

## Hybrid Scan Reflectivity 기법을 이용한 레이더 강우량의 수문모형 적용

### Application of the Radar Rainfall Estimates Using the Hybrid Scan Reflectivity Technique to the Hydrologic Model

이 재 경\* / 이 민 호\*\* / 석 미 경\*\*\* / 박 혜 숙\*\*\*\*

Lee, Jae-Kyoung / Lee, Min-Ho / Suk, Mi-Kyung / Park, Hye-Sook

#### Abstract

Due to the nature of weather radar, blank areas occur due to impediments to observation, such as the ground clutter. Radar beam blockages have resulted in the underestimation rainfall amounts. To overcome these limitations, this study developed the Hybrid Scan Reflectivity (HSR) technique and compared the HSR results with existing methods. As a result, the HSR technique was able to estimate rainfalls in areas from which no reflectivity information was observable using existing methods. In case of estimating rainfalls depending on reflectivity scan techniques and beam-blockage/non beam-blockage, the HSR accuracy is superior. Furthermore, rainfall amounts derived from each method was inputted to the HEC-HMS to examine the accuracy of the flood simulations. The accuracy of the results using the HSR technique in contrast to the RAR calculation system and M-P relation was improved by 7% and 10% (based on correlation coefficients), and 18% and 34% (based on Nash-Sutcliffe Efficiency), on average, respectively. Therefore, it is advised that the HSR technique be utilized in the hydrology field to estimate flood discharge more accurately.

**keywords** : radar rainfall, radar beam blockage, Hybrid Scan Reflectivity, HEC-HMS

#### 요 지

기상레이더의 관측 특성상, 지형클러터 등의 관측영역 한계로 인한 관측공백 지역이 발생한다. 이러한 레이더 빔의 차폐는 강우량의 과소추정 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 Hybrid Scan Reflectivity (HSR) 기법을 개발하고 기존 방법 결과와 비교하였다. 결과에 의하면, 기존 레이더 관측방법으로 지형에 의해 반사도 정보를 얻지 못하는 영역에 대하여 HSR 기법이 레이더 강우량을 추정할 수 있음을 확인하였다. 반사도 스캔기법과 빔차폐/비 빔차폐영역에서 모두 HSR 기법을 적용한 결과가 정확성이 가장 뛰어났다. 다음으로 각 방법별 레이더 추정 강우량을 HEC-HMS에 적용하여 홍수 유출량 추정 정확성을 평가하였다. HSR 기법에 의한 유출량은 RAR 산출 시스템과 M-P 관계식 대비 상관계수는 평균 7%와 10%, Nash-Sutcliffe Efficiency는 평균 18%와 34% 향상되었다. 따라서 정확한 홍수량 추정을 위해 수문분야에 HSR 기법에 의해 추정된 강우량을 활용할 필요성이 있는 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 레이더 강우량, 레이더 빔차폐, Hybrid Scan Reflectivity, HEC-HMS

\* 교신저자, 기상청 기상레이더센터 연구원 (e-mail: tomyroom@korea.kr, Tel: 82-10-9163-0102)

*Corresponding Author*, Researcher, Weather Radar Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

\*\* 기상청 기상레이더센터 연구원 (e-mail: amoreu@korea.kr)

Researcher, Weather Radar Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

\*\*\* 기상청 기상레이더센터 연구사 (e-mail: mksuk@korea.kr)

Junior Researcher, Weather Radar Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

\*\*\*\* 기상청 기상레이더센터 연구관 (e-mail: hspark@korea.kr)

Senior Researcher, Weather Radar Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

## 1. 서 론

강수현상과 위험기상 등의 기상관측을 위해 레이더를 활용하기 시작한 이후 기상레이더는 하드웨어와 소프트웨어에서 많은 발전이 있었다(Crum and Alberty, 1993; Maddox et al., 2002). 더욱이 발생빈도가 증가한 집중호우와 태풍 등의 위험기상을 효율적으로 감시하기 위해 시·공간적으로 고분해능 자료인 기상레이더의 역할이 증대되고 있다. 특히, 수문분야의 최대 관심사 중 하나인 산간이나 도시지역에 발생하는 돌발홍수의 정확한 추정을 위해서는 기상레이더에 의해 산출되는 강우의 정확성이 보장되어야 한다. 그러나 기상레이더의 관측 특성상 지형에 의한 레이더 빔의 완전차폐(complete blockage) 혹은 부분차폐(partial blockage)로 인해 레이더 반사도가 하층 고도각(low-level elevation tilt)에서는 관측되지 않거나 관측되는 레이더 빔 강도가 매우 약해지며, 레이더 빔차폐 현상은 레이더 강우량의 과소추정을 초래한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 레이더 시선방향으로 빔차폐 현상이 발생하는 고도각 대신에 상위의 고도각 정보를 이용하는 하이브리드 관측(hybrid scan) 방법이 개발되었다(Shedd et al., 1991). 관련 연구들을 살펴보면, O'Bannon (1997)은 미기상청(National Weather Service, NWS)에서 운영하는 산악지역에 위치한 레이더 Weather Surveillance Radar (WSR)-88D의 강우량 추정 개선을 위해 지형 조건에 따라 관측 가능한 레이더의 최적 고도각을 선정하고 이에 따라 하이브리드 관측을 수행하였다. Fulton et al. (1998)은 미국 전역에 분포하고 있는 WSR-88D의 강우량 추정을 위해 레이더별로 빔차폐가 되는 방위각을 구역별로 나누고 구역에 따라 관측고도를 달리하는 구역 반사도 하이브리드 관측(sectorized reflectivity hybrid scan)을 수행하였다. Maddox et al. (2002)은 하이브리드 관측의 기본 정보가 되는 미국 전역의 WSR-88D 네트워크에 대하여 고도별로 레이더 네트워크가 관측할 수 있는 공간 범위 지도(spatial coverage map)를 구성하였다. Zhang et al. (2011)은 National Oceanic and Atmospheric Administration의 National Severe Storms Laboratory에서 운영 중인 레이더 기반 강우량 산출 모형인 National Mosaic and Multi-sensor Quantitative Precipitation Estimation 시스템에 단일편파 레이더의 반사도 관측전략으로 하이브리드 관측 기법을 이용하고 이를 바탕으로 강우량을 산출하였다.

이에 기상청 기상레이더센터는 레이더 빔차폐로 인한 관측 공백지역의 강우량 추정 정확도 개선을 위해 하이브리드 관측 기본개념을 기반으로 우리나라 기상과 지형에

적합한 Hybrid Scan Reflectivity(이하 HSR) 기법을 개발하였다(Weather Radar Center, 2013). 본 연구에서는 개발된 HSR 기법을 현업 레이더에 결합하여 적용하고 레이더 강우량을 산출하여 강우량 추정 정확도 향상 정도를 분석하였으며, 기존 강우량 추정 방법 결과와 비교·평가하였다. 또한 홍수유출모형을 이용하여 HSR 기법을 적용한 레이더 강우량으로 추정된 홍수유출량의 정확도 향상 정도를 평가하고 기존결과와 비교하였다.

