

ORIGINAL ARTICLE

국지 우량계 보정 방법의 개선에 관한 연구

김광호 · 김민성 · 서성운 · 김박사¹⁾ · 강동환¹⁾ · 권병혁*

부경대학교 환경대기학과, ¹⁾부경대학교 지구과학연구소

A Study on the Improvement in Local Gauge Correction Method

Kwang-Ho Kim, Min-Seong Kim, Seong-Woon Seo, Park-Sa Kim¹⁾,
Dong-Hwan Kang¹⁾, Byung-Hyuk Kwon*

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

¹⁾Geo-Sciences Institute, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Abstract

Spatial distribution of precipitation has been estimated based on the local gauge correction (LGC) with a fixed inverse distance weighting (IDW), which is not optimized in taking effective radius into account depending on the radar error. We developed an algorithm, improved local gauge correction (ILGC) which eliminates outlier in radar rainrate errors and optimize distance power for IDW. ILGC was statistically examined the hourly cumulated precipitation from weather for the heavy rain events. Adjusted radar rainfall from ILGC is improved to 50% compared with unadjusted radar rainfall. The accuracy of ILGC is higher to 7% than that of LGC, which resulted from a positive effect of the optimal algorithm on the adjustment of quantitative precipitation estimation from weather radar.

Key words : Local gauge correction, Weather radar, Rain gauge, Variogram, Quantitative precipitation estimation

1. 서 론

우리나라는 지형적인 특성에 의해 여름철 돌발적인 국지성 집중호우가 빈번하게 발생하고, 이에 따른 인명 피해와 더불어 경제적 손실도 크게 발생한다. 여름철 돌발성 집중호우에 대한 수재해를 예방하기 위해서는 정량적인 강우량 관측 및 예측이 요구된다. 기상청은 전국에 642 개의 우량계를 이용하여 지상 강우정보를 1분 간격으로 직접 관측하고 있다. 그러나 지리적 접근성이 떨어지는 산악지역은 우량계를 이용한 직접 관측이 어렵기 때문에 정량적으로 정확한 수문 정보를 제공하는 것

이 어렵다. 또한, 우량계의 강우량은 관측 지점에 강풍이 발생할 경우 과소 추정되는 경우도 발생한다(Crum과 Alberty, 1993; Groisman과 Legates, 1994; Hunter, 1996).

기상레이더는 수십 km부터 수백 km까지의 넓은 영역에 대하여 높은 시공간 해상도로 강우 정보를 제공하기 때문에 우량계가 설치되지 않은 미관측 지점에 대한 강우 정보도 획득할 수 있다. 기상레이더는 우량계처럼 지상의 강우량을 직접 측정하지 않고 대기 중 강수입자에 대한 레이더 반사도와 지상 우량계의 상관성을 통해서 지상의 강우를 추정한다. 기상레이더의 강우강도는

Received 10 February, 2015; Revised 14 April, 2015;

Accepted 15 April, 2015

*Corresponding author: Byung Hyuk Kwon, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Phone: +82-51-629-6644

E-mail: bhkwon@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

레이더 반사도(Z)와 강우강도(R)의 R-Z 관계식으로 강우를 추정하기 때문에, 강우 추정에 불확실성을 내포하고 있으며(Jung과 Lee, 2010), 레이더 보정 오차(calibration error), 밝은띠(bright band)에 의한 오염, 거리에 따른 빔폭의 증가, 젖은 레이더돔 및 강우에 의한 감쇠(attenuation) 등에 의하여 강우추정 오차가 발생한다. 특히, 집중호우 사례에 대하여 기상청의 레이더는 음의 반사도 보정오차에 의해 전반적으로 과소추정되는 경향을 보인다(Park과 Lee, 2010).

이와 같은 우량계와 기상레이더가 지닌 각각의 한계를 극복하기 위하여 지상 우량계를 이용한 레이더 강우강도 조정 연구가 수행되었다. 전체 관측영역에서 지상 우량계 강우강도와 레이더 강우강도의 보정계수를 계산하여 레이더 강우강도를 조정하는 MFB (Mean Field Bias) 방법이 수행되었으며(Smith와 Krajewski, 1991; Seo 등, 1999), 레이더와 우량계 자료를 칼만필터(Kalman filter) 방법과 공동크리깅(co-kriging) 방법에 적용하여 조정한 연구도 수행되었다(Chumchean 등, 2006; Kim 등, 2013). 국지우량계보정(Local Gauge Correction, LGC) 방법은 각각의 우량계 지점에서의 오차 특성을 반영하여 레이더 강우강도를 조정하는 방법이다(Ware, 2005). 지구통계학은 시공간적으로 분포하는 물리적인 자료를 수집 및 정리하여 이를 해석함으로써 신뢰성 있는 결론을 도출하는 통계학의 한 분야이다. Kim 등 (2014)은 IDW에 적용되는 유효반경의 값을 지구통계학적 방법으로부터 레이더 강우강도 오차의 공간적인 상관성을 반영하여 LGC 방법을 개선하였다. 이와 같은 LGC 방법은 본 연구에서 KLGC로 명시하였다. 레이더의 실

제오차를 대표하는 유효반경을 단순하게 반복법을 통해서 산출함으로써 LGC 방법 내에 레이더 실제오차의 공간적인 상관성을 전혀 반영하지 못하는 문제를 해결한 것이다.

본 연구에서는 Kim 등 (2014)의 KLGC를 역거리 가중치 차수의 최적화 알고리즘과 레이더 강우강도 오차의 이상치 제거 알고리즘을 추가하여 개선된 LGC 방법(ILGC)을 개발하였다. 레이더 강우강도 조정에 대한 ILGC의 성능은 집중호우 기간 동안 우량계 강우강도와 KLGC의 레이더 강우강도를 기준으로 통계적인 방법을 통해서 정량적으로 검증하였다.

2. 자료

2.1. 레이더 강우강도

LGC 방법의 개선 효과 검증에 이용된 레이더는 총 10대의 단일 편파 기상레이더이다(Table 1). 각각의 레이더는 강수입자에 대한 3차원 반사도 자료를 생성하고, 3차원 반사도 자료에서 특정 층을 대표하는 2차원 반사도 자료를 산출한다. 레이더는 약 1 km 고도 이하의 각종 클러터와 여름철 3.5 ~ 5.5 km 고도에서 발생하는 융해층(melting layer)의 영향으로 관측 오류가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 1.5 km 고도의 레이더 CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 반사도 자료를 생성하였다. 10대의 레이더에서 생성된 CAPPI 반사도 자료는 평균값합성방법을 통해서 공간적으로 반사도 합성을 하였다. 합성된 반사도는 Marshall과 Palmer (1948)에서 제안된 식 (1)의 Z-R 관계식을 이용하여 지상 강우강도로 변환하였다.

Table 1. Characteristics of radars operated by the Korea Meteorological Administration

radar site	wavelength	maximum range (km)	latitude	longitude
Baengnyeongdo	C-band	256	37° 55' 35"	124° 40' 17"
Jindo	S-band	240	34° 28' 19"	126° 19' 25"
Gwangdeoksan	S-band	250	38° 07' 02"	127° 26' 02"
Myeonbongsan	C-band	200	36° 10' 35"	128° 59' 59"
Gudeoksan	S-band	240	35° 06' 56"	129° 00' 06"
Gwanaksan	S-band	240	37° 26' 28"	126° 57' 58"
Seongsan	S-band	250	33° 23' 01"	126° 52' 55"

Table 2. Radar events used to verify improved LGC method

event	period (UTC)	maximum rainfall accumulation
1	1500UTC Jul. 4, 2013 ~ 0900UTC Jul. 5, 2013	171 mm
2	1500UTC Jul. 7, 2013 ~ 1400UTC Jul. 8, 2013	180 mm
3	1500UTC Sep. 10, 2013 ~ 0230UTC Sep. 11, 2013	71 mm
4	1500UTC Sep. 13, 2013 ~ 0600UTC Sep. 14, 2013	158 mm

