

## 2013년 8월 6일 한반도에서 발달한 다세포(Multicell) 대류계의 특성 분석

윤지현 · 민기홍\*

경북대학교 천문대기과학과

(접수일: 2016년 4월 9일, 수정일: 2016년 5월 23일, 게재확정일: 2016년 6월 14일)

### Characteristic Analysis of Multicell Convective System that Occurred on 6 August 2013 over the Korean Peninsula

Ji-Hyun Yoon and Ki-Hong Min\*

*Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea*

(Manuscript received 9 April 2016; revised 23 May 2016; accepted 14 June 2016)

**Abstract** Damages caused by torrential rain occur every year in Korea and summer time convection can cause strong thunderstorms to develop which bring dangerous weather such as torrential rain, gusts, and flash flooding. On 6 August 2013 a sudden torrential rain concentrated over the inland of Southern Korean Peninsula occurred. This was an event characterized as a mesoscale multicellular convection. The purpose of this study is to analyze the conditions of the multicellular convection and the synoptic and mesoscale nature of the system development. To this end, dynamical and thermodynamic analyses of surface and upper-level weather charts, satellite images, soundings, reanalysis data and WRF model simulations are performed. At the beginning stage there was a cool, dry air intrusion in the upper-level of the Korean Peninsula, and a warm humid air flow from the southwest in the lower-level creating atmospheric instability. This produced a single cell cumulonimbus cloud in the vicinity of Baengnyeongdo, and due to baroclinic instability, shear and cyclonic vorticity the cloud further developed into a multicellular convection. The cloud system moved southeast towards Seoul metropolitan area accompanied by lightning, heavy precipitation and strong wind gusts. In addition, atmospheric instability due to daytime insolation caused new convective cells to develop in the upstream part of the Sobaek Mountain which merged with existing multicellular convection creating a larger system. This case was unusual because the system was affected little by the upper-level jet stream which is typical in Korea. The development and propagation of the multicellular convection showed strong mesoscale characteristics and was not governed by large synoptic-scale dynamics. In particular, the system moved southeast crossing the Peninsula diagonally from northwest to southeast and did not follow the upper-level westerly pattern. The analysis result shows that the movement of the system can be determined by the vertical wind shear.

**Key words:** Multicell convection, wind shear, atmospheric instability, heavy precipitation

\*Corresponding Author: Ki-Hong Min, Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea.  
Phone: +82-53-950-6360, Fax: +82-53-950-6359  
E-mail: kmin@knu.ac.kr

## 1. 서 론

우리나라에서는 매년 여름철에 집중호우로 인한 피해가 발생하고 있으며, 대기 중의 적운 대류 현상은 뇌우를 발달하게 하는 등 집중호우, 순간 돌풍과 같은 악기상의 원인을 제공한다. 강풍과 폭우를 동반하는 뇌우는 한 시간 이내에 발달하여 소멸하는 단세포 뇌우(singlecell storm)와 여러 단세포 뇌우들의 조합으로 구성된 다세포 뇌우(multicell storm), 수 시간 동안 유지되며 강풍과 해일 및 토네이도를 발생시키는 거대세포 뇌우(supercell storm)로 분류된다(Markowski and Richardson, 2010). 이러한 단세포 대류계, 다세포 대류계 및 거대세포 대류계는 연직 바람 시어(vertical wind shear)의 크기에 따라서 구분되기도 한다(Weisman and Klemp, 1984; Fovell and Tan, 1998).

중규모 대류계에서 다세포 대류계는 강수의 증발 냉각에 의한 하층의 찬 공기풀(cold pool)과 주변 바람이 만드는 소용돌이도 균형에 의해 유지된다(Rotunno et al., 1988). 이러한 대류세포는 찬공기풀과 주변 바람이 만나 강한 수렴을 발생시키는 돌풍 전선(gust front)에서 발생하며 주변의 덥고 습한 공기는 이 지역에서 상승하면서 대류 세포를 만들어 낸다. 돌풍 전선에서 발생한 대류 세포는 뇌우의 후면으로 이동하고 발생과 이동의 과정을 주기적으로 반복하면서 다세포 뇌우를 유지시킨다. 다세포 뇌우는 수 시간 동안의 지속적인 강수와 강한 바람을 유도하는 조직화된 중규모 대류계로 그 구조와 물리적 과정을 이해하기 위해 많은 관측 및 이론적 연구가 수행되어 왔다(Ogura and Liou, 1980; Thorpe et al., 1982; Smull and Houze, 1985, 1987; Song and Chun, 1998; Song et al., 2000; Nam et al., 2005).

중규모 대류계에 동반되는 집중호우는 그 시공간적 규모가 종관 관측 규모보다 작기 때문에 발생 지점과 시간을 예측하기가 곤란하다(Kim and Lee, 2006). 한반도에 집중호우를 야기하는 유리한 조건들로는 강한 남서 하층 제트(Low Level Jet, LLJ)에 동반된 온난이류, 상층 골에 동반된 한랭이류, 상층제트에 의한 강한 경압성 등이 있다(Lee et al., 1998; Sun and Lee, 2002).

Kim and Lee (2008)는 2003년 8월 5일에서 6일까지 한반도 중부지역을 중심으로 중규모 대류계에 동반된 집중호우 사례에 대하여 분석하였다. 상층의 제트기류에 동반하여 대기 하층에 수렴 영역이, 대기 상층에 발산 영역이 존재하고, 뇌우를 중심으로 남쪽과 북쪽에 각각 저기압성 소용돌이도와 고기압성 소용돌이도를 가지는 중규모 쌍이 위치하면 강한 상승 운동이 일어남을 보였다. 또한 강한 대류성 뇌우의 발달과 유지를 위해서는 하층 수렴과 수렴된 공기를 상층

으로 이동시키는 중규모 소용돌이가 중요한 역할을 수행한다고 분석하였다. 더불어 700 hPa 등온위분석에서 한반도를 중심으로 수평 경도가 강한 지역이 위치하고 있으며 한반도를 중심으로 강한 대류 불안정이 형성되어 대류성 뇌우가 강하게 발생할 수 있다고 조사하였다.

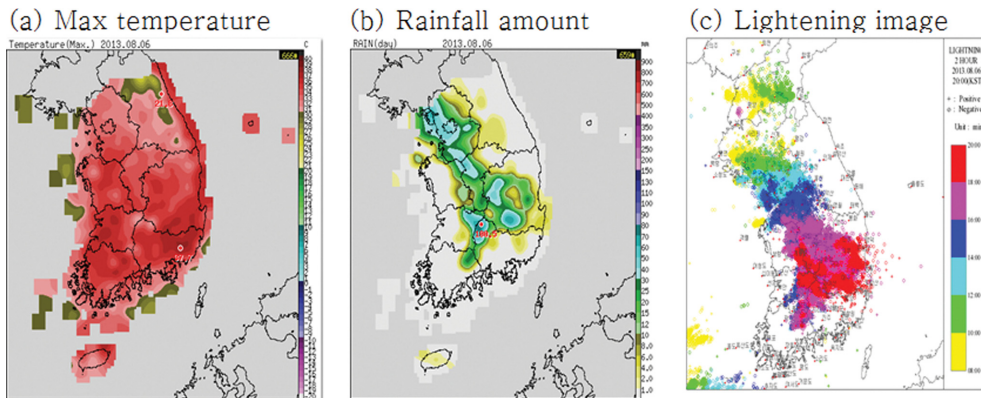
본 연구에서는 2013년 8월 6일 다세포 대류계에서 집중호우가 내린 사례를 중심으로 집중호우의 원인과 다세포 대류계의 발생과 이동특성을 분석하였다. Kim and Lee (2008)의 연구는 전형적인 상층 제트기류에 동반된 사례였음에 반해 본 사례의 중규모 대류계는 상층 제트의 흐름과는 다르게 북서에서 남동으로 한반도를 대각선으로 가로질러 이동한 사례이다. 따라서 본 연구를 통해 그 원인과 특성을 파악하고자 한다. 본 논문의 2장에서는 사례에 대한 설명과 분석 자료를 제시하였고, 3장에서는 분석 방법을, 4장에서는 분석 결과를 일기도, 위성영상, 재분석장 및 모델 시뮬레이션 등을 이용하여 설명하였고, 마지막으로 요약 및 결론을 도출하였다.

## 2. 사례와 분석 자료

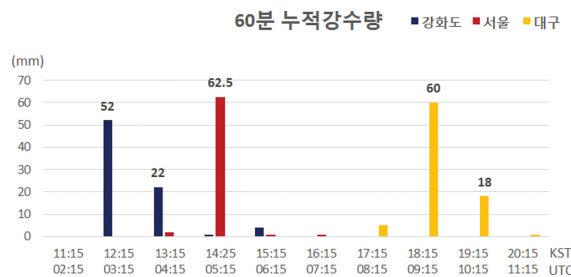
### 2.1 사례

2013년 8월 6일 대구의 최고 기온은 36.6°C로, 한반도 대부분이 일 최고 기온 30°C 이상을 기록하였다. 무덥고 습한 날씨에 대기가 불안정해지면서 백령도에서 돌풍과 낙뢰를 동반한 적란운이 발생하였고, 이 적란운은 0200 UTC에 강화도를 시작으로 내륙을 중심으로 많은 강수를 유발하였다. 특히 강화도를 비롯한 수도권과 대구 등지에 60 mm가 넘는 집중호우를 내렸다. 강수가 있었던 지역과 동일한 위치에 낙뢰가 발생하였는데, 이 날 하루에만 전국적으로 47,833회의 낙뢰가 떨어져 8월 전체 발생 횟수인 132,980회의 36%를 차지하였다. 이는 이례적으로 많은 낙뢰 발생 수치이며, 여름철(6, 7, 8월) 낙뢰 발생 횟수(174,595 회)의 27%, 2013년 연간 발생 횟수인 198,256회의 24%를 차지하는 수치이다. Figure 1은 2013년 8월 6일의 일 최고기온, 강수량, 5일 2300 UTC부터 6일 1100 UTC까지 시간 별 낙뢰 발생 횟수를 각각 나타낸다.

