

연직강우레이더와 광학우적계 관측자료를 이용한 2012년 여름철 남해안 강우사례 분석

문지영^{1)*} · 김동균¹⁾ · 김연희²⁾ · 하종철¹⁾ · 정관영¹⁾

¹⁾기상청 국립기상연구소 예보연구과, ²⁾응용기상연구과

(접수: 2013년 2월 20일, 수정: 2013년 4월 15일, 게재확정일: 2013년 4월 23일)

Analysis of Summer Rainfall Case over Southern Coast Using MRR and PARSIVEL Disdrometer Measurements in 2012

Ji-Young Moon^{1)*}, Dong-Kyun Kim¹⁾, Yeon-Hee Kim²⁾, Jong-Chul Ha¹⁾,
and Kwan-Young Chung¹⁾

¹⁾Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Research, KMA

²⁾Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, KMA

(Received: 20 February 2013, Revised: 14 April 2013, Accepted: 23 April 2013)

Abstract To investigate properties of cloud and rainfall occurred at Boseong on 10 July 2012, Raindrop Size distributions (RSDs) and other parameters were analyzed using observation data collected by Micro Rain Radar (MRR) and PARTICle Size and VELOCITY (PARSIVEL) disdrometer located in the National center for intensive observation of severe weather at Boseong in the southwest of the Korean peninsula. In addition, time series of RSD parameters, relationship between reflectivity-rain rate, and vertical variation of rain rates-fall velocities below melting layer were examined. As a result, good agreements were found in the reflectivity-rain rate time series as well as their power relationships between MRR and PARSIVEL disdrometer. The rain rate was proportional to reflectivity, mean diameter, and inversely proportional to shape (μ), slope (Λ), intercept (N_0) parameter of RSD. In comparison of the RSD, as rain rate was increased, the slope of RSD became less steep and the mean diameter became larger. Also, it was verified that reflectivities are classified in three categories (Category 1: Z (reflectivity) > 40 dBZ, Category 2: 30 dBZ < Z < 40 dBZ, Category 3: Z < 30 dBZ). As reflectivity was increased, rain rate was intensified and larger raindrops were existed, while reflectivity was decreased, shape (μ), slope (Λ), intercept (N_0) parameter of RSD were increased. We expected that these results will lead to better understanding of microphysical process in convective rainfall system occurred during short-term period over Korean peninsula.

Key words: Micro Rain Radar (MRR), PARTICle Size and VELOCITY (PARSIVEL) disdrometer, Raindrop Size Distribution (RSD)

1. 서 론

우리나라는 해마다 태풍과 집중호우의 발생으로 인

해 대부분의 강우가 여름철에 집중되어, 위험기상에 따른 많은 인명과 재산피해가 발생한다. 이러한 기상 재해 예방을 위해 자료동화를 이용한 모델의 개선 등 지속적으로 예측성 향상을 도모해 왔지만, 시공간적으로 급변하는 강우의 패턴 및 강도를 정확히 예측하기에는 여전히 많은 어려움이 존재한다(국립기상연구소, 2010). 따라서 위험기상의 예측성을 향상시키기

*Corresponding Author: Ji-Young Moon, Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Research, KMA, 460-18, Shindaebang, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-70-7850-6617, Fax : +82-2-834-5922
E-mail : mjoy0200@korea.kr

위해서는 고해상도의 시공간 강우자료가 요구되며, 이러한 점에서 강우시스템의 발달과 이동의 탐지 능력이 뛰어나고 다양한 시공간 기상정보를 제공하는 지상레이더를 이용한 관측 및 분석 연구가 매우 중요하다(국립기상연구소, 2010).

또한 정량적 강수 예측(Quantitative Precipitation Estimates, QPE)의 정확성을 높이기 위해서는 레이더와 지상관측 자료로부터 강우입자 크기분포(Raindrop Size Distribution, RSD)와 관련 강우 파라미터들을 산출하는 것이 중요하다(차주완 등, 2010; McGaughey *et al.*, 1996; Mckague *et al.*, 1998; Viltard *et al.*, 1998). 이러한 산출과정은 강우시스템 내의 미세물리 및 역학적 특성을 분석하기 위해 필수적이다. 그 이유는 강우입자 크기분포는 병합, 깨짐(breakup), 응결, 증발, 눈의 용해와 같은 미세물리 과정에 의해 결정되고, 강우시스템에서 미세물리 과정에 따라 시공간적으로 변하기 때문이다(Zhao *et al.*, 2011).

강우입자 크기분포는, 마이크로파 원격탐사(microwave remote sensing)의 정량적 강수량 예측과 수치예보모델의 물리과정을 모수화하기 위해서도 필요하며(Lee *et al.*, 2007), 전파연구에 있어서는 정확한 강우강도와 함께 눈, 안개, 구름, 특히 강우로 인한 전파감쇠의 문제를 개선하기 위해 요구되는 중요한 요소이다(최동유 등, 2010). 또한 Uijlenhoet *et al.*(2003)와 Uijlenhoet and Torres(2006)는 에어로솔 입자의 강수 세정(precipitation scavenging)과 토양침식(soil erosion) 등에서 정확한 강우입자의 크기분포를 이해하는 것이 중요하다고 언급하였으며, Zhao *et al.*(2011)은 강우입자 크기분포를 사용하여 레이더의 강우율 예측을 향상시키고, 여기에서 정확한 강우율 자료를 얻고자 하였다.

