

ORIGINAL ARTICLE

2DVD와 Parsivel 이용한 김해지역 강수사례일의 종관기상학적 분류 및 강수 특성 분석

천은지 · 박종길¹⁾ · 정우식^{2)*}

부산지방기상청, ¹⁾인제대학교 환경공학과/대기환경정보연구센터,

²⁾인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

Synoptic Meteorological Classification and Analysis of Precipitation Characteristics in Gimhae Region Using 2DVD and Parsivel

Eun-Ji Cheon, Jong-Kil Park¹⁾, Woo-Sik Jung^{2)*}

Busan Regional Office of Meteorology, Busan 47808, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea

²⁾Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea

Abstract

During the research period, error analysis of the amount of daily precipitation was performed with data obtained from 2DVD, Parsivel, and AWS, and from the results, 79 days were selected as research days. According to the results of a synoptic meteorological analysis, these days were classified into 'LP type, CF type, HE type, and TY type'. The dates showing the maximum daily precipitation amount and precipitation intensity were 'HE type and CF type', which were found to be attributed to atmospheric instability causing strong ascending flow, and leading to strong precipitation events. Of the 79 days, most days were found to be of the LP type. On July 27, 2011 the daily precipitation amount in the Korean Peninsula reached over 80 mm (HE type). The leading edge of the Northern Pacific high pressure was located over the Korean Peninsula with unstable atmospheric conditions and inflow of air with high temperature and high humidity caused ascending flow, 120 mm/h with an average precipitation intensity of over 9.57 mm/h. Considering these characteristics, precipitation in these sample dates could be classified into the convective rain type. The results of a precipitation scale distribution analysis showed that most precipitation were between 0.4-5.0 mm, and 'Rain' size precipitation was observed in most areas. On July 9, 2011, the daily precipitation amount was recorded to be over 80 mm (CF type) at the rainy season front (Jangma front) spreading across the middle Korean Peninsular. Inflow of air with high temperature and high humidity created unstable atmospheric conditions under which strong ascending air currents formed and led to convective rain type precipitation.

Key words : Precipitation, 2DVD, Parsivel, Synoptic pattern

Received 28 October, 2016; Revised 14 November, 2016;

Accepted 16 November, 2016

*Corresponding author: Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea

Phone : +82-55-320-3932

E-mail : wsjung1@inje.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

1. 서론

최근에 전 세계적으로 많은 우려와 걱정을 야기하고 있는 현재의 기후변화는 과거부터 연속되어온 자연환경의 순응적 변화과정에 적응해온 인류와 그 외 많은 동식물계에 큰 위협을 야기하고 있다. 이러한 위협은 인간생활 전반에 걸쳐 지속적이고 꾸준히 영향을 미치고 있으나, 직접적으로는 매일 노출되고 있는 대기라는 공간에서의 변화가 앞으로의 인류생존에 중요한 대상이 되고 있다. 기후변화와 연관된 이상기후는 여러 측면에서 나타나고 있지만, 그 중에서도 지구 온난화에 의한 기온상승과 더불어 대기 중에 존재하는 수분에 의한 강수현상에 있어서의 큰 변화는 앞으로 많은 관심을 필요로 하고 있다. 1970년부터 2009년까지 한반도에서의 강수현상은 횡수의 감소, 강수강도의 강화가 특징적인 현상으로 나타나는데, 이것은 짧은 시간에 많은 양의 강수가 한꺼번에 내리는 집중호우의 발생 가능성과 연관이 있다.

대부분의 집중호우는 대류성 강수 구름에 의해 발생되는데, 이들 구름 속에 포함된 강수입자의 크기분포(Drop Size Distribution 이하 DSD)나 강수강도 등의 정보를 이용하면 강수의 정성적인 특성 분석 뿐만 아니라 정량적 강수량 예측모델 개발에 유용하게 활용할 수 있다(Viltard et al., 1996; Mckague et al., 1998). 기상레이더센터(Weather Radar Center, WRC, 2014)의 보고에 따르면, 층상형, 대류형, 혼합형 강수 운에 따른 강수입자수 분포를 분석한 결과, 한반도에서의 강수입자수 분포는 강수 유형, 강도 등의 강수시스템에 따라 그 분포가 다르며, 작은 입자($D < 1$ mm) 부근에서 입자수가 최고점을 나타내는 특징이 있다고 밝힌 바 있다. 최근에는 기상 레이더 자료를 이용하여 강수의 물리적 특성을 분석하고 있는데, 여러 장점에 도 불구하고 부분적으로, 강수의 후방산란으로 인해 자료에 관측 오차가 나타날 수 있는 문제점이 있다. 그러나 이러한 레이더 자료를 보정하기 위해 강수의 산란 및 미세물리 특성을 반영할 수 있는 지상우량계인 2 Dimensional Video Distrometer (2차원 광학우량계, 이하 2DVD)가 이용되고 있다(Schonhuber and Baptista, 1997; WRC, 2014).

따라서 본 연구에서는 이러한 장점이 있는 2DVD

를 비롯한 관측장비에서 생산된 강수자료를 이용하여 강수 사례일을 종관기상학적으로 분류하고 유형별로 강수의 특성에 대한 상세한 분석을 수행하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 관측 개요

본 연구에서는 강수 발생시 강수량 및 강수의 물리적 성상을 측정하기 위해 2DVD, Parsivel, AWS (Automatic Weather System, 이하 AWS)를 김해시 어방동 인제대학교 창조관 옥상($35^{\circ}14'55.0''N$, $128^{\circ}54'13.8''E$)에 있는 관측노장에 설치하였다. 이 지역은 주변에 높은 건물이나 지형이 형성되어 있지 않아 주위 지형 및 높은 건물에 의한 미기상학적 기류 변화 가능성이 높지 않은 관측에 적합한 장소이다. AWS와 2DVD는 2011년 6월, 그리고 Parsivel은 2013년 1월에 설치하였다. 본 연구에서는 이들 장비가 각각 설치된 시점부터 2014년 12월까지의 관측자료를 이용하여 연구를 수행하였다.

2.2. 관측 장비

본 연구에서 사용한 강수관측 장비인 2DVD(Fig. 1)와 Parsivel(Fig. 2)는 다음과 같다. 2DVD는 가장 최근에 개량된 compact 2DVD version으로 수평 및 수직 해상도가 각각 0.19 mm 보다 조밀한 장비이다. 이 장비는 2개의 조명장치와 2개의 라인스캔(line-scan) 카메라, Central Processing Unit (CPU), 전원 공급 장치 등으로 구성되어 있다. 2DVD의 중앙부분인 강수 측정 공간으로 강수가 통과하면 각각의 빔방울에 대한 정보가 측정된다. 즉, 2개의 조명에서 나오는 빛을 라인스캔 카메라가 지속적으로 받아들이다가 빔방울이 측정영역을 지날 경우 빔방울에 의해 빛이 가린 그림자를 라인스캔 카메라가 인식하여 이 그림자 부분을 기록하게 된다. 이후, 측정영역 내 빔방울이 순서대로 떨어지면 시간차마다 인식된 그림자들을 차례대로 조합하여 빔방울의 형상을 유추하고(Kruger and Krajewski, 2002), 이때 생성된 그림자로부터 입자의 직경(diameter), 부피, 낙하속도(fall velocity), 편평도(oblateness) 정보를 얻게 된다.

