## 3 고급훈련 기술서

2010년 1월 4일, 중부지방 대설







#### 1. 사례 개요 /01

- 1.1. 개요 /03
- 1.2. 언론 보도 /04
- 1.3. 주요 기록 /05

#### 2. 실황분석 /06

- 2.1. 일기도 분석 /08
- 2.2. 위성 분석 /23
- 2.3. 레이더 분석 /30

#### 3. 예측자료 분석 /36

- 3.1. 지역수치모델(RDAPS) 모델 분석 /38
- 3.2. 예측시간에 따른 예측결과 분석 /39

#### 4. 사례 발생 원인 /44

- 4.1. 종관 및 중규모 기상 환경 /46
- 4.2. 대기 불안정 /50
- 4.3. 강설 발달 단계 /52
- 4.4. 수도권과 경기지역 강한 강설 발생의 원인 /53

#### 5. 사전 예측을 위한 검토 자료 /55

- 5.1. 일기도 /57
- 5.2. 위성 /65
- 5.3. 레이더 /67
- 5.4. 수치모델 /72
- 5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성 /73
- 5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항 /74

#### 참고문헌 /75

### · 사례 개요

- 1.1. 개요
- 1.2. 언론 보도
- 1.3. 주요 기록

#### 1. 사례 개요

#### 1.1. 개요

- 이번 대설은 주로 수도권과 강원도에 집중되어 이들 지역에 평균 20cm 안팎의 기록적인 적설 이 관측되었다.
- 특히, 새벽부터 오전 시간대에 대설이 집중되어 출근길 도로 혼잡이 매우 심했고, 주요 도로가 통제되어 지각 등 출근길 전쟁이 벌어졌던 사례였다. 특히, 경부고속도로 등 중부지방에 위치 한 대부분의 고속도로가 마비되었다.
- 적설의 지역적 편차가 매우 컸으며, 중부지방의 폭설과는 대조적으로 산간을 제외한 남부지방 에서는 기온이 높아 비나 진눈깨비가 내렸다.



- 1월 4일 서울에 내린 일최심 신적설 25.8cm는 1937년 적설 관측 이래 가장 많은 양으로 기록 되었고, 이전 기록은 1969년 1월 28일 25.6cm이었다. 인천은 22.3cm, 수원은 19.5cm의 일 최심 신적설을 각각 기록하였다.
- 이번 대설은 한반도 상공에 차가운 공기가 머무르는 상태에서 중국 중부내륙에서 발생한 저기 압이 서해상을 지나면서 따뜻하고 습한 공기를 공급받아 중부지방을 지나며 눈구름대가 발달 하였기 때문이다.

#### 1.2. 언론 보도



 비닐하우스에 쌓인 눈 치우는 적십자 봉사원 (춘천) (출처 : 연합뉴스)



폭설이 내린 경기도 수원역 (출처 : 연합뉴스)



▶ 폭설에 무너진 시금치 하우스 (출처 : 연합뉴스)



#### 1.3. 주요 기록

지점명	경신 값	종전기록	1위 극값	관측개시일
철원	13.8(2위)	13.6(2001.01.07)	15.7(1991.12.27)	1988.01.01
춘천	23.0(3위)	20.6(1978.02.28)	29.1(1969.01.31)	1966.01.01
서울	25.8(1위)	25.6(1969.01.28)	-	1907.10.01
인천	22.3(2위)	20.0(1969.01.28)	30.0(1973.12.22)	1904.08.29
수원	19.5(3위)	19.2(1973.12.22)	21.9(1981.01.01)	1964.01.01
영월	21.4(1위)	21.3(2001.01.07)	-	1994.12.01
고산	3.2(2위)	2.3(1990.01.25)	6.0(2004.01.24)	1988.01.01
이천	23.0(3위)	21.7(1990.01.31)	28.4(2001.01.07)	1972.01.11

▶ 전체년도 일최심 신적설(cm) 극값 경신



# **2** 실황분석

- 2.1. 일기도 분석
- 2.2. 위성 분석
- 2.3. 레이더 분석

#### 2. 실황분석

#### 2.1. 일기도분석

#### 2.1.1. 일기도 및 관측자료 분석 개요

겨울철에 발생하는 대설은 광범위한 영역에서 사회·경제적인 파급 효과가 매우 큰 현상으로 강설 가능지역, 강설 지속시간, 강설량 등에 대한 정확한 예보를 요구되지만, 집중호우에 비해서는 아 직도 명확한 관측 연구나 예보칙 확립이 진행 중인 상태라고 할 수 있다. 2010년 1월 4일 서울을 포함한 중부 대부분의 지역에서 10cm 이상 많은 곳은 30cm가 넘는 대설로 인해서 도시 기능이 마비될 정도의 사회·경제적인 파급 효과가 발생하였다.

일기도를 통한 기압계 이동 분석과 대부분의 수치예보 모델 결과 자료들은 24시간 전인 1월 3일 부터 이미 중부지방을 중심으로 비교적 많은 눈(평균 5cm 내외, 강원 산간 최 20cm)을 예보할 수 있을 만큼의 많은 정보를 제공하고 있었지만, 시간당 5cm 이상의 폭설을 동반하는 구름대가 12시간 동안 지속적으로 발달하면서 내륙 깊숙이까지 진출해서 30cm가 넘는 전국적인 강설을 예보하는 데는 실패했다고 평가할 수 있다.



[그림 2.1.1] 2010년 1월 4일 중부지방 대설 사례 발생 모식도

그림 2.1.1은 중부지방을 중심 으로 대설이 발생하는 과정을 모식도로 표현한 것이다.

대설의 발생 및 발달 과정을 보 면 한반도 북쪽으로부터 한랭 건조한 공기가 상대적으로 따뜻 한 바다 위를 이류하면서 호수 효과(Lake Effect)로 발생한 많 은 수증기가 공급되어 층운형 눈구름을 만들고 이 눈구름이 서해상에 도달하면서 남쪽으로 부터 유입되는 온난 이류와 지 면 마찰에 의한 강제 상승효과

로 인해 더욱 발달하여 대류성 눈구름을 발달시켰으며, 내륙으로 진출하면서는 산악의 지형효과 까지 더해져서 대설이 지속되었던 것으로 볼 수 있다. 결국 한반도에서 발생하는 전형적인 대설 형태인 서해상 한랭 기류 이류에 의한 호수효과와 지형 및 남서쪽으로부터의 온난 공기 이류에 의한 강제 상승의 복합과정이라고 할 수 있는데, 이러한 현상을 단순한 일기도 및 수치예보 자료 만으로 3차원적인 구조와 역할을 충분히 규명하기에는 한계를 가진다. 앞에서 다룬 집중호우 사 례와 마찬가지로 지상 분석일기도에서부터 상층까지의 기상변화 경향을 분석하여 대설 발생 원 인이 무엇이었는지 먼저 살펴본다.

#### 2.1.2. 지상 및 하층 일기도 분석

그림 2.1.2는 1월 3일 12UTC와 4일 00UTC 지상 분석일기도이다. 3일 12UTC 지상 일기도에 서 한반도는 전체적으로는 고기압권에 놓여 있는 것처럼 보이지만, 상세하게 살펴보면 한반도 남 부지방과 북부지방의 날씨는 극명하게 차이가 난다. 한반도 남부지방은 남서쪽에 중심을 둔 온난 한 고기압의 영향으로 1월 초임에도 불구하고 제주도의 야간 기온이 영상권을 형성한다는 점에 주목할 필요가 있다. 반면 한반도 북부지방으로는 강한 대륙 고기압이 장출하면서 전면에 강수를 포함한 구름대가 형성되어 있고, 강수대 부근에서는 -10~-5℃ 분포의 기온이, 그리고 구름이 없 는 맑은 지역에서는 -20℃ 이하까지 기온이 떨어져 있으며, 강한 남북 기압경도력이 한만 국경을 중심으로 형성되어 있다. 이러한 지상 기압배치로 한반도 중북부 지방이 저기압 발생 구역에 놓 여 있는 것을 알 수 있다.

그리고 산둥반도 서쪽에 중심을 갖 는 저기압이 발달하고 있는데, 이 러한 일기도 패턴을 고려해 보면 다음 시간에 한반도 서해안 부근에 서 강한 기압골이 발달 할 수 있는 조건이었음을 짐작할 수 있다.

3일 12UTC 일기도 분석에서 예측 된 대로 4일 00UTC 지상 분석일 기도에서는 우리나라 서해상에 중 심을 둔 독립적인 저기압이 발달하 고 있으며, 기압골의 접근과 북서 쪽으로부터 한랭 건조한 공기가 상 대적으로 따뜻한(위성 영상 분석 결과 서해안 해수 온도는 2~4℃ 분포를 보임) 서해상을 지나면서 강설 구름으로 발달하여 이미 중부 지방을 중심으로 눈이 내리기 시작 했다. 그런데 지상 기압배치에서 주목해야 할 것은 저기압이 북쪽에 서 장출하는 대륙 고기압과 일본 열도를 따라 선형으로 형성되어 있 는 온난 고기압 사이에 갇혀서 동 쪽으로의 이동이 제한을 받고 있다 는 것이다. 또한 대륙 고기압의 확 장 방향이 북동 쪽에서 발해만 부 근으로 형성되면서 지상 저기압 중 심이 북동진하지 못하고 남동진함





함에 따라 한반도 남부 지방을 통과하는 형태가 되는데, 중국 내륙에서 발생해서 서해안을 통과 하여 한반도 남쪽을 통과하는 경우 패턴에서 20cm 이상의 대설이 자주 발생하는 경향을 가진다 는 예보칙과 잘 일치하고 있는 모습을 보인다. 그리고 저기압성 순환과 함께 한반도 남부지방으 로는 계속해서 온난 이류가, 한반도 북서쪽으로부터는 강한 한랭 이류가 유지되면서 아주 좁은 지역에 강한 온도 경도를 일으켜 공기의 강제 상승에 의한 대설 발생 가능성을 높였다.

4일 00UTC 지상 일기도의 등압선 분포와 등온선 분포를 보면 저기압의 이동이 제한된 상태에서 북쪽 대륙 고기압이 빠르게 남쪽으로 장출하면서 기압 경도가 강화되었고, 전시간에 비해서 중심 기압이 8hPa 이상 떨어지면서 강하게 발달하고 있다. 지상 분석일기도에서 한랭전선과 온난전선 이 분석되어 있지 않지만 기온분포와 구름 분포를 종합해 보면 한랭전선이 경기만에서 발해만 부 근으로 위치하고 온난 전선이 한반도 남부지방에 위치하면서 저기압성 순환을 따라 점차 폐색되 어질 것이라는 사실을 인지할 수 있다. 실제로 이번 사례의 경우에 중부지방을 경계로 북쪽 한기 와 남쪽 난기가 충돌하면서 강제 상승이 이루어졌고, 풍부한 수증기 공급과 온난 이류에 의해서 강수 효율이 더욱 증가하면서 젖은 눈(Wet Snow) 형태의 강설이 내려 많은 적설량을 기록한 것 이다.

겨울철 강설 예보를 위해서 예보관들이 반드시 철저히 분석해야 할 일기도 중에 하나가 925hPa 분석 일기도이다. 특히 925hPa 고도의 등온선, 등고도선 그리고 습수의 변화 경향을 잘 살펴보 는 것이 강설 패턴이나 강설량 예측에 매우 중요하다. 그 이유는 실제로 겨울에 한반도에서 발생 하는 대설과 관련된 구름의 생성과 강도를 판단하는데 925hPa에서 한반도 남서쪽에서의 남서기 류 유입과 함께 온난 이류에 의한 수증기 공급이 지속되는 가운데 북쪽에서 건조한 한기가 강하 게 장출하는 패턴에서 구름 속 눈 입자들의 성장이 촉진되는 역할을 하게 되기 때문이다.

