韓國水資源學會論文集
第35卷 第1號 · 2002年 2月
pp. 25~36

WPMM 방법을 이용한 레이더 강수량 추정
: 1. 1998년 여름철 관악산 DWSR-88C를 위한 Z_e-R 관계식 산출

Radar Rainfall Estimation Using Window Probability Matching Method
: 1. Establishment of Z_e-R Relationship for Kwanak Mt. DWSR-88C at Summer, 1998

김 효 경* / 이 동 인** / 유 철 환*** / 권 원 태****
Kim, Hyo Kyung / Lee, Dong In / you, Cheol Hwan / Kwon, Wong Tae

Abstract

Window Probability Matching Method(WPMM) is achieved by matching identical probability density of rain intensities and radar reflectivities taken only from small window centered about the gage. The equation of Z_e-R relationship is obtained and compared with data between a DWSR-88C radar and high density rain gage networks within 150km from radar site in summer season, 1998.

The probability density of radar effective reflectivity is distributed with high frequency near 15dBZ. The frequency distribution of rain intensities shows that rain intensity is lower than 10mm/hr in most part of radar coverage area. As the result of Z_e-R relationship using WPMM, curved line has shown to the log scale spatially and it can be explained more flexible than any straight-line power laws at the transformation to the rainfall amount from Z_e value. During 3 months, total radar cumulative rainfall amount estimated by $Z=200R^{1.6}$ and WPMM relationships are 44 and 80 percentages of total raingage amount, respectively. Therefore, Z_e R relationships by WPMM may be widely needed a statistical method for the computation of accumulated precipitation.

keywords : Radar rainfall, Z_e R relation, Probability Density Function, WPMM

요 지

1998년 여름철, 기상레이더와 레이더 주위의 고밀도 우량계 관측자료를 이용하여 Z_e-R 관계식을 산출하기 위

* 부경대학교 환경대기과학과, 박사과정 (e-mail: hkkim@gear.pknu.ac.kr)
Doctoral Student, Dept. of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Pusan
** 부경대학교 환경대기과학과, 교수
Professor, Dept. of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Pusan
*** 부경대학교 환경대기과학과, 박사수료
Doctoral Student, Dept. of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Pusan
**** 기상연구소 기후연구실, 실장
Director, Climate Research Lab., Korea Meteorological Institute, Seoul

하여 관악산 레이더 자료와 강우강도 자료의 확률밀도함수를 구해 확률이 같은 지점을 매치 시키는 Window Probability Matching Method(WPMM) 라는 통계적 방법을 사용하였다.

레이더 반사도의 확률 분포는 약 15dBZ에서 가장 많은 빈도 분포를 보였고 강우강도의 확률분포 는 대부분의 영역에서 시간당 10mm 이하의 비가 내리는 것으로 나타났다.

WPMM을 이용한 Z_e-R 관계식은 로그 좌표계에서 곡선형의 분포를 가지고 있어 직선형의 분포를 가지는 멱급수 형태의 관계식에 비해 반사도를 강우량으로 전환하는데 있어 더 나은 것으로 나타났다. 특히, 3개월 동안의 누적 강수량 산출시 $Z=200R^{1.6}$ 식은 실제 우량계 강수량의 44%만을 추정하는데 반해 WPMM의 경우는 실제 강수량의 80%까지 근접하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 레이더 강우량, Z_e-R 관계식, 확률 밀도 함수, WPMM

1. 서 론

오늘날, 넓은 지역에 걸쳐 강수량과 시선방향(Radial Velocity)의 바람을 실시간으로 측정할 수 있는 기상레이더는 단시간 강수예보에 유용하게 사용될 수 있을 뿐만 아니라 급속히 발달하는 악기상에 대한 경고 조치를 내리는데도 매우 유용하게 사용되고 있다. 또한, 레이더가 제공하는 강수량 자료는 하천이나 강의 수위 조절 및 유입·유출량을 예측하기 위한 수문 모델에도 접합시킬 수 있다. 1998년 여름철과 같은 돌발적인 집중호우로 인한 피해를 미연에 예방하고 재산상의 손실도 줄일 수 있었던 것도 레이더를 이용한 강수량 추정에 관한 연구가 국내외에서 점진적으로 진행되고 개발되고 있기 때문이라 하겠다.

레이더는 강수 입자로부터 산란되어 돌아오는 반사도 신호의 강도를 측정하여 강우강도를 추정하게 된다. 강우의 반사도 계수(Z)와 강우강도(R)의 수학적 관계식은 많은 연구자들에 의해 연구되었으며 주로 식(1)과 같은 형태의 관계식을 가지고 있는 것으로 알려져 있다 (Battan, 1973).

$$Z = A R^b \tag{1}$$

여기서 Z는 반사도(Reflectivity)로써, 단위부피(m^3) 내에 존재하는 강수 입자의 직경의 6승에 비례하는 값(mm6)이며, R은 레이더 강우강도(mm/hr)를 나타낸다. 그리고 A와 b는 강수 입자의 직경 분포(Drop Size Distribution)에 따라 결정되는 상수이며, 강수유형, 계절 및 지형 등의 요인에 의해 결정된다. 그러나 식(1)에서 Z는 강수 입자가 모두 구형이고 강수 입자가 레이더 파장보다 작은 입자만을 대상으로 하는 레일리 산란(Rayleigh Scatter) 영역에 대해 후방 산란되어 되돌아오는 반사도 값만을 나타내므로 실제 레이더가 비구름을 관측했을 때에 되돌아오는 유효 반사도(Z_e, Effective Reflectivity) 값과는 다소 차이가 있다. 따라서 레이더에 의해 관측된 유효 반사도, Z_e를 $Z = A R^b$형의 관계식에 대입하여 레이더 강수량을 추정할 경우 실제 우량계(Raingage)로부터 관측된 강수량과는 오차가 발생하게 된다(Barnston and Thomas, 1983; Wilson, 1970; Wilson and Brandes, 1979; Woodley et al, 1975). 현재 우리 나라에서는 멱급수 형태인 $Z=200R^{1.6}$ 식을 이용하여 레이더 강수량을 산출하고 있으며 이는 Marshall and Palmer (1948)가 중위도 층상운의 직경 분포를 관측하여 상수 A=200, b=1.6을 구해 낸 것으로서, 우리 나라에서 관측된 레이더 반사도를 대입해 레이더 강수량을 산출해 보면 실제 강수량에 비해 다소 과소평가 되고 있는 특성을 보이고 있다(기상연구소, 1989). 오늘날 멱급수 형태의 Z-R 관계식으로부터 계산된 레이더 강수량의 오차를 줄이기 위해 여러 가지 대안적인 방법들이 시도되고 있으며 그 중에서도 실제 레이더로부터 관측된 유효 반사도 Z_e와 우량계로부터 관측된 강우량 R 사이의 확률 밀도 함수(Probability Density Function, PDF)를 구하고 레이더 관측영역 내에서 두 변수의 발생 확률에 대한 관계식을 분석하여 Z_e-R 관계식을 추정하는 방법이 시도되고 있다(Rosenfeld et al., 1980; Calherios and Zawadzki, 1987). 이 방법은 Calherios and Zawadzki(1987) 에 의해 처음으로 시도되었고, Rosenfeld et al.(1993)가 Australia Darwin 지방을 대상으로 이 방법을 적용하여 Ze-R 관계식을 구해 본 결과 멱급수 형태의 관계식에 비해 실제 강수량에 보다 근접된 레이더 강수량을 산출할 수 있었다. 우리 나라에서는 1998년에 처음으로 디지털 자료를 생산한 이후 우량계를 이용하여 멱급수 형태의 Z-R 관계식에서 계수 A와 b를 보정하는 연구가 최근에 이루어