이 날 백령도에서 발생한 적란운은 다세포 대류계로 발달해 남동진하면서 한반도 내륙을 중심으로 집중 호우를 내린 후, 부산을 지나 바다로 빠져나가면서 소멸하였다. Figure 2는 집중호우가 있었던 지역 중 강화도, 서울, 대구의 시간대별 60분 누적 강수량이다. 8월 6일 하루 동안의 강수량은 강화도가 77 mm, 서울이 65 mm, 대구가 81 mm였으며, 강수가 시작한 후 1~2시간 사이에 60 mm가 넘는 강수량을 기록해 집중호우가 있었음을 알 수 있다. 또 강수가 내린 시



**Fig. 1.** 24 h (a) maximum temperature and (b) rainfall amount at 6 Aug 2013 and (c) hourly occurrence of lightning from 2300 UTC 5 to 1100 UTC 6 Aug 2013.



**Fig. 2.** Accumulated 60-min rainfall amount of AWS located at Ganghwa-do, Seoul and Daegu.

각은 강화도, 서울, 대구 순으로 지역마다 강수 시각의 차이가 있었다는 것을 알 수 있다.

**2.2 분석자료**

다세포 대류계가 발생하였던 중관 배경 분석을 위해 기상청 지상 및 상층일기도(850, 500, 200 hPa)와 위성영상, AWS 자료, 단열선도 등을 이용하였다. 중규모의 다세포 대류계가 발달하기 위한 역학적 및 열역학적인 환경 조건들은 미 항공우주국(NASA, National Aeronautics and Space Administration)의 the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application (MERRA, Rienecker et al., 2011) 재분석 자료를 이용하였다. MERRA 자료는 해상도가 위·경도  $0.67^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 인 2D 자료와  $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 인 3D 자료이며, 2D 자료와 3D 자료는 각각 한 시간, 세 시간 간격으로 생산된다.

본 사례의 시·공간 규모는 국지적이기 때문에 3차원의 MERRA 자료(3시간 간격,  $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ )로 다세포 대류계의 발달에 중요한 돌풍 전선 및 찬 공기 풀(cold pool)의 형성 등을 분석하는 데는 해상도의 한계가 있다. 따라서, 재분석 자료로는 분석이 어려운 현

상들을 미국 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 개발한 Weather Research and Forecasting (WRF, Skamarock et al., 2005) v3.51 모델 시뮬레이션 결과를 추가하여 더욱 상세히 분석하였다. 본 연구에서 사용한 모델 도메인 영역과 물리 과정에 대한 내용은 3장에서 자세히 기술하였다.

**3. 분석 방법**

다세포 대류계의 발달과 특성을 알아보기 위해 MERRA 재분석 자료를 이용하여 상당운위 등의 열역학적 특성과 발산, 상대 소용돌이도, 수분속 및 지상과 500 hPa의 연직 바람 시어 등의 운동학적 특성, 그리고 WRF 모델 시뮬레이션 자료를 이용하여 전선 발생 함수 분석 등을 수행하였다.

상층 대기의 발산과 하층 대기의 수렴, 상대 소용돌이도는 다세포 대류계를 구성하는 대류 세포들의 발달과 소멸에 중요한 역할을 한다.

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \tag{1}$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2}$$

위 식에서  $D$ 는 발산(Divergence)을 나타내며, 양수( $D > 0$ )일 경우 발산, 음수( $D < 0$ )일 경우 수렴이다.  $\zeta$ 는 상대 소용돌이도를 나타내며,  $D$ 와  $\zeta$ 의 단위는  $s^{-1}$ 이다.  $x$ 와  $y$ 는 각각 동서와 남북 방향의 수평거리로 단위는  $m$ 이며,  $u$ 와  $v$ 의 단위는  $m s^{-1}$ 이다.

대기의 하층에서 습윤한 공기의 지속적인 유입은 새로운 세포들이 발생할 수 있는 원인이 된다(Houze, 1993). 이에 수분속을 계산하여 하층에 습윤한 공기가

유입되었는지 분석하였다.

$$\vec{M} = q\vec{V} \quad (3)$$

여기서  $q$ 는 비습( $\text{g kg}^{-1}$ )이다. 더불어 상당온위를 계산하면 대기 하층의 수증기량의 분포를 알 수 있다. 상당온위는 주어진 공기덩이를 단열과정으로 상승시켜 공기덩이에 포함된 수증기를 완전히 응결시켜 제거한 후 다시 건조 단열적으로 1000 hPa 고도까지 하강시켰을 때의 공기덩이의 온도다. 상당온위는 다음과 같이 계산하였다.

$$\theta_e = T_{LCL} \times \left(\frac{1000}{P_{LCL}}\right)^{R_d C_p} \times \exp\left(\frac{L_v x}{C_p T}\right) \quad (4)$$

여기서  $T_{LCL}$ 과  $P_{LCL}$ 은 각각 LCL (Lifting Condensation Level, 치올립 응결고도)에서의 온도(K)와 압력(hPa)이고,  $R_d$ 는 건조공기의 기체상수( $287 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $C_p$ 는 건조공기의 정압비열( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $L_v$ 는 물의 잠열( $2.5008 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ),  $x$ 는 혼합비( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $T$ 는 온도(K)이다. 상당온위( $\theta_e$ )의 단위는 K이다.

일반적으로 편서풍 지대인 우리나라 주변에서 대류계의 이동은 서에서 동으로 이동하지만, 본 사례는 다세포 대류계로 발생한 이후 꾸준히 남동진하였다. 중규모 대류계의 이동 방향을 알아보기 위해 연직 바람 시어를 계산하였다. 준지귤 운동인 경우, 수평속도는 1차 근사로 지귤적이므로  $\vec{V} = \vec{V}_g + \vec{V}_a$ 로 쓸 수 있다 (Holton, 2007). 여기서  $\vec{V}_a$ 는 비지귤풍이며  $|\vec{V}_a| \ll |\vec{V}_g|$ 이다. 따라서 연직 바람 시어  $\partial\vec{V}/\partial z$ 는  $\partial\vec{V}_g/\partial z$ 로 근사 될 수 있다. 정역학 방정식과 상태 방정식을 이용하여 온도풍 방정식을  $\partial\vec{V}_g/\partial z$ 에 대한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial z} \approx \frac{\partial\vec{V}_g}{\partial z} = \frac{g}{T} \left(\frac{1}{f} \hat{k} \times \nabla_p T\right) \quad (5)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도( $9.8 \text{ m s}^{-2}$ ),  $T$ 는 온도(K),  $f$ 는 코리올리 상수( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ),  $\hat{k}$ 는 연직 단위 벡터,  $\nabla_p T$ 는 등압면에서의 온도 경도이다. 본 연구에서는 지상과 500 hPa의 연직 바람 시어를 계산하였다.

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial z} \approx \frac{\partial\vec{V}_g}{\partial z} \approx \vec{\delta}_{500-sfc} = (u500 - u10m)\hat{i} + (v500 - v10m)\hat{j} \quad (6)$$

여기서  $u500$ 과  $v500$ 은 각각 500 hPa에서의 바람의 동서성분과 남북성분,  $u10m$ 와  $v10m$ 는 각각 지상 10m에서의 바람의 동서성분과 남북성분으로, 바람의 단위는 모두  $\text{m s}^{-1}$ 이다. MERRA 재분석 자료는 기압으로 대기의 층을 나누기 때문에, 지상과 6 km의 연직 바람 시어 대신에 지상과 500 hPa의 연직 바람 시어

한국기상학회 대기 제26권 2호 (2016)

WPS Domain Configuration

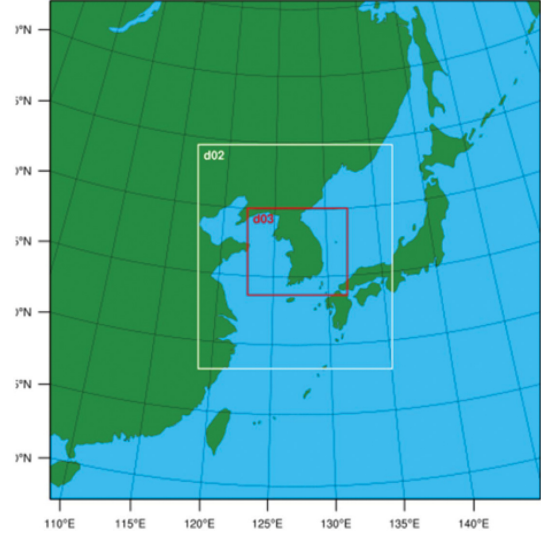


Fig. 3. Domain configuration (d01, d02, d03) of WRF model.

를 계산하였다.

다세포 대류계는 시간이 지날수록 새로운 세포들이 계속 발생하는데, 이는 돌풍 전선(gust front)을 따라 생성된다(Markowski and Richardson, 2010). 이를 확인하기 위해 전선 발생 함수를 계산하여 분석하였다. 전선 발생 함수의 값이 양의 값( $f_{2D} > 0$ )이면 온도의 수평경도를 강화시키고 전선 발생 구역이 되는데, 양의 구역과 그 강도의 변화를 통하여 전선 지점을 찾을 수 있다. 전선 발생 함수는 다음과 같이 계산하였다(Abdurakhimov, 2005; Martin, 2006).

$$f_{2D} = -\frac{1}{2|\nabla_p \theta|} \left[ D \left\{ \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)^2 \right\} + F_1 \left\{ \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)^2 \right\} + 2F_2 \left(\frac{\partial\theta}{\partial x} \frac{\partial\theta}{\partial y}\right) \right] \quad (7)$$

위 식에서  $\nabla_p \theta$ 은 등압면에서의 온위 경도,  $\theta$ 는 온위(K)이다. 또,  $D$ 는 발산(Divergence),  $F_1$ 은 늘림 변형(stretching deformation),  $F_2$ 는 층밀림 변형(shearing deformation)을 나타내며 각각 다음과 같은 식을 이용하여 계산된다.

