

폭설에 대한 예측가능성 연구 - 2008년 3월 4일 서울지역 폭설사례를 중심으로 -

류찬수 · 서애숙* · 박종서* · 정효상

조선대학교 대기과학과/기후변화환경연구소,

*기상청, 국가기상위성센터

(2009년 7월 15일 접수; 2009년 8월 27일 수정; 2009년 10월 19일 채택)

On the Predictability of Heavy Snowfall Event in Seoul, Korea at Mar. 04, 2008

Chan-Su Ryu, Ae-Sook Suh*, Jong-Seo Park* and Hyo-Sang Chung

Department of Science Education, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

**Korea Met. Satellite Center, KMA, Chungbuk 365-831, Korea*

(Manuscript received 15 July, 2009; revised 27 August, 2009; accepted 19 October, 2009)

Abstract

The heavy snowfall event over the eastern part of Seoul, Korea on Mar. 04, 2008 has been abruptly occurred after the frontal system with the heavy snowfall event had been past over the Korean peninsula on Mar. 03, 2008. Therefore, this heavy snowfall event couldn't be predicted well by any means of theoretical knowledges and models. After the cold front passed by, the cold air mass was flown over the peninsula immediately and became clear expectedly except the eastern part and southwestern part of peninsula with some large amount of snowfall. Even though the wide and intense massive cold anticyclone was expanded and enhanced by the lowest tropospheric baroclinicity over the Yellow Sea, but the intrusion and eastward movement of cold air to Seoul was too slow than normally predicted. Using the data of numerical model, satellite and radar images, three dimensional analysis products(KLAPS : Korea Local Analysis and Prediction System) of the environmental conditions of this event such as temperature, equivalent potential temperature, wind, vertical circulation, divergence, moisture flux divergence and relative vorticity could be analyzed precisely. Through the analysis of this event, the formation and westward advection of lower cyclonic circulation with continuously horizontal movement of air into the eastern part of Seoul by the analyses of KLAPS fields have been affected by occurring the heavy snowfall event. As the predictability of abrupt snowfall event was very hard and dependent on not only the synoptic atmospheric circulation but also for mesoscale atmospheric circulation, the forecaster can be predicted well this event which may be occurred and developed within the very short time period using sequential satellite images and KLAPS products.

Key Words : KLAPS, Predictability, Mesoscale, Snowfall, Equivalent temperature, Divergence

1. 서 론

한반도 중부지역에서 남부지역으로 기압골이 통과하면서 눈이 내렸다. 뒤 이은 시베리아 고기압의

장출로 인하여 다음날인 3월 04일 서울에는 “대체로 맑고 동해안과 남부 일부 지역은 눈이 내린다”고 예보를 한 바 있었다. 그러나 동쪽으로 물러난 줄 알았던 저기압은 남동쪽에 위치하며 느리게 동진하면서 중부지역의 영서 지역의 구름대는 오히려 북쪽으로부터 남진하면서 서쪽으로 확장하여 동서울 지역까지 예상치 못했던 폭설이 오전 10시경부터 오후 2시 경까지 약 4시간가량 내렸다. 이번 3월 04일에 서울 지역에 기습적으로 내린 폭설 현상은 예측을 하지 못했었기 때문에, 약 4시간 동안에 걸쳐 3.6 cm의 많은 눈이 기습적으로 내려 시민들에게 많은 불편, 재산상의 피해와 여러 교통 장애를 초래하였다. 최근 이처럼 초봄에 갑자기 내리는 폭설은 아무리 정교한 수치모델이라도 선형예측시간을 가지고 이런 현상을 예보하기는 거의 불가능할 뿐 만 아니라, 실황예보로도 어려운 현상 중의 하나이다¹⁾. 전 날 전선을 동반한 저기압이 통과한 뒤, 한반도 동쪽으로부터 계속 유입되는 편동풍에 의해 영서지방에서 발달한 저기압성 순환에 동반되어 하층에서 발달된 구름대가 서울지역까지 서쪽으로 확장되면서 내린 이런 강설현상의 예측은 거의 불가능하다. 초봄의 강설현상은 더욱 예측이 어려운데, 눈이 내릴지 또는 비가 내릴지 판정하기도 또한 쉽지 않은 현상이다.

한반도에서 발생한 폭설 현상은 여러 연구자들의 관심의 대상이었다. 전 등²⁾은 10년 동안의 강설자료를 이용하여 폭설빈도, 지역적 특성 등을 분석하였고, 김 등³⁾은 2005년 3월 5-6일 부산지역의 폭설은 한대기단(polar low)에 의해 동해상에서 발달과 상층의 한랭이류가 중요한 원인임을 밝혔고, 조 등⁴⁾은 한대 기단 내에 존재하는 강한 소용돌이도와 온난핵이 주요한 인자임을 밝혔으며, 허 등⁵⁾은 이 폭설의 발생 및 발달 원인은 polar low에 기인한 것임을 규명하였다. Fu 등⁶⁾은 동해상의 polar low의 발달과 상층 한기이류의 역할을 밝힌 바 있다. 안 등⁷⁾은 중규모 대기/해양 접합모형을 이용한 영동지역의 폭설 사례실험을 통하여 해수면을 통한 대기와 해양의 상호작용이 폭설을 잘 모사하였으며, 이와 이⁸⁾는 영동지역의 폭설시계 수치실험을 통하여 지형효과와 중요성을 강조하였다. Waldstreicher⁹⁾는 산악지역이 강수율을 높이고, 지역적인 상승효과를 유발하