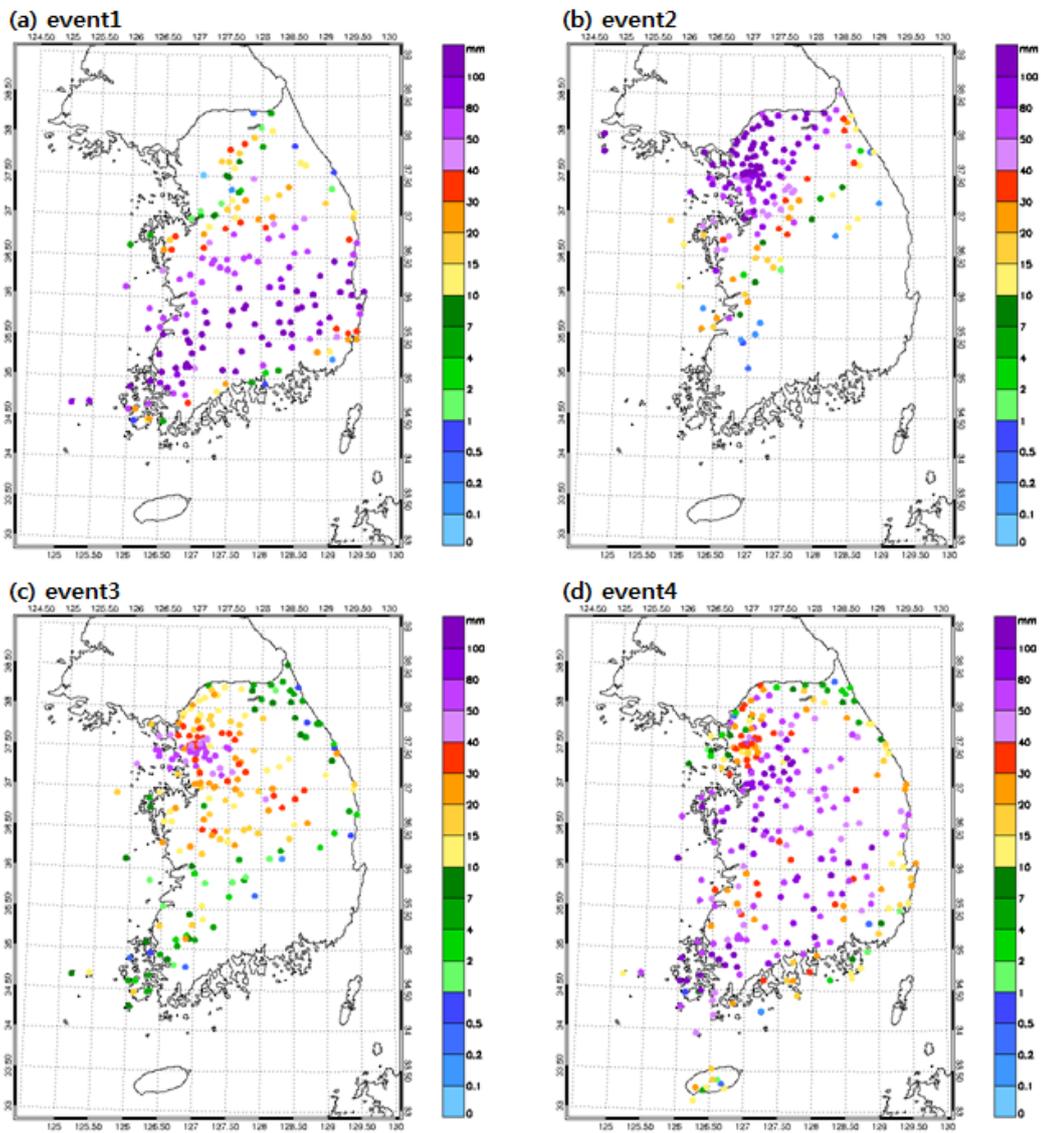


Fig. 1. Amount of the total accumulated rainfall observed by the Automatic Weather System for each event.

$$Z = 200 \times R^{1.6} \quad (1)$$

여기서, Z 는 레이더 반사도이며, R 은 지상 강우강도이다. 레이더 합성 강우강도 자료의 수평 해상도는 1 km 이고, 시간 해상도는 10분 간격이다.

LGC 방법의 개선 효과 검증을 위하여 2013년 4개의 집중호우 사례를 선정하였다(Table 2). 사례 1부터 4는 70 mm 이상의 일누적 강우량을 기록하였고, 국지성 집중호우로 인한 강우량의 지역적인 편차가 크다(Fig. 1). 우리나라의 집중호우는 강우량의 지역적인 편차가 크고, 강수 시스템이 복합적으로 발생하기 때문에 기상레이더의 강수 추정 오차를 크게 유발한다(Kim 등, 2013). 사례 1부터 4는 우리나라에서 전형적으로 발생하는 국지성 집중호우 사례로써, 이와 같은 사례는 LGC 방법의 국지적인 레이더 강수 조정 정확도를 파악하는 것과 더불어 LGC 방법의 개선을 검증하기에 적합하다.

2.2. 우량계 강우강도

LGC 방법의 개선 효과 검증을 위해서는 기준이 되는 지상 강우강도 자료가 요구된다. 본 연구에서는 기상청

에서 관리 및 운영하고 있는 642대의 우량계에서 수집된 자료를 이용하였다. 기상청은 전국적으로 642곳에 자동 기상관측 시스템(Automatic Weather System, AWS)을 운영 중이다. 이 시스템에는 전도형 우량계가 설치되어 있고, 1분 간격으로 0.5 mm 해상도의 누적 강우량 자료를 수집한다. LGC 방법의 적용 및 검증을 위해서는 누적 강우량을 강우강도로 변환해야한다. 우량계의 누적 강우량을 강우강도로 변환하기 위하여 TRMM-GSP (Tropical Rain Measuring Mission Gauge Software Packages) 알고리즘을 이용하였다(Wang 등, 2008). TRMM-GSP 알고리즘은 특정 기간의 강우강도를 시계열로 정리하고 전도 발생 시간 간격이 30분 이내로 연결된 시계열의 강우자료 집단을 하나의 독립된 강우 시스템으로 설정한다. 설정기간 내에서 얻어진 각각의 강우 시스템에 대하여 삼차 스플라인 보간법을 적용하여 시간당 강우강도를 추정한다(Suk 등, 2005). LGC방법의 적용과 검증에 우량계 자료의 중복 이용을 피하기 위하여, 우량계 지점의 수를 50% 씩 LGC 방법의 적용 및 검증에 나누어 이용하였다(Fig. 2).

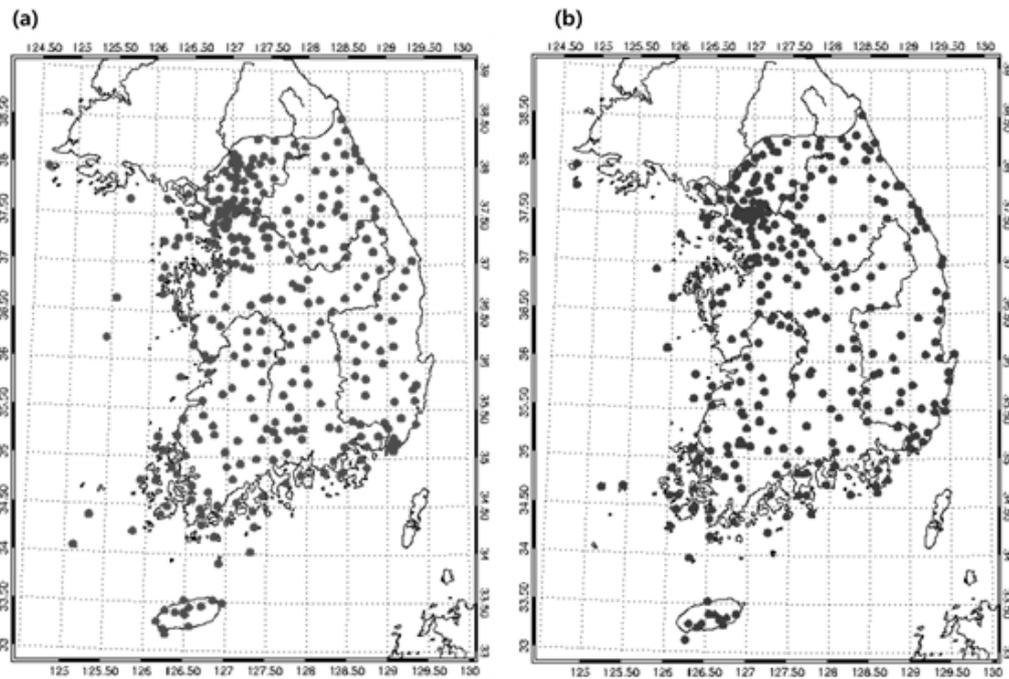


Fig. 2. Spatial distribution of rain gauge positions used (a) to adjust radar rain rates and (b) to verify LGC method.