여름철의 경우에는 850hPa 일기도 분석을 통해서도 하층 제트에 동반되는 수증기 공급을 분석 할 수 있지만 겨울철에는 보통의 경우 850hPa 고도까지 많은 양의 수증기가 분포하는 경우가 거 의 없기 때문에 850hPa 일기도만 분석할 경우 이러한 대기 하층의 변화를 놓치는 우를 범할 가 능성이 높다. 그림 2.1.3은 1월 3일 12UTC와 4일 00UTC 925hPa 분석일기도이다. 지상 일기도 패턴과 비슷 하게 3일 12UTC 일기도에서는 몽고 북쪽에 중심을 둔 대륙 고기압이 강하게 남서쪽으로 장출하 고 있는 가운데 대만 부근에 중심을 둔 온난한 고기압이 위치하고 있으며, 산둥반도에서 중심을 가진 기압골이 발생하기 시작하고 한반도 동쪽으로는 오호츠크해에 중심을 둔 기압골 세력이 뻗 어있다. 한반도는 이들 고기압과 저기압 사이의 안장부에 위치한다. 여기에서 주목해야 할 것은 한반도 상공과 산둥반도에 위치한 기압골 후면의 등온선 분포도이다. 0℃ 등온선과 -12℃ 등온 선이 한반도 남해안과 한만 국경 부근을 지나고 있는데, 서쪽 저기압 중심을 경계로 그 폭이 매우 좁아지고 있다. 이는 북쪽의 한기 남하와 남쪽 고기압 세력의 버팀 현상에 의한 것으로 볼 수 있 는데 두 가지 의미를 가진다. 먼저 저기압 후면에서의 강한 남북온도 경도의 발생은 전선 발생 및 급격한 발달 조건을 제공한다. 둘째로 일반적으로 조밀했던 등온선이 소해지기 시작하는 분류 (Diffluence) 지역에서는 주변에 비해서 강한 상승 운동이 발생 할 수 있는데 이는 기압골 전면에



[그림 2.1.3] 2010년 1월 3일 12UTC(상) 4일 00UTC(하) 925hPa 분석일기도

서의 대류성 구름 발달에 크게 기 여한다.

4일 00UTC 일기도에서는 발달된 기압골이 한반도 서해상에 위치하 고 있으며 기압골 중심의 북서쪽으 로부터 강한 한랭 이류가 발생하고 있는 반면 남서쪽으로는 강한 온난 이류가 발생하고 있다. 등온선 분포 를 보면 전일 야간에 비해서 0℃ 등 온선이 북상하여 한반도 남해안 지 역을 지나고 있으며 -6℃ 등온선이 한반도 중부지방을 그리고 -12℃ 등온선이 한만 국경지역을 지난다. 대설이 발생한 시기가 한 겨울철에 해당한다는 점을 볼 때 925hPa 고 도의 0℃ 등온선이 남해안 부근을 지나고 있다는 것은 이례적인 현상 으로 이는 한반도 남쪽으로 온난 이류에 의한 풍부한 수증기 공급이 가능했으며, 북쪽의 한기와 남쪽의 온난한 공기가 한반도 중부지방에 서 서로 충돌하면서 강제 상승에 의한 종관규모 조건부 대류 잠재불 안정이 형성되어 대류성 구름들이 한반도 내륙에서 연속적으로 발생 하고 유지되었음을 의미한다.



그림 2.1.4는 1월 3일 12UTC와 4일 00UTC 850hPa 분석일기도이다. 전체적인 기압 배치는 925hPa 일기도와 유사한 형태를 보이고 있다. 3일 12UTC 일기도에서 한반도는 전체적으로 약 한 기압능에 위치하고 있는 반면, 산둥반도 부근에서 기압골이 형성되기 시작하고 있으며 그 후 방으로 대륙 고기압이 강하게 장출하고 있다. 등온선은 0℃ 등온선이 제주도 부근을 지나고 있는 가운데 북한 지방으로는 -15℃ 등온선이 지나가고 있다. 그리고 그 서쪽으로는 등온선이 매우 조 밀하게 분포하고 있어 기압골의 동진과 함께 한반도 상공에서 강제 상승 운동이 존재하기 유리한 조건이 형성되고 있다. 또한 습윤 구역이 한반도 중북부 지역과 발해만 부근까지 광범위하게 분 포하고 있는데 이는 겨울철에 850hPa 고도까지 수증기가 깊게 분포하기 힘든 점을 감안하면 매 우 높은 수준의 수증기 공급이 이루어지고 있음을 의미한다.

4일 00UTC가 되면 저기압의 중 심이 옹진반도 부근에 위치하면서. 저기압 중심을 기준으로 서쪽으로 는 온도 골(Thermal Trough)이 그리고 한반도 내륙으로는 온도능 (Thermal Ridge)이 형성되고 있 다. 따라서 서해상으로는 강한 한 기가 남하하면서 상대적으로 따뜻 한 서해상을 지나 구름을 형성하 고 이 구름대가 한반도에 진입하 면서 남서기류에 의해서 공급되는 수증기와 열을 만나 더욱 발달하 여 대류성 구름을 만들어 냈다. 등온선 분포를 보면 한반도 중부 지방을 중심으로 -6℃ 등온선이 지나가고 바로 북쪽에 -9℃ 등온 선이 위치한다. 겨울철 강설예보 에서 850hPa의 -6℃ 등온선이 눈과 비를 구분하는 기준이 되는 데, 이는 남부지방에는 비가 중부 지방에는 눈이 내리는 현상과 잘 일치한다. 겨울철 한기 남하와 함 께 동반되는 기압골의 경우에는 비교적 빠른 속도로 이동해서 한 반도를 통과하는데 길어야 6시간 정도가 소요되는 반면 일기도에서 보는 바와 같이 한반도 남쪽에 강 한 기압능이 존재하는 상태에서 북쪽에서 한기를 동반한 고기압이 장출한 상태에서 일본 동쪽에 중





심을 둔 기압골 세력이 계속해서 머물러 있기 때문에 그 사이에 갇힌 저기압은 그 이동 속도가 상 대적으로 느려지게 된다. 총 강설량이 시간당 강설량과 지속 시간에 의해서 결정된다는 점에서 850hPa 이하 고도에서 장출하는 한기와 남서쪽에서의 유입되는 온난 이류의 충돌에 의한 상승 운동과 풍부한 수증기 공급으로 인해서 강설 효율이 크게 증가하고, 느린 속도로 이동하면서 오 랜 시간 동안 제한적인 장소에 많은 양의 눈을 내리도록 한 것이다



#### 2.1.3. 중상층 일기도 분석

하층 일기도 분석을 통해서 대기 하층의 풍부한 수증기 공급에 의한 강수 효율 상승 여부, 온난 이류와 한랭 이류의 충돌에 의한 중규모 불안정 여부 등에 대한 정보를 확인할 수 있다면, 중상층 일기도 분석을 통해 지상 저기압이 더욱 발달할 수 있는 경압불안정을 얼마나 중상층에서 강화시 켜 주는지를 알아볼 필요가 있다.



[그림 2.1.5] 2010년 1월 3일 12UTC(상), 4일 00UTC(하) 700hPa 분석일기도

그림 2.1.5는 1월 3일 12UTC와 4일 00UTC 700hPa 분석 일기도 이다. 3일 12UTC 일기도에서 한 반도는 약한 기압능에 위치하고 있고 발해만 부근에서 약한 단파 기압골이 형성되기 시작한다. 보 통 중위도에서 대설은 하층에서는 뚜렷한 저기압 중심이 나타나지만 700hPa 이상의 고도에서는 중심 으로부터 분리된 단파 기압골에 동반되며, 상층 기압골이 접근하 면서 더욱 발달하고 상층 기압골 이 통과하면서 강설이 종료되는 특성을 가진다. 강설이 시작되기 전인 3일 12UTC에서는 이러한 조건이 한반도 부근에서 만들어 지기 시작했다. 4일 00UTC 일기 도에서 상층 단파 기압골은 아주 느린 속도로 서진하여 산둥반도 부근에 위치하고 있으며 기압골 축의 북서쪽에는 강한 북서기류가 존재하고 기압골 축의 남서쪽으로 는 강한 남서기류를 유도하고 있 다. -10℃ 등온선은 전 시간과 비 슷한 한반도 남해안 지역을 통과 하고 있으며, 전날 12UTC에 한만 국경에 위치하고 있던 -15℃ 등 온선이 중부지방까지 남하하여 강 한 남북 온도 경도를 형성한다.

그리고 한반도 중부와 북부에 온도와 노점온도 차가 3℃ 이하인 습윤 구역이 존재한다. 이것은 대설 예보에 관한 두 가지 힌트를 제공하는데 먼저 일반적으로 겨울철에 한반도에 눈을 가져오는 구름이 3km 이상 성장하는 경우는 거의 없는데 반해서 이번 사례의 경우에는 약 3km 고도인 700hPa 까지 많은 양의 수증기가 공급되면서 강수효율이 높은 대류성 구름을 만들어 내는데 유 리한 조건을 제공하고 있다. 그리고 일반적으로 중위도 지방에서 강한 눈은 700hPa 노점 온도가 -10℃에서 -5℃ 사이인 습윤한 공기에서 발생한다고 알려져 있는데(예보관 중급교재 대기분석 및 예보 10장 기상요소별 예보 참조) 일기도 분석에서 집중호우 사례가 발생한 한반도 중부지방 을 중심으로 이와 같은 조건이 만들어지고 있다.

그림 2.1.6은 1월 4일 00UTC 500hPa과 300hPa 분석 일기도이다. 500hPa 고도에서 한만국경

에서 서해까지 형성되어 있는 상 층 기압골이 몽골에 한랭 핵을 가 지고 남하하고 있는 한랭 기류 전 면에서 발달하고 있고, 기압골을 중심으로 강한 양의 와도 구역이 형성되고 등고도선 및 등온선이 분류(Diffluence)형태를 보임으로 서, 하층부터 대기 중층까지 상승 운동을 유도하고 있다. (예보관 훈 련 교재 대기역학 7장 5절 그림 7.11, 그림 7.12절 참조)

300hPa 고도에서 한대 제트중심 (Polar Jet Streak)이 전일 야간 에 비해서 남하하여 한반도 중부 지방을 향해 향해 진입되고 있는 데, 이 지역에서 강한 상층 발산구 역이 형성되고 있음을 알 수 있다. 약한 기압골에 동반되어 상층 발 산 구역이 하층의 기압골의 수렴 구역 상공을 통과하면 그 기압계 는 강하게 발달할 가능성이 높다. 이번 대설 사례의 일기도 분석을 종합하면 대기 하층에서 풍부한 수증기가 공급되고 있었고, 저기 압을 중심으로 북서쪽에는 강한 한랭이류가 남서쪽에는 강한 온난 이류가 존재하여 강한 남북온도 경도에 의한 전선 발생에 유리한 조건을 형성하고 있었으며, 한랭



[그림 2.1.6] 2010년 1월 4일 00UTC 500hPa 분석 일기도(상), 300hPa 분석일기도(하)

한 공기의 전면에 온난한 공기가 지속 유입되면서 두 개의 기류가 충돌 강제 상승하여 눈구름들 이 지속적으로 그리고 강하게 발달할 수 있는 조건을 만들었다. 그리고 대기 상층에서는 대기 하 층의 기압계 발달을 촉진시킬 수 있는 상층 기압골과 발산 구역이 대설 구역 상공에 위치하면서 지상에서 300hPa 고도까지 기압계가 전체적으로 서쪽으로 기울어져 강한 종관규모 경압불안정 을 가지는 잘 조직화된 중위도 저기압 시스템에 의해서 (예보관 훈련 교재 대기역학 13장 3절 그 림 13.4 참조) 강설이 유도되었다. 또한 지형효과와 중규모 불안정이 복합적으로 작용하여 강한 눈구름이 형성되고 오랜 시간 동안 유지되었다는 사실을 확인할 수 있었다.



#### 2.1.4. 온난컨베이어 벨트 이론을 바탕으로 한 사례 해석

등압면 분석 일기도도 매우 유용한 분석 도구이기는 하지만 기압계 시스템을 중심으로 형성되는 기류의 흐름을 종합적으로 판단하는 데는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 전체 시스템에 대한 상대적인 기류의 움직임을 통해서 3차원 구조와 기류의 흐름을 설명하는 이론이 컨베이어 벨트(Conveyor Belt) 이론이다. 기존의 대표적인 중위도 저기압 이론이었던 노르웨이 저기압 모형이나 Shapiro-Keyser 모델 등이 시스템에 상대적인 기류의 흐름이나 3차원적 구조 를 완벽하게 설명하지 못하는 한계를 극복하기 위해서 1980년대 들어 시스템에 상대적인 기류 (System Relative Flow) 분석을 통해서 시스템의 발달 기구를 밝히고자 하는 노력의 결과로 제 시된 모형이 컨베이어 벨트 이론이라고 할 수 있다.(컨베이어 벨트 이론의 상세한 내용은 중급 예 보관 교재 대기분석및 예보 6장 수송대 이론 참조)

공기가 단열적으로 상승하거나 하강하면 그 온위(Potential Temperature)는 보존된다. 따라서 상승하거나 하강하는 공기의 운동은 등온위면(θ, Isentropic Surfaces)을 따라 기압계에 상대적 으로 움직이는 공기의 흐름과 동일한 것으로 간주할 수 있다. 등온위면을 따라 운동하는 공기 덩 어리의 궤적을 추적하기 위해서는 포화되어 있는 공기는 등습구온위면(θw, Wet Bulb Potential Temperature Surfaces)을 따라 움직이는 흐름으로 간주하고, 건조한 공기는 등온위면을 따라 움직이는 것으로 간주하고 분석하여야 한다. 구름은 등습구온위 혹은 등온위면의 경사를 따라 상 승하는 기류 부근에서 형성되는 것으로 이해할 수 있다.

