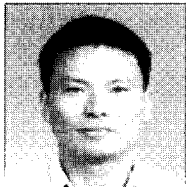


# 2004년 3월 4~5일 중부지방 대설 분석



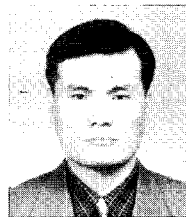
신도식 | 기상청



박윤호 | 기상청



이재원 | 기상청



심기오 | 국립방재연구소

## 1. 서론

일반적으로, 강설현상은 발달한 저기압의 통과, 대륙고기압의 확장 및 변질에 따른 이동성 고기압의 접근에 의해 나타나는 것으로 알려져 있다(육명렬, 2000). 이러한 강설현상은 대체로 지속기간이 짧고, 국지적으로 발생하며 뚜렷한 선행현상을 보이지 않은 특징을 가지고 있다. 지난 수년간 우리나라에서 수행된 대설에 관한 연구는 기압계의 구분 및 기상요소와 관련된 연구(김성삼(1979), 이병설(1979), 문승의와 김성렬(1980), 문길태와 김홍진(1982), 서은경과 전종갑(1991), 송병현(1993), 이재규(1999), 유철환 등(1999)) 및 수치모의를 통한 연구(Park and Jung(1984), 안중배와 조익현(1998), 이훈과 이태영(1994), 전종갑 등(1994), 이재규(1999), 이재규

(2001))로 나누어 볼 수 있다. 앞선 연구에서 제시한 바와 같이 강설현상은 단일과정을 통해 나타나기 보다는 상·하층간의 운동, 수분의 공급, 대기 안정도 및 주변 기압계의 상황 등 복잡한 물리 및 역학과정의 상호작용으로 나타난다(Kocin and Uccellini, 2004). 특히, 전종갑 등(1994)은 10년간의 강설자료를 바탕으로 지역적 대설 빈도를 분석하여 3개 대설 권역으로 나누어 권역별로 강설 특성을 분석한 바 있다. 그 중 제3대설권역인 서해안 지역 및 내륙지역에 발생한 대설의 경우, 한반도 부근에서 북서풍이 현저하고, 찬 시베리아 기단으로부터 서해상으로 한기의 유입이 현저하게 나타나고, 따뜻한 해수면에 의한 대기 불안정의 강화로 인해 강설현상이 발생 할 수 있음을 제시한 바 있다. 이 연구에서는 2004년 3월 4~5일에 발생한 대설 사례를 분석하였다. 이 폭설은

중국 내륙에서 발생한 저기압이 서해상을 지나며 급격히 발달하는 과정에서 2개의 서로 다른 시스템으로, 서울은 강설현상 및 강설량, 충청지방은 강설량을 예측하기 어려웠다. 3월 4일 서울·경기지방의 폭설은 저기압 전면의 난역에서 형성된 오난·다습한 대기하층의 지속적인 수렴 및 대기불안정으로 급격히 발달한 소규모요란(disturbance)에 의해 촉발된 폭설로 분석되며, 특이한 점은 뇌전 현상을 동반하였다. 또한 3월 5일 충청지방의 폭설은 발달한 저기압의 직접적인 영향으로 저기압의 이동경로를 따라 발생하였다. 따라서 이 논문에서는 2개의 서로 다른 폭설 시스템에 대한 분석을 통해 각각의 원인을 진단하고, 예측 가능성을 검토하여 겨울철 강설예보에 활용하고자 한다.

## 2. 분석 자료 및 방법

2004년 3월 4~5일 동안 서울·경기 지역에 18.5 cm, 대전지역에는 49 cm의 기록적인 폭설 현상이 있었다. 강설 사례 당시의 지역별 적설 순위 통계자료를 살펴보면, 3월중 발생한 강설 사례 중 동해(2위)를 제외한 모든 지역에서 최심 신적설 1순위를 기록하였으며, 관측이후 순위에서도 1~5순위를 기록하였다(표 1) 이 연구에서는 4일 발생한 서울·경기 지방의 강설현상(이하, 서울·경기지방 강설)과 5일 발생한 충청지방 강설현상(이하, 충청 지방 강설) 분석을 위해 당시의 종관일기도, 자동기상관측장비 (Automatic Weather System, 이하 AWS), 수치예보자료 및 예보관분석시스템(Forecaster's Analysis System, 이하 FAS)를 사용하였다. 종관일기도 분석을 통해 상

표 1. The rank of fresh snowfall during 4~5 March.

지 역	최심 신적설(cm)					
	3월 4일		3월 5일		관측이후 순위	관측이후 3월 순위
서울·경기도	문 산	23.0			1	1
	동두천	19.2			2	1
	서 울	18.5			5	1
	양 평	17.9			3	1
강 원 도	원 주	16.0	태 백	23.7	*	1
			영 월	20.5	1	1
			원 주	*	*	1
			동 해	11.4	*	2
충청북도			보 은	39.9	1	1
			청 주	32.0	1	1
			충 주	20.5	2	1
			제 천	16.7	3	1
충청남도			대 전	49.0	1	1
			부 여	29.8	1	1
			천 안	13.2	*	1
경상북도			문 경	49.0	1	1
			영 주	35.8	1	1
			상 주	30.6	1	1
			안 동	27.0	1	1
			봉 화	21.7	2	1

·하층 기압계 분포 및 이동상태를 분석하였고, AWS 관측자료를 바탕으로 강설 시스템 발생 전과 발생 당시의 대기 최하층 상태를 분석하였다. 또한, 수치예보 자료의 분석을 통해 대기 하층의 역할과 상층과의 상호작용을 분석하였으며, FAS로부터 수증기의 연직수송과 상승류 및 연직이류에 대한 분석을 수행하였다.

