

## PARSIVEL 측정 자료를 활용한 대관령 산악지역 강수입자분포 모형 연구

박래설<sup>1,2,\*</sup> · 장 민<sup>3,4</sup> · 오성남<sup>5</sup> · 홍윤기<sup>6</sup>

<sup>1</sup>광주과학기술원 환경공학부, 500-712, 광주광역시 북구 첨단과기로 123

<sup>2</sup>한국형수치예보 모델개발사업단, 156-849, 서울특별시 동작구 보라매로 5길 35

<sup>3</sup>웨더링크, 462-806, 경기도 성남시 중원구 둔촌대로 457번길

<sup>4</sup>기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업단, 121-835, 서울특별시 마포구 월드컵북로 434

<sup>5</sup>한국과학기술정보연구원 ReSEAT Program, 130-722, 서울특별시 동대문구 회기로 86

<sup>6</sup>국방과학연구소, 305-600, 대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 35호

### A Study on a Model of Rainfall Drop-Size Distribution over Daegwanryeong Mountainous Area Using PARSIVEL Observations

Rae-Seol Park<sup>1,2,\*</sup>, Min Jang<sup>3,4</sup>, Sung Nam Oh<sup>5</sup>, and Yun-Ki Hong<sup>6</sup>

<sup>1</sup>School of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 500-712, Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Atmospheric Prediction System, Seoul 156-849, Korea

<sup>3</sup>Weatherlink, Gyeonggi 462-806, Korea

<sup>4</sup>CATER Weather Information Service Engine, Seoul 121-835, Korea

<sup>5</sup>ReSEAT Program, Korean Institute of Science and Technology Information, Seoul 130-722, Korea

<sup>6</sup>Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea

**Abstract:** In this study, a model of rainfall drop-size distribution was modified using PARSIVEL-retrieved rainfall drop-size distribution over Daegwanryeong mountainous area. A prototype model (Modified  $\Gamma$  distribution model) applicable for this area was decided through the comparative analysis between results from models proposed by preceding research and PARSIVEL-retrieved data over Daegwanryeong mountainous area. In order to apply the prototype model for Daegwanryeong region, the parameters ( $\alpha$ , A, B) were made via sensitivity experiments and models of the rainfall drop-size distributions for five cases of rainfall rate were proposed. Results from the proposed five models showed high correlations with PARSIVEL-retrieved data ( $R^2=0.975$ ). In order to suggest a generalized form of rainfall drop-size distribution, interaction equations between rainfall rates and parameters ( $\alpha$ , A, B) were investigated. The generalized model of the rainfall drop-size distribution was highly correlated with PARSIVEL-retrieved data ( $R^2=0.953$ ), which means that the proposed model from this study was effective for simulating the rainfall drop-size distribution over Daegwanryeong region. However, the proposed model was optimized for rainfall drop-size distribution over Daegwanryeong region. Therefore, broad observations of other regions are necessary in order to develop the representative model of the Korean peninsula.

**Keywords:** numerical model for rainfall drop-size distribution, PARSIVEL disdrometer, prototype model, modified  $\Gamma$  distribution model, parameter

\*Corresponding author: rspark28@gmail.com

Tel: +82-2-6959-1650

Fax: +82-2-6919-2121

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.

**요약:** 본 연구에서는 대관령 지역에서의 광학우적계(PARSIVEL disdrometer) 강수관측으로부터 산출된 강수율에 따른 강수입자분포 자료를 바탕으로 기존의 강수입자분포 모형을 개선하였다. 선행 연구에서 제안한 다양한 강수입자분포 모형과 측정 자료와의 상관성을 분석한 결과, 대관령 지역에 적용 가능한 원형 모형은 개선된  $\Gamma$  분포 모형임을 확인하였다. 원형 모형을 대관령 지역에 적용할 수 있도록, 민감도 실험을 통해 최적의 매개변수들( $\alpha$ , A, B)을 산정하였으며, 다섯 가지 강수율에 대한 강수입자분포 모형을 제안하였다. 강수율에 따른 강수입자분포 모형의 결과는 관측에서 측정된 값과 높은 상관성( $R^2=0.975$ )을 보였다. 강수율에 따라 표현되는 강수입자분포 모형을 일반화 형태로 개선하기 위해 강수율과 매개변수의 상관성을 도출하여 일반식을 결정하였다. 일반화된 강수입자분포 모형은 대관령 지역의 강수입자분포 측정 자료와 높은 상관성( $R^2=0.953$ )을 보였으며, 이는 본 연구에서 제안한 모형이 대관령 지역의 강수입자분포를 모의하는데 효과적임을 의미한다. 그러나 본 연구에서 제안된 강수입자분포 모형은 대관령 지역의 강수입자분포에만 최적화 되었다는 한계성이 있어, 따라서 한반도를 대표하는 모형을 개발하기 위해서는 다른 지역에 대한 광범위한 측정이 필요하다.

주요어: 강수입자분포 모형, 광학우적계, 원형 모형, 개선된  $\Gamma$  분포 모형, 매개변수

## 서론

대기 중에 존재하는 구름 입자는 성장과 소멸을 반복하는 과정에서 입자의 크기가 일정 크기 이상이 되면 지상으로 낙하하게 된다. 각각의 구름 입자는 크기에 따라 서로 다른 낙하 속도를 가지고 있으며, 낙하 속도는 반지름  $100 \mu\text{m}$ 에서  $70 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $1 \text{ mm}$ 에서  $649 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $2 \text{ mm}$ 에서  $883 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $2.9 \text{ mm}$ 에서  $917 \text{ cm s}^{-1}$  정도이다. 구름 입자의 낙하 속도는 매우 느리기 때문에 대기 중에 존재하는 상승 기류에 의한 부력으로 인해 공기 중에 부유할 수 있다. 이러한 대기 중에 존재하는 수적과 빙정을 포함한 강수 및 구름 입자는 항공기 운항 등 다양한 비행체 등과의 충돌, 마찰 등으로 인하여 비행체의 전면을 마모시키기 때문에 이동과 기능에 대한 정밀성과 정확성 등에 많은 영향을 미치게 된다. Ranger and Nicholls (1969)에 의하면, 대기 중 20 이하의 미세입자는 비행체와 충돌하기 전, 비행체 전면의 고온, 고압의 영역에서 소멸되며, 구름 및 강수 등 수상체 입자는 100이하의 입자만이 소멸되기 때문에 100 이상의 입자만이 비행체에 영향을 미친다고 할 수 있다. 구름 입자와 강수입자의 경계가 약 100이기 때문에 비행체에 영향을 미치는 입자는 강수입자로 규정할 수 있다. 비행체에 가해지는 충격에 의한 침식율을 유추하는 침식 모형(Lee et al., 2003)을 참고하면, 침식율은 입자의 질량, 충돌 속도, 입자의 직경 및 소재의 경도에 따라 달라진다. 즉, 강수입자에 의한 비행체의 침식율을 결정하는 중요한 변수 중 하나로, 강수입자의 크기는 매우 중요하며, 침식의 정도를 이해하고 예측하기 위해서는 구름 내부의 입자 크기의 분

포를 파악하고 이를 규격화하는 연구가 선행되어야 할 것이다.

