

2016년 1월 23일 제주도에 일어난 국지규모 폭설의 원인과 특징에 관한 사례 연구

여지혜 · 하경자*

부산대학교 지구환경시스템학부

(접수일: 2017년 1월 23일, 수정일: 2017년 3월 24일, 게재확정일: 2017년 4월 11일)

A Case Study on Causes and Characteristics of the Local Snowstorm in Jeju Island During 23 January 2016

Ji-Hye Yeo and Kyung-Ja Ha*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Korea

(Manuscript received 23 January 2017; revised 24 March 2017; accepted 11 April 2017)

Abstract The development mechanisms of an unusual heavy snowfall event, which occurred in the coast of Jeju Island on 23 January 2016 were investigated through a thermodynamic approach. The formation of heavy snowfall was attributed to the enhanced thermal convection in two ways. First, the convection was enhanced by the air-sea temperature difference between the cold air advection in low-troposphere associated with the strengthening of the Siberian High and abnormal warm sea surface temperature, which is 1~2°C higher than normal year over the Yellow Sea (YS). Second, the convective instability was increased by the vertical temperature gradient between the 7 days-sustained cold air advection in low-troposphere and the abrupt cold air intrusion in mid-troposphere induced by the southward shift of a cold cut-off vortex (-45°C) at the formation stage. Compared to the twelve hours prior to the formation, the low-level moisture increased by 5% through the moisture supply from the YS, and the air-sea temperature difference increased from 18.5°C to 28.5°C. Furthermore, the upward sensible (latent) heat flux increased 1.5 (1.2) times over the YS before the twelve hours prior to the formation. Thereafter, the sustained moisture supply and upward turbulent heat flux helped to maintain the snowstorm.

Key words: Heavy snowfall, thermodynamic approach, air-sea temperature, cold air advection, convective instability

1. 서 론

겨울철 강설은 매년 인명재산 피해와 교통혼잡 및 마비를 야기하는 주된 원인으로 지목되며, 최근 급격한 기후변화로 인해 한반도 강설량의 극값이 빈번하게 관측되고 있다. 겨울철 한반도 강설은 종관적 및

지역별·지형적 특성에 따라 발달 메커니즘 및 분포가 다양하다. 선행연구에서는 강설 빈도나 강설량 분포에 따라 종관 기상 조건에 의해 한반도에서의 강설 현상이 결정되며 이에 근거하여 5가지 강설 발생유형으로 분류했으며, 이들 중 기단변질형 강설이 가장 많이 나타났다(Cheong et al., 2006). 한반도 강설의 지역별·지형적 특징으로는 시베리아 기단의 경로 차이에 주로 기인하며, 대체로 지역에 따라 동해안과 서해안 및 해양지역(울릉도 및 제주 지역) 강설로 구분했다(Kim, 1979; Seo et al., 1991; Jhun et al., 1994; Chung et al., 1999; Cheong et al., 2006). 제주도는 한

*Corresponding Author: Kyung-Ja Ha, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-510-2177, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: kjha@pusan.ac.kr

반도 최남단에 위치하는 면적 1,847 km²인 섬이며, 저위도에 위치하고 있는 지리적 요인 때문에 그 기상학적 특성이 바다와 유사하다. 따라서 제주 연안 지역의 겨울철 평균 기온이 영하로 떨어지지 않고 영상의 기온을 유지하므로 제주 연안 지역에는 일반적으로 대설이 내리지 않는다. 하지만 2016년 1월 23일에 동아시아 전역에 걸쳐 강설이 관측되며, 제주도만이 아니라 저위도인 30°N 아래에 위치한 광저우와 오키나와에서도 강설이 관측되었다. 특히, 제주 연안 지역에서는 1월 23일 0000 UTC에서 25일 0600 UTC까지 강설이 지속됐으며, 23일 1100 UTC에 최심신적설량이 12 cm로 관측이래로 극값 3위를 기록했고(1위 1984년 1월 18일 13.9 cm, 2위 1959년 1월 17일 12.8 cm), 1월 23~25일 3일 동안 제주 공항에 1,100대의 비행기가 결항 및 연착되어 86,000명의 사람들이 공항에 머무르는 큰 피해가 있었다.

기상청에서 대설이란 짧은 시간에 많은 양의 눈이 내리는 것으로, 일반적으로 시간당 1~3 cm 이상 또는 24시간 이내 5~20 cm 이상의 눈이 내리는 현상으로 정의하고 있다. 선행연구에 의하면 일신적설 20 cm 이상을 기준으로 겨울철 한반도의 강설 분포의 90%가 영동 지역에 분포하고 있기 때문에, 겨울철 한반도의 강설 연구의 대부분은 이 지역에 국한되어 있다(Lee et al., 2011). 특히, 제주 지역의 강설은 서해안 강설 유형으로 분류하고 있기 때문에 제주지역의 대설에 대한 사례연구는 부족한 실정이다. 제주도에서의 강설 혹은 대설은 기단변질형 강설 유형에 속하며, 대륙고기압이 확장할 때 찬 공기가 수온이 높은 황해와 동해를 통과하면서 해기차에 의해 생기는 ocean-effect에 의하여 발생한다. Jeong and Park (2013)은 민감도 실험을 통하여 황해상의 해수면 온도의 변화가 서해상 대기장 및 강설에 끼치는 영향을 분석하여 황해상의 온도를 일률적으로 1.1°C 증가했을 때 호남 지역의 적설량을 18% 변화시킴을 분석하였고, 강설 시에 해수면 온도는 중요한 인자임을 밝혔다. 기후학적으로 2015년 12월에 엘니뇨의 발달과 관련된 쿠로시오 고기압이 강화되고 한반도 및 주변 해상이 평년보다 따뜻했던 반면, 2016년 1월에 강한 음의 북극진동으로 인해 한반도에 한파가 발생하여 약 보름간 강한 추위가 지속되었다(Jeong et al., 2016). 이러한 기후환경 아래에서 제주 지역에 있었던 대설 현상과 원인을 한랭기단의 강화에 따른 대기와 해양 간의 온도차이에 의한 열적 대류 작용으로 보고, 사례일의 해수면 온도의 변화와 함께 대기의 연직 구조의 중요성을 분석하기 위해 기존 서해안 강설 연구 방법과 함께 추가적으로 열역학적, 수문학적인 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 관측자료와 재분석자료를 이용하여 2016년 1월 23일 제주 연안 지역에 내린 대설을 열역

학 방정식을 이용한 연직 열역학적 구조와 수증기 수지 방정식을 이용한 수증기의 이동 패턴의 특징으로 메커니즘을 규명하고자 한다. 2절에서는 자료, 3절에서는 사례 분석, 4절에서는 원인 분석 결과, 마지막으로 5절에서는 요약 및 토의를 제시한다.

2. 자 료

제주지점의 강설량을 정량적으로 분석하기 위해 기상청 종관기상관측(Automatic Synoptic Observation System, ASOS) 장비에 의해 강설 12시간 전부터 강설이 시작된 이후 12시간까지 관측된 매 시간 최심신적설, 적설, 3시간 신적설량, 기온, 기압과 풍향 및 풍속자료를 분석하였다. 제주도의 다른 지점에서는 최심신적설량에 관한 정보를 2015년부터 제공하지 않기 때문에 제주지점의 자료만을 사용하였다. 최심신적설은 하루(00~24시) 중에 눈이 가장 많이 쌓였을 때의 깊이이며, 적설량은 내린 눈의 누적된 깊이이고, 3시간 신적설은 3시간 동안 새로 쌓인 눈의 깊이이다. 수직측풍장비(Wind Profiler)에서 생산되는 자료는 매 10분 간격으로 기압, 기온, 습도, 풍향 그리고 풍속의 5가지 요소를 수집하며 일일 최소 2회(매 0000 UTC와 1200 UTC) 관측한다. 따라서 대설이 왔을 때의 대기의 연직 구조를 분석하기 위해 고산의 수직측풍장비(33.3°N, 126.2°E) 자료를 사용하였다. 국지규모의 대류운의 형성 및 이동과 그 특성을 조사하기 위해 천리안 기상위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite-1, COMS-1)의 가시영상과 적외선영상을 이용하였다. 이 가시영상과 적외선영상은 15분 간격이며, 위경도 분해능은 각각 1 km와 4 km이다. 강설이 발생하기 전후의 종관배치와 강설발달의 역학 및 열역학적인 원인과 대기의 연직 구조를 파악하기 위하여 0.25° × 0.25°의 고해상도 자료를 제공하는 European Centre for Medium-Range Weather forecasts (ECMWF)의 ERA-INTERIM의 6시간 간격의 재분석 자료와 1° × 1° 간격의 일평균 자료를 제공하는 Objectively Analyzed air-sea Heat Fluxes (OAFlux) project의 지표 난류 플럭스 자료를 사용 하였다. 대기와 해양의 온도차의 이례적인 현상을 분석하기 위해 고해상도 자료인 0.25° × 0.25° 간격의 일평균 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) version 2의 해수면 온도를 1982년부터 2016년까지 35년 기간을 기후 자료로 사용하였다.

