2010년 9월 21일 추석 호우와 관련된 대류 세포의 위성 영상 분석

권태영*† · 이정순**

*강릉원주대학교 대기환경과학과, **기상청 국립기상연구소 예보연구과

Satellite Image Analysis of Convective Cell in the Chuseok Heavy Rain of 21 September 2010

Tae-Yong Kwon* and Jeong-Soon Lee**

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

**Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA

Abstract : On 21 September 2010, one of Chuseok holidays in Korea, localized heavy rainfalls occurred over the midwestern region of the Korean peninsula. In this study MTSAT-2 infrared and water vapor channel imagery are examined to find out some features which are obvious in each stage of the life cycle of convective cell for this heavy rain event. Also the kinematic and thermodynamic features probably associated with them are investigated. The first clouds related with the Chuseok heavy rain are detected as low-level multicell cloud (brightness temperature: $-15\sim 0^{\circ}\text{C}$) in the middle of the Yellow sea at 1630~1900 UTC on 20 Sept., which are probably associated with the convergence at 1000 hPa. Convective cells are initiated in the vicinity of Shantung peninsula at 1933 UTC 20, which have developed around the edge of the dark region in water vapor images. At two times of 0033 and 0433 UTC 21 the merging of two convective cells happens near midwestern coast of the peninsula and then they have developed rapidly. From 0430 to 1000 UTC 21, key features of convective cell include repeated formation of secondary cell, slow horizontal cloud motion, persistence of lower brightness temperature ($-75\sim -65^{\circ}\text{C}$), and relatively small cloud size ($\leq -50^{\circ}\text{C}$) of about 30,000 km². Radar analysis showed that this heavy rain is featured by a narrow line-shaped rainband with locally heavy rainrate (≥ 50 mm/hr), which is located in the south-western edge of the convective cell. However there are no distinct features in the associated synoptic-scale dynamic forcing. After 1000 UTC 21 the convective cell grows up quickly in cloud size and then is dissipated. These satellite features may be employed for very short range forecast and nowcasting of mesoscale heavy rain system.

Key Words : Chuseok heavy rain, Convective cell, Life cycle, MTSAT-2

요약 : 이 연구에서는 MTSAT-2 적외 영상과 수증기 영상을 이용하여 2010년 9월 21일 추석 호우 사례에

접수일(2013년 8월 8일), 수정일(1차 : 2013년 8월 23일), 게재확정일(2013년 8월 30일).

† 교신저자: 권태영(tykwon@gwnu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

대하여 대류운 생애주기의 각 단계에서 나타나는 특징을 조사하였다. 추석 호우와 관련된 최초의 구름은 20일 1630~1900 UTC에 서해 중부 지역에서 관측된 다중 세포의 하층운이다. 이 구름 가운데 일부가 1930 UTC에 산동반도 부근에서 휘도온도 -45°C 이하의 대류 세포로 발달한다. 이 때 이 지역은 수증기 영상에서 압력의 가장자리에 위치한다. 대류 세포는 동진하다가 한반도 중서부 해안 부근에서 21일 0030과 0430 UTC에 두 차례의 병합을 거쳐 급격히 발달한다. 이후 21일 0430에서 1000 UTC까지 약 6시간 동안 위성 영상에서 구름의 면적은 상대적으로 작고, 수평 이동속도는 느려졌다. 최저 휘도온도는 약 $-75^{\circ}\text{C} \sim -65^{\circ}\text{C}$ 로 매우 낮게 유지되며, 잘 발달한 부세포가 반복적으로 형성되는 특징을 보인다. 레이더 자료에는 국지적으로 50 mm/hr 이상의 강우율을 보이는 좁은 띠 모양의 강우 밴드가 나타나고 이 밴드는 대류운의 남서쪽 가장자리에 위치한다. 그러나 수치 모델 자료의 중관 규모 역학적 강제항에는 뚜렷한 특징을 찾기 어렵다. 대류 세포의 구름 면적은 21일 1000 UTC 이후 짧은 시간에 급격한 증가를 보이고 뒤이어 소멸한다. 이러한 대류 세포의 발달과 관련된 위성 영상의 특징은 중규모 호우의 초단기 예보와 실시간 예보에 사용될 수 있을 것이다.

1. 서론

강원지역 호우는 강수의 시공간적 분포에서 뚜렷한 특징을 가진다. 이들 호우의 대부분은 시간적으로 4~6시간 동안에 집중된 강수를 보이고 공간적으로는 영동 혹은 영서 지역 어느 한 쪽 지역에만 국지적으로 나타나는 강한 강수를 보인다. 강수량의 지역적 분포에 따라 강원 호우는 영동지역 호우와 영서지역 호우로 나눌 수 있다. Kwon *et al.*(2013)은 10년(2001~2010년) 동안의 호우 정보 자료를 이용하여 강원 호우 사례를 영동지역 호우와 영서지역 호우로 분류하였다. 그리고 이를 분석하여 영동 호우와 영서 호우의 특성을 비교하였다.

영서 호우는 중관 일기도 분석에서 대부분 한반도가 지상으로부터 상층(약 300 hPa)까지 북태평양 고기압의 가장자리에 위치하고 화남지역 혹은 동중국해에 열대 폭풍우(Tropical storm, TS) 혹은 위험열대폭풍우(Severe tropical storm, STS)가 위치하는 특징을 보였다. 열역학적 분석에서는 대부분 대류가용잠재에너지(Convective available potential energy, CAPE)가 약 1000 J/kg 이상, K 지수(K-index)는 약 35 이상, 850 hPa 상대온위는 약 340 K 이상 그리고 총가강수량이 약 55 mm 이상으로 나타난다. 또한 하층(850 hPa) 바람에서는 약 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이상의 수렴과 13~23 m/s의 강한 남서풍이 나타난다(Kwon *et al.*, 2013).

이러한 특징은 기상 요소(ingredients) 기반의 접근에서 보면 강한 습윤대류 현상(deep moist convection)이 나타날 수 있는 조건과 잘 일치한다. 이 조건은 대기 불안정, 충분한 수분 공급, 그리고 치올림(lift)이다(McNulty,

1995; Doswell *et al.*, 1996; Schultz and Schumacher, 1999). 즉 대기가 조건부 불안정해야 하고, 자유대류고도가 나타날 정도로 충분히 습윤해야 하며, 공기덩이를 자유대류고도까지 상승시키는데 필요한 어떤 과정이 있어야 한다. 영서 호우의 경우 위의 세 가지 조건을 만족시키는 특징을 가지고 있다; 약 1000 J/kg 이상의 CAPE, 약 55 mm 이상의 총가강수량 그리고 약 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이상의 850 hPa 수렴은 각각 대기 불안정, 충분한 수분 그리고 치올림의 조건과 잘 일치한다.

그러나 영서 호우를 발생시키는 이러한 조건 가운데 대기 불안정과 치올림은 수치 모델로 모의하거나 예측하기가 어려운 중규모 현상이고 시간적으로도 큰 변동성을 보이는 기상 요소이다. Kirkpatrick *et al.*(2011)은 CAPE의 경우 수치 모델로 정확한 값을 예측하는데 한계가 있고 라디오존데 관측 또한 중규모 현상을 관측하기에는 시공간적 해상도가 빈약하다고 보고하였다(Elmore *et al.*, 2002; Thompson *et al.*, 2003, 2007). 그리고 Doswell(1987)과 McNulty(1995)는 강한 습윤대류 현상과 관련된 대기 하층에서의 치올림은 중관규모 과정이 아니라 중간규모 과정(불연속 경계면, 차등가열, 지형효과)에서 제공된다고 보고하였다. 따라서 영서 호우는 중규모 현상이며 중규모 대류 시스템(Mesoscale Convective System, MCS) 혹은 중규모 대류 복합체(Mesoscale Convective Complex, MCC)로 볼 수 있다. 특히 MCC는 위성의 적외 영상을 이용하여 정의되는 MCS의 한 종류이다. 그러므로 영서 호우의 중규모적 특성을 조사하기 위해서는 위성 영상을 이용한 대류운의 생성, 발달, 성숙과 소멸에 대한 정량적 조사가 필요하다.