이와 같은 영향에 대하여 미국 및 유럽 등의 선진국은 지상, 항공기, 레이더 및 위성 관측 등 다양한 기상관측 자료를 분석하여 비행체와 상관성이 있는 대기의 강수입자분포 모형을 제안하였다(Laws and Parsons, 1943; Marshall and Palmer, 1948; Ulbrich, 1983; Ajayi and Olsen, 1985; Ihara et al., 1986; Brandes et al., 2004). 강수입자분포 모형의 개발을 위해 강수입자분포는 지수함수 분포와  $\Gamma$  분포가 가정되거나(e.g., Marshall and Palmer, 1948; Sekhon and Srivastava, 1970; Ulbrich, 1983), 누승법칙이 가정되었다(Laws and Parsons, 1943). 최근에는 4개의 매개변수로 구성된 개선된  $\Gamma$  분포가 빙정입자와 같은 비구형 입자의 분포를 모사하는데 효과적이라는 결과가 발표된 바 있다(Petty and Huang, 2011). 그러나 강수입자의 분포는 강수 및 구름의 유형에 따라 달라지며(Cecchini et al., 2014), 강수 및 구름의 유형은 지역 및 계절적인 차이를 보이기 때문에(Jung et al., 2014; Yang et al., 2012; Rha et al., 2005), 선행 연구에서 제안된 강수입자분포 모형은 특정 지역의 강수입자의 분포를 대표하며, 전 지구적인 관점에서의 강수 및 구름 유형의 차이를 반영할 수 없다. 한반도를 포함한 중위도 지역에서는 짧은 시간 내에 다양한 구름이 생성되고 소멸되는 과정을 반복하며 구름형성에 대하여 지역적 특성을 보이고 있다. 이러한 구름 속 입자는 구름의 종류나 발생 지역, 발생 및 이동 과정 등에 따라 다양한 형태를 가진다. 따라서 한반도 지역의 강수입자분포를 예측하고 그 특성을 파악하기 위해서는 선행 연구에서 제안된 강수입

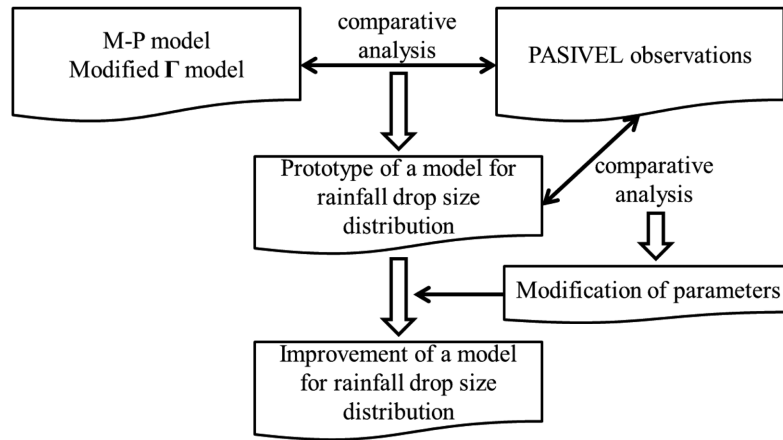


Fig. 1. Schematic diagram for improving a model of rainfall drop-size distributions.

자분포 모형을 활용할 수 있다. 하지만 이들 모형을 모든 지역에 동일하게 적용하는 데는 아직 밝혀지지 않은 불확실성을 내포하고 있어, 한반도 지역에서 측정된 자료를 활용한 최적화된 강수입자분포 모형의 개발이 요구된다.

구름 내부의 강수입자 및 구름입자를 측정하여 그 특성을 파악하기 위해서는 항공기를 이용하여 구름 내부를 직접 관측하는 방법이 가장 효율적이라고 할 수 있다. 그러나 항공기의 운영과 측정기기의 탑재, 과다 측정비용 등으로 인한 제약이 따른다. 따라서 구름 및 강수입자의 분포 특성을 위해서는 위성, 기상레이더, 강우레이더, 구름레이더, 강수입자 측정기(MRR, PARSIVEL, 2DVD 등), 우량계 등에 의해 간접적으로 관측된 자료들을 활용하여 구름 및 강수입자를 추정하게 된다. 하지만, 구름 및 강수입자의 정밀한 측정은 일반적인 구름의 형태와 조건에 따라 아주 복잡하며, 시·공간적으로 입자의 크기나 형태가 다양한 분포 양상을 보이기 때문에 이러한 입자들을 정성적 및 정량적으로 파악하기 위해서는 상당한 어려움이 있다. 이러한 이유로 한반도에서 측정된 구름 및 강수입자 자료는 시·공간적으로 매우 제한적이며, 연구의 범위 역시 시·공간적 제약을 따른다. 본 연구에서는 한반도에서 유일하고 장기간 강수입자의 분포가 측정된 대관령 구름물리 관측소의 자료를 활용하였다. 대관령 지역의 구름물리 관측소는 해발 847 미터의 동쪽 방향은 크게 가파르고 서쪽 방향은 완만한 경사를 지닌 지형에 위치하고 있다. 따라서 동해로부터 습기가 많은 동풍이 있을 때 가파른 활승바람의 높은 단열감을 효과로 인하여 구름과 안개가

쉽게 발생하며 서쪽의 건조한 바람이 있을 때 높새바람(Foehn) 현상으로 동쪽과 서쪽 방향의 기온 차가 크게 나타난다. 이러한 기상조건에 의한 일기변동으로 발생하는 대기의 구름현상과 열역학적 변화를 대표적으로 관측할 수 있어 구름물리현상을 측정하기에 최적의 조건이라 할 수 있어 기상청은 2003년 구름의 입자 및 발생과정을 측정할 수 있는 구름물리 측정기기를 구비한 관측소를 설치하였다. 본 연구는 대관령 구름물리 관측소에서 관측한 자료를 활용하여 한반도에서의 구름의 강수입자분포의 특성을 조사하고, 이러한 특성을 반영할 수 있도록 강수입자분포 모형을 개선하는데 그 목적이 있다.

