

한반도 중서부 국지성 집중호우와 관련된 열역학적 특성

정승필^{1,2)} · 권태영^{2),*} · 한상옥¹⁾

¹⁾국립기상연구소 예보연구과 재해기상연구센터, ²⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2014년 6월 12일, 게재확정일: 2014년 9월 25일)

Thermodynamic Characteristics Associated with Localized Torrential Rainfall Events in the Middle West Region of Korean Peninsula

Sueng-Pil Jung^{1,2)}, Tae-Yong Kwon^{2),*}, and Sang-Ok Han¹⁾

¹⁾High-impact Weather Research Center, Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Research, Gangneung, Korea

²⁾Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 12 June 2014; accepted 25 September 2014)

Abstract Thermodynamic conditions related with localized torrential rainfall in the middle west region of Korean peninsula are examined using radar rain rate and radiosonde observational data. Localized torrential rainfall events in this study are defined by three criteria base on 1) any one of Automated Synoptic Observing System (ASOS) hourly rainfall exceeds 30 mmhr^{-1} around Osan, 2) the rain ($> 1 \text{ mmhr}^{-1}$) area estimated from radar reflectivity is less than $20,000 \text{ km}^2$, and 3) the rain ($> 10 \text{ mmhr}^{-1}$) cell is detected clearly and duration is short than 24 hr. As a result, 13 cases were selected during the summer season of 10 years (2004-13). It was found that the duration, the maximum rain area, and the maximum volumetric rain rate of convective cells ($> 30 \text{ mmhr}^{-1}$) are less than 9hr, smaller than $1,000 \text{ km}^2$, and $15,000\sim 60,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ in these cases. And a majority of cases shows the following thermodynamic characteristics: 1) Convective Available Potential Energy (CAPE) $> 800 \text{ Jkg}^{-1}$, 2) Convective Inhibition (CIN) $< 40 \text{ Jkg}^{-1}$, 3) Total Precipitable Water (TPW) $\approx 55 \text{ mm}$, and 4) Storm Relative Helicity (SRH) $< 120 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$. These cases mostly occurred in the afternoon. These thermodynamic conditions indicated that these cases were caused by strong atmospheric instability, lifting to overcome CIN, and sufficient moisture. The localized torrential rainfall occurred with deep moisture convection result from the instability caused by convective heating.

Key words: Localized torrential rainfall, thermodynamic characteristics, convective cell life-cycle, radar rainfall, radiosonde

1. 서 론

NEMA (2013)에 따르면 최근 10년 동안(2003~2012)

한반도에서는 호우로 인하여 약 4조 4천억 원의 재산 피해와 17만 명의 이재민이 발생하였다. 이는 2003년에 발생한 태풍 피해(매미, Maemi)를 제외할 경우, 호우가 전체피해(8조 5천억 원)의 52%를 차지한다. 특히 재산피해의 경우 태풍(55%), 호우(31%), 대설(12%) 순으로 크게 나타나는 반면, 인명피해(이재민, 사망)는 호우(59%, 50%)가 절반 이상을 차지하여 태풍(29%, 43%)과 대설(11%, 3%)보다 많은 피해를 유발하였다.

*Corresponding Author: Tae-Yong Kwon, Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 210-702, Korea.
Phone : +82-33-640-2323, Fax : +82-33-640-2324
E-mail : tykwon@gwnu.ac.kr

또한 최근 20년(1992~2011) 동안 가장 큰 피해를 발생시킨 10사례의 호우 중 집중호우가 8사례(태풍 2사례)를 차지하고 있고, 그 중 4사례가 수도권과 영서지역에서 나타났다(KMA, 2012). 2010년 9월 21일에 발생한 추석 집중호우는 서울, 경기, 영서 지역을 차례로 통과하며 국지적으로 피해를 일으켰고, 2011년 7월 26~28일에 발생한 수도권 집중호우는 시간당 100 mm 이상의 강우를 기록하여 우면산 산사태와 같은 2차 피해를 유발하였다. 이처럼 국지성 집중호우(localized torrential rainfall)는 피해의 사상자 수가 큰 반면, 시공간적인 규모가 작기 때문에 예측에 어려움이 있다.

국지성 집중호우는 대류스름(convective storm)에 의해서 발생한다고 볼 수 있는데, Weisman and Klemp (1982)는 수치모델을 이용한 대류스름 모의를 통하여 이론적 연구의 방향성을 제시하였다. Weisman and Klemp (1982)는 대류스름을 분석하기 위하여 이상적인 연직프로파일(vertical profile)을 3차원 구름 모델에 수평적으로 균질하게 구성한 후, 온도요란을 주어 인위적인 대류스름의 성장을 모의하였다. 또 부력과 연직바람시어(vertical wind shear)가 대류스름의 성장과 구조에 가장 큰 영향을 미친다고 판단하여, 두 요소와 혼합비를 변화해가면서 60개의 이상적인(idealized) 실험을 수행하였다. 그 결과 연직바람시어가 증가할수록 단일세포(single cell)에서 다중세포(multi cells), 그리고 거대세포(supercell)로 발달할 수 있었고, 부력이 커질수록 최대상승류(maximum updraft, W_{max})가 증가한다고 하였다. 또한 대류가용잠재에너지(Convective Available Potential Energy, CAPE)와 연직바람시어의 비율(Bulk Richardson Number, BRN)이 대류스름의 구조를 결정하는 데 중요하다고 제시하였다.

McCaul and Weisman (1996)은 CAPE가 600 J kg^{-1} 과 같이 작더라도 다른 기작과 함께 작용한다면 거대세포로 발달할 수 있다고 제시하였다. 그리고 McCaul and Weisman (2001)은 Weisman and Klemp (1982)가 수행한 연구에서 CAPE의 변화에 따라 자유대류고도(Levels of Free Convection, LFC)가 변화하였고, 그로 인해 하층의 수증기 공급이 다르게 적용되었다고 하였다. 그러한 문제를 해결하기 위하여 상승응결고도(Lifting Condensation Level, LCL)와 LFC를 0.5 km로 동일한 고도로 설정하여 실험을 수행하였고, 그 결과 CAPE에 따라서 대류스름의 강도가 증가함을 보였다. 또한 McCaul and Cohen (2002)은 대류스름의 발생고도가 중요하다고 판단하여 LCL과 LFC의 고도를 하층(0.5와 0.7 km), 중층(1.0과 1.3 km), 그리고 상층(1.6과 2 km)으로 구분하여 CAPE와 비교하였다. 스름은 LFC와 LCL의 고도가 1.5~2.5 km 일 때 크게 발달할 수 있었고, LCL과 LFC가 같은 경우 그 고도가 증가함에 따라 스름의 크기와 강도가 증가하였다.

대류스름에 관한 연구는 수치모델실험뿐만 아니라, 관측을 통해서도 이루어졌다. 1950년대를 전후로 시작된 연구들에 따르면 Byers and Braham (1949)은 미국 Florida에서 레이더와 항공기 관측 자료를 이용하여 스름 내부의 연직 단면을 제시하였고, 상승류가 고도별 입자상태(비, 눈, 빙정)와 강수구역과 연관되어 있다고 하였다. Fawbush and Miller (1954)와 Beebe (1955)는 미국에서 관측된 라디오존데 자료를 통계적으로 분석하여 스름 내부의 연직 프로파일 값을 제시하였다. 이러한 연구들을 통해 스름의 발생 요소는 크게 두 가지(열역학적 조건과 역학적 조건)로 구분될 수 있었다(Ebelen et al., 1990). 먼저 열역학적 조건은 상승류로서 스름의 발달 강도에 영향을 주고, 다음으로 역학적인 조건은 연직바람시어로서 스름의 지속시간과 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 스름은 두 요소의 관계에 의해서 단일세포, 다중세포, 혹은 거대세포 등 다양한 형태로 발달할 수 있다고 하였다.

또한 Rasmussen and Blanchard (1998)는 1992년 한 해 동안 미국 전 지역의 0000 UTC 자료 중 CAPE가 발생한 6,793회의 관측 자료를 분석하여, 43% (2,937회)에서 뇌우(thunderstorm)가 발생한 것을 확인하였다. 이를 다시 뇌우, 거대세포(tornado가 동반되지 않음), 그리고 토네이도(tornado)로 분류하였다. 그 결과 뇌우가 94% (2,767회)로 가장 높은 비율을 차지하였고, CAPE의 중앙값은 537 J kg^{-1} 로 나타났다. 거대세포와 토네이도는 각각 4% (119회)와 2% (51회)를 차지하였고, CAPE의 중앙값은 $1,152 \text{ J kg}^{-1}$ 과 $1,314 \text{ J kg}^{-1}$ 로, 스름의 강도가 증가함에 따라 CAPE가 커진다고 하였다. 또한 SRH (Storm Relative Helicity)값을 분석하여 뇌우($55 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), 거대세포($124 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), 그리고 토네이도($180 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$)의 중앙값을 제시함으로써 SRH도 스름의 발달에 중요한 요소임을 확인하였다. Thompson et al. (2003)의 경우 1999~2001년 동안 미 대륙에서 발생한 413개의 거대세포 스름을 분석하여 토네이도가 동반되지 않은 거대세포(nontormadic supercell), 약한 토네이도성의 거대세포(weakly tormadic supercell), 그리고 토네이도 거대세포(tormadic supercell)의 순으로 스름의 강도에 따라 CAPE가 증가함을 보였다.

