

KLAPS 재분석 자료를 활용한 집중호우의 3차원 분석

장민¹⁾ · 유철환^{2)*} · 지준범¹⁾ · 박성화¹⁾ · 김상일¹⁾ · 최영진¹⁾

¹⁾한국의국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단, ²⁾부경대학교 대기환경연구소

(접수일: 2015년 12월 10일, 수정일: 2016년 2월 18일, 게재확정일: 2016년 2월 18일)

Three-dimensional Analysis of Heavy Rainfall Using KLAPS Re-analysis Data

Min Jang¹⁾, Cheol-Hwan You^{2)*}, Joon-Bum Jee¹⁾, Sung-Hwa Park¹⁾,
Sang-il Kim¹⁾, and Young-Jean Choi¹⁾

¹⁾WISE Projects, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

²⁾Atmospheric Environmental Research Institute, Pukyong National University, Busan, Korea

(Manuscript received 10 December 2015; revised 18 February 2016; accepted 18 February 2016)

Abstract Heavy rainfall (over 80 mm hr⁻¹) system associated with unstable atmospheric conditions occurred over the Seoul metropolitan area on 27 July 2011. To investigate the heavy rainfall system, we used three-dimensional data from Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS) reanalysis data and analysed the structure of the precipitation system, kinematic characteristics, thermodynamic properties, and Meteorological condition. The existence of Upper-Level Jet (ULJ) and Low-Level Jet (LLJ) are accelerated the heavy rainfall. Convective cloud developed when a strong southwesterly LLJ and strong moisture convergence occurring around the time of the heavy rainfall is consistent with the results of previous studies on such continuous production. Environmental conditions included high equivalent potential temperature of over 355 K at low levels, and low equivalent potential temperature of under 330 K at middle levels, causing vertical instability. The tip of the band shaped precipitation system was made up of line-shaped convective systems (LSCSs) that caused flooding and landslides, and the LSCSs were continuously enhanced by merging between new cells and the pre-existing cell. Difference of wind direction between low and middle levels has also been considered an important factor favouring the occurrence of precipitation systems similar to LSCSs. Development of LSCs from the wind direction difference at heights of the severe precipitation occurrence area was also identified. This study can contribute to the identification of production and development mechanisms of heavy rainfall and can be used in applied research for prediction of severe weather.

Key words: Heavy rainfall, KLAPS reanalysis data, convective system, severe weather, three-dimensional analysis

1. 서 론

우리나라의 여름철에는 집중호우가 빈번히 발생하

고 이로 인해 많은 인적, 물적 피해가 발생하고 있다. 집중호우는 단시간에 발생하는 중규모 기상(Mesoscale Meteorology) 현상으로서, 뇌우 구름, 즉 중규모 대류계(Mesoscale Convective Systems, MCSs)에서 많이 발생한다. 집중호우의 사전적 의미는 짧은 시간 동안에 좁은 지역에서 많은 양의 비가 단기간에 내리는 것을 의미하며, 일반적으로 1시간에 30 mm 이상이나 하루에 80 mm 이상의 비가 내릴 때, 혹은 연 강수량의

*Corresponding Author: Cheol-Hwan You, Atmospheric Environmental Research Institute, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea.
Phone: +82-10-6490-4149, Fax: +82-51-625-2665
E-mail: youch@pknu.ac.kr

10% 정도의 비가 하루 동안에 내리는 것을 말한다. 집중호우는 주로 강한 상승기류에 의해 형성되는 적란운에서 주로 발생한다. 적란운이 짧은 시간 동안 비를 내리면 보통 소낙성 강수라고 하고, 1~2시간 정도의 수명을 가진다. 하지만 적란운이 주변의 기상조건에 의해 한곳에 정체하여 생성과 소멸 과정을 수없이 반복하면서 오랜 기간(1일~수일) 동안 강한 강수를 내리는 경우도 있다. 적란운이 크게 발달하려면 풍부한 수증기의 공급이 있어야 하며, 온난 다습한 공기가 상승할 수 있는 조건이 형성되어야 한다. 온난 다습한 공기와 접하고 있는 해안 부근이나 지형에 의한 강제 상승을 유발하는 지역에 집중호우 발생 가능성이 높다. 그러나 성질이 다른 커다란 공기 덩어리가 만나는 경계면인 전선이나 하층에서 공기가 모여들어 수렴하는 수렴대 등에서는 지리적 여건과 상관없이 집중호우가 발생한다.

중규모 대류계는 주로 스케일의 크기에 따라 meso- α 스케일(200~2000 km), meso- β 스케일(20~200 km), 그리고 meso- γ 스케일(2~20 km)로 나누어진다(Orlanski, 1975). 우리나라에서는 라인형태의 meso- β 스케일 시스템은 자주 나타나고, 이들의 발달 메커니즘에 관한 관측학적 분석이나 개념 모델 연구 등은 다양하게 수행되었다(Sun and Lee, 2002; Shin and Lee, 2005; Kim and Lee, 2006, 2010; You et al., 2010; Ha et al., 2011; Jeong et al., 2012, 2013; Jang et al., 2013). 장마가 끝난 후 우리나라의 여름철에 주로 발생하는 집중호우는 대부분 불안정한 대기상태에서 대류가 활발해지고, 남서류(하층제트)에 의한 지속적인 수증기의 유입으로 지속적으로 발달되며, 상층 제트(Upper Level Jet, ULJ)와 하층 제트(Low Level Jet, LLJ)의 존재에도 영향을 받는다(Lee et al., 1998; Lee, 1999). 또한 중위도에 위치한 일본, 중국 등에서도 저층에서의 습윤한 공기가 남서류의 하층제트에 의해서 수렴대가 형성되고 수직적 불안정이 라인형태 대류시스템(Line-Shaped Convective Systems, LSCSs)의 발달에 중요한 요인이라고 하였다(Kato, 1998, 2006; Seko et al., 1999; Kato and Goda, 2001; Geng et al., 2004, 2009; Schumacher and Johnson, 2008; Shinoda et al., 2009). 고도로 발달한 교통, 통신과 함께 수백만 인구가 밀집되어 사는 대도시에서 유형별 기상현상이 발생할 경우, 복합적인 재해가 유발되므로 자연재해에 대한 방재 목적에서 위험기상의 메커니즘 규명이 필요하다. 특히, 서울 도심부는 라인형태의 대류 시스템에 동반된 중규모 대류계에 의한 집중호우로 피해가 자주 발생하고 있다. 특히, 2011년 7월 26일 오후부터 27일 오전까지 이틀간 서울 도심부에서 라인형태의 대류 시스템에서 발생된 집중호우로 인하여 침수와 산사태가 발생하였으며, 특히 우면산에서 발생한 산사태로 인

근 거주지역에 토사 등이 흘러 내려와 많은 인명 피해와 재산 피해를 야기하였다.

본 연구에서는 우면산 산사태가 발생할 정도로 많은 양의 강수가 단기간에 내린 집중호우 사례의 발생, 발달 메커니즘 규명과 집중호우 유발시의 기상 조건 등을 알아보기 위하여 고해상도의 KLAPS 재분석 자료(5 km \times 5 km 간격의 수평해상도, 50 hPa 간격으로 1~23개 층의 연직해상도)의 3차원 분석을 통하여 집중호우의 특성을 다각적으로 분석하였다.

