

시베리아 고기압 영향으로 영동지역 부근에서 발달한 구름대의 위치와 Froude 수와의 관계

김유진¹⁾ · 김만기²⁾ · 이재규^{1)*}

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾기상청 수치모델링센터

(접수일: 2019년 6월 5일, 수정일: 2019년 8월 21일, 게재확정일: 2019년 8월 28일)

The Relationship of Froude Number and Developed Cloud Band Locations Near Yeongdong Region Under the Siberian High Pressure System

Yu-Jin Kim¹⁾, Man-Ki Kim²⁾, and Jae Gyoo Lee^{1)*}

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

²⁾Numerical Data Application Division, Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 5 June 2019; revised 21 August 2019; accepted 28 August 2019)

Abstract Precipitation and no-precipitation events under the influence of the Siberian high pressure system in Yeongdong region, were analysed and classified as four types [obvious precipitation event (OP) type, obvious no-precipitation event (ON) type, ambiguous precipitation event (AP) type and ambiguous no-precipitation event (AN) type], according to the easiness in determining whether to have precipitation or not in Yeongdong region, to help in improving the forecast skill. Concerning the synoptic pressure pattern, for OP type, the ridge of Siberian high extends from Lake Baikal toward Northeast China, and there is a northerly wind upstream of the northern mountain complex (located near the Korean-Chinese border). On the other hand, for ON type, the ridge of Siberian high extends southeastward from Lake Baikal, and there is a westerly wind upstream of the northern mountain complex. The pressure pattern of AP type was similar to the OP type and that of AN type was also similar to ON type. Thus it was difficult to differentiate AP type and OP type and AN type and ON type based on the synoptic pressure pattern only. The four types were determined by U (wind speed normal to the Taebaek mountains) and Froude number (FN). That is, for OP type, average FN and U at Yeongdong coast are ~ 2.0 and $\sim 6 \text{ m s}^{-1}$, and those at Yeongseo region are 0.0 and 0.1 m s^{-1} , respectively. On the contrary, for ON type, average FN and U at Yeongdong coast are 0.0 and 0.2 m s^{-1} , and those at Yeongseo region are ~ 1.0 and $\sim 4 \text{ m s}^{-1}$, respectively. For AP type, average FN and U at Yeongdong coast are ~ 1.0 and $\sim 4 \text{ m s}^{-1}$, and those at Yeongseo region are 0.0 and 0.2 m s^{-1} , whereas for AN type, average FN and U at Yeongdong coast are 0.1 and 0.6 m s^{-1} and those at Yeongseo region are ~ 1.0 and $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$, respectively. Based on the result, a schematic diagram for each type was suggested.

Key words: Precipitation event type, Froude number, wind field, Yeongdong region, a schematic diagram

*Corresponding Author: Jae Gyoo Lee, Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2322, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: ljgyoo@gwnu.ac.kr

1. 서 론

강원도 영동 해안지역은 태백산맥(대관령 해발고도 832 m)을 기준으로 바다에 인접한 동쪽 지역이며, 북쪽에는 높은 산악지대인 낭림산맥, 마천령산맥, 함경산맥, 묘향산맥, 그리고 적유령 산맥이 위치하고 있다. 낭림산맥(평균 해발고도 1,470 m)은 자강도와 함경남도 및 평안북도의 경계를 이루며 뻗어있으며, 자강도, 중강군, 중지봉에서 시작하여 평안남도 대홍군의 소마대령까지 길게 뻗어 태백산맥과 함께 한반도의 등줄기 산맥을 이룬다(Lee and Kim, 2009). 영동 해안지역은 서쪽과 북쪽으로는 높은 산악지형, 동쪽으로는 바다의 영향으로 다양한 특이 기상들이 자주 발생한다.

특히, 겨울철에는 대륙성 한대 고기압이 확장하면서 나타나는 대설 현상으로 인해 영동 해안지역에서는 재해가 발생하여 막대한 재산 피해를 입기도 한다. 그리고 영동 해안지역으로 북동 기류가 유입될 수 있는 기압 패턴 또는 동해 연안에 약한 기압골이 있는 경우에는 해상에서 형성된 구름들의 이동에 관한 예보가 매우 어렵다. 실제로 구름들이 영동 해안 쪽을 스쳐 지나가면서 강수를 내리기도 하지만 때로는 비슷한 종관 상태에서 구름들이 해안지역으로 상륙하지 못하고 해안선 밖에서 머무르게 되어 예보의 정확도가 떨어지는 경우가 종종 발생하기도 한다. 이러한 경우, 종관적으로 대기 하층에서 북동 계열의 기류가 약하게 나타나며, 영동 해안지역으로 약한 강수 또는 무강수 사례를 발생시킨다. 또한, 현업에서 사용하고 있는 UM (Unified Model) 모델에서도 이러한 약한 강수 또는 무강수 사례를 잘 예측하지 못한다. 실제로 2014년 1월 9일 0000 UTC경, 동해상에서 발달한 구름이 동해안 내륙으로 상륙하지 못하고 근처 앞바다에 위치하여 강수량이 없었으나 UM 지역모델(RDAPS; Regional Data Assimilation and Prediction System)은 영동 해안지역으로 약 5 mm의 약한 강수를 모의하였다. Park et al. (2007)에 따르면 예보 정확도는 예보관 능력 28%, 관측자료 32%, 수치모델 성능 40%에 의해 결정되기 때문에, 이와 같은 수치모델의 모의 실패는 예보정확도에 큰 영향을 끼칠 수 있다. Kim (2016)은 종관적으로 유사했던 약한 강수와 무강수 사례에 대해 WRF (Weather Research and Forecasting) 수치모델의 관측자료를 분석하여 중규모에서의 특징적인 차이를 분석하였다. 그 결과, 종관 분석에서는 두 사례간의 뚜렷한 차이가 없었고, 중규모 분석에서는 북쪽 산맥군의 풍상측에서 유입되는 기류의 방향과 영동 해안선을 따라 나타나는 온도골의 유무, 그리고 특히, 925 hPa 고도면에서 원산 부근의 북서 기류의 존재 유무가 두 사례 사이에 중요한 차이였음을 보였다.

한편, 지형성 강설의 적설량이나 대설이 내리는 위치를 결정하는 중요한 요소는 Froude 수, 중·하층의 습도 프로파일, 바람의 연직 프로파일, 그리고 하층의 안정도이다(Muccilli, 2015). 특히, Froude 수(이하 FN으로 약칭)는 산맥에 의한 저지 효과를 추정할 수 있는 무차원수이며, 수평바람의 운동에너지와 기류가 산맥을 넘어가기 위해 극복해야 할 위치에너지의 비율이다(Forbes et al., 1987). 일반적으로 FN이 큰 경우에는 공기 흐름의 방향이 크게 바뀌지 않은 채 산 정상 넘어가는데 반하여, FN이 작은 경우에는 지형의 저지 효과로 공기의 흐름은 대기 하층에서 저지된다고 하였다(Mason and Sykes, 1978; Baines, 1979). Manins and Sawford (1982), Mason and Skyes (1978) 그리고 Smith (1982)는 기류가 산맥에 저지되면서 전향력의 감소로 기류의 진행 방향이 왼쪽으로 바뀌어 산맥의 등고선에 평행하게 흐르게 된다고 하였다. 또한, Muccilli (2015)는 미국 북동부지역에서 예측하기 어려운 지형성 강설에 대해 FN을 이용하여 예측을 개선하는 방법을 제공하였으며, 미 북동부 산악지역에서 지형성 강설 현상이 발생한 경우, FN의 변화는 지형성 강설의 적설량 및 강설 누적 분포와 상관관계가 있음을 보여주었다. 또한, FN의 크기에 따라 강설이 내릴 수 있는 위치를 구분하여, FN < 1인 경우, 강설은 산악지형의 풍상측에, FN ≈ 1인 경우, 강설은 산 정상에서, 그리고 FN > 1인 경우, 강설은 산악지형의 풍하측에 내릴 가능성이 높음을 보여주었다(Fig. 1). 그리고 수치모델로 예측된 FN은 수치 기상예측 모델의 다른 분야뿐만 아니라 예보관들이 지형성 강설 분포를 결정하는데 도움을 줄 수 있다고 하였다. Evans et al. (2017)은 미국 펜실베이니아의 애플래치아산맥과 골짜기에서의 대설의 경우, 산악지형의 고도가 강설량에 미치는 영향을 판단함에 있어 FN이 유용함을 보여주었다.

국내에서는 강풍과 관련된 연구에서 주로 FN을 이용하여 분석하였고(Kim and Chung, 2006; Han et al., 2007; Jang and Chun, 2008; Lee and In, 2009) 강수와 관련하여서는 지형 효과와 관련된 연구들에서 산맥의 저지 효과를 언급하기 위해 FN을 이용하였을 뿐(Lee and Kim, 2008; Kim and Lee, 2016), 강수량과 강수 분포에 직접적으로 FN을 이용한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 예측이 어려운 영동 해안지역의 약한 강수 사례와 무강수 사례들에 대한 예보 정확도 향상에 기여하고자 최근 5년 겨울철 기간 중 시베리아 고기압이 확장하는 기압 패턴 하에서 영동 해안지역에 강수가 없었던 무강수 사례와 영동 해안지역에 약한 강수(5 mm 이하)가 내린 사례를 대상으로, 관측자료 분석 및 WRF 수치모델을 수행하여,

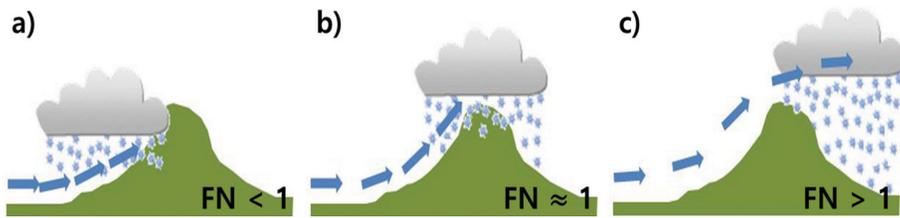


Fig. 1. (a) Blocked flow as seen on the left, (b) contrasted with near critical flow in the middle, (c) and unblocked flow on the right (from Muccilli (2015), their Fig. 6).

Table 1. The WRF simulation cases for the study and the classification according to the obvious and ambiguous types. The date in bold indicates that of a selected typical event for each type.

| Type | | Date |
|----------------|----------------------------------------|--------------------|
| Obvious type | OP (Obvious precipitation events) | 15 Jan 2013 |
| | | 3 Jan 2011 |
| | ON (Obvious no-precipitation events) | 20 Jan 2011 |
| | | 24 Jan 2011 |
| Ambiguous type | AP (Ambiguous precipitation events) | 17 Jan 2014 |
| | | 2 Jan 2012 |
| | AN (Ambiguous no-precipitation events) | 29 Dec 2011 |
| | | 28 Jan 2015 |
| | | 11 Jan 2012 |
| | | 6 Jan 2011 |
| | | 22 Dec 2012 |

무강수 또는 유강수 사례시, 영동 해안지역 및 한반도 부근의 중관 규모 또는 중규모적인 특징 및 차이점을 비교 분석하였다. 또한, 중요지점에서 계산된 FN을 이용하여 영동 해안지역의 약한 강수 사례와 무강수 사례들을 구별할 수 있는지 알아보았다. 즉, 영동 해안에서 발달한 구름대가 영동지역으로 진입하면 유강수 유형이며, 그렇지 않으면 무강수 유형이므로 영동지역에 위치한, 또는 영동 해안선에 가장 가까이 접근한 구름대의 위치와 FN과의 관계를 알아보려 하였다. 즉, 강원 영동지역의 실제 예보 현장에서 쉽게 활용이 가능한 기상 변수인 FN을 활용하여 영동 해안지역에서의 강수 예측의 정확도를 올리는 데 도움을 주고자 하였다. 참고로 여기서 강수는 비 또는 눈을 모두 포함한다. FN을 이용한 분석의 경우, 영동 해안지역의 강수는 동해상으로부터 영동 해안지역으로 유입되는 동풍 계열의 바람(Song et al., 2016; Hong, 2017)과 원산 부근 및 영서지역에서 나타나는 서풍 계열의 바람이 함께 중요하기 때문에(Kim, 2016), 영서지역에서의 서풍 계열의 바람과 동해상에서의 동풍 계열의 바람에 대한 FN을 각각 계산하여 분석하였다.

