2012년 특별관측 자료를 이용한 동해안 겨울철 강수 특성 분석

정승필^{1,2} · 임윤규¹ · 김기훈¹ · 한상옥¹ · 권태영^{2,*}

¹국립기상연구소 예보연구과 재해기상연구센터, 210-702, 강원도 강릉시 죽헌길 7

²강릉원주대학교 대기환경과학과, 210-702, 강원도 강릉시 죽헌길 7

Characteristics of Precipitation over the East Coast of Korea Based on the Special Observation during the Winter Season of 2012

Sueng-Pil Jung^{1,2}, Yun-Kyu Lim¹, Ki-Hoon Kim¹,
Sang-Ok Han¹, and Tae-Yong Kwon^{2,*}

¹High-impact Weather Research Center, Forecast Research Division, National Institute of
Meteorological Research, Gangneung, Gangwon 210-702, Korea

²Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University,
Gangneung, Gangwon 210-702, Korea

Abstract: The special observation using Radiosonde was performed to investigate precipitation events over the east coast of Korea during the winter season from 5 January to 29 February 2012. This analysis focused on the various indices to describe the characteristics of the atmospheric instability. Equivalent Potential Temperature (EPT) from surface (1000 hPa) to middle level (near 750 hPa) was increased when the precipitation occurred and these levels (1000~750 hPa) had moisture enough to cause the instability of atmosphere. The temporal evolution of Convective Available Potential Energy (CAPE) appeared to be enhanced when the precipitation fell. Similar behavior was also observed for the temporal evolution of Storm Relative Helicity (SRH), indicating that it had a higher value during the precipitation events. To understand a detailed structure of atmospheric condition for the formation of precipitation, the surface remote sensing data and Automatic Weather System (AWS) data were analyzed. We calculated the Total Precipitable Water FLUX (TPWFLUX) using TPW and wind vector. TPWFLUX and precipitation amount showed a statistically significant relationship in the north easterly winds. The result suggested that understanding of the dynamical processes such as wind direction be important to comprehend precipitation phenomenon in the east coast of Korea.

Keywords: rainfall events, snowfall events, special observation, instability, tpwflux

요약: 겨울철 동해안 강수 현상에 대한 규명을 위하여 라디오존데를 활용한 특별관측을 2012년 1월 5일부터 2월 29일까지 실시하였고, 이 연구는 대기의 불안정을 나타내는 다양한 변수를 활용하여 강수 사례의 분석을 수행하였다. 그 결과, 강수가 발생할 때 지표면(1000 hPa)에서 중층(약 750 hPa)까지의 상당온위가 증가하는 것을 볼 수 있었고, 이러한 대기층(1000~750 hPa)은 불안정을 일으키기에 충분한 수준의 수증기를 함유하고 있었다. 대류가용잠재에너지의 시간적인 변화를 살펴본 결과 강수가 발생하였을 때 증가하는 것을 볼 수 있었고, 연직바람벡터의 경우에서도 대류가용잠재에너지와 마찬가지로 강수 기간 동안 상승하여 일정수준 이상의 값을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 강수에 따른 대기 구조의 상세한 분석을 위하여 지상 원격 탐사 자료와 지상 관측 자료를 활용하여 분석을 수행하였다. 또한 가강수

*Corresponding author: tykwon@gwnu.ac.kr

Tel: +82-33-640-2323

Fax: +82-33-640-2324

량과 바람벡터를 이용하여 가강수량플렉스를 계산하였다. 가강수량플렉스와 강수량은 북동풍 계열의 바람이 발생하였을 때 높은 관계성을 보였다. 그 결과 동해안영역에서 발생하는 강수 현상에서는 풍계와 같은 역학적인 작용의 이해가 중요한 것으로 판단되었다.

주요어: 강우현상, 강설현상, 특별관측, 불안정도, 가강수량플렉스

서론

한반도 동해안 지역은 서쪽에는 경사가 급한 태백산맥이 위치하고, 동쪽에는 동해가 있기 때문에 지형과 해양의 결합효과로 인하여 대설과 풍하 측 강풍과 같은 위험기상이 빈번하게 발생하고 있다(Lee et al., 2006; Lee and Kim, 2008; Chang et al., 2009; Lee and In, 2009). 선행연구를 살펴보면 Chung et al. (2004)은 겨울철 영동지역의 강수량은 영서지역의 약 2배, 강수 강도는 약 3배인 반면 강수 빈도는 오히려 적기 때문에 한번 강수 현상이 나타나면 영동 지역에 많은 양의 강수량을 기록한다고 분석하였고, Kwon et al. (2013)은 10년(2001-2010년) 동안의 호우 분석을 통하여 영동과 영서의 강수 기작이 다르고 특히 영동지역의 강수 현상은 하층의 동풍과 관련이 있음을 제시하였다. 최근 사례를 살펴보면 2011년 2월 11일부터 14일까지 동해안에 집중된 폭설이 발생하여 강원지역에 약 360 억 원의 재산피해와 동해안 각 지점별 최심신적설의 극값(북강릉: 77.7 cm, 동해: 70.2 cm, 울진: 41.0 cm)을 갱신하였다(NEMA, 2012; Jung et al., 2012). 이는 재산 피해뿐만 아니라 피해에 따른 북구비와 사회 경제적인 피해를 생각했을 때 그 손실은 훨씬 더 컸을 것으로 예상된다. 또한 2018년 평창 동계 올림픽 유치가 확정됨에 따라 영동지방의 대설 메커니즘 규명과 예측능력 향상에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