## 2. 기본이론

### 2.1 기존 정량적 강우량 추정

기상청에서는 레이더 강우량 추정을 위해서 정량적 강수량 추정(Quantitative Precipitation Estimation, QPE) 모형을 사용하거나 Marshall and Palmer (1948)가 제안한 Z-R 관계식( $Z=200R^{1.6}$ )(이하 M-P 관계식)을 기본적으로 사용하고 있다. 우선 QPE 모형에 의한 강우량 추정을 위해 Radar-AWS Rainrate (RAR) 산출 시스템을 실시간 운영하고 있다. RAR 산출 시스템은 11개 단일편파 레이더를 기반으로 현업운영 중에 있으며, 전국 레이더 합성우량을 생성하게 된다. 이를 위해 레이더 반사도 산출, Automatic Weather System (AWS) 강우강도 변환, Z-R 관계식 산출 단계를 수행하게 된다(Fig. 1). RAR 산출 시스템에서는 실시간 정량적 강우량 추정을 위해 10분마다 레이더 강우량 결과를 산출하며, 각 강우발생에 적합하도록 Z-R 관계식의 매개변수를 결정한다. 이를 위해 레이더 반사도와 우량계 강우량을 Window Probability Matching Method (WPMM) (Rosenfeld et al., 1993)에 적용하게 되며, 최종적으로 한반도 합성 강우장을 생성한다. 사용되는 레이더 반사도는 해당 AWS 위치지점을 중심으로  $3 \times 3$  격자 반사도 평균값을 이용하며, 비기상에코 제거 등 품질관리(quality control)된 반사도를 사용하게 된다. WPMM은 레이더 관측반경 이내 반사도와 시공간적으로 일치하는 지상 강우강도의 확률밀도함수를 대응하여 반사도 인자와 강우강도와의 관계식을 결정하게 된다. 이때 지상 관측 강우강도는 관측 가능한 최소 분해능이 존재하고 이에 대해 레이더 반사도 또한 임계값을 가지게 되므로, 이를 반영한 WPMM 기본식은 다음과 같다(Atlas et al., 1990).

$$\int_0^{\infty} f(Z_e)P_c(Z_e)dZ_e = \int_0^{\infty} RP_c(R)dR \quad (1)$$

여기서,  $Z_e$ 는 레이더 반사도(dBZ),  $f(Z_e)$ 는 레이더 반사도를 강우강도로 환산하는 함수인 Z-R 관계식,  $P_c$ 는 조건부

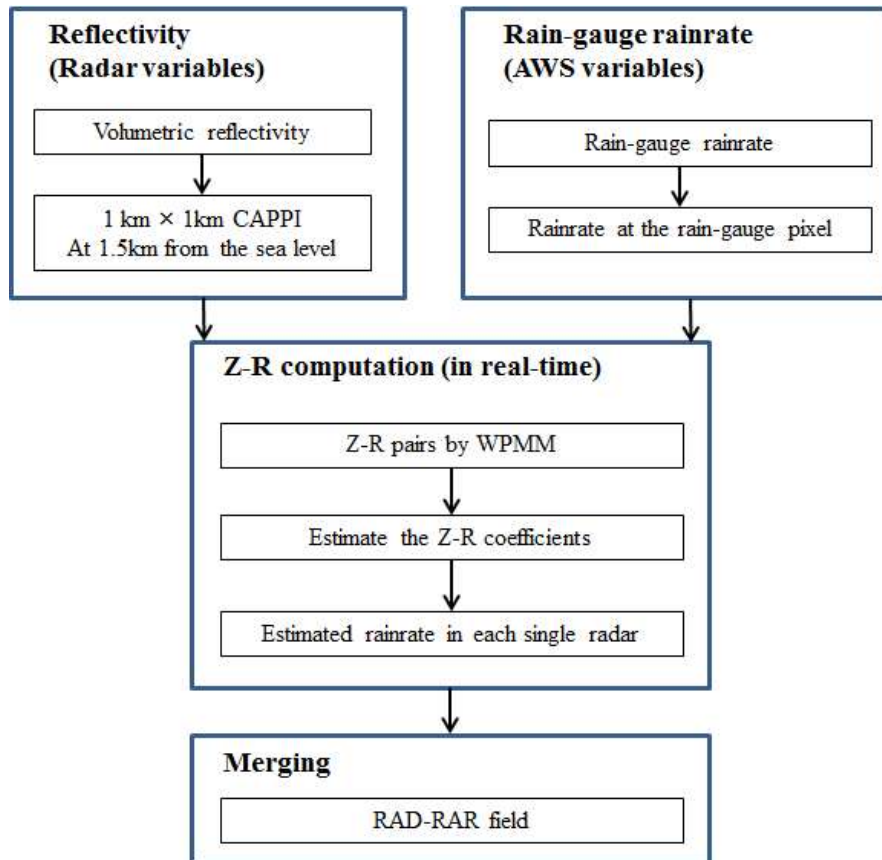


Fig. 1. Flowchart of the Radar-AWS Rainrate Calculation System (National Institute of Meteorological Research, 2010)

확률,  $R$ 은 강우강도(mm/hr),  $T$ 는 임계값을 나타낸다. Eq. (1)에서의 조건부 확률은  $P_c(R) = P(R|R > R_T)$ 와  $P_c(Z_e) = P(Z_e | Z_e > Z_{eT})$ 을 이용하여 추정할 수 있으며, 지상 관측 강우강도의 최소 분해능은 0.1 mm/hr, 레이더 반사도의 임계값은 10 dBZ이다. 이에 따라 현재부터 한 시간 이전까지의 레이더 반사도와 강우강도 쌍을 이용하게 되며, 중앙값 적합(median fitting)에 대입하여 Z-R 관계식의 매개변수를 추정하게 된다(Rosenfeld et al., 1993).

RAR 산출 시스템에서 WPMM의 적용 요건을 충족하지 않는 경우에는 M-P 관계식(Marshall and Palmer, 1948)을 적용한다. 하지만 M-P 관계식은 층상형 강우에 적합한 관계식이며, 강우시스템은 시공간적으로 시시각각 다르게 분포하기 때문에 정확하게 강우량을 추정하는 데 한계가 존재한다(Battan, 1973; Smith and Krajewski, 1993; Smith, 1993).

## 2.2 Hybrid Scan Reflectivity 기법

Hybrid Scan Reflectivity 기법은 레이더 관측자료와 지형 정보를 이용하여 지형에 의한 효과를 최소화하는 고

도각 중 가장 낮은 고도각을 선택하는 방법이다(Weather Radar Center, 2013). 미국 레이더센터(Radar Operation Center, ROC)에서는 레이더 빔 최저 고도는 지형으로부터 적어도 150 m 이상이며, 레이더 빔 차폐율은 50% 이하여야 한다는 기본가정 하에 HSR 기법을 적용하고 있다(O'Bannon, 1997). HSR 기법의 기본 개념을 나타내는 Fig. 2를 살펴보면, 임의의 레이더에서 0.5° 고도각부터 19.5° 고도각까지 변경하며 관측을 수행하고 있다. 하지만 가장 낮은 0.5° 고도각 관측 시에 지형(거리 50 km부터 200 km, 고도는 최대 4 km)에 의해 레이더의 중심으로부터 100 km 떨어진 지점을 시작으로 완전 차폐가 발생하고 있다. 이에 따라 상위 고도각인 1.45° 고도각 관측 정보를 이용하게 되며, 1.45° 고도각 관측에서도 부분 차폐가 발생하여 2.4° 고도각 관측 정보를 이용한다(Maddox et al., 2002). 즉, HSR 기법에서는 지형에 의한 영향을 최소화하기 위하여 서로 다른 고도각을 사용함을 알 수 있다. HSR 기법을 활용한 강우량 추정과정은 다음과 같다(Fig. 3).

- ① 해당 레이더의 각 ray와 bin에 대하여 고도각별 빔 차폐율에 대한 모의결과를 배치한다.

