

레이더 반사도 누적 방법을 이용한 지형에 의한 부분차폐영역의 레이더 반사도 보정

Correction of Radar Reflectivity over Beam Blocking Area by Accumulated Radar Reflectivity

박 성 환* / 정 성 화** / 이 정 훈*** / 김 경 익****

Park, Sung-Hwan / Jung, Sung-Hwa / Lee, Jung-Hoon / Kim, Kyeong-Eak

Abstract

Radar beam blocking which is partially or entirely interrupted by obstacles like a mountain causes underestimation of the rainfall. In this paper, partially blocked radar reflectivity is retrieved using the ARM(Accumulated Reflectivity Map). ARM is made by accumulation of the radar reflectivity and very useful product to analyze the beam blockage. The blockage correcting map could be obtained by assuming the spatially uniform reflectivity field in the ARM. This method is applied to the cases of typhoon and Changma, and we obtain the MFE(Mean Fractional Error) from two radar data, the one is objective radar data which is affected by blockage and the other is comparative radar data which is not affected by blockage. Before blocking correction, MFE is 20-35%. However, after correction, MFE decreases to 7-10%.

keywords : beam blocking, accumulated reflectivity, blocking correction

요 지

레이더 빔 차폐는 송신된 레이더 빔이 지형 및 차폐물로 인해 부분 혹은 완전히 차단되는 현상으로 강수량 추정 시 과소추정의 주된 원인이 된다. 본 연구에서는 레이더 누적반사도지도를 이용하여 지형에 의한 부분차폐영역의 반사도를 보정하였다. 누적반사도지도는 레이더 반사도를 누적하고, 공간적으로 균일한 레이더 반사도 장을 가정하여 작성하며, 빔 차폐를 분석하는데 유용한 자료이다. 차폐분석을 통해 차폐보정지도를 작성하고, 태풍과 장마 사례에 적용하여 차폐가 발생하지 않는 레이더 자료와의 평균분수오차를 분석하였다. 그 결과, 평균분수오차가 차폐보정 전에 20~35%로 나타났으나 차폐보정 후 7~10%로 감소하였다.

핵심용어 : 빔 차폐, 누적반사도, 차폐보정

* 경북대학교 대학원 천문대기과학과 석사
M.S. Dept. of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea
** 경북대학교 대학원 천문대기과학과 박사과정
Ph.D. course, Dept. of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea
*** 케이웨더(주) WIIS 개발팀 과장
Manager, WIIS Development team, Kweather Co., Ltd., Seoul, 152-740, Korea
**** 교신저자, 경북대학교 자연과학대학 천문대기과학과 정교수
Corresponding Author, Full Professor, Dept. of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea
(e-mail: kimke@knu.ac.kr)

1. 서론

한반도에는 장마, 태풍 등 집중적인 강수로 인해 인명 및 재산피해가 매년 발생하고 있다. 집중호우로 인한 수해를 최소화하기 위해 효율적인 수문관리가 필요하다. 강우레이더는 공간적인 강우 자료를 제공함으로써 수문관리 및 운영에 기여한다.

레이더 자료를 이용함에 있어서 지형에코제거, 이상굴절보정, 거리집힘보정, 차폐보정 등 산출물의 품질관리가 중요하다. 특히, 지형에 의한 레이더 빔의 차폐는 송신된 레이더 빔이 레이더 주변의 지형 및 차폐물로 인해 부분 혹은 완전히 차단되는 현상으로 강수량 과소 추정의 주된 원인이다. 또한, 국토의 70% 이상이 산악으로 이루어진 한반도에서는 차폐보정이 필수적이다.

지형에 의한 레이더 빔 차폐와 관련된 선행연구 중, 최근에 중요하게 다루어졌던 연구들은 다음과 같다. Fulton *et al.*(1998)은 레이더 방정식에 근거하여 빔의 차폐율에 따른 보정값을 계산하였다. Bech *et al.*(2003)은 고층기상자료를 이용하여 대기의 연직굴절률기울기(Vertical Refractivity Gradient, VRG)를 계산한 후, 레이더 빔 전파 방정식에 적용하였다. 그리고 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)을 접목하여 VRG에 따라 차폐율을 계산하는 빔 전파 모델(Beam Propagation Model, BPM)을 제시하였으며, Fulton *et al.*(1998)이 제시한 보정값을 이용하여 차폐를 보정하였다. Kucera *et al.*(2004)은 레이더의 격자점마다 반사도의 유무를 기록한 탐지확률지도(Probability of Detection map, POD map)와 BPM 분석을 통한 차폐율을 비교하였다. Gjertsen and Haase(2005)는 BPM을 이용하여 노르웨이 Rissa 레이더 관측소 주변의 빔 차폐율을 분석하였으며, 분석결과를 검증하기 위해 레이더 강우강도를 누적했을 때의 차폐형태와 비교하였다. Fornasiero *et al.*(2005)은 지형에코를 누적한 자료와

BPM 분석 결과를 결합하여 지형에코와 이상굴절로 인한 에코를 제거하였다. 그리고 레이더 빔 단면의 전파 밀도가 가우시안(Gaussian) 분포를 나타내는 것을 고려하여 가중치를 적용하여 보정값을 계산하고 차폐율에 따라 보정을 수행하였다.

최근 국내에서도 레이더 빔 차폐에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 배덕효 등(2005)은 수문학적 활용에 있어서 레이더 에코의 POD 분석을 통해 지형 에코와 빔 차폐영역을 구분하였으며, 석미경 등(2005)은 WPMM(Window Probability Matching Method) 구현을 위해 강우가 활발한 3개월간의 레이더 반사도를 누적하여 방위각별로 레이더 관측효율을 분석한 바 있으나, 대부분의 선행 연구들은 BPM을 이용하여 빔 진행의 모의와 관련된 연구에 국한되어 있다. 또한 빔 차폐 보정에 관한 연구들은 DEM 자료에 기반을 두고 분석한 차폐율에 따라 이론적으로 계산한 값으로 보정하는데 그쳤다.