여 강수의 효과를 높이는 역할을 한다고 하였다. 또한 Jean과 Session¹⁰⁾은 산악지역의 경사면의 강설에 대해 옳은 예보와 틀린 예보를 비교하여 현업화 연구를 하였다. 이와 이¹¹⁾는 영동지역의 폭설원인에 대해 강설 발생기구와 폭설요인에 대해 수치실험을 통하여 영동지역의 하층바람, 지형효과와 중관기압 배치의 지속성 등을 분석하였으며, 류 등^{12,13)}과 원 등¹⁴⁾ 및 Ryu 등¹⁵⁾은 호남폭설발생의 사례연구에서 서해상의 해수면 기온분포 및 남동의 난기유입과 대륙의 한기가 수렴하여 강한 불안정이 형성됨과 강설의 유무를 통계적으로 판단하였고, 정 등¹⁶⁾은 발생기구에 근거한 한반도 강설의 유형분류를 통하여 5 가지의 유형을 제시하고 시베리아 고기압의 확장시 동해안 지형성 강설이 영동지역의 폭설유형을 밝힌 바 있다. 열거한 연구들은 중부, 영동, 호남지방의 폭설에 대한 해석으로 영서에서 발달한 구름이 발달하면서 서쪽으로 확장하여 서울지역까지 내린 현상을 다룬 연구는 없었다. 한반도 북동쪽으로부터 계속 유입되는 편동풍에 의해 영동지역에 내린 폭설과는 별도로 영서지방에서 발달한 저기압순환이 서울지역까지 서쪽으로 확장하면서 이런 준폭설현상과 같은 중규모 현상의 발생에 대한 연구는 매우 중요하고 필요함에도 미흡한 실정이다. 또한, 중규모 폭설의 예측은 거의 불가능한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 국지분석시스템(KLAPS: Korea Local Analysis and Prediction System)에 포함되어 있는 구름 및 강수 산출 알고리즘과 온도분석장, 여러 역학적 수치분석자료를 활용하여 강설을 분석하고, 이의 예측가능성을 판별하는 체계를 파악하는 것이다. 중규모 강설현상을 원격탐사와 KLAPS 수치보조분석 자료로부터 강설의 예측가능성을 제시하는 것이다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 2008년 3월 4일 12시(03UTC)에서 서울지역에 나타난 폭설 사례 전후의 중관 규모의 polar low 및 중규모 상태의 시간적 변화를 살펴보기 위해 서울에서 관측된 적설량을 이용하였다. 또한 기상청의 예보분석시스템(FAS: Forecaster's Analysis System)을 이용하여 지상 및 상층일기도의 수치보조선도, MTSAT-1R의 적외 및 수증기 영상, 레이더

영상자료를 분석하였다.

일반적으로 초봄에는 기온과 관련된 빙결고도의 높이에 따라 강설인지 또는 강우인지가 결정되며, 이는 지상온도와도 밀접한 관련이 있어 강설량 또는 강수량의 판정에 더욱 어려움이 따른다. 더구나 강설량은 강우량에 비하여 약 10배까지의 체적 변화가 있기 때문에 강설량을 예측하기는 더욱 어렵고 한계가 있다. 강설은 강우와 달리 도로 교통의 흐름을 방해하고 눈의 무게로 인해 산업시설 등에 막대한 재해를 일으킬 수 있다.

영서지방의 저기압순환의 발생과 이동은 기상청의 KLAPS를 이용하여 3차원의 바람, 연직운동, 상당위, 기온과 와도장 등의 국지분석을 이용하여 서울 지역을 중심으로 동서연직단면도를 분석하였다. 대기의 상태를 입체적으로 조망하기 위해 실시간으로 가용한 관측 자료와 수치예측 자료를 사용해서 대기를 3차원적으로 분석하여 예보관에게 제공하도록 국립기상연구소에서는 기존에 개발해오던 국지분석시스템을 활용하여 3차원 KLAPS를 구축하고 현업화 하여 2006년 5월 15일부터 운영하고 있다. 이를 통해 매시간 5 km 해상도의 분석장을 예보관들에게 지원하고 있다¹⁾. 이때 KLAPS의 배경장은 연직 35층의 해상도를 갖는 MM5 모델 예측장을 사용하였다.

Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 현재 3차원분석시스템은 매시간 10분 이내에 분석과정이 완료되어 지원을 하기 때문에 매시 6분 이내에 관측되어 수집되어지는 관측자료를 활용하게 된다. 이때 활용되는

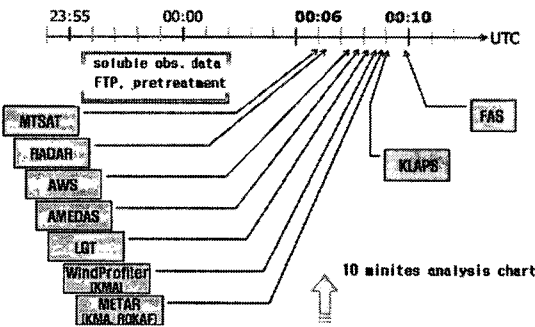


Fig. 1. The flow chart of 3-D KMA analysis and prediction system KLAPS procedure.

관측자료는 위성자료, 레이더자료, AWS자료, 일본 지상관측자료(AMEDAS), 낙뢰자료, 수직층풍장비자료, 항공기상관측자료이다. 15 km 격자 영역의 분석에는 분석유효시각보다 늦게 이루어지기 때문에 GTS, ACARS, 고층관측자료가 더 포함된다. 여러 종류의 관측으로부터 역학적 균형을 이루는 초기장을 생산하는 일련의 물리적 초기화 과정이 KLAPS에는 포함되어 있다¹⁷⁾.

3. 사례분석

3.1. 종관수치분석

겨울철에서 봄철의 변환기에 발생하는 강설 현상의 하나로 한반도에서는 2008년 3월 2일과 3일 저기압 통과 후 고기압의 장출이 진행되고 있었으며, 전날 전선을 동반한 저기압이 통과하여 동해 남쪽으로 통과하여 느리게 동진하고 있었다. 그러나 2008년 3월 4일 12시(03UTC)에 서울지역에 폭설이 내렸다. 이 사례의 전후의 종관 및 중규모 상태의 시간적 변화를 살펴보기 위하여 종관장 및 수치모델 보조 예보장을 분석하였다.

Fig. 2는 3월 4일 09시(00UTC)의 지상일기도(a)와 12시간 전 수치모델을 통한 예측지상일기도(b)이다. 이 일기도에 의하면, 지상분석일기도 상에서 서울 지역에 그렇게 많은 강설이 발생할 것으로 예상되는 정후가 특별히 없었고, 예상일기도 상에서도 영동지역과 영남 일부지역이 기압골의 후반부에 걸치면서 영향을 받아 약간의 강설이 예상되었을 뿐이었다.

Figs. 3과 4는 각각 12시간 전과 당일의 2008년 3월 03일 21시(12UTC)와 3월 4일 9시(00UTC)의 예보장이다. 기압배치도 대신 수치예보모델에서 산출된 수치보조선도로부터 중규모 이하 또는 임의적으로 발생하는 폭설 가능성을 직접 살펴보는 것이 효과적이다. 이것은 영동지역을 제외하고 서울지역에서 나타난 폭설은 중규모 현상이기 때문에 종관적 분석은 용이하지 않은 까닭이다.

