈이 내렸음

- **쟁점2) 왜 비보다는 눈으로 내리며 적설이 늘어났는가?**



17일 09시 925hPa 기온

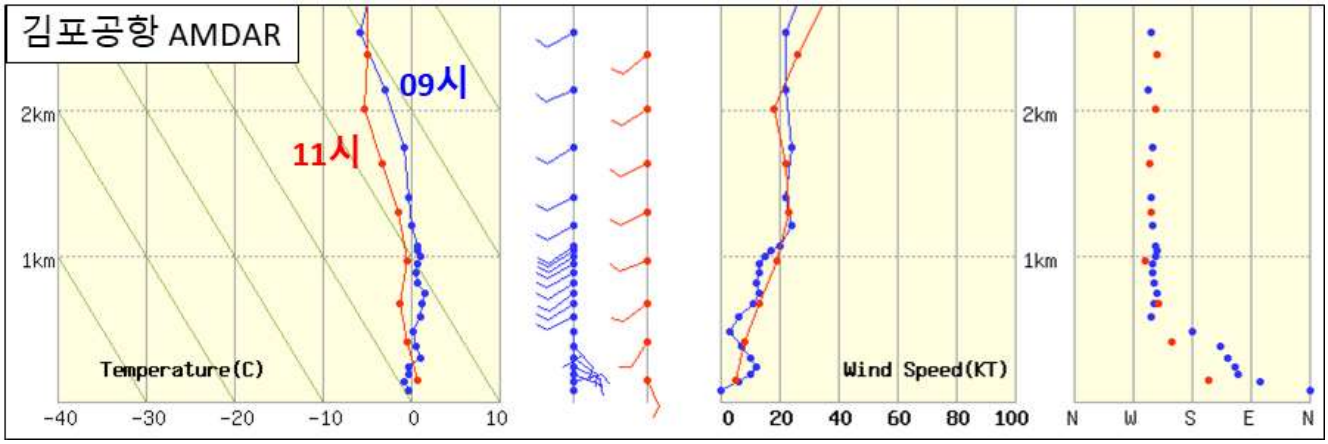


17일 09시 오산 단열선도

- 수도권으로 강수대가 유입되기 직전 위 그림의 17일 09시 925hPa GTS 기온 분포 실황을 보면 수도권 지역으로는 전부 영상권의 기온을 나타내고 있음, 또한 오른쪽의 오산

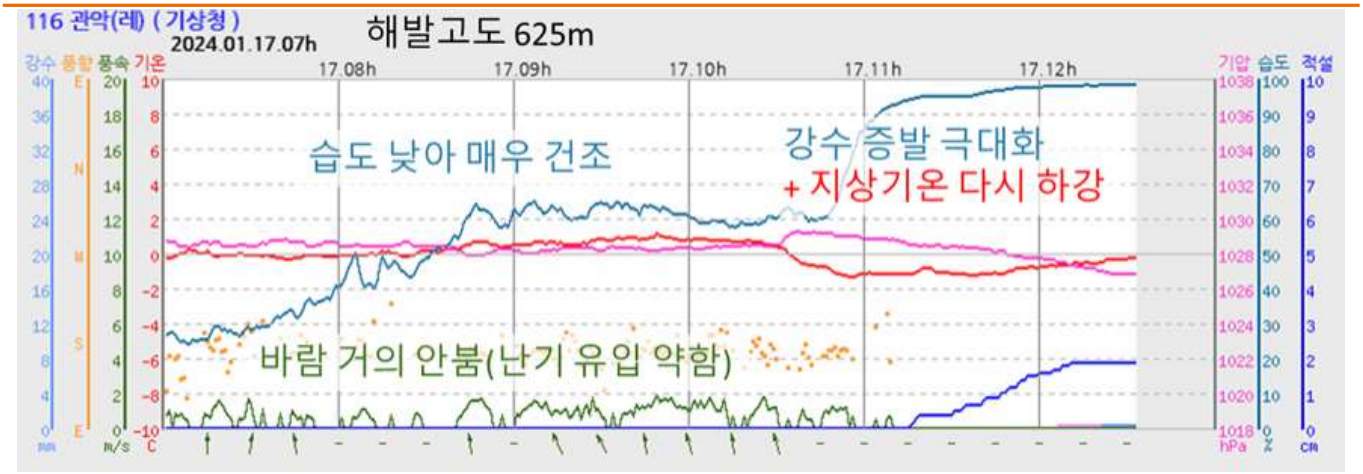
단열선도에서는 925hPa 부근의 영상층 면적이 앞서 덕적북리 단열선도 자료에서 보았던 것보다 더욱 큰 면적으로 나타나고 있어, 강수형태가 눈으로 내리기 어려운 조건인 것처럼 볼 수 있음. 이러한 오산의 기류가 그대로 서울로 유입된다면 서울도 강수 형태가 눈보다는 비로 내릴 가능성을 고려해볼 수 있음

- 하지만, 단열선도 상의 기온은 아직 포화가 되지 않은 상황이라 습구온도는 대부분 영하권에 위치하고 있어, 중층강수의 증발 효과로 하층이 포화가 된다면 기온이 습구온도에 가까워지면서 영하권으로 떨어질 수 있는 상황임



17일 09시/11시 김포공항 AMDAR

- 실제로 위 그림의 17일 09시와 11시의 김포공항 AMDAR 연직기온 관측 자료를 보면 파란색 선인 09시에는 2km 이하 고도의 기온이 0℃ 또는 영상의 기온을 나타내고 있었으나 빨간색 선인 11시에는 2km 이하 고도의 기온이 전부 영하로 하강한 것을 알 수 있음. 09시에는 김포공항에 강수대가 유입되기 전이고, 11시에는 강수대가 유입된 후이기 때문에 결국은 중층강수에서 떨어진 강수입자가 하층에서 증발하면서 영상이었던 기온이 습구온도에 가깝게 하강하여 영하로 내려간 것임을 알 수 있음



17일 07~13시 관악(레) AWS 시계열

- 위 그림은 서울 남쪽 경계에 위치한 관악(레) AWS의 시계열 자료로 관측 지점의 해발고도가 625m이기 때문에 925hPa 고도의 자료로 활용할 수 있는 지점임. 강수는 11시 전후로 시작되었고 강수가 시작된 후에도 풍속이 증가하지 않은 것을 보면 하층의 난기가

강하게 유입되지 않은 상황이 이어진 것을 알 수 있음. 또한 강수가 시작되기 전 상대습도는 60% 내외로 건조한 상태였고 기온은 0~1℃로 영상의 기온을 나타내고 있었으나 11시에 강수가 시작되고 상대습도가 오르자 영상이었던 기온이 급격하게 하강하면서 영하 1℃ 이하로 떨어지고 적설도 기록되기 시작했음.

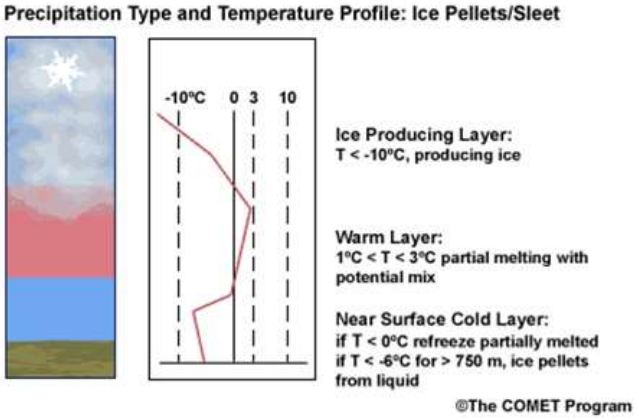
시:분	강수	강수 10분	강수 15분	강수 30분	강수 60분	강수 3H	강수 6H	강수 12H	일강수 (주)	일강수 (보조)	적설	기온	습구 온도 (시험)
15:00	○	0	0	0	0	2.0	2.0	2.0	2.0	.	0.6	0.7	0.5
14:00	○	0	0	0	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	.	1.7	0.4	0.2
13:00	○	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	.	1.9	-0.1	-0.4
12:00	○	0	0	0	0	0	0	0	0	.	1.6	-0.9	-1.3
11:00	○	0	0	0	0	0	0	0	0	.	-	-1.2	-2.5
10:00	○	0	0	0	0	0	0	0	0	.	-	0.8	-2.2
09:00	○	0	0	0	0	0	0	0	0	.	-	0.5	-2.3

17일 09~13시 관악(레) AWS 문숫자

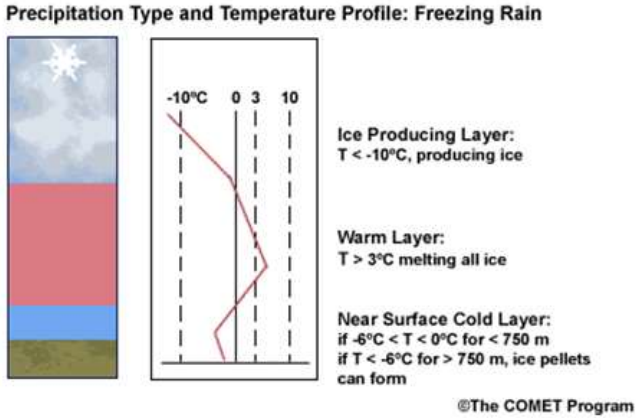
- 위 그림의 관악(레) AWS 문숫자 자료를 보면 09~10시에는 기온이 영상이었으나 습구온도는 영하 2℃ 이하로 낮게 나타났음. 11시에 강수가 시작되자 기온은 급격하게 영하로 떨어졌고, 12시 이후에 강수대와 함께 난기가 유입되면서 습구온도도 점차 오르자 14시에는 습구온도와 기온이 모두 영상권으로 회복하면서 적설도 점차 줄어들었음.
  결국은 본격적인 난기가 유입되기 전인 13시 이전에도 습구온도를 고려했다면 눈과 적설의 가능성을 높게 판단할 수 있었던 상황이었음

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **지상뿐만 아니라 하층의 기온도 습구온도를 고려해야 한다.**



얼음 싸라기가 만들어지는 온도 프로파일



어는 비가 만들어지는 온도 프로파일

- 일반적으로 강수형태를 판단할 때 가장 많이 활용하는 기상요소는 지상 습구온도이며, 지상 습구온도 1.2℃를 기준으로 눈과 비를 판별하고 0℃ 이하일 때를 적설의 기준으로

판단하고 있음. 하지만 이번 사례와 같이 지상은 영하의 기온이지만 그 위 고도의 하층 기온이 영상일 것으로 예상되는 경우 강수형태는 눈이 아닌 위 그림과 같이 얼음 싸라기나 어는 비 형태로 내릴 수 있기 때문에 지상뿐만 아니라 대기 하층의 기온도 함께 고려하는 것이 중요함

- 하지만 이때 하층의 기온이 아직 포화가 되지 않은 상황이라면, 내리는 강수에 의한 증발 효과로 기온이 습구온도에 가깝게 하강할 수 있으므로 반드시 포화 여부와 습구온도를 확인하여 하층의 기온이 영하권으로 떨어질 가능성을 판단하는 것이 필요하겠음

6-7. 2024년 2월 21일 사례

실황분석으로도 예상 못 한 10cm 이상 대설, 비단열냉각과 해발고도의 조합 고려해야 한다

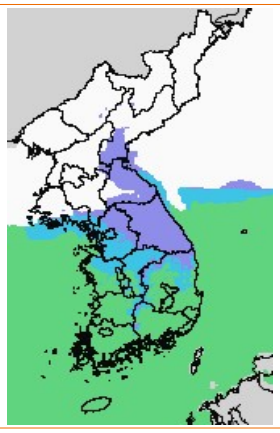
1. 예보와 실황은?

적설 예보(21일 17시 발표)	실황(21~22일)
▸ 예상 적설(21~22일) - 서울, 인천, 경기(남부서해안 제외): 3~8cm - 경기남부서해안: 1~5cm	▸ 관측 적설(21~22일) - 서울: 5.9~15.3cm - 인천: 2.1~13.1cm - 경기도: 0.8~16.2cm

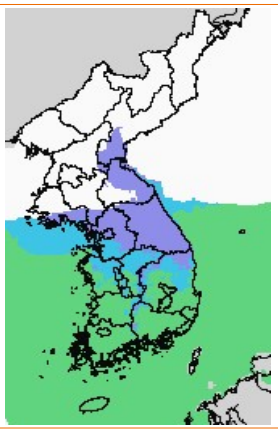
실황 전개 상황

- ▸ 일본 상공 저기압 통과하는 가운데 동해북부 고기압 위치, 남고북저 기압계 강화
- ▸ 700hPa 중층골 통과 → 저기압 동반 850hPa 온난이류(①)강화, 밤~새벽 925hPa 하층 한랭이류(②)강화
- ▸ 전날 실황분석 결과 ①, ②요소 강화될 가능성 커 예보상향(1~5cm→3~8cm) 하였으나 더 많은 적설기록

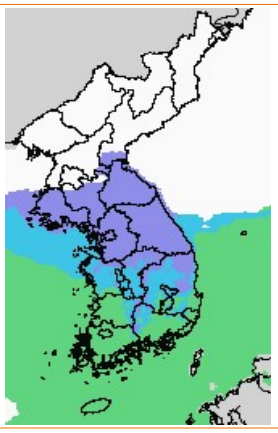
예상 적설 공간분포



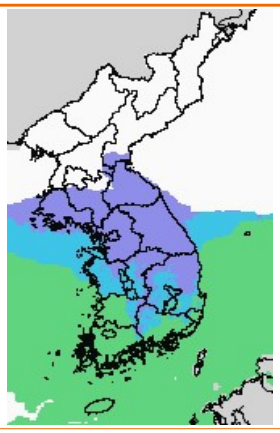
2월 21일 18~21시



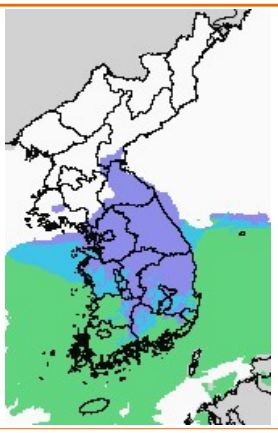
2월 21일 21~24시



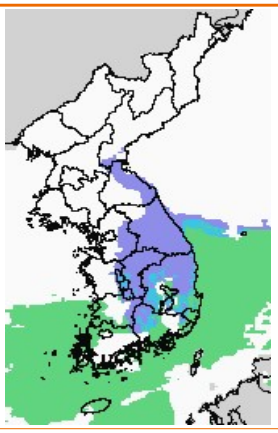
2월 22일 00~03시



2월 22일 03~06시



2월 22일 06~09시

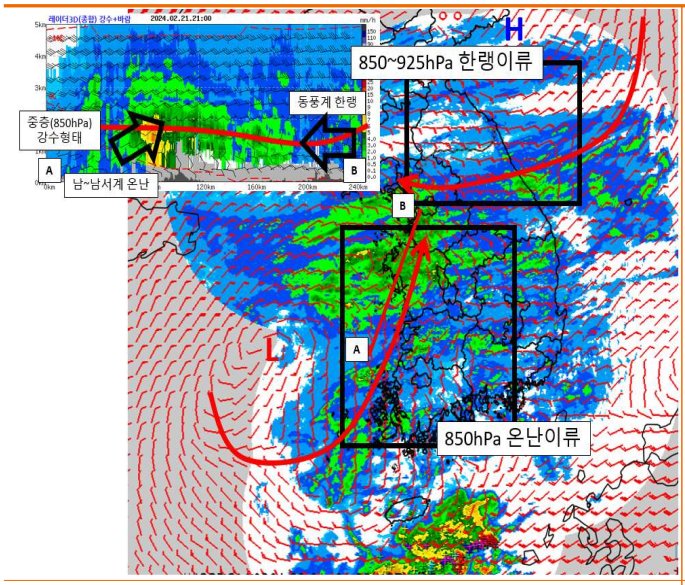


2월 22일 09~12시

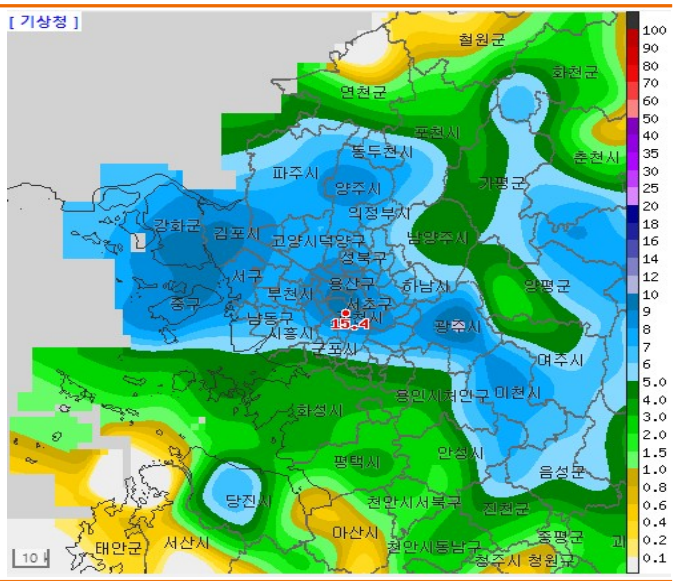
일 최심신적설 현황(cm) - 수도권

(26일 기준) 관악(레) 16.2 관악 15.3 마포 14 서대문 13.7 경기광주 13.5 영종도 13.1 이천 11.9

※ [서울 5.9~15.3] 관악 15.3 마포 14 서대문 13.7 서울 12.7 남현 12.5 동대문 10.6 서초 10.5 성동 10



2월 21일 19시 레이더 영상(1.5km WISSDOM)



2월 21~22일 신적설 분포

2. 쟁점사항은?

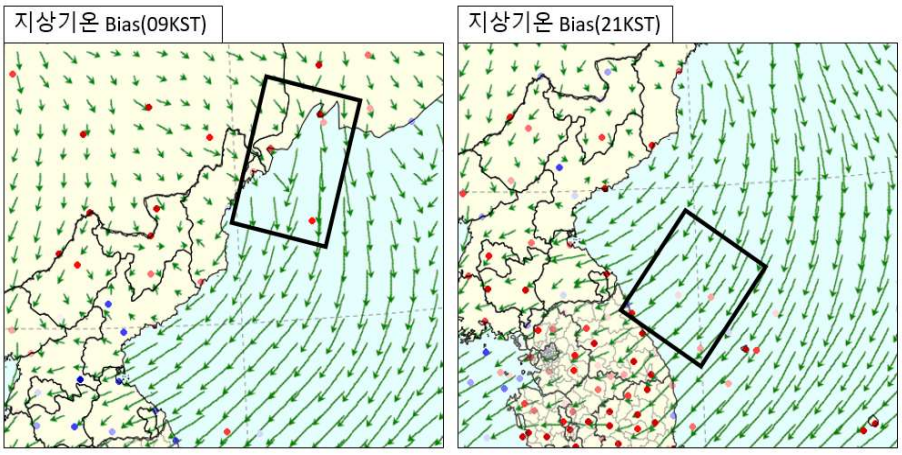
- **비단열냉각에 따른 적설 시간과 적설 효율 증가**
- **100m 고도 차이로 예상보다 많은 적설 가능?**

3. 주요 분석내용

- **비단열 냉각의 원인과 그에 따른 적설증가는 왜 나타났는가?(적설효율↑, 적설시간↑)**

- 비단열냉각의 원인은 크게 3가지로 분류됨
  1. [21일 밤] 한랭이류
  2. [22일 새벽] 냉각, 복사, 전도, 상변화(융해, 증발, 응결, 빙결 등) → 이번사례 응결 주 원인
  3. 연직운동에 의한 기온 하강/상승(건조단열 or 습윤단열)

- [21일 밤] 925hPa 이하 하층은 북동 고기압에 의한 **한랭이류**가 모델대비 강
  [22일 새벽] 강수강도 강해지면서 과냉각수적 생성으로 잠열 흡수도 더 강해짐(**응결**)
  → 더 강한 비단열냉각으로 주위공기 더 하강, 보다 찬 공기 지상으로 낙하



(좌) 09KST 연해주 부근 기온 양의 Bias로 실황이 더 낮음

(우) 21KST 동해상까지 내려온 기류 동반 기온도 양의 Bias로 실황이 낮음

21일 09, 21KST GTS 실황분석(지상바람 + 지상기온 Bias)

- [21일 밤] 모델대비 **한랭이류**에 의한 **비단열냉각** 효과 강해지면서 적설시점이 예상(21시 전후)보다 빨라지고(19시 전후), 이에 따라 적설 가능 시간이 늘어남

  [22일 새벽] 강수가 강해짐에 따라 포화층 점차 깊어짐 → 수증기 **응결** 더 많아지면서 잠열흡수 더욱 활발해짐 → 보다 강한 **비단열냉각**으로 주변 기온이 예상보다 더 낮아짐

이러한 비단열냉각 효과로 인해 기온이 더 낮아지면서 하층 수증기에 포함된 수적이 적어지며 중상층에서 만들어진 눈 결정체에 부착(Accretion)되는 수적이 적어져 **적은 강수로도 적설이 많은** 즉, 적설 효율이 보다 좋은 상태로 전개

시간(KST)	1hr 강설(적설ㅇ)	누적강수(적설O)	1hr 신적설	24hrs 신적설	기온	SLR
19	1.2	1.2	0.4	0.4	0.9	3.3
20	1	2.2	0.7	1.1	0.6	7.0
21	1	3.2	1	2.1	0.4	10.0
22	0.9	4.1	0.8	2.9	0.3	8.9
23	0.6	4.7	0.9	3.8	0.2	15.0
0	1.2	5.9	1.4	5.2	0	11.7
1	1.1	7	1.8	7	-0.1	16.4
2	1.6	8.6	1.5	8.5	-0.2	9.4
3	1.3	9.9	1.3	9.8	-0.2	10.0
4	1.7	11.6	2.2	12	-0.3	12.9
5	1.7	13.3	1.2	13.2	-0.5	7.1
6	0.9	14.2	0.5	13.7	-0.8	5.6
7	0.5	14.7	0.1	13.8	-1.1	2.0
8	0	**14.7**	0	**13.8**	-0.9	-

SLR 평균 8.8

Peak 시간 00~05KST(새벽)

평균 SLR 11.2

SLR 평균 3.8

- 수상당량비는 10내외로 예상과 비슷하였지만,

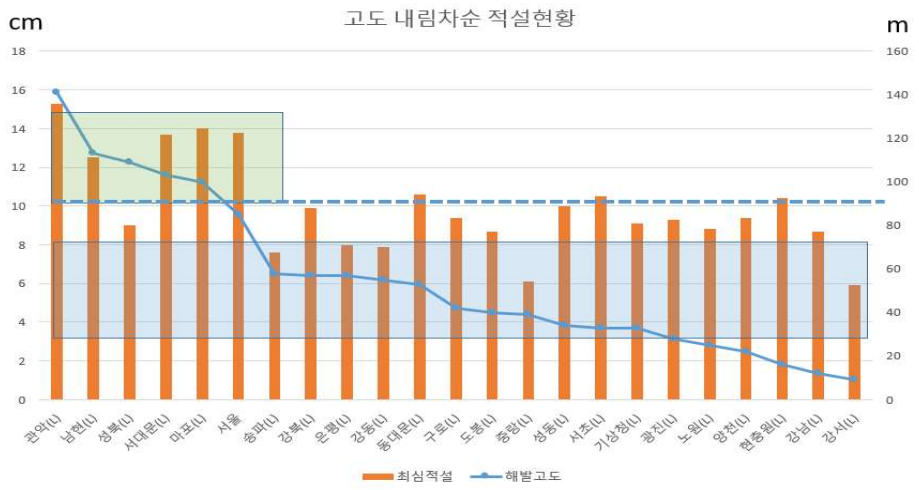
- 적설 Peak 시간대 평균 수상당량비는 11.2(최대 16.4)로 높았음 [비단열냉각(한랭이류)]

서울(108)지점 시간별 수상당량비 및 기온

- **100m 고도 차이로 예상보다 많은 적설차 발생(적설시간↑)**

- 100m의 고도차이로 인한 기온 하강은 크지 않지만(0.5~1도) 눈/비 경계에 해당하는 기온(0~2도)일 때 작은 기온 차이로도 눈/비 경계가 나타남. 이에, 적설 시작 시간이 앞당겨져 고도가 상대적으로 낮은 지역에 비해 적설 많았음

- 실제 이번 사례 서울 관측지점별 24시간 신적설(막대), 해발고도(실선) 분포를 살펴보면 해발고도 100m 이상의 상대적으로 높은 곳 신적설이 고도와 비례하여 높았음, 같은 조건의 강수가 내린다면 100m의 작은 고도차로도 5cm 이상의 큰 적설차가 발생할 수 있음을 보여줌



- 100m 이하 고도지역에서는 예상적설 3~이 8cm(파란영역)보다 적설 많았지만 크게 벗어나지 않음

- 다만, 고도가 높은지역(녹색영역, 100m 이상) 신적설은 15cm까지 기록되면서 예상적설과 차이 컸음

서울 관측지점별 적설현황(고도 내림차순)

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **비단열냉각 강하면 작은 해발고도 차이로도 큰 적설 편차 발생**

- 비단열냉각은 주로 한랭이류가 강하거나 강수가 어느 정도 강할 때 발생

- (적설효율 측면) 비단열냉각 강하면 적은 강수로도 많은 적설로 이어짐
  (적설시간 측면) 비단열냉각 강하면 기온 빠르게 하강, 눈으로 빨리 전환
  100m 내외 작은 고도차라도 눈/비 결정에 결정적이며 전체 적설시간과 직결

- 강우강도가 동일하다면 [적설효율 측면(적설강도) X 적설시간 측면(적설시간) = 적설량] 개념으로 접근 가능

⇨ **비단열냉각 예상보다 강하면 동일 지역 내 5cm 이상의 큰 적설차 발생 가능**

7. 실황분석

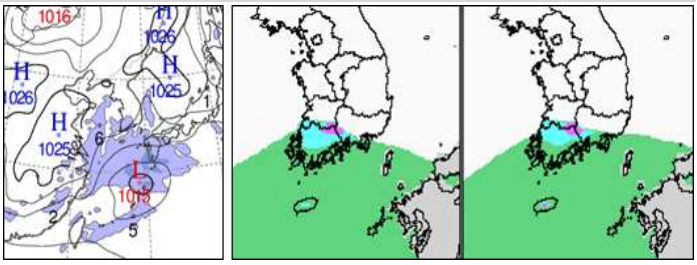
7-1. 2019년 1월 12일 사례

남쪽골은 속임수, 진짜는 서쪽 기압골

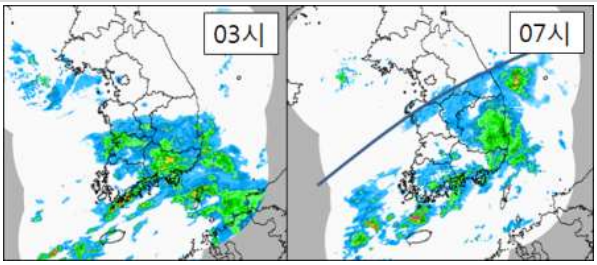
정확한 메커니즘의 이해가 필수!

1. 예보와 실황은?

1월 12일 05시 예보 강수 구역



실황

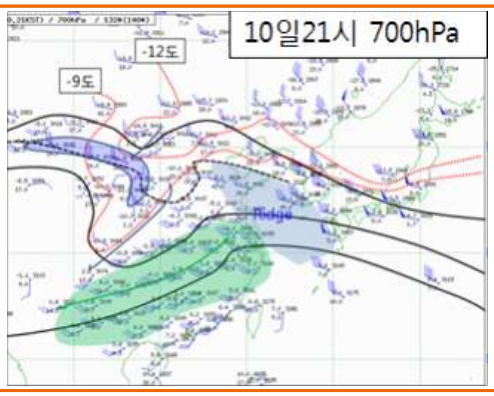


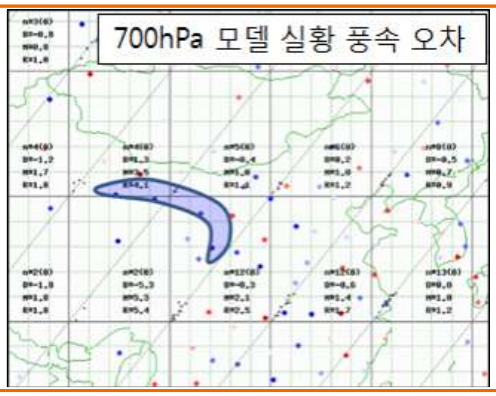
2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 강수 메커니즘이 정확하게 무엇인가?**
- **쟁점2) 중층 기압골이 깊은가? 깊다면 어떤 일이 벌어질까?**

3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 강수메커니즘이 정확하게 무엇인가? 남쪽골은 북위 30도 밑으로 지나는데..**

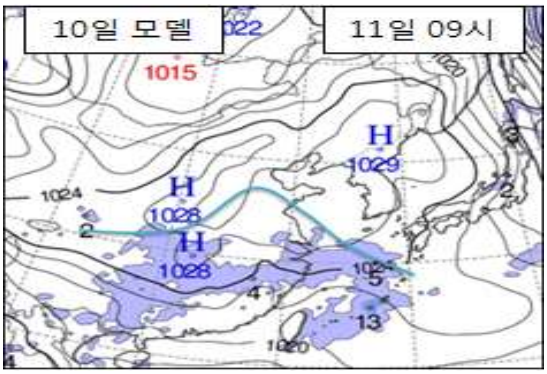


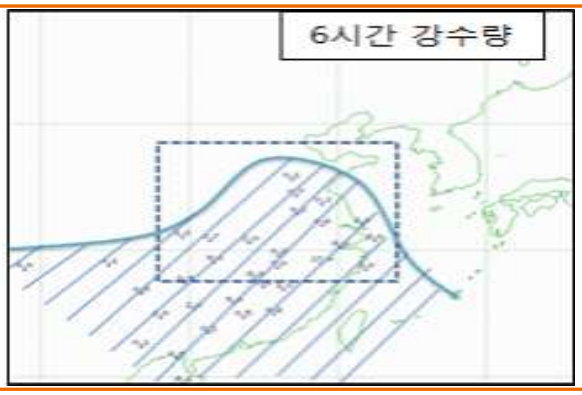


- 지상저기압은 북위 30도 밑으로 통과할 것으로 보임. 남쪽 저기압의 북방한계선은 중심으로부터 약 550km이므로, 강수의 북방 한계선이 제주도를 넘기 어려움
- 700hPa의 GTS분석을 해보면 **골이 매우 깊고, 그 후면에 한기이류가 모델보다 강하게 나타나고 있으므로, 골이 계속해서 깊어질 것으로 예상**할 수 있음
- 골 전면으로 강풍대가 형성되어 있고, 그 강풍라인을 따라 강수역이 형성
- 골이 깊어지다 보니 **전면으로 능이 형성**, 대만 인근 위치한 **하층의 남쪽골은 더욱 북상하기 어려워짐**

  ⇨ 따라서 **우리나라에 유입되는 강수의 메커니즘은 남쪽저기압이 원인이 아니라, 서쪽에서 접근하는 중층기압골에 의한 강수로 이해**해야 함!

