이중 편파레이더의 기상방재 활용

오 성 남 >
기상청 기상연구소 원격탐사연구실 실장

이 동 인 >
부경대학교 환경대기과학과 교수

1. 서 론

기상레이더의 구름관측은 강수 및 강설량 예측과 구름의 수함량 분석 연구 등에 필요한 절대 관측요소이다. 특히 대기수상체의 특성을 파악할 수 있는 이중 편파기능을 가진 도플러레이더의 활용은 돌발 악기상 예측 등에 그 효율성과 적합성이 미국 등에서 입증되었고 표 1과 같이 강설과 같은 입자성 악기상과 호우의 운동학적 구조를 파악하는데 단일 편파레이더의 기능을 배가한 고 효율성이 있다. 편파레이더는 기존의 편파기능이 없는 X-band, C-band, S-band 등의 도플러 레이더에 비해 수직파와 수평파를 이용하여 관측함으로서 얻어지는 편파모수(Polarimetric parameter)들로부터 호우나 악기상시 보다 정확한 자료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 즉 편파레이더는 대기수상체의 형태나 특성, 그리고 강수, 강설 입자의 직경분포 등을 파악할 수 있으므로 기존 레이더보다 한층 더 뛰어난 관측 효율을 가져올 수 있다. 이러한 이중 편파기능의 레이더가 지닌 장점은 이미 미국, 캐나

다, 일본, 프랑스 등에서 충분한 검증을 통하여 기상 및 방재현업에 이용할 수 있는 많은 실험과 분석을 반복해 왔다 (Ryzhkov et al., 2003). 현재 우리나라에서는 일기나 홍수 예보현업을 위한 단일 편파기능의 Doppler레이더 이용에 한정되어 있다. 그러나 금후 우리나라에서도 물체의 모양과 크기까지 구별할 수 있는 이러한 편파레이더를 현업에서 사용할 수 있도록 하기 위하여 이중 편파레이더에 대한 선행 연구가 필요하다. 따라서 차세대 레이더 운영의 핵심 기술이 될 편파레이더에 대한 기초지식 확보와 응용에 대한 조사가 필요하다.

편파레이더의 조사 연구로서 Chandrasekar et al. (1990)은 지상 관측 자료와 multiparameter 레이더 사이의 비교를 통하여 두 관측 값의 오차 구조 등을 분석하였고 Zrnic and Ryzhkov (1996)은 편파모수인 specific differential phase를 이용하여 강수 관측의 이점에 대한 연구를 수행한바 있다. 또 Doviak and Zrnic (1984)은 현업용 WSR-88D 레이더에 편파 기능을 이식하는 연구를 수행하였고 Hubbert et al. (1998)은 동부 콜로라도 지역에서 발생한 강한 폭풍에 대한 연구를 CSU-CHILL 편파레이더로 분석하여 좋은 결과를 얻은바 있다. 또한 Gorgucci et al. (2001)은 편파 레이더 관측을 통하여 관측된 자료를 강수 형태와 크기에 연관된 알고리즘을 이용하여 강수를 평가한 바 있고 Schuur et al. (2001) 은 2D-video disdrometer와 편파레이더를 이용하여 강수입자의 직경분포의 특성을 분석하였고 편파레이더 관측을 통하여 텍사스에서 발생한 홍수 발생 및 메커니즘 분석을 실시한 바 있다. Zrnic and Ryzhkov (1999)은 편파레이더의 편파모수를 이용하여 자동적으로 대기수상체를 구분할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

기상레이더를 이용한 nowcasting 예보 및 수치모델링의 초기입력 자료 산출시에는 기존의 C 및 S-band 도플러 레이더를 이용하는 것보다 편파기능을 가진 레이더의 관측 결과가 더 효과적임이 입증 되었다. 현재 미국과 캐나다 일본 등의 선진국에서는 편파레이더를 현업에 이식하기 위한 연구가 매우 활발하게 진행 중이다.

그러나 우리나라는 편파기능을 가진 기상 레이더를 아직은 보유하고 있지 않아 사실상 편파기능을 이용한 강수량 산정 등에 관한 연구가 전무하고 기상레이더의 편파기능에 관한 기술도 소개되어 있지 않다. 특히 기상레이더의 편파기능은 강우강도가 낮거나 혹은 매우 높은 영역에서 정확한 반사도 인자를 표출하며 상층에서의 구름내부와 강수 시작 시 입자의 크기와 모양을 판단할 수 있어 구름의 수 함량 분석을 통한 집중호우 발달 예측에 크게 기여할 수 있다. 따라서 이중 편파레이더 관측 자료의 활용에 대하여 연구함으로서 향후 국내 악기상예측은 물론 편파레이더를 도입할 시 타당성 검토 등에 관한 기초가 될 수 있다.