한편, 레이더를 이용한 강우관측에도 강우입자의 크기분포가 사용되며, 강우관측은 반사도 인자(Z)와 지상 강우강도(R)의 관계에 의존하므로 Z - R 관계를 명

확히 하는 것이 중요하다. Marshall and Palmer(1948)가 강우입자의 크기분포를 이용하여 Z - R 관계식 $Z = aR^b$ 을 제시한 이후로 많은 연구자들은 강우형태에 따른 Z - R 관계식을 제시하였으며(Fujiwara, 1965; Joss and Waldvogel, 1970; Austin, 1987; Atlas *et al.*, 1999), 강우입자 크기분포의 시공간적 변동성으로 인해 다양한 Z - R 관계식이 존재하므로, 레이더 기상 연구 분야에서는 강우입자 크기분포의 변동성에 대한 여러 연구를 수행해 왔다(Uijlenhoet *et al.*, 2003; Lee and Zawadzki, 2005; Lee *et al.*, 2007).

이처럼 강우입자의 크기분포나 강우강도 및 미세물리 과정에 따른 강우 파라미터에 대한 연구는 국외에서 활발히 이루어지고 있지만, 국내에서는 아직 이와 관련된 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연직강우레이더(Micro Rain Radar, MRR)와 광학우적계(PARTicle Size and VELOCITY, PARSIVEL)의 관측 자료를 이용하여 2012년 여름철 7월 10일 강우사례에 대하여 산출된 강우 파라미터의 시계열과 시간-고도면의 특성, 상관관계, 그리고 반사도를 카테고리별로 분류하여 그에 대한 강우 파라미터의 특성을 분석하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료 및 관측기기의 특성

본 연구에서 사용한 자료는 전라남도 보성군(34.76°N, 127.16°E)에 위치한 보성 국가위험기상집중관측센터(National Center for Intensive Observation of Severe Weather, NCIO)에서 관측된 광학우적계와 연직강우레이더의 관측자료이며, 분석한 강우사례는 장마전선 상에서 발달한 저기압의 영향으로 일강수량이 57.5 mm 인 2012년 7월 10일이다.

연직강우레이더는 24.1 GHz(k-band) 주파수를 사용하는 주파수 변조 연속파(Frequency Modulated

Table 1. The specification of MRR and PARSIVEL at the Boseong NCIO.

Instrument	Micro Rain Radar (MRR)	PARTicle SIze and VELOCITY (PARSIVEL)
Manufacture	Metek, Germany	OTTA
Variables	Reflectivity, Rain rate, Drop size distribution, Liquid water content	Drop size spectra, reflectivity, Fall velocity, Rain rate, etc.
Frequency	24.1 GHz (K-band)	650 nm (Horizontal laser beam)
Height resolution	200 m	-
Particle size range	0.249~4.53 mm	0.2~5 mm (fluid type) 0.2~25 mm (solid type)
Observation interval	1 minute	1 minute
Installation date	May 2002	April 2011

Continuous Wave, FMCW) 방식의 연직지향 도플러 레이더로서, 주파수가 선형 변조된 전자기파를 대기 중에 연직으로 발사하여 입자들에 의해 반사되는 신호를 이용해 각 고도별로 강우율과 강우입자 크기분포 등을 산출한다. 최대 6.2 km 고도까지 총 32개 층의 연직프로파일을 산출하며, 연직해상도는 200 m이다. 광학우적계는 발신부에서 조명된 650 nm 파장대의 레이저 빔이 수신부에 도달되기 전 낙하된 강우의 빔 차단효과에 따른 강우입자와 중단속도를 측정하고, 입자의 크기와 낙하속도를 32개 등급으로 구분한다. 광학우적계와 연직강우레이더의 시간해상도는 1분이며, 상세한 규격은 Table 1과 같다.

2.2 분석방법

광학우적계는 지상에서 강우 파라미터를 직접 관측하고, 연직강우레이더는 대기중의 강우입자들로부터 원격으로 반사되어 오는 마이크로파의 후방산란신호를 이용하여 강우 파라미터와 입자의 크기분포를 산출한다. 본 연구에서는 강우율(R)과 반사도(Z), 평균입자직경(D_m)의 시계열 및 강우율에 대한 반사도와 평균입자직경의 상관관계, 강우입자 크기분포(RSD) 등의 파라미터에 대하여 광학우적계와 연직강우레이더 장비(200 m의 관측값)의 관측자료를 비교하고, 6.2 km의 높이까지 관측 가능한 연직강우레이더 자료를 이용하여 시간-고도면에 대한 반사도와 강우율, 낙하속도 등을 분석하였다. 연직강우레이더는 강한 상승·하강기류에 의해 나타나는 오차와 고도 증가에 따른 감쇠현상이 크고, 이 연구에서는 강우의 특성을 파악하는 것이 목적이므로 용해층(melting layer) 아래의 자료만을 사용하였다.

또한 강우유형에 따른 파라미터의 특성을 알아보고자 반사도를 기준으로 다음의 세 구간으로 구분하고, 구간별 강우 파라미터 사이의 상관성을 비교분석하였다; Category 1: Z > 40 dBZ, Category 2: 30 < Z < 40 dBZ, Category 3: Z < 30 dBZ. 40 dBZ 이상의 반사도는 층운형 강우에서 발생하지 않기 때문에 대류형 구간(Category 1)으로 구분하였다(Steiner et al., 1995). 반사도의 치우침이나 오류가 있을 수 있기 때문에 중립 구간(Category 2)을 포함하였으며, 30 dBZ 이하의 반사도는 층운형 구간(Category 3)으로 구분하였다.

