

2018년 8월 6일 발달한 대류계에 의해 발생한 강릉지역의 집중호우 사례 연구

박성규 · 이재규*

강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2020년 3월 2일, 수정일: 2020년 5월 19일, 게재확정일: 2020년 6월 6일)

A Case Study of Heavy Rainfall by A Developed Convective System over Gangneung on 6 August 2018

Sung-Kyu Park and Jae Gyoo Lee*

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

(Manuscript received 2 March 2020; revised 19 May 2020; accepted 6 June 2020)

Abstract On 6 August 2018, heavy rainfall of daily precipitation of more than 200 mm occurred in the Yeong-dong coastal area, and especially, 1-hour precipitation of 93 mm (0251~0351 LST (local standard time) 6 August) at Gangneung station, ranked second in the history of meteorological survey of the station. In this study, this heavy rainfall case over the Gangneung area would be studied to investigate the process in which the heavy rainfall occurred. A developed ridge moved toward the Yeong-dong coastal area from the Maritime Province in Russia. The approaching of the ridge led to the northeasterly cold wind over the coastal region, causing the collision between the incoming northeasterly cold wind, and the humid and warm (convectively unstable) air located over the Yeong-dong area. This collision led to a strong convergence (maximum $-206 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) at 925 hPa level over the vicinity of Gangneung at 0300 LST 6 August, resulting updraft of up to about 4.4 m s^{-1} at 700 hPa level over the area. This strong updraft forced to lift rapidly the convectively unstable, warm and humid air layer, located over the vicinity of Gangneung, leading to the heavy rainfall (1-hour precipitation of 93 mm) over the area.

Key words: Heavy rainfall, Gangneung, convective instability, convergence, updraft

1. 서 론

서쪽으로는 북서에서 남동 방향으로 뻗어있는 백두대간이, 그리고 동쪽으로는 동해가 위치한 영동지역은 지리적 특성으로 대설과 집중호우 등 다양한 기상 현상이 자주 발생하는 곳이다. 그중에서도 영동지역의 대설은 시베리아 기단이 동해상으로 확장하거나 또는 시베리아기단이 연해주 부근으로 확장하는 가운

데, 우리나라 남쪽에 저기압이 위치하여 동해상의 북동풍 계열의 기류가 영동지역으로 강하게 유입되는 종관 배경에서 자주 발생하였다(Song et al., 2016). 이에 따라 빈번히 발생하는 영동지역의 대설에 관한 다양한 연구가 많이 이루어져왔다. 예를 들어 태백산맥 등 산악지형이 대설분포에 미치는 영향에 관한 수치 모의실험 연구(Lee and Kim, 2008, 2009)와 WRF 모델 등의 수치모의 결과 자료를 이용한 대설 사례분석(Lee, 2001; Lee and Lee, 2003; Lee and Kim, 2008; Kim et al., 2017b) 그리고 재분석자료 등을 이용한 대설현상 연구(Park et al., 2009; Lee et al., 2012) 등을 예로 들 수 있다.

그러나 영동지역에서 발생하는 집중호우의 경우, 대

*Corresponding Author: Jae Gyoo Lee, Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung, Gangwondo 25457, Korea.
Phone: +82-33-643-2322, Fax: +82-33-643-2320
E-mail: ljgyoo@gwnu.ac.kr

설에 비해 적게 발생하는 편이어서 영동지역의 집중호우에 관한 연구는 상대적으로 적은 편이다. 또한, 영동지역에서 발생하는 호우의 대부분은 태풍의 직·간접적인 영향 또는 발달한 저기압에 의한 것이기 때문에(Kwon et al., 2013), 영동지역의 집중호우 현상에 대한 연구는 주로 태풍 또는 발달한 저기압 사례를 대상으로 이루어져왔다. Jeong et al. (2002)은 2002년 태풍 ‘루사’의 영향으로 영동지역에 강한 집중호우가 내린 사례에 대한 종관 분석을 수행하여, 저온다습한 동풍 계열의 바람과 고온다습한 남동 계열의 바람이 지형효과에 의해 강제 상승되면서 강한 대류운이 생성되어 영동지역에 강한 집중호우가 내렸다고 하였다. 또한, Kim and Lee (2007)는 태풍 ‘루사’ 사례에 대한 WRF 수치모의를 수행하여 지형적으로 복잡한 영동지역의 강수량을 모의하는 능력을 분석한 결과, 대관령에서는 북동기류의 유입을 잘 모의하여 이에 따른 지형상승효과로 대관령의 강수량을 적절히 모의하였으나, 가장 많은 비가 내렸던 강릉지역에서는 모의된 풍향의 큰 오차로 수평대를 정확하게 모의하지 못하여 관측 값의 약 30% 정도로 강수량을 모의하였음을 밝혀내었다.

한편, Lee et al. (2010)은 2006년 10월 23일 영동지역에서 발생한 집중호우(강릉 일 강수량: 304 mm) 사례연구에서, 건조하고 안정한 성층권 공기가 대류권 계면 접힘으로 인해 대류권으로 유입되면서 야기된 양의 위치 소용돌이도 이상(anomaly)으로 하층의 경압성이 증대되었고, 이에 따라 저기압이 급격히 발달하여 영동지역에 집중호우가 발생하였다고 언급하였다. Kim et al. (2012)은 발달한 저기압의 통과에 따른 강릉지역의 집중호우 사례(2006년 10월 23일) 분석에서 MTSAT (Multi-Functional Transport Satellite)의 수증기영상과 적외영상의 특징을 분석하여 수증기영상에서 상층의 위치소용돌이도와 연관된 차고 건조한 공기의 이류가 압역의 이동과 발달로 나타남에 따라 수증기영상의 변화를 추적하면 중·상층 대기의 흐름을 파악할 수 있다고 하였다. 또한 적외영상에서 대류운에 비해 상대적으로 휘도가 높은 하층운의 분석을 통해 한기와 난기 이류를 분석할 수 있음을 보여주어 단시간에 발생하는 위험기상 시스템의 급격한 발달을 탐지하는데 위성자료의 활용이 중요하다고 하였다. Kwon et al. (2013)은 10년 동안(2001~2010년)에 나타난 강원지역의 호우 사례를 대상으로 3가지 호우 유형(영동호우, 영서호우, 영동·영서호우)으로 분류하여 호우 유형에 따른 기상요소의 특성을 각각 분석하여 호우 발달에 기여하는 주된 요소를 찾아내어 영동호우와 영서호우의 차이점을 언급하였고, 특히 영동 호우는 종관 및 중규모 시스템의 발달과 연관된 강한 동풍계열의 바람 및 산악에 의한 강한 지형치울

림이 중요한 요소라고 하였다. Choi and Lee (2016)는 2014년 7월 31일 고산지대인 대관령에서 발생한 집중호우 사례에 대한 종관 분석과 고해상도(1 km 분해능) WRF 수치모의의 결과 분석에서 동해안에서부터 시작하여 산 경사면을 타고 대관령 부근으로 유입된 동풍 기류와 영서지역으로부터 유입된 서풍 기류가 만나 대류세포가 발생하였고, 이 대류세포는 대관령 쪽으로 북상하는 또 다른 뇌우세포로부터 발산하는 남풍 계열의 유출류에 의해 더욱 발달하였으며, 또한 다른 대류세포와 병합 되면서 뇌우를 동반한 강한 대류운으로 발달하여 대관령에 시간당 58.5 mm의 많은 강수량이 내렸다고 하였다. 이와 같이 영동지역에서의 집중호우에 관한 연구는 다양하게 이루어져 왔으나, 특히 북태평양고기압 가장자리에서의 대류불안정과 관련된 영동 해안지역에서의 집중호우에 관한 연구는 거의 없는 편이다.

2018년 8월 6일 영동 해안지역에 200 mm 이상의 기록적인 집중호우가 발생하여 약 1억 7천만 원 이상의 재산 피해를 입었다(MOIS, 2019). 특히 강릉 관측소는 1시간(0251~0351 local standard time (LST)) 최대 강수량 93 mm를 기록하여 관측 이래 1시간 최대 강수량 2위 기록을 경신하였다(1위는 2002년 태풍 루사 100.5 mm). 이 연구에서는 2018년 8월 6일 강릉지역에 단시간에 국지적으로 발생한 집중호우 사례를 분석하였다. 이러한 집중호우를 예측한다는 것은 상대적으로 매우 어렵기 때문에 이 사례의 집중호우 발생 과정과 원인을 이해하는 것이 예보 정확도 향상에 도움이 된다고 생각된다. 따라서 이 연구에서는 강릉지역에 짧은 시간 동안에 집중호우가 내린 현상을 분석하여 집중호우의 발달 과정과 그 원인을 종관 및 중규모적인 관점에서 밝히고자 한다. 이 논문의 2장에서는 분석 자료에 대해 설명하고, 3장에서는 이 사례의 주요 특징에 대하여 언급하며, 4장에서는 분석 결과에 대하여 기술하고, 그리고 마지막 장에서는 요약 및 결론을 내리고자 한다.

2. 분석 자료

2018년 8월 6일 강릉에서 발생한 집중호우 사례의 발달 환경 및 특성을 분석하기 위해 기상청의 지상 및 상층 일기도(925, 500 hPa), ASOS (Automated Synoptic Observing System) 자료와 AWS (Automatic Weather System) 자료, 그리고 레이더 자료와 북강릉 지점의 라디오존데 자료를 이용하였다. ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 ERA-Interim 재분석 자료와 VDAPS (Very short-range Data Assimilation and Prediction System; Kim et al., 2017a) 분석 자료를 사용하였으며, 이

VDAPS는 2017년 6월부터 기상청에서 현업으로 운영 중인 시스템이다(Kim et al., 2017a; Jang et al., 2019).

참고로 수평해상도가 약 25 km 정도이고 시간 간격이 6시간 자료인 ERA-Interim 재분석장은 2018년 8월 5일 1500 LST부터 2018년 8월 6일 0300 LST까지 한반도 주변의 바람과 온도, 온도이류 그리고 불안정도 분석에 주로 이용되었다. 시간 간격이 1시간 자료이며, 수평해상도가 1.5 km 정도로 고분해능인 VDAPS 분석장은 주로 집중호우 시간대인 2018년 8월 6일 0100 LST부터 0400 LST까지 1시간 간격으로 영동지역을 보다 상세하게 바람, 상당온위, 발산, 그리고 상승류 등의 수평 및 연직적인 분석을 하기 위해 이용되었다.

