

겨울철 ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) 기간 동안 수증기량과 강수량의 연관성 분석

고아름¹⁾ · 김병곤^{1)*} · 은승희¹⁾ · 박영산²⁾ · 최병철³⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾국립기상과학원 응용기상연구과,
³⁾국립기상과학원 관측기반연구과 재해기상연구센터

(접수일: 2015년 9월 1일, 수정일: 2016년 1월 20일, 게재확정일: 2016년 1월 20일)

Analysis of the Relationship of Water Vapor with Precipitation for the Winter ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) Period

A-Reum Ko¹⁾, Byung-Gon Kim^{1)*}, Seung-Hee Eun¹⁾, Young-San Park²⁾, and Byoung-Choel Choi³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

²⁾Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Jeju, Korea

³⁾High-Impact Weather Research Center, Observational Research Division,
National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Gangneung, Korea

(Manuscript received 1 September 2015; revised 20 January 2016; accepted 20 January 2016)

Abstract Water vapor in the atmosphere is an important element that generates various meteorological phenomena and modifies a hydrological cycle. In general, the Yeongdong region has a lot of snow compared to the other regions in winter due to the complex topography and an adjacent East Sea. However, the phase change from water vapor to ice cloud and further snowfall has little been examined in detail. Therefore, in this study, we investigated phase change of liquid water in terms of a quantitative budget as well as time lag of water vapor conversion to snowfall in the ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) campaign that had been carried out from 2012 to 2015. First, we classified 3 distinctive synoptic patterns such as Low Crossing, Low Passing, and Stagnation. In general, the amount of water vapor of Low Crossing is highest, and Low Passing, Stagnation in order. The snowfall intensity of Stagnation is highest, whereas that of Low Crossing is the lowest, when a sharp increase in water vapor and accordingly a following increase in precipitation are shown with the remarkable time lag. Interestingly, the conversion rate of water vapor to snowfall seems to be higher (about 10%) in case of the Stagnation type in comparison with the other types at Bukgangneung, which appears to be attributable to significant cooling caused by cold surge in the lower atmosphere. Although the snowfall is generally preceded by an increase in water vapor, its amount converted into the snowfall is also controlled by the atmosphere condition such as temperature, super-saturation, etc. These results would be a fundamental resource for an improvement of snowfall forecast in the Yeongdong region and the successful experiment of weather modification in the near future.

Key words: Water vapor, precipitation, synoptic patterns, water budget, time lag

*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, 7 Jukheongil (123 Jibyun),
Gangneung, Gangwon 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2326, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: bgk@gwnu.ac.kr

1. 서 론

대기 중의 수증기는 기상 변수 중에서 상대적으로 적은 양이 존재하지만 다양한 기상 현상을 발생시키는 중요한 인자이며, 구름의 생성과 소멸, 강수, 지표면 증발산 등 수문학적 순환을 통해서 기후에도 큰 영향을 미친다(Chahine, 1992).

가강수량(Precipitable Water Vapor, PWV)은 단위 면적에 포함되어 있는 연직 대기 기둥 속에 포함된 수증기가 전부 강수로 변환되었을 때의 양을 의미하지만 실제 강수량은 아니다. 가강수량(PWV)은 대기 중의 수분양의 변화를 정량화할 수 있는 좋은 기상 인자로 알려져 있으며(Yoo et al., 2004), 수치모델을 이용한 일기 예보에서 가강수량 값은 중요한 입력 변수로써 강수 예보나 기후 예측에서 정확성을 높이기 위해 관측을 통한 수증기의 시·공간적인 이해가 필요하다.

선행 연구에 의하면 강수 시작 전에 가강수량의 증가가 선행되는데, 이는 종관 규모의 파동이 수증기를 유입시키는 것으로 알려져 있다(Haertel and Kiladis, 2004). Holloway et al. (2010)은 남태평양의 섬나라인 나우루(Nauru) 지역에서 8년간 다양한 원격관측기기(Microwave Radiometer (MWR), Sonde, TRMM 위성 등)를 사용하여 가강수량이 강수로 변환 시 지연되는 시간 및 서로의 상관성을 분석한 결과, 종관 규모(Synoptic-scale)와 중간 규모(Meso-scale) 영향에 따라 수증기 선행 시작 시간이 다르며, 종관 규모의 영향으로 수증기가 유입될 경우 수증기 증가는 서서히 일어나는 반면, 중간 규모의 경우 급격한 수증기량 증가가 뚜렷함을 관측한 바 있다. Song (2012)은 GPS로부터 산출된 가강수량과 영동(강릉, 울진)지역 대설과의 상관성을 분석한 결과, 가강수량이 증가한 이후 강설량이 증가하는 추세가 나타나며, 적설량 증가와 함께 GPS 가강수량이 감소하였다고 보고하였다. 또한 웨이블릿 방법을 이용하여 GPS 가강수량과 포화수증기압의 양의 상관성을 보인 바 있다. Yang et al. (2012)은 MWR을 이용해 청주, 합천, 대관령의 가강수량 및 구름수함량(Liquid Water Path, LWP)의 시·공간적인 분포를 분석한 결과, 세 지역의 가강수량 계절 변화 및 일 변화는 유사한 반면, 구름수함량은 지역적으로 계절 차이를 보이는데 이는 각기 다른 지형 및 지리적 영향일 것으로 추정하였다. Kim et al. (2014)은 관측공백지역에서 국지적으로 발생하는 강수현상을 규명하기 위하여 이동식 기상관측차량시스템에 GPS 수신기를 탑재하여 실시간 가강수량의 변화를 라디오존데 및 MWR과 비교 분석한 바 있다.

강원 영동지역은 특수한 지형과 해양의 영향으로 겨울철에 타 지역에 비해 대설이 빈번히 발생하여 사

회·경제적으로 큰 손실을 초래한다. 영동 대설은 주로 시베리아 고기압의 확장과 한반도를 통과하는 저기압에 의해 비롯된 종관적인 강제력(Hong, 1980; Jhun et al., 1994)에 의해 하층 대기가 불안정해지고, 동해상의 해수면으로부터 수증기와 열의 공급에 의해 발달한 강설 구름이 동풍유입으로 인해 영동지역으로 이동하면서 강설이 유발된다(Lee et al., 2012; Nam et al., 2014). 또한, Nam et al. (2014)은 영동지역에서 2000~2012년(13년) 동안 관측된 17개 강설 사례들로부터 영동지역의 적설량과 동해상의 해기차(Sea-Surface Temperature, SST)와 850 hPa 기온 차이가 15°C 이상일 경우 강한 강설과 밀접한 관련성이 있다고 제시한 바 있다. 또한, Kwon et al. (2014)은 2001~2012년(12년) 동안 영동지역 극한 대설 사례(일 신적설 20 cm 이상, 산지의 경우 30 cm)를 예보하기 위한 예측 가이던스(3~4 km 고도의 연직 바람, 500 hPa의 12시간 온도이류, 절대 소용돌이도, 위치 소용돌이도 등)를 제시하였다. 이와 같이 영동지역 강설에 대한 선행 연구는 대설 시·종관 특성과 열역학적인 이해에 집중되어, 수증기량과 적설량과의 관련성 및 강설 전·후 물의 상 변화 시 정량적인 수치(Budget)와 지연 시간(Time lag)에 대한 이해는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 종관 패턴 분류에 따른 연직 수증기량 변화를 관측하여 영동 강설 및 강수 과정의 원인을 규명하고 물 순환 과정에 대해 이해하기 위하여 ESSAY 2012~2015 기간 동안 다양한 구름 원격관측기기(MWR, GNSS, Radiosonde, Ceilometer 등)를 활용하여 강설기간 동안의 북강릉(Bukgangneung, BGN)과 대관령(Daegwallyeong, DGR)에서의 수증기, 구름 및 강수과정 동안 변환되는 물의 양과 지체 시간(Time lag)을 정량화하고자 한다.