## 자료 및 분석 방법

한반도의 특정 지역에 최적화된 강수입자분포 모형을 개선하기 위한 연구 방법은 Fig. 1과 같다. 강수입자분포 모형은 강수입자 관측 자료의 강수율에 따른 분포 양상을 반영하는 통계적 모형이며, 기존의 다양한 모형들이 제안되었다(Laws and Parsons, 1943; Marshall and Palmer, 1948; Ulbrich, 1983; Ajayi and Olsen, 1985; Ihara et al., 1986; Brandes et al., 2004). 따라서 본 연구에서는 선행 연구에서 제안된 모형과 관측 자료와의 비교를 통해 가장 유사한 모형을 원형 모형으로 두고, 실제 관측 자료에 최적화되도록 매개변수를 산출하여 모형을 개선하고자 한다. 본 연구는 정지된 기상상태를 고려한 고정분석(stationary analysis)임을 명시한다. 각 단계별 구체적인 연구 방법은 다음과 같다.

**광학우적계로부터 산출된 강수입자분포 자료**

강수는 짧은 시간에 빠르게 변하기 때문에 정확한 측정이 쉽지 않으며, 강수 시스템은 일반적으로 지역적인 영역에 대해서도 비 균질적인 공간분포를 보인다. 따라서 강수입자분포 모형 개선을 수행하기 위해서는 시·공간적으로 보다 빈번하게 강수를 관측하는 것이 좋다. 육지 영역에서는 강우계와 레이더가 강수 관측에 주로 사용되지만 일반적으로 적용범위가 충분하지 않다. 레이더의 경우에는 보정편차, 지형에 의한 장벽, 빔의 분산, 가변적인 레이더 반사도와 강수율의 관계에 대한 불확실성을 지니고 있다. 따라서 이러한 불확실성을 항공관측을 통해 보완하고 있으며 보다 광범위한 지역을 쉽게 측정하기 위하여 기상위성을 사용하기도 한다. 항공관측은 인공강우와 관련하여 부분적으로 수행되나 장비 및 비용의 한계로 국내에서는 위성측정이나 레이더 측정과 같은 원격탐사 방법에 의존하는 추세이다.

강수현상 발생 시 지상에 설치하여 강수입자의 분포를 관측할 수 있는 장비는 다양하게 개발되어 사용 중이며, 국내에서는 주로 연직강우레이더(Micro Rain Radar (MRR))와 광학우적계(particle size velocity (PARSIVEL) disdrometer) 등을 이용한 관측이 대관령 구름물리 관측소(Fig. 2)에서 이루어진다(Cha et al., 2010; Oh and Jung, 2013). 본 연구에서는 2010-2013년의 총 4년 간, 대관령 구름물리 관측소에서 광학우적계에 의해 관측된 강수율에 따른 강수입자분포 자료를 활용하였다. 광학우적계의 관측 시간 간격은 10초에서 최대 3600초까지 선택하여 관측할 수 있으며, 본 연구에서는 1분 시간해상도 관측 자료를 분석하였다. 광학우적계는 레이저 광(650 nm)을 발사하여 입자에 의한 광 차단 강도의 세기를 전기신호로 변환하여 입자크기와 낙하속도를 측정하고 이로부터 유도되는 반사도로부터 강우강도, 강수입자의 크기, 낙하속도, 시정, 강수형태, 수액량 등을 산출한다. 직경과 낙하속도로 안개, 안개비, 비, 우박, 눈 등을 오차 범위 ±3% 내에서 수상체가 분류되고, 레이저 광이 차단되는 지속시간과 신호의 크기에 따라 수상체의 종단속도와 강수입자 크기분포를 산출한다. 입자의 크기는 0.2-25 mm까지 관측할 수 있으며, 낙하속도는 0.2-20 m s<sup>-1</sup>까지 관측이 가능하며, 강우강도는 0.001-1,200 mm h<sup>-1</sup>까지 관측할 수 있다. 관측된 자료를 바탕으로 레이더 반사도(dBZ), 강우강도(mm h<sup>-1</sup>), 시정(m), 수액량(g m<sup>-3</sup>) 등의 자료를 산출할 수 있다. 광

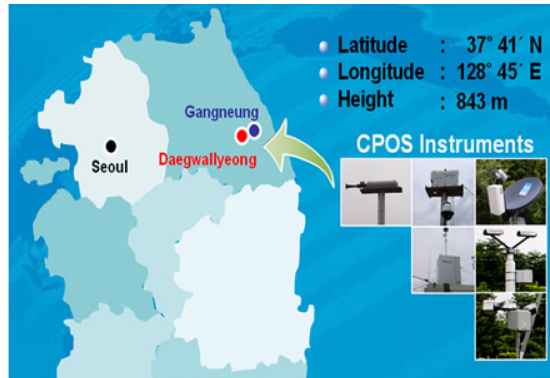


Fig. 2. Cloud-physics observatory at Daegwallyeong.

학우적계에 의해 산출되는 강수입자의 분포는 모멘트 (Moment, M) 접근 방법에 의해 계산되어 진다. M의 일반식은 다음과 같다.

$$M_n = \int_{D_{min}}^{D_{max}} D^n N(D) dD = \sum_{D_i=D_{min}}^{D_{max}} D_i^n N(D_i) \Delta D_i \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 입자 직경을 의미하고,  $N(D)$ 는 광학우적계에 의해 관측되어지는 강수입자 크기별 수농도를 나타낸다. 따라서  $M$ 은  $N(D)$ 에 의해서 계산되어진다. 광학우적계에 의해 관측되는 총 수농도는 입자직경의 0차 모멘트에 의해 계산되지만, 본 연구에서는 강수입자 크기별 수농도 자료가 활용된다.

**강수입자분포 모형 개선 방안**

대관령 지역의 강수입자분포 모형 개선을 위한 원형 모형을 결정하기 위해서 기존 연구에서 제안된 강수입자분포 모형을 조사하였다. 현재까지 개발된 강수입자분포 모형들은 관측 지역에 따른 강수입자분포 양상의 차이를 반영하였고, 서론에서도 언급했듯이 이는 지역 및 계절적 특성에 따른 구름 및 강수 유형의 차이에서 기인한다. Table 1에서는 총 6개의 대표적인 강수입자분포 모형을 제시하였으며, 본 연구에서 활용되는 관측 자료(강수율, 강수입자의 크기별 수농도)가 제한적이기 때문에 고려되는 원형모형은 M-P 분포 모형(Marshall and Palmer, 1948)과 개선된  $\Gamma$  분포 모형(Ulbrich, 1983)이며, 다른 모형의 경우는 입자분포 모형을 검증하기 위해 필요로 하는 관측 자료의 획득이 어렵기 때문에 원형모형으로 활용이 불가능하였다. M-P 분포 모형과 개선된  $\Gamma$  분포