3. 사례 특징

2018년 8월 6일의 일 누적강수량 분포도를 Fig. 1에 나타내었다. 강수량이 영동 해안지역에 집중적으로 분포되어 있으며, 하루 동안에 속초(38.3°N, 128.6°E)에서 강릉(37.8°N, 128.9°E)까지 약 200 mm 이상의 많은 강수량이 내린 것을 볼 수 있다.

강릉에 집중호우가 내리기 약 3일 전인 2018년 8월 3일 0900 LST에서 2018년 8월 5일 0900 LST(집중호우가 내리기 18시간 전)까지 24시간 간격의 지상 일기도(Fig. 2)를 보면, 영동지역은 북태평양 고기압 가장자리에 위치하여 아열대 기단의 영향을 지속적으로 받고 있음을 알 수 있다. 아열대 기단의 덥고 습한 정도를 정량적으로 파악하기 위해 2018년 7월 30일부터 강릉 지점의 상당온위, 온위, 혼합비(건조공기와 수증기의 질량비)의 시계열을 Fig. 3a에 나타내었으며, 집중호우가 발생한 2018년 8월 6일의 매 시간당 강수량을 막대그래프(Fig. 3b)로 제시하였다.

상당온위, 온위, 그리고 혼합비를 구하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다(Bolton, 1980; Stull, 1988).

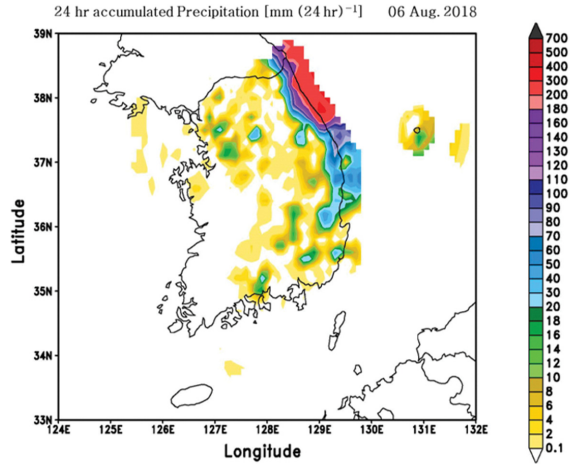


Fig. 1. Distribution of 24-hour accumulated precipitation on 6 August 2018.

$$\theta_e = \theta + \left[\frac{L_v \theta}{C_p T_L} \right] r \tag{1}$$

$$\theta = T \exp \left[\frac{P_0}{P} \right]^{C_p} \tag{2}$$

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T - 55} - \frac{\ln(RH/100)}{2840}} + 55 \tag{3}$$

$$r = \varepsilon + \left(\frac{e}{p - e} \right) \tag{4}$$

여기서 θ_e 는 상당온위(K), θ 는 온위(K), L_v 는 증발 잠열로 $2.501 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$, C_p 는 정압비열로 $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, T_L 은 LCL (Lifted condensation level)에서의 온도

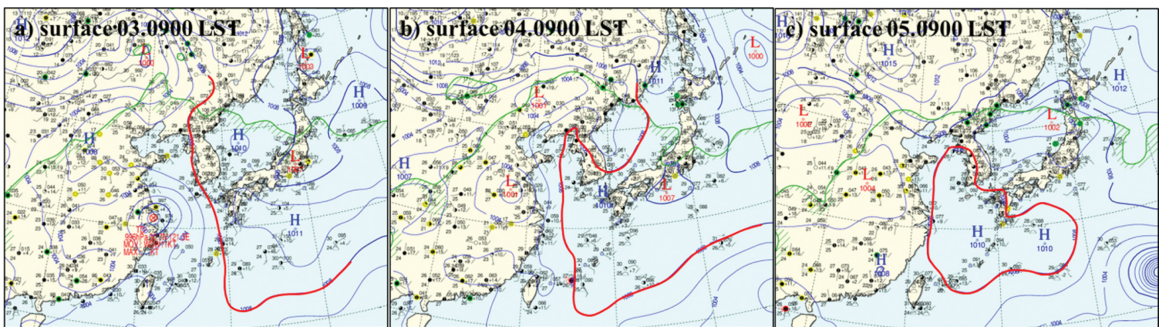


Fig. 2. Surface weather charts at (a) 0900 LST 3, (b) 0900 LST 4 and (c) 0900 LST 5 August 2018, respectively. Red line indicates 1008 hPa isobar.

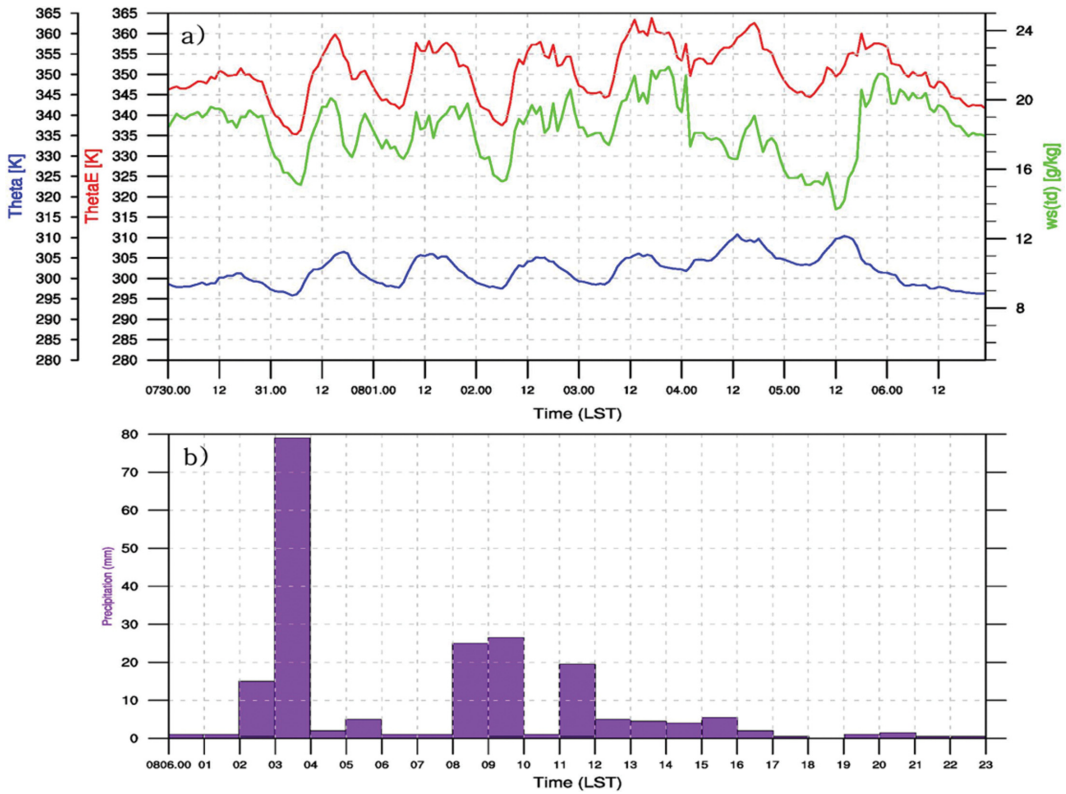


Fig. 3. Time series of (a) equivalent potential temperature (K; red), potential temperature (K; blue) and mixing ratio (g kg^{-1} ; green) from 30 July to 6 August 2018, and (b) bar graph of 1-hour accumulated precipitation (mm hr^{-1} ; bar; purple) on 6 August 2018 at Gangneung station.

(K), r 은 혼합비(kg kg^{-1}), T 는 온도(K), P_0 는 1000 hPa, P 는 기압(hPa), R_d 는 건조공기 기체상수로 $287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, RH 는 상대습도(%), e 는 수증기압(hPa), 그리고 ϵ 는 0.622이다.

Figure 3a에서 온도와 습도가 반영된 상당온위의 시계열을 보면, 2018년 7월 31일부터 8월 5일까지 일주기 변동을 보이면서 상당온위가 대단히 높아(최고 약 360 K 이상) 덥고 습한 상태를 알 수 있으며, 또한 건조공기와 수증기의 질량비를 나타내는 혼합비도 최대 약 22 g kg^{-1} 으로 아주 습윤한 상태이며, 8월 6일 최대 시간당 강수량을 기록하기 약 3시간 전에도 약 22 g kg^{-1} 으로 혼합비가 높았다. 이와 같이 강릉지역은 집중호우가 내리기 수일 전부터 북태평양 고기압 가장자리에 위치하여 덥고 습윤한 아열대 기단의 영향을 지속적으로 받아 8월 4일과 5일에는 강릉의 일 최고기온이 35°C 를 넘어 폭염경보 수준에 이르렀다. 이러한 덥고 습한 공기의 존재는 집중호우를 동반하는 뇌우가 발달하기 위한 필요 조건 중의 한 요소이다(Djuric, 1994).

Figure 3b의 매 정시의 시간당 강수량을 나타내는 막대그래프를 보면, 2018년 8월 6일 04:00 LST경(03:00~04:00 LST)에 79 mm hr^{-1} 의 시간당 강수량이 내렸으며, 6일 05:00 LST경(04:00~05:00 LST)에는 시간당 강수량이 2 mm로 강수량이 급감하여 거의 한 시간 동안에 집중호우가 내린 것을 알 수 있다.

