

레이더기반 다중센서활용 강수추정기술의 개발

이재경* · 김지현 · 박혜숙 · 석미경

기상청 기상레이더센터 레이더분석과

(접수일: 2014년 5월 19일, 게재확정일: 2014년 8월 22일)

Development of Radar-Based Multi-Sensor Quantitative Precipitation Estimation Technique

Jae-Kyoung Lee*, Ji-Hyeon Kim, Hye-Sook Park, and Mi-Kyung Suk

Korea Meteorological Administration, Weather Radar Center, Seoul, Korea

(Manuscript received 19 May 2014; accepted 22 August 2014)

Abstract Although the Radar-AWS Rainrate (RAR) calculation system operated by Korea Meteorological Administration estimated precipitation using 2-dimensional composite components of single polarization radars, this system has several limitations in estimating the precipitation accurately. To overcome limitations of the RAR system, the Korea Meteorological Administration developed and operated the RMQ (Radar-based Multi-sensor Quantitative Precipitation Estimation) system, the improved version of NMQ (National Mosaic and Multi-sensor Quantitative Precipitation Estimation) system of NSSL (National Severe Storms Laboratory) for the Korean Peninsula. This study introduced the RMQ system domestically for the first time and verified the precipitation estimation performance of the RMQ system. The RMQ system consists of 4 main parts as the process of handling the single radar data, merging 3D reflectivity, QPE, and displaying result images. The first process (handling of the single radar data) has the pre-process of a radar data (transformation of data format and quality control), the production of a vertical profile of reflectivity and the correction of bright-band, and the conduction of hybrid scan reflectivity. The next process (merger of 3D reflectivity) produces the 3D composite reflectivity field after correcting the quality controlled single radar reflectivity. The QPE process classifies the precipitation types using multi-sensor information and estimates quantitative precipitation using several $Z-R$ relationships which are proper for precipitation types. This process also corrects the precipitation using the AWS position with local gauge correction technique. The last process displays the final results transformed into images in the web-site. This study also estimated the accuracy of the RMQ system with five events in 2012 summer season and compared the results of the RAR (Radar-AWS Rainrate) and RMQ systems. The RMQ system (2.36 mm hr^{-1} in RMSE on average) is superior to the RAR system (8.33 mm hr^{-1} in RMSE) and improved by 73.25% in RMSE and 25.56% in correlation coefficient on average. The precipitation composite field images produced by the RMQ system are almost identical to the AWS (Automatic Weather Station) images. Therefore, the RMQ system has contributed to improve the accuracy of precipitation estimation using weather radars and operation of the RMQ system in the work field in future enables to

*Corresponding Author: Jae-Kyoung Lee, Korea Meteorological Administration, Weather Radar Center, Seoul, Korea
Phone : +82-2-2181-0831, Fax : +82-2-833-0429
E-mail : tomyroom@korea.kr

cope with the extreme weather conditions actively.

Key words: Radar-based multi-sensor quantitative precipitation estimation, Hybrid scan reflectivity, Classification of precipitation type, Local gauge correction

1. 서 론

최근 갑작스런 기상변화에 의한 기상·수문학적 피해를 최소화하기 위해 고품질·고분해능 기상관측자료의 필요성이 대두되고 있으며, 이를 위해 기상청에서는 2006년부터 고해상도의 정량적 강우정보를 제공하기 위해 레이더 기반의 정량적 강수 추정(Quantitative Precipitation Estimation, QPE) 모형인 레이더-AWS 강우강도(Radar-AWS Rainrate) 산출 시스템(이하 RAR 시스템)을 개발하여 운영하고 있다. RAR 시스템은 WPMM (Window Probability Matching Method) 이론을 기반으로 하여 강우강도를 산정하게 된다. WPMM은 지상우량계에서 관측된 강우강도와 우량계에 근접한 지점의 레이더 반사도를 각각 대응시켜 확률밀도 함수(probability density function)로 재산정하여 반사도(Z)와 강우강도(R)의 관계식인 $Z-R$ 관계식을 결정하는 방법이다(Rosenfeld *et al.*, 1993). 또한 RAR 시스템의 강수산출 정확성을 향상시키기 위하여 구간별로 $Z-R$ 관계식을 구성하는 이중분할 피팅방법(Chung *et al.*, 2007)과 RAR 시스템에서 산출된 강우량을 지상 관측소 자료와 연동하여 RAR 시스템의 강수산출 자료를 보정하는 사후처리(post-process) 방법(Cha *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013) 등이 적용되고 있다. 그러나 현업에서 운영 중인 RAR 시스템은 1.5 km CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 반사도와 강수산출 등을 수행하면서 단일편파 레이더만을 이용하므로 강수량 추정 정확성에 한계점이 존재한다.

기상청에서는 이러한 단점을 보완하여 위험기상에 대처할 수 있는 기술을 확보하기 위하여 2011년 ‘고성능 레이더자료 활용기술 개발(I)’을 통하여 ‘레이더기반 다중센서활용 강수추정 시스템(Radar-based Multi-

sensor Quantitative Precipitation Estimation System, 이하 RMQ 시스템)’을 시범운영하고 있다. RMQ 시스템은 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) NSSL (National Severe Storms Laboratory)의 NMQ (National Mosaic and Multi-sensor Quantitative Precipitation Estimation) 시스템(Zhang *et al.*, 2011)을 우리나라 환경에 적합하도록 개선한 모형으로, 단일편파 레이더로부터 얻어지는 2차원 변수 정보와 볼륨스캔(volume scan) 정보를 포함한 3차원 합성(merging)결과를 이용하여 보다 정확한 강수추정을 수행할 수 있다. 또한 RMQ 시스템에서는 레이더 자료뿐만 아니라 초단기 수치모델 결과와 여러 관측 자료 등의 다중 센서(multi-sensor) 자료를 이용하여 보다 고품질의 고해상도 레이더 기반 강수량을 생산한다.

이에 따라 본 연구는 국내 처음으로 RMQ 시스템 수행과정을 자세히 소개하고 현업에서 운영 중인 RAR 시스템과 강수추정 정확도를 비교하여 RMQ 시스템의 수행능력을 검토하였다. Table 1은 RAR 시스템과 RMQ 시스템을 비교한 표이다.

2. 레이더기반 다중센서활용 강수추정 시스템

RMQ 시스템은 크게 단일 레이더 자료 처리과정, 3차원 반사도 합성과정, 강수추정 과정, 영상 표출 과정으로 나눌 수 있으며, 이에 대한 RMQ 시스템의 전체 흐름도는 Fig. 1과 같다.

2.1 단일 레이더 자료 처리과정

이 과정은 Fig. 1에서 ‘Step#1’에 해당되며 레이더 자료의 사전 처리, 연직 반사도 프로파일(Vertical Profile of Reflectivity, VPR) 생성 및 밝은 띠 보정(Bright

Table 1. Comparison of the Radar-AWS Rainrate (RAR) calculation system and the Radar-based Multi-sensor QPE (RMQ) system.

