

레이더 강우량 자료의 홍수예경보시스템에의 활용 (I . 레이더 강우량 측정)

윤강훈 (한국건설기술연구원 공학박사)

이충기 (주영메테크(주) 대표이사)

1. 서론

근래 들어 우리나라는 게릴라식 집중호우, 가뭄 등의 기상재해로부터 많은 피해를 입고 있어 국민의 기본적 생활에 큰 지장이 초래되고 있다. 전 지구적인 기상현상이 점차 과거와는 다르게 예측하기가 힘든 이상기상 상태로 전이하고 있어 이에 대한 대책수립이 시급한 현실이다. 우리나라가 겪는 기상재해 중 가장 심각한 부분은 집중호우, 태풍 등에 의한 돌발 홍수로서, 많은 인명 및 재산 피해를 동반하고 있어 방재 업무중 가장 관심이 집중되고 있다. 홍수예경보업무는 강수량 관측, 유출 해석, 하도 추적등과 같은 모형운영과 예측결과의 전달 등을 망라하고 있다. 이중 강수량 관측은 그 첫 단계로 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 지금까지 우리나라에서는 지상 우량계 자료에 의한 홍수예경보 업무를 수행하고 있었으나, 선진국에서는 레이더를 이용한 강수량 관측자료를 홍수예경보시스템에 입력하여 그 효용을 높이고 있으며 최근에 우리 나라에서도 임진강 홍수예경보시스템의 운영에 최초로 레이더 자료를 활용하고 있다.

전 세계적으로 볼 때 많은 국가에서 레이더로 산출한 지상강우량을 홍수예경보 등의 수문업무에 적극적으로 활용하고 있고 또한 강수예측업무에도 매우 유용하게 이용하고 있다. 본 기사에서는 기상레이더가 홍수예경보업무에 어떻게 활용되고 있는가

를 이해하기 위하여 레이더를 이용한 강우량 측정의 이론과 문제점 그리고 실제 홍수예경보시스템에의 적용 및 사례를 두 번에 걸쳐 살펴보고자 한다. 이번 회는 그 중 첫 번째 주제로 레이더를 이용한 강우량 측정에 관하여 기술하고자 한다.

강우량의 정확한 측정은 수문, 농업, 기상조절, 기후학 및 기상예보 분야에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 수문 목적으로 사용하는 레이더의 가장 기본적인 요구조건은 집수역 내로 떨어지는 강수의 시공간적인 분포 및 추정 강우량을 제공하는 것이다. 대다수의 농업분야 응용과 기후 연구의 경우에 있어서는, 넓은 범위에 걸친 장기간(수일 또는 수주)의 강수 자료가 필요하며 다소 밀도가 낮은 우량관측망으로부터 하루 한 번 정도의 우량계 보고 자료가 있으면 적당하다. 이와는 대조적으로 돌발적인 홍수를 예보하기 위해서는 매우 조밀한 관측망으로부터 관측된 우량 자료가 필요한데, 구체적으로 말하자면 짧은 시간 간격(6시간 이하) 및 좁은 영역(1,000 평방km 이하)에 대한 자료가 필요하다. 그러나 많은 수의 관측장비를 현장에 조밀하게 설치하여 이로부터 적절한 시간에 관측자료를 중앙처리 장비로 전송하는 관측망을 설치하여 유지관리하는 것은 일반적으로 실용적이지 못하다. 이런 연유에서 기상 레이더에 의한 강우량 추정치는 다른 어떤 관측수단으로 제공하기 힘든 실제적인 자료를 제공하는 원천이 되고 있다. 강우량을 측정하기

위한 도구로서 레이더를 사용하는 방법론의 발달은, 1940년대 말 처음 사용될 때 주관적이고 수동적인 기술로부터 반자동적인 기술시대를 거쳐 오늘날의 완전한 자동기술 시대에 이르고 있다.

레이더는 강수율을 직접 측정하지는 않으며 단지 대기중의 어떤 공간 내에 존재하는 강수 입자들로부터 후방산란된 에너지를 측정한다. 결과적으로 레이더 강우량 추정치는, 후방산란 에너지와 강수율간의 관계상의 변동성 때문에, 샘플링 및 관측상의 오차를 피할 수 없게 된다. 이외의 다른 오차 요인들 역시 레이더로 강우량을 추정하거나 또는 레이더 및 우량계 조합으로부터 강우량을 추정할 때 오차를 유발할 가능성을 가지고 있다. 이 사실에 대해서는 뒤에서 다시 논의한다.

2. 측정 과정의 물리적 원리

다음에서 입자크기분포의 기상학적 물리량, 레이더 반사도 인자 및 강우율 사이의 관계를 구체적으로 논의하고자 한다.