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

$$F_1 = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (9)$$

$$F_2 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (10)$$

**Table 1.** Options used in WRF simulation.

	D01 (27 km)	D02 (9 km)	D03 (3 km)
# of grids	150 × 150 × 40	178 × 202 × 40	274 × 235 × 40
Period	2013.08.05. 1800~2013.08.06. 1800 (UTC)		
Time interval	30 s	10 s	3.333 s
Cumulus	Kain-Fritsch scheme		None
Microphysics	Thompson		
PBL	Yonsei University Scheme		
Longwave radiation	RRTM scheme		
Shortwave radiation	Dudhia scheme		
Surface layer	MM5 similarity		
Land model	Noah land surface		
Initial & boundary conditions	NCEP Final Analysis (FNL) (1° × 1°)		

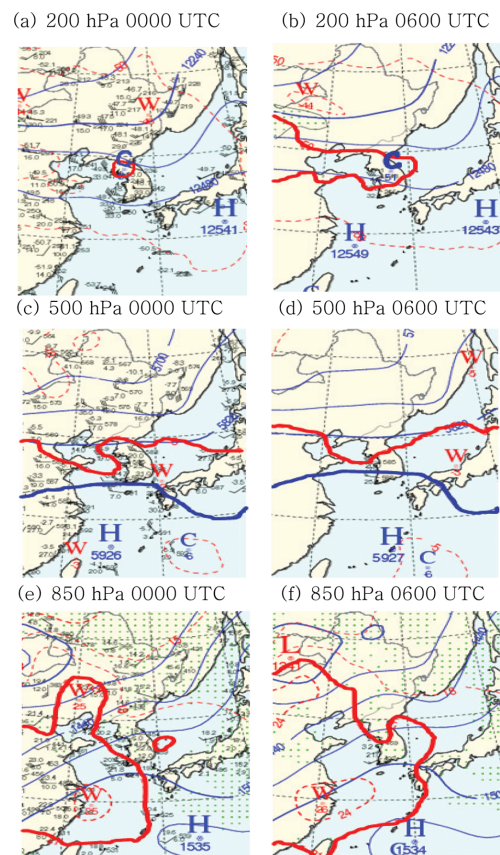
마지막으로 WRF 모델은 등지 격자 기법으로 구동하였으며, 도메인은 집중호우가 있었던 한반도 내륙 지역에 초점을 맞춰 3중 등지 격자 체계로 구성하였다. 첫 번째 도메인(d01)의 격자 크기는 27 km이며 6시간 간격, 두 번째 도메인(d02)의 격자 크기는 d01의 등지 격자로 9 km이며 3시간 간격, 세 번째 도메인(d03)의 격자 크기는 d02의 등지 격자로 3 km이며 1시간 간격으로 시뮬레이션 하였다. Figure 3은 세 도메인의 영역을 나타낸다. Table 1은 WRF 모델 설정 내용으로 격자 개수, 기간, 물리 과정 등을 정리하였다.

#### 4. 분석 결과

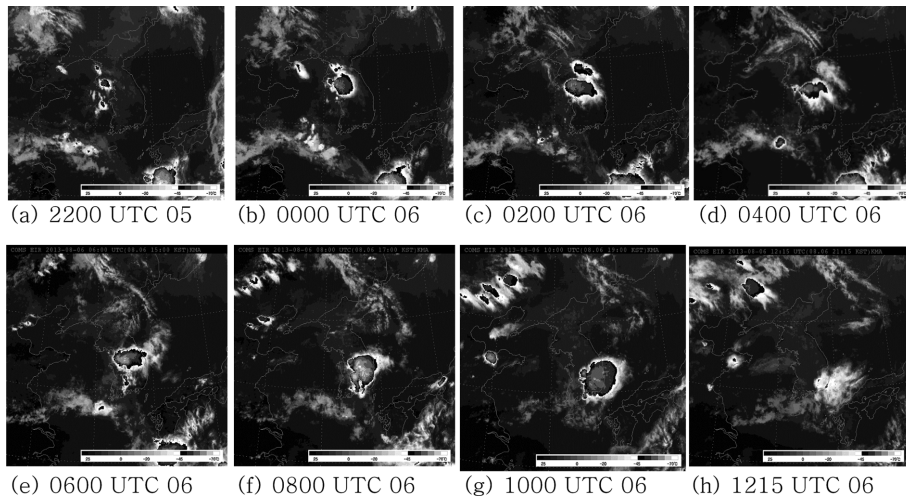
##### 4.1 종관 분석

##### 4.1.1 지상 및 상층 일기도 분석

다세포 대류계가 발생한 때의 종관 상태를 살펴보기 위해 지상일기도와 상층일기도를 분석하였다. Figure 4는 각각 2013년 8월 6일 0000 UTC와 0600 UTC의 200, 500, 850 hPa 일기도와 지상 일기도이다. 200 hPa에서 0000 UTC에 한반도 북부 지역에 위치해 있던 -5°C 온도선(빨간색 실선)이 시간이 지나면서 0600 UTC에 한반도 전체로 확장하였고, 한반도 위에는 한기 핵이 위치해 있다(Figs. 4a, b). 또한 Figs. 4c, d의 500 hPa 일기도를 보면 한반도는 계속해서 북태평양 고기압 가장자리(5,880 gpm, 남색 실선)에 위치해 있으며, 0000 UTC에는 -5°C의 온도골이 강하게 나타났고 한기의 유입이 있었다. 200 hPa과 500 hPa의 일기도를 통해 한반도 상층은 상대적으로 차가운 공기가 머물렀고 뚜렷한 제트의 위치는 확인되지 않는다. 반면 850 hPa 일기도에서는 0000 UTC보다 0600 UTC에



**Fig. 4.** Upper air charts for 200 hPa at (a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC (redline is -5°C isotherm), 500 hPa at (c) 0000 UTC, (d) 0600 UTC (redline is -5°C isotherm and blue line is 5880 gpm isopleth), and 850 hPa at (e) 0000 UTC, (f) 0600 UTC (redline is 21°C isotherm) for 6 Aug 2013, respectively.



**Fig. 5.** Enhanced infrared images at interval of two hours from COMS satellite at (a) 2200 UTC 5 Aug 2013, (b) 0000 UTC, (c) 0200 UTC, (d) 0400 UTC, (e) 0600 UTC, (f) 0800 UTC, (g) 1000 UTC, and (h) 1215 UTC 6 Aug 2013, respectively.

서 따뜻한  $21^{\circ}\text{C}$  온도선이 더 확장하였다(Figs. 4e, f). 차가운 공기가 위치해 있었던 상층과는 달리 하층에서는 따뜻한 공기가 위치했고, 등온선과 등고선이 교차해 경압 불안정이 형성되면서 한반도의 대기는 불안정하였다. 또 850 hPa 일기도에서 한반도는 내륙 지역을 중심으로 기온과 이슬점 온도의 차이가  $3^{\circ}\text{C}$  이하였고, 지상 일기도에서 한반도의 노점 온도는  $20^{\circ}\text{C}$  가 넘어 하층의 대기는 습했다.

#### 4.1.2 위성 영상 분석

시간에 따른 다세포 대류계의 크기, 이동 방향, 속도, 위치 등을 분석하기 위해 매 15분마다 산출되는 COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) 위성 자료를 이용하였다. Figure 5는 2013년 8월 5일 2200 UTC 부터 6일 1200 UTC까지 2시간 간격의 적외 강조 영상이다. 2013년 8월 5일 2200 UTC 에 백령도에서 대류 세포가 발생하기 시작하여 6일 0000 UTC에는 두 개 이상의 대류 세포가 발달하며 경기도 지역으로 영역이 확대되었다. 시간이 지남에 따라 다세포 대류계는 한반도 중부지역으로 이동하며, 0600 UTC에는 남부지역에 새로운 대류 세포들이 생성되었다(Figs. 5c, d). 새롭게 생성된 대류 세포들은 기존의 다세포 대류계와 합쳐지면서 대류계의 규모가 강해지고 그 영역 또한 확대된다(Fig. 5f). 중부지역에서 경상지역으로 남동진하던 다세포 대류계는 1000 UTC 이후로 부산을 지나면서 그 세력이 약해지고 형태를 잃어 소멸하였다.

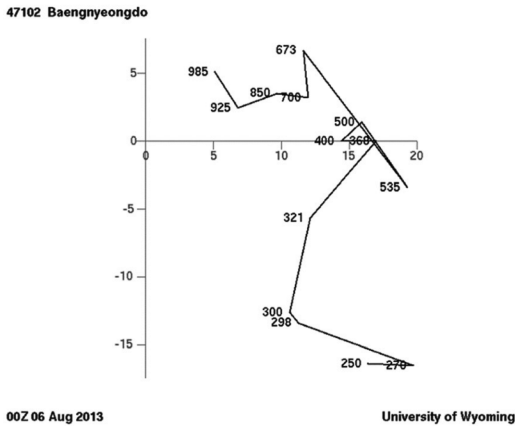
다세포 대류계에서 운정 온도가 낮은 지역은 많은 강수가 있었던 곳과 일치한다(Fig. 1b). 다세포 대류

계의 적란운 상부의 온도는  $-60^{\circ}\text{C}$ 에서  $-70^{\circ}\text{C}$  이하로, 운정 온도와 단연 선도를 이용하여 운정 고도는 약 16 km 이상으로 추정할 수 있으며 이는 다세포 대류계가 상당히 발달했음을 알 수 있다(Fig. 5). 적란운 상부의 상당히 낮은 온도와 두꺼운 구름의 높이가 강한 뇌전 현상의 원인이 된 것으로 사료된다. 위성 영상으로 추정한 다세포 대류계의 크기는 서울에 위치했던 0500 UTC에 약  $28,000\text{ km}^2$ , 대구에 위치했던 0800 UTC에 약  $39,000\text{ km}^2$ 로 0600 UTC이후에 다세포 대류계가 더 크게 발달하였다. 다세포 대류계는 5일 2100 UTC에 적란운으로 발생했을 때부터 6일 1200 UTC에 소멸할 때까지 15시간 동안 평균  $9.09\text{ m s}^{-1}$ 로 남동진하였다.

#### 4.1.3 호도그래프 및 단열 선도 분석

대류 운동이 있는 곳에서 연직 바람 시어는 대류성 뇌우의 구조 및 발달을 예측하는 데에 중요한 역할을 한다. Figure 6은 2013년 8월 6일 0000 UTC의 백령도와 오산의 고층 기상 관측 자료를 이용하여 나타낸 호도그래프이다. 오산의 호도그래프를 보면, 대기 하층에는 순전(Veering)이, 대기 상층에는 반전(backing)이 있어서 대기 중·하층의 594 hPa 아래에서는 온난 이류가, 대기 상층인 300 hPa까지는 한랭 이류가 존재해 대기가 계속해서 불안정하였다(Fig. 6b). 또한 백령도에서 985 hPa와 500 hPa의 연직 바람 시어의 크기는  $11.24\text{ m s}^{-1}$ 이고, 오산에서 지상과 500 hPa의 연직 바람 시어의 크기는  $14.22\text{ m s}^{-1}$ 로 다세포 대류계의 조건(0~6 km의 연직 바람 시어의 크기가 10~20  $\text{m s}^{-1}$ )을 만족하였다.