연구에서 사용된 강우 파라미터들은 아래의 모멘트 방법을 사용하여 산출하였다(Tokay and Short, 1996; Chu and Su, 2008; Williams and Gage, 2009).

$$M_n = \int_0^\infty D^n N(D) dD = \frac{\Gamma(n + 1 + \mu) N_0}{\Lambda^{n+1+\mu}} \quad (1)$$

여기서, M은 모멘트, n은 모멘트 차수를 가리킨다. 예를 들어 M₆은 6차수 모멘트로서 레이더 반사도 인자

(radar reflectivity factor)를 의미한다. D는 강우입자의 직경(mm), N(D)는 단위체적당 물방울의 크기 D와 D + dD 사이에 포함된 물방울의 개수 즉, 강우입자 크기별 수농도 분포(m⁻³ mm⁻¹), Γ은 gamma 함수이며, μ, N₀, Λ는 각각 강우입자 크기분포의 모양, 인터셉트(m⁻³ mm^{-1-μ}), 기울기(mm⁻¹) 파라미터로 아래의 Eq. (2)~(4)에 의해 계산되었다.

$$\mu = \frac{(8 - 11\eta) - (\eta^2 + 8\eta)^{1/2}}{2(\eta - 1)} \quad (2)$$

$$N_0 = \frac{\Lambda^{(\mu+5)} M_4}{\Gamma(\mu + 5)} \quad (3)$$

$$\Lambda = \frac{(4 + \mu)}{D_m} \quad (4)$$

Equation (2)에서 η은 모멘트의 비율이고, Eq. (4)에서 D_m은 평균입자의 직경(mm)으로 Eq. (5)와 Eq. (6)에 의해 계산되었다.

$$\mu = \frac{M_4^2}{M_2 M_6} \quad (5)$$

$$D_m = \frac{\int_0^\infty N(D) D^4 dD}{\int_0^\infty N(D) D^3 dD} \quad (6)$$

3. 분석결과

3.1 2010년 7월 10일 강우사례 분석

본 연구에서는 보성지점에서 하루 57.5 mm의 강우가 내린 2012년 7월 10일의 사례에 대하여 강우 파라미터를 분석하였다. Figure 1은 7월 10일 1300 UTC부터 2100 UTC까지 8시간 동안, 보성 국가위험기상 집중관측센터에서 연직강우레이더에 의해 관측된 레이더 반사도와 강우율, 낙하속도, 그리고 연직속도의 시간-고도면을 나타낸 것으로, 연직속도 w는 Atlas et al.(1973)에 의거하여 Eq. (7)에 의해 계산되었다.

$$w = W_{dop} - V_f, \quad V_f = 3.5Z^{0.084} \quad (7)$$

여기서, W_{dop}는 도플러 속도, V_f는 대기 중 빗방울의 중단 속도이다.

연직강우레이더는 고도증가에 따라 감쇠현상이 크고, 강우의 특성을 분석하는데 있어 용해층(melting layer) 이상의 고도부터는 얼음입자(ice particle)가 존재하기 때문에 약 5.2 km AGL의 용해층까지만 분석하였다. 1700 UTC부터 1810 UTC까지는 4.6 km AGL 부근에서 약한 밝은띠(bright band)가 관측되었고, 그 아래 7.0 m s⁻¹가 넘는 높은 낙하속도가 관측되어 상

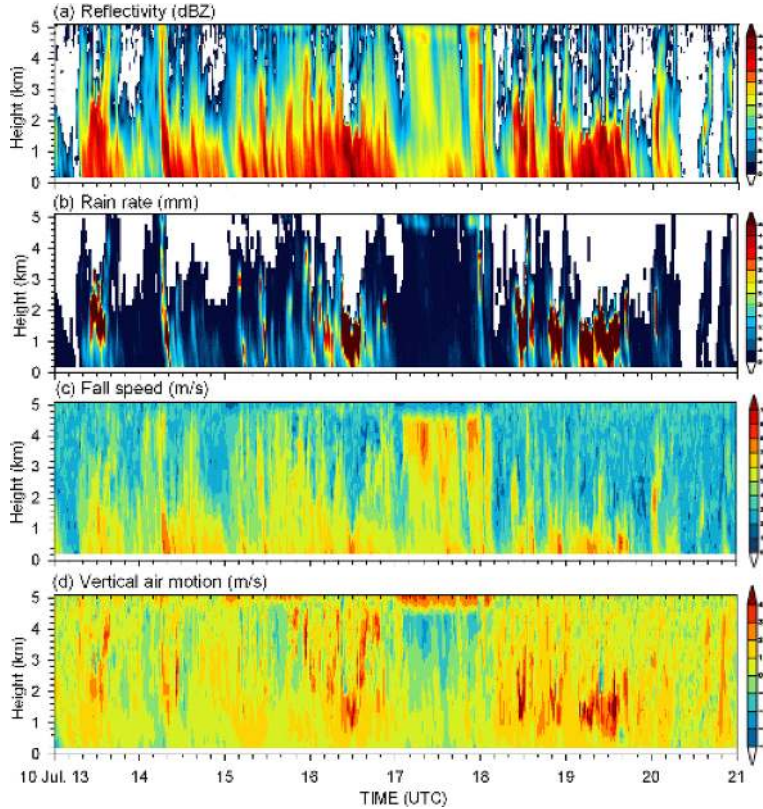


Fig. 1. Time-height sections of (a) radar reflectivity, (b) rain rate, (c) fall speed, and (d) vertical air motion by MRR.

