

블로킹에 의한 2014년 2월 동해안 지방 폭설 분석

배정호 · 민기홍*

경북대학교 천문대기과학과

(접수일: 2016년 2월 3일, 수정일: 2016년 5월 8일, 게재확정일: 2016년 6월 2일)

Analysis of the February 2014 East Coast Heavy Snowfall Case Due to Blocking

Jeong-Ho Bae and Ki-Hong Min*

Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Manuscript received 3 February 2016; revised 8 May 2016; accepted 2 June 2016)

Abstract This study investigated the cause of the heavy snowfall that occurred in the East Coast of Korea from 6 February to 14 February 2014. The synoptic conditions were analyzed using blocking index, equivalent potential temperature, potential vorticity, maritime temperature difference, temperature advection, and ground convergence. During the case period, a large blocking pattern developed over the Western Pacific causing the flow to be stagnant, and there was a North-South oriented High-to-Low pressure system over the Korean Peninsula because of this arrangement. The case period was divided into three parts based on the synoptic forcing that was responsible for the heavy snowfall; detailed analyses were conducted for the first and last period. In the first period, a heavy snowfall occurred over the entire Korean Peninsula due to strong updrafts from baroclinic instability and a low pressure caused by potential vorticity located at the mid-troposphere. In the lower atmosphere, a North-South oriented High-to-Low pressure system over the Eastern Korea intensified the easterly airflow and created a convergence zone near the ground which strengthened the upslope effect of the Taebaek Mountain range with a cumulative fresh snowfall amount of 41 cm in the East Coast region. In the last period, the cold air nestled in the Maritime Province of Siberia and Manchuria strengthened much more than that in the first half and extended to the East Sea. The temperature difference between the 850 hPa air and the SST was large and convective clouds developed over the sea. The highest cumulative fresh snow amount of 39.7 cm was recorded in the coastal area during this period. During the entire period, vertically oriented equivalent potential temperature showed neutral stability layer that helped the cloud formation and development in the East Coast. The 2014 heavy snowfall case over the East Coast provinces of Korea were due to: 1) stagnation of the system by blocking pattern, 2) the dynamic effect of mid-level potential vorticity of 1.6 PVU, 3) the easterly air flow from North-South oriented High-to-Low pressure system, 4) the existence of vertically oriented neutral stable layer, and 5) the expansion of strong cold air into the East Sea which created a large temperature difference between the air and the ocean.

Key words: Heavy snowfall, blocking effect, baroclinic instability, easterly wind

*Corresponding Author: Ki-Hong Min, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea.
Phone: +82-53-950-6362, Fax: +82-53-950-6359
E-mail: kmin@knu.ac.kr

1. 서 론

겨울철 우리나라에 영향을 주는 폭설은 다양한 형태의 종관 기압 배치와 삼면이 바다이고 산 면적이 70% 이상인 한반도의 특수한 지형 형태로 자주 발생한다. 폭설로 인해 노후 된 건물이나 비닐하우스 등이 무너지면서 재산 피해가 발생하고, 도로가 결빙되면서 인명피해가 발생하는 경우가 많다. 매년 겨울 발생하는 폭설의 피해를 줄이기 위해 그 발달 원인을 규명하는 연구는 매우 중요하다.

KMA (2011)는 한반도의 대설개념모델을 크게 6가지로 분류하고 있다. 1) 한대제트 북쪽 한랭 기단 내에서 중국 중부 내륙에서 발생한 저기압이 우리나라 내륙으로 통과하는 한랭 종관 저기압형, 2) 한랭한 극 공기를 수반한 중규모 저기압에 의해 발생하는 극 저기압형, 3) 한랭한 공기의 파동에 의해 발생하는 중규모 저기압이 중부 이북지방을 지나면서 대설이 나타나는 발해만 저기압형, 4) 시베리아 고기압이 확장 할 때 해기차에 의해 눈구름이 서해안 지방에 대설을 발생시키는 서해안형, 5) 한대제트 남쪽 온난한 기단 내에서 중국 내륙에서 발생한 저기압이 남해상을 지날 때 저기압 북쪽에서 강설이 나타나는 온난 종관 저기압형, 그리고 6) 연해주 부근에 500 hPa 저기압이 정체되어 있을 때, 그 후면에서 침강현상이 일어나 중국 북동부 지역의 지상고기압이 발달하여 동풍류가 동해안으로 유입되는 동해안형 등이다. Lee et al. (2009)은 시베리아 고기압이 연해주 지방으로 확장 할 때 찬 북동기류가 동해를 통과하면서 공기덩이의 성질이 변질되고, 태백산맥의 저지효과로 인해 산맥의 주향을 따라 하강하는 공기와 지속적으로 유입되는 변질된 북동기류와 만나 수렴역이 생성되어 동해안 지방에서 강설이 발생함을 보인 바 있다. 그리고 북동풍의 종관규모 기류가 산맥의 저지효과로 인해 풍속이 감소되면서 전향력도 감소하며 지균평형이 깨진 결과 남쪽으로 향하고 있는 기압경도력이 다른 힘보다 더 강해지게 되면서 동쪽지방 해안가를 따라서 북풍계열의 바람이 불게 된다고 하였다.

Park et al. (2009)은 영동지방과 영남지역에서 발생한 두 대설의 발달 메커니즘 비교에서 영동지방은 동해에 형성된 경압불안정의 영역에서 눈구름을 발달시키고, 영남지방은 대류권 접합이 발생 할 때 성층권의 강한 위치소용돌이도를 가진 공기가 대류권으로 유입되면서 저기압성 순환을 강화시키고, 상층 한랭핵에 의한 경압불안정으로 인해 눈구름을 발달시킨다고 하였다.

한 지역에 동일한 기상상태가 지속되는 경우 블로킹현상을 동반하는 경우가 자주 있다. Rex (1950)는

상층 대기의 흐름이 동서방향 흐름을 벗어나 남북방향으로 큰 진폭을 갖는 사행류가 되면 지상기압계는 정상적인 진로가 막혀 정체 또는 변칙적인 경로를 취하게 되는 현상을 블로킹 현상이라 정의하였다. 블로킹의 형태는 1) 저지고기압형, 2) 오메가저지형, 3) Rex형, 4) 절리저기압형 총 네 가지로 구분할 수 있다(Rex, 1950; Treidl et al., 1981; Bluestein, 1993). 블로킹현상에 대한 정량적인 자료를 제시하기 위해 개발된 블로킹지수는 Lejenäs and Økland (1983)에 의해 처음 고안되었으며, Tibaldi and Molteni (1990)는 이를 보완해 TM90 지수를 개발하였다. TM90은 위도 40°N-80°N 의 범위에서 500 hPa 남북지위고도 경도를 계산하여 블로킹의 존재 여부를 분석하였다. Barriopedro et al. (2006)은 기존 TM90 지수를 위도 40°N-77.5°N 로 수정하여 더욱 정확한 블로킹지수를 고안하였다. Ryu (2012)는 TM90 지수에 대해 동서범위가 지정되지 않아 블로킹이 존재함에도 지수조건을 만족시키지 못하는 단점을 보완하여 500 hPa 동서지위고도 경도를 더해 동서남북으로 원하는 지역에 대해 블로킹 지수를 정확하게 구하도록 NEWS (North-East-West-South) 지수를 개발하였다.

블로킹에 의한 강원도 지방의 폭설사례에 대한 연구는 아직도 활발히 진행 중 이지만 사례에 대한 원인을 심층적으로 분석한 연구는 충분히 이뤄지지 못한 상태이다. 특히나, 블로킹은 이미 발생한 폭설이 발생하기 좋은 환경을 계속적으로 한반도 부근에 위치하게 함으로써 지속적으로 많은 적설을 가져와 겨울철 재난피해의 주요한 원인으로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 동해안 지방에 지속적으로 많은 적설을 가져온 2014년 2월 6일~14일까지 9일 동안의 사례에 대한 종관적, 역학적, 열역학적 그리고 블로킹 유무 분석을 통해 강원도 지방에서 지속적으로 발생하는 강설현상에 대한 메커니즘 분석을 수행하고자 한다.

2. 분석 자료 및 사례 선정

2.1 분석 자료

본 연구에서 사용한 자료는 종관적인 규모에서 대기 상하층의 구름을 분석하기 위해 천리안 기상위성의 적외복사영상(파장 10.3 μm ~11.3 μm)과 9일 간의 사례기간 동안에 종관 기압배치를 분석하기 위해 기상청의 지상일기도와 상층일기도(850, 500, 300 hPa)를 이용하였다. 또한, 강설량을 정량적으로 분석하기 위해 기상청 AWS (Auto Weather System)자료를 이용하여 신적설 자료를 분석하였다. 신적설은 하루 동안(00~24시) 새로 쌓인 눈의 깊이를 표시한다. 마지막으로 강설발달의 열역학 및 역학적인 원인을 분석하

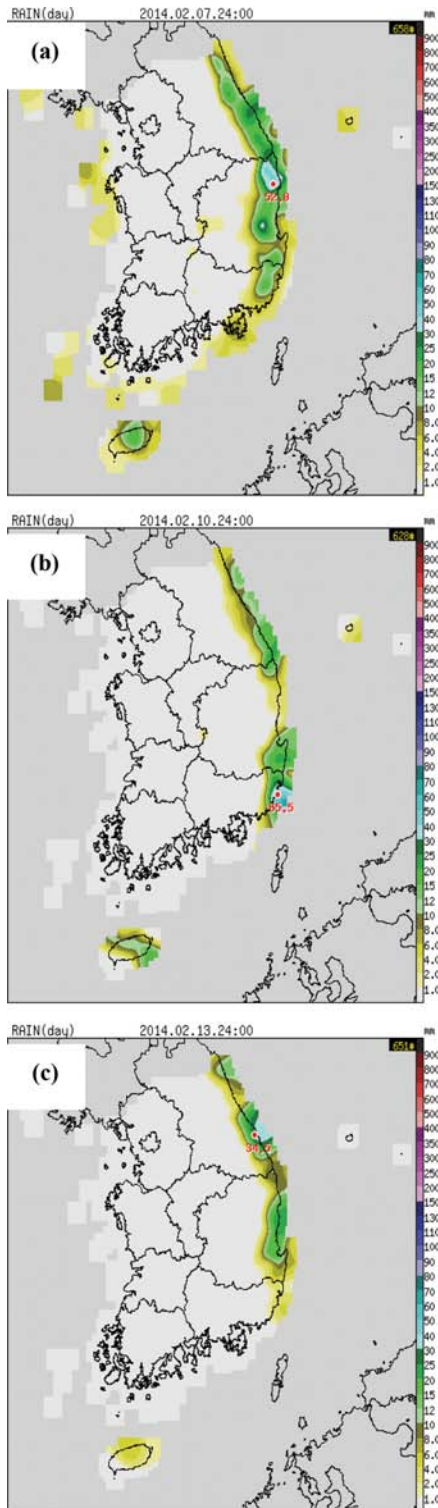


Fig. 1. 24-hour KMA AWS accumulated precipitation for (a) 7 Feb 2014, (b) 10 Feb 2014 and (c) 13 Feb 2014, respectively.