Procedure	Radar-AWS Rainrate (RAR) system (Current operating QPE system)	Radar-based Multi-sensor QPE (RMQ) system
Quality control	· Fuzzy QC	· Neural Network
Merging	· Selection of maximum value in the overlap area	· Correction of bias of azimuth and altitude direction data
Precipitation classification	-	· Classification of five precipitation types
Precipitation estimation	· $Z-R$ relationship with the WPMM algorithm	· Four $Z-R$ relationships related to classified precipitation

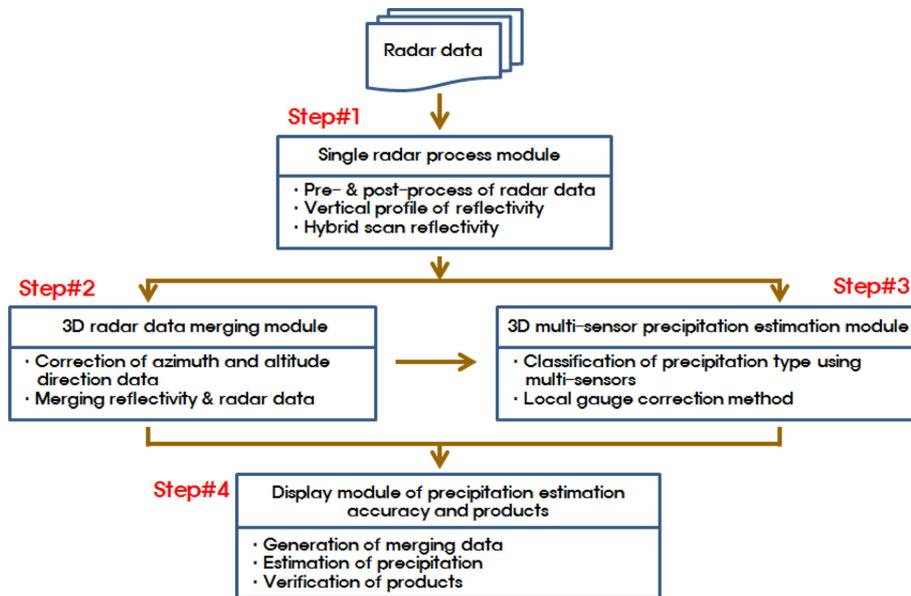


Fig. 1. An overview flowchart of the RMQ system (Korea Meteorological Administration, 2012).

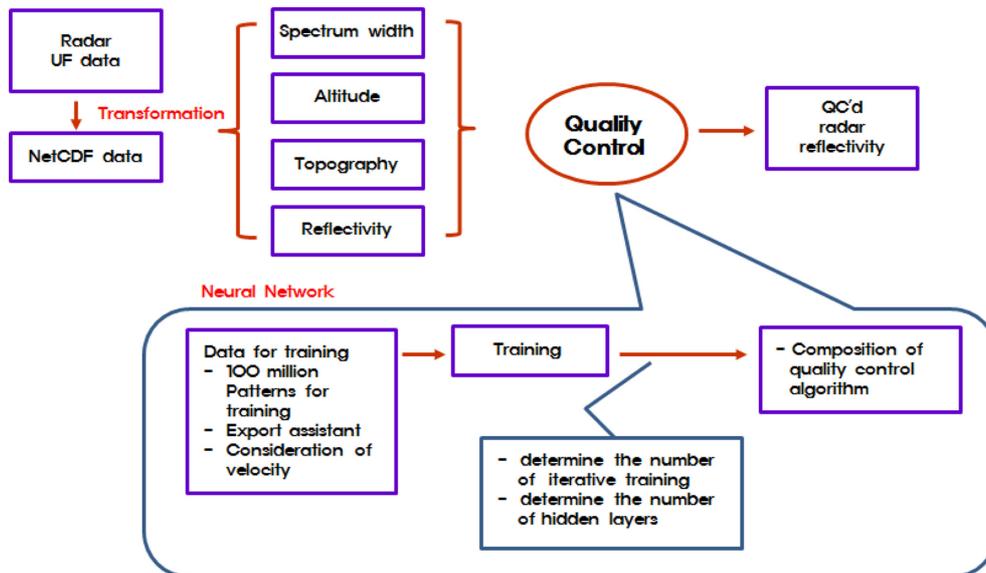


Fig. 2. A quality control procedure using the neural network technique (Korea Meteorological Administration, 2012).

Band Correction, BBC), 하이브리드 스캔 반사도 (Hybrid Scan Reflectivity, HSR) 수행으로 이루어지며, 자세한 사항은 다음과 같다(Korea Meteorological Administration, 2012).

2.1.1 레이더 자료의 사전처리

레이더 자료를 이용하기 위한 전처리 과정으로 데

이터 포맷변환(format transformation)과 품질관리 (quality control)를 수행하게 된다. 데이터 포맷변환은 기상청의 레이더 사이트에서 서버로 전송한 UF (Universal Format) 형식의 파일을 NetCDF 형식의 파일로 변환하여 이후 과정의 알고리즘 적용에 용이하도록 하는 과정이다. 레이더 사이트별 UF 자료의 생성 주기는 일반적으로 8~10분이므로, 10분마다 UF 형

식의 자료를 NetCDF 형식으로 변환한다. 다음으로 품질관리는 레이더 자료에서 지형클러터(ground clutter) 등의 비기상예코를 자동화된 과정을 통하여 제거하는 과정이다(Fig. 2). 품질관리를 위해 신경망(neural network) 기법(Lakshmanan *et al.*, 2007, 2010)을 기반으로 구성된 WDSS (Warning Decision Support System)-II의 품질관리 알고리즘(Zhang *et al.*, 2011)을 적용하였다. 레이더 반사도, 스펙트럼 폭, 지형자료 등에 대한 기상/비기상 예코의 통계적 특성을 품질관리 신경망에 입력하여 최종적으로 비기상 예코를 걸러내는 과정을 거치게 된다. 이렇게 각 레이더 사이트별로 품질관리된 자료를 이용하여 고도별 반사도 CAPPI를 생성하게 된다.

2.1.2 연직 반사도 프로파일 생성 및 밝은 띠 보정

연직 반사도 프로파일(VPR)은 레이더 볼륨관측 자료를 이용하여 임의의 방위각에서 연직으로 고도각을 상승시켜 반사도 단면을 나타낸 것을 의미한다(Lee and Ryu, 2009). VPR은 강수 유형에 따라 다르게 나타나므로, 이를 통해 추후 설명할 강수 유형 분류 단계에 적용하게 된다. 또한 VPR은 밝은 띠를 보정하는 데에도 적용되는데, 밝은 띠란 기온이 0도인 고도에서는 대기 중의 눈이 녹아 물방울처럼 보이므로 반사도 값이 크게 나타나게 되어, 반사도 영상에서 둥근 띠 모양을 이루게 되는 현상을 의미한다(Lee and Ryu, 2009). 하지만 밝은 띠는 강수량의 과다 추정 원인이 되므로 VPR를 산출하여 밝은 띠를 보정(Zhang and Qi, 2010)하게 되며, 이를 밝은 띠 보정(BBC)라고 한다.