2. 분석 자료 및 방법

강릉원주대학교(GWNU)에서는 2012~2015년 동안 강원 영동지역의 강설 기간 전·후를 포함하여 북강릉과 대관령에 설치된 각종 구름 원격관측장비를 활용한 모니터링과 함께, 라디오존데 관측을 실시하는 집중 관측 캠페인(Experiment on Snow Storms At Yeongdong, ESSAY)을 실시하였다(Fig. 1). 라디오존데 관측은 기상청의 강설 예보 발표를 기준으로 강설 전에는 6시간 간격, 강설 중에는 3시간 간격으로 북강릉 지역의 대기 연직 기상 관측을 수행하였다. 또한, 강설구름의 열역학적 특성을 살펴보고자 라디오존데 사운딩을 통해 온위, 상당온위, 혼합비, 포화혼합비, 풍향, 풍속 등을 관측하였다. 구름 내에서 온위는 잠열방출로 인해 다소 증가하는 반면, 상당온위는 일정한 경향을 보이며 혼합비와 포화혼합비가 거의

Experiment on Snow Storms At Yeongdong(ESSAY)

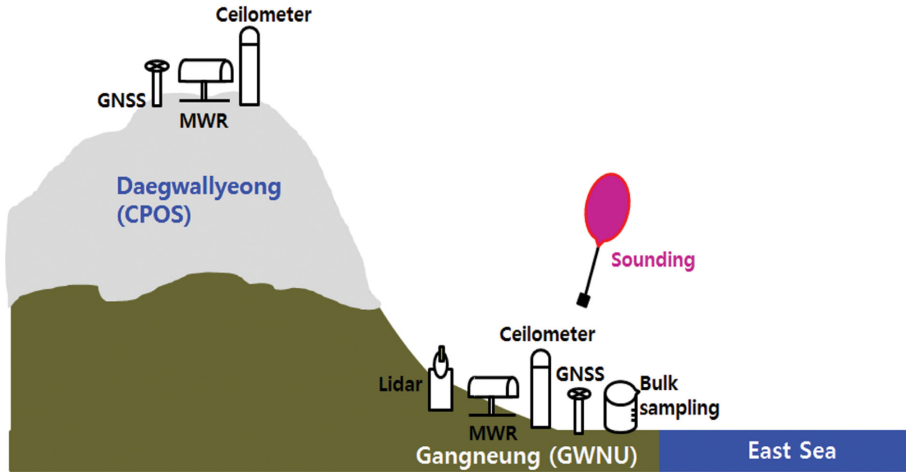


Fig. 1. Schematic diagram of the ESSAY campaign carried out from 2012 to 2015.

일치하는 특징을 보이는 데 이를 이용하여 운정고도 (Cloud Top Height, CTH)를 산출하였다. 그리고 운고계 (Ceilometer)를 이용하여 운저 고도(Cloud Base Height, CBH)를 관측하고 구름 두께(Cloud Depth, CD)를 추정하였다.

일반적으로 가강수량은 마이크로파 라디오미터 (Microwave Radiometer, MWR), 위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS), 라디오존데 (Radiosonde) 등의 다양한 원격관측기기를 통하여 관측되고 있다. 라디오미터의 경우 실제 대기를 통과 하면서 관측하는 라디오존데로부터 산출된 가강수량 값과의 비교를 통해 검증한 많은 선행 연구들이 수행 되어 왔다(Liou et al., 2001; Baelen et al., 2005; Ha et al., 2010). Ha et al. (2007)은 MWR과 더불어 GPS 로부터의 가강수량 비교를 통한 정밀도 검증에서 표준 편차와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 모두 1 mm 내외로 정밀한 가강수량 값이 산출됨을 밝힌 바 있다.

본 연구에서 가강수량 및 구름 특성을 파악하기 위해 주로 사용한 구름 원격관측장비는 MWR, GNSS, 라디오존데, 운고계(Ceilometer) 등이다. MWR은 북강릉(BGN)에 위치한 강원지방기상청과 대관령(DGR)에 위치한 구름물리선도센터에 위치하며, RPG-HATPRO 기기의 22~31 GHz의 주파수 대역에서 대기로부터의 장파복사를 수신하여 얻은 밝기 온도를 통해 산출된 가강수량(Integrated Water Vapor, IWV) 자료를 사용 하였으며, GNSS으로부터의 가강수량과 비교 검증을 위해 1시간 평균 자료를 사용하였다. 또한, MWR은 지상에서 관측하는 장비로 강설 시 관측 오차에 의한

잡음을 제거하기 위해 GNSS의 PWV (Precipitable Water Vapor) 값과 비교하여 20 mm 이상의 이상점(Outlier) 들은 제거한 후 내삽(Interpolation)하였다. GNSS는 3 개 이상의 GPS 위성을 이용하여 대기 중에 존재하는 수증기에 의해 GPS 신호 경로가 굴절되어 지상의 수신기까지 도달하는데 지연되는 정도로 가강수량(PWV) 을 산출한다. GNSS로부터의 가강수량(PWV)은 국토 지리정보원의 GPS 상시관측소 시스템으로부터 제공되며, 강릉원주대학교 자연과학 1호관 앞에 설치되어 있는 GNSS 수신기와 대관령 기상대에 위치한 수신기로부터 산출된 가강수량의 시간 자료를 사용하였다. 또한 MWR과 GNSS로부터의 가강수량과의 비교를 위해 라디오존데를 통해 관측한 연직 10 km 내의 누적 가강수량을 계산하였다. 라디오존데로부터의 가강수량($PWV_{radiosonde}$)은 라디오존데 관측 값으로부터 산출한 혼합비를 통해 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$PWV_{radiosonde} = -\frac{1}{g} \int_{p_0}^p \omega dp \tag{1}$$

여기서 ω 는 수증기의 혼합비($g\ kg^{-1}$), g 는 중력 가속도($9.8\ m\ s^{-2}$)이고 p_0 와 p 는 각각 지상 기압과 상층 기압이다.

라디오존데 관측과 더불어 강릉원주대학교 생명과학 1호관 옥상에 설치되어있는 운고계(Ceilometer)를 이용하여 운저고도(CBH)를 관측하였다. 라디오존데 관측과 북강릉 지역의 위·경도를 사용하여 내삽한 지역예보모델(Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS)로부터 영동지역 강설 구름이 주로 존재하는 약 1.5 km (850 hPa) 고도의 온도 변화를 살

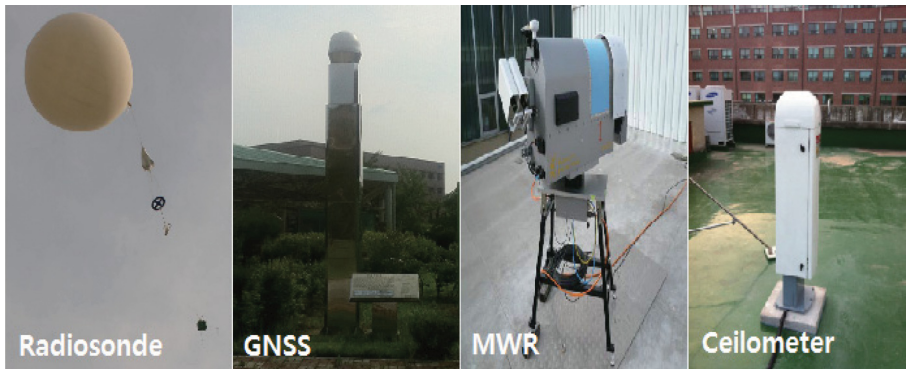


Fig. 2. The instruments mainly used in the ESSAY campaigns (Radiosonde, GNSS, MWR, Ceilometer).

Table 1. Overview of observation equipments used in the study.

	MWR	Ceilometer	GNSS	Radiosonde
Variable	LWP & IWV	Cloud base	PWV	Meteorology
Maker	Radiometer Physics GmbH	VAISALA	Trimble	GRAW
Model	RPG-HATPRO	CL51	NetR9 GNSS Reference Receiver	DFM-06
Range	0~10 km	0~13 km	-	Temperature: + 50°C~-90°C Humidity: 0 to 100% Pressure: 1,060 to 3 hPa Wind speed: 0 to 200 m s ⁻¹ Wind direction: 0 to 360°
Accuracy	LWP: ± 20 g m ⁻² IWV: ± 0.2 kg m ⁻²	± 1% (± 5 m)	[Baseline < 30 km] -Horizontal 3 mm -Vertical 4 mm + 0.4 ppm [Baseline > 30 km] -Horizontal 4 mm -Vertical 9 mm	Temperature: ± 0.2°C Humidity: ± 2% Pressure: ± 1 hPa Wind speed: ± 1 m s ⁻¹ Wind direction: ± 2°
Frequency/ Wavelength	22~31 GHz (7 channel)	910 nm	[Tracking] L1 C/A, L2C, L2E, L5	400~406 MHz

해보았다. 또한, 강설 기간동안 북강릉 지역에서의 라디오존데 관측으로부터 얻은 연직 프로파일을 활용하여 연직 바람 변화에 따른 수증기량의 이동 및 변화를 살펴보았다. 강수량은 북강릉과 대관령에서 종관 기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)으로 관측한 시간 강수량을 사용하였다. 본 연구가 강설 사례임에도 불구하고 신적설량 대신 시간 강수량을 사용한 이유는 겨울철 강설은 대기 하층의 온도에 의존하여 기온이 낮으면 눈으로 관측되고, 기온이 높으면 비로 변환될 수 있기 때문이다. 또한 연직 수증기로부터 강수로 변환되는 양을 정량화하는

과정에서 온도에 대한 의존도를 줄일 수 있다. 본 연구에서 주로 사용된 관측 기기와 사양을 Fig. 2와 Table 1에 각각 제시하였다.