한편, 수치고도모델 자료는 제공되는 해상도의 한계가 있을 뿐 아니라, 레이더 자료를 수치고도모델 자료에 적용하기 위해 좌표변환을 하는 과정에서 변환에 따른 오차가 발생한다. 따라서 단지 이론적이고, 좌표변환에 따른 오차가 발생하는 기존의 방법 대신, 레이더 자료의 저장형식을 유지한 상태로 품질관리를 할 수 있는 방법을 연구하고자 하였다. 그래서 본 연구에서는 누적한 레이더 반사도를 이용하여 자료의 품질을 개선하였으며, 실제 산출된 레이더 자료를 이용하여 보정하는 방법을 개발하였다. 먼저, 레이더 반사도 자료를 수집하여 누적하였다. 그리고 누적한 반사도의 빈도를 통계적으로 분석하고, 레이더 관측소 주변의 기후학적인 특성을 고려하여 격자점마다 보정인자를 산출하였다. 다음으로 레이더 반사도 보정을 통해 지형에 의한 차폐현상을 보정하고, 검증을 위해 주변에 차폐현상이 없는 레이더의 자료와 비교하였다.

Table 1. Characteristics of IMJ(Imjingang) Radar

Parameter	Characteristic Value	Parameter	Characteristic Value
Band type	C-band (5.6 GHz)	PRF	500 Hz
Peak power	250 kW	Gate size	500 m
Antenna diameter	5.3 m	Observation range	170 km
Transmitter type	Klystron	Beam width	1.0°
Products	ZT(uncorrected reflectivity) DZ(corrected reflectivity) VR(radial velocity)	Elevation angle	0.4°, 0.5°, 0.6°, 0.7° 0.8°, 0.9°, 1.0°, 1.2° 1.4°, 1.8°, 2.0°, 2.2°

2. 연구자료

본 연구는 건설교통부의 한강홍수통제소에서 운영하는 C밴드 임진강 강우레이더(IMJ: 37.78°N, 127.47°E, 해발고도 102 m) 자료를 이용하였다. 레이더 특성은 Table 1과 같으며 관측반경 170 km에 대해 0.4°부터 2.2°까지 12개 고도각으로 구성된 볼륨관측을 6분 간격으로 수행한다.

3. 연구방법

3.1 가정

레이더 반사도를 장기간 누적하면, 레이더로 관측한 전체 영역에 대해 강수예코가 비슷한 빈도로 통과하여 누적반사도가 공간적으로 균일하게 나타남을 가정할 수 있다(기상연구소, 2003). 한편, 빔 차폐가 발생하는 방위각 영역은 주변에 대해 통상적으로 낮은 반사도가 관측된다. 그래서 레이더 반사도를 지속적으로 누적할 경우, 차폐가 없는 영역은 누적반사도가 지속적으로 증가하는데 반해, 차폐가 발생하는 영역은 차폐율만큼 수신 전력이 줄어든 상태로 관측하기 때문에 누적반사도가 증가하는 폭이 비교적 작다. 그 결과, 차폐가 나타나는 영역은 주변과의 경계가 점차 뚜렷해진다.

3.2 레이더 자료 누적

레이더 빔의 차폐분석을 위해 2004년 1월 1일 0시부터 2004년 10월 17일 8시 6분까지 기상상태에 관계없이 관측계획에 따라 수행된 레이더 자료를 이용하였다. 이 자료들은 Table 1과 같이 관측전략이 동일하며, 고도각 수, 방위각 수, 게이트 수에 있어서 누락이 없는 42,485 개의 볼륨 반사도 자료이다. 수집된 각 게이트의 자료는 고도각(s), 방위각(r), 거리(b)로 구분하여 누적하였다. 이 때, 누적 단위는 수신전력(\overline{P}_R)에 비례해야하며, Eq. (1)의 레이더 방정식과 같이 수신 전력에 비례하는 값은 레이더 반사도 $Z [mm^6 m^{-3}]$ 이다.

$$\overline{P}_R = C \frac{|k|^2}{r^2} Z \quad (1)$$

여기서 C 는 레이더 상수, $|k|^2$ 는 유전계수, r 은 목표물까지의 거리이다. 그러나 레이더 산출물에서 반사도는 dBZ단위로 저장된다. 따라서 Eq. (2)를 이용하여 $mm^6 m^{-3}$ 단위로 변환하고, Eq. (3)을 이용하여 반사도를 누적한다.

$$Z [mm^6 m^{-3}] = 10^{\frac{Z_{dBZ}}{10}} \quad (2)$$

$$Z_{acc}[s, r, b] = \sum_{i=1}^N Z[i, s, r, b] \quad (3)$$

여기서 i 는 자료의 번호이고, N 개 누적하며, $Z_{acc}[s, r, b]$ 는 누적한 반사도이다. 누적반사도는 차폐영역과 차폐가 없는 영역의 반사도 차이가 크기 때문에 분석을 위해 dBZ단위로 변환하였다. 그리고 누적반사도 자료에서 각 격자점의 누적반사도를 전체 볼륨 중 최고누적반사도에 대한 백분율로 나타내어 Fig. 1과 같이 고도각별로 누적반사도지도를 얻었다.

3.3 누적반사도지도(Accumulated Reflectivity Map, ARM) 분석

Fig. 1에 나타난 ARM은 백분율이 높은 지형예코가 레이더 관측소 주변에 넓게 분포한 것을 보여준다. 방위각 195~220°, 265~290° 영역에서 120~170 km 사이의 누적반사도를 보면 120 km 이내에 분포하는 누적반사도보다 높은 값을 띤다. 그 이유는 관측을 수행할 당시 그 주변의 산란입자들이 관측영역 가장자리에 산재하였는데, 이 산란입자들의 예코가 누적된 결과 관측소 주변의 누적반사도보다 높게 나타나는 것이다. 이 현상을 고려하여 차폐분석을 위해 레이더 관측소로부터 120km 떨어진 곳의 누적반사도를 방위각에 따라 추출하여 Fig. 2에 나타내었다. 방위각 195~220°와 265~290°는 주위보다 현저히 낮은 누적반사도를 보여 차폐가 강하게 나타나고 있으며, 방위각 5~20°, 120~130° 등에서도 나타나고 있다.

ARM의 차폐분석과 보정값 기준결정을 위해 누적반사도에 대한 빈도 곡선을 1% 간격으로 Fig. 3에 나타내었다. 가로축은 볼륨 전체에서 최고누적반사도에 대한 백분율이며, 세로축은 격자점의 개수를 나타내었다. 통상적으로 지형예코는 강수예코보다 반사도가 높고, 항상 관측되기 때문에 누적반사도의 빈도 곡선에서 백분율이 큰 영역에 분포한다.