등온위면 분석을 바탕으로 하는 컨베이어 벨트 이론에서 구름과 강수 구역을 정확하게 이해하기 위해서는 기압계를 따라 이동하는 좌표계를 따라 등온위면 분석이 이루어진다는 사실을 명심하 고 있어야 한다.

기압계를 따라 이동하는 좌표계는 기압계의 운동 벡터의 속도와 형태가 일정하게 유지되는 것을 가정하기 때문에 등온위면 분석을 통해서 얻어진 기류의 운동 벡터에서 시스템 운동 벡터를 빼서 기압계에 상대적인 기류를 얻어내는 방식을 선택하게 된다.

이러한 기압계-상대 분석 구조(System-relative Framework)를 '상대 기류 등온위면 분석 (Relative Flow Isentropic Analysis)'라고 부른다. 따라서 컨베이어 벨트라는 용어는 기압계-상 대 분석 구조 내에서 등온위면을 따라 움직이는 공기의 대규모 운동을 3차원 적으로 설명하는데 사용된다. 컨베이어 벨트 이론에서의 기류의 흐름을 이해하기 위해서는 등온위면을 따라 움직이 는 공기의 시스템 상대 기류에 대한 이해를 먼저 해야 한다.



그림 2.1.7에서 보이는 바와 같이 500hPa 고도에서의 기류의 흐름을 제 3자의 시각에 서 보면 기압골 축을 중심으로 풍하측에는 북서기류가 축의 동쪽인 풍상측에는 남서기 류가 형성되게 된다. 그러나 시스템과 같은 속도로 이동하면서 주변기류의 흐름을 보면 기류의 흐름이 전혀 다르게 보이게 된다. 벡 터 계산식에서 벡터 차는  $\vec{A} - \vec{B} = \vec{C}$  로 표현 할 수 있는데, 비슷하게 스톰상대 기류 벡터 (SR)는  $\vec{V} - \vec{C} = S\vec{R}$ 로 표현할 수 있다. 따라 서 500hPa 기압골 주변의 시스템 상대 기류 의 모습은 그림 2.1.7의 아래와 같은 형태로 분포하는 것처럼 보이게 된다.

그림 2.1.8은 저기압의 발달 단계에서 전선, 구름 분포, 그리고 저기압 시스템에 대해서 상대적으로 움직이는 온난 컨베이어 벨트와 한랭 컨베이어 벨트 그리고 건조 컨베이어 벨트의 위치와 구조를 순간 포착(Snap-shot) 으로 보여주고 있다. 온난 컨베이어 벨트는 저기압 중심의 남동쪽 하층(900hPa)에서 유 입되기 시작해서 한랭 전선을 따라 북쪽으로 이동하면서 점차 상승하여 온난 전선 부근에 서 대기 중층(500hPa) 고도까지 상승한 후 북동쪽으로 방향을 바꾸어 대기 상층으로 빠 져 나가는 경로를 가지고 있다.

온난 컨베이어 벨트와 구별되는 한랭 컨베이 어 벨트는 저기압 중심의 동쪽 대기 하층 (850hPa) 고도에서부터 온난 전선을 따라 동쪽으로 이동하면서 점차 상승하는 모습을 가진다. 그림에서 한랭 컨베이어 벨트는 온 난 컨베이어 벨트에 비해서 연직 운동이 대 기 중층(500hPa)으로 제한되고 있다.



[그림 2.1.7] 500hPa 기압골 부근의 실제 기류벡 터(☆), 시스템 이동벡터(☆), 스톰 상대기류 벡터(♂) 개념도



[그림 2.1.8] 저기압/전선 발달 단계에서의 컨베이어 벨트 (Conveyor Belt) 모형 모식도

구름의 구조에서 주목해야 할 것은 온난 컨베이어 벨트와 한랭 컨베이어 벨트가 교차하는 지역에 서 발생하는 대류성 구름이다. 그리고 마지막으로 폐색 전선과 한랭 전선 사이에서 발생하는 건 조 컨베이어 벨트가 나타난다. 일반적으로 중위도 저기압에서의 컨베이어 벨트의 수직적인 깊이 는 1~3km, 넓이는 200~300km이며 길이는 수천 km에 이른다. 컨베이어 벨트의 온도 폭은 전 선 구역과 관련되어 있는데 컨베이어 벨트를 구성하는 공기의 온도에 따라서 온난 컨베이어 벨트 와 한랭 컨베이어 벨트로 구분되고, 특이하게 습도에 따라 상대적으로 건조한 공기의 유입과 관

> 온난 컨베이어 벨트(WCB; Warm Conveyor Belt)는 중위도 저기압에서 구름을 형성하는 가장 중요한 기류이다. 온난 컨베이어 벨트는 중위도 저기압계의 한랭 전선 전면에서 방대

> 한 양의 열과 수증기 그리고 운동량을 극지방 과 연직으로 수송하는 기류를 의미한다. 온난 컨베이어 벨트는 저기압의 남단 대류권 하층 에서 북단의 대류권 상층으로 상승하는 구조

> 를 가진다. 이러한 운동은 열적 직접 순환의

일부분으로 따뜻한 공기를 상승시키고 차가 운 공기를 하강시키는 역할을 한다. 기류는 상승하면서 점차 가속되어 대기 상층에서 제

트 기류의 최대풍을 만들어 낸다. 상승 기류

의 흐름이 매우 빨라서 빠르게 포화되면 강수

의 강도가 증가하게 되는데 보통 온난 컨베이 어 벨트 구역의 대류권 하층과 중층에서 뚜렷 한 강 수가 발생한다. 따라서 온난 컨베이어

벨트는 하층운과 중층운을 주로 만들어 내고

북단에 도달하면 권운 띠를 형성한다. 온난 컨베이어 벨트와 관련된 구름 띠들은 컨베이 어 벨트의 서쪽과 극 방향에 뚜렷한 끝단을

가지는 상층운으로 구분된다. 구름의 뚜렷한

끝단은 대류권 상층이나 성층권 하부로부터 의 하강 운동에 대응하는 역할을 하는 온난

려된 건조 컨베이어 벨트도 중요한 역할을 한다.



[그림 2.1.9] 온난 컨베이어 벨트 전방 상승에 의 한 활강 한랭 전선 평면(상)과 한랭 전선에 수직한 연직 단면도(하)

컨베이어 벨트의 진출에 의해서 상대적으로 형성되는 변형 구역의 형성 결과로 만들어진 것이다. 이러한 이유 때문에 변형 구역은 온난 컨베이어 벨트 내에서 최대 풍속 구역과 일치하게 된다. 온난 컨베이어 벨트의 왼쪽 끝단의 뚜렷한 구름 경계는 지상 한랭 전선의 바로 뒤쪽이거나 전면 에 형성되는데 이것은 온난 컨베이어 벨트의 기류가 한랭 전선에 상대적으로 후방을 향하는지(활 승 한랭 전선 : Ana Cold front) 혹은 전방을 향하는지(활강 한랭 전선 : Kata Cold Front)에 따 라서 구분된다. 2010년 1월 4일 대설 사례의 경우 온난 컨베이어 벨트 이론 중에서 온난 컨베이 어 벨트의 전방 상승(Forward Sloping) 활동에 의한 강제 상승의 결과로 발생하였다(그림 2.1.9 참조). 온난 컨베이어 벨트의 전방 상승 운동은 대기 중층 공기가 빠르게 이동해서 지상 한랭 전선을 지 나 중층 공기의 전단이 온난 컨베이어 벨트로 넘어 들어온 경우에 발생한다. 온난 컨베이어 벨트 를 침범한 공기는 매우 건조하기 때문에 낮은 습구온위(θ<sub>W</sub>)를 갖는 특성을 가진다. 그러나 습구 온위가 낮다는 것이 온난 컨베이어 벨트에 비해서 실제 온도가 낮다는 것을 바로 의미하지는 않 는다. 왜냐하면 건조한 공기가 하강하면서 단열 승온해서 더워질 수 있기 때문이다.

대류권 중층의 공기가 온난 컨베이어 벨트의 공기 위를 덮으면 컨베이어 벨트 지역은 잠재 불안 정 상태에 놓이게 되어 온난 컨베이어 벨트의 따뜻한 공기가 충분히 불안정해져서 한랭한 공기 위로 충분히 들어 올려 질 수 있게 된다. 온난 컨베이어 벨트에서 이러한 형태의 운동을 유도하는 구조를 가지면 이것을 활강 한랭 전선이라고 부른다.

실제로 대설 사례에서 컨베이어 벨 트의 구조가 어떻게 형성되었는지 를 추정하기 위해서 850hPa 일기 도에 상·하층 기압계의 위치를 중첩 시킨 것이 그림 2.1.10이다.

1월 4일 00UTC 850hPa 일기도에 서 기압골 중심은 옹진반도 부근에 위치하고 있으며, 지상 기압계는 그 보다 약한 남동쪽인 서해안 부 근에 위치하여 지상 분석일기도에 서는 분석되지 않았지만 수증기 영 상의 구름 형태와 온도 분포를 고 려해서 지상 한랭전선과 온난 전선 의 위치를 확인 수 있었다. 700hPa 고도의 기압골은 850hPa 기압골의 후면에 위치하고 있어 한랭 이류와 온난 이류가 한반도 내륙 중부지방 에서 충돌하고 있는 것을 알 수 있 다. 흥미로운 것은 850hPa 유선과 바람장을 보면 온난한 공기가 한랭



[그림 2.1.10] 2010년 1월 4일 00UTC 합성 일기도

전선과 나란하게 불어 들어와 온난전선 부근까지 깊숙하게 유입되고 있으며, 상층 건조 컨베이어 벨트와 관련되어 있는 Dry Slot을 동반한 500hPa 기류가 발해만 부근에서 한반도 중부를 지나 남부지방으로 강하게 침강하면서 유입되고 있고, 동시에 상층 제트의 축이 한랭전선을 추월하여 한반도 남부지방으로 유입되고 있다. 합성일기도에서 먼저 확인할 수 있는 것은 한반도 주변의 종관규모 환경이 상당한 경압불안정 구역에 위치하고 있었다는 점이다. 그리고 전체 지상기압계 의 이동 속도가 거의 정체되거나 빨라도 남동쪽 방향 5kts(2.5m/s)를 넘지 않는 가운데, 700hPa 고도와 850hPa 그리고 925hPa 고도의 바람은 남서기류로 20kts(10m/s)를 넘고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 한랭전선 전면에서 강한 온난이류가 발생하고 있으며, 이를 시스템 상대 기류로 판단하면 강한 남~남서 기류가 온난전선에 거의 수직으로 발달하고 있다는 것을 충분히 추정할 수 있다. 그리고 이와 상반되게 500hPa 이상 고도의 한랭하고 건조한 침강 기류는 한랭전선을 훨씬 추월하여 남서쪽에서 유입되는 남~남서 시스템의 상대 기류와 충돌하면서 온난 전선을 가 로지르는 강제 상승운동을 가지는 시스템 상대기류를 만들어 내고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 종관 규모 시스템 상대 기류의 추정은 등온위면 분석과 단열선도를 통해서 실제로 존재하였음을 증명할 수 있다.





[그림 2.1.11] 2010년 1월 4일 00UTC 280K 등온위면 일기도(좌), 오산 단열선도(우)

그림 2.1.11은 1월 4일 00UTC 한반도 상공 등온위면 분석 일기도(좌측 하단 같은 시간 레이더 영상)와 오산에서 관측된 단열선도를 보여준다.

