



## Application of an empirical method to improve radar rainfall estimation using cross governmental dual-pol. radars

Yoon, Jungsoo<sup>a</sup> · Suk, Mi-Kyung<sup>a</sup> · Nam, Kyung-Yeub<sup>a</sup> · Park, Jong-Sook<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Radar Analysis Division, Weather Radar Center, Korea Meteorological Administration

Paper number: 16-035

Received: 29 March 2016; Revised: 13 June 2016 / 22 June 2016; Accepted: 22 June 2016

### Abstract

Three leading agencies under different ministries - Korea Meteorological Administration (KMA) in the ministry of Environment, Han river control office in the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) and Weather Group of ROK Air Force in the Ministry of National Defense (MND) - have been operated radars in the purpose of observing weather, hydrology and military operational weather in Korea. Eight S-band dual-pol. radars have been newly installed or replaced by these ministries over different places by 2015. However each ministry has different aims of operating radars, observation strategies, data processing algorithms, etc. Due to the differences, there is a wide level of accuracy on observed radar data as well as the composite images made of the cross governmental radar measurement. Gaining fairly high level of accuracy on radar data obtained by different agencies has been shared as a great concern by the ministries. Thus, "an agreement of harmonizing weather and hydrological radar products" was made by the three ministries in 2010. Particularly, this is very important to produce better rainfall estimation using the cross governmental radar measurement. Weather Radar Center(WRC) in KMA has been developed an empirical method using measurements observed by Yongin testbed radar. This study is aiming to examine the efficiency of the empirical method to improve the accuracies of radar rainfalls estimated from cross governmental dual-pol. radar measurements. As a result, the radar rainfalls of three radars (Baengnyeongdo, Biseulsan, and Sobaeksan Radar) were shown improvement in accuracy (1-NE) up to 70% using data from May to October in 2015. Also, the range of the accuracies in radar rainfall estimation, which were from 30% to 60% before adjusting polarimetric variables, were decreased from 65% to 70% after adjusting polarimetric variables.

**Keywords:** Cross Governmental Dual-Pol. Radar Composite, Radar Rainfall, Accuracy Of Radar Rainfall, Polarimetric Variables

## 범부처 이중편파레이더의 강우 추정 향상을 위한 경험적 방법의 적용

윤정수<sup>a</sup> · 석미경<sup>a</sup> · 남경엽<sup>a</sup> · 박종숙<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>기상청 기상레이더센터 레이더분석과

### 요 지

기상청, 국토교통부 및 국방부는 각 기관의 특성에 맞게 기상, 수문 및 항공 관측용 레이더를 운영하고 있다. 2015년까지 국내에는 총 8대의 이중편파레이더(백령도, 용인테스트베드, 진도, 면봉산, 비슬산, 소백산, 모후산, 서대산 레이더)가 도입되어 운영되고 있다. 레이더를 운영 중인 세 개 부처는 관측목적이 달라 레이더에 대한 운영방식, 자료 처리 방식 및 활용 방안 등에서 서로 많은 차이를 보여 왔으며 이러한 차이는 각 부처에서 운영하는 레이더 자료의 정확도가 달라지게 하는 원인이 되고 있다. 이에, 세 부처는 2010년 "기상-강우 레이더 자료 공동 활용에 관한 합의서"를 체결하고, 서로 다른 부처에서 생산된 모든 레이더 자료를 공동 활용하는 체계를 마련하였다. 범부처 이중편파레이더 자료의 합성을 위해서는 부처 별 레이더 간의 정확도가 서로 유사해야 한다. 서로간의 정확도가 다른 상태에서 레이더 강우 자료를 합성하게 된다면 공간적으로 품질이 다른 합성 강우장이 생산될 수밖에 없다. 이에 본 연구에서는 범부처 이중편파레이더 강우량의 정확도 향상과 통합을 위해 2015년도에 용인테스트베드 레이더에서 시행되었던 경험적 방법을 이용하였다. 그 결과 2015년 5월부터 10월까지의 백령도, 비슬산 및 소백산 레이더 자료에 대한 강우량 정확도 (1-NE)가 70% 수준으로 향상되었다. 또한 레이더 편파변수 조절 전에는 정확도가 30~60%까지 넓은 범위를 보이고 있으나 조절 후 65~70%로 그 범위가 줄어들었다.

**핵심용어:** 범부처 이중편파레이더 합성, 레이더 강우량, 강우량 정확도, 레이더 편파변수

\*Corresponding Author. Tel: +82-10-6255-7524  
E-mail: jspark9957@gmail.com (J. -S. Park)

## 1. 서론

이중편파레이더의 도입으로 다양한 레이더 편파변수들이 제공되고 있다. 반사도( $Z$ )는 단일편파레이더에서부터 제공되던 대표적인 편파변수로 DSD (Drop Size Distribution)는 이러한 반사도를 강우 강도( $R$ )로 변환하기 위한 핵심적인 역할을 하고 있다. 반사도와 강우 강도 모두 DSD의  $n$ 차 모멘트로 산정된다는 점을 이용하여 유도된 관계식이  $ZR$  관계식 ( $Z=AR^b$ )이다. Marshall-Palmer (1948)의 관계식( $A=200$ ,  $b=1.6$ )은 현재 국내에서 적용하고 있는 대표적인 관계식으로 층상형 강우 사례로부터 유도된 관계식이기 때문에 큰 강우 영역에서 강우를 과소하게 추정한다는 문제점이 존재한다 (Battan, 1973; Ryzhkov and Zrníc, 1996). 또한 감쇄나 부분차폐 역시도 반사도로부터 추정된 강우 강도를 과소하게 만드는 원인이 되고 있다(Austin, 1987; Ryzhkov and Zrníc, 1995b).

차등반사도( $Z_{DR}$ )는 수평반사도와 수직반사도의 비로부터 산정되며 우박은 이러한 차등반사도의 도입에 매우 큰 영향을 미친 대기수상체이다. 강우와 달리 우박은 항공기에 직접적인 피해를 입혔고 이로 인해 우박에 대한 정확한 탐지가 필요하였다(Eccles and Atlas, 1973). 강우와 우박의 축비가 서로 다르다는 점으로부터 착안하여 대기 수상체의 축비를 추정할 수 있는 수평 및 수직반사도의 비 즉, 차등반사도도 도입되었던 것이다(Atlas and Ludlam, 1961; Sulakvelidze, 1968; Eccles and Atlas, 1973). Seliga and Brangi (1976)는 차등반사도를 이용하여 DSD를 유도하였고 이로부터 차등반사도를 이용한 레이더 강우량 추정이 가능함을 보여주었다. 이후 차등반사도를 이용하여 추정된 레이더 강우량이 전통적인  $ZR$  관계로 추정된 레이더 강우량보다 우수함을 보여주었다 (Seliga et al., 1986; Aydin et al., 1987; Aydin et al., 1990).