전반적으로 3월 3일은 전선을 동반한 저기압이 통과하며 폭설을 기록하였으며, 3월 4일은 맑은 날씨와 영동지방에 폭설이 내리고 있었다. 이때 서울은 강설예측 대신에 맑고 구름 조금만 예측된 상태임을 예보하였다. 동시에 영동지역에서는 폭설이

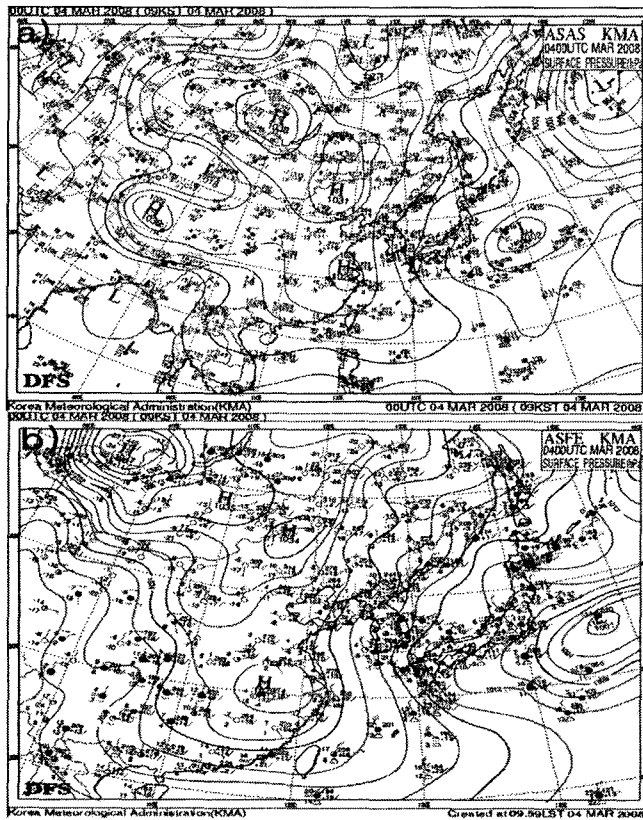


Fig. 2. The weather chart in 00UTC Mar. 4, 2008.

a) synoptic weather chart, b) numerical weather prediction chart.

내리고 있는 상태로 계속 내릴 것으로 예보하였다. 강설 현상이 발생한 2008년 3월 03일 21시(12UTC) 인 12시간 전 수치모델 보조예측장에서 하층에 어떤 불안정이나 강수 징후가 전체적으로 볼 때 없었다. 단지 12시간 전 예측장에서 700 hPa에서 중부 지방에 약하지만 양의 상승운동 영역이 존재하고 있었다. 종관일기도의 분석장과 12시간 전 수치모델 지상예상도에서 본 것과 다르게 수치예보모델에서 산출된 수치보조분석도와 예상도로부터 중규모 이하 또는 임의적으로 발생하는 폭설 가능성을 직접 살펴보는 것이 효과적이다. 이것은 영동지역을 제외하고 서울지역에서 나타난 폭설은 중규모 현상이기 때문에 종관적 분석은 용이하지 않은 가답이다. 이 현상은 700 hPa 고도 이하에서 발생한 현상이기 때문에 중층 이하의 고도에서 변화를 살펴봐왔다.

Figs. 3a와 4a 및 Figs. 3b와 4b는 24시간동안 500 hPa 고도변화장과 850 hPa의 온도변화장, Figs. 2c와 3c 및 Figs. 2d와 3d는 700 hPa와 500 hPa의 연속속도와 와도장, 그리고 Figs. 3e와 4e 및 Figs. 3f와 4f는 850 hPa와 300 hPa의 수렴과 등풍속장(> 25 kts)과 발산과 등풍속장(>50 kts)을 나타내고 있다. 여기서 12시간 전인 3월 03일 21시(12UTC)에 예측한 보조선도 중에서 Figs. 3a와 3c에서 보여 주는 바와 같이 500 hPa의 고도변화 하강과 850 hPa 고도에서 온도의 2차 약한 하강이 중부를 제외하고 북한 동부지역 일부와 남해안에 위치하고 있어 약한 저압성 변화는 예상되고 있었지만, 종관규모로 볼 때 서울에 강한 강설이 내릴 것으로 예상하는 것은 어려웠다. 마찬가지로 당일 4월 04일 09시(00UTC) 수치보조 분석도인 Figs. 3a와 3b에서 500 hPa의 고도변화 하강과 850 hPa 고도에서 온도의 2차 약한 하강이 중부