280K 등온위면 기압 및 기류 분석장을 보면 한반도 남해안 쪽을 900hPa 등압면이 분포하고 한 반도 북부 지역으로 700hPa 등압선이 지나가고 있다. 그리고 이 등압선을 가로질러 남풍 계열의 상대기류가 분포하고 있음을 알 수 있다. 등온위면 분석에서 고기압에서 저기압 방향으로 등압선 을 가로질러 불어 들어가는 기류는 상승운동을 의미하는데, 남해안에서 중부지방까지 약 400km 를 이동하는 동안 200hPa의 차이를 가지므로 이것은 일반적으로 온난전선면의 기울기 1:200로 강제 상승운동을 유도하고 있는 것을 알 수 있다.

레이더 에코에서 상승운동 구역을 따라 발달된 레이더 에코가 존재하고, 같은 시간 위성영상에서 한반도 내륙에 대류성 구름이 분포하는 것은 서해상에서 만들어진 층운형 구름들이 강제 상승하 는 시스템 상대기류를 만나서 강하게 발달하고 있음을 잘 보여준다. 그리고 오산에서 관측된 4일 OOUTC 단열선도에서 지상에서 850hPa 고도까지 강한 역전층이 형성되어 있는 것을 볼 수 있는 데 이는 925hPa에서 850hPa 고도까지 상대적으로 온난한 기류가 유입되면서 형성된 역전현상 으로, 보통 겨울철에 대기 하층에 역전층이 존재하는 경우에는 한랭 기류의 유입에 의해서 만들 어지는 구름의 발달이 제한되어 층운형 구름을 만들어 내는 것을 알 수 있다. 그런데 이들 구름들 은 내륙으로 상륙하면서 강하게 발달하여 대류형 구름을 만들어 내는데 이것은 한반도 내륙에 형 성되어 있는 강제 상승에 의한 잠재 불안정의 결과라고 추정해도 무리가 없을 것이다.

단열선도에서 여기에서 또 하나 주목해야 할 것은 대기 최하층에서부터 700hPa 고도까지 거의 포화된 공기가 존재하며 500hPa 고도까지 확대하더라도 평균 상대습도가 80%를 넘어서고 있는 데 이러한 형태의 단열선도는 충분한 습기를 동반하고 있기 때문에 작은 상승 운동만으로도 충분 하게 연직으로 발달할 수 있는 환경을 제공한다.

## 2.2. 위성분석2.2.1. 대설 발생 전 위성영상의 특성

대류세포 발생 전 위성영상의 특징을 파악하기 위해 강설 발생 두 시간 전인 2010년 1월 4일 0200KST부터 0333KST까지 한반도와 동아시아지역의 적외영상과 수증기영상을 분석하였다. 적외영상 그림 2.2.1(a.1)와 그림 2.2.2(a.1)에서 서해상, 서해의 해안선, 전라도 지방 등 곳곳에

하층운이 분포하고 있으며 서해상 에 넓은 해무가 존재하고 있는 것 을 볼 수 있다. 또한 서해상에 동 서방향으로 길게 뻗은 높은 구름 이 존재한다. 특히 해안선과 나란 한 구름대의 경우 온난전선과 연 관이 있는 것으로 보이며 이것으 로 현재 서해상으로부터 한반도로 저기압이 다가오는 것을 알 수 있 다. 시간이 지나며 시스템들이 동 진하고 요동반도 쪽 하층운이 점 차 발달하고 있으며 그림 2.2.1 (a.3)에서 산둥반도 남쪽 지역의 구름열을 보아 저기압 순환과 관 련된 차가운 대륙 쪽에서부터 북 서풍이 불고 있는 것을 알 수 있었 다.

수증기영상 그림 2.2.1(b.1)와 그 림 2.2.2(b.1)에서 고위도에서부 터 경기만까지 파고드는 약한 암 역이 존재하며 시간에 따라 동진/ 강화 된다. 적외영상과 수증기영 상에서 대기 중·상층의 암역과 대 기하층의 하층운 영역이 서해상에 위치하여 건조공기의 하강으로 인 하여 그 전방에 눈 구름대가 만들 어질 수 있는 가능성이 있는 것으 로 판단된다. 겨울철에는 대류세 포가 높은 곳까지 발달하기 힘들 므로 여름철과 달리 적외영상에서 강설과 관련된 구름을 찾는 것은 어려웠다. (a.1) IR1-0200KST



(a.2) IR1-0233KST



(a.3) IR1-0333KST



[그림 2.2.1] 강설 발생 전 한반도 영역의 (a)적외영상과 (b)수증기영상





(b.2) WV-0233KST



(b.3) WV-0333KST







(a.2) IR1-0233KST



(a.3) IR1-0333KST

(b.1) WV-0200KST



(b.2) WV-0233KST



(b.3) WV-0333KST





[그림 2.2.2] 강설 발생 전 동아시아 영역의 (a)적외영상과 (b)수증기영상



#### 2.2.2. 대설 발생 시 위성영상의 특성

한반도에 강설이 시작된 후 위성영상의 특징을 보기 위해 2010년 1월 4일 0400KST부터 1400KST까지 한반도 영역의 적외영상, 수증기영상, AWS 강수분포를 분석하였다. 겨울에는 대 류가 깊게 발달하기 힘들므로 강설 시간 동안 한반도 주변에 -45℃ 이하 구름이 존재하지 않았다. 따라서 적외 강조영상의 분석은 고려하지 않았다.

그림 2.2.3은 2010년 1월 4일 강설 발생 후 적외영상, 수증기영상, AWS 강수분포를 나타낸다. 적외영상 그림 2.2.3(a)의 0400KST에 서해상에 광범위하게 해무가 존재하고 있으며 서해의 해 안선을 따라 온난전선과 관련된 낮은 대류세포가 존재한다. 한랭전선과 관련된 구름은 해무와 주 변의 하층운의 영향으로 찾아보기 힘들었다. 또 시간이 지남에 따라 저기압이 동진/발달하며 대 류세포가 성장하였다. 특히 강설발생 초기 시간에 요동반도 전방에서부터 경기만까지 위치한 구 름의 발달을 볼 수 있으며 0633KST에 온난전선과 관련된 구름이 높게 성장한 것을 적외영상에 서 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 또 0800KST에 서해 해안선을 따라 나란히 발달한 한랭전선과 관 련된 구름을 볼 수 있다. 0933KST에 산둥반도에서 북서풍을 따라 호남/제주 해안으로 이어진 운열들을 볼 수 있으며 이것으로 저기압 후면에서 대륙 고기압 확장하는 것을 알 수 있다. 그리고 1000KST부터 1200KST에 서울/경기 등 한반도 중부지방에서 한랭전선과 관련된 구름이 지속 적으로 발달하여 중부지방에 많은 강설을 내린 것을 알 수 있다.

0700KST에 경기만에서부터 발달되어 들어온 대류세포가 한반도 중부에 위치하고 있으며 0800-0933KST에 급격하게 발달하여 면적이 증가하였다. 이 대류 세포는 기존 저기압과 관련된 구름의 발달과는 다른 양상으로 발달하는 것과 대류세포가 계속해서 동진/발달하여 동해안으로 시스템이 빠져나간 1300KST 영상에서 후면의 저기압과 관련된 구름과 분리되어 있는 것을 보 아 산등반도에서부터 생성되어 발달되어 온 저기압과는 분리된 다른 독립적인 대류세포로 판단 된다. 1400KST에 저기압은 동해안으로 이동하여 일부 지역을 제외하고는 강설이 종료되었다.

수증기영상 그림 2.2.3(b)의 0400KST에 산둥반도에서부터 경기만 앞바다까지 이어진 암역이 존재하고 있다. 암역이 동진하며 강화되어 0633KST에 상층의 하강기류로 인한 대류세포의 발달 을 볼 수 있으며 0833KST, 0933KST에 경기만 부근, 1000KST에 충청지방에 눈 구름대가 지속 적으로 생성/발달되는 것을 볼 수 있다. 1200KST 이후 한반도로 매우 강한 암역이 유입되어 전 방의 구름의 발달을 유도하였다. 그러나 뚜렷한 새로운 대류세포의 생성은 없었고 강한 암역이 저기압과 함께 1400KST에 동해상으로 이동하였다.

그림 2.2.3(c)는 AWS 강수분포를 나타낸다. 강수는 0430KST에 경기만에서부터 시작되었다. 0700KST에 구름의 발달로 인한 강수의 증가를 볼 수 있다. 1000KST부터 한랭전선이 한반도로 진입하여 이와 관련된 강수가 나타났으며 시간이 지남에 따라 시스템이 동진하여 동해안으로 빠 져나가 1430KST에 강수가 대부분 지방에서 약해졌다.







기상청 Korea Meteorological Administration (a.5) IR-0933KST



(a.6) IR-1000KST

(b.5) WV-0933KST



(b.6) WV-1000KST

(c.5) AWS-1000KST



(c.6) AWS-1030KST



(a.7) IR-1200KST



(a.8) IR-1300KST





(b.7) WV-1200KST



(b.8) WV-1300KST





(c.7) AWS-1230KST



(c.8) AWS-1330KST







[그림 2.2.3] 2010년 1월 4일 강설 발생 후 (a)적외영상, (b)수증기영상, (c)AWS 강수분포



(b) 월 편자 온도



[그림 2.2.4] 2010년 1월 4일 NOAA 주 편차 해수면 온도(a)와 월 편차 해수면 온도(b)

그림 2.2.4에서 한반도 주변의 해수면 온도가 월 평균, 주간 평균 모두 평년보다 2~3℃ 높게 유 지되었다. 따라서 수온이 평년보다 높은 상태에서 저기압이 서해상을 통과하는 동안 해상에서 많 은 수증기를 공급받았고 상층에 찬 하강기류의 접근을 의미하는 건조서지경계(Dry Surge Boundary)가 접근함에 따라 대류가 발달하여 대설이 유발된 것으로 판단된다. 또한 저기압이 해 안가에 상륙함에 따라 지형의 영향도 작용한 것으로 추정된다.



2. 실황분석

대류세포의 시간에 따른 발달 구조의 변화를 알아보기 위해 서울·경기·강원 지역의 평균 휘도온 도, 최소 휘도온도를 구하였다.

그림 2.2.5는 서울·경기·강원 지역의 평균, 최소 휘도온도와 평균 강수의 시간 변화를 나타낸다. 적외1채널의 평균 휘도온도와 최소 휘도온도가 0600KST부터 0933KST까지 꾸준히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 휘도온도의 감소는 대류세포의 발달을 나타내며 적외영상 그림 2.2.3(a) 의 0633KST부터 1000KST까지 구름이 지속적으로 발달하는 것과 잘 일치하고 있다. 위의 시간 에서 휘도온도가 감소할수록 강수가 증가하는 경향을 보이며 강수와 휘도온도간의 시간변화 또 한 잘 일치하였다.



[그림 2.2.5] 서울·경기·강원 지역의 평균, 최소 휘도온도와 평균 강수의 시간변화



#### 2.3. 레이더 분석

#### 2.3.1. 레이더 수평반사도

중부지방에 위치한 저기압과 대륙고기압의 영향으로 서해 중부 지역에 강한 수렴을 형성하였다. 저기압이 서해상을 통과하면서 따뜻하고 습한 공기를 공급하고, 저기압 후면으로 찬 공기가 유입 되면서 눈구름을 발달시켰다. 약 10시간 동안 서울 (25.8cm) 및 경기 지역에 기록적인 대설이 발 생하였다.

강설밴드는 수평 200km 내외의 규모를 가지고 서해 중부 지역으로 진입하였으며 새로운 강설밴 드가 기존의 강설밴드 후면에 지속적으로 생성되어 유입되었다. 강설밴드가 연속적으로 생성되 면 대설을 발생할 가능성이 높다. 강설시스템은 약 15~19ms<sup>-1</sup>의 속도로 빠르게 중부지방을 통 과하였으며, 이동방향은 시선속도 패턴과 유사하게 0300KST에는 동쪽, 0600KST 이후에는 북 동쪽으로 이동 하였다. 강설시스템의 후면으로 15 ms<sup>-1</sup>이상의 강한 바람이 유입되었다.

그림 2.3.1은 0300KST부터 1200KST까지의 1시간 간격 반사도 CAPPI영상으로 0300KST에 25dBZ이상의 반사도와 240km 정도의 수평규모를 가지는 선형밴드가 서울지역 인근의 서해안 에 관측되었고 이후 0400KST에는 서울 및 경기 지역에 위치하였으며 후면으로 20dBZ의 반사 도를 가지는 에코가 생성되었다. 0400KST에 생성된 반사도 에코는 0500KST에 선형의 밴드형 태로 발달하여 0600KST 이후 서울 및 경기 지역을 통과하였다.