차등위상차( $\Phi_{DP}$ )는 수평 및 수직 파장의 위상차이로부터 유도된 편파변수이다. 차등위상차는 위상 정보이기 때문에 반사도와 다르게 감쇄나 부분차폐의 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 있다. 비차등위상차( $K_{DP}$ )는 차등위상차의 거리 미분으로 추정되며 이 또한 감쇄나 부분차폐의 영향을 받지 않는다(Ryzhkov and Zrníc, 1995a; Zrníc and Ryzhkov, 1999). 강우 강도와 비차등위상차의 관계를 최초로 제시한 연구는 Humphreys (1974)에 의해서였다. Humphreys (1974)는 비차등위상차가 강우 강도에 선형적으로 관련되어 있다는 것을 보여주었고 이후 비차등위상차를 이용한 강우 강도 추정 알고리즘들이 제시되었다(Jameson, 1985; Sachidananda and Zrníc, 1986; Chandra et al, 1990). 비차등위상차를 이용한 강우 강도는 강도가 높은 강우 영역에서 높은 정확도를 보

이는 것으로 알려져 있다(Sachidananda and Zrníc, 1986; Chandrasekar et al., 1990).

반사도, 차등반사도 및 비차등위상차는 서로 관련성이 있는 변수들이다. 이중편파변수들 간의 관계는 많은 연구를 통해 제시되었다(Leitao and Watson, 1984; Aydin et al., 1986; Ryzhkov and Zrníc, 1996; Straka et al., 2000). 대표적으로 Scarchilli et al. (1996)은 반사도, 차등반사도 및 비차등위상차 간의 자기상관성을 제시하고, 이로부터 반사도의 검보정 방법을 제시한바 있다. Straka et al. (2000)은 이차원  $Z-Z_{DR}$  및  $Z-K_{DP}$ 공간에서 편파변수들의 영역에 따라 대기수상체를 구분하였다. Weather Radar Center (2014; 2015)에서도  $Z-Z_{DR}$  및  $Z-K_{DP}$  관계식을 제시하였고, Weather Radar Center (2015)에서는 이러한 관계식을 이용하여 반사도, 차등반사도 및 비차등위상차에 대한 조절을 통해 레이더 강우량의 정확도를 향상시킨 바 있다.

기상청 기상레이더, 국토교통부 강우레이더, 국방부 기상레이더는 현재 범부처 레이더로 공동 운영되고 있다. 그러나 범부처 레이더로 운영되고 있는 레이더들은 관할 기관이 서로 달라 그동안 적용되어 왔던 레이더 자료 처리 알고리즘 및 관측 전략들이 큰 차이를 보여 왔다. 경기도 용인에 설치된 기상청 테스트베드레이더는 레이더 자료 처리 알고리즘 및 관측 전략을 실험적으로 운영하여 이러한 차이점을 극복하기 위해 도입된 이중편파레이더이다. 본 연구에서는 2015년도에 용인테스트베드레이더에서 레이더 강우량의 정확도 향상을 위해 실험적으로 수행되었던 Weather Radar Center (2015)의 경험적 방법을 범부처 현업용 이중편파레이더에 적용하여, 각 부처별 레이더 강우량의 정확도 향상과 통합을 시도하였다. 이를 위해 백령도, 비슬산 및 소백산 레이더 자료와 각 레이더의 150 km 반경 이내의 AWS 자료가 레이더 강우량의 정확도 검증에 사용되었다.

## 2. 범부처 이중편파레이더의 도입

1969년 수도권 기상 감시를 목적으로 기상청 관할의 기상레이더가 관악산에 국내 최초로 도입되었다. 이 당시 관악산 기상레이더는 S-밴드 재래식(conventional) 레이더로 반사도 영상만을 제공하였다. 이후 국내 전역을 감시할 수 있는 기상레이더 관측망의 요구로 1985년에는 전국기상레이더 관측망 구성 계획이 수립되었다. 이와 같은 계획으로 국내에 5기의 C밴드 도플러 레이더(관악산, 구덕산, 고산, 동해, 오성산 기상레이더)가 도입되어 국내에 1기 기상레이더 관측망이 구

성되었다. 1기 레이더 관측망은 특히 해안으로 접근하는 태풍의 감시에 장점이 있었으나, 동쪽 태백산맥 주변지역에 대해 관측의 사각지대가 매우 넓고, 낙동강 유역 등 주요 수해지역을 밀도 있게 관측하는데 어려움이 있었다. 이에 1990년대 후반부터 기존 레이더를 C-밴드에서 S-밴드로 교체하고(동해는 강릉으로 이전), 추가로 5곳에 레이더(백령도, 진도, 광덕산, 면봉산, 성산기상레이더)를 설치하는 2기 기상레이더 관측망이 구성되었다. 그리고 전국에 기 설치된 기상레이더들은 2014년부터 S밴드 이중편파 레이더로 교체되고 있으며 이러한 교체 사업은 2019년에 마무리될 예정이다.

기상청 관할의 기상레이더의 주 목적이 해안과 내륙에서의 악기상 감시였다면 국토교통부 관할의 강우레이더의 주 목적은 대하천에서의 홍수 예정보였다. 1996년 7월 경기북부 지역의 집중호우로 인한 인명피해 및 재산피해는 강우레이더 도입에 큰 역할을 하였다. 임진강 하류 유역에 해당하는 경기북부 지역은 상류 유역이 북한에 포함되어 있었기 때문에 그동안 수문 관측이 불가능한 상황이었다. 이에 2001년 인천 강화군에 임진강 강우레이더(C밴드 단일편파레이더)가 강우레이더로서 최초로 도입되어 현재 임진강 유역에서의 홍수 예정보를 담당하고 있다. 2002년 강우레이더 도입을 위한 기본 설계가 수립된 이후 2009년부터 2015년까지 4대의 S밴드 이중편파 레이더(비슬산, 소백산, 모후산, 서대산강우레이더)가 도입되었고 2016년까지 2대의 S밴드 이중편파 레이더(가리산, 예봉산강우레이더)가 설치될 예정이다.

국방부 관할의 레이더는 군사 작전에서의 기상 정보 지원을 위해 도입되었다. 1991년에 강원도 강릉, 경기도 수원 및 충청북도 증원에 위치한 3개의 공군기지에 최초로 도입되어 1998년에는 충청남도 서산에, 1999년에는 대구시에 레이더가 도입되었다. 이후 2000년에 광주시, 경상남도 사천, 강원도 원주에 레이더가 도입되었고 2001년에는 경상북도 예천에 레이더가 도입되었다. 2009년부터는 레이더 교체사업이 진행되어 강릉, 수원, 증원에 위치한 레이더가 C밴드 단일편파 레이더로 교체되었다. 그리고 서산, 대구, 광주, 사천, 원주, 예천에 위치한 레이더들은 C밴드 이중편파 레이더로 교체될 예정이다.