이와 더불어, 본 연구에서 사용된 광학우량계인

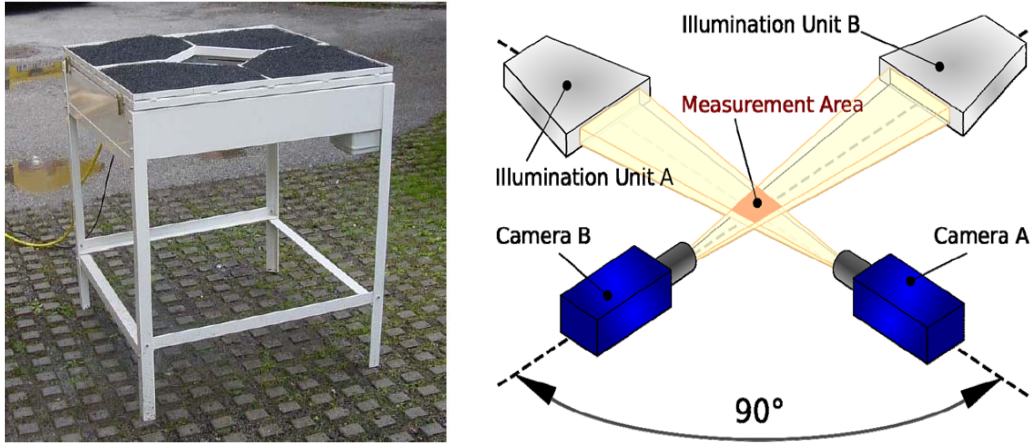
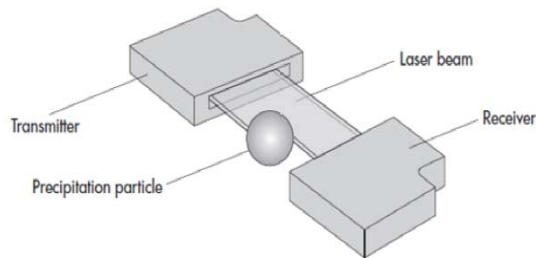


Fig. 1. 2D-Video distrometer.



Fig. 2. OTT parsivel.



Parsivel은 OTT사의 OTT Parsivel이며 2DVD와 마찬가지로 강수 강도, 강수 입자의 크기 및 낙하속도, DSD 등을 측정하는 장비이다. 이 장비는 레이저 방출기 및 수신기, 전력 공급 장치 등으로 구성되어 있으며 레이저 빔을 수평으로 발사한 경우, 레이저 빔 사이를 지나가는 강수 입자가 레이저 광의 세기를 감소시켜 강수 입자의 크기를 판단한다. 이에 비해 2DVD는 측정 영역 내를 통과하는 강수 입자의 형상과 라인스캔 카메라에 의해 인식된 그림자에 의해 입자의 물리적 특성을 판단하므로 두 장비의 측정 방식에 차이점은 있다. Parsivel의 경우 입자가 레이저빔 사이를 통과하는 시간을 계산하여 입자의 낙하속도를 측정한다.

Parsivel은 강수강도 정보를 이용하여 강수 유형을 Drizzle, Rain, Snow, Snow grains, Freezing rain, Hail 등을 $\pm 3\%$ 오차 범위내로 분류할 수 있다(Cha et al., 2010).

2.3. 유효자료 분석

2.3.1. 2DVD 유효자료 분석

일반적으로 2DVD에서 관측된 강수량은 AWS 관측 강수량과 10~20% 정도 차이가 나타난다(Hagen and Yuter, 2003; Tokay et al., 2003). 따라서 총 누적 강수량의 백분율 오차(percentage error)를 이용하여 그 차이가 20% 이내인 경우만 분석에 활용하였다.

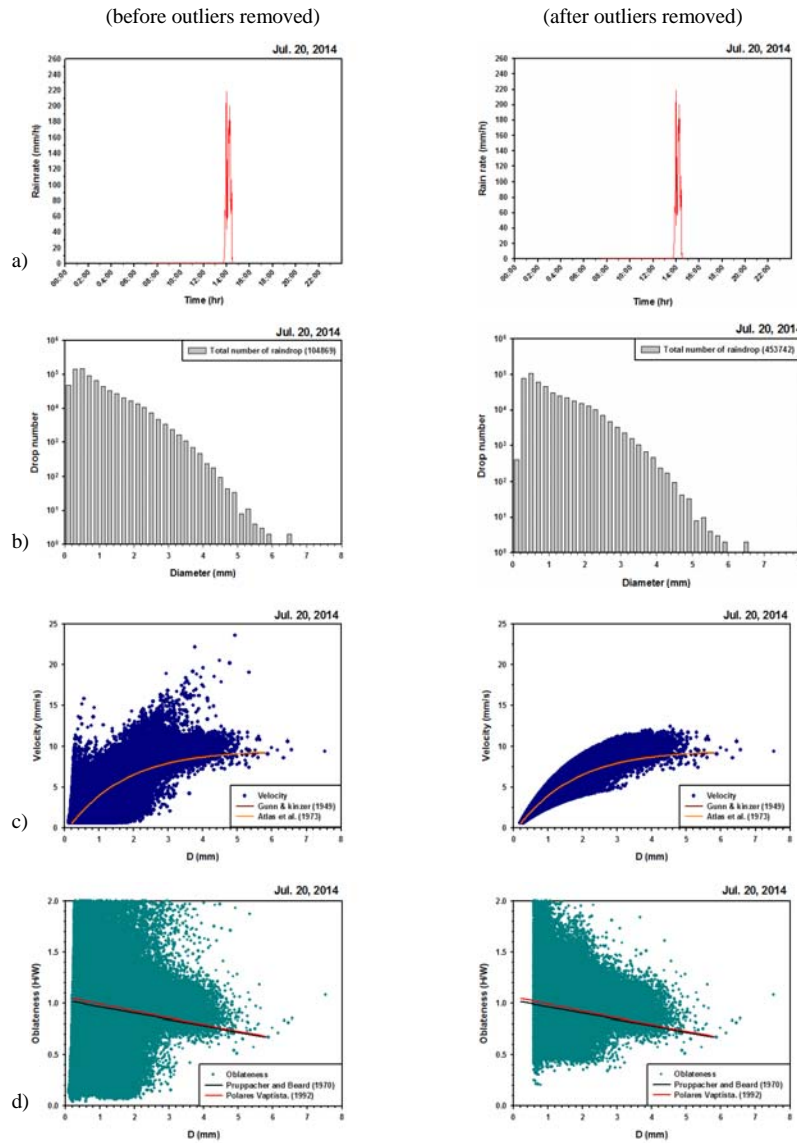


Fig. 3. Distribution of (a) rainrate, (b) a number of drops, (c) fall velocity, and (d) oblateness before and after more outliers removed.

이를 위해, 본 연구에서는 선정된 강수사례일의 2DVD 관측값에서 이상치를 제거하기 위해 Atlas et al. (1973)의 낙하속도 산출식을 이용하여 직경별 낙하속도를 구하고 이를 Kruger and Krajewski(2002)가 제시한 식을 이용하여 비정상 값들을 제거하였다. 이러한 과정을 통해 유효자료 분석을 수행한 결과, 약

10~34% 정도의 관측값이 제거되었으며, 총 입자 개수로 보면 평균 약 20%가 분석에서 제외되었다. Fig. 3은 일 총강수량이 67.62 mm 관측된 2014년 7월 20일에 대해서 유효자료 선별 분석을 수행하기 전과 후의 결과를 예시적으로 나타낸 것이다. 그림을 보면, 이상치를 제거하기 전에 비해 총 입자 개수 중 33.70%에

해당하는 자료가 제거되는 것을 알 수 있으며, 이 중에서도 0.2~0.4 mm의 직경을 지닌 입자수가 가장 많이 제거된 것을 알 수 있다. 이러한 과정을 통해 나머지 모든 사례일에 대해서도 동일한 분석을 수행하였다.