겨울철 동해상에서 발생하는 저기압은 중규모이지만, 해상의 관측망 부족으로 그 발달 구조를 파악하기가 어렵다. 또한 영동지역의 겨울철 강수는 강수 영역이 좁고 공간 변동성이 크기 때문에 국지적인 현상으로 이해되지만 기상 관측 자료의 부족으로 그 현상을 모의하는 데에는 어려움이 있다(Cho et al., 2004). 특히 겨울철 영동지역에서는 하층의 바람이 강수에 중요한 영향을 미친다고 하였고(Chung et al., 2004), 수치모의를 통해 대설과 동풍 계열의 기류가 연관성을 가지고 있다고 하였다(Lee and Lee, 2003). 그러나 기존연구에 사용된 자료는 지상 관측 자료로 제한되어 있었고, 수치모델 자료를 통해 고층 자료를

Fig. 1. Location of observation stations for upper-air sounding during the special observation Period.

활용하였지만 공간해상도가 낮기 때문에 라디오존데, 수직측풍장비(Wind profiler) 등을 활용한 추가적인 분석이 필요시 되고 있다. 또한 동해안에서 고층 관측은 속초와 포항에서만 이루어지고 있기 때문에 동해안 대기의 연직적인 상태분석에 한계가 있고, 강수가 집중되는 중부 동해안 영역에서는 고층 관측 자료가 없기 때문에 강수 특성 분석에 어려움이 있다. Kim et al. (2012a, 2012b)은 고층 관측 자료가 부족한 수도권에서 집중 관측을 수행하여 호우시스템의 연직적인 구조를 분석함으로써 고해상도의 고층 대기 관측의 중요성을 제시하였다. 즉, 겨울철 동해안 강수 메커니즘 규명을 위해서는 수평적·연직적으로 고해상도의 관측 자료가 요구되고 있다.

국립기상연구소 재해기상연구센터에서는 동해안 강수 메커니즘 규명을 위한 정기적인 특별관측 프로그램을 계획하고 있으며, 그 첫 번째 시도로서 2012년 1월 5일부터 2월 29일까지 겨울철 동해안 특별관측을 수행하였다. 특별관측은 강원지방기상청(북강릉)과 울진기상대에서 라디오존데를 활용한 고층 대기 관측으로 이루어졌다(Fig. 1). 라디오존데를 활용한 특별관측을 수행하여 동해안 영역의 고층 대기 관측 자

료를 확보함으로써 동해안 강수 특성 분석 및 수치 모델의 자료동화를 통하여 동해안영역 예보 정확도 향상을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 특별관측 기간 동안에 나타난 동해안 대기의 특성 변화를 살펴본 후 동해안에서 발생한 세 차례의 강수 사례 중 동해안에 집중적으로 발생한 두 사례에 초점을 맞추어 강수 발생 전후에 나타나는 열역학 불안정(상당온위, CAPE, TPW)과 역학적(SRH, 바람, TPWFLUX) 불안정의 변화를 분석하여 겨울철 동해안 강수의 주요 원인을 분석하였다.

자료 및 분석 방법

국립기상연구소 재해기상연구센터에서는 겨울철 동해안 강수 메커니즘 규명을 위해 기상청 고층 기상 관측소인 속초와 포항기상대간의 고층 관측 공백지역에서 라디오존데를 활용한 특별관측을 실시하였다. 관측 지점은 북강릉(강원지방기상청)과 울진(기상대)이고, 관측 기간은 2012년 1월 5일 0900 KST부터 2월 29일 2100 KST까지이며, 고층 대기 관측 주기의 경우 평상시 일 2회 12시간 간격(0900, 2100 KST), 강수 예보가 있을 시 일 4회 6시간 간격(0300, 0900, 1500, 2100 KST)이다. 특별관측 기간 동안 강수 사례는 총 3회였으며, 첫 번째 사례는 1월 19일 0900 KST부터 1월 21일 0900 KST까지이고, 두 번째 사례는 1월 31일 0900 KST에서 2월 1일 0900 KST까지이다. 마지막 사례는 2월 25일 0900 KST부터 2월 27일 0900 KST까지이다.

고층 대기 관측에 사용된 장비는 북강릉은 독일 GRAW사의 DFM-06 라디오존데이고, 울진에서는 미국 InterMet사의 iMet-1 라디오존데가 사용되었다. 두 장비 모두 현재까지 다양한 분야에서 예보와 연구 목적으로 사용되고 있으며 World Meteorological Organization (WMO)에서 수행하는 공동관측에 참여하여 우수평가를 받았다(WMO, 2011). 그러나 두 지점 간 사용된 장비가 다르므로, 특별관측 수행에 앞서 비교 관측을 통하여 기기 간 차이를 비교하였다(Fig. 2). 그 결과 장비간의 뚜렷한 계통오차는 나타나지 않았고 온도의 경우 약 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 노점온도는 약 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 범위에서 차이를 나타내었다. 따라서 북강릉과 울진의 다른 기종의 라디오존데 관측 장비를 이용한 분석 결과는 본 연구 목적에 크게 무리가 없는 것으로 판단하였다.