표 1 기상레이더의 특성과 활용

레이더 구분	특 성	활 용
Conventional Radar (일반레이더)	신호 처리	물체의 존재 및 상대적 위치 파악
Doppler Radar (도플러 레이더)	신호 처리 도플러 처리	물체의 존재 및 상대적 위치 물체의 운동 탐지
Polarimetric Radar (편파레이더)	도플러 레이더 + 편파기능	물체의 존재 및 종류 파악 물체의 위치 및 운동 탐지 구름물리 연구
Parametric Radar (다중파장 레이더)	파장에 따른 전파의 흡수차이 활용 C+S, S+X, C+X, C+K, X+Lidar 등	강수량 측정 구름물리 연구 등
기 타	SAR, TRMM 등과 같은 위성 탑재 레이더	지질탐사, 열대강수 관측 등

편파레이더의 선행 연구로서 편파레이더의 기본 원리 및 기능 등을 이해하고 편파레이더 관측을 사례 분석 함으로서 기존 C-band 혹은 S-band 레이더와의 비교 하여 향후 이중 편파레이더가 우리나라 차세대 주 기상레이더로서의 기능을 예상할 수 있다. 이중 편파레이더로 관측한 차등 반사도 (Differential Reflectivity, ZDR)는 강우량과 강우입자크기분포(raindrop size distribution: DSD) 추정의 정확도를 향상시킬 수 있다는 것이 증명되어진 후 현재의 편파레이더는 강우량과 DSD의 산출뿐만 아니라 강수입자 종류 분류(classification of hydrometeor type), 낙뢰 및 강수계의 물리학적 해석에 관한 연구 등에 매우 유용한 관측도구이다 (Bringi and Chandrasekar, 2001).

2. 편파레이더의 기본원리

대부분의 기상레이더는 수평적 전자파를 송신하여 목표물로 되돌아오는 파를 송신하여 목표물의 특성이나 크기 등에 대한 정보를 얻는다. 이에 따라 구름이나 강수의 수평적인 영역에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이와 반대로 이중 편파레이더는 수평과 수직의 두 개의 편파를 송신하고 수신함으로서 강수입자의 크기와 모양 등에 대한 정보를 얻을 수 있고 강수·강설량 추정과 구름의 수함량 분석 및 대기수상체의 특성을 파악하는 데 매우 효율적이다.

그림 1과 같이 편파레이더에서 산출할 수 있는 편파요소들은 Horizontal and Vertical Reflectivity (ZHH, ZVV), Differential Reflectivity (ZDR), Specific Differential Phase (ϕdp), Linear Depolarization Ratio(LDRvh), Correlation Coefficient at Zero Lag (ρvh)등 으로서 이러한 관측 변수 등을 이용하여 강수입자의 크기 및 모양, 특성 판별, 목표물의 판별, 강수량 추정 등에 이용한다. 또한 수치 기상예보 모델의 요소로서 응용된다.

이중 편파레이더를 사용함으로써 얻어지는 이점은 첫째 강수와 강설의 강도 측정이 개선되고 둘째 강수로부터 우박의 구분 그리고 우박 크기 측정이 가능하며 겨울철에 빈번히 발생하는 스톰의 강수 유형을 알 수 있고 항공기의 결빙 조건을 규명하는데 사용된다. 또한 조류나 곤충 등 비 기상요소 물체의 움직임이 도플러 시선속도의 관측에서 속도 값을 가지는 기상학적 목표물로 표시가 된다면 이해하기 힘든 바람장의 해석을 할 수 있다. 이러한 문제들은 이중 편파레이더를 이용한 편파 특성으로 쉽게 노이즈로 판단 가능하며 제거가 가능하다. 또한 기상레이더 관측에 있어서 문제점인 이상 전파의 존재(AP)를 이러한 편파레이더를 활용함으로써 유효하게 제거할 수 있다.

