



최근 5년간 강원 영동지역의 대설과 관련된 기상요소의 변화 특성

김해민* · 인소라* · 이진화* · 박창근** · 김백조****

*국립기상과학원 관측예보연구과 재해기상연구센터 연구원, **재해기상연구센터 연구사, ***재해기상연구센터 센터장

Characteristics of Meteorological Elements Change Associated with Heavy Snowfall in the Youngdong Area, Gangwon Province in the Past Five Years

Kim, Hae-Min*, In, So-Ra*, Lee, Jin-Hwa*, Park, Chang-Geun** and Kim, Baek-Jo****

*Researcher, High Impact Weather Research Center (HIWRC), National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Korean Meteorological Administration (KMA), Gangneung, Korea

**Research Scientist, HIWRC, NIMS, KMA, Gangneung, Korea

***Director, HIWRC, NIMS, KMA, Gangneung, Korea

ABSTRACT

In this study, based on 10 cases of heavy snowfall observed in the Youngdong area during the past five years (2014-2018), the characteristics of surface and upper-air meteorological element change were examined. Automated Surface Observing System (ASOS) data from Bukgangneung (BGN), radiosonde data from Gangneung, buoy data from the East Sea, and ERA-5 reanalysis data over East Asia were used. Heavy snowfall occurs when sea level pressure increases and air temperature at the surface decreases. Analysis of upper-air sounding data showed that the more snowfall occurs, the higher the altitude of northwesterly wind. The air-sea temperature difference in East Sea associated with heavy snowfall was relatively high compared to previous studies. Heavy snowfall was observed at a Precipitable Water Vapor (PWV) of more than 5 mm and a Storm Relative Helicity (SRH, 0-3 km) of 16 to 183 m^2s^{-2} . However, SRH in most cases was lower than the threshold value (150 m^2s^{-2}) for producing precipitation. Also, during heavy snow warnings, snowfall occurred heavily in a relatively short period of time compared with conditions during heavy snow advisories.

Key words: Heavy Snowfall, Meteorological Elements, Youngdong Area

1. 서 론

동해안 지역은 태백산맥과 동해의 복합적인 영향으로 대설 발생에 따른 피해 발생의 위험성이 높다 (Kim et al., 2012; Kim et al., 2017). 강원도에서 대설로 인한 재해발생 위험도는 영서지방 (내륙지역)보다 영동지방 (해안지역)에서 높다 (Oh et al., 2015). 대설로 인한 피해액은 강설 (량), 강설 일, 그리고 비도시 면적비율에 의해 결정된다 (Kim et al., 2018). 따라서 강원 영동지역의 강설 (량)과 강설일 (지속시간)의 예보 정확도 향상은 겨울철 방재 대책 수립에 도움이

되고 나아가 기상재해 저감 차원에서도 중요하다.

영동지역의 강설은 주로 연해주 방향으로 확장하는 시베리아 고기압과 남해안을 통과하는 저기압으로 인한 동풍의 영향을 많이 받는다 (Jhun et al., 1994). 이런 차고 건조한 동풍은 동해의 따뜻한 해수면을 지나면서 대기가 불안정하여 눈구름을 만들어 육지로 이동시켜 대설을 유발한다고 알려져 있다 (Chung et al., 2004; Nam et al., 2014). 또한 과거 7년 (1995~2001)간의 NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer) 자료를 사용하여 겨울철 영동지역 대설 유형과

*Corresponding author: swanykim@korea.kr, (Tel :+82-33-913-1051, High-Impact Weather Research Center, Observation and Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, N10-707, 7, Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25457, Korea)

Received June 20, 2019 / Revised July 19, 2019 1st, August 12, 2019 2nd / Accepted August 30, 2019

관련된 기단의 특성을 분석하였다 (Cho and Kwon, 2004; Kim et al., 2005). 이들 연구들에서 영동지역 겨울철 강수는 중관기상패턴과 밀접한 연관성이 있음을 보였다. 이와 같이 선행연구에서는 주로 수치모델과 재분석자료를 활용하여 영동지역 강설현상의 기상학적 연구가 수행되었다. 최근 고층 관측 기반의 강설 연구도 진행되고 있으나, 주로 강설의 미세 물리적 특성에 관한 연구에 중점을 두었다 (Seong et al., 2015; Ko et al., 2016 etc). 이처럼 영동지역의 대설에 대한 많은 연구에도 불구하고 대설특보에 따라 구분된 관측관점의 분석과 시간에 따라 변화된 대설 시 기상요소의 연구는 부족한 실정이다.

영동지역에 강설이 발생하는 전형적인 종관기압패턴 (북고남저형, 서고동저형, 저기압 통과형)들 중 ‘서고동저형’이 나타날 때 영동 해안지역에서 대설로 발생하는 빈도가 가장 높았다 (Kim and Lee, 2005). 반면에 시베리아 고기압의 확장 시에 기상 예보의 정확도가 상대적으로 낮았다 (Park et al., 2007). 동해나 남동해상에 저기압이 위치하는 지상 기압계일 때 동해안 지역에 대설이 종종 발생하였다. 강설의 분포와 양은 종관기압계에 의해 좌우된다 (Song, 1993). 그러나 종관 기상조건만으로는 대설의 정확한 예보가 어렵고 특히, 종관 기상조건이 유사하더라도 종종 다른 강설현상을 보인다 (Kim and Lee, 2005). 따라서 유사 종관패턴 하에서 정확한 강설 예보가 어려운 것이 사실이다. 이와 같이 선행연구들에서 대설 메커니즘에 대한 분석 결과를 제시하고 있지만, 유사 종관패턴 하에서의 대설주의보와 대설경보로 구분하여 특보에 따른 기상요소의 변화 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 최근 5년 (2014~2018)의 겨울철 (12, 1, 그리고 2월) 동안 강원 영동지역에서 동풍계열의 바람이 우세한 ‘서고동저형’의 기압배치 하에서 강릉에 대설특보 수준의 강설을 내린 사례를 활용하여 기상요소의 변화 특성을 분석하였다. 연구 사례는 대설주의보와 대설경보로 나누어 관측 분석에 주안점을 두고 기상요소의 변화에 대한 분석을 수행하였다. 이를 통해 강원 영동지역의 대설과 관련된 인적·물적 피해를 경감시키는 정책적 방안 마련에 도움을 주고자 한다.