Fig. 2. Comparison of temperature (line) and dew point temperature (dotted line) between GRAW (red) and InterMet (blue) at Gangneung-Wonju national university at 15 KST on 28 December 2011.

특별관측 기간 동안 총 241회의 고층 관측이 수행되었다. 평균적으로 라디오존데는 75분간 27,100 m까지 관측하였고, 최대로는 108분간 33,800 m를 보였다. 그리고 전체의 5-95% 구간에서 60-90분 동안 19,000-31,000 m로 나타났다(Fig. 3). 라디오존데의 상승 속도는 총 관측 횟수 중 233회(96.6%)에서 평균 6 m s^{-1} 로 WMO 권고 적정 비양속도($5-8\text{ m s}^{-1}$)를 만족하였다(WMO, 2006).

또한 특별관측 기간 동안의 라디오존데 관측 자료 뿐만 아니라, 기상청 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)의 시간 및 누적강수량, 라디오미터(Micro Wave Radiometer, MWR)와 Global Navigation Satellite System (GNSS)의 가강수량(Total Precipitable Water, TPW, Yoo et al., 2004; Lim et al., 2013), 수직측풍장비의 바람 자료를 활용하였다.

겨울철 동해안 강수 사례 시 대기의 불안정도를 판단하고자, 열역학적 불안정을 표현하는 상당온위, TPW 및 대류가용잠재에너지(Convective Available Potential Energy, CAPE, Moncrieff and Miller, 1976) 지수와, 역학적 불안정을 나타내는 바람 자료와 연직 바람회전(Storm Relative Helicity, SRH, Davies-Jones et al., 1990) 지수를 분석하였다. 또한 중관규모의 바람 패턴은 동해안 지역의 지리적 특성에 의해 야기되는 대기의 역학적·열역학적 흐름을 변화시킬 수 있기 때문에 수평 및 연직 바람의 분포를 살펴보는 것은 강수 메커니즘을 이해하는데 필수적이다. 따라

Fig. 3. Information of radiosonde observations: (a) duration of observation and (b) maximum height of balloon in each station (Bukgangneung: GN, Uljin: UJ). The box and whiskers plot are identical to ordinary boxplots.

서 본 연구에서는 수직측풍장비를 이용하여 연직적 · 시간적 풍계의 변화량을 분석하였고, Paul et al. (2013)이 적용한 누적수증기량플럭스(Integrated Water Vapor FLUX, IWVFLUX) 산정 방식을 이용하여 가강수량플럭스(Total Precipitable Water FLUX, TPWFLUX)를 계산하였다. TPWFLUX는 고정된 풍향으로 들어오는 수분량을 의미하기 때문에 각 사례의 풍향에 따른 강수와와의 연관성 분석이 가능하다.

각 대기 불안정 지수 및 TPW와 TPWFLUX의 계산은 다음과 같다.

$$CAPE = g \int_{LFC}^{ZE} \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz \quad (1)$$

$$SRH = \int_{0km}^{3km} (\nabla \times \vec{V}_H) \cdot (\vec{V}_H - \vec{V}_C) dz \quad (2)$$

$$TPW = \frac{IWV}{\rho} = \frac{\kappa ZWD}{\rho} = \sum_{sfc}^{top} 0.01 \times \bar{q} \times \Delta P \quad (3)$$

$$TPWFLUX = TPW \times V \quad (4)$$

여기서 g 는 중력가속도, ZE 는 평형고도(Equilibrium Level), LFC 는 자유대류고도(Level of Free Convection), $\theta(z)$ 는 특정 입자의 가온도, $\bar{\theta}(z)$ 는 입자 주변의 가온도를 의미한다. $\vec{V}_H$ 는 Horizontal velocity vector, $\vec{V}_C$ 는 Storm motion vector, IWV 는 누적수증기량, ρ 는 물의 밀도, κ 는 굴절지수 그리고 ZWD 는 습윤지연량(Zenith Wet delay)을 나타낸다. 그리고 $\bar{q}$ 는 상하층 비습의 평균, ΔP 는 상하층의 기압변화량, V 는 고정된 풍향의 풍속이다.

특별관측결과 분석

사례별 강수 유형과 종관일기도의 특성

특별관측 기간(1월 5일-2월 29일) 동안 총 세 차례의 강수 현상이 나타났고, 각 사례별 지속 기간은 1월 19-21일(CASE-1), 1월 31일-2월 1일(CASE-2), 그리고 2월 25일-26일(CASE-3)이다(Table 1). 강수는 CASE-1 사례에서 가장 오래 지속되었고 다른 사례에 비해 가장 많은 강수량(42mm)을 보였다. 사례별 강수 분포의 특이점을 살펴보면, CASE-1과 CASE-2는 전국적인 강수가 발생한 반면, CASE-3은 태백산맥 동쪽의 영동지역에서만 국지적으로 나타났다. 또한 CASE-1에서는 강수가 태백산맥을 경계로 동쪽에 집중되는 반면, CASE-2에서는 태백 및 소백산맥을 경계로 서쪽에서 나타나는 차이를 보였다(Fig. 4).