4. 분석 결과

4.1 지상 및 상층 일기도 분석

지상 일기도(Figs. 4a, b)를 보면, 5일 15:00 LST (Fig. 4a)에 제주도 남쪽 해상에 북태평양 고기압으로부터 분리되어 나온 중심기압이 1009 hPa인 고기압이, 그리고 일본 나가노 부근(36°N , 138°E)에 중심기압이 1000 hPa인 저기압이 위치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 동해북부 해상에서는 등압선 배열이 북동에서 남서방향으로 배열되어 이곳에서는 지균폭적으로 북동계열의 기류가 유입되는 형태이다. 6일 03:00 LST (Fig. 4b)에는 중국 동북지방에 위치한 상대적으로 차가운

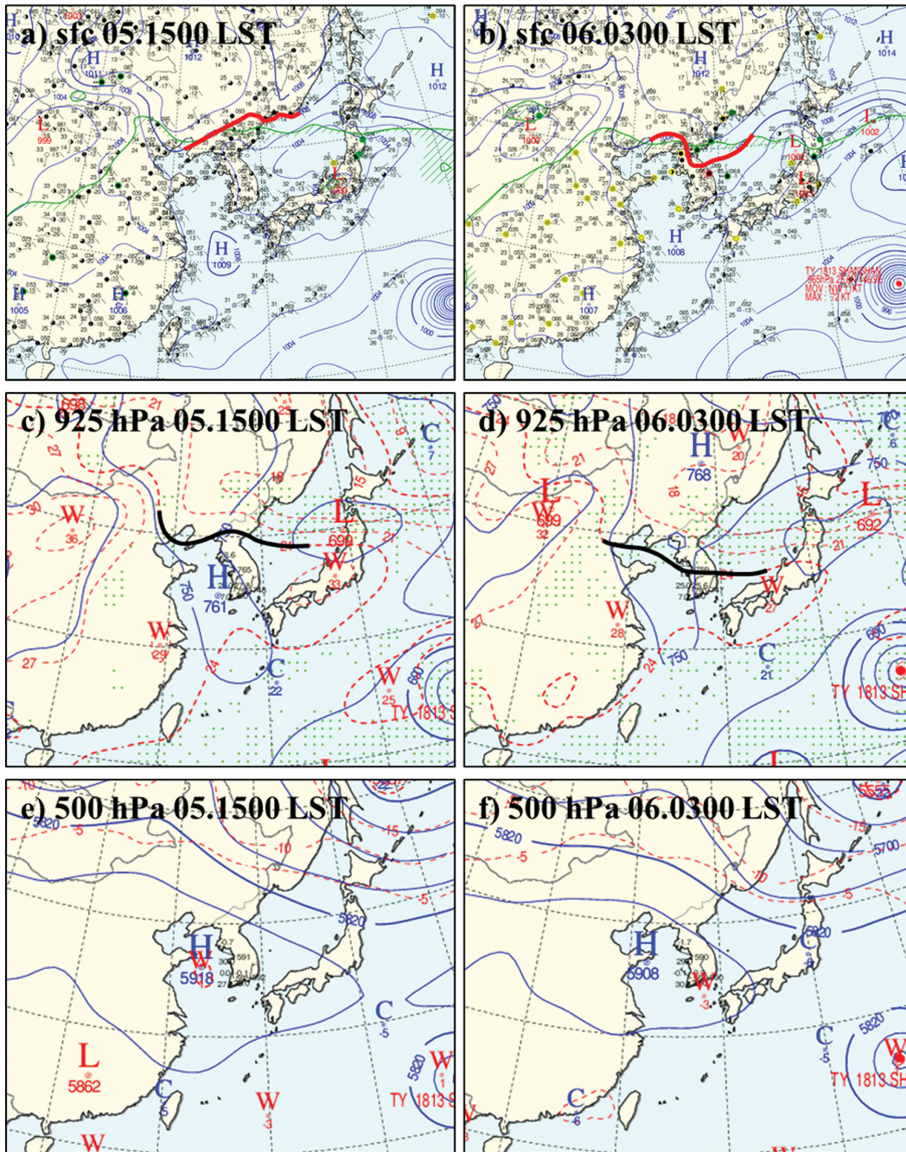


Fig. 4. Surface weather charts (top panels) at (a) 1500 LST 5 and (b) 0300 LST 6 August 2018 (Red line indicates 1008 hPa isobar), 925 hPa charts (middle panels) at (c) 1500 LST 5 and (d) 0300 LST 6 August 2018 (Black line indicates 24°C isotherm.), and 500 hPa charts (bottom panels) at (e) 1500 LST 5 and (f) 0300 LST 6 August 2018, respectively.

고기압에서 뺏어 나온 기압능(ridge)이 연해주와 동해 북부 해상을 거쳐 강릉 부근까지 남동쪽으로 확장하였다.

925 hPa 상층 일기도(Figs. 4c, d)를 보면, 5일 1500 LST (Fig. 4c)에 고기압 중심이 서해안에 위치하고 있고, 중국 화북지방에서 우리나라 쪽으로 온도능(thermal ridge)이 뺏으면서 한반도 대부분이 24°C 등온선 안에 놓여있어 더운 공기가 한반도에 머물고 있음을 알 수 있다. 6일 0300 LST (Fig. 4d)에는 중국 동북지방에

위치한 상대적으로 차가운 고기압의 영향으로 24°C 등온선이 온도골(thermal trough) 형태로 영동 남부지역으로 남하한 모습이다.

500 hPa 상층 일기도(Figs. 4e, f)를 보면, 5일 1500 LST (Fig. 4e)에 서해상에는 키가 큰 고기압 중심이 위치하고 있으며, 6일 0300 LST (Fig. 4f)에도 여전히 위치하고 있어 북태평양 고기압이 한반도에 지속적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한, 5일 1500

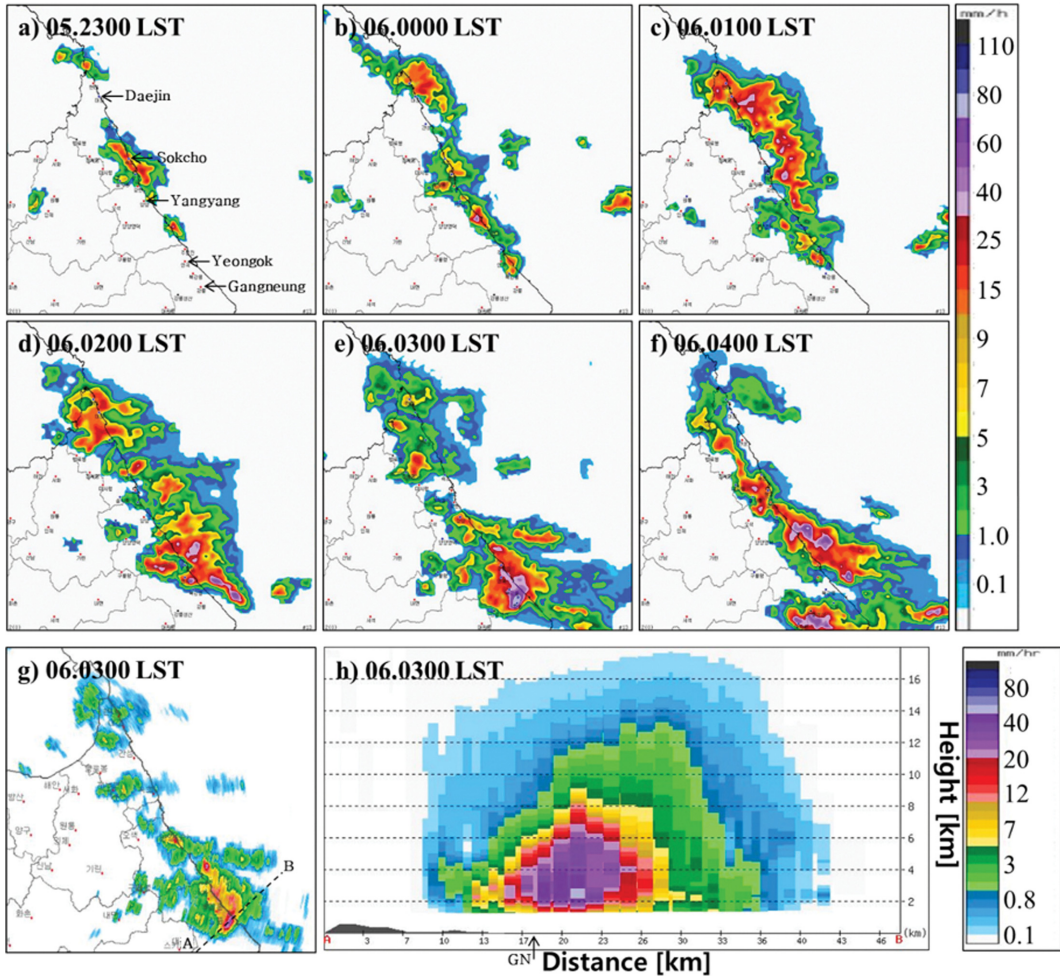


Fig. 5. (a, b, c, d, e and f) Hourly CAPPI radar composites at 1.5 km altitude from 2300 LST 5 to 0400 LST 6 August 2018, and (g) CAPPI radar image at Gwangdeoksan radar site and (h) vertical cross-section (along the A-B line in Fig. 5g) at 0300 LST 6 August 2018, respectively. Gray shade stands for terrain and black arrow indicates the location of Gangneung (GN).

LST와 6일 0300 LST의 300 hPa 상층 일기도(그림 생략)를 보면, 티베트 고원에서 뿜어 나온 상층의 티베트 고기압이 한반도를 지나 일본 열도까지 뿜어 있어 강릉의 호우와 상층 기압골과는 관계가 없음을 알 수 있다.

정리하면, 우리나라는 북태평양 고기압의 영향을 받는 가운데, 중국 동북지방의 상대적으로 차가운 고기압 세력이 연해주 지역을 지나 동해안으로 확장하였고, 이에 동반된 온도골(thermal trough)이 영동 남부 지역으로 확장하는 시간에 강릉지역에서 집중호우가 발생하였다.

4.2 레이더 영상 분석

2018년 8월 5일 2300 LST부터 2018년 8월 6일 0400

LST까지 1시간 간격으로 고도 1.5 km 합성 CAPPI (Constant altitude plan position indicator) 레이더 영상을, 그리고 강릉에 집중호우가 발생한 6일 0300 LST의 광덕산 관측소의 CAPPI 레이더 영상을, 그리고 최대 강수율을 보이는 에코(echo)를 가로지르는(A-B) 연직단면도를 각각 Fig. 5에 나타내었다. 참고로 6일 0300 LST의 강릉 관측소는 에코 중심에 위치하여 난반사와 산란 현상 등으로 에코가 제대로 나타나지 않아 강릉 사이트의 CAPPI 레이더 영상을 사용할 수 없었다. 따라서 발달한 에코의 연직구조를 보기 위해 광덕산 관측소의 레이더 자료를 사용하게 되었다.

