



Uncertainty analysis of quantitative rainfall estimation process based on hydrological and meteorological radars

Lee, Jae-Kyoung^{a*}

^aInnovation Center of Engineering Education, Daejin University

Paper number: 18-009

Received: 29 January 2018; Revised: 14 February 2018; Accepted: 14 February 2018

Abstract

Many potential sources of bias are used in several steps of the radar-rainfall estimation process because the hydrological and meteorological radars measure the rainfall amount indirectly. Previous studies on radar-rainfall uncertainties were performed to reduce the uncertainty of each step by using bias correction methods in the quantitative radar-rainfall estimation process. However, these studies do not provide comprehensive uncertainty for the entire process and the relative ratios of uncertainty between each step. Consequently, in this study, a suitable approach is proposed that can quantify the uncertainties at each step of the quantitative radar-rainfall estimation process and show the uncertainty propagation through the entire process. First, it is proposed that, in the suitable approach, the new concept can present the initial and final uncertainties, variation of the uncertainty as well as the relative ratio of uncertainty at each step. Second, the Maximum Entropy Method (MEM) and Uncertainty Delta Method (UDM) were applied to quantify the uncertainty and analyze the uncertainty propagation for the entire process. Third, for the uncertainty quantification of radar-rainfall estimation at each step, two quality control algorithms, two radar-rainfall estimation relations, and two bias correction methods as post-processing through the radar-rainfall estimation process in 18 rainfall cases in 2012. For the proposed approach, in the MEM results, the final uncertainty (from post-processing bias correction method step: ME = 3.81) was smaller than the initial uncertainty (from quality control step: ME = 4.28) and, in the UDM results, the initial uncertainty (UDM = 5.33) was greater than the final uncertainty (UDM = 4.75). However uncertainty of the radar-rainfall estimation step was greater because of the use of an unsuitable relation. Furthermore, it was also determined in this study that selecting the appropriate method for each stage would gradually reduce the uncertainty at each step. Therefore, the results indicate that this new approach can significantly quantify uncertainty in the radar-rainfall estimation process and contribute to more accurate estimates of radar rainfall.

Keywords: Radar-rainfall estimation, Uncertainty quantification, Uncertainty propagation, Maximum entropy, Delta method

수문·기상레이더기반 정량적 강우량 추정과정에서의 불확실성 분석

이재경^{a*}

^a대진대학교 공학교육혁신센터

요 지

수문·기상레이더는 강우량을 바로 추정하지 못하고 여러 단계의 정량적 강우량 추정과정을 거치게 되므로 많은 불확실성 발생요소가 존재한다. 불확실성 관련한 기존 연구들은 정량적 레이더기반 강우량 추정과정에서 보정방법을 이용하여 각 단계별 불확실성을 줄이는 연구들을 수행하였다. 하지만 기존 연구들은 전체 과정에 대한 포괄적인 불확실성을 나타내지 못하고 각 단계별 불확실성의 상대적인 비율도 제시하지 못하는 단점이 있다. 본 연구에서는 정량적 레이더강우량 추정과정의 각 단계별 불확실성을 정량화하고 불확실성 전파를 나타낼 수 있는 적합한 방법을 제시하였다. 첫 번째로 초기와 최종 불확실성, 각 단계별 불확실성의 변동과 상대적인 비율을 나타낼 수 있는 새로운 개념을 제안하였다. 두 번째로 레이더기반 추정과정의 불확실성 정량화와 전파과정을 분석하기 위해 Maximum Entropy Method (MEM)와 Uncertainty Delta Method (UDM)를 적용하였다. 세 번째로 레이더기반 강우량 추정과정의 불확실성 정량화를 위해 2개 품질관리 알고리즘, 2개 강우량 추정방법, 2개 후처리 강우량 보정방법을 2012년 여름철 18개 사례에 대하여 사용하였다. 적용결과, MEM에서 최종 불확실성(후처리 강우량 보정 불확실성: ME = 3.81)이 초기 불확실성(품질관리 불확실성: ME = 4.28)보다 작게 나타났으며, UDM에서도 최종 불확실성(UDM = 4.75)이 초기 불확실성(UDM = 5.33)보다 작게 나타나 불확실성이 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 레이더강우량 추정단계의 불확실성은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 레이더강우량 추정과정에서 각 단계별로 적합한 방법을 선정하는 것이 각 단계별로 불확실성이 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구는 새로운 방법이 명확히 불확실성을 정량화할 수 있으며 정확한 정량적 레이더 강우추정에 기여할 것으로 판단한다.

핵심용어: 레이더강우량추정, 불확실성 정량화, 불확실성 전파, Maximum entropy, Delta method

*Corresponding Author. Tel: +82-31-539-2357
E-mail: myroom1@daejin.ac.kr (J.-K. Lee)

1. 서론

수문·기상레이더는 우리나라 내륙과 해상에 대하여 시공간적으로 고분해능(high resolution) 기상자료의 생산이 가능하므로 돌발홍수, 태풍, 강설구분 등에서 그 역할과 중요성이 점차 증대되고 있으나, 여러 단계의 정량적 강우량 추정과정을 거치게 되므로 많은 불확실성 발생 요소가 존재한다. 이러한 불확실성이 존재하는 근본적인 원인은 수문·기상레이더 특성상 강우량을 바로 추정하지 못하기 때문이다. 강우추정과정에서 발생하는 불확실성 원인들을 살펴보면, 높은 고도에서 발생하는 레이더의 강우관측에서 일어나는 시공간적 관측오차 (spatio-temporal sampling error), 레이더 자체의 기계적 오차 (hardware error), 신호처리 오차(signal process error), 레이더 품질관리에서의 오차(error of quality control), 정량적 강우량 추정(quantitative precipitation estimation, QPE) (레이더-강우량 관계식 매개변수, QPE 모형 매개변수 및 구조 등)에서의 오차 등의 계통오차(systematic error)나 자연발생적 오차에 의한 편차(bias due to random error)에 기인한다(Huff, 1970; Woodely *et al.*, 1975; Wilson and Brandes, 1979; Austin, 1987; Ciach and Krajewski, 1999; Campos and Zawadzki, 2000; Krajewski and Smith, 2002). 이러한 오차를 해결하기 위해 국내외 연구들을 살펴보면, 기상레이더 관측에 있어서 시공간적으로 발생하는 관측오차 보정에 대한 연구(Villarini and Krajewski, 2008; Moulin *et al.*, 2009), 레이더 관측변수 품질관리에 의해 발생하는 오차보정에 대한 연구(Germann *et al.*, 2006), 레이더 관측변수를 이용하여 강우량을 추정하는 방법 혹은 모형에 의해 발생하는 오차보정에 대한 연구(Ciach and Krajewski, 1999; Ciach *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2007; Villarini and Krajewski, 2010) 등이 활발하게 수행되었다. 국내 관련 연구는 대부분 강우량 추정에서 발생하는 오차를 보정하는 연구(Oh *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006; Yoo *et al.*, 2011)에 집중되어 있으며, 다른 과정에서 발생하는 오차보정을 위한 연구는 미비하다.