Kwon et al. (2013)은 10년간(2001~2010) 한반도 영동과 영서지역에서 국지적으로 발생한 집중호우사례를 조사하여, 두 지역에서 나타난 호우 특성을 비교하였다. 영서호우는 여름철인 7, 8월에 집중되어 발생하였고, 최근(2009~2010년)에는 영서지역에서 집중호우가 자주 발생한다고 하였다. 특히 영서호우의 발생시간이 오후시간에 집중됨을 확인하였고, 이를 통해 영서호우가 지면가열에 의한 대기불안정과 관련되어 있다고 유추하였다. 영서지역에서 발생한 집중호우를 살펴보면 CAPE는 대체로 $1,000 \text{ kg}^{-1}$ 이상의 값을 보

였고, 가강수량(Total Precipitable Water, TPW)은 55 mm 이상, 그리고 SRH는 $100\sim 300\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$ 사이에 분포하였다. 이는 앞서 언급한 연구(Rasmussen and Blanchard, 1998; Thompson et al., 2003)와 비교했을 때 CAPE와 SRH가 거대세포와 비슷한 수치를 보였다.

한반도에서의 호우는 태풍, 장마전선, 중규모 대류 시스템(mesoscale convective system), 국지적인 대기 불안정 등 다양한 메커니즘에 의해서 발생하고 있다(Lee and Kim, 2007; Park and Lee, 2008; KMA, 2012; Kwon et al., 2013). 이 중 짧은 시간 동안 좁은 면적에서 발생하는 국지성 집중호우에 대한 연구는 부족한 실정이며, 이들에 대한 세밀한 분류와 연구가 필요시 된다. 이 연구에서는 (1) 한반도 중서부 지역에서 여름철에 발생하는 국지성 집중호우사례를 선정하고, 이들에 대한 강우세포의 특징(강우면적, 총강우량, 강우지속시간, 발달시기 등)을 조사하였다. (2) 각 사례별 강우세포의 특징과 오산지점 고층대기의 열역학적 특성(가강수량, CAPE, CIN, SRH 등)을 비교하였다. 그리고 (3) 이러한 비교를 통해 한반도 중서부에서 국지성 집중호우를 유발한 강우세포의 특징과 열역학적 특성의 관계성을 조사하였다. 이러한 특징을 조사하기 위하여, 레이더 강우율을 활용하여 집중호우를 유발한 강우세포를 탐지 및 추적하여 강우세포의 life-cycle을 분석하였다. 강우세포의 life-cycle을 구함으로써 강우세포의 발생과 소멸, 그리고 최대 발달시기를 알 수 있었고, 그에 따른 열역학적 특성

을 비교할 수 있었다. 이 논문의 2장에서는 집중호우 사례 선정기준과 분석자료, 그리고 연구방법에 대하여 설명하였고, 다음으로 3장에는 각 사례별 강우세포의 특징을 분석하였다. 그리고 4장에서는 강우세포의 특징과 대기의 열역학적 성질을 비교하였고, 마지막으로 5장은 위의 결과에 대하여 요약하고 토의하였다.

2. 사례선정 및 연구방법

기상청에서 발표하는 호우주의보의 기준은 6시간에 70mm와 12시간에 110mm로 짧은 시간 동안 발달하고 소멸하는 국지성 집중호우를 선정하기 위한 기준으로 사용하는 데 어려움이 있다. 국지성 집중호우를 선정하기 위해서는 짧은 시간에 대한 강우량 기준이 필요하다. Kim et al. (2011)은 한반도에서 발생하는 호우사례를 분석하여 강우강도에 따른 호우피해발생 확률을 제시하였다. 10 mm hr^{-1} 와 20 mm hr^{-1} 의 강수가 1시간 동안 발생할 경우 피해발생누적확률은 25%와 50%로 강수강도가 강할수록 피해발생누적확률은 증가하였다. 특히 30 mm hr^{-1} 의 강수가 발생 시 피해발생누적확률은 75%로 나타났다. 본 연구에서는 피해발생확률이 높게 나타나는 30 mm hr^{-1} 를 호우라 규정하여 사례선정을 수행하였다.

한반도 중부지역의 고층관측은 백령도, 오산, 그리고 속초에서 수행되고 있으며, 그 중 오산은 1950년대에 관측을 시작하여 현재까지도 관측이 이루어지는

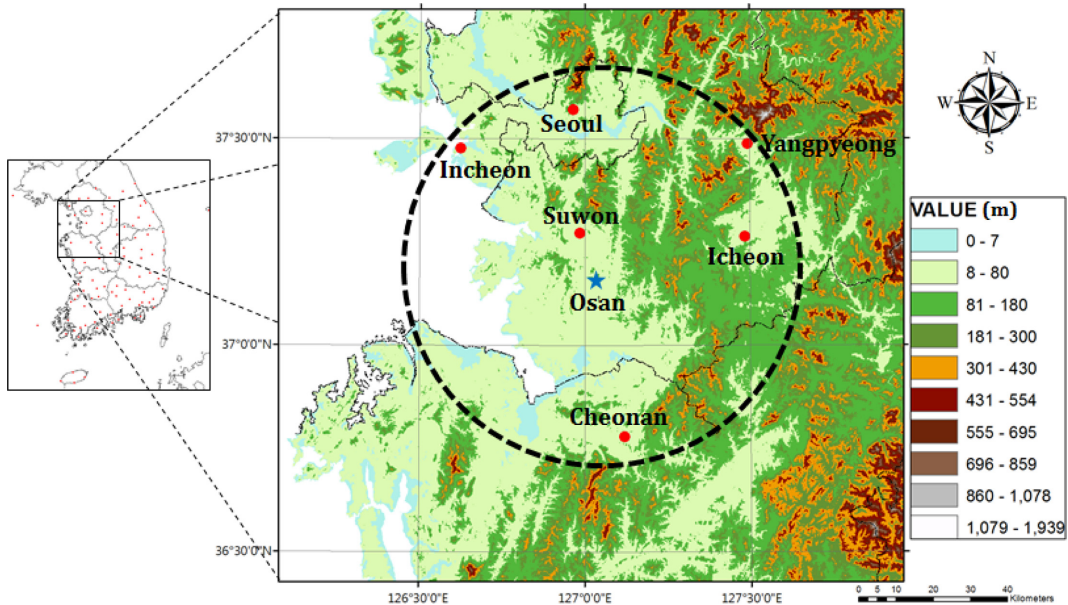


Fig. 1. Spatial locations of the six ASOS stations currently operating around Osan radiosonde site. Osan and six ASOS positions are denoted by blue star and red dots. Black dashed line means the radius of 50 km around Osan.

장기간의 고층관측이 수행된 곳이다. 또한 백령도와 속초는 해안에 위치하고 일 2회(0900, 2100 KST) 관측을 수행하는 반면 오산은 내륙에 위치하고 일 4회(0300, 0900, 1500, 2100 KST)의 관측을 수행하기 때문에 국지적 가열에 의한 대기의 열역학적 과정을 조사하는 데 도움이 된다. 한반도 중서부지역에서 발생한 호우사례를 선정하기 위하여 고층관측이 이루어지는 오산지점을 중심으로 약 50 km 반경에 위치한 Automated Synoptic Observing System (ASOS) 6개소(수원, 서울, 양평, 이천, 인천, 천안)의 1시간 강우량 자료를 이용하였다(Fig. 1). 그 결과 최근 10년(2004~2013)동안 여름철(6~8월)에 6개 지점 중 한 지점이라도 시간당 30 mm 이상의 강우를 기록한 사례는 총 65개 사례가 나타났다.

앞서 조사한 65개 사례에는 태풍, 저기압, 장마전선, 그리고 국지적 대기불안정 등과 관련된 다양한 호우 사례가 포함되어 있다. 이 가운데 대기불안정과 관련된 국지성 집중호우의 경우 짧은 시간 동안 좁은 지역에서 강한 강우를 나타내기 때문에 많은 인명피해와 재산피해를 유발한다. 또한 이러한 사례는 정확한 강우지점, 강우시기, 변동성이 큰 강우량을 예보하는 데 어려움이 있다. 따라서 이 연구에서는 다음의 기준을 적용하여 국지성 집중호우를 분류하였다. 국지성 집중호우의 강우특징은 (1) 강우면적이 좁고, (2) 강우지속시간이 짧으며, (3) 최대강우 시간을 찾을 수 있을 정도로 강우의 변화가 뚜렷하고, 강한 강우를 보인다는 것이다.

국지성 집중호우를 분류하기 위해 65개 사례에 대하여 첫 번째 기준인 최대강우시기의 강우면적을 구하였다. 강우면적은 기상청에서 제공하는 레이더 자료 중 한반도 CAPPi 1.5 km 합성장의 반사도(dBZ)값을 사용하여 계산하였다. 연구에 사용된 자료 가운데 2008년 8월 14일 19시 이후의 자료는 기상청의 품질검사(Quality Control)가 적용된 반면, 그 이전에 생성된 자료에는 적용되지 않았다. 레이더를 통해 얻어진 반사도 값은 Marshall and Palmer (1948)가 제시한 반사도 인자(Z)와 지상 강우강도(R)의 관계식($Z = aR^b$, $a = 200$, $b = 1.6$)을 이용하였다. 그러나 여기서 사용된 Marshall and Palmer의 Z-R 관계식은 층운형 구름에 적합하고, 다양한 연구들에 따르면 Z-R 관계식은 구름의 종류와 관측지점에 따라서 달라질 수 있다(Atlas and Chmela, 1957; Fujiwara, 1965; Woodley et al., 1975; Nam et al., 2003). 이에 한반도 중서부 지역의 국지성 호우와 관련된 대류운에 대한 Z-R 관계식은 다시 조사할 필요가 있으며 이 부분은 3장에서 자세히 논의한다.

앞서 호우사례로 선정한 65개 사례의 최대강우시기에 나타난 강우면적의 빈도분포를 계산하였다(Fig. 2).