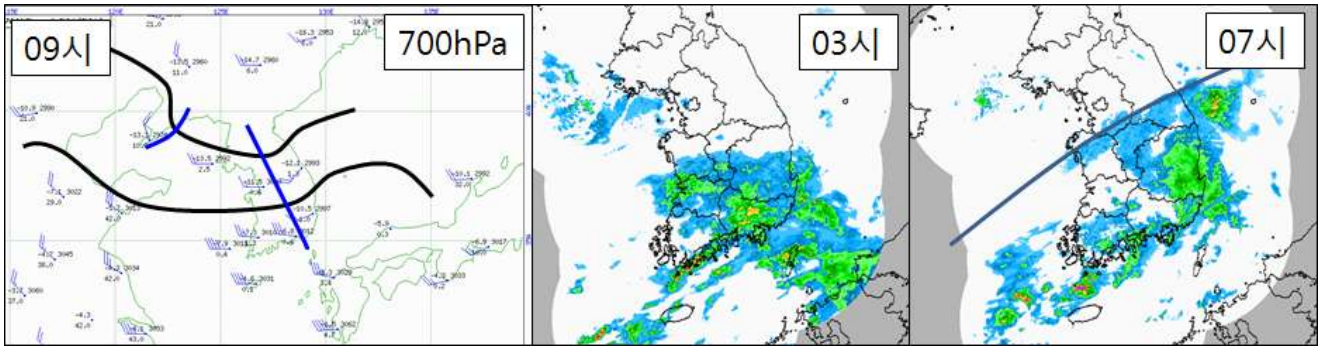
- **쟁점2) 700hPa 기압골이 깊어지다 보니.. 실황에서 오차가 감지되기 시작**





- 10일 21시 모델에서 예측한 결과와, 11일 09시 실제 GTS에서 관측되는 강수 영역이 다르게 나타나고 있음
- 이 강수구역은 남쪽골로 설명할 수 없음→ 강수 메커니즘이 서쪽골임을 다시 증명
- 가이던스를 고려하면 1cm내외의 적설이 예측 가능했으나, 실제로는 눈날림
- 따라서 모델이 예측한 것 보다 강수가 북상할 가능성이 높음

▸ 실황에서 나타난 특징



- 700hPa 골 위치, 전면인 포항, 북강릉에서 20kts 내외의 남서류 관측
- 강수의 북방한계는 충청~강원남부 까지 북상하였음(예상보다 높음)
- 강수량 : 경북동해안 5~20mm, 그 외 5mm 내외
- 적설 : 강원남부, 경북 2~7cm, 경남북서내륙 1cm내외, 전북 1~3cm

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **정확한 메커니즘의 이해**
  - 남쪽저기압의 위치는 북위30도 미만에 위치하고, 반면에 서쪽기압골은 깊은 것으로부터 **강수 메커니즘을 서쪽기압골로 판단했어야 함**
- **실황에서의 모델과 오차를 예보에 반영 필요**
  - 700hPa의 서쪽기압골의 후면으로 모델이 강풍을 과소모의 했으므로 골은 깊어질 것임
  - 중국남부에서 **6시간 강수실황이 예상보다 북편한 것을 감안**하여 강수 예보를 남부지방에서 충청~강원 권역까지 북상시켰어야 함

12월 3~4일 하층대기 기온예측 오차로 인한 적설 과대 예측

실황에서 높은 고도에 위치한 관측소(관악산 등)의 기온과 모델 예측의 차이를 고려했어야

1. 예보와 실황은?

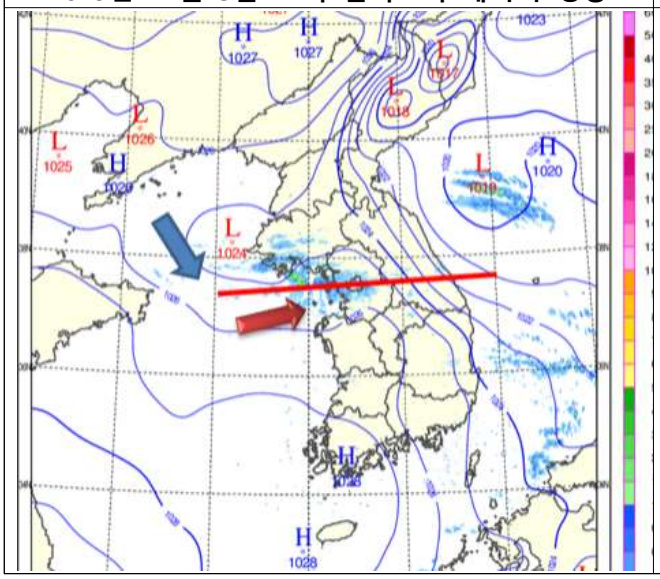
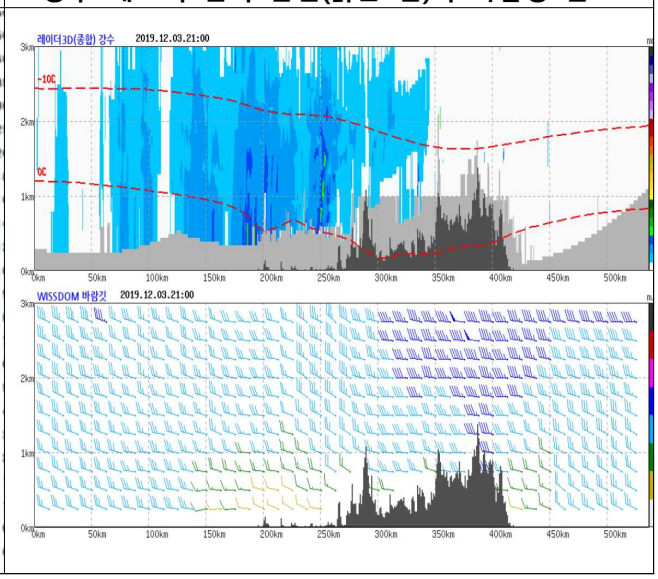
적설 예보(3일 17시 발표)	실황
경기남부, 충청북부: 1~5cm 충북남부, (3일) 서울, 울릉도.독도, (4일) 강원영서남부, 경북북부내륙: 1cm 내외	서울. 경기도, 충청도에 0.5~3.5mm 기록 여주, 제천 0.2cm의 적은 적설 대부분 비로 내리거나 진눈깨비 형태였음

2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 강수 메커니즘은?**
- **쟁점2) 수치모델은 어떻게 예측했을까?**

3. 주요 분석내용

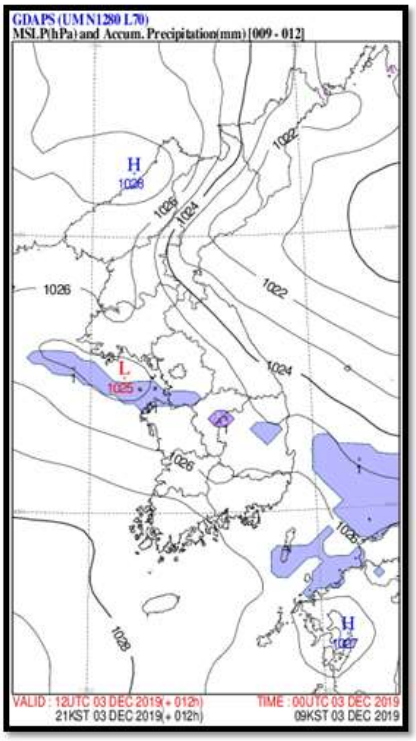
- **쟁점1) 강수 메커니즘은?**
  - (3일 밤) 지상의 저기압 중심은 백령도 부근에 위치하고, 경기만과 수도권은 저기압 남쪽에서 서풍류가 유입되고 있음
  - 한랭전선형 front 전면에서 서풍의 난기류가 유입되면서 강수대가 유입되는 구조이며, 저기압의 규모가 작고 발생 초기 단계여서 강원도에는 하층 대기에도 북서풍이 우세함. 이에 따라 해상에서 해안 중심으로 강수대가 형성되었고 내륙으로 진행하면서 약화되는 구조임

2019년 12월 3일 21시 일기도와 레이더 영상	강수 에코의 연직 단면(붉은 선)과 바람장 분포
	

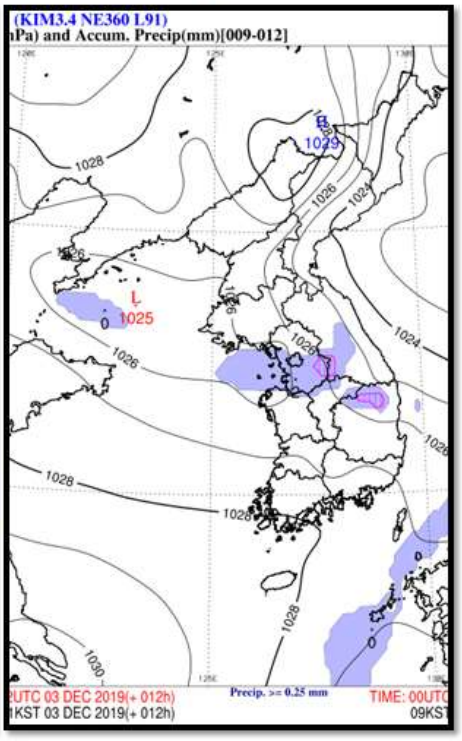
- **쟁점2) 수치모델은 어떻게 예측했을까?**
  - (3일 밤~4일 새벽) 중규모 저기압 중심이 남동진하면서 3일 밤 서해상, 4일 새벽 우리나라를 통과하면서 지상 저기압의 남쪽으로 서풍의 온난 습윤 기류가 유입되면서 강수 발생 예상
  - UM 모델은 저기압 중심을 남쪽으로 모의했으며, 이에 따라 우리나라는 난기류의 유입은 적고, 북쪽의 한기의 영향이 커 실황보다 1도 이상 낮은 기온을 예측하였음

2019년 12월 3일 09시 생산 21시(+12h) 강수 예상장, UM(좌)과 KIM(우) 모델

UM



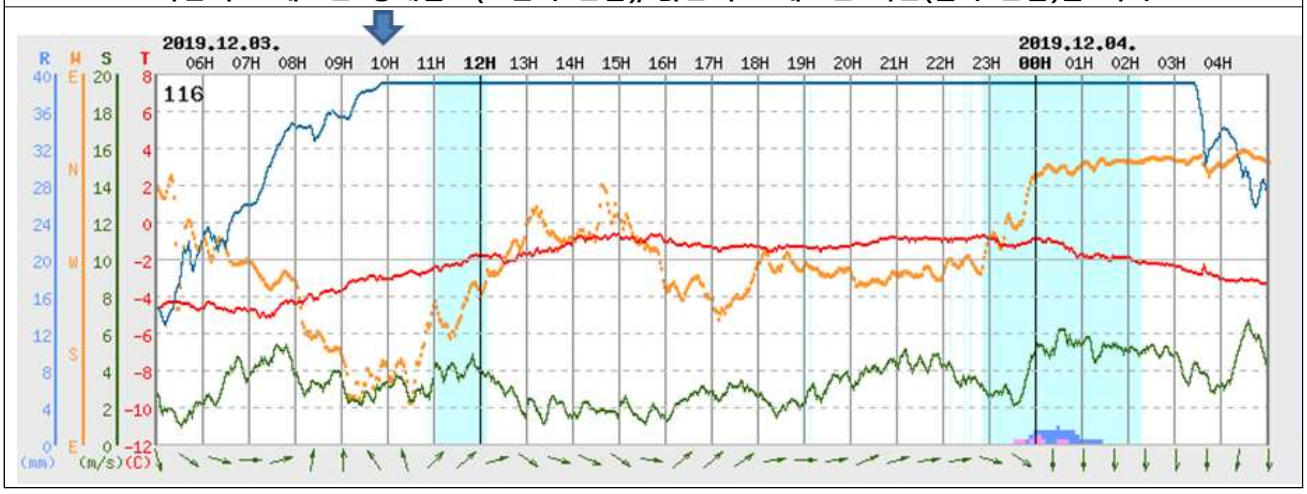
KIM



4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

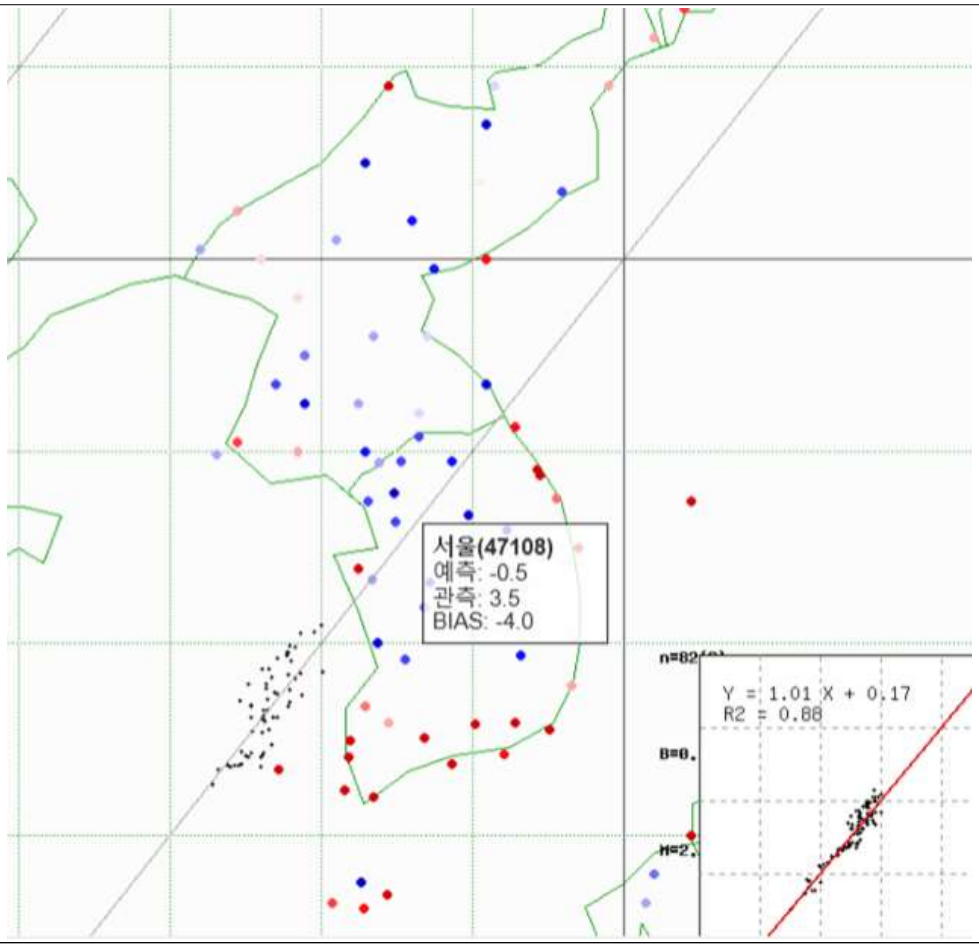
- **저기압 중심은 모델보다 북쪽으로 지나가면서 서~남서풍의 풍계가 경기만으로 유입, 강수가 나타날 것으로 분석, 예측하였음**
  - 모델에서 예상하지 못한 강수를 실황분석을 통해 예측하였으나 저기압 중심이 북향하여 지나간다면, 그 남쪽에 위치한 서울.경기도는 난기의 유입이 더 많아지므로 기온이 높아 눈보다 비로 내릴 가능성을 간과한 것이 가장 큰 문제였음

관악산(레이더) 625m 관측소 3일 05시~4일 05시 관측 자료
파란색 그래프는 상대습도(오른쪽 눈금), 붉은색 그래프는 기온(왼쪽 눈금)을 의미



- **오전 난기유입, 기온상승과 100% 상대습도 기록**
  - 3일 아침부터 서해상에서 서울로 남~서풍의 기류가 유입되면서 관악산은 기온상승과 함께 상대습도가 증가하여 10시에 100%에 포화에 이르렀음
  - 그 이후에도 기온은 상승하거나 유지되었으며, 100% 포화된 상태에서는 증발 효과가 없기 때문에 주변 온도 이류에 따라 기온이 변화하는데, 서울의 강수는 대부분 지상저기압의 남쪽과 동쪽에서 발생하는 온난이류에서 나타나므로 기온이 하강하기 어려운 상태였음

- **강수형태 판별을 위해서는 높은 고도에 위치한 AWS 자료를 반드시 참조해야 함**
  - 결국, 625m 고도의 기온이 100% 포화된 상태에서 –1℃ 내외였으므로 습구온도 역시 –1℃ 내외로 지상의 기온은 영상 2℃ 이상을 보여 눈보다는 비가 관측되었음
  - 만약, 관악산 AWS 관측자료를 분석했다면, 적설예측을 줄일 수 있었던 사례였음. 향후 강수형태 판별에 반드시 높은 고도에 위치한 AWS 관측자료를 활용해야 함

3일 21시 실황과 모델예측 기온 차이 분포도. UM 모델의 기온 편차로 모델 생산시각은 3일 9시, 모델 예측은 3일 21시 임. 파란색은 모델이 실황에 비해 낮게 예측한 것으로 서울은 –4℃의 오차가 나타났음


8. 그 외 유형

8-1. 2018년 2월 22일 사례

대류불안정에 의한 중부지방 강수

겨울철에도 낙뢰를 동반한 대설 가능!

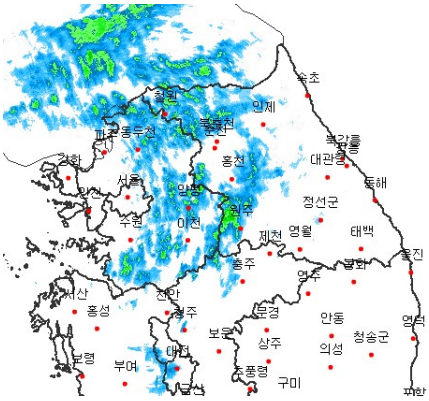
1. 예보와 실황은?

예보 (2월 21일 17시 발표)	24일 실황
▸ 예상 강수량 - 강원영서: 5mm 내외 - 서울.경기도, 충청도, 전라도, 경상내륙: 5mm 미만 ▸ 예상 적설 - 강원영서: 2~7cm - 서울.경기도, 충청도, 전북, 경북내륙: 1~5cm - 전남동부내륙, 경남북서내륙: 1cm 내외	22일 오후에는 중부지방 상하층 불안정에 의한 대류성 강수 발달, 22일 밤부터 기압골의 영향

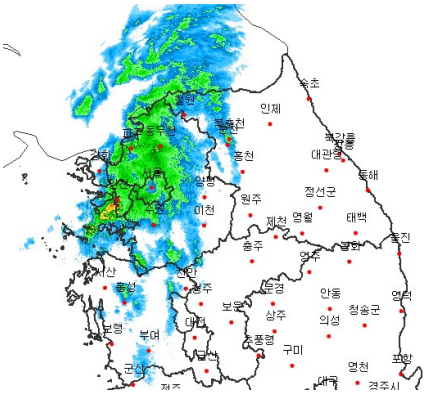
최심신적설 현황(cm)

수도권 서울 4.1 강화 2.5 인천 2.9 동두천 6.8 수원 1.7 양평 6.0 의정부 5.0 이천 4.0 파주 2.7
충청도 단양 4.5 보은 2.0 추풍령 1.8 옥천 3.0 제천 4.0 청주 0.5 충주 1.6 수안보 4.0 금산 5.5
강원도 해안 7.7 양구 4.0 영월 5.2 원주 5.0 북평 7.5 북춘천 7.6 횡성 8.5 진부령 4.7 미시령 3.0
경상도 봉화 6.0 상주 3.4 영주 2.5 김천 0.7 거창 1.1 해인사 1.0
전라도 무주 11.0

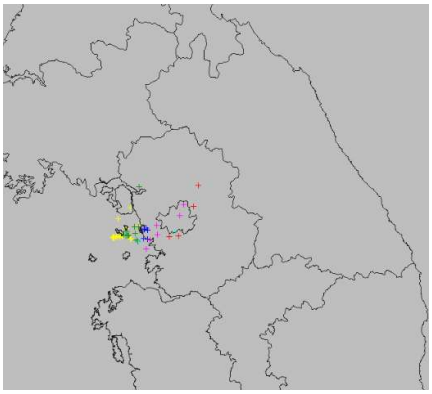
- 22일 밤~23일 새벽 기압골 통과 시 수도권에는 뇌전을 동반한 강설 발생
- 기압골이 통과하기 전(22일 오후) 중부지방에는 눈이 날리면서 강원영서에 2cm 이하의 적설 기록
  * 대화 1.5 면온 1.5 안흥 2.0 청일 1.0 횡성 1.0 진부 0.5 용평 0.0



2월 22일 15시 레이더 영상



2월 22일 24시 레이더 영상



2월 23일 00시 40분 낙뢰 영상

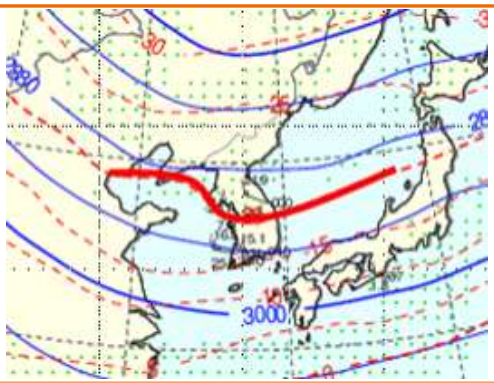
2. 강수 메커니즘은?

<22일 오후>

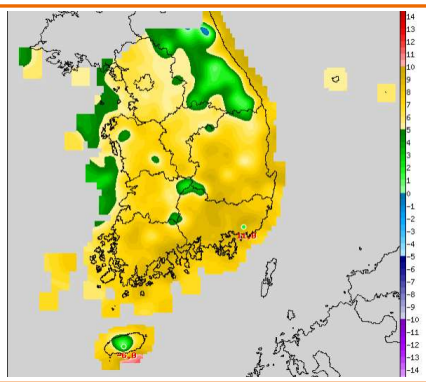
- **(700hPa 온도골)** 500hPa 단파골은 발해만 북서쪽에 위치한 가운데 700hPa의 온도골이 중부지방을 통과하면서 상하층의 불안정을 강화시킴
- **(지면 가열)** 고기압 영향으로 맑은 상태에서 지면 가열로 인해 지상 기온이 상승, 중층 한기+지면 가열로 상하층간 열적 불안정이 강화

  * 서울 15시 예상 단열선도 CVT(Convective Temperature) 5.4℃, 춘천 15시 예상 단열선도 CVT 5.7℃

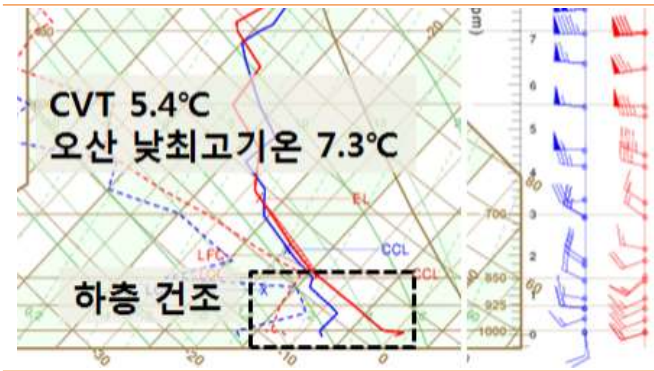
  * 서울 낮 최고기온 5.4(12시 12분), 춘천 낮 최고기온 5.3(13시 28분)
- **(하층 건조)** 중국중북부내륙이 건조한 상태이므로 중국내륙의 고기압 가장자리를 따라 우리나라로 유입되는 서풍은 건조함. 850hPa 이하 하층이 건조하고 지상 부근의 바람도 강해(남서풍 15kts) 강수가 지속되지 못하고 발달과 소멸을 반복하며 적설이 많이 쌓이기 어려운 조건이었음. 다만 지대가 높아 낮 기온이 낮게 형성된 강원영서 일부 지역 위주로 적설이 기록됨

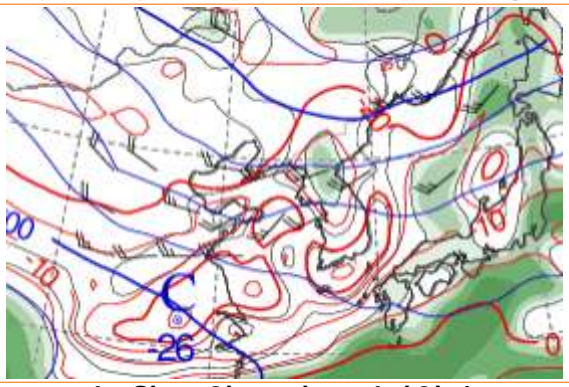


2월 22일 15시 700hPa 분석장

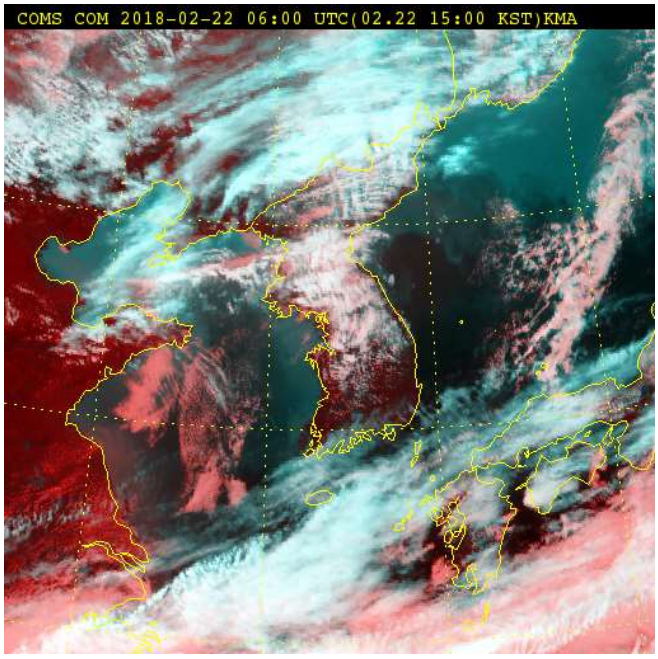


2월 22일 낮 최고기온 분포도





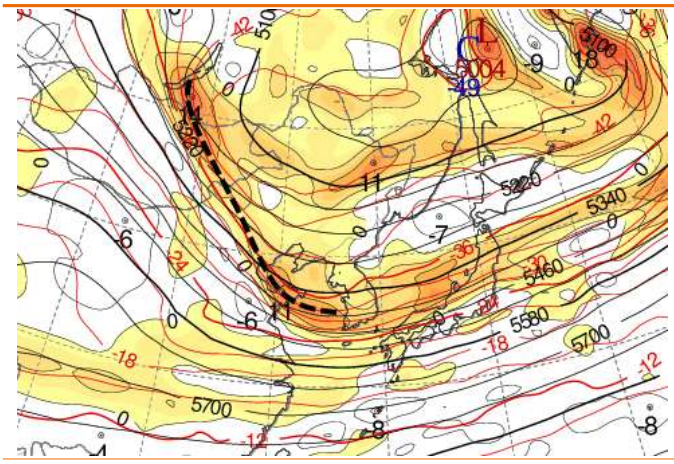
(상)2월 22일 15시 오산단열선도
(하)2월 22일 15시 850hPa 습수 초기장



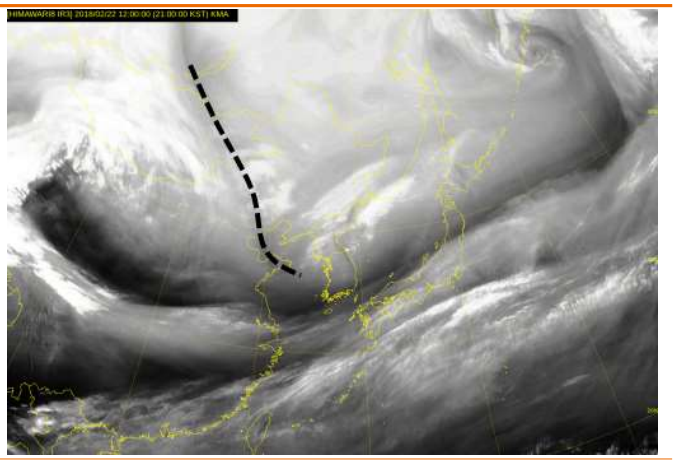
2월 22일 15시 위성 합성영상

<22일 밤~23일 아침>

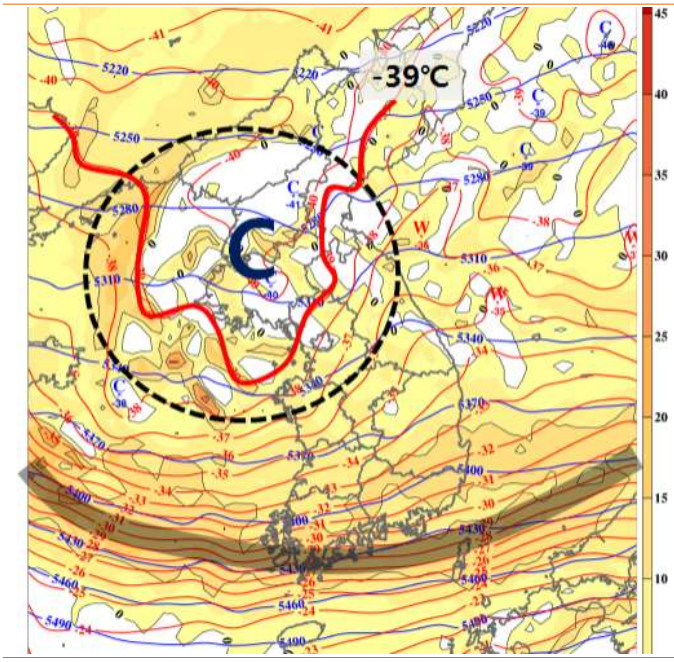
- **(상층 한기+건조역)** 산둥반도에 있던 500hPa의 vorticity streak를 동반한 상층 기압골이 접근하여 중부지방을 지나면서 지상 저기압 발달을 지원. vorticity streak를 따라 건조역이 침투하고 상층 한기가 남하하면서 상하층의 불안정을 강화시킴
- **(하층 난기+수증기 유입)** 기압골 전면에서 서풍이 850hPa 30kts, 925hPa 30kts 이상으로 강하게 불면서 난기와 수증기가 유입
- **(열적 불안정)** 낮 동안 가열되었던 지면과 하층 온난이류가 나타나는 상태에서 중부지방은 상층 한기의 중심에 들게 되면서(500hPa –39℃선 중부지방 통과) 상하층 기온차가 커져 열적 불안정까지 더해짐
- **(상승기류 발달+불안정 증가)** 위에서 언급했듯이 하층에 강한 온난이류가 나타나는 가운데 상층에는 한랭건조한 공기가 침투하면 상승기류가 유발되어 구름이 높게 발달하고 상하층 사이의 온도차에 의해 불안정도가 커지면서(SSI(850-500)지수 1.6, LI(925-500)지수 1.6) 낙뢰가 발생할 가능성이 증가함