[그림 2.3.1] 2010년 1월 4일 0300KST부터 1200KST까지 1시간 간격의 강설시스템 CAPPI영상

#### 2.3.2. 레이더 반사도의 연직단면 분석

강설시스템의 발달구조 및 이동을 조사하기 위해 그림 2.3.2와 그림 2.3.3에 0600KST부터 0700KST까지 강설시스템의 수평 반사도와 반사도의 강도와 이동방향을 고려하여 반사도의 연 직단면도를 나타내었다. A-A'은 진행방향에 대한 강설시스템의 연직단면도를 나타내고 B-B'과 C-C'은 각각 기존의 강설시스템과 후면에서 새로 생성된 강설밴드의 방향에 대한 연직단면도를 나타내고 있다. A-A' 단면에서, 0600KST에 나타난 높이 4km의 강한 강설시스템은 북서쪽으로 0630KST에 약 20km 정도 이동하면서 점차적으로 약해졌으나, 그 후면으로 35dBZ 이상의 새 로운 강설시스템들이 발달하였다. 0700KST에는 새롭게 발달한 강설시스템이 병합하면서 넓은 영역에서 발달하였다. B-B' 단면에서, 1.5km 높이의 40dBZ가 넘는 강한 반사도를 가지는 종모 양의 셀이 나타났으나 이후 0630KST와 0700KST에는 3개의 강설시스템으로 분리되면서 점차 쇠퇴하였다.



[그림 2.3.2] 0600KST와 0630KST의 1.5km 반사도 CAPPI영상과 각 영상에 표시된 A-A', B-B', C-C'에 대한 연직 반사도 단면도. 검은색과 분홍색 원은 각각 기존에 존재하고 있던 셀과 새로 생성된 셀을 표시하고 있음





[그림 2.3.3] 그림 2.3.2와 동일. 0630KST와 0700KST를 나타냄



#### 2.3.3. 레이더 시선속도

그림 2.3.4는 1.5km 반사도와 시선속도의 CAPPI영상이다. 0700KST와 1000KST의 0.7° PPI 시선속도분포에서 등도플러속도선(0값)이 활모양을 가지고 있어 모든 충에서 풍계가 분류 (Diffluence)함을 알 수 있다. 활모양을 기준으로 전반적으로 남서풍계열이며, 레이더로부터 북 서방향은 남남서풍, 북동방향은 남서풍, 남동방향으로는 서풍이 주로 불고 있다.



[그림 2.3.4] 0400, 0700, 1000KST의 반사도 1.5km CAPPI 영상과 시선속도 0.7° PPI영상



#### 2.3.4. 이중바람장 분석

그림 2.3.5와 그림 2.3.6은 이중 도플러 레이더 분석 결과를 나타내었다. 0630KST 1.5km 수평 바람 분포에서는 시스템 내부에 수평적으로 약한 바람방향의 변화를 확인할 수 있다. 해양에서 대부분 서남서풍의 바람이 내륙으로 접근할수록 남서풍 방향으로 변화가 있는 것을 확인할 수 있 다. 시스템 내부 바람 방향에 따른 남서-북동 방향의 연직단면도(A-A')에 나타난 수직적 대기의 흐름은 셀의 코어 주변이 아닌 보다 멀리 떨어진 풍상측 (A지점으로부터 북동쪽 20km 지점)에 2ms<sup>-1</sup> 이상의 상승류가 나타났다(그림 2.3.5). 또한, 해당지점인 25dBZ 지역 후면에는 2-3km 아래에서 하강류가 뚜렷이 나타나고 있다.

A-A' 선의 발산분포도에 나타난 강설사례의 발산분포 (그림 2.3.6)는 약한 발산과 수렴값이 나 타나고 있으며, 상승류가 발생하는 지역의 하층에 ≤ -0.001s<sup>-1</sup> 이하의 수렴지역이 좁게 나타나 고 있다. 선형의 30dBZ 영역에 따라 나타낸 북서-남동 방향의 연직단면도 (D-D')에서 나타나듯 발달된 시스템 내부는 전반적으로 약한 상승류와 하강류 (2ms<sup>-1</sup>미만)가 나타났다. 발산분포도 또 한 강수사례보다 상대적으로 약한 수렴·발산이 나타나는 패턴을 보였으며 새로이 발달하는 지역 (D지점으로부터 약 10km 이내)을 제외한 영역에서는 하층에 좁은 수렴영역이 존재한다.



[그림 2.3.5] 이중 도플러 레이더 분석결과 (2010. 01. 04. 0830KST). 1.5km 고도의 CAPPI 반사도와 수평 바람분포(좌). A-A'와 D-D' 선에 따른 수직류 (Shaded)와 반사도(Contour)에 대한 연직단면도(우)



[그림 2.3.6] 이중 도플러 레이더 분석결과 (2010. 01. 04. 0830KST). 1.5km 고도의 CAPPI 반사도와 수평 바람분포(좌). A-A'와 D-D' 선에 따른 발산(Shaded)과 반사도(Contour)에 대한 연직단면도(우)





#### 3.1. 수치예보 모델 특성 분석

: 지역수치예보모델(RDAPS)

3.2. 모델의 강수 예측결과 분석
#### 3. 예측자료 분석

## 3.1. 수치예보 모델 특성 분석: 지역수치모델 (RDAPS)3.1.1. 운동에너지 스펙트럼 분석 (모델 유효 해상도 분석)

MM5 기반의 30km 격자 해상도를 가지는 지역수치예보모델(RDAPS)의 운동에너지 스펙트럼을 보여주고 있다(그림 3.1.1). UM 기반의 12km 격자 해상도의 지역수치예보모델의 결과(2010년 9월 21일 수도권 호우 사례 분석서 참조)에서와 유사하게, 대규모 영역의 운동에너지 스펙트럼 (κ<sup>-3</sup>기울기)은 관측과 잘 일치하고 있지만 약 200km(6~7ΔX)보다 작은 규모의 운동에너지는 관 측(κ<sup>-5/3</sup>)에 비해 강한 감쇄가 일어나고 있음을 보여준다. 이는 종관 규모의 이동성 고/저기압을 모의하기에는 적절한 해상도이나 Meso-β 이하의 대기 운동은 정확하게 모의하기 어렵다고 판 단할 수 있다.



[그림 3.1.1] MM5 기반 RDAPS(ΔX=30km)에 의해 모의된 평균 운동에너지 스펙트럼 분포. 동서(U), 남북(V), 연직(W) 방향의 운동에너지 스펙트럼과 전체 운동에너지 스펙트럼을 나타냄. 각각의 스펙 트럼은 시간(24시간)과 공간(700-300hPa)에 대한 평균값을 나타냄



#### 3.2. 모델의 강수 예측 결과 분석

중국에서 발생한 저기압이 한반도를 통과하면서 중부 지방을 중심으로 대설이 발생한 사례로(그 림 3.2.1), 전국에 걸쳐 강우가 관측되었으며 강설량은 중부지방 25cm/day, 충청/경북 지역 5~10cm/day, 전남/경남5cm/day 미만을 기록하였다(그림 3.2.2).



[그림 3.2.1] 2010년 1월 3일/4일 지상 일기도



서울 지역은 06KST에 눈이 시작되어 12-15KST에 25cm 이상의 적설을 기록하였으며, 춘천 지 역은 저기압의 이동에 따라 09KST에 눈이 시작되어 13KST 이후 20cm 이상의 적설량을 보였 다(그림 3.2.2).



[그림 3.2.2] 서울(108지점)과 춘천(101지점)에서 관측된 신적설 시계열과 2010년 1월4일 최대 신적설 공간 분포 지역수치예보모델(RDAPS: 2010010312UTC 적분 시작)에 모의된 저기압의 이동 속도는 지상 일기도에 나타난 것보다 3-6시간 정도 느리게 이동하는 것으로 모의하고 있다. 지상 일기도에서 는 09KST에 서쪽에서 이동해 온 저기압이 한반도 전역에 영향을 미치고 있으나 RDAPS에 의해 모의된 저기압은 서해상에 머물고 있다. 12KST에서도 수치 모의된 저기압은 여전히 서해상에 머물고 있는 것으로 예측되었다. 수치 모형에서 저기압의 이동 속도가 늦어진 원인은 한반도에 위치한 기압능(그림 3.2.3 03과 09KST)을 강하게 모의함에 기인하는 것으로 분석된다.



[그림 3.2.3] 지역수치예보모델(RDAPS)에 의해 모의된 2010년 1월 3일 21KST, 4일 03, 09, 12KST의 해면기압과 3시간 누적 강수량(2010010312UTC 적분 시작)





[그림 3.2.4] 지역수치예보모델(RDAPS)의 2010년 1월 4일 12KST 예측 해면기압과 누적 강수량

그림 3.2.4은 선행 시간의 차이에 따른 지역수치예보모델에 의해 모의된 해면기압과 누적 강수량 을 나타낸다. 전일(1월 3일 09KST와 21KST) 모의 결과와 당일(1월 4일 09KST) 모의 결과는 1월 4일 12KST의 저기압 위치와 강수 영역 예측에서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 모델의 초기 장으로 사용된 전지구 분석장에서 큰 차이가 나타난 것으로 판단되며 또한 모델의 저기압의 발달 과 이동의 모의 성능에도 기인할 수 있을 것이다. 이런 차이에도 불구하고 12KST 이후의 지역수 치예보모델은 전국적으로 약한 강수(5mm/3hr 미만)를 예측하고 있으며 관측 강수량과 유사하게 예측을 하고 있다(그림 3.2.5). 지역수치예보모델(2010010312UTC 적분 시작)의 모의 결과는 서울 지점에서 1월 4일 09KST에 눈이 시작되어 24KST까지 지속되는 것으로 예측하고 있으며 춘천 지점의 경우에도 서울과 비슷한 시각인 09KST에 눈이 시작되어 다음날 03KST까지 지속 되는 것을 예측하고 있다(그림 3.2.6). 모의된 저기압의 한반도 진입이 늦어져 관측에 비해 강설 시작 시간이 약간 늦게(서울에서 3시간 차이) 나타나는 것으로 분석할 수 있다.



[그림 3.2.5] 2010년 1월 4일 지상 관측 강수량(13KST)과 지역수치예보모델(RDAPS)에 의해 모의된 3시간 (12-15KST) 누적 강수량





[그림 3.2.6] 지역수치모형(RDAPS) 2010년 1월 4일 예측 연직시계열. 서울(상)과 춘천(하)

3

12

22

17.5



22

20.4 28.3 27.5

20



- 4.1. 종관 및 중규모 기상 환경
- 4.2. 대기 불안정
- 4.3. 강설 발달 단계
- 4.4. 수도권과 경기지역 강한 강설 발생의 원인

#### 4. 사례 발생 원인

#### 4.1. 종관 및 중규모 기상 환경

- 📕 대설의 개요
  - 중부 지역 대설
    - 2010년 1월 4일 05-10KST에 수도권과 강원도 지역에 강한 강설현상이 발생하였다.
    - 일반 종관규모 저기압에 의한 강설보다 많은 양의 강설이 발생하였다.
      - (강설량 : 서울 25.8cm, 인천 22.3cm 등)
  - 강수계 : 종관 저기압 강수계에 의한 강설
    - 서해를 통과하면서 발달한 저기압의 중심이 경기도 남쪽으로 통과하면서 저기압 중심부근 동쪽과 북쪽 부분에서 강한 강설이 발생하였다.
    - 중부 지방 대설 유형(손에 잡히는 예보기술 19. 대설사례분석과 예측방법)에 속하는 사례 이다.

■ 온대 저기압의 발달과 이동(그림 4.1.1)

중국 동부(산동반도 남서쪽)에서 형성된 종관 저기압이 1월 4일 00-09KST에 서해를 통과하 면서 강해졌고, 저기압 중심이 경기도 남쪽으로 통과하였다. 강원도 지역의 등압선 모습은 지 형의 효과를 보여주는 것으로 판단된다.