이 연구에서는 영서 호우 사례 가운데 위성의 적외 영상에서 MCS가 잘 발달하고 다른 구름과 명확하게 식별되는 2010년 9월 21일 추석 호우 사례를 선정하였다. 이 사례의 적외 영상에서 대류 세포를 탐지하고 이 세포를 추적하면서 구름의 수평 공간적 크기와 위치 그리고 온정온도의 변화와 구름의 병합 과정을 분석하였다. 대류운의 경우 구름의 면적 그리고 그 면적의 변화는 총강수량과 관련이 있기 때문이다(Kwon, 2001; Lovejoy and Austin, 1979). 이 때 사용된 대류 세포의 추적 방법은 Kim and Kwon(2011)과 Kim *et al.*(2012)의 방법을 사용하였다. 그리고 위성 영상의 구름과 레이더의 강우율을 비교하여 MCS를 몇 개의 성장 단계로 분류하고 다양한 관측 자료와 모델 자료를 이용하여 각 단계별로 기본적인 발달 구조를 이해한다. 이러한 이해는 MCS와 관련된 호우예보를 위한 초단기 예측 가이드선의 개발에 도움이 될 것이다.

2. 2010년 9월 21일 호우 사례

1) 강수특징

2010년 9월 21일 추석 호우 사례에서 시공간적인 강수량의 분포에 나타난 특징은 짧은 시간에 좁은 지역에 집중된 강수량이다. Table 1은 9월 21일 한반도 중부 지

역에서 관측한 5 mm/hr 이상의 강수량 분포를 보여준다. 이 날 호우 경보(6시간 동안 110 mm 이상 혹은 12시간 동안 180 mm 이상)에 해당하는 강수량이 서울, 인천, 원주, 영월에서 관측되었다. 여기서 주목할 부분은 위의 4개 지점 관측 강수량이 6시간 기준의 호우 경보를 만족한다는 것이다. 즉 강한 강수가 연속적인 6시간 이내에 나타난다는 것이다. 특히 20 mm/hr 이상의 강수는 연속적인 3~4시간 이내에 집중되어 있다. 또한 Table 1로부터 강한 강수가 5~8 UTC에 서울과 인천 지역으로부터 12~14 UTC에 원주와 영월 지역으로 남동진하고 있음을 유추할 수 있다. 또한 서울 지점(259.5 mm/day)은 관측 이래 9월 일 최대 강수량 2위 기록을 경신하였고, 영월의 경우(153 mm/day) 9월 일 최대 강수량으로 기록되었다.

자세한 시공간적 강수 분포를 조사하기 위하여 기상청에서 제공하는 레이더 강우율(rain rate)을 분석하였다. 이 자료는 일정 고도(1.5 km)의 평면위치지시기(Constant altitude plan position indicator, CAPPI) 합성자료이며 Z-R 관계식을 사용하여 추정된 값이다. 시간 간격은 위성자료와의 비교를 위해 30분 간격으로 나타냈으며 수평해상도는 1×1 km 이다. 이 자료를 사용하여 강수의 공간 면적의 시간적 변화를 조사하였다(Fig. 1). 강수의 공간 면적은 위도 36.5~38.0°N와 경도 125~130°E 영역에서 대류세포와 관련된 강우율의 격자 수를 헤아리는 과정을 통하여 구하였다. 즉 격자 하나는 면적

Table 1. Distribution of the hourly rainfalls (mm) at some weather stations on 21 September 2010

Time(UTC)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	24-hr
Seoul			15	67	71	61	26	7							260
Baengnyeongdo															12
Dongducheon	6	12.5	19												49.5
Munsan	6.5	24	6												45.5
Incheon					40	49	65					5.5			176
Suwon									61	6	11.5				96
Cheorwon	7.5	8	13												38.5
Chuncheon		5.5		24											47.5
Wonju						9		32	49	50	26	19.5	7.5	5.5	209
Yeongwol										10	30	59	42	9.5	153
Sokcho			5	15.5	6.5										47.5
Bukgangneung					5	9	8.5	8			5	8.5			58
Gangneung						5	7	9			5.5	10		7	54
Daegwallyeong						10	7.5	8.5							59.5
Donghae									8		5.5	12	8.5	9	52.5

Fig. 1. Time series of rain areas (the number of pixels related convective cloud cell) using radar composite rainrate. The threshold values of rain rainrate are 20 mm/hr (solid line), 30 mm/hr (dashed line) and 50 mm/hr (dotted line) from 2100 UTC 20 to 1500 UTC 21 September 2010.

(a) 12UTC 20

(b) 00UTC 21

Fig. 2. Surface weather chart at (a) 1200 UTC 20 and (b) 0000 UTC 21 September 2010.

1 km²를 의미한다. Fig. 1에서 50 mm/hr 이상의 강수는 21일 0330에서 0930 UTC 까지 6시간 동안 약 100 ~ 400 개 격자에서 나타났다. 즉 이것은 이 시간대에 평균적으로 약 230 km²의 면적에서 50 mm/hr 이상의 강수가 나타났다 것을 의미한다. 20 mm/hr 이상의 강수는 0000 부터 1200 UTC 사이에 약 1000 km² 보다 넓은 지역에서 관측되었다. 그리고 면적을 기준으로 할 때 20과 30 mm/hr 이상인 강우율의 면적은 1000 UTC 이후부터 일관된 감소를 보였다. 한편 0030에서 0300 UTC 사이에서도 뚜렷한 강우율의 감소를 발견할 수 있었다.

2) 종관적 특징

추석 호우 사례의 종관적 특징을 조사하기 위하여 20 mm/hr 이상의 강한 강수가 넓게 나타나기 시작하는 2010년 9월 20일 1200 UTC와 21일 0000 UTC의 상·하층 분석 일기도를 조사하였다. 20일 1200 UTC 지상 일기도에서 약한 기압골이 산동반도, 한반도 중부, 그리고 동해 중부를 연결하는 지역에 위치하고 있다. 이 기압골은 21일 0000 UTC에 발달하고 있으며 지상 일기도에서는 한반도 중서부 지역에 중규모 저기압의 중심이 나타났다(Fig. 2).

Fig. 3의 20일 1200 UTC 850 hPa 일기도에서 저기압 중심이 사할린 부근에 위치하고 이와 관련된 기압골이 한반도 북동부 지역으로 향하였다. 그리고 등온선 조밀

지역이 발해만 북서지역에 분포한다. 12시간 후인 21일 0000 UTC에는 발해만과 요동반도 지역에서 기압골이 발달하고 있고 등온선 조밀지역도 발해만 지역으로 이

(a1) 850 hPa - 12UTC 20

(a2) 850 hPa - 00UTC 21

(b1) 500 hPa - 12UTC 20

(b2) 500 hPa - 00UTC 21

(c1) 300 hPa - 12UTC 20

(c2) 300 hPa - 00UTC 21

Fig. 3. Upper level analysis of the geopotential height of (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 300 hPa at 1200 UTC 20 (a1, b1, c1) and 0000 UTC 21 (a2, b2, c2) September 2010.

