X밴드 이중-편파 레이더에 있어서의 강우량 산정

윤 강 훈 (한국건설기술연구원 강우레이더팀장, khyoon@kict.re.kr)

▶ 요지

수문학자들의 주요 관심사 중 하나인 정확한 면적 강우량을 파악하는데 있어서 강우레이더는 아주 우수한 첨단 장비이다. 그러나 S 밴드나 C 밴드 레이더를 고지대에서 운영하는 것은 많은 시설비와 운영비가 필요하다. 따라서 연구 및 대도시 소유역에 대한 강우 관찰 목적으로는 차량 탑재가 가능한 소형 X 밴드 레이더가 유용할 수 있다. X 밴드 전파는 강우 도래시 전파특성상 감쇠(減衰:attenuation)가 크며, 감쇠도는 강우강도에 영향을 받는다. 이를 극복하기 위한 이중-편파 이론이 1970년대에 제시되었으나, 기술적인 어려움으로 20여년이 지난 1990년대에 실무적용이 가능하게 되었다. 현재 이중-편파 레이더의 도입으로 감쇠보정 알고리듬이 성공적으로 개발되고 있으며, 그와 같은 발상의 전환은 차등위상(differential phase)에 의한 강우 측정방법 개발로 전파 감쇠에 영향을 받지 않는 강우 관측이 가능하게 하였다. 본 기사에서는 소형 X밴드 이중-편파(偏波) 레이더의 강우량 산정방법에 대하여 간략히 검토하고자 한다.

1. 서론

강우량 산정을 위해 일반적으로 가장 많이 사용되는 이중-편파 레이더 측정법은 수평반사도(Z_h), 차등반사도(Z_{dr}), 그리고 비차등위상(K_{dp}) 등과 같은 반사도 인자를 활용하는 방법이다. 상기 세 가지 인자를 활용하여 강우량을 추정하기 위한 많은 알고리듬이 현재까지 유도되었다.(Bringi & Chandrasekar, 2001 참조) 이러한 알고리듬은 강우입자의 크기가 커질수록 낙하시 공기저항에 의하여 형태가 원형에서 타원형으로 납작해 진다는 사실에 근거하여 수식을 유도하였다(Pruppacher and Beard, 1970). 강우입자 크기에 대한 수평축과 수직축의 비율 관계는 Z_{dr}과 K_{dp}를 사용하는 알고리듬을 유도하는데 중요하다. K_{dp}는 주파수 변화로 직접 측정하며 X밴드에서 예민하게 반응한다. 이러한 특징으로 X밴드에서의 K_{dp}는 매우 활용성이 높다. 이러한 장점을 가진 X밴드 강우 측정법 또한 문제점도 갖고 있는데, 특히 문제가 되는 것은 감쇠도, 차등감쇠도에 있다. 본 기사에서는 S밴드(2.8GHz)와 X밴드(9.3GHz)에서 이중-편파 레이더를 이용한 강우량 추정 알고리듬을 비교 소개하고자 한다.

2. 이중-편파 레이더 측정법과 강우량 산정 방식

강우입자의 크기와 형태 분포는 강우장(rain-filled media)의 전파 산란 특성을 결정한다. 그 결과는, h와 v편파상태에서의 반사도 인자($Z_{h,v}$), 즉 이중-편파 상태의 반사도인 차등반사도(Z_{dr})와, 두 편파간의 전파위상 차이로 인한 비차등위상(K_{dp})과 같은 레이더 측정치에 통합된다. 강우입자의 크기 분포(Raindrop Size Distribution; RSD)는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다(Chandrasekar and Bringi, 1987).

$$N(D) = n_c f(D) \qquad (\mathrm{mm^{-1}m^{-1}}) \quad (1)$$

여기서, $N(D)$는 단위크기 간격(D에서 $D+\Delta D$)의 단위체적당 강우입자의 수이며, n_c는 수농도(number concentration), $f(D)$는 확률밀도 함수이다. 이중-편파 레이더 측정을 포함한 이론·실험연구에서 강우입자 형태는 다음과 같은 축 비율에서 타원체 모양에 의해 추정할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

$$\mathrm{r} = \frac{b}{a} \approx 1.03 - \beta D \qquad (2)$$

여기서, D가 등체적 구면 지름(일반적으로 단위 mm에서)일 때, a와 b는 구면의 장축과 단축이다. 일반적으로 β에 사용되는 값은 0.062이다. 레이더로 측정가능한 $Z_{h,v}$, Z_{dr}, K_{dp}는 다음과 같이 RSD로 나타낼 수 있다.