하지만 기존 수문·기상레이더의 불확실성에 대한 연구들은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 첫째, 수문·기상레이더의 관측에서부터 정량적 강우량 추정까지 연속적으로 수행되는 과정에 대해 포괄적으로 불확실성 정량화와 분석이 이루어지지 못하고 있다. 둘째, 전체 불확실성(total uncertainty)이 정량화되지 못하므로 각 단계별 불확실성의 상대적인 비율도 제시하는데 한계가 있다. 마지막으로 기존 연구들은 중요 단계에 대한 불확실성을 줄이고자 여러 방법을 사용하고 있으나 어느 정도 불확실성을 저감하는지에 대한 효율성을 불확실성

측면에서 제시하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구의 문제점을 개선할 수 있는 Maximum Entropy Method (MEM)와 Uncertainty Delta Method (UMD)를 이용한 새로운 접근방법들을 제안하여 수문·기상레이더 기반의 정량적 강우량을 추정하는 전체적인 과정에서 단계별로 불확실성을 어떻게 정량화하고 전파되는지 추정하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 품질관리, 레이더 강우추정, 후처리과정으로 강우량보정기법에 초점을 맞추어 수행하였다.

2. 수문·기상레이더강우량 추정과정에서의 불확실성 정량화 방법

2.1 불확실성 전파 개념

수문·기상레이더강우량 추정과정에 관한 불확실성 연구는 정량적 강우추정 분야에서 1970년대부터 시작되었다(Huff, 1970; Woodely *et al.*, 1975; Ciach *et al.*, 2007). 최근까지 레이더강우량 추정과정에서의 불확실성 연구들의 주요 초점은 Z-R 관계식이나 강우량 추정모형의 매개변수 선정이나 강우량 추정모형의 구조에 따른 불확실성, 정량적 레이더강우량 추정의 정확성 향상을 위한 오차보정 등의 사후처리(post-processing) 등이 있으며, 이를 이용하는 수문분야에서는 수문모형의 입력 자료로서 레이더 강우량의 불확실성 분석 등의 연구(Moulin *et al.*, 2009; Villarini and Krajewski, 2010; Krajewski *et al.*, 2010; McMillan *et al.*, 2011)에 집중되어 있다. 전체 과정에서 연속적으로 발생하는 단계별 불확실성 연구는 1980년대부터 기후변화 분야에 많이 연구되었다(Schneider, 1983; Henderson-Sellers, 1993). 대표적으로 Jones (2000)는 기후변화 단계별 불확실성 전파(cascade of uncertainty, uncertainty explosion, uncertainty propagation)가 어떻게 진행되어야 하는지에 대한 기본 개념을 제시하였고, 이 개념은 IPCC (inter-governmental panel on climate change) 3차 보고서(2001)의 불확실성 제시에 대한 기초가 되었다.

불확실성 전파에서 중요한 기본개념은 기후변화 수행단계에 따른 불확실성은 각 단계별로 전 단계가 다음 단계에 영향을 주도록 모든 단계가 연결되어 있기 때문에 각 단계별로 독립적으로 불확실성을 정량화하는 것이 아닌 전체 수행단계를 포괄적으로 평가되어야 한다는 것이다. 따라서 불확실성 정량화 및 평가와 전파는 Fig. 1(a)와 같이 제시되어야 하며, 이렇게 제시된 최종 결과물에서 전체 불확실성의 크기, 각 단계별 불확실성의 비율, 불확실성의 전파과정의 제시가 가능하다.

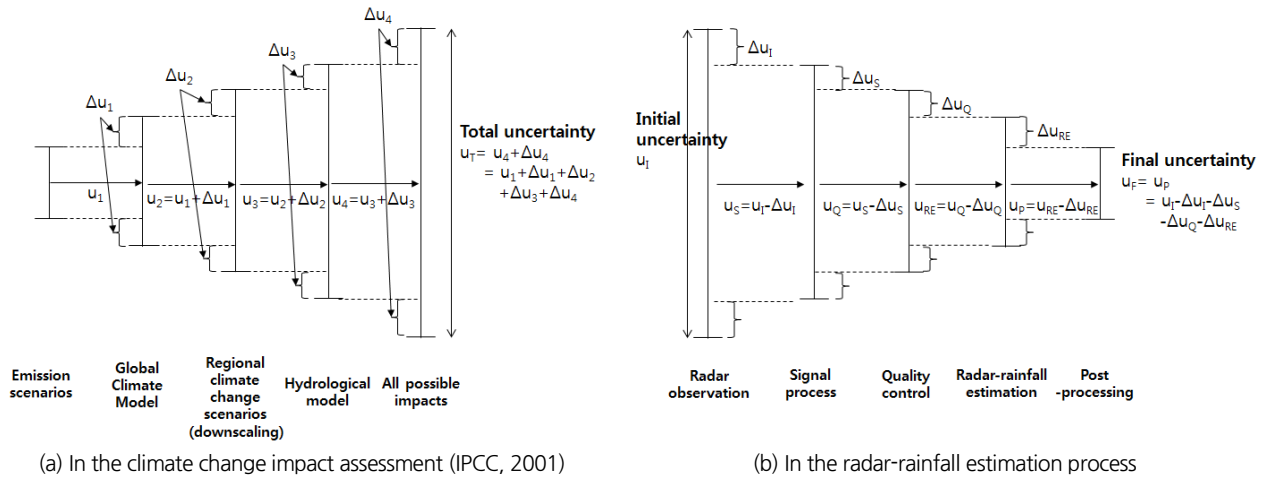


Fig. 1. Basic concept of uncertainty quantification and propagation

하지만 레이더 강우량 추정에서 살펴보면, 앞서 언급한 바와 같이 직접적 강우관측이 아니므로 강우관측에서 매우 큰 불확실성이 발생할 것이며, 이 불확실성은 신호처리, 품질관리, 강우추정, 후처리과정 등을 통하여 감소될 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 레이더 강우량 추정에서의 불확실성 전파단계를 Fig. 1(b)와 같이 제안하고 그에 따른 전체 불확실성과 불확실성 전파과정을 살펴보았다(Lee, 2015).

2.2 불확실성 정량화 방법

본 연구에서는 불확실성을 정량화하는 방법으로 Maximum Entropy Method (MEM)과 Uncertainty Delta Method (UDM)을 이용하였으며, 각 방법의 자세한 내용은 다음과 같다.

2.2.1 Maximum Entropy Method (MEM)를 이용한 불확실성 정량화

Shannon (1948)은 주어진 정보에 의해 발생하는 정보량 (information context)에 대한 불확실성(uncertainty)을 정량적으로 추정할 수 있는 방법으로 entropy를 제안하였다. 주어진 정보의 발생확률이 크다면 정보량은 작으며 불확실성 또한 작게 된다. 이와 반대로 주어진 정보의 발생확률이 작다면 정보량은 크게 되며 이에 따라 불확실성도 크게 된다.