본 연구에서는 ESSAY 2012~2015 캠페인 동안 관측된 강설 사례들을 중심으로 3 가지 분류 방법을 통해 분석하였다. 먼저, 강설 전·후로 ± 1일(총 3일) 동안 저기압이 한반도를 통과하는 경로에 따라 세 가지 종관 패턴으로 분류하였다. 중국 내륙으로부터 한반도를 가로지르는 저기압에 의해 강수가 관측된 경우를 “저기압 관통형(Low Crossing, LC)”으로 명명하였다(Fig. 3a). 또한, 한반도 남해상을 통과하는 저기

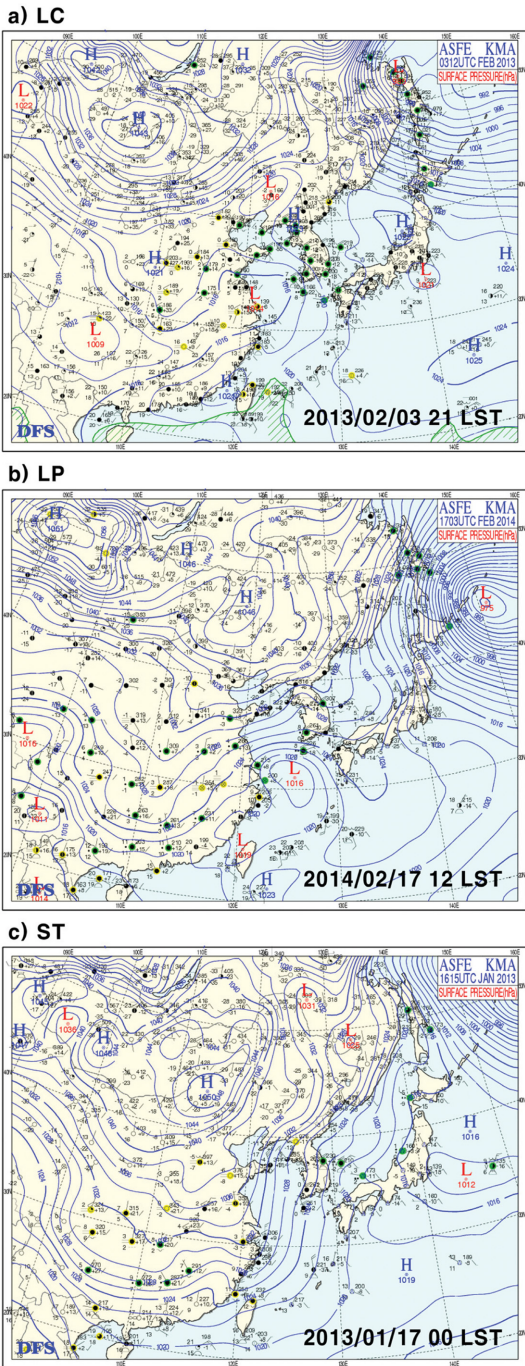


Fig. 3. Representative synoptic patterns of LC (a; Low Crossing), LP (b; Low Passing), and ST (c; Stagnation) types.

압 시스템에서 강수가 관측된 경우를 “저기압 남해상 통과형(Low Passing, LP)”으로 명명하였으며(Fig. 3b), 시베리아 고기압의 한반도 확장 및 동해상에 정체한

저기압의 영향으로 강수를 유발시킨 패턴을 “정체형(Stagnation, ST)”으로 명명하였다(Fig. 3c). 다음으로 일 강수 분포도를 참조하여 종관 패턴을 분류하였는데(Fig. 4), LC형의 경우 한반도 중부지역을 포함하여 전국적으로 강수가 관측된 사례들을 선정하였고(Fig. 4a), LP형의 경우 한반도 중부지역을 제외하고 남부 및 제주와 영동지역에 강수가 관측된 사례들을 선정하였다(Fig. 4b). 또한 ST형의 경우, 영동 해안지역에만 강수가 국한되어 관측된 사례들을 선정하였다(Fig. 4c). 마지막 절차로써 강설 기간동안 라디오존데를 통해 관측한 북강릉의 연직 구조를 활용하여 구름 층이 존재하는 약 1.5 km 고도(850 hPa)의 풍향을 참조하였다. Figures 5-7은 각 종관 유형별 라디오존데로 관측한 기상변수의 연직구조를 나타낸 것이다. LC형의 경우, 서쪽으로부터 상대적으로 두꺼운 구름의 유입과 함께 남서 · 서풍계열의 바람이 관측되었다(Fig. 5). 한편, 동쪽 시스템에 의한 LP형의 경우, 북동 · 동풍계열의 바람과 함께 지상에서부터 2 km 이내에 구름이 관측되었고(Fig. 6), ST형의 경우는 주로 북풍계열의 바람과 함께 2 km 두께의 하층운이 관측되었다(Fig. 7).

이 세 가지 분류 방법을 통해 선정된 강수 및 강설 사례는 각각 5사례씩 총 15가지 사례이며(Table 2), 다음 절에서는 각각의 종관 유형별 수증기량 및 강수량의 연관성에 대하여 분석하고자 한다.

3. 결 과

3.1 영동지역의 수증기량 변화

분석에 앞서 구름 원격관측장비로부터 추정된 가강수량 자료의 상관성 검토를 위해 GNSS, MWR, 라디오존데 관측자료를 비교 분석하였다. 사용된 가강수량 자료는 라디오존데 관측을 실시한 2012년 12월~2014년 3월 기간 중 겨울철(12월, 1월, 2월, 3월)에 해당하는 북강릉 지역의 자료를 사용하였다. Figure 8은 각각 GNSS로부터 산출된 PWV, MWR의 IWV, 라디오존데로 추정된 가강수량($PWV_{radiosonde}$)간의 상관성을 나타낸 것이다. 3가지 관측 장비들은 대기 중의 수증기량을 측정하는 방식의 차이가 있음에도 불구하고 산출된 값들 간의 상관관계수(R)가 0.89~0.94로 자료의 상관성이 높게 나타났다. 또한, 장비들간의 편향오차(bias)와 평균제곱근오차(RMSE)를 계산한 결과, 라디오존데 기준 GNSS의 편향오차는 1.8 mm로 GNSS가 과대 추정하였고, RMSE는 2.5 mm로 나타났다. 마찬가지로 라디오존데 기준 MWR의 편향오차는 0.5 mm로 MWR이 과대 추정하였으나 GNSS에 비해 약 1/3 적은 수준의 편향오차를 보였고, RMSE는 1.6 mm로 나타났다. GNSS와 MWR간의 bias와 RMSE는 각각 1.6 mm, 2.4 mm로 GNSS가 과대 추정하는 경향을 보

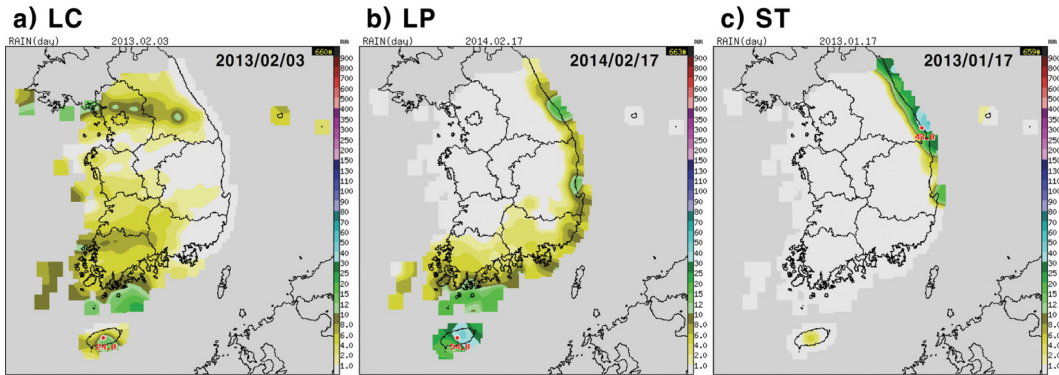


Fig. 4. Typical horizontal distribution of daily precipitation amount for LC (a; Low Crossing), LP (b; Low Passing), and ST (c; Stagnation) types.

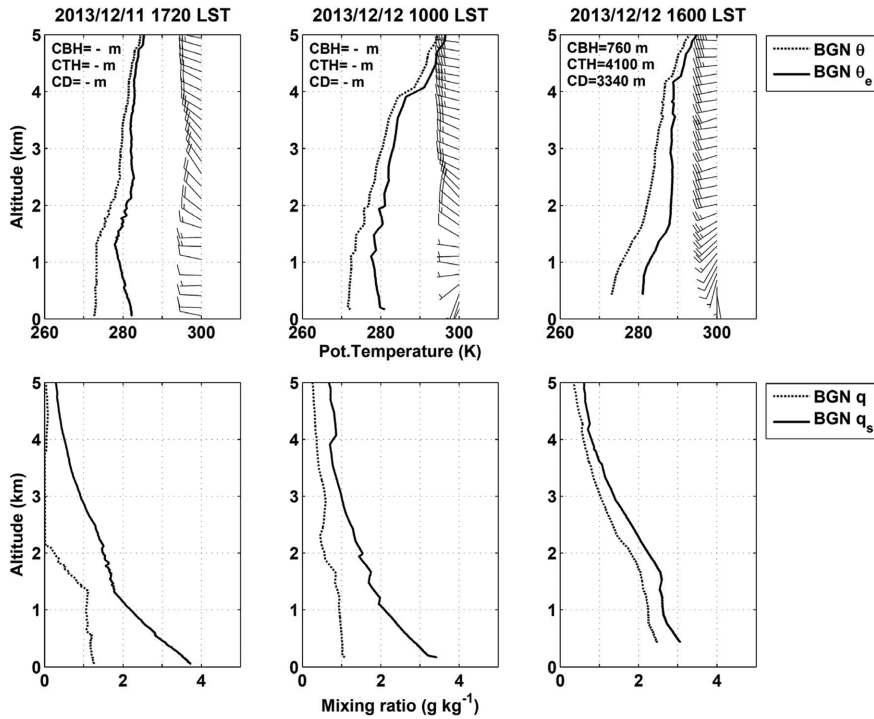


Fig. 5. Vertical profiles of potential temperature (dot), equivalent potential temperature (line), wind (wind flag), mixing ratio (dot), saturation mixing ratio (line) during 11 and 12 December 2013 belonging to the Low Crossing synoptic pattern.