2.1 입자크기분포

입자 지름이 작은 경우($D < 1\text{mm}$)를 제외할 경우, 비와 눈에 대한 입자크기분포는 다음 식에 의해 근사 될 수 있다. 즉

$$N(D) = N_{0e}^{-AD} \quad (1)$$

여기서 $N(D)$ 는 단위 부피 내에서 입자 지름이 D 인 입자의 수농도(number concentration)이며, A 는 평균입자크기, 그리고 N_0 는 단위 부피당 입자의 갯수이다(Marshall and Palmer, 1948). 눈 입자의 경우, D 는 눈 입자와 동일질량을 가진 물방울 입자의 지름이다. 한 해 여름동안 염색필터종이를 이용한 강수입자 크기 관측 기록 자료로부터,

Marshall과 Palmer는 N_0 는 $8000\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ 로 A 는 $4.1R^{-2.1}\text{mm}^{-1}$ 로 결정했는데, 여기서 R 은 강수율(mmh^{-1})이다. 물론, 다른 지역의 강수에 대해서 이러한 파라미터 값들에는 상당한 차이가 있으며, 사실 정확한 관계식은 개개의 입자 크기 샘플과 임의의 강수 유형에 대한 단순한 지수함수적인 관계식과는 상당히 다른 형태를 취할 수도 있다. 다른 많은 연구조사들에서 A 및 N_0 가 각 폭풍들에 따라 변할 수 있으며 N_0 역시 강수율의 함수라는 사실이 또 다시 강조되었다. 일반적으로 N_0 및 A 두 파라미터 모두 크기분포를 규정하기 위해 필요하다.

2.2 레이더 반사도 인자(Radar Reflectivity Factor)

입자크기분포가 알려지면, 단위 부피에 대한 레이더 반사도 인자 Z 는 다음 식으로부터 계산될 수 있다.

$$Z = \int_0^{\infty} D^6 N(D) dD \quad (2)$$

또 다른 방법으로 Z 는 레이더 방정식을 이용하여 다음과 같이 계산될 수 있다. 즉,

$$Z = \frac{2^{10}(\ln 2)}{\pi^3 c} \left(\frac{\lambda^2}{P_t \tau G^2 \theta_{3dB}^2} \right) \left(\frac{R^2 \overline{Pr}}{|K|^2} \right) \quad (3)$$

여기서

\overline{Pr} = 평균 반사 전력, [Watt]

P_t = 최대 송신 출력, [Watt]

G = 안테나 이득, [무차원]

λ = 레이더 파장, [m]

θ_{3dB} = 안테나 빔출력 반치폭, [radian]

τ = 펄스 지속시간(펄스폭), [sec]

c = 전자기파의 전파속도, 상수(빛의 속도) = $3 \times 10^8 \text{msec}^{-1}$

R = 레이더와 목표물간의 거리, [m]

K = 복소 굴절율, 일반적으로 $|K|^2$ 값은 물일 경우 0.93, 얼음일 경우 0.2로 취해진다.
 Z = 레이더 반사도 인자

- 이 방정식은 다음과 같은 사실을 가정하고 있다.
- 레일리(Rayleigh) 산란 이론의 적용이 합당하도록 입자가 작고 균질한 구형이어야 한다.
 - 샘플링 공간을 통하여 입자가 고르게 분포하고 있어야 한다.
 - 레이더 반사도 인자 Z 가 전 샘플링 공간에 걸쳐 일정하고 상수이어야 한다.
 - 모든 입자들은 동일한 유전상수 값, $|K|^2$ 를 가져야 한다. 즉 혼합된 강수 형태가 아니어야 한다.
 - 안테나 빔 패턴의 주빔(mainlobe)이 가우시안(Gaussian) 함수로 적절히 표현되어야 한다.
 - 마이크로파의 감쇄 및 다중 산란 효과가 무시될 수 있어야 한다.
 - 입사 및 후방 산란되는 전자기파의 편파가 선형이어야 한다.

만약 모든 가정이 충족될 수 있고 또 어떠한 측정 오차도 존재하지 않는다면, 레이더로 관측한 Z (식 3)는 기상학적으로 정의된 Z (식2)와 일치 할 수 있다. 그러나 실제로는 그렇지 않기 때문에 등가레이더 반사도인자(equivalent radar reflectivity factor) Z_e 를 식 (3)의 레이더 방정식에서 관습적으로 사용하며, 이는 다시 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다. 즉

$$Pr = \frac{C Z_e}{r^2} \quad (4)$$

여기서 C 는 방정식내의 모든 알려진 상수를 합하여 표현한 것이다. Z_e 는 Pr 과 r 이 알려지면 계산된다.

동일한 방법으로 Z 는 입자크기분포와 관련지어 질 수 있고, 강수율 R 은 연직방향의 공기 속도가 0 일 때 즉 지표면 상에서 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{\pi}{6} \int D^3 v_t(D) N(D) dD \quad (5)$$

Z 와 R 간의 분석적인 관계식을 도출하기 위해 식 (2)와 식 (5)를 결합하는 시도가 이루어졌으나 오히려 여러 가지 문제에 봉착하였다. 첫째로 입자크기 분포에 대한 시공간적인 변동이 거의 알려져 있지 않으며, 둘째로 공기의 연직방향 운동이 종종 입자의 종단속도(terminal fall velocity)와 같은 크기(특히 뇌우 등과 같은 폭풍 내에서)를 가진다는 것이다. 마지막으로 서로 다른 R 값을 산출하는 서로 다른 입자크기분포가 동일한 Z 값을 산출할 수 있다는 사실이다.