정보 X 는 확률 p 를 가지는 무작위 변수(random variable)라 하고 평균 정보량 $I(X)$ 를 정리하면, entropy의 기본식은 다음과 같다(Shannon, 1948).

$$H(X) = - \sum p_X(x) \ln p_X(x) = \sum p_X(x) I(X) = E[I(X)] \tag{1}$$

여기서, H 는 X 의 entropy, X 는 확률 p 를 가지는 무작위 변수, x 는 변수 X 의 값, $p_X(\cdot)$ 는 X 의 확률질량함수(probability mass function)이다. Jaynes (1957)은 Entropy 이론을 바탕으로 Maximum Entropy (ME)를 제안하였으며, ME는 어떤 정보가 주어졌을 때 이를 바탕으로 불확실성을 최대화 하는 확률 밀도함수를 제공한다. ME의 기본식은 다음과 같으며, 제약 조건으로 모멘트 제약조건($\sum_{i=1}^n p_X(x_i) f_m(x_i) = y_m$)과 정규화 제약조건($\sum_{i=1}^n p_X(x_i) = 1$)이 있다(Gay and Estrada, 2010).

$$\max_p H(X) = - \sum_{i=1}^n p_X(x_i) \ln p_X(x_i) \quad (p_X(x_i) \geq 0) \tag{2}$$

여기서, $f_m(\cdot)$ 은 모멘트 제약조건, n 은 샘플크기이다. 만약 최댓값 a 와 최솟값 b 로 주어진 경우에는 ME 분포는 균등분포(uniform distribution) ($f(x) = 1/(b-a)$)이며, $[a, b]$ 구간 내에서 모든 사건의 발생확률은 동일하다. 이를 entropy $H(X)$ 로 나타내면 아래와 같다(Gay and Estrada, 2010).

$$H(X) = - \int_a^b f_X(x) \ln f_X(x) dx = - \int_a^b \frac{1}{b-a} \ln \frac{1}{b-a} dx = - \ln(b-a) \tag{3}$$

본 연구에서 제안한 불확실성 전파 및 정량화 방법은 ME를 사용할 때 쉽게 수행될 수 있다. 우선 모든 경우의 수에 대한 레이더 강우량을 모두 추정 한 후 살펴보고자 하는 단계 i 의 모형 $j(i)$ 에 해당하는 레이더 강우량 추정결과들 중 최댓값과 최

숫값을 각각 a 와 b 로 설정하여 entropy H_{ij} 를 계산한다. 이 과정을 모든 $j(i)$ 에 되풀이하여 H_{ij} 를 모두 구한 후, 불확실성을 최소화한다는 ME 가정하에 모든 H_{ij} 에 대하여 $\max(H_{ij})$ 하여 최대 H_i 를 구하게 된다. 하지만 이 방법의 가장 기초적인 가정은 모든 모의결과의 발생가능성은 동일하다는 것에 있다.

2.2.2 Uncertainty Delta Method (UDM)를 이용한 불확실성 정량화

Delta method는 Talyor series expansion을 기반으로 2차 모멘트인 분산을 이용하여 단계별 변동성을 분석할 수 있는 방법이다. 무작위변수 X 와 x 의 특정값을 a 라 하면, Talyor series expansion에서 높은 차수의 항을 제외하고 나타내면 다음과 같다.

$$f(x) \approx f(a) + f'(a)(x-a) \tag{4}$$

여기서, 특정값 a 는 x 의 평균 μ_x , y 는 $f(x)$ 라 하고, Eq. (4)의 양변에 분산을 적용하면 다음과 같다.

$$Var(Y) = Var(f(X)) \approx [f'(\mu_x)]^2 Var(X) \tag{5}$$

Eq. (5)를 이용하여 본 연구에서는 불확실성 정량화에 활용 가능하도록 Uncertainty Delta Method (UDM)로 개선하였으며, Fig. 2(a)는 수문-기상레이더기반 정량적 강수추정 과정에 대하여 UDM을 적용하는 기본개념을 나타낸 것이다.

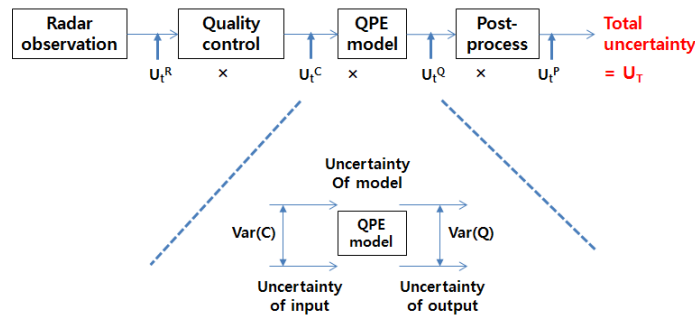
Fig. 2(a)에서 최종불확실성(U_T)은 후처리과정에서 발생한 분산이 될 것이며, 이에 Eq. (5)를 이용하여 역으로 추정하고 수식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U_T &= Var(P) = Var(l(Q)) = (l(Q) - l(\mu_C))^2 \\ &\approx (l'(\mu_Q)(Q - \mu_Q))^2 = l'(\hat{Q})^2 Var(Q) \\ &\approx (l'(\mu_P))^2 (h'(\mu_Q))^2 (g'(\mu_C))^2 Var(R) \end{aligned} \tag{6}$$

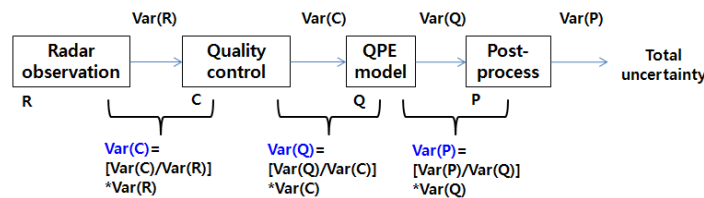
여기서, R, S, Q, P 는 레이더 강수량 추정과정에서는 각 단계를 나타내며, $l(\cdot), h(\cdot), g(\cdot)$ 는 각 단계별 평균값(μ)에 대한 확률 함수이다. 다음으로 각 단계별 불확실성은 Eq. (5)를 이용하면 $(l'(\mu_P))^2 = Var(P)/Var(Q)$ 이므로 이를 다른 단계에 동일하게 적용하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_T = Var(P) \approx \left(\frac{Var(P)}{Var(Q)}\right) \times \left(\frac{Var(Q)}{Var(C)}\right) \times \left(\frac{Var(C)}{Var(R)}\right) \times Var(R) \tag{7}$$

Eq. (7)의 구성은 (전체불확실성) = (후처리불확실성) × (QPE모형불확실성) × (품질관리) × (레이더관측불확실성)으로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하면 전체불확실성을 각 단계별 분산값을 이용하여 정량화할 수 있으며, 각 단계별 불확실성은 Eqs. (6) and (7)을 이용하면 분산값을 이용하여 정량화가 가능하고 Fig. 2(b)와 같이 도식화할 수 있다. UDM를 활용하여 MEM과 마찬가지로 (1) 각 단계별 정량화된 불확실성 제시;



(a) Uncertainty quantification and propagation in the radar-based rainfall estimation process



(b) Quantification quantification in each step

Fig. 2. Basic concept of uncertainty delta method

(2) 전체 불확실성 산정이 가능하다. 이를 위해 최종적으로 Eq. (8)의 양변에 로그를 취하여 불확실성을 산정하게 된다.

MEM에서는 모든 모의결과에 대한 최댓값과 최솟값을 구하고 Eq. (3)을 이용함으로써 불확실성을 산정하며, UDM은 모든 모의결과의 분산을 구하고 Eq. (7)을 이용하여 불확실성을 산정한다는 데 있다. 이 두 방법은 모든 모의결과들이 어느 정도 퍼지는가에 대한 통계특성을 이용한다는 점에서 비슷하다고 할 수 있다.

