

Maximum Entropy를 이용한 정량적 레이더 강우추정 불확실성 분석

이재경*

대진대학교 공학교육혁신센터

(접수일: 2015년 4월 21일, 수정일: 2015년 7월 15일, 게재확정일: 2015년 7월 15일)

Uncertainty Analysis of Quantitative Radar Rainfall Estimation Using the Maximum Entropy

Jae-Kyoung Lee*

Daejin University, Innovation Center of Engineering Education, Pocheon-si, Korea

(Manuscript received 21 April 2015; revised 15 July 2015; accepted 15 July 2015)

Abstract Existing studies on radar rainfall uncertainties were performed to reduce the uncertainty for each stage by using bias correction during the quantitative radar rainfall estimation process. However, the studies do not provide quantitative comparison with the uncertainties for all stages. Consequently, this study proposes a suitable approach that can quantify the uncertainties at each stage of the quantitative radar rainfall estimation process. First, the new approach can present initial and final uncertainties, increasing or decreasing the uncertainty, and the uncertainty percentage at each stage. Furthermore, Maximum Entropy (ME) was applied to quantify the uncertainty in the entire process. Second, for the uncertainty quantification of radar rainfall estimation at each stage, this study used two quality control algorithms, two rainfall estimation relations, and two bias correction techniques as post-processing and progressed through all stages of the radar rainfall estimation. For the proposed approach, the final uncertainty (ME = 3.81) from the ME of the bias correction stage was the smallest while the uncertainty of the rainfall estimation stage was higher because of the use of an unsuitable relation. Additionally, the ME of the quality control was at 4.28 (112.34%), while that of the rainfall estimation was at 4.53 (118.90%), and that of the bias correction at 3.81 (100%). However, this study also determined that selecting the appropriate method for each stage would gradually reduce the uncertainty at each stage. Finally, the uncertainty due to natural variability was 93.70% of the final uncertainty. Thus, the results indicate that this new approach can contribute significantly to the field of uncertainty estimation and help with estimating more accurate radar rainfall.

Key words: Radar rainfall estimation, uncertainty quantification, uncertainty propagation, maximum entropy

1. 서 론

기상레이더는 우리나라 전역과 해상에 대하여 시공

간적으로 고분해능(high resolution) 자료 생산이 가능하고 그 역할과 중요성이 점차 증대되고 있으나, 정량적 강우산출 과정 중에 많은 불확실성 발생 요소가 존재한다. 이러한 불확실성이 발생하는 이유는 기상레이더 특성상 강우량을 바로 추정하지 못하기 때문이다. 불확실성 발생 원인들을 살펴보면, 기상레이더의 강우관측에서 발생할 수 있는 시공간적 관측오차 (spatiotemporal sampling error), 기상레이더의 기계적

*Corresponding Author: Jae-Kyoung Lee, Innovation Center of Engineering Education, Daejin University, Hoguk-ro 1007, Pocheon-si, Gyeonggi-do 487-711, Korea.
Phone : +82-31-539-2357, Fax :+82-31-539-2359
E-mail : myroom1@daejin.ac.kr

오차(hardware error), 레이더 신호처리 오차(radar signal process error), 레이더 품질관리에서의 오차(error of quality control), 정량적 강우량 추정(Quantitative Precipitation Estimation, QPE)에서의 오차 등의 계통 오차(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 많은 연구들이 수행되었으며(Germann et al., 2006; Ciach et al., 2007; Zhang et al., 2007; Villarini and Krajewski, 2008; Villarini and Mandapaka, 2010; McMillan et al., 2011), 국내 연구들은 대부분 QPE 과정에서 발생하는 오차를 보정하는 연구(Oh et al., 2003; Kim et al., 2006; Yoo et al., 2011)에 집중되어 있다.

하지만 기존 연구들은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 첫째, 기상레이더의 관측에서부터 정량적 강우량 추정까지 일련의 과정에 대한 포괄적으로 불확실성 정량화와 분석이 이루어지지 못한다. 둘째, 전체 불확실성이 어느 정도 되는지 제시하지 못하므로 각 단계별 불확실성이 전체 불확실성 대비 어느 정도 비율이 되는지 제시하지 못한다. 마지막으로 기존 연구들은 불확실성을 줄이고자 여러 방법을 사용하고 있으나 어느 정도 효용성이 있는지 불확실성 측면에서 제시하지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구의 문제점을 개선할 수 있는 간단하나 새로운 접근방법을 제안하여 기상레이더를 활용하여 정량적 강우량을 추정하는 일련의 과정에서 단계별로 불확실성이 어떻게 전파되는지 추정하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 품질관리, 레이더 강우추정, 후처리과정으로 강우량보정기법에 초점을 맞추어 수행하였다. 본 논문의 구성은 2장에서는 본 연구에서 제안하는 레이더 정량적 강우량 추정과정에서의 불확실성 전파 기본개념과 불확실성을 정량화하기 위해 사용된 maximum entropy에 대한 간단한 이론을 소개하였다. 3장에서는 소개한 방법을 활용하여 본 연구에서 어떻게 정량화하는지 상세히 설명하였으며, 마지막으로 4장에서는 결론을 서술하였다.