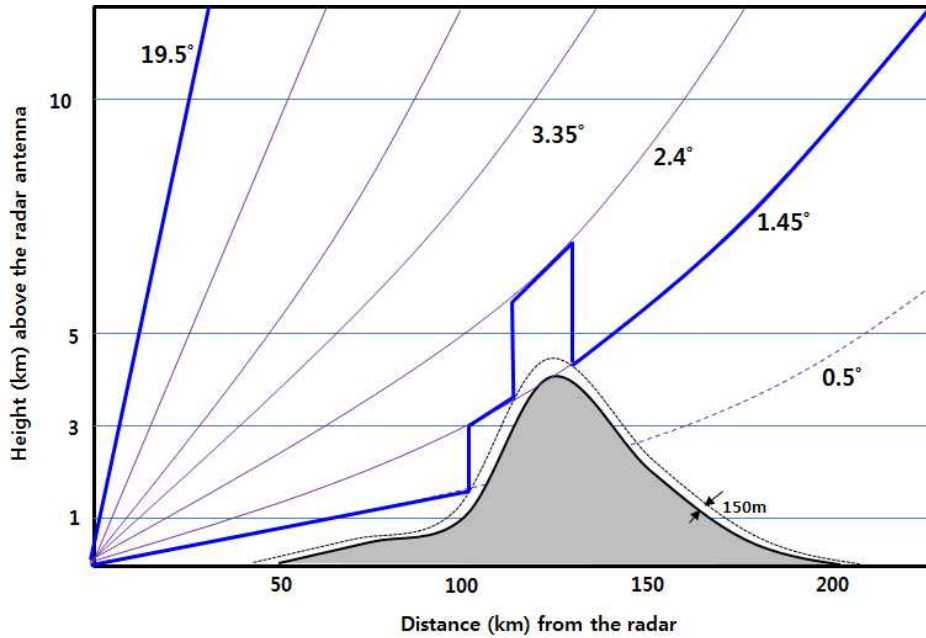


Fig 2. Concept of the Hybrid Scan Reflectivity Technique (Maddox et al., 2002)

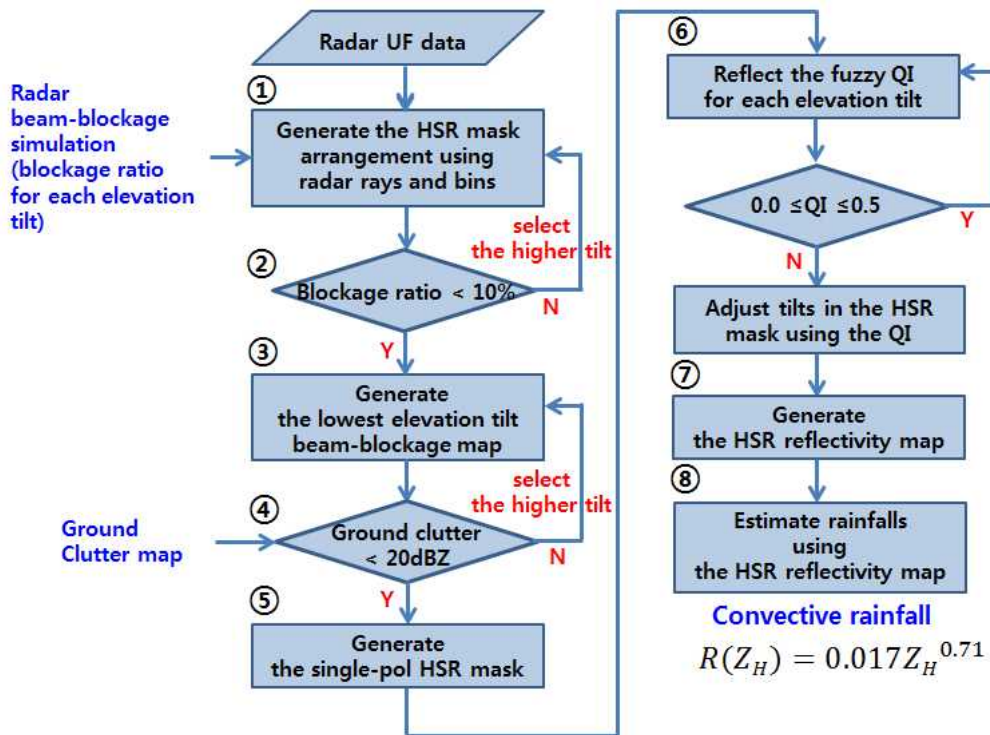


Fig. 3. Flowchart of the Hybrid Scan Reflectivity Technique

② 임의의 ray와 bin의 빔 차폐율이 10% 이상인 경우에는 해당 고도각의 바로 위 고도각으로 변경하여 빔 차폐율을 비교한다. 빔 차폐율이 10% 미만인 경우에 해당 ray와 bin 자료를 이용한다.

③ 빔 차폐율 임계값을 만족한 최저고도각 빔 차폐지도 생성한다(Fig. 4a).

④ 최저고도각 빔 차폐지도에서 지형클러터(ground clutter)가 20 dBZ보다 작은지 비교하고 조건을 만족하

지 못하면 해당 고도각 바로 위 고도각으로 변경하며, 조건이 맞을 때까지 고도각을 변경하여 비교한다(Fig. 4b).

- ⑤ 지형클러터 임계값을 만족한 최저고도각 단일편파 레이더 HSR 마스크를 생성한다.
- ⑥ 각 ray와 bin의 품질정보(Quality Information, QI)가 0.5 이하인 경우에 해당 고도각 바로 위 고도각으로 변경하며, 조건이 맞을 때까지 고도각을 변경하며 비교한다.
- ⑦ 품질정보 임계값을 만족한 HSR 반사도 지도를 생성한다(Fig. 4c).
- ⑧ ⑦번에서 생성된 HSR 반사도 정보에 Z-R 관계식을 적용하여 HSR 강우량을 추정한다. Z-R 관계식은 대류성(convective) 강우에 널리 사용되는  $R(Z_H)=0.017 Z_H^{0.71}$  (Woodley et al., 1974)을 적용한다(Fig. 4d).

### 3. 방법적용 및 결과분석

#### 3.1 분석자료 및 검증방법

본 연구에서 HSR 기법을 관악산(KWK), 광덕산(GDK), 오성산(KSN) 레이더 사이트에 적용하여 10분 레이더 추정

강우량을 산출하였으며, 분석에 사용된 강우사례는 여름철 3개 사례(7월 5일~7일: 장마, 8월 14일~16일: 저기압, 8월 29일~30일: 태풍)이다(Table 1). HSR 기법을 적용한 레이더 추정 강우량의 정확성 향상 정도를 비교하기 위해 앞서 언급한 기상청에서 현재 레이더 강우량 추정을 위해 운영 중인 RAR 산출 시스템과 비교하였으며, RAR 산출 시스템은 10분 단위 강우강도를 산출한다. 또한 기상청 레이더 강우량 표출에 기본 적용되는 M-P 관계식을 이용하여 추정한 10분 단위 강우강도도 비교하였다. 또한 레이더 추정 강우량의 정량적 정확성 검증을 위해 각 레이더 사이트별 관측반경 100km 이내 모든 AWS의 관측 강우를 이용하였다(Table 2). 검증지표로는 Mean Absolute Error (MAE), Fractional-MAE, Root Mean Square Error (RMSE), Fractional-RMSE를 이용하였으며, 식은 다음과 같다.

$$MAE = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t |R_i - G_i|, \quad F-MAE = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \left| \frac{R_i - G_i}{G_i} \right| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (R_i - G_i)^2}, \quad F-RMSE = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \left( \frac{R_i - G_i}{G_i} \right)^2} \quad (3)$$

여기서,  $t$ 는 강우발생 기간,  $R$ 은 RAR 산출 시스템 강우,  $G$ 는 관측 강우이다.