3. 사례분석

3.1 일기도 및 위성영상 분석

2016년 1월 22일 1800 UTC부터 호남지방에 시작된

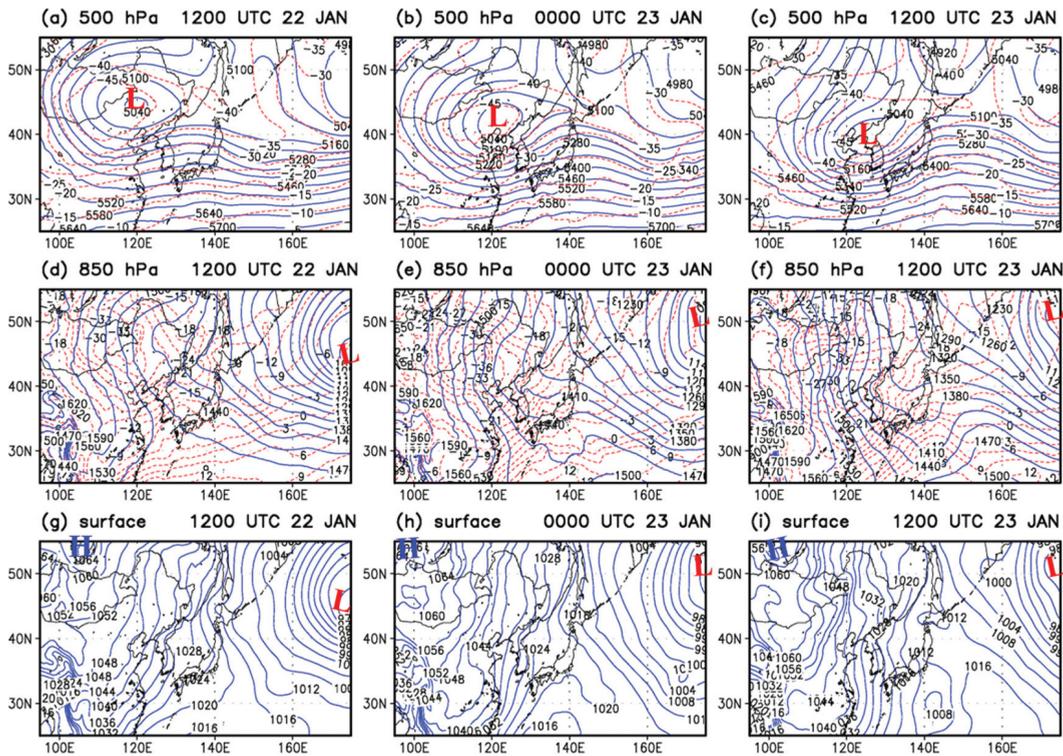


Fig. 1. Synoptic 500 hPa weather charts at (a) 1200 UTC 22 January (JAN), (b) 0000 UTC, and (c) 1200 UTC 23 January 2016. (d), (e) and (f) same as (a), (b) and (c), respectively, except for the synoptic 850 hPa weather charts. (g), (h) and (i) same as (a), (b) and (c), respectively, except for surface weather charts. The solid lines represent the height contours with 60 gpm interval in (a), (b) and (c) 30 gpm interval in (d), (e) and (f) or the isobar with 4 hPa intervals in (g), (h) and (i). The dashed lines represent the isotherms with a 5°C interval in (a), (b) and (c) and a 3°C interval in (d), (e) and (f).

강설은 23일 오전 0000 UTC부터 서해안지방과 제주 지역으로 확장되었으며, 전남 및 전북 일부 지역과 제주지역에 평균 9.7 cm 이상의 많은 눈이 내렸다. 이 대설로 사례 기간 총 누적 강설량은 울릉도 102.0 cm, 광주 25.7 cm, 목포 25.0 cm, 군산 27.0 cm를 기록하였다. 특히, 제주 연안 지역에서 1월 23일 1100 UTC에 이례적으로 최심신적설량이 12 cm로 관측되었다.

사례기간 동안 제주에 폭설이 내렸던 시기의 종관 상태를 알아보기 위하여 ECMWF의 ERA-INTERIM 자료를 사용하여 지상 및 중층일기도를 분석하였다 (Fig. 1). 제주 연안 지역에 강설 시작 전인 1월 22일 1200 UTC의 500 hPa 일기도에서 한반도 북서쪽에 위치한 -45°C의 한기핵을 동반한 질리지기압의 중심이 강설이 시작된 1월 23일 0000 UTC에는 남서쪽으로 더 남하하여 황해상에서 등압선과 등온선이 조밀해졌다(Figs. 1a, b). 강설이 발달된 1월 23일 1200 UTC의 500 hPa 일기도를 보면, 한반도에 위치한 질리지기압의 중심이 남서쪽으로 더 남하하여 황해상에 등압선과 등온선 간격이 더욱 조밀해졌으며, 기압골이

북동남서 방향으로 기울어짐을 확인할 수 있다(Fig. 1c). 850 hPa 일기도에서 제주지역에 위치하는 등온선의 변화를 살펴보면, 22일 1200 UTC에는 -6°C의 등온선이, 23일 0000 UTC에는 -12°C의 등온선이, 23일 1200 UTC에는 -18°C의 등온선이 분포하고 있다. 이는 강설이 시작되면서 시베리아 고기압의 확장으로 인해 하층에 기온이 급격히 감소하는 것으로 해석된다(Figs. 1d, e, f). 22일 1200 UTC에 발해만과 황해상에서 등압선과 등온선이 교차하여 경압성 대기가 존재하며, 남중국쪽으로 확장한 고기압에 의해 황해상에서 강설이 시작된 23일 0000 UTC에 등압선 간격이 12시간 전보다 조밀해졌으며, 발해만과 황해상에서 경압성이 더욱 강해졌다(Figs. 1d, e). 23일 1200 UTC에는 등온선 간격은 넓어 졌으나 등압선과의 교각이 직각을 이루는 것을 보아 경압성이 강해졌음을 알 수 있다(Fig. 1f). 22일 1200 UTC의 지상일기도에서 바이칼호 남서쪽에 중심이 1064 hPa인 시베리아 고기압과 일본 북동쪽에 중심이 972 hPa인 알루산 저기압으로 인해 서고동저형 기압배치의 영향으로 한반도에 차고

