

이중편파레이더 관측오차 보정에 따른 강수량 추정값 개선 Improvement of Rainfall Estimation according to the Calibration Bias of Dual-polarimetric Radar Variables

김 해 립* / 박 혜 숙** / 고 정 석***

Kim, Hae-Lim / Park, Hye-Sook / Ko, Jeong-Seok

Abstract

Dual-polarization can distinguish precipitation type and dual-polarization is provide not only meteorological phenomena in the atmosphere but also non-precipitation echoes. Therefore dual-polarization radar can improve radar estimates of rainfall. However polarimetric measurements by transmitting vertically vibration waves and horizontally vibrating waves simultaneously is contain systematic bias of the radar itself. Thus the calibration bias is necessary to improve quantitative precipitation estimation. In this study, the calibration bias of reflectivity (Z) and differential reflectivity (Z_{DR}) from the Bislsan dual-polarization radar is calculated using the 2-Dimensional Video Disdrometer (2DVD) data. And an improvement in rainfall estimation is investigated by applying derived calibration bias. A total of 33 rainfall cases occurring in Daegu from 2011 to 2012 were selected. As a results, the calibration bias of Z is about -0.3 to 5.5 dB, and Z_{DR} is about -0.1 dB to 0.6 dB. In most cases, the Bislsan radar generally observes Z and Z_{DR} variables lower than the simulated variables. Before and after calibration bias, compared estimated rainfall from the dual-polarization radar with AWS rain gauge in Daegu found that the mean bias has fallen by 1.69 to 1.54 mm/hr, and the RMSE has decreased by 2.54 to 1.73 mm/hr. And estimated rainfall comparing to the surface rain gauge as ground truth, rainfall estimation is improved about $7\sim 61\%$.

keywords : 2D Video Disdrometer, calibration bias, dual-polarization, radar rainfall estimation

요 지

이중편파레이더는 강수의 형태를 구분하고 대기 중의 기상 현상뿐만 아니라 비강수에코에 대한 정보를 제공하기 때문에 보다 정확한 강수량 추정을 가능하게 한다. 그러나 수직, 수평으로 진동하는 전파를 송·수신하여 생성되는 이중편파레이더 관측변수들은 레이더 자체가 갖는 시스템적 관측오차를 포함하기 때문에 정량적 강수량 추정을 위해서는 이에 대한 보정이 필수적이다. 본 연구에서는 2차원 영상우적계(2-Dimensional Video Disdrometer, 이하 2DVD) 관측 자료를 이용하여 비슬산 이중편파레이더가 갖는 Z , Z_{DR} 관측오차를 계산한 후, 관측오차 보정에 따라 강수량이 정량적으로 얼마나 개선되는지를 살펴보았다. 총 33 강수사례에 대한 분석결과, Z 는 약 $-0.3\sim 5.5$ dB, Z_{DR} 는 $-0.1\sim 0.6$ dB의 관측오차를 가지며, 대부분의 사례에서 Z 와 Z_{DR} 는 모의된 값보다 낮게 관측하였다. 관측오차를 보정한 전·후 산출된 이중편파레이더 강수량 추정값을 지상관측 강우강도와 비교한 결과, 평균 bias와 RMSE는 각각 1.54 mm/hr, 1.73 mm/hr로 보정 전의 1.69 mm/hr, 2.54 mm/hr 보다 감소함으로써 지상우량계 관측값 대비 레이더 강수량 추정값이 약 $7\sim 61\%$ 향상되었다.

핵심용어 : 2차원 영상우적계, 관측오차, 이중편파레이더 강수량추정

* 교신저자, 기상청 기상레이더센터 레이더분석과 연구원 (e-mail: hlk0919@korea.kr, Tel: 82-2-2181-0874)

Corresponding Author, Researcher, Weather Radar Center 61 Yeouuidaebang-ro 16-gil, Dongak-gu Seoul 156-720, Korea

** 기상청 기상레이더센터 레이더분석과 연구관 (e-mail: hyesookpark@korea.kr)

Senior Researcher, Weather Radar Center 61 Yeouuidaebang-ro 16-gil, Dongak-gu Seoul 156-720, Korea

*** 기상청 기상레이더센터 레이더분석과 과장 (e-mail: twin0323@korea.kr)

Manager, Weather Radar Center 61 Yeouuidaebang-ro 16-gil, Dongak-gu Seoul 156-720, Korea

1. 서 론

이중편파레이더는 수직·수평파를 송신하여 대기 중에 존재하는 대기수상체에 부딪혀 산란(scattering) 되어 돌아오는 신호를 수신하며, 반사도(Z), 차등반사도(Z_{DR}), 비차등 위상차(K_{DP}), 교차상관계수(ρ_{hv}) 등 다양한 이중편파변수를 제공하여 보다 정확한 강수 정보를 얻을 수 있다. 시·공간적으로 높은 분해능의 레이더를 이용한 강수량 추정에는 돌발홍수, 폭우 등 위험기상을 감시 및 예측하는데 매우 유용하며, 반사도 외의 다양한 이중편파변수를 제공하는 이중편파레이더의 경우 대기수상체 분류 및 미세물리과정의 변화에 의한 우적크기분포(Drop Size Distribution, 이하 DSD) 변동을 설명할 수 있어 이에 따른 강우 추정 오차를 줄일 수 있다(Ryzhkov et al., 2005). 그러나 레이더 관측은 빔 차폐, 지형클러터, 채프, 그리고 이상전파에코와 같은 비기상에코의 영향을 받을 뿐만 아니라, 레이더 하드웨어 불안정, 신호처리 기법 차이, 레이더 시스템 내의 손실 등에 의해 레이더 자체의 시스템적 관측오차를 지닌다(Park and Lee, 2010). 특히 Z 와 Z_{DR} 은 파워 강도와 관련 있기 때문에 송신기의 출력, 수신 강도, 하드웨어에서의 감쇠, 안테나 이득(antenna gain) 등의 영향을 받는다(Lee et al., 2012).

기상청에서는 이중편파레이더의 정량적 강수량 추정을 위해 ORPG (Open Radar Product Generator) 품질관리 알고리즘을 이용하여 비기상에코를 제거하고 있으나, 레이더 자체가 시스템적 관측오차를 포함하기 때문에 정량적 강수량 추정을 위하여 정확한 측정 또는 보정(calibration)이 기반 돼야 한다(Park and Lee, 2010). 단일편파레이더의 경우 하드웨어 안정도 감시를 통하여 장기간의 반사도 보정이 가능하며, 우적계(disdrometer)와 같은 지상 관측장비를 이용하여 관측된 반사도 값을 보정할 수 있다. 우적계를 이용한 보정 방법은 Joss et al. (1968)에 의해 처음 소개되었으며 이들은 레이더의 zenith pointing으로부터 약 200 m 높이에서 관측한 반사도를 지상우량계(rain gauge)와 우적계에서 관측된 자료로 보정하였다. Ulbrich and Lee (1999)은 WSR-88D의 반사도 보정을 위하여 우적계로부터 유도된 반사도를 사용하여, 레이더가 약 3 dB 정도 낮게 관측됨을 발견하였다. 이중편파레이더에서는 자기상관(self-consistency)관계를 이용한 반사도 보정 방법도 널리 사용되고 있다. 이를 이용하면 우적계와 같은 장비 없이 동일한 레이더에서 관측한 레이더 변수를 이용하여 관측 부피와 높이의 차이에서 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있다. 이 외에도 Atlas (2002)에 다양한 검보

정 방법이 간략하게 소개되었다.

