극저기압에 의한 한반도 강설 발달기구 분석

김진연¹ · 민기홍^{2,*}

¹기상청 국가태풍센터, 699-942, 제주특별자치도 서귀포시 남원읍 서성로 810-2

²경북대학교 대기원격탐사연구소, 702-701, 대구광역시 북구 대학로 80

Analysis of Snowfall Development Mechanism over the Korean Peninsula due to Polar Low

Jinyeon Kim¹ and Ki-Hong Min^{2,*}

¹National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju 699-942, Korea

²Center for Atmospheric Remote Sensing, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Abstract: The synoptic, thermodynamic, and dynamic characteristics of a heavy snowfall event that occurred in Seoul metropolitan area on 27 to 28 December 2010 was investigated. During this period there was a distinctive case that was identified as a polar low. We analyzed surface and upper level weather charts, snowfall amount, sea surface temperature, satellite imagery, sounding, and the National Center for Environmental Prediction global $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data. The polar low developed in an area where there was strong baroclinicity in the lower level aided by strong conditional instability due to 925 hPa warm air advection and 700 hPa cold air advection. The development mechanism of polar low is due, in part, to the tropopause folding, which advected stratospheric air increasing potential vorticity in mid-level and inducing cyclonic vorticity and convergence in low-level. Eventually clouds developed and there were snowfall total of 10 cm in Seoul metropolitan area and as much as 20 cm in southern parts of Korea. During the snowfall development, there was a -45°C cold core at 500 hPa and shortwave maintained $3\text{--}5^\circ$ separation with surface trough, which favored the development of polar low located in the warm sector and cyclonic advection area. The height of the dynamical tropopause lowered to 700 hPa during the peak development and increase in potential vorticity allowed strong vertical motion to occur. Overall, there was a close relationship between the development of snowfall and tropopause undulation. The heaviest snowfall occurred east of the tropopause folding where strong cyclonic vorticity, vertical motion, and moisture advection all coincided while the polar low was passing through the Korean peninsula.

Keywords: polar low, snowfall, tropopause folding, potential vorticity, baroclinicity

요약: 본 연구에서는 2010년 12월 27일부터 28일까지 서울을 포함한 수도권 지역에 많은 강설을 일으킨 사례의 종관적, 열역학적 및 역학적 특징을 조사하였다. 이 사례는 극저기압으로 분류할 수 있는 특성을 지녔다. 분석에 사용된 자료는 지상 및 상층 일기도, 강설량, 해수면온도, 위성사진, 연직프로파일 및 미국 국립환경예측센터의 전구 $1^\circ \times 1^\circ$ 재분석자료 등이다. 극저기압은 대기 하층에서 양의 경압성이 강하게 나타나며 925 hPa에 온난이류가, 700 hPa에 한랭이류가 있어 조건부 불안정층이 뚜렷하게 보이는 곳에서 형성되는 것으로 사료된다. 극저기압의 발달기구는 대류권계면 접힘에 의한 성층권 공기의 유입과 그에 따른 위치 소용돌이도의 증가로 하층에 수렴과 저기압성 순환의 유발에 기인한다. 이는 눈구름의 발달로 이어져 서울 지역에는 10 cm, 남부지방에는 최고 20 cm까지 적설을 보였다. 강설의 발달기간

*Corresponding author: kmin@knu.ac.kr

Tel: +82-53-950-7334

Fax: +82-53-950-6359

동안 상층 500 hPa에는 -45° 의 한랭핵이 존재하였고 단파골과 지상 기압골간의 위상차도 $3-5^{\circ}$ 를 이루어 극저기압이 온난역의 저기압성 소용돌이도 이류 지역에서 발달할 수 있었다. 발달의 최성기에는 역학적 대류권계면이 700 hPa까지 하강하였고 위치소용돌이도의 증가로 상승기류도 강화되었다. 전반적으로 강설의 발생과 대류권계면의 파상운동과는 깊은 관련을 보였다. 극저기압이 한반도를 통과하는 동안 대류권계면이 하강하는 지점의 동쪽에 소용돌이도와 상승기류가 강화되었고 동시에 많은 습기가 이루어지는 곳에서 강설량도 최대로 나타났다.

주요어: 극저기압, 강설, 대류권계면 접합, 위치 소용돌이도, 경압성

서 론

2010년 겨울철(2010년 12월-2011년 2월)은 다양한 종관 기상학적인 원인으로 우리나라에 눈이 많이 내린 해이다. 겨울철에 발생하는 강설은 그 양이 적어도 많은 문제를 일으키기 때문에 우리나라 기상청에서는 기상특보 발표기준에 따라 5 cm 이상의 신적설이 예상될 경우 대설 주의보를, 20 cm 이상(산지에선 30 cm) 예상될 경우 대설 경보를 발령한다. 대설 특보가 내릴 정도로 많은 강설이 발생하는 경우 눈의 무게를 이기지 못하여 노후 주택의 지붕이나 축사, 비닐하우스 등이 무너지거나 눈으로 인해 도로가 막혀 고립되는 등의 많은 재산상 피해가 발생한다. 또한 도로에서는 결빙으로 인해 큰 사고가 나는 경우가 많다. 적은 양의 눈이라도 강설이 많이 발생하지 않는 지역에서라면 대처가 미흡하여 큰 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 강설 발달 기구에 관한 연구는 매우 중요하다.

기상청(KMA, 2011)의 대설개념모델에 의하면 우리나라에서 발생하는 강설은 그 기압배치에 의해 1) 한대제트 북쪽의 찬 기단 내에서 중국 중부내륙에서 발생한 저기압이 서해상을 지나 우리나라 내륙으로 통과하는 한랭종관저기압형, 2) 가장 차가운 극공기를 수반한 중규모저기압에 의한 극저기압형, 3) 차가운 기단 내에서 더 차가운 공기의 파동에 의해 발생하는 중규모 저기압이 중부이북지방을 지나는 발해만 저기압형, 4) 한대제트 북쪽의 차가운 기단내에서 시베리아고기압이 확장할 때 해기차에 의해 만들어진 눈구름이 충남서해안 및 전라남북도에 대설을 발생시키는 서해안형, 5) 한대제트 남쪽의 따뜻한 기단내에서 중국내륙에서 발생한 저기압이 남해상으로 지날 때 저기압 중심의 북쪽에서 강설이 나타나는 온난종관저기압형의 5가지 형태로 분류할 수 있다.

극저기압은 강한 경압 불안정 영역에서 상층의 한기가 유입되는 곳에서 형성되는 중규모 저기압이다

(Park and Lee, 2005; Kim et al., 2010). 극저기압은 겨울철 대서양과 태평양에서 각각 북위 60도, 북위 40도 부근에서 주로 발생하며 극저기압의 수명은 16-36시간 정도이다(Reed, 1979). Fu et al. (2004)은 극저기압의 크기는 200-1000 km 정도의 중규모 현상으로서 한랭 전선 후면에서 발생하며 종종 대류운이나 콤팩트 구름과 함께 나타난다고 하였다. Lee and Park (1998)은 극저기압의 공통된 특징으로 한기가 유입해오는 지역에서 형성되며 강한 하층 경압성과 대류권 하부에서 조건부 불안정 등을 제시하였다. 극저기압은 주로 고위도 지방에서 발생하지만 겨울철 한기의 남하에 의해 경압지역의 위치 변동으로 유럽의 지중해 및 우리나라의 동해에서도 발생한다고 보고된 바 있다(Fu et al., 2004; Lee and Park, 1998).

