CAPPI 반사도의 오차구조 및 지구곡률효과로 인한 거리오차 보정

유철상 · 윤정수*

고려대학교 건축사회환경공학부

(접수: 2012년 4월 4일, 수정: 2012년 6월 24일, 게재확정일: 2012년 7월 5일)

The Error Structure of the CAPPI and the Correction of the Range Dependent Error due to the Earth Curvature

Chulsang Yoo and Jungsoo Yoon*

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

(Received: 4 April 2012, Revised: 24 June 2012, Accepted: 5 July 2012)

Abstract It is important to characterize and quantify the inherent error in the radar rainfall to make full use of the radar rainfall. This study verified the error structure of the reflectivity and corrected the range dependent error in the CAPPI using a VPR (vertical profile of reflectivity) model. The error of the CAPPI to display the reflectivity data becomes bigger for the range longer than 100 km. This range dependent error, however, is significantly improved by corrected the CAPPI data using the VPR model.

Key words: Error structure, Range dependent error, VPR model, CAPPI

1. 서 론

단시간에 발생하는 집중호우는 최근 많은 인적, 물적 피해를 일으키고 있다. 이러한 피해를 줄이기 위해서는 집중호우에 대한 실시간 감시 및 예측이 필요하다. 넓은 관측 영역의 고해상도 자료인 레이더 강우는 집중호우에 대한 실시간 감시 및 예측을 위한 자료로 활용되고 있다 (Sun, 2005; Berenguer and Zawadzki, 2008). 그러나 전자기파를 통하여 간접적으로 측정된 레이더 강우는 여러 오차를 내재하고 있다는 문제점을 지니고 있다 (유철상과 김경준, 2007; 유철상 등, 2007). 따라서 레이더 강우를 적극적으로 활용하기 위해서는 레이더 강우에 포함된 각 오차들에 대한 특성을 파악하고 정량화하는 것이 무엇보다 중요하다.

대표적인 레이더 강우의 오차로는 레이더 반사도를 강우 강도로 변화하는 과정에서 발생할 수 있는 Z-R

변환 오차 (Battan, 1973; Austin, 1987; Rosenfeld *et al.*, 1993), 큰 건물이나 산으로 인해 발생하는 차폐 (Andrieu *et al.*, 1997; Gabella and Perona, 1998), 대기의 기압, 기온, 습도 등의 불균등한 연직분포로 인한 이상전파 (Battan, 1973), 지구 곡률효과로 인한 거리오차 등이 있다 (Andrieu and Creutin, 1995; Fabry and Zawadzki, 1995; Vignal *et al.*, 1999). 본 연구에서는 이러한 다양한 오차들 중 거리오차에 집중하여 그 특성을 파악해 보고자 한다.

거리오차는 레이더 강우의 편의를 일으키는 대표적인 오차이다. 거리오차는 레이더 관측의 구조적인 문제임에도 불구하고 충분히 고려하여 보정해주지 못하고 있는 대표적인 오차에 해당된다. 거리오차를 보정하지 않은 상태에서 지상 강우자료를 활용하여 레이더 강우의 보정을 실시한 경우 또 다른 오차를 일으키는 원인이 될 수 있다 (Borga and Tonelli, 2000). 거리에 따라 오차가 증가한다는 것은 Collier (1986)의 연구에서 찾아볼 수 있다. 그는 레이더 강우와 지상 강우의 비로써 표현한 편의가 레이더로부터 멀어질수록 증가하는 경향이 있음을 보고하였다. 이후 많은 연구에서도 비 (ratio)로써 표현되는 편의가 거리에 영향

*Corresponding Author: Jungsoo Yoon, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Anam 5ga, Seongbukgu, Seoul 136-713, Korea.
Phone : 82-2-3290-3912, Fax: 82-2-3290-3912
E-mail : civileng01@korea.ac.kr

을 받는다는 것을 보여왔다 (Koiostinen, 1991; Kitchen and Jackson, 1993; Smith *et al.*, 1996).