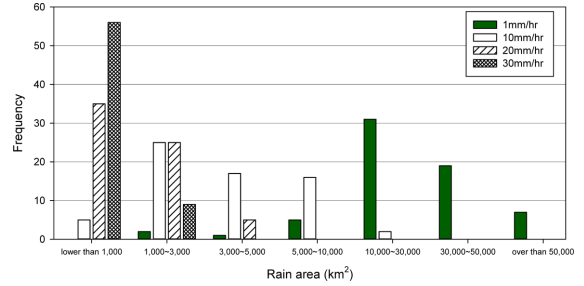


Fig. 2. The frequency of rain area (km^2) according to different rain rates for 65 heavy rainfall events. The rain area are calculated by radar rain rate at 1.5 km height (CAPPi) over middle west region of Korean peninsula (latitude: $35.5\text{--}39^\circ$, longitude: $125.5\text{--}129^\circ$).

여기서 강우면적은 위도 $35.5^\circ\text{--}39.0^\circ$ 와 경도 $125.5^\circ\text{--}129.0^\circ$ 내에 위치한 모든 레이더 격자 자료를 통해 구하였다. 호우라 규정한 30 mm hr^{-1} 이상의 강우면적은 대부분 $2,000\text{ km}^2$ 이하로 좁게 나타났고, 20 mm hr^{-1} 이상과 10 mm hr^{-1} 이상의 강우면적은 각각 $4,000\text{ km}^2$ 이하와 $10,000\text{ km}^2$ 이하의 강우면적을 보였다. 그러나 1 mm hr^{-1} 이상의 강우가 나타난 면적은 대부분 $10,000\text{--}50,000\text{ km}^2$ 로 면적의 변동이 컸다. 또한 1 mm hr^{-1} 이상의 강우면적이 $20,000\text{ km}^2$ 를 넘는 41사례의 종관일기도를 분석한 결과, 이들 사례는 대부분 저기압 중심, 장마전선, 태풍 등과 관련되어 강우세포의 면적이 크고, 지속시간이 길게 나타남을 발견하였다. 따라서 이 연구에서는 종관시스템의 영향을 상대적으로 적게 받는 사례를 선택하기 위해서 1 mm hr^{-1} 이상의 강우면적이 $20,000\text{ km}^2$ 이하인 사례를 선정하였다. 이러한 기준은 국지성 호우에 일반적으로 사용되는 것이 아니라 분석의 용이함을 위하여 사용하였다. 1 mm hr^{-1} 이상 강우면적이 $20,000\text{ km}^2$ 이하인 사례는 전체 65개 사례 중 24개 사례였으며, 이를 중점적으로 분석하고자 한다.

국지성 집중호우의 두 번째와 세 번째 특징은 강우세포의 지속시간이 24시간 이하로 짧고, 최대강우시간이 뚜렷하게 나타나는 것이다. 이러한 특징을 조사하기 위하여, 3장에서는 24개 사례의 레이더 강우율을 이용하여 강우세포를 탐지하고, 그 세포를 추적하며 30분 간격으로 강우강도별 강우면적을 분석하였다. 이 자료로부터 각 사례별 강우세포의 life-cycle을 분석하여 강우특징(강우지속시간, 최대강우시간, 체적강우량, 강우강도별 최대강우면적 등)을 조사함으로써 국지성 집중호우를 선별하였다. 4장에서는 최대강우가 나타난 시간과 가장 근접한 시간의 오산지점 라디오존데로부터 산출된 열역학적 특성(가장수량, CAPE, CIN, SRH 등)을 조사하였다. 이러한 국지규모의 열

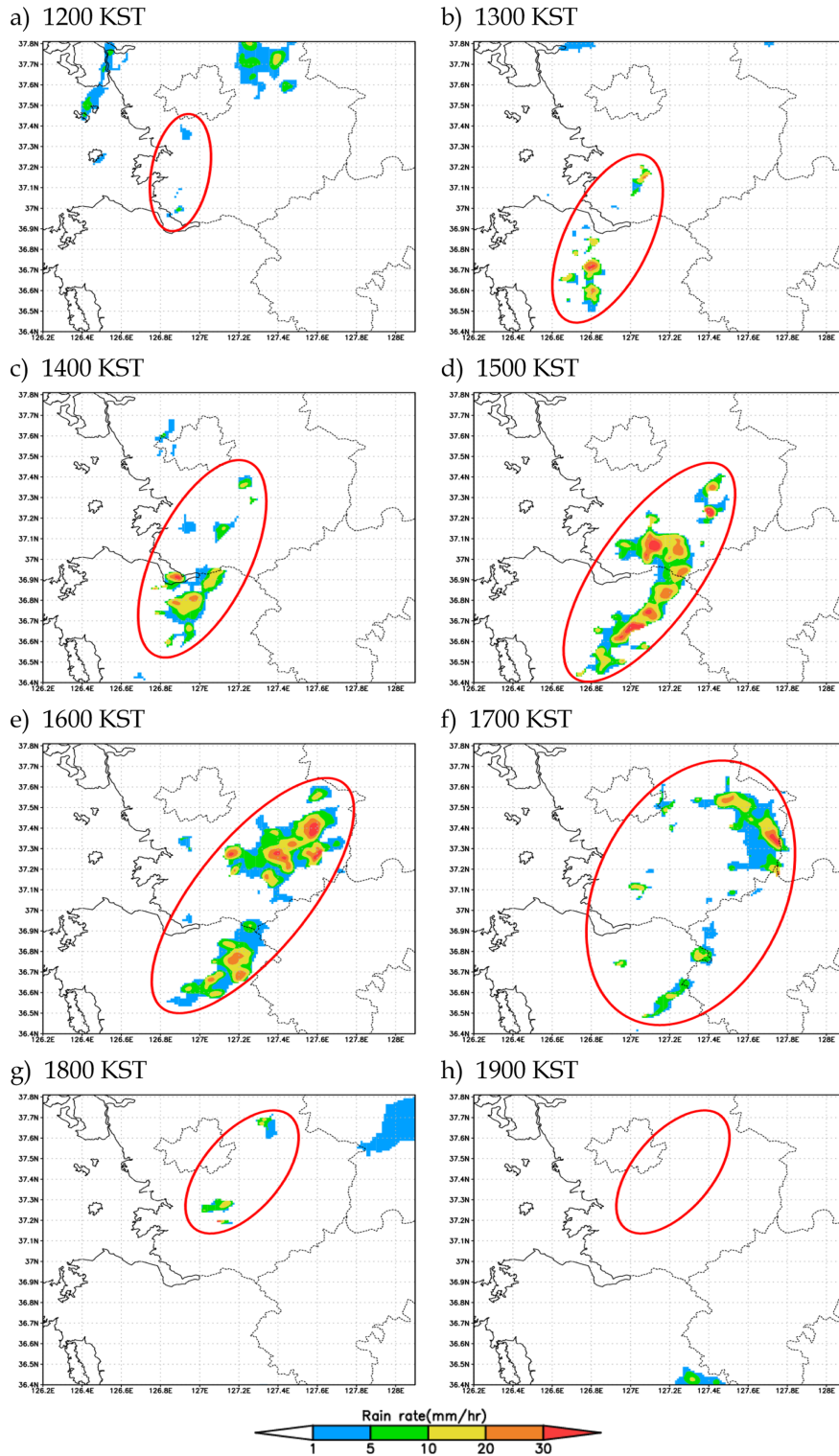


Fig. 3. Detecting and tracking of rain cell (red solid line) using rain rate estimated from radar echo at 1.5 km height (CAPPI 1.5) from 1200 KST to 1900 KST 25 August 2012 (CASE-17).

역학적 특성과 강우세포의 특징 간의 관계성을 조사함으로써 한반도 중서부에서 발생하는 국지성 집중호우의 예보 및 연구에 도움이 될 것을 기대한다.

3. 국지성 집중호우사례의 강우특징

국지성 집중호우의 경우 짧은 시간 동안 좁은 면적에 강우가 집중되는데, 이를 유발한 강우세포를 탐지하기 위해서는 Automatic Weather System (AWS)의 관측으로는 한계가 있다. 수도권 지역의 경우 AWS의 관측망이 다른 지역보다 조밀하지만, 관측지점간의 간격이 약 10 km 이상으로 국지규모의 호우를 이해하는데 어려움이 있다. 그러나 레이더 강우율의 경우 약 1 km²의 격자 값을 제공하기 때문에 호우를 유발한 강우세포를 탐지하고, 이를 추적하는 데 용이하다. 따라서 앞서 선정된 24개 사례의 호우 발생시간을 기준으로 호우를 유발한 강우세포를 탐지한 후, 앞뒤시간의 레이더 강우율 자료를 활용하여 강우세포를 추적하였다. 이를 통해 집중호우를 유발한 강우세포의 최대 발달시기, 강우면적, 그리고 성장 및 소멸과정을 분석하여 사례별 강우세포의 life-cycle을 확인하였다.

레이더 강우율은 구름의 유형과 관측지역에 따라 그 산정방식이 다르게 나타나며, 대표적으로는 Marshall and Palmer (1948)가 제시한 층운형 계수($a=200$, $b=1.6$)와 Woodley et al. (1975)의 대류운형 계수($a=300$, $b=1.4$)가 보고되었다. 하지만 본 연구에서는 10 mm hr⁻¹, 20 mm hr⁻¹, 그리고 30 mm hr⁻¹를 기준으로 강우면적을 계산하였기 때문에 두 관계식에 의한 강우면적의 차이가 크지 않았다. 따라서 일반적으로 사용되고 있는 Marshall and Palmer (1948)의 계수($a=200$, $b=1.6$)를 사용하여 강우면적을 계산하였다.