극저기압의 발달기구에 대한 외국의 연구들을 살펴보면, Reed and Duncan (1987)은 극저기압이 경압불안정이면서 정적 안정도가 낮은 곳에서 형성된다고 하였다. Rasmussen (1979)은 저기압의 발달에 있어서 제2종의 조건부 불안정도(conditional instability of the second kind; CISK)가 중요한 역할을 하며 이는 극저기압에서도 적용됨을 밝혔다. CISK는 양의 되먹임 메커니즘으로 대류계를 계속 발달시키는 이론이다. 초기의 요란이 마찰로 인해 공기가 수렴하면서 상승기류가 발생하게 되는데, 그에 따라 수증기가 응결하게 되며 잠열이 방출된다. 잠열은 대기의 온도를 상승시키고 대기는 더욱 상승하고 팽창하게 되어 지상의 기압을 계속 감소시키게 된다. Yanase et al. (2004)은 수렴에 의한 잠열은 극저기압을 빠르게 발달시키는 데 중요한 역할을 한다고 주장하였다. Businger and Baik (1991)에 따르면 극저기압은 상층 위치소용돌이도와 하층 경압성의 상호작용을 통해 발생한다고 하였으며, Grønås and Kvamstø (1995)는 수치실험결과 극저기압 서쪽에 성층권 공기의 유입이 발생함을 보였다. 위치소용돌이도가 2 PVU (Potential Vorticity Unit)인 고도를 대류권계면으로 정의하였을

때 성층권공기의 유입으로 450-750 hPa에 대류권계면이 나타났다. 이는 노르웨이에서 행해진 비행기 관측에서도 나타났으며 2008년 3월 4일 관측결과 극 저기압 중심 가까이에 성층권의 건조공기가 유입되었으며 이때 대류권계면은 500 hPa에 위치하였다(Kristjánsson et al., 2011).

중위도 지역에서 지상 저기압이 발생하는 중요한 메커니즘 중 하나는 대류권계면 접합이 위치한 지역에 높은 위치 소용돌이도를 가진 성층권 공기가 대류권으로 유입되면서 지상 저기압이 발달하는 것이다(Uccellini et al., 1985). Hirschberg and Fritsch (1991)는 대류권계면 파상운동은 지상 저기압이 발달하기 전에 존재하며 이때 상층의 등온위 위치 소용돌이도 이상은 대류권계면 파상운동의 연직 진폭과 하부 성층권 온도장 변화가 함께 발생한다고 하였다. 그리고 Bell and Bosart (1993)는 절리 저기압이 형성되고 지상 기압이 하강할 때 대류권계면 접합이 있으며, 대류권계면이 500 hPa까지 하강함을 보였다. Lee et al. (2001, 2002)은 대류권계면 파상운동의 발달에 따라 하층의 경압성이 증가하며, 지상의 온도가 상승을 증가시켜 겨울철 악기상을 초래한다고 하였다. 또한 급격하게 발달하는 저기압의 경우 그렇지 않은 경우에 비해서 대류권계면이 100 hPa 이상 많이 하강하며 연구 사례에서는 670 hPa까지 하강함을 보였다. Lee et al. (2010)은 2006년 10월 23일 영동지방의 집중호우 사례에서 지상 저기압이 급격히 발달하는 동안 대류권계면 접합 현상의 최저 고도가 900 hPa에 위치하며, 건조하고 안정하며 소용돌이도가 큰 성층권 공기가 대류권계면 접합 현상에 의해 대류권으로 유입되면서 지상저기압이 발달함을 보였다. Kim et al. (2004)은 대류권 중하층의 비단열 가열과정에 의한 위치소용돌이도와 지상 저기압의 상호작용이 지상 저기압 발달의 주요 메커니즘 중 하나라는 것을 밝혔다.

우리나라에서 발생하는 강설은 주로 시베리아 고기압의 변질이나 온대 저기압의 영향에 의해 발생하며 이에 대한 강설 사례에 대해 많은 연구가 행해져 왔다(Kwak and Yoon, 2000; Jeong, 1999). 그러나 중규모 저기압에 의한 강설의 경우 좁은 지역에 많은 눈을 내려 큰 피해를 줄 수 있음에도 불구하고 이에 대한 연구는 외국에 비해 많이 부족하다. 따라서 본 연구의 목적은 한반도에서 극 기압골과 극저기압과 관련하여 하층 경압성, 조건부 불안정, 대류권계면의

접합과 파상운동을 분석하여 한반도를 통과하는 극저기압의 구조와 상하층 간의 관계를 조사하는데 있다.

분석 자료 및 사례 선정

분석 자료

본 연구는 한반도에서 발생한 강설을 종관, 열역학, 역학적으로 분석하기 위하여 2010년 12월 27일에서 28일 동안의 기상청 지상 및 상층 일기도(850, 500, 300 hPa), Multi-functional Transport Satellites (MTSAT)-2 강조적외영상, NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 전구분석자료(Global Final Analyses data, Kalnay et al., 1996)와 NOAA의 해수면온도 분포자료(NOAA Optimum Interpolation 1/4 Degree Daily Sea Surface Temperature Analysis, Reynolds et al., 2007) 등을 이용하였다.

지상 및 상층 일기도는 강설이 발생하기 전후의 종관 상태와 극저기압의 형성 및 위치를 조사하는데 이용하였다. NOAA의 해수면온도 분포자료는 하루 동안의 해수면 온도 자료로 위·경도 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 로 구성되어 있으며, 이를 이용하여 해수면과 850 hPa의 온도차를 분석하였다. 강설량과 그 분포 분석에는 기상청 AWS 강수자료와 최심신적설 관측자료가 이용되었다. AWS는 기상청에서 운영 중인 무인자동기상 관측장비로 강수량, 기온, 풍향, 풍속, 습도, 해면기압 등을 관측한다. 강수자료는 15분, 60분, 6시간, 12시간 동안 내린 강수의 양(mm)을 관측한 값과 00시부터 24시간 동안 내린 하루 강수량 값이 있으며, 이 중에서 12시간 동안의 누적 강수량을 이용한 강수 분포도를 사용하였다. 신적설은 3시간마다의 새로 내린 눈의 깊이를 측정한 값을 사용하였으며 최심신적설은 하루 동안(00-24시)의 신적설 값을 누적하여 눈이 가장 많이 쌓였을 때의 깊이를 구하였다. 일본 기상청의 MTSAT-2 인공위성의 IR1 채널(파장 10.3-11.3 μm)에서 관측한 강조적외영상은 구름의 분포, 모양, 이동 방향, 시간에 따른 위치를 분석하는데 이용하였다. 또한, 위성사진과 단열선도를 이용하여 운고를 결정하였다.

NCEP 전구분석자료는 6시간 간격의 위·경도 $1^\circ \times 1^\circ$ 로 구성되어 있으며 26개층(1000-10 hPa)에 대한 지오폠펜셜 고도, 온도, 절대와도, 동서와 남북 바람성분과 21개층(1000-100 hPa)에 대한 연직 상승속도와 상대습도로 구성되어 있다. NCEP 전구분석자

료는 대기의 안정도, 상대소용돌이도, 공기의 발산, 수렴 등 사례 기간 동안 대기의 열역학적 상태와 운동학적 특성을 분석하는데 이용하였다.