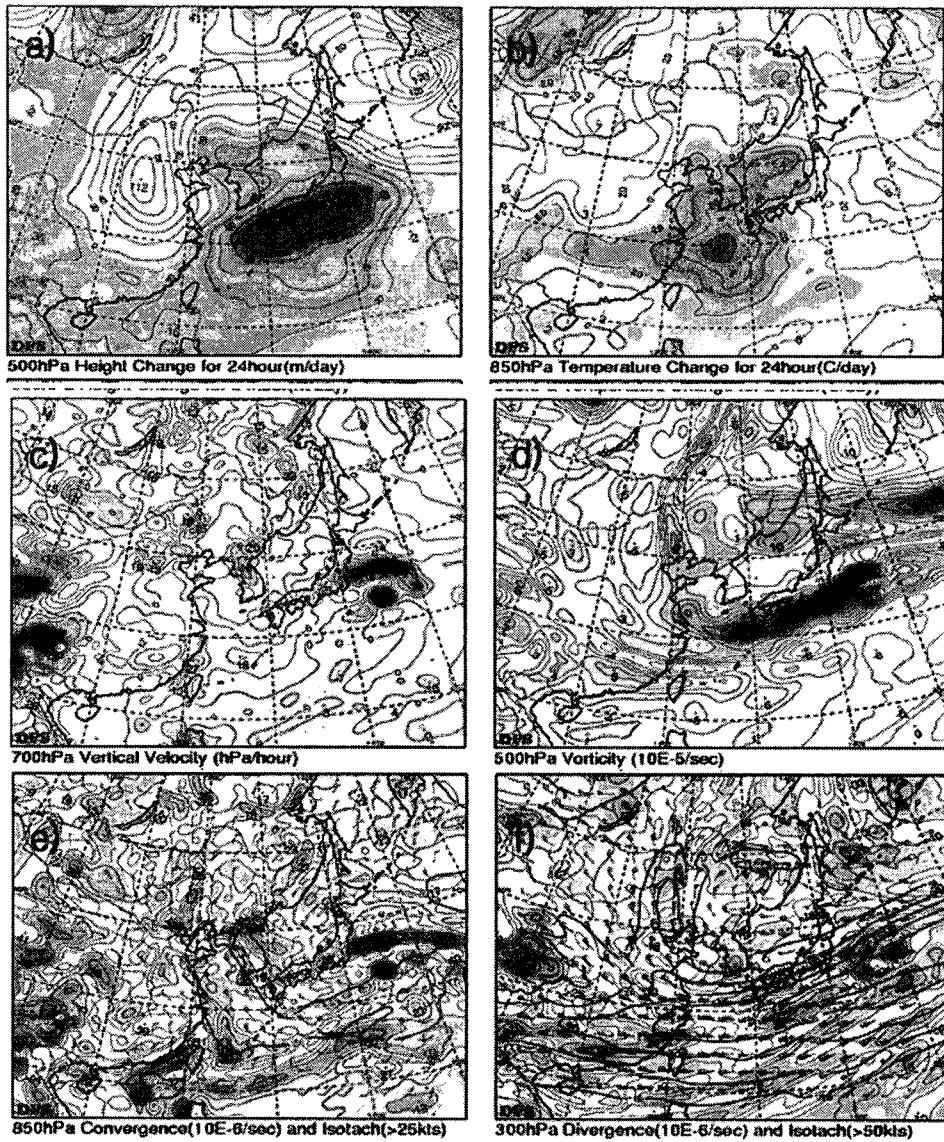


Fig. 3. Numerical auxiliary weather charts for Mar. 03, 12UTC, 2008; a) 500 hPa height change for 24hrs(m), b) 850 hPa temperature change for 24hrs(°C), c) 700 hPa vertical velocity(hPa), d) 500 hPa vorticity($10E-5/sec$), e) 850 hPa convergence($10E-6/sec$) and isotach(> 25kts), and f) 300 hPa divergence ($10E-6/sec$) and isotach(> 50kts).

를 포함하여 위치하고 있었다더라도 이미 기압골이 빠지는 상황에서 서울지역에 강 한강설의 예상은 어려웠을 것으로 판단된다. Fig. 4에서는 3월 4일 09시(00UTC)의 하층 예보장에 대해서 강수의 뚜렷한 징후는 없었으며, 단지 850 hPa에서 수증기속이 약간 북동쪽으로 치우쳐 있었다. 500 hPa에서 고도변화의 2차 중심이 중부지역에 걸쳐있는 것이 보였지

만 12시간 전과 뚜렷한 차이가 없어 강설을 예측할 수 없었다.

3.2. 위성 및 레이더 영상 분석

Fig. 5는 한반도를 덮고 있는 구름대를 MTSAT -1의 적외선 창역과 수증기 영상이다. 이 구름대는 영동 쪽에서 서쪽으로 남북으로 길게 뻗어있으며, 중

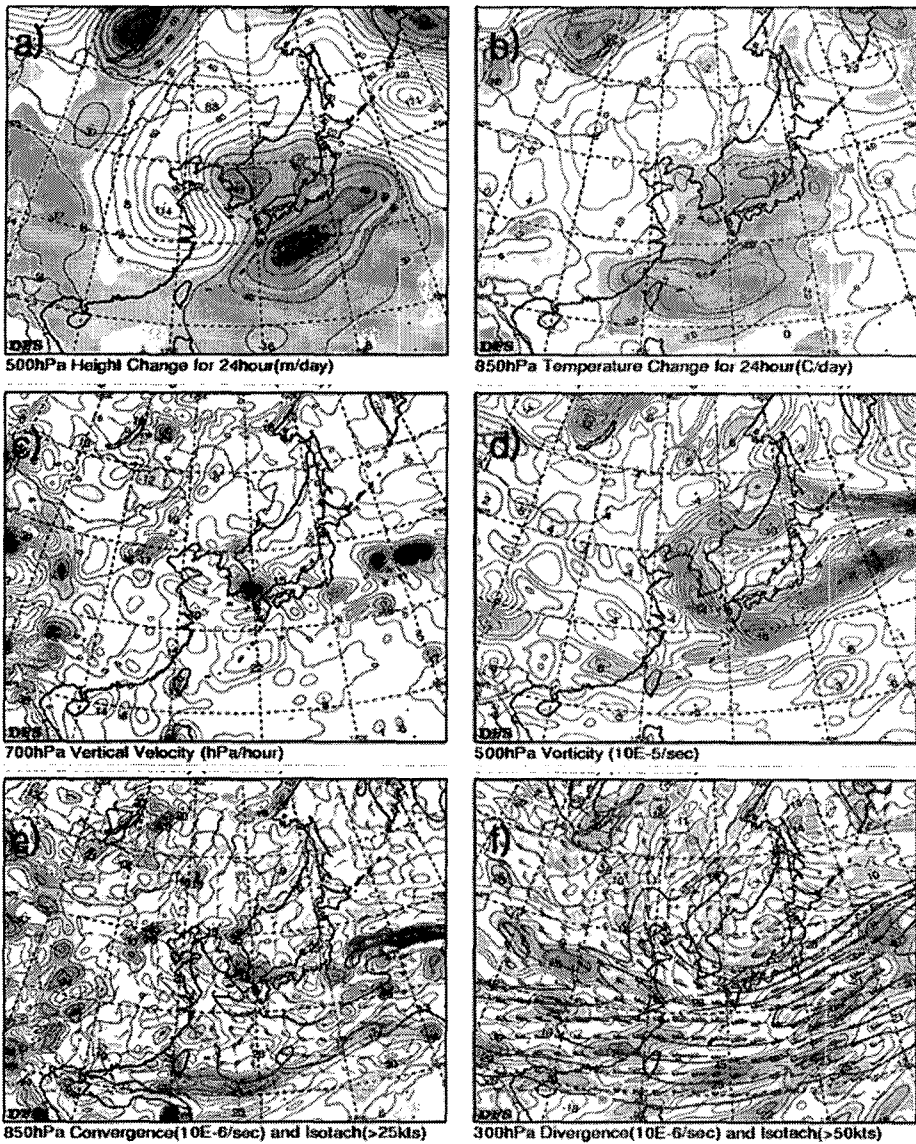


Fig. 4. The same as Fig. 3 except for Mar. 04, 00UTC, 2008.