Gwon et al. (2010)은 관측 고도각을 90°로 고정하고 방위각을 360° 회전하면서 획득한 연직지향 관측방법을 통해 비슬산 이중편파레이더의 Z_{DR} 를 보정하였다. 그러나 이 방법은 레이더 관측의 효율성을 저해할 수 있으며 바람과 지형에 따라 Z_{DR} 값이 변동할 수 있기 때문에 본 연구에서는 대기 중 강우입자의 크기, 모양, 낙하속도 등 DSD 정보를 제공하는 2차원 영상우적계(2-Dimensional Video Disdrometer, 이하 2DVD) 자료를 이용하여 비슬산 이중편파레이더에서 관측한 Z 와 Z_{DR} 의 관측오차를 산출하고, 이를 보정한 Z 와 Z_{DR} 을 강수량 추정식에 적용함으로써 강수량이 정량적으로 얼마나 개선되는지를 살펴보았다. 또한 강우입자의 산란특성은 강우입자의 모양에 따라 달라지기 때문에 2DVD 자료를 이용하여 강우입자의 모양을 대변하는 축비(axis ratio) 관계식을 도출하여 이론적인 이중편파변수를 모의하는데 사용하였다. 2장에서는 본 연구에 사용된 비슬산 이중편파레이더와 2DVD의 관측 자료와 분석방법에 대해 설명하였고, 3장에서는 강우입자의 축비 관계식 도출 과정, 관측오차 산출 및 강수량 추정결과를 나타내었다. 마지막으로 결론 및 향후 계획은 4장에 제시하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료 및 관측기기의 특성

본 연구에서는 이중편파레이더 변수의 관측오차를 산출하기 위하여 비슬산 S-밴드 이중편파레이더(35.7° N, 128.5° E)와 비슬산 사이트로부터 약 22 km 떨어져 있는 대구지역(경북대학교, 35.9° N, 128.6° E)의 2DVD 자료를 사용하였다. 국토교통부에서 2009년부터 운영 중인 비슬산 S-밴드 이중편파레이더는 해발고도 1,057 mm인 조화봉에 위치하고 있으며 2,795 MHz (S-band) 주파수에서 수직, 수평파를 송신하여 강우를 탐지한다. 이 레이더는 수문 관리 및 홍수예보를 목적으로 하기 때문에 넓은 영역에 대한 기상감시를 목적으로 하는 기상레이더와는 달리 관측반경(약 150 km)이 좁고, 관측주기(2.5분)가 빠르며 주로 낮은 고도각(-0.5°~1.6°) 관측으로 지표부근의 강우현상을 집중 관측한다. 비슬산 이중편파레이더에서는 반사도(Z), 차등반사도(Z_{DR}), 비차등위상차(K_{DP}), 교차상관계수(ρ_{hv}) 등의 이중편파변수를 산출하며, 비차등위상차는 차등위상차(Φ_{DP})로부터 계산되는 변수이다.

2DVD는 2개의 전구와 이 전구의 빛을 반사시켜주는 거울과 렌즈, 2대의 라인스캔(line-scan) 카메라, 그리고 카

메라를 통해 기록된 정보를 저장하는 CPU 등으로 구성된다. 2DVD는 기기 안으로 떨어지는 강수입자가 빛을 막으면 그 그림자를 카메라가 인식하여 그림자 부분을 기록하게 된다. 이때 시간차마다 인식된 그림자들은 차례대로 조합되어 대기수상체들의 입자 직경, 부피, 낙하속도, 모양, 편평도 등의 정보로 기록된다(Kruger and Krajewski, 2002). 일반적으로 산란에 영향을 주는 인자인 축비(axis ratio)는 장축의 반경에 대한 단축의 반경 비로 편평도를 이용하여 계산된다. 2DVD 관측 자료는 강수입자크기분포 정보를 제공하기 때문에 실제 대기 중 강우의 산란 및 미세물리 특성을 반영한 참값으로 볼 수 있어 레이더 관측 자료의 검증에 이용된다. 본 연구에서 사용한 비슬산 이중편파레이더와 2DVD의 기본사항은 Table 1과 같으며, 2011년 9~10월과 2012년 4~10월까지 대구지역에 내린 강우사례에 대해 분석하였다. 또한 2DVD와 동일한 지점에 위치한 지상우량계(rain gauge) 관측 자료와 비교하여 신뢰도가 높은 강우사례만을 사용하였다.

2.2 분석방법

2DVD는 지상에서 대기수상체 입자정보를 직접 관측하며, 강우레이더는 대기 중으로 수직·수평파를 송신하여 돌아오는 강수입자의 후방산란신호를 수신함으로써 입자정보를 알 수 있다. 본 연구에서는 2DVD 관측 자료를 이용하여 이론적인 이중편파변수를 모의하고 이를 실제 운영 중인 비슬산 이중편파레이더 관측변수와 비교함으로써 이중편파레이더가 갖는 관측오차를 산출하였으며, 관

측오차를 보정한 후 강수량이 정량적으로 얼마나 개선되는지를 살펴보았다.

먼저 이론적인 이중편파변수를 모의하기 위하여 2DVD와 동일한 관측지점에 위치한 지상우량계(한 버킷당 최소 관측 강수량이 0.2 mm)를 이용하여 2DVD 관측 자료의 정확도를 검증한 후 보다 신뢰성 높은 자료획득을 위해 품질관리 과정을 수행하였다. 2DVD 자료의 정확도 검증은 지상우량계와 2DVD로부터 관측된 총 누적강수량을 비교하여 백분율 오차(percent error)를 계산하였다. 일반적으로 지상우량계와 2DVD 간의 누적강수량 차이가 약 10~20%를 보인다는 선행연구의 결과에 비추어 본 연구에서는 20% 이내의 백분율 오차를 가지는 2DVD 자료만을 사용하였다(McFarquhar and List, 1993; Sheppard and Joe, 1994; Hagen and Yuter, 2003; Tokay et al., 2003; Kim et al., 2014). 정확도 검증을 거친 2DVD 자료는 낙하속도 기반의 필터링 기법을 적용하여 품질관리를 수행하였다. 일반적으로 2DVD는 기기 내에서 2개의 라인스캔 카메라가 떨어지는 빔방울의 모양과 속도 등의 정보를 기록하고 이로부터 입자직경에 따른 축비 등을 계산할 수 있다. 그러나 2개의 라인스캔 카메라가 서로 일치하지 않거나 큰 강수입자가 파열(break up) 또는 강수입자가 되퇴었을 경우에는 부정확한 대기수상체의 정보를 기록하게 된다. 이는 Figs. 1(a) and 1(b)에서처럼 주로 입자직경이 작은 영역에서 낙하속도와 축비 값들이 정상분포를 벗어난 이상점(outlier)들로 나타나게 된다. 이러한 이상점들은 잘못된 대기수상체 정보를 제공하므로 본 연구에서는 Eq. (1)