(a) Baengyeongdo



(b) Osan

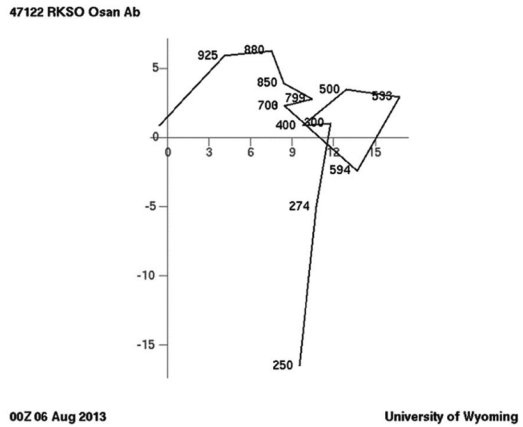
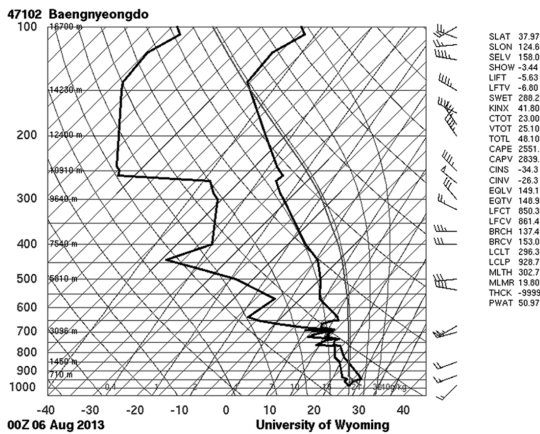


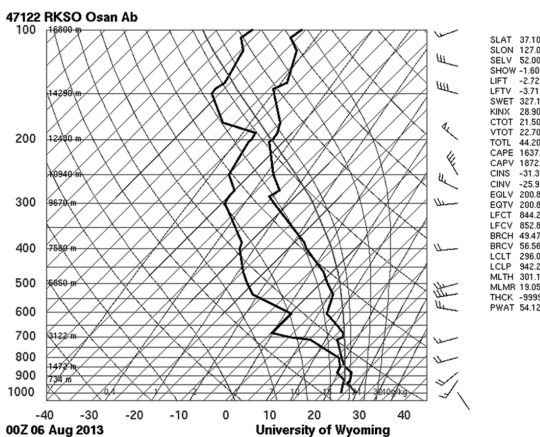
Fig. 6. Hodograph of (a) Baengyeongdo and (b) Osan at 0000 UTC 6 Aug 2013, respectively.

(a) Baengyeongdo, 0000 UTC 6 Aug 2013



SLAT 37.97  
 SLON 124.83  
 SELV 155.0  
 SHOW -3.44  
 LIFT -5.63  
 LFTV -6.00  
 SWET 288.2  
 KINX 41.80  
 CTOT 53.00  
 VTOT 25.10  
 TOTL 48.10  
 CAFE 2551  
 CAPV 2839  
 CINS -34.3  
 CINV -26.3  
 EQLV 149.1  
 EGTV 148.9  
 LFCV 850.3  
 LFCV 861.4  
 BRCH 137.4  
 BRCV 153.0  
 LCLT 296.3  
 LCLP 302.7  
 MLTH 302.7  
 MLMR 19.80  
 THCK -9599  
 PWAT 50.97

(b) Osan, 0000 UTC 6 Aug 2013



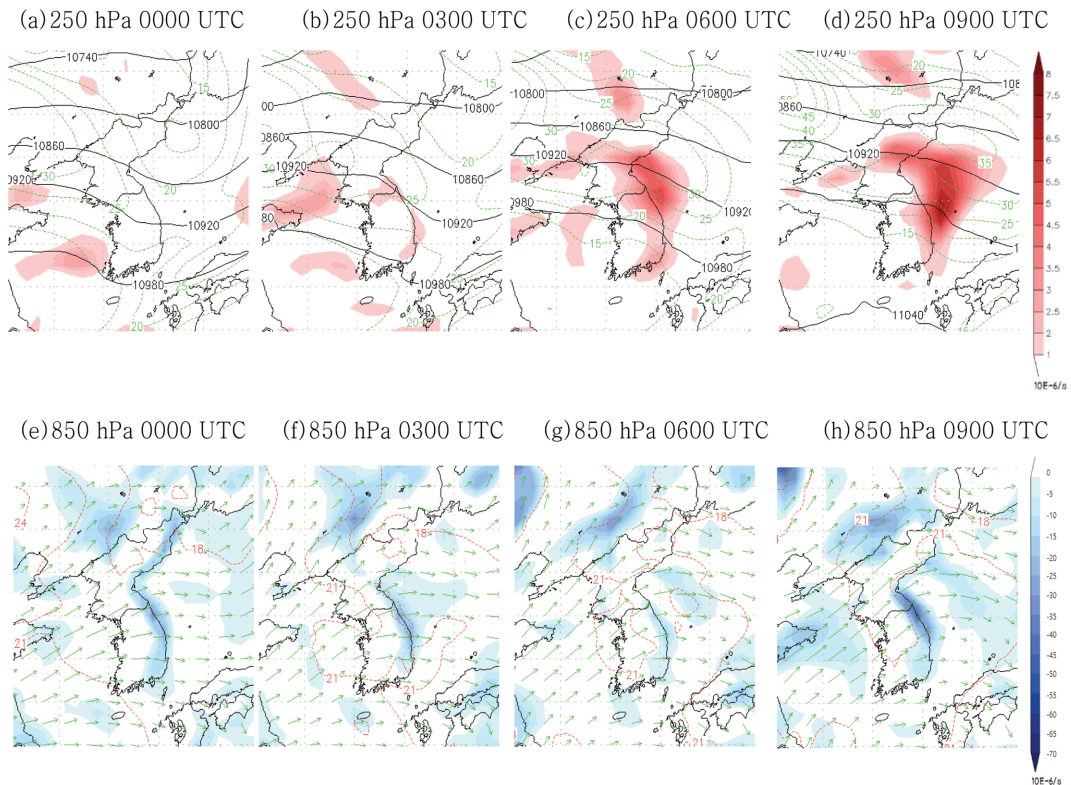
SLAT 37.10  
 SLON 127.03  
 SELV 52.00  
 SHOW -1.80  
 LIFT -2.72  
 LFTV -3.71  
 SWET 327.1  
 KINX 28.90  
 CTOT 21.50  
 VTOT 22.70  
 TOTL 44.20  
 CAFE 1637  
 CAPV 1872  
 CINS -31.3  
 CINV -25.9  
 EQLV 200.8  
 EGTV 200.8  
 LFCV 844.2  
 LFCV 852.8  
 BRCH 454.7  
 BRCV 56.56  
 LCLT 296.0  
 LCLP 342.2  
 MLTH 301.1  
 MLMR 19.05  
 THCK -9599  
 PWAT 54.12

Fig. 7. Skew T - log P diagrams at 0000 UTC from (a) Baengyeongdo and (b) Osan upper-air observation station.

다세포 대류계의 발생과 관련된 대기의 연직 구조와 안정도 지수를 살펴보기 위하여 단열선도를 분석하였다. Figure 7은 2013년 8월 6일 0000 UTC의 백령도와 오산의 단열선도이다. 6일 0000 UTC에 백령도는 지상에서부터 700 hPa까지, 오산은 지상부터 800 hPa까지 이슬점 편차( $T - T_d$ )가  $5^{\circ}\text{C}$  이하로 습윤한 상태인 반면, 그 이상의 대기 중상층은 이슬점 편차의 값이 갑자기 커지면서( $T - T_d > 5^{\circ}\text{C}$ ) 매우 건조한 상태를 알 수 있다. 따라서 대기 하층은 습윤하고 상층은 매우 건조한 대류 불안정(potential instability) 상태이므로 적란운의 발생 가능성이 높았다. 이 때 백령도의 대류가용에너지 Convective Available Potential Energy (CAPE)는  $2,551 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ , K 지수는 41.8, LI 값은  $-5.63$ 으로 대기가 매우 불안정하였다. 또한 대기의 가습수량을 나타내는TPW (Total Precipitable Water)가 50.97 mm로 호우를 발생시킬 수 있는 임계 값 수준인 50 mm을 넘었다. 오산의 CAPE는  $1,637 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ , K 지수는 28.9, LI의 값은  $-2.72$ 로 내륙에서도 불안정한 조건을 만족한다. 오산의 TPW의 값은 54.12 mm이다.