였다.

본 연구에서는 대기 중의 수증기량은 주로 하층 대류권 내에 분포하며, 대기를 직접 통과하면서 상층을 관측하는 라디오존데의 가강수량이 참값에 근접한 것으로 가정하였다. 따라서 라디오존데로부터의 가강수량과 상관성이 가장 높고, bias가 적은 MWR의 가강수량(IWV)을 시계열 분석 시 주로 사용하였다. 이때, 지상에서 관측하는 장비인 MWR은 강설 시 오차에

의한 잡음을 제거하기 위해 GNSS의 가강수량(PWV)과 비교하여 20 mm 이상의 값들은 제거한 후 내삽(Interpolation)하여 사용하였다.

먼저, 영동지역의 강설 전·후의 가강수량 변화를 분석하기에 앞서 북강릉(BGN)과 대관령(DGR) 지역의 가강수량 연 변화를 살펴보았다. Figure 9는 GNSS와 MWR의 가강수량의 연 변화를 Boxplot(백분위수를 표현)을 통해 나타냈으며, Table 3은 가강수량의

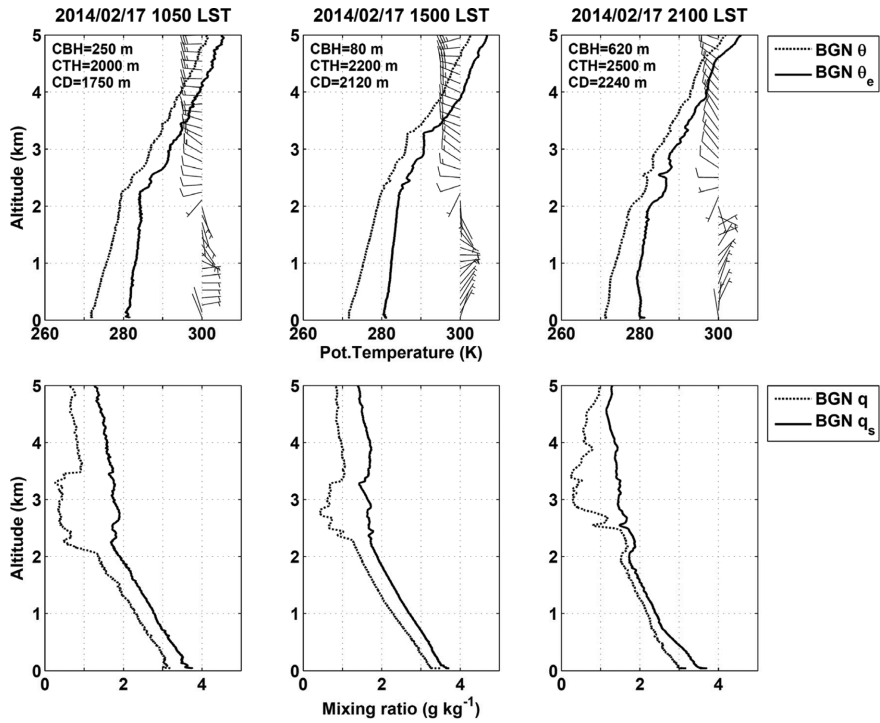


Fig. 6. Same as Fig. 5, except for on 17 February 2014 in the Low Passing synoptic pattern.

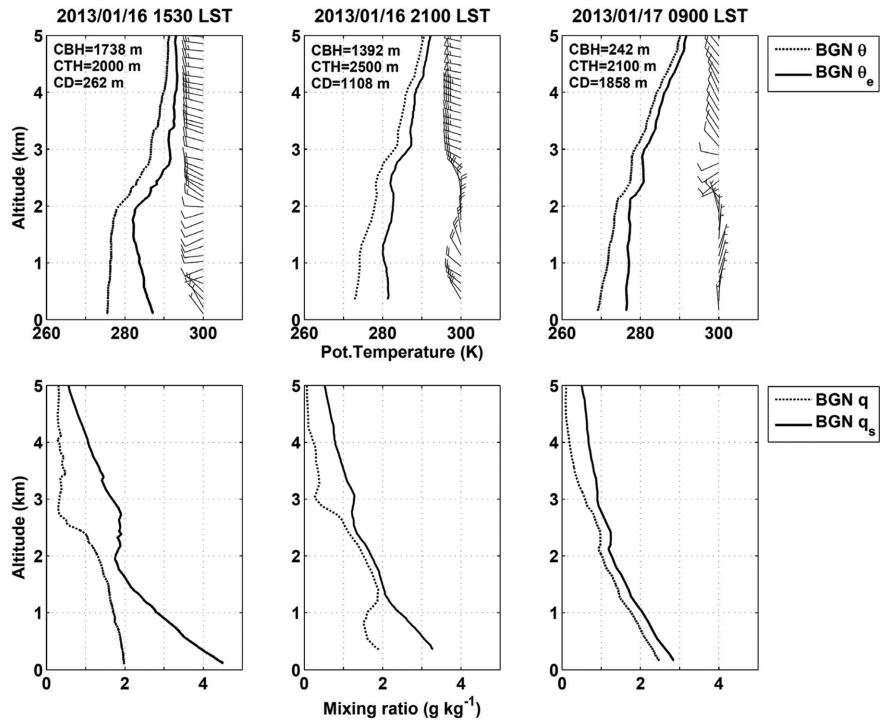


Fig. 7. Same as Fig. 5, except for during 16 and 17 January 2013 in the Stagnation synoptic pattern.

Table 2. Case periods of each type used in this study.

Type	Case number	Period		
		Year	Month	Date
Low Crossing (LC)	LC1	2013	02	03~05
	LC2	2013	12	08~10
	LC3	2013	12	11~13
	LC4	2015	01	24~26
	LC5	2015	02	20~22
Low Passing (LP)	LP1	2012	03	08~10
	LP2	2013	02	17~19
	LP3	2013	12	16~18
	LP4	2014	02	06~08
	LP5	2014	02	16~18
Stagnation (ST)	ST1	2013	01	16~18
	ST2	2013	03	24~26
	ST3	2014	03	04~06
	ST4	2015	02	03~05
	ST5	2015	02	17~19

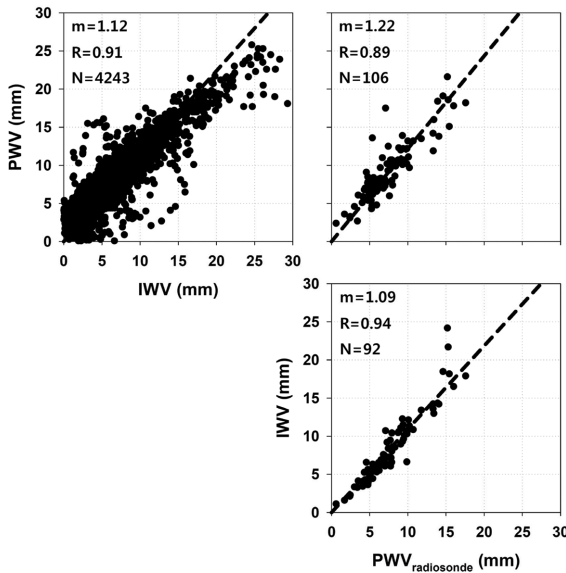


Fig. 8. Correlation analysis of water vapors derived from GNSS, MWR, and Radiosonde. PWV is derived from GNSS, IWV from MWR, $PWV_{radiosonde}$ from radiosonde. The m, R, and N values indicate mean, correlation coefficient and the number of data, respectively.