3. 불확실성 정량화 방법의 적용 및 결과

3.1 적용개요

본 연구에서는 수문·기상레이더강우량 추정과정에서 품질관리, 강우추정, 후처리보정 단계만을 수행하고 해당 단계별 불확실성을 정량화하였다. 적용지역은 한반도 전역을 대상으로 하였으며, 본 연구에서 사용한 레이더 자료 및 강우사례는 Table 1과 같다. Table 1(a)는 기상청에서 운영하는 11개 단일편파레이더(single-polarization radar) (백령도, 관악산, 오성산, 진도, 고산, 성산, 구덕산, 면봉산, 강릉, 광덕산, 인천)를 나타내며, 레이더 관측반경은 레이더별로 조금씩 다르나 최대 280 km이다. 본 연구에서는 자료확보가 가능한 2012년 여름철(6~8월)에 발생한 18개 강우사례(장마, 태풍, 지역적 강우)를 나타낸다(Table 1(b)). Table 2는 본 연구에서 수문·

Table 2. Process of the radar-based rainfall estimation (quality control, rainfall estimation, and bias correction methods) in this study

Step	Description
Quality control	ORPG algorithm, Fuzzy algorithm
Rainfall estimation	WPMM, M-P relation (in the RAR system)
Rainfall bias correction	G/R ratio, LGC method

기상레이더강우량 추정과정에서 각 단계별 적용된 방법을 나타내며, 각 단계별로 품질관리(quality control) 알고리즘, 강우량 추정기법, 후처리 강우량 보정기법이 사용되었다. 품질관리 알고리즘은 fuzzy 알고리즘과 기상청 기상레이더센터에서 단일편파에 기본적으로 적용되는 ORPG (open radar product generator) 품질관리 알고리즘을 적용하였다(Weather Radar Center, 2013). Fuzzy 알고리즘은 지형에코에 대한 필터가 적용되기 전의 반사도를 입력변수로 하여, 통계분석을 통해 비기상에코의 소속함수를 생성하여 품질관리를 수행하는 알고리즘이다(Weather Radar Center, 2013). 이에 반해 ORPG 품질관리 알고리즘은 지형에코필터가 적용되어 보정된 반사도(corrected reflectivity)를 입력변수로 하여, 임계치 이상의 영역에 대한 반사도를 제거하는 품질관리 알고리즘이다. 레이더강우량 추정을 위해서 기상청에서 현업운영 중인 Radar-AWS Rainfall 산출 시스템(이하 RAR 시스템)을 이용하였다. RAR 시스템은 11개 단일편파레이더를 기반으로 운영되며, 최종적으로 범정부적 레이더 합성강우량을 생산한다.

Table 1. Summary of the radars and rainfall cases in this study

(a) Hydrological and meteorological radars

Item	Detail
Radar	11 single-polarization radars operated by the Korea Meteorological Administration: Baegnyeondo (BRI), Kwanaksan (KWK), Oseonsan (KSN), Jindo (JNI), Gosan (GSN), Seongsan (SSP), Gudeoksan (PSN), Myeonbongsan (MYN), Gangneung (GNG), Gwnagdeoksan (GDK), Incheon (IIA)
Calibration data	Rainfall cases from June 1 st to August 31 st in 2012

(b) Rainfall cases

Case	Period (LST)	Source	Case	Period (LST)	Source
Case1	20120608 06:00 - 20120608 19:00	Local convective rainfall	Case10	20120716 23:00 - 20120717 22:00	Changma front
Case2	20120615 05:00 - 20120616 04:00	Changma front	Case11	20120718 14:00 - 20120719 13:00	Typhoon
Case3	20120618 00:00 - 20120619 13:00	Changma front	Case12	20120810 03:00 - 20120810 22:00	Local convective rainfall
Case4	20120623 13:00 - 20120624 19:00	Local convective rainfall	Case13	20120812 05:00 - 20120813 15:00	Local convective rainfall
Case5	20120629 08:00 - 20120701 01:00	Changma front	Case14	20120814 17:00 - 20120816 23:00	Local convective rainfall
Case6	20120705 04:00 - 20120707 02:00	Changma front	Case15	20120819 16:00 - 20120822 21:00	Local convective rainfall
Case7	20120710 10:00 - 20120711 19:00	Changma front	Case16	20120822 22:00 - 20120825 11:00	Local convective rainfall
Case8	20120712 23:30 - 20120713 07:30	Changma front	Case17	20120827 13:00 - 20120828 18:00	Changma front and Typhoon
Case9	20120714 08:00 - 20120715 15:00	Changma front	Case18	20120829 15:00 - 20120830 23:00	Typhoon

정량적 강우량 추정을 위해 강우강도 산출과정을 거치게 되며, 이를 위해 10 단위 레이더 반사도(Z)와 시간당 우량계 강우강도(R)를 WPMM (window probability matching method) (Rosenfeld *et al.*, 1993)에 적용하여 각 레이더사이트별로 강우량을 산정하고 최종적으로 합성하여 한반도 합성강우장을 생산한다. 특히 RAR 시스템에서는 옵션으로 WPMM과 더불어 $Z = 200R^{1.6}$ (이하 M-P 관계식) (Marshall *et al.*, 1947)의 적용이 가능하다. 이에 본 연구에서는 WPMM과 M-P 관계식을 정량적 강우량 추정기법으로 사용하였다. 마지막으로 후처리 강우량 보정방법은 LGC (local gauge correction) 방법 (Zhange *et al.*, 2011)과 G/R (gauge to radar) ratio 방법 (Morin *et al.*, 2005)을 적용하였다. LGC 방법은 레이더 격자별로 관측강우량과 레이더 추정강우량의 오차와 가중치를 산정하고 이를 기반으로 레이더 격자별 강우량을 보정하는 방법으로 지역적으로 발생하는 강우량 보정에 장점이 있다. G/R ratio 방법은 적용지역 전역을 대상으로 레이더 추정강우량과 지상 관측소 관측강우량의 비에 따른 오차를 산정하고 적용지역 전역에 산정된 동일한 오차를 적용하여 레이더 추정강우량을 보정하는 방법이다.

3.2 단계별 적용방법에 따른 레이더 강우량 추정결과 비교

3.1장의 서술과 같이 본 연구에서는 우리나라 전역을 대상으로 2개의 품질관리 알고리즘, 2개의 레이더강우량 추정방법, 2개의 후처리 강우량 보정방법을 사용하여 총 8 종류의 레이더 강우량을 추정하였다. 그 중 품질관리 알고리즘(ORPG와 fuzzy 알고리즘)과 후처리 강우량 보정방법(G/R ratio와 LGC 기법)에 따른 레이더강우량 추정 정확성을 비교하였으며, 관측값으로 AWS 1시간 관측 강우강도를 이용하였다. 이를 위하여 품질관리 알고리즘과 후처리 강우량 보정방법을 제외한 레이더강우량 추정방법과 레이더입력자료(18개 사례)들은 동일한 조건으로 하였다. Table 3은 18개 강우사상에 대하여 품질관리 알고리즘(ORPG와 fuzzy 알고리즘)과 후처리 강우량 보정방법(G/R ratio와 LGC 기법)에 따른 레이더강우량 추정 정확성 평가결과를 평균하여 비교한 결과를 나타내고 있다. Table 3(a)에서 ORPG를 적용한 경우에는 RMSE (root mean square error)와 상관계수(correlation coefficient)가 각각 8.56 mm/hr와 0.79이며, fuzzy 알고리즘의 경우에 RMSE와 상관계수는 각각 8.32 mm/hr와 0.81로서 결과적으로 품질관리단계에서 fuzzy 알고리즘을 적용한 레이더강우량에 더 정확한 것으로 나타났다. 다음으로 Table 3(b)는 G/R ratio와 LGC 방법을 적용한 사례이며, 각 후처리 강우량 보정방법