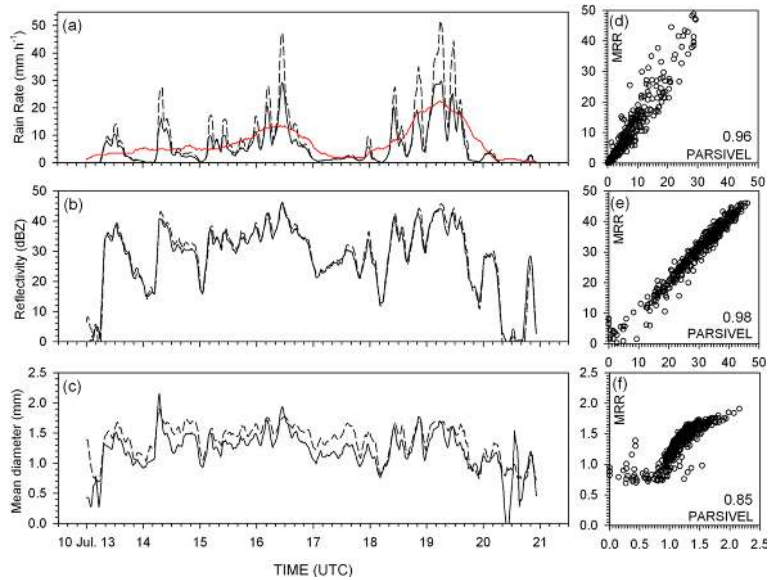


Fig. 2. Time series of the (a) rain rate, (b) radar reflectivity, and (c) mean diameter by MRR (dashed line), PARSIVEL (solid line), and AWS (red solid line). Scatter plots of (d) rain rate, (e) radar reflectivity, and (f) mean diameter from MRR and PARSIVEL.

대적으로 강한 하강기류가 존재하였다. 전반적으로 강우율은 레이더 반사도에 비례함을 보였으며, 이러한 비례관계는 1600 UTC부터 1700 UTC까지와 1820 UTC부터 1940 UTC까지 강한 상승기류가 관측된 구간에서 뚜렷이 나타났다. Figure 2는 광학우적계와 연직강우레이더에 의해 관측된 강우율과 레이더 반사도, 평균입자직경의 시계열을 나타낸 것으로, 지상에서 관측하는 광학우적계와 비교하기 위해 연직강우레이더에서 관측한 가장 낮은 높이인 200 m의 관측값과 비교하였다. 측정 고도와 샘플링 볼륨의 차이가 있음에도, Figs. 2d-f의 상관분석에서 상관계수가 강우율은 0.96, 반사도는 0.98, 평균입자직경은 0.85로 두 장비는 높은 상관관계를 보였고, 시계열에서 파라미터 사이의 변화경향은 매우 유사하였다. 한편, 1420 UTC의

평균입자직경은 30 mm h^{-1} 이상의 높은 강우율을 기록한 1630 UTC와 1920 UTC보다 $0.3\sim 0.8 \text{ mm}$ 정도 더 크게 산출되었는데, 이는 1630 UTC와 1920 UTC에 작은 강우입자가 더 많이 존재한다는 것을 의미하여, 상대적으로 강한 상승기류의 영향으로 보인다. 또한, 강우율과 반사도, 평균입자직경 사이의 상관성 분석을 실시하였으며, Fig. 3은 레이더 반사도 인자(Z)와 강우율(R)의 산포도 및 관계식을 나타낸 것으로, 0.1 mm h^{-1} 이하의 강우에 대해서는 나타내지 않았다. 두 장비의 Z - R 관계식은, 광학우적계가 $Z = 160.8 R^{1.6}$, 연직강우레이더가 $Z = 176.6 R^{1.5}$ 로 서로 근사하였고, Fig. 1과 Fig. 2에서 보았듯이 강우율과 레이더 반사도 인자는 비례 관계를 보였다. Figure 4는 강우율(R)과 평균입자직경(D_m)의 산포도와 관계식을 나타낸 것으로, 30 mm h^{-1} 이상의 강우에 대해서는 나타내지 않았다. 전반적으로 두 관측자료 모두 강우율과 평균입자직경 사이에서 비례 관계를 보이고, 광학우적계는 $D_m = 1.11 R^{0.12}$, 연직강우레이더는 $D_m = 1.24 R^{0.09}$ 로 R - D_m 관계식 또한 서로 근사하여, 두 장비는 잘 일치하고 있음을 보였다.

Figure 5는 Peters *et al.*(2005)와 차주완 등(2010)이 사용한 강우강도분류 기준에 따라 산출한 강우입자의 크기에 따른 수농도 분포를 비교한 것이다; Category 1: $R(\text{rain rate}) < 0.5 \text{ mm h}^{-1}$, Category 2: $0.5 < R < 4.0 \text{ mm h}^{-1}$, Category 3: $R > 4.0 \text{ mm h}^{-1}$. 그림에서 0.5 mm 이하의 강우입자크기에 대해서는 나타내지 않았다. 연직강우레이더와 광학우적계는 시공간적인 차이와 관

