

이중편파레이더 시뮬레이터 개발을 위한 2차원 영상우적계 관측자료의 활용가능성 연구

김해림* · 박혜숙 · 박향숙 · 박종서
기상청 기상레이더센터 레이더분석과

(접수일: 2013년 12월 27일, 수정일: 2014년 4월 18일, 게재확정일: 2014년 5월 6일)

Study on the Application of 2D Video Disdrometer to Develop the Polarimetric Radar Data Simulator

Hae-Lim Kim*, Hye-Sook Park, Hyang Suk Park, and Jong-Seo Park

Radar Analysis Division, Weather Radar Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 27 December 2013; revised 18 April 2014; accepted 6 May 2014)

Abstract The KMA has cooperated with the Oklahoma University in USA to develop a Polarimetric Radar Data (PRD) simulator to improve the microphysical processes in Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS), which is critical for the utilization of PRD into Numerical Weather Prediction (NWP) field. The simulator is like a tool to convert NWP data into PRD, so it enables us to compare NWP data with PRD directly. The simulator can simulate polarimetric radar variables such as reflectivity (Z), differential reflectivity (Z_{DR}), specific differential phase (K_{DP}), and cross-correlation coefficient (ρ_{hv}) with input of the Drop Size Distribution (DSD) and scattering calculation of the hydrometeors. However, the simulator is being developed based on the foreign observation data, therefore the PRD simulator development reflecting rainfall characteristics of Korea is needed. This study analyzed a potential application of the 2-Dimension Video Disdrometer (2DVD) data by calculating the raindrop axis ratio according to the rain-types to reflect Korea's rainfall characteristics into scattering module in the simulator. The 2DVD instrument measures the precipitation DSD including the fall velocity and the shape of individual raindrops. We calculated raindrop axis ratio for stratiform, convective and mixed rainfall cases after checking the accuracy of 2DVD data, which usually represent the scattering characteristics of precipitation. The raindrop axis ratio obtained from 2DVD data are compared with those from foreign database in the simulator. The calculated the dual-polarimetric radar variables from the simulator using the obtained raindrop axis ratio are also compared with in situ dual-polarimetric observation data at Bislsan (BSL). 2DVD observation data show high accuracies in the range of 0.7~4.8% compared with in situ rain gauge data which represents 2DVD data are sufficient for the use to simulator. There are small differences of axis ratio in the diameter below 1~2 mm and above 4~5 mm, which are more obvious for bigger raindrops especially for a strong convective rainfall case. These differences of raindrop axis ratio between domestic and foreign rainfall data base suggest that the potential use of disdrometer observation can develop of a PRD simulated suitable to the Korea precipitation system.

Key words: Dual-polarimetric radar simulator, axis ratio, T-matrix, 2D video disdrometer, BSL dual-polarimetric radar

*Corresponding Author: Hae-Lim Kim, Weather Radar Center, 61 Yeouidaebang-ro, 16-gil, Dongak-gu Seoul 156-720, Korea.
Phone : +82-2-2181-0874, Fax : +82-2-2181-0879
E-mail : hlk0919@korea.kr

1. 서 론

기상청은 2013년 백령도를 시작으로 2018년까지 전국 레이더 관측망을 이중편파레이더로 교체할 계획을 추진 중이다. 이중편파레이더는 반사도 외에 단일편파레이더가 제공하지 못했던 변수들을 관측하기 때문에 레이더 관측자료의 품질 향상뿐만 아니라 비, 눈, 우박 등의 강수유형을 분류할 수 있는 장점이 있다. 이러한 이중편파레이더의 장점은 레이더 관측 영상의 실시간 초단기 예보지원을 강화할 뿐만 아니라, 이중편파레이더 관측자료를 수치모델에 활용할 수 있는 가능성도 증대하게 된다.

수치모델은 직접적으로 기상현상을 관측하지 않고도 이를 예측할 수 있다. 그러나 수치모델은 적절한 관측자료와 함께 검증되어야 한다는 한계를 가지고 있다. 이에 이중편파레이더 관측자료를 활용함으로써 강수계의 역학, 열역학 그리고 미세물리과정 연구 등 강수계에 대한 이해 향상을 통해 수치예보 결과를 검증할 수 있으며, 자료동화를 통한 수치예보 정확도 향상을 기대할 수 있다. 또한 이중편파레이더 관측자료 형태를 통하여 수치모델 자료를 보다 쉽게 이해하면서 악기상 예측 및 종합적 분석지원이 가능하다. 이에 기상청에서는 “초단기 예보모델(KLAPS: Korea Local Analysis and Prediction System) 강수물리과정 개선을 위한 이중편파레이더 시뮬레이터 개발” 연구를 미국 오클라호마 대학과 공동으로 수행하였다. KLAPS는 현재 1시간 간격으로 3시간까지 대국민 서비스되는 초단기 동네예보에 활용되고 있는 모델로써 WDM (WRF Double Momentum)-6 강수물리과정을 이용하고 있다.

이중편파레이더 시뮬레이터는 수치모델자료를 이중편파레이더 관측자료 형태로 또는 관측자료를 수치모델 자료의 형태로 상호 변환시켜주는 역할을 함으로써, 수치모델 결과와 레이더 관측자료의 직접 비교를 가능하게 해주며, 모델의 미세물리과정 평가나 검증에 이중편파레이더 관측자료가 직접 이용될 수 있도록 해준다(Jung *et al.*, 2010). 또한 시뮬레이터의 결과는 자료동화(Jung *et al.*, 2008b; Jung *et al.*, 2010), 분석장 및 수치예보 검증(Jung *et al.*, 2012), 강수계의 역학연구(Snyder *et al.*, 2013; Dawson *et al.*, 2014) 및 미세물리과정의 검증 등 다양한 연구분야에 활용되고 있다.

이중편파레이더 시뮬레이터는 수치모델에서 제공하는 강우나 눈, 싸락눈 등의 비습과 총 입자개수 등을 입력자료로 이용하여 입자크기분포도를 계산하고 T-matrix(T-행렬) 산란방법을 이용하여 입자에 따른 산란계수를 계산한 후, 반사도(Reflectivity, Z), 차등반사도(Differential Reflectivity, Z_{DR}), 비차등위상차(Specific

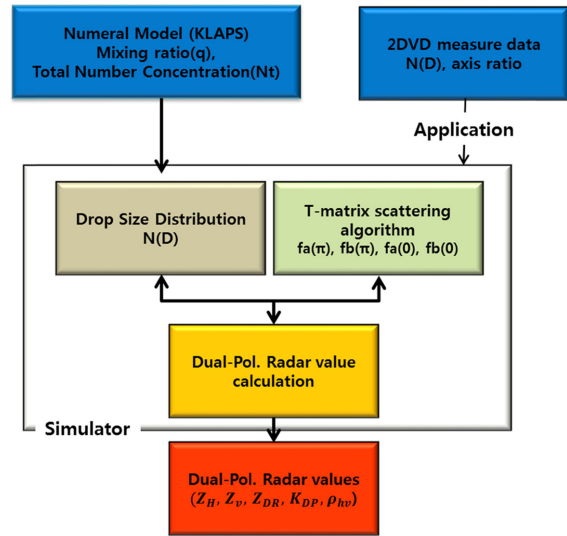


Fig. 1. Conceptual diagram of dual polarimetric radar simulator.

Differential Phase, K_{DP}), 교차상관계수(Cross-correlation Coefficient, ρ_m)의 이중편파변수를 모의한다(Fig. 1). 시뮬레이터를 통해 모의되는 이중편파변수는 강우입자의 크기분포에 따라 강수생산과정이 달라지기 때문에 강우유형별 산란특성에 따라 좌우된다. 그러나 개발된 시뮬레이터에 내장된 입자산란계수는 강우유형의 구분 없이 전체 강우시스템을 대표하는 강우입자의 장축과 단축의 비율인 축비(axis ratio) 방정식을 T-matrix 산란방법을 이용하여 계산하고 있다. 이는 미국의 강수특성을 기반으로 생성된 것으로 한국의 강수시스템을 반영하지 못한다. 따라서 한국의 강수특성에 맞는 시뮬레이터를 개발하기 위해서는 국내 관측자료를 기반으로 한반도에서 발생하는 강우유형별로 사례를 분석하고 이에 따른 각각의 특성이 산란모델에 반영되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 관측된 2차원 영상우적계(2 Dimensional Video Disdrometer, 이하 2DVD라고 함) 자료를 이용하여 한반도 강수특성을 시뮬레이터에 반영하고자 하였다. 특히 강우입자의 산란특성은 입자의 축비에 따라 달라지기 때문에 강우유형별 입자의 축비 관계식을 도출하여 시뮬레이터에 사용된 축비 관계식과 비교함으로써, 2DVD 관측자료를 이용한 한반도 강수특성 분석 및 시뮬레이터 활용가능성을 분석하였다. 이를 위해 먼저 2DVD 관측자료의 품질을 검증하고, 2DVD 관측자료로부터 산출된 강우의 축비 경험식을 시뮬레이터에 적용하여 모의된 이중편파변수와 관측된 이중편파레이더 변수를 비교함으로써 레이더관측 자료의 품질검증 가능성도 조사

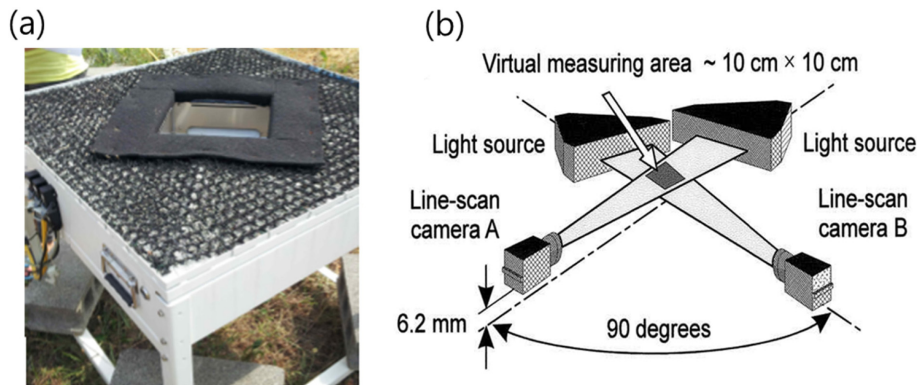


Fig. 2. (a) Photograph of the 2DVD, (b) principle of operation.