사례 선정

본 연구에서 선정된 사례는 우리나라에 중규모 저기압으로 인해 강설이 있었던 2010년 12월 27일부터 28일까지의 기간이다. 이 기간 동안 북극진동에 의해 한기가 중위도로 남하하면서 저기압이 발해만 부근에서 형성되었고 한반도를 통과하면서 강설이 발생하였다. 그러나 특이하게도 이 저기압은 발해만에서 발달하였지만 극저기압의 성질을 같이 지니고 있는 것으로 판단되어 본 연구에서 그 역학적인 관계를 규명하고자 한다. 사례 기간 동안 극저기압에 의한 강설만을 분석하기 위해 AWS 관측 자료를 이용하여 지역별 강설분포, 최심신적설 그리고 위성사진과 우리나라 주변 기압배치도 등을 조사하였다.

기상청 AWS 관측자료를 이용하여 12시간동안 내린 강수(mm)의 분포를 Fig. 1에 나타내었다. 27일 1200 UTC에 중부 지방에서 강설이 시작되었으며 강설지역은 12시간 뒤 충청도 및 전라도 지역으로 남하하였다. 각 관측소별로 관측된 신적설량을 통해 적설량을 계산한 결과 12월 27-28일 중부지방을 중심으로 동두천 11.1 cm, 문산 10.3 cm, 서울 9.7 cm, 인천 7.3 cm, 수원 6.6 cm의 적설을 기록하였음을 보였다.

강설이 발생하기 전인 12월 27일 0000 UTC에서는 러시아 연해주에 위치한 중심기압 1002 hPa의 저기압에 의해 발해만 쪽으로 기압골이 깊게 형성되어 있었다(Fig. 2a). 12시간 후인 27일 1200 UTC에서는 발해만에 형성되었던 기압골이 발달하여 요동반도에 극저기압이 형성되었다(Fig. 2b). 이로 인한 서풍 기류는 서해안으로 습기를 유입시켰으며 중부지방에서 강설이 시작되었다. 28일 0000 UTC에는 극저기압이 빠르게 동진하여 동해상에 위치하였고(Fig. 2c) 우리나라에서는 극저기압의 통과 후 서해상으로 북서 기류가 유입되었으며 강설지역은 충청도 및 전라도 지방으로 이동하였다(Fig. 2d).

극저기압의 위치와 이동방향에 따른 구름의 형태와 이동을 MTSAT-2 적외강조영상을 통해서도 확인할 수 있다(Fig. 3). 27일 0033 UTC에서 기압골 후면에 위치한 구름은 12시간 후 옹진반도와 산둥반도 사이

Fig. 1. Distribution of 12 hour total precipitation (mm) in Korea for (a) 0000 UTC to 1200 UTC 27, (b) 1200 UTC 27 to 0000 UTC 28, and (c) 0000 UTC 28 to 1200 UTC 28 December 2010. The red dot represents the location of maximum precipitation.

Fig. 2. Surface weather chart for (a) 0000 UTC 27, (b) 1200 UTC 27, (c) 0000 UTC 28, and (d) 1200 UTC 28 of December 2010.

에 띠 형태로 위치하였다(Fig. 3a-b). 이 구름은 28일 0033 UTC에 극저기압과 함께 남동진하여 우리나라를 통과하였으며 발해만에서 형성된 구름들은 북서 기류에 의해 충청도와 전라북도 지역으로 유입되었다. 이로 인해 28일 1233 UTC에 하층운이 계속해서 서해안으로 유입됨을 볼 수 있다(Fig. 3d).

분석 방법

열역학적 분석

대기가 불안정할 경우, 안정할 때와는 달리 대기의 작은 요란도 크게 발달 할 수 있다. 대기의 안정도는 크게 안정, 조건부불안정, 불안정으로 분류할 수 있으며 온위와 상당온위의 연직경도에 의해 판정이 가능하다. 온위와 상당온위의 연직 변화량이 모두 음일 경우 절대 불안정층이며, 온위의 연직 변화량은 양이고 상당온위의 연직 변화량이 음일 경우 조건부 불안정층이다. 상당온위(θ_e)는 다음 식으로 계산하였다 (Bolton, 1980).

$$\theta_e = \theta \exp \left[q(1 + 0.00081q) \left(\frac{3.376}{T_L} - 0.00254 \right) \right] \quad (1)$$

여기서 온위는 $\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{R_d/c_p}$ 이고 T 와 p 는 해당

고도의 온도(K)와 기압(hPa)이다. c_p 는 건조공기의 정압비열로 $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, R_d 는 건조공기의 기체 상수로 $287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 이며 R_d/c_p 는 0.28571이다. q 는 혼합비이고 T_L 은 치올립 응결 고도(lifting condensation level)이며 다음의 식으로 계산하였다 (Bolton, 1980).

$$T_L = \frac{2840}{3.5 \ln T - \ln e - 4.805} + 55 \quad (2)$$

여기서 e 는 수증기압(hPa)으로 0°C 를 기준으로 다음의 식으로 계산하였다(Kurz, 1994).

$$T \geq 0^\circ\text{C인 경우, } e = 6.1078 \times \exp \left(\frac{19.8T}{273 + T} \right) \quad (3)$$

Fig. 3. Enhanced infrared images of MTSAT-2 satellite at (a) 0033 UTC 27, (b) 1233 UTC 27, (c) 0033 UTC 28, and (d) 1233 UTC 28 December 2010.

$$T < 0^{\circ}\text{C인 경우, } e = 6.1078 \times \exp\left(\frac{22.5T}{273 + T}\right) \quad (4)$$

여기서 T 의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

또한, 온도이류는 대기층의 안정도와 저기압의 발달과도 밀접하게 관계되어 있으며 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$-\vec{V} \cdot \nabla T = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} \quad (5)$$

여기서 온도이류의 단위는 Ks^{-1} 이며 u , v 는 각각 바람의 동서성분과 남북성분이며, x , y 는 각각 동서와 남북 방향의 수평거리이다. u , v 의 단위는 ms^{-1} , x , y 의 단위는 m 이다.

운동학적 특성 분석

등고선과 등온선이 교차하는 대기를 경압(baroclinic) 대기라 한다. 이와 같은 대기 상태에서 온도이류가 존재할 수 있으며 이에 의한 연직 운동도 발생한다. 경압성(baroclinic instability: BI)은 솔레노이드(solenoid) 향인 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$BI = -(\nabla \alpha \times \nabla p) \cdot \hat{k} = -\frac{R}{p}(\nabla_H T \times \nabla_H p) \cdot \hat{k} \quad (6)$$

여기서 식 (6)은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$BI = -\frac{R}{p}(\nabla_H T \times \nabla_H p) \cdot \hat{k} \approx -\frac{R}{p}(\nabla T \times \nabla Z) \cdot \hat{k} \quad (7)$$

여기서 α 는 비체적(specific volume), R 은 보편기

체상수(universal gas constant), k 는 단위 연직 벡터, ∇_H 는 등고도면에서 계산된 연산자이고, Z 는 지위고도(geopotential)이다. 경압성(BI)의 단위는 Km^{-1} 이다. 등고도면에서 기압의 변화 경향은 정역학계를 가정할 때 등압면에서의 고도의 변화로 유추할 수 있다. 따라서 등고도면에서 발생하는 등압선과 등밀도선의 교차(솔레노이드 항)는 등압면에서 등고도선과 등온선의 교차를 통해 경압의 정도를 확인할 수 있다. 순압

(barotropic) 대기에서 $\frac{dp}{\rho} = 0$ 은 순환의 보존을 나타내는 관계식으로 적도 지방처럼 $\rho \approx \rho(p)$ 의 대규모 흐름에서 일반적으로 정의되며 중위도 지방의 경압 대기에서는 $\rho = \rho(p, T)$ 이므로 성립하지 않을 수 있다 (Martin, 2005). 본 논문에서는 BI 계산의 편의를 위해 식 (7)을 이용하여 경압성을 계산하였다.