3. 연구방법

KLGC의 개선을 위하여 역거리 가중(Inverse Distance Weighting, IDW)의 차수의 최적화 알고리즘과 레이더 강우강도 오차의 이상치 제거 알고리즘을 추가하였다 (Fig. 3). LGC 방법은 레이더 측정반경 내에 존재하는 우량계 지점과 우량계 지점을 중심으로 주변 레이더 픽셀의 거리로부터 레이더 강우강도의 실제오차에 역거리 가중치를 부여하여 레이더 강우강도의 예측오차를 산출하고 레이더 강우강도를 조정하는 방법이다. 우선, 식 (2)와 같이 각각의 우량계 지점에 대응하는 레이더 강우강도 오차를 계산한다.

$$e_i = r_i - g_i \quad (2)$$

여기서, i 는 강우가 기록된 우량계 지점을 의미한다. r_i 는 i 번째 우량계 지점에 대응되는 조정 전 레이더 강우강도이며, g_i 는 i 번째 우량계의 강우강도이다. e_i 는 i 번째 우량계 지점에 대응되는 레이더 강우강도의 실제오차이다. 레이더 강우강도의 실제오차는 레이더 강우강도의 조정을 위한 레이더 강우강도 예측오차 분포 산출에 이용된다. 레이더 강우강도의 실제오차 내에 존재하는 이상치는 이상치 주변의 레이더 강우강도 예측오차 분포에 대한 과소추정 혹은 과대추정의 원인이 된다. 본 연구에서는 레이더 강우강도의 예측오차 분포를 산출하기 전에 실제오차의 이상치 제거 알고리즘을 통한 전처리를 수행하였다(Fig. 4). Fig. 4에서 \bar{e} 는 레이더 강우강도의 실제오차에 대한 평균이며, σ_e 는 실제오차에 대한 표준편차이다. e_{low} 와 e_{high} 는 각각 이상치 제거를 위한 하한치와

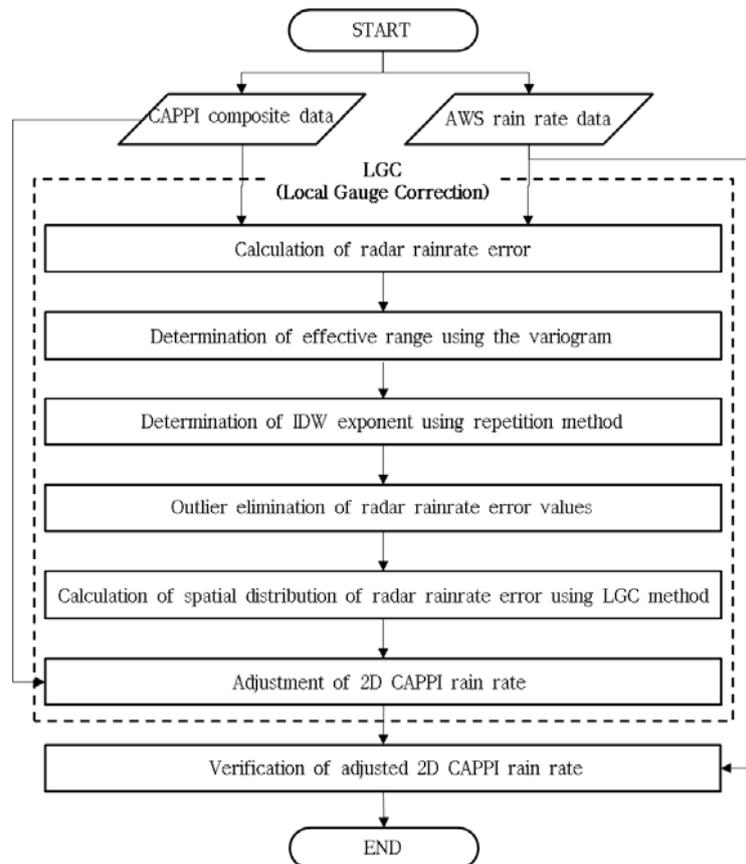


Fig. 3. Adjustment procedure of radar rainrate using improved LGC method.

상한치이다. w_i 는 i 번째 우량계 지점에 대응되는 역거리 가중치이다. e_i 가 이상치 제거를 위한 하한치보다 작고 상한치보다 크면, e_i 에 대한 역거리 가중치는 0이 되면서 e_i 는 레이더 강우강도 예측오차 산출에서 제외된다.

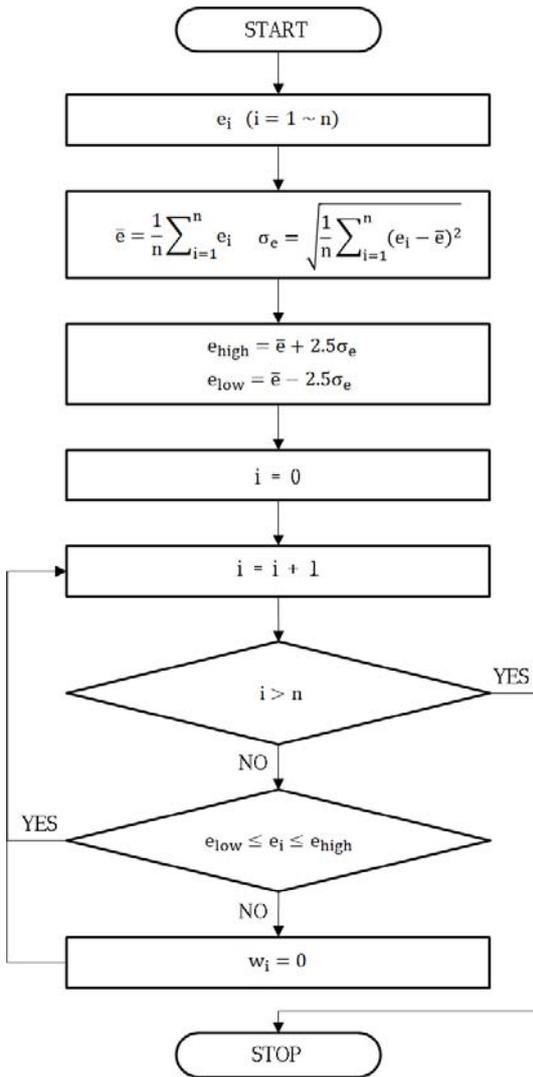


Fig. 4. Procedure for outlier elimination of radar rainrate error values.

레이더 강우강도 예측오차는 식 (3)을 사용하여 레이더 도메인 격자 위에 보간된다. 레이더 강우강도 예측오차의 보간은 역거리 가중 방법을 사용한다(Simanton과

Osborn, 1980). 역거리 가중치를 계산하는 방법은 식 (4)와 같다. 역거리 가중치 계산에 이용되는 변수인 α 는 식(5)와 같이 계산된다. α 는 내삽을 하기에 적합한 우량계의 수가 갖춰졌는지 판단하는 기준값이다. 역거리 가중치를 산출할 때 강우가 발생한 우량계 지점수가 적은 경우에는 유효반경 내의 추정 오차의 변화가 작게 나타날 수 있는데, 이와 같은 문제를 완화하기 위하여, Zhang 등 (2011)은 오차 추정에 정규분포를 적용하여 거리가 멀어질수록 우량계의 영향이 감소하도록 하였다.

$$R_e = \sum_{i=1}^n e_i w_i / \sum_{i=1}^n w_i \tag{3}$$

$$w_i = \begin{cases} \alpha/d_i^b; & d_i \leq D \\ 0; & d_i > D \end{cases} \tag{4}$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \exp\{-d_i^2/(D/2)^2\} \tag{5}$$

