

레이더 추정강우의 수문학적 활용 (I): 최적 레이더 강우 추정

Hydrologic Utilization of Radar-Derived Rainfall (I) Optimal Radar Rainfall Estimation

배 덕 효* / 김 진 훈** / 윤 성 심***

Bae, Deg-Hyo / Kim, Jin-Hoon / Yoon, Seong-Sim

Abstract

The objective of this study is to produce optimal radar-derived rainfall for hydrologic utilization. The ground clutter and beam blockage effects from Mt. Kwanak station (E.L 608m) are removed from radar reflectivities by POD analysis. The reflectivities are used to produce radar rainfall data in the form of rain rates (mm/h) by the application of the Marshall-Palmer reflectivity versus rainfall relationship. However, these radar-derived rainfall are underestimated in temporal and spatial scale compared with observed one, so it is necessary to hire a correction scheme based on the gauge-to-radar (G/R) statistical adjustment technique. The selected watershed for studying the real-time correction of radar-rainfall estimation is the Soyang dam site, which is located approximately 100km east of Kwanak radar station. The results indicate that adjusted radar rainfall with the gauge measurement have reasonable G/R ratio ranged on 0.95-1.32 and less uncertainty with that mean standard deviation of G/R ratio are decreased by 9-28%. Mean areal precipitation from adjusted radar rainfall are well agreed to the observed one on the Soyang River watershed. It is concluded that the real-time bias adjustment scheme is useful to estimate accurate basin-based radar rainfall for hydrologic application.

keywords : radar rainfall, POD analysis, Z-R relationship, bias adjustment, Mt. Kwanak radar

요 지

본 연구의 목적은 기상 레이더의 수문학적 활용성을 높이고자 최적의 레이더 강우를 추정하기 위해 관악산 레이더 자료를 대상으로 POD 분석기법을 활용하여 지형클러터 및 빔 차폐영역 등을 제거하고 Marshall-Palmer의 Z-R 관계식으로 레이더 강우를 추정한 결과 강우계 관측강우와 비교하여 시·공간적으로 과소 모의하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 강우계 관측강우와의 실시간 보정기법을 소양강 유역을 대상으로 적용한 결과 평균 G/R 값은 0.95~1.32로 적정분포를 보이고 평균편차는 9~28% 범위로 감소되어 불확실성 또한 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 편차가 보정된 최적 레이더 추정강우로 소양강 유역평균 강우량을 산정한 결과 관측강우와 비교하여

* 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수

Associate Professor, Water Resources Institute, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea

** 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea

(e-mail: jhenu@chol.com)

*** 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea

매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 실시간 편차보정 기법은 수문학적 유역평균 강수량 산정시 다소 과소추정되는 레이더 강우정보를 정확하게 보정할 수 있다는 측면에서 그 적용성이 우수한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 레이더 강우, POD 분석, Z-R 관계식, 편차보정, 관악산 레이더

1. 서론

전 세계적으로 국지적 집중호우와 같은 악기상 현상으로 인해 홍수피해가 증가하고 있는 실정이고 우리나라도 예외가 아니다. 집중호우시 예상되는 예측강우의 정확도 향상은 홍수피해를 경감할 수 있는 주요한 요소 가운데 하나일 것이다. 이러한 국지적 강우예측을 위해 여러 선진국에서는 강수예보에 직접 활용되는 레이더 및 위성과 같은 기상 원격탐사 자료를 활용하여 실시간으로 강수현상을 감시하고 있다. 특히 기상 레이더는 신속한 관측능력과 우수한 시·공간적 강수탐지의 장점을 가지고 있으므로 세계 각국에서는 다수의 레이더를 설치하여 레이더 관측망 구성과 강수현상 감시 체계의 보편화를 위해 노력하고 있다.

기상 레이더는 반사되는 수신호를 간접적으로 분석하여 강우를 관측하기 때문에 지상 강우계와 같이 직접적으로 실제 강우를 관측할 수 없지만 공간적으로 고분해능 자료를 얻을 수 있고, 넓은 영역을 관측할 수 있다는 장점을 가지고 있어 많은 연구자들이 레이더의 반사도 자료와 강우량계의 장점만을 고려하여 시·공간적으로 실제 강우에 근접한 고분해능의 강우 자료를 얻기 위한 연구를 진행해 왔다(남경엽 등, 2003). 그 대표적인 것이 레이더 반사도 인자(Z)와 강우강도(R)의 Z-R 관계에 관한 연구이다(Marshall and Palmer, 1948; Wilson, 1963; Calherios and Zawadzki, 1987; Rosenfeld et al., 1993, 1995). 이러한 Z-R 관계의 대표적인 형태인 $Z = AR^b$ 형태의 관계식을 이용하여 레이더 강우를 추정할 경우 강우계로부터 관측된 강우량과는 오차가 발생하게 된다(Woodley et al., 1975; Barnston and Thomas, 1983). Anagnostou et al.(1998)은 미국 NWS(National Weather Service)의 NEXRAD(Next Generation Weather Radar)를 대상으로 칼만필터(Kalman filter) 개념을 도입하여 추계학적 편차보정 기법을 제시하기도 하였다. 또한, 이러한 레이더 추정강우의 수문학적 적용사례로 Carpenter et al.(2001)과 Carpenter and Georgakakos(2004)는 레이더 추정강우의 불확실성이 수문모델에 미치는 영향을 분석하기도 하였다.

국내의 레이더 강수추정에 관한 연구로는 기상연구

소(1989, 1990)의 연구결과를 필두로 기상연구소(1995, 1996)는 레이더를 이용한 유역평균 강수량 산정에 관한 연구를 수행하였으며, 정재성과 이재형(1996)은 레이더 자료를 활용한 시우량곡면(rainfall surface) 예측에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 김효경 등(2002)은 WPMM(Window Probability Matching Method) 방법을 이용하여 Z-R 관계식 추정에 관한 연구를 수행하였고, 남경엽 등(2003)은 연구용 도플러 기상 레이더 자료로 CWPMM(Classified Window Probability Matching Method) 기법을 활용하여 대류형 및 층운형 강우에 대한 Z-R 관계식을 도출하였으며, 안상진과 김진국(2003)은 지점별, 호우별 Z-R 관계식을 도출한 바 있다. 한편, Skahill 등(2003)은 기상 레이더와 GIS을 이용하여 분포형 강우-유출모형의 개발과 검증에 관한 연구를 수행하였고, 이정도 등(2004)은 HEC-1 모형을 이용하여 레이더 추정강우의 수문학적 적용성을 검토하기도 하였다. 이상과 같이 국내의 경우도 강수유무 및 강수량 예보의 질적 향상을 도모하기 위해 레이더의 활용성이 부각되고 있으나, 하천유량 모의와 같은 수자원 분야에서의 레이더 자료 활용에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 이와 같은 국내의 실정을 고려하여 기상 레이더 추정강우의 수문학적 활용성을 높이고자 (a) 관악산 레이더 자료를 대상으로 지형클러터 및 오차 자료를 제거하고 Marshall-Palmer의 Z-R 관계식으로 강우강도를 추정한 후, 강우계 관측 자료와의 편차를 실시간으로 보정하여 소양강 유역의 시단위 유역평균 강우량을 산정하고; (b) 레이더 추정 유역평균 강우량의 수문모형 적용성을 평가한 후, 레이더 추정강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형에 미치는 영향을 앙상블(ensemble) 유량모의 기법을 활용하여 비교·검토할 수 있는 두개의 연속논문으로 구성하였다. 본 논문은 그 첫 번째 논문으로서, 2장에서는 레이더 및 지형클러터 제거 기법, 실시간 편차보정 기법에 대한 기본 이론을 기술하고, 3장에서는 관악산 레이더 및 소양강 상류유역을 대상으로 한 사례연구 결과를 제시하여 이들의 요약 및 결론을 4장에 기술하였다.