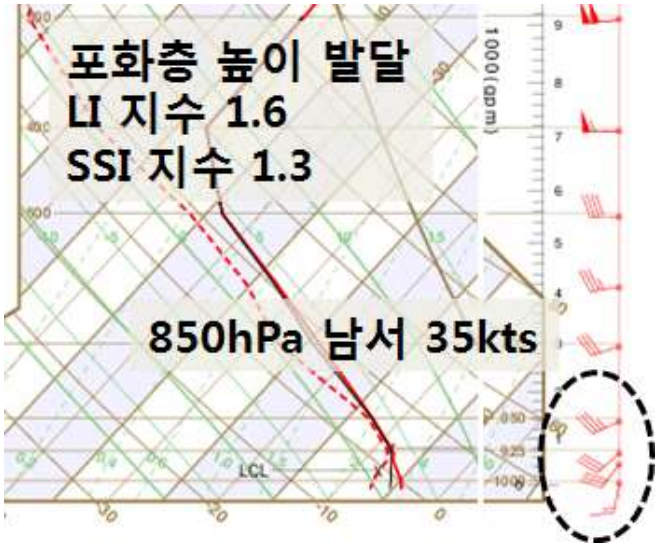
2월 22일 500hPa 초기장



2월 22일 히마와리 수증기 위성영상



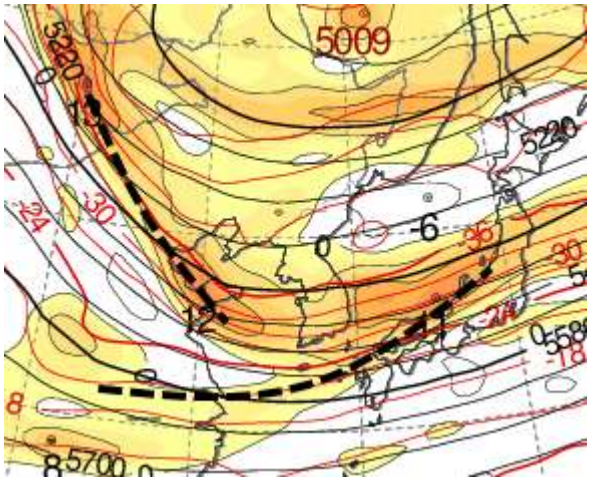
2월 22일 21시 VDAPS 500hPa 고도,기온,와도



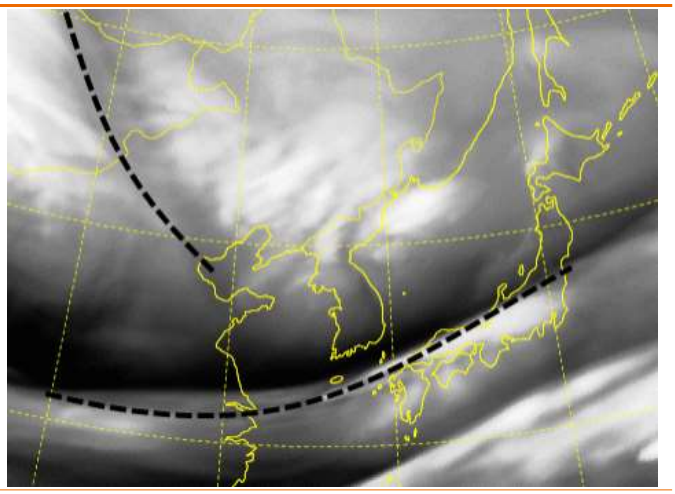
2월 23일 00시 서울 예상단열선도(+03h)

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

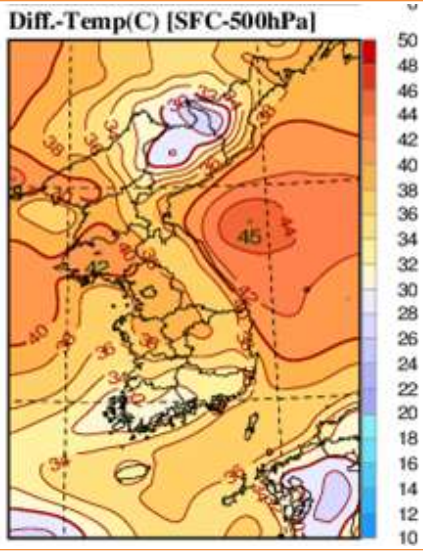
- 500hPa 기압골이 산둥반도에서 중부지방을 통과하면서 북한지방에 있던 –36℃ 등온선이 중부지방까지 남하하고 기압골에 동반된 vorticity streak는 남부지방을 지나면서 중부지방은 한기역내에 위치
- 하층에는 기압골 전면에서 서남서풍이 850hPa 30~40kts, 925hPa 25~30kts로 불면서 하층제트가 발달하여 강한 온난이류
- 22일 낮에는 경기북부와 강원영서북부에 하층 기온이 상승하며 상하층 온도차에 의한 열적 불안정 강수를 잘 모의하였고, 22일 밤부터는 건조역을 동반한 상층 기압골이 접근하고 하층에는 남서풍이 강하게 불면서 다시 강수대가 발달할 것으로 모의
- 수도권과 강원영서에 SSI(850-500) 3 이하, 내륙 대부분 SRH 300이상(원주 부근 463)으로 대류 불안정을 모의함



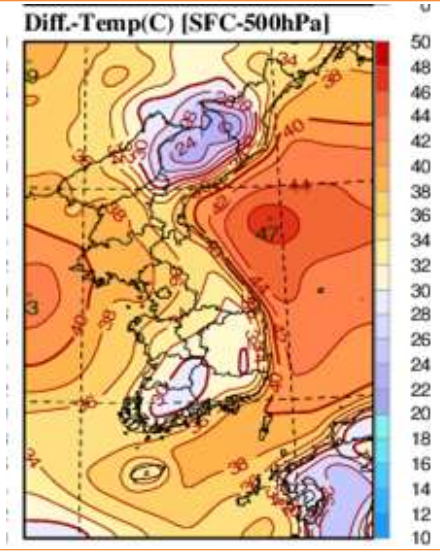
2월 22일 21시 500hPa 와도 예상장(+36h)



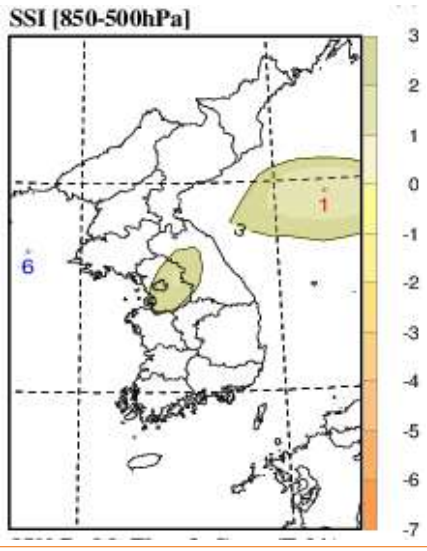
2월 22일 21시 RDAPS 수증기 모의 영상(+36h)



2월 22일 15시(+30h)
상하층 기온차(500hPa-지상)



2월 22일 21시(+36h)
상하층 기온차(500hPa-지상)



2월 23일 00시
SSI(850-500hPa)

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **상하층 대류 불안정에 의한 낙뢰 발생 조건 검토**
  - 500hPa 층에서 온도골과 온도조밀역이 통과하는 시점에 850hPa(850hPa 이하 하층에는 서남서풍 30kts로 불면서 온난이류가 있는 상태)과 500hPa 사이의 기온차가 38℃로 가장 큼
  - 상층 한랭건조한 공기가 침투하고 하층에는 온난이류가 나타나면서 상승기류가 발달. 구름이 높이 발달하고 대류 불안정이 큰 상태
  - 서울 기준 23일 00시 SSI(850-500) 지수 2.2, LI(925-500) 지수 2.1 TTI 60으로 강한 불안정 모의(21일 09시 모델 기준)

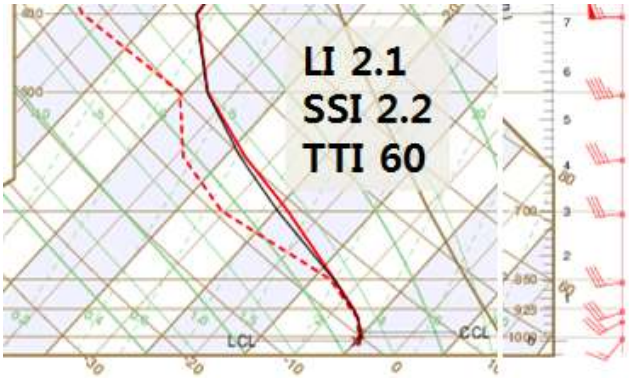
    ⇨ **상하층 기온차가 크고 불안정도 증가, 500hPa까지 상승기류 존재**

- **22일 낮 열적 불안정에 의한 눈날림**
  - 850hPa, 925hPa에 남서풍의 난기가 이류되고 낮 동안 지면이 가열되면서 기온이 상승하는 것을 고려

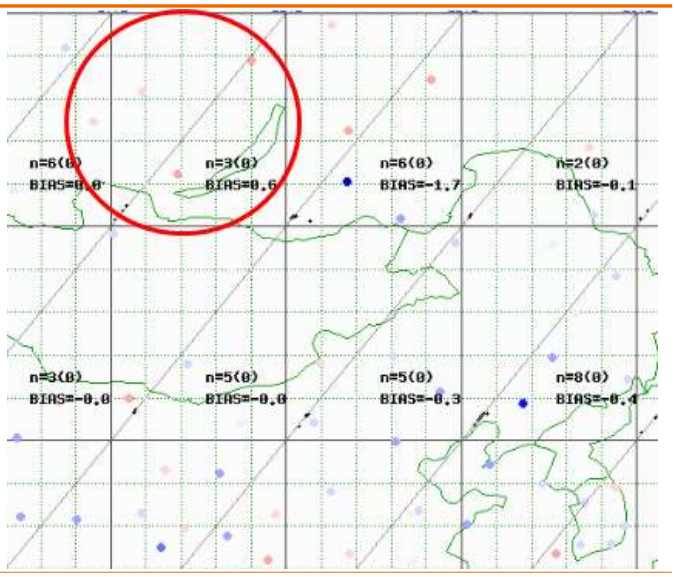
    ⇨ **850hPa 이하 하층이 건조하여 850hPa부터 지상까지 건조단열적으로 기온 상승(낮 최고기온이 CVT 온도만큼 상승)**
  - 22일 낮부터 500hPa 한기로 인해 상하층 온도차가 30℃ 이상 커지기 시작

    ⇨ **대류 불안정 발생**
- **21일 09시 바이칼호 부근의 500hPa 기온 실황을 살폈더라면**
  - 21일 09시 바이칼호 부근의 단파골이 22일 중부지방을 통과할 것으로 예상
  - 바이칼호 부근의 500hPa 기온 실황이 모델 예상보다 더 낮은 상태

    ⇨ **한기가 모델 예상보다 강하게 남하할 가능성이 있음. 불안정 강화**



2월 23일 00시 서울 예상단열선도(+39h)



2월 21일 09시 500hPa 기온 GDAPS-GTS

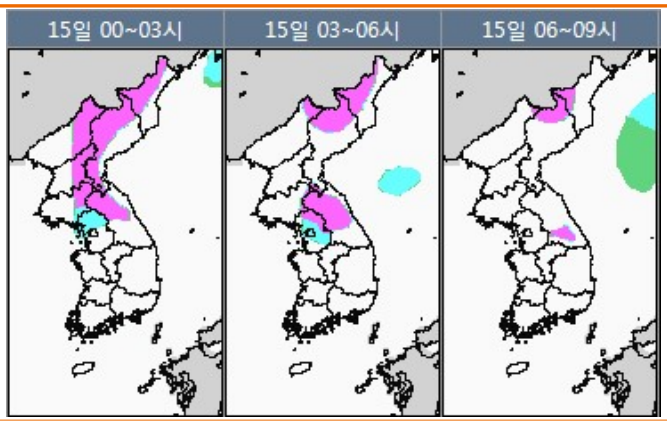
8-2. 2018년 1월 15일 사례

하층 시어역에 의한 중부지방 예상보다 약한 강수

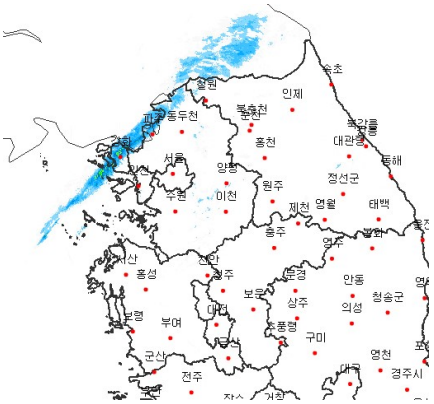
하층의 건조한 남서풍 유입을 고려했다면

1. 예보와 실황은?

예보 (1월 14일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 서울.경기도, 강원영서: 5mm 미만 ▸ 예상 적설 - 경기동부: 1cm 미만 - 강원영서: 1~3cm	▸ 예보보다 한타임 늦은 15일 새벽~아침 하층 시어역 통과하면서 약한 강수 - (강수시점) 15일 00시~03시 사이 경기북부, 강원영서북부에 강수가 시작할 것으로 예보하였으나 04시 이후 한랭전선 형태의 강수대 유입 - (강수형태) 경기북동부와 강원영서에 눈, 그 외 서울.경기도는 눈/비가 내릴 것으로 예상하였으나 약한 비 또는 눈날림의 형태로 내리면서 적설 기록하지 않음



단기예보 분포도(1월 14일 17시 발표)

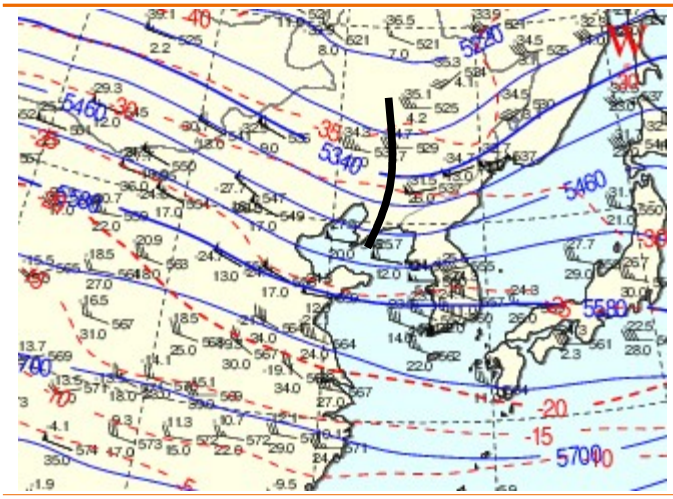


1월 15일 04시 레이더 영상

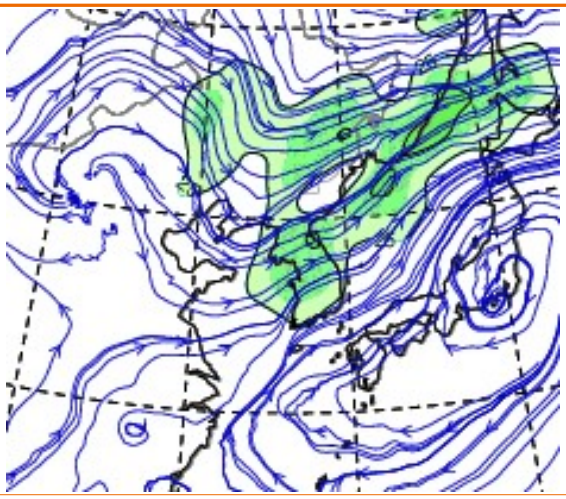
2. 강수 메커니즘은?

- **(약한 상층지원)** 중국북동지방에 500hPa 기압골이 통과하나 기압골에 의한 강수대는 주로 북한지방을 지나며 우리나라에 직접 영향을 주지 않고 기압골 후면의 한기이류도 약해 지상 저기압이 크게 발달하기 힘든 구조
- (하층 건조한 공기 유입) 남동쪽 고기압 가장자리를 따라 850hPa 이하에서 남서풍을 타고 난기 유입이 전일(14일)부터 지속된 상태지만 중국내륙이 건조하여 하층 남서기류에 의한 수증기 유입은 제한적인 상황
- **(하층시어)** 남고북저형(중국북동지방 저기압과 일본큐슈 부근 고기압) 기압배치로 등압선 간격이 조밀해지며 기압골 전면에서 남서풍이 850hPa 25~35kts, 925hPa 25~30kts로 강화됨. 하층에는 난기가 유입되어 있는 가운데 중국북동지방을 지나는 저기압 후면에서 한기가 남하하면서 북서-남서 시어역(한난 경계)에서 강수대 발달. 난기가 이류 될 때가

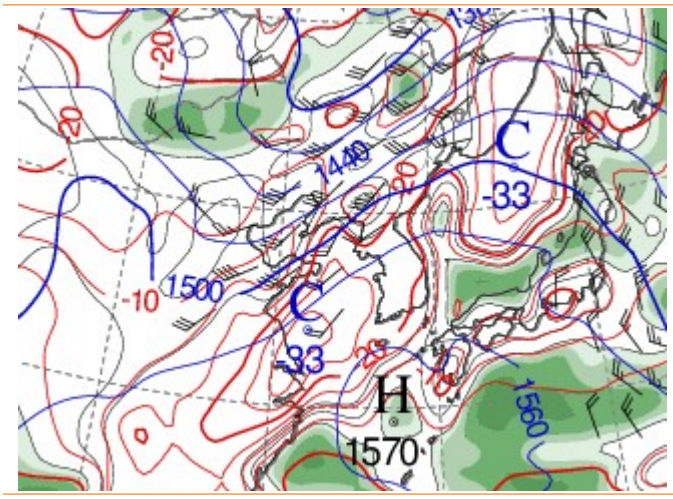
아닌 한기가 남하하며 하층 시어역이 통과할 때 강수가 발생하였으나 수증기 유입이 원활하지 못하여 약하게 발달함(좁고 얇은 형태)



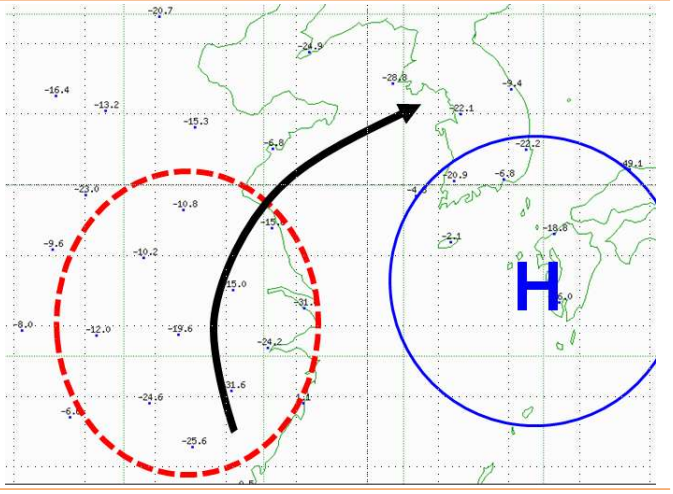
1월 14일 21시 500hPa 분석장



1월 14일 21시 850hPa 유선



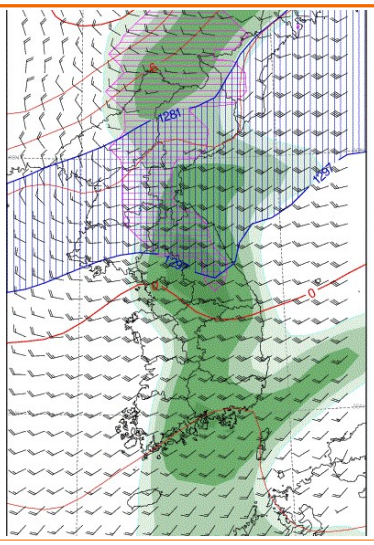
1월 14일 09시 850hPa 습수 초기장



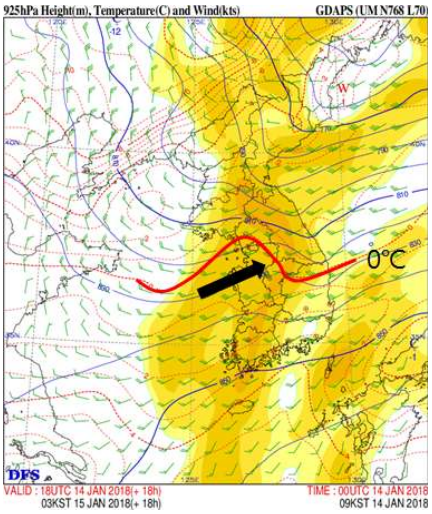
1월 14일 09시 GTS 850hPa 이슬점 온도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

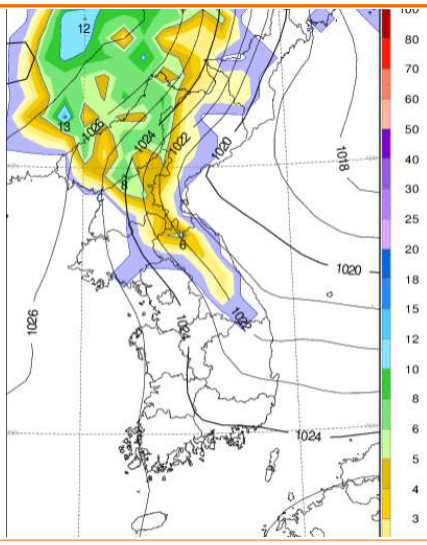
- **(하층제트 유입)** 몽골 남동쪽에 있는 500hPa 기압골은 14일 저녁~15일 새벽 중국북동지방을 지나면서 우리나라에 직접적인 영향을 주기 어려운 위치였으나 남고북저의 기압배치로 기압경도력이 강화되어 기압골 전면에서 남서풍이 강화되는 것으로 모의(850hPa 남서풍 35~40kts, 925hPa 남서풍 30~35kts)
- **(850hPa 이하 포화도)** 해상이나 중국내륙으로부터의 수증기 유입이 원활하지 않은 상태에서 기압골 전면의 850hPa 이하 하층 온난이류역에서 내륙의 찬공기와 만나 포화되는 것으로 모의(서울 예상 강수량 0.1mm, 춘천 예상 강수량 1.2mm)
- **(강수 형태)** 925hPa 0℃ 등온선은 15일 00시~03시 사이 경기동부와 강원영서남부를 지나고, 1000-850hPa 층후도에서도 눈/비 혼재구역의 남방 한계선인 1297선이 남해안에서 점차 북상하면서(14일 낮부터 난기이류에 의해 기온이 상승) 경기북부와 강원영서 중북부만 눈/비 혼재구역에 드는 것으로 모의하였음



1월 15일 03시(+18h)
1000-850hPa 층후도



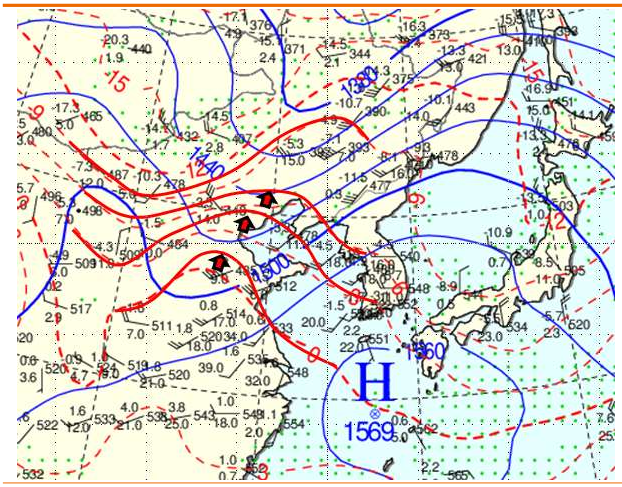
1월 15일 03시(+18h) 925hPa
상세바람장



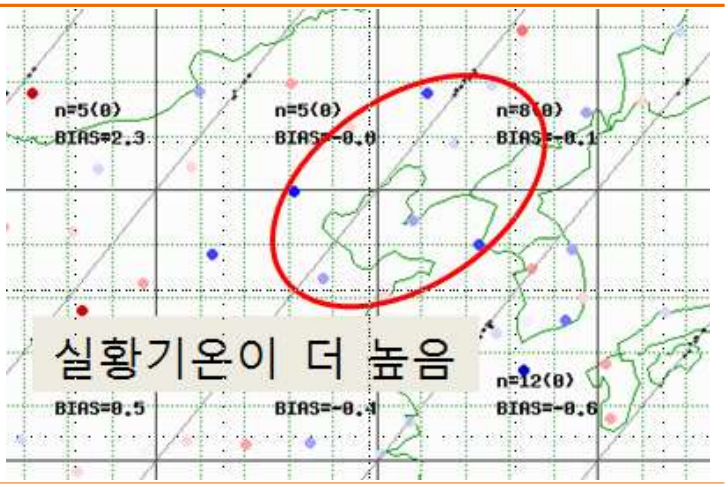
1월 15일 03시(+18h)
총누적적설

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **지상 저기압 전면 난기이류와 후면 한기이류의 강도**
  - 14일 09시 실황에서 나타난 발해만 북서쪽의 난기이류가 모델이 예상하는 것보다 강했고, 기압골 후면의 한기이류는 예상보다 약했음
    - ⇨ **한난 경계역에서 발생하는 강수대의 남하가 예상보다 늦어질 수 있음을 인지**
    - ⇨ **강수대의 남하가 늦어질수록 건조한 공기가 유입되는 시간이 늘어남**



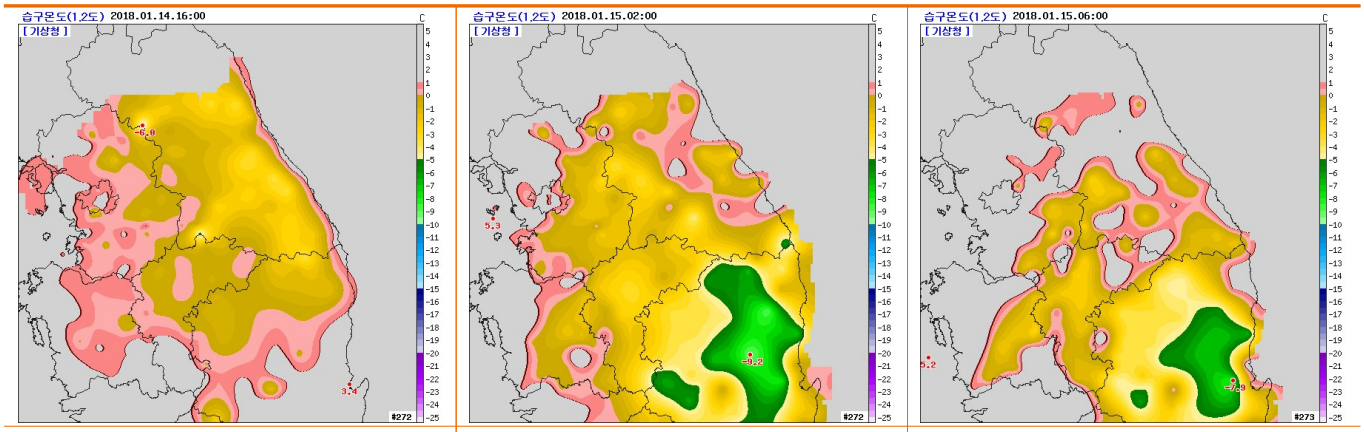
1월 14일 09시 850hPa 분석장



1월 14일 09시 850hPa 기온 GDAPS-GTS

- **925hPa 이하에서 나타나는 온난이류**
  - 기압골의 전면에 드는 15일 새벽에는 남서풍이 더욱 강화(925hPa 30kts)되면서 야간의 기온 하강을 저지할 수 있음을 고려
    - ⇨ **925hPa 기온이 0℃라 하더라도 그 이하 층의 강한 온난이류로 인해 지상 기온이 영상권 유지**

- **습구온도 실황을 살펴보았더라면**
  - 저기압이 통과하기 전부터 남쪽 고기압 가장자리에서 건조한 남서풍이 지속적으로 유입되면서 기온과 습구온도가 증가
  - 저기압이 접근하는 14일 야간에도 전면에서 남서풍이 강화되면서 습구온도가 오히려 증가하는 경향을 보임



1월 14일 16시 습구온도 분포	1월 15일 02시 습구온도 분포	1월 15일 06시 습구온도 분포

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 강수 시작 시점은 늦었지만 4일 전 예상장부터 기압계와 기온분포가 일관되게 모의했던 사례임
- GDAPS 모델 예상장에도 경기북부, 경기동부, 강원영서의 925hPa의 기온이 0℃ 이하이지만 그 이하층에서 나타나는 온난이류로 인해 지상 기온이 영상으로 유지되는 것으로 나타나고 있었음
- 포화층이 850hPa 이하에서 형성되어 두껍지 않고 하층 시어역에서 발달한 강수는 925hPa 기온이 0℃ 이하라 하더라도 그 이하층의 온난 이류로 인해 강수형태가 변할 수 있는 점 감안

8-3. 2018년 1월 16일 사례

북쪽골 + 남쪽골, 중부지방 적설 발생 시점 오차

강수발생의 메커니즘을 고려했다면

1. 예보와 실황은?