2. 자료 및 연구 방법

본 연구에서는 최근 5년 (2014~2018)의 겨울철 (12, 1, 그리고 2월) 동안 지상 및 고층 관측자료를 사용하여 강원 영동지역의 대설 (5 cm 이상) 사례에 대해서 기상요소의 변화를

조사하였다. 강원 영동지역에 위치하고 유인관측을 통하여 신뢰성 높은 신적설 자료를 사용할 수 있는 북강릉 지점을 선정하였다. 신적설 자료와 기상요소 (기온 등)의 변화간의 연관성을 분석하기 위하여 ASOS (Automated Surface Observing System) 자료를 사용하였다. 고층기상관측의 경우 강원 영동지역의 유일한 현업 관측지점인 북강릉 (12시간 간격)은 2015년 12월 24일 이후 고층관측을 시작하여 자료기간이 짧아 기후학적으로 분석하기에 부족함이 있다. 한편, 강릉 원주대학교 (GWU, Gangneung-Wonju National University)는 강원 영동지역 대설 연구를 위해 2011년부터 비정기적으로 3시간 간격의 고층관측을 수행하였다. 따라서 강설관련 연직대기 구조 특성은 자료기간과 관측간격을 고려해 볼 때 강릉원주대학교 지점의 자료를 활용하여 분석하는 것이 의미 있다고 판단하였다. 대설 사례의 강설 최대시각의 -3 hr~0 hr 사이의 기상관측자료 (고층관측자료)를 사용하였다. 이와 함께 동해의 해양기상 특성을 분석하기 위해 동해 부이의 해수면 온도, 바람 (풍향, 풍속) 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 관측 지점을 Fig. 1에 나타내었다.

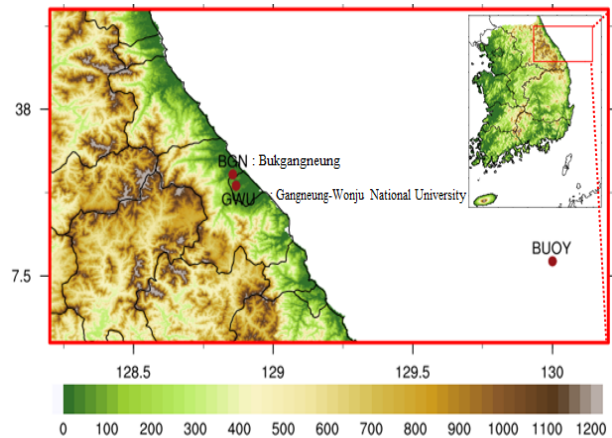


Fig. 1. Location of 3 observation sites used in this study.

북강릉 지점에 눈이 내린 강설 사례를 선정하기 위하여 기상 특보문과 적설자료를 이용하였다. 먼저 기상청의 대설특보 기준인 24시간 신적설량이 각각 5 cm (대설주의보, Case A), 20 cm 이상 (대설경보, Case W)인 경우를 사례로 선택하였다. 이후, 각각 강설 최대시각의 지상일기도를 이용하여 서고동저 패턴을 보이는 사례를 선정하였다. 본 연구에서 서고동저 패턴은 시베리아 고기압이 확장하고 동쪽의 저기압에 의해 등압선이 북동-남서 방향으로 놓일 때로 정의하였다. 또

한 지상일기도에서 공통적으로 기준 등압선이 빈번하게 나타나고 동풍계열의 바람이 유입가능하다고 판단될 때 대설사례로 정하였다. 본 연구에서 ‘서고동저형’의 기압패턴을 선정 시 고려해야하는 기준 등압선을 Fig. 2에 제시하였다. 실선으로 표시된 1024 hPa 등압선이 왼쪽 박스 (30~40 °N, 120~130 °E)에 포함되고 점선으로 표시된 1016 hPa 등압선이 오른쪽 박스 (30~40 °N, 130~140 °E)에 포함되는 사례이다. 본 연구에서는 기본적으로 동풍계열에 의한 강설로 제한하였기 때문

에 서풍계열에 의해 전국적으로 강수를 보이는 저기압이 한반도를 통과하는 기압패턴 (LC, Low Crossing)은 제외하였다. 저기압이 한반도 남해상을 통과하는 LP (Low Passing)와 시베리아 고기압의 확장으로 정체한 동해상 저기압의 영향으로 강수를 유발시킨 ST (Stagnation)패턴은 동풍계열과 관련된 시스템으로 두 패턴은 사례에 포함하였다. 이는 제주도와 영동지역으로 강수가 있거나 영동지역에 국한된 사례이다 (Ko et al., 2016). 구름은 대부분 지상에서 2 km 이내로 관측되며 (예외 W02) 약 1~2 km고도에서 북-동풍계열의 바람이 우세하였다 (Fig 5 참조). 즉, 종관기상패턴은 유사하면서 강설 (량)이 다른 10개의 사례를 선정하였다. 본 연구에서 각 사례별 북강릉 지점에서의 강설 (량), 최대 강설시각, 그리고 라디오존데 관측시각을 Table 2에 요약하였다. 각 사례별 상층 한기 위치 및 강도 분석을 위해 상층 (500 hPa) 일기도를 사용하였다. 대설주의보와 대설경보의 두 그룹간의 차이를 명확

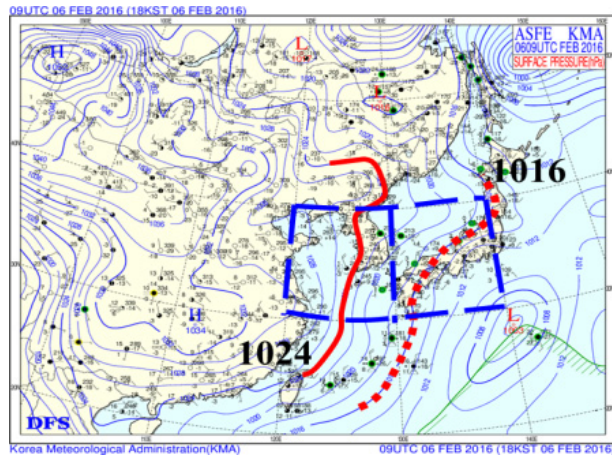


Fig. 2. Typical surface weather pattern of west-high east-low type associated with heavy snowfall in Youngdong area. The isobars of 1016 hPa and 1024 hPa are indicated by a dashed line and a solid line, respectively.