2. 기본이론

2.1 레이더 방정식 및 Z-R 관계식

레이더 방정식은 Probert-Jones(1960)에 의해 (a) 목표물의 입자는 완전구형이다(등방산란); (b) 입자의 크기는 레이더 파장에 비해 매우 작다(Rayleigh 산란); (c) 강수입자들은 레이더 빔 내에서 균일하게 분포한다는 가정하에 유도되었다. 이러한 레이더 방정식은 안테나에 수신되는 평균전력(\overline{P}_r)이 송신 침투전력(\overline{P}_t), 목표물까지의 거리(r), 안테나의 단면적(A_e) 및 목표물의 특성($|K|^2$) 등에 좌우되며, 이들의 관계를 나타낸 레이더 방정식을 간략히 나타내면 Eq. (1)과 같다(엄원근, 1995).

$$\overline{P}_r = \frac{C|K|^2}{r^2} Z \quad (1)$$

여기서,

$$C = \frac{\pi^3 P_t \theta \phi h G^2}{1024 \lambda^2 \ln 2} : \text{레이더 상수}$$

Z : 반사인자(mm^6/m^3) 단위부피(m^3) 내에 존재하는 산란체인 물방울의 직경과 개수에 직접 관련된 값($\sum D_i^6$)

레이더 상수(C)는 포함된 변수인 안테나의 수평, 수직 빔폭(θ, ϕ), 펄스폭(h), 안테나 이득계수(G), 및 레이더 파장(λ) 등에 따라 고정된 값을 사용한다.

Eq. (1)에서 반사인자 Z는 산란체의 체적내에 존재하는 물방울의 직경과 개수에 따라 결정되는 값으로 강우 강도, 즉 강수량(R)을 결정하는 인자이기도 하다. 대기 중에서 강수입자의 분포는 Eq. (2)와 같이 지수 함수적으로 표현된다.

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} \quad (2)$$

여기서, N(D)는 단위 체적내에 존재하는 직경 D+dD인 물방울의 개수이며, N_0 은 물방울의 직경에 따라 변하기 때문에 $V_t(D) = 14.2D^{1/2}$ 로 나타낼 수 있으므로 강우 강도 R은 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \int_0^\infty N \frac{\pi D^3}{6} V_t dD = \frac{14.2\pi N_0 \Gamma(4.5)}{6A^{4.5}} \quad (3)$$

여기서, $\Gamma(n)$ 은 감마함수로서 $(n-1)!$ 의 값이다. 한편,

반사인자 Z는 진술한 바와 같이 물방울의 직경과 개수에 관련되어 있으므로 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = \int_0^\infty ND^6 dD = \frac{N_0 \Gamma(7)}{A^7} \quad (4)$$

Eqs. (3) and (4)에서 A를 소거하여 강수량과 반사계수, 즉 Z-R 관계식을 유도하면 Eq. (5)와 같다.

$$R = \left(\frac{1420\pi N_0 \Gamma(4.5)}{6} \right) \left(\frac{Z}{720N_0} \right)^{4.5/7} \quad (5a)$$

$$Z = \text{constant} \cdot R^{1.6} (= A \cdot R^b) \quad (5b)$$

여기서, Z와 R의 단위는 각각 mm^3/m^3 , mm/h 이다. Marshall and Palmer(1948)는 물방울의 분포수 0.08-4cm에 대한 $Z=200R^{1.6}$ 을 구한 바 있으며, 이것은 기상 레이더의 신호 처리기의 제작 시 보편적으로 사용되는 Z-R 관계식으로 알려져 있다. Eq. (5)에서 알 수 있듯이 계수 A와 지수 b 값은 기상조건에 따라 변하기 때문에 유일한 Z-R 관계식의 산출은 현실적으로 불가능하다. 지금까지 A와 b의 정확한 값을 찾기 위하여 실험적인 연구가 꾸준히 수행되어 왔으며, 이는 Z-R 관계식의 다양성을 의미한다. 여러 다른 강우 사례에 대한 조사들로부터 보고된 상수(A, b) 값들은 살펴보면 계수 A의 경우 적게는 20 이하로부터 크게는 1000 이상의 값을 나타내고 지수의 경우 1.11로부터 3.05까지의 범위를 나타내고 있다(엄원근, 1995).

현재 우리나라 기상청에서는 Marshall-Palmer의 Z-R 관계식을 사용하고 있으며(김효경 등, 2002), 본 관계식은 중위도 층상운의 직경분포를 관측하여 상수 A=200, b=1.6을 구해 낸 것으로서, 우리나라에서 관측된 레이더 반사도를 대입해 레이더 강우를 산출해 보면 실제 관측강우보다 과소평가되는 특성을 보이고 있다(기상연구소, 1989). 본 연구에서는 이러한 레이더 추정 강우와 관측강우 사이의 편차를 2.3절의 실시간 편차보정 기법을 적용하여 최적의 레이더 강우를 추정하였다.