2. 분석 방법

2.1 관측자료 및 사례 선정

2011년부터 2015년까지 겨울철(12월, 1월, 2월) 기간의 지상 일기도를 이용하여, 시베리아 고기압이 중국 화남지방 또는 한반도 부근으로 확장하고, 영동 해안지역으로 북풍 내지 북동 계열의 기류가 유입되는 중관 배경을 가진 사례들을 추출하였다. 유강수 사례의 경우에는 총 17 사례, 무강수 사례의 경우에는 총 19 사례가 있었으며, 원격 관측자료(위성영상, 레이더 영상)를 활용하여 동해상에서 발달하는 구름대의 이동과 진입 여부를 판단하고, 영동 해안지역의 ASOS (Automated Synoptic Observing Systems) 1시간 누적 강수량을 이용하여 구름대의 진입 또는 근접 시 강수 여부를 확인하였다. 또한, 원격 관측자료와 수치모의 결과를 이용하여 발달한 구름대가 영동 해안지역에 가장 근접한 시간대에 해당하는 구름대의 위치를 기준으로 유강수와 무강수 사례에 대한 분류를 수행하였다.

유강수의 경우, 1) 영동 해안지역으로 완전히(명확하게) 진입한 사례(Obvious precipitation event, 이하 OP)의 유형, 2) 구름대의 가장자리가 해안선에 약간

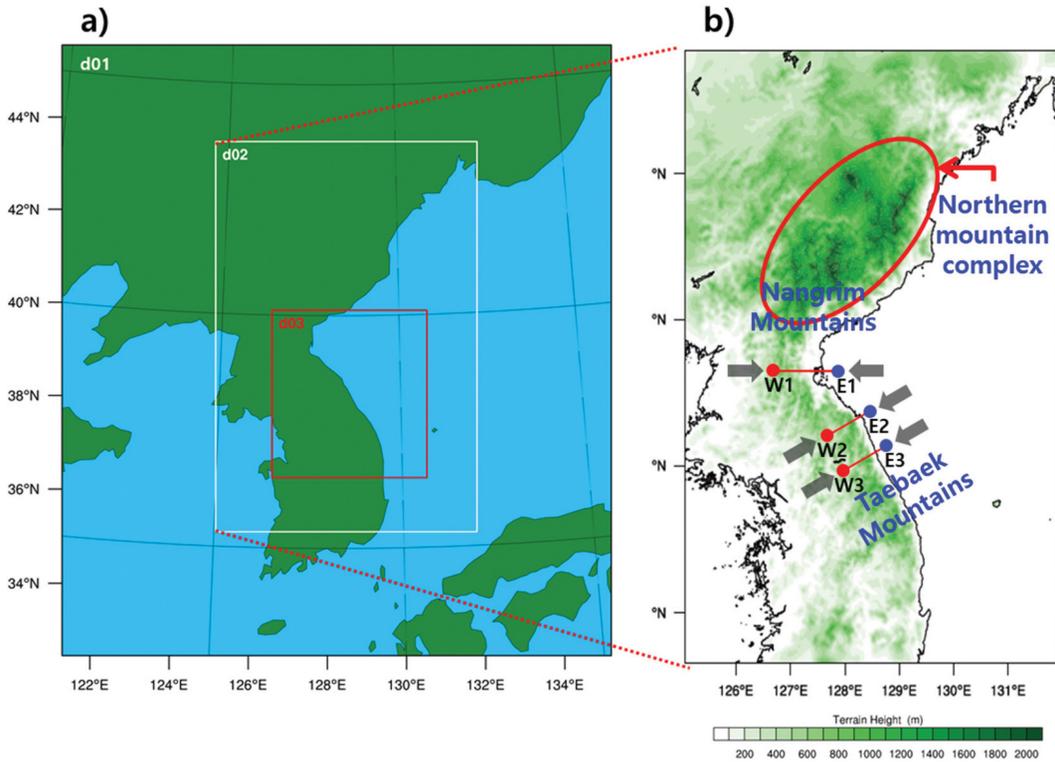


Fig. 2. (a) WRF model domains for domain 1 (d01), domain 2 (d02), and domain 3 (d03). (b) Magnified domain 2. Topography is represented with shading based on scale at bottom. The oval of red line indicates Northern mountain complex. Some geographic areas referred to in the text are indicated.

걸쳐져 있는 사례(Ambiguous precipitation event, 이하 AP)의 유형으로 분류하였고, 무강수의 경우에는 3) 구름대가 해안선에서 뚜렷이 멀리 떨어져 있는 사례(Obvious no-precipitation event, 이하 ON)의 유형, 4) 해안선에 가깝게 근접한 사례(Ambiguous no-precipitation event, 이하 AN)의 유형으로 각각 분류하여 Table 1에 정리하였다. 분류한 4가지 유형에 대해 각각 3개의 사례를 선정하여 총 12개의 사례를 분석하였고, 각 유형에 해당하는 3개의 개별적인 사례들이 모두 유사한 중관 배경과 특징을 보였기 때문에 이 연구에서는 각 유형을 대표하는 한 사례들을 각각 선정하여 유형별로 분석하였다. 선정한 대표 사례는 다음과 같다. 영동 해안지역으로 구름대가 완전히 진입한 강수 사례(OP)는 2013년 1월 15일 사례, 영동 해안지역으로 구름대의 일부가 진입한 강수 사례(AP)는 2012년 1월 2일 사례, 영동 해안 앞바다에서 뚜렷이 멀리 떨어져 구름대가 위치한 무강수 사례(ON)는 2011년 1월 20일 사례, 영동 해안선에 구름대가 가깝게 근접한 무강수 사례(AN)는 2012년 1월 11일 사례이다. 이와 관련하여 선정된 사례를 대상으로 지상 및 상층

일기도를 이용한 중관 규모 분석을 수행하였고, 영동 해안지역의 중규모 바람 패턴을 분석하고자 AWS (Automatic Weather System) 바람 분포 및 강릉 Wind profiler의 연직 바람 분포를 이용하였다.

2.2 수치모델

AWS, Wind profiler 및 중관 관측자료는 대부분 육지에 집중되어 있어 동해 앞바다로부터 영동 해안지역으로 이동하는 구름대의 기상학적인 분석을 하기에는 한계가 있다. 따라서 관측자료의 공백을 극복하고자 고분해능의 수치모의 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 수치모델은 WRF V3.6.1 (Skamarock et al., 2008)이며, 등지격자기법(two-way nesting)을 사용하였다. 강원도 지역을 중심으로 3개의 영역을 설정하였고, Domain1, Domain2, Domain3는 각각 9 km (144 × 159), 3 km (205 × 304), 1 km (364 × 391)의 격자를 구성하였다(Fig. 2). 초기장 및 경계장은 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공되는 0.25° × 0.25° 격자 간격으로 내삽된 ERA-Interim (ECMWF Interim Re-Analysis) 자료를

Table 2. Configuration of the WRF model used in the simulations for this study.

| Model | WRF V3.6.1 | | |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------|
| Domains | Domain1 | Domain2 | Domain3 |
| Horizontal grid spacing | 9 km | 3 km | 1 km |
| Vertical layer/Model top | 38 Eta vertical layer/50 hPa | | |
| Initial condition | ECMWF reanalysis ERA-Interim (6 hourly, 0.25° × 0.25°) | | |
| Microphysics | WDM 6 scheme | | |
| Planetary Boundary Layer | YSU scheme | | |
| Cumulus parameterization | Kain-Fritsch scheme | Not used | |
| Land Surface Model | Unified Noah land-surface model | | |
| Long wave radiation scheme | RRTMg scheme | | |
| Short wave radiation scheme | RRTMg scheme | | |
| Grid nesting | Two-way | | |
| Run time | OP: 0000 UTC 14~1200 UTC 15 January 2013 (36 hr) ON: 1200 UTC 19~1200 UTC 20 January 2011 (24 hr) AP: 0600 UTC 01~0000 UTC 02 January 2012 (18 hr) AN: 1800 UTC 10~1800 UTC 11 January 2012 (24 hr) | | |

활용하였다. 미세물리 과정은 WDM6 (WRF Double-Moment 6-class) 기법(Lim and Hong, 2010), 경계층 모수화는 YSU (Yonsei University) PBL (planetary boundary layer) 기법(Hong et al., 2006)을, 장파복사와 단파복사는 RRTMg (Rapid Radiative Transfer Model for Global climate models) 기법(Iacono et al., 2008)을 모든 영역에 사용하였고, 적운모수화는 new Kain-Fritsch 기법(Kain, 2004)을 Domain1 영역에만 사용하였다. 이러한 모델 설정에 대한 내용은 Table 2에 요약하였다.

2.3 Froude 수(FN)

FN이 크면 기류가 산을 쉽게 넘어가고, 작으면 산을 넘지 못하고 우회하여 등고선에 평행하게 불고 (Manins and Sawford, 1982), FN이 0.3~0.4일 경우 산악 지형에 의해 기류가 저지된다고 하였다(Forbes et al., 1987). FN의 계산은 수식 (1)에 나타내었다.

$$FN = \frac{U}{NH} N = \left(\frac{g\partial\theta}{\theta\partial z} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서, U 는 산맥에 수직한 바람의 크기로 동해안 지역의 경우 U 는 동풍 계열의 바람이며, 영서지역의 경우 U 는 서풍 계열의 바람이 된다. H 는 산의 높이이고, N 은 부력진동수로서 중력 g , 온위 θ 와 고도에 따른 온위 변화의 곱(안정도)으로 나타낸다. FN이 계산되는 지점은 총 여섯 지점으로 낭림산맥과 태백산맥의 서쪽에 위치한 W1~W3 지점, 그리고 영동 해안

가까이 위치한 E1~E3 지점이다(Fig. 2b 참조). 분석지점을 중심으로 5×5 격자에 대한 U , θ , 안정도 N 을 산출한 후 평균하여 FN을 계산하였다. FN을 계산하기 위한 산의 높이(H)는 내륙지역(W1~W3)과 바다(E1~E3) 사이의 산악지형의 최고 고도를 이용하였으며, W1 지점에서 E1 지점 사이의 최고 고도는 774 m, W2 지점에서 E2 지점 사이의 최고 고도는 1161 m, W3 지점에서 E3 지점 사이의 최고 고도는 943 m이다.

