

발 간 등 록 번 호

11-1360577-000023-01

기상레이더센터 기술노트 WRC2014-04

---

---

# S-밴드 이중편파레이더 정량적 강수량 추정값 산출 기술개발 및 사례검증(II)

2014. 12.



**기상레이더센터**

KMA Weather Radar Center



# S-밴드 이중편파레이더 정량적 강수량 추정값 산출 기술개발 및 사례검증(II)

기상레이더센터장	권태순
레이더분석과장	고정석
기상연구관	박혜숙
기상연구사	석미경
연구원	이재경



**기상레이더센터**

KMA Weather Radar Center



# 목 차

제1장 서론 .....	1
제2장 자료 및 방법 .....	2
2.1 자료 .....	2
2.2 방법 .....	4
2.2.1 차등위상차( $\phi_{DP}$ ) 접힘풀기 .....	6
2.2.2 FIR 필터링 .....	12
2.2.3 비차등위상차( $K_{DP}$ ) 계산 .....	24
2.2.4 강수량 추정값 관계식 적용 .....	33
2.3 이중편파변수 분포 분석 .....	35
제3장 강수량 추정값 산출 및 분석 .....	41
제4장 이중편파변수 보정오차 산출 및 검증 .....	45
4.1 이중편파변수 보정오차 산출 .....	45
4.1.1 방법 .....	45
4.1.2 보정오차 산출 결과 분석 .....	48
4.2 보정오차 적용 및 검증 .....	49
4.3 2DVD를 이용한 강수량 추정값 검증 .....	53
제5장 요약 .....	57
참고문헌 .....	59



# 제1장 서론

우리나라는 계절적·지형적 특징으로 여름철에 연평균 70% 이상의 강수가 집중되는 지고 있다. 특히 잦은 기상변화로 인한 사회경제적 피해가 증대되고 있으므로 이를 예·경보할 수 있는 기상레이더의 역할이 점점 커지고 있다. 특히 이중편파레이더는 반사도(reflectivity,  $Z$ ), 차등반사도(differential reflectivity,  $Z_{DR}$ ), 차등위상차(differential phase,  $\Phi_{DP}$ ), 비차등위상차(specific differential phase,  $K_{DP}$ ) 등의 이중편파변수들의 산출이 가능하다. 이러한 이중편파변수들을 활용하여 강수입자 형태를 구분하고 정량적 강수량 추정값 정확성을 등을 향상시키는데 있어 활용성이 증대하면서, 이와 관련된 연구가 꾸준히 수행되고 있다(Vulpiani, *et al.*, 2009; Oh *et al.*, 2010; Cifelli *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2011; Kwon, *et al.*, 2011).

기상레이더센터는 2014년도 백령도와 용인테스트베드를 시작으로 2019년도까지 현업 및 연구용 레이더 11대 모두를 이중편파레이더로 교체를 추진하고 있다. 이에 따라 이중편파레이더 관측변수를 활용한 강수량 추정값 산출 기술 등의 개발이 필요하여, 이에 대한 지속적으로 투자가 필요하다.

본 연구에서는 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 알고리즘을 개선하고 분석·검증하고자 한다. 첫 번째로 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 알고리즘의 전처리 과정(차등위상차 접힘풀기, FIR 필터링, 비차등위상차 산출)을 개선하고, 강수량 추정값 산출 관계식 적용하여 분석한다. 두 번째로 개선된 알고리즘을 이용하여 레이더 강수량 추정값을 산출하는 사례분석을 통하여 레이더 강수량 추정값의 정확도를 평가한다. 마지막으로 이중편파변수의 보정오차를 산출하고 이를 알고리즘에 적용하여 레이더 강수량 추정값 정확도를 검증평가한다. 또한 비슬산레이더 중심에서 약 20km 떨어진 대구에 위치한 영상우적계인 2DVD<sup>1)</sup> 관측자료를 이용하여 보정오차를 산출하고 이를 적용하여 분석·검증하였다.

1) 2DVD(2-Dimensional Video Disdrometer) : 2차원영상우적계

## 제2장 자료 및 방법

### 2.1 자료

본 연구에서는 NCAR 알고리즘의 개선 정도를 검증하기 위해 국토교통부의 비슬산레이더에 개선한 알고리즘을 적용하여 검증을 하였다. 표 2.1은 비슬산레이더의 제원이며, 그림 2.1은 비슬산레이더의 위치를 나타낸다. 적용사례는 2012년 여름철 5개 사례, 2013년 여름철 10개 사례를 이용하였다(표 2.2). 비슬산레이더 강수량 추정값의 정확도 검증을 위해 비슬산레이더 관측반경 100km 이내 위치한 71개 AWS 지점의 지상 강수량 관측값을 이용하였다. 정확도 검증을 위해 사용한 검증지표는 편차(bias), 절대평균오차(Mean Absolute Error, MAE), 제곱근 평균오차(Root Mean Square Error, RMSE), 상관계수(correlation coefficient)이며, 수식은 다음과 같다.

$$\text{Bias} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T R_i - O_i \quad (2.1)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T |R_i - O_i| \quad (2.2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (R_i - O_i)^2} \quad (2.3)$$

$$\text{상관계수} = \frac{1}{T-1} \frac{\sum_{i=1}^T [(R_i - \bar{R})(O_i - \bar{O})]}{\sqrt{\text{Var}(R) \text{Var}(O)}} \quad (2.4)$$

여기서  $R$ 은 레이더 강수량 추정값,  $O$ 는 지상 강수량 관측값,  $T$ 는 총 기간이다.

표 2.1 비슬산기상레이더 제원

구분		사항
위도/경도		35.6941° N / 128.5353° E
안테나해발고도		1085m
주파수		2,795MHz (S 밴드)
출력관		Klystron
송출방법		Simultaneous H/V
송신최대출력		750KW
레이더 빔폭		0.95°
산출변수		$Z, Vr, SW, Z_{DR}, \Phi_{DP}, K_{DP}, \rho_{HV}$
관측전략 (강우레이더)	관측주기	2.5분
	관측반경	100km
	관측고도	저고도6개 고도각(-0.5,0.0,0.5,0.8,1.2,1.59)
관측소 개소일		2009년 6월 10일

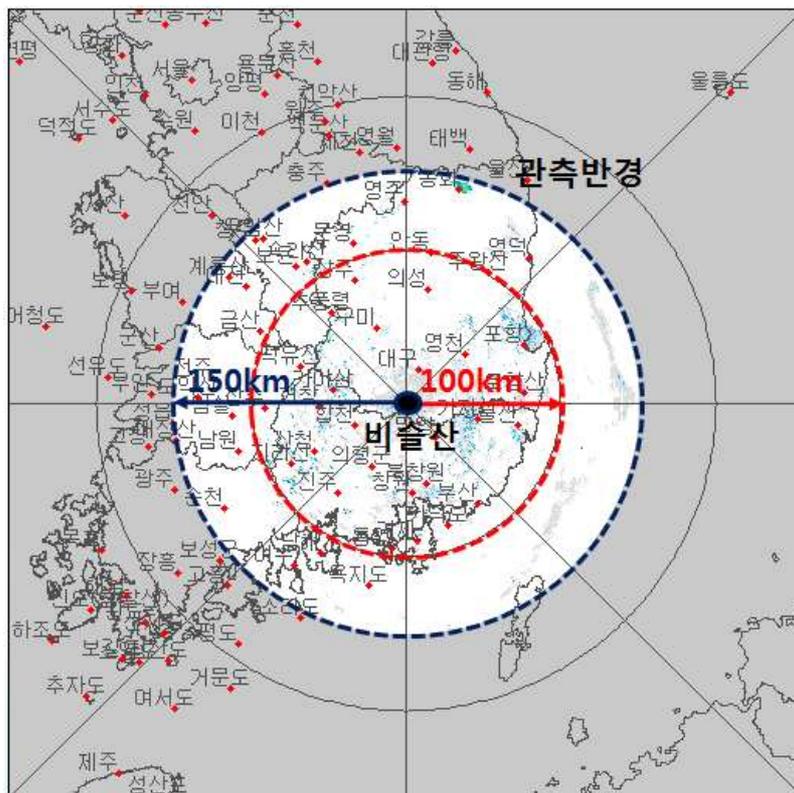


그림 2.1 비슬산레이더 위치 및 관측반경

표 2.2 레이더 강수량 추정값 산출 및 분석 사례

년도	시간(KST)	강수유형	시간(KST)	강수유형
2012년	7월 5일 0000~2400 KST	장마	8월23일 0500~1600 KST	장마
	7월13일 0000~1300 KST	장마	8월28일 0000~2400 KST	태풍
	8월12일 1700 KST~ 8월13일 0200 KST	기압골		
2013년	6월18일 0000 KST~ 6월19일 1000 KST	장마	9월14일 0200~1300 KST	기압골
	7월 4일 1600 KST~ 7월 5일 2100 KST	장마	9월30일 0200~0600 KST	국지성
	7월 7일 0500~1800 KST	장마	9월30일 2100~2400 KST	국지성
	7월28일 0400~1100 KST	장마	10월 8일 1700~2100 KST	기압골
	9월12일 0900~1030 KST	기압골	10월10일 1500~2400 KST	기압골

## 2.2 방법

기상레이더센터에서는 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 알고리즘을 2013년부터 개선해 오고 있다. 현재 사용하고 있는 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 기법은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 알고리즘으로써, 2009년 국립기상연구소에서 도입하여 2013년 기상레이더센터에서 이전 받아 S-밴드 이중편파레이더에 적합하게 개선하였다. 2013년의 기상레이더센터에서 개선한 내용은 다음과 같다(그림 2.2).

- (1) 레이더자료 입출력 단계에서 레이더 UF(Universal Format) 파일을 입력하고, binary나 NetCDF로 출력할 수 있도록 하여 결과분석이 용이하도록 하였다.
- (2) 기존의 X-밴드 이중편파레이더의 강수량 추정값 산출을 위해 적용되었던 감쇄보정 알고리즘을 제거하여 분석하였다.

- (3) 이중편파레이더 관측변수(반사도, 차등반사도)의 보정오차를 산출하고 이를 적용하여 정확도를 검증하였다.
- (4) 다양한 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 관계식을 적용하여 비교분석하였다.(기상레이더센터, 2013).

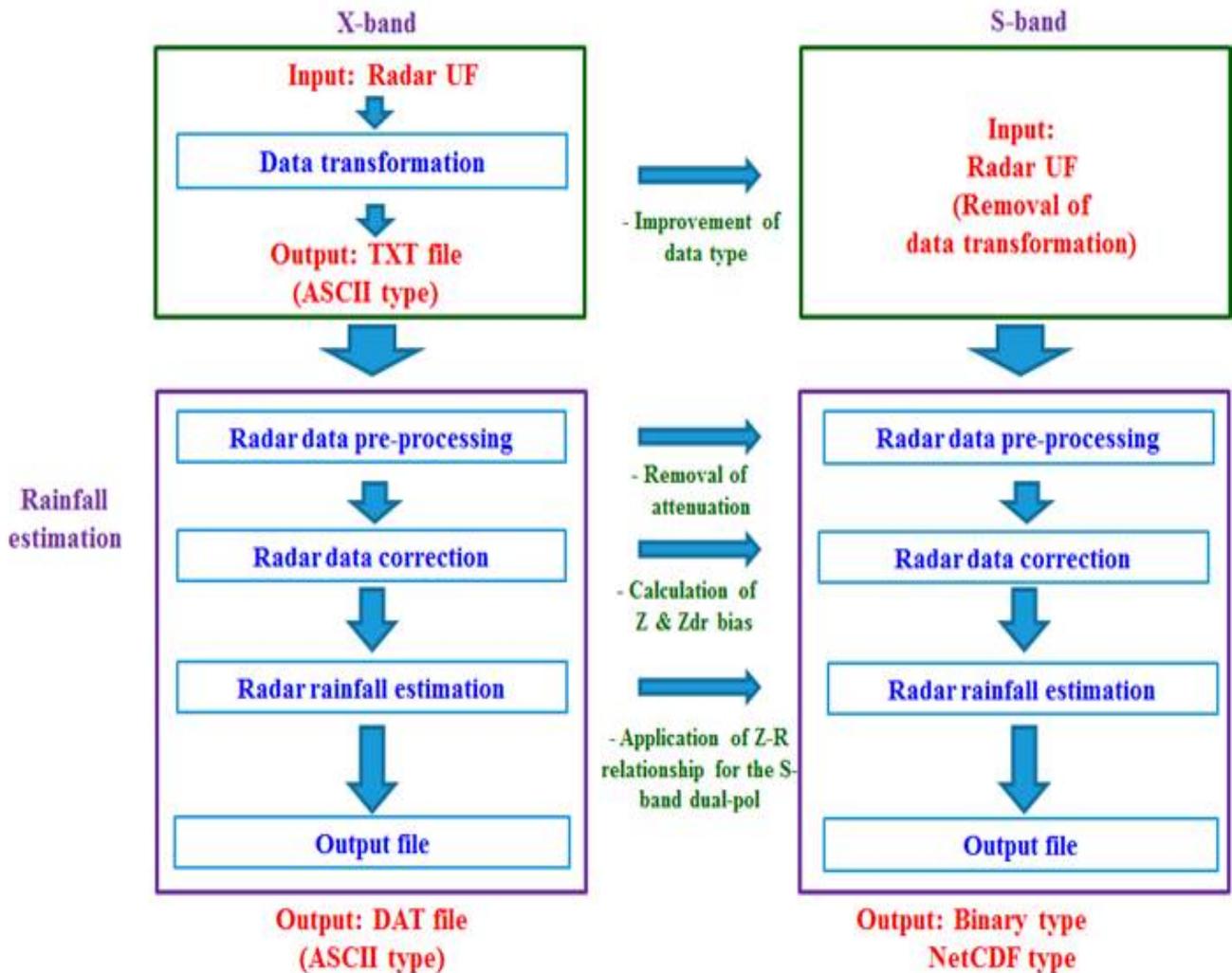


그림 2.2 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 알고리즘(2013)

본 연구에서는 기존의 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 알고리즘에 대해 차등 위상차 접힘풀기, FIR<sup>2)</sup> 필터링, 비차등위상차 계산, 강수량 추정값 산출식 계산 등의 과정을 적용하여 알고리즘을 개선하고자 하였다(그림 2.3).

2) FIR(Finite Impulse Response) : 유한 임펄스 응답

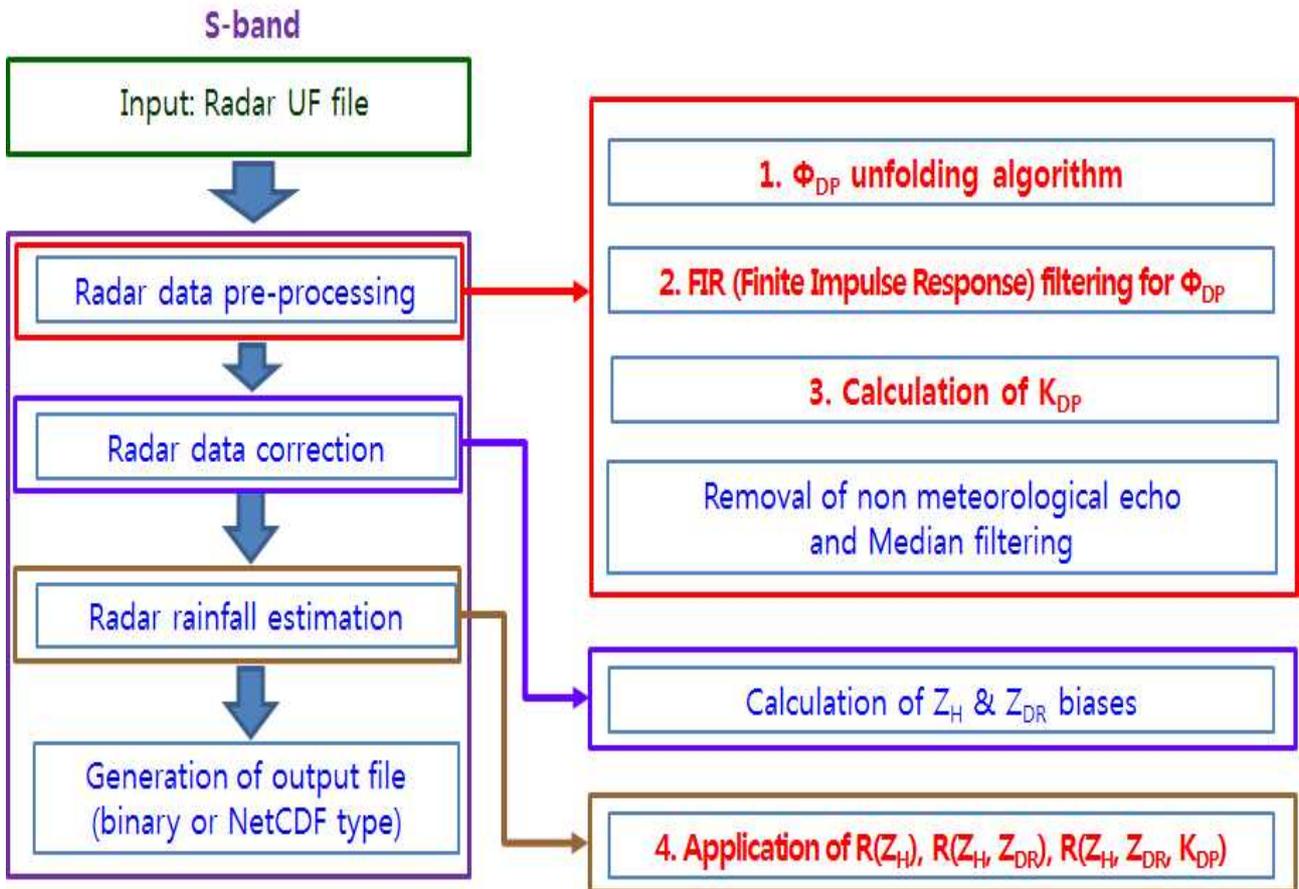


그림 2.3 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 알고리즘

### 2.2.1 차등위상차( $\phi_{DP}$ ) 접힘 풀기

이중편파레이더의 강수량 추정값을 산출하기 위해서는 비차등위상차( $K_{DP}$ )를 산출하여야 하며, 비차등위상차는 차등위상차( $\phi_{DP}$ )로부터 계산된다. 정확한 차등위상차를 산출하기 위해서는 차등위상차 접힘(folding)을 개선하여야 한다. 차등위상차 접힘 현상이란 이중편파레이더에서 관측된 차등위상차 값이 거리에 비례하여 양의 값으로 점차 증가하여야 하나  $180^\circ$  지점에서 반대로 음의 큰 값으로 떨어지면서 갑작스런 불연속이 나타나는 현상을 의미한다. 일반적으로 강수 발생 시 차등위상차가 거리에 따라 비례하여 증가하므로 접힘 부분에 대하여  $180^\circ$  를 더해줌으로서 차등위상차 접힘은 풀 수 있다.

기존 NCAR 알고리즘에서는 차등위상차 접힘 여부를 점검하는 시작기준이  $180^\circ$  이상부터이며, 접힘 여부 점검을 시작 이후 차등위상차가  $-10^\circ$  이하이면

접힘 풀기가 수행된다. 또한 차등위상차 접힘을 풀 때, 미국 WSR(Weather Surveillance Radar)-88D 기준으로  $360^\circ$  를 더해 접힘을 풀게 되어 있다. 기존 알고리즘에 비슬산레이더 관측자료를 적용하면 그림 2.4와 같이 차등위상차가 접혀 나타나는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 기존 NCAR 알고리즘에서 차등위상차 접힘이 발생하는 현상을 국내 이중편파레이더 현황에 적합하도록 다음과 같이 개선하였다(표 2.3).

- (1) 차등위상차 접힘 여부의 점검 시작기준을  $180^\circ$  이상에서  $160^\circ$  이상으로 변경한다.
- (2) 차등위상차 접힘 여부 점검 시작 이후 접힘 풀기 기준이 차등위상차가  $-10^\circ$  이하에서  $100^\circ$  이하로 변경한다.
- (3) 차등위상차 접힘을 풀기위해 더하는 기준값을  $360^\circ$  에서  $180^\circ$  로 변경한다.
- (4) 차등위상차 접힘 풀기가 잘 수행되었는지 재점검하는 알고리즘 추가한다.

위의 개선사항을 NCAR 알고리즘에 적용하였다(그림 2.5). 기존의 차등위상차 계산과정(그림 2.3(a))을 개선하여 차등위상차 접힘풀기(그림 2.3(b))를 수행하였다.

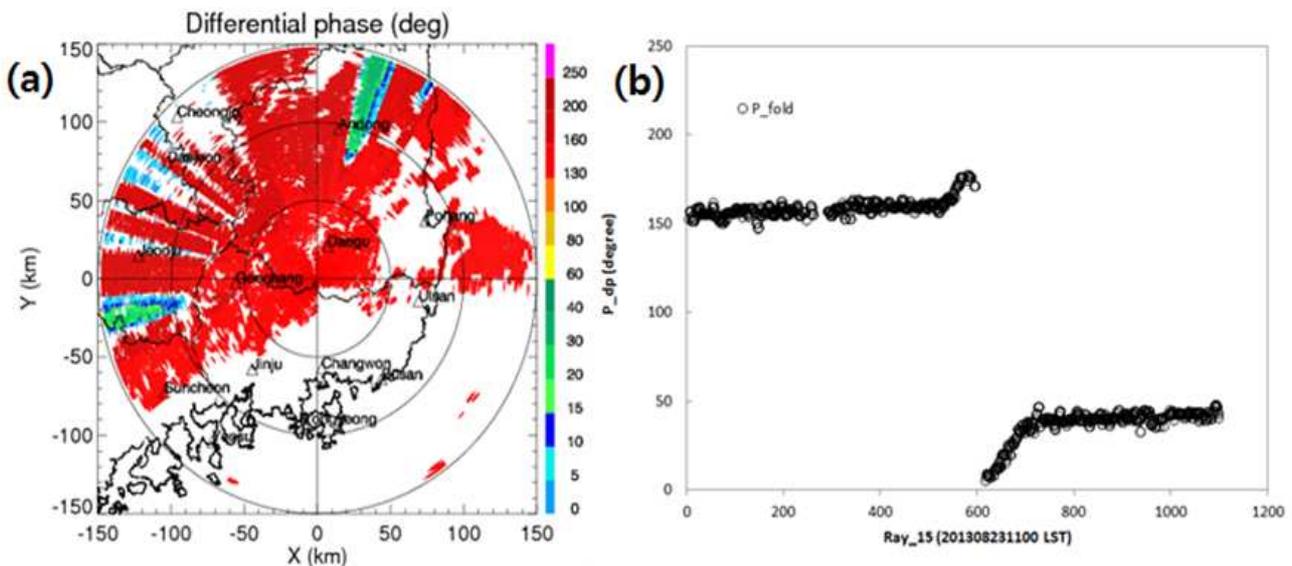


그림 2.4 차등위상차 접힘현상 : (a)  $0^\circ$  고도각의 차등위상차 PPI 영상,  
(b) 방위각  $15^\circ$  의 차등위상차(2013년 8월 23일 1100 KST)

표. 2.3 차등위상차 접힘 풀기 알고리즘(기상레이더센터, 2013a; You, et al., 2014)

구분	기존	개선	비고
$\overline{\Phi_{DP}}$ 계산	21개 gate 평균값 (기준±10개 gate)	유지	-
접힘 점검 기준	접힘 점검: $\overline{\Phi_{DP}} \geq 180^\circ$	접힘 점검: $\overline{\Phi_{DP}} \geq 160^\circ$	120° 기준
접힘 풀기 기준	접힘 풀기: $\overline{\Phi_{DP}} \leq -10^\circ$	접힘 풀기: $\overline{\Phi_{DP}} \leq 100^\circ$	79° 기준
$\Phi_{DP}$ 수정값	360°	180°	
추가	-	접힘풀기 재점검	

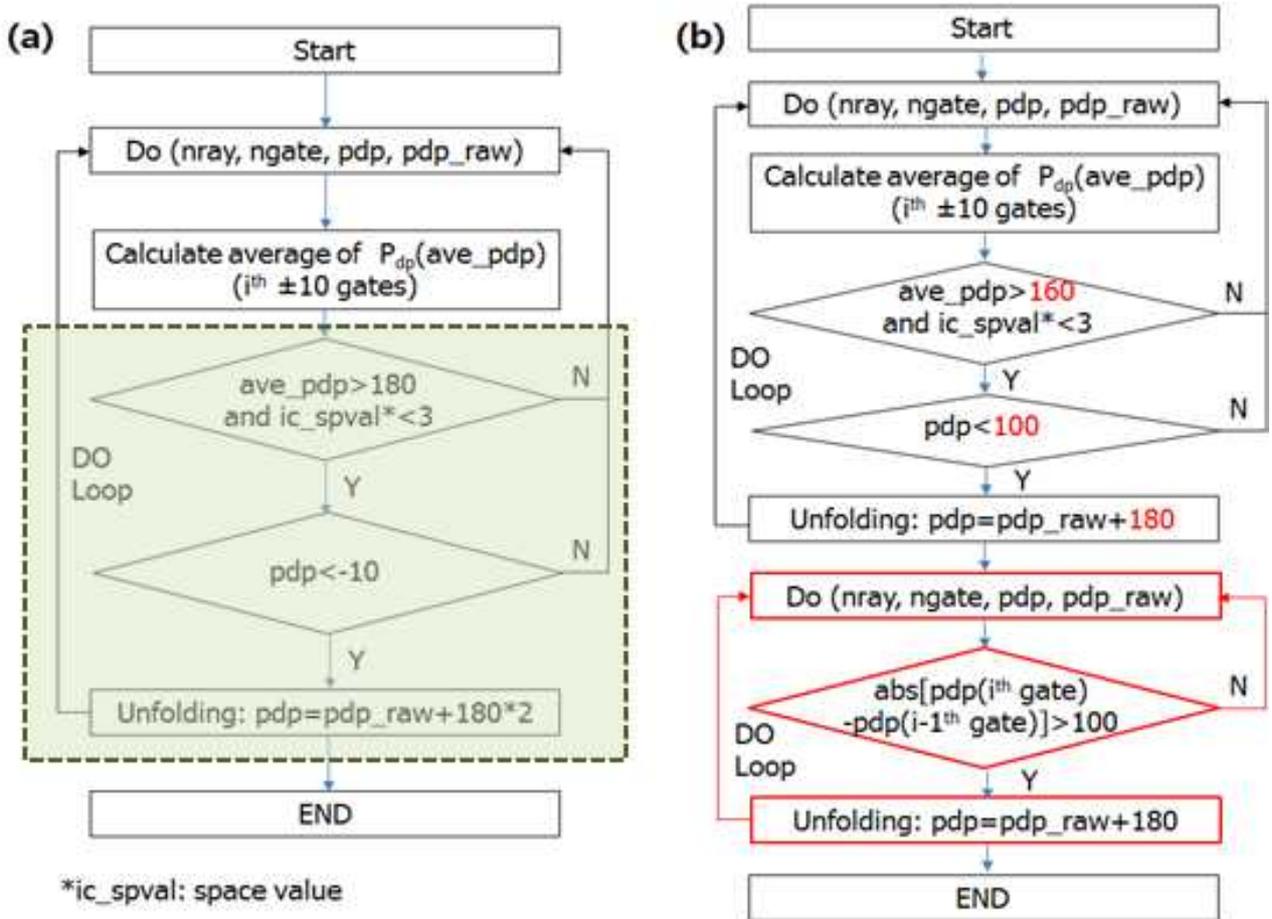


그림 2.5 차등위상차 접힘 풀기 처리과정 흐름도 : (a) 개선 전, (b) 개선 후

### (3) 사례분석

#### a. 사례 1 (2012년 12월 5일 1700 KST)

본 사례는 비슬산레이더 관측영역에 발생한 강설 사례(2012년 12월 5일)이며, 레이더 중심으로부터 정남방향으로 약 108km 떨어진 영역에서 차등위상차가 접히는 현상이 발생하였다. 이에 대하여 개선된 차등위상차 접힘 풀기 알고리즘을 적용하였으며, 적용결과 방위각 방향으로 레이더 중심으로부터 멀어질수록 차등위상차가 증가하는 것을 확인하였다(그림 2.6와 그림 2.7).