2.2 POD 분석기법

기상 레이더에 있어서 전파가 목표에서 반사되어 수신신호를 레이더 에코(radar echo)라 말하며, 단순히 에코라고도 한다. 원시자료 에코는 정확한 레이더 강수량을 산정할 때 적용되는 Z-R 관계식의 변수 결정에 기여하게 되므로 에코에 대한 정확한 개념 인식과 특징에 대한 정보는 매우 중요하다. 그러나 레이더 영상에

나타나는 에코에는 기상현상에 관련되어 있는 기상 에코와 그렇지 않은 비기상 에코로 나눌 수 있으며, 전자는 다시 강수 에코와 비강수 에코로 분류된다. 비기상 에코 중 지형에 의해 반사되어 나타나는 에코(지형클러터) 자료의 경우 기상과 무관한 자료가 생성되므로 이를 제거하는 것이 상당히 중요하다. 본 연구에서는 지형클러터(ground clutter)와 빔 차폐(beam blockage)의 영향을 받는 에코의 통계학적 처리를 위해서 Georgakakos et al.(1999)에서 제시한 POD(Probability Of Detection) 방법을 이용하였다. POD는 관측강수에 대한 유강수 예측의 확률적 비율을 의미하는 것으로 그 범위는 0에서 1이며 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{i,j} = \text{Prob}\{R_{i,j} > 0\} = \frac{N(R_{i,j} > 0)}{N_T} \quad (6)$$

여기서 Prob{}는 유강수 에코가 나타날 확률을 의미하며, $R_{i,j}$ 는 지점 강우강도를 나타낸다. 또한, $N(R_{i,j} > 0)$ 은 임의 지점의 강우강도가 0 이상인 경우를 유효강우라 보고 그 수를 나타낸 것이며, N_T 는 임의 고도각에서 이상관측 자료를 제외한 유효지점의 총 수이다. 임의 강우기간에 대한 레이더 자료에서 매우 낮은 POD 값은 빔 차폐로 간주할 수 있고, 높은 POD의 값은 지형클러터 및 에코의 변이(anomalous)를 의미한다.

2.3 실시간 편차보정 기법

레이더 강우추정 과정에서 발생하는 강우계와 레이더 사이의 편차는 강우기간 동안의 보정을 필요로 한다. 보정은 대개 Z-R 관계식의 변화 혹은 Z-R 관계식을 고정시키고 강우계를 통해 관측된 자료를 이용하여 레이더 추정강우를 조정하는 것으로 나누어진다. 레이더 강우의 이러한 편차발생의 원인은 a) 레이더 반사인자의 측정오차; b) Z-R 관계식의 변동성; c) 강우계-레이더의 상이한 강우 추출(sampling) 방법; d) 강우계 관측오차 등으로 알려져 있다.

본 연구에서는 레이더 추정강우와 강우계 관측강우의 편차에 초점을 맞추어 강우기간 동안 실시간 편차보정(bias adjustment) 기법을 적용하였다. 즉, Marshall-Palmer의 Z-R 관계식으로 레이더 강우를 추정하여 대상구역의 지점 강우계 관측자료와의 편차를 균일하게 보정하는 방법으로 수행하였으며, 사용된 강우계 수에 대한 보정계수(F)는 다음과 같다.

$$F_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i / R_i \quad (7)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^N G_i / \sum_{i=1}^N R_i \quad (8)$$

여기서 G 는 강우계 관측강우, R 은 레이더 추정강우를 의미한다. Eq. (7)은 모든 강우계-레이더 비교가 동일한 가중치를 가지는 것이고, Eq. (8)은 강우깊이에 비례한 가중치 적용을 의미한다. 각 보정계수는 레이더 하드웨어 보정과 Z-R 관계식에 관계된 편차 수정에 적용되며, 또한 강우형태별 Z-R 관계식 선정에 대한 어려움을 다소 해결할 수 있고 최적의 레이더 강우패턴을 찾고자 수정된 레이더 깊이산정의 영향(Brandes, 1974)을 무시할 수 있는 것으로 알려져 있다.

3. 사례연구

3.1 적용대상지역 및 기본자료

본 연구에서는 레이더 추정강우의 편차보정과 수문학적 적용을 위해 기상청 관악산 레이더에서 생산되는 UF(Universal Format) 10분 자료를 이용하였으며, 수문학적 적용을 위해 Fig. 1과 같은 소양강댐 상류유역을 선택하였다. 현재 관악산에 설치 운용중인 기상 레이더는 1988년 8월에 도입된 DWSR-88C(EL. 638m) C-band 레이더로써 관측 반경 240km, 파장 5.6cm, 펄스폭은 2.0 μ s이며 관측 고도각 0~7도 사이에 8개의 sweep 자료를 생산한다. 또한, 소양강댐 대상유역은 관악산 레이더로부터 약 100~160km 떨어진 위치에 존재하고 있으며, 유역면적이 2,703km², 총 유로연장이 166.2km로써 한강수계를 형성하는 북한강의 최대 지류이며 인북천 및 내린천의 두 지류로 구성되어 있다. 소양강댐은 소양강 계곡에 위치한 높이가 123m, 댐 길이 530m, 체적 약 9,600,000m³의 사력댐으로서 홍수기에 자연 유하량을 저류하여 갈수기에 서서히 유하시킬 수 있는 홍수조절 능력을 갖추고 있는 다목적 댐이다.

본 연구대상 유역에는 기상청에서 운영하는 해남, 서화, 진부령, 미시령, 내면, 기린, 인제, 신남, 북산 등 9개의 AWS 강우계가 존재하며, 원통, 내린천, 양구, 북천 등 4개의 수위관측소와 소양강댐이 존재한다. 본 연구의 실시간 편차보정을 위한 사례기간은 2003년 7월 강우-유출사상이 발생한 18~19일, 22~23일의 두 호우사상을 선택하였고, POD 분석을 위해서는 호우사상과 상관없이 7월 한달 자료를 모두 이용하였다.