하였다. 2장에서는 본 연구에 사용된 2DVD, 지상우량계(rain gauge) 그리고 비슬산 이중편파레이더 관측자료에 대해 설명하였고, 3장에서는 2DVD 관측자료의 품질관리 방법을 나타내었다. 4장에서는 지상우량계 자료와 비교를 통하여 2DVD 관측자료의 정확도 검증과 2DVD 자료로부터 강우입자의 축비 관계식 도출 과정, 그리고 시뮬레이터를 이용하여 모의된 이중편파레이더변수와 비슬산 이중편파레이더 변수를 비교한 결과를 나타내었다. 마지막으로 요약 및 향후 계획은 5장에 제시하였다.

2. 관측자료

본 연구에서는 한반도에서 발생하는 강수계의 강우 특성을 분석하기 위해 대구 경북대학교(35.9°N, 128.6°E)에 설치되어 있는 2DVD와 지상우량계, 그리고 비슬산의 S-밴드 이중편파레이더 관측자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 2DVD는 compact 2DVD version으로 이의 수평관측 해상도는 약 0.2 mm이며 수직관측 해상도는 연직속도가 10 m s⁻¹ 미만일 때 약 0.2 mm이다.

2DVD는 비, 눈, 우박 등 대기수상체 입자의 낙하속도, 모양, 직경 등을 지상에서 측정할 수 있는 기기로, 일반적으로 가로, 세로 약 1 m에 해당하는 정사각형을 가진다(Fig. 2a). 이 정사각형 2DVD 기기 안에는 2개의 전구와 이 전구의 빛을 반사시켜 주는 거울과 렌즈, 2대의 라인스캔(line-scan) 카메라, 그리고 카메라를 통해 기록된 정보를 저장하는 CPU 등이 들어 있다. 2DVD 관측기기 한 가운데에는 정사각형 구멍이 뚫려 있고 이 구멍으로 빗방울이 통과함으로써 각각의 빗방울 정보들이 기록된다(Fig. 2b). 2DVD 내부의 라인스캔 카메라는 한 열의 픽셀들로부터 대기수상체 각 입자에 대한 모양을 측정한다. 그 원리는 스캔 카메라가 빛을 지속적으로 받아들이다가 떨어지는

강수입자가 빛을 막으면 그 그림자를 라인스캔 카메라가 인식하여 그림자 부분을 기록하게 된다. 각 입자들의 정보는 시간차마다 인식된 그림자들을 차례대로 조합하여 유추되며, 입자의 직경, 부피, 낙하속도, 면적 등의 정보가 기록된다(Kruger and Krajewski, 2002). 강우입자의 산란특성을 나타내는 입자의 축비(r)은 2DVD에서 관측된 입자의 편평도(oblateness)를 이용하여 산출한다. 강우 입자의 축비는 식 (1)과 같이 장축의 반경 (a)에 대한 단축의 반경 (b) 비와 같다.

$$r = b/a, \tag{1}$$

본 연구에서는 2DVD 관측자료를 지상에서 관측한 값으로 시뮬레이터에 이용하기 위해 먼저 2DVD 관측자료의 정확도를 검증하였다. 정확도 검증을 위해 2DVD 관측지점과 동일한 위치에 있는 지상우량계 관측자료를 이용하여 강우량을 비교하였다. 지상우량계는 버킷 형식으로 한 버킷당 최소 관측 강우량은 0.2 mm이다.

한편, 지상우량계 자료를 통해 검증된 2DVD 관측자료를 사용하여 시뮬레이터로부터 모의된 이중편파변수를 관측자료와 비교하기 위해 2DVD 관측지점과 가장 가까운 비슬산 S-밴드 이중편파레이더(조화봉 해발 1057 m, 35.7°N, 128.5°E) 관측자료를 이용하였다. 비슬산 이중편파레이더는 국토교통부에서 2009년부터 운영중인 레이더로, 2DVD 관측 지점으로부터 약 17° 방위각으로 22.28 km 떨어진 곳에 위치한다(Fig. 3). 비슬산 이중편파레이더의 기본사항은 Table 1과 같다. 시뮬레이터를 이용하여 2DVD 관측자료로부터 이중편파변수를 모의할 수 있어도 2DVD 관측자료는 한 지점에서의 자료이고, 레이더 관측자료는 볼륨자료이기 때문에 두 자료를 비교하기 위해서는 상호 일치 지점을 선정하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 2DVD 위치를 중심으로 가장 가까운 1개의 방위각과 2DVD 위치를 중심으로 앞과 뒤의 4개 게이트, 즉 총

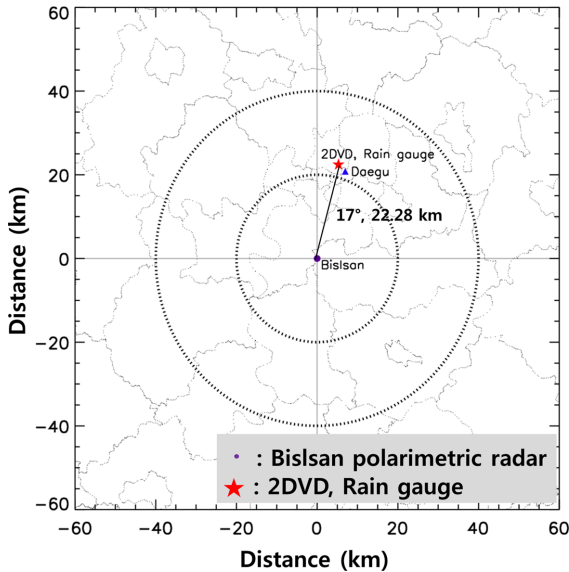


Fig. 3. Observation range of dual-polarization weather radar in Bislan, the full circle represents BSL site, star represents the 2DVD and rain gauge site.

Table 1. Description of S-band dual-polarization radar in Bislan.

Characteristics	Description
Lat/Lon	35° 42' 54", 128° 32' 12"
Sea level of antenna	1,085 m
Frequency	2,795 MHz (S-band)
Transmitter type	Klystron
Antenna polarization	Simultaneous H/V
Transmitter peak power	750 KW
Beam width of radar	0.95°
Variable	Z, V _r , SW, Z _{DR} , Φ _{DBZ} , K _{DBZ} , ρ _{hv}
Observation Frequency	2.5 min
(Weather Range)	150 km
radar) Gate size	125 m
Elevations	-0.5°~1.6° (6 elevations)

9개 게이트(1° × 9 gate)에서 추출한 자료를 산술 평균하여 사용하였다. 이때 비교대상과의 고도 차이와 지형에 의한 영향을 최소화하기 위해 0.0° 고도각에서 관측된 PPI 자료를 사용하였다.

3. 연구방법

3.1 2DVD 자료 품질관리

일반적으로 2DVD 관측자료는 라인스캔 카메라가 서로 일치하지 않았을 때 대기수상체의 모양과 속도

등에 대해 부정확한 정보를 제공하게 된다. 이러한 불일치는 Figs. 4a, b처럼 강우입자의 직경에 따라 낙하속도나 축비의 분포가 비정상적으로 벗어난 이상점(outlier)으로 나타나게 된다(Kruger and Krajewski, 2002). 특히 heavy rain일 때 입자의 불일치가 더 자주 발생한다(Thurai and Bringi, 2005). 본 연구에서 2DVD가 관측한 비정상적인 대기수상체 정보를 제거하기 위해 식 (2)에서와 같이 강수입자의 낙하속도에 대한 조건을 적용하여 비정상적인 값들을 제거하였다.

$$|V_{measured} - V_A| < 0.4V_A \tag{2}$$

$$V_A(D) = 9.65 - 10.3\exp(-0.6D),$$

여기서 $V_{measured}$ 는 2DVD에서 관측된 입자들의 낙하속도이며, V_A 는 Atlas *et al.* (1973)가 제시한 입자크기별 낙하속도 산출식이다. 낙하속도 기반의 필터링 기법은 강수입자의 낙하속도가 입자의 크기에 따라 Atlas *et al.* (1973)이 제시한 낙하 속도식(V_A)을 따른다는 것을 가정하고 있으며, 관측된 낙하속도와 V_A 의 차가 V_A 의 0.4배 보다 작아야 한다는 조건을 적용함으로써 비정상적인 값을 제거하는 것이다(Thurai and Bringi, 2005). 또한 본 연구에서는 입자직경에 따른 편평도 자료가 매우 작은($D < 0.6$ mm) 입자직경에서 많은 노이즈를 보여, 입자의 축비 관계식을 산출할 때 입자의 직경이 0.6 mm 미만인 자료는 사용하지 않았다. 이는 작은 입자가 신호 대 잡음 비(Signal to Noise Ratio, SNR)가 매우 약하여 관측된 노이즈를 구분하기 어렵기 때문이다(Handwerker and Straub, 2011).

Figure 4에는 2011년 10월 14일 0000~0759 UTC의 층상형 강우사례에 대해 2DVD 관측자료의 품질관리 전(Figs. 4a, b)과 후(Figs. 4c, d)에 대해 강수입자의 직경에 따른 낙하속도와 축비의 분포를 비교하여 나타내었다. Figure 4의 상단에 있는 범례는 입자개수의 밀도를 나타낸다. Figure 4에서 2DVD 관측자료의 품질관리 전후 분포를 비교해 보면, 품질관리 전에 작은 입자에서 매우 넓게 분포하던 비정상적인 값들이 제거되었음을 확인할 수 있으며, 총 입자 개수가 품질관리 전인 203,414개에서 품질 관리 후에는 189,034개로 감소하였다. 대류형 강우사례(Fig. 5)와 대류형/층상형 혼합 강우사례(Fig. 6)에 대한 품질관리 전후 결과에서도, 층상형 강우사례와 같이 2 mm 이하의 작은 입자 주위로 넓게 산포하던 비정상적 값들이 제거됨에 따라 총 입자개수가 7~43%까지 감소하였다.

