

영동 대설

2014년 2월 7~10일



기상청
Korea
Meteorological
Administration

목차

CONTENTS

1. 사례 개요

2. 실황분석

- 2.1. 일기도 분석 /08
- 2.2. 위성 분석 /33
- 2.3. 레이더 분석 /45

3. 예측자료 분석

- 3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석 /57
- 3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석 /65

4. 사례 발생 원인

- 4.1. 대설 기간의 한반도 기압 패턴과 바람분포 특징 /71
- 4.2. 2014년 2월 7~10일 대설 발생의 원인 /75
- 4.3. 대설 발생 조건 지속의 원인 /84

5. 사전 예측을 위한 검토 자료

- 5.1. 영동지역 대설 예측 매개변수 분석 /89
- 5.2. 위성 /97
- 5.3. 레이더 /98
- 5.4. 수치모델 /104
- 5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성 /106
- 5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항 /107

참고문헌 /108

1

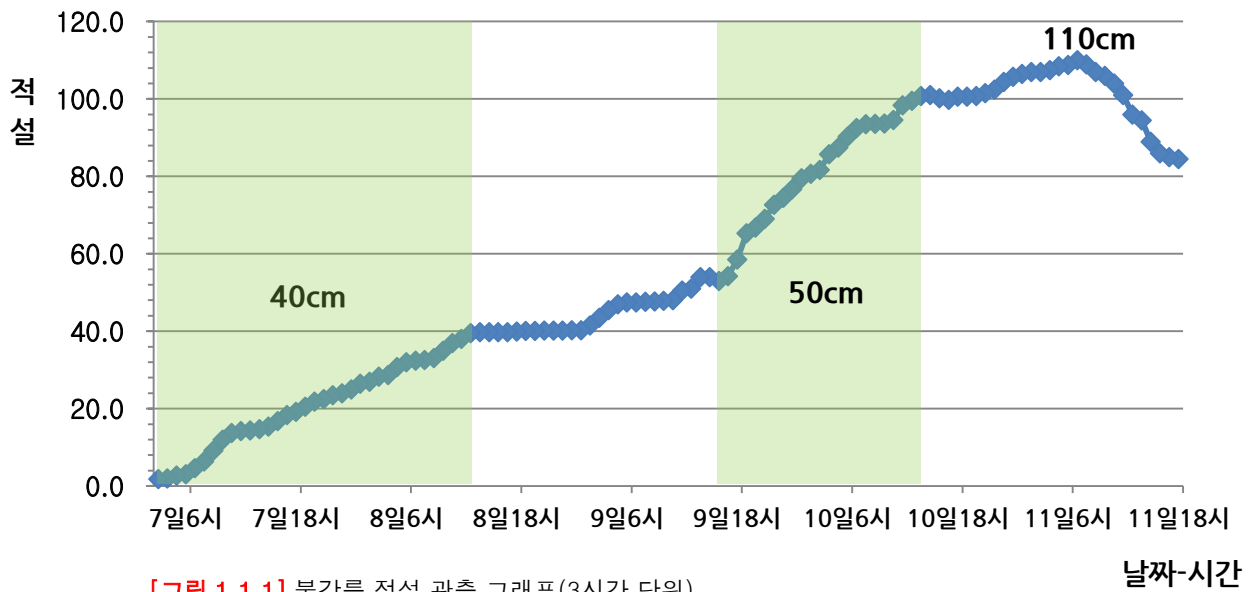
사례개요

2014년 2월 7~11일 영동 대설은 북고 남저형의 기상일기도 패턴에서 그림 1.1.1과 같이 2번의 대설 집중시간대가 있었다.

특히, 북강릉은 9일 오후부터 10일 오전사이에 50cm의 적설을 기록하였다.

북강릉의 최심적설은 11일 110cm를 기록하였다.

북강릉 적설(snow depth) 2월 7~11일



[그림 1.1.1] 북강릉 적설 관측 그래프(3시간 단위)

강원도 영동은 2월 6일부터 눈이 내렸으나, 경상남북도 동해안은 비로 내리다가 눈으로 변하여 수상당량비 계산을 제외하였다.

강릉의 최심적설은 110cm 로 1990년 이후 가장 많은 적설이며, 1911년 10월 1일 관측개시 이래 3번째로 많은 적설 기록이다(138.1cm(1990.1.29~2.1), 130.2cm(1923.1.22~27)).

강릉과 속초의 경우 수상당량비가 10 미만으로 습설, 대관령은 혼합 형태로 내려 눈의 하중이 큰 것으로 분석 된다.

[표 1.1.1] 주요 지점 및 CCTV 적설 관측자료

기상관서 (2.6~11)				CCTV 관측(cm)	
	적설(cm)	강수량(mm)	수상당량비		
북강릉	110.0	139.8	7.87	향로봉	163.0
속초	83.5	111.6	7.48	진부령	122.0
대관령	74.0	68.7	10.77	강릉	117.5
경주시(공)	34.8	-	-	간성(고성)	101.5
울진	25.6	46.8	-	왕산(강릉)	100.5
울산	16.0	55.9	-	삼척	90.0
포항	11.8	58.6	-	동해	86.0
				주문진	79.0
				서면(울진산간)	59.5
				수비(영양산간)	46.0
				온양C(울산울주)	29.0
				석포(봉화산간)	20.5

2

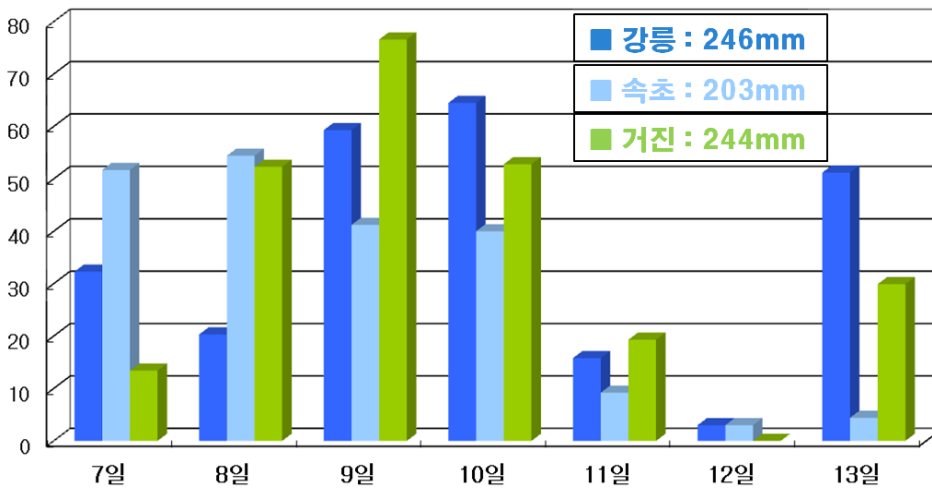
실황분석

2.1. 일기도 분석

2.1.1. 분석일기도 및 관측자료 분석

1) 최장기 영동지방 대설 사례 특성

2014년 2월 6일부터 14일까지 9일 연속으로 영동지방에 강설이 지속되는 동시에 영하의 날씨가 유지되어 내리는 강설이 그대로 적설로 쌓이면서 제설작업의 한계를 넘어서는 사상 초유의 103년 만의 최장기, 최대 강설이 발생하여 100억 원 이상의 재산피해와 산간지역 주민 고립, 교통 두절 등 영동지방 전체의 기능이 마비되는 수준의 피해를 가져왔다.



[그림 2.1.1] 2014년 2월 7일~13일 영동지방 지점별 일 강설량 분포

그림 2.1.1은 영동지방 대설 기간 동안 주요 지점들의 일 강설량을 도표로 보인 것이다. 강릉 지역을 중심으로 9일 동안 누적 강설량이 약 1.9m(총 누적강수량은 2.5m였으며, 일별 최심 신적설 기준으로는 1.9m에 해당함)에 달했고, 가장 많은 일 강설량은 거진 지역에서 일 75cm를 기록하였다.

영동지방 대설은 기본적으로 북고남저형의 기압배치에 따라 지상부근에 동풍기류가 형성되고, 이 동풍기류가 동해상을 건너면서 포화되어 눈구름을 형성하며, 이 구름들이 영동지방까지 진출한 후에 태백산맥과 동풍기류가 충돌하여 지속적인 강설을 유도하는 패턴을 가지게 된다. 그리고 일반적으로 이러한 기압패턴은 24시간 혹은 길어야 72시간을 넘지 않는 것이 특징이고, 영동지방의 2월 기온이 낮 동안에는 영상을 기록하는 경우가 대부분이기 때문에 하루 최대 1m 이상의 폭설이 내리더라도 도시 기능이 마비될 정도의 피해를 발생시키는 경우는 매우 드물게 발생한다. 그런데 이번 최장기 영동지방 대설사례의 경우에는 강설량 분포도에서 알 수 있듯이, 12일 일시적인 소강상태를 제외하고는 거의 매일 30cm에서 50cm의 대설이 지속되는 특이한 양상을 보였다.

2월 6일 밤부터 동풍기류를 따라 동해상에서 만들어진 눈구름이 영동지방에 유입되면서 눈이 내리기 시작했는데 이때의 강설 강도는 평이한 수준이라고 할 수 있었다.

6일 시작된 동풍기류에 의한 국지적인 강설이 7일 일시 약화되기 전에 일본 남쪽을 지나는 지상 기압골과 상층의 한기를 동반한 상층기압골이 한반도를 통과하면서 한기와 동풍기류를 더욱 강화시켜 8일에서 10일까지는 중관규모 강제력과 영동지방의 국지적인 지형 특성이 결합되어 한파와 함께 가장 많은 눈이 내리는 시기를 보내게 된다,

일본 남쪽의 기압골이 점차 물러나면서 11일과 12일 동풍이 약화되어 강설은 잠시 소강상태에 접어드는 것처럼 보였지만 다시 12일 야간부터 남쪽 기압골이 활성을 띄면서 13일과 14일까지 눈이 내린 후에 대설 현상은 종료되었다. 사실상 2월 영동지방에서 발생하는 대설 현상에 대한 메커니즘은 비교적 잘 알려져 있고, 또한 최근 수치예보 모델 성능이 좋아지면서 영동지방 대설 현상은 사전에 충분히 예측되고 대설 가능성에 대한 기상정보를 미리 제공하는 수준에 까지 도달되어 있는 수준이다. 실제로 기상청 통보문을 보더라도 7일부터 14일 까지 매일 영동지방에 많게는 하루 60cm, 적게는 하루 15cm의 강설 가능성을 예보하고 눈 피해가 없도록 대비하도록 적절한 예보와 정보를 제공하였음을 확인할 수 있다.

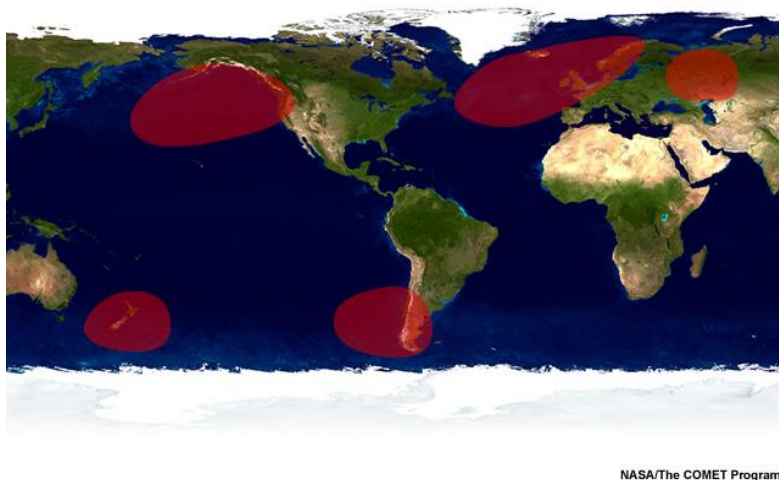
예보관의 관점에서는 영동지방 대설 메커니즘 즉 북고남저형 기압배치에 의해 형성된 동풍기류가 유입되어 태백산맥에 부딪치면서 강하게 눈구름이 발달하는 패턴이 어떻게 일주일 이상 지속될 수 있었는지, 그리고 그 시작과 종료를 결정할 중관규모 매개변수는 무엇인지, 적절하게 강설량을 결정하기 위해서 확인하고 활용해야 할 중관규모 및 중규모 예측변수들이 어떤 것들이 있는지 명확하게 이해하여야 한다. 아울러 다른 대설 사례들에 이들 분석 및 예측 변수들을 적용하여 현업에 활용할 가치기가 있는지에 대한 지속적인 검증작업을 거쳐야 할 것이다.

1) 최장기 영동지방 대설 사례 종관 환경

2014년 2월 영동지방 대설 사례는 기상 관측이 시작된 이래 최장기인 9일 연속으로 영동지방에 강설이 지속되었다는 것이 가장 큰 특징이라고 할 수 있다. 일반적으로 국지적인 강설현상은 종관규모 강제력이 동반되지 않으면 지속 시간이 최대 72시간을 넘지 못하는 것이 대부분이므로 어떤 종관적인 환경이 작용하여 지속적인 강설을 유도하였는지 판단하는 것이 중요한데, 결국은 비슷한 강설이 시작되어 종료되는 시점까지 비슷한 종관 환경이 유지되었다는 것이고 그것은 대기 상층의 흐름에 큰 변화가 없었다는 것을 의미한다.

대기의 대규모 기압장 패턴이 거의 정체되어 저기압의 이동을 저지하거나 방향을 변화시키는 현상을 저지 혹은 블로킹(Blocking) 현상이라고 부르고 이러한 작용을 하는 고기압을 블로킹 고기압(Blocking Highs or Blocking Anticyclones)이라고 한다. 블로킹 현상은 한번 발생하면 영향을 받는 지역에서는 수일에서 길게는 수 주 동안 거의 동일한 기상 현상이 반복된다. 블로킹 현상은 대류권 상층의 바람 패턴이 비정상적으로 흐르는 것으로도 볼 수 있는데, 동서 흐름이 약화되고 남북 흐름이 강화되면서 기압계 중심이나 중심의 서쪽에 강한 남북 변형 장을 형성하여 전체적인 종관 운동을 준-정체, 정체 혹은 후진시키기도 하는 특징을 가진다. 그런데 계절적으로 블로킹 현상을 발달시키는 특정한 종관 규모 강제력이 무엇인지는 아직까지 명확하게 밝혀지고 있지 않다. 다만 기후학적으로 블로킹 현상이 자주 발생하는 지역은 북반구에서는 유럽 대서양, 우랄 산맥 근처, 중앙 태평양, 북미 대륙 서부 해안으로 알려져 있고, 남반구에서는 남미 대륙 서부 해안, 뉴질랜드 인근 등으로 알려져 있다 (그림 2.1.2 참조).

Climatological Locations of Blocks



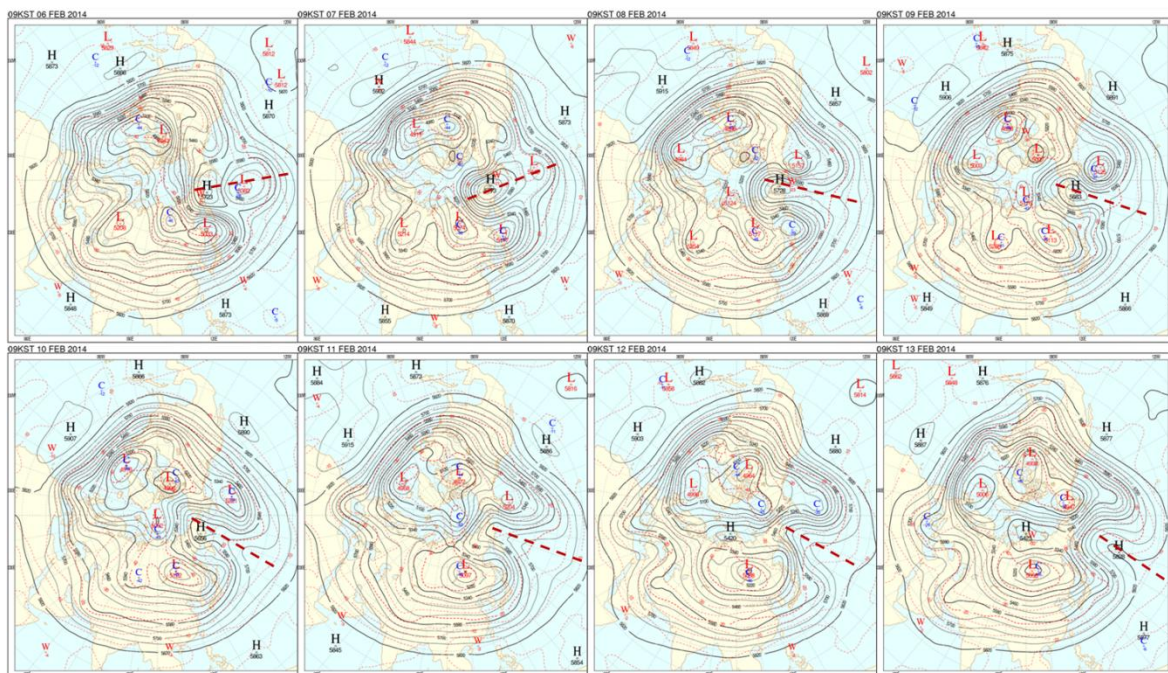
[그림 2.1.2] 기후학적 블로킹 현상 다발 지역(붉은 색칠 지역)

이번 대설 사례에서의 블로킹 현상은 북미 서부 해안에서 베링해 부근으로 형성된 블로킹 고기압에 의한 것이었다. 예보관들은 블로킹 현상의 발생 여부를 명확하게 인지하고 있어야 한다. 왜냐 하면 블로킹 현상이 발생하면 일정한 기간 동안 비슷한 기상 현상이 유지될 것이라는 것을 예단할 수 있기 때문에 기상 현상에 예보 초점을 맞출 것인지 결정하는데 중요한 정보를 제공하기 때문이다.

블로킹의 종류는 블로킹 고기압, 절리 저기압, Rex형 블로킹, Omega형 블로킹으로 분류할 수 있다 (기상청 중급대기분석및예보 교재 5장 비전선성기압계(2012) 참조). 블로킹 현상을 정확하게 인지하고 있으면 수치 모델 결과 자료의 유효성을 판단하는데 유리하다. 보통 중규모 모델의 경우에는 블로킹 현상과 같은 기상 현상들에 대해서 명확한 예측 알고리즘을 가지고 있지 못하기 때문에 블로킹 현상의 형성 과정을 너무 느리게 모의하는 반면 블로킹 현상의 해소는 너무 빠르게 모의하는 경향을 가지고 있어서 상층 대기 흐름에 대해서 부정확한 정보를 제공할 수 있다는 사실을 예보관들은 인식하고 있어야 한다.

블로킹 현상의 존재 여부를 직관적으로 판단하는데 좋은 정보를 제공하는 것이 전구 수증기 위성 영상과 500hPa 북반구 일기도이다. 수증기 영상은 약 700hPa에서 400hPa 사이의 상층 대기 패턴을 수증기 추적을 통해서 보여주기 때문에 분리된 고도 별로 분석되어지는 단일 상층 일기도에서 찾기 힘든 블로킹 현상의 존재 여부를 판단하는데 좋은 정보를 제공한다. 수증기 영상과 500hPa 북반구 일기도를 연속적으로 관찰하면 상층의 종관적인 대기의 흐름을 파악할 수 있고, 상층의 와도 중심, 변형 지역, 제트 중심축의 위치를 판별하는데도 유리하기 때문에 직관적으로 블로킹 현상의 발생 여부를 판단할 수 있다.

그림 2.1.3은 영동지방 대설이 시작된 2월 6일부터 대설이 점차 종료되는 시점인 2월 13일 까지의 500hPa 북반구 일기도이다.



[그림 2.1.3] 2014년 2월 6일~13일 500hPa 북반구 일기도

2월 6일 한반도를 포함한 동북아시아 지역은 약한 기압능에 속해 있는 가운데 알래스카와 북미대륙 서해안 부근에서 상층 절리형 블로킹 고기압과 절리 저기압이 남북으로 형성되어 있다. 상층 절리형 저지 고기압은 동서 방향으로 이동하는 상층 기류가 느린 속도로 북쪽으로 전향되면서 형성되는 기압능 속에서 만들어지게 되고, 그 남쪽으로 기압골이 깊어지면서 절리 저기압이 형성 된다. 절리 고저기압이 형성되면 남북 변형 구역을 강화시켜 동서 기류의 흐름이 남북으로 바뀌면서 정체기 시작되어 북쪽에는 난기가 남쪽에는 한기가 강화되는 역할을 수행해서 강한 상층 블로킹 현상 발생의 전조가 될 수 있으므로 수증기 영상과 북반구 일기도를 통해서 그 발달 경향을 주시하여야 한다.

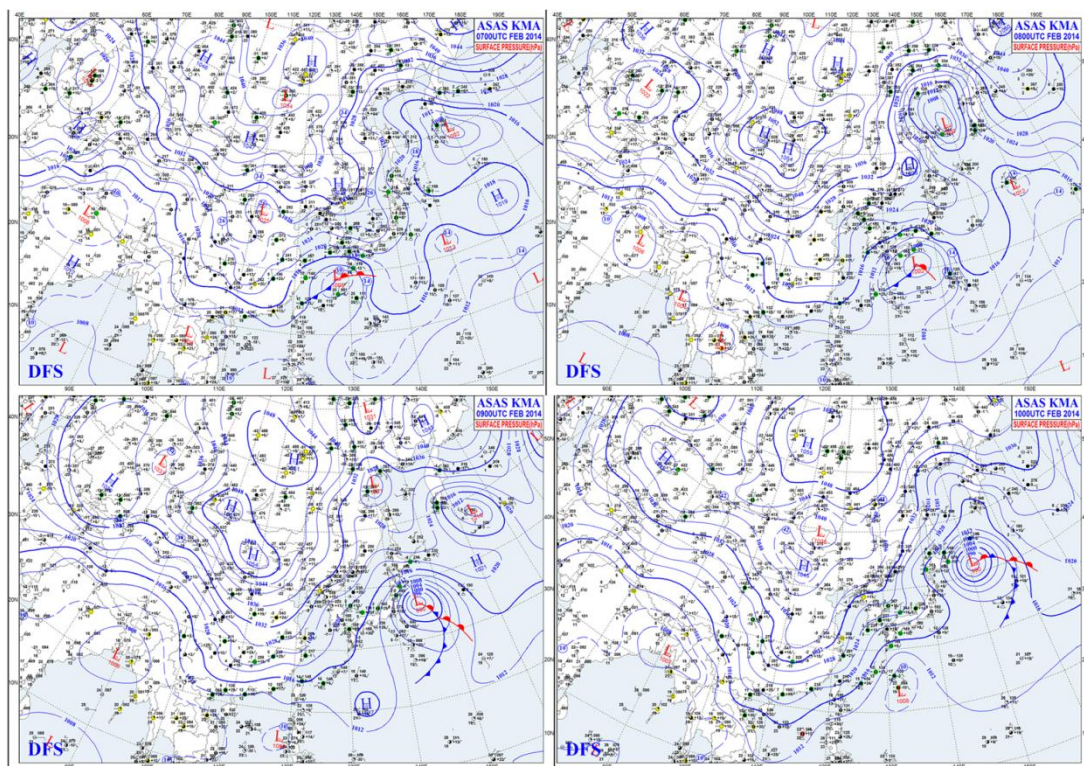
7일까지 비슷한 형태의 절리 고저기압이 유지된 이후 8일부터 10일까지 절리 고저기압이 존재하던 지역으로 Omega형의 전형적인 블로킹 현상이 발생한다. Omega형 블로킹은 1개의 북쪽 중앙에 위치한 저지 고기압을 중심으로 남쪽 서쪽과 동쪽에 절리 저기압이 형성되어 그리스 문자 (Ω)를 닮은 등고도선 패턴을 보이며 기류의 동서 흐름 보다는 남북 흐름이 더욱 강화되어 있는 것이 특징이다.

Omega형 블로킹이 상층에 형성되면 대기의 동서 흐름이 본격적으로 제한되기 때문에 영향을 받는 지역에서는 지속적인 강수 현상과 구름이, 저지 고기압 지역에서는 맑고 건조한 날씨가 지속되는 특성을 가진다. 8일부터 블로킹이 Omega형으로 강화되면서 시베리아 내륙에 중심을 둔 한랭 건조한 기단이 동쪽이 아니라 남쪽으로 확장하면서 한반도를 포함한 동북아시아 지역에는 단과골 형태의 상층 기압골이 한기와 함께 24시간 정도의 주기로 자주 통과하는 형태를 가진다.

9일과 10일에는 그 축이 더 깊어져 상대적으로 깊고 강한 500hPa 단파골이 한반도 동해안으로 확장하도록 만들어 주고 있다. 일반적으로 한랭핵을 동반하는 상층 단파골은 한랭침강을 동반하기 때문에 거의 포화된 하층 대기의 조건부대칭불안정과 대류불안정이 Capping Inversion 구역 내에 갇혀서 강한 대류활동이 유지되도록 만들어 강한 강설 현상이 지속되는데 필요한 에너지를 공급하게 된다. 이 상층 기압골은 중심이 한반도까지 확장하지는 못해서 강한 경압불안정에 의한 대규모 저기압계를 대기 하층에 형성시키는데 큰 역할을 하지 못했지만, 한랭 건조한 공기를 지속적으로 한반도 동쪽 동해상으로 이류시켜 대기 하층과 대기 중층의 온도차를 증가시켜 대류불안정을 강화시키는 역할을 한 것으로 판단할 수 있다.

11일 부터는 Omega형 블로킹을 형성했던 절리 저기압과 고기압이 약화되어 중심은 사라졌지만 상층 기압골과 기압능이 여전히 공기의 흐름을 동서 흐름보다 남북 흐름으로 바꾸어 놓고 있어 시베리아에 중심을 둔 상층 기압골의 흐름을 방해해서 비슷한 기압배치가 한반도 주변에서 만들어지도록 유도하였다. 13일 이후 블로킹이 서서히 약화되면서 한반도 상공에 정체되어 있던 한랭 건조한 공기들이 동쪽으로 이동하면서 영동지방 대설도 점차 약화되는 단계에 도달하게 된다.

그림 2.1.4는 대설이 지속된 시기 중에서 가장 강한 대설현상이 나타났던 2월 7일에서 10일까지의 지상일기도를 보인 것이다.



[그림 2.1.4] 2014년 2월 7일~10일 지상 일기도

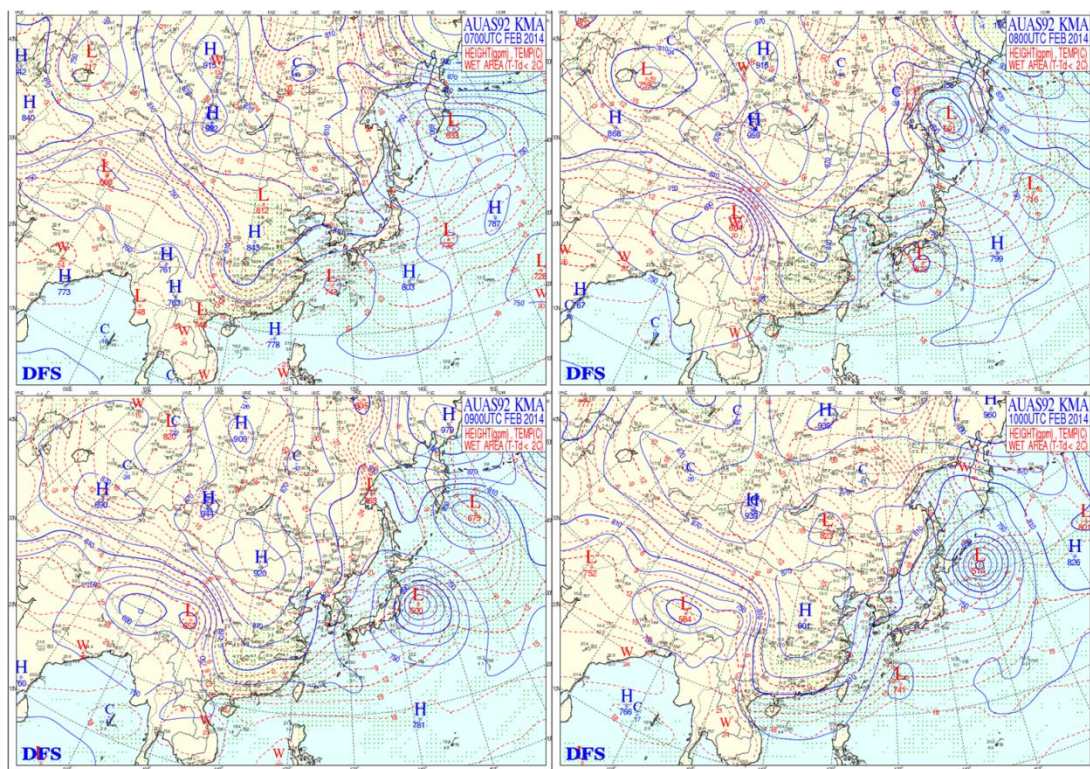
7일 일기도에서 먼저 눈에 띄는 것은 일본 남쪽에서 발달하면서 동진하고 있는 저기압의 존재이다. 이 저기압이 발달하면서 기압골이 한반도와 중국 내륙까지 형성되기 시작하고, 이 기압골의 동쪽으로 한랭 건조한 시베리아고기압이 강하게 확장하면서 연해주 부근에 고기압 중심을 가지고 위치하게 된다. 이렇게 북쪽에 시베리아고기압이 위치하고, 일본 남쪽에 저기압이 위치하는 북고남저형의 지상기압 배치는 한반도에 전체적인 동풍기류를 형성하여 동풍에 의한 동해안 지역 강설 형성에 큰 역할을 한다. 7일까지 한반도는 구름은 많은 상태이지만 울릉도와 남해안 지역으로는 비가 내리고 있었다. 아직까지 상층의 한기가 침강하지 않아서 구름은 형성되었지만 비로 내리는 양상을 보이고 있지만 상층의 한기가 강화되면서 비는 눈으로 바뀌게 되고, 눈구름은 동풍기류를 타고 동진하여 7일 야간부터 동해안 지역에 눈이 강화된다.

8일 일기도에서 일본 남쪽의 기압골이 더 이상 동진하지 못하고 일본 남해안 부근에서 정체하면서 발달하는 가운데 7일 동쪽으로만 확장했던 시베리아고기압의 세력이 중국과 한반도 동쪽으로 확장하면서 한반도 지역은 전체적으로 기압골이 강화되는 형태를 보이고 있다. 8일에는 동해안 지역의 강설이 더욱 강화되기 시작할 뿐만 아니라 전국적으로 구름이 많은 가운데 강설현상이 나타났다. 강한 시베리아고기압이 한반도 동서로 확장하면서 한반도 상공에는 강한 한기가 침강하여 지상 기온이 영하로 떨어지기 시작한다.

9일에는 남쪽 기압골이 정체되면서 발달하여 폐색되는 단계에 까지 도달한다. 몽골에 중심을 둔 강한 시베리아고기압 세력이 한반도를 지배하면서 한반도 상의 기압골은 사라지고 한반도 대부분 지방은 맑은 날씨를 보인다. 반면, 시베리아고기압 세력과 남쪽의 기압골 세력이 서로 충돌하면서 동해상으로 강한 기압경도력이 형성되어 동풍이 더욱 강화되는 패턴을 보인다. 이미 상층에서부터 침강한 한기에 의해서 대기와 해양의 온도차가 증가함에 따라 대류불안정이 강화되어 많은 눈구름이 형성되고 이 구름들이 강화된 동풍기류를 타고 동해안에 도달한 후 태백산맥에 의한 강제상승이 더해져서 더욱 강한 눈이 영동지방에 내릴 수 있는 조건을 제공하였다.

10일에도 여전히 시베리아고기압이 한반도를 지배하는 가운데 일본 남쪽에서 새로운 기압골이 형성되어 한반도 전체에 동풍이 강화되었으며 강설 구역이 영동지방에서 영남 동해안 지방까지 확대되는 경향을 보였다. 500hPa 북반구 일기도와 지상일기도 분석 결과를 보면, 블로킹에 의해서 대기의 동서 흐름이 차단된 가운데 강한 시베리아고기압이 확장하면서 강한 한기를 한반도로 유입시켰으며, 이 시베리아고기압 세력과 남쪽에서 동진이 저지되면서 발달한 저기압 세력이 서로 충돌하면서 동해상으로 강한 동풍기류와 대류불안정이 지속되는 대설 발생에 적합한 메커니즘이 7일 가량 지속되도록 만들었다는 사실을 발견할 수 있다.

그림 2.1.5는 2월 7일에서 10일까지의 925hPa 분석일기도를 보인 것이다. 예보관들이 교육을 받고 훈련을 받는 동안 일상적으로 접하고 예보를 생산하는데 활용하는 일기도들은 지상 일기도에서 850, 700, 500, 300 혹은 200hPa 일기도일 것이다.



[그림 2.1.5] 2014년 2월 7일~10일 925hPa 일기도

여기에서 925hPa 분석일기도는 포함되어있지 않다. 그런데 봄에서 가을까지 일기예보를 생산하는 과정에서 925hPa 일기도는 지상일기도와 850hPa 일기도의 중간에서 특별한 정보를 제공하지 못하는 것이 사실이다. 그렇지만 겨울에 접어들면 925hPa의 활용성이 떨어진다는 것은 사실이 아니다. 왜냐하면 지상에서 상층까지 뚜렷하게 경압불안정을 가질 만큼 잘 조직화된 저기압 시스템이 아니라면 850hPa 고도의 등고도, 기온, 습수 분석만으로 겨울철 강설 가능성과 강설량을 예측하기는 힘들다. 겨울철의 절대적인 대기 중의 수증기의 양이 떨어지고 대기 하층의 열에너지 공급량도 떨어지기 때문에 평균적으로 1.5km의 고도에 위치하는 850hPa 고도의 등온선과 습수는 대기 하층의 대기 불안정 상태를 제대로 묘사하지 못하는 경우가 많다. 따라서 겨울철에 대기 하층의 상태를 분석하고 미래에 어떤 상태에 놓일 것인지 예측하기 위해서는 850hPa 일기도보다 925hPa 일기도를 보다 세밀하게 분석해 볼 것을 추천한다.

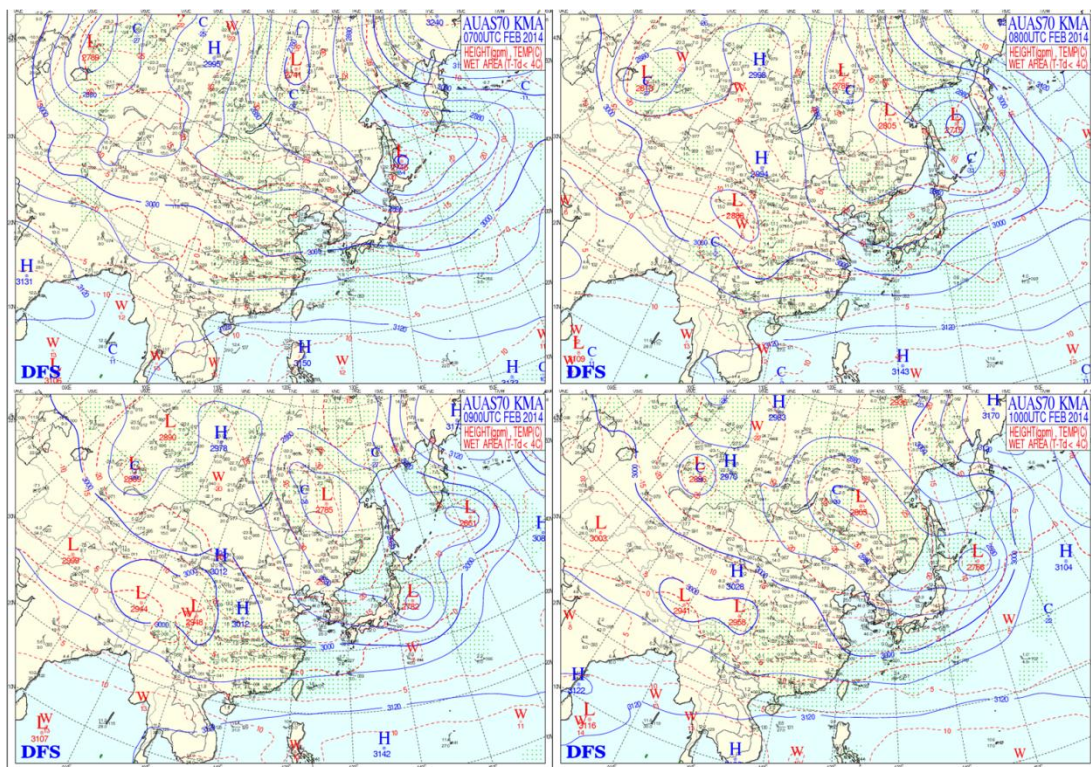
7일 925hPa 일기도에서 한반도 남부지방은 일본 남서쪽에 위치한 기압골과 중국 내륙에 위치한 고기압 사이에서 기압골과 온도 능의 영향을 받고 있는 반면 한반도 중부 서해와 동해는 대륙에서 확장하는 한랭 고기압의 영향으로 온도 골을 동반하는 고기압권 내에 위치하고 있다. 따라서 한반도 지역은 상대적으로 경압적으로 안정한 상태에 위치하고 있는 것으로 보인다. 24시간 후인 8일 000UTC가 되

면 925hPa 고도의 저기압 중심이 더욱 발달해서 일본 남해안으로 진출하고 한반도 지역으로 온도 경도가 크게 증가하고 있다. 이에 따라 서해상에서는 경압불안정이 강화되고 한반도 중부지방까지 기압골이 형성되어있다. 지상 일기도에서 언급했듯이 이 시기는 한반도 대부분 지역에 눈을 동반한 흐린 날씨가 만들어지고 있었다. 물론 기압골 중심의 북상과 함께 동해상에서 동풍기류와 온도경도가 강화되어 대기 하층에서의 열적 대류불안정이 증가함에 따라 점점 강설의 강도가 더해지고 있는 시기였다.

영동지방에 가장 강한 강설이 발생했던 9일 925hPa 일기도에서 가장 눈에 들어오는 것이 동해상에 형성된 강한 경압불안정이다. 저기압의 동진이 제한됨에 따라 북쪽으로의 이동이 강화됨에 따라 동해상에는 등온선과 등고도선이 이루는 각도가 거의 수직에 가까워 질 정도로 경압불안정이 강화되는 양상을 보이고 있다. 한기 침강으로 인해서 형성된 하층이 대류불안정에 경압불안정 효과까지 더해지면서 더욱 강하고 잘 조직화된 강설 시스템이 동해상에 형성되고 있는 모습을 매우 잘 보여주고 있다.

10일에도 여전히 동풍기류와 경압불안정 그리고 강한 온도경도가 동해상에 위치하면서 지속적인 강설의 발생과 발달에 유리한 기상조건이 형성되고 있었다는 사실도 확인할 수 있다. 지상일기도를 상기하면 대설을 위한 기본적인 기압 패턴이 북고남저형이었다면 925hPa 고도에서는 서고동저형의 기압패턴이다. 즉 상층으로 갈 수록 경압불안정이 강화되는 조건을 일기도가 잘 보여주고 있다는 것이다.

그림 2.1.6은 2월 7일에서 10일까지의 700hPa 분석일기도이다. 700hPa 고도에서 주목해야 할 점은 925hPa 이하의 고도에서 나타났던 남쪽 저기압이 더 이상 일기도에 나타나고 있지 않다는 점이다. 이것은 지상 저기압계의 연직 한계가 3km 이하였음을 의미한다.



[그림 2.1.6] 2014년 2월 7일~10일 700hPa 일기도

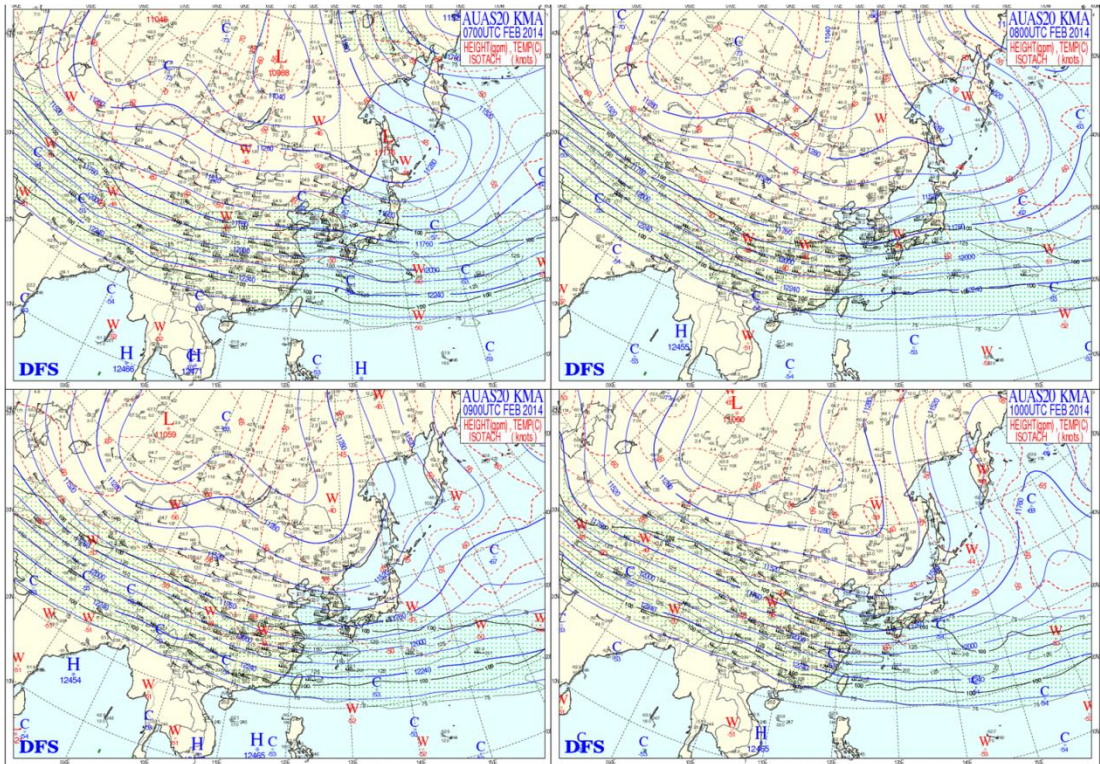
겨울철에 대설을 유도하는 저기압계는 그 자체로는 구조적으로 700hPa 고도까지 영향력을 행사할 수 없는 대기 하층의 메커니즘이라는 사실을 잘 보여주고 있다. 따라서 700hPa 고도의 기압계는 여름철에 500hPa 고도의 기압계의 역할 즉 대기 하층의 불안정을 더욱 더욱 강화시킬 수 있는 어떠한 기작들을 제공해 주는 것이라고 할 수 있겠다.

겨울철 한반도 대설의 대표적인 양상인 서해안 대설과 동해안 대설에서 구름의 최대 운정고도가 700hPa 고도와 거의 일치하는 점은 겨울철 강설 현상에 직접적인 영향을 미치는 것은 700hPa 이하 고도에서의 역학이 주요하다는 것을 보여주는 것이다.