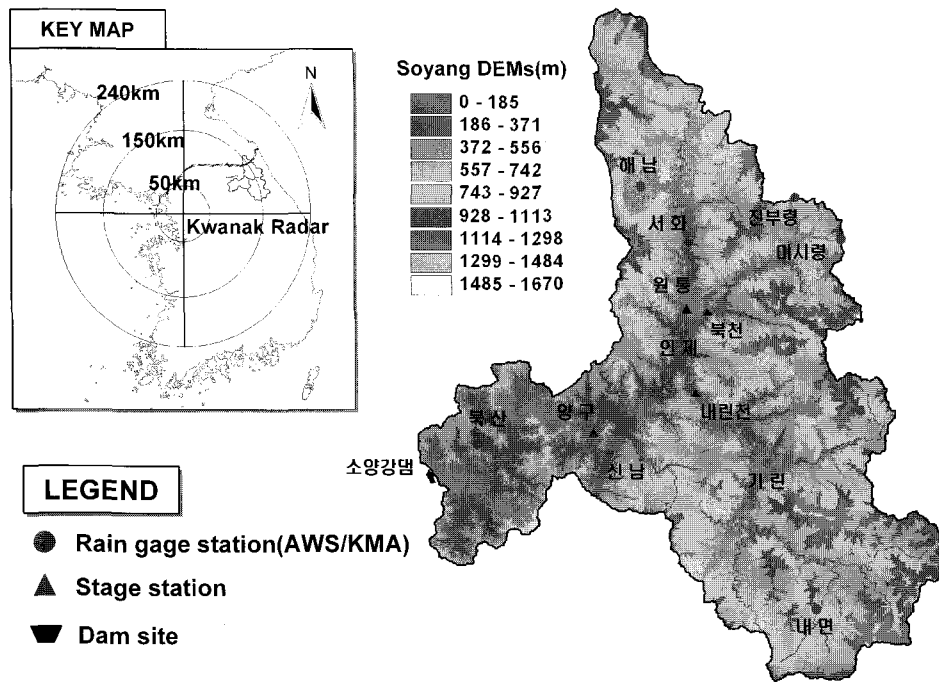


Fig. 1. Soyang River watershed and Kwanak radar site

3.2 POD 분석

본 연구에서는 지형클러터 및 빔 차폐영역 등을 결정하기 위해 2003년 7월의 4,000개 이상의 10분 단위 관악산 극좌표 레이더 자료(1°×1km)를 활용하여 POD 해석을 수행하였다. Fig. 2는 이들 결과를 나타낸 것으로 POD 축의 해상도는 0.0002이다. 그림에 따르면 0.05보다 작은 다수의 POD가 존재한다는 것을 알 수 있는데, 여기서 POD 하한치(p_h)보다 낮은 POD 픽셀은 빔 차폐(beam blockage)를 의미한다. 또한, 높은 POD 분

석결과는 지형클러터나 이상전파(anomalous propagation)를 의미하는 것으로 상한치 p_h 는 POD 크기에 대한 빈도의 변화에 따라 0.25~0.35의 범위를 가진다. Fig. 3은 고도각 $\theta=0.95^\circ$, $p_h=0.30$ 에서 지형 클러터 맵을 극좌표로 나타낸 것이다. 여기서 지형클러터 및 이상전파 영역은 등고선 형태로 추출되었는데, 본 등고선은 관악산 레이더 사이트 인접지역인 청계산, 백운산 일대와 남한산 주변에 표시되면서 대부분 능선들 사이의 이상전파 영역을 표현하기 때문에 이와 같은 레이더 오자료를 효과적으로 추출할 수 있는 것으로 나타났다.

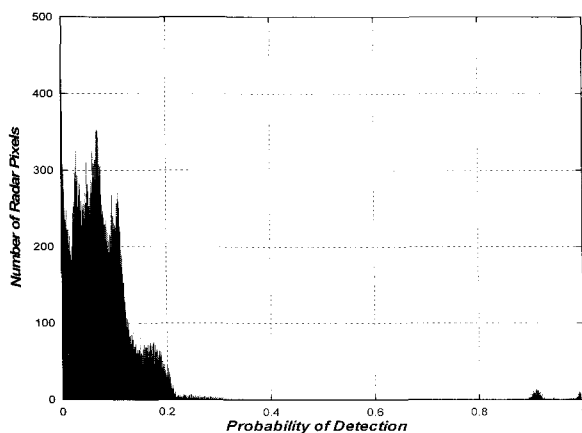


Fig. 2. Histogram of probability of detection(POD) of non-zero rain over the KWK radar umbrella for $\theta=0.95^\circ$

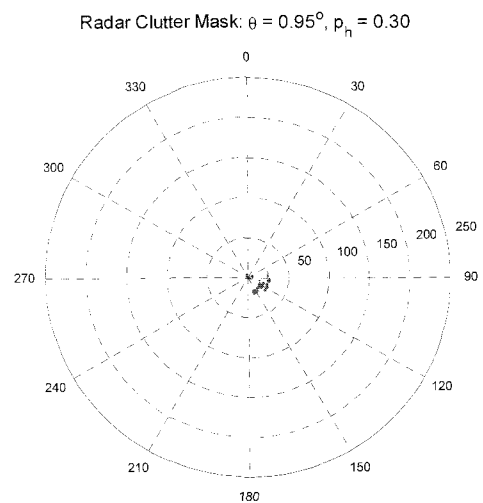


Fig. 3. Clutter map produced for $p_h=0.30$ and $\theta=0.95^\circ$. Clutter regions are shown in contours

Table 1. Sensitivity study cases for delineation of erroneous radar data

POD 하한치(p_l)	POD 상한치(p_h)	고도각(θ)
0.02	0.30	0.05°
0.02	0.30	0.95°
0.02	0.30	1.95°
0.002	0.30	0.05°
0.002	0.30	0.95°
0.002	0.30	1.95°

Radar Clutter Mask: $\theta = 0.05^\circ$, $p_l = 0.002$, $p_h = 0.30$

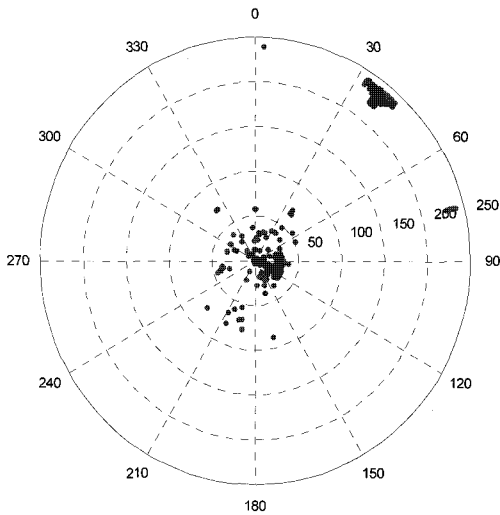


Fig. 4. Clutter map produced for $p_l=0.002$, $p_h=0.30$ and $\theta=0.05^\circ$. Clutter region and beam-blockage/far-range effects are shown in dots