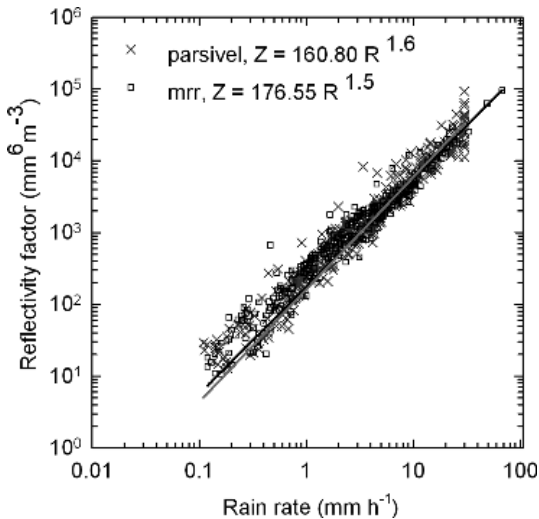


Fig. 3. Scatter plot of the rain rate and the reflectivity factor by MRR (the symbol “□”) and PARSIVEL (the symbol “×”).

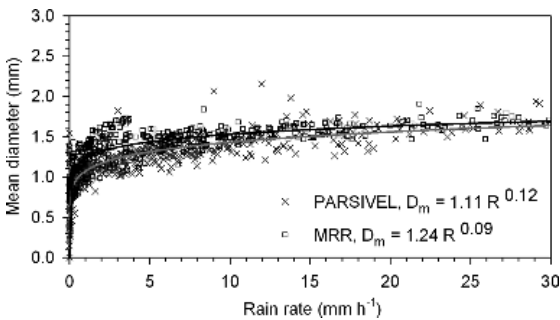


Fig. 4. Scatter plot between rain rate and mean diameter from MRR (the symbol “□”) and PARSIVEL (the symbol “×”).

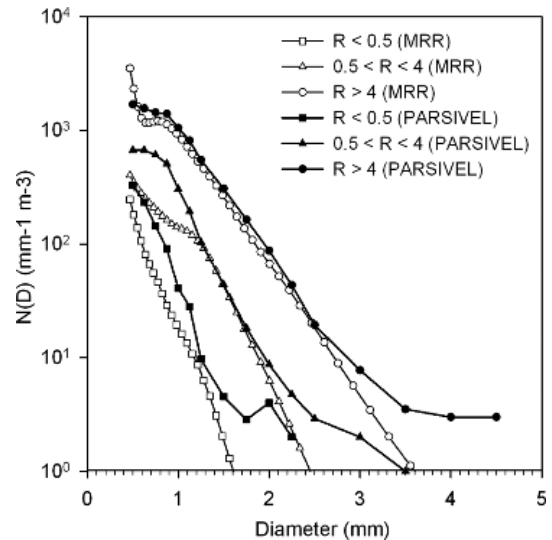


Fig. 5. Comparison of mean raindrop size distribution measured by MRR and PARSIVEL according to three ranges of rain rate.

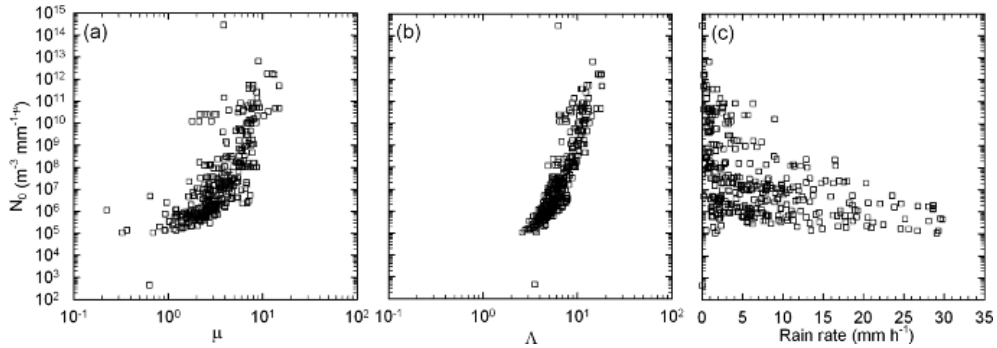


Fig. 6. Scatter plots of the intercept parameter (N_0) and (a) shape (μ), (b) slope (Λ) parameter, (c) rain rate by PARSIVEL.

측방법의 차이가 있음에도 모든 강우 카테고리에 대하여 비교적 비슷한 강우입자 크기분포의 형태를 보였으며, 강우강도가 4 mm h^{-1} 이상인 Category 3에서 가장 비슷한 강우입자 크기분포의 형태를 보였고, 가장 작은 강우강도인 Category 1에서 상대적으로 큰 차이를 보였다. 또한 연직강우레이더의 4~5 mm 강우입자 크기의 수농도는 광학우적계보다 적는데, 이는 입자가 큰 강우인 경우 연직강우레이더의 전파감쇠 영향이나 고도별 관측오차 중의 하나인 상승류 효과일 수 있다(차주완 등, 2010). 강우입자 크기분포는 강우강도가 클수록 기울기가 완만해졌으며, 즉 강우입자 크기의 분포가 넓어졌으며, Eq. (6)에 의해 계산된 강우 카테고리별 평균입자직경은 광학우적계가 0.14, 0.45, 0.60, 연직강우레이더가 0.20, 0.43, 0.73으로 강우강도가 클수록 커졌다. 또한, 강우입자 크기분포를 구성하는 모양(μ), 인터셉트(N_0), 기울기(Λ) 파라미터에 대해 상관성 분석을 실시하였으며, 연직강우레이더와 광학우적계는 비슷한 결과를 보였기 때문에 이 논문에는 광학우적계의 결과만 나타냈다. Figures 6a와 6b는 인터셉트 파라미터에 대한 모양과 기울기 파라미터의 산포도를 나타낸 것으로, 각 파라미터 사이에는 비례 관계를 보였으며 인터셉트와 기울기 파라미터 사이에서 더 뚜렷하였다. 반면, 인터셉트 파라미터와 강우율 사이에는 반비례의 관계를 보였다(Fig. 6c). 따라서 모양, 인터셉트, 기울기 파라미터는 강우율과 반사도, 평균입자직경과 전반적으로 반비례한 관

계를 나타낸다.