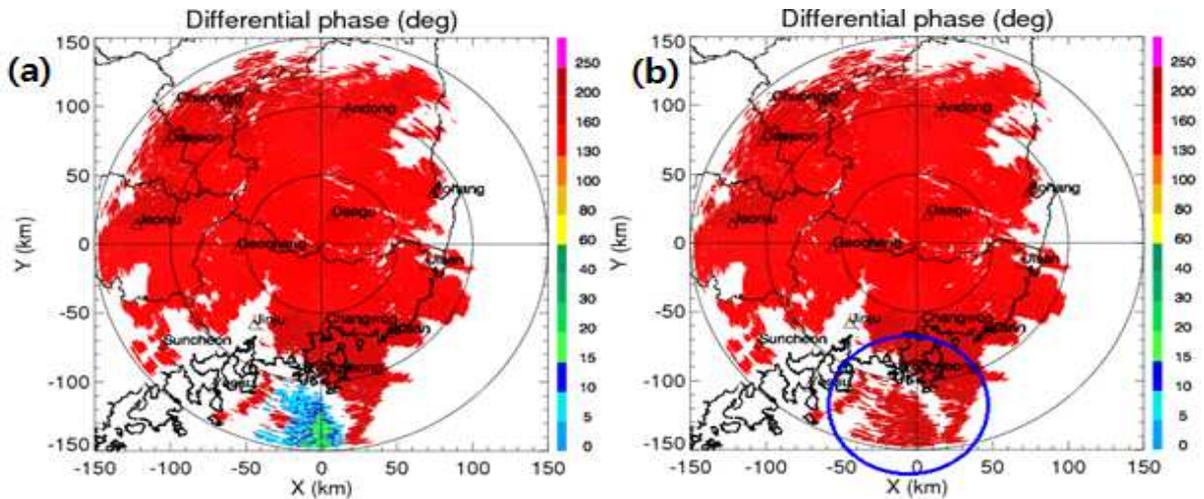


그림 2.6 차등위상차 접힘 풀기 PPI 영상(고도각 0°) : (a) 개선 전, (b) 개선 후 (2012년 12월 5일 1700 KST)

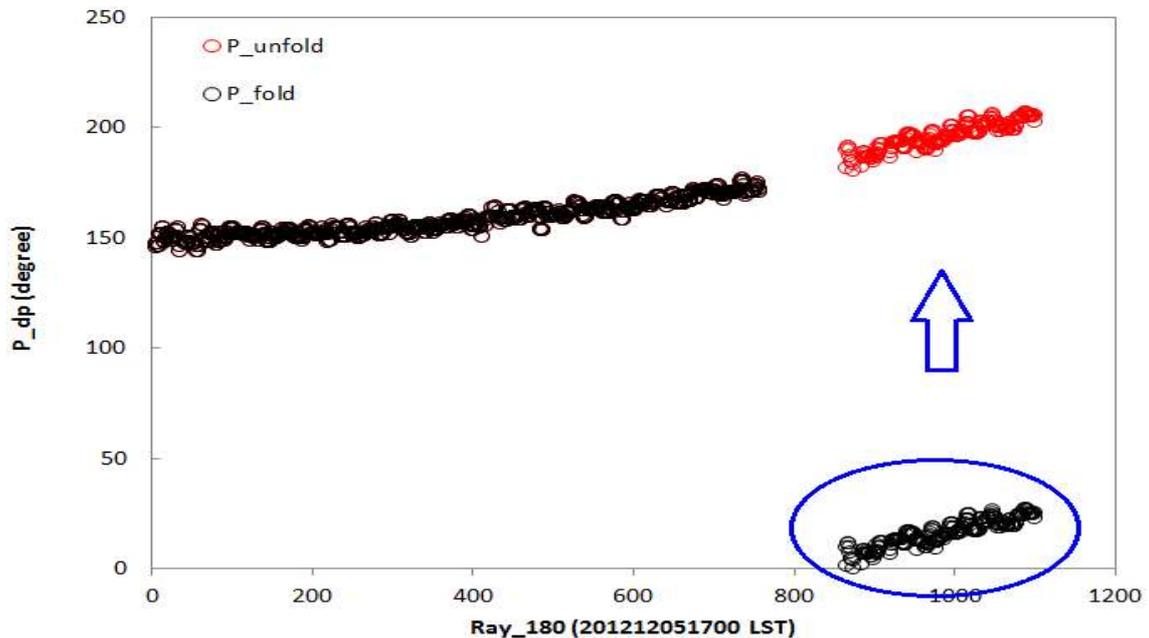


그림 2.7 차등위상차 접힘 풀기(180° 방위각 방향, 2012년 12월 5일 1700 KST)

b. 사례 2 (2013년 8월 3일 1800 KST)

본 사례는 비슬산레이더 관측영역에 발생한 국지성 호우 사례(2013년 8월 3일)이며, 레이더 중심으로부터 북쪽방향으로 약 44km 떨어진 영역에서 차등위상차 접힘 현상이 나타났다. 이에 개선된 차등위상차 접힘 풀기 알고리즘을 적용하였으며, 차등위상차의 접힘이 풀어진 것을 확인하였다(그림 2.8과 그림 2.9)

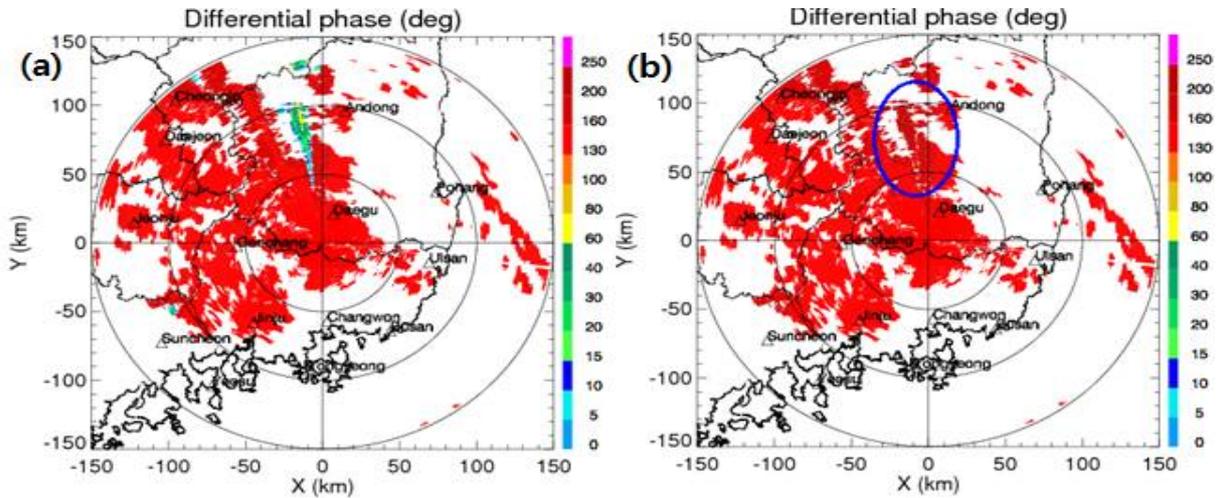


그림 2.8 차등위상차 접힘 풀기 PPI 영상(고도각  $0^\circ$ ) : (a) 개선 전, (b) 개선 후 (2013년 8월 3일 1800 KST)

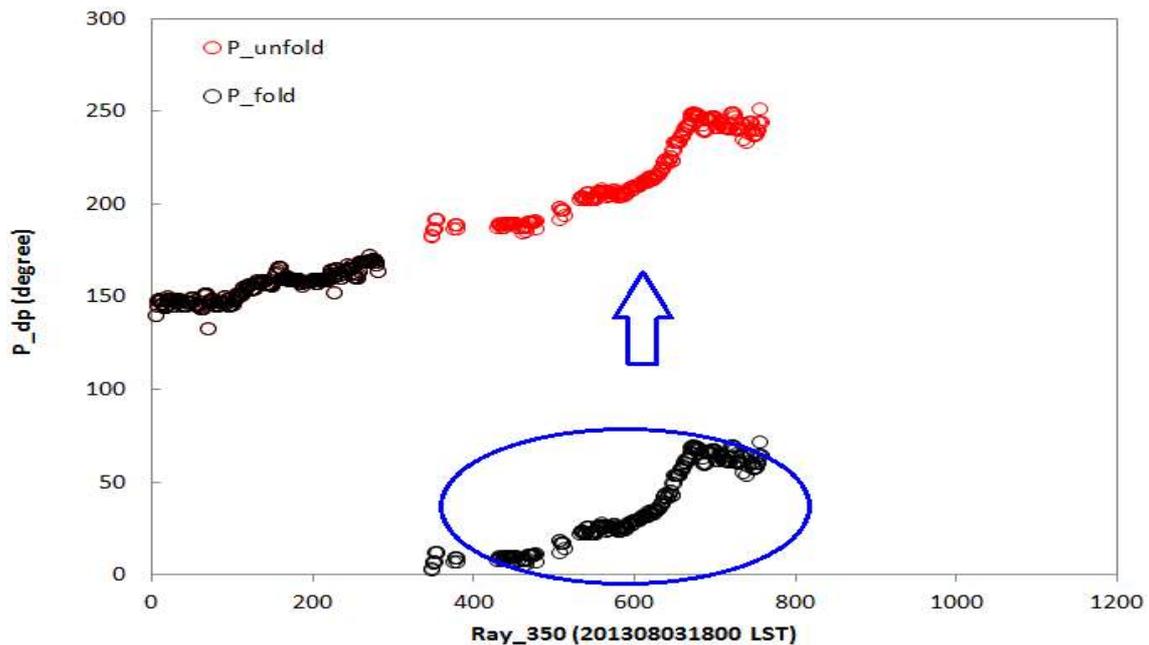


그림 2.9 차등위상차 접힘 풀기( $350^\circ$  방위각 방향, 2013년 8월 3일 1800 KST)

c. 사례 3 (2013년 8월 23일 1100 KST)

본 사례는 비습산레이더 관측영역에 발생한 장마전선 사례(2013년 8월 23일)이며, 레이더 중심으로부터 서쪽과 북쪽방향으로 약 77km 떨어진 영역에서 차등 위상차 접힘 현상이 발생하였다. 이에 차등위상차 접힘풀기 알고리즘을 적용하였으며, 차등위상차 접힘 풀기 수행되는 것을 확인하였다(그림 2.10과 그림2.11)

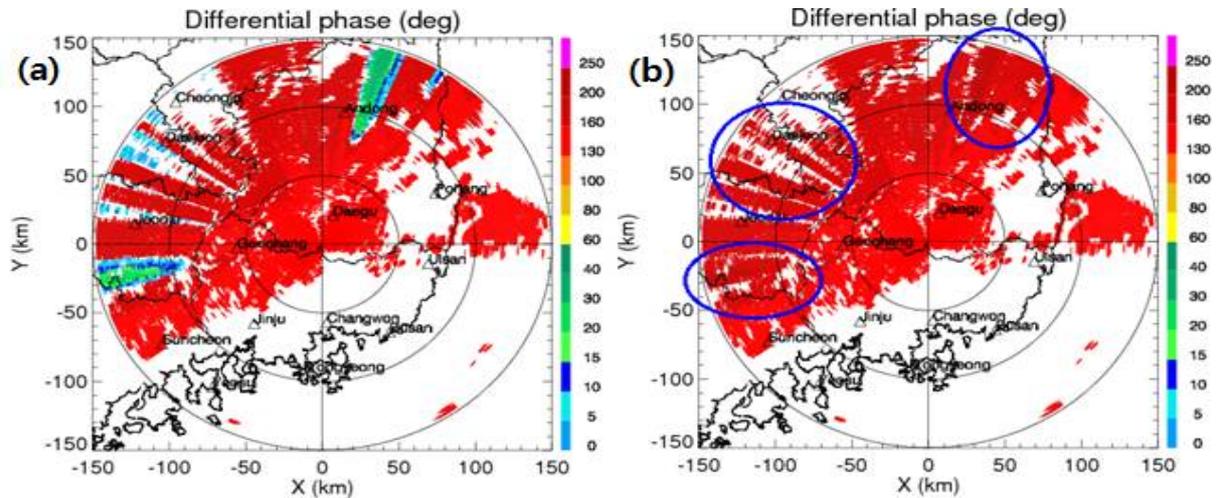


그림 2.10 차등위상차 접힘 풀기 PPI 영상(고도각 0°) : (a) 개선 전, (b) 개선 후 (2013년 8월 23일 1100 KST)

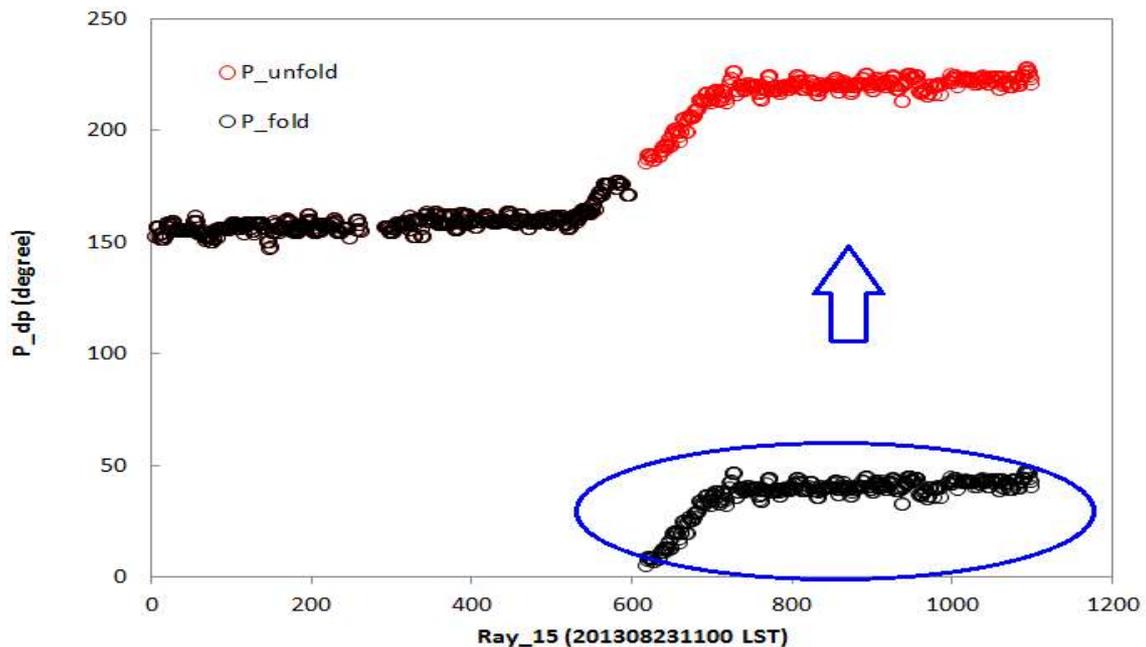


그림 2.11 차등위상차 접힘 풀기(350° 방위각 방향, 2013년 8월 23일 1100 KST)

## 2.2.2 FIR 필터링

FIR 필터링이란 관측된 차등위상차의 변동 폭이 큰 현상을 억제시키기 위해 이를 필터링하는 방법이다. 즉, 변동 폭이 큰 차등위상차에 대해 평활화(smoothing) 과정을 유한 반복하여 적정값 범위내로 필터링함으로써 차등위상차가 거리에 따라 양의 값으로 비례하여 증가하는 값으로 산출될 수 있도록 하는 방법이다(기상 레이더센터, 2013).

기존 알고리즘에서는 차등위상차의 변동을 줄이기 위해 방위각 방향으로 임의의 격자(21개)에 대해 선형회귀식(Hubbart and Bringi, 1995)을 적용한다. 하지만 입력 자료에 Null 값인 경우에 이를 0값으로 대체하여 FIR 필터링을 적용하므로 최종 계산된 차등위상차가 작아지는 결과가 나타났다. 특히, FIR 필터링의 적용횟수가 증가할수록 Null 값이 존재하는 격자의 차등위상차가 매우 작아지는 경향을 나타냈다(그림 2.12).

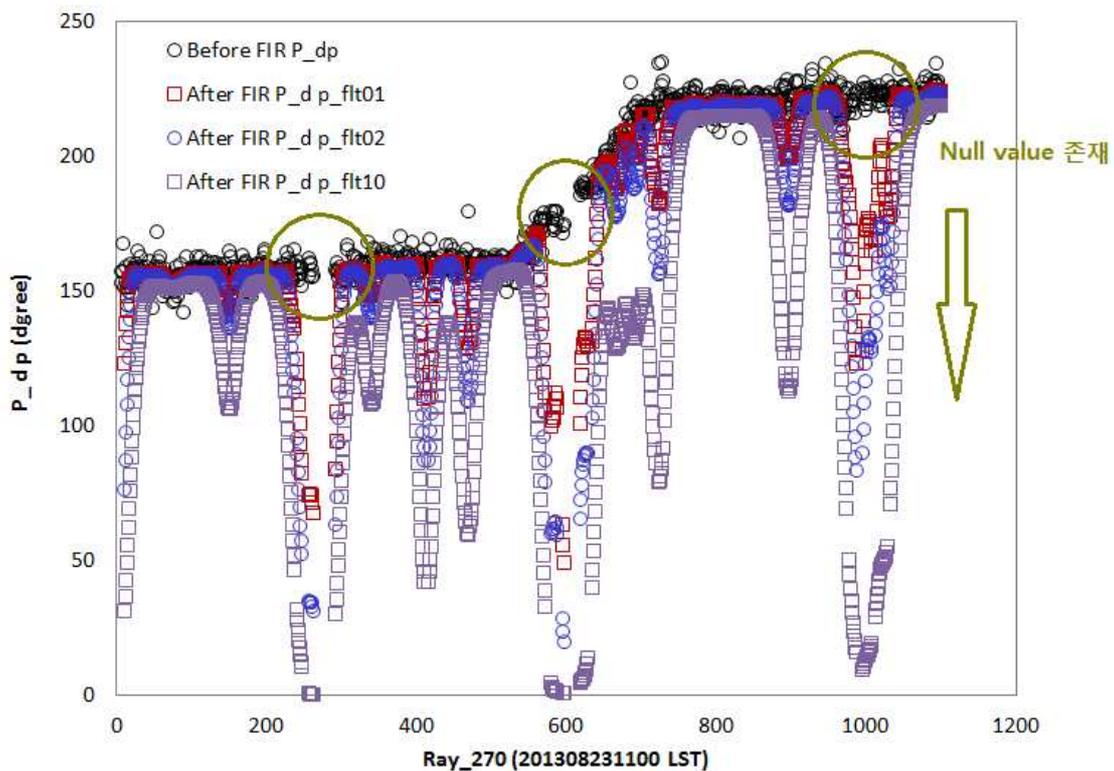


그림 2.12 차등위상차의 방위각 방향으로 Null값이 존재할 때의 FIR 필터링 결과

본 연구에서는 기존 알고리즘에서 Null 값에 따라 차등위상차가 작아지는 단점을

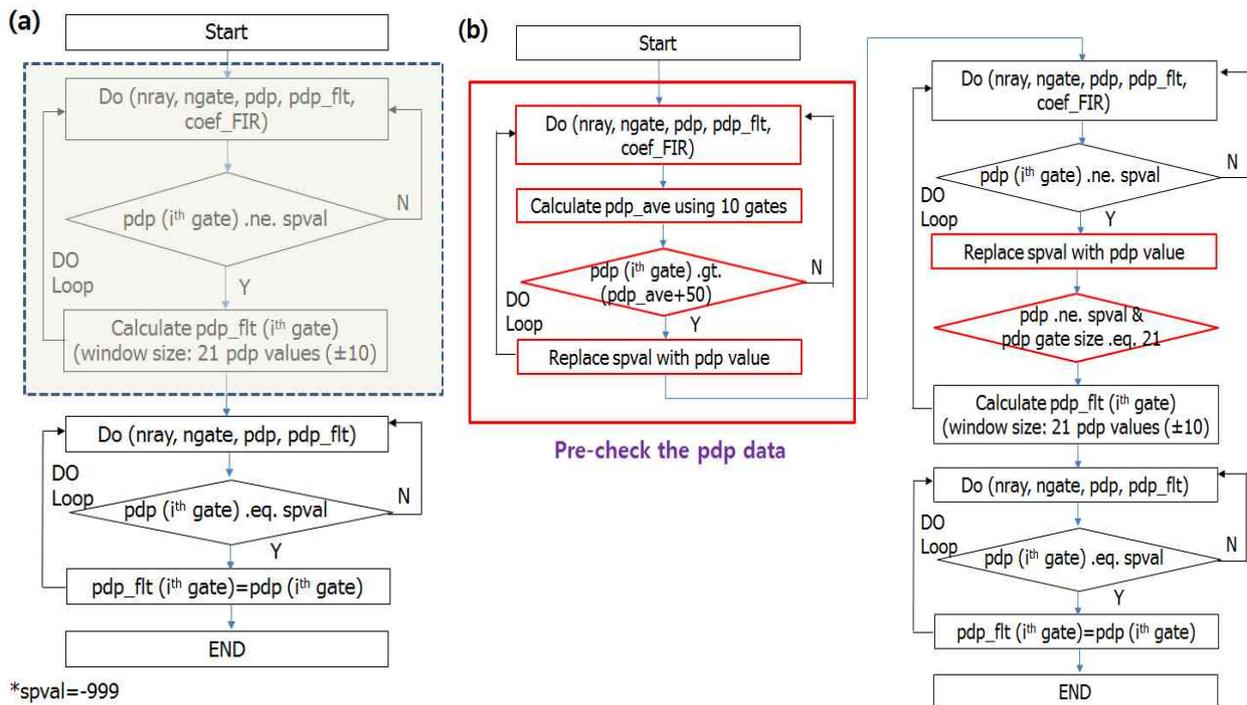
개선하기 위하여 Null 값 위치에 주변의 차등위상차로 대체하는 방법을 적용하였다. 적용절차는 다음과 같다(그림 2.13):

- (1) Null 값이 끝난 후 시작되는 차등위상차를 필터링하기 위해 최대 10개 격자까지 Null 값을 시작지점의 차등위상차로 대체한다.
- (2) 차등위상차 사이에 Null 값이 존재하는 경우, Null 값 바로 전 차등위상차로 대체한다.
- (3) Null 값이 시작되기 전의 차등위상차를 필터링하기 위해 최대 10개 격자까지 Null 값을 끝난 지점의 차등위상차로 대체한다.

위의 개선된 차등위상차에 대한 FIR 필터링 처리과정은 그림 2.14와 같다.



그림 2.13 차등위상차의 방위각 방향으로 Null값이 존재할 때, Null값 대체 방법 (여기서, N: Null값)



\*spval=-999

그림 2.14 차등위상차 FIR 필터링 처리과정 : (a) 개선 전, (b) 개선 후

### (3) 사례분석

#### a. 사례 1 (2012년 6월 30일 1200 KST)

본 사례는 2012년 6월 30일 발생한 장마에 대한 사례이며, 이에 대하여 개선된 FIR 필터링 알고리즘을 적용하였다. 비슬산 기준 북서방향 영역으로 차등위상차 값에 대하여 개선된 FIR 필터링 알고리즘 전과 후를 비교한 결과, 차등위상차 값의 변동이 많이 줄어들음을 확인하였다(그림 2.15). 또한 차등위상차 값 PPI 영상을 FIR 필터링 알고리즘 전과 후에 대하여 비교하면 보라색 원 영역이 FIR 필터링을 수행함으로써 변동이 많이 감소한 것을 알 수 있다(그림 2.16). 다음으로 변동 감소 정도를 차등위상차 값의 표준편차로 비교한 결과, 원 차등위상차의 표준편차는  $4.03^\circ$  이었으나 1회 적용 시에는  $1.93^\circ$ , 2회 적용 시에는  $1.89^\circ$ , 10회 적용 시에는  $1.77^\circ$  로서 FIR 필터링의 적용 횟수가 증가할수록 변동이 감소됨을 확인하였다 (표 2.4).

