



Quantitative evaluation of radar reflectivity and rainfall intensity relationship parameters uncertainty using Bayesian inference technique

Kim, Tae-Jeong^a · Park, Moon-Hyeong^b · Kwon, Hyun-Han^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Chonbuk National University

^bDepartment of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Paper number: 18-049

Received: 20 July 2018; Revised: 3 August 2018; Accepted: 3 August 2018

Abstract

Recently, weather radar system has been widely used for effectively monitoring near real-time weather conditions. The radar rainfall estimates are generally relies on the Z-R equation that is an indirect approximation of the empirical relationship. In this regards, the bias in the radar rainfall estimates can be affected by spatial-temporal variations in the radar profile. This study evaluates the uncertainty of the Z-R relationship while considering the rainfall types in the process of estimating the parameters of the Z-R equation in the context of stochastic approach. The radar rainfall estimates based on the Bayesian inference technique appears to be effective in terms of reduction in bias for a given season. The derived Z-R equation using Bayesian model enables us to better represent the hydrological process in the rainfall-runoff model and provide a more reliable forecast.

Keywords: Radar, Rainfall, Z-R relationship, Uncertainty, Bayesian inference

Bayesian 추론기법을 활용한 레이더 반사도-강우강도 관계식 매개변수의 불확실성 정량적 평가

김태정^a · 박문형^b · 권현한^{a*}

^a전북대학교 토목공학과, ^b한국건설기술연구원 국토보전연구본부

요 지

최근 기후변동성으로 유발되는 불안정한 기상상태를 효과적으로 관측하고자 레이더가 도입되고 있다. 레이더는 경험식으로 산정된 Z-R 관계식을 통하여 레이더 강우량을 제시하게 된다. 이 과정에서 레이더 강우량은 필연적으로 지상에 도달하는 실제 강우량과는 정량적 오차가 발생하게 된다. 본 연구는 확률통계학적 방법론을 이용하여 Z-R 관계식 매개변수 산정과정에서 우리나라의 강우특성을 고려함과 동시에 Z-R 관계식 매개변수의 불확실성을 정량적으로 제시하고자 한다. 강우의 계절성을 고려하여 Z-R 관계식 매개변수를 추정하는 과정에서 Bayesian 추론기법을 도입하여 생산된 레이더 강우량은 기존의 Z-R 관계식에 비하여 개선된 통계적 효율기준을 제시하였다. 따라서 Bayesian 추론기법을 활용한 Z-R 관계식 매개변수 산정은 정량적으로 신뢰성 있는 고해상도 강우정보의 생산은 고도화된 수문해석 및 기상예보 지원을 가능케 할 것으로 판단된다.

핵심용어: 레이더, 강우량, Z-R 관계식, 불확실성, Bayesian 추론

*Corresponding Author. Tel: +82-63-270-2426
E-mail: hkwon@jbnu.ac.kr (H.-H. Kwon)

1. 서론

전 세계적인 기후변화로 인하여 국지적으로 높은 강우강도를 나타내는 집중호우의 발생빈도가 증가하고 있으며 우리나라에서 발생하는 강우사상도 점차적으로 집중호우의 특성을 나타내고 있다. 2011년 7월 서울지역에 일강우량 301.5 mm을 기록한 강우사상은 우면산 산사태 및 도심지 침수를 유발하여 18명의 사망자와 700억 원의 재산피해를 발생시켰다. 2012년 8월에 전라북도 군산지역에 발생한 집중호우는 일강우량 414.5 mm를 기록하여 국가산업단지 시설물 및 도로를 침수시켰다. 2016년 10월에는 울산지역을 내습한 18호 태풍 차마는 시간당 최대 134 mm의 강우를 유발하여 태화강 수위 상승으로 인한 침수를 유발하였다.

급변하는 강우현상으로 발생하는 위험기상에 대한 대처능력 향상과 효율적인 수자원 활용의 고도화를 위하여 고해상도로 관측이 가능한 레이더의 활용성이 부각되고 있으며 방재 및 수문기상학 등의 다양한 분야에서 레이더 자료의 활용성을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다. 선진 기상기술을 확보하고 있는 미국 및 유럽연합은 레이더 및 위성영상을 활용하여 발생가능성이 있는 재해를 예측 및 대응하고 있다(NOAA and USGS, 2005; EU, 2011). 특히 짧은 시간에 광범위한 영역의 관측이 가능한 레이더는 집중호우 및 돌발홍수 등과 같은 실시간 예보의 수요가 높은 수문기상학 및 재난방재 분야에서 활용성이 높다(Krajewski and Smith, 2002; Bae *et al.*, 2007; Kim and Kwon, 2016).

레이더 반사도 자료로부터 레이더 강우량을 산정하기 위해서 필수적으로 레이더 반사도 자료와 지상 강우량의 관계규명이 선행되어야 한다. 레이더 반사도 자료와 지상 강우량의 관계를 규명하기 위하여 캐나다 McGill 대학교에 소속된 Marshall Radar Observatory 연구진이 다양한 강우유형, 레이더 기종 및 지형학적 특성을 고려한 사례연구를 수행한 이후부터 레이더 자료를 대상으로 다양한 연구가 활발히 수행되기 시작하여 현재까지도 많은 나라에서 활발한 연구가 수행되고 있다(Bringi and Chandrasekar, 2001; Villarini and Krajewski, 2010).

수문기상분야에서 레이더를 도입한 이후로 레이더 반사도-강우강도 관계식(이하, Z-R 관계식) 산정은 국내외적으로 수문기상학적 연구에서 다양한 방법론을 적용하여 현재까지 연구되어 오고 있다. Ahn and Kim (2003)은 관악산 레이더 관측반경에 포함되는 충주댐 유역 유출량의 범위가 1,000~8,519 m³/s인 강우사상을 선정하고 32개 지상 강우량을 대상으로 선형회귀분석을 통하여 Z-R 관계식 매개변수를 산정한 결과

에서 0.75~0.63의 상관성을 확인하였다.

Bae *et al.* (2009)은 레이더 강우량의 수문학적 활용을 평가하기 위하여 최소자승법으로 관악산 및 진도 레이더 관측반경에 포함되는 지상 강우량을 대상으로 Z-R 관계식 매개변수를 추정하여 레이더와 이격된 거리가 짧을수록 레이더 강우량의 정확도가 향상되는 것을 확인하였다. Kim and Yoo (2014)는 Z-R 관계식 매개변수를 실시간으로 산정하기 위하여 확장 칼만 필터링 기법을 적용하여 구덕산 레이더 관측반경에서 발생한 6개 호우사상에 대한 Z-R 관계식을 추정하였다. 추정된 레이더 강우량은 지상 강우량과 전반적으로 근사한 결과를 확인하였다.

Berenguer and Zawadzki (2008)은 층상형 강우유형에 중점을 두고 S-band 기상레이더 반사도 자료의 관측반경 및 고도에 따른 오차특성을 공분산 행렬을 이용하여 규명하였으며 앙상블 기법을 도입하여 최종적으로 수치예보 및 강우-유출 모형의 입력정보로 레이더 강우량의 활용성을 주장하였다. Alfieri *et al.* (2010)은 레이더를 중심으로 반경 25 km에서 발생한 19개 강우사상을 대상으로 지속시간 변화 및 실시간에 따른 Z-R 관계식 매개변수를 산정하여 28%의 표준오차의 개선을 확인하였지만 강우사상이 제한적이므로 광범위하게 적용하는 경우 레이더 강우량의 정확도에 오차가 포함될 수 있으므로 가능한 다양한 강우사상을 대상으로 Z-R 관계식을 산정할 것을 주장하였다.

지역적인 기후특성의 차이에서 발생하는 강우유형 및 레이더 기종 등과 같은 전제조건 차이로 인하여 Z-R 관계식으로 산정된 레이더 강우량은 실제 대상유역에 적용하는 경우 과소 추정 및 과대추정의 문제가 발생하게 된다. 현재까지 수문기상학적으로 레이더 반사도 자료로부터 레이더 강우량을 산정하는 과정은 강우입자의 크기(Drop Size Distribution, DSD) 분포의 변화에 따라 Marshall and Palmer (1948)가 개발한 Z-R 관계식을 사용하여 레이더 강우량을 1차적으로 생산한 후에 다양한 확률통계학적 기법을 도입하여 레이더 강우량에 포함되어 있는 편의(bias)를 정량적으로 보정한다. 이러한 문제점을 인지하고 한정된 자료로 수행된 대부분의 선행연구는 레이더의 기술적 발전과 더불어 장기간의 축적자료를 이용하여 신뢰성 있는 분석을 제한하였다(Allen and DeGaetano, 2005; Yates *et al.*, 2006; Rico-Ramirez *et al.*, 2015).

본 연구에서는 우리나라 수문기상학 분야에서 활용성이 증가하고 있는 레이더 강우량의 신뢰성을 확보하기 위하여 국외의 강우유형으로 구분된 기존의 레이더 Z-R 관계식을 활용하는 과정에서 내포되는 제한성 및 불확실성을 평가하고자 한다. 세부적으로는 계절성이 강한 우리나라의 강우패턴을

우기와 건기로 구분하고 Z-R 관계식 매개변수의 불확실성을 정량적으로 평가하기 위한 Bayesian 기법 기반의 해석기법 개발하였으며 우리나라 강우특성에 적합한 Z-R 관계식 매개변수를 산정하고 통계학적으로 검증하였다.