7일 00UTC 700hPa 일기도에서 한반도는 기압골이나 기압능의 영향권에 놓여있지 않고 평범한 동서 방향 움직임이 주를 이루고 있다. 하층에서 이미 기압골이 형성되어 있지만 그 위쪽에서는 특별한 기작이 존재하지 않았다는 것을 의미한다. 그런데 8일 00UTC부터 10일 00UTC까지 한반도에는 마치 한 장의 일기도가 연속적으로 펼쳐져 있는 것처럼 온도골을 동반하는 기압골이 북동쪽에 중심을 두고 형성되어 있다. 대기가 유체이기 때문에 한반도에 위치하고 있는 기압골은 정체된 것이 아니라 하나가 통과한 후에 다시 그 자리에 새로운 단파골이 형성되었음을 의미한다.

700hPa 고도에서의 기압골과 한랭 이류는 대기 하층에서 발생한 강설시스템의 연직적인 발달을 유도하는 중요한 역할을 한다. 일반적으로 약 4km까지 발달하는 겨울철 대류시스템은 24시간에 50cm 이상의 대설을 유도할 정도로 매우 발달된 것으로 간주된다. 결국 700hPa 고도에서의 기압골과 한랭 공기 침범은(500hPa 고도에서의 기압골과 한랭 공기 침범의 영향에 의한) 대기 하층의 강설 시스템이 강화될 것인가를 결정하는 매우 중요한 매개 변수가 되는 것이다.

그림 2.1.7은 2월 7일 00UTC에서 10일 00UTC 까지의 200hPa 일기도이다. 7일에는 상층제트가 위도 30°N까지 남하하여 동서 성분이 매우 강한 형태로 지나가고 있다. 그런데 8일에는 한반도에 약하지만 뚜렷하게 구분이 되는 약한 상층 기압골이 한반도 상에 위치하면서 남쪽의 상층제트에서 분리된 강풍대가 한반도 지역으로 유입되고 있다. 기본적으로 상층 수렴대에 놓여있던 한반도 상공에 더욱 강한 종관규모 수렴구역이 존재하게 되었음을 의미한다. 물론 겨울철에 대설을 포함하는 대류 시스템의 활동은 하층으로 부터의 제한된 수증기와 열 에너지의 공급으로 대기 중층까지 도달하지 못하지만 대기 상층에서 강한 발산구역이 존재하고 중층에서 와도를 동반한 저기압성 회전 성분이 존재하면 발달된 대류 시스템이 상대적으로 오랜 시간 동안 세력을 유지하는데 매우 유리한 조건을 제공함과 동시에 강한 한랭 공기의 침강으로 대기 하층에서의 대류불안정을 강화시키는 역할을 하게 된다.

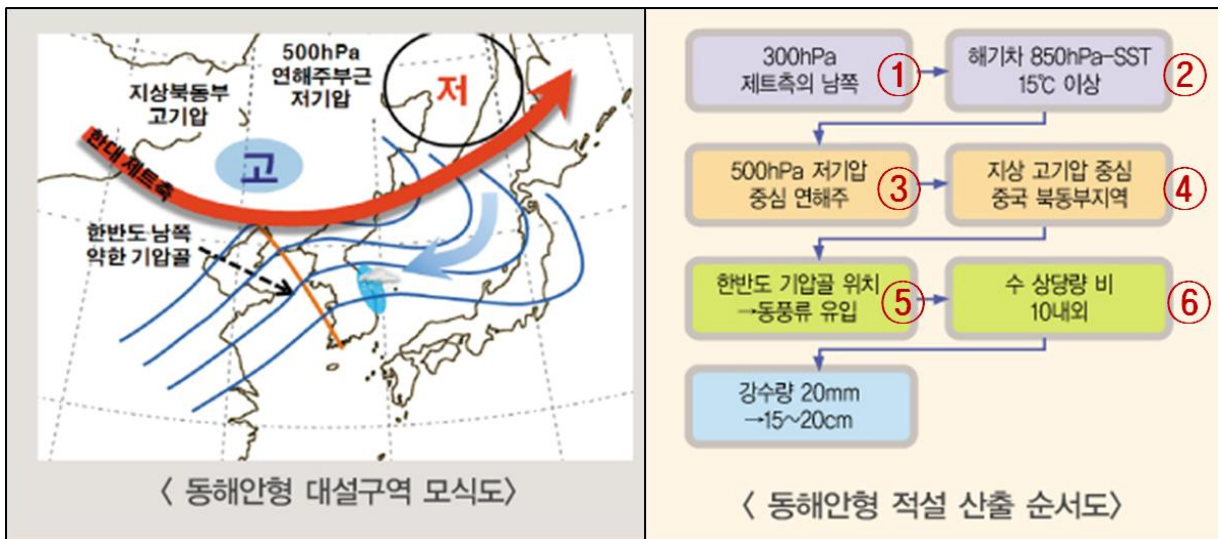


[그림 2.1.7] 2014년 2월 7일~10일 200hPa 일기도

2.1.2. 최장기 영동지방 대설 사례 분석(개념 모델)

1) 기상청 동해안형 대설 개념모델을 적용한 대기분석

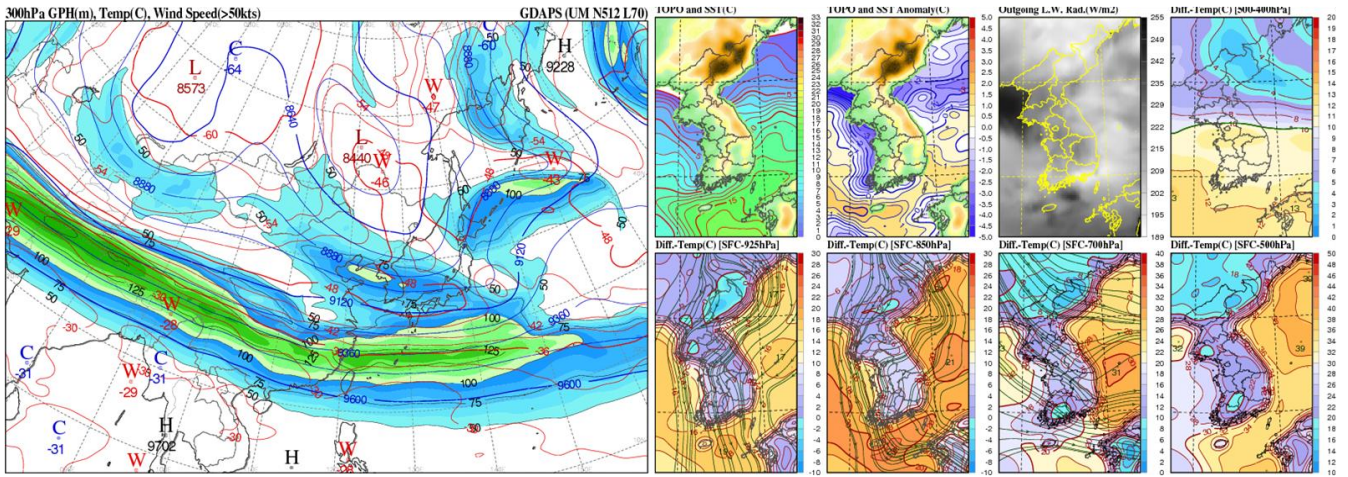
지상 기압배치와 중층의 Blocking에 의해서 지속적으로 동풍기류가 유입되는 중관규모 환경이 만들어진 상태라는 사실을 먼저 염두에 두고, 영동지방의 전형적인 대설 개념 모델에 이번 사례가 어떻게 적용될 수 있는지 살펴보기로 하자. 기상청에서 발간한 손에 잡히는 예보기술을 보면 한반도 대설 개념 모델 6가지를 제시하고 있는데, 그림 2.1.8은 동해안형 대설 모식도이다. 동해안형 대설개념 모델은 대기의 상층에는 상층 제트기류가 한반도 북쪽을 통과하면서 대기 하층으로 강한 한랭 침강을 유도해서 동해상에서 대기와 해양의 온도 차이가 15℃ 이상 발생하면서 경계층에서 대기불안정에 의한 구름이 발생할 수 있는 조건을 만들고, 연해주 부근에 500hPa 저기압이 형성되어 지속적으로 한기가 유입되는 형태를 보인다.



[그림 2.1.8] 동해안형 대설 개념모형 및 적설 산출 순서도

하층에서는 시베리아고기압이 강하게 확장하여 중심이 중국 북동쪽에 위치하고, 한반도 상에는 약한 남쪽 저기압의 영향으로 기압골이 형성되어 있다. 이에 따라 한반도에는 전체적으로 동풍기류가 우세하게 된다. 한랭한 공기가 상대적으로 따뜻한 동해상을 지나면서 형성된 난구름들이 동해안으로 접근하면서 강수가 시작된다. 동풍기류 유입에 의한 강설 시스템은 유지되는 기간이 1일 이상으로 다른 강설 시스템에 비해서 긴 것이 특징이며, 발생 조건은 지상에서 700hPa 고도까지 습윤층이 분포하고, 지상 동풍에서 대기 중층인 500hPa 바람이 고도에 따라 반전하는 조건을 가져야 하는 것으로 알려져 있다. 그리고 강설량을 결정하는데 중요한 요소인 강설량 대 강수량의 비율 즉 수상당량비가 10 내외의 습설이 내리게 되어 강수량으로 20mm 정도의 비가 강설량으로는 15~20cm의 눈으로 전환되어 내리는 패턴을 보인다. 동해안형 대설 개념모델을 이번 사례에 대한 기상청 수치예보 자료들을 통해서 살펴보기로 하자.

그림 2.1.9는 최장기 영동지방 대설 사례에서 가장 강한 눈이 내렸던 2014년 2월 9일 00UTC GDAPS 300hPa 분석일기도와 같은 시간 RDAPS에서 생산된 SST, SST Anomaly, Outgoing Long Wave Radiation(OLR), 500hPa-400hPa 온도차, 지표-925hPa 온도차, 지표-850hPa 온도차, 지표-700hPa 온도차, 지표-500hPa 온도차를 보인 것이다.



[그림 2.1.9] 2014년 2월 9일 GDAPS 300hPa 분석도(좌), SST, SST anomaly, 500-400hPa 온도차, 지표-925hPa/지표-850hPa/지표-700hPa/지표-500hPa 온도차(우)

동해안형 대설 개념모델은 300hPa 고도에서 제트의 위치와 850hPa 기온과 해수면온도의 차이가 15도 이상 되어야 한다는 조건을 대설 발생의 조건으로 제시하고 있는데 이번 사례에 어떻게 충족하고 있는지 살펴보도록 하자.

먼저 300hPa 일기도를 보면 상층제트의 축이 한반도 남쪽의 북위 30도 부근을 지나가고, 발해만에서 옹진반도 쪽으로 또 하나의 강풍대가 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 동해안 대설 개념모델에서 상층제트의 위치는 한중 국경 북쪽을 지나고 있는 것으로 제시되고 있는 반면 이번 사례의 경우에는 상층제트가 위도 10° 정도 남쪽으로 내려와서 위치하고 있다. 상층제트의 위치가 개념모델에서 제시된 것보다 남쪽으로 내려와서 위치하고 있는 것이 문제가 되지 않는다. 오히려 그림 2.1.9와 같이 상층제트가 한반도 남쪽에 위치하고 다른 강풍대가 한반도 북쪽으로 지나가고 있는 패턴은 한반도 상공에 강한 상층 발산구역이 형성되어 대기 하층에서 한기의 침강에 의한 대기불안정으로 대류활동이 만들어지면 이 활동에 의한 강수 시스템이 더욱 발달하는데 유리한 조건을 제공한다. 따라서 이번 사례는 개념 모델에서 제시한 사례보다 더욱 강한 중관규모 강제력을 제공하여 더 많은 강설이 내릴 수 있는 조건이었음을 보여주고 있다.

두 번째 조건인 850hPa 기온과 해수면온도의 차이가 15도 이상 되어야 한다는 것은 RDAPS 분석 보조장을 통해서 확인할 수 있다. 2월 9일 00UTC 위도 40°N 남쪽 한반도 동해상의 해수면온도는 10도에서 15도 분포로 온난한 상태를 보였으며, 위도 40°N 이북의 북부 동해안의 해수면온도는 5도 이하의 분포를 보이고 있었다. 이때 850hPa 온도가 중요한데, 영하 8도 내외의 분포를 보이기 때문에 850hPa 기온과 해수면온도의 차이가 18도에서 21도에 이르게 된다.

그리고 850hPa 기류를 보면 대기-해양 온도 차가 큰 지역으로 따라 오랜 시간 동안 긴 거리를 거쳐 동해안 지역으로 유입되고 있는 패턴을 보이고 있다. 일반적으로 대기 하층의 기류가 오랜 시간 동안 해수면 위를 흘러 갈수록 하층 대기의 대기불안정에 의한 에너지 교환과 응결 그리고 강설의 강도가 더욱 강해지는 것으로 알려져 있다. 그리고 여기에서 놓치지 말아야 할 흥미로운 사실은 고도가 올라 갈수록 대기-해양 온도차가 증가하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 대기의 상층으로 갈수록 더 차가운 공기가 위치하면서 지속적인 한기 침강이 이루어지고 있었으며, 이로 인해 대기 하부에서 형성된 불안정이 더욱 가속화되는 효과를 가져 온 것으로 보인다.

연직 풍향의 변화 즉 바람시어의 존재도 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 지상에서 850hPa 고도까지 유지되었던 동풍기류가 700hPa 고도에 도달하면 서풍으로 갑자기 전환되고 있다는 것이다. 이것은 대기 하층의 대류불안정 구역 즉 Capping Inversion의 고도 이하에서 강한 대류 불안정이 유지되고 하층에서 수증기와 열을 공급받아 불안정한 공기가 지형을 따라 강제상승하면서 응결해서 눈을 만들게 되는 과정에서 한번 형성된 대류성 구름밴드들이 소산되지 않고 하층에서 지속적으로 발달할 수 있는 환경을 제공하고 있다는 것을 의미한다.

최장기 영동지방 대설 사례에서 대기 상층의 제트기류의 위치와 대기와 해양의 온도 차이는 동해안형 대설 개념모델이 제시하는 기준보다 대설 형성에 더 유리한 조건을 가지고 있었음을 의미한다.

2.1. 일기도 분석

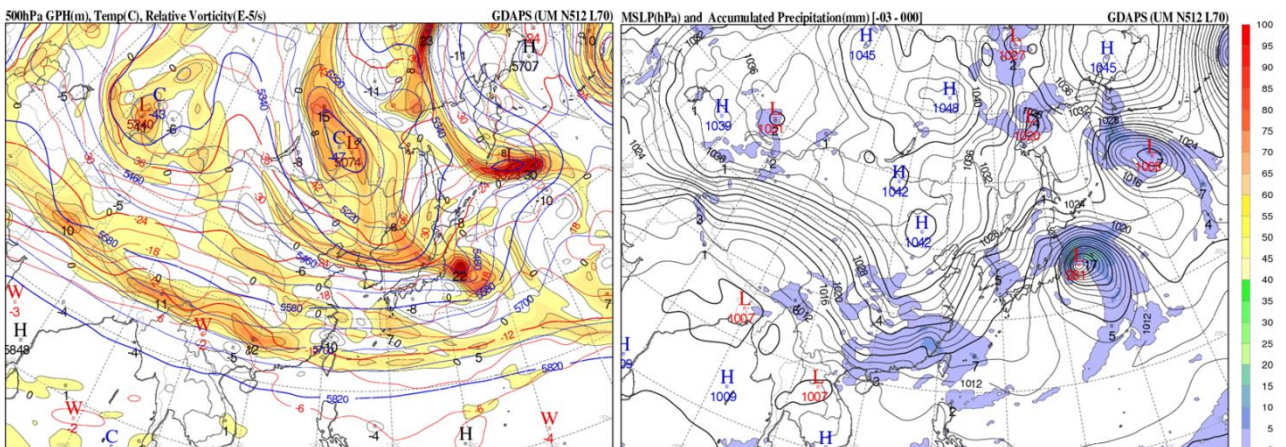
그림 2.1.10은 GDAPS에서 분석한 500hPa 고도의 등고도선과 상대와도 그리고 지상 분석도를 보여주고 있다. 동해안형 대설 개념모형은 연해주 부근에 500hPa 저기압이 형성되어 지속적으로 한기가 유입되는 형태를 보이고, 지상에서는 시베리아 고기압이 강하게 확장하여 중심이 중국 북동쪽에 위치하고, 한반도 상에는 약한 남쪽 저기압의 영향으로 기압골이 형성되어 있는 형태의 일기도를 대설 발생에 적합한 형태로 제시하고 있다.

500hPa 분석도를 보면 중국 북동쪽에 분리된 강한 상층 기압골 중심이 위치하고 기압골이 동해상으로 형성되어 위치하고 있는 가운데, 강한 양의 와도 구역이 북한 지역을 지나 동해상까지 길게 위치하고 있는 것을 보여주고 있다.

대기 중층에서 한랭 건조한 공기의 대규모 침강이 이루어지고 있는 가운데 대기 중층의 양의 와도구역이 지나면서 대기하층에 형성되어 있는 대류경계층의 높이가 높아지고 연직 운동이 더욱 강화되어 더 강한 강설을 유도하는 기압 패턴을 보이고 있다. 그리고 지상에서는 한반도를 중심으로 강하게 발달한 시베리아고기압의 축이 각각 중국 내륙과 한반도 동해상으로 확장하고 있는 가운데 남쪽 기압골의 간접적인 영향으로 한반도에는 기압골이 형성되어 있는 기압배치를 보인다.

전형적인 북고남저형의 기압배치로 지상으로 동풍기류가 유입되는 형태를 보임과 동시에 남북 기압경도가 동해상에서 증가하여 동풍의 풍속을 강화시켜주고 있어 동해상과 영동지방에 많은 눈구름이 만들어질 수 있는 조건을 만들고 있다. 그리고 일본 북부 열도부터 한반도까지 긴 거리를 두고 동풍이 형성되어 있는 것을 알 수 있다.

호수-효과(Lake-effect)에 의한 대설의 경우 한랭 건조한 공기가 상대적으로 온난 습윤한 해상을 얼마나 긴 거리를 이동하느냐에 따라 강설량과 강설 지속시간이 결정되는데 이번 대설사례는 해안선 근처에서 구름이 형성되는 것이 아니라 동해상 전체에서 구름이 형성되어 지속적으로 영동지방에 유입되면서 대설을 유도했다는 사실을 잘 보여주고 있다.



[그림 2.1.10] 2014년 2월 9일 GDAPS 500hPa 분석도(좌), 지상 분석도(우)

그림 2.1.11은 GDAPS에서 분석한 지상 기압배치와 강수량, 925hPa 기류와 강설량, 그리고 지상일기도와 수상당량비 분석도와 72시간 누적도를 보인 것이다.

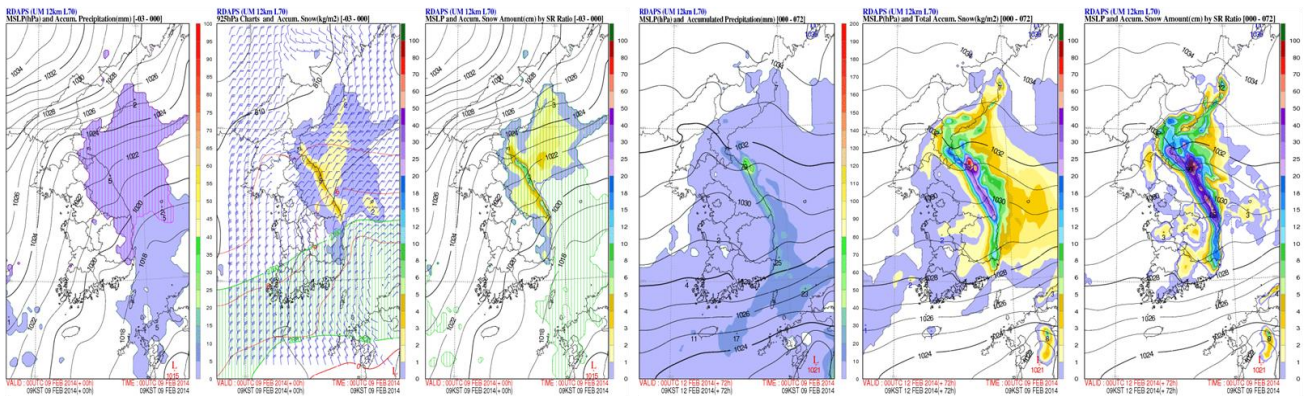
지상에서 상층까지 기압 패턴과 강제력의 구조가 동해안형 대설 형성에 매우 적합한 조건을 가지고 있었다는 사실을 확인할 수 있었고, 이어서 강설량을 결정하는데 중요한 정보를 제공하는 모델 강수량과 강설량 예측장을 통해서 실제로 얼마나 많은 눈이 내릴 것인가 판단하는 기준으로 삼아야 한다.

강설이 발생할 수 있는 지상과 상층의 기압배치를 확인한 이후에는 강설량을 판단해야 하는데, 강수량을 눈으로 환산해야 적설량을 예측할 수 있는데 이때 눈과 비의 비율인 수상당량비의 계산이 필요하다.

오른쪽 그림에서 72시간 누적 강수량이 79mm이고, 누적 강설량이 99cm 임을 볼 수 있는데 이는 수상당량비가 10을 넘고, 최대 누적강설량 148cm의 66%에 달하는 예측 강설량이다. 일반적으로 수치 모델에서 이 정도의 강설량을 예측한 것은 매우 훌륭한 수준의 모의라고 할 수 있다.

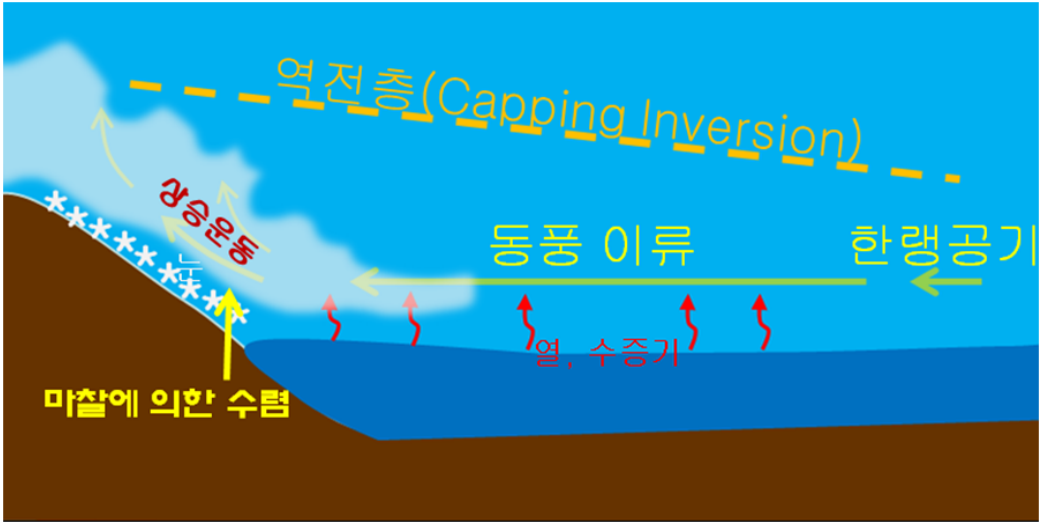
동해안형 대설 개념모델에서 제시하는 조건은 지상과 500hPa 고도의 기압배치, 그리고 상층 제트의 위치 등을 토대로 대설이 발생할 수 있는 가장 적합한 형태를 제시하고 있고, 이번 사례를 여기에 적용하면 대설 발생에 적합한 구조였음을 알 수 있었다. 그렇지만 동해안형 대설 개념모델은 어떤 역학적인 구조와 대기 불안정이 대설을 유도하고, 또 태백산맥이라는 영동지방 대설에서 매우 중요한 역할을 하는 지형 효과에 대한 직관적인 정보를 제공하고 있지 못하는 한계가 있다.

영동지방 대설의 핵심은 한랭 건조한 공기가 상대적으로 온난한 해수면을 지나면서 구름이 발생하고 해안선 부근에서의 수렴과 강제 상승에 의한 강설효과가 강화되는 전형적인 호수/해양-효과 강설(Lake/Ocean-effect Snow)이라는 사실이다. 따라서 호수/해양-효과 강설 모델을 적용하여 보다 상세하게 분석할 필요가 있다.



[그림 2.1.11] 2014년 2월 9일 GDAPS 지상 기압과 강수량, 925hPa 바람과 강설량, 지상 기압과 수상당량 분석도(좌), 지상 기압과 강수량, 925hPa 바람과 강설량, 지상 기압과 수상당량 72시간 예상도(우)

그림 2.1.12는 영동 지방에서 발생하는 호수/해양-효과 강설의 개념모형을 보여주고 있다. 사실 호수/해양 효과에 의한 대설 현상은 미국 시카고 주변과 동부해안에서 자주 발생하는 현상으로 그 발생 및 발달 매커니즘이 비교적 상세하게 밝혀져 있다. 다만, 여전히 예보관의 입장에서 어려운 문제는 언제부터 강설이 시작되어서 언제 끝날 것인가의 문제가 되는데, 결국은 기압 패턴의 변화에 따라 기류의 방향이 변화하는 시기를 적절하게 판단하는 것이 중요하다고 할 수 있다.



[그림 2.1.12] 호수/해양-효과 강설(Lake/Ocean-effect Snow) 발생 및 발달 개념모델

해안형 호수/해양효과 대설 개념 모델의 핵심은 한랭한 공기가 상대적으로 따뜻한 수면을 지나면서 상대적으로 좁은 지역에 강한 대류성 구름밴드를 풍하측, 대부분의 경우 해양과 육지가 만나는 지역에 집중해서 강설 현상이 나타나게 된다. 보통 여름철에 발생하는 대류활동이 대류권계면까지 발달하지만, 해안형 대설의 경우에는 그 대류의 상부가 대류권 하부로 제한되는 Shallow Convection의 형태를 보이게 되는데 이러한 낮은 대류활동에서도 강한 강설이 발생할 수 있는 것은, 대설을 발생시키는 요소들이 복합적으로 작용한 결과이기 때문이다.

먼저, 해안형 호수/해양 효과 대설의 구성 요소들은 한랭공기가 온난한 수면을 지나면서 열과 수증기를 공급받아 포화 상태에 이르러 구름이 만들어 지게 되는데, 이러한 대류권 하부에 불안정 경계층이 형성되는 것이 첫 번째 구성 요소가 된다.

다음으로는 강제 상승을 들 수 있는데, 강제 상승의 시작은 대기가 상대적으로 거칠기가 큰 육지를 만나게 되면 마찰력에 의한 강제적인 수렴이 발생하게 되고, 동해안과 같이 바로 산맥을 만나는 경우에는 기류가 산맥을 타고 강제 상승을 하게 된다. 따라서 해상의 불안정 경계층에서 형성된 구름이 지형 효과에 의해서 더욱 강하게 발달하는 결정적인 역할을 하게 된다.

그리고 세 번째 구성 요소는 이렇게 만들어진 구름밴드들에서 강설이 발생하게 되고, 이 강설현상의 강도와 기간이 오랜 시간 동안 유지되기 위해서는 지속적인 상승운동을 유도할 수 있는 불안정이 유지되어야 한다.

이러한 대기 불안정은 정적 불안정, 대칭 불안정과 같은 중규모 불안정과 상층 와도에 의한 하층 경압성 증가, 상층 한기 지배하에 하층 난기의 유입과 수렴, 온난 컨베이어 벨트와 같은 요소들이 작용을 하는데, 등온위면 분석의 대가인 Moore 교수의 연구에 의하면 상층의 상당위치와도(EPV; Equivalent Potential Vorticity)가 음인 구역이고, 지형을 따라 상승하는 것과 같은 기울어진(Slantwise) 면을 따라 이동하는 대기의 운동은 그 자체로 조건부 정적 불안정과 조건부 대칭 불안정 상태에 놓이게 된다고 알려져 있다.

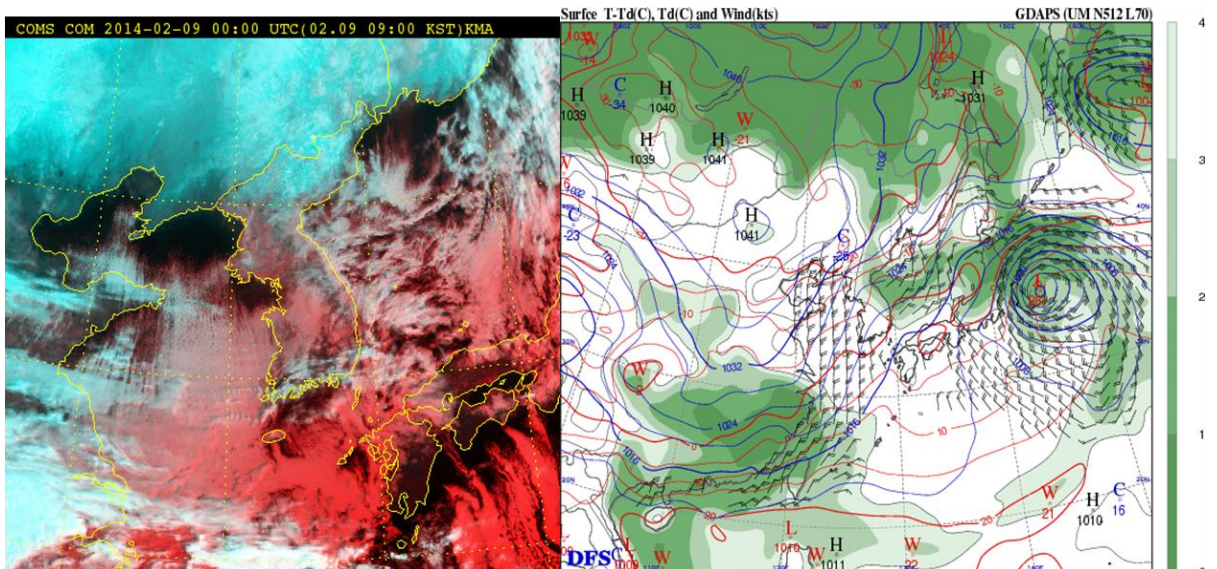
해안형 호수/해양 효과 대설의 경우에는 대기 하부에 해당하는 수면으로부터 1~4km 상공에 강한 모자 형태의 역전층(Capping Inversion)이 형성되는 것이 보통이고, 이 역전층이 깨질 때 까지 강설이 유지되는 것이 특징이다. 이렇게 상부에 역전층이 존재하고 있는 상태에서 대기 하층의 포화된 공기는 기본적으로 등온위면을 따라 움직이게 되는데, 기본적으로 등온위면은 지형을 따라 좁게 형성되기 때문에 잠열을 방출하면서 등온위면을 따라 강제상승하는 공기는 주변에 비해서 상대적으로 따뜻하기 때문에 조건부대칭불안정 즉 CSI 상태에 놓이게 된다. 결국 역전층에 의해서 지속적인 상승이 제한을 받게 되면 상승하는 공기는 계속해서 대기하층에서 상하운동을 하면서 응결하게 되고 지속적으로 강설 현상을 유지하게 되는 것이다. 그리고 해양을 지나는 공기가 해양과의 접촉을 통해서 더 많은 에너지 교환을 이루기 위해서는 기류의 흐름이 너무 빠르면 공기와 해수면 사이에서 충분한 에너지를 교환할 시간적 여유가 발생하지 않기 때문에 구름 발생이 해안선 부근으로 제한되는 한계를 가진다. 따라서 길고 넓은 구역에 강설 구름을 만들어 내기 위해서는 해수면 상공의 풍속이 7m/s에서 10m/s 정도 되는 것이 적합하고, 대기 하층에서 역전층 고도까지의 풍향의 변화가 거의 없어야 한다. 그리고 지형과 기류가 이루는 각도가 수직이면 더욱 그 효과가 커진다. 이러한 중규모 환경이 존재하는 상태에서 해양을 지나는 기류의 풍하측에 기압골이나 상층 기압골, 그리고 상층 제트에 의한 발산과 같은 종관 환경이 존재하게 되면 “호수/해양 효과에 의해서 강화된 대설”이 발생하게 된다.

수치모델 및 관측자료 분석을 통해서 (1) 불안정 경계층 내에서 한랭공기에 온난한 수면으로부터 열과 수증기가 공급되어 대류성 구름밴드가 형성되고, (2) 대기와 육지의 마찰에 의한 수렴과 지형(Orographic) 효과에 의한 강제 상승이 이루어지며, (3) 수면으로부터 1~4km 상공에 Capping Inversion이 대기 하층에 강한 조건부대칭불안정을 생성시키고, (4) 바람이 15~20kts 내외의 풍속을 가지며, 지형과의 각도가 90° 내외이고 약한 하층 바람시어가 존재하여야 한다는 호수/해양-효과 강설 특성을 분석해야 한다. 중규모 과정을 넘어서 풍하측의 지상 기압골과 상층 기압골, 상층제트, 상층 제트와 같은 적합한 종관 규모 강제력이 더해져서 “호수/해양 효과에 의해 강화된” 대설을 만드는 과정들을 살펴보기로 하자. 한랭한 공기가 온난한 수면을 지나면서 열과 수증기를 공급받아 강한 대류성 구름 밴드를 형성하는 첫 번째 구성 요소는 위성사진과 지상 바람, 그리고 습기 분포를 보면 쉽게 확인 할 수 있다.

그림 2.1.13은 2월 9일 00UTC 합성 위성영상과 GDAPS에서 분석한 지상 기압 및 습수 분석도이다. 지상일기도에서 몽골 부근에 중심을 둔 고기압과 일본 남해상에 정체되어 있는 기압골 사이에서 동해상으로 북동쪽에서 남서쪽으로 등압선이 누워있는 상태를 보이면서 동풍기류가 형성되어 있고, 일본 북부에서 한반도 동해안까지 지표면 부근의 공기가 거의 포화되어 있는 형태를 볼 수 있다.

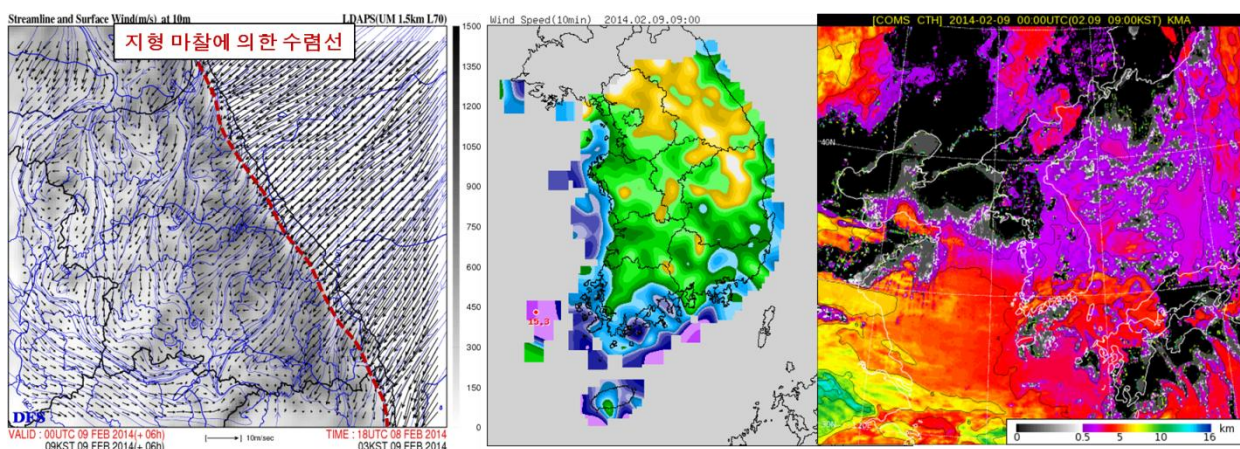
한랭 건조한 공기가 온난 습윤한 해양으로부터 풍부한 수증기를 공급받고 대기불안정에 의해서 구름들이 강하게 발달할 수 있는 조건이었다. 합성 위성 영상에서 동해상에 광범위하게 구름 밴드가 위치하고 있으며, 영동지방 해안선 부근과 태백산맥 상에는 상대적으로 높게 발달한(흰색) 대류성 구름들이 존재하고 있는 것을 볼 수 있다. 서해상에도 북서쪽으로부터 한랭 건조한 공기 이류에 의한 구름들이 넓게 분포하고 있는데, 해안선 안쪽으로 유입되지 못하고 해상에만 머물러 있는 것은 지상풍의 풍계가 동풍 기류를 이루고 있기 때문이다. 그리고 구름들이 동해안이나 태백산맥에 위치한 구름들에 비해서 연직으로 높게 성장하지 못하고 있는 모습을 알 수 있다. 이것은 영동지방 대설이 가지는 지형효과와 강제 상승효과 그리고 대류불안정 효과가 상대적으로 약하게 발생하였기 때문으로 분석된다.

호수/해양-효과 대설모델의 두 번째 구성 요소가 강제 상승인데, 강제 상승의 시작은 대기가 상대적으로 거칠기가 큰 육지를 만나게 되면 마찰력에 의한 강제적인 수렴이 발생하는 것에서부터 비롯된다. 해안선 부근에서 수렴된 공기가 산맥과 같은 가파른 지형을 만나면 강제 상승효과가 더해져서 강한 구름을 만들어 내게 된다.



[그림 2.1.13] 2014년 2월 4일 00UTC 합성위성영상(좌), GDAPS 지상 분석 일기도(우)

그림 2.1.14는 LDPAS에서 분석된 2014년 2월 9일 00UTC 지상 10m 유선장, AWS 바람 관측장, 운정고도 분석 위성영상이다. LDAPS에서 분석된 영동지방의 지상 10m 유선과 바람을 보면 해상에서 큰 장애를 받지 않고 육지로 진행되는 기류가 태백산맥을 만나면서 마찰력에 의해서 풍속이 크게 줄어들어 지형에서 회색으로 보이는 태백산맥 중간 부분에 강한 마찰에 의한 수렴선을 형성하는 모습을 볼 수 있다. 같은 시간 AWS 관측에서도 동해안 부근의 풍속이 태백산맥을 만나면서 크게 약화되어 수렴이 형성되어 있는 모습을 볼 수 있는데, 이에 따라 상승하는 공기에 의해서 만들어진 구름이 약 3~5km 고도까지 발달해 있는 것을 위성 영상을 통해서 확인 할 수 있다. 실제로 겨울철 해안형 강설을 예보할 때 강설을 포함한 하층운의 운정고도가 3km 까지만 발달해도 많은 눈을 예보하게 되는데, 구름이 높아진 경계층을 따라 최대 5km 고도까지 발달해 있는 것은 매우 강한 강설이 발달할 수 있는 조건을 제공하고 있었다는 점을 확인할 수 있다.



[그림 2.1.14] 2014년 2월 9일 00UTC LDAPS 10m 유선과 지형(좌), AWS 바람장(중), 운정고도 위성영상(우)

호수/해양-효과 대설 개념 모델의 세 번째 구성 요소는 경계층 하부의 강한 대기불안정인데, 대기 하층의 불안정도는 그림 2.1.15의 2월 9일 00UTC속초 단열선도에서 그 특성을 잘 분석할 수 있다.

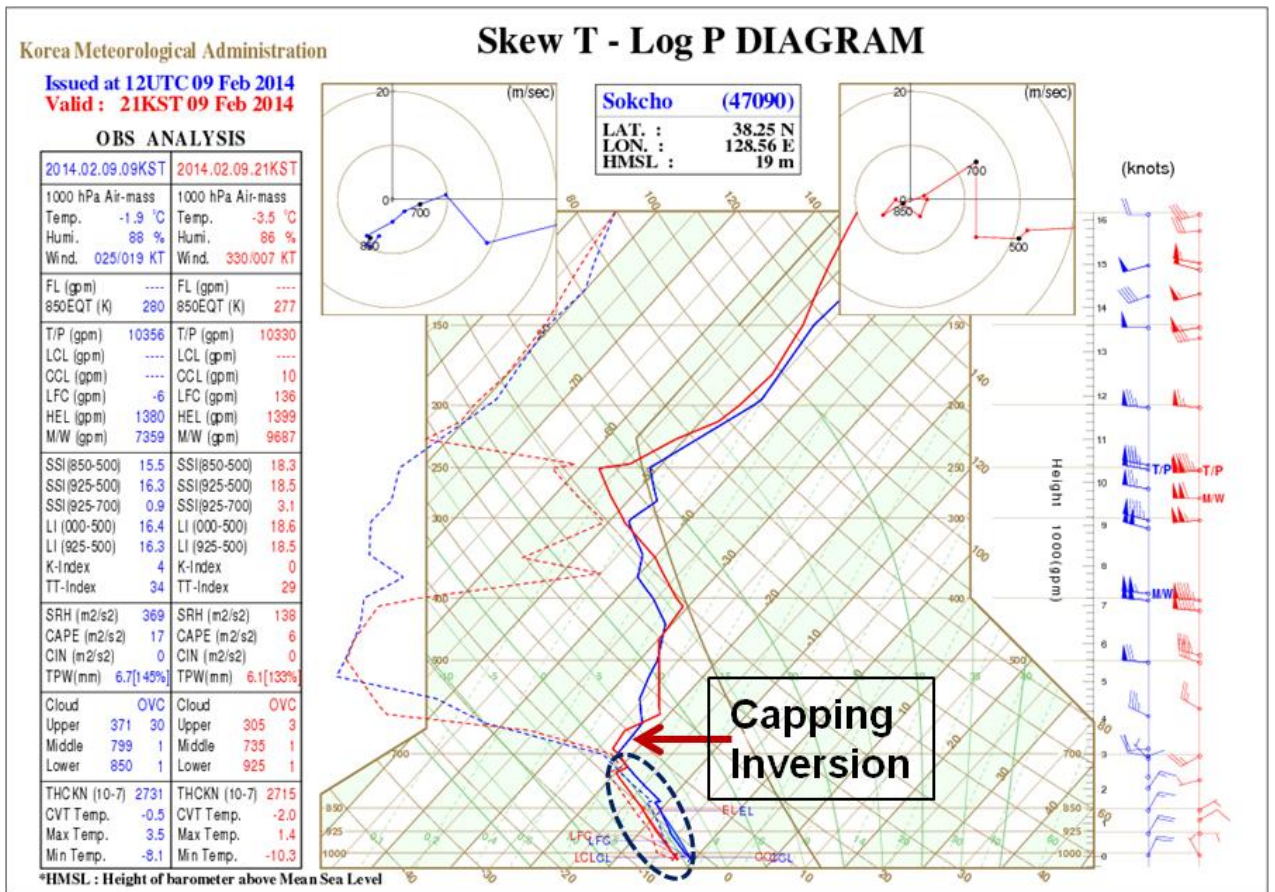
단열선도를 보면 약 3km의 고도까지 포화된 혼합경계층이 존재하고 있고, 특히 온도선의 기울기 즉 기온감률이 습윤단열 감률보다 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이는 포화된 공기가 상승운동을 하면 조건부잠재불안정(CSI) 상태에 놓여서 경사진 지형을 따라 상승하는 공기덩어리들이 매우 강한 대류불안정 상태에 놓여있게 됨을 의미한다. 그런데 이러한 불안정한 대기상태에서 강제로 상승하는 공기 덩어리의 상승이 상부의 모자 역전층에 의해서 제한을 받게 되면 지속적으로 대기 하층에서 강설 구름이 계속해서 발달하는데 필요한 충분한 에너지를 공급하고 있다.

겨울철에 한반도 서해상과 동해상에서 발생하는 호수/해양-효과에 의한 강설은 모두 Capping Inversion을 가지고 있다. 만약 역전층이 존재하지 않으면 대기 하층의 대류불안정이 오랜 시간 동안 지속되지 못하고 강설 현상이 약화되거나 빠른 시간 내에 종료되는 효과가 나타났을 것이다.