5일 2300 LST (Fig. 5a)에 속초 부근의 해안선을 따라 최대 약 25 mm hr⁻¹ 정도의 강수율을 보이는 다소 강한 에코들이 형성되기 시작하였으며, 6일 0000 LST

(Fig. 5b)에는 이 강수 에코들이 영동 해안선을 따라 연곡 부근으로 남하하였으며, 0100 LST (Fig. 5c)에는 더욱 강화되어 대진 부근에서 양양 앞바다까지 띠 모양의 조직화된 대류계로 발달하였으며, 이 대류계 안에는 최대 약 40 mm hr^{-1} 정도의 강한 대류세포들이 위치해있다. 한편, 연곡 부근에 산재해 있던 에코들은 0200 LST (Fig. 5d)에 더욱 발달하여 조직화된 대류계로 되었으며, 이 대류계 안에는 최대 약 60 mm hr^{-1} 정도의 강한 대류세포가 강릉 앞바다 쪽으로 위치해 있다. 이 강한 대류세포들은 0300 LST (Fig. 5e)에 내륙 쪽으로 남서진하여 강릉 부근으로 이동하면서 최대로 강한 대류세포(약 80 mm hr^{-1})로 발달하였다. 0400 LST (Fig. 5f)에는 강릉에 위치하였던 강한 대류세포는 보다 남쪽으로 이동하였고, 강릉 부근에는 약한 에코들이 위치해 있다.

한편, 0300 LST의 고도 1.5 km CAPPI 광덕산 레이더 영상(Fig. 5g)을 보면, 강릉에 약 30 mm hr^{-1} 이상의 강수 에코가 위치하고 있다. 이 에코를 중심으로 연직 구조를 보기 위해 에코를 가로지르는(A-B) 연직 단면도를 Fig. 5h에 제시하였다. 이 연직단면도를 보면, 16 km 이상까지 대류운이 높게 형성되었고, 고도 2~3 km 사이에 최대 약 60 mm hr^{-1} 의 강수율을 보이는 강한 에코가 위치한 것을 볼 수 있다.

4.3 CAPE 분석

CAPE는 대류가용잠재에너지이다. 여기서 북강릉 지점(37.80°N, 128.86°E)의 고층 관측 자료를 이용하여 CAPE를 계산하기 위해 다음과 같은 식을 이용하였다 (Doswell and Rasmussen, 1994; Craven et al., 2002).

$$CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} \frac{T_{v, parcel} - T_{v, env}}{T_{v, env}} dz \quad (5)$$

여기서 g 는 중력 가속도로 9.8 m s^{-2} , z_{EL} 은 EL (Equilibrium level)의 고도(m), z_{LFC} 는 LFC (Level of free convection)의 고도(m), $T_{v, parcel}$ 는 공기덩이의 가온도(K), $T_{v, env}$ 는 주위 공기의 가온도(K)이다.

Figure 6은 북강릉 지점의 2018년 8월 5일 2100 LST의 단열선도이며, 이 시각은 강릉지역에 집중호우가 내리기 약 6시간 전이다. 지상에서 약 700 hPa까지 습수($T - T_d$)가 4°C 이하로 습윤한 상태임을 알 수 있다. 또한, 700 hPa 부근에 위치한 역전층에 의해 CAPE가 87 J kg^{-1} 으로 작으며, 이 역전층 위의 얇은 기층(그림에서 등근 원으로 표시)에서 약 9 J kg^{-1} 으로 아주 작은 값의 CINE (Convective inhibition energy)이 있다. 그리고 CINE이 위치한 대기층 위에서 EL까지 계산한 CAPE 크기는 1750 J kg^{-1} 으로, 대기 하층의 공기덩이들을 들어 올릴 수 있는 적절한 상승 운동이 있는 경우, 대류운이 강하게 발달할 수 있는 대

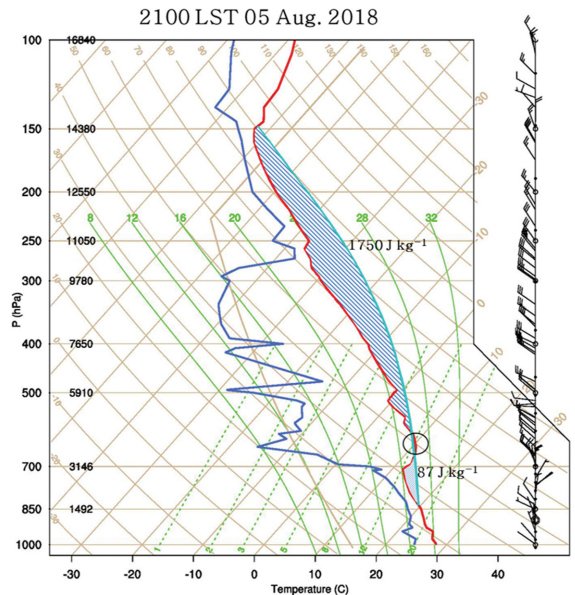


Fig. 6. Skew-T log-P diagram at Bukgangneung station at 2100 LST 5 August 2018. The hatched areas are proportional to the amount of CAPE, and black circle contains small CINE (9 J kg^{-1}) area.

기 상태이다. 참고로, 이 연구사례와 유사하게 북태평양 고기압 가장자리에서 수도권에서 집중호우가 발생한 2013년 8월 6일 사례의 경우, 서울 부근에 위치한 소하 관측소에서 시간당 62.5 mm의 최대값을 기록하였으며, 이 기록 시각으로부터 약 5시간 전, 오산에서의 CAPE 값은 1617 J kg^{-1} 정도였다(Yoon and Min, 2016). 따라서 강릉지역의 1750 J kg^{-1} 이상의 큰 CAPE 값은 호우가 내릴 수 있는 대기 조건이 갖추어졌음을 보여준다.

4.4 ERA-Interim 자료 분석

한반도 주변의 대기 상황을 분석하기 위해 ERA-Interim 자료를 사용하였다. Figure 7은 ERA-Interim 자료를 이용한 925 hPa 고도의 유선도, 온도 그리고 온도 이류 분포도이며, 유선 방향을 쉽게 알 수 있도록 검은색 화살표로 표시하였다. 강수 시작 전인 5일 1500 LST (Figs. 7a, d, and g)에 28°C 이상의 고온역의 중심이 영서지역(Fig. 7d, 파란색 타원)에 위치하면서 북서 기류가 영동 해안으로 불고 있어 상대적으로 더운 공기가 풍하측인 영동 해안으로 유입되었다. 이에 대응하여 온도 이류 분포도에서도 영동 해안을 따라 최대 약 $0.06 \times 10^{-3} \text{ K s}^{-1}$ 의 난기 이류(warm air advection)역이 생성되었다. 5일 2100 LST (Figs. 7b, e, and h)에는 태백산맥 부근(Fig. 7e, 파란색 선)을 기

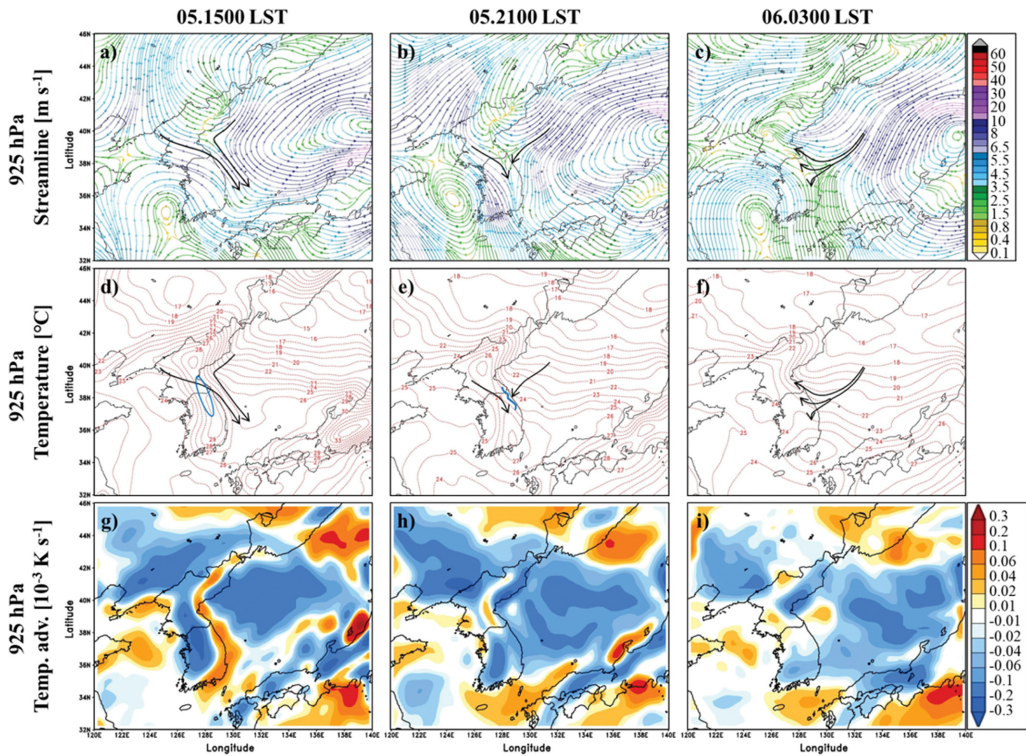


Fig. 7. Distributions of 925 hPa (a, b, and c) streamline, (d, e, and f) temperature, and (g, h, and i) temperature advection at 1500 LST 5 (left panels), 2100 LST 5 (center panels), and 0300 LST 6 (right panels) August 2018, respectively. See text for details.