2. 불확실성 전파 방법의 제시

2.1 불확실성 전파 기본 개념

기상레이더 관측에서부터 정량적 강우량 추정과정까지 발생하는 불확실성에 관한 연구는 1970년대부터 언급되기 시작하였다(Huff, 1970; Woodely et al., 1975; Ciach et al., 2007). 이후 불확실성에 관련된 많은 연

구들이 수행되었으나 레이더 강우추정 과정에서 발생하는 불확실성에 관련한 기존 연구들의 접근방법은 정량적 레이더 강우추정 정확성 향상을 위한 오차보정이나 Z-R 관계식에 따른 불확실성에 초점이 맞추어져 있으며, 수문기상분야에서는 입력자료로서 레이더 강우량에 따른 불확실성 분석 등의 연구(Moulin et al., 2009; Krajewski et al., 2010; Villarini and Krajewski, 2010; McMillan et al., 2011)에 집중되어 있다. 일련의 과정에 따른 단계별 불확실성 연구는 1980년대부터 기후변화 분야에 많이 연구되었으며(Schneider, 1983; Henderson-Sellers, 1993), Jones (2000)는 기후변화 단계별 불확실성 전파(cascade of uncertainty, uncertainty explosion, uncertainty propagation)가 어떻게 진행되는지에 대하여 제시하였고, 이 개념은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 3차 보고서(2001)의 기초가 된 바 있다. 불확실성 전파에서 중요한 기본개념은 기후변화 수행단계에 따른 불확실성은 각 단계별로 독립적으로 불확실성을 정량화하는 것이 아니라, 모든 단계가 연결되어 있어 전 단계가 후 단계에 영향을 주기 때문에 전체 수행단계를 총체적으로 고려해서 평가되어야 한다는 것이다. 따라서 불확실성 평가와 정량화에 대한 최종 결과물은 Fig. 1a와 같이 제시되어야 하며, 이를 통해 전체 불확실성의 크기, 불확실성이 가장 큰 단계, 불확실성의 전파과정 등의 제시가 가능하다. 하지만 레이더 강우량 추정은 관측에서부터 매우 큰 불확실성을 포함하고 있으며, 신호처리, 품질관리, 강우추정, 후처리과정을 통하여 그 불확실성을 줄이고 있다. 따라서 본 연구에서는 레이더 강우량 추정에서의 불확실성 전파단계를 Fig. 1b와 같이 제안하고 그에 따른 전체 불확실성과 불확실성 전파과정을 살펴보았다.

2.2 Maximum entropy를 이용한 불확실성 정량화

Entropy (Shannon, 1948)은 주어진 정보에 의해 발생하는 정보량(information context)에 대한 예측 불가능성(unpredictability) 혹은 불확실성(uncertainty)을 정량적으로 추정할 수 있는 방법 중 하나이다. 정보량은 정보가 발생할 확률로부터 주어지게 되며, 어떤 정보가 발생할 확률이 크다면 정보량도 작고, 정보의 발생확률이 작다면 정보량도 크게 된다. 정보 X 는 확률 p 를 가지는 무작위 변수(random variable)라하고 정보량 $I(X)$ 를 평균적인 개념을 도입하여 정리하면, entropy의 기본식은 다음과 같다(Shannon, 1948).

$$\begin{aligned} H(X) &= - \sum p_X(x) \ln p_X(x) \\ &= \sum p_X(x) I(X) = E\{I(X)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

