

## 이중편파 레이더강우와 분포형 모형을 이용한 유출해석 Runoff Analysis Using Dual Polarization RADAR and Distributed Model

정 지 영\* / 유 명 수\*\* / 이 재 응\*\*\*  
Jeong, Jiyoung / Yu, Myungsu / Yi, Jaeung

### Abstract

In this study, average rainfall of basin was estimated and compared with that obtained from Biseulsan dual polarization RADAR. And the runoffs are estimated using Vflo distribution model for Habcheon reservoir basin and Huicheon basin. In the rainfall estimation using dual polarization RADAR, the rainfall was estimated by using the specific phase difference and differential reflectivity of dual polarization RADAR variables. As a result, for all events rainfall estimation using dual polarization RADAR has the closest value to the gauge rainfall in terms of the peak rainfall and total rainfall. Also, runoff simulation results from dual polarization RADAR show the better results. It is concluded that the method using dual polarization radar can improve the accuracy more than a single polarization radar using only horizontal reflectivity.

**keywords** : dual polarization RADAR, Vflo, distributed Model, Habcheon reservoir, Huicheon

### 요 지

본 연구에서는 합천댐, 회천 유역에 대하여 비슬산 이중편파 레이더를 이용하여 유역평균강우량을 각각 추정하여 지상우량계의 강우량과 비교한 후 분포형 유출모형인 Vflo 모형을 사용하여 유출을 모의하였다. 유역평균 강우량 분석 결과 이중편파 레이더 변수를 사용한 결과 침투우량 및 전체 강우량 값이 지상우량계 값과 근접하게 산정되었고, Vflo 분포형 모형을 사용한 유출모의 분석 결과 또한 이중편파 레이더 변수를 사용한 유출모의가 실제 유출량에 근접하였다. 이는 이중편파 레이더를 사용한 강우추정 및 유출모의가 기존의 수평반사도만을 사용한 단일편파 레이더보다 정확성을 높일 수 있는 방법이라고 판단된다.

**핵심용어** : 이중편파 레이더, Vflo, 분포형 모형, 합천댐, 회천

### 1. 서 론

지금까지 강우를 이용한 수문해석에서는 대부분 지상우량계에 의한 관측 강우량 자료를 공간적으로 평균하여

활용해 왔다. 그러나 실제 강우의 공간분포를 정의하는데 있어 지상우량계 자료 이용은 우량계 사이의 강우량 분포에 대한 정확한 정보를 제공하지 못한다. 이러한 한계성을 극복하기 위한 대안의 하나로 원격탐사장비인 기상레

\* 아주대학교 건설교통공학과 연구원 (e-mail: jungjung@ajou.ac.kr)  
Researcher, Dept. of Civil & Transportation Engineering, Ajou Univ., Suwon 442-749, Korea

\*\* 아주대학교 건설교통공학과 박사수료 (e-mail: niceguy-03@ajou.ac.kr)  
Doctoral Course, Dept. of Civil & Transportation Engineering, Ajou Univ., Suwon 442-749, Korea

\*\*\* 교신저자, 아주대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사 (e-mail: jeyi@ajou.ac.kr, Tel: 82-31-219-2507)

*Corresponding Author*, Professor, Div. Dept. of Civil & Transportation Engineering, Ajou Univ., Suwon 442-749, Korea

이더가 널리 활용되고 있다. 레이더는 강우의 공간적 분포를 관측할 수 있어 우량계 사이의 강우분포의 특성을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 레이더는 강우량을 직접 관측하는 것이 아니라 대기 중 수분 입자에 의한 반사도(reflectivity)를 측정하여 강우량을 추정함으로써 실제 강우량과는 차이가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 MFB(Mean Field Bias), Kalman 필터, WPMIM(Kim, 2002), 편차보정 기법(Bae, 2005), 조건부 합성기법(Kim, 2007) 등의 보정기법들이 제시되었으며, 최근에는 이중편파 레이더의 활용으로 강우량 추정 정확도가 향상되고 있다. 이중편파 레이더는 단일편파 레이더와는 달리 수직반사도, 차등반사도, 비차등반사도 등 다양한 변수들의 취득이 가능하여 강우입자의 형태를 더욱 정확하게 추정함으로써 강우를 보다 정확히 산정할 수 있다. 현재 국내에서는 Kang et al. (2005), Choi (2012), Lee (2012), Jeon et al. (2012) 등에서 이중편파 레이더를 활용할 시 단일편파 레이더를 사용한 강우 추정보다 정확한 강우량을 추정할 수 있음을 확인하였다. 그러나 아직 수문학적 활용을 위한 이중편파 레이더의 유출해석에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 한강홍수통제소에서 운용되고 있는 비슬산 이중편파 레이더로 강우를 추정하여 지상우량계와의 비교를 통해 이중편파 변수를 사용한 강우량 추정 정확도를 검증하여 확인하고자 한다. 본 연구의 주요 목적은 산정된 레이더 추정강우를 지상 강우량과의 보정 없이 분포형 유출모형에 대표적으로 사용되고 있는 Vflo 모형에 적용한 후 실측 유출량과의 비교·분석을 통하여 이중편파 레이더를 통한 유출모의의 정확성 및 활용성에 대하여 분석하는데 있다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 단일편파 레이더 강우 추정이론

단일편파 레이더는 수평파만을 송신하여 수신되는 에너지를 분석하여 강우구름의 위치와 이동상태, 강우강도 등을 감시, 추적한다. 단일편파 레이더를 통해 관측된 자료

는 반사도, 도플러속도, 스펙트럼 폭, 신호품질지수 등이 있으며, 이 중 반사도 자료가 강우량 추정에 이용되고 있다.

### 2.2 이중편파 레이더 강우 추정이론

일반적으로 떨어지는 강우입자는 공기 저항에 의해 수평축의 길이가 수직축의 길이보다 길어져 수평으로 납작한 타원형이 되어 수평단면적이 수직단면적보다 크게 된다. 기존의 단일편파 레이더는 수평편파만을 이용해 강우입자의 정확한 구분이 어렵지만, 이중편파 레이더는 수평편파와 수직편파된 수신신호의 차이를 분석하여 강우의 모양, 종류, 형태 등을 산출할 수 있는 장점을 가지고 있어 강우의 정성·정량적 특성에 대한 더 상세한 정보를 얻을 수 있다(Ryzhkov et al., 2003).

강우량 추정과 직접적인 관련이 있는 이중편파레이더 관측변수들은 수평·수직반사도, 차등반사도, 차등위상차, 비차등위상차, 교차상관계수 등이 있으며, 이들 중 수평반사도만이 기존의 단일편파 레이더의 강우추정용으로 관측할 수 있는 유일한 변수이다.

수직반사도는 Eq. (1)과 같이 단일편파 레이더의 수평 반사도와 동일한 방법으로 산정되며, 이중편파 레이더로부터 방사된 수직파의 에너지와 목표물로부터 산란되어 되돌아온 수신에너지의 비로 정의된다.

$$Z_V = \sum_{i=1}^n N_i D_i^6 \quad (1)$$

여기서,  $D_i$ 는 단위 체적에 포함되어 있는 강우 입자의 지름(mm)으로 크기별로 그룹화되어 있으며,  $N_i$ 은  $i$ 번째 지름을 갖는 강우입자 그룹의 개수를 의미하고, 위 식의 단위는  $mm^6 m^{-3}$  또는 dBZ이다.