2.1.3 하이브리드 스캔 반사도 기법

HSR 기법은 단일 레이더 자료에서 지형의 영향을 최소로 받는 최저 고도각(elevation)의 반사도 자료를 조합하여 하나로 만드는 기법이다(O'Bannon, 1997). 단일 HSR (Single HSR, SHSR)은 가장 낮은 고도각 4개의 자료를 선택적으로 합성해 만들어지며, Fig. 3은 SHSR의 합성 과정을 나타낸다. Figure 3에서 보는 바와 같이, 처음에는 가장 낮은 고도각에서 반사도를 취하게 되며, 산이나 건물 등의 장애물에 의해 차폐되어 반사도가 존재하지 않거나 품질이 낮다면 그 다음 거리부터는 바로 위 고도각의 반사도를 취하는 방법을 반복수행하게 된다. 최종적으로 4개의 가장 낮은 고도각에서 반사도 자료를 선택·조합하는 방법으로 SHSR을 만들게 된다. 모든 레이더 사이트의 SHSR이 만들어지면, HSR 합성(서로 다른 레이더의 SHSR을 합성) 과정을 수행하게 된다. HSR 합성을 위해 다음과 같은 식과 가중치를 적용하게 된다(Zhang *et al.*, 2011).

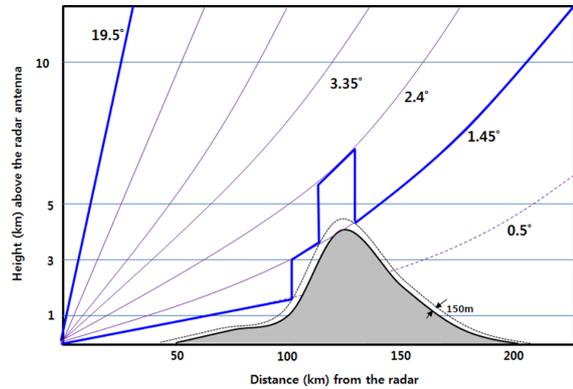


Fig. 3. A concept of the hybrid scan reflectivity method (Maddox *et al.*, 2002).

$$HSR = \left(\sum_i w_L^i \times w_H^i \times SHSR^i \right) / \left(\sum_i w_L^i \times w_H^i \right) \quad (1)$$

$$w_L = \exp(-d^2/L^2)$$

$$w_H = \exp(-h^2/L^2),$$

여기서 w 는 i 번째 레이더의 가중치, L 과 H 는 스케일 지수, d 는 레이더로부터의 거리, h 는 반사도 고도를 나타내며 본 연구에서 L 은 50 km, H = 2 km로 적용되었다.

2.2 3차원 반사도 합성과정

사전처리 단계에서 품질관리된 각 레이더 사이트별 자료는 3차원 격자 공간과 빔의 각도 차이, 거리와 시간 차이를 보정하고 이러한 과정을 통해 얻은 가중치를 이용해 각 레이더 사이트의 반사도별 가중평균을 구해 3차원 반사도 합성 자료를 생성한다(Fig. 1의 Step#2). 레이더 자료는 거리, 방위각, 고도각으로 이루어진 좌표계이므로 이를 위도와 경도로 이루어진 위경도 좌표계로 바꾸어야 한다. 좌표계 변환을 위해 아래 식을 이용한다(Korea Meteorological Administration, 2012).

$$h_g = \sqrt{\{r^2 + (R + h_r)^2 + 2r(R + h_r)\sin e\}} - R \quad (2)$$

$$a_g = \arcsin(\cos(s/R)\sin a_r + \sin(s/R)\cos a_r \times \cos e)$$

$$\beta_g = \arcsin(\sin a_r \times \sin(s/R)/\cos a_g) + \beta_r$$

$$\sin(s/R) = r \cos e / (R + h_g - h_r);$$

$$\cos(s/R) = \sqrt{1 - \sin^2(s/R)},$$

여기서 h_g 는 고도, a_g 는 위도, β_g 는 경도, h_r 는 레이더 지점의 고도, a_r 는 레이더 지점의 위도, β_r 는 레이더 지점의 경도, R 은 지구의 반지름, a 는 방위각, e 는 고도각, s 는 지구 곡면을 따라가며 켜 거리, r 은 레이더로부터 물체까지의 직선거리이다. 또한 임의의 중첩

되는 단위 공간(voxel)에서 각 레이더 사이트별로 관측한 반사도의 합성은 다음과 같은 방법으로 구하게 된다.

$$Z_{com} = \sum_i Z_i \delta_i / \sum_i \delta_i, \quad (3)$$

여기서 Z_{com} 은 합성반사도, Z_i 는 i 번째 레이더 사이트에서 관측한 반사도, δ_i 는 i 번째 레이더 사이트의 반사도에 대한 가중치이며, 가중치는 거리와 시간차의 함수이다.

이 단계에서는 반사도뿐만 아니라 레이더 볼륨관측 자료의 각 열에 존재하는 누적된 수증기량을 나타내는 연직적분 액체수함량(Vertically Integrated Liquid, VIL)과 연직적분 액체수함량 밀도(VIL Density, VILD)도 구한다. 이 두 자료 모두 다음과정인 강수유형 분류에 적용된다.

2.3 강수추정 과정

본 단계는 Fig. 1의 Step#3에 해당하며, 크게 세 가지로 나뉜다. 우선 강수유형을 분류하고, 다음으로 분류된 강수유형에 따라 강수량을 추정하며, 마지막으로 강수량을 보정하는 과정을 거친다.

2.3.1 강수유형 분류

강수유형 분류에서는 전단계에서 산출된 합성 반사도 CAPPI, VIL, VILD, VPR, HSR 반사도 등과 지상 관측자료 및 수치예보모델의 자료를 이용하여 강수유형을 분류한다. 관측자료인 지면 온도, 지면 습구온도 등은 AWS (Automatic Weather Station)로부터 구하며, 낙뢰발생 관측자료도 사용한다. 고도별 온도자료는 기상청 동네예보의 기반이 되는 KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System) 초단기예보모델 분석 자료에서 취득하여 영하 10의 고도를 구하며, 이는 강수유형 분류의 기준 중 하나가 된다. 또한 10분 단위(레이더 자료 산출 주기 기준)로 수행되는 레이더자료 처리 프로세스와 입력 자료로 사용되는 KLAPS, AWS 등의 자료 생성 주기와 공간 해상도가 다르므로, 레이더 자료를 기준으로 시간(10분)과 공간 해상도(1 × 1 km)가 일치하도록 가공하여 사용한다. RMQ 시스템에서는 강수 유형을 눈(snow), 우박(hail), 열대형(warm), 층상형(stratiform), 대류형(convective)의 5가지로 분류하며, 강수유형 분류에 대한 흐름도는 Fig. 4와 같다 (Xu *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008).

