

고도 가중 방법을 이용한 레이더 반사도의 합성

이정훈* · 정성화* · 허복행** · 김경익*†

*경북대학교 천문대기과학과, **기상청 기상선진화추진단

Reflectivity Mosaic of Two Radars Using a Height-weighted Method

Jung-Hoon Lee*, Sung-Hwa Jung*, Bok-Haeng Heo**, and Kyung-Eak Kim*†

*Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Korea

**Meteorological Advancement Council, Korea Meteorological Administration, Korea

Abstract : A new method to mosaic reflectivity over the overlapped coverage of two radars was developed. The method mosaics the radar reflectivity with weights after adjustment of reflectivity differences on overlapped coverage of neighboring two radars. Their weights are inverse proportion to the difference between the height of an interpolated reflectivity and the level of CAPPI (Constant Altitude PPI).

The performance of this method was compared to different mosaic methods (Mosaics by maximum value, averaged value, nearest value and distance weighted value) using the reflectivity fields of a typhoon event observed by two radar. New method was better than any other methods either as a continuity and as a bias analysis of reflectivity at the boundaries in overlapped coverage by two radars.

Key Words : weather radar, reflectivity mosaic, height-weighted method, Precipitation, CAPPI.

요약 : 두 대의 레이더를 이용하여 반사도를 합성할 때 중복영역을 처리하는 새로운 합성 방법을 개발하였다. 이 합성 방법은 인접한 두 레이더의 중복되는 영역의 반사도 차이를 보정한 후 가중치를 주어 합성하는 방법이다. 가중치는 CAPPI(Constant Altitude PPI) 고도와 반사도가 관측된 고도와의 차이의 비를 역으로 계산한 것이다.

이 합성방법의 결과를 분석하기 위하여 두 레이더를 이용하여 관측한 태풍 사례의 반사도장에 대해 다른 합성방법(최댓값, 평균값, 근거리, 거리 가중)과 비교하였다. 두 레이더의 중복영역의 경계지점들에 대해 반사도의 연속성과 치우침을 분석하였고 그 결과 새로운 방법이 다른 합성방법에 비해 더 우수한 결과를 얻었다.

1. 서론

최근 국지성 집중호우로 인명과 재산 피해가 급증하면서 자동기상관측장비와 레이더를 이용한 중규모 기상

현상의 감시와 초단시간 예보의 중요성이 높아지고 있다. 특히, 짧은 시간 간격으로 넓은 범위의 강수량 분포를 추정하는 레이더의 중요성은 매우 높다.

최근 여러 대의 레이더로부터 산출한 예코장을 하나의

접수일(2009년 10월 12일), 수정일(1차 : 2010년 4월 28일), 게재확정일(2010년 7월 21일).

† 교신저자: 김경익(kimke@knu.ac.kr)

에코장으로 합성하기 위한 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다. 레이더간의 반사도 차이를 최소화하면서 실제 기상시스템의 수평분포를 잘 묘사하기 위한 선행연구는 다음과 같다. 허소정 등(1998)은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)의 내·외삽기법을 활용하여 에코 합성장을 만들고, 저고도 PPI(Plan Position Indicator) 관측과 비교하여 격자 변환의 정확도를 검증하였다. 또한, 각 레이더 관측소별 반사도를 극평사도법으로 좌표 변환하는 최저 고도각 합성 방법, CAPPI(Constant Altitude PPI) 합성 방법, 각 에코 기둥에서 반사도가 최대인 에코를 합성하는 CMAX(Column max) 방법 등으로 합성도를 작성하였다. Zhang *et al.*(2005)은 단일 레이더에 대한 내·외삽 방법을 분석하였고, 근거리 합성 방법, 최댓값 합성 방법, 거리 가중 합성 방법 등을 비교하였다. Fo *et al.*(1998)은 1시간 누적 강우량을 합성 방법에 따라 비교하여 오차 변동성에 의한 가중 합성이 강우량 추정에 적합함을 보였다. Lakshmanan *et al.*(2006)은 반사도, 시선속도, 관련 산출물 등을 3차원 합성장으로 빠르게 갱신하기 위한 방법을 제안하였다. Atlas(2002)는 9가지 레이더 보정 방법을 제시하였다. Gourley *et al.*(2003)은 18대의 레이더를 이용하여 보정 방법에 따른 반사도 차이를 분석하고 Carolinas 지역의 레이더 관측망에서는 최대 0.36dB 차이가, Oklahoma 지역의 레이더 관측망에서는 최대 0.74dB의 차이가 있음을 보였다.

최근까지 제시된 합성 방법으로는 최댓값 합성 방법, 평균값 합성 방법, 근거리 합성 방법, 거리 가중 합성 방법 등이 있다. 근거리 합성 방법은 격자점에서 가장 가까운 거리에 있는 레이더의 반사도를 합성하는 방법으로 동일 에코에 대해 두 레이더 간에 반사도 차이가 있을 경우 불연속선이 나타날 수 있다. 최댓값 합성 방법은 한 격자점을 관측하는 여러 레이더 반사도 중에서 가장 강한 반사도의 합성이며, 이 방법은 레이더 보정차에 의해 편향된 정보를 제공할 수 있다. 거리 가중 합성 방법은 레이더의 거리에 따라 반사도에 가중치를 주어 합성하며, 이 방법은 불연속선이 발생하지 않고 대류운의 구조도 잘 표현해 준다. 현재 기상청 레이더의 에코 합성장은 1.5km 고도의 CAPPI 반사도를 기반으로 하는 최댓값 합성 방법으로 산출하고 있다.

본 연구에서는 기상청 진도레이더와 구덕산 레이더

의 관측자료를 이용하여 불연속선과 레이더간의 보정차를 개선할 수 있는 고도 가중 합성 방법을 새로이 제안하였다. 그리고 이 방법을 태풍사례에 적용하여 기존 최댓값 합성 방법, 평균값 합성 방법, 근거리 합성 방법, 거리 가중 합성 방법과 비교·분석하였다.

2. 연구자료

본 연구에서는 기상청 자동기상관측장비(Automatic Weather System; AWS)와 진도 레이더와 구덕산 레이더의 관측자료를 이용하였다. 진도 레이더와 구덕산 레이더의 특성은 Table 1과 같다. 두 레이더는 Klystron 송신기의 S 밴드 레이더로서 빔 폭은 1°이다. 진도 레이더는 최대출력이 750kW로 반경 240km를 관측을 하며, 구덕산 레이더는 최대출력이 850kW로 반경 246km를 관측한다. 두 레이더의 반사도 자료는 Mohr and Vaughan(1979)의 곱선형(bilinear)방법으로 내삽하여 격자점 자료로 산출한다.

두 레이더의 관측범위가 중복되는 지역에 있는 자동기상관측장비의 위치는 Fig. 1과 같다. 자동기상관측장비는 0.5 mm 진도되형 강수량계를 이용하여 측정한다(기상청, 2003). 본 연구에서는 레이더 반사도 보정을 위하여 진도와 구덕산 레이더의 관측범위가 중복되는 영역에 있는 150개소의 자동기상관측장비 강수량 자료를 사용하였다. 그리고 레이더와 진도되형 강수량계의 관측시각의 차이를 최소화하기 위해 자동기상관측장비의 1시간 누적 강우강도를 사용하였다.