Radar Clutter Mask: $\theta = 0.95^\circ$, $p_l = 0.002$, $p_h = 0.30$

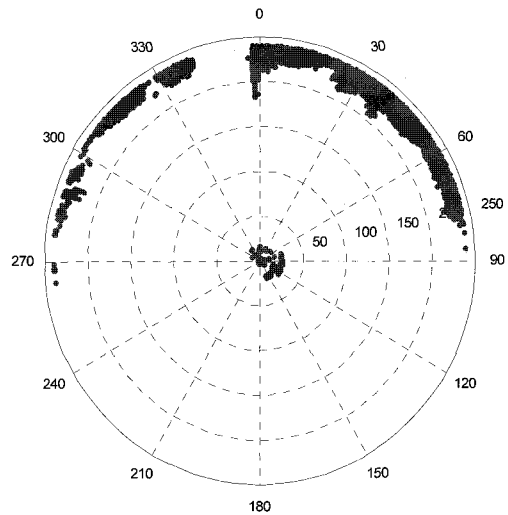


Fig. 5. As in Fig. 4 but for $p_l=0.002$, $p_h=0.30$ and $\theta=0.95^\circ$

Radar Clutter Mask: $\theta = 1.95^\circ$, $p_l = 0.002$, $p_h = 0.30$

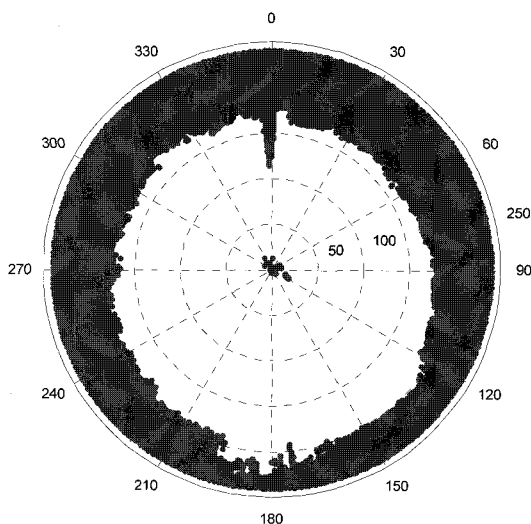


Fig. 6. As in Fig. 4 but for $p_l=0.002$, $p_h=0.30$ and $\theta=1.95^\circ$

Fig. 2 및 3과 같은 분석을 위해서는 다양한 p_h , p_l 임

계치 및 고도각 θ 에 대한 민감도 해석이 필요하다. Table 1은 민감도 해석을 위한 대표적 사례를 나타낸 것으로, 이들 결과를 분석한 결과 (a) p_l 값은 빔 차폐를 나타냄과 동시에 레이더 감쇠(attenuation)와 원거리 지역에서 구름의 일시적 초과(overshooting) 현상과 밀접하게 관계되고; (b) 각 고도각은 그들 자신만의 지형클러터(이상전파 포함)를 가지고 있고; (c) 1.95°보다 높은 고도각 자료는 레이더 지점으로부터 약 150km 떨어진 지역에서 사용 가치가 없는 것으로 나타났다. Fig. 4~6은 유강수 레이더 자료를 대상으로 Table 1의 고도각에 따른 지형클러터와 빔 차폐영역을 나타낸 것이다. 이들 그림에 따르면, 낮은 고도각에서는 짧은 범위의 레이더 오자료가 지배적이고, 반면에 높은 고도각에서는 원거리 오자료가 매우 현저하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4~6에 대응하는 POD 빈도분석 결과는 Fig. 2, 7 및 8과 같다. 이러한 결과들에서 p_l 및 p_h 의 값은 히스토그램의 형상과 고도각에 종속됨을 알 수 있고, $p_h=0.30$ 은 모든 경우에서 지형 클러터 범위를 정의하기

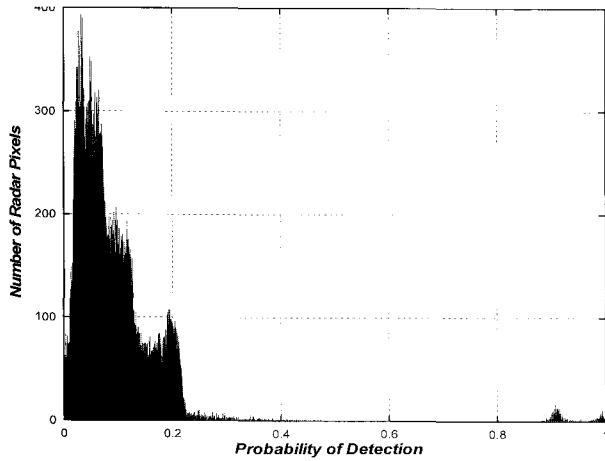


Fig. 7. As in Fig. 2 but for $\Theta=0.05^\circ$

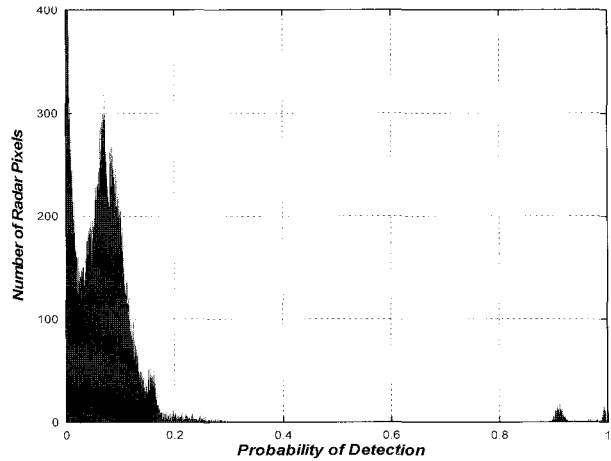


Fig. 8. As in Fig. 2 but for $\Theta=1.95^\circ$

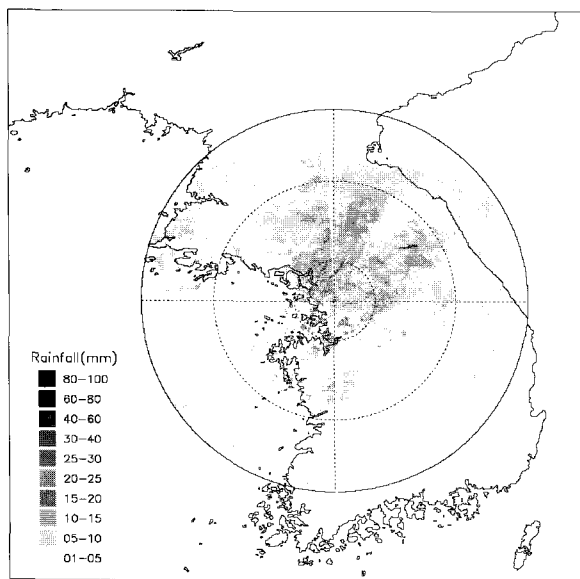


Fig. 9. Radar rainfall estimated by Marshall-Palmer relationship

위해 상수로 사용되었다. 반면에 p_n 값은 고도각이 높아짐에 따라 원거리 구름의 일시적 초과 현상으로 빈도 분포도의 형상을 현저하게 변화시켜 그 값의 추출이 p_n 보다 복잡한 관계를 가지는 것으로 검토되었으나, 본 연구에서는 Table 1의 민감도 분석을 통해 0.002의 값을 채택하였다. 또한, 부수적 잡음제거를 위해 임의의 격자에서 에코값이 해당 격자를 중심으로 한 $5 \times 5 \text{ km}$ 격자 내의 에코값의 산술평균과의 차가 $\pm 15 \text{ dBZ}$ 이상인 경우는 해당 격자의 값을 산술평균값으로 대체하였다.