동하였다. 그리고 20일 1200 UTC와 21일 0000 UTC에 한반도 중부지역은 일본 남쪽에 위치한 고기압의 가장 자리에 위치한다.

20일 1200 UTC와 21일 0000 UTC 500 hPa과 300 hPa 일기도에는 한반도 주변에 뚜렷한 특징(온도골이나 기압골이 없고 온도이류도 약함)이 없다. 한반도 중남부 지역은 500 hPa과 300 hPa에서 서해상과 산둥반도 부근에 위치한 고기압의 영향을 받고 있다. 300 hPa 제트류도 한반도로부터 먼 거리인 위도 약 44도에 위치하고 있

다(Fig. 3).

3) 고층 관측 자료에 나타난 특징

추석 호우가 나타나기 전 대기의 열역학적 변화를 조사하기 위하여 20일 1200 UTC와 21일 0000 UTC 백령도 단열선도를 비교하였다(Fig. 4). 이 비교에서 대기의 중·하층이 점차 불안정해지고 대류 발생 확률이 높아지고 있다는 여러 가지 수치들이 나타났다. 예를 들어 K-index는 33에서 37로, 쇼월터안정도지수(Showalter stability

Fig. 4. Skew T-log p chart and hodograph from Baengyeongdo radiosonde data at (a) 1200 UTC 20 and (b) 0000 UTC 21 September 2010.

Fig. 5. Same as Fig. 4 except for Osan at (a) 0000 UTC and (b) 0600 UTC 21 September 2010.

index, SSI, 925~500 hPa)는 6.0에서 -0.6으로, 850 hPa의 상당온위는 338에서 343 K로, 그리고 약 600 hPa 이상에서 상대습도는 약 30~80%에서 10% 이하로 변화하였다. 그리고 7 J/kg인 대류억제도(Convective inhibition; CIN)도 사라졌다. 대기의 수분의 양을 나타내주는 총 가강수량은 49.9에서 53.3 mm로 증가하였다, 스톰상대헬리시티(Storm relative helicity, SRH)는 105에서 289 m^2/s^2 로 증가하였고 풍속은 500 hPa에서 뚜렷한 증가(17.5에서 27.5 m/s로 변화)를 보였다.

또한 추석 호우에서 강수 시작 시각과 최대 강수가 나타나는 시각의 열역학적 차이를 조사하기 위하여 21일 0000과 0600 UTC의 오산 단열선도를 비교하였다(Fig. 5). CAPE가 18에서 1727 J/kg으로 크게 증가한 반면에 50 J/kg의 CIN은 사라졌다. 총 가강수량(Total precipitable water, TPW)은 46.7에서 56.5 mm로 증가하였고 SRH도 231에서 366 m^2/s^2 로 증가하였다. 풍속은 중하층 대기 가운데 700 hPa에서 뚜렷한 증가(15에서 22.5 m/s로 변화)를 보였다.

3. 위성영상의 특징

추석 호우 사례의 발달 구조를 이해하기 위하여 MTSAT-2(Multifunctional Transport Satellite) 2의 적외 영상과 수증기 영상을 이용한 구름의 변화를 조사하였다. 이 연구에서는 추석 호우 사례와 관련된 초기 구름(대류 세포)

을 탐지하고 이 구름을 추적하면서 대류 세포의 발달, 이동과 병합 그리고 2차 구름의 발달과 병합을 조사하였다. 초기 대류 세포의 탐지는 추석 호우 사례와 관련된 구름 가운데 위성 휘도온도가 -45°C 이하인 화소가 최초로 나타난 구름의 관측이다. 이 분석에서 초기 대류 세포를 탐지한 후 이 세포를 추적하면서 대류 세포의 화소 수(구름의 공간 면적), 평균 휘도온도, 최소 휘도온도, 대류 세포의 공간 중심과 최소 휘도온도의 위치를 구하였다.

Fig. 6은 대류 세포의 공간 면적의 시간 변화를 보여준다. 여기서 휘도온도 -50°C 와 -55°C 이하의 구름의 공간 면적은 위에서 탐지한 대류 세포 내에서 구한 값이다. 붉은 색으로 표시한 점들은 두 개 이상의 대류 세포가 탐지된 경우이다(이 경우 구름의 공간 면적이 가장 큰 값을 사용하였다). 즉 붉은 색으로 표시된 점들이 끝나는 부분은 2~3개의 대류 세포가 병합하는 시각이다. Fig. 6에서 중요한 구름 병합은 두 차례(1차 병합과 2차 병합) 나타나는데 1차 병합은 0030 UTC에 2차 병합은 0430 UTC에 일어났다. 1차 병합이 나타난 0030 UTC는 레이더 강우율로 추정된 강수 면적이 1차 최고점을 보이는 시각과 일치한다. 강수 면적이 1차 최고점을 보이는 시각은 20, 30, 50 mm/hr 이상의 강수 모두 0030 UTC이다. 그리고 2차 병합이 나타난 0430 UTC는 강수 면적이 2차 최고점을 보이는 시각과 대체로 일치하였다(2차 최고점이 나타나는 시각은 20, 30, 50 mm/hr 이상의 강수에서 각각 0430, 0400, 0430 UTC이다). 따라서 이러한 분석으로부터 대류 세포의 병합은 뚜렷한 강우율의 증가와

Fig. 6. Time series of cloud cell area (number of pixels) using TBB of IR1 which the threshold values of TBB are -55°C (rectangle), -50°C (triangle) and -45°C (circle) from 1200 UTC 20 to 1500 UTC 21 September 2010.

Fig. 7. Same as Fig. 6 except for threshold values -60°C (circle) and -65°C (triangle).

Fig. 8. Time series of mean (solid line) and minimum (dashed line) TBB of detected cloud cell from 1200 UTC 20 to 1500 UTC 21 September 2010.

밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에서 대류 세포의 면적은 1차 병합(0030 UTC) 후 뚜렷한 증가를 보이다 0200 UTC부터 0833 UTC까지 비슷한 크기를 유지한다. 이 때 휘도온도가 -50°C 이하인 대류 세포의 면적은 약 $30,000\text{ km}^2$ (약 1,000 화소)이다. 이 면적은 MCC를 정의하는 면적 보다 작다. MCC는 -52°C 이하인 운정의 면적이 $50,000\text{ km}^2$ 이상인 구름으로 정의된다. 0833 UTC 이후 대류 세포의 면적은 급격히 증가하여 휘도온도가 -45 와 -50°C 이하일 때 1133 UTC에서 그리고 -55°C 이하일 때 1100 UTC에서 최대가 된다. 대류 세포의 최대 면적은 -50°C 이하에서 약 $75,000\text{ km}^2$ 이고 이것은 MCC의 조건을 만족한다.

대류 세포의 병합을 보다 자세히 분석하기 위하여 대류 세포를 탐지하는 임계온도를 -60°C 로 낮추고 위의 과정을 다시 수행하였다(Fig. 7). 여기서 구름의 공간 면적은 휘도온도 -60 과 -65°C 이하에서 구한 값이다. 붉은 색으로 표시한 점들은 두 개 이상의 대류 세포가 탐지된 경우이다. 이 분석에는 앞의 분석에서 나타난 두 번의 대류 세포 병합(Fig. 6)이 잘 나타났다. 그러나 이외에도 여러 차례에 다중 대류 세포(두 개 이상의 대류 세포)가 탐지되었다. 이 경우 휘도온도의 임계값에 따라 다중 대류 세포의 존재 유무가 달라진다. 즉 휘도온도의 임계값을 -45°C 로 했을 때는 단일 세포로 탐지되었으나 -60°C 로 했을 때는 두 개 이상의 세포로 탐지되었다. 이러한 다중

Fig. 9. Movement of the locations for the center of the detected cloud cell which is estimated by (a) cloud area and (b) minimum TBB from 1930 UTC 20 to 1500 UTC 21 September 2010.