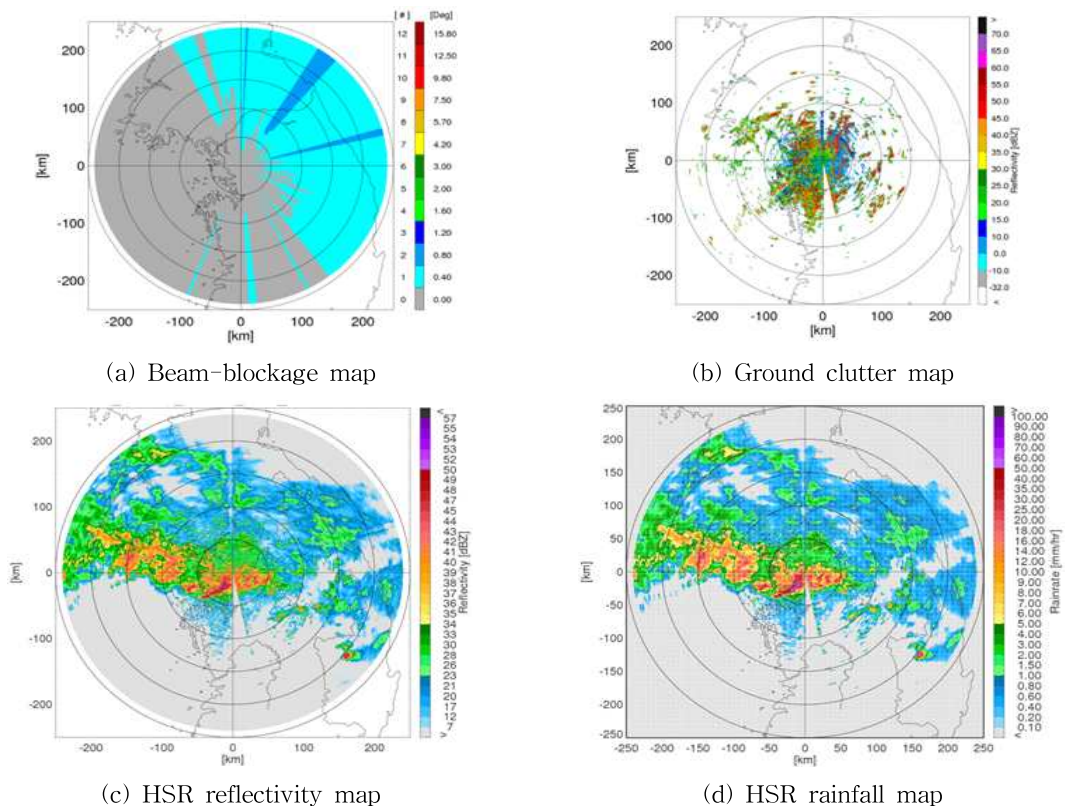


Fig. 4. Phased Examples of the Hybrid Scan Reflectivity Technique for the KWK Radar Site

**Table 1. Radars and Events for the Hybrid Scan Reflectivity Technique**

(a) Characteristics of weather radars operated by the Korea Meteorological Administration

Radar site	Wavelength	Max. range (km)	Data interval	Latitude	Longitude
Gwanaksan (KWK)	S-band	240	10-minute	37°26 ' 28 "	126°57 ' 58 "
Gwandeoksan (GDK)	S-band	250	10-minute	38°07 ' 02 "	127°26 ' 02 "
Osungsan (KSN)	S-band	240	10-minute	36°00 ' 35 "	126°47 ' 09 "

(b) Events in 2012 summer season

Event	Period in 2012	Type
1	0400 LST, 5 July ~ 0200 LST, 7, July	Changma front
2	1700 LST, 14 August ~ 2300 LST, 16 August	Low pressure
3	1500 LST, 29 August ~ 2300 LST, 30 August	Typhoon

**Table 2. AWSs Located within 100 km from the Center of each Radar Site**

Radar site	Total	AWSs in beam-blockage area	AWSs in non beam-blockage area
KWK	203	110 (54%)	93 (46%)
GDK	171	64 (37%)	107 (63%)
KSN	91	54 (59%)	37 (41%)

### 3.2 Hybrid Scan Reflectivity 기법 적용과 결과분석

#### 3.2.1 사례검증분석

본 절에서는 각 레이더 사이트별 사례에 대하여 HSR 기법, RAR 산출 시스템, M-P 관계식의 적용결과를 AWS 관측강우와 비교하고, HSR 기법에 의한 개선정도를 검증하였다. HSR 기법, RAR 산출 시스템, M-P 관계식으로 산출된 강우량을 각각 HSR\_Rain, RAR\_Rain, M-P\_Rain으로 명명하였다. 우선 각 레이더 사이트별 대표 사례에 대하여 AWS\_Rain, HSR\_Rain, RAR\_Rain, M-P\_Rain을 비교하였다(Fig. 5). Fig. 5(a)는 2012년 7월 6일 0210 LST(사례 1)의 관악산 레이더 사이트 강우분포를 나타내고 있다. 우측 상단의 빗 차폐지도에서 A영역은 관악산 레이더 사이트에서 가장 차폐가 심한 지역으로 가장 높은 레이더 고도각을 사용하고 있으며, 이 지역(빨간색 원)에 대한 M-P\_Rain(좌측 하단)과 RAR\_Rain(중앙 하단)는 레이더 중심에서 멀어질수록 AWS\_Rain(좌측 상단)에 비해 강우가 약하게 나타나고 있다. 이에 반해 하단 좌측의 HSR\_Rain는 M-P\_Rain과 RAR\_Rain 결과보다 상대적으로 강우가 강하게 나타나고 있다(검은색 점선 원). 즉, 고도각이 낮아 레이더 정보가 존재하지 않거나(빔 완전차폐) 약하게 나타나는(빔 부분차폐) 영역에 대하여 HSR 기법

을 적용하여 고도각이 높은 반사도 정보를 가져와 채워줌으로써 보다 AWS\_Rain과 가까운 강우량 추정이 가능하다. Fig. 5(b)는 2012년 8월 30일 1200 LST(사례 3)의 광덕산 레이더 사이트 강우분포를 나타내고 있다. 광덕산의 경우 남동쪽 화악산(해발 168 m)을 비롯하여 산악지형으로 둘러싸여져 있으며, 빗 차폐가 심하게 발생하는 영역 중 우측 상단 빗 차폐지도의 B영역에 대하여 강우분포를 비교하였다. AWS\_Rain(좌측 상단)은 최대 18 mm/hr이나 M-P\_Rain(좌측 하단)과 RAR\_Rain(중앙 하단)에서는 빗 차폐로 인하여 강우분포가 없는 것을 알 수 있다. 이에 반해 HSR\_Rain은 AWS\_Rain보다는 약하지만 레이더 빗 차폐없이 강우추정이 되었다. 마지막으로 Fig. 5(c)는 Fig. 5(b)와 동일한 시각의 강우분포를 오성산 레이더 사이트에 대하여 나타내고 있다. 빗 차폐가 발생하는 영역(우측 상단 빗 차폐지도의 C영역)의 영향으로 M-P\_Rain(좌측 하단)가 약하게 추정되었으며, HSR\_Rain(우측 하단)은 M-P\_Rain보다는 강하게 나타나지만 역시 과소추정하고 있다. 이에 반해 RAR\_Rain은 AWS\_Rain에 제일 가깝게 추정하고 있다. 이유는 오성산 레이더 사이트 영역에서 강한 강우시스템이 발생하여 RAR 산출 시스템이 Z-R 관계식을 보다 잘 추정하였기 때문이나 부분적으로 AWS\_Rain보다 과대추정함을 알 수 있다.

