

레이더를 이용한 강우 관측



최규현 >>>

정회원, 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 토목연구사, 공학박사
khchoi@moct.go.kr



김양수 >>>

정회원, 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 센터장, 공학박사
kimys2@moct.go.kr



현명숙 >>>

정회원, 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 기상연구사, 이학석사
mshyun@moct.go.kr

1. 머리말

유역에서의 강수량을 산정하는 방법에는 지상의 강수량계를 사용하여 직접적으로 측정하는 방법과 레이더를 이용하여 간접적으로 대기 중의 강수입자를 관측하여 강수량 자료로 변환하는 방법이 있다. 이때, 강수량계는 강수량을 직접 관측하기 때문에 실측 강수량 정보를 얻을 수 있으나, 이는 지점 강수량이며 넓은 지역을 관측하기 위해서는 다수의 강수량계가 지상에 설치되어야 한다. 반면에 간접적으로 강수를 관측하는 레이더는 고분해능의 자료를 얻을 수 있고, 넓은 영역에 걸쳐서 강수의 공간적 분포양상과 강수의 경계 파악이 가능하다. 이로 인해 많은 연구자들이 레이더 반사도 자료와 지상의 강수량 자료의

장점을 이용한 시·공간적으로 실제 강우에 근접한 고분해능의 강수량 자료를 얻기 위하여 노력하고 있다.

본고에서는 첨단 강수량 측정 기술인 레이더의 관측 원리에 대해서 살펴보고, 레이더 반사도 자료의 의미와 강수량 변환에 대한 기초내용 및 경향을 논하고자 한다. 또한 건설교통부에서 현재 추진 중인 강우레이더 설치와 활용에 대해서 간략히 기술하고자 한다.

2. 레이더 일반

레이더는 RAdio Detection And Ranging의 합성어이며, 목표물을 향해 전파를 발사해서 목표물로부터 되돌아오는 전파의 강도와 목표물까지의 거리를 측정하는 장치이다. 목표물의 위치는 안테나의 방향과 고도각, 그리고 송신전파와 반사파의 시간간격으로부터 알 수 있다. 강우레이더의 경우 주로 파장이 3.2cm(X 밴드), 5.7cm(C 밴드), 10cm(S 밴드)의 마이크로파를 사용한다. 일반적으로 파장이 짧을수록 강수에 의한 감쇠가 크고 넓은 영역을 관측할 수 없기 때문에 현업용 레이더는 주로 C 밴드나 S 밴드 파장을 사용하고 있다.

2.1 시스템 주요 구성요소

레이더 시스템의 주요 구성요소로는 송·수신기, 안테나 및 표출시스템 등이 있다. 송신기의 심장부는 무선 주파수(RF: Radio Frequency)영역의 마이크로파 전력을 생성하는 송신관(transmitter tube)이다. 현재 마그네트론(Magnetron)과 클라이스트론

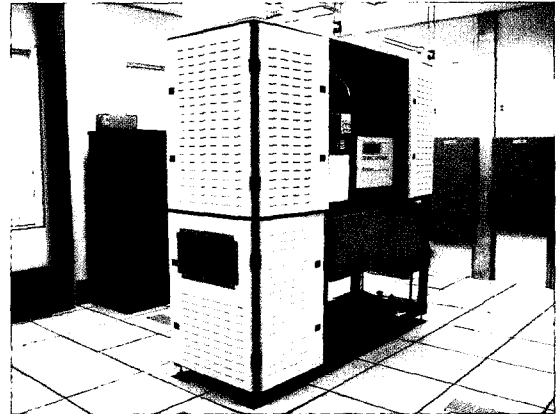
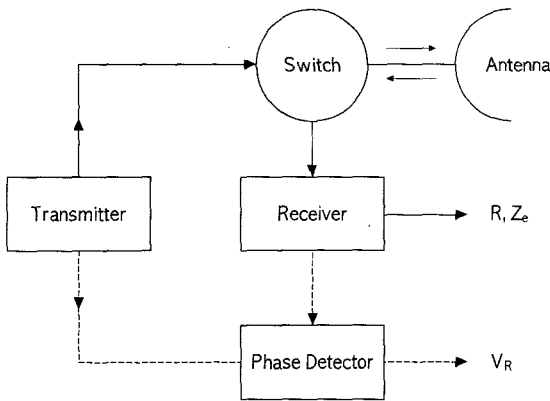


