

ORIGINAL ARTICLE

2D-Video Distrometer를 이용한 강수의 물리적 특성에 관한 사례연구

박종길 · 천은지¹⁾ · 정우식^{1)*}

인제대학교 환경공학과/대기환경정보연구센터, ¹⁾인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

Case Study on the Physical Characteristics of Precipitation using 2D-Video Distrometer

Jong-Kil Park, Eun-Ji Cheon¹⁾, Woo-Sik Jung^{1)*}

Dept. of Environmental Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

¹⁾*Dept. of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

Abstract

This study analyze the synoptic meteorological cause of rainfall, rainfall intensity, drop size distribution(DSD), fall velocity and oblateness measured by the 2D-Video distrometer(2DVD) by comparing two cases which are heavy rainfall event case and a case that is not classified as heavy rainfall but having more than 30 mm h⁻¹ rainrate in July, 2014 at Gimhae region.

As a results; Over the high pressure edge area where strong upward motion exists, the convective rain type occurred and near the changma front, convective and frontal rainfall combined rain type occurred. Therefore, rainrate varies based on the synoptic meteorological condition. The most rain drop distribution appeared in the raindrops with diameters between 0.4 mm and 0.6 mm and large particles appeared for the convective rain type since strong upward motion provide favorable conditions for the drops to grow by colliding and merging so the drop size distribution varies based on the location or rainfall types.

The rainfall phases is mainly rain and as the diameter of the raindrop increase the fall velocity increase and oblateness decrease. The equation proposed based on the 2DVD tends to underestimated both fall velocity and oblateness compared with observation. Since these varies based on the rainfall characteristics of the observation location, standard equation for fall velocity and oblateness fit for Gimhae area can be developed by continuous observation and data collection hereafter.

Key words : 2DVD, Rainrate, Rainfall intensity, DSD, Convective rain types, Precipitation types

1. 서론

20세기 후반 이후부터 현재까지 인위적 요인에 의해

기후가 변화하고 있는데, 특히 한반도는 다른 지역에 비해 상대적으로 큰 변화를 보이고 있다(An et al., 2011). 한반도는 기후변화로 인해 강수 패턴과 강도가 변화하고

Received 13 April, 2015; Revised 12 February, 2016;
Accepted 15 February, 2016

*Corresponding author : Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Graduate School/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, 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.

있는데, Park et al.(2008)은 1978년부터 2007년까지의 강수량을 비교 관측한 결과 최근 들어 장마 기간과 장마 후 강수 기간에 발생한 강수량이 증가하고 있었으며, 또한 여름철의 강수 시간이 증가하고 있음을 지적하였고, Park et al.(2014)의 연구에서도 지난 40년간 강수가 지속된 강수 시간은 16.1%로 감소하였지만, 시간 강수강도는 28.2%나 증가하였음을 지적한 바 있다. 이러한 강수 현상은 현재뿐 아니라 미래에도 크게 증가할 것으로 예상되고 있는데, Bae(2013)의 연구에서도 기후 변화를 완화하기 위한 노력 없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출한다면 21세기 말(2070~2099년)의 여름철 한반도 강우량은 20.4% 증가할 것으로 예상한 바 있다. 이는 결국 점차적으로 증가할 강수 피해와 밀접한 관련이 있는 것으로 볼 수 있다.

실제 최근 2014년 8월 25일 부산지역에서 발생한 집중호우의 사례를 보면, 일 강수량은 약 270 mm로 나타났으며, 인근 창원지역에서는 250 mm로 나타나 부산을 포함한 경남지역에서만 9명의 사망자가 발생하였고, 차량침수, 산사태, 그리고 농경지와 도로가 유실되는 등 인적, 물적 피해가 심각했다. 이처럼 짧은 시간 동안 강수강도의 급격한 증가는 이들 실제 사례에서 볼 수 있는 바와 같이 심각한 기상재해로 연결될 수 있다. 그러나 현재 기상청에서 운영하고 있는 관측시스템으로는 단시간 내에 내리는 강수의 특성을 정확히 또는 구체적으로 파악하기 어렵기 때문에 실제 방재기상학적 측면에서 볼 때, 피해 대책 및 저감에 직접 활용하기가 쉽지 않다. 즉, 방재기상학적 측면에서 직접적으로 활용하기 위해서는, 강수 시간에 따른 강수량과 강수강도, 그리고 강수입자분포 및 입경별 낙하속도 및 편평도 등 강수의 물리적 특성을 파악할 수 있어야 하며, 이를 통해 향후 기후변화로 인한 강수의 강도 및 특성변화에 따른 자연재해 저감방안을 마련할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기후변화로 단위 시간당 강수강도가 증가하며, 대류성 집중호우에 의한 피해를 줄이기 위해서는 강수에 대한 지속적인 관측과 물리적 특성에 대한 연구 분석이 중요하므로 이들을 측정할 수 있는 2D-Video Distrometer(이하, 2DVD)를 이용하여 관측된 강수사례를 선정하여 강수의 물리적 특성을 비교·분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 관측 장소

강수 발생 시 강수량 및 강수의 물리적 성상을 측정하기 위해 2DVD와 AWS (automatic weather station)를 김해시 어방동 인제대학교 창조관의 옥상(35°14′55.0″N, 128°54′13.8″E) 관측노장에 설치하였다. 이 지점은 북서쪽에 분성산(해발 325 m), 북동쪽에는 신어산(해발 630 m), 그리고 남동쪽으로는 돛대산(해발 380 m)으로 둘러싸인 분지 지형에 위치하며 그 사이로 길게 김해평야와 인접해 있으며, 주변에 높은 건물이나 산지 지형으로부터 이격거리가 높아 주위 지형 및 높은 건물에 의한 미기상학적 기류 변화 가능성이 높지 않아 관측 수행에 적합한 장소이다(Fig. 1 참조).

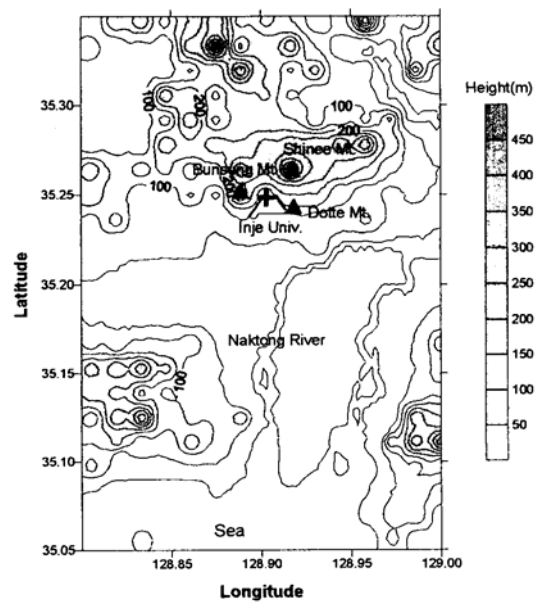


Fig. 1. The topography of observation site and Gimhae area.