기 위해 단열선도와 미항공우주국(NASA)의 The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) 재분석자료를 이용하였다. 지상, 850 hPa, 500 hPa, 250 hPa 고도에서의 대기를 분석하기 위하여 $0.5^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ 격자 해상도를 가진 1시간 간격 자료를 사용 하였고, 대기의 연직 구조를 파악 하기 위하여 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 격자 해상도를 가진 3시간 간격 자료를 사용 하였다. 위의 자료들을 이용하여 2월 6일~2월 14일까지 총 9일 동안 동해안 지방에 피해를 준 강설현상을 분석하였다.

2.2 사례 선정

겨울철에는 상층에서 한기핵을 동반한 질리지기압이나 온도골을 동반한 기압골이 남하하여 한반도에 영향을 준다. 이로 인해 일반적인 겨울철 지상 기압 배치는 서고동저형 기압배치로, 해기차에 의해 발달한 구름대가 북서풍을 타고 서해안지방에 강설을 집중적으로 유발 시킨다. 하지만 본 사례는 2014년 2월 6일~14일의 9일 동안 동해안 지방을 중심으로 강설이 지속되어 최고 192 cm의 적설량을 기록했고, 8명의 사상자가 발생하였으며 총 피해액은 179억 원으로 집계된 매우 이례적인 현상이다(Ministry of Public Safety and Security, 2014). 이 기간 동안 동해안 지방의 강설량을 기상청 AWS 자료를 이용하여 나타내었다(Fig. 1). 총 9일의 사례 기간 동안 강릉에는 192.6 cm의 신적설량이 기록되었으며, 속초 129.3 cm, 울진 41 cm, 포항 17.6 cm, 울산 16.9 cm의 신적설량을 기록하였다.

이 기간 동안 천리안 위성 적외복사 영상에서 2월 7일 1200 UTC, 2월 10일 0000 UTC 그리고 2월 13일 0000 UTC에 온대 저기압에 의해 발생한 구름대가 동중국해 부근을 지나는 통과하였고 해기차에 의한 온도차가 낮은 하층운이 동해안지방에 영향을 주었다(Fig. 2). 온대저기압이 동중국해를 지나면서 상층운과 하층운의 영향을 받은 2월 7일~2월 8일, 2월 9일~2월 11일 그리고 고기압이 동해상으로 많이 확장하여 하층운의 영향을 많이 받은 2월 13일~14일을 중심으로 전체기간을 각각 전반기, 중반기, 후반기로 나뉘었다(Fig. 3). 분석은 사례기간의 강설 메커니즘이 뚜렷하게 달라 보여 상층운과 하층운의 영향을 받은 전반기와 대체로 하층운의 영향을 많이 받은 후반기(2월 13일 0000 UTC)를 기준으로 분석을 수행하였다.

3. 분석 방법

3.1 블로킹 지수(Blocking index)

먼저 2월 6일~2월 14일까지 총 9일 동안 강설이 지속된 원인을 조사하기 위하여 기압계의 정체를 확인할 수 있는 블로킹 현상의 존재 유무를 블로킹 지수

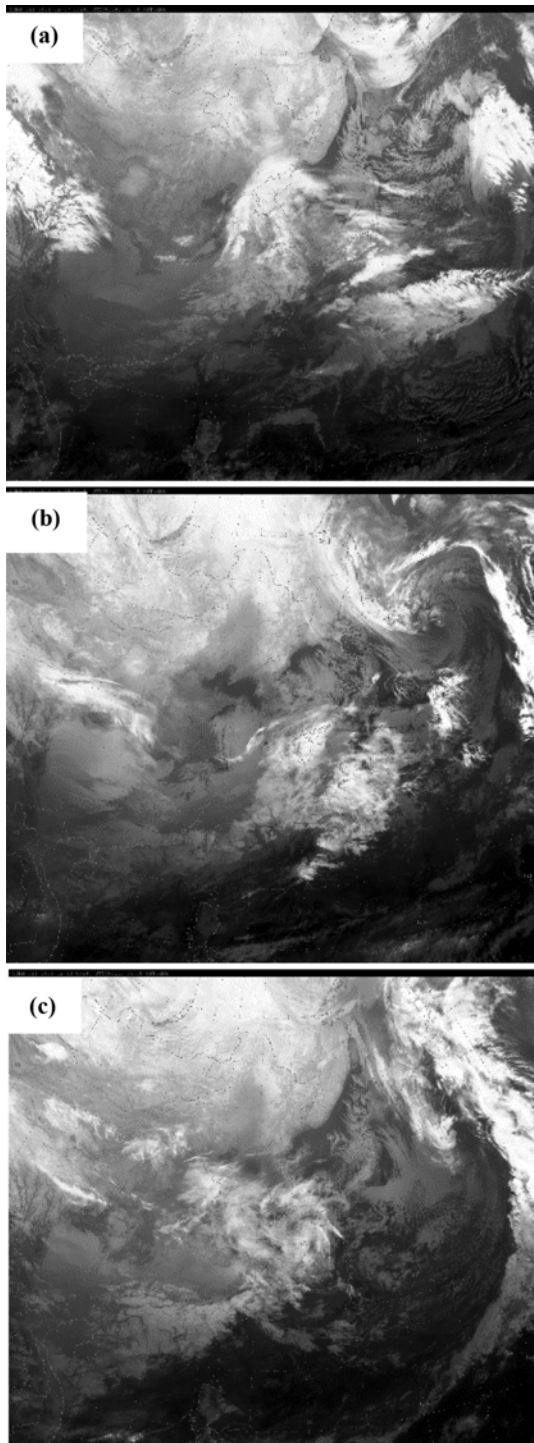


Fig. 2. Representative infrared radiation (IR) image from Cheonrihan Meteorological Satellite for (a) 1200 UTC 7 Feb 2014, (b) 0000 UTC 10 Feb, and (c) 0000 UTC 13 Feb, respectively.

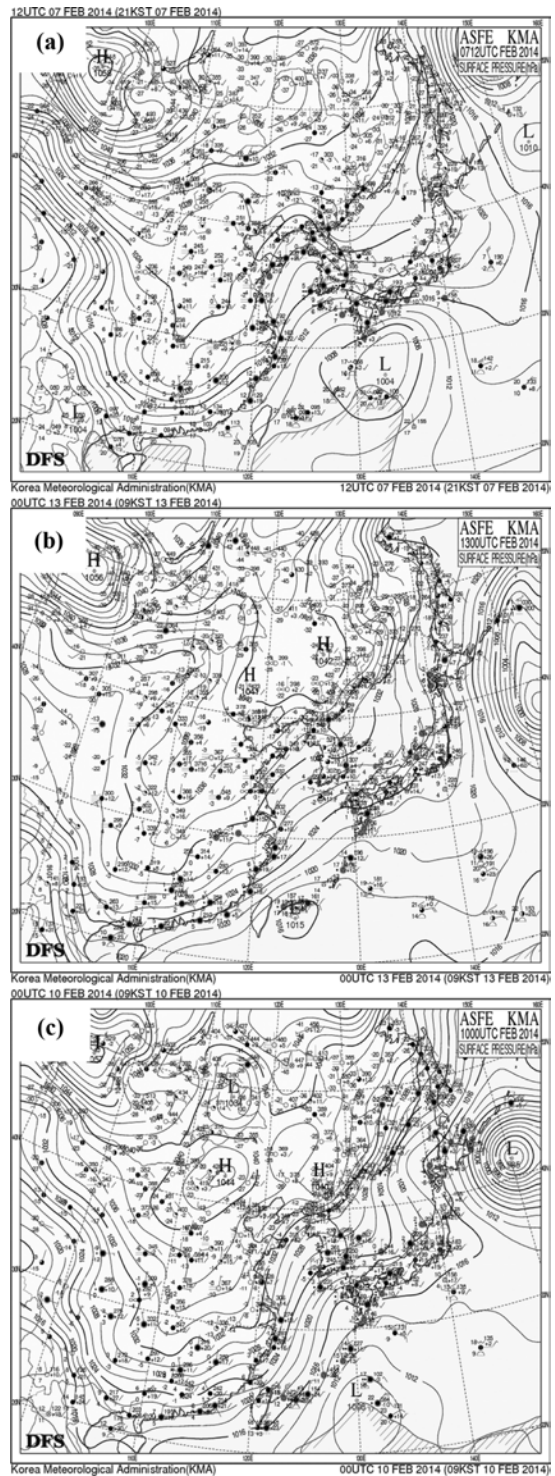


Fig. 3. Synoptic surface pressure weather charts at (a) 1200 UTC 7 Feb, (b) 0000 UTC 10 Feb, (c) 0000 UTC 13 Feb 2014.