보정값 기준을 결정하기 위해 강수영역과 지형예코영역을 구별해야 한다. 이를 위해 두 가지 사항을 고려하였다. 먼저, 관측고도각이 높아짐에 따라 지형예코는 관측 영역에서 점차 벗어나기 때문에 누적반사도 빈도에서 차츰 감소하는 경향이 있다. 반대로 강수영역은 차폐영역에서 점차 벗어나기 때문에 빈도가 증가하며, 차폐가 없는 영역으로 빈도가 밀집되면서 고도각이 높아짐에 따라 그래프의 기울기가 커진다. 이에 따라 보정값 기준을 61%로 결정하였다. 그리고 완전차폐영역을 제외한 부분차폐가 나타나는 강수영역을 보정임계값 (Z_{acc}^{CRIT})까지 보정해야 한다.

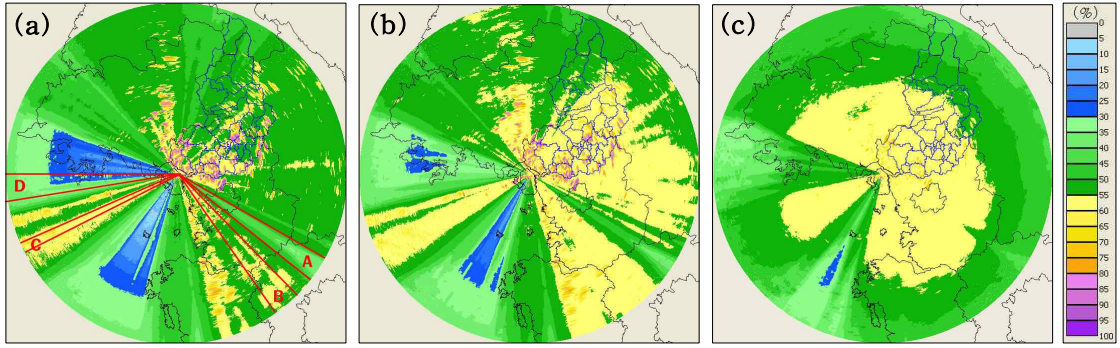


Fig. 1. Accumulated Reflectivity Map (ARM) for Elevation Angle (a)0.4°, (b)1.0°, (c)2.0°. Color-bar Represents the Percentage of Accumulated Reflectivity to the Maximum of Accumulated Reflectivity. Areas of High Values are Clutter and Areas of Low Values are Blocked Area by the Obstacles Around Observatory

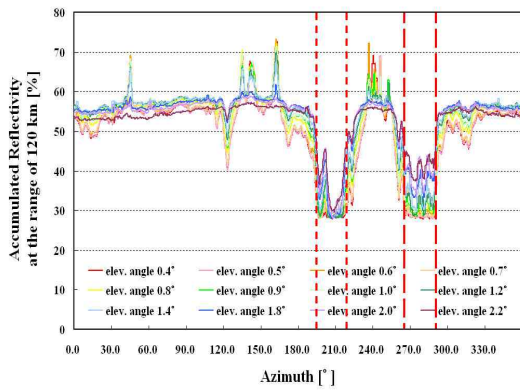


Fig. 2. Variation of Accumulated Reflectivity to Azimuth for Twelve Elevation Angles at the Range of 120 km. Two Azimuthal Regions of Low Value less than 30.0 % are Blocked Region by the Obstacles Around the Observatory

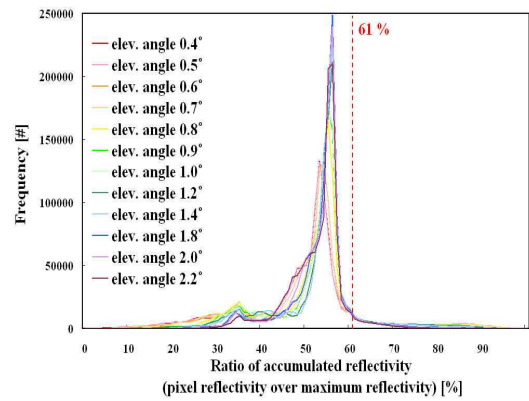


Fig. 3. Frequency Curves of Accumulated Reflectivity for Twelve Elevation Angles. Threshold between Rain Area and Clutter Area is 61 %

다음으로 완전차폐분석을 위해 먼저 최저고도각에서 차폐율이 60%이상으로 나타나는 영역을 선택하였다 (Fulton *et al.*, 1998). 그리고 레이더 빔 폭(1°) 이상의 범위에 걸쳐 비슷한 강도를 나타내는 방위각 영역을 분석한 결과, Fig. 2와 같이 방위각 195°~220°와 265°~290°에 완전차폐영역이 분포하였다. 그리고 이에 해당하는 누적반사도의 백분율은 30% 이하이며, Fig. 1의 파란색으로 나타낸 방위각 영역에 해당한다.

3.4 부분차폐보정

빔 차폐율을 BB 라고 할 경우 비(非)차폐율(f)은 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f = 1 - BB \quad (4)$$

비차폐율 f 은 차폐영향이 없는 반사도에 대해서 차

폐가 나타난 격자점에 있는 반사도의 비율로 볼 수 있기 때문에 Eq. (5)와 같이 각 격자점의 누적반사도(Z_{acc})를 지형에코와 강수에코의 경계가 되는 보정임계값(Z_{acc}^{CRIT})으로 나누어 계산할 수 있다.

$$f = \frac{Z_{acc}}{Z_{acc}^{CRIT}} \quad (5)$$

즉, 격자점의 누적반사도는 보정임계값에 대한 비차폐율을 나타낸다. 지형에 의해 차폐된 영역은 Eq. (6)과 같이 실시간으로 관측한 반사도(Z_{OBS})에 비차폐율의 역수(f^{-1})를 곱함으로써 보정된 반사도(Z_{BC})를 구한다.

$$Z_{BC} = f^{-1} \cdot Z_{OBS} \quad (6)$$

Eqs. (5) and (6)은 $mm^6 m^{-3}$ 단위의 관계식이다.