Table 1. Overview of observation equipment used in this study

| Instrument | Manufacturer (Model) | Accuracy |
|------------|----------------------|---------------------------------|
| Radiosonde | GRAW (DMF-06) | T ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) |
| | | RH ($\pm 2\%$) |
| | | P ($\pm 1 \text{ hPa}$) |
| | | WS ($\pm 1 \text{ ms}^{-1}$) |
| | | WD ($\pm 2^{\circ}$) |

Table 2. Characteristics of the 10 heavy snow events observed at Bukgangneung (BGN) during 5 years (2014~2018)

| Weather special report | Case No. | Date | Total amount of snowfall (cm) | Maximum snowfall-observed time (KST) | Rawinsonde-observed time (KST) |
|------------------------|----------|--------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Heavy Snow Advisory | A01 | 04 Jan. 2014 | 6.2 | 12 | 09 |
| | A02 | 26 Jan. 2014 | 5.1 | 09 | |
| | A03 | 27 Jan. 2015 | 5.9 | 18 | 18 |
| | A04 | 05 Feb. 2015 | 7.5 | 06 | 06 |
| | A05 | 06 Feb. 2016 | 17.2 | 18 | |
| | A06 | 14 Dec. 2016 | 13.0 | 12 | 12 |
| | A07 | 27 Dec. 2016 | 18.5 | 15 | 15 |
| Heavy Snow Warning | W01 | 21 Jan. 2014 | 36.3 | 15 | 15 |
| | W02 | 20 Jan. 2017 | 31.3 | 15 | 15 |
| | W03 | 30 Jan. 2017 | 20.2 | 15 | |

히 보이고, 대설사례 12시간 전의 합성장을 분석하기 위해 ECMWF에서 1시간 간격으로 제공하는 ERA-5 재분석 자료를 사용하였다. ERA-5 재분석자료는 전구 자료로 0.25° x 0.25°의 수평 해상도이며 본 연구에 사용된 변수는 지상의 해면기압, 상층 (500 hPa)의 지위고도와 기온이다.

본 연구에서 선정된 10개의 강설사례의 라디오존데 관측 자료를 활용하여 대기 열역학적 특성을 나타내는 지수를 계산하였다. 라디오존데는 GRAW사의 DFM-06 제품으로 Table 1에 장비 개요를 제시하였다. GRAW사의 존데는 현재 까지 다양한 분야에서 현업과 연구 목적으로 사용되고 있으며 WMO (World Meteorological Organization)에서 수행하는 공동관측에 참여하여 우수평가를 받았다 (WMO, 2011). 라디오존데 자료를 통해 역학적 불안정 (SRH) (Jung et al., 2014) 과 가강수량을 활용하여 연직 대기의 특성을 분석하였다 (Lee et al., 2012). 라디오존데 관측자료를 이용하여 Eqs. (1) 과 (2)을 이용해 대기의 변수들을 계산하였다. 먼저 대기 중의 수증기량인 가강수량은 Eq. (1)을 활용하여 산출하였다.

$$PWV_{radiosonde} = -\frac{1}{g} \int_{p_0}^p q dp \quad (1)$$

여기서, PWV (Precipitable Water Vapor)는 가강수량, 중력 가속도는 g 로 9.8067 m s^{-2} , q 는 비습 (g kg^{-1})이다. 관측이 시작된 고도 (p_0)에서 관측이 종료된 고도 (p)까지 각 고도별 비습 (specific humidity; q)을 계산한 후 연직 적분하여 가강수량 ($PWV_{radiosonde}$)을 계산하였다 (Ohtani and Naito, 2000; Kwon et al., 2007).

바람 자료와 연직 바람시어를 에너지 단위로 수치화한 SRH (Storm Relative Helicity)는 역학적 불안정을 나타내며 Eq. (2)와 같이 계산하였다 (Davies-Jones et al., 1990). 이는 호도그래프상에서 지상으로부터 3 km까지 둘러싼 면적을 환산한 것이다.

$$SRH = \int_0^{h'} (\nabla \times V_H)(V_H - V_c) dz \quad (2)$$

여기서 적분에 사용된 h' 는 약 3km 고도이며, V_H 는 수평 속도벡터 (Horizontal Velocity Vector), 그리고 V_c 는 폭풍 이동벡터 (Storm Motion Vector)이다. 본 연구에서는 ‘서고동저형’의 종관기압배치일 때 적설에 따라 사례를 분류하여 그에 따른 기상요소 변화 특성의 차이를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 종관 분석

Fig. 3은 대설주의보와 대설경보 사례의 강설 발생 12시간 이전 (Fig. 3a and 3b)과 각 사례의 강설 최대시각 (Fig. 3c and 3d)에 대해 지상 해면기압과 상층의 지위고도 및 기온을 평균하여 나타낸 합성장이다. Fig. 2의 기준에 부합하는 ‘서고동저형’ 사례에서 강설 (량)이 많은 대표적인 종관일기도의 기준 등압선을 Fig. 3a과 3c에 나타내었다. 지상의 해면 기압 분포에서는 전반적으로 중국 내륙쪽 (북서쪽)에 위치한 시베리아 고기압이 확장하고 동해상 (남-동쪽)에 저기압이 위치하여 강원 영동지역에 동풍계열의 바람이 유입되기 용이한 기상환경이 만들어졌다. 강설 발생 12시간 이전 (Fig. 3a)과 비교하여 강설 최대시각 (Fig. 3c)에 등압선의 간격이 조밀하여 강한 기압경도력이 존재함을 확인할 수 있었다. 대설경보의 경우 대설주의보에 비해 기압경도력이 강하여 대설관련 기상 풍속이 강할 것으로 판단된다.

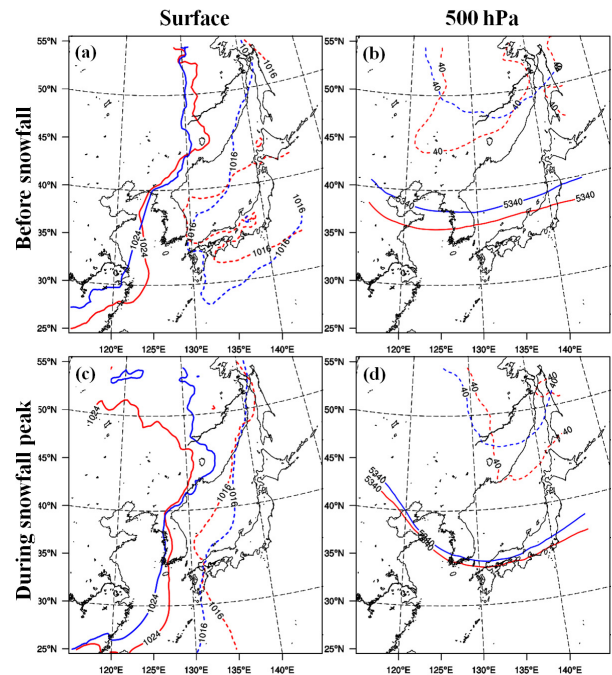


Fig. 3. Composites mean sea level pressure (left panel) and 500hPa geopotential height (right panel) obtained from the ERA-5 reanalysis before snowfall and during snowfall peak. Blue line and red line indicate heavy snow advisory and heavy snow warning case, respectively.