를 이용하여 파악 하였다. 블로킹 지수는 Ryu (2012)가 제시한 남북의 500 hPa 고도 경도를 나타내는 GHGN (Geopotential Height Gradient North)과 GHGS (Geopotential Height Gradient South, Barriopedro et al., 2006), 그리고 동서의 500 hPa 고도 경도를 나타내는 GHGW (Geopotential Height Gradient West)와 GHGE (Geopotential Height Gradient East)를 통해 계산하였다.

$$GHGN = \frac{Z(\Phi_N) - Z(\Phi_0)}{\Phi_N - \Phi_0} \quad (3.1)$$

$$GHGS = \frac{Z(\Phi_0) - Z(\Phi_S)}{\Phi_0 - \Phi_S} \quad (3.2)$$

$$GHGW = \frac{Z(\lambda_W) - Z(\lambda_0)}{\lambda_W - \lambda_0} \quad (3.3)$$

$$GHGE = \frac{Z(\lambda_0) - Z(\lambda_E)}{\lambda_0 - \lambda_E} \quad (3.4)$$

여기서 Φ_N , Φ_0 , Φ_S 는 각각 위도 77.5°N, 60°N, 40°N를 나타내고, λ_W , λ_0 , λ_E 는 경도 132.5°E, 160°E, 160°W를 나타낸다. $Z(\Phi_{lat})$ 와 $Z(\lambda_{lon})$ 은 해당 위·경도의 500 hPa 지위고도이다. GHGN과 GHGS의 단위는 $m \text{ lat}^{-1}$ 이며, 계산된 지수가 각각 $-10 m \text{ lat}^{-1}$ 이하일 때와 $0 m \text{ lat}^{-1}$ 이상일 때 남북방향으로 블로킹 조건을 만족한다. GHGW와 GHGE의 단위는 $m \text{ lon}^{-1}$ 이며, 계산된 지수가 각각 $-7 m \text{ lon}^{-1}$ 이하일 때와 $5 m \text{ lon}^{-1}$ 이상일 때 동서방향으로 블로킹 조건을 만족한다. GHGN과 GHGS의 경우 두 지수 모두 조건을 만족 해야 하고 5일 이상 지속되어야 하지만, GHGW와 GHGE 지수는 두 지수 중 한 지수만 5일 이상 지속될 때 블로킹이 발생하였다고 판단한다. 또한 블로킹이 발생 하는 위치에 따라 위도는 $\pm 5^\circ$ 범위, 경도는 $0^\circ \sim 15^\circ$ 범위를 조절하여 블로킹 지수를 구할 수 있다.

3.2 온도 이류(Temperature advection)

일반적으로 온난이류가 존재하는 지역에서는 구름이 형성되고 저기압계가 발달할 수 있고, 한랭이류가 존재하는 지역에서는 고기압계가 발달하는 경향이 있다. 이에 공기의 이류에 의한 기압계의 발달 정도를 분석하기 위해 다음 식을 사용하여 계산하였다(Holton, 2006).

$$-V \cdot \nabla T = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.5)$$

온도 이류의 단위는 $K \text{ s}^{-1}$ 이며 u 는 동서성분 그리고 v 는 남북성분의 바람으로 단위는 $m \text{ s}^{-1}$ 이고 x 는 동서수평거리, y 는 남북수평거리이다. 위 식을 이용해

한랭 · 온난 이류를 분석하여 대기 하층의 구름 및 기압계 발달을 분석하였다.

3.3 상당온위(Equivalent potential temperature)

대기의 정역학적 안정도는 온위 또는 상당온위의 연직구배를 통해 파악할 수 있다. 대기의 안정도는 안정($\partial\theta_e/\partial z > 0$), 조건부불안정($\partial\theta_e/\partial z = 0$), 불안정($\partial\theta_e/\partial z < 0$)으로 분류되며 대기가 조건부 불안정할 경우 대류에 의해 발생된 구름으로 강수가 발생할 수 있다. 대기의 안정도는 아래의 상당온위 식을 사용하여 계산하였다(Bolton, 1980; Kim, 2010).

$$\theta_e = T_{LCL} \left[\left(\frac{1000 \text{ hPa}}{P_{LCL}} \right)^{R_d/C_p} \right] \left(\frac{L_v x}{C_p T} \right) \quad (3.6)$$

위 식에서 T_{LCL} 은 상승응결고도(Lifted Condensation Level, LCL)에서의 온도, P_{LCL} 은 상승응결고도에서의 압력고도(hPa), R_d 는 건조공기의 기체상수로 $287 J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 이며, C_p 는 정압비열로 $1005 J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 이고, x 는 비습($g \text{ kg}^{-1}$), L_v 는 물의 잠열을 나타내며, 0°C 에서 $2.5008 \times 10^{-6} J \text{ kg}^{-1}$ 이다. 위 식을 사용하여 상당온위(θ_e)의 연직 구배를 분석하여 대기의 안정도를 판단하였고, 단위는 K이다.

3.4 위치소용돌이도(Potential vorticity)

위치소용돌이도(Potential vorticity, PV)는 무마찰, 단열과정에서 등온위면에서 보존되고 이에 따라, 공기덩이가 수축하면 정적 안정도는 증가하게 되고 PV를 보존하기 위해 절대소용돌이도가 감소한다. 반대로 공기덩이가 연직으로 확장하면 정적 안정도가 감소하고 PV를 보존하기 위해 절대소용돌이도가 증가한다. 위치소용돌이도의 계산은 아래의 식을 사용하여 계산하였다(Hoskins et al., 1985; Holton, 2006).

$$PV = -g(f + \vec{k} \cdot \nabla_\theta \times \vec{V}) \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (3.7)$$

위 식에서 g 는 중력가속도 $9.81 m \text{ s}^{-2}$, f 는 코리올리 인자 $2\Omega \sin\phi$ 이며 Ω 는 전향력, ϕ 는 해당지역의 위도이다. 그리고 \vec{k} 는 연직 성분, ∇_θ 는 등온위면에서 계산된 연산자, \vec{V} 는 바람벡터이며 위치소용돌이의 단위는 $10^{-6} K \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ 이다. 위치소용돌이도를 이용하여 세계기상기구(WMO)에서 정의한 1.6 PVU를 역학적 대류권계면으로 정의 하였다(WMO, 1992). 대류권계면의 접힘이 발생하여 1.6 PVU 이상의 영역이 대기 중층 까지 하강하게 되면 해당 지역의 정적안정도가 감소하고, 절대소용돌이도를 증가시키게 된다. 강설의 역학과정을 파악하기 위해 MERRA 재분석 자료를 이용해 분석하였다.

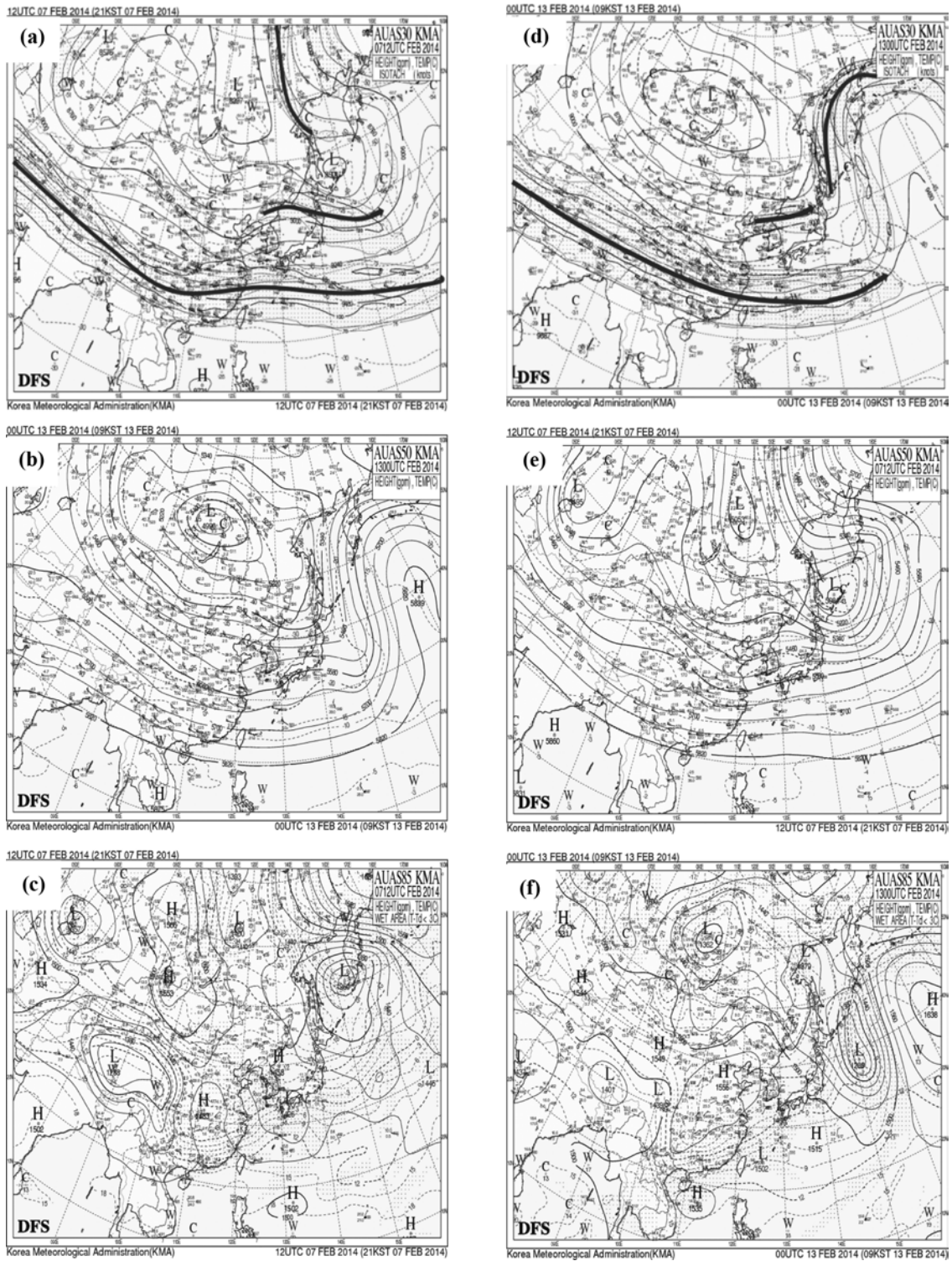


Fig. 4. Synoptic weather charts for (a, d) 300 hPa, (b, e) 500 hPa and (c, f) 850 hPa at 1200 UTC 7 Feb (left panel) and 0000 UTC 13 Feb 2014 (right panel).