2.3.2 레이더 강수량 추정

강수량 추정단계에서는 HSR 자료로부터 픽셀별 반사도 Z (dBZ)를 읽어 강수유형 분류에 따라 해당되는 Z - R 관계식에 대입하여 시간당 강수량 R (mm hr⁻¹)

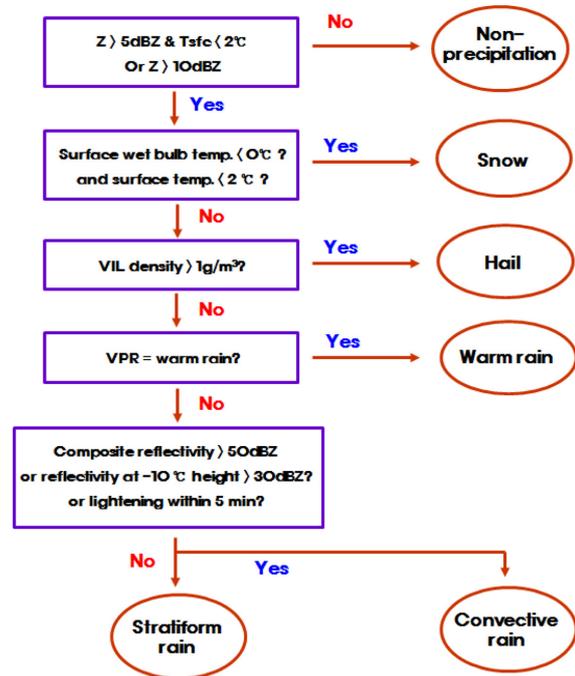


Fig. 4. A flowchart of the precipitation classification method (Zhang *et al.*, 2011).

을 구하게 된다. 누적 강수량은 시간당 강수량을 시간에 대해 적분하여 추정하게 된다. 각 강수유형별 적용되는 Z - R 관계식은 아래와 같으며, 강수량 추정에서 우박에 대한 Z - R 관계식은 제외한다(Zhang *et al.*, 2011).

대류형 강수(convective rain)

$$(Fulton *et al.*, 1998): Z = 300R^{1.4} \quad (4)$$

층상형 강수(stratiform rain)

$$(Marshall *et al.*, 1955): Z = 200R^{1.6}$$

열대형 강수(warm rain)

$$(Rosenfeld *et al.*, 1993): Z = 230R^{1.25}$$

지상에서의 눈(snow at the surface)

$$(Radar operations center, 1999): Z = 75R^{2.0}$$

2.3.3 지상 우량계를 이용한 강수량 보정

본 단계에서는 추정된 강수량을 지상우량계(AWS)를 이용하여 보정하는 기법인 국지우량계보정(Local Gauge Correction, LGC)(Ware, 2005) 기법을 적용하였다. LGC 기법은 역거리가중법(inverse distance weight)을 개선한 방법으로 AWS에서 관측된 강수와 레이더로부터 산출된 강수의 오차에 가중치를 적용하게 되며, 가중치는 관측하는 레이더와 관측반경 안에

존재하는 AWS의 거리에 따라 가중치를 추정한다. LGC 기법을 이용하여 강수량을 보정하는 과정은 다음과 같다.

레이더 반경 안의 어떤 지점(혹은 픽셀) i 에서 보정된 강수량 추정치를 r_{LGC} , 강수량 추정치를 r , 추정된 레이더오차를 R_e 라고 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$1\text{단계: } r_{LGC} = r - R_e = r_{LGC}(b, D). \tag{5}$$

다음으로 r_{LGC} 와 AWS 관측강수 g_i 의 차이를 E_i 로 정의하면 식 (6)과 같으며, E_i 역시 b 와 D 의 함수이다.

$$2\text{단계: } E_i = r_{LGC} - g_i = E_i(b, D). \tag{6}$$

오차 E_i 에 대한 MSE (Mean Square Error)는 식 (7)과 같으며, MSE 역시 b 와 D 의 함수이다. 반복수행을 통하여 MSE가 최소가 되는 b 와 D 를 찾게 되며, 이를 이용하여 최종적인 강수량 추정치 r_{LGC} 를 사용하게 된다.

$$3\text{단계: } MSE = \sum_i E_i^2/n = MSE(b, D). \tag{7}$$

특히, 식 (5)에서 R_e 계산하기 위하여 가중치가 적용되며, 식 (8)과 같다.

$$R_e = \sum_{j=1}^n e_j w_j / \sum_{j=1}^n w_j \tag{8}$$

조건1) AWS 수가 충분한 경우, $w_j = (\text{if } d_j \leq D)$ 혹은 0 (if $d_j > D$)

조건2) AWS 수가 충분하지 않은 경우,

$$\alpha = \sum_{j=1}^n \exp[-d_j^2/(D/2)^2]$$

$$w_j = \alpha \cdot 1/d_j^b \text{ (if } d_j = D) \text{ 혹은 } 0 \text{ (if } d_j > D),$$

여기서 R_e 는 추정된 레이더 가중평균 오차, e 는 AWS의 관측강수(g_i)와 레이더로부터 추정된 강수(r_i)의 오차, w 는 오차의 가중치, j 는 해당되는 AWS의 수, n 은 레이더 관측반경 내에 존재하는 AWS의 수, d 는 AWS와 레이더 픽셀의 거리, D 는 레이더의 영향반경, b 는 d 의 가중치, α 는 영향계수이다. α 값이 1보다 크다면 강우보정을 위한 AWS의 수가 충분한 것이며, α 값이 1보다 작다면 강우보정을 위한 AWS의 수가 불충

분하다는 의미이기 때문에 가중치에 영향계수 α 를 곱하여 수정된 가중치를 적용하게 된다.

식 (5)~식 (7)까지의 과정이 끝나면 주변 예상 오차와 큰 차이를 보이는 우량계를 제외하는 우량계 품질관리 과정을 거치게 된다. 전체 우량계 중 10%의 우량계가 제외되면 과정이 멈추게 되며, 이 때 산출되는 r_{LGC} 는 LGC 기법을 적용한 보정된 레이더 강수량이다. 또한 지상 우량계를 중심으로 반경 10 km 이내의 픽셀에 대해 구해진 오차(R_e)와 AWS 관측강수(g_i)의 오차(E_i)의 차이가 5 mm 이하인 픽셀의 개수가 전체 격자수의 25% 미만인 우량계에 대해 ‘이상(abnormal)’ 우량계로 지정하여 사용하지 않았다. ‘이상’ 우량계를 제외한 나머지 자료를 바탕으로 앞에서 설명한 강수량 보정 과정을 다시 수행하게 된다. 위의 과정을 4회 반복수행한 후 최종적으로 강수량 보정 과정이 종료되나 ‘이상’ 우량계의 비율이 7%가 넘어도 강수량 보정 과정이 멈추게 된다.

2.4 영상 표출 과정

마지막으로 영상 표출 과정(Fig. 1의 Step#4)은 전 과정에서 처리한 레이더 자료를 사용자에게 제공하기 위해서 영상 파일로 변환하고 변환된 자료를 웹 페이지에 표출하는 과정이다. 각 레이더 사이트에서 생성된 자료, 품질관리 과정을 거친 레이더 자료, 각 레이더 사이트별 CAPPI, 합성 CAPPI, HSR, 강수유형 분류, 강수량 추정, LGC 적용 등의 각 과정별 산출결과들은 png 형식으로 파일로 변환되어 해당 웹 페이지에 표출된다. 이외에도 6시간 누적 강수량, 12시간 누적 강수량, 강수량 추정 검증 결과도 표출하고 있다(Korea Meteorological Administration, 2012).

3. 레이더기반 다중센서활용 강수추정시스템의 검증

3.1 기본사항

본 연구에서 RMQ 시스템의 검증을 위한 적용지역으로 우리나라 전역을 대상으로 하였으며, 적용기간은 2012년 6월부터 8월까지의 강우발생 사례 중 5개의 사례를 선정하였다(Table 2 참조). RMQ 시스템의

Table 2. Description of rainfall events in 2012 summer season.