여기서, R_e 는 레이더 강우강도의 예측오차이다. n 은 역거리 가중치 산출을 위한 유효반경(D) 내의 레이더 픽셀과 대응되는 우량계의 총 지점수를 의미한다. d_i 는 레이더 도메인 내의 레이더 픽셀과 i 번째 우량계 지점 사이의 거리이며, b 는 역거리 가중치의 차수이다. α 가 1보다 큰 경우는 내삽을 하기에 적합한 우량계의 수가 갖춰졌다고 판단하여 α 를 적용하여 역거리 가중치를 계산하고, α 가 1보다 작을 경우는 α 를 1로 적용한다. 역거리 가중치의 유효반경은 베리오그램과 상관그램을 통해서 결정된다. 베리오그램은 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도이며, 공간적 자기상관 함수의 결과에 따라 해당 영역의 특성을 보여주는 지구통계학적 방법으로써 식 (6)과 같다. 베리오그램은 식 (7)을 통해서 상관그램으로 나타낼 수 있으며, 일정한 분리거리를 갖는 오차값들의 상관성을 상관계수로 나타낼 수 있다 (Deutsch, 2002). 상관그램의 상관계수가 0으로 수렴할 경우의 분리거리를 LGC 방법의 유효반경으로 선정한다.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i+h)\}^2 \tag{6}$$

$$\rho(h) = 1 - \hat{\gamma}(h)/\sigma^2 \tag{7}$$

여기서, h 는 두 자료 간에 떨어져 있는 분리거리이다. $N(h)$ 는 분리거리만큼 떨어진 자료의 수이고, $Z(x_i)$ 는 지점 x_i 에서 측정된 값이다. σ^2 는 측정된 자료의 분산을 의미한다.

Kim 등(2014)의 연구에서는 유효반경의 결정 방법에 따른 LGC 방법의 효과를 검증하기 위하여 역거리 가중

치의 차수를 관측지점과 미관측지점 사이의 거리의 제곱으로 고정하였다. 역거리 가중 방법의 가중치는 차수의 크기에 따라 크게 달라지며, 차수가 증가할수록 가까운 관측값의 영향을 더 크게 받는 특징을 갖는다(Park과 Kim, 2013). 본 연구에서는 역거리 가중치 차수의 최적화를 위한 반복법을 수행하였다(Fig. 5). Fig. 5에서 I 는

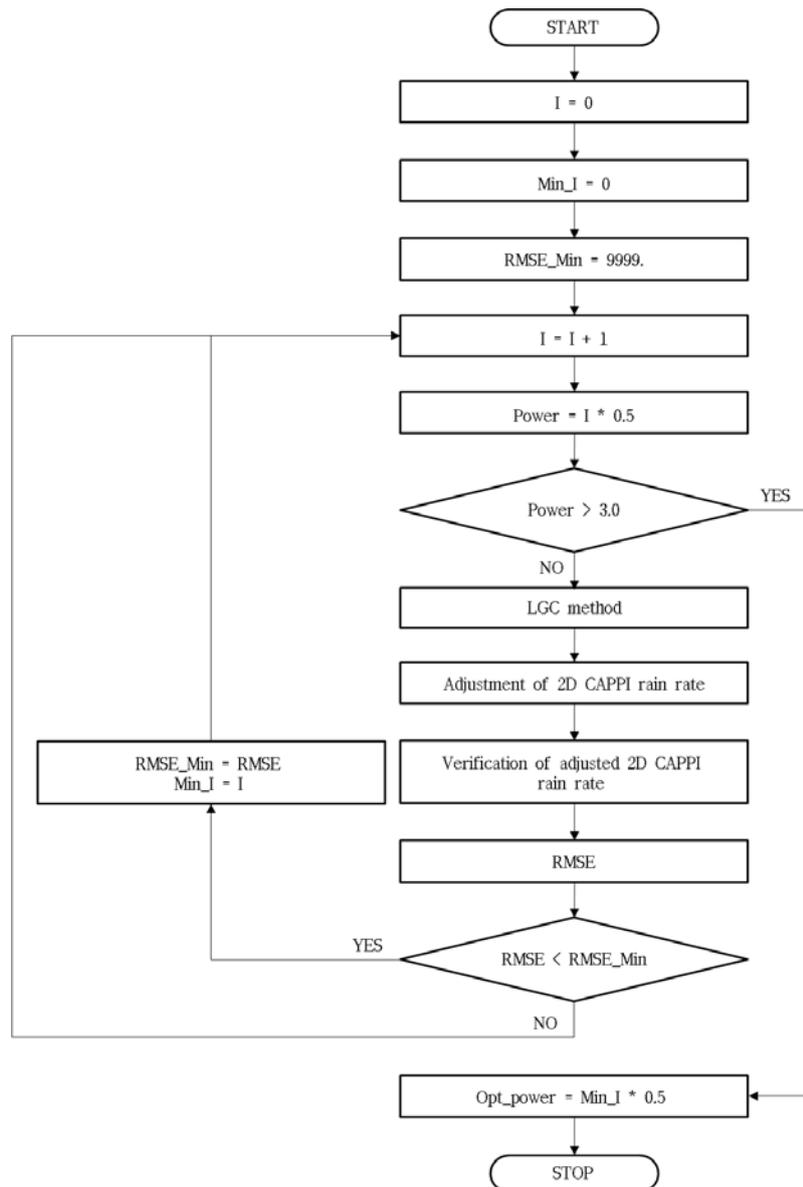


Fig. 5. Optimization procedure of distance power for IDW.

반복 횟수이며, Min_I는 최적화된 차수의 배열 번호이다. RMSE_Min은 LGC방법의 최소 제곱근평균제곱오차(Root Mean Square Error, RMSE)이다. Power는 역거리 가중치의 차수이고, Opt_power는 최적화된 역거리 가중치의 차수이다. 역거리 가중치의 차수가 가장 적합한 값에 수렴될 때까지 차수를 반복적으로 일정 범위 내에서 조정한다. 역거리 가중치 차수의 범위 및 해상도는 Zhang 등(2011)의 기준을 적용하여, 각각 0.5 ~ 3.0 과 0.5로 결정하였다. LGC 방법의 개선 알고리즘에 의해 산출된 레이더 강우강도의 예측오차는 최종적으로 식 (8)과 같이 조정전의 레이더 강우강도에 적용하여 조정된 레이더 강우강도(r_{LGC})를 산출한다.

$$r_{LGC} = r - R_e \quad (8)$$

4. 분석 결과

Fig. 6(a)와 (b)는 각각 2013년 9월 14일 2120UTC 사례에 대하여 KLG와 ILGC로 조정된 레이더 강우강도 분포와 레이더 강우강도 오차 분포이다. ILGC는 레이더 강우강도 오차 중 파란색 원으로 표시된 부분의 오차를 KLG보다 약 10 mm h^{-1} 정도 감소시켰다. ILGC로 조정된 레이더 강우강도 분포는 역거리 가중치의 차수가 KLG보다 증가하여 가까운 관측 지점의 레이더 강우강도 오차의 영향을 더 크게 받음으로써, 빨간색 원으로 표시된 부분이 KLG보다 약 10 mm h^{-1} 이상으로 높게 조정되었다(Table 3). 동일한 지구통계학적 방법으로 산출된 ILGC와 KLG의 유효반경은 200 km로 일치하였다. KLG의 역거리 가중치의 차수는 2.0의 고정된 상수를 이용하였다. 역거리 가중치 차수의 최적화 알고리즘과 레이더 강우강도 오차의 이상치 제거 알고리즘

을 적용한 ILGC의 역거리 가중치 차수는 3.0으로 산출되었다. KLG는 레이더 강우강도 오차의 이상치 제거를 하지 않기 때문에 이상치 제거 개수는 0이며, ILGC는 2개의 이상치가 발견되어 제거되었다. 위의 조건에 의한 ILGC와 KLG의 레이더 강우강도 정확도는 Table 3과 같이 조정 전의 레이더 강우강도보다 각각 약 42%, 33% 개선되었다. ILGC의 레이더 강우강도의 정확도는 KLG보다 9% 높았다.