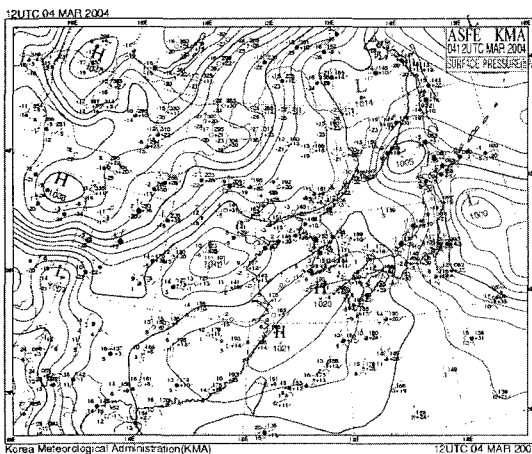
### 3. 분석결과

#### 3.1 기압계의 특성

3월 4일 12UTC에 저기압의 중심은 화중 내륙에 위치하고 있으며, 우리나라는 북서쪽에 위치한 고기압과 남쪽에 위치한 고기압 사이에 놓여 있어, 종관적으로는 강설을 예측하기가 어려운 기압계 형태를 보였다(그림 1). 반면, 3월 5일 00UTC에 저기압의 중심은 서해 남부해상에 위치하고 있으며, 점차 상층 강풍대를 따라 남동쪽으로 이동하였다. 이 저기압 시스템은 남부지방을 거쳐 동해 남부해상으로 이동하면서 점차 발달하였다. 또한, 500 hPa 상층일기도(그림 2)

에서 상층절리저기압은 저기압성 회전을 하며 느리게 동진하고 있으며, 한기를 동반한 상층골(500 hPa - 35 oC 선이 중부지방에 위치)이 바이칼호 남쪽에서 점차 강화되며 남남동진하고 있다. 한기를 동반한 상층골은 화중 내륙에서 서해상으로 이동하고 있는 지상저기압을 강화시키고 있다. 전종갑 등(1994)은 500 hPa에 위치한 한랭저기압이 점차 남동진하고, 850 hPa에서 한대기단의 확장에 의한 한기이류가 뚜렷할 때 서해안 및 내륙에 강설 현상이 나타남을 보인다. 따라서 충청지방 강설현상은 중국 내륙에 위치한 저기압 전면의 저기압성 소용돌이(vortex)에 의해 발생한 서울·경기지방 강설과는 다른 메커니즘으로 발달하였음을 알 수 있다. 즉, 서울·경기지방 강설은 한기가 유입된 상태(850 hPa -9 oC 선이 남부지방에 위치)에서 주로 하층의 역할(난기 이류성 상승류)에 의해 발생한 강설 시스템이나, 충청지방 강설은 지상저기압이 상층 한기의 지원을 받아 서해상을 통과하며 발달하면서 온난전선 상에서 전선성 상승류에 의한 강설 시스템임을 알 수 있다. 이하의 분석에서는 서울·경기지방 강설 사례와 충청지방 강설 사례로 나누어 강설 시스템의 발생원인과 발달과정에 대한 분

(a) 12UTC 4 March 2004



(b) 00UTC 5 March 2004

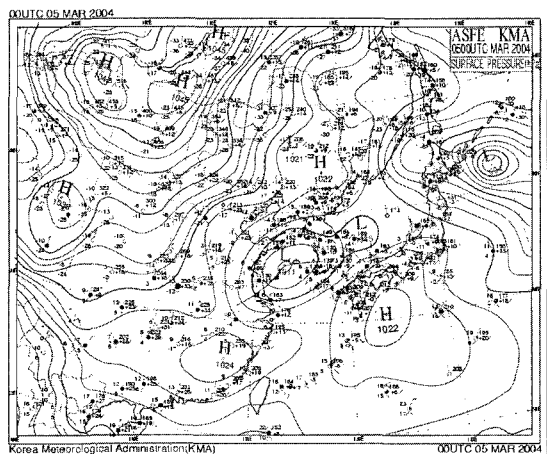


그림. 1 Surface weather chart at 12UTC 4 and 00UTC 5 March 2004. The solid line represents mean sea level pressure with 2 hPa interval.

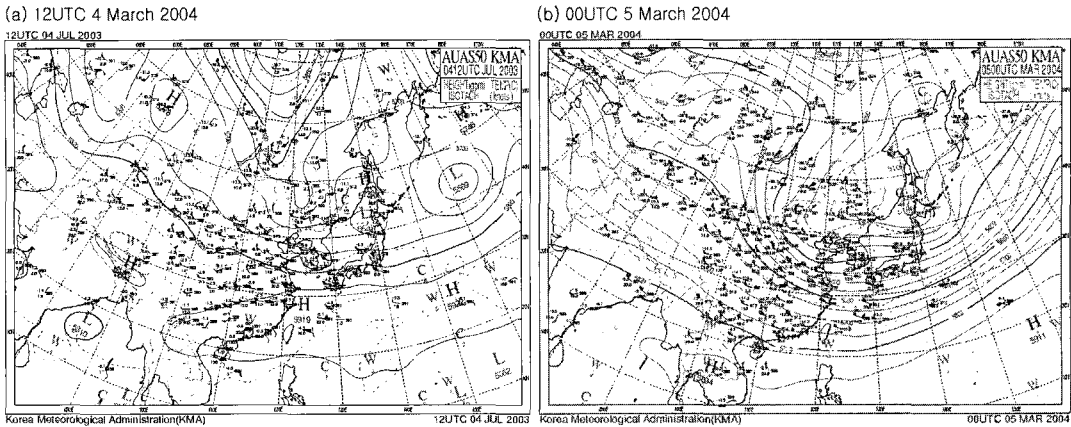


그림. 2. Same as 그림. 1, except for 500 hPa weather chart.