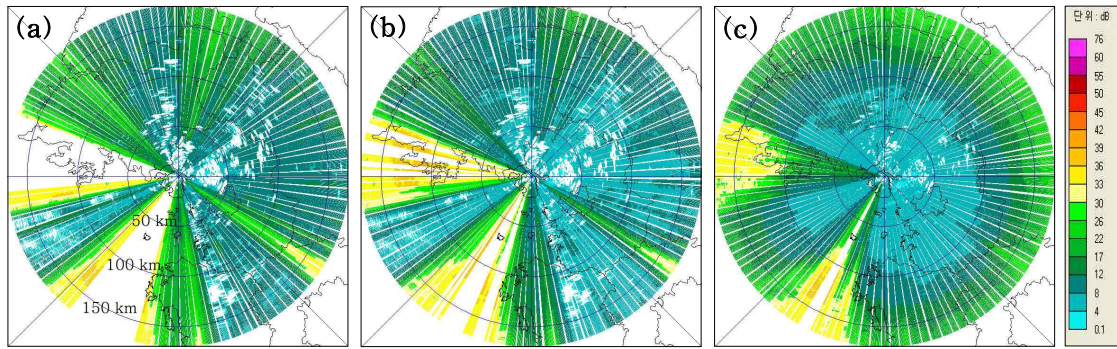


Fig. 4. Correcting Map of Beam Blockage for Elevation Angles (a)0.4°, (b)1.0°, (c)2.0°

그러나 레이더 산출물은 dBZ 단위로써 보정할 때마다 관측한 반사도를 $mm^6 m^{-3}$ 로 전환하고, 보정값을 적용한 후, 다시 dBZ 로 변환해야한다. 그러므로 보정시간을 단축하기 위해 보정식 및 보정값을 dBZ 단위로 전환하여야 한다. 그래서 dBZ 단위의 보정값 $F[dBZ]$ 를 Eq. (7)과 같이 정의하였고, Eqs. (5) and (6)을 dBZ 단위의 관계식으로 정리하면, Eqs. (8) and (9)와 같다.

$$F[dBZ] \equiv 10 \log f^{-1} \quad (7)$$

$$F = R_{acc}^{CRIT} - R_{acc} \quad (8)$$

$$R_{BC} = R_{OBS} + F \quad (9)$$

여기서 레이더 관측 자료를 보정하기 위한 최종 보정식은 Eq. (9)이다. 그리고 레이더 관측 자료를 보정하기 위해 보정값 F 를 저장해야 한다. 격자점마다 보정값을 산출하여 차폐보정지도를 작성하였으며, Fig. 4에 나타내었다. 최저관측고도각의 차폐보정지도에서 방위각 $5 \sim 20^\circ$, $120 \sim 130^\circ$, $170 \sim 190^\circ$, $310 \sim 320^\circ$ 영역과 같이 관측소 주변에서 170 km에 걸쳐 호 모양으로 보정값이 주위보다 높게 나타난다. 하지만 관측고도각이 높아짐에 따라 차폐보정값이 감소하면서 부분차폐영역이 점차 줄어들어간다. 물론 낮은 고도각에서 완전차폐로 나타나는 방위각 $195 \sim 220^\circ$, $265 \sim 290^\circ$ 영역에서는 높은 고도각에서도 부분차폐가 강하게 나타나기 때문에 높은 차폐보정값이 나타난다.

Table 2. Characteristics of GDK(Gwangdeoksan) Radar

Parameter	Characteristic Value	Parameter	Characteristic Value
Band type	S-band (5.6 GHz)	PRF	600 Hz
Peak power	750 kW	Gate size	250 m
Antenna diameter	8.5 m	Observation range	240 km
Transmitter type	Klystron	Beam width	1.0°
Products	Spectrum Width(SW)	Elevation angle	0.0°, 0.1°, 0.2°, 0.3°, 0.5°
	Corrected Reflectivity(CZ)		0.8°, 1.2°, 1.9°, 2.7°, 4.0°
	Radial Velocity(VR)		5.8°, 8.5°, 12.4°, 18.0°

4. 분석방법

검증을 위해 비교 자료로 광덕산 기상레이더의 반사도 자료를 이용하였다. 두 레이더의 반사도 분포와 수치분석을 위해 레이더 자료를 직교좌표계로 변환하였다. 그리고 광덕산 기상레이더의 반사도 자료를 바탕으로 임진강 강우레이더의 차폐보정 전과 보정 후의 반사도 분포의 유사성과 수치분석을 위해 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 검정 방법을 이용하였다.

4.1 비교자료

보정한 임진강 강우레이더 반사도 자료를 검증하기 위한 비교자료로서 임진강 강우레이더 방향으로 차폐가 없는 광덕산 기상레이더(GDK: 38.12°N, 127.43°E, 해발고도 1,061 m)를 선정하였다. 광덕산 기상레이더는 240 km 관측반경의 S밴드 레이더로써 C밴드 레이더에 비해서 강우에 의한 감쇄가 적다. 시선방향으로 공간분해능은 125 m이며, 최대관측거리까지 960개의 반사도 자료가 산출된다. 관측고도각은 0.0°부터 18.0°까지 14개의 고도각으로 관측을 수행하며, 한 시각의 볼륨관측을 수행하는데 약 8분으로 자료처리를 포함하여 10분 주기로 관측을 수행한다. 광덕산 기상레이더의 상세한 특징은 Table 2에 나타내었다. 그리고 임진강 강우레이더와 광덕산 기상레이더의 위치와 관측 영역은 Fig. 5와 같다.

4.2 좌표계 설정

좌표를 보정한 결과를 검증하기 위해 (r, θ, ϕ) 좌표계로 저장된 레이더 반사도를 (x, y, z) 좌표계로 변환하였다. 좌표변환에서 대기의 표준굴절을 가정하여 거리에 따른 레이더 빔 중심의 고도(h)를 고려하였다.

$$h = \sqrt{r^2 + Re^2 - 2r Re \sin\theta} - Re + H_0 \quad (10)$$

r 은 레이더로부터 거리, Re 는 유효지구반경, θ 는 관측도고각, H_0 는 레이더의 해발고도이다. 반사도 변환 자료는 수평 1 km, 연직 0.2 km의 격자로 설정하였으며, 연직범위는 해발고도로부터 4 km까지 설정하였다. 임진강 강우레이더의 경우 $x=341, y=341, z=20$ 이고, 광덕산 강우레이더에서 동쪽으로 85 km, 북쪽으로 38 km 떨어진 광덕산 기상레이더는 $x=481, y=481, z=20$ 의 볼륨으로 구성된다. 두 레이더의 위치정보를 이용하여 임진강 강우레이더를 기준으로 격자점을 정렬하였으며, 광덕산 기상레이더는 임진강 강우레이더의 볼륨 좌표에서 $x=256, y=209, z=5$ 에 위치한다. 그리고 관측소의 근거리에서 (x, y, z) 격자점에는 1개 이상의 레이더 빔이 통과하므로 관측소로부터 40 km 이내에 존재하는 격자점의 반사도는 비교대상에서 제외하였다.