3. 편파레이더 관측 요소

수평, 수직 반사도는 편파레이더로부터 수평, 수직

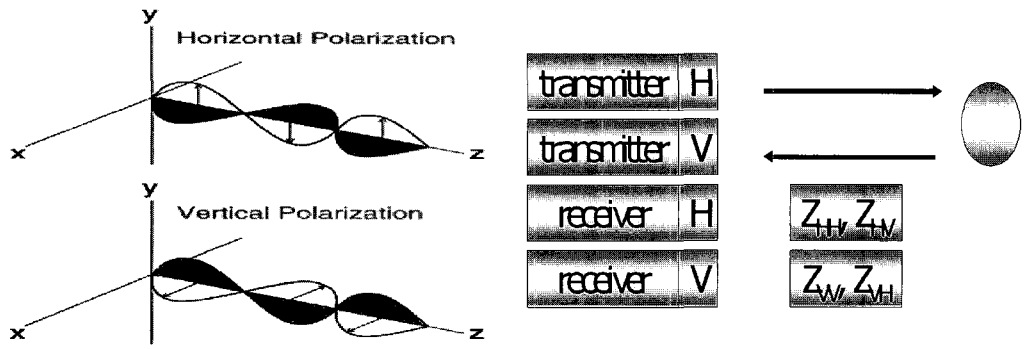

그림 1. 레이더의 수평 및 수직편파

파를 방사하여 목표물로부터 되돌아오는 수평, 수직파의 수신율로 정의된다. 수평 반사파 (ZHH)는 레이더 반사강도 인자를 의미한다. 즉 그림 2와 같이 수평파를 방사하여 목표물에 부딪혀 돌아오는 수평파의 수신율로서 수직반사파 (ZVV)도 수평파 (ZHH) 와 유사한 방법으로 식(1)과 (2)로 구한다.

$$Z_{HH} = \sum_{i=1}^{n} N_i D_i^6 \ (mm^6/m^3 or\ dBZ) \quad (1)$$

$$Z_{VV} = \sum_{i=1}^{n} N_i D_i^6 \ (mm^6/m^3 or\ dBZ) \quad (2)$$

여기서 D는 입자들의 직경이며 N은 입자수이다. Differential Reflectivity (ZDR)는 수평과 수직파의 후방산란 비이며 식(3)과 같다.

$$Z_{DR} = 10log(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}}) \quad (3)$$

수평과 수직파의 후방산란의 비 값으로 일정한 목표물의 축비(axis ratio)를 나타낸다. 이 값을 이용해 분석장 내의 대기수상체(hydrometeor)의 모양 및 크기 정보를 알 수 있다. 차등 반사도 (그림 3)는 일반적으로 -2 dB에서 6 dB 사이의 값을 가지며, 큰 수적과 같이 다소 수평적으로 퍼져 있는 모양의 수상의 경우 Differential Reflectivity (ZDR)는 양(+)의 값을 보이고, 이와는 반대로 거의 원형에 가까운 drizzle, graupel, hail 과 같은 수상체들에서는 0에 가깝거나, 음(-)의 값을 보인다.

Specific differential phase (KDP)는 주어진 영역에서 수평과 수직으로 편파된 레이더 펄스에 대한 비차등 위상의 차이를 의미한다. KDP를 이용한 강수추정(R-KDP)은 R-Z를 이용한 강수추정에 비해 여러 가지 이점이 있다. 첫째 수신기와 송신기의 보정에 비독립적이고, 강수입자의 직경분포, 대기의 감쇄