KLG는 역거리 가중치 차수를 2.0으로 고정시킨 반면, ILGC의 역거리 가중치 차수는 레이더 강우강도 오차의 분포에 따라 최적의 값을 결정하였다. 레이더 강우강도는 10분 간격으로 생성되기 때문에, 역거리 가중치 차수도 10분 간격으로 갱신된다. Fig. 7은 역거리 가중치 차수의 시계열을 연구사례별로 제시하였고, Table 4는 이에 대한 역거리 가중치 차수의 평균과 표준편차를 제시하였다. 최적화된 역거리 가중치 차수는 전 연구사례에서 불규칙적인 변화 경향을 보였다. 즉, 고정된 상수로서 역거리 가중치 차수를 정의하는 것은 다양한 레이더 강우강도 오차의 분포를 현실적으로 반영할 수 없음을 의미한다. 사례 1부터 4까지의 평균 역거리 가중치 차수는 각각 2.0, 2.2, 2.1, 그리고 1.8이었다. 국지성 집중호우 사례에 대한 역거리 가중치 차수의 평균적인 수치와 표준편차는 각각 약 2.0, 1.0이었다. ILGC의 역거리 가중치 차수의 평균적인 크기는 KLG의 역거리 가중치 차수와 2.0으로 동일하였다.

KLG는 레이더 강우강도의 실제오차 내에 존재할 수 있는 이상치를 제거하지 않는다. 이상치는 주변의 레이더 강우강도 예측오차에 대한 과소추정 혹은 과대추정을 유발할 수 있기 때문에 이상치를 제거해주는 과정이 요구된다. ILGC는 이상치 제거 알고리즘을 통해서 Fig. 8과 같이 연구사례에서 이상치를 제거하였다. Fig. 8은

Table 3. Comparison of rainfall applying KLG and ILGC on 2120 UTC September 14, 2013

description	before adjusting	KLG	ILGC
effective radius (km)	-	200	200
distance power	-	2	3
the number of outlier	-	0	2
Correlation Coefficient	0.30	0.66	0.71
Root Mean Square Error (mm h^{-1})	15.61	10.44	9.08

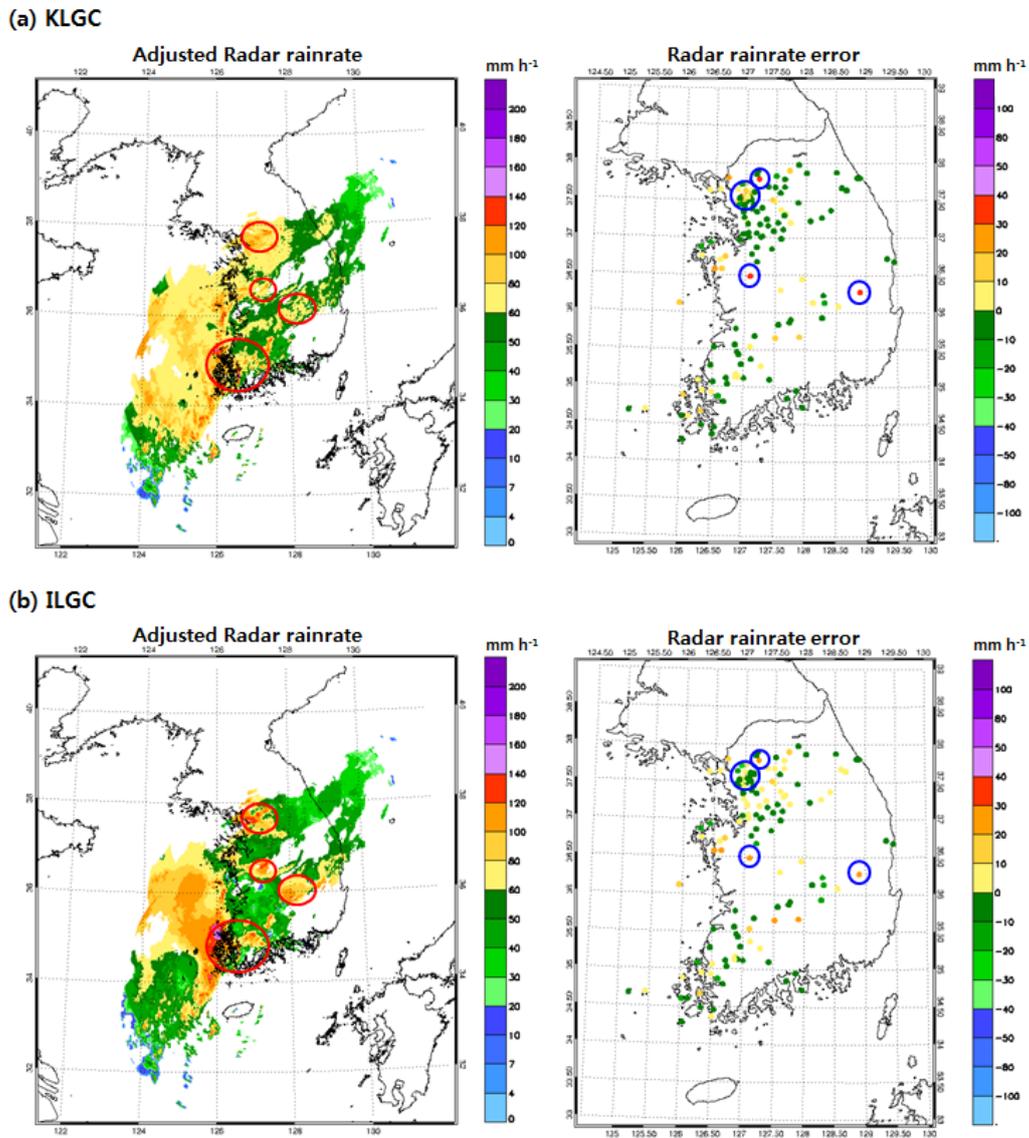


Fig. 6. Spatial distribution of radar rainrate and errors (a) applying KLCG and (b) ILGC on 2120 UTC September 14, 2013.

Table 4. Mean distance powers in IDW for each event

event	mean distance power	standard deviation
1	2.0	0.9
2	2.2	0.9
3	2.1	0.9
4	1.8	1.0

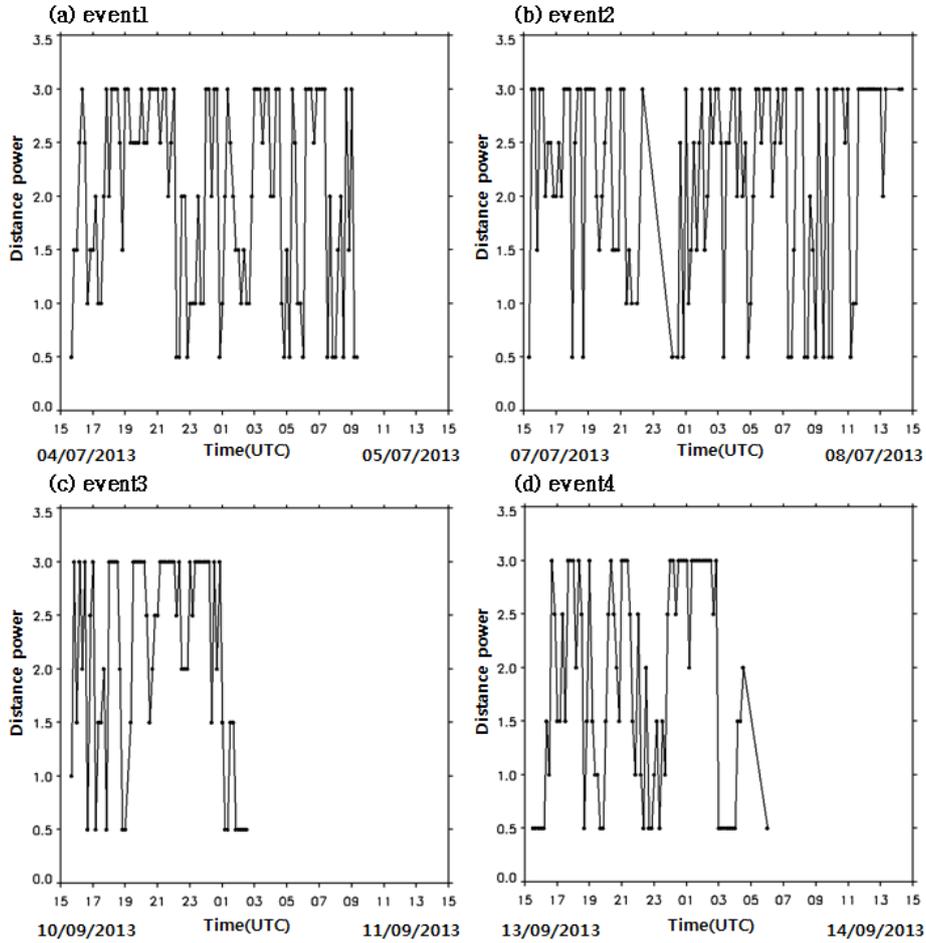


Fig. 7. Time series of distance powers in IDW for each event.