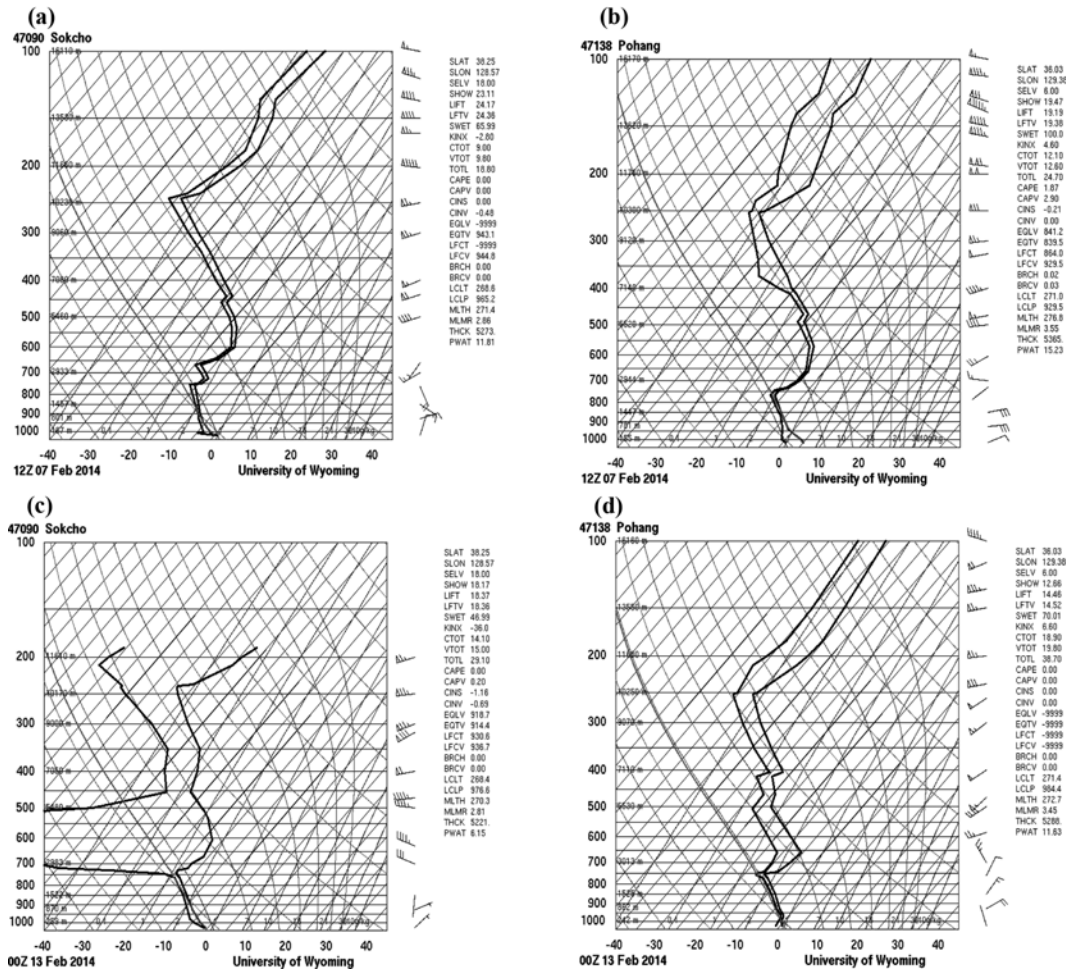


Fig. 5. Skew T - log P diagram of (a, c) Sokcho, (b, d) Pohang at 1200 UTC 7 Feb (top) and 0000 UTC 13 Feb (bottom).

4. 분석 결과

4.1 종관 일기도 분석

사례기간 동안 동해안에 폭설이 내렸던 시기의 종관 상태를 알아보기 위해 2월 7일 1200 UTC와 2월 13일 0000 UTC에서의 지상 및 상층일기도(850, 500, 300 hPa)를 분석하였다(Fig. 4). 2월 7일 1200 UTC 상층 300 hPa (Fig. 4a)과 500 hPa (Fig. 4b) 일기도를 보면 전반적으로 한반도 북동쪽에 절리저기압이 위치하고 있고, 한반도 서쪽에는 한기핵을 동반한 기압골이 위치하고 있다. 대기 하층 850 hPa 일기도(Fig. 4c)에서는 동한만 부근에 중심을 둔 고기압과 한반도 남쪽으로 지나간 저기압이 일본 규슈 지방에 위치하고 있으며 북고남저형의 기압배치 영향으로 동풍류의 바람이 동해안으로 지속적으로 불어 들어왔고, 저기압의 주변에서 발생한 온도능이 한반도에 위치하고 있다.

저기압의 북쪽으로 발생한 약한 기압골이 한반도 서쪽에 위치하고 있고 이 기압골로 인해 전국적으로 강설 현상이 발생하였다.

2월 13일 0000 UTC 300 hPa, 500 hPa에서 유라시아 대륙에 규모가 큰 절리저기압이 위치하고 있고 그 주변으로 약한 기압골이 위치하고 있다(Figs. 4d, e). 대기 하층 850 hPa에서는 동해상에 위치한 온도 골의 -9°C 등온선이 2월 7일에 비해 더욱 강하게 뺏어있으며 동중국해 해상에 저기압이 위치하였다(Fig. 4f). 2월 7일은 남쪽으로 지나가는 저기압이 한반도와 가까운 곳에 위치하면서 동풍류가 13일에 비해 상대적으로 더 강하였고 이 저기압의 영향으로 강설이 발생하였다. 반면에 2월 13일은 대륙고기압의 확장에 의한 동해상으로의 한기 유입이 상대적으로 따뜻한 해수면과의 해기차에 의한 강설이 발달하였다.

2월 7일 1200 UTC 속초와 포항의 단열선도를 비교

하면 250 hPa 아래의 노점차가 1~3°C 정도로 습하였고 800 hPa 하층에서는 동한만의 고기압과 일본 규슈 부근에 위치한 저기압 사이에서 동풍이 유입되는 것을 확인할 수 있다(Figs. 5a, b). 이는 구름대가 지상에서 상층까지 존재하였고 지속적인 동풍유입과 접근하는 상층기압골이 영향으로 강설이 발생했음을 알 수 있다. 2월 13일 0000 UTC 속초의 750 hPa 이하 하층은 노점차가 1~3°C 정도로 습하지만 7일에 비해 대기 중층 영역에서 건조역이 유입되어 노점차가 30°C 이상 커지면서 구름이 존재하지 않았고(Fig. 5c), 포항은 7일 1200 UTC와 비슷하나 750 hPa 이상의 상층에서 노점차가 10°C로 관측되었다(Fig. 5d). 따라서 속초는 대륙고기압이 동해로 확장하면서 해기차에 의한 운고가 낮은 구름 형성, 그리고 지속적인 대기하층에서 동풍유입으로 인한 산맥저지현상으로 강설의 원인을 찾을 수 있다. 포항은 속초에 비해 남쪽에 위치하고 있어서 제주도 남쪽해상으로 지나가는 저기압의 영향이 존재하였다. 속초와 포항 모두 7일보다 13일에 온도가 4°C가 낮아져 13일에 동해상으로 장출한 기의 영향이 더 강했음을 보여주고 있다.

4.2 블로킹 지수를 활용한 블로킹 판정

사례기간 동안 지속적으로 동해안 지방에 강설을 유발한 원인을 찾기 위해 기압계의 정체를 일으키는 블로킹 지수를 위도 77.5°N-40°N, 경도 132.5°E-160°W의 서태평양 범위에서 분석하였다.

사례기간의 전반기 기간(2월 7일~2월 8일) 동안 서태평양 부근 위도 25°N-65°N, 경도 170°E-175°W까지 500 hPa 기압능이 발달 하였으며(Fig. 6a), Rex (1950), Treidl (1981) 및 Bluestein (1993)이 분류한 4가지 블로킹 분류법에서 저지고기압형 패턴을 만족하였다. 연해주 북쪽에 중심을 둔 절리저기압이 서태평양에 위치한 저지기압능으로 인해 서진하지 못하고 남쪽으로 이동하였고, 동해상에 단파골이 발달하면서 -40°C의 찬 공기가 동해상으로 장출하였다. 지상에서는 동해상으로 장출한 단파골의 후면으로 지상고기압이 강하게 발달하였다.

사례기간의 중반기 기간(2월 9일~2월 11일)에는 저지기압능이 더욱 발달하여 위도 25°N-75°N, 경도 150°E-160°W까지 전반기에 비해 수평 규모로 약 1000 km 이상 면적이 증가하였으며(Fig. 6b), 4가지 블로킹 형태에서 오메가저지형을 만족하였다. 절리 저기압은 연해주 북쪽에 중심을 뒀던 전반기에 비해 남쪽으로 이동하여 만주지방에 위치하였으며 -30도 등온선이 한반도까지 남하하여 전반기에 비해 10도가량 낮아졌다. 지상에서는 전반기와 비슷한 기압배치를 보였으나 전반기에 비해 찬 공기가 더욱 남하하여 동해상으로 지상 고기압이 더욱 강하게 발달하여 장출 하였다.