차등반사도( $Z_{DR}$ )는 Eq. (2)와 같이 수평과 수직파의 후방산란 에너지 비로 계산된다.

$$Z_{DR} = 10 \log \left( \frac{Z_H}{Z_V} \right) \quad (2)$$

여기서,  $Z_H$ 와  $Z_V$ 는 수평·수직파의 반사도이다. 이 값은 강우입자 모양의 가로·세로의 축비를 나타내고, 이를 이

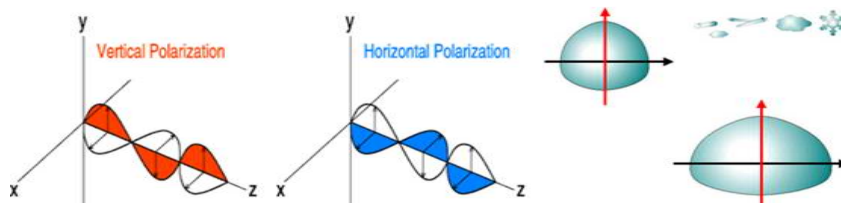


Fig. 1. Observation Principle of Dual Polarization RADAR (adapted by www.srh.noaa.gov)

용하여 구름 속의 강우입자의 모양 및 크기 정보를 알 수 있으며, 일반적으로 -2dB~6dB 사이의 값을 갖는다(Lee, 2009). 큰 물방울과 같이 다소 수평적으로 퍼져 있는 모양의 강우입자의 경우는 양의 값을 보이고, 반대로 거의 원형에 가까운 이슬비, 우박 등과 같은 입자들의 경우에는 0에 가깝거나 음의 값이 나온다.

차등위상차( $\phi_{DP}$ )는 Eq. (3)과 같이 주어진 거리에서 수평과 수직으로 편파된 레이더 펄스간의 위상 차이를 의미한다.

$$\phi_{DP} = \phi_H - \phi_V, \phi_H, \phi_V \geq 0 \quad (3)$$

비차등위상차( $K_{DP}$ )는 차등위상차( $\phi_{DP}$ )를 거리에 대해 차분한 것으로 다음 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$K_{DP} = \frac{\phi_{DP(r_2)} - \phi_{DP(r_1)}}{r_2 - r_1} \quad (4)$$

$\phi_{DP}$ 는 일정 방위각에서 수평·수직 전파의 위상차 합을 적분 개념으로 축적한 값인 반면에  $K_{DP}$ 는 특정 거리지점에서  $\phi_{DP}$ 의 변화율을 구한 값으로, 각 지점에서 상호 위상차를 비교할 수 있다. 이러한 위상차는 레이더 보정 오차나 기타 외부적 요인들과는 독립적으로 적용되어 강우에 대해 보다 유용한 정보를 도출해 낼 수 있다. 이의 대표적인 방법이  $K_{DP}$ 를 이용한 강우량 추정이다. 이 추정방법은 단일편파 레이더의 강우산정식에 비해 여러 가지 장점이 있다. 수신기와 송신기의 보정에 독립적이고, 강우입자의 직경분포, 감쇄 등에 의한 영향을 받지 않으며, 빔 차폐, 지형차폐, 이상전파와 같은 잡음에 대한 영향을 덜 받는다. 따라서 이중편파 레이더에서 산출되는 변수를 사용함으로써 강우추정의 정확도를 높일 수 있다.

이처럼 단일편파와 달리 다양한 관측변수를 이용할 수 있는 이중편파 레이더는 수평반사도 외에도 차등반사도, 비차등위상차를 사용하여 강우량을 산정하고, 이는 수평반사도만 사용하는 단일편파 레이더에 비해 평균 10~30% 정도 정확도 향상이 가능하다(Jeon, B.G., 2012).

## 2.3 유출모형의 기본이론

### 2.3.1 집중형 모형과 분포형 모형의 비교

집중형 모형(Lumped Model)은 수문해석을 원하는 곳의 유역을 소유역으로 분할하여 간단한 모식도로 나타낸다. 각 소유역에는 각 소유역의 지형학적 특성인자와 해석에 필요한 매개변수의 평균값이 입력되게 된다. 따라서 하천의 형상이 모형에 표현될 수 없다. 또한 강우의 입력 시에는 강우 관측소의 측정된 점 강우량을 유역내의 관측

소 주위로 작도한 Thiessen 다각형의 면적비를 가중치로 하여 평균 강우량을 산정하는 등 면적에 대한 평균 강우량으로 환산한 값을 입력하게 되므로 강우의 시공간적인 분포를 제대로 표현할 수 없다.

분포형 모형(Distributed Model)은 격자체계를 기반으로 한다. 수문해석을 원하는 곳의 유역을 정사각형의 격자로 분할하여 재현한다. 각 격자안에 지형적 특성인자와 하천의 특성인자를 입력하는 방식이다. 따라서, 격자의 크기에 따라 정밀도가 결정된다. 그러므로 집중형 모형과는 달리 인위적인 소유역의 구분이 없고 격자로 표현되므로 하천의 형상 및 유역의 공간적인 변화를 나타낼 수 있다. 분포형 모형은 강우자료 또한 격자배열의 유역에 분포시켜 강우의 공간적인 분포를 꾀할 수 있는데, 이것을 가능하게 하는 것이 바로 레이더 강우자료이다. 레이더로 측정된 강우자료를 격자로 분할하여, 격자로 분할된 분포형 모형의 유역에 입력시킨다면 강우의 공간분포 및 강우로 인한 유역의 강우-유출 현상을 효과적으로 표현할 수 있다. 이것은 지정된 강우 관측소가 없는 곳에 강우가 집중 될 수도 있는 국지성 호우의 강우-유출 현상을 적절히 묘사할 수 없는 집중형 모형의 한계를 보완할 수 있다(Sin, 2009).

### 2.3.2 Vflo 모형

대표적인 분포형 수문모형 중 하나인 Vflo는 미국 오클라호마 대학의 벡스터교수측에서 개발된 물리적 기반의 분포형 모형이다. 이 모형은 아주 작은 유역에서부터 큰 규모의 유역에 이르기까지 치수에 관한 고해상도의 유출량 계산을 할 수 있으며, 레이더, 인공위성, 우량계, 다중센서 장치들의 조합들로부터 고해상도의 정량적 강수 추정을 할 수 있다. 주요 특징으로는 모든 입력자료를 GIS 데이터로 구성할 수 있으며, 다양한 시간대를 표현할 수 있는 효과적인 모의가 가능하다. 또한 유역의 공간적인 분포를 위해 유한요소법을 사용하고 있으며, 특별한 보정이 없이도 유효한 모의를 할 수 있다.