**Table 1.** Models of rainfall drop-size distribution developed by previous studies

Model	Expression	Reference
L-P distribution	$N_D = \frac{R_{pD}}{6\pi \times 10^{-4} v_D D^3}$	Laws and Parsons (1943)
M-P distribution	$N(D) = N_0 \exp(-AD)$	Marshall and Palmer (1948)
Modified $\Gamma$ -distribution	$N(D) = N_G D^\alpha \exp(-AD)$	Ulbrich (1983)
log-normal DSD	$N(D) = \frac{N_T}{\sigma D \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln D - \mu]^2\right\}$	Ajayi and Olsen (1985)
Ihara model	$N(D) = 1.73 \times 10^4 R^{-0.16} \exp(-5.11 R^{-0.25} D)$	Ihara et al. (1986)
Beta method	$N(D) = N_w f(\mu)(D/D_0)^\mu \exp(-(3.67 + \mu)(D/D_0))$	Brandes et al. (2004)

모형은 각각 식 (2)와 (3)에서 알 수 있듯이 지수함수로 표현된다.

$$N(D) = N_0 \exp(-AD) \text{ (cm}^{-4}\text{): M-P 분포} \quad (2)$$

$$N(D) = N_G D^\alpha \exp(-AD) \text{ (cm}^{-4}\text{): 개선된 } \Gamma \text{ 분포} \quad (3)$$

Ulbrich (1983)에 의해 제안된 개선된  $\Gamma$  분포 모형은 Willis (1984)와 Willis and Tattleman (1989)에서 자세히 논의되었다. 개선된  $\Gamma$  분포 모형은 M-P 분포 모형과 비교하여 복잡한 형태를 가진다. 여기서, 각 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$$A = 5.5880/D_0 \quad (4)$$

$$\alpha = 2.160 \quad (5)$$

$$N_G = \frac{512.85M \times 10^{-6}}{D_0^4} \left(\frac{1}{D_0}\right)^{2.160} \quad (6)$$

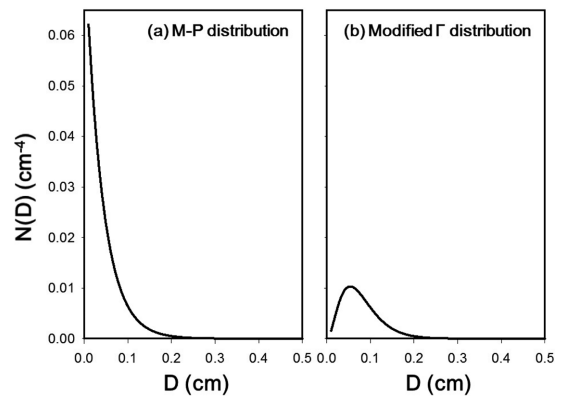
$D_0$ 은 중간체적 직경인데 Willis (1984)에서 자세히 기술되며, 다음과 같이 구해진다.

$$D_0 = 0.1557M^{0.1681} \text{ (cm)} \quad (7)$$

$M$ 은 수분함량으로, 강수율( $R$ ; mm hr<sup>-1</sup>)에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$M = 0.062R^{0.913} \text{ (g m}^{-3}\text{)} \quad (8)$$

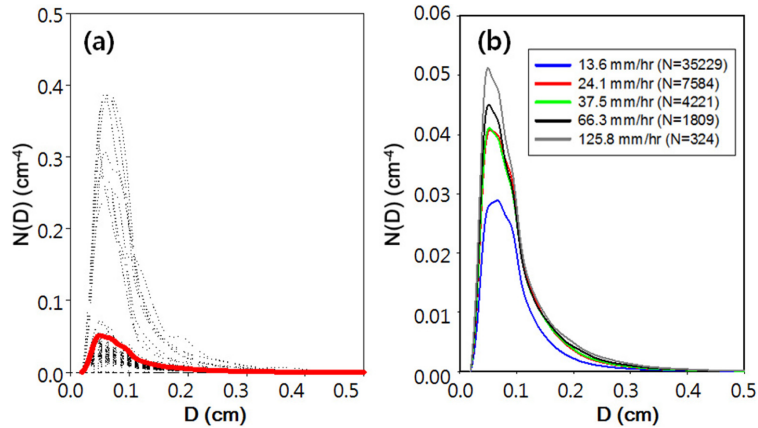
Fig. 3은 강수율을 10 mm hr<sup>-1</sup>로 가정할 때, M-P 분포 모형과 개선된  $\Gamma$  분포 모형에 따른 강수입자 분포를 나타낸다. M-P 분포 모형의 경우는 입자의



**Fig. 3.** Rainfall drop-size distributions calculated from (a) M-P distribution and (b) modified  $\Gamma$  distribution with  $R$  (rainfall rate)=10 mm/hr.

직경이 작을수록 많은 입자의 수농도가 높아지지만, 개선된  $\Gamma$  분포 모형의 경우는 강수입자의 직경이 약 0.05 cm 이하인 경우에 큰 차이를 보인다. 강수율이 변하여도 강수입자의 분포 양상은 유사하며, 강수입자의 크기별 수농도의 값만 변하는 양상을 보인다 (Ulbrich, 1983; Willis, 1984; Willis and Tattleman, 1989).

두 모형은 서로 명확히 다른 강수입자분포 양상을 보이기 때문에 본 연구에서는 강수입자분포 측정 자료의 입자분포 양상과 각 모형의 유사성을 확인하여 원형 모형이 결정된다. 결정된 원형 모형의 강수입자 분포와 측정 자료의 강수입자분포는 유사한 양상을



**Fig. 4.** Rainfall drop-size distributions depending on rainfall rates. (a) Black dotted lines indicate rainfall drop-size distributions with  $R > 100 \text{ mm hr}^{-1}$  and red line indicates rainfall drop size distribution with  $R = 125.8 \text{ mm hr}^{-1}$  (mean rainfall rate of  $R > 100 \text{ mm hr}^{-1}$ ). (b) Lines indicate mean rainfall drop-size distributions at mean rainfall rates between 10-20, 20-30, 30-50, 50-100, and 100-200  $\text{mm hr}^{-1}$ , respectively. Ndata indicates number of data used for averaging.

보이지만, 최대 수농도, 최대 수농도를 가지는 강수 입자의 직경, 강수입자분포의 강수입자 크기에 따른 변화율 등이 상이할 것이므로, 이러한 요소들을 일치시키기 위해 민감도 실험을 통해 매개변수를 보정하였다. 구체적인 방법은 원형모형이 결정된 이후에 적용 가능하기 때문에, 연구 결과에서 다시 자세히 기술하였다.