그림 1. 레이더 시스템의 주요 구성요소 및 송·수신기

(Klystron)이라는 두 종류의 송신관이 사용되고 있는데, 마크네트론 송신관은 클라이스트론 송신관에 비하여 낮은 출력을 생성하고 크기도 작다. 반면에 클라이스트론 송신관은 마그네트론 송신기보다 안정된 출력 주파수를 생성하며, 더 큰 전력을 전달할 수 있다. 따라서 두 종류의 송신관 중 어느 쪽을 선택하느냐 하는 것은 레이더를 활용하는 분야에 따라 결정된다. 소형의 송신기를 필요로 하는 항공기나 차량에 설치되는 레이더에는 마그네트론 송신기를 주로 사용하고, 도플러 레이더와 같이 주파수나 위상변화를 탐지하는 경우에는 주파수의 안정성이 무엇보다도 중요하므로 클라이스트론 송신기가 더 선호되는 것이다. 그림 1은 레이더 시스템의 주요 구성요소 및 송·수신기의 모습을 보여주고 있다.

레이더 전파는 송·수신스위치(듀플렉서)를 통해서 도파관이라 불리는 마이크로파 송신관을 따라 안테나로 보내지는데, 송신기에서 생성된 마이크로파는 안테나에 의해 빔(Beam) 형태로 만들어져 대기 중으로 방사된다. 레이더 빔은 연필 빔(Pencil Beam)이라 불리는 좁은 아이스크림 컵(Corn) 모양으로써, 이러한 마이크로파가 대기 중의 어떤 물체와 부딪히면 에너지의 일부가 반사되거나 후방 산란되어 안테나로 되돌아오게 된다. 흔히 레이더 에코(Radar Echo)라 불리는 이러한 후방 산란파는 포물면 접시 안테나에 의해 수집되어 도파관을 따라 듀플렉서를 통과하여 수신기로 들어온다.

2.2 레이더 관측 특성

레이더 안테나를 통하여 방사되는 전파는 주방사부(main lobe)와 부방사부(side lobe)로 나눌 수 있다. 주방사부는 그림 2에서 확인할 수 있듯이, 레이더 전파의 절반 이상의 에너지가 포함되어 있다.

부방사부는 레이더 전파 주방사부의 양쪽으로 보이는 작은 돌출부를 가리킨다. 레이더 사이트보다 낮은 고도에서 에코가 관측이 되는 것은 이러한 부방사부 때문이다. 레이더에서 방사되는 전파는 일정 방향으로 집중해서 송신되는데, 이러한 지향성을 갖는 전파를 레이더 빔이라 한다. 빔의 중심축에서 레이더 전력의 1/2되는 점까지의 각을 빔 폭이라 한다.