[그림 4.1.1] 2010년 1월 4일의 지상 일기도에 나타난 온대 저기압 발달 모습

- 온대 저기압의 서해안 접근 시 서해안과 인근 서해에서 비교적 강한 상승 운동이 분석되었다 (그림 4.1.2).
  - 종관 규모 강제에 의한 상승 : 양의 상층 와도 이류와 1000-700hPa 층후 이류(온난 이류)
     가 서해상에서 중첩되어 비교적 강한 상승에 기여한 것으로 보인다(그림 4.1.3).
  - 관측된 강수계의 위치(수도권과 경기도)와 RDAPS 재분석장(그림 4.1.2)의 상승 진단 지역 이 일치하지 않는다.

RDAPS 재분석장



[그림 4.1.2] RDAPS 재분석장: 2010년 1월 4일 09 KST의 연직 p 속도





[그림 4.1.3] RDAPS 재분석장: 2010년 1월 4일 09KST의 500hPa 와도 이류(좌)와 000-700hPa 층후 이류(우)



#### 📕 온대 저기압 발달에 대한 해양의 영향

- 그림 4.1.1에서 온대저기압은 서해를 지나면서 비교적 강한 중심 기압 심화를 보여주었다. 이 기압 하강에는 해양으로부터의 현열과 잠열 공급도 영향을 주었을 가능성이 있는 것으로 판단 된다. RDAPS 예측장에 따르면,
- 저기압 통과 중 하층 대기의 온도는 물론 습도도 증가하여 저기압 중심과 그 남쪽 서해상에 서 925hPa 상당온위가 약 6℃ 증가하였다(그림 4.1.4).
- 1월 4일 09KST에 저기압 중심 부근 서해안과 전남 해상의 925hPa 상당온위 차이는 12℃ 에 이르고 있다.
  - → 상대적으로 높은 상당온위를 갖는 남쪽 해상의 공기가 저기압 순환에 의해 경기도 서해 안과 내륙 지역으로 공급됨으로써 대기 불안정과 강수 발달에 영향을 미쳤을 것으로 판 단 된다.

RDAPS 예측장: 925 θ<sub>E</sub> (red contour) and 925-hPa height (blue)



[그림 4.1.4] RDAPS 예측장(초기 시각: 2010년 1월 3일 09KST) 2010년 1월 3-4일의 925hPa 고도(파랑)와 상당온위(빨강)

#### 4.2. 대기 불안정

하층의 기온 구조와 수분량이 중요한 LI는 안정한 상태를 암시하나, 850-500hPa 기층의 기온 감율과 850hPa 수분량이 중요한 Total Totals(TT) 지수는 서해안과 인근 서해상에 불안정 상 태를 보여준다(그림 4.2.1).

- 남쪽으로부터 이류해 온 공기의 대류 상승 가능성을 암시한다.



[그림 4.2.1] RDAPS 재분석장 : 2010년 1월 4일 09 KST의 Lifted Index (좌), K Index(중), Total-Totals Index(우)

강한 온난 이류에 의한 지상에서 850hPa 고도까지의 강한 역전층은 구름의 성장을 방해하여 층 운형 구름을 만들어 낸다. 이들 구름들은 내륙으로 상륙하면서 강하게 발달하여 대류형 구름을 만들어 내는데 이것은 한반도 내륙에 형성되어 있는 강제 상승에 의한 잠재 불안정의 결과라고 추정해도 무리가 없을 것이다. 또 하나 주목해야 할 것은 대기 최하층에서부터 700hPa 고도까지 거의 포화된 공기가 존재하며 500hPa 고도까지 확대하더라도 평균 상대습도가 80%를 넘어서고 있는데 이는 공기가 충분한 습기를 동반하고 있기 때문에 작은 상승 운동만으로도 충분하게 연직 으로 발달할 수 있는 환경을 제공한다. 지상의 공기덩이를 건조단열과정에 의해 강제 상승시켰을 때 포화에 이르는 고도를 의미하는 상승응결고도(LCL; Lifting Condensation Level)와 지상의 공기덩이가 복사가열로 에너지를 받아 단열적으로 상승하여 포화에 이르는 고도를 의미하는 대 류응결고도(CCL; Convection Condensation Level)의 고도가 각각 136gpm과 238gpm이라는 사실로 볼 때 한반도 상공의 대기는 아주 작은 불안정과 상승 운동에 의해서도 쉽게 응결에 이르 게 되고 지속적인 잠열 방출로 상대적으로 높은 고도까지 연직으로 성장할 수 있었음을 보여준다. 또한, 중층 이하의 불안정 요소를 진단하는 불안정지수인 KI 지수가 30을 기록하고 있다. 여름철 기준으로 30을 넘으면 뇌우 발생 가능성이 60~80%에 이르는 것으로 알려져 있는 KI 지수는 대 기 하층에 수증기가 많고 노점 온도가 높아 응결에 의한 상승운동의 척도로 알려져 있는데 겨울 철에 30이라는 높은 값을 보인 것으로도 대기 하층에서의 강한 온난 이류에 의한 잠재 불안정이 대류형 구름 발생과 대설로 이어지는데 크게 기여하였다.



#### 4.3. 강설 발달 단계(2010년 1월 3일 21KST - 4일)

지상 일기도(그림 4.1.1)와 시간 별 강수량(그림 4.3.1)에 따르면 중부지역 대설은 다음과 같이 진행 되었다:

3일 21KST : 중국 동부(산동반도 남서쪽)에서 저기압이 형성된다.

- 4일 03KST : 저기압 중심이 산동반도 남쪽을 통과해가고 저기압 강수계가 경기 서해안에 접 근하면서 서해안에 강설이 시작된다.
  - 7-10KST: 저기압 중심이 서해안에 접근하면서 저기압의 동쪽과 북쪽(수도권+경기지역) 부분에서 강한 강설이 발생하였다.
- 9-15KST : 강원 지역에 강설이 지속되었다(11시 이후부터는 지형 효과에 의한 강설이 나타 나기 시작하고 자정까지 지속되었다.).



#### 시간 별 강수량: 2010년 1월 4일

[그림 4.3.1] 2010년 1월 4일 05-15KST의 1시간 강수량

#### 4.4. 수도권과 경기지역 강한 강설 발생의 원인

- 지상 저기압 동쪽 부분의 경기도 해안과 내륙에서 종관 규모 강제 등 복수의 강제에 의해 비교 적 강한 상승 운동이 발달한 것으로 진단되며, 일반적 종관 규모 상승 보다 더 강한 상승에 의 해 강한 강설이 발생한 것으로 추정된다.
  - ※ RDAPS 예측장도 비교적 강한 상승운동과 강설 지역을 예측하고 있으나, 관측된 것보다 약 3시간 늦게 경기지역에 진입함으로써 수치예측 결과가 실제와 큰 차이를 갖게 된 것 으로 판단된다(그림 4.4.1).

#### RDAPS 예측장: 850-hPa temp and 700 hPa p-velocity



[그림 4.4.1] RDAPS 예측장 : 2010년 1월 4일 09KST(좌)와 12KST(우)의 연직(p) 속도



■ 대류운 발달의 가능성 존재

- 서해상을 통과하면서 해수면으로부터 현열과 잠열의 공급을 받아 저기압 중심과 동쪽의 잠
   재 불안정성이 증가하였다.
- 850hPa 위 기층에 대기 불안정성이 존재함에 따라 남쪽으로부터 경기 지역으로 이류해 온 공기의 대류 상승 가능성이 있다(위성 자료 분석은 경기 지역 상공에 대류운 발달을 제시하고 있다.).



# 5 사전 예측을 위한 검토 자료

- 5.1. 일기도
- 5.2. 위성
- 5.3. 레이더
- 5.4. 수치모델
- 5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성
- 5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항

#### 5. 사전 예측을 위한 검토 자료

#### 5.1. 일기도

#### 5.1.1. 중부지방 대설의 매개변수 분석

두 가지 집중호우 사례와 대설 사례의 예측 매개변수 분석을 위해서 RDAPS 자료를 활용했지만, 수치예보 모델 예측장으로 집중호우 매개변수들을 찾아내기에는 많은 제한이 있었다. 좀 더 나은 참고자료를 확보하기 위해서 3가지 사례에 대한 자문위원을 통해 공군에서 활용하고 있는 NCEP GFS 모델을 초기자료로 하는 WRF 모델 결과를 분석하였는데, 2가지 집중호우 사례는 RDAPS 와 비슷하게 강수지역이나 강수량을 예측하는데 실패한 것으로 평가되어 RDAPS 분석장을 활용 했고, 대설 사례는 WRF 모델 결과가 RDAPS에 비해서 좋은 결과를 보여주었기 때문에 그 결과 자료를 통해서 대설 매개변수들을 통한 예측장을 분석하였다.

그림 5.1.1은 실제 대설이 발생하기 36시 간 전인 1월 2일 12UTC에 6km 격자 간 격으로 수행하여 예측한 1월 4일 24시간 누적강설량과 AWS에서 관측된 실제 관 측값을 비교한 그림이다. 남해안을 제외 한 한반도 중부와 남부지방 전체가 10cm 이상의 적설구역에 포함되어 있으며, 강 원 산간 지역으로는 최대 30cm의 적설을 예측하였고, 서울·경기·영서 및 충청지역 으로는 20cm가 넘는 적설을 예측하고 있 다. 경북 일부 지방을 제외하고 전체적인 강설 패턴과 집중지역 그리고 서울·경기· 영서·충청 지역에서의 20cm 이상 구역과 모델 예측자료가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 3시간 누적 강수량 분포 와 구름(습수) 분석에서도 강수집중 지역 과 강수 집중시간 그리고 하층운의 분포 와 대류성 구름이 발달하는 구역을 비교 적 잘 모의하고 있다.



[그림 5.1.1] 1월 4일 24시간 예상 누적강수량

그림 5.1.2는 1월 3일 18UTC, 4일 00UTC, 그리고 06UTC 지상 일기도 및 누적강수량을 예측 한 그림이다. 3일 18UTC에 산둥반도 부근에서 머물러 있던 지상 저기압의 중심이 4일 00UTC 에는 한반도 서해상으로 진출하였고, 06UTC에는 경북지역에 중심을 두고 나타나고 있는데 이는 실제 지상일기도 패턴과 매우 유사하였다는 것을 알 수 있다(그림 2.1.2 참조). 저기압의 이동경 로를 보면 산둥반도-서해안-한반도 남부지방을 관통하는 형태로 한반도에서 가장 많은 대설을 가져오는 기압계 이동 경로와 같으며, 6시간 누적강수량과 강수분포도 실제 관측자료와 유사하 다. 지속적인 강설이 온난전선 북쪽지역에서 발생, 지상저기압 중심과 거리가 멀어도 강설 발생, 저기압 중심이 다가올수록 강수강도가 증가, 저기압 중심이 통과한 후에도 강수가 몇 시간 지속 되는 한반도 대설 특성에 매우 부합하는 조건을 예측 자료는 잘 모의하고 있다.



[그림 5.1.2] 1월 3일 18UTC~4일 06UTC 6시간 간격 지상기압 및 누적강수량 예상도





[그림 5.1.3] 1월 3일 18UTC~4일 06UTC 6시간 간격 925hPa 고도, 혼합비, 온도

그림 5.1.3은 925hPa 예측장을 보여주고 있는데 이 또한 실제 관측 일기도와 매우 유사하다. 강 하게 발달한 기압골이 지상 저기압의 경로와 비슷하게 이동하고 있으며, 저기압 중심의 북쪽과 동쪽에서 많은 수증기를 함유한 패턴이 나타나는데 이는 한기가 남하하면서 서해상을 건너 수증 기를 공급받아 구름을 형성하고 이 구름들이 남쪽으로부터 남서기류와 함께 유입된 온난 기류의 영향으로 발달한 결과라고 할 수 있다. 등온선 분포를 보면 저기압 중심을 기준으로 남쪽에서는 영상의 온도를 가진 기류가 강하게 유입되는 반면, 저기압 중심의 북서쪽에서는 강한 한기를 함 유한 기류가 유입되면서 두 개의 성질이 다른 공기가 충돌하여 강한 상승운동을 유도하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 성질이 다른 공기의 충돌에 의한 강제 상승운동은 기압골의 발달을 더욱 촉진시켰으며, 그 결과 저기압의 이동이 느려지고 더 많은 강설이 지속되었다는 사실을 알 수 있 다. 또한 남서쪽으로부터의 영상의 기온을 가지는 공기가 유입됨으로써 강설 입자들의 성장을 더 욱 촉진하여 시간당 강설량이 5cm가 넘는 대설을 유도하는데 크게 기여한 것으로 판단할 수 있 다.