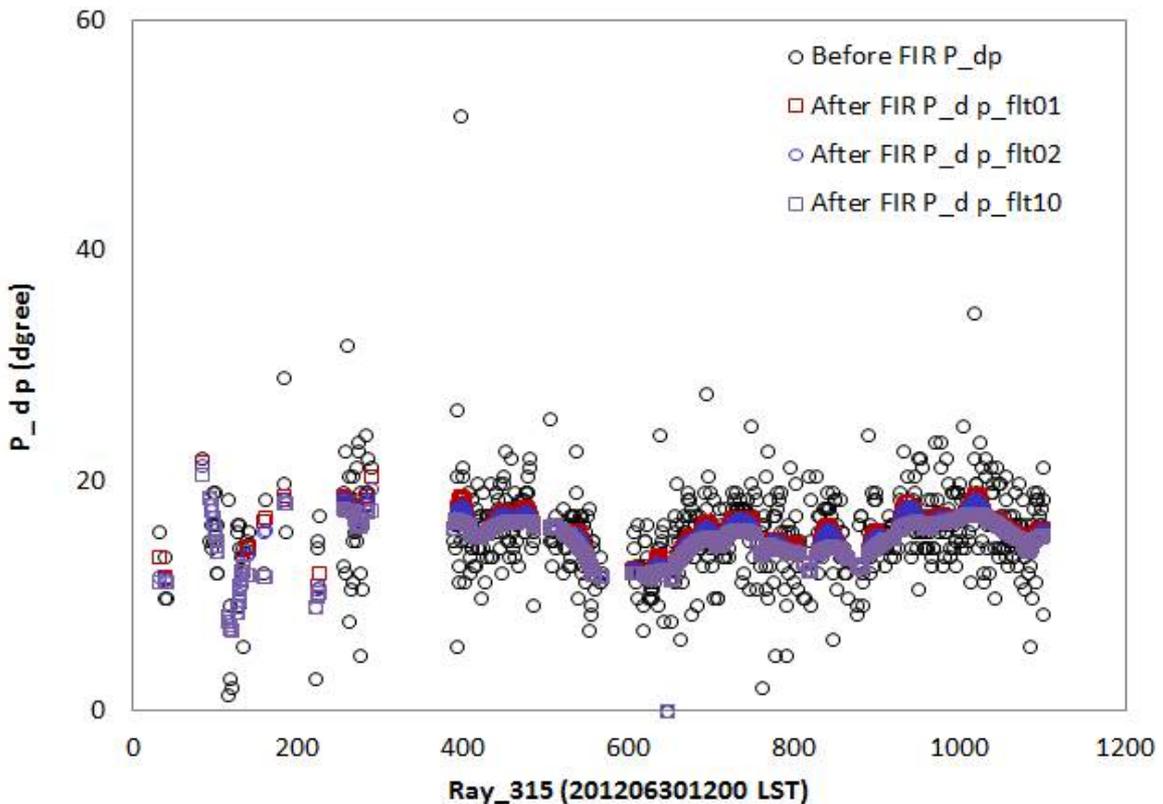


그림 2.15 개선된 FIR 필터링이 적용된 차등위상차(FIR 필터링 반복회수 : 1, 2, 10회) (2012년 6월 30일 1200 KST)

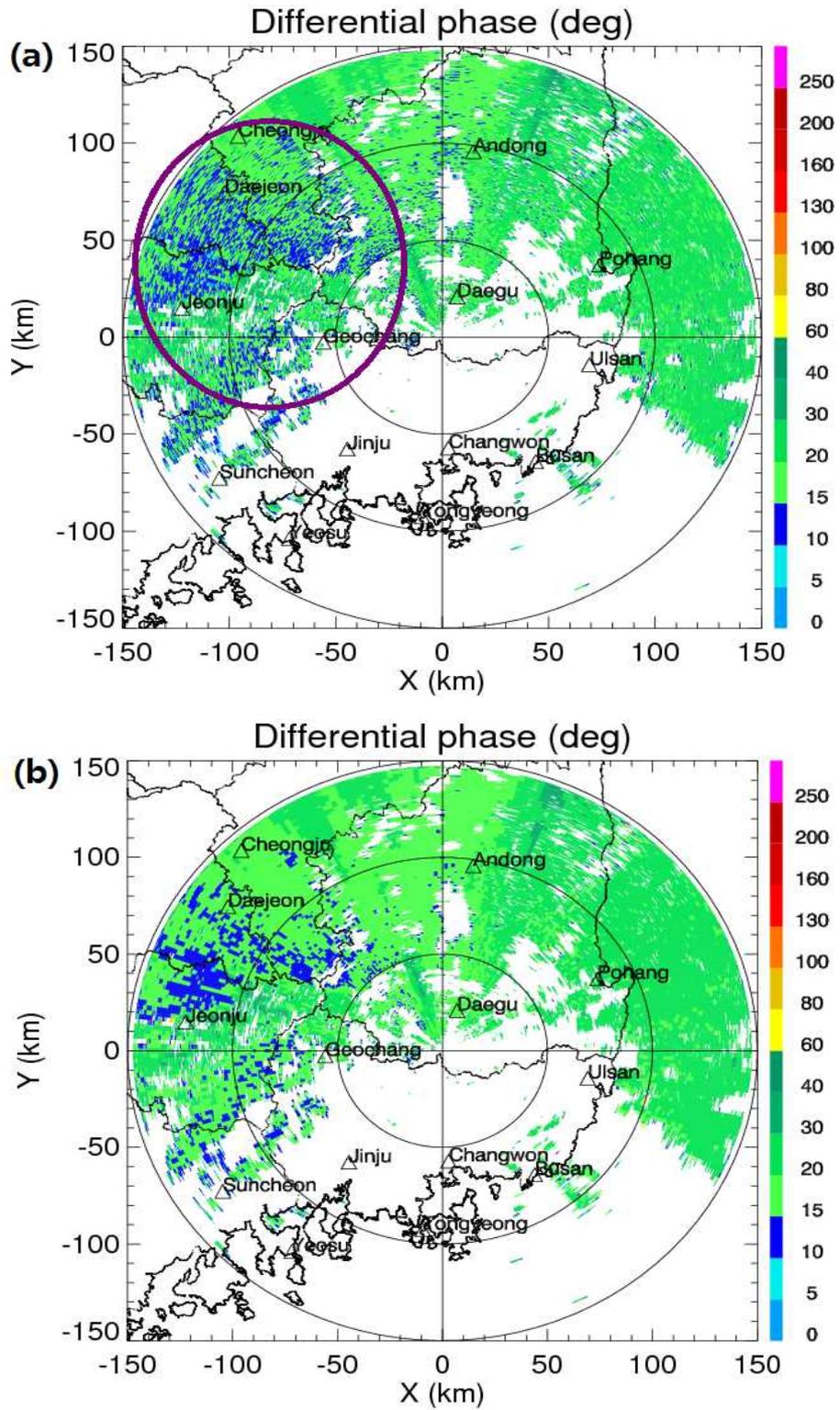


그림 2.16 차등위상차 PPI 영상(0° 고도각) : FIR 필터링 (a) 개선 전, (b) 개선 후

표 2.4 FIR 필터링 적용회수에 따른 차등위상차 표준편차 비교

필터링 적용회수	0회	1회	2회	10회
$SD(\Phi_{dp})$	78.60°	77.38°	77.12°	75.59°

b. 사례 2 (2012년 9월 17일 1000 KST)

본 사례는 2012년 9월 17일 태풍이 발생한 사례이며, 이에 대하여 개선된 FIR 필터링 알고리즘을 적용하였다. 비슬산 기준 남서방향 영역으로 차등위상차 값에 대하여 개선된 FIR 필터링 알고리즘 전과 후를 비교한 결과, 차등위상차 값의 변동이 많이 줄어들음을 확인하였다(그림 2.17). 또한 차등위상차 값 표출영상을 FIR 필터링 알고리즘 전과 후에 대하여 비교하면 검은색 원 영역이 FIR 필터링을 수행함으로서 변동이 많이 감소한 것을 알 수 있다(그림 2.18). 다음으로 변동 감소 정도를 차등위상차 값의 표준편차로 비교한 결과, 원 차등위상차의 표준편차는  $28.44^\circ$  이었으나 1회 적용 시에는  $28.41^\circ$ , 2회 적용 시에는  $28.36^\circ$ , 10회 적용 시에는  $27.82^\circ$  로서 FIR 필터링의 적용 횟수가 증가할수록 변동이 감소됨을 확인하였다(표 2.5).

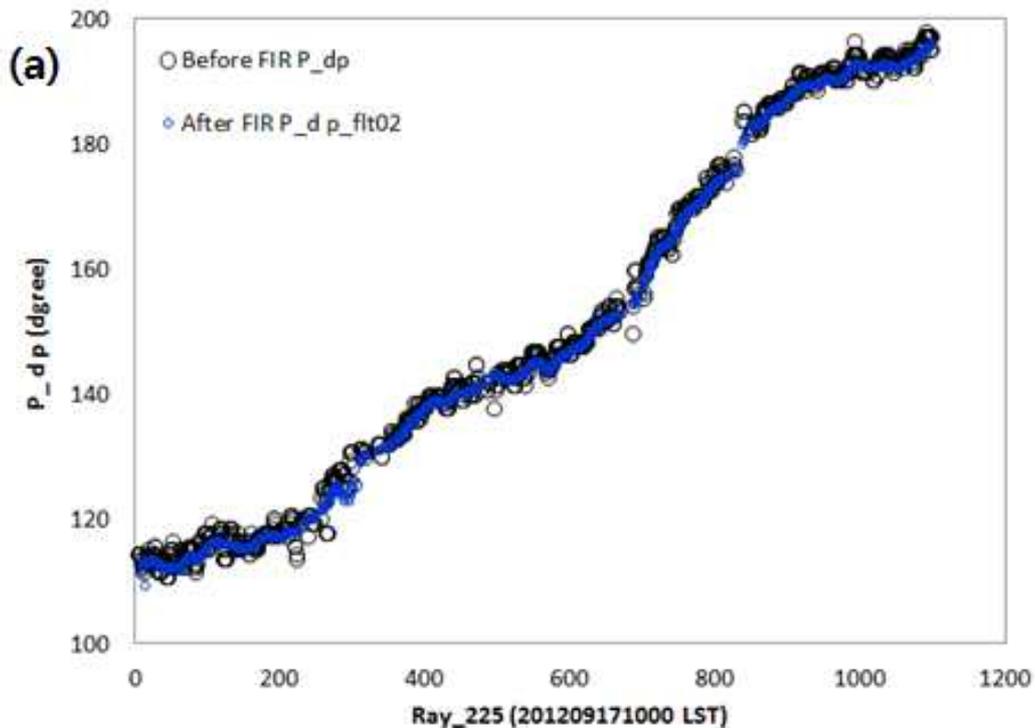


그림 2.17 개선된 FIR 필터링이 적용된 차등위상차(FIR 필터링 반복회수 : 1, 2, 10회)  
(2012년 9월 17일 1000 KST)

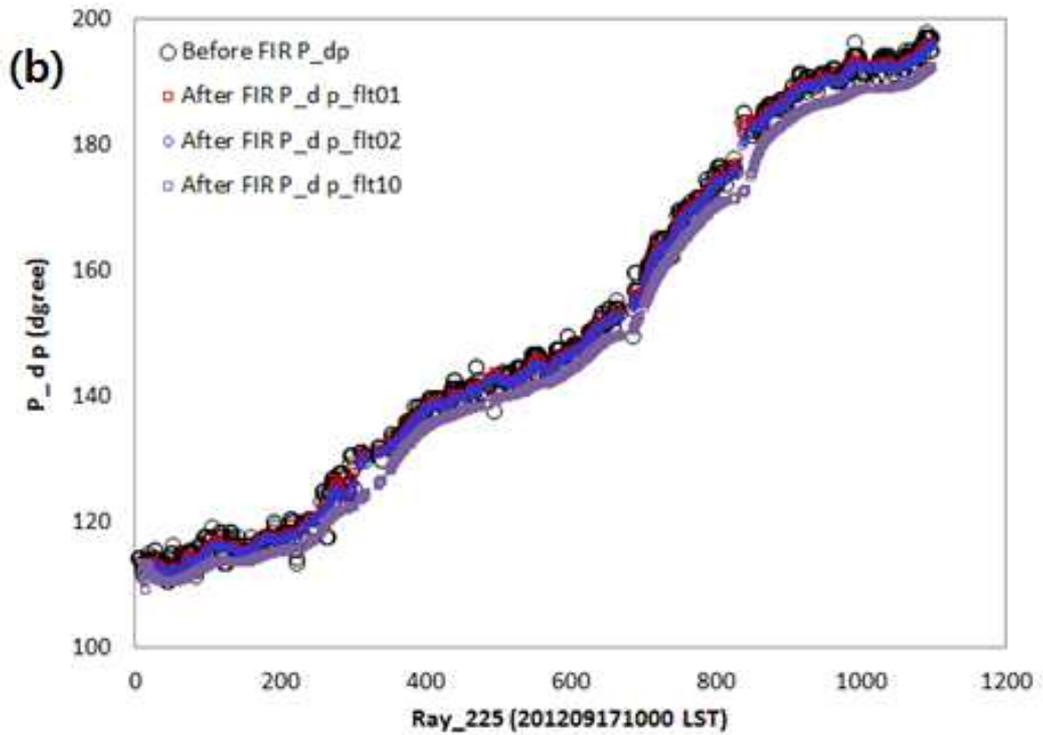


그림 2.17 개선된 FIR 필터링이 적용된 차등위상차(FIR 필터링 반복회수 : 1, 2, 10회)  
(2012년 9월 17일 1000 KST)

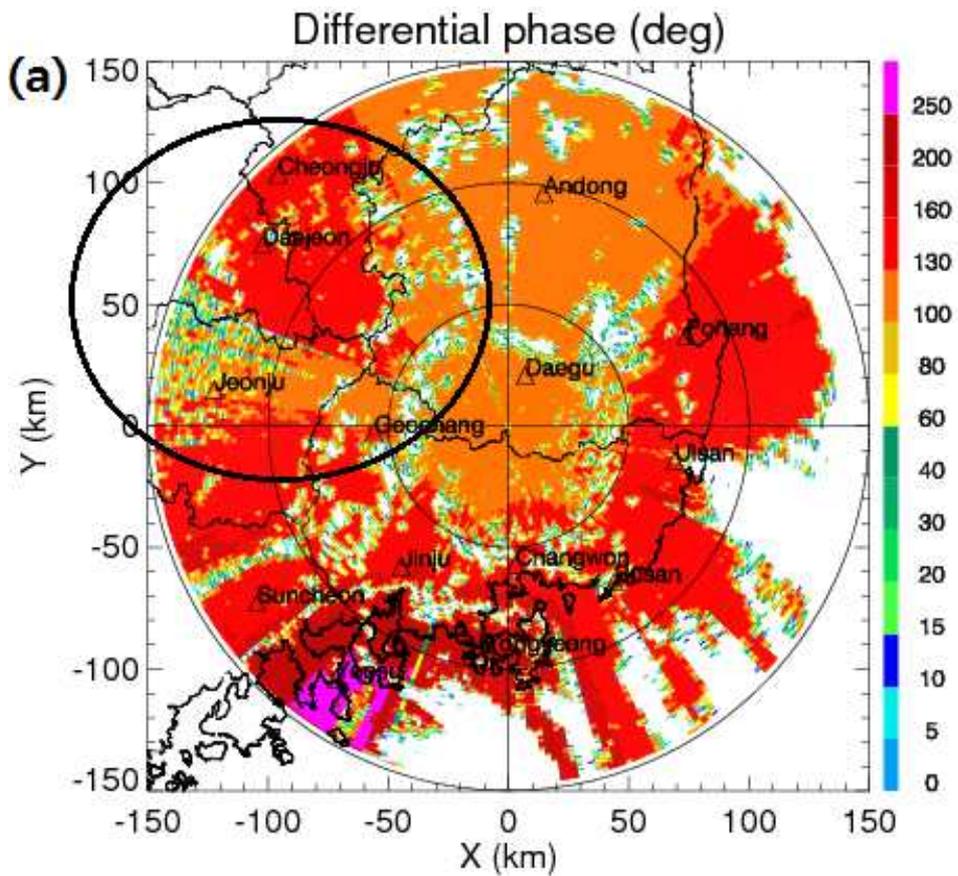


그림 2.18 차등위상차 PPI 영상( $0^\circ$  고도각) : FIR 필터링 (a) 개선 전, (b) 개선 후

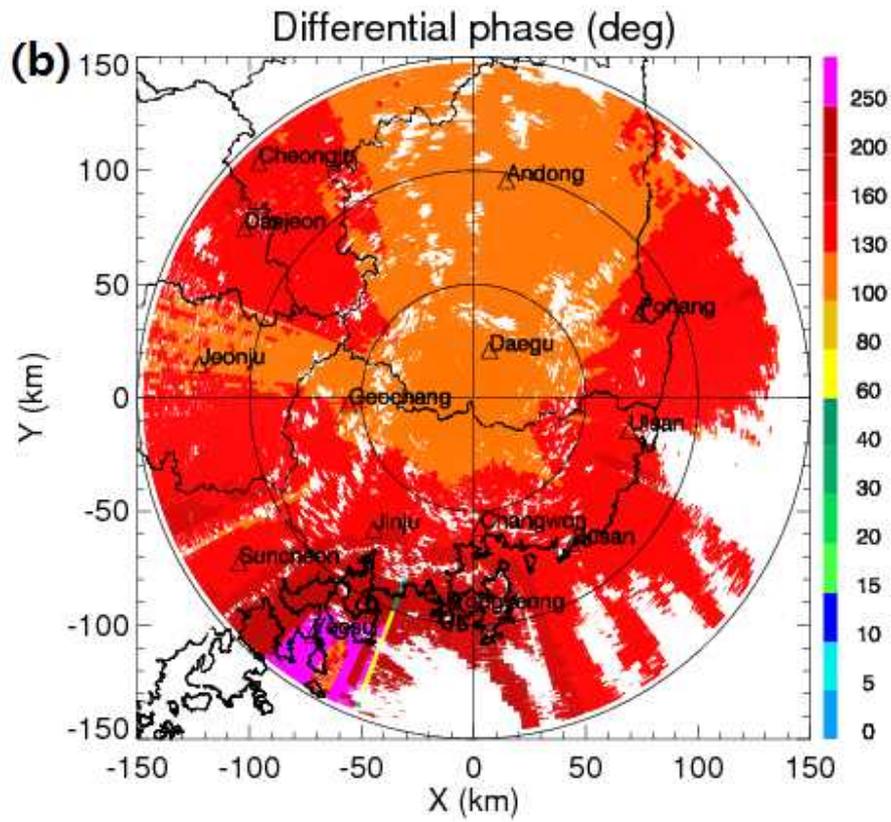


그림 2.18 차등위상차 PPI 영상(0° 고도각) : FIR 필터링 (a) 개선 전, (b) 개선 후

표 2.5 FIR 필터링 적용회수에 따른 차등위상차 표준편차 비교

필터링 적용회수	0회	1회	2회	10회
$SD(\Phi_{dp})$	28.44°	28.41°	28.36°	27.82°

c. 사례 3 (2013년 9월 17일 0920 KST)

본 사례는 2013년 9월 17일 기압골에 의해 강우가 발생한 사례이며, 이에 대하여 개선된 FIR 필터링 알고리즘을 적용하였다. 비슬산 기준 북동방향 영역으로 차등 위상차 값에 대하여 개선된 FIR 필터링 알고리즘 전과 후를 비교한 결과, 차등 위상차 값의 변동이 많이 줄어들음을 확인하였다(그림 2.19). 또한 차등위상차 값 표출영상을 FIR 필터링 알고리즘 전과 후에 대하여 비교하면 보라색 원 영역이 FIR 필터링을 수행함으로써 변동이 많이 감소한 것을 알 수 있다(그림 2.20). 다음으로 변동 감소 정도를 차등위상차 값의 표준편차로 비교한 결과, 원 차등위상차의 표준편차는  $63.63^\circ$  이었으나 1회 적용 시에는  $63.08^\circ$  , 2회 적용 시에는  $63.01^\circ$  , 10회 적용 시에는  $62.13^\circ$  로서 FIR 필터링의 적용 횟수가 증가할수록 변동이 감소됨을 확인하였다(표 2.6).

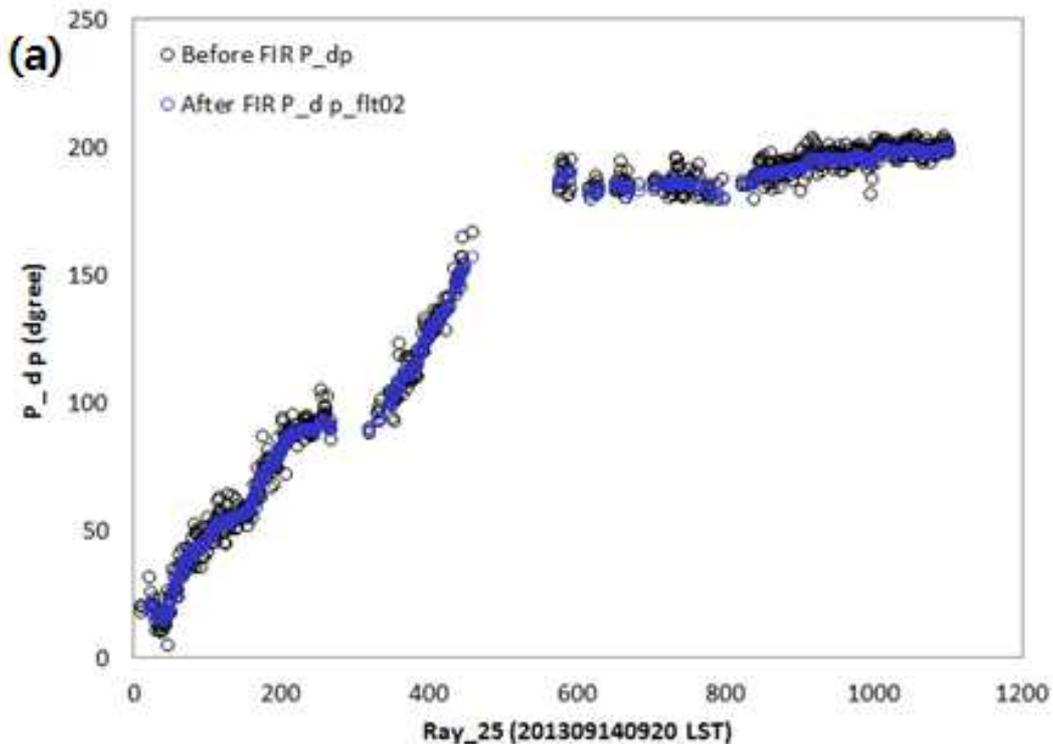


그림 2.19 개선된 FIR 필터링이 적용된 차등위상차(FIR 필터링 반복회수 : 1, 2, 10회) (2013년 9월 17일 0920 KST)

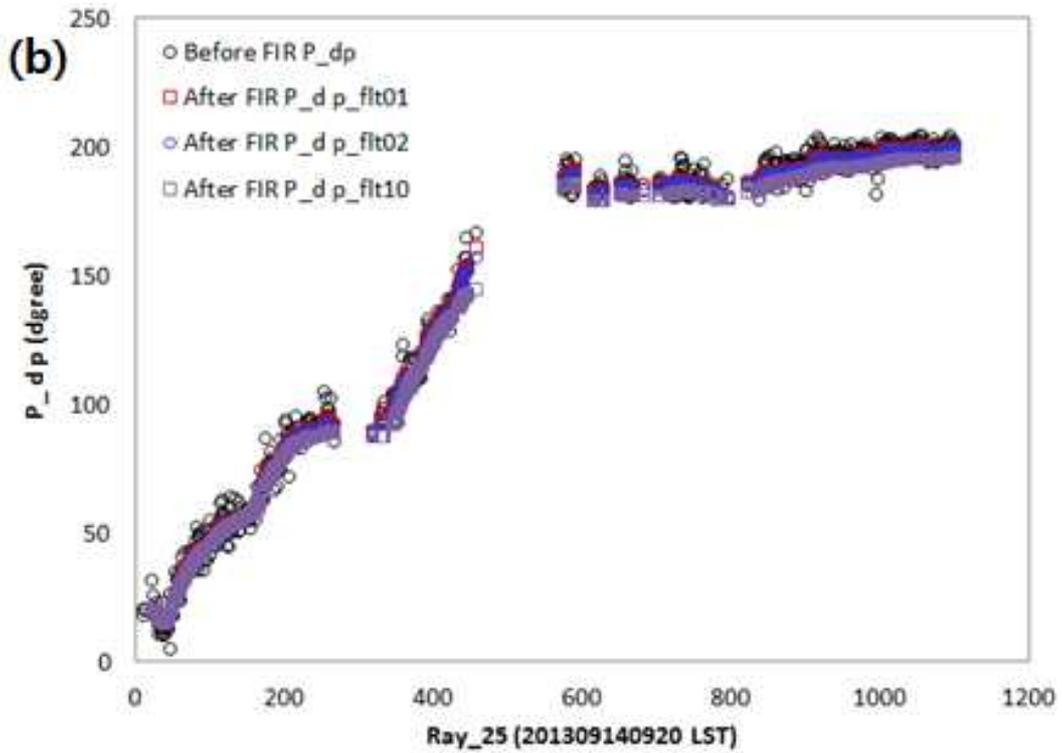


그림 2.19 개선된 FIR 필터링이 적용된 차등위상차(FIR 필터링 반복회수 : 1, 2, 10회)  
(2013년 9월 17일 0920 KST)