Figures 3과 4는 레이더 강우율 자료를 통해 강우세포를 추적하고 강우강도에 따른 강우세포의 면적변화를 분석한 예시이다. 먼저 Fig. 3은 2012년 8월 25일 1600 KST에 천안에서 33.5 mm의 강우를 기록한 사례의 1시간 간격 레이더 강우율 영상이다. 1200 KST에는 1~10 mm hr⁻¹의 약한 강우가 일부지역에서 존재하지만 강우세포가 나타나지는 않는다. 1300 KST에는 오산부근과 천안남서방향으로 산발적으로 강우세포가 생성되었고, 1400 KST에는 강우세포가 북동진하며 발달하여 천안부근에 위치하였다. 강우세포는 1500 KST경에 경기 이천지역에서 충북 예산까지 남서쪽으로 길게 띠 형태로 발달하였고, 그 안에 여러 개의 강우세포가 존재하며, 강한 강우의 면적이 증가한 것을 볼 수 있었다. 강우세포는 오산을 중심으로 남동쪽을 통과하고 있으며, 1600 KST에는 크게 두 개의 강우세포로 분리되어 경기도 남동지역과 천안 북동쪽에 위치하고 있으며, 강우세포가 다소 약화되었

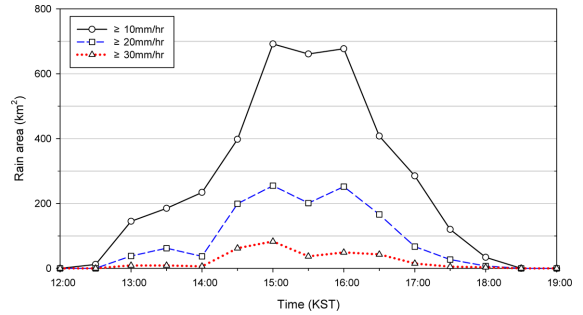


Fig. 4. Time series of the area of rain cell estimated from radar rain rates at 1.5 km height (CAPPI 1.5) from 1200 KST to 1900 KST 25 August 2012 (CASE-17). The threshold values of rain rate are 10 mm hr⁻¹ (black solid line), 20 mm hr⁻¹ (blue dashed line) and 30 mm hr⁻¹ (red dotted line), respectively.

다. 1700 KST경에는 두 개의 강우세포가 분열 및 쇠퇴하기 시작하였고, 1800 KST에는 일부지역에서만 약하게 남아있었다. 1900 KST에는 강우세포가 완전히 소멸한 것을 볼 수 있었고, 이 사례는 대류세포의 발달과 소멸을 확인할 수 있는 완전한(complete) life-cycle이 나타났다.

Figure 4는 앞서 레이더영상을 제시한 사례의 강우강도별 강우세포의 면적변화를 30분 간격으로 나타낸 것이다. 강우강도와 상관없이 강우세포의 면적은 1230 KST부터 증가하기 시작하여, 1500 KST에 가장 넓게 나타난 후 1600 KST까지 유지되었다. 그 이후 강우세포의 면적은 감소하기 시작하여 1830 KST경에 소멸한 것을 볼 수 있다. 강우세포의 최대면적은 강우강도와 상관없이 1500 KST에 나타났으며 10 mm hr⁻¹ 이상의 경우 약 700 km²이었고, 20 mm hr⁻¹ 이상과 30 mm hr⁻¹ 이상은 각각 255 km²과 83 km²이었다. 강우세포의 지속시간은 10 mm hr⁻¹ 이상의 경우 1300 KST부터 1800 KST까지 약 5시간 30분이며, 20 mm hr⁻¹ 이상은 1300 KST부터 1700 KST까지 약 4시간 30분이다. 그리고 30 mm hr⁻¹ 이상은 1430 KST에서 1630 KST까지 2시간 30분 동안 지속되었다. 최대강우시기는 1500 KST 전후로 나타났고, 이후 강우세포는 1600 KST까지 분열 및 재발달과정(redevelopment process)이 나타난 후 급격히 소멸한 것을 볼 수 있었다. 이 사례의 경우 앞서 제시한 국지성 집중호우의 두 번째와 세 번째 기준인 강우지속시간이 짧고, 최대강우시기가 뚜렷이 나타나는 특징을 만족하였다. 이러한 방법으로 앞서 선정된 24개 사례의 분석을 수행하였고, 그 결과를 Table 1에 제시하였다.

24개 사례 중 강우세포의 발생에서부터 소멸까지 추적이 가능한 완전한 life-cycle은 9개 사례가 나타났

Table 1. Information of the heavy rainfall cases selected by rainfall amount ($>30 \text{ mm r}^{-1}$) and rain area ($<20,000 \text{ km}^2$) in this study. The symbols ‘○’, ‘△’, ‘×’, and ‘~’ indicate the complete life-cycle, incomplete life-cycle, failure of cell detecting, and long duration cases, respectively.

CASE No.	ASOS Data			Cell tracking information	
	Time (KST)	Station	Amount (mm)	Symbol	Result
1	2004 07 06 1900	Seoul	38.5	○	Complete life-cycle (Multi cell)
2	2004 08 04 2300	Seoul	38.9	△	Incomplete life-cycle (Redeveloped cell)
3	2006 08 26 2000	Yangpyeong	40.0	○	Complete life-cycle (Multi cell)
4	2007 08 03 1400	Cheonan	32.0	×	Difficulties in detecting cell (Scattered cells)
5	2008 07 13 0300	Yangpyeong	45.0	○	Complete life-cycle (Multi cell)
6	2008 07 20 0700	Suwon	46.0	○	Complete life-cycle (Multi cell)
7	2009 07 02 1300	Suwon	39.0	×	Difficulties in detecting cell (Scattered cells)
8	2009 07 17 2200	Suwon	55.0	~	Cell with long-duration ($\geq 24 \text{ hr}$) (Changma front)
9	2010 07 23 1300	Cheonan	34.5	~	Cell with long-duration ($\geq 24 \text{ hr}$) (Changma front)
10	2010 08 15 0300	Seoul	45.0	~	Cell with long-duration ($\geq 24 \text{ hr}$) (Migratory cyclone)
11	2010 08 27 1900	Seoul	33.0	△	Incomplete life-cycle (Redeveloped cell)
12	2010 08 29 0400	Incheon	35.0	×	Difficulties in detecting cell (Merging with small cells)
13	2011 07 28 2300	Seoul	39.5	○	Complete life-cycle (Multi cell)
14	2011 08 06 1600	Incheon	35.5	○	Complete life-cycle (Single cell)
15	2012 07 14 1700	Suwon	35.5	○	Complete life-cycle (Single cell)
16	2012 08 21 0100	Seoul	31.5	×	Difficulties in detecting cell (Merging with small cells)
17	2012 08 25 1600	Cheonan	33.5	○	Complete life-cycle (Multi cell)
18	2013 07 17 0700	Cheonan	39.0	△	Incomplete life-cycle (Redeveloped cell)
19	2013 07 22 0900	Icheon	59.0	~	Cell with long-duration ($\geq 24 \text{ hr}$) (Changma front)
20	2013 07 31 0700	Cheonan	40.5	~	Cell with long-duration ($\geq 24 \text{ hr}$) (Changma front)
21	2013 08 03 1700	Cheonan	33.5	×	Difficulties in detecting cell (Scattered cells)
22	2013 08 06 1400	Seoul	38.5	△	Incomplete life-cycle (Cell merging)
23	2013 08 10 1200	Suwon	36.9	○	Complete life-cycle (Multi cell)
24	2013 08 29 1600	Cheonan	36.0	~	Cell with long-duration ($\geq 24 \text{ hr}$) (Migratory cyclone)

으며, 그 중 7개 사례는 다중세포, 2개 사례는 단일세포로 확인되었다. 강우세포의 추적이 가능하여 최대 발달시기의 판단은 가능하지만, 재발달과정 중에 발생하여 초기를 알 수 없거나, 소멸과정 중에 다른 강우세포와 병합(merging)하여 후기를 알 수 없는 불완전한(incomplete) life-cycle은 총 4개 사례가 나타났다. 여기서, 완전한 life-cycle과 불완전한 life-cycle은 앞서 제시한 국지성 집중호우의 두 번째와 세 번째 기준을 만족하였고, 국지성 집중호우사례로 규정할 수 있었다. 이는 전체 65개 호우사례의 20%(13사례)를 차지하였다. 다음으로 강우세포가 넓고 산발적으로 발생했거나, 강우세포가 발달 중에 다른 세포와 병합되어 독립적인 강우세포의 추적이 불가능한 경우는 5개 사례가 존재하였다. 마지막으로 6개 사례는 강우세포의 추적이 가능하지만 그 지속시간이 24시간 이상으로 길어 뚜렷한 최대발달시기를 판단할 수 없었다. 이러한 사례를 위성영상과 중관일기도를 통해 추가적으로 확인한 결과 장마전선(4사례) 혹은 이동성저기압(2사례)에 의해 긴 띠 형태의 대류운이 한반도를 통과하

며 강우가 발생하였다.

완전한 life-cycle 분석이 가능한 9개 사례의 강우강도별 강우세포의 지속시간을 살펴보았다(Table 2). 다중세포의 경우 10 mm hr^{-1} 이상은 6~14시간, 20 mm hr^{-1} 이상은 5~10시간, 그리고 30 mm hr^{-1} 이상은 9시간 이하로 나타난 반면, 단일세포로 발생한 14번 사례의 경우 강우강도와 상관없이 1~3시간으로 그 지속시간이 짧았고, 15번 사례는 넓은 강수대 옆에서 소규모로 발달한 세포로서, 10 mm hr^{-1} 이상에서만 6시간 30분이 존재했다. 또한 다중세포가 단일세포보다 강우의 지속시간이 약 2~3배 길게 나타나는 차이를 보였지만, 단일세포의 사례수가 적어 통계적인 의미를 부여하는 데 무리가 있기 때문에 향후 단일세포에 대한 추가적인 분석이 필요하다. 또한 레이더자료를 사용하여 강우지속시간을 구할 경우 클러터(Clutter) 등으로 인해 강수와 무관한 에코(noise)가 관측될 수 있기 때문에 본 연구에서는 강우세포의 기준을 30 km^2 이상으로 조사하였다. 강우세포를 추적하는 과정에서 완전한 life-cycle인 경우에도 강우세포가 성장하는 과

Table 2. Duration of rain cell detected by radar rain rates for the 9 localized torrential rainfall cases with complete life-cycle.