본 연구에서는 우리나라 수문기상학 분야에서 활용성이 증가하고 있는 레이더 강우량의 신뢰성을 확보하기 위하여 국외의 강우유형으로 구분된 기존의 레이더 Z-R 관계식을 활용하는 과정에서 내포되는 제한성 및 불확실성을 평가하고자 한다. 세부적으로는 계절성이 강한 우리나라의 강우패턴을 우기와 건기로 구분하고 Z-R 관계식 매개변수의 불확실성을 정량적으로 평가하기 위한 Bayesian 기법 기반의 해석기법 개발하였으며 우리나라 강우특성에 적합한 Z-R 관계식 매개변수를 산정하고 통계학적으로 검증하였다.

2. 연구방법 및 연구자료

2.1 레이더 반사도-강우강도 관계식

레이더는 ‘Radio Detection And Ranging’의 합성어이며 송신기에서 전자파를 발사하여 대기수상체에 부딪혀 후방산란으로 되돌아오는 반사파를 수신하여 대기수상체의 위치, 속도 및 강도 등을 탐지하는 원격관측 장비이다. 기상관측을 목적으로 하는 레이더는 주로 마이크로파를 사용하는데 파장에 따라서 C-band (3.75~7.5 cm), S-band (7.5~15.0 cm) 및 X-band (2.5~3.75 cm)로 구분된다. 일반적으로 파장이 클수록 대기 중에서 전파감쇠의 영향이 적어 광범위한 영역을 관측할 수 있어 수문기상 관측을 위한 현업용 레이더는 주로 C-band 및 S-band 파장을 이용한다.

레이더 안테나로 수신된 반사파로부터 반사도 자료를 획득하기 위해서는 Eq. (1)과 같은 레이더 방정식이 사용된다. 레이더 방정식에서 수신 전력은 레이더 상수와 반사도 인자에 비례하고 대기수상체까지의 거리의 제곱에 반비례한다.

$$P_r = \frac{C \cdot Z}{r^2} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 P_r 은 레이더 수신전력, r 은 레이더로부터 대기수상체까지의 거리를 의미하며 C 는 레이더 상수이다. 레이더 상수는 전파 파장, 송신전력, 안테나 직경 및 신호처리 특성 등과 같은 레이더 성능을 반영한 상수 값으로 레이더마다 다르게 설정된다. 반사도(Reflectivity, Z)는 단위체적에 존재하는 강우입자의 직경과 개수에 따라 결정되는 값으로 mm^6/m^3

의 단위를 가진다.

레이더 반사도는 후방산란으로 되돌아오는 전자파로 추정하지만 강우입자의 크기분포를 파악하고 있다면 직접 계산할 수 있다. 레이더 반사도는 Eq. (2)와 같이 우적크기분포에 의존적이다. Eq. (2)에서 D 는 우적의 직경으로 단위는 mm이다. $N(D)$ 는 단위체적(m^3)내의 주어진 우적크기 간격에 대한 우적의 개수를 나타내므로 레이더 반사도 Z 는 Eq. (2)와 같이 강우입자 크기의 6승에 의존한다.

$$Z = \int N(D) D^6 dD \quad (2)$$

수문기상학 분야에서 레이더 반사도로부터 강우량을 산정하는 과정을 레이더 강우량 추정(Quantitative Precipitation Estimation, QPE)이라 한다. QPE는 레이더 반사도 자료를 이용하여 경험적인 관계식을 통하여 레이더 강우량을 추정하는 것으로 레이더 반사도와 지상 강우량의 역함수 형태의 Z-R 관계식을 활용하며 Eq. (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$Z = \alpha \cdot R^\beta \text{ or } R = \left(\frac{Z}{\alpha}\right)^{1/\beta} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 R 은 강우강도로 단위는 mm/hr이며 Z 의 단위는 mm^6/m^3 이다. α 와 β 는 본 연구에서 정량적으로 불확실성을 평가할 Z-R 관계식 매개변수이다.

레이더가 도입된 이후부터 레이더 반사도 자료를 이용하여 정량적인 강우량으로 변환하고자 하는 연구는 세계적으로 꾸준히 진행되고 있으며 현재까지 널리 사용되고 있는 Z-R 관계식은 Table 1과 같다. 하지만 레이더 강우량의 정확성을 확보하기 위해서는 지형학적 특성, 기후학적 특성, 레이더 기종 및 강우특성을 반영하여 실제 레이더 관측환경에 적합한 Z-R 관계식을 적용하는 것이 논리적으로 타당하다. 하지만

Table 1. Various types of Z-R relationships for different rainfall types

| Rainfall type | Z-R relationship |
|---|---------------------------|
| Stratiform rainfall (Marshall and Palmer, 1948) | $Z = 200 \times R^{1.6}$ |
| Convective rainfall (Fulton et al., 1998) | $Z = 300 \times R^{1.4}$ |
| Tropical rainfall (Gochis et al., 2015) | $Z = 32 \times R^{1.65}$ |
| Thunderstorm rainfall (Jones, 1956) | $Z = 486 \times R^{1.37}$ |
| Orographic rainfall (Blanchard, 1953) | $Z = 31 \times R^{1.71}$ |
| Warm rainfall (Rosenfeld et al., 1993) | $Z = 230 \times R^{1.25}$ |
| Hurricane rainfall (Jorgensen and Willis, 1982) | $Z = 300 \times R^{1.35}$ |
| Snow rainfall (Carlson and Marshall, 1972) | $Z = 2000 \times R^{2.0}$ |

동일한 강우유형에서 나타나는 강우특성이 다양하게 나타날 수 있다. 예를 들어, 평지에서 발달한 강우현상이 산악지형으로 진행되는 경우 상승운동으로 인하여 적운형 형태의 강우로 변환되기도 하며 우리나라와 같이 국토의 70% 이상이 산악지형인 경우에는 강우특성의 변동성이 더욱 심하다. 이러한 경우 층상형과 적운형 강우유형이 동시에 존재하게 되므로 완벽하게 Z-R 관계식을 적용하여 지상 강우량과 동일한 레이더 강우량을 산정하는 것은 현실적으로 불가능하다.

우리나라는 수문기상현상 관측을 목적으로 레이더를 도입한 기간이 짧고 초창기 레이더 분야의 연구는 장비의 설치 및 유지관리에 주안점을 두고 있어 국외에서 개발된 층상형 및 대류성 강우유형의 Z-R 관계식을 전체 레이더 반사도 자료에 일괄적으로 적용하고 있는 실정이다. 강우현상은 시공간적으로 특성이 다르며 레이더 관측전략이 상이하기 때문에 국외에서 산정된 Z-R 관계식을 우리나라 레이더 반사도 자료에 적용하는 경우 지형학적 및 기후학적 특성이 결여되는 문제점이 있으며 실무자의 주관적인 강우유형 판단으로 동일한 레이더 반사도 자료를 이용하여 레이더 강우량을 산정하더라도 실제 지상에 도달하는 강우량과 정량적인 차이가 나타나고 있으며 수문 및 수리모형의 입력 자료로 부정확한 강우정보를 활용하는 경우가 발생하게 된다. 특히, 호우발생 초기시점과 같이 Z-R 관계식 매개변수 추정이 어려운 시점에서는 레이더 강우량의 과소 및 과대 추정을 야기할 가능성이 매우 높다.

2.2 레이더 반사도-강우강도 관계식 산정의 Bayesian 추론기법 적용

우리나라는 지상 관측소를 설치하여 약 30~40년 이상의 지상 관측자료를 보유하고 있는 반면에 레이더 반사도 자료는 설치시기와 품질관리 알고리즘의 개발의 사유로 약 10년 내외의 자료를 보유하고 있다. 본 연구에서 레이더 반사도 자료와 지상 강우량 보유기간이 중첩되는 기간은 확률통계학적 분석을 하는데 있어서 제한이 없을 것으로 사료된다. 추가적으로 본 연구에서 적용한 Bayesian MCMC (Markov chain Monte Carlo) 기법은 사전확률을 기준으로 자료증가의 영향으로 정보가 갱신되기 때문에 Z-R 관계식 매개변수를 추정하는데 있어서 기존의 방법론에 비하여 매개변수의 불확실성을 정량적으로 판단할 수 있는 결과를 제시할 수 있다(Fox and Wikle, 2005; Chen and Han, 2016).

Bayesian 추론기법은 매개변수 최적화 및 불확실성 정량화를 목적으로 확률통계학에서 다양한 목적으로 활용되고 있으며 확률분포형 형태로 사전확률(prior distribution, $p(\theta|y)$)이 주어지는 경우에 사건이 발생할 가중치를 의미하는 우도

(likelihood, $p(y|\theta)$)를 활용하여 사후확률(posterior distribution, $p(\theta|y)$)을 추론하게 된다. 이러한 과정을 수학적으로 정리하면 Eq. (4)와 같다.

$$p(\theta|y) = \frac{p(\theta)p(y|\theta)}{p(y)} \quad (4)$$

본 연구에서는 BIC (Bayesian Information Criteria) 통계량에 근거하여 레이더 강우량의 확률분포형을 대수정규분포(Lognormal distribution)로 가정하였으며 지상 관측소별로 추정되는 Bayesian Z-R 관계식 및 우도를 Eq. (5)와 같이 구축하였다.

$$Y \sim \text{Lognormal}(\mu_t, \sigma^2) \quad t = 1, \dots, N \quad (5a)$$

$$p(\mu_t) \sim \left(\frac{X_t}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad t = 1, \dots, N \quad (5b)$$

$$p(X|\alpha, \beta) = \prod_{t=1}^N \text{Lognormal}(X_t|\mu_t, \sigma^2) \quad (5c)$$

Eq. (5)에서 μ 와 σ 는 대수정규분포의 위치 매개변수(location parameter)와 규모 매개변수(scale parameter)를 의미하며 t 는 지점별 레이더 반사도 자료의 개수이다. X 는 레이더 반사도이며 μ 는 Bayesian Z-R 관계식을 추정하는데 있어 연결함수(link function)로 정의되며 α 와 β 는 Bayesian Z-R 관계식의 매개변수를 의미한다.