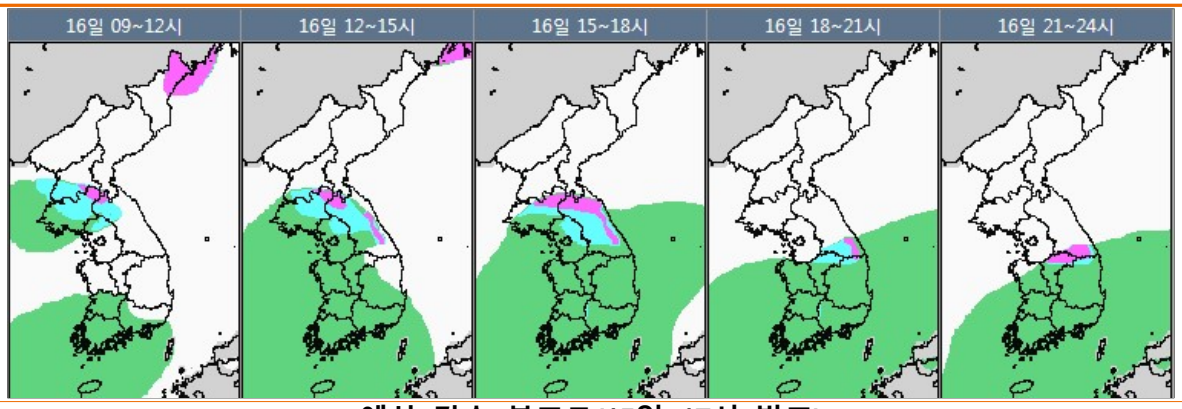
예보 (1월 15일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 남해안, 제주도: 10~40mm - 남부지방(남해안 제외): 5~20mm - 서울.경기도, 강원도, 충청도: 5mm 미만 ▸ 예상 적설 - 강원영서: 1~3cm - 경기북부 및 동부, 충북북부, 경북북부내륙: 1cm 내외	16일 북쪽 기압골이 지나며 경기북부 및 동부 눈/비 1cm 내외, 강원영서 눈/비, 강원산지 눈 1~3cm 적설을 예상하였으나 → 북쪽 기압골에 의한 강수는 산발적 빗방울로 나타났고 17일 새벽 남쪽 기압골에 의해 적설 발생

최심신적설 현황(cm)

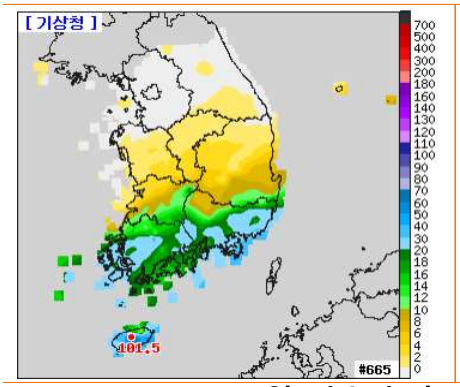
충청 추풍령 2.9 금산 0.5

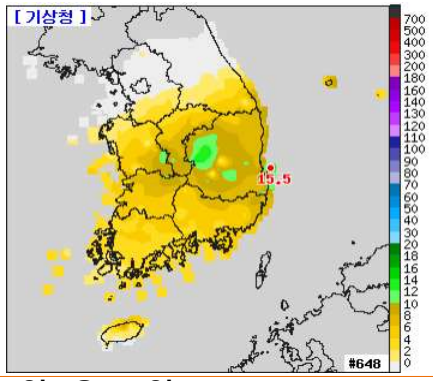
강원 면온 6.5 사북 6.3 내면 3.5 서석 3.0 대화 2.0 안흥 2.0 태백 2.0 대관령 1.2 횡성 0.5

경상 석포 3.5

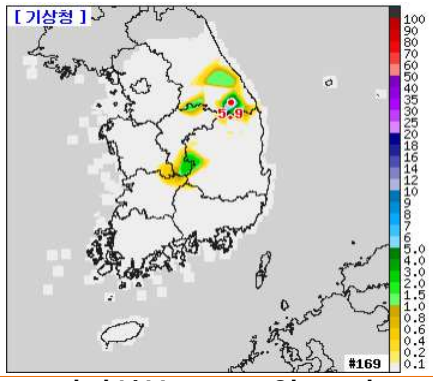


예상 강수 분포도(15일 17시 발표)





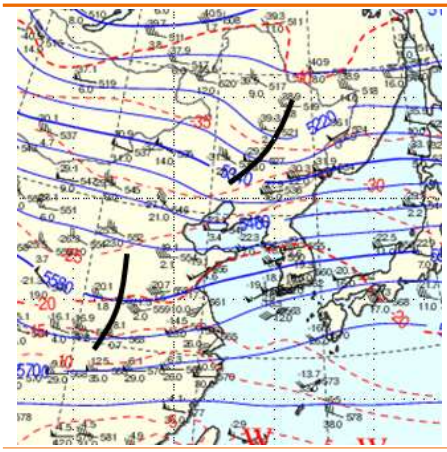
일 강수량(좌 16일, 우 17일)



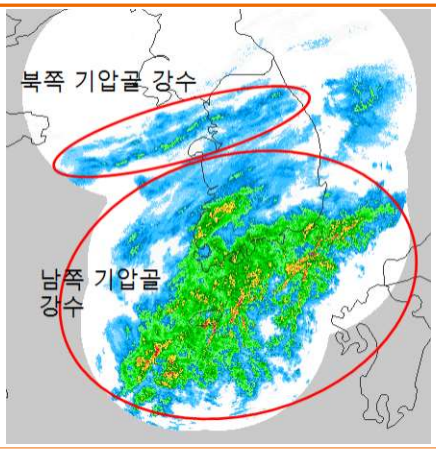
신적설분포도(17일 11시)

2. 강수 메커니즘은?

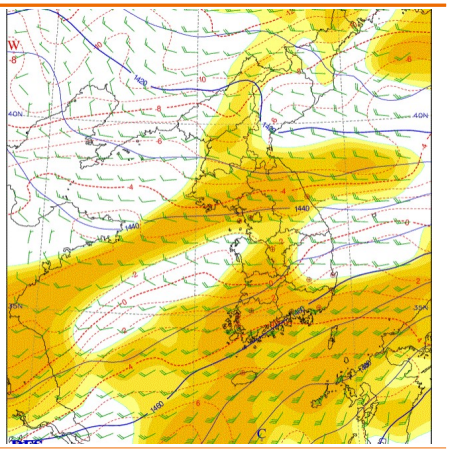
- **(북쪽 기압골 통과 후 남쪽 기압골 접근)** 중국북동지방으로 500hPa 기압골이 먼저 통과한 후 중국 상해부근에서 남쪽 기압골이 접근하면서 중부지방의 강수메커니즘과 남부지방의 강수 메커니즘이 분리
- **(남쪽 기압골 강수)** 일본남쪽해상 고기압과 상해부근 저기압 사이에 기압경도력이 강화되면서 발달하는 하층제트(850hPa 남서풍 30kts, 925hPa 남서풍 25kts)에 의해 발생하는 온난역 강수. 남쪽 고기압 가장자리의 강풍역을 따라 해상에서 수증기가 공급. 하층제트가 수렴되는 남해안과 제주도에 강수 집중
- **(북쪽 기압골 강수)** 중부지방에는 취주거리가 길지만 건조한 중국 내륙을 통과하는 남서류가 유입(수증기가 포함된 남서기류는 남부지방으로 유입되어 중부지방에는 수증기 공급이 제한적)되는 상태에서 북쪽 기압골 후면의 한기가 남하하면서 한난경계에서 폭이 좁고 약한 강수대가 발달
- 북쪽 기압골이 먼저 통과하지만 남쪽 기압골 전면에서 하층제트가 발달하면서 강수대가 먼저 유입



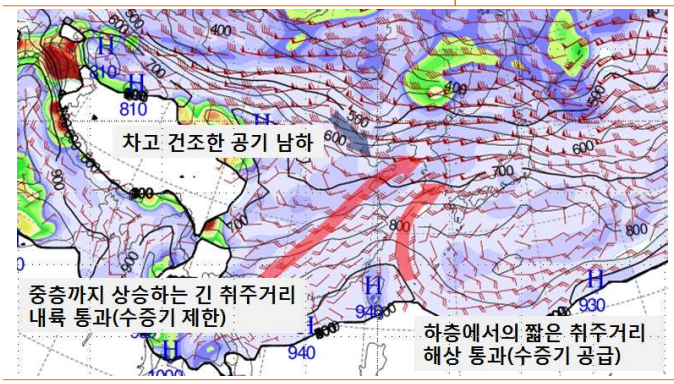
1월 16일 09시 500hPa 분석장



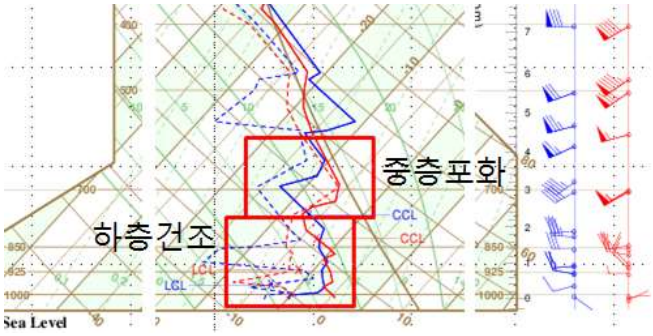
1월 16일 15시 레이더 영상



1월 16일 15시 850hPa 초기장



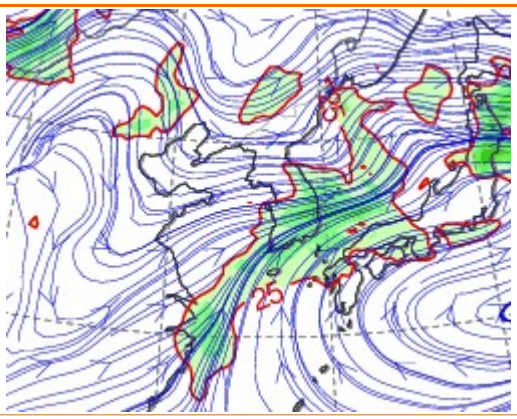
1월 16일 09시 295K 등온위면



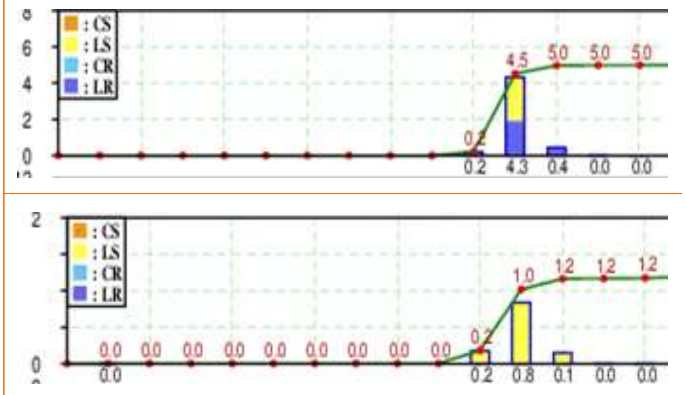
1월 16일 15시 오산 단열선도

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

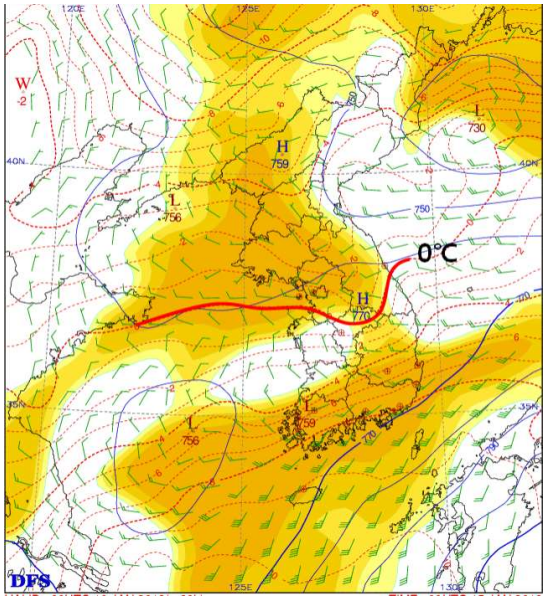
- **(남쪽 기압골 전면 하층제트 발달)** 남쪽 기압골 전면에서 남서풍의 하층제트(850hPa 30~35kts, 925hPa 25~30kts)가 발달하여 16일 새벽 전남남해안부터 강수 시작. 지형적인 영향으로 하층제트의 수렴대가 형성되는 제주도와 남해안을 중심으로 30~40mm의 많은 강수량 모의
- **(북쪽골에 의한 중부지방 강수)** 16일 오전에는 북쪽 기압골의 영향으로 중부지방에도 강수 시작(16일 낮 전국으로 강수가 확대되는 것으로 모의). 중부지방의 강수는 북쪽 기압골이 남쪽 기압골보다 먼저 접근하여 중국북동지방을 통과하면서 기압골 전면의 남서풍이 925hPa 10kts 이하로 약하게 나타남. 기압골 통과 후에는 후면에 하강기류가 지배하면서 남쪽 기압골에 의한 강수대는 북상하기 어려울 것으로 예상함
- **(중부지방의 강수형태)** 낮에는 남해상에서 동진하는 고기압의 가장자리를 따라 남서풍이 지속적으로 유입되면서 기온이 상승하여 강수형태는 대부분 비로 예상. 그러나 16일 오후에 북쪽 기압골이 통과하면서 850hPa에서 한기이류가 나타나고 925hPa 기온이 0℃ 이하로 떨어지는 강원영서와 경기북부 및 동부, 충북북부, 경북북부내륙에는 적설을 모의함



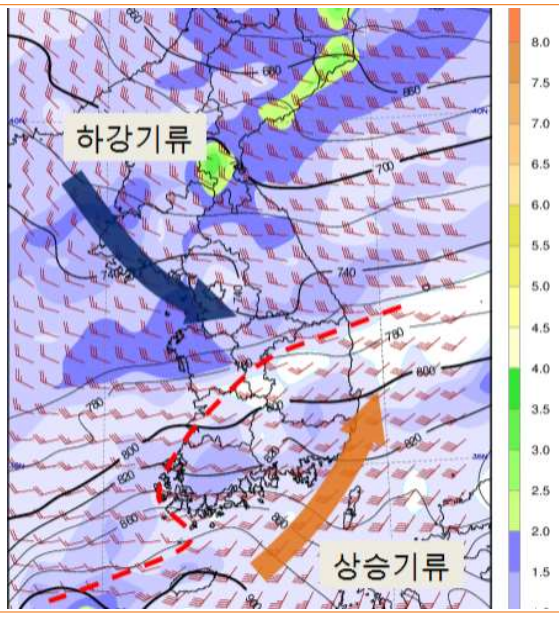
1월 16일 09시(+24h) 850hPa 유선 예상장



연직시계열 강수량(상 이천, 하 춘천)



1월 16일 15시(+30h) 925hPa 상세바람 예상장

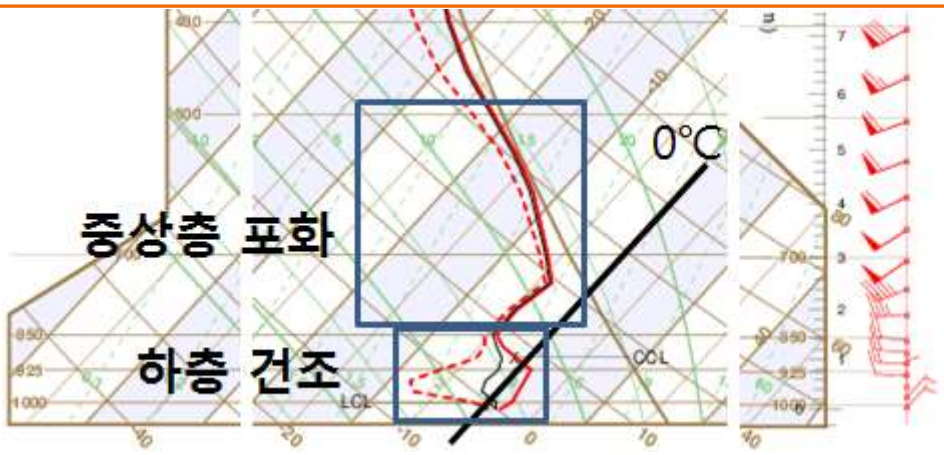


1월 16일 18시(+33h) 290K 등온위면 예상장

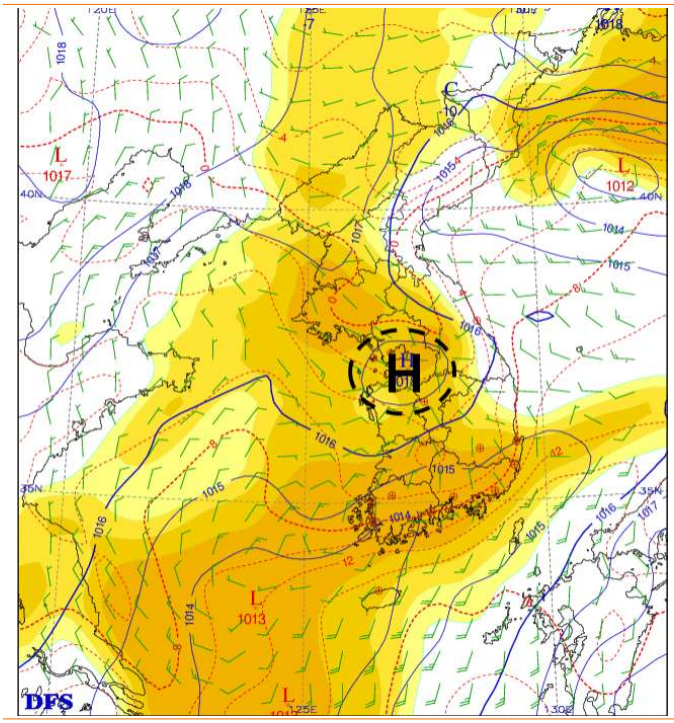
4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **중부지방의 중층운에 의한 강수대 약화**
  - 중부지방으로 중층운이 유입되고 1km 이하 하층에는 영상의 기온을 보이면서 건조역이 분포
  - 중층에서 낙하하는 강수 입자가 하층의 온난 건조역을 지나면서 증발할 가능성
  - 16일 낮까지 중부내륙에 국지 고기압이 버티는 상태에서 북쪽 기압골 전면의 난기이류와 후면의 한기이류가 강하지 않아 기압골에 의한 강수대는 남하하면서 약화될 가능성이 있었음

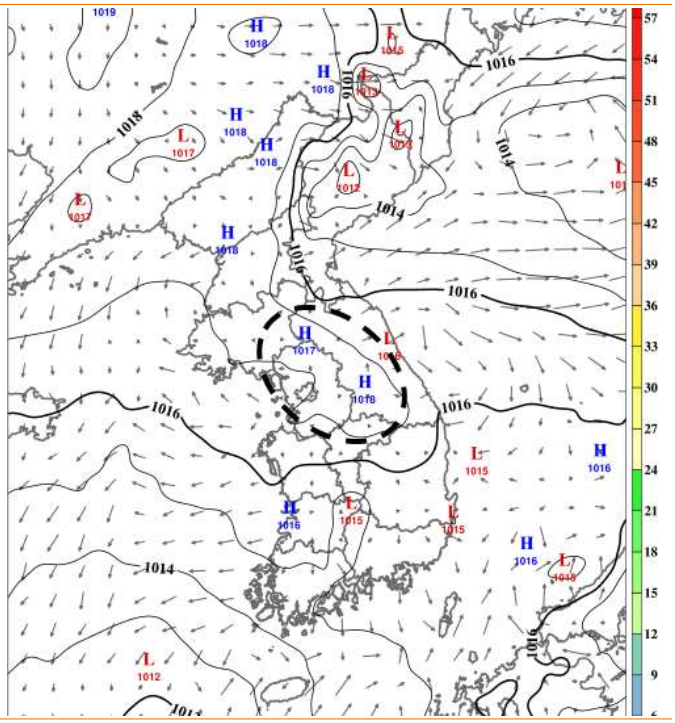
    ⇨ **북쪽 기압골의 약화로 인해 남쪽 기압골이 예상보다 북상하는 결과**



1월 16일 15시(+30h) 오산 예상단열선도



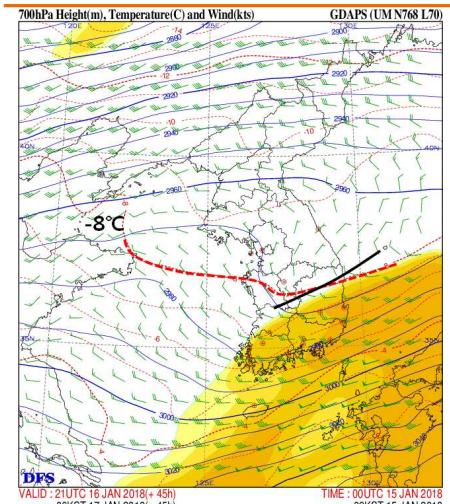
1월 16일 15시(+30h) 지상 예상장



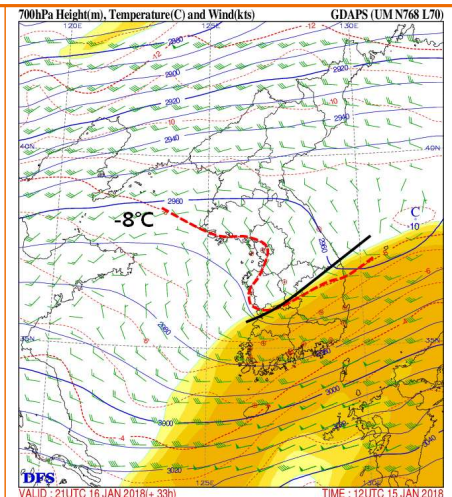
1월 16일 15시 VDAPS 해면기압, 바람 분석장

- **중상층 기압골의 위치 변화 경향**
  - 남쪽의 지상 저기압이 대한해협으로 빠져나가더라도 중상층 기압골의 중심은 중부지방에 계속 남아있으면서 중층의 상승기류를 유도함

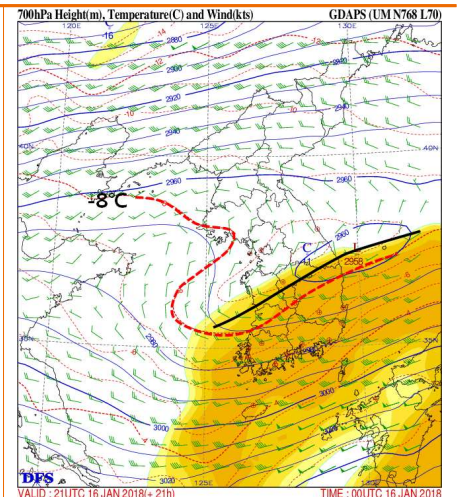
- 예측 시간이 다가올수록 중층 기압골이 더 강해지고 이동은 느려지는 경향을 보임
  ⇨ **중층 기압골이 예상보다 느리게 빠져나가고 중심이 강해지는 경향**
  ⇨ **북쪽 기압골 후면에서 건조한 북서풍이 유입될 것으로 예상했던 17일 아침까지 중층 기압골 전면에 있으면서 경기남부와 강원남부에 남서풍 계속 유입**



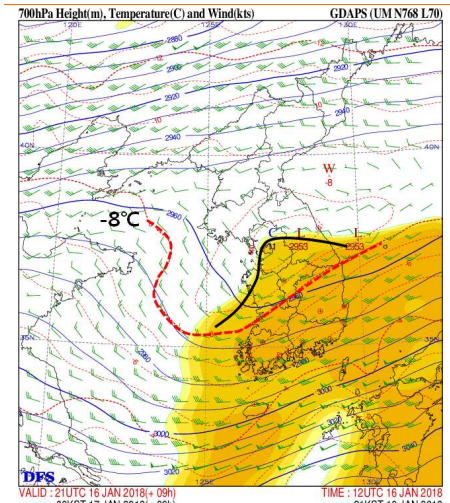
1월 17일 06시(+45h)
700hPa 상승속도 예상장



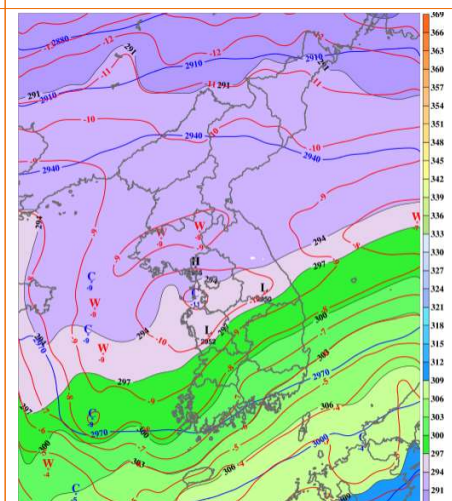
1월 17일 06시(+33h)
700hPa 상세바람 예상장



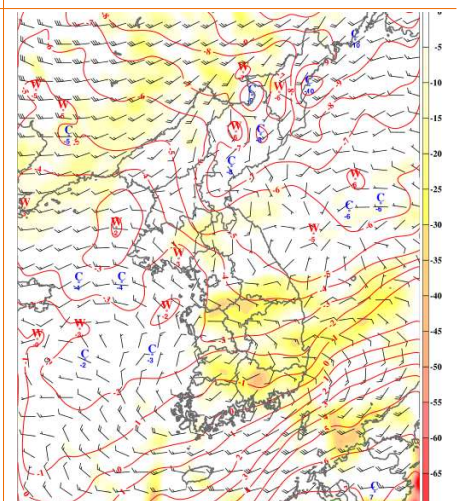
1월 17일 06시(+21h)
700hPa 상세바람 예상장



1월 17일 06시(+09h)
700hPa 상세바람 예상장



1월 17일 06시 700hPa
고도,기온,상당온위 VDAPS 분석장



1월 17일 06시 700hPa
상승속도 VDAPS 분석장

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 북쪽 기압골과 남쪽 기압골의 영향을 같이 받을 경우 수증기 유입 경로에 따른 강수 메커니즘 분석이 중요(남쪽 기압골 북상 여부를 분석)
- 지상 저기압이 빠져나가더라도 중상층에 남아있는 기압골의 강도 및 위치 추적에 대한 분석 필요

8-4. 2018년 1월 22일 사례

한랭종관 저기압에 의한 중부지방 중심의 강수

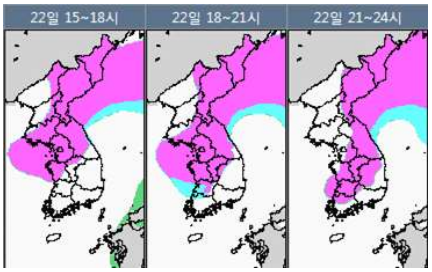
저기압은 어디로 지나가는지, 이동경로 변동성 중요

1. 예보와 실황은?

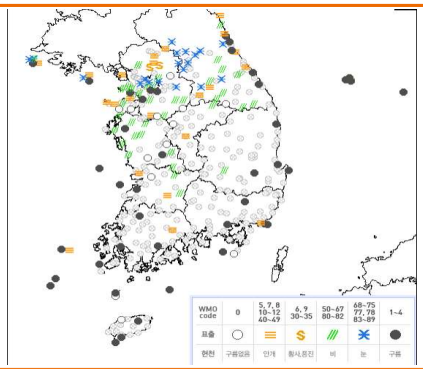
예보 (1월 21일 17시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 전국: 5mm 내외 - 제주도: 5~20mm ▸ 예상 적설 - 강원도(동해안 제외): 3~8cm - 서울.경기도, 충청도, 제주도산지, 강원동해안: 2~5cm - 전라도, 경남서부내륙, 경북내륙: 1~3cm	충청도와 전라도의 강수형태를 눈으로 예보하였으나 → 대부분 비로 내리면서 예보보다 적은 적설 기록

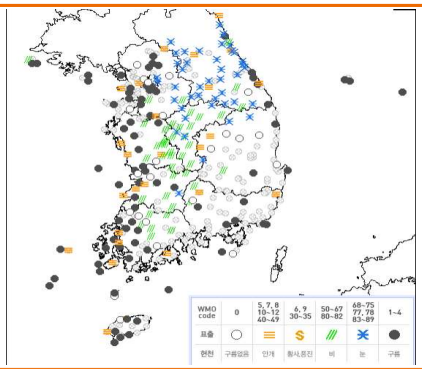
최심신적설 현황(cm)	
수도권	동두천 9.5 신서 6.5 파주 6.0 하면 5.0 의정부 4.5 양평 2.0 남양주 1.4 서울 1.0
충청도	제천 2.0 수안보 1.0 청주 0.4
강원도	(내륙) 면온 14.0 대화 12.0 철원 7.8 북평 6.0 평창 5.5 북춘천 5.0 인제 4.5 안흥 4.5 (산지) 미시령 17.0 스키점프 8.3 진부령 7.9 대관령 7.0 진부 7.0 태백 5.0 용평 5.0 (동해안) 양양 7.0 속초 6.4 북강릉 5.1 간성 5.0
경상도	석포 7.5 수비 4.0 봉화 3.0 영주 0.5

- 충청이남 지역의 강수가 비로 시작되었기 때문에 한랭전선으로 인해 일부 지역의 강수형태가 비에서 눈으로 바뀌었어도 적설이 쌓이기 힘들었음
- 강원영서의 강수형태는 잘 예보했으나 산지와 일부 내륙에 예보보다 많은 눈(10cm 이상)이 기록됨



강수 예상 분포도 (1월 21일 17시 예보)





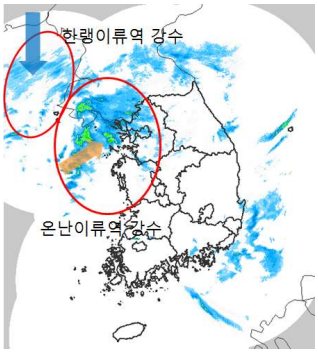
1월 22일 일기 현상 분포도(좌 16시, 우 19시)

2. 강수 메커니즘은?