석 및 강설 선행요소를 분석하였다.

### 3.2 서울·경기지방 강설

#### 3.2.1 일기도 분석

서울·경기지방의 강설은 강설 시스템이 접근하기 전 저기압 전면에서 국지적으로 meso-β 규모의 저기압이 형성되면서 발달한 사례로 이러한 모습은 1시간 간격의 한반도 일기도에서 그 모습을 찾을 수 있다(그림 3). 2004년 3월 4일 09UTC에 우리나라는 한반도를 중심으로 남북으로는 고기압이, 동서로는 저기압이 형성되어 있으며, 저기압 전면의 불안정으로 인해 서울·경기를 중심으로 약한 강설현상이 나타나고 있었다. 이후 10UTC에 남북으로 형성된 고기압대가 점차 상하로 축소됨에 따라 그 사이로 저기압의 확장이 나타났다. 또한 한기가 남하한 상태에서 기압골 전면인 서해상을 통해 수증기를 함유한 따뜻한 공기가 서울·경기지방으로 유입되면서 대류 불안정으로 천둥 번개를 동반한 강설현상이 나타났다.

#### 3.2.2 바람 벡터와 수렴대

남북으로 형성된 고기압과 동서로 형성된 저기압 시스템에 의해 09UTC경 서해중부 해상에 저기압성

소용돌이가 형성되어 점차 강화되기 시작하였다(그림 4). 이 소용돌이는 10UTC에 고압대가 약화됨에 따라 meso-β 규모의 저기압으로 발달하였다. 이 저기압에 의해 서울·경기지방으로 남서류(하층의 상대적으로 따뜻하고 습윤한 공기)의 유입이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 강설 시스템 전면 난역에 형성된 온난·다습한 대기하층의 지속적인 수렴 및 대기불안정으로 인해 소규모 요란이 급격히 발달함에 따라 서울·경기 지역에 많은 양의 강설이 발생한 것으로 사료된다. 기상연구소(2003)과 박윤희 등(2003)은 이러한 하층에서의 바람 수렴과 남서류의 유입이 급격한 대류운의 발생 및 발달에 중요한 요소임을 제시한 바 있다. 그림 5는 지상에서의 수렴구역을 나타낸 것으로, 강설 발생 3시간 전부터 강설 시스템이 발달한 지역으로 하층에서 지속적인 수렴이 나타났다. 이러한 좁은 영역에서의 수렴역 발생은 상대적으로 하층의 따뜻하고 다습한 공기를 상층으로 끌어올리는 역할을 한 것으로 분석된다. 또한, 양의 와도 구역이 뚜렷하지는 않지만 서해중부 해상에서 형성되어 서울·경기지역으로 이동하는 경향을 보였다(그림 생략).