2.3 반사도-강우량 관계식(Z-R 관계식)

Z 와 R 간의 유일한 관계식은 실제로 존재하지 않는다. 그러나 만약 식 (2)와 (5)를 도출할 때 도입된 모든 가정들이 만족되고 또 N_0 가 상수라고 가정한다면, 단일 파라메타 관계식 $R = R(Z)$ 가 도출될 수 있다. 이 관계식은 일반적으로 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$Z = AR^b \quad (6)$$

위 식(6)의 계수 (A)와 지수(b) 값을 규정하기 위한 많은 실험적인 연구가 수행되었으며 또한 계속 수행되고 있다. 여러 다른 강우 사례에 대한 연구조사들로부터 보고된 파라메타 값들을 살펴보면, 계수 A의 경우 적게는 20이하로부터 크게는 1000 이상의 값을 나타내며 지수의 경우 1.11로부터 3.05까지의 범위를 나타내고 있다. 대부분의 경우에서 Z-R 관계식의 계수값이 증가하면 지수값은 감

소한다.

3. 레이더 강우량 측정의 오차 요인들

레이더로 지상 강우량을 측정할 경우 오차를 유발하는 요인들을 다음과 같이 크게 네 가지 범주로 분류할 수 있다.

- ① 등가레이더반사도인자 추정으로부터의 오차
- ② Z-R 관계식의 변동성으로부터 기인된 오차
- ③ 레이더에 의해 측정된 강수의 시공간상의 평균에 의한 오차
- ④ 레이더 빔-하부 효과에 의한 오차

이러한 범주 각각에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

3.1 등가레이더반사도인자(equivalent radar reflectivity factor)의 추정

등가레이더반사도인자는 부정확한 레이더 장비 보정(calibration), 지형 클러터(ground clutter), 빔의 비정상 전파(anomalous propagation, AP), 샘플링 공간 내에서 빔의 부분 충전(partial beam filling), 그리고 습한 레이더에 의한 감쇄 등과 같은 여러 가지 요인들에 의해 편이(bias)될 수 있다.

반사도 측정시의 시스템 오차(bias)는 부정확한 레이더 장비 보정으로부터 발생한다. 심지어 전자 기기 시스템을 세심하게 보정한 후에도, 설명하기 어려운 큰 오차가 강수 추정시에 가끔 나타난다. 보통 손실이 추정치보다 더 크며 따라서 강우량은 적게 추정되는데 이와 반대 경우의 효과도 역시 가능하다.

레이더 장비와 관련되지는 않지만 잠재적으로 심각한 오차 요소는, 나무 숲, 건물, 그리고 다리 등과 같은 레이더 관측소 주변의 지형지물에 의한 빔의

차단현상인데, 이 때문에 유효 송수신 전력이 심하게 감소될 수 있고 또 강수 패턴상에 사각(死角)영역이 반복적으로 나타날 수 있다. 이러한 빔의 차단에 의한 영향은 조정계수나 주변 관측자료를 이용한 내삽 등의 방법을 수행함으로써 교정할 수 있다.

대기 온도, 습도 및 기압의 연직 경도(gradient)는 굴절율의 경도를 형성한다. 이러한 경도 때문에 레이더 빔은 표준 대기 상태에 비교해서 특성적인 방식으로 휘어지면서 진행한다. 비표준 대기상태 및 이와 관련된 굴절율의 비표준 경도에 의해 레이더 빔은 비정상적으로 전파(anomalous propagation)되며 이로 인해 레이더 반사도 추정상에 상당한 오차가 발생된다. 고도에 따라 습기가 감소하는 상황의 온도 역전 상태는 빔을 휘게 하거나 심할 때는 레이더 신호의 덕팅(ducting) 현상을 일으키는데 이로 인해 장거리의 지형지물로부터 레이더 신호가 반사되어 돌아오는 현상도 발생된다. 이러한 상태는 가끔 넓은 범위에 걸쳐 나타난다.

지형 클러터와 AP(비정상전파)는 낮은 고도각에서 레이더를 운영할 때 레이더 신호로부터 반사도를 추정하는 것을 가장 힘들게 만드는 것 같다. 결과적으로 이러한 효과는 저고도에서 연속적으로 관측하여 얻어진 4개의 스캔 자료로부터 적절한 반사도 자료를 선택함으로써 감소될 수 있다. 이러한 방법을 "hybrid scan(혼합 스캔 방식)"이라고 한다.

신호의 저하 및 빔의 부분 충전은 장거리에서의 강수율 추정치를 감소시킨다. 이것은 거리효과(range effect)라고 알려져 있다. 거리효과는 예코 강도(강수율)와 상관되어 있다고 밝혀졌으며 강수역이 좁을 경우 아주 크게 나타난다. 혼합 스캔 방식이 거리효과를 상당히 감소시켜 준다고 기대되고 있지만, 거리에 관련되고 관측소에 따라 변화되는 추가적인 교정 방법들이 강수율 자료에 역시 응용되고 있다.