Table. 1. The Specification of Dual-polarization Weather Radar in Bislsan and 2DVD

Characteristics		S-band radar	2DVD
Variables		Z, Vr, SW, ZDR, Φ_{DP} , KDP, ρ_{hv}	Drop diameter[mm], Fall velocity[m/s], Oblateness, Area[mm ²], etc.
Resolution	Horizontal	-	better than 0.18 mm
	Vertical	-	better than 0.2 mm for vel.< 10 m/s
Sampling Area		-	100 × 100 mm
Transmitter type		Klystron	-
Transmitter peak power		750 KW	-
Beam width of radar		0.95°	-
Observation	Frequency	2.5 min	1 min
	Range	150 km	-
	Gate size	125 m	-
	Elevations	-0.5°~1.6° (6 elevations)	-

과 같이 관측된 강우입자의 낙하속도와 계산된 속도(V_A)의 절대차가 계산된 속도의 0.4배보다 작아야 한다는 조건을 적용하여 이상점을 제거하였다(Thurai and Bringi, 2005).

$$|V_{measured} - V_A| < 0.4 V_A \quad (1)$$

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

여기에서 D 는 입자직경, $V_{measured}$ 는 2DVD에서 관측된 입자의 낙하속도[ms^{-1}]이며, V_A 는 Atlas et al. (1973)의 입자크기별 낙하속도 관계식을 나타낸다. 그 결과를 나타낸 Figs. 1(c) and 1(d)을 보면, 낙하속도 기반의 필터링 후 정상적인 분포를 벗어나는 값들이 상당수 제거(총 입자개수가 약 17% 감소)된 것을 확인할 수 있다. 그러나 입자직경에 따른 평평도가 매우 작은 입자($D < 0.5 \text{mm}$) 범위에서는 품질관리를 적용한 이후에도 여전히 많은 노이즈를 보여, 본 연구에서는 강우입자의 축비관계식을 산출할 때,

0.5mm 미만의 입자직경 자료는 사용하지 않았다.

본 연구에서는 정확도 검증과 품질관리를 거친 2DVD 관측 자료를 입력 자료로 사용하여 Jung et al. (2010)의 이중편파변수 계산식으로부터 이론적인 이중편파변수(Z , Z_{DR} , K_{DP} , ρ_{hv})를 모의하였다. 모의에 필요한 강우의 입자크기분포($N(D)$)와 전후방 산란크기($f_a(0)$, $f_b(0)$, $f_a(\pi)$, $f_b(\pi)$) 값은 2DVD 관측 자료로부터 산출하였다. 먼저 $N(D)$ 는 아래의 Eq. (2)에 의해 계산되었다.

$$N(D_i) = \frac{1}{\Delta t \Delta D} \sum_{j=1}^M \frac{1}{A_j V_j} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 $N(D)$ 는 강우입자크기별 수농도 분포 [$\text{mm}^{-3} \text{mm}^{-1}$], D 는 강우입자의 직경[mm], Δt 는 샘플링 시간간격($\Delta t=60\text{s}$), ΔD 는 입자간격($\Delta D=0.2 \text{mm}$), M_i 는 ΔD 에 관측된 입자개수, A_j 는 입자의 관측면적[mm^2], 그리고 V_j 는 입자의 낙하속도[ms^{-1}]를 의미한다.

입자의 전후방 산란크기는 T-행렬(Transition-matrix)

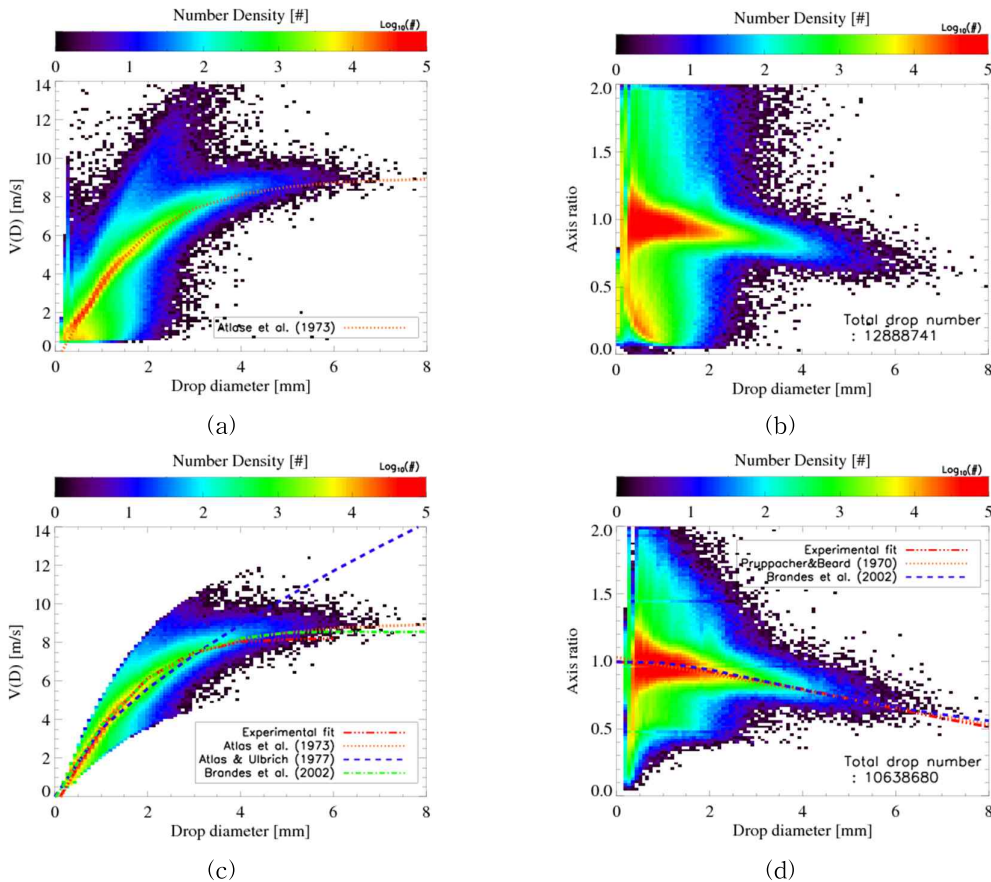


Fig. 1. Distribution of Fall Velocity and Axis Ratio according to the Diameter. (a) Velocity-based Filter for the Drop Measurements. The Color Scale Represents Drop Number Density (log scale). (b) Drop Axis Ratios for all Measured Drops. (c) Drop Falling Velocity after Removing Mismatched Drops. (d) Drop Axis Ratios after Removing Mismatched Drops