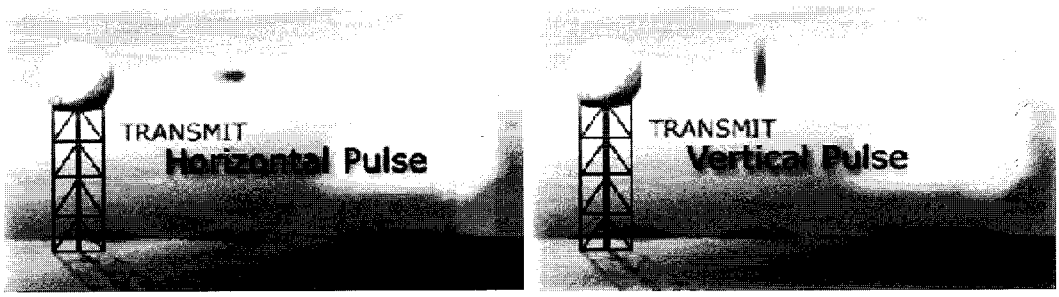

그림 2. 강수입자의 크기와 차등 반사도 값 사이의 관계

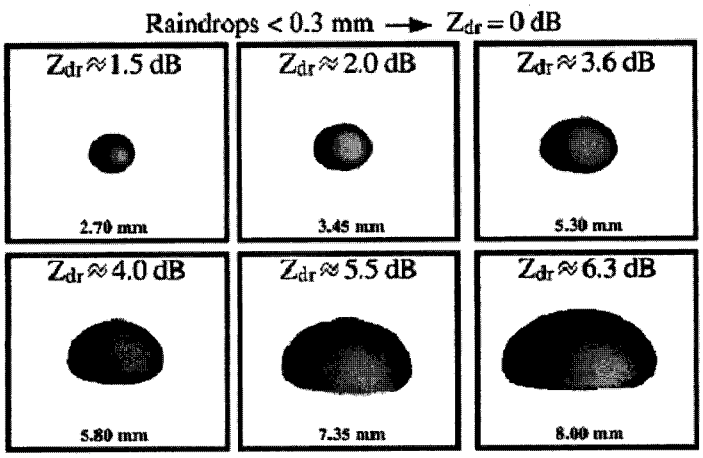

그림 3. 강수입자의 크기와 차등반사도의 상관도

등에 의한 영향을 덜 받으며, 빔 차폐, ground clutter, 이상전파와 같은 노이즈에 대한 영향을 덜 받는다. 따라서 편파레이더에서 산출되는 변수를 사용함으로서 강수추정의 정확도가 높아질 수 있다.

기상학적 에코에서 레이더 신호의 상관계수 값은 주로 0.7이상이다 (Meteorological echoes : $|\rho vh| \geq 0.7$). 우박의 경우에 0.9에서 0.95 사이의 값($0.90 \leq |\rho vh| \leq 0.95$)을 가지며 강수는 0.95이상의 값($|\rho vh| \geq 0.95$)을 drizzle이나 약한 강수일 경우에는 0.90이하의 값($|\rho vh| \leq 0.90$)을 나타내며 얼음입자나 graupel의 경우에는 0.95보다 큰 값($|\rho vh| > 0.95$)을 그리고 강설의 경우에는 0.95이상의 값($|\rho vh| \geq 0.95$)을 bright band는 0.90에서 0.95 사이의 값($0.90 \leq |\rho vh| \leq 0.95$)을 가진다.

3. 일본의 편파레이더 연구 현황

일본 국내에는 현재 십 여대의 이중편파 레이더가 여러 연구소와 대학에 소속되어있다. 이들 중 많은 레이더는 ZDR까지만 측정할 수 있는 초기단계의 편파 레이더(KDP 측정 기능은 없음)이며, 또한 구름입자의 관측을 목적으로 하는 밀리미터 파장을 사용하는 구름 레이더 또한 다수 포함되어 있다. 현재 일본 국내에서 운용중인 센티미터 파장을 사용하는 강수관측용 편파레이더 중에서 최신의 편파기능, 즉 KDP와 ρHV 등의 관측기능을 가지고 있는 편파레이더에 대해서만 소개하면 다음과 같다.

현재 일본 국내에서 운용중인 두 대의 강수관측용 이중편파 레이더는 방재과학기술연구소(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention: NIED)의 MP-X 레이더(Multi-Parameter radar at X-band)와 정보통신연구기구(National Institute of Information and Communications Technology: NICT)산하의 오키나와 아열대계측기술센터(Okinawa Subtropical Environmental Remote Sensing Center)의 COBRA 레이더(CRL Okinawa Bistatic Polarimetric Radar)이다. MP-X 레이더는 호우에 의한 산사태와 홍수 등으로 인한 자연재해 방지를 주목적으로 2000년에 개발?완성된 일본 최초의 최신 편파기능을 가진 레이더이다(Iwanami et al., 2001). MP-X 레이더는 9.375 GHz (파장 3.2 cm)에서 운용되는 X-band 레이더로서, 최대관측반경은

표 2. MP-X 레이더의 시스템 특성

Frequency	9.375 GHz
Antenna type	*Circular parabola 2.1φm*
Scan range (scan rate): Azimuth	Full circle (≤36 deg/s)
Elevation	−2 to +92 deg (≤18 deg/s)
Antenna gain	41.6 dB
Beam width	1.3 deg
Transmitter tube	Magnetron
Dynamic range	83 dB
Peak power	50 kW
Pulse length	0.5 μs
Pulse repetition frequency	≤ 1,800 Hz
Doppler processing	PPP, FFT
Noise figure	2.3 dB
Observable range	80 km
Polarization	Horizontal (H) and Vertical (V)
Outputs	V, SW, ZH, ZDR, φDP, KDP, ρHV

그림 4. MP-X 레이더

80 km이다 (표 2).