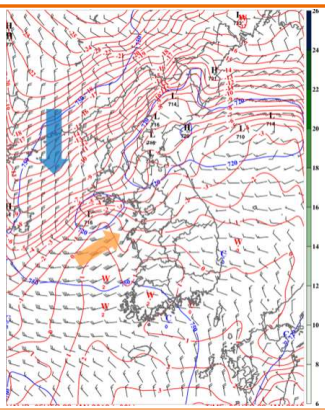
- **(한랭종관저기압 통과)** 500hPa 강한 양의 와도역의 지원을 받는 한랭종관저기압이 산둥반도에서 동진하여 경기북부를 통과. 저기압 전면에서 남서풍의 온난이류에 의해 발달한 강수대가 유입되었다가 저기압 후면에서 남하하는 한기에 의해 하층 시어역에서 강수대

발달. 그러나 상층기압골 후면의 한기 이류가 약하고 저기압을 받쳐주는 고기압이 남쪽에 존재하지 않아 저기압 세력을 유지하는데 불리함

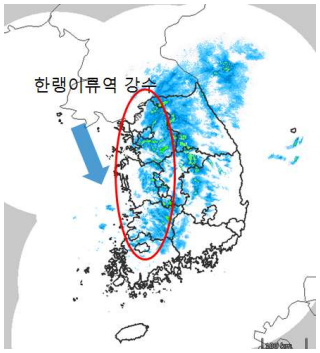
- **(기압골 연직구조)** 상하층간 기압골의 위치가 멀어 즉, 남북방향으로 기압골의 기울기가 완만한 형태로 기압골 후면의 한랭이류가 약해 지상 저기압이 크게 발달하기 힘든 역학적 구조. 특히 한랭이류에 의해 강수가 내릴 때는 상층의 지원이 거의 없는 상태이므로 하층 시어(북서풍-남서풍)역에 의해서만 발생
- **(강수형태)** 저기압 중심이 경기북부를 지나면서 중부지방까지 남서풍이 원활하게 유입되어 온난역에 들면서 대부분 비로 내림. 그러나 수도권과 강원도는 남서풍의 풍속이 925hPa 10kts로 약하고 925hPa 기온이 영하권이어서 대부분 눈의 형태. 저기압 후면에서 한기가 이류될 때 기온이 떨어지면서 충청도와 전라도의 강수형태도 차츰 눈으로 바뀜



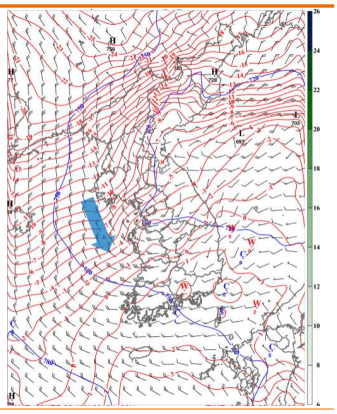
1월 22일 14시 레이더



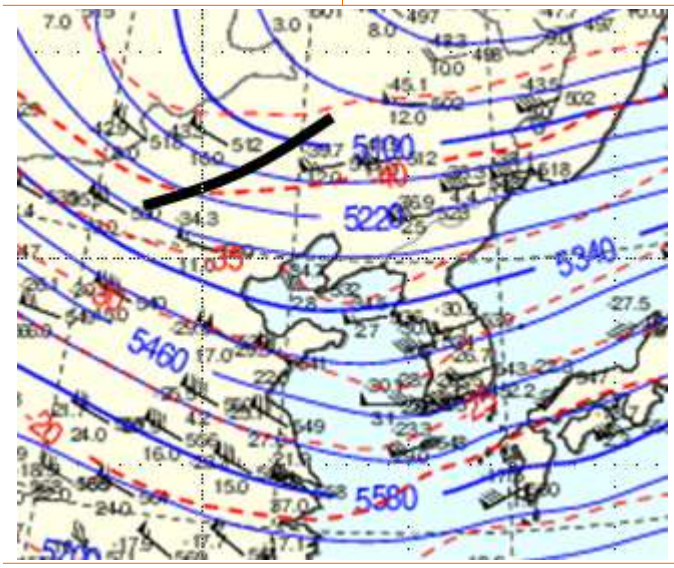
1월 22일 14시 VDAPS 925hPa 고도,기온,바람



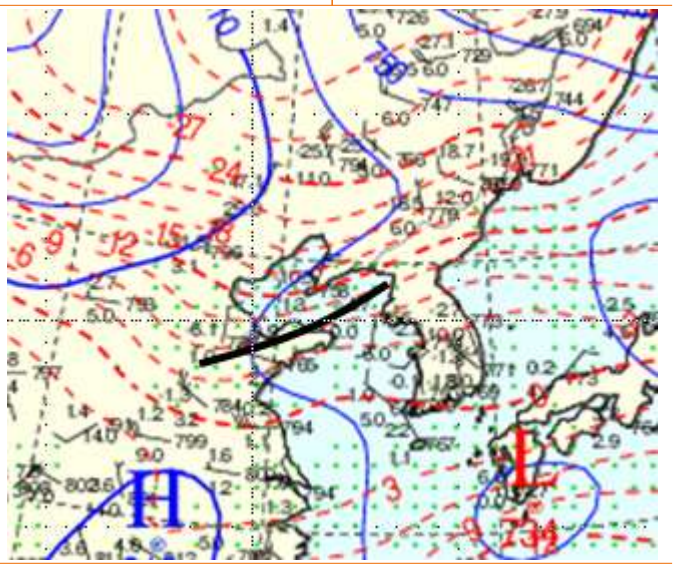
1월 22일 18시 레이더



1월 22일 18시 VDAPS 925hPa 고도,기온,바람



1월 22일 09시 500hPa 분석장(기압골 위치)

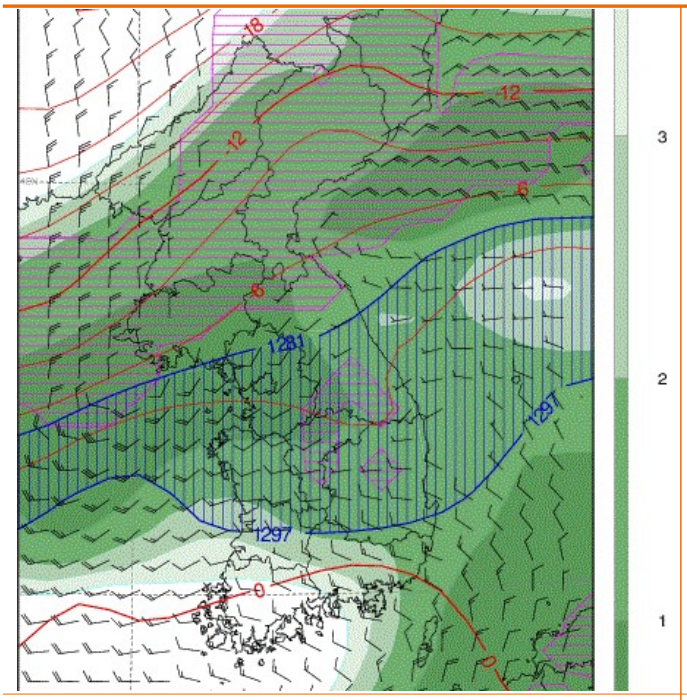


1월 22일 09시 925hPa 분석장(기압골 위치)

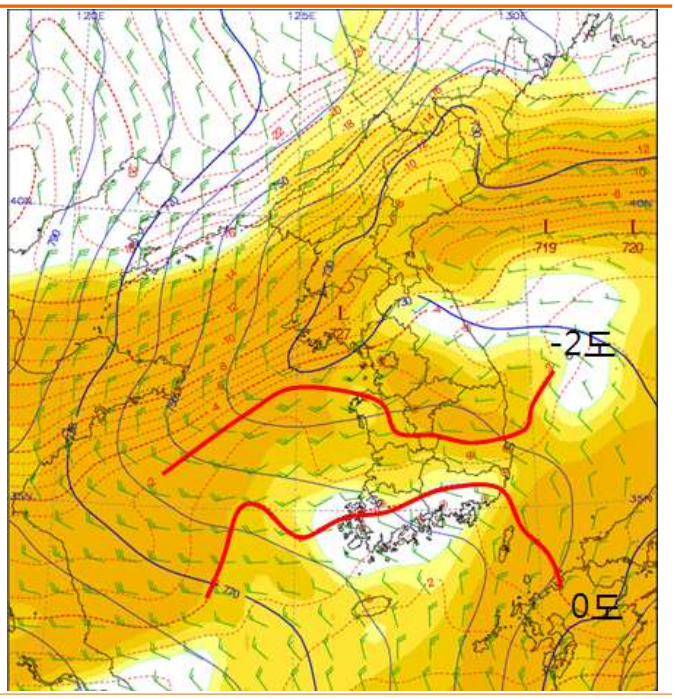
3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

- **(저기압 발달)** 500hPa 단파골의 지원을 받아 지상 저기압 발달. 저기압 전면에서 남서풍이 유입(850hPa 20~30kts, 925hPa 15~25kts)되는 온난이류역에서 강수가 시작된 후 저기압 후면의 강한 한기이류(850hPa 25~30kts, 925hPa 25~30kts)로 인해 한랭전선이 발달하면서 강수 종료

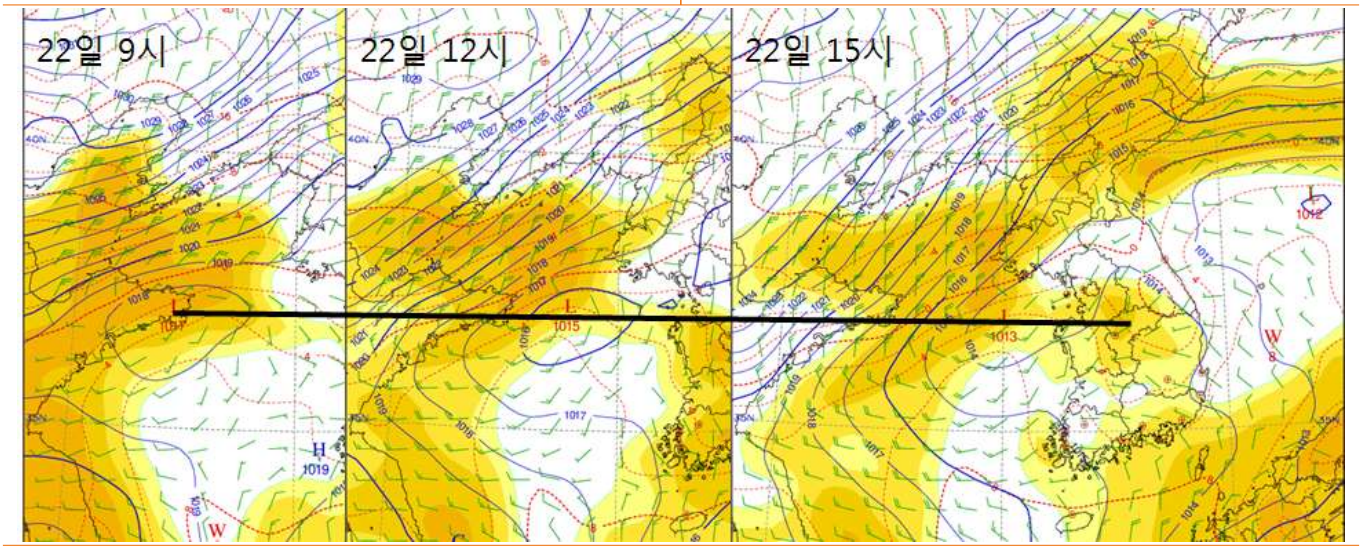
- **(강수 형태)** GDAPS 상세바람예상장에서 925hPa 0℃선이 남해안에 위치하면서 하층 기온이 낮게 형성되고 1000-850hPa 층후 예상장에서도 남부지방을 제외한 대부분 지역이 눈/비 혼재구역에 들어있는 것으로 모의. 한랭전선이 통과하면서 남부지방의 강수형태도 비에서 눈으로 바뀌면서 강수 종료될 것으로 모의
- **(저기압 이동 경로)** 산둥반도 - 서해상 - 경기남부로 이어지는 저기압 이동경로를 모의하여 저기압 전면에서 온난이류의 영향을 받는 지역이 충청이남으로 제한됨



1월 22일 15시 1000-850hPa 층후도



1월 22일 15시(+30h) 925hPa 상세바람예상장



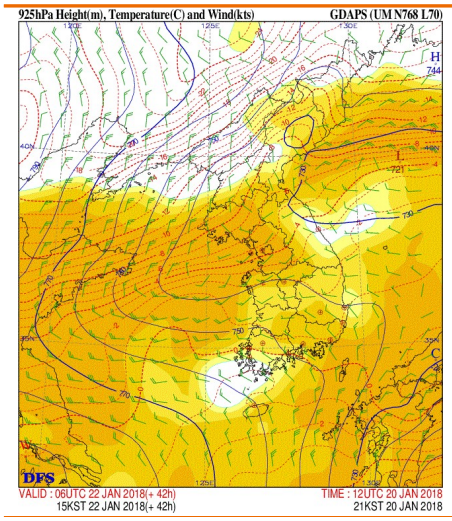
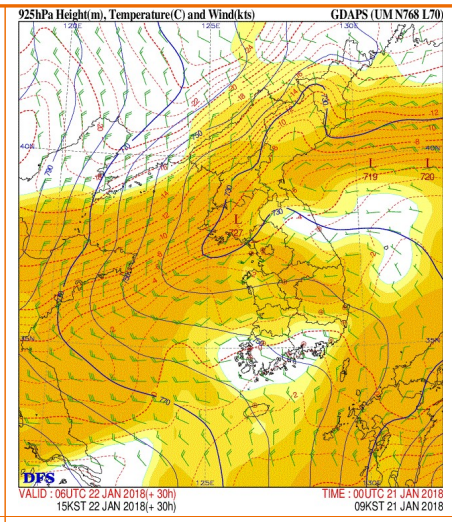
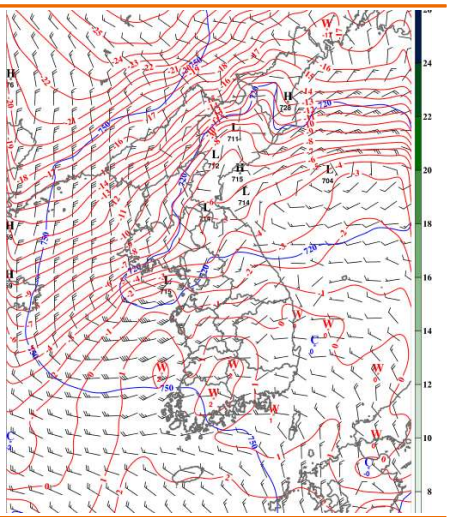
1월 22일 지상 상세바람 예상장(21일 09시 모델)

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **모델 발표 시간에 따른 저기압 이동경로의 변화 경향을 살펴봤더라면**
  - 지상 저기압이 모델 예상보다 약간 북상하여 지나면서(경기남부 통과 예상 → 경기북부 통과) 중부지방의 난기 유입이 원활해짐
  - 925hPa 상세바람 예상장에서 저기압 중심을 경기남부에서 경기북부로 점차 북상시키는

경향을 보이고 있었음

- 서울 및 경기남부와 충청북부에는 온난이류에 의해 하층 기온이 영상을 유지하면서 강수가 비로 시작하여 적설이 적었던 반면, 기온이 낮게 유지되어 눈으로 내린 경기북부와 강원산지에는 강제상승 등 지형적인 영향과 원활한 온난이류에 의해 예상보다 적설이 증가

		
1월 22일 15시(+42h) 925hPa 상세바람 예상장	**1월 22일 15시(+30h) 925hPa 상세바람 예상장**	**1월 22일 15시 VDAPS 분석장 925hPa 고도,기온,비습,바람**

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 저기압의 이동 경로에 따라 온난역의 영향을 받는 영역도 달라짐
- 특히 저기압 전면에서 925hPa과 지상 사이에 나타나는 온난이류로 인해 강수의 상변화가 일어날 수도 있는 경우에는 온난역의 북상여부를 살펴야함

남해상을 지나는 저기압에 의한 남부내륙 적설

저기압의 이동 속도 및 경로 변화를 주시했다면

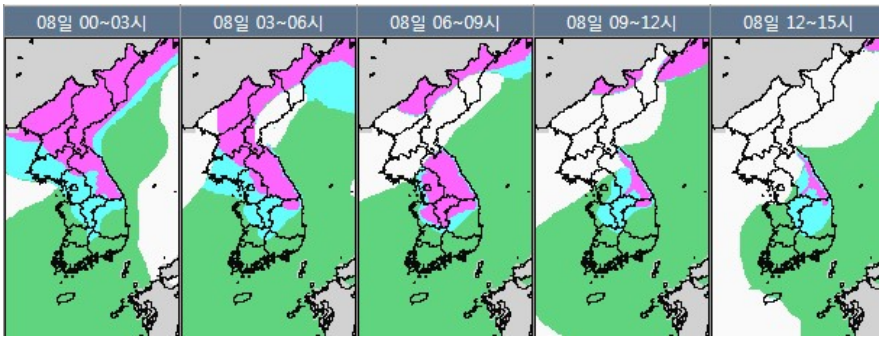
1. 예보와 실황은?

예보 (3월 7일 05시 발표)	실황
▸ 예상 강수량 - 제주도, 전남, 경남 : 20~60mm(많은 곳 제주도 산지, 경남남해안 80mm 이상) - 전북, 강원동해안, 강원산지, 충청도, 경북 : 10~40mm - 서울.경기도, 강원영서(산지 제외): 5mm 내외 ▸ 예상 적설 - 강원산지, 강원동해안, 경북북동산지:5~10cm (많은 곳 강원산지 20cm 이상) - 강원영서(산지 제외), 충북, 경북북부: 2~5cm - 경기동부, 경북남부내륙, 경남북서내륙, 전북북동내륙, 제주도산지: 1cm 내외	충청이남 내륙에 예상보다 많은 적설 기록

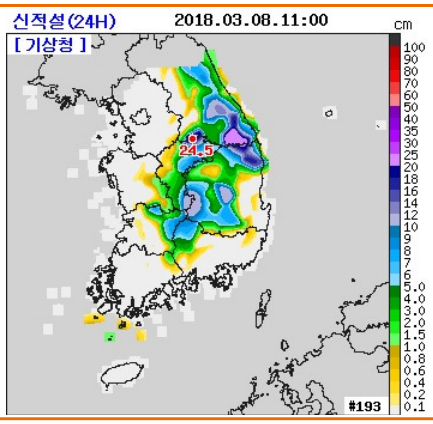
최심신적설 현황(cm)

충청도	괴산 12.0 추풍령 11.7 수안보 9.5 제천 8.0 단양 7.2 옥천 4.4 세종금남 3.0 금산 2.5
강원영서	사북 26.2 면온 14.5 대화 8.5 해안 8.1 안흥 5.5 북평 4.5 평창 3.5 기린 3.2 양구 3.0
강원영동	태백 25.5 임계 20.5 용평 19.5 대기리 17.0 스키점프 13.9 대관령 13.5 미시령 12.0
경상도	석포 23.6 수비 17.6 군위 11.4 김천 11.0 봉화 10.0 거창 9.7 성주 9.0 대구 7.5
전라도	무주 9.0 장수 7.5 진안 6.0 김제 1.4 고창군 0.4 전주 0.2
제주도	어리목 0.8

- 3월 8일 7시 30분 대구 대설주의보 발표
- 남부내륙은 비로 시작해 눈/비로 바뀌어 이어질 것으로 예상하였으나 눈으로 내리면서 적설 증가



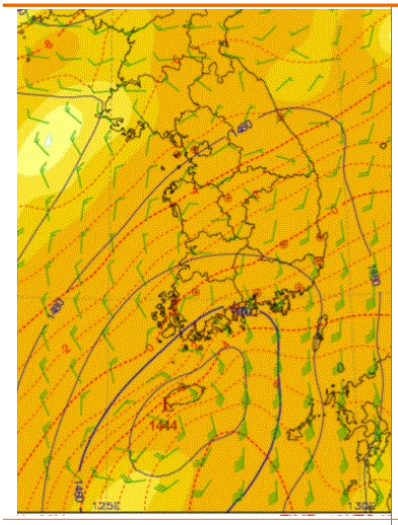
3월 8일 강수형태 분포도



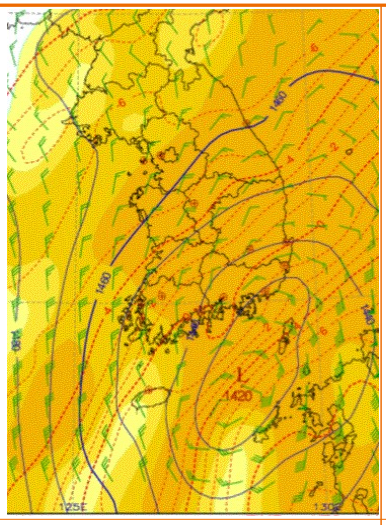
3월 8일 11시 신적설 분포도(24h)

2. 강수 메커니즘은?

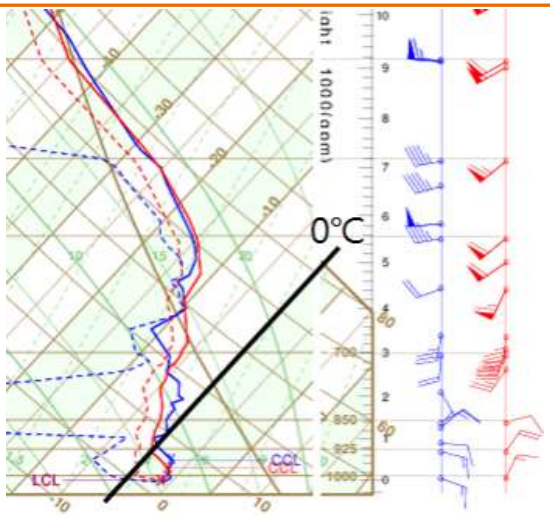
- **(상층 지원)** 중국 중부내륙에 있는 500hPa 단파골의 지원으로 상해부근에 있던 하층 기압골이 북동진하면서 제주도 남서쪽 해상에서 지상 저기압으로 발달. 상층까지 남서풍이 불면서 상승기류가 발달하여 포화층이 두껍게 발달
- **(저기압 전면 하층제트 유입 제한)** 남쪽 저기압과 일본 동쪽 고기압 사이에서 기압 경도력이 증가하면서 하층 제트가 발달하여 850hPa 남풍이 30~40kts로 강하게 불면서 수증기가 공급됨. 그러나 하층제트는 남해상에 위치하며 남부지방에 유입되지 못함
- **(하층 북동풍 유입)** 상층까지 난기가 이류되는 가운데 하층 저기압 북쪽 사면에는 850hPa 이하 고도에서 북동~동풍이 불면서 강한 연직시어에 의해 상하층 공기가 활발히 혼합됨. 특히, 하층 저기압이 대한해협으로 빠져나갈 때 저기압 북쪽에 해당하는 동해안 지역으로 북동풍이 불면서 한기가 유입되고 이때 강수 피크가 나타남
- **(남부내륙 강수형태)** 8일 새벽 저기압이 제주도 남쪽해상을 통과하면서 남부내륙까지 전면의 강한 남서풍이 유입되지 못하고 바람이 약하게 불면서 기온이 하강하여 강수형태가 비에서 눈으로 바뀜



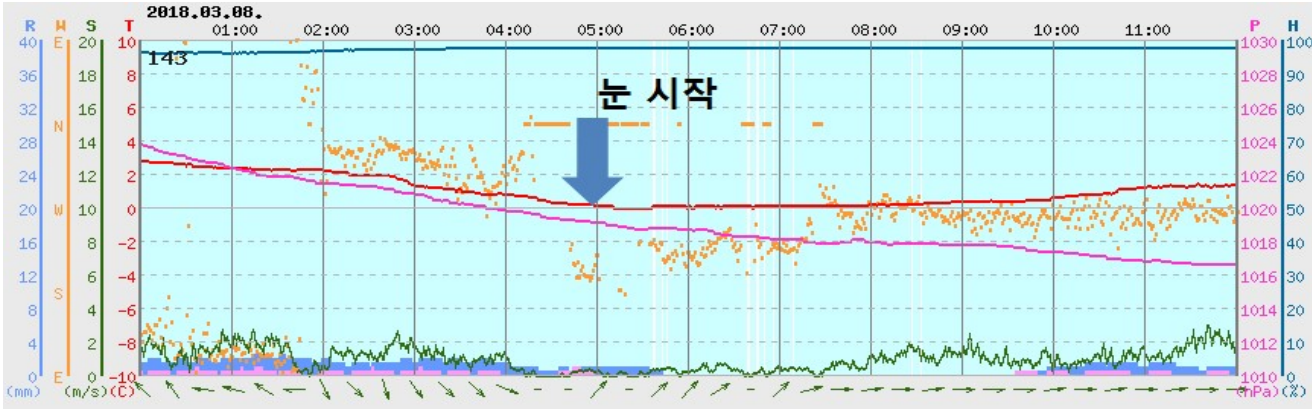
3월 8일 03시 850hPa 상세바람장 초기장



3월 8일 09시 850hPa 상세바람장 초기장



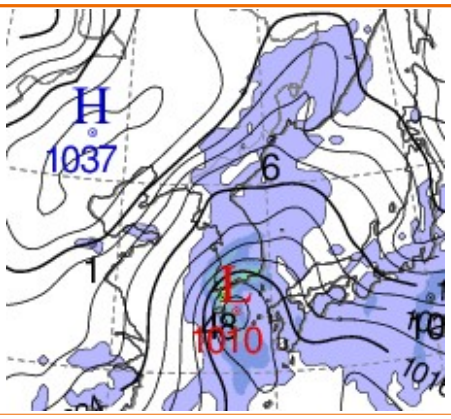
2월 7일 21시 흑산도 단열선도



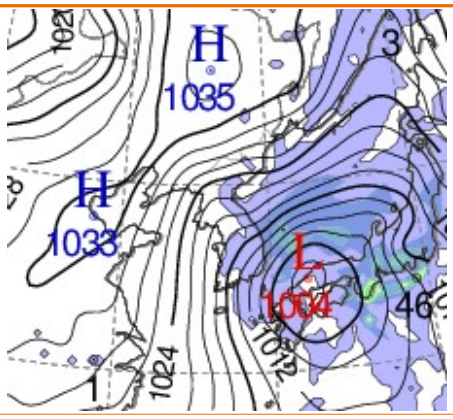
3월 8일 대구 시계열

3. 수치모델은 어떻게 예측했을까?

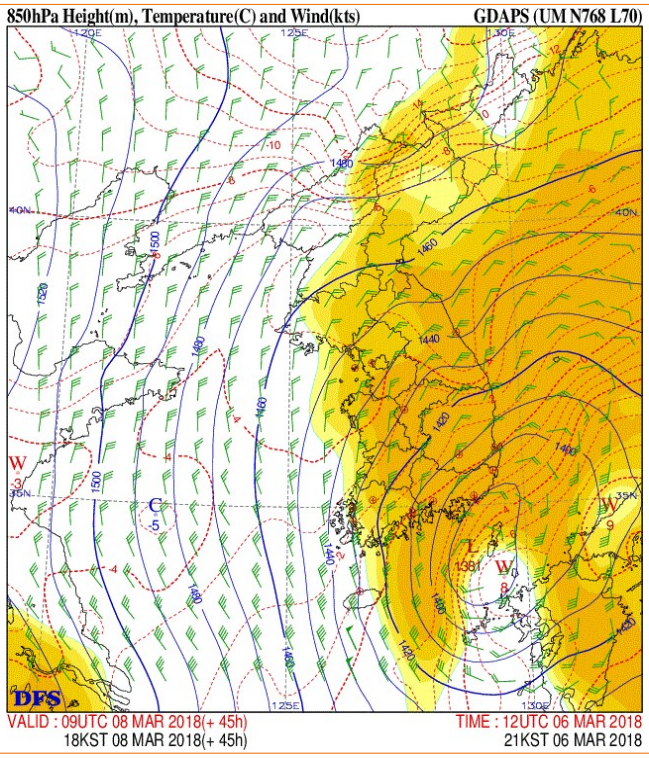
- 지상 저기압이 8일 새벽 제주 서쪽해상으로 접근하여 8일 밤 대한해협으로 이동. 저기압 전면 850hPa, 925hPa에서 남동~남풍이 45~50kts로 강하게 불면서 수증기 공급이 활발한 남부지방에 강수가 집중되고 난기 유입으로 인한 기온 상승으로 강수 형태는 주로 비 또는 비에 가까운 눈/비가 될 것으로 예상함
- 8일 새벽 대구 강수형태의 경우 700hPa 이상 고도에서 남서풍이 40kts로 불면서 난기가 이류되는 가운데 850hPa 이하에는 동풍계열의 바람이 불면서 강한 연직시어에 의해 대기가 혼합되어 925hPa 이하의 기온이 0℃ 이상인 연직 구조를 모의
- 강수 피크는 저기압이 대한해협으로 이동하여 저기압의 북쪽 사면에 북동풍이 850hPa 20~35kts로 유입되면서 한기가 파고드는 8일 오후가 될 것으로 예상. 그러나 북동풍이 불면서 동해안을 중심으로 기온이 하강 하지만 등온선에 나란하게 유입되면서 한기 이류는 강하지 않아 지상 기온은 영상으로 유지될 것으로 예상



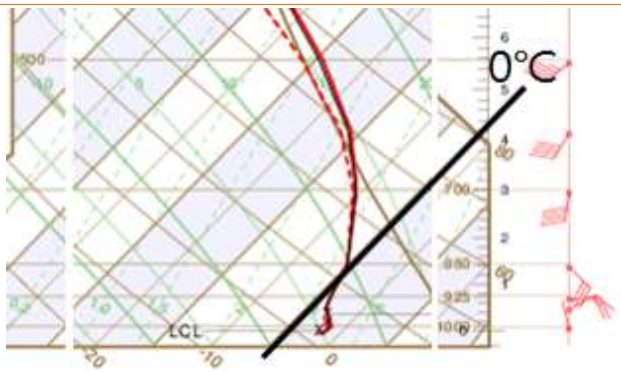
3월 8일 09시(+36h) 지상 예상장

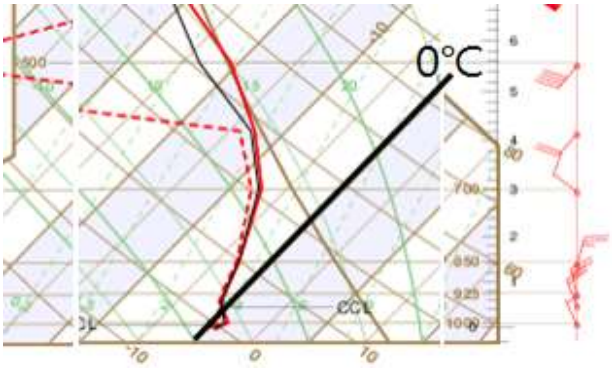


3월 8일 21시(+48h) 지상 예상장



3월 8일 18시(+45h) 850hPa 상세바람 예상장

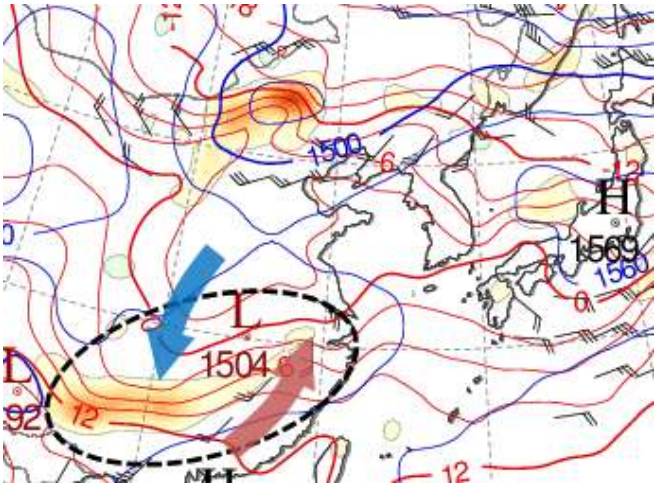




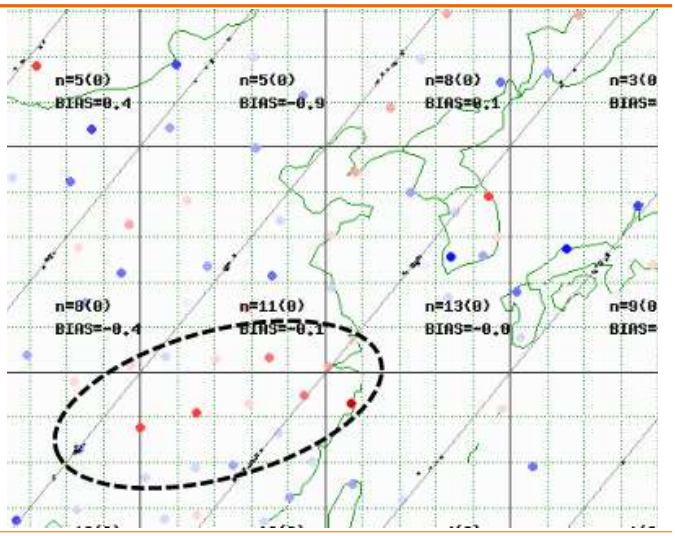
(상) 3월 8일 06시(+21h) 대구 예상 단열선도
(하) 3월 8일 18시(+33h) 대구 예상 단열선도