한국기상학회 대기 제26권 2호 (2016)

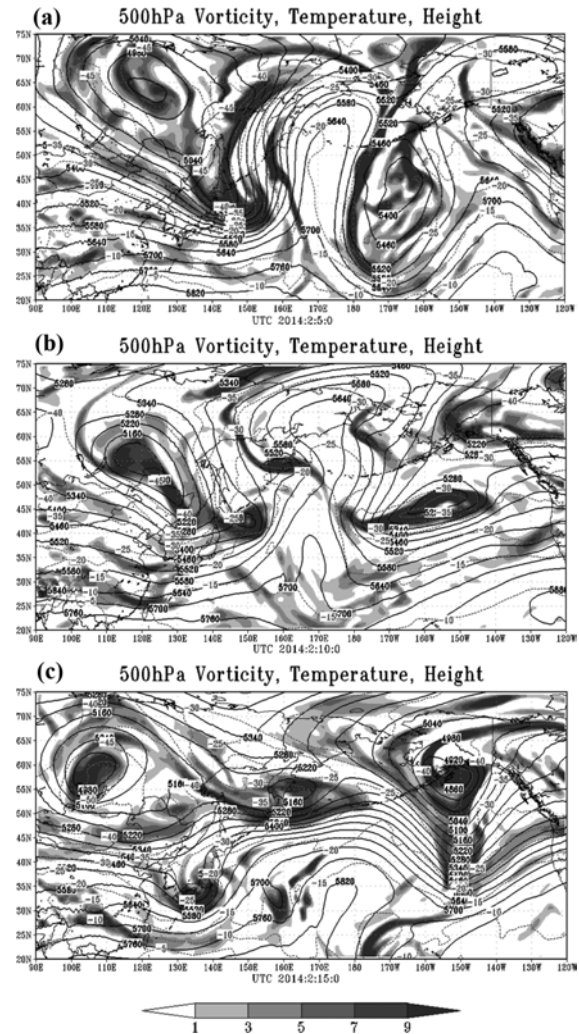


Fig. 6. 500 hPa geopotential height (gpm, solid lines), temperature (°C, dotted lines) and vorticity (10^{-5} s^{-1} , shaded area) for (a) 0000 UTC 5 Feb, (b) 0000 UTC 10 Feb and (c) 0000 UTC 13 Feb 2014, respectively.

사례기간의 후반기 기간(2월 13일~2월 15일)에는 강하게 발달하였던 오메가저지형 기압능이 저지기압능의 형태로 약화되었고 만주 지역에 위치하였던 절리 저기압은 베타효과로 인해 서진하였다(Fig. 6c). 한반도는 절리저기압 주변으로 형성된 단파골의 영향을 받고 있고 블로킹이 강하게 발달했었던 중반기에 비해 -30도 선이 북쪽으로 이동하였다. 지상에서는 전반기, 중반기와 마찬가지로 연해주 부근에 위치한 지상고기압의 영향을 받았으나 강도는 상대적으로 약화되었다.

2004년~2013년까지 10년 동안 2월 평균 블로킹 지

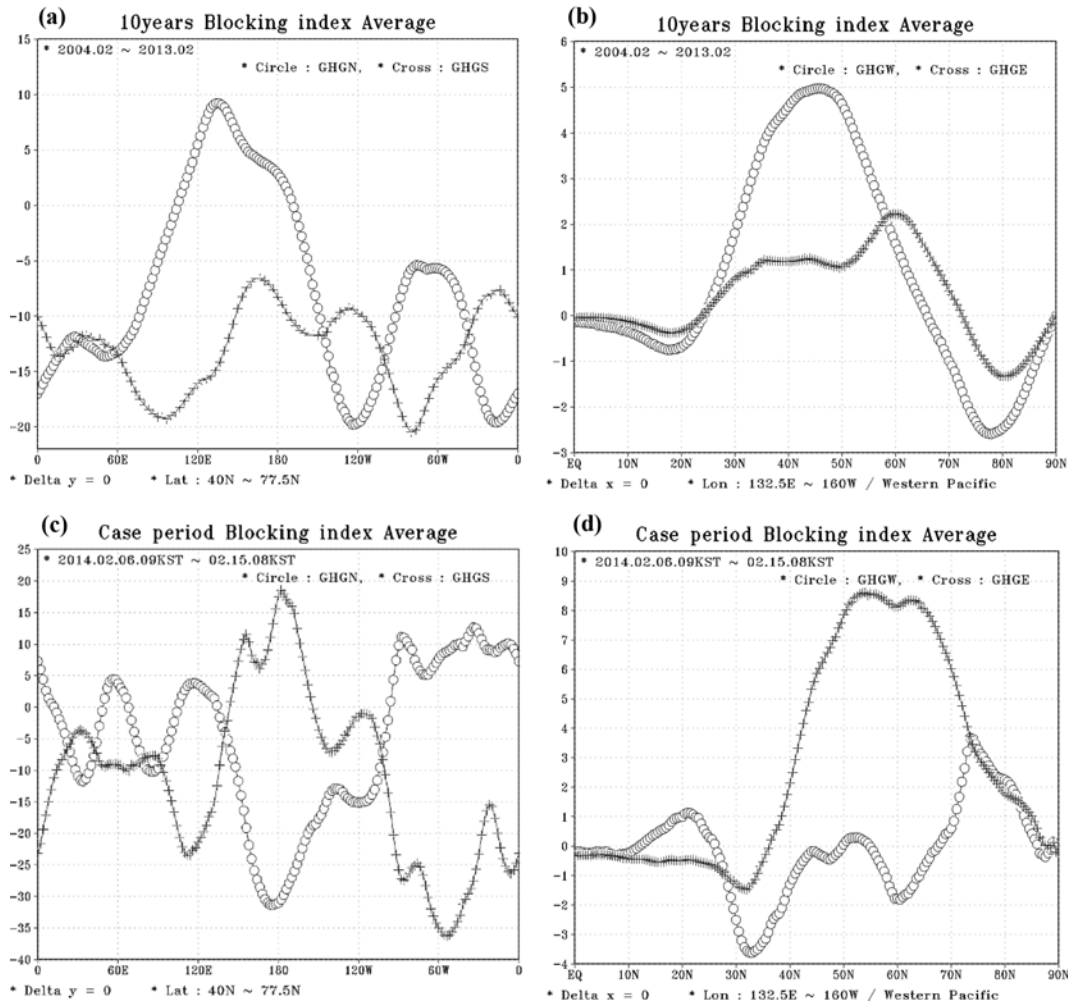


Fig. 7. Blocking indices ($m \text{ degree}^{-1}$) obtained from 10-year average (top) and case period (bottom). Left column is for GHGN and GHGS while right column is for GHGW and GHGE.

수는 500 hPa 남북 지위고도 경도를 나타내는 GHGN이 $-20 m \text{ lat}^{-1}$, GHGS는 $-6 m \text{ lat}^{-1}$ (Fig. 7a) 그리고 500 hPa 동서 지위고도 경도를 나타내는 GHGW가 $-2.6 m \text{ lon}^{-1}$, GHGE는 $2.3 m \text{ lon}^{-1}$ 로 나타났다(Fig. 7b). 사례기간 동안 블로킹 지수는 GHGN이 $-32 m \text{ lat}^{-1}$, GHGS는 $18 m \text{ lat}^{-1}$ (Fig. 7c), GHGW는 $-3.8 m \text{ lon}^{-1}$ 그리고 GHGE는 $8 m \text{ lon}^{-1}$ 로 나타나(Fig. 7d) GHGN과 GHGS는 모두 블로킹 조건을 만족하였으며, GHGW와 GHGE 중 GHGE의 값이 블로킹 조건을 만족하였고 사례기간 총 9일 동안 지속되어 강한 블로킹이 존재하였다.

또한 서태평양에서 사례기간 동안의 평균 500 hPa 지위고도와 10년 평균(2004년 2월~2013년 2월) 500 hPa 고도의 편차를 계산하였는데, 사례기간이 10년 평

균에 비해 최고 350 gpm 높았다. 이러한 블로킹 현상이 기압계의 정체를 일으켜 찬 공기가 유라시아 대륙에 머물게 되면서 연해주와 만주 지역에 자리 잡은 강한 지상 고기압이 확장하였고, 사례기간 동안 동해의 평균기온이 10년 평균기온에 비해 $-2^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$ 가량 낮았다(Fig. 8).

4.3 역학적 분석

2014년 2월 7일 1200 UTC 500 hPa에서 -25°C 가 위도 40°N 에 걸쳐있고 -35°C 는 위도 $45^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 에 위치해 있다. 한반도는 -20°C 온도능의 영역에 위치하고 있고 중국 산둥반도 부근에서 화중지방까지 형성된 단파골이 접근하고 있다(Fig. 9a). 약한 단파골상에서 저기압성 소용돌이를 나타내는 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이상의 양

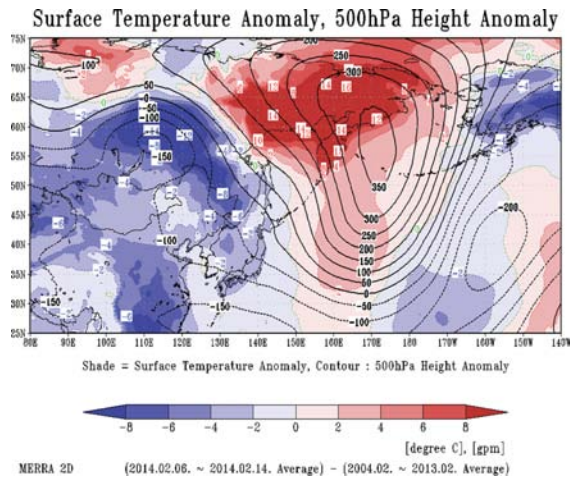


Fig. 8. 10-year mean 500 hPa geopotential height (gpm, solid lines) and surface temperature anomaly ($^{\circ}\text{C}$, shaded area) the case period (2004. 02.~2013. 02.).

의 소용돌이도가 형성되어 한반도로 접근하고 있다. 이 기압골의 영향으로 7일에 전국적으로 강수현상이 이어졌다. 한편 13일 0000 UTC에서는 -25°C 가 위도 35°N 부근에 위치하고 있고 -35°C 는 위도 42°N 부근에 위치해 있어 전반기에 비해 등온선이 더욱 남하하였다. 중국 화중지방 연안으로 단파골이 형성되었고 한반도 남쪽으로 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이상의 양의 소용돌이도가 보이지만 한반도 동해상은 특별한 값이 나타나지 않았다(Fig. 9b). 즉, 13일은 강설의 원인이 대기 하층의 영향으로 주로 나타났다.