상층 (500 hPa) 지위고도와 기온의 합성장 (Fig 3b and 3d) 을 살펴보면, 모든 사례 (10회)에서 만주와 연해주 상공에 -40°C 이하의 찬 공기덩이 (한기골)가 존재하고 강원 영동지역이 이 한기골의 전면에 위치하였다. 본 연구에서 설정한 5340 gpm 등고선이 한반도 중북부지역에 걸쳐있던 강설 발생 12시간 이전 (Fig. 3b)과 달리, 강설 최대시각 (Fig. 3d)에는 이 등고선이 남쪽으로 확장하는 특징을 볼 수 있다. 또한 강원 영동지역은 강설 이전부터 기압골 전면에 속하여 상층 발산으로 인해 하층의 저기압이 보다 발달할 수 있는 종관기상 환경임을 알 수 있다.

대기와 해수면의 온도차로부터 수증기와 열에너지가 대기 중으로 공급되어 눈구름이 발생한다. 이 와 관련하여 동해상의 부이에서 관측된 해수면 온도와 강릉원주대학교의 라디오존데로부터 얻은 850 hPa 기온의 차이 (해기차)를 분석하였다 (Fig. 4). 라디오존데 관측 자료는 사례 A02, A05 그리고 W03는 결측, A01와 A04는 관측은 되었으나 부분 결측으로 제외하였다 (Table 2 참조). 따라서 해기차 분석에 대설주의보 3사례와 대설경보 2사례로 총 5사례가 적용되었다. 강설 현상 시, 해기차는 $20.6\sim 24.5\text{K}$ 이었고 강설 (량)에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 선행연구 (Nam et al., 2014; Song et al., 2016)에서 시베리아 고기압 확장과 동해상의 기압골과 관련된 경우 해기차가 $12\sim 15\text{K}$ 이상으로 나타남을 보였다. 이와 비교해 보면 최근 5년 동안 발생한 강원 영동지역의 대설 사례 (5개)에서 해기차는 다소 높은 값이 보임을 알 수 있었다. 즉, 시베리아 고기압이 발달하여 연해주 방향으로 확장함에 따라 저기압과의 상호작용에 의해 북동 계열의 종관풍이 발생하게 된다. 찬 대기와 따뜻한 해수면으로부터 20.6K 이상의 해기차에 의해 열과 수분을 공급받아 기단의 변질효과로 눈구름이 발달하였다.

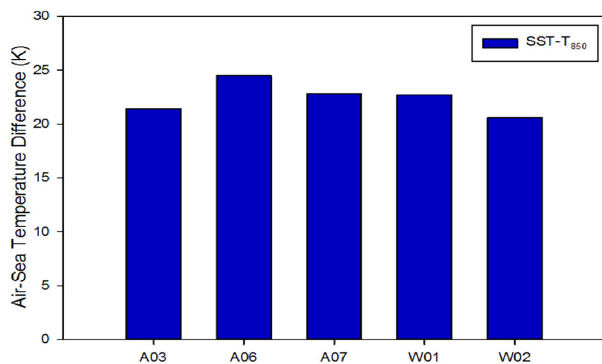


Fig. 4. Air-sea temperature difference by each case associated with heavy snowfall.

3.2 기상요소 변화 특성

3.2.1 지상

동해안 지역의 지리적 특성에 의해 대기의 열·역학적 흐름을 변화시킬 수 있기 때문에 수평 및 연직 바람 (풍향, 풍속)의 분포를 살펴보았다. 동해상의 대표 관측 지점인 동해 부이와 육상에 위치한 북강릉 지점의 ASOS 바람 자료를 활용하였다. 특히 기단변질에 따른 눈구름대의 이동과 관련하여 수평 바람의 특징을 조사하였다. 강설 기간에 동해 부이 (Fig 5a and 5b)와 북강릉 지점의 ASOS (Fig 5c and 5d)에서 관측된 풍향과 풍속의 세기 그리고 빈도를 대설주의보 (Fig 5a and 5c)와 대설경보 (Fig 5b and 5d)로 구분하여 바람장미로 제시하였다. 동해 부이 (Fig 5a and 5b)에서는 주로 북동풍 계열의 바람을 탁월하였다. 대설주의보 (Fig 4a)의 경우 주풍향은 $337.5^{\circ}\sim 67.5^{\circ}$ 로 나타났으며, 풍속은 $5\sim 10\text{ ms}^{-1}$ 을 보였다. 대설경보 (Fig 5b)에서는 주풍향이 $337.5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 로 북북동-북동계열이며, $10\sim 15\text{ ms}^{-1}$ 의 풍속이 가장 많이 관측되었다. 북강릉 (Fig. 5c and 5d)에서 주풍향은 $292.5^{\circ}\sim 337.5^{\circ}$ (서북서-북북서)이며 대설주의보 (Fig 5a)는 풍속이 $2\sim 5\text{ ms}^{-1}$, 대설경보 (Fig 5b)는 풍속이 $5\sim 10\text{ ms}^{-1}$ 범위에서 가장 많은 출현 빈도를 보였다. 따라서 풍속의 경우, 두 지점 모두 하층 풍속

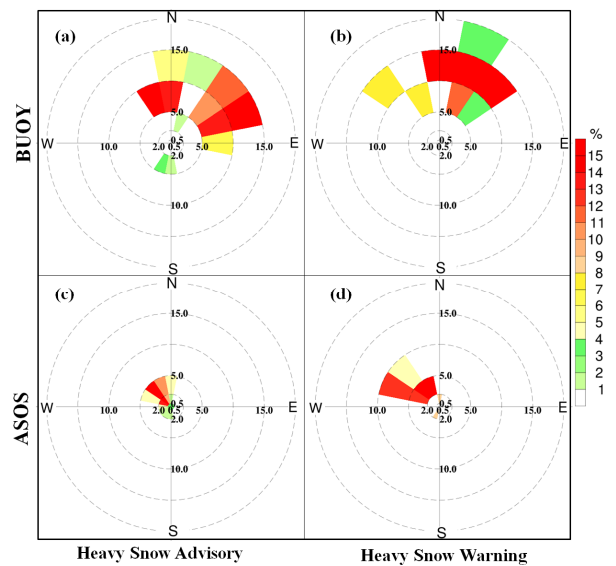


Fig. 5. Wind rose calculated from Buoy at Donghae (upper panel) and ASOS at BGN (lower panel) in the heavy snow advisory and heavy snow warning. Color and circle indicate wind direction percentiles (percentile limits of 15%) and wind speed, respectively.