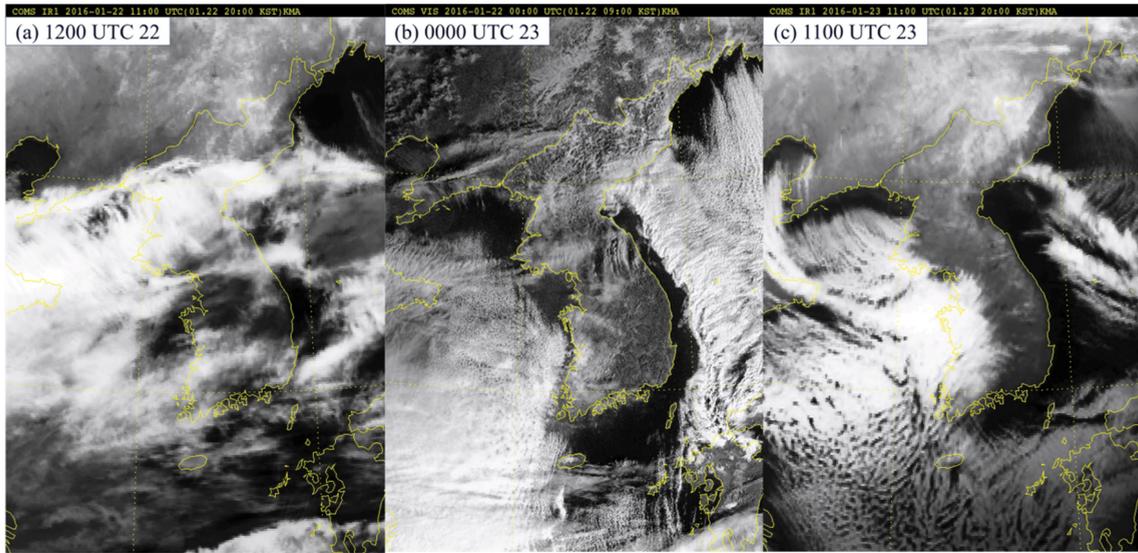


Fig. 2. The COMS-1 (a) infrared imagery at 1200 UTC 22, (b) visible imagery at 0000 UTC, and (c) infrared imagery at 1100 UTC 23 January 2016.

건조한 북풍류의 바람이 지속적으로 유입됨을 알 수 있다(Fig. 1g). 23일 0000 UTC에서 시베리아 고기압이 남중국쪽까지 세력이 확장되었으며, 23일 1200 UTC에는 남동쪽으로 더욱 확장되어 북서풍류의 바람이 더욱 강화되어 한반도에 차고 건조한 한기가 강하게 유입되는 것으로 보인다(Figs. 1h, i). 이를 통하여 강설이 시작된 1월 23일 0000 UTC에 차가운 대륙성 고기압의 영향과 500 hPa의 질리지기압의 남하로 인해 중상층의 기온이 급격히 감소하여 차고 건조한 공기가 한반도로 유입한 것으로 해석할 수 있다.

1월 23일 제주 연안 지방의 대설 발생 및 발달과 관련된 구름 분포를 파악하며, 일기도와의 일관성 및 비교를 용이하게 하기 위하여 강설 12시간 전인 22일 1200 UTC와 강설이 시작된 23일 0000 UTC, 강설이 가장 발달한 23일 1100 UTC의 가시영상(낮)과 적외선 영상(밤)을 제시하였다(Fig. 2). 22일 1200 UTC에 황해상에 적운열의 구름이 보이지 않으며, 23일 0000 UTC에 발해만부터 황해에 남동 방향으로 가늘고 긴 모양의 적운열이 나타나기 시작했다(Figs. 2a, b). 이 적운열은 한반도 호남지역 및 제주 지역으로 뻗어 있고, 형태는 수평바람의 북서풍과 일치하는 방향으로 북서에서 남동 방향으로 길게 늘어진 띠 모양으로 나타난다. 23일 1100 UTC에는 제주도 해상까지 적운열이 발달하여 위치하고 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 2c). 서고동저형의 기압패턴으로 인해 황해상에서는 적운열의 발달 조건이 잘 유지되고 있으며, 사례 기간에 황해상에 발달한 적운열이 제주 지역까지 발달하여 제주

도 연안 지역에 강설을 유발한 것으로 분석할 수 있다. 적운열은 일반적으로 큰 호수나 해양에서 상층의 찬공기가 상대적으로 따뜻한 수면 위를 지날 때 roll 형태의 대류가 발달하면서 나타나며(Liu et al., 2006), 여러 선행 연구들을 통해 제시된 한반도 주변 해상의 겨울철 적운열의 발생에 의한 강설 현상과도 일치한다(Lee and Ryu, 2010; Jeong et al., 2016).

3.2 제주지역의 지상 및 고층 관측자료 분석

제주지역의 대설 현상과 관련된 기상요소의 특징을 알아보기 위해 1월 22일 0300 UTC부터 24일 0300 UTC까지 제주지점에서 관측된 해면기압, 기온, 강설량, 풍향 및 풍속에 대한 시계열을 분석하였다(Fig. 3). 강설 14시간 전인 22일 2100 UTC부터 기압이 떨어지기 시작했으며, 24일 2100 UTC에 1021.8 hPa로 가장 낮았다. 제주 1월 평균 기온이 6.75°C인 것과 다르게, 23일 0300 UTC부터 영하로 떨어지기 시작해 24일 0000 UTC에는 -5.3°C를 기록했다. 특히 23일 0900~1100 UTC에는 3시간 신적설이 6 cm (3 hr)⁻¹가 넘었으며, 1000 UTC에 시간당 신적설은 3 cm hr⁻¹로 최대값을 나타냈으며 이후 신적설량은 감소하였다. 최심신적설량은 시간당 신적설량이 최대값을 나타낸 1시간 뒤 1100 UTC에 12 cm로 38년만에 극 값을 나타냈다. 강설 전에 북동풍 계열의 바람이 강설이 시작되면서 북풍 계열의 바람에서 북서풍 계열의 바람으로의 전향이 뚜렷하게 나타난다. 이는 시베리아 고기압의 남동쪽으로의 확장으로 인한 것으로 해석되며, 제주의 북서풍 또

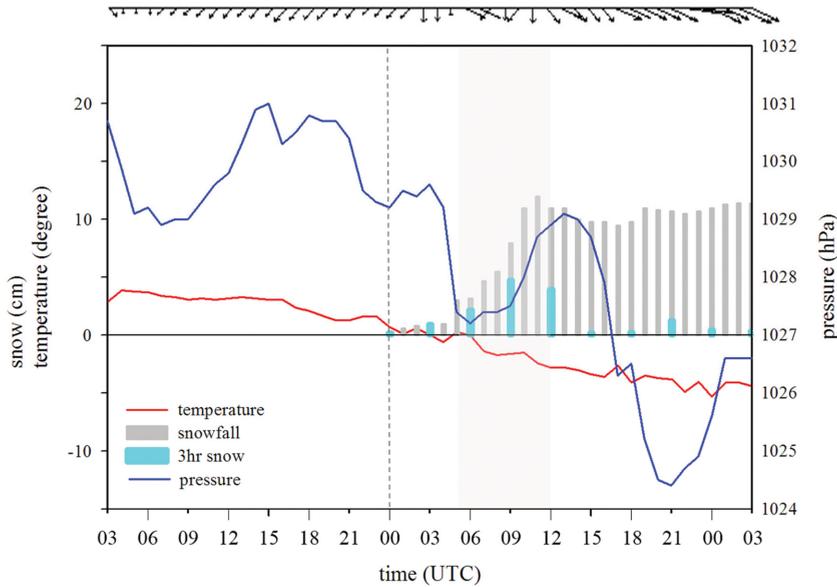


Fig. 3. Time series of the air temperature (red solid line, Unit: °C), snowfall (grey bar, Unit: cm), 3 hour snow (light blue bar, Unit: cm), pressure (blue solid line, Unit: hPa), and wind (vector, Unit: $m s^{-1}$) at Jeju station from 0300 UTC 22 to 0300 UTC 24 January 2016. Shaded area indicates the heavy snowfall above 3 cm (3 hr)⁻¹. Vertical dashed line indicates the time when snow started falling at Jeju station.