강설이 발생할 때의 운동학적 특성을 조사하기 위해 발산장, 상대소용돌이도, 위치소용돌이도, 대류권 계면고도 등을 계산하였다. 위치소용돌이도(potential vorticity: PV)는 무마찰, 단열과정에서 등온위에서 보존되는 물리량이며 등온위면에서의 위치소용돌이도는 다음 식으로 계산하였다(Hoskins et al., 1985).

$$PV = -g \left(f + k \cdot \nabla_\theta \times \vec{V} \right) \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (8)$$

여기서 g 는 중력가속도, f 는 코리올리 인자, k 는 단위 연직 벡터, ∇_θ 는 등온위면에서 계산된 연산자, $\vec{V}$ 는 바람 벡터(ms^{-1})이며, 단위는 $10^{-6} \text{K m}^2 \text{s}^{-1} \text{kg}^{-1}$ 이다.

대류권계면은 대류권과 성층권의 경계로 정의에 의해 열적 대류권계면과 역학적 대류권계면이 결정된다. 열적 대류권계면은 북반구 중위도에서 2 km에 대한 기온감률이 2K km^{-1} 보다 작은 층의 아랫부분으로 정의된다(WMO, 1992). 역학적 대류권계면은 위치소용돌이 값으로 정의되나 이 값은 연구자마다 1-3.5 PVU (potential vorticity unit)로 다양하다. Reed and Sanders (1953)는 1.5 PVU를 Bithell et al. (1999)은 1 PVU를 각각 사용하였다. 본 연구에서는 세계기상기구(WMO, 1986)에서 정의한 위치소용돌이도가 1.6 PVU인 고도를 역학적 대류권계면으로 고려하였다. 따라서 1.6 PVU 이상의 값이 대류권 증상층에서 나타나면 위치소용돌이도의 양(positive)의 편차(anomaly)로 고려할 수 있다.

대류권계면의 접합이 있는 지역에서는 성층권의 높

은 위치소용돌이도가 대류권으로 단열 이류 되어 위치소용돌이도 편차가 나타난다. 이 경우 위치소용돌이도 보존식 (8)에 의해 이 지역의 정적 안정도는 감소하고 이는 절대 소용돌이도의 증가를 야기한다. 따라서 대류권계면 접합 현상은 상층의 소용돌이도를 증가시키기 때문에 저기압의 발달 유무에 중요하다 (Uccellini et al., 1985).

수분속 분석

대기 하층에 충분한 수증기가 공급되지 않을 경우 경압성이 강화되고 저기압성 순환이 증가하여도 대류계는 발달할 수 없다(Lee, 2007). 구름의 발달과 강설이 있기 위해서는 수증기의 공급이 필수적이며 이를 위해 혼합비와 수분속을 다음 식을 이용하여 분석하였다.

$$\vec{M} = q \vec{V} \quad (9)$$

수분속(moisture flux: $\vec{M}$)은 수증기의 플럭스를 나타내는 변수로 단위는 ms^{-1} 이다. 수분속을 통해 수증기의 유입과 유출을 분석할 수 있으며 유입이 많고 유출이 적은 지역에서 구름이 쉽게 형성된다.

분석 결과

종관상대 분석

극저기압이 통과하면서 강설이 발생한 기간의 상층 종관 상태를 살펴보기 위하여 12시간 간격의 기상청 상층 850 hPa 및 500 hPa 일기도를 분석하였다(Fig. 4). 강설이 발생한 27일 0000 UTC의 상층 850 hPa 일기도에는 러시아 연해주 지역에 중심 고도 1242 gpm의 저기압이 위치하고 있었으며 만주 지역에 -22°C 의 한랭핵이 위치하고 있다. 만주 지역에서부터 우리나라 서해안으로 온도골이 형성되었으며 발해만과 요동반도에서 강한 경압성을 보이고 있다(Fig. 4a). 27일 1200 UTC에서는 만주지역에 -21°C 의 한랭핵이 계속해서 존재하였으며 웅진반도 및 우리나라 서해상으로 경압성 대기가 위치한 것을 볼 수 있다(Fig. 4b). 27일 하루 동안 발해만과 우리나라 서해상의 기온은 -12°C ~ -8°C 에서 -9°C ~ -3°C 로 증가하여 해기차는 13°C ~ 15°C 정도로 나타났으며 서해상으로 습윤한 지역이 0000 UTC에서는 보이지 않았으나 1200 UTC에서는 -6°C ~ 3°C 선 사이에 나타났다(그림 생략). 서해상의

Fig. 4. Upper-air weather charts of 850 hPa (left panel) and 500 hPa (right panel) for (a, e) 0000 UTC 27, (b, f) 1200 UTC 27, (c, g) 0000 UTC 28, and (d, h) 1200 UTC 28 December 2010, respectively. The solid contours are geopotential heights and dashed are isotherms. Capital letters H, L, W, and C represent anticyclone, cyclone, warm core, and cold core, respectively.

구름대는 서풍을 통해 서해안으로 유입되었다. 28일 0000 UTC에서도 만주지역에 계속해서 -21°C 의 한랭핵이 위치하며 발해만에서 산둥반도를 향하여 온도골이 형성되었다. 서해상에 등온선과 등고선의 교각이 크게 나타나 강한 경압성 영역이 형성된 것을 알 수 있다(Fig. 4c). 28일 1200 UTC에서도 서해상으로 온도골이 형성되어 있었으며 여전히 강한 경압성 대기가 나타나고 있다(Fig. 4d). 우리나라 서해상으로 온도골이 형성되면서 850 hPa의 기온이 하강하여 서해상의 해기차가 20°C 이상 나타났다. 이로 인해 서해상에 습윤한 지역이 넓게 존재하였으며 북서풍에 의해 우리나라 서해안으로 유입되며 많은 강설이 있었다.

500 hPa 일기도 분석을 통해서 상층 기압골의 위치와 이동방향을 살펴보았다. 27일 0000 UTC에서는 몽골에서부터 남동진하여 발해만으로 다가오는 상층 단파골을 볼 수 있다(Fig. 4e). 이 단파골은 지상 일기도의 발해만에서 산둥반도 쪽으로 형성된 기압골의 북서쪽에 위치하여 지상 기압골이 더욱 발달할 수 있는 조건이다. 지상 기압골의 발달은 27일 1200 UTC에 요동반도와 산둥반도 사이에 중심기압 1009 hPa의 극저기압이 형성된 것으로 확인할 수 있다(Fig. 2 참조). 즉, 발해만 후면에 상층의 단파골이 위치하고 있고 단파골 전면에 극저기압이 위치해 있다(Fig. 4f). 28일 0000 UTC에는 단파골이 웅진반도에서 서해상으로 형성되어 있었고 1200 UTC에서는 상층 기압골이 동해상으로 동진하였다(Fig. 4g-h). 본 사례의 경우 강설기간 내내 상층 기압골의 전면에 지상의 극저기압이 위치하였으며 이로 인해 극저기압은 계속해서 발달할 수 있었다.