다음으로 각 사례에 대한 방법별 정량적 검증을 수행하였으며, 사례를 중심으로 사이트에 대한 방법별 검증지표 결과를 평균하였다(Table 3). 검증 결과를 살펴보면, 태풍에 의해 가장 강한 강우발생사례인 사례 3에서 모든 방법의 강우량 추정 정확성이 다른 사례에 비해 우수하였으며, 국지적으로 강우시스템이 발생한 사례 2의 정확성이 가장 낮게 나타났다. 각 사례별로 자세히 살펴보면, 장마사례인 사례1에서는 MAE와 RMSE 기준으로 HSR\_Rain, RAR\_Rain M-P\_Rain이 각각 3.00과 6.24, 3.09와 6.30, 3.61과 7.83 mm/hr로 나타나, HSR\_Rain이 RAR\_Rain과 M-P\_Rain보다 모든 검증지표에서 우수하였으며, M-P\_Rain의 정확성이 가장 낮았다. 또한 저기압에 의한 강우사례인 사례 2와 태풍사례인 사례 3에서도 HSR\_Rain의 RMSE는 9.40과 4.54 mm/hr이나 RAR\_Rain과 M-P\_Rain은 각각 9.51과 4.83 mm/hr, 11.27과 5.56 mm/hr로 나타나, 사례 1과 동일하게 HSR\_Rain가 모든 검증지표에서 우수하여 HSR\_Rain의 정확성이 가장 뛰어났다. 따라서 레이더 빔 차폐에 의해 발생한 관측공백 영역을 HSR 기법에 의해 레이더 강우량을 채워줌으로써 HSR\_Rain의 강우량 추정 정확성이 향상됨을 확인하였다.

### 3.2.2 스캔기법에 따른 정확도 검증

HSR 기법은 레이더가 대기를 관측하여 얻는 반사도 정보를 최대한 활용하기 위한 방법이며, 지형에 의한 차폐를 최소화하기 위해 지형에 따라 고도를 달리한 반사도를 이용하게 된다. 반면에 기존 강우량 관측을 위해 많이 사용되는 반사도 관측 기법은 1.5km CAPPI(Constant Altitude

Plan Position Indicator) 반사도를 이용하는 것이다. 1.5 km CAPPI 반사도는 볼륨(volume)관측된 반사도를 1.5 km 고도에서 수평으로 자른 평편한 반사도를 의미한다. 본 연구에서는 HSR 기법을 적용한 반사도 관측정보와 1.5 km CAPPI 반사도 관측정보를 동일한 강우량 추정식(M-P 관계식)에 적용하여, 어떤 반사도 관측기법이 더 정확한 강우량을 추정하는지 비교하였다.

Table 4는 HSR 기법에 의한 반사도를 M-P 관계식에 대입하여 추정한 강우량(HSR\_M-P)과 1.5 km CAPPI 반사도를 동일한 강우량 추정식에 대입하여 추정한 강우량(CAPPI\_M-P)의 정확성을 나타내고 있다. HSR\_M-P 강우량의 MAE, F-MAE, RMSE, F-RMSE가 각각 3.33 mm/hr, 0.65, 6.52 mm/hr, 1.30으로 모든 정확성 지표에서 CAPPI\_M-P보다 우수하였다. 이는 지형에 따라 반사도 고도를 달리하여 반사도 정보를 최대한 활용하는 것이 레이더 강우량 추정의 정확성을 더 향상시킬 수 있음을 의미한다. 따라서 HSR 기법을 이용한 반사도 관측 기법이 기존 기법보다 우수함을 증명하였다.

### 3.2.3 빔차폐영역 개선도 검증

관악산과 오성산 레이더 사이트는 레이더 빔이 완전 혹은 부분 차폐되는 영역이 전체 관측 영역 대비 54%와 59%로서 매우 넓은 영역이 레이더 빔 파위가 지형에 의해 감소되며, 광덕산 레이더 사이트의 경우에도 37%가 빔차폐 영역으로 나타났다(Table 2). 이는 레이더가 최저고도각으로 기상 관측을 하는 경우에 관측영역 내에서 레이더 빔이 지형에 의해 많이 손실됨을 의미한다.

Table 3. Accuracy for Rainfall Estimates of the HSR Technique, RAR Calculation System, M-P Relation in each Event

Event	Rainfall	MAE (mm/hr)	F-MAE	RMSE (mm/hr)	F-RMSE
Event1	HSR_Rain	<b>3.00</b>	<b>0.75</b>	<b>6.24</b>	<b>1.56</b>
	M-P_Rain	3.61	0.90	7.83	1.95
	RAR_Rain	3.09	0.77	6.30	1.58
Event2	HSR_Rain	<b>4.73</b>	<b>0.70</b>	<b>9.40</b>	<b>1.40</b>
	M-P_Rain	5.68	0.85	11.27	1.69
	RAR_Rain	4.91	0.73	9.51	1.41
Event3	HSR_Rain	<b>2.56</b>	<b>0.56</b>	<b>4.54</b>	<b>1.05</b>
	M-P_Rain	2.89	0.69	5.56	1.40
	RAR_Rain	2.61	0.59	4.83	1.15
Total	HSR_Rain	<b>3.43</b>	<b>0.67</b>	<b>6.73</b>	<b>1.34</b>
	M-P_Rain	4.06	0.81	8.22	1.68
	RAR_Rain	3.54	0.69	6.88	1.38

Bold represents the best result among three rainfalls

따라서 본 연구에서는 빗차폐가 발생하는 영역과 차폐가 없는 영역으로 나누어 HSR 기법, RAR 산출 시스템, M-P 관계식을 적용하고 그 결과를 비교·분석하였다(Table 5). 우선 빗차폐 영역의 HSR 기법, RAR 산출 시스템, M-P 관계식에 의한 강우량 추정 정확성에서 RMSE 기준으로 4.73, 5.01, 6.78 mm/hr로서 HSR 기법을 적용한 결과가 가장 뛰어났으며, 다른 검증지표에서 같은 결과를 나타냈다. 비(非) 빗차폐 영역에서도 동일한 결과를 얻어, 모든 검증지표에서 HSR 기법을 적용한 추정 강우량이 가장 우수하였다. 다음으로 빗차폐 영역과 비 빗차폐 영역간의 강우량 추정 정확성을 비교하면, 빗차폐 영역에서의 M-P 관계식 대비 HSR 기법의 결과가 MAE, F-MAE, RMSE, F-RMSE에서 각각 21.55%, 27.16%, 30.24%, 37.24%로서 비 빗차폐 영역(MAE: 18.06%, F-MAE: 16.88%, RMSE: 17.22%, F-RMSE: 16.56% 향상)보다 강우량 추정 정확성이 향상되었다. 이러한 결과는 레이더 빗 차폐/비차폐되는 영역에서 모두 HSR 기법을 적용함으로써 더 정확한 레이더 강우량을 추정할 수 있음을 의미한다. 특히, HSR 기법이 비 빗차폐영역보다 빗차폐영역에서 레이더 강우량을 더욱 정확하게 추정할 수 있는 효과적인 방법임을 확인하였다.

#### 4. 홍수유출모형에의 적용

##### 4.1 홍수유출모형의 선정 및 적용자료

본 연구에서는 광덕산(GDK) 레이더를 대상으로 HSR 기법, RAR 산출 시스템, M-P 관계식을 적용하여 산출한 강우량을 홍수유출모형에 적용하였으며, 각 방법에 의한 홍수유출 모의정확성을 비교·분석하였다. 홍수유출모형으로 HEC-HMS 3.5 version (US Army Corps of Engineers,

2008)을 적용하였으며, 강우손실량계산에는 SCS curve number, 유출변화에 대한 단위도는 Clark 단위도, 기저유량은 Recession, 홍수추적에는 Muskingum 방법을 적용하였다. 또한 적합한 매개변수 추정을 위해 HEC-HMS의 최적화 기법을 적용하였다. 특히 HEC-HMS에 의한 불확실성을 최대한 줄이기 위해 사례별로 사전모의(warming-up)를 통하여 얻은 동일한 초기조건으로 유출량을 모의하였으며, AWS 관측 강우량과 유출량을 입출력자료로 하여 모의한 HEC-HMS 추정 매개변수를 적용하였다.