4.3 K-S 검정

첫 번째 분석 방법으로 두 레이더 볼륨 자료가 서로 동일한 분포를 가지는지 알아보기 위해 K-S 검정을

수행하였다. Fig. 6(a)와 같이 가로축은 $1dBZ$ 간격의 반사도이며, $41(n)$ 개의 계급으로 $10 \sim 50dBZ$ 사이에 나타내었다. 세로축 $A(x)$ 는 반사도에 따른 개수분포이다. 그리고 Fig. 6(b)의 $F_{M1}(x)$ 및 $F_{M2}(x)$ 는 누적확률분포 함수(CDF)이며, x 보다 작은 영역의 반사도 개수를 모두 누적하여 구한다.

$$F_N(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^x A(i) \quad (11)$$

여기서 i 는 계급의 번호이며, N 은 도수의 총합이다.

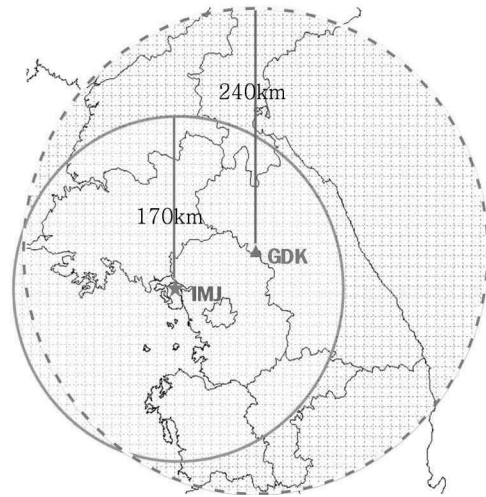


Fig. 5. Location and Observation range of Two Radars (Solid-line: IMJ, Dashed-line: GDK Radar)

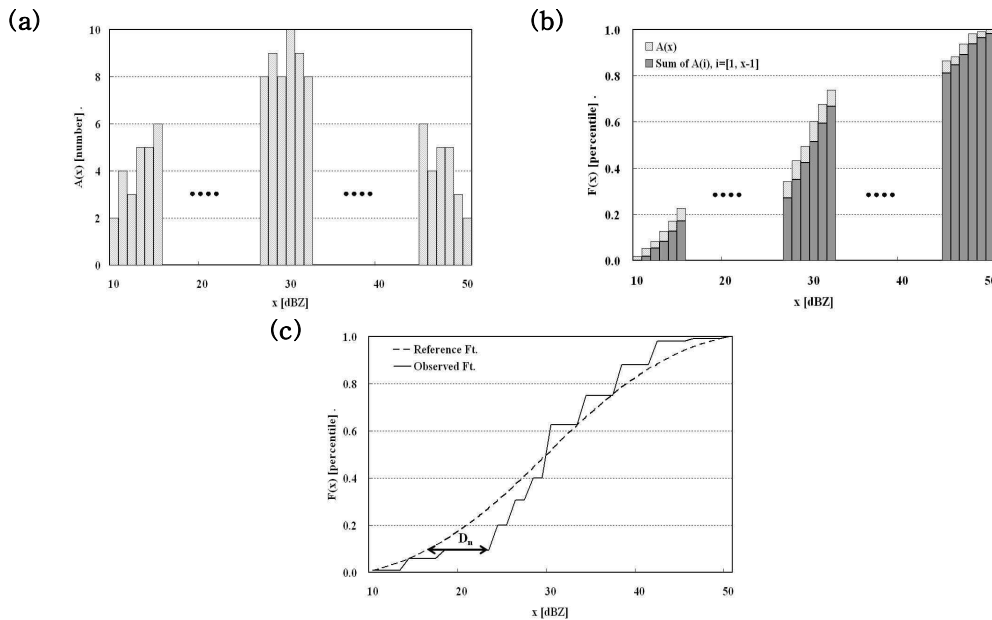


Fig. 6. Schematic of K-S Test. (a) Frequency Distribution Function, (b) CDF, (c) Two CDF. At CDF, $F(x)$ is Sum of $A(i), i = [1, x]$. And D is Defined as the Maximum Value of the Absolute Difference between of Two CDF

분포자료를 비교하기 위한 인자로 K-S 분석통계량 D_n 을 사용한다. 분포함수 $F(x)$ 에 대해 $F(X_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)가 $F(x) \geq F(X_i)$ 을 만족하는 계급의 개수를 구하고, 총 계급의 개수에 대한 비율로 나타낸다. 이 비율을 중간함수 $E_n(x)$ 로 두고, 두 분포의 중간함수 $E_{n1}(x)$ 와 $E_{n2}(x)$ 의 차이가 최대가 나타나는 값을 D_n 로 정의하며, I_{X_i} 는 지표함수이다.

$$E_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{X_i} \quad (12)$$

$$I_{X_i} = \begin{cases} 1, & (F(X_i) \leq F(x)) \\ 0, & (F(X_i) > F(x)) \end{cases} \quad (13)$$

$$D_n = \max_x |E_{n1}(x) - E_{n2}(x)| \quad (14)$$

두 분포가 유사함을 나타내기 위해서는 D_n 이 임계값 (K_α)보다 작아야한다. 95%의 신뢰구간에 대해 $n > 40$ 의 경우, K_α 는 $1.36/\sqrt{n}$ 와 같이 결정되며, 본 연구에서 K_α 는 0.2124이다.

4.4 평균반사도와 평균분수오차

두 번째 분석 방법으로 방위각별로 표본자료를 추출하였다. 표본자료로 Fig. 1에서 차폐율이 서로 다른 A, B, C, D 영역과 전체 볼륨(E)을 선정하였으며, 영역별 평균반사도와 평균분수오차(Mean Fractional Error, MFE)를 구하였다. 각 영역의 차폐율은 Table 3과 같다.

$$MFE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|R_i^{IMJ} - R_i^{GDK}|}{\frac{1}{2}(R_i^{IMJ} + R_i^{GDK})} \quad (15)$$

여기서 N 은 비교 대상에 포함된 격자점의 개수이며, R_i^{GDK} 는 광덕산 기상레이더의 반사도, R_i^{IMJ} 는 임진강

강우레이더의 반사도이다. 먼저 임진강 강우레이더의 추출한 격자점에서 강수에코의 유무를 판단한다. 강수에코는 약한 강수에코에서부터 뇌우의 강한 강수에코에 이르기까지 통상 20~60dBZ 사이에 분포한다(Rinehart, 1991). 본 연구에서는 강수에코는 20dBZ 이상으로 판단하여, 20dBZ 이하의 반사도는 강수에코에서 제외시켰다. 강수에코가 존재할 경우, 해당 격자점에 위치한 광덕산 기상레이더의 격자점의 위치를 계산한다. 그리고 강수에코 유무를 판단하여 비교 대상에 포함하여 계산한다.