세포는 0533, 0700, 0900, 1033, 1300 UTC에 나타난다. 또한 대류 세포의 공간 면적은 0700 UTC에서 급격히 증가하며 최대값이 나타나는 시각은 휘도온도의 임계값이 낮을수록 빠르다. 휘도온도의 임계값을 -65°C 로 했을 때 대류 세포의 공간 면적이 최대가 되는 시각은 약 1000 UTC이다.

Fig. 8은 대류 세포의 평균 휘도온도와 최저 휘도온도의 변화를 보여준다. 여기서 평균 휘도온도와 최저 휘도온도는 잘 발달된 대류운으로부터 구한 값으로 운정온도의 평균 및 최저값과 비슷하다. 대류 세포가 여러 개인 경우 공간 면적이 가장 큰 세포에 대해서 계산한 평균 휘도온도와 최저 휘도온도를 사용하였다. 대류 세포의 평균 휘도온도의 분포에는 뚜렷한 시간적인 변화가 나타나지 않고 다만 1030 UTC 이후에 증가하는 경향이 나타났다. 반면 최저 휘도온도의 시간적인 분포에는 뚜렷한 변화가 나타나는데 구름의 1차 병합 이후 최저 휘도온도가 급격히 낮아짐을 알 수 있었다. 최저 휘도온도는 병합이 일어나기 전인 20일 2300 UTC에 약 -56°C 에서 병합 후 21일 0200 UTC에 약 -76°C 로 급격히 낮아진다. 그리고 21일 0200에서 0933 UTC까지 높고 낮은 작은 변화를 보이다가 이 후 급격히 높아졌다. 이 시각(21일 0933 UTC)은 레이더 강우율에서 일관된 감소가 나타나는 시각(1000 UTC)과 대류 세포의 공간 면적이 감소하는 시각(휘도온도 임계값을 -65°C 로 사용했을 때 1000 UTC)과 잘 일치하고 있다. 이러한 결과로부터 레이더 강우율과 대류운의 발달(공간 크기와 최저 운정온도의 변화) 사이에는 밀접한 관련성이 있음을 알 수 있다.

대류 세포의 이동을 조사하기 위하여 세포의 위치를

추적하고 분석한다. 이 위치 분석에서 휘도온도가 -45°C 이하인 구름 세포의 공간 중심 위치와 최저 휘도온도가 나타나는 위치를 조사하였다(Fig. 9). 공간 중심 위치의 분석에서 대류 세포가 20일 1933~21일 0033 UTC 사이에는 동북동쪽으로 이동하고 그 이후는 대체로 동쪽으로 이동한다. 한편 최저 휘도온도가 나타난 위치인 20일 1933~21일 0100 UTC 사이에는 공간 중심 위치와 잘 일치하고 있으나 이후부터는 이 두 위치 사이에 뚜렷한 차이가 나타났다. 0100~0500 UTC 사이에는 최저 휘도온도의 위치가 세포 공간 중심 위치보다 경도 약 $1 \sim 1.5$ 도 서쪽에 위치한다. 특히 21일 0533 UTC부터는 최저 휘도온도의 위치가 공간 중심 위치보다 뚜렷하게 남서쪽에 위치한다.

4. 대류운 세포의 성장단계

1) 다중세포 구름의 생성

2010년 9월 21일 추석 호우와 관련된 구름 가운데 가장 초기에 관측된 구름은 휘도온도가 약 $-15 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 인 다중 세포 구름이다. 이 구름은 20일 1630 ~ 1900 UTC에 산동반도와 웅진반도 사이에서 생성되었다(Fig. 10). 이 구름과 시공간적으로 가까운 백령도의 고층관측자료(20일 1200 UTC와 21일 0000 UTC 자료)를 조사해 보면 이 구름의 운정 고도는 약 600 ~ 400 hPa이다. 이 구름은 20일 1630 UTC에 산동반도와 웅진반도 사이 중간 지점에서 휘도온도가 약 0°C 인 3~4개의 작은 구름 세포로 나타난다. 그리고 점차 발달하여 20일 1900 UTC에는 산

Fig. 10. MTSAT-2 IR1 image at (a) 1633 UTC, (b) 1733 UTC, (c) 1833 UTC and (d) 1933 UTC 20 September 2010.

Fig. 11. Distribution of equivalent potential temperature (K) at 850 hPa from the (a) RDAPS10 analysis field and (b) RDAPS30 (6hr forecast field) at 1800 UTC 20 September, 2010.

동반도와 웅진반도를 연결하는 보다 넓은 지역에서 휘도온도가 약 -15°C 인 다중 세포의 구름이 된다.

이 구름의 생성에 기여하는 원인을 조사하기 위하여 현업지역예보모델인 Regional Data Assimilation and Prediction System(RDAPS)10 분석장과 RDAPS30 예보장을 분석한다. RDAPS10은 WRF모델을 기반으로 하는 10 km 해상도의 현업모델이며, RDAPS30은 MM5 기반의 30 km 해

상도 지역예보모델을 의미한다.

이 분석에서 1000과 850 hPa 수렴 지역과 다중 세포 구름이 나타난 지역(다중 세포 지역; 산둥반도와 웅진반도를 연결하는 지역)을 비교하였다. RDAPS30 6시간 예측장으로 20일 18 UTC(초기시각 20일 12 UTC)에 대한 1000 hPa와 850 hPa의 수렴 및 발산을 비교하였다. 1000 hPa 발산장 분석에서 수렴지역이 비교적 다중 세포 지역

과 잘 일치하고 850 hPa의 경우 발해만 북부 지역과 요동반도에 나타난다. 또한 다중 세포 지역은 지상 일기도에서도 기압골의 위치와 유사하다. 따라서 추석 호우와 관련된 초기 구름은 대기 하층(1000 hPa)의 수렴과 밀접하게 연관된 것으로 이해할 수 있다.

20일 1800 UTC의 850 hPa 상당온위 분석에서 RDAPS10의 경우 상당 온위의 능이 산둥반도 북쪽에 놓여있고 상당온위는 336~340 K 사이에 분포한다. 한편 RDAPS30 자료에서는 상당온위의 능이 산둥반도에서 웅진반도를 향하여 놓여있다. 상당온위는 336~344 K 사이에 분포한다. 이 상당온위 능의 위치는 다중 세포 구름이 나타난 지역과 잘 일치한다(Fig. 11). 이러한 결과를 백령도 고층 관측 자료와 비교해 보면 대기 하층이 점차 불안정해지고 있음을 의미한다. 따라서 위의 분석 결과를 종합해 보면 다중 세포 구름의 생성 원인은 국지적인 대기 하층의 수렴과 대기불안정에 의한 치올림으로 볼 수 있다.

2) 대류 세포의 생성

추석 호우와 관련된 구름 가운데 최초로 대류 세포가 산둥반도 부근에서 20일 1930 UTC에 나타났다. 이 연구에서 대류 세포는 최저 휘도온도가 -45°C 이하인 구름 세포로 정의하였다. 이 대류 세포는 20일 1630 ~ 1900 UTC에 산둥반도와 웅진반도 사이에서 나타난 다중 세포 구름 가운데 일부에서 발달한 것이다. 이 때 구름의

최저 휘도온도는 약 30분 동안에 약 35°C (-15°C 에서 -50°C 로) 감소를 보였다. 그 후 이 대류 세포는 80도 방향에 약 20 m/s로 이동하며 발달하였다. 이러한 대류 세포의 이동 방향과 속도는 백령도 고층 관측 자료에서 풍향 그리고 풍속과 대체로 일치한다. 이 고도(300~200 hPa)에서의 백령도 바람은 대략 서남서 방향에 약 25 m/s이다.