3. 분석 결과

3.1 관측자료 분석

Figure 3은 각 사례별 COMS (Communication, Ocean, and Meteorological Satellite) 합성 위성 영상, 강릉 레이더 영상, 1시간 누적 강수량 분포도를 나타낸 것이다. 여기서 유강수 유형(OP와 AP)은 구름이 해안내륙 쪽으로 가장 많이 진입한 시간대를, 무강수 유형(ON와 AN)은 구름의 가장자리가 해안선에 가장 가깝게 접근한 시간대를 각각 나타내었다. 각 유형별 피크 시각의 경우, OP는 2013년 1월 14일 1500 UTC, AP는 2012년 1월 1일 1600 UTC, ON은 2011년 1월 20일 0100 UTC, AN은 2012년 1월 11일 0500 UTC이다. 유강수 유형인 OP와 AP의 1시간 누적 강수량 분포를 보면(Figs. 3c, f), 두 사례 모두 영동 해안지역에 강수가 있으며, 위성 영상(Figs. 3a, d)과 레이더 영상(Figs. 3b, e)에서도 영동 해안지역으로 구름대가 위치하고 있는 것을 알 수 있다. 대조 사례인 ON과 AN

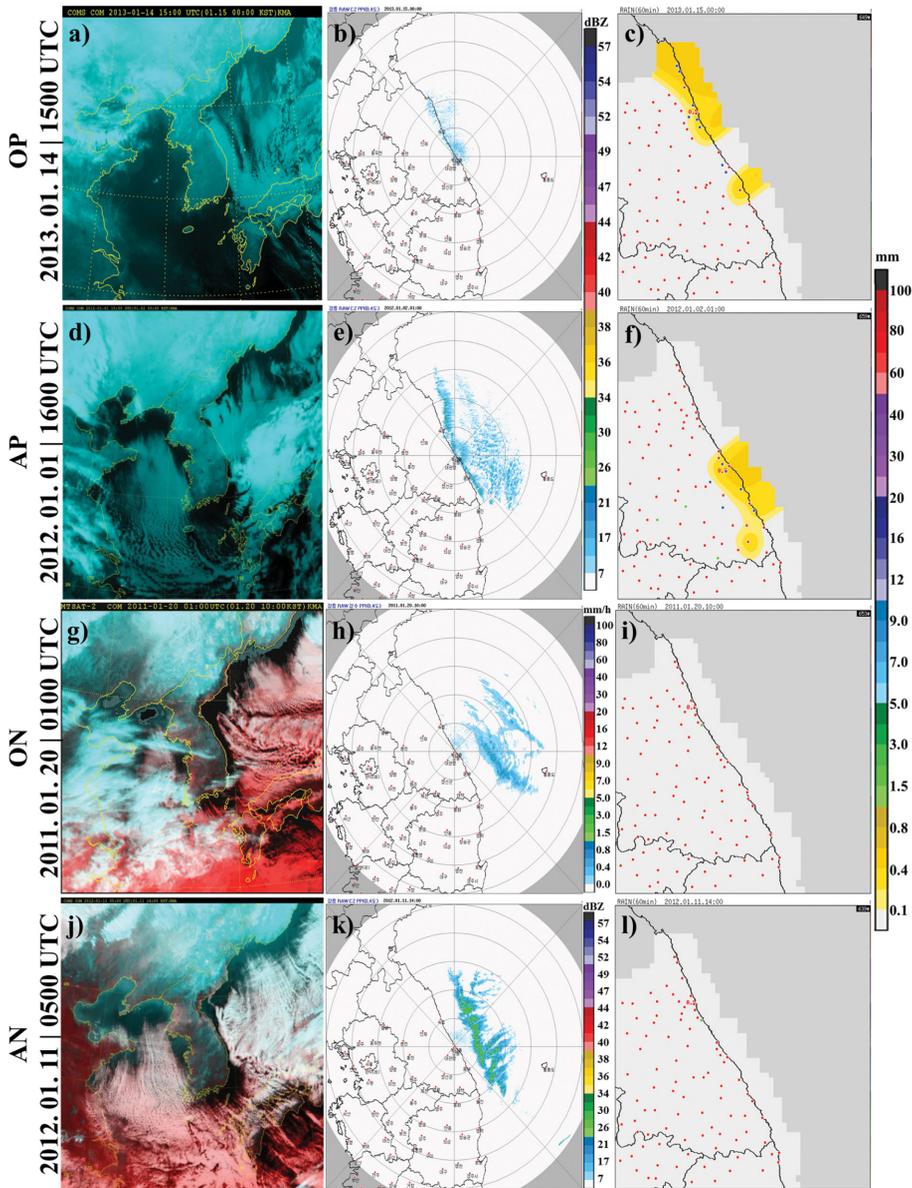


Fig. 3. COMS satellite composites images (left panels), radar images (middle panels), and 1 hr accumulated precipitation from AWS (right panels) at (a, b, c) 1500 UTC 14 January 2013, (d, e, f) 1600 UTC 01 January 2012, (g, h, i) 0100 UTC 20 January 2011, and (j, k, l) 0500 UTC 11 January 2012. The radar reflectivity (dBZ) and rain rate (mm h^{-1}) are represented with color shading based on scale at right of the figures (middle panels). The precipitation (mm) is represented with color shading based on scale at right of the figures (right panels).

의 경우, 두 사례 모두 영동 해안지역에 강수가 없으며(Figs. 3i, l), 위성 영상(Figs. 3g, j)과 레이더 영상(Figs. 3h, k)에서 구름대는 영동 해안선 밖에 위치하고 있다. 다만 AN의 구름대의 위치는 ON의 구름대의 위치보다 해안선에 보다 더 근접하다.

유강수 유형과 무강수 유형의 종관 규모의 차이점을 분석하기 위해 각 유형별 피크 시각에 대응되는 지상, 925 hPa, 850 hPa의 종관 일기도를 분석하였다(Fig. 4). 먼저 지상 일기도를 보면, 모든 사례에서 바이칼호 부근에 시베리아 고기압이 중국 화남 지역과

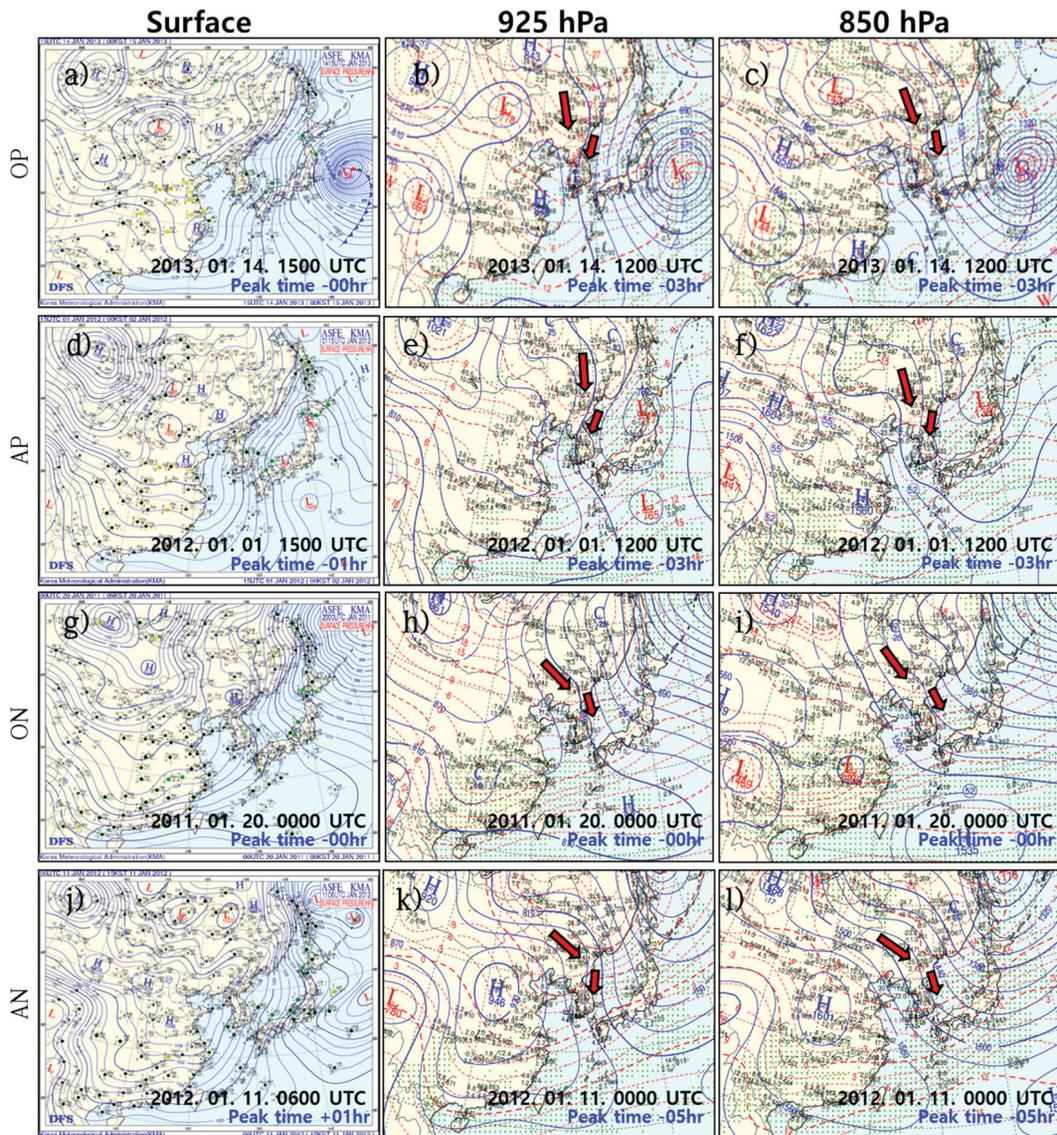


Fig. 4. Surface weather charts (left panels) for (a) 1500 UTC 14 January 2013, (d) 1500 UTC 01 January 2012, (g) 0000 UTC 20 January 2011, and (j) 0600 UTC 11 January 2012. 925 hPa (middle panels) and 850 hPa (right panels) synoptic charts at (b, c) 1200 UTC 14 January 2013, (e, f) 1200 UTC 01 January 2012, (h, i) 0000 UTC 20 January 2011, and (k, l) 0000 UTC 11 January 2012, and the bold red arrows indicate the gradient wind direction around the Korean peninsula.

한반도 쪽으로 확장하는 기압 패턴을 보임을 알 수 있다. 그리고 유강수 유형(Figs. 4a, d)에서는 고기압 세력의 확장 방향이 대부분 중국 동북 지역이며, 무강수 유형(Figs. 4g, j)에서는 좀 더 남하한 한-중 국경 부근이다. 그런데 구름대가 영동 해안선으로 접근하지 못하여 영동 해안지역에 눈이 내리지 않았던 ON의 경우, 원산 이북부터 포항 쪽으로 등압선이 북서-남동 방향으로 놓여있고, 나머지 OP, AP, 그리고 AN

의 경우에는 종관적으로 북동 기류가 유입되게 고성 부근에서 부산 쪽으로 등압선이 북-남 방향으로 놓여 있어 단순히 지상 기압 패턴만으로는 구름대의 영동 해안선으로의 진입 여부를 결정하기가 어렵다.