본 연구에서는 적용지역은 충주댐 상류유역(남한강상류(1001), 평창강(1002), 충주댐유역(1003))으로 선정하였다. 충주댐 상류유역은 광덕산 레이더에서 남동쪽으로 약 130 km(충주댐 기준) 떨어져있으며, 광덕산 레이더 빗차폐 영역에 위치하여(Fig. 5b 광덕산 빗차폐지도 참조) HSR 기법을 적용한 효과를 검증하기에 적합한 대상유역이라 판단된다. 적용사례로는 2012년 여름철 2개 강우사례(장마: 2012.0705.0400~2012.0708.2300 LST; 장마와 태풍: 2012.08.19.1600~2012.08.27.0500 LST) 선정하였다. 모든 레이더 추정 강우량은 Eq. (4)와 같이 Gauge to Radar (G/R) ratio 방법을 이용하여 보정하였으며, 특히 강우량의 중복보정을 피하기 위해 RAR 산출 시스템에 기본으로 수행되는 사후보정을 적용하지 않았다. 홍수유출 정확도 검증을 위한 지표로서 상관계수, Fractional-Mean Absolute Error (F-MAE), Fractional-Root Mean Square Error (F-RMSE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)를 산정하였다.

$$G/R \text{ ratio factor} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (4)$$

여기서,  $G_i$ 는 AWS 지상관측소에서 관측된 강우량(mm/hr),  $R_i$ 는 기상레이더에 의해 추정된 강우량(mm/hr),  $n$ 은 전체

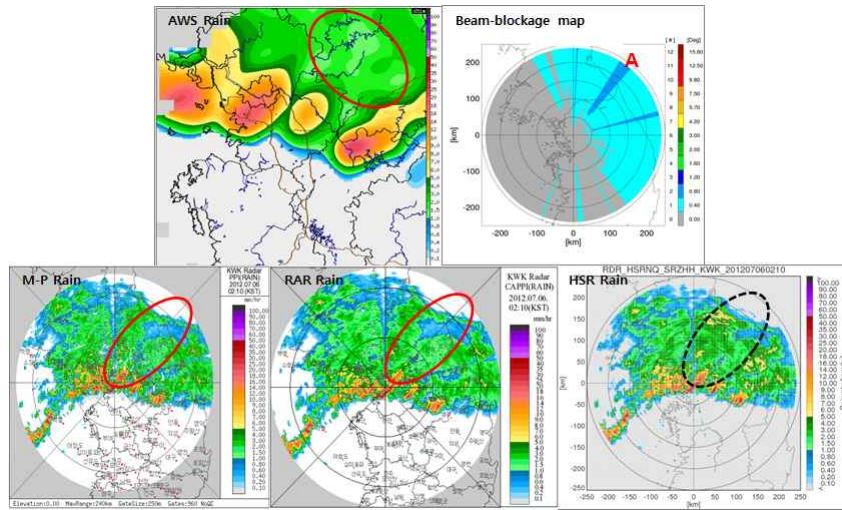
Table 4. Accuracy for Rainfall Estimates of the HSR and CAPPI techniques under the Same M-P relation

Method	MAE (mm/hr)	F-MAE	RMSE (mm/hr)	F-RMSE
HSR_M-P	3.33	0.65	6.52	1.30
CAPPI_M-P	3.54	0.69	6.88	1.38

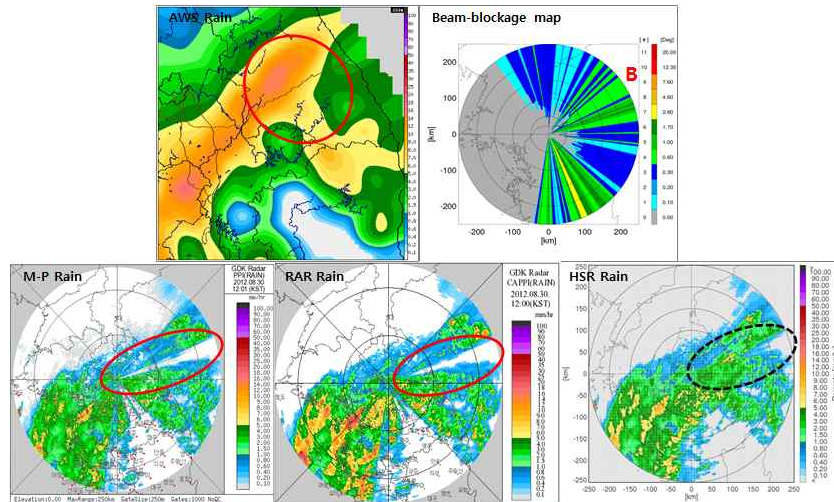
Table 5. Accuracy for Rainfall Estimates between the Beam-blockage and non Beam-blockage Areas

Section	Rainfall	MAE (mm/hr)	F-MAE	RMSE (mm/hr)	F-RMSE
Beam-blockage	HSR_Rain	2.33	0.59	4.73	1.23
	M-P_Rain	2.97	0.81	6.78	1.96
	RAR_Rain	2.35	0.60	5.01	1.37
Non beam-blockage	HSR_Rain	2.54	0.64	5.24	1.31
	M-P_Rain	3.10	0.77	6.33	1.57
	RAR_Rain	2.64	0.71	5.67	1.42

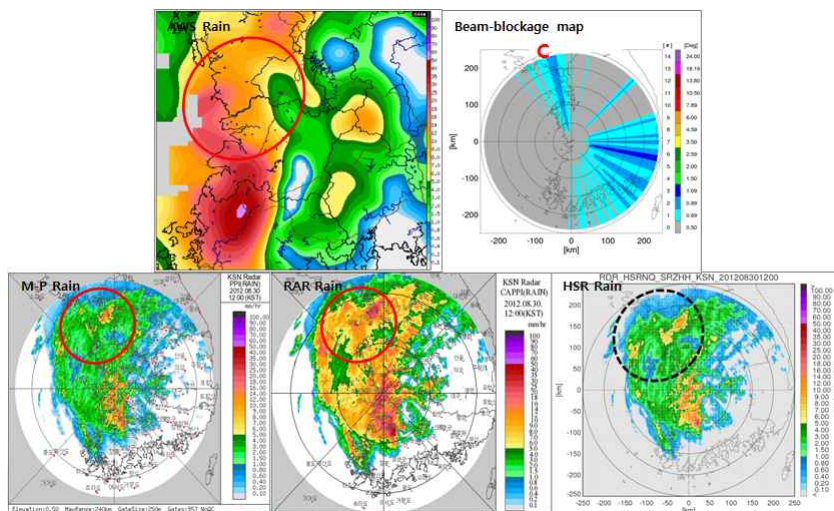




(a) KWK radar site (0210 LST on 6 July in 2012)



(b) GDK radar site (1200 LST on 30 August in 2012)



(c) KSN radar site (1200 LST on 30 August in 2012)

Fig. 5. Comparison of the AWS, M-P, RAR, and HSR Rainfall Estimates for KWK, GDK, and KSN Radar Sites

관측소의 수를 나타낸다.