Table 5. Percentage of outliers in radar rainrate errors for each event

event	mean (Average of the number of outliers)	standard deviation (Average of the number of outliers)
1	3.3%(2.5)	1.3%(1.5)
2	2.2%(1.1)	1.9%(1.1)
3	3.1%(2.4)	1.4%(1.6)
4	3.9%(4.1)	1.2%(2.4)

ILGC의 레이더 강우강도의 실제오차 개수에 대한 이상치 제거 개수의 비율이다. 사례 1부터 4까지의 이상치는 최대 약 9% 이내로 제거되었지만, 대부분의 강수 기간 내에서 연속적으로 발생하였다. 사례 1부터 4까지 각각

의 이상치 평균 제거 비율은 3.3%, 2.2%, 3.1%, 그리고 3.9%이었다(Table 5). 모든 사례에 대한 이상치의 평균적인 제거 비율은 4% 이내였고, 이상치 제거 비율에 대한 표준편차는 2% 이내였다. 전체 연구사례에 대하여 이

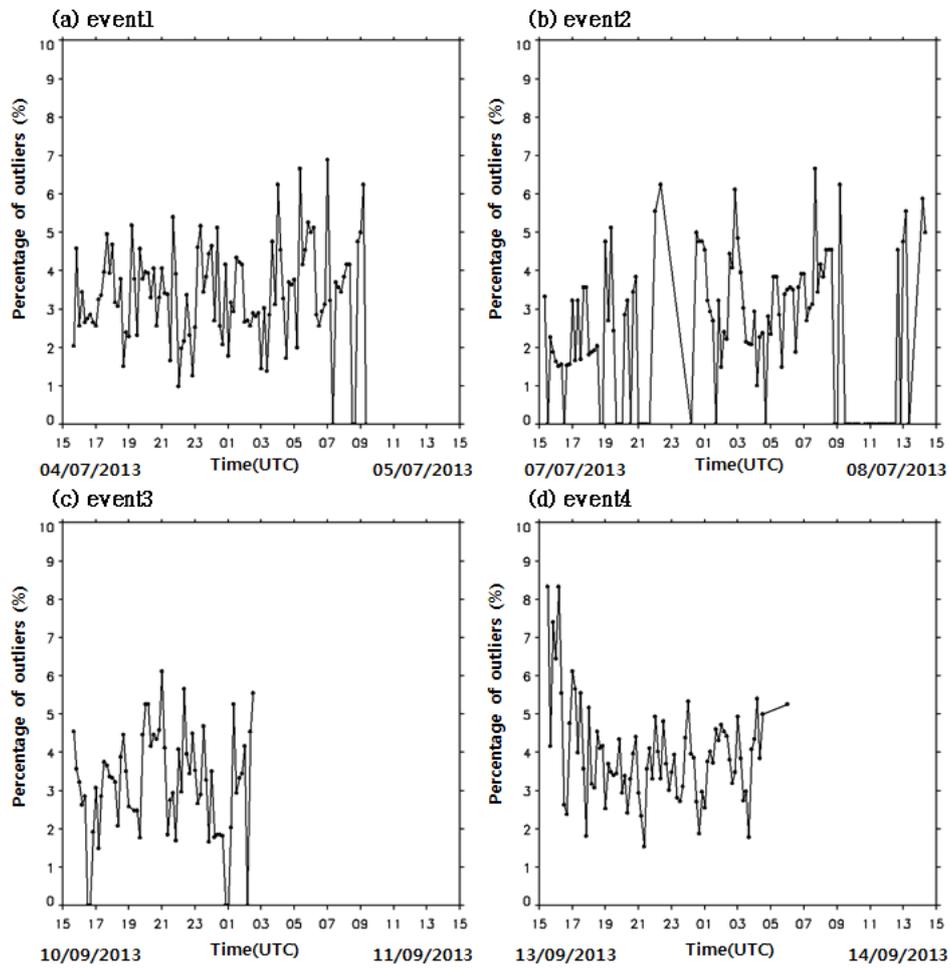


Fig. 8. Time series of percentage of outliers in radar rainrate errors for each event.

Table 6. Verification of adjusted amount of the hourly accumulated rainfall using KLGC and ILGC for each event

verification method	event	before adjusting	after adjusting (KLGC)	after adjusting (ILGC)
Correlation Coefficient	1	0.68	0.81	0.84
	2	0.67	0.84	0.87
	3	0.60	0.82	0.86
	4	0.64	0.79	0.81
Root Mean Square Error (mm)	1	6.11	3.28	3.05
	2	10.39	5.03	4.59
	3	4.57	2.51	2.20
	4	8.87	5.37	5.06

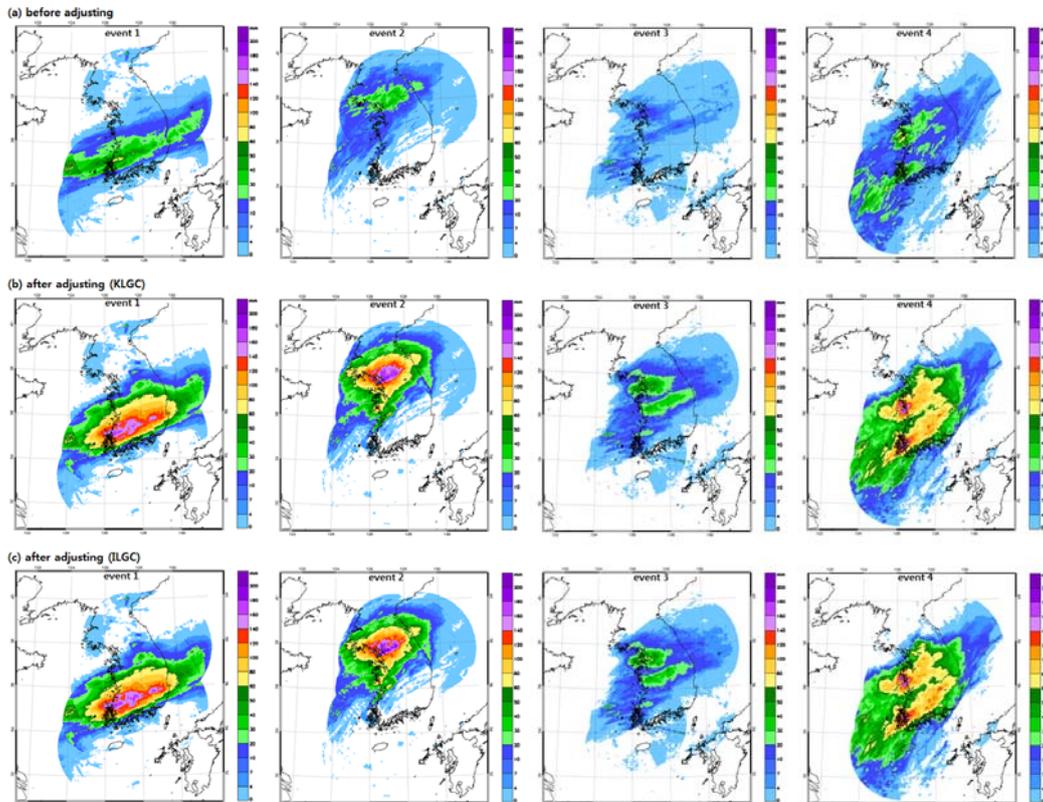


Fig. 9. Spatial distribution of total rainfall accumulation (a) before applying LGC method and (b) after applying KLGC and (c) ILGC for each event.

상치의 평균적인 개수는 약 2.5개이며, 표준편차는 1.6개였다. 연구사례에서 발견된 이상치의 비율 및 개수는 많다고 판단할 수는 없지만, 한 개의 이상치로 인하여 유효반경 내의 레이더 강우강도 예측오차에 대한 산출 정확도가 충분히 감소할 수 있기 때문에 제거되어야 할 필요가 있다.