Table 1. Characteristics of Jindo and Gudeoksan radars of Korea Meteorological Administration

Characteristics	Jindo radar	Gudeoksan radar
Location	34.78°N, 126.55°E	35.20°N, 129.00°E
Transmitter	Klystron	Klystron
Band	S	S
Frequency	2,890MHz	2,712MHz
Peak power of transmitter	750kW	850kW
Antenna Diameter	8.5m	8.5m
Beam width	1°	1°
Observation range	240km	246km

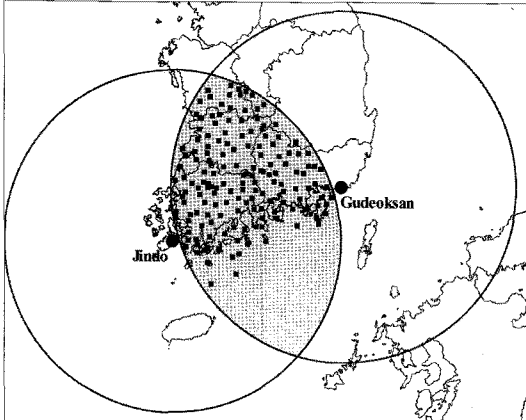


Fig. 1. Positions and observation ranges of Jindo and Gudeoksan radar. Shadow region and rectangular dots represent overlapped area by Jindo and Gudeoksan radars and Automatic Weather Systems, respectively.

3. 레이더 반사도 합성 방법의 비교 분석 방법

1) 기존 레이더 반사도 합성

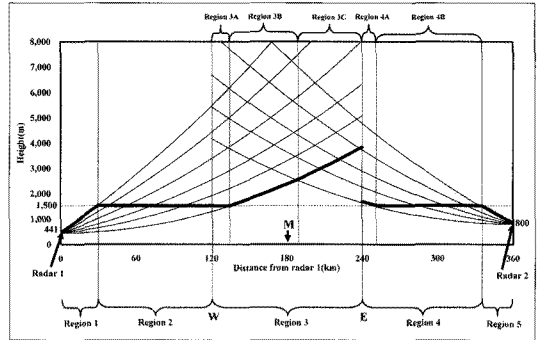
본 연구에서는 기존의 합성 방법을 비교하는데 필요한 합성장은 고도 1.5km의 CAPPI 산출물을 이용하여 다음과 같은 과정으로 생성하였다.

- ① 각 레이더에 대해 극 좌표계로 관측된 레이더의 반사도를 곱선형 방법으로 내삽하여 직교 좌표계의 CAPPI 격자점으로 변환한다.
- ② 각 레이더의 직교 좌표계의 자료를 Lambert 정형 원추도법으로 전환한다.
- ③ 중복 영역의 반사도는 각 합성 방법에 따라 처리하여 합성장을 생성한다.

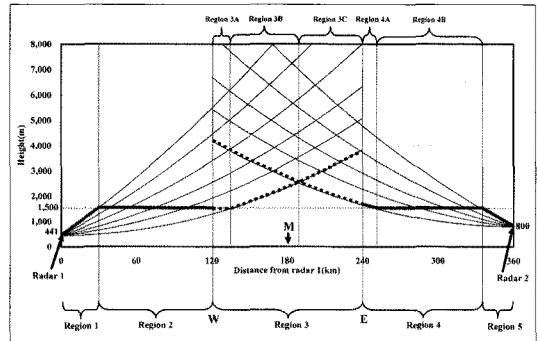
최댓값 합성 방법(Mosaic by Maximum Value; MMV), 평균값 합성 방법(Mosaic by Averaged Value; MAV), 근거리 합성 방법(Mosaic by Nearest Value; MNV), 거리 가중 합성 방법(Mosaic by Distance Weighted Value; MDW)의 산출 방법과 특징은 다음과 같다.

(1) 최댓값 합성 방법

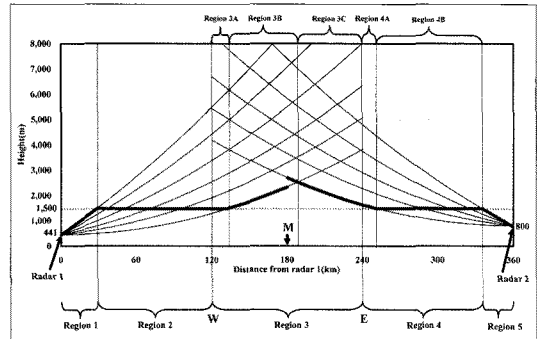
하나의 격자점에 두 개 이상의 레이더 반사도가 관측될 때 중복되는 반사도 중 가장 강한 반사도를 선택하여 합성하는 방법으로서 다음과 같다.



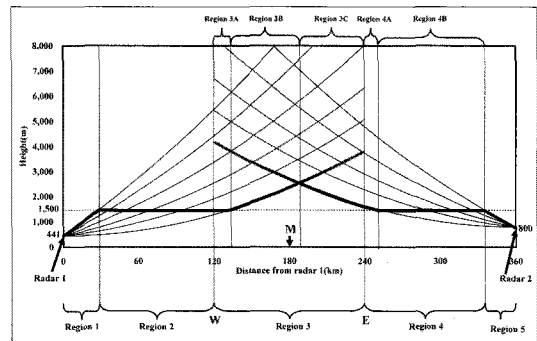
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. Schematic diagrams showing mosaic reflectivity field by (a) Mosaic by Maximum Value (MMV), (b) Mosaic by Averaged Value (MAV), (c) Mosaic by Nearest Value (MNV), (d) Mosaic by Distance Weighted Value (MDW).

$$Z_{MMV} = \sum_{i=0}^n w_i Z_i \left\{ \begin{array}{l} \text{if } Z_i \geq Z_j \text{ then } w_i = 1, w_j = 0 \\ \text{if } Z_i \leq Z_j \text{ then } w_i = 0, w_j = 1 \end{array} \right\}, \quad (1)$$

where $i = 1 \dots n, j = 1 \dots n, i \neq j$

여기서 Z_{MMV} 는 해당 격자점의 반사도, Z_i 와 Z_j 는 레이다에서 관측한 반사도, 첨자 i, j 는 격자점을 관측하는 레이다, w_i 와 w_j 는 반사도 가중치이다. n 은 해당 격자점을 관측할 수 있는 레이다의 수이다.

최댓값 합성 방법은 Fig. 2(a)로 설명할 수 있다. 레이다 1이 레이다 2보다 같은 예코에 대해서 강하게 관측한다고 가정하면, 레이다 1의 관측 범위에 해당하는 영역 1과 2에서는 레이다 1의 반사도를 선택하고, 레이다 2의 관측 범위에 해당하는 영역 4와 5에서는 레이다 2의 반사도를 선택하여 합성한다. 그러나 영역 3에서는 레이다 1의 강한 반사도를 선택하여 합성한다. 따라서 영역 3과 영역 4 사이에 강한 불연속선이 나타난다. 이와 같이 이 방법은 어느 한쪽 레이다의 반사도가 다른 레이다에 비해 강한 경우에 E지점 또는 W지점에서 불연속선이 나타날 수 있다. 또한 영역 3B와 3C에서는 고도 1.5 km CAPPI가 아닌 반사도가 합성된다.

(2) 평균값 합성 방법

하나의 격자점에 두 개 이상의 레이다 반사도가 관측될 때 중복되는 반사도의 평균값을 산출하여 합성하는 방법으로서 다음과 같다.

$$Z_{MAV} = \sum_{i=1}^n w_i Z_i, w_i = \frac{1}{n} \quad (2)$$

여기서 Z_{MAV} 는 해당 격자점의 반사도, Z_i 는 레이다에서 관측한 반사도, 첨자 i 는 격자점을 관측하는 레이다, w_i 는 반사도 가중치이다. n 은 해당 격자점을 관측할 수 있는 레이다의 수이다.