## 3. 대상유역 선정 및 호우사상 선정

### 3.1 대상유역의 개황

본 연구에서는 레이더 추정강우의 정확도를 높이기 위하여 반경 100 km 이내에 위치하고 있는 합천댐 유역과 회천 유역을 선정하여 강우를 추정하였다. 합천댐 유역은 유로연장 63 km, 유역면적 928.94 km<sup>2</sup>로서 황강 전 유역의 70%를 차지하고 있다. 회천 유역은 유역면적이 781.7 km<sup>2</sup>, 유로연장 71.8 km로서 낙동강 전체유역의 약 3.3%

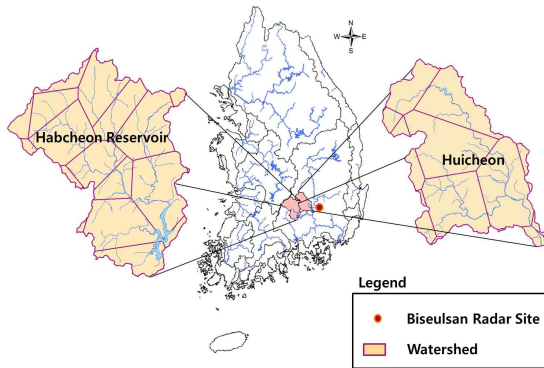


Fig. 2. Study Area

를 점유하고 있으며 합천댐 유역과 마찬가지로 낙동강 제 1지류이다.

### 3.2 호우사상 선정

합천댐 및 회천 유역에 대해 2011년부터 2012년까지의 강우사상 중 강우패턴(장마, 태풍)별로 3개의 호우사상을 선정하여 Table 1에 정리하였다. Case 1, Case 2는 2011년 여름철 장마전선에서 발달한 저기압의 영향으로 전국적으로 호우가 발생한 사상이고, Case 3은 2012년 9월 16일부터 17일까지 태풍 산바로 인해 발생한 호우 사상으로 남부지방에 많은 비가 내렸다.

Table 1. Study Rainfall Event

Division	Period	Note
Case 1	2011/06/25 00:00 ~ 2011/06/26 23:00	Rainy season
Case 2	2011/07/09 00:00 ~ 2011/07/10 20:00	Rainy season
Case 3	2012/09/16 00:00 ~ 2012/09/17 15:00	Typhoon (Sanba)

## 4. 레이더 강우 추정 및 지상강우와 비교

### 4.1 레이더자료 변환

본 연구에서는 레이더 강우추정을 위해 국토교통부 한강홍수통제소에서 운영하고 있는 비슬산 강우레이더 관측소의 비강수예코 제거 및 Z-bias를 적용하여 품질 관리가 완료된 UF(Universal Format)형태의 이진자료를 사용하였다. Fig. 3과 같이 UF자료에서 강우량 자료를 산정하기 위해 레이더자료 변환 절차는 강우장 생성, 좌표 변환, smoothing, 강우량 산정 과정을 거친다.

첫 번째, 강우장 생성 과정은 레이더 강우량 산정을 위한 대상 자료를 선정하는 과정이다. 레이더 자료는 어떤

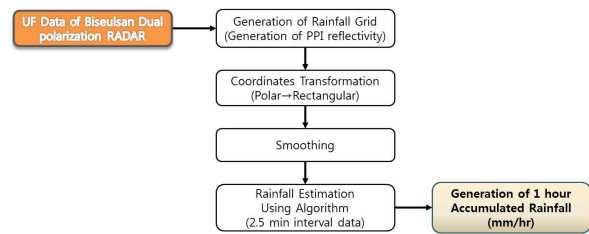


Fig. 3. RADAR Rainfall Estimation Procedure

고도 및 고도각의 자료를 활용하는데 따라 강우량값이 달라질 수 있다. 일반적으로 국토교통부에서는 최저고도 각지도, PPI, CAPPI 등 3가지로 구분하여 강우장을 생성하지만 그 중 PPI를 이용한 강우량 산정이 가장 우수한 결과값을 보이기 때문에 본 연구에서는 PPI만을 사용하였다(Lee, 2012).

두 번째, 좌표변환 과정은 레이더의 극좌표계를 직교좌표계로 변환하는 과정이다. 원시 볼륨 자료 내 각 지점별 자료의 위치 정보는 레이더를 중심으로 하여 방위각, 고도각, 거리로 표현되는 극좌표계 형식이지만 각종 지형정보 자료와의 호용성을 고려한다면 직교좌표계로의 변환이 필요하다. 수학적 극좌표계는 동쪽이 기준점이며 방위각은 반시계 방향으로 증가한다. 하지만 레이더 극좌표계에서는 기준점이 북쪽이며 시계 방향으로 방위각이 증가하므로, 좌표 변환 시 기준 위치 및 방향차를 주의하여야 한다.

세 번째, smoothing 과정은 미확인 오차의 영향을 줄이는 과정이다. 극좌표 형식에서 레이더 중심 부근에서는 자료가 매우 밀접한 형태를 보이지만 레이더로부터 멀어질수록 자료의 밀도가 감소한다. 또한, 레이더의 기계적 결함으로 인해 일부 특정 방위각에서 미측정될 가능성이 있다. 따라서 이러한 미확인 오차의 영향을 가능한 최소화하기 위한 자료처리 과정으로써 레이더 전 관측 영역에서 자료의 smoothing 과정을 실시한다.

네 번째, 본 연구에서 사용된 비슬산 레이더 관측자료는 2.5분 간격으로 산출되어 2.5분 강우강도 자료를 생성한다. 따라서 24개(총 1시간) 자료를 누적하여 1시간 강우강도로 환산하고 레이더 강우량 산정 알고리즘을 통해 강우량을 산정하였다. 본 연구에서는 수평편파를 사용한 강우량 추정을 ZR, 차등반사도를 사용한 강우량 추정을 ZDR, 비차등위상차를 사용한 강우량 추정을 KDP로 표현하였다.

### 4.2 레이더 강우와 지상강우의 비교

#### 4.2.1 합천댐 유역

지상 유역평균강우량은 지상 관측자료를 이용하여 유

역평균강우량 산정시 가장 널리 사용되고 있는 방법인 Thiessen 다각형 방법으로 강우량을 추정하였다(Yoon, 2008). Figs. 4~6은 합천댐의 지상 유역평균강우량과 레이더 유역평균강우량의 강우사상 Case 1~Case 3을 도식화한 것이다. 전체적으로 이중편파 변수를 사용한 강우량

이 수평편파변수 ZR만을 사용한 강우량보다 크게 나타난다. 일반적으로 단일편파 레이더의 강우량 추정 연구에서 추정값이 지상강우량값보다 작게 나타나는데 본 연구에서도 동일한 특성을 보이고 있다. Fig. 7의 산포도 분석은 강우량 크기에 따른 상대적인 오차의 분산 정도를 파악하기

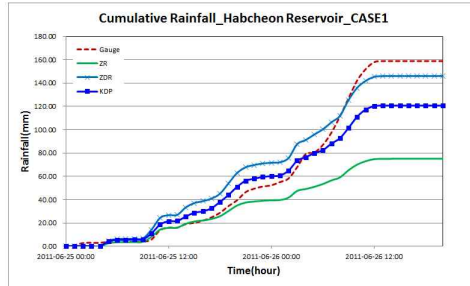
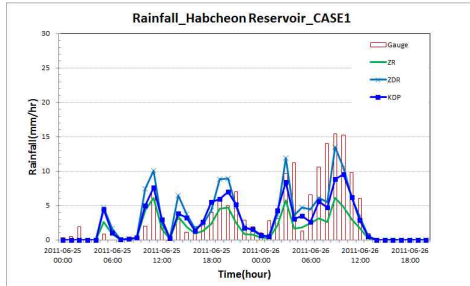