본 연구에서는 매개변수의 초기치(initial value)는 최소자승법을 이용하여 도출된 매개변수를 적용하였다. Bayesian 기법의 적용과정에서 매개변수 사전분포의 선택은 매개변수의 특성파악으로 결정될 수 있으며 부정확한 사전분포를 선택하는 경우 신뢰성이 낮은 사후분포를 추정하는 문제점이 있으므로 무정보(non-informative) 사전분포를 적용하였다(Gelman, 2006). 본 연구에서는 Eq. (6)과 같이 확률분포형 매개변수의 사전분포를 가정하였다. 본 연구에서 무정보 사전분포를 적용한 이유는 추정할 매개변수의 개수에 비해 자료의 개수가 충분하며, 이를 통해 우도추정에 있어서도 사전분포에 크게 의존하지 않고 자료의 특성을 그대로 반영한 매개변수 추정이 가능하기 때문이다.

$$\alpha \sim N(10^{-1}, 10^{-2}) \quad (6a)$$

$$\beta \sim N(10^{-1}, 10^{-2}) \quad (6b)$$

$$\sigma \sim \Gamma(10^{-1}, 10^{-1}) \quad (6c)$$

사전분포와 우도함수를 Eq. (4)에 의하여 재정리하면 매개변수의 사후분포는 Eq. (7)과 같이 정의된다.

$$p(\alpha, \beta | X) \propto \prod_{t=1}^T \text{Lognormal}(X_t | \mu_t, \sigma^2) \cdot N\left(\frac{X_t}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}} \cdot \sigma^2 \quad (7)$$

$$N(10^{-1}, 10^{-2}) \cdot N(10^{-1}, 10^{-2}) \cdot \Gamma(10^{-1}, 10^{-1})$$

Z-R 관계식 매개변수를 추정하기 위하여 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 기법의 Gibbs 표본추출법을 활용하여 매개변수를 추정하였다. 고성능 컴퓨터의 발달로 인하여 MCMC 기법의 적용을 위한 수치적 접근이 가능하게 되었으며, 본 연구에서는 여러 MCMC 기법 중 Gibbs 표본추출법을 활용하였다. Gibbs 방법은 조건부 분포로부터 종속성이 있는 난수를 비교적 안정적으로 추출할 수 있어 다양한 분야에서 사용되고 있다(Kwon *et al.*, 2011). 본 연구에서는 MCMC 기법의 적용과정에서 표본이 편향되지 않고 혼합(mixing)되어 추출되도록 3개의 연쇄 체인을 도입하였으며 불안정한 초기 난수의 영향을 제거하기 위하여 10,000개의 초기 난수를 제거하였다.

2.3 레이더 반사도 및 지상 강우자료

한국기상청은 1969년 서울 관악산에 도플러 레이더를 최초로 설치하여 기상장비 현대화 사업을 기반으로 우리나라 전역에 레이더를 설치하여 운영하고 있으며 1999년에 수립된 국가수해방지종합대책을 반영하여 기상청은 레이더 관측의 성능향상 및 관측영역 확대를 목적으로 총 10대의 현업용 레이더를 이중편파 레이더로 교체를 진행하고 있다.

본 연구에서 활용한 오성산 레이더는 전북 군산시 성산면 오성산 정상에 위치하고 있어 서남해상의 태풍과 집중호우를 유발하는 기상현상을 조기에 탐지하기 위해 1992년에 설치되었으며 관측반경 제한 및 장비 노후화로 인하여 2007년 5월에 S-band 레이더로 교체되었으며 레이더의 제원은 Table 2와 같다. 2007년에 교체된 오성산 S-band 레이더는 C-band 레이더에 비하여 긴 파장을 사용하므로 태풍 및 집중호우 등 높은 강우강도의 특성을 가지는 기상현상 관측과정에서 전파 감쇠가 적어 원거리 관측에 유리하다.

신형 레이더 장비가 도입되더라도 실제적으로 레이더 강우량을 산정하는 과정에서 발생하는 비구조적 시스템이 개선

Table 2. Specification of the Oseongsan weather radar

| | | |
|----------------------|--------------------------------|--------|
| Model name | WSR-98D/S | |
| Manufacturer | Metstar (China) | |
| Latitude | 36°00'46" | |
| Longitude | 126°47'03" | |
| Observation distance | Effective observation distance | 240 km |
| | Maximum observation distance | 480 km |
| Antenna speed | 12 (°/s) | |
| Bin size | 250 m | |
| Bin number | 957 | |
| Altitude | 231 m | |
| Frequency | 2.735 MHz (S-band) | |

되지 않는다면 고비용을 투자하여 위험기상으로부터 국민의 재산과 생명을 보호하는 목적을 달성할 수 없으므로 본 연구에서는 기존의 Z-R 관계식의 문제점을 개선하고자 한다. 본 연구에서는 2008년부터 2016년까지의 오성산 레이더 자료를 활용하였으며 분석기간 동안 장비의 문제로 인하여 결측사례가 발생하거나 관측반경에 레이더 반사도가 관측되지 않은 기간의 자료를 제외하였다.

세부적으로 오성산 레이더를 중심으로 반경 100 km에 포함되는 지상 관측소를 분석대상으로 선정하였다. 이와 같은 사유는 관측반경이 증가함에 따라 전자파의 감쇠 및 지구곡률 효과 등으로 유발되는 오차가 증가하기 때문이다(Willems, 2001; Bellon *et al.*, 2005). Fig. 1은 현재 기상청에서 운영하고 있는 현업용 레이더 위치와 본 연구에서 사용한 오성산 레이더의 관측반경 100 km에 포함되는 총 15개 지상 관측소의 위치를 도시한 결과이다.

본 연구에서 구면좌표계로 이루어진 UF (universal format) 형태의 레이더 자료를 직교좌표계로 변환하기 위하여 미국 항공우주국(national aeronautics and space administration, NASA)에서 개발한 RSL (Radar Software Library)를 활용하여 처리하였으며 10분 단위 레이더 반사도 자료의 활용성을 극대화 및 비기상 예코의 영향을 제거를 하고자 2006년부터 기상청에서 현업에 활용하고 있는 ORPG (Open Radar Product Generator) 품질관리가 적용된 보정 후 반사도(CZ) 자료를 사용하였다. 오성산 레이더 1.5 km CAPPI 레이더 반사도 자료를 구축하고 누적 10분의 강우강도(mm/10 min)를 시간단위의 강우강도(mm/hr)로 환산하여 사용하였다.

기하학적으로 격자로 구축되어 있는 레이더 자료에서 지상 관측소에 대응하는 레이더 반사도 자료를 추출하는 과정은 지상 관측소와 가장 근접하게 위치한 격자의 반사도 자료를 선택하는 것이다. 하지만 전자파를 이용한 레이더 관측체계의

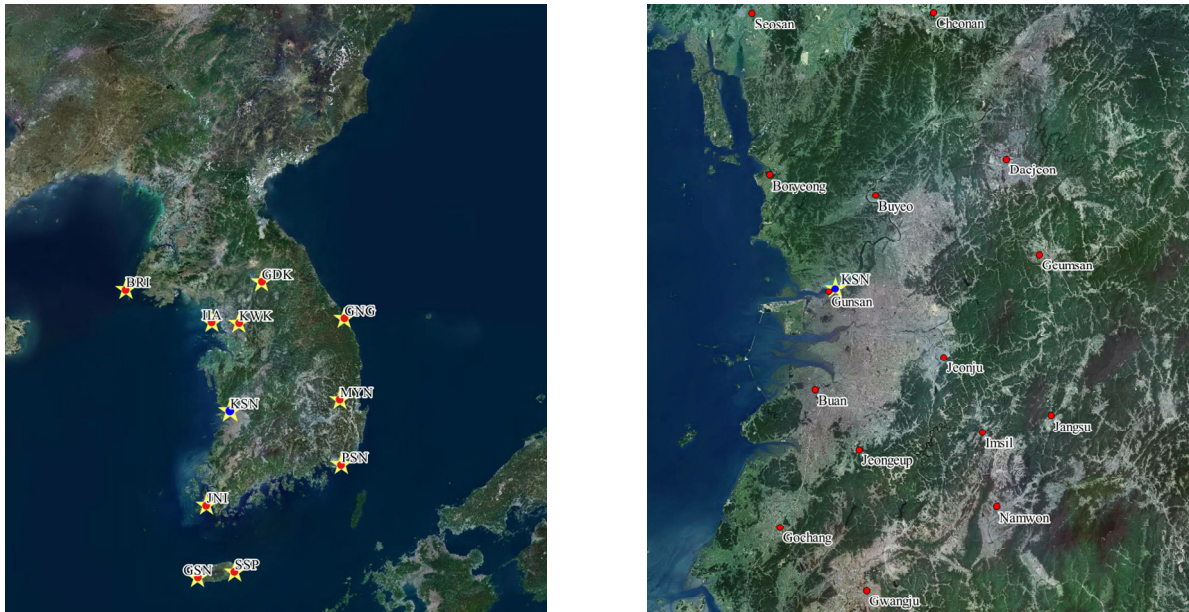


Fig. 1. Location of a KMA radar sites and ground gauge within the KSN radar observation radius

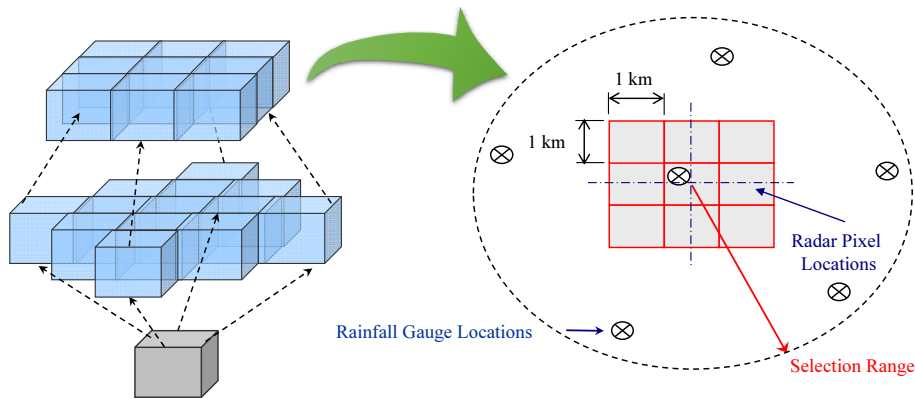


Fig. 2. Conceptual procedure for the extraction of radar data with the ground gauging station

경우 바람 및 대기 중의 이물질 등과 같은 오차발생요소로 인하여 하나의 격자의 레이더 반사도 자료를 추출하는 경우 이상치(outlier)가 포함될 가능성이 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 지상 관측소에 대응되는 격자를 중심으로 9개 격자의 레이더 반사도 자료의 평균값을 산정하여 활용하였다(Horritt *et al.*, 2001; Kelly *et al.*, 2012).