평균값 합성 방법의 모식도인 Fig. 2(b)를 보면, 영역 3에서 두 레이다 반사도의 평균값을 선택한다. 따라서 영역 3에서는 영역 1, 2, 4, 5에서 두 레이다의 고도 1.5 km CAPPI 반사도가 합성되는 것과 달리, 다른 고도의 평균 반사도가 합성된다. 이 방법에서는 최댓값 합성 방법과 같은 뚜렷한 불연속은 나타나지 않지만, 두 레이다의 양쪽 경계 지점인 E와 W지점에서 불연속이 나타나게 된다.

(3) 근거리 합성 방법

하나의 격자점에 두 개 이상의 레이다 반사도가 관측될 때 중복되는 반사도 중 격자점과 레이다 중심과의 거리가 가까운 레이다의 반사도를 선택하여 합성하는 방법으로서 다음과 같다.

$$Z_{MNV} = \sum_{i=0}^n w_i Z_i \left\{ \begin{array}{l} \text{if } d_i \geq d_j \text{ then } w_i = 1, w_j = 0 \\ \text{if } d_i \leq d_j \text{ then } w_i = 0, w_j = 1 \end{array} \right\}, \quad (3)$$

where $i = 1 \dots n, j = 1 \dots n, i \neq j$

여기서 Z_{MNV} 는 해당 격자점의 반사도, Z_i 와 Z_j 는 레이다에서 관측한 반사도, 첨자 i, j 는 격자점을 관측하는 레이다, w_i 와 w_j 는 반사도 가중치, d_i 와 d_j 는 각 레이다로부터 해당 격자점까지의 거리이다. n 은 해당 격자점을 관측할 수 있는 레이다의 수이다.

근거리 합성 방법의 모식도인 Fig. 2(c)를 보면, 두 레이다의 등거리 지점인 M을 중심으로 레이다 1에 가까운 지점은 레이다 1의 반사도를 합성하며 레이다 2에 가까운 지점은 레이다 2의 반사도를 합성한다. 단, 영역 3B와 3C에서는 고도 1.5km CAPPI 반사도가 아닌 더 높은 고도의 반사도를 합성한다. 두 레이다 반사도의 차이가 있을 경우 M에서 불연속이 나타날 수 있다.

(4) 거리 가중 합성 방법

하나의 격자점에 두 개 이상의 레이다 반사도가 관측될 때 중복되는 반사도를 격자점과 레이다 중심과의 거리를 계산하여 합성하는 방법으로서 다음과 같다.

$$Z_{MDW} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i Z_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, w_i = \frac{1}{d_i^x} \quad (4)$$

여기서 Z_{MDW} 는 해당 격자점의 반사도, Z_i 는 레이다에서 관측한 반사도, 첨자 i 는 격자점을 관측하는 레이다, w_i 는 반사도 가중치, d_i 는 격자점과 각 레이다와의 거리, x 는 거리에 대한 가중치를 나타내는 변수로 x 를 2로 하면 레이다와의 지점과의 거리에 대해 제곱의 가중치를 준다. 즉 두 레이다가 있을 때 x 가 커질수록 가까운 레이다의 가중치는 커지고, 멀리 있는 레이다의 가중치는 작아지게 된다. n 은 해당 격자점을 관측할 수 있는 레이다의 수이다.

거리 가중 합성 방법의 모식도인 Fig. 2(d)를 보면,

영역 3에서 각 레이더로부터의 역거리에 비례하여 가중 평균된 반사도를 합성한다. M지점을 중심으로 레이더 1에 가까울수록 레이더 1의 가중치가 높아지고, 레이더 2에 가까워질수록 레이더 2의 가중치가 높아진다.

2) 고도 가중 합성 방법

본 연구에서 새로이 제안한 고도 가중 합성 방법(Mosaic by Height-Weighted Value; MHW)방법은 반사도 보정 후 반사도 합성을 수행하였다. 먼저 반사도 합성 시에 발생하는 에코의 불연속성을 제거하기 위해 레이더간의 반사도를 비교하여 차이를 보정하였다. 두 레이더의 강우강도와 자동기상관측장비 강우강도를 비교하여 기준레이더를 선정하고 다른 하나의 레이더는 보정 레이더로 선정하였다. 기준 레이더는 진도 레이더와 구덕산 레이더 관측 반경 중복 지역의 자동기상관측장비 강우강도와 두 레이더 강우강도를 상관계수(γ)와 제곱근평균오차(Root Mean Square Error; RMSE) 분석을 통해 선정하였다. 레이더 반사도를 강우강도로 추정함에 있어 Marshall and Palmer(1948)가 제안한 식을 $Z = 200 R^{1.6}$ 이용하였다. 다음으로 중복격자점에서 각 레이더 반사도를 산출하고 최소 자승법을 이용하여 $y = ax + b$ 와 같은 보정식을 구하였다. x 는 보정 전 레이더의 반사도이고, y 는 보정 후 레이더의 반사도이다. 보정식을 보정할 레이더에 적용하여 각 격자점에서의 보정된 레이더 반사도를 구했다. 보정된 레이더 반사도를 이용하여 반사도 합성을 하였다. 합성 방법은 중복되는 반사도를 격자점의 고도와 1.5 km 고도와의 차를 계산하여 가중치를 주는 방법으로서 다음과 같다.

$$Z_{MHW} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i Z_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, w_i = \frac{1}{h_i^x} \quad (5)$$

여기서 Z_{MHW} 는 해당 격자점의 반사도, Z_i 는 레이더에서 관측한 반사도, 첨자 i 는 격자점을 관측하는 레이더, w_i 는 반사도 가중치, h_i 은 CAPPI 고도와 각 레이더가 관측한 빈 고도와의 거리차이, x 는 거리에 대한 가중치를 나타낸다. n 은 해당 격자점을 관측할 수 있는 레이더의 수이다.

고도 가중 합성 방법의 모식도인 Fig. 3을 보면, 영역 3은 CAPPI 고도로부터의 역거리에 비례하여 가중 평균

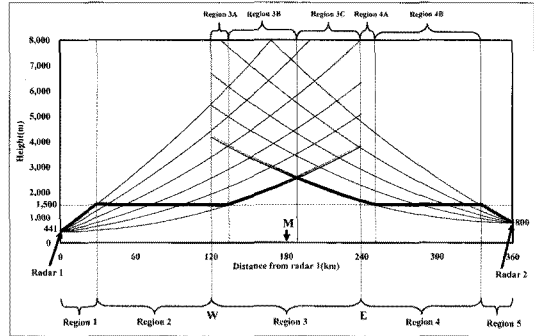


Fig. 3. Schematic diagrams showing mosaic reflectivity field by Height-Weighted Value (MHW).

된 반사도를 이용한다. 영역 3B에서는 CAPPI 고도에 가까운 레이더 1의 가중치가 높고, 영역 3C에서는 레이더 2의 가중치가 높다. 영역 3B와 영역 3C 내에서도 CAPPI 고도와 거리에 따라 가중치가 달라진다.