CASE No.	ASOS Data			Duration		Remarks
	Time (KST)	Station	Amount (mm)	$\geq 10 \text{ mm hr}^{-1}$	$\geq 20 \text{ mm hr}^{-1}$	
1	2004 07 06 1900	Seoul	38.5	7 hr 30 min	6 hr 30 min	Multi cell
3	2006 08 26 2000	Yangpyeong	40.0	11 hr	10 hr	Multi cell
5	2008 07 13 0300	Yangpyeong	45.0	14 hr 30 min	10 hr 30 min	Multi cell
6	2008 07 20 0700	Suwon	46.0	7 hr	5 hr 30 min	Multi cell
13	2011 07 28 2300	Seoul	39.5	9 hr	5 hr 30 min	Multi cell
14	2011 08 06 1600	Incheon	35.5	2 hr 30 min	2 hr	Single cell
15	2012 07 14 1700	Suwon	35.5	6 hr 30 m	-	Single cell
17	2012 08 25 1600	Cheonan	33.5	5 hr 30 min	4 hr 30 min	Multi cell
23	2013 08 10 1200	Suwon	36.9	8 hr 30 min	8 hr	Multi cell

Table 3. Maximum rain area and volumetric rain rate of rain cells for the 13 localized torrential rainfall cases.

CASE No.	Date	Maximum rain area (km ²) (Occurrence time, KST)			*Maximum volumetric rain rate (m ³ s ⁻¹) (Occurrence time, KST)	Remarks
		$\geq 10 \text{ mm hr}^{-1}$	$\geq 20 \text{ mm hr}^{-1}$	$\geq 30 \text{ mm hr}^{-1}$	$\geq 5 \text{ mm hr}^{-1}$	
Complete life-cycle						
1	2004 07 06	2,712 (2100)	1,254 (2030)	750 (2030)	62,239 (2100)	Multi cell
3	2006 08 26	3,118 (1800)	1,627 (1800)	895 (1800)	63,475 (1830)	Multi cell
5	2008 07 12	1,048 (2130)	232 (2200)	56 (2100)	24,550 (2130)	Multi cell
6	2008 07 20	1,838 (0630)	607 (0630)	129 (0630)	41,227 (0630)	Multi cell
13	2011 07 28	377 (2200)	42 (2200)	4 (2200)	11,044 (2130)	Multi cell
14	2011 08 06	475 (1530)	169 (1530)	67 (1600)	10,219 (1530)	Single cell
15	2012 07 14	141 (1530)	21 (1400)	2 (1500)	3,319 (1530)	Single cell
17	2012 08 25	692 (1500)	255 (1500)	83 (1500)	16,277 (1600)	Multi cell
23	2013 08 10	5,226 (1030)	2,910 (1030)	1,820 (1000)	122,138 (1030)	Multi cell
Incomplete life-cycle						
2	2004 08 04	618 (2230)	362 (2230)	249 (2200)	14,759 (2230)	Redeveloped cell
11	2010 08 27	777 (1900)	433 (1900)	179 (1900)	20,284 (1900)	Redeveloped cell
18	2013 07 17	3,705 (0630)	1,676 (0630)	954 (0630)	85,834 (0630)	Redeveloped cell
22	2013 08 06	2,567 (1400)	1,197 (1400)	476 (1400)	59,031 (1400)	Cell merging

*Volumetric rain rate was calculated using 'a = 385.7' and 'b = 0.9'.

정 중에 작은 강우세포의 발달과 소멸이 나타나기 때문에 life-cycle을 찾는 데 어려움이 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 먼저 호우를 유발한 강우세포가 최대로 발달한 시기를 찾고, 이를 역추적하여 강우세포의 발생시간을 구한 후, 이를 다시 추적하여 소멸할 때까지의 시간을 찾았다. 이 과정에서 작은 세포의 작용은 배제되었지만, 강우세포의 life-cycle을 찾는 데 문제가 되지 않았다.

Life-cycle을 통해 최대강우시기의 판단이 가능한 13개 사례의 강우강도별 강우세포의 최대면적과 최대체적강우량, 그리고 발생시간을 조사하였다(Table 3). 단일세포로 발달한 14번과 15번 사례의 강우세포 면적은 10 mm hr^{-1} 이상과 20 mm hr^{-1} 이상은 각각 500

km^2 이하와 200 km^2 이하로, 그리고 30 mm hr^{-1} 이상은 100 km^2 이하로 나타났다. 13번 사례의 경우 소규모의 세포들이 국지적으로 발생하여 단일세포와 유사한 특징을 보였으며, 23번 사례의 경우 서해상에서 3개의 강우세포가 함께 발생하여 병합한 사례로 다른 사례에 비하여 넓고, 강한 강우세포를 형성하였다. 위 4개 사례를 제외한 평균적인 면적을 살펴보면, 10 mm hr^{-1} 이상은 약 $1,000\sim 4,000 \text{ km}^2$ 로 나타났고, 20 mm hr^{-1} 이상은 약 $500\sim 1,500 \text{ km}^2$ 의 분포를 보였다. 그리고 30 mm hr^{-1} 이상은 약 $100\sim 1,000 \text{ km}^2$ 의 값을 보였다. 이는 중규모 대류계 내부에서 소규모 강우세포(단일세포)들이 $2,500 \text{ km}^2$ 이하로 분포한다는 결과(Park and Lee, 2008)와 유사했으며, 본 연구의 경우 다중세

Table 4. Thermodynamic characteristics of the 13 localized torrential rainfall cases from Osan radiosonde observational data. The complete life-cycle cases and incomplete life-cycle cases are denoted by ‘○’ and ‘△’ symbols, respectively.

CASE No.	Maximum development time (KST)	Symbol & Cell	Radiosonde observation time (KST)	Thermodynamic indices			
				TPW (mm)	CAPE (J kg ⁻¹)	CIN (J kg ⁻¹)	SRH (m ² s ⁻²)
1	2004 07 06 2100	○ Multi cell	2004 07 06 2100	50.4	1,193	7	91
2	2004 08 04 2230	△ Redeveloped cell	2004 08 04 2100	58.0	1,027	2	45
3	2006 08 26 1800	○ Multi cell	2006 08 26 1500	51.3	1,392	0	163
5	2008 07 12 2130	○ Multi cell	2008 07 12 2100	55.1	1,102	30	118
6	2008 07 20 0630	○ Multi cell	2008 07 20 0300	53.6	0	160	96
11	2010 08 27 1900	△ Redeveloped cell	2010 08 27 1500	54.8	1,384	0	2
13	2011 07 28 2200	○ Multi cell	2011 07 28 2100	58.6	1,494	4	117
14	2011 08 06 1530	○ Single cell	2011 08 06 1500	63.8	1,508	9	31
15	2012 07 14 1530	○ Single cell	2012 07 14 1500	56.3	337	11	96
17	2012 08 25 1500	○ Multi cell	2012 08 25 1500	59.3	810	6	48
18	2013 07 17 0630	△ Redeveloped cell	2013 07 17 0300	68.5	35	83	414
22	2013 08 06 1400	△ Cell merging	2013 08 06 1500	58.9	*2,346	3	171
23	2013 08 10 1030	○ Multi cell	2013 08 10 0900	65.0	*3,243	11	63

*CAPE was provided by Wyoming University.

포의 총 면적을 계산하여 다소 크게 나타나는 차이를 보였다. 특히 다중세포의 면적이 단일세포보다 강우 강도에 따라 2~10배까지 증가하였으며, 재발달과정 혹은 병합과정이 나타난 강우세포의 면적은 다중세포와 유사하게 나타남을 확인하였다. 또한 전체 13개 사례 중 10개 사례가 1400 KST에서 2230 KST까지 오후 시간에 최대로 발달한 것을 확인하였고, 3개 사례가 0630 KST에서 1030 KST까지 오전 중에 최대로 발달하였다.

집중호우를 유발한 강우세포의 정확한 체적강우량을 산정하기 위해서는, 이에 적합한 Z-R관계식의 a , b 계수가 필요하다. a , b 계수를 구하기 위하여 다중세포 7개 사례의 레이더 반사도와 강우세포 내에 존재하는 AWS 강우량 자료를 이용하였다. a , b 계수를 계산하는 데 356개의 자료가 사용되었으며 레이더 반사도와 AWS 강우량의 상관관계수(R : Correlation coefficient)는 0.51로 나타났다. 새롭게 구해진 a 와 b 는 각각 385.7과 0.9로 층운형 계수($a=200$, $b=1.6$)보다 대류운형 계수($a=300$, $b=1.4$)와 유사하게 나타났다. 이러한 a , b 계수를 적용하여 13개 사례의 최대 체적강우량을 계산한 결과는 Table 3에 제시하였다. 단일세포로 발생한 14번과 15번, 그리고 다중세포지만 단일세포와 유사한 13번 사례는 최대체적강우량이 10,000 m³ s⁻¹ 안팎으로 나타났으며, 3개의 세포가 결합하여 발생한 23번 사례는 120,000 m³ s⁻¹ 이상으로 다른 강우세포보다 큰 값을 보였다. 평균적인 최대체적강우량은 15,000~60,000 m³ s⁻¹의 값을 보였고, 그 발생시간은 앞서 강우면적으로 추정된 최대발달시기

와 잘 일치하였다.