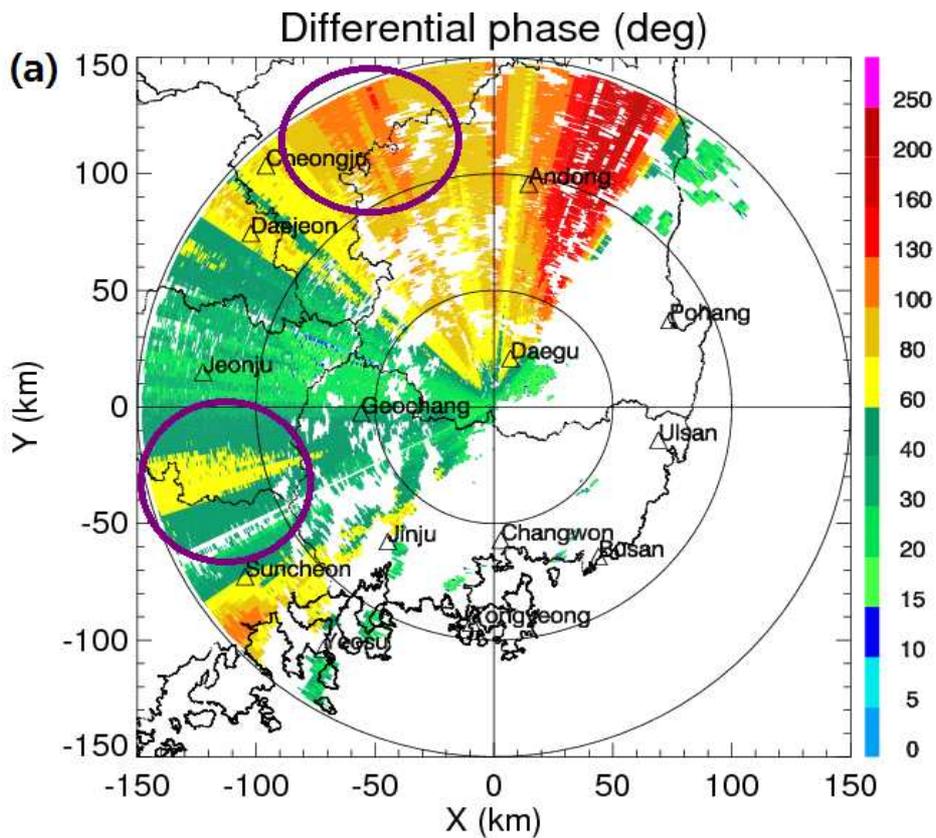


그림 2.20 차등위상차 PPI 영상( $0^\circ$  고도각) : FIR 필터링 (a) 개선 전, (b) 개선 후

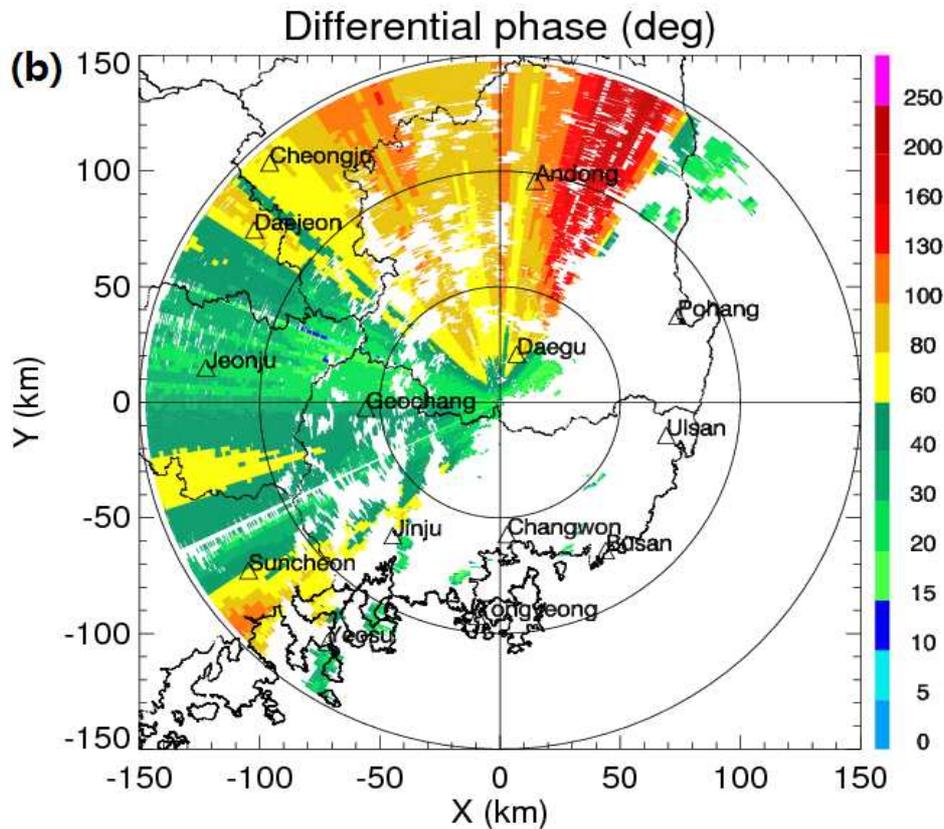


그림 2.20 차등위상차 PPI 영상( $0^\circ$  고도각) : FIR 필터링 (a) 개선 전, (b) 개선 후

표 2.6 FIR 필터링 적용회수에 따른 차등위상차 표준편차 비교

적용회수	0회	1회	2회	10회
$SD(\phi_{dp})$	$63.63^\circ$	$63.08^\circ$	$63.01^\circ$	$62.13^\circ$

### 2.2.3 비차등위상차( $K_{DP}$ ) 계산

비차등위상차( $K_{DP}$ )는 단위거리당 차등위상차의 변화를 나타내며, 강한 강우 산출이나 대기수상체분류에 있어 매우 중요한 변수이다. 비차등위상차는 차등위상차 접힘 풀기 및 FIR 필터링을 2회 수행 후 얻어진 차등위상차 값을 사용하여 (Hubbert and Bringi, 1995) 연속된 거리 샘플에 대하여 최소자승법을 사용하여 비차등위상차를 계산한다. 레이더로부터의 거리를  $r$ 이라 한다면 비차등위상차 계산 기본식은 다음과 같다.

$$K_{DP} = \frac{\Phi_{DP}(r_2) - \Phi_{DP}(r_1)}{r_2 - r_1} \quad (2.1)$$

앞서 언급한 바와 같이 레이더로부터 연속된 거리에 따른 차등위상차에 대하여 비차등위상차를 계산하게 되는데, 연속된 거리의 차등위상차 개수는 비차등위상차 계산 기준변수값에 따라 달라진다. 기존 NCAR 알고리즘에서는 비차등위상차 계산 기준변수로 차등위상차 값을 이용하였으며, 차등위상차 값이 45° 이상일 때는 window size가 10개, 30° 와 45° 사이의 값에서는 20개, 차등위상차 값 30° 이하 일 때는 30개이며, 각각 window size만큼 차등위상차 값을 사용하여 비차등위상차를 계산하게 된다. 기존 비차등위상차 계산 알고리즘을 적용한 결과는 그림 2.21과 같다.

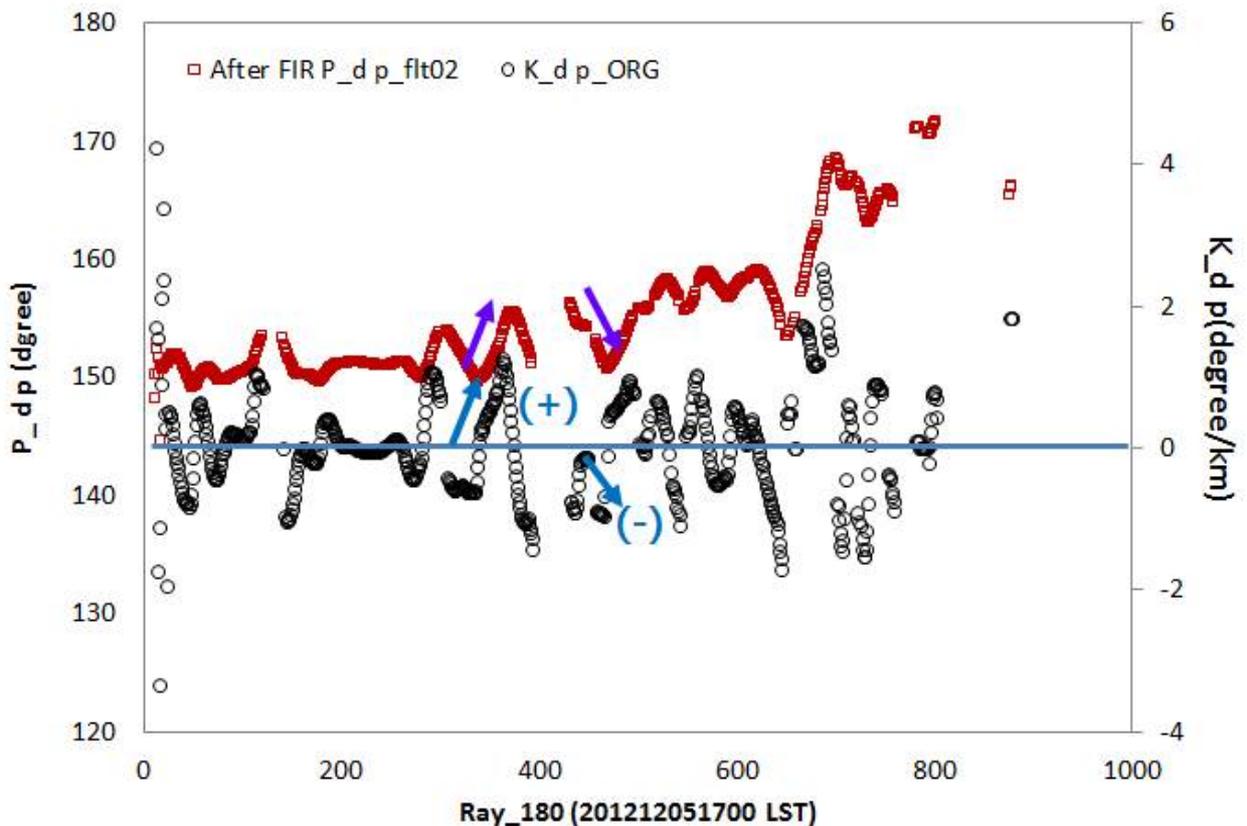


그림 2.21 비차등위상차 계산 기존결과(2012년 12월 5일 1700 KST)

그림 2.21을 살펴보면, 차등위상차 값이 증가하는 경우 비차등위상차 값도 비례하여 증가하고 양의 값을 나타내며, 차등위상차 값이 감소하는 경우 비차등위상차 값도 감소하고 음의 값을 나타내고 있다. 또한 차등위상차 값의 변화가 크지 않으면 비차등위상차 값은 0에 가까운 값으로 계산되었다. 대체적으로 차등위상차 값의 변화에 따라 비차등위상차 값의 변화가 비슷한 경향을 나타내어 어느 정도 비차등위상차 값이 잘 계산된 것으로 판단되나 차등위상차 값 초기부분에 비차등위상차 값의 변동이 매우 심하게 나타났다. 이는 초기 차등위상차 값이 Null인 경우에 처리되지 않고 바로 비차등위상차 값으로 계산되어 발생하는 것으로서 개선 필요성이 있는 것으로 나타났다.

기존 비차등위상차 계산은 정확한 가이드라인이 제시되어 있지 않기 때문에 각 연구목적에 적합하게 비차등위상차를 계산 하였다. 따라서 본 연구에서는 비차등위상차 계산 관련 기존 연구들을 조사하였으며, 표 2.7은 기존 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 계산 기준과 다른 연구들의 비차등위상차 계산 기준을 비교한 표이다. 표 2.7을 살펴보면, 기존 NCAR 알고리즘에서는 차등위상차 값을 기준으로 window size를 결정하였으나 관련 연구들은 반사도  $Z$ 를 기준으로 window size를 결정하였다. 또한 window size를 비교하면 NCAR 알고리즘에서는 window size가 기존 관련 연구들보다 반사도 값이 클수록 더 촘촘하게 비차등위상차를 계산하는 것을 알 수 있다. 또한 window size에 대한 개선은 비차등위상차 계산을 살펴본 후, 차후 진행할 예정이다.

표 2.7 비차등위상차 계산을 위한 기준변수 분류에 따른 차등위상차 값 사용 개수 비교

방법	기존	Wang and Chandrasekar (2009)	NOAA <sup>3)</sup>
내용	if $\phi_{DP} < 35$ : size=20	if $Z < 35$ : size=30	if $Z < 40$ : size=25
	if $35 < \phi_{DP} < 45$ : size=13	if $35 < Z < 45$ : size=20	if $Z \geq 40$ : size=9
	if $\phi_{DP} > 45$ : size=6	if $Z \geq 45$ : size=10	

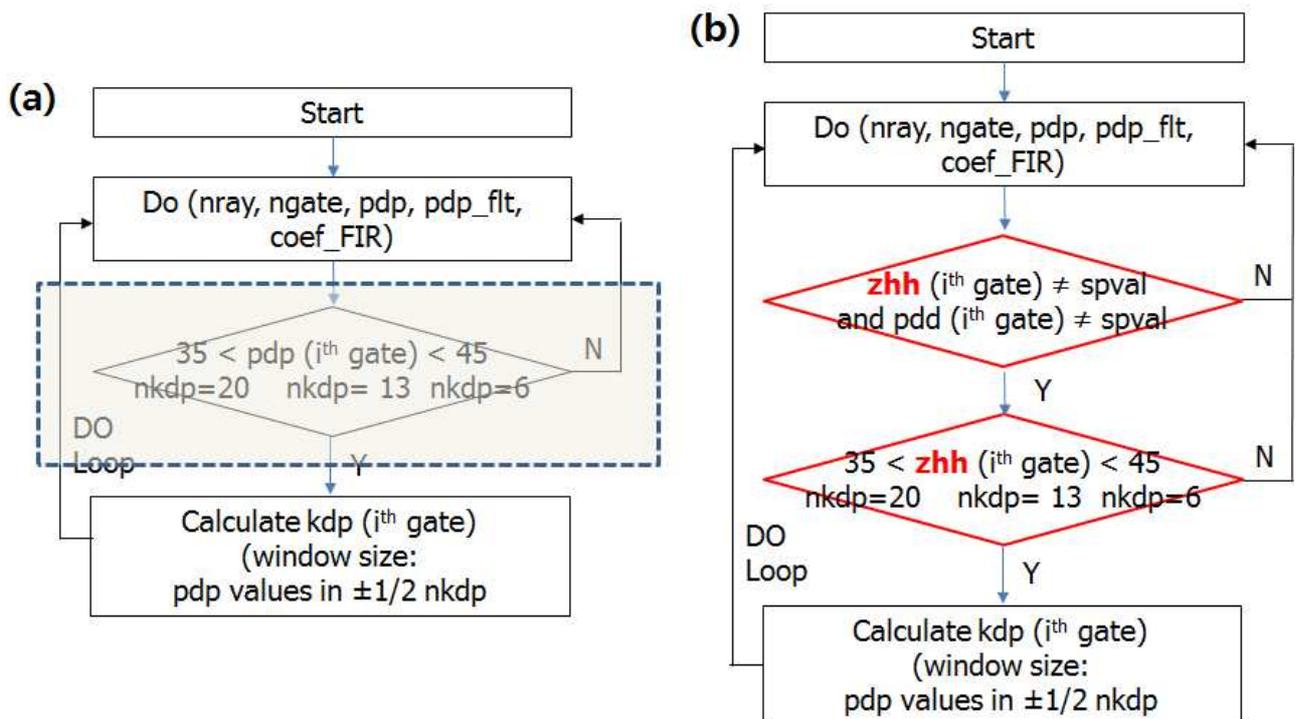
이에 따른 본 연구에서의 개선 사항은 다음과 같다.

- (1) 반사도를 기준으로 비차등위상차 계산을 위한 차등위상차의 window size 결정한다,
- (2) 초기 비차등위상차 값의 변동개선을 위한 차등위상차와 반사도가 Null 값이 아닌 경우 비차등위상차 값 계산한다.

위의 개선사항을 NCAR 알고리즘에 적용하였으며(표 2.8), 이를 흐름도로 나타내면 그림 2.22와 같다. 그림 2.22(a)의 박스부분이 개선대상이 되는 부분이며, 그림 2.22(b)의 빨간색 부분이 개선된 부분을 나타낸다.

표 2.8 기존 비차등위상차 계산과 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘 비교

구분	개선 전	개선 후
내용	if $\phi_{DP} < 35$ : size=20	if $Z < 35$ : size=20
	if $35 < \phi_{DP} < 45$ : size=13	if $35 < Z < 45$ : size=13
	if $\phi_{DP} > 45$ : size=6	if $Z > 45$ : size=6



3) NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) : 미국 국립해양대기청

그림 2.22 비차등위상차 계산과정 : (a) 개선 전, (b) 개선 후

(3) 사례분석

a. 사례 1 (2012년 12월 5일 1700 KST)

본 사례는 2012년 12월 5일 발생한 강설에 대한 사례이며, 이에 대하여 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘을 적용하였다. 비슬산 기준 정남방향 영역으로 차등위상차 값과 개선된 알고리즘 적용 전·후의 비차등위상차 값을 비교하였다. 차등위상차 값이 상승하는 부분에서 알고리즘 적용 전과 후의 비차등위상차 값 모두 (+) 값과 상승하는 경향을 나타내고 반대로 차등위상차 값이 하강하는 부분에서 알고리즘 적용 전과 후의 비차등위상차 값 모두 (-) 값과 하강하는 경향을 나타내어 차등위상차에 따른 비차등위상차 계산이 타당하게 되었음을 확인하였다. 하지만 기존 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값(K\_dp\_ORG)의 변동 폭이 개선된 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값(K\_dp\_NCAR)보다 변동 폭이 큰 것을 알 수 있다(그림 2.23 보라색 점선 박스 영역). 이는 비차등위상차 값을 과소 혹은 과대하게 계산하여 비차등위상차 값을 이용하여 강수량을 추정하는 경우에 강수량을 매우 과대하게 추정할 수 있음을 의미한다.

또한 개선된 NCAR 알고리즘으로 계산된 비차등위상차 값과 반사도  $Z$ 를 비교하였다(그림 2.24). 35dBZ 이상의 강한 반사도에서 비차등위상차 값도  $1^{\circ}/\text{km}$  이상 계산되어 비차등위상차 값이 어느 정도 타당하게 계산되었음을 확인하였다.

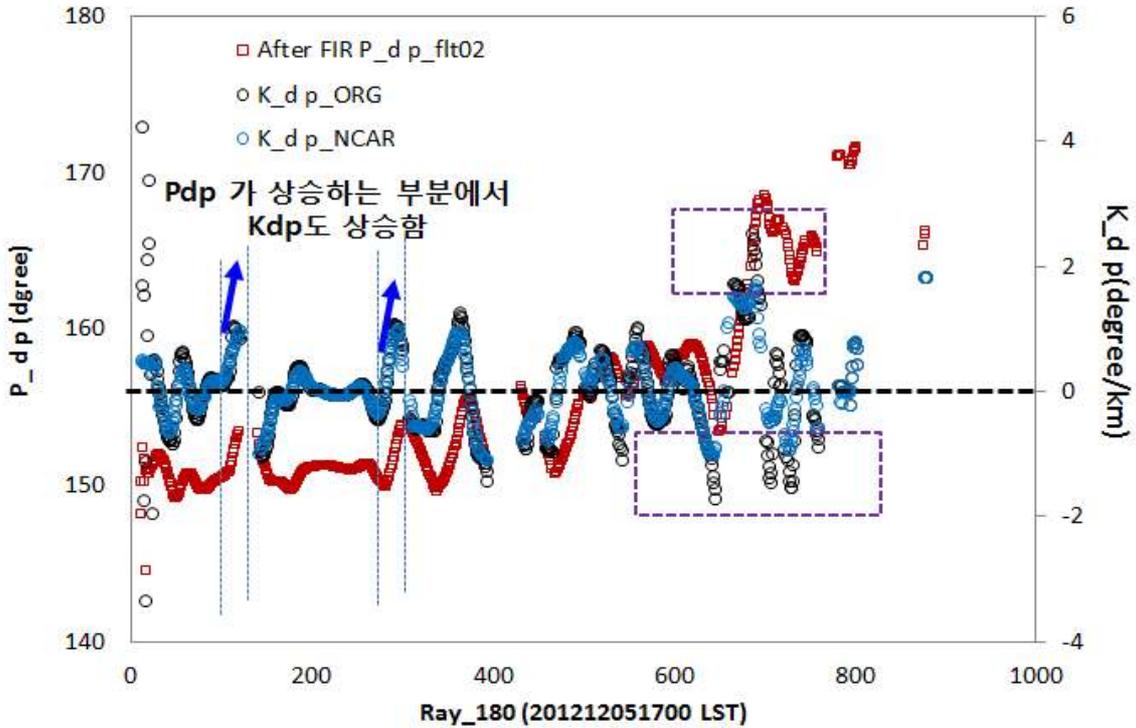


그림 2.23 기존과 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘을 적용한 결과 비교

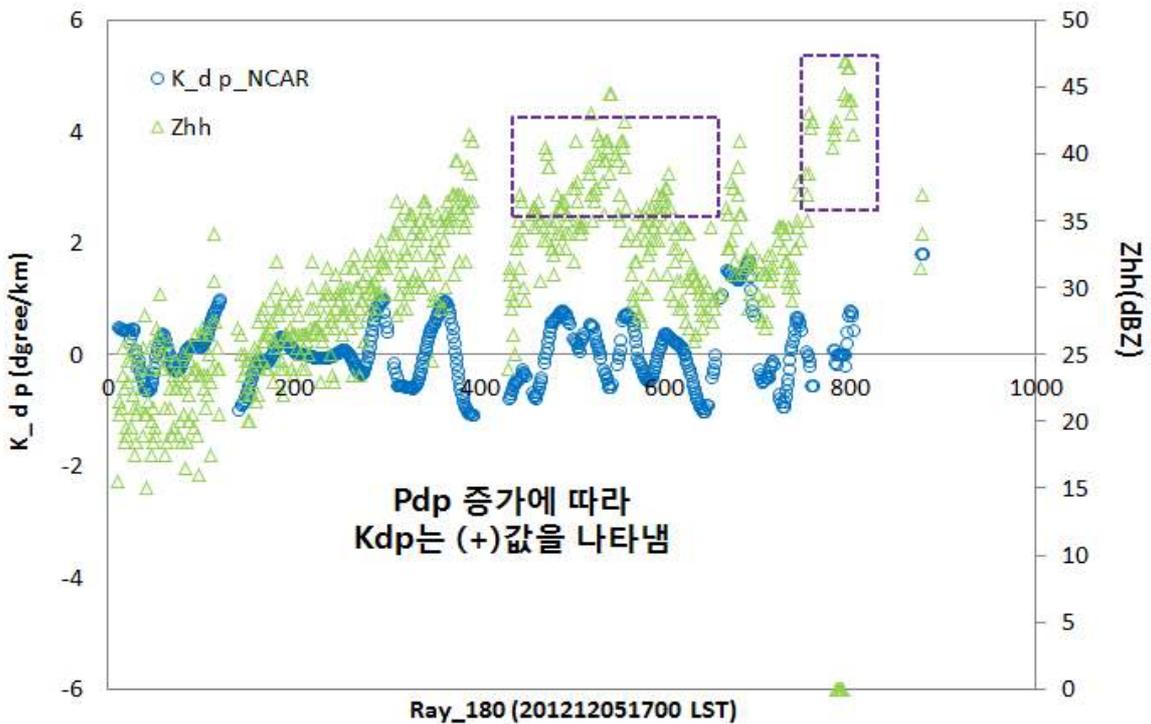


그림 2.24 개선된 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값과 반사도의 비교

다음으로 본 연구에서는 앞서 소개한 각 방법별로 계산한 비차등위상차 값의 표준편차(변동폭)를 산정하였다(표 2.9). 기존 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값의

표준편차는  $1.445^{\circ}/\text{km}$ , 개선된 NCAR 알고리즘은  $0.358^{\circ}/\text{km}$ , Wang and Chandrasekar 방법은  $0.273^{\circ}/\text{km}$ , NOAA 방법은  $0.341^{\circ}/\text{km}$ 로 산정되어, 기존 NCAR 알고리즘의 표준편차 변동성이 가장 크고 Wang and Chandrasekar 방법의 표준편차가 가장 작았다. 이는 window size에 따라 비차등위상차 값이 민감하게 계산될 수 있음을 의미하며, 우리나라 강우사례에 적합한 방법을 위해 지속적인 개선이 필요하다.

표 2.9 기존과 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘 비교

구분	기존 NCAR	개선 NCAR	Wang and Chandrasekar	NOAA
표준편차 ( $^{\circ}/\text{km}$ )	1.445	0.358	0.273	0.341

b. 사례 20130823 1100 KST

본 사례는 2013년 8월 23일 발생한 장마에 대한 사례이며, 이에 대하여 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘을 적용하였다. 비슬산 기준 북동방향 영역으로 차등 위상차 값과 개선된 알고리즘 적용 전·후의 비차등위상차 값을 비교하였다. 차등 위상차 값이 급상승하는 부분(550~800 bin)에서 알고리즘 적용 전과 후의 비차등 위상차 값 모두 매우 큰 (+) 값과 상승하는 경향을 나타내고 있으며, 차등위상차 값의 증감이 없는 부분(800 bin~)에서 알고리즘 적용 전과 후의 비차등위상차 값 모두 0° /km 근처의 값이 나타나 차등위상차에 따른 비차등위상차 계산이 타당하게 되었음을 확인하였다. 본 사례에서도 앞선 사례와 동일하게 기존 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값(K\_dp\_ORG)의 변동 폭이 개선된 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값(K\_dp\_NCAR)보다 변동 폭이 큰 것을 알 수 있다(그림 2.25 보라색 점선 박스 영역 참조).