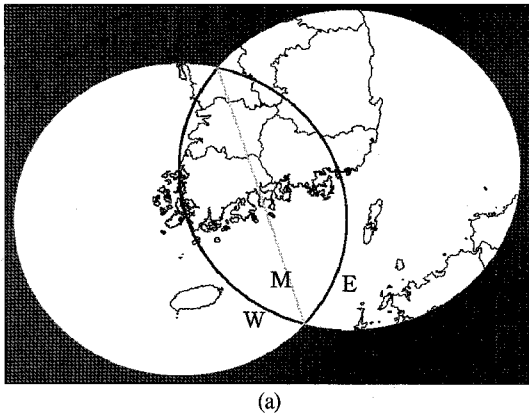
3) 에코의 연속성 비교 방법

기존의 합성 방법과 고도 가중 합성 방법에서 두 레이더 간의 경계선에서 인접한 강수 에코의 연속성을 다음과 같이 비교하였다. 연속성을 비교하기 위한 경계선 지점은 Fig. 4(a)와 같이 구분하였으며, 진도 레이더 관측반경의 동쪽 가장자리(E는 Fig. 2의 E와 동일지점), 진도 레이더와 구덕산 레이더로부터의 동일 거리 지점(M는 Fig. 2의 M과 동일지점), 구덕산 레이더의 관측반경 서쪽 가장자리(W는 Fig. 2의 W와 동일지점)에 대해 γ 와 RMSE를 분석하였다. 경계선에서 γ 와 RMSE를 구하기 위한 반사도 추출 지점은 Fig. 4(b)와 같다. 경계선을 중심으로 진도 레이더로부터 A, B, C, D로 네 그룹을 만들고 경계선을 따라 각 그룹별로 반사도를 추출 ($A_1 \sim A_N, B_1 \sim B_N, C_1 \sim C_N, D_1 \sim D_N$)한다. 사례 분석에서는 A와 B의 관계를 A' , B와 C의 관계를 B' , C와 D의 관계를 C' 으로 정의하였다.

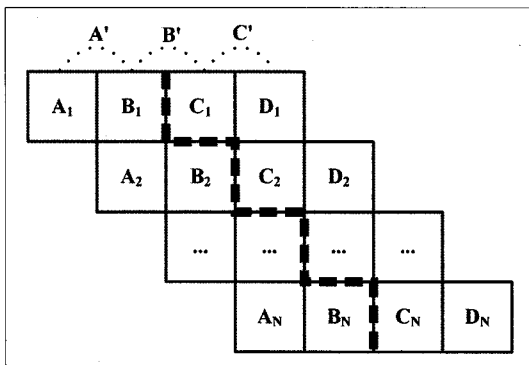
각 합성 방법에 따라 B와 C지점의 관측값을 이용하여 다음식과 같이 치우침(Bias; ϵ)을 분석하였다.

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=0}^n C_i}{\sum_{i=0}^n B_i}, w_i = \frac{1}{h_i^x} \quad (6)$$

여기서 B_i 는 B지점의 반사도, C_i 는 C지점의 반사도, i 는 경계선의 관측 지점이다. ϵ 의 값이 1에 가까울수록 B와



(a)



(b)

Fig. 4. Schematic diagrams to analyse discontinuity in radar reflectivities on the radar ranges and the equidistance line from the two radars. The figure (a) in the upper panel shows a discontinuity boundary (W : west edge boundary from Gudeoksan radar, M : equidistance boundary from Jindo and Gudeoksan radars, E : east edge boundary from Jindo radar). The figure (b) in the lower panel shows pixels to analyse discontinuity at each boundary.

C지점의 값의 차이가 작다는 것을 나타낸다.

4. 분석 결과

1) 합성 방법의 모의실험 비교

임의 레이더 반사도 값을 입력하여 합성장을 모의하고 그 특성을 비교하였다. 진도 레이더에 49dBZ, 구덕산 레이더에 22dBZ의 레이더 반사도를 각 합성 방법으로 산출한 합성장은 Fig. 5와 같다. 최댓값 합성 방법의 모의 결과인 Fig. 5(a)를 보면, 하나의 레이더 반사도가 다른 레이더 반사도에 비해 강하게 관측된다면, 강한 레이더의 반사도가 해당 레이더 관측 범위 전체 영역의 반

사도가 된다. 평균값 합성 방법의 모의 결과인 Fig. 5(b)를 보면, 두 레이더가 관측하는 중복 격자점의 반사도는 각 레이더의 평균 반사도가 된다. 근거리 합성 방법의 모의 결과인 Fig. 5(c)를 보면, 두 레이더 중심 경계 지역을 중심으로 하여 각 레이더의 반사도를 이용한다. 거리 가중 합성 방법의 모의 결과인 Fig. 5(d)를 보면, 거리에 반비례하여 가중치를 변화하는 방법으로 레이더로부터 멀어짐에 따라 가중치가 선형으로 감소한다. 고도 가중 합성 방법의 모의 결과인 Fig. 5(e)를 보면, 관측 고도와 CAPPI 고도의 차이에 따라 가중치가 달라진다. 각 합성 방법이 중복 영역에서 고유한 특성을 보여 주고 있고 최댓값 합성, 평균값 합성, 근거리 합성 방법은 경계선에서 불연속선이 나타남을 알 수 있다.

2) 태풍 '산산(200613)' 사례의 적용 비교

2006년 제13호 태풍 '산산'의 영향권에 있었던 2006년 9월 17일 1200LST부터 1750LST까지의 기간에 관측된 진도와 구덕산 레이더 반사도를 이용하여 각 합성 방법에 대한 γ , RMSE, ϵ 등을 분석하고 경계 지점의 특징을 비교·분석하였다.

태풍 '산산'은 9월 10일 북태평양 해상(134.80° E, 16.80° N)에서 발달하여 17일 2100LST경 부산 남동쪽 약 170km 부근 해상을 지나 18일 0900LST에 독도 남 남동쪽 약 30km 부근 해상을 지난 후 19일 1500LST에 일본 삿포로 서쪽 약 340km 부근 해상에서 소멸하여 온대저기압으로 변질되었다.

고도 가중 합성을 위하여 레이더 반사도 보정을 수행하였다. 사례 분석 기간 동안 진도 레이더와 구덕산 레이더의 중복 관측반경의 자동기상관측장비와 레이더 강우강도를 비교한 결과는 Fig. 6과 같다. 자동기상관측장비의 평균 강우강도는 2.10mmhr⁻¹이다. 진도 레이더와 자동기상관측장비를 비교한 결과 $\gamma=0.70$, RMSE=1.12이며, 진도 레이더 평균 강우강도는 2.27mmhr⁻¹이다. 구덕산 레이더와 자동기상관측장비를 비교했을 경우 $\gamma=0.57$, RMSE=1.82이며, 평균 강우강도는 1.26mmhr⁻¹이다. 구덕산 레이더 강우강도에 비해 진도 레이더 강우강도가 자동기상관측장비의 γ 가 높고 RMSE가 낮으며 평균 강우강도의 차이도 작으므로 진도 레이더 반사도를 이용하여 구덕산 레이더 반사도를 보정하였다.