Maximum entropy는 Shannon (1948)이 제시한 entropy 이론을 바탕으로 Jaynes (1957)이 발표한 이론이며, 어

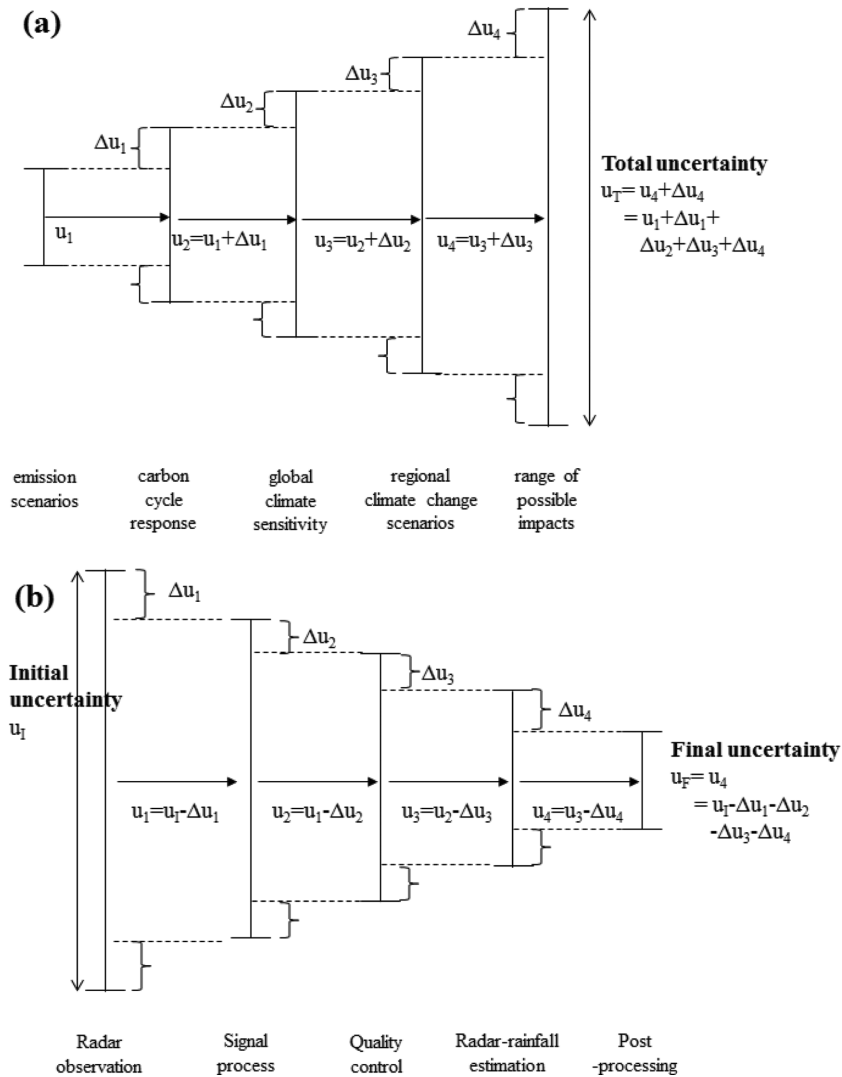


Fig. 1. Basic concept of uncertainty propagation: (a) in climate change assessment (IPCC, 2001), (b) in radar-rainfall estimation procedure on this study.

편 정보가 주어졌을 때 이를 바탕으로 불확실성을 최대한화하는 확률밀도함수를 제공한다. Maximum entropy의 기본식은 다음과 같다(Gay and Estrada, 2010).

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

subject to

moment-consistency constraint:

$$\sum_{i=1}^n p_X(x_i) f_m(x_i) = y_m, \quad (m = 1, 2, \dots, M), \quad (3)$$

normalization constraint:

$$\sum_{i=1}^n p_X(x_i) = 1 \quad (p_X(x_i) \geq 0), \quad (4)$$

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), $f_m(\cdot)$ 은 모멘트 제약조건, n 은 샘플크기이다. 만약 최대값 a 와 최소값 b 로 주어진 경우에는 maximum entropy distribution은 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).

Table 1. Summary of the Radars and Rainfall Cases.

(a) Weather radars used in this study

Item	Detail
Target 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 (KST)	Source
Case 1	20120608 06:00~20120608 19:00	Local rainfall
Case 2	20120615 05:00~20120616 04:00	Changma front
Case 3	20120618 00:00~20120619 13:00	Changma front
Case 4	20120623 13:00~20120624 19:00	Local rainfall
Case 5	20120629 08:00~20120701 01:00	Changma front
Case 6	20120705 04:00~20120707 02:00	Changma front
Case 7	20120710 10:00~20120711 19:00	Changma front
Case 8	20120712 23:30~20120713 07:30	Changma front
Case 9	20120714 08:00~20120715 15:00	Changma front
Case 10	20120716 23:00~20120717 22:00	Changma front
Case 11	20120718 14:00~20120719 13:00	Typhoon
Case 12	20120810 03:00~20120810 22:00	Local rainfall
Case 13	20120812 05:00~20120813 15:00	Local rainfall
Case 14	20120814 17:00~20120816 23:00	Local rainfall
Case 15	20120819 16:00~20120822 21:00	Local rainfall
Case 16	20120822 22:00~20120825 11:00	Local rainfall
Case 17	20120827 13:00~20120828 18:00	Changma front and typhoon
Case 18	20120829 15:00~20120830 23:00	Typhoon

$$H(X) = - \int_a^b f_X(x) \ln f_X(x) dx$$

$$= - \int_a^b \frac{1}{b-a} \ln \frac{1}{b-a} dx = - \ln(b-a). \quad (5)$$

본 연구에서 제안한 불확실성 전파 및 정량화 방법은 maximum entropy를 사용할 때 쉽게 수행될 수 있다. 우선 모든 경우의 수에 대한 레이더 강우량을 모두 추정한 후 살펴보고자 하는 단계 i 의 모형(또는 시나리오, 기법) $j(i)$ 에 해당하는 레이더 강우량 추정결과들 중 최대값과 최소값을 각각 a , b 로 설정하여 entropy $H_{i,j}$ 를 계산한다. 이 과정을 모든 $j(i)$ 에 되풀이 하여 $H_{i,j}$ 를 모두 구한 후, 불확실성을 최대화한다는 ME 가정에 모든 $H_{i,j}$ 에 대하여 $\max(H_{i,j})$ 하여 최대 H_i 를 구하게 된다.