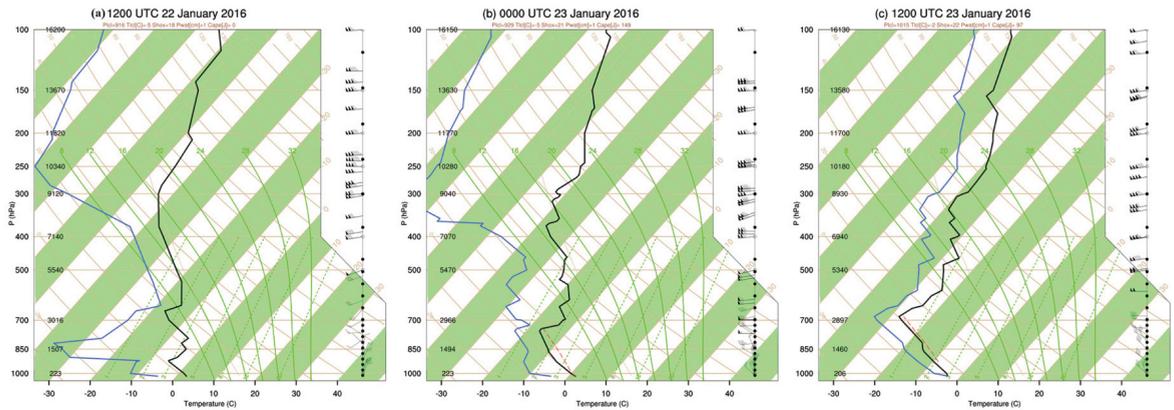


Fig. 4. Profiles of air temperature (black solid line, Unit: °C), dew point temperature (blue solid line, Unit: °C), and wind obtained from radiosonde sounding data at Gosan station (33.3°N, 126.2°E) at (a) 1200 UTC 22 (before snow fall), (b) 0000 UTC 23 (when snow started falling at Jeju station) and 1200 UTC 23 (when snow is developed) January 2016.

는 북풍기류의 유입이 대설을 유발했다는 기존의 연구결과들을 뒷받침해준다. 제주지역의 지상 풍속을 살펴보면, 강설 6시간 전에 $5.1 m s^{-1}$ 의 평균풍속이 강설이 시작되면서 빨라졌으며 강설이 가장 많이 왔던 23일 1100 UTC에는 $9.3 m s^{-1}$ 가 관측되었다.

제주지역의 대설 현상과 관련된 대기의 열역학적 특징과 바람의 연직 분포를 조사하기 위하여 강설 12

시간 전인 22일 1200 UTC부터 강설이 발달한 23일 1200 UTC까지 12시간 간격으로 고산에서 관측된 고층기상 관측자료를 이용하여 Skew T-Log P diagram을 분석하였다(Fig. 4). 22일 1200 UTC부터 23일 1200 UTC까지 2 km 이하인 약 800 hPa 이하 고도의 대류권 하층에서 고도에 따른 풍향변화는 $345^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 로 분포하여 22일 1200 UTC에는 북동풍에서 23일 0000 UTC

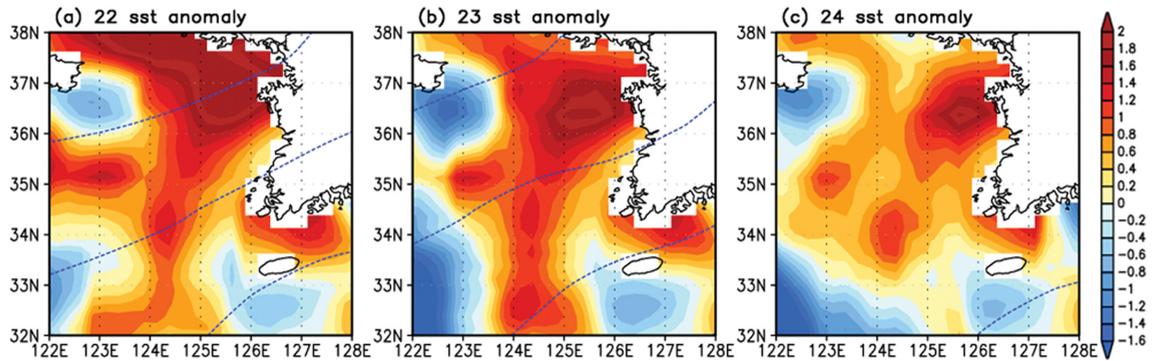


Fig. 5. Spatial distributions of sea surface temperature (SST, shading, Unit: °C) anomaly and 850 hPa air temperature (blue dashed line, Unit: °C) at (a) 22, (b) 23 and (c) 24 January 2016. The January climatology of SST is based on 1982~2016.

에는 북풍으로, 강설이 강해지는 23일 1200 UTC로 갈수록 북서풍이 강화되었다. 이것은 시베리아 고기압의 확장이 강화되고 있다는 것을 증명한다. 바람의 연직 분포를 보면 22일 1200 UTC에 850 hPa 이하의 하층에서는 바람의 변화가 없으며, 그 보다 상층에서는 반전하는 것을 확인할 수 있다. 강설이 시작된 23일 0000 UTC와 1200 UTC에서 지상부터 800 hPa까지 순전하고 있고, 그 상층 약 500 hPa까지 반전이 나타난다. 따라서 강설이 시작된 이후 연직 방향의 순전이 나타나는 800 hPa 고도 아래에서 온난이류가 있고 그 상층에 반전에 의한 한랭이류가 나타남으로 보아 불안정이 야기되므로 대류가 발생할 가능성이 있음을 보여준다. 그리고 풍속의 변화는 고도가 증가할수록 풍속이 증가하고 있는데, 강설이 시작된 23일 0300 UTC 이전에는 하층의 풍속이 약하다가 강설이 시작되면서 풍속이 강해지는 것을 알 수 있다. 강설 12시간 전인 22일 1200 UTC에서 900~850 hPa에서의 노점차가 26~31°C로 건조한 반면, 강설이 시작되면서 23일 0000 UTC에서는 5~6°C로, 강설 12시간 후에는 지표근처에서 3~4.5°C에서 700 hPa까지 습한 대기로의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 이는 23일 0000 UTC부터 하층부터 습해짐에 따라 대기가 불안정해지기 시작한 것으로 해석할 수 있다. 강설이 시작되었을 때 12시간 전과의 850 hPa에서의 기온 차이는 7.4°C이며, 기온이 연직적으로 급격하게 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 중상층의 절리저기압 중심의 남하에 의한 것으로 해석된다. 대기의 안정성과 관련하여 구름 발달의 원인이 되는 안정층의 역전층 고도는 강설이 시작되었을 1월 23일 0000 UTC에는 850 hPa에서 강설이 발달한 시간대인 1월 23일 1200 UTC에는 700 hPa에서 안정층이 형성되어, 강설이 시작되었을 때보다 발달한 시기에 더 높은 고도까지 구름이 발달하였음을 알 수 있다.

4. 원인 분석

4.1 열역학적 분석

4.1.1 해기차에 의한 열적 대류

한랭한 대륙성 고기압이 상대적으로 온난한 해양을 지날 때 상층의 공기와 해양의 온도 차이에 의해 유발되는 열적 대류 작용에 의하여 구름이 형성되며 강설이 유발된다. 이는 현열 및 수증기 플럭스가 경계층 내의 불안정을 가져오기 때문이며 해수면 온도(sea surface temperature, SST)와 850 hPa의 온도 차이가 13°C 이상일 때를 기준으로 불안정을 판별하였다(Waldstreicher, 2002; Heo et al., 2005, 2010). 본 사례일에서 35년간의 해수면 아노말리에서 황해상의 해수면 온도는 8~15°C로 평년에 비해 1~2°C 높았다(Fig. 5). 강설 시작 이후 황해상의 해수면 온도는 평년 값을 회복했다. 일 평균 850 hPa의 온도선을 보면 22일에서 23일간 황해상에서 10°C 이상의 기온 감소가 나타났다. 이에 23일 SST와 850 hPa에서의 기온 차이는 황해상에서 24~30°C의 분포를 보였다. 강설이 시작된 1월 23일 0000 UTC에 황해상에서 SST와 850 hPa의 온도 차이는 28.5°C로, 강설이 가장 발달된 시기와 근접한 23일 1100 UTC에는 30.4°C로 매우 크게 나타나며 이것은 대설 발생 가능성이 높은 조건을 만족한다.