4. 국지성 집중호우와 열역학적 특성의 관계성

앞서 선정된 집중호우사례에서는 각기 다른 강우특징이 나타났으며, 이를 이해하기 위해서 오산지점의 라디오존데 관측 자료를 활용하여, 국지적인 열역학적 특성과 비교하였다. 라디오존데 자료는 강우세포의 추적이 가능한 사례는 강우세포의 면적이 최대로 나타나는 시점을 기준으로 하였고, 강우면적이 최대인 시기를 판단하기 어려운 사례는 집중호우발생시점을 기준으로 그보다 선행시간에 관측된 자료를 사용하였다. 그 시간차는 4시간을 넘지 않았고, 4번과 22번 사례의 경우 시간차가 커서 1시간 후에 관측된 자료를 사용하였다. 라디오존데는 연속적인 관측을 수행하기 때문에 열역학적 특성을 나타내는 다양한 지수의 생산이 가능하고, 그 중 대표적인 지수인 가강수량, CAPE, CIN (Convective Inhibition), SRH를 활용하여 앞서 조사한 강우특징과 비교하였다.

완전한 life-cycle을 알 수 있는 9개 사례와 완전한 life-cycle은 알 수 없지만 강우세포의 강우면적이 최대로 나타나는 시간을 알 수 있는 4개 사례의 열역학적 특성을 조사하였다(Table 4). 이러한 사례는 발생 시간에 따라 크게 두 분류로 나눌 수 있었으며 하나는 오후에 발생한 10개 사례이고, 다른 하나는 오전에 발생한 3개 사례이다. 먼저 오후에 발생한 사례에서는 대부분 800 J kg⁻¹ 이상의 CAPE, 30 J kg⁻¹ 이하의 CIN, 160 m² s⁻² 이하의 SRH, 그리고 50~60 mm

Table 5. Same as Table 4 except for the cases that the rain cell has long duration (symbol '~') or rain cell was not detected (symbol '×').

CASE No.	Heavy rainfall occurrence time (KST)	Symbol & Cell	Radiosonde observation time (KST)	Thermodynamic indices			
				TPW (mm)	CAPE ($J kg^{-1}$)	CIN ($J kg^{-1}$)	SRH ($m^2 s^{-2}$)
4	2007 08 03 1400	× Scattered cell	2007 08 03 1500	55.2	3,349	0	6
7	2009 07 02 1300	× Scattered cell	2009 07 02 0900	32.7	1,761	0	49
8	2009 07 17 2200	~ Changma front	2009 07 17 2100	65.3	790	0	337
9	2010 07 23 1300	~ Changma front	2010 07 23 0900	55.5	1,522	0	161
10	2010 08 15 0300	~ Migratory cyclone	2010 08 15 0300	64.1	935	24	411
12	2010 08 29 0400	× Cell merging	2010 08 29 0300	60.1	677	39	289
16	2012 08 21 0100	× Cell merging	2012 08 20 2100	68.6	1,066	3	153
19	2013 07 22 0900	~ Changma front	2013 07 22 0900	68.4	561	5	180
20	2013 07 31 0700	~ Changma front	2013 07 31 0300	62.9	177	44	295
21	2013 08 03 1700	× Scattered cell	2013 08 03 1500	56.1	2,392	0	46
24	2013 08 29 1600	~ Migratory cyclone	2013 08 29 1500	68.1	383	2	302

정도의 가강수량이 관측되었고, 이 중 15번 사례는 넓은 강수대 옆에서 소규모 단일세포로 발생하여 CAPE 값($337 J kg^{-1}$)이 다소 작게 나타났다. 이러한 사례는 대기불안정에 기인하는 국지성 집중호우로 이해할 수 있다. 그러나 오전에 발생한 사례의 경우 이들 값들의 변화폭이 크게 나타났다. 23번 사례는 3개의 강우세포가 병합하여 발달한 사례로 오후에 발생한 사례와 비슷한 특징을 보였다. 그러나 6번 사례는 CAPE가 존재하지 않았고, CIN이 $160 J kg^{-1}$ 로 큰 값을 보이는 차이가 있었다. 6번 사례의 경우, 중국 상해에 중심을 둔 태풍의 간접적인 영향권에 들었던 사례이다. 18번 사례의 경우 CAPE ($35 J kg^{-1}$)는 낮은 반면, CIN ($83 J kg^{-1}$)과 SRH ($414 m^2 s^{-2}$)가 컸고, 특히 가강수량이 $68.5 mm$ 로 매우 습윤한 특징을 보였다. 당시 한반도 북부지역에는 장마전선이 위치하였고, 이 동성 저기압이 한반도 북부지역을 통과한 사례이다.

강우지속시간이 길거나 혹은 다수의 강우세포가 존재하여 강우세포의 추적이 어려운 11개 사례의 열역학적 특성을 조사하였다(Table 5). 먼저 강우세포가 분산되어있는 3개 사례는 모두 오후에 발생했고, CIN이 존재하지 않는 것을 제외하고 앞 절의 오후에 나타난 사례와 비슷한 특징을 보였다. 이러한 사례는 CIN이 존재하지 않음으로서, 분산된 작은 세포들이 만들어졌다고 이해할 수 있다. 다음으로 강우세포의 병합이 나타난 2개 사례의 경우 앞서 언급한 오후에 발생한 사례와 유사하였지만, 새벽에 발달하였다는 점과 SRH가 $150 m^2 s^{-2}$ 이상으로 큰 값을 보이는 차이가 있었다. 마지막으로 강우지속시간이 24시간 이상으로 긴 6개 사례의 열역학적 특성은 CAPE는 $1,000 J kg^{-1}$ 이하였고, CIN은 $50 J kg^{-1}$ 이하의 값을 보였다. 반면 SRH는 $160\sim 400 m^2 s^{-2}$ 로 상대적으로 큰 값을 보였고,

가강수량은 $60\sim 70 mm$ 로 매우 습윤한 대기를 형성하였다. 각 사례의 일기도를 살펴본 결과, 장마전선 혹은 저기압 중심이 중부지역부근에 위치하였다. 특히 SRH와 가강수량이 높게 나타났는데, 이는 Kim et al. (2011)과 Kim et al. (2012)의 라디오존데를 활용한 연구에서 장마전선의 영향을 받을 때 가강수량($55\sim 75 mm$)이 증가하고, 역학적 불안정인 SRH($50\sim 420 m^2 s^{-2}$)의 증가가 뚜렷이 나타난다는 결과와 유사하였다. 이러한 사례는 중관 역학장이 영향을 미친 것으로 생각될 수 있다.

위의 분석결과를 종합적으로 살펴보면, 집중호우와 관련된 국지적 열역학적 특성은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 하나는 CAPE가 $800 J kg^{-1}$ 이상이고, CIN이 $40 J kg^{-1}$ 이하로 존재하는 것과, $55 mm$ 정도의 가강수량, 그리고 $120 m^2 s^{-2}$ 이하의 낮은 SRH가 나타나는 특징을 보인다는 것이다. 이는 대기불안정이 강하고, 하층에 대류를 억제하는 층이 약하게 존재하고 있으며, 수증기 공급이 충분히 이루어지고 있음을 나타낸다. 또한 SRH가 낮은은 연직바람시어가 약함을 의미하고, 이는 온도의 수평경도가 약한 국지적인 사례이다. 따라서 이러한 사례는 대기불안정에 기인하는 국지적인 집중호우로 분류할 수 있고, 본 연구에서는 오후에 발생한 10개 사례, 23번 사례, 그리고 강우세포가 분산된 3개 사례까지 총 14개 사례가 해당되었다. 이는 전체 65개 호우사례 중 22%를 차지하였다.

다른 하나는 CAPE가 대부분 $1,000 J kg^{-1}$ 이하이고, SRH가 $160\sim 400 m^2 s^{-2}$ 로 크고, 가강수량이 $60 mm$ 이상으로 매우 습윤한 사례로서, 강우지속시간이 24시간 이상으로 길게 나타나는 특징이 있었다. 이러한 사례의 경우 대기불안정이 존재할 수 있지만, SRH의 영향이 더 크게 나타났다. 이는 연직바람시어가 크고,

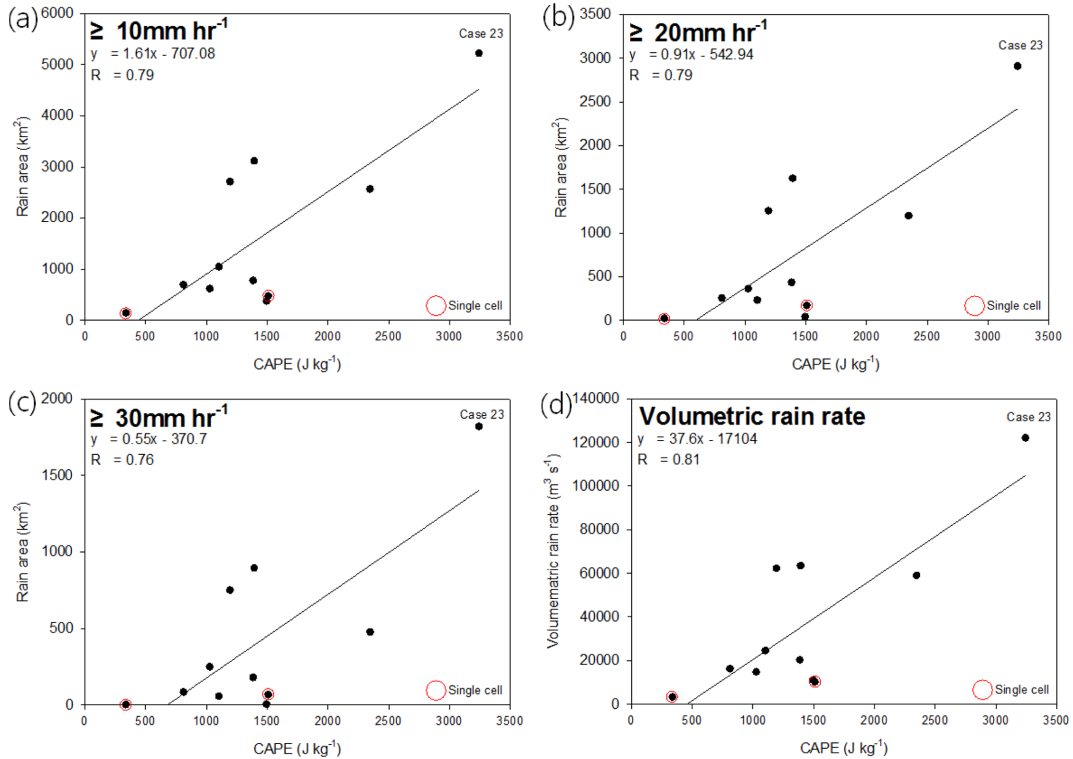


Fig. 5. Scattered diagram of CAPE and rainfall characteristics of 11 localized torrential rainfall events: (a)~(c) maximum rain area of rain cell, (d) total volumetric rain rate of convective cell. The single cell cases are denoted by red solid circle.