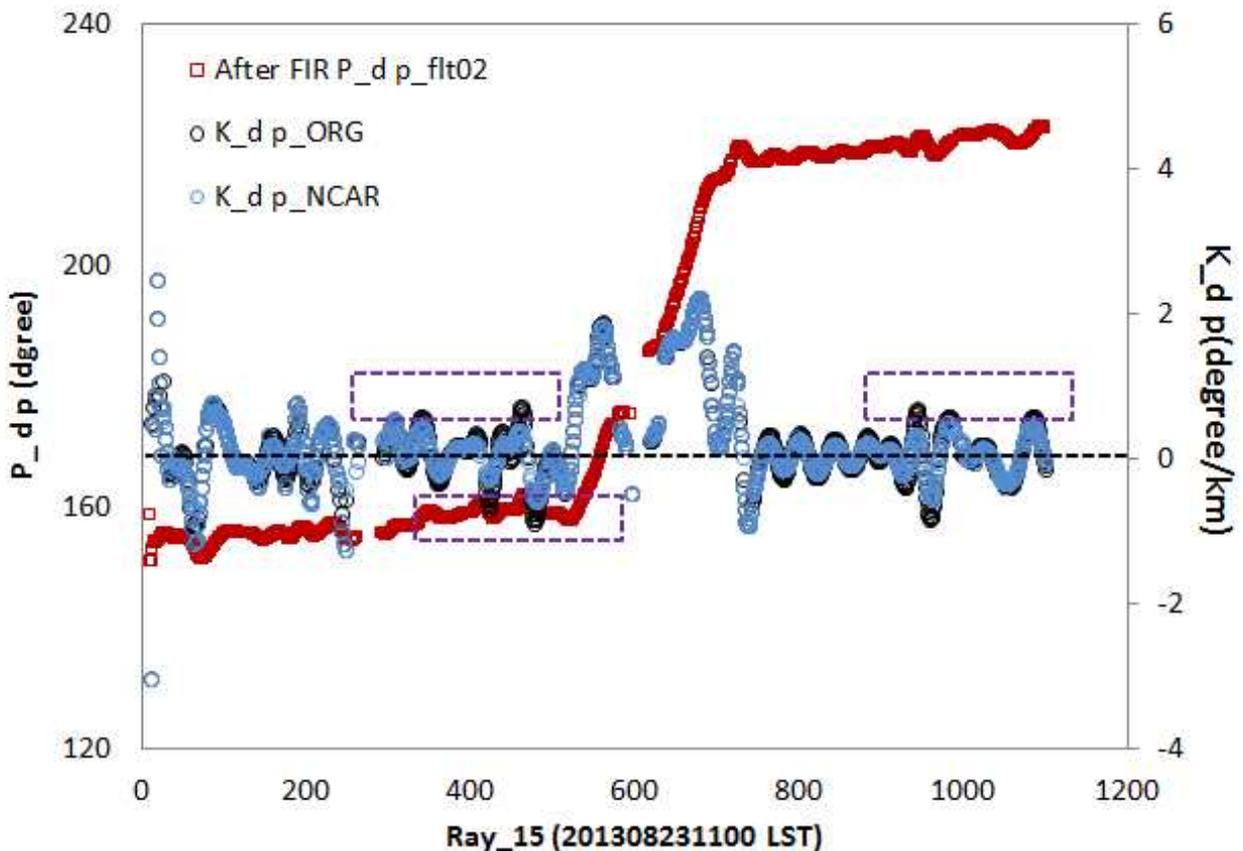


그림 2.25 기존과 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘을 적용한 결과 비교

또한 개선된 NCAR 알고리즘으로 계산된 차등위상차 값과 반사도를 비교하였다(그림 2.26). 그림 2.24에서 차등위상차 값이 급상승하고(550~800 bin) 40dBZ 이상의 강한 반사도(강우강도 40~60mm/hr)에서 비차등위상차 값도  $2^{\circ}/\text{km}$  이상 큰 값으로 계산되었으며(그림 2.26 보라색 점선 박스 영역), 약한 반사도(강우강도 4~6mm/hr)에서는 상대적으로 비차등위상차 값이 작게 계산되어 개선된 NCAR 알고리즘에 의하여 비차등위상차 값이 어느 정도 타당하게 계산되었음을 확인하였다. 이는 강우강도가 강한 영역에서는 비차등위상차 값이 크고 민감하게 반응하게 되므로 비차등위상차 값을 활용할 필요성이 있음을 확인하였다(Zrnich and Ryzhkov, 1996; Gorgucci and Scarchilli, 1997).

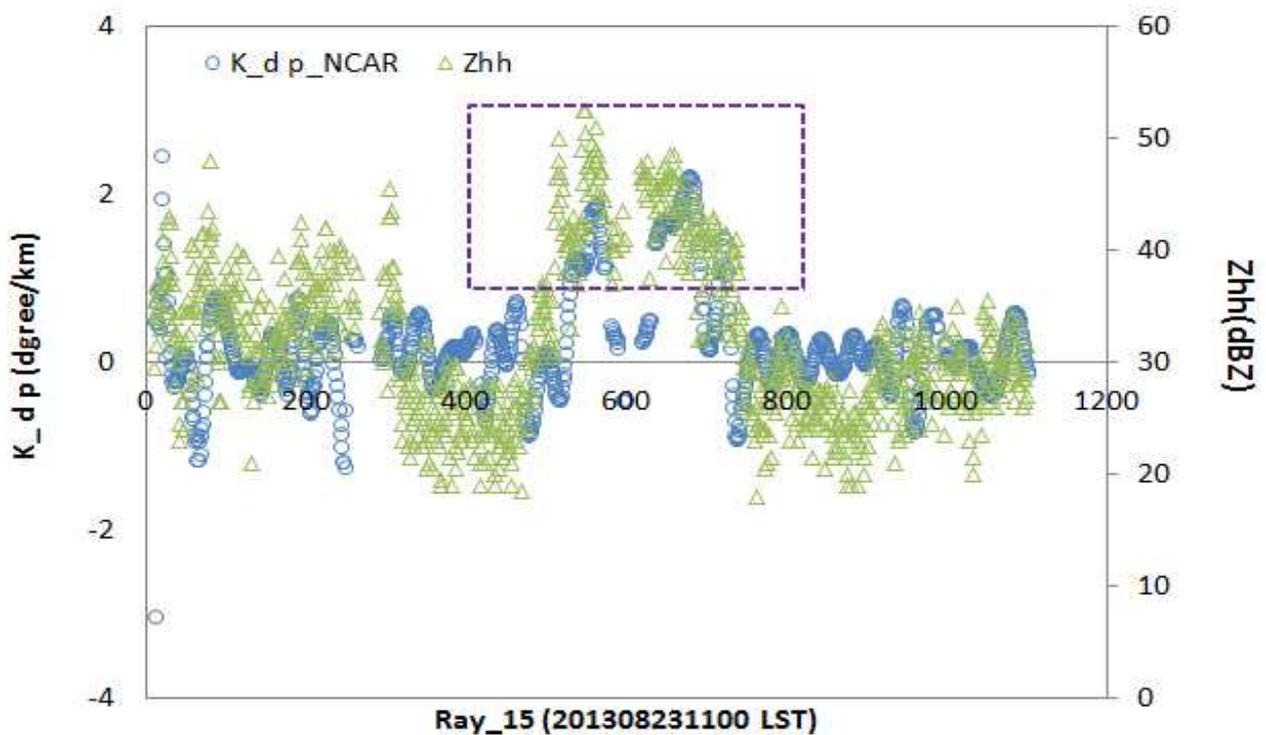


그림 2.26 개선된 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값과 반사도의 비교

다음으로 본 연구에서는 앞서 소개한 각 방법별로 계산한 비차등위상차 값의 표준편차(변동폭)를 산정하였다(표 2.10). 기존 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값의 표준편차는  $0.751^{\circ}/\text{km}$ , 개선된 NCAR 알고리즘은  $0.619^{\circ}/\text{km}$ , Wang and Chandrasekar 방법은  $0.568^{\circ}/\text{km}$ , NOAA 방법은  $0.657^{\circ}/\text{km}$ 로 산정되어, 기존

NCAR 알고리즘의 표준편차가 가장 크고 Wang and Chandrasekar 방법의 표준 편차가 가장 작아 앞선 사례와 동일한 결과를 나타냈다.

표 2.10 기존과 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘 비교

구분	기존 NCAR	개선 NCAR	Wang and Chandrasekar	NOAA
$SD(K_{dp})$ ( $^{\circ}$ /km)	0.751	0.619	0.568	0.657

c. 사례 20130914 0920 KST

본 사례는 2013년 9월 14일 발생한 태풍에 대한 사례이며, 이에 대하여 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘을 적용하였다. 비슬산 기준 북동방향 영역으로 차등 위상차 값과 개선된 알고리즘 적용 전·후의 비차등위상차 값을 비교하였다. 차등 위상차가 급상승하는 초기 부분(30~600 bin)에서 알고리즘 적용 전과 후의 비차등 위상차 값 모두 매우 큰 (+) 값과 상승하는 경향을 나타내고 있으며, 차등위상차 값의 증감이 없는 부분(600 bin~)에서 알고리즘 적용 전과 후의 비차등위상차 값 모두  $0^\circ / \text{km}$  근처의 값이 나타나 차등위상차에 따른 비차등위상차 계산이 타당하게 되었음을 확인하였다. 본 사례에서도 앞선 사례와 동일하게 기존 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값( $K_{dp\_ORG}$ )의 변동 폭이 개선된 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값( $K_{dp\_NCAR}$ )보다 변동 폭이 큰 것을 알 수 있다(그림 2.27 보라색 점선 박스 영역).

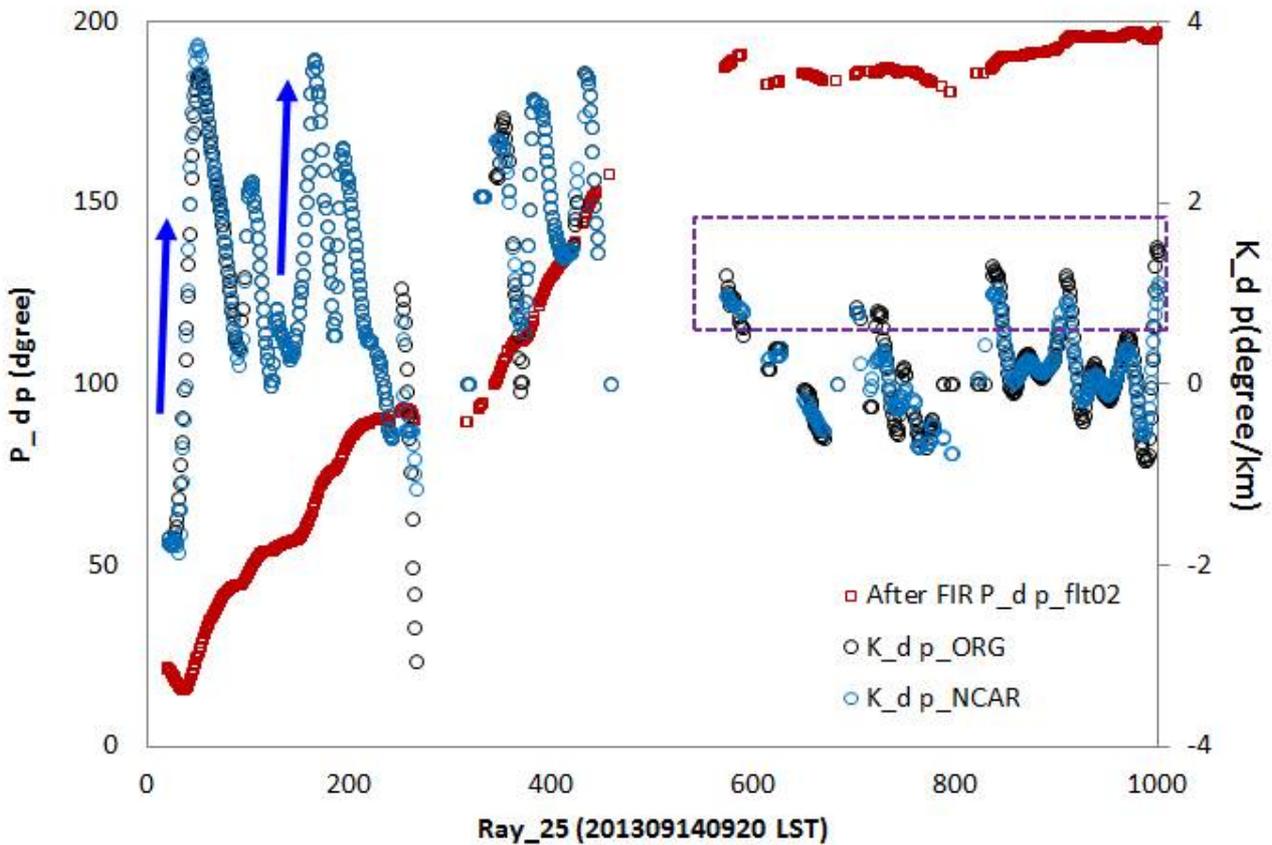


그림 2.27 기존과 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘을 적용한 결과 비교

또한 개선된 NCAR 알고리즘으로 계산된 비차등위상차 값과 반사도를 비교하였다 (그림 2.28 참조). 40dBZ 이상의 강한 반사도(강우강도 40~60mm/hr)에서 비차등 위상차 값도 최대 4° /km 이상 큰 값으로 계산되었으며(그림 2.28 보라색 점선 박스 영역), 약한 반사도(강우강도 4~6mm/hr)에서는 상대적으로 비차등위상차가 작게 계산되어 개선된 NCAR 알고리즘에 의하여 비차등위상차 값이 어느 정도 타당하게 계산되었음을 확인하였다.

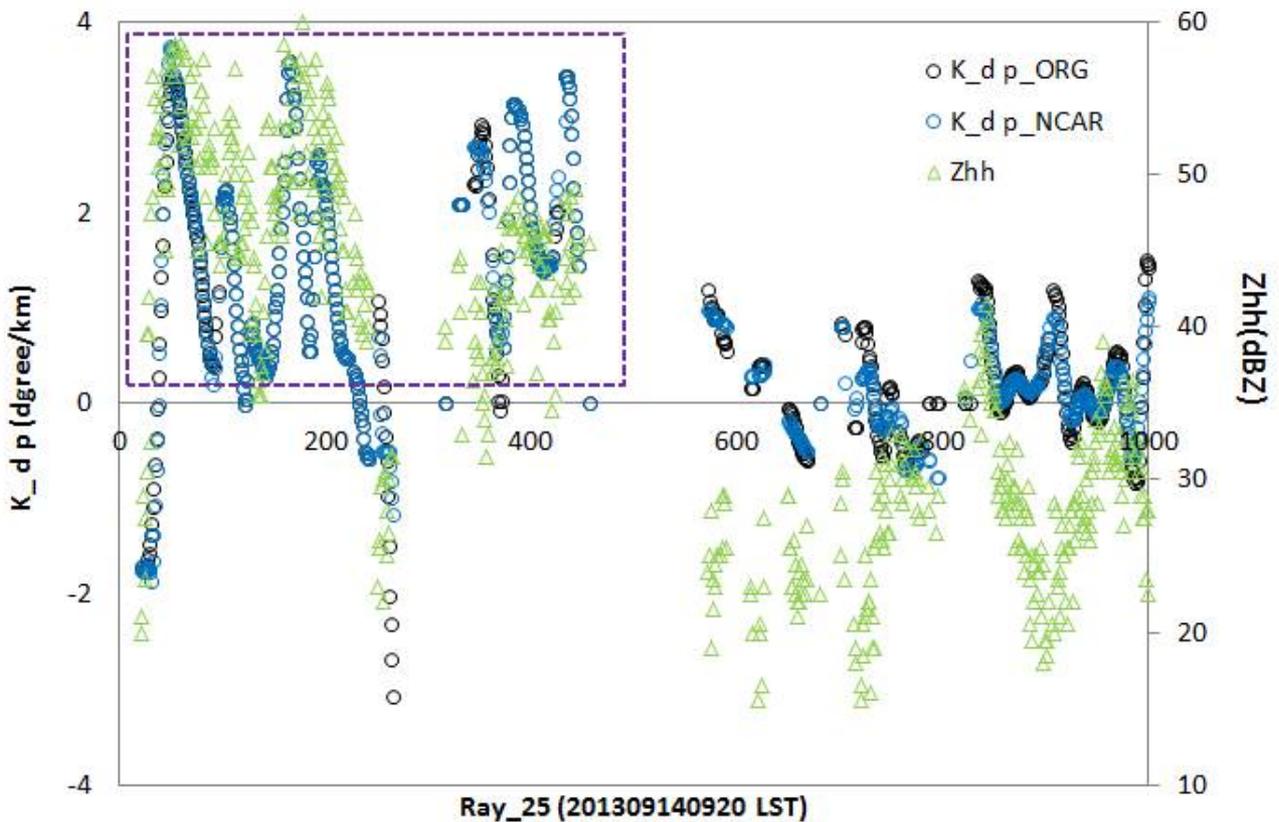


그림 2.28 개선된 NCAR 알고리즘의 비차등위상차와 반사도 값의 비교

다음으로 본 연구에서는 앞서 소개한 각 방법별로 계산한 비차등위상차 값의 표준편차(변동폭)를 산정하였다(표 2.11). 기존 NCAR 알고리즘의 비차등위상차 값의 표준편차는 0.505° /km, 개선된 NCAR 알고리즘은 0.419° /km, Wang and Chandrasekar 방법은 0.345° /km, NOAA 방법은 0.381° /km로 산정되어, 기존 NCAR 알고리즘의 표준편차 변동성이 가장 크고 Wang and Chandrasekar 방법의

표준편차가 가장 작아 앞선 사례와 동일한 결과를 나타냈다.

표 2.11 기존과 개선된 비차등위상차 계산 알고리즘 비교

구분	기존 NCAR	개선 NCAR	Wang and Chandrasekar	NOAA
표준편차 (° /km)	0.505	0.419	0.345	0.381

## 2.2.4 강수량 추정값 관계식 적용

본 연구에서는 기존 연구들에서 많이 사용되거나 제안한 S-밴드 이중편파레이더에 사용 가능한 강수량 추정값 관계식을 살펴보았다. 가장 널리 사용되는 단일편파 변수만을 사용하는  $R(Z)=0.0365 \times Z^{0.625}$  관계식(Marshall and Palmer, 1948)부터 조건별로 다양한 식을 적용하는 관계식 등 매우 다양한 강수량 추정값 관계식이 제안되었으며 다음과 같다.

$$R(Z) = 0.0365 \times Z^{0.625} \quad (\text{Marshall and Palmer, 1948}) \quad (2.5)$$

$$R(Z, Z_{DR}) = 0.0067 \times (Z^{0.93}) \times 10^{(0.1 \times -3.43 \times ZDR)} \quad (2.6)$$

(Bringi and Chandraseker, 2001)

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 90.3 \times (K_{DP}^{0.93}) \times 10^{(0.1 \times -1.69 \times ZDR)} \quad (2.7)$$

(Gorgucci and Scarchilli, 1997)

$$R(Z, Z_{DR}, K_{DP})_{\text{CSU (liquid part)}} \quad (2.8)$$

if  $K_{DP} \geq 0.3^\circ / \text{km}$  and  $Z \geq 38\text{dBZ}$  and  $Z_{DR} \geq 0.5\text{dB}$

$$\rightarrow R(K_{DP}, Z_{DR}) = 90.3 \times (K_{DP}^{0.93}) \times 10^{(0.1 \times -1.69 \times ZDR)}$$

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  $Z_{DR} \geq 0.5\text{dB}$

$$\rightarrow 0.0067 \times (Z^{0.93}) \times 10^{(0.1 \times -3.43 \times ZDR)}$$

if ( $K_{DP} < 0.3^\circ / \text{km}$  or  $Z < 38 \text{dBZ}$ ) and  $Z_{DR} < 0.5 \text{dB}$   
 $\rightarrow 0.0170 \times (Z^{0.7143})$

$R(Z, Z_{DR}, K_{DP})_{\text{NSSL}}$  (2.9)

$$R(Z) = 0.017 \times Z^{0.714}$$

$$R(K_{DP}) = 44.0 \times |K_{DP}^{0.93}| \text{sign}(K_{DP})$$

if  $R(Z) < 6 \text{mm/hr}$  :  $R = R(Z) / f_1(Z_{DR})$

if  $6 \leq R(Z) < 50 \text{mm/hr}$  :  $R = R(K_{DP}) / f_2(Z_{DR})$  ; (under condition:  $K_{DP} \geq 0.3^\circ / \text{km}$ )

if  $R(Z) \geq 50 \text{mm/hr}$  :  $R = R(K_{DP})$  ; (under condition:  $K_{DP} \geq 0.3^\circ / \text{km}$ )

where,  $f_1(Z_{DR}) = 0.4 + 5.0 |Z_{DR} - 1|^{1.3}$  ;  $f_2(Z_{DR}) = 0.4 + 3.5 |Z_{DR} - 1|^{1.7}$

$R(Z, Z_{DR}, K_{DP})_{\text{NCAR}}$  (for S-polarimetric radar) (2.10)

$$R(Z) = 0.027366 \times Z^{0.6944}$$

$$R(Z, Z_{DR}) = 0.00746 \times (Z^{0.945}) \times Z_{DR}^{(-4.76)}$$

$$R(K_{DP}) = 40.6 \times |K_{DP}|^{0.866} \text{sign}(K_{DP})$$

$$R(K_{DP}, Z_{DR}) = 136 \times |K_{DP}|^{0.968} \times Z_{DR}^{(-2.86)} \text{sign}(K_{DP})$$

Hybrid method: application of one among  $R(Z)$ ,  $R(Z, Z_{DR})$ ,  $R(K_{DP})$ ,  
and  $R(K_{DP}, Z_{DR})$  under some conditions

본 연구에서는 현재 우리나라에 적합하며 강수량 추정값을 가장 정확하게 나타낼 수 있는 강수량 추정값 관계식을 선정하기 위해 식(2.5)~식(2.10)을 백령도레이더 관측 자료를 이용하여 시험적용 하였다(그림 2.29).

시험적용 결과, 국내 도입되었거나 도입예정 중인 S-밴드 이중편파레이더의 변수 안정성과 선정된 관계식의 적용 가능성을 고려하여 이중편파변수의 조건(임계값)에 따라 식을 달리 적용하되 반사도와 차등반사도만을 이용하는 관계식으로 구성하였다. 이 식을 본 연구에서는 WRC 관계식으로 명명하였으며, 관계식은 식(2.11)과 같다.

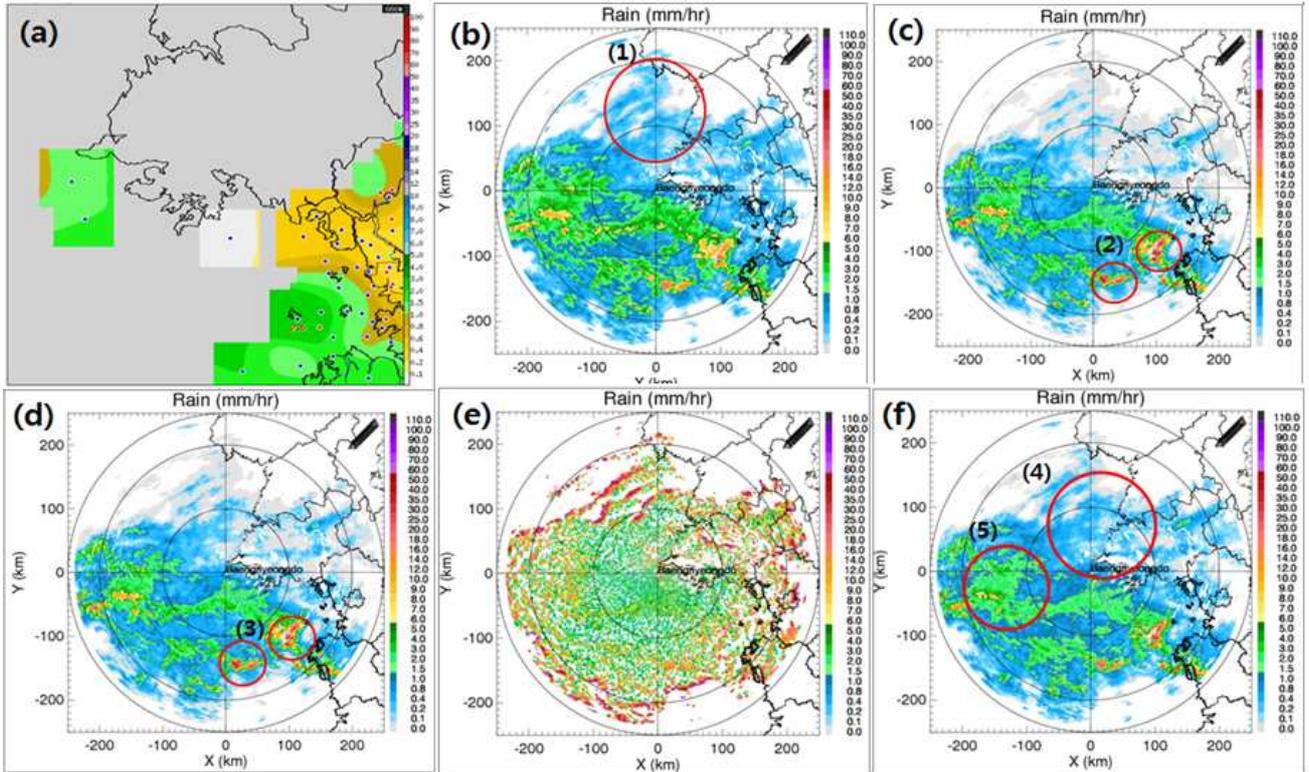


그림 2.29 다양한 S-밴드 이중편파레이더 강수량 추정값 관계식의 적용 예시 (사례 2014년 4월 27일 0700 KST):

- (a) AWS 강우분포
- (b)  $R(Z)$  적용
- (c)  $R(Z, Z_{DR})$  적용
- (d)  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})_{CSU}$
- (e)  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})$
- (f)  $R(Z, Z_{DR}, K_{DP})_{NSSL}$

$$R(Z, Z_{DR})(WRC \text{ 관계식}) \tag{2.11}$$

If  $Z \geq 38\text{dBZ}$  and  $Z_{DR} \geq 0.5\text{dB}$

$$\rightarrow R(Z, Z_{DR}) = 0.0067 \times (Z^{0.93}) \times 10^{(0.1 \times -3.43 \times ZDR)}$$

(Bringi and Chandraseker, 2001)

Otherwise

$$\rightarrow R(Z) = 0.0365 \times (Z^{0.625}) \text{ (Marshall and Palmer, 1948)}$$

## 2.3 이중편파변수 분포 분석

본 연구에서는 앞서 개선한 NCAR 알고리즘의 전처리 과정(차등위상차 접힘 풀기, FIR 필터링, 비차등위상차 계산)을 적용하여 이중편파변수를 산출하였으며, 산출된 이중편파변수의 분포 분석을 통하여 안정성을 검토하였다. 이를 위해 기존 연구들에서 제시된 각 이중편파변수별 산출범위와 특징들을 살펴보았다.

우선 National Weather Service Warning Decision Training Branch에서 제공하는 “Dual-polarization radar operations course”에서는 각 강수형태에 따른 이중편파변수의 범위를 제시하고 있다(표 2.12). 차등반사도의 경우 비는 최대 5dB이나 우박의 경우 6dB까지 산출될 수 있으며, 비차등위상차는 강수형태 구분 없이 최대 7° /km으로 제시하였다.