Fig. 4. Comparing Radar Rainfall with Gauge Rainfall about Habcheon Reservoir (Case 1)

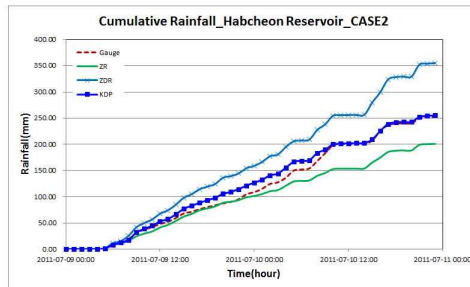
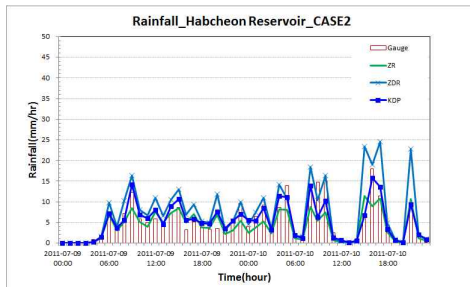


Fig. 5. Comparing Radar Rainfall with Gauge Rainfall about Habcheon Reservoir (Case 2)

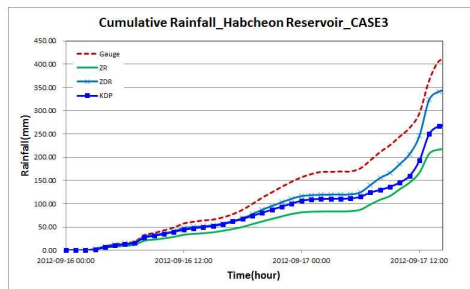
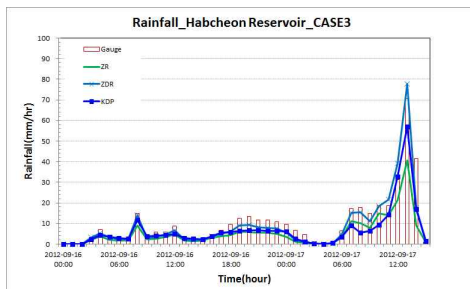


Fig. 6. Comparing Radar Rainfall with Gauge Rainfall about Habcheon Reservoir (Case 3)

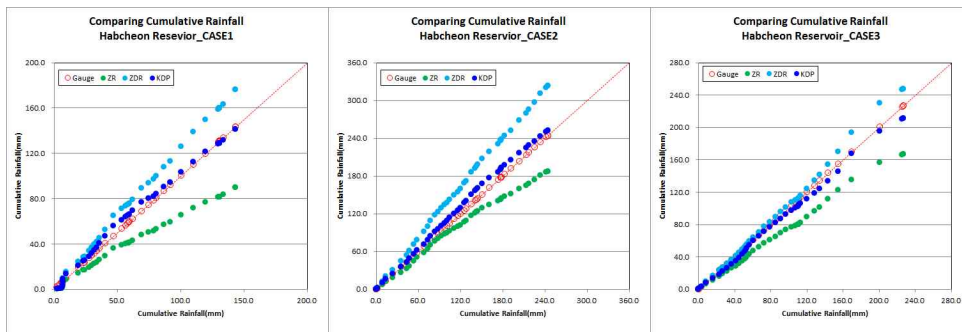


Fig. 7. Comparing Accumulation Rainfall about Habcheon Reservoir

위한 것으로 지상우량값을 기준으로 ZR, ZDR, KDP 강우량 간의 오차정도와 분산정도를 정성적으로 판단할 수 있다. Figs. 4~6으로부터 알 수 있는 것은 이중편파 변수를 사용한 강우량 추정은 강우강도가 강한 부분에서 정확도 향상이 뚜렷하게 나타났으나, 강우강도가 약한 강우의 경우 수평편파만 사용한 강우추정과의 차이가 미비하게 나타났다. 특히 Case 1과 Case 3의 경우 레이더를 사용한 강우량 추정이 지상강우량 보다 낮게 추정이 되는 것을 확인할 수 있다. 또한 ZDR을 통한 강우추정은 강우강도가 최

대강우 강도를 갖는 부분이나 누적강우량에서 지상강우보다 과대 산정하는 경향을 보였고, KDP의 경우 Case 2를 제외하고 Case 1과 Case 3에서 과소 추정되는 경향을 보였다. 합천댐의 레이더 강우량 추정 결과는 Table 2에 정리하였다.

#### 4.2.2 회천 유역

Figs. 8~10은 회천유역의 지상 유역평균강우량과 레이더 유역평균강우량의 강우사상 Case 1~Case 3에 대해

Table 2. Rainfall Estimate Result in Habcheon Reservoir

Division	Period	Method	Average Rainfall (mm/hr)	Maximum Rainfall (mm/hr)	Accumulative Rainfall (mm)
Case 1	2011/06/25 00:00~ 2011/06/26 20:00	Gauge	5.5	15.4	158.9
		ZR	2.3	6.2	75.1
		ZDR	4.4	13.5	146.0
		KDP	3.7	9.5	120.8
Case 2	2011/07/09 00:00~ 2011/07/10 23:00	Gauge	5.7	18.0	252.3
		ZR	4.6	11.5	201.1
		ZDR	8.1	24.6	355.1
		KDP	5.8	15.8	255.4
Case 3	2012/09/16 00:00~ 2012/09/17 15:00	Gauge	11.0	70.9	407.8
		ZR	5.9	40.7	217.4
		ZDR	9.3	77.9	342.6
		KDP	7.3	57.0	268.3

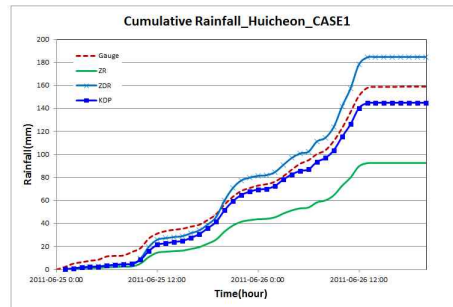
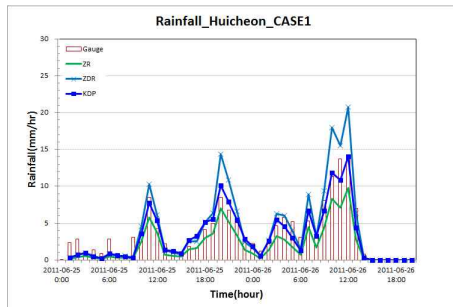


Fig. 8. Comparing Radar Rainfall with Gauge Rainfall about Huicheon (Case 1)

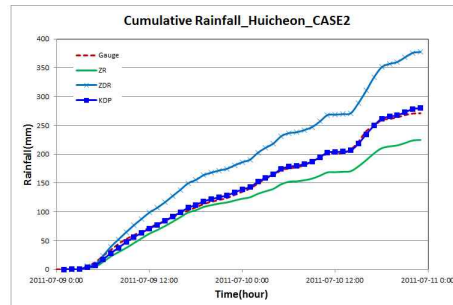
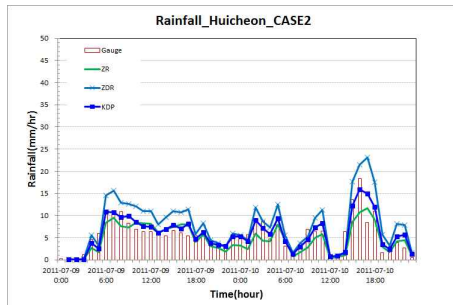