열역학적 분석

상당온위의 연직 변화는 대기 안정도 분석에서 매우 중요하고 구름의 발달 유무를 결정하는 중요한 인자이다. 극저기압의 형성과 관련한 대기 안정도를 분석하기 위하여 극저기압이 형성되기 전인 27일 0000 UTC에서부터 극저기압이 우리나라를 통과하여 동해상으로 빠져나간 28일 0000 UTC까지 상당온위의 연직 변화량에 대한 동서 단면도를 분석하였다. 온위와 상당온위의 연직 변화량이 모두 음일 경우 절대 불안정층이며, 온위의 연직 변화량은 양이고 상당온위의 연직 변화량이 음일 경우 조건부 불안정층이다.

Fig. 5. East-west cross section at 38-39°N for equivalent potential temperature on (a) 0000 UTC 27, (b) 1200 UTC 27 and (c) 0000 UTC 28 December 2010. Solid and dashed lines represent absolutely stable and absolutely unstable conditions with contour intervals in 1K.

27일 0000 UTC의 대기 안정도를 살펴보면 지상 기압골의 전면부인 39°N , $119-125^{\circ}\text{E}$ 지역의 900 hPa 고도까지 조건부 불안정층이 형성되어 있다(Fig. 5a). 27일 1200 UTC에도 39°N , $115-125^{\circ}\text{E}$ 지역에서 최대 800 hPa까지 불안정층이 형성되어 있었으며 불안정층

이 높게 나타난 곳은 122-125°E 지역으로 이곳은 지상에 극 저기압이 형성되어 있는 곳과 일치한다(Fig. 5b). 28일 0000 UTC에서는 극저기압이 위치한 (38°N, 130°E) 부근에서 970 hPa까지는 절대 불안정층이, 800 hPa까지는 조건부 불안정층이 형성되어 있다(Fig. 5c). 조건부 불안정층은 포화상태인 대기일 때 불안정한 층을 의미하기 때문에 수증기의 공급여부에 따라 구름의 발달 정도가 결정된다.

열역학적인 측면에서 온도 이류는 저기압의 발달이나 구름의 발달에 중요한 역할을 한다. 일반적으로, 수평 온난 이류가 위치한 지역에서 저기압계가 발달하며 그 반대인 한랭 이류가 위치한 곳에서는 고기압계가 발달한다(Holton, 2004). 또한, 상하층간의 온도이류 변화도 기압계나 구름 발달에 기여하기 때문에 925 hPa와 700 hPa 두 층에서 온도이류의 분포를 분석하였다(Fig. 6). Fig. 6에서 실선은 난기이류, 점선은 한기이류이고, 굵은 실선은 지상 기압골, 검은 사각형(■)은 극저기압, 그리고 굵은 점선은 상층 단파골의 위치를 각각 표시하였다.

지상 기압골은 27일 0000 UTC에 925 hPa의 난기이류가 있는 곳에 위치하고(Fig. 6a) 있으며 27일 1200 UTC에는 난기이류가 있는 요동반도 부근에서 극저기압이 형성되었다(Fig. 6b). 지상 기압골 전면으로 난기이류가 있었으며 후면에는 한기이류가 나타났다. 28일 0000 UTC에서도 지상 기압골 전면으로 이상의 강한 난기이류가 나타났으며 그 후면으로 한기이류가 나타났다(Fig. 6c). 상층 기압골이 있는 곳(굵은 점선)에는 한기이류가 존재한다. 27일 0000 UTC에서 700 hPa의 온도이류를 살펴보면 지상 기압골 전면으로는 난기이류가 있으며 후면으로 한기이류가 있다(Fig. 6d). 27일 1200 UTC에서는 지상 기압골과 극저기압, 상층 단파골의 전면과 후면에 한기이류만이 존재하였으며(Fig. 6e) 28일 0000 UTC에는 극저기압과 지상 기압골 전면으로 정도의 난기이류가, 그 후면으로는 한기이류가 있다(Fig. 6f). 이와 같이 극저기압과 지상 기압골의 상층 925 hPa 및 700 hPa의 전면에는 난기이류가 후면에는 한기이류가 나타났다.

운동학적 분석

하층 대기의 경압성은 극저기압으로 발달 가능한 초기 환경을 제공한다(Reed, 1979). 이에 따라 대류권 하부에 위치하면서 마찰의 영향이 적은 925 hPa

을 선택하여 분석하였다(Fig. 7). Fig. 7에서 굵은 실선은 지상 기압골이고 굵은 점선은 상층 단파골이며, 검은 사각형(■)은 극저기압의 위치를 표시하였다.

27일 0000 UTC에서 지상 기압골 전면으로 경압성이 강한 양의 영역($0 \sim 4 \times 10^{-9} \text{ Km}^{-1}$)이 위치하고 있다(Fig. 7a). 양의 영역인 요동반도와 산둥반도 사이로 극저기압이 형성되었다. 27일 1200 UTC에서 지상 기압골 축 전면으로 양의 경압성 영역이 보이고 있으며 중부지방 및 서해안 지역에는 $1 \times 10^{-9} \text{ Km}^{-1}$ 의 경압성이 나타난다(Fig. 7b). 28일 0000 UTC에서도 지상 기압골 축 전면으로 양의 경압성 영역이 $3 \times 10^{-9} \text{ Km}^{-1}$ 이상으로 강하게 나타나고 있었으며 우리나라에는 아직 양의 경압성 영역이 나타나지 않는다(Fig. 7c).

극저기압의 형성과 발달에 관련이 있는 상대 소용돌이도와 상층기류의 영향과 상호관계를 분석하기 위해 동서 연직 단면도를 살펴보았다(Fig. 8). 극저기압의 이동 경로를 고려하여 27일 0000 UTC와 1200 UTC는 39°N의 동서 단면도를 분석하였으며(Fig. 8a-b) 28일 0000 UTC에서는 38°N의 동서 단면도를 분석하였다(Fig. 8c). 27일 0000 UTC에서 지상 기압골의 전면부인 121°E-126°E에서 저기압성 소용돌이도를 보이고 있으며 123°E 부근에서 저기압성 소용돌이도의 최댓값이 $6.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 으로 나타나며 125°E에서도 $1.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 로 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 위치 소용돌이도가 1.6PVU인 고도를 굵은 실선으로 표시하였으며 이 때 대류권계면은 380 hPa 부근에 위치하고 있다(Fig. 8a). 27일 1200 UTC에서는 123°E 부근의 저기압성 소용돌이도의 최댓값이 $8.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 로 12시간 전에 비해 증가한 것을 확인할 수 있다. 이와 동시에 이곳에서 극저기압이 형성되었다. 125°E에서는 저기압성 소용돌이도가 $1.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 로 높게 나타나나 상대소용돌이도의 값은 12시간 전과 동일하였다. 대류권계면은 점차 하강하고 있으며 125°E 부근에서 400 hPa까지 하강하였다(Fig. 8b). 28일 0000 UTC에 극저기압은 130°E 부근에 존재하였으며, 이곳의 저기압성 소용돌이도 값은 최대 $3.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 로 상당히 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 극저기압 부근의 대류권계면도 500 hPa까지 하강하였고(Fig. 8c) 이후 점차 상승하여 300 hPa부근으로 대류권계면이 위치하였다(그림 생략). 이는 악기상의 발생 전, 역학적 대류권계면이 조금씩 하강하여 300 hPa에 위치하고 악기상이 발생한 후에 470 hPa까지 급격하게 하강하였다가

Fig. 6. Temperature advection at 925 hPa (left panel) and 700 hPa (right panel) for (a, d) 0000 UTC 27, (b, e) 1200 UTC 27, and (c, f) 0000 UTC 28 December 2010. This solid and dashed contours represent warm and cold air advection, respectively with contour interval of $1 \times 10^{-4} \text{ K s}^{-1}$. Heavy solid and dashed line lines are the location of surface trough and the 500 hPa short-wave trough. Box area (■) represents the center of polar low at the surface.