편의가 거리에 따라 다르게 나타나는 원인은 거리에 따른 레이더 빔의 고도와 불균등한 레이더 연직반사도 (Vertical Profile of Reflectivity, 이하 VPR)와 연관된다 (Joss and Waldvogel, 1990; Fabry *et al.*, 1992; Smith *et al.* 1996). 레이더 빔의 고도는 거리가 멀어질수록 높아지고 따라서 관측되는 VPR의 위치가 달라지기 때문에 이러한 편의가 발생한다. Seo *et al.* (2000)의 연구에서는 이러한 레이더 빔의 고도와 VPR을 고려하여 레이더 편의 보정 계수를 산정하여 편의 보정을 실시한 바 있다. VPR을 고려하여 레이더의 편의를 보정하는 방법은 이후에도 많이 연구되어져 왔다 (Vignal and Krajewski, 2001; Villarini and Krajewski, 2010).

본 연구는 레이더 반사도 자료의 오차구조를 파악하고 그러한 오차구조를 가진 반사도 자료로부터 표출한 CAPPI의 오차 특성을 파악하여 거리오차를 적절히 보정하는 것을 목적으로 한다. 오차구조의 파악을 위해서는 참 값으로 가정할 수 있는 기준 반사도의 결정이 필요하며, 본 연구에서는 VPR 모형으로부터 기준 반사도라 할 수 있는 지상 반사도를 추정하였다. 추정된 지상 반사도는 레이더 반사도의 오차구조와 레이더 반사도로부터 표출된 CAPPI의 오차 특성을 파악하는데 적용되었다. 마지막으로 CAPPI에 포함된 거리오차를 VPR 모형을 이용하여 보정하여 그 결과를 검토하였다.

2. 레이더 반사도 오차구조와 CAPPI 반사도의 거리오차

2.1. 레이더 반사도 오차구조와 VPR 모형

z_r 를 참 값의 반사도라 하면 레이더 반사도의 오차는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 (Koistinen *et al.*, 2003; Berenguer and Zawadzki, 2008). 여기서 오차는 거리 r 과 방위각 θ 로 결정되는 위치 X 와 관측고도 h 의 함수로 나타난다.

$$\varepsilon(X, h) = 10 \log \frac{Z(X, h)}{Z_T(X, h)} = z(X, h) - z_T(X, h) \quad (1)$$

여기서, $\varepsilon(X, h)$ 는 위치 X 와 고도 h 에서의 오차를 의미하고 단위는 dBZ이다. $Z(X, h)$ 와 $z(X, h)$ 는 (X, h) 지점에서의 반사도를 의미하며 각각과 dBZ의 단위를 갖는다.

본 연구에서는 지상에서의 반사도 값을 참 값의 반사도로 가정하였다. 이에 지상 반사도를 결정하기 위한 방법으로 VPR 모형을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 지상 반사도 결정을 위한 VPR 모형으로 식 (2)

를 채택하였다. 이 모형은 고도가 높아짐에 따라 반사도가 지수적으로 감소하는 형태를 가진다 (윤정수 등, 2011).

$$z(h) = c(1 - e^{-a(b-h)}) \quad (2)$$

여기서, a , c 는 상수이고 b 는 반사도가 0일 때의 고도를 의미한다. 이 모형으로부터 추정된 지상에서의 반사도 z_0 는 $c(1 - \exp(-ab))$ 와 같다. 즉, 위치 X 에서 식 (2) 형태의 반사도 분포를 갖는다면 레이더의 오차는 다음 식과 같이 계산된다.

$$\varepsilon(h) = c(1 - e^{-a(b-h)}) - c(1 - e^{-a(b-0)}) = ce^{-ab}(1 - e^{ah}) \quad (3)$$

즉, 레이더 반사도의 오차는 고도가 높아짐에 따라 음의 값을 가지고 지수적으로 커짐을 알 수 있다. 이 결과는 물론 식 (1)로부터 산정된 것으로 어떤 레이더 한 격자에서의 오차를 의미한다.