레이더 안테나를 감싸고 있는 레이돔이 비로 젖어 있을 경우, 레이더 신호의 감쇄가 증가된다. 이 감쇄는 수막 두께에 비례하고 레이더 파장에 반비례하는 함수이며 WSR-88D(NEXRAD)의 경우 약 1dB 정도이다. 이 일시적인 상태를 정량적으로 설명하기가 어렵고 또한 강수가 끝나면 원상태로 빠르게 복귀되기 때문에, 일반적으로 S 밴드 레이더에 대해서는 이러한 손실을 보상하기 위한 어떠한 시도도 이루어지지 않고 있다. 젖은 레이돔에 의한 감쇄가 기계적인 오차를 유발하기 때문에, 우량계 자료를 이용한 조정이 큰 도움이 된다.

3.2 Z-R 관계식의 변동성

Z와 R간의 관계식에 대한 많은 연구가 수행되어 왔고 또한 현재도 수행되고 있는데 특히 비에 대한 경우가 대부분이다. 만약 입자크기분포가 강수율에 대한 유일한 함수라면, 비에 대한 보편적인 Z-R 관계식이 존재할 것이다. 그러나 주어진 강수율에 대한 유일한 입자크기 분포가 없다는 사실이 상세하게 설명되어 왔다. 비에 대한 Z-R 관계식의 주제에 대한 연구 문헌은 모두 다 조사하기 힘들 정도로 많지만, 여기서는 그 중 중요하고 일반적인 결과들을 논의하기로 한다.

가장 오래되고 또한 가장 친숙한 관계식 중의 하나는 다음과 같다.

$$Z = 200 R^{1.6} \quad (7)$$

이것은 Marshall과 Palmer(1948)가 연구한 결과이다.

입자 크기 분포에 대한 다양한 측정이 층운형 강수, 소나기 및 뇌우성 소나기 등의 경우에 대하여 수행되었으며, 특성적인 Z-R 관계식들이 여러 문헌을 통하여 발표되었다. 일반적으로 강수가 더 대류성 강수로 발달하면 식 (6)의 계수 A가 증가한다.

예를 들어, Joss 등(1970)은 다음 관계식을 내놓았다.

이슬비(Drizzle)

$$Z = 140 R \sup 1.6 \quad (8)$$

뇌우성 소나기(Thundershowers)

$$Z = 500 R^{1.5} \quad (9)$$

뇌우 속에 존재하는 더욱 더 큰 강수입자가 계수 A를 더 커지도록 만든다.

거대한 오클라호마 뇌우 아래에서의 입자 크기 측정(Martner, 1977)으로부터 다음과 같은 관계식이 도출되었다.

뇌우 선단 부분

$$Z = 667 R^{1.33} \quad (10)$$

뇌우 중심 부분

$$Z = 124 R^{1.64} \quad (11)$$

뇌우 후미 부분

$$Z = 436 R^{1.43} \quad (12)$$

눈(snow)에 대한 평균 Z-R 관계식은 다음과 같은데, 여기서 R은 상당강우율(equivalent rain rate)이다.

$$Z = 2000 R^2 \quad (13)$$

우박의 Z-R 관계식은 우박의 밀도, 즉 우박의 성장이 건성인가 습성인가, 그리고 수막의 두께가 얼마인가에 의존한다. Douglas(1963)는 다음과 같은 관계식을 발견했다.

습성 성장

$$Z = 84000 R^{1.29} \quad (14)$$

건성 성장

$$Z = 22500 R^{1.17} \quad (15)$$

이와 같은 모든 경우를 고려하여, 미국 NEXRAD의 경우 수문 소프트웨어에는 Z-R 관계식의 계수 A와 지수 b를 변경할 수 있도록 하는 기능이 구비되어 있으며 초기관계식은 다음과 같이 설정되어 있다.

$$Z = 300 R^{1.4} \quad (16)$$

그림 1은 다양한 강수 형태에 대한 Z-R 관계식의 예를 보여주고 있다. 그림 1에서 볼 수 있는바와 같이 NEXRAD 수문 소프트웨어는 식 (16)을 사용함으로써 여러 다른 강수 형태에 대한 좋은 평균을 제공하고 있다.

식 (16)에 선택된 계수는 일반적으로 기대하는 것과 같이 그렇게 결정적이지는 않은데, 이는 수문 소프트웨어가 우량계 자료를 이용해서 평균 오차를 조정하기 때문이다. 물론 이것은 레이더 관측 영역 내에 이 평균 오차를 만족할 만한 수준으로 제거할 수 있을 정도의 우량계가 설치되어 이용 가능하다는 가정이 만족될 때 그러하다. 또한, 평균 오차가 제거되었다는 가정하에서, Z-R 관계식에 의해 유발되는 오차는 그림 2(Hudlow and Arkell, 1978)에 보인바와 같이 더욱더 넓은 공간과 더 긴 시간 간격에 대하여 자료를 평균할 때 상쇄되는 경향이 있기 때문에, Z-R관계식의 지수를 어떤 명목상의 값(예를 들어 1.4)으로 선택한다 하더라도 이 지수와 관련된 오차는 그렇게 과대하지는 않다.