강수의 특성을 이해하고자 일기도를 이용한 종관 특성을 살펴보았다(Fig. 5). CASE-1에서는 일본 오키나와 주변을 중심으로 기압골이 850 hPa까지 북쪽(한반도)으로 기울어져 있어, 시베리아 고기압은 한반도로 접근하지 못하고 중국 화남지방으로 확장하였다. 저위도 기압골은 이후 동진하면서 따뜻한 성질의 온난 저기압으로 발달하여 700 hPa까지 성장하였다. 한반도 동해안에서는 저기압 북쪽에서 유입되는 동풍류의 영향을 받아 비의 형태로 강우가 발생한 것으로 판단되고, 강수 영역은 태백산맥을 넘어 한반도 전역으로 확장되었다. CASE-2의 경우 서해 중부해안에서 지상저기압이 생성되어 한반도 중부지역을 통과하면서 850 hPa까지 발달하여 눈의 형태로 약한 강설을

Table 1. Information of three precipitation cases during the Special Observation Period

Precipitation information		Sokcho	Bukgangneung	Uljin	Pohang
CASE-1	Duration (KST)	1.19. 0100 - 1.21. 1700 (64 hours)	1.19. 0100 - 1.21. 1800 (65 hours)	1.19. 0000 - 1.21. 2100 (69 hours)	1.18. 1600 - 1.21. 2100 (77 hours)
	Total Amount (mm)	24.0	40.5	25.5	42.0
CASE-2	Duration (KST)	1.31. 1700 - 1.31. 2100 (4 hours)	1.31. 1700 - 2.1. 0100 (8 hours)	1.31. 1900 - 2.1. 0200 (7 hours)	1.31. 2300 - 2.1. 0100 (2 hours)
	Total Amount (mm)	0.2	3.3	0.2	0.5
CASE-3	Duration (KST)	2.25. 0800 - 2.26. 2200 (38 hours)	2.25. 0600 - 2.26. 2000 (38 hours)	2.25. 1200 - 2.27. 0200 (38 hours)	2.25. 1600 - 2.26. 2100 (29 hours)
	Total Amount (mm)	22.7	25.9	8.9	0.0

Fig. 4. Spatial distributions of precipitation amount observed by AWS for CASE-1 (16 KST on 18 Jan-21 KST on Jan 2012), CASE-2 (17 KST on 31 Jan-02 KST on 1 Feb 2012), and CASE-3 (06 KST on 25 Feb-02 KST on 27 Feb 2012).

보인 사례이다. 강수 현상은 저기압이 한반도를 경유하여 동쪽으로 이동함에 따라 한반도 전역에서 나타났다, 강수 시간은 8시간 이하로 다른 사례보다 짧게 나타난 것을 볼 수 있다. CASE-3은 두 사례와 다르게 저기압 중심이 나타나지 않았지만, 겨울철 시베리아 고기압의 확장에 따른 전형적인 강설 사례로, 시베리아 고기압 전면에서 차가운 북동기류가 동해상을 통과하면서 눈구름이 형성되었고, 태백산맥을 넘지 못하여 북부 동해안에 집중적으로 강설이 발생한 것으로 판단된다.

지상저기압의 통과로 전국적인 강수가 발생한 CASE-2와는 달리 CASE-1과 CASE-3은 동해안에 강수(강우 또는 강설)가 집중되어 발생한 사례이다. 이에 본 연구에서는 CASE-1과 CASE-3의 강수 특성과 차이를 분석하였다.

특별관측 기간에 나타난 대기 안정도의 특성

특별관측 기간 동안 대기의 특성 변화를 분석하기 위해 북강릉과 울진에서 라디오존데를 통해 확보한 자료를 이용하여 1000 hPa부터 500 hPa까지의 상당온위와 상대습도(HUM) 80% 이상, 그리고 남북 방향 바람 성분(VND)과 동서 방향 바람 성분(UND), 6시간 누적 강수량(PCN)의 시계열 분포를 제시하였다(Fig. 6). Fig. 6a를 보면 강수가 발생하지 않았을 경우 하층의 상당온위는 약 270 K, 상층은 약 290 K로 상층이 하층보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 강수가 발생한 CASE-1과 CASE-3에서 하층의 상당온위가 상승하여 안정한 대기를 형성하였고 이러한 대기층은 상대습도 80% 이상의 습윤한 층으로 구성되어 있었다. 강수가 종료되면서 하층의 상당온위는 다시 낮아지고, 안정한 대기의 고도는 감소하

CASE-1

(a) 1/19 0900 KST at Surface (b) 1/19 0900 KST at 850 hPa (c) 1/20 0900 KST at 700 hPa

CASE-2

(d) 1/31 1200 KST at Surface (e) 1/31 1500 KST at Surface (f) 1/31 2100 KST at 850 hPa

CASE-3

(g) 2/25 0900 KST at Surface (h) 2/25 2100 KST at Surface (i) 2/26 0900 KST at Surface

Fig. 5. Surface and upper-air weather map charts in each case.