하나의 송신기로부터 45° 방향으로 전파를 송신하고 두 개의 수신기로 수평 · 수직(H · V) 두 방향에서의 산란된 전파를 동시에 수신하는 혼성 (hybrid) 편파모드를 사용한다. IRIS/SIGMET 신호처리 시스템을 사용함으로서, 도플러 시선속도(V)와 스펙트럼(SW) 외에, 수평방향에서의 레이더 반사도 인자(radar reflectivity factor; ZH), 수평 · 수직 반사도의 비(differential reflectivity; ZDR), 수평 · 수직 편파 위상차(differential propagation phase; φDP), 단위 거리당 위상차(specific differential phase; KDP), 수평 · 수직 반사도의 상관관계(co-polar cross correlation; ρHV)를 출력한다.

MP-X 레이더는 4톤 트럭에 탑재되어 있으므로 (그림 4) 이동성이 좋으며, 또한 고속 통신회선을 사용함으로서 레이더의 원격조정과 관측 자료의 실시간 전송이 가능하다. 또한 고속 통신회선의 사용이 불가능한 지역에서는 통신위성을 통한 원격조정도 가능하다. 2003년부터 현재까지 MP-X 레이더는 카나가와현에 설치되어있으며, 도쿄를 중심으로 하는 관동평야지대에서의 홍수 예보와 산악지대에서의 산사태 위험도의 실시간 예보를 위한 강우량 추정 업무에 사용되고 있다. 일본 방재과학기술연구소의 레이더 연구실에서는 2005년 현재 MP-X 레이더와 동일한 편파기능을 가지도록 구형 레이더 한 대를 개조 중에 있으며, 2006년부터 이 두 대의 편파 레이더를 이용한 동시관측을 계획하고 있다.

COBRA 레이더는 아열대 지역에서의 악기상 관측을 위해 NICT에서 2002년에 개발 완료한 C-band (5.34 GHz, 파장 5.6 cm) 편파 레이더로서 반경 300 km 까지 에코의 관측이 가능하다 (표 3).

COBRA 레이더는 두 개의 송신기와 두 개의 수신기를 사용하며, 수평 · 수직방향으로의 송 · 수신 기능뿐만 아니라, 45° 방향과 원형 편파의 송신도 가능하다 (Nakagawa et al. 2003). 이 레이더는 두 개의 송신기를 사용함으로서 LDR (Linear Depolarization Ratio ZHV/ZHH)도 관측할 수 있다. COBRA의 또 하나의 특징은 C-band 편파레이더 시

표 3. COBRA 레이더의 시스템 특성

Frequency	5.34 GHz
Antenna type	4.5 φm parabola
Antenna scan range : Azimuth	0.1 – 3.6 rpm
Elevation	0.5 – 10 rpm
Antenna gain	45.6 dBi (include radome)
Beam width	0.91 deg
Transmitter tube	Klystron (2 units)
Peak power	250 kW × 2 units
Pulse width	0.5, 1.0, 2.0 μs
Pulse repetition frequency	250 – 3,000 Hz
Doppler estimation	PPP, FFT
Sidelobe level	〈-31.8dB (AZ), 〈-28.3 dB (EL)
Polarization	H, V, ±45°, right- and left-hand circular
Outputs	V, SW, ZH, ZDR, φDP, KDP, ρHV, LDR, etc.

스템과 함께, 고해상도 3차원 바람장 산출을 위해 두 대의 bistatic 수신 장치를 동시에 운용하고 있다는 것이다. 현재 COBRA 레이더는 오키나와에 고정 · 설치되어 있으며 태풍관측을 위한 전진기지로서 뿐만 아니라 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)과 GPM (Global Precipitation Measurement Mission)의 검증자료로도 사용되고 있다.

4. 미국의 편파레이더 연구현황

미국의 편파레이더 활용은 편파레이더 개발국으로서 악기상시 기상레이더를 이용한 강수 · 강설량 추정, 구름의 수함량 분석 등의 연구와 대기수상체의 특성 파악에 역점을 두고 있다. 미국 악기상 연구소 NSSL에 설치된 S-band NEXRAD 편파레이더는 0.5도 고도각에서 1도의 공간분해능을 가지고 NSSL의 자체 볼륨 스캔 전략(Volume scan pattern, VCP)에 의해 관측을 한다.