4.2 MERRA 자료 분석

우리나라 여름철에 발생하는 집중호우는 대기 상층의 제트기류의 영향을 받아 대기의 상층에는 발산이, 대기의 하층에는 수렴이 형성되면서 저기압의 발달에 의해 나타나는 것이 일반적이다(Kim and Lee, 2006). 본 사례가 대기 상층의 영향을 받았는지 살펴보기 위해 250 hPa에서의 발산(Divergence)과 850 hPa에서의 수렴(Convergence)을 계산해보았다. Figure 8은 2013년 8월 6일 0000 UTC에서 0900 UTC까지 250 hPa에서의 발산과 850 hPa에서의 수렴을 3시간 간격으로



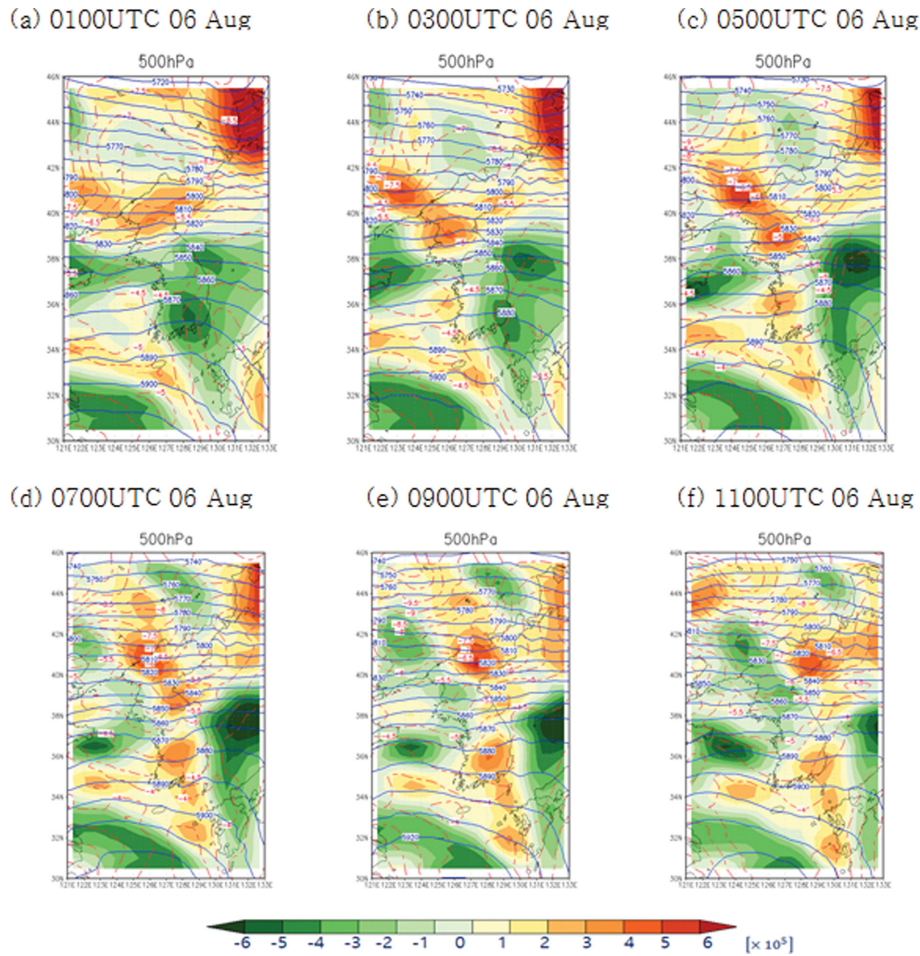
**Fig. 8.** (a)-(d): Divergence of 250 hPa at (a) 0000 UTC, (b) 0300 UTC, (c) 0600 UTC and (d) 0900 UTC 6 Aug 2013, respectively. Solid line represents geopotential height (gpm), dotted line represents isotach ( $\text{m s}^{-1}$ ), and shaded area represents divergence ( $\times 10^6$ ). (e)-(h): Convergence of 850 hPa at (a) 0000 UTC, (b) 0300 UTC, (c) 0600 UTC and (d) 0900 UTC 6 Aug 2013, respectively. Dotted line represents temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), arrow represents moisture flux ( $\times 10^3 \text{ m s}^{-1}$ ), and shaded area represents convergence ( $\times 10^6$ ).

나타낸 그림이다. 제트류는 대기의 상층(200이나 300 hPa)에서 풍속이  $37.5 \text{ m s}^{-1}$  (75 kts) 이상인 강풍대를 말하는 것으로, Figs. 8a, b에서 확인할 수 있듯이 풍속이  $37.5 \text{ m s}^{-1}$  이상인 지역은 발해만 북쪽 지역에 위치하고 있어 한반도는 제트기류의 영향을 거의 받지 않았음을 알 수 있다. 또한 250 hPa에서의 발산 구역과 850 hPa에서의 수렴 구역을 보면 초기의 발생 시기를 제외하면 구름의 위치와 강수 구역에서는 발산과 수렴이 약하거나 없고, 동쪽으로 치우쳐서 동해안을 따라 발산과 수렴이 강하게 나타난다. 따라서 다세포 대류계는 초기에는 제트류의 영향을 받아 발생하지만, 그 지속성과 이동은 연관이 없는 것으로 판단된다. 이를 통해, 본 사례의 다세포 대류계에 의한 집중호우는 일반적인 사례와는 달리 중관 규모의 영향보다 중규모, 국지 규모의 영향이 더 컸던 것으로 사료된다.

Figure 9는 2013년 8월 6일 0100 UTC에서 1100 UTC 까지 500 hPa에서의 상대 소용돌이도와 지위고도, 온

도를 2시간 간격으로 나타낸 것이다. 0100 UTC에 한반도 북쪽에 위치한 저기압성 소용돌이도는 시간이 지나면서 점점 강해지며 한반도 중부지역으로 이동하는 것을 볼 수 있다(Figs. 9a-d). 이 저기압성 소용돌이도가 남쪽으로 이동함에 따라 다세포 대류계가 함께 이동하는 양상을 보인다. 한편, 한반도 남부해상에 위치한  $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 저기압성 소용돌이도의 중심이 한반도 남부 내륙 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있고, 특히 0700 UTC에 저기압성 소용돌이도의 위치는 새로운 대류 세포들이 발생한 위치와 일치한다. 이후 저기압성 소용돌이도의 위치 변화는 다세포 대류계의 이동 방향과 일치한다(Figs. 9e, f). 또한 0900 UTC를 전후로 저기압성 소용돌이도가 강해졌다가 약해지는 양상도 0800 UTC를 전후로 다세포 대류계가 발달했다가 약해지는 양상과 일치한다. 더불어 저기압성 소용돌이도의 주변 지역에서 약한 단과골(등고선 5,880 gpm과 5,865 gpm)과 온도골(등온선  $-4.5^{\circ}\text{C}$ 와  $-5^{\circ}\text{C}$ )이 있는 것을 확인할 수 있다(Figs. 9e, f). 이를 통해 다





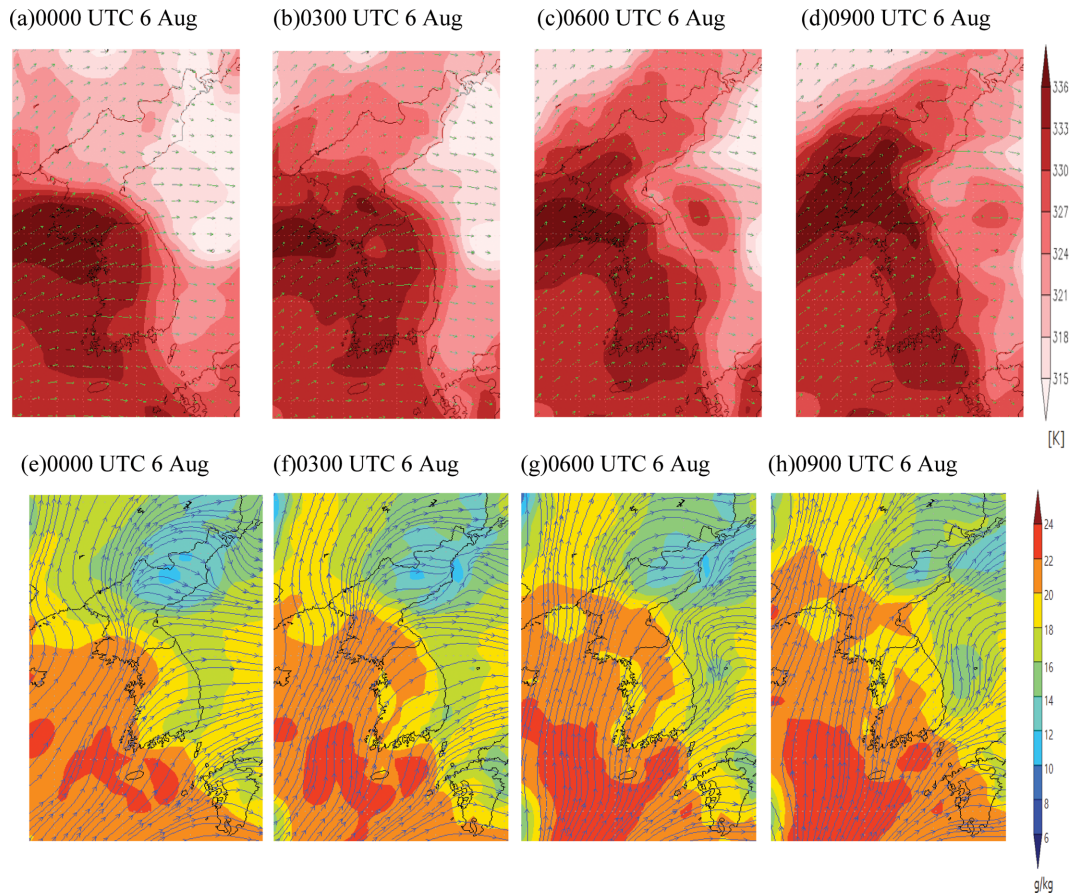
**Fig. 9.** Relative vorticity of 500 hPa at (a) 0100 UTC, (b) 0300 UTC, (c) 0500 UTC, (d) 0700 UTC, (e) 0900 UTC, and (f) 1100 UTC 6 Aug 2013, respectively. Solid line represents geopotential height (gpm), dashed line represents temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), and shaded area represents relative vorticity ( $\times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ).

세포 대류계가 발생한 후 시간이 지나면서 약한 단파골과 온도골에 의해 저기압성 소용돌이도가 강해지고 ( $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), 새로운 대류 세포들이 내륙에서 발생하여 기존의 다세포 대류계와 합쳐진 것임을 알 수 있다.

일기도 분석과 단열선도 분석을 통해 상층의 대기는 차고 건조한 상태였음을 알았다. 대기의 하층이 습윤하고 대기의 상층이 건조할 때 대기는 불안정해지고, 하층의 습윤한 공기가 부력에 의해 상승하면서 적란운이 발생한다. 이에 하층 대기의 수증기 유입과 수증기량의 분포를 살펴보기 위해 850 hPa에서 상당온위와 수분속을 계산하고, 지상에서 유선(stream line)의 흐름을 분석하고 비습을 계산하였다.