Table 3. Sampling Areas and its Blocking Percentage

Area	A	B	C	D
Blocking ratio(%)	18~43	8~13	8~9	43~50

5. 분석결과

레이더 관측영역 내 강수에코가 가득 찬 두 사례를 선정하여 K-S 검정과 평균반사도, 평균분수오차를 이용하여 차폐보정을 수행한 결과를 분석하였다.

5.1. 장마 사례

한반도 서해상에 발달한 온대저기압과 함께 장마전선을 따라 수증기가 다량 공급되어 강수가 발생한 사례로 천둥과 번개를 동반한 집중호우가 발생하였다.

임진강 강우레이더의 차폐보정 전·후 및 광덕산 기상레이더의 반사도 영상을 Fig. 7에 나타내었다. 영상 비교를 위해 임진강 강우레이더는 0.4°, 광덕산 기상레이더는 0.0°의 관측고각을 선택하였다. 자료를 비교하기 쉽도록 임진강 강우레이더의 완전차폐영역과 광덕산 기상레이더의 차폐영역을 동일하게 제거하였고, 두 레이더가 관측하는 중복영역만을 나타내었다. 그리고 모든 영상의 중심 지점은 임진강 강우레이더 관측소이다.

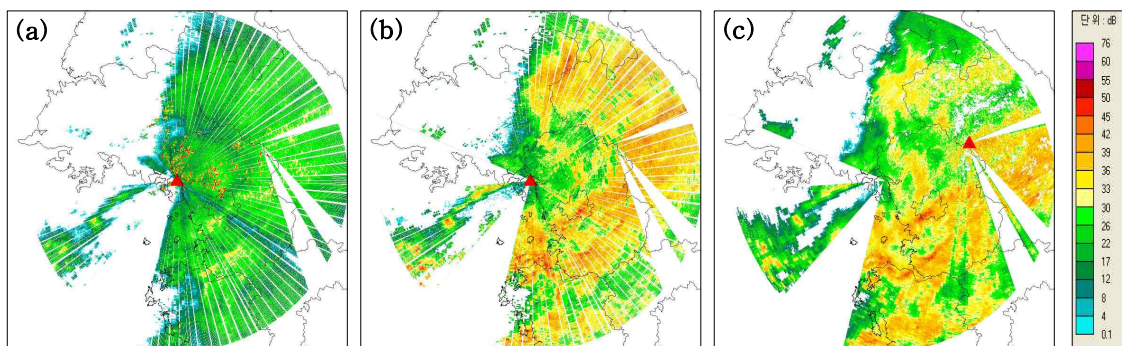


Fig. 7. Reflectivity Image of IMJ Radar for Elevation Angle 0.4° (a)before Correction, (b)after Correction, (c)GDK Radar for Elevation Angle 0.0° at 2200 LST 19 June 2004

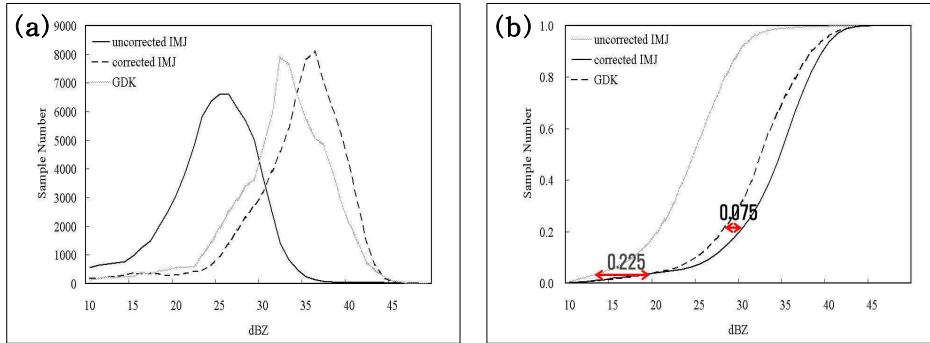


Fig. 8. K-S test. (a) Reflectivity Distributions for Area E (entire) and its (b) CDF at 2200 LST 19 June 2004. The Numbers above the Left-Right Arrows are Difference (D_n) between Two CDF

Table 4. Difference (D_n) between Distributions of Two Radar at 2200 LST 19 June 2004

Area	A	B	C	D	ABCD	E
Before correction	0.525	0.200	-	0.400	0.425	0.225
After correction	0.325	0.075	-	0.225	0.050	0.075

차폐보정 전의 반사도 자료에서 방위각 120°와 320°에 관측소 주변에서 170 km까지 호 모양으로 부분차폐가 나타나며, 방위각에 따라 강수예코의 불연속성이 두드러졌다. 그러나 차폐보정 후, 불연속성이 완화되었으며, 강수예코의 패턴이 유사해졌다.

반사도 분포를 분석한 결과를 영역 A, B, C, D와 영역 A+B+C+D, 그리고 전체 볼륨(E)에 따라 Table 4에 나타내었으며, 전체 영역에 대해 보정 전·후의 반사도 분포 및 누적확률분포를 Fig. 8에 나타내었다.

차폐보정 전에는 영역 B에서는 D_n 이 0.200으로 나타났으나, 나머지 영역에서는 0.400~0.525로 임계값 $K_\alpha = 0.2124$ 보다 0.1876~0.3126 크게 나타났고, E에서 0.225로 임계값보다 다소 높게 나타났다. 차폐보정 후 영역 A에서 D_n 이 0.325, 영역 D에서 0.225로 임계값보다 다소 높았으나, 나머지 영역에서 D_n 이 0.1이하를 나타내

었으며, E에서 0.075로 임진강 강우레이더와 광덕산 강우레이더의 반사도 분포가 비교적 유사하게 나타났다.