3.2 반사도에 따른 특성 분석

본 연구에서는 강우유형에 따른 특성을 분석하기 위하여, 반사도를 기준으로 다음의 세 구간(대류형, 중립, 층운형)으로 분류하여 비교분석 하였다; Category 1: $Z(\text{reflectivity}) > 40 \text{ dBZ}$, Category 2: $30 < Z < 40 \text{ dBZ}$, Category 3: $Z < 30 \text{ dBZ}$. Table 2는 반사도 카테고리별 평균 강우율(Mean R)과 평균 반사도(Mean Z)를 나타낸 것으로, 두 장비는 Category 1 구간을 제외한 평균 강우율과 전 구간의 평균 반사도에서 비슷한 수치를 보였다. 평균 강우율에서, Category 1과 Category 3 구간은 강우율의 차이가 뚜렷하였고, 중립 구간 Category 2의 강우율은 총 분석시간의 평균강우율과 비슷하였다. Figure 7은 200 m 자료를 기준으로 구분한 반사도 카테고리에 따른 연직강우레이더의 반사도와 낙하속도의 연직 프로파일이다. Category 3 구간에서는 약 4.5~5.2 km AGL에서 밝은띠(bright band)가 관측되었고, 융해고도(melting layer) 아래 5.2 km AGL에서 낙하속도의 급격한 증가가 나타났다. 이는 층운형 강우의 전형적인 특징으로, 얼음입자들이 융해고도 가까이에서 녹기 시작함과 동시에 그 크기가 병합과정을 통해 급속히 커지기 시작하면서 낙하속도의 분포도 넓게 증가하기 때문이다(국립기상연구소, 2010). 이와 대조적으로 Category 1 구간에서는 밝은 띠가 관측되지 않았고, 융해고도 아래 낙하속도가 급

Table 2. The statistical properties of Mean R, Mean Z from MRR and PARSIVEL.

PARSIVEL	Entire Period	Category 1 ($Z > 40 \text{ dBZ}$)	Category 2 ($30 < Z < 40$)	Category 3 ($Z < 30 \text{ dBZ}$)
Mean R	5.8	22.5	6.6	1.2
Mean Z	27.7	42.9	34.5	22.8
MRR	Entire Period	Category 1 ($Z > 40 \text{ dBZ}$)	Category 2 ($30 < Z < 40$)	Category 3 ($Z < 30 \text{ dBZ}$)
Mean R	8.2	31.2	7.3	1.1
Mean Z	28.1	43.3	34.6	21.8

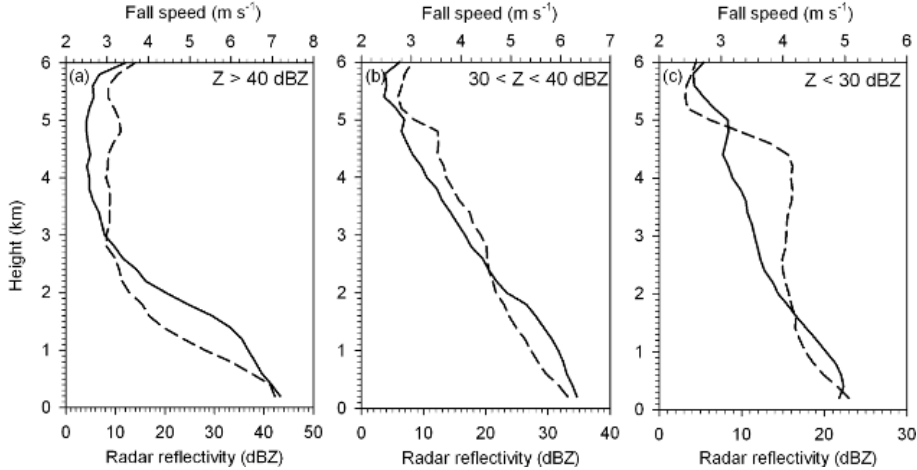


Fig. 7. Mean vertical properties of radar reflectivity (solid line) and fall speed (dashed line) by MRR.

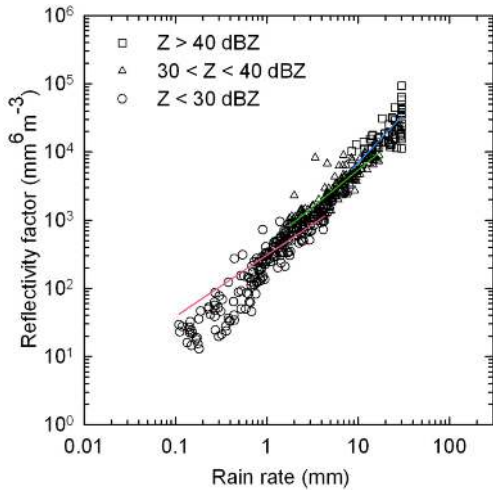


Fig. 8. Scatter plot between rain rate and reflectivity factor from PARSIVEL.