즉 온도의 수평경도가 큰 것을 의미한다. 이러한 사례는 종관적인 영향을 받고 있음을 나타내고, 앞서 종관일기도를 통해 확인한 것처럼 저기압 또는 장마전선 등이 존재하였다. 이로 인하여 강수기간이 길고 SRH가 크게 나타남을 확인할 수 있었으며 이러한 사례를 종관 역학장의 영향을 받은 호우로 분류할 수 있다.

국지적인 대기불안정에 기인하는 집중호우 사례를 대류시스템을 연구한 선행연구결과와 비교해보았다. Rasmussen and Blanchard (1998)가 조사한 미국 대륙의 CAPE와 SRH를 살펴보면, CAPE의 경우 미국의 거대세포(super cell: $1,100\text{ J kg}^{-1}$)와 유사하였고, SRH는 뇌우(thunderstorm: $160\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ 이하)와 유사한 특징을 보였다. Kim et al. (2012)이 수도권에서 집중관측을 통해, 고기압 확장시 CAPE가 $420\sim 1,700\text{ J kg}^{-1}$ 정도일 때 강수가 발생한다는 결과와 유사하였다. 또 Kwon et al. (2013)이 조사한 영서지역에서 발생한 호우경보수준의 집중호우와 비교했을 때, CAPE $1,000\text{ J kg}^{-1}$ 이상과 가강수량 55 mm 이상, 그리고 오후에 주로 발생한다는 특징이 일치하였고, SRH ($100\sim 300\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$)는 유사하지만, 더 작은 값을 보였다. 특히 국지적인 대기불안정에 의해서 집중호우가 발달하더라

도 CIN이 존재하지 않을 경우에는 강우세포가 분산되어 발달할 수 있었고, 이는 CIN이 10 J kg^{-1} 이하일 경우 에너지가 분산되어 다수의 소규모 대류운으로 발달할 수 있다는 결과와 일치한다(Djuric, 1994). 또 SRH가 상대적으로 크게 나타날 때는 강우세포의 병합이 일어날 수 있음을 확인하였다.

국지적인 대기불안정에 의해서 발생한 집중호우 사례의 강우특징(강우강도별 최대강우면적, 최대체적강우량)과 국지적 열역학적 특성(CAPE, SRH)의 관계성을 조사하였다. 강우세포를 통해 최대발달시기를 알 수 있는 13개 사례 중 오전에 발생하여 그 대기특성의 차이가 있는 2개 사례(6번, 18번)를 제외하고, 11개 사례의 상관계수(R)를 구하였다(Fig. 5). 먼저 CAPE와 강우특징의 관계성을 살펴보면, 10 mm hr^{-1} 이상과 20 mm hr^{-1} 이상의 최대강우면적과는 0.79 로 나타났다, 30 mm hr^{-1} 이상일 경우에는 0.76 을 보였다. 또 최대체적강우량과는 0.81 로 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 11개 사례의 유의수준 0.01 을 만족하였다. 그러나 CAPE가 크고 3개의 강우세포가 병합한 23번 사례를 제외할 경우, 상관계수는 약 0.5 로 크게 낮아지고, 유의수준은 0.1 에서 기각된다. 다음으로 SRH와

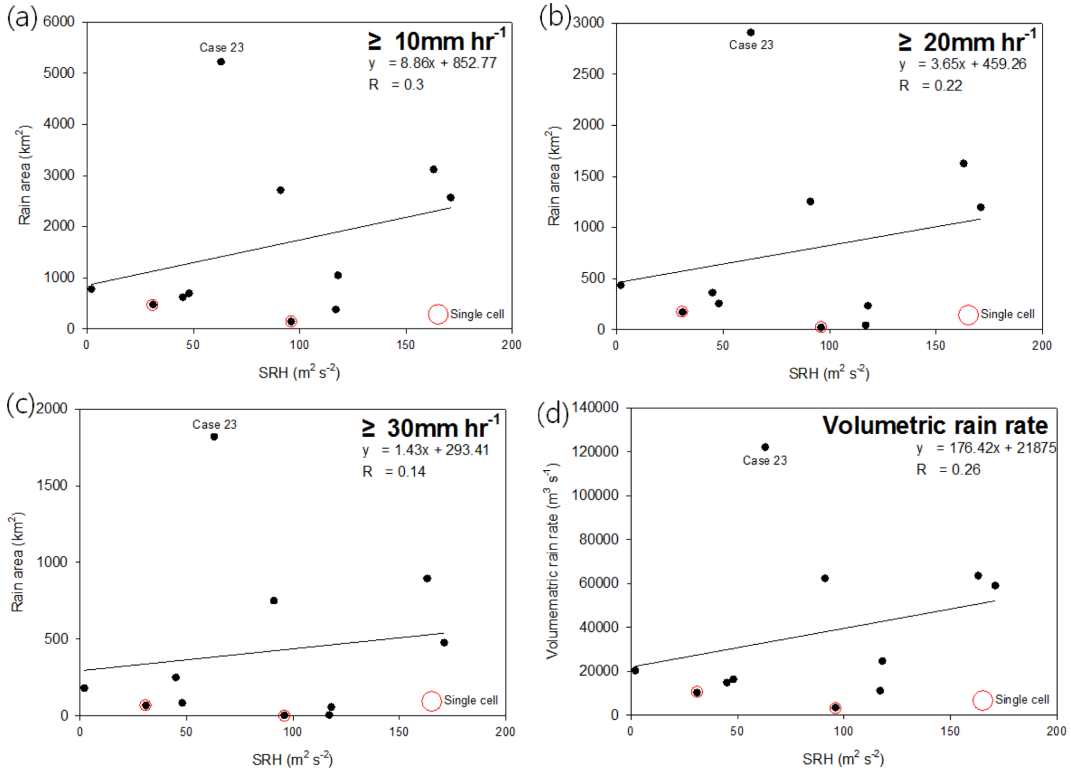


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for the SRH.

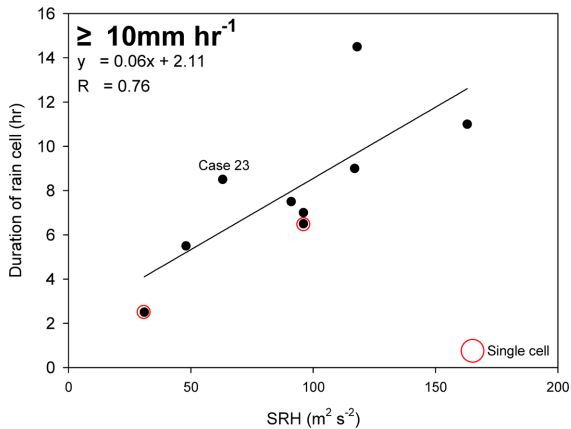


Fig. 7. Scattered diagram of SRH and Duration of rain cell with 9 completed life-cycle cases. The single cell cases are denoted by red solid circle.

의 관계성을 살펴보면, 10 mm hr⁻¹ 이상의 최대강우 면적과는 0.30, 20 mm hr⁻¹ 이상에서는 0.22로 나타났고, 30 mm hr⁻¹ 이상일 경우에는 0.14였으며, 최대체 적강우량과는 0.26으로 강우특징과 SRH의 관계성은

약 0.2로 낮게 나타났다(Fig. 6). 반면 23번 사례를 제외할 경우에는 상관계수는 약 0.55로 다소 증가하여, 유의수준 0.1을 만족하였다. 또한 단일세포 2개 사례를 제외할 경우(총 9개 사례)의 CAPE와 SRH에 대한 관계성은 11개 사례에 대한 관계성과 큰 차이를 보이지 않았고, 완전한 life-cycle을 구할 수 있는 9개 사례의 10 mm hr⁻¹ 이상의 강우지속시간과 SRH의 관계성은 0.76으로 유의수준 0.05를 만족함을 확인하였다(Fig. 7). 이러한 결과는 강우특징과 열역학적 특성의 관계성이 23번 사례의 추가(배제)에 따라서 통계 값이 크게 변함을 의미하고, 통계적으로 로버스트(robust)가 낮은 결과(특히 값의 영향을 크게 받음)이기 때문에 앞으로 더 많은 사례에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

5. 요약 및 토의

이 논문에서는 한반도 중서부지역에서 발생하는 국지성 집중호우의 특성과 주요원인을 이해하고자, 집중호우를 유발한 강우세포의 특징(강우면적, 총강우량, 강우지속시간 등)과 열역학적 특성(가강수량, CAPE, SIN, SRH 등)을 분석하였다. 이를 위해 고층대기 관

측지점인 오산주변에서 발생한 최근 10년 동안의 집중호우를 조사한 후, 레이더 반사도를 이용하여 각 사례의 강우특징을 구하고, 짧은 시간 동안 국지적으로 발생한 국지성 집중호우를 선정 및 강우세포의 특징을 제시하였다. 또 오산지점의 고층대기 관측 자료를 통해 얻은 열역학적 특성을 분석하여 국지성 집중호우의 주요요인을 확인하였고, 강우특징과의 관계성을 조사하였다.