지상 관측소 우기(6~9월, JJAS)와 건기(11~2월, NDJF)의 연평균 강우량은 Table 3과 같다. 우리나라는 지형학적인 조건으로 인하여 연강우량의 편차가 크게 나타나며 6월부터 9월까지의 기간 동안 연강우량의 약 70%가 발생하게 된다(Kim *et al.*, 2014). 따라서 수문기상학적 연구에 있어서 보다 면밀한 강우분석을 위해서는 우기기간과 건기기간을 구분하

는 경우가 일반적이다.

오성산 레이더를 중심으로 반경 100 km에 포함되는 관측소의 우기 강우량은 780.7 mm이며 건기의 강우량은 156.3 mm로 약 5배의 차이를 보이고 있다. 우리나라의 강우는 계절성이 명확하기 때문에 동일한 강우유형인 경우에도 레이더 반사도 자료는 서로 다른 특성을 나타낼 수 있으므로 본 연구에서 개발한 Bayesian Z-R 관계식 매개변수 산정은 우기와 건기를 구분하여 수행하였다.

레이더 반사도 자료를 활용한 QPE 과정에서 Bayesian Z-R 관계식 매개변수를 추정하기 위하여 자료에 0 dBZ와 0 mm을 포함하는 자료는 불필요한 편의가 개입되어 왜곡된 강우량 보정결과를 제시하게 되는 것으로 알려져 있다(Yoo *et al.*,

Table 3. Seasonal rainfall amounts at each station (unit: mm)

| Rainfall | Season | | Rainfall | Season | | Rainfall | Season | |
|----------|--------|-------|----------|--------|-------|----------|--------|-------|
| | JJAS | NDJF | | JJAS | NDJF | | JJAS | NDJF |
| Seosan | 814.2 | 158.8 | Gochang | 505.6 | 120.7 | Buan | 699.4 | 176.0 |
| Daejeon | 813.8 | 147.6 | Cheonan | 773.4 | 123.4 | Imsil | 855.9 | 157.8 |
| Gunsan | 758.2 | 165.0 | Boryeong | 737.8 | 151.2 | Jeongeup | 822.0 | 182.7 |
| Jeonju | 789.2 | 152.8 | Buyeo | 797.8 | 157.4 | Namwon | 801.6 | 145.2 |
| Gwangju | 832.9 | 184.5 | Geumsan | 790.4 | 142.1 | Jangsu | 918.7 | 179.4 |

2011; Zhang *et al.*, 2015). 따라서 본 연구에서는 0 dBZ와 0 mm를 초과하는 레이더 반사도 자료와 지상 강우량을 대상으로 분석을 수행하였다.

3. 연구결과

통계학분야에서는 모형의 적합성 여부(good-of-fit) 및 모형성능(model performance)을 판단하기 위하여 통계적 효율 기준을 활용하고 있다. 본 연구에서 제안하는 Z-R 관계식으로 산정된 레이더 강우량의 통계적 유의성 및 적합성을 정량적으로 검증하고자 일치계수(index of agreement, IoA), 평균 절대오차(mean absolute error, MAE), 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE) 및 편의(bias)를 검토하였다.

IoA는 0~1의 범위를 가지며 1에 가까울수록 모형성능이 우수함을 의미하며 MAE는 관측자료와 모형결과 오차의 절댓값의 평균으로 산정되는 것으로 0에 가까울수록 모형성능이 우수하다는 것을 의미한다. IoA는 무차원 지표이며 MAE, RMSE 및 Bias의 단위는 mm/hr 이다. Eqs. (8)~(11)에서 G 는 지상 강우량, R 은 Z-R 관계식으로 산정된 레이더 강우량을 의미하며 \bar{G} 와 \bar{R} 은 지상 강우량과 레이더 강우량의 평균값을 의미한다.

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (R_n - G_n)^2}{\sum_{n=1}^N (|R_n - \bar{R}| + |G_n - \bar{G}|)^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |R_n - G_n| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (G_n - R_n)^2} \quad (10)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (G_n - R_n) \quad (11)$$

본 연구에서 제안하는 방법론의 타당성을 검증하기 위하여 기존에 사용되고 있는 Z-R 관계식의 통계적 효율기준을 검토하였다. Tables 4~7에서 확인 할 수 있듯이 현재 층운형과 적운형 강우유형에 사용되고 있는 Z-R 관계식은 정량적인 강우추정 관점에서 대체적으로 유사한 결과를 도출하고 있지만 지상에서 관측되는 강우량과 비교해서 상당한 오차가 포함되어 있으며 우기(JJAS)와 건기(NDJF)에 따른 레이더 강우량의 통계적 효율기준 또한 명확하게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 기존 Z-R 관계식을 통한 강우의 추정은 강우의 변동성 측면을 고려할 때 불확실성이 클 것으로 판단되며, 본 연구에서 제시하는 바와 같이 우기와 건기를 구분하여 불확실성을 정량적으로 제시하는 과정은 수문 및 수리모형 입력 자료의 활용성 측면에서 다양한 장점을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

레이더 반사도로부터 레이더 강우량을 산정하는 과정에서 매개변수 β 의 영향력이 매개변수 α 에 비하여 미비하므로 Z-R 관계식 매개변수를 추정하는 유사연구에서 매개변수 β 을 일정상수로 고정하는 경우가 일부 수행된 바 있지만(Seed *et al.*, 2002; Fields *et al.*, 2004; Yoo and Ku, 2017) 본 연구에서는 전체적인 강우유형을 다룰 수 있는 Z-R 관계식 매개변수를 정량적으로 제시하는 것에 주안점을 두고 있기 때문에 보다 정밀한 레이더 강우량 산정을 위하여 매개변수 β 를 고정하지 않고 연구를 진행하였다. 특정 강우유형 및 강우사상만을 대상으로 Z-R 관계식을 도출하는 방법론은 위험기상을 사전에 관측하여 대응하는 레이더 운영의 주요 목적에 부합하지 못하므로 본 연구에서는 우리나라의 경우 레이더를 이용한 기상관측이 과거부터 진행되면서 확률통계학적 분석을 수행

Table 4. IoA of the existing Z-R relationship (I is stratiform and II is convective)

| IoA | JJAS | | NDJF | | IoA | JJAS | | NDJF | | IoA | JJAS | | NDJF | |
|---------|---------|------|------|------|----------|------|---------|------|------|----------|------|------|---------|------|
| | Z-R Eq. | I | II | I | | II | Z-R Eq. | I | II | | I | II | Z-R Eq. | I |
| Seosan | 0.69 | 0.68 | 0.48 | 0.49 | Gochang | 0.80 | 0.79 | 0.50 | 0.53 | Buan | 0.75 | 0.74 | 0.51 | 0.53 |
| Daejeon | 0.70 | 0.71 | 0.53 | 0.54 | Cheonan | 0.62 | 0.62 | 0.48 | 0.49 | Imsil | 0.79 | 0.78 | 0.55 | 0.56 |
| Gunsan | 0.69 | 0.67 | 0.44 | 0.45 | Boryeong | 0.80 | 0.77 | 0.47 | 0.48 | Jeongeup | 0.73 | 0.71 | 0.49 | 0.51 |
| Jeonju | 0.73 | 0.72 | 0.53 | 0.54 | Buyeo | 0.78 | 0.77 | 0.43 | 0.44 | Namwon | 0.69 | 0.68 | 0.55 | 0.57 |
| Gwangju | 0.78 | 0.77 | 0.52 | 0.53 | Geumsan | 0.73 | 0.72 | 0.52 | 0.54 | Jangsu | 0.71 | 0.70 | 0.46 | 0.48 |

Table 5. MAE of the existing Z-R relationship (I is stratiform and II is convective)

| MAE (mm/hr) | JJAS | | NDJF | | MAE | JJAS | | NDJF | | MAE | JJAS | | NDJF | |
|-------------|---------|------|------|------|----------|------|---------|------|------|----------|------|------|---------|------|
| | Z-R Eq. | I | II | I | | II | Z-R Eq. | I | II | | I | II | Z-R Eq. | I |
| Seosan | 2.25 | 2.20 | 2.03 | 1.95 | Gochang | 1.90 | 1.94 | 1.27 | 1.21 | Buan | 1.96 | 1.91 | 1.59 | 1.51 |
| Daejeon | 1.97 | 1.91 | 2.06 | 1.97 | Cheonan | 2.29 | 2.19 | 1.79 | 1.71 | Imsil | 1.87 | 1.80 | 1.67 | 1.58 |
| Gunsan | 2.06 | 2.04 | 1.66 | 1.59 | Boryeong | 1.99 | 2.00 | 1.70 | 1.63 | Jeongeup | 2.10 | 2.07 | 1.52 | 1.45 |
| Jeonju | 2.16 | 2.11 | 1.76 | 1.68 | Buyeo | 1.98 | 1.96 | 2.33 | 2.24 | Namwon | 2.06 | 2.00 | 1.75 | 1.65 |
| Gwangju | 2.08 | 2.06 | 1.76 | 1.69 | Geumsan | 1.90 | 1.87 | 1.86 | 1.78 | Jangsu | 2.07 | 2.00 | 2.02 | 1.93 |