였다. 다음으로 남북바람의 경우 1000 hPa에서 950 hPa까지의 하층에서는 남풍이 우세하고, 950 hPa에서 500 hPa까지의 중상층에서는 북풍이 지배적인 것을 볼 수 있다(Fig. 6b). 그러나 CASE-1을 전후로 상층은 남풍으로, 하층은 북풍으로 전향하였고, CASE-3에서는 고도와 관계없이 대체적으로 북풍이 발생하였다. 동서바람의 경우 전반적으로 서풍이 나타났고, 고도에 따라 풍속이 증가하였다(Fig. 6c). 그러나 CASE-1에서는 1000 hPa에서 약 750 hPa까지 동풍 계열로 전향하였고, CASE-3의 경우는 강수 시간을 전후로 1000 hPa에서 850 hPa까지의 동풍이 발생하였다. 종합해보면, CASE-1은 상층의 남풍과 하층의 동풍에 의해서 상당온위의 증가가 나타났고, CASE-3

는 하층의 북동풍에 의해서 상당온위가 상승한 것으로 판단되며, 이를 확인하기 위하여 다음 절에 CASE-1과 CASE-3에 나타난 특성을 자세히 기술하였다.

강수 사례일 대기 특성 비교 분석

Fig. 7에 CASE-1과 CASE-3의 상당온위와 상대습도 80% 이상의 연직분포를 제시하였다. CASE-1의 상당온위는 하층에서 288 K, 상층은 303 K이고, 전 구간에 걸쳐 상대습도 80% 이상의 대기가 조성되었다. 특히 1000 hPa에서 800 hPa까지 상당온위의 변화가 없는 안정한 대기를 구성한 것을 볼 수 있다. 그러나 CASE-3은 상하층의 상당온위가 각각 279 K와 300 K로 CASE-1에 비해 하층에서의 감소가 뚜렷하

Fig. 6. Time-series of the (a) equivalent potential temperature and humidity (top), (b) V component of wind (middle), and (c) U component of wind with precipitation (bottom) at Bukgangneung (left) and Uljin (right) during the special observation period.

Fig. 7. Time-height cross section of equivalent potential temperature (shaded) and humidity (contour) in CASE-1 (left) and CASE-3 (right) at (a) Bukgangneung and (b) Uljin.

게 나타났으며, 750 hPa 이하에서만 상대습도 80% 이상의 습윤한 영역이 존재하였다. 또한 하층은 차갑고 상층은 따뜻한 안정적인 대기를 조성하였다. 이는 CASE-1의 경우 상층까지 잘 발달된 따뜻하고 습윤한 대기를 의미하고, CASE-3은 차가운 수증기가 하층에 집중된 대기로 해석된다. 이러한 대기 조성의 차이로 인하여 두 사례에서 다른 유형의 강수(CASE-1: 강우, CASE-3: 강설)가 발생한 것으로 판단되고,

이로 인해 CASE-1에서의 강수량과 CAPE가 CASE-3보다 높게 나타났다(Fig. 8).

남북바람의 경우 CASE-1의 하층은 북풍이 지배적인 반면 상층은 부분적으로 남풍이 발생하였고, 북강릉보다 지상저기압의 위치와 가까운 울진에서의 풍속이 크게 나타났다(Fig. 9). 특히 남북바람의 변화가 나타나는 층이 750 hPa 부근으로 Fig. 7에 나타난 상단위위의 등온위선과 유사한 것을 볼 수 있다.

Fig. 8. Time-series of CAPE (red line), SRH (blue dotted line), and 6hr precipitation amount (green box) in CASE-1 (left) and CASE-3 (right) at (a) Bukgangneung and (b) Uljin.

Fig. 9. Same as Fig. 7 except for the V component of wind vector.

CASE-3은 일부 기간을 제외한 전 영역에서 북풍이 우세하게 나타난 것을 볼 수 있으며 하층의 풍계변화가 CASE-1 보다 크게 나타났고 일부구간에서 남풍이 발생하였다. 이는 하층의 상단온위와 습윤한 영역이 북풍 계열 바람에 영향을 받은 것을 의미한다. 다음으로 동서바람을 살펴보면 CASE-1에서는 약 750 hPa를 기준으로 하층은 동풍, 상층은 서풍이 지배하는 구조가 뚜렷하고, 풍속은 남북바람과 같이 울진에서 크게 관측되었다(Fig. 10). CASE-3은 하층에서 6 m s^{-1} 이하의 동풍과 서풍이 번갈아 발생하였고,

상층에서는 서풍이 우세하게 나타났다.

CASE-1은 중상층까지 풍계의 변화가 일어난 반면 CASE-3은 하층에서만 나타났는데, 이는 동해상으로 부터 유입된 기류의 차이에 의한 것으로 판단된다. CASE-1은 하층에서 북풍과 동풍이 지배적으로 나타났으며 시간이 지남에 따라 동풍이 약화되는 것을 볼 수 있었고 상하층간의 풍계의 대립이 뚜렷하였다. CASE-3은 전반적으로 북풍과 서풍이 나타났지만, 하층에서는 남풍과 동풍이 발생하기도 하였다. 이러한 상하층간의 풍계변화는 역학적 불안정을 일으킬 수

Fig. 10. Same as Fig. 7 except for the U component of wind vector.