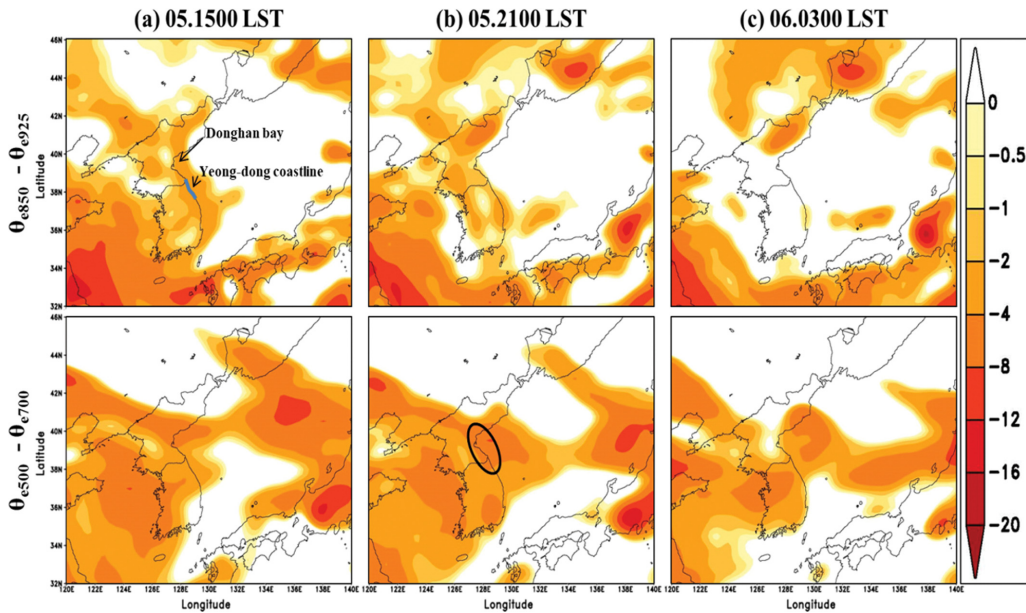


Fig. 8. Distributions of vertical stability of the layers between 850 hPa and 925 hPa (top panels), and 500 hPa and 700 hPa (bottom panels) at (a) 1500 LST 5, (b) 2100 LST 5, and (c) 0300 LST 6 August 2018, respectively. The oval in black in Fig. 8b (bottom panel) indicates the area from the north of Gangneung district to Donghan bay.

준으로 영서지역에서는 북서풍이 불고 있다. 한편, 북동풍이 속초 이남의 영동 해안을 따라 불면서 동해상의 찬 공기가 영동 해안으로 유입되어 영동 해안을 따라 최대 약 $-0.04 \times 10^{-3} \text{K s}^{-1}$ 의 한기 이류(cold air advection)역이 생성되었다. 강릉지역에서 호우가 발생한 시간인 6일 0300 LST (Figs. 7c, f, and i)에는 동풍 계열의 기류가 영동남부 해안까지 남하하였으나, 영동지역에서는 기류의 방향과 등온선의 교각이 작아져 온도 이류의 강도는 약한 모습이다.

대기 하층과 대기 중층의 대류불안정도를 알아보기 위해 850 hPa 고도에서의 상당온위 값에서 925 hPa 고도에서의 상당온위 값을 뺀 값의 분포도(Fig. 8 top panels)와 500 hPa 고도에서의 상당온위 값에서 700 hPa 고도에서의 상당온위 값을 뺀 값의 분포도(Fig. 8 bottom panels)를 각각 제시하였다. 여기서 음의 값은 대류불안정을 나타내며, 붉은색이 짙을수록 더 강한 불안정을 나타낸다. 해당 시각은 5일 1500 LST (Fig. 8a), 5일 2100 LST (Fig. 8b) 그리고 6일 0300 LST (Fig. 8c)이다. 5일 1500 LST (Fig. 8a)에 동한만과 영동 해안선을 따라 대기 하층과 대기 중층의 모든 층이 대류불안정한 상태($\frac{\partial \theta_e}{\partial z} < 0$)를 보인다. 5일 2100

LST에도 대기 하층(Fig. 8b top panel)의 경우, 영동지역과 그 앞바다는 불안정하며, 또한 대기 중층(Fig. 8b bottom panel)에서도 강릉 이북에서 동한만 부근으로 강한 대류불안정역이 위치하고 있다. 따라서 영동지역은 호우가 발생할 수 있는 잠재적인 대기 조건이 갖추어 졌음을 알 수 있다. 6일 0300 LST에는 호우에 따른 대류불안정의 해소로 인해 영동지역에서는 대기

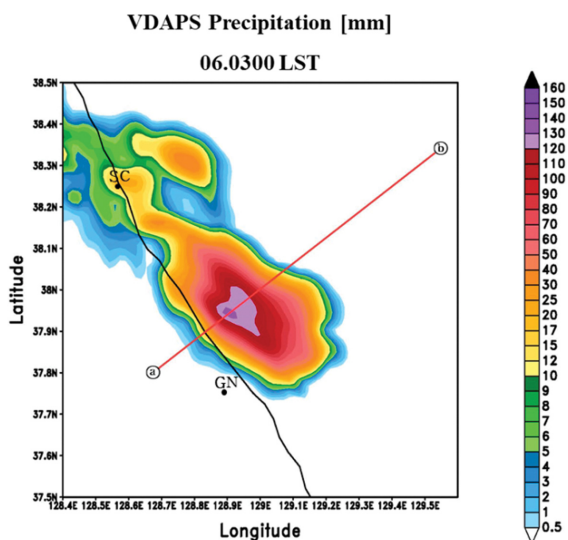


Fig. 9. Distribution of VDAPS 1-hour accumulated precipitation (mm) at 0300 LST 6 August 2018. The a-b line represents the path of the vertical cross-section used in Figs. 12, 13 and 14. Black dots stand for Sokcho (SC) and Gangneung (GN) station, respectively. Hereafter, SC and GN stand for Sokcho and Gangneung, respectively.

하층의 대류불안정도가 감소한 모습(Fig. 8c top panel)이나, 대기 중층에서는 여전히 대류불안정한 상태를 보여준다(Fig. 8c bottom panel).

4.5 VDAPS 자료 분석

영동지역에서의 대류계 발달과정을 상세하게 분석하기 위해 분해능이 1.5 km인 VDAPS 분석 자료를

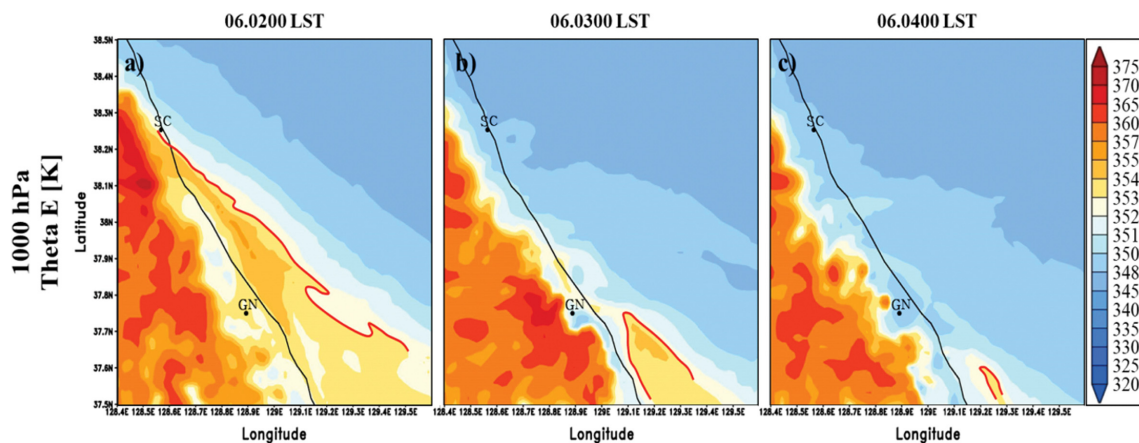


Fig. 10. Distributions of 1000 hPa Equivalent potential temperature at (a) 0200 LST, (b) 0300 LST, and (c) 0400 LST 6 August 2018, respectively.

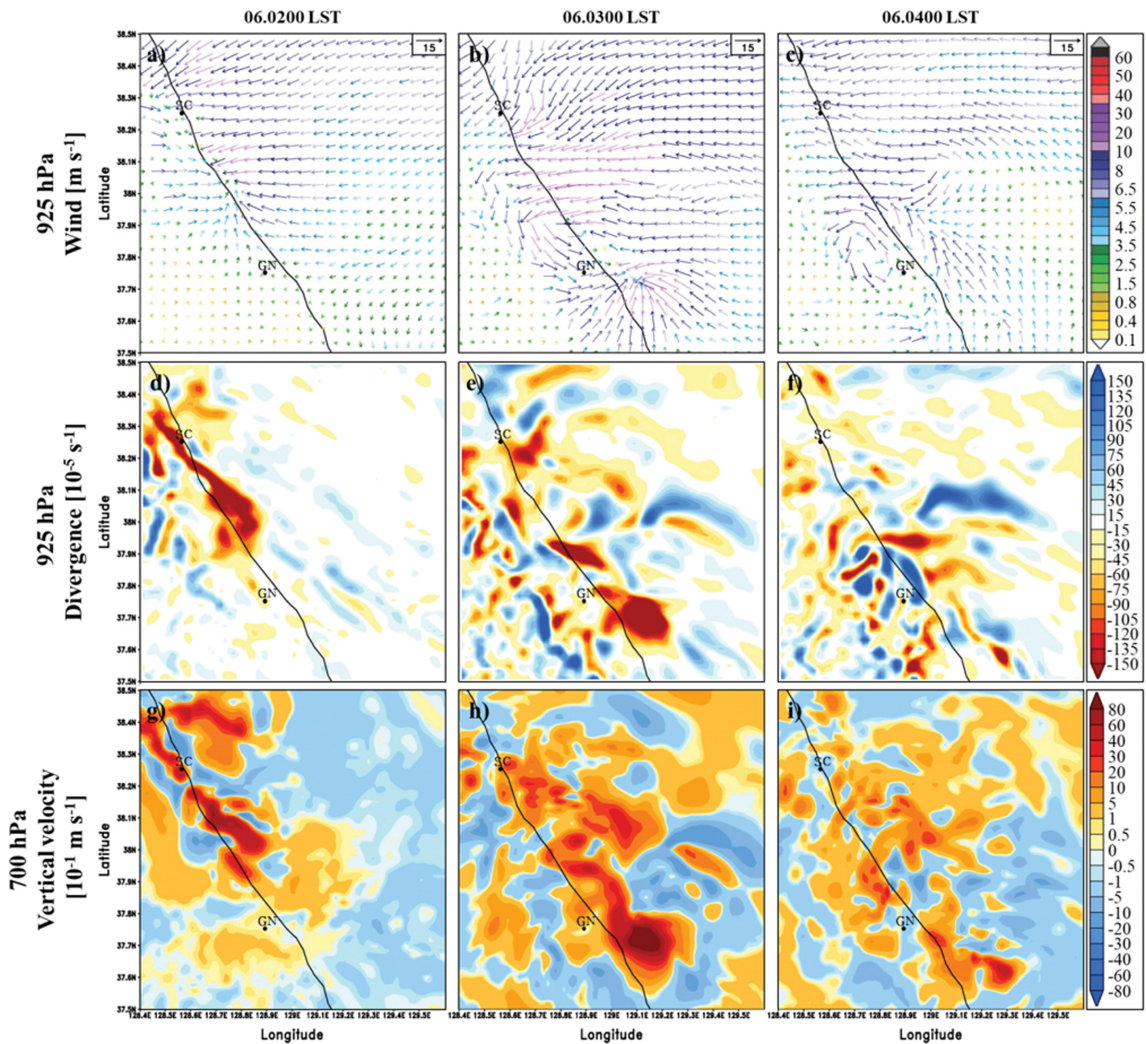


Fig. 11. Distributions of (a, b, and c) 925 hPa wind, (d, e, and f) 925 hPa divergence, and (g, h, and i) 700 hPa vertical velocity at 0200 LST (left panels), 0300 LST (center panels), and 0400 LST (right panels) 6 August 2018, respectively.