3.2 이중편파레이더자료 시뮬레이터

이중편파레이더자료 시뮬레이터는 T-행렬 산란방법을 기반으로 하고 있다. T-행렬 산란방법은 대기수상

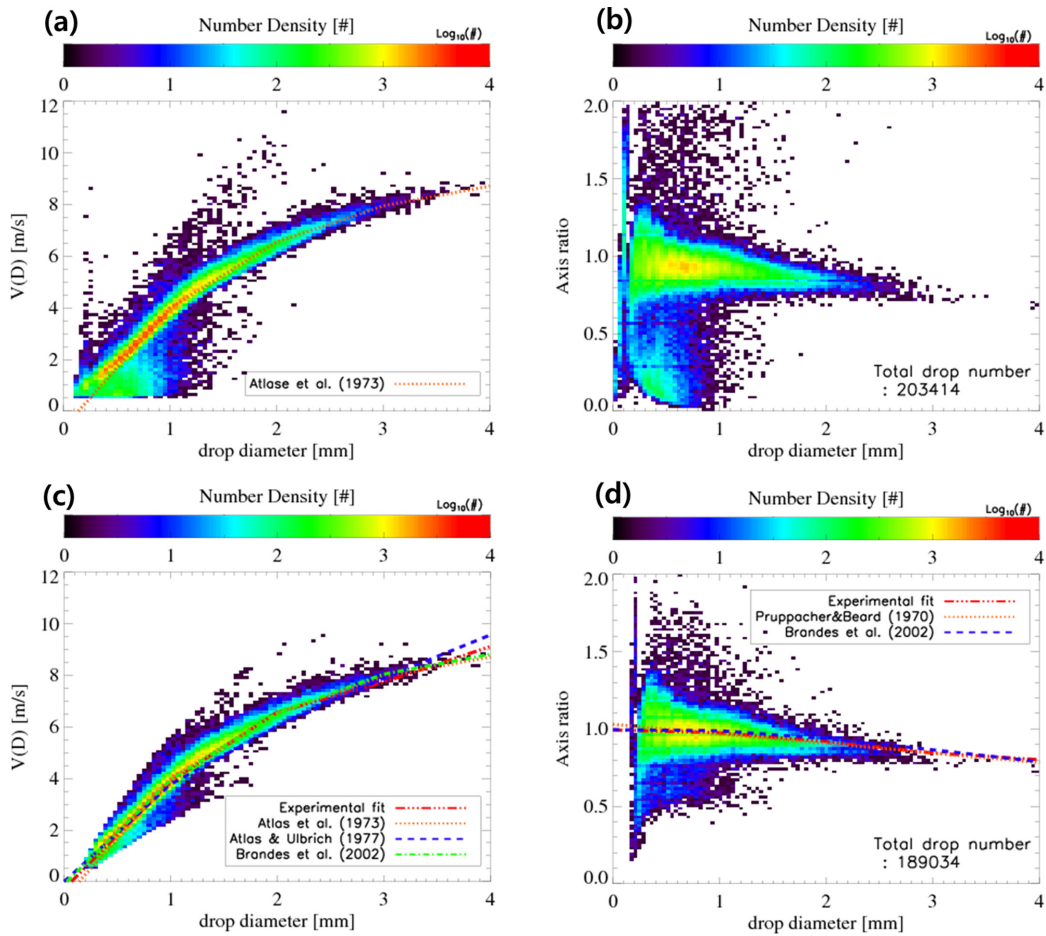


Fig. 4. Distribution of fall velocity and axis ratio according to the diameter. (a) Velocity-based filter for the drop measurements. The color scale represents drop number density. (b) Drop axis ratios for all measured drops. (c) Drop falling velocity after removing mismatched drops. (d) Drop axis ratios after removing mismatched drops (14 October 2011).

체를 비구형이라 가정한 상태에서 입자의 장/단축 비율을 반영하여 입자의 전후방 산란크기를 계산하는 가장 빠르고 유용한 산란방법이다(Zhang *et al.*, 2001; Jung *et al.*, 2008b).

기존에 존재하는 대부분의 편파레이더 시뮬레이터는 강우나 건조한 눈만을 다루고 있다(e.g., Vivekanandan *et al.*, 1994; Ryzhkov *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2001; Capsoni *et al.*, 2001; Brandes *et al.*, 2004). 그러나 Jung *et al.* (2008a)는 얼음입자(ice particle)의 다양한 밀도와 물 함량에 대해서도 고려하였으며 T-행렬 산란방법을 이용하여 강수의 전후방 산란크기를 계산하였다. 이후 Jung *et al.* (2010)은 기존의 편파레이더 시뮬레이터보다 한층 일반화된 시뮬레이터를 소개하였다. 이 시뮬레이터는 기존에 소개된 시뮬레이터(Jung *et al.*, 2008a)와 같이 강수와 얼음 입자에 대해서 T-

행렬 산란방법을 사용하지만, 다양한 파장(X-밴드, C-밴드, S-밴드)에 대한 전후방 산란크기를 계산할 수 있다는 것이 차이점이며, 기존의 시뮬레이터에서 볼 수 없었던 ρ_{hv} 계산이 포함된 최신버전의 시뮬레이터이다. 기상청과 미국 오클라호마 대학은 Jung *et al.* (2010)의 시뮬레이터를 기반으로 “초 단기 예보모델 강수물리과정 개선을 위한 이중편파레이더 시뮬레이터”를 개발하였다. 이는 수치모델에서 제공하는 비, 눈, 싸락눈, 우박 등의 비습(q), 총 입자개수(N_T)를 입력자료로 이용하여 입자분포도를 계산하며, T-행렬 산란방법 기반의 산란모듈을 사용하여 각각의 대기수상체(비, 눈, 싸락눈, 우박)의 전후방 산란크기 계수를 계산한다. 이 때 대기수상체 각각의 축비 관계식이 전후방 산란크기계수를 계산하는데 사용된다. 계산된 입자분포도와 산란크기 계수는 식 (4)~(8)의 레이더변수

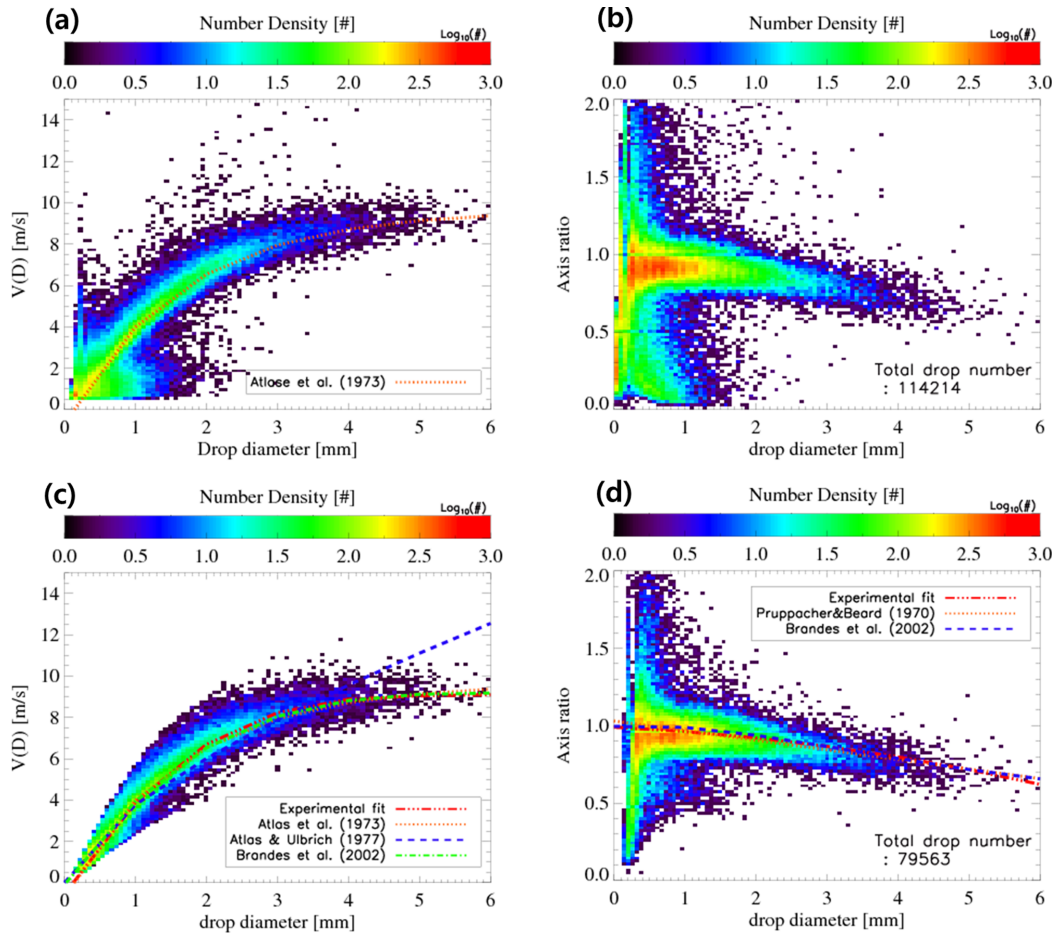


Fig. 5. Same as Fig. 4, except for the date 23 June 2012.

계산 알고리즘에 입력자료로 사용되어 이중편파변수를 모의한다.

본 연구에서는 Jung *et al.* (2010)의 이중편파레이더 시뮬레이터에 수치모델자료 대신 품질관리를 거친 2DVD 자료를 입력하여 이중편파레이더 변수(Z_h , Z_w , Z_{DR} , K_{DB} , ρ_{hv})를 모의한 후 비습산 이중편파레이더 관측변수와 비교하였다. 이중편파변수를 모의하기 위해 시뮬레이터에서는 10.7 cm의 S-밴드 파장을 사용했으며, 식 (3)을 이용하여 2DVD 관측자료 기반의 입자 크기분포($N(D)$) 값을 산출하였다. 그리고 이론적인 전후방 입자 산란크기 [$f_a(0)$, $f_b(0)$, $f_a(\pi)$, $f_b(\pi)$]는 4.2장에서 산출된 강우 측비 경험식을 T-행렬 산란알고리즘에 적용하여 산출하였다.

$$N(D_j) = \frac{1}{\Delta t \Delta D} \sum_{j=1}^{M_j} \frac{1}{A_j V_j}, \quad (3)$$

식 (3)에서 $N(D)$ 는 입자크기 분포[# $m^{-3} mm^{-1}$], Δt 는

샘플링 시간간격($\Delta t = 60$ s), ΔD 는 입자간격($\Delta D = 0.2$ mm), M_j 는 ΔD 에 관측된 입자개수, A_j 는 입자의 관측 면적[mm^2], V_j 는 입자의 낙하속도[mm^{-1}]을 나타낸다. 2DVD 관측자료 기반으로 산출된 입자크기분포와 전후방입자 산란크기는 식 (4)~(8)의 이중편파변수 계산식에 대입하여 이론적 이중편파변수를 계산한다. 시뮬레이터를 이용하여 이중편파변수를 모의하기 위해서는 입자의 모양, 기울기, 밀도 등 입자의 특성 정보가 필요하다. 하지만 이러한 입자특성을 명확하게 정의하기는 어렵기 때문에 눈과 우박은 장축에 나란하게 수평적으로 떨어진다고 가정하며, 입자의 평균 기울기(mean canting angle)는 0° 로, 입자 기울기(canting angle)의 표준편차는 눈은 20° , 건조한 우박은 최대 60° 로 각각 가정하였다. 본 연구에서 사용한 사례는 모두 강우사례에 대한 모의로 빗방울의 평균 기울기는 7° , 입자기울기의 표준편차는 0° 로 가정하여 계산하였다(Huang *et al.*, 2008).