Event	Period	Type
1	2012.06.08. 0600~2012.06.08. 1900 LST	Low pressure
2	2012.06.15. 0500~2012.06.16. 0400 LST	Front
3	2012.07.14. 0800~2012.07.15. 1500 LST	Front
4	2012.08.14. 1700~2012.08.16. 2300 LST	Low pressure
5	2012.08.29. 1500~2012.08.30. 2300 LST	Typhoon

Table 3. Input data of the RAR and RMQ system.

Input		Data	Production cycle	Type	Note
RAR	RMQ				
O	O	AWS	every 1 minute	Text	642 sites
	O	KLAPS	every 1 hour	Grib	KMA* model
	O	Lightening	when it occurs	Text	21 sites
O	O	Radar	every 8~10 minute	UF	11 sites

* KMA: Korea Meteorological Administration.

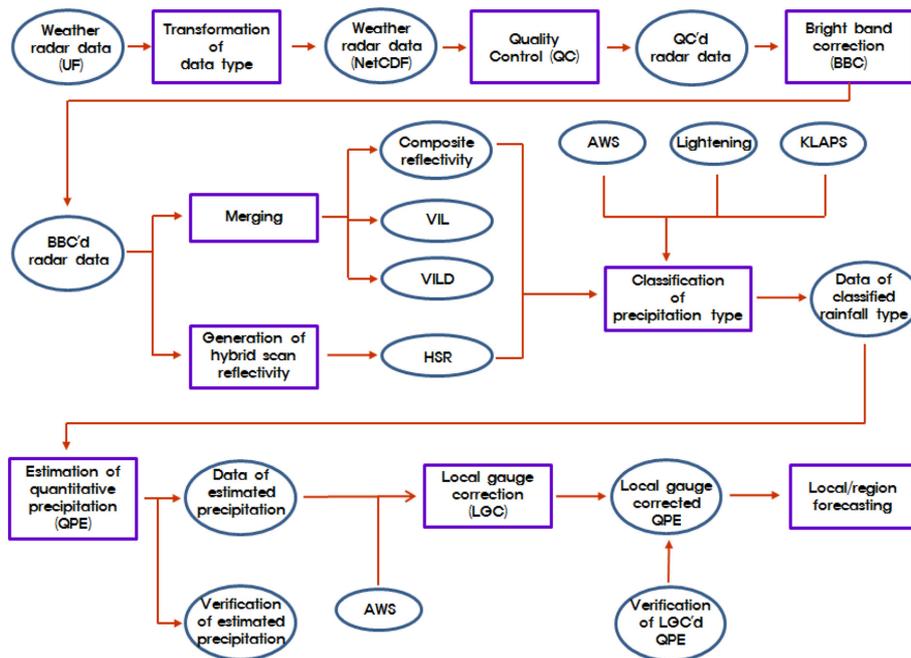


Fig. 5. A flowchart of the RMQ data processing (Korea Meteorological Administration, 2012).

입력자료는 AWS 관측강수량(전국 642개소), KLAPS의 온도자료, 뇌우자료(전국 21개소), 레이더 반사도자료(전국 11개 사이트: 백령도, 관악산, 오성산, 진도, 고산, 광덕산, 강릉, 면봉산, 구덕산, 성산, 인천)이다. Table 3은 RAR 시스템과 RMQ 시스템의 입력자료를 비교하였다.

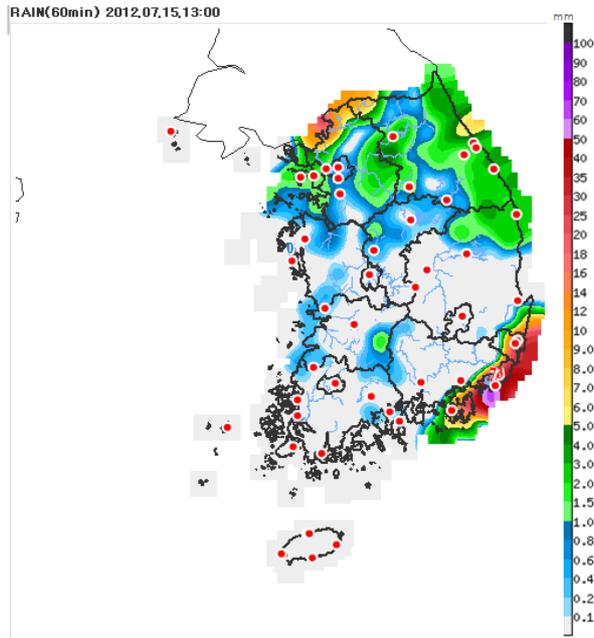
본 장에서는 2012년 여름사례 중 선정된 사례에 대하여 RMQ 시스템의 결과를 단계별로 나누어 분석하였다. 다음으로 RMQ 시스템의 강수량 추정 정확성과 개선정도를 평가하기 위해 RAR 시스템의 결과와 비교하였다. RMQ와 RAR 시스템의 강수량 추정 정확성을 검증하기 위해 평가지수로서 제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 상관계수(correlation coefficient)를 이용하였으며, 시각적인 검증을 위해 RMQ와 RAR 시스템에서 생산되는 전국 강수분포 표

출 영상을 AWS의 전국 관측 강수분포 영상과 비교·분석하였다.

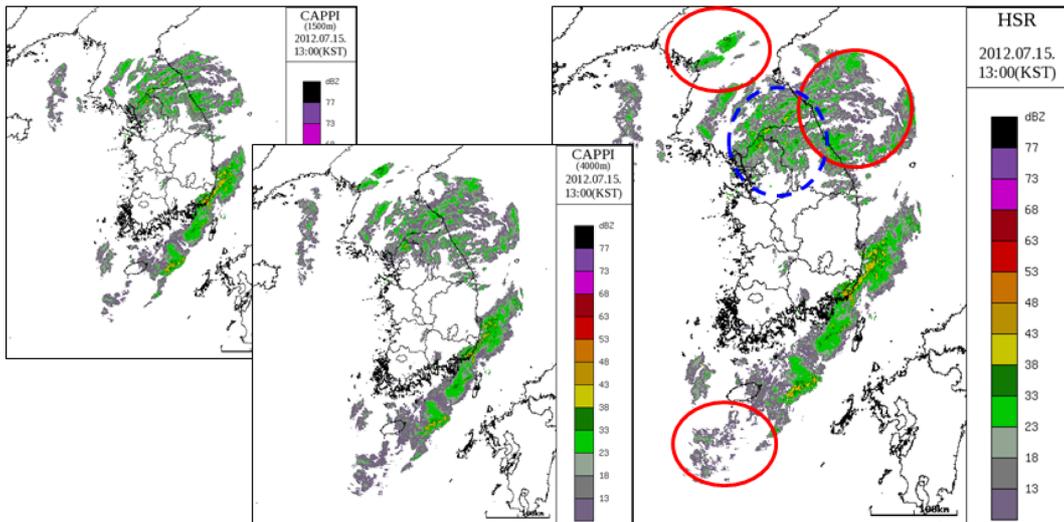
3.2 RMQ 시스템의 적용

본 연구에서는 레이더 자료 입력, 자료변환, 품질관리, HSR, 3D 합성, 강수유형분류, 강수산출, 최종적으로 강수보정 단계(Fig. 5 참조)까지 여름철 사례에 대하여 수행하였으며, 우선 2012년 7월 15일에 발생한 강수사례(사례#3)에 대하여 각 단계별 주요 결과에 대하여 살펴보았다. 이 사례는 남해상에 위치한 장마전선으로 인하여 전국적으로 많은 강우가 발생하였고, 특히 부산지역에 누적강수 최고 260 mm가 발생한 사례이다. Figure 6(a)는 2012년 7월 15일 13시 1시간 누적 강수량 분포이다.