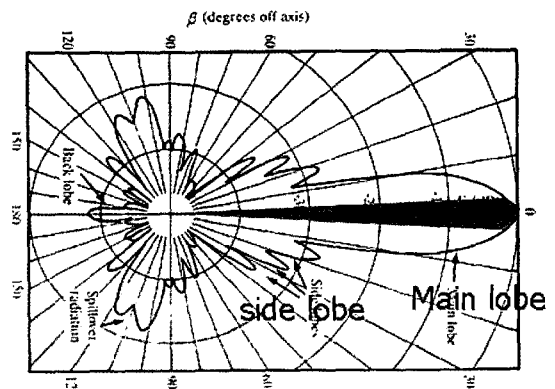


그림 2. 레이더의 주방사부와 부방사부

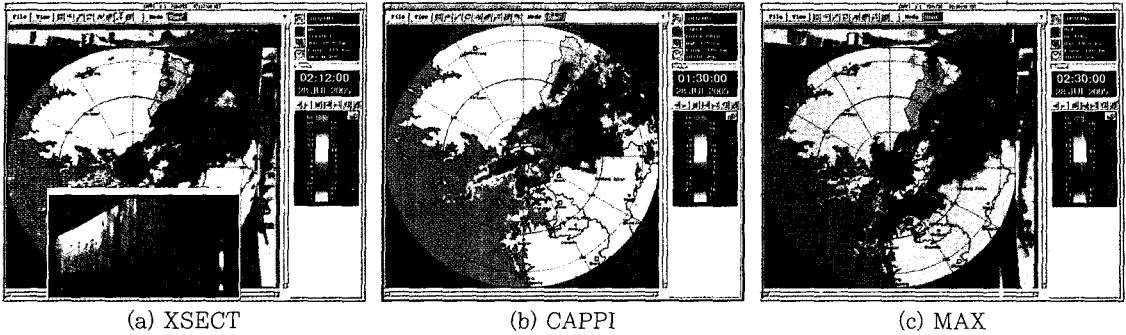


그림 3. 레이더 영상 표출 예

2.3 레이더 영상 표출

XSECT는 가장 기본적인 표출방식으로서 특정한 레이더 빔 방향에 위치한 다양한 목표물로부터 수신된 에코 강도를 거리(또는 레인지)에 따라 표현한 것이다. 이 자료는 특정한 방향에 위치한 지형 클러터를 판단하는데 주로 이용된다. PPI는 가장 일반적으로 사용되는 표출방식으로서, 안테나의 고도각을 일정하게 고정시키고 360°로 회전시켜 수신된 영상 자료를 말한다. 이 자료는 방위각과 레인지로 표출되며 주위에 있는 강수의 수평분포를 파악하는데 이용된다. CAPPI는 여러 층의 PPI 관측(Volume)자료를 큐브(Cube)에 저장하고, 관심 있는 일정한 고도(km)의 수평자료를 뽑아서 표출하는 것을 말한다. PPI 자료와 다른 점은, PPI 자료는 지구 곡률 때문에 일정한 고도자료가 아니라 관측소로부터 멀어지면서 에코의 고도가 점점 높아지지만, CAPPI 자료는 원하는 고도의 자료만을 보여준다는 것이다. MAX는 볼륨 관측자료 중 각각의 자료에서 가장 강한 에코 부분만을 표출한 영상을 말한다.

3. 레이더 관측 자료

레이더 원시자료에는 반사도 자료와 도플러 자료가 있다. 레이더에서 빔을 주사하여 기상목표물에 맞고 후방산란으로 되돌아오는 파가 있을 경우에 다음

과 같은 레이더 방정식에 의해서 반사강도를 알아낼 수 있다.

$$P_r = \left(\frac{\pi^3 P_t G \theta \phi h}{1024 \lambda^2 \ln 2} \right) \frac{|k|^2 Z}{r^2} \quad (1)$$

여기서, P_t : 최대송신전력, h : 펄스폭, G : 안테나 이득, θ : 수평빔폭, ϕ : 수직빔폭, λ : 파장, k : 유전율, Z : 수상입자에 의한 레이더 반사도 인자, r : 목표물까지의 거리를 나타낸다.

이 식에서 괄호 안의 값은 레이더의 종류 및 기능에 따라 결정되므로 레이더에 따른 상수값으로 상수로 대치가 가능하며 다음과 같이 간단한 레이더 방정식으로 표현이 가능하다.

$$P_r = C \frac{|k|^2 Z}{r^2} \quad (2)$$

이 방정식에서 수신전력 P_r , 레이더 상수 C , 유전율 k , 그리고 기상목표물의 거리 r 을 알면 수상입자에 의한 레이더 반사도 인자 Z 를 알 수 있다. 단, 레이더 방정식을 유도하는 데는 다음과 같은 3가지 가정을 전제로 하고 있는데, 이러한 가정은 실제 강수량과 레이더로부터 얻어진 강수량 간에는 차이가 있을 수 있음을 의미한다.

- (1) 목표물의 입자는 완전구형이다.(등방산란)
- (2) 입자의 크기는 레이더 파장에 비하여 훨씬 작다.(레이리 산란)

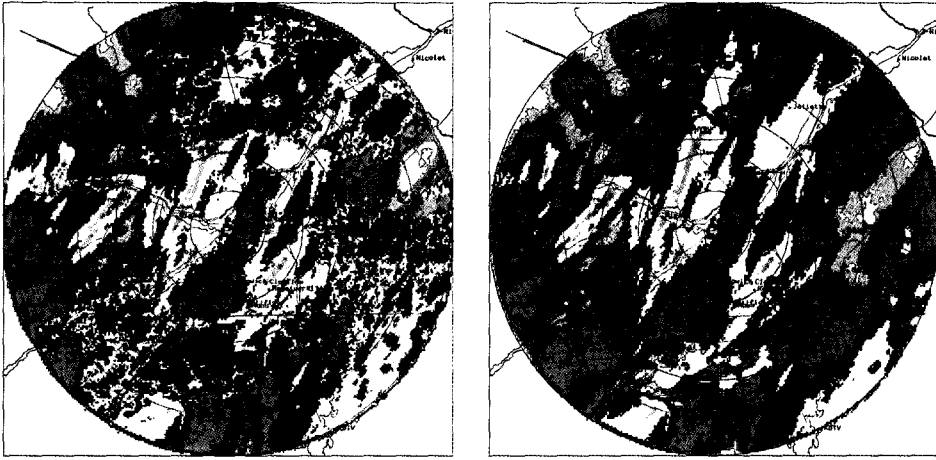


그림 4. 보정전 반사도자료와 보정후 반사도자료의 예

- (3) 강수입자들은 레이더 빔 내에 균일하게 채워져 있다.