2.2. CAPPI 반사도의 거리오차구조

3차원 볼륨 자료인 레이더 강우는 표현 방법에 따라 다양하게 표출된다. PPI, RHI, CAPPI, BASE, CMAX, ETOP, VIL 등이 3차원 레이더 볼륨 자료로부터 표출될 수 있는 자료이다. 이중 BASE는 임계값 이상의 에코가 나타나는 최하층 자료만을 표출하는 가장 낮은 고도 자료로 레이더 값을 강수량으로 환산하거나, 지상강수량과 비교 시에 유용하게 사용될 수 있다 (이종호와 류찬수, 2009). 일정 고도에서의 레이더 반사도를 표출한 CAPPI는 특히 국내에서 수문해석의 입력자료로 적용되어왔다 (건설교통부, 2006; 국토해양부, 2008; 최규현 등, 2006; 김광섭과 김종필, 2008). 반면 국외에서는 CAPPI를 적용하는 경우도 있

Fig. 1. Observation height of the CAPPI vs. the distance from the radar.

Fig. 2. The reflectivity and error structure of the CAPPI with respect to the distance from the radar.

으나 여러 고도각에서의 PPI를 적용하고 있기도 하다 (Anagnostou *et al.*, 1999; Anagnostou and Krajewski, 1999; Borga and Tonelli, 2000; Chumchean *et al.*, 2003; Collier, 1986; Fabry *et al.*, 1992).

CAPPI는 일정 고도에서의 반사도를 2차원 평면으로 표출한 것으로써 강수의 수평적인 해석에 많이 활용되고 있다. 본 연구에서는 Mohr and Vaughn (1979)에서 제시한 Bilinear 방법으로 CAPPI를 표출하였다. 표출된 CAPPI의 거리에 따른 관측 고도는 Fig. 1의 굵은 실선과 같다. Fig. 1에서 일점쇄선은 각 레이더 빔의 관측 고도를 나타내며 점선은 1.5 km 고도를 나타낸다. CAPPI의 관측고도는 그림에서와 같이 일정 거리까지 1.5 km 고도를 유지하다 일정 거리 이후부터 점점 높아진다. 결국 본 연구에서 고려한 VPR 모형을 적용하여 거리에 따른 오차구조를 파악하면 CAPPI는 일정 거리 이후부터 오차가 점점 커질 것

이다. Fig. 2는 VPR 모형의 매개변수로 각각 $a=0.4$, $b=10$, $c=35$ 를 적용하여 추정된 CAPPI 반사도와 CAPPI의 거리에 따른 오차구조를 나타낸 것으로 거리에 따른 오차의 거동을 잘 보여주고 있다.

3. 실제 레이더 자료의 오차구조 및 거리오차 보정

3.1. 분석자료

한반도의 70%는 산지로 이루어져 있어 강수 발생 시에도 산악효과가 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 레이더 반사도의 오차구조 파악 시 산악효과로 인한 영향을 배제하기 위해 해안가에 설치되어 있는 강릉 기상레이더의 자료를 적용하였다. S밴드의 강릉 기상레이더는 관측 거리가 280km이며 고도각은 총 16개 (0.40° , 0.59° , 0.82° , 1.09° , 1.43° , 1.85° , 2.38° , 3.04° ,

Fig. 3. Location and beam height of the Gangneung weather radar.

Fig. 4. Storm event considered in this study. ; (a) Weather map (09 Sep. 12 2012 UTC), (b) 1.5 km CAPPI (0700 Sep. 12 2012 LST)

Table 1. Specification of the Gangneung weather radar.

관측개시년도	2010.05
제작사	METSTAR(중국)
송신주파수(MHz)	2,855
대역	S 밴드
송신관	klystron
첨두전력(kW)	750
빔폭(°)	1
안테나 직경(m)	8.54
다이내믹 레인지(dB)	97

3.87°, 4.93°, 6.25°, 7.92°, 10.02°, 12.67°, 15.95°, 19.95°) 이다. 이 관측 고도각은 관측 전략에 따라 변할 수 있다. 강릉 기상레이더의 위치 및 관측영역 그리고 각 고도각 별 거리에 따른 빔의 관측 고도는 Fig. 3과 같다. Table 1은 강릉 기상레이더의 제원을 정리한 것이다. 본 연구에서는 2010년 9월 12일 0100 LST에서 2010년 9월 12일 1000 LST에 발생한 호우사상을 적용하였다. 본 호우는 한반도에 전형적으로 나타나는 온대성 저기압으로 Fig. 4와 같다.