2.3.2. Parsivel 유효자료 분석

Parsivel에서 관측된 강수량도 2DVD와 마찬가지로 AWS의 강수량과 비교하여 일반적으로 10~20%의 차이를 나타낸다(Hagen and Yuter, 2003; Tokay et al., 2003). 따라서 총 누적강수량의 백분율 오차(percentage error)를 산정하여 20% 이내인 경우를 강수 사례일로 선정하였다. 이후, 강수사례에 관측된 Parsivel 자료 중에서 0.1 mm/h 미만의 매우 약한 강수자료를 제거하였으며(Jaffrain and Berne, 2011), 극단의 낙하속도(매우 빠르거나 매우 느린 낙하속도)로 인해 강수량 자료에 비이상적 정보가 포함되는 것을 방지하기 위해 Atlas et al.(1973)의 식을 사용한 여러 연구(Kruger and Krajewski, 2002; Thurai and Bringi, 2005)에서와 같이 Atlas et al.(1973)을 이용하여 낙하속도의 유효자료를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강수 사례의 종관기상유형과 통계적 특성

3.1.1. 강수 사례일

연구대상기간 동안 강수 사례일을 선정한 결과, 관측지점에 설치된 AWS와 2DVD, 두 장비에서만 강수가 관측된 날이 47일, AWS와 Parsivel 두 장비에서만 강수가 관측된 날이 103일, AWS, 2DVD, Parsivel 세 장비모두에서 강수가 관측된 날이 23일, 그리고 2DVD와 Parsivel 두 장비에서만 관측된 날이 6일로 나타나서, 연구대상기간동안 김해에서 강수가 관측된 날은 총 179일이었다. 이 사례일 중에서, AWS 강수량을 근거로 장비별 관측자료에 있어 백분율 오차가 적은 강수 사례일은 173일로 분석되었고, 이들 사례일의 강수자료에 대하여 유효자료 분석을 수행하면, 최종적으로, 연구기간동안 총 79일이 연구대상일로 선정되었다.

3.1.2. 종관기상유형 분류 및 특성

연구대상기간동안 선정된 총 79개의 강수사례일을 대상으로 종관기상학적 분석을 수행하면, 김해 지역에 발생한 강수일의 종관유형이 4가지로 분류된다. 이들은 각각 ‘저기압형(Low Pressure, LP 유형)’, ‘장마전선형(Changma Front, CF 유형)’, ‘고기압 가장자리형(High pressure Edge, HE 유형)’, ‘태풍형(Typhoon, TY 유형)’으로 나타낼 수 있다.

이 중에서, LP 유형은 전체 사례일에 있어서 가장 높은 빈도를 나타낸 유형으로, 총 31일이 이 유형에 해당된다. 이 유형에서의 강수 현상은 상승 기류에 의해 형성된 구름과 밀접한 관련이 있어, 해당일 당시의 대기불안정도에 따라 대류성 강수나 층상형 구름에 의한 강수, 그리고 이들의 혼합 형태에 의해 발생하는 강수를 동반하였으며, 화중지방(Central China)에 중심을 둔 저기압이 한반도를 통과하면서 김해지역에 강수를 나타낸 경우가 많았고, 다음으로 화남지방(South China)과 화북지방(North China)을 발원지로 하는 저기압에 해당하였다. 이 유형에 해당하는 총 31일의 강수성을 살펴보면, 일강수량은 1.64~37.12 mm로 나타나서 80 mm 이상 되는 호우가 발생한 사례일은 없었으나, 시간당 강수강도가 30 mm 이상인 사례일은 7일 발생했다. 분당 최대 강수강도는 1.85~73.12 mm/h로 나타났으며, 평균 강수강도는 0.11~3.34 mm/h로 나타났다. 30 mm/h 이상의 강한 강수강도가 나타난 7일은 사례일(31일)의 약 22.6%였지만, 나머지 24일에는 대부분 이보다 약한 강수강도를 보였다. 강수입자수를 보면 0.4~0.812 mm크기의 강수입자가 가장 많이 나타났으며, 최대 크기의 강수입자는 5.5 mm 이하로 나타나서, 대부분 ‘Rain’에 해당하는 크기의 강수가 나타났다. 이외에도 부분적으로 ‘drizzle’과 ‘hail’ 크기의 강수가 나타나기도 하였다(Table 1 참조).

두 번째로 높은 빈도를 나타낸 종관기상유형인 CF 유형은 총 26이 해당하였다. 이 유형은 북태평양 고기압과 오호츠크해 고기압이나 대륙 고기압에 의해 형성되는 정체전선으로 인해 강수가 나타나는데, 한 달 이상의 장기간 동안 많은 비와 강풍을 동반하며 가끔 집중호우와 폭풍을 유발하기도 한다. 이 유형에 해당

Table 1. Type of precipitation and diameter

Type	Diameter	Water conditions
Mist	0.005~0.05 mm	liquid
Drizzle	Less than 0.5 mm	liquid
Rain	0.5~5 mm	liquid
Sleet	0.5~5 mm	solid
Glaze	1 mm~ 2 cm	solid
Rime	(variety)	solid
Snow	1 mm~ 2 cm	solid
Hail	5 mm~ 10 cm or more	solid
Graupel	2~5 mm	solid

하는 사례일의 강수 특성을 살펴보면, 일강수량이 6.05~137.94 mm로 나타나서 LP 유형에 비해 강수량이 좀 더 많은 경향이 있었으며, 80 mm 이상의 호우는 2일 나타났다(2011 7월 9일에 137.93 mm, 2011년 6월 25일에 94.48 mm). 평균 강수강도는 0.26~6.29 mm/h, 분당 최대 강수강도는 3.83~99.95 mm/h로 나타났다으며, 30 mm/h를 초과하는 강수강도가 나타난 사례일은 12일(약 46%)이었다. 이 외에도 강수입자수가 가장 많이 나타난 크기는 0.4~1.2 mm이었으며, 최대 크기도 2.75~6.2 mm로 나타나서 LP 유형에 비해서 크기가 더 큰 'Rain'이 주로 나타났다. 이 유형에 해당하는 사례일의 강수특징을 보면, 전반적으로 강수량도 많고, 강수강도 또한 강하게 나타났다.

세 번째로 높은 빈도를 나타낸 HE 유형은 총 13일 나타났는데, 고기압이 한반도를 통과할 때 고기압 가장자리에 한반도가 위치하게 되면서 강수가 발생하는 경우가거나 북태평양 고기압의 확장이나 수축하는 과정에서 한반도가 고기압 가장자리에 놓이게 될 때 남쪽으로부터 다량의 온습한 공기가 유입되면서 강수가 발생하는 경우에 해당하였다(Lee, 1986). 이 유형에 해당하는 사례일의 강수 특성을 살펴보면, 일강수량이 2.93~150.28 mm로 나타났으며 80 mm 이상인 경우는 2011년 7월 27일 하루만 발생하였다. 이 유형에서는 앞의 두 유형에 비해 가장 많은 강수를 나타내는 특징이 있었으며, 최대 강수강도(2.42~219.08 mm/h), 평균 강수강도(0.26~61.51 mm/h)도 더 강하고 많은 경향을 보였다. 또한 30 mm/h를 초과하는 강수가 나

타난 사례일도 8일(61.5%) 나타나는 등, 가장 많은 강수량과 강수강도가 높게 나타난 유형이었다. 이 유형에서 이러한 특징이 나타난 것은 북태평양 고기압 가장자리에 한반도 및 김해지역이 위치해 고온 다습한 기류의 유입으로 대기는 매우 불안정하고 강한 상승 기류에 의해 형성된 대류성 강수에 의해 강수 강도는 높아져 많은 비가 내린 것으로 분석된다. 이 유형에서 강수입자수가 가장 많이 나타난 크기는 0.4~0.812 mm로 LP 유형과 유사한 경향을 보였으나, 최대 크기는 3.24~7.8 mm로 나타나 액체상태의 Rain과 고체상태의 Hail이 주요 강수 형태로 나타나서, 이 유형에서는 매우 강한 대기불안정에 의한 강한 상승기류의 영향으로 강수 크기가 큰 강수 현상이 많았던 것으로 분석된다.