산란방법을 사용하여 산출하였다. T-행렬 산란방법은 입자를 비구형이라 가정한 상태에서 입자의 축비를 반영하여 전후방 산란크기를 계산하는 방법(Zhang et al., 2001)이다. 본 연구에서 사용한 강우입자의 축비는 33개의 강우사례에 대한 2DVD 관측 자료로부터 산출하였으며, 강우입자의 축비관계식 도출은 3.1절에서 자세히 다루었다. 2DVD 관측 자료로부터 계산된 N(D)과 전후방 산란크기를 이용하여 이중편파변수를 모의하기 위해 10.7 cm의 S-밴드 파장을 사용하였으며, 빗방울의 평균 기울기(mean canting angle)와 입자기울기(canting angle)의 표준편차는 각각 7°과 0°로 가정하였다(Huang et al., 2008).

2DVD 관측 자료로부터 모의된 이중편파변수를 참값으로 보고, 비슬산 이중편파레이더 관측변수들의 오차를 계산하기 위해서는 상호일치 지점을 선정하는 것이 중요하다. 비슬산레이더는 2DVD 관측지점으로부터 약 17° 방위각으로 22.28 km 떨어진 곳에 위치하며(Fig. 2), 2.5분마다 6개의 고도각에 대해 볼륨 관측을 하는 반면, 2DVD는 한 지점에서의 분당 관측 자료이므로 비교를 위해서는 두 관측기기의 시·공간 해상도 차이를 일치시켜야 한다. 이에 본 연구에서는 2DVD 관측지점을 중심으로 가장 가까운 1개의 방위각과 2DVD 위치를 중심으로 앞과 뒤의 4개 게이트, 즉 총 9개 게이트(1° × 9 gate)에서 추출한 자료를 산술평균하여 사용하였다. 또한 2DVD와 레이더의 고도 차이와 지형에 의한 영향을 최소화하기 위해 두 번째로 낮은 0.0° 고도각에서 관측된 PPI 자료와 비교하였다(Kim et al., 2014).

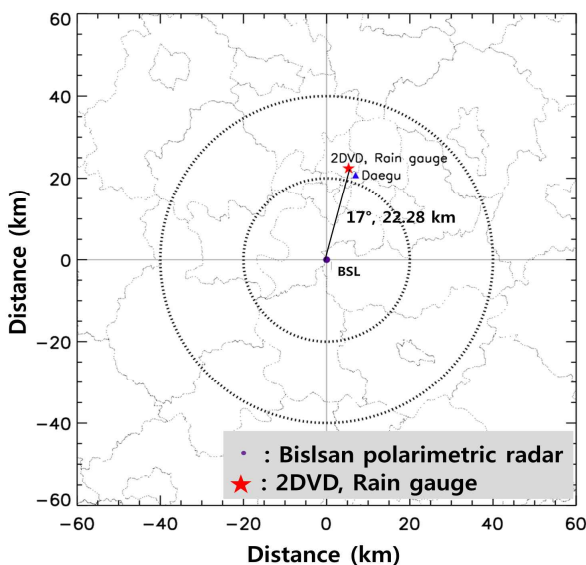


Fig. 2. Observation Range of Dual-polarization Weather Radar in Bislan, the Full Circle Represents BSL Site, Star Represents the 2DVD and Rain Gauge Site (Kim et al., 2014).

3. 분석결과

3.1 강우입자의 축비 관계식 도출

강우입자는 지역적으로 발생하는 강수시스템(e.g., 대류형 강수, 층상형 강수)과 그들의 발달단계에 따라 그 특성이 달라진다(Zhang et al., 2008). 따라서 지역적 강우특성을 반영해야만 보다 정확한 강수량 추정 값을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 한반도의 강우입자 특성을 파악하기 위해 2DVD 관측 자료로부터 강우의 산란정도를 지배하는 축비관계식을 도출하였다. 본 연구에 사용된 강우사례는 2011~2012년 동안 대구지역에서 발생한 33개의 강우사례(총 255시간)로 층상형(12 사례), 대류형(10 사례), 혼합형(11 사례) 강우로 구성되어 있다.

강우입자의 축비관계식은 다항식 함수(polynomial function)로 산출하였으며, 산출된 축비 관계식은 강우입자의 전후방 산란크기를 계산하기 위하여 T-행렬 산란알고리즘에 적용하였다. 국내 강우사례로부터 계산된 축비 관계식은 Eq. (3)과 같으며, Fig. 1(d)에 붉은 점선(Experimental fit)으로 나타내었다. 또한 국내에서 산출된 축비 관계식과 미국지역에서 관측된 자료로부터 산출된 축비 관계식을 서로 비교하기 위하여 Pruppacher and Beard (1970)와 Brandes et al. (2002)의 축비 관계식을 함께 나타내었으며, 낙하속도의 경우는 Atlas et al. (1973), Atlas and Ulbrich (1977), 그리고 Brandes et al. (2002)의 관계식을 함께 표출하여 비교하였다.

$$R=0.997845-0.0208475D-0.0101085D^2+0.000643316D^3 \quad (3)$$

$$(0.5 \leq D \leq 8 \text{ mm})$$

국내 관측 자료로부터 도출된 축비 관계식(Eq. (3))을 보면 강우입자의 크기가 작을수록 입자가 구형이므로 축비가 1에 근사한 값을 잘 나타내며, 강우가 성장할 수 있는 최대크기인 8mm까지 포함하고 있다. Fig. 3에서 미국에서 산출된 축비(Brandes et al., 2002)와 한국에서 산출된 축비 관계식(Experimental fit) 분포를 비교해보면, 작은 입자($D \leq 3 \text{ mm}$)와 큰 입자($D > 5.5 \text{ mm}$) 직경에서 국내 관측자료 기반의 축비가 국외에서 산출된 축비보다 작게 모의한다. 즉, 한국에서의 강우입자가 미국의 것보다 상대적으로 더 편평함을 말하며, 이에 따라 산란정도가 달라지기 때문에 강수량 추정에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