과 적설사이의 양의 상관관계가 나타남을 알 수 있었다. 풍향의 경우, 북-북동풍이 주로 관측되었으며 이로 인해 해상을 이동하면서 습한 공기를 육지로 이동하여 축적하게 된다. 특히 이와 같은 기류는 그 세기가 약함에 따라 태백산맥에 의해 대기 하층으로 저지되고, 공기의 흐름은 진행 방향의 왼쪽으로 전향되어 산맥의 등고선과 평행하게 불게 된다 (Maninis and Sawford, 1982; Smith, 1982). 이러한 이유로 북강릉에서 바람이 북서계열로 전환하게 되었다.

강원 영동지역의 강설관련 바람특성을 수치모델을 활용해 연구한 바도 있다 (Lee and Lee 1994; Lee 2001). Lee and Lee (1994)는 폭설 사례에 대해 관측과 수치모델을 통해 풍속과 강설 (량)사이의 양의 상관관계를 나타남을 보였다. Lee (2001)는 영동 해안지역 (강릉 부근)에 강설이 많은 사례와 영동 산악지역 (대관령 부근)에 강설이 많은 사례에 대해 수치모델 연구를 수행하였다. 여기에서도 중관풍 (북-북동풍)이 산맥의 저지효과에 의해 북서계열로 변화하는 특징을 보였다. 본 연구의 10개 사례에서도 동해상과 북강릉에서 풍향의 변화와 강설에 따른 풍속의 증가를 확인할 수 있었다. 따라서 이를 설명할 수 있는 강원 영동지역에서 관측데이터 기반의 의미 있는 대설 연구결과로 사료된다. 즉, 해상의 구름은 북동기류 (동해 부이)에 의해 육상으로 이동하게 되었으며, 산맥의 저지효과 (지형효과)에 의해 형성된 북서계열의 바람에

의해 영동지역으로 수렴대가 형성된다. 또한 적설량이 많을 수록 풍속이 강하여 해양으로부터 더 많은 수분을 유입시킨 것으로 판단된다.

선행연구에서 강설에 따른 기온과의 연관성 분석할 때 주로 850 hPa 등압면의 온도 변화에 중점을 두었다 (Seong et al., 2015). 850 hPa 등압면의 기온자료는 주로 기상청의 12시간 간격으로 고층관측을 통해 얻어지므로 그 관측간격이 성기다. 고층관측자료에 비해 ASOS는 매 시간 마다 관측되므로 시간 해상도가 높고 관측지점이 많아 공간적인 분포 특성을 파악하는데 용이하다. 이에 ASOS의 관측값 (기온, 해면기압)을 사용하여 강설 (량)과의 관련성을 분석하였다.

Fig. 6는 강설 시작 시간을 기준으로 8시간 이전과 이후의 기온, 해면기압, 그리고 바람 (풍향, 풍속)의 시계열을 나타낸 것이다. 이는 시각에 대해 평균된 자료로 표준편차를 함께 나타내었다. 풍향의 경우 $u \cdot v$ 벡터로 변환하여 평균하고, 평균된 벡터자료를 통해 풍향과 풍속으로 재산출한 자료이다. 대설주의보 (Fig. 6a)와 대설경보 (Fig. 6b)에서 검은 선은 기온, 빨간 선은 해면기압, 노란 점은 풍향을 각각 나타내고 채색은 풍속을 의미한다. 즉, 색이 진할수록 풍속이 세다는 것을 의미한다. -1 시간 (적설 발생 시각을 0이라고 함)에 기온 하강이 관측되는데, 이는 대기 중의 빙정의 상변화로 인해 잠열이 소모되었기 때문이다. 특히 대설주의보는 적설이 관측되기 5

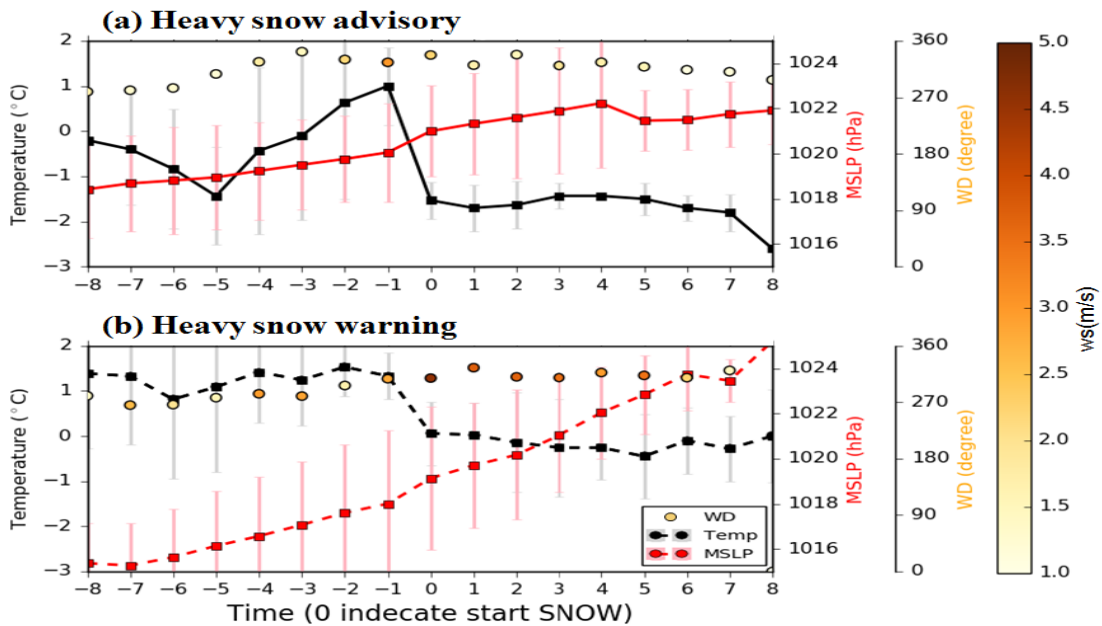


Fig. 6. Temporal variations of temperature (black) and sea level pressure (red) at BGN in the (a) heavy snow advisory and (b) heavy snow warning. Dot and dot color indicate are wind direction and wind speed, respectively.

~6시간 전에 0°C이하가 나타나고 이후 1°C (영상)으로 상승하였다가 -2°C (영하)로 하강하고, 적설 내내 영하를 유지하였다. 이에 반하여 대설경보는 1시간 전에 약 1.5°C (영상)에서 0°C로 하강하여 강설 기간 동안 이를 유지하였다. 따라서 많은 양의 눈이 내리는 대설경보는 대설주의보에 비하여 대기가 따뜻한 특징을 보였다. 그리고 강설 중의 표준편차의 오차막대는 매우 작아서 대표할 수 있는 결과를 의미한다.