한편, 925 hPa 상층 일기도에서도 지상 기압 패턴과 유사하게 OP, AP, 그리고 AN 사례의 경우, 영동 해안지역으로 북동 기류가 유입되는 기압 패턴이며 (Figs. 4b, e, k), ON 사례의 경우에는 북-북서 기류가

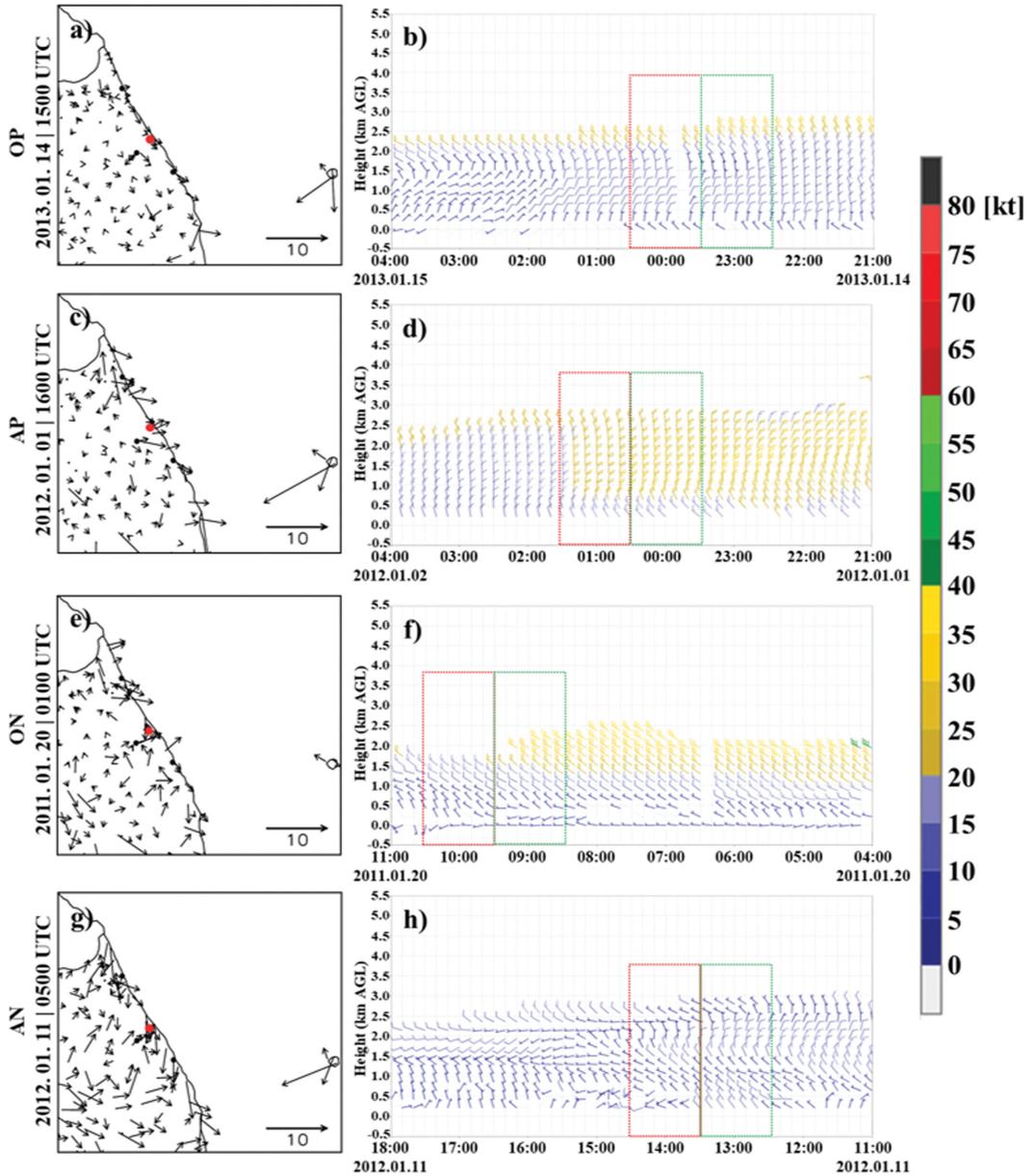


Fig. 5. Wind fields ($m s^{-1}$) from AWS at (a) 1500 UTC 14 January 2013, (c) 1600 UTC 01 January 2012, (e) 0100 UTC 20 January 2011, and (g) 0500 UTC 11 January 2012. Vertical wind profile (kts) at Bukgangneung (red dots) from (b) 2100 LST 14 January to 0400 LST 15 January 2013, (d) 2100 LST 01 January to 0400 LST 02 January 2012, (f) 0400 LST to 1100 LST 20 January 2011, and (h) 1100 LST to 1800 LST 11 January 2012. Length scale for the wind vector is given at lower right corner of the Fig. 5 (left panels), respectively. The wind speed (kts) is represented with color shading based on scale at right of the figures (right panels).

유입되는 기압 패턴임을 알 수 있다(Fig. 4h). 다만, 유강수 유형인 OP와 AP의 경우(Figs. 4b, e)에는 북쪽산맥군의 풍상측(중국 동북 지역 부근)에서 북풍 기

류가 유입되는 기압 패턴이 나타나고, 무강수 유형인 ON과 AN의 경우(Figs. 4h, k)에는 북쪽산맥군의 풍상측에서 북서 기류가 유입되는 기압 패턴이 나타나는

차이점이 있었다. 이러한 특징은 850 hPa 상층 일기도 (Figs. 4c, f, i, l)뿐만 아니라 각 유형별 다른 사례에서도 동일하게 나타난다(그림생략). 이러한 결과는 유강설 사례가 무강설 사례보다 영동 해안지역으로 더 강한 북동 기류가 유입되는 기압 패턴이 나타난다는 Kim (2016)에서 제시한 기압 패턴의 특징과 일치한다.

이와 같이 종관 규모 분석에서는 지상에서 시베리아 고기압의 확장 방향 및 중규모 고기압의 위치, 그리고 북쪽산맥군의 풍상측에서 유입되는 기류의 방향에 다소 차이가 있음을 확인하였지만, 대부분의 유강수와 무강수 유형 모두에서 영동 해안지역으로 북동 기류가 유입되는 기압 패턴을 보여줌에 따라 영동 해안지역으로의 구름대의 진입 여부를 판단하기가 어렵다.

영동 해안지역의 상세한 기류 분포를 분석하기 위해 AWS 지상 바람 관측자료(1시간 간격)와 강릉 wind profiler의 연직 바람 분포(10분 간격)를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서는 강원도 지역에 위치한 총 80개의 AWS 지점을 대관령지역을 기준으로 영동 해안지역(30지점)과 영서지역(50지점)으로 구분하여 풍향과 풍속을 확인하였다. 지상 바람 분포(Figs. 5a, c, e, g)의 경우, 영동 해안지역에서는 유강수와 무강수 유형 모두 북풍 내지 북서 계열의 바람이 불었으며, 유강수 유형의 풍속은 평균 약 1.7 m s^{-1} 로 무강수 유형(평균 약 2.9 m s^{-1})보다 다소 약하게 나타났다. 한편, 영서 지역에서는 대부분의 사례에서 서풍 계열의 바람이 주로 불었으며, 무강수 유형의 풍속(평균 약 1.9 m s^{-1})이 유강수 유형의 풍속(평균 약 0.8 m s^{-1})보다 두 배 정도 강하게 나타났다.

연직 바람 시계열 분포(Figs. 5b, d, f, h)에서는 빨간색 박스는 피크 시각을 기준으로 전후 30분 동안의 바람 정보를, 초록색 박스는 피크 시각으로부터 한 시간 전을 기준으로 전후 30분 동안의 바람 정보를 각각 담고 있다. 먼저, 각 사례에 해당하는 피크 시간대의 연직 바람 시계열 분포를 분석하였다. OP의 경우, 피크 시간대에 지상에서 북서 계열의 바람이, 고도 0.5~2.0 km에서는 북풍 내지 북동 계열의 바람이 불고, 2.0 km 고도 이상에서는 북서 계열의 바람이 나타난다(Fig. 5b). AP의 경우, 고도 0.5 km 이하에서는 북서 계열의 바람이, 0.5~2.5 km 상공에서는 북풍 계열의 바람이, 그리고 고도 2.5 km 이상에서는 북서 계열의 바람이 부는 것을 알 수 있다(Fig. 5d). ON의 경우, 지상에서 서풍 계열의 바람이 불고, 고도 0.5~1.0 km 내에서는 북서 계열의 바람이, 그리고 고도 1.0 km 이상에서는 서풍 계열의 바람이 나타난다(Fig. 5f). AN의 경우, 고도 0~0.5 km 내에서 서풍 계열의 바람이, 0.5 km 고도 부근에서는 북서 계열의 바람이, 그리고 0.7 km부터 약 1.5 km 고도 사이에서는 서풍 계열의 바람이 불었다. 1.5~2.0 km 내에서는 북서 내지

북풍 계열의 바람이, 그리고 2.5 km 이상에서는 서풍 계열의 바람이 불었다(Fig. 5h).

피크 시간대의 연직 바람을 분석한 결과, 유강수 유형(OP와 AP)에서는 고도 0.5~2.0 km 내에서 북동 내지 북풍 계열의 바람이 부는 반면에, 무강수 유형(ON과 AN)에서는 지상~1.5 km 내에서 북서 내지 서풍 계열의 바람이 불었음을 알 수 있었다.

한편, 피크 시각 이전의 연직 바람의 분포를 확인하기 위한 초록색 박스의 연직 바람 분포를 보면, OP와 AP의 경우(Figs. 5b, d), 고도 0.5~2.0 km 내에서는 대부분 북풍 계열의 바람이 피크 시각 이전부터 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 ON과 AN의 경우(Figs. 5f, h)에는 피크 시각 이전부터 고도 0~1.5 km 내에서 서풍 내지 북서 계열의 바람이 부는 것을 알 수 있다. 참고로, AN의 경우, 고도 약 1.5~2 km 내에서 북풍 계열의 바람이 존재하여 AP의 연직 바람 분포와 다소 유사하나, 북풍 계열의 바람이 존재하는 고도층의 두께가 AP의 경우보다 얇음을 알 수 있다.

특히, ON과 OP의 바람 분포는 Kim (2016)의 연구에서 분석된 지상에서 2.5 km 부근까지 북북서 내지 북풍 계열의 바람이 부는 유강설 사례와, 지상에서는 북동풍, 상층 약 2 km 부근까지는 북서 계열의 바람이 나타나는 무강설 사례의 바람 분포와 일치하며, 두 유형 사이의 바람 특성을 잘 보여주고 있다.

3.2 수치모의 결과 분석

각 사례에 대해 WRF 수치모델이 잘 모의하였는지, 그리고 각 사례별로 강수대가 영동 해안지역으로부터 얼마나 떨어져 있는지 확인하고자, 각 사례별 피크 시각에 대한 1시간 누적 강수량 분포도를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 영동 해안지역으로부터 강수대가 떨어져있는 거리가 얼마나 되는지 확인하기 위하여 강릉 지점으로부터 산맥에 수직인 방향으로 20 km, 40 km, 60 km 기준선을 1시간 누적 강수량 분포도에 각각 표시하였다.