표 2.12 강수형태에 따른 차등반사도와 비차등위상차 범위

강수형태	$Z_{DR}$ (dB)	$K_{DP}$ (° /km)
Rain	0.0 ~ 5.0	0.0 ~ 7.0
Snow	-1.0 ~ 1.0	-0.8 ~ 7.0
Hail	-2.0 ~ 6.0	-0.5 ~ 7.0

Steiner et al.(1995)는 반사도 값을 임계값으로 하여 강수발생형태를 구분하고 이에 따른 반사도-차등반사도( $Z-Z_{DR}$ )와 반사도-비차등위상차( $Z-K_{DP}$ ) 관계를 제시하였다(그림 2.30). 반사도 값이 40dBZ보다 작으면 층상형 강수이며, 그 이상이면 대류형 강수로 구분하고 각 강수발생형태에 따른 반사도, 차등반사도, 비차등위상차 특징을 제시하였다(표 2.13). 특히 대류형에서 반사도-차등반사도 관계를 살펴보면, 반사도 값이 증가할수록 차등반사도 값이 비례하여 증가하여 큰 빗방울이 많아지는 현상을 나타내며, 이는 Staka, et al.(2000)이 제시한 그림 2.30에서도 알 수 있다. 또한 반사도-비차등위상차 관계에서는 반사도 값의 증가에 비례하여 비차등위상차 값이 증가하면 수 농도가 증가함을 의미한다(Zrníc and Ryzhkov, 1996).

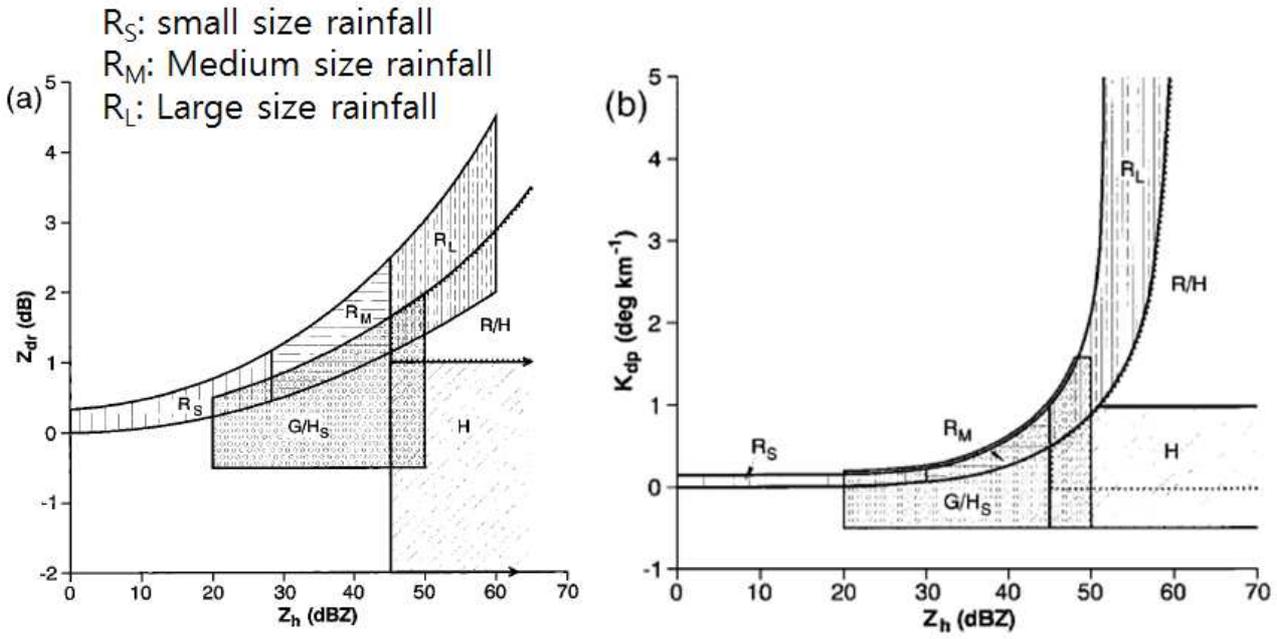


그림 2.30 강수발생유형에 따른 이중편파변수 간 관계 : (a) 반사도-차등반사도 관계, (b) 반사도-비차등위상차 관계

표 2.13 강수발생유형에 따른 반사도-차등반사도와 반사도-비차등위상차 관계(1: 기상레이더센터, 2013b; 2: Straka et al., 2000; 3: Zrnice and Ryzhkov, 1996)

강수형태	구분	특징	참고
층상형 ( $Z < 40\text{dBZ}$ )	$Z-Z_{DR}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일정값 중심으로 모여 있음</li> <li>- 오차없는 경우 0dB 값 중심으로 모여 있음</li> <li>• 20dBZ 기준</li> <li>- <math>Z &lt; 20 \rightarrow Z_{DR} &lt; \pm 3\text{dB}</math> ; <math>Z &gt; 20 \rightarrow 0 &lt; Z_{DR} &lt; 1\text{dB}</math></li> </ul>	기상레이더센터(2013b) <sup>1</sup>
	$Z-K_{DP}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일정값(<math>0^\circ/\text{km}</math>) 중심으로 모여 있음</li> </ul>	
대류형 ( $Z \geq 40\text{dBZ}$ )	$Z-Z_{DR}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Z</math> 증가에 비례하여 <math>Z_{DR}</math> 증가: 큰 빗방울 증가</li> </ul>	Straka et al.(2000) <sup>2</sup>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20dBZ 기준: <math>Z &lt; 20 \rightarrow Z_{DR} &lt; \pm 2\text{dB}</math></li> <li>• 50dBZ 이상: <math>Z_{DR} &gt; 0\text{dB}</math></li> </ul>	기상레이더센터(2013b) <sup>1</sup>
	$Z-K_{DP}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Z</math> 증가에 비례하여 <math>K_{DP}</math> 증가: 수농도 증가</li> </ul>	Zrnice et al.(1996) <sup>3</sup>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40dBZ 이상: <math>Z_{DR} &gt; 0\text{dB}</math></li> </ul>	기상레이더센터(2013b) <sup>1</sup>

a. 사례 20120917 1100 KST

본 사례는 2012년 9월 17일 발생한 태풍에 대한 사례이며, 이에 대한 반사도-차등반사도와 반사도-비차등위상차 관계를 살펴보았다(그림 2.31). 반사도-차등반사도 관계를 살펴보면, 차등반사도는 대부분 0~2.5dB 사이로 강수기준범위(0~5dB)에 존재하나 전체평균이 0보다 높아 차등반사도 보정이 필요할 것으로 판단된다. 다음으로 반사도-비차등위상차 관계를 살펴보았으며, 비차등위상차 값은  $-1 \sim 2^\circ / \text{km}$  사이에 존재하며 반사도 값이 40dBZ까지는 0을 중심으로 모여 있으나 그 이상에서는 증가하는 경향을 나타냈다. 반사도-차등반사도와 반사도-비차등위상차 관계 모두 어느 정도 타당한 범위에 속하며 기존 이중편파결과와 일치함을 확인하였다.

b. 사례 20130713 0410 KST

본 사례는 2013년 7월 13일 발생한 장마에 대한 사례이며, 이에 대한 반사도-차등반사도와 반사도-비차등위상차 관계를 살펴보았다(그림 2.32). 반사도-차등반사도 관계를 살펴보면, 반사도 값에 비례하여 차등반사도 값이 증가하는 경향을 나타내며, 특히 차등반사도는 대부분  $-1.0 \sim 4.0\text{dBZ}$  사이로 강수기준범위에 존재하나 전체평균이 0보다 높아, 차등반사도 보정이 필요할 것으로 판단된다. 다음으로 반사도-비차등위상차 관계를 살펴보았으며, 비차등위상차 값은  $-2 \sim 6^\circ / \text{km}$  사이에 존재하고 반사도 값이 40dBZ까지는 0을 중심으로 모여 있으나 40dBZ 이상의 강한 강수에서는 그 이상에서는 비차등위상차 값이 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 강한 강수 추정에서 비차등위상차 값이 중요한 변수로 활용됨을 나타내는 예라 할 수 있다. 앞선 사례와 마찬가지로 반사도-차등반사도와 반사도-비차등위상차 관계 모두 어느 정도 타당한 범위에 속하며 기존 이중편파결과와 일치함을 확인하였으며, NCAR 알고리즘의 전처리 과정이 잘 개선되었음을 확인하였다.

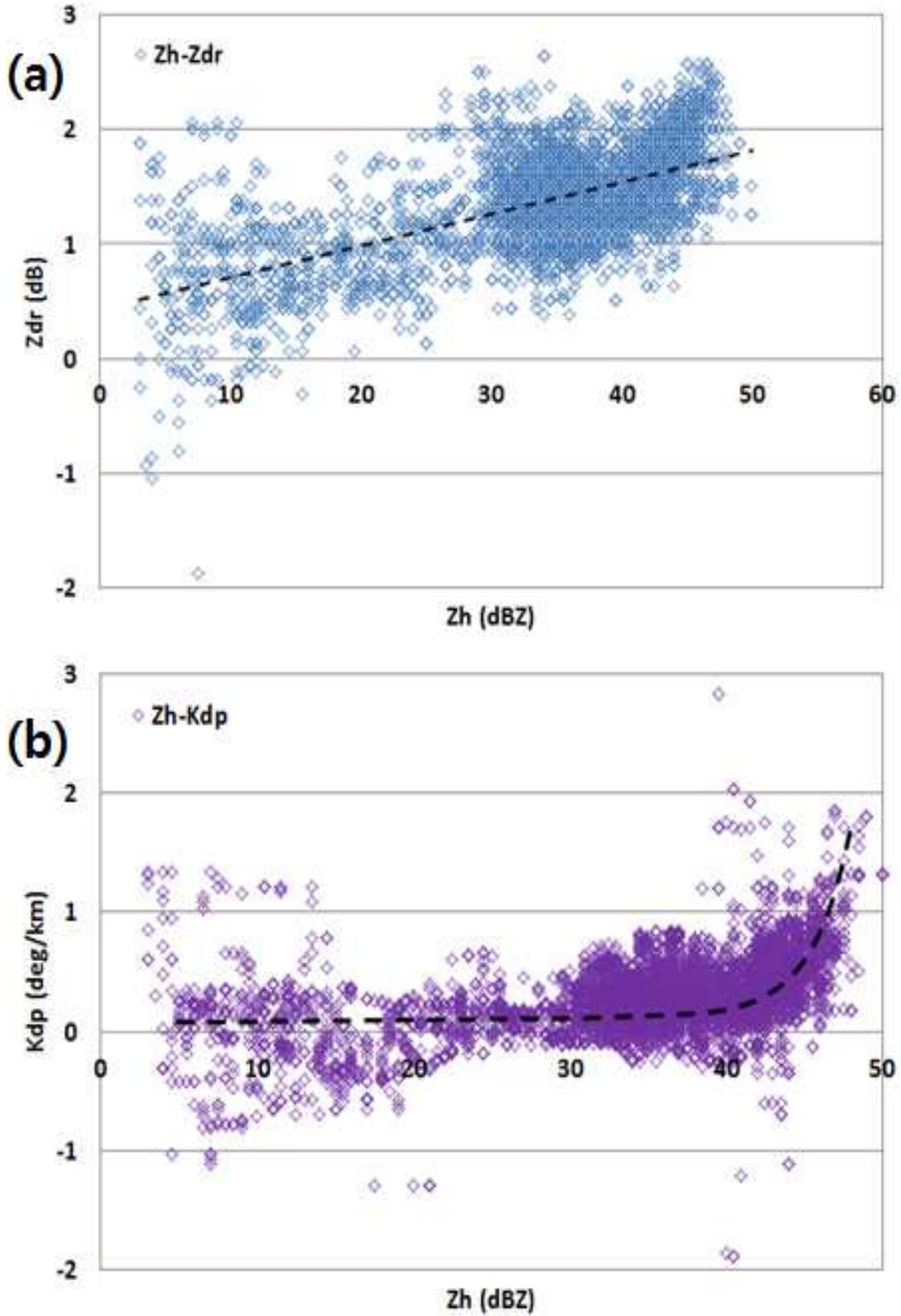


그림 2.31 이중편파변수 간 관계 : (a) 반사도-차등반사도 관계, (b) 반사도-비차등 위상차 관계 (사례 2012년 9월 17일 1100 KST)

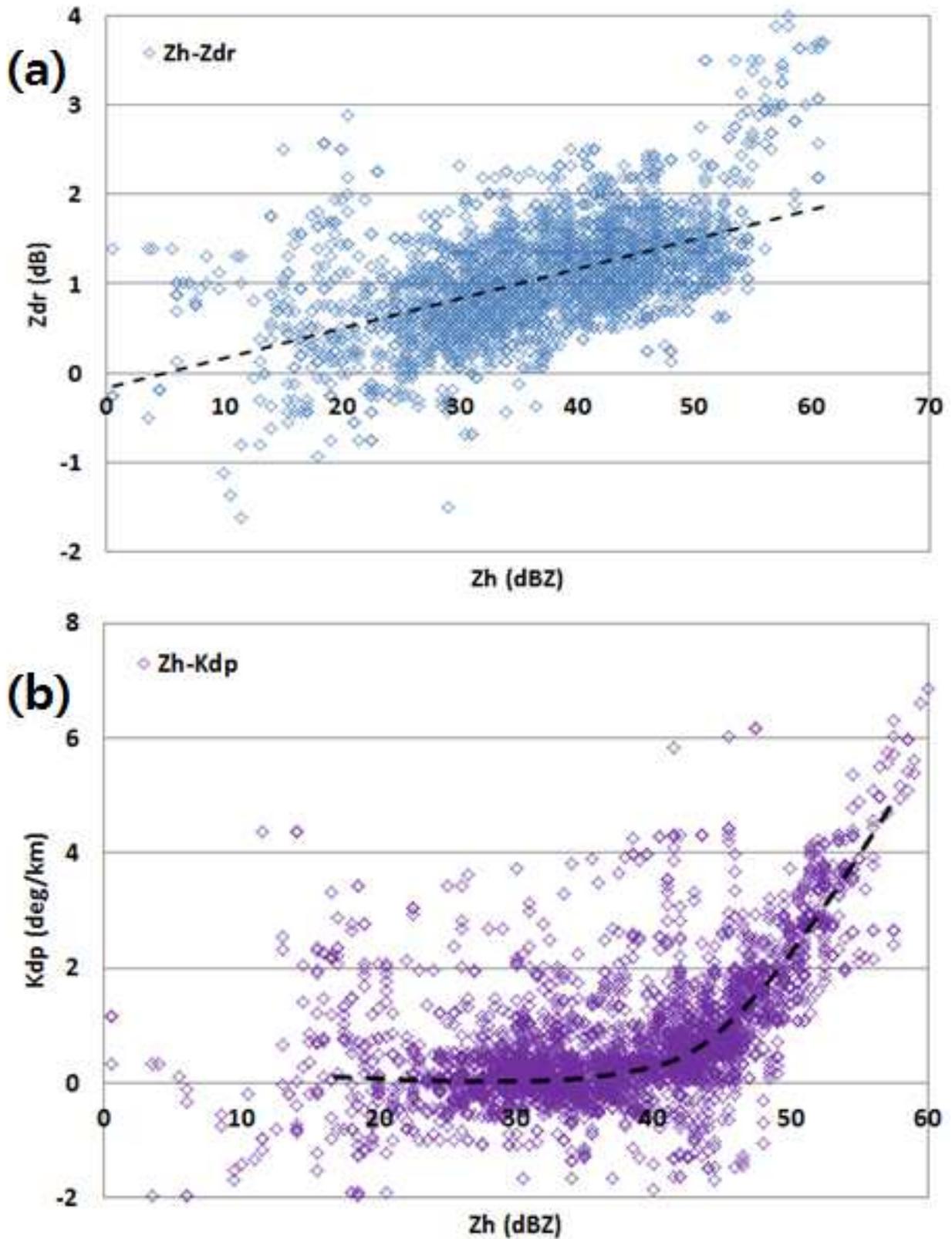


그림 2.32 이중편파변수 간 관계 : (a) 반사도-차등반사도 관계, (b) 반사도-비차등 위상차 관계 (사례 2013년 7월 13일 0410 KST)

### 제3장 강수량 추정값 산출 및 분석

본 연구에서는 WRC 관계식을 이용하여 비슬산레이더 강수량 추정값을 산출하고 검증하기에 앞서, 단일/이중편파변수 사용에 따른 강수량 추정값 정확도 향상 정도를 평가하였다. 따라서 2012년 여름철 3개 사례에 대하여 기상레이더센터에서 기존에 사용하고 있는 단일편파변수만을 이용하는  $R(Z)=0.0365 \times Z^{0.625}$ (이하 M-P 관계식)(Marshall and Palmer, 1948)의 강수량 추정값과 이중편파변수를 이용하는 WRC 관계식의 강수량 추정값을 산출하고 정확도를 비교하였으며, 그 결과는 표 3.1과 그림 3.1과 같다.

결과를 살펴보면, M-P 관계식의 강수량 추정값의 Bias, RMSE, 상관계수가 각각 -0.110mm/hr, 0.575mm/hr, 0.773이나 WRC 관계식의 Bias, RMSE, 상관계수가 각각 -0.087mm/hr, 0.428mm/hr, 0.796으로 나타나 정확도가 각각 20.9%, 25.6%, 3.0% 향상되었다. 이는 이중편파변수를 사용한 WRC 관계식을 이용하여 레이더 강수량 추정값을 산출하는 것이 단일편파변수만을 사용한 기존 M-P 관계식보다 우수함을 나타낸 결과라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 WRC 관계식의 적용이 타당함을 증명하였다.

표 3.1 M-P 관계식과 WRC 관계식 강수량 추정값 정확도 비교

사례(KST)	관계식	Bias(mm/hr)	RMSE(mm/hr)	상관계수
20120630 0000~2400	M-P	-0.005	0.231	0.597
	WRC	-0.043	0.230	0.618
20120715 0000~1300	M-P	-0.134	0.863	0.936
	WRC	-0.013	0.434	0.967
20120823 0500~1600	M-P	-0.192	0.632	0.786
	WRC	-0.204	0.620	0.803
평균	M-P	-0.110	0.575	0.773
	WRC	<b>-0.087</b>	<b>0.428</b>	<b>0.796</b>

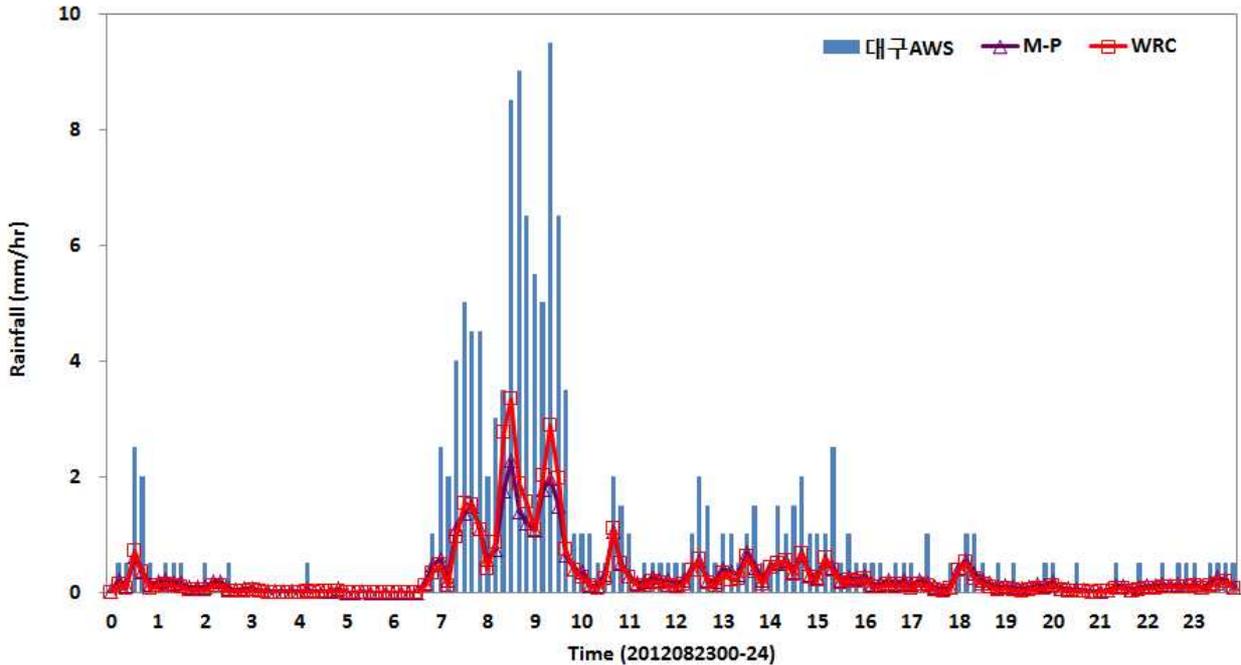


그림 3.1 M-P 관계식과 WRC 관계식 강수량 추정값 시계열 비교 (대구 AWS 지점, 사례 2012년 8월 23일 0000-2400 KST)

본 연구에서는 WRC 관계식의 적용 타당성을 확인하였으므로 앞선 15개 사례의 비슬산레이더 관측자료를 WRC 관계식에 적용하여 강수량 추정값을 산출하고 월별로 정리하였다(표 3.2와 그림 3.2~3.3 참조). 정량적 검증 결과를 살펴보면, 비슬산레이더 강수량 추정값 월별로 MAE는 최소 1.17에서 최대 4.76mm/hr, RMSE는 최소 1.91에서 최대 10.84mm/hr, 상관계수는 최소 0.39에서 최대 0.73으로 나타났다.

또한 전반적으로 비슬산레이더 강수량 추정값이 AWS 지상 강수량 관측값 보다 과소 추정하였다. 그림 3.2를 살펴보면, 그림 3.3(a)의 AWS 지상 강수량 관측값 분포가 비슬산레이더를 중심으로 북동에서 남서쪽으로 강한 강수대가 형성되어 있으며, 그림 3.3(b)의 비슬산레이더 관측반경내 레이더 강수량 추정값의 분포도 비슷하게 나타나고 있다. 하지만 비슬산레이더 강수량 관측값 분포의 강도가 AWS 강수분포보다 다소 약하게 표출되고 있어 과소 추정함을 알 수 있다. 다음으로 그림 3.3는 대구와 포항 AWS 지점의 지상 강수량 관측값과 비슬산레이더

강수량 추정값의 시계열을 나타내고 있다. 두 지점에서 비슬산레이더 강수량 추정값 시계열은 강수량 관측값 경향을 잘 나타내고 있으나 최고 관측값을 잘 추정하지 못하고 전체적으로 과소 추정하는 것으로 나타났다.