지상 바람의 경우, 전 기간 북강릉에서 북서풍 (270-360°)이 탁월하였으며 이는 앞의 바람장미 (Fig. 5)에서도 확인하였다. 또한, 풍속도 강설의 발생과 함께 비교적 강해지는 특징을 보였다. 그리고 강설 시작 전 8시간 동안의 해면기압 변화와 강설 전후의 8시간을 포함하는 전 기간의 변화를 살펴 보았다 (Fig. 6). -8 시간 (적설 발생 시각을 0이라고 함)동안 대설주의보는 평균적으로 +2.5 hPa, 대설경보는 평균 +3.8 hPa정도의 해면기압이 상승하였다. 또한 대설주의보에 해당하는 전 기간동안 평균된 해면기압의 변화는 +3.5 hPa이었고 대설경보의 경우, 이 변화는 +9.8 hPa이었다. 해면기압이 높아졌다는 것은 차가운 시베리아 고기압의 확장과 따뜻한 저기압의 영향권에서 벗어남과 관련이 있다. 이러한 지상기압계의 변화는 차가운 대기의 영향을 받게 되며 이로 인해 강수형태가 비보다는 눈으로 내릴 가능성이 높다는 것을 의미한다. 즉, 겨울철에 북강릉에 동풍계열이 우세한 종관기상패턴 ('서고동저형')시, 적설에 따른 기온과 해면기압의 특성으로 대설특보 수준의 강설 발생 가능성과 대설주의보와 경보를 구분하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 최근 5년의 사례에서 평균 적설기간이 대설주의보는 약 10.4시간, 대설

경보는 약 8.7시간으로 대설경보 때 강한 눈이 짧은 시간에 집중되는 것을 알 수 있었다.

3.2.2 고층

최대 강설 시의 연직대기구조의 패턴을 보기 위해서 강설 시 3시간 간격으로 관측된 고해상도 고층관측자료를 사용하였다. 3.1절에서 언급한 바와 같이 결측을 제외한 총 5개 사례이며 대설주의보 3사례와 대설경보 2사례이다.

Fig. 7은 각 사례별 고도에 따른 수평바람을 나타내었고, 사례는 적설에 따라 오름차순으로 정리하였다. 모든 사례에서 하층 바람은 북-북서계열이 탁월하였다. 이는 북강릉의 왼쪽에 위치한 산악지형의 영향으로 해석된다. 또한 강설 (량)이 많아질수록 하층의 북서풍 계열의 바람이 나타나는 고도가 증가하여 최대 2.5 km 고도에서 바람의 급격한 변화 (sudden change)가 나타났다. 그러나 W02는 상층의 높은 고도까지 북동계열의 바람이 불었는데 이는 최대 2 km까지 발달하는 일반적인 층운형 구름에 의한 강설과 달리 6 km 까지 발달한 대류형 구름 (Kim et al., 2018)에 의한 강설이 발생하였기 때문이다. 강설 (량)이 많아질수록 하층의 북서풍 계열의 바람이 나타나는 고도가 높아져 바람의 급격한 변화가 최소 1 km 부근 (A03)에서 최대 2.5 km 고도 (W01)까지 나타났다. 따라서 하층의 북서풍이 유입되는 고도 (강설구름의 높이)가 높아질수록 많은 강설 (량)이 관측되는 것을 알았다. 이러한 결과는 강원 영동지역의 하층에서 관측된 바람 특성 분석을 통해 현업 강설 (량) 예측에 도움을 줄 것으로 사료된다.

강설이 발생하는 최소조건인 충분한 수증기의 공급과 재해기상현상의 예측에 활용되는 역학적 불안정과의 연관성을 분석하기 위해, 본 연구에서는 강설 발생 이전의 가습수량과 SRH를 분석하였다 (Table 3). 대기의 습윤도를 나타내는 가

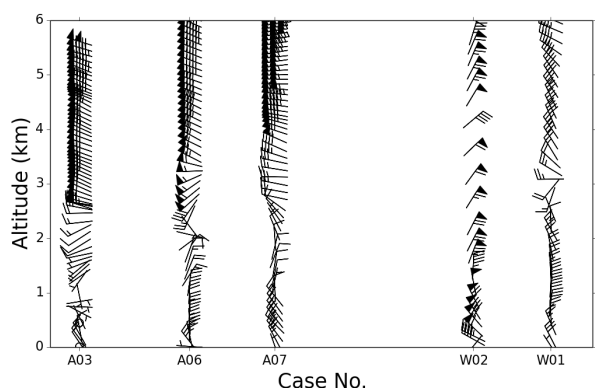


Fig. 7. Vertical profiles of wind direction and wind speed obtained from rawinsonde at GWNU. X-axis corresponds to snowfall case. A (number) and W (number) mean the heavy snow advisory and heavy snow warning, respectively.

Table 3. Precipitable water vapor and storm relative helicity values obtained from rawinsonde at GWNU related with the heavy snowfall events in Youngdong region

| Weather special report | Case No. | PWV (mm) | SRH (m^2s^{-2}) |
|------------------------|----------|----------|---------------------|
| Heavy Snow Advisory | A03 | 6.07 | 183 |
| | A06 | 8.78 | 79 |
| | A07 | 9.82 | 131 |
| Heavy Snow Warning | W01 | 5.69 | 51 |
| | W02 | 5.01 | 16 |

강수량은 최소 5.0 mm를 초과할 때 대설특보 수준의 강설 (5 cm 이상/일)이 관측되었다. 가강수량은 대설주의보일 때 6.07~9.82 mm, 대설경보일 때 5.01 mm와 5.69 mm이 각각 나타났다. 이는 강설 (량)에 있어 해당 지점에 존재하는 대기 중에서 내릴 수 있는 수증기량보다 이루어져 유입되는 수증기와 바람의 수렴에 의한 효과가 더 중요한 역할을 했다는 것을 알 수 있었다 (Fig 5 참조).