4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

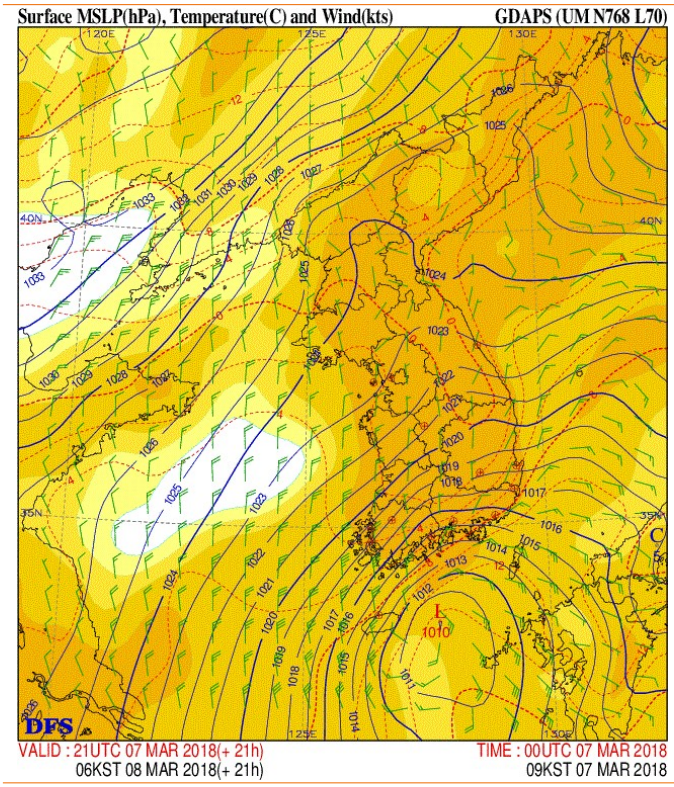
- **저기압 이동 속도가 빨라지는 경향을 실황분석을 통해 알았더라면**
  - 남쪽 골의 이동 속도가 모델 예상보다 빠르고 이동 경로도 모델이 모의했던 것보다 더 남쪽으로 쳐짐(제주도 남쪽해상을 통과하면서 북동진)
  - 저기압이 남하하면서 난기가 모델이 모의했던 만큼 남부지방까지 강하게 유입되지 못하고 하층에 북동풍이 불면서 한기 유입. 즉 기온이 예상했던 것보다 낮음
  - 모델 예상장을 통해 8일 오후라고 예상했던 강수 피크(저기압 북쪽에서 북동풍이 불며 한기가 유입되는 시점)가 8일 아침에 나타남
    - ⇨ **8일 아침 예상보다 강한 강수가 내리면서 기온이 하강**
    - ⇨ **영하층 고도에서 형성된 눈이 FL고도를 지나며 녹아 비로 바뀌면서 융해열을 흡수하여 주변 대기의 기온이 하강**
  - 3월 7일 09시 실황분석을 통해 중국남부내륙의 온도조밀구역에 저기압 전면 난기 이류는 약하고 후면의 한기 이류는 강해 모델 예상과는 다르게 남쪽 저기압이 빠르게 이동하고 북상이 예상보다 어려울 것을 알 수 있음



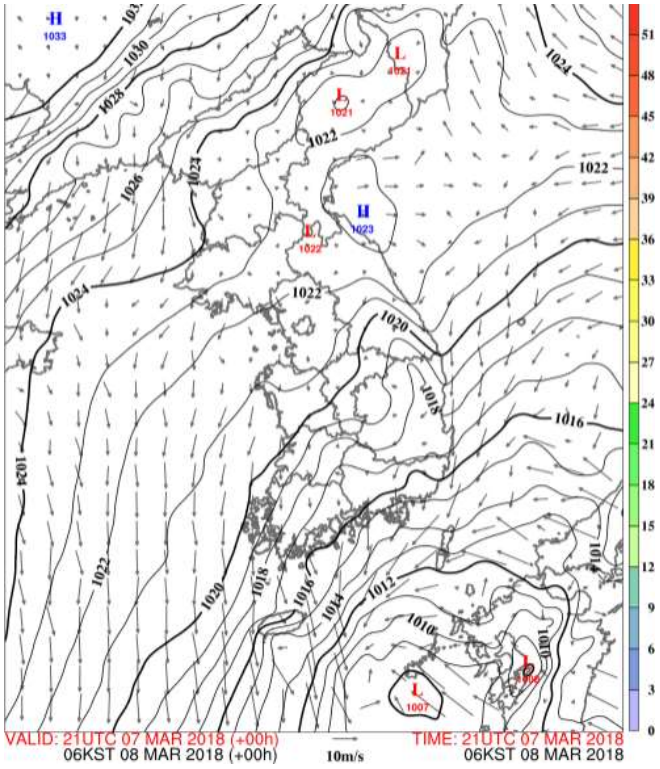
3월 7일 09시 850hPa 전선,고도,기온 초기장



3월 7일 09시 850hPa 기온 GDAPS-GTS

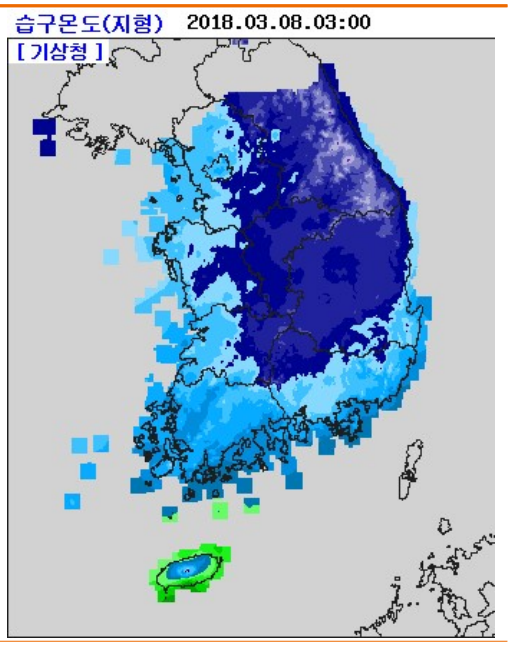


3월 8일 06시 지상 상세바람예상장



3월 8일 06시 VDAPS 해면기압, 바람

- **습구온도를 통한 실황 대처**
  - 강수 유입 전 습구온도의 실황 분포를 통해 강수 형태 예측 가능
  - 강수가 시작되면서 850hPa에는 하층제트가 강화되어 기온이 오르지만 지상에서는 영하층에서 내리던 눈이 비로 바뀌면서 융해열에 의해 주변 대기 기온이 하강
    - ⇨ **하층의 기온도 영하권에 도달하면서 강수형태가 눈이 될 가능성 시사**
    - ⇨ **8일 새벽 습구온도도 영하를 보이고 있었음**

		
3월 7일 21시 예상단열선도	3월 8일 09시 예상단열선도	3월 8일 03시 습구온도(지형반영)

5. 향후 유사유형 시 고려해야 할 것은?

- 강수의 비단열 과정 시 모델의 예상단열선도가 잘 모의하지 못하는 경향을 보이므로 강수 형태의 변화가 예상될 때는 저기압의 이동경로에 따른 난기 유입의 강도, 하층 기온의 변화 등을 고려해야함. 또한 습구온도의 실황 감시를 통해 초단기적인 대응도 필요

8-6. 2019년 1월 30일 사례

북쪽 기압골 통과 후 남쪽 저기압, 중층 난기 유입으로 인한 강수
하층이 건조한 줄 알았는데

1. 예보와 실황은?

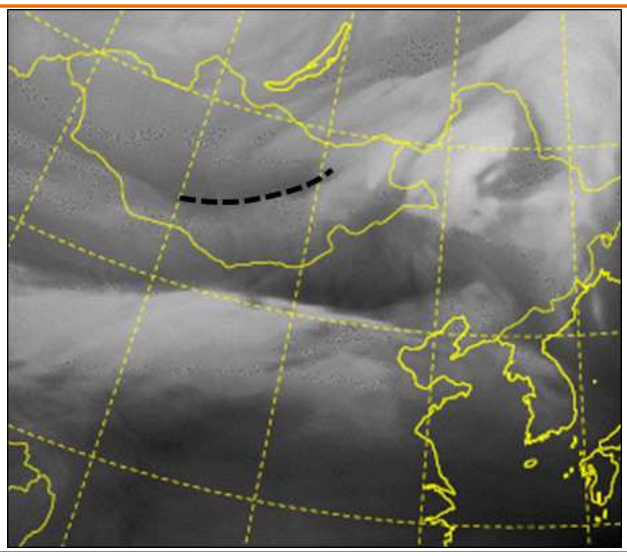
2019년 1월 29일 17시 발표	실황
▸ 예상 강수량	▸ 강수량
- 제주도: 10~40mm	- 제주도: 10~30mm
- 남해안: 5~20mm	- 남해안: 5~20mm
- 남부지방: 5~10mm	- 남부지방: 5~10mm
- 충북남부: 5mm 미만	- 충청남부: 5mm 미만
▸ 예상 적설	▸ 적설
- 제주도산지: 5~15cm	- 제주도산지: 5~15cm
- 남부지방, 제주도: 1~5cm	- 남부지방: 1~5cm(지리산, 덕유산 부근 5~10cm)
- 충북남부: 1cm 내외	- 충청남부: 1~3cm

2. 쟁점사항은?

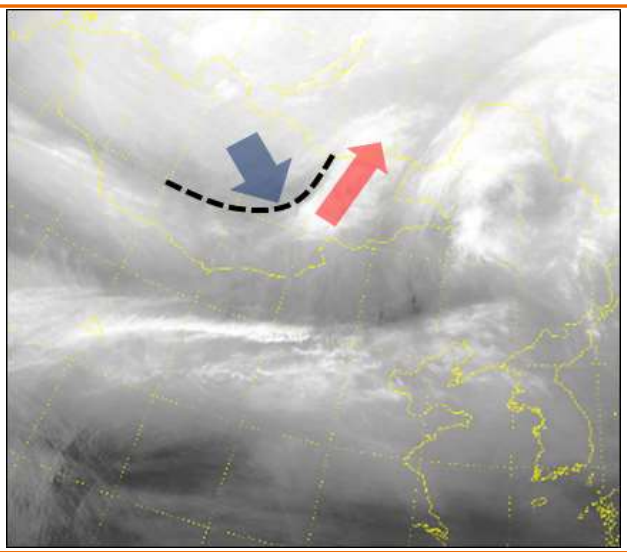
- **쟁점1)** 남쪽 저기압 강수 구역은 어디까지?
- **쟁점2)** 남부지방의 대설 가능성?

3. 주요 분석내용

- **쟁점1)** 남쪽 저기압에 의한 강수 구역은 어디까지?



1월 29일 09시 수증기 모의 영상

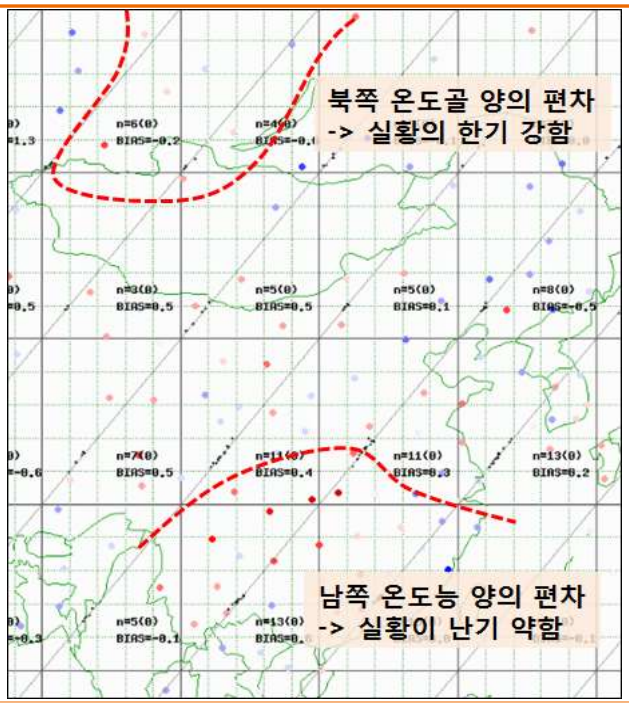


1월 29일 09시 히마와리 수증기 영상

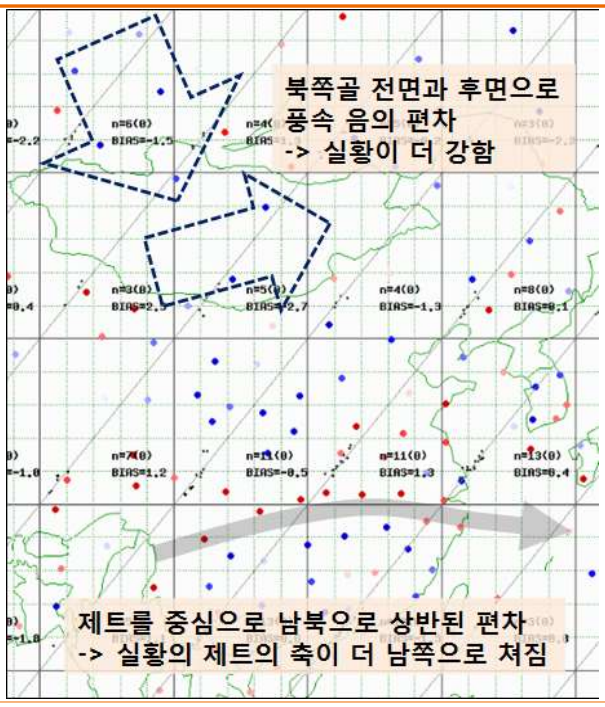
- 북쪽 기압골 통과 후 남쪽 기압골이 접근하므로 700hPa 남서기류(남쪽 기압골 전면이자 남쪽 고기압 가장자리)와 북서기류(북쪽 기압골 후면)가 수렴되는 곳에서 강수 발달 예상
- 북쪽 기압골이 먼저 통과한 후에 700hPa 이하 층으로 북서기류 남하

⇨ 강수역 북상을 저지하는 역할

- 전일(29일) 09시를 기준으로 수증기 모의 영상보다 북쪽 건조역 더 깊게 남하
  ⇨ 모델 예상보다 기압골 깊어지면서 북쪽 한기가 강하게 남하할 것으로 예상
- 북쪽의 한기는 예상보다 강하게 남하하고 남쪽의 고압부는 예상보다 쳐져 있어 받쳐주는 힘이 약했음 ⇨ 강수역 크게 북상하지 못할 것으로 예상

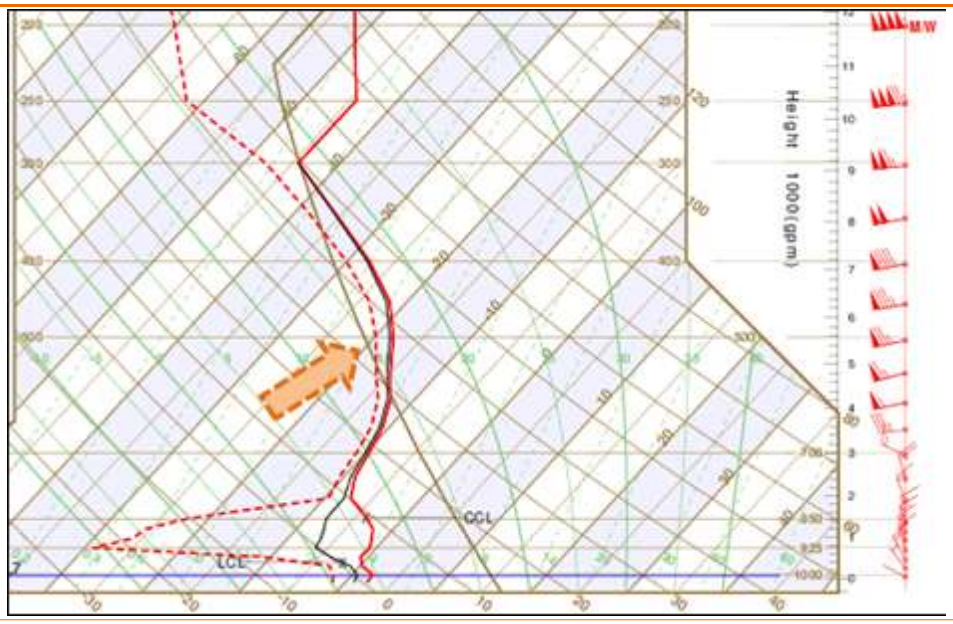


1월 29일 09시 500hPa 모델 기온 편차



1월 29일 09시 500hPa 모델 풍속 편차

- **쟁점2)** 남부지방의 대설 가능성?



1월 31일 09시 대구 예상 단열선도

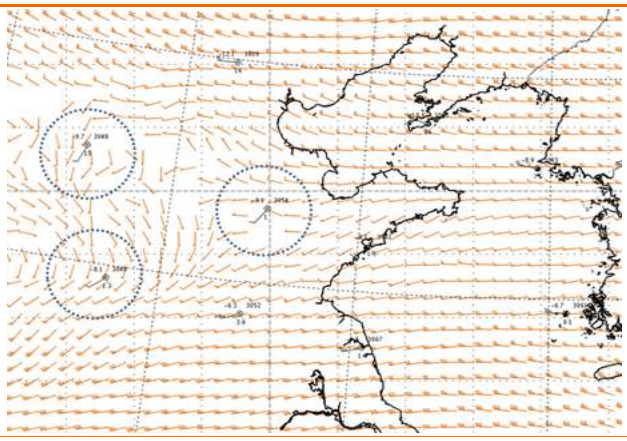
- 눈이 잘 발달할 수 있는 구간(-12℃~-16℃)에 포화층이 형성되나,
- 700hPa 이상에서는 난기가 유입되지만 하층에는 북서풍이 불면서 건조
- 또한 남쪽 기압골 전면에서 유입되는 700hPa 층의 난기가 모델 예상보다 약한 것으로

판단 ⇨ 강수형태는 눈이지만 하층이 건조하므로 고도가 높은 산지 위주로 적설이 쌓일 것으로 예상하였음

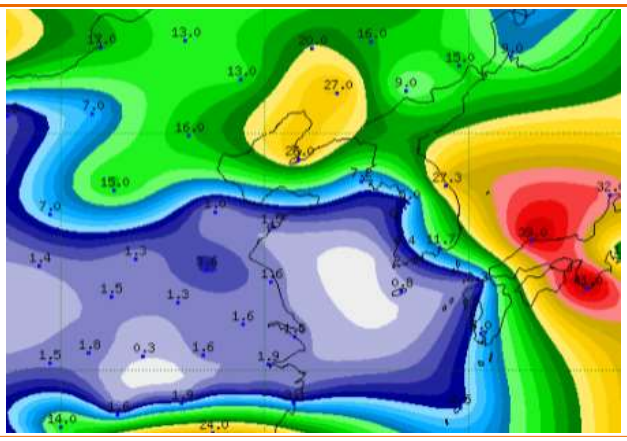
4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- 남서풍 유입 영역 북상
  - 당일(30일) 09시 GTS를 통해 산둥반도 부근에서 700hPa 남서풍이 불고 있는 것을 확인 → UM 모델이 예상한 것보다 북상한 영역에서 남서풍 유입 → 700hPa 기류가 수렴되는 곳이 예상보다 북쪽에서 나타날 가능성
- 하층 수증기 공급
  - 당일(30일) 09시 700hPa 습수역은 산둥반도까지 형성되어 있으며 850hPa 하층 습수역도 산둥반도 남부까지 분포되어 있음
  - 남쪽 고기압 가장자리의 남서류와 북서쪽 대륙 고기압 가장자리의 북동류 사이에서 하층 저기압성 회전이 발달
  - 남부지방은 하층 저기압 전면에서 북동풍이 유입되면서 건조역 남하 저지

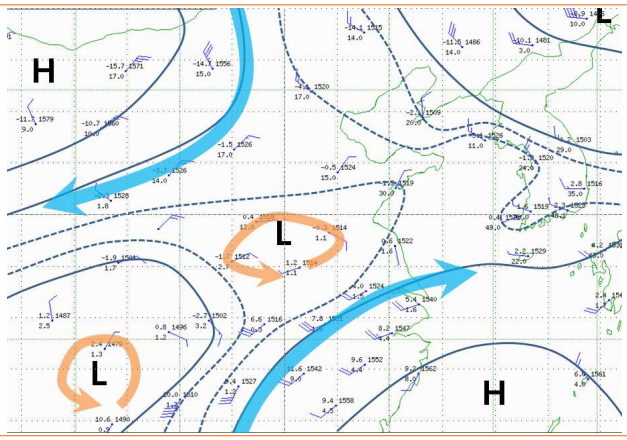
    ⇨ 하층 저기압에 동반된 습수역이 유입되면서 중층부터 하층까지 눈이 형성되기에 좋은 조건을 갖춤



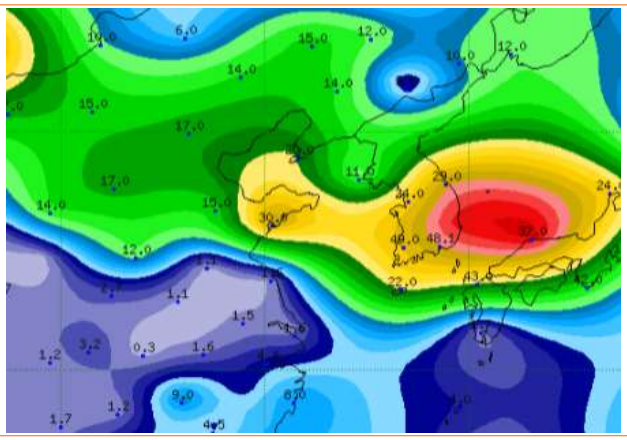
1월 30일 09시 700hPa 풍향 비교(UM-GTS)



1월 30일 09시 700hPa GTS 습수



1월 30일 09시 850hPa GTS 분석



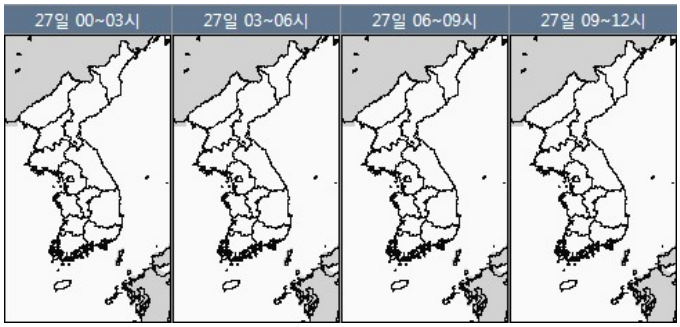
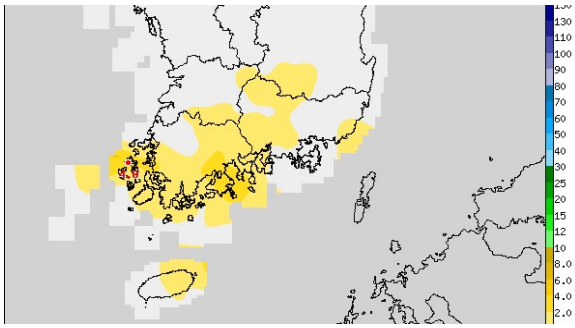
1월 30일 09시 850hPa GTS 습수

8-7. 2019년 2월 27일 사례

예보하지 않았던 남쪽 저기압 강수

수증기 영상을 통한 실황분석을 했더라면

1. 예보와 실황은?

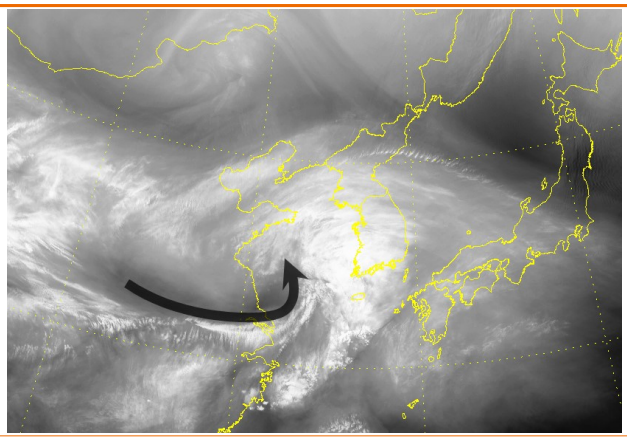
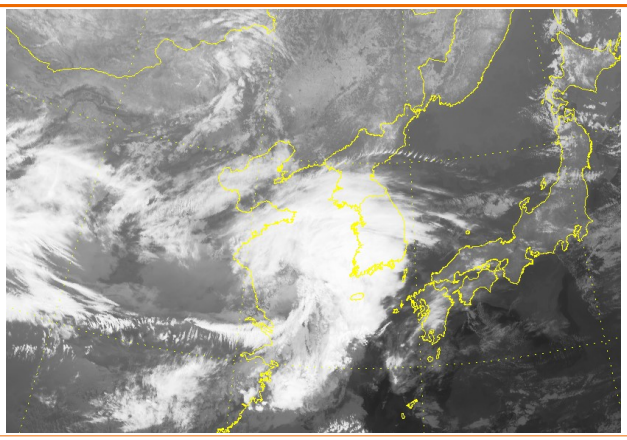
예보(2월 26일 17시 발표)	실황
	
▸ 27일 새벽 강수 예보 없었음	▸ 전남과 경남지역 5㎜ 미만 강수 발생

2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 27일 새벽 강수 발생 원인은?**
- **쟁점2) 예보에 없었던 강수, 실황에서 알 수 없었나?**

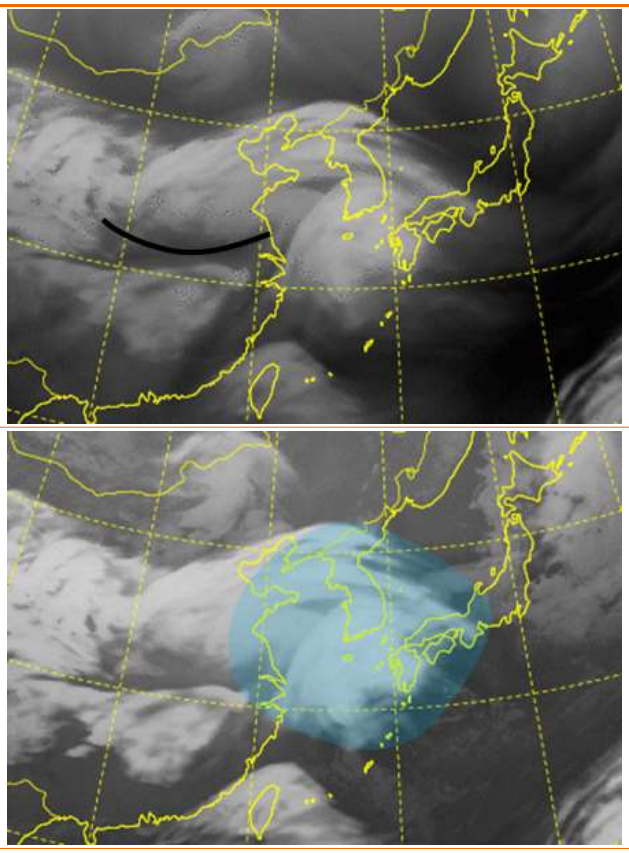
3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 27일 새벽 강수 발생 원인은?**

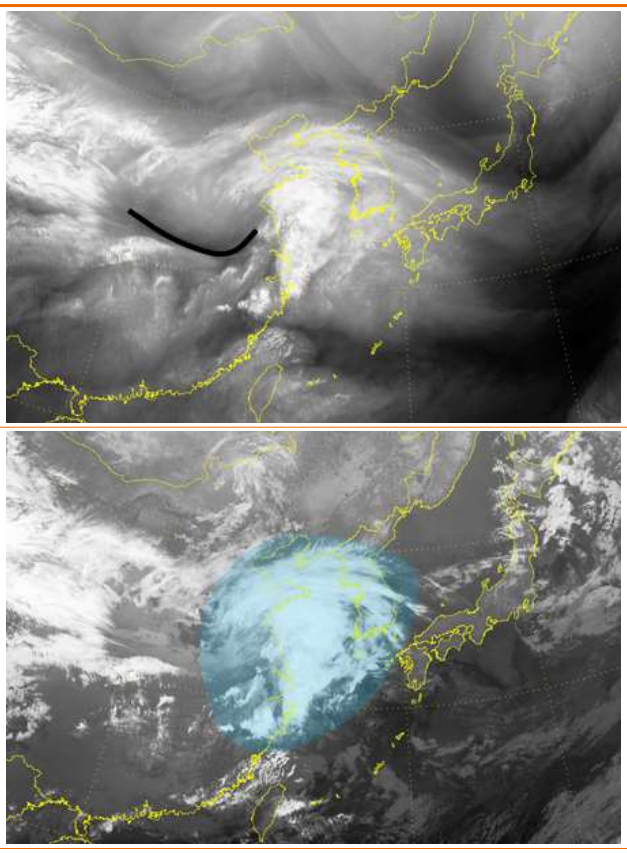
	
2월 27일 00시 히마와리 수증기 영상	**2월 27일 00시 히마와리 적외 영상**

- 상해 서쪽에 상층 기압골+서해상에 기압능 발달
- 기압골 후면에 동반된 건조역이 말려 들어가면서 콤마형의 구름대 발달
- 전일(26일 09시 모델) 예상장에서는 서해상과 동해상에 고기압이 위치하면서 27일 새벽에는 남쪽 저기압에 의한 강수가 유입되지 않을 것으로 모의

● **쟁점2) 예보에 없었던 강수, 실황에서 알 수 없었나?**

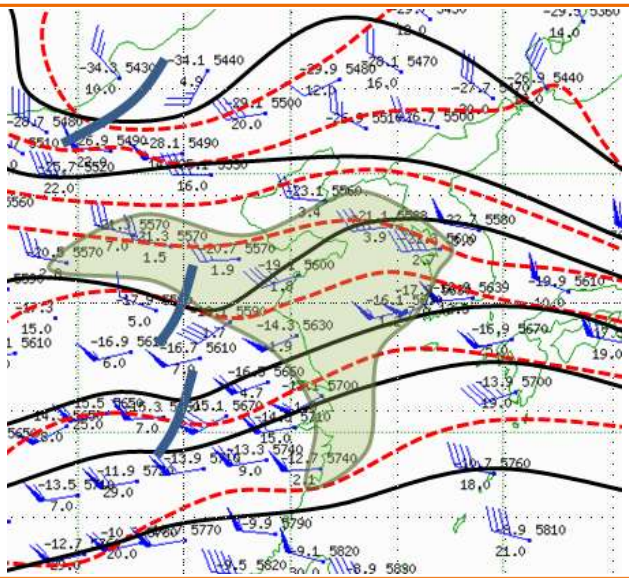


2019년 2월 26일 21시 모델 예상장(+12h) (위) 수증기 (아래) 적외영상

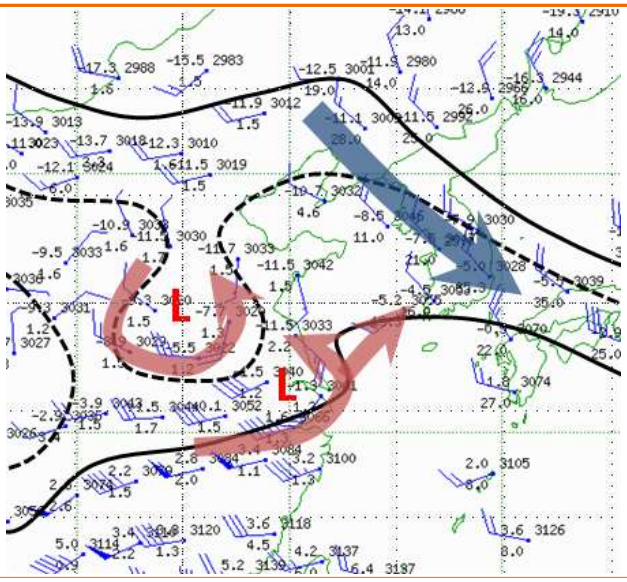


2019년 2월 26일 21시 히마와리 위성 영상 (위) 수증기 (아래) 적외영상

- 26일 21시 히마와리 위성의 수증기 영상과 UM 모델 수증기 예상장을 비교해보면 상해 서쪽 기압골 후면의 건조역이 예상보다 깊게 유입되고 있는 것을 알 수 있음 ⇨ 모델 예상보다 기압골 발달한 상태
- 기압골이 발달하면서 전면의 구름대도 예상보다 발달
- 우리나라 대부분은 서쪽 기압능 전면에서 북서기류의 하강류가 나타나지만 흑산도에는 상해부근 기압골 전면의 남서기류(700hPa)가 유입됨



2월 26일 21시 500hPa GTS 분석장

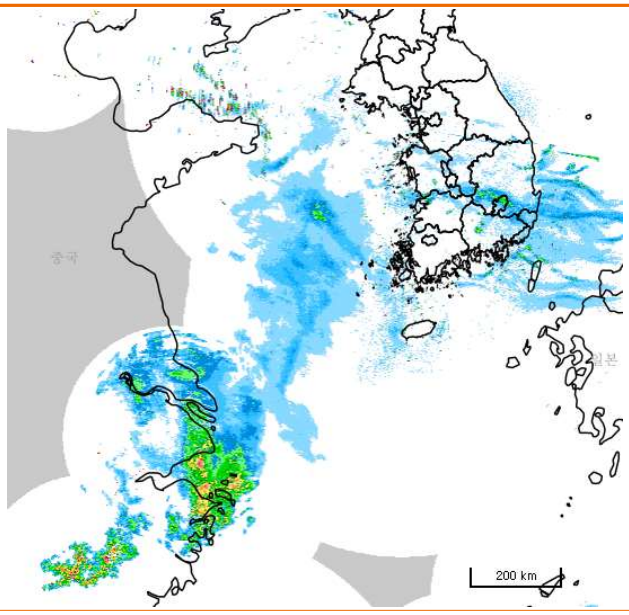


2월 26일 21시 700hPa GTS 분석장

- (500hPa GTS 분석) 상해 서쪽뿐만 아니라 산둥반도 서쪽에도 기압골이 존재하고 있음을 확인
- (700hPa GTS 분석) 산둥반도 서쪽 저기압 후면의 침강 공기가 상해 부근 기압골 후면으로 유입됨 ⇨ 건조 공기가 예상보다 깊게 유입되면서 전단이 말려들어가는 형태로 발달함

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- **실황분석을 통한 초단기 예보**
  - 26일 21시 레이더 영상에서 서해상과 상해 부근에 이미 에코가 나타나고 있었고 수증기 영상에도 건조역이 예상보다 깊은 형태를 보이면서 전면의 구름대가 발달하고 있음을 사전에 감지할 수 있었음



2월 26일 21시 한중일 레이더 영상

- 아열대 제트에 동반되어 있는 남쪽 기압골의 경우 동서 흐름이 강해 건조역 전면에서 구름대가 강하게 발달하지 못하고 빠르게 흘러갈 것으로 예상했음
- 그러나 이번 사례와 같이 뒤따르는 기압골이 남쪽 기압골 발달을 돕는다면 모델 예상보다 건조역이 깊게 유입되면서 콤마형 구름까지도 발달할 가능성이 있다는 사실을 고려해야 할 것임

1월 18일 대한해협 중규모저기압에 의한 대구지역 동풍강수

포항의 850hPa 북동기류 25kts 이상 → 대구에 강수 가능

1. 예보와 실황은?