3.2. 강릉 기상 레이더 자료의 오차구조 및 거리오차 보정

강릉 기상 레이더 자료의 오차구조를 파악하기 위해서는 먼저 VPR (Vertical Profile of Reflectivity) 모형 추정이 필요하다. 강릉 기상레이더의 서쪽 부분은 태백산맥의 영향으로 차폐가 발생하므로 VPR 모형의 매개변수 a 추정 시에는 이러한 차폐부분의 영향을 제외하기 위해 30~145° 방위각 자료만을 적용하였다. Fig. 5에서 속이 빈 원형 점들은 2010년 9월 12일 0800 LST, 방위각 90°, 거리 60 km에서 관측된 반사도의 연직분포를 나타내며 실선은 연직분포 자료에 대해 추

Fig. 5. The VPR model fitted to the observed data (0800 Sep 12 2010 LST, $\theta = 90^\circ$, $r = 60$ km).

정된 VPR 모형을 나타낸다.

VPR 모형으로부터 거리와 고도에 따라 반사도를 추정하면 Fig. 6(a)와 같다. Fig. 6(a)에서 음영 처리된 부분은 지구곡률효과로 인해 관측되지 않는 영역과 무방사 원뿔 (cone of silence) 영역을 나타낸다. 동일한 VPR 모형을 적용하였기 때문에 같은 고도에서의 반사도는 거리에 따라 일정하다. 이와 함께 거리와 고도에 따른 오차구조에서도 일정 고도에서의 오차는 거리에 관계없이 일정하게 나타날 것이다 (Fig. 6(b)). 즉, 일정한 VPR 모형을 적용하게 되면 거리에 따라 오차는 일정하고 오직 고도에 의해서만 영향을 받는다. 그러나 일정 고도에서의 반사도 표출 방법인 CAPPI는 지구곡률효과로 인해 실제로 거리가 멀어 질수록

Fig. 6. The reflectivity and error estimated by applying the VPR model with respect to the distance and height.

Fig. 7. The error structure of the CAPPI estimated by applying the VPR model.

관측 고도가 높아진다. 이에 따라서 오차는 거리가 멀어질수록 커지게 된다 (Fig. 7).

2010년 9월 12일 0800 LST 강릉 기상 레이더 반경 내에 표출된 CAPPI 반사도는 Fig. 8(a)와 같다. Fig. 8(a)에서와 같이 강릉 레이더의 서남 방향에 해당하는 내륙 영역에는 차폐로 인해 반사도 영상이 나

타나지 않았다. Fig. 8(b)는 방위각 45° 에서의 거리와 고도에 따른 반사도 분포를 나타낸다. 반사도는 고도 4~6 km까지 거의 일정하다가 그 이상부터 감소하는 형태로 나타났다. 본 연구에서 적용된 VPR 모형이 지수적으로 감소하는 형태임을 감안한다면 본 모형을 적용하기에 적절한 호우 형태임을 알 수 있다.

Fig. 8. 1.5 km CAPPI and the reflectivity with respect to the distance and height ($\theta=45^\circ$).

Fig. 9. Error structure estimated hourly with respect to the distance and height ($\theta = 45^\circ$).

Fig. 10. Mean and standard deviation of the error estimated for the storm event considered ($\theta = 45^\circ$).

Fig. 11. Error structure of 1.5 km CAPPI estimated with respect to the distance.

Fig. 9은 2010년 9월 12일 0100 LST에서 2010년 9월 12일 1000 LST까지 10시간 동안의 거리와 고도에 따른 방위각 45° 레이더 반사도의 오차 분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서 고려한 VPR 모형을 적용한다면 거리와 고도에 따른 레이더 반사도의 오차 분포는 Fig. 6(b)와 같이 고도가 높아질수록 오차는 커질 것이다. 그러나 Fig. 9의 0100 LST부터 0300 LST까지는 호우가 시작되는 시점이어서 그와 유사하게 나타나지는 않았다. 호우가 레이더 관측영역 전반적으로 확산되어 있기 시작한 0400 LST부터는 이론적으로 검토한 형태와 유사하게 나타났다. 이는 호우의 총 기간 동안의 거리, 고도에 따른 오차 분포에 대한 평균과 표준편차에서 더욱 뚜렷이 나타났다 (Fig. 10).