대류 세포가 생성되는 시기에 위성의 수증기 영상을 살펴보면 대류 세포는 수증기 영상에서 암역의 가장자리에서 발달하고 있음을 확인 할 수 있다(Fig. 12). 이 때 수증기 영상에서 암역은 산둥반도 서쪽에서 대류세포 주변으로 확장하고 있으며, 수증기 영상의 휘도온도는 약 -25°C 이다. 수증기 영상의 암역은 중·상층 대기에서 기온 변화가 크지 않다고 가정하면 건조 지역을 의미한다. 이러한 중·상층 대기의 건조화는 20일 2100 UTC와 21일 0000 UTC 백령도 고층 관측 자료의 비교에서 잘 나타났다. 두 시간대의 상층 기온과 이슬점을 비교해 보면, 기온의 연직 분포는 비슷하나, 이슬점 분포는 600 hPa 이상에서 큰 하강이 나타난다. 이 고도에서 상대습도는 약 30~80%에서 10% 이하로 변화하였다. 이것은 600 hPa 이상에서의 대기가 건조해졌다는 것을 의미한다. 즉 이 지역에서 중·상층 대기의 건조화로 대류 불안정이 일어나고 있음을 의미한다.

여러 연구에 의하면 일반적으로 수증기 영상의 암역

Fig. 12. MTSAT-2 water vapor image (shaded, more than -28°C using IR3) and detected cloud cell (contour, less than -45°C using IR1) 2233 UTC 20 September 2010.

과 위치 소용돌이도의 양의 편차 사이에는 강한 양의 상관관계가 있다(Uccellini *et al.*, 1985; Young *et al.*, 1987; Kurz, 1994; Georgiev, 1999). 이러한 암역은 상층의 위치 소용돌이도와 관련되어 지상의 기압골이나 저기압을 발달시키는 데 기여한다. 이를 조사하기 위하여 RDAPS10 분석장과 RDAPS30 예보장을 사용하여 20일 2100 UTC의 500 hPa 위치 소용돌이도 분포를 조사하였다. RDAPS10에서는 1 PVU 이상의 위치 소용돌이도가 한반도 중부지방에 위치하고 있는 반면 RDAPS30 9hr 예보장에서는 1 PVU 이상인 값이 만주 지역에 분포한다. 수치모델 자료에서 강한 위치 소용돌이도의 위치와 위성의 수증기 영상에서 암역의 위치 사이에는 상당한 차이가 존재한다. 따라서 20일 1630 UTC에 산동반도 부근에서 일어난 대류 세포의 생성은 상층 위치 소용돌이도와 연관된 것이 아니라 중·상층 대기의 건조화에 의한 대류 불안정에 기인한 것으로 볼 수 있다.

3) 대류 세포의 발달과 병합

20일 1630 UTC에 산동반도 부근에서 생성된 대류 세포는 100도 방향으로 약 20 m/s로 이동하면서 발달하고 병합한다. 이 대류 세포는 21일 0500 UTC까지 두 번의 뚜렷한 병합을 거쳐 발달한다. 첫 번째와 두 번째 병합은

각각 21일 0033 UTC에 경기만의 북부 지역에서 그리고 0433 UTC에는 서울 부근에서 일어난다(Fig. 13와 14). 여기서 구름의 병합은 회도온도 -45℃를 임계값으로 대류 세포를 탐지했을 때 약 30분 전에 여러 개로 관측된 대류 세포가 그 후 하나의 대류 세포로 탐지되는 경우이다. 첫 번째 병합의 경우 병합 후 대류 세포의 공간 면적이 급격히 증가하고 대류 세포의 최저 회도온도 또한 급격히 하강한다. 이 때 레이더 강우율도 첫 번째 최고점을 보인다. 그러나 두 번째 병합에서는 대류 세포의 공간 면적과 최저 회도온도에는 큰 변화가 없으나 레이더 강우율에는 두 번째 최고점이 나타난다.

대류 세포의 병합 과정을 조사하기 위하여 대류 세포의 공간 분포와 이동을 자세히 분석하였다. 첫 번째 병합의 경우 산동반도 부근에서 하나의 대류 세포가 동진하면서 발달하다가 20일 2200 UTC에는 이 대류 세포의 전면에 새로운 대류 세포가 나타난다(Fig. 13). 새로운 대류 세포는 웅진반도 가까이에서 발생했으며 비록 공간 면적에서 이전의 대류 세포보다 작지만 최저 회도온도는 더 낮은 값을 보인다. 이것은 새롭게 생성된 대류 세포가 이전의 대류 세포보다 빠르게 성장하고 있음을 의미한다. 또한 새로운 대류 세포가 웅진반도 가까이에서 생성

Fig. 13. MTSAT-2 IR1 image at (a) 2200 UTC, (b) 2233 UTC, (c) 2333 UTC 20 and (d) 0033 UTC 21 September 2010.

Fig. 14. MTSAT-2 IR1 image ($TBB \leq -45^{\circ}\text{C}$) at (a) 0133 UTC, (b) 0233 UTC, (c) 0333 UTC, and (d) 0433 UTC 21 September 2010.

되었다는 것은 바다와 육지의 경계 부분에서 나타나는 하층 수렴과의 연관성을 생각하게 한다. 두 개의 대류 세포는 그 후 동진하다가 21일 0033 UTC에 경기만의 북부 지역에서 병합한다. 병합 후 대류 세포의 공간 면적(최저 휘도온도 -50°C 이하)은 $30,000\text{ km}^2$ 로 급격히 증가하고 최저 휘도온도는 -55 에서 -76°C 로 하강한다. 이들 두 개의 대류 세포와 관련된 레이더 강우율을 조사해 보면 주된 강우는 새롭게 생성된 대류 세포에서 나타난다. 그리고 병합 후 레이더 강우율은 급격히 증가하여 20 mm/hr 와 30 mm/hr 이상인 면적이 각각 약 1600 km^2 와 700 km^2 이상이 된다. 한편 레이더 강우율에서 특이한 점은 대류 세포와 관련이 없는 주변 지역에서도 국지적으로 강한 강우가 나타난다는 것이다.

첫 번째 병합 후 하나로 합쳐진 대류 세포는 경기만 북부 지역에서 수도권 지역으로 이동하면서 발달한다. 이 과정에서 21일 0133 UTC에 서해 중부 지역(약 124°E , 37.5°N)에 새로운 대류 세포가 탐지된다(Fig. 14). 이 두 대류 세포는 약 3 시간 후인 0433 UTC에 서울 부근에서 하나의 세포로 합쳐진다. 이 때 두 대류 세포의 이동 속도는 각각 약 100 도 방향에 24 m/s 와 7 m/s 로 큰 차이를 보인다. 여기서 대류 세포의 이동은 구름의 공간 중심을 이용하여 계산한다. 즉 육지에 상륙한 대류 세포의 이동

속도가 느려지는 반면 서해상에서 발달한 대류 세포가 빠르게 이동하면서 두 대류 세포가 병합한다. 첫 번째 병합과는 다르게 두 번째 병합에서는 대류 세포의 공간 면적과 최저 휘도온도에 뚜렷한 변화가 없다. 그러나 레이더 강우율은 두 번째 병합에서 다시 최고점에 도달한다. 첫 번째 병합 후 레이더 강우율은 최고점에서 서서히 감소하는 경향을 보이다 두 번째 병합에서 다시 증가한다. 두 번째 최고점에서 20 mm/hr 와 30 mm/hr 이상인 강우율의 면적이 각각 약 1600 km^2 와 1200 km^2 이상이 되었고 약 200 km^2 이상의 면적에서 50 mm/hr 이상인 강우율이 나타나기 시작한다.