Figure 10은 2013년 8월 6일 0000 UTC에서 0900 UTC까지 상당온위, 수분속 및 지상에서의 유선(stream

line)과 비습을 나타낸 것이다. Figures 10a-d를 통해서 해안과 남해안으로부터 수분의 유입이 꾸준하게  $0.10\text{--}0.17 \text{ m s}^{-1}$ 로 활발히 일어나고 있는 것을 확인할 수 있다. 0000 UTC에 백령도 부근과 한반도 수도권 지역(Fig. 10a), 0300 UTC와 0600 UTC에 백령도 부근, 한반도 중부지역과 전라도 지역(Figs. 10b, c), 0900 UTC에 한반도 동해안 일부를 제외하고는 한반도의 북서에서 남동으로 850 hPa의 상당온위 값이 333 K 이상으로 주변 지역보다 큰 값을 갖는다(Fig. 10d). 이는 주변 지역보다 대기의 수증기 함유량이 많아 강한 대류 불안정이 나타난다는 것과 백령도에서 남해안 지역으로 강한 온도 구배가 존재함을 의미한다. 또한 Figs. 10e-h에서는 지상에서의 비습이 850 hPa에서의 상당온위 분포와 비슷한 양상을 보인다. 한반도의 남



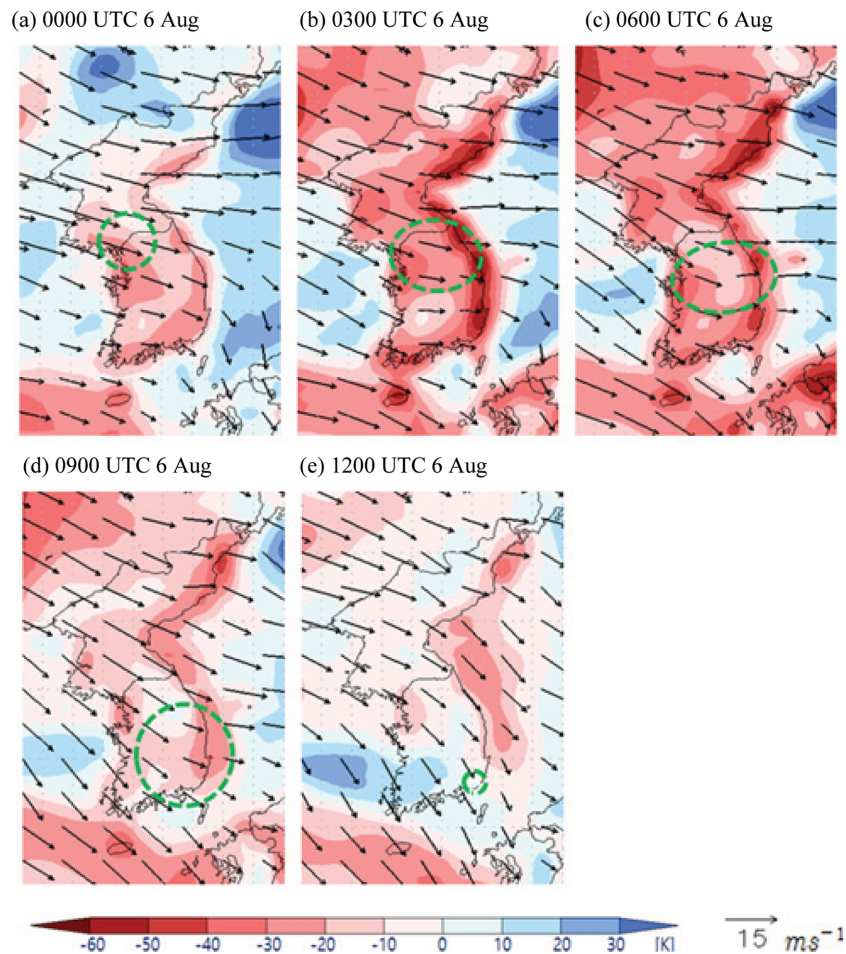
**Fig. 10.** (a)-(d): Equivalent potential temperature and moisture flux of 850 hPa at (a) 0000 UTC, (b) 0300 UTC, (c) 0600 UTC, and (d) 0900 UTC 6 Aug 2013, respectively. Arrow represents moisture flux ( $\times 10^3 \text{ m s}^{-1}$ ) and shaded area represents equivalent potential temperature (K). (e)-(h): Stream line and specific humidity at the surface for the same data as (a)-(d). Solid line represents stream line and shaded area represents specific humidity ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

서쪽의 비습은  $20 \text{ g kg}^{-1}$  이상으로 주변 지역보다 높고, 시간이 지남에 따라 비습이  $22 \text{ g kg}^{-1}$  이상인 지역이 넓어지면서 한반도에는 지속적인 수증기 유입이 있었다는 것을 알 수 있다. 따라서 한반도는 지속적인 수증기의 유입으로 인해 하층 대기가 매우 불안정하고 습윤한 상태였고 강한 온도 구배에 의해 연직시어도 크게 발달하였음을 시사한다.

미국에서 발생하는 다세포 대류계 시스템은 지상과 6 km의 연직 바람 시어의 방향을 따라 이동하는 특성이 있다(Markowski and Richardson, 2010). 이를 우리나라에 적용시켜 보았고, 지상과 500 hPa의 연직 바람 시어를 계산하고 그 크기와 방향을 분석하였다. Figure 11은 2013년 8월 6일 0000 UTC에서 1200 UTC까지 지상과 500 hPa의 연직 바람 시어( $\text{m s}^{-1}$ )를 3시간 간격의 벡터로 나타낸 그림이다. 화살표의 크기는

연직 바람 시어의 세기를, 화살표의 방향은 시어에 의한 온도풍의 방향을 나타내며, 그림에서 초록색 원형은 각 시각 당시에 다세포 대류계의 크기를 나타낸 것이다. 각 그림에 표시된 다세포 대류계의 위치에서 연직 바람 시어의 방향을 보면 모두 남동쪽을 향해 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 분석한 다세포 대류계의 이동 방향과 일치한다. 즉, 우리나라에서도 다세포 대류계의 이동이 연직 바람 시어에 의해 결정될 수 있으며 위험 기상 예보에 적용할 수 있는 중요한 단서이다.

한편 연직 바람시어의 평균 크기는 Fig. 11에 표시된 다세포 대류계 위치(녹색 점선) 내에서 0000 UTC에  $16.67 \text{ m s}^{-1}$ , 0300 UTC에  $12.22 \text{ m s}^{-1}$ , 0600 UTC에  $10 \text{ m s}^{-1}$ , 0900 UTC에  $12.22 \text{ m s}^{-1}$ 이다. Fovell and Tan (1998)은 단세포 대류계가  $10\sim 20 \text{ m s}^{-1}$ 의 연직 바



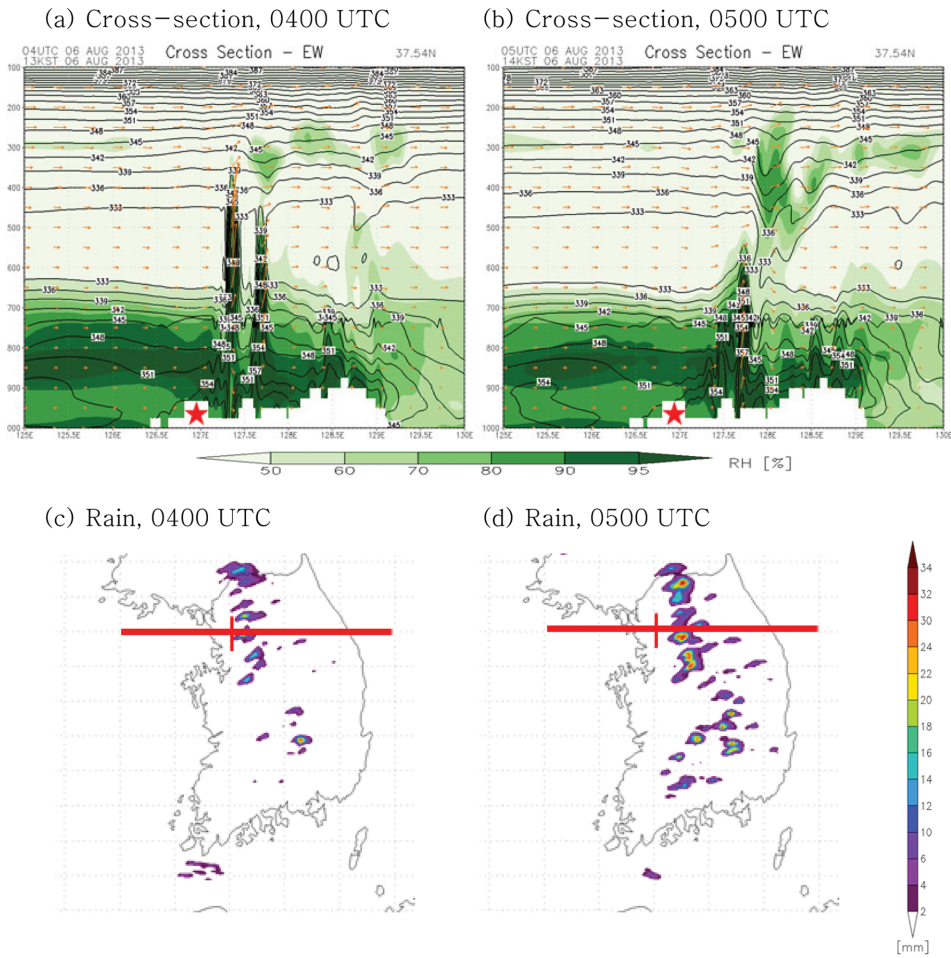
**Fig. 11.** Vertical wind shear (500 hPa-surface) at (a) 0000 UTC, (b) 0300 UTC, (c) 0600 UTC, (d) 0900 UTC, and (e) 1200 UTC 6 Aug 2013, respectively. Arrow represents (surface - 500 hPa) wind vector difference ( $m s^{-1}$ ) and shaded area represents (surface - 500 hPa) equivalent potential temperature difference (K).

람시어 환경에서 다세포 대류계로 발달할 수 있다고 설명하였는데 본 사례의 분석 결과와도 잘 일치한다. 또한, Fig. 11에서 파란색 지역은 지상과 500 hPa의 상당온위 차가 양수인 지역으로 대기가 안정한 것을, 붉은색 지역은 상당온위 차가 음수인 지역으로 대기가 불안정한 것을 나타낸다. 즉, 0000 UTC와 0300 UTC에 다세포 대류계가 발달하면서 대기는 불안정해지고 (Figs. 11a, b), 강수가 있는 지역을 중심으로 대기의 불안정이 해소되는 모습을 보이다가(Figs. 11c, d), 다세포 대류계가 소멸하면서 안정한 상태의 대기로 복원됨을 알 수 있다(Fig. 11e).