300 hPa, 270 hPa까지 다시 상승하는 Lee et al. (2001)의 대류권계면 파상운동 분석 결과와 일치한다. 즉, 28일 0000 UTC에 극저기압이 발달하면서 500 hPa까지 대류권계면이 하강하였다가 다시 상승하는 대류권계면 파상운동이 발생하였음을 보여준다. 이와 같은 분석결과를 통하여 저기압성 소용돌이도가 나타난 곳에서 극저기압이 형성되었으며 대류권계면이 하강하면서 성층권 공기의 유입에 의해 하층의 저기압성 소용돌이도를 강화하였고, 이로 인해 저기압이 강화되는 것을 알 수 있었다. 또한, 대류권계면이 많이 하강할수록 극저기압도 더 많이 강화됨을 보였다.

상승속도는 대류계의 발달정도 및 강설 강도와 밀접한 관계가 있어 극저기압의 연직 발달 규모를 분석하는데 중요하다. 또한, 상승속도의 동서 연직 단면도를 통해 극저기압이 형성되고 발달하는 지역의 상·하층의 수렴과 발산 정보도 함께 파악할 수 있다 (Fig. 8d-f). Fig. 8에서 실선은 상승기류, 점선은 하강기류를 나타낸다. 27일 0000 UTC의 39°N, 121°E에서 $-2 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이하의 상승기류를 보이고 있으며 125°E의 900 hPa에서 $-4 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이하의 강한 상승속도가 나타나고 있다 (Fig. 8d). 123°E 부근에서는 $0.1 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 의 값을 보여 상승기류가 나타나지 않거나 약한 하강기류가 위치하는 것을 알 수 있다. 27일 1200 UTC에는 122-123°E 지역에 지상에서 850 hPa까지 약한 하강기류가 나타나지만 그 부근으로는 강한 상승기류가 나타나고 있다 (Fig. 8e). 120°E, 800 hPa에서 $-6 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이하의 상승기류가 나타났으며 125°E에서 $-8 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 이하의 상승기류가 나타났다. 같은 시기에 극저기압은 39°N에서 121-125°E 사이에 위치하였으며 중심은 122°E에 위치하였는데 상승기류가 중심에선 보이지 않고 극저기압 중심의 동쪽에서 강하게 나타남을 알 수 있다. 28일 0000 UTC에는 극저기압이 동해상으로 빠져나감에 따라 130-135°E 지역에서 강한 상승기류가 나타나고 120°E 부근의 서해안에서는 시베리아 고기압의 확장에 따른 호수효과(lake-effect)에 의해 대류가 나타났다 (Fig. 8f). Jung (1999)과 Lee et al. (2001)은 대류권계면 파상운동의 최저점의 서쪽으로 하강기류가 나타나고, 동쪽으로 상승기류가 나타나는 현상은 대류권계면 접합 시의 대기상태와 유사하다고 밝힌 바 있다. 이에 따라 대류권계면 접합이 발생하여 대류권계면이 하강하였다. 전체적으로 강한 상승운동이 나타나는 지역은 대류권계면 파상 운동의 동쪽이고 파

Fig. 7. Baroclinicity at 925 hPa for (a) 0000 UTC 27, (b) 1200 UTC 27, and (c) 0000 UTC 28 December 2010. Positive value represents area of baroclinicity and vice versa with contour interval of $1 \times 10^{-9} \text{ Km}^{-1}$.

Fig. 8. East-west cross section of relative vorticity (left panel) and vertical velocity (right panel) for (a, d) 38°N on 0000 UTC 27, (b, e) 37°N on 1200 UTC 27, and (c, f) 37°N on 0000 UTC 28 December 2010. For vorticity, solid and dashed lines represent cyclonic and anticyclonic vorticity with contour intervals in $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. For vertical velocity, solid and dashed lines represent upward and downward velocity with contour intervals in $1 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$.

상의 진폭이 클수록 대류도 강하게 나타나 보다 더 많은 강설이 발생하였다.

수분속과 혼합비 분석

강설 발생 전후의 수증기의 유입량과 풍향에 따른

유입경로를 알아보기 위하여 850 hPa의 수분속과 혼합비를 분석하였다(Fig. 9). 수분속을 화살표로 나타내었으며 혼합비는 음영으로 나타내었고 짙은 색일수록 높은 혼합비를 보인다. 극저기압이 발생하기 전인 27일 0000 UTC에 서해상에는 1.0 g kg^{-1} 의 혼합비를 가진 건조한 공기가 북서기류를 통해 우리나라로 유입되고 있으며 중부지방과 충청도, 전라도 지역에는 1.6 g kg^{-1} 이상의 혼합비를 보였다(Fig. 9a). 27일 1200 UTC에서 극저기압의 전면부에 1.4 g kg^{-1} 이상의 혼합비 영역이 나타났으며 남서기류를 통해 2.0 g kg^{-1} 이상의 혼합비를 가진 공기가 우리나라로 유입되고 있다. 우리나라 중부지방과 충청도, 전라도 지역은 3.0 g kg^{-1} 이상의 높은 혼합비를 보인다(Fig. 9b). 극저기압이 동진한 이후에도 우리나라 서해안으로 서풍을 통해 수증기가 유입되고 있었으며 중부지방은 1.8 g kg^{-1} 이상의 혼합비를 보였으며 충청도와 전라도는 2.0 g kg^{-1} 이상의 높은 혼합비를 보였다(Fig. 9c). 이처럼 많은 습기의 유입을 통해 중부 내륙 지방으로도 10 cm 안팎의 강설을 기록할 수 있었다.

종합 토의

27일 0000 UTC에 발해만에서 지상 기압골이 형성되었으며 12시간 후인 27일 1200 UTC에 지상의 기압골이 요동반도 부근에서 극저기압으로 발달하였다. 이 저기압은 빠르게 동진하여 28일 0000 UTC에 우리나라를 통과하여 동해상에 위치하였다. 상층의 기압골은 지상 기압골의 북서쪽에 위치하여 지상 기압골이 발달할 수 있는 조건을 충족하였다. 극저기압이 발생하기 전인 27일 0000 UTC에 지상 기압골 전면부의 하층에서 900 hPa까지 조건부 불안정층이 형성되었고 요동반도에는 강한 양의 경압성을 보였다. 지상 기압골 위로 925 hPa에는 난기이류가, 700 hPa에는 한기이류가 분포하고 있었다. 상대 소용돌이도는 $-4.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이하로 나타났고 대류권계면의 하강은 보이지 않았다. 27일 1200 UTC에 극저기압이 요동반도에서 형성되었고 저기압 전면으로 양의 경압성과 난기 이류가 있었으며 그 후면으로는 한기 이류가 나타났다. 이 때, 상층의 대류권계면은 하강하고 있었고 극저기압 부근인 39°N , 123°E 에서는 400 hPa까지 하강하였다. 극저기압의 중심에서는 주변보다 약한 수렴역이 보이고 상승기류는 보이지 않은 반면 중심과 인접한 부근에서는 강한 수렴역과 상승기류를 보였다. 28일 0000 UTC에는 대류권계면이 500

Fig. 9. Moisture flux at 850 hPa for (a) 0000 UTC 27, (b) 1200 UTC 27, and (c) 0000 UTC 28 December 2010. Vector represents the direction and size of moisture flux, and shading is that of specific humidity.