레이더를 도입한 세 개 부처(기상청, 국토교통부, 국방부)는 관측목적이 달라 레이더에 대한 운영방식, 자료 처리 방식 및 활용 방안 등에서 서로 많은 차이를 보여 왔었다. 그러나 국가 레이더 자원의 효율적 활용을 위해 범정부 기상-강우레이더 공동활용 업무협약(MOU)을 2010년에 체결하여 범부처 레이더 사업이 도입되었다. 기상청 기상레이더센터는 이러한 범부처 레이더 사업에 대한 운영 및 자료 처리 기술을 선도하고 있다. 기상레이더센터는 범부처 이중편파레이더 자

료에 대한 품질관리, 눈비 분류, 강우 추정 및 합성 등에 관한 연구를 진행 중에 있다. 또한 각 부처별로 운영 중인 레이더 운영체계에 대한 표준화를 위해 경기도 용인에 테스트베드레이더(S밴드 이중편파 레이더)가 2014년에 도입되어 기상레이더센터에서 운영 중에 있다. 용인테스트베드레이더는 신호처리 및 데이터품질관리와 같은 레이더 기술개발, 레이더 전문 인력 양성, 관련 알고리즘의 검증 등과 같은 역할을 하고 있다.

### 3. 적용자료

2015년까지 국내에는 총 8대의 S밴드 이중편파레이더가 도입되었다. 이중 용인테스트베드레이더는 연구용으로 활용되고 있고, 나머지 7대(백령도, 진도, 면봉산, 비슬산, 소백산, 모후산, 서대산)는 현업용으로 활용되고 있다. 이중 진도, 면봉산, 모후산, 서대산 레이더는 2015년도에 도입되어 현재 시스템 안정화 단계이다. 이에 본 연구에서는 백령도, 비슬산, 소백산 레이더에 대한 레이더 강우량의 정확도를 비교 및 검증하였다(Fig. 1). 백령도 레이더는 기상청 관할의 기상레이더이고, 비슬산 및 소백산 레이더는 국토교통부 관할의 강우레이더로 보다 자세한 레이더 제원은 Table 1과 같다. 기상레이더와 달리 강우레이더는 저 고도에서의 관측이 중요하고 밝은 띠에 의한 강우량 추정 오차를 최소화하기 위해 관측 거리를 150 km로 제한하고 있다. 이에 본 연구에서는 정확도 검증 조건을 동일하게 하기 위해 150 km 반경 이내의 레이더 관측

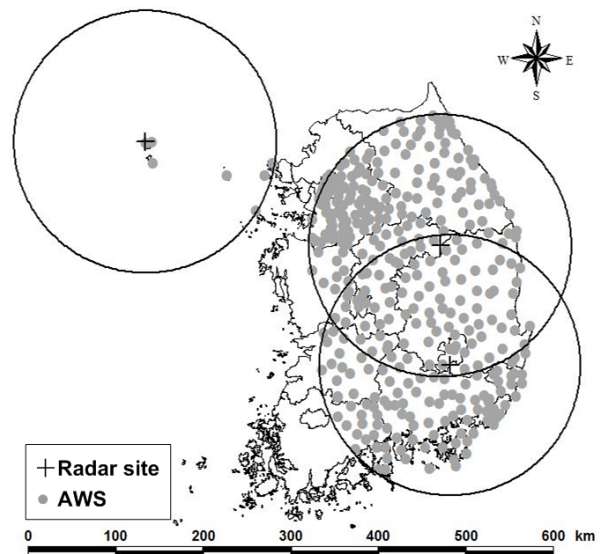


Fig. 1. Locations of radar site and aws

Table 1. Specifications

	BRI	BSL	SBS
Manufacturer	EEC (U.S.)	METSTAR (China)	METSTAR (China)
Antenna diameter (m)	8.5	8.5	8.5
Beam width (°)	1.0	0.95	0.95
Transmitting tube	Klystron	Klystron	Klystron
Band	S	S	S
Transmitting frequency (MHz)	2,879.0	2,795.0	2,862.5
Peak power (kW)	850	750	750
Observational range (km)	240	150	150

자료와 AWS 자료를 이용하였다(Fig. 1). 또한 2015년 5월부터 10월까지 내린 모든 강우사례가 정확도 검증에 적용되었다.

## 4. 레이더 강우량 정확도 향상을 위한 경험적 방법과 레이더 강우 강도 추정 알고리즘

### 4.1 레이더 강우량 정확도 향상을 위한 경험적 방법

본 연구에서는 레이더 강우량의 정확도를 향상시키기 위해 용인테스트베드레이더에서 실험적으로 수행되었던 경험적 방법을 이용하였다(Weather Radar Center, 2015). Weather Radar Center (2015)에서는 레이더 강우량의 정확도를 향상시키기 위해 Weather Radar Center (2014)에서 제시한 이중편파변수 관계( $Z$ - $Z_{DR}$  및  $Z$ - $K_{DP}$ )를 이용한 경험적 방법이다. 본 방법을 이용한 품질 향상 과정은 다음과 같다. 먼저, 우량계 지점과 동일한 레이더 지점에서의 호우사례 전체 시간에 대한  $Z$ - $Z_{DR}$ 의 이변량 확률분포와  $Z$ - $K_{DP}$ 의 이변량 확률분포를 추출한다. 그리고 이변량 확률분포의 최빈값이 이중편파변수 관계 선 상에 있도록 한다. 그러나 문제는 최빈값이 이중편파변수 관계의 어느 곳에 위치해 있느냐이다. 이에 0에서 10등급까지 반사도를 0 dBZ에서 10 dBZ까지 1 dBZ 간격으로 가산하고 이변량 확률분포의 최빈값이 이중편파변수 관계 위에 있도록  $Z_{DR}$ 과  $K_{DP}$ 를 증감한다. 본 연구에서는 Weather Radar Center (2015)에서 적용한 경험적 방법을 이용하여 레이더 강우량의 정확도를 향상시켰다. 다만 적용된  $Z$ - $Z_{DR}$  및  $Z$ - $K_{DP}$  관계식은 Weather Radar Center (2014)에서 제시한 이중편파변수 관계식을 보완한 Weather Radar Center (2015)에서 제시한 아래의 관계식을 적용하였다.