지고 있으나 통계적 기법을 이용한 Ze-R 관계식 산출은 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 관악산 레이더를 이용하여 관측 영역 내에 통계학적 Ze R 관계식을 산출하고 먹급수 형태의 관계식과의 비교 분석을 통한 정량적인 특성을 살펴보았다.

2. 확률분포를 이용한 Ze-R 관계식 산출

2.1 이론적 원리

Z_e-R 관계식을 산출하기 위해 사용한 방법은 Window Probability Matching Method(WPMM)이며 이 방법은 장기간 동안 레이더 관측 영역으로부터 구한 유효반사도 Ze의 확률 분포 함수와 이 영역에 포함되는 우량계 강우강도의 확률 분포를 비교하여 확률이 같은 지점을 연결시켜 look up table 형의 Z_e-R 관계식을 얻는 것이며 식 (2)와 같이 표시될 수 있다 (Rosenfeld et al., 1993).

$$\int_0^{Z'} PDF(Z_e)\,dZ_e = \int_0^{R'} PDF(R)\,dR \qquad (2)$$

WPMM 방법은 레이더 자료와 우량계 자료가 동시간, 동지점에서 얻어진 것이어야 할 필요가 없다는 장점이 있으며, 오랜 기간 동안 관측된 자료들을 이용하므로 적용 지역의 기후학적 특성을 반영하므로 기후학적 Z_e-R 관계식이라고도 한다. 이 방법은 Probability Matching Method(PMM)에서 보다 개선된 방법으로 제시된 것이며 PMM 방법은 레이더 관측 반경 내에서 생산되는 모든 반사도 자료를 이용하는 것인데 반해 WPMM은 지상에 우량계가 존재하는 지점을 기준으로 작은 창(Window)을 선정하고 이 창 내의 상층 레이더 반사도, Z_e만을 추출하여 통계 자료로 활용하는 것이므로 PMM 방법에 비해 레이더 반사도 Z_e의 갯수는 상대적으로 감소하지만 안정된 Z_e-R 관계식을 얻을 수 있는 장점이 있다(Rosenfeld et al.,1994).

2.2 자료 및 처리 방법

Z_e-R 관계식을 산출하기 위해 사용된 레이더는 관악산 도플러 레이더(C밴드, 126.57° E, 36.26° N)이며 자세한 제원은 Table 1과 같다.

관악산 레이더는 미국 EEC(Enterprise Entertainment Company)사에서 제작된 DWSR-88C의 일종이며 10분마다 5개 고도각의 볼륨 자료를 생산하며 관측 반경은 240km이다. 레이더 자료는 강수 및 거리에 의한 감쇄 효과가 나타나므로 강수량 산정시 레이더를 중심으로 반경 150km 이내의 자료만을 활용하였고 고도 1.5km의 자료를 이용하여 강수량을 추출하였다. 레이더 원시 자료는 강수 에코 성분만이 아니라 지형 에코, 이상 에코, 잡음 등이 포함되어 있으므로 레이더 반사도를 강수량으로 전환하고자 할 경우 품질 검사가 필수적이다(기상연구소, 1996). 품질 검사는 레이더가 감지하는 강수에코의 보편적인 특징을 바탕으로 강수 에코의 높이와 반사도에 대해 몇 가지의 임계값을 정해 주어 그 조건을 만족시키지 못할 경우 비강수 에코로 분류되는 원리이며 본 연구에서 사용된 품질 검사 알고리즘은 Rosenfeld et al.(1995a)에 의해 제시된 방법을 사용하였으며, 이는 TRMM 강수 레이더의 지상검증 프로그램으로도 활용되고 있다. Fig. 1은 1998년 8월 12일 관측된 레이더 최저 고도각의 PPI(Plan Position Indicator) 화상을 나타내고 있다. 레이더 중심 영역의 대기 중에서 많은 잡음을 포함하고 있음을 볼 수 있고 이를 Rosenfeld et al.(1995a)에 의한 알고리즘을 이용하여 품질 검사를 실시한 결과, Fig. 2에서와 같이 레이더 부근의 비강수성 반점들이 잘 제거되었음을 알 수 있다. 강우강도 자료는 관악산 레이더 사이트를 중심으로 반경 150km이내에 포함되어 있는

Table 2. The characteristics of radar at Kwanak Mt.

Parameters	Characteristics
Radar type	DWSR 88C
Wavelength (cm)	5.6
Range (km)	240
Pulse width (μs)	2.0
Pulse repetition frequency (Hz)	250
Azimuthal resolution (deg.)	1°
Gate size (m)	1000
Antenna diameter (m)	3.6

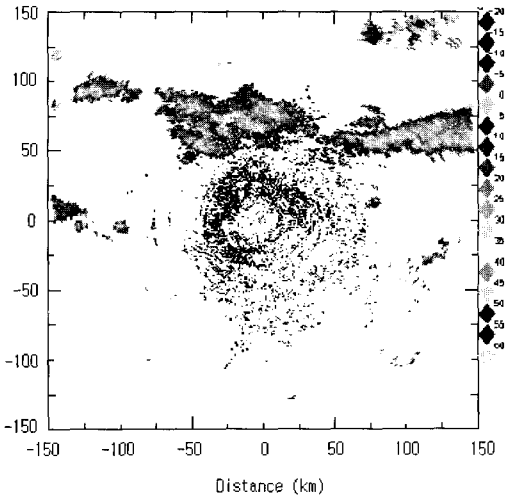

Fig. 1. The raw data of radar base scan reflectivity on 12 August, 1998.