호수/해양-효과 개념모델 모식도(그림 5.1.12)에서 동해상에서 태백산맥으로 형성되어 있는 Capping Inversion의 역할과 존재를 단열선도 분석을 통해서 확인할 수 있다. 그리고 자유대류고도(LFC) 높이도 주목해야 한다. 일반적으로 자유대류고도가 낮다는 것은 하층의 포화된 공기가 아주 작은 강제상승 효과만 주어져도 구름 내부의 잠열 방출에 의한 에너지 공급으로 독자적으로 대류 구름으로 성장할 수 있는 조건을 제공하고 있다는 것을 의미한다.

영동지방의 경우에는 태백산맥과 해안선이라는 하층 수렴 및 강제 상승을 위한 매우 좋은 조건을 구성하고 있는데, 자유대류고도의 높이가 136gpm에 불과하다는 것은 해안과 지형의 수렴과 강제 상승 효과가 더욱 강한 대류활동으로 이어질 수 있고 그 시간도 Capping Inversion이 깨어지는 시기까지 이어질 수 있었음을 의미한다. 결론적으로 대류권 하부의 강한 불안정과 역전층 하부에서 지속적인 상승운동이 가능한 대기 구조를 가지고 있었다는 것을 알 수 있다.

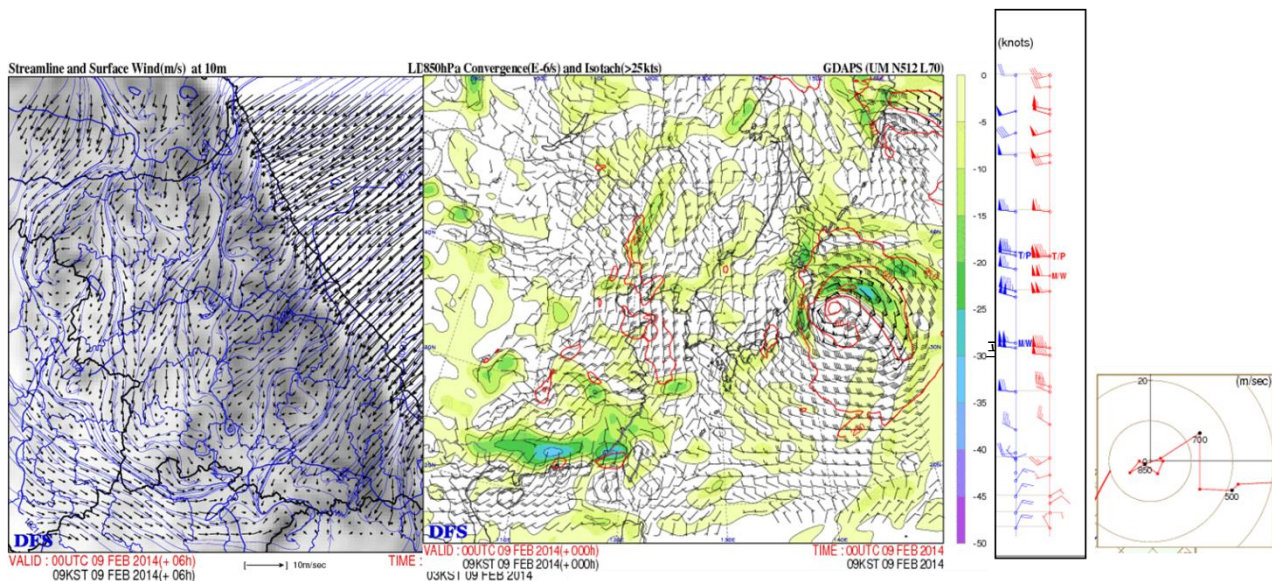
3~4km 고도에 강한 Capping Inversion이 존재하고 경사면을 따라 강제상승하는 공기가 대류권 하부에 조건부대칭불안정을 만들어 내는데 가장 좋은 조건을 보여주는 호수/해양-효과 대설 개념모델에서 제시하고 있는 가장 전형적인 단열선도를 보여주고 있다.



[그림 2.1.15] 2014년 2월 9일 속초 단열선도

그림 2.1.16은 호수/해양-효과 대설모델의 네 번째 구성 요소로 역전층 하부의 풍속이 15~20kts 내외로 강하지 않고 지형과의 각도가 수직이며, 약한 하층 바람시어가 존재해야 한다는 사실을 확인하기 위한 것으로, 지표면 부근의 바람장은 그림 2.1.4에서와 같이 기류가 해안선과 거의 90°의 각도를 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 실제로 한반도 지도를 보면 영동지방의 해안선이 북서쪽에서 남동쪽으로 기울어진 형태를 가진다. 따라서 영동지방의 경우에는 지상풍의 풍향이 북동풍일 때 더 많은 눈구름이 형성되고 대설이 발생하는 특성을 보인다.

지상풍의 풍향이 완전히 동풍이면 영동지방에 대설이 형성되지 않고 오히려 영남 동해안 지역으로 많은 눈이 내리게 되는데 2월 13일부터 풍향이 동풍으로 바뀌면서 영동지방의 강설은 약화되고 영남 동해안의 강설의 강도가 세지는 이유도 여기에 있다. 여러 차례 강조했지만, 호수/해양-효과 강설의 지속시간과 강도는 지상풍의 풍속과 풍향에 의해서 좌우된다는 사실을 명심할 필요가 있다. 850hPa 분석 일기도에서도 한반도는 북동쪽으로부터 유입되는 북동기류의 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 강도는 약하지만 동해상과 영동지방을 따라 수렴구역이 형성되어 있는데, 여름철에 비해서는 약해 보이지만 겨울철에 850hPa 고도에서 이 정도의 수렴이 형성되는 것은 매우 이례적으로 강한 대류활동이 850hPa 고도까지 유지되었음을 잘 보여준다.



[그림 2.1.16] 2014년 2월 9일 LDAPS 10m 유선도(좌), 850hPa 수렴도 및 바람(중), 속초 단열선도 연직바람 및 호도그래프(우)

그리고 주목해야 할 것은 지상과 850hPa 고도까지 풍속과 풍향의 변화가 크지 않다는 것이다. 이러한 사실은 2월 9일 00UTC 속초에서 관측된 연직바람 분포와 호도그래프를 통해서 다시 확인할 수 있다.

바람의 연직 구조를 보면 Capping Inversion이 존재했던 4km 이하의 고도에서는 풍향과 풍속의 변화가 거의 없는 즉 바람시어가 약한 구역이 나타나는 반면, 역전층 바로 상부에는 풍속이 강한 서풍기류가 나타나는 가운데 약 5km 이상의 중층에서는 25m/s 이상의 강풍대가 나타나고 있다.

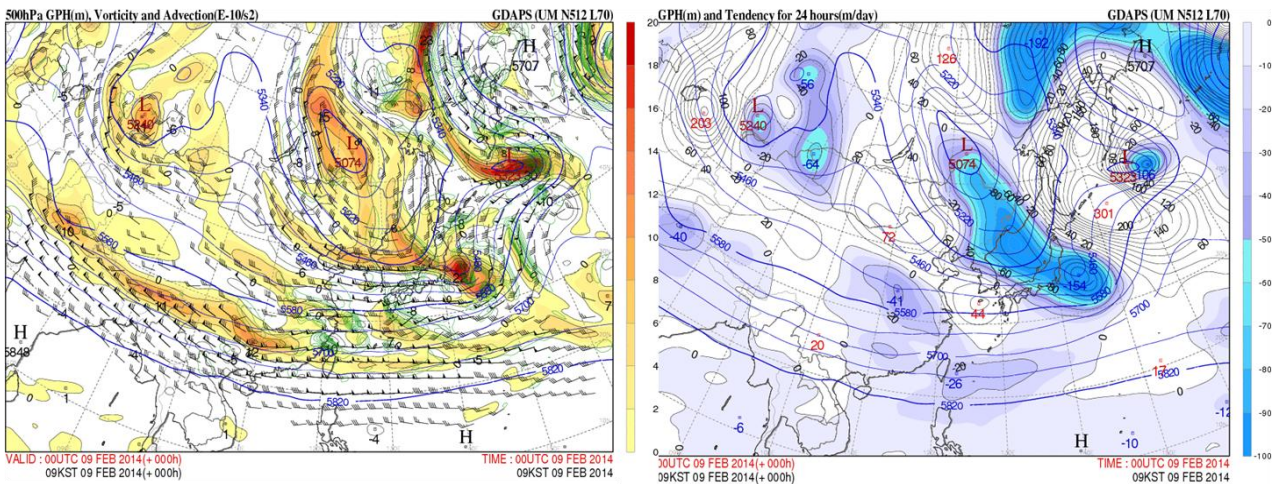
Capping Inversion 하부에는 해수면과 맞닿는 공기는 마찰에 의해서 속도가 줄어들고, 그 바로 상공에 있는 공기의 풍속은 조금 빠르기 때문에 자연스럽게 Rolling Convection이 형성된다. 만약 역전층의 하부에서 연직 바람시어가 강하게 발생했다면 Rolling Convection의 발생이 제한되었을 것이다. 역전층 아래 하층대기에서의 대류활동은 역전층 상층과 정반대의 풍향을 가지는 바람에 의한 강한 바람시어가 나타나는 가운데 Capping Inversion에 의해 대기 하층에 갇힌 상태에서 지속적으로 유지되는데, 대기 하층에서 대기 중층까지 누운 "S"자 형태의 호도그래프는 호수/해양-효과 대설의 전형적인 형태 중에 하나이다.

지금까지 설명했던 구성요소들 만으로도 충분히 호수/해양-효과 대설모델에 영동지방 대설사례가 정확하게 들어맞는다는 사실을 알 수 있다. 그런데 여기에서 한발 더 나아가 “호수/해양 효과에 의해 강화된 대설”의 개념에 대해서 설명해 보기로 하겠다. 기본적으로 호수/해양-효과 대설은 그 운동의 시간적 공간적 규모를 보면 중규모 현상에 가깝다고 할 수 있다. 강설이 집중적으로 발생하는 지역도 수평으로 100km를 넘지 않고, 대설에 직접 연관된 대류성 스톰들의 생애도 6시간을 넘지 못한다. 그럼에도 불구하고 오랜 시간 동안 강한 강도의 강설이 유지될 수 있었던 것은 종관규모 강제력이 호수/해양-효과 대설의 효율을 더 높였기 때문이다.

그림 5.1.17은 2014년 2월 9일 00UTC GDAPS의 500hPa 와도 분석장과 등고도선의 24시간 경향성 분석을 보인 것으로 중관규모 강제력이 대설 발생에 얼마나 영향을 미쳤는지 잘 설명해 주고 있다.

500hPa에서는 단파 기압골이 존재하고 저기압성 양의 와도 이류가 한반도 북부에서 동해안 부근으로 길게 형성되어 있는 것을 볼 수 있는데 대기 중층에서 와도이류가 형성되면 이 소용돌이 효과에 의해서 Capping Inversion의 높이가 위로 더 끌어올려지게 되고 이에 따라 대류성 구름이 더 높은 고도까지 발달할 수 있게 만드는 역할을 한다. 만약 양의 와도가 이류하고 있는 상층에 발산구역이 같이 존재하면 Capping Inversion의 높이는 높은 고도까지 성장할 것이다. 그리고 등고도선의 24시간 변화경향을 보면 한반도 동쪽에서 24시간 동안 100gpm 이상 떨어져 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 동해상으로 강한 한기의 침강이 있었다는 것을 의미하고 이 한기의 침강에 의해서 대기와 해양 사이의 온도 차이가 해양과 대기의 열과 수증기 교환 증가에 따른 대기 불안정이 확대되는 조건을 만들어 낸 것으로 보인다.

기본적으로 중규모 현상 중에 하나인 호수/해양-효과 대설의 강도와 지속 시간을 결정하는 요소는 중관규모 강제력이다. 최장기로 기록되는 영동지방 대설이 발생할 수 있었던 이유는 이번 대설 사례가 지상 기압계에서부터 200hPa 상층제트와 발산장까지 아주 강한 중관규모 강제력에 의한, “호수/해양 효과에 의해 강화된 대설”의 발생 메커니즘과 정확하게 일치하는 조건을 가지고 있었기 때문으로 판단된다.



[그림 2.1.17] 2014년 2월 9일 00UTC GDAPS의 500hPa 와도 분석장과 등고도선의 24시간 경향성

2.2. 위성 분석

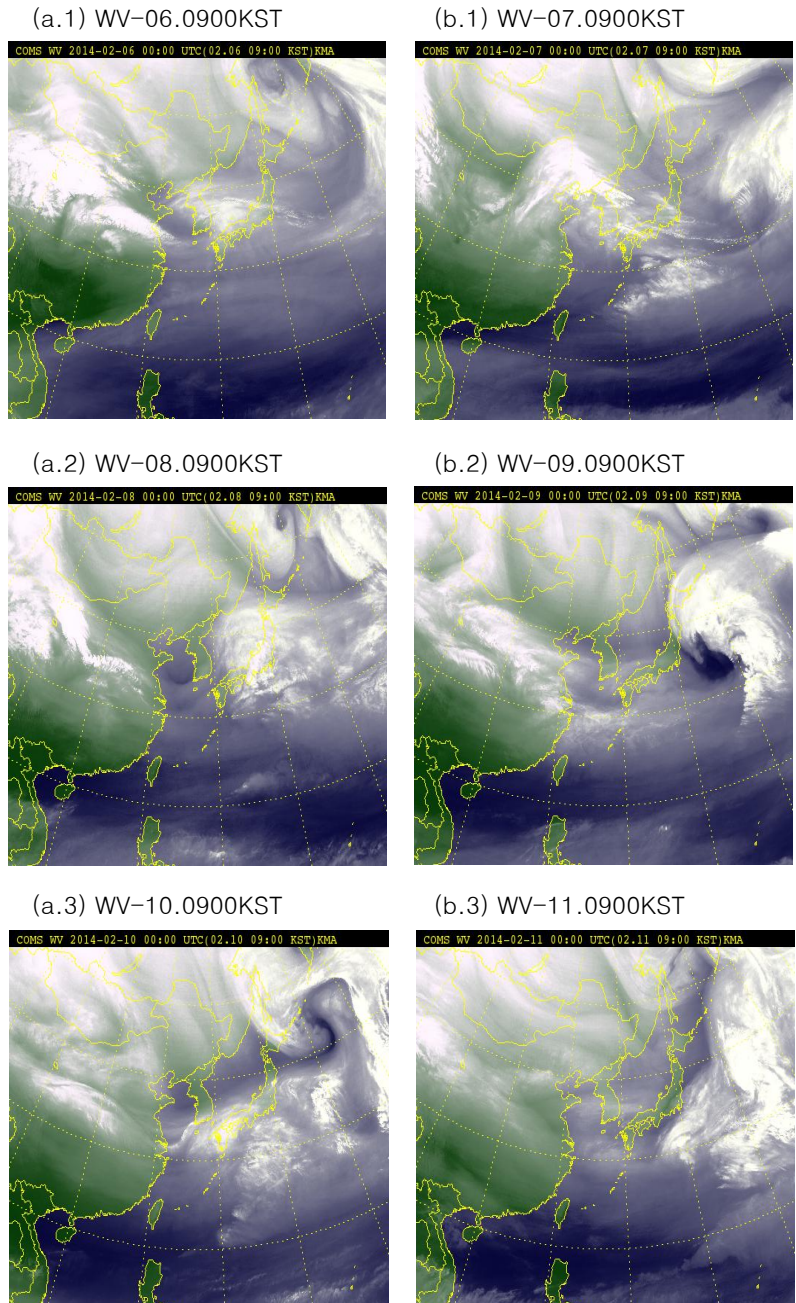
2.2.1. 대설 기간 동아시아 영역 위성영상의 특성

2014년 2월 6일부터 14일까지 9일간 강릉 등 영동지역에 폭설이 연속적으로 내린 사례로 연속 신적설 일수가 관측(1911년) 이래 가장 길었으며, 강릉의 일 최심적설은 110cm(2월 11일)로 1990년 이후 가장 많은 눈이 내렸다. 그 결과 사망자 2명, 공공시설의 피해액 32억원, 사유시설의 피해액 1,530억원이 발생하였다.

이 사례는 5일부터 베링해 근처에서 오메가 형태의 저지 기압능이 발달하면서 동아시아 지역의 기압계 흐름이 정체됨에 따라 한반도 북쪽에서 고기압이 정체하고 남쪽에서 저기압이 접근하면서 북고남저와 북서고 남동저의 기압 배치로 동해안 지역에 동풍류와 북동풍류가 강화된 결과로 발생하였다.

즉, 동풍류가 상대적으로 따뜻한 동해바다를 지나면서 다량의 수증기를 공급받게 되었고, 태백산맥의 산사면에 부딪히면서 강제 상승-구름 발생-동해안을 따라 수렴이 가속화되어 영동해안에 많은 눈을 내린 것이다.

본 대설 기간 위성영상의 특성을 분석하기 위해 대설 발생 전날인 2014년 2월 06일 09:00KST부터 소강상태에 들어갔던 2월 11일 09:00 KST까지 1일 간격으로 동아시아 지역의 수증기영상을 분석하였다(그림 2.2.1). 동아시아 지역 수증기영상에서는 대설 기간 동안 한반도 중부지역으로 기압골이 2회(8, 10일) 통과하면서 기압골 전면에서 발달한 구름대가 보이고 있다. 8일 서해상에 위치한 잠재와도 아노말리(역학적 대류권계면 아노말리)의 동쪽 경계에서 발생하기 시작한 저기압은 9일 전선을 동반한 저기압으로 발달하면서 일본 동쪽해역으로 이동하였다.

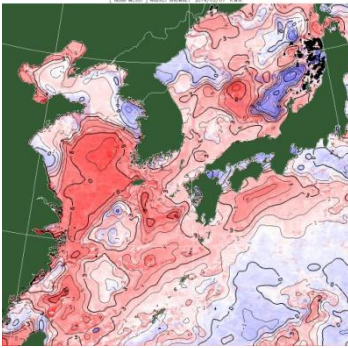


[그림 2.2.1] 대설 기간 동아시아 영역의 일별 수증기영상

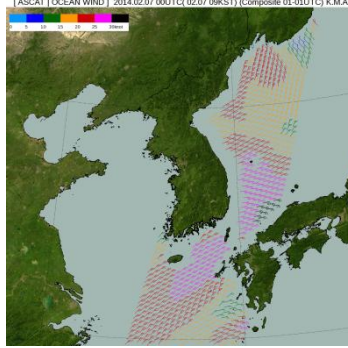
또한 전반적으로 대류권 중상층에 수증기가 많은 것처럼 보이고 있으나 이는 지면온도가 낮은 것과 관련된 것으로 보이며, 6, 7일에는 동해안 지역에 상층운이 지나감을 볼 수 있다.

그림. 2.2.2(a)는 NOAA 위성에서 관측한 주간 해수면온도 편차 영상으로 대설기간 동안 동해안을 비롯하여 우리나라 주변 해역에 높은 양의 해수면온도 편차값이 분포하는 것을 볼 수 있어 따뜻하고 습윤한 공기를 대기하층에 공급할 수 있음을 제시한다. 그림. 2.2.2(b)는 MetOP/ASCAT 위성에서 관측한 해상풍 영상으로 동해안에 지속적으로 동풍 및 북동풍의 해상풍이 불고 있음을 알 수 있다. 또한 이로 인해 그림. 2.2.2(c) 가시영상에서는 대설기간 모두 동해안과 태백산맥 주위에 광범위하게 하층운이 분포하고 있음을 볼 수 있다. 7일에는 동해상에서 발달하기 시작한 구름대가 동풍에 의해 태백산맥부근까지 발달하고 있으며 8일에는 동해상 전체에 하층운이 발달하고 있으나 태백산맥 주위에는 전날보다 구름강도가 약해 보인다. 9일에는 장출하는 시베리아 고기압의 전면에서 발달하는 북풍에 의해 서해상에 운열들이 발달하고 있으며, 동해상에서는 대상대류운들이 발달하여 동해안 지역으로 유입되고 있다. 9일과 10일에는 서해와 동해에 발생하고 있는 다양한 유형들의 운열(Cloud Street: 줄기모양구름)들이 해안가의 근거리에서부터 발달하는 것으로 보아 한기가 강하게 장출하고 있음을 알 수 있다.

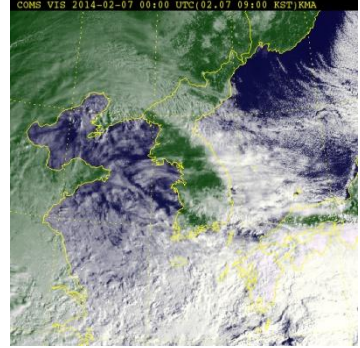
(a.1) SST-07.0900KST



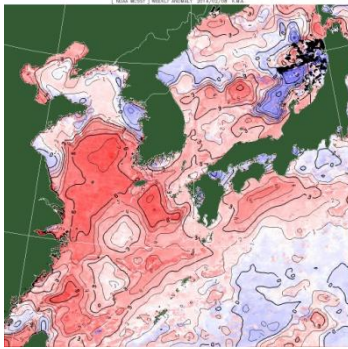
(b.1) OW-07.0900KST



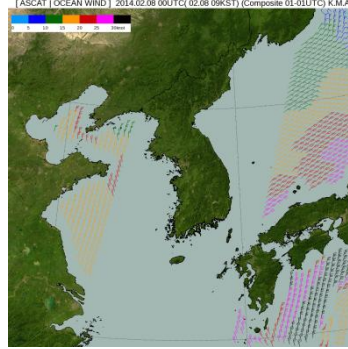
(c.1) OW-08.0900KST



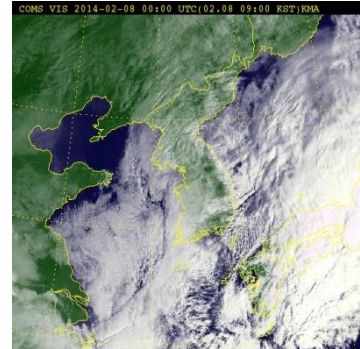
(a.2) SST-08.0900KST



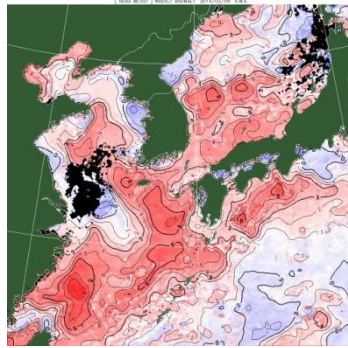
(b.2) OW-08.0900KST



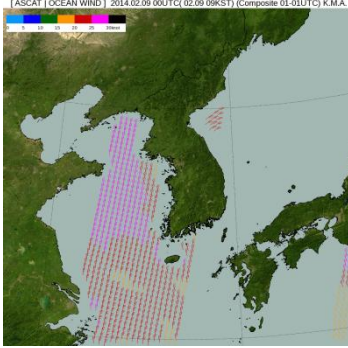
(c.2) OW-08.0900KST



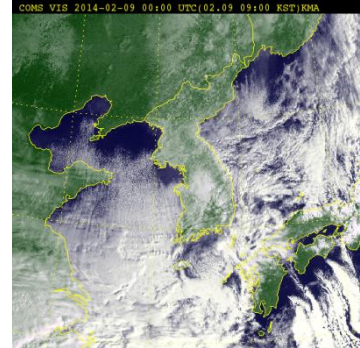
(a.3) SST-09.0900KST



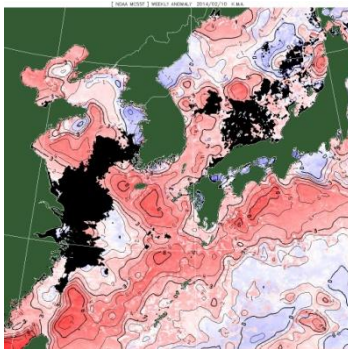
(b.3) OW-09.0900KST



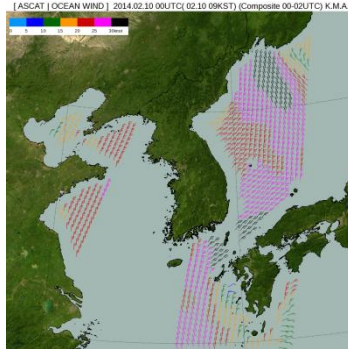
(c.3) OW-09.0900KST



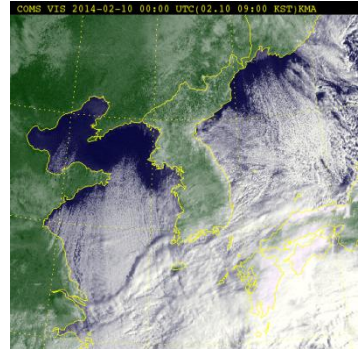
(a.4) SST-10.0900KST



(b.4) OW-10.0900KST



(c.4) OW-10.0900KST

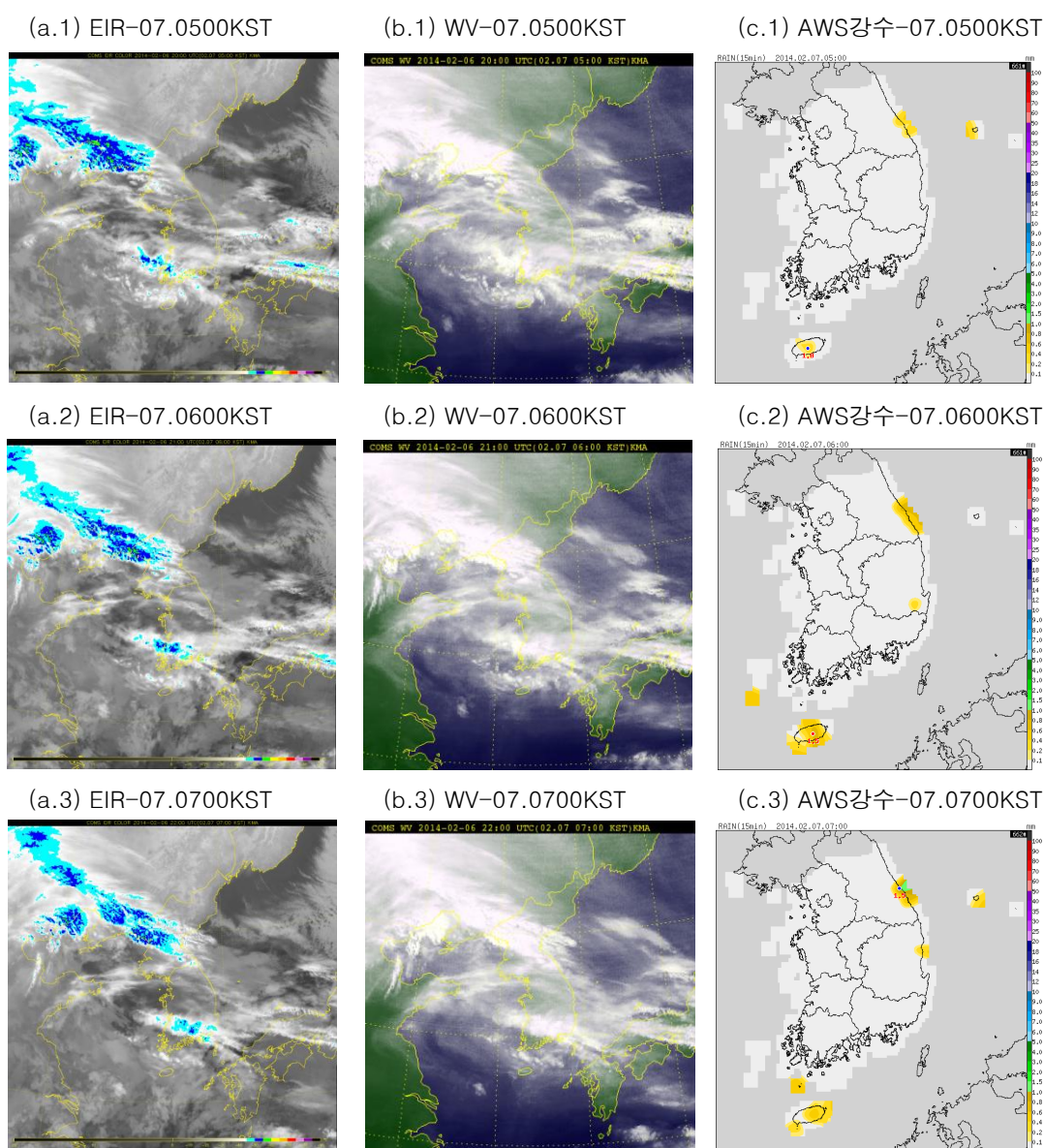


[그림 2.2.2] 대설 사례 기간 한반도영역의 (a) NOAA 위성에서 관측한 주간 해수면온도 편차(Weekly SST Anomaly), (b) MetOP/ASCAT 위성으로 관측한 해상풍 그리고 (c) 가시영상

2.2.2. 강설 발생 시 위성영상의 특성

강설 발생 시 위성영상의 특성을 분석하기 위해 강설 발생 시간인 2014년 2월 7일 05:00KST부터 07:00KST까지 1시간 간격으로 한반도 지역의 적외강조영상과 수증기영상을 분석하였다.

그림 2.2.3(a)에서 동해에 광범위하게 하층운이 분포하여 있는 것을 볼 수 있으며, 동해안 지역에는 운정온도가 상대적으로 높은 구름(회색)과 북서풍에 의해 남동진하는 상층운이 중첩되어 분포하고 있다. 수증기영상에서는 한반도와 동해에 전반적으로 상층에 수증기가 분포하고 있으며, 북서풍에 의해 상층 구름대가 남동진하고 있음을 볼 수 있다. 적외강조영상에서는 동해안 전체에 하층운이 존재하는 것으로 나타나지만 AWS 강수분포에서 강릉과 북강릉 지역에서만 먼저 강설이 시작되고 있다.

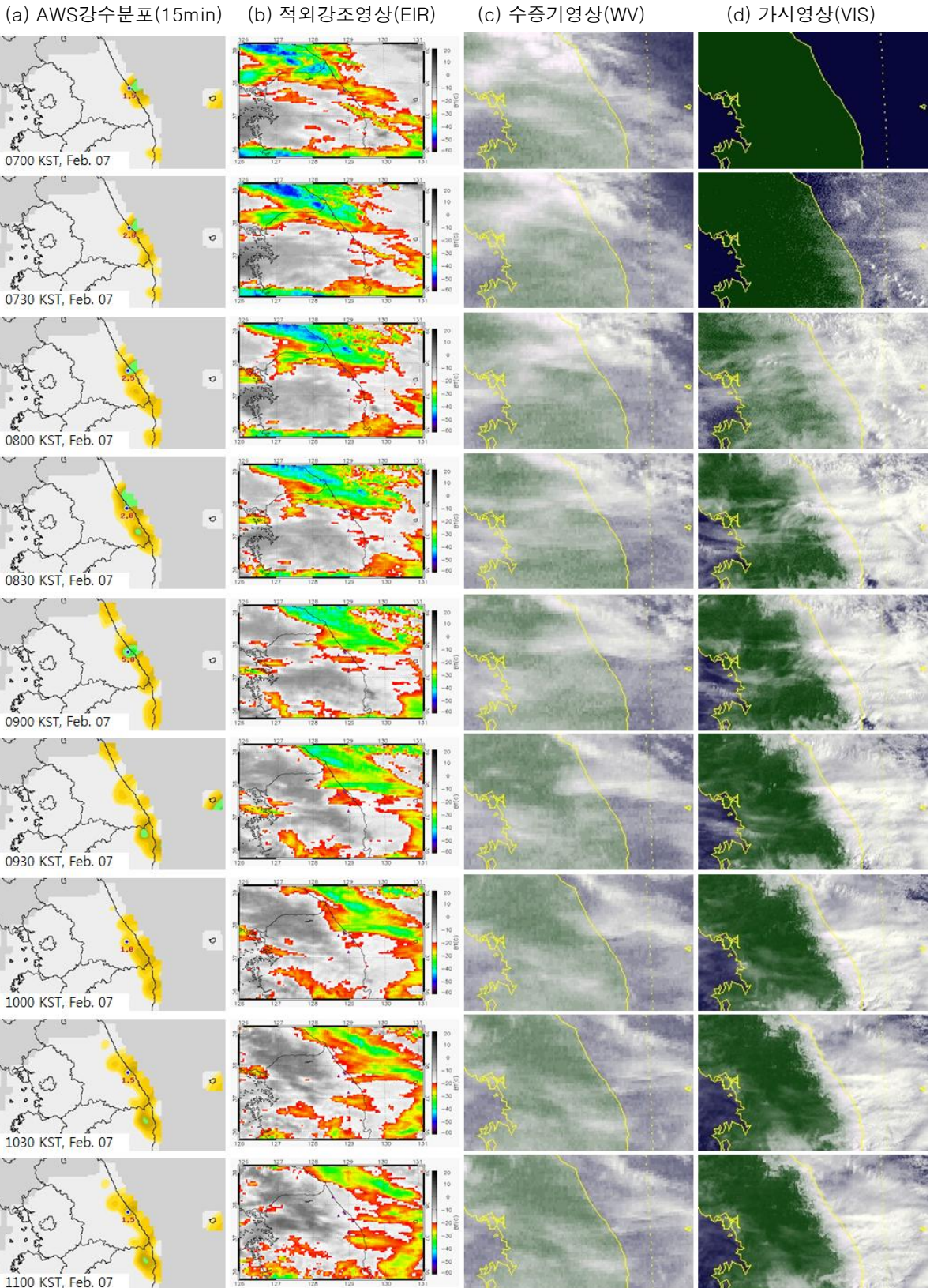


[그림 2.2.3] 강설 발생 전 동아시아 영역의 (a) 적외강조영상과 (b) 수증기영상, (c) AWS 강수분포(15min)

2.2.3. 대설 시 위성영상의 특성

대설 사례 기간 동안 강우강도가 4mm/h 이상 강하게 내린 강설 시간인 7일 07:00~11:00KST와 9일 12:00~14:00KST까지의 두 부분을 집중적으로 분석하였다.

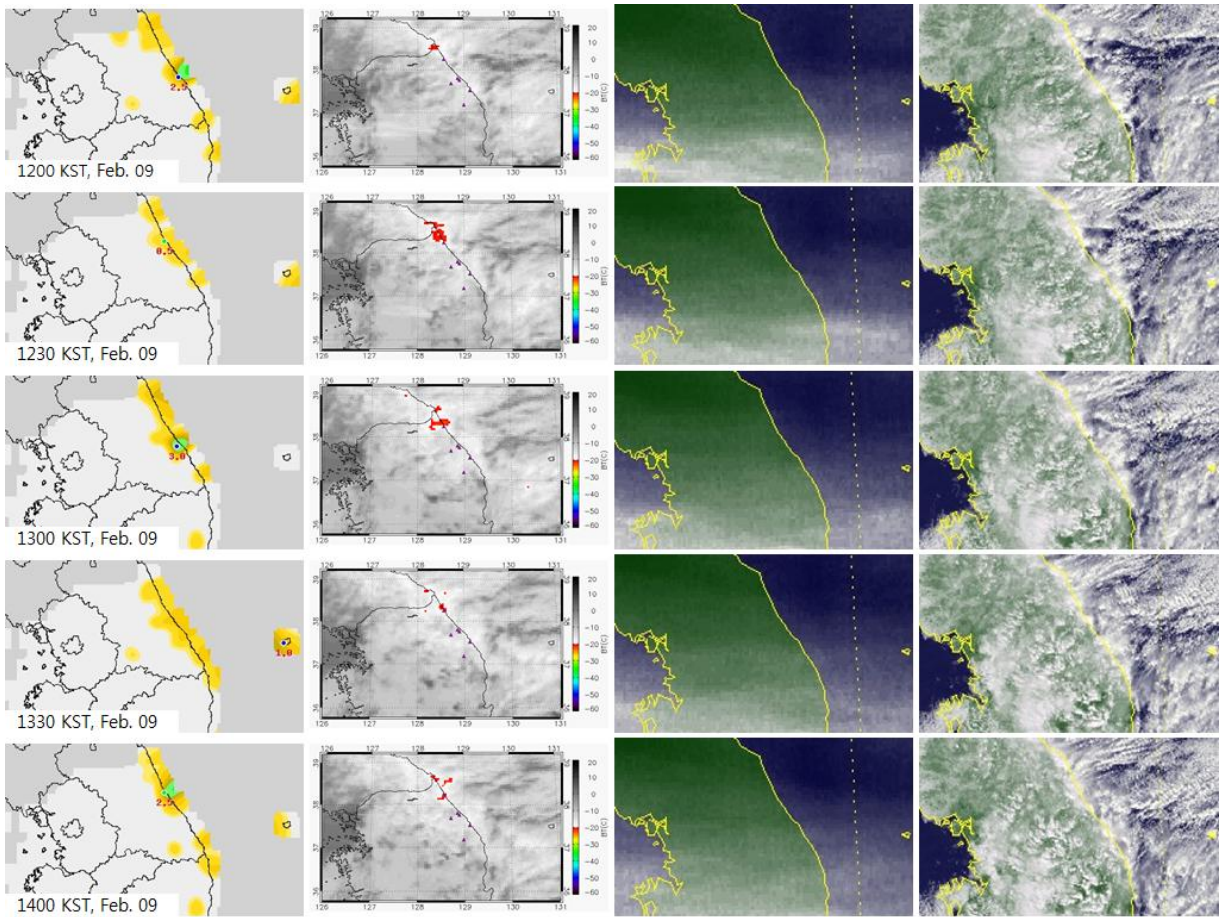
그림 2.2.4(a) AWS 강수분포에서 강설은 강원도 지역의 해안에 집중되어 내렸으며, 시간에 따라 최대 강설지역이 남하하고 있음을 볼 수 있다. 위색상 적외강조영상에서 하층운과 상층운의 영향을 알아보기 위해 적외영상에서 강조범위를 $-15\sim-40^{\circ}\text{C}$ 로 하였다. 강설이 발생한 지역의 운정온도는 약 -20°C 정도로 상대적으로 높게 나타나고 있다. 가시영상에서는 울릉도 동쪽에서부터 동해안에 이르기까지 하층운이 발생하고 있음을 볼 수 있으며 편서풍의 영향으로 구름대는 태백산맥까지만 도달하고 있다. 또한 적외영상, 수증기 및 가시영상을 비교 하였을 때 동풍에 의한 하층운과 북서쪽에서 접근하는 상층운이 중첩되어 강설에 영향을 주는 것으로 보인다. 수증기영상에서는 한반도 중부지역 전역에 수증기가 분포하고 있는 상태에서 강설이 발생하였다.



[그림 2.2.4] 대설 시 한반도 영역의 (a) AWS강수분포(15min), (b) 적외강조영상(EIR), (c) 수증기영상(WV), (d) 가시영상(VIS)

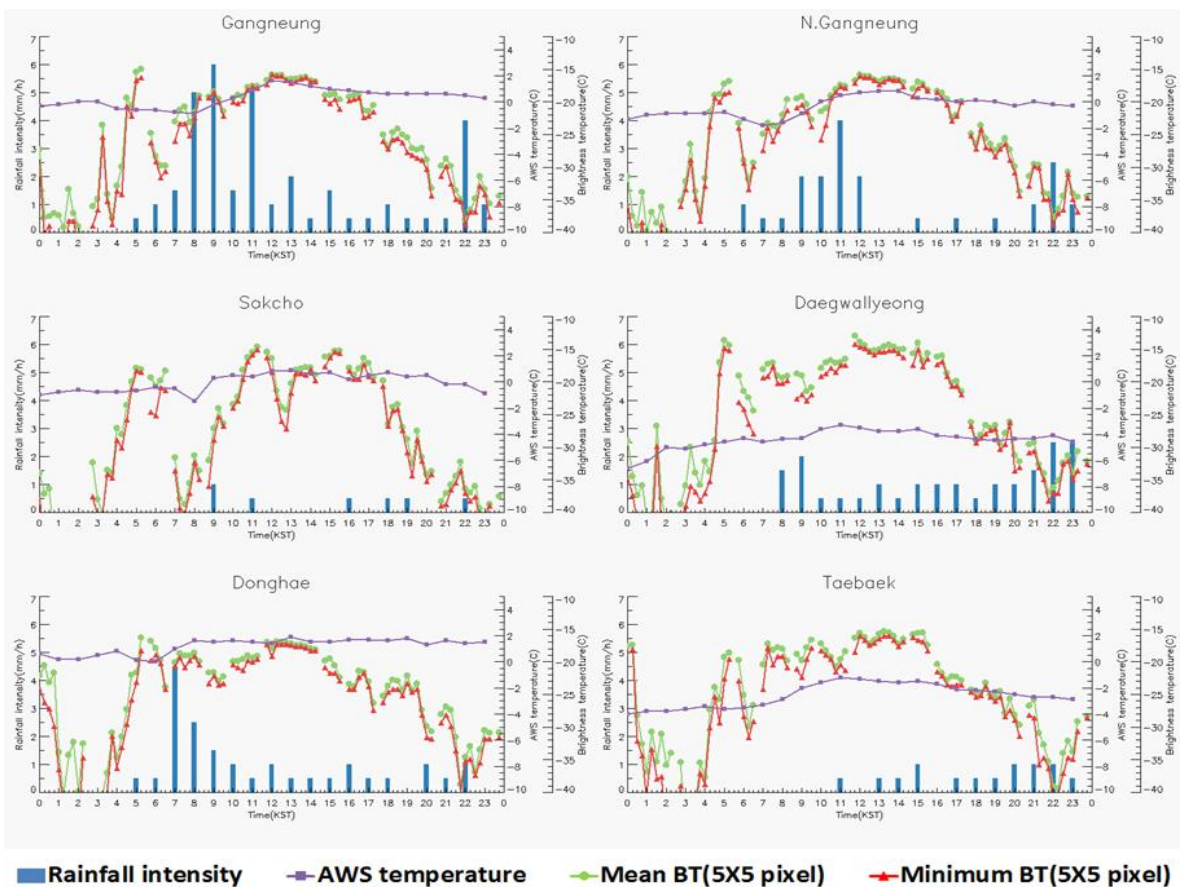
그림 2.2.5는 2월 9일 AWS 강수 분포 및 위성영상을 30분 간격으로 나타낸 것으로 7일과 같이 9일에도 강설은 강원도의 지역의 해안에 집중되었으며, 강원도 남쪽보다는 북쪽에 더 많이 내렸다. 적외강조영상에서 낮은 운정온도($< -20^{\circ}\text{C}$)의 구름은 찾아 볼 수 없어 중상층운의 영향 없이 하층운에 의해서만 내린 것으로 보인다. 하지만 강설이 많은 지역에서는 운정온도가 주위보다 상대적으로 낮게 나타나고 있어 운정온도의 상세한 분석을 통해 대설지역을 추정할 수 있음을 제시한다. 수증기영상에서는 한반도 중부 이북지역, 특히 동해에 암역이 분포하고 있으며, 이 암역이 동해상에서 대류가 발생하는 것을 억제한 것으로 보인다. 가시영상에서는 북동풍에 의해 하층운이 동해안으로 들어오는 것을 볼 수 있으며, 동해안에 강설 지역이 나타나고 있다.