그림 5는 미국 오클라호마 주에 위치한 KOUN 편파레이더와 KTLX WSR-88D 레이더의 위치도 이다. 편파레이더를 이용한 목표물의 물리적 특성, 강수추정의 정확성 등의 비교를 위해 지상에 설치된 좁은 영역의 ARS micronet gage 사이트와 그림5와 같이 MESONET gages 영역에 대하여 비교한다. 수평, 수직 편파 반사도(ZH, ZV), 도플러 속도(Vr), 차등반사도(ZDR), 위상차(φDP), 상관계수(ρhv), 그리고 노이즈 레벨 등의 값을 관측 및 계산하여 편파레이더 관측 알고리즘에 입력 자료로 사용하고 6단계의 과정을 통하여 자료를 전처리하여 레이더 에코의 자동분류 과정을 거쳐 강수 추정 알고리즘에 적용하여 강수량을 추정한다. 기존의 반사도 Z 성분 이외에 각 편파변수들을 합성해서 사용한 알고리즘으로 강수추정을 하며 만약 각각의 강우강도 변화에 따른 Z-R 관계식에 따라 합성알고리즘은 3가지로 고려된다. 이 강수추정 알고리즘을 사용하여 강우강도를 추정하고 또한 각 mesonet gage와 micronet gage를 사용하여 검증한다. 강우강도의 추정은 "기상학적 산란체"로 분류된 레이더 에코의 range gates에서 계산되어 각 기상학적 gate 에서 계산된 강수강도의 두 가지 추정을 위 두식으로 나타내며 강우강도 R (Z), R (KDP) 그리고 차등반사도의 추정은 표준 11 km (or 22 km) 직교좌표계위에서 평균된 것이다.

KOUN 편파레이더는 현업용 기상레이더로 사용하기 위해 계속 활발한 연구를 수행 중에 있는 레이더로서 자료의 정확성에 대한 비교 검증을 위해 오클라호마 Norman에 위치한 KTLXWSR-88D 레이더