Table 6. RMSE of the existing Z-R relationship (I is stratiform and II is convective)

| RMSE (mm/hr) | JJAS | | NDJF | | RMSE | JJAS | | NDJF | | RMSE | JJAS | | NDJF | |
|--------------|---------|------|------|------|----------|------|---------|------|------|----------|------|------|---------|------|
| | Z-R Eq. | I | II | I | | II | Z-R Eq. | I | II | | I | II | Z-R Eq. | I |
| Seosan | 5.18 | 5.13 | 3.51 | 3.42 | Gochang | 4.32 | 4.26 | 2.45 | 2.38 | Buan | 4.17 | 4.16 | 2.68 | 2.58 |
| Daejeon | 4.27 | 4.00 | 3.52 | 3.43 | Cheonan | 4.52 | 4.44 | 2.85 | 2.76 | Imsil | 4.02 | 3.92 | 2.84 | 2.75 |
| Gunsan | 4.92 | 4.90 | 3.05 | 2.97 | Boryeong | 4.27 | 4.37 | 3.23 | 3.15 | Jeongeup | 4.51 | 4.52 | 2.64 | 2.56 |
| Jeonju | 4.45 | 4.34 | 2.91 | 2.82 | Buyeo | 3.87 | 3.88 | 4.08 | 3.98 | Namwon | 4.45 | 4.38 | 2.85 | 2.74 |
| Gwangju | 4.32 | 4.31 | 3.31 | 3.24 | Geumsan | 3.87 | 3.86 | 2.99 | 2.89 | Jangsu | 4.15 | 4.09 | 3.43 | 3.33 |

Table 7. Bias of the existing Z-R relationship (I is stratiform and II is convective)

| Bias (mm/hr) | JJAS | | NDJF | | Bias | JJAS | | NDJF | | Bias | JJAS | | NDJF | |
|--------------|---------|------|------|------|----------|------|---------|------|------|----------|------|------|---------|------|
| | Z-R Eq. | I | II | I | | II | Z-R Eq. | I | II | | I | II | Z-R Eq. | I |
| Seosan | 1.71 | 1.54 | 1.88 | 1.75 | Gochang | 1.00 | 0.87 | 1.21 | 1.09 | Buan | 1.34 | 1.19 | 1.53 | 1.41 |
| Daejeon | 1.29 | 1.13 | 1.96 | 1.84 | Cheonan | 2.08 | 1.89 | 1.75 | 1.63 | Imsil | 1.44 | 1.30 | 1.60 | 1.46 |
| Gunsan | 1.35 | 1.21 | 1.60 | 1.49 | Boryeong | 1.14 | 1.00 | 1.59 | 1.47 | Jeongeup | 1.65 | 1.49 | 1.42 | 1.30 |
| Jeonju | 1.43 | 1.29 | 1.65 | 1.52 | Buyeo | 1.30 | 1.15 | 2.13 | 2.00 | Namwon | 1.51 | 1.35 | 1.67 | 1.54 |
| Gwangju | 1.29 | 1.15 | 1.67 | 1.55 | Geumsan | 1.30 | 1.12 | 1.67 | 1.53 | Jangsu | 1.77 | 1.60 | 1.97 | 1.84 |

함에 있어 가용할 수 있는 레이더 자료는 충분한 것으로 판단하고 강우의 계절성을 고려한 Z-R 관계식의 매개변수를 산정하였다.

논문의 지면관계상 Fig. 3에 군산지점의 우기와 건기의 Bayesian 기반 Z-R 관계식 매개변수의 사후분포를 도시하였

으며 각 지점의 Z-R 관계식 매개변수는 Table 8에 정리하였다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 우기와 건기의 Z-R 관계식 매개변수는 수치적으로 상당한 차이를 보이고 있으므로 강우의 계절성을 고려한 Z-R 관계식 매개변수 산정은 타당한 것으로 사료된다. Bayesian 추론기법을 활용하여 추정된 Z-R 관계식

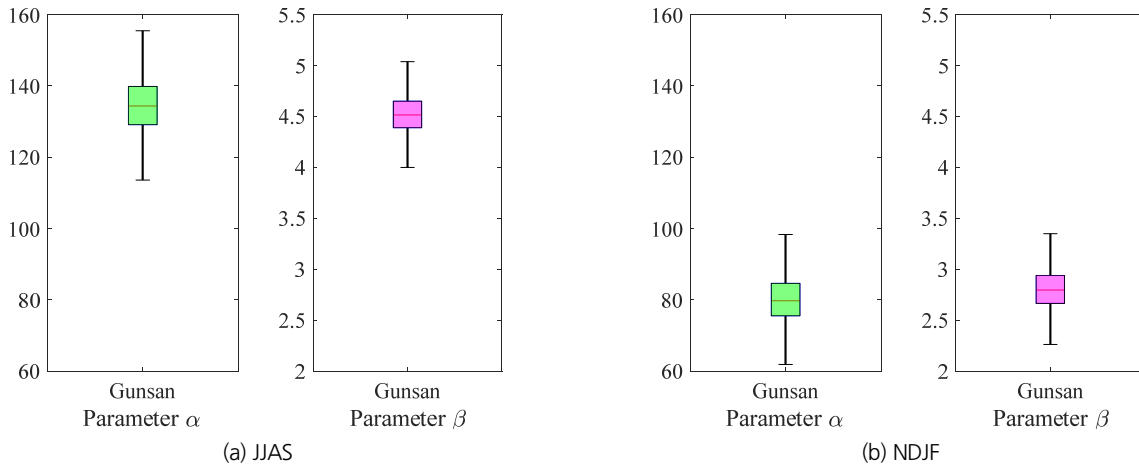


Fig. 3. Boxplots of the posterior distribution of the Bayesian Z-R relationship parameters

Table 8. Parameters of Z-R relationship and their credible intervals for JJAS and NDJF season

| Season | JJAS | | | | | | NDJF | | | | | |
|----------|----------|-------|-------|---------|------|-------|----------|-------|-------|---------|------|-------|
| | α | | | β | | | α | | | β | | |
| | 2.5% | 50% | 97.5% | 2.5% | 50% | 97.5% | 2.5% | 50% | 97.5% | 2.5% | 50% | 97.5% |
| Seosan | 122.3 | 137.7 | 153.7 | 3.95 | 4.26 | 4.65 | 42.82 | 56.94 | 70.95 | 3.79 | 4.62 | 5.93 |
| Daejeon | 130.1 | 144.3 | 159.7 | 4.08 | 4.47 | 4.84 | 48.16 | 61.01 | 75.05 | 3.27 | 3.84 | 4.80 |
| Gunsan | 120.0 | 134.4 | 149.7 | 4.15 | 4.52 | 4.93 | 67.05 | 79.76 | 93.51 | 2.47 | 2.80 | 3.23 |
| Jeonju | 112.9 | 128.4 | 144.2 | 4.57 | 4.99 | 5.54 | 52.17 | 66.95 | 82.03 | 3.40 | 4.10 | 5.27 |
| Gwangju | 123.5 | 139.0 | 153.7 | 4.37 | 4.74 | 5.23 | 64.32 | 79.42 | 93.59 | 3.15 | 3.59 | 4.17 |
| Gochang | 68.3 | 88.2 | 105.8 | 5.66 | 6.89 | 9.26 | 67.91 | 82.92 | 97.90 | 2.52 | 2.89 | 3.42 |
| Cheonan | 143.7 | 157.6 | 173.2 | 3.00 | 3.20 | 3.43 | 47.33 | 61.93 | 75.89 | 2.87 | 3.56 | 4.71 |
| Boryeong | 109.5 | 125.1 | 141.1 | 4.70 | 5.24 | 5.86 | 53.48 | 67.05 | 82.16 | 3.25 | 3.80 | 4.62 |
| Buyeo | 127.0 | 142.7 | 157.3 | 4.26 | 4.63 | 5.12 | 37.67 | 52.41 | 67.46 | 4.10 | 4.99 | 6.84 |
| Geumsan | 127.6 | 144.4 | 160.2 | 4.26 | 4.65 | 5.23 | 45.65 | 61.17 | 77.79 | 3.88 | 4.70 | 6.49 |
| Buan | 117.7 | 133.7 | 149.7 | 4.22 | 4.63 | 5.07 | 69.79 | 83.31 | 97.94 | 2.79 | 3.20 | 3.74 |
| Imsil | 149.5 | 163.6 | 178.8 | 3.64 | 3.89 | 4.16 | 64.02 | 78.85 | 93.83 | 3.07 | 3.54 | 4.21 |
| Jeongeup | 131.2 | 146.3 | 162.1 | 3.81 | 4.12 | 4.43 | 70.22 | 83.68 | 97.59 | 2.95 | 3.37 | 3.97 |
| Namwon | 132.1 | 146.8 | 162.3 | 3.84 | 4.14 | 4.52 | 56.82 | 70.08 | 84.37 | 3.21 | 3.74 | 4.46 |
| Jangsu | 153.5 | 168.9 | 183.7 | 3.35 | 3.56 | 3.80 | 61.19 | 73.46 | 86.43 | 2.86 | 3.27 | 3.90 |

매개변수는 우리나라 레이더 반사도 자료에 일반적으로 사용되고 있는 기존의 층상형 및 적운형 강우유형의 매개변수와 수치적으로 차이가 나타나고 있으며 매개변수 α 의 경우 차이의 정도가 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 기존의 Z-R 관계식의 경우 특정 강우유형 및 강우사상을 선별하여 Z-R 관계식 매개변수를 산정하였기 때문으로 우리나라의 강우특성이 외국과는 확연히 다름을 의미하며 고려할 수 있는 레이더 반사도 자료 스펙트럼이 제한적이기 때문으로 사료된다.

