

장기간(1997~2013) 라디오존데 관측 자료를 활용한 집중호우 시 연직대기환경 유형 분류

정승필^{1)*} · 인소라¹⁾ · 김현욱¹⁾ · 심재관¹⁾ · 한상옥²⁾ · 최병철¹⁾

¹⁾국립기상과학원 관측기반연구과 재해기상연구센터,

²⁾국립기상과학원 환경기상연구과

(접수일: 2015년 7월 16일, 수정일: 2015년 10월 12일, 게재확정일: 2015년 11월 3일)

Classification of Atmospheric Vertical Environment Associated with Heavy Rainfall using Long-Term Radiosonde Observational Data, 1997~2013

Sueng-Pil Jung^{1)*}, So-Ra In¹⁾, Hyun-Wook Kim¹⁾, JaeKwan Sim¹⁾,
Sang-Ok Han²⁾, and Byoung-Choel Choi¹⁾

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

²⁾Environmental Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 16 July 2015; revised 12 October 2015; accepted 3 November 2015)

Abstract Heavy rainfall ($>30 \text{ mm hr}^{-1}$) over the Korean Peninsula is examined in order to understand thermo-dynamic characteristics of the atmosphere, using radiosonde observational data from seven upper-air observation stations during the last 17 years (1997~2013). A total of 82 heavy rainfall cases during the summer season (June-August) were selected for this study. The average values of thermo-dynamic indices of heavy rainfall events are Total Precipitable Water (TPW) = 60 mm, Convective Available Potential Energy (CAPE) = 850 J kg^{-1} , Convective Inhibition (CIN) = 15 J kg^{-1} , Storm Relative Helicity (SRH) = $160 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, and 0~3 km bulk wind shear = 5 s^{-1} . About 34% of the cases were associated with a Changma front; this pattern is more significant than other synoptic pressure patterns such as troughs (22%), migratory cyclones (15%), edges of high-pressure (12%), typhoons (11%), and low-pressure originating from Changma fronts (6%). The spatial distribution of thermo-dynamic conditions (CAPE and SRH) is similar to the range of thunderstorms over the United States, but extreme conditions (supercell thunderstorms and tornadoes) did not appear in the Korean Peninsula. Synoptic conditions, vertical buoyancy (CAPE, CIN), and wind parameters (SRH, shear) are shown to discriminate among the environments of the three types. The first type occurred with high CAPE and low wind shear by the edge of the high pressure pattern, but Second type is related to Changma front and typhoon, exhibiting low CAPE and high wind shear. The last type exhibited characteristics intermediate between the first and second types, such as moderate CAPE and wind shear near the migratory cyclone and trough.

Key words: Heavy rainfall, thermo-dynamic characteristics, radiosonde observation, CAPE, SRH

*Corresponding Author: Sueng-Pil Jung, High-impact Weather
Research Center, N10-707, 7 Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-
do 210-702, Korea.
Phone : +82-70-7850-6645, Fax : +82-33-644-2657
E-mail : suengpil@korea.kr

1. 서 론

최근 10년(2004~13) 동안 한반도에서는 호우로 인해 약 4조 3천억 원의 재산피해와 17만 명의 이재민이 발생하였다(National Emergency Management Agency, 2014). 이는 전체 기상재해로 인한 피해액의 절반 이상(51%)을 차지하고, 인명피해의 경우 76%를 차지해 그 위험성이 크게 나타난다. 특히 짧은 시간동안 강한강우를 내리는 집중호우는 홍수, 산사태와 같은 사회경제적 피해를 유발하며, 그 발생빈도가 꾸준히 증가하고 있기 때문에 집중호우 연구의 필요성이 크다(Korea Meteorological Administration, 2012). 집중호우를 이해 및 예측하기 위해서는 집중호우를 유발한 연직대기환경에 대한 연구가 수행되어야 한다. 연직대기환경에 관한 연구는 라디오존데, 라디오미터, 수직측풍장치, 인공위성 등 다양한 장비를 통해 수행되고 있으며, 이중 라디오존데는 지상에서 고층대기(최대 35 km)의 기압, 기온, 습도, 바람을 관측할 수 있어 현업 예보를 비롯한 다양한 연구에 사용되고 있다.

최근 들어 특정지역 또는 일정기간 동안의 라디오존데 집중관측을 수행하여 집중호우의 연직대기환경을 분석한 연구가 수행되고 있다. Kim et al. (2009)은 2007년 한반도 9개 지점의 라디오존데 자료를 분석하여 장마기간의 강수 발생은 열적 불안정을 의미하는 대류가용잠재에너지(Convective Available Potential Energy, CAPE)의 증가보다는 역학적 불안정을 나타내는 Storm Relative Helicity (SRH)와 더 밀접한 관계가 있다고 하였다. 특히 SRH가 $150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 이상일 때 강수가 발생하였고, SRH의 값이 클수록 강수량이 증가함을 확인하였다. Kim et al. (2012)은 2010년 수도권에서 라디오존데를 활용한 집중관측을 수행하여 북태평양 고기압이 확장하여 한반도에 영향을 미칠 때는 CAPE가 $420 \sim 1,700 \text{ J kg}^{-1}$ 로 다른 기작의 영향을 받을 때 보다 높은 값이 유지됨을 보였다. 그리고 정체전선 상에서는 대체로 CAPE가 발생하지 않았고, 태풍의 간접적인 영향을 받을 때는 CAPE가 $50 \sim 1,000 \text{ J kg}^{-1}$ 의 범위에서 분포한다고 하였다. 반면 정체전선과 태풍의 직접적인 영향을 받을 때 SRH의 최댓값은 각각 $330 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 과 $990 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 으로 증가하여 역학적인 불안정이 호우시스템을 지배한다고 하였다. 이처럼 라디오존데는 강수를 유발한 연직대기환경을 이해하는데 용이하지만, 기존의 연구는 제한된 영역(시간적, 공간적)에 대한 분석이기 때문에 다년간의 다양한 사례를 조사하여 집중호우의 열역학적 특징을 규정할 필요가 있다.

Kwon et al. (2013)의 경우 2001~2010년 동안 영서와 영동의 집중호우현상을 분석하여 집중호우를 유발한 연직대기환경의 공통된 특징을 제시하였다. 라디

오존데 자료를 통해 분석된 영동 호우에서는 CAPE가 발생하지 않는 반면, 영서에서는 $1,000 \text{ J kg}^{-1}$ 이상의 CAPE와 $100 \sim 450 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 의 SRH가 나타난다고 하였다. 특히 지역과 관계없이 집중호우 시 약 55 mm 이상의 가강수량(Total Precipitable Water, TPW)이 관측됨을 보였고, 지역에 따라 하층의 치올림을 지배하는 기작(지형에 의한 수렴, 하층가열에 의한 대기불안정, 종관적인 역학장)이 다르게 나타난다고 하였다. 그러나 이 연구에서 조사된 집중호우의 사례수가 영동과 영서지역 모두 10개 사례 미만으로 통계적인 특징을 이해하는데 어려움이 있었다. 특히 집중호우의 유형에 따라서 이를 유발한 요인들(ingredients)이 다르게 나타났으며, 유형에 따라서 어떠한 요인이 주요하게 작용했는지 파악할 필요가 있다고 하였다.