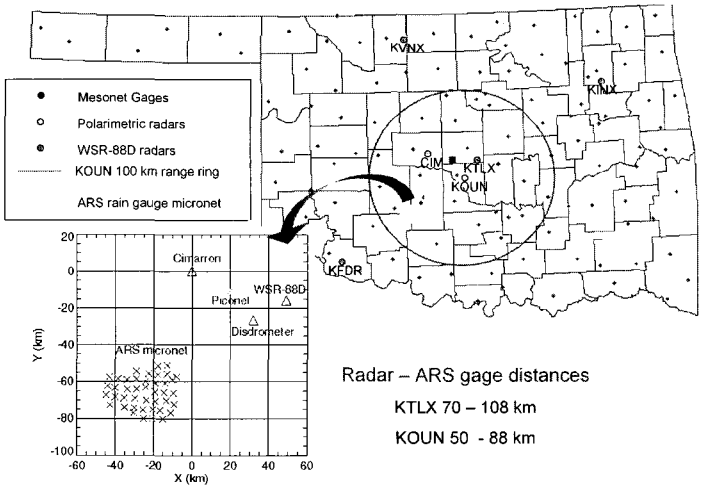

그림 5. 미국 오클라호마 주에 위치한 KOUN 편파레이더와 KTLX WSR-88D 레이더의 위치

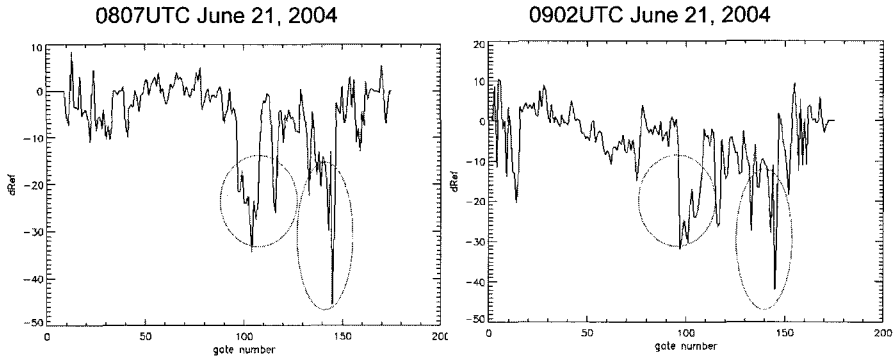

그림 6. 각 라인의 게이트 수에 대한 반사도 차이

를 이용한다. KOUN 레이더에서 가장 근접한 KTLX 레이더를 이용하여 직접 반사도를 비교하여 차를 구하는 방법으로 먼저 보정을 하며 KTLX 레이더는 오랜 기간 동안 보정이 잘 된 것으로서 산출되는 값과 KOUN 레이더에서 산출되는 자료를 각각 비교한다. 데이터 전처리 과정에서 두 레이더의 데이터 포맷을 같게 하여 아래의 두 레이더 사이의 공통적으로 중복되는 라인을 비교한다. 공통된 라인의 각 게이트의 반사도 값을 비교해서 반사도 값의 차이를 구하며 이때 경계(threshold)값은 KOUN 레이더와 KTLX 레이더 모두 반사도가 15 dBZ이상일 경우의 값을 비교조사하고 두 반사도 차의 값이 15 dBZ 이상인 것은 제외한다. 비교하는 공통라인에 missing 데이터와 no 데이터는 유효게이트에서 제외한다. 위의 방법으로 실제 각각에 대해서 반사도 값의 보정을 수행한 결과 threshold값을 정했는데도 Z bias편차가 큰 것을 알 수 있고 특히 부분적으로 상당히 높은 값을 나타내는 지점(영역)이 있다 (100번째 gate주변과 150번째 gate주변). 그림 6은 한 시간 간격으로 두 시간대의 각 라인의 게이트 수에 대한 반사도 차이를 나타낸 것으로서 반복되는 gate에서 반사도 차이가 상당히 높은 것을 알 수 있다. 따라서 KOUN레이더와 KTLX 레이더의 화상 비교에서 Ground clutter의 존재에 문제점이 있음을 알 수 있다.

Z bias는 실제로 수행해 본 결과 몇 가지 문제점이 발견되었으나 청천(clean air)에서나 곤충(insects)이나 새(birds)에 대해서는 KOUN 레이더와 KTLX 레이더 반사도 값의 비교시 실제로는 크게 문제시 되지 않는다. KTLX 레이더는 GC가 모두 제거되어 Raw data가 생성되지만, KOUN 레이더는 GC가 제거되지 않아 레이더 주변에 아주 높은 반사도의 값을 나타낸다. 따라서 프로그램 자체에 각각의 레이더 반사도 값이 15 dBZ 이하이면 제거하여 처리하는 조건을 주었으므로 실제로 두 레이더의 반사도 차이 값을 계산할 시에는 크게 영향을 받지 않는다. 강한 스톰이 두 레이더의 중심 주변에 나타날 때는 문제가 발생하였다. KTLX 레이더는 실제로 GC가 제거되어 레이더 주변의 반사도 값이 실제 스톰 에코의 반사도 값으로 나타내고 있다.

KOUN 레이더의 경우 스톰이 레이더 주변에 위치해 있으므로 상당히 높은 반사도 값을 나타내게 된다. KOUN 레이더는 GC가 제거되지 않았으므로 순수한 스톰에코 뿐만 아니라 GC 또한 함께 포함되어 나타나고 있다. 위의 그림에서 중심의 반사도 값을 살펴보면 알 수 있다. 실제로 두 레이더의 반사도 값을 비교할 때 KTLX 레이더는 순수한 스톰에 대한 반사도 값을 나타내고 있고, KOUN 레이더는 Ground clutter와 스톰이 혼합된 값이 나타나 두 레이더의 반사도 값이 비교가 됨으로서 15 dBZ의 반사도가 넓은 상당한 값의 차이를 보이게 된다. 또한 40-50 dBZ 값 이상의 반사도 값이 나타나는 영역이 항상 같은 방위각에서 존재함으로서 Ground clutter임을 확인할 수 있다. 따라서 KOUN 레이더의 raw data는 QC 처리가 필요함을 인식하고 Netcdf 파일로 전