각 사례에 대한 수치모의 결과는 지상 및 상층 기압장(그림 생략)을 관측과 유사하게 모의하였으며, 영동 해안지역에서의 총 누적 강수량 분포(그림 생략)도 관측에 가깝게 모의하여 이 사례들을 분석하는데 문제가 없는 것으로 판단하였다. 하지만, 실제 관측에서 나타난 피크 시각과 수치모의 결과는 다소 차이가 있기 때문에, 이 기술노트에서는 수치모의 결과를 기준으로 동해상에서 발달한 구름대가 영동 해안지역에 가장 가깝게 근접한 시간대(피크 시각)를 분석하였다.

OP의 경우, 해안내륙 지역까지 강수대가 진입하였고, AP의 경우, 강수대의 일부가 영동 해안지역에 걸쳐 있고 해안선 밖 20 km 이내에 주 강수대가 위치한다. 그리고 ON의 경우, 강수대가 해안지역으로부터

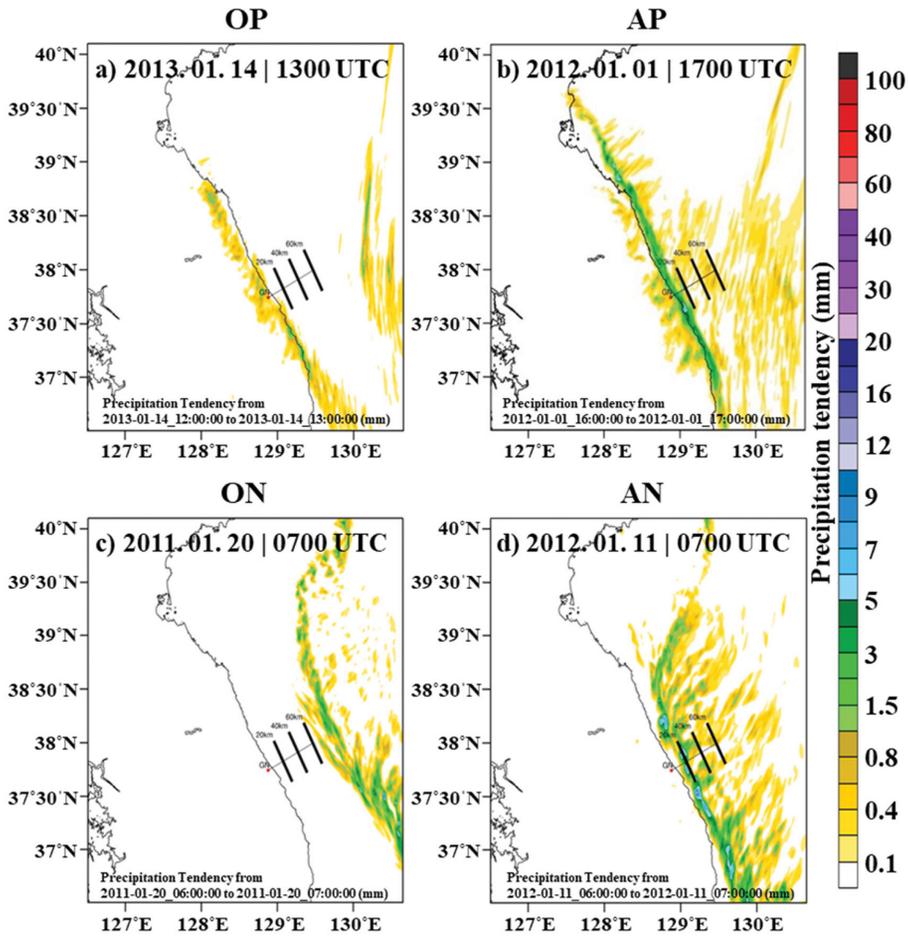


Fig. 6. The simulated 1hr accumulated precipitation (mm) fields valid at (a) 1300 UTC 14 January 2013, (b) 1700 UTC 01 January 2012, (c) 0700 UTC 20 January 2011, and (d) 0700 UTC 11 January 2012. The precipitation (mm) is represented with color shading based on scale at right of the figures. The red dots indicate the observation station of GN (Gangneung). The bold black lines indicate the parallel direction of the Taebaek mountains and are located 20 km, 40 km, and 60 km away from the gangneung observation station, respectively.

60 km 이상 떨어져 있고, AN의 경우에는 해안선 밖 20 km 내외로 아주 근접하였지만 해안지역에서는 강수가 없다. 따라서 수치 모의된 강수 분포가 관측과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Figure 7은 각 사례별로 관련된 기류의 분포를 분석하기 위해 각 사례의 피크 시각에 대한 지상 및 925 hPa 고도의 유선도를 나타낸 것이다. 지상의 경우(Figs. 7a-d), OP에서는 동해 먼 해상에서부터 영동 해안지역을 지나 태백산맥 정상 부근까지 북동 계열의 기류가 유입되고, AP에서는 동해 먼 해상에서 영동 해안 앞바다까지는 북동 계열의 기류가, 그리고 영동 해안선 부근에서는 지형적인 영향으로 전향된 북서 계열의 기류가 나타난다. ON에서는 영동 해안지역부터 동

해 먼 해상까지 북서 계열의 기류가 나타나며, AN에서는 낭림산맥과 태백산맥의 풍상측에서 영동 해안지역으로 넘어오는 서풍 계열의 기류가 영동 해안선을 따라 북서 기류로 전향됨을 알 수 있다. 또한 영동 앞 바다에서 접근하는 북풍 계열의 기류는 해안선 밖에서 북서 계열의 기류로 바뀐 모습이다. 따라서 지상 유선도에서 OP와 ON의 경우, 영동 해안지역에 유입되는 바람이 각각 북동 계열의 기류와 북서 계열의 기류로 뚜렷한 차이가 있지만, AP와 AN의 경우, 영동 해안 부근에서 나타나는 기류 패턴이 다소 유사하여 구별하기가 어렵다. 또한 유강수 유형에 해당하는 OP와 AP의 경우, 북쪽산맥군의 풍상측(41.0~43.3°N, 125.0~128.0°E)은 풍속이 작아(2.6 m s⁻¹ 이하) 주 풍

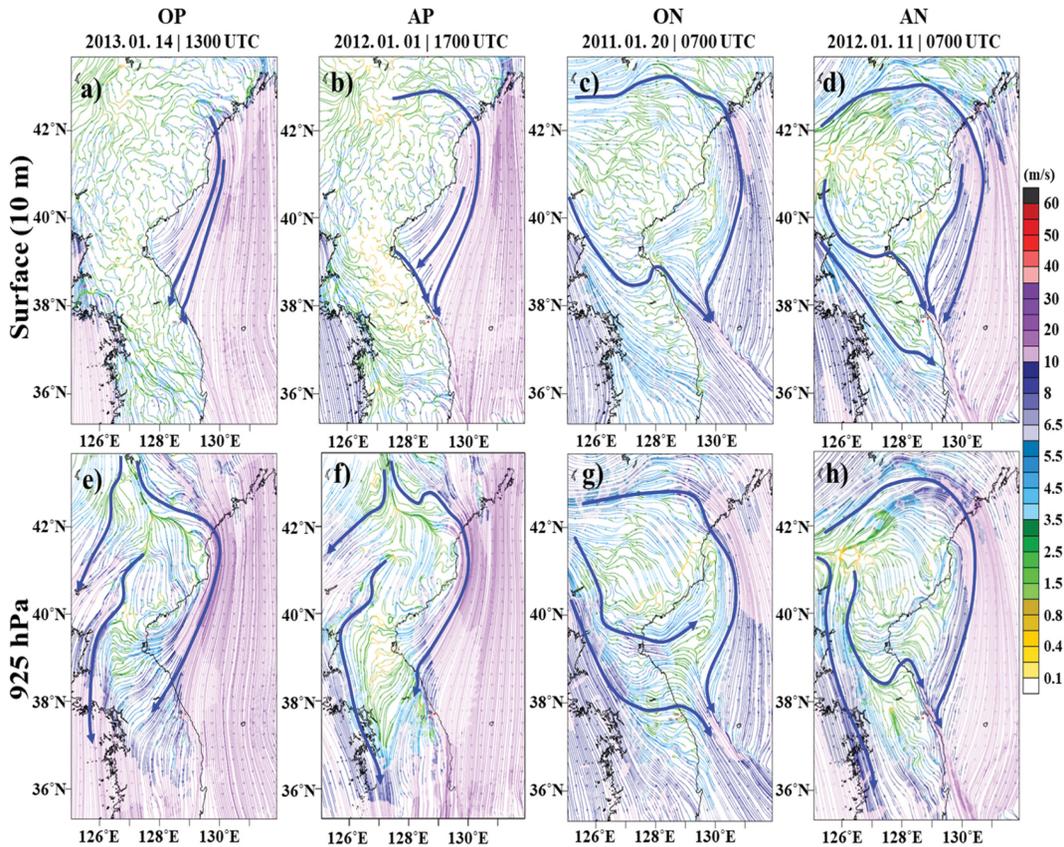


Fig. 7. Surface and 925 hPa streamline charts at (a, e) 1300 UTC 14 January 2013, (b, f) 1700 UTC 01 January 2012, (c, g) 0700 UTC 20 January 2011, and (d, h) 0700 UTC 11 January 2012, respectively. The wind speed (m s^{-1}) is represented with color shading based on scale at right of the figures. The bold blue arrows indicate major streamlines, respectively.

향이 뚜렷하게 나타나지 않는 반면에, 무강수 유형에 해당하는 ON과 AN의 경우에는 북쪽산맥군의 풍상측에서의 풍속이 3.0 m s^{-1} 이상으로 서풍 계열의 기류가 뚜렷하게 나타난다.

925 hPa 상층의 경우(Figs. 7e-h), OP에서는 동해상의 북동 계열의 기류가 태백산맥의 서쪽까지 강하게 유입되고, AP에서는 북동 계열의 기류가 영동 해안 앞바다까지 유입되다가 영동 해안지역에서 지형적인 영향으로 전향되어 북풍으로 바뀐 것을 알 수 있다. ON과 AN의 경우에는 지상의 기류 분포와 거의 유사하게 낭림산맥과 태백산맥의 풍상측에서 영동 해안지역으로 넘어오는 서풍 계열의 기류의 존재가 뚜렷하고, 동해상에서는 북동 계열의 기류가 있음을 알 수 있다.

즉, OP와 AP의 경우에는 시베리아 고기압이 중국 동북지역으로 확장하면서 북쪽산맥군의 왼쪽으로 우회하여 동해상으로 유입되는 강한 북동 계열의 기류에 의해 강수역이 영동지역에 위치한 반면에, ON과 AN의 경우에는 고기압이 한-중 국경 부근으로 확장

하면서 북쪽산맥군을 왼쪽으로 우회하여 동해상으로 유입되는 북동 계열의 기류에 비해, 북쪽산맥군을 오른쪽으로 우회하여 영서지역에서 태백산맥을 넘어 영동 해안지역으로 유입되는 서풍 계열의 기류가 보다 강하여 강수역이 영동 해안 밖에 위치하였다.