2.2. 관측 장비 소개

본 연구에 사용된 관측 장비인 2DVD는 2차원 강수입자모형 측정기로, 실시간으로 강수량뿐만 아니라, 대기 수상의 강수강도, 개별 빗방울의 직경과 형태 등을 측정할 수 있는 최신 강수 관측 장비이다(Fig. 2a). 이 장비는 중간의 측정구역으로 빗방울이 통과할 때, 장비 안에서 내보내는 광학 빔을 지날 때 생기는 그림자를 인식하

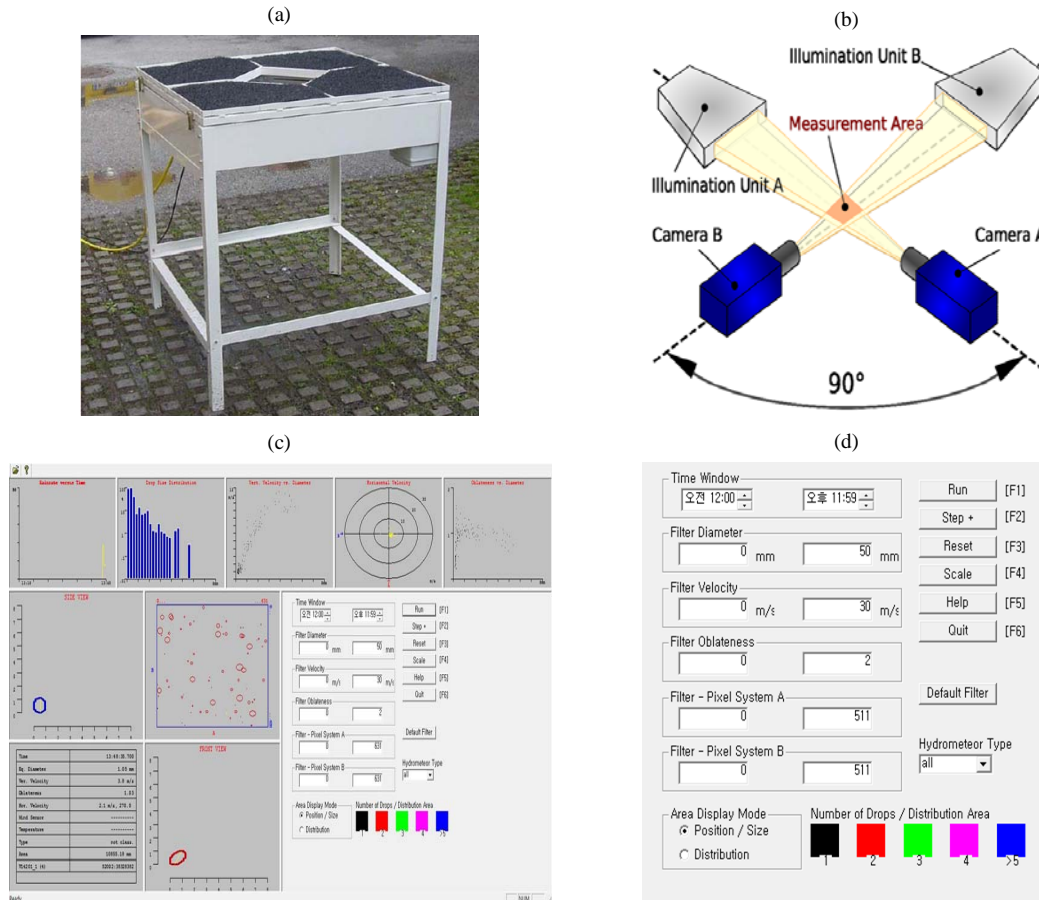


Fig. 2. 2D-Video Distrometer. (a) A photograph of the 2DVD equipment (b) Schematic illustration of the 2D video measurement principle using two light sources and two orthogonally placed fast line scan cameras. View_HYD: The display of 2DVD data (c) The View_HYD main screen (d) Control Panel.

여 빗방울의 형태를 인식하고, 측정구역의 서로 다른 단면에 두 개의 카메라가 배치되어 낙하속도 및 수평 속도를 측정할 수 있다(Fig. 2b). 사용된 2DVD는 compact 2DVD version이며 가장 최근 버전으로 수평 및 수직 해상도가 각각 0.19 mm 이상이다. Fig. 2.2에서 알 수 있듯이 장비의 외관은 한 면이 850 mm 인 정사각형 모양이며, 2DVD 관측 장비의 정 중앙에는 100×100 mm² 크기의 강수 측정영역이 있다. 그 외 상세한 제원은 Table 1에 제시하였다. 2DVD에서 주요 표출되는 자료 화면은 Fig. 2c와 같이 나타나는데, 강수강도, 입자직경 분포도, 입자직경에 대한 낙하속도 및 편평도, 편평도 분포도, 입자 형태 등을 확인할 수 있다. 또한, 관측된 요소

들은 제어판을 통해 사용자가 임의로 조절할 수 있다 (Fig. 2d).

2.3. 연구 대상일

경상남도는 하계에 강수량이 집중되며, 호우의 빈도가 가장 많고 월강수량도 가장 많은 월이 7월이므로 (Park et al., 2005; Park and Lee, 1993), 2DVD로 관측이 이루어진 2014년 7월을 대상으로 하였다. 2014년 7월 한 달간 18회의 강수가 발생하였으나, 일강수량이 80 mm 이상이거나 시간 강수량이 30 mm 이상인 호우에 해당하는 경우(Park et al., 2014, 2013; Seoung, 2012; KMA, 2002; Lee, 1986)는 2014년 7월 20일 하루로 나

Table 1. 2DVD performance specifications

Variables	Drop diameter(mm), Fall velocity(m/s), Oblateness, Area(mm ²), etc.
Resolution (horizontal)	Better than 0.19 mm
Resolution (vertical)	Better than 0.19 mm for vertical velocity less than 10 m/s
Vertical velocity accuracy	Better than 4% for vertical velocity less than 10 m/s
Sampling area	100×100 mm ²
Rain rate compared to tipping bucket	Differences typically less than 10 %

타났다. 2DVD에 의해 관측된 강수의 물리적 특성을 비교하기에 사례가 부족하여 호우 수준은 아니나 일강수량이 30~80 mm 사이이며 강수강도가 30 mm h⁻¹ 이상이 되는 경우도 선정하였다. 2DVD에서 강수강도는 시간당 강수의 강도를 나타내는 것으로 사용자가 설정한 시간 간격 동안 나타난 강수량이 1시간 동안 같은 양으로 내렸을 때의 강수량(mm h⁻¹)을 나타낸다.

그리고 2DVD에 의해 관측되어진 강수량과 2DVD 부근에 설치된 AWS의 강수량을 비교할 경우 누적강수량의 백분율 오차(percentage error)가 10~20% 이내인 경우(McFarquhar and List, 1993; Sheppard and Joe, 1994; Hagen and Yuter, 2003; Tokay et al., 2003), 2DVD의 정확도가 높다고 하였으므로 누적강수량의 백분율 오차가 20% 이내인 강수 사례만 선정하였다.

이 두 가지 조건을 만족하는 강수사례는 2014년 7월 3일, 8일, 18일, 20일의 총 4일로 나타났는데, 이들 사례 일 중에서 강수량이 많고 강수강도가 비교적 높게 나타난 7월 8일과 7월 20일 사례를 선정하여 비교·분석하였다.

2.4. 유효자료 선정

선정된 두 사례에 대해서도 2DVD는 두 개의 라인스캔 카메라가 일치하지 않으면 강수 입자에 대한 모양이나 속도에 대해서 부정확한 정보를 제공하며, 잘못된 정보는 강수 입자의 직경에 따라 낙하속도나 편평도(축비) 분포가 비정상적으로 벗어난 이상치(outlier)가 나타나게 되므로(Kruger and Krajewski, 2002), 유효자료는 선행 연구와 같이 식 (1)과 (2)를 이용하여 이상점(outlier)을 제거함으로써 구할 수 있다(Kim et al., 2014; Kruger and Krajewski, 2002; Thurai and Brangi, 2005). 식 (1)은 Atlas et al.(1973)에서 정의한

낙하속도 산출 식으로써 직경별 낙하속도를 나타내고 있으며, 식 (1)을 이용하여 V_a 를 산출한 후, 식 (2)에 의해 관측 속도값($V_{measured}$)과 V_a 의 절대값 차가 V_a 의 0.4배보다 작은 값만 선택하였다. 그리고 편평도에서는 이상값을 제거하기 위해 Kim et al.(2014)의 연구에 따라 0.6 mm 이상인 입자만 사용하였다.