2. 자료 및 방법

KLAPS 재분석 자료는 초단기 기상분석 및 예측시스템(Korea Local Analysis and Prediction System, KLAPS) 기반으로 다양한 관측자료를 추가하여 한반도 중심의 공간영역에 대해 기상자료를 재생산한 것이다(NIMS, 2006, 2009). KLAPS 재분석 자료는 현업 분석에서 시간적 제약으로 수집하지 못했던 관측 자료와 특별 관측 기간에 관측된 자료를 추가함으로써 좀 더 자연에 가까운 대기 상태를 구현하고자 하였으며, 이러한 고해상도 재분석 자료는 관측 자료만으로 분석하기 어려운 역학 지수를 직접 계산할 수 있는 장점이 있어 위험기상 사례의 역학적 특성을 분석하거나 강수 메커니즘을 이해하는 데 매우 유용한 자료로 활용될 수 있다(NIMS, 2012). 또한 KLAPS의 구름분석 과정이 재분석 자료에도 포함되어 있기 때문에 기존의 다른 재분석 자료와 달리 구름에 관한 분석장도 유용하게 활용할 수 있다(Ha et al., 2010). KLAPS 재분석 자료 생산을 위해 사용되는 자료는 AWS (Automatic Weather station), AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System), METAR (METeoro logical Aerodrome Report), 수직측풍장비, 레이더, 위성, 낙뢰 자료 등이다. KLAPS 재분석 자료는 모델의 예측장을 배경장으로 사용하였기 때문에 다양한 역학 변수 계산이 용이하며, 기상현상의 수평 및 연직 특성을 이해하는데 도움을 줄 수 있다(Lee et al., 2010). KLAPS 재분석 자료는 한반도 영역을 중심으로 5 km 간격의 수평해상도와 50 hPa 간격의 연직해상도로 1시간 간격으로 생산되는 자료이다. Figure 1은 KLAPS 재분석 자료의 수평 영역과 연직 영역을 나타낸 것으로서, 한반도를 중심으로 사각형의 공간영역(31.344~44.283 N, 119.799~133.619 E)에 하나의 층이 235 \times 283의 수평 격자(약 5 km의 공간해상도)로 구성되어 있으며, 변수에 따라 1~23개의 연직 층(1100 hPa~50 hPa까지 50 hPa 간격)으로 각각 구성되어 있다. KLAPS에서 산출되는 변수는 기온, 습도, 바람, 기압, 강수량, 비습, 구름에 관한 정보(운저, 운고, 수액함량 등) 등 총 46 종류의 자료를 생산한다.

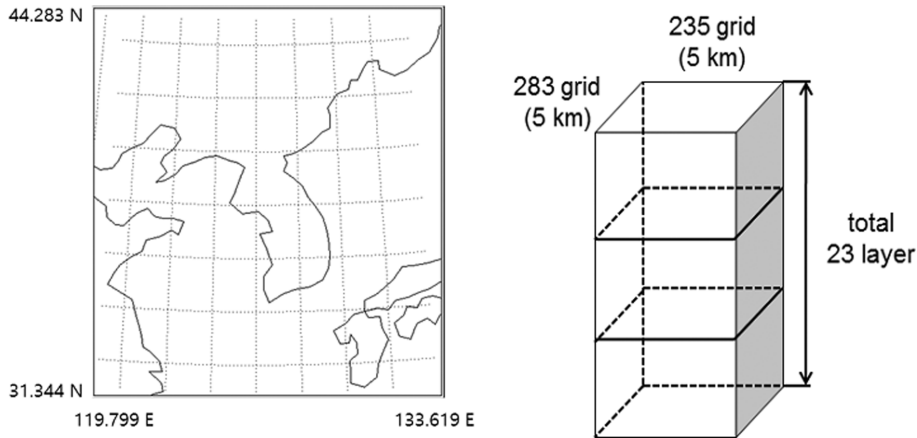


Fig. 1. Schematic diagram of the re-analysis data region and grid in the Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS) very short-term meteorological analysis and prediction system.

Table 1. Types of meteorological variables of the Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS) re-analysis data used in this analysis.

Index	Parameters	Resolution (X × Y × Z)	Unit
cb	Cloud base	283 × 235 × 1	m
ctop	Cloud top	283 × 235 × 1	m
rh	Relative humidity	283 × 235 × 23	%
t	Temperature	283 × 235 × 23	⁰ K
sh	Specific humidity	283 × 235 × 22	kg kg ⁻¹
cw	Cloud liquid water	283 × 235 × 22	kg m ⁻³
uw, vw	wind	283 × 235 × 23	m s ⁻¹
pvv	Pressure vertical velocity	283 × 235 × 23	Pa/s
pot	Potential temperature	283 × 235 × 1	⁰ K
ept	Equivalent potential temperature	283 × 235 × 1	⁰ K
mcon	Moisture convergence	283 × 235 × 1	kg m ⁻³
pc	Precipitation	283 × 235 × 1	mm

본 연구에서는 2011년 7월 26일 0100 LST부터 7월 27일 2300 LST까지의 KLAPS 재분석 자료를 분석하였으며, 그 중 강수량이 가장 많이 내린 7월 27일 0800 LST와 0900 LST에 대해서 중점적으로 분석하였다. Table 1은 본 연구에서 집중호우의 3차원 분석에 사용된 기상 변수로서, 각각의 기상 변수명, 수평 및 연직 해상도 등을 나타낸 것이다. 또한, KLAPS 재분석 자료에서 생산되는 강수량(pc)은 레이더 자료의 처리과정과 품질관리 과정을 개선하여 새롭게 생산된 강수량 재분석 자료(Nam et al., 2012)로 대체하여 사용하였다.

3. 집중호우 사례

2011년 7월 26일부터 28일까지 서울, 경기, 강원도

영서지역을 중심으로 막대한 양의 강수가 내렸다. 특히 27일 오전에 서울특별시 관악구에 시간당 113 mm(남현동, 오전 8시 41분), 서초구에 86.0 mm(서초동, 오전 8시 43분)의 집중호우가 내리는 등 중부지방을 중심으로 시간당 수십~113 mm의 비가 내렸다. 또한 동두천과 문산에서는 449.5 mm와 322.5 mm의 일강수량을 기록하였다. 이러한 국지적 집중호우의 영향으로 주택과 도로가 침수되면서 피해가 발생하였으며, 2011년 7월 27일 0900 LST 전후로 서울특별시 서초구 우면산 지역에 산사태가 발생하였고, 산사태로 인해 흘러내린 토사 등이 인근 거주지역까지 흘러 내려와 아파트를 덮치는 등의 인명과 재산 피해가 발생하였다.

집중호우가 발생한 2011년 7월 27일의 지상일기도(Fig. 2)를 보면, 한반도 지역에 기압골이 걸쳐져 있

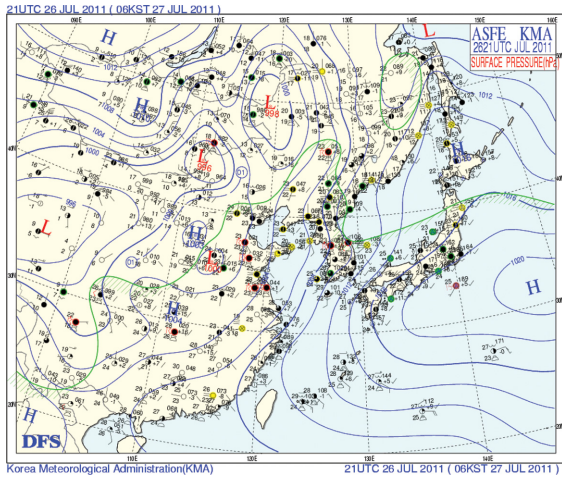


Fig. 2. The surface weather map at 0600 LST on 27 July 2011.

며, 오른쪽에 고기압이 위치하고 있음으로 인해 라인 형태 혹은 밴드 모양의 강수시스템이 발달하기에 좋은 조건을 가지고 있다(Lee, 2014). 또한 필리핀 지역에 위치한 열대성 저기압(TS)인 NOCK-TEN이 북서쪽으로 이동하고 있어 한반도 지역의 하층에 따뜻하고 습윤한 공기를 수송하는데 중요한 역할을 하고 있다. Figure 3은 시간당 80 mm 이상의 집중호우가 내린 2011년 7월 27일 0830 LST에서의 기상레이더 영상(Fig. 3(a))과 2011년 7월 27일 0845 LST에서의 위성영상(Fig. 3(b))이다. 서울과 경기 북부 지역을 중심으로 얇고 강한 서해안 지역으로부터 지속적으로 라

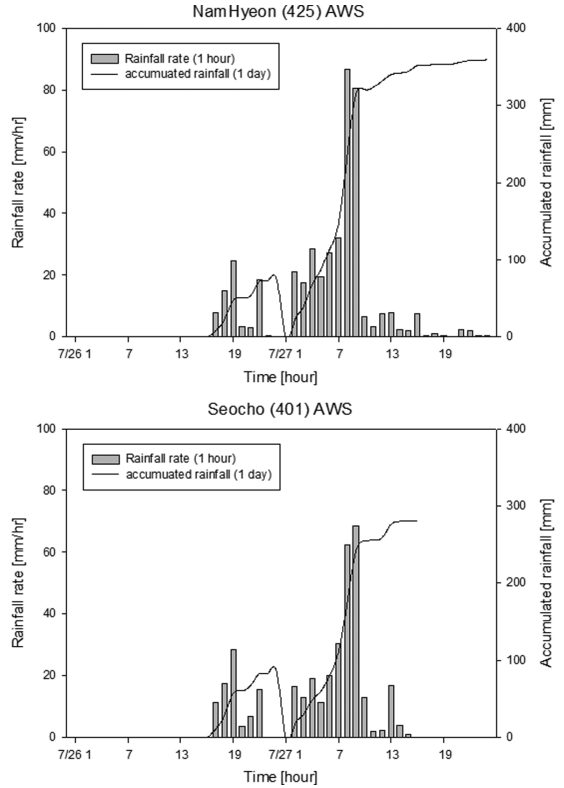


Fig. 4. The distribution of hourly precipitation and cumulative daily precipitation measured by automatic weather systems (AWSs) in Namhyeon and Seocho stations near Woomyeonsan showing from 0100 LST on 26 July to 2300 LST on 28 July 2011.