역거리 기중치의 차수 결정 알고리즘과 레이더 강우강도 오차의 이상치 제거 알고리즘을 포함한 ILGC의 정확성을 검증하였다. Fig. 9는 조정 전의 레이더 일누적 강우량 분포와 더불어 ILGC와 KLGC에 의해 조정된 레이더 일누적 강우량 분포를 연구사례별로 나타내었다. 조정 전의 레이더 일누적 강우량 분포는 Fig. 1의 우량계 일누적 강우량 분포에 비하여 사례 1부터 4까지 과소추정되었다. ILGC와 KLGC의 조정된 레이더 일누적 강우량 분포는 우량계 일누적 강우량 분포와 유사하였다. 특

히, 집중호우가 발생한 영역에서 나타난 레이더 강우량의 과소추정은 우량계 일누적 강우량 분포와 유사하게 조정되었다. ILGC와 KLGC의 조정된 레이더 일누적 강우량 분포는 ILGC와 KLGC의 동일한 유효반경에 의해 전체적인 강우량 분포는 유사하게 나타났지만, 집중호우 영역에서는 차이를 보였다. 이는 Fig. 6과 같이 ILGC의 역거리 기중치 차수의 변화로 인한 결과로 판단된다. ILGC 적용을 통한 레이더의 일누적 강우량의 공간적인 분포는 KLGC와 유사하였고, 우량계 일누적 강우량 분포와 유사하게 나타났다.

ILGC의 성능을 통계적인 방법을 이용하여 정량화하였다. Fig. 10은 사례 1부터 4까지 우량계의 1시간 누적 강우량과 레이더의 1시간 누적 강우량의 산포도이며, 이에 대한 정량적인 통계적 검증 결과는 Table 6에 제시하였다. 조정 전의 레이더 1시간 누적 강우량은 사례 1부터

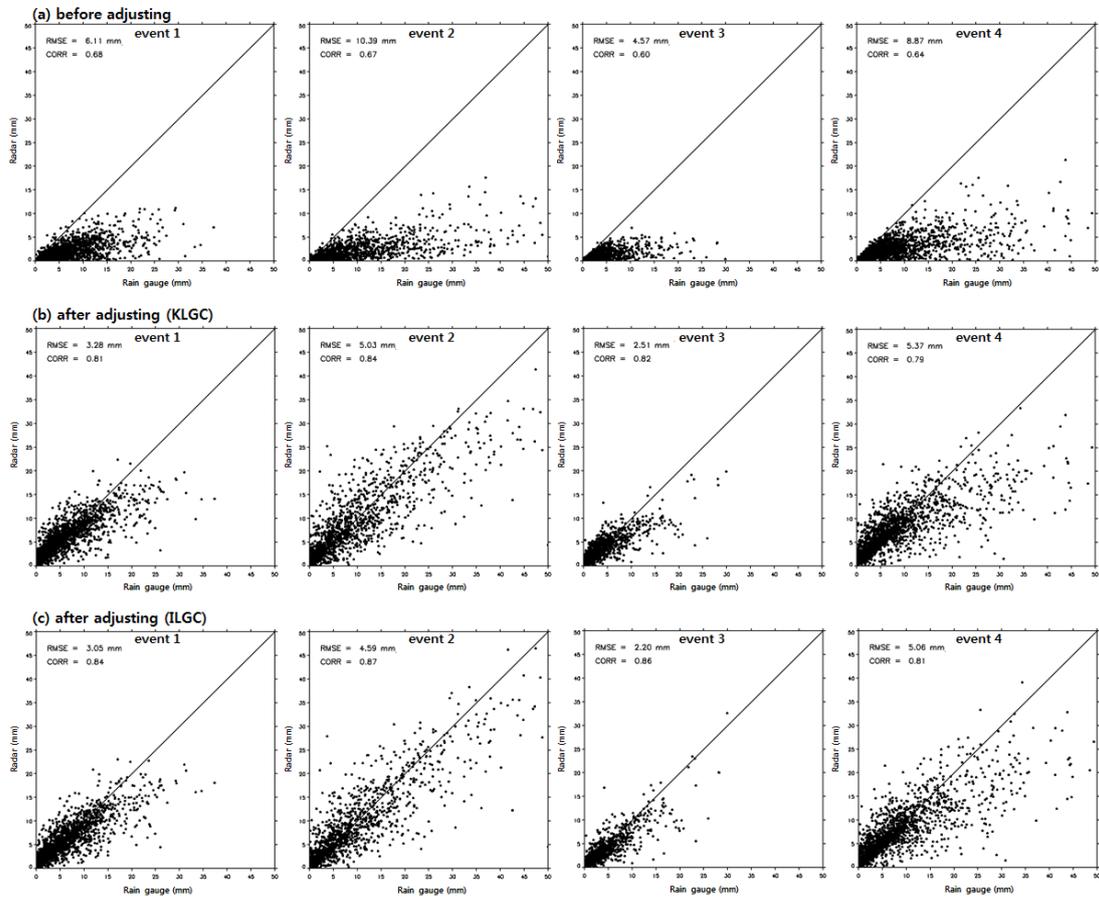


Fig. 10. Comparison of hourly rainfall accumulation from rain gauges and radar (a) before applying LGC method and (b) after applying KLGC and (c) ILGC for each event.

Table 7. Verification of adjusted amount of the total accumulated rainfall using KLGC and ILGC for each event

verification method	event	before adjusting	after adjusting (KLGC)	after adjusting (ILGC)
Correlation Coefficient	1	0.93	0.96	0.96
	2	0.89	0.93	0.94
	3	0.92	0.93	0.95
	4	0.86	0.90	0.91
Root Mean Square Error (mm)	1	53.61	14.52	13.78
	2	67.59	18.30	16.96
	3	20.16	6.94	6.01
	4	42.61	17.07	16.18

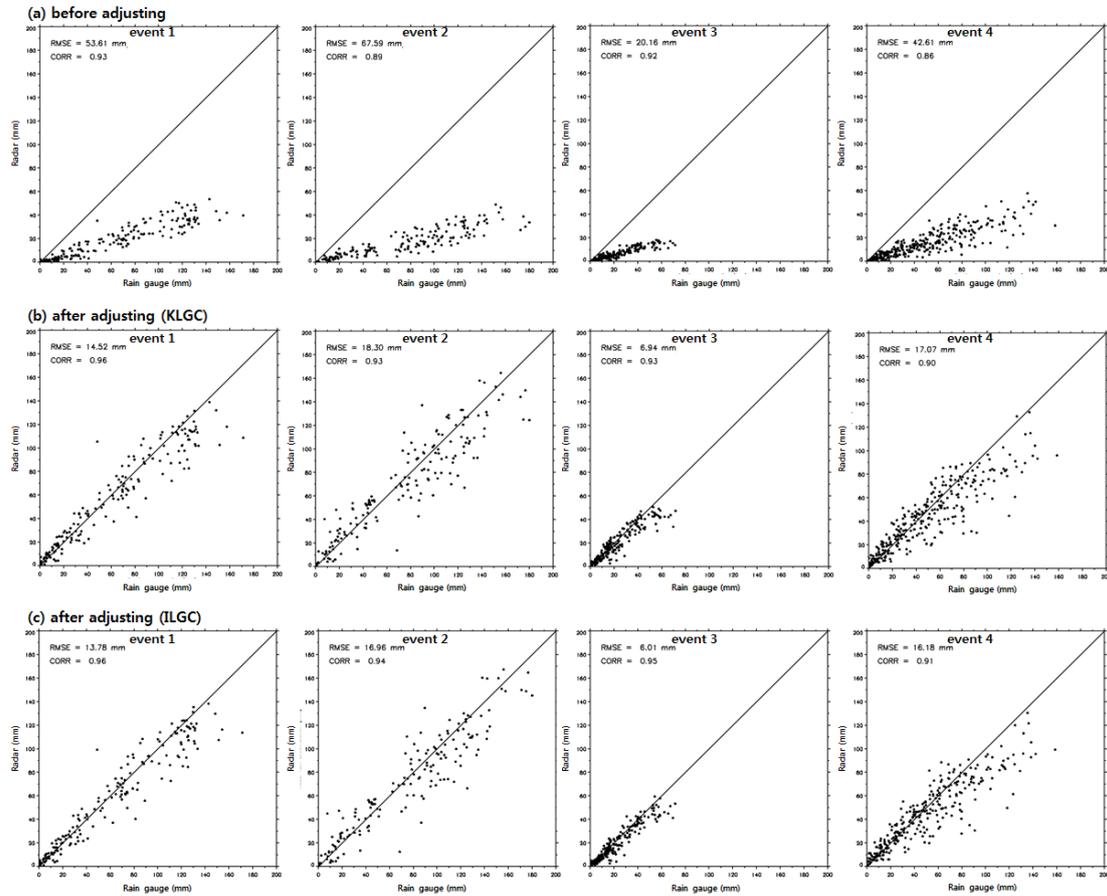


Fig. 11. Comparison of total rainfall accumulation from rain gauges and radar (a) before applying LGC method and (b) after applying KLGC and (c) ILGC for each event.