$$V_a(D) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D) \quad (1)$$

$$|V_{measured} - V_a| < 0.4 V_a \quad (2)$$

where,

$V_{measured}$: 2DVD에서 관측된 강수 입자의 낙하 속도

V_A : Atlas et al.(1973)가 제시한 입자 직경별 낙하속도 산출식

이와 같이 본 연구에서 유효 관측 자료를 선정한 경우, 약 10~34%의 제거율을 나타내었으며, 평균적으로 총 강수입자 개수의 약 20%가 제거되었다. 예를 들어 일 총 강수량이 67.62 mm 인 강수 사례(2014년 7월 20일)를 위의 방식으로 이상치를 제거하였을 때, 적용하기 전에 비해 총 입자 개수 중 33.70%가 제거됨을 확인하였고, 특히 0.2~0.4 mm의 직경을 지닌 입자가 크게 감소함을 알 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 2014년 7월 8일 사례

3.1.1. 종관현황

2014년 7월 8일은 주로 김해를 포함한 남해안 지역과 충청도 일부 지역에 강수가 나타난 사례이다. 관측지점이 위치한 김해에서는 0300 LST (local standard time)

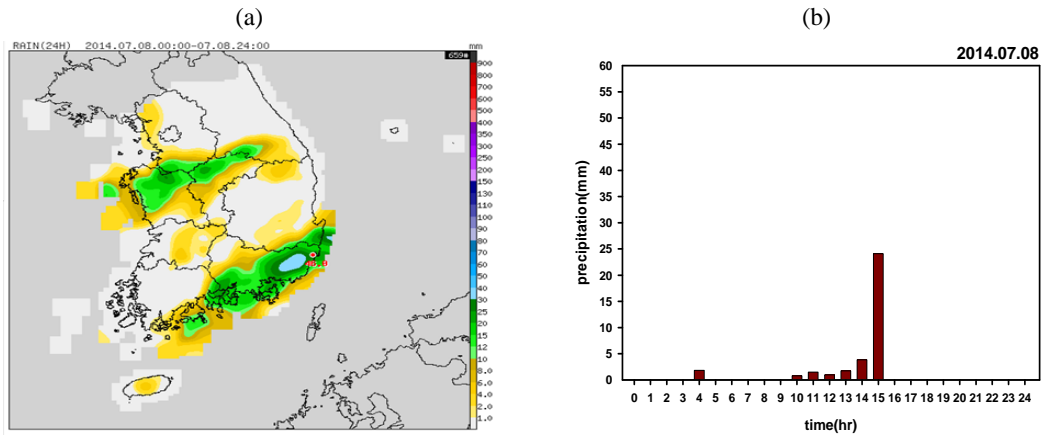


Fig. 3. Distribution of (a) daily rainfall and (b) hourly rainfall at July 8, 2014 in Gimhae, Korea.

부터 1500 LST 까지 34.84 mm의 강수량을 기록하였으며, AWS에 측정된 시간 강수량은 1400 LST까지는 5 mm 이내였으나 1500 LST에 25 mm를 나타내었다

(Fig. 3 참조).

일강수량은 호우 수준은 아니었으나, 강수강도가 크게 나타난 경우로 강수 원인을 중관기상학적으로 살펴

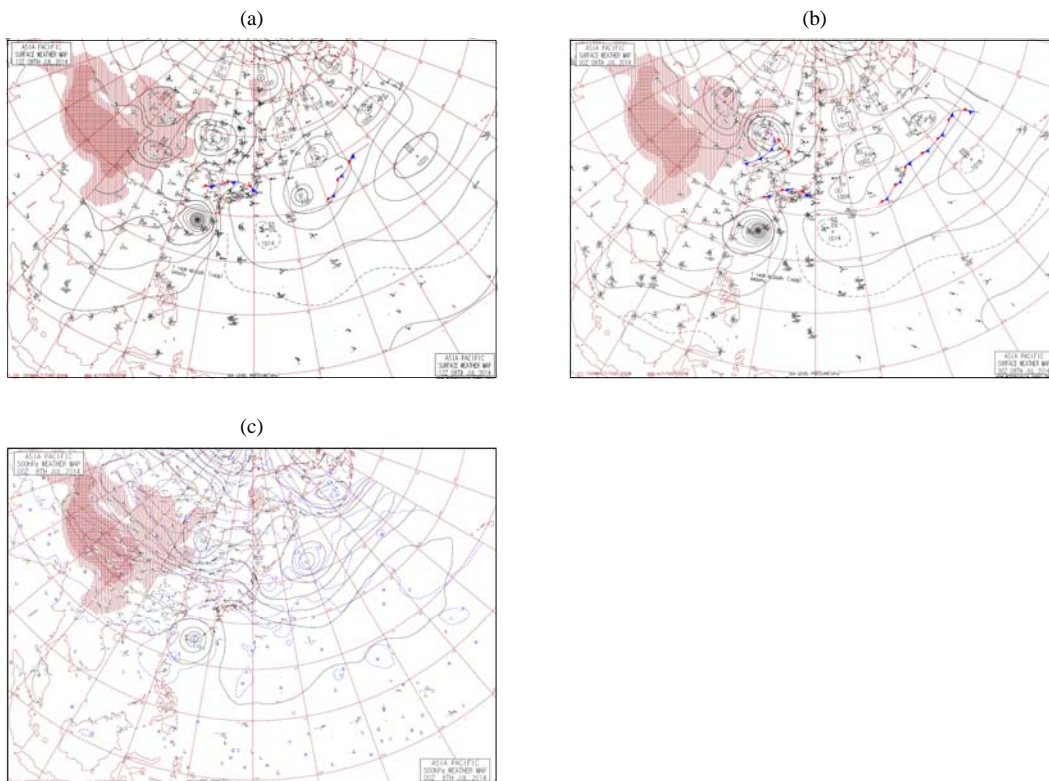


Fig. 4. Synoptic weather chart of (a) surface at 1200 UTC July 7, (b) surface, and (c) 500 hPa at 0000 UTC July 8, 2014.

보면(Fig. 4 참조), 당일 0000 UTC (universal time coordinated) 지상일기도에서는 남해상에 장마전선이 걸쳐 있고 동지나 해상에 태풍 Neoguri(1408)가 다가오고 있음을 알 수 있다. 12시간 전인 7월 7일 1200 UTC에는 한반도 남부지방에 장마전선이 걸쳐 있었으나, 강수가 있었던 당일 0000 UTC에 장마전선이 남하하여 남해상에 걸쳐있었는데, 이는 남쪽에 있는 태풍보다는 한반도 북쪽에 위치한 저기압의 중심기압이 986 mb로 강해지면서 장마전선을 남하시켜 불안정해진 대기에 의해 강수가 발생한 경우로 본 사례가 장마전선에 의한 강수임을 알 수 있다.

500 hPa 일기도에서도(Fig. 4c 참조) 한반도 남부지역에 남서풍이 유입되어 태풍의 영향은 아직 없으며, 장마전선에 의한 것임을 확인할 수 있다. 포항의 단열선도를 살펴보면(Fig. 5 참조) 강수 전날 1200 UTC에 지상 1.5 km 하층에는 풍향이 순전(veering)하여 난기 유입이 이루어지고 있었으며, 강수 당일인 0000 UTC에는 지상 5 km 까지 남서기류가 유입되면서 대기가 매우 불안정하여 짧은 시간에 많은 비를 내릴 수 있었으며, SSI (showalter stability index) 지수나 K index 모두 약한 뇌우 발생 가능성을 나타내고 있었다.

따라서 2014년 7월 8일 강수사례는 한반도상에 위치한 장마전선이 남하하고 지상 5 km 고도까지 난기류가 유입되면서 대기가 매우 불안정해져 짧은 시간에 강수를 포함한 남부지방에 많은 강수를 기록한 장마전선 형임을 알 수 있었으며 단열선도에서 확인할 수 있었다.

3.1.2. 강수의 물리적 특성

2DVD에 의한 강수의 물리적 특성을 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 강수강도(rainrate)의 시계열은 0400 LST에 약한 강수가 있었다가 이후 소강되었으며, 1415 LST에 141.13 mm h⁻¹의 매우 강한 강수강도를 나타내었음을 알 수 있었다(Fig. 6a 참조).