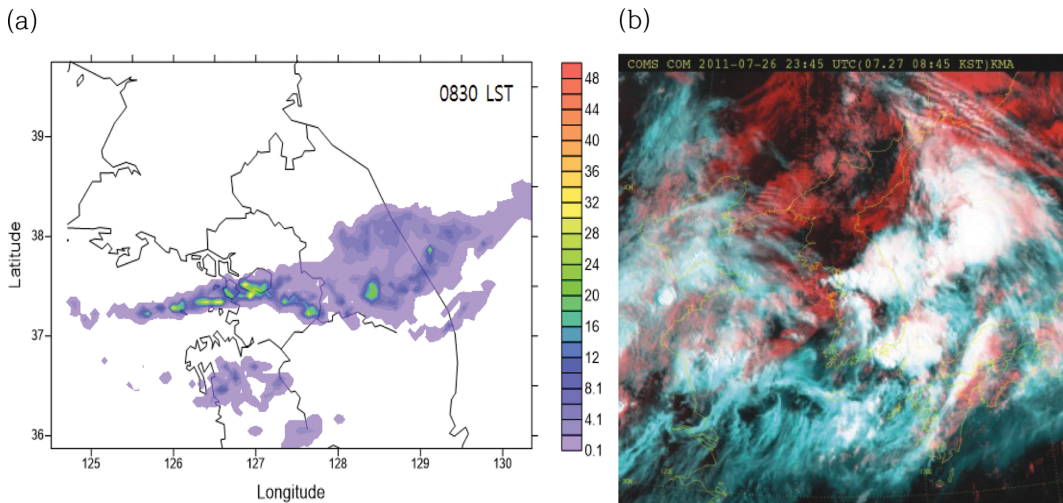


Fig. 3. (a) Weather radar image at 0830 LST on 27 July 2011, and (b) a satellite image at captured at 0845 LST on the same day prior to the Woomyeonsan landslide.

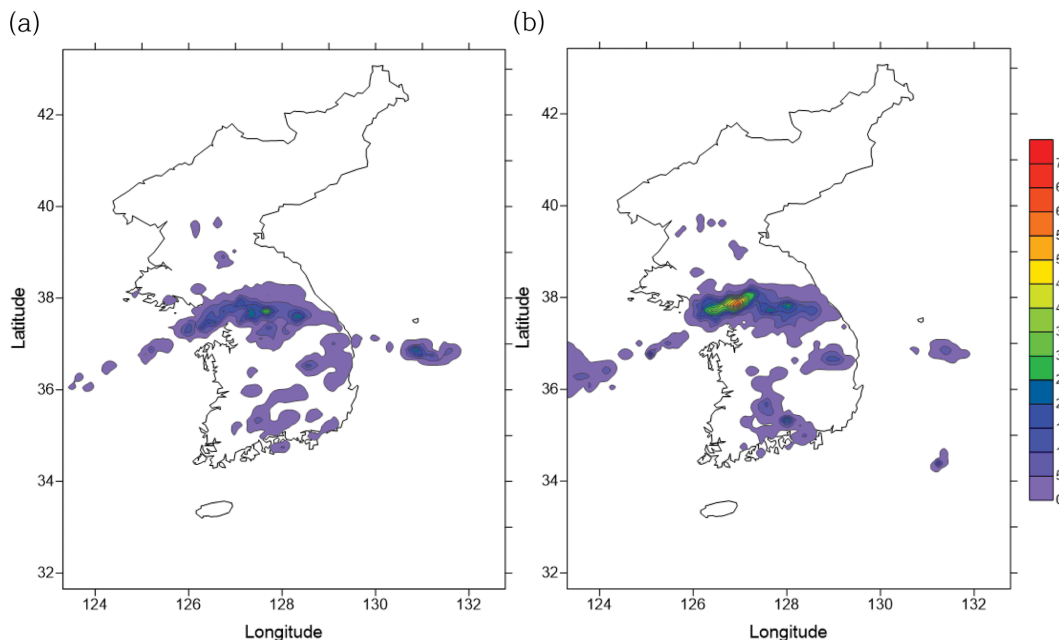


Fig. 5. The distribution of hourly precipitation by precipitation reanalysis data at 0800 LST and 0900 LST on 27 July 2011.

인형 강수밴드가 형성되어 유입되고 있으며, 강도가 강한 대류셀에 의해 국지적으로 강수가 내렸다.

산사태가 발생한 우면산의 근접 거리에 위치한 남현동(37° 27' N, 126° 59' E)과 서초구(37° 29' N, 127° 00' E)에 설치되어 있는 자동 기상관측 시스템(AWS)의 2011년 7월 26일부터 7월 27일까지의 시간당 강수량과 일누적 강수량의 시간변화는 Fig. 4와 같다. 7월 26일 1600 LST 경부터 강수가 내리기 시작하여 2300 LST 경까지 지속되다가 잠시 소강상태 후, 7월 27일 0100 LST부터 다시 강수가 내렸다. 7월 27일 0100 LST 부터 다시 시작된 강수는 시간당 약 15 mm hr⁻¹ 이상의 강수가 거의 9시간 이상 지속되었으며, 산사태가 발생하기 전인 0800 LST(남현 - 86.5 mm hr⁻¹, 서초 - 62.5 mm hr⁻¹)와 0900 LST(남현 - 80.5 mm hr⁻¹, 서초 - 68.5 mm hr⁻¹)에 가장 많은 강수가 내렸다. 일누적 강수량도 7월 26일에는 100 mm 정도였으나, 7월 27일에는 약 280~360 mm를 기록하였다. Figure 5는 강수량 재분석 자료를 이용하여 2011년 7월 27일 0800 LST와 0900 LST에서의 1시간 강수량 분포를 나타낸 것이다. 서울과 중부지방을 중심으로 라인형 강수가 주로 분포하여 있고, 특히 서울지역 인근에 국지적으로 강한 강수대가 보이고 있으며, 이는 레이더에서 관측한 1시간 누적강수량과 유사한 분포를 보이고 있다. 이렇게 단시간에 국지적으로 내린 집중호우는 우면산에서 산사태가 발생하는 주요한 요인 중에 하나라고 해석할 수 있다.

4. 결 과

4.1 KLAPS 재분석 자료의 3차원 표출

집중호우 발생시의 종관 상황 등 기상조건을 알아보기 위하여 KLAPS 재분석 자료에서 산출되는 3차원 기상변수를 활용하여 분석을 수행하였다. 기상변수의 3차원 분석과 표출은 강수시스템의 생성 및 발달 구조 분석에 매우 중요한 부분으로서, 기상 조건의 직-간접적인 분석과 기상상황의 공간적인 분석이 가능하여 집중호우 등을 유발하는 위험기상의 메커니즘을 규명하거나 분석하는데 매우 유용하다. 2011년 7월 27일 0800 LST와 0900 LST에서의 KLAPS 재분석 자료의 구름수액함량(Cloud liquid Water, CW)과 강수량 재분석 자료로 구현한 3차원 영상을 Fig. 6에 나타내었다. Figure 6(a)와 6(b)는 0800 LST와 0900 LST에서의 3차원 영상의 정면도(Front View)이며, Fig. 6(c)와 6(d)는 상면도(Top View)이다. 구름수액함량은 구름속에 존재하는 수액의 양을 나타내는 것으로서, 구름수액함량의 값이 존재한다는 것은 구름이 존재한다는 것을 의미하며, 구름수액함량을 구름의 형태로 표현하였다. 서울 인근의 수도권에 강한 강수가 국지적으로 분포하고 있고, 강한 강수가 내리는 지역 상공의 구름을 보면, 높은 구름수액함량을 가지는 구름이 존재하고 있으며, 강한 강수구역의 서쪽에 구름 높이가 10 km에 이르는 얇은 라인형태의 강수 구름이 서해안부터 한반도까지 연결되어 존재하고 있으며, 지