3.2 비슬산 이중편파레이더의 관측오차 산출

한 지점에서 관측한 2DVD 자료와 넓은 공간을 볼륨 관측하는 레이더 자료 간에는 관측 환경, 관측기기의 오차, 샘플

플링 볼륨 차이 등 다양한 오차를 포함한다. 그러나 2DVD 관측 자료가 지상우량계 자료와 비교하여 오차 범위(20% 이내) 내에 존재한다면, 2DVD 자료로부터 모의된 이중편파변수를 참값으로 볼 수 있다(Kim et al., 2014). 따라서 본 연구에서는 2DVD 관측 자료로부터 모의된 이중편파변수와 비슬산 이중편파레이더에서 관측된 변수들을 비교하여 비슬산레이더의 관측오차를 산출하였다. 이때 비교한

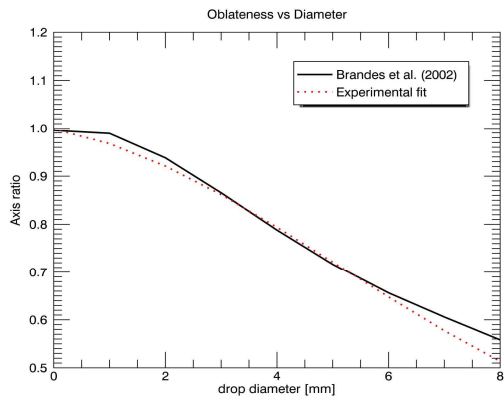


Fig. 3. Comparison of Axis Ratios Relation. The Solid Line Represents Brandes et al. (2002), and the Red Dotted Line Represents Experimental Fit

이중편파변수는 강우입자 크기에 주로 영향을 받는 Z 와 Z_{DR} 이며, 비교에 사용된 비슬산 레이더의 Z 는 지형에코를 제거한 보정 후 Z 값이다.

Fig. 4는 2011년 10월 21일 16시간동안 56.625mm의 강우가 내린 혼합형 강우사례에 대한 Z 와 Z_{DR} 비교결과이다. Figs. 4(a) and 4(b)는 2DVD로부터 모의된 Z 와 Z_{DR} (실선)를 비슬산에서 관측된 변수들(+ 표시)과 강우 지속 시간에 따라 각각 비교한 결과이며, Figs. 4(c) and 4(d)는 16시간동안 관측된 Z 와 Z_{DR} 를 모의된 값들과 정량적으로 비교하기 위해 산포도로 나타낸 것이다. Fig. 4를 보면, 두 관측기기 간에 측정 고도와 샘플링 볼륨의 차이가 있음에도 불구하고 시계열 변화경향이 서로 유사하며, 상관관계 또한 Z 는 0.94, Z_{DR} 는 약 0.7로 비교적 높은 상관성을 보인다. 그러나 비슬산 이중편파레이더에서 관측된 Z 와 Z_{DR} 는 2DVD로부터 모의된 값들에 비해 각각 약 1.7 dB와 0.27 dB 정도 낮게 관측함을 알 수 있다.

Fig. 5는 2012년 9월 16일 강우사례에 대한 분석결과로, 강우지속시간은 24시간이며 대류성 강우사례이다. Fig. 5(a) and 5(b)를 보면, 강우가 지속적으로 내린 0000-1500 UTC 동안 Z 와 Z_{DR} 의 시계열 분포는 비교적 유사한 경향을 보이지만, 약한 강우(1500 UTC 이후)가 훑날리며 내리는 시

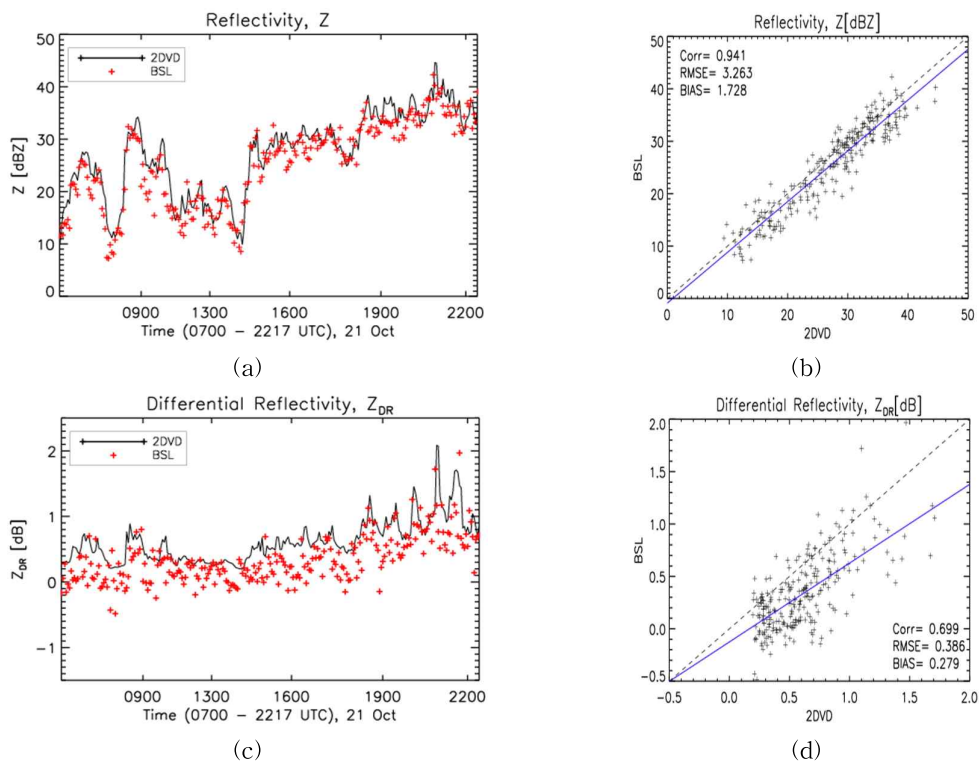


Fig. 4. Time series of the (a) Reflectivity, and (b) Differential Reflectivity by 2DVD (solid line), Bislan Radar (plus). Scatter Plots of (c) reflectivity, and (d) Differential Reflectivity from 2DVD and Bislan Radar (21 October 2011)

간 동안에는 2DVD의 관측변동이 심해서 서로 차이를 보인다. 이는 Figs. 5(c) and 5(d)의 산포도 분포에서도 확인할 수 있다. 이 사례의 경우 Z는 약 0.76의 상관관계를 갖지만, Z_{DR}은 0.4로 상관성이 낮으며, 비슬산레이더가 모의된 이중편파변수에 비해 Z는 약 1.8 dB 낮게, Z_{DR}은 약 0.08 dB 높게 관측하였다. 이는 비슬산레이더의 변수별 관측오차가 강우시스템에 따라 달라지며, 특히 강우의 크기와 모양 등과 관련 있는 Z_{DR}이 강우시스템에 따른 영향을 더 많이 받는 것을 의미한다. Table 2에는 본 연구에서 분석한 33개 강우사례에 대한 사례일, 강우지속시간, 강우형태, 비슬산 이중편파레이더의 Z와 Z_{DR}의 관측오차를 나타내었다. Table 2를 보면 비슬산 이중편파레이더는 전반적으로 모의된 값에 비해 반사도를 낮게 관측하며, 관측오차는 -0.3 dB에서 최대 5.5 dB이다. Z_{DR} 또한 일부 사례의 경우 모의 값에 비해 높게 나타났지만, 대부분의 경우 낮게 관측되었으며, 관측오차는 약 -0.1~0.6 dB를 보였다. Z와 Z_{DR} 모두 비가 단시간에 오거나 산발적으로 내린 강우사례의 경우 상대적으로 높은 관측오차를 보였다.