[그림 5.1.4] 1월 3일 18UTC~4일 06UTC 6시간 간격 850hPa 고도, 혼합비, 온도

그림 5.1.4의 850hPa 예측장에서 저기압 중심의 이동은 지상 일기도보다 약간 북쪽 경로를 따라 이동하고 있는 형태를 보이는데 이 또한 관측자료와 잘 일치하고 있다. 850hPa 예측장에서 3일 18UTC에 제주도 남쪽을 주의 깊게 살펴야 할 매개변수는 온도 변화와 하층 제트의 유입으로 인 한 강제 상승구역을 판별하는 것이다. 3일 18UTC에 제주도 남동쪽에 위치했던 0℃ 등온선이 4 일 00UTC에는 급격하게 북상하여 한반도 남해안까지 진출하였으며 온난이류의 중심이 저기압 중심을 향해 있음을 알 수 있다. 이것은 강한 온난 기류가 저기압 중심으로 유입되면서 풍부한 수 증기와 한기와의 충돌로 인한 강제 상승을 유도하고 나아가 저기압의 발달을 유도한 것으로 볼 수 있다. 또한 5cm 이상의 대설이 오기 위해서는 저기압 중심의 남쪽에는 0℃에 가까운 온난한 공기가 이류하고 중심의 북쪽에는 -5℃ 이하의 한기가 유입되어 온도 경도에 의한 불안정이 강 화되어야 하는데 이러한 저기압 발달과 강수 효율 증가를 위한 충분한 조건을 잘 제공하고 있다 는 것을 850hPa 예측장을 통해서 알 수 있다.



그림 5.1.5의 수분속과 유선 예상도에서 한반도 남부지방으로 강한 수분속이 나타나고 이것은 저 기압을 중심으로 남서쪽에서 불어들어오는 강한 하층제트에 의한 수증기 수송의 결과라고 할 수 있다. 겨울철 대설 예보에서는 대기 중에 충분한 수증기가 함유되어 있지 않기 때문에 이처럼 상 대적으로 온난한 해양을 통과하여 유입되는 수분속의 집중 지역과 강도를 잘 분석하고 예측에 반 영하여야 한다.



[그림 5.1.5] 1월 4일 00UTC 850hPa 수분속(좌),유선과 등풍속선(> 25kts)(우)



그림 5.1.6의 상당온위(색칠) 분포와 이동을 보면 상층 기압골을 중심으로 후면을 따라 매우 건 조하고 차가운 공기가 한반도를 향해서 강하게 진출하고 있고, 이에 대응하는 온난하고 습윤한 공기가 한반도 주변에서 한기의 남하를 저지하고 있는 모습을 보여주고 있다. 대설 예보에 있어 서 700hPa에서의 한기와 난기의 충돌로 인한 강제 상승의 강도가 매우 중요하다. 4일 00UTC에 산등 반도에서 한반도 서해상으로 한랭 건조한 공기가 침투하고 있는 것을 알 수 있는데, 이 침투 하는 한랭 건조한 공기의 축은 06UTC에는 한반도 남부지방을 지나고 있다. 700hPa 고도에서의 한랭 건조한 공기가 침투하는 모습은 수증기영상에서 Dry Slot이 한반도를 가로질러 진행하는 형태와 연결해서 생각할 수 있다. 한랭 건조한 Dry Slot이 북서쪽에서 한반도 주변의 상대적으로 온난한 공기를 향해 침강하면 온난한 공기는 강제로 상승하여 조건부 대류불안정 상태에 놓이게 된다. 이렇게 들어 올려진 공기는 등온위면을 따라 상승하면서 북동쪽으로 이동하게 되고 이 상 승기류에 의해서 구름은 더욱 연직으로 발달할 수 있게 된다.



[그림 5.1.6] 1월 3일 18UTC~4일 06UTC 6시간 간격 700hPa 고도, EPV, 온도

2장 1절에서 설명한 온난 컨베이어 벨트의 전방 상승에 의한 대류운 발달 과정을 잘 설명해 주고 있다. 그림 5.1.7의 700hPa 연 직 속도 분포에서 한반도 남서해상과 태안 반도 부근에서 강한 연직 운동이 모의되고 있는데 한기와 난기의 충돌 그리고 하층 제 트의 유입에 의한 강제 상승과 그로 의한 연직 운동은 강수량의 증가와 상층 및 지상 기압계의 발달을 유도하는데 매우 중요한 역할을 했다고 할 수 있다.



[그림 5.1.7] 1월 4일 00UTC P-Velocity



그림 5.1.8을 통해서 500hPa 고도에서 약한 상층 골을 동반하는 저기압이 한반도로 접근하면서 전면에 서풍에서 남서풍 계열의 바람을 형성하고, 양의 상대와도 중심이 지상 저기압의 후면에서 접근하여 기압골 중심 부근으로 이동하고 있는 것을 알 수 있다. 이 양의 와도 구역은 바로 후면 에 -36℃의 매우 한랭한 공기주머니를 동반하고 있는데 겨울철 강설 현상은 이 양의 와도 축의 전면에서 시작되어 와도 축이 완전히 빠져나간 후 수 시간 동안 지속되다가 종료된다. 이 양의 와 도 이류는 매우 느린 속도로 이루어지는데 이렇게 강풍을 동반하지만 느리게 이동하는 와도 중심 은 지상과 하층 기압계의 연직 발달을 유도하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 700hPa 상당온위 이동과 마찬가지로 와도 중심을 따라 이동하는 한랭 핵은 상층에서 침강하는 Dry Slot의 위치를 예단하는데 매우 중요한 역할을 한다. Dry Slot의 침강은 지상 한랭전선을 추월하여 온난전선 구 역까지 도달하여 전방-상승(Forward-sloping) 온난 컨베이어 벨트의 연직 방향 발달을 유도하 고 이에 따라 강한 대류성 구름들이 형성되어 많은 눈을 가져올 수 있을 것으로 예측할 수 있다.



[그림 5.1.8] 1월 3일 18UTC~4일 06UTC 6시간 간격 500hPa 고도, 상대속도, 온도





[그림 5.1.9] 1월 3일 18UTC~4일 06UTC 6시간 간격 300hPa 고도, 등풍속선 > 100kts, 온도

그림 5.1.9에서 보는 바와 같이 3일 18UTC에 한반도는 제트 축의 전단(Nose)에 위치하고 있으 며 그 후면으로 약한 상층 기압골이 동반되어 있는 것을 알 수 있다. 이 제트 축은 4일 00UTC에 한반도 남부지방을 관측하고 있고, 06UTC에는 남해상으로 진출하게 된다. 제트 기류의 후면으 로는 -48℃이 한랭 핵을 가지는 한랭 건조한 공기가 뒤따르고 있다. 제트 축의 전면은 상층 발산 구역으로 이 구역이 하층의 수렴 구역과 만나면 구름은 연직을 높게 발달하고 전체 기압계는 잘 조직화되어 상대적으로 많은 양의 눈을 만들어 낼 수 있다.

WRF 모델 예측장은 36시간 전부터 대설이 발생할 수 있는 매개변수 즉 풍부한 수증기 공급, 지 속적인 온난 이류에 의한 수분속의 유지, 상층 제트를 가로지르는 하층 제트의 존재, 중층 양의 와도 이류, 상층 발산 구역 형성 등을 비교적 잘 모의해 내고 있어, 대설 사례를 분석하는데 매우 유용하였으며, 예측을 위한 매개변수의 형태를 보이는데도 활용할 수 있었다. 이번 대설 사례는 서해상에서의 호수-효과(Lake-effect)와 잘 조직화된 기압계에 의한 경압불안정 제공, 난기와 한기의 충돌에 의한 강제 상승과 육지에서의 지형의 효과에 의한 강화 등이 복합적으로 작용하여 발생한 것이었음을 알 수 있다.

#### 5.2. 위성

2010년 1월 4일 대설사례는 산둥반도에서 생성된 저기압이 서해상을 통과하여 한반도로 들어온 사례이다. 그러므로 우리나라 대설 개념모델 중 한랭 종관 저기압형으로 분류할 수 있다.

그림 5.2.1은 한반도 적설 발생 시까지 동아시아 영역의 적외영상과 수증기영상을 나타낸 것이다. 적외영상 그림 5.2.1(a)와 (c)를 보면 서해상에 광범위하게 하층운과 안개가 존재하며 시간이 지 남에 따라 동진한다. 하지만 적외영상에서 강설과 관련된 구름을 쉽게 구분하기 힘들다. 수증기 영상 그림 5.2.1(b)와 (d)에서 약한 암역이 산둥반도 쪽에서 다가오며 강화되는 것을 확인할 수 있다. 강설과 관련된 대류세포는 하층에 수증기가 존재하며 그 상층에 암역의 경계나 암역내에서 생성되었다. 하지만 겨울철 대류세포는 낮은 고도에서 생성되기 때문에 적외영상이나 적외 강조 영상을 이용하여 대류세포를 찾는 것은 매우 힘들며 대류세포 생성과 관련된 특징은 더욱이 찾을 수 없었다. 앞서 말한 것과 같이 위성영상을 이용하여 강설과 관련된 대류세포를 찾는 것은 쉽지 않지만 대류세포 생성을 예측하기 위해 하층의 수증기 분포와 상층의 암역의 유무를 참고하여 분 석하는 것이 도움이 될 것이다.



대설 사례 2010년 1월 4일, 중부지방 대설



[그림 5.2.1] 적설 발생 시까지 동아시아 영역의 (a)적외영상과 (b)수증기영상과 한반도영역의 (c)적외영상, (d)수증기영상



#### 5.3. 레이더

2010년 1월 4일 0500KST에서 0600KST의 강설시스템 사례의 움직임을 통해 산출한 이동속도 를 나타내었다(그림 5.3.1). 0500KST에 분홍색 원의 직교점이 위치하고 있는 반사도 에코는 0520KST에 동북동으로 20km 정도 이동하였고, 같은 방향으로 0540KST에 40km, 0600KST 에는 53 km 정도 이동하였다. 이를 통해 산출된 강설시스템의 이동속도는 53 kmh<sup>-1</sup>이고, 1시간 뒤 같은 방향으로 강설시스템이 이동함을 가정한다면 그림 5.3.2의 0600KST에 검은색 원으로 표시된 반사도 에코는 0700KST에 검은색 파선으로 표시된 지점으로 이동하여야한다. 그러나 레이더에서 관측된 반사도 에코의 실제 이동위치는 빨간색 실선의 화살표 지점으로 0600KST에 예상한 에코의 이동위치와 차이가 있다. 실제 반사도 에코가 이동하여 0700KST에 위치한 지점 은 0700KST에 관측된 시선속도 0.7° PPI영상에 나타난 주풍인 남서풍의 영향으로 0600KST에 예상한 위치보다 좀 더 북쪽으로 이동하였다.



[그림 5.3.1] 2010년 1월 4일 0500KST, 0520KST, 0540KST, 0600KST의 반사도 CAPPI영상과 강수시스템의 이동벡터



[그림 5.3.2] 2010년 1월 4일 0600KST, 0610KST, 0620KST, 0700KST의 반사도 CAPPI영상과 강수시스템의 이동벡터(좌), 1.5km 고도의 시선속도 CAPPI영상(우)



그림 5.3.3은 0400KST에서 0600KST까지 예보 2시간에 대한 레이더 관측자료와 MAPLE의 예 측 강설시스템 분포를 나타낸 것이다. 레이더 관측자료에서 0400KST 강설시스템은 해안선을 따라 길게 늘어서 있고 서울·경기 지역에 상대적으로 강한 반사도가 위치하고 있다. 강설밴드는 시간이 지남에 따라 동쪽으로 이동하며 소멸하였고 후면에서 생성된 반사도 에코는 점차 발달하 여 0600KST에 서울·경기 지역에 위치하였다. 그러나 MAPLE에서 모의된 강설시스템은 관측과 유사하게 시간이 지남에 따라 동쪽으로 이동하였지만 소멸하지 않고 계속 유지되었으며 후면에 서 발달하는 강설시스템은 모의되지 않았다.