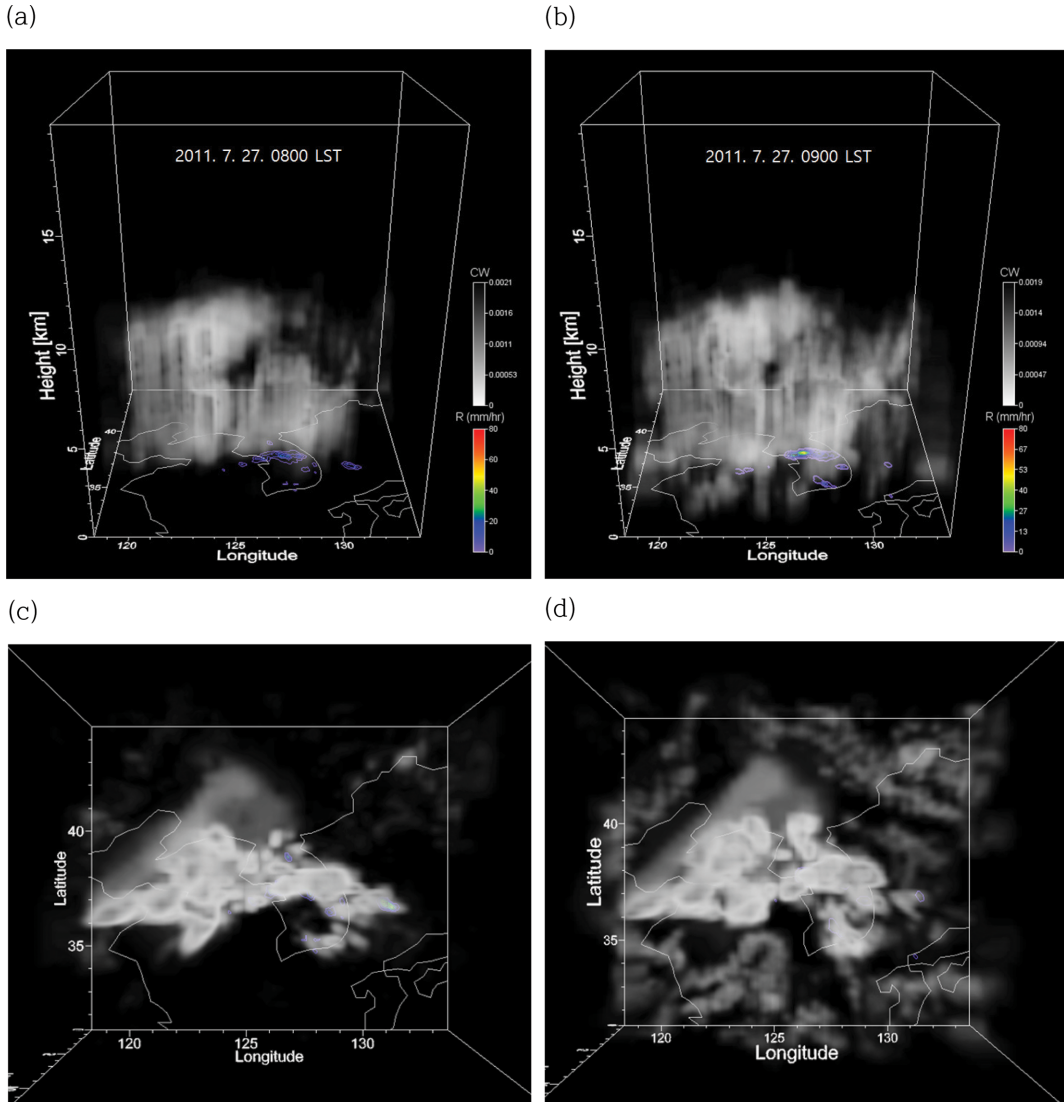


Fig. 6. The 3-Dimensional display of cloud liquid water and ground rainfall amounts by KLAPS reanalysis data and precipitation reanalysis data at 0800 LST (a and c) and 0900 LST (b and d) on 27 July 2011.

속적으로 한반도로 유입되고 있다. 이러한 라인형태의 구름에 동반된 대류셀에 의해 강한 강수가 내리고 있음을 알 수 있다.

4.2 열역학적 특성

장마전선이나 집중호우의 특성을 이해하기 위하여 온도와 습도를 동시에 고려하는 상당온위에 대한 분석은 널리 이용되고 있다. Seo et al. (2011)은 850 hPa 상당온위 값을 이용하여 335 K의 상당온위 값이 한반도 북쪽으로 올라갔을 때 장마가 종료된다고 제시하였다. 여름철 장마전선의 경우에도 남북간의 상당온

위 수평경도가 큰 지역에서 주로 활성화 되는 특징(KMA, 2012)이 있다. Figure 7은 2011년 7월 27일 0800 LST에서의 온위(Potential Temperature, θ)와 상당온위(Equivalent Potential Temperature, θ_e)의 분포를 나타낸 것이다. Figure 7(a)의 온위 분포를 보면, 한반도 중부지역, 서해와 동해에 파란색 계열로 표시된 상대적으로 낮은 온위값(291~297 K)의 영역이 존재하고 있다. 낮은 온위값의 영역이 수도권 인근의 중부지방까지 얇은 라인 형태로 분포하고 있으며, 반대로 수도권 아래의 중부 지역과 남해안 지역은 상대적으로 높은 온위 분포를 보이고 있다. 파란색 계열은 차가

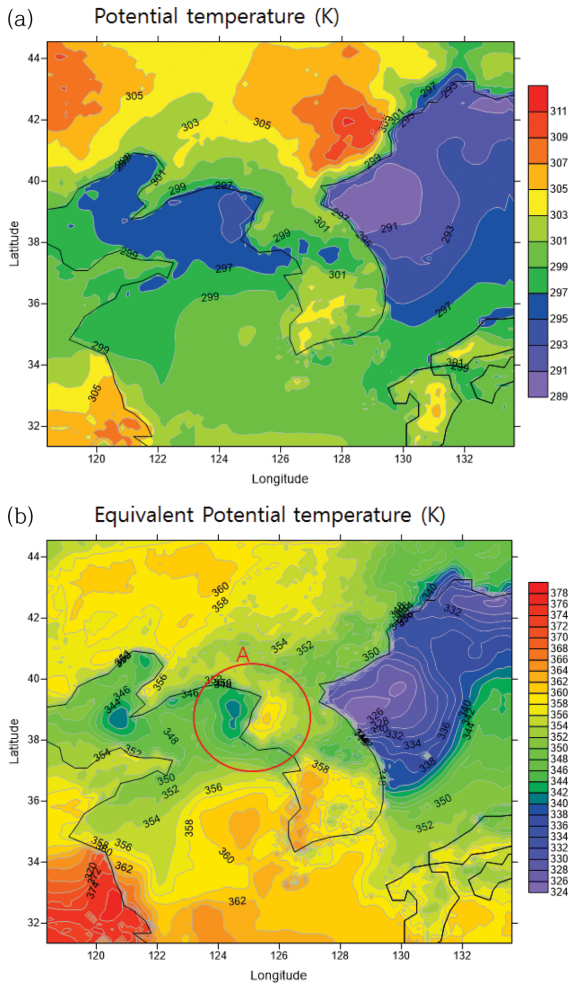


Fig. 7. The distribution of potential temperature (θ , $^{\circ}\text{K}$) and equivalent potential temperature (θ_e , $^{\circ}\text{K}$) at 0800 LST on 27 July 2011.