한편, 지상 유선도에서 영동 해안지역과 영동 해안선 부근으로 북서 계열의 기류가 나타나 구별하기 어려웠던 AP와 AN의 경우, 특히 925 hPa 유선도에서 낭림산맥과 태백산맥 부근의 기류 분포에서 특징적인 차이를 보이고 있다. 즉, AP의 경우, 영동 해안지역에서의 북풍은 동해상의 북동 계열의 기류가 태백산맥에 의한 지형적인 효과로 인해 전향된 바람인 반면에, AN에서 나타난 영동 해안지역에서의 북서 계열의 기류는 낭림산맥과 태백산맥의 풍상측에서 유입된 서풍 계열의 기류가 전향되어 나타난 바람이다. 또한, 850 hPa 상층 유선도(그림 생략)에서는 모든 사례에서 영동 해안지역으로 북풍 계열의 기류가 유입되는 패턴이 나타나 특징적인 차이는 없었다.

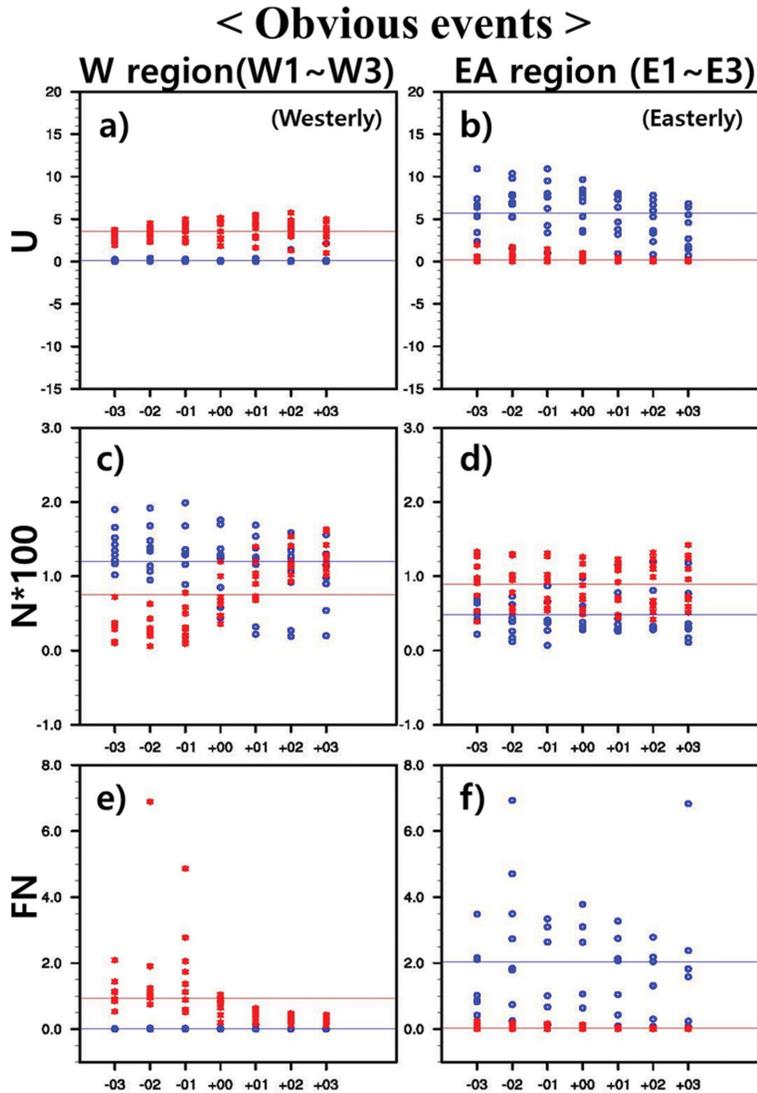


Fig. 8. Scatterplots of the cross-mountain wind speed (U ; top panels), Brunt-väisälä frequency (N ; middle panels) and Froude number (FN ; bottom panels) versus time (h). Bold blue and red points are for obvious precipitation events and obvious no-precipitation events, respectively. The blue (red) lines indicate average values of U , N , and FN for the obvious precipitation events (obvious no-precipitation events) (See text for details).

3.3 Froude 수 분석

Table 1의 총 12개 사례를 대상으로 총 6개 지점 (W1~W3, E1~E3)에 대한 6시간(피크 시각을 기준으로 ± 3 시간)의 FN 과 FN 의 구성성분(산맥에 수직한 바람 U , 안정도 N) 값을 각각 산출하였다. 여기서 W 지역은 영서지역에 해당하는 W1, W2, W3 지점을 망라한 지역으로 표현하였고, EA 지역은 영동 해안 앞 바다에 해당하는 E1, E2, E3 지점을 함께 묶어 지역으로 표현하였다. 그리고 산맥에 수직한 바람 성분이

음의 값이면 U 와 FN 을 분석에서 제외하였으며, 또한 연직 온도 경도가 음의 값이면 N 과 FN 을 분석에서 제외하였다.

Figure 8은 OP의 세 사례와 ON의 세 사례를 대상으로, 피크 시각을 기준으로 ± 3 시간에 해당하는 각 시각별로 총 6개 지점에 대해 구한 FN 과 FN 의 구성성분 값을 분석 지역별(W 지역, EA 지역)로 산포도로 나타낸 것이다. Figure 9는 Fig. 8과 같으나, 차이점은 AP의 세 사례와 AN의 세 사례를 대상으로 한

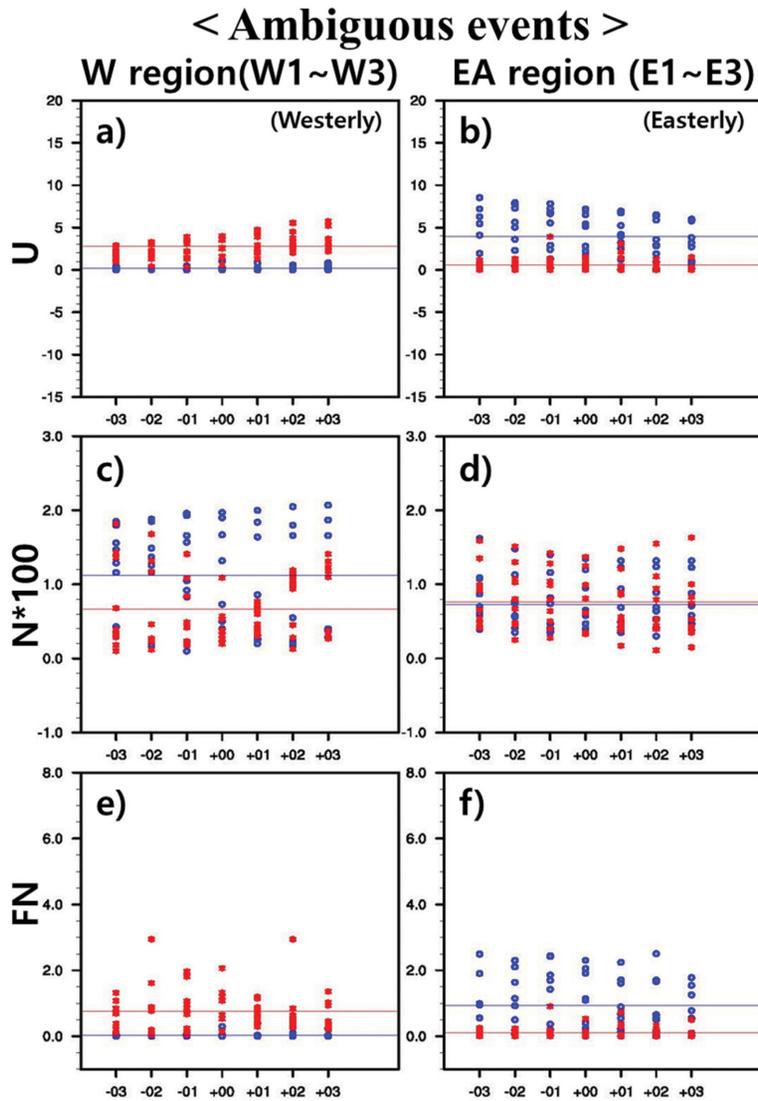


Fig. 9. Same as in Fig. 8, but for the ambiguous precipitation events and ambiguous no-precipitation events.

Table 3. The cross-mountain wind speed (U ; $m s^{-1}$), Brunt-väisälä frequency (N ; s^{-1}), and Froude number (FN) according to the type. These values are regional (W, EA) and 6 hour (peak ± 3) averages. Refer to the text for detail.

| Type | W | | | EA | | |
|------|-----------------|-------|-----|-----------------|-------|-----|
| | U (Westerly) | N | FN | U (Easterly) | N | FN |
| OP | 0.1 | 0.012 | 0.0 | 5.7 | 0.005 | 2.1 |
| AP | 0.2 | 0.011 | 0.0 | 4.0 | 0.007 | 0.9 |
| ON | 3.6 | 0.008 | 0.9 | 0.2 | 0.009 | 0.0 |
| AN | 2.8 | 0.007 | 0.8 | 0.6 | 0.008 | 0.1 |

산포도인 점이다. Figure 8과 Fig. 9의 산포도에서 파란색 굵은 점은 유강수 사례에 대해, 그리고 빨간색 굵은 점은 무강수 사례에 대해 계산한 결과 값을 각각 보여주며, 파란색 실선과 빨간색 실선은 각각 유강수와 무강수 사례에 대한 평균값을 보여준다. 그리고 모든 분석 지역과 강수 사례에 대해 산술 평균된 FN과 FN의 구성성분 값을 Table 3에 나타내었다.

3.3.1 OP (명확한 유강수)와 ON (명확한 무강수) 유형에 대한 FN의 구성성분과 FN 분석

먼저, 산에 수직한 바람 성분인 U에 대한 산포도를 보면(Figs. 8a, b), 백두대간의 서쪽에 위치한 W 지역

(Fig. 8a)에서는 서풍 계열의 평균 바람 세기는 OP의 경우, 0.1 m s^{-1} 정도로 서풍 계열의 바람이 거의 없는 반면에 ON의 경우, 3.6 m s^{-1} 정도이었다(Table 3).

백두대간의 동쪽에 위치한 EA 지역(Fig. 8b)에서는 W 지역과는 반대로 OP의 U 값(+인 경우, 동풍 계열)들이 $0.5\sim 11 \text{ m s}^{-1}$ 까지 넓게 분산된 분포를 보이며, ON에서는 대부분 0 m s^{-1} 에 가까운 U 값의 분포를 보였다. 평균적으로 보면, EA 지역에서의 동풍 계열의 바람 세기는 OP 유형의 경우, 5.7 m s^{-1} 그리고 ON 유형의 경우, 0.2 m s^{-1} 정도로, 명확한 유강수 유형(OP)이 명확한 무강수 유형(ON)보다 동풍 계열의 바람 세기가 상대적으로 더 컸다.

정리하면, 명확한 유강수 유형의 경우, 영서지역에서는 서풍 계열의 바람이 아주 약하며, 동해 앞바다에서는 동풍 계열의 바람이 다소 강함을 알 수 있다. 반면에 명확한 무강수 유형의 경우, 영서지역에서는 서풍 계열의 바람이 존재하고 그리고 동해 앞바다에서는 동풍 계열의 바람이 거의 없음을 알 수 있다.