월 평균과 연 평균을 제시하였다. Figure 9의 검은 색 점은 각각 상·하위 1% 값을 의미하며, 검은 실선은 상·하위 5% 값을 의미한다. 직사각형 경계선은 상·하위 25% 값을 설명하고, 상자 중앙의 검은 실선은 50%의 중앙값(Median)을 나타내며 흰색 실선은 평균

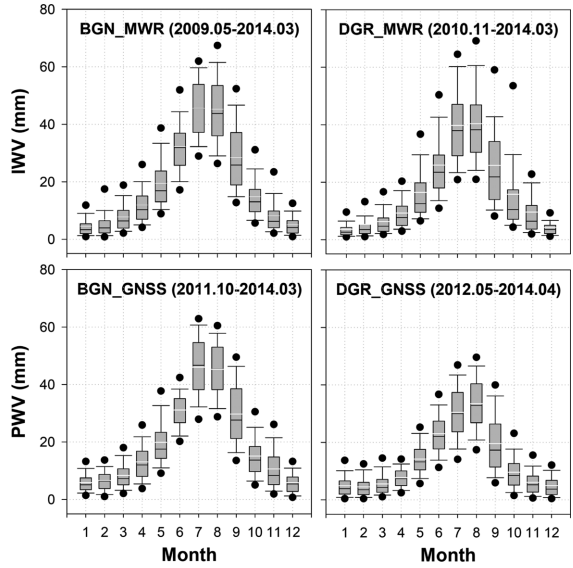


Fig. 9. Box plots of annual variations of integrated water vapor (IWV) and precipitable water vapor (PWV) at Bukgangneung (BGN) and Daegwallyeong (DGR).

Table 3. Monthly mean values of precipitable water vapor from Microwave radiometer (MWR) and Global Navigation Satellite System (GNSS) at Bukgangneung (BGN) and Daegwallyeong (DGR). (Unit: mm)

Month	BGN		DGR	
	MWR (IWV)	GNSS (PWV)	MWR (IWV)	GNSS (PWV)
January	4.5	5.5	3.6	4.9
February	6.8	5.4	5.3	4.5
March	7.8	8.5	6.3	5.6
April	11.9	13.1	9.3	7.7
May	19.5	19.9	16.5	14.2
June	32.3	31.1	25.9	23.0
July	45.6	46.1	39.8	30.5
August	45.3	45.3	40.4	33.4
September	28.4	29.7	25.9	19.6
October	14.8	16.0	15.8	9.6
November	8.2	8.5	9.6	6.1
December	5.0	5.7	4.3	4.9
Annual mean	19.2	19.6	16.9	13.7

(Mean)값을 의미한다. 사용한 자료 기간은 MWR의 경우, 북강릉에서 2009년 5월~2014년 3월(약 4년 10개월)간의 자료와 대관령에서 2010년 11월~2014년 3월(약 3년 4개월)간의 자료를 활용하였다. 또한 GNSS의 경우, 북강릉에서 2011년 10월~2014년 3월(약 2년

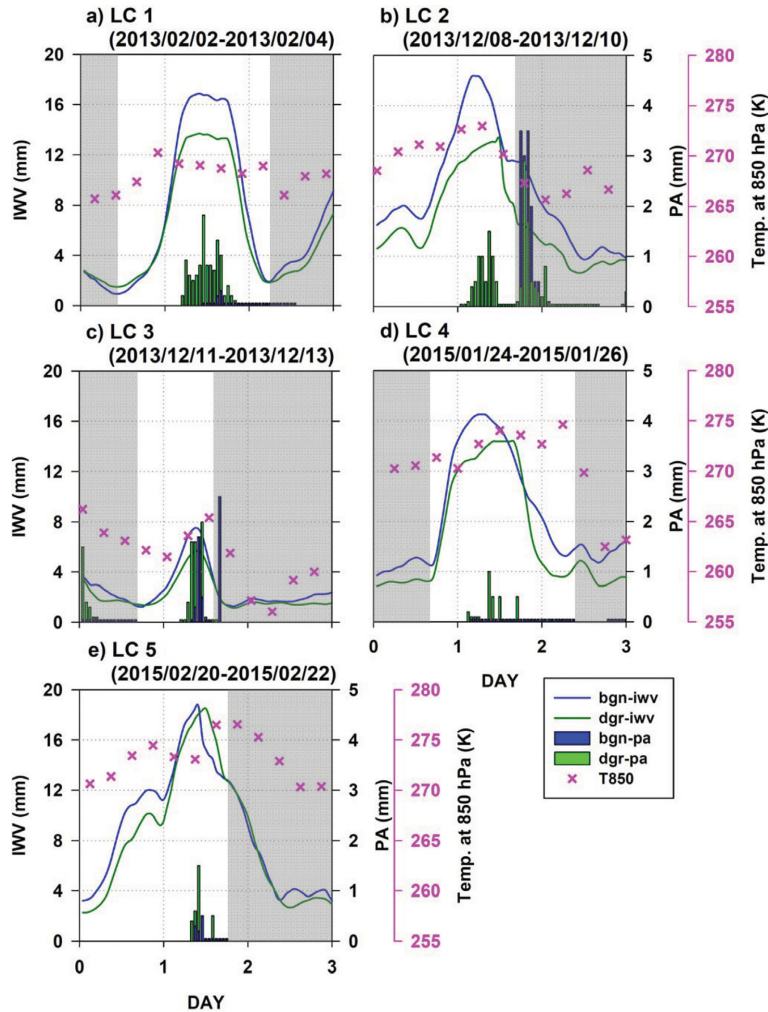


Fig. 10. Time series of hourly precipitation, integrated water vapor, and temperature of 850 hPa for the Low Crossing type. The lines and bars indicate integrated water vapor (IWV) and hourly precipitation, respectively. The blue and green colors denote Bukgangneung (BGN) and Daegwallyeong (DGR), respectively. Cross marker (x) is the temperature of 850 hPa at BGN. Analysis has been taken after excluding the shading period.

5개월), 대관령에서 2012년 5월~2014년 4월(2013년 3월~5월 제외, 약 1년 8개월)의 자료를 사용하였다.

MWR과 GNSS로부터의 북강릉과 대관령의 가강수량 연 변화는 1~12월까지 상호 유사한 경향성을 보였다(Fig. 9). 가강수량의 연 평균 값은 북강릉에서 각각 19.2 mm (MWR), 19.6 mm (GNSS)로 유사한 수준인 반면, 대관령은 MWR의 경우 약 17 mm, GNSS의 경우 약 14 mm로 약 3 mm의 차이가 나타났다(Table 3). 이는 Liou et al. (2001)에서 제시한 MWR과 GNSS 간의 약 1~3 mm의 평균적인 차이 수준을 만족하는 범위에 있으며, 차이의 이유는 두 관측 장비의 관측 원리상 관측하는 대기의 부피가 다르며 관측기기 주

변의 기상학적 환경 및 관측기기의 위치 등에 따라 차이가 발생하는 것으로 추정된다. 따라서 북강릉과 대관령의 MWR 및 GNSS로부터 산출된 각각의 연 평균 가강수량을 고려하여 비교할 때, 북강릉(약 19 mm)이 대관령(약 15 mm)보다 약 4 mm 큰 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 집중적으로 분석하는 겨울철(1월, 2월, 3월, 12월)기간 평균 가강수량은 북강릉이 약 5.2 mm, 대관령이 약 3.8 mm으로 북강릉이 1.4 mm 큰 것을 알 수 있다. 이는 대관령의 고도가 강릉보다 높기 때문에 공기 기둥 내 누적 수증기량은 산 정상 부근의 대관령(약 800 m)이 적은 수증기량을 나타내는 것으로 생각된다.

Table 4. Amounts of water budget and temperature at 850 hPa at Bukgangeung (BGN) and Daegwallyeong (DGR) for each type. The ratio indicates phase change rate of water (PA/IWV). Also, the time lag is delay time during the conversion. (PA: Precipitation, IWV: Integrated Water Vapor, T_{850} : Temperature at 850 hPa)

Type	Case number	Low Crossing										Low Passing										Stagnation				
		LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	Mean	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	Mean	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	Mean							
IWV (mm)	Mean	9.2	11.6	4.1	11.4	10.6	9.4	7.8	6.3	8.3	8.0	7.3	7.5	5.0	7.5	5.2	6.1	6.8	6.1							
	Std.	6.2	4.1	2.2	4.1	4.3	3.1	2.2	3.6	2.2	2.1	2.2	0.8	0.8	1.5	1.3	0.9	1.6	1.0							
PA (mm)	Mean	0.1	0.3	0.4	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.7	0.5	0.3	1.1	0.6	0.8	0.2	0.2	0.6							
	Std.	0.1	0.3	0.6	0.0	0.2	0.2	0.5	0.2	0.3	0.6	0.6	0.2	1.2	0.7	1.2	0.3	0.3	0.4							
Ratio (%)		1.1	2.6	9.8	0.9	0.9	2.1	3.8	1.6	2.4	8.8	6.8	4.0	22.0	8.0	15.4	3.3	2.9	9.8							
Time lag (hr)		9	13	5	8	1	7																			
IWV (mm)	Mean	7.7	8.7	3.3	9.6	9.9	7.8	5.6	4.9	5.5	4.8	5.2	5.2	3.1	4.5	5.7	3.9	4.9	4.4							
	Std.	4.9	3.1	1.6	4.3	4.9	2.7	1.3	2.7	1.5	1.0	1.2	0.3	0.4	0.9	0.8	0.5	1.4	1.0							
PA (mm)	Mean	0.4	0.4	0.7	0.1	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1	0.7	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2							
	Std.	0.5	0.5	0.8	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.7	0.2	0.3	0.4	0.4	0.2	0.1	0.3	0.1							
Ratio (%)		5.2	4.6	21.2	1.0	3.0	5.1	1.8	2.0	1.8	14.6	3.8	3.8	9.7	6.7	3.5	2.6	4.1	4.5							
Time lag (hr)		1	9	0	1	0	2																			
Min.		267	269	262	270	270	268	265	261	265	260	261	262	260	264	261	262	263	262							
T_{850} (K)	Mean	269	271	263	273	273	270	267	263	266	263	263	264	263	267	268	264	265	265							
	(std.)	(0.9)	(1.5)	(1.7)	(1.5)	(2.1)	(4.2)	(1.0)	(1.6)	(0.6)	(1.1)	(2.7)	(1.9)	(2.5)	(2.4)	(4.6)	(1.0)	(1.1)	(2.2)							