운 성질의 공기덩이이며, 녹색과 노란색 계열은 따뜻한 공기덩이라 할 수 있다. 이러한 온위분포에서 보듯이, 위도 38도 인근 지역에 차가운 공기덩이와 상대적으로 따뜻한 공기덩이가 충돌하면서 대류불안정이 활발해지고, 이로 인해 대류성 구름이 지속적으로 생성되면서 서울과 수도권 지역에 강한 강수를 유발한 요인이 되었다. Figure 7(b)의 상당온위 분포를 보면, 중국 남쪽 지역에서부터 남해안, 그리고 한반도 중부 지역까지 상대적으로 높은 상당온위(녹색, 노란색, 붉은색) 분포가 나타나고 있고, 북동해안과 북서해안에 상대적으로 낮은 상당온위 분포(파란색 계열)를 보이고 있다. 가장 주의해서 봐야 할 부분은 경기 북부 내륙에 위치한 높은 상당온위 영역과 북서해안

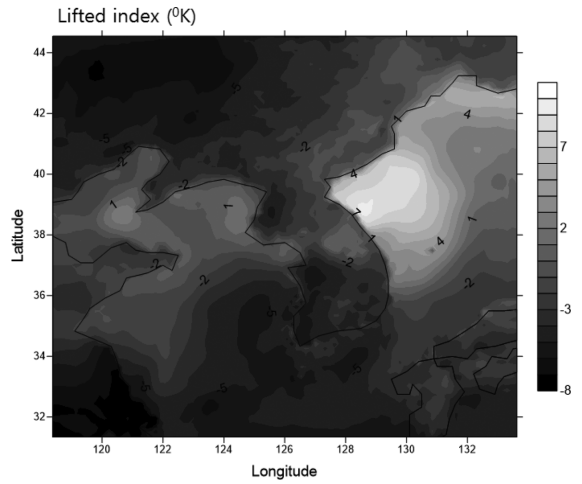


Fig. 8. The distribution of the lifted index (LI) at 0800 LST on 27 July 2011.

에 위치한 낮은 상당온위 영역이 존재하는 것이다. 이렇게 수평경도가 큰 상당온위 분포(A 영역)는 차고 건조한 공기(파란색 계열)와 따뜻하고 습한 공기(노란색 계열)가 만나면서, 전선 형성에 기여하게 되고 집중호우를 유발할 수 있는 조건이 된다.

여름철 집중호우 및 뇌우 등과 같은 대류성 강수의 발생 가능 조건을 진단하기 위하여 열역학적 개념의 각종 지수(K-index, SI, CAPE, LI)가 많이 활용된다. 그 중에서 상승 지수(Lifted Index, LI)는 대류권에서 주어진 압력하에서 주변 공기의 온도(T_e)와 건조 단열적으로 상승하는 공기 온도와의 차이를 의미한다. 상승 지수가 양의 값일 경우 대기는 안정한 상태이며, 음의 값일 경우 대기는 불안정한 상태가 된다. 상승 지수는 일반적으로 1에서 6까지의 값일 경우 안정한 상태이며, 6보다 클 경우에 매우 안정한 조건이다. 0부터 -2까지는 약한 불안정 조건이며, -2부터 -6까지는 불안정한 조건, -6보다 클 경우에는 매우 불안정한 상태를 의미한다.

Figure 8은 2011년 7월 27일 0800 LST에서의 상승 지수(LI)의 분포를 나타낸 것이다. 동해안 영역에 높은 상승 지수(6 이상)를 가지는 매우 안정한 상태의 기단이 존재하고 있으며, 한반도의 남쪽으로 낮은 상승 지수(-1 이하)를 가지는 불안정한 대기가 존재하고 있다. 이러한 상승 지수는 연직대기의 안정도를 나타내는 지수로서 강수시스템의 생성이나 발달 조건에 관한 정보를 제공해 주는 요소로서, 불안정한 상태의 대기는 대류시스템을 생성 및 발달시키는데 기여하는 바가 크다. 국지적으로 집중호우가 내린 2011년 7월 27일의 한반도 주변의 상승지수를 살펴보면, 강수 구

역 남쪽으로 남서류가 지속적으로 유입되는 지역(남서해안 지역)에 불안정한 대기가 존재함으로 인해 대류시스템의 발달을 가속화하고 있음을 알 수 있다.

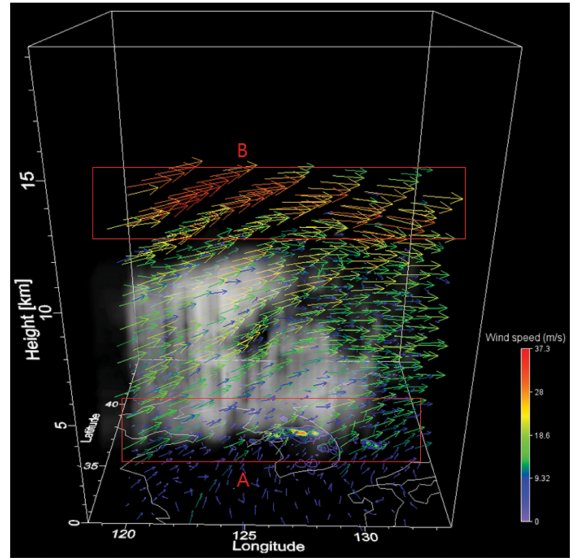
4.3 운동학적 특성

집중호우의 발생 및 발달에 영향을 미치는 주요 특징 중의 하나는 우리나라 주위에 상층 제트기류(Upper Level Jet, ULJ)와 하층 제트기류(Low level Jet, LLJ)가 존재할 때, 이 두 제트기류의 사이에서 주로 발생한다. 상층 제트기류는 남쪽과 하층에서 상층 기류를 유발하는 역할을 하며, 하층 제트기류는 남쪽 및 남서쪽에서 따뜻하고, 습윤한 공기를 북쪽 및 북동쪽으로 유입하는데 중요한 역할을 한다. 이렇게 유입되는 습윤한 공기는 상층 제트기류 북쪽의 차고 건조한 공기와 만나면서 상승하게 되고 연직으로 이동하면서 응결하면서 상승기류의 발생을 가속화한다. 제트기류들의 종관 규모적 패턴은 대류시스템이 형성될 수 있는 좋은 환경을 만든다. 북쪽의 차고 건조한 공기는 상층 제트기류와 함께 남, 남동쪽으로, 남쪽의 따뜻하고 습한 공기는 하층 제트기류에 의하여 서, 북서쪽으로 이동하여 상층 제트기류와 하층 제트기류의 간격이 매우 가까울 때 가장 강도가 강해지며, 이 지역에서 집중 호우가 발생한다(Lee, 1999).

Figure 9는 2011년 7월 27일 0800 LST에서의 KLAPS 재분석 자료로 구현한 고도별 수평바람장의 3차원 분포(Fig. 9(a))와 상층제트와 하층제트가 나타나는 고도(850 hPa, 300 hPa)에서의 수평바람장 분포(Fig. 9(b))를 나타낸 것이다. Figure 9(a)에서 보면, 붉은색 사각형 영역인 1.5~3 km 정도의 고도에 녹색 화살표(15 m s⁻¹ 이상, A 영역)가 서, 남서방향에서 국지적 호우 구역으로 강하게 불어 들어오고 있으며, 10~12 km 정도 고도에 붉은색 화살표로 표시된 강한 바람(약 25 m s⁻¹ 이상, B 영역)이 서쪽에서 불어오고 있는 것을 알 수 있다. 두 고도 영역에서 아주 강한 바람이 불고 있으며, 하층 제트기류와 상층 제트기류임을 알 수 있다. 장마전선의 경우에는 850 hPa 하층 제트 축(streak)의 북쪽이 상층제트와 커플링(직접 순환)되는 경우, 큰 연직 바람시어로 강한 대류와 호우가 발생된다(KMA, 2012). 본 사례에서도 국지적으로 강한 강수구역을 중심으로 하층제트와 상층제트가 커플링되어 있으며, 하층과 상층에서의 제트류에 의해 북서쪽 상공의 차고 건조한 공기와 남서쪽 하층의 따뜻하고 습한 공기를 만나게 하면서 대류시스템을 가속화시키는 작용을 하였다.

집중호우의 발생 특성의 다른 하나는 고도별 바람 방향의 차이에 의해 발생된다. Kato (2006)는 하층과 중층 고도에서 바람 방향의 차이는 LSCSs와 유사한 강수 시스템의 생성과 발달에 중요한 요소로 작용한

(a)



(b)

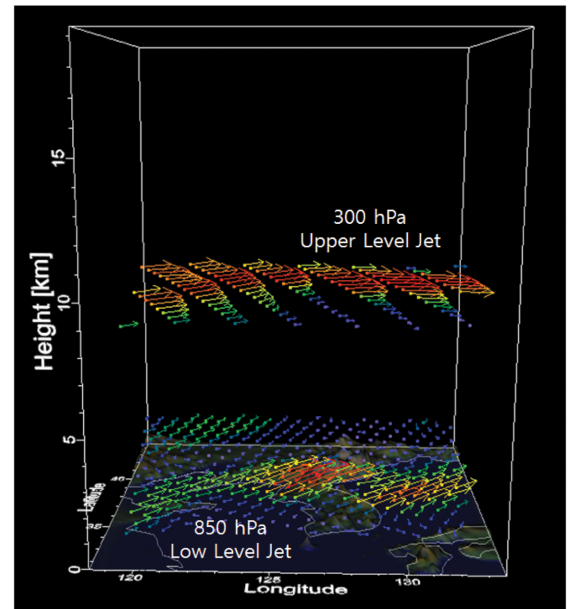


Fig. 9. (a) The 3-dimensional display of horizontal wind field using KLAPS reanalysis data. (b) Upper level jet and Low level jet at 300 hPa and 850 hPa height at 0800 LST on 27 July 2011.