$$Z_{DR} = 0.1015 + 0.00511Z + 0.00049Z^2 \quad (1)$$

$$K_{DP} = 2.575 \times 10^{-13} \times Z^{7.5} \quad (2)$$

각 등급에 따른  $Z$ ,  $Z_{DR}$ ,  $K_{DP}$ 를 산정하여 레이더 강우량을 추정하고 그 레이더 강우량의 정확도를 산정하여, 최고 정확도에서의  $Z$ ,  $Z_{DR}$ ,  $K_{DP}$ 를 최적의 편파변수로 보았다. 이때 정확도 산정을 위해 사용된 정량적 통계값은 Eq. (3)과 같은 1-NE이다. 1-NE는 1에서 NE(Normalized Error)를 감한 후 백분율화한 값으로, 100%에 가까울수록 정확도가 높음을 의미한다. 이러한 1-NE는 편의와 변동성이 함께 정량화된 값이기 때문에 최대값을 나타내는 1-NE에서 편의와 변동성이 혼합된 오차가 최소가 됨을 의미한다. 본 연구에서 적용한 경험적인 방법에 대한 보다 자세한 내용은 Weather Radar Center (2015)의 연구에 기술되어 있다.

$$1-NE = \left( 1 - \frac{\sum |R_i - G_i|}{\sum G_i} \right) \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서,  $R_i$ 는 레이더 강우량을,  $G_i$ 는 우량계 강우량을 나타낸다.

### 4.2 레이더 강우 강도 추정 알고리즘

본 연구에서는 총 3개의 레이더 강우 강도 추정 알고리즘을 적용하였다(Table 2). 먼저, 첫 번째  $R(Z)$  식은 전통적으로 단일편파레이더에서 적용되어 온 Marshall and Palmer (1948) 관계식이다. 본 관계식은 층상형 관계식으로부터 유도된 식으로 큰 강우 영역에서는 다소 과소하게 추정하는 것으로 알려져 있다(Battán, 1973; Ryzhkov and Zrníc, 1996). 다음 알고리즘은 Weather Radar Center (2015)에서 2DVD로 관측된 73개의 호우사상으로부터 유도된  $R(Z, Z_{DR})$  강우 강도 추정식이다.  $R(Z)$  및  $R(Z, Z_{DR})$  식은 편파변수의 크기에 상관없이 적용된 공식이다.  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$ 은 Colorado State University에서 개발한 방법으로 CSU-ICE Algorithm으로 명하고 있다(Cifelli et al., 2011). 본 식은 각 편파변수들의 값의 범위에 따라  $R(Z)$ ,  $R(Z, Z_{DR})$ ,  $R(K_{DP}, Z_{DR})$ ,  $R(K_{DP})$  식을 이용하고 있다.

Table 2. Radar rainfall estimation algorithms

Name	Algorithm
$R(Z)$	$R(Z) = 0.0365 \times Z^{0.625}$
$R(Z, Z_{DR})$	$R(Z, Z_{DR}) = 0.0081 \times Z^{0.91} \times Z_{DR}^{-4.2467}$
$R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$	if $K_{DP} \geq 0.3^\circ/\text{km}$ and $Z \geq 38\text{dBZ}$ and $Z_{DR} \geq 0.5\text{dB}$ $\rightarrow R(K_{DP}, Z_{DR}) = 90.8 \times K_{DP}^{0.93} \times Z_{DR}^{-1.69}$ if $K_{DP} \geq 0.3^\circ/\text{km}$ and $Z \geq 38\text{dBZ}$ and $Z_{DR} < 0.5\text{dB}$ $\rightarrow R(K_{DP}) = 40.5 \times K_{DP}^{0.85}$ if $(K_{DP} < 0.3^\circ/\text{km}$ or $Z < 38\text{dBZ})$ and $Z_{DR} \geq 0.5\text{dB}$ $\rightarrow R(Z, Z_{DR}) = 0.0067 \times Z^{0.93} \times Z_{DR}^{-3.43}$ if $(K_{DP} < 0.3^\circ/\text{km}$ or $Z < 38\text{dBZ})$ and $Z_{DR} < 0.5\text{dB}$ $\rightarrow R(Z) = 0.0170 \times Z^{0.7143}$

이와 같이 추정된 레이더 강우 강도는 1시간 누적 우량계 강우량과의 비교를 위해 1시간 누적 레이더 강우량으로 변환하였다.

### 5. 적용결과

Fig. 2는 편파변수 조절 전 각 레이더별 레이더 강우량과 우량계 강우량의 산포도를 나타낸다. 그림에서와 같이 각 레이더 강우량의 정확도는 서로 상이하게 나타나고 있다. 백령도 레이더는 3개의 강우 강도 추정 알고리즘 모두에서 과소한 결과를 보여주고 있다.  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$ 에서 편파변수가 다소 개선된 것으로 나타났으나, 레이더 강우량은 여전히 과소하게 추정되고 있음을 확인할 수 있다. 비슬산 레이더도 대체로 과소하게 강우량을 추정하는 것으로 나타났다. 물론 비슬산 레이더의 경우도  $Z_{DR}$ 과  $K_{DP}$ 가 적용됨에 따라 레이더 강우량의 편파변수가 다소 개선되는 것으로 나타났으나, 오히려 두 강우량의 상관성은 낮아지는 것으로 나타났다. 소백산 레이더의  $R(Z)$ 로부터 추정된 레이더 강우량은 여전히 과소한 것으로 나타났으나  $R(Z, Z_{DR})$ 의 경우 높은 정확도를 보이고 있다. 그러나  $K_{DP}$ 까지 적용된  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$ 의 경우 두 강우량의 상관성이 매우 낮아지는 것으로 나타났다.

소백산 레이더의  $R(Z, Z_{DR})$ 로 추정된 강우량 정확도가 높게 나타나고 있는 것은 낮은  $Z_{DR}$  때문이다. Fig. 3은 각 레이더에 대한  $Z-Z_{DR}$  및  $Z-K_{DP}$  이변량 확률분포를 나타낸다. 그림에서 굵은 실선은 Weather Radar Center (2015)에서 제시한  $Z-Z_{DR}$  및  $Z-K_{DP}$  관계 (Eq. (1))를 나타낸다. 그림에서와 같이 백령도 및 비슬산 레이더에서의  $Z_{DR}$ 은 Weather Radar Center (2015)에서 제시한  $Z-Z_{DR}$  관계 보다 다소 높게 나타나고 있다. 이에

비해 소백산 레이더의  $Z_{DR}$ 은 매우 낮게 나타나 심지어 음의 값을 보이고 있다.  $R(Z, Z_{DR})$ 에서  $Z_{DR}$ 의 지수 인자는 음의 값이기 때문에  $Z_{DR}$ 이 음의 값이면 강우 강도는 크게 되고 과소하게 추정되었던 레이더 강우량 역시도 크게 되어 정확도가 향상된 것이다. 그러나  $Z_{DR}$ 이 음인 경우는 대기수상체 분류에서 대부분 우박에 속하기 때문에 이러한  $Z_{DR}$ 은 강우물리 자료와 관련한 검토가 필요하다. 소백산 레이더는  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$ 로 추정된 결과에서도 강우물리 자료와 관련한 검토가 필요함을 보여주고 있다. Fig. 2(c)의 맨 오른쪽 그림에서와 같이 편파변수의 크기에 따라 추정되는 레이더 강우량과 우량계 강우량의 상관성이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 소백산 레이더의 이중편파변수들이  $Z-Z_{DR}$  및  $Z-K_{DP}$  공간에서 서로 적절치 않은 영역에 있기에 그 변수에 대한 조절이 필요함을 의미한다.