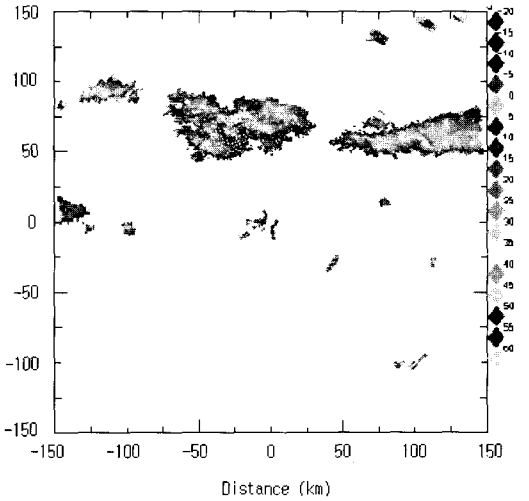

Fig. 2. The quality controlled radar base scan reflectivity on 12 August, 1998.

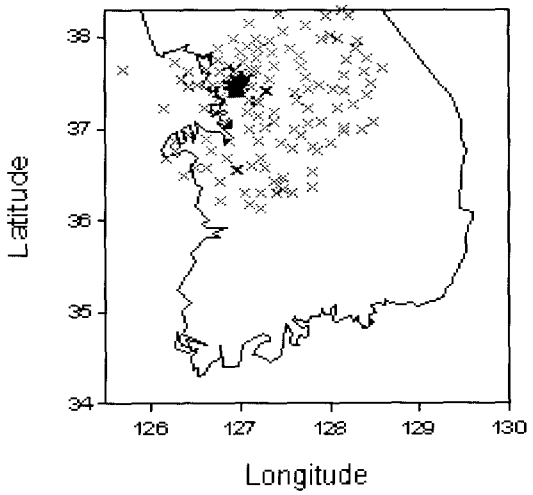

Fig. 3. The locations of raingage(×) near Kwanak radar site(■)

141개 지점의 우량계에서 1분 단위로 생산되는 강우강도 값을 이용하였다(Fig. 3).

반사도와 강우강도의 빈도 분포와 각각의 확률을 구하는 방법과 절차는 Fig. 4에 순서도로 나타내었다. 먼저 우량계가 레이더 공간 내 어느 지점에 위치하는지를 조사하기 위하여 우량계로부터 가장 가까운 레이더 빔을 찾고 레이더로부터의 떨어진 거리를 구하여 우량계의 위치 정보를 얻어 그 위치로부터 레이더 반사도를 추출하였다. 그러나 강수시에는 우량계가 존재하는 지점과 상공의 레이더 관측 지점이 일대일로 정확하게 일치하지 않기 때문에 이런 효과를 고려해 주기 위하여 우량계로부터 가장 가까운 빔을 기준으로 좌·우 한 개씩을 더 포함하여 총 3개의 빔을 선택하고 거리 방향으로 앞·뒤 한 개씩을 더 포함하여 한 지점의 우량계에 대해 하나의 볼륨 자료로부터 총 9개의 반사도를 추출하였다. 이를 141개의 우량계에 대해 모든 기간의 볼륨 자료로부터

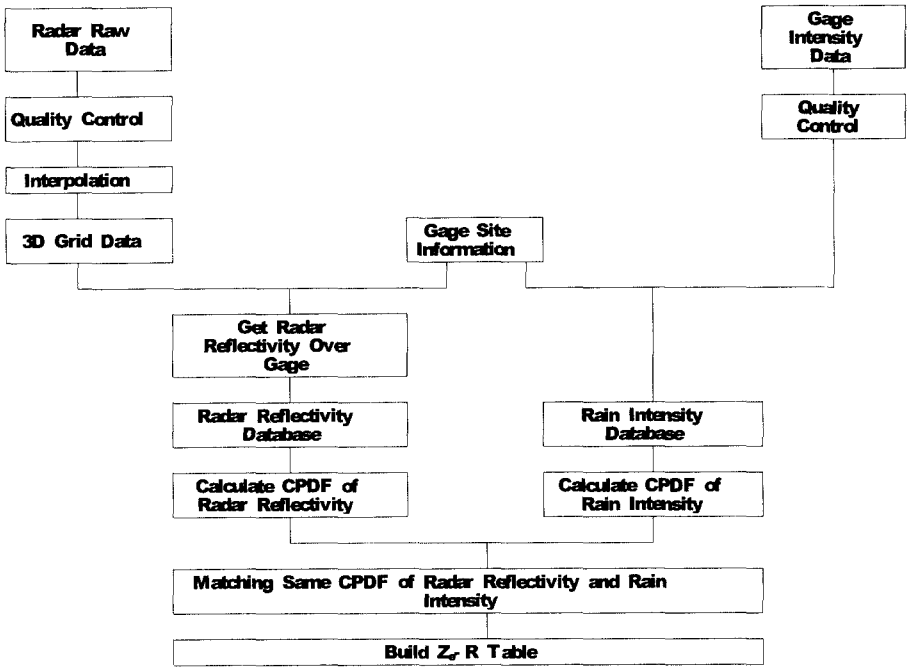

Fig. 4. The schematic flow chart for probability distribution calculation between radar reflectivity and rainfall intensity

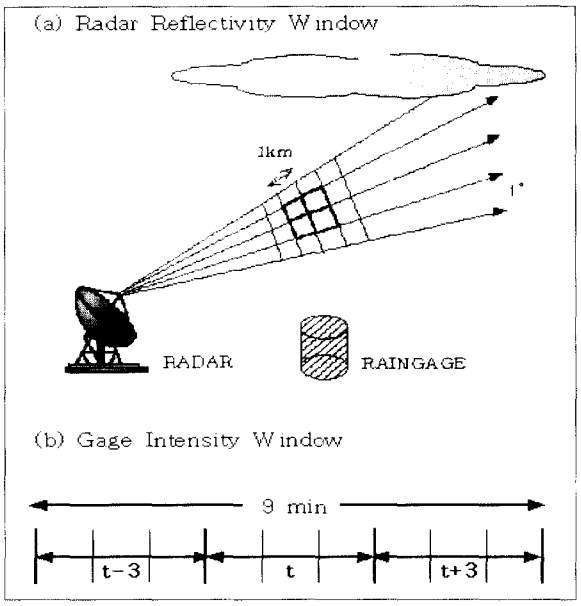

Fig. 5. (a) Nine reflectivity data are contributed to the WPMM procedure from the window of 3km×3rays, to be matched with the rain intensities measured by the gages located at the center of each window.
(b) Gage rain intensities are obtained from the 3 minute averaged rain gauge intensities, centered at the time of the radar scan(t).