Rasmussen and Blanchard (1998)와 Thompson et al. (2003, 2007 등)에서 언급하였듯이 재해기상현상의 예측을 위한 중요한 예단 변수 (prognostic variable)로서 활용되는 SRH (0~3 km)는 대설주의보와 대설경보에서 79~183 m^2s^{-2} 와 16~51 m^2s^{-2} 을 각각 보였다. 이 값들은 약한 불안정 수준으로 대체로 SRH에 의해 발생하는 강수의 기준 (150 m^2s^{-2})보다 낮은 값들이었다. 하지만 모두 0보다 큰 양의 값으로 풍향은 고도 증가와 함께 시계방향으로 바뀌어 온난이류 (순전)의 영향을 받아 열적 대기불안정을 강화하였음을 알 수 있었다. 2011년 겨울철 특별관측기간동안 동해안에 집중된 강수 관련 열역학적 변화를 연구한 Jung et al. (2014)에서도 SRH는 강수발생 기준 (150 m^2s^{-2})미만으로 제시된 바 있다. 또한 본 연구에서 최근 5년 동안 발생한 겨울철 강설에서도 강수 발생 기준을 초과하지 않았다. 따라서 강원 영동지역의 겨울철 강수 또는 강설 발생은 역학적인 불안정 보다 열적인 불안정에 의해 발달한 것으로 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 최근 5년 (2014-2018, 12~2월)동안 지상기압계가 '서고동저형' 인 경우 강원 영동지역에서 발생한 대설주의보 (5 cm/ 24 hr)와 대설경보 (20 cm/ 24 hr) 사례를 기상 변수 (기온, 해면기압)의 시간 변화를 조사하였다. 또한 강설 최대시각의 바람 및 지수 (가강수량, SRH) 사용하여 대기 특성을 분석하였다. 이를 위하여 종관일기도와 ERA-5 재분석 자료를 활용한 합성장과 ASOS에서 관측된 지상관측자료와 라디오존데에서 특별관측된 고층자료를 활용하였다.

중국 내륙에 위치한 시베리아 고기압이 연해주방향으로 확장함에 따라 저기압과의 상호작용에 의해 북동계열의 종관풍이 나타났다. 강원 영동지역이 상층 기압골 전면에서 속하며, 만주와 연해주 상공의 -40°C 이하의 차가운 공기덩이가 존재하였다. 동해 부이와 라디오존데 관측자료로부터 따뜻한 해수면에 의해 해기차가 20.6K 이상이였다. 이로 인해 동해상에서 열과 수분을 공급받아 눈구름이 형성되었고, 이 눈구름은 강원 영동해안지역으로 이동하면서 찬 공기가 동반된 북

동계열의 바람 (종관풍)이 지속적으로 유입되어 태백산맥 (지형효과)에 의해 수렴 및 상승을 일으켜 영동지역에 대설을 발생하였다.

대설경보의 경우, ERA-5 합성장을 통해 지상의 1024 hPa의 기준 등압선이 연해주와 동중국해로 확장하고 기압경도력이 상대적으로 강함을 확인했다. 또한 상층의 5340 gpm 등고선과 한기골도 상대적으로 낮은 위도대까지 남하하였다. 이로 인해 상층 대기는 대설주의보와 비교하여 상대적으로 차가운 공기가 나타나는 종관기상환경이었다. 강원 영동지역은 강한 기압경도력에 의해 337.5°~45°의 풍향을 가진 강한 바람이 동해상에서 유입될 수 있었다. 북강릉은 태백산맥의 지형효과에 의해 292.5°~337.5°의 풍향이 관측되었다. 풍속은 동해상에서 10~15 ms^{-1} , 북강릉에서 5-10 ms^{-1} 이었다. 강설 이전에 영상 (1.5°C)의 기온에서 강설 기간 동안 0°C를 유지하고, 해면기압은 적설발생 8시간 전 대비 평균 +3.8 hPa의 상승하였다. 평균 적설시간은 약 8.7시간으로 짧은 시간에 대설이 발생함을 알 수 있었다.

대설주의보의 경우, 상대적으로 지상의 기압경도력이 약하고 상층의 기준 등고선도 고위도대에서 나타나 대설경보와 비교하여 상층의 한기의 영향이 약함을 알 수 있었다. 하지만 대설경보와 동일하게 상층의 기압골 전면에서 일어나는 발산의 영향으로 하층의 저기압이 발달할 수 있는 종관기상환경이었다. 또한 동해상에서 유입되는 바람은 337.5°~67.5°으로 풍향의 범위가 다소 넓었다. 풍속은 대부분 5~10 ms^{-1} (동해상)와 2~5 ms^{-1} (북강릉)이었다. 강설 이전에 5~6시간 이전에 영하에서 1시간 이전에 +1.0°C의 기온이 강설 기간 동안 -2°C로 유지되었다. 또한 해면기압은 -8시간 (적설 발생시각을 0이라고 함) 동안 평균 +2.5 hPa로 증가하였다. 적설 기간은 평균 약 10.4시간이었다.

두 가지 사례 모두 요약하면, 상층의 기압골 전면에서 일어나는 발산으로 인해 하층의 저기압이 잘 발달할 수 있는 종관기상환경이었다. 상층 한기의 영향과 지상의 기압경도력에 의한 동풍 유입은 대설경보에서 더욱 강하게 나타났다. 또한 북강릉에서 해면기압이 증가하고, 강설발생 1시간 전에 기온이 하강하면서 강설이 발생하였다. 이로 북강릉의 특보 이상의 강설은 찬공기와 연관이 있음이 알 수 있었다. 강설 (량)이 많을수록 하층의 북서계열의 바람이 나타나는 고도가 높아지고, 풍속은 강한 것으로 나타났다. 풍속이 강하여 해상에서 발달한 눈구름과 수증기가 효과적으로 이류될 수 있음을 짐작할 수 있었다. 이를 통해, 겨울철 강설은 내륙으로 유입되는 바람장 (이류)이 중요함을 알 수 있다. 따라서 기상 변수를 활용한 대설특보 예보에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

강원 영동지역의 겨울철 강설 예보에 있어 관측자료를 사용한 기상요소의 변화를 분석하는 것은 매우 중요하다. 또한, 대설특보 (주의보와 경보)시 고층관측자료로부터 계산된 해기차 (20.6 K 이상), 가강수량 (5.0 mm 이상), 그리고 역학적인 불안정 지수 (SRH)에서 뚜렷한 차이를 찾기에는 여전히 한계가 있었다.

하지만 강원 영동지역의 대설과 관련하여 기존에는 수치모델과 재분석 자료를 활용하거나 관측 기반 강설 미세물리적 특성 연구가 대부분이었다. 또한 이 지역의 대설은 태백산맥과 동해의 복합적인 영향을 받으므로 유사 증관폐턴 하에서도 정확한 강설예보가 어렵다. 이러한 관점에서 볼 때 고층기상관측자료를 활용하여 현업 대설특보와 관련하여 기상요소 변화 특성을 분석한 연구는 강원 영동지역에 동풍계열의 바람이 유입되었을 때 강설 예보에 큰 도움이 될 것으로 사료된다. 본 연구는 강원 영동지역의 장기간 고층기상관측자료가 축적되지 않아 최근 5년간의 대설사례를 바탕으로 분석하였다. 따라서 향후 강원 영동지역의 대설사례에 대한 고층기상관측자료가 많아지고 이들 자료를 활용한 대설사례에 대한 추가적인 지상 및 고층 기상관측자료의 변화특성 연구가 요구된다.