연직대기환경을 나타내는 기상지수를 활용하여 집중호우의 예측성을 비교한 몇몇 연구가 수행되었다. 그 예로서 Kim and Ham (2009)은 집중호우 예측에 주요한 지수를 선정하기 위해 다양한 지수(SSl, KI, CAPE, SRH 등)와 집중호우의 관계를 비교하여 SSl, LI, KI 보다 CAPE, SRH, 그리고 벌크-리처든 수(bulk-Richardson number, BRN)가 한반도에서 발생하는 집중호우를 예측하는데 더 적합한 지수라고 하였다. 그리고 최근 들어 한반도의 여름철 강수가 대류성 강수로 변화하고 있기 때문에 대기불안정에 대한 연구의 중요성을 주장하였다. Lee and Byun (2011)은 2001~2008년 동안의 한반도 고층대기 관측지점 6개소의 라디오존데 관측 자료를 분석하여 소나기 발생 가능성을 연구하였고, CAPE는 일사량이 커서 강한 대류가 일어나기 용이한 여름철(특히 7~8월)의 늦은 오후에 내륙(오산과 광주)에서 높게 나타남을 보였다. 특히 오산과 광주는 해안에 위치한 지역보다 자유대류고도(Level of Free Convection, LFC)는 낮고, 평형고도(Equilibrium Level, EL)는 높아 자유대류층(Free Convection Layer, FCL)이 깊게 형성됨을 보였다. 또한 CAPE가 $3,000 \text{ J kg}^{-1}$ 이상으로 연직적인 대기가 불안정 하더라도 하층의 수증기 공급이 이루어지지 않는다면 강수발생확률이 낮다고 하였다.

한반도에서의 집중호우에 대한 연직대기환경 연구는 관측뿐만 아니라, 수치모의실험을 통해서도 수행되었다. Hong (2004)은 한국과 미국 중부에서 발생한 집중호우를 통해 두지역의 집중호우 발생 메커니즘 차이를 비교하여 한국의 집중호우사례에서는 하층이 습윤하고, 연직으로 중립적인 대기구조를 이루어 미국보다 CAPE가 약하게 나타난다고 하였다. 또한 연직적인 대기불안정보다는 종관 역학장에 의한 수증기 수렴이 집중호우의 주된 기작이라고 하였다. Park and Lee (2008)는 장마전선 상에서 발생한 집중호우사례를 분석하여 열·역학적 불안정에 기인하여 대류운이

발달함을 보였다. 특히, CAPE와 대류억제(Convective Inhibition, CIN)가 모두 클 경우 부력 에너지가 집중되어 강한 대류운으로 성장 할 수 있다고 하였다. 또한 Kim and Ham (2009)은 집중호우사례를 모의하여 CAPE가 낮더라도 SRH에 의해서 강한 상승류가 유지될 수 있음을 보였고, 집중호우 예측을 위해서는 CAPE와 SRH를 함께 고려해야 한다고 하였다.

앞서 언급된 선행연구들의 결과를 종합하면, 한반도 여름철 집중호우가 장마, 태풍과 같은 중관적인 기상장에 의해 발생할 경우에는 역학적인 불안정이 지배하고, 고기압 가장자리와 같이 대기가 불안정한 상태에서는 열적 불안정이 주요하다. 그러나 이러한 결과는 특정지역 또는 단기간의 집중관측을 통해 분석된 결과 이거나, 몇몇 사례 분석을 통해 얻어진 결과이기 때문에 장기간의 다양한 사례에 대한 통계적인 분석이 필요하다. 또한 각 사례의 중관적인 유형에 따라서 집중호우를 유발한 요인이 다르게 나타날 수 있기 때문에 중관 기압배치에 따른 집중호우의 분류가 수행되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 최근 17년(1997~2013) 여름철(6~8월) 동안 한반도 고층대기 관측지점 7개소에서 발생한 집중호우를 조사하였고, 라디오존데 관측 자료를 이용하여 집중호우를 유발한 연직대기환경을 분석하였다. 이 논문의 2장에서는 집중호우사례 선정 및 연구방법 그리고 기상지수에 대해 설명하였고, 다음으로 3장에서는 집중호우를 유발한 연직대기환경과 기압배치에 따른 차이, 그리고 열·역학적 특성에 따른 분포를 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 위의 결과에 대하여 요약하고 토의하였다.

2. 자료 및 연구방법

집중호우에 대한 기준은 연구에 따라서 다양하게 적용되고 있으며, 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 30 mm hr^{-1} 을 집중호우로 규정하였다(Kim et al., 2004). 집중호우사례를 조사하기 위하여 한반도 고층대기 관측지점 7개소(고산, 광주, 백령도, 속초, 오산, 흑산도, 포항)의 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)의 강수량 자료를 이용하였다(Fig. 1). AWS를 통해 생산되는 다양한 강수량 자료 중 1분 간격의 60분 이동누적강수량 자료를 활용하였고 이에 대한 설명은 다음 문단에 자세히 기술하였다. 조사기간은 AWS를 통해 1분 간격 관측이 시작된 1997년부터 2013년까지 최근 17년의 여름철(6~8월)이며, 오산 지점의 경우 장기간의 AWS 관측 자료가 존재하지 않아 가장 가까운 수원지점의 AWS 자료를 활용하였다. 라디오존데를 활용한 고층대기 관측 자료는 지점별로 기간이 다르게 존재하여 광주, 오산, 포항, 그리고 고산은 1997년부터 2013년까지 17년의 자료가 사용되

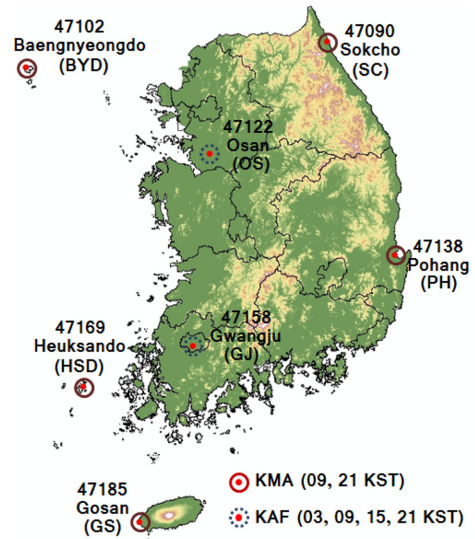


Fig. 1. Spatial location of the 7 upper-air observation sites in the Korean peninsula.

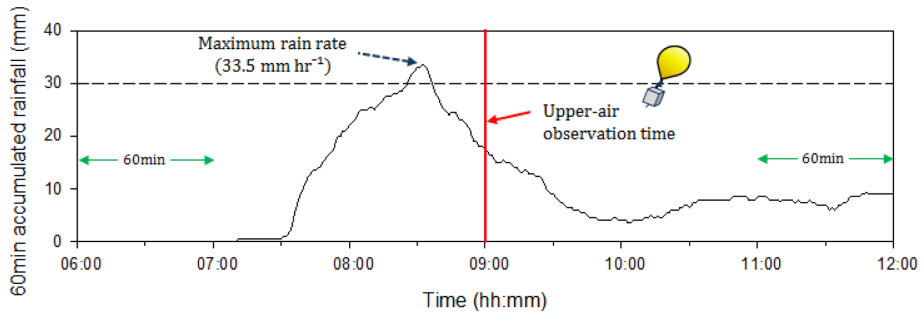
었다. 백령도와 속초는 관측이 시작된 2000년과 2001년 이후의 자료를 이용하였고, 흑산도의 경우 2003년부터의 자료를 활용하였다.