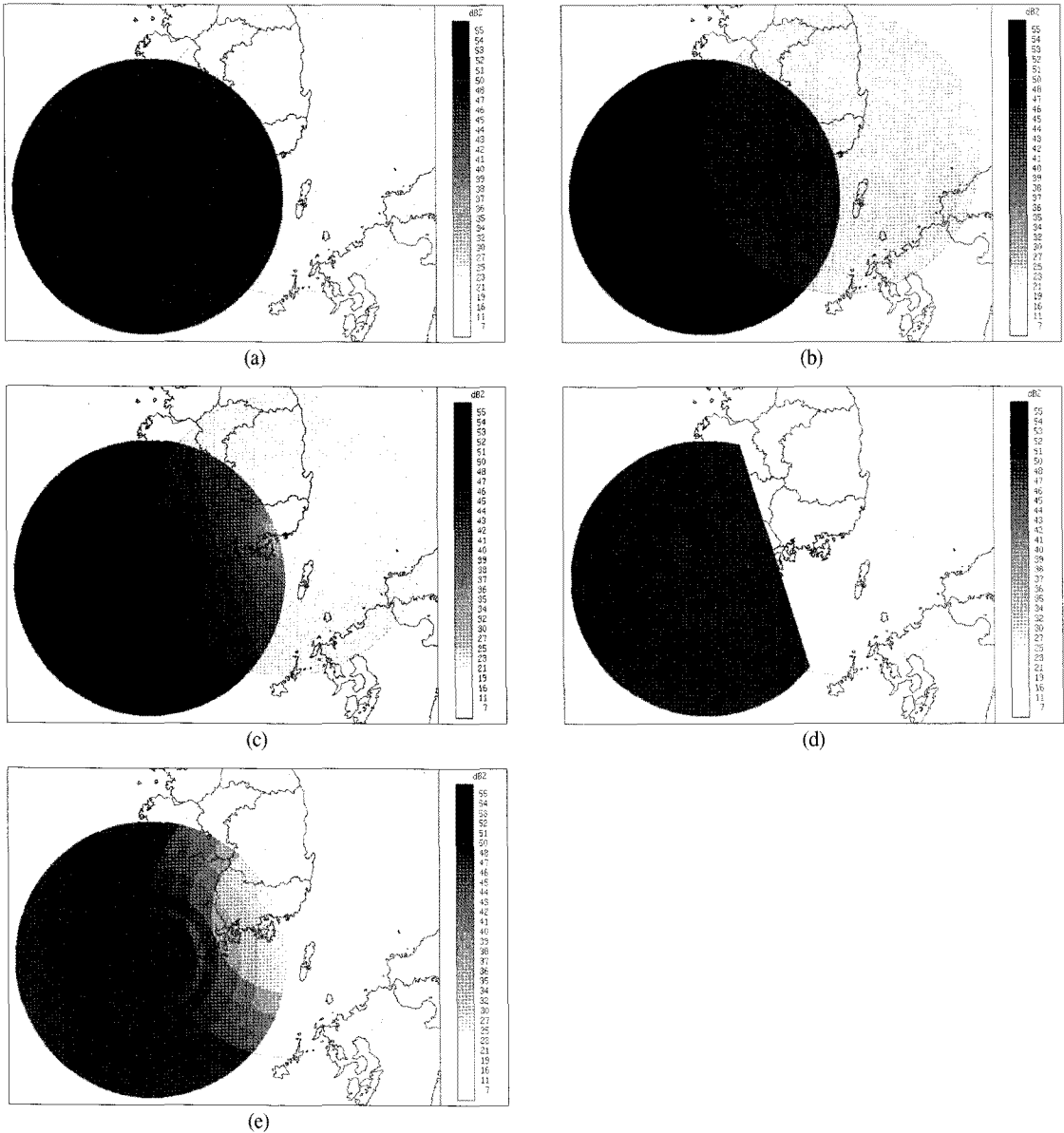
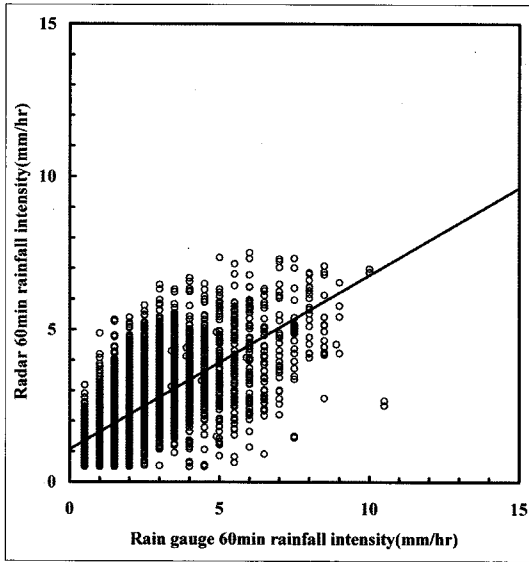


Fig. 5. Reflectivity fields simulated by five mosaic methods: (a) MMV, (b) MAV, (c) MNV, (d) MDW, (e) MHW.

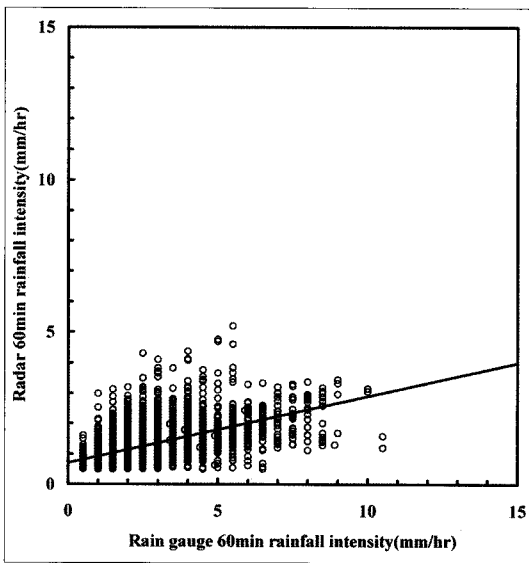
보정식을 산출하기 위하여 3차원 공간의 중복 격자점에 대해 진도 레이더 반사도와 구덕산 레이더 반사도를 비교한 산포도는 Fig. 7(a)과 같다. 진도와 구덕산 레이더를 비교했을 때 $\gamma=0.94$, $RMSE=3.57$ 로 나타났으며, 진도 레이더 평균 반사도는 25.90dBZ이고 구덕산 레이더 평균 반사도는 23.32dBZ로 나타났다. 이를 이용하여 최소자승법으로 상관관계식 $y=0.97x-1.7$ 을 구하여 구덕산 레이더를 보정하였다. 여기서 x 는 구덕산 레이더에서 관측된 반사도이고, y 는 진도 레이더의 반사

도이다. 보정 후 진도 레이더 반사도와 구덕산 레이더 반사도의 $\gamma=0.97$ 로 큰 변화는 없었지만 $RMSE=2.04$ 로 개선되었고, 보정된 구덕산 레이더의 평균 반사도는 24.84dBZ로 진도레이더 반사도와 차이가 줄어들었다. 구덕산 레이더의 반사도 보정 후의 산포도는 Fig. 7(b)이다.

구덕산 레이더 반사도 보정 전·후의 결과인 Fig. 8은 2006년 9월 17일 1630LST의 레이더 반사도 영상이다. Fig. 8(a)은 진도 레이더 반사도, Fig. 8(b)은 보정



(a)

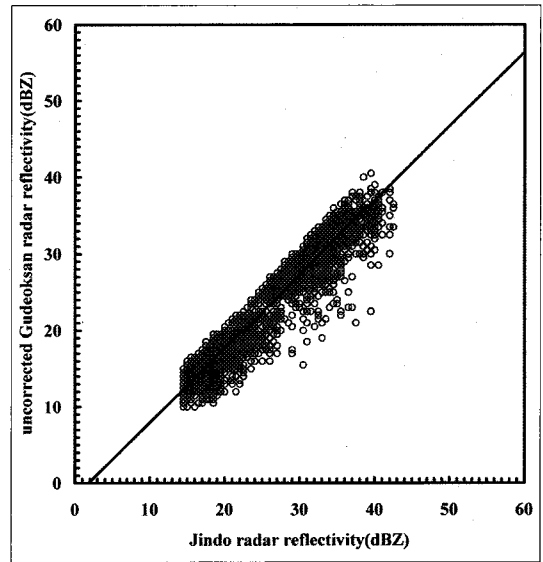


(b)

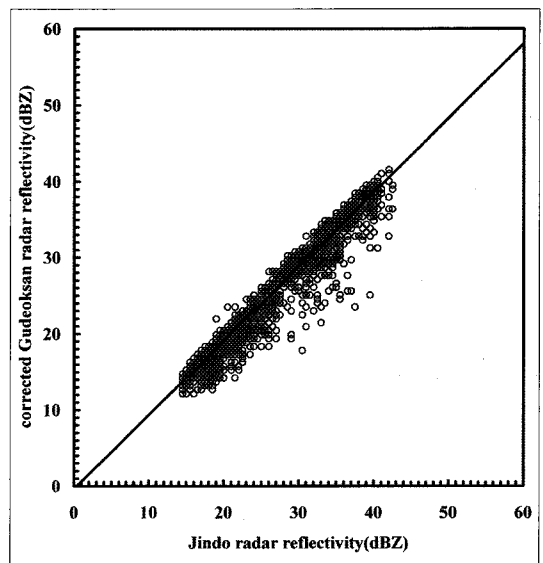
Fig. 6. Scatterplots of rainfall intensity by AWS rain gauges and radars: (a) Jindo and (b) Gudeoksan from 1200LST to 1750LST on 17 Sept. 2006.