$$Z_{hv} = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |\kappa|^2} \int \sigma_{h,v}(D) N(D) dD \quad (\mathrm{mm^6 m^{-3}}) \quad (3)$$

여기서, $\sigma_{h,v}$가 수평, 수직 편파에서 레이더 빈사단면적을 나타낼 때, 각각 λ은 파장, $\kappa = (\varepsilon_r - 1)/(\varepsilon_r + 2)$이며 ε_r는 물의 유전상수이다.

$$Z_{dr} = 10\log_{10}(Z_h / Z_v) \qquad (4)$$

$$K_{dp} = \frac{180\lambda}{\pi} R\int [f_h(D) - f_v(D)] N(D) dD \quad (\mathrm{degkm^{-1}}) \quad (5)$$

여기서, R은 복소수의 실수 부분, f_h와 f_v는 h와 v 각각의 편파에서 전방산란 크기이다. 이중-편파 강우레이더 측정에서 사용된 레이더 측정치는 $Z_h(\mathrm{mm^6 m^{-3}})$, $Z_{dr}(\mathrm{dB})$와 $K_{dp}(\mathrm{deg\ km^{-1}})$이다. 이중-편파 레이더 측정치를 이용한 강우량 추정에 관한 연구논문는 수많은 산정방식이 소개되었다. 본 기사에서는 연구논문에서 널리 사용되어 온 산정방식으로 다음의 세 종류를 소개한다. 즉, a) 수평반사도와 차등반사도를 이용한 $R(Z_h, Z_{dr})$, b) 비차등위상을 이용한 $R(K_{dp})$, c) 비차등위상과 차등반사도를 이용한 $R(K_{dp}, Z_{dr})$이 그것이다. 이러한 산정방식은 다음과 같이은 식으로 사용된다.

$$R(Z_h, Z_{dr}) = c_1 Z_h^{a_1} 10^{b_1 Z_{dr}} \qquad (6)$$

$$R(K_{dp}) = c_2 K_{dp}^{a_2} \qquad (7)$$

$$R(K_{dp}, Z_{dr}) = c_3 K_{dp}^{a_3} 10^{-0.1 b_3 Z_{dr}} \qquad (8)$$

3. 주파수 측정치 스케일링

레일리 산란 가설하에 식(3)에서 주어진 반사율은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$Z = \int D^6 N(D) dD \qquad (9)$$

레일리 산란 가정하에서, 반사도는 주파수에 따라 변화하지 않는다. 그러나 X밴드 주파수에서 레일리 산란 가정은 완벽하게 정확하지 않기에 결과적으로 반사도는 변화한다. 그림 (1)은 X밴드와 S밴드의 반사도의 산포를 보여준다. 그림 1에서는 30dBz이상에서 반사도가 증가되면서 반사도에 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 Z_{dr}값은 1dB이상의 값에서는 레일리 산란이 아니므로 차이를 보이는데 그 결과는 그림 1에 나타나있다. K_{dp}는 주파수에 따라 직접적인 영향을 받는다(13 GHz까지 유효함). 진폭 측정범위에서 변화를 관찰하면서, Z_h와 Z_{dr}을 사용하는 강우량 산정방식의 오류 구조는 X밴드와 S밴드가 비슷한 것 같다. 그러나 K_{dp}를 이용하는 산정법은 매우 다른 것 같다. X밴드에서 증가된 K_{dp}값(같은 강우강도의 경우) 때문에 $R(K_{dp})$는 보다 작

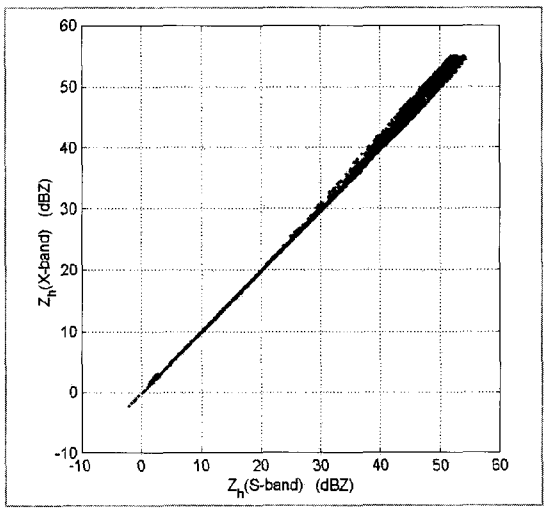

그림 1. 큰 변화를 보이는 RSD의 S-밴드의 반사도와 X밴드의 반사도 사이의 산포도

은 강우강도에서 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 유효한 β가 잘 알려져 있다면 $R(K_{dp})$은 보다 작은 강우강도에서 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 감쇠도를 유발하는 효과는 Z_h와 Z_{dr}에 영향을 미치지만 K_{dp}에는 영향을 미치지 않는다. 그러나 K_{dp}는, 후방 산란 δ에서 위상변화에 의해 오차가 발생하며 X밴드에서 8-12도 정도 일 수 있다. 이것은 방사형 경사지역에서 다뤄져야 하는데 이곳에서 방사변화 δ는 차등위상으로 해석할 수 있다.