Fig. 4 and Table 9는 본 연구에서 제안하는 Bayesian 방법

을 통하여 산정된 Z-R 관계식 매개변수의 사후분포를 이용하여 산정된 레이더 강우량과 지상 강우량의 통계분석 결과를 도시한 결과이다. Bayesian 방법을 통하여 산정된 매개변수의 사후분포는 확률분포로 정의되기 때문에 해당 범위의 매개변수를 이용하여 시나리오 형태의 레이더 강우량을 생산할 수 있는 장점이 있으며 대부분의 통계적 효율기준은 Tables 4-7에 제시된 기존의 Z-R 관계식에 비하여 개선되는 것을 확인할 수 있다. 세부적으로는 RMSE 및 Bias의 개선정도가 가장 우수하고 IoA 및 MAE의 개선효과도 확인하였다.

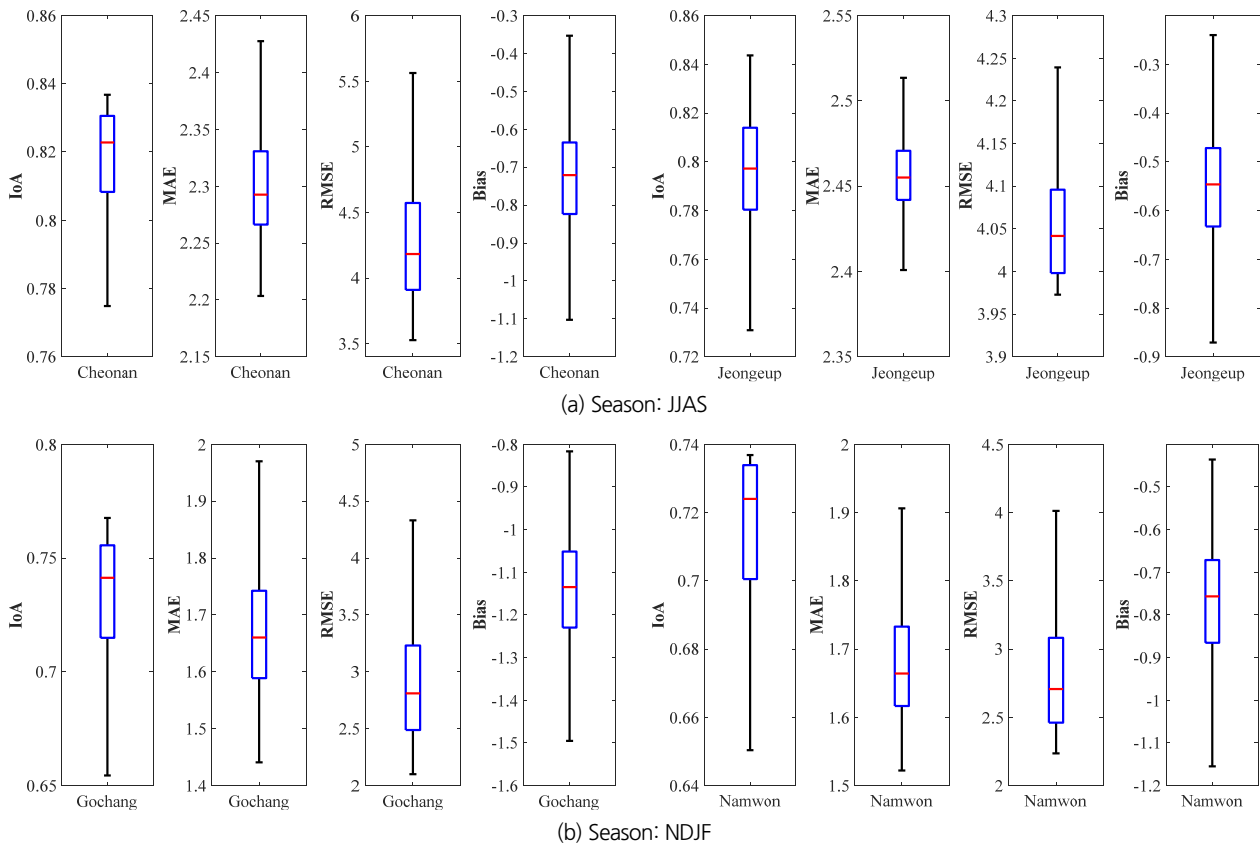


Fig. 4. Boxplots of basic statistics for Bayesian model based Z-R relationship

Table 9. A comparison of basic statistics for Bayesian model based Z-R relationship

| Season | JJAS | | | | NDJF | | | |
|----------|------|-------------|--------------|--------------|------|-------------|--------------|--------------|
| | IoA | MAE (mm/hr) | RMSE (mm/hr) | Bias (mm/hr) | IoA | MAE (mm/hr) | RMSE (mm/hr) | Bias (mm/hr) |
| Seosan | 0.70 | 2.63 | 5.36 | -0.52 | 0.59 | 2.06 | 3.05 | -0.45 |
| Daejeon | 0.64 | 2.46 | 4.93 | -0.71 | 0.66 | 2.04 | 3.74 | -0.61 |
| Gunsan | 0.69 | 2.64 | 4.82 | -0.63 | 0.49 | 1.92 | 4.33 | -0.76 |
| Jeonju | 0.68 | 2.60 | 4.29 | -0.33 | 0.70 | 1.75 | 2.53 | -0.69 |
| Gwangju | 0.75 | 2.65 | 4.32 | -0.51 | 0.73 | 1.80 | 3.09 | -0.71 |
| Gochang | 0.51 | 3.01 | 5.18 | -0.31 | 0.73 | 1.68 | 2.94 | -1.15 |
| Cheonan | 0.82 | 2.30 | 4.31 | -0.73 | 0.68 | 1.74 | 2.40 | -0.59 |
| Boryeong | 0.67 | 2.67 | 4.75 | -0.46 | 0.54 | 2.03 | 3.74 | -0.80 |
| Buyeo | 0.76 | 2.43 | 3.83 | -0.55 | 0.50 | 2.15 | 3.43 | -0.22 |
| Geumsan | 0.70 | 2.39 | 3.83 | -0.57 | 0.64 | 1.87 | 2.60 | -0.67 |
| Buan | 0.74 | 2.46 | 4.08 | -0.61 | 0.71 | 1.75 | 2.65 | -0.78 |
| Imsil | 0.60 | 2.39 | 9.29 | -1.00 | 0.76 | 1.72 | 2.71 | -0.80 |
| Jeongeup | 0.80 | 2.46 | 4.06 | -0.56 | 0.61 | 1.70 | 2.98 | -0.83 |
| Namwon | 0.73 | 2.49 | 4.35 | -0.66 | 0.71 | 1.69 | 2.85 | -0.77 |
| Jangsu | 0.73 | 2.32 | 5.50 | -0.73 | 0.68 | 1.81 | 3.19 | -0.49 |

최종적으로 Bayesian 기법을 활용하여 산정된 Z-R 관계식의 불확실성을 정량적으로 Fig. 5에 표현하였다. 레이더 반사도가 증가할수록 불확실성 범위가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 건기가 우기에 비하여 불확실성 증가의 정도가 명확한 것을 확인하였다. 이러한 원인은 높은 강도의 레이더 반사도 자료가 상대적으로 부족한 원인으로 사료된다. 2018년 3월 27일부터 기상청은 레이더 관측주기를 기존 10분에서 5분으로 단축하여 레이더를 운영하여 자료를 확충하고 있다. 따라서 이러한 관측운영 정책과 맞물려 Bayesian 추론기법을 활용한 Z-R 관계식 산정은 분석자료 양이 증가할수록 수문기상학적 해석을 수행하는 과정에서 불확실성을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

기존의 층상형 및 대류성 Z-R 관계식은 Bayesian 추론기법을 활용하여 정량적으로 제시된 Z-R 관계식의 불확실성 구간에 대부분 위치하고 있는 것을 확인하였으며 0~20 mm의 강우구간에서는 기존의 층상형 및 대류성 Z-R 관계식으로 산정된 레이더 강우량의 과소추정 문제점에 대한 개선을 확인하

였다. 그러나 우기기간의 반사도가 10^4 (mm^6/m^3)를 초과하는 경우와 건기기간의 반사도가 10^3 (mm^6/m^3)를 초과하는 경우에는 기존의 Z-R 관계식과 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 근거로 본 연구에서 제안하는 방법론은 기존의 Z-R 관계식에서 제시하는 레이더 강우량의 과소추정 문제를 개선함에 있어 불확실성을 정량적으로 고려한 레이더 강우량을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

Bayesian 추론기법을 통하여 산정된 Z-R 관계식의 정량적 강우량 검증(Quantitative Precipitation Verification, QPV)을 추가적으로 수행하였다. Fig. 6은 대전 및 보령지점의 우기와 건기의 강우사상을 대상으로 Z-R 관계식으로 산정된 레이더 강우량 및 잔차의 표본분포(sampling distribution)를 Boxplot으로 도시한 결과이다. 앞서 서술한 내용과 일맥상통하게 기존의 Z-R 관계식으로 산정된 레이더 강우량은 과소추정의 문제가 발생하고 있으며 지상강우량의 양적범위를 재현하는데 있어 한계가 있는 것으로 사료된다.