4가지 과소추정되었지만, ILGC와 KLGC에 의해 과소 추정이 개선되었다. 사례 1에서 ILGC와 KLGC의 정확도는 조정 전의 레이더 1시간 누적 강우량 보다 각각 50%, 46% 개선되었고, 사례 2에서는 각각 56%, 51% 개선되었다. 사례 3에서는 각각 52%, 45% 개선되었고, 사례 4에서는 각각 43%, 39% 개선되었다. 사례 1에서 4까지 레이더 강우강도 조정에 대한 ILGC의 정확도는 KLGC보다 4 ~ 7% 높게 나타났으며, ILGC와 KLGC의 상관계수는 평균적으로 약 0.8로 동일하였다. Fig. 11의 우량계의 일누적 강우량에 대한 ILGC와 KLGC의 산포도에서는 1시간 누적 강우량에 대한 산포도와 같이 조정 전의 레이더 강우량의 과소추정이 개선되었다. 사례 1

에서 ILGC와 KLGC의 정확도는 조정 전의 레이더 일누적 강우량 보다 각각 74%, 72% 개선되었고, 사례 2에서는 각각 75%, 72% 개선되었다. 사례 3에서는 각각 70%, 65% 개선되었고, 사례 4에서는 각각 62%, 59% 개선되었다(Table 7). 사례 1에서 4까지 ILGC의 정확도는 KLGC보다 2 ~ 5% 높게 나타났으며, ILGC와 KLGC의 상관계수는 평균적으로 약 0.9 이상으로 유사하였다.

5. 요약 및 결론

KLGC는 레이더 오차에 따라 변경되는 유효반경에 대한 최적화된 차수를 고려할 수 없다는 단점이 존재한

다. 본 연구에서는 역거리 가중치 차수의 최적화 알고리즘과 레이더 강우강도 오차의 이상치 제거 알고리즘을 추가하여 개선된 LGC 방법인 ILGC를 개발하였다. ILGC의 최적화된 역거리 가중치 차수는 10분 간격으로 생성되는 레이더 강우강도의 오차 분포에 따라 결정된다. 집중호우 기간 동안 ILGC의 역거리 가중치 차수는 불규칙적인 변화 경향을 보였다. ILGC의 최적화된 역거리 가중치 차수는 국지성 집중호우 사례에 대하여 평균적으로 약 2.0을 기록하였고, 표준편차는 약 1.0이었다. 이와 같은 결과는 불규칙하게 변화하는 레이더 강우 분포를 현실적으로 반영하기 위해서 KLGC와 같이 고정된 역거리 가중치 차수의 적용이 아닌 ILGC의 역거리 가중치 차수의 최적화 알고리즘을 적용해야 하는 것을 의미한다. ILGC는 레이더 강우강도 오차 내에 존재하는 이상치를 제거하였다. 이상치는 주변의 레이더 강우강도 예측오차에 대한 과소추정 혹은 과대추정을 유발할 수 있다. 이상치는 집중호우 기간 동안 최대 약 9% 이내로 제거되었다. 모든 사례에 대한 평균적인 이상치 제거 비율은 4%였고, 약 2.5개에 해당한다. 이상치의 발생 비율은 높지 않았지만, 연속적으로 발생하는 이상치는 소수라도 유효반경 내의 레이더 강우강도 예측오차 정보를 오염시킬 수 있기 때문에 제거해야 할 필요가 있다.

레이더 강우강도 조정에 대한 ILGC의 성능은 집중호우 기간 동안 우량계 강우강도와 KLGC의 레이더 강우강도를 기준으로 통계적인 방법을 통해서 정량적으로 검증되었다. ILGC와 KLGC의 조정된 레이더 일누적 강우량 분포는 ILGC와 KLGC의 동일한 유효반경에 의해 전체적인 강우량 분포는 유사하게 나타났지만, 역거리 가중치 차수의 불규칙적인 변화로 인하여 집중호우 영역에서는 차이를 보였다. 모든 사례 기간 동안 ILGC의 우량계와 유사한 조정된 일누적 강우량 분포를 생성하였다. 집중호우 기간 동안 조정 전의 레이더 1시간 누적 강우량은 우량계의 1시간 누적 강우량에 비하여 과소추정되었다. ILGC에 의해 조정된 레이더 1시간 누적 강우량의 정확도는 조정 전보다 약 50% 개선되었고, KLGC보다 4~7% 개선되었다. 즉, 레이더 강우강도 조정에 대한 ILGC의 성능은 KLGC보다 높았고, 역거리 가중치의 차수 결정 알고리즘과 레이더 강우강도 오차의 이상치 제거 알고리즘이 레이더 강우강도 조정에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(14AWMP-B079364-01)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chumchean, S., Seed, A., Sharma, A., 2006, Correcting real-time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach, *Journal of Hydrology*, 317(1), 123-137.
- Crum, T.D., Alberty, R.L., 1993, The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, 1669-1687.
- Deutsch, C.V., 2002, *Geostatistical reservoir modeling*. Oxford University Press, New York, USA, 376.
- Groisman, P.Y., Legates, D.R., 1994, The accuracy of United States precipitation data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, 215-227.
- Hunter, S.M., 1996, WSR-88D Radar rainfall estimation: Capabilities, limitations and potential improvements. *National Weather Digest*, 20, 26-38.
- Jung, S.H., Lee, G.W., 2010, Statistical characteristics of atmospheric conditions related to radar beam propagation using radiosonde data in 2005-2006. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 31, 584-599.
- Kim, K.H., Kim, M.S., Lee, G.W., Kang, D.H., Kwon, B.H., 2013, The adjustment of radar precipitation estimation based on the kriging method. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 34, 13-27.
- Kim, K.H., Lee, G., Kang, D.H., Kwon, B.H., Han, K.Y., 2014, Adjustment of radar precipitation estimation based on the local gauge correction method. *Journal of Korean Earth Science Society*, 35, 115-130.
- Marshall J.S., Palmer W.M.K., 1948, The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5, 165-166.
- Park, J.C., Kim, M.K., 2013, Comparison of precipitation distributions in precipitation data sets representing 1 km spatial resolution over South Korea produced by PRISM, IDW, and Cokriging. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 16, 147-163.
- Park, S.-G., Lee, G.W., 2010, Calibration of radar reflectivity measurements from KMA operational radar network. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 46, 243-259.
- Seo, D.-J., Breidenbach, J.P., Johnson, E.R., 1999, Real-time

- estimation of mean field bias in radar rainfall data. *Journal of Hydrometeorology*, 1, 222-240.
- Simanton, J.R., Osborn, H.B., 1980, Reciprocal distance estimate of point rainfall. *Journal of the Hydraulics Division American Society of Civil Engineers*, 106, 1242-1246.
- Smith, J.A., Krajewski, W.F., 1991, Estimation of the mean field bias of radar rainfall estimates. *Journal of Applied Meteorology*, 30, 397-412.
- Suk, M.K., Nam, K.Y., Kim, Y.H., Oh, S.N., 2005, Estimation of quantitative rain intensity from radar reflectivities using a window probability matching method. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 123-138.
- Wang, J., Fisher, B.L., Wolff, D.B., 2008, Estimating rain rates from tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 43-56.
- Ware, E.C., 2005, Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data. MSD. dissertation, Cornell University, Newyork, United States, 96.
- Zhang, J., Howard, K., Langston, C., Vasiloff, S., Kaney, B., Arthur, A., Van C.S., Kelleher K., Kitzmiller D., Ding F., Seo, D.J., Wells, E., Dempsey C., 2011, National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) System: Description, results, and future plans. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 1321-1338.