두 개 이상의 자료를 동시에 이용하여 분석할 경우 시·공간적 일치가 중요하고 적합한 자료를 선정하기 위한 기준이 필요하다. 특히 본 연구에서는 AWS와 라디오존데 관측지점의 공간적인 일치성은 이루어졌지만, 시간적인 일치성은 이루어지지 않았기 때문에 그 기준을 규정해야 한다. 이를 위해 라디오존데를 활용한 선행연구(Table 1)의 기준을 참고하여, 각 지점별 고층대기 관측이 이루어진 시간을 기준으로 $-2 \text{ hr} \sim +3 \text{ hr}$ 사이의 60분 이동누적강수량이 30 mm 이상인 사례를 조사하였다. 또한 정확한 기상지수의 산출을 위하여 고층대기 관측 자료의 품질이 우수한(종말기압이 300 hPa 을 초과, 기압 면이 20층 이상) 사례만을 선별하였다. 그 결과 총 82개 집중호우사례가 선정되었다.

Figure 2는 2006년 7월 15일 0900 KST의 속초 라디오존데 관측시간을 기준으로 집중호우를 조사한 사례이다. 이 사례의 경우 30 mm 이상의 강우가 0826 KST에서 0836 KST까지 나타났으며, 최대강우는 0832 KST의 33.5 mm 로 나타났다. 이를 통해 본 연구에서 보편적으로 사용되는 시간강수량 대신 1분 간격의 60분 이동누적강수량 자료를 사용한 장점이 나타난다. 먼저 시간강수량을 사용할 경우 0800 KST와 0900 KST의 강수량이 각각 22 mm 와 17 mm 로 집중호우의 강도가 약하게 해석될 수 있고, 최대강우강도를 추정할 수 없다. 또 앞 시간의 후반부와 다음 시간의 전

Table 1. Proximity criteria used in selected previous studies.

| No. | Temporal criterion (sounding time-event time) | Spatial criterion | Author |
|-----|--|----------------------|-------------------------------|
| 1 | -30 min ~ +30 min | 40 km | Thompson et al., 2003 |
| 2 | -2 hr ~ +1 hr | 100 km | Eom and Suh, 2010 |
| 3 | -2 hr ~ +2 hr | 40 km | McCaul, 1991 |
| 4 | -3 hr ~ +3 hr | 121 km | Davies and Johns, 1993 |
| 5 | -3 hr ~ +3 hr | 185 km | Craven and Brooks, 2004 |
| 6 | -6 hr ~ +3 hr | 400 km | Rasmussen and Blanchard, 1998 |

**Fig. 2.** Schematic diagram to select the heavy rainfall events using AWS minutely data.**Table 2.** The threshold of CAPE, CIN, 0~3 km shear, and SRH.

| CAPE | | CIN | |
|-------------------|-----------------------|-------------|--|
| Value | Atmospheric condition | Value | Atmospheric condition |
| 0=CAPE | Stable | CIN<50 | Weak cap that can be easily broken by surface heating |
| 0<CAPE≤1000 | Marginally unstable | 50≤CIN≤200 | Moderate cap that can be broken by strong heating/synoptic scale forcing |
| 1000<CAPE≤2500 | Moderately unstable | CIN>200 | Strong cap that impedes thunderstorm development |
| 2500<CAPE≤3500 | Very unstable | | |
| CAPE>3500 | Extremely unstable | | |
| 0~3 km Wind shear | | SRH | |
| Value | Atmospheric condition | Value | Atmospheric condition |
| 0<shear≤4 | Weak instability | SRH=150 | Threshold for super-cell development |
| 4<shear≤6 | Moderate instability | 150<SRH≤300 | Weak tornadoes possible |
| 6<shear≤8 | Large instability | 300<SRH≤450 | Strong tornadoes possible |
| 8<shear | Severe instability | SRH>450 | Violent tornadoes possible |

반부에 걸쳐 짧게 발생한 집중호우사례가 시간강수량에서는 조사되지 않는 문제가 있지만, 1분 간격의 60분 이동누적강수량 자료를 사용할 경우 이러한 문제가 해결된다. 즉 60분 이동누적강수량 자료를 활용함으로써 정확한 강우강도를 추정할 수 있고, 단시간에

발생하여 소멸한 집중호우사례를 모두 조사할 수 있었다. 본 연구에서 선정된 82개 집중호우사례의 라디오존데 관측 자료를 활용하여 열·역학적 특성을 나타내는 기상지수를 산출하였다. 가강수량(Total Precipitable Water, TPW)은 연직대기의 비습을 더한 값으로 대기

의 습윤도를 나타내는 지수이다. CAPE는 대류에 의한 대기불안정을 나타내는 대표적인 지표로서 자유대류고도에서 평형고도까지의 양의 부력을 적분한 값이다. CIN은 지면에서 자유대류고도까지의 음의 부력을 더한 값으로 CAPE와 대비되는 성질을 가지고 있다. SRH는 스톰의 진행방향(Storm motion)에 따른 지상에서 3 km 고도까지의 풍계의 변화를 적분한 값으로 연직바람시어(0~3 km Bulk wind shear)와 함께 역학적인 불안정을 의미하는 대표적인 지수이다. 각 기상지수의 계산식과 그 크기에 따른 분류는 다음과 같다 (Table 2).

$$TPW = \frac{1}{g} \int_{sfc}^{top} w dp \quad (1)$$

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz \quad (2)$$

$$CIN = g \int_{sfc}^{LFC} \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz \quad (3)$$

$$SRH = \int_{0km}^{3km} (\nabla \times \vec{V}_H) \cdot (\vec{V}_H - \vec{V}_C) dz \quad (4)$$

$$0\sim 3 \text{ km Bulk wind shear} = \frac{\vec{V}_{3km} - \vec{V}_{sfc}}{dz} \quad (5)$$

여기서, g 는 중력가속도, w 는 혼합비를 의미하고, $\theta(z)$ 는 특정 공기덩이의 가온도, $\bar{\theta}(z)$ 는 공기덩이 주변의 가온도를 나타낸다. \vec{V}_H 는 수평속도벡터(Horizontal velocity vector), \vec{V}_C 는 스톰 운동벡터(Storm motion vector)이고, \vec{V}_{3km} 와 \vec{V}_{sfc} 는 3 km와 지면에서의 바람 벡터이다.

본 연구에서는 82회의 집중호우사례들에서 나타난 열·역학적 특성을 분석하여, 한반도에서 일어난 집중호우의 연직대기환경을 제시하였다. 또한 이러한 집중호우사례에는 이동성 저기압, 장마전선, 태풍, 국지적인 불안정 등과 관련된 다양한 호우사례가 포함되어 있기 때문에 종관적인 기압배치에 따라 각 사례를 분류하여 그에 따른 열·역학적 특성의 차이를 비교하였다.

3. 분석결과

3.1 집중호우 시 연직대기환경 특성

한반도에서 발생하는 집중호우의 특징을 살펴보기 위하여 앞서 선정된 82개 사례의 연직대기환경을 분석하였다. Figure 3은 AWS를 통해 구해진 60분 이동누적강수량의 최대값(최대강우강도)과 라디오존데로부터 계산된 기상지수의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF) 분포이다. 먼저 최대강우강도는 30 mm hr⁻¹ 이상을 조사하였지만 최대강우강도는 약 35 mm hr⁻¹ 부