#### 4.3 시뮬레이션 결과 분석

Figures 12와 13은 집중호우가 있었던 지역 중 0400~0500 UTC의 서울과, 0700~0800 UTC의 대구의 WRF

모델로 모의한 상당온위와 상대습도에 대한 연직 단면도와, 시간대별 강수량(mm)이다. 앞서 분석한 AWS 자료(Fig. 1)와 위성 영상(Fig. 5)의 결과와 유사하게 모델이 강수계를 서울 지역에서 소백산맥 부근으로 이동시키고 다세포 대류계로 발달하는 것을 잘 모의한다. 이를 토대로 강수가 있었던 시각의 연직 단면도를 통해 하층과 상층의 수증기량을 비교하고, 연직 상승 속도를 살펴보았다(Figs. 12, 13). 그림에서 별(★) 모양은 각각 서울과 대구의 위치를 나타낸다. 또, Figs. 12c, d에서 빨간 굵은 실선은 경도 125°E~130°E를 나타내고, 빨간 얇은 실선은 위도 37.54°N를 나타내며 두 실선이 교차하는 지역이 서울(37.54°N, 126.90°E)이다. Figure 13c, d도 마찬가지로 빨간 굵은 실선은 경도 125°E~130°E를 나타내고, 빨간 얇은 실선은 위도 35.87°N를 나타내며 두 실선이 교차하는 지역이



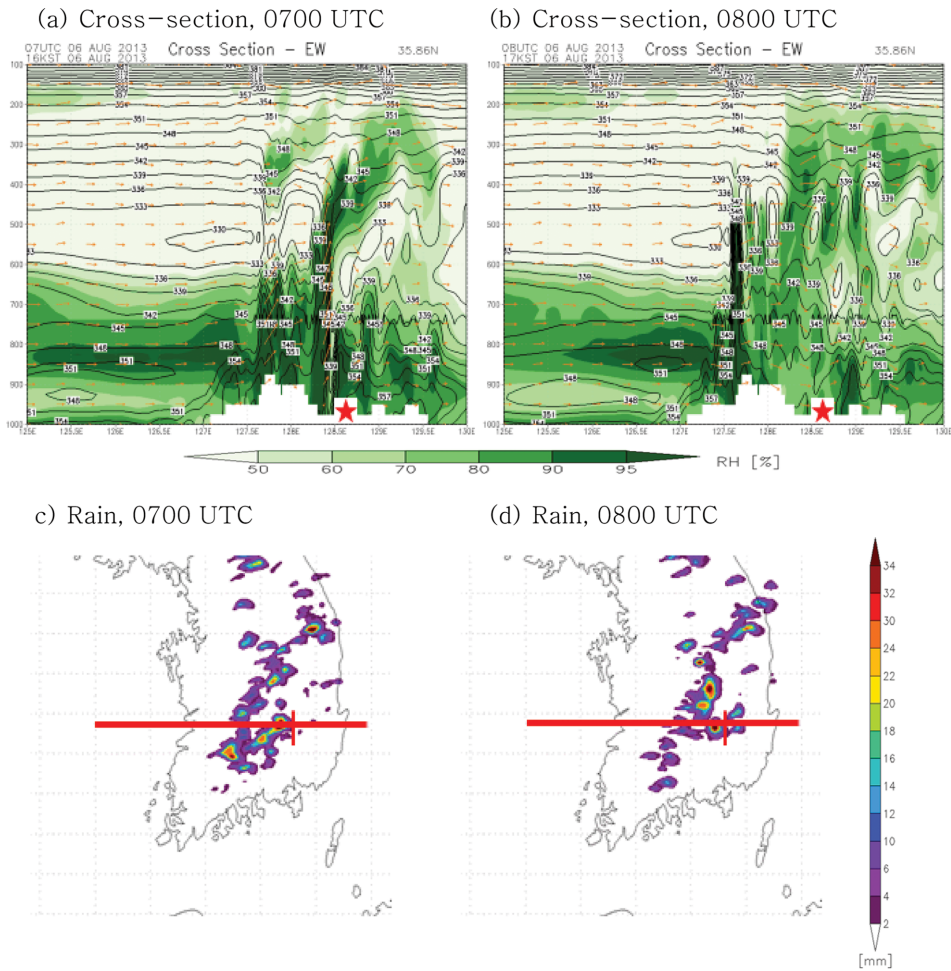
**Fig. 12.** Model simulated vertical cross section of equivalent potential temperature (K), relative humidity (%) and vertical velocity ( $m s^{-1}$ ) along  $37.54^{\circ}N$  at (a) 0400 UTC and (b) 0500 UTC 6 Aug 2013. Rainfall amount (mm) is shown for (c) 0400 UTC and (d) 0500 UTC 6 Aug 2013.

대구( $35.87^{\circ}N$ ,  $128.63^{\circ}E$ )이다.

Figures 12a, b를 보면, Figs. 12c, d에서 강수가 나타나는 서울과 경기도 지역이 주변 지역보다 상대습도와 상당온위가 높게( $\theta_e > 333 K$ ) 치솟아 있는 것을 볼 수 있다. 또한 큰 값의 상대 습도( $RH > 90\%$ )와 상당온위( $\theta_e > 333 K$ )가 나타나는 곳에서 연직 상승 속도도 매우 크게( $w > 4 m s^{-1}$ ) 나타난다. 이러한 양상은 두 지점에서 확연히 나타나는데, 이를 통해 두 개 이상의 대류 세포가 존재한다는 것을 짐작할 수 있다. Figure 12a와 b의 그림을 비교해보면, 시간이 지남에 따라 강수계가 동쪽으로 이동한 것도 확인할 수 있다. 이와 유사하게 Figs. 13a, b를 보면, Figs. 13c, d에서 강수가 나타나는 전라북도와 경상북도의 내륙과 대구에서 주변 지역보다 큰 값의 상대 습도( $RH > 90\%$ ),

상당온위( $\theta_e > 336 K$ ), 그리고 상승 속도( $w > 4 m s^{-1}$ )가 나타난다. 서울지역과 비교했을 때, 대구에서는 더 넓은 지역에서 상대습도와 상당온위, 상승 속도 값이 크게 나타난다. 서울은 상대 습도가 90% 이상인 영역의 높이가 500~400 hPa 사이에서 나타나는 것에 비해 대구는 400 hPa보다 더 높은 곳까지 나타나, 다세포 대류계가 서울보다 대구에서 100 hPa 이상 더 높게 발달하였음을 알 수 있다.

본 사례에서 다세포 대류계는 0600 UTC를 전후로 소백산맥 서쪽 지역에서 새로운 대류 세포들이 발생하면서 기존의 다세포 대류계와 합쳐져 그 규모와 발달 정도가 강해졌다. 다세포 대류계에서 강수가 내리면, 하강 기류에 의해 내려오는 차가운 공기는 주위의 따뜻한 공기를 파고들어 온도의 수평 경도가 커지



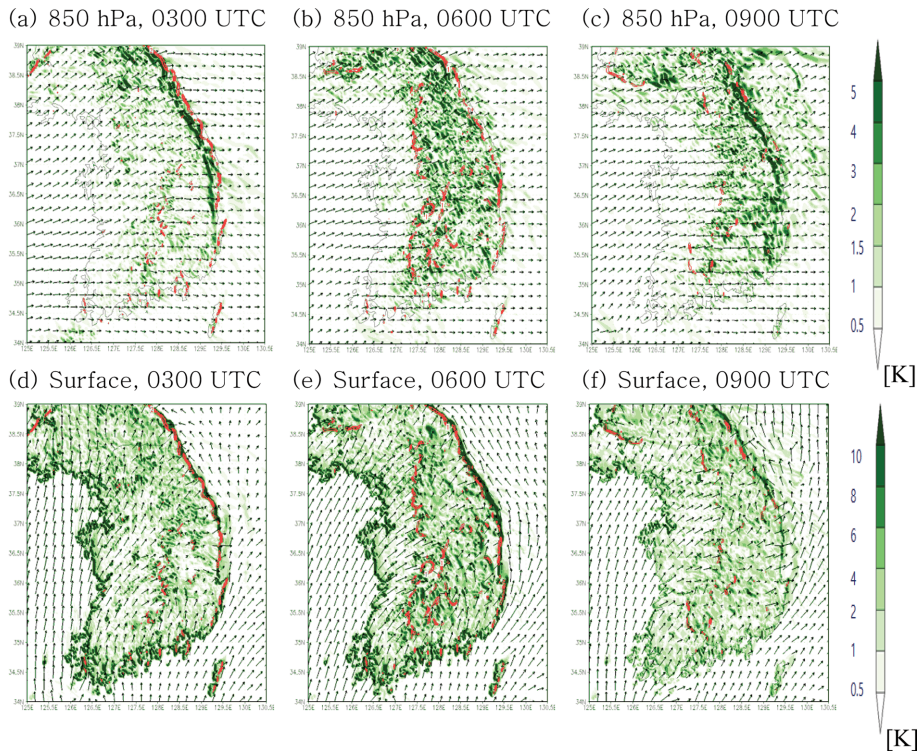
**Fig. 13.** Model simulated vertical cross section of equivalent potential temperature (K), relative humidity (%) and vertical velocity ( $\text{m s}^{-1}$ ) along  $35.86^\circ\text{N}$  at (a) 0700 UTC and (b) 0800 UTC 6 Aug 2013. Rainfall amount (mm) is shown for (c) 0700 UTC and (d) 0800 UTC 6 Aug 2013.

게 되면서 전선이 만들어진다. 이 전선은 국지적으로 발생하는 돌풍 전선(gust front)으로 새로운 대류 세포들은 돌풍 전선을 따라 발생할 수 있다. 이에 새로운 대류 세포가 만들어 지는 6일 0600 UTC를 전후로 전선이 만들어지는지를 확인하기 위해 전선 발생함수를 계산하였다. 전선 발생 함수의 값이 양이면 전선 발생 지역이라고 판단하였다(Adburakhimov, 2005).