사 사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 『재해기상 감시·분석·예측기술 개발 및 활용연구』 (1365003083)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 저자는 본 논문에 라디오존데 자료를 제공해 준 강릉원주대학교 김병곤 교수 연구팀과 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원 분들께 깊은 감사드립니다.

REFERENCES

Anderson T, and Nilson S, 1990. Topographically induced convective snowbands over the baltic sea and their precipitation distribution. *Amer. Meteor. Soc.* 5: 299-312.

Carpenter DM, 1993. The lake effect of the great salt lake: Overview and forecast problems. *Wea. Forecasting* 8: 181-193.

Waldstreicher JS, 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.

Cho KH, and Kwon TY, 2012. Orographic and ocean effects associated with a heavy snowfall event over Yeongdong region. *Atmosphere* 22: 57-71 (in Korean with English abstract).

Chung KB, Kim JY, and Kwon TY, 2004. Characteristics of Lower-Tropospheric Wind Related with Winter Precipitation in the Yeongdong Region. *Atmosphere* 30 (4): 369-380 (in Korean with English abstract).

Davies-Jones RP, Burgess D, and Foster M, 1990. Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conference on Severe Local Storms. *American Meteorological Society* 5: 56-60.

Manins PC, and Sawford B, 1982: Mesoscale observations of upstream blocking. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 108: 427-434.

Nam, HG, Kim BG, Han SO, Lee C, and Lee SS, 2014. Characteristics of easterly-induced snowfall in Yeongdong and its relationship to air-sea temperature difference. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 50 (4): 541-552.

Jhun JG, Lee DK, and Lee HY, 1994. A Study on the Heavy Snowfalls Occurred in South Korea. *Atmosphere* 30 (1): 97-117 (in Korean with English abstract).

Jung SP, Lim YK, Kim KH, Han SO, and Kwon TY, 2014. Characteristics of Precipitation over the East Coast of Korea Based on the Special Observation during the Winter Season of 2012. *Korean Earth Science Society* 35 (1): 41-53 (in Korean with English abstract).

Kim GY, Joo HT, Kim HJ, 2018. The Study for Damage Effect Factors of Heavy Snowfall Disasters : Focused on Heavy Snowfall Disasters during the Period of 2005 to 2014. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 19 (2): 125-136 (in Korean with English abstract).

Kim HM, Jung SP, In SR, Choi BC, 2018. A Case Study of Heavy Snowfall with Thunder and Lightning in Youngdong Area. *Atmosphere* 28 (2): 187-200 (in Korean with English abstract).

Kim JE, Kwon TY, Lee BY, 2005. Characteristics of Sensible Heat and Latent Heat Fluxes over the East Sea Related with Yeongdong Heavy Snowfall Events, *Ocean and Polar Research* 27 (3): 237-240 (in Korean with English abstract).

Kim MG, Lee SH, 2005. On the characteristics and

- causative factors of heavy snowfall over the Youngdong region. The Spring Meeting of 2005 KGS Conference; 2005 May 12~Jan 13; Yeosu University, Korea: The Korean Geographical Society. p. 209-210
- Kim SW, Lee JM, Jang DW, Chon JJ, 2017. Disaster Risk Assessment for the Disaster Resources Management Planning. Korean Society of Hazard Mitigation 18 (2): 387-394 (in Korean with English abstract).
- Kim YJ, Lee JG, and Yang AR, 2012. Analysis of Meteorological Disasters Generated in Gangwon-do Region Using Synoptic Pressure Patterns. Korean Society of Hazard Mitigation 12 (3): 57-70 (in Korean with English abstract).
- Ko AR, Kim BG, Eun SH, Park YS, and Cho BC, 2016. Analysis of the Relationship of Water Vapor with Precipitation for the Winter ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) Period. Atmosphere 26 (1): 19-33 (in Korean with English abstract).
- Kwon HT, Iwabuchi T, and Lim GH, 2007. Comparison of precipitable water derived from ground-based GPS measurements with radiosonde observations over the Korean peninsula. J. Meteor. Soc. Japan 85: 733-746.
- Lee H, Lee TY, 1994. The Governing Factors for Heavy Snowfalls in Youngdong Area. Atmosphere 30 (2): 197-218 (in Korean with English abstract).
- Lee JG, 2001. A numerical simulation of a heavy snowfall event occurred along the Youngdong coastal area. Atmosphere 37 (1): 1-12 (in Korean with English abstract).
- Lee SM, Sim JK, Hwang YJ, Kim YH, Ha JC, Lee YH, and Chung KY, 2012. Vertical Atmospheric Structure and Sensitivity Experiments of Precipitation Events Using Winter Intensive Observation Data in 2012. Atmosphere 23 (2): 187-204 (in Korean with English abstract).
- Oh SM, Kim GH, Jung YH, Kim DH, Kim HS, 2015. Risk Assessment of Heavy Snowfall Using PROMETHEE - The Case of Gangwon Province. J. Korean Soc. Hazard Mitig 15 (1): 87-98 (in Korean with English abstract).
- Ohtani R, and Naito I, 2000. Comparisons of GPSderived precipitable water vapors with radiosonde observations in Japan. J. Geophys. Res., 105: 26917-26930.
- Seong DK, Seo WS, Eun SH, Kim BG, Ko AR, Lee GM, Jeon HL, Choi BC, and Park YS, 2015. Time changes of snowfall and snowplate during ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) campaign. The Autumn Meeting of 2015 KMS Conference; 2015 Oct 12~Oct 13; ICC JEJU, Korea: The Korean Meteorological Society. p. 158-159
- Smith RB, 1982. Synoptic observation and theory of orographically disturbed wind and pressure. J. Atmos. Sci. 39, 60-70.
- Song BH, 1993. A comparative study for snowfalls between east coast and west coast region in South Korea [dissertation]. Seoul National University
- Song, J.-A., J. G. Lee, Y.-J. Kim, 2016. The Study of Correlations between Air-Sea Temperature Difference and Precipitation and between Wind and Precipitation in the Yeongdong Coastal Region in Relation to the Siberian High. Atmosphere 26 (1): 127-140 (in Korean with English abstract).
- Park CY, Choi YE, Kim SB, 2007. A Study on Forecast Accuracies by the Localized Land Forecast Areas over South Korea. Journal of the Korean Geographical Society 42 (1): 1-14 (in Korean with English abstract).
- Rasmussen EN, and Blanchard DO, 1998. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting 13: 1148-1164.
- Thompson RL, Hart JA, Elmore KL, and Markowski P, 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle. Wea. Forecasting 18: 1243-1261.
- Thompson RL, Mead CM, and Edwards R, 2007. Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments. Wea. Forecasting 22: 102-115.
- WMO (World Meteorological Organization) 2011. Instruments and Observing Methods Report 107-101.