추출하여 반사도의 빈도 분포를 구하였다. 레이더 관측은 매 10분마다 실시되므로 하나의 우량계를 통과하는 횟수는 10분 동안 1번에 불과하지만 우량계는 1분마다 자료를 생산하므로 10개의 자료를 생산해 낸다. 따라서 레이더가 정확하게 그 우량계를 통과하는 시간의 1분 강우강도 자료를 찾기가 어려우므로 한 지점의 우량계에 대해 강우강도의 추출은 레이더 볼륨 관측의 중심 시간을 기준으로 3분 평균한 자료와 그 전·후 3분을 기준으로 3분 평균한 자료, 즉 3개의 3분 평균 자료를 사용하여 총 9분 동안의 강우강도 자료를 이용함으로써 레이더 관측시간과의 오차를 조절하였으며 모식도는 Fig. 5와 같다(Rosenfeld et al., 1995b) . 모든 우량계로부터 추출된 강우강도 R의 빈도 분포와 레이더로부터 추출한 반사도 Z_e의 빈도 분포를 구하여 총 관측기간에 대해 R과 Ze의 확률을 계산해 확률 값이 서로 같은 지점을 연결하여 Z_e-R 관계식을 구하였다.

Z_e-R 관계식을 구하기 위하여 1998년 6월 1일부터 8월 31일까지 관측된 레이더 및 우량계 자료를 이용하여 여름철 강수의 보편적인 Z_e-R 관계식을 도출하였다.

3. 결 과

3.1 확률분포 특성

레이더를 중심으로 150km 내에 우량계가 존재하는 지점들의 강우강도(R)와 상층 레이더 반사도(Ze)를 추출하여 빈도 분포를 구하였으며, 그 분포는 각각 Fig. 6과 7에 나타내었다. 가로축은 각각 강우강도(mm/hr)와 반사도(dBZ)를 나타낸 것이며 두 변수 모두 0.1 간격으로 나누어 빈도를 구하였다. 3개월 동안 우량계로부터 추출한 강우강도 데이터를 분석하면 강수가 관측되지 않은 경우가 90%이고 비가 온 경우는 총 데이터의 약 10%를 차지하는 것으로 조사되었다. 비가 온 경우, 가장 빈번하게 관측되는 강우강도는 1.6mm/hr인 것으로 나타났고 강우강도가 클수록 관측 횟수가 지수적으로 감소하는 경향을 볼 수 있었으며, 20mm/hr이 넘는 경우는 거의 드문 것으로 나타났다. Fig. 7은 관악산 레이더가 관측한 반사도의 빈도 분포를 나타낸 것으로 가장 빈번히 관측된 반사도는 약 15dBZ 부근인 것으로 나타났고 중심 축에서 멀어질수록 관측 횟수가 감소해 강우강도와 유사한 분포 양상을 보였으며, 45dBZ를 넘는 반사도는 거의 관측되지 않는 것으로 조사되었고 또한, 15dBZ 이하에서는 이웃한 계급간에 빈도의 변동폭이 커 이중적인 빈도 분포 양상을 띄는 불안정성을 보였는데 이에 관해서는 많은 양의 자료 확보를 통해 객관적으로 재분석되어야 할 것이다. 최다 빈도를 가지는 15dBZ를 현재 우리 나라 레이더의 Z-R 관계식인 $Z=200R^{1.6}$식에 대입하여 강수량으로 환산하면 시간당 0.3mm의 강수량이 산출되고 관측된 반사도 중 비교적 높은 값에 속하는 45dBZ를 레이더 강수량으로 환산하면 시간당 23.7mm 정도의 강수량이 산출되는 것을 알 수 있다. 그러나 실제 여름철에 시간당 50mm 이상의 강수가 내리는 사례가 적지 않음을 감안하면 현재 우리 나라 현업용 관계식 $Z=200R^{1.6}$식은 강수량을 과소 평가하는 문제점을 가지고 있으므로 계수 200과 1.6을 적

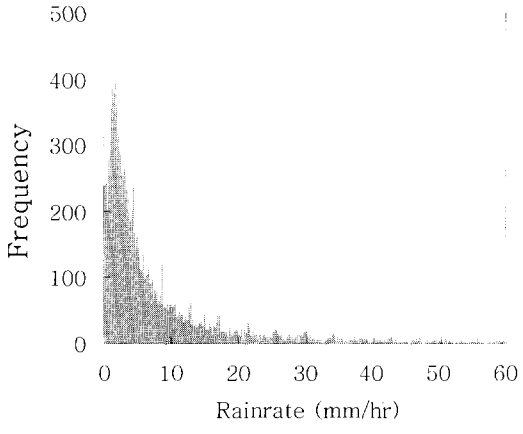

Fig. 6. The frequency distribution of gauge rainrate (mm/hr) during June - August, 1998.

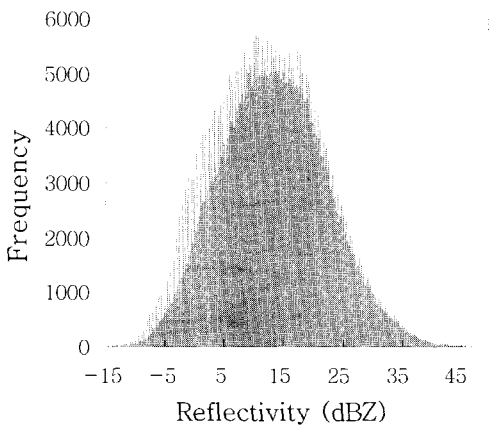

Fig. 7. The frequency distribution of radar reflectivity (dBZ) during June - August 1998.