4. 강우량 연산방식

β추정값은 Z_h, Z_{dr}, K_{dp}에서 얻을 수 있다. 그에 따른 매개변수는 X밴드에서는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{\beta}_x = 0.589 Z_h^{0.292} 10^{0.1142 Z_{dr}} K_{dp}^{0.292} \qquad (10)$$

방정식 (10)은 허용오차 5%의 정확성을 보인다. 강우량 산정방식을 개발하는데 있어서 유효한 β를 추정하는 것은 중요하다.

4.1 $R(Z, Z_{dr})$ 연산방식 :

$R(Z, Z_{dr})$연산방식의 일반형태는 $Z_{dr} = 10\log_{10}(\xi_{dr})$일 때 다음과 같다.

$$R = a_1 Z_h^{b_1} \xi_{dr}^{c_1} \qquad (11)$$

X밴드 값은 $a_1 = 0.623\beta^{1.44}$, $b_1 = 0.964$, $c_1 = -1.02\beta^{-0.056}$에 의해 주어진다.

그림 2는 정확한 강우량 비율 함수로서 (11)에서 얻어진 R의 산포도를 나타낸다. 그림 1의 결과는 이러한 매개변수가 정규화된 13.5%의 표준편차와 상관계수 99.6%를 갖고 상당히 정확한 강우량 추정값을 산출한다는 것을 나타낸다. 여기에는 측정 오차나 감쇠보정은 없다.

4.2 $R(K_{dp})$ 연산방식 :

X밴드에서 $R(K_{dp})$의 매개변수화는 다음 식에 의해

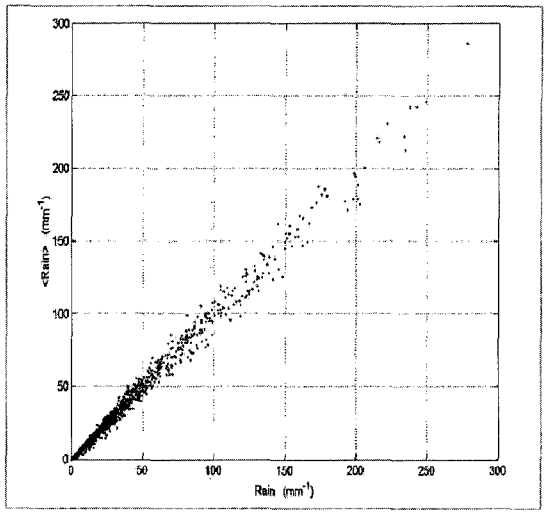

그림 2. R(Zh, Zdr)의 산포도 대 X밴드에서 실제 강우 값

주어진다.

$$R(K_{dp}) = a_2 K_{dp} \qquad (12)$$

여기서, $a_2 = 0.278\beta^{-1.33}$이다.

(12)에서 나타난 매개변수화는 (11)과 비슷하여 편파적이지 않다. 그러나 그보다 높은 표준편차값을 갖는다. 그림 3은 강우량 비율의 함수로서 (12)에 의해 주어진 $R(K_{dp})$의 정규화된 표준오차를 나타낸다. 그림 3에서 오차는, 20mm/hr일때 20%, 40mm/hr일 경우엔 15%로 매개변수화가 상당히 정확하다는 것을 알 수 있다.

4.3 $R(K_{dp}, Z_{dr})$:

X밴드에서 $R(K_{dp}, Z_{dr})$에 대한 최상의 매개변수화는 다음 식에 의해 주어진다.

$$R = a_3 K_{dp}^{b_3} \zeta_{dr}^{c_3} \qquad (13)$$

여기서, $a_3 = 0.0734\beta^{-1.99}$, $b_3 = 1.27\beta^{0.0935}$, $c_3 = -4.71\times10^{-3}\beta^{-1.92}$