상술된 지형클러터, 빖 차폐영역, 레이더 잡음 등이 제거된 레이더 최저 고도각($\Theta=0.05^\circ$) 반사도 자료로부터 Marshall-Palmer Z-R 관계식(이후로 “M-P 관계식”이라 칭함)을 적용하여 추정된 레이더 강우자료를 표현하면 Fig. 9와 같다. 그림의 결과는 2003년 7월 22일 6

시부터 11시까지의 누적강우를 1~100mm 범위로만 표현한 것으로 기상연구소(1989)의 연구에서처럼 과소 추정될 가능성을 다분히 내재하고 있다. 본 연구에서는 이러한 레이더 추정강우와 강우계 관측강우와의 편차를 소양강 유역을 대상으로 분석하고 실시간 편차보정 기법을 적용하였으며, 그 결과를 다음 절에 제시하였다.

3.3 편차 분석 및 보정

레이더 추정강우는 상술한 바와 같이 여러 가지 이유로 인해 자료의 정확도가 떨어지는 것으로 알려져 있다. 본 절에서는 이러한 정확도를 향상시키기 위해 Fig. 9와 같은 M-P 관계식으로 추정된 10분 단위의 레이더 강우와 강우계 관측강우와의 편차를 분석하였다. Fig. 10은 2003년 7월의 두 강우사상 기간동안 레이더 및 강우계 관측강우의 소양강 유역평균 강우량(Mean Areal Precipitation, MAP)을 시간위로 계산하여 표현한 것이다. 여기서 레이더 강우의 경우는 적용유역에 포함된 레이더 격자들의 평균값으로 MAP를 산정하였고, 강우계의 경우는 Thiessen의 가중치 기법을 사용하였다. Fig. 10의 결과에서 알 수 있는 것처럼 M-P 관계식으로 추정된 레이더 강우는 강우계 관측강우에 비해 매우 과소 모의되는 것으로 분석되었다. 그 현상은 선택사상에서 강우계 관측강우가 0.3mm 이상일 때 보다 현저하게 나타났고, 첫 번째 강우사상(“Event 1”)이 보다 큰 변동성을 가지는 것으로 검토되었다.

Fig. 11은 과소추정된 레이더 강우의 공간분포를 검토하기 위해 강우 침투치가 발생했던 2003년 7월 22일 7시 50분 강우계 관측강우(G)에 대한 레이더 추정강우의 비율인 G/R의 분포를 등고선 형태로 나타낸 것이다. 여기에 사용된 강우계 자료는 소양강 유역 안팎의 28개소의 자료를 활용하여 지점별로 계산한 것이다. 본 그

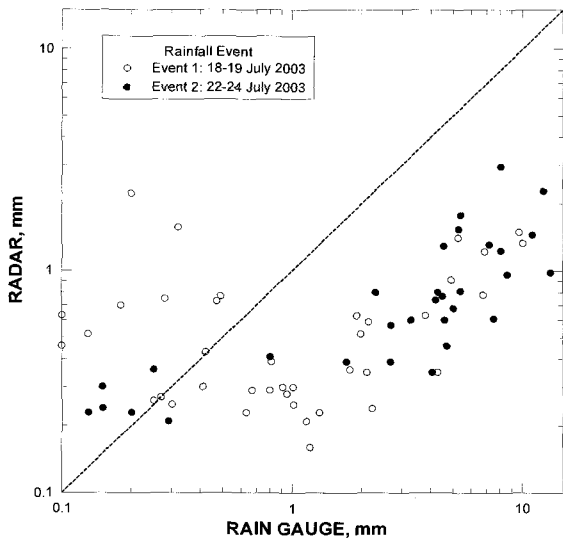


Fig. 10. Comparison of hourly rainfall measurements by radar and rain gauge for two rainfall events over the Soyang River watershed

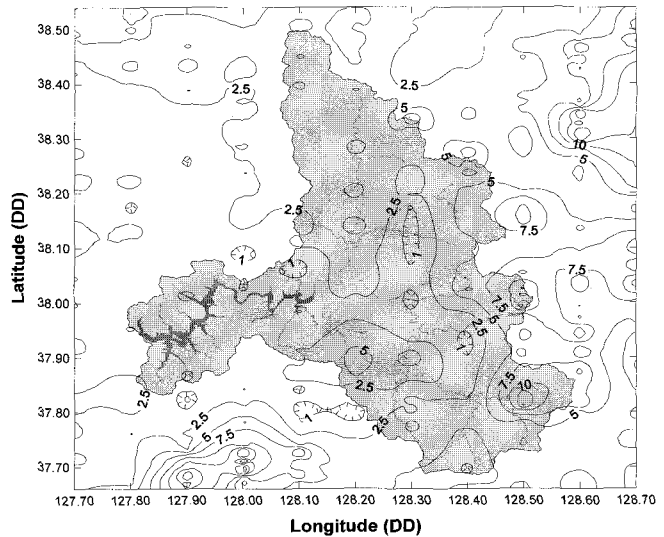


Fig. 11. Distribution of G/R ratio on 0750KST, 22 July 2003

림의 결과는 Fig. 10의 결과와 유사하게 M-P 관계식의 레이더 추정강우가 강우계 관측강우 비해 평균적으로 3.8배 정도 과소추정됨을 알 수 있고 공간적으로 매우 다양한 분포를 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 강우계와 레이더 간의 발생 편차를 분석하고자 여러 통계치를 계산하여 레이더 추정강우의 정확도 평가하고자 하였다. Table 2는 2003년 7월의 선택 호우사상에 대한 소양강 유역에 포함된 강우계와 레이더 강우자료 간의 통계치를 나타낸 것으로, \bar{G} 는 지상강우계의 산술평균 강우량, $\overline{G/R}$ 는 지상 강우계와

M-P 관계식으로 추정된 레이더 강우와의 평균 비(ratio)와 함께 $\overline{G/R}$ 의 상대분산(relative dispersion), 평균편차(average difference) 등도 계산하여 나타내었다. Table 2의 결과에 따르면, 평균 G/R 값은 호우사상 1, 2에서 각각 3.64, 5.86으로 레이더 추정강우가 앞선 결과와 동일하게 과소모의 됨을 알 수 있고, 평균 G/R의 상대분산은 각각 145%, 102%, 평균편차는 68%, 69%로 계산되어 M-P 관계식으로 추정된 레이더 강우가 불확실성을 다소 포함하는 것으로 검토되었다.