대기 하층 850 hPa에서는 7일 1200 UTC에 제주도 남쪽 해상을 지나는 저기압의 영향을 받아 전국적으로 강수현상이 있었고, 한반도는 -9°C 의 온도능의 영역에 위치 하고 있었다. 그리고 노점차가 1°C 이하로 나타나 아주 습한 영역이 동해상과 서해상에 자리 잡고 있었다(Fig. 9c). 13일 0000 UTC에는 저기압이 동중국해를 지나면서서 노점차도 7일에 비해 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 가량 낮게 나타났고 동해상과 남해상이 습하였다(Fig. 9d).

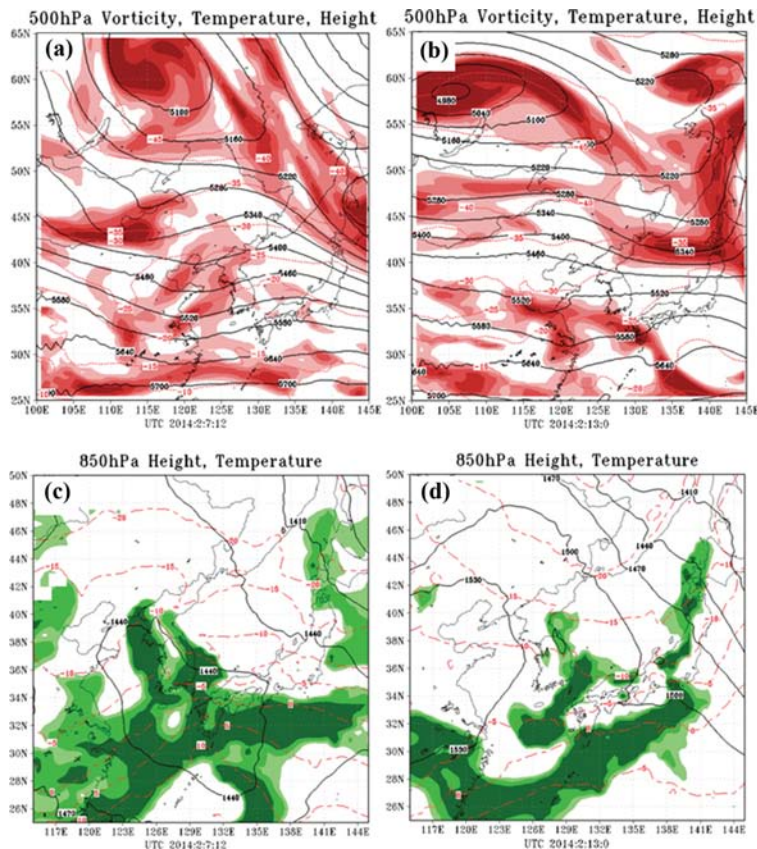


Fig. 9. (a, b) 500 hPa geopotential height (gpm, solid lines), vorticity (10^{-5} s^{-1} , shaded area), temperature ($^{\circ}\text{C}$, dotted lines) and (c, d) 850 hPa geopotential height (solid lines), temperature (dotted lines), T-Td (shaded area) for 1200 UTC 7 Feb 2014 (left panel) and 0000 UTC 13 Feb 2014 (right panel), respectively.

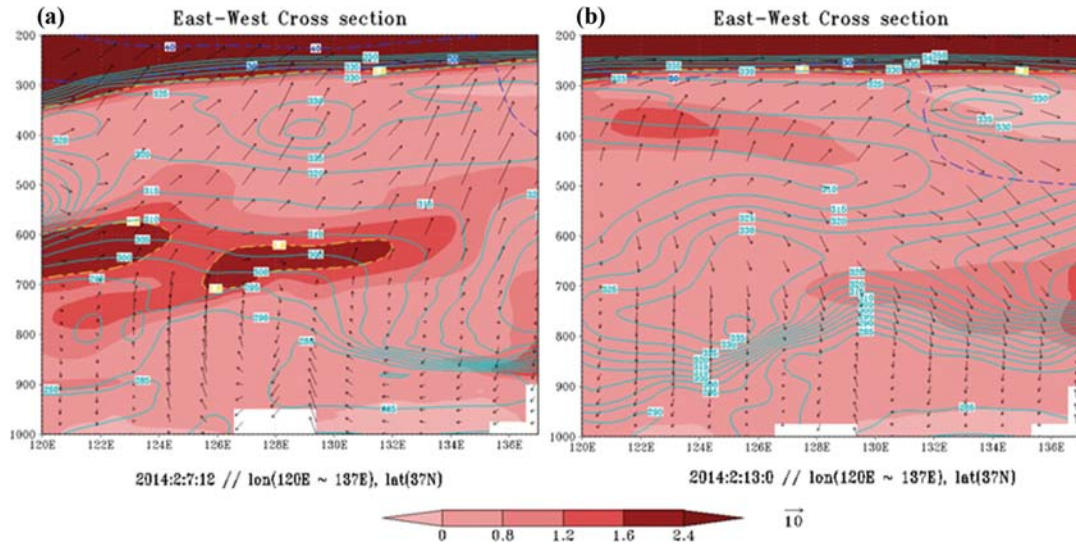


Fig. 10. East-West vertical cross-section at latitude 37°N. Solid cyan line is equivalent potential temperature (K), black arrow is vertical velocity (m s^{-1}) and shaded area is potential vorticity (10^{-5} s^{-1}) for (a) 1200 UTC 7 Feb 2014, (b) 0000 UTC 13 Feb 2014, respectively.

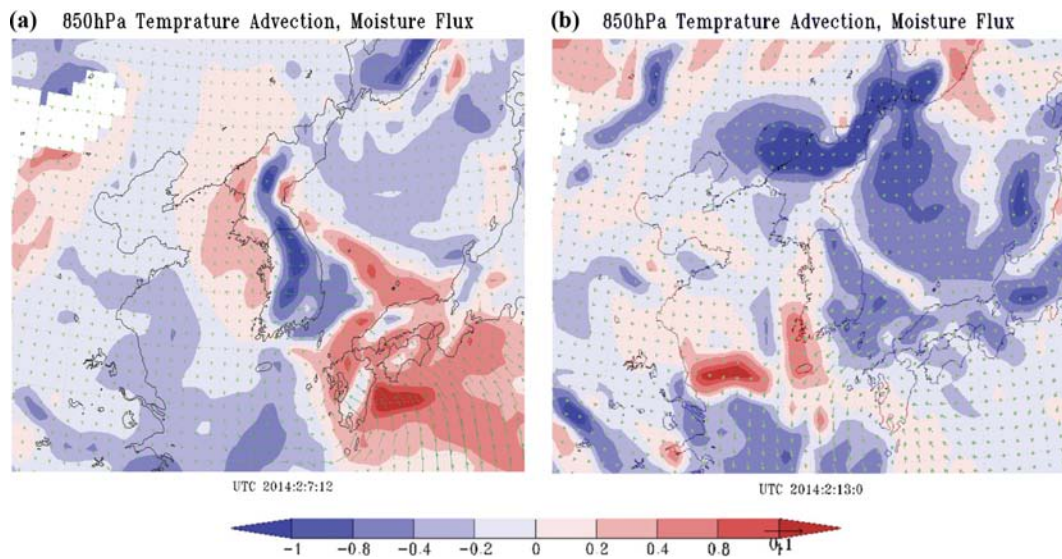


Fig. 11. 850 hPa temperature advection (K s^{-1} , shaded area) and moisture flux ($\text{g kg}^{-1} * \text{m s}^{-1}$, vector) for (a) 1200 UTC 7 Feb 2014, and (b) 0000 UTC 13 Feb 2014, respectively.

7일에 비해 한기가 동해상으로 더욱 강하게 확장 하면서 -10°C 선이 영남 동해안 지방까지 내려오게 되어 해기차가 더욱 크게 났다.

4.4 열역학적 분석

대기의 연직 운동과 안정도를 분석하기 위해 동서

연직 단면도를 계산하였다(Fig. 10). 동서 연직단면도에는 상당온위의 연직변화와 위치소용돌이도의 변화를 분석하기 위하여 1.6 PVU와 연직속도를 분석하였다. 또한, 열역학적인 측면에서 온도 이류는 저기압의 발달이나 구름의 발달에 중요한 역할을 하므로 대기 하층 850 hPa에서 온도이류와 수분속을 계산하였다

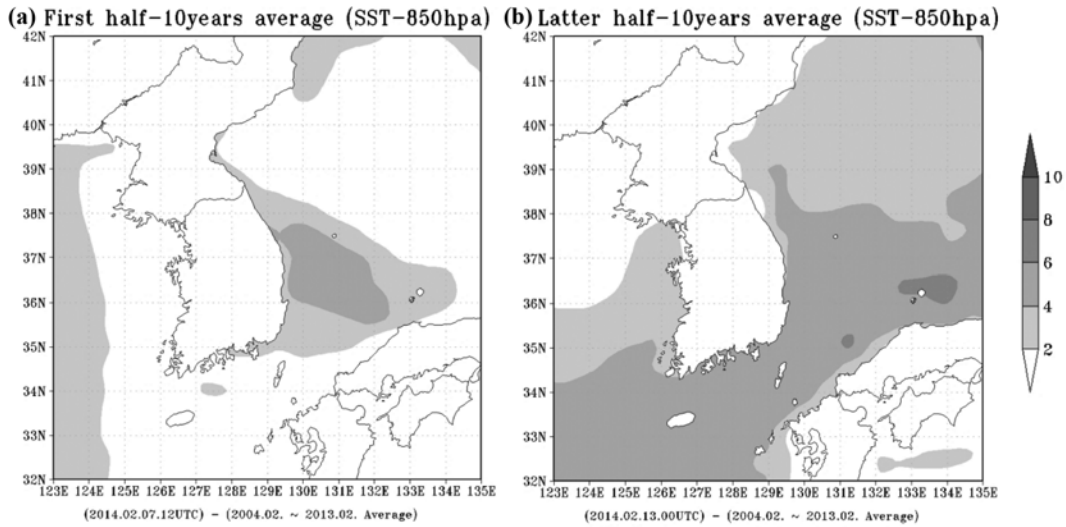


Fig. 12. The difference between 10-year sea-air temperature for case periods (a) 1200 UTC 7 Feb 2014 (first half), and (b) 0000 UTC 13 Feb 2014 (latter half), respectively.