3. 적용 및 결과

3.1 적용개요

본 절에서는 앞서 살펴본 레이더 정량적 강우추정 단계별 불확실성을 정량화하기 위하여 품질관리, 강

Table 2. Quality control, rainfall estimation, and bias correction methods used 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

우추정, 후처리보정 단계만을 수행하였다. 한반도 전역을 대상으로 하였으며, 사용한 레이더 자료 및 강우사례는 Table 1과 같다. Table 1a는 기상청에서 운영하는 11개 단일편파레이더(백령도, 관악산, 오성산, 진도, 고산, 성산, 구덕산, 면봉산, 강릉, 광덕산, 인천)이며, 레이더 관측반경은 레이더별로 조금씩 다르나 최대 280 km이다. Table 1b는 본 연구에서 사용한 강우사례로서 2012년 여름철(6월~8월)에 발생한 18개 사례를 나타낸다. Table 2는 본 연구에서 불확실성 정량화를 위해 사용된 품질관리(quality control) 알고리

즘, 강우추정기법, 후처리 강우량 보정기법을 보여주고 있다. 품질관리 알고리즘은 기상청 기상레이더센터에서 단일편파에 기본적으로 적용되는 ORPG (Open Radar Product Generator) 품질관리 알고리즘과 시험 운영 중인 fuzzy 알고리즘을 적용하였다(Weather Radar Center, 2013). ORPG 품질관리 알고리즘은 지형에코가 필터가 적용된 보정반사도(corrected reflectivity)를 입력변수로 하여, 임계치 이상의 영역을 제거하는 품질관리 알고리즘이다. Fuzzy 알고리즘은 지형에코필터 적용 전의 반사도를 입력변수로 하여, 기상에코와 비기상에코의 통계분석을 통해 각 변수들의 비기상에코 소속함수를 생성하여 품질관리를 수행하는 알고리즘이다(Weather Radar Center, 2013). 레이더 강우추정을 위해서 기상청에서 현업운영 중인 Radar-AWS Rainfall 산출 시스템(이하 RAR 시스템)을 이용하였다. RAR 시스템은 11개 단일편파레이더를 기반으로 운영되며, WPMM (Window Probability Matching Method) (Rosenfeld et al., 1993)을 이용하여 강우사상에 맞도록 Z(반사도)-R(강우강도) 관계식의 매개변수를 실시간 결정한다. RAR 시스템에 대한 자세한 사항은 Lee et al. (2014a)를 참조하길 바란다. 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 강우추정기법으로 사용하였다. 마지막으로 후처리 보정기법은 LGC (Local Gauge Correction) 기법(Zhang et al., 2011)과 G/R (Gauge to Radar) ratio 기법(Morin et al., 2005)을 적용하였다. LGC 기법은 레이더 격자별 강우량을 보정하는 기법으로 지역적으로 발생하는 강우량 보정에 장점이 있으며, G/R ratio 기법은 적용지역 전역을 대상으로 레이더 추정 강우량과 지상관측소 관측강우량의 비를 이용하여 보정하는 기법이다. 두 기법에 대한 자세한 사항은 Lee et al. (2014b)에 있다.

3.2 방법별 레이더 강우추정 비교

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 2개의 품질관리 알고리즘, 2개의 레이더 강우추정기법, 2개의 후처리 강우량 보정기법을 사용하여 우리나라 전역을 대상으로 총 8개 조합의 레이더 강우량을 추정하였다. 그 중 품질관리 알고리즘과 후처리 강우량 보정기법에 따른 강우량 추정 정확성을 비교하였으며, AWS 1시간 관측 강우강도를 이용하였다. 우선 Table 3은 18개 사례에 대하여 품질관리 알고리즘인 ORPG와 fuzzy 알고리즘 및 후처리 강우량 보정기법인 G/R ratio와 LGC 기법을 적용한 레이더 강우량 정확성을 기법별로 평균하여 비교한 결과이다. 두 기법 적용 시, 비교하고자 하는 기법을 제외한 다른 조건들(강우추정식,

Table 3. Comparison of accuracy of radar rainfall estimates for each quality control algorithm and correction technique.

(a) Accuracy of ORPG and fuzzy algorithms

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

(b) Accuracy of G/R ratio and LGC techniques

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

레이더자료 등)은 동일하게 구성하였다. Table 3a에서는 fuzzy 알고리즘을 적용한 강우의 RMSE (Root Mean Square Error)와 상관계수(correlation coefficient)가 각각 8.32 mm hr^{-1} 와 0.81로서 ORPG보다 정확성이 높게 나타났다. Table 3b에서는 LGC 기법을 적용한 강우의 RMSE와 상관계수가 각각 6.06 mm hr^{-1} 와 0.94로서 G/R ratio보다 강우추정 정확성이 우수하였다.