부지역에서는 약간 서쪽으로 편향되어 있다. Fig. 5a에서 영동지역에는 당일 아침 8시(3일 23UTC)경 수증기 영상에서 구름의 높이는 최고 700 hPa 이상 높지 않으며, 레이더 에코 합성영상에서 영동지역과 남부 일부지역을 제외하고 뚜렷한 강수는 없었다. 그러나 Fig. 5b에서 10시(01UTC)를 지나면서 구름대는 서쪽으로 더욱 확장되어 서울까지 폭넓게 하층운으로 덮혔으며, 강설이 내린 12시(03UTC)경에

는 서울지역까지 저압성 순환의 구름대가 강한 레이더 에코와 동시에 일치하며 덮혀 있었다(Fig. 5c). 수증기 영상에서 낮은 구름대가 서쪽으로 유입되었음이 일부 보이고 있었으나 이 구름의 층고는 대부분 맑은 구역으로 700 hPa 이하의 층으로 생각된다. 영동지역의 구름대는 700 hPa 이상의 대류성 구름대가 대부분으로 폭설을 기록하고 있었다. Fig. 6은 위성영상에 상응한 레이더 에코의 합성도이다. 영

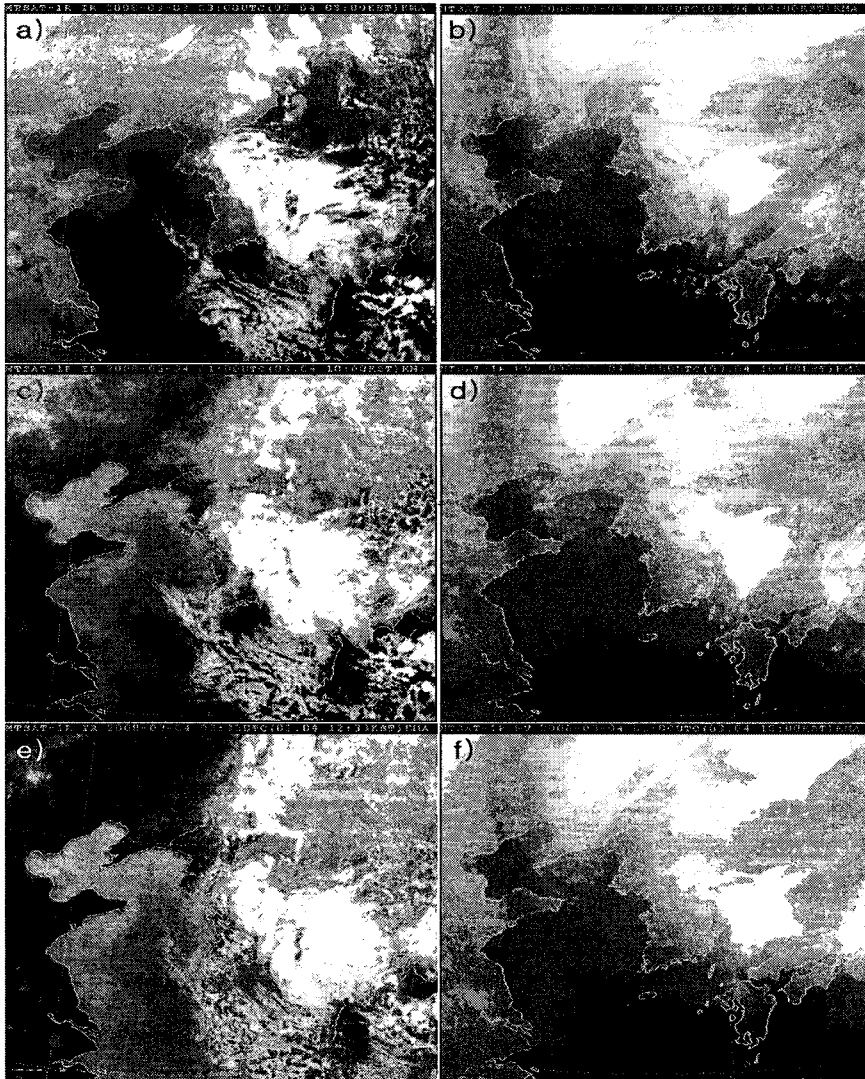


Fig. 5. MTSAT-IR IR for a) Mar. 03, 23UTC, c) Mar. 04, 01UTC, and e) Mar. 04, 03:33UTC, 2008, but WV for and WV images b) Mar. 03, 23UTC, d) Mar. 04, 01UTC, and f) Mar. 04, 03UTC, 2008, respectively.

동 일부 지역과 강원 영서지역을 포함한 영남지역까지 길게 밴드형 에코가 덮혀 있었으며, 강설을 보이고 있었다(Fig. 6a). 강한 밴드형 에코들은 점차 약해지다가(Fig. 6b) 영서지역에 위치해 있던 밴드형 에코들이 서쪽으로 이동하며 동서울지역에서 갑자기 선형 에코로 바뀌어 많은 강설이 나타났다(Fig. 6c). 이런 변화는 위성과 레이더 영상에서 구름밴드의 서쪽으로 이동과 강설에코의 변화를 연속적으로 짧은 시간에 비교하여 알 수 있었다.

3.3. 3차원입체 관측 분석장

기상청에서는 다양한 관측자료를 활용하는 국지 분석시스템을 통해 매시간 분석장을 생산하여 제공하고 있다. 그리고 이로부터 매시간 수치분석 보조 자료를 생산하여 활용하였다. 서울을 중심으로 동서로 관통하여 도식화한 분석장을 서울의 최서단을 시작점(37.6N, 125.6E)으로 동쪽으로 250 km 떨어진 끝점(37.6N, 129.2E)까지 묘화하였다. Figs. 7, 8과 9는 Figs. 5와 6에 대응한 서울지역의 강설발생

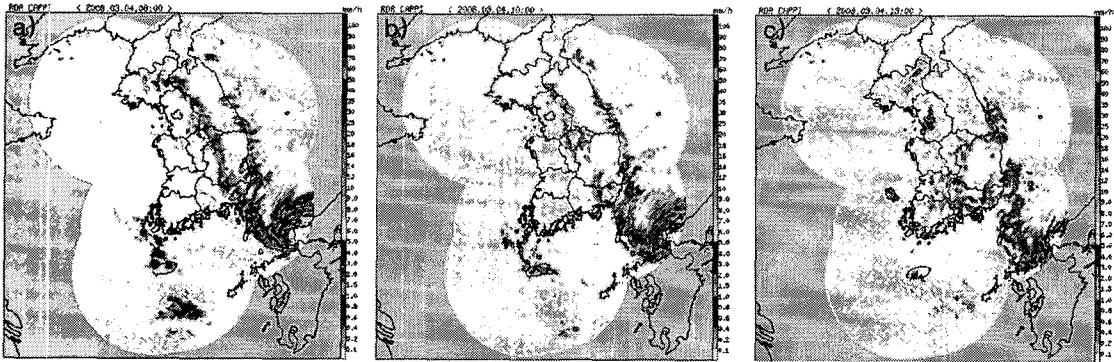


Fig. 6. Radar composite images for a) Mar. 03, 23UTC, b) Mar. 04, 01UTC, and c) Mar. 04, 03UTC, 2008, respectively.