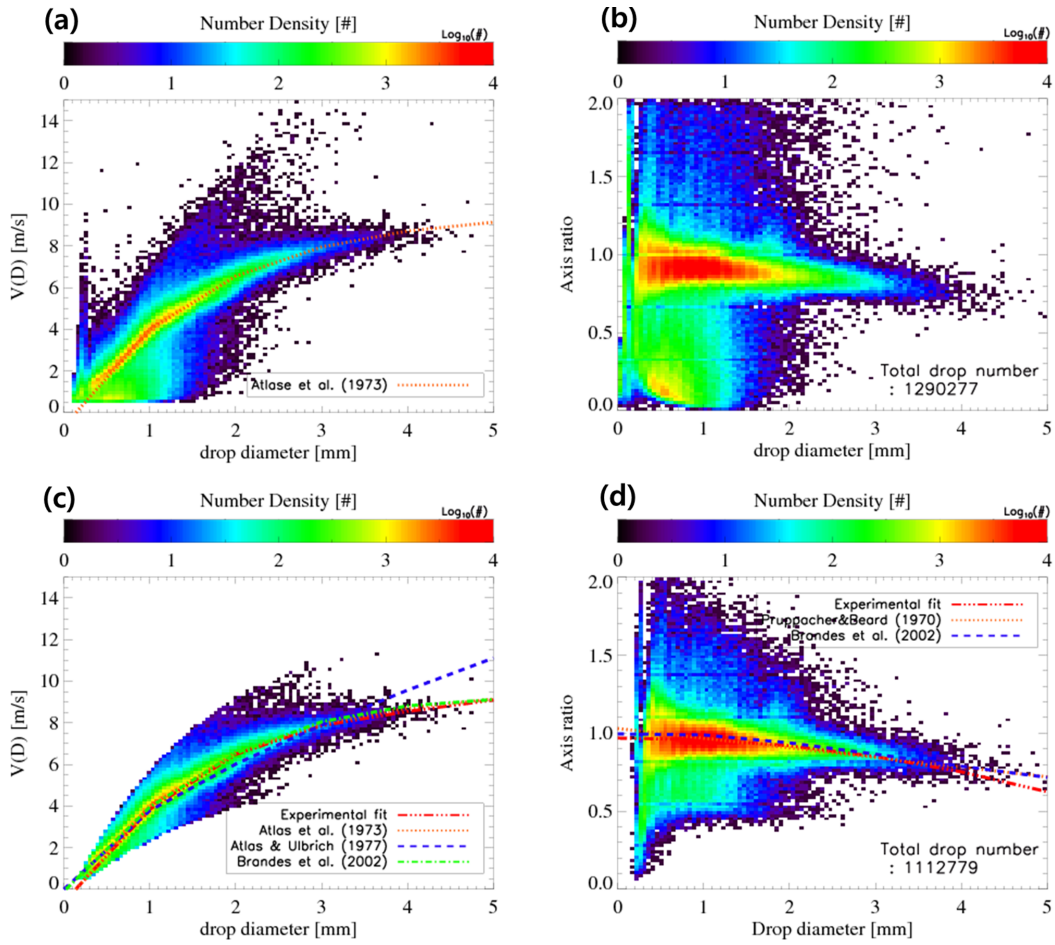


Fig. 6. Same as Fig. 4, except for the date 23 August 2012.

$$Z_{h,x} = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \int_0^{D_{max,x}} A |f_{a,x}(\pi)|^2 + B |f_{b,x}(\pi)|^2 + 2C Re[f_{a,x}(\pi) f_{a,x}^*(\pi)] N(D) dD \quad (\text{mm}^6 \text{m}^{-3}), \quad (4)$$

$$Z_{v,x} = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \int_0^{D_{max,x}} B |f_{a,x}(\pi)|^2 + A |f_{b,x}(\pi)|^2 + 2C Re[f_{a,x}(\pi) f_{a,x}^*(\pi)] N(D) dD \quad (\text{mm}^6 \text{m}^{-3}), \quad (5)$$

$$A = \langle \cos^4 \phi \rangle = \frac{1}{8} (3 + 4 \cos 2\phi e^{-2\sigma^2} + \cos 4\phi e^{-8\sigma^2})$$

$$B = \langle \sin^4 \phi \rangle = \frac{1}{8} (3 - 4 \cos 2\phi e^{-2\sigma^2} + \cos 4\phi e^{-8\sigma^2})$$

$$C = \langle \sin^2 \phi \cos^2 \phi \rangle = \frac{1}{8} (1 - \cos 4\phi e^{-8\sigma^2})$$

$$K_{DP,x} = \frac{180\lambda}{\pi} \int_0^{D_{max}} C_k Re[f_{a,x}(0) - f_{b,x}(0)] N(D) dD \quad (^\circ \text{ km}^{-1}) \quad (6)$$

$$C_k = \langle \cos 2\phi \rangle = \cos 2\phi e^{-2\sigma^2}$$

Table 2. Rainfall cases analyzed in this study.

Items	Date	Time of observation (UTC)	Type of precipitation
Case 1	14 October 2011	0000-0759	Stratiform
Case 2	23 June 2012	0507-0707	Convective
Case 3	23 Aug 2012	0000-2359	Convective/Stratiform

$$\rho_{hv} = \frac{|Z_{hv,r} + Z_{hv,ds} + Z_{hv,dh} + Z_{hv,rs} + Z_{hv,rh}|}{[(Z_{h,r} + Z_{h,ds} + Z_{h,dh} + Z_{h,rs} + Z_{h,rh})(Z_{v,r} + Z_{v,ds} + Z_{v,dh} + Z_{v,rs} + Z_{v,rh})]^{1/2}}, \quad (7)$$

$$Z_{hv,x} = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \int_0^{D_{max,x}} C |f_{a,x}(\pi)|^2 + |f_{b,x}(\pi)|^2 + A [f_{a,x}(\pi) f_{a,x}^*(\pi)] + B [f_{b,x}(\pi) f_{b,x}^*(\pi)] N(D) dD \quad (\text{mm}^6 \text{m}^{-3}), \quad (8)$$

위 식에서 사용된 입자는 국내 2DVD 자료로부터 관측된 빗방울로 입자직경이 최대 6 mm까지 관측되었다. 이에 위 식에서 빗방울의 최대 입자크기는 $D_{max} = 6 \text{ mm}$ 로 설정하였으며, 아래첨자 x 는 대기수상체 입자 종류로써 r (rain, 강우), rs (rain-snow mixture, 비-눈 혼합), ds (dry snow, 건설), rh (rain-hail mixture, 비-우박 혼합), dh (dry hail, 건조우박)를 나타낸다. $f_a(\pi)$, $f_b(\pi)$ 은 장축과 단축에 따른 후방산란크기를 나타내며, $f_a(0)$, $f_b(0)$ 은 장축과 단축에 따른 전방산란크기이다. f_a^* , f_b^* 은 전후방 산란크기의 켈레(Conjugate)이며, $\text{Re}[\dots]$ 는 복소수의 실수부를 나타낸다. $|\dots|$ 는 세로줄(single bars) 사이의 변수 크기이며, $\langle \dots \rangle$ 는 입자기울기의 앙상블 평균을 나타낸다. 또한 $\bar{\phi}$ 는 평균 입자기울기, σ 는 입자기울기의 표준편차, λ 는 레이더 파장 그리고 K_w 은 물의 유전율로 0.93이다.

4. 사례분석 결과

4.1 2DVD 자료의 정확도 검증

2DVD 관측자료를 이용하여 이중편파변수를 모의하고 이를 실제 관측한 이중편파변수와 비교에 사용하기 위해서는 먼저 2DVD 관측자료의 정확도가 평가되어야만 한다. 이를 위해 2DVD와 동일한 곳에 위치한 지상우량계 관측 강우강도를 2DVD 관측자료로부터 추정된 강우강도와 비교하였다. 정확도 검증은 3가지 강우사례(2011년 10월 14일, 2012년 6월 23일, 8월 23일)에 대해서 실시하였으며, 식 (9)를 이용하여 2DVD 관측자료로부터 강우강도를 산출하였다.

$$R = 6 \times 10^{-4} \pi \sum_{i=1}^L D_i^3 V(D_i) N(D) \Delta D, \quad (9)$$

식 (9)에서 L 은 입자간격($\Delta D = 0.2 \text{ mm}$)당 최대 입자크기($D_{max} = 6 \text{ mm}$)까지의 범위를 나타내며, 강우강도를 산출하기 위해 식 (9)에 사용된 낙하속도(V)는 국외 관측자료 기반의 Brandes *et al.* (2002)의 관계식을 사용하여 비교하였다. 2DVD 관측자료의 정확도 검증

은 10분 단위 강우강도와 시간당 누적강우량을 비교하였으며, 백분율 오차(percent error)는 지상우량계와 2DVD 자료의 총 누적강우량을 가지고 계산하였다. 층상형 강우사례(2011년 10월 14일)의 경우 1.63% 백분율 오차를 보였으며, 대류형 강우사례(2012년 6월 23일)는 2.41%, 혼합형 강우사례(2012년 8월 23일)의 경우는 7.88%의 정확도를 보였다. 이 값은 지상우량계와 우적계 자료 사이의 차이가 일반적으로 약 10~20%를 보인다는 선행연구의 결과에 비추어볼 때 높은 정확도이므로(McFarquhar and List, 1993; Sheppard and Joe, 1994; Hagen and Yuter, 2003; Tokay *et al.*, 2003), 본 연구에서는 2DVD 관측자료를 2DVD 경험식 도출 및 실제 비습산 이중편파레이더 관측자료와의 비교에 사용하기 적합하다고 판단하였다.

4.2 2DVD 경험식 도출 및 비교

강우의 축비와 낙하속도 경험식은 품질관리와 정확도 검증을 거친 2DVD 관측자료로부터 다항식 함수(polynomial function)로 산출한다. 낙하속도 경험식은 낙하속도 기반으로 품질관리된 2DVD 관측자료로부터 산출하며, 축비 경험식은 낙하속도 기반의 품질관리뿐만 아니라 입자직경이 0.6 mm 미만의 자료를 제거한 관측자료로부터 산출하였다. 강우 유형에 따른 축비 경험식을 도출하기 위하여 2DVD가 위치한 대구지역에서 발생한 층상형, 대류형 그리고 대류형/층상형 혼합 강우 사례를 각각 한 사례씩 선정하였다(Table 2). 층상형 강우 사례는 2011년 10월 14일 사례로 0000 UTC에 강우가 시작되어 0759 UTC까지 대구지역에 약한 비가 지속적으로 내렸다. 2012년 6월 23일 사례는 0507~0707 UTC의 짧은 시간 동안 단세포가 발달하여 약 2시간 동안 대구지역에 12.5 mm 강수량을 기록했던 대류형 사례이다. 특히 총 누적강수량의 약 88%인 11 mm가 1430~1450 UTC 동안 집중적으로 내렸다. 마지막으로 2012년 8월 23일 사례는 0000~0859 UTC 동안에 경상북도와 대구광역시에 천

Table 3. Axis ratio and fall velocity formula of raindrop.