입자크기 분포를 변화시키고 또 그 결과로 Z-R 관계식을 변화시키는 물리적 기구(mechanism)로

는 다음과 같은 것들이 있다. 즉, 증발(evaporation), 부착(accretion), 병합(coalescence), 파열(breakup), 입자크기 정렬(size sorting) 및 공기의 연직 운동 등. 비구형(non-spherical) 얼음 입자와 납작한 빗방울은 그들의 크기가 커질 때, 사용되는 레이더 편파에 따라 측정되는 레이더 반사도 값이 수 dB 정도 증가되거나 감소될 수 있는데, 이것 또한 강수를 추정의 오차에 한 몫을 한다. 뇌우 속의 비나 우박같이 혼합된 강수 형태는 Z-R 관계식을 상당히 크게 변화시킬 수 있다. 우박 효과를 최소화 시키는 한 가지 방법은 강우율에 최대 임계값을 설정해 놓는 것이다. 이 임계치는 주어진 지역에서 예상되는 최대 강우율에 근거하여야 한다. 이 임계치를 초과하는 레이더 에코의 존재는 우박의 존재 가능성에 대한 지시자가 되며 강우율이 최대에 도달했다는 것을 나타낸다.

폭풍우 형태나 여러 기상 조건 등과 같은 다른 기상정보에 근거하여 Z-R 관계식의 변동성을 결정해 보려는 여러 시도가 있어 왔지만, 강우율의 불확실성을 감소시키기에는 다소 부족한 결과들만 얻어졌다(Stout and Mueller, 1968).

3.3. 시간 및 공간 평균

레이더는 일반적으로 일련의 고정된 고도각에서 전 방위각에 걸쳐 레이더 빔을 주사하여 에코를 관측하고, 관측된 자료는 방사상의 레이더 거리 및 방위각 방향에서 최소의 관측 범위(range bin 또는 cell) 별로 저장된다. 등가레이더반사도인자 값은 적절한 Z-R 관계식을 사용하여 강우율로 변환되며, 강우량의 공간적인 분포도를 만들기 위해 시간적으로 누적된다.

사용되는 Z-R 관계식에 관계없이, 이 절차에는 시간과 공간상의 샘플링 오차가 발생되게 된다. 그림 3은 다양한 평균 영역 각각에 대하여 샘플링 시간 간격이 증가함에 따라 이러한 오차가 증가하는 상황을

설명하고 있다. 예를 들어 그림3의 제일 윗 그림은, 동일한 자료에 대하여 샘플링 시간 간격을 5분에서 10분으로 증가시킬 때 시간당 강우량 추정 오차는 평균되는 영역의 넓이에 따라 약 5에서 15%까지 증가된다는 것을 보여주고 있다. 주어진 샘플링 시간에 대하여 오차 백분율은 평균 영역을 증가시키고 누적 시간을 증가시킴에 따라 감소한다.

3.4 빙-하부 효과

빙-하부 효과는 레이더 빔 하부에서 일어나는 강수의 발달 및 증발로 인해 발생한다. 레이더 관측 거리가 커지면 이와 함께 레이더 샘플링 부피가 커지고 또 레이더 빔의 높이도 증가하기 때문에, 레이더 추정치와 지상에서 측정된 강우량 사이의 상관성은 감소한다. 빙-하부 효과의 극단적인 예는 하강하는 강수의 완전한 증발현상이다. 그러므로 이때 레이더 디스플레이상의 먼 거리에서 나타나는 강수 현상은 지상에 전혀 떨어지지 않게 된다. 우량계 관측 자료와 다른 지상관측 자료를 함께 비교해보면 이 문제를 명확하게 확인할 수 있다.

4. 레이더로 구한 강우량 추정치의 조정(adjustment)

서로 다른 폭풍들 사이에서 또는 하나의 폭풍 내에서 일어나는 매우 큰 레이더 강우량 추정상의 오차는 앞에서 설명한 여러 오차 요인들로부터 발생할 수 있다. 실제로 상황에 따라 상당한 양의 오차도 발생하는데, 이것은 강우량 추정치를 평균하는 공간의 넓이와 시간간격에 따라 다르며, 많은 요소들이 각 오차의 크기에 영향을 미치고 있다. 이러한 오차들은 레이더에 의해 산출된 강수 추정치를 여러 방법으로 조정하고 교정함으로써 어느 정도 감소시킬 수 있다. 이러한 것들 중의 가장 간단한 조정기법들이 레이더 파라메타 자체에 적용되고 있

다. 다른 더 정교한 절차를 이용하여 레이더 추정치와 다른 수문학적 및 기상자료를 통합하여 조정한다. 이러한 조정 절차에 대해 다음에서 간략히 설명한다.