전의 구덕산 레이더 반사도, Fig. 8(c)은 보정 후의 구덕산 레이더 반사도, Fig. 8(d)은 보정 후의 구덕산 레이더 반사도와 보정 전의 구덕산 레이더 반사도의 차이를 나타내고 있다. 보정 후의 진도 레이더 반사도와 차이가 줄어들었음을 알 수 있고, 보정 전 보다 약 3dBZ 정도 값이 올라갔음을 알 수 있다.

사례 기간 중 2006년 9월 17일 1630LST의 각 합성 방법별 합성 영상은 Fig. 9이다. Fig. 9(a)는 최댓값 합



(a)



(b)

Fig. 7. Scatterplots of Jindo radar reflectivity versus (a) unadjusted and (b) adjusted reflectivities from Gudeoksan radar. The data was taken for the period of 1200LST to 1750LST on 17 Sep. 2006.

성, Fig. 9(b)는 평균값 합성, Fig. 9(c)는 근거리 합성, Fig. 9(d)는 거리 가중 합성, Fig. 9(e)는 고도 가중 합성이다. 최댓값 합성의 경우에 진도 레이더 동쪽 경계선(E)에서 불연속 지점이 나타나고, 평균값 합성의 경우에는 진도 레이더 동쪽 경계선(E)과 구덕산 레이더 서쪽 지점(W)에서 약하게 불연속면이 나타난다. 근거리 합성의 경우에는 진도 레이더와 구덕산 레이더의 동일 거리

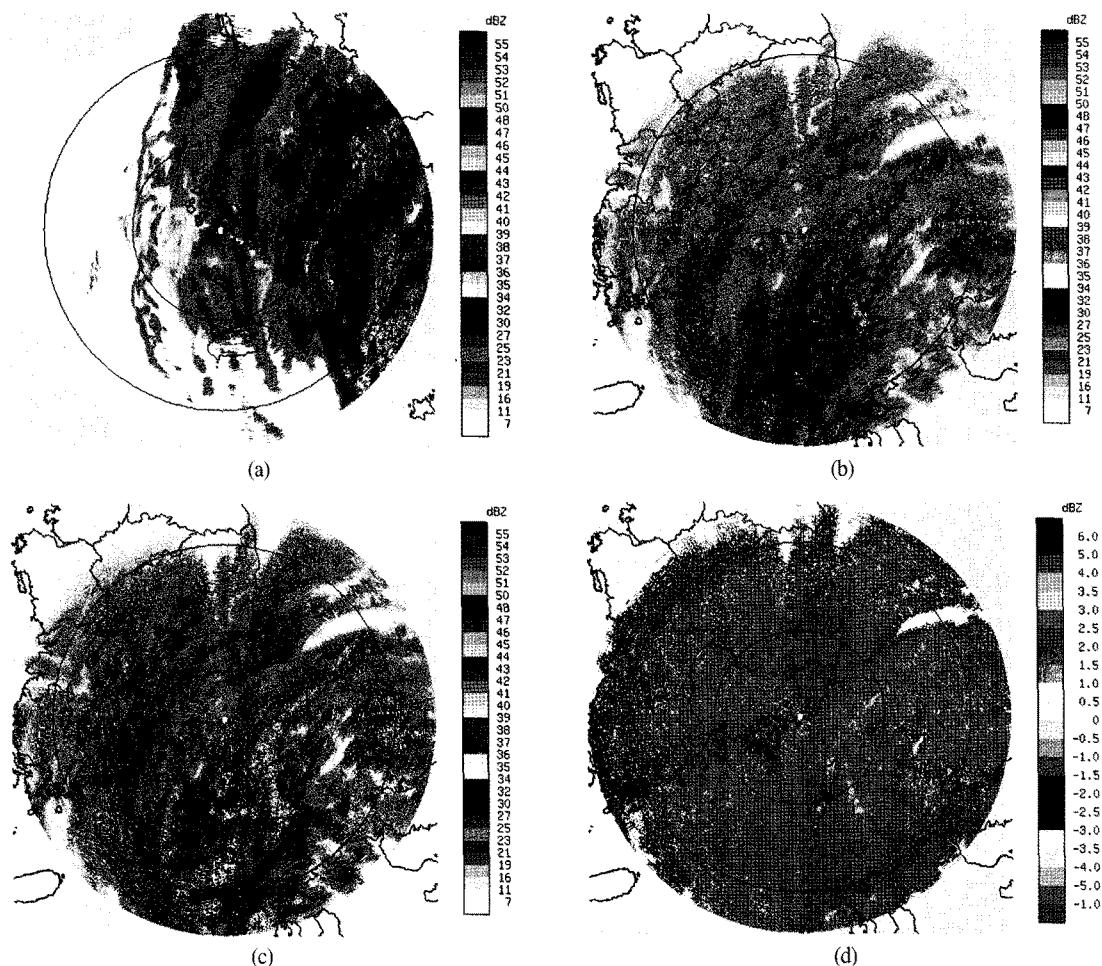


Fig. 8. CAPPI images of reflectivity: (a) Jindo radar, (b) unadjusted Gudeoksan radar, (c) adjusted Gudeoksan radar. (d) shows the difference between adjusted and unadjusted reflectivity of Gudeoksan radar at 1630LST on 17 Sep. 2006. The range interval in the figures is 100km.

지점(M)에 불연속면이 나타났다. 거리 가중 합성과 고도 가중 합성은 불연속면은 거의 나타나지 않았다.

2006년 9월 17일 1630LST의 각 합성 방법별 경계 지점에 대한 γ 분석 결과는 Fig. 10이고, RMSE 분석 결과는 Fig. 11이다. 최댓값 합성은 진도 레이더 동쪽 경계선 지점(E)에서 낮은 γ 와 높은 RMSE를 보여서 연속성이 낮은 것으로 나타났다. 평균값 합성은 최댓값 합성보다 차이가 작았지만 낮은 γ 와 높은 RMSE를 보였다. 근거리 합성은 동일한 거리 지점(M)에서 낮은 γ 와 높은 RMSE를 보여주어 연속성이 낮았다. 거리 가중 합성과 고도 가중 합성은 경계선에서는 γ 와 RMSE는 비슷하지

만 고도 가중 합성 방법이 거리 가중 합성보다 연속성이 높은 것으로 나타났다. 2006년 9월 17일 1200LST부터 1750LST까지 ε 의 분석 결과는 Fig. 12이다. 고도 가중 합성이 거리 가중 합성보다 작은 ε 을 보였다. 고도 가중 합성 방법 중 레이더 반사도 보정에 의한 효과를 분석하기 위하여 레이더 반사도 보정을 제외하고 다른 합성방법과 비교하여 ε 의 분석 결과는 Fig. 13이다. 고도 가중 합성의 경우 레이더 반사도 보정과 관계없이 가장 좋은 ε 를 보여주어 다른 합성 방법에 비해 가장 우수한 것으로 나타났다.