Fig. 9. Comparing Radar Rainfall with Gauge Rainfall about Huicheon (Case 2)

도식화한 것이고, Fig. 11은 회천유역의 누적강우량 산포도를 도식화한 것이다. 강우량 추정 결과 회천유역의 경우 레이더로 추정된 강우량이 지상강우보다 현저하게 적은 경우는 없었다. 그러나 수평편파만 사용한 ZR의 경우 누적강우에서 지상강우량 보다 꽤나 크게 과소 추정하는 경향을 보이고 ZDR은 과대추정, KDP는 지상강우와 유사한 강우량 값을 보인다. 최대 강우강도를 가진 부분에서 ZDR은 모든 Case에서 과대 산정하였고, KDP의 경우 지상강우와 가장 유사하긴 하였지만 모든 Case에서 과소 산

정되었다. 회천유역의 레이더 강우량 추정 결과는 Table 3에 정리하였다.

### 4.3 레이더 강우의 통계적 평가

Table 4는 지상강우를 이용하여 산출된 레이더강우의 RMSE와 상관계수(r)이다. RMSE는 6개 모두 KDP가 우수하게 나타났고, 상관계수(r)는 ZDR 4개, KDP 2개가 우수하게 나타났다. RMSE는 표준편차를 기준으로 하여 작은 오차보다 큰 오차에 더 큰 영향을 미치기 때문에 모든

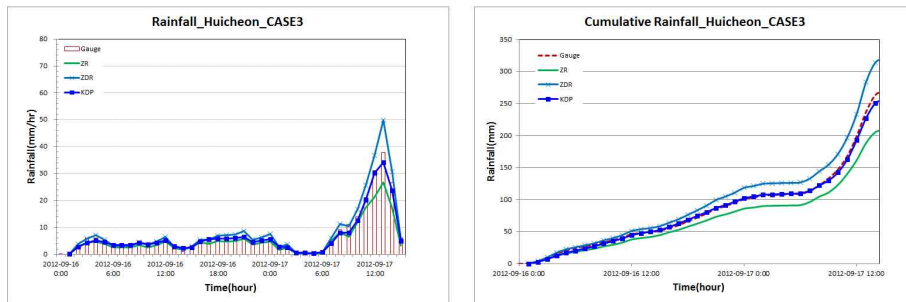


Fig. 10. Comparing Radar Rainfall with Gauge Rainfall about Huicheon (Case 3)

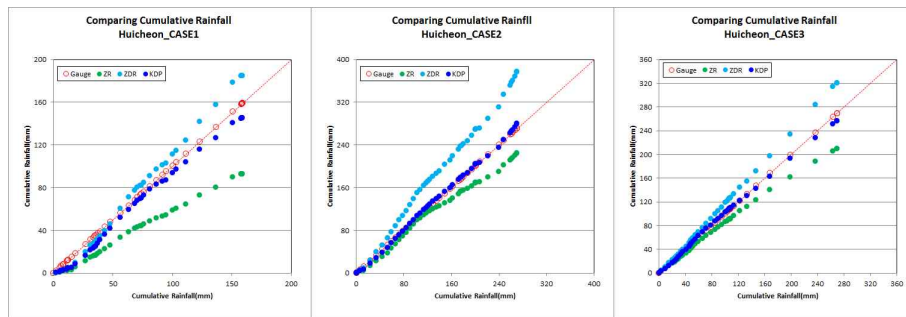


Fig. 11. Comparing Accumulation Rainfall about Huiheon

Table 3. Rainfall Estimate Result in Huicheon

Division	Period	Method	Average Rainfall (mm/hr)	Maximum Rainfall (mm/hr)	Accumulative Rainfall (mm)
Case 1	2011/06/25 00:00 ~ 2011/06/26 20:00	Gauge	3.5	14.2	159.0
		ZR	2.1	9.8	92.6
		ZDR	4.1	20.8	184.8
		KDP	3.2	14.0	145.0
Case 2	2011/07/09 00:00 ~ 2011/07/10 23:00	Gauge	6.0	18.3	271.1
		ZR	5.0	11.6	224.8
		ZDR	8.4	23.2	377.4
Case 3	2012/09/16 00:00 ~ 2012/09/17 15:00	Gauge	6.7	37.8	269.6
		ZR	5.2	26.7	208.7
		ZDR	8.0	49.8	319.8
		KDP	6.4	34.2	255.8

Case에서 KDP가 좋은 결과를 보였고, 상관계수는 평균 값을 기준으로 하기 때문에 Case 1과 Case 3에서 KDP의 상관계수가 ZDR보다 작게 나타난 것으로 사료된다. 결론적으로 KDP의 RMSE는 1.098~2.138, r은 0.917~0.995 사이의 값을 가지며 RMSE의 perfect score인 0, 상관계수 perfect score인 1에 가장 가까운 값을 나타냈다. 이와 같은 결과는 기존의 수평편파만을 사용해오던 강우량 추정 ZR보다 이중편파변수를 사용한 강우량 추정 KDP가 좀 더 우수하다고 판단된다.

## 5. 강우-유출모의 결과

### 5.1 시험유역별 유출모의 결과

본 연구에서는 각 시험유역의 수치고도자료, 토지피복

도, 토양도로부터 흐름방향, 모형구축영역경사, 조도계수, 유효공극률 등을 산정한 후 Vflo 모형을 이용하여 유출을 모의하였다. 또한 Vflo 모형의 매개변수 보정과정은 지상 강우의 유출모의를 먼저 시행한 후 실제 관측된 유출량과의 비교를 통해서 각각 유역의 특성을 고려하여 보정인자를 결정한 후 보정된 인자를 레이더 강우를 이용한 유출 모의에 적용하였다.

#### 5.1.1 합천댐 유역

합천댐 유역의 유출모의 결과는 Figs. 12~14, Table 5와 같다. 관측자료와 추정된 자료의 첨두치의 차이를 정량적으로 확인하기 위해 첨두값의 퍼센트 오차(PEP: Percent Error in Peak)를 사용하였다.