약 3시간 전에 분석된 상당온위와 바람, 연직운동과 발산, 수증기속 발산과 상대와도의 연직단면도를 FAS에서 묘화한 것이다. 상당온위 θ_e 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\theta_e = T_e \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_d}{\gamma_p}} \approx \left(T + \frac{L_v r}{c_p} \right) \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R_d}{\gamma_p}}$$

여기서 T_e 는 상당온도, T 는 기압고도 p 에서 대기 온도, p 는 그 지점에서의 압력(p_0 와 같은단위), p_0 는 표준기압(1000 hPa), R_d 는 대기가스 상수(287J/(kg·K)), c_p 는 정압비열(1004 J/(kg·K)), L_v 는 증발잠열(2400kJ/kg {at 25 °C} to 2600kJ/kg {at -40 °C}), r 은 대기 중의 수증기 혼합비이다. Fig. 7은 서울지역의 강설발생 약 4시간 전인 3월 4일 0800LST에 분석된 상당온위와 바람장의 연직단면도를 묘화한 것이다. Fig. 7a는 서울지역의 강설발생 약 4시간 전부터 강설 발생시간까지 분석된 KLPAS 매시간 분석된 온도, 상당온위 및 연직 바람 분석장이다. 동쪽 지역에서 하층 대류권에는 북동풍이 계속 유입되고 있으며, 700 hPa 고도 위에서는 북서풍이 우세하고, 상당온위가 고도에 따라 증가하므로 아주 불안정한 것을 보여준다. 동쪽의 700 hPa 고도는 강한 바람쉬어 지역으로 불안정이 급속히 증가하고 있다. 이 경우 태백산맥의 풍하측인 영서지역에서 저기압 생성을 위한 강한 저압성 순환이 형성되고 있음을 보여준다¹⁸⁾. 또한 상당온위 204K 선은 서쪽에 비해 동쪽이 급속히 하강하여 불안정함을 나타내고 있으며, 이 고도 아래에서 저압성 순환에 의한 대류성 구름이 형성되고 있다. 대류성 구름 발달은 수증기 영상 분

석에서 언급한 것과 같이 700 hPa 고도 이하에서 형성되고 있다는 것과 동일함을 나타낸다. 동쪽 지역인 영서지방에서 지속적인 강설현상을 보여주었다. 또한 상당온위는 하층으로 갈수록 증가하고, 서쪽은 지면 부근에서 200K 선으로 둘러싸여 있는 분포를 보여주고 있다. 따라서 동쪽의 안정도는 불안정하고, 상대적으로 서쪽인 서울부근은 자색으로 표시된 바와 같이 안정한 상태임을 보여주고 있었다. 그러나 서울지역에서 900 hPa 고도 이상은 북서풍계, 그 이하의 층에서는 북동풍계가 약하게 불고 있어, 서쪽인 서울 지역에서 지면 부근은 불안정화하려는 경향을 유추할 수 있다. 2시간 후의 KLAPS 분석장인 Fig. 7b에서, 동쪽의 북동풍계 바람은 650 hPa 고도까지 우세하게 불고 있으나, 그 이하의 고도에서는 북동풍 또는 북서풍계로 변화하며 서쪽으로 확장하고 있다. 서울의 동쪽지역의 하층에서 상당온위는 하층으로 더욱 하강하며 증가하여 점차 옅은 하늘색으로 변하여 불안정화를 지속하고 있으며, 동쪽의 저압성 순환은 더욱 서쪽으로 확장되고 있다. Fig. 7c에서 서울에서 폭설이 시작하였던 12시(03UTC)에 동쪽의 저압성순환은 4시간 전보다 저기압중심은 상향 되며 서쪽으로 그 세력을 강화하고 있다. 상당온위는 지속적으로 하강하며 증가하며 불안정화를 지속시키고 있다. 서울지역의 700 hPa 고도 이하에서는 북서풍계, 이 고도 이상에서는 북동풍계의 순환이 서쪽으로 월등히 확장되고 있다. 이것은 서울 동쪽 부근에 국지적으로 영서지방의 저기압 순환과 별도의 다른 저압성 순환이 하층에 중심을 두면서 강설을 유지 시킨 것이다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일하게 분석된 연직운동(오메가)은 흰색과 주황색으로 표시되고, 연직순환과 발산(초록색 선)의 연직단면도 분석장이다. Fig. 8a에서 동쪽인 영서지방에서 700 hPa 고도의 풍하층에

서 중규모 이하의 상승운동(수렴)과 서울 서쪽으로 700 hPa 고도 이상에서 고압대가 위치한 반면, 지표 부근에서 약한 상승운동과 수렴현상을 보여준다. 저압성 순환은 700 hPa 고도 이하에서 영서지방에

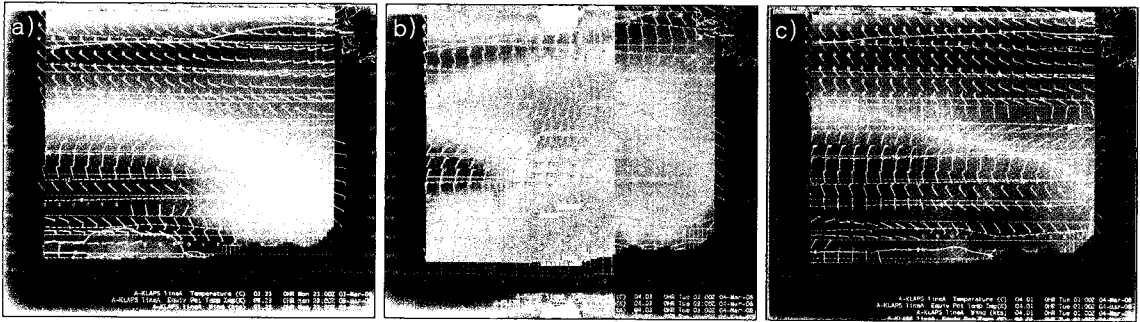


Fig. 7. Cross sections of temperature(blue dotted line ; $^{\circ}\text{C}$), Equivalent potential temperature (green solid line ; K) and wind(brown bar) for a) Mar. 03, 23UTC, b) Mar. 04, 01UTC, and c) Mar. 04, 03UTC, 2008 over west-east area centered Seoul, respectively. Abscissa means the distance(km) from the origin(37.6N, 125.6E) to the end(250 km) and ordinate means the height (hPa). Blue and purple colors mean the unstable and stable conditions, respectively.