Table 2. The look-up table of WPMM based Z_e-R relationship

dBZ	Rain rate (mm/hr)	dBZ	Rain rate (mm/hr)	dBZ	Rain rate (mm/hr)	dBZ	Rain rate (mm/hr)
22.4	0.0	33.1	20.0	37.8	50.3	43.0	91.3
22.5	0.2	33.2	20.5	37.9	51.3	43.1	92.5
22.6	0.3	33.3	21.0	38.0	52.0	43.2	93.6
22.7	0.5	33.4	21.4	38.1	53.2	43.3	93.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27.0	5.0	35.0	30.1	39.1	60.1	44.5	100.5
27.1	5.1	35.1	30.3	39.2	60.7	44.6	102.0
27.2	5.2	35.2	30.8	39.3	61.7	44.7	102.1
27.3	5.4	35.3	31.4	39.4	62.8	44.8	102.9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29.8	10.0	36.5	40.6	40.6	71.2	49.0	130.7
29.9	10.2	36.6	41.2	40.7	72.5	⋮	⋮
30.0	10.5	36.7	42.0	40.8	72.9	60.0	158.6
30.1	10.7	36.8	42.7	40.9	73.3	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

절히 조절해야 할 것으로 판단된다.

3.2 Ze-R 관계식 특성

강우강도와 반사도의 빈도 분포를 바탕으로 각 변수의 발생 확률을 구하여 발생 확률이 같은 지점을 서로 연결시키는 WPMM 방법을 이용하여 Ze-R 관계를 구하였으며 그 결과를 look-up table로 간략하게 나타내면 Table 2와 같고 연속적으로 표현한 그래프는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 직선은 $Z=200R^{1.6}$식을, 곡선은 WP MM 방법으로 구한 관계식을 나타내며 $Z=200R^{1.6}$식은 Log (Z)-Log(R) 축에 대해 직선으로 나타나 모든 구간에서

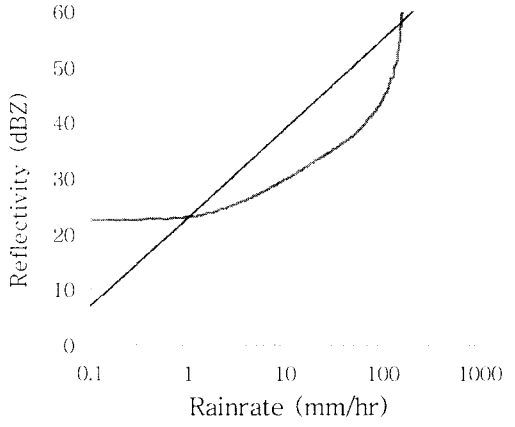

Fig. 8. The comparison between $Z=200R^{1.6}$ (straight line) and Z_e-R relationship by WPMM(curved line) in Kwanak radar from June to August, 1998.

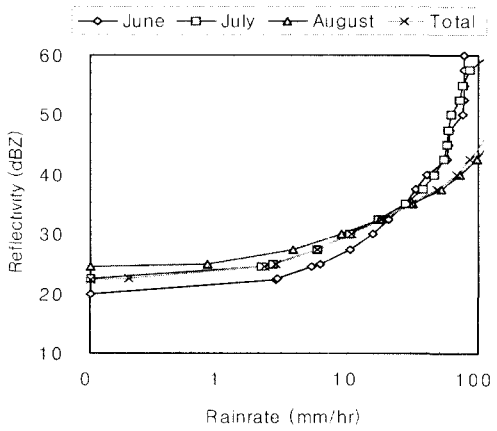

Fig. 9. The monthly and total Z_e-R relationships from June to August, 1998.

일률적인 관계식이 적용되는 반면 WPMM의 경우는 곡선형으로 강우강도에 따라 유연성 있는 관계가 적용되고 있음을 알 수 있다. WPMM에 의한 Z_e-R 관계식을 살펴보면 22.4dBZ에서 비가 내리기 시작하며 23dBZ 이하일 경우 $Z=200R^{1.6}$이 WPMM에 의한 것보다 더 많은 강수량을 산출하는 반면 23~58dBZ 구간에서는 WPMM에 의한 결과보다 더 많은 레이더 강수량을 산출하는 것으로 조사되었다. 40dBZ에서 두 식에 의한 레이더 강수량은 WPMM 방법에서는 시간당 67.5mm를, $Z=200R^{1.6}$에서는 11.5mm로 나타나 강수량의 차이가 가장 큰 것으로 나타났다.

본 연구는 3개월 동안 추출된 자료를 모두 이용하여 Z_e-R 관계식을 구한 것이므로 WPMM 방법을 이용하여 구한 Z_e-R 관계식이 자료 추출 기간에 얼마나 영향을 받는가를 알아보기 위하여 6월, 7월, 8월에 대해 각각의 Z_e-R 관계식을 구해 3개월 동안 자료를 이용하여 구한 Z_e-R 관계식과 비교하여 보았으며 그 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 월별 Z_e-R 관계식에서 강수가 내리기 시작하는 반사도는 6월에 20dBZ, 7월에 15dBZ로 월별로 최대 5dBZ 정도의 차이가 나는 것으로 조사되었다. 3개월 동안 추출된 모든 자료를 이용하여 산출된 Z_e-R 관계식은 강수량이 25mm 이하인 경우에는 7월의 관계식과 유사하나 25mm 이상인 경우는 8월의 관계식과 유사한 경향을 보였다. 이와 같이 자료의 추출기간에 따라 Z_e-R 관계식이 서로 다른 이유는 추출기간 동안 내린 강수의 유형이 서로 다르기 때문인 것으로 판단되며 WPMM 방법을 사용할 경우 이런 문제를 해결하기 위해 강수 유형을 분류하여 Z_e-R 관계식을 구하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.3 Z_e-R 관계식의 검증

WPMM 방법으로 구한 레이더 강수량이 실제 강수량에 얼마나 근접한지를 조사하고 $Z=200R^{1.6}$식으로부터 구한 레이더 강수량과의 차이는 얼마인지를 알아보기 위하여 여름철 호우가 주로 발생하는 경기 북부 철원과 연천 두 지방을 대상으로 강수량을 비교하였다. 레이더 강수량 산출은 매 10분마다 관측된 6회의 반사도를 각각 Z_e-R 관계식에 대입하여 강수량(mm/hr)으로 전환한 후 이를 산술 평균하였다. Fig. 10은 분석 대상 기간에 포함되는 1998년 8월 7일과 8일 사이에 발생한 호우에 대하여 각각의 강수량을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 방법 모두 관측 강수량 보