Figure 2는 fuzzy와 ORPG 품질관리 알고리즘을 적용한 결과를 비교한 사례이다. 우선 Figs. 2a~c는 2012년 7월 13일 0700 KST에 동해와 남해상 지역에 강우가 집중적으로 발생한 사례로서 Fig. 2a의 AWS 관측강우에서 확인할 수 있다. Figures 2b와 c는 fuzzy와 ORPG 알고리즘을 각각 적용한 결과로서, 지역①에 Fig. 2b는 Fig. 2c에 비해 상대적으로 약하게, 지역②에서는 Fig. 2b가 Fig. 2c에 비해 다소 강하게 나타났다. 특히 지역①에서는 Fig. 2b의 결과가 AWS 관측강우에 더 가깝게 표출되었다. 하지만 fuzzy 알고리즘이 적용된 Fig. 2b에서 지역③에 파랑에코가 완벽히 제거되지 않고 표출되었다. Figures 2d~f는 2012년 8월 28일 1020 KST에 전국적으로 태풍과 장마가 발생한 사례이며, Fig. 2d의 AWS 관측강우에서 확인할 수 있다. Figures. 2e와 f는 fuzzy와 ORPG 알고리즘을 각각 적용한 결과로서, 지역④와 ⑤에서 ORPG 알고리즘이 적용된 Fig. 2f가 더 강하게 표출되었다. 특히 중부지방인 지역⑤의 강우는 Fig. 2e가 더 가깝게 표출되고 있으나 지역⑥에서는 Fig. 2b와 동일하게 파랑에코가 나타났다. 다음으로 Fig. 3은 레이더 강우량 보정기법인 G/R ratio와 LGC 기법을 적용한 결과를 비교한 사례이다. Figures 3a~c는 2012년 7월 13일 0530 KST에 중부와 남부지역을 중심으로 장마가 발생한 사례이며, Fig. 3a의 AWS 관측강우에서 확인할 수 있다. 지역①과 ②를 살펴보면, LGC 기법을 적용한 Fig. 3c가 G/R ratio 기법을 적용한 Fig. 3b보다 강하게 표출되고 있으며, AWS 관측강우에 더 가깝게 나타났다. Figures 3d~f는 2012년 8월 30일 1030 KST

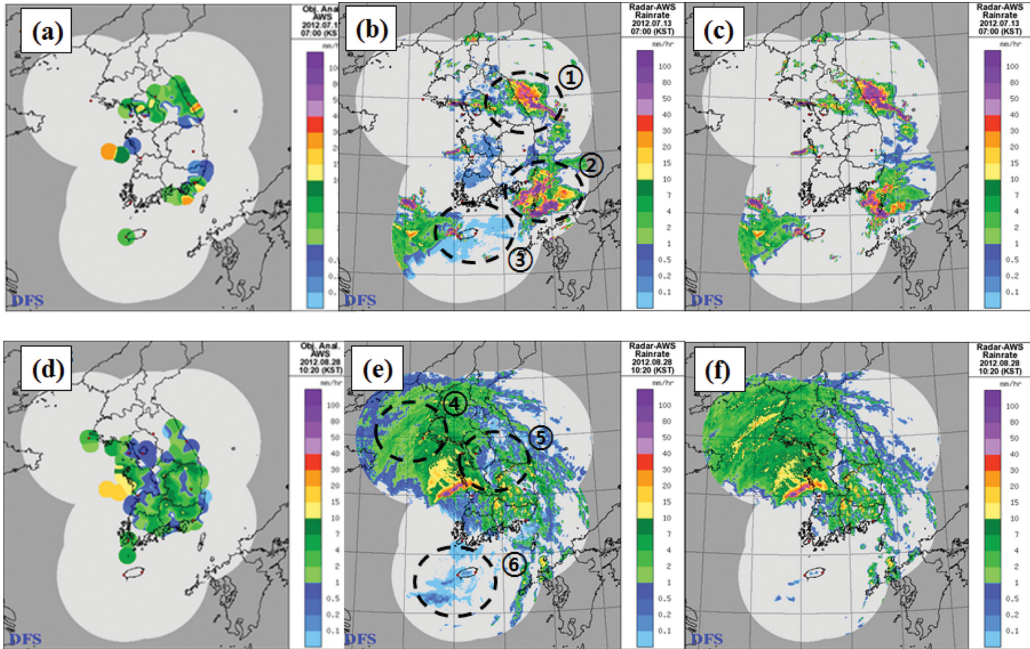


Fig. 2. Comparison of rainfall estimates between AWS and quality control techniques: (a) AWS, (b) fuzzy, (c) ORPG on 0700 LST on 13 July in 2012; (d) AWS, (e) fuzzy, (f) ORPG on 1020 LST on 28 August in 2012.