Table 2. Summary of gauge-radar comparisons for 2 rainfall events on the Soyang watershed (Based on 10 min radar samples and $Z=200R^{1.6}$)

Date	Event 1 (18-19 July 2003)	Event 2 (22-23 July 2003)
Number of gauges	9	9
Event duration (hours)	36	48
\bar{G} (mm)	3.51	5.96
$\overline{G/R}$	3.64	5.86
¹ Relative dispersion about $\overline{G/R}$ (%)	145	102
² Average difference (%)	68	69

¹ Relative dispersion (coefficient of variation) about $\overline{G/R} = 100\% \sigma[G/R] / \overline{G/R}$ where $\sigma[G/R]$ is the standard deviation of the gauge-radar ratios.

² Average difference = $100\% \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{G_i - R_i}{G_i} \right|$

이상과 같이 분석된 레이더 추정강우의 편차는 양질의 레이더 관측장을 생산하기 위해 편차보정 기법으로 수정하고자 하였다. 본 연구에서는 Eq. (7) 및 (8)의 편차보정 기법을 모두 적용하여 레이더 추정강우의 정확도 향상을 비교·분석하였다. Fig. 12와 13은 소양강 유역에서 실시간 편차보정 기법으로 추정된 레이더 MAP를 도시한 것이다. 그림에서 "Observation"은 지상 강우계의 관측강우량, "M/P Z-R"은 M-P 관계식으로 추정된 레이더 강우량, 나머지는 편차 보정된 레이더 강우량으로 "Method 1"은 Eq. (7)의 보정결과이고 "Method 2"는 Eq. (8)의 적용결과를 나타낸 것이다. M-P 관계식으로 추정된 레이더 강우는 앞선 결과에서와 같이 매우 과소추정됨을 알 수 있고, 보정된 레이더 강우량은 두 적용기법의 물리적 차이로 Eq. (7)의 적용 결과는 관측강우에 비해 다소 과다추정되는 결과로 나타났지만, Eq. (8)의 적용 결과는 관측 강우량과 비교하

여 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

각 보정기법으로 산정된 레이더 추정강우의 통계치를 계산한 결과 Table 3의 평균 G/R은 각 적용 기법별로 강우사상 1에서는 0.95, 1.02로 감소하였고, 강우사상 2에서는 0.96, 1.32로 감소하였다. 이들의 평균편차는 68%에서 각각 59 및 44%, 69%에서 각각 58 및 56%로 줄어든 결과로 나타나 그 불확실성 또한 감소하는 것으로 검토되었다. 이들의 결과를 종합해 볼 때, 실시간 편차보정 기법은 수문학적 유역평균 강우량 산정시 지상 강우계와의 오차향을 고려하여 다소 과소추정되는 레이더 강수정보를 매우 정확하게 보정할 수 있다는 측면에서 그 적용성이 매우 뛰어나고, 특히 Eq. (8)의 적용 결과는 강우계 관측강우와 대체로 동일한 레이더 강우산정 결과를 제시하므로 수문학적 적용을 위한 시·공간적 고해상도 강수정보를 제공할 수 있는 유용한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

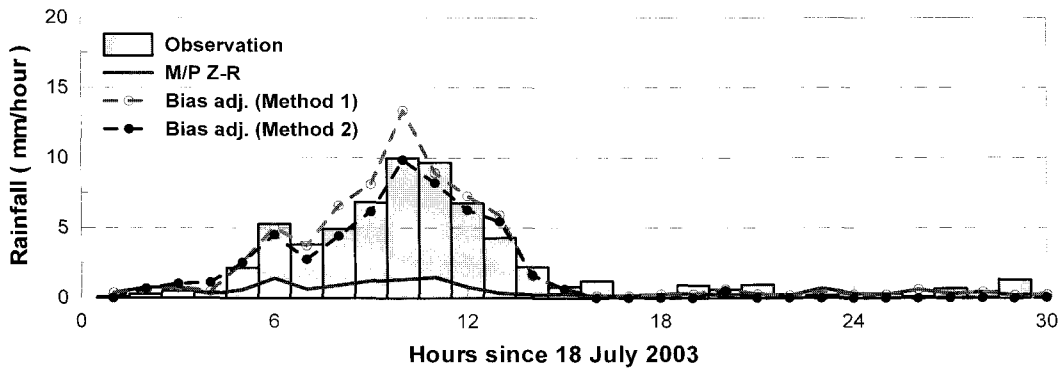


Fig. 12. Bias adjusted results on 18-19 July 2003. All quantities are computed to mean areal rainfall for the Soyang watershed

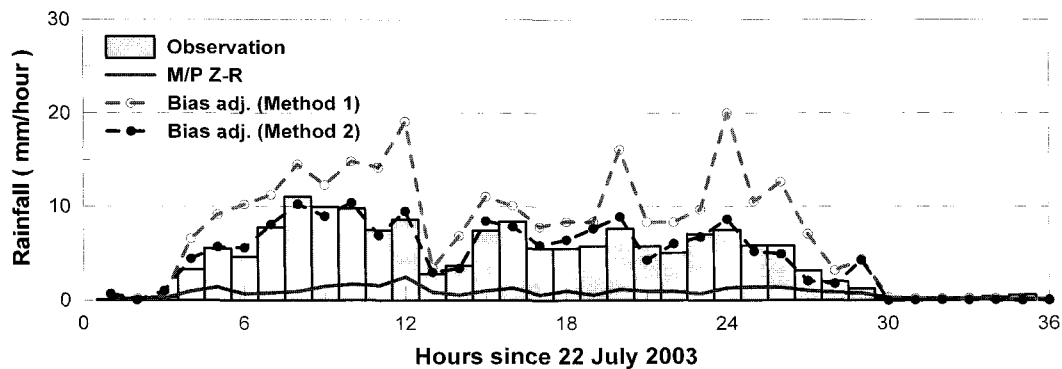


Fig. 13. Bias adjusted results on 22-23 July 2003. All quantities are computed to mean areal rainfall for the Soyang watershed

Table 3. Bias adjustment results for 2 rainfall events on the Soyang River watershed

Date	18-19 July 2003		22-23 July 2003	
	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2
\bar{G}/\bar{R}	0.95	1.02	0.96	1.32
Average difference (%)	59	44	58	56

4. 결 론

본 연구에서는 기상 레이더 추정강우의 수문학적 활용성을 높이고자 관악산 레이더 자료를 대상으로 POD 분석을 통해 지형클러터 및 오자료를 제거하고 M-P 관계식으로 강우강도를 추정한 후, 강우계 관측 자료와의 편차를 실시간으로 보정하여 소양강 유역의 최적 레이더 추정강우를 산정하였다. POD 분석결과 낮은 POD 값은 빗 차폐를 나타냄과 동시에 레이더 감쇠와 원거리 지역에서 구름의 일시적 초과현상과 밀접하게 관계되고, 각 고도각은 그들 자신만의 지형클러터를 가지고 있으며, 1.95°보다 높은 고도각 자료는 레이더 지점으로부터 약 150km 떨어진 지역에서 사용가치가 없는 것으로 나타났다. 이들 결과를 바탕으로 POD 하한치 및 상한치는 0.002 및 0.3을 선택하였고, 지형클러터 및 레이더 오자료들이 제거된 반사도 자료를 M-P 관계식에 적용하여 레이더 강우를 추정하였다.