[그림 5.3.3] 2010년 1월 4일 0400KST에서 0600KST까지 30분 간격의 레이더 합성장(상)과 0400KST에 모의된 30분 간격의 MAPLE 예측장(하)

0600KST부터 0800KST까지 예보 2시간에 대한 레이더 관측자료와 MAPLE의 예측 강설시스 템 분포를 나타낸 그림 5.3.4에서 0600KST의 강설시스템은 점차 발달하며 동쪽으로 이동하였 고 0730KST의 강설시스템의 아래쪽의 반사도는 더욱 강해지며 전라북도 위에 정체하였다. 그 러나 MAPLE에서는 예측장에서의 강설시스템 발달이 모의되지 않았고 특히 전라북도에서 발달 한 강설에코가 모의되지 않고 동쪽으로 이동하는 형태를 보였다. MAPLE 모의자료는 알고리즘 특성상 신규 시스템의 발달은 예측되지 않으며, 존재하는 시스템의 발달과 소멸만 예측 가능하기 때문에 MAPLE 모의자료를 예측자료로 이용할 때는 많은 주의가 요구된다.



[그림 5.3.4] 2010년 1월 4일 0600KST에서 0800KST까지 30분 간격의 레이더 합성장(상)과 0600KST에 모의된 30분 간격의 MAPLE 예측장(하)

📕 종합의견

중부지방에 위치한 저기압과 대륙고기압의 영향으로 서해 중부 지역에 강한 수렴을 형성하였다. 저기압이 서해상을 통과하면서 따뜻하고 습한 공기를 공급하고 저기압 후면으로 찬공기가 유입 되어 눈구름을 발달시켜 약 10시간 동안 서울(25.8cm) 및 경기 지역의 기록적인 대설이 발생하 였다. 레이더를 이용한 강설 구조분석에서 수평 200km 내외 규모의 강설밴드가 서해 중부 지역 으로 진입하고, 새로운 강설밴드가 기존의 강설밴드 후면에 지속적으로 생성되어 유입되었다. 강 설시스템은 약 15~19ms<sup>-1</sup>의 속도로 중부지방을 통과하였으며, 이동방향은 0300KST에는 동쪽, 0600KST 이후에는 북동쪽으로 이동하였으며, 이는 시선속도의 패턴과 유사하였다.



강설시스템 후면으로 15ms<sup>-1</sup> 이상의 강한 바람이 지속적으로 유입되었다. 이중바람장 분석 결과, 2~3km 고도 아래에서 서풍과 하강류가 후면에서 유입되었으며 강설에코가 새로 발달하는 지역 을 제외한 영역에서 하층의 좁은 수렴영역이 존재하였다.

2010년 1월 4일 대설사례의 경우, (모식도를 그림 5.3.5에 나타낸 바와 같이) 낮은 고도에서 서 풍과 남서풍이 시스템의 후면에서 유입되고 새로운 강설밴드가 기존의 강설밴드 후면으로 지속 적으로 생성되며, 또한 하층의 좁은 수렴영역이 존재하며 대류운들 사이에 저 고도의 상하흐름이 존재하는 경우, 대설 발생에 유의할 필요가 있다.



[그림 5.3.5] 2010년 1월 4일 대설사례 모식도

#### 5.4. 수치모델

- 온대 저기압에 의한 강우/강설 예보를 위해서는 지역수치예보모델(RDAPS) 예측 결과를 토대 로 온대 저기압의 위치 및 한반도 통과 시점, 발달 가능성을 검토한다. 저기압의 한반도 통과 시점과 발달 정도에 따라 강우/강설의 시작/종료 시점과 강수량의 차이를 유발한다. 이 사례 의 경우 지역수치예보모델에 의해 예측된 저기압의 이동 속도는 실제 이동 속도와 3-6시간 정도의 차이를 보여 지역적으로 강수의 시적/종료 시점에서 오차를 발생하였다(그림 5.4.1).
- 지역수치예보모델의 경우 지속적으로 초기장/배경장이 수정되어 모델이 수행되므로 모델의 예측 선행 시간의 차이에 따라 저기압의 이동 경로와 발달 정도도 함께 차이를 보일 수 있으므 로, 일기도 분석을 토대로 지역수치예보모델에 의해 모의된 저기압의 이동/발달 상황을 보완 하여 예보 오차를 줄일 필요가 있다.
- 중국에서 이동해 온 저기압은 서해상과 한반도 주변에서 중규모적 대기 현상에 의해 발달 및 이동 속도에 영향을 받으므로, 중규모 현상 모의에 적합한 국지수치예보모델(LDAPS)의 결과 를 토대로 저기압의 발달 가능성을 점검할 필요가 있다(사례 당시에는 LDAPS가 없었다.). 지 역수치예보모델은 종관 규모 현상의 수치 모의에 보다 적합하며 중규모 현상의 모의는 다른 고해상도 모델의 결과를 통해 보완할 필요가 있다.



[그림 5.4.1] 2010년 1월 4일 대설 사례에 대한 지역수치모형(RDAPS)에 의해 모의된 해면기압과 3시간 누적 강수량: 1월 3일 21KST, 4일 03, 09, 12KST(2010010312UTC 적분 시작)



#### 5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성

■ 종관 및 중규모 환경

- 본 대설 사례는 저기압의 중심이 경기도 남쪽으로 통과하면서 저기압 중심 부근 동쪽과 북쪽 부분에서 강한 강설이 발생한 중부 지방 대설 유형의 한 예라고 볼 수 있다. 종관 기압 패턴 이 특이하다 할 만한 사례는 아니지만, 일반 온대 저기압에 의한 강설보다는 많은 양의 강설 이 발생한 것이 특이하다고 하겠다.
- 약한 온대 저기압이 서해를 통과하면서 해수면으로부터의 현열과 잠열속을 공급받아 상대적 으로 불안정해지고, 많은 양의 수분을 공급 받은 것이 중요한 것으로 보인다. 그리고 경기도 지역 상공에서 대류 상승의 가능성도 보였다.



#### 5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항

- 📕 본 사례에서의 수치예보의 문제점
- 겨울철 온대 저기압에 의한 강수 예보는 여름철 그것에 비해 수치 예측의 신뢰도가 높기 때 문에 수치예보가 주도할 수 있는 사안이라 하겠다.
- 본 사례에서 수치예보의 문제점 4일 09KST의 일기도에서 온대 저기압 중심은 서해안 근처에 와 있고 저기압 동쪽 부분이 한반도를 대부분 덮고 있다(그림 5.6.1, 좌).
  반면, 같은 시각에 대한 수치예측에서는 3일 09KST와 21KST를 각각 초기 시각으로 한 예 측 모두에서 기압능이 남북 방향으로 한반도를 덮고 있어 온대 저기압과 강수계의 한반도 상 륙을 늦추었다(그림 5.6.1, 중과 우). 이 때문에 강수 수치예측에 적지 않은 오류가 야기됐다.



#### 수치예측 결과 - 1월 4일 09 KST

[그림 5.6.1] 1월 4일 09KST의 해면기압과 강수에 대한 두 수치예측 결과: 초기 시각이 3일 09KST(중)인 경우와 3일 21KST(우)

📕 향후 예보를 위한 고려 사항

그림 5.6.1에 제시된 수치예측과 관측의 차이는 가볍지 않은 것으로 판단되며, 향후에 되풀이 될 가능성도 있어 보인다. 위에 언급된 예측 오류가 30km 격자 때문인지, 지형 및 해륙간 열 적 차이 등을 포함한 한반도 효과를 제대로 모사하지 못했기 때문인지에 대한 검토와 개선이 필요하다.



### 참고문헌

- 1. 국가기상위성센터, 2011: 기상위성영상의 이해(I), 137-142.
- 2. 국가기상위성센터, 2011: 기상위성영상의 이해(Ⅱ), 7-93.
- 권태영, 이정순, 2013: 2010년 9월 21일 추석 호우와 관련된 대류 세포의 위성 영상 분석. 대한원격탐사학회지, 29(4), 423-441.
- 4. 기상청, 2011: 손에 잡히는 예/보/기/술, (제 2호)
- 5. 기상청, 2011: 손에 잡히는 예/보/기/술, (제 4호)
- 6. 기상청, 2011: 손에 잡히는 예/보/기/술, (제 8호)
- 김덕래, 권태영, 2011: 대류 세포의 발달 단계별 위성 휘도온도와 강우강도의 특성 -사례연구. 한국기상학회지, 21(3), 273-284.
- 이광재, 허기영, 서애숙, 박종서, 하경자, 2010: 호우사례 분석을 위한 개념모델 구성에 위성영상과 위성자료의 활용 연구. 한국기상학회지, 20(2), 131-151.
- 9. 예보관 훈련용 기술서-레이더기상학.
- 10. 홍성길, 1995: 기상 분석과 일기예보, 교학연구사.
- Browning, K.A., 1999: Mesoscale aspects of extratropical cyclones: An observational perspective. in Life Cycles of Extratropical Cyclones, Ame. Meteo. Soc. Boston, 265-283.
- 12. Carlson, T.N., 1980: Airflow through midlatitude cyclones and the comman cloud patterns. Mon, Wea. Rev., 108, 10, 1498-1509.
- Cintineo, J. L, M. J. Pavolonis, J. M. Sieglaff, and A. K. Heidinger, 2013: Evolution of Severe and Nonsevere Convection Inferred from GOES-Derived Coloud Properties. J. Appl. Meteor., 52, 2009-2023.
- 14. Djuric, D., 1994: Weather Analysis. Prentice Hall, Texas A&M university
- Estelle de Coning, 2013: Optimizing Satellite-Based Precipitation Estimation for Nowcasting of Rainfall and Flash Flood Events over the South African Domain. Remote Sens, 5, 5702-5724.
- Harrold, T.W., 1973: Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbances. Quart. Journal of the Royal Meteorological Society, 99, 232-251.
- 17. J. Moore, 1989: Isentropic analysis and interpretation: operational applications to synoptic and mesoscale forecast problems, Air Weather Service, Technical Note.
- 18. Jung, W., and T.-Y. Lee, 2013: Formation and evolution of mesoscale convective systems that brought the heavy rainfall over Seoul on September 21, 2010. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 49, 635-647.
- 19. NOAA, 2003: COMET program, Heavy Banded Snow. <https://www.meted.ucar.edu/norlat/bandedsnow/>
- 20. NOAA, 2005: COMET program, Mesoscale Aspects of Winter Forecasting. <a href="https://www.meted.ucar.edu/norlat/snow/">https://www.meted.ucar.edu/norlat/snow/</a>
- 21. NOAA, 2005: COMET program, Mesoscale Banded Precipitation. <https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/bandedprecip/>
- 22. NOAA, 2005: COMET program, Topics in Lake Effect Snow Forecasting. <https://www.meted.ucar.edu/norlat/snow/lake\_effect/>
- 23. NOAA, 2005: COMET program, Topics in Precipitation Type: New Brunswick, 01-03 February 2003. <a href="https://www.meted.ucar.edu/norlat/snow/preciptype/">https://www.meted.ucar.edu/norlat/snow/preciptype/</a>
- 24. NOAA, 2006: COMET program, Skew-T Mastery. <a href="http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt/">http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt/</a>
- 25. Parker, M. D. and R. H. Johnson, 2000; Organizational Modes of Midlatitude Mesoscale Convective Systems, Monthly Weather Review, 128, 3413-3436.
- 26. Rabin, R. M, 2007: A Quantitative Analysis of the Enhanced\_V Feature in Relation to Severe Weather. J. Appl. Meteor., 22, 853-872.
- 27. Roberts, R. D, D. Burgess, and M. Meister, 2006: Developing Tools for Nowcasting Storm Severity. J. Appl. Meteor., 21, 540-558.


## 참고문헌

- 28. Schumacher, R. S. and R. H. Johnson, 2005; Organization and Environmental Properties of Extreme-Rain-Producing Mesoscale Convective Systems, Monthly weather review, 133, 961-976.
- 29. Sieglaff, J. M, L. M. Cronce, and W. F. Feltz, 2011: Nowcasting Convective Storm Initiation Using Satellie-Based Box-Averaged Cloud-Top Cooling and Cloud-Type Trends. J. Appl. Meteor., 50, 110-126.
- Suh, M. S, J. R. Lee, and C. H. Kwak, 2004: Evaluation of NOAA/NESDIS Autoestimator for heavy rainfall events over Korean peninsula. J. Korean Meteor. Soc., 40(6), 685-696.
- Yu, X., and T.-Y. Lee, 2010: Role of convective parameterization in simulations of a convection band at grey-zone resolution. Tellus Series A-Dynamic Meteorology And Oceanography, 62A, 617-632.





- 발행일 2013.12.30
- 발행처 기상청 예보기술분석과
- 집필진 김영철(한서대학교) 서명석(공주대학교) 이동인(부경대학교) 이상현(공주대학교) 이태영(연세대학교)