#### 3.2.3 난기 이류성 상승류

850 hPa 은위 조밀구역(적색선)이 만주지방에서

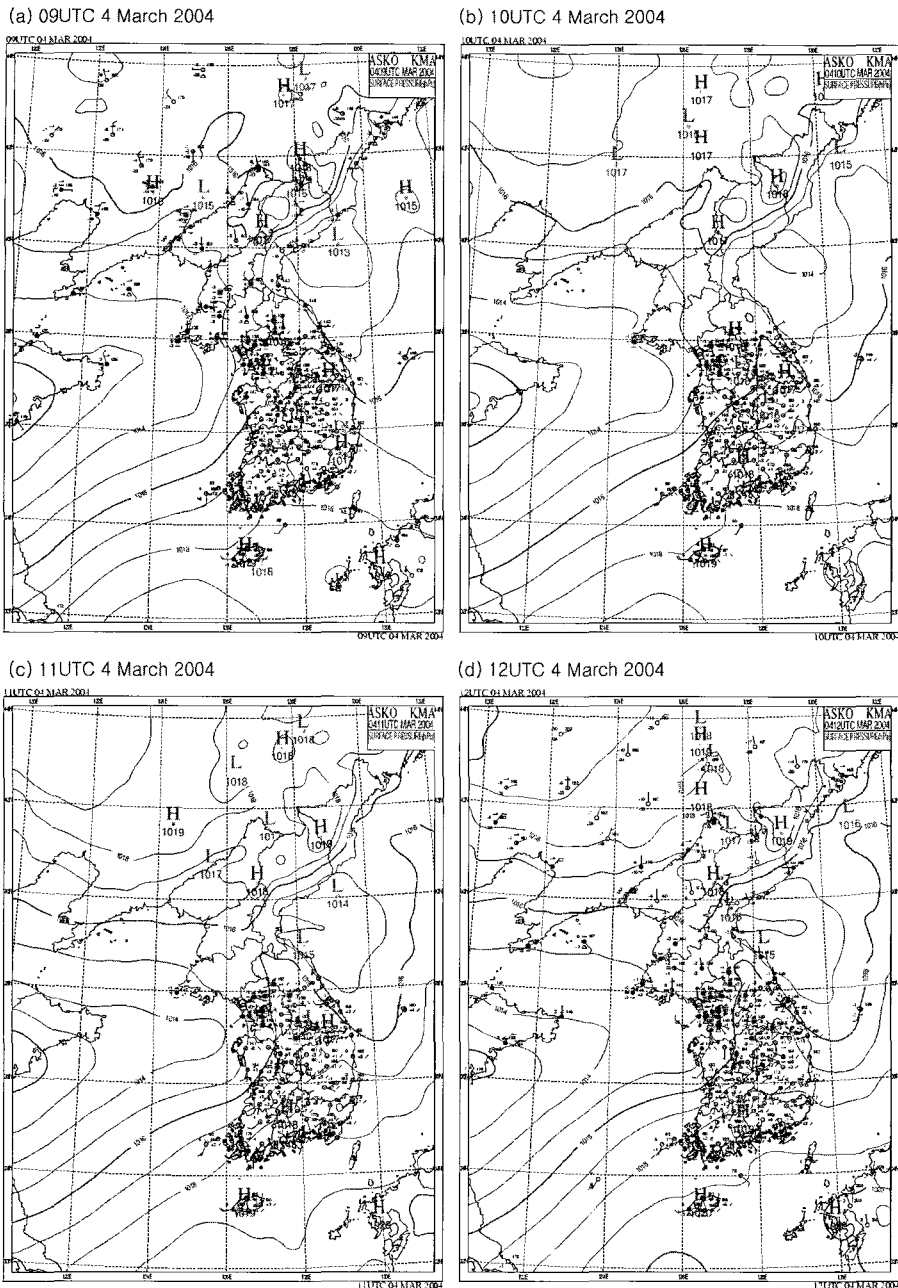


그림. 3. Hourly Korean Peninsula weather chart at (a) 09UTC, (b)10UTC, (c) 11UTC and (d) 12UTC on 4 March 2004.

서해북부해상에 걸쳐 형성되어 있으며, 중국 동해안에서 강원 북부지방(남서~북동)으로 혀 모양으로 길

게 뻗어있어 남서류가 유입되면서 난기 이류성 상승류가 유도되어(적색 이미지는 하층의 수렴장을 의

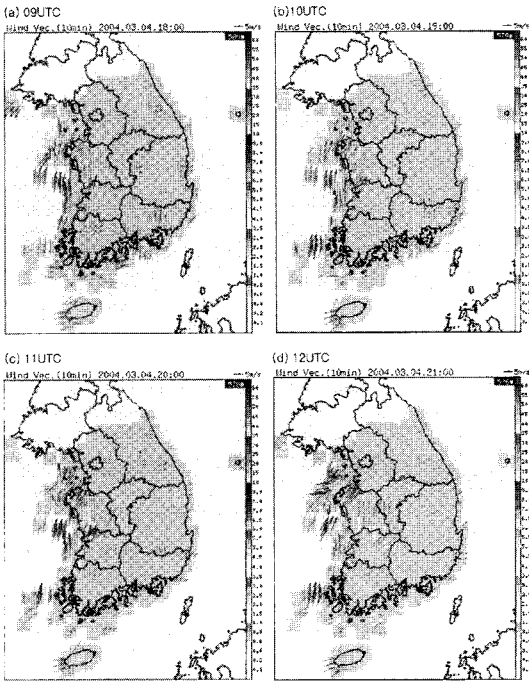


그림. 4. Wind vector at (a) 09UTC, (b) 10UTC, (c) 11UTC and (d) 12UTC on 4 March 2004.

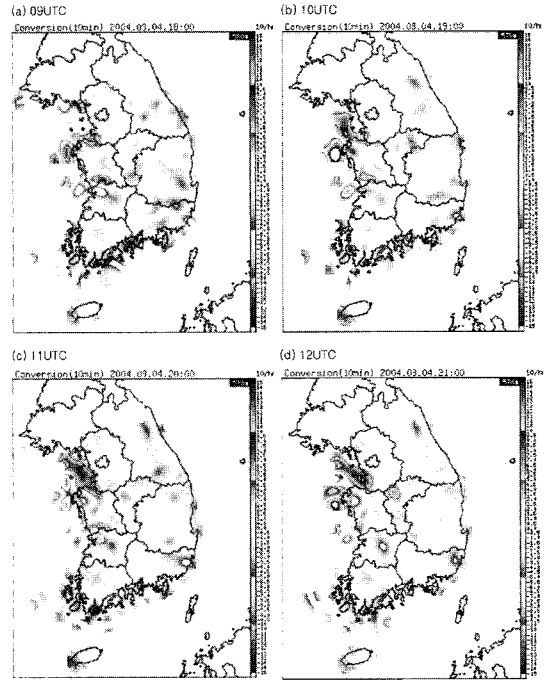


그림. 5. Convergence at (a) 09UTC, (b) 10UTC, (c) 11UTC and (d) 12UTC on 4 March 2004.

(a) 00UTC



(b) 12UTC

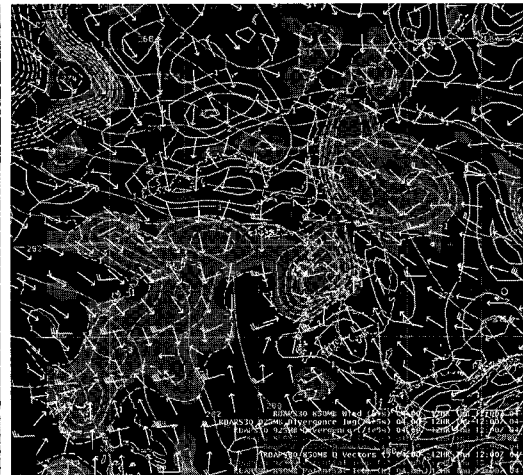
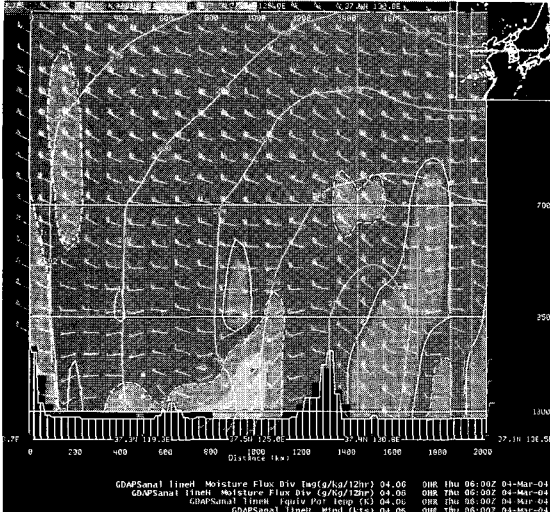


그림. 6. Low-level convergence and warm air advection vertical flow at (a) 00 UTC and (b) 12UTC 4 March 2004.