### 연구 결과

#### 강수입자분포 원형 모형

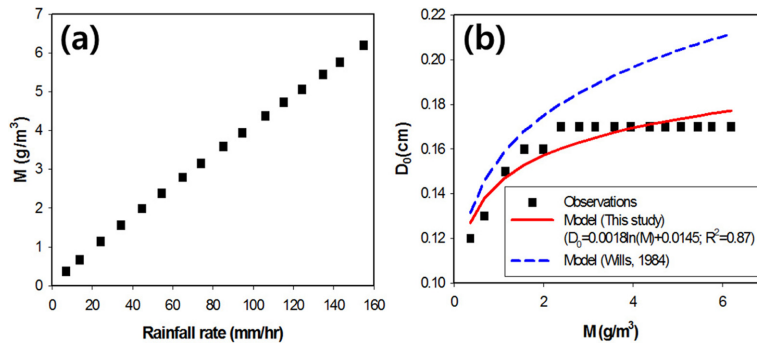
Fig. 4는 대관령 구름물리 관측소의 광학우적계 측정으로부터 산출된 자료를 활용한 강수율에 따른 강수입자분포를 나타낸다. Fig. 4a는 강수율이  $100 \text{ mm hr}^{-1}$  이상인 경우에 강수입자분포의 단일 자료들을 제시하고 있는데, 그림에서 알 수 있듯이 단일 자료들의 분포의 양상은 유사하지만, 단일자료는 어느 정도의 편차를 가지고 있다. 이러한 편차는 강수시스템의 유형에 따라 강수입자의 분포가 다르기 때문인데, 하나의 강수시스템 안에서 층상형과 대류형이 공존하여 존재하는 경우가 많기 때문에 강수입자 분포의 변동성이 크게 나타난다고 사료된다. 따라서 단일 자료로부터 명확한 강수입자분포 양상을 산출하기는 한계가 있다. 그러나 Fig. 4a의 붉은색 실선과 같이 구간의 평균 분포를 그려보면 강수입자분포의 명확한 양상을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강수율을 기준으로 구간을 나누어서 구간 평균 강수율에

따른 평균 강수입자분포를 산출하였다(Fig. 4b). 강수율이 10-20, 20-30, 30-50, 50-100, 100-200  $\text{mm hr}^{-1}$ 인 구간에서 평균 강수율은 각 13.6, 24.1, 37.5, 66.3, 125.8  $\text{mm hr}^{-1}$ 였으며, 각 평균 강수율에 대한 평균 강수입자분포가 Fig. 4b에서 제시된다. 강수율이 증가함에 따라 최대 강수입자 수농도는 증가하였으며, 평균 강수율에 관계없이 최대 강수입자 수농도를 가지는 입자의 크기는 약 0.06-0.07  $\text{cm}$ 였다. 이러한 분포는 Willis (1984)에서의 강수입자분포와 유사하게 개선된  $\Gamma$  분포를 따르지만, 최대 수농도의 입자 크기(Willis (1984)에서는 약 0.05  $\text{cm}$ 로 제시) 및 최대 수농도는 다른 양상을 보인다. 따라서 본 연구에서는 개선된  $\Gamma$  분포 모형을 원형 모형으로 결정하고, 관측 자료와 유사성이 높은 매개변수를 산출하고자 한다.

#### 개선된 $\Gamma$ 분포 모형의 매개변수

강수입자분포의 유사성에 근거하여 원형모형으로 결정된 개선된  $\Gamma$  분포 모형은 아래와 같은 과정을 거쳐 모형에서 사용되는 모든 매개변수를 재산정하여 강수율에 따른 강수입자분포가 결정된다.

- 1단계: 강수율( $R$ )을 활용한 수분함량( $M$ ) 산출
- 2단계: 수분함량( $M$ )을 활용한 중간체적직경( $D_0$ ) 산출
- 3단계: 중간체적직경( $D_0$ )과 수분함량( $M$ )을 활용한 매개변수  $\Lambda$  과  $N_G$  값 산출( $\alpha=2.160$ 으로 일정)
- 4단계: 1-3단계에 의해 산출된 매개변수( $N_G, \alpha$ ,



**Fig. 5.** Correlations (a) between rainfall rates and liquid water contents and (b) between liquid water contents and volume median diameters.

A)를 활용하여 강수입자분포 결정

본 연구에서 매개변수 결정 과정은 위에서 제시한 개선된  $\Gamma$  분포 모형에 의한 강수입자분포 산출 과정을 따른다. 대관령 구름물리 관측소에서의 활용 가능한 수분함량( $M$ ) 자료 부재로 1단계에서의 수분함량 산출 관계식은 Willis (1984)의 모형(식 (8))을 사용하였다(Fig. 5a). Fig. 5a에서 알 수 있듯이, 강수율과 수분함량은 선형의 관계를 가진다. 강수율에 따른 중간체적직경을 결정하기 위해서 광학우적계로부터 산출된 강수입자분포 자료를 활용하였다. 식 (8)로부터 산출된 강수율에 따른 수분함량과 광학우적계 자료로부터 획득한 중간체적직경의 관계는 Fig. 5b와 같으며, 다음과 같은 관계식을 따른다.

$$D_0 = 0.0178 \times \ln(M) + 0.1447 \text{ (cm)} \quad (9)$$

식 (8)-(9)를 통해 강수율로부터 수분함량과 중간체적직경이 결정되면, 원형 모형은 다음과 같은 일반화식(식 (10)-(12))으로 표현할 수 있다.

$$N(D) = N_G D^\alpha \exp(-AD) \text{ (cm}^{-4}\text{)} \quad (10)$$

$$A = A/D_0 \quad (11)$$

$$N_G = \frac{BM \times 10^{-6}}{D_0^4} \left(\frac{1}{D_0}\right)^\alpha \quad (12)$$

광학우적계 측정 자료로부터 산출한 강수입자분포를 가장 잘 모의하는 매개변수  $\alpha$ , A, B 값을 산출하기 위해서, 각 매개변수의 특성을 조사하였다.  $\alpha$ , A, B 값에 따라 강수입자분포가 달라지는 양상을 분석하기 위해 매개변수를 변화시키면서 민감도 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 6에서 제시한다. 강수율의 변화에 따른 강수입자분포의 변화를 반영하기 위