4.1 레이더 파라메타만을 사용한 조정

3절에서 논의한 오차 요인들 중 많은 것을 레이더 자료 자체에 대하여 품질관리 및 조정절차를 수행함으로써 감소시킬 수 있다. 다음은 그 사례들이다.

- 산소에 의한 전파의 흡수 보정
- 주어진 잠음 임계치 이하의 모든 반사도값을 0으로 설정
- 지형 클러터 제거(또는 감소)
- 빔 차단현상 교정
- 고립 레이더 빈(세포) 및 다른 특이 에코 점검
- 다중 고도각에서 관측
- 시간적 연속성 점검
- 거리효과 교정
- 밝은 띠(bright band) 교정
- 강수 형태 또는 기후학적 특성 및 계절에 따른 Z-R 관계식의 조정

미국 NEXRAD의 경우 강수 추정 절차에 이와 같은 품질관리 및 조정 절차들이 많이 채택되어 있다.

4.2 우량계를 사용한 조정

우량계 관측자료를 이용하여 레이더 강우량 추정치를 조정하는 기법은 다음과 같은 두 가지의 큰 이점을 제공한다. 즉 ① 강수의 시공간적인 분포를 포괄적으로 샘플링할 수 있는 우수한 레이더 기능을 이용할 수 있는 장점 ② 지상 강우량을 상대적으로 정확하게 측정할 수 있는 우량계의 우수한 능력을 이용할 수 있는 장점 등이다. 이러한 조정 작업이 적절히 수행되기만 한다면, 부적절한 Z-R 관계식에

의해 야기되는 오차를 포함하여 앞에서 설명한 다른 모든 요인들에 의한 강우량 추정상의 오차를 줄일 수 있다.

반드시 명심해야 할 사항 한가지를 언급한다면, 비록 우량계나 레이더 측정상에서 양측 모두에 실제적인 오차가 없다 하더라도, 두 경우의 샘플링 방법에 의한 차이로 야기되는 불일치가 여전히 존재한다는 것이다. 레이더는 지상으로부터 수백 또는 수천 m 상공의 일정 공간을 순간적으로 샘플링하는데 이것을 지상 지도에 투영할 때는 적어도 수 평방 km 이상의 영역에 대한 평균값이 한 지점의 관측값으로 지정되게 된다. 레이더 관측은 일반적으로 5-10분 간격으로 반복된다. 우량계는 수십 평방 cm 정도의 지상 영역에 떨어지는 강수를 연속적으로 기록한다. 강수 강도는 종종 1-2km 이하의 거리를 두고도 심하게 변할 때도 있으며 또한 시간상으로 수분 간격으로 크게 변할 때도 있다. 그러므로 우량계로 샘플링하여 관측된 자료는 레이더가 샘플링한 상공의 부피 공간 하부 지상영역 전체에 대한 관측 대표값으로는 적절치 않을 수도 있다. 이와 유사하게 어떤 주어진 레이더 빈에 대하여 레이더에 의해 순간적으로 관측된 강우율 역시 관측 시간 간격에 대한 대표값으로는 역시 적절치 않을 수도 있다 (Austin, 1987). 이러한 샘플링에 관계된 불일치는 레이더 추정치를 우량계 자료로 적합(match)시키는 조정 절차에 매우 중요하다. 또한 몇 개의 우량 관측소 자료를 주변의 우량계가 설치되지 않은 더 넓은 지역으로 확장하여 지상 관측값으로 삼을려고 하는 기법은 특히 이러한 불일치에 매우 민감하다.

여기서 직관적으로 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 즉, 비록 보정(calibration)이 잘 되지 않은 레이더를 가지고 전체 영역의 강우량을 측정하더라도 이것은 단일 우량계로 측정하는 것보다 훨씬 더 우수하다는 것과 또 반대 상황으로, 만약 레이더 관측

영역 아래의 지상에 우량계가 매우 조밀하게 설치되어 있을 경우에는 레이더를 설치하더라도 우량관측상 현저한 개선을 기대할 수는 없다는 사실이다 (Wilson and Brandes, 1979).

우량계를 이용한 레이더 강우량 추정의 조정(adjustment) 작업은 다양한 공간적인 조정(adjustment) 기법들을 필요로 하고 있다. 다음에서 그 중 주요한 몇 가지를 논해본다.

4.2.1 단일-파라메타 우량계 자료를 이용한 조정(adjustment)

레이더 자료와 우량계 자료를 비교하여 조정하는 방법들 중의 가장 간단한 방법은 단 하나의 "교정인자(correction factor)"를 레이더 강우량 추정 전 영역에 균일하게 적용하는 것이다.

가장 일반적인 접근 방식은 일정한 시간 간격 동안의 우량계/레이더(G/R) 비(ratio)를 전체적으로 평균하여 평균 레이더 오차(bias)를 계산하는 것이다. 이때 두 가지 중요한 고려사항으로는 ① 단일 교정인자가 시간에 따라 변하는가 변하지 않는가의 여부, ② 교정인자를 계산하는 절차가 실시간 응용(사후 분석에 반대되는 개념으로서)에 적합한가 아닌가의 여부 등과 같은 것이다. 예로서 NEXRAD의 수문 소프트웨어에는, 시간에 따라 탄력적으로 변하는 단일-파라메타 우량계 자료 조정절차 기법을 사용하고 있다.