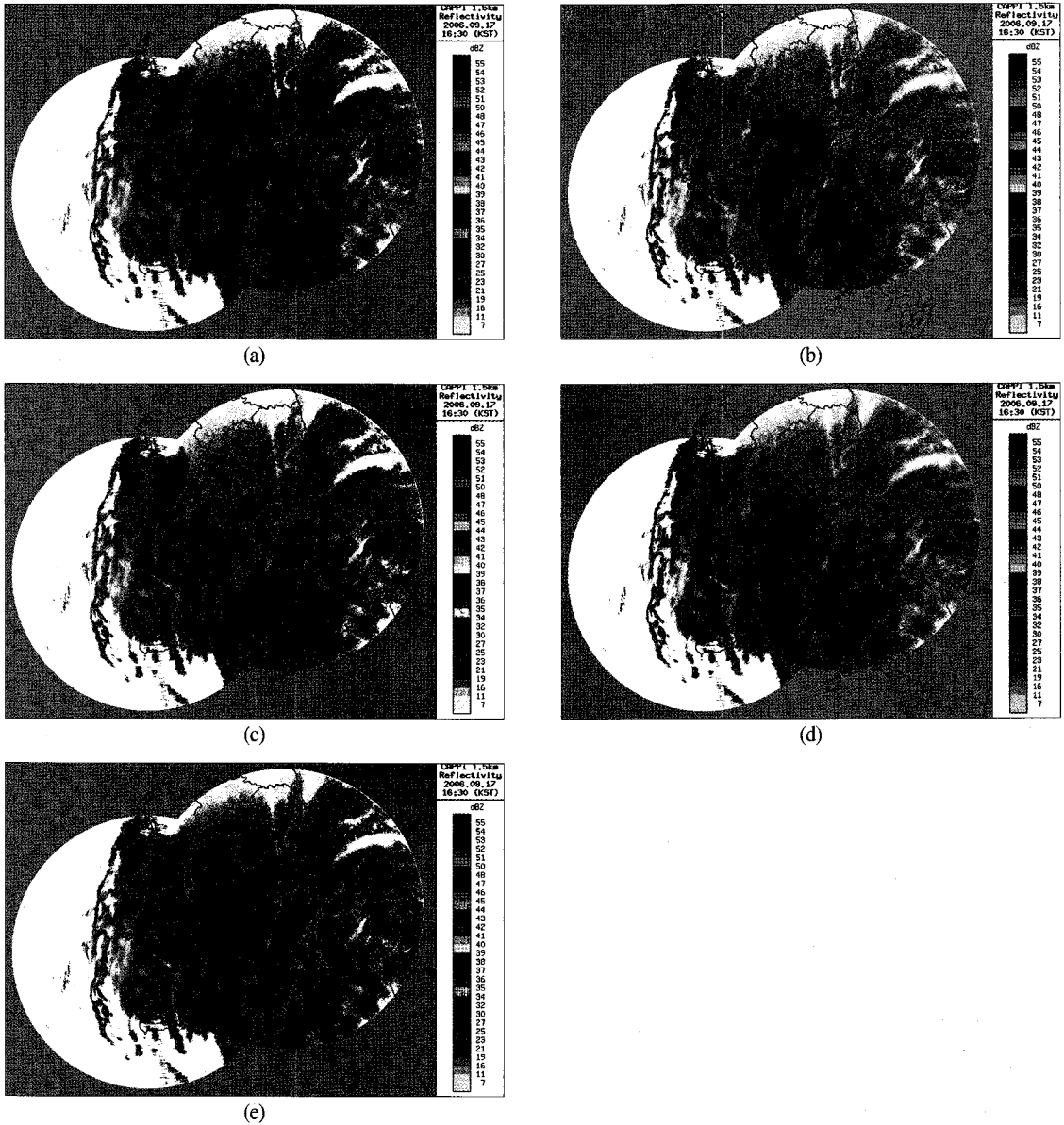
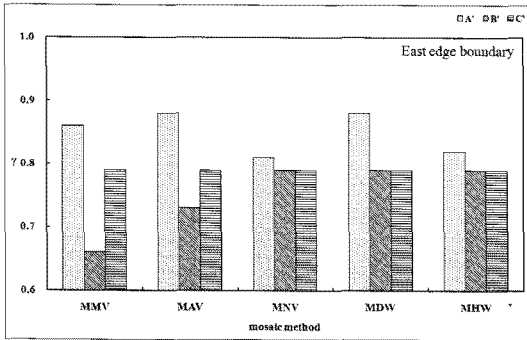
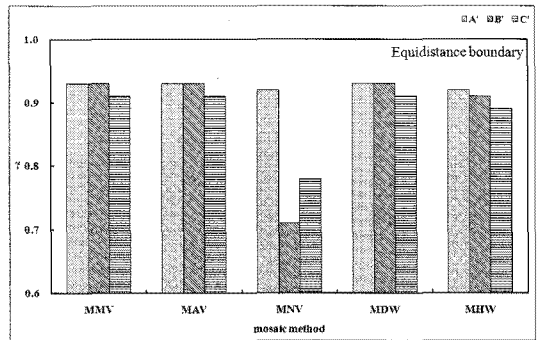


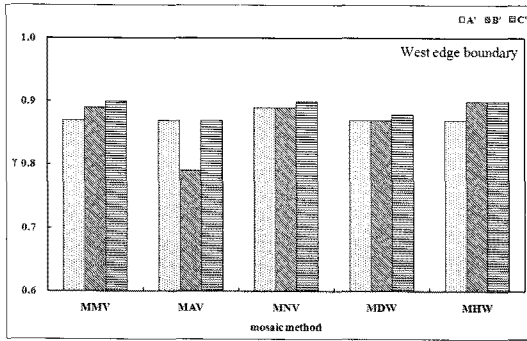
Fig. 9. Mosaic images of Jindo and Gudeoksan radar reflectivities: (a) MMV, (b) MAV, (c) MNV, (d) MDW, (e) MHW at 1630LST 17 Sep. 2006.



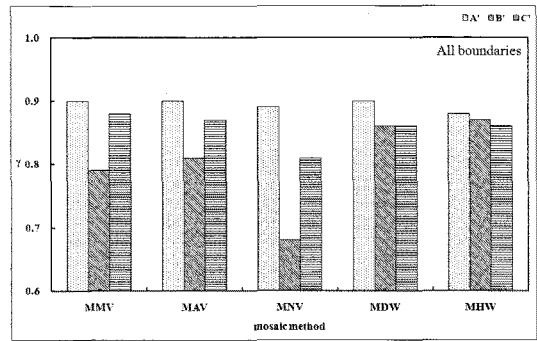
(a)



(b)

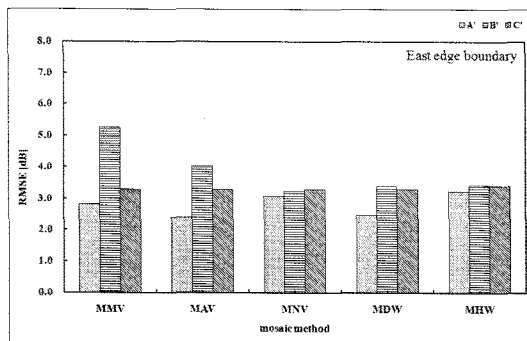


(c)

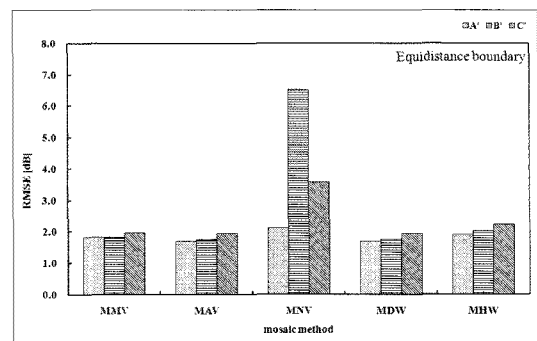


(d)

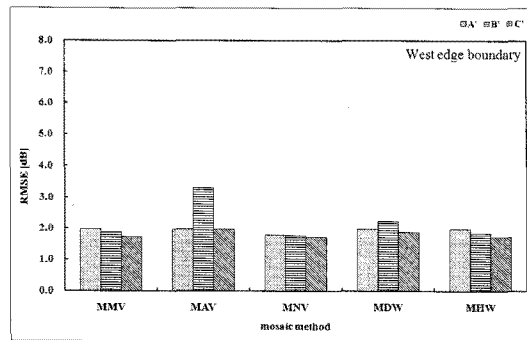
Fig. 10. Histograms of correlation coefficient for mosaic methods: (a) east edge boundary from Jindo radar, (b) equidistance boundary from Jindo and Gudeoksan radar, (c) west edge boundary from Gudeoksan radar and (d) all boundaries at 1630LST 17 Sep. 2006.