사용하였다. Figure 9는 강릉에서 집중호우가 발생한 6일 0300 LST의 VDAPS의 시간당 강수량 분포도이다. 이 분포도를 보면, 강릉에서 북쪽으로 약 20 km 떨어진 앞바다에 시간당 최대 강수량(약 130 mm hr⁻¹)이 위치하고 있다.

Figure 10은 강릉지역을 중심으로 1000 hPa 고도에서의 상당온위의 수평 분포를 상세하게 보여준다. 이 그림에서 시간에 따른 상당온위의 변화를 쉽게 보기 위해 상당온위가 353 K에 해당하는 등상온위선을 붉은 선으로 부분적으로 표시하였다. 0200 LST (Fig. 10a)에 속초 부근부터 영동중부 앞바다까지 353 K 이상의 높은 상당온위역이 위치하고 있으며, 353 K 등상온위선의 북동쪽으로는 상대적으로 낮은 상당온

위역이 위치하고 있다. 0300 LST (Fig. 10b)에는 353 K 이상의 높은 상당온위역이 강릉 앞바다까지 남동쪽으로 밀려났다. 0400 LST (Fig. 10c)에도 353 K 이상의 높은 상당온위역은 계속 줄어들어 채로 강릉에서 남동쪽으로 약 30 km 떨어진 앞바다 쪽으로 밀려나 북동쪽에 위치한 찬 공기가 계속해서 영동남부 해안까지 유입된 것을 알 수 있다.

Figure 11은 6일 0200 LST부터 0400 LST까지의 925 hPa 고도에서의 바람장, 발산장 그리고 700 hPa 연직 속도장을 보여준다. 6일 0200 LST의 925 hPa 바람장 (Fig. 11a)을 보면, 강릉에서 북서쪽으로 약 30 km 거리에 위치한 지점(38.1°N, 128.7°E)을 기준으로 앞바다에서는 10 m s⁻¹ 이상의 상대적으로 차가운 북동~

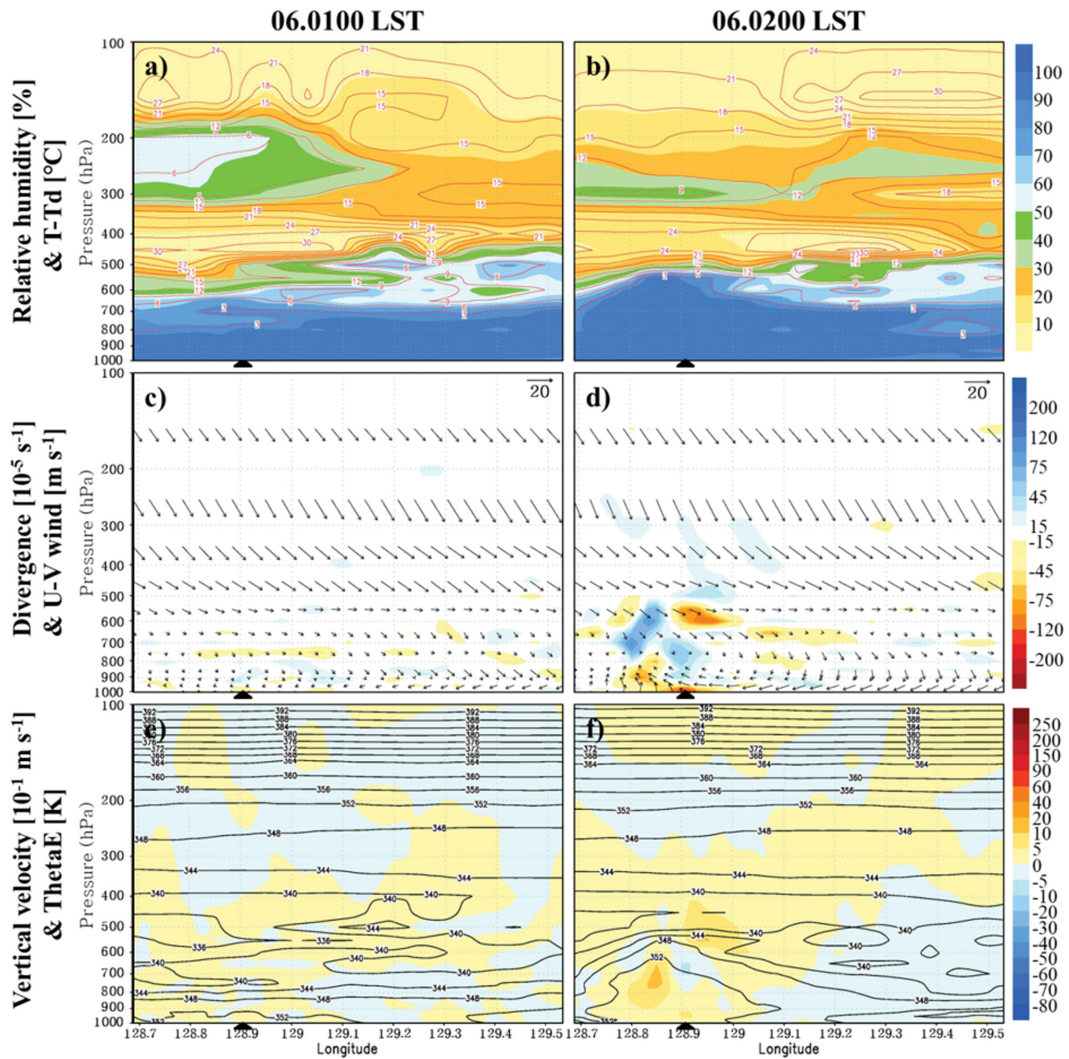


Fig. 12. Vertical cross-sections (along the (a)-(b) line in Fig. 9) of (a and b) relative humidity (shaded) and $T - T_d$ (contours), (c and d) divergence (shaded) and U-V wind (vector), and (e and f) vertical velocity (shaded) and equivalent potential temperature (contours) at 0100 LST (left panels), and 0200 LST (right panels) 6 August 2018, respectively. See text for details.

동풍 계열의 바람이 그리고, 그 반대편 서쪽 내륙지역에서는 5 m s^{-1} 이하의 남서~북서풍 계열의 바람이 불어 925 hPa 고도에서 최대 약 $-370 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 수렴역(Fig. 11d)이 형성되었고, 이에 대응하여 그 상층인 700 hPa 고도에 최대 약 8.2 m s^{-1} 의 강한 상승류(Fig. 11g)가 위치하며, 강릉 부근에서는 약 1.5 m s^{-1} 의 상승류가 있음을 볼 수 있다.

호우 발생 시간인 0300 LST의 925 hPa 바람장(Fig. 11b)에서 강릉 지점의 북서쪽에서는 약 10 m s^{-1} 의 강한 북서풍이, 그리고 남쪽에서는 5 m s^{-1} 내외의 서~남서풍이, 그리고 강릉 앞바다에서는 $5\sim 10 \text{ m s}^{-1}$ 의 남

동~동풍이 불고 있어 강릉 인근 주위로 저기압성 순환이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이에 따라 925 hPa 고도에서 최대 $-206 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 수렴역(Fig. 11e)이 형성되었고, 이에 대응하여 700 hPa 고도에서 최대 4.4 m s^{-1} 의 강한 상승류(Fig. 11h)가 나타났다. 이러한 강한 상승 운동(Figs. 11g, h)으로 인해 강릉 부근의 덥고 습윤한 그리고 대류불안정한 공기층(Fig. 8 참조)이 들어 올려졌음을 알 수 있다.

강수가 약해진 6일 0400 LST의 925 hPa 바람장(Fig. 11c)에서는 강릉 주변과 앞바다의 풍속이 다소 약해졌으며, 발산장(Fig. 11f)의 경우, 강릉 주위에서는 부