산 높이에 해당하는 기층의 안정도(N)를 분석한 결과(Figs. 8c, d), 영서지역인 W 지역(Fig. 8c)에서는 OP의 경우, 피크 시각 이전에는 안정도 값이 높은 분포(0.01 s^{-1} 이상)를 보이다가 피크 시각 이후에는 점차 안정도가 낮아지는 경향을 보였으며, ON의 경우에는 OP와는 반대로 피크 시각 이전에는 안정도 값이 낮은 분포(0.01 s^{-1} 미만)를 보이다가 피크 시각 이후부터는 점차 안정도 값(0.01 s^{-1} 이상)이 높아지는 경향을 보였다. W 지역에서 평균 안정도 값은 OP 유형의 경우, 0.012 s^{-1} , 그리고 ON 유형의 경우 0.008 s^{-1} 로, 명확한 유강수 유형(OP)이 명확한 무강수 유형(ON)보다 영서지역에서의 안정도가 높았다.

EA 지역(Fig. 8d)에서는 W 지역에서 나타난 안정도의 시간에 따른 변화는 거의 나타나지 않고 다소 균일한 분산 분포를 보인다. OP와 ON 모두 안정도의 평균값이 0.01 s^{-1} 미만이며, EA 지역에서의 평균 안정도 값은 OP의 경우, 0.005 s^{-1} 이며, ON의 경우, 0.009 s^{-1} 이다. 즉, 영동 해안에서의 안정도는 명확한 유강수 유형(OP)이 명확한 무강수 유형(ON)보다 상대적으로 낮았다.

정리하면, 명확한 유강수 유형의 경우에는 영서지역에서의 안정도가 높아 영서지역에서 영동 해안지역으로 서풍 계열의 바람이 유입되기 어려운 대기 환경이었고, 명확한 무강수 유형의 경우에는 영동 해안에서의 안정도가 높아 동풍 계열의 바람이 동해상에서 태백산맥을 넘어가기 어려운 대기 환경이었다.

한편, FN의 경우, W 지역(Fig. 8e)에서는 OP 유형의 FN은 대부분 0에 가깝게 분포하며, ON 유형은 피크 시각 이전에는 대부분 약 1 이상인 FN의 분포를 보이며, 피크 시각 이후에는 FN이 점차 낮아진다. 평

균적으로 볼 때 W 지역에서의 FN은 OP의 경우, 0.0(안정)이며, ON의 경우, 0.9(불안정) 정도로, 명확한 유강수 유형의 경우, 풍상측에서의 저지효과로 영서 지역에서 영동 해안지역으로 기류가 쉽게 넘어가지 못함을 알 수 있으며, 명확한 무강수 유형의 경우에는 서풍 계열의 기류가 쉽게 넘어갈 수 있는 대기 조건임을 알 수 있다.

EA 지역(Fig. 8f)에서는 W 지역에서 보여준 시간적인 경향이 나타나지 않으며, W 지역과는 반대로 OP 유형은 FN이 0~8 사이에 다소 분산된 분포를 보이고, ON 유형은 대부분 FN이 0에 가깝게 분포하여, 평균 FN은 OP의 경우, 2.1 그리고 ON의 경우에는 0.0이다. 즉, 명확한 유강수 유형은 동해상에서 불어오는 동풍 계열의 기류가 태백산맥으로 쉽게 넘어갈 수 있는 대기 조건을 갖춘 반면에, 명확한 무강수 유형은 동해상에서 불어오는 동풍 계열의 기류가 백두대간을 넘어가기 어려운 대기 조건을 갖고 있음을 알 수 있다.

3.3.2 AP (불명확한 유강수)와 AN (불명확한 무강수) 유형에 대한 FN의 구성성분과 FN 분석

앞의 OP와 ON 유형에 대한 U의 산포도(Figs. 8a, b)와 AP와 AN 유형에 대한 U의 산포도(Figs. 9a, b)를 비교해 보면, 불명확한 유강수 유형(AP)과 명확한 유강수 유형(OP) 그리고 불명확한 무강수 유형(AN)과 명확한 무강수 유형(ON)은 서로 유사하다. W 지역의 서풍 계열의 평균 바람 세기는 AP 유형(0.2 m s^{-1})이 AN 유형(2.8 m s^{-1})보다 작게 나타나고, EA 지역에서의 동풍 계열의 평균 바람 세기는 AP 유형(4.0 m s^{-1})이 AN 유형(0.6 m s^{-1})보다 상대적으로 더 크게 나타난다.

안정도(N)의 경우, W 지역(Fig. 9c)에서는 AP와 AN 모두 N 값이 $0\sim 0.02 \text{ s}^{-1}$ 사이에 분산된 분포를 보이며, N의 평균값은 AP의 경우, 0.011 s^{-1} 이며, AN의 경우에는 0.007 s^{-1} 이다. EA 지역(Fig. 9d)에서는 AP와 AN 모두 $0.001\sim 0.018 \text{ s}^{-1}$ 사이에 N 값이 분포하며 N의 평균값은 AP의 경우, 0.007 s^{-1} 이며, AN의 경우, 0.008 s^{-1} 로 계산되어, 두 유형 사이의 뚜렷한 특징을 찾을 수 없었다.

다만, 명확한 유강수(OP)와 불명확한 유강수 유형(AP)의 경우, W 지역에서는 안정도(N)의 평균값이 0.01 s^{-1} 이상이며, EA 지역에서는 0.007 s^{-1} 이하로 나타나고, 명확한 무강수(ON)와 불명확한 무강수 유형(AN)의 경우, 대부분의 W 지역에서는 N 값이 0.01 s^{-1} 미만이며, EA 지역에서는 0.007 s^{-1} 이상으로 나타나, 명확 또는 불명확한 유형과 관계없이 유강수인 경우, 전반적으로 볼 때, 무강수 유형의 경우보다 영서지역에서는 안정도가 높고, 반면에 영동 해안에서는 안정도가 상대적으로 낮은 특징을 보였다. 따라서 유강수

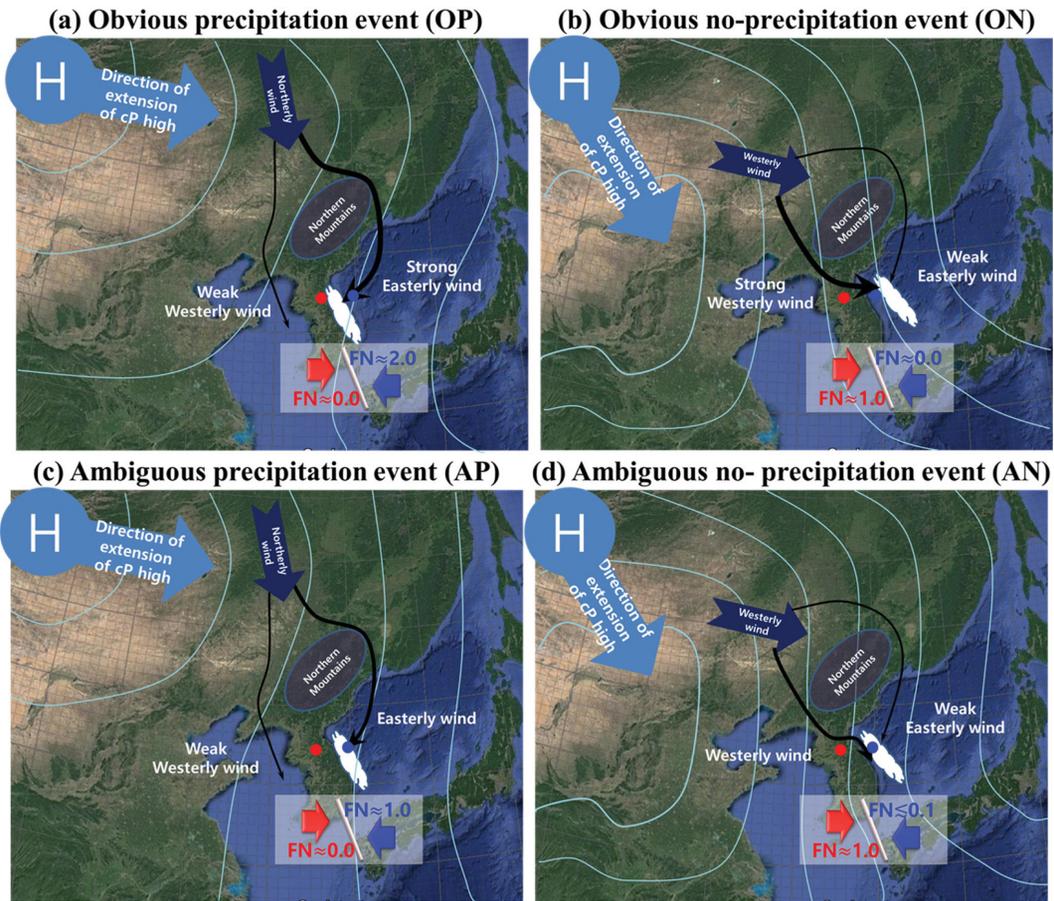


Fig. 10. The schematic diagrams for the (a) obvious precipitation event, (b) obvious no-precipitation event, (c) ambiguous precipitation event, and (d) ambiguous no-precipitation event.

유형인 경우, 동풍 계열의 기류가 영동지역에서 태백산맥을 넘어 영서지역으로 쉽게 유입될 수 있는 반면에, 영서지역에서는 서풍 계열의 기류가 영동지역으로 쉽게 유입될 수 없는 대기 상태를 보여준다.

AP 유형의 경우, EA 지역에서는 평균 FN은 0.9, 그리고 W 지역에서는 평균 FN이 0.0 그리고 AN 유형의 경우, EA 지역에서는 평균 FN은 0.1 그리고 W 지역에서는 평균 FN은 0.8로, AP 유형의 경우, FN이 큰 지역이 영동 해안인 반면에 AN 유형의 경우에는 영서지역에 위치해 있다. 즉, 불명확한 경우에도 유강수의 경우, 영동 해안에서는 FN이 크고 영서지역에서는 FN이 작아 동풍 계열의 기류가 쉽게 영동 해안을 지나 태백산맥을 넘을 수 있는 대기 상태이다. 반면에, 불명확한 무강수의 경우, 영동 해안에서는 FN이 작고 영서지역에서는 FN이 커서 서풍 계열의 기류가 쉽게 태백산맥을 넘어 영동지역으로 진출할 수 있는 대기 상태로 영동 앞바다에 위치한 구름대가 쉽게 해안

선에 접근하기 어려운 상태를 알 수 있다(Figs. 9e, f).

주요 지역별로 강수 유형에 대한 FN과 FN의 구성 성분을 분석한 결과, 명확하거나 불명확하거나 관계 없이 모든 유강수 유형의 경우에는 피크 시각에 산맥의 동쪽에서 서쪽으로 산을 넘어갈 수 있는 동풍 계열의 기류가 존재한 반면에, 산맥의 서쪽에서는 동쪽으로 산을 넘어갈 수 있는 서풍 계열의 기류가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 발달한 구름대가 동해상에서 해안지역으로 쉽게 진입할 수 있는 이유를 설명하고 있다. 반대로 명확하거나 불명확하거나 상관 없이 모든 무강수 유형은 산맥의 서쪽에서 동쪽으로 산을 넘을 수 있는 서풍 계열의 바람이 존재하고 동쪽에서는 서쪽으로 산을 넘을 수 있는 동풍 계열의 바람이 아주 약하여 동해상의 구름대가 영동 해안지역으로 쉽게 진입하지 못함을 알 수 있다. 그리고 명확한 유강수 유형(OP)과 불명확한 유강수 유형(AP)의 경우, W 지역에서 FN이 둘 다 0에 가깝다. 한편, EA

지역에서 명확한 유강수 유형(OP)의 평균 FN이 불명확한 유강수 유형(AP)의 평균 FN보다 약 두 배 정도 크게 나타났다. 이것은 명확한 유강수 유형(OP)의 경우, 동풍 계열의 기류의 세기가 불명확한 유강수 유형(AP)의 경우보다 훨씬 더 컸으며 또한, 안정도가 상대적으로 더 낮았기 때문이다(Table 3). 위의 분석 결과를 바탕으로 네 가지 유형(OP, ON, AP, 그리고 AN) 별로 지상기압장, 바람장, 그리고 FN의 분포 특징을 모식도(Fig. 10)로 나타내었다.