3.3 레이더 강수량 추정값 평가

레이더 관측변수의 오차보정에 따른 강수량 추정값의 향상 정도를 평가하기 위해 본 연구에서는 3.2절에서 산출

된 Z와 Z_{DR}의 관측오차를 보정한 후 레이더 강수량 추정값을 산출하여 AWS 관측 강수량과 비교하였다. 대구 지점 (35.88° N, 128.62° E)의 AWS 관측강수와 비교하기 위해 0.0° PPI 고도에서의 비슬산 레이더 관측 자료를 이용하였으며, 강수량 추정식은 Eq. (4)인 Bringi and Chandraseker (2001)의 식을 사용하였다. 2DVD의 관측특성상 산발적이거나 단시간에 오는 비의 경우 두 기기간의 오차가 커지기 때문에 지속적으로 비가 내리며, 누적 강수량이 많은 11 강우사례만을 선별하여 분석하였다. 또한 Eqs. (5a) and (5b)인 제곱근 편차(Root Mean Square Error, RMSE)와 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE)를 이용하여 레이더 관측오차 보정에 따른 강수량 추정값의 정확성을 평가하였다.

$$R(Z_h, Z_{DR}) = 0.0067 \times (Z_h^{0.93}) \times 10^{(0.1 \times (-3.43) \times Z_{DR})} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |R_i - O_i| \quad (5a)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - O_i)^2} \quad (5b)$$

Fig. 6(a)는 2011년 10월 21일 강우사례의 10분당 강우강도(왼쪽 y축)와 누적 강우량(오른쪽 y축) 추정 결과를

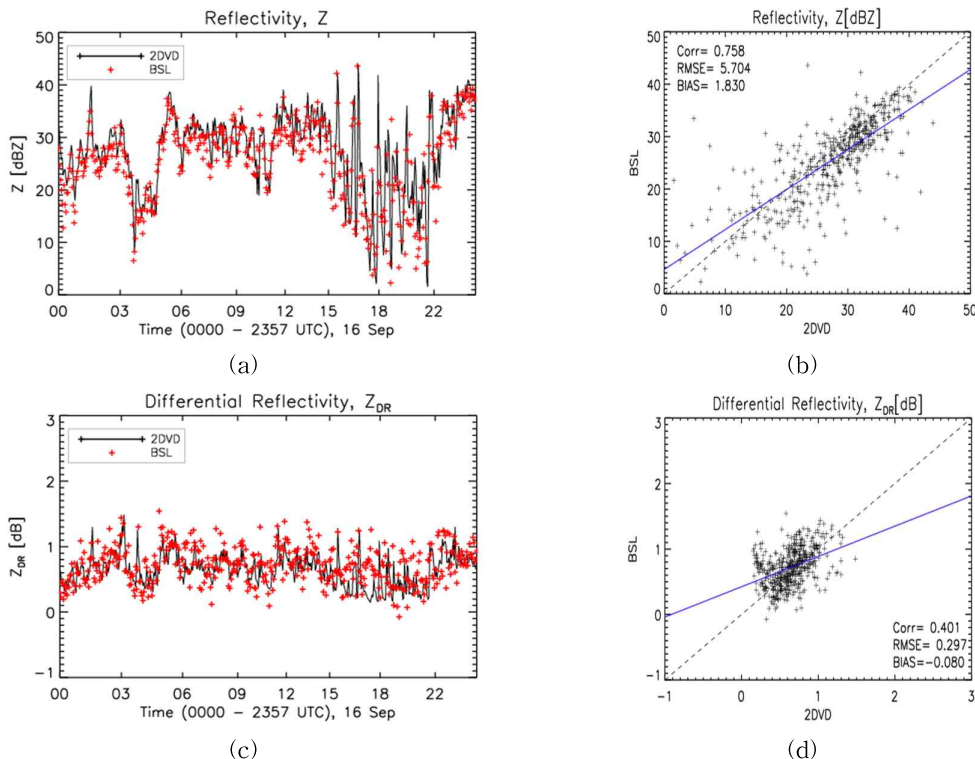


Fig. 5. Same as Fig. 4, Except for the Date 16 September 2012

Table 2. The Calibration of Bias of Reflectivity and Differential Reflectivity as Determined from Radar Measurement and Computed from Disdrometer Observations

Date	Time of observation [UTC]	Rainfall duration [hr]	Type of precipitation	Bias correction		Date	Time of observation [UTC]	Rainfall duration [hr]	Type of precipitation	Bias correction	
				Z [dB]	ZDR [dB]					Z [dB]	ZDR [dB]
'11.09/05	1215-1300	1	C	5.466	0.087	'12.07/11	0120-0820	3	S	4.132	0.071
09/09	1730-1930	2	S	-0.331	-0.108	07/13	0740-0900	1	C	2.399	-0.211
09/10	0100-2359	12	M	0.888	-0.041	07.15	0050-0120	1	M	2.775	0.094
09/29	1400-1600	2	S	2.368	0.196	07/16	1620-2320	7	M	1.401	0.181
10/13	2220-2340	2	S	0.183	0.220	07/21	0915-1025	1	C	3.056	0.103
10/14	0000-0800	7	S	2.644	0.210	08/12	0830-1745	8	C	0.894	0.161
10/21	0700-2250	16	M	1.728	0.279	08/13	0000-1400	14	M	2.040	0.122
'12.04/02	1530-2340	8	M	3.280	0.599	08/23	0000-2359	24	M	2.048	0.128
04/21	0000-1440	14	S	2.693	0.604	08/24	0000-0710	7	S	0.740	0.206
04/25	0040-0730	7	M	1.159	0.492	08/27	1630-2340	7	M	3.621	0.298
05/01	0930-1330	4	S	1.978	0.368	08/29	1920-2320	4	S	1.971	0.037
05/08	0630-1350	7	C	2.796	0.012	09/09	0020-2330	23	S	2.029	0.100
05/14	0020-1350	13	S	2.077	0.236	09/16	0000-2359	24	C	1.830	-0.080
05/28	0605-0650	1	C	5.081	0.121	09/17	0000-0540	5	M	0.613	-0.157
06/08	0710-0830	1	C	3.301	0.244	10/22	0630-1000	4	M	1.076	-0.051
06/23	0520-0600	1	C	1.534	-0.097	10/27	0010-0810	8	S	1.901	0.007
07/06	0100-1630	15	C	3.799	0.070						