미) 그 지역에서 강설 가능성이 큼을 알 수 있다(그림 6). 그러나, 앞서 살펴본 중관일기도(그림 1)에서

는 이러한 모습을 찾기가 어려우며, 상층에서의 한기에 의한 지원이 뚜렷하지 않기 때문에 하층의 역

(a) 00UTC



(b) 12UTC

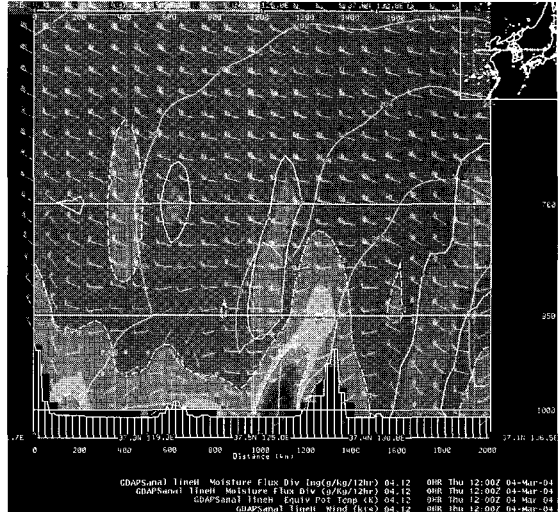


그림 7. Moisture flow and warm air advection at (a) 00UTC and (b) 12UTC 4 March 2004.

할 만으로 많은 강설을 예상하기 어려운 기압계로 판단된다.

### 3.2.4 수분속과 난기 이류

그림 7은 서울을 중심으로 한 동서 연직 단면을 나타낸다. 3월 4일 06 UTC경 서해상으로부터 남서류가 유입되면서 850 hPa 고도까지 수분속의 유입이 현저하게 나타났다. 또한, 하층에서의 지속적인 수증기 유입으로 인해 상·하층 간 큰 상당온위로 대류운이 발달함에 따라 12UTC경 강설과 함께 뇌우를 발생시켰다. 상·층간의 상당온위 차이에 의해 대류 불안정의 크기가 결정됨에 따라 이러한 상당온위에 대한 분석은 대류운의 발달과정에 중요한 요소로 사료된다(박윤호 등, 2003) 따라서 종관자료 분석을 통해 강설현상을 판단하기 어려울 경우, 앞서 제시한 하층의 분석을 통한 저기압성 소용돌이와 수렴대의 위치 및 이류와 상승류에 대한 분석을 통해서만 강설 예보의 정확성을 향상 시킬 수 있으리라 사료된다.

## 3.3 충청지방의 강설

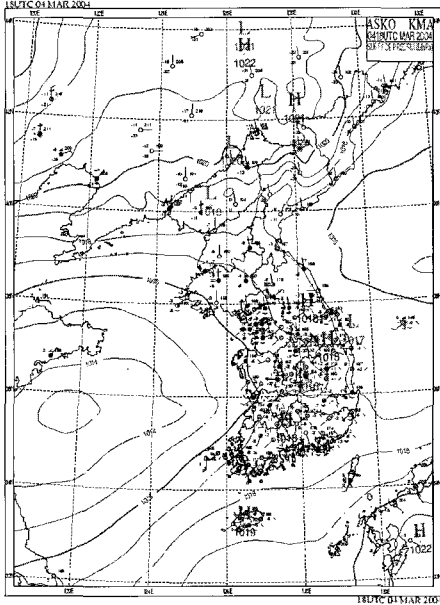
### 3.3.1 일기도 분석

3월 5일 새벽이후 저기압의 중심은 서해 남부해상에서 서서히 동진하면서, 남부지방을 거쳐 동해 남부해상으로 이동하였다(그림 8). 이 저기압은 상층 한기의 남하와 상대적으로 따뜻한 해수면에 의해 불안정이 가속되면서 서해상에서 급격히 발달하였다. 당시 제트류의 중심대는 남하하면서 남해상에 위치하였다(그림 생략). 상공의 등치선이 더 큰 곡률을 갖게 함으로써 저기압 발달에 크게 기여한 것으로 사료된다. 이는 전종갑 등(1994)이 제시한 서해안 및 내륙의 강설 시스템의 발달과정과 일치하였으며, Miller (1972)에 의한 악기상 패턴 분류 중 C-패턴의 저기압의 발달 및 이동과 유사하여 온난전선 전면에 위치한 충청지방에 집중적인 강설현상이 나타났다.