격하게 증가하는 부분이 존재하지 않았으며, Category 2 구간은 Category 1 구간의 특성과 비슷하였다. 따라서 Table 2와 Fig. 7의 분석에 따라 Category 1과 Category 3은 각각 대류형 강우와 층운형 강우로 볼 수 있다.

또한, 연직강우레이더와 광학우적계의 자료를 이용하여 반사도 카테고리별 강우 파라미터 사이의 상관성 분석을 실시하였으며, 유사한 결과를 보였기 때문에 이 논문에는 광학우적계의 결과만 나타냈다. Figure 8은 카테고리별 강우율과 반사도 인자의 산포도 및 관계식으로, Z-R 관계식에서 Category 1은 $Z = 260.21 R^{1.52}$, Category 2는 $Z = 437.75 R^{1.11}$, Category

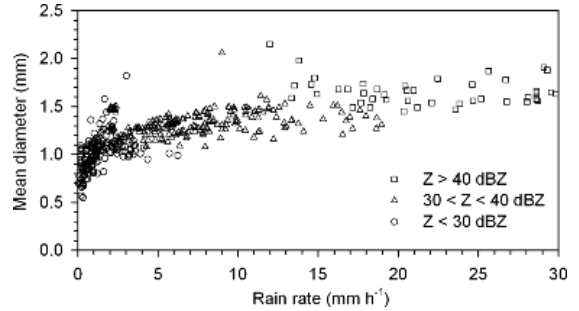


Fig. 9. Scatter plot between rain rate and mean diameter from PARSIVEL.

3은 $Z = 305.43 R^{1.05}$ 로 반사도가 클수록 기울기가 컸고, 계수는 Category 2에서 가장 높게 나타났다. 카테고리별 강우율과 평균입자직경의 산포도에서는, 전반적으로 반사도가 클수록 강우율이 높고 큰 강우입자가 많이 분포하였으며, 반사도가 작을수록 강우율과 평균입자직경의 비례관계가 뚜렷함을 보였다(Fig. 9). Figure 10은 강우입자 크기분포의 모양, 인터셉트 파라미터, 그리고 평균입자직경의 상관성을 분석한 것으로, 전반적으로 반사도가 클수록 평균입자직경이 크고 인터셉트 파라미터는 작아졌으며, 반사도가 작아질수록 인터셉트 파라미터는 넓은 분포를 보였다(Fig. 10a). 또한 강우입자 크기분포의 모양과 인터셉트 파라미터는 반사도가 클수록 좁은 분포의 비례관계를 보였다(Fig. 10b).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 연직강우레이더와 광학우적계의 관

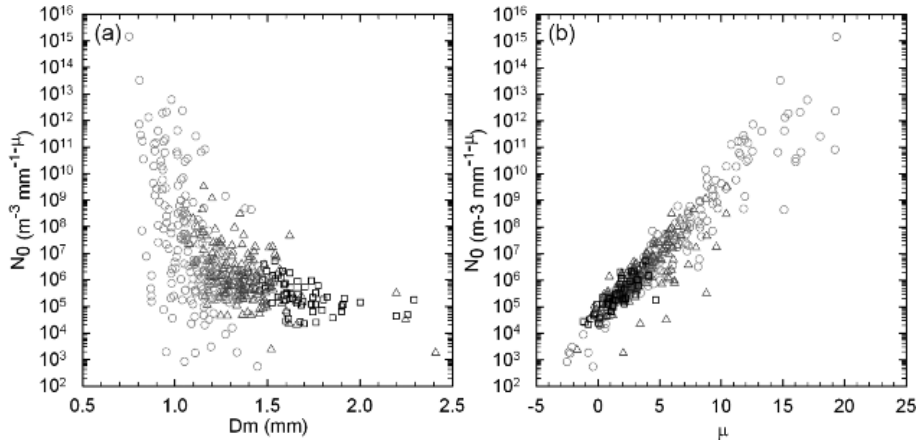


Fig. 10. Scatter plots of the N_0 and (a) the mean diameter, (b) μ by PARSIVEL. Squares denote category 1, triangles denote category 2, and circles denote category 3.

측자료를 이용하여 7월 10일 1300 UTC부터 2100 UTC까지 8시간의 기간에 대하여 시계열 및 강우 파라미터 사이의 상관성 분석을 실시하고, 그 특성을 알아보았다. 7월 10일 사례는 시간-고도면에서 1700 UTC부터 1810 UTC까지 4.5 km AGL 부근의 약한 밝은띠 (bright band)와 함께 그 아래 7.0 m s^{-1} 가 넘는 높은 낙하속도가 관측되어 상대적으로 강한 하강기류가 존재하였고, 1600 UTC부터 1700 UTC까지와 1820 UTC부터 1940 UTC까지는 강한 상승기류가 존재하였다.

시계열과 파라미터 사이의 상관성 분석에서, 측정 고도와 샘플링 볼륨의 차이가 있음에도 연직강우레이더와 광학우적계는 대체로 일치함을 보였다. 강우율은 반사도에 비례하였으며, 특히 상승기류 구간에서 뚜렷하였다. 강우율은 평균입자직경과도 비례하였으며, 높은 강우율을 기록한 1630 UTC와 1920 UTC에서 작은 강우입자가 더 많이 존재하였는데, 이는 상대적으로 강한 상승기류의 영향인 것으로 보인다. 강우강도에 따른 강우입자 크기분포(RSD) 분석에서는 강우강도가 클수록, 강우입자 크기의 분포가 넓어지고 평균입자직경이 커짐을 보였다. 강우입자 크기분포를 구성하는 모양(μ), 인터셉트(N_0), 그리고 기울기(Λ) 파라미터는 서로 뚜렷한 비례관계가 존재한 반면, 강우율, 반사도, 평균입자직경과는 반비례의 관계를 보였다.