해기차에 의한 열적 대류 작용을 살펴보기 위해 평년보다 따뜻했던 황해상에서 지표 난류 플럭스의 효과가 대기에 미친 영향을 분석했다. 강설이 시작된 23일 0000 UTC에 지표 난류 플럭스의 영향을 알아보기 위해 지표 잠열 플럭스와 지표 현열 플럭스를 각각의 양과 강설이 시작된 23일과 강설 전인 22일의 차이로 나타냈다(Fig. 6). 총 지표 난류 플럭스는 황해상에서 700~900 W m⁻²의 값을 나타냈다(Figs. 6a, b). 강설이 시작되면서 황해상에 지표 잠열 플럭스는 50~150 W m⁻², 지표 현열 플럭스는 150~200 W m⁻²가 증가하였

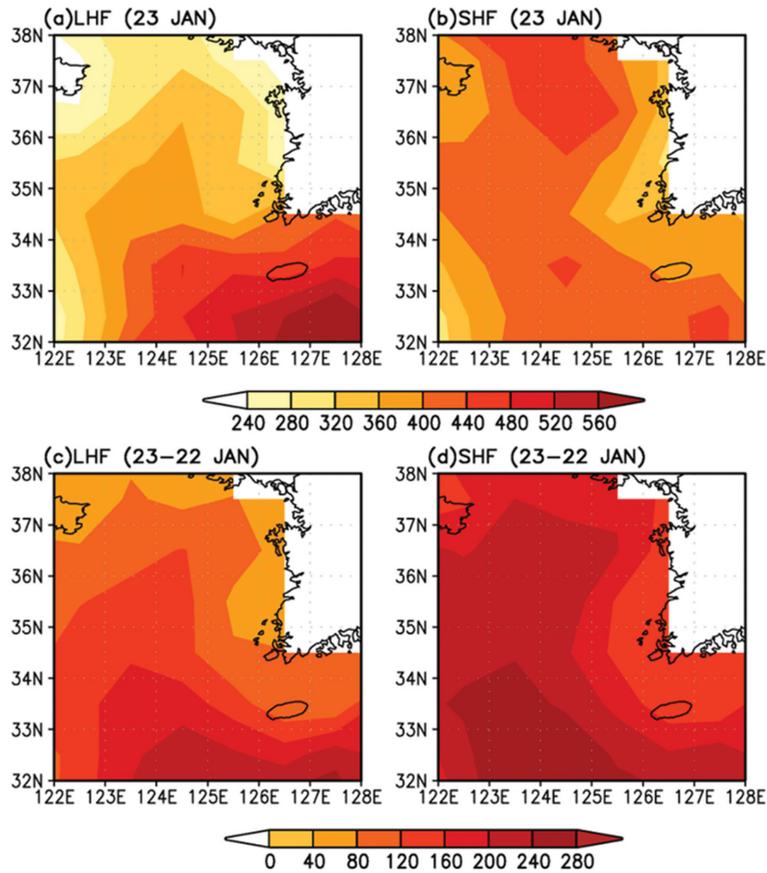


Fig. 6. (a) Surface latent heat flux (LHF, $W m^{-2}$) and (b) surface sensible heat flux (SHF, $W m^{-2}$) at 23 January 2016. (c) Differences of surface latent heat flux between 22 (before snow fall) and 23 (when snow started falling at Jeju station) January 2016. (d) is same as (c), but for SHF.

으며, 지표 현열 플럭스가 지표 잠열 플럭스보다 대기 중으로 공급하는 열이 1.2배 정도 큰 기여를 했으며 대기와 해수면의 온도차가 중요하다는 것으로 해석된다(Figs. 6c, d). 이와 같이 지표 난류 플럭스의 증가는 23일 중하층에 한랭 이류가 상대적 따뜻한 황해상을 지나면서 구름을 형성하는 열과 에너지를 대기 중으로 공급한 것으로 분석된다.

4.1.2 열역학 방정식을 이용한 연직구조 분석

대기층의 안정도와 저기압의 발달에 있어 온도 이류는 중요한 역할을 하며, 대기가 불안정할 경우 작은 요란도 크게 발달할 수 있기 때문에 열역학적 이해를 하는 것은 중요하다(Holton and Hakim, 2012; Kim et al., 2013). 본 연구에서는 열역학 방정식을 이용하여 대설 발생시 제주지역에서 나타나는 열역학적 연직구조 분석을 실시하였다.

열역학 방정식은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla T - \omega \frac{\partial T}{\partial p} + \omega \frac{\alpha}{c_p} + \frac{\dot{Q}}{c_p} \quad (1)$$

$$-\omega \frac{T \partial \theta}{\theta \partial p} = -\omega \frac{\partial T}{\partial p} + \omega \frac{\alpha}{c_p} \quad (2)$$

여기서 식 (1)에서 좌항은 온도의 시간적 변화를 나타내며, 우항은 차례대로 온도의 수평이류, 연직이류, 단열가열, 비단열가열을 나타낸다. \dot{Q} 는 residual로 계산된다. 식 (1)에서 T 는 온도(K), p 는 기압(hPa), \vec{V} 는 수평 바람성분($m s^{-1}$), ω 는 연직 바람성분($m s^{-1}$)이다. α 는 단위체적당 부피로 정역학 방정식을 이용하여 RT/p 로 나타낼 수 있으며, 여기서 R 은 공기의 기체상수로 $287 J kg^{-1} K^{-1}$ 이다. 또한 c_p 는 정압비열로 $1004 J kg^{-1} K^{-1}$ 이다. 식 (1)에서 연직 이류 항($-\omega(\partial T/\partial p)$)과 단열가열 항($\omega(\alpha/c_p)$)의 합은 식 (2)와 같이 대기의 안정도를 나타내는 항으로 나타낼 수 있다. θ 는 온위(potential temperature, K)이다.