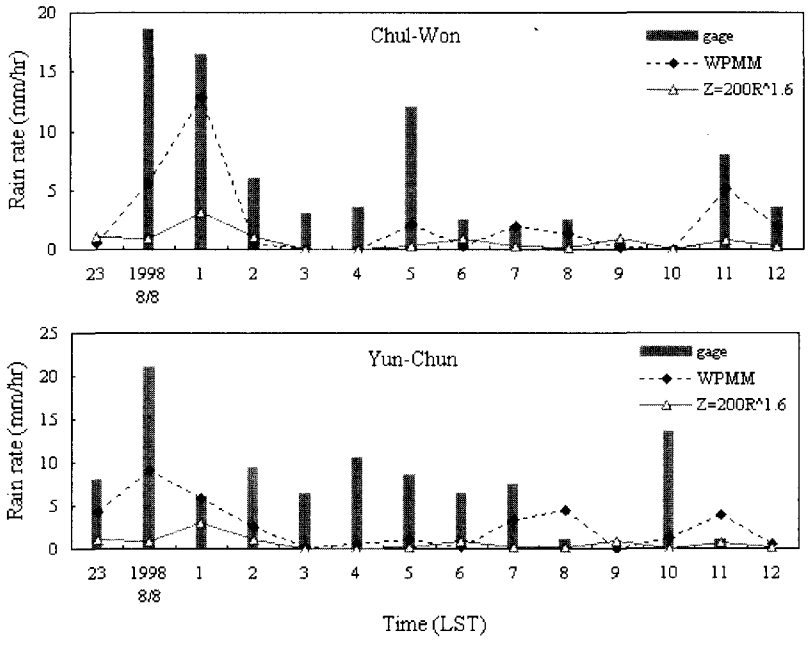

Fig. 10. The time series of rain rate(mm/hr) based on rain gage, WPMM and $Z=200R^{1.6}$ in Chul-Won and Yun-Chun from 23 LST 7 August to 12 LST 8 August, 1998.

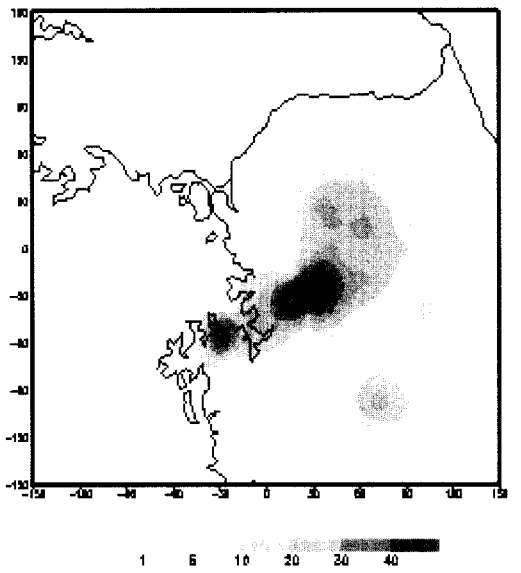

Fig. 11. The contour of accumulate rainrate (mm/hr) by gage data near Kwanak Mt. at 22LST on 8 August, 1998.

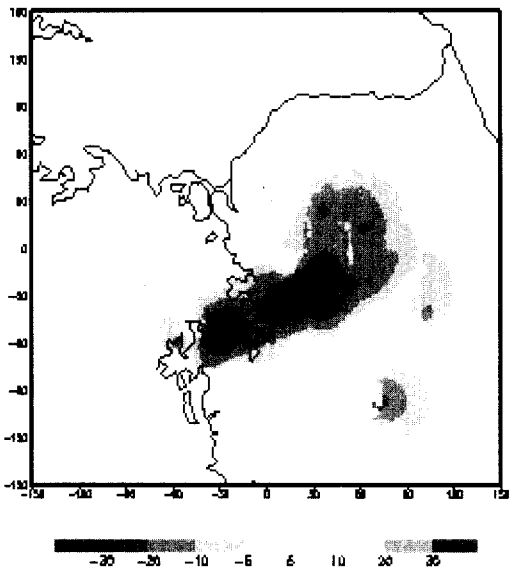

Fig. 12. Difference between radar rainfall by $200R^{1.6}$ and gage rainfall (mm/hr).

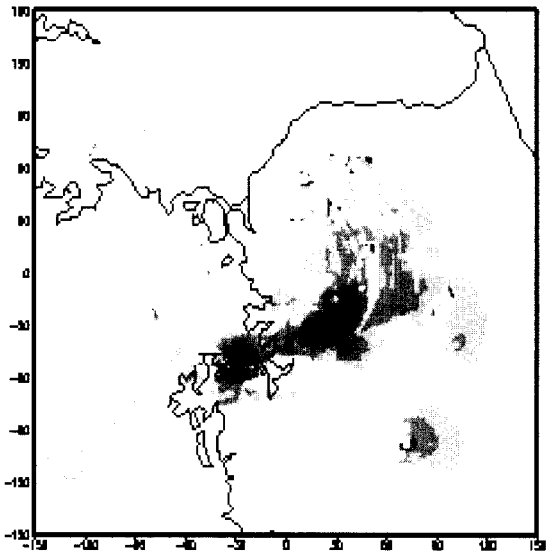

Fig. 13. Difference between radar rainfall by WPMM and gage rainfall (mm/hr).