Table 3. Comparison of the accuracy of radar-based rainfall estimates in each quality control algorithm and bias correction method

(a) Accuracy of the quality control algorithms (ORPG and fuzzy algorithms)

Accuracy	ORPG	Fuzzy
RMSE (mm/hr)	8.56	8.32
Correlation coefficient	0.79	0.81

(b) Accuracy of bias correction methods (G/R ratio and LGC methods)

Accuracy	G/R ratio	LGC
RMSE (mm/hr)	7.29	6.06
Correlation coefficient	0.93	0.94

은 두 품질관리를 적용한 모든 결과(18개 강우사상 × 2개 품질관리)를 적용하였다. 추정결과를 살펴보면, G/R ratio를 적용한 레이더강우량의 RMSE와 상관계수는 각각 7.29 mm/hr와 0.93이며, LGC 방법에서 RMSE와 상관계수는 각각 6.06 mm/hr와 0.94로서 레이더강우량 후처리단계에서는 레이더 격자별로 오차를 보정하는 LGC 방법의 적용이 더 정확한 레이더강우량을 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

다음으로 Fig. 3에서는 fuzzy와 ORPG 품질관리 알고리즘 및 G/R ratio와 LGC 방법을 적용한 결과를 도시하여 비교하였다. 우선 Figs. 3(a)~3(c)는 fuzzy와 ORPG 품질관리 알고리즘을 적용한 레이더강우량 추정결과를 나타내고 있으며, 2012년 8월 20일 1020 LST에 인천지역과 서해상을 중심으로 강우가 집중적으로 발생한 사례이다. Figs. 3(a)~3(c)는 각각 AWS 관측강우, fuzzy 알고리즘, ORPG 알고리즘을 적용한 한반도 레이더강우량 추정결과이다. 분석에 앞서 AWS 이미지와 fuzzy 및 ORPG 알고리즘 결과 강우이미지의 인덱스 차이가 있음을 알린다. Fig. 3(a)에서 지역①과 ②에서 강우가 각각 16~20 mm/hr와 8~12 mm/hr가 발생하였으며, Figs. 3(b) and 3(c)에서도 동일지역을 중심으로 강우가 발생하는 것으로 추정하였다. 지역①에서 Fig. 3(c)가 가장 강하게 나타났으며 (가장 강한 지역은 40 mm/hr 이상), Fig. 3(b)의 강우도 강하나 상대적으로 관측강우에 가깝게 표출되었다. 지역②에서도 Fig. 2(c)가 Fig. 2(b)에 비해 다소 강하게 나타나 상대적으로 Fig. 2(b)의 결과가 AWS 관측강우에 더 가깝게 표출되었다. 하지만 Fig. 3(b)의 지역③을 보면, fuzzy 알고리즘이 적용된 지역③에 파랑에코가 완벽히 제거되지 않고 표출된 것으로 나타나 이에 대한 개선이 필요한 것으로 판단된다. 다음으로 Figs. 3(d)~3(f)는 레이더강우량 후처리 보정기법인 G/R ratio와 LGC 기법을 적용한 결과를 비교한 것으로 2012년 7월 13일 0530 LST 강원도 지역과 경상남도를 중심으로 장마가 발

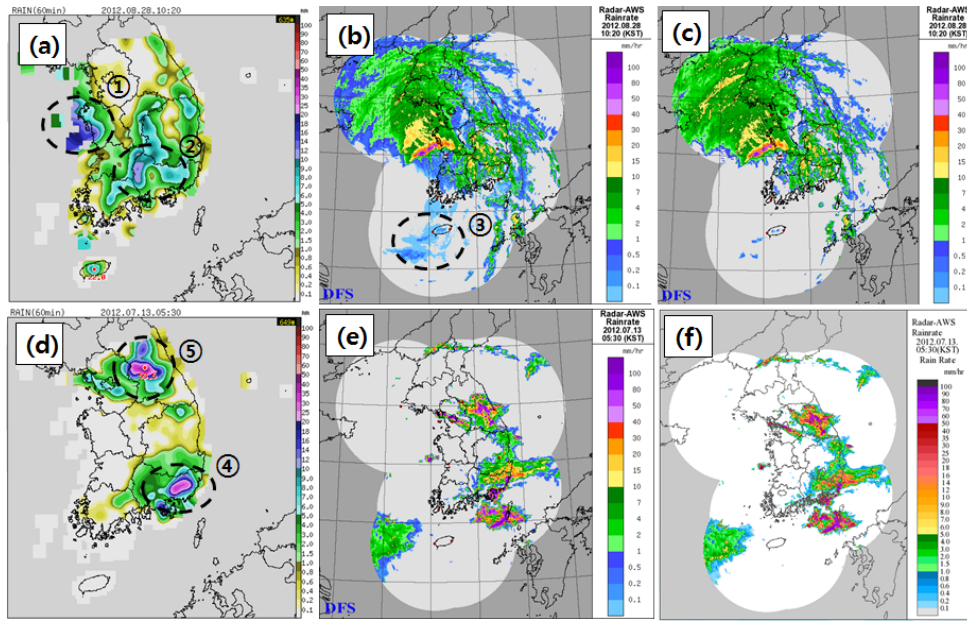


Fig. 3. Comparison of rainfall estimates: between AWS and quality control techniques (a) AWS, (b) fuzzy, (c) ORPG on 1020 LST on 28 August in 2012; between AWS and bias correction techniques (d) AWS, (e) G/R ratio, (f) LGC on 0530 LST on 13 July in 2012

생한 사례이며, 장마대가 동해안을 따라 남해까지 형성되었다. Fig. 3(d)의 AWS 관측강우에서 지역④와 ⑤에서 강한 강우가 발생함을 알 수 있으며, 가장 강한 강우는 지역⑤에서 53.5 mm/hr을 기록하였다. G/R ratio 방법이 적용된 Fig. 3(e)에서는 강우대가 잘 나타나 있으나 전체적으로 관측강우보다 과소 추정된 것으로 나타났다. LGC 방법이 적용된 Fig. 3(f)를 살펴보면, G/R ratio 방법보다 전체적으로 강우가 더욱 강하게 표출되었으며, 특히 지역④와 ⑤의 강한 강우발생을 상대적으로 잘 표출하였다.

이에 따라 Table 2 and Fig. 3의 결과를 종합하면, 품질관리 알고리즘에서는 fuzzy 알고리즘, 레이더강우량 후처리방법에서는 LGC 방법이 더 정확한 레이더강우량을 추정할 수 있는 방법으로 판단된다.