Fig. 4는 레이더 편파변수 조절에 따른 레이더 강우량의 정확도를 각 레이더별로 나타낸 결과이다. 그림에서 적용된 호우사례는 BRI는 2015년 6월 26일 사례, BSL은 2015년 7월 12일 사례, SBS는 2015년 8월 2일 사례였다. 그림에서와 같이 모든 레이더에서 1-NE 값이 증가하다 최고값을 보인 후 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이중편파변수를 적용하는 경우 대략 4~6 등급에서 최고의 1-NE를 나타냈으나, 단일편파변수를 적용한 경우는 이 보다 넓은 등급에서 최고의 1-NE를 나타내고 있다.

Fig. 5는 가장 높은 1-NE 값을 갖는 경우에 해당하는 레이더 강우량과 우량계 강우량의 산포도를 나타낸다. 그림에서와 같이 가장 높은 1-NE에 해당하는 경우 두 강우량이 45도선에 가깝게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. Table 3은 조절 전후에 대한 1-NE와 ME(Mean Error)를 각 레이더별로 나타낸 것이다. 표에서와 같이 모든 레이더의 1-NE가 65~70% 수준으

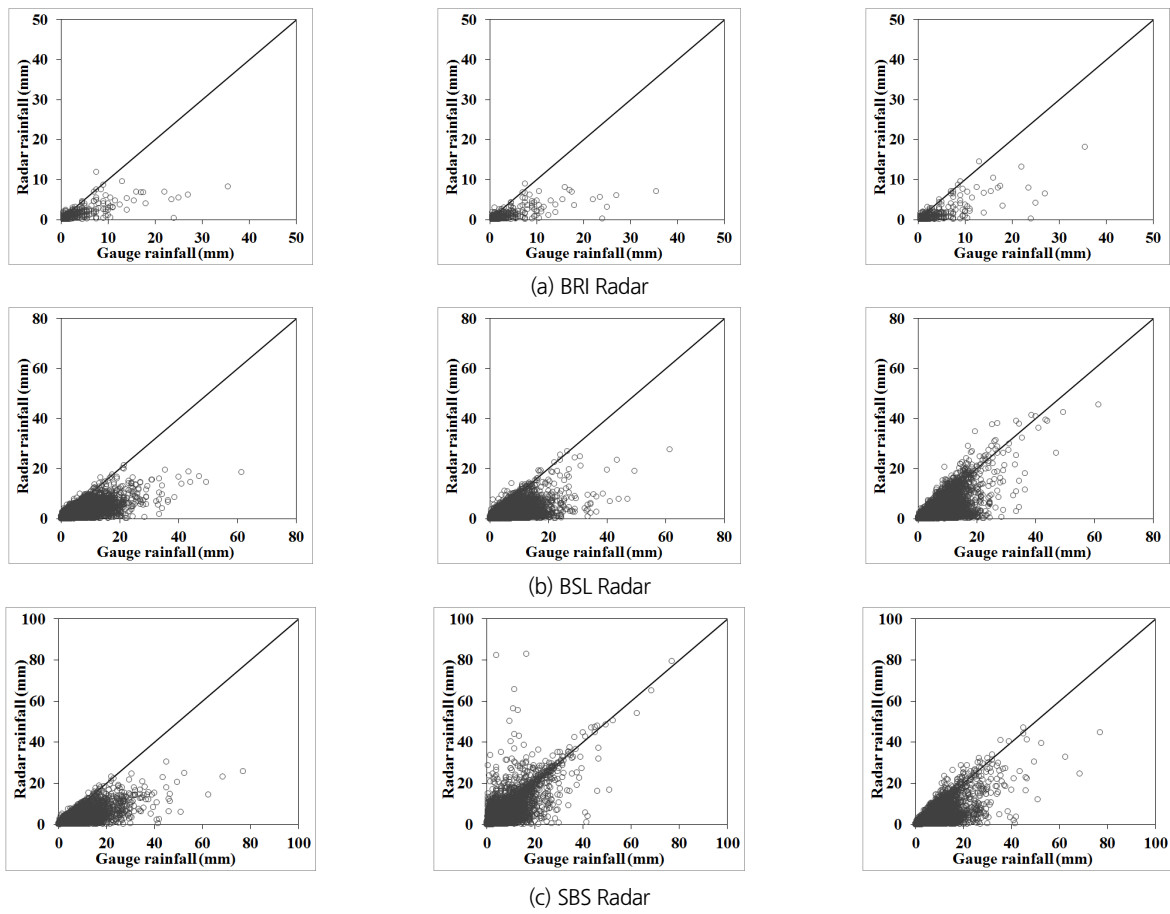


Fig. 2. Scatter plots between hourly gauge rainfall and hourly radar rainfall before the adjustment from May to Oct 2015 ( $R(Z)$ ,  $R(Z, Z_{DR})$  and  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$  from left to right)