위 추정치는 13%의 정확도까지 강우량 비율을 산정한다. 이러한 산정값은 측정오차나 감쇠도를 고려하

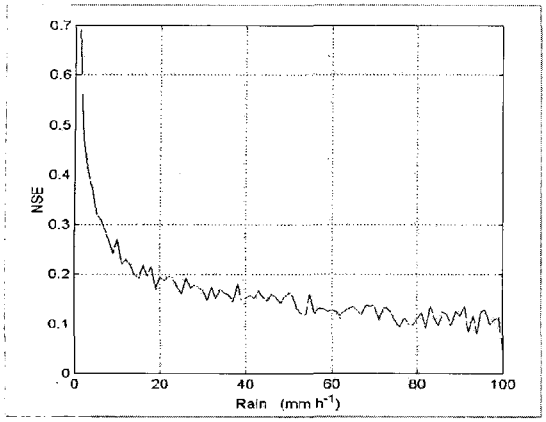

그림 3. R(Kdp) 매개변수화의 정규화된 표준오차

지 않고 얻어진다는 것을 다시 한번 주지해야 한다.

5. 측정오차, 감쇠도 영향, 후방 산란에 대한 위상변화

5.1 측정 오차

S밴드와 X밴드에서 Z_h의 측정오차는 비슷한 크기일 수 있다. 통계적으로 정상 레이더 신호를 위해, X밴드에서 Z_h측정치는 S밴드보다 더 정확해야 한다. Z_{dr}과 ϕ_{dp}의 정확성은 산정 방법에 달려있다. 정확도는 하이브리드 모드와 교류 모드 알고리듬 사이에 큰 차이가 있을 수 있다(Bringi & Chandrasekar, 2001 참조). 여기서는 간단하게 설명하기 위해 하이브리드 모드 산정방식만을 고려하기로 한다. 그림 4b는 ρ_{co}의 함수로서 ϕ_{dp}의 표준편차를 나타낼 때, 그림 4a는 코폴라 상관계수(ρ_{co}) 함수로 Z_{dr}의 표준편차를 나타낸다. 그림 4에서 Z_{dr}과 ϕ_{dp}는 S밴드와 X밴드에서 유사한 계수의 정확도까지 추정할 수 있음을 알 수 있다.

5.2 감쇠도 보정

X밴드에서 감쇠도 보정이 중요하며 감쇠도의 범위에 따르게 되어 있다. 감쇠도의 범위는 강우시 누적 의양에서 쉽게 추정할 수 있다. 고유 감쇠도 즉 미분 감쇠도와 K_{dp}간의 단순한 선형 근사값, 즉 감쇠도와 미분 감쇠도간의 단순한 추정값은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$A = \alpha_A \phi_{dp} \tag{14}$$

$$A_{DP} = \alpha_{dp} \phi_{dp} \tag{15}$$

여기서, α_A와 α_{dp}는 대략 0.2와 0.35 값이다(강우입자 형태모형에 따라). 감쇠도 보정에 이용할 수 있는 상세한 절차는 더 많이 있다(Bringi & Chandrasekar, 2001 참조). 여기서는 간단히 설명하기 위해 세부적인 주제만 언급하고 자세한 토론은 제한하도록 한다.

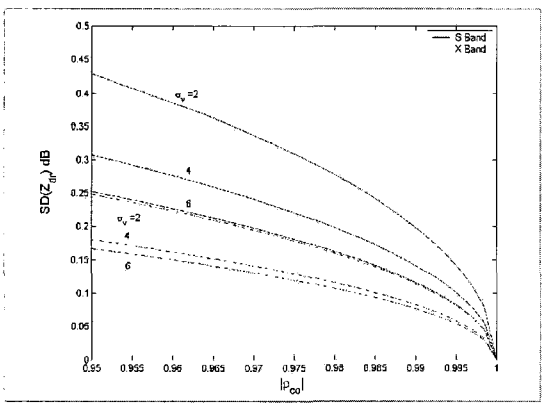

그림 4(a)

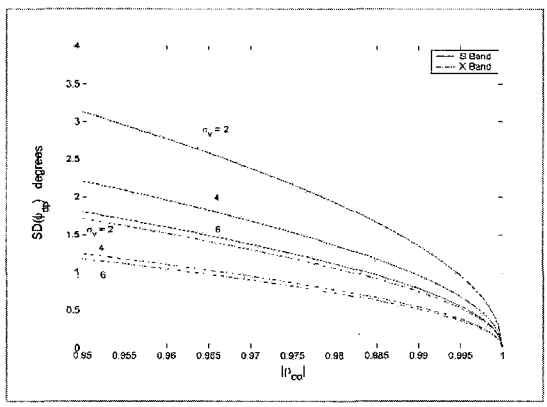

그림 4(b)

그림 4. 도플러 스펙트럼 폭(σv)의 다양한 값에 대한 ρco의 함수로 나타난 S밴드와 X밴드(128개 샘플의 하이브리드 모드)의 Zdr과 Kdp의 오차구조. 그림 4a는 Zdr의 표준편차를 나타내고 그림 4b는 Φdp의 표준편차를 나타낸다.