다고 하였다. Figure 10은 고도별 수평 바람의 경향을 알아보기 위하여 2011년 7월 27일 0800 LST의 1000, 850, 700, 300 hPa 고도에서의 수평 바람장 분포를 각각 나타낸 것이다. 1000 hPa의 수평바람장에서 보면,

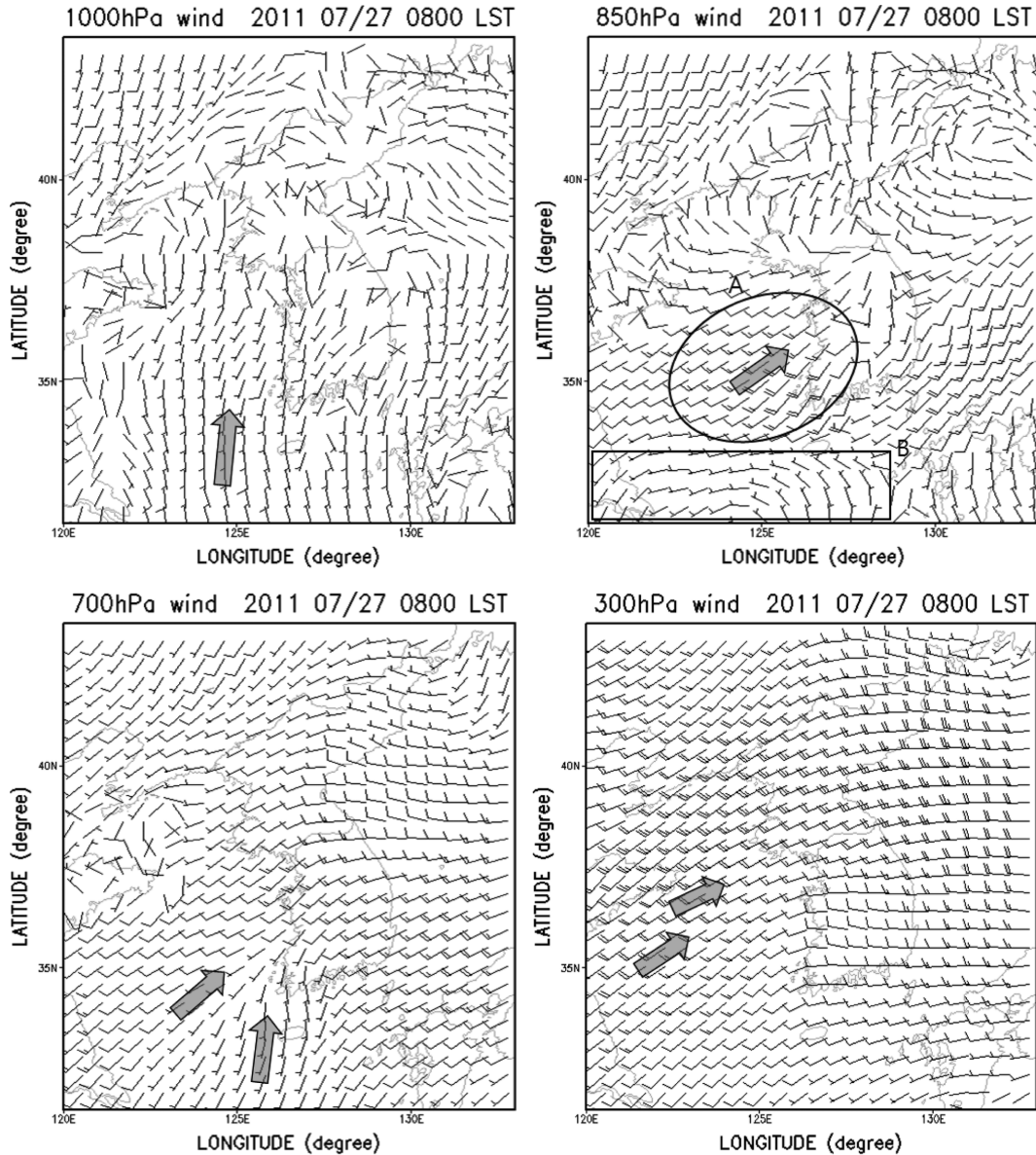


Fig. 10. Horizontal wind field with heights of 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa, and 300 hPa at 0800 LST on 27 July 2011.

남풍이 한반도 영역으로 불고 있는 것을 알 수 있으며, 850 hPa에서는 남서해안(A 구역)에 15 m s^{-1} 이상의 강한 바람(하층 제트기류)이 한반도를 향해 불고 있으며, 사각형 영역(B)의 저기압성 바람은 필리핀 인접 지역에 위치한 열대성 저기압(NOCK-TEN)에 의한 바람 분포이다. 700 hPa에서는 남풍과 남서풍이 한반도를 향하여 유입되고 있다. 이러한 남풍과 남서풍은 습하고 따뜻한 남쪽 지역으로부터 지속적인 수증기를 유입하고 있으며, 고도에 따라 바람의

방향이 다르게 불고 있음을 알 수 있다. 2011년 7월 27일의 강수 사례에 대해 KLAPS 재분석 자료로 산출된 고도별 수평 바람장의 고도별 차이는 Kato (2006)가 제시한 라인형 강수시스템이 생성되고 발달되는 결과와 일치하는 결과이다. Figure 11은 KLAPS 재분석 자료로 산출된 2011년 7월 27일 0800 LST의 연직 바람(Pressure Vertical Velocity) 분포를 지상 강수구역 중심의 연직단면을 나타낸 것이다. 지상 강수구역의 중심에 약 4 Pa s^{-1} 정도의 하강기류가 존재하

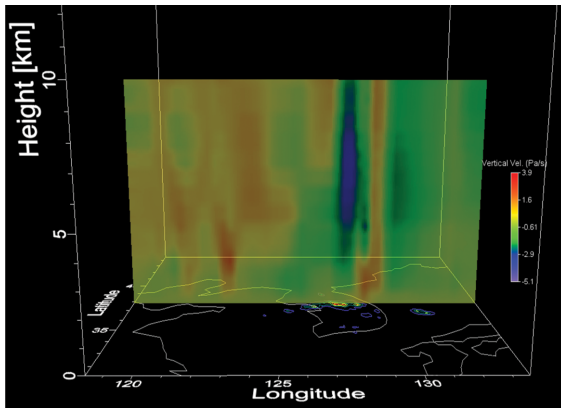


Fig. 11. The 3-dimensional display of pressure vertical velocity (Pa s^{-1}) at 0800 LST on 27 July 2011.

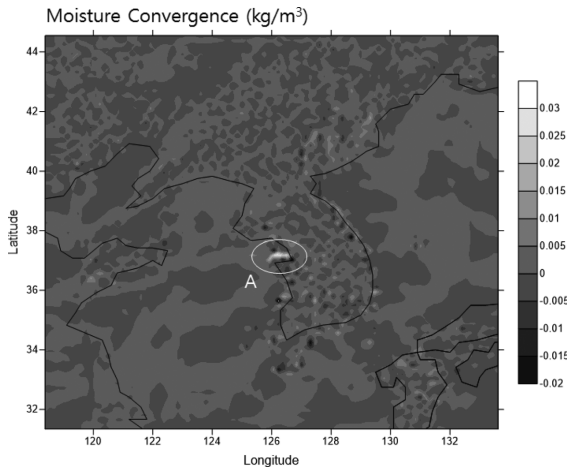


Fig. 12. The distribution of moisture convergence at 0800 LST on 27 July 2011.

고 있고, 구름이 지속적으로 생성되고 있는 서해안 영역에 상승기류 구역이 넓게 분포하고 있다. 이러한 상승기류는 강수구름의 생성과 발달에 지속적으로 기여하게 된다.