특히 오차의 평균은 이론적으로 검토한 Fig. 5(b)와 같이 고도가 높아질수록 커지는 것으로 나타났다. 물론 Fig. 10은 Fig. 6(b)와 다르게 각 거리별로 VPR 모형의 매개변수를 달리 추정하여 도출한 결과이다. 고도에 따른 레이더 반사도의 오차가 Fig. 10과 같다

면 일정 고도에서 추출된 2차원 형태의 반사도는 거리에 상관없이 일정한 오차를 가질 것이다. 그러나 반사도 추출 고도가 높아질수록 오차는 커질 것이며, 따라서 이러한 오차구조를 감안한다면 반사도 추출 고도는 낮을수록 유리해 보이는 것이 사실이다. 그러나 차폐와 지형 에코를 고려했을 때 너무 낮은 고도는 레이더 반사도의 품질을 떨어뜨리는 원인이 될 수 있다.

강릉 기상 레이더의 경우 1.5 km CAPPI는 약 100 km까지 1.5 km 고도를 유지하다 그 이상부터 고도가 점점 높아진다. 이는 Fig. 3(b)를 통해 확인할 수 있다. 앞선 결과에 의하면 이는 결국 100 km 이상부터 오차가 점점 커지기 시작한다는 것을 의미한다. 두 자료의 오차를 거리에 따라 분포시키면 Fig. 11과 같다. 그림에서 원형 점은 각 레이더 격자에서 산정된 오차를 나타내고 굵은 실선은 각 거리별 오차에 대한 평균 값을 의미한다. 그림에서와 같이 100 km까지는 어느 정도 일정한 오차를 보이다 그 이상부터 오차가 점점 커지는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 CAPPI의 오차를 2차원 평면으로 나타낸 것이다. 호우가 시작되는 0100 LST에서 0300 LST까지는 지역적인 오차가 크게 나타나나 그 이후부터는 대체로 원거리에서 큰 오차를 보이고 있다. 이는 오차의 평균에서 더욱 명확히 나타남을 알 수 있다 (Fig. 13). 오차의 표준편차에서는 오차의 평균에서와 같이 뚜렷한 결과를 보이고 있지 않으나 이 역시도 거리가 멀어질수록 크게 나타났다. 이는 레이더 반사도의 수직구조와 지구곡률현상으로 인해 발생하는 어쩔 수 없는 현상이며, 따라서 이에 대한 보정 없이 CAPPI를 바로 적용한다면 특히 원거리 자료는 심각한 오차를 일으킬 수밖에 없을 것이다. 또한 이러한 오차는 강우 강도 변환시 편의의 문제와 연관될 수 있다.

마지막으로 본 연구에서는 앞서 제시한 VPR 모형

Fig. 12. Spatial error structure of 1.5 km CAPPI estimated hourly within the radar umbrella.

Fig. 13. Mean and standard deviation of the error of 1.5 km CAPPI estimated over the rainfall event within the radar umbrella.

Fig. 14. Error structure of 1.5km CAPPI estimated with respect to the distance after removing the range-dependent error.

을 이용하여 CAPPI에 대한 보정을 실시하였다. 보정된 CAPPI와 지상반사도를 비교하면 Fig. 14와 같다. 특히 원거리에서의 오차가 상당히 감소하였음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 두 자료의 오차에 대한 2차원 평면 분포에서도 살펴볼 수 있다 (Fig. 15).

Fig. 16은 지상으로 보정된 CAPPI의 오차 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 오차의 평균 (Fig. 16(a))의 경우 보정전 (Fig. 13(a))보다 원거리에서 참 값으로 가정한 지상반사도와 차이가 명확히 줄어들었음을 확인할 수 있다. 그림에서 보정 전과 유사한 오차 크기를 보이는 부분은 레이더 관측 영역 중 육상 영역으로 태백산맥의 산악 및 차폐의 효과로 인한 오차가 여전히 남아 있음을 의미한다. 표준편차의 경우는 보정 전과 비교하였을 때 약간 감소하였으나 거의 유사하게 나타났다.

Fig. 15. Spatial error structure of 1.5 km CAPPI estimated hourly within the radar umbrella after removing the range-dependent error.

Fig. 16. Mean and standard deviation of the error of 1.5 km CAPPI estimated over the rainfall event within the radar umbrella after removing the range-dependent error.