적설 예보(26일 05시 발표)	실황
경북동해안: 10~40mm 경북북동산지: 5~20mm 대구, 경북동부: 5mm 내외(적설 1~5cm)	경북동해안: 5~20mm(호미곶 25.5mm) 경남: 1mm 내외 경북북부산지: 1cm 내외(석포 0.8cm) **대구 강수 없었음**

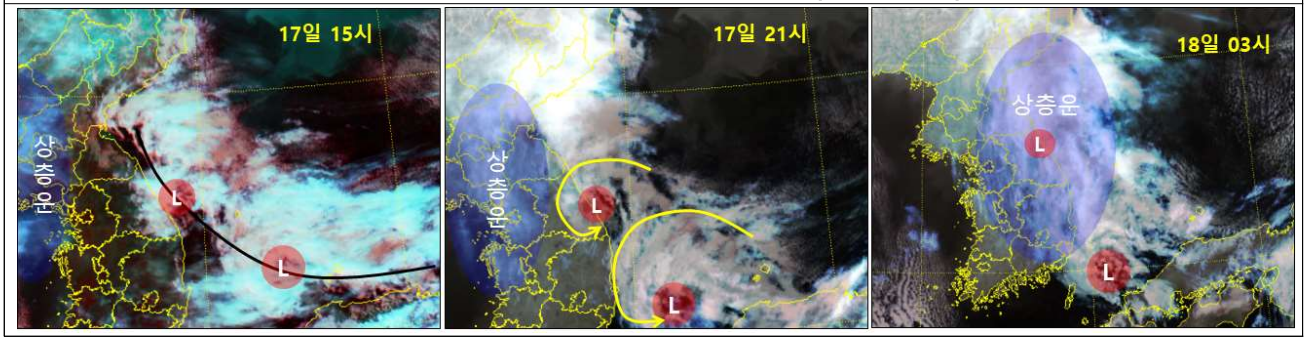
2. 쟁점사항은?

- **쟁점1) 강수 시스템을 확실하게 이해하는 것이 중요하다.**
- **쟁점2) 중규모 저기압의 발달과 위치에 따라 내륙 유입이 결정된다.**
- **쟁점3) 동해남부해상의 중규모 저기압으로 대구까지 강수가 유입되려면?**

3. 주요 분석내용

- **쟁점1) 강수 시스템을 확실하게 이해하는 것이 중요하다.**

17일 15시 ~ 18일 03시까지 합성영상(6시간 간격)



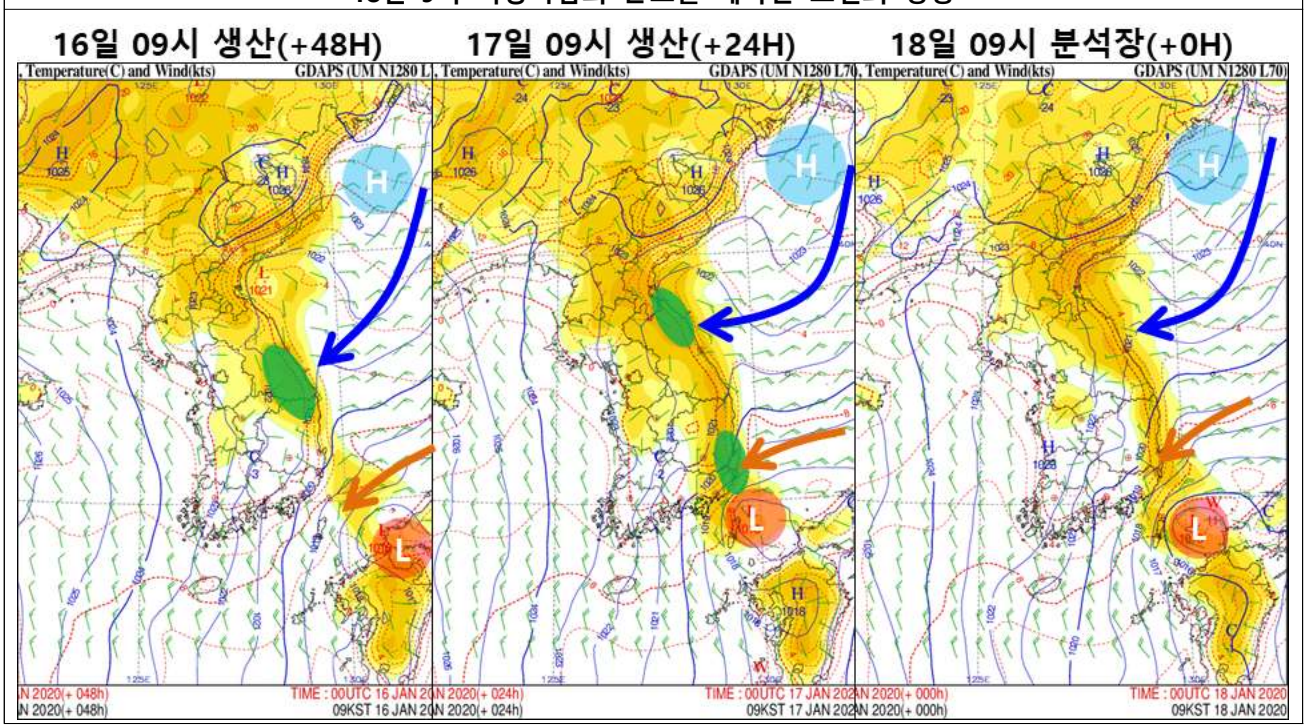
- 대한해협 동쪽에 중규모 저기압이 발달하면서 하층의 저기압성 수렴대가 내륙으로 유입되고, 18일 3~9시 사이 기압골이 통과하면서 강수가 강화될 것으로 예상
- 저기압성 회전이 고압부에 밀려 해안으로 유입되는 지역에서 강수가 시작되었고, 기압골 전면의 상층운과 하층 수렴역이 overlap 되면서 강수가 강화됨

18일 09시 포항단열선도

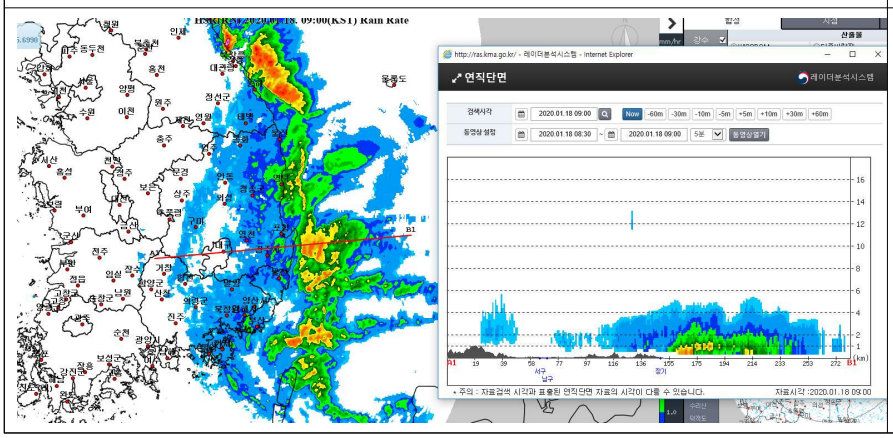
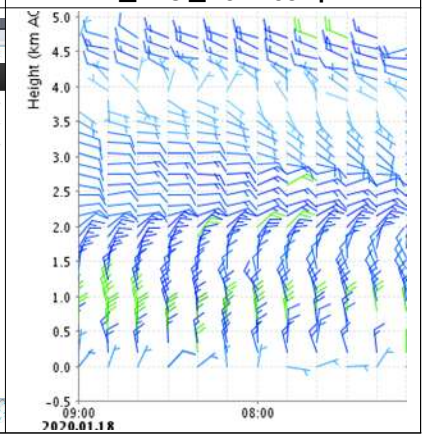
- 포항 단열선도를 보면 최하층은 서풍, 925hPa 북서~북풍, 850hPa은 북동풍이 관측됨
- 700hPa~500hPa 사이에서 veering이 나타나고 동풍은 850hPa~700hPa까지 불면서 하층의 저기압성 수렴이 상층의 기류를 타고 발달할 수 있는 연직구조를 보임

- **쟁점2) 중규모 저기압의 발달과 위치에 따라 내륙 유입이 결정된다.**
- UM 모델이 예측한 18일 09시의 저기압 중심위치에 따라 강수 집중구역과 강수 내륙 유입 정도가 결정됨. 16일 09시 생산 모델은 저기압이 규슈 쪽으로 붙으면서 동풍 강도가 약함. 반면에 17일 09시 생산 모델은 부산 쪽으로 저기압이 붙으면서 동풍이 강화되어 내륙 깊숙이(대구까지) 강수가 유입되는 것으로 모의함

18일 9시 지상바람과 온도를 예측한 모델의 경향



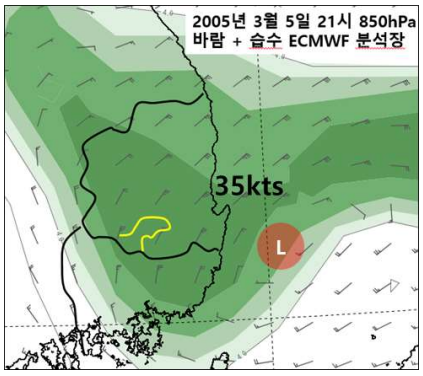
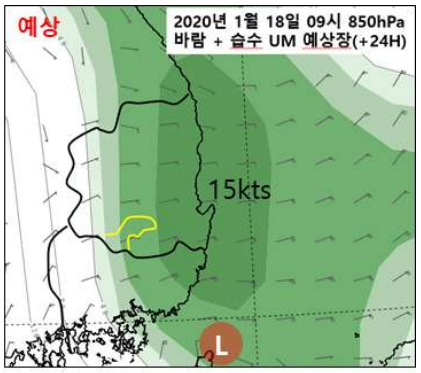
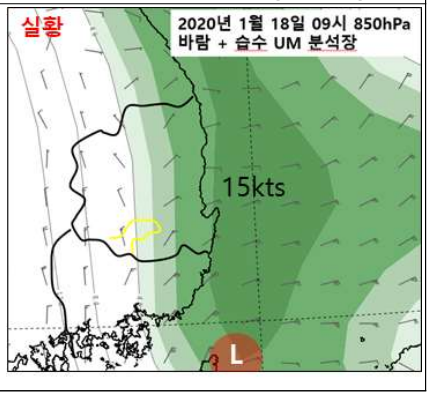
- 그러나 실황에서는 저기압 중심이 대마도 동쪽에 위치하면서 17일 생산 모델보다 부산 쪽으로 붙지 못하고 남동쪽으로 빠짐. 저기압성 북동풍이 내륙 깊숙이 유입되지 못하고 저기압 중심과 가까운 부산과 경남내륙(창원)까지만 강수 유입

2020년 01월 18일 09시 레이더 합성영상과 연직단면	창원 수직측풍장치 1월 18일 07~09시
	

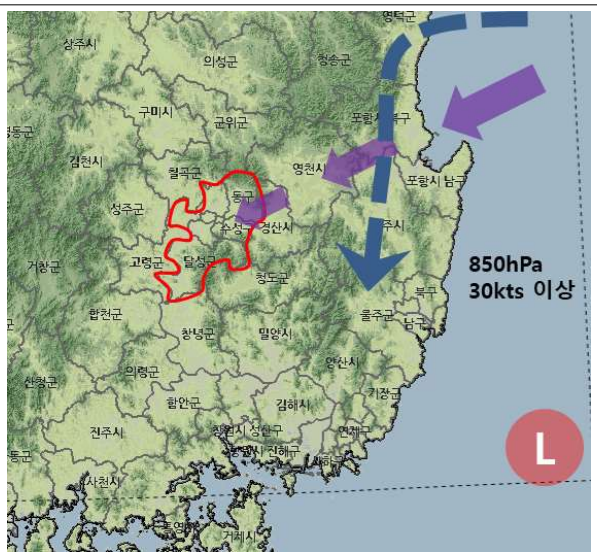
- 해상에 발달한 구름대가 있고 내륙으로 갈수록 중상층운만 존재함. 850hPa의 수렴대는 내륙으로 유입되지 못함. 창원 수직측풍장치에서도 1.5km 이하 층은 북풍류(저기압성 회전의 경계)가 우세한 것으로 관측되면서 동풍은 1.5~3.5km에 유입된 것을 알 수 있음.

- **쟁점3) 동해남부해상의 중규모 저기압으로 대구까지 강수가 유입되려면?**

- 2005년 중규모 저기압이 동해남부해상에 발생했을 때 대구에 4.5cm의 적설 기록

2005.3.05. 21시 850hPa 습수+바람 분석장(유사사례)	2020.1.18. 09시 850hPa 습수+바람 예상장(24시간 예상)	2020.1.18. 09시 850hPa 습수+바람 분석장(분석장)
		

- 유사사례에서 지상 저기압 중심은 대구에서 남동쪽으로 약 140km 떨어져 있었고, 포항 고층관측에서 850hPa 북동풍이 35kts 불면서 저기압성 기류가 대구까지 유입될 수 있었음. 이번 사례에서는 저기압이 남동쪽으로 쳐지면서 850hPa 바람이 15kts로 약해 하층 수렴 라인이 대구까지 유입되지 못함

동해남부해상에 중규모 저기압 발생 시 대구까지 강수가 유입되기 위한 모식도


- 중규모 저기압이 동해남부해상에 발달할 때는 상층의 강한 기압골이 남쪽까지 남하했다는 의미로 하층의 기류 수렴이 기압골 전면의 상승류를 타기 좋은 구조
- 따라서, 하층의 저기압성 수렴라인의 유입 정도에 따라 강수 구역이 결정됨
- 대구지역은 낙동정맥이 끊어진 사이로 북동기류가 유입될 수 있는 지형구조이므로 850hPa 저기압성 북동풍이 25kts 이상이면 강수가 유입될 수 있고 30kts 이상일 때는 3cm 이상의 적설이 가능함

0.5mm강수에 5cm적설?
적은 강수로도 대설 발생한다!

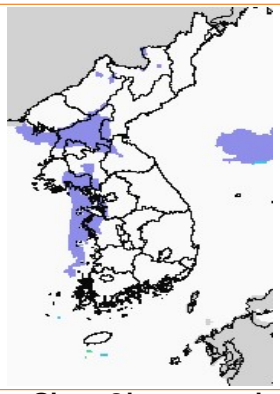
1. 예보와 실황은?

적설(강수) 예보(24일 17시, 25일 17시 발표)	실황(26일)
▸ (25일 17시 발표) 25일 밤~26일 예상 - 중부지방(경기동부 강원도 제외): 2~7cm(5~10mm) - 경기동부, 강원내륙·산지: 1~5cm(5mm미만) ▸ (24일 17시 발표) 26일 예상 - 수도권, 충청권, 경북북부내륙, 강원내륙·산지: 2~7cm(5~10mm)	▸ (26일 일 최심신적설) - 중부지방(경기동부 강원도 제외): 0.7~10.0cm(0.3~6mm) - 경기동부, 강원내륙·산지: 0.5~7.1cm(0.1~1.3mm)

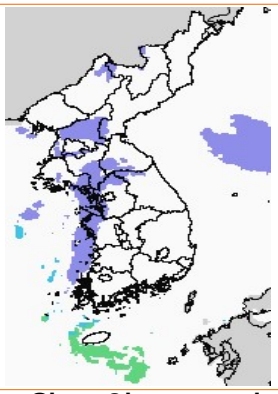
실황 전개 상황

- 발해만 부근 중층골 발달하는 가운데 일본 남쪽 부근 고기압 위치, 남고북저 기압계 강화
- 여기에 지상 새벽에 발달한 Cold Pool까지 결합, 25일 밤부터 26일 오후까지 중부 중심 적설
- **예보에 비해 강수량은 적었으나 적설 많았음(수도권 위주)**

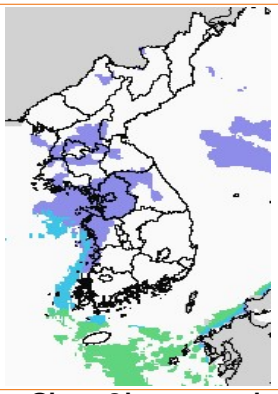
예상 적설 공간분포



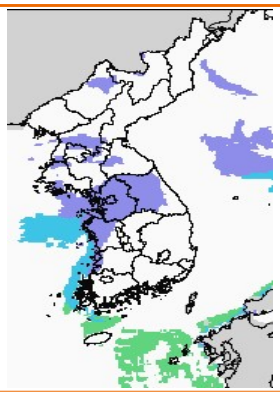
1월 25일 21~24시



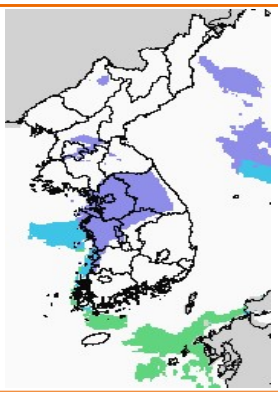
1월 26일 00~03시



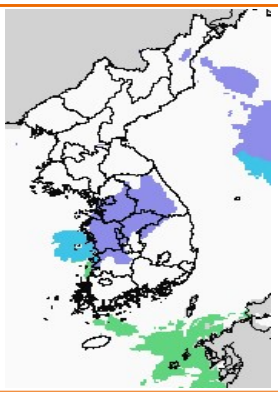
1월 26일 03~06시



1월 26일 06~09시



1월 26일 09~12시

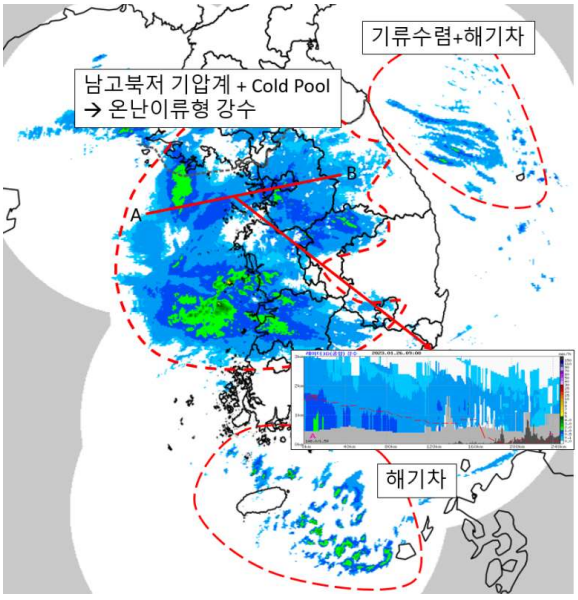


1월 26일 12~15시

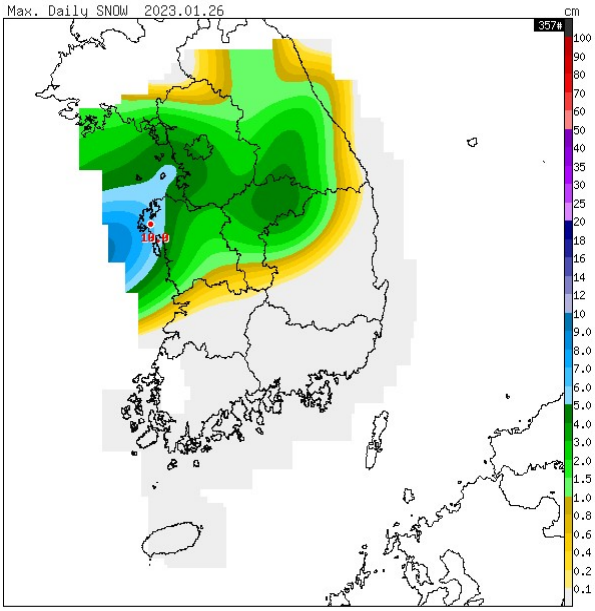
일 최심신적설 현황(cm)

(26일 기준) 태안 10.0 인천 8.4 서산 7.1 송계(제천) 6.9 김포장기 6.2 부평 5.8 과천 5.5 예산 3.0

※ [수도권 0.5~8.4 / 강원 3.3~8.0 / 충청권 0.7~10] 서울 4.5 광명노온 6.2 춘천 0.7



1월 26일 09시 레이더 강설영상



1월 26일 일 최심신적설 분포

2. 쟁점사항은?

- **적은 강수로 많은 적설이 나타나기 쉬운 대기 연직구조는?**

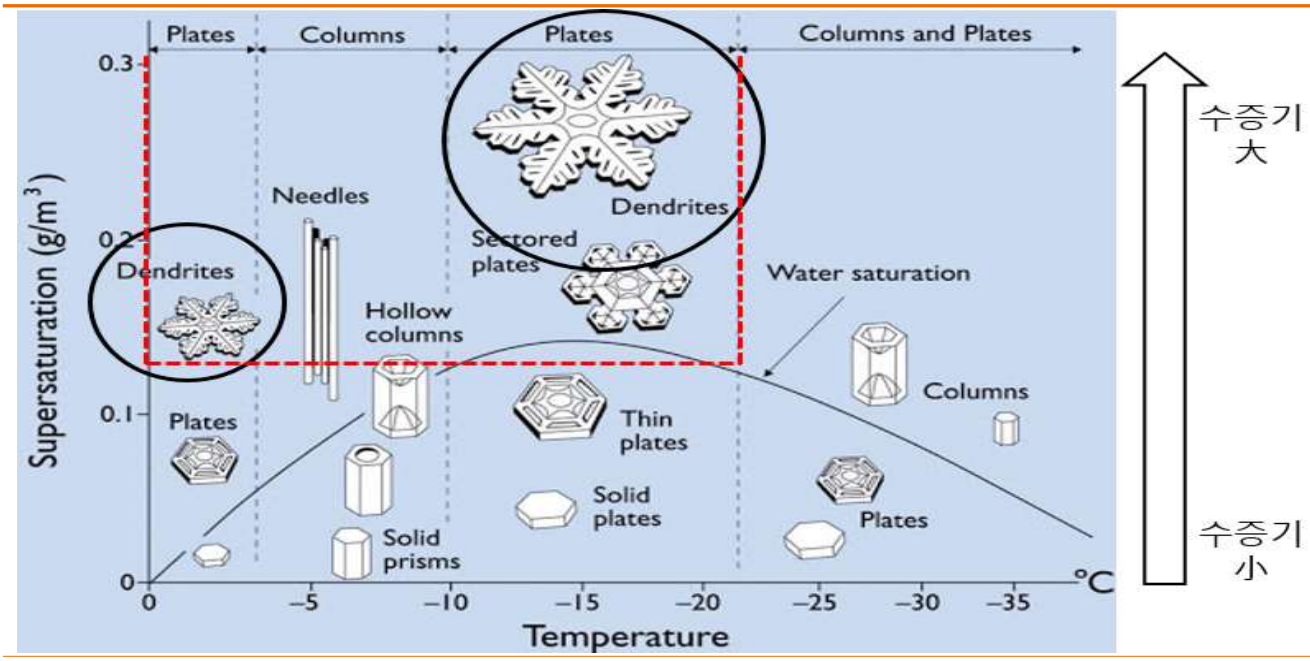
3. 주요 분석내용

- **적은 강수로 많은 적설이 나타나기 쉬운 대기 연직구조는?**

- 적은 강수로 많은 적설이 관측되면 수상당량비가 높은 고 수상당량비 현상이 발생한 것임

- 고 수상당량비가 나타나는 대기의 연직 구조를 이해하기 위하여 기온과 과포하수적량에 따라 결정되는 눈의 결정 발달 형성 그래프를 살펴보면,

- 눈 결정의 크기는 수증기량과 기온의 영향을 받아 결정됨. 수증기가 많을수록 눈 결정이 커지며, –20~–10℃ 기온 구간에서 눈의 결정이 Dendrites 형태를 이룰 때 가장 큰 눈 결정을 형성함. 반면, 기온이 –5~0℃의 Dendrites는 눈의 결정 크기가 작은 특징을 보임. 기온이 –20~–10℃에 위치하더라도 수증기량이 적으면 눈의 결정은 작은 Sectored Plates로 형성되므로, 눈 결정의 크기를 결정하는 데에 있어 수증기량도 중요한 역할을 함



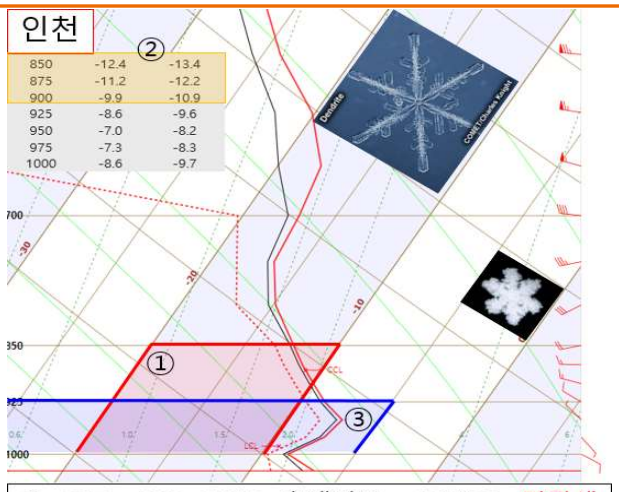
기온(x)~포화수증기(y)에 따른 눈 결정모양 형성 그래프

(※ 출처: Dr. Kenneth Libbrecht Cal Tech: snowcrystals.com)

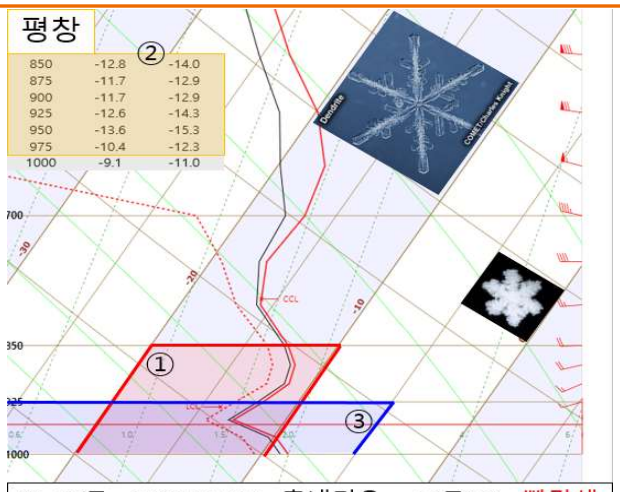
- 이를 바탕으로 고 수상당량비가 나타나기 위한 대기 연직구조 특성을 정리하면 다음과 같음. 첫 번째, **1000~850hPa 층 사이 기온이 –20~–10℃에 위치하며 –20~–10℃ 층은 포화(T-Td≤1.0℃)**되어야 함. 1000~850hPa 층 사이에서 –20~–10℃ 기온이 존재해야 큰 Dendrites를 형성할 수 있으며, 더불어 하층 수증기 포화도가 높아야 침착이 이뤄짐. 일부 층이 포화되지 않을 경우, 공기 중 과냉각수적이 적거나 없게 되어 눈 결정체가 침착하여 커지는 큰 Dendrites 형성엔 어려움이 있음