합천댐 유역 Case 1 ZR의 첨두값은 389.39 m<sup>3</sup>/s, ZDR의

Table 4. RMSE and Correlation Coefficient of Mean Areal Rainfall

Division		Habcheon Reservoir		Huicheon	
		RMSE	r	RMSE	r
Case 1	ZR	1.881	0.917	2.025	0.946
	ZDR	1.738	<b>0.919</b>	2.095	<b>0.957</b>
	KDP	<b>1.253</b>	0.917	<b>1.169</b>	0.946
Case 2	ZR	2.149	0.852	2.372	0.804
	ZDR	2.365	0.924	3.751	0.861
	KDP	<b>1.204</b>	<b>0.934</b>	<b>1.712</b>	<b>0.896</b>
Case 3	ZR	3.134	0.924	3.006	0.989
	ZDR	2.355	<b>0.942</b>	2.485	<b>0.995</b>
	KDP	<b>2.138</b>	0.937	<b>1.098</b>	0.995

Table 5. Model Simulation Result in Habcheon Reservoir

Division	Method	Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	PEP (%)
Case 1	Measurement	841.4	-	-
	Gauge	854.1	-12.7	1.5
	ZR	383.4	-458.0	119.5
	ZDR	1,230.0	388.6	31.6
	KDP	729.6	-111.8	15.3
Case 2	Measurement	1,268.9	-	-
	Gauge	1,260.8	8.1	0.6
	ZR	634.5	-634.4	100.0
	ZDR	2,074.5	805.6	38.8
	KDP	1,074.4	-194.5	18.1
Case 3	Measurement	3,733.6	-	-
	Gauge	3,514.1	219.5	6.2
	ZR	1,727.1	-2006.5	116.2
	ZDR	3,709.6	-24.0	0.7
	KDP	2,557.6	-1,176.0	46.0



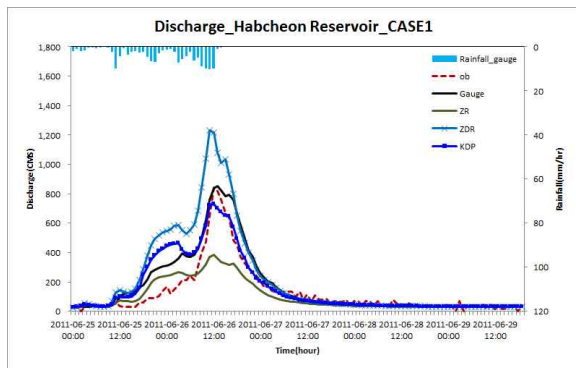


Fig. 12. Model Simulation Result in Habcheon Reservoir about Case 1

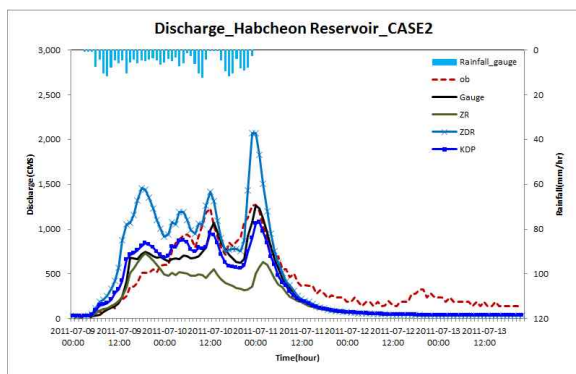


Fig. 13. Model Simulation Result in Habcheon Reservoir about Case 2

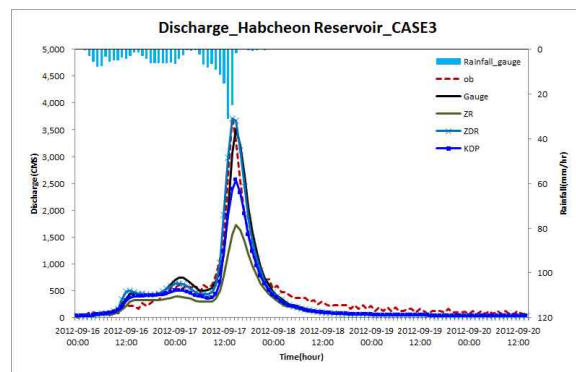


Fig. 14. Model Simulation Result in Habcheon Reservoir about Case 3

침투량은 1,230.0 m<sup>3</sup>/s, KDP의 침투량은 729.6 m<sup>3</sup>/s로 모의되었고 이는 실제 관측값인 841.4 m<sup>3</sup>/s와 각각 458.0 m<sup>3</sup>/s, 388.6 m<sup>3</sup>/s, 111.8 m<sup>3</sup>/s의 차이를 나타내었다. 차등반사도 및 비차등위상을 사용한 KDP의 경우가 PEP 15.3%로 실제 유출량의 침투값에 가장 유사하게 나타났다. 지상강우를 이용한 모의 결과와 비교하여도 수평편과 변수만을 사용한 ZR은 침투값 및 전체적인 유출량을 과소 산정하였고

차등반사도를 사용한 ZDR의 경우에는 과대 산정하는 경향을 보였다.

Case 2 ZR의 침투값은 634.5 m<sup>3</sup>/s, ZDR의 침투값은 2,074.5 m<sup>3</sup>/s, KDP의 침투값은 1,074.4 m<sup>3</sup>/s로 모의되었고 이는 실제 관측값인 1,268.9 m<sup>3</sup>/s와 각각 634.4 m<sup>3</sup>/s, 805.6 m<sup>3</sup>/s, 194.5 m<sup>3</sup>/s의 차이를 나타내었다. 차등반사도 및 비차등위상을 사용한 KDP의 경우 PEP 18.1%로 실제 유출량의 침투값에 가장 유사하게 나타났다. Case 1과 마찬가지로 수평편과 변수만을 사용한 ZR은 침투값 및 전체적인 유출량을 과소 산정하였고 차등반사도를 사용한 ZDR의 경우에는 과대 산정하는 경향을 보였다.

Case 3 ZR의 침투값은 634.5 m<sup>3</sup>/s, ZDR의 침투값은 2,074.5 m<sup>3</sup>/s, KDP의 침투값은 1,074.4 m<sup>3</sup>/s로 모의되었고 이는 실제 관측값인 3,733.6 m<sup>3</sup>/s와 각각 2,006.5 m<sup>3</sup>/s, 24.00 m<sup>3</sup>/s, 1,176.0 m<sup>3</sup>/s의 차이를 나타내었다. 차등반사도를 이용한 ZDR의 경우 PEP 0.7%로 실제 유출량의 침투값에 가장 유사하게 나타났다.

### 5.1.2 회천 유역

회천 유역의 유출모의 결과는 Figs. 15~17, Table 6과 같다. 회천 유역의 매개변수 보정과정의 경우 3가지 Case를 모두 만족시킬 보정 값 산정이 어려움이 있어, 가장 강한 강우강도를 가진 Case 3을 이용하여 보정인자를 결정하였다.

회천 유역 Case 1 ZR의 침투값은 564.6 m<sup>3</sup>/s, ZDR의 침투값은 1,860.4 m<sup>3</sup>/s, KDP의 침투값은 1,082.3 m<sup>3</sup>/s로 모의되었고 이는 실제 관측값인 1,014.7 m<sup>3</sup>/s와 각각 450.1 m<sup>3</sup>/s, 845.7 m<sup>3</sup>/s, 67.6 m<sup>3</sup>/s의 차이를 나타내었다. 차등반사도 및 비차등위상을 사용한 KDP의 경우가 PEP 6.3%로 실제 유출량의 침투값에 가장 유사하게 나타났다. 실제 관측자료가 아닌 지상강우를 통한 유출모의와 비교를 통해서도 수평편과 변수만을 사용한 ZR은 침투값 및 전체적인 유출량을 과소 산정하고 차등반사도를 사용한 ZDR의 경우에는 과대 산정하는 경향을 확인할 수 있었다.