(a) AWS강수분포(15min) (b) 적외강조영상(EIR) (c)수증기영상(WV) (d) 가시영상(VIS)



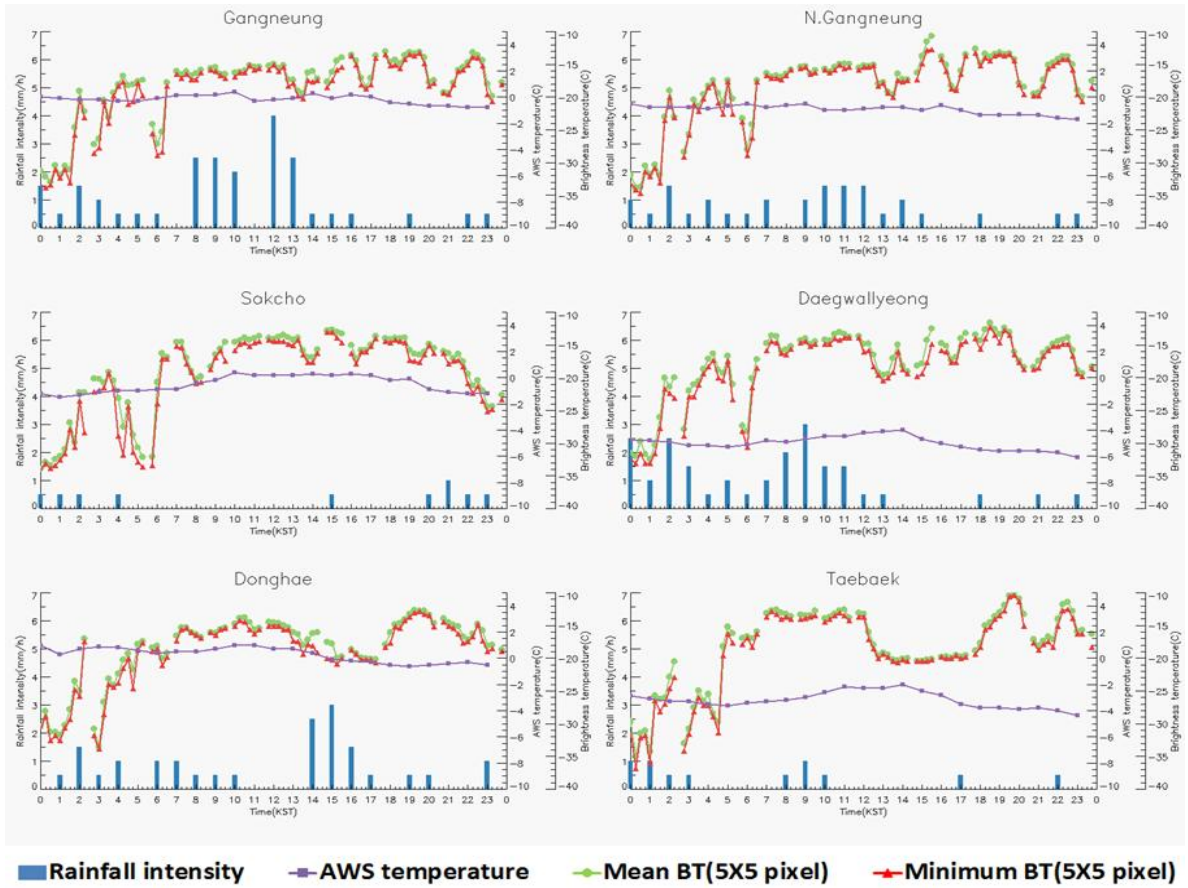
[그림 2.2.5] 대설 시 한반도 영역의 (a) AWS강수분포(15min), (b) 적외강조영상(EIR), (c) 수증기영상(WV), (d) 가시영상(VIS)

그림 2.2.6은 2014년 2월 7일 강원도 지역 인근의 AWS 6지점(강릉, 북강릉, 속초, 대관령, 동해, 태백)을 선정하여 AWS 지점에서 5X5 화소들의 휘도온도와 강우강도, 지상기온의 시계열을 나타내었다. 대설 기간 중 강우강도가 가장 강했던 7일 07:00~11:00KST에 다른 시간에 비해 높은 휘도온도(~-20℃)가 나타났다. 또한 지상의 기온은 고지대를 제외하면 0℃ 부근에서 큰 시간변화 없이 나타났다. 적외강조영상에서는 강원도 지역에 상층운의 이동이 나타나 상층운과 하층운이 동시에 작용하여 나타난 강설이라 생각되었지만 그림 2.2.6에서는 상층의 구름을 나타내는 낮은 휘도온도는 나타나지 않았다. 7일 야간에는 낮은 휘도온도(~-35℃)에서 강설이 발생하였는데 이 때 적외강조영상에서는 동해안 지역에 광범위하게 상층운이 분포하는 것을 보였다.



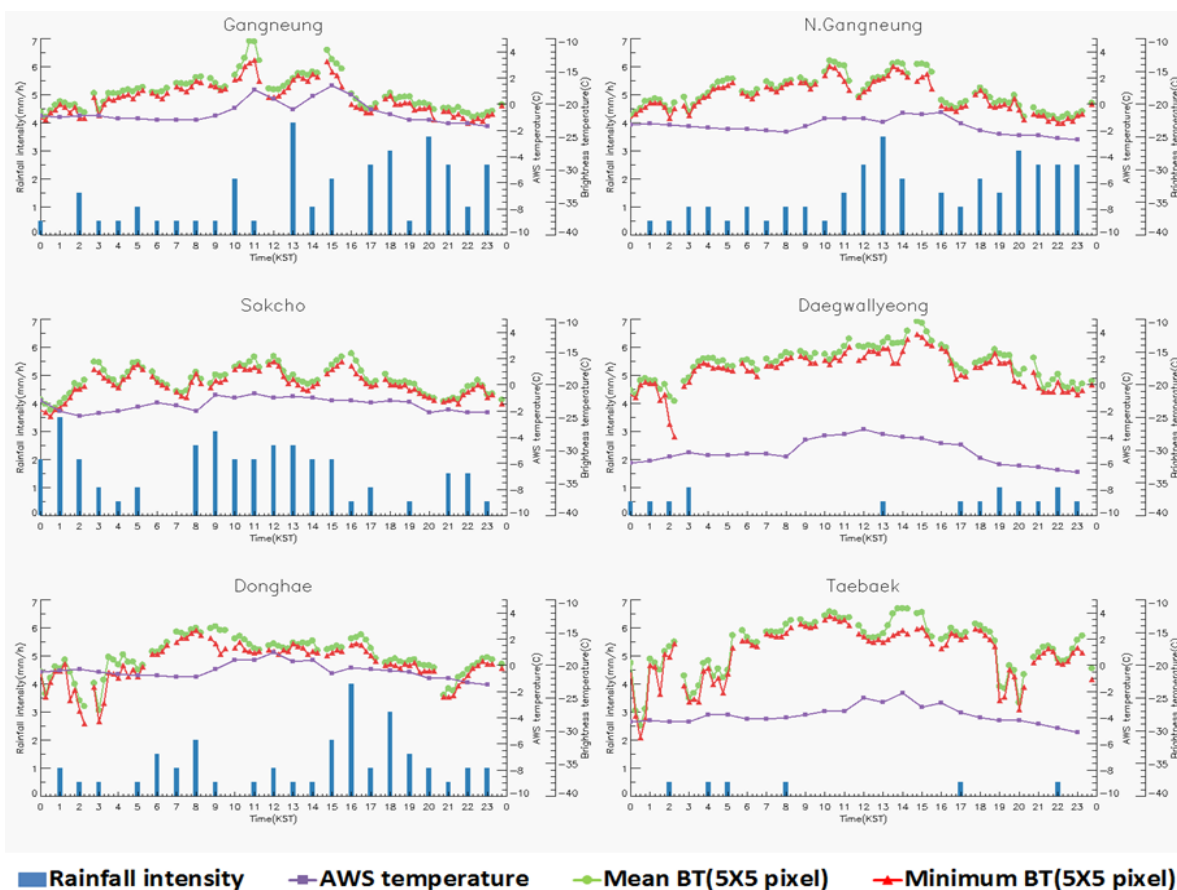
[그림 2.2.6] 2014년 2월 7일 강원도 지역의 AWS 관측소별 휘도온도와 강우강도, 지상기온

그림 2.2.7은 8일의 시계열 그래프로 대체적으로 강설이 나타날 때 휘도온도는 $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$ 사이에서 나타나며, 이는 이미 잘 알려진 바와 같이 동해안 지역에서의 강설이 하층운에서 발생하고 있음을 제시한다. 또한 공간분포에서도 상층운은 뚜렷하게 나타나지 않았다.



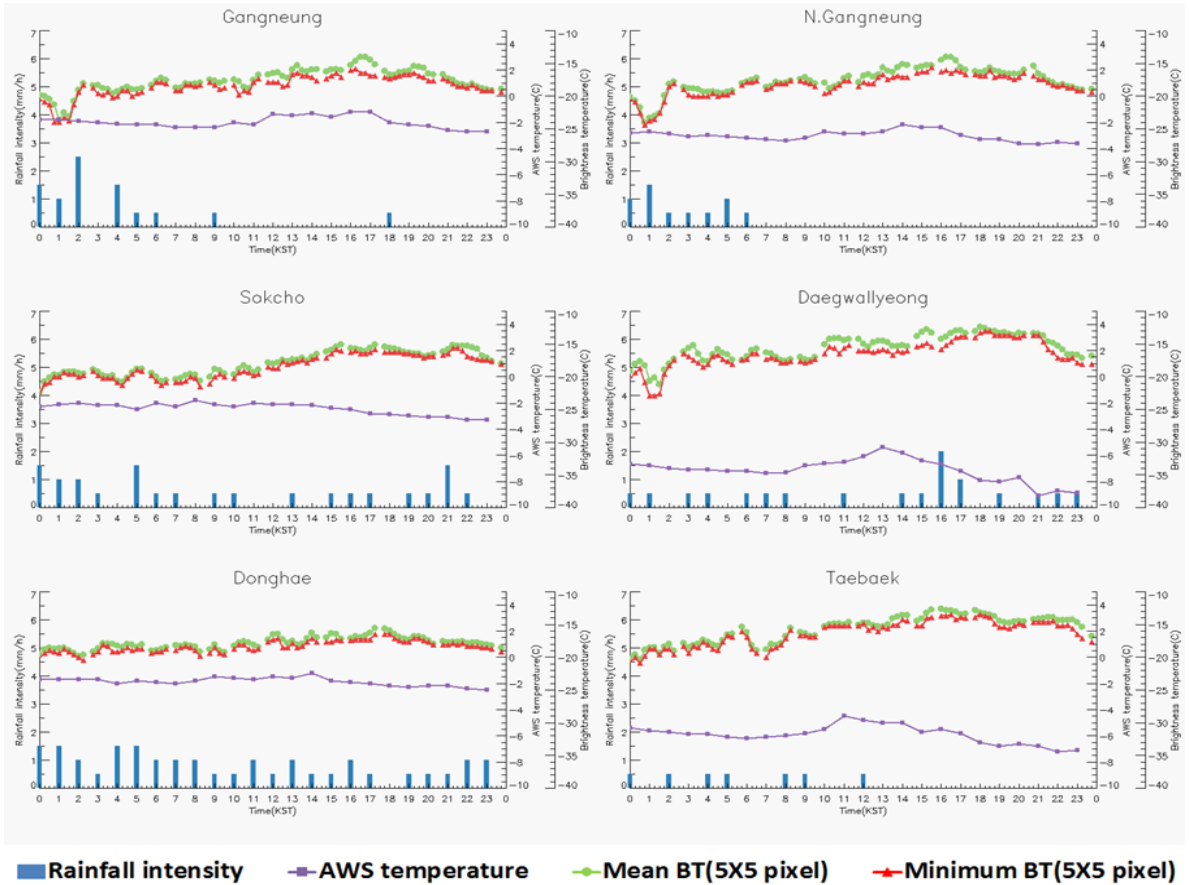
[그림 2.2.7] 2014년 2월 8일 강원도 지역의 AWS 관측소별 휘도온도와 강우강도, 지상기온

그림 2.2.8은 9일의 시계열 그래프로 휘도온도가 주간과 야간에 관계없이 -20°C 부근에서 일정하게 나타나고 있다. 지상의 기온은 고지대를 제외하면 -2°C 에서 큰 변화 없이 나타나고 있다. 그로 인해 휘도온도와 대설 사이에 특별한 특징이 나타나지 않고 있다.



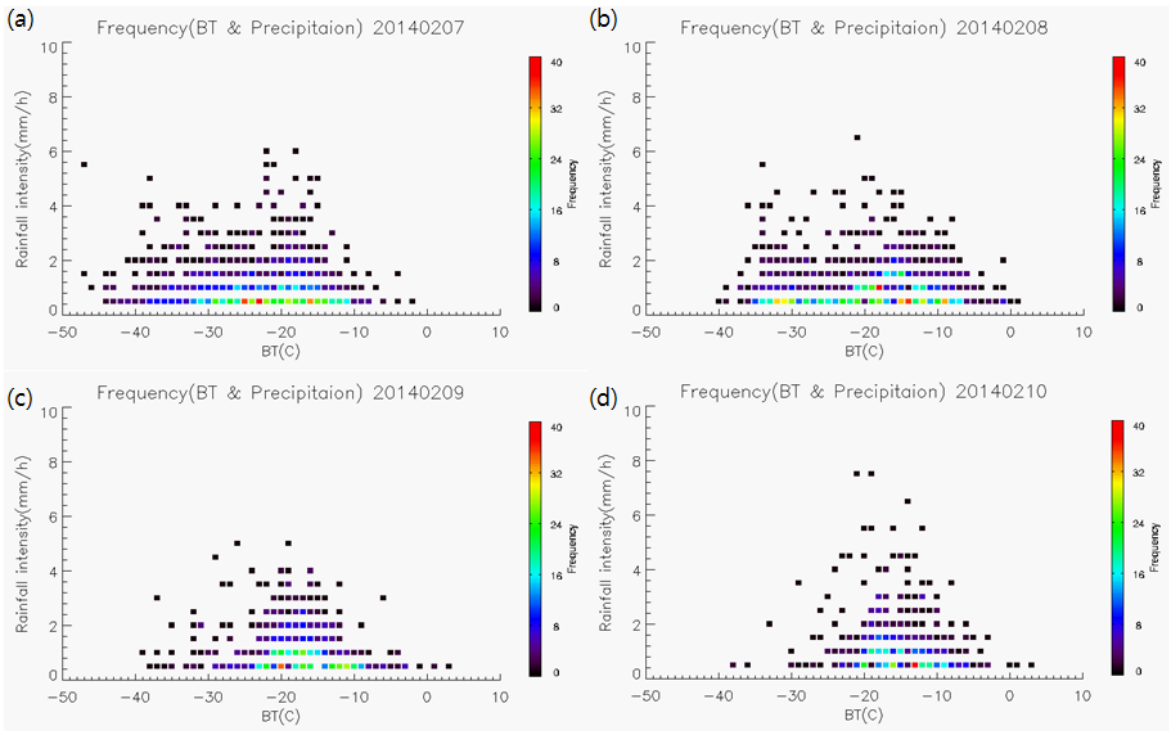
[그림 2.2.8] 2014년 2월 9일 강원도 지역의 AWS 관측소별 휘도온도와 강우강도, 지상기온

그림 2.2.9는 10일의 시계열 그래프로 대설 사례 기간 중 가장 휘도온도 변화가 적게 일어나 상층운의 영향 없이 하층운에 의해서 지속적인 강설이 발생한 것으로 보인다.



[그림 2.2.9] 2014년 2월 10일 강원도 지역의 AWS 관측소별 휘도온도와 강우강도, 지상기온

그림 2.2.10은 전국의 AWS 지점에서의 운정온도별 강수의 발생빈도를 나타낸 것이다. 7일에는 $-50\sim 0^{\circ}\text{C}$ 의 넓은 범위에서 강수가 발생하여 하층운뿐만 아니라 상층운의 영향이 있을 것으로 보이며, 8일도 휘도온도가 넓은 범위에서 나타났지만 AWS 강수 공간분포에서 동해안뿐만 아니라 서해안과 내륙지역에서도 강수분포가 나타나 강원도 지역의 강설이 상층운의 영향을 받았는지 설명하기는 어렵다. 9일과 10일은 강수의 발생빈도가 $-20\sim -10^{\circ}\text{C}$ 사이에 집중되어 나타나 하층운에 의한 강설로 보여진다.



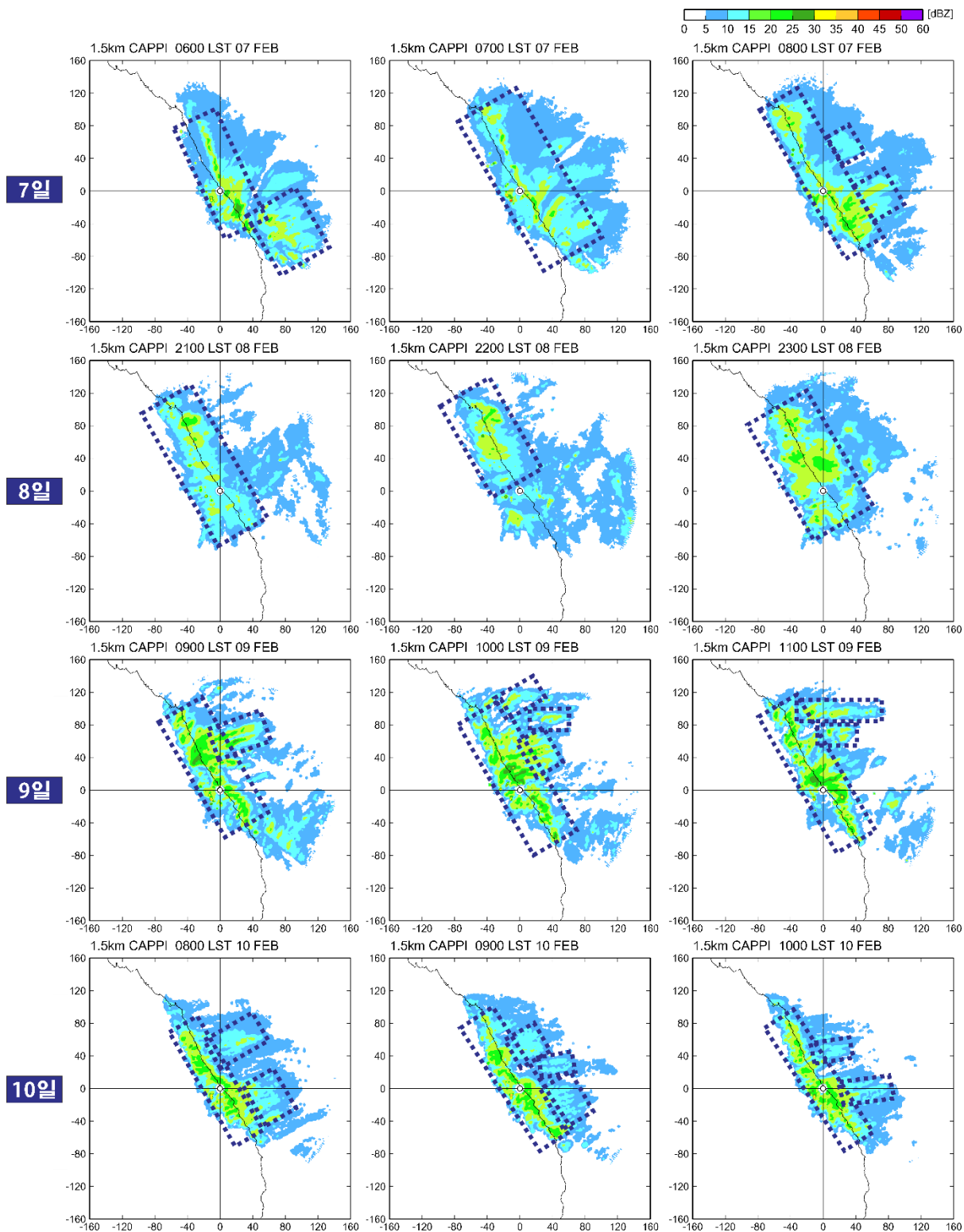
[그림 2.2.10] 운정온도 별 강우강도의 발생빈도 2014년 2월 (a) 7일, (b) 8일, (c) 9일, (d) 10일

2.3.4. 요약

2014년 2월 7~11일 대설 사례의 특징은 수증기영상에서 대설 기간에 한반도 중부지역으로 기압골이 2회 통과하면서 기압골 전면에서 발달한 구름대가 보이고 있다. 상대적으로 높은 운정온도의 하층운에서 지속적인 강설이 발생하였으며, 암역 또는 다양한 유형의 경계(Boundary)의 영향도 크게 나타나지 않았다. 하지만 대설 사례 기간 동안 동해에 양의 해수면온도 편차(Weekly SST Anmaly)가 크게 나타나 대기 하층에 열과 수분속을 충분히 제공할 수 있는 환경을 갖추었다. 또한 동해에서 해상풍은 동풍 및 북동풍을 나타내어 하층운이 지속적으로 한반도 동해안에 상륙될 수 있었다.

2.3. 레이더 분석

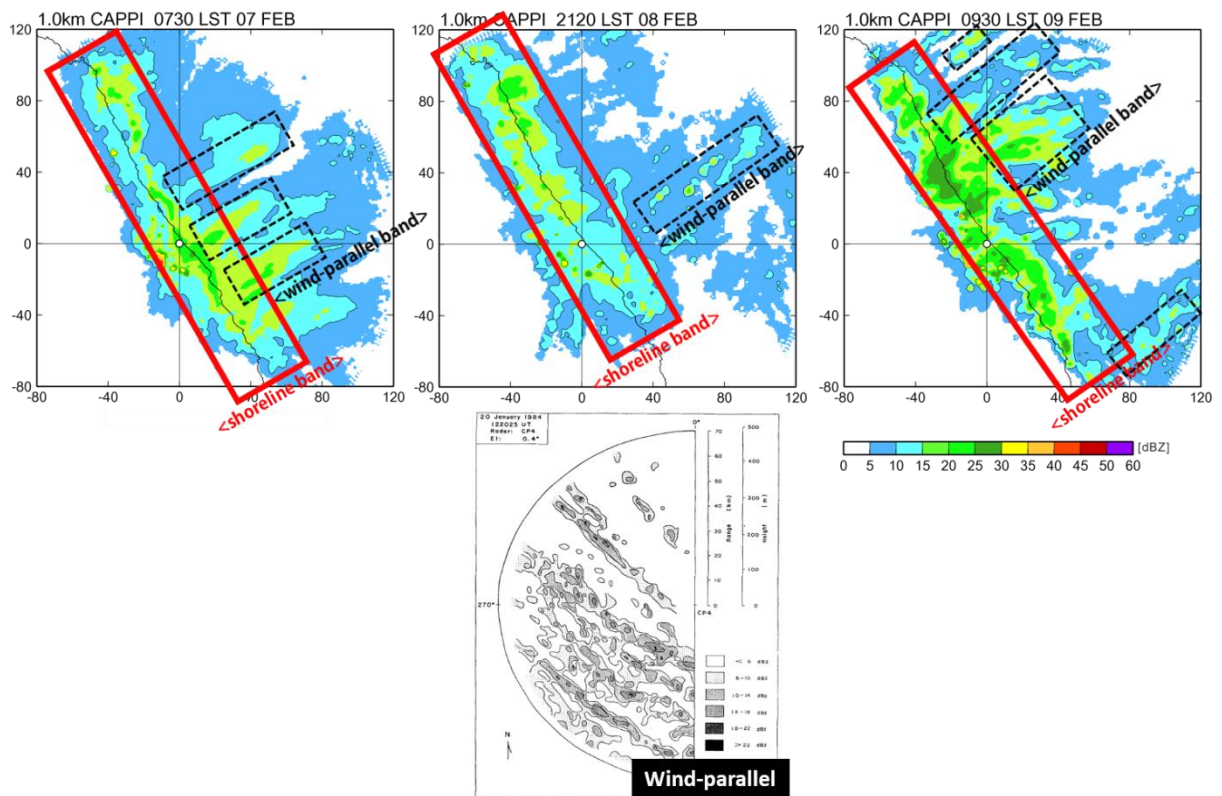
2.3.1. 레이더 수평반사도



[그림 2.3.1] 4일간의 강설시스템에 대한 1시간 간격 1.5km CAPPI 반사도 영상(2014.02.07~10)

2014년 2월 영동지역의 기록적인 폭설은 강릉에 9일 동안 110cm의 최심적설량을 기록할 만큼 많은 양의 강설을 기록하였다. 한반도 북쪽의 정체고기압과 남쪽의 이동성 저기압의 영향으로 많은 강설이 기록되었으며, 이러한 기압배치 아래 동풍과 북동풍류의 바람이 영동지역에 지배적인 영향을 미쳤다. 차가운 북동풍류는 상대적으로 따뜻한 수온의 동해를 지나면서 많은 양의 수증기를 공급받아 강설시스템으로 발달하였다. 그림 2.3.1은 4일간(7-10일) 영동지역에 나타난 강설시스템에 대한 1.5km CAPPI 수평반사도 분포를 나타낸 그림이다. 4일 동안 강설시스템은 대부분 영동지역의 해안가에 집중되었으며, 해안선을 따라 길게 늘어진 형태로 분포하였다. 북동쪽으로부터 지속적으로 유입되는 셀과의 병합은 해안가 주변의 강설시스템이 계속 유지될 수 있는 원인이 되었던 것으로 사료된다.

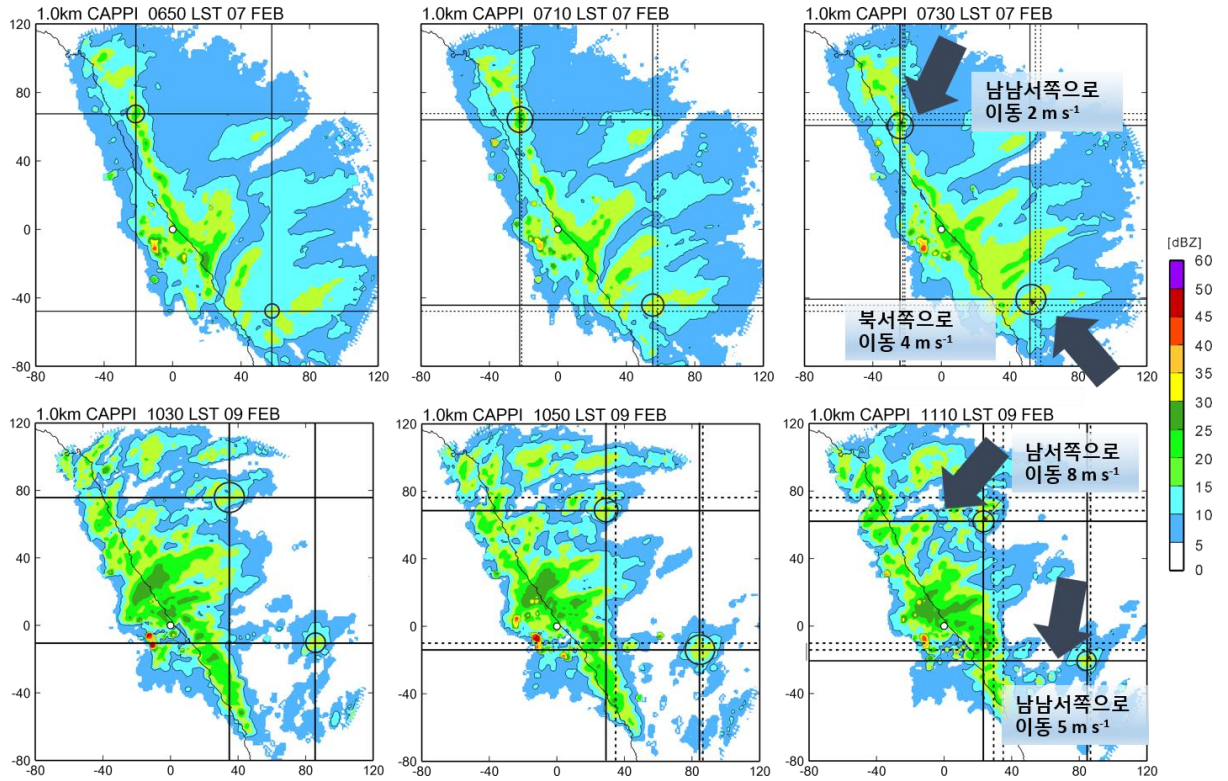
비교적 차가운 공기가 따뜻한 해수면을 지나면서 구름이 발생하게 되는 Ocean-effect(Lake-effect)는 영동지역 강설의 대표적인 강설시스템 발달 원인으로 지목된다. 해당 사례도 마찬가지로 차가운 북동풍이 따뜻한 해수면으로부터 수증기를 공급받아 강설시스템으로 발달한 사례이며, 바람방향과 평행하게 발생하는 Wind-parallel 형태의 구름이 영동 해안가에서 Shoreline 형태로 수렴하는 모습을 보인다(그림 2.3.2).



[그림 2.3.2] 07일 0730-0930KST의 1시간 간격 1km 수평반사도 CAPPI 와 Kristovich(1933)에 의한 Wind-parallel 형태 구름의 예시

강설 셀들의 이동방향 및 속도를 알아보기 위해 그림 2.3.3에 07일과 09일 20분 간격 셀 이동에 따른 이동방향과 이동속도를 나타내었다.

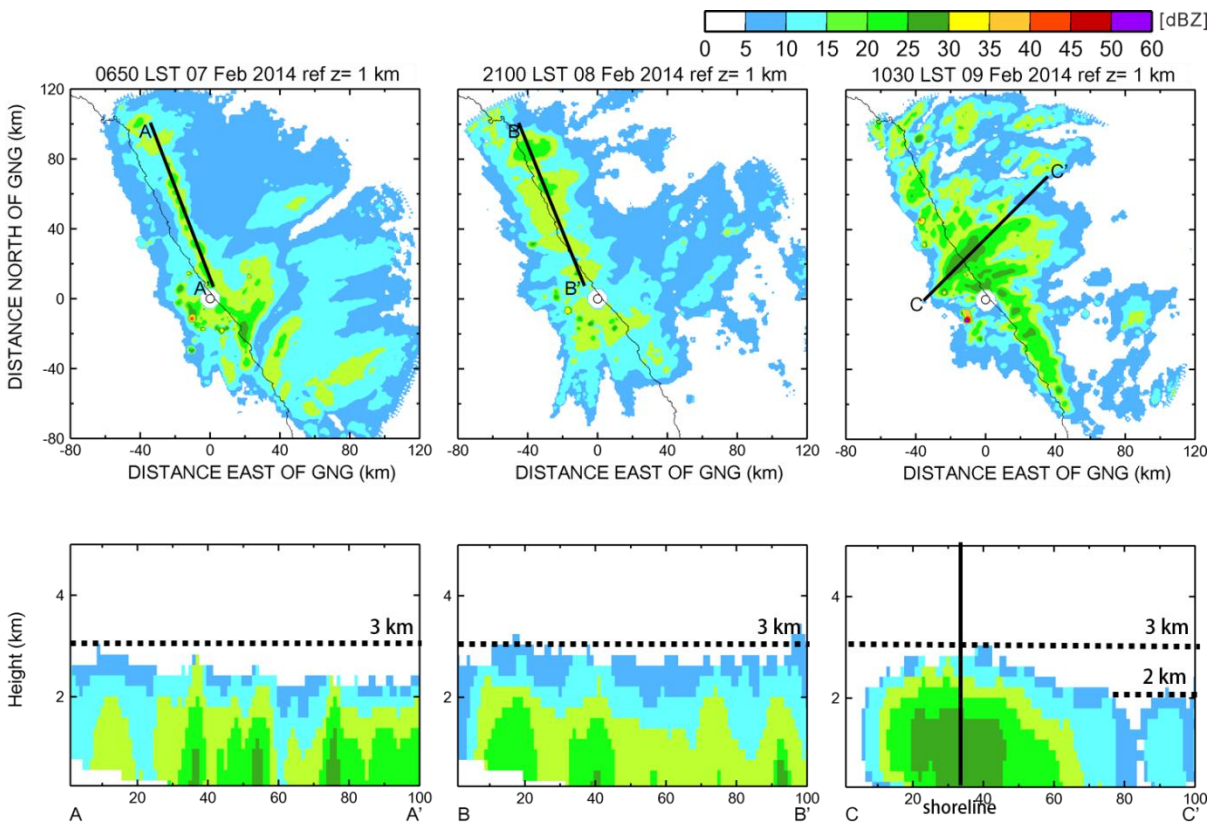
07일의 경우, 강릉 레이더 남동쪽에서 북서방향으로 이동하는 셀과 북쪽에서 남서 방향으로 이동하는 셀을 가진 두 가지 이동모습이 나타났으며, 이는 종관 바람패턴의 영향에 의한 것으로 사료된다. 9일 강릉 북쪽 셀의 이동속력(8m/s)을 제외하고는 대부분 3-5m/s 의 속력으로 이동하였다.



[그림 2.3.3] 07일, 9일 각각 0650-0730KST와 1030-1110KST의 20분 간격 1km 수평반사도 CAPPI 와, 셀의 이동에 따른 이동벡터

2.3.2. 레이더반사도의 연직 단면분석

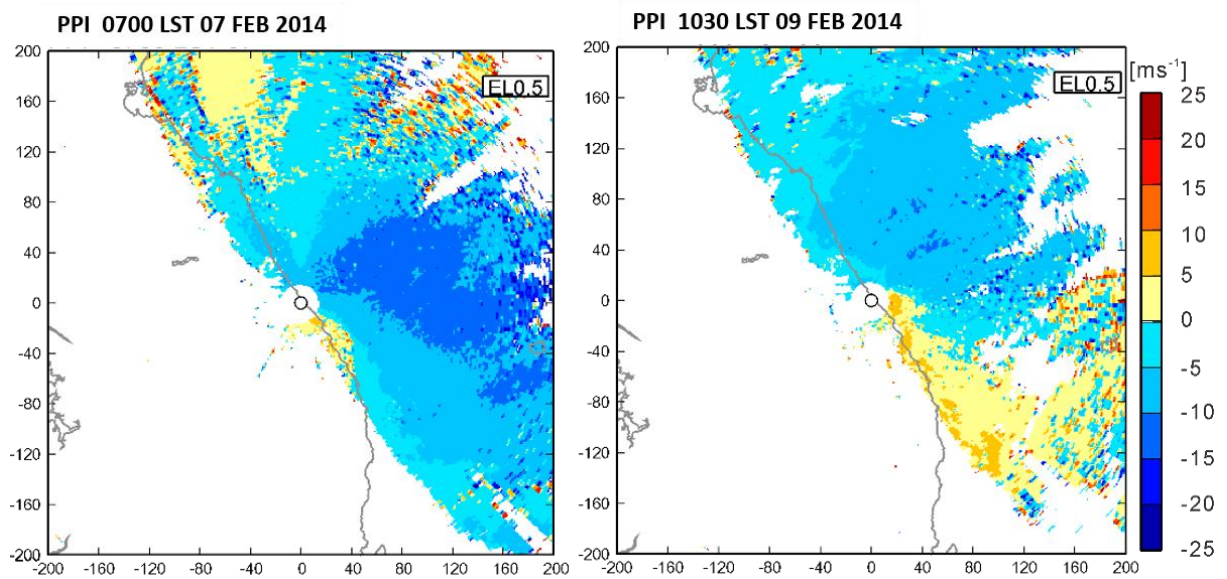
그림 2.3.4는 강설시스템의 연직적 발달구조를 나타내기 위해 선(A-A', B-B', C-C')에 따른 반사도의 연직 단면도를 나타낸 그림이다. 07, 08, 09일에 대해 대부분의 강설 시스템의 높이는 3km 고도 밑으로 발달하였으며, 25dBZ 이상의 반사도가 약 1.7km 고도 까지 발달한 영역(09일) 또한 반사도의 최대 높이는 3km 로 나타났다. 또한, 9일의 경우 해안선으로 접근하기 전의 강설 셀들의 높이는 약 2km 고도의 높이였으나, 해안선 인근지역에서 발달한 셀의 높이는 3km 로써, 해안가에 들어와서 구름의 높이가 발달되었음을 알 수 있다.



[그림 2.3.4] 7일-9일의 1km 수평반사도 CAPPI 영상과, 선(A-A', B-B', C-C')을 따르는 반사도의 연직단면도

2.3.3. 레이더 시선속도

그림 2.3.5는 시스템의 이동을 파악하기 위한 2014년 2월 7일 0700KST와 2월 9일 1030KST의 시선속도 PPI(0.5°) 자료이다. 대표적인 시선속도의 형태 두 가지를 나타내었다. 07일 0700KST의 경우, 강설 시스템의 시선속도로 유추된 바람 방향은 동풍계열이며 09일 1030KST에 나타나는 시선속도로 판단한 바람방향은 북동풍이다. 강설시스템의 발달고도는 3km 내외이기 때문에 저 고도각의 시선속도 자료의 사용이 보다 넓은 범위의 강설에 대한 판단이 가능할 것으로 사료된다. 하지만, 저 고도각은 지형의 차폐로 인해 제한적인 영역의 시선속도 자료를 제공한다.

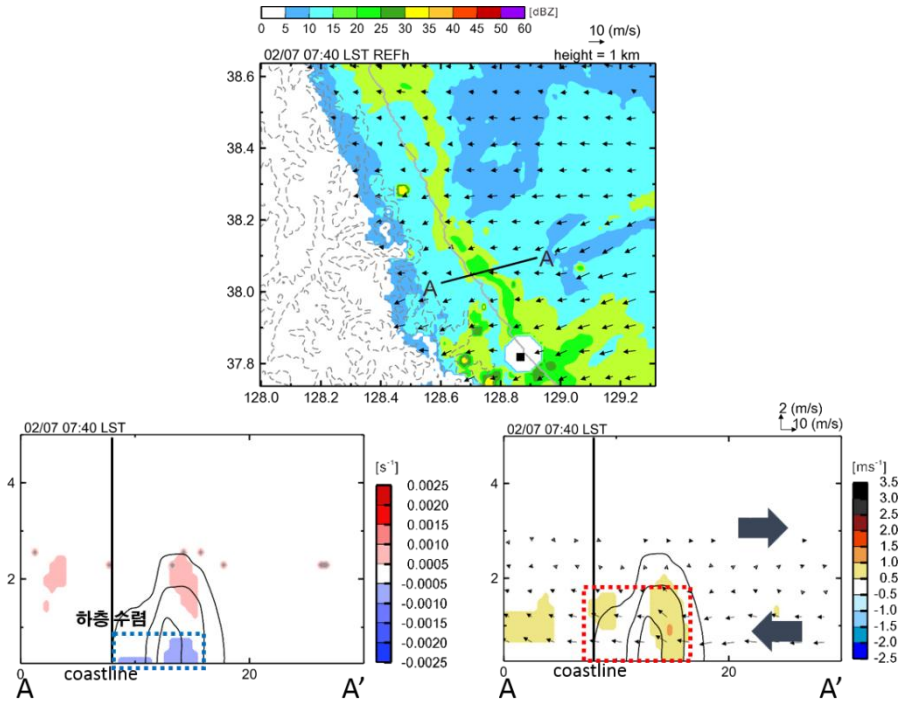


[그림 2.3.5] 7일 0700KST와 9일 1030KST의 시선속도 PPI(0.5°) 영상

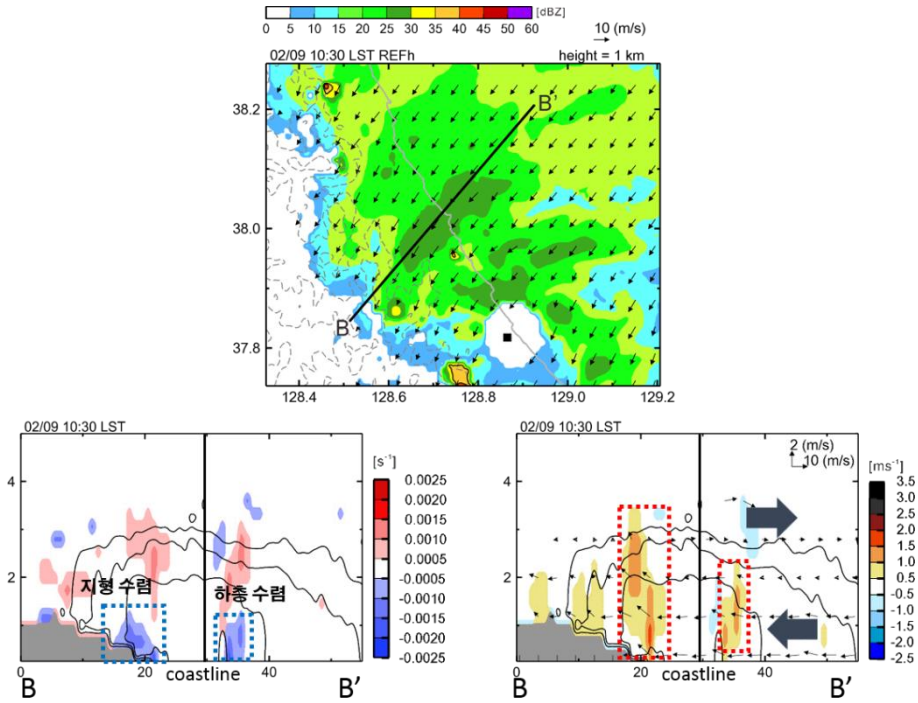
2.3.4. 이중바람장 분석

그림 2.3.6과 그림 2.3.7은 이중 도플러 레이더 분석 결과를 나타내었다. 7일 0740KST 1km 고도 수평 바람 분포에서는 시스템 내부에 수평적으로 동풍계열의 약한 바람 시어가 나타났다. 강릉 레이더 동쪽에서 나타나는 10m/s 이상의 바람은 북쪽과 북동지역의 약한 바람보다 비교적 강하게 나타났으며, 이는 대기의 종관적인 환경요인에 의한 것으로 사료된다. 해안선을 따라 길게 늘어진 15dBZ 이상의 영역에 대해 시스템 내부 바람방향에 따른 선 A-A'의 연직단면도로 나타나는 발산장을 그림 2.3.6의 좌측하단에 나타내었다. 해안선을 기준으로 서쪽하층에 약한 수렴($> -0.001s^{-1}$)이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 우측하단에 나타나는 수직 대기의 흐름은 해안선을 기준으로 2km 고도 아래에서 모두 약한 상승류($< 1m/s$)가 나타남을 알 수 있다.

9일 1030KST 1km 높이의 수평 바람 분포에서 나타나는 시스템 내부의 바람방향은 북동풍이 지배적으로 나타나며 약 8m/s의 풍속을 가졌다. 바람방향에 따른 연직단면도는 그림 2.3.7의 아래그림과 같다. 수평바람의 시어는 나타나지 않았으나, 좌측 하단에 나타나는 발산장은 그림 2.3.6과 같이 해안선을 기준으로 서쪽하층 수렴지역에 존재하며 지형고도에 따라 하층에서 상대적으로 강한 수렴지역이 나타났다. 이때의 대기의 연직운동은 우측하단에 나타나는 것과 같이 하층에 수렴영역이 나타나는 지역에서 따라 상승류가 나타나며, 지형고도에 따라 3km 고도 까지 최대 1.5m/s의 상승류가 나타났다.