있었고, 강수 기간 동안 SRH의 증가로 나타났다(Fig. 8). SRH는 상하층간 풍계의 대립이 뚜렷한 CASE-1이 CASE-3보다 크게 나타났고, 대체로 강수 유발수준($150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) 이하의 값을 보였지만 SRH의 증감은 강수량과 유사한 패턴을 보였다.

수평바람장 분석

좀 더 조밀한 시간 간격의 변화를 확인하기 위하여 북강릉과 울진의 수직측풍장비를 통해 수평바람의 연직 시계열 분포를 살펴보았다(Fig. 11, 12). 시계열 분포는 강수가 발생한 시간을 기준으로 선택하였고 초록색 실선은 강수 시각을 의미하고, 빨간색 실선은 동풍 계열(혹은 북풍 계열) 바람을 나타낸다. 먼저 CASE-1의 기간은 1월 18일 1200 KST부터 1월 22일 1200 KST까지이고, 강수 시각은 Table 1과 같다(Fig. 11). 북강릉의 경우 강수 전에는 지상에서 2 km 고도까지 서풍 계열이 나타나다가 시간이 지나면서 지상풍을 제외한 하층(약 0.3-2 km)의 바람이 동풍 계열로 전향하였다. 그리고 울진에서는 지상에서 약 2 km 고도까지 서풍 계열이 관측되었고, 강수가 발생함에 따라 하층(약 0.3-0.5 km)의 바람이 동풍 계열로 전향하고, 점차 동풍 계열의 고도가 증가하여 약 3 km까지 나타났다. 북강릉에서는 동풍 계열의 바람이 발생한 후 약 7시간 후에 강수가 시작되었고, 울진은 약 10시간 후에 강수가 관측되었다. 또한 북강릉은 동풍 또는 북풍이 소멸된 후 1시간 후에, 울진은 2시간 전에 강수가 종료되었다.

다음으로 CASE-3의 기간은 2월 24일 1200 KST부터 2월 28일 1200 KST까지이고, 강수 시각은 Table 1과 같다(Fig. 12). 북강릉의 경우 강수 전에는 지상에서 1 km 고도까지는 남풍 계열, 1 km 이상의 고도에서는 서풍 계열이 나타나다가 시간이 지나면서 하층(지상-약 1.5 km)의 바람이 동풍 혹은 북풍 계열로 전향하였다. 그리고 울진에서는 2 km 이하는 남풍 계열이, 그 이상의 고도에서는 서풍 계열이 나타나다가, 지상풍을 제외한 하층(약 0.3-1.5 km)의 바람이 동풍 혹은 북풍 계열로 전향하였다. 북강릉에서는 동풍 혹은 북풍 계열의 바람이 발생한 후 약 2시간 후에 강수가 시작되었고, 울진은 약 5시간 후에 강수가 발생하였다. 북강릉은 동풍 또는 북풍이 사라지기 3시간 전에, 울진은 1시간 전에 강수 종료가 나타났다.

CASE-1과 CASE-3 모두 동풍 혹은 북풍 계열 바람의 발생 전후로 강수가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 동해상으로부터 유입된 바람이 동해안 영역에서 나타나는 강수와 밀접한 관계가 있음을 보여주는 결과이며, Lee and Lee (2003)가 수치모의 연구를 통해 얻은 연직프로파일과 일치함을 확인하였다.

TPW와 TPWFLUX 분석

대기 중 수증기량은 대기의 불안정도를 가속화 시킬 수 있는 요소이기 때문에 중요하게 판단된다(Lim et al., 2013). 이에 좀 더 명확한 분석을 위하여 북강릉과 울진의 라디오존데, 라디오미터, 그리고 GNSS를 활용한 TPW의 시계열 분포를 살펴보았다(Fig.

(a) Bukgangneung (47104)

(b) Uljin (47130)

Fig. 11. Time-height cross section of the horizontal wind observed by wind profiler at (a) Bukgangneung and (b) Uljin for CASE-1.

(a) Bukgangneung (47104)

(b) Uljin (47130)

Fig. 12. Same as Fig. 11 except for the CASE-3.

13). 그 결과 강수가 나타났던 CASE-1과 2, 그리고 3에서 TPW가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 강수가 발생한 기간 외에도 증가 패턴을 보인 2월 6일과 2월 13일에는 동해안 영역에 강수 예보가 발표되었지만 강수가 발생하지 않았다. 두 사례를 확인해본

결과 동해상에 저기압이 위치하였지만 세력이 약하여 빠르게 소멸되었으며, 수직층풍장비를 통해 동풍 계열의 바람이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었다 (이 논문에 제시하지 않음). 즉, TPW가 강수가 나타나는 기간에는 뚜렷이 증가함에도 불구하고 강수 현

(a) Bukgangneung (47104)

(b) Uljin (47130)

Fig. 13. Temporal distribution of the TPW during the special observation period at (a) Bukgangneung and (b) Uljin. The TPW obtained by radiosonde (RS), GNSS and MWR are denoted by black solid line, red dashed line and blue dotted line, respectively.