RMQ 시스템에서는 고도별 반사도 CAPPI 영상과



(a) Precipitation composite image of AWS.

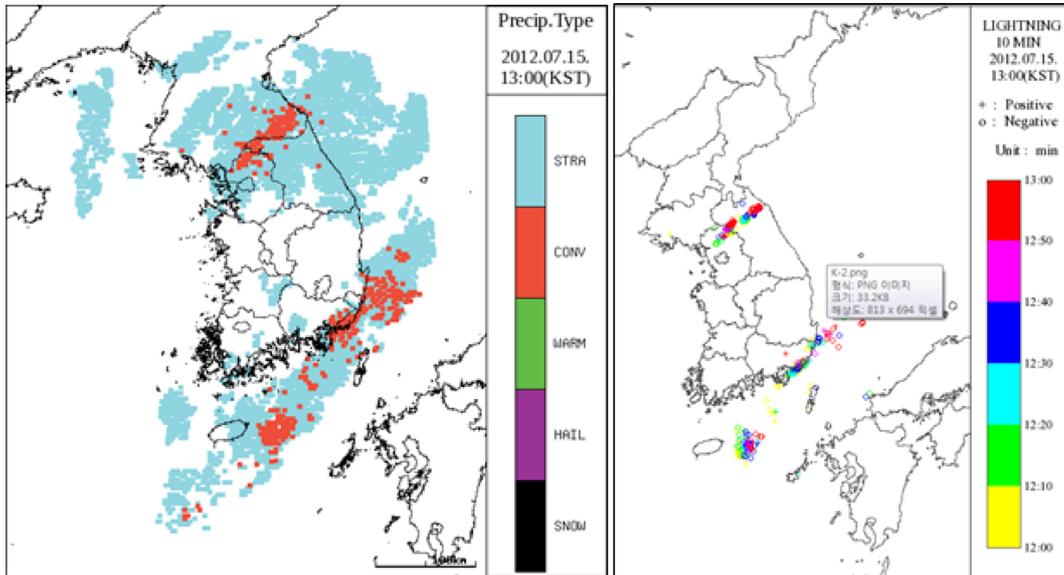


(b) 1.5 km altitude reflectivity CAPPI image (left-upper), 4.0 km altitude reflectivity CAPPI image (left-middle), and HSR reflectivity image (right) from the RMQ system.

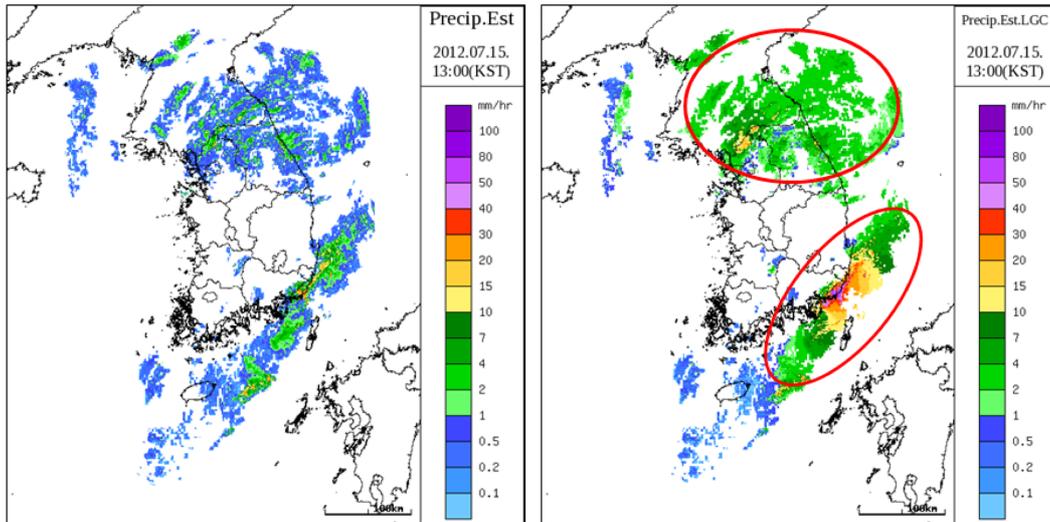
Fig. 6. Simulation results of the RMQ system in Event#3 (1300 LST on 15 July in 2012).

HSR 반사도 영상을 산출한다. Figure 6(b)는 1.5 km 와 4.0 km 반사도 CAPPI와 HSR 반사도 영상을 나타 낸다. 우선 1.5 km CAPPI와 HSR 반사도 영상을 비 교하면, 1.5 km CAPPI 영상에서는 평안도 지역과 동 해상 동북부 지역의 반사도(빨간 원)가 잘 나타나지 않으나 HSR 영상에서는 반사도가 넓은 영역에서 강

하게 나타난다. 이러한 원인을 살펴보면, 1.5 km CAPPI 영상에서는 지형클러터(ground clutter)의 영향으로 반 사도가 차폐되나 4.0 km CAPPI 영상에서는 지형클러 터에 의한 차폐영향이 작아 빨간 원 영역에서 반사도 가 강하게 표출된다. 하지만 고도상승의 영향으로 4.0 km CAPPI 영상은 경기북부와 강원도 지역(파란점선



(c) Classification of precipitation type from the RMQ system (left) and lightning image (right): blue color represents stratiform rainfalls and red color represents convective rainfalls. the area of convective rainfalls is identical to the lightning.



(d) QPE image of the RMQ system before (left) and after (right) the LGC technique: red circles represents corrected rainfalls with the LGC technique.

Fig. 6. Continued.

원 영역)에서 1.5 km CAPPI와 HSR 영상보다 반사도가 약하게 나타난다. 즉, 고도가 낮으면 반사도는 강하지만 지형클러터에 의한 차폐영역이 나타나며, 고도가 높으면 지형클러터에 의한 차폐영향은 감소하나 반사도가 약해지는 단점이 있다. RMQ 시스템에서는 HSR을 적용함으로써 고도별 CAPPI 영상에서 발생하

는 단점들을 보완하여 지형클러터에 의한 차폐영향 없이 레이더 반사도를 잘 나타내고 있다.