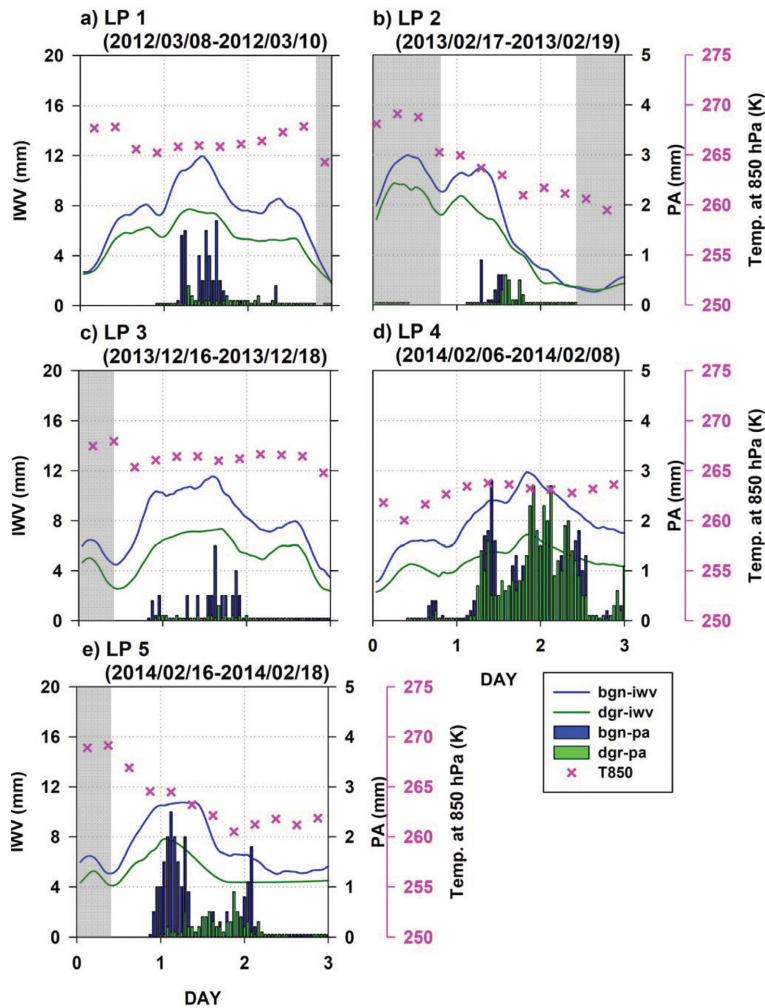


Fig. 11. Same as Fig. 10, except for the Low Passing type.

3.2 종관 패턴 별 강수 전 · 후의 수증기량 및 강수량 변화

3.2.1 저기압 관통형(LC)의 수증기량 및 강수량 변화

Figures 10-12는 3가지 종관 패턴 분류에 따른 강수가 관측된 사례들의 가강수량과 강수량의 시계열을 나타낸 것이고, Table 4는 각 유형별 가강수량, 강수량, 수증기에서 강수로의 상 변환율, 850 hPa의 온도, 지연 시간 등을 통계적인 방법을 이용해 정량화 한 것이다.

먼저, Fig. 10은 LC형 종관 패턴으로 중국 내륙으로부터 한반도를 관통하는 저기압 시스템에 의해 강수가 관측된 5사례에 대한 시계열을 나타낸 것이다. LC형의 경우 저기압 시스템이 한반도를 관통하면서 대관령 지역에 많은 강수가 관측되었다. 이후 저기압 시스템이 인접한 동해상으로 이동하면서 북서-북풍에

의해 기온이 하강하면서 북강릉 지역에 많은 강수가 관측되는 경우(정체형, ST)가 일부 나타났다. 따라서 LC형 패턴에 의한 가강수량과 강수량을 살펴보기 위하여 ST형 또는 다른 유형에 해당하는 기간(그림상의 음영)을 제외한 부분만을 통계 분석 시 사용하였다. 선정한 5사례 모두 강수 전에 가강수량이 급격히 증가하였고, 북강릉과 대관령 지역에서 시간 평균 가강수량은 각각 9.4 mm, 7.8 mm으로 나타났다. 강수는 대관령 지역에서 먼저 관측된 이후 북강릉에서 관측되었고, 강수 강도는 대관령이 약 0.4 mm hr⁻¹으로 북강릉(약 0.2 mm hr⁻¹)보다 강한 강도로 관측되었다. 또한, 가강수량에서 강수로의 상 변환율은 대관령 지역에서 시간당 7.8 mm의 수증기가 0.4 mm의 강수로 약 5%의 상 변환율을 보였고, 반면, 북강릉 지역에서는 9.4 mm의 수증기가 0.2 mm로, 상 변환율은 약 2%로

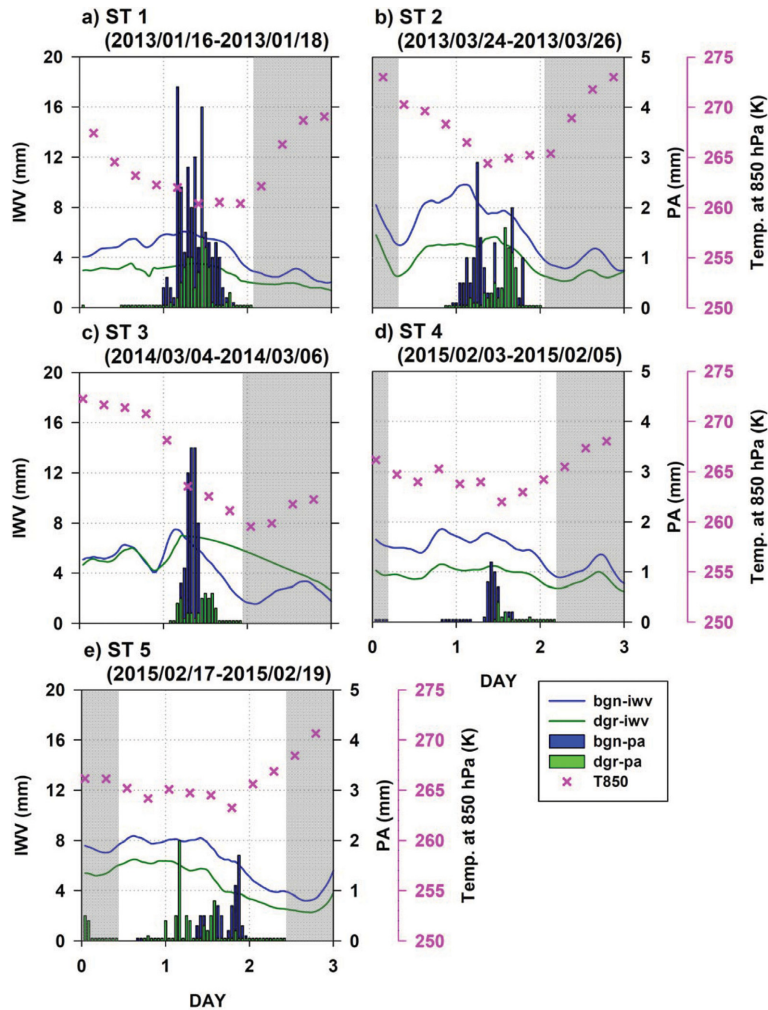


Fig. 12. Same as Fig. 10, except for the Stagnation type.

대관령보다 적은 수증기량이 강수로 변환된 것을 확인할 수 있다. 이는 서쪽으로부터 시스템이 이동할 경우, 대관령 지역이 산악 지형 효과에 의해 수증기에서 강수로의 변환율이 크게, 강릉지역은 산 후면의 그늘(Shadow) 효과 때문에 작게 나타난 것으로 판단된다.