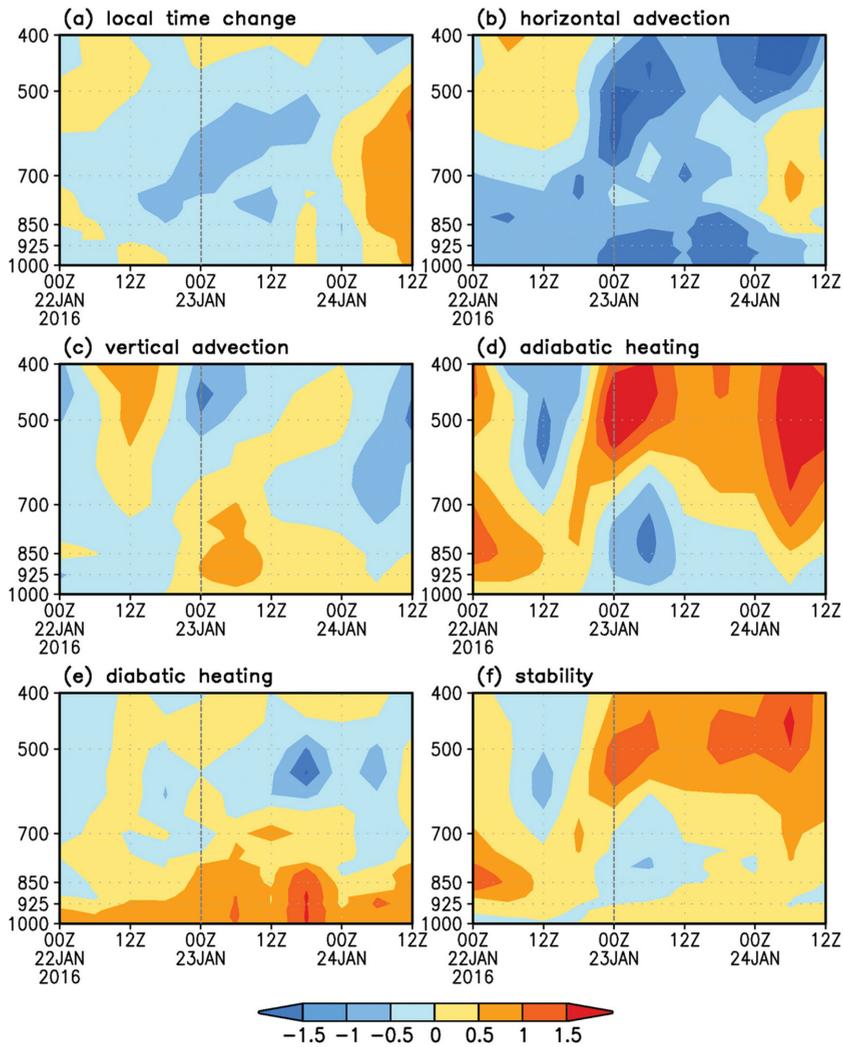


Fig. 7. Vertical cross-section of (a) local time change, (b) horizontal advection, (c) vertical advection, (d) adiabatic heating, (e) diabatic heating, and (f) stability ($K\ hr^{-1}$) averaged ($124\text{--}126^{\circ}E$, $34\text{--}36^{\circ}N$) from 0000 UTC 22 to 1200 UTC 24 January 2016. Vertical dotted line indicates the time when snow falling at Jeju station.

앞서 일기도에서 살펴 보았듯이, 황해상에서는 강설 시작 12시간 전인 22일 1200 UTC부터 경압 대기 상태이기 때문에, 온도 이류가 존재할 수 있으며, 이로 인해 연직운동이 나타날 수 있다. 따라서 강설이 발생한 시기의 열역학 방정식의 각 항과 대기 안정도 향을 황해 영역($124\text{--}126^{\circ}E$, $34\text{--}36^{\circ}N$)에 대해 평균하여 연직적으로 나타냈다(Fig. 7). 찬 시베리아 고기압의 영향을 받은 황해지역은 강설 시작 전인 22일 0000 UTC부터 냉각이 지속되는 특징을 보인다(Fig. 7a). 사례일 대설의 지배적인 영향을 준 수평 온도 이류향의 연직적인 분포는 안정도의 변화를 결정하는데 도움이 되므로, 상대적으로 하층과 비교하여 상층에 온난이

류가 존재 할 경우에 대기가 안정해지는 반면, 한랭 이류가 존재 할 경우에는 대기가 불안정해 진다. 제주에 강설 전인 22일 0000 UTC부터 황해상에서 600 hPa 보다 하층에서 한랭 이류가, 600 hPa 보다 상층에서는 온난이류가 존재하였으며, 이는 안정한 상태를 의미한다. 강설 시작 6시간 전인 22일 1800 UTC 부터 700 hPa에서 400 hPa 고도까지 하층보다 더 큰 한랭 이류가 발생하였으며, 이는 불안정 상태를 발생 시킨다(Fig. 7b). 이러한 연직고도 두 층의 수평온도 이류의 구조는 대기의 안정도를 변화시켜 황해상에 상승운동을 유발시킨다(Fig. 7c). 황해상에 대기의 상승운동이 유발되면서 단열 냉각의 특징이 나타난다

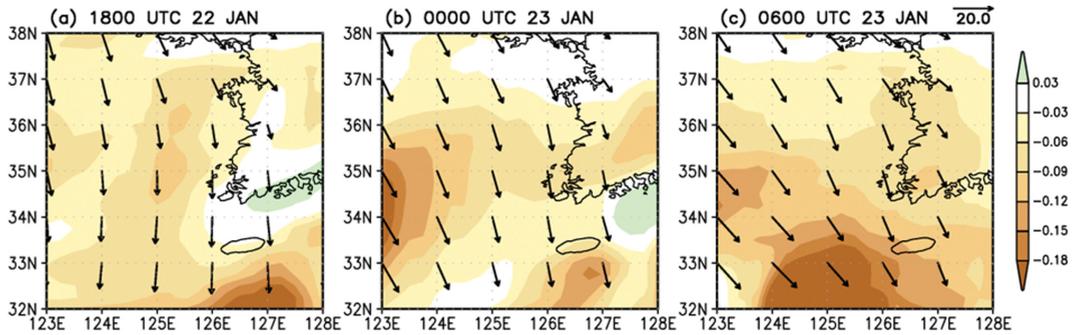


Fig. 8. Spatial patterns of 850 hPa moisture horizontal advection (shading, Unit: s^{-1}) and 10 m wind (vector, Unit: $m s^{-1}$) at (a) 1800 UTC 22, (b) 0000 UTC 23 and (c) 0600 UTC 23 January 2016.

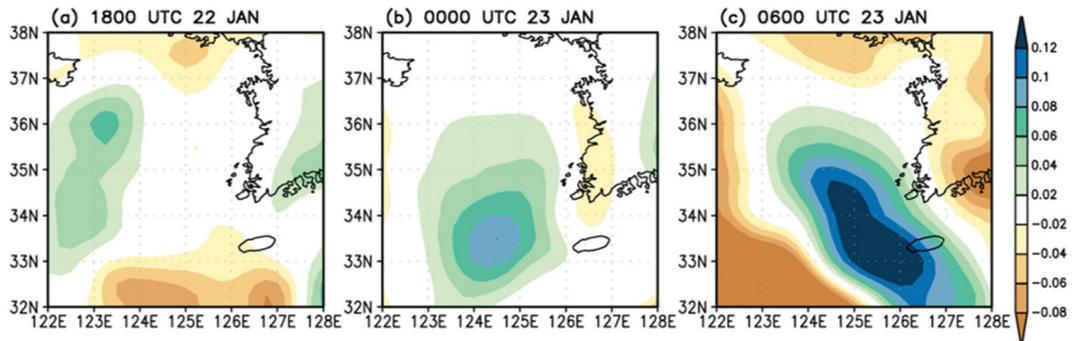


Fig. 9. Spatial patterns of 850 hPa moisture vertical advection (shading, Unit: s^{-1}) at (a) 1800 UTC 22, (b) 0000 UTC 23 and (c) 0600 UTC 23 January 2016.

(Fig. 7d). 지표에서도 지속적인 비단열가열의 특징이 나타나며 이는 황해상에 유입되는 한랭 이류와 관련이 있다. 강설 시작 6시간 전인 22일 1800 UTC에 925 hPa 이상에서 비단열가열이 증가하는 특징을 보이며, 이는 따뜻한 황해 해수면 위로 강한 한랭 이류가 유입되었을 뿐만 아니라, 연직고도 두 층의 상대적 수평 이류의 차이에 의한 불안정이 상승운동을 유발해 생긴 구름에 의한 것으로 수평 온도 이류향의 결과를 뒷받침해 준다(Fig. 7e). 안정도 향을 통해 강설 시작 전인 22일 0000 UTC부터 지표에서 존재하던 불안정 영역 또한, 강설이 시작되기 6시간 전인 22일 1800 UTC부터 925~700 hPa에 나타남을 보아 열역학 방정식의 각 항을 분석한 것과 일치하였다(Fig. 7f).

4.2 수문학적 분석

4.2.1 수증기 수지 방정식을 이용한 수증기 이류 분석

대기 하층에 충분한 수증기가 공급되지 않을 경우 경압성이 강화되고 저기압성 순환이 증가하여도 대류계는 발달할 수 없다(Lee, 2007). 구름의 발달과 강설

이 있기 위해서는 수증기의 공급이 필수적이다. 따라서 수증기의 공간적인 이류를 알아보기 위해 습기 방정식을 이용하여 분석하였다(Trenberth and Guillemot, 1995).

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} = e - c, \quad (3)$$

여기서, 식 (3)에서 좌항은 차례대로 수분의 시간적 변화, 수평이류, 연직이류를 나타내며, 우항은 수분의 소멸과 생성을 나타낸다. e 는 구름과 빙물의 재 증발 속도이며, c 는 강수량을 산출하는 단위 질량당 응결률이고, q 는 비습(specific humidity)이다.