표 3.2 WRC 관계식을 이용한 강수량 추정값 정확도 검증

사례	MAE (mm/hr)	RMSE (mm/hr)	상관계수	
2012년	7월	2.75	3.92	0.39
	8월	4.20	6.66	0.42
2013년	6월	1.28	3.61	0.64
	7월	4.76	10.84	0.56
	8월	1.58	5.55	0.56
	9월	1.17	1.91	0.73
	10월	3.01	3.37	0.67
평균	2.68	5.13	0.57	

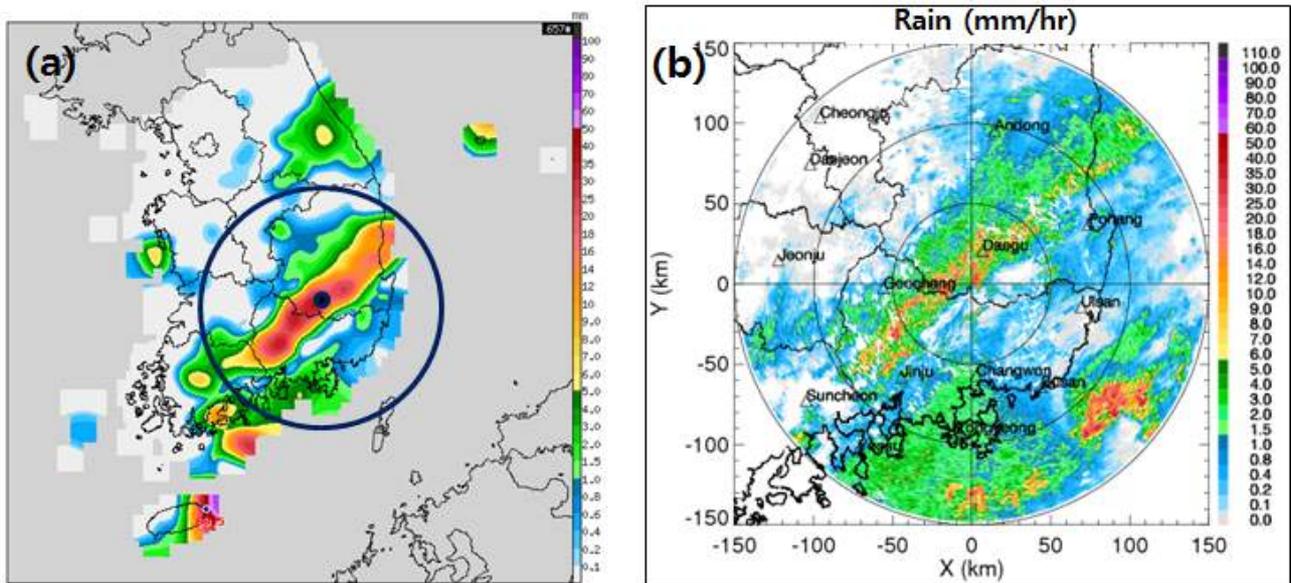


그림 3.2 비슬산레이더 강수PPI 영상 비교(0° 고도각, 사례 2014년 8월 23일) : (a) AWS 관측 강수분포, (b) 비슬산기상레이더 강수분포

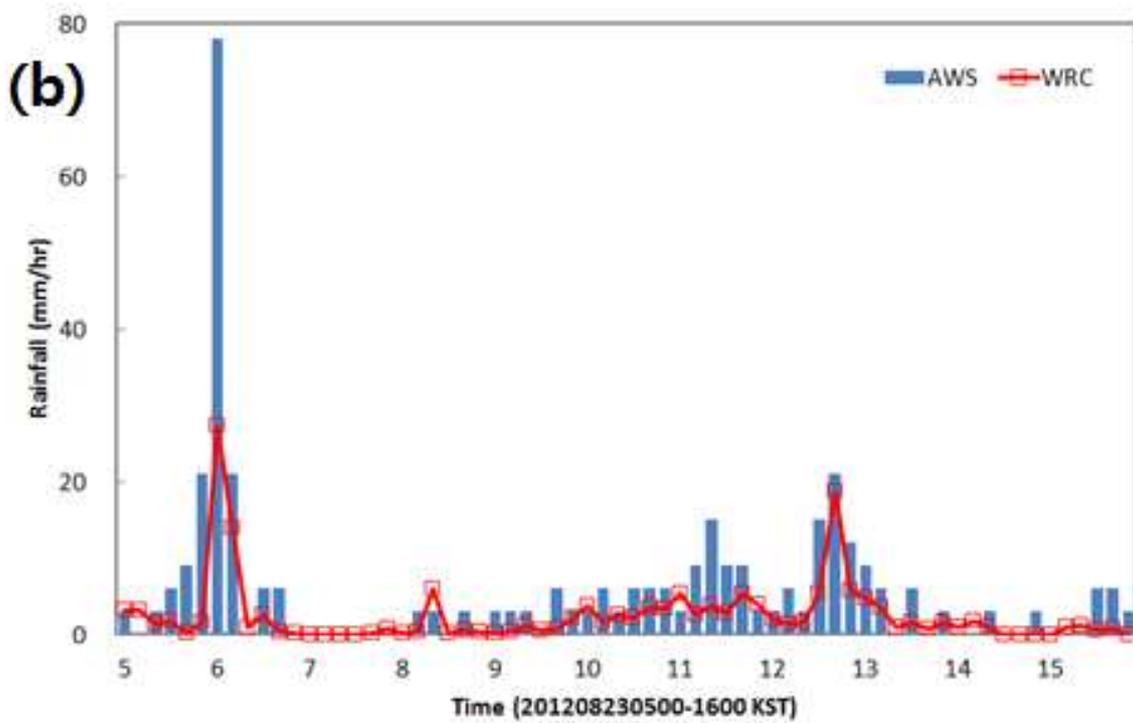
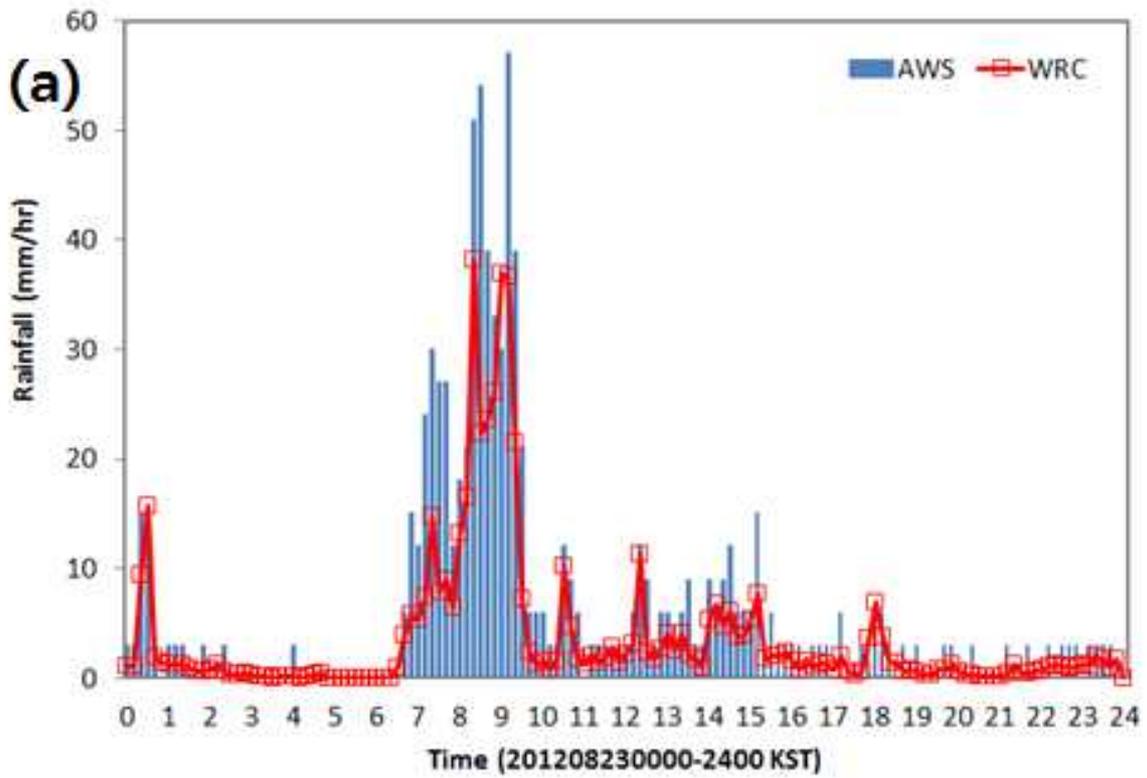


그림 3.3 AWS 지상 강수량 관측값과 WRC 관계식을 적용한 비슬산레이더 강수량 추정값 시계열 비교(사례 2014년 8월 23일): (a) 대구 AWS 지점, (b) 포항 AWS 지점

## 제4장 이중편파변수 보정오차 산출 및 검증

### 4.1 이중편파변수 보정오차 산출

WRC 관계식을 적용한 비슬산레이더 강수량 추정값은 강수량 관측값의 경향성을 잘 따라가나 전체적으로 과소 추정하였다. 따라서 비슬산레이더 강수량 추정값의 정확도 향상을 위해 이중편파변수의 오차를 산출하였다. WRC 관계식에 사용되는 편파변수는 반사도( $Z$ )와 차등반사도( $Z_{DR}$ )이므로 두 변수에 대한 오차를 계산하였다.

#### 4.1.1 방법

##### a. 반사도 보정오차

본 연구에서는 기상레이더센터(2013)의 ‘레이더자료 통합품질관리기술 개발’ 과업을 통해 개발된 반사도( $Z$ )-차등반사도( $Z_{DR}$ )-비차등위상차( $K_{DP}$ ) 사이의 자기 상관관계(self-consistency constraint) 방법을 이용하여 반사도 보정오차를 계산하였다. 이 방법은 레이더 파워(power)에 의한 영향이 없어 반사도 보정오차가 존재하지 않는 비차등위상차와 파워에 대한 변수인 반사도 간의 자기 상관관계를 이용하는 방법이며, 순서는 다음과 같다(기상레이더센터, 2013).

- (1) 강수입자크기분포(Drop Size Distribution, DSD)로부터 반사도-비차등위상차 관계식 유도
- (2)  $Z$ - $K_{DP}$  관계식을 이용하여 이중편파레이더의 반사도 격자 자료에 대한 비차등위상차 계산
- (3) 비차등위상차를 방위각 방향으로 적분하여 차등위상차 계산
- (4) 계산된 차등위상차와 관측된 차등위상차의 차이( $\theta$ )를 산출하여,  $\theta$ 를 식(4.1)과 (4.2)(Lee, et al., 2006)에 적용하여 반사도 보정오차( $\epsilon$ ) 계산(그림 4.1)

$$\tan \theta = \frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_{DP_{cal}} - \Phi_{DP_{obs}})}{\sum_{i=1}^n \Phi_{DP_{obs}}^2} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon \text{ (dB)} = 10b \times \log(\tan \theta) \quad (4.2)$$

여기서  $\Phi_{DP_{cal}}$  는 DSD로부터 계산된 이론적 차등위상차,  $\Phi_{DP_{obs}}$  는 비슬산레이더에서 관측된 차등위상차,  $\theta$  는 계산된 차등위상차와 관측된 차등위상차의 차이각,  $b$  는 경험적 상수(empirical constant),  $\varepsilon$  는 추정된 반사도 보정오차이다.

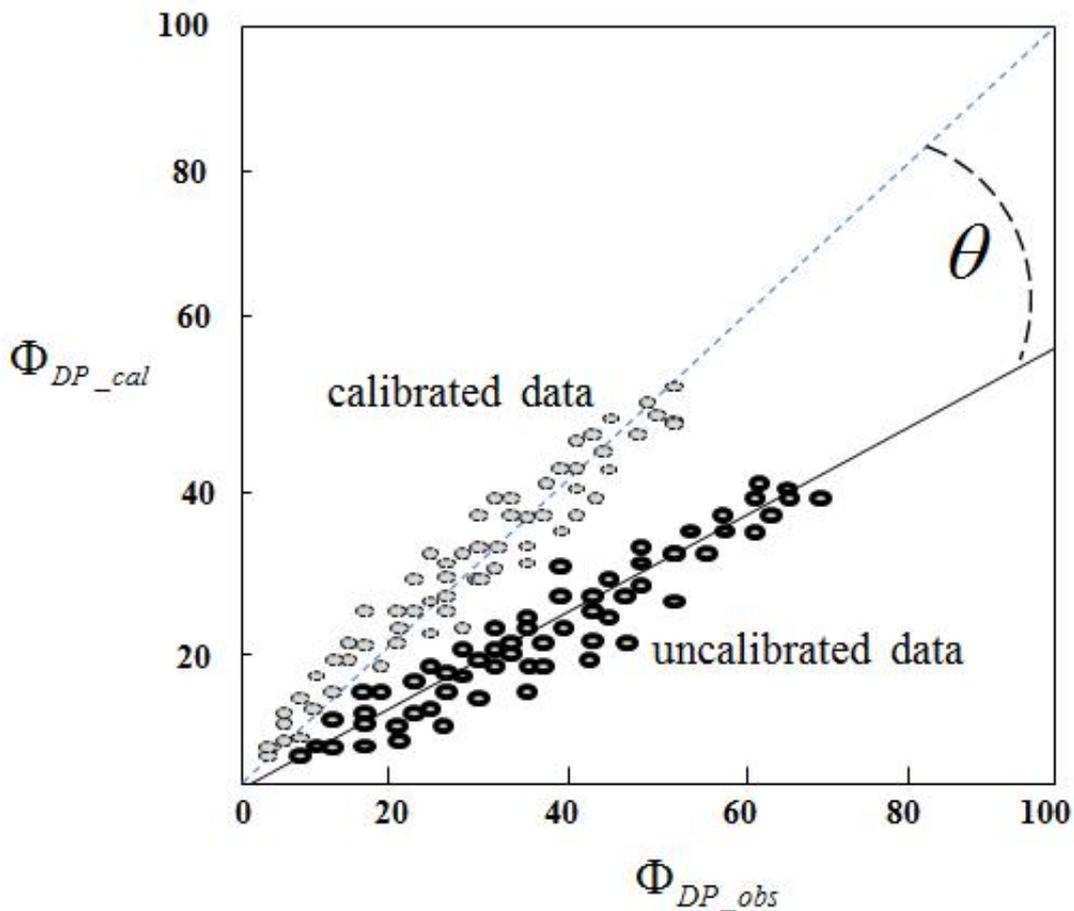


그림 4.1 자기 상관관계식에서  $\Phi_{DP_{cal}}$  와  $\Phi_{DP_{obs}}$  를 이용하여  $\theta$  를 구하는 예시

b. 차등반사도 보정오차

이중편파레이더에서 연직관측을 수행하면 밑에서 보는 강우모양이 원형이므로 차등반사도는 0dB가 된다(그림 4.2). 하지만 레이더 관측에 있어 오차발생 원인이 존재한다면 연직관측에 있어서 차등반사도는 0dB가 아니며, 이는 강수량 추정값의 정확도에 영향을 미치게 된다. 특히 차등반사도는 강수형태에 따라 다른 값을 나타내기 때문에 강수량 추정에 있어 매우 중요한 이중편파변수이다. 따라서 차등반사도의 오차를 보정하는 것은 매우 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 차등반사도 보정오차를 계산하기 위해 가장 널리 사용되는 방법은 레이더 연직관측자료에서 차등반사도 값을 이용하여 보정오차를 계산하는 방법이며, 이를 위해서 본 연구에서는 비슬산레이더의 연직관측자료를 이용하였다.

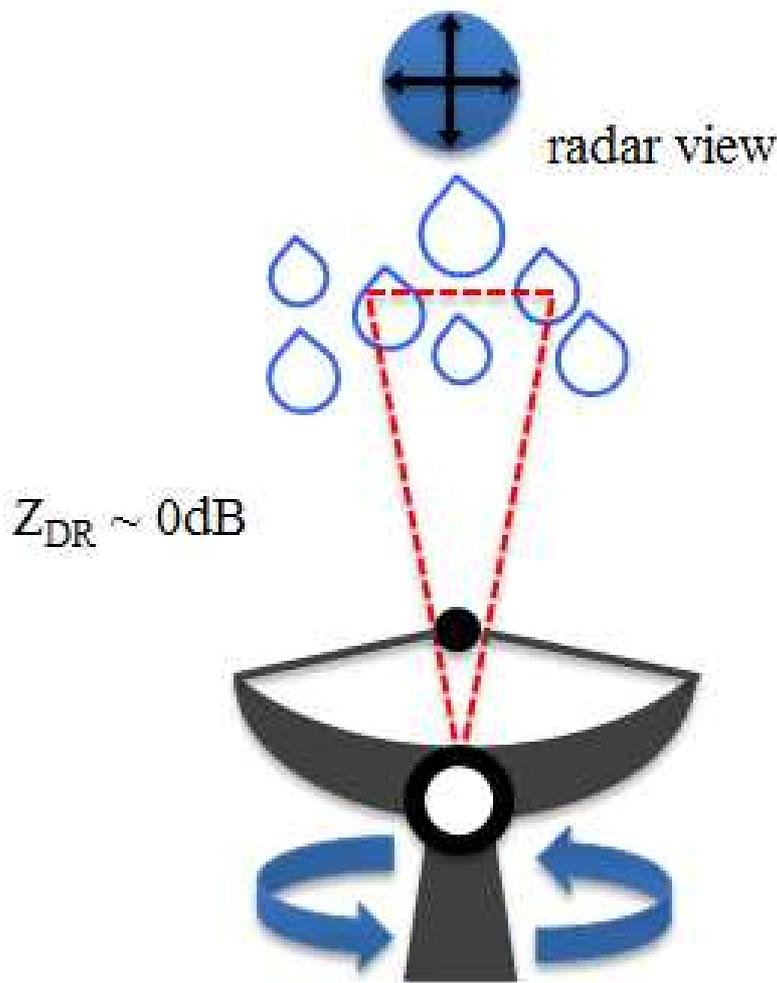


그림 4.2 차등반사도 보정오차 계산을 위한 이중편파레이더 연직관측 개념도

#### 4.1.2 보정오차 산출 결과 분석

반사도 보정오차는 자기상관관계식, 차등반사도 보정오차는 레이더 연직지향 관측자료를 이용하여 계산하였으며, 표 4.1은 2012년과 2013년 월별 반사도와 차등 반사도 보정오차를 나타낸다. 반사도 보정오차 계산결과를 살펴보면, 2012년의 Z 오차는 음(-)의 값을 가지며 -1.656~-1.123dB로 월별로 보정오차가 크게 차이 나지 않았다. 이는 비슬산레이더 강수량 추정값이 강수량 관측값 보다 과소 추정 했음을 의미한다. 2013년의 반사도 보정오차는 -0.251~0.776dBZ로 10월을 제외하고 양(+)의 값을 가져 2012년과는 반대경향이었으나 보정오차가 2012년에 비해 1/2 정도로 나타났다. 다음으로 차등반사도 보정오차 계산결과를 살펴보면, 비슬산레이더 연직관측자료가 2012년 여름철 자료만 확보가 가능하여 이에 대해서만 분석하였으며, 차등반사도 보정오차는 0.135~0.218dB의 값을 나타냈다.

표 4.1 반사도와 차등반사도 보정오차 산출 결과

사례		반사도 보정오차 (dB)	차등반사도 보정오차 (dB)	적용사례 수
2012년	6월	-1.656	0.135	4
	7월	-1.610	0.218	10
	8월	-1.123	0.17	20
2013년	6월	0.065	-	7
	7월	0.311	-	16
	8월	0.776	-	13
	9월	0.630	-	4
	10월	-0.251	-	2
전체 사례수				76

## 4.2 보정오차 적용 및 검증

4.1장에서 산출한 반사도와 차등반사도 보정오차(표 4.1)를 반영하여 WRC 관계식을 적용한 비슬산레이더 강수량 추정값을 재산출하고 검증하였다(표 4.2와 그림 4.3~4.4). 결과를 살펴보면, 2012년과 2013년 여름철 사례 모두 MAE, RMSE, 상관계수에서 정확도가 향상되었다. 반사도와 차등반사도 오차보정 전의 비슬산레이더 강수량 추정값의 MAE는 최저 1.17에서 최고 4.76mm/hr(평균 2.68mm/hr), RMSE는 최저 1.19에서 10.84mm/hr(평균 5.12mm/hr), 상관계수는 최저 0.39에서 0.73(평균 0.57)이었다. 하지만 오차보정 후에 강수량 추정값의 MAE는 최저 0.99에서 4.15mm/hr(평균 2.26mm/hr), RMSE는 최저 1.56에서 7.73mm/hr(평균 4.06mm/hr), 상관계수는 0.42에서 0.77(평균 0.61)로 모든 검증지표에서 정확도가 향상되었다. 평균적으로 MAE는 15.7%, RMSE는 20.7%, 상관계수는 7.0% 향상되었다.

그림 4.3을 살펴보면, 비슬산레이더를 중심으로 북동에서 남서쪽으로 형성되어 있는 강수대에서 AWS 지상 강수량 관측값 분포(그림 4.3(a))보다 반사도와 차등반사도 오차보정 전 비슬산레이더 강수량 추정값 분포(그림 4.3(b))의 강도가 다소 약하게 표출되고 있다. 하지만 오차보정 후 비슬산레이더 강수량 추정값 분포(그림 4.3(c))는 오차보정 전보다 다소 강하게 나타나(검은색 점선 원) AWS 지상 강수량 관측값 분포에 가깝게 표출되었다. 또한 AWS 지상 강수량 관측값 분포에는 나타나지 않으나 남해상에 위치한 강수대에 대해서도 오차보정 후 비슬산레이더 강수량 추정값 분포가 더 강하게 표출됨을 확인하였다.

다음으로 그림 4.4(a)는 대구 AWS 지점(2012년 8월 23일 0000-2400 KST)의 강수량 관측값과 반사도와 차등반사도 오차보정 전과 후의 비슬산레이더 강수량 추정값 시계열을 비교한 그림이다. 오차보정 전에는 비슬산레이더 강수량 추정값이 대구 AWS 지상 강수량 관측값보다 과소 추정되어 반사도는 1.610dB, 차등반사도는 -0.218dB 만큼 보정한 결과, 비슬산 강수량 추정값이 개선되어 강수량 관측값과 거의 비슷하게 추정되었다. 그림 4.4(b)는 포항 AWS 지점(2013년 7월 4일 1600-7월

5일 2100 KST)의 지상 강수량 관측값과 반사도와 차등반사도 오차보정 전과 후의 비슬산레이더 강수량 추정값 시계열을 비교한 그림이다. 오차보정 전에는 비슬산레이더 강수량 추정값이 대구 AWS 지상 강수량 관측값보다 과대 추정되어 반사도를 -0.311dB 만큼 보정한 결과, 비슬산 강수량 추정값이 개선되어 강수량 관측값과 거의 비슷하게 추정되었다. 따라서 반사도와 차등반사도 오차보정을 수행함으로써 비슬산레이더 강수량 추정값의 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

표 4.2 반사도와 차등반사도 오차보정 전과 후 비슬산기상레이더 강수량 추정값 정확도 비교

사례		오차보정 전			오차보정 후		
		MAE (mm/hr)	RMSE (mm/hr)	상관계수	MAE (mm/hr)	RMSE (mm/hr)	상관계수
2012	07	2.75	3.92	0.39	2.41	3.30	0.42
	08	4.20	6.66	0.42	3.14	4.42	0.49
2013	06	1.28	3.61	0.64	1.03	3.45	0.64
	07	4.76	10.84	0.56	4.15	7.73	0.63
	08	1.58	5.55	0.56	1.2	4.80	0.63
	09	1.17	1.91	0.73	0.99	1.56	0.77
	10	3.01	3.37	0.67	2.91	3.19	0.70
평균		2.68	5.12	0.57	2.26(15.7% ↑)	4.06(20.7% ↑)	0.61(7.0% ↑)

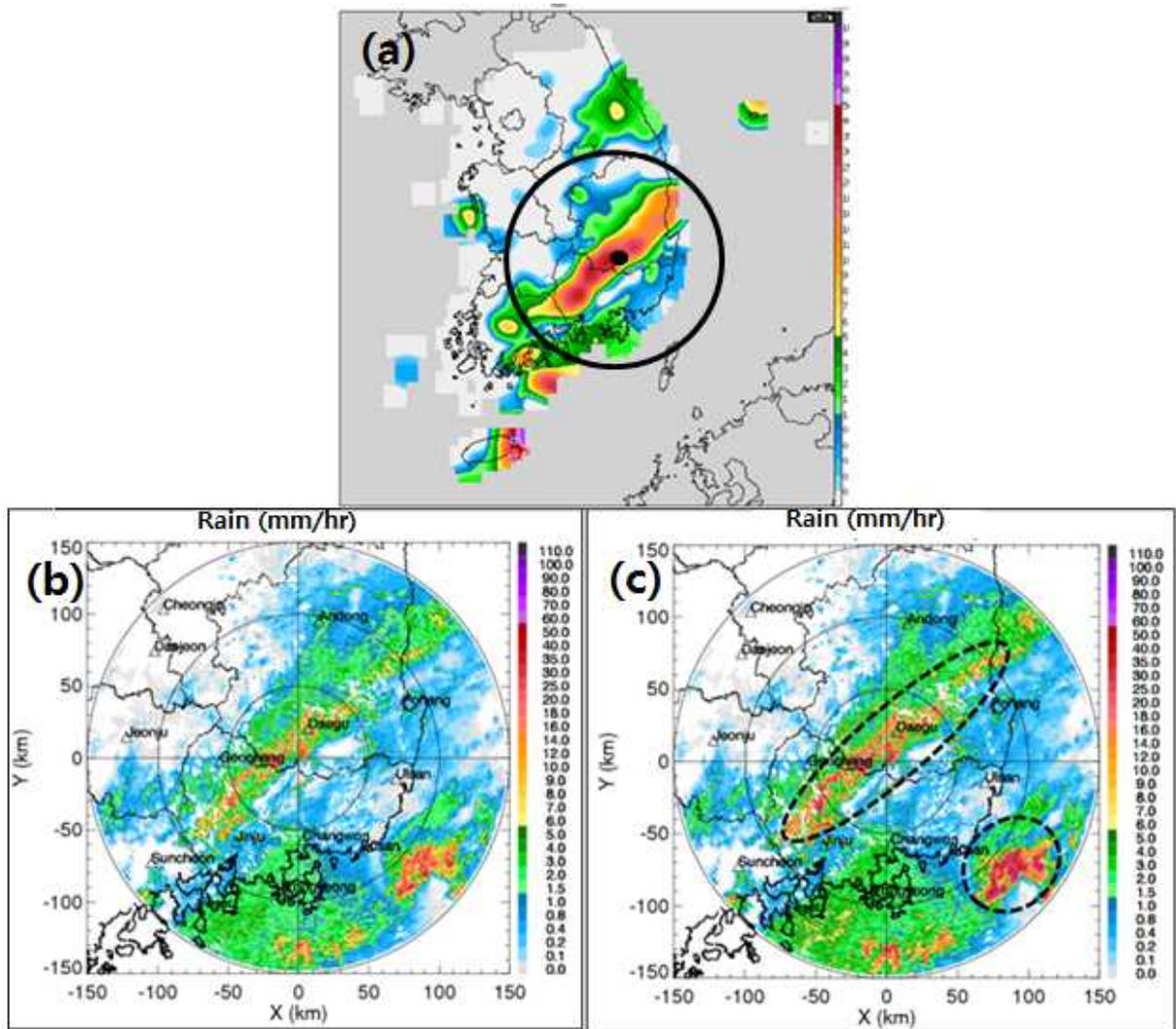


그림 4.3 비슬산레이더 강수분포 비교 (사례 2012년 8월 23일 0800 KST)

- (a) AWS 지상 강수량 관측값 분포,
- (b) 오차보정 전 비슬산기상레이더 강수량 추정값 분포
- (c) 오차보정 후 비슬산기상레이더 강수량 추정값 분포