레이더 관측으로 얻은 반사도 Z 는 2가지 종류가 있다. 최초에 레이더가 관측하여 얻는 모든 자료를 저장한 것은 보정전 반사도(Uncorrected reflectivity)라 하여 DZ 혹은 UZ 로 표시한다. 이 자료에는 기상목표물에 의한 신호 이외에 대기에 존재하는 잡음, 레이더 빔의 부방사부에 의한 지형클러터 등도 함께 들어 있다. 도플러 자료의 경우는 목표물에 대한 속도정보도 함께 수집함으로써 지형클러터와 같이 속도정보가 일정시간 계속해서 "0"으로 기록되는 목표물의 정보는 기상정보가 아니라고 판단하여 필터에 의해 제거가 된다. 왜냐하면 기상목표물은 대부분 이동하는 속도정보를 가지고 있기 때문이다. 기상정보가 아니라고 판단되는 기준에 의해 지형클러터나 대기잡음이 레이더 신호처리기에서 제거되고 남은 정보를 저장한 것이 보정후 반사도(Corrected reflectivity)로 CZ 라 한다. 이 두 자료 중에서 강수량으로 환산하여 표출하는 자료는 CZ 를 사용하는 것이다.

레이더 관측 후 저장되는 반사도 자료는 라는 단위를 사용하며 레이더 반사도 인자의 대수(logarithm)로 레이더 방정식에서 얻어지는 ()와의 관계는 다음과 같다.

$$dBZ = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Z}{1mm^6/m^3} \right) \quad (3)$$

dBZ 라는 단위개념이 생소하겠지만, 식 그대로 쉽게 설명하면, $1mm^6/m^3$ 에 대한 비 값을 대수로 나타낸 것이다. 따라서 단위부피 $1m^3$ 안에 직경 인 물방울이 1개 있으면 $0dBZ$, 10개 있으면 $10dBZ$, 100개 있으면 $20dBZ$, 1000개 있으면 $30dBZ$ 가 된다고 해석하면 된다. 수상입자의 크기가 레이더 파장의 $1/10$ 이하로 작은 경우에 수상입자는 레일리 산란(Rayleigh scattering)에 의해 후방산란을 한다. 레일리 산란에 의한 수상입자의 반사도 인자 $Z(mm^6/m^3)$ 는 수상입자의 직경 $D(mm)$ 가 포함된 식으로 표현이 된다.

$$Z = \sum_i^N D_i^6 \quad (4)$$

이 식에 의하면 Z 는 $1m^3$ 에 들어있는 수상입자의 직경 D 를 6제곱하여 더한 값이다.

역사적으로 레이더 관측에서 레이더 반사도 인자 Z 는 강수강도 R 과 상당히 깊은 관계가 있음이 밝혀졌고, 이러한 관계를 이용하여 다양한 종류의 $Z-R$ 관계식($Z = aR^\beta$)이 제안되었다. 여기서 R 은 시간당 강수량인 강수강도로서 mm/h 단위를 사용하며, α, β 는 경험에 의한 상수값이다. 레이더에서 추정된 강수

량은 레이더로 측정된 Z 를 이러한 관계식에 적용하여 추정하는 것이다. 가장 대표적인 식이 중위도대의 층상형 강수에 적용하는 식으로 $Z=200R^{1.6}$ 이다.

$Z-R$ 관계는 물리적으로 빗방울의 직경 분포에 의존하고, 시·공간적으로 변화한다. 비록 $Z-R$ 관계가 강한 상관도를 가진다 할지라도 $Z-R$ 관계는 항상 고정된 값을 가지지는 않는다(Battan, 1973; Smith and Krajewski, 1993; Smith, 1993). 따라서 고정된 $Z-R$ 관계를 적용한 강수량 추정에는 한계가 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 지상강수량 자료와 레이더 반사도 자료 각각의 확률밀도함수를 대응시킨 WPMM(Resonfeld et al., 1993), CWPMM(Resonfeld et al., 1995) 등이 연구되었다. 레이더 자료를 이용한 강수량 산정을 위해 통계적 처리를 통한 지상의 강우계 자료와 연계한 연구 또한 다수 수행(Krajewski, 1987; Seo et al., 1990; Sun et al., 2000; 최규현 등, 2006b)되고 있다.