4.2.2 다중-파라메타 우량계 자료를 이용한 조정

매우 다양한 다중-파라메타 절차들이 레이더 관측 자료를 지상에 분포된 보정용 우량계와 통합하여 레이더 추정치의 신뢰성을 향상시키기 위해 고안되었으며 계속 새로운 기법들이 발표되고 있다. 몇몇의 기법들에서는 컴퓨터로 보정용 우량관측소 주변에서 G/R비(ratio)를 계산하여 국지적인 조정 계수를 만든 후 이를 거리에 반비례하는 가중치를

주어 그 주변 영역으로 외삽(extrapolation)하는 절차를 사용하고 있다. 본질적으로 레이더 관측치는, 레이더 자료로 표시되는 지상의 우량계들 사이의 강수 변동성을 유지하는 가운데 평면-적합(fitting) 기법을 이용하여 지상의 우량관측 자료로 변형되어 지는 것이다. 더욱더 복잡하고 정교한 다중-파라메타 객관분석 기법도 역시 구현 가능하다. 일반적인 다중-파라메타 객관분석 기법을 구현하기 위해서, "ordinary kriging"이라고 불리는 최적내삽절차가 사용되고 있는데, 여기서는 레이더와 우량계 자료가 다중-파라메타 분석 공간으로 통합되어 분석되어 진다.

비록 다중-파라메타 우량계 자료 조정이 강우량 추정에 대한 고도의 신뢰성을 제공한다고는 하지만, 이것은 단일-파라메타 방법보다 더 긴 계산시간(때로는 매우 긴 시간)을 요구한다. 또한 다중-파라메타 기법은 공간상에 분포되어 있는 보정용 우량계의 분포 특성과 각 우량계 관측값의 정확도에 매우 민감한 경향을 보이고 있다. 이러한 이유로 미국의 NEXRAD는 다중-파라메타 우량계 조정 기법을 사용하고 있지 않다.

4.3 기타 자료를 이용한 조정

실현 가능한 가장 정확한 강우량 추정방법은 사용 가능한 모든 정보(레이더, 우량계, 위성자료, 고층관측자료, 지상관측자료 등)를 적절하게 통합하여 추정치를 분석하는 것이라는 것은 두 말할 나위도 없는 명백한 사실이다. 그러한 처리 시스템은 굉장히 복잡한 것이 되겠지만, 이러한 시스템을 구축하기 위한 첫 단계로서 레이더 및 우량계 자료와 함께 위성분석 자료를 사용하는 것이 가장 효율적일 것이다. 이러한 시도 역시 현재 굉장한 관심속에

서 여러 연구자들에 의해 수행되고 있다.

5. 결론

앞에서 살펴본 바대로 등가레이더반사도인자(equivalent radar reflectivity factor)를 강수율로 관련지우는 시도에는 여러 가지 제한조건들이 많이 있다. 레이더 오차 패턴 분석 연구들은 여러 다른 폭풍들간의 구조적인 특성 차이에 의해 여러 가지 불일치가 발생하며 이 때문에 하나의 관계식 적용이 어렵다는 것을 말해 주고 있다. 구체적으로 말하자면 레이더에는 약한 강수는 과대추정하고 강한 강수는 과소 추정하는 경향이 있다는 것이다. 레이더 관측에 대한 구조적인 오차 패턴에 대한 연구가 수행되어 그 장래가 밝아지고 있다고는 하나 이러한 지식들이 레이더 강우량 관측에 완전하게 적용되기 전까지는, 레이더 자료를 보정하기 위해 우량계 자료를 사용하는 것이 가장 바람직하고 신뢰성 있는 방법이다. 그러나 이러한 방법도 매우 신중하게 적용되어야 하며, 채택된 조정절차는 수치계산상의 안정성과 물리적으로 의미 있는 교정이라는 것을 확증하기 위해 수학적으로 공식화되어야 한다.