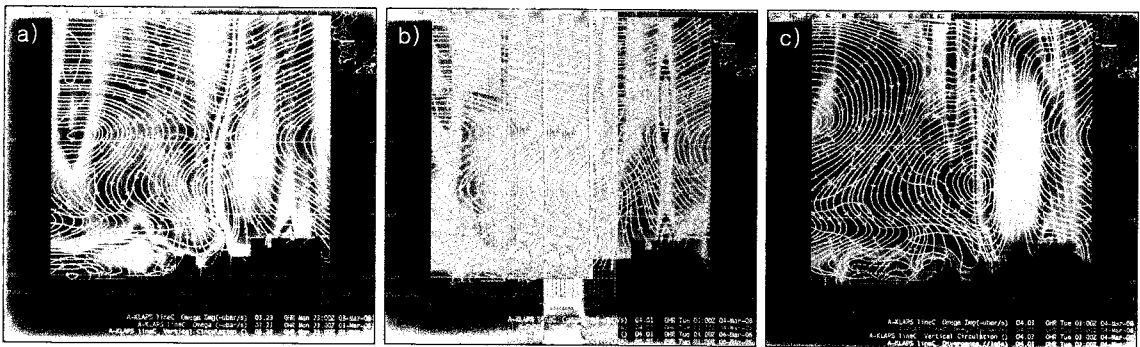


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for Cross sections of vertical circulation(brown lines), and divergence (green lines; $/1\text{e}5\text{s}$). Brown and purple colors mean rising and sinking motions, respectively.

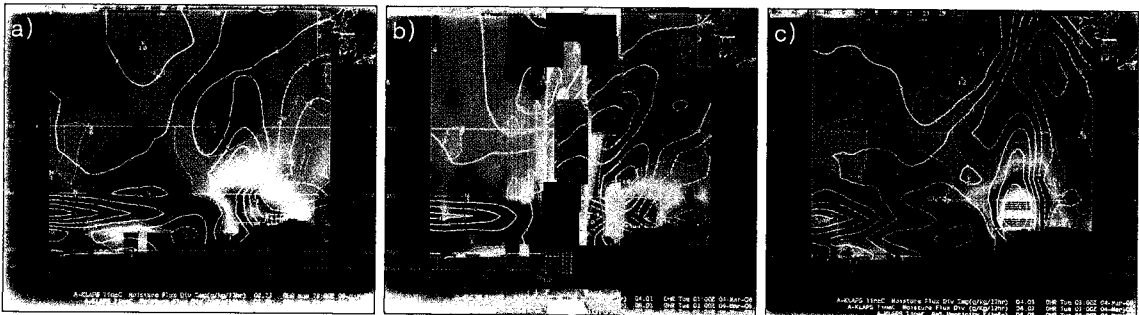


Fig. 9. Same as Fig. 7 except for Cross sections of moisture flux divergence($\text{g}/\text{kg}/12\text{hr}$), relative vorticity($/1\text{e}5\text{s}$). White and black colors mean wet and dry conditions, respectively.

위치하고 있으며, 상층에 양의 발산역과 하층의 수렴역이 위치하여 뚜렷한 중규모 이상의 상승기류(음의 발산)와 발산이 존재하는 원활한 대류활동과 연직순환의 형태를 보여주고 있다. Fig. 7에서 보여주는 운동과 유사하게, 동쪽은 전형적인 중규모 이상의 상승과 발산, 하강 및 발산과 수렴운동이 활발하지만, 상대적으로 서쪽 지역은 활동이 미미하지만 지상 부근에서 약한 수렴의 발생하는 것이 눈에 띈다. Fig. 8b에서 동쪽의 중규모 이상의 상승과 하강운동 및 수렴과 발산순환은 좀 더 서쪽으로 확대되었고, 서쪽의 하층에서 수렴발산은 서울 동쪽으로 이동하였다. Fig. 8c에서 동쪽의 중규모 이상의 상승과 하강운동 및 수렴과 발산순환은 더욱 서쪽으로 확장하여 확대되었으며, 서울 동쪽으로 이동하여 하층에서 수렴발산은 강화되었고, 강설을 내린 소규모 상승운동(수렴)은 증가되었다.

Fig. 9는 Figs. 7 및 8과 동일하게 분석된 수증기속 발산과 상대와도의 연직단면도를 묘화한 것이다. Fig. 9a에서 동쪽의 풍하층에는 동쪽에 음의 상대와도, 서쪽에 양의 와도가 존재하므로 이 시스템의 발달을 유지시키고 있다. 영서지방에서 하층에서 수증기속 수렴이 왕성하여 저압성 순환은 더욱 활발하고, 수증기의 공급도 지속되고 있다. 서쪽의 서울 부근에서 지상에는 900 hPa 고도의 하층에 약한 수증기속 수렴이 존재하고 있으며, 서쪽 상층에 양의 와도가 존재하고 있어 불안정화 하려는 징후가 보인다. Fig. 9b에서 2시간 뒤 동쪽의 수증기속 수렴의 양쪽에 활성화된 양의와도와 음의 와도가 위치하여 이 시스템이 계속 유지되고 있음을 알 수 있다. 서쪽의 약한 수증기속 수렴인 지역에 양의 와도가 활성을 띠고 있어 저압성 순환의 발생에 좋은 징후를 보여주고 있다. Fig. 9c에서 서울에 강설을 내린 시각에 동쪽의 수증기속 수렴은 더욱 강화되어 수증기의 공급이 더욱 원활해지고 있으며, 양의 와도가 위 지역전체를 지배하고 있어 이 시스템의 강화를 알 수 있다. 상대적으로 약했던 서쪽의 하층의 약한 수증기속 수렴도 마찬가지로 강화된 양의 와도에 둘러 쌓여있어 불안정으로 인한 하층 대류시스템을 유지시키고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

2008년 3월 4일 (03UTC; 112KST)에 서울지역에

나타난 폭설 사례 전후의 종관 및 중규모 상태의 시간적 변화를 살펴보기 위하여 12시간 전과 강설현상 당일 아침에 대해 계산된 2008년 3월 03일 21시(12UTC)와 3월 4일 09시(00UTC)의 지역규모모델의 예보장과 KLAPS로 도출한 서울을 중심으로 동서로 관통하여 도식화한 분석장으로 서울의 최서단을 시작점(37.6N, 125.6E)으로 동쪽으로 250 km 떨어진 끝점(37.6N, 129.2E)까지 묘화한 서울지역 강설발생 약 4시간 전, 2시간 전, 강설시작 시간의 분석된 상당온위와 바람, 연직운동과 발산, 수증기속 발산과 상대와도의 연직단면도를 분석하였다.