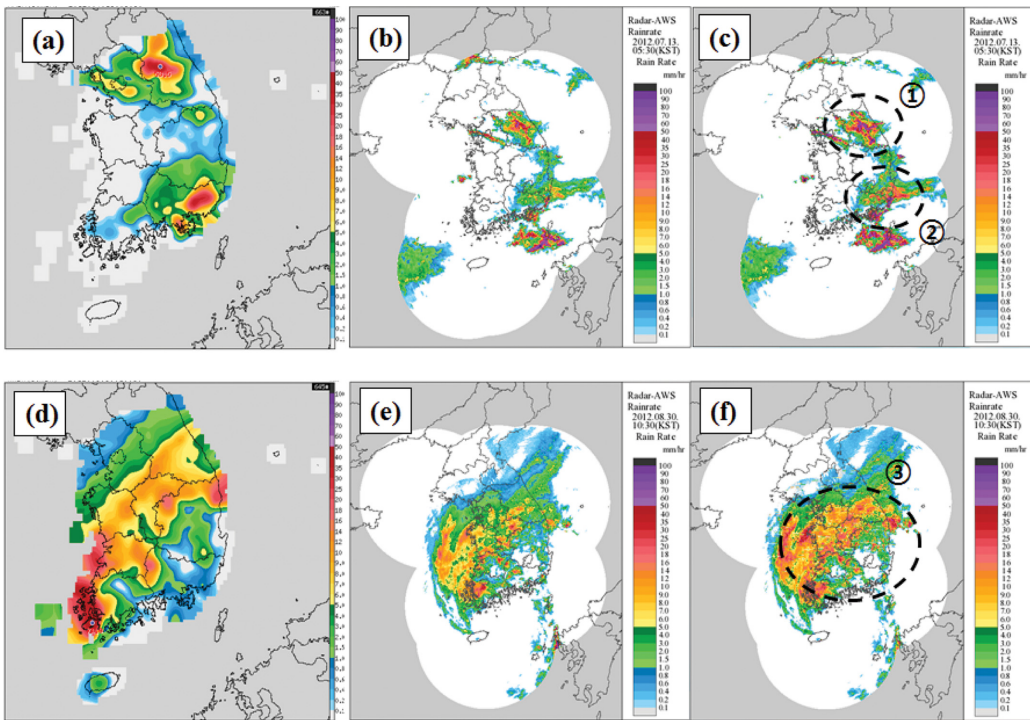


Fig. 3. Comparison of rainfall estimates between AWS and bias correction techniques: (a) AWS, (b) G/R ratio, (c) LGC on 0530 LST on 13 July in 2012; (d) AWS, (e) G/R ratio, (f) LGC on 1030 LST on 30 August in 2012.

Table 4. Uncertainty quantification in each step of the radar rainfall estimation for the study basin using the Maximum Entropy (ME).

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			
PRBC	LGC	3.77	3.81	-0.72 (-15.89%)	100.00
	G/R ratio	3.81			
Final uncertainty		3.81	3.81	-	100.00
Natural variability		3.57	3.57	-	93.70

* QC, RRE, and PRBC represent Quality Control, Radar Rainfall Estimation, Post-processed Rainfall Bias Correction, respectively.

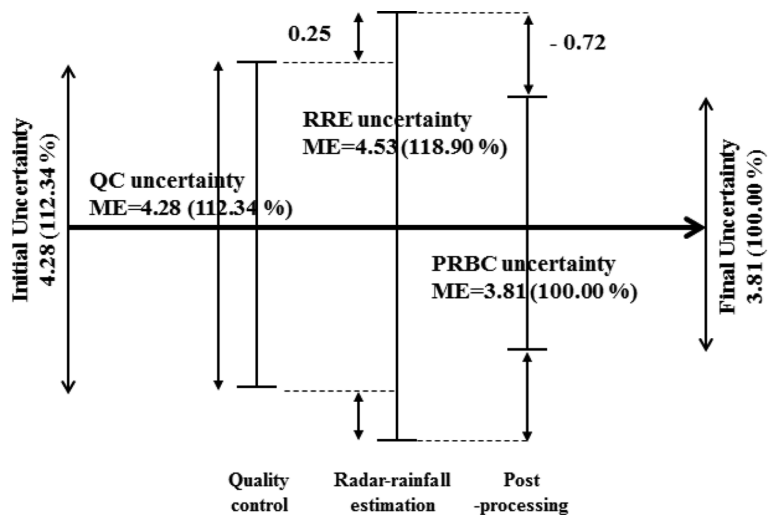


Fig. 4. Uncertainty quantification in the radar rainfall estimation.

태풍 Tembin에 의해 전라도 지역을 중심으로 전국적으로 강우가 발생한 사례이며, Fig. 3d의 AWS 관측 강우에서 확인할 수 있다. 지역③을 살펴보면, LGC 기법을 적용한 Fig. 3f가 Fig. 3e보다 더 강우가 강하게 표출되었으며, Fig. 3d와 같이 남서에서 북동쪽으로 태풍 Tembin 이동경로를 따라 형성된 강우대를 잘 나타내고 있다.

3.3 불확실성 정량화 결과

본 연구에서는 3.2절의 레이더 강우추정결과들을 가지고 본 연구에서 제시한 불확실성 정량화 방법을 적용하였으며, 그 결과는 Table 4와 Fig. 4와 같다. 우선 Fig. 1b에서 제시한 레이더 관측과 신호처리 단계는

수행하지 않았으므로 품질관리를 첫 단계로 하여 초기 불확실성(initial uncertainty)으로 가정하였다. 각 단계별 ME를 살펴보면, 품질관리단계에서 ORPG 알고리즘의 ME는 4.28, fuzzy 알고리즘의 ME는 4.15로서 최대 ME는 4.28이며, 레이더 강우추정단계에서 WPMM의 ME는 3.90, M-P 관계식의 ME는 4.53으로서 최대 ME는 4.53이다. 후처리 강우보정단계에서 LGC 기법의 ME는 3.77, G/R ratio 기법의 ME는 3.81로서 최대 ME는 3.81이다. 초기 불확실성의 ME는 품질관리 단계와 동일한 4.28이며, 최종 불확실성(final uncertainty)의 ME는 후처리 강우보정단계와 같은 3.81로 산정되었다. 최종 불확실성 ME를 100%로 하면 품질관리는 12.34%, 레이더 강우추정 단계는 18.90% 많은 것으