마지막 네 번째 종관기상유형인 TY 유형은 총 9일 나타났는데, 태풍의 직접적인 영향에 의한 강수와 태풍이 열대성 저기압으로 약화된 이후에 김해지역에 강수를 내린 경우도 포함하였다. 이 유형은 중국의 화북, 화중, 화남에서 이동해 오는 저기압에 비해 고온 다습한 특징을 보이는 경우로 LP 유형과는 발원적 측면에서 특성이 다르다. 이들 사례일의 강수 특성을 살펴보면, 일강수량이 0.56~76.68 mm로, 태풍사례가 포함된 것을 고려해 본다면 비교적 적은 일강수량으로 볼 수 있는데, 이것은 태풍뿐만 아니라, 태풍이 한반도 남해연안에서 온대성 저기압으로 약화되거나, 태풍이 남해연안을 통과하여 일본 쪽으로 이동하는 경로를 보여 비교적 강수량이 적었던 것 사례가 포함

Table 2. Representative cases each synoptic weather types with daily precipitation at Gimhae, Korea

Synoptic weather type	Occurrence day	Daily precipitation(mm)
HE	Jul. 27, 2011	150.28
	Aug. 13, 2011	69.11
	Jul. 20, 2014	67.62
	Jul. 18, 2014	31.40
CF	Jul. 09, 2011	137.93
	Jun. 25, 2011	94.48
	Jul. 07, 2013	91.98
	Jun. 19, 2013	54.68
	Jul. 08, 2014	34.84
	Jul. 04, 2013	32.94
	Jul. 05, 2012	31.11
TY	Sep. 24, 2014	76.68
LP	Apr. 25, 2012	37.12

되었기 때문에 판단된다. 이 유형에서 최대 강수강도는 3.79~54.51 mm/h로 나타났으며, 평균 강수강도도 0.26~3.39 mm/h로 다른 유형에 비해 다소 약한 강수 특성을 나타내었다. 강수입자수가 가장 많이 나타난 크기는 0.4~1.375 mm이었으며, 최대 크기는 3.24~4.75 mm로 나타났다.

3.2. 일강수량이 80 mm 이상 나타난 호우 사례일 분석

일반적으로 호우(extreme heavy rainfall)란 시간당 강수량이 30 mm 이상이거나 일강수량이 80 mm 이상인 경우(Lee, 1986; Seoung, 2012)라고 정의하고 있는데, 최근 기후변화로 호우의 빈도가 증가하면서 기상청에서는 9.2~18.3 mm/h 이상이 6시간 또는 12시간 동안 예상될 경우 호우특보를 발령하고 있으므로, 종관기상유형별 선정된 강수 사례 가운데 일 총강수량이 80 mm 이상으로 나타난 호우 사례일을 대상으로 강수의 원인과 물리적 특성을 분석해 보고자 하였다.

Table 2는 종관유형별로 일강수량이 80 mm 이상으로 나타난 사례일을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이, 앞서 분석에서, 가장 많은 강수사례일에 해당하는 LP 유형과 가장 적은 강수사례의 종관유형인 TY 유형에는 일강수량 80 mm 이상의 호우사례일이 나타나지 않았다. 따라서 여기서는 80 mm 이상이 일강수량이 나타난 두 유형에서 각각 가장 많은 강수량

을 보인 2011년 7월 27일(HE 유형)과 2011년 7월 9일(CF 유형)에 대해서 분석을 수행하였다.

3.2.1. 2011년 7월 27일 사례 분석 (HE 유형)

2011년 7월 27일은 김해지역이 북태평양 고기압 가장자리의 위치한 사례일로서 150.28 mm의 일강수량이 나타났다. 이 시기의 종관기상학적 특성을 살펴보면, 강수사례일의 하루 전날인 2011년 7월 26일 1200 UTC의 지상일기도(Fig. 4a)를 보면, 중국지역의 저기압에 비해 북태평양 고기압이 한반도 방향인 서쪽으로 확장함에 따라 이 북태평양 고기압의 가장자리에 김해를 포함한 한반도가 위치하여 대기가 불안정하고 강한 상승기류가 발생하여 짧은 시간에 많은 강수를 일으킬 수 있는 조건을 보이고 있다. 또한 500 hPa 일기도(Fig. 4b)를 보더라도 한반도가, 중국 서쪽에 위치한 약한 기압골의 영향을 받고 있기는 하지만, 북태평양 고기압이 확장하면서 기압골을 북상시켜 한반도에는 고기압성 순환이 발달하여 온난 다습한 남서기류가 유입되는 상황임을 알 수 있다. 이와 더불어 850 hPa 고도에서의 습수분석(Fig. 4c)을 해 보면, 김해를 포함한 한반도 주변에 습기가 유입되고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 강수가 발생한 당일 0000 UTC의 지상 일기도를 보면(Fig. 4d), 북태평양 고기압이 더욱 확장하면서 한반도로 북상한 것을 알 수 있다.