4.4 수증기 수렴

850 hPa 고도에서의 하층제트는 남서풍에 의한 수증기의 지속적인 공급을 통해 대류시스템이 발생 및 발달하는데 영향을 미친다. 이러한 수증기의 유입은 대류시스템의 메커니즘에서 중요한 역할을 하며, 하층 수렴으로 인해 새로운 대류셀을 생성시키는 변수로서 작용한다(Schumacher and Johnson, 2005; Watanabe, 2007; Shinoda et al., 2009). 본 사례에서도 수증기의 지속적인 공급으로 인해 집중호우를 유발하

는 라인형 강수시스템이 지속적으로 생성 및 발달하게 되었다. Figure 12는 KLAPS 재분석 자료에서 산출된 수분 수렴(Moisture Convergence)의 분포를 나타낸 것이다. 강수가 집중되고 있는 영역 왼쪽의 서해안 지역에 아주 강한 수증기 수렴 영역(0.03 kg m^{-3} 이상, A 영역)이 존재하고 있으며, 한반도의 남쪽 영역쪽에도 국지적으로 수증기 수렴 지역이 존재하고 있다. 원활한 수증기 공급과 강한 수렴지역의 존재는 대류성 강수 구름을 생성시킬 수 있는 조건을 만들어 주며, 이전 연구에서처럼 이러한 하층 수렴이 새로운 대류셀을 지속적으로 생성시키는 변수로서 작용하였다.

4.5 대류성 스톰 발생 가능성

층간 바람시어를 에너지 단위로 수치화하여 표현한 것을 헬리시티(Storm Relative Helicity, SRH)라고 한다. SRH는 호도그래프상에서 지상으로부터 3 km까지 둘러싼 면적을 환산한 것으로 정의되며, 슈퍼셀(supercell)과 토네이도(tornado) 환경의 예보 도구로서 유용하며, SRH의 값이 $150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 이상일 경우 강한 대류성 스톰이 발생할 가능성이 높다고 분석한다(Davies-Jones, 1984; Davies-Jones et al., 1990; Rasmussen and Blanchard, 1998; Adam et al., 2013). 극단적인 값은 $600 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 을 초과하는 경우도 있다(NASA glossary).

Davies-Jones et al. (1990)은 Storm-Relative Helicity (SRH)를 아래와 같이 정의하였다.

$$SRH = \int_0^{h'} (\mathbf{V} \times \mathbf{V}_H)(V_H - V_C) dz \quad (1)$$

여기서, h' 는 자유 대류 고도 혹은 약 3 km 고도이며, 수평 속도 벡터(Horizontal Velocity Vector) V_H 와 스톰 모션 벡터(Storm Motion Vector) V_C 는 적분에 사용된다. 수많은 연구에서 저층 SRH가 토네이도의 잠재성을 나타내는 좋은 도구이며, 위험기상의 예측을 위한 중요한 예후 변수(Prognostic Variable)로서 활용 가능함(e.g., Leftwich, 1990; Davies and Johns, 1993; Colquhoun and Riley, 1996; Kerr and Darkow, 1996; Rasmussen and Blanchard, 1998; Thompson et al., 2003, 2007)을 밝혔다. 따라서 스톰이나 위험기상의 중요한 시공간적 변동성을 짐작할 수 있는 저층 SRH의 정확한 추정에는 매우 중요하다. 약 100 mm 정도의 집중호우가 내린 2011년 7월 27일 0800 LST와 0900 LST에서의 SRH의 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 라인형 강수 시스템이 지속적으로 생성되는 한반도의 중부 지역을 중심으로 $250 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 정도의 강한 SRH가 나타나고 있다. 이러한 강한 SRH가 나타남은 대류성 스톰에 의한 지속적인 호우가 내림을 예상할 수 있다.

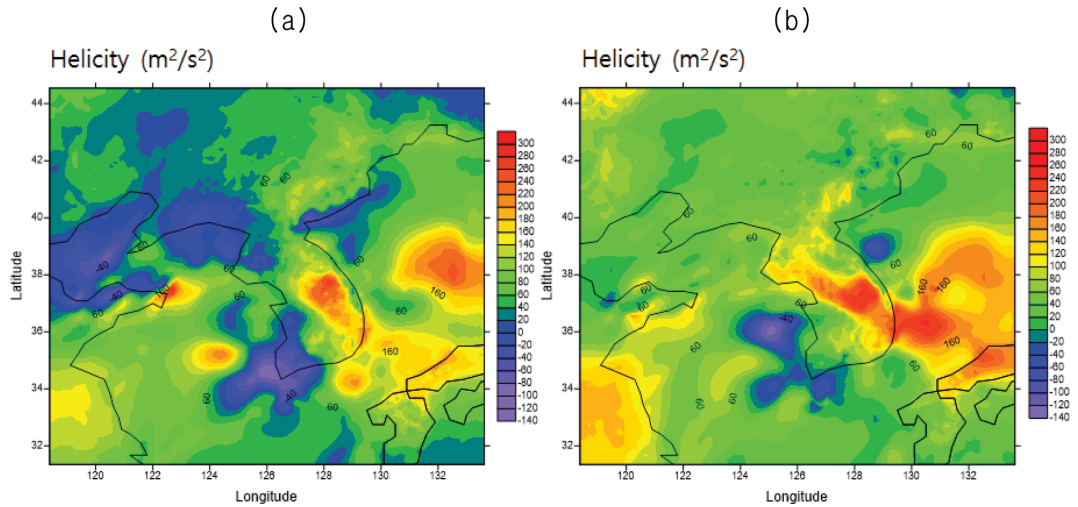


Fig. 13. The distribution of storm relative helicity at (a) 0800 LST and (b) 0900 LST on 27 July 2011.

5. 토의 및 결론

본 연구에서는 국지성 집중호우가 내린 2011년 7월 11일 사례에 대한 주변 기상 조건과 강수시스템의 특성에 대해 알아보았다. 일반적으로 여름철 중위도에서 집중호우의 발생은 중규모 대류시스템에 의한 것으로서, 불안정한 대기조건, 고도별 풍향의 차이, 상층제트와 하층제트의 존재, 하층제트에 의한 지속적인 수증기의 공급, 상당온위의 수평 혹은 연직 분포, 수증기의 수렴과 상승류의 존재, 저지고기압에 의한 지속적 강수 발생 등에 영향을 받는다. 국지적 집중호우는 짧은 생존 기간(Lifetime)을 가지면서 단시간에 국지적으로 많은 강수를 내리면서 피해를 증대시킨다. 중위도에서 발생하는 대류시스템으로부터의 국지적 집중호우는 아시아 지역에서 빈번히 발생하고 이에 대한 연구도 중국, 일본, 한국 등에서 활발히 진행 중이다. 2011년 7월 26일부터 27일까지 서울 도심지 인근에 국지적으로 집중호우(시간당 약 100 mm)가 내리면서, 침수 피해와 산사태 등이 발생하여 많은 인명과 재산 피해를 가져왔다. 집중호우를 유발하는 기상 조건을 알아보기 위하여 KLAPS 재분석 자료에서 산출되는 3차원 변수를 활용하여 분석을 수행하였다. 온위와 상당온위의 분포, 상승지수, 수증기수렴 등의 열역학적 특성 분석을 통하여 한반도 주변의 기단의 분포, 대류불안정 및 전선 형성 등의 주변 조건을 살펴보았다. 그리고 3차원 바람 분석을 통하여 상층제트기류와 하층제트기류가 존재할 때, 집중호우가 발생 및 발달한다는 선행연구를 확인하였다. 더불어 하층제트기류에 의해 따뜻하고 습한 남서류의 유입이 대류시스템을 지속적으로 발달시키며, 고도에 따

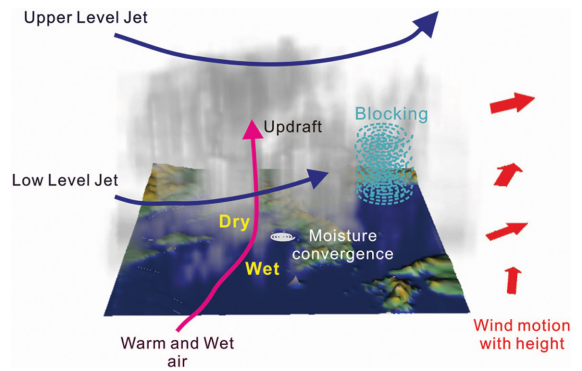


Fig. 14. 3-Dimensional schematic representation of the heavy rainfall system on 27 July 2011.