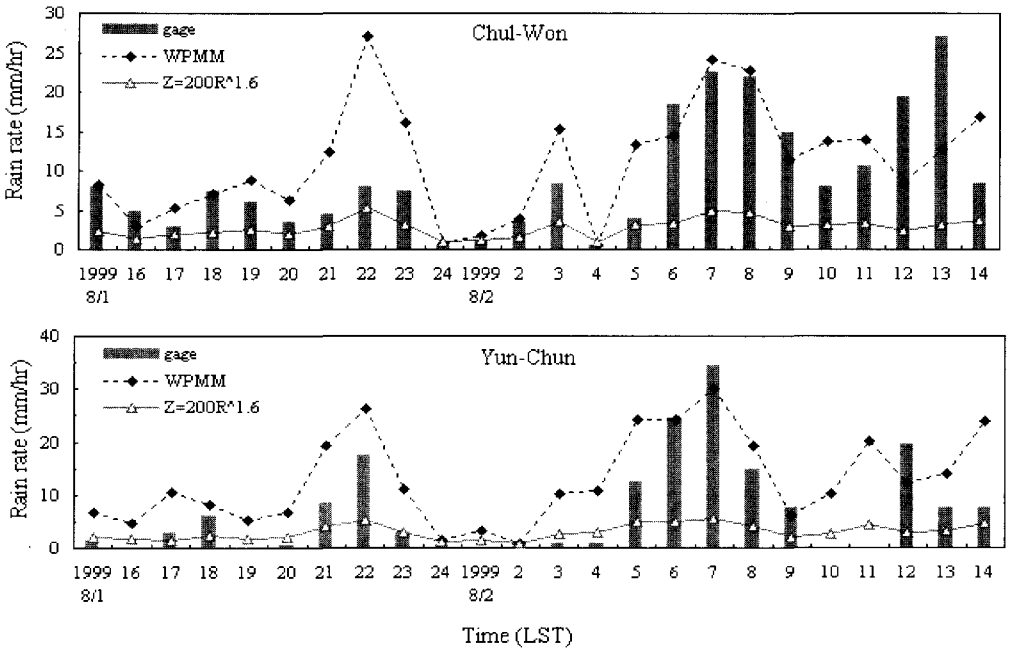

Fig. 14. Same as Fig. 10 but for from 15 LST 1 August to 14 LST 2 August, 1999.

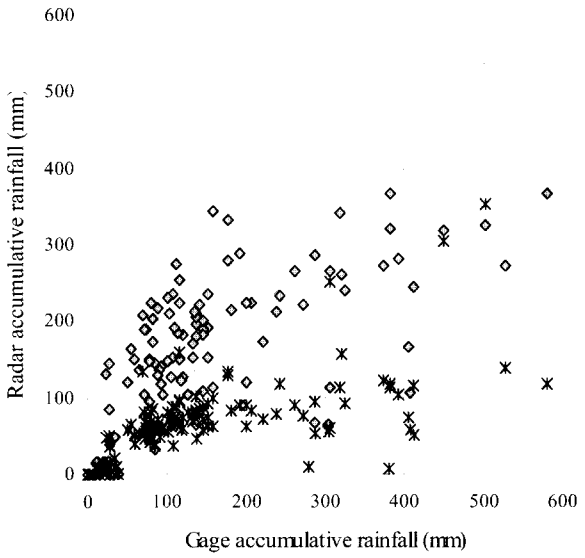

Fig. 15. The comparison between the gage accumulative rainfall amount and radar rainfall amount over gauge using $Z=200R^{1.6}$(×) and WPMM(◆) during June-August, 1998.

다 과소 평가 되고 있는 것을 알 수 있으며 Marshall and Palmer(1948)가 중위도 층상운을 대상으로 제시한 $Z=200R^{1.6}$ 식보다는 WPMM에 의한 레이더 강수량이 정량적인 측면에서 다소 바르게 평가되고 있으나 두 방법 모두 실제 강수량과의 변동 패턴은 완전히 잘 일치하지 못 하고 있다.

레이더 강수량이 과소평가 되는 현상이 다른 지역에서도 나타나는지를 알아보기 위하여 실제 강수량에서 레이더 강수량을 뺀 값의 공간 분포를 살펴보았으며 결과는 Fig. 11~13에 나타내었다. Fig. 11은 관악산 레이더로부터 반경 150km 내의 우량계로부터 1시간 동안 관측된 강수량의 공간 분포이며 Fig. 12는 관측 강수량에서 $Z=200R1.6$ 식에 의해 구해진 레이더 강수량을, Fig. 13은 WPMM에 의해 구해진 레이더 강수량을 뺀 값의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 12와 13을 비교하여 보면, 두 방법 모두 대부분의 지역에서 레이더 강수량이 과소 평가 되고 있는 것을 볼 수 있으며 WPMM 방법이 $Z=200R^{1.6}$식보다 ± 5mm내로 차이 나는 지역이 다소 적어 실제 강수량에 근접하는 것으로 나타났으나 상대적으로 과대 평가하는 지점도 나타나는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 14에서는 1998년 6월에서 8월 사이의 자료를 이용하여 구한 WPMM 관계식이 다른 해 여름에도 적용 가능한지에 대해 알아보기 위하여 다음 해인 1999년 8월 1일에 발생한 강수 사례에 같은 지역을 대상으로 적용하여 보았다. $Z=200R^{1.6}$식은 여전히 관측 강수량에 비해 과소 평가 되고 있는 것을 알 수 있으며 WPMM의 경우는 강수량이 시간당 10mm/hr 이하일 때에는 강우강도에 비해 다소 과대 평가되고 있으나 강수량이 증가할 경우에는 거의 일치하는 경향을 보였고 1998년과는 달리 두 방법 모두 실제 강수량과의 변동 패턴은 유사하게 나타났다.

3.4 우량계와 레이더 누적 강수량 비교

WPMM 식으로부터 구한 레이더 강수량이 실제 강수량에 비해 어느 정도의 강수량을 추정하는지를 살펴보기 위하여 레이더 관측 자료와 우량계 관측 자료가 동시에 존재했던 시간만을 추출하여 우량계 누적 강수량(R_{gage})과 각각의 방법에 대한 레이더 누적 강수량(R_{radar})을 비교하여 보았으며 그 결과는 Fig. 15와 같다. $Z=200R^{1.6}$식에 의해 추정되는 R_{radar}를 R_{gage}와 비교하여 보면 대부분의 관측 지점에서 레이더 강수량이 실제 강수량에 비해 과소평가 됨을 알 수 있고 누적 강수량이 커질수록 과소평가 되는 양도 더 커짐을 알 수 있다. WPMM 관계식에 의해 추정되는 Rradar 와 R_{gage}를 비교하면 누적 강수량이 150mm 이하인 지점에서는 우량계 강수량보다 과대 평가되는 경향을 보이는 반면 누적강수량이 150mm 보다 커질수록 다소 과소 평가되는 경향으로 바뀌었다. R_{radar}와 R_{gage}의 상관관계를 조사한 결과 $Z=200R^{1.6}$식의 경우는 상관계수가 0.63으로 나타났고 WPMM은 0.68로 약간 높게 나타났으나 큰 차이는 없는 것으로 조사되었다.