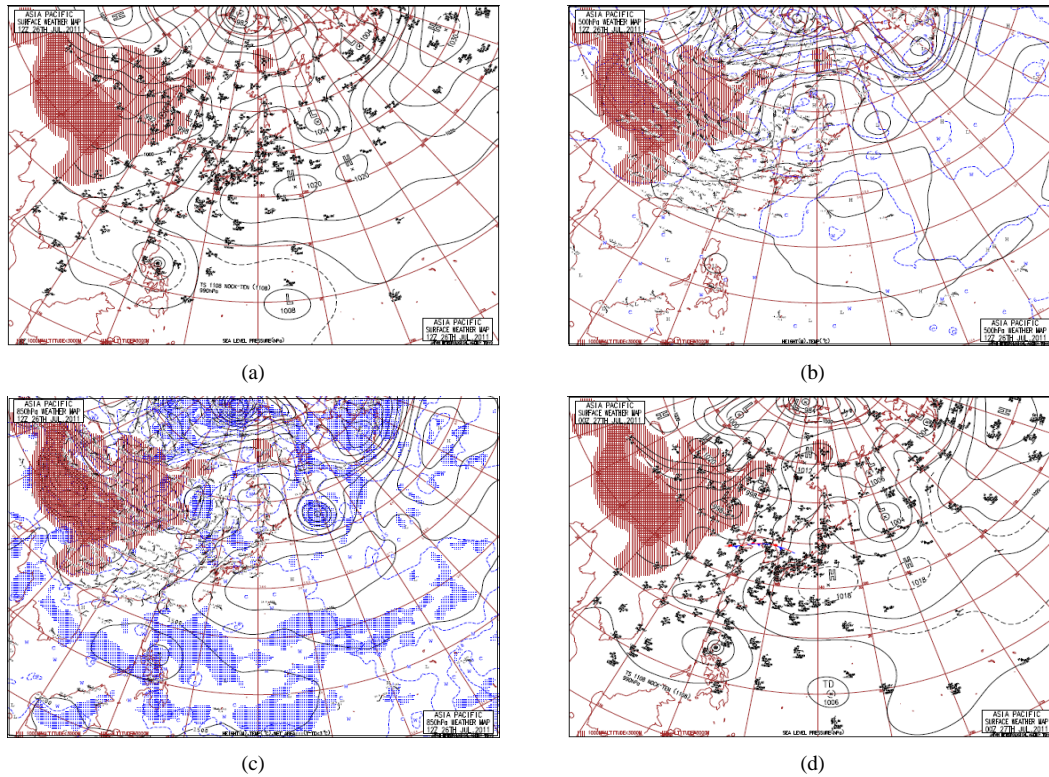


Fig. 4. Synoptic weather chart of (a) surface, (b) 500 hPa, (c) 850 hPa at 1200 UTC 26 July 2011, and (d) surface at 0000 UTC 27 July 2011 under the High pressure edge type.

이 날의 단열선도를 보면(Fig. 5), 대류성 강수의 발생 가능성을 나타내는 CAPE (Convective Available Potential Energy) 지수가 1200 UTC에 $1302 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 로 나타나 강력한 대류가 발생할 조건($1000 \sim 2000 \text{ m}^2/\text{s}^2$, Kim and Ham, 2009)이 형성되어 있음을 알 수 있었다. 이러한 분석결과를 통해, 2011년 7월 27일에 발생한 강수는 한반도가 북태평양 고기압 가장자리에 위치해 매우 불안정한 대기조건과 더불어 온난 다습한 습기유입으로 강한 상승기류가 발생하여 짧은 시간에 강한 강도의 강수가 나타난 것임을 알 수 있었다.

이와 더불어, 이날 강수의 물리적 특성을 살펴보기 위하여 강수량도와 강수입자수, 그리고 강수 입자별 낙하속도, 그리고 편평도를 분석하였다(Fig. 6). 그림에 나타난 바와 같이, 2011년 7월 27일에는, 시간당 120 mm 이상의 강한 강수가 3회 발생했으며(Fig. 6a), 분당 최대 강수를 나타낸 0556 LST에는 157.06 mm/h

의 매우 강한 강수현상이 나타났고, 평균 강수량도 역시 9.57 mm/h 로 강하게 나타났다.

Brangi et al.(2003)에 의하면 강수량도가 5 mm/h 이상이며 2분 간격의 연속되는 5개 강수입자의 강수량도 표준편차가 1.5 mm/h 보다 클 경우에 강수유형은 convective rain, 그렇지 않은 경우를 stratiform rain으로 구분하였는데, 이 날의 경우 표준편차가 1.5 mm/h 이상의 높은 값($SD=22.00 \text{ mm/h}$)을 나타내었으며, 강수량도가 최대를 나타낸 시간대를 보더라도 선행연구에서 제시한 convective rain의 조건을 충분히 만족하고 있어, 이 날 강수 사례는, 앞서 단열선도 분석 결과에서 설명한 바와 같이, 강력한 대류성 강수에 해당하는 것을 알 수 있었다. 이와 더불어, 7월 27일 0000 UTC 기상레이더 영상에서 김해지역 주변의 강수량도가 $7 \sim 10 \text{ mm/h}$ 로 나타나고 있는 것을 볼 때, 본 연구의 관측자료와 이들 관측자료로부터 분석한

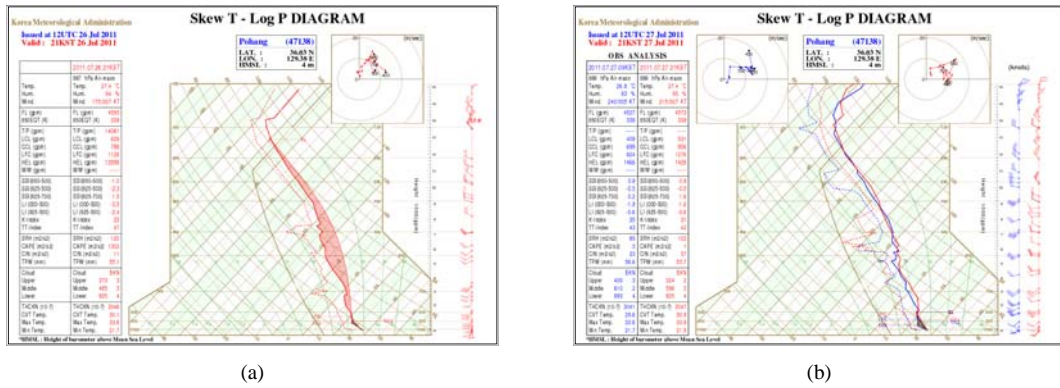


Fig. 5. Adiabatic chart of (a) 1200 UTC July 26 and (b) 0000 UTC July 27, 2011 at Pohang.

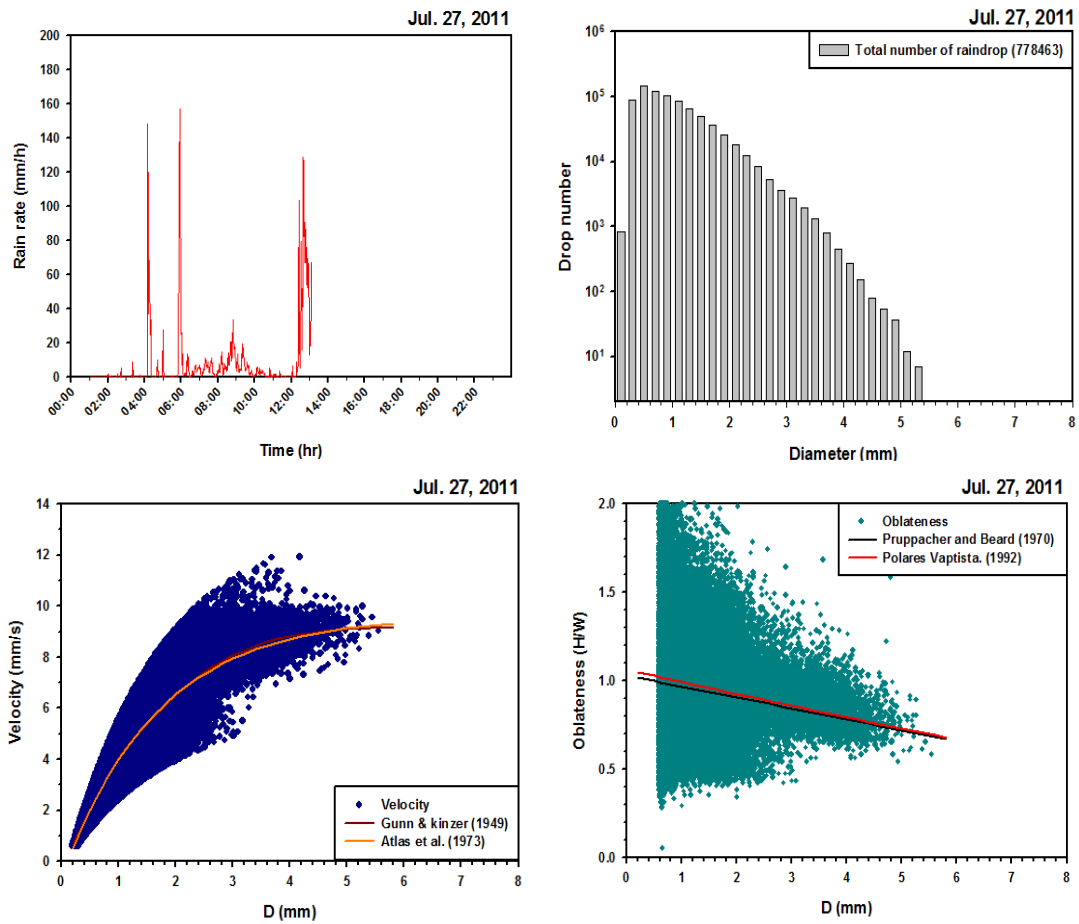


Fig. 6. The physical characteristics such as rainrate, drop number, drop fall velocity, and drop oblateness of precipitation observed at Gimhae in July 27, 2011.