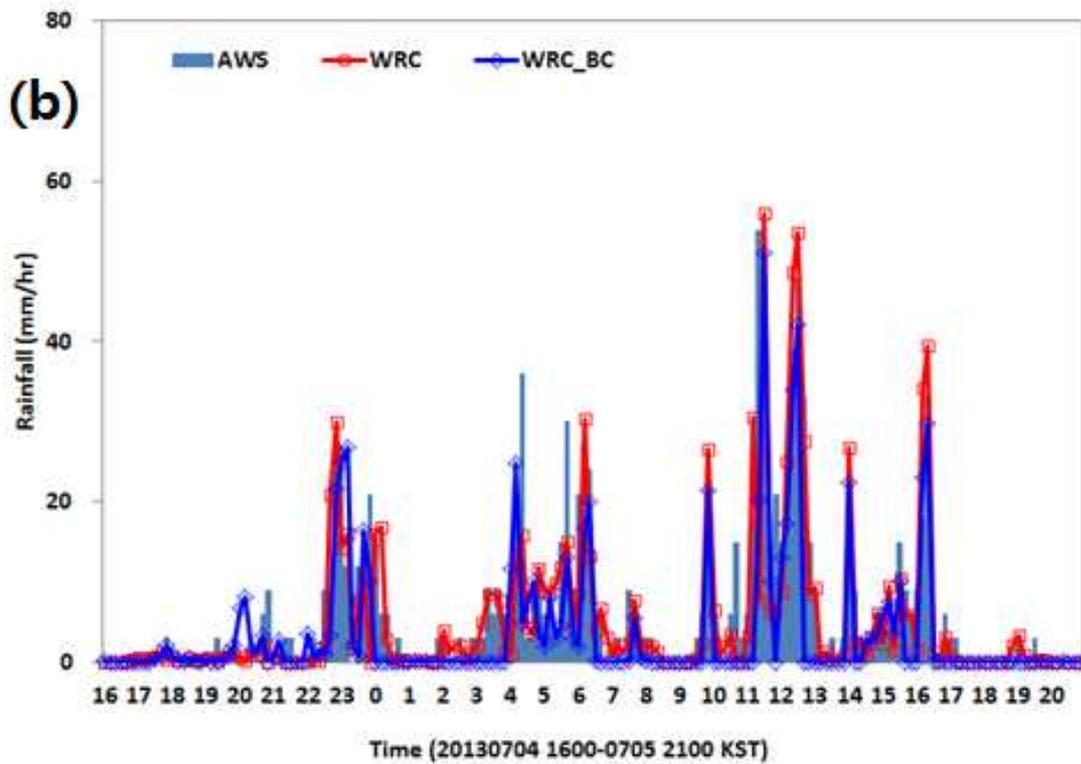
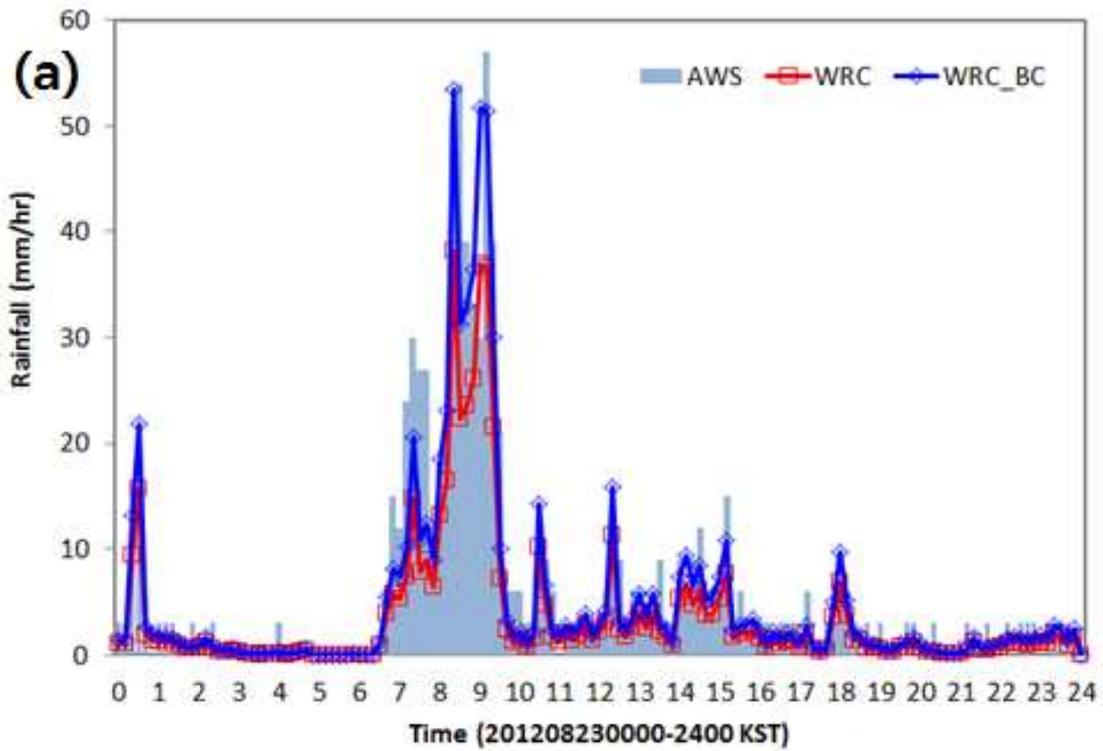


그림 4.4 반사도와 차등반사도 오차보정 전과 후 비슬산레이더 강수량 추정값 시계열 비교

(a) 대구 AWS 지점(2014년 8월 23일 0000-2400 KST),

(b) 포항 AWS 지점(2013년 7월 4일 1600-7월 5일 2100 KST)

### 4.3 2DVD를 이용한 강수량 추정값 검증

본 연구에서는 비슬산레이더의 강수량 추정값 정확도를 향상시키기 위하여 강수 입자계측기인 2DVD 자료를 이용하여 반사도와 차등반사도의 보정오차를 계산하고 이를 이용하고자 하였다. 2DVD는 빗방울의 낙하속도, 모양, 지름 등을 측정할 수 있는 관측기기로서, 우적 모양의 정보를 얻을 수 있어 지름에 따른 우적의 편평도를 알 수 있다(그림 4.5). 본 연구에서는 경북대학교내에 위치한 2DVD(위도: 35.9° N, 경도: 128.6° E)의 자료를 이용하였으며(그림 4.6), 적용사례는 2012년 3개 사례이다(표 4.3). 3개 사례에 대하여 2DVD 자료를 이용하여 반사도와 차등반사도의 보정오차를 계산하였으며(표 4.4), 비슬산기상레이더 강수량 추정에 적용하여 강수량 추정값을 재산출하고 정확도를 평가하였다(표 4.5와 그림 4.7). 평가결과를 살펴보면, 반사도와 차등반사도 오차보정 전의 비슬산기상레이더 강수량 추정값의 Bias는 평균 2.453mm/hr, RMSE는 평균 3.983mm/hr, 상관계수는 평균 0.889이었으며, 오차보정 후에는 각각 2.067mm/hr, 3.280mm/hr, 0.889로서 Bias는 15.7%, RMSE는 17.7% 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 이는 자기상관관계법과 레이더 연직지향관측자료로부터 계산한 반사도와 차등반사도 보정오차를 적용하여 재산출한 비슬산레이더 강수량 관측값의 정확도와 거의 비슷한 향상정도를 보였다. 그림 4.7을 살펴보면, 두 사례에서 반사도와 차등반사도 오차보정 전의 비슬산레이더 강수량 추정값 시계열은 강수량 관측값의 경향성을 잘 따라가고 있으나 과소 추정되고 있다. 오차보정 후의 비슬산레이더 강수량 추정값은 부분적으로 과대 추정하나 강수량 관측값에 더 가깝게 나타났다.

하지만 2DVD 관측자료를 이용하여 계산한 반사도와 차등반사도 보정오차는 지점자료이나 자기상관관계법과 레이더 연직지향관측자료로부터 계산한 반사도와 차등반사도 보정오차는 비슬산레이더 관측반경을 모두 고려한 공간자료이다. 따라서 반사도와 차등반사도 보정오차를 적용함에 있어서 신중할 필요가 있다고 판단된다.

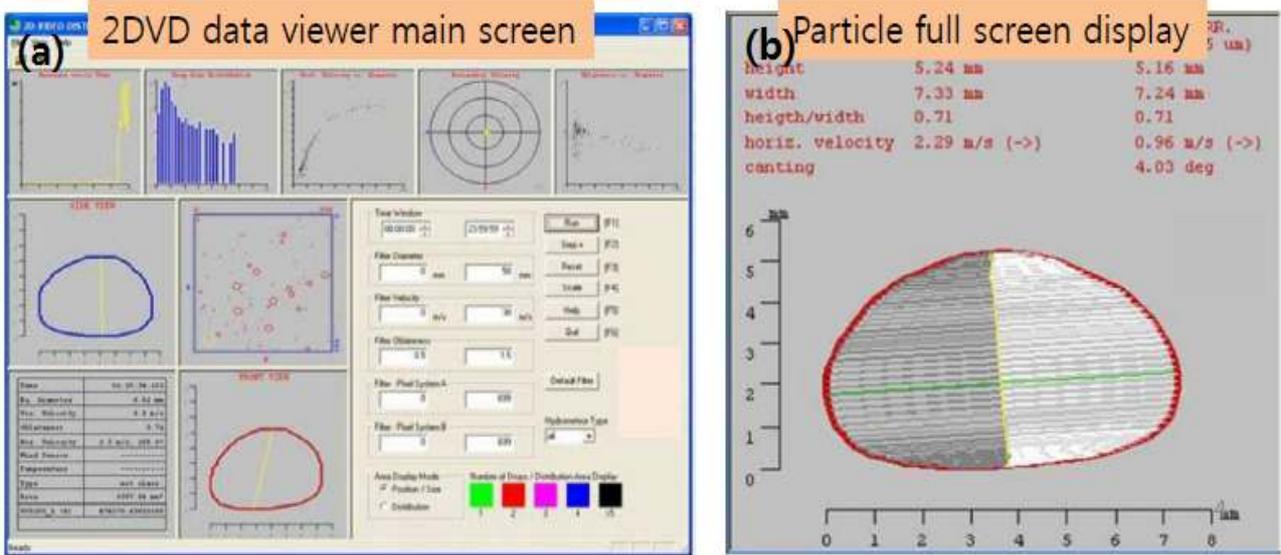


그림 4.5 강수입자계측기(2DVD) 관리 프로그램:

- (a) 메인 프로그램
- (b) 관측된 빗방울 표출 프로그램

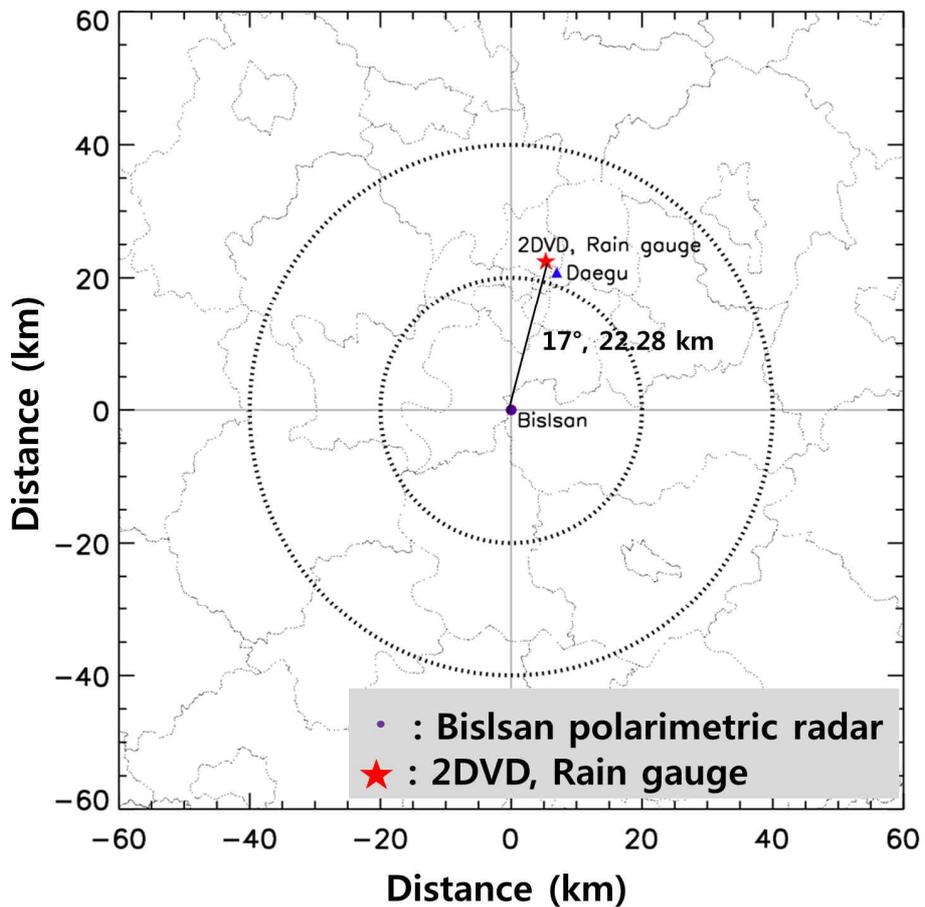


그림 4.6 비슬산레이더와 강수입자계측기(2DVD) 위치

표 4.3 2DVD를 이용한 분석사례

사례	날짜	시간 (KST)	강수시스템
1	20120425	0900-1700	저기압
2	20120823	0000-2400	장마
3	20120917	0900-1500	태풍

표 4.4 2DVD를 이용한 반사도 및 차등반사도의 보정오차

사례	보정오차	
	Z(dB)	Z <sub>DR</sub> (dB)
20120425	1.159	0.492
20120823	2.048	0.128
20120917	0.613	-0.157

표 4.5 2DVD를 이용한 반사도 및 차등반사도 보정오차 적용 결과 검증

사례	오차보정 전			오차보정 후		
	Bias (mm/hr)	RMSE (mm/hr)	상관계수	Bias (mm/hr)	RMSE (mm/hr)	상관계수
20120425	1.050	1.601	0.822	1.052	1.501	0.822
20120823	2.953	5.538	0.918	2.282	4.246	0.918
20120917	3.357	4.810	0.927	2.867	4.093	0.927
평균	2.453	3.983	0.889	2.067 (15.7% ↑)	3.280 (17.7% ↑)	0.889

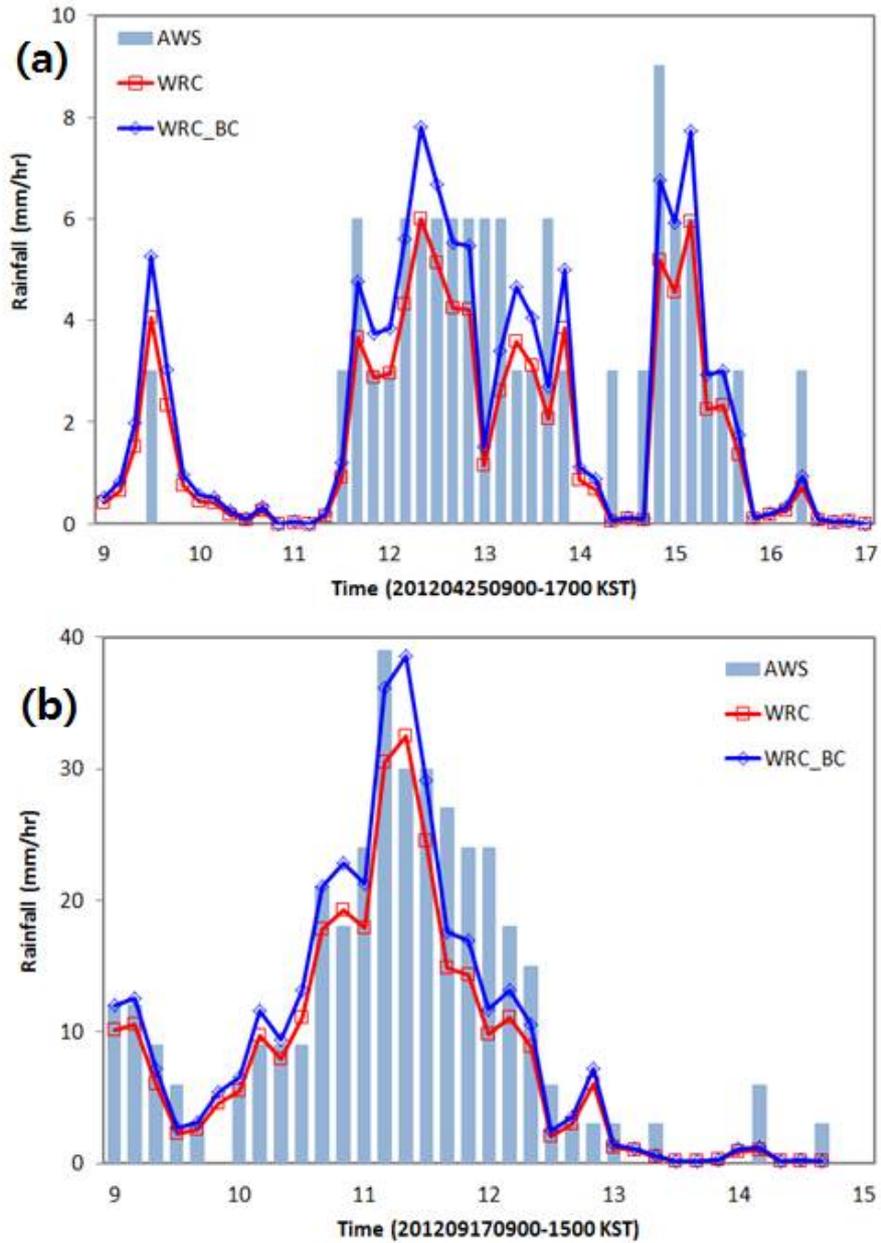


그림 4.7 2DVD로터 계산한 반사도와 차등반사도 오차보정 전과 후 비슬산레이더 강수량 추정값 시계열 비교 : (a) 사례 20120425, (b) 사례 20120917

## 제5장 요약

본 연구에서는 이중편파레이더 강수량 추정값 정확도 향상을 위해 레이더 강수량 추정값 산출 기술을 개선하고자 한다.

첫 번째로 이중편파레이더용 강수량추정 알고리즘의 전처리 과정을 개선하였으며, 두 번째로 여러 사례에 개선된 강수량추정 알고리즘을 이용하여 강수량을 산출하고 검증하였다.

마지막으로 S-밴드 이중편파변수 오차보정을 적용하여 강수량 정확도 향상정도를 살펴보았다.

각 사항에 대하여 자세히 살펴보면 다음과 같다.

첫째, NCAR 기술기반 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 알고리즘에서 레이더 자료 전처리 과정(차등위상차 접힘풀기, FIR 필터링, 비차등위상차 산출)을 중심으로 개선하였다. 또한 강수량 추정값 산출 알고리즘 내에서 다양한 강수량 추정값 산출 관계식이 적용 가능하도록 개선하였다. 각 전처리 과정의 개선을 위해 국내외 선진연구를 살펴보고 국외 레이더 기준으로 되어있던 알고리즘이나 임계값을 국내 레이더에 적합하도록 개선하였다. 차등위상차 접힘 풀기에서는 접힘 여부 시작기준, 접힘 풀기 위한 기준값 등을 개선하였으며, FIR 필터링에서는 Null 값을 차등위상차 값으로 대체하는 방법을 개선하였으며, 비차등위상차 산출에서는 비차등위상차 산출 기준값을 개선하였다. 다음으로 다양한 이중편파레이더용 강수량 추정값 관계식을 선택적으로 적용할 수 있도록 개선하였으며, 특히 기존 강수량 추정값 관계식을 비교·검증하여 WRC 관계식을 제시하였다. 마지막으로 개선된 NCAR 알고리즘을 적용하여 산출한 이중편파변수의 안정성을 분석하기 위해 반사도-차등반사도와 반사도-비차등위상차 관계를 살펴보았으며, 기존 연구들과 비슷한 경향을 나타내어 이중편파변수가 타당하게 산출됨을 확인하였다.

둘째, 개선된 이중편파레이더 강수량 추정값 산출 알고리즘을 국토교통부에서 운영 중인 비슬산레이더에 적용하여 개선 정도를 검증하였다. 우선 2012년 3개

사례에 대하여 단일편파만을 이용하는 M-P 관계식과 이중편파변수를 이용하는 WRC 관계식을 비교한 결과, WRC 관계식의 정확도가 Bias와 RMSE에서 각각 평균 20.9%, 25.6% 향상되어 이중편파변수 적용의 타당성을 확인하였다. 다음으로 2012년과 2013년 총 15개 사례에 대하여 개선된 NCAR 알고리즘을 적용하고 강수량 추정값 정확도를 검증하였다. 그 결과 MAE는 평균 2.68mm/hr, RMSE는 평균 5.13mm/hr, 상관계수는 평균 0.57이었으며, 전체적으로 레이더 강수량 추정값이 과소 추정되었다.

마지막으로 비슬산레이더 강수량 추정값 정확도 향상을 위해 이중편파변수 (반사도와 차등반사도) 보정오차를 계산하고 보정하였다. 반사도 보정오차는 자기 상관관계 방법을 이용하여 계산하였으며, 차등반사도 보정오차는 레이더 연직지향 관측자료를 이용하여 계산하였다. 반사도와 차등반사도 보정오차를 적용하여 비슬산 레이더 강수량 추정값 정확도를 검증한 결과, MAE는 평균 15.7%, RMSE는 평균 20.7%, 상관계수는 평균 7.0% 향상되었으며, 비슬산레이더 강수분포에서도 오차 보정 후 강수분포가 더 강하게 표출되었다. 반사도와 차등반사도 오차보정을 함으로써 비슬산레이더 강수량 추정값의 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 다음으로 2DVD 관측자료를 이용하여 반사도와 차등반사도 보정오차를 계산하고 이를 비슬산레이더에 적용하였다. 반사도와 차등반사도 보정오차를 적용한 결과를 살펴보면, 비슬산레이더 강수량 추정값 정확도가 Bias는 15.7%, RMSE는 17.7% 향상되었다. 하지만 2DVD에 의한 반사도와 차등반사도 보정오차는 지점자료이므로 이를 적용함에 있어서 신중해야 할 것으로 판단된다.

이와 같이 우리나라 레이더에 적합하도록 레이더 강수량 추정값 산출 기법이 개발된다면 보다 정확한 강수량 산출이 가능하므로 향후 기상예보의 정확도 향상과 강수로 인한 기상재해를 사전에 예방하는데 기여할 것이다.

## 참고문헌

- 국립기상연구소, 2009: 관측기술 지원 및 활용연구(I) - 이중편파레이더 도입 및 기반연구, 349.
- 국립기상연구소, 2012: 연구용 X-밴드 이중편파레이더 강수량 추정 알고리즘, 국립기상연구소 기술노트(NIMR-TN-2012-010), 응용기상연구과, 기상청.
- 기상레이더센터. 2013a: 레이더자료 통합품질관리기술 개발 보고서. 기상청.
- 기상레이더센터, 2013b: 에코종류별 이중편파변수 특성 분석 보고서. 기상청.
- 기상청, 2012: 레이더기반 다중센서활용 강수량추정기술 개발 보고서, 기상청.
- Bringi, V. N. and Chandrasekar, V., 2001: *Polarimetric doppler weather radar: Principal and applications*. Cambridge University Press, 636.
- Cifelli, R., Chandrasekar, V., Lim, S., Kennedy, P. C., Wang, Y., and Rutledge, S. A., 2011: Dual-polarization radar rainfall algorithm: Application in Colorado precipitation events. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28, 352-364.
- Fulton, R. A., J. P. Breidenbach, D. J. Seo, D. A. Miller, and T. O' Bannon, 1998: The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, 13, 377-395.
- Gorgucci, E., and G. Scarchilli, 1997: Intercomparison of multiparameter radar algorithms for estimating rainfall rate. Preprints, *28th Conf. on Radar Meteorology*, Austin, TX, American Meteorology Society, 55-56.
- Hubbert, J. and Bringi, N. 1995: An iterative filtering technique for the analysis of Copolar differential phase and dual-frequency radar measurement, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technique*, 12, 643-648.
- Kang, M., Nam, K.-Y., Choi, J.-C., and Choi, Y.-J., 2011: Rainfall estimation case study with the NIMR X-POL radar. *Proceeding of Annual Meeting of Korea Water Resources Association 2011*, 358-359.

- Lee, G. W. 2006: Sources of errors in rainfall measurements by polarimetric radar: variability of drop size distributions, observational noise, and variation of relationships between R and polarimetric parameters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 1005-1028.
- Marshall, J. S. and Palmer, W. M., 1948: The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5, 165-166.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. *Dual-polarization radar principles and system operations*.
- Oh, Y.-A., Lee, G., Jung, S.-H., Cho, Y.-H., and Nam, K.-Y., 2010: Quantitative rainfall estimation with the NIMR X-POL radar. *Proceeding of the Autumn Meeting of Korea Meteorological Society*, 2011, 412-413.
- Straka, J. M., Zrníc, D. S., and Ryzhkov, A., 2000: Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: synthesis of relations. *Journal of Applied Meteorology*. 39, 1341-1372.
- Vulpiani G., Giangrande, S., and Marzano, F. S., 2009: Estimation from polarimetric S-band radar measurement: Validation of a neural network approach. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 2022-2036.
- Wang, Y. and Chandrasekar, V., 2009: Algorithm for estimation of the specific differential phase. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 26. 2565-2578
- You, C.-H., Lee, D.-I., and Kang, M.-Y., 2014: Rainfall estimation using specific differential phase for the first operational polarimetric radar in Korea. *Advanced in Meteorology*, Article ID 413717.
- Zrníc, D. S. and Ryzhkov, A. 1996: Advantages of rain measurements using specific differential phase. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13, 454-464.

# 기상레이더센터 기술노트 발행목록

WRC2010-01 : 채프에코 식별 및 제거 알고리즘

WRC2010-02 : 레이더 강수량 예측시스템 활용 매뉴얼

WRC2010-03 : 레이더 기반 태풍 추적 및 감시

WRC2010-04 : 레이더 반사도 합성기법 분석

WRC2010-05 : 이중편파 기상레이더 밴드 특성

WRC2011-01 : 강릉기상레이더 운영을 위한 기술노트

WRC2011-02 : 기상레이더를 이용한 조류이동 감시

WRC2011-03 : 레이더 모멘트자료 표준형식 지정을 위한 자료형식 분석

WRC2011-04 : 클러스터링 및 퍼지추론기법 이용한 채프에코 식별

WRC2011-05 : 낙뢰관측자료 통합표출 알고리즘 개발

WRC2011-06 : 2011년 레이더자료 공동활용시스템 개발

WRC2011-07 : 레이더자료 품질관리 모듈 개발

WRC2011-08 : 레이더를 활용한 중규모 사례 분석

WRC2011-09 : 레이더 분석현업 업무매뉴얼

WRC2012-01 : 이중편파레이더 자료 활용법

WRC2012-02 : 2012년 여름철 위험기상 레이더 분석보고서

WRC2013-01 : 2012년 겨울철 위험기상 레이더 분석보고서

WRC2013-02 : 기상레이더 자료분석 가이드스

WRC2013-03 : 레이더 바람자료 품질검증 기술노트

WRC2013-04 : 대기수상체 분류 알고리즘 사용자 매뉴얼

- WRC2013-05 : 에코 종류별 이중편파변수 특성 분석 보고서
- WRC2013-06 : 레이더 기반 뇌우탐지 기술 보고서
- WRC2013-07 : S-밴드 이중편파레이더 정량적 강수량추정 시험기술개발  
및 사례검증(I)
- WRC2013-08 : 2차원 영상우적계 관측자료의 시뮬레이터 활용방안
- WRC2013-09 : 레이더자료 퍼지 품질관리 알고리즘 최적화 연구
- WRC2013-10 : 대기수상체 분류 알고리즘 검증 및 사례분석 I
- 
- WRC2014-01 : 레이더자료 통합품질관리기술 개발 (III)
- WRC2014-02 : 레이더 원시신호(I/Q)의 이중편파변수 및 신호특성분석
- WRC2014-03 : 한반도 강우특성을 반영한 강우입자크기분포 특성분석
- WRC2014-04 : S-밴드 이중편파레이더 정량적 강수량 추정 시험기술개발  
및 사례검증(II)
- WRC2014-05 : 레이더 강수량 추정값 후처리 보정기법 개선 및 과거자료  
재생산