Figure 14는 2013년 8월 6일 0300 UTC에서 0900 UTC까지 850 hPa과 지상에서의 온위 경도(K), 전선 발생 지역, 그리고 바람( $\text{m s}^{-1}$ )을 나타낸 그림이다. 전선 발생 함수의 값이 1 이상( $f_{2D} > 1$ )인 지역을 빨간색 실선으로 나타내었다. 850 hPa과 지상 모두에서 0300, 0900 UTC에 비해 0600 UTC에서 내륙을 따라 온위 경도가 크게 나타나고(850 hPa은 4 이상, 지상은

8 이상), 큰 온위 경도의 값을 갖는 지역에서 전선 발생이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이 위치는 위성 영상에서 확인했던 새로 발생하는 대류 세포들의 위치와도 일치한다. 또한 지상의 0600 UTC에는 온위 경도가 큰 곳과 전선 발생 지역을 따라 바람이 수렴하는 것을 확인할 수 있어 이 지역을 중심으로 새로운 대류 세포들이 발생하였음을 알 수 있다(Fig. 14c). 동해안을 따라서도 전선 발생 함수 값이 양인 지역이 나타나지만 바람의 주풍이 서풍 계열이기 때문에 풍하측에서 대류 세포나 강수는 크게 발달하지 못하였다.

종합하면, 불안정한 상태의 대기에서 온난하고 습윤한 공기의 유입으로 적란운이 발생하였고, 이후 다세포 대류계로 발달하며 수도권에 집중호우를 내렸다.



**Fig. 14.** Model simulated gradient potential temperature, frontogenetic function and wind vector for 850 hPa at (a) 0300 UTC, (b) 0600 UTC, (c) 0900 UTC and for surface at (d) 0300 UTC, (e) 0600 UTC, (f) 0900 UTC 6 Aug 2013, respectively. Solid line represents frontogenetic region ( $f_{2D} > 1$ ), arrow represent wind vector ( $\text{m s}^{-1}$ ), and shaded area represents gradient potential temperature (K).

0600 UTC 이후 다세포 대류계에 의한 돌풍 전선, 저기압성 소용돌이도 및 지형 효과에 의해 새로운 대류 세포들이 발생했고, 기존의 다세포 대류계와 새로 발생한 대류 세포들이 합쳐지면서 그 규모와 강도가 커졌으며, 남부지역에 집중호우를 내린 후 한반도를 빠져나가면서 소멸하였다. 다세포 대류계의 이동은 상층의 바람 방향과는 무관하게 지상과 500 hPa의 연직 바람 시어의 방향에 의해 꾸준히 남동진 하였던 것으로 분석되었다.

## 5. 요약 및 결론

본 논문에서는 2013년 8월 6일 수도권과 대구·경북 지역에서 집중 호우를 내린 다세포 대류계를 분석하였다. 대류계는 5일 2100 UTC에 백령도 부근에서 처음 적란운으로 발생하여 다세포 대류계로 발달하였다. 다세포 대류계의 발달과 이동특성을 분석하기 위해 중관과 중규모 분석을 수행하였다. 분석에 이용한 자료는 기상청 60분 누적 강수량 자료, 지상 및 상층 일기도(850, 500, 200 hPa), COMS 적외 강조 영상, 단

열선도, MERRA 재분석 자료 및 WRF 모델 시뮬레이션 결과 등이다.

다세포 대류계는 5일 2100 UTC에 백령도 부근에서 처음 단세포의 적란운으로 발생하여 수도권을 지나 한반도 중부지방까지 남동진하다가, 6일 0600 UTC에 소백산맥 서쪽에서 발생한 새로운 대류 세포들과 합쳐져 규모가 확대되었다. 이후 다세포 대류계는 대구 인근 지역으로 남동진한 후 1000 UTC 이후에 부산을 지나면서 소멸하였다. 다세포 대류계는 발생에서부터 소멸까지 15시간 동안 지속되었으며, 평균  $9.1 \text{ m s}^{-1}$ 의 속도로 남동진하였다. 다세포 대류계가 발생한 직후인 0000 UTC에 백령도와 오산에서의 CAPE는 각각  $2,551 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 와  $1,637 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ , K 지수는 42와 29로 열역학적으로 매우 불안정한 상태를 나타내었다. 백령도와 오산의 0000 UTC 단열선도를 통해 대기 하층은 습하고(백령도는  $T - T_d < 4^\circ\text{C}$ , 오산은  $T - T_d < 5^\circ\text{C}$ ), 대기 상층은 매우 건조해 적란운이 발생하기에 충분한 환경이었다. 특히 오산의 호도그래프에서 대기 하층에는 순전(Veering)이 일어나 온난이류가 있었고, 상층에서는 반전(Backing)이 일어나 한랭이류가 있어 대

기가 불안정했음을 뒷받침해주었다. 또 한반도의 서해상과 남해상에 다량의 수증기( $q > 50 \text{ g kg}^{-1}$ )가 분포했고, 지속적인 남서기류의 유입으로 인해 한반도 대기 하층에 많은 수증기가 존재했다. 이로 인해 대기 하층은 온난 습윤했고( $\theta_e > 333 \text{ K}$ ), 다세포 대류계가 발달하는 데에 습윤한 공기의 공급을 충분히 제공할 수 있는 환경이었다.

250 hPa의 제트류는 북중국에 위치하고 있어 한반도는 상층 제트류의 2차 순환 영향을 거의 받지 않았고, 250 hPa에서의 발산과 850 hPa에서의 수렴은 강수 지역이 아닌 영동 해안으로 치우쳐서 나타나 다세포 대류계는 종관 규모의 영향보다는 중규모의 영향이 더 컸음을 알 수 있다. 다세포 대류계가 중부지방으로 남동진할 때 한반도의 서해상에는  $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ 의 저기압성 소용돌이도 중심이 있어서 새로운 대류 세포들이 발생하였다. 0600 UTC에 기존의 다세포 대류계와 새로 발생한 대류 세포들이 합쳐진 이후에는 다세포 대류계의 위치에  $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ 의 강한 저기압성 소용돌이도와 온도골, 단과골이 형성되었다. 또한 새로운 대류 세포들이 발생할 때(0600 UTC) 850 hPa과 지상에서는 같은 위치에 큰 온도 경도와 함께 1 이상의 전선 발생 함수 값이 나타나 새로 발생하는 대류 세포들이 국지적 돌풍 전선에 의해 생성되었을 것으로 사료된다. 다세포 대류계는 서울에 65 mm, 대구에 81 mm의 강수를 내렸고 그 크기는 서울에서는 0500 UTC에 약 28,000 km<sup>2</sup>, 대구에서 0800 UTC에 약 39,000 km<sup>2</sup>로 중규모 대류복합체(MCC)의 크기(50,000~100,000 km<sup>2</sup>)에는 미치지 못하였으나 매우 크게 발달하였음을 알 수 있다.

2013년 8월 6일 한반도에서 발달한 중규모 대류계는 백령도 근처에서 단세포로 발생하여 다세포 대류계로 성장하였으며, 서풍의 상층 흐름을 따라 이동하지 않고 한반도를 대각선으로 가로질러 부산지역으로 남동진하였다. 이러한 이동 특성은 지상과 500 hPa에서의 연직 바람 시어 벡터를 통해 설명할 수 있음이 파악되었다. 또한 국지적으로 강한 온도 구배와 이로 인한 연직의  $15 \text{ m s}^{-1}$ 의 바람시어는 단세포에서 다세포 대류계로 발달할 수 있는 환경을 제공하였다. 본 연구 결과를 통해 우리 나라에서 발생한 다세포 대류계의 발달 및 이동 특성이 분석되었으며 여름철 위험 기상 예보에 도움이 될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국기상산업진흥원의 기상씨앗기술개발 연구사업의 연구비(KMIPA2015-1090) 지원으로 수행되었습니다. 논문에 대해 유익한 지적을 해주신 두 분의 심사위원님께 감사드립니다.

### REFERENCES

- Adburakhimov, B. F., 2005: The calculation of the frontogenetic function. *ROMAJ J.*, **1**, 1-2.
- Fovell, R. G., and P.-H. Tan, 1998: The temporal behavior of a numerically simulated multicell-type storms, Part I: The convective cell life cycle and cell regeneration. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 551-577.
- Holton, J. R., 2004: *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th ed. Elsevier, 576 pp.
- Kim, H. W., and D. K. Lee, 2006: An observational study of mesoscale convection system with heavy rainfall over the Korea Peninsula. *Wea. Forecasting*, **21**, 125-148.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2008: An analysis of mesoscale vorticity of internal of convective storm associated with heavy rainfall. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*, 34-35.
- Lee, D. K., H. R. Kim, and S. Y. Hong, 1998: Heavy rainfall over Korea during 1980~1990. *Korean J. Atmos. Sci.*, 32-50.
- Markowski, P., and Y. Richardson, 2010: *Mesoscale Meteorology in Mid-latitudes*. WILEY Press, 430 pp.
- Martin, J. E., 2006: *Mid-latitude Atmospheric Dynamics: A First Course*. WILEY Press, 336 pp.
- Nam, K. Y., Y. H. Kim, K. I. Kim, and J. C. Nam, 2005: Study on the multi-cell storm structure using dual doppler radars observations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 967-981.
- Ogura, Y., and M. T. Liou, 1980: The structure of a mid-latitude squall line: A case study. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 553-567.
- Rienecker, M. M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA's Modern-era retrospective analysis for research and applications. *J. Climate*, **24**, 3624-3648.
- Rotunno, R., J. B. Klemp, and M. L. Weisman, 1988: A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 463-485.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005: A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Tech Notes-468+STR, 88 pp.
- Smull, B. F., and R. A. Houze, Jr., 1985: A mid-latitude squall line with a trailing region of stratiform rain: Radar and satellite observations. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 117-133.
- Song, I. S., and H. Y. Chun, 1998: The role of gravity wave to the multi-cell storm. *Proceedings of the Meeting of KMS*, 146-149.

- \_\_\_\_\_, H. Y. Chun, S. M. Lee, and T. Y. Lee, 2000: A numerical study on physical processes related to periodic cell regeneration in multicell storm. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **36**, 51-64.
- Sun, J., and T. Y. Lee, 2002: A numerical study of an intense quasi-stationary convection band over the Korean Peninsula. *J. Japan Meteor. Soc.*, **80**, 1221-1245.
- Thorpe, A. J., M. J. Miller, and M. W. Moncrieff, 1982: Two-dimensional convection in non-constant shear: A model of mid-latitude squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 739-762.
- Weisman, M. L., and J. B. Klemp, 1984: The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shear. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 2479-2498.