Authors	Axis ratio formulas
Pruppacher and Beard (1970)	$= 1.03 - 0.062D$
Brandes <i>et al.</i> (2002)	$= 0.9951 + 0.0251D - 0.03644D^2 + 0.005303D^3 - 0.0002492D^4$
Experimental fit(*11.10.14)	$= 0.993438 - 0.00153826D - 0.0130729D^2 - 0.00502576D^3 + 0.00134617D^4$
Experimental fit(*12.6.23)	$= 0.990150 - 0.0210607D - 0.00675852D^2$
Experimental fit(*12.8.23)	$= 0.968761 + 0.00458678D - 0.0146843D^2$
Authors	Fall velocity formulas
Atlas <i>et al.</i> (1973)	$= 9.65 - 10.3\exp(-0.6D)$
Atlas and Ulbrich (1977)	$= 3.78 \times D^{0.67}$
Brandes <i>et al.</i> (2002)	$= -0.1021 + 4.932D - 0.9551D^2 + 0.07934D^3 - 0.002362D^4$
Experimental fit(*11.10.14)	$= -0.278535 + 4.48021D + 0.0575368D^2 - 0.438097D^3 + 0.0726433D^4$
Experimental fit(*12.6.23)	$= -0.556609 + 5.40734D - 1.019962D^2 + 0.0645172D^3$
Experimental fit(*12.8.23)	$= -0.613867 + 5.56266D - 1.19471D^2 + 0.0941570D^3$

등 번개를 동반한 강한 대류형 강우가 내렸고, 그 이후 0900~2359 UTC에는 층상형 강우가 내렸던 혼합 사례이다.

본 연구에 사용된 3개의 국내 강우사례로부터 산출된 낙하속도와 축비 경험식은 Figs. 4~6에 붉은 점선 (Experimental fit)으로 나타냈으며, 국내에서 산출된 경험식과 국외에서 산출된 관계식을 비교하기 위해 낙하속도의 경우는 Atlas *et al.* (1973), Atlas and Ulbrich (1977), Brandes *et al.* (2002)의 관계식을, 축비의 경우는 Pruppacher and Beard (1970)와 Brandes *et al.* (2002)의 관계식을 함께 나타내었다. Atlas *et al.* (1973)의 낙하속도 관계식은 Gunn and Kinzer (1949)의 실험실 측정값(laboratory measurements)을 가지고 지수함수 형태(exponential form)로 계산된 식이며, Atlas and Ulbrich (1977)은 Atlas *et al.* (1973) 낙하속도 관계식으로부터 멱 법칙 형태(Power law form)로 산출된 식이다. 그리고 Brandes *et al.* (2002)의 낙하속도는 Gunn and Kinzer (1949)의 자료에서 다항식 함수로 유도되었다. Pruppacher and Beard (1970)는 입자의 평형모양(equilibrium shapes)을 고려하여 입자의 축비 관계식을 유도하였다. 즉, 중력의 영향아래에 떨어지는 입자의 평균모양을 고려하여 선형함수(linear function)로 관계식을 산출하였다. Zhang *et al.* (2001)은 평형 방정식을 풀이 후, 다항식 함수로 축비 관계식을 도출하였다. 빗방울은 보통 편구면(oblate spheroids)처럼 모델되어 있으며 편평도는 입자의 장/단축 사이의 축비에 의해 나타나는데, 이는 평형모델(equilibrium model)에서 Green (1975)에 의해 주어진 대응직경(equivalent diameter)과 관련 있다. 이후 Jung *et al.* (2010)은 강우의 관측자료를 기반으로(Brandes *et al.*, 2002) Zhang *et al.* (2001) 관계식과 비교하였을 때, 모든 입자크기에서 보다 구면의 모양을 나타내는 축

비 관계식을 산출하였다. 본 연구에 사용된 3개의 국내 강우사례로부터 계산된 낙하속도와 축비 경험식, 그리고 국외에서 적용된 관계식은 Table 3와 같다.

국내 관측자료로부터 산출된 경험식과 국외에서 구해진 관계식을 비교한 결과, 층상형 사례인 2011년 10월 14일의 산출된 낙하속도와 축비 경험식은 입자직경범위($0 \leq D \leq 4$ mm)에서 국외의 관계식과 유사한 분포를 보이며, 대류형 사례인 2012년 6월 23일의 경우에는 입자직경범위($0 \leq D \leq 6$ mm)에서 유사한 분포를 보였다. 대류형/층상형 혼합 강우사례의 경우, 산출된 축비 경험식이 약 1 mm 미만의 작은 입자와 4 mm 이상의 큰 입자의 범위에서 조금 차이를 보였다. 그러나 세 사례에서 산출된 축비 경험식 모두 입자 직경이 작은 구간에서 편평도가 1에 가깝고 입자의 직경이 증가할수록 입자의 편평도가 점점 감소하는 형태를 잘 나타내고 있다. Figure 7은 T-행렬 산란방법을 이용하여 국외(Brandes *et al.*, 2002) 강우 축비 관계식 기반의 전후방산란크기와 국내 2DVD 자료로부터 산출된 강우입자의 축비 경험식(Experimental fit)의 산란크기를 비교한 결과이다. Figure 7을 보면 국내의 축비 관계식 기반의 전후방산란크기는 서로 유사한 분포를 보이나 전체산란크기 평균값은 약 0.0001~0.0002 정도 차이를 보이며, 특히 입자직경이 5 mm 이상의 구간에서 차이를 보인다. 또한 2DVD 기반의 축비 경험식을 사용한 $f_a(\pi)$, $f_b(0)$ 가 국외 축비 관계식 기반의 산란크기보다 높게 나타나고 있다. 축비 관계식에 따라 서로 작은 산란크기차이를 보이지만 이는 이중편파변수 모의에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 Fig. 7의 전후방 산란크기를 사용하여 시뮬레이터로부터 이중편파변수들을 모의하였다. 이중편파변수들을 모의하기 앞서 축비 관계식에 의한 차이만을 보기 위해 축비 관계식 외에 모든 조건은 동일하게 하였다. Figure 8

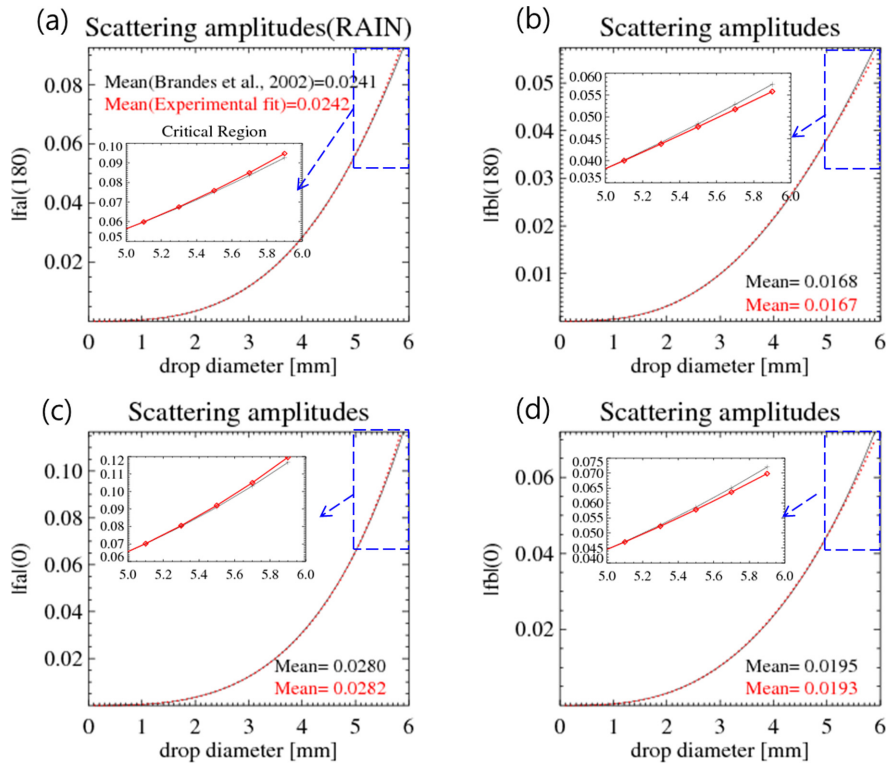


Fig. 7. Polarimetric scattering amplitudes as a function of particle size. (a) Backscattering amplitude for major axis, (b) backscattering amplitude for minor axis, (c) forward-scattering amplitude for major axis, and (d) forward-scattering amplitude for minor axis (23 June 2012).

은 국내외 축비 관계식 기반의 모의된 이중편파변수를 비교한 결과로, 검은색 실선은 Brandes *et al.* (2002) 축비관계식 기반의 모의변수, 빨간색 점선은 2012년 6월 23일의 2DVD 자료로부터 산출된 축비 경험식 기반의 모의변수, 그리고 파란색 파선은 이들의 차이(Experimental fit - Brandes)을 나타낸다. Z , K_{DB} , ρ_{hv} 의 모의된 변수들은 거의 유사한 분포를 보이지만, 세 변수 모두 국내 관측 기반의 경험식을 사용할 때가 국외 축비 관계식 기반보다 다소 높게 모의되었다. 즉, Z (Fig. 8a)는 국내 관측기반의 변수가 약 0.00~0.08 dBZ 높게 나타나고, K_{DP} (Fig. 8c)는 관측초반의 강한 비에서 최대 0.09 deg/km의 차이를 보였지만 약한 강우 구역의 관측 후반에는 거의 0에 가까운 차이를 보였다. 그리고 ρ_{hv} 는 거의 0에 가까운 유사한 분포를 보이는 등, Z , K_{DB} , ρ_{hv} 의 모의된 변수들은 강한 비가 내리던 시간대의 K_{DP} 를 제외하고 거의 유사한 분포를 보였다. 그러나 Z_{DR} 은 국내 관측자료 기반의 모의 변수가 0.0~0.25 dB 정도 높게 모의되고 있다. 이는 강우입자의 모양을 대변하는 축비와 수직/수평과의 후방산란의 비인 Z_{DR} 이 서로 밀접한

관련있기 때문이다.