#### 4.2 적용결과

본 연구에서는 HSR\_Rain, RAR\_Rain, M-P\_Rain을 HEC-HMS에 입력하여 계산한 유출량 결과를 HSR\_Flow, RAR\_Flow, M-P\_Flow로 명명하였으며, AWS 관측값을 HEC-HMS에 입력하여 산출한 결과를 AWS\_Flow로 명명하였다. Table 6은 2개 여름철 강우사례에 대한 AWS\_Flow, HSR\_Flow, RAR\_Flow, M-P\_Flow의 정확성을 나타낸다. Table 6에서는 AWS 관측강우에 의한 유출량 AWS\_Flow의 상관계수는 0.9 이상, ME는 0.8 이상으로 관측유출량에 가장 잘 일치하여 HEC-HMS의 매개변수 추정이 잘 되었음을 확인하였다. 레이더 추정 강우량에 의한 유출량 중 HSR\_Flow가 관측 유출량에 더 가깝게 모의되어 HSR 기법에 의한 홍수량 추정이 가장 우수하였다. HSR\_Flow는 상관계수에서 평균 0.9 이상, R-MAE는 평균 0.26, R-RMSE는 평균 0.37, NSE에서 평균 0.8 이상으로 관측 유출량에 가장 가깝게 모의되었으며, RAR\_Flow와 M-P\_Flow 대비 상관계수는 평균 약 7%와 10%, NSE는 약 18%와 34% 향상되었

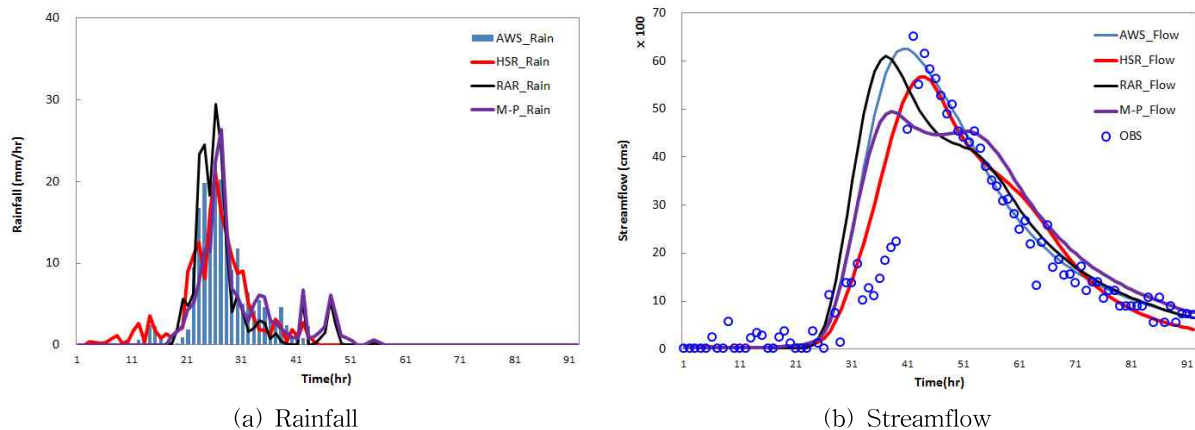
다. 또한 RAR\_Flow와 M-P\_Flow를 비교하면, 사례 1에서는 RAR\_Flow의 정확성이 높았고 사례 2에서는 거의 비슷하여 평균적으로 RAR 산출 시스템 추정 강우량에 의한 유출량이 더 정확하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 고정된 강우량 추정식은 정확한 강우량을 추정하는데 한계가 있으며, 이러한 부정확성이 유출량 모의까지 영향을 준 것으로 분석되었다.

Figs. 6 and 7은 각 사례별 레이더 추정 강우량과 이에 따른 모의 유출량에 대한 시계열을 나타내고 있다. Fig. 6에서 사례 1에 대한 강우량(Fig. 6a)과 유출량(Fig. 6b) 시계열을 비교하면, RAR\_Rain은 강우발생 초기(1~20hr)에는 무강우였으나 강우 침투기간(21~31hr)동안 관측강우보다 과대추정하였으며, 이 기간 이후 급격히 강우가 감소하다 무강우 시간(42~51hr)에 다시 강우가 추정되는 형태를 나타냈다. M-P\_Rain은 강우 침투기간 초기에는 과소모의하고 침투기간이 끝난 이후 급격히 강우가 감소되었다. 이에 반해 HSR\_Rain이 제일 관측강우 형태를 잘 나타냈으나 강우 침투기간에는 다소 과소추정되었다. 이에 따른 모의된 유출량을 살펴보면, RAR\_Flow의 침투유

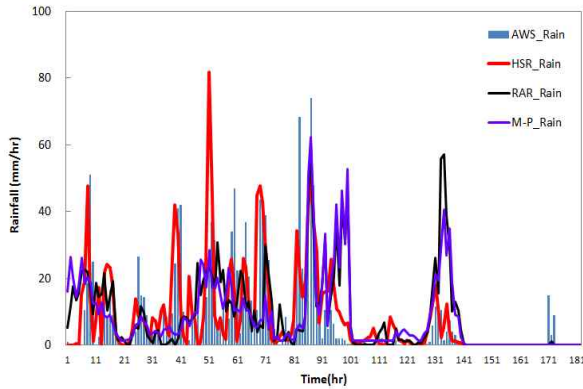
**Table 6. Accuracy of Hydrologic Model Results of AWS, HSR Technique, RAR Calculation System, and M-P Relation for each Event**

Section	Rainfall	MAE (mm/hr)	F-MAE	RMSE (mm/hr)	F-RMSE
Beam-blockage	HSR_Rain	2.33	0.59	4.73	1.23
	M-P_Rain	2.97	0.81	6.78	1.96
	RAR_Rain	2.35	0.60	5.01	1.37
Non beam-blockage	HSR_Rain	2.54	0.64	5.24	1.31
	M-P_Rain	3.10	0.77	6.33	1.57
	RAR_Rain	2.64	0.71	5.67	1.42

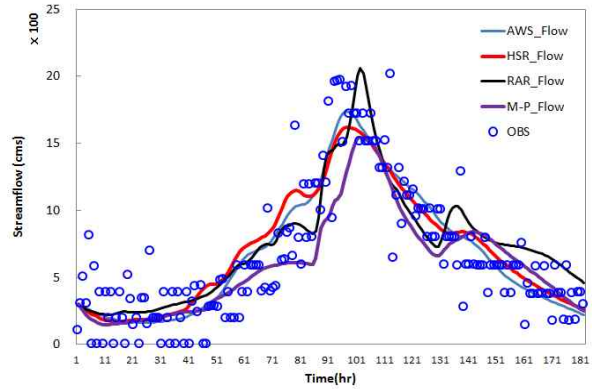
Bold represents the best result except AWS results



**Fig. 6. Comparison of Rainfall and Streamflow Time Series for each Method in Event1**



(a) Rainfall



(b) Streamflow

Fig. 7. Comparison of Rainfall and Streamflow Time Series for each Method in Event2