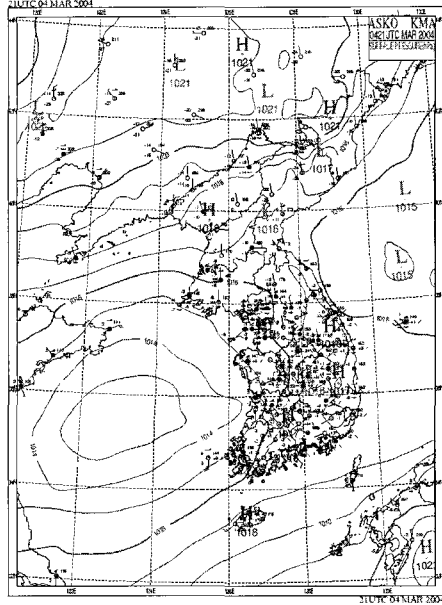
### 3.3.2 바람 벡터와 수렴대

그림 9의 바람 벡터 자료를 살펴보면, 서해남부해상에 위치한 저기압이 점차 우리나라로 접근함에 따

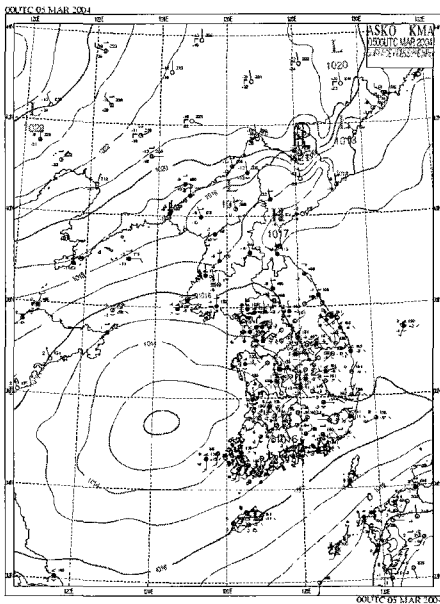
(a) 18UTC 4 March 2004



(b) 21UTC 4 March 2004



(c) 00UTC 5 March 2004



(d) 03UTC 5 March 2004

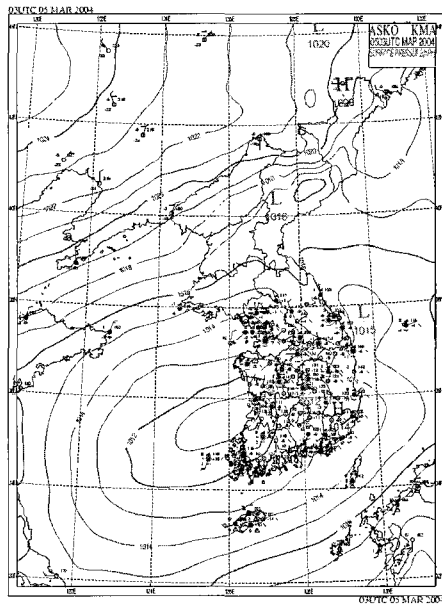


그림 8. Three hourly Korean Peninsula weather chart at (a) 18UTC, (b) 21UTC, (c) 00UTC 5 March 2004, and (d) 03UTC on 5 March 2004.

라 이전에 서울·경기로 유입되던 남서류는 점차 약화되었고, 충청과 전라남북도 서해안지방으로 남서류의

유입이 강화되고 있다. 또한 수렴대가 선상으로 서해 상에서 충청남북도 남부와 경상북도 북부지역으로 형



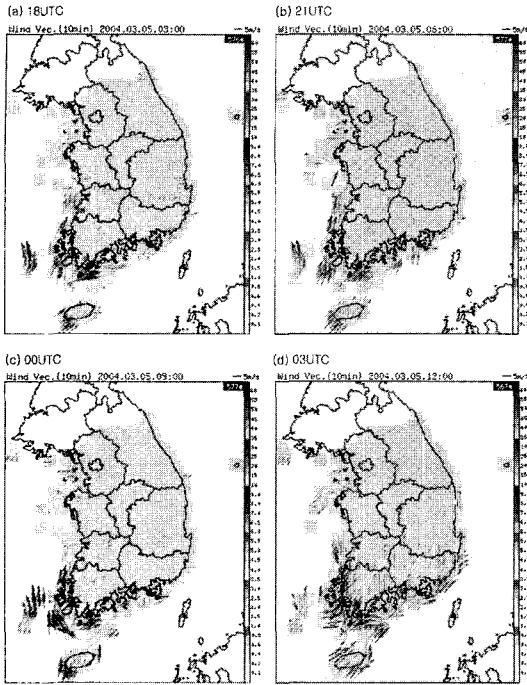


그림 9. Wind vector at (a) 18UTC, (b) 21 UTC 5 March 2004, (c) 00UTC, and (d) 03UTC on 5 March 2004.

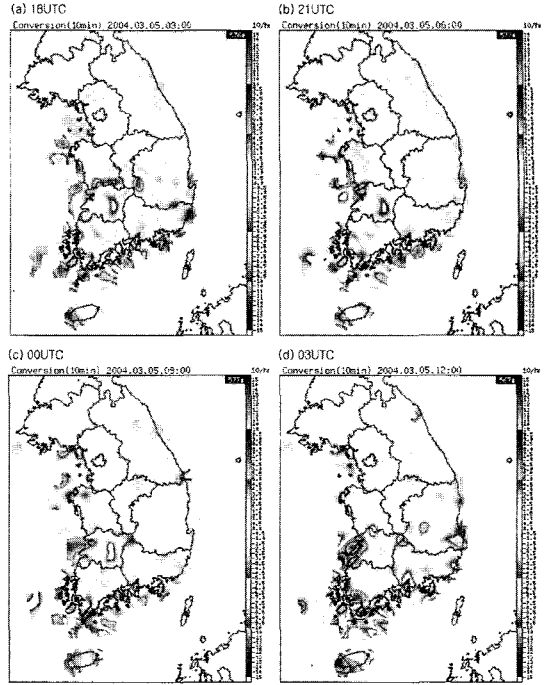


그림 10. Convergence at (a) 18UTC, (b) 21UTC 5 March 2004, (c) 00 UTC, and (d) 03UTC on 5 March 2004.