해서 강수율에 따른 매개변수를 산출하기 위해서 각 강수율 구간(10-20, 20-30, 30-50, 50-100, 100 mm hr<sup>-1</sup> 이상)의 평균 강수율인 13.6, 24.1, 37.5, 66.3, 125.8 mm hr<sup>-1</sup>를 민감도 실험을 위한 기준 강수율로 선정하였다.  $\alpha$ 가 증가함에 따라 최대 수농도는 감소하고, 최대 수농도를 가지는 입자의 직경은 감소한다(Fig. 6a).  $\alpha$ 의 영향과는 반대로, A 값이 증가하면 최대 수농도는 증가하지만, A는 최대 수농도를 가지는 입자의 직경에는 영향을 주지 않는다(Fig. 6b).  $\alpha$  값과 마찬가지로 B 값이 증가함에 따라 최대 수농도는 감소하지만,  $\alpha$ 의 영향과는 다르게 최대 수농도를 가지는 입자의 직경은 감소하는 경향을 보인다. 각 매개변수가 강수입자분포에 미치는 영향을 분석한 결과,  $\alpha$ , A, B의 세 가지 매개변수는 각 강수입자분포에 미치는 영향이 서로 상이하기 때문에, 하나의 매개변수 값은 다른 매개변수 결정에 영향을 준다. 따라서 하나의 매개변수를 우선적으로 결정 한 후 다른 매개변수를 순차적으로 결정하는 과정을 통해 효과적으로 매개변수를 산정할 수 있다. 특히, 강수입자분포의 너비는 매개변수 B에 민감하게 변하기 때문에 본 연구에서는 B 값을 우선적으로 결정하였다. B 값이 약 0.9에서 광학우적계로부터 산출된 강수입자분포와 유사한 너비를 가지기 때문에 B 값은 0.9로 고정하고  $\alpha$ 와 A 값을 변화시키면서 관측 자료와 높은 상관성을 보이는 규격화 모델 매개변수를 산출하였다. A의 경우 최대 수농도에만 영향을 주기 때문에, 우선적으로  $\alpha$  값을 결정하여 최대 수농도를 가지는 입자의 크기를 맞춰주고, 마지막으로 A 값을 변화시키면서 최대 수농도 값을 맞춰주는 과정을 통해 매개변수를 결정하였다. Table 2는 민감도 실험을 통해 산출된 강수량에 따른 매개변수  $\alpha$ , A, B 값을

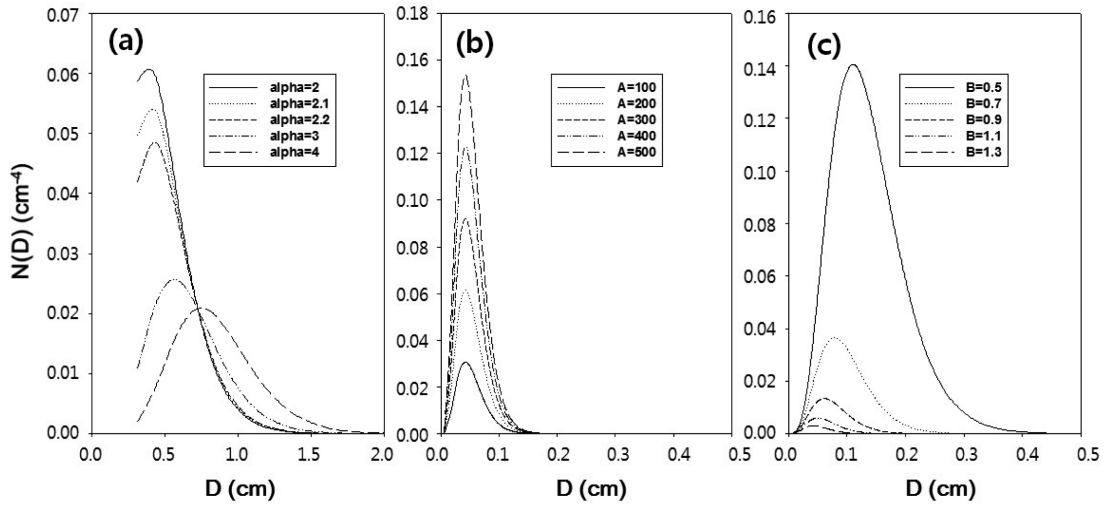


Fig. 6. Rainfall drop-size distributions with variations of (a)  $\alpha$ , (b) A, and (c) B.

Table 2. Parameters with rainfall rates decided by sensitivity experiments

Rain rate (mm hr <sup>-1</sup> )	13.6	24.1	37.5	66.3	125.8
$\alpha$	4.0	3.8	3.6	3.2	2.8
A	22	32	34	37	61
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

제시하며, 각 매개변수를 식 (10)-(12)에 적용하면 다음과 같이 강수량에 따른 강수입자분포 모형을 제시할 수 있다.

$$R=13.6 \text{ mm hr}^{-1}: N(D)=12.4D^{4.2}\exp(-6.5D) \quad (13)$$

$$R=24.1 \text{ mm hr}^{-1}: N(D)=11.4D^{3.8}\exp(-6.1D) \quad (14)$$

$$R=37.5 \text{ mm hr}^{-1}: N(D)=8.6D^{3.6}\exp(-5.8D) \quad (15)$$

$$R=66.3 \text{ mm hr}^{-1}: N(D)=6.2D^{3.2}\exp(-5.5D) \quad (16)$$

$$R=125.8 \text{ mm hr}^{-1}: N(D)=4.6D^{2.8}\exp(-5.2D) \quad (17)$$

### 대관령 지역의 강수입자분포 모형

민감도 실험을 통해 산출한 강수량에 따른 강수입자분포 모형과 광학우적계 측정 자료의 강수입자분포를 강수율에 따라 비교하였다(Fig. 7). 모든 강수율 구간에서 측정자료와 모형은 매우 높은 상관성을 보이며(Fig. 7a-e), 전 강수율 구간에 대한 자료의 상관성도 매우 높은 것을 확인하였다( $R^2=0.975$ ). Willis (1984)의 모형은 강수량이 변함에 따른  $\alpha$ 와 A 값의 변화를 무시하고 일정한 값을 사용하였지만( $\alpha=2.16$ ,  $A=5.588$ ), 본 연구에서는  $\alpha$ 와 A 값이 강수량에 따

라 민감하게 변하기 때문에(B 값은 0.9로 고정), 강수입자분포 모형의 일반적인 형태를 산출하기 위해서는 매개변수  $\alpha$ 와 A 값을 강수율에 대한 함수로 규격화하여야 한다.