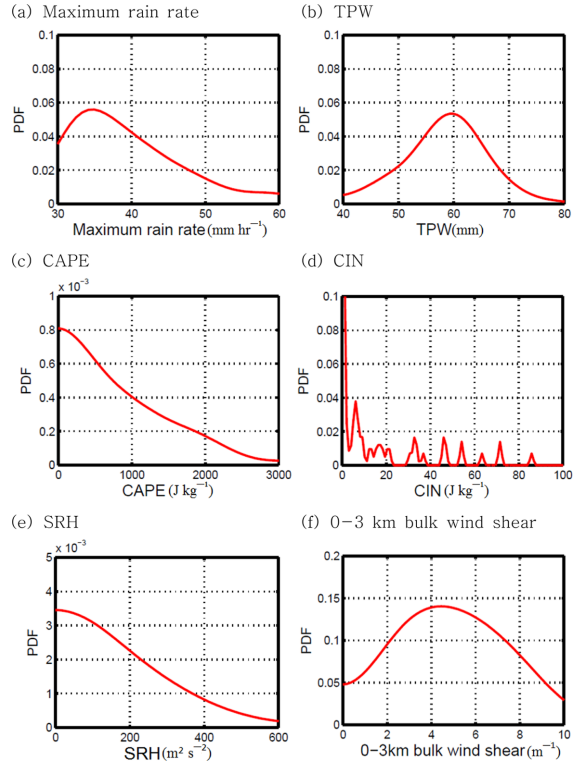
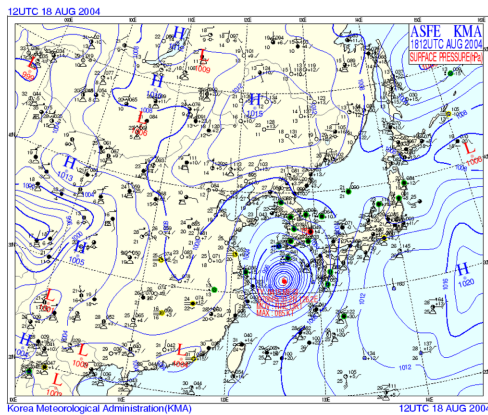


Fig. 3. Probability Density Function of (a) maximum rain rate, (b) TPW, (c) CAPE, (d) CIN, (e) SRH, and (f) 0-3 km bulk wind shear.

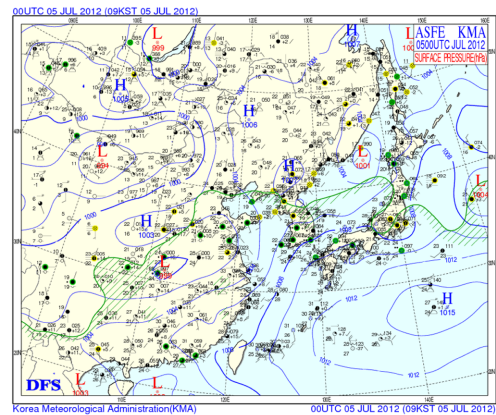
근에서 나타났고, 강우강도가 증가할수록 발생확률은 서서히 감소하였다(Fig. 3a). 강우강도가 가장 강한 사례는 96.5 mm hr⁻¹이었고, 중앙값과 평균값은 각각 38.3 mm hr⁻¹과 40.6 mm hr⁻¹이었다. 가강수량의 경우 정규분포와 유사한 형태를 보였고, 상·하위 10%는 각각 67 mm와 45 mm이었다(Fig. 3b). 중앙값과 평균값은 각각 59.3 mm와 57.3 mm로 여름철 집중호우가 약 60 mm 이상의 가강수량을 가진 습윤한 대기상태에서 발생하였음을 의미하고, 집중호우 시 약 55 mm의 가강수량이 관측된다는 Kwon et al. (2013)의 결과와 유사하다.

CAPE는 0 J kg⁻¹에서 3,000 J kg⁻¹ 이상까지 존재하였으며 약 650 J kg⁻¹이 중앙값 이었다(Fig. 3c). 특이한 사례를 제외한 81개 사례에서 대류불안정이 발생(CAPE > 0 J kg⁻¹)하였고 평균값은 865 J kg⁻¹로 나타났다. 이는 여름철 집중호우를 유발한 대기에서 연직적인 대류불안정이 주요한 요소임을 나타내는 바이다. 대류억제를 나타내는 CIN은 대체로 0~100 J kg⁻¹ 구간의 값을 보였고, 특히 CIN이 10 J kg⁻¹ 이하일 때가 58개 사례로 전체의 70%를 차지하였다(Fig. 3d). 평균

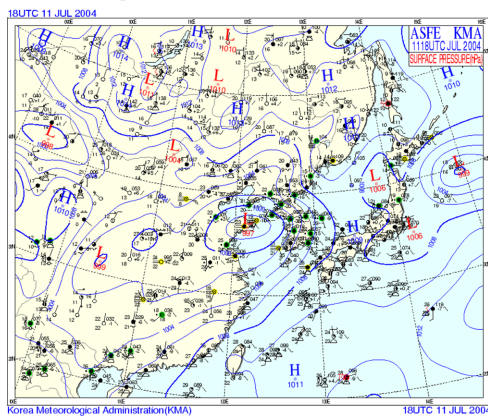
(a) Typhoon



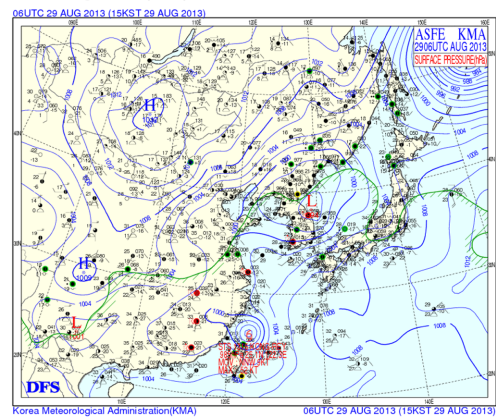
(b) Changma front



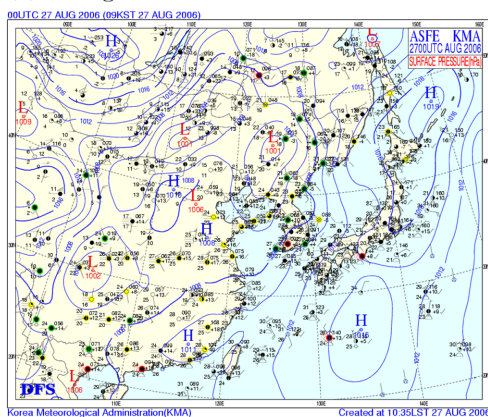
(c) *Low-pressure



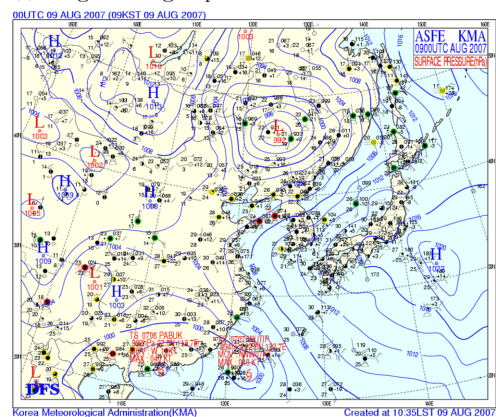
(d) Migratory cyclone



(e) Trough



(f) Edge of high-pressure



* Low-pressure originated from changma front

Fig. 4. Spatial distribution of representative surface pressure patterns causing heavy rainfall over Korean Peninsula: (a) Typhoon, (b) Changma front, (c) Low-pressure originated from changma front, (d) Migratory cyclone, (e) Trough, and (f) Edge of high-pressure.