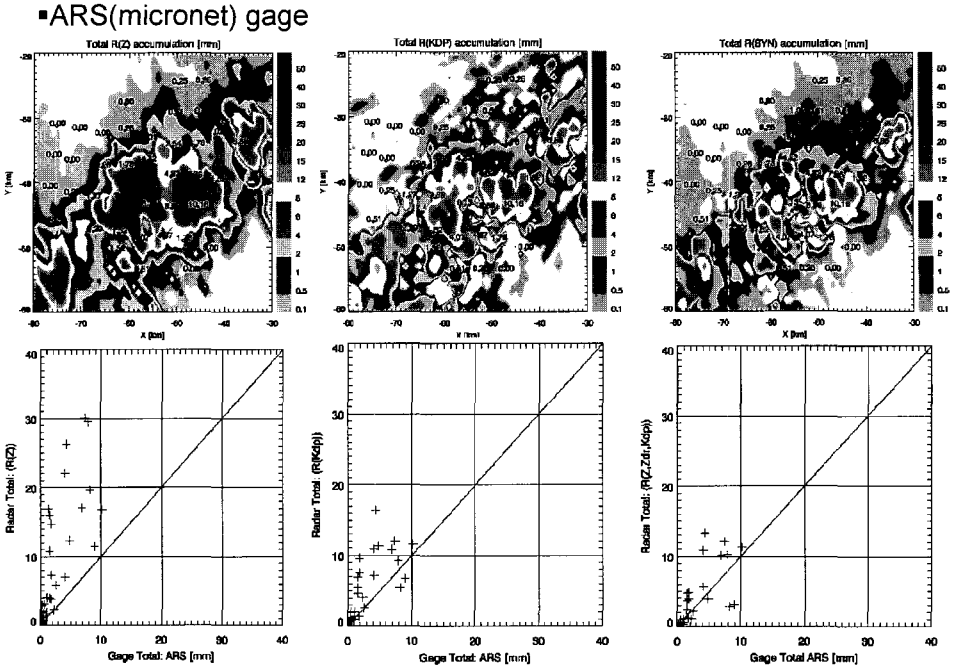

그림 7. 편파레이더의 강수 추정값과 ARS 우량계와 비교된 강수분포 (오클라호마, 2004년 5월 13일)

환하는 과정에서 HCA 프로그램을 사용하여 GC를 제거해주고 데이터를 비교한다.

강수량 추정 후 지상 자료와 비교하여 검증을 실시한 결과는 아래 그림7에 나타내었다. 사례일은 2004년 5월 13일 19 UTC에서 20 UTC까지 1시간동안 내린 강수사례이다. 이날은 강한 스콜 라인이 오클라호마 중심을 지나칠 때 편파강수추정 알고리즘을 사용하였다.

참고문헌

Bringi, V. N., and V. Chandrasekar, 2001: Polarimetric Doppler weather radar. Cambridge Univ. Press, 636.

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

Doviak, R. J., and D. S. Zrnic, 1984: Doppler radar and weather observations. Academic Press, 2nd Ed., 562.

Gorgucci, E., G. Scarchilli, V. Chandrasekar, and V. N. Bringi, 2001: Rainfall estimation from polarimetric radar measurements: Composite algorithms immune to variability in raindrop shape-size relation. J. Atmos. Oceanic Technol., 18, 1773-1786.

Hubbert, J., V.N. Bringi and L.D. Carey, 1998: CSU-CHILL polarimetric measurements from a severe hailstorm in eastern Colorado. J. Appl. Meteor., 37, 749-775.

Iwanami, K., R. Misumi, M. Maki, T. Wakayama, K. Hata, and S. Watanabe, 2001: Development of a multiparameter radar system on mobile platform. Preprints,

30th Int. Conf. Radar Meteor., Munich, Germany, Amer. Meteor. Soc., 104-106.

Nakagawa, K., H. Hanado, S. Satoh, N. Takahashi, T. Iguchi, and K. Fukutani, 2003: Development of a new C-band bistatic polarimetric radar and observation of typhoon events. Preprints, 31th Int. Conf. Radar Meteor., Seattle, Washington, Amer. Meteor. Soc., 863-886.

Ryzhkov, A. V., S. Giangrande, and T. J. Schuur, 2003: Rainfall estimation with a polarimetric prototype of the operational WSR-88D radar. Preprints, 31th Conf. on Radar Meteorology, Seatle, WA, U.S., Amer. Meteor. Soc., 208-211.

Schuur, T. J., A. V. Ryzhkov, D. S. Zrnic, and M. Schchuber, 2001: Drop size distributions measured by a 2D video disdrometer: Comparison with dual-polarization radar data. J. Appl. Meteor., 40, 1019-1034.

Zrnic, D. S. and A. V. Ryzhkov, 1996: Advantages of rain measurements using specific differential phase. J. Atmos. Oceanic Technol., 13, 454-464.

-----, and -----, 1999: Polarimetry for weather surveillance radars. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80, 389-406.