Bayesian 추론기법을 이용하여 산정된 레이더 강우량은

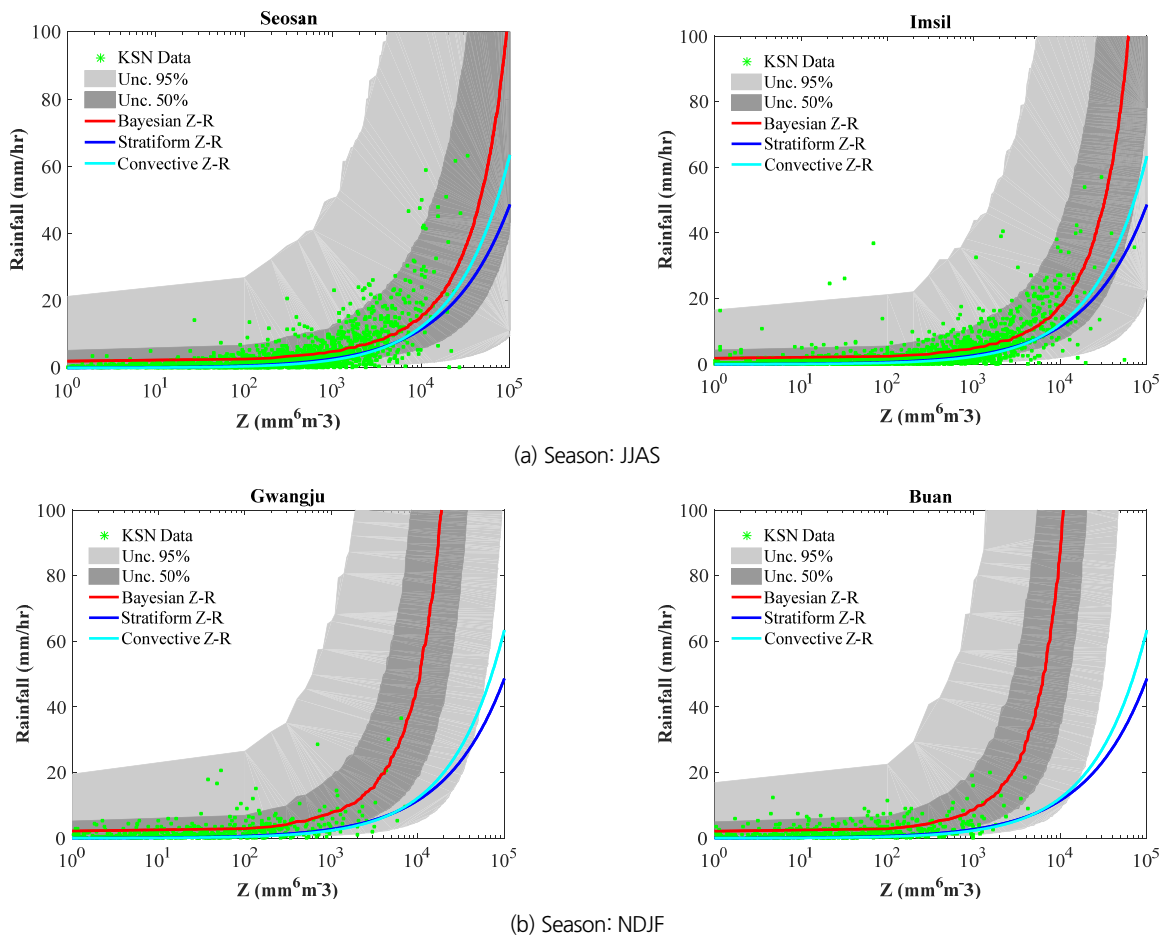


Fig. 5. Bayesian inference-based seasonal posterior prediction uncertainty of Z-R relationship

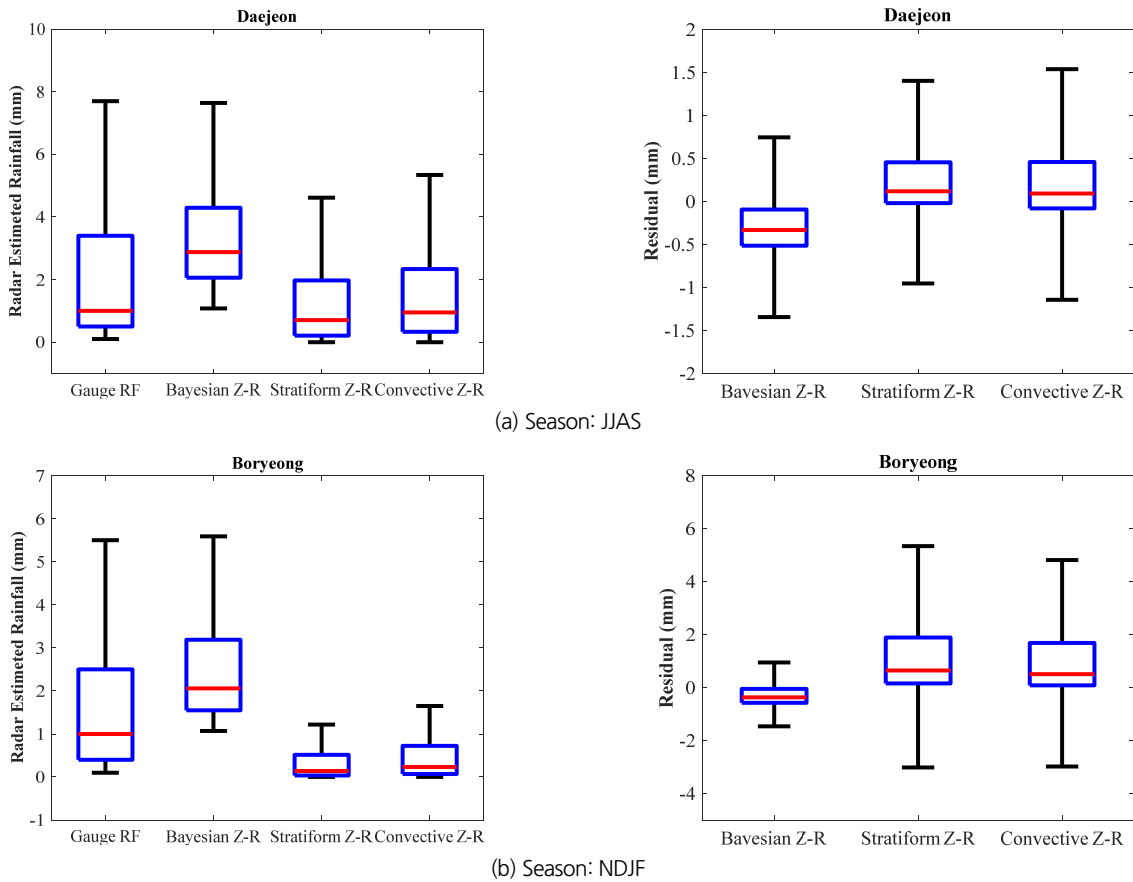


Fig. 6. Quantitative precipitation verification of Bayesian model based Z-R relationship

극치특성을 나타내는 지상 강우량의 정량적 범위를 유사하게 재현하고 있으며 기존의 Z-R 관계식으로 산정된 레이더 강우량 및 지상 강우량의 양적범위를 전반적으로 포괄하는 레이더 강우량을 제시하는 것을 확인할 수 있다. 잔차의 표본분포의 경우 Bayesian 추론기법을 통하여 산정된 Z-R 관계식의 경우 기존의 Z-R 관계식으로 산정된 레이더 강우량의 잔차의 표본분포에 비하여 작은 것을 확인하였다. 이러한 연구결과를 기반으로 본 연구에서 제시하는 Z-R 관계식 산정기법은 기존의 Z-R 관계식에 비하여 정확성 및 신뢰성을 확보한 레이더 강우량을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

기후변동성으로 돌발적이고 국지적인 강우현상의 발생빈도가 증가하는 상황에서 정확한 강우정보는 풍수해 대응 및 수자원의 효율적인 활용을 위하여 필수적으로 확보되어야 하는 요소이다. 기계 및 전산장비의 발달로 레이더는 신속한 관

측능력과 우수한 시공간적 해상도의 장점을 가지고 있어 국내 외적으로 레이더 반사도 자료를 이용하여 레이더 강우량을 산정하기 위한 다양한 연구를 수행하고 있으나 그 성과는 만족스러운 수준에 도달하지 못하고 있다.