국지성 집중호우사례를 선정하기 위해서 다음과 같은 3가지 기준을 정하였다. (1) 오산주변 약 50 km반경에 위치한 ASOS 6개소(서울, 수원, 양평, 이천, 인천, 천안) 중 어느 한 지점에서라도 30 mm hr^{-1} 이상의 강한 강우가 관측된다. (2) 레이더 강우율 자료를 통해 관측된 1 mm hr^{-1} 이상의 강우면적이 $20,000 \text{ km}^2$ 이하로 국지적으로 나타난다. (3) 레이더 강우율을 활용하여 강우세포를 추적했을 때, 그 지속시간이 24시간 이하로 짧다. 이러한 기준으로 최근 10년 동안의 집중호우를 선정한 결과, ASOS 6개소에서 30 mm hr^{-1} 이상인 호우는 65개 사례가 관측되었다. 그 가운데 위의 3가지 조건을 모두 만족하는 국지성 집중호우는 13개 사례였고, 전체 호우사례 중 20%가 국지성 집중호우로 분류되었다. 또한 1 mm hr^{-1} 이상의 강우면적이 $20,000 \text{ km}^2$ 를 넘는 사례 중에서는 국지적으로 발생한 사례가 존재하지 않았다.

국지성 집중호우로 선정된 강우세포의 특징은 다음과 같다. 강우세포의 지속시간은 10 mm hr^{-1} 이상은 6~14시간, 30 mm hr^{-1} 이상은 9시간 이하로 나타났다. 최대강우면적의 경우 10 mm hr^{-1} 이상은 $4,000 \text{ km}^2$ 이하, 30 mm hr^{-1} 이상은 $1,000 \text{ km}^2$ 내의 영역에서 나타남을 확인하였고, 최대체적강우량은 $15,000\sim 60,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 의 값을 보였다. 특히 국지성 집중호우 사례는 대부분이 오후시간에 최대로 발달하였고, 오전에 발생한 사례와 열역학적 특성의 차이가 뚜렷하였다. 오후에 발생한 사례에서는 CAPE 800 J kg^{-1} 이상, CIN이 40 J kg^{-1} 이하, 가강수량 약 $50\sim 60 \text{ mm}$, 그리고 $120 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 이하의 낮은 SRH가 나타나는 특징을 보였다. 이는 대기불안정이 강하고, 하층에 대류를 억제하는 층이 약하게 존재하고 있으며, 충분한 수증기 공급이 있음을 의미한다. 또한 SRH가 낮음은, 연직바람 시어가 약함을 나타내고, 이는 온도의 수평경도가 약한 국지적인 사례로서, 이러한 사례는 대기불안정에 기인하여 오후시간에 발생하는 국지적인 집중호우로 분류할 수 있다.

국지적인 대기불안정에 의해서 발생한 11개 집중호우 사례(오후에 발생한 10개 사례와 23번 사례)의 강우세포의 특징(최대강우면적, 최대체적강우량, 지속시간)과 열역학적 특성(CAPE, SRH)의 관계성을 조사한 결과, 강우세포의 면적과 CAPE의 상관관계(R)는 약

0.79로 유의수준 0.01에서 양의 상관관계를 보였지만, SRH의 경우 상관관계는 약 0.2로 매우 낮게 나타났다. 또한 완전한 life-cycle을 구할 수 있는 9개 사례의 10 mm hr^{-1} 이상의 강우지속시간과 SRH의 관계성은 0.76으로 유의수준 0.05로 나타났다. 그러나 23번 사례를 제외할 경우, CAPE와 강우세포의 면적의 상관관계는 약 0.5로 낮아지고 유의수준은 0.1에서 기각된 반면, SRH와 강우세포의 특성의 상관관계는 약 0.55로 증가하였고 유의수준은 0.1을 만족하였다. 이러한 결과는 23번 사례의 추가(배제)에 따라서 강우특징과 열역학적 특성의 관계성이 크게 변하는 결과이고, 이는 통계적으로 로버스트(robust)가 낮은 결과이기 때문에 앞으로 더 많은 사례에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 한다.

국지성 집중호우가 발생하기 위해서는 충분한 수증기 공급, 대기불안정, 그리고 치올립의 조건이 필요하다. 이 중 치올립에 영향을 주는 CIN이 클 경우에는 대류가 억제되어 강우세포가 잘 발달하지 못하였고, 없을 경우에는 강우세포가 분산되었다. 그러나 CIN이 약하게 존재할 경우에는, 대류가 집중되어 대류스톰으로 잘 발달하여 강우가 나타났다. SRH가 클 경우에는 강우면적과 지속시간이 늘어남을 확인하였고, CIN과 SRH에 따라서 강우세포가 분산되거나 병합하였다. 또한, 한반도 중서부지역은 장마전선, 저기압통과 그리고 태풍 등 종관 역학장에 기인하는 집중호우도 발생한다는 것을 발견하였다. 이러한 집중호우의 경우 레이더 강우율에 나타난 특징은 좁고 강한 강우영역이 장시간 존재한다. 따라서 국지성 집중호우, 즉 대기불안정에 의한 호우를 연구하는 데 있어서 중요하게 해결해야 될 문제는 종관 역학장에 기인하는 집중호우를 배제하는 과정이다. 또한 국지성 집중호우를 명확하게 이해하기 위해서는 더 많은 지역의 다양한 사례에 대한 연구가 필요시 되고, 레이더자료뿐만 아니라 위성자료와 수치모델자료 등을 활용하여 구름상태에 대한 연구가 수행되어야 한다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소의 주요사업 ‘재해기상연구센터 설립 및 운영(NIMR-2012-B-7)’의 일환으로 수행되었습니다. 또한 본 논문의 개선을 위해 건설적인 제언을 해주신 심사위원분들께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Atlas, D., and A. C. Chmela, 1957: Physical-synoptic variations of drop size parameter. *Proc. 6th. Wea. Radar Conf., Boston, USA, Amer. Meteor. Soc.*, 21-29.

- Beebe, R. G., 1955: Types of air masses in which tornadoes occur. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **36**, 349-350.
- Byers, H. R., and R. R. Braham, 1949: *The thunderstorm*. U.S. Government Printing Office, 287 pp.
- Djuric, D., 1994: *Weather Analysis*. Prentice-Hall, Inc., 304 pp.
- Eblen, L. H., J. W. Ladd, and T. M. Hicks, 1990: *Severe thunderstorm forecasting*. NOAA Tech. memo. NWS SR-130. National Weather Service Forecast Office, 42 pp.
- Fawbush, E. J., and R. C. Miller, 1954: The types of air masses in which American tornadoes form. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **35**, 154-165.
- Fujiwara, M., 1965: Raindrop-size distribution from individual storms. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 585-591.
- Kim, D.-W., Y.-H. Kim, K.-H. Kim, S.-S. Shin, D.-K. Kim, Y.-J. Hwang, J.-I. Park, D.-Y. Choi, and Y.-H. Lee, 2012: Atmospheric vertical structure of heavy rainfall system during 2010 summer intensive observation period over Seoul metropolitan area. *J. Korean Earth Sci.*, **33**, 148-161.
- Kim, K.-H., Y.-H. Kim, D.-W. Kim, and D.-E. Chang, 2011: The performance assessment of special observation program (ProbeX-2009) and the analysis on the characteristics of precipitation at the Ulleungdo. *Atmosphere*, **21**, 185-196.
- Kim, Y.-H., D.-Y. Choi, D.-E. Chang, H.-D. Yoo, and G.-B. Jin, 2011: An improvement on the criteria of special weather report for heavy rain considering the possibility of rainfall damage and the recent meteorological characteristics. *Atmosphere*, **21**, 481-495.
- KMA, 2012: *Learn from case of the last 20 years, top 10 heavy rainfall*. Korea Meteorological Administration, 47 pp.
- Kwon, T.-Y., J.-S. Kim, and B.-G. Kim, 2013: Comparison of the properties of Yeongdong and Yeongseo Heavy Rain. *Atmosphere*, **23**, 245-264.
- Lee, T.-Y. and Y.-H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean peninsula and their classification. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 367-396.
- Marshall, J. S., and Palmer, 1948: The distribution of rain-drop size. *J. Atmos. Sci.*, **5**, 165-166.
- McCaul, E. W. Jr., and M. L. Weisman, 1996: Simulations of shallow supercell storms in landfalling hurricane environments. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 408-429.
- _____, and _____, 2001: The sensitivity of simulated supercell structure and intensity to variations in the shapes of environmental buoyancy and shear profiles. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 664-687.
- _____, and C. Cohen, 2002: The impact on simulated storm structure and intensity of variations in the mixed layer and moist layer depths. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1722-1748.
- Nam, K.-Y., B.-H. Song, E.-K. Seo, J.-H. Choi, J.-S. Lee, and J.-C. Nam, 2003: A study on Z-R relationship of the summertime convective system occurred around Cheongju. *J. Korean Meteor. Soc.*, **39**, 431-440.
- NEMA, 2013: Annual disaster report for 2012, National Emergency Management Agency, 1285 pp.
- Park, C.-G., and T.-Y. Lee, 2008: Structure of mesoscale heavy precipitation systems originated from the changma front. *Atmosphere*, **18**, 317-338.
- Rasmussen, E. N., and D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecasting parameters. *Wea. Forecasting*, **13**, 1148-1164.
- Thompson, R. L., R. Edward, 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.
- Weisman, M. L., and J. B. Klemp, 1982: The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 504-520.
- Woodley, W. L., A. R. Olsen, A. Herndon, and V. Wiger, 1975: Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 909-928.