3.3 불확실성 정량화 결과

3.3.1 정량화 방법별 결과 분석

본 연구에서는 앞서 제시된 불확실성 정량화 방법들을 3.2 절의 레이더강우량 추정결과들을 대상으로 적용하였으며, 불확실성 정량화 결과는 Table 4 and Fig. 4와 같다. Fig. 1(b)에서 제시한 레이더강우량 추정과정에서 레이더 관측은 하드웨어적인 과정이 필요하고 신호처리 단계는 자료의 한계로 인하여 수행하지 않았으므로 품질관리를 첫 단계로 하여 초기 불확실성(initial uncertainty)으로 가정하였다. 각 단계별 결과는 18개 강우사례에 대한 평균값을 나타낸다. 우선 MEM을

적용한 불확실성 정량화 결과에서 각 단계별 ME를 살펴보면, Table 4(a)와 같이 품질관리 단계에서 ORPG 알고리즘의 ME는 4.28, fuzzy 알고리즘의 ME는 4.15(최대 ME는 4.28), 레이더강우량 추정단계에서 WPMM의 ME는 3.90, M-P 관계식의 ME는 4.53(최대 ME는 4.53), 후처리 강우량 보정단계에서 LGC 기법의 ME는 3.77, G/R ratio 기법의 ME는 3.81(최대 ME는 3.81)으로 산정되었다. 이를 기반으로 초기 불확실성의 ME는 품질관리 단계와 동일한 4.28이며, 최종 불확실성(final uncertainty)의 ME는 후처리 강우량 보정단계와 같은 3.81로 산정되었다. 최종 불확실성 ME를 100%라고 한다면, 품질관리 단계의 ME는 112.34%, 레이더강우량 추정단계의 ME는 118.90%로 산정되어 초기 불확실성인 품질관리 단계의 불확실성보다 레이더강우량 추정단계에서 불확실성이 증가하였다가 후처리 강우량 보정단계에서 감소되어 최종적으로 초기보다 불확실성이 줄어드는 것으로 나타났다. 이에 대한 원인을 살펴보면, WPMM의 ME는 3.90인 반면, M-P 관계식의 ME는 4.53으로서 M-P 관계식에 의해 불확실성이 증가한 것으로 나타났으며, 이는 어떤 강우량 추정식을 적용하느냐에 따라 레이더강우량 추정결과와 그에 따른 불확실성이 매우 달라질 수 있음을 나타내는 중요한 의미라 할 수 있다. Fig. 4(a)에서도 초기 불확실성의 품질관리 단계에서 다음 단계인 레이더강우량 추정단계에서 불확실성이 증가하다가 다시 후처리 강우량 보정단계에서 불확실성이 감소되는 것을 알 수 있다.

다음으로 UMD를 적용하기 위해 우선 각 단계별 분산을 산

정하였다. 산정결과, 품질관리 단계의 ORPG와 fuzzy 방법의 분산은 각각 206.43와 121.51 mm²/hr², 레이더강우량 추정단계에서 WPMM과 M-P 방법의 분산은 각각 145.47과 254.68 mm²/hr², 후처리 강우량 보정단계의 LGC와 G/R ratio방법의 분산은 각각 82.45와 115.58 mm²/hr²로 산정되었다. 이를 바탕으로 Eq. (7)을 이용한 UMD를 적용하고 앞서 언급한 바와

같이 양변에 로그를 취하게 되면, 각 단계별 UMD값으로 분리가 가능하다. 이를 바탕으로 각 단계별 불확실성을 살펴보면, Table 4(b)에 제시된 바와 같이 품질관리 단계에서 ORPG 알고리즘의 UMD값은 5.33, fuzzy 알고리즘은 4.80(최대 UMD값은 5.33), 레이더강우량 추정단계에서 WPMM의 UMD값은 0.18, M-P 관계식은 0.21(최대 UMD값은 4.53), 후처리 강

Table 4. Comparison of uncertainty quantification results for each step in the radar-based rainfall estimation process using the maximum entropy method and uncertainty delta method

(a) Maximum entropy method

Procedure		ME	Maximum of ME	Incremental	Ratio (%) to the final uncertainty
Initial uncertainty		4.28	4.28	-	112.34
QC	ORPG	4.28	4.28	-	112.34
	Fuzzy	4.15			
RRE	WPMM	3.90	4.53	0.25 (6.07%)	118.90
	M-P	4.53			
RBC	LGC	3.77	3.81	-0.72 (-15.89%)	100.00
	G/R ratio	3.81			
Final uncertainty		3.81	3.81	-	100.00

(b) Uncertainty delta method

Procedure		UMD	Maximum of UMD	Final UMD	Ratio (%) to the final uncertainty
Initial uncertainty		5.33	5.33		112.21
QC	ORPG	5.33	5.33	5.33	112.21
	Fuzzy	4.80			
RRE	WPMM	0.18	0.21	5.54	116.63 (+4.42%)
	M-P	0.21			
RBC	LGC	-0.81	-0.79	4.75	100.00 (-16.63%)
	G/R ratio	-0.79			
Final uncertainty		4.75	4.75	4.75	100.00

QC, RRE, and RBC represent Quality Control, Radar Rainfall Estimation, and Rainfall Bias Correction, respectively

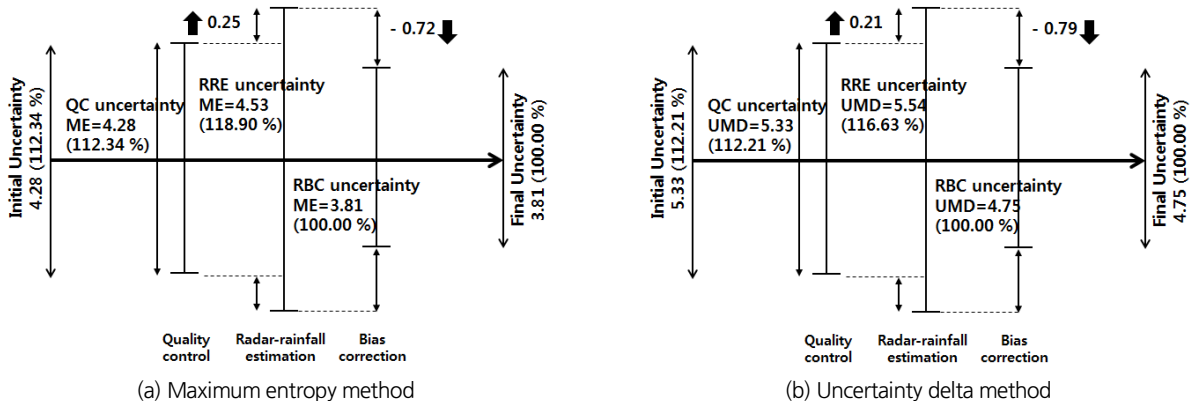


Fig. 4. Uncertainty quantification and propagation in the radar-based rainfall estimation process using (a) the maximum entropy method and (b) the uncertainty delta method

우량 보정단계에서 LGC 기법의 UMD값은 -0.81, G/R ratio 기법은 -0.79(최대 UMD값은 -0.79)로 산정되었다. 이를 기반으로 초기 불확실성의 UMD값은 품질관리 단계와 동일한 5.33이며, 최종 불확실성(final uncertainty)의 UMD값은 후처리 강우량 보정단계와 같은 4.75로 산정되었다. 최종 불확실성 ME를 100%로 하면 품질관리는 112.21%, 레이더 강우 추정 단계는 116.63%로 산정되어 MEM을 적용한 결과와 동일하게 레이더강우량 추정단계에서 불확실성이 증가하였다가 후처리 강우량 보정단계에서 감소되는 것으로 나타나 초기보다 불확실성이 줄어들었다. 이에 대한 원인도 M-P 관계식의 UMD값이 0.21로서 품질관리 단계의 불확실성에서 조금 더 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 WPMM식도 전단계보다 불확실성을 증가시키기는 하나 M-P 관계식보다는 상대적으로 불확실성을 작게 증가시키는 것으로 나타났다. Fig. 4(b)에서 레이더강우량 추정과정의 불확실성이 전파되는 과정을 살펴보면, 초기 불확실성의 품질관리 단계에서 다음 단계인 레이더강우량 추정단계에서 불확실성이 증가하다가 다시 후처리 강우량 보정단계에서 불확실성이 감소되는 것으로 나타났다. 이와 같이 본 연구에서 제시한 불확실성 정량화 방법에서는 각 단계별로 어떤 기법(또는 알고리즘, 관계식 등)의 불확실성이 가장 큰지 판단할 수 있는 중요한 결과라 할 수 있다.