2DVD 자료로부터 산출된 낙하속도 경험식 또한 국외 관측자료 기반의 Brandes *et al.* (2002) 낙하속도 관계식을 사용하여 비교하였다. Figures 9와 10에는 강우유형별 사례에 대해 지상우량계와 2DVD로부터 산출된 10분당 강우강도(왼쪽 y축) 및 누적 강우량(오른쪽 y축)의 시계열을 비교하여 나타내었다. 그림에서 파란색 점선과 빨간색 파선은 각각 Brandes *et al.* (2002)의 낙하속도 관계식과 국내관측 2DVD 자료로부터 산출된 낙하속도 경험식을 이용하여 추정된 강우강도를 의미한다. 그리고 검은색 실선은 지상우량계에서 관측한 결과이다. Figures 9와 10을 보면 지상우량계는 관측한계 문제를 가지고 있어 지상우량계로부터 관측된 강우강도는 2DVD 관측 자료로부터 산출된 강우강도와 차이를 보였다. 이는 전도형 우량계의 특성상 작은 시간변동에 따른 강우강도를 측정하기 어려운 것에 기인하며(Habib *et al.*, 2001), 강우강도의 시간규모를 늘릴수록 에러는 감소한다(Wang *et al.*, 2008). 층상형 강우사례(Fig. 9)를 보면, 누적강우량의 경우 지상우량계 관측자료나 Brandes *et al.* (2002)

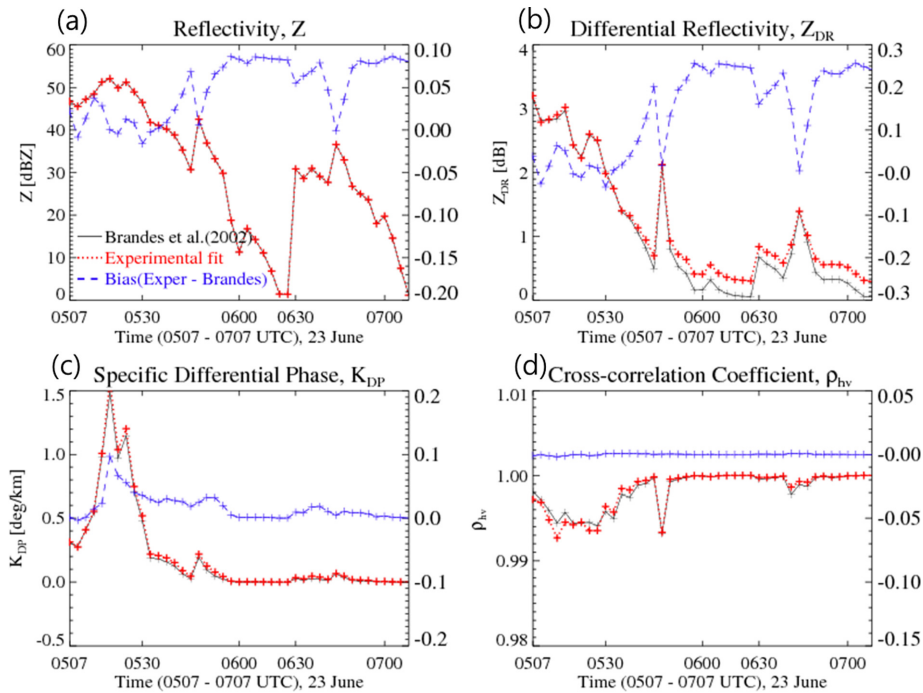


Fig. 8. Time series comparison of simulated reflectivity (Z), differential reflectivity (Z_{DR}), specific differential phase (K_{DP}) and cross-correlation coefficient (ρ_{hv}). Results are shown for radar parameters using the Brandes *et al.* (2002) and Experimental axis ratio. The left ordinate is for parameter and the right ordinate is for bias of parameter (23 June 2012).

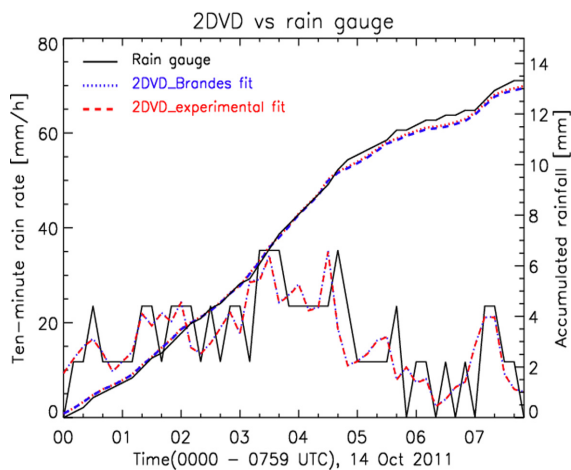


Fig. 9. Time series of ten-min rain rates measured from the rain gauge (solid line), and estimated from the 2DVD disdrometer (dotted line, using Brandes *et al.* (2002) and dashed line, using Experimental fit) for the event of 14 October 2011. Also shown is accumulated rainfall from measured 2DVD and that from estimated rain gauge. The left ordinate is for rain rates and the right ordinate is for accumulative rainfall (14 October 2011).

관계식, 국내 2DVD 산출 경험식으로부터 구해진 강우량이 서로 비슷한 분포를 보였다. 실제 2011년 10월 14일 0000~0759 UTC 관측 기간 동안 지상우량계의 총 누적 강우량은 13.324 mm, Brandes *et al.* (2002) 낙하속도 관계식을 이용하여 2DVD 관측자료로부터 추정된 총 누적 강우량은 13.106 mm, 2DVD 관측자료로부터 산출된 낙하속도 경험식을 이용하여 추정된 총 누적 강우량은 13.027 mm로 매우 유사하였다. 2011년 10월 14일 관측 자료의 정확도는 2DVD로부터 산출된 낙하속도 경험식을 사용하였을 때, 약 2.228%, Brandes *et al.* (2002)의 낙하속도 관계식을 사용하였을 때 1.635% 백분율 오차를 보였다. 대류형 강우사례(Fig. 10a)의 경우 관측초반(0507~0600 UTC)에 2DVD가 지상우량계보다 빨리 관측됨에 따라 최대 강우강도가 나타나는 시점이 먼저 나타나고 있으며 이는 누적강우량 분포에서도 동일한 현상을 보였다. 대류형 강우사례에서 지상우량계는 2시간 동안 13.715 mm의 총 누적강우량을 관측하였으며, Brandes *et al.* (2002) 낙하속도 관계식을 이용한 총 누적강우량은, 13.384 mm로 2.415%의 백분율 오차를 보이며, 2DVD 관측자료로부터 산출된 낙하속도 경험식을 이용하여 추정된 총 누적 강우량은 13.531 mm로 1.347%

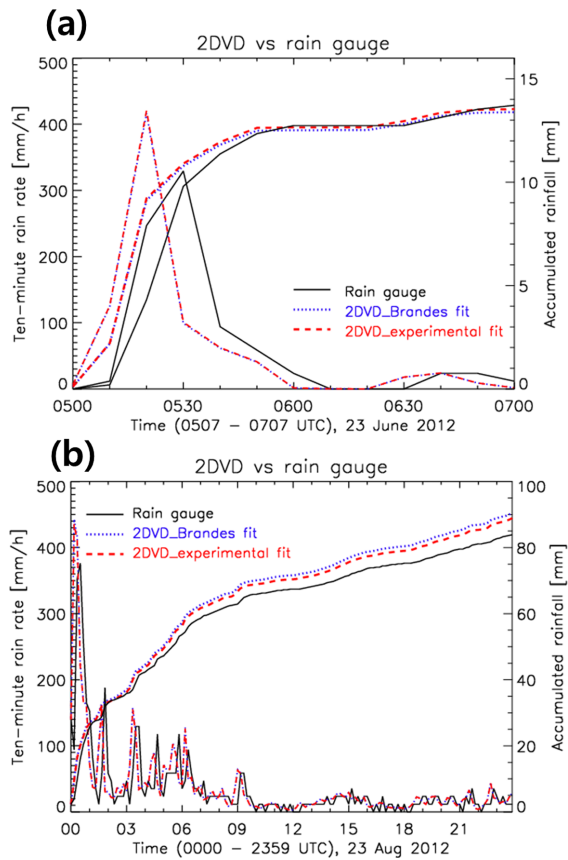


Fig. 10. Same as Fig. 9 except for the date. (a) 23 June 2012, (b) 23 August 2012.

Table 4. Percent error in total rainfall accumulations between rain gauge and 2DVD.

Items	Date	Rain gauge and 2DVD	
		Brandes <i>et al.</i> (2002)	Experimental fit
Case 1	14 October 2011	1.63%	2.23%
Case 2	23 June 2012	2.41%	1.35%
Case 3	23 Aug 2012	7.88%	5.99%

의 오차를 보였다. 즉, 2DVD 자료로부터 산출된 낙하속도 경험식을 사용한 누적 강우량이 국외 낙하속도 관계식을 사용한 것보다 강우량을 보다 잘 모의하였다. 대류형/층상형 혼합 강우사례(Fig. 10b)의 경우는 앞선 두 강우사례에 비해 누적강우량에서 다소 차이를 보였다. 대류형/층상형 강우사례(Fig. 10b)에서는 지상우량계 관측자료와 유사한 분포를 보였지만 2DVD 자료로 관측한 강우강도가 다소 높게 관측하는 경향

을 보였다. 지상우량계의 총 누적강우량은 83.860 mm이며, Brandes *et al.* (2002) 관계식 기반의 총 누적강우량은 90.472 mm, 2DVD 자료로부터 산출된 경험식을 사용하였을 때 총 누적강우량은 88.887 mm로 정확도는 앞선 두 강우사례에 비해 다소 낮은 5.995%로 나타났다(Table 4).

4.3 2DVD와 비슬산 이중편파레이더 변수 비교

지상관측자료와 레이더 관측자료의 비교에는 다양한 오차가 존재한다. 볼륨 관측하는 레이더와 한 지점의 관측자료인 2DVD는 서로 관측영역의 차이를 통해 샘플링 볼륨 차이를 가지며, 이 외에 관측기기의 오차, 관측 환경 그리고 강수가 대기를 통과하면서 공기의 연직운동이라든지, 증발, 부착, 파열(break up) 등 다양한 요인에 의해 강수형태가 변하여 차이를 보인다. 그러나 4.1절에서 2DVD 관측자료의 정확도가 지상우량계자료와 비교해 오차 범위(20% 이내) 내에 존재 한다면, 이중편파레이더 시뮬레이터를 이용하여 2DVD 관측자료로부터 모의된 이중편파변수를 참값으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2DVD 자료로부터 모의된 이중편파변수와 레이더에서 관측된 이중편파레이더 변수를 관측시간에 따라 비교하였다. 여기에서 레이더와 2DVD의 관측시간 해상도가 다르기 때문에 서로 가장 가까운 관측시간의 자료를 비교하였다.