Case 2 ZR의 침투값은 774.2 m<sup>3</sup>/s, ZDR의 침투값은 1,972.2 m<sup>3</sup>/s, KDP의 침투값은 1,244.1 m<sup>3</sup>/s로 모의되었고 이는 실제 관측값인 1,968.4 m<sup>3</sup>/s와 각각 1,194.1 m<sup>3</sup>/s, 3.8 m<sup>3</sup>/s, 724.2 m<sup>3</sup>/s의 차이를 나타내었다. 차등반사도를 사용한 ZDR의 경우 PEP 0.2%로 실제 유출량의 침투값에 가장 유사하게 나타났다. 그러나 전체적인 양상을 보았을 때 ZDR의 경우 초기에 크게 과대 산정하여 전체적인 패턴 반영을 잘 못하였고 KDP의 경우가 전체적인 유출량 및 패턴에 더 비슷하였다. 또한 지상강우를 통한 모의결과와 비교해보아도 KDP를 통한 유출해석이 가장 유사하게 나타났다.

Table 6. Model Simulation Result in Huicheon

Division	Method	Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Difference (m <sup>3</sup> /s)	PEP (%)
Case 1	Measurement	1,014.7	-	-
	Gauge	1,413.4	-398.7	28.2
	ZR	564.6	-450.1	79.7
	ZDR	1,860.4	845.7	45.5
	KDP	1,082.3	67.6	6.3
Case 2	Measurement	1,968.4	-	-
	Gauge	1,455.2	513.2	35.3
	ZR	774.2	-1,194.1	154.2
	ZDR	1,972.2	3.8	0.2
	KDP	1,244.1	-724.2	58.2
Case 3	Measurement	4,554.3	-	-
	Gauge	4,583.5	-29.2	0.6
	ZR	2,369.7	-2,184.6	92.2
	ZDR	5,067.8	513.5	10.1
	KDP	3,462.6	-1,091.6	31.5

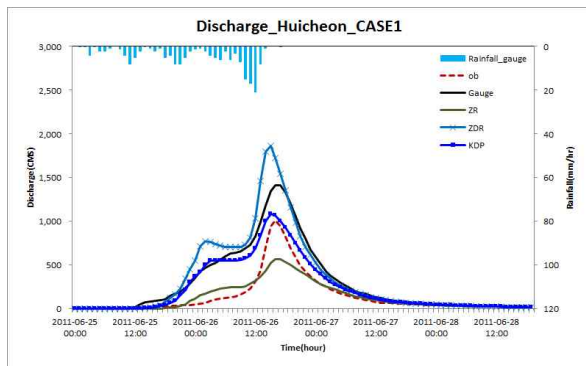


Fig. 15. Model Simulation Result in Huicheon about Case 1

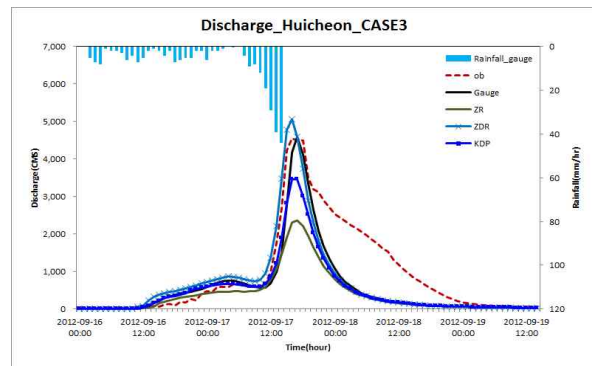


Fig. 17. Model Simulation Result in Huicheon about Case 3

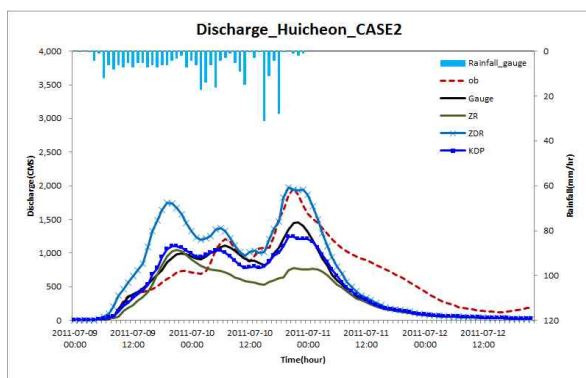


Fig. 16. Model Simulation Result in Huicheon about Case 2

그리고 수평편파 변수만 사용한 ZR의 경우는 앞의 Case들과 마찬가지로 과소 산정하는 경향을 보였다.

Case 3 ZR의 첨두값은 2,369.7 m<sup>3</sup>/s, ZDR의 첨두값은 5,067.8 m<sup>3</sup>/s, KDP의 첨두값은 3,462.6 m<sup>3</sup>/s로 모의되었고 이는 실제 관측값인 4,554.3 m<sup>3</sup>/s와 각각 2,184.6 m<sup>3</sup>/s, 513.5 m<sup>3</sup>/s, 1,091.6 m<sup>3</sup>/s의 차이를 나타내었다. 차등반사도를 사용한 ZDR의 경우 PEP 10.1%로 실제 유출량의 첨두값에 가장 유사하게 나타났다. 수평편파 변수만 사용한 ZR의 경우는 앞의 Case들과 마찬가지로 과소 산정하는 경향을 보였다.

## 5.2 결과종합

Case별 유출량비교 결과를 자세히 알아보기 위하여 오차분석을 실시하였다. 홍수기에 중요시되는 첨두유량의 오차 분석을 위해서 NPE (Normalized Peak Error)와 PTE (Peak Timing Error)를 이용하였고, 유출모의로 추정된

유출량의 평균적인 추정 오차를 확인하기 위해 평균 추정 오차(MES: Mean Estimation Error)방법을 사용하였다. 각 시험유역별 유출모의 오차분석 결과는 Tables 7 and 8 과 같다.

합천댐 유역의 오차분석 결과 선행강우에 대한 유출량이 크게 발생하고 강우가 종료될 때 유출량이 급격히 줄어드는 모의 결과로 인하여 MES 오차 값은 크게 만족할 만한 값을 보이지 않지만, Case 1의 침투유량에 대해서는 이중편과 변수 중 차등반사도와 비차등위상을 사용한 KDP가 NPE -0.133를 보이며 가장 좋은 결과를 나타내었다. Case 2도 마찬가지로 KDP를 사용한 유출모의가 NPE -0.153을 보이며 가장 좋은 결과를 나타내었고, 태풍 산바가 있었던 Case 3에서는 ZDR을 사용한 유출모의가 NPE -0.006을 나타내며 전체적으로 가장 양호한 결과를 보였고, KDP 또한 -0.315를 나타내며 양호한 결과를 보였다.