기존의 레이더 강우량 산정은 자료기간 및 강우사상 확보 여부 등의 문제로 인하여 해외에서 개발한 Z-R 관계식을 특정 강우조건에 적용하여 레이더 강우량을 산정한 후 레이더 강우량에 포함되어 있는 편의를 추가적인 보정기법을 통하여 보정하여 사용하고 있다. 이러한 과정은 레이더 강우량을 산정하는데 있어서 이중적(doubleness) 불확실성이 포함된 결과를 제시하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하고자 레이더 반사도 자료로부터 직접 레이더 강우량을 산정할 수 있는 Z-R 관계식을 제시하였다. 이를 위하여 Bayesian 추론기법과 MCMC 모의기법을 연계하여 강우의 계절성을 고려한 Z-R 관계식 매개변수의 불확실성을 정량적으로 제시하였으며 확률통계학적으로 검증하였다. Bayesian 추론기법을 이용하여 산정된 Z-R 관계식 매개변수 α 는 우기의 경우 기존의 Z-R 관계식에 비하

여 약 0.5~0.7 감소하였으며 β 의 경우 약 2.8~3.2배 증가였다. 건기의 매개변수 α 는 기존의 Z-R 관계식에 비하여 약 0.2~0.4 감소하였으며 β 의 경우 약 2.3~2.7배 증가였다. 따라서 본 연구를 통하여 산정된 Z-R 관계식은 우리나라 강우특성을 보다 면밀하게 반영한 Z-R 관계식으로 활용될 수 있으며 세부적으로 본 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 본 연구에서는 장기간의 레이더 반사도 자료를 활용하여 확률통계학적 분석의 신뢰도를 확보함과 동시에 강우의 계절성을 고려한 Z-R 관계식 매개변수를 추정하였다. 계절에 따른 강우특성의 변동성이 명확한 경우 일괄된 Z-R 관계식을 적용하는 경우 발생할 수 있는 문제점을 개선할 수 있을 것으로 판단되며, 전반적으로 레이더 강우량을 산정하는 경우 기존의 Z-R 관계식의 편의를 약 40% 이상 개선하여 후속적으로 진행되는 레이더 강우량 편의보정 과정의 정확도를 향상할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 본 연구에서 제안하는 방법론으로 레이더 관측반경에 포함되는 유역의 Z-R 관계식을 결정된 후 국지성 집중호우 및 태풍과 같은 위험기상이 발생하는 경우 레이더 반사도 자료를 입력하여 시공간적으로 고해상도 강우정보를 직접적으로 생산함과 동시에 Z-R 관계식 매개변수의 불확실성을 정량적으로 반영하여 시공간적 강우량 확률예보 관점에서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 레이더 반사도가 증가함에 따라 불확실성 구간이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 레이더 반사도가 크다는 것은 기상현상의 엔트로피가 높다는 것으로 사료할 수 있다. 즉, 일반적인 반사도를 초과하는 극치강우 및 우박 등과 같은 위험기상 현상의 발생 가능성을 내포하는 경우로 고려될 수 있다. 이러한 관점에서 보다 정확도 높은 레이더 강우량을 산정하기 위해서는 레이더 반사도 종류(PPI, C-Max 및 Base Section) 및 레이더 관측반경에 따른 바람특성 및 강우입자 크기분포를 고려할 수 있는 추가적인 보정기법의 적용의 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 본 연구를 통하여 개발된 Z-R 관계식 매개변수 산정기법은 현재 운영되고 있는 레이더뿐만 아니라 신설되는 레이더 적용하는 경우 레이더 관측전략 및 운영전략 수립에 반영되어 보다 정확한 레이더 강우량 산정을 가능케 할 것으로 판단된다. 추가적으로 지구통계학적 특성을 고려하여 Z-R 관계식 매개변수를 공간적으로 분포한다면 미세측 유역의 강우정보를 정량적으로 생산하여 레이더 분야에서 적용성이 미비한 가뭄해석에 적용하는 경우 고해상도의 가뭄해석 결과를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(18AWMP-B127555-02)에 의해 수행되었습니다. 저자들은 전북대학교 방재연구센터에 소속되어 연구를 수행하였습니다.

References

- Ahn, S. J., and Kim, J. G. (2003). "Estimation of Z-R relationships between radar reflectivity and rainfall rate." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 1, pp. 13-21 (in Korean).
- Alfieri, L., Claps, P., and Laio, F. (2010). "Time-dependent ZR relationships for estimating rainfall fields from radar measurements." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, No. 1, pp. 149-158.
- Allen, R. J., and DeGaetano, A. T. (2005). "Considerations for the use of radar-derived precipitation estimates in determining return intervals for extreme areal precipitation amounts." *Journal of Hydrology*, Vol. 315, No. 1-4, pp. 203-219.
- Bae, D. H., Jeong, D. M., and Kim, G. S. (2007). "Monthly dam inflow forecasts using weather forecasting information and neuro-fuzzy technique." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 52, No. 1, pp. 99-113.
- Bae, D. H., Tran, A. P., and Yoon, S. S. (2009). "A method to evaluate the radar rainfall accuracy for hydrological application." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 12, pp. 1039-1052 (in Korean).
- Bellon, A., Lee, G. W., and Zawadzki, I. (2005). "Error statistics of VPR corrections in stratiform precipitation." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, No. 7, pp. 998-1015.
- Berenguer, M., and Zawadzki, I. (2008). "A study of the error covariance matrix of radar rainfall estimates in stratiform rain." *Weather and Forecasting*, Vol. 23, No. 6, pp. 1085-1101.
- Blanchard, D. C. (1953). "Raindrop size-distribution in Hawaiian rains." *Journal of Meteorology*, Vol. 10, No. 6, pp. 457-473.
- Bringi, V. N., and Chandrasekar, V. (2001). *Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications*. Cambridge University Press.
- Carlson, P. E., and Marshall, J. S. (1972). "Measurement of snowfall by radar." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 11, No. 3, pp. 494-500.
- Chen, Y., and Han, D. (2016). "Big data and hydroinformatics." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 18, No. 4, pp. 599-614.
- European Union (2011). *Work package WP 4.1 -short-term weather forecasting for shallow landslide prediction, safe land project*.
- Fields, G., Seed, A., Yu, B., and Malone, T. (2004). "Calibration of weather radar in South East Queensland." *Proceedings 6th International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*, Melbourne, Australia.

- Fox, N. I., and Wikle, C. K. (2005). "A Bayesian quantitative precipitation nowcast scheme." *Weather and Forecasting*, Vol. 20, No. 3, pp. 264-275.
- 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, No. 2, pp. 377-395.
- Gelman, A. (2006). "Prior distributions for variance parameters in hierarchical models (comment on article by Browne and Draper)." *Bayesian Analysis*, Vol. 1, No. 3, pp. 515-534.
- Gochis, D., Schumacher, R., Friedrich, K., Doesken, N., Kelsch, M., Sun, J., Ikeda, K., Lindsey, D., Wood, A., Dolan, B., Matrosov, S., Newman, A., Mahoney, K., Rutledge, S., Johnson, R., Kucera, P., Kennedy, P., Sempere-Torres, D., Steiner, M., Roberts, R., Wilson, J., Yu, W., Chandrasekar, V., Rasmussen, R., Anderson, A., and Brown, B. (2015). "The great Colorado flood of September 2013." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 96, No. 9, pp. 1461-1487.
- Horritt, M. S., Mason, D. C., and Luckman, A. J. (2001). "Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, No. 13, pp. 2489-2507.
- Jones, D. M. A. (1956). *Rainfall drop-size distribution and radar reflectivity*. Illinois State Water Survey.
- Jorgensen, D. P., and Willis, P. T. (1982). "A ZR relationship for hurricanes." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 21, No. 3, pp. 356-366.
- Kelly, J. F., Shipley, J. R., Chilson, P. B., Howard, K. W., Frick, W. F., and Kunz, T. H. (2012). "Quantifying animal phenology in the aerosphere at a continental scale using NEXRAD weather radars." *Ecosphere*, Vol. 3, No. 2, pp. 1-9.
- Kim, J. H., and Yoo, C. S. (2014). "Using extended Kalman filter for real-time decision of parameters of Z-R relationship." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 119-133 (in Korean).
- Kim, T. J., and Kwon, H. H. (2016). "Development of tracking technique for short term rainfall field forecasting." *Procedia Engineering*, Vol. 154, pp. 1058-1063.
- Kim, T. J., Kwon, H. H., Lee, D. R., and Yoon, S. K. (2014). "Development of stochastic downscaling method for rainfall data using GCM." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 9, pp. 825-838 (in Korean).
- Krajewski, W. F., and Smith, J. A. (2002). "Radar hydrology: rainfall estimation." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 8-12, pp. 1387-1394.
- Kwon, H. H., Lall, U., and Engel, V. (2011). "Predicting foraging wading bird populations in Everglades National Park from seasonal hydrologic statistics under different management scenarios." *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 9.
- Marshall, J. S., and Palmer, W. Mc K. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Meteorology*, Vol. 5, pp. 165-166.
- National Oceanic and Atmospheric Administration and United States Geological Survey (2005). *NOAA-USGS debris-flow warning system-final report*. National Oceanic and Atmospheric Administration and United States Geological Survey.
- Rico-Ramirez, M. A., Liguori, S., and Schellart, A. N. A. (2015). "Quantifying radar-rainfall uncertainties in urban drainage flow modelling." *Journal of hydrology*, Vol. 528, pp. 17-28.
- 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, No. 1, pp. 50-72.
- Seed, A., Siriwardena, L., Sun, X., Jordan, P., and Elliott, J. (2002). *On the calibration of Australian weather radars*. CRC for Catchment Hydrology.
- Villarini, G., and Krajewski, W. F. (2010). "Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall." *Surveys in Geophysics*, Vol. 31, No. 1, pp. 107-129.
- Willems, P. (2001). "Stochastic description of the rainfall input errors in lumped hydrological models." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 15, No. 2, pp. 132-152.
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'Donnell, J., and Rowe, C. M. (1985). "Statistics for the evaluation and comparison of models." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 90, No. C5, pp. 8995-9005.
- Yates, E., Anquetin, S., Ducrocq, V., Creutin, J. D., Ricard, D., and Chancibault, K. (2006). "Point and areal validation of forecast precipitation fields." *Meteorological Applications*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-20.
- Yoo, C. S., and Ku, J. M. (2017). "Vertical variation of Z-R relationship at Hallasan mountain during typhoon Nakri in 2014." *Advances in Meteorology*, Vol. 2017.
- Yoo, C. S., Kim, J. H., Chung, J. H., and Yang, D. M. (2011). "Mean field bias correction of the very-short-range-forecast rainfall using the kalman filter." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 3, pp. 17-28 (in Korean).
- Zhang, F., and Weng, Y. (2015). "Predicting hurricane intensity and associated hazards: A five-year real-time forecast experiment with assimilation of airborne Doppler radar observations." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 96, No. 1, pp. 25-33.