수증기의 수평 이류향에서 수평적으로는 사례일 동안 황해상에 전반적으로 건조한 수증기가 수송되고 있다(Fig. 8). 또한, 제주지역 관측 시계열 분포에서 봤듯이 강설 시작 6시간 전인 22일 1800 UTC에 바람의 방향이 북풍에서, 강설이 시작된 23일 0000 UTC부터 북서풍에서 북서풍으로 바람의 전향이 뚜렷하게 나타난다(Figs. 8a, b). 수평적으로 황해상에 계속적으로

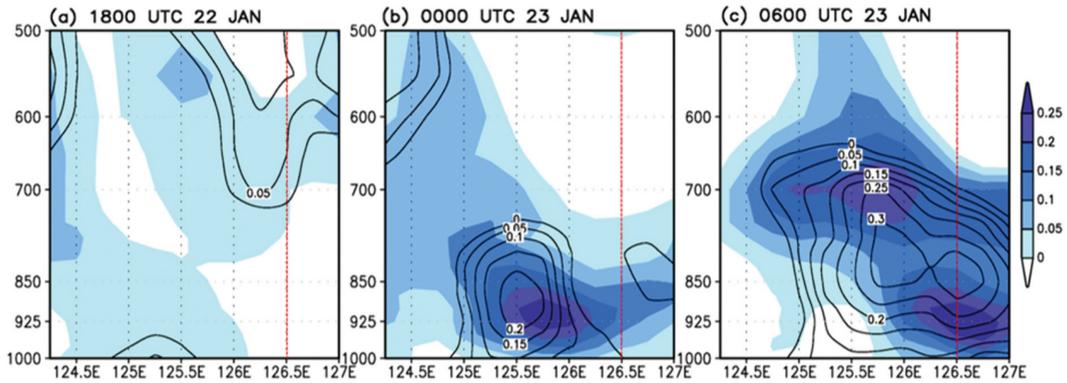


Fig. 10. Vertical cross section of vertical velocity (contour, Unit: m s^{-1}) and vertical gradient specific humidity (shading, Unit: kg kg^{-1}) from 124.25°E , 38°N to 127°E , 32.5°N at (a) 1800 UTC 22, (b) 0000 UTC 23 and (c) 0600 UTC 23 January 2016. Vertical red dotted line indicates Jeju station.

건조한 수평 이류가 우세했던 반면 수증기의 연직 이류향에서는 황해상에서 수증기의 이동 분포가 보인다. 22일 1800 UTC에 123°E , 36°N 영역에 습기의 연직 이류가 발생하였고, 23일 0000 UTC에 남동쪽으로 이류되며 강해졌으며, 23일 0600 UTC에는 그 중심이 제주 서쪽 해상을 통과했다(Fig. 9). 이는 앞서 분석한 황해상에 불안정한 대기가 형성되면서 유발된 상승기류에 의해 수증기가 대기중으로 공급되는 것으로 해석된다.

4.2.2 연직속도와 연직 수증기 구배

연직 수증기 이류 향을 연직 속도와 연직 수증기 구배향으로 나누어 연직 대류 과정을 분석하고자 각 향이 열적 대류를 어떻게 변화시키는지 알아보기 위해 23일 눈이 가장 많이 왔을 때의 황해 영역(124°E ~ 126°E , 34°N ~ 36°N)에 주풍의 방향(124.25°E , 38°N ~ 127°E , 32.5°N)으로 연직 횡단면을 나타냈다(Fig. 10). 강설 6시간 전에 황해상에서 발달한 상승류가 시간이 지남에 따라 남동쪽으로 확장하였으며, 상승류의 중심이 눈이 오기 전 125.25°E , 34.75°N 에서 강설이 시작되면서 제주로 이동하였다. 강설 전에 상승류의 세기는 0.25 m s^{-1} 에서 0.4 m s^{-1} 로 매우 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 연직 수증기 구배향을 보면 강설 여부와 관계없이 저위도에서 크게 나타나며, 강설이 발달할수록 하층에 수증기 구배가 더 커짐을 확인할 수 있다(Fig. 10). 연직 수증기 플럭스향을 위와 동일한 방법으로 시간적 변화를 분석하였을 때, 강설 6시간 전에 황해상에서 중상층에 수증기 수렴이 존재하였는데, 강설이 시작되면서 하층에서 분포가 깊게 나타나는 것을 확인하였다. 이를 통하여 하층에서 대기로의 수증기 공급이 많음을 확인할 수 있었다(그림 미제시). 또한 황해상에서 사례일 당시 적운열이 생성

된 중하층의 기온이 -10 ~ -25°C 로 수증기가 과포화 되기에 좋은 조건을 유지하였다. 따라서 하층에서의 수증기가 5% 증가하고, 중하층의 기온이 10°C 이상 감소하여 대기가 과포화 되어, 대기 중의 수증기 분자간의 충돌에 의한 구름 미세물리과정이 작용하여 강설이 발생한 것으로 보인다(Waldstreicher, 2002; Yang et al., 2002). 그러므로 황해상에서 발달한 상승기류와 하층에서 공급된 더 많은 수증기가 제주 연안 지역에 대설을 내리기에 충분한 조건을 만족한 것으로 판단된다.

5. 요약 및 토의

본 연구에서는 2016년 1월 23~25일 3일 동안 제주 연안 지역에 대설 사례일의 원인을 강설이 시작하기 전부터 강설이 가장 발달 했을 때까지 열역학적 인 방법과 수문학적인 방법으로 분석하였다.

사례 기간 동안 바이칼호 서쪽에 발달한 그 중심기압이 1064 hPa 인 찬 대륙성 고기압이 확장하여 중국 화남지방까지 영향을 끼쳤으며, 일본 북쪽에 그 중심기압이 971 hPa 의 저기압이 형성되어 우리나라에는 서고동저형의 전형적인 겨울철 기압배치가 나타났다. 이러한 서고동저형의 기압배치는 눈이 내리기 전부터 유지되어 23일 0000 UTC에는 한반도 부근으로 등압선이 남북으로 서는 패턴이 나타나 강한 기압경도력으로 인해 차가운 공기가 지속적으로 한반도로 유입되었다. 또한 500 hPa 에서 한랭한(-45°C) 절리저기압의 중심이 한반도로 남하하여 연직적으로 온도가 감소하였다. 이로 인해 상대적으로 따뜻한 해수면 위로 차고 건조한 공기의 유입이 해수면으로부터 $1\sim 2 \text{ km}$ 이내까지 습윤단열적으로 불안정층이 발달함을 알 수

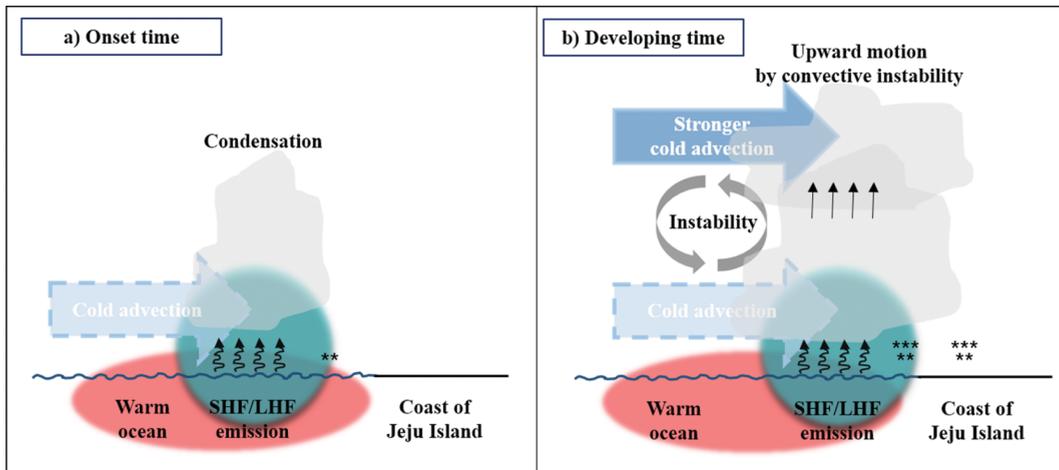


Fig. 11. A schematic diagram of snowfall during 23 January 2016. The solid (dotted) circle and arrow indicate 500 hPa (surface). Arrows indicate direction. Red and blue shaded area indicates warm ocean and moisture. Symbols ‘*’ represent snowfalls.