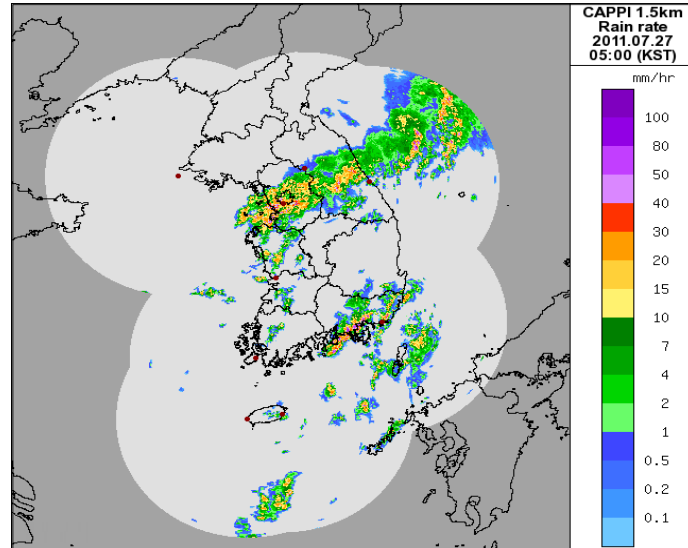


Fig. 7. Distribution of rainrate on the Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) of weather radar at 1900 UTC July 26 2011.

결과가 타당함을 알 수 있다(Fig. 7). 강수 입자 크기 분포를 보면(Fig. 6b), 최대 크기는 5.4 mm로 나타났으며, 가장 많은 입자수가 나타난 강수크기는 0.4~0.6 mm였고, 이 크기의 강수는 전체 강수 입자 수의 18.54%를 보였다. 두 번째로 많은 입자수가 나타난 크기는 0.6~0.8 mm(15.23%)였고, 다음으로 0.8~1.0 mm(13.3%)로 나타나 0.4~1.0 mm 범위에서 전체 강수의 47.07%가 나타났다. 또한 0.2~0.4 mm에 해당하는 'Drizzle' 크기의 강수(Table 1 참조)도 사례일 전체 강수의 11.39%로 나타났지만, 나머지 대부분의 강수는 1.0~5.0 mm 크기를 보여, 이 날 강수형태는 'Rain' 크기의 강수(Table 1 참조)가 대부분을 나타내었음을 알 수 있다.

Fig. 6c는 강수 크기별 낙하속도를 나타낸 것으로, Gunn and Kinzer(1949)와 Atlas et al.(1973)의 강수 크기별 낙하속도 경향과 높은 일치도를 보여, 강수 크기가 클수록 낙하속도가 증가하는 일반적인 경향을 잘 나타내고 있다. Fig. 6d는 강수 입자의 편평도를 나타낸 것으로, 아주 작은 크기의 강수는 측정 센서를 지나며 서로 부딪히거나 벽면에 부딪혀 잘게 쪼개져서 강수 입자의 크기 관측에 영향을 줄 수 있으므로 0.6

mm 보다 작은 강수 자료는 분석에서 제외하였다. 그림을 보면, 강수 크기가 클수록 편평도는 작아지는 Pruppacher and Beard(1970)와 Poirares(1992)의 표준식을 잘 따르고 있다.

3.2.2. 2011년 7월 9일 사례 분석 (CF 유형)

2011년 7월 9일에 발생한 강수는 한반도 중부지방에 걸쳐 있던 장마전선에 의해 김해를 포함한 한반도에 강수가 나타난 것으로 이 날 하루 동안 137.93 mm가 관측되었다. 이날의 종관기상학적 특성을 살펴보면, 강수현상이 있기 전인 2011년 7월 8일 1200 UTC의 지상일기도(Fig. 8a)를 보면, 한반도 남동쪽에 있는 북태평양 고기압이 한반도 남해상까지 확장해 있고 북만주에는 저기압이 위치하고 있다. 이러한 기압계 사이 영역으로 남서쪽에서 북동쪽으로 길게 장마전선이 한반도에 위치하고 있으며 점차 남하하면서 김해를 포함한 한반도 남동부 지역에 강수를 야기하고 있다. 500 hPa 일기도(Fig. 8b)를 보더라도, 한반도는 중국 서해안에 존재하는 약한 기압골의 영향 하에서 한반도에는 고기압성 순환이 발달해 있으며 40 kts 이상의 남서기류가 유입되고 있어 상승기류를 유발하고 이로 인해 강수가 발생한 것으로 분석할 수 있다.

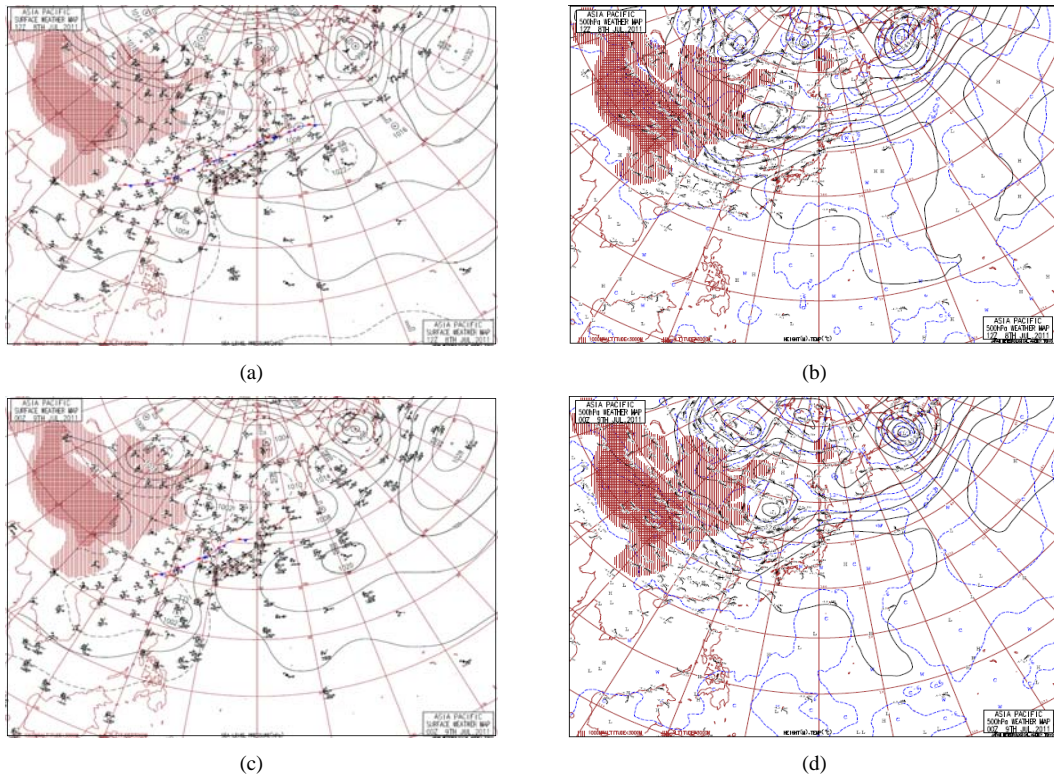


Fig. 8. Same as Fig. 4, except for July 9 2011 under the Changma front type.