Bringi et al.(2003)에 의하면 1분 강수강도가 5 mm h⁻¹ 이상이며 2분 간격의 연속되는 5개 강수입자의 강수강도 표준편차(standard deviation, SD)가 1.5 mm h⁻¹ 보다 클 경우 강수유형을 convective rain type이라 하였으며, 1분 강수강도가 0.5 mm h⁻¹ 보다 크고 2분 간격의 연속되는 5개 강수입자의 강수강도 SD가 1.5 mm h⁻¹ 보다 작은 경우를 stratiform rain type의 강수유형이라 정의하였는데, 본 사례의 최대 강수강도는 141.13 mm h⁻¹로 매우 강하게 나타났으며, 평균 강수강도 6.29 mm h⁻¹, SD는 17.07 mm h⁻¹로 나타나 전체적으로는 convective rain type의 강수유형을 알 수 있었고, 강수기간동안 강수강도가 5 mm h⁻¹ 이상인 경우가 총 11회 발생하였는데, 그 중 대류성 강수유형이 10회 발생하였고 그 외 기간에는 장마전선에 의한 강수로 나타나, 한 차례의 강수사례에서도 강수강도는 지속적으로 변화하고 있음을 알 수 있었다.

그리고 장마전선에 의한 강수강도는 대개 중정도의 강수강도(50~100 mm h⁻¹)를 나타내는 경우가 대부분이나(Cheon, 2016), 특정 시기에는 강수강도가 이 보다

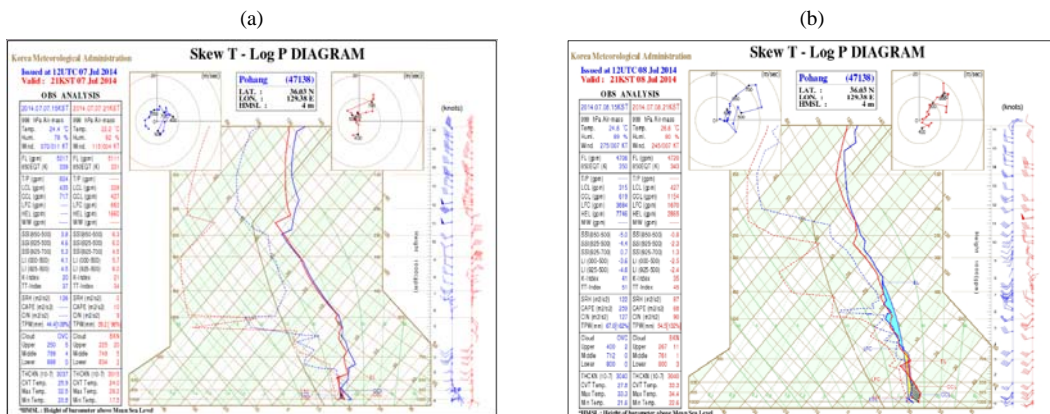


Fig. 5. Adiabatic chart of (a) 1200 UTC July 7 and (b) 0300 UTC July 8, 2014 at Pohang.

높은 대류성 강수가 혼합되어 나타나기도 한다. 이처럼 여러 차례 대류성 강수유형이 나타난 것은 장마전선이 한반도 북쪽에서 발달한 저기압이 확장하면서 빠르게 남하하였고, 지상 5 km 고도까지 난기류가 유입되면서 강한 상승기류의 발생을 유발하였기 때문으로 생각된다.

다음은 입경별 강수입자수의 분포(drop size distribution, DSD)를 Fig. 6b와 Table 2에 나타내었는데, 그림과 표에서 알 수 있듯이 0.4~0.6 mm 입경이 전체 강수입자수의 34.52%를 나타내어 가장 많은 강수입자가 분포하였으며, 그 다음은 0.6~1.0 mm(33.67%), 0.2~0.4 mm (13.26%)로 나타나 강수형태는 주로 rain임을 알 수 있었고, 일부는 drizzle이 나타났음을 알 수 있었

다. 또한 제주도 한라산에서 고도별 DSD를 조사한 결과 중간고도에서는 강수유형에 관계없이 작은 입경($D \leq 1$ mm)의 수농도가 증가하나, 중간 입경($1 < D \leq 3$ mm)과 큰 입경($D > 3$ mm)의 수농도는 낮았다고 하였는데(Kim, 2015), 본 사례의 경우 작은 입경이 81.49%로 가장 많이 분포하였으며, 중간 입경은 18.21%, 큰 입경은 0.3%로 나타나 고도뿐 아니라 지역에 따라서도 그 경향이 달라짐도 알 수 있었다. 그리고 직경이 클수록 강수 입자수는 감소하는 경향을 보였으며, 최대 입경은 4.8~5.0 mm로 나타나 Cheon(2016)의 장마전선 유형과 유사한 분포를 나타내었다.

Fig. 6c는 입자직경에 대한 낙하속도의 분포를 나타낸

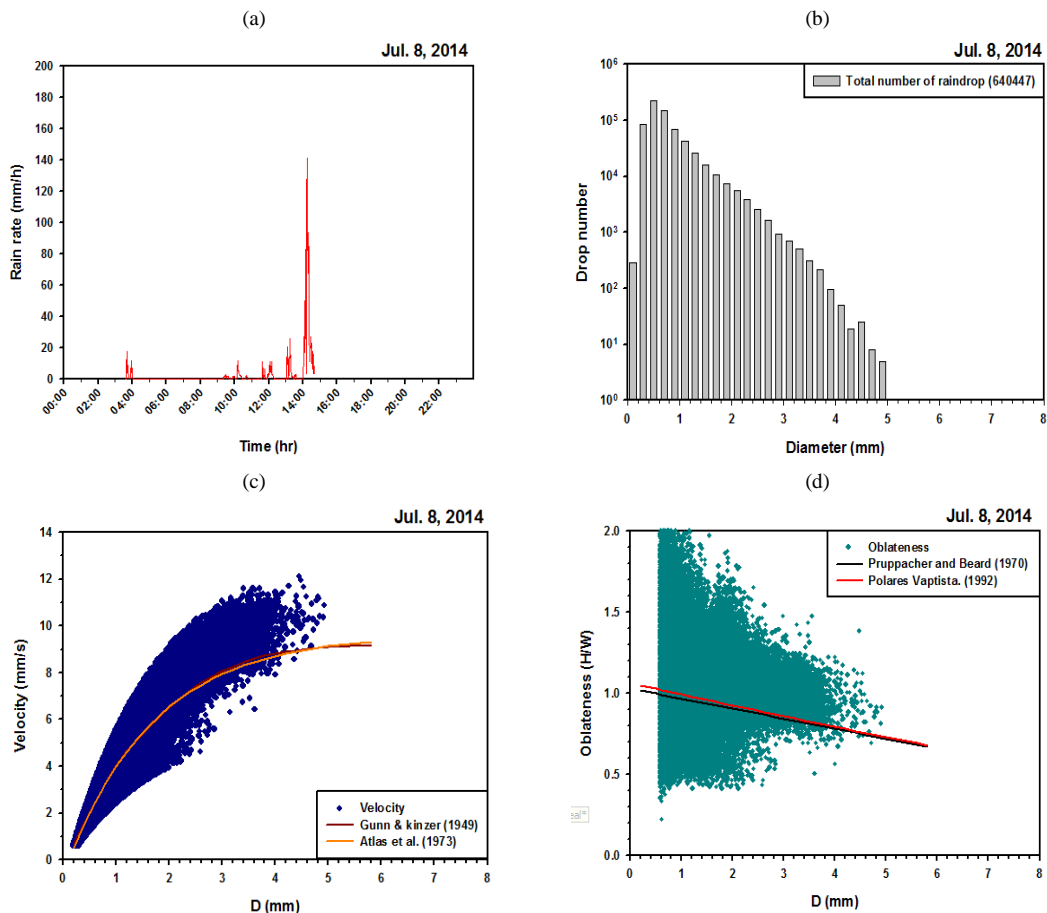


Fig. 6. The physical characteristics such as (a) rainrate (mm h^{-1}), (b) drop number (c) drop fall velocity (m s^{-1}), and (d) drop oblateness of precipitation observed at Gimhae in July 8, 2014.