있었다. 대기의 열역학적 연직구조를 확인하기 위해 열역학 방정식을 분석한 결과, 사례일에 수평 온도 이류향이 중요하게 작용함을 확인하였다. 황해상에서 강설 시작 7일 전부터 하층에 한랭이류가 지속되었으며, 강설이 시작되면서 중상층에 상대적으로 더 강한 한랭이류가 발생하여 대류불안정이 증가함으로 해석하였고 안정도 항을 분석하여 강설이 시작된 이후 중층에 불안정이 증가함을 보였다. 수증기의 이동 분포를 확인하기 위해 습기 방정식의 이류향을 분석하여, 수평적으로 건조한 수평 이류가 우세했던 반면 연직적으로 습기의 연직 이류가 강설이 시작되면서 황해상에 강해짐을 확인할 수 있었다. 또한 강설이 시작되면서 황해상에 하층에서 수증기가 6시간 전에 비해 5% 증가함을 보였다. 이러한 조건은 대기가 과포화되어 수증기 분자간의 충돌에 의한 구름 미세물리과정 작용하여 강설이 발생했음을 보여준다.

분석을 종합해 볼 때 평년에 비해 1~2°C 높았던 황해상에 시베리아 고기압이 확장하여 차고 건조한 공기가 한반도로 남하하는 조건에서 강설이 내리기 전에 하층에 한랭이류가 있었으며 이에 의해 상대적으로 따뜻한 황해상에서 열과 수증기가 대기 중으로 공급되었다. 23일 0000 UTC에 하층의 지속적인 한랭이류와 더불어 700 hPa부터 400 hPa 고도까지 상대적으로 더 강한 한랭이류가 나타나 두 층의 한랭이류 차이에 의해 대류 불안정이 형성되어 중층에서 강한 상승류가 유발되었다. 중하층의 기온은 -10~-25°C로 감소하였으며, 이로 인해 해기차(SST - air_{850 hPa})는 강설기간 동안 대략 28°C 이상의 차이를 보였다. 이로 인해 제주에 강설이 발달된 23일 지표 현열 플럭스(surface

sensible heat flux, SHF)는 전날에 비해 약 1.5배 증가하였으며, 지표 잠열 플러스(surface latent heat flux, LHF)는 약 1.2배 증가하여, 대기에 수분과 에너지를 공급하여 대기를 가열시키며 공기를 더욱 상승시켜 눈구름을 생성하였고, 앞의 조건들에 의해 발달한 눈구름은 북풍기류에 남하하였고, 제주 연안 지역에 대설을 유발하였다(Fig. 11).

본 연구는 겨울철 확장한 시베리아 고기압과 관련하여 발생한 강설에 대한 사례로 열역학적, 수문학적 분석을 통해 제주지역에 일어나는 대설의 원인에 대해 조사하였다. 분석을 통하여 대설의 원인으로서는 하층에 지속적인 한랭이류와 강설이 시작되면서 중상층에 상대적으로 더 강한 한랭이류에 의한 대류불안정에 의한 강한 상승기류와 황해상에서의 열 및 수증기의 공급이 중요한 것으로 나타났다. 또한 위와 같은 기상환경에서 해수면의 온도 및 해기차에 의한 난류 플러스가 중요함을 언급했다. 따라서 제주도 남서쪽에서 149 km 떨어진 곳(125.18°E; 32.12°N)에 위치한 이어도 종합해양과학기지의 해양 및 기상 관측자료를 이용하여 추후에 제주도 연안 지역 대설 사례에 대한 해양의 정량적인 분석을 통하여 예보 정확성을 높여 인명피해와 재산피해를 최소화시킬 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 글로벌연구실사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0021927). 이 논문은 2017년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지

원을 받아 수행된 연구(종합해양과학기지 구축 및 활용연구 II)입니다.

REFERENCES

- Cheong, S.-H., K.-Y. Byun, and T.-Y. Lee, 2006: Classification of snowfalls over the Korean Peninsula based on developing mechanism. *Atmosphere*, **16**, 33-48.
- Chung, K. Y., Y. S. Jung, and B. J. Hwang, 1999: Classification of snowfall regions using principal component analysis. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**, 466-473 (in Korean with English abstract).
- Heo, K.-Y., K.-J. Ha, and S.-H. Shin, 2005: On development mechanism of heavy snowfall event occurred in Busan on 5 March 2005. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 547-556 (in Korean with English abstract).
- _____, K.-E. Kim, K.-J. Ha, K.-S. Park, K.-C. Jun, J.-S. Shim, and Y.-S. Suh, 2010: Simulation of snowstorm over the Yellow Sea using a mesoscale coupled model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 437-452, doi:10.1007/s13143-010-0025-0.
- Holton, J. R., and G. J. Hakim, 2012: *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 5th Edition. Academic press, 532 pp.
- Jeong, J.-I., and R.-J. Park, 2013: A study of the effects of SST deviations on heavy snowfall over the Yellow Sea. *Atmosphere*, **23**, 161-169, doi:10.14191/Atmos.2013.23.2.161 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.-H., T.-W. Park, J.-H. Choi, S.-W. Son, K. Song, J.-S. Kug, B.-M. Kim, H.-K. Kim, and S.-Y. Yim, 2016: Assessment of climate variability over East Asia-Korea for 2015/16 winter. *Atmosphere*, **26**, 337-345, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.337 (in Korean with English abstract).
- Jhun, J. G., D. K. Lee, and H. A. Lee, 1994: A study on the heavy snowfalls occurred in South Korea, *Atmosphere*, **30**, 97-117 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. Y., K. H. Min, K.-E. Kim, and G. Lee, 2013: A case study of mesoscale snowfall development associated with tropopause folding. *Atmosphere*, **23**, 331-346 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-S., 1979: Meteorological conditions for Korean snowfall with the Depths 10 cm. *J. Korean Meteor. Soc.*, **15**, 1-10.
- Lee, H. R., 2007: Development mechanism of a winter-time explosive cyclone: A case study. Ph. D. thesis, Kyungpook National University, 155 pp.
- Lee, J.-G., T.-Y. Kwon, I.-U. Jeong, and B.-G. Kim, 2011: *Development of the techniques for analyzing of severe weather meteorological variables in the Gangwon region I*. National Institute of Meteorological Sciences, 802 pp (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-H., and C.-S. Ryu, 2010: Influence of continuous satellite-based SST distribution on heavy snowfall events over the Korean Peninsula. *Int. J. Remote Sens.*, **31**, 2853-2883, doi:10.1080/01431160903140795.
- Liu, A. Q., G. W. K. Moore, K. Tsuboki, and I. A. Renfrew, 2006: The effect of the sea-ice zone on the development of boundary-layer roll clouds during cold air outbreaks. *Bound.-Layer Meteor.*, **118**, 557-581, doi:10.1007/s10546-005-6434-4.
- Seo, E. K., and J.-G. Jhun, 1991: A case study of the heavy snowfalls occurred in the Korean Peninsula from 29 January to 1 February 1990. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 165-179.
- Trenberth, K. E., and C. J. Guillemot, 1995: Evaluation of the global atmospheric moisture budget as seen from analyses. *J. Climate*, **8**, 2255-2272.
- 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.*, **83**, 19-22.
- Yang, H. Y., S. M. Park, and C. S. Ryu, 2002: Characteristics of heavy rainfall in Korea. *Atmosphere*, **12**, 534-537 (in Korean).