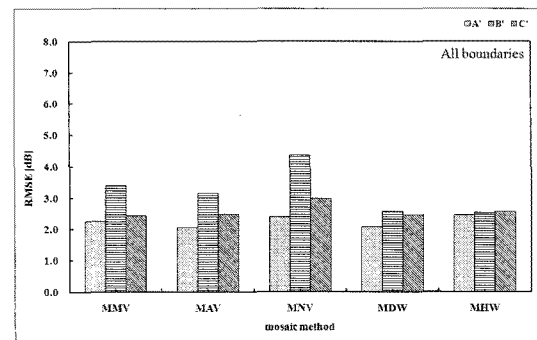
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11. Same as Fig. 10 except for root mean square error (RMSE).

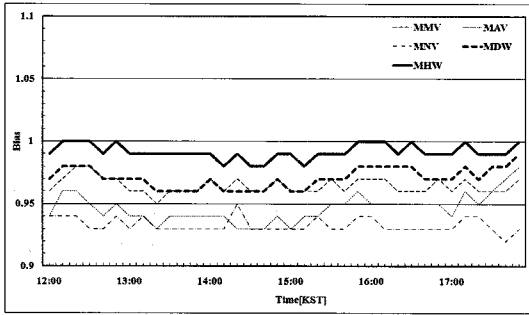


Fig. 12. Time-series plot for radar reflectivity bias of Jindo and Gudeoksan radar. The radar reflectivity bias on the three boundaries was obtained by five different mosaic methods from 1200LST to 1750LST on 17 Sep. 2006.

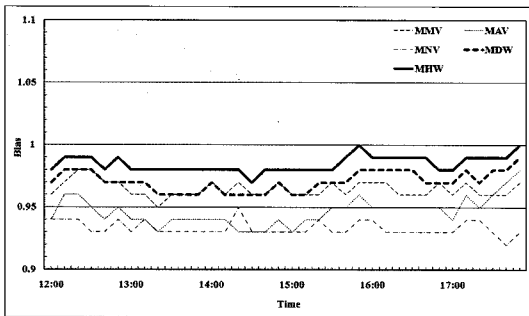


Fig. 13. Same as Fig. 12 except for MHW without adjustment.

5. 결론

본 연구에서는 기존 레이더 반사도 합성 방법의 특성을 비교하였고, 이들 방법의 문제점을 개선하기 위하여 새로운 고도 가중 합성 방법을 제시하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 고도 가중 합성 방법과 기존 합성 방법을 모의실험과 태풍사례에 적용하여 그 특성을 비교·분석하였다.

기존 합성 방법과 새로 제안된 합성 방법에 대한 모의실험을 수행 결과를 보면, 각 합성 방법에 따른 중복 영역에서 고유한 특성을 확인할 수 있었고, 최댓값 합성, 평균값 합성, 근거리 합성 등의 방법에서 경계선의 불연속이 뚜렷하고, 고도 가중 합성 방법에서 다소 약해지는 것을 알 수 있었다.

기존 합성 방법과 새로 제안된 합성 방법에 대한 태풍사례 적용 결과는 다음과 같다. 하나의 레이더가 강하게 관측할 때 중복 영역에서 강한 레이더의 반사도로 표현되는 최댓값 합성 방법에서는 상대적으로 강하게 관측되는 진도 레이더의 반사도가 중복 영역의 대부분을

차지하게 되면서 진도 레이더 관측반경 동쪽 가장자리에서 낮은 연속성을 보였다. 중복 영역에서 두 레이더의 평균 관측값으로 표현하는 평균값 합성 방법에서는 레이더의 반사도 차이에 의해 진도 레이더 관측반경 동쪽 가장자리와 구덕산 레이더 관측반경 서쪽 가장자리에서 낮은 연속성을 보였다. 두 레이더의 동일 거리 지점을 기준으로 각각 레이더의 반사도를 이용하는 근거리 합성 방법에서는 두 레이더의 동일 거리 지점에서 상대적으로 강한 진도 레이더 반사도와 상대적으로 약한 구덕산 레이더 반사도에 의해 낮은 연속성을 보였다. 각 격자점에 대해서 레이더와의 거리에 의해 가중치가 달라지는 거리 가중 합성 방법은 모든 경계선에서 높은 연속성을 보여 주었지만 치우침(ϵ)이 조금 낮게 분석되었다. 진도와 구덕산 레이더의 반사도 차이를 보정하고 1.5 km 고도와 실제 관측한 지점과의 고도차에 따라 다른 가중치를 부여하여 표현한 고도 가중 합성 방법에서는 모든 경계선에서 가장 우수한 연속성을 보여주었고 치우침도 가장 우수한 결과를 보여 주었다.

본 연구에서 제안한 고도 가중 합성 방법은 레이더간의 보정 차이와 합성 경계선에서 불연속을 현저하게 개선하였다. 이 방법은 레이더를 적용하면 정량적인 강우량 산정과 단시간 예보의 정확성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술사업(CATER 2009-2109)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 기상청, 2003. 기상청 지동기상관측망 현황, 기상청 관측담당관실 기술노트, 2003-1: 61pp.
- 허소정, 임은하, 엄원근, 류상범, 1998. 기상청 레이더 원시 자료의 합성에 관한 고찰. 1998년 한국기상학회 가을학술발표회.
- Atlas, D., 2002. Radar calibration: come simple approaches, *Bull. Amer. meteor. Soc.*, 83: 1313-

- 13316.
- Fo, A. J. P., K. C. Crawford, and C. L. Hartzell, 1998. Improving WSR-88D hourly rainfall estimates, *Wea. Forecasting*, 13: 1016-1028.
- Gourley, B. Kaney, and R. A. Maddox, 2003. Evaluating the calibrations of radars: A software approach. Preprints, *31st Int. Conf. on Radar Meteorology*, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 459-462.
- Lakshmanan. V., T. Smith, K. Hondl, G. J. Sutmpf, and A. Witt, 2006. A real-time, three-dimensional, rapidly updating, heterogeneous radar merger technique for reflectivity, velocity, and derived products, *Wea. Forecasting*, 21: 802-823.
- Marshall, J. S. and W. McK. Palmer, 1948. The distribution of raindrops size. *J. Atmos. Sci.*, 5: 165-166.
- Mohr, C. G. and R. L. Vaughan, 1979. An economical procedure for cartesian interpolation and display of reflectivity factor data in three-dimensional space, *J. Appl. Meteor.*, 18: 661-670.
- Zhang, J., K. Howard, and J. J. Gourley, 2005. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22: 30-42.