평균반사도와 MFE 분석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 광덕산 기상레이더의 반사도와 비교하였을 때, 차폐보정 전에는 평균반사도 차이가 평균 8.80dBZ로 나타났으나 차폐보정 후에는 영역별로 비슷한 수준을 보이며 평균 1.35dBZ로 격차가 크게 줄었다. 그리고 영역 E에서는 차이가 평균 6.83dBZ에서 -1.76dBZ로 줄었다. 각 영역별로 광덕산 기상레이더와 임진강 강우레이더의 반사도 사이에 MFE를 살펴보면, 차폐보정 전에는 차폐율에 따라 21.0~43.8%의 오차를 보이는 반면, 차폐보정 후에는 9.3~11.6% 차이를 보여 비교적 차폐보정이 잘 이루어졌다.

5.2. 태풍 사례

제7호 태풍 ‘민들레’가 대만을 거쳐 북서진하면서 열

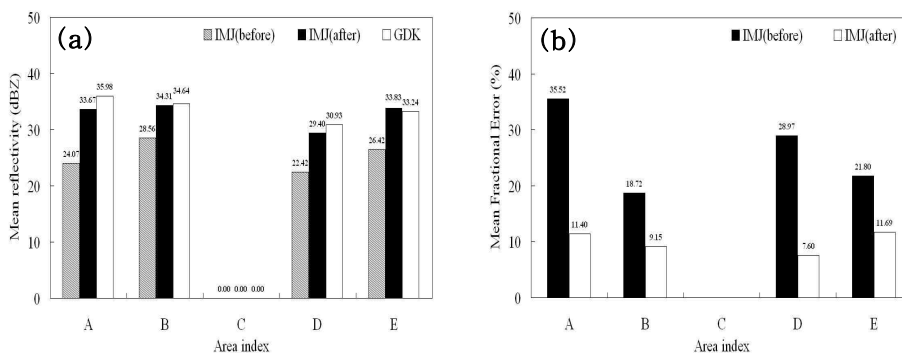


Fig. 9. Comparison of IMJ Radar with GDK Radar at 2200 LST 19 June 2004 (a) Mean Reflectivity, (b) Mean Fractional Error

대성저기압으로 변질되었고, 2004년 7월 4일 12시를 기점으로 온대저기압으로 약화된 강수사례이다.

부분차폐보정 영상을 Fig. 10에 나타냈으며, 태풍 사례에서도 방위각 120°와 320°에 관측소주변에서 170 km까지 호 모양의 부분차폐 현상이 완화되었다.

Table 5와 같이 차폐보정 전에는 D_n 이 최저 0.225에서 최고 0.575로 나타났으며, 영역 E에서 0.275로 임계값보다 높았다. 차폐보정 후 D_n 이 0.050에서 최고 0.175로 나타났으며, 전체 볼륨 E에서 0.150으로 두 레이더의 반사도 분포가 아주 유사함을 보였다.

영역 A, B, C, D에 대해 Fig. 12(a)와 같이 영역에 따라 차폐보정 전 평균반사도 차이가 최저 3.89dBZ, 최고 13.88dBZ에서 차폐보정 후 최저 0.01dBZ, 최고 -1.84dBZ로 평균 7.69dBZ에서 0.96dBZ로 감소했으며, 전체 볼륨 E에서는 6.93dBZ에서 -0.07dBZ로 보정되었다. Fig. 12(b)의 MFE 역시 차폐보정 전, 24.9~42.7%

의 오차를 보였으나 차폐보정 후, 4.0~10.6%로 차폐보정이 잘 이루어졌다.

6. 결론

본 연구는 지형에 의한 레이더 빔의 차폐로 인해 레이더 자료가 왜곡되는 문제를 해결할 하나의 방안을 제시하였다. 레이더 반사도를 누적하여 누적반사도 지도와 누적반사도 빈도 곡선을 작성하고, 지형에코 및 지형에코와 강수에코의 경계를 보정임계값으로 설정하였다. 그리고 완전차폐영역을 제외한 영역의 격자점마다 보정값을 계산하여 관측고도각에 따라 보정지도를 생성하였으며, 장마 사례와 태풍 사례에 적용하였다. 차폐보정 검증을 위해 임진강 강우레이더 주변에 위치하며, 임진강 강우레이더 방향으로 차폐가 없는 광덕산 기상레이

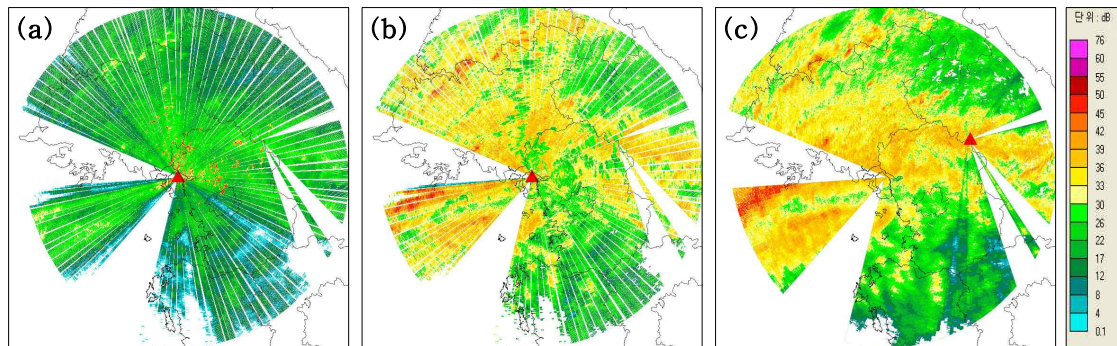


Fig. 10. Reflectivity Image of IMJ Radar for Elevation Angle 0.4° (a)before Correction, (b)after Correction, and (c)GDK Radar for Elevation Angle 0.0° at 1148 LST 4 July 2004

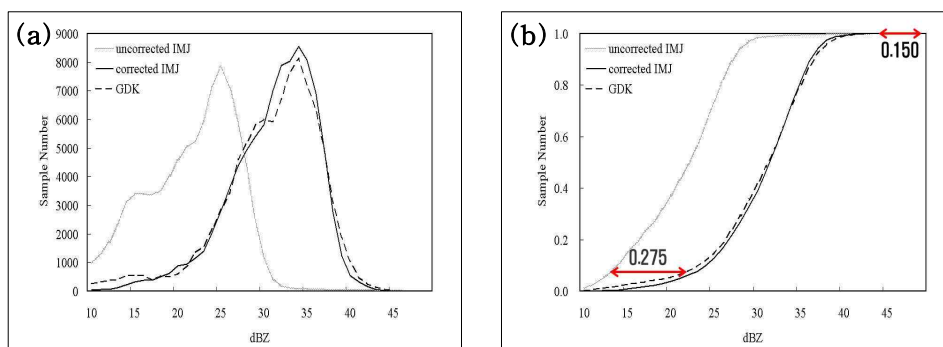


Fig. 11. K-S test. (a)Reflectivity Distributions for Area E(entire) and its (b)CDF at 1148 LST 4 July 2004. the Numbers above the Left-Right Arrows are Difference(D_n) between Two CDF