회천 유역의 오차분석 결과 합천댐 유역과 마찬가지로 선행강우에 대한 유출량이 크게 발생하고 강우가 종료될 때 유출량이 급격히 줄어드는 모의 결과로 인하여 MES 오차 값은 크게 만족할 만한 값을 보이지 않지만, Case 1의 침투유량에 대해서는 이중편과 변수 중 차등반사도와 비차등위상을 사용한 KDP가 NPE 0.067을 나타내며 가장 좋은 결과를 보였다. Case 2에서는 ZDR이 NPE 0.002를 나타내며 가장 좋은 결과를 보였고 KDP가 NPE -0.368을 나타내며 양호한 값을 보였다. 태풍 산바가 있었던 Case 3에서도 ZDR이 NPE 0.113을 나타내며 가장 양호한 결과를 보였고, KDP 또한 -0.24를 나타내며 양호한 결과를 보였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 이중편과 레이더를 사용하여 시험유역의 유출을 모의하고 실제 관측유량과의 차이를 비교·분석하였다. 이를 위해 비슬산 레이더 반경 내의 합천댐 유역과 회천 유역을 시험유역으로 선정하고 총 3가지 호우사상을 선정하였다. 그 후 수평편과 및 이중편과 변수를 사용하여 강우량을 추정된 후 지상 강우량과의 비교를 통해 이중편과 레이더의 강우 추정 정확도를 검증 및 확인하고 Vflo 모형을 통해 유출해석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 유역평균강우량 산정에서 수평편과만 이용한 강우량 추정 방식보다는 이중편과 변수 중 차등반사도와 비차등위상을 이용한 강우량 추정이 지상 강우량과 더 근접하다는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 강우강도가 약한 강우의 경우 이중편과 변수를 사용한 강우량 추정값과 수평편과 변수만을 사용한 강우량 추정값의 차이가 미비한 것으로 나타났지만 강우강도가 강한 부분에서 이중편과 변수를 사용한 강우량 추정의 정확도 향상이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 지상강우량을 침투강우량이나 누적 강우량에 대하여 비교·검토했을 경우 차등반사도를 이용한 ZDR은 과대산정하는 경향을 보였고, 차등반사도 및 비차등위상을 이용한 KDP는 지상강우와 가장 유사한 강우량 값을 보였으나 과소 산정되는 Case가 많았다.
- 3) 이중편과 레이더 변수 중 차등반사도를 이용한 ZDR의 유출모의에서는 침투유량을 실제 유출량 및 지상

Table 7. Error Analysis in Model simulation Result in Habcheon Reservoir

Division	Habcheon Reservoir								
	Case 1			Case 2			Case 3		
	ZR	ZDR	KDP	ZR	ZDR	KDP	ZR	ZDR	KDP
NPE	-0.544	0.462	-0.133	-0.500	0.635	-0.153	-0.537	-0.006	-0.315
PTE	0	1	0	2	1	1	1	0	1
MES	-0.030	0.581	0.312	-0.496	-0.052	-0.318	-0.448	-0.262	-0.356

Table 8. Error Analysis in Model simulation Result in Huicheon

Division	Huicheon								
	Case 1			Case 2			Case 3		
	ZR	ZDR	KDP	ZR	ZDR	KDP	ZR	ZDR	KDP
NPE	-0.444	0.833	0.067	-0.607	0.002	-0.368	-0.480	0.113	-0.240
PTE	1	1	1	0	1	0	1	0	0
MES	-0.114	1.179	0.634	-0.504	-0.043	-0.376	-0.491	-0.092	-0.342

강우를 이용한 유출량과 비슷하게 모의하는 경우도 있었지만 전체적으로 과대 산정하는 경향을 보였다. 차등반사도 및 비차등위상을 이용한 KDP의 경우 대부분의 Case에서 지상강우를 이용한 유출모의와 실제 유출량과 가장 유사하였지만, 과소 산정하는 경향을 보였다. 이는 아직 전파를 이용하는 레이더의 특성의 한계로 생각하며 HW, SW의 연구 및 발전이 필요할 것으로 생각된다.

- 4) 유출모의 오차분석 결과 MES 오차의 값은 선행강우에 대한 유출량이 크게 발생하고 강우가 종료될 때 유출량이 급격히 감소하는 결과로 만족할 만한 값은 보이지 않았지만, 침두유출에 대한 NPE 같은 경우 대부분의 Case에서 차등반사도 및 비차등위상을 사용한 KDP 값이 가장 우수한 결과를 보였다.

본 연구를 통해 이중편파 레이더를 활용하면 기존의 수평편파만을 사용하는 단일편파 레이더보다 정확한 강우를 산정하고 유출모의 또한 더 정확함을 확인하였다. 그러나 아직 이중편파 레이더를 통한 연구가 부족한 실정이기 때문에 기상·수문학적으로 활용하기 위한 추가적인 정확도 확보에 대한 연구가 필요하다. 따라서 향후 다양한 강우사상에 대해 이중편파 레이더를 적용하는 지속적인 연구와 우리나라의 기후특성 및 지형적 특성에 적합한 이중편파레이더 강우 추정식 산정 및 유출모형에 대한 연구가 추가로 수행된다면 이중편파 레이더의 강우량 및 유출 해석의 정확도가 더욱 증대되어 돌발홍수나 도시홍수의 예측 및 홍수피해 방지 등에 높은 활용 가능성이 있다고 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013-065006).

## References

Bae, D.H., Kim, J.H., and Yoon, S.S. (2005). "Hydrologic Utilization of Radar-Derived Rainfall (I) Optimal Radar Rainfall Estimation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 12, pp. 1039-1052.

Choi, W.S. (2012). *Assessment of Dual Polarization Radar on Hydrology Field*. Master's theses, Sejong University, Seoul, Korea. pp. 27-28.

Jeon, B.G., Lee, C.K., and Kim, Y.S. (2012). "Evaluation of Rainfall Measurement Capability of Dual Polarization Radar." *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2. pp. 215-224.

Kang, M.Y., Jang, M., Lee, D.I., Seo, K.J., Kim, K.I., Yoo, C.H., and Kim, J.H. (2005). "Quantitative Rainfall Estimation Using Dual Polarization Radar." *Journal of Korea Meteorological Society*, Vol. 2005, pp. 154-155.

Kim, B.S., Hong, J.B., Kim, H.S., and Choi, K.H. (2007). "Combining Radar and Rain Gauge Rainfall Estimates for Flood Forecasting Using Conditional Merging Method." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 27, No. 3B, pp. 255-265.

Kim, H.K., Lee, D.I., Yu, C.H., and Kwon, W.T. (2002). "Radar Rainfall Estimation Using Window Probability Matching Method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 1, pp. 211-221.

Lee, G.T. (2011). *Improving the HEC-HMS Model Parameter Estimation Method*, Master's dissertation, Seoul University, Seoul, Korea. pp. 48.

Lee, J.H., and Ryu, C.S. (2009). *Radar Meteorology*, Sigma Press, pp. 197-205.

Lee, J.Y. (2013). *Case Study for Rainfall Estimation Using Dual-Polarization Radar Data*. Master's dissertation, Inha University, Incheon, Korea, pp. 48-50.

Marshall, J.S., and Palmer, W.Mc K. (1948). "The Distribution of Raindrops with Size." *Journal of Atmospheric Science*, Vol. 5, pp. 165-166.

Ryzhkov, A.V., Giangrande, S.E., and Schuur, T.J. (2003). "Rainfall estimation with a polarimetric prototype of the operational WSR-88D radar." *31st Conference on Radar Meteorology, Seattle, Washington*, Vol. I, pp. 99.

Sin, D.H. (2009). *Runoff Analysis of Distributed Model Using Radar Rainfall Data*. Master's theses, Kyunghee University, Seoul, Korea. pp. 7-9.

Yoon, Y.N. (2008). *Elementary Hydrology*, Cheong Moon Gak, pp. 93-95.

논문번호: 14-044	접수: 2014.06.09
수정일자: 2014.07.25/08.20	심사완료: 2014.08.20