LC형의 연직 850 hPa 고도의 평균기온은 270 K (-3°C) 안팎으로 온도가 상대적으로 높은 특징을 확인할 수 있다. LC3 사례를 제외하고 나머지 4개 사례들은 한반도 중부 지역을 관통하는 저기압 및 기압골의 영향으로 강수가 관측된 반면, LC3 사례는 한반도 북쪽으로 기압골이 통과한 유형으로 850 hPa 고도의 평균기온이 나머지 사례에 비해 약 7 K 낮은 263 K (-10°C)으로 관측되었다. 또한, 북강릉과 대관령의 시간 평균 가강수량은 각각 4.1 mm, 3.3 mm로 비교적 낮지만, 강수는 각각 0.4 mm hr⁻¹, 0.7 mm hr⁻¹

으로 강한 강도로 강수가 관측되었다. 따라서, 저기압 혹은 기압골이 한반도를 관통하는 경로에 따라 가강수량 및 강수량의 차이가 나타날 수 있음을 확인하였다.

3.2.2 저기압 남해상 통과형(LP)의 수증기량 및 강수량 변화

Figure 11은 LP형 종관 패턴으로 한반도 남해상을 통과하면서 제주도 및 남부지역과 영동지역에 주로 강수가 관측된 5사례에 대한 가강수량과 강수량의 시계열을 나타낸 것이다. LP형의 경우 저기압 시스템이 한반도 남쪽을 통과하면서 영동지역에 북동-동풍을 유입시켜 동해상으로부터 수증기의 공급을 받는 전형적인 영동 강설의 패턴이다(Lee et al., 2011; Lee et al., 2012; Nam et al., 2014). 앞 절에서의 LC형과 마찬가지로 오직 LP형 패턴의 영향만을 고려하기 위해 음

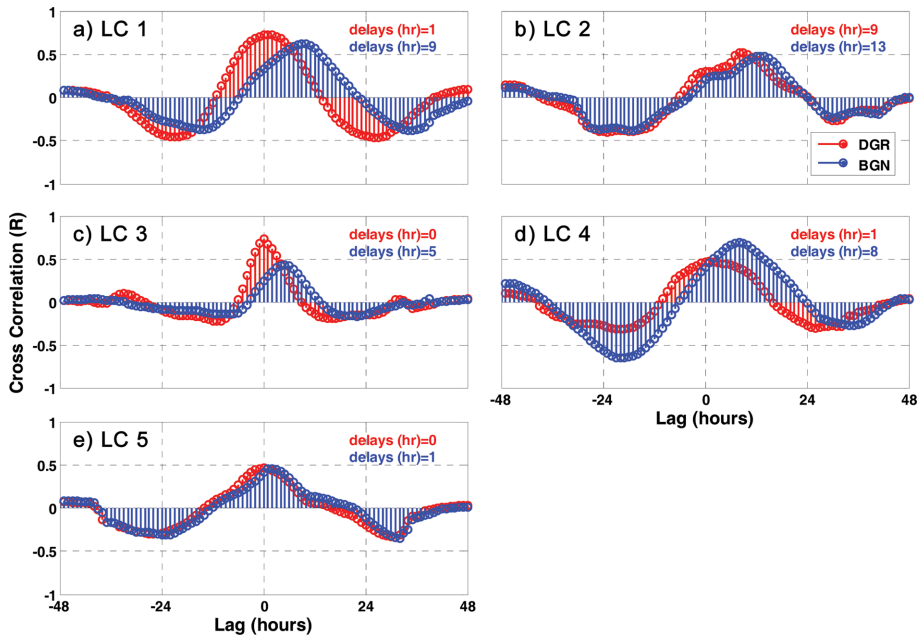


Fig. 13. Lagged cross correlation between Integrated Water Vapor (IWV) and precipitation amount for the Low Crossing type. The blue and red lines indicate Bukgangneung (BGN) and Daegwallyeong (DGR), respectively.

영을 제외한 기간만을 분석하였다. LP형의 경우 시간 평균 가강수량은 북강릉 지역에서 7.5 mm, 대관령에서 5.2 mm로 관측되었다. 강수는 LC형과 달리 주로 북강릉 지역에서 먼저 관측된 이후, 대관령에서 관측되는 특징을 보였고, 강수가 지속되는 기간이 LC형에 비해 장기간 강수가 관측되었다. 5사례의 평균 강수 강도는 북강릉과 대관령 지역에서 각각 0.3 mm hr^{-1} , 0.2 mm hr^{-1} 로 관측되었고, 수증기에서 강수로 변환되는 양은 북강릉에서 약 4.0%, 대관령에서 약 3.8%로 두 지역에서 비슷한 변환율을 보였다. 5사례에 대한 850 hPa 고도의 최저온도는 약 262 K (-11°C)이며, 평균 온도는 264 K (-9°C)로 서쪽으로부터 유입된 LC형에 비해 온도가 6°C 가량 낮았다. 따라서, LP형이 LC형 보다 가강수량은 적지만, 강한 강수 강도로 오랫동안 강수가 관측었는데, 이는 하층대기의 평균 온도가 약 264 K로 낮게 유지되면서 상대적으로 따뜻한 동해상으로부터 지속적인 수증기 공급과 더불어 하층대기의 냉각으로 인한 과포화도 증가로 수증기의 구름 응결 및 강수로의 상 변화가 원활히 이루어졌기 때문으로 추정된다.

3.2.3 정체형(ST)의 수증기량 및 강수량 변화

Figure 12는 한반도 동해상 혹은 일본 동해상에 저기압이 정체하거나 한반도 동해상에 부 저기압의 형성 및 시베리아 고기압의 한반도 남하의 중관 패턴하

에서 영동지역에 국한되어 강수가 관측된 5사례에 대한 시계열을 나타낸 것이다. ST형의 경우도 기존 분석과 마찬가지로 음영을 제외한 기간을 주로 분석하였다. 5사례에 대한 시간 평균 가강수량은 북강릉 지역에서 6.1 mm, 대관령에서 4.4 mm로 앞에 설명한 두 가지 유형에 비해 가장 낮은 가강수량이 관측되었다. 반면, 평균 강수 강도는 북강릉 지역에서 0.6 mm hr^{-1} 로 가장 강한 강수 강도가 관측된 반면, 대관령 지역에서는 LP형과 비슷한 강도(0.2 mm hr^{-1})의 약한 강수 강도가 관측되었다. 수증기에서 강수로의 변환율은 북강릉에서 약 10%로 나머지 유형에 비해 가장 높은 상 변환율을 보였고, 대관령 지역에서는 약 4.5%의 변환율을 보였다. 850 hPa의 온도를 살펴보면, 분석기간 동안의 평균 온도는 265 K (-8°C)로 나타나 LP형과 유사한 온도 분포를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, LP형과 달리 각 사례별 850 hPa의 온도 편차를 살펴보면 LP형에 비해 ST형의 경우 $1^\circ\text{C} \sim 4.6^\circ\text{C}$ 로 기온 변동성이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 즉, ST형 중관 패턴일 때, 가강수량은 앞의 LC형과 LP형에 비해 적고, 또한 강수가 관측되기 전 가강수량의 증가 폭이 적게 관측되었음에도 불구하고 북강릉 지역의 시간 당 강수량은 나머지 유형에 비해 가장 높았다. 이는 북강릉 지역의 850 hPa의 고도에 북풍으로 인한 한기의 영향으로 상층 온도가 낮아지면서 해수면 온도와의 차이가 증가하고, 이로 인해 하

층 대기의 불안정에 의해 상대적으로 따뜻한 동해상에서 수증기가 대기 중으로 원활히 공급되면서 이와 동시에 한기에 의한 냉각으로 눈구름의 생성 및 성장을 촉진하였을 것으로 생각된다(Lee et al., 2012; Nam et al., 2014). 따라서, ST형의 경우에서 LC형과 같은 뚜렷한 수증기의 증가 없이도 강수가 상당기간 지속되면서 대설을 유발한 것으로 판단된다.

3.3 물의 상 변화 시 지연시간

지금까지 세가지 종관 유형에 따른 수증기와 강수간의 연관성에 대해 살펴보았는데, 이 중에서 수증기 증가가 현저하게 나타나고 수증기와 강수량간의 시간 지체 현상이 가장 뚜렷한 저기압 관동형(LC)에 대해서 지연시간을 분석하였다. Figure 13은 LC형에 대한 수증기에서 강수로의 시간 지체(Time lag)를 고려한 상호 상관계수(Lagged Cross-Correlation, R)를 나타낸 것이다. 붉은 색은 대관령 지역의 수증기와 강수간의 상관성을 나타낸 것이고 파란 색은 북강릉 지역을 나타낸 것이다. 시간 지체를 고려하여 상호간의 상관계수를 분석한 것인데, 수증기와 강수량간의 상관성이 가장 클 때의 시간을 가강수량에서 강수로 변환되는데 걸리는 시간으로 해석하였다. 예를 들어 2013년 12월 11일 사례(Fig. 13c)의 경우 대관령 지역은 지연 시간 없이 수증기에서 곧바로 강수로 변환되는 반면에 북강릉은 수증기에서 강수로 변환하는데 약 5시간이 걸렸다. 이와 같은 방법으로 나머지 사례들을 살펴보면 대관령 지역이 북강릉 지역보다 수증기에서 강수로 변환하는데 걸리는 시간이 짧았으며, 5사례에 대한 평균 지연 시간(Time lag)은 북강릉에서 약 7시간, 대관령에서 약 2시간으로 나타났다(Table 4). 한반도를 관통하면서 서쪽으로부터 유입된 시스템에서 강수가 관측될 경우(LC), 산악에 의한 지형성 효과 때문에 대관령 지역에서 수증기에서 강수로의 변환시간이 짧은 것을 알 수 있다.