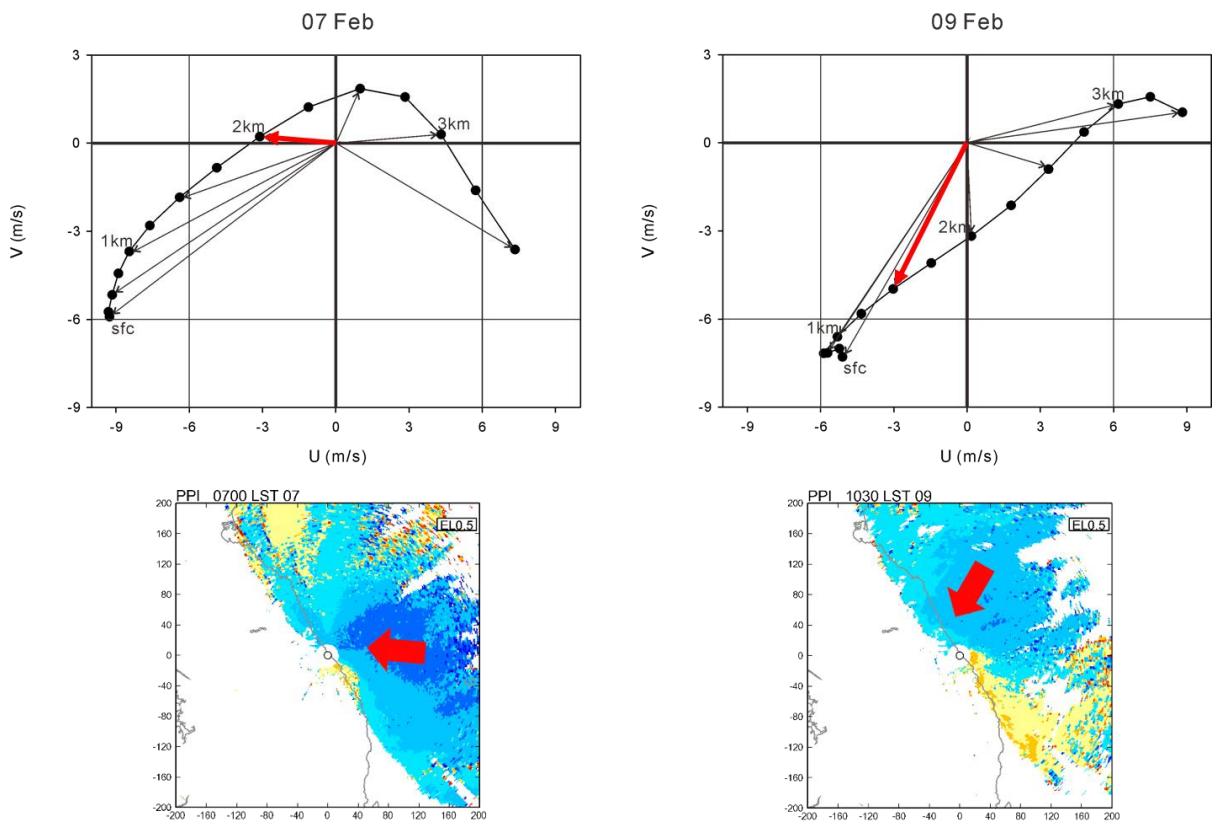


[그림 2.3.6] 이중 도플러 레이더 분석결과(2014. 02. 07. 0740KST). 1km 수평반사도 CAPPI와 수평 바람분포(상), A-A' 선에 따른 발산(Shaded; 좌측하단)에 대한 연직단면도와 상승류(Shaded; 우측하단)에 대한 연직 단면도



[그림 2.3.7] 이중 도플러 레이더 분석결과(2014. 02. 09. 1030KST). 1km 수평반사도 CAPPI와 수평 바람분포(상), A-A' 선에 따른 발산(Shaded; 좌측하단)에 대한 연직단면도와 상승류(Shaded; 우측하단)에 대한 연직 단면도

그림 2.3.8은 산출된 3차원 바람장값을 이용하여 시스템 내부 바람(지상으로부터 3.5km)을 호도그래프로 나타낸 그림이다. 07일의 경우 하층의 바람은 북동풍으로 나타나며, 고도에 따른 순전 방향을 따라 2km 고도에서는 동풍의 바람이 나타난다. 2.5km 고도 이상에서는 남서풍과 서풍계열 바람이 나타난다. 09일의 경우 07일과 마찬가지로 하층의 바람은 북동풍으로 나타나며 1.5km 고도까지 풍향의 변화가 거의 없이 북동풍의 바람이 나타난다. 2km 이상의 대기 바람은 북서풍과 서풍계열로 반전되어 나타난다. 호도그래프에 나타난 1.5-2km 사이의 바람 방향은 시선속도를 통해 판단된 바람의 방향과 매우 유사하게 나타나며, 강수시스템의 이동방향을 판단하기 위해 사용되는 850-300hPa 고도와는 구별이 된다.



[그림 2.3.8] 이중 도플러 레이더 분석으로 산출된 3차원 바람장 결과를 통해 나타낸 호도그래프 (07일, 09일)

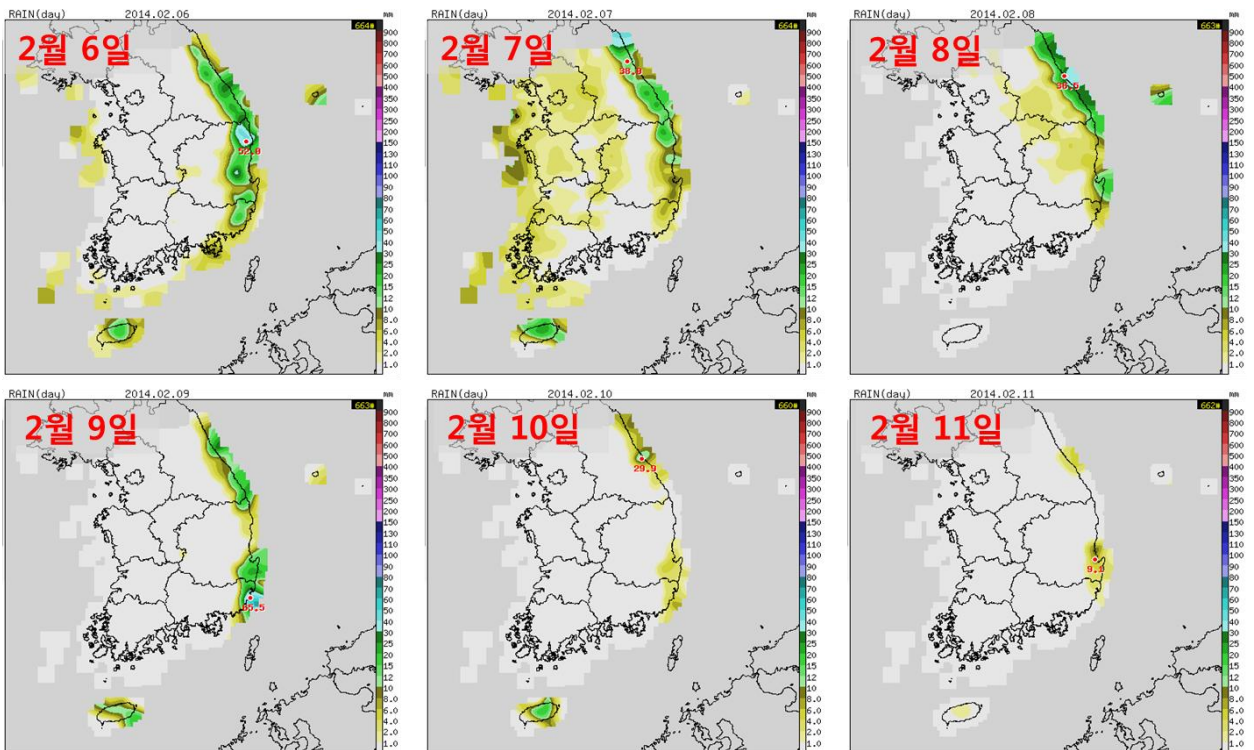
3

예측 자료 분석

3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석

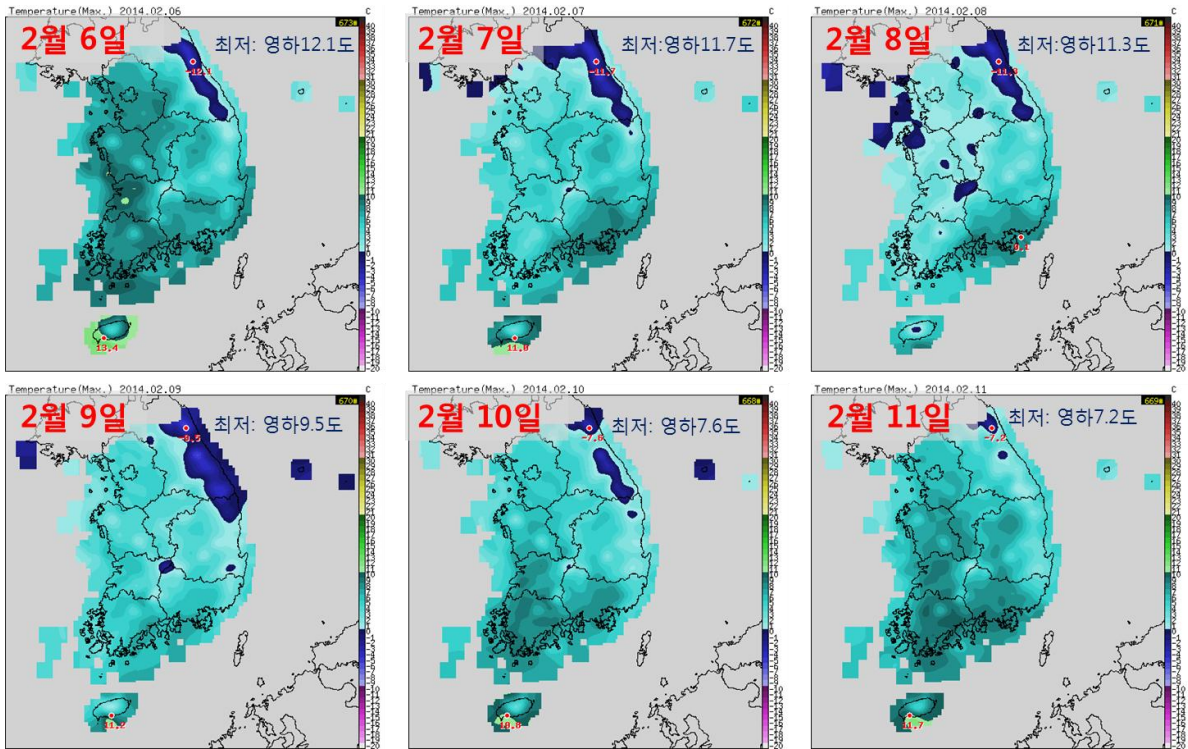
3.1.1. 지역예보모델(RDAPS)와 국지예보모델(LDAPS)의 강수 예측

본 사례는 2014년 2월 영동지역으로 약 일주일간의 대설이 지속된 사례로, 시베리아 고기압의 확장
과 한반도 남쪽으로 저기압이 지나는 중관 상황에서 영동지역으로 지속적인 동풍의 유입이 가능하였
으며 높은 해기차에 의해 공급된 많은 수증기와 하층 대기불안정에 의해 발생하였다. 그림 3.1.1과
3.1.2는 2014년 2월 6일부터 11일까지 6일 동안 AWS에서 측정된 일누적 강수량과 일최고 지상기온
의 공간분포를 보여주고 있다. 2월 6일에는 태백산맥을 따라 동쪽 능선 부근으로 10mm/day 이상 (최
대 52mm/day)의 강수가 기록되었으며, 7일에는 영동지역의 강수(최대 39mm/day)와 함께 서해상으
로 발달한 중규모 기압골의 영향으로 수도권 지역과 충청북 및 서해안 연안 지역으로도 10mm/day
내외의 강수가 내렸다. 8일-10일까지 영동지역으로는 지속적으로 10-30mm/day(최대 30-
37mm/day)의 강수가 측정되었으며 11에는 소강 상태로 접어들었다. 동 기간 동안 영동지역의 일최
고 기온은 영하의 낮은 기온을 기록하였으며, 일최고 기온의 최저값은 영하 7-12℃를 나타내었다.



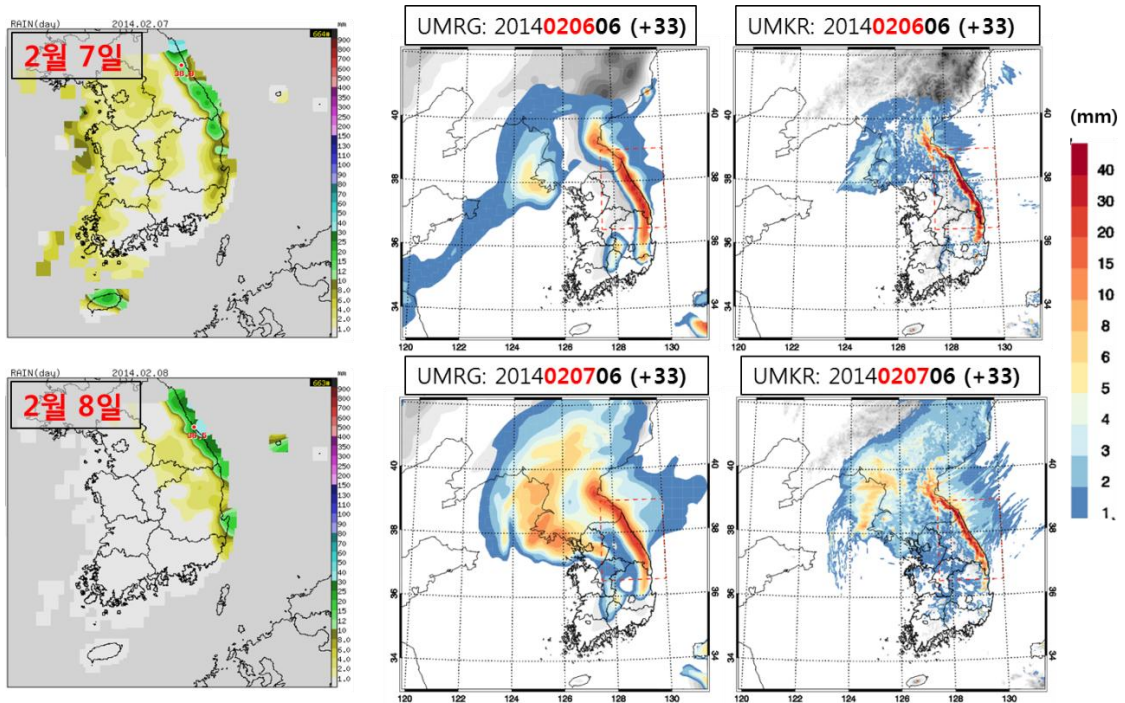
[그림 3.3.1] 2014년 2월 6일에서 11일까지의 AWS에서 측정된 일누적 강수량 공간분포

3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석



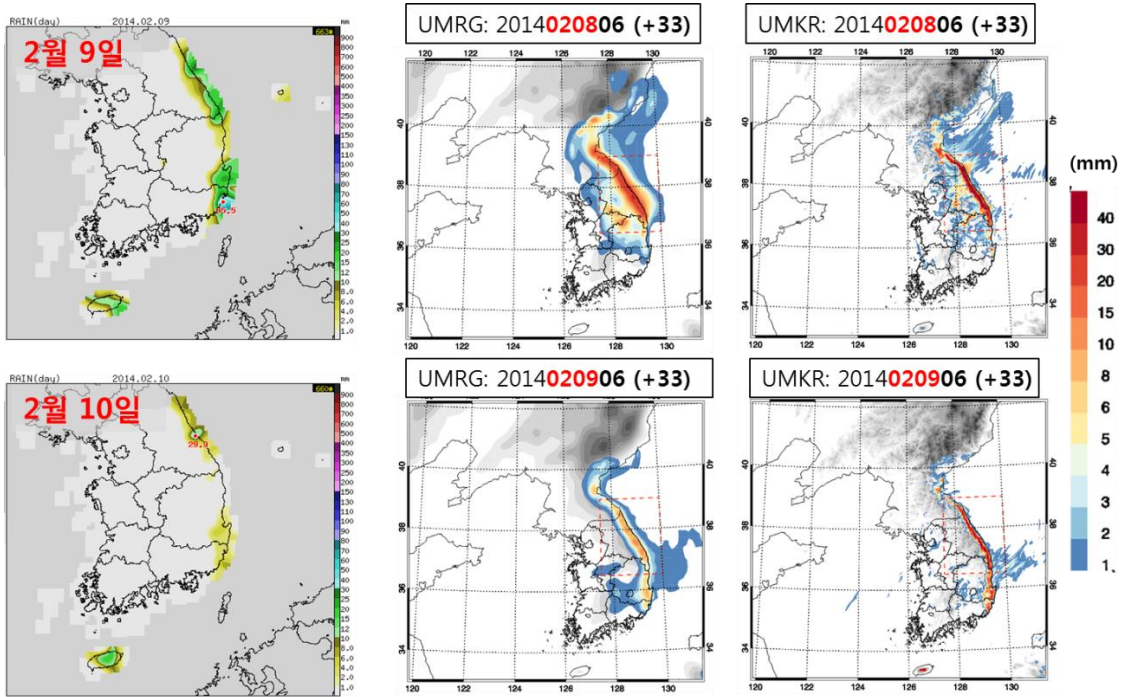
[그림 3.1.2] 2014년 2월 6일에서 11일까지의 AWS에서 측정된 일최고 지상기온 공간분포

그림 3.1.3과 3.1.4는 2월 7일부터 10일까지의 지역예보모델(RDAPS)과 국지예보모델(LDAPS)의 예측 일누적 강수량과 AWS 지상 관측 강수량을 비교하고 있다. 영동지역(붉은색 점선 표시)을 중심으로 살펴보면, 두 모델 모두 기간동안 10-30mm/day 내외의 높은 강수량을 모의하고 있으며 관측 강수량과 잘 일치하고 있다. 지역예보모델은 9일에서 10일 사이에 10mm/day 이내로 약해진 강수량을 잘 예측하고 있다. 반면 남부(부산 및 포항) 지역과 수도권 주변 지역으로 발생했던 강수량은 예측 오차가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 두 모델의 격자 해상도 차이로 인해 지역예보모델과 국지예보모델의 강수 구역의 범위는 다소 차이를 보인다. 그림 3.1.5는 두 모델의 적분시간별로 예측된 영동지역 평균 강수량의 시계열과 앙상블 평균을 나타내고 있다. 주로 7일부터 9일 사이에 집중되었던 관측 강설의 패턴을 잘 모의하고 있다. 영동지역의 좋은 예측성은 모델이 중관 규모 기압 배치를 적절히 모의함으로써 영동 지역으로의 동풍 유입과 높은 해기차에 의한 대기 불안정 조건을 만족하여 대설이 가능한 조건을 유지할 수 있기 때문이다.

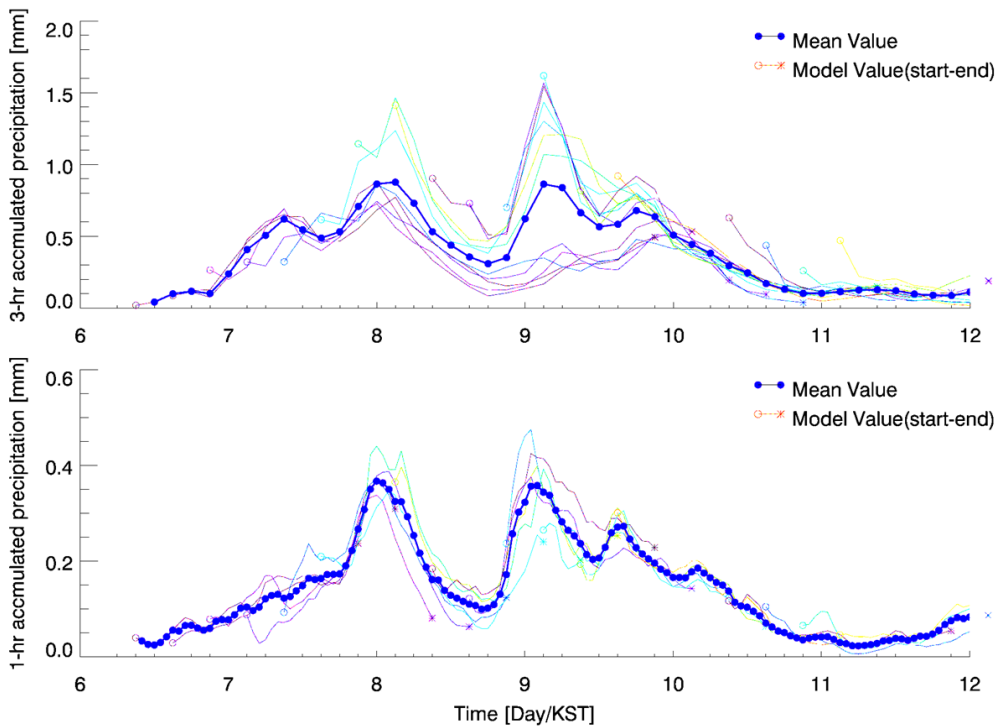


[그림 3.1.3] 2014년 2월 7일과 8일의 지역예보모델(RDAPS)과 국지예보모델(LDAPS)의 예측 일누적 강수량과 AWS 관측 결과 비교

3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석



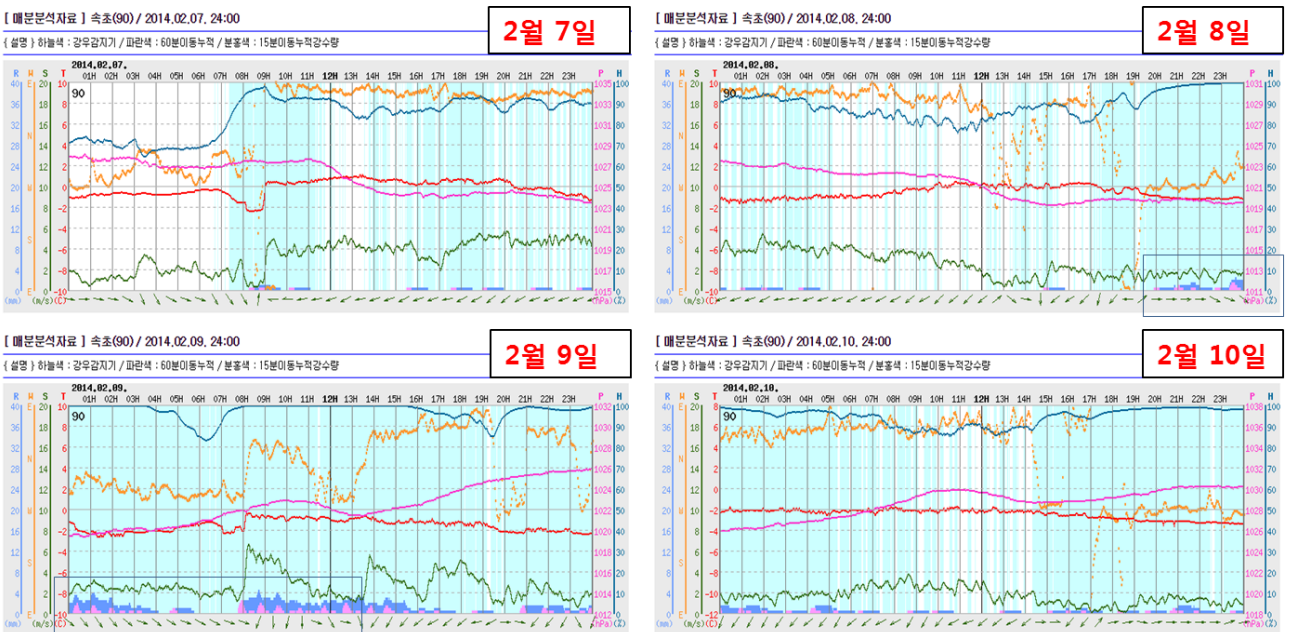
[그림 3.1.4] 2월 9일과 10일의 지역예보모델(RDAPS)과 국지예보모델(LDAPS)의 예측 일누적 강수량과 AWS 관측 결과 비교



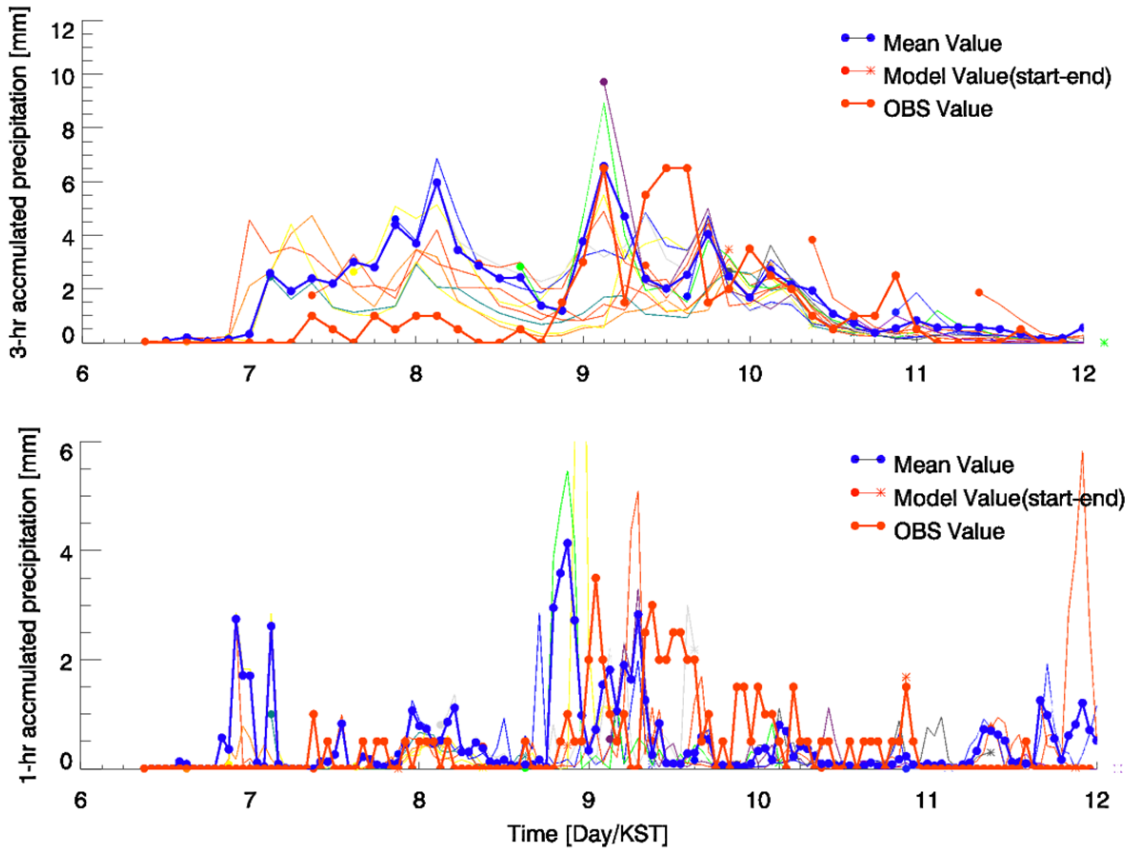
[그림 3.1.5] 2014년 2월 6일~11일 사이의 지역예보모델(RDAPS)(상)과 국지예보모델(LDAPS)(하)의 영역 평균(그림 3.1.3과 3.1.4의 붉은 사각 영역)된 시간별 예측 강수량 비교. RDAPS는 세시간 누적 강수량을, LDAPS은 한시간 누적 강수량을 각각 나타냄. 평균값은 적분 시작 시간별 모델 예측 결과의 앙상플 평균을 나타냄

3.1.2. 지역예보모델(RDAPS)와 국지예보모델(LDAPS)의 강수 예측: 속초와강릉 지점

그림 3.1.6과 3.1.7은 속초 지점에서 관측된 강수량과 예보모델에 의해 예측된 강수량을 나타내고 있다. 2월 7일부터 10일 사이 거의 대부분의 시간에서 강수가 있었으며 8일 야간부터 9일 사이에 강수량이 높게 관측되었다. AWS 관측된 7일과 11일 사이의 누적 강수량은 약 55.5mm이었으며, 지역예보모델과 국지예보모델의 동 기간 동안의 누적 강수량은 각각 86.7mm와 59.5mm로 관측된 대설을 잘 예측하였다고 판단할 수 있다. 특히 국지예보모델의 경우에는 강수 강도도 관측과 아주 유사하게 모의하고 있다.

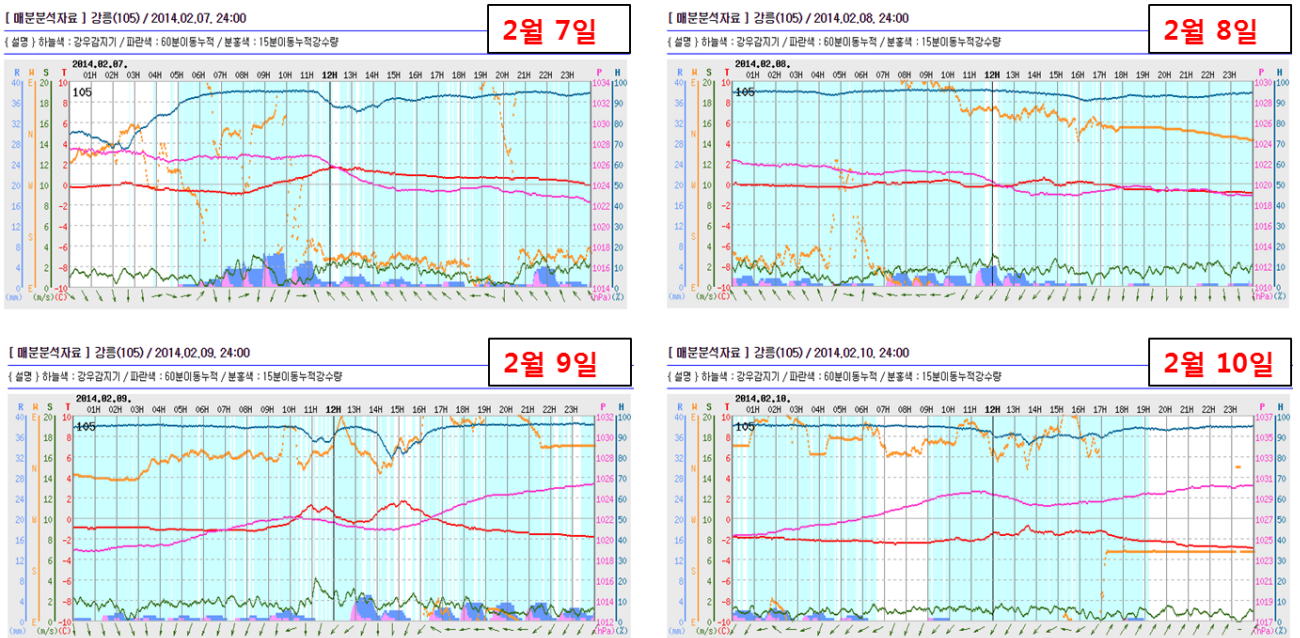


[그림 3.1.6] 2014년 2월 7-9일의 속초지점 AWS 관측 기상장 시계열

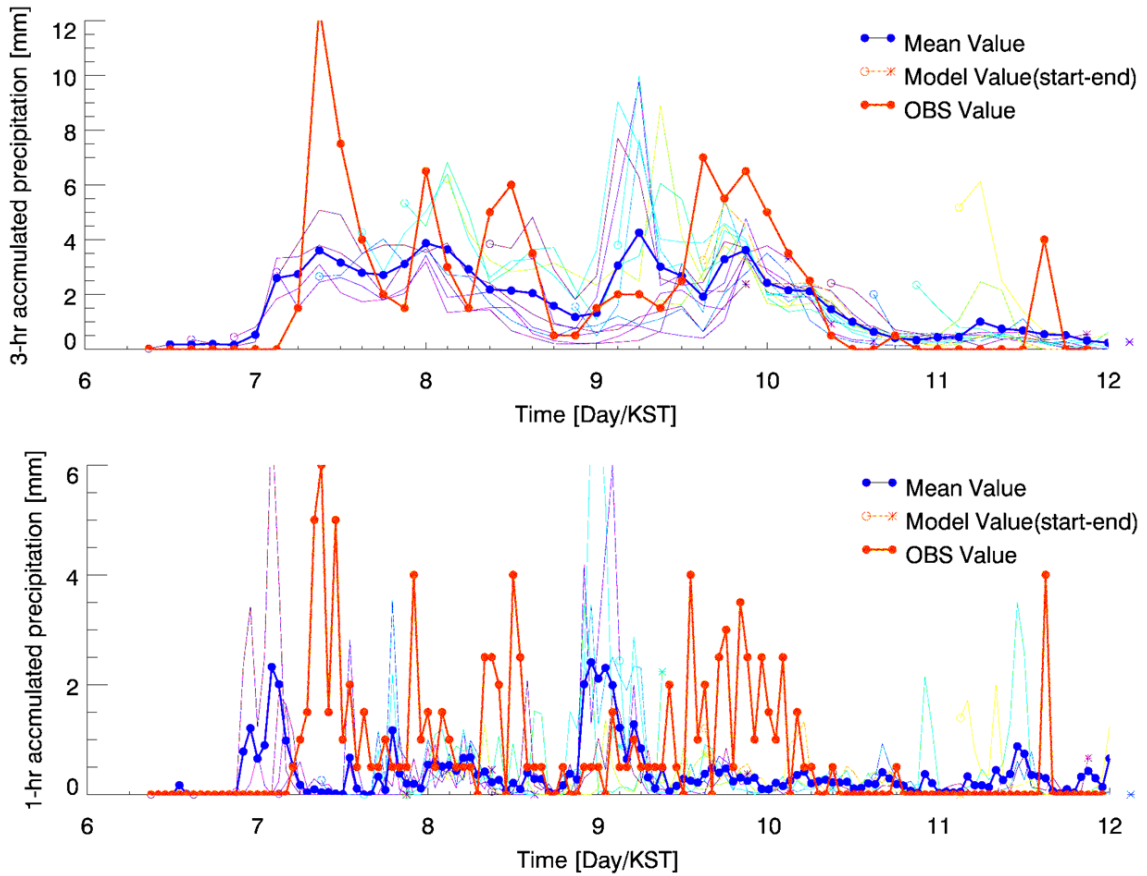


[그림 3.1.7] 2014년 2월 6일-11일의 지역예보모델(RDAPS)(상)과 국지예보모델(LDAPS)(하)의 시간 별 예측 강수량과 속초 지점 AWS 관측 결과 비교. RDAPS는 세시간 누적 강수량을, LDAPS은 한시간 누적 강수량을 각각 나타냄. 모델의 예측 결과의 양상을 평균을 함께 나타내었음

그림 3.1.8과 3.1.9는 강릉 지점에서 관측된 강수량과 수치예보모델에 의해 예측된 강수량을 비교하고 있다. 속초와는 달리 2월 7일 오전부터 10일 아침까지 지속적으로 강수가 기록되었으며, 수 시간 간격으로 강수 강도의 주기적 패턴이 나타나고 있다. 이는 얇은 대류셀에 의한 강설에 기인하는 것으로 의한 것으로 보여진다. AWS 관측된 7일과 11일 사이의 누적 강수량은 약 100.0mm이었으며, 지역예보모델과 국지예보모델의 동 기간 동안의 누적 강수량은 각각 91.4mm와 52.5mm로 관측된 대설을 잘 예측하였다. 모델 예측강수의 시점이 관측에 비해 약 6시간 빠르게 나타나고 있으나, 강수 지속시간에서도 좋은 예측 성능을 보여주고 있다. 국지예보모델은 속초지점에서와 마찬가지로 관측 강수 강도를 잘 모의하고 있다.



[그림 3.1.8] 2014년 2월 7-9일의 강릉지점 AWS 관측 기상장 시계열

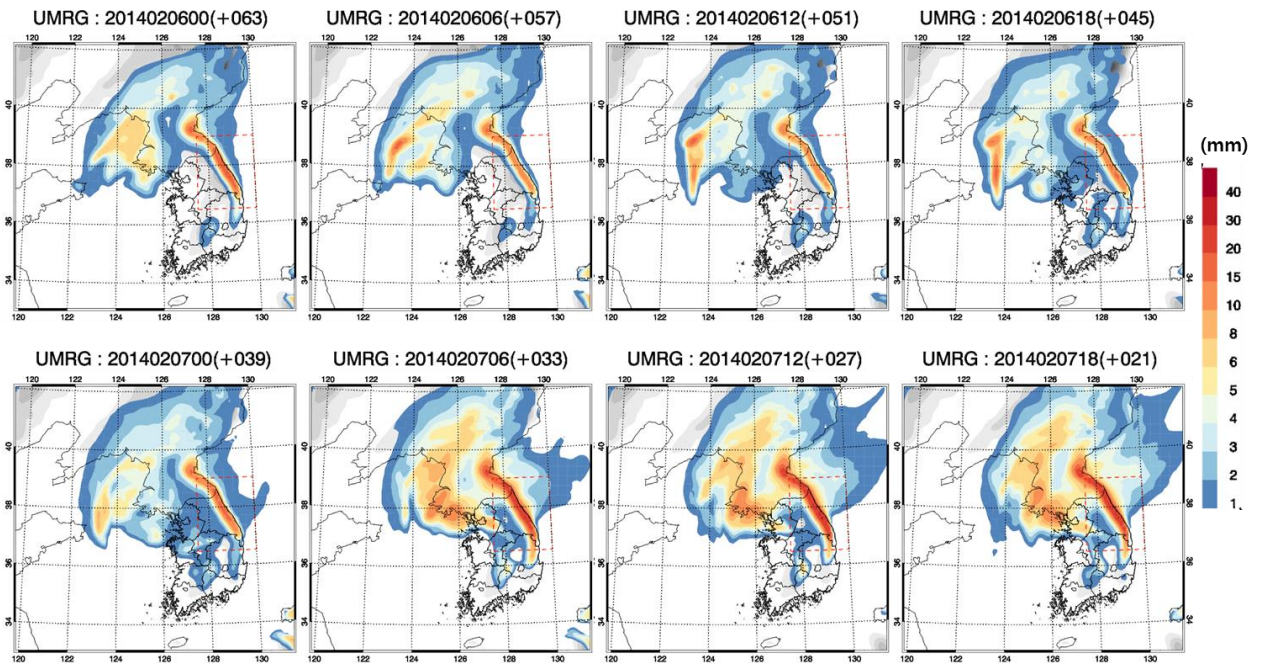


[그림 3.1.9] 2014년 2월 6일-11일의 지역예보모델(RDAPS)(상)과 국지예보모델(LDAPS)(하)의 시간 별 예측 강수량과 강릉 지점 AWS 관측 결과 비교. RDAPS는 세시간 누적 강수량을, LDAPS은 한시간 누적 강수량을 각각 나타냄. 모델의 예측 결과의 양상불 평균을 함께 나타내었음

3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석

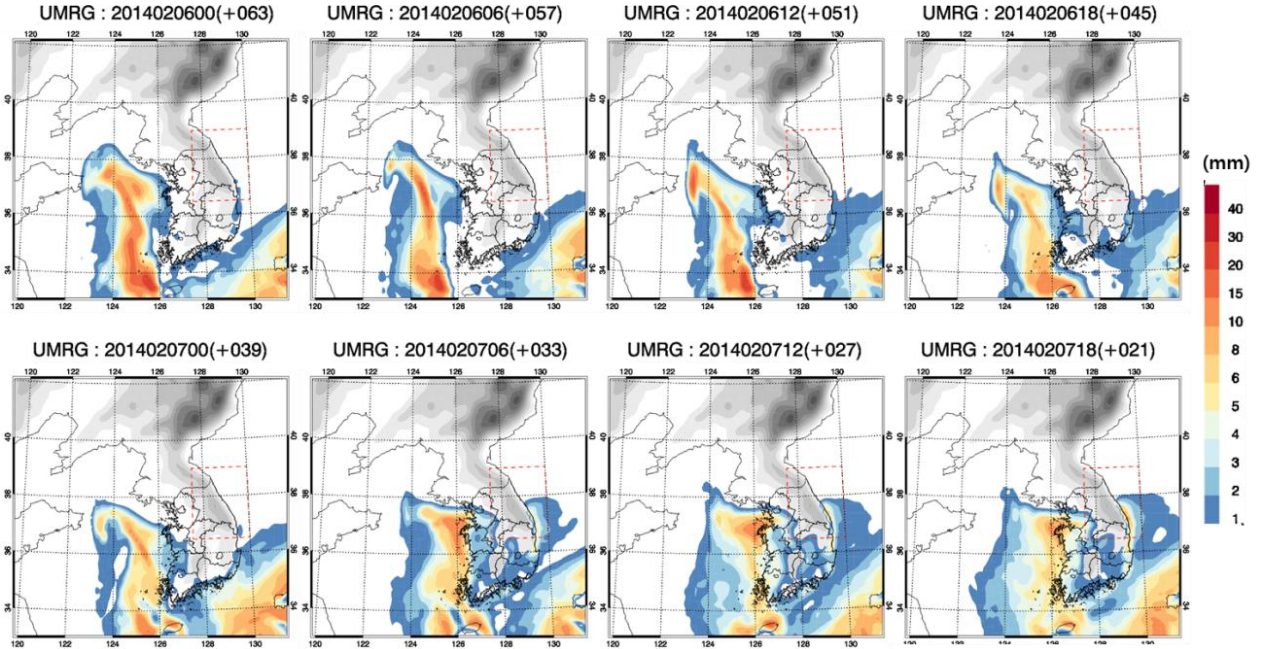
3.2.1. 지역예보모델(RDAPS)의 강수 예측 특성

수치모델의 강수는 구름 물리 과정에 따라 총 강수량은 강우량과 강설량으로 명시적으로 구분되어 계산된다. 그림 3.2.1과 3.2.2는 지역예보모델에 의해 모의된 2월 8일 일누적 강설량과 강우량의 공간 분포를 각각 나타낸다. 수도권과 영동지역 그리고 그 북쪽 지역에서는 눈 형태의 강수가 예측되고 있으며, 한반도 남쪽 일부 지역과 해양 지역으로는 비 형태의 강수가 명시적으로 구분되어 모의되고 있다. 2014020706UTC 적분 결과부터는 동해 지역으로 넓게 강설구역 나타나고 있으며, 영동지역 영역 평균된 강설량이 이 시점을 기준으로 더 높게 모의되는 양상을 볼 수 있다(그림 3.2.3). 또한 적분 시작 시간에 따라 모의된 강수량의 예측 일관성이 아주 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