Table 5. Difference(D_n) between Distributions of Two Radar at 1148 LST 4 July 2004

Area	A	B	C	D	ABCD	E
Before correction	0.400	0.225	0.275	0.575	0.325	0.275
After correction	0.175	0.100	0.050	0.075	0.125	0.150

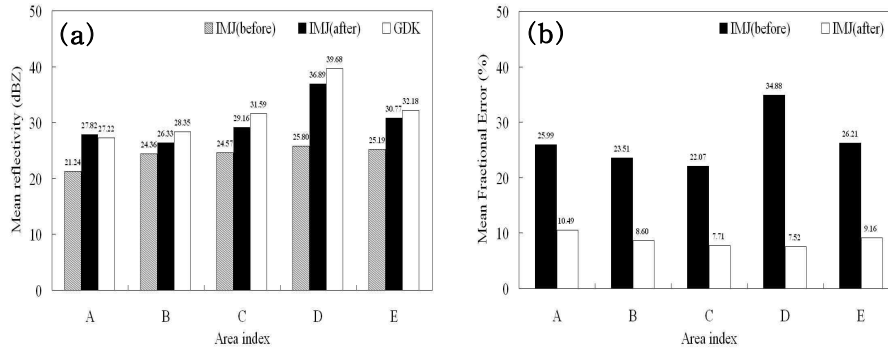


Fig. 12. Comparison of IMJ Radar with GDK Radar at 1148 LST 4 July 2004 (a)Mean Reflectivity, (b)Mean Fractional Error

더를 이용하였다. 두 레이더의 반사도 분포를 비교하였으며, 분포의 유사도를 계산하고, 평균반사도와 MFE를 분석하였다.

선정한 두 사례에서 영역별 평균반사도 차이가 감소하였으며, MFE 또한 감소하였다. 2004년 6월 19일 0시의 장마 사례에서 반사도 분포의 차이 D_n 이 임계값 $K_\alpha = 0.2124$ 보다 비슷하거나 낮게 나타나 두 레이더의 반사도 분포가 비교적 유사함을 보였다. 그리고 평균반사도 차이가 평균 8.80dBZ에서 차폐보정 후 평균 1.35dBZ로 나타났으며, MFE는 차폐보정 전 21.0~43.8%에서 차폐보정 후 9.3~11.6%로 크게 감소하였다. 2004년 7월 4일 8시 6분의 태풍 사례에서는 D_n 이 임계값보다 현저히 낮게 나타나 두 레이더의 반사도 분포가 유사함을 알 수 있었다. 평균반사도 차이는 차폐보정 전 평균 7.69dBZ에서 차폐보정 후 평균 0.96dBZ로 나타났으며, MFE는 차폐보정 전 24.9~42.7%에서 차폐보정 후 4.0~10.6%로 감소하였다. 본 연구에서 제시한 방법으로 차폐보정을 수행한 결과 평균반사도와 MFE가 감소하는 등 차폐보정이 잘 이루어졌음을 보였다.

본 연구에서 제시한 레이더 반사도 누적 방법을 이용한 지형에 의한 부분차폐영역의 레이더 반사도 보정 방법은 동일한 관측전략으로 관측한 레이더 반사도 자료를 이용하며, 장기간에 걸쳐 수집된 레이더 반사도를 누적하여 누적반사도 지도를 만든다. 차폐영역분석을 통해 한차례 차폐보정지도를 작성해 놓았을 경우, 현업에서 관측결과물이 생성되는 즉시 차폐보정이 가능하다. 따라서, 본 연구 방법은 레이더를 이용한 강수량 산정에 앞서 레이더 품질을 향상시키는데 아주 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 한강홍수통제소의 수문조사 및 홍수예보 연구개발사업 “임진강 강우레이더 시스템

최적화 연구용역(2차년도)” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 기상연구소 (2003). 연구용 도플러 기상 레이더 운영 및 자료분석 기술 개발(III), 기상연구소, pp. 206-216.
- 배덕효, 김진훈, 윤성심 (2005). “레이더 추정강우의 수문학적 활용(I): 최적 레이더 강우 추정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 1039-1049.
- 석미경, 남경엽, 김영화, 오성남 (2005). “WPMM을 이용한 레이더 반사도로부터 정량적 레이더 강우강도의 추정.” **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제41권, 제1호, pp. 123-138.
- Bech, J., Codina, B., Lorente, J. and Bebbington, D. (2003). “The sensitivity of single polarization weather radar beam blockage correction to variability in the vertical refractivity gradient.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, AMS, Vol. 20, No. 6, pp. 845-855.
- Doviak, R.J. and Zrnic, D.S. (1993). *Doppler radar and weather observations*. Dover Publications, INC., New York, pp. 21.
- Fornasiero, A., Alberoni, P.P., Amorati, R., Ferraris, L. and Taramasso, A.C. (2005) “Effects of propagation conditions on radar beam-ground interaction: Impact on data quality.” *Advances in Geosciences*, Vol. 2, 201-208.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.J., and Miller, D.A. (1998). “The WSR-88D rainfall algorithm.” *Weather and Forecasting*, AMS, Vol. 13, No. 2, pp. 377-395.
- Gjertsen, U., and Haase, G. (2005). “Radar data quality - The challenge of beam blockages and

propagation changes." *Proc. World Weather Research Program Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting*, Toulouse, France.

Kucera, P.A., Krajewski, W.F., and Young, C.B. (2004). "Radar beam occultation studies using GIS and DEM technology: An example study of Guam." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, AMS, Vol. 21, No. 7, pp. 995-1006.

Rinehart, R.E. (1991). *Radar for meteorologists*.

Knight Print Company, North Dakota, pp. 119-120.

Vignal, B., and Krajewski, W.F. (2001). "Large-sample evaluation of two methods to correct range-dependent error for WSR-88D rainfall estimates." *Journal of Hydrometeorology*, AMS, Vol. 2, No. 5, pp. 490-504.

논문번호: 09-005	접수: 2009.01.10
수정일자: 2009.06.26	심사완료: 2009.06.26