또한, 강우유형에 따른 강우의 특성을 비교하기 위하여, 반사도를 기준으로 세 구간으로 분류하였으며, 평균 강우율과 평균 반사도의 수치, 연직강우레이더 관측자료의 연직 프로파일을 통해 각 구간을 대류형, 중립, 층운형 강우로 볼 수 있음을 확인하였다. 카테고리별 파라미터 사이의 상관성 분석에서, 전반적으로 반사도가 클수록 강우율이 높고 큰 강우입자가 많

이 분포하였으며, Z-R 관계식의 지수가 높게 나타났다. 이와 반대로 강우입자 크기분포의 모양, 인터셉트, 기울기 파라미터는 반사도가 작을수록 컸으며, 넓은 분포를 보였다.

이처럼, 이번 보성 지역에 내린 강우사례에 대한 파라미터의 시계열 및 상관성 분석을 통해 전반적인 강우 파라미터의 특성에 대해 파악할 수 있었다. 여러 지역에서 발생하는 강우 사례들에 대하여 지속적으로 분석하고 다양한 오차요소들에 대해 고려한다면, 향후 구름 및 강우의 미세물리 과정을 이해하는데 있어 많은 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 주요사업 ‘예보기술지원 및 활용연구(NIMR-2012-B-1)’의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Atlas, D., R. C. Srivastava, and R. S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **11**, 1-35.
- _____, C. W. Ulbrich, F. D. Marks Jr., E. Amitai, and C. R. Williams, 1999: Systematic variation of drop size and radar-rainfall relations. *J. Geophys. Res.*, **104**, 6155-6169.
- Austin, A. M., 1987: Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1053-1070.
- Cha, J.-W., K.-H. Chang, S.-N. Oh, Y.-J. Choi, J.-Y. Jeong, J.-W. Jung, H.-Y. Yang, J.-Y. Bae, and S.-Y. Kang,

- 2010: Analysis of observational cases measured by MRR and PARSIVEL disdrometer for understanding the physical characteristics of precipitation. *Atmos.*, **20**, 37-47.
- Choi, D.-Y., J.-Y. Sung, J.-H. Yun, and S.-K. Noh, 2010: Rainfall intensity distribution by time rate in Korea. *Proceedings of the 2010 KIIT Summer Conference*, Korean Institute of Information Technology, 111-114.
- Chu, Y. H., and C. L. Su, 2008: An investigation of the slope-shape relation for gamma raindrop size distribution. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 2531-2544.
- Fujiwara, M., 1965: Raindrop-size distribution from individual storms. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 585-591.
- Joss, J., and A. Waldvogel, 1970: A method to improve the accuracy of radar measured amounts of precipitation. *Proc. 14th Conf. on Radar Meteorology*, Tucson, AZ, Amer. Meteor. Soc., 237-238.
- Lee, G. W., and I. Zawadzki, 2005: Time-scale dependence of the variability and its effects on rain estimation. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 241-255.
- Lee, C. K., G. W. Lee, and K. E. Kim, 2007: Variability of the rain drop size distributions within a storm. *Korean Meteor. Soc.*, **43**, 1-16.
- Marshall, J. S., and W. Mck. Palmer, 1948. The distribution of raindrop size. *J. Atmos. Sci.*, **5**, 165-166.
- McGaughey, G., E. J. Zipser, R. W. Spencer, and R. E. Hood, 1996: High-resolution passive microwave observations of convective systems over the tropical pacific ocean. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1921-1947.
- McKague, D., K. F. Evans, and S. K. Avery, 1998: Assessment of the effects of drop size distribution variations retrieved from UHF radar on passive microwave remote sensing of precipitation. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 155-165.
- National Institute of Meteorological Research, 2010: Development and application of technology for weather forecast (II), 67-79.
- Peters, G., B. Fischer, M. Clemens, and A. Wagner, 2005: Profiles of raindrop size distribution as retrieved by micro rain radars. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 1930-1949.
- Steiner, M., R. A. Houze Jr., and S. E. Yuter, 1995: Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gage data. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1978-2007.
- Tokay, A., and D. Short, 1996: Evidence from Tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 355-371.
- Uijlenhoet, R., M. Steiner, and J. A. Smith, 2003: Variability of raindrop size distribution in a squall line and implications for radar rainfall estimation. *J. Hydrometeorol.*, **4**, 43-61
- _____, and D. S. Torres, 2006: Measurement and parameterization of rainfall microstructure. *J. Hydrol.*, **328**, 1-390.
- Viltard, A., J. Oubt. de F. de Felice, and H. Laurent, 1998: Rainfall and 6-9 day wave-like disturbance in west-africa during summer 1989. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **66**, 229-234.
- Williams, C. R., and K. S. Gage, 2009: Raindrop size distribution variability estimated using ensemble statistics. *Ann. Geophys.*, **27**, 555-567.
- Zhao, G., R. Chu, T. Zhang, J. Li, J. Shen, and Z. Wu, 2011: Improving the rainfall rate estimation in the midstream of the Heihe River Basin using raindrop size distribution. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**, 943-951.