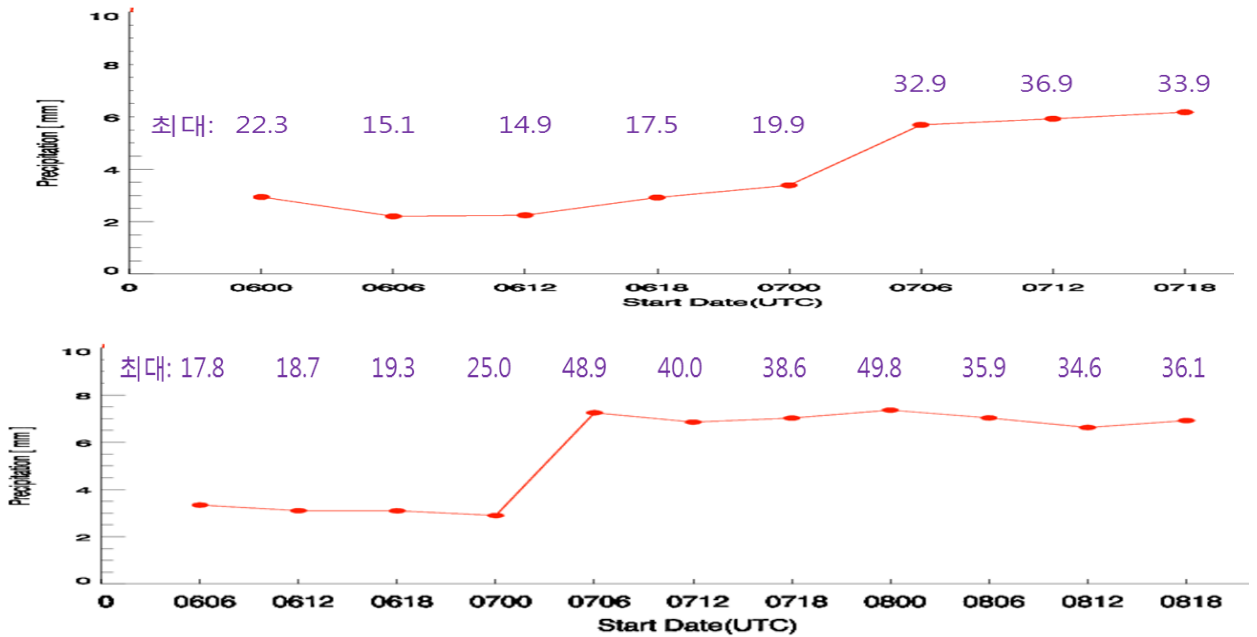


[그림 3.2.1] 지역예보모델(RDAPS)의 적분시작 시간별 2월 8일 일누적 강수량(눈) 예측 결과 비교

3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석



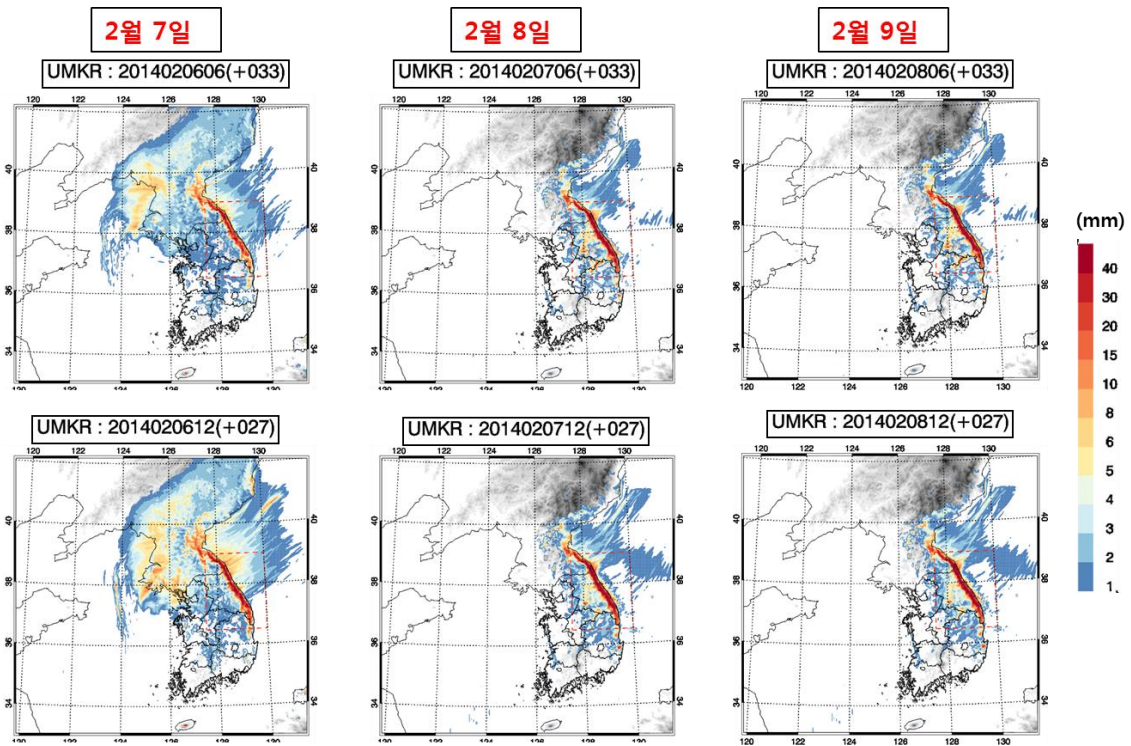
[그림 3.2.2] 지역예보모델(RDAPS)의 적분시작 시간별 2월 8일 일누적 강수량(비) 예측 결과 비교



[그림 3.2.3] 지역예보모델(RDAPS)의 적분시작 기간별 영역 평균(그림 3.2.1의 붉은색 점선 표시 영역) 강수량(눈) 예측 결과 비교: 2월 8일(상)과 2월 9일(하)

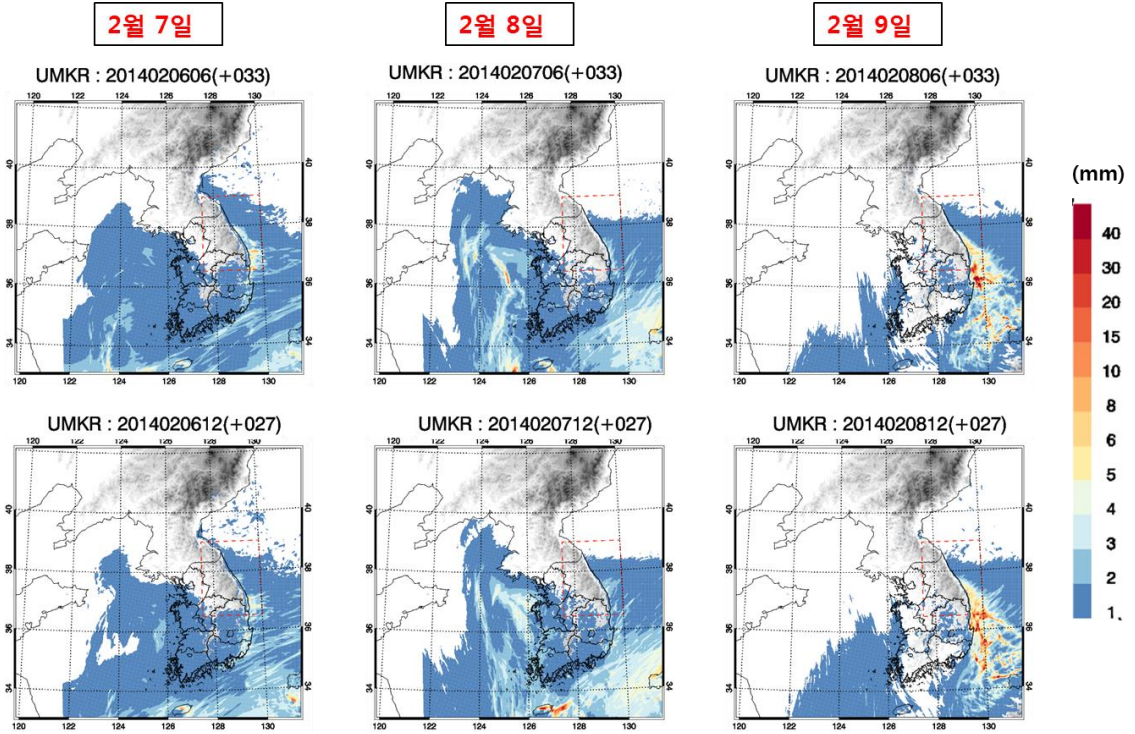
3.2.2. 국지예보모델 (LDAPS)의 강수 예측 특성

그림 3.2.4과 3.2.5는 국지예보모델에 의해 모의된 2월 8일 일누적 강설량과 강우량의 공간 분포를 각각 나타낸다. 강설/강우 구역은 지역예보모델의 예측 결과와 유사한 결과를 보여주고 있으며, 강수 영역과 강도는 지역예보모델에 비해 좁고 강하게 예측하는 특징을 보여준다. 영동지역에서 일최대 누적강설량이 120mm를 초과하는 지역이 나타나는 것으로 모의하고 있으며, 적분시작 시간에 따른 모델 예측 강수량의 일관성은 지역예보모델에서와 같이 높게 나타나고 있다.

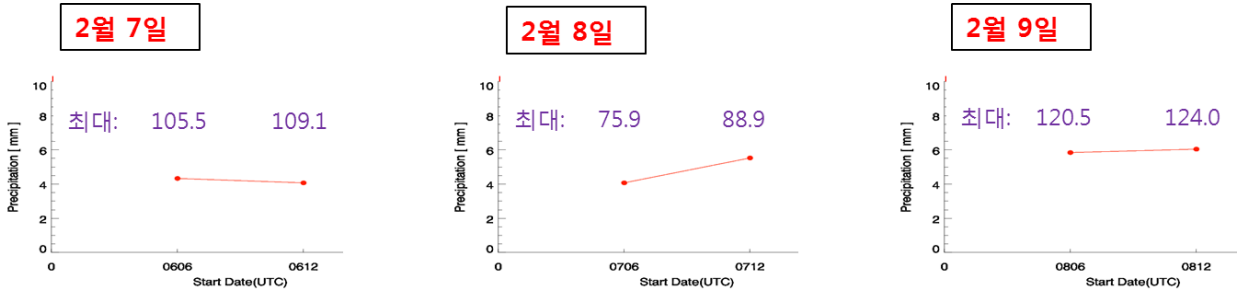


[그림 3.2.4] 국지예보모델(LDAPS)의 적분시작 시간별 2월 8일 일누적 강수량(눈) 예측 결과 비교

3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석



[그림 3.2.5] 국지예보모델(LDAPS)의 적분시작 시간별 2월 8일 일누적 강수량(비) 예측 결과 비교



[그림 3.2.6] 국지예보모델(LDAPS)의 적분시작 시간별 영역 평균(그림 3.2.1의 붉은색 점선 표시 영역) 강수량 (눈) 예측 결과 비교

4

사례 발생 원인

4.1. 대설 기간의 한반도 기압 패턴과 바람 분포 특징

4.1.1. 대설 진행과 특징

1) 대설 진행

2월 7일

0500KST 부터 강릉 등 영동 지역에 비교적 강한 강설이 시작되고 08KST 경부터 경북 해안까지 확대

1000KST 이후, 동해안 전역에서 강설이 나타나며 8일 0800KST까지 지속됨

2월 8일

0800KST 이후 울진 남쪽의 강설이 약화 또는 중단되며, 09KST 부터는 강원도 해안에서만 강한 강설

1700KST 이후에는 영동 일부 지점과 경북해안 일부 지점 등에서만 강한 강설이 나타남

2월 9일

0430KST 부터 영동 해안지역을 따라 비교적 강한 강설이 종일 지속되고

2000KST 이후부터 동해안 전역으로 비교적 강한 강설 지역이 확대됨

2월 10일

10일 02KST 이후 경북해안 일부에서 강설 중단, 19KST 이후 영동과 경북해안지역 대부분에서 강설 중단

11일 1430KST까지 강릉 등 국지적으로 비교적 강한 강설이 있으나, 나머지 동해안에서는 강수 종료

2) 대설 진행의 특징

2월 7일 10시부터 동해안 전역에서 강설이 시작되어 강릉 등을 제외하고는 10일 밤에 대부분 종료되었다. 이 기간 동안 강원도 해안에서는 일부 기간, 일부 지점에서 국지적 강수가 나타나기도 했지만 대체로 전 사례기간에 걸쳐 강수가 나타났다. 그리고 2월 7일 10KST부터 8일 오전까지, 그리고 9일 20KST 부터 10일 새벽까지는 동해안 전역에서 강수가 나타난 것이 중요한 특징이라 하겠다.

4.1.2. 대설 기간의 한반도 기압 패턴과 바람 분포

대설 기간 동안의 가장 중요한 기상 특징은 한반도에 남북으로 연장된 기압골이 사례기간 내내 존재한 것과 남북기압 경도가 시간에 따라 변하면서 동해안에서의 동풍계열 바람의 강도가 시간에 따라 변하는 것이라 하겠다.

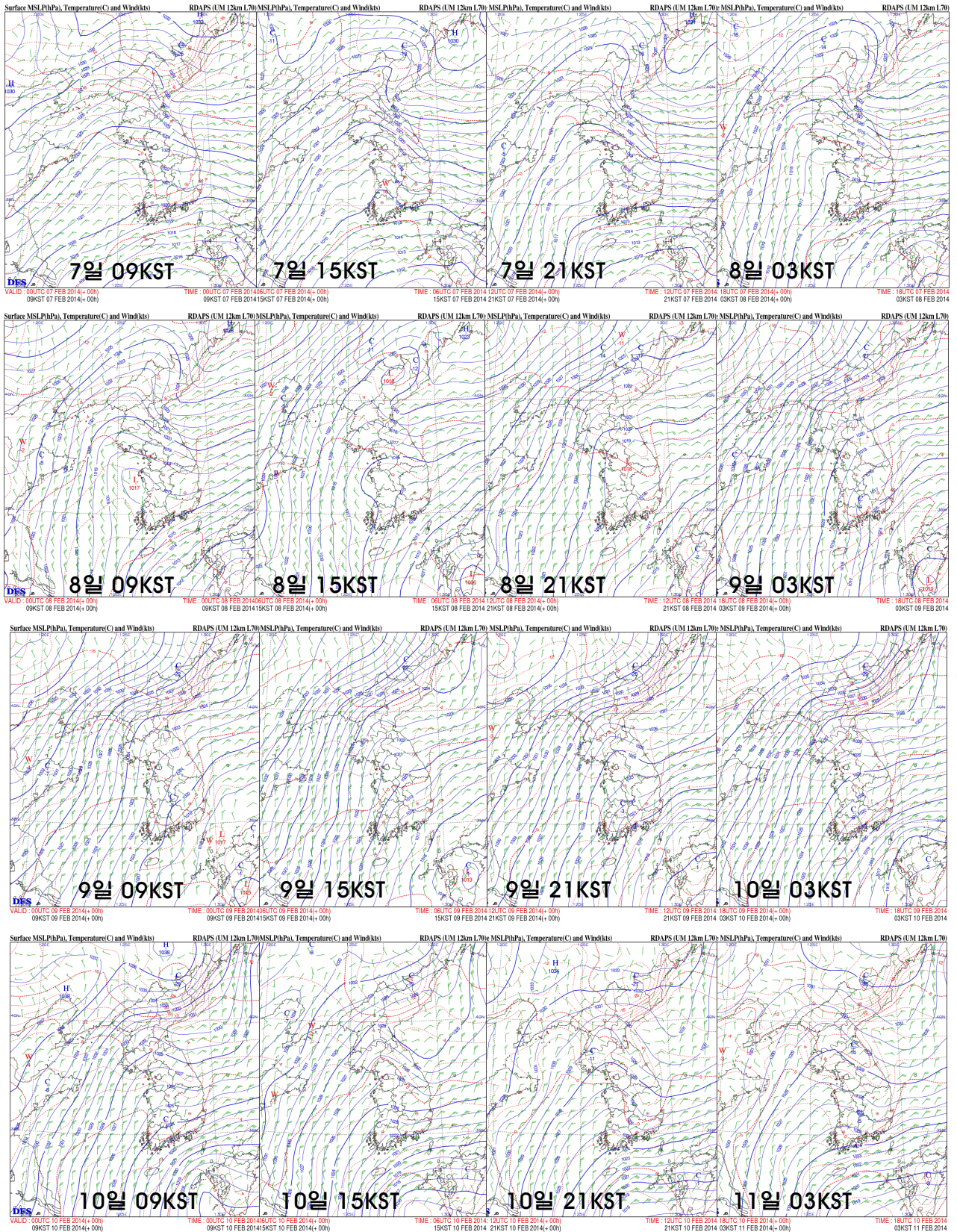
1) 해면 기압 패턴과 바람

2월 6-11일 동안 한반도(또는 황해도)에는 남북 방향의 기압골이 존재하였는데, 7일과 8일 09KST까지는 황해상에 기압골 위치하였으며, 백두산 북쪽까지 연장되었다.

8일 09KST 이후는 한반도 상에 중규모 기압골이 위치하면서 개마고원까지 연장되어 나타났고 그 강도가 강약을 되풀이 하는 변화를 보이며 10일까지 계속 유지되었다. 이 중규모 기압골의 존재로 인해, 동해안 지역에서는 동풍계열의 바람이 비교적 강하게 유지되었다.

한편, 한반도로부터 떨어진 남쪽 해상에서 저기압이 발달 및 이동하면서 2월 7일 정오 부근부터 8일 오전 사이 그리고 9일 저녁과 10일 오후 사이에 남한지역 또는 남부지역에서의 기압경도 강화와 함께 동해안 지역에서 동풍을 강화시켰다. 10일에는 동해안 지역의 기압경도가 다시 약화되면서 동풍 계열 바람도 약화되었다.

뒤에서 설명하겠지만, 수 일에 걸쳐 기압골이 한반도에서 나타날 수 있었던 이유는 1) 북태평양 상공(캄차카 반도와 알래스카 사이)의 Blocking-high로 인해 아시아 지역 상공의 기압골이 정체하였고, 2) 오호츠크해로의 저기압 이동과 정체 그리고 새 저기압의 이동으로 인해 시베리아 고기압의 동쪽 확장이 계속 저지되었기 때문인 것으로 보인다. 결과적으로, 한반도 부근에서 시베리아 고기압의 남동향 확장이 지속되었고, 이로 인해 한반도 중규모 기압골의 발달도 지속되었던 것으로 보인다.

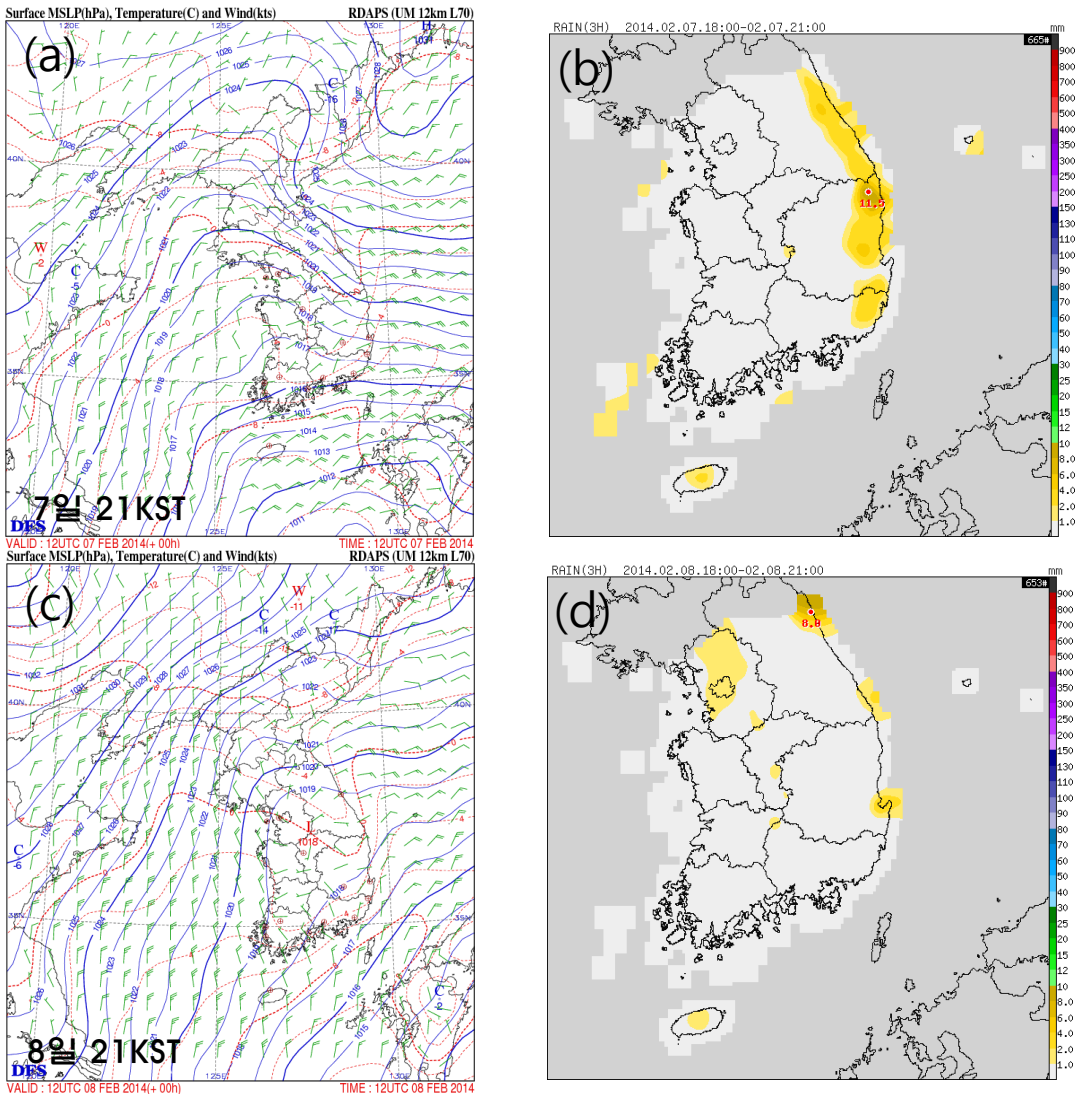


[그림 4.1.1] 대설기간 동안의 해면기압(실선), 지상 기온(적색 점선)과 바람 분포. RDAPS 재분석장

2) 바람 분포와 강설의 관계

중규모 기압골이 한반도에서 발달함에 따라 동해안을 따라 영동지역 산맥으로 불어 들어가는 동풍이 발달하며, 기압경도 변화에 따라 민감하게 풍속이 달라진다. 이에 따라 동해안 강설량도 민감하게 달라지는 것으로 나타났다.

동해안 전체에서 남북 기압경도가 쉼 2월 7일 21KST에는 전체적으로 동풍이 켜고, 그와 함께 강한 강설이 동해안 전체에서 나타나고 있다(그림 4.1.2a, b). 반면에 동해안 전체에서 남북 기압경도가 약한 편인 2월 8일 21KST에는 전체적으로 동풍도 약해졌고, 그와 함께 일부 지점을 제외한 대부분의 동해안에서 강수가 나타나지 않는다(그림 4.1.2c, d). 하층 기압패턴에 강수 발생의 이 같은 민감한 반응은 다른 시간에서도 쉽게 찾을 수 있다.



[그림 4.1.2] (a, c) 해면기압(실선), 지상 기온(적색 점선)과 바람, (b, d) 3시간 강수량 분포. 위 그림들은 2014년 2월 7일 21KST, 아래 그림들은 2월 8일 21KST에 대한 것임

4.2. 2014년 2월 7~10일의 대설 발생의 원인

대설 기간 동안의 가장 중요한 기상 특징은 1) 한반도에 남북으로 연장된 기압골이 사례기간 내내 존재한 것과, 2) 한반도로부터 먼 남쪽해상에서 저기압이 지나면서 한반도에서의 남북 기압경도를 강화시킨 것이라 하겠다. 이 특징들이 동해안 지역에 대설을 가져온 핵심 원인을 제공한 것으로 판단된다.

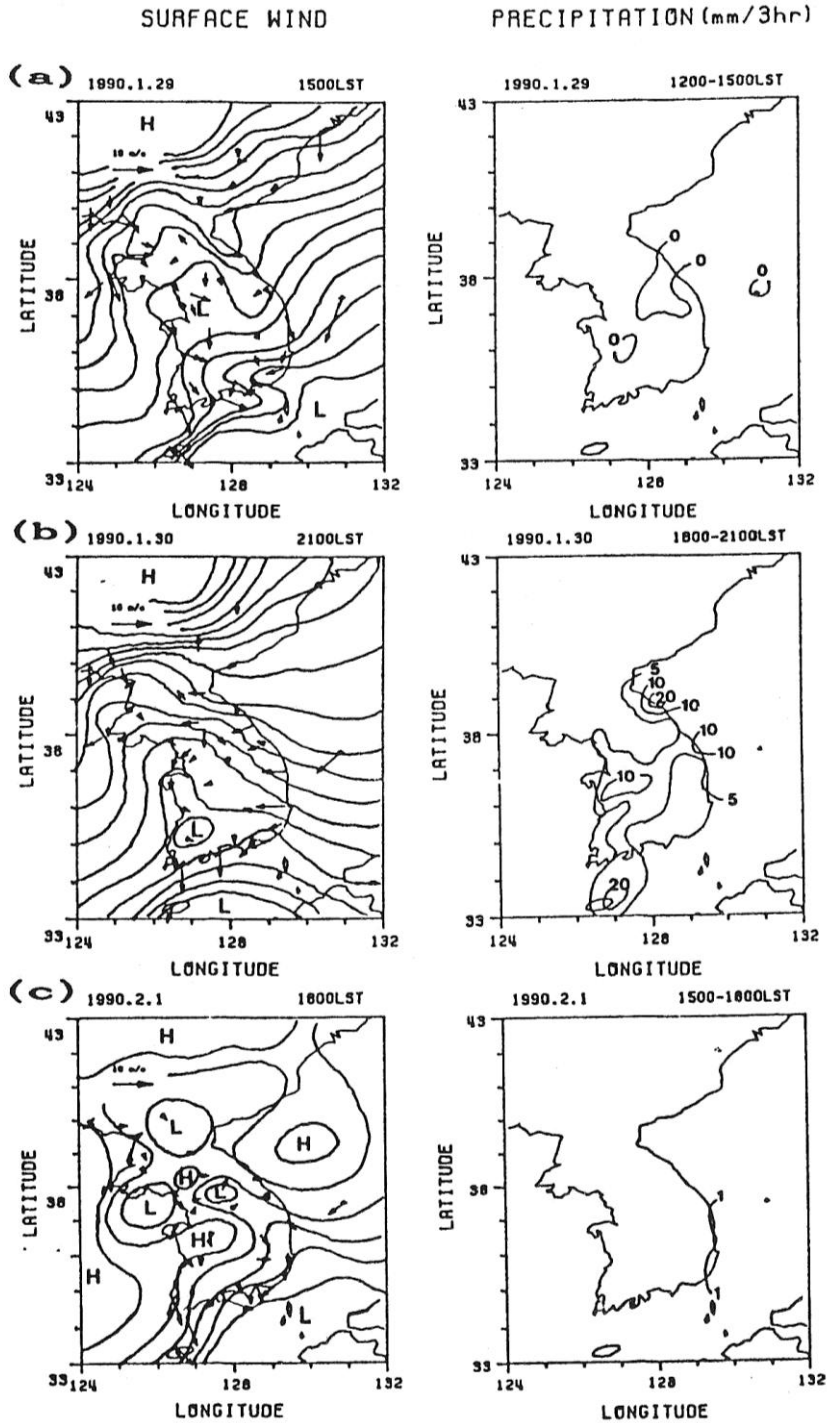
4.2.1. 동해안 지역 대설 발생 조건

1) 영동지역 대설 요건

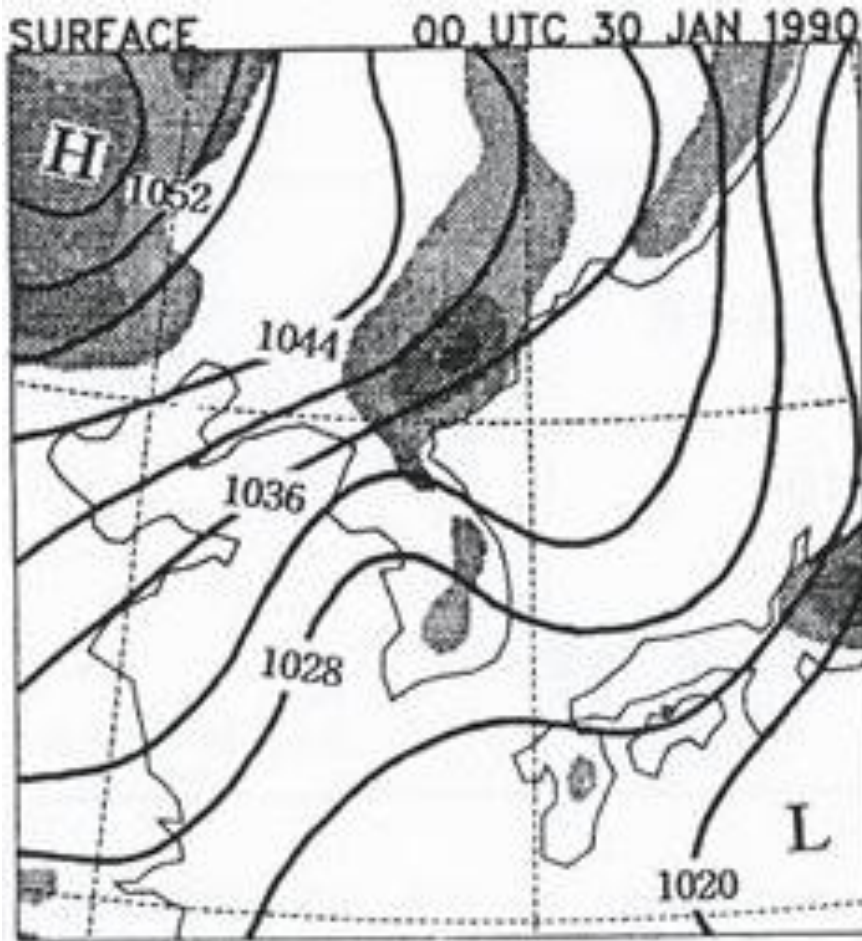
- 산맥을 향해 부는 바람의 수직 방향 강도가 강하게 지속되는 것과, 동해상을 돌아 거쳐 습해진 하층 공기의 유입
 - 영동지역 대설 요건은 시베리아 고기압 확장 시 한반도에 중규모 기압골이 발달하면서 갖추어졌다(이훈, 이태영, 1994; Lee and Park, 1996)(그림 4.2.1). Lee and Park(1996)은 연구한 사례에서의 한반도 중규모 기압골이 한반도 지형의 열적, 기계적 효과 때문에 발생하는 것임을 밝혔다.
 - 본 사례에서는 이 같은 조건들이 내내 유지되었고, 그 강도에 따라 강설 발생이 민감하게 반응하였다. 서은경, 전종갑(1991)도 한반도에 기압골이 발달한 사례에서의 대설을 연구한 바 있다.

2) 동해안 전역 대설 요건

영동 지역 대설 요건이 유지되는 상황에서, 한반도 남쪽 해상에 저기압(또는 기압골)이 발생 또는 존재하게 되면 한반도에서의 남북기압경도 강화와 함께 동해안 남부로의 습한 동~남동풍 유입의 강화를 가져옴으로써 남한지역 동해안 전체에 대설을 가져올 수 있다(Lee and Park, 1996). (그림 4.2.2)



[그림 4.2.1] 지상기압 패턴, 지상 바람과 동해안 강수 강도의 관계를 보여주는 사례: 1990년 1월 29일-2월 1일에 관측된 해면기압과 지상 바람(왼쪽), 3시간 강수량(오른 쪽). 출처: 이훈, 이태영(1994)

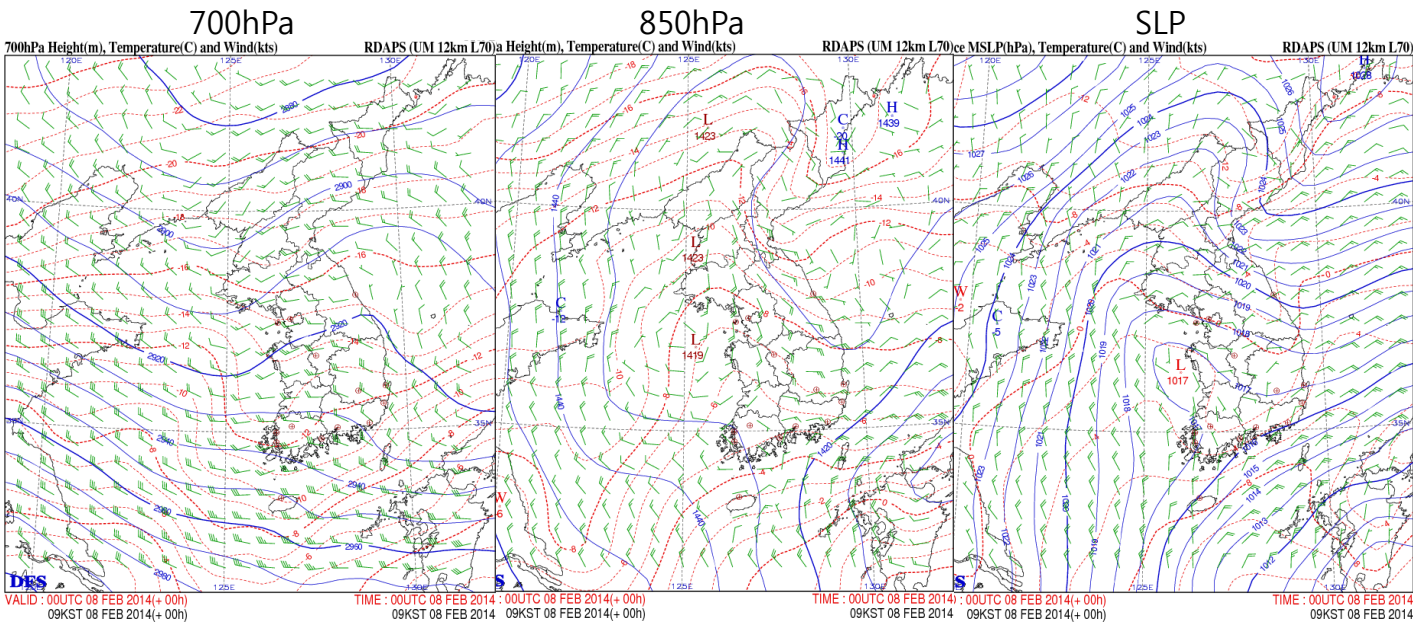


[그림 4.2.2] 한반도 상에 기압골이 나타나면서 동시에 한반도 남쪽 해상에 기압골이 존재했던 1990년 1월 30일 00UTC의 지상 일기도. 이와 같은 조건은 남한 지역 동해안 전체에서 대설을 가져올 수 있는 것으로 지적된 바 있음. 출처: Lee and Park(1996).

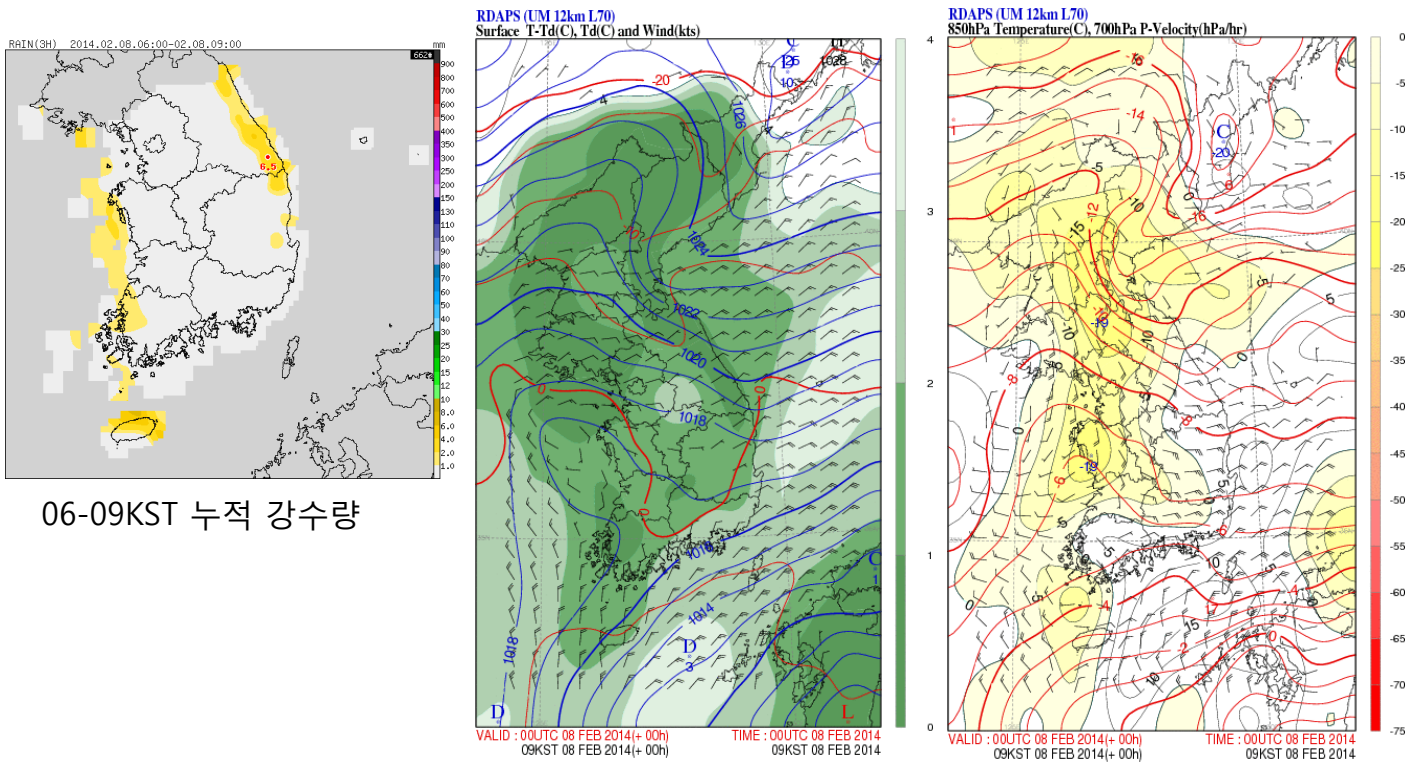
4.2.2. 대설 기간 동안의 기간 별 대설 발생 원인

1) 7일 정오 ~ 8일 이른 오전 (남한 동해안 전체에서의 강설 기간)

- 7~8일(8일 오전까지)의 해면기압 패턴(그림 4.1.1과 그림 4.3.1)의 특징
 - ① 중관 기압골의 동진(황해상) + ② 대만 북동해상의 저기압 발달 + ③ 시베리아 고기압 확장 및 북한 지형효과와 연관된 기압골 발달(북한 지역 산악 부근)
- 8일 오전의 상하층 구조(그림 4.2.3)
 - 한반도 서쪽으로부터 이동해온 기압골(지상, 850hPa, 700hPa 전체 고도에서 나타남)이 황해상에 위치하고 있으며, 기압골 지역을 따라 비교적 강한 상승운동이 나타나고 있다(그림 4.2.4, 오른쪽). 한편, 지상에서는 동해안을 따라 습한 하층 공기가 산맥으로 유입되고 있다(그림 4.2.4, 가운데).
- 대설 발생 원인
 - 중관 기압골의 동진(①)과 시베리아 고기압 확장에 따른 북한지형 효과와 연관된 기압골(③) 발달로 인해 동해안을 따라 비교적 강한 동풍 계열 바람이 발달하였다. 이와 동시에 대만 북동해상에서 발달한 저기압이 한반도의 남북기압경도를 강화 시켜 하층 동풍(습기) 유입이 강화됨에 따라 남한 동해안 전체에서 비교적 강한 강수가 발생하였다.



[그림 4.2.3] 2014년 2월 8일 09KST의 700hPa 고도와 바람(왼쪽), 850hPa 고도와 바람(가운데), 해면기압과 지상 바람(오른쪽). 적색의 점선은 등온선

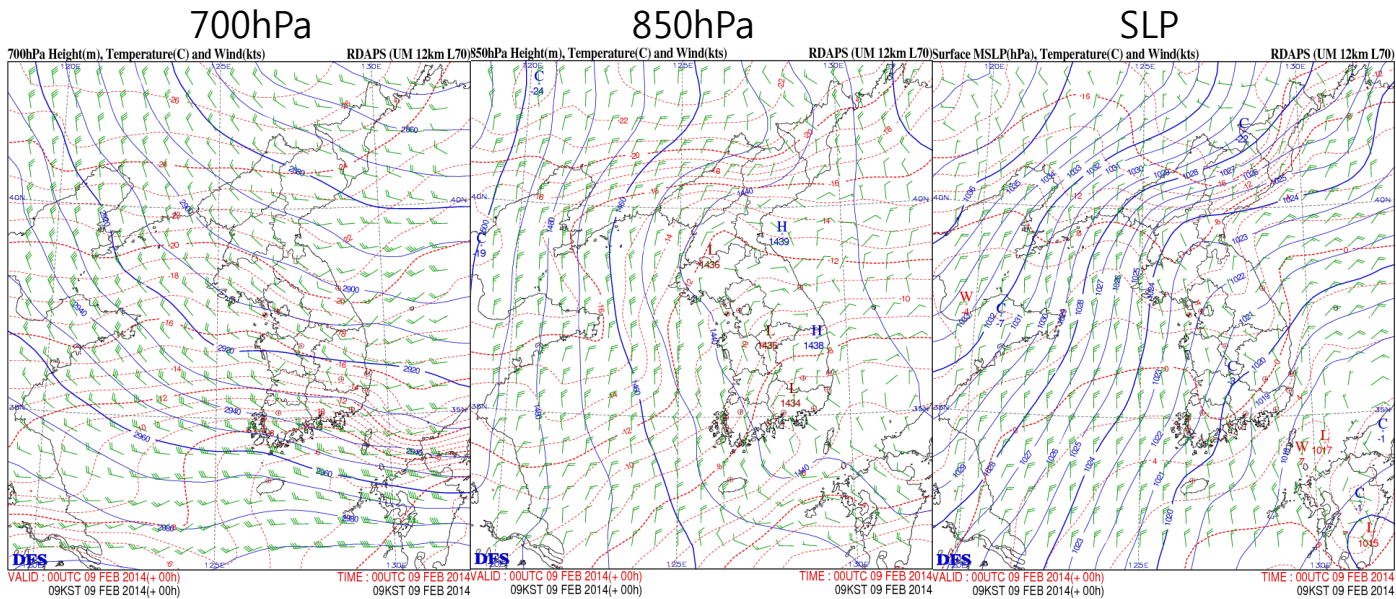


06-09KST 누적 강수량

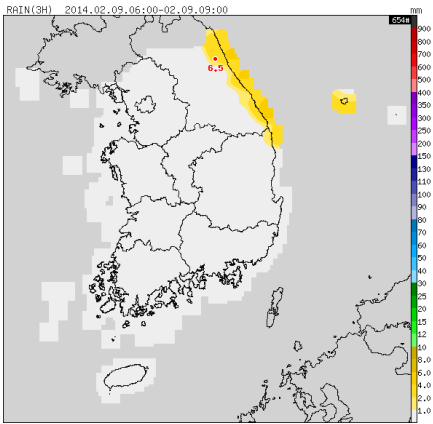
[그림 4.2.4] 2014년 2월 8일 09KST의 3시간 누적 강수량(왼쪽), 지상 바람과 T-Td(shading)(가운데), 700hPa 연직 p속도(Shading)과 850hPa 기온(적색 실선)(오른쪽)

2) 8일 오전 ~ 9일 오후 (강원도 동해안 중심 강설 기간)

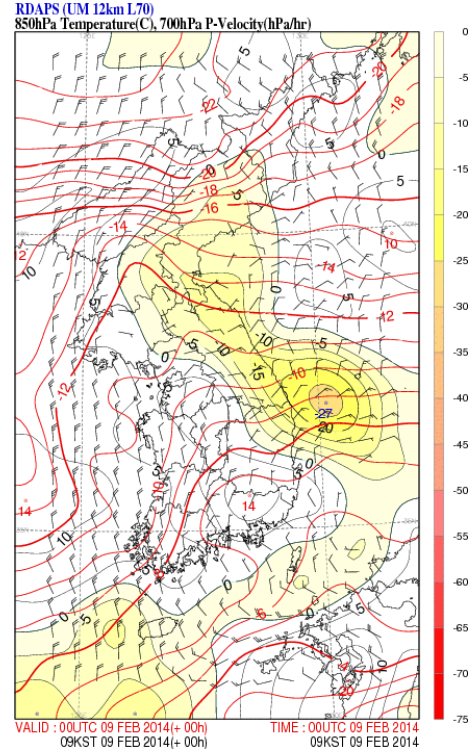
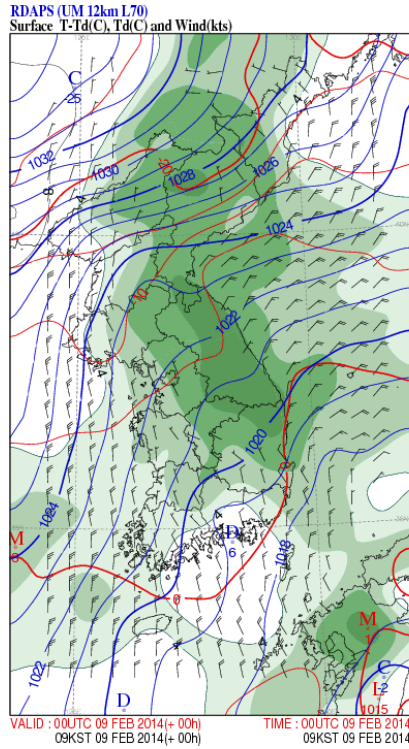
- 9일 오전의 해면기압 패턴(그림 4.1.1, 4.3.1)
 - 시베리아 고기압 확장 및 지형과 연관된 중규모 기압골이 한반도에 발달하면서 영동 해안을 따라 비교적 강한 동풍 계열 바람이 발달. 남쪽 해상의 저기압은 동쪽으로 빠져나가 남부의 기압경도 약화된다.
- 8일 오전의 상하층 구조(그림 4.2.5, 4.2.6)
 - 700hPa에서는 북서풍이 개마고원 지역을 넘어가고 있으나(그림 4.2.5 왼쪽), 850hPa에서는 개마고원 풍상 측의 북풍이 개마고원 앞에서 갈라짐으로써 지형의 영향을 잘 보여주고 있다. (그림 4.2.5, 가운데).
 - 황해와 동해로 갈라져 부는 북풍에 의한 차등 한기 이류로 인해 한반도에 온난 능이 발달하고, 지상에는 중규모 기압골이 발달(그림 4.2.5 오른쪽). 중규모 기압골은 낮에 더 강하게 그리고 중부지방에서도 발달하며, 비교적 강한 동풍 계열 바람에 의해 습기가 영동산악으로 불어 들어간다. (그림 4.2.6, 가운데).
- 대설 발생 원인
 - 시베리아 고기압 확장 및 지형과 연관된 중규모 기압골이 한반도에 발달함에 따라 영동 해안을 따라 비교적 강한 동풍 계열 바람이 발달하였고, 이로 인해 영동 지역을 중심으로 대설이 발생하였다.