Table 1. Summary of maximum thermodynamic, dynamic, and moisture characteristic values identified by analyzing mesoscale polar low with heavy snowfall

	Polar Low
Cloud height (km)	6
Baroclinicity at 925 hPa (Km^{-1})	$<3 \times 10^{-9}$
Height of conditional instability layer (hPa)	<650
Distance between shortwave and surface trough (km)	~ 250
Height of dynamic tropopause (hPa)	700
Depth of tropopause undulation (hPa)	410
Relative vorticity (s^{-1})	1.6×10^{-5}
Updraft speed (hPa s^{-1})	-1.2×10^{-2}
Specific humidity (g kg^{-1})	3.5

hPa까지 하강하였고 저기압성 소용돌이도도 크게 강화되어 수렴이 증가하고 상승기류도 강해졌다.

극저기압의 발생에 의한 2010년 12월 27일에서 28일 사례의 경우, 강설의 발생은 대류권계면의 파상운동에 따른 상대소용돌이도의 강화가 일차적인 요인으로 보인다. 대류권계면은 500 hPa까지 하강하였고 하강하는 동안 상대소용돌이도가 강화되었으며 강설이 발생하기 전에 높은 혼합비를 가진 공기가 우리나라로 유입되었다. 상승기류는 27일 1800 UTC에 최대 나타나며 혼합비도 3.0 g kg^{-1} 이상으로 큰 값을 나타내어 이 때 가장 많은 강설이 있었다.

본 연구에서 조사된 사례에 대하여 종합 분석한 결과를 Table 1에 요약하여 나타내었다. 극저기압의 형성과 우리나라를 통과하면서 미친 영향을 분석하기 위해 극저기압이 발해만과 서해상에 있을 때, 그리고 우리나라를 통과중일 때 나타나는 열역학적, 역학적, 그리고 수분 분석 등의 최댓값을 나타내었다. 운정고도의 경우, 우리나라에서 발생한 구름의 최대 높이를 분석하였으며 본 사례에서는 6 km 정도로 나타났다. 하층 경압성의 경우, 925 hPa에서 양의 경압성이 $3 \times 10^{-9} \text{ Km}^{-1}$ 정도로 비교적 강하게 나타났다. 조건부 불안정 층의 높이는 서해를 통과하면서 높아졌고 650 hPa 정도까지 형성되었다. 극저기압이 서해상에 위치하였을 때, 상층 500 hPa 단파골과 지상 기압골과의 거리를 계산해보면 본 사례에서는 약 250 km 정도의 위상차가 나타나 극저기압이 온난역과 양의 저기압성 소용돌이도 구역에 위치하여 더욱 발달할 수 있었다.

역학적 대류권계면의 높이는 700 hPa 고도까지 하강하여 대류권계면 접합에 의해 강한 위치소용돌이도를 가진 성층권공기가 대류권 하층으로 유입되면서

하층 저기압성 소용돌이도를 강화시켰다. 이는 저기압성 소용돌이도의 값이 본 사례에서 $1.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 로 나타나는 것으로 확인되었다. 상대소용돌이도의 강화는 수렴과 발산, 그리고 상승기류도 강화시키는 것으로 조사되었고 이는 상승 기류 분석을 통하여 $-1.2 \times 10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$ 정도로 나타났다. 강설 지역을 중심으로 분석하였을 때 대류권계면 파상운동의 진폭은 410 hPa로 크게 나타났다. 강설기간 중 혼합비의 최댓값은 3.5 g kg^{-1} 이상으로 큰 값을 보여 중부지방으로 높은 혼합비를 가진 공기가 유입되었다.

요약 및 결론

본 연구에서는 2010년 12월 27일 0000 UTC에서 28일 1200 UTC까지 발해만 부근에서 발생한 중규모 저기압이 우리나라 중부 지방을 통과하며 강설을 유발시킨 사례를 분석하였다. 이 저기압은 발해만에서 발달하였지만 극저기압의 성질을 지니고 있어, 기상청(2011)의 대설개념모델로는 설명에 한계가 있어 본 연구에서 그 역학적인 관계를 규명하였다. 분석에 이용한 자료는 AWS 지상 강수량 자료, 최심신적설 자료, 지상 및 상층일기도(850, 500 hPa), MTSAT-2 강조적외영상, NCEP 전구분석 자료(NCEP global final analysis data)이다. 특히, NCEP 전구분석 자료를 이용하여 극저기압의 발달과 강설의 발생에 대해 열역학적 특성과 운동학적 특성, 대류권계면 분석, 그리고 수분 분석 등을 수행하였다.

2010년 12월 27일 0000 UTC에 발해만에서 기압골이 형성되었으며 12시간 후 요동반도 부근에서 형성된 극저기압이 우리나라를 통과하며 주로 중부지방에 많은 강설을 발생시켰다. 지상 기압골 전면의 대류권 하층에서는 조건부 불안정층이 형성되어 있었으며 강한 양의 경압성을 보였다. 상층 단파골이 극저기압의 북서쪽에 위치하여 발달에 영향을 주었으며 극저기압 부근에서는 하층 난기 이류와 상층 한기이류가 나타나 대기가 불안정 하였다. 극저기압이 발생한 이후로 저기압성 소용돌이도는 점차 강화되었는데 이는 대류권계면 접합으로 성층권 공기가 유입되면서인 것으로 분석되었다. Grønås and Kvamstø (1995)의 수치모델결과에서는 2 PVU의 고도가 750 hPa의 경우 상대소용돌이도의 최대값이 $4.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 500 hPa의 경우 $3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 로 나타났다. 본 연구에서 나타난 저기압성 소용돌이도의 값은 이보다 작게 나타났지만 극

저기압의 중심 부근으로 성층권 공기가 유입됨으로 인해 극저기압이 발달한다는 사실을 뒷받침해준다.

극저기압은 하층에서 양의 경압성이 강하게 나타나며 하층 925 hPa에 난기 이류가, 중하층 700 hPa에 한기 이류가 있어 조건부 불안정이 뚜렷하게 보이는 곳에서 형성되는 것으로 사료된다. 극저기압의 발달 기구로는 대류권계면 접합에 의한 성층권 공기의 유입과 그에 따른 위치 소용돌이도의 증가로 하층에 수렴과 저기압성 순환이 강하게 발생하였다. 강설 지역을 중심으로 분석하였을 때 대류권계면이 가장 낮게 하강한 지역에서의 대류권계면 파상운동의 진폭은 410 hPa로 크게 나타났다. 이러한 결과는 지상저기압이 남해안을 통과하면서 강설 및 강우가 발생한 사례에 대한 Lee et al. (2001)의 200-270 hPa과 2005년 3월 영남지역에서 발생한 강설 사례를 연구한 Park et al. (2009)의 220 hPa보다 더 크게 나타났다. 이는 상승기류와 구름의 형성 및 강설로 이어졌고 전국적으로 10-20 cm 안팎의 많은 눈이 내렸다. 또한 상층 500 hPa의 단파골과 지상 기압골간의 위상차도 중요한 것으로 나타났다. 극저기압의 발생기간 동안 대류권계면이 500 hPa까지 하강하였고, 위치소용돌이도 증가로 인한 상승기류도 강하게 발생시켰다. 대류로 인해 발생한 잠열은 대기를 가열시키며 공기를 더욱 상승시켜 하층 수렴을 강화하였으며 이로 인해 저기압은 발달하고 상승기류는 강화되었다. 강설의 발생도 대류권계면의 파상운동과 관련이 깊게 분석되었다. 대류권계면이 하강하면서 상대소용돌이도와 상승기류가 강화되어 각각 최대 $1.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $-1.2 \times 10^{-2} \text{ hPa}^{-1}$ 로 나타났으며 서해상으로부터 3.0 g kg^{-1} 이상의 많은 수증기가 제공될 때 서울 9.7 cm, 동두천 11.1 cm 등으로 많은 강설량을 보였다.