단열선도를 보면(Fig. 9), 약 500 hPa까지 구름대가 존재하고 있고, 불안정 정도는 약하게 나타났으며 대류 가능성을 나타내는 CAPE 지수는 강수강도가 강하게 나타나는 시점 한 시간 전인 0000 UTC에 $1045 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 로 나타나 강한 대류성 강수의 발생 가능성을 확인할 수 있다. 또한, 평균 강수강도가 5.86 mm/h ($SD = 11.48 \text{ mm/h}$)였고 당시 기상레이더 영상(Fig. 11)에 나타난 것을 종합적으로 분석해 보면, 강수유형이 convective rain이었음을 알 수 있다. 1005 LST에 72.19 mm/h 로 최대 강수강도를 나타내었으나, 앞서 분석한 HE 유형 사례일인 2011년 7월 27일의 강수에 비해서는 다소 약한 경향을 보이는 조건이었다. Fig. 10b는 강수 크기별 입자수를 나타낸 것으로 최대 4.8 mm 크기의 강수가 관측되었으며, $0.6\sim 0.8 \text{ mm}$ 크기에 가장 많은 강수가 분포(18.88%)하였으며, 다음으로 $0.8\sim 1.0 \text{ mm}$ (17.33%)으로 나타났다. 전반적으로, $0.4\sim 1.2 \text{ mm}$ 크기에 전체 강수의 66.2%, $0.2\sim 1.4$

mm 크기에 전체 강수의 83.2%이 해당되어 이 날 관측된 대부분의 강수는 'Rain' 크기의 강수에 해당되었다. 강수 크기별 낙하속도를 보면(Fig. 10c), 앞서 분석한 HE 유형 사례일의 결과와 마찬가지로 Gunn and Kinzer(1949)와 Atlas et al.(1973)의 분포경향과 유사하게 나타나고 있으며, 강수 입자가 클수록 입자의 낙하속도가 커지는 것을 알 수 있다. 강수 입자의 편평도(Fig. 10d)에서도 앞에서 분석한 사례일과 마찬가지로 강수 크기가 커질수록 편평도는 작아지는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인제대학교 창조관 옥상의 관측노장에 설치한 2DVD와 Parsivel, 그리고 AWS 관측을 통해 김해지역에서 나타난 강수일의 종관기상학적 유형과 강수의 물리적 특성을 분석하고자 하였다. 연구

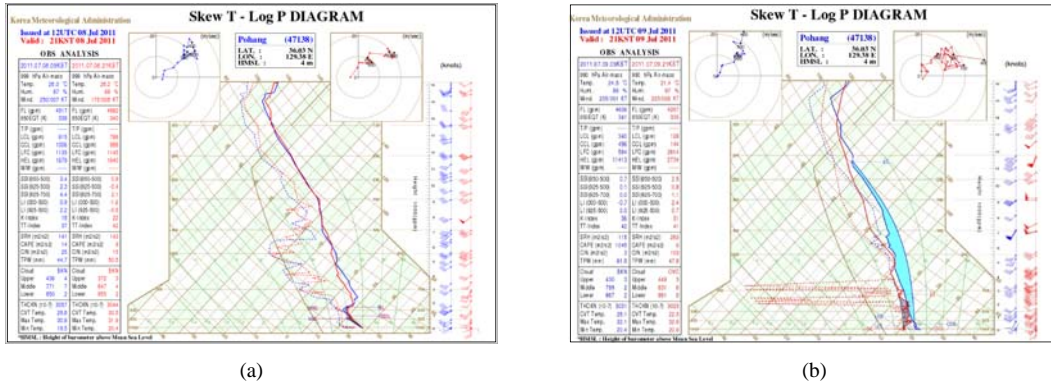


Fig. 9. Same as Fig. 5, except for July 9, 2011.

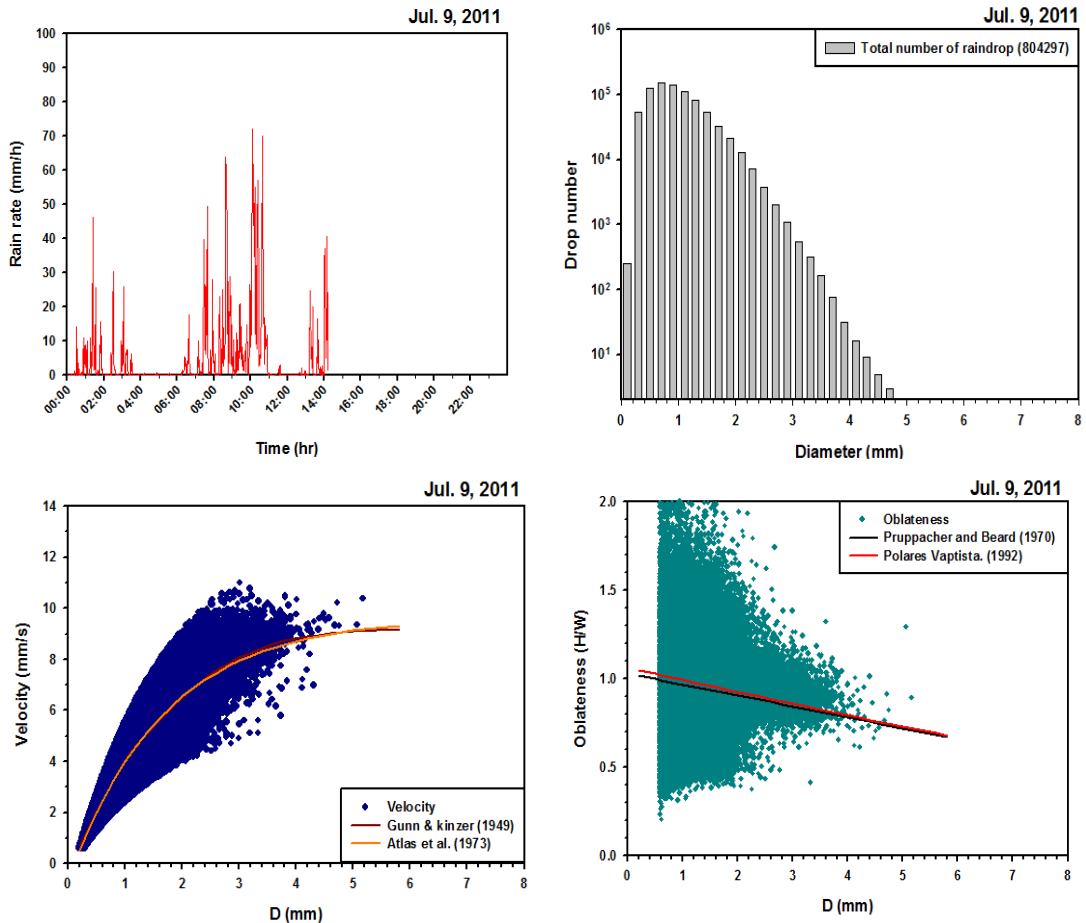


Fig. 10. Same as Fig. 6, except for July 9, 2011.