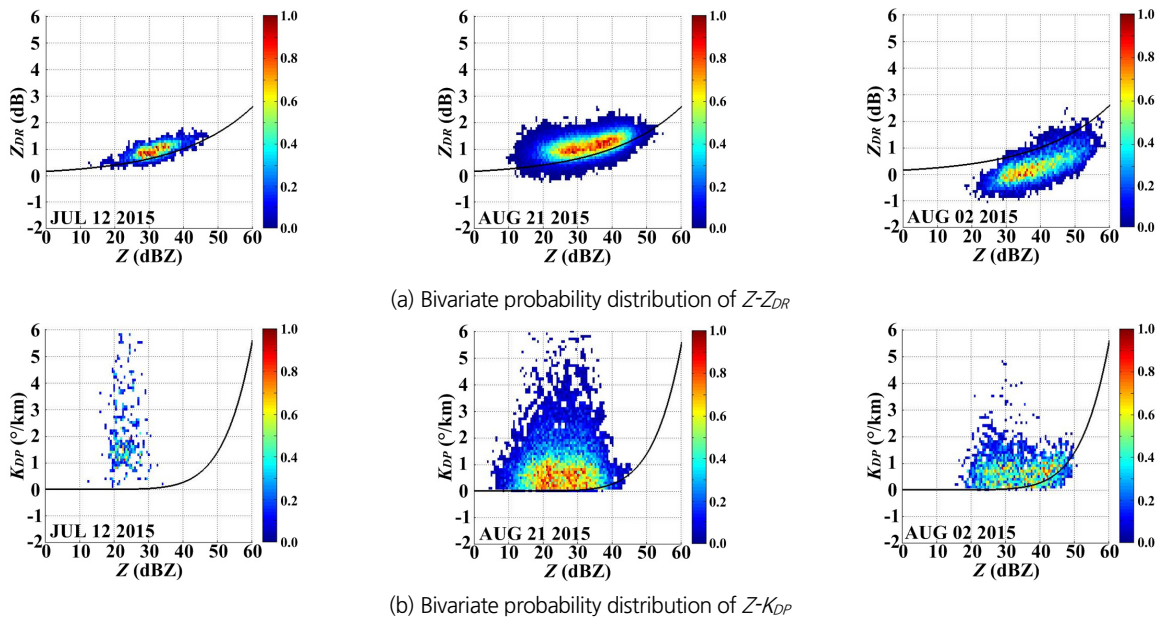


Fig. 3. Bivariate probability distribution of  $Z-Z_{DR}$  and  $Z-K_{DP}$  (BRI, BSL and SBS Radar from left to right)

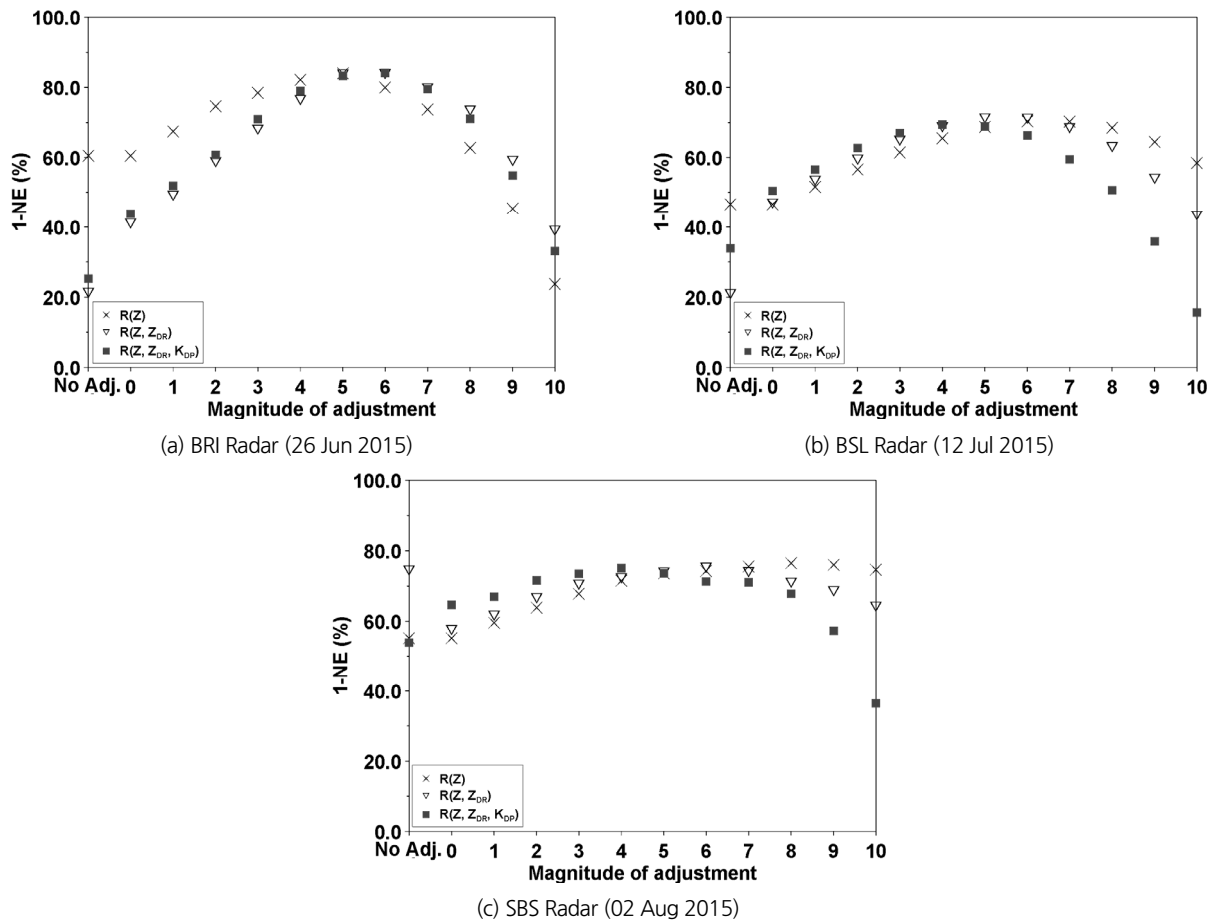


Fig. 4. Accuracy of the radar rainfall with respect to the magnitude of adjustment

로 나타나 그 정확도가 크게 향상된 것으로 나타났다. 특히, 2015년 5월부터 10월까지의 백령도, 비슬산 및 소백산 레이더 자료에 대한 강우량 정확도가 단일편파변수 알고리즘 적용 시 43.7% ( $R(Z)$ )에서 이중편파변수 알고리즘 적용 후 69.8% ( $R(Z, Z_{DR})$ )으로 26.1% 향상되었다. 또한 레이더 편파변수 조절 전에는 1-NE가 30~60%까지 넓은 범위를 보이고 있으나 조절 후 65~70%로 그 범위가 줄어들었다. 즉, 레이더별 정확도의 차이가 많이 줄어들었음을 의미한다. 범부처 이중편파 레이더의 합성을 위해서는 이와 같은 방법으로 각 레이더 별로 나타나고 있는 품질의 차이를 줄여야 한다.

## 6. 결론

범부처 이중편파레이더들은 관할 기관이 서로 달라 그동안 적용되어 왔던 레이더 자료 처리 알고리즘 및 관측 전략들이 큰 차이를 보여왔으며, 이러한 차이는 각 부처에서 운영하

는 레이더의 품질을 다르게 만드는 원인이 되고 있다. 이에 본 연구에서는 용인테스트베드레이더에서 실험적으로 수행되었던 Weather Radar Center (2015)의 경험적 방법을 범부처 현업용 이중편파레이더에 적용하여 각 부처별 레이더 강우량의 정확도 향상과 통합을 시도하였다. 그 결과는 다음과 같다.