4. 건설교통부 강우레이더 도입 및 활용

중소규모 하천 및 산악지역에서는 집중호우로 인한 인명 및 재산피해가 해마다 증가되고 있어 국가방재상 중요한 문제로 대두되고 있다. 강우레이더는 기

존의 우량계가 점관측(0차원) 자료를 제공하는 것과 달리 면관측(2차원) 또는 공간관측(3차원) 자료를 제공함으로써, 기존의 우량계 관측망이 제공하지 못하는 강우의 공간분포와 이동발달상황 등을 우수한 해상도로 제공하여 집중호우에 의한 피해를 사전에 대비하여 경감하는데 매우 효율적이다. 이에 건설교통부에서는 이미 임진강 유역(DMZ 이북)의 효율적인 강수량 산정을 위해서 임진강 강우레이더를 설치 및 운영 중에 있으며, 전국에 강우레이더 11기를 설치하기 위한 기본계획을 수립하였고, 현재 낙동강 유역에 대한 강우레이더 설치 사업을 추진 중에 있다. 그림 5는 건설교통부 강우레이더 관측망(안)과 레이더 관측을 이용한 홍수예보 예를 보여주고 있다.

5. 맺음말

최근 빈번히 발생하는 돌발홍수나 게릴라성 집중호우 등의 악기상에 대한 경고조치를 위한 강수량 추정에는 넓은 지역에 대한 고해상도 자료를 실시간으로 관측할 수 있는 레이더의 활용이 반드시 필요하다. 레이더의 활용으로 인해 강수량의 공간적인 분포를 고려한 좀더 정확한 강수량 추정 뿐 아니라 관측이 불가능한 지역(북한지역 혹은 해상지역)의 강수량



그림 5. 건설교통부 강우레이더 관측망(안) 및 활용 예

정보를 실시간으로 추정해 냄으로써 보다 신뢰성 있는 홍수 예보 시스템을 구축할 수 있으며, 악기상으로부터 국민의 생명과 재산을 보호할 수 있을 것이다. 레이더를 이용한 더 정확하고 더 신뢰성 있는 유역 강수량을 생산해 내기 위해서는 레이더에 대한 관심과 투자, 관련 기술의 개발이 지속적으로 추진되어야 하겠다.

참고문헌

- 남경엽, 송병현, 서은경, 최지혜, 이정석, 남재철 (2003). "청주부근에서 발생한 여름철 강우의 레이더-지상강우량계 관계에 관한 연구." 한국기상학회지, 제39권, 제4호, pp. 431-440.
- 엄원근 (1995). 레이더기상학, 영재사.
- 최규현, 한건연, 김경익, 이창희 (2006a). "레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립(I): 품질검사와 합성 CAPPI 산출." 한국수자원학회논문집, 제39권, 제4호, pp. 321-334.
- 최규현, 한건연, 김광섭, 이창희 (2006b). "레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립(II): Cokriging을 이용한 2차원 정량강우 산정." 한국수자원학회논문집, 제39권, 제4호, pp. 335-346.
- Battan, L.J. (1973). Radar Observation of the Atmosphere, The University of Chicago Press, p. 324.
- Krajewski, W.F. (1987). "Cokriging radar-rainfall and rain-gauge data." Journal of Geophysical Research, Vol. 92, pp. 9571-9580.
- Rosenfeld, D., Wolff, B.D., and Atlas, D. (1993). "General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate." Journal of Applied Meteorology, Vol. 32, pp. 50-72.
- Rosenfeld, D., Amitai, E., and Wolff, B.D. (1995). "Classification of rain regimes by the three-dimensional properties of reflectivity fields." Journal of Applied Meteorology, Vol. 34, pp. 198-211.
- Seo, D.J., Krajewski, W.F., Azimi-Zonooz, A., and Bowles, D.S. (1990). "Stochastic interpolation of rainfall data from rain gages and radar using cokriging. II: Results." Water Resources Research, Vol. 26, pp. 915-924.
- Smith, J.A. (1993). "Marked point process models of raindrop-size distributions." Journal of Applied Meteorology, Vol. 32, pp. 284-296.
- Smith, J.A. and Krajewski, W.F. (1993). "A modeling study of rainfall rate-reflectivity relationships." Water Resources Research, Vol. 29, pp. 2505-2514.
- Sun, S., Mein, R.G., Keenan, T.D., and Elliott, J.F. (2000). "Flood estimation using radar and raingauge data." Journal of Hydrology, Vol. 239, pp. 4-18.