Fig. 14. Temporal distribution of TPW (blue line), precipitation amount (green box), and TPWFLUX (red line) in CASE-1 and CASE-3 at Bukgangneung. The TPWFLUX are calculated using the directional component of the wind vector.

상이 나타나지 않는 것은 수증기 공급 외에 다른 요소(바람장의 변화)가 동해안 영역의 강수 발생에 주요한 요소임을 나타낸다.

수평바람장의 변화를 통해 동풍과 북풍이 동해안 영역의 강수와 관계가 있는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 11, 12). 북강릉 수직측풍장비의 1004.29 m 고도의 바람을 북풍(360°), 북동풍(45°) 그리고 동풍(90°)으로 나누어서 각 풍향으로 유입되는 풍속(V)을 계산하여, 북강릉의 1시간 간격 TPWFLUX를 계산하였다(Fig. 14). 그리고 GNSS를 통해 얻어진 TPW와 대관령기상대의 1시간 강수량의 시계열 분포를 나타내었다. CASE-1의 경우 동풍, 북동풍, 북풍 순으로 대관령의 강수량과 유사한 패턴을 보였으며, 동풍과 강수량의 상관계수는 0.79로 가장 높게 나타났다. 특히 TPW는 강수 발생 전에 증가하여 일정하게 유지된 반면 동풍에 의한 TPWFLUX는 증가와 감소를 나타내었고, 이는 대관령 강수량의 변화와 유사한 것을 확인할 수 있었다. 또한 TPWFLUX의 발생과 소멸이 강수 시점과 상당부분 일치하였다. CASE-3에서 북풍과 북동풍에 의한 TPWFLUX와 강수량의 상관계수는 각각 0.66과 0.50으로 높게 나타났지만 동풍과는 0.28로 연관성이 떨어지는 것 볼 수 있었다. 특히 강수가 TPW의 감소시점에 발생한 것을 고려한다면 북동풍이 강수의 중요한 요소라고 해석된다.

요약 및 결론

본 연구에서는 라디오존데와 기타 기상관측장비를 활용하여 특별관측 기간(2012년 1월 5일-2월 29일) 동안의 동해안 대기 특성의 변화와 동해안에 강수가 집중된 두 사례(CASE-1과 CASE-3)에 대하여 분석을 실시하였다. CASE-2의 경우 지상저기압의 통과로 짧은 시간동안 한반도 전역에 강수가 발생하였기 때문에 동해안 강수 사례로 보기 힘들어 분석대상에서 제외하였다. CASE-1의 경우 동해상에 위치한 저기압의 영향으로 강우가 발생하였고, CASE-3은 동해상으로 확장한 시베리아 고기압에 의해 강설이 나타났다. 라디오존데를 활용하여 고층 대기의 변화를 살펴본 결과 강수 기간 동안 중하층의 상당운위가 상승하여 연속적으로 중립적인(또는 안정한) 대기를 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 바람의 경우 전반적으로 서풍과 남풍이 우세하였지만, 강수 기간을 전후로 중하층의 풍계가 동풍과 북풍으로 전향하였다. 동풍 또는

북풍이 발생한 후 7-10시간 후에 강수가 시작되었고, 이러한 바람이 소멸되기 1-2시간을 전후로 강수가 종료됨을 확인하였다. 이는 동해안 영역의 강수 예보에서 동풍 계열 바람의 중요성을 시사하는 바이다. 대기의 불안정을 나타내는 CAPE와 SRH를 비교해 본 결과, 강수 기간 동안 두 불안정도 모두 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 각각의 기상변수가 강수를 유발 할 수 있는 수준에는 도달하지 못하였고 SRH가 CAPE 보다 강수량과 유사한 증감을 보였다. TPW는 강수 기간 동안 증가하는 것을 확인할 수 있었지만 강수 기간 외에도 두 차례의 증가가 나타났다, 이는 TPW가 강수 기간 동안 증가하지만 TPW만으로 강수의 발생을 판단하기에 무리가 있음을 알 수 있었다. 또 TPWFLUX를 통해 주요한 풍향을 판단해본결과 CASE-1과 CASE-3가 각각 동풍($R=0.79$)과 북동풍($R=0.66$)이 강수 현상과 관계성이 높게 나타났다.

동해안영역에 집중된 강수는 중하층의 풍계가 서풍 계열에서 동풍 또는 북동풍으로 바뀌면서 동해상의 수증기의 유입이 있었고, 이는 대기의 불안정을 가속화시켰다. 더불어 태백산맥에 의한 지형효과는 유입된 공기의 수렴 및 상승을 일으켜 겨울철 동해안 지역의 대설 발생 가능성을 높게 하는 원인이 될 수 있다. 이와 같이 동해안에서 발생하는 강수 현상은 대기의 역학적 및 열역학적 불안정의 복합적인 영향으로 나타난 것으로 보이며, 특히 기압배치에 따라 수증기의 성질과 풍향이 결정되어, 강수의 형태(강우와 강설)가 구분된 것으로 판단된다.