M-P 관계식으로 추정된 레이더 강우(R)는 강우계 관측강우(G)와 비교하여 시·공간적으로 매우 과소 모의하는 것으로 나타났고, 이들의 통계특성치인 평균 G/R 값은 각 호우사상에서 각각 3.64, 5.96으로 계산되어 동일한 과소모의 특성을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 평균 G/R의 평균편차는 68%, 69%로 계산되어 M-P 관계식으로 추정된 레이더 강우가 불확실성을 다소 포함하는 것으로 검토되었다. 이들의 결과를 바탕으로 실시간 보정기법을 적용한 결과 평균 G/R 값은 0.95~1.32로 적정분포를 보이고, 평균편차는 9~28% 범위로 감소되어 불확실성 또한 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 편차가 보정된 최적 레이더 추정강우로 소양강 유역의 MAP를 산정한 결과 관측강우와 비교하여 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 실시간 편차보정 기법은 수문학적 유역평균 강우량 산정시 과소추정되는 레이더 강우정보를 매우 정확하게 보정할 수 있다는 측면에서 그 적용성이 매우 우수한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 후속 논문인 김진훈 등(2005)의 레이더 추정강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형에 미치는 영향을 검토하고자 하는 연구목적에 비추어 정확한 레이더 강우입력 자료는 수문학적 활용성 연구에서 매우 중요한 기반자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 기상연구소 (1989). 레이더 에코로 계산된 강우량의 정확도 평가 연구. 연구보고서, 63p.
- 기상연구소 (1990). 레이더를 이용한 단시간 강우예측 결과의 정성 및 정량적인 평가(I). 연구보고서, 101p.
- 기상연구소 (1995). 레이더를 이용한 유역강우 산정 기법 연구(I), 연구보고서, 113p.
- 기상연구소 (1996). 레이더를 이용한 유역강우 산정 기법 연구(II), 연구보고서, 133p.
- 김진훈, 이경도, 배덕효 (2005). "레이더 추정강우의 수문학적 활용: (II) 불확실성 해석." 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 1051-1060.
- 김효경, 이동인, 유철환, 권원태 (2002). "WPMM 방법을 이용한 레이더 강수량 추정: 1. 1998년 여름철 관악산 DWSR-88C를 위한 Z_e-R 관계식 산출." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제35권, 제1호, pp. 25-36.
- 남경엽, 송병현, 서은경, 최지혜, 이정석, 남재철 (2003). "청주부근에서 발생한 여름철 강우의 레이더-지상강우량계 관계에 관한 연구." 한국기상학회지, 한국기상학회, 제39권, 제4호, pp. 431-440.
- 안상진, 김진극 (2003). "레이더 반사강도와 강우강도의 Z-R 관계식 산정." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제36권, 제1호, pp. 13-21.
- 임원근 (1995). 레이더 기상학, 영재사.
- 이경도, 김진훈, 배덕효 (2004). "레이더 추정강우의 수문학적 적용성 검토에 관한 연구." 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 775-780.
- Skahill, B. E., 최우희, 김민환, 김성균, Johnson, L. E. (2003). "기상레이더와 지형정보시스템을 이용한 분포형 강우-유출 유역모형의 개발과 검증." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제36권, 제2호, pp. 285-300.
- 정재성, 이재형 (1996). "기상레이더 자료를 이용한 시우량곡면 예측." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제29권, 제3호, pp. 187-195.
- Anagnostou, E. N., Krajewski, W. F., Seo, D.-J., and Johnson, E. R. (1998). "Mean field rainfall bias studies for WSR-88D." *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3(3), pp. 149-159.
- Barnston, A. G., and Thomas, J. L. (1983). "Rainfall measurement accuracy in FACE: A comparison of gage and radar rainfalls." *J. Climate Appl.*

- Meteor.*, Vol. 22(12), pp. 2038-2052.
- Brandes, E.A. (1974). *Radar rainfall pattern optimizing technique*, NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-67, 16p.
- Calheiros, R., and V. Zawadzki, I. (1987). "Reflectivity-rainrate relationships for radar hydrology in Brazil", *Journal of Climate and Appl. Meteor.*, Vol. 26, pp. 118-132.
- Carpenter, T. M, Georgakakos, K. P., and Sperfslage, J. A. (2001). "On the parametric and NEXRAD-radar sensitivities of a distributed hydrologic model suitable for operational use." *Journal of Hydrology*, Vol. 254, pp. 169-193.
- Carpenter, T. M, and Georgakakos, K. P. (2004). "Impacts of Parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulation of a distributed hydrologic model." *Journal of Hydrology*, Vol. 298, pp. 202-221.
- Georgakakos, K. P., Sperfslage, J. A., Tsintikidis, D., and Carpenter, T. M. (1999). *Design and Tests of an Integrated Hydrometeorological Forecast System for the Operational Estimation and Forecasting of Rainfall and Streamflow in the Mountainous Panama Canal Watershed*, HRC Technical Report No. 2, 143p.
- Marshall, J. S., and Palmer, W. Mc. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Atmos. Sci.*, Vol. 5, pp. 165-166.
- Probert-Jones, J. R. (1960). "The analysis of Doppler radar echoes from precipitation." *Proceeding Eighth Wea. Radar Conf.*, pp. 377-385.
- Rosenfeld, D., Wolff, B. D. Atlas, D. (1993). "General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate." *Journal of Appl. Meteor.*, Vol. 32, pp.50-72.
- Rosenfeld, D., Amitai, E., and Wolff, B. D. (1995). "Classification of rain regimes by the three-dimensional properties of reflectivity fields." *J. Appl. Meteor.*, Vol. 34, pp. 198-211.
- Wilson, J. W. (1963). "Relationship between gage-measured precipitation rates and radar echo intensities." *Proc. 10th Weather Radar Conf.*, Boston, pp. 241-246.
- Woodley, W. L., Olsen, A. R., Herndon, A., and Wiggert, V. (1975). "Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement." *J. Appl. Meteor.*, Vol. 14, pp. 909-928.

(논문번호:05-109/접수:2005.07.27/심사완료:2005.10.21)