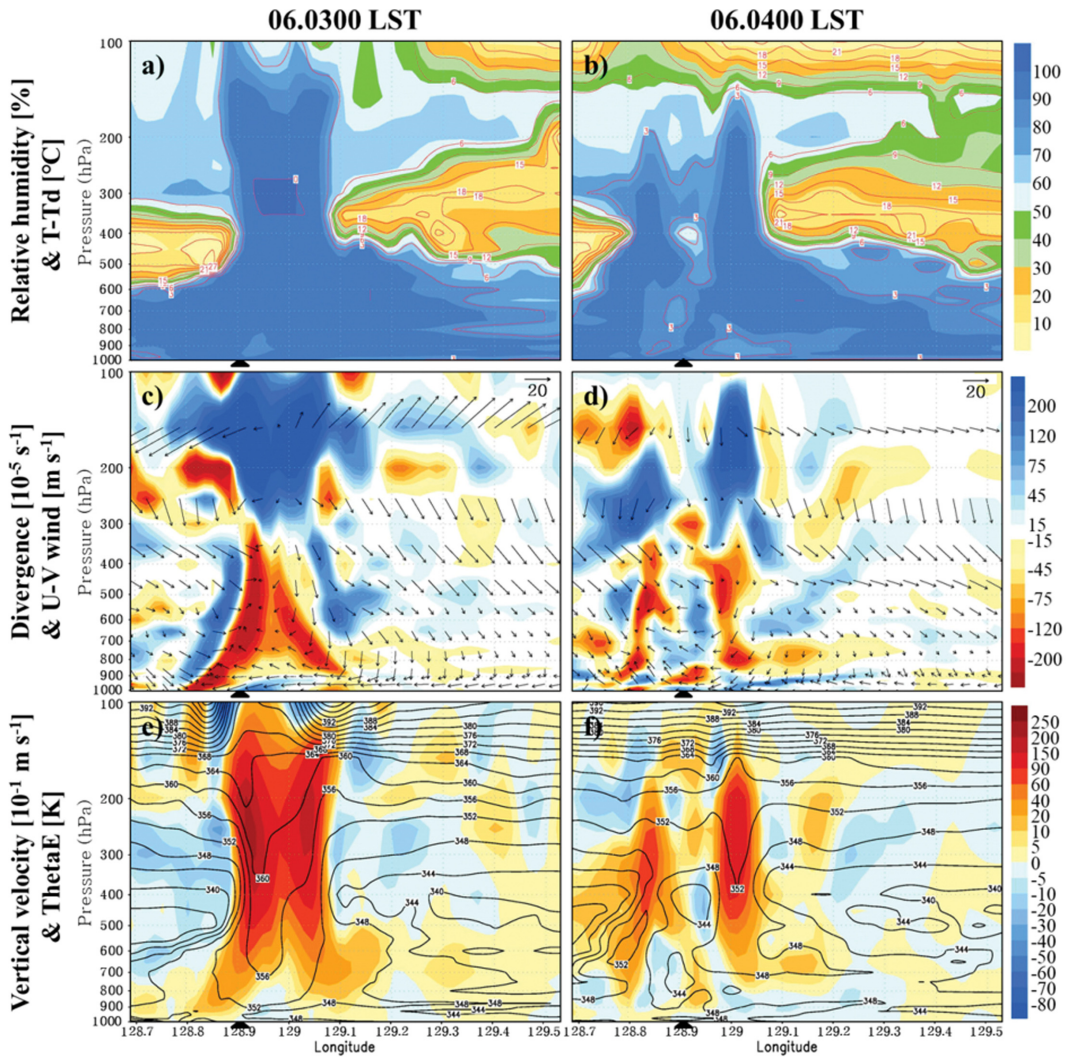


Fig. 13. The Same as Fig. 12 except for 0300 LST (left panels), and 0400 LST (right panels) 6 August 2018, respectively.

분적으로 발산역이 있음을 알 수 있다. 700 hPa 연직 속도장(Fig. 11i)을 보면, 강릉 주위로 부분적으로 하강역이 위치하고 있어 상승 운동도 약화된 모습을 알 수 있다.

Figure 12는 6일 0100과 0200 LST, 그리고 Fig. 13은 6일 0300과 0400 LST의 상대습도와 습수, 발산과 U(동서 성분)-V(남북 성분)바람 그리고 연직속도와 상당온위의 연직단면도를 각각 보여준다. 연직단면도가 지나가는 경로는 최대 강수역을 남서쪽에서 북동쪽으로 가로지르는 ㉓-㉕ 선이다(Fig. 9 참조). 또한, 그림에서 검은색 작은 삼각형이 위치한 지점(이하 삼각형 지점)은 6일 0300 LST에 최대 시간당 강수량을 보인 지점(Fig. 9 참조)을 나타낸다.

0100 LST의 상대습도와 습수의 연직단면도(Fig. 12a)를 보면, 연직단면도의 모든 경로를 따라 지상에서부터 약 700 hPa 고도까지 상대습도가 90% 이상이고, 습수가 3°C 이하로 매우 습윤한 상태를 알 수 있다. 한편, 상대습도가 20% 이하인 건조층은 약 500 hPa에서 400 hPa 사이에 위치해 있다. 발산 및 U-V 바람의 연직단면도(Fig. 12c)를 보면, 대기 하층(약 950 hPa 기준)에서는 삼각형 지점에서 북동쪽(그림에서는 오른쪽)으로 약 0.1° 떨어진 129°E인 곳에서는 약 1~2 m s⁻¹의 동풍 계열의 바람이, 그리고 보다 더 멀리 약 0.4° 떨어진 129.3°E인 곳에서는 약 10 m s⁻¹ 내외의 동풍 계열의 바람이 불고 있다. 그리고 삼각형 지점의 바로 남서쪽(그림에서는 왼쪽)에서는 약한 동풍 계

열의 바람이 불고 있어 대기 하층에서는 뚜렷하고 조직화된 수렴과 발산역이 형성되어 있지 않다. 상승류와 상당온위의 연직단면도에서도 대기 하층에 뚜렷한 연직류가 형성되어 있지 않다(Fig. 12e). 그리고 삼각형 지점 부근의 대기 하층에서 약 730 hPa까지 상층으로 갈수록 상당온위가 낮아져 대기 하층에서 약 730 hPa 사이의 공기층이 대류불안정함을 알 수 있다.

0200 LST의 상대습도와 습수의 연직단면도(Fig. 12b)를 보면, 삼각형 지점 부근에서, 지상에서부터 약 550 hPa 고도까지 상대습도가 90% 이상이고, 습수가 3°C 이하로 매우 습윤한 상태이며, 0100 LST에 비해 습윤층의 두께가 약 150 hPa 정도 더 두꺼워졌음을 알 수 있다. 발산 및 U-V 바람의 연직단면도(Fig. 12d)에서 대기 하층에서는 삼각형 지점의 북동쪽에서는 약 10 m s⁻¹ 내외의 강한 동풍 계열의 바람이 그리고 남서쪽에서는 약 6 m s⁻¹ 내외의 남풍 계열의 바람이 만나 삼각형 지점 인근에 수렴역(최대 $-185.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)이 형성되었음을 볼 수 있다. 상승류와 상당온위의 연직단면도(Fig. 12f)를 보면, 삼각형 지점에서 남서쪽으로 약 0.05° 떨어진 곳의 상층 700 hPa 고도 부근에 1~2 m s⁻¹의 상승류의 중심이 위치하고, 이 상승류 중심 주변으로 약 1 m s⁻¹ 이하의 하강역이 위치함을 알 수 있다. 삼각형 지점 상공 750 hPa 고도 부근에서 약 450 hPa 고도까지 상층으로 갈수록 상당온위가 낮아져 대류불안정함을 알 수 있다.

0300 LST의 상대습도와 습수의 연직단면도(Fig. 13a)를 보면, 삼각형 지점과 이 지점에서 북동쪽으로 약 0.17° 떨어진 지점 사이의 모든 상공에서는 90% 이상의 상대습도를 보이는 습한 영역이 약 150 hPa 고도까지 아주 높게 나타나 대류운이 깊고 강하게 발달하여 운정 고도가 아주 높음을 알 수 있다. 발산 및 U-V 바람의 연직단면도(Fig. 13c)를 보면, 삼각형 지점에서 남서쪽으로 0.08° 떨어진 지점을 기준으로 북동쪽에서는 약 10 m s⁻¹의 강한 동풍이, 그리고 남서쪽에서는 약 10 m s⁻¹의 강한 북서풍이 만나 그 영역에서 강한 수렴역(최대 $-358.37 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)이 나타나고, 이 수렴역은 삼각형 지점 상공 약 300 hPa 고도까지 높게 형성되었다. 상승류와 상당온위의 연직단면도(Fig. 13e)를 보면, 앞에서 언급한 수렴역에 대응하여 삼각형 지점에서부터 100 hPa 고도 부근까지 상승류가 나타나며, 가장 강한 상승역(약 21 m s⁻¹)은 250 hPa 부근에 위치함을 알 수 있다. 한편, 이 강한 상승역 주위로 약 700 hPa에서 300 hPa 고도에 걸쳐 광범위한 하강역(최대 약 -4 m s^{-1})이 위치하고 있다. 그리고 삼각형 지점에서부터 최대 약 150 hPa 고도 부

근까지 연직으로 상당온위가 일정($\frac{\partial \theta_e}{\partial z} = 0$)하여 습윤 단열적으로 중립적인 대기 상태로 변환 것을 알 수 있다.

0400 LST의 상대습도와 습수의 연직단면도(Fig. 13b)를 보면, 삼각형 지점 부근으로 90% 이상의 상대습도를 보이는 영역이 크게 두 군데로 분리되었으며, 90% 이상의 상대습도를 보이는 최대 고도도 0300 LST에 비해 다소 낮아졌음을 알 수 있다. 발산 및 U-V 바람의 연직단면도(Fig. 13d)에서 삼각형 지점 부근 상공에서는 수렴역이 약 800 hPa 고도까지 낮게 위치하고, 이 고도 위로 약 400 hPa 고도까지 발산역이 존재하며, 이 발산역 주위로 수렴역이 존재한다. 이러한 모습은 0300 LST에 비해 수렴의 강도가 크게 약해졌음을 보여준다. 그리고 연직단면도의 모든 경로를 따라 지면에서 약 900 hPa 사이의 기층에서는 0300 LST에 존재하였던 서풍 계열의 바람은 모두 사라지고 동풍 계열의 바람이 지배적이다. 상승류와 상당온위의 연직단면도(Fig. 13f)를 보면, 수렴역에 대응하여 거의 유사한 위치에 상승역이 위치하나, 0300 LST에 비해 상승 속도는 다소 줄어들었음을 알 수 있다. 또한, 삼각형 지점에서 북동쪽으로 약 0.1° 떨어진 지점의 상공의 경우, 대략 800 hPa 부근에서 200 hPa 부근까지 연직으로 상당온위가 일정($\frac{\partial \theta_e}{\partial z} = 0$)한 모습을 보여 습윤 단열적으로 중립적인 기층의 두께가 0300 LST에 비해 다소 얇아졌음을 알 수 있다.

4.5절의 주요 내용을 정리하면, 호우가 시작되기 전인 6일 0200 LST에 강릉 부근에서는 대류불안정한 상태에서 10 m s⁻¹ 이상의 상대적으로 차가운 북동~동풍 계열의 바람과 5 m s⁻¹ 이하의 따뜻한 남서~북서풍 계열의 바람이 만나 수렴이 발생하였으며, 이에 따라 강한 상승 운동이 나타나기 시작하였고, 집중호우가 발생한 6일 0300 LST의 경우, 이전 시간에 형성되었던 대기불안정층이 강한 상승 운동으로 들어올려지면서 불안정이 해소되는 과정에서 대류운들이 강하게 발달하여 호우가 내렸다.