먼저 각 레이더별 레이더 강우량과 우량계 강우량의 산포도를 확인한 결과 각 레이더의 강우량 정확도는 서로 상이한 것으로 나타났다. 이와 같이 서로 상이한 레이더 강우량의 정확도는 차후 범부처 이중편파레이더 합성 강우장의 품질을 떨어트리는 원인이 될 수 있다. 또한 레이더 강우량은 우량계 강우량과 비교 시 대체로 과소하게 추정되고 있었다. 물론 이중편파변수를 활용한  $R(Z, Z_{DR})$  및  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$  알고리즘을 이용한 경우 레이더 강우량이 다소 개선되었으나, 여전히 우량계 강우량에 비해 과소하게 나타나거나 우량계 강우량과의 상관성이 낮아지는 것으로 나타났다.

소백산 레이더의  $R(Z, Z_{DR})$ 로부터 추정된 레이더 강우량은 편파변수 조절 전에도 높은 정확도를 보이고 있었다. 그러나



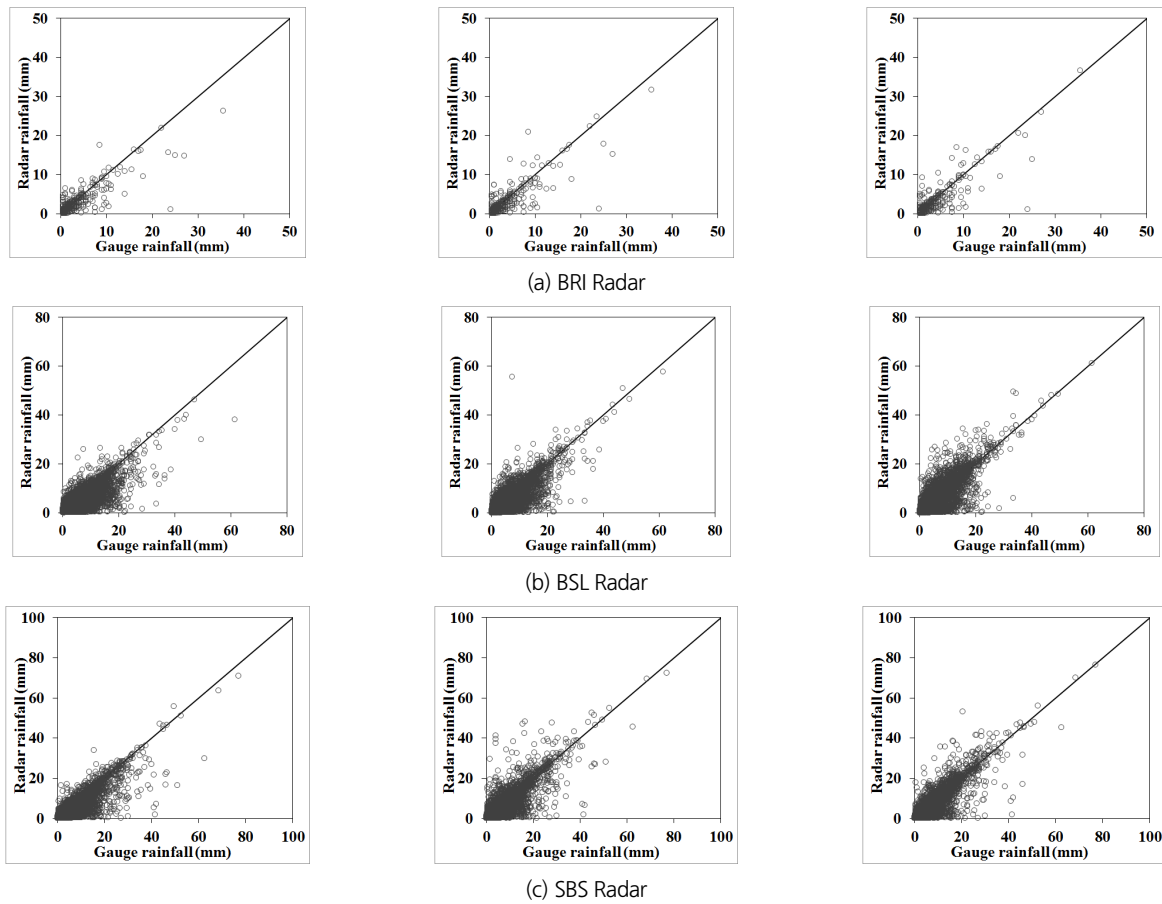


Fig. 5. Scatter plots between hourly gauge rainfall and hourly radar rainfall after the adjustment from May to Oct 2015 ( $R(Z)$ ,  $R(Z, Z_{DR})$  and  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$  from left to right)

Table 3. Accuracy of the radar rainfall before and after the adjustment (from May to Oct 2015)

	Algorithms	BRI		BSL		SBS		Total	
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
1-NE (%)	$R(Z)$	40.8	65.7	47.9	68.1	38.6	69.4	43.7	68.6
	$R(Z, Z_{DR})$	33.3	66.0	37.3	70.5	57.8	68.9	46.6	69.8
	$R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$	37.9	67.6	41.4	67.8	38.5	70.0	40.0	68.8
ME (mm/hr)	$R(Z)$	-1.88	-0.54	-1.47	-0.54	-1.93	-0.60	-1.67	-0.56
	$R(Z, Z_{DR})$	-2.19	-0.46	-1.84	-0.47	-0.62	-0.38	-1.34	-0.43
	$R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$	-2.04	-0.46	-1.71	-0.42	-1.92	-0.41	-1.80	-0.41

소백산 레이더의 레이더 강우량의 정확도가 높은 것은 낮은  $Z_{DR}$  때문이었다. 백령도 및 비슬산 레이더에서의  $Z_{DR}$ 이 Weather Radar Center (2015)에서 제시한  $Z-Z_{DR}$  관계 보다 다소 높게 나타나고 있는 것에 비해 소백산 레이더의  $Z_{DR}$ 은 매우 낮게 나타나, 심지어 음의 값을 보이고 있었다. 이와 같이 소백산 레이더의 경우에는  $Z_{DR}$ 을 레이더 강우 강도 추정 알고리즘에 적용하기 위해서는  $Z_{DR}$ 에 대한 보정이 필요하다.