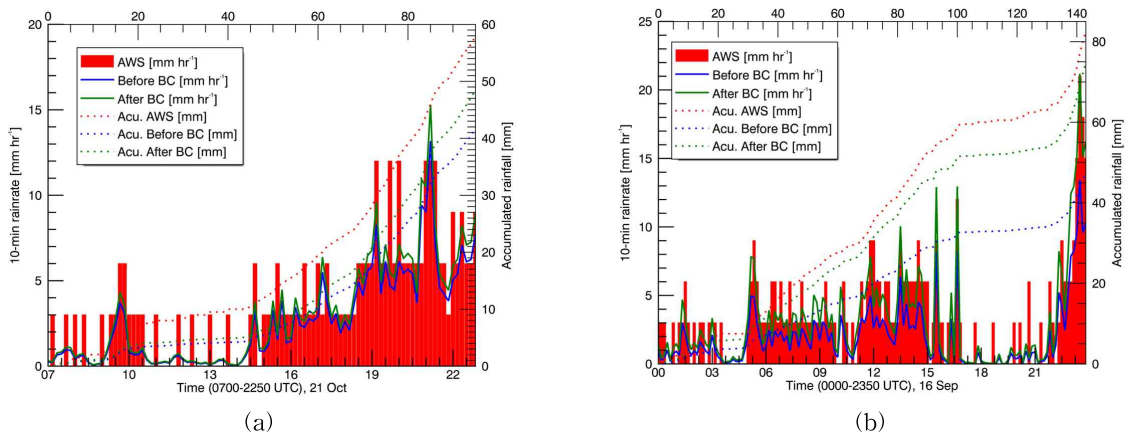


Fig. 6. The Comparison of Ten-min Rain Rate and Accumulated Rainfall Obtained by Radar and AWS Rain Gauge. (a) 21 October 2011, (b) 23 August 2012. The Left Ordinate is for Rain Rates and the Right Ordinate is for Accumulative Rainfall

관측시간에 따라 비교한 결과이다. 파란색 실선은 Z, Z_{DR} 관측오차를 보정하기 전 추정된 10분당 강우강도이며, 초록색 실선은 오차보정 후 추정된 10분당 강우강도, 그리고 비교검증을 위해 대구 AWS 10분당 강우강도는 붉은색 막대그래프로 나타내었다. 또한 AWS의 누적강우량

(붉은색 점선), 오차보정 전 누적강우량(초록색 실선), 그리고 오차보정 후 누적강우량(파란색 점선) 분포도 함께 나타내었다. 그 결과, 시계열에 따른 10분당 강우강도는 강우강도가 클수록 오차보정 후 강우강도가 오차보정 전의 강우강도 보다 높게 나타났으며, 대구지역의 AWS 관

측 강우강도와 비슷한 분포를 보였다. 누적강우량의 정확도를 비교해 보면, 레이더 관측변수의 오차보정 전·후 레이더 추정 누적강우량은 각각 41.759 mm, 48.576 mm로, AWS 관측 누적강우량(58.0 mm)을 기준으로 레이더 관측변수의 오차보정 후, 약 11.754% 강수량 추정값이 개선됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 오차보정 전 1.438이던 MAE가 1.339로 감소하고, RMSE가 1.995에서 1.835로 감소된 결과를 통해서도 알 수 있다.

2012년 9월 16일 강우사례(Fig. 6(b))의 경우는 약 24시간동안 AWS는 82.5mm의 총 누적강우량을 관측하였으며, 오차보정 전 누적강우량은 47.369 mm로 AWS의 누적강우량과 비교하였을 때 약 35 mm 이상 과소 추정하였다. 그러나 Z와 Z_{DR}의 관측오차를 보정한 결과, 레이더 추정 총 누적강우량이 74.782 mm로 약 33% 강수량 추정값이 향상되었으며, MAE는 1.866에서 1.505로, RMSE는 2.487에서 1.961로 감소하였다. 이외에 지속적으로 강우가 있었던 9사례에 대해 추가로 살펴본 결과, 관측오차보정 후 강수량 추정값이 오차보정 전보다 7~61% 향상된 결과를 보였다(Table 3). Table 3에서 약 61%의 높은 개선을 보인 강우사례(2012년 9월 17일)는 다른 강우사례에 비해 비교적 높은 Z 관측오차를 보였으며, 오차보정 전 강수량 추정값이 AWS 누적강우량과 비교하였을 때 과소 추정하고 있었다. 이는 레이더 강수량 추정값 산출에 있어 Z의 관측오차 보정이 매우 중요함을 시사한다. 비록 단시간동안 산발적으로 강우가 내린 사례의 경우에는 오히려

관측오차보정 후 강수량 추정 정확도가 낮아지는 경우도 있었으나 지속적으로 내리는 강우 사례의 경우 관측변수의 오차보정을 통하여 강수량 추정 정확도가 향상됨을 볼 수 있었다. 이는 레이더 강수량 추정에 있어 이중편파변수의 오차보정이 반드시 필요함을 시사하며, 이중편파변수에 대한 관측오차 보정을 주기적으로 수행한다면 단일 편파레이더보다 강수량 추정 정확도는 더 높아질 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 강우입자의 물리적 특성을 관측하는 2DVD 자료를 이용하여 비습산 이중편파레이더가 갖는 Z와 Z_{DR}의 관측오차를 보정하고, 강우량이 정량적으로 얼마나 개선되는지를 살펴보았다. 레이더가 갖는 Z와 Z_{DR}의 관측오차를 산출하기 위해 강우입자의 크기, 편평도, 낙하 속도 등을 관측하는 2DVD 자료를 사용하여 한반도 강우 특성을 반영한 강우입자의 축비 관계식을 산출하였으며, 이를 활용하여 이론적인 이중편파변수를 모의하였다. 모의된 이중편파변수는 비습산 이중편파레이더 변수와 비교를 통해 2011~2012년 대구에서 발생한 33 강우사례에 대해 비습산 이중편파레이더가 갖는 Z와 Z_{DR}의 관측오차를 산출하였다. 단시간 동안 비를 내린 경우나 산발적으로 훑날리는 비를 내린 강우사례의 경우 지속적으로 비를 내린 사례보다 높은 관측오차를 보였다.