4. 결 론

예측이 어려운 영동 해안지역의 약한 강수 유형과 무강수 유형에 대한 예보 정확도 향상을 위하여 유강수와 무강수 사례에 대한 영동 해안지역 및 한반도 부근의 종관 규모 또는 중규모에서 나타나는 특징 및 차이점을 비교 분석하고, 북쪽산맥군 풍상측에서 원산 부근으로 유입되는 서풍 계열의 기류와 동해상에서 영동 해안지역으로 유입되는 동풍 계열의 기류 및 대기안정도가 동해상에서 발달하는 구름대의 이동에 미치는 영향을 알아보려고 Froude 수를 이용하여 분석하였다.

유강수와 무강수 유형에 대한 종관 일기도와 관측 바람을 분석한 결과, 지상에서는 유강수와 무강수 유형 모두 영동 해안지역으로 북동 계열의 기류가 나타나는 기압 패턴이었으며, 925와 850 hPa 상층 일기도에서는 유강수 유형이 무강수 유형보다 더 강한 북동 계열의 기류가 유입되는 기압 패턴을 보여, 종관적으로 약간의 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한, 유강수 유형의 경우, 북쪽산맥군의 풍상측에서 북풍 계열의 기류가 유입될 수 있는 기압 패턴이 나타나는 반면에, 무강수 유형에서는 서풍 내지 북서 계열의 기류가 유입될 수 있는 기압 패턴이 나타났다. 그러나 이러한 기압 패턴의 차이에도 불구하고 무강수 유형의 경우, 영동 해안지역으로 강수가 유입될 수 있는 종관적인 기압 패턴과 유사하므로 강수 유무를 판단하기에는 어려움이 있음을 확인하였다.

유강수와 무강수를 결정하는 주요 요소 분석을 위해 수치모의 실험을 수행한 결과, 지상 유선도에서는 영동 해안지역으로 유입되는 바람이 북동 계열의 기류(명확한 유강수 유형)와 북서 계열의 기류(명확한 무강수 유형)로 뚜렷하게 구분되는 반면에, 불명확한 유강수와 불명확한 무강수 유형은 영동 해안지역으로 유입되는 기류가 거의 유사하여 구분하기 어렵다. 925와 850 hPa 고도면에서는 유강수 유형의 경우, 영서 지역에서 태백산맥을 넘어 원산 이남으로 유입되는 서풍 계열의 기류가 나타나지 않아 영동 해안지역으로 북동 계열의 기류의 유입이 이루어졌으며, 무강수

유형의 경우에는 태백산맥을 넘어 원산 이남으로 유입되는 기류가 나타나 영동 해안지역으로 북동 계열의 기류가 유입되지 못함을 확인하였다. 따라서 영서 지역에서 영동 해안지역으로 유입되는 서풍 계열의 기류가 구름대의 유입을 막는 중요 인자로 분석되었다. 또한 지상~850 hPa 고도에서 유강수 유형의 경우에는 북쪽산맥군의 풍상측에서 북풍 계열의 바람이 북쪽산맥군을 우회하여 동해안으로 유입되며, 무강수 유형의 경우에는 북쪽산맥군의 풍상측에서 서풍 계열의 바람이 북쪽산맥군을 우회한 후 태백산맥을 넘어 동해안으로 유입되는 유선 패턴을 보였다.

그리고 구름대의 이동과 FN과의 관계를 분석하였다. 종관적으로 차이가 명확한 유강수와 명확한 무강수 유형은 서풍 계열의 바람과 동풍 계열의 바람의 존재 그리고 안정도 또한 차이가 뚜렷하였다. 명확한 유강수 유형의 경우, 영동 해안에서의 평균 FN은 약 2.0이고, 영서지역에서의 평균 FN은 0.0, 명확한 무강수 유형의 경우에는 영동 해안에서의 평균 FN은 0.0, 영서지역에서의 평균 FN은 0.9로 명확한 유강수 유형과는 상반되는 결과를 보였다. 즉, 명확한 유강수 유형은 산맥의 동쪽에서 산맥을 넘어갈 수 있는 강한 동풍 계열의 바람과 낮은 안정도 조건이 형성되고, 이에 맞대응되는 산맥 서쪽의 서풍 계열의 바람은 태백산맥을 넘어가기에 충분한 조건이 형성되지 않아 구름대가 쉽게 영동 해안지역으로 유입될 수 있음을 보였다.

불명확한 유강수 유형의 경우에는 영동 해안에서의 평균 FN이 0.9, 영서지역에서의 평균 FN이 0.0로 명확한 유강수 유형보다 상대적으로 영동 해안에서의 평균 FN은 작고, 영서지역에서의 평균 FN은 같았다. 불명확한 무강수 유형의 경우에는 영동 해안에서의 평균 FN이 0.1, 영서지역에서의 평균 FN이 0.8로 명확한 무강수 유형보다 상대적으로 영동 해안에서의 평균 FN이 조금 더 크게 나타났다. 불명확한 유강수와 불명확한 무강수 유형 모두에서는 원산 이남으로 유입되는 서풍 계열의 바람과 영동 해안지역으로 유입되는 동풍 계열의 바람의 세기가 명확한 유강수와 무강수 유형보다 상대적으로 작았다. 불명확한 무강수 유형의 경우에는 명확한 무강수 유형보다 영서지역에 영동 해안지역으로 유입되는 서풍 계열의 바람의 세기가 작고 동해상에서 영동 해안지역으로 유입되는 동풍 계열의 바람의 세기가 상대적으로 커 동해상의 구름대가 해안 쪽으로 보다 더 접근한 것으로 분석되었다.

명확한 유강수 유형(OP)과 불명확한 유강수 유형(AP)의 경우, 평균 FN에 따른 구분이 다소 명확한 반면에, 명확한 무강수 유형(ON)과 불명확한 무강수 유형(AN)에서는 두 사례 모두 평균 FN에서 거의 차이

가 없기 때문에 ON과 AN의 두 가지 무강수 유형 사이의 구분을 하기가 어렵다. 따라서 FN을 이용한 강수 예측은 영동 해안지역의 강수 유무를 판단하는데 도움을 줄 것으로 보이나, 영동 해안선에서 다소 멀리 구름대가 위치할 것인지 또는 가까이 접근할 것인지에 대한 판단 자료로 단순히 FN만을 이용하여 판단하기에는 어려울 것으로 보인다.

한편, 925와 850 hPa 고도면에서 동해상에서 영동 해안지역으로 유입되는 북동 계열 기류의 크기 및 안정도, 북쪽산맥군의 풍상측 기류의 유입 방향, 지상~850 hPa 고도면에서 낭립산맥과 태백산맥의 풍상측에서 유입되는 서풍 내지 북서 계열 기류의 크기 및 풍상측의 안정도에 따라 유/무강수 유형(OP, ON, AP, 그리고 AN) 및 구름대의 위치가 대부분 결정됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구노트의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2018RID1A1B07042652)의 지원(기여도 70%)과 일부 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “재해기상 감시·분석·예측 기술 개발 및 활용연구(KMA2018-00123)”의 지원(기여도 30%)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baines, P. G., 1979: Observations of stratified flow past Three-dimensional barriers. *J. Geophys. Res. Oceans*, **84**, 7834-7838.
- Evans, M., M. Jurewicz, and R. Kline, 2017: The elevation-dependence of snowfall in the Appalachian Ridge and Valley region of northeastern Pennsylvania. *J. Operational Meteor.*, **5**, 87-102, doi:10.15191/nwajom.2017.0508.
- Forbes, G. S., D. W. Thomson, and R. A. Anthes, 1987: Synoptic and mesoscale aspects of an Appalachian ice storm associated with cold-air damming. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 564-591.
- Han, J.-Y., J.-J. Kim, and J.-J. Baik, 2007: Flow Regimes of Continuously Stratified Flow over a Double Mountain. *Atmosphere*, **17**, 231-240 (in Korean with English abstract).
- Hong, M. R., 2017: A Study on a Heavy Snowfall Phenomenon over Yeongdong Coastal Area Using a Trajectory Analysis. M.S. Thesis, Gangneung-Wonju National University, 33 pp (in Korean with English abstract).
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, **113**, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- Jang, W., and H.-Y. Chun, 2008: Severe downslope windstorms of Gangneung in the springtime. *Atmosphere*, **18**, 207-224 (in Korean with English abstract).
- Kain, J. S., 2004: The Kain-fritsch convective parameterization: an update. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **43**, 170-181.
- Kim, A.-H., and T.-Y. Lee, 2016: A study of a heavy rainfall event in the Middle Korean Peninsula in a situation of a synoptic-scale ridge over the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **26**, 577-598 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-K., 2016: A Comparative Study of the Low Clouds Off the Coast and those Entering the Coastal Area. M.S. Thesis, Gangneung-Wonju National University, 42 pp (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-H., and I.-U. Chung, 2006: Study on mechanisms and orographic effect for the springtime downslope windstorm over the Yeongdong region. *Atmosphere*, **16**, 67-83 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-G., and Y. J. Kim, 2008: A numerical simulation study using WRF of a heavy snowfall event in the Yeongdong coastal area in relation to the northeasterly. *Atmosphere*, **18**(4), 339-354 (in Korean with English abstract).
- _____, and S.-R. In, 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 with English abstract).
- _____, and Y. J. Kim, 2009: A numerical case study examining the orographic effect of the northern mountain complex on snowfall distribution over the Yeongdong region. *Atmosphere*, **19**, 345-370 (in Korean with English abstract).
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612, doi:10.1175/2009MWR2968.1.

- Manins, P. C., and B. L. Sawford, 1982: Mesoscale observations of upstream blocking. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 427-434.
- Mason, P. J., and R. I. Sykes, 1978: On the interaction of topography and Ekman boundary layer pumping in a stratified atmosphere. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **104**, 475-490.
- Muccilli, M., 2015: Using the Froude Number to Improve Orographic Snow Forecasts in the Green Mountains of Vermont. Eastern Region Technical Attachment No. 2015-05, 43 pp.
- Park, S. K., H. H. Kim, Y. G. Roh, S. M. Lim, J.-H. Kim, S.M. Oh, and Technovation partners, 2007: Technology evaluation through diagnosis of forecast capability. KMA TRKO201100007095. Atmospheric science and earth quake research. CATER 2007-1109, 129 pp (in Korean with English abstract).
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Smith, R. B., 1982: Synoptic observations and theory of orographically disturbed wind and pressure. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 60-70.
- Song, J.-A., J. G. Lee, and 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**, 127-140 (in Korean with English abstract).