것으로, Atlas et al.(1973)와 Gunn and Kinzer(1949)가 제시한 강수입자의 직경에 따른 낙하속도 식은 강수입자가 커질수록 낙하속도가 급격히 증가하다가 일정 크기 이상의 강수입자는 낙하속도가 증가하지 않고 거의 일정 수준으로 유지되는 경향을 보이고 있는데, 관측 결과 낙하속도는 대체로 이들 식을 잘 따르고 있으며, 입경 2.4 mm에서 다양한 낙하속도를 나타내었고 최대 12.0 m s⁻¹의 낙하속도를 나타내어 입경이 커질수록 제시된 식은 관측 값에 비해 과소평가하는 경향이 있었다.

Fig. 6d는 강수직경에 대한 편평도(축비= Height/Width = H/W ratio)를 나타낸 그림이다. 여기서, 편평도는 입자의 직경에 대한 높이의 비를 나타내며, Poiares

(1992)와 Pruppacher and Beard(1970)가 제시한 직경에 대한 편평도 식을 함께 제시하였다. 전반적으로 입경이 증가함에 따라 편평도는 감소하는 경향을 나타낸다. 본 사례의 경우 입경이 2.2 mm 미만에서는 H/W ratio가 0.2~2.0 범위로 나타났으나, 그 이상의 입경에서는 0.7~1.3 범위로 나타나 강수입자의 직경이 클수록 편평도가 작아지는 경향을 나타내었고, 전반적으로는 제시된 식에 비해 더 큰 편평도가 나타나 관측결과에 비해 편평도를 과소평가하는 구간이 나타남을 알 수 있었다. 그리고 실제 관측결과에서 편평도가 1.0 보다 더 큰 입자가 주로 나타나면서 완전한 구의 형태보다는 높이가 조금 높은 길쭉한 모양의 빗방울이 많이 나타남을 알 수 있

Table 2. Distribution of raindrop number, accumulate raindrop number, and their percentage in the case of July 8, 2014

Diameter (mm)	Drop Number	Percentage (%)	Accumulate drop number	Accumulate percentage (%)
<0.2	282	0.04	282	0.04
0.2-0.4	84935	13.26	85217	13.31
0.4-0.6	221103	34.52	306320	47.83
0.6-0.8	146826	22.93	453146	70.75
0.8-1.0	68760	10.74	521906	81.49
1.0-1.2	41617	6.50	563523	87.99
1.2-1.4	26583	4.15	590106	92.14
1.4-1.6	15897	2.48	606003	94.62
1.6-1.8	10589	1.65	616592	96.28
1.8-2.0	7467	1.17	624059	97.44
2.0-2.2	5500	0.86	629559	98.30
2.2-2.4	3792	0.59	633351	98.89
2.4-2.6	2547	0.40	635898	99.29
2.6-2.8	1670	0.25	637568	99.55
2.8-3.0	952	0.15	638520	99.70
3.0-3.2	703	0.11	639223	99.81
3.2-3.4	502	0.08	639725	99.89
3.4-3.6	308	0.05	640033	99.94
3.6-3.8	212	0.03	640245	99.97
3.8-4.0	95	0.01	640340	99.98
4.0-4.2	50	0.01	640390	99.99
4.2-4.4	19	0.00	640609	99.99
4.4-4.6	25	0.00	640434	100
4.6-4.8	8	0.00	640442	100
4.8-5.0	5	0.00	640447	100

었다.

따라서 2014년 7월 8일 강수사례는 강수량은 다소 적으나 강수강도가 큰 경우로 한반도상에 위치한 장마전선이 남하하고 대기하층으로부터 난기류가 유입되면서 대기가 매우 불안정해져 짧은 시간에 김해를 포함한 남부 지방에 많은 강수를 기록하였고, 1400 LST 부근에 141.13 mm h^{-1} 의 매우 강한 강수강도를 나타내었다. 평균 강수강도는 6.29 mm h^{-1} ($SD = 17.07 \text{ mm h}^{-1}$)로 나타나 대류성 강수와 전선에 의한 강수가 혼합되어 나타났다. 강수 입경은 $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$ 에서 가장 많은 강수입자가 분포하였으며, 입경에 따른 DSD도 지역에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 그리고 강수형태는 rain이 주를 이루었고 일부 drizzle도 나타났다. 또한 입경이 커질수록 강수입자의 낙하속도는 증가하며, 제시된 식은 관측값에 비해 과소평가하는 경향을 나타내었고, 편평도는 작아지는 일반적인 경향을 잘 따르고 있었음을 알 수 있었다.

3.2. 2014년 7월 20일 사례

3.2.1. 종관현황

2014년 7월 20일은 김해를 포함한 경남과 부산지역에 짧은 시간동안 강수가 나타난 사례이다. 이날 김해에서는 67.62 mm 의 일강수량이 관측되었으며, 1500 LST에 1시간동안 약 55 mm 강수가 발생하여 호우 기준인 시간당 30 mm 를 초과한 경우이다(Fig. 7 참조).

본 강수사례는 아주 짧은 시간에 호우 수준의 많은 비를 동반한 경우로 강수의 원인을 알아보기 위해 강수가 시작되기 전인 2014년 7월 20일 0000 UTC 일기도를

제시하였다(Fig. 8 참조). 먼저 지상일기도에서는 한반도는 중국 내륙까지 확장한 북태평양 고기압 세력의 가장 자리에 위치하여 지역에 따라 불안정해진 대기가 상승하여 국지성 호우가 발생한 경우이다.

상층 500 hPa 일기도에서도 화중과 화남에 위치한 고기압 셀(cell)과 북태평양 고기압의 사이에 한반도가 위치하여 대기는 다소 불안정하였으며(Fig. 8b 참조), 김해를 포함한 한반도에는 북동풍이 유입되면서 지형적인 상승기류를 유발할 수 있었고, 포항지방의 단열선도(Fig. 9 참조)에서도 확인할 수 있었다. 전체적으로 대기상층에서 하층에 이르기까지 북동풍이 하강하면서 유입되고 있어 대기 전 층은 안정해지고 있으나, 하부 700 hPa까지는 북동풍에 의한 지형적인 요인에 의해 상승기류가 발생하였고 뇌우 발생 가능성을 나타내었다. 이는 2014년 7월 20일 0000 UTC 단열선도 상의 SSI가 -0.5 로 나타나 보통의 뇌우 강도를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 본 강수사례는 한반도가 북태평양 고기압 세력의 가장자리에 위치하면서 국지적인 저기압 발생이 용이하였으며, 상층에서 하층에 이르기까지 전 층에서 북동기류가 유입되었으나, 지형적인 요인에 의해 대기가 매우 불안정해지고 상승기류를 유발하여 호우가 발생하였음을 알 수 있다.

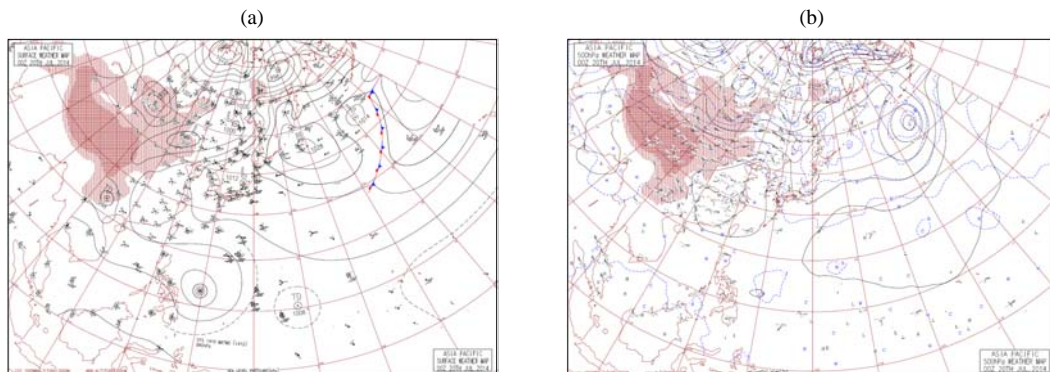


Fig. 8. Synoptic weather chart of (a) surface and (b) 500 hPa at 0000 UTC July 20, 2014.