른 수평 풍향의 차이에서 야기되는 라인형태의 대류시스템의 발생 및 발달에 관한 선행연구와의 일치성도 찾았다. 또한 연직 상승류의 3차원 분석을 통하여 대류불안정에 따른 대류시스템의 발달에 대해서도 살펴보았으며, 대류불안정을 판별하는 SRH의 수평분포 분석을 통하여 대류시스템이 발달할 수 있을 만큼 강한 SRH ($200 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$)가 집중호우를 유발한 중부지역을 중심으로 분포함을 확인하였다. 이러한 복합적인 주변 기상 상황이나 열역학적, 운동학적 특성 등이 종합적으로 작용하여 집중호우를 유발하게 된 것이다. 최종적으로 KLAPS 재분석 자료의 3차원 분석을 통한 집중호우 메커니즘의 모식도를 Fig. 14에 나타내었다.

본 연구에서는 $5 \times 5 \text{ km}$ 수평해상도와 연직 50 hPa 의 연직해상도를 가지는 고해상도의 KLAPS 재분석 자료를 활용한 3차원 표출과 분석 등을 통하여 국지

성 집중호우의 생성 및 발달에 관한 분석을 좀 더 세밀히 수행하였다. 기상자료의 3차원적 표출과 분석은 집중호우를 유발하는 대류시스템의 발생, 발달 메커니즘 규명 등에 활용성이 매우 높으며, 향후 KLAPS 재분석 자료를 활용한 보다 세밀한 연구(구름물리, 대기물리, 메커니즘 규명 등)를 수행할 수 있는 응용 연구로서 활용성이 높을 것으로 생각된다. 또한 본 연구 방법은 3차원 자료 생산이 가능한 다른 수치모델들의 결과물을 이용한 연구에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업(KMIPA-2012-0001-1)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Abromowitz, M., and I. A. Stegun, 1964: *Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Courier Corporation, 933 pp.
- Clark, A. J., J. Gao, P. T. Marsh, T. Smith, J. S. Kain, J. Correia Jr., M. Xue, and F. Kong, 2013: Tornado pathlength forecasts from 2010 to 2011 using ensemble updraft helicity. *Wea. Forecasting*, **28**, 387-407.
- Colquhoun, J. R., and P. A. Riley, 1996: Relationships between tornado intensity and various wind and thermodynamic variables. *Wea. Forecasting*, **11**, 360-371.
- Davies-Jones, R. P., 1984: Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2991-3006.
- _____, D. W. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a forecast parameter. *Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms*, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc. 588-592.
- Davies, J. M., and R. H. Johns, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. Part I: Wind shear and helicity. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, 573-582, doi:10.1029/GM079p0573.
- Geng, B., H. Yamada, K. Reddy, H. Uyeda, and Y. Fujiyoshi, 2004: An observation study of the development of a rainband on a Meiyu front causing heavy rainfall in the downstream region of the Yangtze River. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **82**, 1095-1115.
- _____, _____, _____, _____, and _____, 2009: Mesoscale development and along-frontal variation of a Meiyu/Baju front and precipitation observed in the downstream region of the Yangtze River. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **87**, 423-457.
- Ha, J. C., J. S. Lee, Y. H. Lee, H. C. Lee, and D. E. Jang, 2010: Production of High resolution reanalyses data based on KLAPS in Korean peninsula. *Proc. Spring Meeting of Korea Meteor. Soc.*, 227-228.
- Ha, J. H., H. W. Kim, and D. K. Lee, 2011: Observation and numerical simulations with radar and surface data assimilation for heavy rainfall over central Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **28**, 573-590.
- Jang, S. M., and Coauthors, 2013: Radar reflectivity and wind field analysis by using two X-band Doppler radars at Okinawa, Japan from 11 to 12 June 2007. *Meteorol. Appl.*, **21**, 898-909.
- Jeong, J. H., and Coauthors, 2012: Environment and morphology of mesoscale convective systems associated with the Changma front during 910 July 2007. *Ann. Geophys.*, **30**, 1235-1248.
- _____, and Coauthors, 2013: Structure and evolution of line-shaped convective system associated with Changma front during GRL PHONE-09: 6 July 2009 case. *Meteorol. Appl.*, **21**, 786-794.
- Kato, T., 1998: Numerical simulation of the band-shaped torrential rain observed over southern Kyushu, Japan on 1 August 1993. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **76**, 97-123.
- _____, and H. Goda, 2001: Formation and maintenance processes of a stationary band-shaped heavy rainfall observed in Niigata on 4 August 1998. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **79**, 899-924.
- Kerr, B. W., and G. L. Darkow, 1996: Storm-relative winds and helicity in the tornadic thunderstorm environment. *Wea. Forecasting*, **11**, 489-505.
- Kim, H. W., and D. K. Lee, 2006: An observation study of mesoscale convective systems with heavy rainfall over the Korean Peninsula. *Wea. Forecasting*, **21**, 125-148.
- KMA, 2012: Forecasting techniques caught in the hand. The characteristics of Jangma front and analytical methods, No. 15. 3-4.
- Lee, D. K., H. R. Kim, and S. Y. Hong, 1998: Heavy rainfall over Korea during 1980-1990. *Korean J. Atmos. Sci.*, **1**, 32-50.
- Lee, D. K., 1999: Heavy rainfall. *Physics and High Technology*, **8**. [Available online at <http://mulli2.kps.or.kr/~pht/8-6/19.html>].
- Lee, J. S., Y. H. Lee, E. H. Kim, J. C. Ha, and D. E. Jang,

- 2010: A Study on the Dynamical Characteristics Associated with Heavy Rainfall Case of July 14, 2009. *Proc. Autumn Meeting of Korea Meteor. Soc.*, 244-245.
- Lee, J. T., D. I. Lee, C. H. You, H. Uyeda, Y. C. Liou, and I. S. Han, 2014: Dual-Doppler radar analysis of a near-shore line-shaped convective system on 27 July 2011, Korea: a case study. *Tellus A*, 1-15.
- Leftwich, P. W., 1990: On the use of helicity in operational assessment of severe local storm potential. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 269-274.
- Nam, J. E., Y. H. Lee, J. C. Ha, and K. Y. Jung, 2012: The production of rainfall re-analysis data using the production techniques of synthetic precipitation in Korean peninsula. *Proc. Spring Meeting of Korea Meteor. Soc.*, 136-137.
- NIMS, 2006: A study on improving short-range precipitation forecast skill (III). *National Institute of Meteorological Sciences*, 247 pp.
- _____, 2009: Development of very short-range prediction system for severe weather. *National Institute of Meteorological Sciences*, 277 pp.
- _____, 2012: Improvement of prediction skills in very short, short and mid-term for severe weather (IV). *National Institute of Meteorological Sciences*, 86 pp.
- Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **56**, 527-530.
- Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, **13**, 1148-1164.
- Richardson, Y. P., K. K. Droegemeier, and R. P. Davies-Jones, 2007: The influence of horizontal environmental variability on numerically simulated convective storms. Part I: Variations in vertical shear. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3429-3455.
- Seo, K. H., J. H. Son, and J. Y. Lee, 2011: A New Look at Changma. *Atmosphere*, **21**, 109-121.
- Shinoda, T., T. Amano, H. Uyeda, K. Tsuboki and H. Minda, 2009: Structure of line-shaped convective systems obliquely training to the Baiu front observed around the Southwest Islands of Japan. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **87**, 739-745.
- Shin, C. S., and T. Y. Lee, 2005: Development mechanisms for the heavy rainfalls of 67 August 2002 over the middle of the Korean Peninsula. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **83**, 683-709.
- Schumacher, R. S., and R. H. Johnson, 2008: Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood. *Mon. Weather. Rev.*, **136**, 3964-3986.
- Sun, J., and T. Y. Lee, 2002: A numerical study of an intense quasistationary convection band over the Korean Peninsula. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **80**, 1221-1245.
- Thompson, R. L., J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle. *Wea. Forecasting*, **18**, 1243-1261.
- _____, C. M. Mead, and R. Edwards, 2007: Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments. *Wea. Forecasting*, **22**, 102-115.
- You, C. H., D. I. Lee, S. M. Jang, M. Jang, H. Uyeda, and T. Shinoda, 2010: Characteristics of rainfall systems accompanied with Changma front at Chujado in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 41-51.