4) 대류 세포의 성숙

대류 세포의 두 번째 병합 후 하나의 잘 발달한 대류 세포는 약 4시간(0430~0830 UTC) 동안 최저 휘도온도와 구름의 공간 면적에서 뚜렷한 변화 경향 없이 비슷한 값을 유지한다. 이 기간 동안 최저 휘도온도는 추석 호우와 관련된 구름에서 가장 낮은 온도인 -65 에서 -75°C 사이에 분포한다. 그리고 구름 면적은 휘도온도가 -50 , -55 , -60°C 이하인 경우 각각 약 $30,000$, $18,000$, $6,000\text{ km}^2$ 이고 화소 수로는 각각 약 1000 , 600 , 200 이다. 이 면적은 MCC를 정의할 때 사용하는 -52°C 이하에서 약 $50,000$

Fig. 15. MTSAT-2 IR1 image ($TBB \leq -45^{\circ}\text{C}$) at (a) 0533 UTC, (b) 0700 UTC and (c) 0900 UTC 21 September 2010.

km^2 보다 작다. 이 후 대류 세포는 0830 UTC부터 급격히 성장하는데 공간 면적은 약 1000에서 1230 UTC에 최대가 된다. 이 최대가 되는 시각은 휘도온도의 임계값이 낮을수록 빨라진다(휘도온도 임계값이 -50 과 -65°C 일 때 최대가 되는 시각은 각각 1130과 1000 UTC이다). 이 때 구름의 면적은 휘도온도가 -50 , -55 , -65°C 이하인 경우 각각 약 75,000, 50,000, 12,000 km^2 이고 화소 수로는 각각 약 2400, 1700, 400이다. 그리고 최저 휘도온도는 1000 UTC부터 증가하는 경향을 보인다. 따라서 구름의 공간 면적과 최저 휘도온도 분석에서 0430 ~ 1000 UTC 기간을 대류 세포의 성숙 단계로 분류할 수 있다. 이러한 성숙 단계는 레이더 강우율에서도 잘 나타난다. 즉 구름의 면적은 성숙 단계에서는 MCC보다 작고 이 후 쇠퇴기에서 MCC의 크기를 보인다.

Fig. 15는 대류 세포의 성숙 단계에서 0533, 0700 그리고 0900 UTC에 나타난 다중 대류 세포의 크기와 위치를 나타낸 것이다. 여기서 다중 대류 세포는 공간적으로 비교적 서로 가깝게 위치하며 작은 세포가 큰 세포의 좌측에 위치하고 있다. 그리고 약 30분 후에는 다시 병합하는 패턴을 보인다. 따라서 이러한 다중 세포는 주 대류 세포와 이것의 후면에 생성되는 부 대류 세포로 구성된다고 볼 수 있다. 즉 주 대류 세포에서 형성된 하강 기류가 중

관 바람장인 서풍과 주 세포의 좌측에서 만나 수렴 지역을 만들고 이 지역에서 부 대류 세포(secondary cloud)가 생성된 것으로 이해 할 수 있다. James and Markowski (2010)은 CAPE가 크고 선 모양의 대류계에서 대기 중층이 건조할 때 이러한 부 대류 세포가 더 잘 형성된다고 보고하고 있다. 레이더 강우율에서도 0700과 0900 UTC에 약한 최고점이 나타났다.

대류 세포의 성숙 단계에서 세포의 이동을 조사하기 위하여 21일 0033 UTC와 1033 UTC에서 세포의 공간 중심 위치와 최저 휘도온도의 위치를 조사하고 이 자료를 이용하여 세포의 이동을 조사하였다. 10시간 동안 대류 세포의 이동 방향과 속도는 공간 중심과 최저 휘도온도 위치를 사용할 때 각각 85° 방향의 9.2 m/s 와 96° 방향의 6.5 m/s 이다. 이러한 대류 세포의 이동은 1차 병합 이전의 이동(80° 방향의 20 m/s)과 비교할 때 뚜렷한 차이를 보인다. 성숙 단계에서 대류 세포의 이동은 느려지는 경향을 보이고 특히 최저 휘도온도의 위치는 더욱 느려지고 방향도 동남동으로 변화함을 알 수 있다. 이러한 대류 세포의 이동에 나타난 변화는 해양과 육지의 차이, 대류 세포의 발달 유무, 그리고 2차 구름의 발달과 관련될 수 있으며 이에 대한 더 자세한 연구가 필요하다.

위의 성숙 단계에서 뚜렷한 열역학적 특징은 CAPE와

SRH에서 잘 나타난다. 21일 0000과 0600 UTC의 오산 단열선도에서 CAPE가 18에서 1727 J/kg 으로 크게 증가하고 반면에 50 J/kg 의 CIN은 사라졌다. 그리고 자유대류고도(Level of free convection, LFC)도 1768에서 549 gpm으로 낮아졌다. SRH는 231에서 $366 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 로 그리고 총가강수량은 46.7에서 56.5 mm로 증가하였다. 그러나 성숙 단계 후 1200 UTC 오산 단열선도에서는 CAPE는 사라지고 반면 SRH는 366에서 $438 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 총가강수량도 56.5에서 66.8 mm로 오히려 증가하였다. 따라서 성숙 단계에서는 대기불안정 즉 높은 CAPE가 중요한 역할을 한

(a)

(b)

(c)

Fig. 16. Distribution of (a) absolute Vorticity ($\times 10^5/\text{s}$), (b) potential vorticity ($\times 10^5/\text{s}$) and (c) Q-vector divergence ($\text{km}^2\text{s}^{-1} \times 10^{-16}$) at 500 hPa from the RDAPS30 at 0600 UTC 21 September 2010.

다고 볼 수 있다.

추석 호우에 미치는 중관규모 중층 대기의 역학장의 영향을 조사하기 위하여 21일 0600 UTC 500 hPa 절대소용돌이도, 위치소용돌이도, 큐벡터 발산(Div-Q)의 분포를 조사하였다(Fig. 16). 이 자료는 모두 RDAPS30의 6시간 예보장이다. 절대소용돌이도에서는 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 이상인 값이 만주 지역에 위치하며 중부 지방에는 낮은 값이 분포한다. Div-Q에서는 $-10 \times 10^{-16} \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ 이하인 값이 요동반도와 만주지역에 위치하고 위치소용돌이도에서는 뚜렷한 특징이 나타나지 않았다. 이러한 결과는 21일 0000과 0300 UTC 자료에서도 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다. 따라서 추석 호우의 성숙 단계는 중관규모 역학적 강제항에 크게 영향을 받지 않았음을 알 수 있다.

적외 휘도온도와 레이더 강우율의 공간 분포를 서로 비교해 보면 휘도온도가 낮은 지역과 강우율이 높은 지역의 상대적인 위치는 대류 세포의 성장 단계와 병합과

Fig. 17. Brightness temperature ($^{\circ}\text{C}$) of convective cloud cell (red contour, interval 5°C) using MTSAT-2 IR1 and radar rain rate (mm/hr) at 1.5 km height (shaded) at (a) 0100 UTC, (b) 0400 UTC and (c) 0500 UTC 21 September 2010.