다음으로 강수유형 분류를 수행하게 된다. Figure 6(c)는 2012년 7월 15일 1300 LST 사례의 강수유형 분류 결과와 낙뢰 영상을 나타낸다. 장마전선에 의해 집중호우가 발생한 경기와 강원도 북부지방, 남

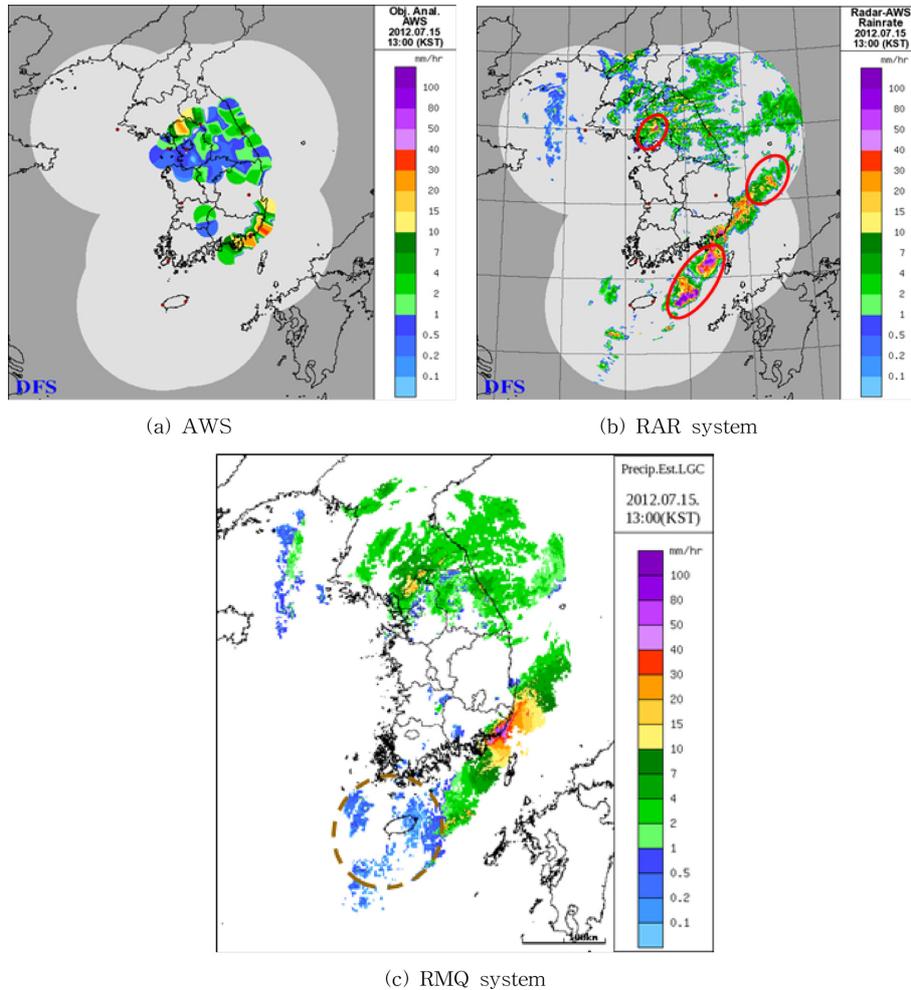
Table 4. Comparison of the RAR and RMQ system accuracy.

Event	RAR	RMQ	Improvement ratio (%)	
	RMSE (mm hr ⁻¹)	RMSE (mm hr ⁻¹)	RMSE	Correlation
1	6.36	1.29	79.67	1.78
2	2.75	0.62	77.37	7.38
3	8.59	3.58	58.30	21.41
4	13.76	5.03	63.47	47.71
5	10.19	1.28	87.44	49.54
Average	8.33	2.36	73.25	25.56

해상과 제주도 동쪽 해상 지역에는 반사도가 50 dBZ 이하이나 낙뢰가 발생하여 대류형(convective) 강우

가, 다른 지역에서는 층상형(stratiform) 강우가 발생하였다.

마지막으로 강수량을 추정하게 된다. 또한 AWS 관측 강수량을 이용하여 추정된 강수량을 보정하는 과정을 거치게 되며, 보정 전과 후의 추정 강수량 영상은 Fig. 6(d)와 같다. RMQ 시스템에 의해 추정된 강수량인 Fig. 6(d) 왼쪽 영상은 Fig. 6(b)의 RMQ 시스템 반사도 분포와 잘 일치한다. 그러나 이를 LGC 기법을 이용하여 보정한 결과[Fig. 6(d) 오른쪽 영상], 전체적으로 강수량이 증가하였으며, 특히 강수량 가장 많았던 부산지역을 중심으로 강수량이 상대적으로 강하게 표출되고 있어 AWS 관측 강수 영상과 가장 잘 일치한다. 따라서 약하게 추정되었던 강수량이 LGC 기법을 적용함으로써 지상 관측자료에 의해 보정되었음을 알 수 있다.

**Fig. 7.** Comparison of precipitation composite images of the AWS, RAR, and RMQ system in Event#3.

3.3 RMQ 시스템의 정확성 평가

본 연구에서는 RMQ 시스템의 정확성과 개선정도를 평가하기 위하여 기존 기상청에서 운영 중인 RAR 시스템의 결과와 비교하였다. 비교사례는 2012년 여름철 사례 중 대표 5개 사례를 선정하였으며, 결과는 Table 4 및 Fig. 7과 같다.

Table 4를 살펴보면, 지상 관측자료와 RAR 시스템 추정 강수량의 평균 RMSE는 8.33 mm hr^{-1} (최소 2.75 mm hr^{-1} 에서 최대 13.76 mm hr^{-1}), RMQ 시스템 추정 강수량의 평균 RMSE는 2.36 mm hr^{-1} (최소 0.62 mm hr^{-1} 에서 최대 5.03 mm hr^{-1})으로 RMQ 시스템의 강수량 추정 정확성이 RAR 시스템에 비하여 상대적으로 우수하였다. 사례별로 보면, RMQ 시스템이 RAR 시스템에 비해 RMSE에서는 58.30%부터 최대 87.44%까지 평균 73.25% 향상되었으며, 상관계수에서는 최소 1.78%부터 최대 49.54%까지 평균 25.56% 정확성이 향상되었다. Figure 7은 사례#3(2012. 7. 15. 1300 LST)에 대하여 AWS, RAR 시스템, RMQ 시스템의 전국 강우 합성장 분포이다. Figure 7을 보면, RAR 시스템의 강우 영상의 남해상 영역(빨간 원)에서 AWS 관측강수보다 다소 과대추정(overestimation)되고 있다. AWS 영상이 해상부분까지 나타나지는 않으나 해안을 따라 발생한 강수만 보면, RAR 시스템의 산출 강수량이 AWS보다 최대 10 mm hr^{-1} 이상 강하게 나타나고 있다. 또한 수도권 부근의 강수도 RAR 시스템이 AWS에 비해 최대 20 mm hr^{-1} 이상 강하게 표출된다. 이에 반해 RMQ 시스템의 강수는 남해상 부근뿐만 아니라 수도권 영역에서도 상대적으로 AWS 관측 강수에 가깝게 나타난다. 또한 제주도 동해상 부근의 강우 영상에서는 RMQ 시스템이 RAR 시스템에서 과소 추정하는 강우에코도 나타내고 있으며, 제주도 서해상 부근에서는 RAR 시스템이 RMQ 시스템보다 강우를 과대추정하고 있다.