(a) 00UTC



(b) 12UTC

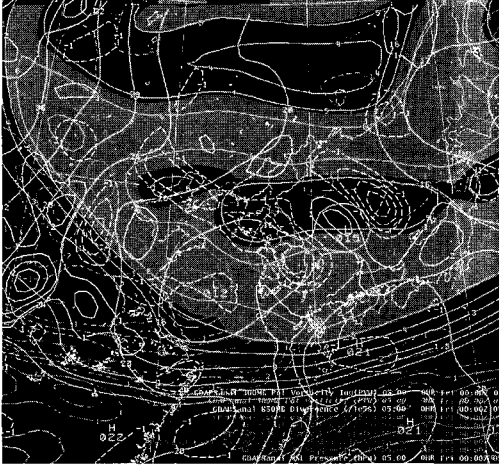


그림 11. Low-level convergence and warm air advection vertical flow at (a) 12UTC 4 and (b) 00UTC 5 March 2004.

성되어 있으며(그림 10), 이 수렴대를 중심으로 강설이 나타났다. 이러한 수렴대의 변화와 온난전선의 위

치는 강설의 이동을 분석 및 예측할 수 있는 중요한 요소로 사료된다.

(a) 00UTC



(b) 06UTC

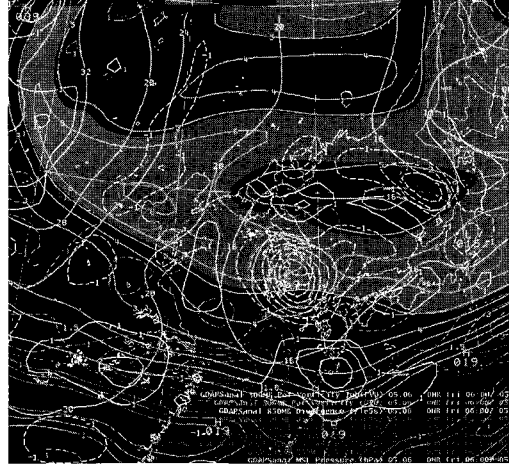
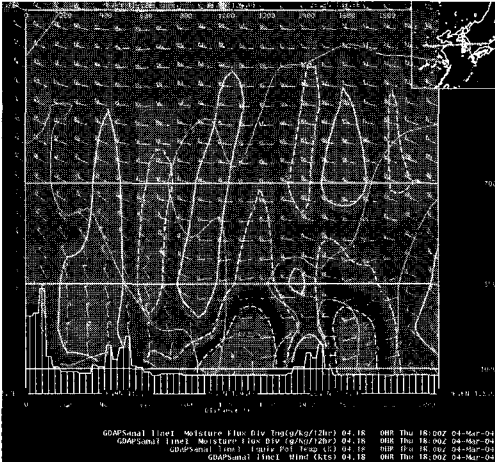


그림 12. Characteristics of upper-level and low-level at (a) 00UTC and (b) 06UTC 5 March 2004.

(a) 18UTC



(b) 00UTC

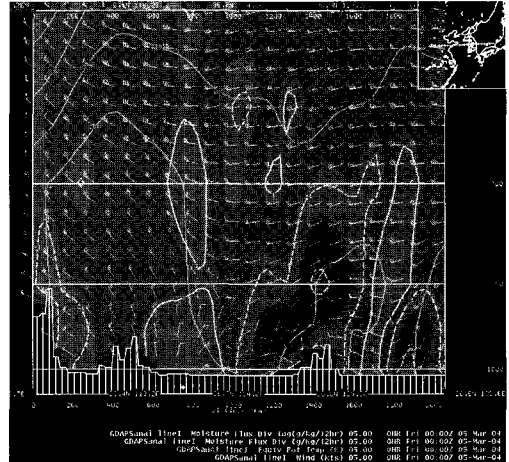


그림 13. Moisture flow and warm air advection at (a) 18UTC 4 March 2004, and (b) 00UTC 5 March 2004.

### 3.2.3 전선성 상승류

그림 11은 하층의 수렴과 Q-vector의 분포를 나타낸다. 850 hPa 온위 조밀구역(적색선)이 서해중부 해상에서 중부지방을 중심으로 형성되어 있으며 서서히 남하하는 경향을 보였다.

이러한 온위 조밀구역과 하층 수렴대의 위치가 잘 일치하고 있으며, 온위 조밀구역의 남쪽(충청지방)

에 강한 수렴대가 위치하고 있어 유도된 전선성 상승류에 의해 충청과 경북북부지방에 강설 현상이 집중되어 나타난 것으로 분석되었다. 상층 강풍대 축은 우리나라 부근에서 저기압성 순환을 하고 있으며, 이 강풍대 축은 우리나라 남쪽에 위치하고 있다(그림 생략). 그림 12는 300hPa 등온위면위치소용돌이도(IPV)를 나타낸다. 저기압의 발달과정에서 나

타나는 양의 IPV는 남해 먼해상까지 수평적으로 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한 3월 5일 00UTC경에는 상층 발산이 뚜렷하지 않지만 저기압이 남부지방을 통과하고 있는 06UTC에는 상층 발산과 하층 수렴이 뚜렷하게 나타나고, 상층 한기의 남하에 따라 저상저기압의 급격한 발달이 나타났다. 따라서 충청지방 사례는 앞서 설명한 서울·경기지방 사례와는 달리 상층에서의 차고 건조한 공기의 대류권으로의 유입과 하층에서의 상승기류에 의해 발생한 것으로 분석된다.

### 3.2.5 수분속과 난기 이류

그림 13은 대전을 중심으로 한 동서 연직 단면을 나타낸 것이다. 3월 5일 03시경에 700 hPa 고도까지 수분속의 수렴이 나타났으며, 하층에서의 지속적인 수증기 유입에 의해 상·하층의 큰 상당온위 차이에 의해 대기 불안정이 나타났다. 특히, 북서쪽으로부터 차고 건조한 공기의 유입에 의해 대기 불안정이 가속됨에 따라 폭발적인 강설현상이 나타났다.