정에 따라 상당한 변화를 보였다. 성숙 단계에 있어 두 지역의 위치는 Fig. 17에서 뚜렷한 차이를 보인다. 대류 세포의 1차 병합 후 0100 UTC에서 적외 휘도온도가 낮은 지역과 레이더 강우율이 높은 지역은 서로 잘 일치하고 있다(Fig. 17a). 그러나 대류 세포의 2차 병합이 나타나는 시기와 병합 후 기간에 레이더 강우율의 분포는 동서 방향의 선 모양의 분포를 보인다(Fig. 17b와 17c). 이 분포는 2차 병합 과정에서는 적외 영상에서 두 개의 대류 세포를 포함하는 연결된 구름 덩어리의 남쪽 가장자리에 위치한다. 그리고 이 분포는 2차 병합 후에는 구름 덩어리의 남서쪽 가장자리에 위치한다. 따라서 추석 호우의 성숙 단계에는 레이더 강우율의 분포가 대류 세포의 남서쪽 가장자리에 위치한다는 특징을 보인다.

5) 대류 세포의 소멸

대류 세포의 평균 휘도온도와 최저 휘도온도는 각각 1100과 1000 UTC 이후부터 뚜렷한 증가를 보였다. 그리고 휘도온도가 -60°C 와 -65°C 이하일 때 대류운의 면적은 각각 1133과 1033 UTC부터 뚜렷한 감소 경향을 나

타냈다. 또한 면적을 기준으로 조사할 때 각각 20과 30 mm/hr 이상인 레이더 강우율의 면적은 1000 UTC 이후부터 일관된 감소를 보였다. 그리고 1130 UTC 이후부터는 50 mm/hr 이상의 레이더 강우율은 나타나지 않았다. 따라서 이러한 결과로부터 대류 세포의 소멸은 약 1000 혹은 1130 UTC부터 시작된다고 볼 수 있다.

한편 지점 관측 강수량 자료를 살펴보면 대류 세포가 소멸하기 시작하는 시각인 1100 UTC 이후에도 강한 강수가 나타남을 알 수 있다. 원주의 경우 1000과 1100 UTC에 그리고 영월의 경우 1300과 1400 UTC에 40 mm/hr 이상의 강수량이 관측되었다. 그러나 이 시간대의 후반부(1230에서 1400 UTC)에서 레이더 강우율(Fig. 1)은 전체적으로 크게 감소하여 극히 일부 지역에서 30 mm/hr 이상의 값을 보였다.

Fig. 18은 대류 세포의 소멸기에 위성의 휘도온도와 레이더 강우율의 공간적 분포이며 21일 1230 부터 1400 UTC 까지의 시각에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 시간이 경과함에 따라 평균적으로 휘도온도는 뚜렷하게 증가하고 강우율은 크게 감소함을 알 수 있다. 그러나

Fig. 18. Brightness temperature ($^{\circ}\text{C}$) of convective cloud cell (contour lines -65°C , -60°C and -55°C indicate violet, red and orange, respectively) using MTSAT-2 IR1 and radar rain rate (mm/hr, shaded) at (a) 1230 UTC, (b) 1300 UTC, (c) 1330 and (d) 1400 UTC 21 September 2010. The filled circles A and B denote Wonju and Yeongwol, respectively.

자세히 살펴보면 21일 1230 UTC의 경우 휘도온도가 -65°C 이하인 영역(보라색 실선)이 나타나고 이 영역의 남남서와 남쪽에 부분적으로 30 mm/hr 이상의 강한 강우가 존재한다. 또한 21일 1300 UTC에도 비록 휘도온도는 크게 증가했지만 일부 지역에 30 mm/hr 이상의 강한 강우가 나타났다. 이들 강한 강우 가운데 Fig. 18b의 남서쪽 모서리에 나타난 강우는 대류운과 직접적으로 연관되어 있다고 보기 어렵다. 한편 영월(Fig. 18에서 B 지점)의 지점 강수량은 1300과 1400 UTC에 각각 58.5와 41.5 mm/hr를 기록했다. 그러나 이 부근의 레이더 강우율은 1230 UTC(30 mm/hr 이하)를 제외하고 모두 20 mm/hr 이하이다. 따라서 대류 세포의 소멸기에는 위성의 휘도온도나 레이더 강우율로부터 지점 강수량을 유추하는 데에는 어려움이 있음을 알 수 있다.

결론적으로 위의 분석은 대류 세포의 소멸기, 즉 대류 세포가 성숙기를 지나 약해지기 시작하고 나서 약 2~3 시간 후에도 강한 강수가 나타날 수 있음을 보여준다. 그리고 이러한 강수 가운데 일부는 휘도온도를 기준으로 탐지한 주된 대류운과 직접적으로 연관되어 있지 않으며, 레이더 강우율에도 잘 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 이러한 강수에 보다 자세한 연구가 필요하다.

5. 요약과 결론

2010년 9월 21일 추석 호우 사례에서 한반도 중부지역의 4개 기상 관측소에서 호우 경보에 해당하는 강수량이 관측되었고 이 강수량은 일강수량과 시간 강수량에서 9월 극값으로 기록되었다. 레이더 강우율은 21일 0430에서 1000 UTC까지 약 6시간 동안 선 모양의 강한 강우 분포를 보였고 이 때 강우율이 30과 50 mm/hr 이상인 면적이 각각 약 1000과 230 km^2 였다.

이 연구에서는 2010년 9월 21일 추석 호우와 관련된 MCS의 특성을 조사하기 위하여 위성의 적외 영상과 수증기 영상을 분석하였다. 이 호우 사례에서 호우와 관련된 구름은 다른 구름과 명확하게 식별되고 또한 대류 세포(MCS 혹은 MCC)의 성장단계가 뚜렷이 탐지되었다. 따라서 이 연구에서는 적외 영상에서 대류 세포를 탐지하고 이 세포를 추적하면서 구름의 수평 공간적 크기와 위치 그리고 온도도의 변화와 구름의 병합 과정을 분

석하였다. 그리고 위성 영상의 구름과 레이더의 강우율을 비교하여 MCS를 몇 개의 성장 단계로 분류하고 다양한 관측 자료와 모델 자료를 이용하여 각 단계별로 기본적인 발달 구조를 이해하고자 하였다.

추석 호우와 관련된 MCS의 특성을 요약하면 Table 2와 같다. 추석 호우와 관련된 가장 초기의 구름은 20일 1630~1900 UTC에 산둥반도와 옹진반도 사이에서 생성된 휘도온도가 약 $-15\sim 0^{\circ}\text{C}$ 인 다중 세포 구름이다. 이 초기 구름의 생성은 국지적인 대기 하층의 수렴과 대기 불안정에 의한 치올림에 기인한다고 볼 수 있다. 이 후 20일 1630 UTC에 휘도온도가 -45°C 이하인 최초의 대류 세포가 산둥반도 부근에 나타났다. 이 대류 세포는 수증기 영상에서 휘도온도가 약 -25°C 이상인 암역의 가장 자리에서 발달하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이 대류 세포의 생성은 중·상층 대기의 건조화에 의한 대류 불안정과 밀접하게 연관되어 있다고 볼 수 있다.

대류 세포는 0030(경기만의 북부 지역)과 0430(서울 부근) UTC에 나타난 두 번의 병합 과정을 거쳐 급격히 발달하였다. 첫 번째 병합 후 대류 세포의 공간 면적이 급격히 증가하고 최저 휘도온도도 급격히 하강하였다. 이 때 레이더 강우율도 첫 번째 최고점을 보였다. 두 번째 병합 후 대류 세포의 공간 면적과 최저 휘도온도에는 큰 변화가 없으나 레이더 강우율에는 두 번째 최고점이 나타났다. 이 병합에서 두 개의 대류 세포는 서로 다른 이동 속도를 보이는데 육지에서 잘 발달한 대류 세포는 느리게 이동하는 반면 서해상에서 나타난 작은 대류 세포는 빠르게 이동하면서 두 세포가 병합하였다.