강수율에 따라  $\alpha$ 와 A가 변하는 양상은 Fig. 8에서 제시하며, 산출되는 상관식은 다음과 같다.

$$\alpha=6.2077 \times R^{-0.16} \quad (18)$$

$$A=6.4846 \times R^{0.4652} \quad (19)$$

이로부터, 최종적으로 산출된 강수입자분포 모형은 다음과 같이 강수량의 함수로 제시할 수 있다.

$$N(D)=N_G D^\alpha \exp(-AD) \quad (20)$$

$$A=0.9/D_0 \quad (21)$$

$$\alpha=6.2077 \times R^{-0.16} \quad (22)$$

$$N_G = \frac{6.4846 R^{0.4652} M \times 10^{-6} \left(\frac{1}{D_0}\right)^\alpha}{D_0^4} \quad (23)$$

$$D_0=0.0178 \times \ln(M)+0.1447 \quad (24)$$

$$M=0.062 R^{0.913} \quad (25)$$

최종 모형을 사용하여 강수율에 따른 강수입자분포를 산출한 결과와 광학우적계 측정 자료를 비교한 결과는 Fig. 9에서 제시한다. 본 연구에서 개선된 일반화된 강수입자분포 모형(식 (20)-(25))은 강수율에 따라 구분된 강수입자분포 모형(식 (13)-(17))과 유사한 정확도를 보이며, 대관령 지역의 강수입자분포를 잘 모의하고 있다.



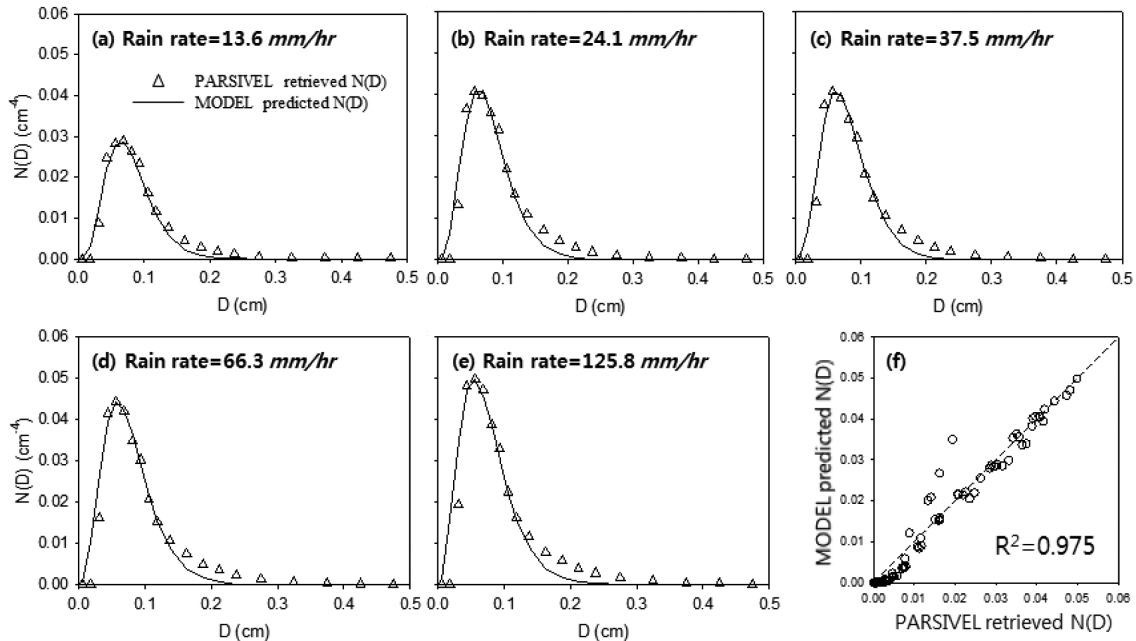


Fig. 7. (a)-(e) PARSIVEL-retrieved and model-predicted rainfall drop-size distributions at specific rainfall rates and (f) correlation between observation and model prediction.

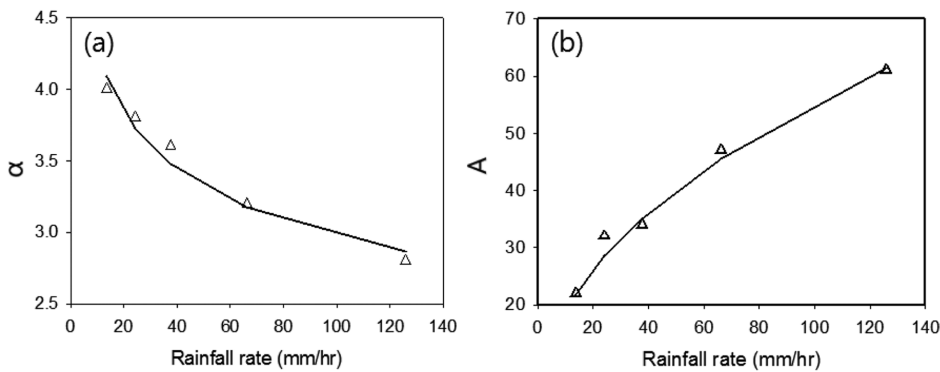
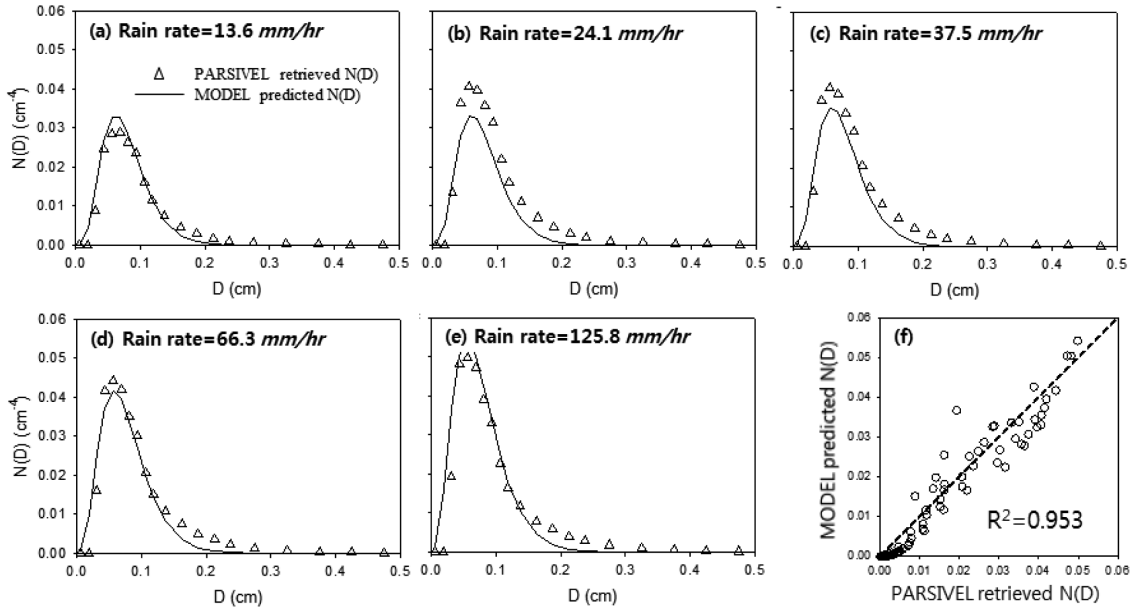


Fig. 8. Variations of (a)  $\alpha$  and (b)  $A$  with variation of rainfall rates.