(Fig. 11).

Figure 10은 2월 7일 1200 UTC와 2월 13일 0000 UTC의 위도 37°N의 연직단면도이다. 먼저 2월 7일 1200 UTC에서 대기의 안정도를 분석해보면 한반도 (126.5°E~129.5°E)는 대체적으로 중립상태를 보이고 있으며 동해상에서는 1000-800 hPa까지 연직고도변화에 따른 중립층($d\theta/dz \approx 0$)이 존재하고 있다(Fig. 10a). 700-600 hPa 대기 중층에 1.6 PVU 이상의 값을 가지는 위치소용돌이도가 자리 하고 있다. 기류는 대기 중상층까지 상승하는 모습을 보여주고 있으며 대기 하층에서의 중립대기와 대기 중층의 위치소용돌이도의 영향으로 강설이 비교적 강하게 발달 할 수 있었다. 이에 비해 2월 13일 0000 UTC에는 상당온위 값이 높은 건조한 공기가 대기 중층으로 형성되어 있어 대기 중층은 대기가 안정한 상태이고, 대기 하층은 연직고도변화에 따른 상당온위의 변화가 없는 중립층을 형성하고 있다. 산맥 저지현상으로 인한 기류의 상승이 800 hPa까지 나타나고 있고 상승한 기류가 안정한 층($d\theta/dz > 0$)을 만나 동해상에서 다시 하강하게 되면서 열적 순환이 나타나고, 지속적인 동풍류의 유입으로 인한 산맥저지현상으로 강설이 발생하였다(Fig. 10b).

Figure 11은 2월 7일 1200 UTC와 2월 13일 0000 UTC의 온도이류와 수분속을 분석한 것이다. 2월 7일 1200 UTC에서는 일본 규슈지방에 위치한 저기압의 영향으로 온난 이류대가 동해상에 형성되어 있으며 저기압이 한반도와 가깝게 지나가면서 동풍의 영향을 받아 수분속이 0.05 m s^{-1} 으로 나타났다(Fig. 11a). 반면에 13일 0000 UTC에서는 동해상으로 장출한 한기

의 영향에 의해 동해상에 한랭이류가 나타나고 있으며 상대적으로 따뜻한 동해안의 해수면과 만나게 되어 기단이 변질되고 해기차에 의한 운고가 낮은 구름대가 발생하였다(Fig. 11b). 저기압은 제주도 남쪽 먼 바다로 지나가면서 7일에 비해 동해로 확장한 대륙고기압의 영향을 더 많이 받았다.

Figure 12는 2월 7일 1200 UTC와 2월 13일 0000 UTC의 850 hPa 고도의 온도와 동해 해수면의 온도차를 분석한 것이다. 7일 1200 UTC에는 동해상에 최고 21°C의 온도 차가 발생하였고, 13일 0000 UTC에는 25°C의 차이가 발생하였다. 이는 10년 평균의 온도차와 비교하였을 때 사례기간의 전반기 동안에는 1°C~3°C 가량 더 낮았다(Fig. 12a). 후반기에는 전반기보다 온도차가 더욱 커져 2°C~6°C 차이를 보였으며, 큰 해기차에 의한 열적 불안정으로 운고가 낮은 구름대가 발생하였다(Fig. 12b).

4.5 사례 종합 분석

본 연구에서는 2014년 2월 6일~2월 14일까지 9일의 기간 동안 강설일을 기준으로 강설량이 가장 많았던 7일 1200 UTC와 13일 0000 UTC를 중심으로 전반기와 후반기로 나누어 종관 일기도 분석, 블로킹 분석, 역학적 분석, 열역학적 분석 등을 수행하였다. 사례기간 동안 위도 34°N-39°N, 경도 127°E-132°E 영역에서의 500 hPa 지위고도와 700 hPa 지위고도, 그리고 기상청 유인관측소 5개 지점(속초, 강릉, 울진, 포항, 울산)에서 관측한 강수량자료와 12시간 단위의 신적설자료, 기상청 AWS에서 관측된 지상 바람 등을 시

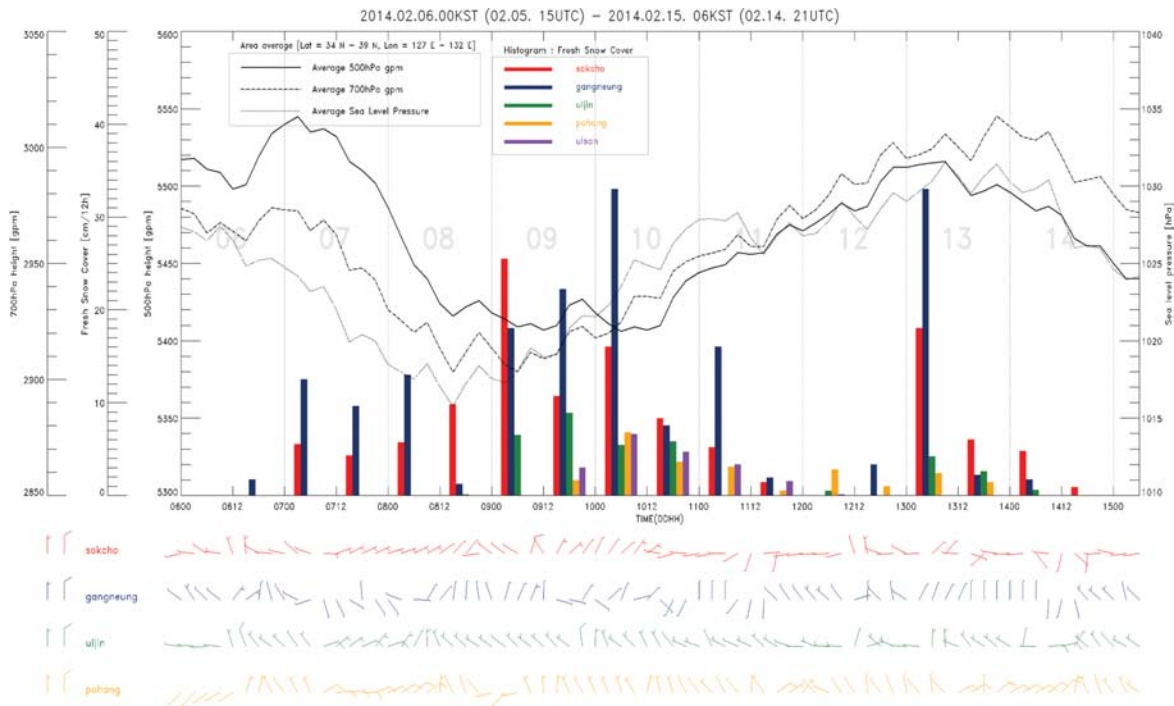


Fig. 13. Time series of geopotential height at 500 hPa (solid line) and 700 hPa (dashed line) areas between latitude from 34°N to 39°N and 127°E to 132°E with mean sea-level pressure (dotted line), Histogram showing fresh snow accumulation intervals in 12 hour interval observations at KMA sites (Sokcho, Gangneung, Uljin, Pohang, Ulsan) with observed surface winds.

계열로 나타내었다(Fig. 13). 본 연구의 전반기(2월 6일~2월 8일)에 서태평양 부근에서 블로킹이 발생하여 저지고기압의 패턴이 발달하였다. 한반도는 연해주 북쪽에 위치한 500, 700 hPa 절리저기압의 가장자리에서 발생한 단파골의 영향을 받아 지위고도 및 지상기압이 감소하고 있었다. 지상에서는 북고남저형의 기압배치로 인해 최고 10 m s⁻¹의 동풍기류가 불었고 남해상의 저기압이 북쪽으로 약한 기압골을 뻗쳐 동해안 지방과 전국에 강설이 있었다. 또한 5 × 10⁻⁵ s⁻¹ 이상의 강한 양의 소용돌이도를 지닌 단파골이 한반도에 영향을 주어 500 및 700 hPa 지위고도가 감소하였다. 동해상에 연직으로 800 hPa 고도까지 상당온위의 중립층이 존재하였고, 동풍의 영향에 의한 상승기류와 1.6PVU 이상의 위치소용돌이도가 한반도 상공을 통과하면서 대기 중·상층까지 연직 상승류를 강화시켰다. 대기 하층에서는 저기압의 영향에 의해 동해상에 2 × 10⁻⁴ K s⁻¹ 이상의 온난 이류역이 형성되었고, 저기압이 한반도 남쪽으로 지나가 수증기의 유입에 의해 동해안 지방에 노점차가 1°C 이하로 나타나 습하였다. 동해상에 850 hPa 고도의 기온과 해수면의 온도 차이를 나타내는 해기차는 최고 21°C였다.