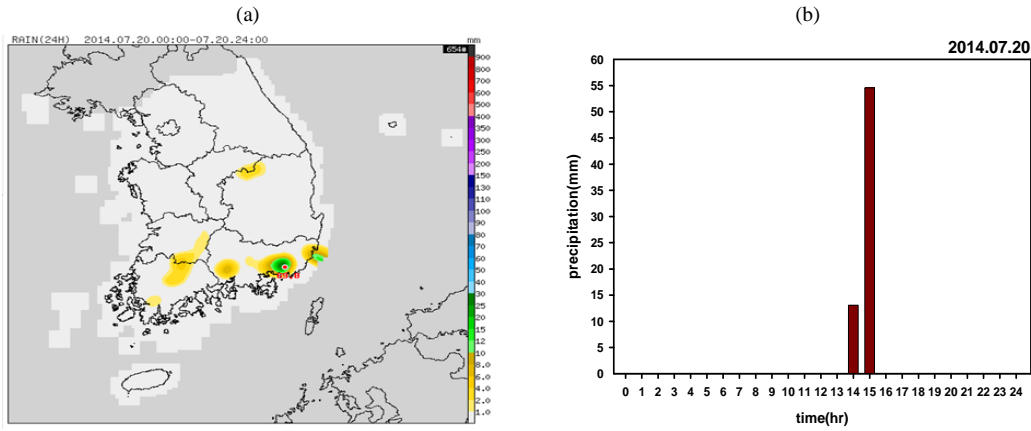


Fig. 7. Distribution of (a) daily rainfall and (b) hourly rainfall at July 20, 2014 in Gimhae, Korea.

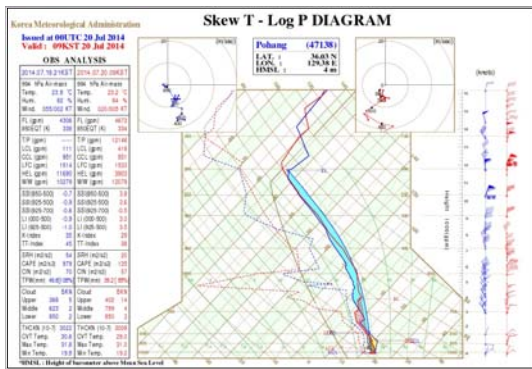


Fig. 9. Adiabatic chart of 0000 UTC July 20, 2014 at Pohang.

3.2.2. 강수의 물리적 특성

2DVD에 의해 관측된 강수사례에 대하여 강수강도, 입경별 DSD, 낙하속도와 편평도 등의 물리적 특성을 Fig. 10에 제시하였다. 먼저 강수강도의 시계열을 살펴 보면(Fig. 10a 참조), 1~2시간동안 강수가 나타난 경우로 1359 LST 무렵에 219.08 mm h⁻¹의 강한 강수강도를 나타내었고 1500 LST에 55 mm의 호우를 나타내어 일 총강수량은 67.62 mm를 기록하였는데, 시간대별로는 Fig. 7b와 같다. 이 기간 동안 평균 강수강도는 61.51 mm h⁻¹(SD = 67.52 mm h⁻¹)로 나타나 강수유형은 convective rain type으로 판단할 수 있었다.

또한 강수기간동안 1분 강수강도가 5 mm h⁻¹ 이상이면서 2분 간격의 연속되는 5개 강수입자의 강수강도 SD가 1.5 mm h⁻¹보다 크게 나타나는 convective rain type

이 총 5회 발생하였는데, 모두 convective rain type 의 강수유형으로 나타나, 앞 사례와는 다소 차이가 나타난 전형적인 대류성 강수유형임을 알 수 있었다.

최대 강수입자가 분포하는 입경은 0.4~0.6 mm로 나타나 앞 사례와 유사하였으나, 최대 입경은 7.4~7.6 mm로 앞 사례와 달리 조대입자가 나타났으며(Fig. 10b, Table 3 참조), Cheon(2016)에 의해 분류된 중관유형 가운데 고기압 가장자리 유형과 일치함을 알 수 있었다 (Cheon, 2016).

강수입자 형태는 0.4~0.6 mm 입경에서 전체의 23.8%의 DSD를 나타내었고, 그 다음이 0.2~0.4 mm로 17.53%를 차지하였고, 0.6~1.0 mm가 23.96%를 차지하여 강수형태는 rain이 우세하였으며 drizzles도 많이 나타났음을 알 수 있다. 입경의 크기를 3단계로 구분하였을 경우(Kim, 2015) 작은 입경이 65.36%로 가장 많이 분포하였으며, 그 다음이 중간 입경(33.13%), 큰 입경(1.49%)로 중간 입경이 앞 사례에 비해 많은 분포를 차지하는 등 강수유형에 따라 DSD가 달라짐을 알 수 있었으며(Cecchini et al., 2014), 고기압 가장자리의 영향으로 대류성 강수가 주를 이룬 7월 20일 사례는 앞 사례와 다소 차이가 나타나 중관기상유형에 따라서도 DSD가 달라짐을 알 수 있었다.

이처럼 강한 강수강도에 의해 호우가 내리는 경우 주요 입경은 0.4~0.6 mm 이나 다른 중관기상유형에 비해 입경이 큰 강수입자가 많이 발생하였는데, 이는 강한 상승기류에 의해 구름입자의 충돌과 병합이 용이하게 일어