4. 결 론

레이더 강우를 적극적으로 활용하기 위해서는 레이더 강우에 포함된 각 오차들에 대한 특성을 파악하고 정량화하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 레이더 반사도 자료의 오차구조를 파악하고 그러한 오차구조의 특성을 가진 반사도로부터 표출된 CAPPI의 거리오차를 보정하였다. 이러한 오차구조 파악을 위해서는 참 값으로 가정할 수 있는 기준 반사도가 필요하며 본 연구에서는 VPR 모형으로부터 추정된 지상 반사도를 기준 반사도로 결정하였다. 파악된 레이더 반사도의 오차구조와 그러한 오차구조의 특성을 지닌 반사도로부터 표출된 CAPPI 오차의 특성은 다음과 같다.

먼저, 레이더 전체 영역에 동일한 VPR 모형이 적용될 경우 반사도의 오차구조와 CAPPI 오차의 특성이 어떻게 나타나는지를 확인하였다. 이와 같은 경우 일정 고도에서의 오차는 거리에 관계없이 일정하게 나타난다. 그러나 일정 고도에서의 반사도 표출 방법인 CAPPI는 지구곡률효과로 인해 실제로 거리가 멀어 질수록 관측 고도가 높아지므로 그 오차는 거리가 멀어질수록 커지게 된다.

2010년 9월 12일 10시간 동안 발생한 호우사상에 적용한 결과에서도 레이더 반사도의 오차는 전반적으로 거리에 상관없이 고도가 높아질수록 커지는 것으로 나타났다. 이러한 오차구조는 특히 오차의 평균에서 더욱 뚜렷이 나타났다. 이러한 반사도 자료로부터 표출된 CAPPI의 오차를 거리에 따라 분포시킨 결과, 오차는 100 km까지 어느 정도 일정한 오차를 보이다 그 이상부터 오차가 점점 증가하는 것으로 나타났다. 이는 강릉 기상 레이더의 경우 1.5 km CAPPI는 약 100 km까지 1.5 km 고도를 유지하다 그 이상부터 고도가 점점 높아지기 때문이다. CAPPI의 오차를 2차

원 평면으로 나타낸 결과에서도 호우가 전반적으로 퍼져있는 시점부터 원거리에서 큰 오차를 보이고 있다. 이는 오차의 평균에서 더욱 명확히 나타났다.

마지막으로 본 연구에서는 VPR 모형을 이용하여 CAPPI에 포함된 거리오차를 보정하였다. 그 결과 원거리에서 참값으로 가정한 지상반사도와와의 차이가 명확히 줄어들음을 확인하였다. 즉, VPR 모형을 이용한 거리오차의 보정이 CAPPI 자료의 정도 향상에 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0014566).

참고문헌

- 건설교통부, 2006: 강우레이더에 의한 돌발홍수예보시스템 개발(2차년도).
- 국토해양부, 2008: 기상레이더 자료활용체계 구축 연구.
- 김광섭, 김종필, 2008: 기상레이더 자료를 이용한 단시간 강우예측모형 개발. 한국수자원학회논문집, **41(10)**, 1023-1034.
- 유철상, 김경준, 2007: 강우 레이더와 지상 우량계의 통합관측 효과. 한국수자원학회논문집, **40(11)**, 841-849.
- _____, 김병수, 김경준, 최정호, 2007: 우량계 강우를 이용한 레이더 강우의 Ground-Truth 방법 검토. 한국수자원학회논문집, **41(5)**, 545-558.
- 윤정수, 김정호, 유철상 2011: 지상반사도 결정을 위한 VPR 모형비교. 제12회 기상레이더 워크숍, 강원도 용평.
- 이종호, 류찬수, 2009: 레이더 기상학, 시그마프레스