후반기(2월 13일~2월 14일)에는 서태평양에서 발생 하였던 블로킹이 점차 약화되었지만 저지고기압과 만주부근에 위치한 절리저기압의 기압 배치는 큰 변화가 없었으며, 동해상으로 장출하였던 단파골의 후면에 한반도가 위치하였다. 따라서 500 및 700 hPa 지위고도 그리고 지상기압이 점차 높아져 고기압의 영향을 받았고, 지상바람은 강원도 동해안에서 북동풍이, 경상도 동해안에서는 북풍이 주로 불었다. 이는 Lee et al. (2009)이 언급했던 동풍기류가 산맥의 저지효과로 인해 풍속이 감소되면서 지균 균형이 깨져 기압경도력에 의한 북풍계열의 바람이 해안가를 따라 불게 되는 것과 일치하였다. 이 기간에는 만주·연해주 지방에 중심을 두었던 대륙 고기압이 동해로 더욱 강하게 확장하여 -10°C의 온도선이 일본 규슈지방까지 하강 하였고 7일에 비해 더욱 남쪽지방인 동중국해 해상으로 저기압이 통과하였다. 이로 인해 최고 8 m s⁻¹ 이상의 동풍기류가 발달하여 동해안 지방의 강설에 영향을 주었다. 또한 연직으로 상당온위의 중립층이 800 hPa까지 존재하였고 동풍이 지속적으로 유입됨에 따라 산맥 저지현상으로 인한 기류의 상승이 동해안 지역에서 확인되었다. 2월 7일과 다르게 대기 중상층에서 1.6PVU 이상의 위치소용돌이도는 발

견되지 않았다. 노점차가 30°C 이상 차이 나는 건조한 공기가 동해상 전체로 확장하면서 대기 중층은 상대적으로 안정한 상태였다. 대기 하층 850 hPa에서는 동풍의 영향으로 동해안은 여전히 습한 상태였고, 7일 대비 한기가 강하게 확장하여 850 hPa에서의 온도 이류는 동해상 전역에 한랭이류가 존재했다. 해기차는 최고 25°C로 해기차에 의한 구름발달이 7일 대비 더 활발히 이루어 졌으며 이로 인해 생성된 잠열로 대류계가 발달 한 것으로 사료된다(Conditional Instability of Second Kind, CISK; Bates, 1973; Kim et al., 2013).

사례 전 기간의 강수량을 기준으로 보면 중반부인 9~11일 사이에 강수량이 가장 많았는데, 이는 전반부에서 후반부로 넘어가는 과정에서 블로킹이 가장 강하게 발달하여 오메가저지형의 패턴을 보였고 질리지기압은 베타평면효과(β -plane effect)로 동진하지 못하고 서진하였기 때문이다. 즉, 질리지기압의 가장자리에서 발생한 대기 중층 기압골의 영향과 대기 하층 한기의 동해 확장 효과가 더해져 강한 강설현상을 유발하였다. 이는 Gangwon Forecast Technical Research Society (2009)에 언급된 대기 중층 500 hPa 고도에서 연속으로 단파골들이 접근할 때 강설이 강해질 수 있다고 보고한 사례와 일치한다. 본 연구 사례 기간 동안 대기 중층 500 hPa 고도에서 총 9번의 단파골이 한반도를 통과하였고, 단파골이 강설현상을 발달 시키는데 영향을 주었을 것으로 사료된다.

또한 서태평양에서 발생한 블로킹에 의해 기압계가 정체되어 강설현상이 오래 지속되었다. 사례 기간 동안의 평균 블로킹지수는 GHGN이 -32 m lat^{-1} , GHGS는 18 m lat^{-1} 를 나타내었고, GHGW가 -3.8 m lon^{-1} , GHGS는 8 m lat^{-1} 을 나타내면서 강한 블로킹 현상이 존재하였다. 블로킹 현상으로 인해 기압계가 정체되어 9일 동안 북고남저형의 기압배치를 유지하여 강설현상이 지속되었다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 2014년 2월 6일~2월 14일까지 한반도 동해안 지방에서 발생한 강설사태에 대해 전반부(2월 7일~2월 9일)와 후반부(2월 13일~2월 14일)로 나누어 분석 하였다. 분석에 사용된 자료는 AWS 지상 강수량과 지상바람 자료, 지상 및 상층일기도(850, 500, 300 hPa), 천리안 위성의 적외영상, NASA MERRA 재분석자료 이다. NASA MERRA 재분석자료를 사용하여 블로킹지수와 역학적, 열역학적 분석 등을 시행하였다.

사례 기간 전반부에는 대기 중층 600~700 hPa 고도에 위치한 위치소용돌이도가 대기 하층에서 중층까지의 경압 불안정을 유발시켜 연직 상승류가 발달하여 강설로 이어졌고 후반부에는 북고남저형의 기압배치

에서 동해로 확장한 지상 고기압의 영향으로 한기가 따뜻한 해수면을 지나면서 대기 하층의 정적 불안정이 유도되어 강설로 이어졌다. 이는 Park et al. (2009)이 언급한 영동과 영남지방의 대설 메커니즘과 유사한 결과를 보였다. 이로 인해 대기 하층에서는 북고남저형의 기압배치가 유지되면서 동해상의 온도는 10년 평균에 비해 최고 4°C가량 낮았고, 동해안으로 동풍이 지속적으로 유입되면서 태백산맥의 산맥 저지현상으로 해안가에 수렴대가 형성되어 강설현상이 유발되어 속초 26.5 cm, 강릉 41 cm, 울진 0.1 cm의 누적 신적설량을 기록했다.

후반부에는 7일과 같이 북고남저형의 기압배치에 의해 동풍기류가 지속적으로 유입되어 산맥저지현상에 의한 강설이 이어졌다. 또한 대륙 고기압이 더욱 강하게 확장하면서 -9°C 의 등온선이 동해상 전역으로 확장하여 한랭이류가 동해상에 강하게 나타났다. 이로 인해 7일에 비해 해기차가 4°C 더 커지면서 최고 25°C를 나타내어 대류운이 많이 발생하였으며 이는 잠열이 방출하여 비단열 가열로 인한 것으로 분석되며 CISK로 사료된다. 동풍의 영향으로 대류운이 동해안으로 유입되어 속초 25 cm, 강릉 39.7 cm, 울진 9.8 cm, 포항 2.5 cm의 누적 신적설량을 기록하였다.

사례의 중반부(2월 9일~2월 11일)에는 속초 77.8 cm, 강릉 111.9 cm, 울진 31 cm, 포항 15.1 cm, 울산 16.9 cm의 누적 신적설량을 기록하여, 전반부에서 대기 중층의 위치소용돌이도의 영향과 후반부에는 한기의 동해상 확장에 따른 영향 그리고 지속적인 대기 중층 단파골의 영향 등이 중첩되면 더욱 강한 강설현상이 나타났음을 알 수 있었다. 마지막으로 9일 간 장기적으로 폭설을 내리게 한 원인 중 하나인 서태평양에서 발생한 블로킹현상은 Bluestein (1993)이 구분지었던 블로킹 구분법으로 분류해 보았을 때, 저지고기압형 - 오메가저지형 - 저지고기압형 순서로 발달했다가 소멸하였으며, 블로킹 현상에 의해 규모가 큰 질리지기압이 정체하는 모습을 보였다.

본 연구는 우리나라 동해안 지방에 발생한 폭설 사례로 종관적, 역학적, 열역학적인 분석을 통해 폭설의 발달 메커니즘에 대해 조사하였다. 분석을 통하여 대기 중·상층에서의 블로킹현상, 위치소용돌이도의 영향, 종관적인 기압배치에 의한 풍향, 한기의 위치, 그리고 대기의 안정도가 동해안지방의 강설현상과 밀접하게 관련이 있음을 알 수 있었다. 향후 겨울철 다양한 강설현상 사례에 대해 대기 중·상층에서의 시스템 개입, 종관규모 기압배치, 역학적, 열역학적, 그리고 한반도 주변 지형 환경 분석 등이 지속적으로 이루어져 강설 예보의 정확성을 더욱 높여 인명피해와 재산피해를 최소화시킬 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 경북대학교 연구기금 2014의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Barriopedro, D., H. R. Garcia, A. R. Lupo, and E. Hernandez, 2006: A Climatology of Northern Hemisphere Blocking. *J. Climate*, **19**, 1043-1061.
- Bates, J. R., 1973: A Generalization of the CISK Theory. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1509-1519.
- Bluestein, H., 1993: Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. *Oxford University Press*, 608 pp.
- Bolton, D., 1980: The computation of equivalent potential temperature. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1046-1053.
- Gangwon Forecast Technical Research Society, 2009: *Gangwon Yeongdong severe weather research report*. Gangwon regional Meteorological Administration, 1-10.
- Holton, J. R., 2006: *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th ed. Elsevier Inc., 535 pp.
- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877-946.
- Kim, J. Y., K. H. Min, K. E. Kim, and K. W. Lee, 2013: A Case Study of Mesoscale Snowfall Development Associated with Tropopause Folding. *Atmosphere*, **23**, 331-346.
- Kim, K. E., 2010: Atmosphere thermodynamics. *Donghwa Publishing*, 254 pp.
- KMA, 2011: *Analysis of winter heavy snowfall cases using satellite imagery (Analysis of heavy snowfall characteristics based on conceptual models)*. KMA National Satellite Center Tech. Note 2011-2, 48 pp.
- Lee, J. G., S. D. Kim, Y. J. Kim, S. H. Jung, S. H. Han, and J. H. Kim, 2009: A numerical study of the topographic effect on the downslope wind and a distribution of the heavy snowfall in the Yeongdong area. Research Thesis, Gangneung-Wonju University, 61 pp.
- Lejenäs, H., and H. Økland, 1983: Characteristics of northern hemisphere blocking as determined from along time series of observational data. *Tellus A*, **35**, 350-362.
- Ministry of Public Safety and Security, 2014: *Disaster Report 2014*. Ministry of Public Safety and Security Disaster Insurance Division, 27 pp.
- Park, J. H., K. E. Kim, and B. H. Heo, 2009: Comparison of Development Mechanisms of Two Heavy Snowfall Events Occurred in Yeongnam and Yeongdong Regions of the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **19**, 9-36.
- Rex, D. F., 1950: Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate. *Tellus*, **2**, 275-301.
- Ryu, D. H., 2012: Development of Blocking Index for detecting Extreme Climate in Korea. MA degree Thesis, Kongju National University, 48 pp.
- Tibaldi, S., and F. Molteni, 1990: On the operational predictability of blocking. *Tellus A*, **42**, 343-365.
- Treidl, R. A., E. C. Birch, and P. Sajecki, 1981: Blocking action in the northern hemisphere: A Climatological study. *Atmosphere-Ocean*, **19**, 1-23.
- WMO (World Meteorological Organization), 1992: *International Meteorological Vocabulary*. Secretariat of the World Meteorological Organization, 784 pp.