5.3 후방 산란에 대한 위상변화(δ)

주파수 변이가 위상변화와는 달리 비가 올 때 X밴드에서 더 크다. 그것을 상호 연관시키는 최상의 매개변수는 Z_{dr}이다. 그림 5는 X밴드에서 δ대 Z_{dr}의 도표를 보여주고 그 결과는 δ이 10도 정도일 수 있다는 것을 나타낸다. 이것은 Z_{dr}의 강우량에서 변화도가 큰 지역인 경우 특히 K_{dp}의 추정값에서 고려해 보아야 한다.

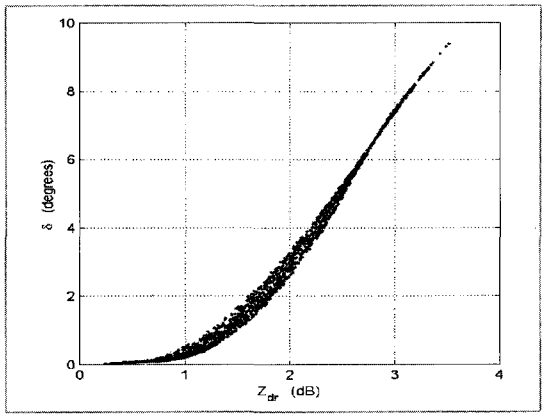

그림 5. σ의 산포도 대 차등반사도 Zdr

6. 산정방식의 비교

감쇠도 보정은 Z_h와 Z_{dr}이 포함된 산정방식을 사용하는데 있어서 중요하며 그 절차는 너무 상세해 여기서는 생략하기로 한다. S밴드와 X밴드 사이의 $R(K_{dp})$비교가 제시되어 있다. 그림 6은 측정 산정방식의 효과를 포함하여 S밴드와 X밴드 간의 $R(K_{dp})$에서의 정규화된 표준오차의 비교를 나타낸다. 이 값은 7.5km의 경로길이를 추정하고 β는 0.062에서 고정되어 있다. 그림 6은 X밴드와 S밴드에서 동시에 $R(K_{dp})$의 NSE를 나타낸다. X밴드에서 $R(K_{dp})$은 S밴드에서 보다 그 결과가 더 좋다는 것을 알 수 있다.

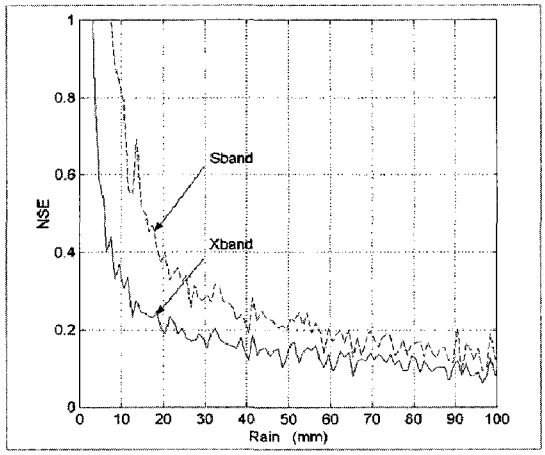

그림 6. 7.5Km 경로에 대한 강우강도의 함수로서 X밴드와 S밴드의 강우강도 추정에 대한 정규화된 표준오차

7. 결론

본 기사는 X밴드 레이더에 있어서 강우량 산정방식을 검토하였다. 소형의 X밴드 레이더가 초대형의 S밴드 레이더와 유사한 정확성을 얻을 수 있는 강우강도을 추정하였다. $R(K_{dp})$을 이용한 X밴드 강우량은 S밴드 레이더 강우 강도의 약 1/3 정도에서 유의성이 있음을 알 수 있다. X밴드 이중-편파 기술을 이용한 레이더 강우량 산정에서 만족스러운 결과를 얻기 위해서는 해당 레이더의 하드웨어 및 전파 특성과 강우강도와의 관계를 정확히 파악하여 기준 레이더인 S밴드 레이더와 비교 연구하는 작업을 지속적으로 진행하여야 한다.

참고문헌

Bringi, V.N. and V. Chandrasekar, Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and applications, Cambridge Univ. Press, 2001

Chandrasekar, V., V.N. Bringi, N. Balakrishnan, and D.S. Zrnic, "Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: Spexific differential phase," J. Atmos. Oceanic Technol., vol. 7, pp. 621-629, 1990