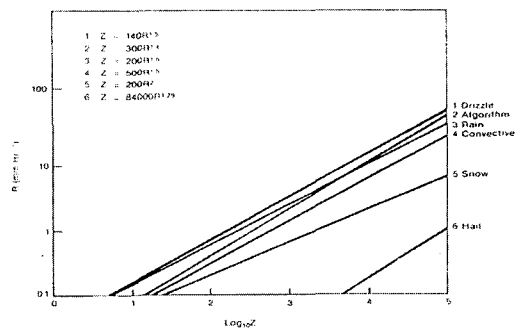


그림 1. 여러 가지 강수 형태의 변동성을 설명하는 Z-R 관계식의 도식적 표현

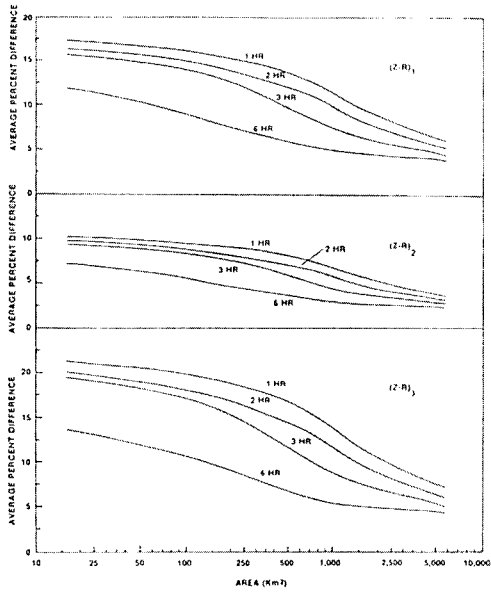


그림 2. Z-R 관계식에 근거한 강우량 추정들간의 평균 절대 오차 백분율

Derived from a Z-R relationship of $Z = 230R^{1.25}$ and $(Z-R)_1$ of $Z=170 R^{1.52}$, $(Z-R)_2$ of $Z= 300R^{1.4}$, and $(Z-R)_3$ of $Z=200R^{1.6}$, for a range of spatial averaging and temporal integration scales. Phase biases were removed before compilation of differences. Figure is based on the analysis of GARP Atlantic Tropical Experiment(GATE) data(Hudlow and Arkell, 1978)

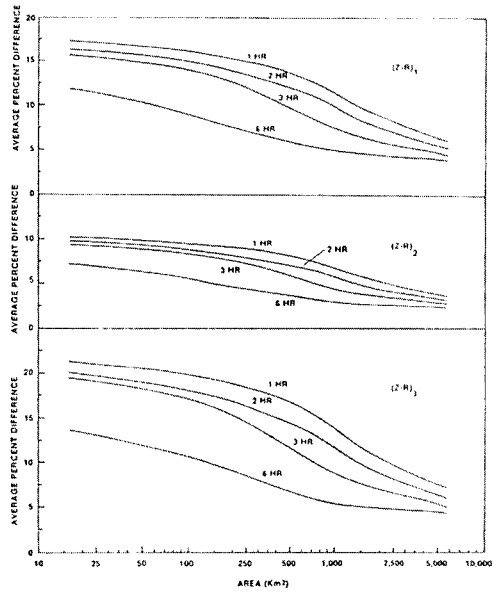


그림 3. 샘플링 방법에 근거한 강우량 추정들간의 평균 절대 오차 백분율

Upper two panels: Using five-minute base sampling intervals and those from coarse sampling intervals for a range of spatial averaging and temporal integration scales. Lower two panels: same as upper two, except 15-minute base sampling interval was used and longer integration periods were included. Figure is based on the analysis of GARP Tropical Experiment(GATE) data(Hudlow and Arkell, 1978).

References

- Ahnert, P.R., M.D. Hudlow, E. R. Johnson, and D. R. Greens, 1983 : Proposed "on-site" precipitation processing system for NEXRAD, Preprints, 21st Conference on Radar Meteorology, Amer. Meteor. Soc.
- Austin, Pauline M., 1987 : Relation between Measured Radar Reflectivity and Surface Rainfall. *Mon. Wea. Rev.*, 115:1053-1070.
- Battan, L. J., 1973 : Radar Observation of the Atmosphere. Univ. of Chicago Press, 324pp.
- Douglas, R. H., 1963 : Size Distribution of Alberta hail samples. *Sci. Rept. MW-36*. Montreal : Stormy Weather Group, McGill Univ., 71pp.
- Hudlow, M., and R. Arkell. 1978 : Effect of Temporal and Spatial Sampling Errors and Z-R Variability on accuracy of GATE Radar Rainfall Estimates. Preprints, 18th Conference on Radar Meteorology, Amer. Meteor. Soc. pp. 342-349.
- Hudlow, M., and R. Arkell, V. Patterson, P. Pythowany, F. Richards, and S. Goetis, 1979 : Calibration and intercomparison of the GATE C-band radars. NOAA Tech. Rept. EDIS 31, NTIS, Springfield, VA.
- Joss, J. K., K. Schram, J. D. Thams, and A. Waldvogel, 1970 : On the quantitative determination of precipitation by radar. *Wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 63*, Eidgenossischen Kommission Zum Studium der Hagelbildung und der Hagelabwehr, 38pp.
- Marshall, J. S., and W. M. Palmer, 1948 : The distribution of raindrops with size. *J. Appl. Meteor.*, 5 : 165-166.
- Martner, B. E., 1977 : A field experiment on the calibration of radars with raindrop disdrometers. *J. Appl. Meteor.*, 16: 451-454.
- Stout, G. E., and E. A. Mueller, 1968 : Survey of relationships between rainfall rate and radar reflectivity in the measurements of precipitation. *J. Appl. Meteor.*, 7 : 465-474.
- Wilson, J. W., 1975 : Radar-gage precipitation measurements during the IFYGL. The Center for the Environment & Man, Inc., Rept. 4 177-540.
- Wilson, J. W., and E. A. Brandes, 1979 : Radar measurement of rainfall—a summary. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 60 : 1048-1058.