  두 번째, **1000~925hPa 최고기온이 –4℃보다 낮아야 함**. 1000~925hPa 최고기온이 –5℃ 내외보다 높으면 빙정보다 수증기가 더 많이 존재하게 되고, 상층에서 큰 Dendrites가 내려오면서 수증기가 눈 결정체에 부착(Accretion)되어 눈이 녹았을 때 강수량이 많아져 고 수상당량비가 나타나기 어려움. 그러나, -4℃ 이하일 경우 수적보다 빙정이 더 많아져 큰 Dendrites에 부착되는 수적이 적어지게 되고, 수증기가 부착(Accretion)되지 않아 눈이 녹았을 때 강수량은 줄어들어 30 이상의 고 수상당량비가 나타날 가능성이 큼

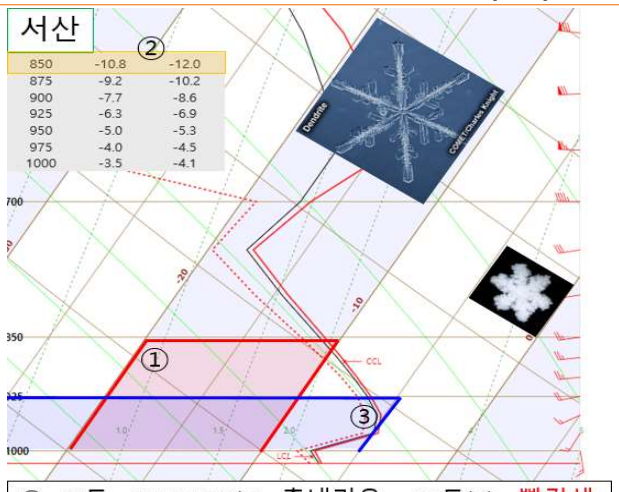
- 아래 그림은 수상당량비가 높은 순(수도권>강원영서>충남≈충북)으로 위의 조건을 기준으로 분석한 결과임. 4가지 조건을 모두 만족하는 지역은 인천뿐이었음



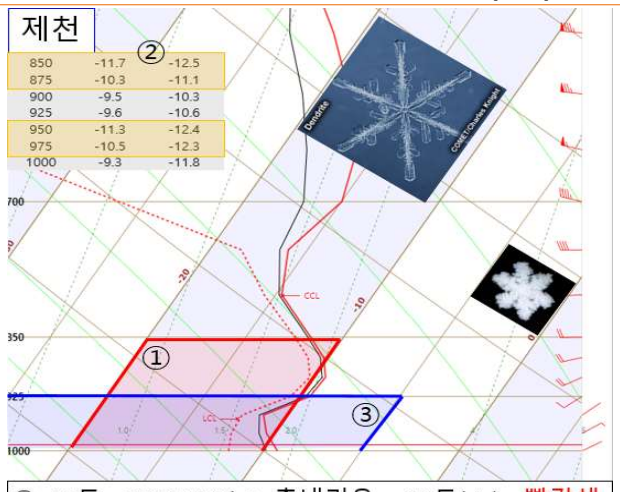
Peak Time 인천 예상 단열선도(UM)



Peak Time 평창 예상 단열선도(UM)



Peak Time 서산 예상 단열선도(UM)



Peak Time 제천 예상 단열선도(UM)

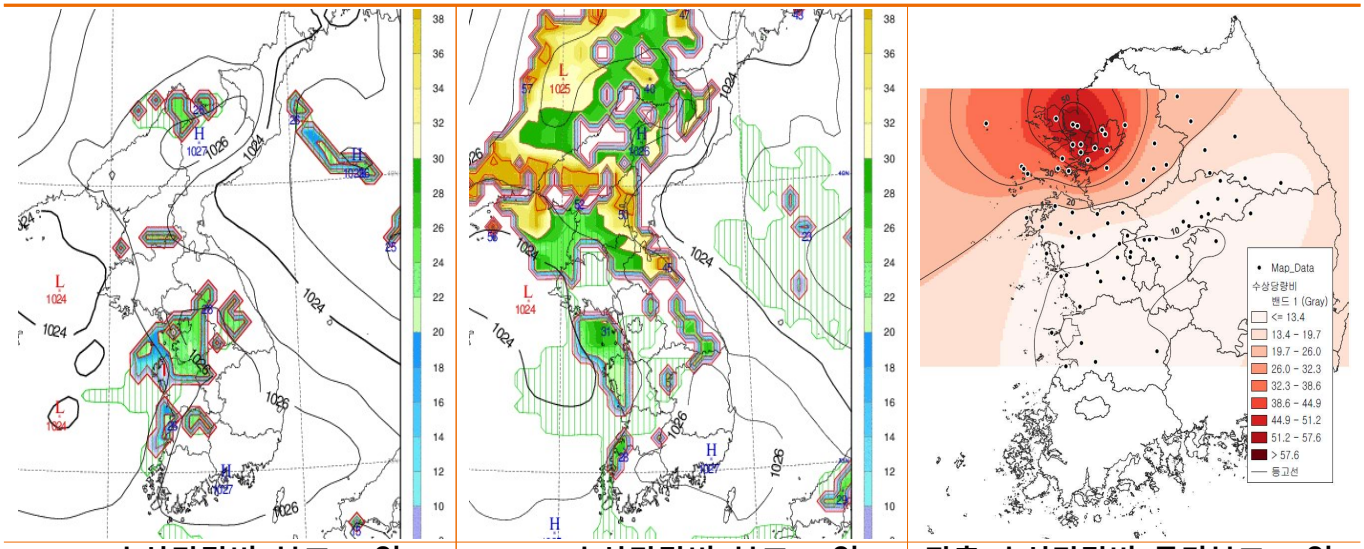
4. 그 때 이것을 놓치지 않았더라면…!

- **적은 강수에도 고 수상당량비로 대설 발생 가능성 염두**

- 적은 강수에도 대설이 유발되는 만큼 고 수상당량비가 나타날 수 있는 대기 연직구조를 염두 해야함. 아래 표와 그림은 26일 수치모델에서 수상당량비 모의 결과+실제 관측값, 수상당량비 가장 높았을 때 공간분포+실제 관측 수상당량비 공간분포임. 모델 수상당량비 최댓값은 30 내외로 극단적 고 수상당량비 예측에 한계를 지님

- 이번 사례와 같이 기온조건(**-20℃<1000~850hPa 층 기온<-10℃ & 1000~925hPa 최고기온<–4℃**)을 만족하면서 특정층이 포화(**-20℃~-10℃층 T-Td≤1.0℃)**될 경우 30 이상의 고 수상당량비가 나타날 것으로 예상할 수 있음. 적설 예상 지역의 단열선도를 분석할 때 3개 조건을 비교하면서 고 수상량비 발생 가능성 진단

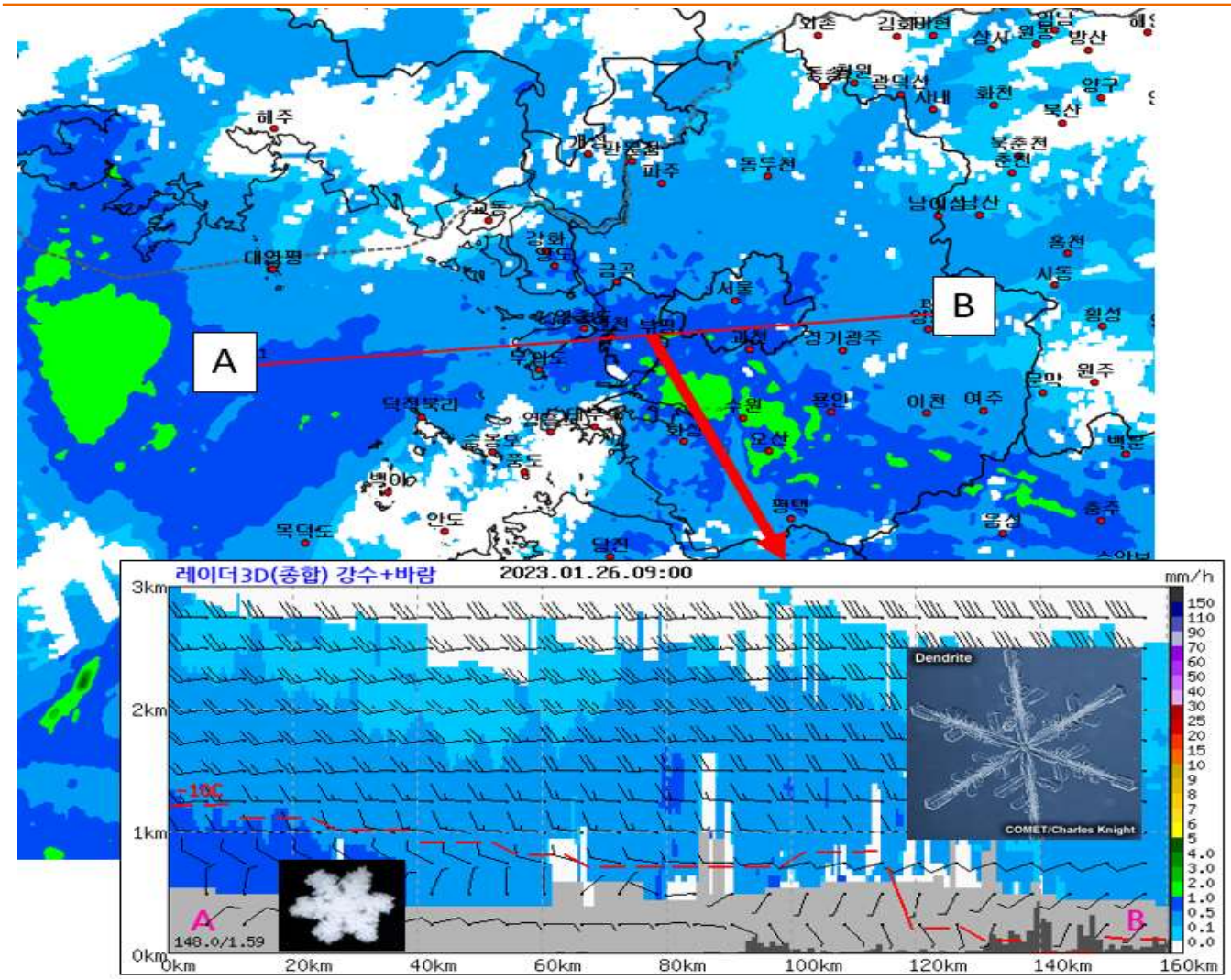
	UM		ECM	
	일강수(mm)	일 신적설(cm)	일강수(mm)	일 신적설(cm)
수도권	0~2	0~5	0~2	0~2
강원영서	0~2	0~3	0~2	0~4
충남	1~8	1~10	1~4	1~6
충북	0~2	1~3	1~2	1~5
수상당량비 최댓값	26내외		32내외	
	관측			
	일강수(mm)	일 신적설(cm)	수상당량비 평균	수상당량비 최댓값
수도권	0.3~1.6	0.5~8.4	46.1	118
강원영서	0.1~0.8	0.7~7.1	14.7	30
충남	0.5~6	0.7~10	6.3	24
충북	0.5~1.7	1.5~6.9	6.2	12



UM 수상당량비 분포(26일)	ECM 수상당량비 분포(26일)	관측 수상당량비 공간분포(26일)

- 아래 그림과 같이 실황 감시 시 **레이더 에코 탐지 + 지상~1.5km기온이 –20℃~–10℃**를 만족하면서 **지상 부근기온이 –4℃ 이하**일 경우 기온과 포화조 조건을 충족할 가능성이 크므로 고 수상당량비 가능

⇨ 수치모델에서 예상하는 수상당량비는 과소모의 경향이 있으므로 단열선도 분석과 레이더 등을 통한 실황감시 중요



1월 26일 09시 수도권 레이더 영상, 연직 단면도

8-10. 2025년 3월 18일 사례

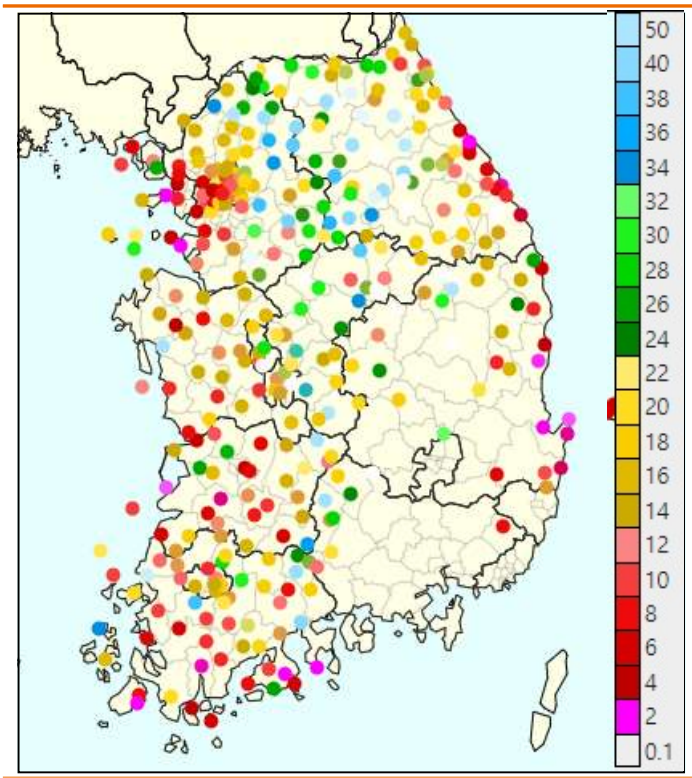
봄철 밤사이 통과하는 극저기압
왜 천둥·번개가 약했나

1. 예보와 실황은?

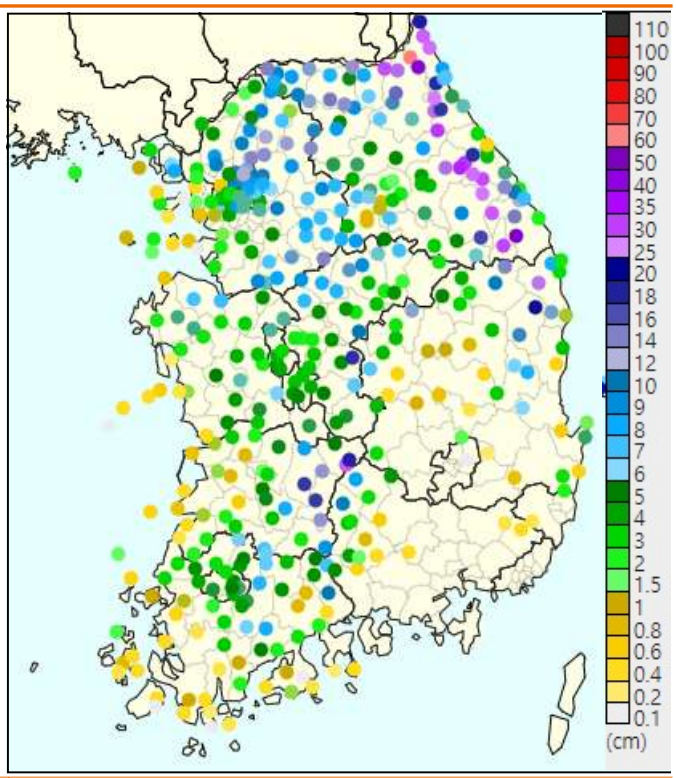
예보(3월 17일 17시 발표)	실황(3월 18일)
▶ 예상 적설 - 수도권: 5~10(경기북서부·동부 15cm↑) - 강원도: 최대 40cm↑ 등	▶ 최심신적설 - 서울 8.9cm, 도봉 11.6cm, 가평조정 12.9cm 등 - 향로봉 60.6cm, 도계 47.4cm, 진부령 42.9cm 등

실황 전개 상황

▶ 500hPa 상공에서 –40℃ 이하의 절리된 찬 공기가 남하로 유도된 극저기압이 서해상을 거쳐 내륙 통과
▶ 극저압의 스파이럴 밴드가 통과 시 시간당 5cm 내외의 강한 적설이 내렸으나, 천둥·번개·우박 없었음



3월 18일 수상당량비



3월 18일 최심신적설

2. 쟁점사항은?

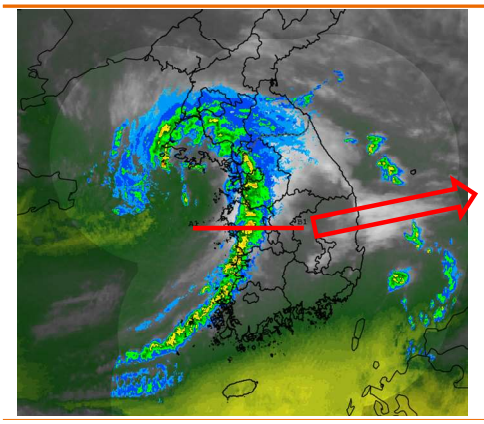
- **쟁점1) 강한 강수는 어디서 나타나는가?**
- **쟁점2) 유사사례와 달리 천둥·번개가 치지 않은 이유는 무엇인가?**

3. 주요 분석내용

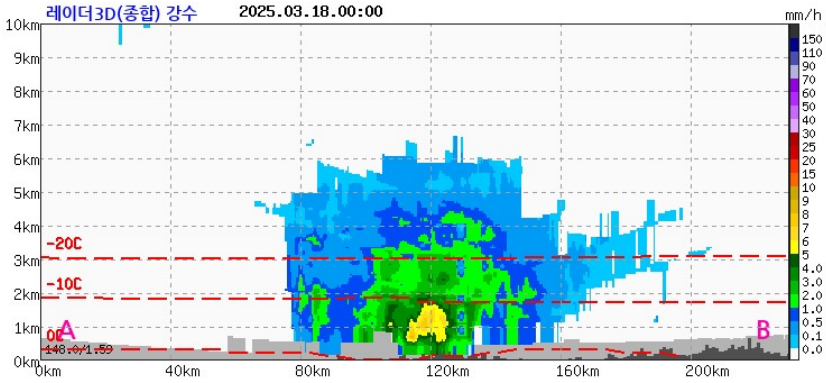
- **쟁점1) 강한 강수는 어디서 나타나는가?**

- 이번 사례에서는 북쪽 고위도의 차갑고 건조한 공기가 빠르게 절리되면서 강한 회전과 함께 대류권계면 접힘 현상이 동반되며 지상 부근까지 강한 저기압성 회전을 유도하여 극저기압을 형성하였다. 아래 그림처럼 하층의 저기압성 기류가 해상을 지나며 수증기를 공급받아 저기압성 수렴이 일어나는 곳에서는 열적 불안정과 역학적 불안정이 동반되며 5km 이상 구름이 강하게 발달하였다.

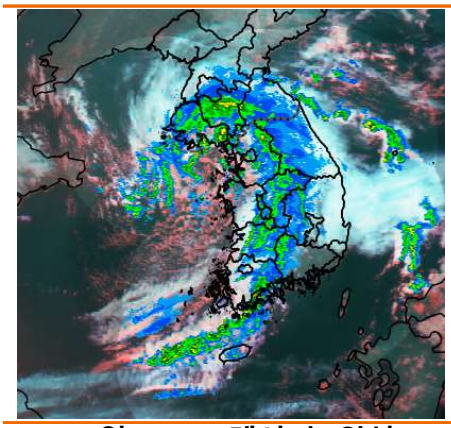
- 이른 새벽까지 극저기압에 의한 강한 강수대가 유지되었으나, 상층이 빠르게 흘러가면서 지상 저기압과의 연계가 약화되었고, 건조역이 더 동쪽으로 파고들어 동해안에 부저기압이 생기면서 18일 06시 이후에는 메인 저기압이 약화되기 시작했다. 오후에는 부저기압에 의해 동풍이 불면서 강원영동을 비롯한 동해안에 적설이 밤까지 이어졌다.



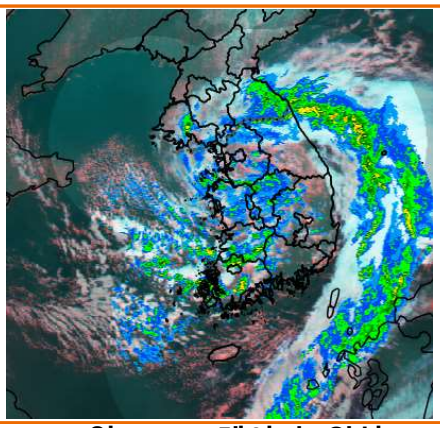
18일 00시 레이더+중층 수증기



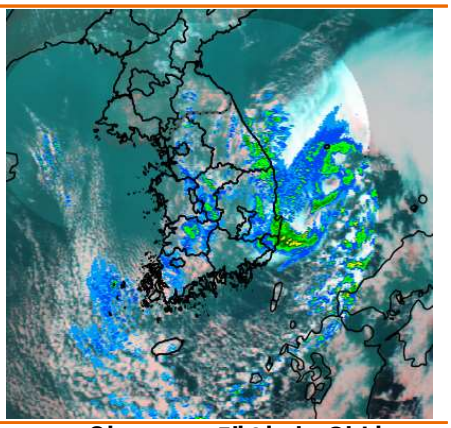
레이더 연직단면도



18일 02:30 레이더+위성



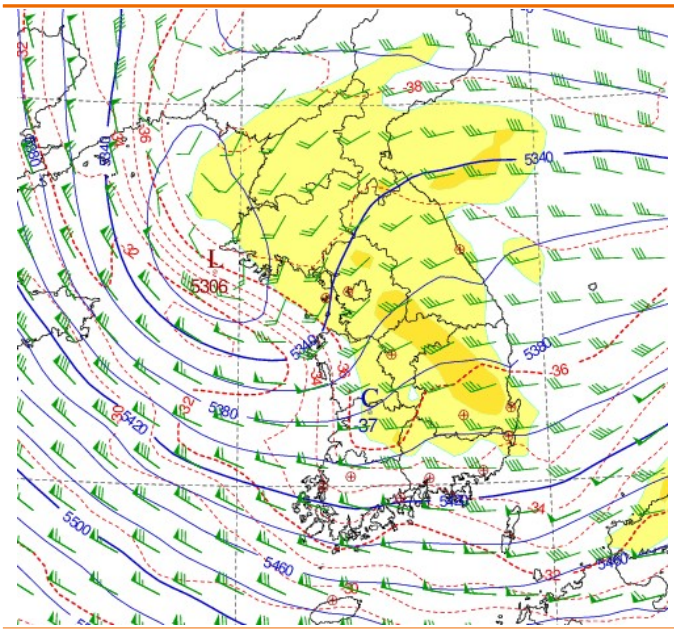
18일 09:30 레이더+위성



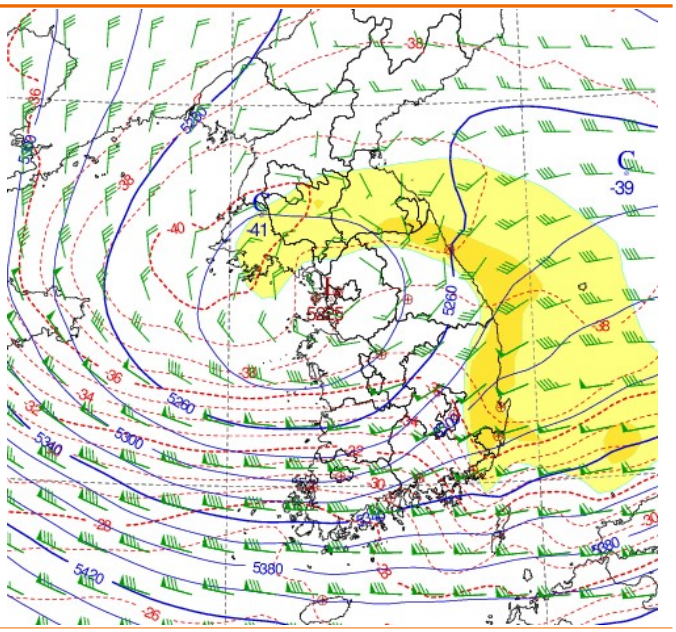
18일 18:30 레이더+위성

- **쟁점2) 유사사례와 달리 천둥·번개가 치지 않은 이유는 무엇인가?**

- 당시 분석했던 유사사례 2019년 3월 15일에서 절리저기압에 동반된 500hPa 한기핵 기온이 –37℃ 내외였고, 저기압이 통과하면서 내륙에도 **천둥·번개를 동반한 강한 돌풍이 발생**하였다.

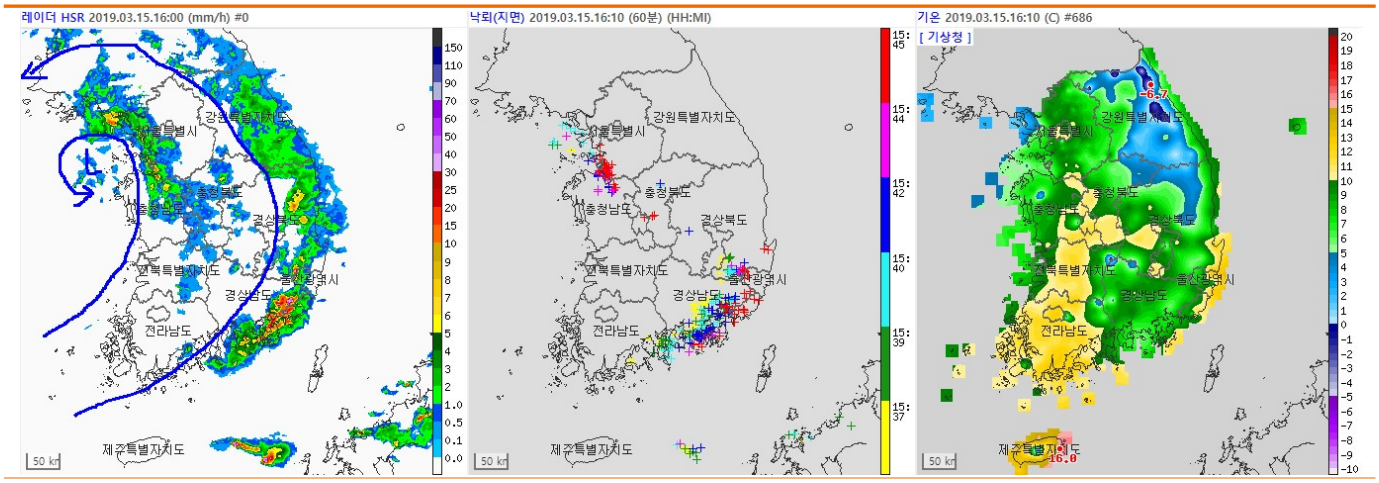


2019년 3월 15일 15시 500hPa 바람, 기온

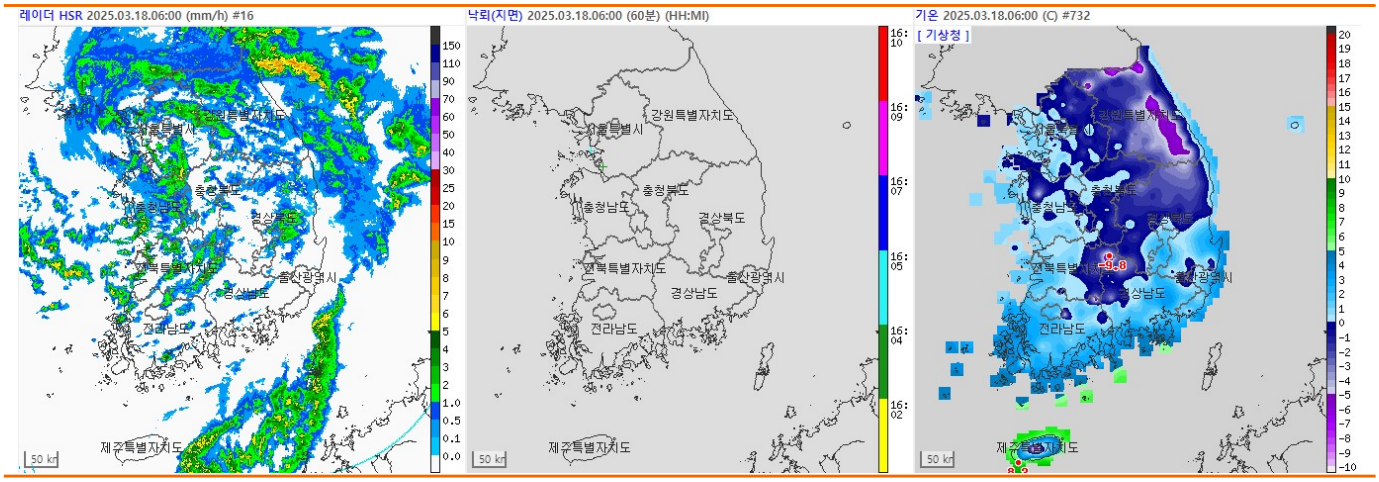


2025년 3월 18일 6시 500hPa 바람, 기온

- 과거 사례의 경우 시스템이 낮에 통과하면서 낮기온이 10℃ 이상 오르면서 열적인 불안정이 매우 컸으며 건조공기가 지상 부근까지 내려올 때는 돌풍도 강하게 불었다.



2019년 3월 15일 16:00 레이더/낙뢰/기온



2025년 3월 18일 06:00 레이더/낙뢰/기온

- **하지만** 이번 사례의 경우 시스템이 새벽에서 오전 사이에 통과하였고 지상 기온이 5℃

내외로 낮게 형성되면서 열적인 불안정이 과거 유사사례보다 크지 않았고, 천둥·번개가 해상에서는 잠깐 나타났으나 내륙으로 들어오면서 강한 상승류를 만들지 못하면서 내륙에는 천둥·번개가 발생하지 않았다.

4. 무엇을 더 고려했어야 했나?

- 3월에는 북쪽에서 찬 공기를 동반한 상층 절리저기압이 해상을 지나면 극저기압을 유도하며 위험기상을 유발할 수 있으나, 내륙은 낮과 밤의 기온차가 커서 주요 시스템 통과 시점을 고려해야 하며, 같은 시스템이라도 낮에는 열적 불안정이 커져 위험기상 강도를 조절해 전달해야 한다.

Why? How! 겨울예보 사례분석

발 행 일	2025년 6월
집 필	한상은, 공상민, 박중환, 우재훈, 김영준, 구진모, 고병승, 김연직, 강혜미, 이상진
편 집	남민지
감 수	임윤진
발행부서	예보국 재해기상대응팀