### 요약 및 결론

본 연구는 광학우적계에 의해 산출된 강수입자분포 자료를 활용하여 강수입자분포 모형을 개선하는 것을 목적으로 한다. 다양한 선행 연구에서 개발된 강수입자분포 모형과 측정 자료와의 비교를 통해 대관령 지역의 강수입자분포를 가장 잘 모의하는 개선된  $\Gamma$  분포 모형을 원형모형으로 결정하였다. 그러나 선행 연구에서 제안된 모형은 분포 양상은 일치하였으나, 최대 강수입자 수농도 및 최대 강수입자 수농도를 가지는 강수입자의 크기 등에서는 큰 차이를 보

였다. 따라서 원형모형에서 활용되는 매개변수 산출을 위하여 광학우적계 강수입자 측정 자료를 활용하였으며, 산출된 매개변수는 선행 연구에서 제안된 모형의 매개변수와 큰 차이를 보였다. 특히 강수입자의 크기 및 강수율에 따른 매개변수의 변화 양상은 현저한 차이가 있음을 확인하였다. 1차적으로 강수율에 따른 강수입자분포 모형을 제안하였으며, 강수율에 따른 강수입자분포모형을 일반화시키기 위하여 각 매개변수도 강수율에 따른 함수로 규격화하여 일반화된 강수입자분포 모형을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 일반화된 강수입자분포 모형은 대관령 지역의



**Fig. 9.** Comparisons between PARSIVEL-retrieved and generalized model-predicted rainfall drop-size distributions. (a)-(e) and (f) indicate comparative results at specific rainfall rates and correlation using all data, respectively.

광학우적계로부터 산출된 강수입자분포를 비교한 결과 대관령의 강수입자분포를 잘 모의하고 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 대관령 지역의 강수입자분포 모형은 지상측정 자료로부터 산출되었으며, 고도에 따른 강수입자분포를 모의하기 위해서는 강수율의 연속분포 자료가 요구된다. 따라서 강수율의 연속분포 산출을 위한 연구가 추가적으로 수행된다면, 본 연구 결과와 연계하여 3차원 강수입자분포 모의가 가능할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 국방과학연구소 “기상자료 가공 및 분석 용역(과제번호: UE135059GD)”의 지원을 받아 수행되었으며, 저자 박래설은 기상청의 지원을 받는 한국형수치예보모델개발사업단의 연구과제의 지원을 받았습니다.

## References

Ajayi, G.O. and Olsen, R.L., 1985, Modelling of tropical raindrop size distribution for microwave and millimeter wave applications. *Radio Science*, 20, 193-202.

Brandes, E.A., Zhang, G., and Vivekanandan, J., 2004, Comparison of polarimetric radar drop size distribution retrieval algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21, 584-598.

Cecchini, M.A., Machado, L.A.T., and Artaxo, P., 2014, Droplet Size Distributions as a function of rainy system type and Cloud Condensation Nuclei concentrations. *Atmospheric Research*, 143, 301-312.

Cha, J.-W., Chang, K.-H., Oh, S.-N., Choi, Y.-J., Jeong, J.-Y., Jung, J.-W., Yang, H.-Y., Bae, J.-Y., and Kang, S.-Y., 2010, Analysis of observational cases measured by MRR and PARSIVEL disdrometer for understanding the physical characteristics of precipitation. *Atmosphere*, 20, 37-47. (in Korean)

Ihara T., Furuhashi, Y., and Manabe, T., 1986, Modification of Morita and Higuti's prediction method of lognormal rain attenuation distribution by using spatial correction of specific attenuation. *The Institute of Electronics, Informations and Communication Engineers Transaction*, E69, 139-147.

Jung, S.-P., Lim, Y.-K., Kim, K.-H., Han, S.-O., and Kwon, T.-Y., 2014, Characteristics of precipitation over the east coast of Korea based on the special observation during the winter season of 2012. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 35, 41-53. (in Korean)

Laws, J.O. and Parsons, D.A., 1943, The relation of raindrop-size to intensity. *Transaction American Geophysical Union*, 24, 452-460.

- Lee, B.-E., Riu, K.-J., Shin, S.-H., and Kwon, S.-B., 2003, Development of a water droplet erosion model for large steam turbine blades. *Korean Society of Mechanical Engineers International Journal*, 17, 114-121. (in Korean)
- Marshall, J.S. and Palmer, W.McK., 1948, Short contributions: The distribution of raindrops with size. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 5, 165-166.
- Oh, S.N. and Jung, J.W., 2013, Measurements of cloud raindrop particles using the ground optical instruments and small doppler radar at Daegwallyeong mountain site. *Korean Remote Sensing*, 29, 293-306.
- Petty, G.W. and Huang, W., 2011, The modified gamma size distribution applied to inhomogeneous and nonspherical particles: Key relationships and conversions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68, 1460-1473.
- Ranger, A.A. and Nicholls, J.A., 1969, Aerodynamics shattering of liquid drops. *The American Institute Aeronautics and Astronautics Journal*, 7, 285-290.
- Rha, D.-K., Kwak, C.-H., Suh, M.-S., and Hong, Y., 2005, Analysis of the characteristics of precipitation over South Korea in terms of the associated synoptic patterns: A 30 Years Climatology (1973-2002). *Journal of the Korean Earth Science Society*, 26, 732-743. (in Korean)
- Sekhon, R.S. and Srivastava, R.C., 1970, Snow size spectra and radar reflectivity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 27, 299-307.
- Ulbrich, C.W., 1983, Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, 1764-1775.
- Willis, P.T., 1984, Functional fits to some observed drop size distributions and parameterizations of rain. *Journal of Atmospheric Science*, 41, 1648-1661.
- Willis, P.T. and Tattelman, P., 1989, Drop-size distributions associated with intense rainfall. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 28, 3-15.
- Yang, H.-Y., Chang, K.-H., Cha, J.-W., Choi, Y.-J., and Ryu, C.-S., 2012, Characteristics of precipitable water vapor and liquid water path by microwave radiometer. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 33, 233-241. (in Korean)

---

Manuscript received: July 1, 2014

Revised manuscript received: October 5, 2014

Manuscript accepted: October 21, 2014