서울의 강설 시작 12시간 전과 당일 아침의 수치보조선도로부터 폭설가능성을 직접 살펴보면, 12시간 전 수치모델 보조예측장에서 하층에 어떤 불안정이나 강수 징후가 없었다. 12시간 전 예측장에서 700 hPa에서 중부지방에 양의 상승운동 영역이 존재하고 있으며, 3월 4일 아침 하층 예보장에 대해서 강수의 뚜렷한 징후는 없었다. 그리고 850 hPa에서 습윤속이 약간 북동쪽으로 치우쳐 있으나, 종관 기상장의 분석과 예측장에서 서울의 강설의 예측은 불가능하였다.

위성 영상과 레이더 영상에 의한 원격탐사 자료에 의한 강설의 단시간 분석과 예측도 어려웠으나, 서울 동쪽에서 강설의 시작 전과 시작 시의 위성영상의 구름의 형태와 이동경로 및 레이더 에코의 위치와 모양으로 폭설의 가능성을 파악할 수 있었다. 서울의 폭설 발생 전과 후의 상당온위와 바람, 연직운동과 발산, 수증기속 발산과 상대와도의 연직단면도의 변화를 분석한 결과, 폭설에 대한 단시간 예측성을 유추할 수 있음을 알 수 있었다. 동쪽의 700 hPa 고도는 강한 바람쉬어지역으로 불안정이 급속히 증가하고 있으며, 이 경우 태백산맥의 풍하층인 영서지역에서 강한 저압성순환이 형성되고 있었다. 또한 상당온위의 284 K선이 700 hPa에서 약 900 hPa까지 서쪽에 비해 동쪽이 급속히 하강하여 불안정함을 보여주고 있으며, 이 700 hPa 고도 아래에서 저압성 순환에 의한 대류성 구름이 형성되고 있다. 동쪽의 중규모 이상의 연직상승과 하강운동 및 수렴과 발산순환은 더욱 서쪽으로 확장·확대되었으며, 서울 동쪽으로 이동한 하층에서 또 다른 저압성 순환과 소규모 상승운동(수렴)이 증가하여 수렴발산은 강화되어 강설을 내렸다. 따라서 위성과 레이

더 영상자료의 전개과정과 상당운위와 바람, 연직 운동과 발산, 수증기속 발산과 상대와도의 3차원 입체 분석장을 통해 사전에 강설예측을 위한 판별 또는 예측성에 대해 초단기(1~3시간 이내) 예측은 가능할 것이다. 향후 더 많은 사례를 분석·평가하고, KLAPS의 중요한 강수판별 기상요소들과 연계하여 위성영상의 개념을 확립하면 예측하기 어려운 단시간 집중호우나 폭설의 예측가능성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 기상청 R&D사업인 기상위성운영기반 구축사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) 기상연구소, 2006, 단시간 강수예측능력 향상 연구 (III), 247pp.
- 2) 전종갑, 이동규, 이현아, 1994, 우리나라에서 발생한 폭설에 관한 연구, 한국기상학회지, 30(1), 97-117.
- 3) 김도우, 한상은, 임병환, 변희룡, 2005, Polar low에 의한 2005년 3월 5-6일 부산 지역 폭설, 한국기상학회 춘계학술대회 Proceedings, 한국기상학회, 364-365.
- 4) 조경미, 백은혁, 임규호, 2005, 2005년 3월 5-6일 부산 폭설사례를 통한 Polar Low의 발달 기구 모의, 한국기상학회 춘계학술대회 Proceedings, 한국기상학회, 66-67.
- 5) 허기영, 하경자, 신선희, 2005, 2005년 3월 5일에 나타난 부산지역 폭설의 발달기구에 대한 연구, 한국기상학회지, 41(4), 547-556.
- 6) Fu G. et al., 2004, A Polar Low over the Japan sea on 21 January 1997, part I : Observational Analysis. Mon. Wea. Rev., vol. 132, 1537-1551.
- 7) 안중배, 오재호, 조익현, 1998, 중규모 대기/해양 결합모형을 이용한 한반도 폭설사례 실험, 한국기상학회지, 34(4), 652-663.
- 8) 이재규, 이재성, 2003, 동풍계열의 기류와 관련된 영동 폭설사례에 대한 수치모의, 한국기상학회지, 39(4), 475-490.
- 9) Waldstreicher J. S., 2002, A foot of snow from a 3000-foot cloud: The ocean-effect snowstorm of 14 January 1999, Bull. Amer. Meteor. Soc., Amer. Meteor. Soc., 83, 19-22.
- 10) St. Jean D. and P. A. Session, 2004, Characteristics of Upslope Snowfall Events in Northern New York State and Northern Vermont: Diagnostics and Model Simulations of Several Northwest-Flow Cases, Preprints, 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, 18.4.
- 11) 이훈, 이태영, 1994, 영동지역의 폭설 요인, 한국기상학회지, 30(2), 197-218.
- 12) 류찬수, 이순환, 2006, 서해상의 해수면 기온 분포에 따른 폭설 강도변화에 관한 수치 연구, 한국지구과학회 추계학술대회 Proceedings, 한국지구과학회, 229-231.
- 13) 류찬수, 이순환, 박철홍, 2007, 2005년 12월에 발생한 호남폭설의 발달 환경에 관한 연구, 한국환경과학회지, 16(12), 1439-1449.
- 14) 원효성, 이순환, 류찬수, 2005, 호남지방 고층관측 자료동화가 수치기상예보에 미치는 영향에 관한 연구, 한국지구과학회지, 26(1), 66-77.
- 15) Ryu C. S., K. T. Shon and J. H. Lee, 2005, Statistical prediction of occurrence of heavy snow in Honam area, Korea, ISAM5 Proceeding, ISAM5 Organizing Committee, 63-65.
- 16) 정성훈, 변건영, 이태영, 2006, 발생기구에 따른 한반도 강설의 유형분류, 한국기상학회, 대기, 16(1), 33-48.
- 17) Shaw B. L., J. A. McGinley and P. Schultz, 2001, Explicit initialization of clouds and precipitation in mesoscale forecast models, Preprints, 14th Conf. on Numerical Weather Prediction, Ft. Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc.
- 18) Howard B. B., 1993, Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes, Vol. II. New York Oxford University Press, 594pp.