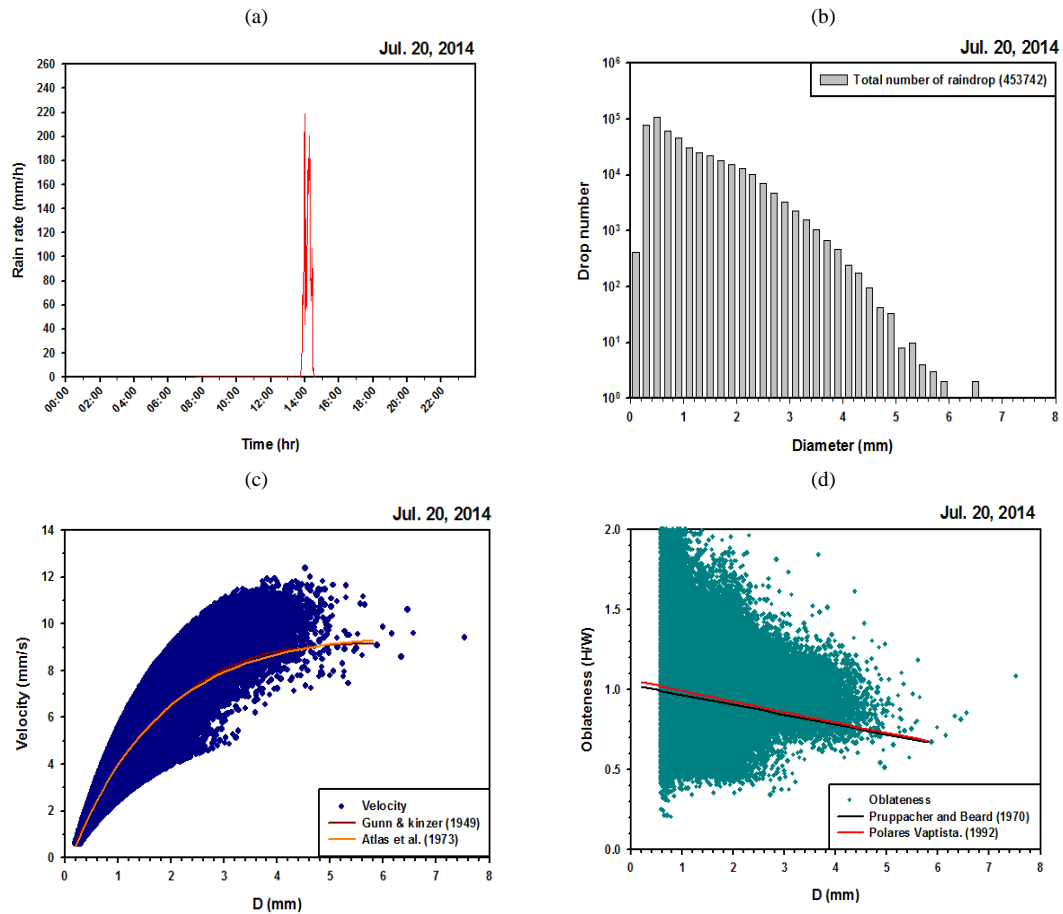


Fig. 10. The physical characteristics such as (a) rainrate (mm h^{-1}), (b) drop number (c) drop fall velocity (m s^{-1}), and (d) drop oblateness of precipitation observed at Gimhae in July 20, 2014.

나 다소 큰 입경의 강수입자가 발생한 것으로 생각된다.

Fig. 10c에 나타난 강수입자의 낙하속도는 입경이 클수록 낙하속도가 크게 나타남을 알 수 있으며, 선행연구의 관계식(Atlas et al., 1973; Gunn and Kinzer, 1949)을 잘 따르고 있으며, 입경 2.8 mm 부근에서 다양한 낙하속도를 나타내었으며, 직경이 커질수록 제시된 식에 비해 큰 낙하속도를 나타내어 관측 결과에 비해 낙하속도가 과소평가됨을 알 수 있었다. 최고 낙하속도는 12.5 m s^{-1} 로 나타나 고기압 가장자리 유형의 다른 사례와 유사한 값을 나타내었다.

강수입자의 편평도의 경우(Fig. 10d 참조) 강수입자의 입경이 클수록 편평도는 작아지는 일반적인 경향을

잘 나타내고 있으며, 입경이 작은 경우 H/W ratio는 0.2 ~ 2.0 범위를 나타내어 제시된 식에 비해 더 큰 편평도가 나타나 관측결과에 비해 편평도를 과소평가되었으며, 입경이 2.6 mm 이상에서는 ratio가 0.7 ~ 1.4를 나타내어 선행연구의 경향을 잘 따르고 있음을 알 수 있었다.

따라서 2014년 7월 20일 사례는 북태평양 고기압 가장자리에 한반도가 위치하면서 국지적인 저기압 발생이 용이하였고, 상·하층에 북동기류의 유입으로 지역에 따라 지형적인 요인에 의해 대기가 불안정해지고 상승기류를 유발하여 호우가 발생한 경우이며, 일강수량은 67.62 mm이었으나, 시간강수량이 30 mm를 초과하였고, 219.08 mm h^{-1} 의 최대 강수강도를 나타내었다. 강수기

Table 3. Distribution of raindrop number, accumulate raindrop number, and their percentage in the case of July 20, 2014

Diameter (mm)	Drop Number	Percentage (%)	Accumulate drop number	Accumulate percentage (%)
<0.2	413	0.09	413	0.09
0.2-0.4	79560	17.53	79973	17.63
0.4-0.6	107971	23.8	187944	41.42
0.6-0.8	62342	13.74	250286	55.16
0.8-1.0	46391	10.22	296677	65.38
1.0-1.2	30741	6.77	327418	72.16
1.2-1.4	25179	5.55	362597	77.71
1.4-1.6	22077	4.87	374674	82.57
1.6-1.8	18333	4.04	393007	86.61
1.8-2.0	15466	3.41	408473	90.02
2.0-2.2	13261	2.92	421734	92.95
2.2-2.4	10237	2.28	431971	95.20
2.4-2.6	7051	1.55	439022	96.76
2.6-2.8	4665	1.03	443687	97.78
2.8-3.0	3283	0.72	445970	98.51
3.0-3.2	2323	0.52	449293	99.02
3.2-3.4	1610	0.35	450903	99.37
3.4-3.6	1074	0.24	451977	99.61
3.6-3.8	580	0.15	452657	99.76
3.8-4.0	462	0.1	453119	99.86
4.0-4.2	241	0.05	453360	99.92
4.2-4.4	178	0.04	453538	99.96
4.4-4.6	95	0.02	453633	99.98
4.6-4.8	43	0.01	453676	99.99
4.8-5.0	34	0.01	453710	99.99
5.0-5.2	8	0	453718	99.99
5.2-5.4	10	0	453728	100
5.4-5.6	4	0	453732	100
5.6-5.8	3	0	453735	100
5.8-6.0	2	0	453737	100
6.0-6.2	1	0	453738	100
6.2-6.4	1	0	453739	100
6.4-6.6	2	0	453741	100
6.6-6.8	0	0	453741	100
6.8-7.0	0	0	453741	100
7.0-7.2	0	0	453741	100
7.2-7.4	0	0	453741	100
7.4-7.6	1	0	453742	100

간동안 평균 강수강도도 높게 나타나 강수유형은 앞 사례와 달리 convective rain type이었고, 0.4~0.6 mm 입경에서 가장 많은 강수입자가 분포하였으며, 최대 크기의 강수입자는 7.4~7.6 mm로 나타나 조대입자가 나타나 강한 상승기류에 의한 구름입자의 충돌과 병합이 용이하였음을 알 수 있으며, 종관유형에 따라 DSD가 달라지므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 강수입자의 낙하속도와 편평도는 일반적인 경향을 잘 따르고 있음을 알 수 있었다.

이상과 같이 한반도에는 기후변화로 강수 pattern과 강도가 달라짐에 따라 일강수량이 80 mm 이상이거나 시간강수량이 30 mm를 초과하는 호우인 경우와 호우수준은 아니나 강수강도가 30 mm h⁻¹를 초과하는 두 가지 사례를 선택하여 김해지역에 발생한 강수의 종관원인과 강수강도, 강수입자분포, 낙하속도 및 편평도를 분석한 결과, 고기압 가장자리 영향으로 강한 상승기류가 발생할 경우 강수강도가 높게 나타나 대류성 강수유형을 나타내었으며, 장마전선에 의해 상승기류가 발생한 경우 역시 강수강도는 높게 나타났으나, 고기압 가장자리 영향보다는 낮게 나타났으며, 대류성 강수유형과 전선에 의한 강수가 혼합되어 나타나 강수의 종관적 원인에 따라 강수강도가 달라짐을 알 수 있었다.

가장 많은 강수입자분포는 0.4~0.6 mm 입경에서 나타났으며, 대류성 강수유형의 경우 조대입자도 나타났는데, 이는 강한 상승기류에 의한 구름입자의 충돌과 병합이 용이하였음을 알 수 있으며, 지역이나 고도는 물론 강수유형에 따라 강수입자분포가 달라지므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있었다.

강수형태는 주로 rain이었으며 또한 입경이 커질수록 강수입자의 낙하속도는 증가하며, 제시된 식은 관측값에 비해 과소평가하는 경향을 나타내었고, 편평도는 작아지는 일반적인 경향을 잘 따르고 있었음을 알 수 있었다.

3.3. 최대 강수강도별 강수입자분포

Fig. 11은 각 사례별 최대 강수강도가 나타난 1분 동안 DSD를 나타내었는데, 실선은 2014년 7월 20일 1359 LST에 219.08 mm h⁻¹의 강한 강수강도를 나타낸 사례이며, 점선은 장마전선 상에서 강한 강수강도(141.13 mm h⁻¹)를 나타낸 7월 8일 1415 LST 사례

다.