값과 중앙값은 각각 14.4 J kg^{-1} 과 2.0 J kg^{-1} 로 나타났으며, 전반적으로 집중호우대기에서는 CIN이 존재하

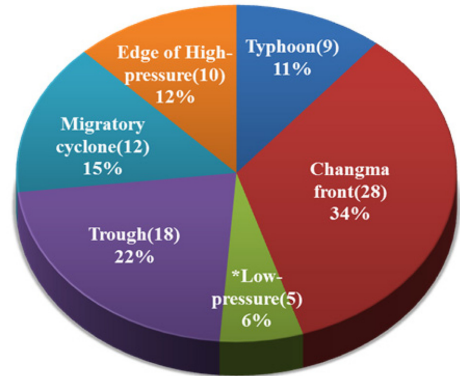
지 않거나 10 J kg^{-1} 이하로 약하게 발생함을 확인할 수 있었다.

SRH는 $-10 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 에서 $600 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 이상까지 분포하였고, 중앙값과 평균값은 각각 $127 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 과 $159 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 으로 나타났다(Fig. 3e). SRH가 $0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 미만인 사례는 8개 사례로 약 10%를 차지하였고, 이는 바람이 반전하고 있으며 평균바람에 비해 스톰이 왼쪽으로 이동하고 있음을 의미한다(Kim and Ham, 2009). 또한 SRH가 $0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 보다 큰 사례는 바람이 순전하고, 평균바람에 비해 스톰이 오른쪽으로 이동하는 것을 의미하며 저기압성 회전과 관련되어 있다. 거대세포(Supercell) 발생 기준(SRH $> 150 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, Table 2참조)을 만족하는 사례는 33개로 전체의 40%를 차지하였다. 마지막으로 0~3 km 연직바람시어의 상·하위 10%는 각각 2.2 s^{-1} 과 8.0 s^{-1} 이었고 최대빈도는 약 4 s^{-1} 이었다(Fig. 3f). 중앙값과 평균값은 모두 5.0 s^{-1} 이며, 중간정도의 불안정(moderato unstable)을 나타내는 4 s^{-1} 이상은 66%(54개 사례)를 차지하고 있었다. SRH와 0~3 km 연직바람시어를 확인한 결과, 집중호우를 유발한 대기상태에서 상하층간의 풍계변화 같은 역학적인 불안정도 주요한 요인 중 하나로 판단된다.

3.2 종관 기압배치에 따른 연직대기환경 차이

앞서 선정한 집중호우는 이동성저기압, 장마전선, 태풍, 국지적인 대기불안정 등 다양한 기작에 의해서 발생하였다. 이러한 집중호우의 종관기압배치는 열·역학적 특성에 영향을 미치기 때문에 기압배치에 따른 분류가 필요하다. 본 연구에서 분류한 여름철 기압배치는 6가지 유형이며 태풍(Typhoon), 장마전선(Changma front), 장마전선 상에서 발달한 저기압(Low-pressure originated from Changma front), 이동성 저기압(Migratory cyclone), 기압골(Trough), 그리고 고기압 가장자리(Edge of high-pressure)이다.

Figure 4는 6가지 유형의 대표적인 기압배치의 예시를 나타낸 것이다. Figure 4a는 2004년 8월 18일 2100KST의 지상일기도이며 태풍(메기)에 의해서 집중호우가 발생한 사례이다. 대체로 태풍이 제주도 남해상에 위치하였을 때 집중호우가 발생하였고, 북상하면서 약화되어 열대저기압으로 변화한 경우도 태풍에 의한 사례로 분류하였다. Figure 4b는 2012년 7월 5일 0900KST의 지상일기도로 강수대가 한반도 남부지방에서 일본 혼슈까지 길게 늘어져 있는 장마전선에 의해 발생한 집중호우사례이다. Figure 4c는 장마전선 상에서 발달한 저기압의 영향으로 집중호우가 나타난 2004년 7월 12일 0300KST의 지상일기도이다. 이러한 사례의 경우 장마전선과 (이동성)저기압의 복합적인 특징을 나타내기 때문에 하나의 유형으로 구분지어 분류하였다. Figure 4d는 2013년 8월 29일 1500KST의 지상일기도이며 중국 산둥반도에서부터 발달한 저기압이 한반도를 통과하여 집중호우가 발생



* Low pressure originated from changma front

Fig. 5. The percentage of each synoptic condition pattern for 82 heavy rainfall events.

한 사례이다. 이처럼 한반도가 뚜렷한 저기압의 영향권에 들거나 저기압이 통과하며 발생한 한랭전선에 의한 호우도 이동성 저기압 사례로 분류하였다. 다음으로 Fig. 4e는 기압골 유형이며, 한반도 북부지방을 통과하는 기압골이 서해상까지 확장되어 한반도에 영향을 미치는 상태의 일기도(2006년 8월 27일 0900KST)이다. 마지막은 고기압 가장자리에서 집중호우가 발생한 유형(2007년 8월 9일 0900KST)으로 한반도는 일본 남동쪽에 중심을 둔 북태평양 고기압의 가장자리에 위치하고 있다(Fig. 4f). 또한 이를 확인하기 위해서 상층 850 hPa 일기도를 통해 한반도가 고기압의 영향권에 있는지를 확인한 후 분류하였다.

Figure 5는 앞서 조사된 82개 집중호우사례를 기상청에서 제공하는 종관일기도와 단기예보 통보문을 참고하여 6가지 유형으로 분류한 결과이다. 집중호우를 유발한 기압배치는 장마전선이 34%(28개 사례)로 가장 높은 비율을 차지하였고, 그 다음은 기압골(22%, 18개 사례)과 이동성 저기압(15%, 12개 사례)이었다. 이는 남한의 평년 강수 특성을 분석하여 여름철에는 장마와 저기압에 의해 강수가 가장 많이 발생한다는 Rha et al. (2005)의 결과와 일치하고, 종관규모의 역학장이 한반도 집중호우의 주요한 요소라는 Hong (2004)의 연구결과와도 유사하다. 고기압 가장자리와 태풍에 의한 집중호우는 각각 12%(10개 사례)와 11%(9개 사례)를 차지하였고, 장마전선 상에서 발달한 저기압은 6%(5개 사례)로 가장 적게 나타났다.

앞서 조사한 집중호우사례의 열·역학적 특성을 6개의 기압배치별로 분류하여, 평균값을 비교하였다(Table 3). 최대강우강도는 기압골의 영향을 받을 때가 44.8 mm hr^{-1} 로 가장 강하게 나타났고, 장마전선 상에서 발생한 저기압이 36.2 mm hr^{-1} 로 가장 약했다. 그러나 가장수량은 고기압 가장자리가 52.0 mm 로 가

Table 3. The average values of environmental parameters and synoptic conditions from radiosonde observational data. The maximum rain rate in mm hr^{-1} , TPW in mm, Rainfall efficiency in %, CAPE and CIN in J kg^{-1} , SRH in m^2s^{-2} , and Wind shear in s^{-1} .

| Synoptic condition | Environmental parameters | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|------|---------------------|--------|------|-------|------------|
| | Max. rain rate | TPW | Rainfall efficiency | CAPE | CIN | SRH | Wind shear |
| 1. Typhoon | 39.8 | 61.7 | 64.6 | 460.2 | 15.3 | 205.3 | 5.0 |
| 2. Changma front | 37.8 | 59.1 | 64.0 | 709.8 | 11.3 | 162.8 | 6.2 |
| 3. *Low-pressure | 36.2 | 55.4 | 65.3 | 227.8 | 30.4 | 422.4 | 8.2 |
| 4. Migratory cyclone | 44.1 | 52.8 | 83.6 | 974.8 | 10.1 | 146.9 | 4.1 |
| 5. Trough | 44.8 | 58.9 | 76.0 | 1077.9 | 22.4 | 125.1 | 4.3 |
| 6. Edge of high-pressure | 39.5 | 52.0 | 75.9 | 1467.8 | 5.3 | 49.0 | 2.9 |

*Low-pressure originated from changma front

장 작은 값을 보이고, 태풍과 장마전선이 각각 61.7 mm와 59.1 mm로 다른 기압배치보다 습윤한 대기를 형성함을 알 수 있었다. 최대강수강도로 얻어진 60분 강수량과 가강수량의 비율을 통해 강수효율(강수량 ÷ 가강수량 × 100%)을 계산하면, 이동성 저기압과 기압골, 그리고 고기압가장자리에서의 강수효율이 75% 이상으로 높게 나타나고, 태풍 또는 장마전선과 관련된 두 유형은 상대적으로 낮게(65% 이하) 나타났다.