3.3.2 불확실성 정량화 결과에 따른 고찰

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 레이더강우량 추정과정의 각 단계별로 어떤 방법을 적용하느냐에 따라 레이더강우량의 정확성과 불확실성이 달라질 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 3.2절의 MEM와 UDM을 적용한 결과를 이용하여, 레이더강우량 추정과정에서 각 단계별로 우수한

방법만을 선별한 결과에 대하여 다시 불확실성 정량화와 전파 정도를 분석하였다. 이에 따라 품질관리 단계에서는 fuzzy 알고리즘, 레이더강우량 추정단계에서는 WPMM, 후처리 강우량 보정단계에서는 LGC 방법을 선정하였다. 이에 따른 결과에 MEM을 적용하면 최종적으로 Fig. 5(a)와 같은 결과를 산출하였다. 각 단계별 ME를 살펴보면, fuzzy 알고리즘의 ME는 4.15, WPMM의 ME는 3.90, LGC 방법의 ME는 3.77로서 불확실성이 점차 줄어드는 것으로 나타났다. 마찬가지로 최종 불확실성을 100%로 한다면, fuzzy 알고리즘의 불확실성은 110.08%, WPMM의 불확실성은 103.45%, 마지막으로 최종 불확실성과 동일한 LGC 방법의 불확실성은 100%로서 불확실성이 단계별로 감소되는 것으로 나타났다. 이는 서두에서 언급한 바와 같이, 레이더의 강우관측에서 가장 큰 불확실성이 발생하였으며, 각 단계별 과정을 거치면서 그에 대한 불확실성을 줄여나가는 결과를 나타냈다고 할 수 있다. 반면에 UDM을 이용한 결과를 살펴보면, 전체적인 경향은 Fig. 4와 동일한 형태를 나타냈다. 각 단계별 UDM값을 살펴보면, fuzzy 알고리즘의 UDM값은 4.80, WPMM는 4.98, LGC 방법은 4.11로서 불확실성이 강우량 추정단계에서 증가하였다가 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이는 각 단계별로 우수한 모의결과를 나타내는 방법을 선택한다 하더라도 불확실성을 증가시킬 수밖에 없는 단계가 존재할 수 있음을 나타내 ME와는 다른 결과를 나타냈다. 물론 UDM의 식구성상 이와 같은 형태로 나타날 수밖에 없는지에 대해서는 후속 연구가 더 필요하다.

하지만 이 결과를 종합하면, 전체 레이더강우량 추정과정에 있어서 모의결과의 정확성이 높은 방법을 사용한다면, 최종적으로 불확실성이 가장 적은 레이더강우량 추정결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

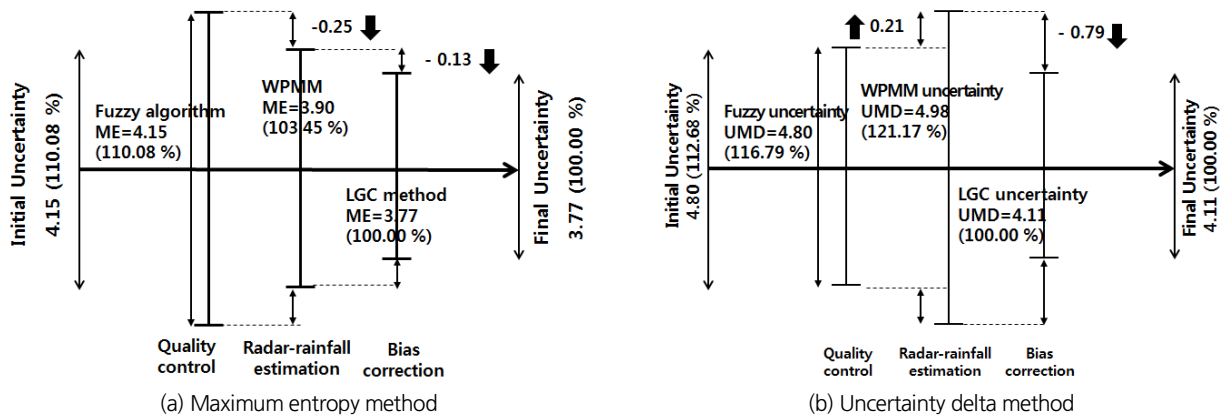


Fig. 5. Uncertainty quantification and propagation in the radar-based rainfall estimation process using superior methods of the maximum entropy method in each step using (a) the maximum entropy method and (b) the uncertainty delta method

4. 결론

본 연구에서는 기존 수문기상레이더기반 정량적 강우량 추정과정의 불확실성 연구의 문제점을 개선한 불확실성 정량화 방법을 제안하여 레이더강우량 추정과정에서 품질관리, 강우량 추정, 후처리 강우량 보정 단계별 불확실성을 정량화하고 수행단계별 불확실성의 전파과정을 분석하였다. 본 연구에서 수행한 세부 연구를 자세히 살펴보면, 첫째, 기존 레이더기반 정량적 강우량 추정과정에서 발생하는 불확실성 분석의 문제점을 분석하고 타당한 불확실성 전파 및 정량화의 기본개념을 제시하고 개선된 새로운 접근방법을 제안하였다. 기존 레이더 강우추정 불확실성 연구는 각 단계별 불확실성만을 분석하거나 특정 단계의 정확성을 개선하는 연구에 치중되었으나 본 연구에서는 전체 불확실성, 각 단계별 불확실성 증감 정도, 각 단계별 불확실성 비율을 제시할 수 있는 새로운 접근방법을 제안하였다.

둘째, 본 연구에서는 레이더기반 강우량 추정과정의 불확실성의 정량화와 전파과정을 분석하기에 적합한 방법을 개발하였다. 우선 앞서 언급한 각 단계별 불확실성의 정량화와 단계별 불확실성 전파에 적용가능 하도록 불확실성 정량화에 많이 적용되는 Maximum Entropy Method를 제안하였다. 다음으로 Taylor's expansion에 기반한 Delta method를 이용하여 레이더기반 강우량 추정과정의 불확실성 분석이 가능하도록 하여 Uncertainty Delta Method를 제안하였다.