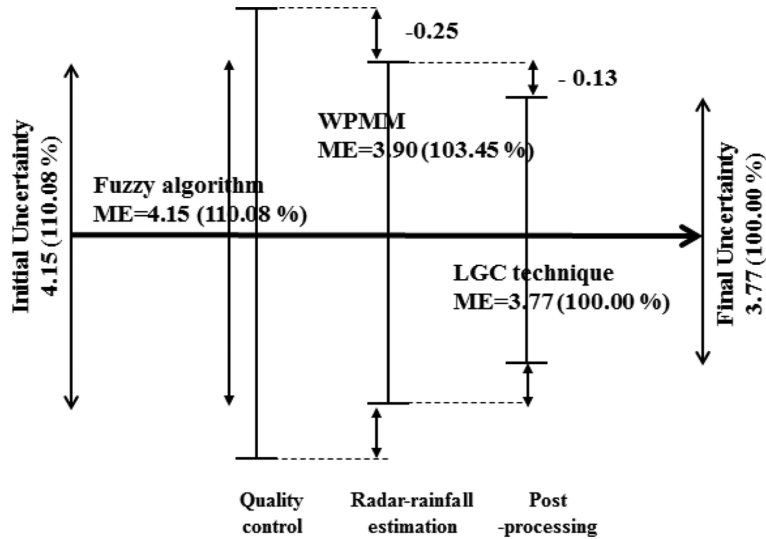


Fig. 5. Minimum uncertainty for each step of the radar rainfall estimation in this study.

로 나타나 최종적으로 불확실성이 줄어들었으나, 강우추정 단계에서 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 원인을 살펴보면, WPMM의 ME는 3.90인 반면, M-P 관계식의 ME는 4.53으로서 M-P 관계식에 의해 불확실성이 증가하여 어떤 강우추정식을 적용하느냐에 따라 레이더 강우추정결과가 매우 달라질 수 있음을 의미한다. Figure 4에서도 레이더 강우추정단계에서 불확실성이 증가하다가 다시 후처리 강우보정 단계를 거치면서 불확실성이 줄어드는 것을 알 수 있다. 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. 본 연구의 결과를 기반으로 품질관리에서는 fuzz 알고리즘(ME=4.15), 레이더 강우추정에서는 WPMM (ME=3.90), 후처리 강우보정에서는 LGC 기법(ME=3.77)을 적용한다면 Fig. 5와 같이 단계별로 불확실성이 줄어드는 것으로 나타나며, 불확실성이 가장 작은 레이더 강우추정결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

다음으로 본 연구에서 제시한 불확실성 정량화 방법을 이용하여 자연변동성(natural variability)의 불확실성과 상대적 비교를 수행하였다. 자연변동성의 ME는 과거 18개 사례의 변동성 중, 가장 큰 값과 가장 작은 값을 식 (5)에 대입하여 산정하였다. 자연변동성의 ME는 3.57로 각 단계별 불확실성과 비교하면, 품질관리 대비 83.41%, 강우추정 대비 78.81%, 후처리 보정 대비 93.70%로 나타났다. 이는 레이더 강우추정 단계를 수행하면서 정확성이 향상되어 관측강수에 가까워지고 있음을 나타낸다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 기존 정량적 레이더 강우추정 과정의 불확실성 연구의 문제점을 개선한 불확실성 정량화 방법을 제안하여 레이더 강우추정에서 품질관리, 강우추정, 후처리 강우보정 단계별 불확실성을 정량화하고 수행단계별 불확실성의 전과 정도를 분석하였다. 본 연구에서 수행한 세부 연구를 살펴보면, 첫째, 기존 레이더 정량적 강우추정의 불확실성 분석의 문제점을 분석하고 적합한 불확실성 전과 및 정량화의 기본개념을 제시하고 개선된 새로운 접근방법을 제안하였다. 기존 레이더 강우추정 불확실성 연구는 각 단계별 불확실성만을 분석하는 데 머물렀으나 본 연구에서는 전체 불확실성, 각 단계별 불확실성 증감 정도, 각 단계별 불확실성 비율을 제시할 수 있는 새로운 접근방법을 제안하였다. 또한 불확실성을 정량적으로 추정할 수 있는 방법으로 maximum entropy를 선정하고 적용하였다.

둘째, 본 연구에서는 정량적 레이더 강우추정의 단계별 불확실성 정량화를 위해 2012년 여름철 18개 사례에 대하여 2개 품질관리 알고리즘, 2개 강우추정기법, 2개 후처리 강우보정기법을 사용하였다. 본 연구에서 제시한 불확실성 정량화 방법을 적용한 결과, 품질관리단계에서 최대 ME는 4.28, 강우추정단계에서 최대 ME는 4.53, 후처리 강우보정단계에서 최대 ME는 3.81로 나타나, 초기 불확실성의 ME는 4.28, 최종 불확실성의 ME는 3.81로 산정되었다. 특히 최종적으로 레이더 강우추정의 불확실성은 줄어들었으나, 강우추정 단계에서 불확실성이 증가하는 것으로 나타나