[그림 4.2.5] 2014년 2월 9일 09KST의 700hPa 고도와 바람(왼쪽), 850hPa 고도와 바람(가운데), 해면기압과 지상 바람(오른쪽). 적색의 점선은 등온선



06-09KST 누적 강수량

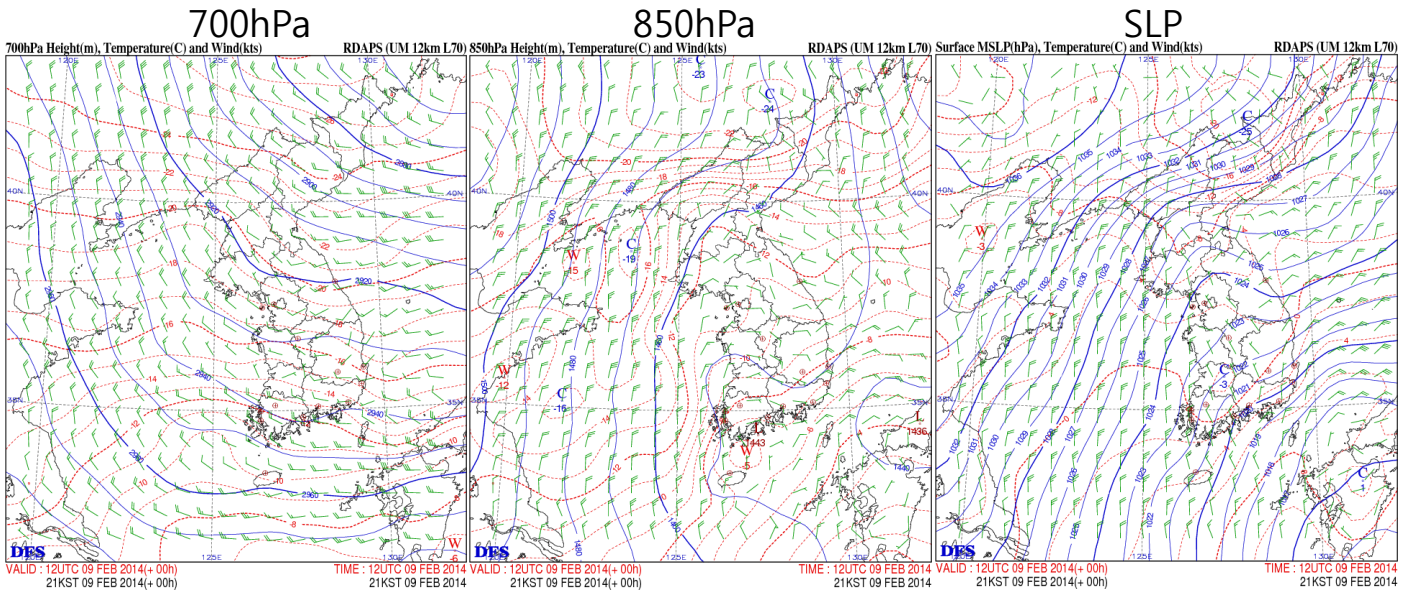


[그림 4.2.6] 2014년 2월 9일 09KST의 3시간 누적 강수량(왼쪽), 지상 바람과 T-Td(Shading)(가운데), 700hPa 연직 p속도(Shading)과 850hPa 기온(적색 실선)(오른쪽)

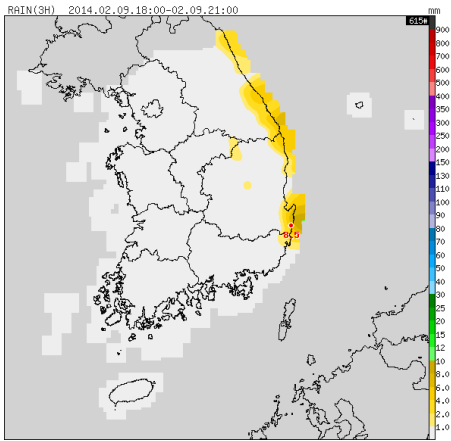
3) 9일 저녁 ~ 10일 오후

(남한 동해안 전체에서의 강설 기간, 일부 동해안은 때때로 제외)

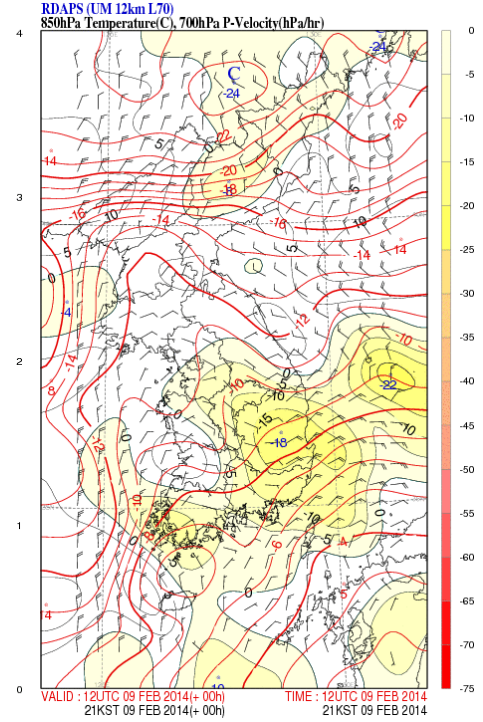
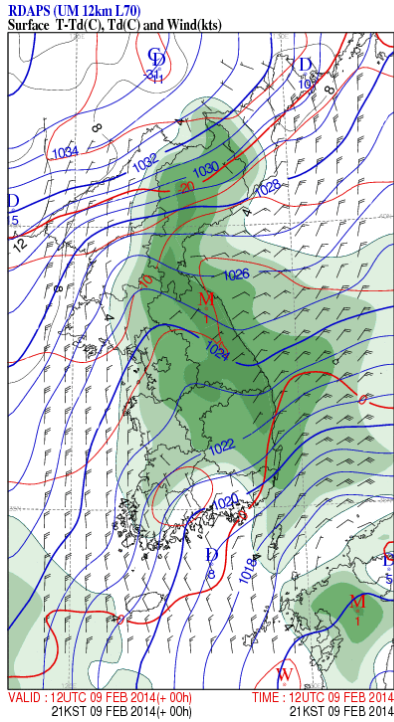
- 해면기압 패턴(9일 밤부터)(그림 4.1.1, 4.3.1)
 - ① 시베리아 고기압 확장 및 지형과 연관된 한반도 중규모 기압골 + ② 일본 규슈 남쪽 해상의 저기압
 - 중규모 기압골과 남쪽 해상의 저기압 발달로 인해 남한 동해안 전체에서 강한 동풍 계열 바람 발달
 - 시베리아 고기압 확장이 막판에 약해지면서 10일 낮 부터는 중부 동해안 지역의 동풍도 약화되었다.
- 상하층 구조(그림 4.2.7, 4.2.8)
 - 850hPa에서 개마고원 풍상 측의 북풍이 개마고원 앞에서 갈라져 흐르면서 한반도에 온난 능과(그림 4.2.7, 가운데) 지상의 중규모 기압골이 발달하였다(그림 4.2.7, 오른쪽). 한반도 남동부에 비교적 강한 상승 기류가 존재하나, 영동 동해안 강설지역 상공에는 상승 기류가 나타나지 않았다.(그림 4.2.8, 오른쪽)
- 대설 발생 원인
 - 한반도에서의 중규모 기압골 발달로 인한 영동지역 동풍 발달과 규슈 남쪽 해상 저기압으로 인한 하층 동~남동풍(습기) 유입 강화에 따라 남한 동해안 전체에서 비교적 강한 강수가 발생하였다. 그러나 10일 오후에는 시베리아 고기압이 막판에 이르면서 중부 동해안의 남북기압경도가 약화되어 영동지역에 강수가 나타나지 않는 곳들이 늘어났다.



[그림 4.2.7] 2014년 2월 9일 21KST의 700hPa 고도와 바람(왼쪽), 850hPa 고도와 바람(가운데), 해면기압과 지상 바람(오른쪽). 적색의 점선은 등온선



18-21KST 누적 강수량



[그림 4.2.8] 2014년 2월 9일 21KST의 3시간 누적 강수량(왼쪽), 해면기압(청색실선), 지상 바람과 T-Td(Shading)(가운데), 700hPa 연직 p속도(Shading)와 850hPa 기온(적색 실선)(오른쪽)

4.3. 대설 발생 조건 지속의 원인

4.3.1. 북태평양 (베링해) 상공의 저지 고기압

북태평양 상공(캄차카 반도와 알래스카 사이)의 Blocking High로 인해 아시아 지역 상공의 기압골이 정체되었고, 이것이 동아시아 지역의 기압계 정체에 영향을 미친 것으로 판단된다(2.1 일기도 상황분석 참조).

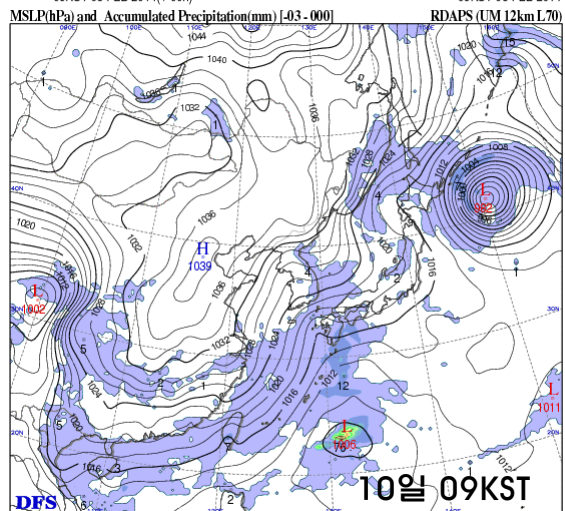
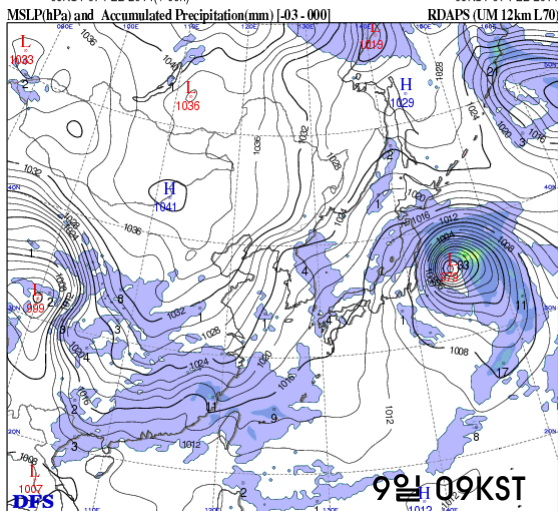
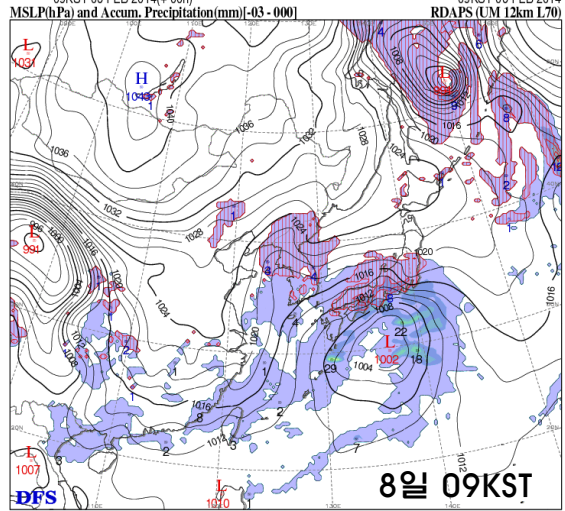
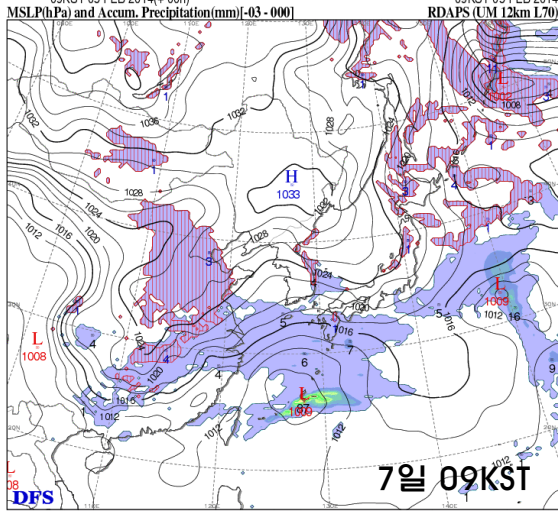
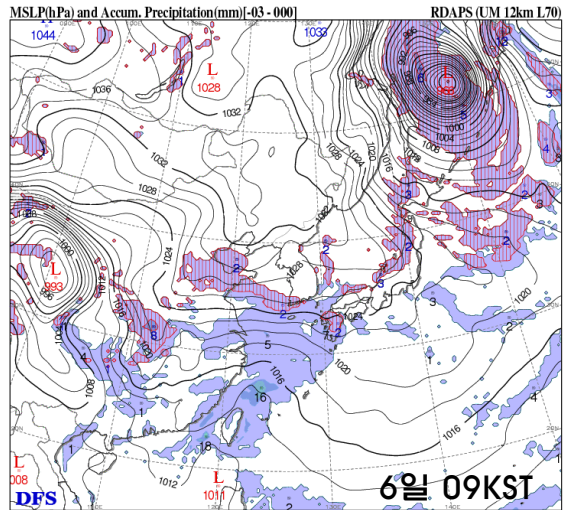
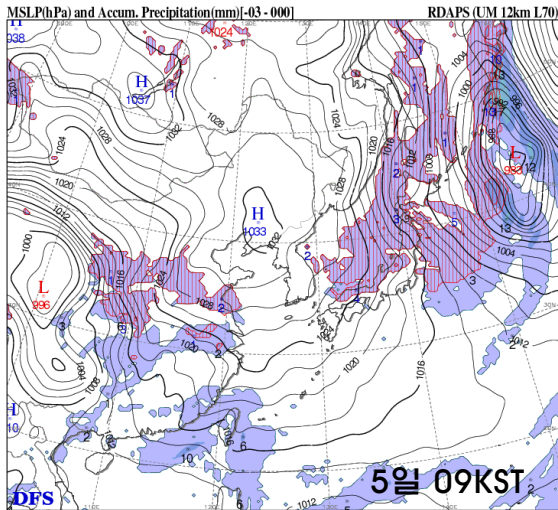
4.3.2. 시베리아 고기압의 동쪽 확장 저지가 지속됨

오호츠크해로의 저기압 이동과 정체 그리고 새 저기압의 이동으로 인해 시베리아 고기압의 동쪽 확장이 계속 저지됨. 이로 인해 시베리아 고기압의 남동향 확장과 한반도 중규모 기압골 발달이 지속될 수 있었다.

4.3.3. 한반도 기압경도 및 동해안의 동풍 (습기) 유입 강화가 이어졌음

사례 기간 중 한반도 남쪽 먼 해상에서 2회에 걸쳐 저기압이 발생함으로써 한반도에서의 남북기압경도 강화가 이어졌고, 그로 인해 하층 동~남동풍(습기) 유입이 강화되어 남한 동해안 전체에서 비교적 강한 강수가 7일 정오~8일 오전과 9일 저녁~10일 오후에 각각 발생하였다.

- ① 대만 북서쪽에서 저기압 발생(6-7일 사이) 및 북동진
- ② 일본 남쪽의 해상(23N, 132E 부근)에서의 새 저기압 발생(10일 오전)



[그림 4.3.1] 2014년 2월 5일 ~ 10일 09KST의 아시아 지역 지상 일기도

※ 남쪽 해상에서의 지상 저기압 발생 원인

• 사례 기간 중 두 개의 저기압의 발생(그림 4.3.1)

- ① 대만 북동쪽에서 저기압 발생(6-7일 사이) : 경압 불안정이 약한 대만 부근에서 시작되었으며, 응결가열에 의한 하층 저기압 발생으로 추정된다. 이것이 이동하면서 경압불안정 지역으로 진입할 때 상층 기압골과 연결되어 강하게 발달하는 것으로 분석되었다.
- ② 일본 남쪽의 해상(23N, 132E 부근)에서의 저기압 발생(10일 오전) : 상층강제가 약한 상태에서 하층 기압골 발생 후 바로 저기압으로 발달한 경우임. 빠른 저기압 발달과정에서 경압불안정의 역할이 중요했을 것으로 판단된다.

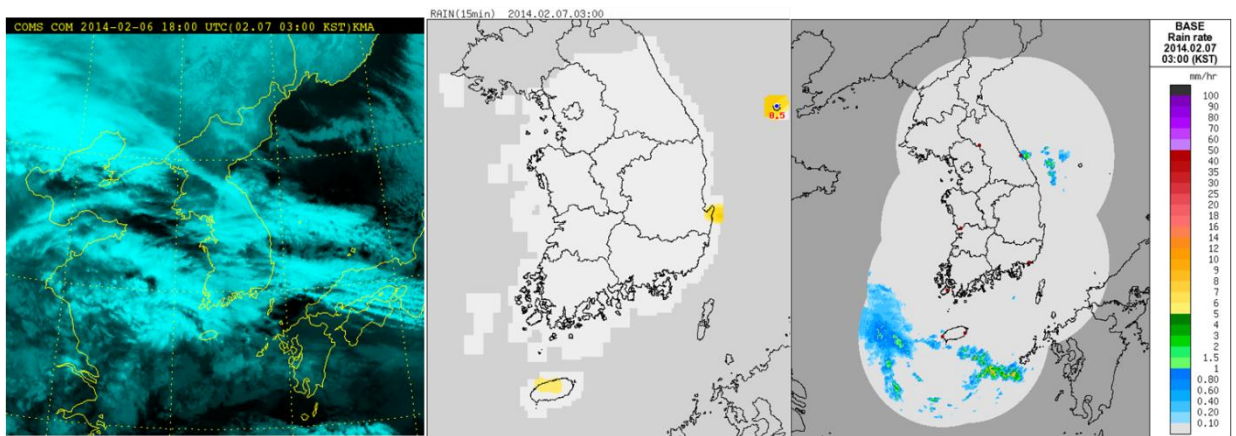
5

사전 예측을 위한 검토 자료

5.1. 영동지역 대설 예측 매개변수 분석

1) 영동지역 대설 시종과 강도 예측 변수

2.1절에서 동해안 대설 현상을 개념모델을 통해서 영동지방에 최장기 대설을 발생시킨 원인과 과정을 분석해 보았다. 5.1절에서는예보관들이 대설을 판단할 때 어떤 매개변수들에 주목해야 하는지 살펴보기로 하겠다. 보통 예보관들이 대기분석과 수치예보 모델을 통해서 강설의 발생 가능성을 충분히 예측했다고 하더라도 강수 현상의 시작과 종료 그리고 강도를 정확하게 판단하기 위해서 원격탐사 자료를 주로 활용하게 된다. 그런데 위성, AWS, 레이더 등의 원격탐사 자료들은 대설의 경우에는 한계를 보이는 경우가 많다. 실제로 2014년 최장기 영동지방 대설사례의 시작 단계에서도 비슷한 상황을 보여주었다.

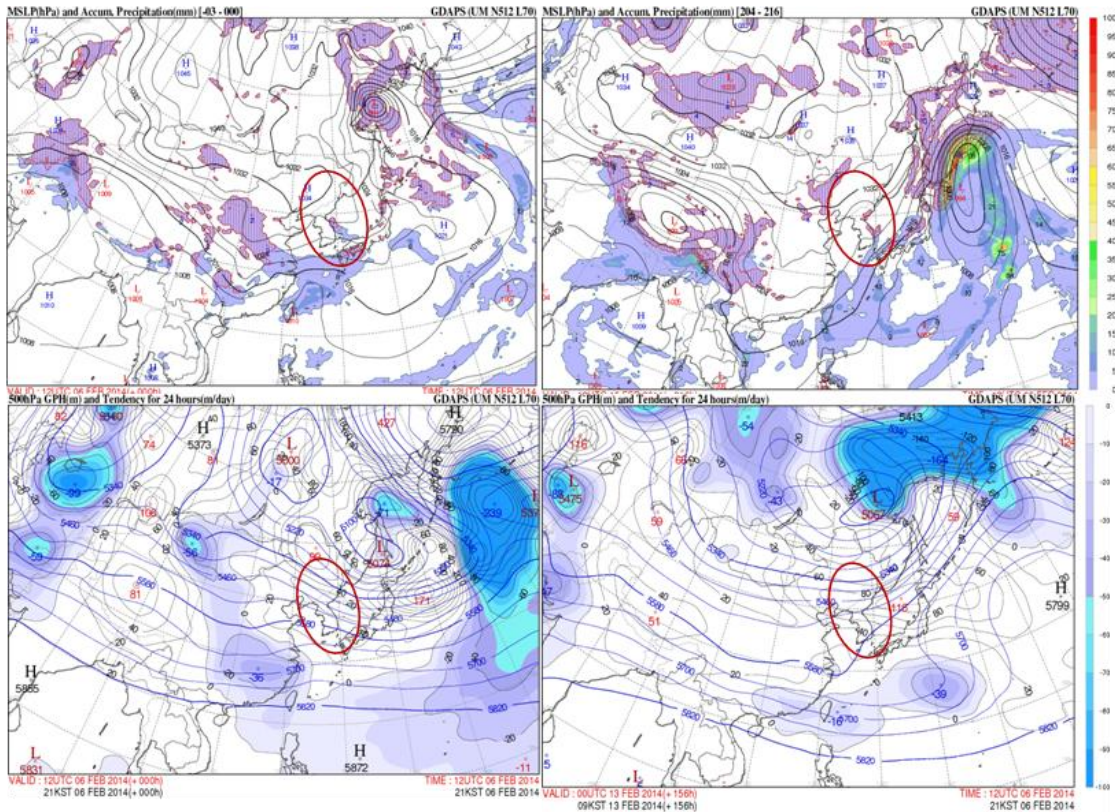


[그림 5.1.1] 2014년 2월 7일 03LST 위성영상(좌), AWS 강수량(중), 레이더 영상(우)

그림 5.1.1은 2014년 2월 7일 03시 위성영상, AWS 강수량, 그리고 레이더 영상을 보인 것이다. 위성 영상에서는 실제 강설이 시작된 시각에 복합 구름층이 한반도 상공으로 유입되면서 동해상에 머물러 있던 눈구름이 정확하게 어느 지역에 언제 유입되는지를 판단하거나 영동지방 해안선 부근에서 얼마나 강하게 발달하고 있는지 판단하기 어려운 상황이었다. 그리고 실제 관측에서 0.5cm의 적설이 기록되었지만 AWS 강수는 기록되고 있지 않다.

겨울철 눈의 경우에 강설량과 적설량의 측정이 매우 중요하다. 자동관측장비가 보편화되지 않은 과거에는 설판을 설치하여 강설량과 적설량을 관측하였지만, 자동관측장비를 주로 활용하면서 강우계에서 눈을 녹여 강설량으로 변화시키는 측기들을 사용함에 따라 일정한 적설이 발생하지 않으면 강우계 감지가 안되는 한계를 가지고 있고, 설판 위의 실제 적설량보다 강설량이 적게 보고되는 경우가 많다. 그리고 레이더의 경우에도 구름 속의 입자들이 편형을 가지는 강설 에코의 특성 상 반사도 값이 아주 낮고, 구름의 발달 고도까지 낮아 에코를 지속 감시하는데 한계를 가진다. 따라서 대설 현상은 수치예보 모델 분석 및 예측 자료를 적극적으로 활용해야 한다. 이번 사례의 경우에는 전구모델과 지역모델 모두 대설의 발생 가능성을 충분히 모의하고 있었고 기상청에서도 2월 6일부터 동풍기류에 의한 영동지방의 대설 가능성을 지속적으로 예상하면서 사전에 보도자료를 발표해 위험기상의 발생가능성 정보를 사전에 제공하였다

대설예측 매개변수 첫 번째는 언제 강설이 시작되고 종료할 것인가를 결정하는 것이다. 동해안 지형성 강설은 동풍기류와 함께 유입되는 구름이 지형과 충돌하면서 시작되고 동풍기류가 약화되면서 끝나게 되는데, 해수면온도의 변동성이 작은 점을 고려하면 적합한 지상 기압 배치와 상층 종관 환경의 변화가 이러한 강설 현상의 시종을 판단하는데 중요한 정보를 제공한다. 대설의 시작과 종료를 예보하기 위해서는 먼저 500hPa 북반구 일기도를 통해서 대규모 순환이 어떻게 이루어지고 있는지 분석하고, 종관규모 분석장을 통해서 지위고도 변화 경향을 분석함으로써 얼마나 오랫동안 현재의 기압 패턴이 유지될 것인지를 판단하는 것이 중요하다.



[그림 5.1.2] 2014년 2월 6일 12UTC 지상 분석도 및 500hPa 지위고도 변화도(좌), 2월 13일 00UTC 지상 및 500hPa 지위고도 변화 예상도(우)

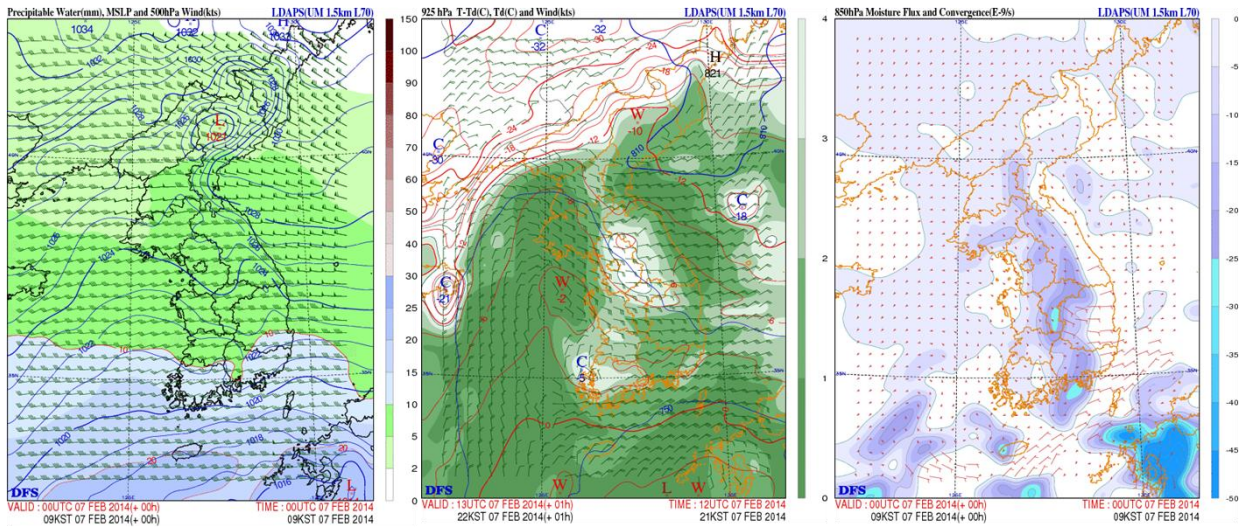
그림 5.1.2는 지상 기압계와 대기 중층의 변화 경향을 GDAPS 지상 분석 및 예상도와 500hPa 분석 및 예상도를 보인 것이다. 2월 6일 지상 분석도에서 이미 영동지방에 강수가 시작되었고, 500hPa 고도에서는 한랭축을 가진 기압골이 동해쪽으로 확장되어 있는 모습을 보여주고 있다. 그런데 150시간 후인 2월 13일 00UTC에도 비슷한 상하층 기압패턴이 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 기상분석에서도 설명했듯이 지상에서 동풍계열이 유지되고, 동해상에 상층 기압골이 유지되는 시점이 대설이 시작되는 시점이 되고, 이러한 패턴이 깨어지기 시작하는 시점이 대설이 종료되는 시점이므로 전체적인 기압 배치의 변화 경향을 상세하게 분석해서 강설 시작과 종료 예보에 반영하여야 한다.

지상 일기도와 지위고도 변화 경향을 종합적으로 판단해서 지속적인 지상 기압계 발달 여부 판단이 필요한데, 한 가지 유의해야 하는 것은 전구 모델의 기술적인 한계로 다양한 변수가 작용하는 Blocking 현상의 발생과 소멸을 예측하는데 한계를 가지고 있다는 것이다. 보통 전지구 모델의 경우에는 블로킹 현상에 대해서 명확한 예측 알고리즘을 가지고 있지 못하기 때문에 블로킹 현상의 형성 과정을 너무 느리게 모의하는 반면 블로킹 현상의 해소는 너무 빠르게 모의하는 경향을 가지고 있어서 상층 대기 흐름에 대해서 부정확한 정보를 제공할 수 있다는 사실을 예보관들은 인식하고 있어야 한다. 대설의 시작과 종료를 판단했다면 강설량을 결정해야 한다. 정확한 강설량을 예보하기 위해서는 공급되는 수증기의 양, 불안정 정도(대기-해양 온도차), 대기하층 혼합층의 깊이, 상승운동의 함수 등에 대한 종합적인 고려가 필요하다.

그림 5.1.3은 대설이 발생하고 있는 지역에 공급되는 수증기의 양의 예측 매개변수인 가강수량, 925hPa 습수와 바람, 850hPa 습윤속과 수렴도를 보인 것이다. 2014년 2월 7일 00UTC에 지상에서는 5~10mm의 가강수량을 보여주고 있다. 여름철의 경우에는 가강수량이 40mm가 넘으면 집중호우 가능성을 예보하는데 미국의 호수효과 대설 연구들에 따르면 겨울철에는 4mm 이상이면 20cm 내외의 강설 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 5~10mm의 가강수량이면 50cm 이상의 대설이 내릴 정도로 풍부한 수증기가 공급되고 있었다는 것을 의미한다. 또한 925hPa 고도까지 거의 포화된 공기가 강한 북동기류와 함께 영동지방으로 유입되고 있는 것을 보면 대기 최하층뿐만 아니라 Capping Inversion 하부 전체 하층대기가 충분히 포화될 정도로 수증기가 풍부하게 공급되고 있었음을 알 수 있다.

850hPa 고도까지도 약하기는 하지만 습윤속이 동풍을 타고 유입되고 있다. 그리고 850hPa 고도의 수렴구역이 바로 태백산맥 동쪽에 형성되고 있다는 사실은 동쪽으로부터 유입되어 강제 상승하는 기류가 태백산맥을 넘어서 서쪽의 성질이 다른 공기와 충돌하여 수렴을 형성했다는 것을 의미하며 이는 풍부한 수증기와 상승운동이 강하게 태백산맥 부근에서 이루어지고 있었다는 사실을 보여준다.

강설의 강도를 결정하는 두 번째 요소는 대기 하층의 불안정의 정도이다. 한랭건조한 공기와 온난습윤한 해수면 사이의 열과 에너지 교환에 기인하는 대기하층의 불안정의 정도를 결정하는 요소는 바로 대기와 해양의 온도차이다. 기본적으로 850hPa 온도와 해수면온도의 차이가 15℃ 이상이면 대설 가능성이 높은 것으로 판단하는데, 단순히 850hPa 고도와 해수면온도의 차이만을 고려할 것이 아니라, 925hPa에서 500hPa 고도와 해수면온도의 차이를 충분히 고려해야 한다. 왜냐하면 시간의 흐름에 따라 얼마나 많은 한기가 침강하고 있는지를 한 눈에 분석하는데 가장 효율적인 자료가 대기와 해양의 온도차 분석도이기 때문이다.

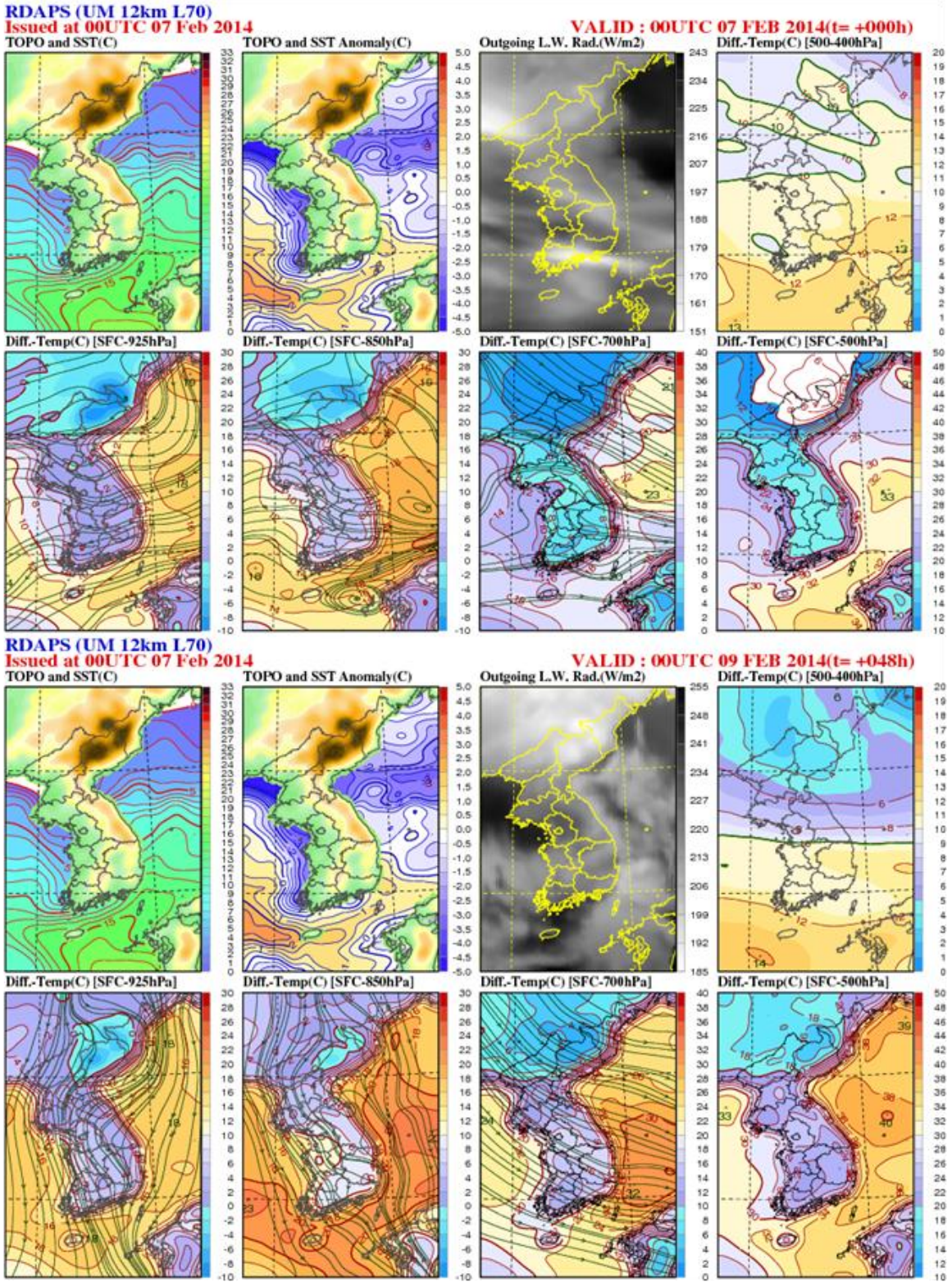


[그림 5.1.3] 2014년 2월 7일 지상기압과 가강수량(좌), 925hPa 습수, 바람, 등온선(중), 850hPa 습윤속과 수렴도(우)

그림 5.1.4는 2014년 2월 7일 RDAPS에서 분석한 SST와 대기의 온도차를 보인 것이다. 2월 7일 00UTC 해수면온도는 5~10℃ 내외의 분포를 보이고 있고, 점차 동해 북부의 해수면온도가 점차 차가워지는 경향성을 가지는데, 48시간 후인 9일 00UTC에도 해수면온도는 큰 변화가 없다. 그런데 대기와 해수면온도 차이는 큰 변화를 보인다.

먼저 2월 7일 분석에서는 925hPa 대기와 해수면온도의 차이는 13~16℃ 정도를 보였는데, 9일에는 그 차이가 16℃ 이상으로 더욱 차이가 벌어졌다. 그리고 850hPa 대기와 해수면온도 차이는 14~18℃에서 18~20℃로, 700hPa 대기와 해수면온도 차이는 20~23℃에서 28~30℃로 500hPa에서는 30~33℃에서 38~40℃로 시간이 지남에 따라 대기와 해양과의 온도차이가 증가하고 대기 상층으로 갈수록 그 폭이 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 대기 하층에서의 대류불안정이 시간에 따라 증가하고 있었으며, 상층의 한랭 서풍이류에 의한 Capping Inversion 높이의 성장과 하층의 풍부한 수증기 공급에 의한 대기 포화가 복합적으로 작용하여 강한 대류활동 영역(혼합층과 역전층 사이)에서 조건부대칭불안정(CSI) 정도가 더욱 강화되어 지속적이고 강도가 강한 대설이 유지되는데 기여한 것으로 평가할 수 있다.

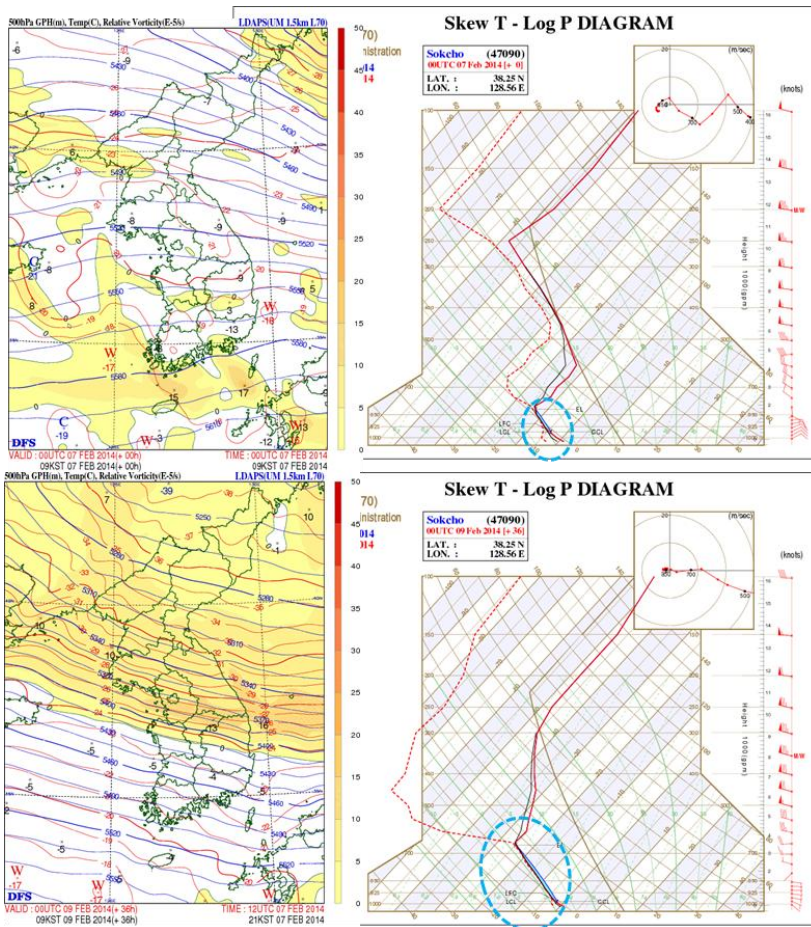
호수/해양-효과 대설의 강설량은 대기 하층 혼합층의 깊이에 비례한다. 따라서 대기 하층 혼합층의 깊이 변화를 분석하고 예측하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 호수/해양-효과 대설의 경우에는 혼합층의 높이가 3km 정도에 도달했을 때 강한 강설이 시작되고, 그 이상으로 높아질수록 강설의 강도는 세지며, 혼합층의 깊이가 1.5km 이하로 내려가거나 Capping Inversion이 깨어지면 강설의 강도는 약화되면서 종료 단계로 접어들게 된다.