출량은 관측 유출량에 가장 가깝게 모의되었으나 강우 침투기간의 과대모의에 의하여 유출량 침투시간이 다소 빨리 발생하였으며, M-P\_Flow는 강우 침투기간에 대한 과소모의의 영향으로 유출량의 침투도 제일 낮게 모의되었다. HSR\_Flow는 AWS\_Flow보다 침투 유출량이 다소 과소모의 되었으나 전체 경향은 가장 가깝게 모의되었다. 하지만 모든 모의 유출량이 관측 유출량의 상승부에서 급격히 상승하는 부분은 잘 모의하지 못하였다. 다음으로 Fig. 7에서 사례 2에 대한 강우량(Fig. 7a)과 유출량(Fig. 7b) 시계열을 비교하면, RAR\_Rain과 M-P\_Rain은 강우발생 초중반(1~85 hr)까지 과소추정 하였으나 이후 매우 과대추정하는 결과를 나타냈다. 이는 모의 유출량(Fig. 7b)에도 영향을 나타내어, 두 방법 모두 수문곡선 초기에는 관측 유출량보다 과소 추정되었으나 수문곡선 하강부분에서 다소 과대추정하는 경향을 나타냈다. 특히, RAR\_Rain의 강우량 중후반의 과대 추정으로 인해 RAR\_Flow의 침투유출량이 매우 크게 나타났다. 이에 반해 HSR\_Rain은 부분적으로 과대추정 되었으나 관측강우에 가장 일치하는 것으로 나타났다. 이에 따라 모의 유출량에서도 AWS\_Flow와 비슷한 수문곡선이 모의되는 경향을 보였다. 따라서 레이더 기상 관측에 있어서 HSR 기법을 적용하여 추정된 강우량을 홍수유출모형의 입력자료로 활용한다면 기존 방법을 이용한 레이더 추정 강우량을 이용한 것보다 정확성이 향상된 홍수유출 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 향후연구

기상레이더의 관측 특성상 지형에 의한 레이더 빔의 완전차폐 혹은 부분차폐로 인한 레이더 강우량의 과소 추정이 발생한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 HSR 기

법을 개발하고 현업 레이더에 결합하여 적용하고 레이더 강우량을 산출하여 기존 강우량 추정 방법(RAR 산출 시스템, M-P 관계식) 결과와 비교·평가하였다.

평가방법으로는 사례별 검증, 반사도 스캔기법에 따른 검증, 빗차폐/비 빗차폐 영역에 대한 검증으로 나누었다. 첫 번째로 사례별 검증에서 HSR 기법을 적용하여 강우량을 추정된 결과, 기존 레이더 관측방법으로 지형에 의해 반사도 정보를 얻지 못하는 영역을 보완하여 레이더 강우량을 추정할 수 있음을 확인하였다. 정량적 정확성 검증에서도 RAR 산출 시스템과 M-P 관계식을 적용한 강우량 정확성보다 HSR 기법에 의한 강우량이 모든 검증지표에서 우수하였다. 두 번째로 반사도 스캔기법에 따른 강우량 추정 정확성을 비교하기 위해 HSR 기법을 적용한 반사도 관측정보와 1.5 km CAPPI 반사도 관측정보를 동일한 강우량 추정식(M-P 관계식)에 적용하였다. 그 결과, HSR, M-P 강우량이 모든 정확성 지표에서 CAPPI, M-P보다 뛰어나 지형에 따라 반사도 고도를 달리하여 반사도 정보를 최대한 활용하는 것이 레이더 강우량 추정의 정확성을 더 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 빗차폐가 발생하는 영역과 차폐가 없는 영역으로 나누어 HSR 기법, RAR 산출 시스템, M-P 관계식을 적용하고 그 결과를 비교·분석하였다. 레이더 빗 차폐/비차폐 되는 영역에서 모두 HSR 기법을 적용한 결과가 가장 정확성이 높게 나타났으며, 특히 HSR 기법이 비 빗차폐영역보다 빗차폐영역에서 레이더 강우량을 더욱 정확하게 추정할 수 있는 효과적인 방법임을 증명하였다.

다음으로 각 방법별 레이더 추정 강우량을 HEC-HMS에 적용하여 홍수 유출량 추정 정확성을 평가하였다. HSR\_Flow는 상관계수와 NSE에서 각각 평균 0.9와 0.8 이상으로 관측 유출량에 가장 가깝게 모의되었으며, RAR\_Flow

와 M-P\_Flow 대비 상관계수는 평균 약 7%와 10%, NSE는 약 18%와 34% 향상되었다. HSR 기법에 의해 추정된 레이더 강우량을 활용함으로써 홍수유출량 정확도 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

따라서 지형에 의한 영향을 최소화할 수 있는 HSR 기법을 레이더 관측기법에 적용함으로써 레이더 추정 강우량의 정확성 향상이 가능함을 확인하였다. HSR 기법에 의해 추정된 강우량을 수문분야에 활용한다면 보다 정확한 홍수량 추정에 기여할 것으로 사료된다. 또한 계속 국내 도입이 진행 중인 이중편파레이더로의 확장적용을 통하여 보다 정확한 정량적 강우량 추정이 가능하도록 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상레이더센터 2014년도 R&D 연구개발사업 “범부처 융합 이중편파레이더 활용 기술개발(WRC-2013-A-1)”의 지원으로 수행되었습니다.

### References

Atlas, D., Rosenfeld, D., and Wolff, D.B. (1990). “Climatologically tuned reflectivity-rain rate relations and links to area time integrals.” *Journal of Meteorology*, Vol. 29, pp. 1120-1139.

Battan, L.J. (1993). *Radar Observation of the Atmosphere*, The University of Chicago Press, pp. 324.

Crum, T.D., and Albery, R.L. (1993). “The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 74, pp. 1669-1687.

Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.-J., Miller, D.A., and O'Bannon, T. (1998). “The WSR-88D rainfall algorithm.” *Weather and Forecasting*, Vol. 13, pp. 377-395.

Maddox, R., Zhang, J., Gourley, J.J., and Howard, K. (2002). “Weather radar coverage over the contiguous United States.” *Weather and Forecasting*, Vol. 17, pp. 927-934.

Marshall, J.S., and Palmer, W.M. (1948). “The distribution of raindrops with size.” *Journal of Meteorology*, Vol. 5, pp. 165-166.

National Institute of Meteorological Research (2010). *Research for the meteorological observation technology*

*and its application*(II), Scientific Research Report, National Institute of Meteorological Research, Korean Meteorological Agency.

O'Bannon, T. (1997). “Using a ‘terrain-based’ hybrid scan to improve WSR-88D precipitation estimates.” *Proceeding of 28th Conference on Radar Meteorology, Austin, TX, American Meteorology*, pp. 506-507.

Rosenfeld, D., Wolff, D.B., and Atlas, D. (1993). “General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 50-72.

Shedd, R.C., Smith, J.A., and Walton, M.K. (1991). “Sectorized hybrid scan strategy of the NEXRAD precipitation processing system.” *Hydrological Applications of Weather Radar*, I. Cluckie and C. Collier, Eds. Ellis Horwood Limited, pp. 151-159.

Smith, J.A. (1993). “Marked point process models of rain-drop-size distributions.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, pp. 284-296.

Smith, J.A., and Krajewski, W.F. (1993). “A modeling study of rainfall rate-reflectivity relationships.” *Weather Resources Research*, Vol. 29, pp. 2505-2514.

US Army Corps of Engineers. (2008). *Hydrologic Modeling System, HEC-HMS Release Notes Version 3.3*, Hydrologic Engineering Center.

Weather Radar Center (2013). *Development of application of cross governmental dual-pol radar harmonization*[1], Korea Meteorological Administration.

Woodley, W., Olsen, A., Herndon, A., and Wiggert, V. (1974). “Optimizing the measurement of convective rainfall in Florida.” *NOAA Tech Memo. ERL-WMPO-18, Boulder, Colorado*, pp. 99.

Zhang, J., Howard, K., Langston, C., Vasiloff, S., Kaney, B., Arthur, A., Cooten, V.C., Kelleher, K., Kitzmiller, D., Ding, F., Seo, D.-J., Wells, E., and Dempsey, C. (2011). “National mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: Description, results, and future plans.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 92, pp. 1321-1338.

논문번호: 14-060	접수: 2014.07.09
수정일자: 2014.08.18/09.19	심사완료: 2014.09.19