## 4. 결론

이 연구는 2004년 3월 4~5일 동안 발생한 서울·경기 지역과 충청 지역의 강설 시스템의 발생원인과 발달과정에 대한 분석 및 예측 가능성을 당시의 종관 일기도, AWS, 원격탐사자료, 수치예보자료 및 FAS 자료를 이용하여 분석하였다.

서울·경기 지역 강설의 경우, 우리나라는 북서쪽에 위치한 고기압과 남쪽에 위치한 고기압 사이에 놓여 있어, 종관적으로는 강설을 예측하기가 어려운 기압계 형태를 보였으나, 서해중부 해상에 형성된 저기압성 소용돌이의 강화로 인해 서울·경기지방으로 폭발적인 남서류의 유입과 강설 시스템 전면 난역에 형성

된 온난·다습한 대기하층의 지속적인 수렴 및 대기 불안정으로 인해 소규모 요란이 급격히 발달하였다. 또한 하층에서의 지속적인 수증기 지원과 850 hPa 고도까지의 수증기 유입으로 인해 상·하층 간의 큰 상당온위로 인해 대류운이 발달함에 따라 서울·경기 지역을 중심으로 강한 뇌우를 동반한 많은 강설이 나타났다.

충청 지역 강설의 경우, 저기압의 중심이 서해 남부해상에 위치한 후, 점차 상층 강풍대를 따라 남동쪽으로 이동함에 따라 남부지방을 거쳐 동해 남부해상으로 이동하면서 점차 발달함에 따라 서울·경기지방 강설에 비해 종관적으로 강설현상을 예측할 수 있는 기압계 형태를 보였다. 이러한 저기압 시스템의 이동에 따라 충청과 전라남북도 서해안지방으로 남서류의 유입이 강화되었다. 850 hPa 온위 조밀구역이 서해중부해상에서 중부지방을 중심으로 형성되어 점차 남하였고, 온위 조밀구역과 하층 수렴대의 위치가 잘 일치하였다. 또한, 충청지방을 중심으로 강한 수렴대가 위치하였다. 또한 저기압이 남부지방을 통과하는 동안 상층에서의 차고 건조한 공기의 대류권으로의 유입과 하층에서의 상대적으로 따뜻하고 습한 공기의 유입에 의해 충청지방을 중심으로 강설 현상이 집중되어 나타났다.

이상의 결과로부터 서울·경기 및 충청 지역의 강설의 경우, 바람벡터와 수렴대, 상승류 및 수분속과 난기이류의 형성 및 발달에 의해 강설 시스템의 강도가 결정됨에 따라 이들의 분석을 통해 선행시간을 확보하여야 하며, 특히 종관자료 분석을 통해 강설현상을 판단하기 어려울 경우, 하층자료의 분석을 통한 저기압성 소용돌이와 수렴대의 위치 및 이류와 상승류에 대한 분석 등을 통해서 강설 예보의 정확성을 향상시킬 수 있으리라 사료된다. 또한 앞으로 이러한 자료를 활용하여 강설현상에 대한 보다 향상된 연구들이 활성화되기를 기대한다.

## 참고문헌

1. 기상연구소, 2003: 수치예보자료를 활용한 저기압 발달 및 강수과정 분석. pp 94.
2. 김성삼, 1979: 남한의 10cm이상 절설의 기상조건. 한국기상학회지, 15(1), 1-10.
3. 문승의, 김성렬, 1980: 동계 전선통과에 따른 남한의 강수분포 특성. 한국기상학회지, 16(2), 1-13.
4. 문길태, 김홍진, 1982: 1981년 1월 14일-16일 사이의 저기압에 동반된 대설의 특성 연구. 한국기상학회지, 18(1), 22-32.
5. 박윤희, 신도식, 함동주, 옥명렬, 2003: 강한 호우를 유발하는 대류운의 형성과 유지과정(대류운 발생의 선행조건과 집중호우). 가을 기상학회, 대기 13(3), 290-291.
6. 서은경과 전종갑, 1991: 1990년 1월 29일-2월 1일 한반도에서 발생한 대설에 관한 연구. 한국기상학회지, 27(2), 165-179.
7. 송병현, 1993: 우리 나라 동해안 지역과 서해안 지역의 강설 특성 비교 연구. 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 32pp.
8. 안중배, 조익현, 1998: 한반도 주변 해수면 온도에 따른 중규모 대기 모형 반응. 한국기상학회지, 34(4), 643-651.
9. 유철환, 이동인, 이병걸, 2000: 북서 계절풍 발달시 레이더 에코 유형별로 본 강설운의 운동학적인 특성. 한국기상학회지, 36(6), 655-666.
10. 옥명렬, 2000: 서울·경기도 지방의 강설유형. 기상청 예보기술발표회, 73-79.
11. 이병설, 1979: 남한의 강설분포에 관한 연구. 지리학과 지리교육, 9, 224-233.
12. 이재규, 2000: 영동해안 대설사례의 수치모의 연구. 한국기상학회지, 37(1), 1-12.
13. 이재규, 1999: 대관령과 강릉지역의 강설량 차이를 일으키는 중관구조: 사례연구. 한국기상학회지, 35(3), 319-334.
14. 이훈, 이태영, 1994: 영동 지역의 폭설 요인. 한국기상학회지, 30(2), 197-218.
15. 전종갑, 이동규, 이현아, 1994: 우리 나라에서 발생한 대설에 관한 연구. 한국기상학회지, 30(1), 97-117.
16. Kocin, P.J. and L.W., Uccellini, 1990: Snowstorms along northeastern coast of the United States: 1955 to 1985. Amer. Meteor. Soc., 280pp.
17. Park, S.U. and C.H., Joung, 1984: Air modification over the Yellow Sea during cold-air outbreaks in winter. J. Korean Meteor. Soc., 20, 35-50.