반경 150km 내에 포함되는 우량계들의 3개월 누적 강수량의 합은 32,022mm이며 $Z=200R^{1.6}$식에 의한 레이더 강수량은 14,090mm로 실제 강수량의 44%를, WPMM 방법에 의한 경우는 25,618mm로 관측치의 80%까지 추정하는 것으로 나타나 넓은 면적을 대상으로 장기간의 누적 강수량을 산출할 때는 WPMM의 방법을 이용하는 것이 보다 정확한 값을 나타내는 것으로 판단되었다. 이는 $Z=200R^{1.6}$식을 통해 레이더 강수량을 산출하는 경우는 거의 모든 지점에서 실제 강수량에 비해 과소 평가되는 반면, WPMM 방법의 경우 과소 평가되는 지점과 과대 평가되는 지점이 서로 상쇄되어 실제 강수량에 근접함을 알 수 있었다(Fig. 15).

4. 결 론

1998년 6월부터 8월까지 여름철에 관악산 레이더(DWSR-88C)와 레이더 중심으로부터 반경 150km 내에 포함된 우량계 1분 강우강도 자료를 이용하여, 통계적 방법인 장기간 동안 관측된 레이더 반사도 Z_e와 우량계 강수량 R의 확률 분포를 이용하여 그 확률이 서로 일치하는 지점을 대응시켜는 WPMM 방법과 현업에서 사용되고 있는 멱급수 형태의 Z_e-R 관계식인 $Z=200R^{1.6}$ 과 비교하여 레이더 강수량의 개선 여부를 살펴보았다.

(1) WPMM에 의해 구해진 Z_e-R 관계식은 log(Z)-log(R) 좌표계에서 곡선 형태로 나타나 모든 구간에서 일률적인 함수($Z=ARb$)가 적용되는 멱급수 형태의 식과는 달리 강우 강도에 따라 다른 관계식이 적용되는 것으로 나타났다.

(2) 23dBZ 이하 영역에서는 $Z=200R^{1.6}$ 식이 WPMM에 의한 식보다 더 많은 레이더 강수량을 나타내는데 반해 그 이상의 영역에서는 WPMM에 의한 방법이 더 많은 레이더 강수량을 나타내는 것으로 조사되었으며, 두 방법에서 구한 레이더 강수량의 차이는 40dBZ 부근에서 가장 큰 것으

로 나타났다.

(3) 월별 자료를 이용하여 매월의 Z_e-R 관계식을 비교 분석한 결과 월별로 강우가 내리기 시작하는 반사도는 최대 5dBZ 내에서 변동을 보였고 강우강도에 따라 약간씩 차이가 있는 것으로 나타났다.

(4) 모든 우량계에 누적된 강수량의 합과 같은 기간에 대해 Z_e-R 관계식에 의한 레이더 누적 강수량의 합을 비교하여 본 결과, $Z=200R^{1.6}$ 식에 의한 레이더 누적 강수량은 우량계 누적 강수량의 44%를 나타내는데 비해 WPMM에 의해 산출된 누적강수량은 우량계 누적 강수량의 80%를 나타내고 있어 넓은 지역의 누적 강수량 산정시 WPMM 관계식을 사용하는 것이 보다 더 나은 것으로 사료된다.

(5) 우량계와 레이더 누적 강수량간의 상관관계에서 $Z=200R^{1.6}$ 식과 레이더 누적강수량과는 상관계수가 0.63인 반면, WPMM 방법과는 상관계수가 0.68로 나타났다.

(6) $Z=200R^{1.6}$ 식을 이용한 레이더 강수량 추정은 거의 모든 지역에서 강수량이 과소 평가되는 반면 WPMM의 경우는 과대 평가되는 경우와 과소 평가되는 경우로 각각 다르게 나타났다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해 방재기술개발사업의 일환으로 수행된 것입니다. 시스템 구축에 도움을 주신 기상청 박훈씨와 레이더 자료를 제공해 주신 기상청 원격탐사과 직원들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

기상연구소, 1989: 레이다 에코로 계산된 강우량의 정확도 평가 연구. 연구보고서, 63PP.

기상연구소, 1996: 레이더를 이용한 유역강우 산정 기법 연구(II). 연구보고서, 71pp.

Barnston, A. G. and J. L. Thomas, 1983: Rainfall measurement accuracy in FACE: A comparison of gage and radar rainfalls. *J. Climate Appl. Meteor.*, 2038-2052.

Battan, L. J., 1973: Radar Observation of the Atmosphere. *University of Chicago Press*, 323 pp.

Calheiros, R. V. and I. Zawadzki, 1987: Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil. *J. Clima. Appl. Meteor.*, 26, 118-132

Marshall, J. S. and W. McK. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, 5, 165-166.

Ronald E. Rinehart, 1997: Radar for meteorologists. Rinehart publishing, 94-95pp.

Rosenfeld, D., 1980: Characteristics of rain cloud systems in Israel as derived from radar data and satellite images. M. S. thesis(Hebrew), the Hebrew University of Jerusalem, Israel, 129pp.

Rosenfeld D., B. D. Wolff and D. Atlas, 1993: General Probability-matched Relations between Radar Reflectivity and Rain Rate. *J. Appl. Met.*, 32, 50-72.

Rosenfeld D., B. D. Wolff and A. Eyal, 1994: The Window Probability Matching Method for Rainfall Measurements with Radar. *J. Appl. Met.*, 33, 682-693.

Rosenfeld D., A. Eyal and B. D. Wolff 1995a: Improved Accuracy of Radar WPMM Estimated Rainfall upon Application of Objective Classification Criteria. *J. Appl. Met.*, 34, 212-223.

Rosenfeld D., A. Eyal and B. D. Wolff, 1995b: Classification of Rain Regimes by the Three-Dimensional Properties of Reflectivity Fields. *J. Appl. Met.*, 34, 197-211.

Wilson, J. W., 1970: Radar measurement of rainfall-A summary. *Bull. Amer. Meteor.* Soc., 60, 1048-1058.

Wilson, J. W. and E. A. Brandes, 1979: A radar measurement of rainfall - A summary. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 60, 1048 - 1058.

Woodley, W. L., A. R. Olsen, A. Herndon and V. Wiggert, 1975: Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement. *J. Appl. Meteor.*, 14, 909-928.

(논문번호:01-048/접수:2001.06.21/심사완료:2001.12.12)