본 연구는 우리나라를 통과하는 극저기압과 관련하여 발생한 강설에 대한 사례로 종관적, 열역학적, 운동학적 분석을 통해 극저기압의 발달기구에 대해 조사하였다. 분석을 통하여 극저기압에 대한 잠열의 역할 또한 중요한 것으로 나타났다. 그러나, 이에 대해서는 좀 더 심도 있는 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2013-2040)의 지원으로 수행되었습니다. 논문이 출판될 수 있도록 배려해준 기상청 국가태풍센터와 이

논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 해주신 심사위원들께 감사드립니다.

References

- Bell, G.D. and Bosart, L.F., 1993, A case study diagnosis of the formation of an upper-level cutoff cyclonic circulation over the eastern United States. *Monthly Weather Review*, 121, 1635-1655.
- Bithell, M., Gray, L.J., and Cox, B.D., 1999, A three-dimensional view of the evolution of midlatitude stratospheric intrusions, *Journal of Atmospheric Science*, 56, 673-688.
- Bolton, D., 1980, The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, 108, 1046-1053.
- Businger, S. and Baik, J.-J., 1991, An Arctic hurricane over the Bering. *Monthly Weather Review*, 119, 2293-2322.
- Fu, G., Niino, H., Kimura, R., and Kato, T., 2004, A polar low over the Japan Sea on 21 January 1997. Part I: Observational analysis. *Monthly Weather Review*, 132, 1537-1551.
- Grønås, S., and Kvamstø, N.G., 1995, Numerical simulations of the synoptic conditions and development of Arctic outbreak polar lows. *Tellus A*, 47, 797-814.
- Hirschberg, P.A. and Fritsch, J.M., 1991, Tropopause undulations and the development of extratropical cyclones. Part I: Overview and observations from a cyclone event. *Monthly Weather Review*, 119, 496-517.
- Holton, J.R., 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 4th ed. Elsevier Academic Press, Burlington, USA, 535 p.
- Hoskins, B.J., McIntyre, M.E., and Robertson, A.W., 1985, On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 111, 877-946.
- Jeong, Y.-K., 1999, Synoptic environment associated with the heavy snowfall in the Southwestern Region of Korean Peninsula. *Journal of Korean Earth Science Society*, 20, 398-410.
- Jung, E.-S., 1999, Analysis of intrusion of stratospheric air by VHF radar and energy change in troposphere. *Kyungpook National University, Daegu, Korea*, 79 p.
- Kalnay, E., and coauthors, 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-470.
- Kim, D.J., Kim, D.H., Chun, J.M., and Hong, K.D., 2010, A study of mesoscale heavy snowfall development mechanism in Jeju Island. *Proceedings of Korean Meteorological Society*, Busan, Korea, 206-207.
- Kim, Y.M., Youn, Y.-H., and Chung, H.-S., 2004, Potential vorticity thinking as an aid to understanding mid-

- latitude weather systems. *Journal of Korean Meteorological Society*, 40, 633-647.
- KMA, 2011, Analysis of winter heavy snowfall cases using satellite imagery (Analysis of heavy snowfall characteristics based on conceptual models). KMA National Satellite Center, Technical note 2011-2, 55 p.
- Kristjánsson, J.E., and coauthors, 2011, The Norwegian IPY-THORPEX: Polar lows and Arctic fronts during the 2008 Andøya campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 1443-1466.
- Kurz, M., 1994, The role of diagnostic tools in modern weather forecasting. *Meteorology and Applications*, 1, 45-67.
- Kwak, B.C. and Yoon, I.H., 2000, Synoptic analysis on snowstorm occurred along the East Coast of the Korean Peninsula during 5-7 January, 1997. *Journal of Korean Earth Science Society*, 21, 258-275.
- Lee, H.-R., 2007, Development mechanism of a wintertime explosive cyclone: A case study. *Kyungpook National University*, Daegu, Korea, 155 p.
- Lee, H.-R., Kim, K.-E., Yoo, J.-M., and W.-J. Lee, 2002, Tropopause undulation as sociated with explosive development of a cyclone. *Journal of Korean Meteorological Society*, 38, 431-463.
- Lee, H.-R., Kim, K.-E., Yoo, J.-M., and Min, K.-D. 2001, A study on a severe winter weather occurred in the Korean Peninsula by tropopause undulation. *Journal of Korean Meteorological Society*, 37, 195-224.
- Lee, H.Y., Ko, H.Y., Kim, K.-E., and Yoon, I.H., 2010, An analysis of characteristics of heavy rainfall events over Yeongdong Region associated with tropopause folding. *Journal of Korean Earth Science Society*, 31, 354-369.
- Lee, T.-Y. and Park, Y.-Y., 1998, A numerical modeling study of mesoscale cyclongenesis to the east of the Korean Peninsula. *Monthly Weather Review*, 126, 2305-2329.
- Martin, J.E., 2005, *Mid-latitude Atmospheric Dynamics - A First Course*. Wiley, West Sussex, U.K., 324 p.
- Park, J.-H., Kim, K.-E., and Heo, B.-H., 2009, Comparison of development mechanisms of two heavy snowfall events occurred in Yeongnam and Yeongdong Regions of the Korean Peninsula. *Journal of Korean Meteorological Society*, 19, 9-36.
- Park, S.-G. and Lee, T.-Y., 2005, A case study of mesoscale cyclone development in the East Sea during winter. *Proceedings of Korean Meteorological Society*, Daegu, Korea, 34-35.
- Rasmussen, E., 1979, The polar low as an extratropical CISK disturbance. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 105, 531-549.
- Reed, R.J., 1979, Cyclogenesis in polar air streams. *Monthly Weather Review*, 107, 38-52.
- Reed, R.J. and Duncan, C.N., 1987, Baroclinic instability as a mechanism for the serial development of polar lows: a case study. *Tellus* 39A, 376-85.
- Reed, R.J. and Sanders, F., 1953, An investigation of the development of a mid-tropospheric frontal zone and its associated vorticity field. *Journal of Meteorology*, 10, 338-349.
- Reynolds, R.W., Smith, T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S., and Schlax, M.G., 2007, Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473-5496.
- Uccellini, L.W., Keyser, D., Brill, K.F., and Walsh, C.H., 1985, The president's day cyclone of 18-19 February 1979, influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 113, 941-961.
- WMO (World Meteorological Organization), 1986, *Atmospheric Ozone 1985: Global Ozone Research and Monitoring Report*. Rep. No. 16, WMO, Geneva, Switzerland, 392 p.
- WMO (World Meteorological Organization), 1992, *International Meteorological Vocabulary*. Geneva, Switzerland, 784 p.
- Yanase, W., Fu, G., Niino, H., and Kato, T., 2004, A polar Low over the Japan Sea on 21 January 1997. Part 2: A Numerical Study. *Monthly Weather Review*, 132, 1552-1574.

2013년 10월 8일 접수
2013년 11월 5일 수정원고 접수
2013년 11월 13일 채택