[그림 5.1.4] 2월 7일 00UTC RDAPS 분석 SST, SST Anomaly, 500-400hPa 온도차, 지상-925hPa/지상-850hPa/지상-700hPa/지상-500hPa 온도차(좌)와 48시간 예측 SST, SST Anomaly, 500-400hPa 온도차, 지상-925hPa/지상-850hPa/지상-700hPa/지상-500hPa 온도차(우)

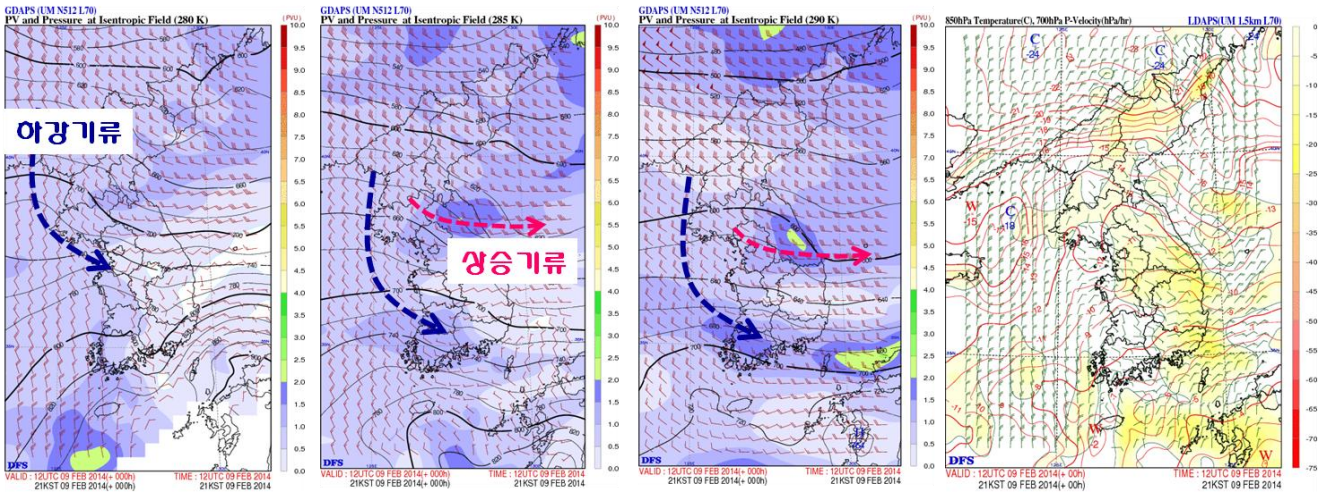
그림 5.1.5는 500hPa 와도 이류와 단열선도의 시간 변화를 보인 것이다. 7일 00UTC에 한반도는 음의 와도 이류구역에 위치하고 있었고 혼합층의 깊이는 2km(850hPa)로 제한되어 있었으나, 9일 00UTC에는 500hPa 고도에서 강한 양의 와도가 중부지방으로 이류되면서 혼합층의 깊이가 4km(700hPa)까지 급격하게 높아지는 모습을 볼 수 있다. 이것은 상층에서의 와도 이류에 따라 Capping Inversion의 높이가 상층으로 끌어올려진 결과로 볼 수 있으며 높아진 혼합층의 깊이만큼 더 많은 불안정과 수증기가 고급될 수 있기 때문에 대류성 강설밴드의 지속적인 발달과 유지에 결정적인 역할을 한 것으로 평가할 수 있다.

경계층의 높이는 상층에서 양의 와도 이류가 지속되는 동안 4km 정도까지 유지된 이후 양의 와도가 약화되기 시작하는 10일 이후 점차 3km 이하로 낮아지는 경향을 보였다. 강설의 강도를 결정하는 마지막 요소는 상승 운동이 얼마나 강하게 오랫동안 지속되느냐에 달려있다. 상승 운동의 정도는 직관적으로는 연직 속도장을 통해서 확인할 수 있지만 수평바람장의 변화에 따라 큰 오차가 발생할 수 있기 때문에 850hPa이나 925hPa 상당위능 축(Equivalent Potential Temperature Ridge Axis) 축 분석을 통해서 상승운동이 강한 지역을 찾아낼 수 있다. 그리고 또 다른 방법은 등온위면 분석일기도를 활용하는 것이다.



[그림 5.1.5] 2014년 2월 7일 00UTC RDAPS 500hPa 등고도선과 상대와도(상), 2월 9일 00UTC 예상 등고도선과 상대와도(하)

그림 5.1.6은 2014년 2월 9일 12UTC 285°K, 285°K, 290°K 등온위면 분석도와 700hPa 연직속도 분석도이다. 등온위면 분석에서 9일 12UTC 서해상에는 하강기류가, 태백산맥을 중심으로는 상승기류가 형성되는 모습을 보여주고 있는데, 이는 700hPa 연직 상승구역과 잘 일치하고 있다. 그리고 Shading 된 EPV 분석장을 보면 영동지방에 상승운동 구역이 존재하고 있으며, 이 구역을 통해 대류 불안정에 의한 상승운동이 강하게 나타날 것이라는 것도 쉽게 짐작할 수 있다. 대설에 대한 정확한 예보를 위해서는 강설의 시작과 종료 그리고 강설의 강도를 예측할 수 있는 매개변수들에 대한 이해와 함께 변수들의 시간적인 변화 경향을 수치모델 자료를 통해서 판단할 수 있는 판단력이 요구된다.



[그림 5.1.6] 2014년 2월 9일 12UTC 등온위면 일기도와 700hPa 연직 속도 분석도

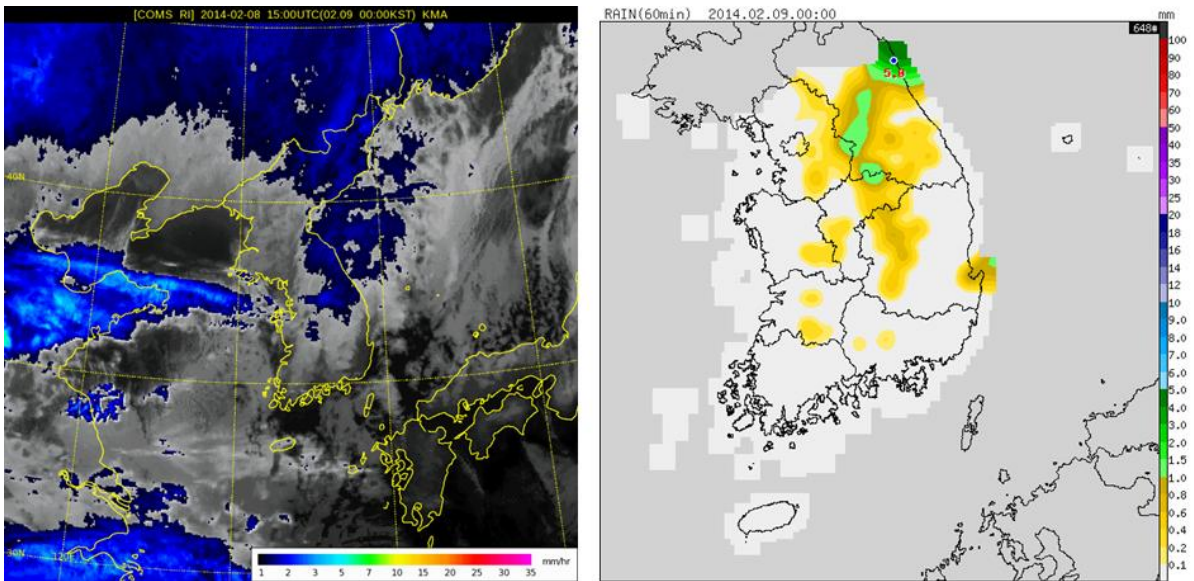
5.2. 위성

5.2.1. 영동지역 대설사례 사전예측

본 사례는 2014년 2월 6일부터 14일까지 9일간 강릉 등 영동지역에 연속적으로 폭설이 내린 사례로 연속 신적설 일수가 관측(1911년) 이래 가장 길었으며, 강릉의 일 최심적설은 110cm(2월 11일)로 1990년 이후 가장 많은 눈이 내렸다. 동해안에 대설이 발생할 때의 전형적인 패턴인 한반도 북쪽에 고기압이 정체하고 남쪽에 이동성 저기압이 접근하면서 북고남저와 북서고 남동저의 기압 배치로 동해안 지역에 동풍류와 북동풍류가 강화된 결과로 발생하였다.

위성영상에서 동해안 대설 현상 및 이 현상이 지속된 원인을 탐지하기는 용이하지 않다. 특히, 대설을 유발하는 구름이 주로 3km 이내로 발달하기 때문에 적외영상의 운정온도가 상대적으로 높아(-10~-20℃) 이 정도 발달한 구름에서 폭설을 예측하기가 쉽지 않기 때문이다(그림 5.2.1, 그림 2.2.10).

그림 5.2.1에서 보는 바와 같이 강설 지역은 어느 정도 추정하였으나 대설의 강도는 현저히 적게 추정하고 있다. 대설 시 운정온도가 -30℃ 이하로 발달하는 경우는 대부분 서쪽지역에서 이류해 오는 상층운이 동해안 지역을 통과하는 경우로 이 상층운이 대설에 미치는 영향에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 다만, 가시영상에서 하층운의 발달 정도, 위성으로 관측한 해수면온도와 ASCAT 등의 위성 자료로부터 도출한 해상풍의 강도를 이용하여 대설 발생 가능성과 강도를 추정할 수 있을 것이다(그림 2.2.2).



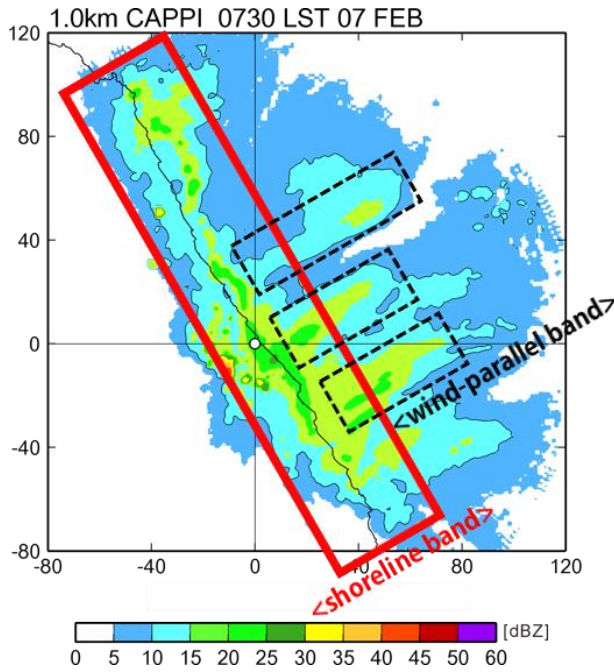
[그림 5.2.1] 대설 발생 시 국가기상위성센터 천리안위성자료처리시스템(CMDPS)의 강우강도 추정 알고리즘으로 추정한 강수강도(왼쪽)와 AWS 측정 강수강도 분포(오른쪽), 2014년 2월 9일 0000KST

5.3. 레이더

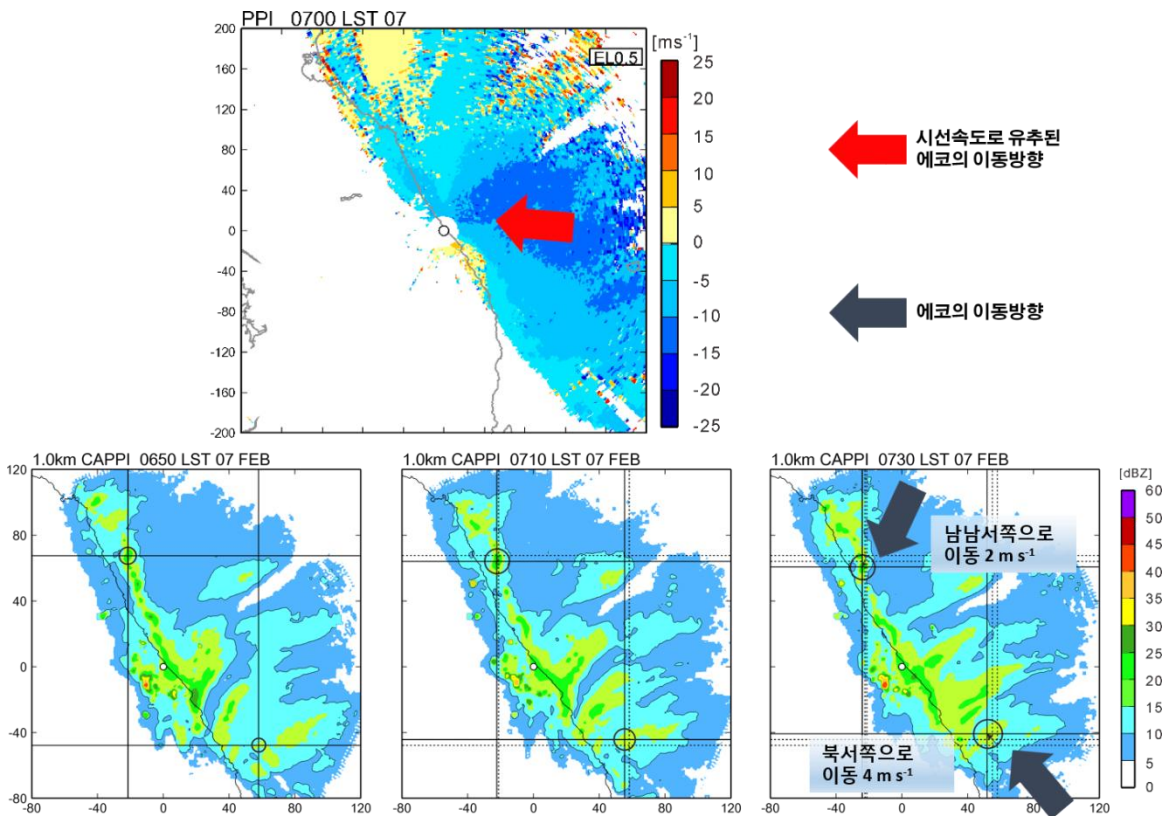
영동지역에서 발생하는 강설의 특징은 Ocean-effect로 대표될 수 있으며, 같은 원리를 가진 Lake-effect의 경우 강설시스템을 형태적 특징에 따라 다음 3가지로 분류할 수 있다(Michael and David, 2007). 바람방향과 평행한 모습으로 발달해 이동하는 Wind-parallel, 해안선을 따라 길게 발달하는 Shoreline, Meso-scale Vortices 형태로 나타날 수 있으며, 영동지역의 경우 동해상 Wind-parallel 형태로 발달해 한반도 동해안쪽에서 수렴하여 Shoreline 형태를 보였다. 이 같은 특징은 유입되는 에코의 유무에 대한 파악이 이후의 강설에 대한 예보를 가능케 할 수 있다. 즉, 최저 고도각의 PPI 영상으로 동해상에서 에코의 유입을 확인하게 되면 해당 에코는 해안선 인근에서 수렴하여 강설을 내릴 것으로 예보 가능하다.

강릉 레이더의 서쪽은 태백산맥의 빙 차폐로 인해 서쪽의 낮은 고도에서의 자료의 사용에 제약이 따르기 때문에, 불충분한 시선속도 자료를 통해 에코의 이동방향을 판단해야 하며, 이러한 과정에서 발생될 수 있는 오류는 그림 5.3.1과 같다. 저 고도각의 시선속도 영상을 통해 판단된 에코의 이동방향은 붉은색 화살표와 같이 서쪽 방향으로 이동하며, 강릉 레이더 남동지역에 위치한 셀의 1km CAPPI 추적을 통해 판단된 이동방향은 북서방향으로써 시선속도로 판단된 방향과 차이가 있지만, 유사한 이동방향이 나타난다. 그러나, 강릉 레이더 북쪽에 위치한 셀의 추적결과는 시선속도로 판단된 에코의 이동방향과 다르게 남남서 방향으로 나타나며, 이들의 이동방향 차이는 북고남저형의 종관적인 특징에서 나타나는 것으로 사료된다. 따라서, 강설에코의 이동방향은 시선속도 자료만을 통해 전반적인 에코이동을 판단하는 것은 크게 오류를 불러올 수 있다.

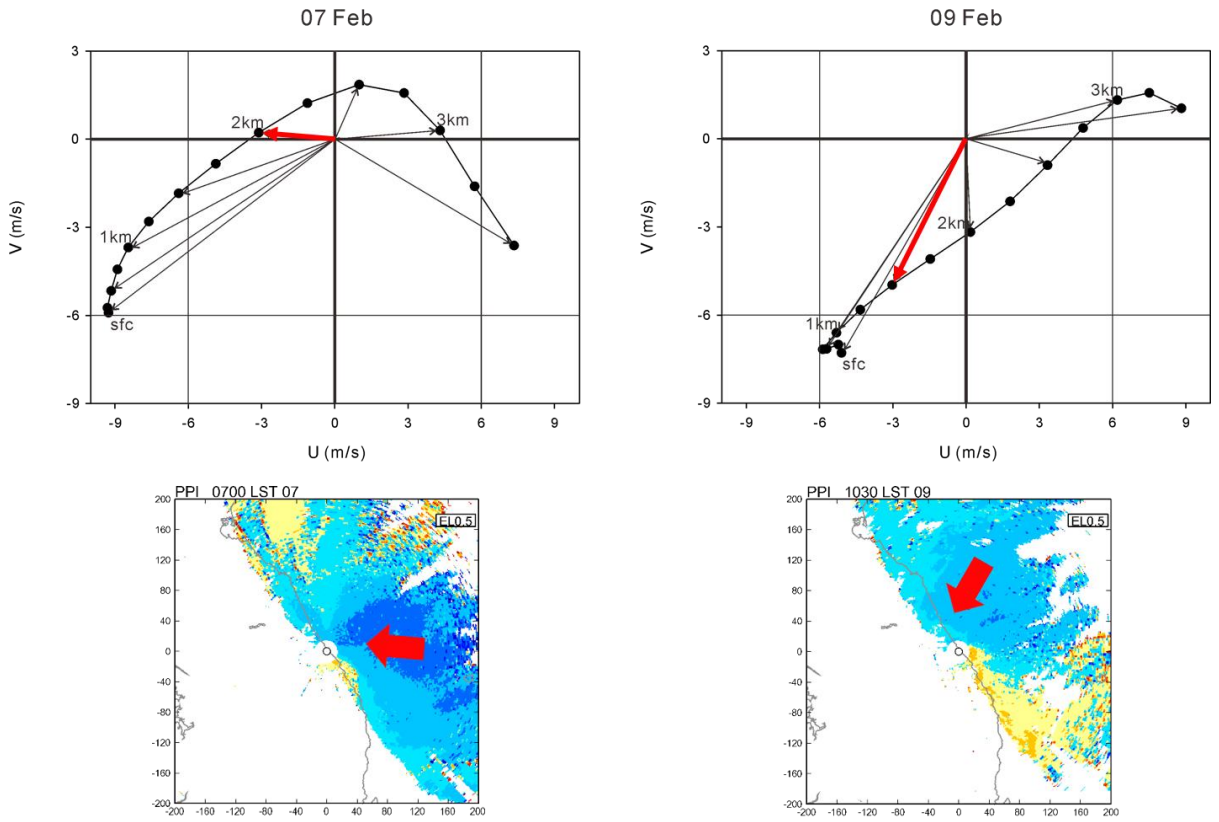
시선속도 자료를 보완하여 보다 명확한 에코의 이동방향을 판단하기 위해서는 산출된 3차원 바람장 자료를 사용하여 이동방향을 파악하고 예측할 필요가 있다. 해당 사례의 경우 호도그래프에서 나타나는 1.5-2km 고도의 바람방향은 시선속도로 유추된 에코의 이동방향과 매우 유사하게 나타났다. Corfidi(1996)에 따르면 강수에코의 경우 850-300hPa 의 바람방향과 유사하게 이동하지만, 영동지역에 발생하는 강설의 경우 2.5km 고도 이상은 대부분 서풍계열의 바람이 나타나므로, 1.5-2km 고도의 바람방향으로 에코의 이동방향을 판단 하는 것이 적절할 것으로 사료된다.



[그림 5.3.1] 07일 0730KST의 1km CAPPI 반사도 분포



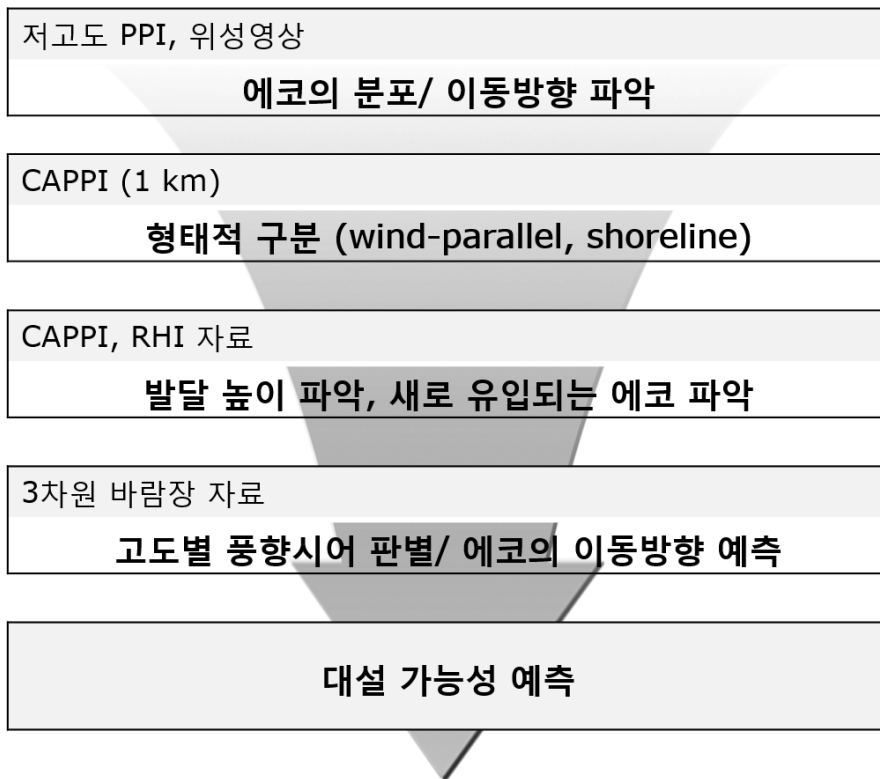
[그림 5.3.2] 07일 0700KST의 0.5°PPI 영상(상), 0650-0730KST의 20분 간격 1km 수평반사도, CAPPI(하), 유추된 에코의 이동방향과 셀 추적을 통해 판단된 에코의 이동방향



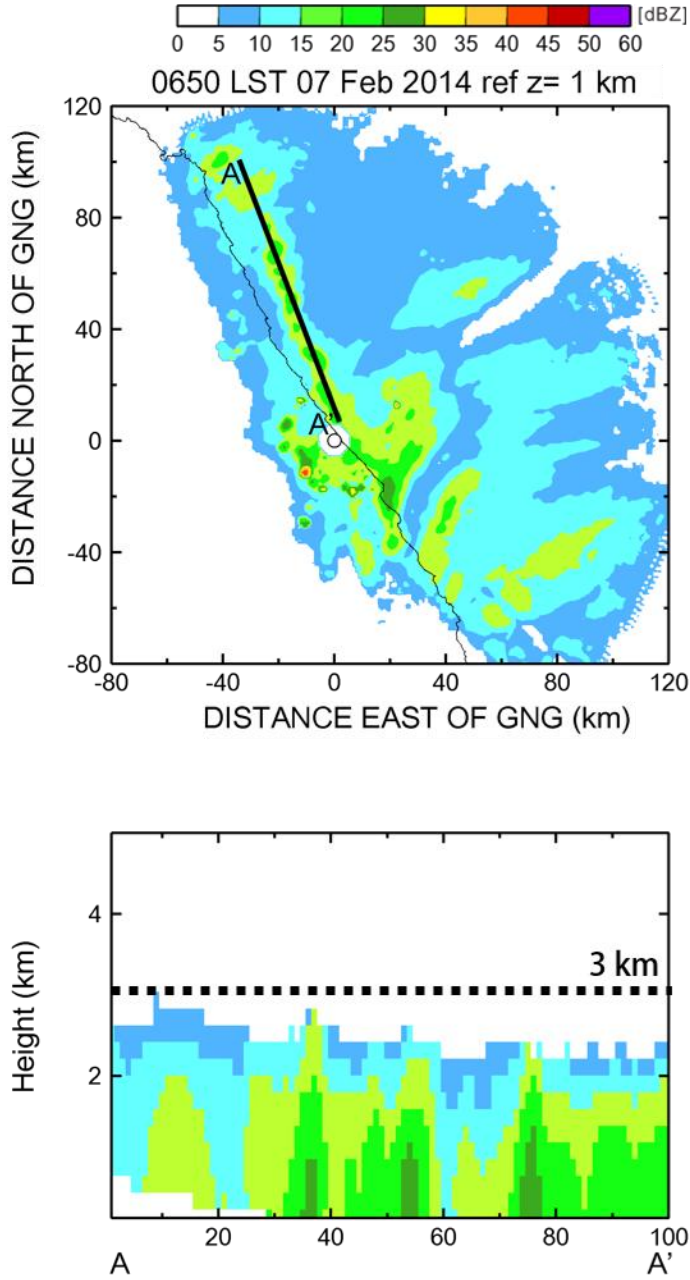
[그림 5.3.3] 이중 도플러 레이더 분석으로 산출된 3차원 바람장 결과를 통해 나타낸 호도그래프(07일 , 09일)

레이더를 통한 강설사례의 분석은 여러 제약이 있음에도 불구하고 예보하는 과정에 있어 필수적이다. 해당 사례를 통해 살펴본 강설에 대한 레이더의 분석 과정은 그림 5.3.4와 같다.

먼저, 강설 시스템 특성상 3km 이하의 높이로 발달하기 때문에 저 고도각의 PPI 자료를 사용한 상황 파악이 필요하며, 최저 고도각을 사용하더라도 관측전략에 못 미치는 강설탐지가 나타날 수 있다. 따라서, 위성영상을 통해 동해 먼 바다의 하층구름 상황파악이 레이더 영상분석과 동시에 이루어 져야 될 것으로 판단된다. 강수에코의 경우 일반적으로 1.5km 고도의 CAPPI 영상을 통해 이동과 강도, 형태를 구분하지만, 강설에코는 그림 5.3.4와 같이 상대적으로 강하게 발달한 25dBZ 이상의 영역이 1.5km 고도까지 성장하지 않는 경우에 강하게 발달한 영역에 대한 분석과 예측이 어려울 수 있으므로 1 km 고도의 CAPPI 영상을 통해 에코의 강도와 형태를 구분하도록 한다. 추가적으로 연직 단면자료의 활용으로 강설에코의 발달높이와 새로 유입되는 에코를 파악하며, 3차원 바람장 자료를 통해 에코의 이동방향을 예측한다.



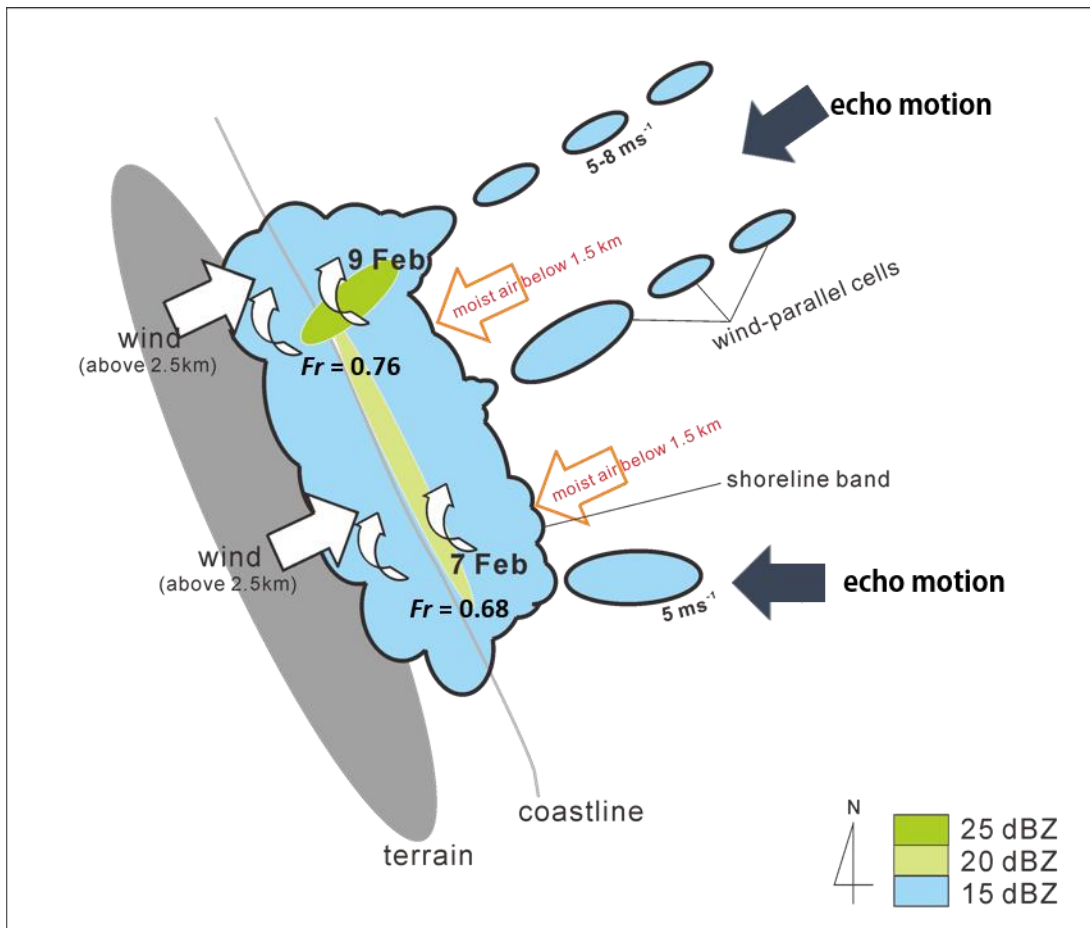
[그림 5.3.4] 강설에코에 대한 레이더자료 분석과정



[그림 5.3.5] 7일 1km 수평반사도 CAPPI 영상과, 선(A-A')을 따르는 반사도의 연직단면도

종합의견

해당 사례는 한반도 북쪽의 정체성고기압과 남쪽의 이동성 저기압의 영향으로 영동지역에 많은 강설이 기록한 사례이며, 따뜻한 해수면으로부터 수증기를 공급받은 동풍과 북동풍류의 바람이 영동지역에 지배적인 영향을 미치며 9일간의 기록적인 강설을 기록한 사례이다. 동쪽해양에서 내륙으로 진입해 들어오는 강설시스템을 시작으로 바람과 평행한 Wind-parallel 형태의 구름들이 해안선 인근지역에서 수렴하여 Shoreline 형태로 변화했으며, 해안선을 따르는 Shoreline 형태의 구름들은 지속적으로 영동지역에 강설을 발생시켰다. 바람방향으로 평행한 구름들은 3-8m/s의 속도를 가지고 한반도 동쪽에 유입되었으며 해안선 근처에서 수렴하였다. 또한 해안선 주변에서의 수렴에 의해 상승류가 발달하였다. 내륙으로 들어온 강설예고는 지형고도에 의해 다시 하층 수렴에 의한 상승류의 발달과정을 겪게 되며, 이러한 지형적인 요인은 영동지역에 대설을 발생시키는 중요한 역할을 함으로, 강설예보에 고려해야 할 필수 인자들이다.



[그림 5.3.6] 2014년 2월 7일, 9일 대설사례 모식도

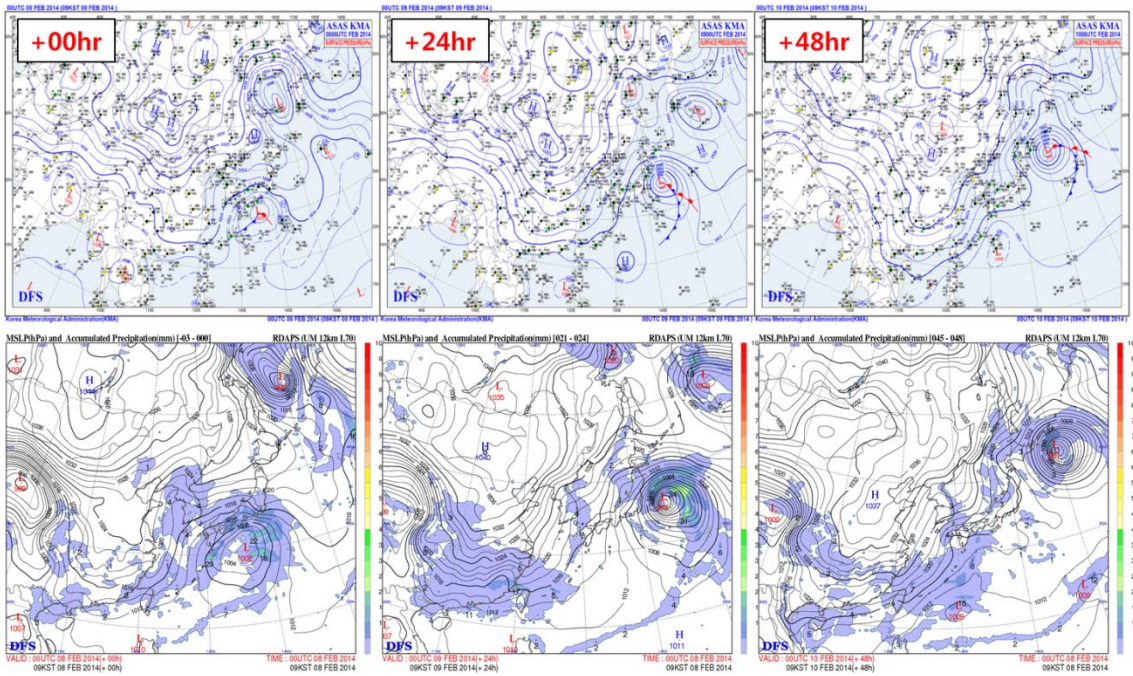
5.4. 수치모델

수치모델을 이용한 정확한 대설 예보를 위해서는 모델의 예측 결과의 일관성과 신뢰도의 검증을 바탕으로 판단되어야 한다. 우리나라에서 대설이 발생하는 경우는 주로 종관 규모 기압 배치와 저기압의 이동과 밀접하게 관련되어 있다(손에 잡히는 예보기술, 2012). 본 사례는 시베리아 고기압과 한반도 남쪽을 지나는 저기압이 만들어내는 종관 기압 배치 상황에서 영동지역으로 지속적으로 유입되는 동풍 계열의 바람장이 중요한 역할을 하고 있다. 또한 높은 해기차에 의해 해양으로부터 풍부한 수증기 공급과 대기불안정이 얇은 대류셀을 형성하였다.

지역예보모델은 이러한 종관 상황을 적절히 모의함으로써 영동지역으로의 지속적인 동풍 유입이 가능하도록 하였으며, 결과적으로 좋은 강수 예측이 가능하였다. 모델의 종관 규모 기압계의 예측 오차는 저기압의 발달과 이동 속도에서 공간적으로 수십~백 km, 시간적으로 6시간 정도 일어날 수 있으며, 이에 따라 강수의 시작과 강수 강도에 차이를 가져올 수 있다(2010년 1월 4일 중부지방 대설 사례 분석서 등). 본 사례에서도 종관 규모 예측 오차가 나타나고 있으나(그림 5.4.1), 모델에 의해 영동 지역 대설의 예측이 좋았던 이유는 동해상에서 태백산맥을 향하는 동풍 계열의 바람을 모의하여 중규모 역학 강제력과 하층 대기층에서의 열적 강제력이 잘 모의되었기 때문인 것으로 보여진다. 국지예보모델은 이런 중규모 강제력과 명시적 구름 물리 과정을 통해 강수 지역과 강도를 현실적으로 모의하였다. 유사 사례에 대한 두 예측 모델의 지속적인 예측 성능 검증을 통해 좀 더 정확한 예보도 가능할 것으로 판단된다.

적설량은 모델의 예단 변수가 아니므로 모델에 의해 계산된 질량 혼합비 단위(kg/kg)의 강설량은 적절한 수 상당량비의 적용을 통해 적설량으로 예보한다. 관측 자료 분석을 통해 얻어진 수 상당량비 조건표를 따르면(손에 잡히는 예보기술, 2011), 본 사례의 경우 10 내외의 값으로 적설량 산출하면 된다.

산악에 의한 강한 역학적 강제력이 존재했던 영동지역의 모델의 대설 예측성은 높았지만 수도권 지역과 남부 일부 지역으로 관측된 강수의 예측성은 상대적으로 낮았음을 향후 예보에서 참고할 필요가 있을 것으로 생각된다.



[그림 5.3.6] 지상 분석일기도와 48시간 지역예보모델 예측장 비교. 2월 8일(좌), 2월 9일(중), 2월 10일(우)

5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성

이번 사례의 가장 중요한 특징은 동해안에서 대설이 3일 이상 지속되었다는 것이라 하겠다. 이는 동해안 대설 요건(시베리아 고기압 확장에 따른 중규모 기압골의 발달, 한반도 남쪽 해상의 저기압의 존재) 두 가지 모두 또는 최소한 한 조건은 지속적으로 존재하였음을 의미하는 것이다. 이 같은 대설 요건의 지속을 가져 오는 대규모와 지역규모의 기상 환경이 이번 사례의 특이점이라 하겠다.

5.5.1. 대규모 및 지역 규모의 기상환경

대설 요건이 지속되는 데는 북태평양 상공의 고기압 정체라는 대규모 조건과, 시베리아 고기압의 동쪽 확장 저지 및 한반도 기압경도 강화에 기여하는 지역적 원인들이 중요한 역할을 한 것으로 판단된다.

1) 북태평양 상공의 저지 고기압

북태평양 상공(캄차카 반도와 알래스카 사이)의 Blocking High로 인해 아시아 지역 상공의 기압골이 정체되었고, 하층의 기압 패턴(시베리아 고기압, 오호츠크의 저기압 등)도 유지되는 패턴을 보였다.

2) 시베리아 고기압 확장의 지속적 저지

아시아 대륙의(시베리아 고기압의) 동쪽 오호츠크해상에 저기압이 정체하거나 새 저기압의 이동으로 시베리아 고기압의 동쪽 확장이 계속 저지되고 한반도 북쪽에서 고기압의 남동 방향 확장이 지속되었다. 이로 인해 한반도에는 중규모 기압골이 지속적으로 발달함으로써 영동지역 폭설 조건이 수일간 유지 되었다.

3) 한반도 남쪽 해상에서의 이어지는 저기압 발달

대만 북서쪽 해상에서의 저기압 발생과 북동진, 그리고 규슈 남쪽 해상에서의 저기압 발생 등 두 차례에 걸쳐 남쪽 해상의 저기압이 한반도 기압 경도에 영향을 주면서 동해안 전역에서의 대설을 가져왔다.

5.5.2. 유사 사례 발생 예보를 대비한 점검

대규모 조건(상층 Blocking High)과 남쪽 해상 저기압 발생의 예측이 예보의 핵심 부분이라 하겠다. 시베리아 고기압 확장과 그에 따른 한반도에서의 중규모 기압골 발달은 수치예보의 신뢰도가 비교적 높은 편으로 판단된다. 수치 모형의 지형 효과 재현은 대체로 성공적이기 때문이다. 이 때문에 유사 사례 발생 예보를 위해서는 다음 사항들의 점검을 통한 대비가 필요한 것으로 생각된다.

- 1) 북태평양 저지 고기압의 발생 빈도와 그것에 대한 수치 예보의 신뢰도 점검
- 2) 한반도로부터 먼 남쪽 해상에서 발생하는(한반도에 영향을 주는) 저기압에 대한 수치예보의 성능 점검

후자의 경우는 전자보다 더 자주 발생할 것으로 판단되어 이 점검과 함께 가이드라인 보완이 필요할 것으로 생각된다. 그리고 이 저기압들의 발생이 기압골 형태로 시작되고 이는 재분석장에서 나타나기 때문에 재분석장을 발생 점검 출발점으로 보는 것도 타당하다.

5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항

5.6.1. 대설개념 모델 재정립

대설에 대한 개념 모델은 대설 사례의 개수만큼 존재한다고 할 수 있을 정도로 다양하다고 할 수 있다. 최장기 영동지방 대설 사례를 기상청의 동해안형 대설모형과 호수/해양-효과 개념모델을 분석 및 예측 도구로 활용한 결과 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 그렇지만 동해안형 대설모형은 상층제트의 위치 차이가 있었고, 호수/해양-효과 개념모델은 종관규모 강제력보다는 중규모 순환 모형에 가까운 것이었다는 한계를 가지고 있었으며, 단일 사례에 대한 적용으로 모든 대설 사례에 적용할 수 있을지에 대해서는 더 다양한 사례들을 적용해 볼 필요가 있겠다. 예를 들어 Capping Inversion의 높이 변화와 강설량의 변화, 풍속의 변화와 강설량의 변화, 풍속의 변화에 따른 수렴과 지형에 따른 강제 상승 효과에 대한 객관적인 판단 기준 등을 다양한 사례를 통해서 찾아내서 이를 통해 한반도 동해상에서 발생하는 대설을 총괄적으로 아우를 수 있는 개념 모델을 만들어 현업 예보에 활용한다면 보다 정확한 대설의 시종과 강설량 예보에 활용할 수 있을 것이다.

5.6.2. 국지 예보척 보완과 발전

예보관들의 예보 능력 중에서 객관적인 대기과학적 지식 못지않게 중요한 것이 다양한 기상현상에 대한 분석과 예보를 통한 풍부한 경험이다. 풍부한 경험을 개인적인 능력의 발전으로 한정하지 않고 모든 예보관들이 활용하기 위해서는 경험을 객관적인 예보척으로 발전시킬 필요가 있다. 특히 한반도는 4계절 동안 다양한 자연재해가 발생하는데 매우 국지적인 경향성을 보인다. 국지적인 경향성이 크다는 것은 자연재해를 야기하는 기상현상들의 발달 메커니즘이 중규모적 환경에 의해서 크게 좌우된다는 것을 의미한다. 이러한 중규모 환경과 관련된 국지적인 기상현상들은 현장의 경험이 많은 예보관들에 의해서 정리되어야 하며, 정리된 예보척은 충분히 교환되고 교육되어야 한다. 잘 만들어진 예보척은 예보 매뉴얼로 발전시켜 새로운 예보관에 대한 교육 자료로 활용할 수 있으며, Check List화하여 현업 업무에 그대로 적용할 수 있다. 영국 기상청의 경우에는 기상 교범에 각 요소별 예보법에 대한 상세한 Check list를 제공하고 있으며, 미국 대기해양청은 각 지역별로 별도의 예보척들을 만들어 인터넷에 공개해서 예보관 뿐만 아니라 기상예보에 관심이 있거나 연구를 하는 학생과 일반인들이 활용할 수 있도록 하고 있다.

참고문헌

1. 서은경, 전종갑, 1991년: 1990년 1월 29-2월 1일에 한반도에서 발생한 대설에 관한 연구. 한국기상학회지, 27(2), 165-179.
2. 손에 잡히는 예보기술 (2011) 2011년 손에 잡히는 예보기술, 기상청
3. 손에 잡히는 예보기술 (2012) 2012년 손에 잡히는 예보기술, 기상청
4. 이훈, 이태영, 1994: 영동지역의 폭설 요인. 한국기상학회지, 30(2), 197-218.
5. Corfidi, S. F., J. M. Fritsch, and J. H. Merritt, 1996: Predicting the movement of mesoscale convective complexes, *Wea. Forecasting*, 11, 41-46.
6. Kristovich, D. A. R., 1993: Mean circulations of boundary-layer rolls in lake-effect snow storms, *Bound.-Layer Meteor.*, **63**, 293-315.
7. Lee, T.-Y., and Y.-Y. Park, 1996: Formation of a mesoscale trough over the Korean peninsula during an excursion of the Siberian High. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74(3), 299-323.
8. Spinar, Michael L., and David A. R. Kristovich, 2007: Multiscale interactions in a lake-effect snowstorm, Preprint, *12th Conference on Mesoscale Processes*, American Meteorological Society, 6-9 August 2007, Waterville Valley, *N.H.* Boston, Paper 11.3, 4 p.

영동 대설

2014년 2월 7~10일

발행처 기상청예보기술분석과
집필진 김영철(한서대학교)
서명석(공주대학교)
이동인(부경대학교)
이상현(공주대학교)
이태영(연세대학교)



기상청 Korea
Meteorological
Administration