기압배치에 따른 연직대기환경의 차이는 열·역학적 특성을 나타내는 지수에서 더욱 뚜렷하였다. 고기압 가장자리에서 CAPE의 평균값은 약 $1,400 \text{ J kg}^{-1}$ 로 중간정도의 불안정(Moderately unstable, Table 2참조)에 해당되었고, 대류성 구름에 의한 집중호우의 CAPE 값과 유사하다(Kim and Ham, 2009; Kim et al., 2012; Kwon et al., 2013). 그러나 장마전선, 장마전선 상에서 발달한 저기압, 그리고 태풍은 CAPE가 800 J kg^{-1} 이하로 약한 불안정(Marginally unstable)을 보였고, 기압골과 이동성 저기압의 영향을 받을 때의 CAPE는 약 $1,000 \text{ J kg}^{-1}$ 로 앞서 언급된 3가지 기압배치(태풍, 장마전선, 장마전선 상에서 발달한 저기압)와 고기압 가장자리의 중간적인 수치를 보였다. 즉, 대기불안정은 고기압 가장자리가 가장 크고, 다음으로는 기압골과 이동성 저기압이었다. 태풍과 장마전선, 그리고 장마전선 상에서 발달한 저기압의 기압배치에서는 대기 불안정이 약하게 존재함을 확인하였다. 반면 CIN의 평균은 기압배치와 관계없이 30 J kg^{-1} 이하로 나타났다. 특히 장마전선 상에서 발달한 저기압에서 CIN의 평균은 30 J kg^{-1} 으로 상대적으로 큰 값을 보였고, 고기압가장자리에서는 5 J kg^{-1} 로 가장 작았다.

기압배치에 따른 SRH와 연직바람시어의 평균값은 CAPE와 반대적인 경향을 보였다. 먼저 고기압 가장자리에서의 SRH 평균값은 $49.0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 로 낮게 나타났지만, 나머지 4개 기압배치에서는 모두 $100 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 이상의 값을 보였다. 특히 태풍과 장마전선의 영향을 받

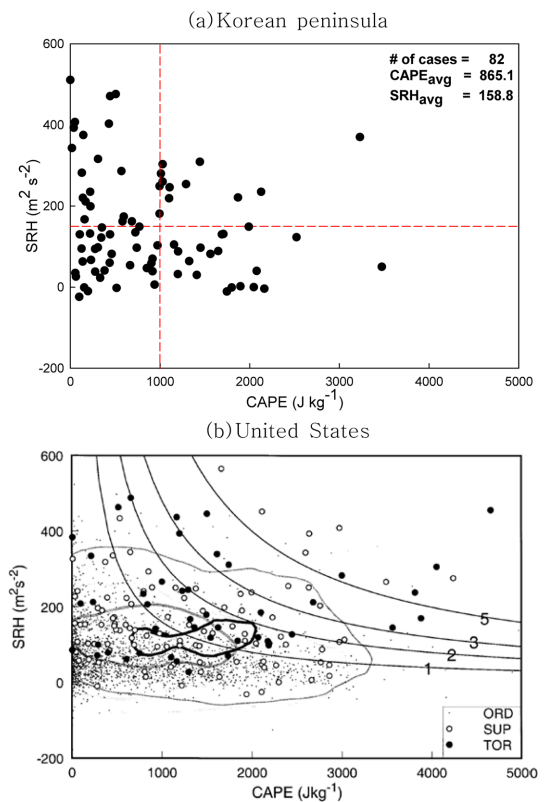
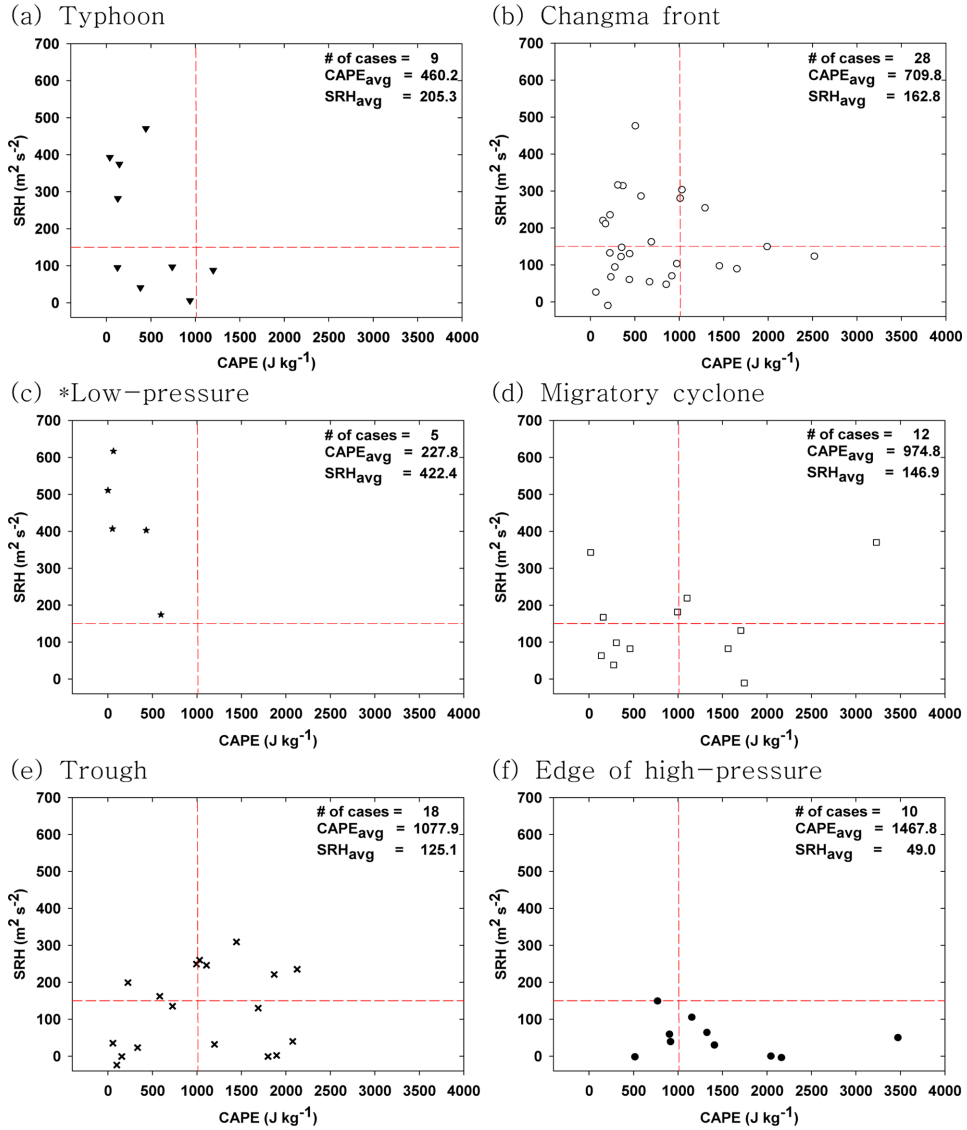


Fig. 6. Scattered diagram of CAPE and SRH for the (a) 82 heavy rainfall events in the Korean peninsula and (b) United States from Rasmussen and Blanchard (1988).