5. 요약 및 결론

2018년 8월 6일 영동 해안지역에 일 강수량 200 mm 이상의 많은 강수가 내렸다. 특히 강릉지역의 경우, 최대 시간당 강수량이 93 mm로 해당 지역 관측 사상 2위를 기록하였다. 특히 강수가 시작되기 전인 8월 2일부터 5일까지 발달한 아열대 고기압의 지속적인 영향으로 고온 다습한 공기가 영동 해안지역에 계속 머물러 지상의 상당온위가 약 350 K 이상을 유지하면서

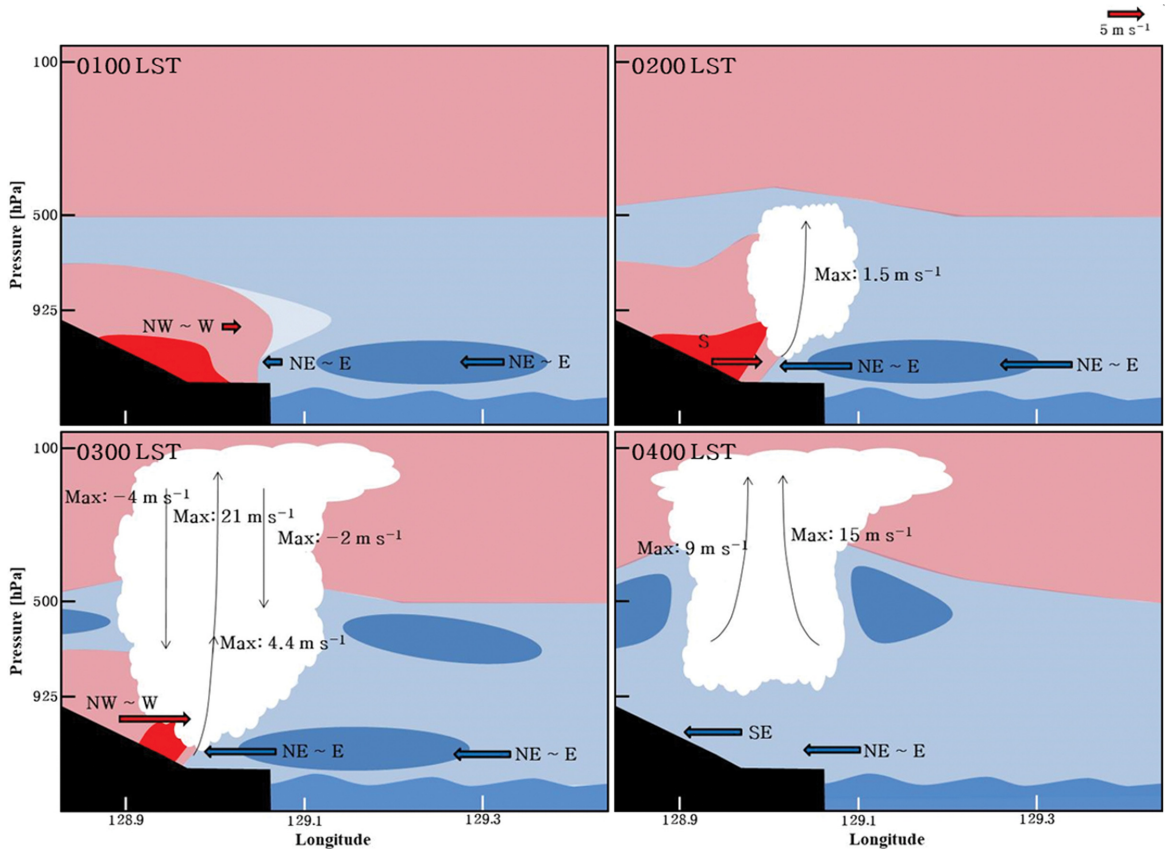


Fig. 14. The vertical schematic diagrams for the evolution of the heavy rainfall over the Gangneung area on 6 August 2018. X-axis stands for the path of cross-section in Fig. 9. Y-axis indicates height in hPa, and height interval of the low-level is exaggerated to represent the condition of the low-level conspicuously. Black shade stands for terrain, and red shade and blue shade indicate relatively warm and humid air and cool air, respectively. The thin black arrow in the convection represents the movement of the air flow. Red bold arrow and blue bold arrow indicate the movements of the warm and the cool air flow, respectively, and its length represents the speed of the air flow. Refer to the scale on the upper right of the figure.

대류불안정한 상태가 형성되었으며, 최대 시간당 강수량을 보인 시점에서 약 6시간 전인 5일 2100 LST에 북강릉 상공에서는 약 1837 J kg^{-1} 의 큰 CAPE가 위치하고 있었다. 이렇게 고온 다습하고 대류불안정한 공기가 머물고 있는 영동 해안으로 8월 6일 0100 LST경에 찬 공기를 동반한 기압능이 연해주에서 동해 북부 해상을 거쳐 영동 해안으로 확장하면서 동해상의 찬 공기가 북동 기류를 따라 강하게 유입되면서, 영동 해안에서 성질이 다른 두 공기덩이들의 충돌이 일어났다. VDAPS 분석장의 강릉지역에서는 집중호우가 발생한 8월 6일 0300 LST경에 925 hPa 고도에서 최대 $-206 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 수렴이 발생하였고, 이에 대응하여 700 hPa 고도에서 최대 4.4 m s^{-1} 의 강한 상승 운동이 일어났다. 이러한 상승 운동으로 인

해 습하고 더운 대류불안정한 기층이 빠르게 들어올려지면서 불안정이 해소되는 과정에서 대류운들이 강하게 발달하여 강릉에서 최대 시간당 강수량(93 mm hr^{-1})이 내린 것으로 분석되었다. 따라서 이러한 대류운들의 발달 과정을 볼 때, 영동 해안에서 성질이 다른 두 공기덩이들의 충돌에 따른 강한 수렴이 집중호우의 방아쇠 역할을 한 것으로 여겨진다. 최종적으로, 분석을 종합하여 주요 시간별로 개략적인 모식도(Fig. 14)를 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2018R1D1A1B07042652)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bolton, D., 1980: The computation of equivalent potential temperature. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1046-1053.
- Choi, S.-B., and J. G. Lee, 2016: A numerical simulation study of a heavy rainfall event over Daegwallyeong on 31 July 2014. *Atmosphere*, **26**, 159-183, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.159 (in Korean with English abstract).
- Craven, J. P., R. E. Jewell, and H. E. Brooks, 2002: Comparison between observed convective cloud-base heights and lifting condensation level for two different lifted parcels. *Wea. Forecasting*, **17**, 885-890.
- Djuric, D., 1994: *Weather analysis*. Prentice Hall, 304 pp.
- Doswell, C. A. III, and E. N. Rasmussen, 1994: The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations. *Wea. Forecasting*, **9**, 625-629.
- Jang, J., Y. H. Lee, K. Lee, M. Kim, S.-B. Oh, and S.-R. Park, 2019: The improvement of predictability for very short range precipitation by blending of VDAPS and MAPLE using Micro-Genetic algorithm. *J. Korean Inst. Intell. Syst.*, **29**, 258-267, doi:10.5391/JKIS.2019.29.4.258 (in Korean with English abstract).
- Jeong, B.-S., G.-H. Park, S.-A. Yoo, and J.-S. Chung, 2002: Analysis of heavy rainfall in Yeongdong area by 15th typhoon 'Rusa' on 2002. *Atmosphere*, **12**, 414-417 (in Korean).
- Kim, I.-H., T.-Y. Kwon, and D.-R. Kim, 2012: MTSAT satellite image features on the sever storm events in Yeongdong region. *Atmosphere*, **22**, 29-45 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-W., and J. G. Lee, 2007: A qualitative analysis of WRF simulation results of typhoon 'Rusa' case. *Atmosphere*, **17**, 393-405 (in Korean with English abstract).
- Kim, M., W. Choi, K. Lee, and Y. H. Lee, 2017a: Improvement of unified model based very short-range data assimilation and prediction system. *Proc. 2017 Autumn Meeting of KMS*, Korean Meteorological Society, 262-263 (in Korean).
- Kim, Y. J., M. Hong, and J. G. Lee, 2017b: A polar low observed over the Korea Strait on 11 February 2011: High-resolution Numerical Simulations. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **17**, 55-67, doi:10.9798/KOSHAM.2017.17.3.55 (in Korean with English abstract).
- Kwon, T.-Y., J.-S. Kim, and B.-G. Kim, 2013: Comparison of the properties of Yeongdong and Yeongseo heavy rain. *Atmosphere*, **23**, 245-264, doi:10.14191/Atmos.2013.23.3.245 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-Y., H.-Y. Ko, K.-E. Kim, and I.-H. Yoon, 2010: An analysis of characteristics of heavy rainfall events over Yeongdong region associated with tropopause folding. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **31**, 354-369, doi:10.5467/JKESS.2010.31.4.354 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. G., 2001: A numerical simulation of a heavy snowfall event occurred along the Yeongdong coastal area. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **37**, 1-12 (in Korean with English abstract).
- _____, and J. S. Lee, 2003: A numerical study of Yeongdong heavy snowfall events associated with easterly. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 475-490 (in Korean with English abstract).
- _____, 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**, 339-354 (in Korean with English abstract).
- _____, and _____, 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).
- 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 (in Korean with English abstract).
- MOIS, 2019: *2018 Statistical yearbook of natural disaster*. Ministry of the Interior and Safety, 392 pp (in Korean).
- Park, J.-H., K.-E. Kim, and B.-H. Heo, 2009: Comparison of development mechanisms of two heavy snowfall events occurred in Yeongnam and Yeongdong regions of the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **19**, 9-36 (in Korean with English abstract).
- 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, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.127 (in Korean with English abstract).
- Stull, R. B., 1988: *An introduction to boundary layer meteorology*. Springer Netherlands, 670 pp.
- Yoon, J.-H., and K.-H. Min, 2016: Characteristic analysis of multicell convective system that occurred on 6 August 2013 over the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **26**, 321-336, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.321 (in Korean with English abstract).