본 연구는 동해안 강수 메커니즘 규명을 위한 특별관측 사업의 일환으로 2012년 1월 5일부터 2월 29일까지 북강릉과 울진에서 라디오존데를 활용한 고층 관측을 수행하였고 이를 통해 동해안영역의 고해상도 3차원 자료를 확보 할 수 있었다. 또한 다른 기상관측기기를 활용해 추가적인 분석을 수행함으로써 역학적 및 열역학적 변화를 확인하였다. 향후 정기적으로 수행될 특별관측으로 누적될 고해상도의 3차원 자료는 동해안의 중규모 기상현상의 분석과 수치모델의 예측능력 향상에 기여할 수 있을 것이라고 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소의 주요사업 ‘재해기상연구센터 설립·운영(R&D)’의 일환으로 수행되었습니다.

다. 겨울철 대설 메커니즘 분석을 위한 특별관측을 위해 협조해주신 강릉원주대학교, 강원지방기상청, 울진기상대에 감사를 포함합니다. 또한, 논문의 원고를 상세히 심사해 주신 심사위원님께도 감사를 드립니다.

References

- Chang, H., Franczyk, J., and Kim, C., 2009, What is responsible for increasing flood risk? The case of Gangwon province, Korea. *Natural Hazards*, 48, 339-354.
- Cho, K.-H., Cho, Y.-J., and Kwon, T.-Y., 2004, Characteristics of air mass related with precipitation events in Yeongdong region. *Asia-Pacific Journal of Atmosphere Sciences*, 40, 381-393. (in Korean)
- Chung, K.-B., Kim, J.-Y., and Kwon, T.-Y., 2004, Characteristics of lower-Tropospheric wind related with winter precipitation in the Yeongdong region. *Asia-Pacific Journal of Atmosphere Sciences*, 40, 369-380. (in Korean)
- Davies-Jones, R.P., Burgess, D., and Foster, M., 1990, Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, 56-60.
- Jung, S.-H., Im, E.-S., and Han, S.-O., 2012, The effect of topography and sea surface temperature on heavy snowfall in the Yeongdong region and a case study with high resolution WRF simulation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 48, 259-273.
- Kim, D.-W., Kim, Y.-H., Kim, K.-H., Shin, S.-S., Kim, D.-K., Hwang, Y.-J., Park, J.-I., Choi, D.-Y., and Lee, Y.-H., 2012a, Atmospheric vertical structure of heavy rainfall system during 2010 summer intensive observation period over Seoul metropolitan area. *Journal of Korean Earth Science Society*, 33, 148-161. (in Korean)
- Kim, D.-W., Kim, Y.-H., Kim, K.-H., Shin, S.-S., Kim, D.-K., Hwang, Y.-J., Park, J.-I., Choi, D.-Y., and Lee, Y.-H., 2012b, Effect of urbanization on rainfall events during the 2010 summer intensive observation period over Seoul metropolitan area. *Journal of Korean Earth Science Society*, 33, 219-232. (in Korean)
- Kwon, T.-Y., Kim, J.-S., and Kim, B.-G., 2013, Comparison of the properties of Yeongdong and Yeongseo heavy rain. *Atmosphere*, 23, 245-264. (in Korean)
- Lee, J.G. and In, S.-R., 2009, A numerical sensitivity experiment of the downslope windstorm over the Yeongdong region in relation to the inversion layer of temperature. *Atmosphere*, 19, 331-344. (in Korean)
- Lee, J.G. and Kim, Y.J., 2008, A numerical case study examining the orographic effect of the Taebaek mountains on snowfall distribution over the Yeongdong area. *Atmosphere*, 18, (in Korean)
- Lee, J.G. and Lee, J.S., 2003, A numerical study of Yeongdong heavy snowfall events associated with easterly. *Asia-Pacific Journal of Atmosphere Sciences*, 39, 475-490. (in Korean)
- Lee, J.-S., Kwon, T.-Y., and Kim, D.-R., 2006, Statistical verification of precipitation forecasts from MM5 for heavy snowfall events in Yeongdong region. *Atmosphere*, 16, 125-139. (in Korean)
- Lim, Y.-K., Han, S.-O., Jung, S.-P., and Seong, J.-H., 2013, The Characteristic analysis of precipitable water vapor according to GPS observation baseline determination. *Journal of Korean Earth Science Society*, 34, 1-7. (in Korean)
- Moncrieff, M. and Miller, M.J., 1976, The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, 373-394.
- NEMA, 2012, Annual disaster report for 2011. National Emergency Management Agency, 973 p. (in Korean)
- Paul J. Neiman, Hughes, M., Moore, B.J., Ralph, F.M., and Sukovich E.M., 2013, Sierra barrier jets, atmospheric rivers, and precipitation characteristics in northern California: A composite perspective based on a network of wind profilers. *Monthly Weather Review*, 141, 4211-4233.
- WMO, 2006, WMO guide to meteorological instruments and methods of observation, WMO publication no. 8. World Meteorological Organization, 47 p.
- WMO, 2011, Instruments and observing methods report no. 107. World Meteorological Organization, 101 p.
- Yoo, C.S., Shin, C.-K., and Yoon, Y.-N., 2004, Estimation and analysis of precipitation water. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 24, 413-420. (in Korean)

2013년 12월 23일 접수

2014년 1월 15일 수정원고 접수

2014년 2월 5일 채택