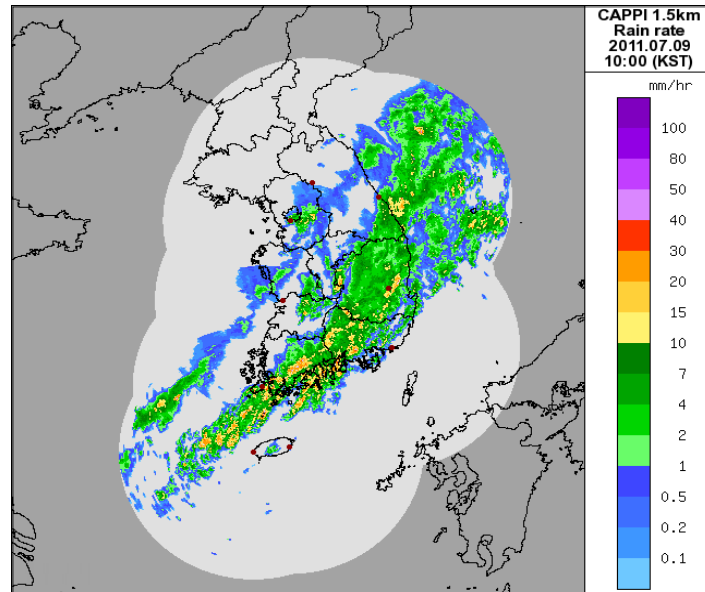


Fig. 11. Same as Fig. 7, except for July 9, 2011.

대상기간동안 각각의 관측장비와 AWS에서 관측된 자료 중에서 일 누적강수량에 대한 오차 분석을 수행한 결과 총 79일의 사례일이 선전되었다. 이들 사례일을 대상으로 중관기상분석을 수행한 결과, 저기압형 유형(LP 유형), 장마전선 유형(CF 유형), 고기압 가장자리 유형(HE 유형), 그리고 태풍 유형(TY 유형) 등, 4가지 유형으로 분류되었다. 이들 유형별 발생빈도를 살펴본 결과, 가장 많이 나타난 유형은 LP 유형이었으나, 가장 많은 일강수량과 분당 최대 강수강도가 나타난 사례일의 유형은 HE 유형이었으며, 그 다음으로 CF 유형에서 많은 일강수량과 분당 최대 강수강도가 나타났다. 이것은 대기불안정에 의한 강한 상승기류의 발생과 이로 인해 형성된 강수의 영향이었기 때문으로 분석되었다.

이와 더불어 중관기상유형별로 일강수량이 80 mm 이상인 호우사례일에 대한 분석을 수행한 결과, HE 유형의 사례일인 2011년 7월 27일에는 한반도가 북태평양 고기압 가장자리에 위치해 불안정한 대기조건과 고온다습한 공기의 유입으로 인한 상승기류의 영향으로 120 mm/h 이상의 강한 강수가 3회 이상 발생하였고, 평균 강수강도가 9.57 mm/h로 높게 나타나 convective rain 유형의 강수가 나타난 것으로 분석되

었다. 또한 강수 크기 분포를 분석한 결과, 대부분의 강수가 0.4~5.0 mm에 분포하여 'Rain' 크기의 강수가 주로 관측된 것을 알 수 있었다. CF 유형의 사례일인 2011년 7월 9일은 한반도의 중부지방에 걸쳐 있는 장마전선에 의해 고온다습한 공기가 유입되어 대기가 불안정해짐에 따라 강한 상승기류가 발생하여 convective rain 유형의 강수가 관측되었으며 강수입자수는 0.4~0.8 mm 크기에서 많이 분포하였다.

현재 연구에서는 일강수량이 80 mm를 초과하는 날을 연구대상으로 설정하여 분석대상일의 선정에 한계가 있었다. 따라서 일강수량 80 mm 이상의 사례일 외에도 시간당 30 mm를 초과하는 사례가 관측되는 사례일을 추가로 분석하여 본 연구에서 분류한 중관기상유형별 강수사례일의 상세한 특성 분석이 추가로 수행된다면 지역적 강수관련 연구에서 도움일 될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상산업지원 및 활용기술 개발 사업(KMIPA2015-8070)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Atlas, D., Srivastava, R. C., Sekhon, R. S., 1973, Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence, *Rev. of Geo.*, 11(1), 1-35.
- Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Hubbert, J., Gorgucci, E., Randeu, W. L., Schoenhuber, M., 2003, Raindrop size distribution in different climatic regimes from distrometer and dual-polarized radar analysis, *J. Atmos. Sci.*, 60, 354-365.
- Cha, J. W., Chang, K. H., Oh, S. N., 2010, Analysis of observational cases measured by MRR and Parsivel Distrometer for understanding the physical characteristics of precipitation, *J. Env. Sci.*, 20(1), 37-47.
- Gunn, R., Kinzer, G. D., 1949, The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *J. Meteo.*, 6(4), 243-248.
- Hagen, M., Yuter, S., 2003, Relations between radar reflectivity, liquid water content, and rainfall rate during the MAP SOP, *Quarterly J. Royal Meteo. Society*, 129(588), 477-493.
- Jaffrain, J., Berne, A., 2011, Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from Parsivel distrometers, *J. Hydro.*, 12(3), 352-370.
- Kim, Y. C., Ham, S. J., 2009, Heavy rainfall precipitation using convective instability index, *J. Korean soc. aero. operation*, 17(1), 17-23.
- Kruger, A., Krajewski, W. F., 2002, Two-dimensional video distrometer : A Description, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19(5), 602-617.
- Lee, B. S., 1986, Heavy rainfall, Gyohak press, 15-29.
- McKague, D., Evans, K. F., Avery, S. K., 1998, Assessment of the effects of drop size distribution variations retrieved from UHF radar on passive microwave remote sensing of precipitation, *J. App. Meteo.*, 37, 155-165.
- Poiaras, J. P. V., 1992, Proceedings of the 17th meeting of the olympus propagation experimenters, Stockholm, Helsinki, Minutes of Radar Working Group, 03-05.
- Pruppacher, H. R., Beard, K. V., 1970, A Wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air, *Quarterly J. Royal Meteo. Society*, 96(408), 247-256.
- Schoenhuber, M., Baptista, J. P., 1997, Weather radar versus 2D-video distrometer data, *Weather Radar Technology for Water Resources Management*, 159-171.
- Seong, I. C., 2012, Case study on torrential heavy rain and characteristics of hourly precipitation caused by sub-tropicalization, Master's Thesis, Inje University, Gimhae, Korea.
- Sheppard, B. E., Joe, P. I., 1994, Comparison of raindrop size distribution measurements by a Joss-Waldvogel distrometer, a PMS 2DG spectrometer, and a POSSS Doppler radar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 11(4), 874-887.
- Thurai, M., Bringi, V. N., 2005, Drop axis ratios from a 2D video distrometer, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 966-978.
- Tokay, A., Wolff, D. B., Wolff, K. R., 2003, Rain gauge and distrometer measurements during the keys area microphysics project(KAMP), *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20, 1460-1477.
- Viltard, A., Oubuih, J., de, F. P., 1998, Rainfall and 6-9day wave-like disturbance in west-africa during summer 1989, *Meteo. Atmos. physics*, 66, 229-234.
- Weather Radar Center (WRC), 2014, Analysis of precipitation drop size distribution characteristics that reflects the characteristics of rainfall in the Korean Peninsula, WRC, 1-52.