상호 상관 계수를 이용한 분석은 LC형과 같이 수증기의 증가가 뚜렷한 경우에 강수량과의 상호 상관성 비교가 용이하지만, 나머지 LP형, ST형에서는 수증기 증가 경향이 뚜렷하지 않았기 때문에 본 연구에서는 실제로 분석하지 않았다.

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 2012~2015년 ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) 캠페인 기간 동안 강원 영동지역의 대관령과 북강릉의 가강수량과 강수 특성을 파악하고자 다양한 구름 원격관측기기(MWR, GNSS, Radiosonde, Ceilometer 등)를 통해 비교 분석하였다. MWR과 GNSS 및 Radiosonde로부터 산출한 각각의

가강수량 값들은 높은 상관성($R = 0.89 \sim 0.94$)을 보였다. MWR과 GNSS를 활용한 북강릉과 대관령의 가강수량의 연 변화 경향은 상호 유사하나 가강수량 값은 북강릉 지역이 대관령보다 항상 큰 것을 알 수 있었다. 특히 본 연구가 이루어지는 겨울철의 가강수량 평균은 북강릉 지역(약 5.2 mm)이 대관령 지역(약 3.8 mm) 보다 큰 것을 확인할 수 있었는데, 이는 북강릉보다 대관령이 해발 고도가 약 800 m로 높기 때문에 연직 공기 기동 내 누적 수증기량이 적은 것으로 추정된다.

ESSAY 2012~2015기간 동안 관측된 강설 사례의 가강수량과 강수량의 연관성 분석을 위해 세 가지 단계를 통해 종관 사례를 구분하였다. 먼저 저기압 시스템의 한반도 통과 경로에 따라 저기압 관동형(LC), 저기압 남해상 통과형(LP), 정체형(ST)으로 분류하였다. 또한, 이동하는 저기압 시스템에 의해 한반도 지역에 강수가 관측된 지역을 나타낸 일 강수 분포 및 라디오존데를 통해 관측한 연직 프로파일을 통해 구름 층이 존재하는 1.5 km 부근의 풍향을 참조하여 분류하였다. 그 결과, 영동 지역에서 세 가지 종관 패턴에 따른 가강수량은 LC형, LP형, ST형의 순으로 감소하는 반면에, 시간 당 강수량은 역순으로 ST형, LP형, LC형 순으로 나타났다.

종관 패턴 별 강수 사례의 시계열 분석을 통해 강수 이전에 가강수량의 증가 경향이 선형적이고, 강수가 관측되면서 가강수량이 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 서쪽으로부터 유입된 구름에 의해 강수가 유발되는 LC형의 경우 수증기에서 강수로의 변환은 산악 효과에 의해 대관령(약 5%)지역이 북강릉(약 2%)지역보다 강수로의 변환율이 큰 것으로 나타났다. 상층 850 hPa의 온도는 270 K로 나머지 유형에 비해 약 6 K만큼 더 높았으며, 북강릉 지역의 경우 세 가지 패턴 중 가장 큰 가강수량이 관측되더라도 불구하고 가장 낮은 강수 변환율(약 2%)을 보였다. 반면, 동쪽 해상으로부터 유입된 눈구름에 의해 강수가 관측되는 LP형과 ST형의 경우 서쪽에서부터 유입된 LC형보다 낮은 가강수량이 관측되었지만, 북강릉 지역에 강한 강수 강도가 관측되었다. 특히, ST형의 경우 가강수량이 가장 낮은데도 강한 강수 강도가 관측된 것은 상층 850 hPa의 풍향이 북풍계열로써 상층의 한기 유입으로 인해 상층 온도와 해수면 온도의 차이가 증가하면서 인접한 동해상으로부터 하층 대기로 수증기와 열이 공급되고, 한기로 인한 수증기 냉각으로 눈구름의 생성 및 성장을 촉진하였을 것으로 추정된다. 그래서 수증기에서 강수로의 상 변환은 북강릉 지역에서 약 10%로 다른 유형에 비해 가장 활발했던 것으로 생각된다.

결국 강설 전에 수증기 증가가 먼저 선행되지만 강설로 변환되는 양은 구름 층의 온도, 과포화도 등의

대기 조건에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 북강릉과 대관령의 수증기에서 강수로의 지연 시간(Time lag)은 시간 지체를 고려한 상호 상관계수(R)를 통해 분석한 결과, 서쪽으로부터 유입된 LC형의 경우, 산악 효과에 의해 북강릉 지역보다 대관령에서 상 변화 시간이 가장 짧게 나타났고 대기 중의 가강수량이 가장 컸음에도 불구하고 강수로 변환되는 양이 가장 적었다(약 2%). 이는 대기 중의 가용 가능한 수증기량이 많고, 수증기에서 강수로의 지체 시간이 가장 짧았던 점을 고려하면 향후 인공증설 실험 성공을 위한 조건 선정 시에 본 연구 결과를 참조할 수 있을 것이다. 또한 본 연구와 같은 겨울철 수증기와 강수량과의 정량적인 연관성 분석결과는 강설 예측 정확도 향상에도 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 응용기상연구과의 ‘인공 증설 실험 수치모델링기술 개발연구(III)’ 사업의 일환으로 수행되었으며 일부 재해기상연구센터의 ‘강원영동지역 겨울철 재해기상 분석 및 예측기법개발’ 사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baelen, J. V., J. P. Aubagnac, and A. Dabas, 2005: Comparison of near-real time estimates of integrated water vapor derived with GPS Radiosonde, and microwave radiometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 201-210.
- Chahine, M. T., 1992: The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, **359**, 373-380.
- Ha, J., K.-D. Park, K.-H. Chang, and H.-Y. Yang, 2007: Precision validation of GPS precipitable water vapor via comparison with MWR measurements. *Atmosphere*, **17**, 291-298.
- _____, _____, K. Kim, and Y.-H. Kim, 2010: Comparison of atmospheric water vapor profiles obtained by GPS, MWR, and radiosonde. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 233-241.
- Haertel, P. T., and G. N. Kiladis, 2004: Dynamics of 2-day equatorial waves. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 2707-2721.
- Holloway, C. E., and J. D. Neelin, 2010: Temporal relations of column water vapor and tropical precipitation. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1091-1105.
- Hong, S.-G., 1980: Heavy rainfall in the taebaeg mountain range. *Natl. Inst. Meteor. Stud.*, MR-80-1, 45-47.
- Jhun, J.-G., D.-G. Lee, and H.-A. Lee, 1994: A Study on the heavy snowfalls occurred in South Korea. *Atmosphere*, **30**, 97-117.
- Kim, Y.-J., S.-O. Han, K.-H. Kim, S.-J. Kim, G.-T. Kim, and B.-G. Kim, 2014: An analysis of the least observing-session duration of GPS for the retrieval of precipitable water vapor. *Atmosphere*, **24**, 391-402.
- Kwon, T.-Y., Y.-J. Cho, D.-H. Seo, M.-G. Choi, and S.-O. Han, 2014: Synoptic environment associated with extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **24**, 343-364.
- Lee, J.-G., S.-D. Kim, and Y.-J. Kim, 2011: A trajectory study on the heavy snowfall phenomenon in Yeongdong region of Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 45-62.
- Lee, J.-H., S.-H. Eun, B.-G. Kim, and S.-O. Han, 2012: An analysis of low-level stability in the heavy snowfall event observed in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **22**, 209-219.
- Liou, Y. M., Y. T. Teng, T. V. Hove, and J. C. Liljegren, 2001: Comparison of precipitable water vapor observations in the near tropics by GPS, microwave radiometer, and radiosondes. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **40**, 5-15.
- Nam, H.-G., B.-G. Kim, S.-O. Han, C.-K. Lee, and S.-S. Lee, 2014: Characteristics of easterly-induced snowfall in Yeongdong and its relationship to air-sea temperature difference. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 541-552.
- Song, D.-S., 2012: Correlation analysis between GPS precipitable water vapor and heavy snowfall on Gangwon province in early 2011. *J. Korean Soc. Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, **30**, 97-104.
- Yang, H.-Y., K.-H. Chang, J.-W. Cha, Y.-J. Choi, and C.-S. Ryu, 2012: Characteristics of precipitable water vapor and liquid water path by microwave radiometer. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **33**, 233-241.
- Yoo, C.-S., C.-K. Shin, and Y.-N. Yoon, 2004: Estimation and analysis of precipitable water. *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **24**, 413-420.