그림에서 알 수 있듯이 두 사례 모두 입경 1.0 mm 이내에 DSD가 많이 분포하여 강수형태가 rain이었으나, 입경이 1 mm 이내에도 크게 3가지 입경그룹으로 나누어짐을 알 수 있었으며, 0.5 mm 미만의 drizzles이 상당히 분포함도 알 수 있었다. 그리고 7월 20일의 강수입자 수농도가 7월 8일에 비해 더 많아 강수강도가 강할수록 강수입자 수농도가 많아짐을 3가지 입경그룹 모두에서 알 수 있었으며, 이들 강수입자의 수농도 의해 강수량에도 현저한 차이가 있음을 알 수 있었다.

따라서 기후변화로 나타나는 호우 현상은 강수의 종관적 원인과 지역, 그리고 강수강도에 따라 강수유형이나 형태는 물론 강수량의 차이를 나타내므로 동일 지역에서 지속적인 모니터링을 통해 강수의 종관적 원인과 강수강도에 따른 강수의 물리적 특성을 비교 분석하는 것이 강수량의 예측 모델 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

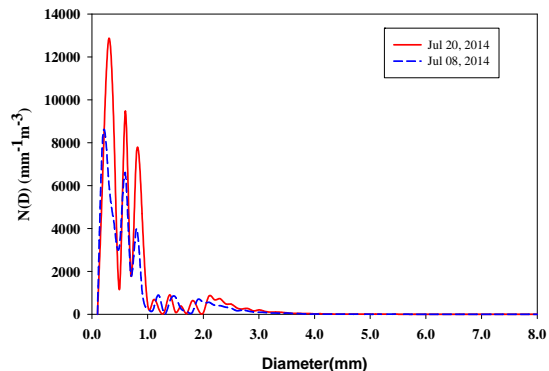


Fig. 11. The drop size distribution at maximum rainrate (1minute) of case. The red line is Jul. 20, 2014 (1359 LST) and the blue dotted line is Jul. 08, 2014 (1415 LST).

4. 결론

본 연구에서는 강수의 특성을 상세히 측정하여 다양한 강수 분석에 유용하게 활용 가능한 2D-Video distrometer(2DVD)를 이용하여 2014년 7월 관측된 집중호우 사례 일과 호우수준은 아니나 강수강도가 30 mm h⁻¹를 초과하는 두 가지 사례를 선택하여 김해지역에 발생한 강수의 종관원인과 강수강도, 강수입자분포, 낙하

속도 및 편평도를 분석하였다.

그 결과 고기압 가장자리 영향으로 강한 상승기류가 발생할 경우 강수강도가 높게 나타나 대류성 강수유형을 나타내었으며, 장마전선에 의해 상승기류가 발생한 경우 대류성 강수유형과 전선에 의한 강수가 혼합되어 나타나 강수의 종관적 원인에 따라 강수강도가 달라짐을 알 수 있었다. 가장 많은 강수입자분포는 0.4~0.6 mm 입경에서 나타났으며, 대류성 강수유형의 경우 조대입자도 나타났는데, 이는 강한 상승기류에 의한 구름입자의 충돌과 병합이 용이하였음을 알 수 있으며, 지역이나 고도는 물론 강수유형에 따라 강수입자분포가 달라지므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있었다.

강수형태는 주로 rain이었으며 또한 입경이 커질수록 강수입자의 낙하속도는 증가하고 편평도는 작아졌으며, 2DVD에서 제시된 식은 관측 값에 비해 과소평가하는 경향을 나타내었다. 이는 관측지점의 강수 특성에 따라 달라지므로 향후 지속적인 관측과 자료 수집을 통해 김해지역에 맞는 낙하속도와 편평도의 표준모델 식을 만들 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상산업지원 및 활용기술 개발사업(KMIPA 2015-8070)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- An, S. I., Ha, K. H., Seo, K. H., Yeh, S. W., Min, S. K., Ho, C. H., 2011, A review of recent climate trends and causes over the Korean peninsula, climate change research, 2(4), 237-251.
- Atlas, David, R. C. Srivastava, Rajinder, S. S., 1973, Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence, Reviews of Geophysics, 11(1), 1-35.
- Bae, S. H., 2013, Temporal spatial rainfall characteristics in urban area considering climate change, M.Sc, Kyungpook National University.
- Cecchini, M. A., Machado, L. A. T., Artaxo, P., 2014, Droplet size distribution as a function of rainy system type and cloud condensation nuclei concentrations, Atmospheric Research, 143, 301-312.
- Cheon, E. J., 2016, Case study on the physical properties of precipitation and synoptic meteorological patterns using 2d-video disdrometer and Parsivel, M.S. Thesis. Gimhae, Inje University, 2016 : 1-132(Korean).
- Gunn, R., Kinzer, G. D., 1949, The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, Journal of Meteorology, 6(4), 243-248.
- Hagen, M., Yuter, S., 2003, Relations between radar reflectivity, liquid water content, and rainfall rate during the MAP SOP, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 129(588), 477-493.
- Kim, H. J., The characteristics of drop size distribution in relation to the precipitation system around MT. Halla, Jeju in summer, 2012. M.S. Thesis. Pukyong National University, 2015 (Korean).
- Kim, H. L., Park, H. S., Park, H. S., et al., 2014, Study on the application of 2D video disdrometer to develop the polarimetric radar data simulator, Journal of Korea Meteorological Society, 24(2), 173-188.
- Korea Meteorological Administration (KMA), An interpretation of the meteorological terminology, KMA, 2002: 1-149.
- Kruger, A., Krajewski, W. F., 2002, Two-dimensional video disdrometer: A description, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19(5), 602-617.
- Lee, B. S., Heavy Rainfall, Gyohak press, 1986 : 15-29.
- MacFarquhar, G. M., List, R., 1993, The effect of curve fits for the disdrometer calibration on raindrop spectra, rainfall rate, and radar reflectivity, Journal of Applied Meteorology, 32, 774-782.
- Park, J. K., Jang, E. S., Choi, H. J., 2005, Investigation of characteristic and states of natural disaster for water resources disasters control in Gyeongsangnam-do, Journal of the Environmental Sciences, 15(6), 621-627.
- Park, J. K., Lee, B. Y., 1993, The characteristics of the anomaly level and variability of the monthly precipitation in Gyeongnam, Korea, Journal of the Environmental Sciences, 2(3), 179-191.
- Park, C. Y., Moon, J. Y., Cha, E. J., Yun, W. T., Choi, Y. E., 2008, Recent changes in summer precipitation characteristics over south Korea, Journal of the Korean Geographic Society, 324-336.

- Park, J. K., Seong, I. C., Kim, B. J., Jung, W. S., Lu, R. Y., 2013, On the characteristics of hourly precipitation intensity variation according to climate change in the Korean Peninsula, *Disaster Advances*, 6(8), 60-72.
- Park, J. K., Seong, I. C., Kim, B. J., Jung, W. S., Lu, R. Y., 2014, On the characteristics of the precipitation patterns in Korea due to climate change, *Journal of Environmental Science International*, 23(1), 25-37.
- Poiares Baptista, J. P. V., 1992, Proceedings of the 17th meeting of the olympus propagation experimenters, Stockholm/Helsinki, Minutes of Radar Working Group, pp. 36-40, May 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 Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(408), 247-256.
- Seong, I. C., 2012, Case study on torrential heavy rain and characteristics of hourly precipitation caused by sub-tropicalization. M.S. Thesis. Gimhae, Inje University, 1-66(Korean).
- Sheppard, B. E., Joe, P. I., 1994, Comparison of raindrop size distribution measurements by a Joss-Waldvogel disdrometer, a PMS 2DG spectrometer, and a POSSS Doppler radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(4), 874-887.
- Thurai, M., Bringi, V. N., 2005, Drop axis ratios from a 2D video disdrometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22 : 966-978.
- Tokay, A., Wolff, D. B., Wolff, K. R., et al., 2003, Rain gauge and disdrometer measurements during the keys Area Microphysics Project (KAMP), *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 1460-1477.