Figure 11은 2011년 10월 14일 층상형 강우사례(위), 2012년 6월 23일 대류형 강우사례(중간)와 2012년 8월 23일 대류형/층상형 강우사례(아래)에 대해 2DVD로부터 모의된 반사도(Z)와 차등반사도(Z_{DR})를 실제 비슬산에서 관측된 반사도(Z)와 차등반사도(Z_{DR})를 비교한 결과이다. 비슬산에서 관측된 Z 는 지형예코를 제거한 보정 후 반사도 자료를 사용하였다. Z 와 Z_{DR} 의 시계열 분포를 보면, 층상형 강우사례의 경우, Z 는 전반적으로 유사한 패턴을 보이지만, 비슬산에서 관측되는 Z_{DR} 는 2DVD 자료로부터 모의된 변수에 비해 낮게 나타났다. 대류형 강우사례의 경우는 Z 와 Z_{DR} 모두 유사한 패턴을 보이지만, 큰 반사도 값에서 차이를 보이며, 30 dBZ 이하의 반사도 부분에서 Z_{DR} 분포가 차이를 보였다. 대류형/층상형 강우사례는 대류형 강우사례보다는 반사도의 시계열 분포가 더 잘 일치하였지만, Z 와 Z_{DR} 모두 2DVD 자료로부터 모의된 변수에 비해 레이더에서 관측된 변수가 낮은 값을 보였고, 이러한 차이는 Z_{DR} 분포에서 더욱 뚜렷이 나타났다. 이는 비슬산에서 관측되는 Z 와 Z_{DR} 이 실제보다 낮게 관측되고 있음을 의미한다.

비슬산에서 관측된 Z 와 Z_{DR} 을 2DVD 자료로부터 모의된 값들과 정량적 차이를 비교하기 위해 Fig. 12에는 Fig. 11의 사례에 대한 산포도를 나타내었다.

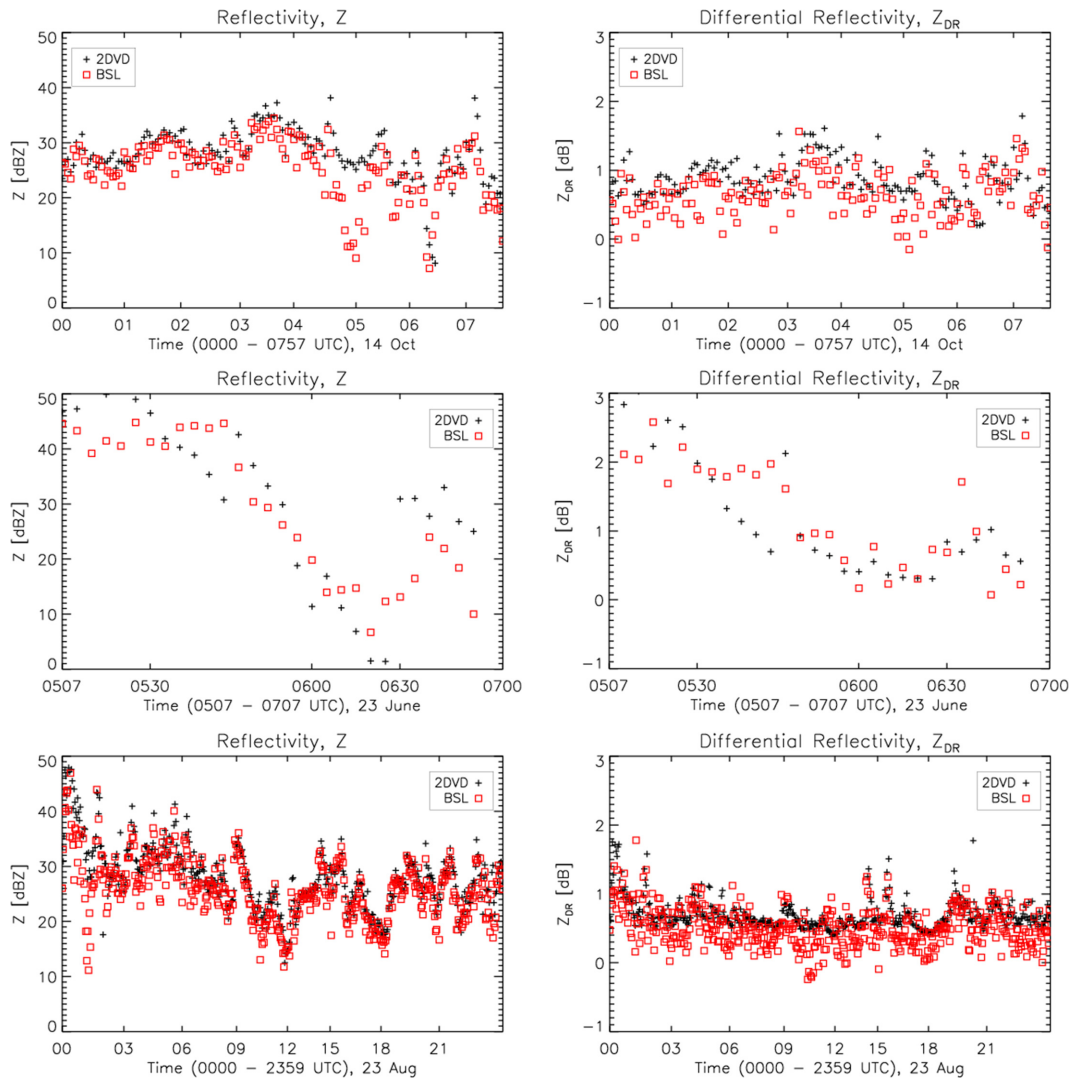


Fig. 11. Comparison of radar parameters between simulation using 2DVD data and Bislan radar data for the (top) 14 October, (middle) 23 June and (bottom) 23 August. The (left) reflectivity, Z and (right) differential reflectivity, Z_{DR} .

Figure 12를 보면, Fig. 11에서 나타나는 현상들을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 즉, 비슬산에서 관측된 Z 는 3가지 강우사례 모두 0.75에서 0.8 이상의 상관관계를 갖고 모의된 자료에서 관측된 자료의 차가 약 2 dB 정도의 바이어스를 갖는다. 이는 비슬산에서 관측된 Z 가 실제 2DVD 자료로부터 모의된 반사도 값에 비해 약 2 dBZ 정도 적게 관측됨을 의미하며, 특히 25 dBZ 이상에서는 더 낮게 관측됨을 알 수 있다. 한편, Z_{DR} 값은 3가지 강우사례에 대해 서로 다른 분포를 보였다. 대류형 강우의 경우 상관관계가 0.830, 바이어스는 -0.111 dB로 2DVD 자료로부터 모의된 값에 비해 관측된 Z_{DR} 이 높게 나타났지만, 층상형과 대류

형/층상형 강우의 경우는 상관관계가 약 0.5 정도이고 바이어스는 약 0.2 dB로 오히려 2DVD 자료로부터 모의된 값에 비해 관측 값이 낮게 관측되었다. 이는 강우의 크기와 관계하는 Z_{DR} 의 특성상 큰 입자가 많은 대류형 강우사례와 큰 입자와 작은 입자가 섞여 있는 대류형/층상형 강우사례 등에 대한 비슬산 이중편파 레이더의 관측오차가 서로 다를 수 있음을 의미한다. Z 와 Z_{DR} 외에 K_{DB} , ρ_{hv} 에 대해서도 동일한 분석을 수행하였지만, 강한 비가 내렸던 8월 23일 대류형/층상형 강우사례의 K_{DP} 를 제외한 모든 사례에서 K_{DB} , ρ_{hv} 는 낮은 음의 상관성을 보였다. 강한 강우에 영향을 받는 K_{DP} 는 대류형 강우사례의 경우에는 비슬산에서 관측된

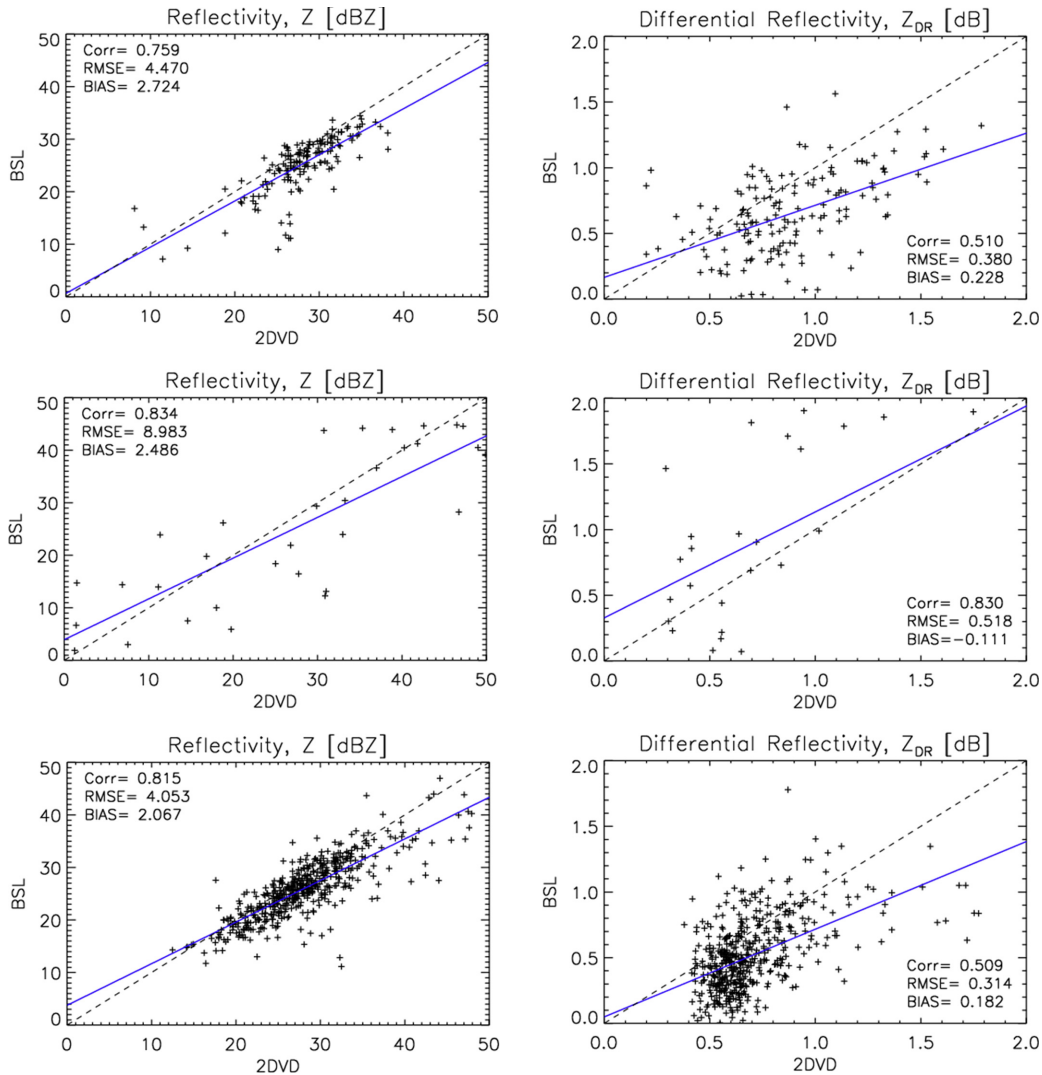


Fig. 12. The scatter plots of parameter between 2DVD and radar value for the (top) 14 October, (middle) 23 June and (bottom) 23 August. The (left) reflectivity, Z and (right) differential reflectivity, Z_{DR} .