어떤 강우추정식을 적용하느냐에 따라 레이더 강우추정결과가 매우 달라질 수 있음을 나타냈다. 또한 품질관리 fuzz 알고리즘, 강우추정 WPMM, 강우보정 LGC 기법을 적용한다면 단계별로 불확실성이 줄어들어 불확실성이 가장 작은 레이더 강우추정결과를 얻는 것으로 나타났다. 마지막으로 자연변동성의 ME는 3.57로 최종 불확실성 대비 93.70%로 나타나, 레이더 강우추정 단계를 수행하면서 정확성이 향상되어 관측 강수에 가까워지고 있음을 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 전과과정을 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

이 연구는 2015학년도 대전대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Austin, P. M., 1987: Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1053-1070.
- Campos, E., and I. Zawadzki, 2000: Instrumental uncertainties in Z-R relations. *J. Appl. Meteorol.*, **39**, 1088-1102.
- Ciach, G. J., W. F. Krajewski, and G. Villarini, 2007: Product-error-driven uncertainty model for probabilistic quantitative precipitation estimation with NEXRAD data. *J. Hydrometeorol.*, **8**, 1325-1347.
- _____, and W. F. Krajewski, 1999: On the estimation of radar rainfall error variance. *Adv. Water Resour.*, **22**, 585-595.
- Gay, C., and F. Estrada, 2010: Objective probabilities about future climate are a matter of opinion. *Climatic Change*, **99**, 27-46.
- Germann, U., G. Galli, M. Boscacci, and M. Bolliger, 2006: Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 1669-1692.
- Huff, F. A., 1970: Sampling errors in measurement of mean precipitation. *J. Appl. Meteorol.*, **9**, 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.
- Kim, D.-S., M.-Y. Kang, D.-I. Lee, J.-H. Kim, B.-C. Choi, and K. E. Kim, 2006. Reflectivity Z and differential reflectivity ZDR correction for polarimetric radar rainfall measurement. *Proceeding of the Spring Meeting of Korean Meteorological Society*, 130-131.
- Krajewski, W. F., and J. Smith, 2002: Radar hydrology: rainfall estimation. *Adv. Water Resour.*, **25**, 1387-1394.
- _____, G. Villarini, and J. A. Smith, 2010: Radar-rainfall uncertainties. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 87-94.
- Lee, J.-K., J.-H. Kim, H.-S. Park, and M.-K. Suk, 2014a: Merging radar rainfalls of single and dual-polarization radar to improve the accuracy of quantitative precipitation estimation. *Atmosphere*, **24**, 365-378 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, J.-S. Park, and K.-H. Kim, 2014b: Application of radar rainfall estimates using the local gauge correction method to hydrologic model. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **14**, 67-78.
- Marshall, J. S., R. C. Langille, and W. McK. Palmer, 1947: Measurement of rainfall by radar. *J. Meteor.*, **4**, 186-192.
- McMillan, H., B. Jackson, M. Clark, D. Kavetski, and R. Woods, 2011: Rainfall uncertainty in hydrological modeling: An evaluation of multiplicative error models. *J. Hydrol.*, **400**, 83-94.
- Morin, E., R. A. Maddox, S. Goodrich, and S. Sorooshin, 2005: Radar Z-R relationship for summer monsoon storm in Arizona. *Wea. Forecasting*, **20**, 672-679.
- Moulin, L., E. Gaume, and C. Obled, 2009: Uncertainties in mean areal precipitation: assessment and impact on streamflow simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **13**, 99-114.
- Oh, H.-M., K.-J. Ha, K.-E. Kim, and D.-H. Bae, 2003. Precipitation rate combined with the use of optimal weighting of radar and rain gauge data. *Atmosphere*, **13**, 316-317 (in Korean with English abstract).
- Rosenfeld, D., D. B. Wolff, and E. Amitai, 1994: The window probability matching method for rainfall measurements with radar. *J. Appl. Meteorol.*, **33**, 682-693.
- Shannon, C. E., 1948: A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J.*, **27**, 379-423.

- Villarini, G., and W. F. Krajewski, 2008: Empirically-based modeling of spatial sampling uncertainties associated with rainfall measurements by rain gauges. *Adv. Water Resour.*, **31**, 1015-1023.
- _____, and _____, 2010: Sensitivity studies of the models of radar-rainfall uncertainties. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **49**, 288-309.
- Weather Radar Center, 2013: Weather radar data analysis guidance. Weather Radar Center technical note WRC 2013-02.
- Wilson, J. W., and E. A. Brandes, 1979: Radar measurement of rainfall. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **60**, 1048-1058.
- Woodley, W., A. Olsen, A. Herndon, and V. Wiggert, 1975: Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement. *J. Appl. Meteorol.*, **14**, 909-928.
- Yoo, C., J. Kim, J. Yoon, C. Park, and C. Jun, 2011: Use of the Kalman filter for the correction of mean-field bias of radar rainfall. *The 5th Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology*, Busan, Korea.
- Zhang, Y., T. Adams, and J. V. Bonta, 2007: Subpixelscale rainfall variability and the effects on the separation of radar and gauge rainfall errors. *J. Hydrometeorol.*, **8**, 1348-1363.
- Zhang, J., and Coauthors, 2011: National mosaic and multi-sensor QPE (NMW) system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 1321-1338.