따라서 단일편파 레이더로부터 얻은 2차원 반사도 합성장을 이용하여 강수를 산출하는 RAR 시스템보다 HSR, 3차원 반사도 합성, 다양한 관측변수 등을 이용하고 강수유형에 따라 적합한 강수추정식을 적용한 RMQ 시스템의 강수추정 정확성이 기존 RAR 시스템보다 정량적으로 향상된 결과를 나타냈다. 이는 RMQ 시스템을 적용함으로써 보다 정확한 강우 추정이 가능함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 NSSL의 NMQ 시스템을 우리나라 기상환경에 적합하도록 개선한 RMQ 시스템에 대하여 소개하고 수행능력을 검증하였다. RMQ 시스템은 크게 단일 레이더 자료 처리과정, 3차원 반사도 합성

과정, 강수추정 과정, 영상 표출 과정으로 구성된다. 레이더 자료 처리과정에서는 레이더 자료의 사전 처리(데이터 포맷변환과 품질관리), VPR 생성 및 BBC 수행, HSR 수행으로 이루어진다. 3차원 반사도 합성 과정에서는 품질관리된 각 레이더 사이트별 자료는 3차원 격자 공간과 빔의 각도 차이, 거리 및 시간 간격을 보정하여 3차원 반사도 합성 자료를 생성한다. 다음으로 강수추정 과정에서는 합성 CAPPI, VIL, VILD, VPR, HSR 등과 지상 관측자료 및 수치예보모델의 자료를 이용하여 강수유형을 분류한다. 분류된 강수유형(대류, 층상, 열대, 지상에서의 눈)에 적합한 Z-R 관계식을 적용하여 강수량을 추정한다. 또한 AWS 지상 관측소 자료를 기반으로 레이더 강수량을 보정하는 LGC 기법을 이용하여 추정된 강수량을 보정하게 된다. 마지막으로 영상 표출 과정은 처리된 레이더 자료를 사용자에게 제공하기 위해서 영상 파일로 변환하여 웹 페이지에 표출하는 과정이며, 반사도부터 최종 강우 검증 결과까지 각 단계별 결과를 영상으로 표출하게 된다.

본 연구에서 우선 2012년 7월 15일 발생한 강수사례에 대하여 각 단계별 주요 결과를 살펴보았다. HSR 기법에 의하여 지형클러터에 의해 차폐되던 단점이 보완되었으며, 낙뢰발생 영역에 따른 강수유형이 잘 분류되었다. 또한 LGC 방법에 의해 강수가 보정되어 RMQ 시스템 산출 강수가 AWS 관측 강수분포에 가깝게 나타남을 확인하였다. 다음으로 우리나라 전역을 대상으로 2012년 여름철에 발생한 저기압, 장마, 태풍 등 5개 강우사례에 대하여 RMQ 시스템의 강수추정 정확성을 검증하였다. 또한 그 결과를 기상청 현업 운영 중인 RAR 시스템과 비교하였다. 강수추정 결과를 보면, RMQ 시스템이 RAR 시스템보다 RMSE와 상관계수가 각각 평균 73.25%와 25.56% 향상되어 강수추정 정확성이 상대적으로 우수하였다. 또한 강우합성장 비교에서도 RMQ 시스템에서 추정된 강우가 AWS 관측 강수에 더 가깝게 분포함을 확인하였다.

따라서 RMQ 시스템을 이 기존 RAR 시스템보다 정확한 강수추정이 가능함을 보였으며, 향후 현업에서 RMQ 시스템이 운영이 된다면 위험기상의 실황감시와 예측 정확도가 향상될 것으로 기대된다. 그러나 RMQ 시스템에서 강수보정 수행시간 최적화, RMQ 시스템에 활용가능한 관측자료 확장, 각 단계별로 선택적 결과물 산출에 의한 RMQ 수행시간 단축, 이중편파 레이더의 적용가능성 등 향후 연구를 통하여 개선되어야 할 사항으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상레이더센터 2014년도 R&D

연구개발사업 “범부처 융합 이중편파레이더 활용 기술개발(WRC-2013-A-1)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cha, J.-W., J.-K. Lee, H.-S. Park, J.-S. Park, and K.-H. Kim, 2013: Improvement of the Radar-AWS Rain-rate calculation system using the Local Gauge Correction (LGC) method. *Proceedings of the 2013 Spring Meeting of Korea Meteorological Society*, 104-105.
- Chung, C.-K., M.-K. Suk, H.-K. Kim, K.-H. Jang, and Y.-J. Choi, 2007: Improvement of the Radar-AWS Rain-rate calculation system using the dual fit method, *Proceedings of the 2007 Autumn Meeting of Korea Meteorological Society*, 114-115
- Fulton, R. A., J. P. Breidenbach, D.-J. Seo, D. Miller, and T. O'Bannon, 1998: The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea. Forecasting*, **13**, 377-395.
- Korea Meteorological Administration, 2012: Development of radar-based multi-sensors quantitative precipitation estimation technical report. Weather Radar Center.
- Lakshmanan, V., J. Zhang, and K. Howard, 2010: A technique to censor biological echoes in weather radar images. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 453-462.
- _____, A. Fritz, T. Smith, K. Hondl, and G. J. Stumpf, 2007: An automated technique to quality control radar reflectivity data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 288-305.
- Lee, J.-K., J.-W. Cha, D.-S. Kim, and J.-S. Park, 2013: Accuracy estimation of the radar rainfall using local gauge correction method, *Proceeding of the 2013 Korea Society of Civil Engineers*, 1757-1760.
- Lee, J.-H., and C.-S. Ryu, 2009: *Radar meteorology*. Sigma Press, 101 pp.
- Maddox, R., J. Zhang, J. J. Gourley, and K. Howard, 2002: Weather radar coverage over the contiguous United States. *Wea. Forecasting*, **17**, 927-934.
- Marshall, J. S., W. Hirschfeld, and K. L. S. Gunn, 1955: Advances in radar weather. *Adv. Geophys.*, **2**, 1-56.
- O'Bannon, T. 1997: Using a 'terrain-based' hybrid scan to improve WSR-88D precipitation estimates. *Proceeding of 28th Conference on Radar Meteorology, Austin, TX, American Meteorology*, 506-507.
- Radar operation center, 1999: Guidance on selecting Z-R relationships. Radar operation center.
- Rosenfeld, D., D. B. Wolff, and E. Amitai, 1994: The window probability matching method for rainfall measurements with radar. *J. Appl. Meteorology*, **33**, 682-693.
- _____, D. B. Wolff, and D. Atlas, 1993: General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate. *Journal of Applied Meteorol.*, **32**, 50-72.
- Ware, E. C., 2005: Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data. M. S. thesis, Cornell University.
- Xu, X., J. Howard, and J. Zhang, 2008: An automated radar technique for the identification of tropical precipitation. *J. Hydrometeor.*, **9**, 885-902.
- Zhang, J., and Y. Qi, 2010: A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar derived precipitation estimation. *J. Hydrometeor.*, **11**, 1157-1171.
- _____, C. Langston, and K. Howard, 2008: Brightband identification based on vertical profiles of reflectivity from the WSR-88D. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 1859-1872.
- _____, and Coauthors, 2011: National mosaic and multi-sensor QPE(NMQ) system: Description, results, and future plans. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 1321-1338.