- 최규현, 한건연, 김경익, 이창희, 2006: 레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립 I. 품질검사와 합성 CAPPI 산출. 한국수자원학회논문집, **39(4)**, 321-334.
- Anagnostou, E.N., and W.F. Krajewski, 1999: Real-time radar rainfall estimation Part II: Case study. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **16**, 198-205.
- _____, W.F. Krajewski, and J.A. Smith, 1999: Uncertainty quantification of mean-areal radar rainfall estimation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **16**, 206-215.
- Andrieu, H., and J.D. Creutin, 1995: Identification of vertical profiles of radar reflectivity for hydrological applications using an inverse method. Part I: Formulation. *American Meteorological Society*, **34**, 225-239.
- _____, J.D. Creutin, G. Delrieu, and D. Faure, 1997: Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part 1: Radar measurement interpretation. *Journal of Hydrology*, **193**, 1-25.
- Austin, P., 1987: Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Monthly Weather Review*, **115**, 1053-1070.
- Battan, L., 1973: *Radar observation of the atmosphere*, University of Chicago Press, 324pp.
- Berenguer M., and I. Zawadzki, 2008: A study of the error covariance matrix of radar rainfall estimates in stratiform rain. *Weather Forecasting*, **23**, 1085-1011.
- Borga, M., and F. Tonelli, 2000: Adjustment of range-dependent bias in radar rainfall estimates. *Physics and Chemistry of the Earth*, **25**, 909-914.
- Chumchean, S., A. Sharma, and A. Seed, 2003: Radar rainfall error variance and its impact on radar rainfall calibration. *Physics and Chemistry of the Earth*, **28**, 27-39.
- Collier C.G., 1986: Accuracy of rainfall estimates by radar, Part I: calibration by telemetering raingauges. *Journal of Hydrology*, **83**, 207-233.
- Fabry, F., G.I. Austin, and D. Tees, 1992: The accuracy of rainfall estimate by radar as a function of range. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, **118**, 435-453.
- _____, and I. Zawadzki, 1995: Long-term radar observations of the melting layer of precipitation and their interpretation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **52(7)**, 838-851.
- Gabella, M., and G. Perona, 1998: Simulation of the orographic influence on weather radar using a geometric-optics approach. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **15**, 1486 - 1495.
- Joss, J., and A. Waldvogel, 1990: Precipitation measurement and hydrology. *Radar in Meteorology*, Boston, MA, American Meteorological Society, 1990 577-606.
- Kitchen, M., and P.M. Jackson, 1993: Weather radar performance at long range: Simulated and observed. *Journal of Applied Meteorology*, **32**, 975-985.
- Koistinen, J., 1991: Operational correction of radar rainfall errors dues to the vertical profile of reflectivity. *Preprints, 25th Radar Meteorology Conf., Paris, France, American Meteorological Society*, 91-96.
- _____, D.B. Michelson, H. Hohti, and M. Peura, 2003: Operational measurement of precipitation in cold climates. *Weather Radar-Principles and Advanced Applications*, P. Meishcner, Ed., Springer, 78 - 114.
- Mohr, C.G., and R.L. Vaughan, 1979: An economical procedure for cartesian interpolation and display of reflectivity factor data in three-dimensional space. *Journal of Applied Meteorology*, **18**, 661-670.
- Rosenfeld, D., D. Wolff, and D. Atlas, 1993: General probabilitymatched relations between radar reflectivity and rain rate. *Journal of Applied Meteorology*, **32**, 50-72.
- Seo, D.J., J. Breidenbach, R. Fulton, and M. Miller, 2000: Real-Time Adjustment of Range-Dependent Biases in WSR-88D Rainfall Estimates due to Nonuniform Vertical Profile of Reflectivity. *Journal of Hydrometeorology*, **1**, 222-240.
- Smith, C.J., D.J. Seo, M.L. Baeck, and M.D. Hudlow, 1996: An intercomparison study of NEXRAD precipitation estimates. *Water Resources Research*, **32**, 2035-2045.
- Sun, J., 2005: Convective-scale assimilation of radar data: Progress and challenges. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **131**, 3439-3463.
- Vignal, B., H. Andrieu, and J.D. Creutin, 1999: Identification of vertical profiles of reflectivity from volume scan radar data, *Journal of Applied Meteorology*, **38**, 1214-1228.
- _____, and W.F. Krajewski, 2001: Large-sample evaluation of two methods to correct range-dependent error for WSR-88D rainfall estimates. *Journal of Hydrometeorology*, **2**, 490-504.
- Villarini, G. and W.F. Krajewski, 2010: Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall. *Surveys in Geophysics*, **31**, 107-129.