마지막으로 본 연구에서는 정량적 레이더강우량 추정과정의 단계별 불확실성 정량화와 전파과정 분석을 위해 2012년 여름철 18개 사례에 대하여 2개 품질관리 알고리즘, 2개 강우량 추정방법, 2개 후처리 강우량 보정방법을 사용하였다. 우선 MEM을 적용한 결과, 품질관리 단계에서 최대 ME는 4.28, 강우량 추정단계에서 최대 ME는 4.53, 후처리 강우량 보정단계에서 최대 ME는 3.81로 나타나, 초기 불확실성의 ME는 4.28, 최종 불확실성의 ME는 3.81로 산정되었다. 다음으로 UMD를 적용한 결과에서 품질관리 단계에서 최대 UMD값은 5.33, 강우량 추정단계의 최대 UMD는 0.21, 후처리 강우량 보정단계에서는 -0.79로 산정되었다. 두 방법 모두, 레이더 강우량 추정의 최종 불확실성은 줄어들었으나 강우량 추정단계에서 불확실성이 증가하여 어떤 강우량 추정식을 적용하느냐에 따라 레이더 강우량 추정결과가 매우 달라질 수 있음을 나타냈다. 특히, 품질관리에서 fuzzy 알고리즘, 강우량 추정에서 WPMM, 강우량 보정에서 LGC 방법을 적용한 경우에 단계별 불확실성이 감소하여 불확실성이 가장 작은 레이더 강우량 추정결과를 얻을 수 있는 것으로 나타나 전체 레이더강우

량 추정과정에 있어서 모의결과의 정확성이 높은 방법을 사용하는 것이 불확실성을 줄일 수 있는 방법임을 확인하였다.

따라서 본 연구에서 제시한 새로운 불확실성 정량화 방법을 통하여 정량적 레이더 강우추정 과정에 있어서 첫째, 전체 및 단계별 불확실성을 정량화할 수 있고, 둘째, 최종 불확실성 대비 각 단계별 불확실성을 비율을 제시할 수 있으며, 마지막으로 수행단계별로 불확실성 전파과정을 파악할 수 있다. 이는 향후 정량적 레이더 강우추정 과정에 있어서 불확실성을 발생시키는 주요 원인파악과 이에 대한 집중적인 투자를 가능하게 한다. 이러한 과정을 통하여 보다 정확한 정량적 레이더 강우추정이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2017 R1D1A1B03030174)의 연구비와 대전대학교 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Austin, P. M. (1987). "Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall." *Monthly Weather Review*, Vol. 115, pp. 1053-1070.
- Campos, E., and Zawadzki, I. (2000). "Instrumental uncertainties in Z-R relations." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 39, pp. 1088-1102.
- Ciach, G. J., and Krajewski, W. F. (1999). "On the estimation of radar rainfall error variance." *Advances in Water Resources*, Vol. 22, pp. 585-595.
- Ciach, G. J., Krajewski, W. F., and Villarini, G. (2007). "Product-error-driven uncertainty model for probabilistic quantitative precipitation estimation with NEXRAD data." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8, pp. 1325-1347.
- Gay, C., and Estrada, F. (2010). "Objective probabilities about future climate are a matter of opinion." *Climatic Change*, Vol. 99, pp. 27-46.
- Germann, U., Galli, G., Boscacci, M., and Bolliger, M. (2006). "Radar precipitation measurement in a mountainous region." *Quarterly Journal of the Royal Meteorologic Society*, Vol. 132, pp. 1669-1692.
- Henderson-Sellers, A. (1993). "An antipodean climate of uncertainty." *Climatic Change*, Vol. 25, pp. 203-224.
- Huff, F. A. (1970). "Sampling errors in measurement of mean precipitation." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 9, pp. 35-44.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptations, and*

- vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Jaynes, E. T. (1957). "Information theory and statistical mechanics." *The Physical Review*, Vol. 106, pp. 620-630.
- Jones, R. N. (2000). "Managing uncertainty in climate change projections - issues for impact assessment: an editorial comment." *Climatic Change*, Vol. 45, pp. 403-419.
- Kim, D.-S., Kang, M.-Y., Lee, D.-I., Kim, J.-H., Choi, B.-C., and Kim, K. E. (2006). "Reflectivity Z and differential reflectivity ZDR correction for polarimetric radar rainfall measurement." *Proceedings Spring Meeting of Korean Meteorological Society*, 130-131.
- Krajewski, W. F., and Smith, J. (2002). "Radar hydrology: rainfall estimation." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp. 1387-1394.
- Krajewski, W. F., Villarini, G., and Smith, J. A. (2010). "Radar-rainfall uncertainties." *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 91, pp. 87-94.
- Lee, J.-K. (2015). "Uncertainty analysis of quantitative radar rainfall estimation using the maximum entropy." *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, Vol. 25, pp. 511-520.
- Marshall, J. S., Langille, R. C., and Palmer, W. Mc K. (1947). "Measurement of rainfall by radar." *Journal of Meteorology*, Vol. 4, pp. 186-192.
- McMillan, H., Jackson, B., Clark, M., Kavetski, D., and Woods, R. (2011). "Rainfall uncertainty in hydrological modeling: an evaluation of multiplicative error models." *Journal of Hydrology*, Vol. 400, pp. 83-94.
- Morin, E., Maddox, R. A., Goodrich, S., and Sorooshin, S. (2005). "Radar Z-R relationship for summer monsoon storm in Arizona." *Weather and Forecast*, Vol. 20, pp. 672-679.
- Moulin, L., Gaume, E., and Obled, C. (2009). "Uncertainties in mean areal precipitation: assessment and impact on streamflow simulations." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 13, pp. 99-114.
- Oh, H.-M., Ha, K.-J., Kim, K.-E., and Bae, D.-H. (2003). "Precipitation rate combined with the use of optimal weighting of radar and rain gauge data." *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, Vol. 13, pp. 316-317.
- Rosenfeld, D., Wolff, D. B., and Amitai, E. (1994). "The window probability matching method for rainfall measurements with radar." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, pp. 682-693.
- Schneider S. H. (1983). "CO₂, climate change society: a brief overview." *Social Science Research and Climate Change: Interdisciplinary Appraisal*. [Chen, R. S., E. Boulding, and S. H. Schneider (Eds.)]. D. Reidel, Boston, MA, UAS, pp. 9-15.
- Shannon, C. E. (1948). "A mathematical theory of communication." *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379-423.
- Villarini, G., and Krajewski, W. F. (2008). "Empirically-based modeling of spatial sampling uncertainties associated with rainfall measurements by rain gauges." *Advances in Water Resources*, Vol. 31, pp. 1015-1023.
- Villarini, G., and Krajewski, W. F. (2010). "Sensitivity studies of the models of radar-rainfall uncertainties." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 49, pp. 288-309.
- Weather Radar Center (2013). *Weather radar data analysis guidance*. Weather Radar Center technical note WRC 2013-02.
- Wilson, J. W., and Brandes, E. A. (1979). "Radar measurement of rainfall." *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 60, pp. 1048-1058.
- Woodley, W., Olsen, A., Herndon, A., and Wiggert, V. (1975). "Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, pp. 909-928.
- Yoo, C., Kim, J., Yoon, J., Park, C., Park, C., and Jun, C. (2011). "Use of the Kalman filter for the correction of mean-field bias of radar rainfall." *Proceedings 5th Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology*, Busan, Korea.
- Zhang, Y., Adams, T., and Bonta, J. V. (2007). "Subpixelscale rainfall variability and the effects on the separation of radar and gauge rainfall errors." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8, pp. 1348-1363.
- Zhang, J., Howard, K., Langston, C., Vasiloff, S., Kaney, B., Arthur, A., Cooten, S. V., Kelleher, K., Kitzmiller, D., Ding, F., Seo, D.-J., and Dempsey, C. (2011). "National mosaic and multi-sensor QPE (NMW) system." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 92, pp. 1321-1338.