Table 3. MAE and RMSE of Rainfall Estimates with Before Bias Correction and after Bias Correction. And Estimated Rainfall, Comparing to the Surface Rain Gauge as Ground Truth, Rainfall Estimation is Improved about 7–61%. BC Represents Bias Correction

Date	Rainfall duration [hr]	Bias correction		Accumulated rainfall [mm]			MAE		RMSE		Improve [%]
		Z [dB]	ZDR [dB]	Before BC	After BC	AWS	Before BC	After BC	Before BC	After BC	
'11.10/21	16	1.728	0.279	41.759	48.576	58.0	1.438	1.339	1.995	1.835	11.754
'12.04/21	14	2.693	0.604	21.460	23.815	32.5	1.304	1.246	1.643	1.601	7.246
05/14	13	2.077	0.236	9.318	12.164	21.5	1.201	1.120	1.762	1.645	13.240
07/11	3	4.132	0.071	1.863	4.308	4.0	0.970	0.720	1.382	0.955	61.128
08/13	14	2.040	0.122	24.571	34.594	39.0	1.781	1.591	3.611	3.195	25.698
08/23	24	2.048	0.128	54.130	75.987	90.0	2.060	1.706	3.251	2.458	24.286
09/09	23	2.029	0.100	14.693	21.070	23.5	0.875	0.875	1.657	1.466	27.136
09/16	24	1.830	-0.080	47.369	74.782	82.5	1.866	1.505	2.487	1.961	33.229
09/17	5	0.613	-0.157	49.253	63.584	62.5	4.149	4.027	5.707	0.181	22.930
10/22	4	1.076	-0.051	12.628	16.563	17.5	1.841	1.724	2.782	2.201	22.485
10/27	8	1.901	0.007	4.691	7.057	9.0	1.148	1.126	1.645	1.578	26.289

산출된 Z와 Z_{DR}의 관측오차는 보다 정확한 강수량 산출과 이중편파레이더의 Z와 Z_{DR} 값의 오차를 줄이기 위하여 사용되었다. 정량적 강수량 추정을 위해 관측오차가 존재하는 날 중 지속적으로 비를 내리며 누적 강수량이 많은 강우사례를 선정하여 적용하고, 검증을 위하여 대구 AWS 지점의 강수량과 비교하였다. 그 결과 관측오차보정 후 레이더로부터 구한 강우강도가 실제 강우강도에 근접하였으며, 총 11 강우사례에서 약 7~61%의 개선을 보였다. 따라서 2DVD 관측 자료를 이용하여 산출된 레이더 관측오차는 현재 레이더 변수를 통한 실 강수량 추정 시 오차를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 주기적으로 이중편파변수에 대한 보정을 수행한다면 향후 보다 높은 강수량 추정을 기대할 수 있다. 하지만 우적계 자료를 이용한 레이더 관측오차 보정은 실시간 적용에 어려움이 있으며, 정확한 관측오차 추정을 위해서는 품질 높은 레이더 관측 자료가 필요하다. 이는 향후 연구를 통해 개선할 수 있도록 노력해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상레이더센터 2014년도 R&D 연구 개발사업 “범부처 융합 이중편파레이더 활용 기술 개발 (WRC-2013-A-1)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Atlas, D. (2002). “Radar calibrations: Some simple approaches.” *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 83, pp. 1313-1316.
- Atlas, D., and Ulbrich, C.W. (1977). “Path and area integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band.” *J. Appl. Meteor.*, Vol. 16, pp. 327-332.
- Atlas, D., Srivastava, R.C., and Sekkon, R.S. (1973). “Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence.” *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 2, pp. 1-35.
- Brandes, E.A., Zhang, G., and Vivekanandan, J. (2002). “Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment.” *J. Appl. Meteor.*, Vol. 41, pp. 674-685.
- Bringi, V.N., and Chandrasekar, V. (2001). “Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications.” Cambridge University Press, p. 636.
- Gwon, S.H., Lee, G.W., and Lee, C.G. (2010). “Calibration of differential reflectivity from the Bislsan S-Band dual-polarization radar.” Proceedings of the spring meeting of KMS, pp 458-459.
- Hagen, M., and Yuter, S. (2003). “Relations between radar reflectivity, liquid water content, and rainfall rate during the MAPSOP.” *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 129, pp. 477-493.
- Huang, G.J., Bringi, V.N., and Thurai, M. (2008). “Orientation angle distributions of drops after 80-m fall using a 2D video disdrometer.” *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 25, pp. 1717-1723.
- Joss, J., Thams, J.C., and Waldvogel, A. (1968). “The accuracy of daily rainfall measurements by radar.” Preprints, *13th Conf on Radar Meteorology, Montreal, QC, Canada*, Amer. Meteor. Soc., pp. 448-451.
- Jung, Y., Xue, M., and Zhang, G. (2010). “Simulations of polarimetric radar signatures of a supercell storm using a two-moment bulk microphysics scheme.” *J. Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 49, pp. 146-163.
- Kim, H.-L., Park, H.-S., Park, H.-S., and Park, J.-S. (2014). “Study on the Application of 2D Video Disdrometer to Develop the Polarimetric Radar Data Simulator.” *Atmos.*, KMS. Vol. 24, pp. 173-188.
- Kruger, A., and Krajewski, W.F. (2002). “Two-dimensional video disdrometer.” *J. Atmos. Sci.*, Vol. 19, pp. 602-617.
- Lee, G.W., Gwon, S.-H., Lee, C.-G., and Nam, G.-Y. (2012). “Application of dual-polarization radar.” *Magazine of Korea Water Resources*, Vol. 45, pp. 28-39.
- McFarquhar, G.M., and List, R. (1993). “The effect of curve fits for the disdrometer calibration on raindrop spectra, rainfall rate, and radar reflectivity.” *J. Appl. Meteor.*, Vol. 32, pp. 774-782.
- Park, S.-G., and Lee, G.W. (2010). “Calibration of Radar Reflectivity measurements from the KMA Operational Radar Network.” *Asian-Pacific J. Atmos. Sci.*, Vol. 46, No. 3, pp. 243-259.
- Pruppacher, H., and Beard, K.V. (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.*, Vol. 96, pp. 247-256.
- Ryzhkov, A.V., Giangrande, S.E., and Schuur, T.J. (2005). “Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of

- WSR-88D." *J. Appl. Meteor.*, Vol. 34, pp. 2121-2134.
- Sheppard, B.E., and Joe, P.I. (1994). "Comparison of raindrop size distribution measurements by a Joss-Waldvogel disdrometer, a PMS 2DG spectrometer, and a POSS Doppler radar." *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 11, pp. 874-887.
- Thurai, M., and Bringi, V.N. (2005). "Drop Axis Ratios from a 2D Video Disdrometer." *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 22, pp. 966-978.
- Tokay, A., Wolff, D.B., Wolff, K.R., and Bashor, P. (2003). "Rain gauge and disdrometer measurements during the keys Area Microphysics Project (KAMP)." *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 20, pp. 1460-1477.
- Ulbrich, C.W., and Lee, L.G. (1999). "Rainfall measure-
ment error by WSR-88D radars due to variations in Z-R law parameters and the radar constant." *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 16, pp. 1017-1024.
- Zhang, G., Vivekananda, J., and Brandes, E. (2001). "A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements." *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 39, pp. 830-841.

paper number : 14-086

Received : 3 September 2014

Revised : 17 November 2014

Accepted : 17 November 2014