레이더 편파변수 조절에 따른 레이더 강우량의 정확도를 확인한 결과 모든 레이더에서 1-NE 값이 증가하다 최고값을 보인 후 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이중편파변수를 적용하는 경우 대략 4~6 등급에서 최고의 1-NE를 나타냈으나 단일편파변수를 적용한 경우는 이보다 넓은 범위의 등급에서 최고의 1-NE를 나타내고 있었다. 이와 같은 최고의 1-NE 값을 갖는 경우에 해당하는 레이더 강우량과 우량계 강우량의



산포도를 확인한 결과 두 강우량이 45도선에 가깝게 나타나고 있었다.

최적 편파변수를 적용한 레이더 강우량의 정확도는 65~70% 수준으로 나타나 그 정확도가 크게 향상된 것으로 나타났다. 특히, 2015년 5월부터 10월까지의 백령도, 비슬산 및 소백산 레이더 자료에 대한 강우량 정확도가 단일편파변수 알고리즘 적용 시 43.7%( $R(Z)$ )에서 이중편파변수 알고리즘 적용 후 69.8%( $R(Z, Z_{DR})$ )으로 26.1% 향상되었다. 또한 레이더 편파변수 조절 전에는 1-NE가 30~60%까지 넓은 범위를 보이고 있었으나 조절 후 65~70%로 그 범위가 줄어들었다. 즉, 레이더별 정확도의 차이가 많이 줄어들었음을 의미한다. 범부처 이중편파레이더의 합성을 위해서는 이와 같은 방법으로 각 레이더 별로 나타나고 있는 품질의 차이를 줄여야 하며 본 연구에서 적용한 Weather Radar Center (2015)의 경험적 방법이 이러한 품질의 차이를 줄이는 데 있어 적절한 방법임을 확인하였다.

이중편파레이더가 도입되었음에도 불구하고 레이더 강우량은 단일편파레이더에서와 같이 여전히 과소한 문제점을 나타내고 있었다. 이는 S밴드 레이더 강우량의 정확도는 다른 두 편파변수 보다도 반사도의 정확도로부터 큰 영향을 받기 때문이다. 즉, 단일편파레이더에서부터 제기되어 온 레이더 반사도의 품질로 인한 레이더 강우량의 과소한 문제가 이중편파레이더에까지 이어져 온 것이다. 이에 우선적으로 레이더 반사도에 대한 정확한 오차 산정이 필요하며 아울러 다른 두 편파변수들에 대한 조절이 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상레이더센터 2015년도 R&D 연구개발사업 “범부처 융합 이중편파레이더 활용 기술개발(WRC-2013-A-1)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Aydin, K., Direskeneli, H., and Seliga, T.A. (1987). “Dual-Polarization Radar Estimation of Rainfall Parameters Compared with Ground-Based Disdrometer Measurements: October 29, 1982 Central Illinois Experiment.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 25, No. 6, pp. 834-844.
- Aydin, K., Lure, Y.M., and Seliga, T.A. (1990). “Compared with ground-based rain gauges during MAYPOLE'84.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, pp. 443-449.
- Aydin, K., Seliga, T.A., and Balaji, V. (1986). “Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar.” *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 25, No. 10, pp. 1475-1484.
- Atlas, D., and Ludlam, F.H. (1961). “Multi-wavelength radar reflectivity of hailstorms.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 87, No. 374, pp. 523-534.
- Austin, P.M. (1987). “Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall.” *Monthly Weather Review*, Vol. 115, No. 5, pp. 1053-1070.
- Battan, L.J. (1973). *Radar observation of the atmosphere*, University of Chicago Press, p. 324.
- Chandrasekar, V., Bringi, V.N., Balakrishnan, V.N., and Zrnić, D.S. (1990). “Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: Specific differential phase.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 621-629.
- Cifelli, R., Chandrasekar, V., Lim, S., Kennedy, P.C., Wang, Y., and Rutledge, S.A. (2011). “A new dual-polarization radar rainfall algorithm: application in Colorado precipitation events.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 28, No. 3, pp. 352-364.
- Eccles, P.J., and Atlas, D. (1973). “A dual-wavelength radar hail detector.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 12, No. 5, pp. 847-854.
- Humphries, R.G. (1974). *Depolarization effects at 3 GHz due to precipitation. Storm Weather Group Scientific Report MW-82*, McGill University, Montreal, Quebec, p. 84.
- Jameson, A.R. (1985). “Microphysical interpretation of multiparameter radar measurements in rain. Part III: Interpretation and measurement of propagation differential phase shift between orthogonal linear polarizations.” *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 42, No. 6, pp. 607-614.
- Leitao, M.J., and Watson, P.A. (1984). “Application of dual linearly polarized radar data to prediction of microwave path attenuation at 10–30 GHz.” *Radio Science*, Vol. 19, No. 1, pp. 209-221.
- Marshall, J.S., and Palmer, W.M. (1948). “The distribution of raindrops with size.” *Journal of Meteorology*, Vol. 5, No. 4, pp. 165-166.
- Ryzhkov, A.V., and Zrnić, D.S. (1995a). “Comparison of dual polarization radar estimators of rain.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 249-256.
- Ryzhkov, A.V., and Zrnić, D.S. (1995b). “Precipitation and attenuation measurements at a 10-cm wavelength.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, No. 10, pp. 2121-2134.
- Ryzhkov, A.V., and Zrnić, D.S. (1996). “Assessment of rainfall measurement that uses specific differential phase.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 35, No. 11, pp. 2080-2090.
- Sachidananda, M., and Zrnić, D.S. (1986). “Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation.” *Radio Science*, Vol. 21, No. 2, pp. 235-247.

- Scarchilli, G., Gorgucci, E., Chandrasekar, V., and Dobaie, A. (1996). "Self-consistency of polarization diversity measurement of rainfall." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 34, No. 1, pp. 22-26.
- Seliga, T.A., Aydin, K., and Direskeneli, H. (1986). "Disdrometer Measurements during an Intense Rainfall Event in Central Illinois\_Implications for Differential Reflectivity Radar Observations." *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 25, No. 6, pp. 835-846.
- Seliga, T.A., and Bringi, V.N. (1976). "Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarization for measuring precipitation." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 15, No. 1, pp. 69-76.
- Straka, J.M., Zrnić, D.S., and Ryzhkov, A.V. (2000). "Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 39, No. 8, pp. 1341-1372.
- Sulakvelidze, G.K. (1968). "Radar identification of hail." *Proceedings 13th Radar Meteorology Conference*, Montreal, American Meteorological Society.
- Weather Radar Center, (2014). *Development and application of cross governmental dual-pol. radar harmonization*, Seoul, Korea.
- Weather Radar Center, (2015). *Development and application of cross governmental dual-pol. radar harmonization*, Seoul, Korea.
- Zrnić, D.S., and Ryzhkov, A.V. (1999). "Polarimetry for weather surveillance radars." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 80, No. 3, pp. 389-406.