을 때는 약한 토네이도 발생기준치($\text{SRH}=150 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, Table 2참조)를 초과하였고, 장마전선 상에서 발달한 저기압의 경우에는 $400 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 이상으로 상하층간의 풍계변화가 뚜렷함을 알 수 있었다. 이러한 수치는 Kim et al. (2009)이 장마기간 동안 SRH가 $150 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 이상



* Low-pressure originated from changma front

Fig. 7. Same as Fig. 6a except for the events: (a) Typhoon, (b) Changma front, (c) Low-pressure originated from changma front, (d) Migratory cyclone, (e) Trough, and (f) Edge of high-pressure.

일 때 강수가 발생한다는 결과와 유사하다. 그리고 이 동성 저기압과 기압골의 영향을 받을 경우는 약 $130 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 의 값을 보였다. 기압배치에 따른 SRH값의 차이는 연직바람시어에서도 유사하였다. 고기압 가장자리에서는 2.9 s^{-1} 로 약하지만, 기압골과 이동성 저기압은 약 4.2 s^{-1} , 그리고 태풍과 장마전선에서는 5.0 s^{-1} 이상으로 중간정도의 불안정을 보였다. 특히 장마전선 상에서 발달한 저기압의 영향을 받을 경우는 8.2 s^{-1} 로 SRH와 마찬가지로 상하층간의 풍계변화에 따른 불안

정이 크게 나타남을 알 수 있었고, 이는 위험수준(severe)에 해당되었다.

즉, 고기압 가장자리에서는 열적 불안정이 크게 나타나지만, 이를 제외한 나머지 기압배치에서는 연직적인 풍계의 변화와 같은 역학적인 불안정이 크게 작용하고 있음을 의미한다. 또한 집중호우는 기압배치와 상관없이 가강수량 50 mm 이상의 습윤한 대기상태에서 발생하였고, 대류억제는 존재하지 않거나 그 크기가 약하였다. 그러나 이러한 결과는 평균값을 통

해 분석된 결과이기 때문에 그 특징을 규정하는데 한계가 있다. 따라서 다음 장에서는 각 기압배치에 따른 CAPE와 SRH의 분포를 분석하여 이러한 결과를 확인하고자 한다.

3.3. CAPE와 SRH를 이용한 집중호우유발 연직대기환경 분류

집중호우사례의 열·역학적 특성을 비교하기 위해서 CAPE와 SRH에 따른 산포도를 나타내었다(Fig. 6a). CAPE는 주로 0~2,500 J kg⁻¹ 사이에 분포하였고, SRH는 0~500 m²s⁻²의 값을 보였다. 특히 그 분포가 왼쪽으로 기운 직각삼각형의 모양을 띠는 것을 확인할 수 있었고 이러한 분포는 Rasmussen and Blanchard (1998)가 미 대륙의 라디오존데 관측 값을 통해 얻은 뇌우(thunderstorm, ORD)현상의 CAPE와 SRH 분포와 유사하였다(Fig. 6b). 그러나 미 대륙의 경우 토네이도(Tornado, TOR)와 거대세포(Supercell, SUP)의 CAPE와 SRH 분포가 각각 0~5,000 J kg⁻¹과 0~600 m²s⁻²로 본 연구를 통해 얻은 한반도의 분포보다 넓은 범위에서 나타났다. 특히 미 대륙에서는 CAPE와 SRH가 모두 큰 극단적인 조건(CAPE > 2,000 J kg⁻¹, SRH > 200 m²s⁻²)이 존재하였지만, 한반도에서는 이러한 조건이 잘 나타나지 않는 차이가 있었다.

기압배치유형에 따른 CAPE와 SRH 분포의 차이를 살펴보고자 각 유형별 산포도를 제시하였다(Fig. 7). 분석의 용이함을 위하여 중간정도의 불안정을 나타내는 CAPE (1,000 J kg⁻¹ 이상)와 뇌우 발생의 임계값인 SRH (150 m²s⁻² 이상)를 기준으로 적용하였다(Table 2). 태풍에 의한 집중호우의 경우 한 사례를 제외하고 CAPE가 1,000 J kg⁻¹ 이하로 나타났다. SRH는 10~500 m²s⁻²의 범위를 보였고 4사례가 기준치를 초과하였다(Fig. 7a). 장마전선의 영향을 받은 집중호우는 CAPE와 SRH가 각각 0~2,500 J kg⁻¹과 0~500 m²s⁻²에 분포하였고, CAPE와 SRH의 기준치를 초과하는 사례가 각각 11사례와 7사례였다(Fig. 7b). 특히 CAPE와 SRH가 기준치 이하의 값을 보인 사례가 13사례로 47%를 차지하였다. 장마전선 상에서 발달한 저기압의 경우 5사례 모두 CAPE는 1,000 J kg⁻¹ 이하로 상대적으로 약하였지만 SRH는 150 m²s⁻² 이상의 값을 보여 역학적 불안정이 뚜렷함을 확인할 수 있었다(Fig. 7c). 이동성 저기압에 의한 집중호우의 CAPE와 SRH는 각각 0~1,700 J kg⁻¹과 0~250 m²s⁻²로 넓게 분포하였고, 기준치를 초과하는 사례는 각각 4사례로 나타났다(Fig. 7d). 다음으로 기압골에 영향을 받을 때 발생한 집중호우의 CAPE와 SRH를 살펴보면 각각 10사례와 8사례가 기준치를 초과하였고, 앞서 언급한 4가지 유형의 기압배치보다 열적 불안정은 강하고 역학적 불안정은 약하게 나타남을 확인할 수 있었다(Fig. 7e). 마

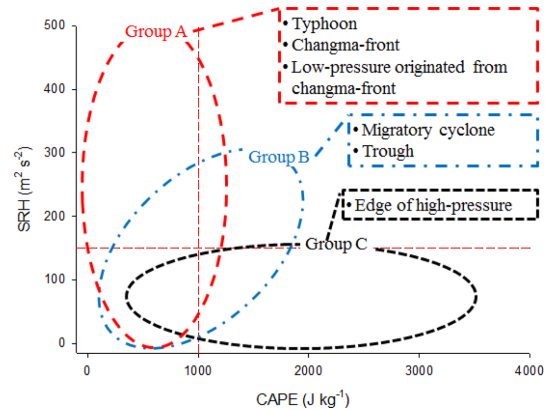


Fig. 8. Three kinds of heavy rainfall groups with each group separated by synoptic condition, CAPE, and SRH.

지막으로 고기압 가장자리에서 발생한 집중호우의 SRH는 모든 사례가 150 m²s⁻² 이하의 값을 보여 역학적인 불안정이 약하게 나타난 반면, CAPE는 500 J kg⁻¹ 이상의 값을 보여 열적 불안정이 우세함을 알 수 있었다(Fig. 7f).

종합적으로 살펴보면 장마전선과 장마전선 상에서 발달한 저기압, 그리고 태풍의 기압배치에서는 주로 CAPE가 약하고 SRH가 큰 조건(Group A)에서 집중호우가 발생했다(Fig. 8). 그러나 고기압 가장자리에서는 CAPE가 크고 SRH가 약한 조건(Group C)에서 집중호우가 나타났다. 저기압과 기압골의 CAPE와 SRH는 다른 네 가지 유형의 중간적인 분포(Group B)를 보였지만 그 분포 폭이 컸다. 특히 대부분의 기압배치에서 CAPE와 SRH 기준치 모두를 초과하지 않는 사례가 존재함을 확인하였고 이는 한반도에서 발생하는 집중호우를 예측하기 위해선 새로운 기준치가 필요함을 의미한다.