K_{DP} 가 모의된 K_{DP} 보다 약 1 deg km^{-1} 정도 높게 관측되었고, 층상형 강우사례의 경우에는 -0.1 deg km^{-1} 바이어스를 보였다. 그러나 강한 비가 내렸던 대류형/층상형 강우의 경우는 약 0.74의 상관관계를 보이며 관측된 K_{DP} 가 $0.026 \text{ deg km}^{-1}$ 정도도 낮게 관측되었다. 2DVD로부터 모의된 ρ_{hv} 는 세 사례 모두 거의 1에 가까운 순수한 강우 사례임을 나타내었지만, 비슬산에서 관측된 ρ_{hv} 는 모의된 ρ_{hv} 보다 0.01~0.02 정도 낮게 나타났다. K_{DP} 와 ρ_{hv} 가 Z 와 Z_{DR} 에 비해 2DVD로부터 모의된 변수와 상관성이 낮고 오차가 큰 것은 현재 산출되는 이중편파변수 중 계속해서 개선되고 있는 변수들로 Z 와 Z_{DR} 에 비해 많은 불확실성과 오차

를 포함하고 있기 때문이다. 따라서 향후에 K_{DP} 와 ρ_{hv} 에 대한 품질개선이 향상된다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 사료되며, 본 논문에선 K_{DP} 와 ρ_{hv} 의 비교결과를 수록하지 않았다.

이상의 분석 결과, 비슬산에서 관측되는 이중편파 변수들은 실제 2DVD 자료로부터 모의된 값에 비해 전반적으로 낮게 관측되고 있고, Z 와 Z_{DR} 은 2DVD 자료로부터 모의된 값과 비교적 높은 상관성을 보였다. 이는 2DVD 자료를 활용하여 비슬산 이중편파레이더의 관측오차를 보정할 수 있음을 시사하며, K_{DP} 와 ρ_{hv} 는 관측오차를 포함한 품질관리가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

5. 요약 및 향후 계획

본 연구에서는 이중편파레이더 관측자료의 수치예보 활용 및 레이더 품질관리뿐만 아니라 개발된 이중편파레이더 시뮬레이터에 국내 강우특성을 반영하기 위해 2DVD 관측자료의 활용 가능성을 조사하였다. 이중편파레이더자료 시뮬레이터의 핵심알고리즘 중 하나는 대기수상체에 따른 전후방 산란크기를 계산하는 T-행렬 산란알고리즘으로, 일반적으로 강수의 입자 크기별 산란특성이 축비로 대변된다.

따라서 본 연구에서는 한반도의 강우유형별 특성을 조사하기 위해 2011~2012년 대구에서 발생한 강우사례 중 증상형, 대류형, 대류형/증상형 강우사례를 선정하였다. 먼저 지상우량계 관측자료로부터 2DVD 관측자료의 품질을 검증한 후, 2DVD 관측자료로부터 강우입자의 축비 경험식을 도출하였다. 또한 이를 시뮬레이터에 적용하여 이중편파변수(Z , Z_{DR} , K_{DP} , ρ_m)를 모의하고 비슬산 이중편파레이더 관측자료와 비교하였다.

3개 강우사례에 대하여 2DVD 관측자료의 품질 검증 결과, 1.347~5.995%의 높은 정확도를 보였다. 이는 시뮬레이터에 한반도 강우특성을 반영하기 위해 2DVD 관측자료를 사용하고, 시뮬레이터로부터 모의된 이중편파변수와 관측된 이중편파레이더 자료와의 비교가 충분하다고 해석할 수 있다.

한편, 이중편파레이더 시뮬레이터를 이용하여 2DVD 관측자료로부터 모의된 이중편파변수와 비슬산 이중편파레이더 관측변수를 비교한 결과 Z 는 약 0.8 이상의 비교적 높은 상관관계를 보이며, 2DVD 자료로부터 모의된 값에 비해 관측된 Z 가 약 2 dBZ 정도 낮게 관측되었고, 강한 반사도의 경우 관측오차가 더욱 크게 나타났다. Z_{DR} 은 세 강우 사례에 대해 $-0.111 \sim +0.228$ 정도의 차이를 보였다. K_{DP} 와 ρ_m 는 Z 와 Z_{DR} 에 비해 2DVD 자료로부터 모의된 값과의 상관성이 낮았으며 특히 ρ_m 는 모의된 값에 비해 0.01~0.02 정도 음의 차이를 보였다. 이는 비슬산 이중편파레이더에서 관측되는 모든 이중편파변수에 관측오차가 포함되어 있어 전반적으로 2DVD로부터 모의된 값에 비해 낮게 관측되고 있음을 의미한다. 이중편파변수는 강수량 산출이나 대기수상체 분류 등의 기본이 되는 자료이므로 이 자료들을 2차 산출물 생산에 사용하기 위해서는 먼저 관측오차를 포함한 기본적인 품질관리가 이루어져야만 할 것이다.

본 연구는 국내 강우 특성을 반영한 한국형 이중편파레이더 시뮬레이터 개발을 위해 2DVD 관측자료 활용 가능성을 조사하기 위한 기초연구로써, 향후에는 강우사례에 대한 2DVD 자료를 추가하여 강우 유형에 따른 입자크기분포를 도출하고 산란크기 차이를

도출할 것이다. 또한 한국의 강우특성을 대표할 수 있는 축비 관계식을 도출하여 개발될 시뮬레이터에 반영할 계획이다.

감사의 글

본 연구를 위해 지상관측자료(2차원 영상우량계, 지상우량계)를 제공해 주신 경북대학교 이규원 교수님과 학생들께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 기상레이더센터 2014년도 R&D 연구개발사업 “범부처 융합 이중편파레이더 활용 기술 개발(WRC-2013-A-1)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Atlas, D., R. C. Srivastava, and R. S. Sekkon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **2**, 1-35.
- _____, and C. W. Ulbrich, 1977: Path and area integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 327-332.
- Brandes, E. A., G. Zhang, and J. Vivekanandan, 2002: Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 674-685.
- _____, _____, and _____, 2004: Comparison of polarimetric radar drop size distribution retrieval algorithms. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **21**, 584-598.
- Capsoni, C., M. D'Amico, and R. Nebuloni, 2001: A multiparameter polarimetric radar simulator. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **18**, 1799-1809.
- Dawson, Daniel T., Edward R. Mansell, Youngsun Jung, Louis J. Wicker, Matthew R. Kumjian, and Ming Xue, 2014: Low-level Z_{DR} signatures in supercell forward flanks: the role of size sorting and melting of hail. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 276-299.
- Green, A. W., 1975: An approximation for the shapes of large raindrops. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1578-1583.
- Gunn, R., and G. D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air. *J. Meteor.*, **6**, 243-248.
- Habib, E., W. F. Krajewski, and A. Kruger, 2001: Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements. *J. Hydrol. Eng.*, **6**, 159-166.
- Hagen, M., and S. Yuter, 2003: Relations between radar reflectivity, liquid water content, and rainfall rate during the MAPSOP. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 477-493.
- Handwerker, J., and W. Straub, 2011: Optimal Determina-

- tion of Parameters for Gamma-Type Drop Size Distributions Based on Moments. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **28**, 513-529.
- Huang, G. J., V. N. Bringi, and M. Thurai, 2008: Orientation angle distributions of drops after 80-m fall using a 2D video disdrometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 1717-1723.
- Jung, Y., G. Zhang, and M. Xue, 2008a: Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using ensemble kalman filter. Part I: Observation operators for reflectivity and polarimetric variable. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2228-2245.
- _____, M. Xue, G. Zhang, and J. M. Straka, 2008b: Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using ensemble Kalman filter. Part II: Impact of polarimetric data on storm analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2246-2260.
- _____, _____, and _____, 2010: Simulations of polarimetric radar signatures of a supercell storm using a two-moment bulk microphysics scheme. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 146-163.
- _____, _____, and M. Tong, 2012: Ensemble Kalman Filter Analyses of the 29-30 May 2004 Oklahoma Tornadoic Thunderstorm using One- and Two-Moment Bulk microphysics Schemes, with verification against polarimetric radar data. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1457-1475.
- Kruger, A., and W. F. Krajewski, 2002: Two-dimensional video disdrometer. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 602-617.
- McFarquhar, G. M., and R. List, 1993: The effect of curve fits for the disdrometer calibration on raindrop spectra, rainfall rate, and radar reflectivity. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 774-782.
- Pruppacher, H., and K. V. Beard, 1970: A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **96**, 247-256.
- Ryzhkov, A. V., and D. S. Zrnic, 1998: Polarimetric method for ice water content determination. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 125-134.
- Sheppard, B. E., and P. I. Joe, 1994: Comparison of rain-drop size distribution measurements by a Joss-Waldvogel disdrometer, a PMS 2DG spectrometer, and a POSSS Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 874-887.
- Snyder, J., H. B. Bluestein, D. T. Dawson II, and Y. Jung, 2013: Examining the effect of the vertical wind shear environment on polarimetric signatures in numerically-simulated supercells, 36th Conference on Radar Meteorology, Breckenridge, CO.
- Thurai, M., and V. N. Bringi, 2005: Drop Axis Ratios from a 2D Video Disdrometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 966-978.
- Tokay, A., D. B. Wolff, K. R. Wolff, and P. Bashor, 2003: Rain gauge and disdrometer measurements during the keys Area Microphysics Project (KAMP). *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 1460-1477.
- Vivekanandan, J., V. N. Bringi, M. Hagen, and G. Zhang, 1994: Polarimetric radar studies of atmospheric ice particles. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **32**, 1-10.
- Wang, J., B. L. Fisher, and D. B. Wolff, 2008: Estimating rain rates from tipping-bucket rain gauge measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 43-56.
- Zhang, G., J. Vivekanandan, and E. Brandes, 2001: A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39**, 830-841.