대류 세포의 두 번째 병합 후 대류 세포는 약 4시간(0430~0830 UTC) 동안 최저 휘도온도와 구름의 공간 면적에서 뚜렷한 변화 경향 없이 비슷한 값을 유지하였다. 이 후 대류 세포는 급격히 발달하여 1000 UTC에는 공간 면적(휘도온도 -65°C 이하)이 최대가 되었고 이 시 각부터 최저 휘도온도는 증가하는 경향을 보였다. 0430~1000 UTC 기간에는 레이더 강우율도 최대값을 보였다. 따라서 이 기간을 대류 세포의 성숙 단계로 분류할 수 있다. 이 단계에서 대류 세포의 이동 속도는 상대적으로 감소하였고 최저 휘도온도의 위치는 구름의 공간 중심의 남서쪽에 위치하였다. 또한 이 기간에 3차례 부 대류 세포가 주 대류 세포의 서쪽에서 생성되어 병합하는 과정을 보였다. 그리고 레이더 강우율의 분포는 선

Table 2. Features of satellite image and radar rain rate, and the probably associated kinematic and thermodynamic features for Chuseok heavy rain

Date	Time (UTC)	Satellite(TBB)	Radar(rain rate)	Kinematic and thermodynamic features
20 Sep.	16:30 ~19:00	- Development of multicell clouds in the middle of the Yellow sea (-15 ~ 0°C)		- Convergence at 1000 hPa
	19:30	- Development of convective cell ($\leq -45^{\circ}\text{C}$) in the vicinity of Shantung peninsula, which is placed around the dry intrusion in water vapor image ($\approx -25^{\circ}\text{C}$)		- Drying above 600 hPa (Baengnyeongdo) - EPT ridge at 850 hPa
21 Sep.	00:30	- 1st merging	- 1st peak	
	04:00	- 2nd merging - size of cloud($\leq -50^{\circ}\text{C}$): 30000 km ² - Development of secondary convective cell - Persistence of minimum TBB between -65 and -75°C - Decrease of the moving velocity of convective cell	- 2nd peak - Occurrence of heavy rainrate (≥ 50 mm/hr) - Line-shaped rainband - Rainband is located in the south-western edge of the convective cell.	- No distinct features in synoptic-scale dynamic forcing - CAPE 1727 J/kg, TPW 56.6 mm SRH 366 m ² /s ² (Osan)
	10:00	- Dissipation of convective cell	- Local heavy rains in the rear of convective cell	- TPW 66.8 mm SRH 438 m ² /s ² (Osan)
	15:00			

EPT: Equivalent potential temperature, TPW: Total precipitable water, SRH: Storm relative helicity, CAPE: Convective available potential energy

모양의 분포를 보였고 대류 세포의 남서쪽 가장자리에 위치하였다. 이 기간에 종관규모 역학적 강제항에서는 뚜렷한 특징을 발견하지 못하였고 오산 단열선도에 1727 J/kg의 CAPE가 나타났다. 따라서 대류 세포의 성숙에 기여하는 주된 요소는 대기 불안정(대기 상층까지 존재하는 강한 CAPE)으로 볼 수 있다.

2010년 9월 21일 추석 호우 사례의 경우 호우와 관련된 구름(MCS)의 특성(다중 구름 세포의 생성, 대류 세포의 생성, 대류 세포의 병합, 부 대류 세포의 생성, 대류 세포의 이동, 그리고 대류 세포의 소멸 등)을 위성의 적외 영상과 수증기 영상에서 분명하게 탐지할 수 있었다. 그리고 이러한 특성이 레이더 강우율 및 강우 지역과 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있었다. 그러나 수치 모델 자료로부터 호우와 관련된 위의 요소를 예측하는 데에는 한계가 있음이 나타났다. 따라서 여러 사례의 영서 호우에 대한 MCS의 특성을 수집한다면 이 자료들은 영서 호우 예보를 위한 초단기 예측 가이드선으로 사용될 수 있을 것이다. 한편 2010년 9월 21일 추석 호우 사례에서 원주와 영월 지역의 호우는 MCS의 소멸 단계에 발생했는데 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

사 사

본 연구에 사용된 자료를 제공하여 주신 기상청에 감사드리며, 이 논문은 기상청/국립기상연구소의 연구용역사업인 “강원 산지 겨울철 재해기상 사례연구 및 예측 가이드선 개발”과 강릉원주대학교 자연과학연구소의 지원을 받았습니다.

Reference

- Doswell C.A., III, 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example, *Wea. Forecasting*, 2(1):3-16.
- Doswell C.A., III, H.E. Brooks, and R.A. Maddox, 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology, *Wea. Forecasting*, 11(4): 560-581.
- Elmore, K.L., D.J. Stensrud, and K. C. Crawford, 2002.

- Ensemble cloud model applications to forecasting thunderstorms, *J. Appl. Meteorol.*, 41(4): 363–383.
- Georgiev, C.G., 1999. Quantitative relationship between meteosat WV data and positive potential vorticity anomalies: a case study over the Mediterranean, *Meteorol. Appl.*, 6(2): 97-109.
- James, R.P. and P.M. Markowski, 2010. A numerical investigation of the effects of dry air aloft on deep convection, *Mon. Wea. Rev.*, 138(1): 140-161.
- Kim, D.-R. and T.-Y. Kwon, 2011. Characteristics of satellite brightness temperature and rainfall intensity over the life cycle of convective cells-case study, *Atmosphere*, 21(3):273-284(in Korean with English abstract).
- Kim, I.-H., T.-Y. Kwon, and D.-R. Kim, 2012. MTSAT satellite image features on the severe storm events in Yeongdong region, *Atmosphere*, 22(1): 29-45(in Korean with English abstract).
- Kirkpatrick, C., E.W. McCaul Jr., and C. Cohen, 2011. Sensitivity of simulated convective storms to environmental CAPE, *Mon. Wea. Rev.*, 139(11): 3514-3532.
- Kurz, M., 1994. The role of diagnostic tools in modern weather forecasting, *Meteorol Appl.*, 1(1): 45-67.
- Kwon, T.-Y., 2001. The relationship between GMS-5 IR1 brightness temperature and AWS rainfall: a heavy rain event over the mid-western part of Korea for August 5-6, 1998, *The Korean Journal of Remote Sensing*, 17(1): 15-31(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*, accepted(in Korean with English abstract).
- Lovejoy, S., and G.L. Austin, 1979. The source of error in rain amount estimating schemes from GOES visible and IR satellite data, *Mon. Wea. Rev.*, 107(8): 1048-1054.
- McNulty, R.P., 1995. Severe and convective weather: A Central Region forecasting challenge, *Wea. Forecasting*, 10(2): 187-202.
- Schultz, D.M., and P.N. Schumacher, 1999. The use and misuse of conditional symmetric instability, *Mon. Wea. Rev.*, 127(12): 2709-2732.
- Thompson, R.L., R. Edwards, 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(6): 1243–1261.
- Thompson, R.L., C.M. Mead, and R. Edwards, 2007. Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments, *Wea. Forecasting*, 22(1): 102–115.
- Uccellini, L.W., D. Keyser, K.F. Brill, and C.H. Wash, 1985. The presidents' day cyclone of 18-19 February 1979. Influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis, *Mon. Wea. Rev.*, 113(6): 962-988.
- Young, M.V., G.A. Monk, and K.A. Browning, 1987. Interpretation of satellite imagery of a rapidly deepening cyclone, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 113(478): 1089-1115.