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 한반도에서 발생하는 여름철 집중호우를 이해하고자, 최근 17년(1997~2013년)의 라디오존데 관측 자료를 활용하여 집중호우를 유발한 연직대기환경을 분석하였다. 여름철(6~8월)에 발생한 30 mm hr⁻¹ 이상의 집중호우를 조사하여 총 82회의 집중호우사례를 선정하였다. 열·역학적 특성을 나타내는 기상지수의 평균값을 살펴본 결과, 가강수량이 약 60 mm로 대기가 습윤하였고, CAPE와 CIN은 각각 850 J kg⁻¹과 15 J kg⁻¹로 연직적인 열적 불안정은 나타났으나 대류를 억제하는 층은 약하게 존재하였다. SRH와 연직바람시어는 160 m²s⁻²와 5 s⁻¹로 상하층간의 풍계 변화로 인한 불안정이 강하게 나타나 역학적인 불안

정이 주요한 요소 중 하나임을 확인할 수 있었다.

집중호우사례를 여름철의 대표적인 6개 기압배치에 따라 분류한 결과 장마전선이 34%로 가장 높은 빈도를 보였다. 기압배치와 상관없이 집중호우를 유발한 대기는 강수량 약 60 mm 이상으로 습윤한 대기상태를 보였고, 강수효율은 고기압 가장자리와 기압골, 그리고 이동성저기압에서 강수효율이 75% 이상으로 높았다. CAPE의 평균값은 고기압 가장자리에서 $1,400 \text{ J kg}^{-1}$ 이상으로 가장 높았고, 태풍과 장마전선에 관련된 기압배치에서는 700 J kg^{-1} 이하로 상대적으로 낮게 나타났다. CIN은 기압배치와 관계없이 30 J kg^{-1} 이하로 약하게 존재함을 확인할 수 있었다. SRH와 연직바람시어의 경우, CAPE와는 반대로 고기압가장자리($49 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$)에서 가장 약했고, 태풍과 장마전선에 관련된 기압배치에서는 $160\text{--}430 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 로 강했다. 이러한 경향은 연직바람시어에서도 유사하였다. 고기압가장자리에서의 연직바람시어는 3.0 s^{-1} 이하로 크지 않았고, 나머지 기압배치에서는 4 s^{-1} 이상으로 연직적인 풍계변화가 크게 나타났다.

한반도 집중호우에서는 CAPE와 SRH가 모두 큰 극단적인(extreme) 사례가 잘 나타나지 않음을 확인하였고, 미 대륙의 뇌우의 분포와 유사하였다. 태풍 및 장마전선에 의한 집중호우는 SRH가 크고 CAPE가 약한 조건에서 주로 발생한 반면, 고기압 가장자리에서의 집중호우는 CAPE가 크고 SRH가 약한 조건에 집중되어 분포하였다. 그리고 이동성 저기압과 기압골에 의한 집중호우는 CAPE와 SRH의 분포가 앞서 언급한 네 가지 유형의 중간적인 분포를 보였고, 그 분포의 폭이 컸다.

한반도 여름철 집중호우는 크게 세 가지 유형으로 분류할 수 있었다. 첫 번째는 태풍, 장마전선, 그리고 장마전선 상에서 발생한 저기압과 같은 중관적인 역학장에 기인하는 유형(Group A)으로 풍계변화와 같은 역학적인 불안정이 주된 기작으로 작용하는 특징을 보였다. 두 번째는 이동성 저기압 또는 기압골에 의해서 발생한 유형(Group B)으로 열적, 역학적인 불안정이 결합되어 나타났다. 세 번째는 고기압 가장자리의 영향을 받아 열적 불안정이 강하게 나타나는 유형(Group C)이다.

본 연구에서는 장기간의 라디오존데 관측 자료를 활용하여 집중호우를 유발한 다양한 사례의 종합적인 열·역학적 특성을 제시하였고, 기압배치에 따른 차이와 주요한 요인들을 비교하였다. 이러한 결과는 집중호우의 유형에 따른 요인을 이해하고 예측하는데 도움이 될 것이라 기대한다. 그러나 본 연구에서 중점적으로 분석한 CAPE와 SRH의 임계값을 초과하지 않는 사례가 다수 존재함이 확인되어 이들을 예보에 활용하는 데는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서

이들 지수들의 예보활용도를 높이기 위해서는 한반도에 적합한 기준치가 필요할 것으로 사료된다. 또한 최근 들어 빈번히 발생하는 국지성 집중호우를 이해하기 위해서는 다양한 자료를 통한 추가적인 분석이 요구된다. 이를 위해 집중호우 시 동반되는 적란운에 대한 다양한 모의실험과 레이더와 위성과 같은 원격관측 자료를 활용한 분석을 수행한다면 한반도에서 발생하는 집중호우 적란운의 물리과정의 이해와 예측 정확도 향상에 도움이 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원의 주요사업 ‘재해기상연구센터 설립 및 운영(과제번호: NIMR-2012-B-7)’의 일환으로 수행되었습니다. 또한 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원분들께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Craven, J. P., and H. E. Brooks, 2004: Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Natl. Wea. Dig.*, **28**, 13-24.
- Davies, J. M., and R. H. Johns, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes: 1. Wind shear and helicity. In *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, C. Church et al., Eds., AGU, 573-582.
- Eom, H.-S., and M.-S. Suh, 2010: Analysis of stability indexes for lightning by using upper air observation data over South Korea. *Atmosphere*, **20**, 467-482.
- Hong, S.-Y., 2004: Comparison of heavy rainfall mechanisms in Korea and the central US. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1469-1479.
- 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 the 2010 summer intensive observation period over Seoul metropolitan area. *J. Korean Earth Sci.*, **33**, 148-161.
- Kim, K.-H., Y.-H. Kim, and D.-E. Chang, 2009: The analysis of changma structure using radiosonde observational data from KEOP-2007: Part II. The dynamic and thermodynamic characteristics of changma in 2007. *Atmosphere*, **19**, 297-307.
- Kim, S., W.-S. Nam, and J.-H. Heo, 2004: Analysis of flash flood movement using rainfall temporal distribution. *J. Korean Soc. Civil Engineers*, 4092-4095.
- Kim, Y.-C., and S.-J. Ham, 2009: Heavy rainfall prediction

- using convective instability index, *J. Korean Soc. Aviation and Aeronautics*, **17**, 17-23.
- Korea Meteorological Administration, 2012: Learn from case of the last 20 years, top 10 heavy rainfall. 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, S.-M., and H.-R. Byun, 2011: Distribution of convective energy at upper level in South Korea and the possibility of artificial showery rain caused by activated CAPE. *Theor. Appl. Climatol.*, **105**, 537-551.
- McCaul, E. W., 1991: Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1954-1978.
- National Emergency Management Agency, 2014: Annual disaster report for 2013. 680 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 forecast parameters. *Wea. Forecasting*, **13**, 1148-1164.
- Rha, D.-K., C.-H. Kwak, M.-S. Suh, and Y. Hong, 2005: Analysis of the characteristics of precipitation over South Korea in terms of the Associated synoptic patterns: A 30 years climatology (1973~2002). *J. Korean Earth Sci.*, **26**, 732-743.
- Thompson, R. L., R. E. Edwards, and J. A. Hart, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle. *Wea. Forecasting*, **18**, 1243-1261.