

# 소형 이중편파 레이더망을 이용한 소유역 강수추정 시스템

## I. 서론

홍수는 우리나라에서 볼 수 있는 가장 흔하면서도 엄청난 인명 및 재산의 손실을 불러올 수 있는 자연재해이다. 특히 개발 사업이 증점적으로 이루어져 아스팔트 혹은 콘크리트로 대부분이 포장되어 있는 도시 지역에서는 그 불투수 지면 특성 때문에 대부분의 강우가 직접유출로 연결되어 침투유량이 발생하는 시간인 유역 반응시간이 짧아지고 홍수 발생 확률은 커지게 된다.<sup>[1]</sup> 재해 발생 지역 규모는 대단위 유역의 그것에 비해 작지만 최근 기후변화로 심화된 강우 집중 현상과 유역 반응시간의 높은 시간 변동성으로 인해 그 규모 및 시기를 정확하게 관측하거나 예측하는 것이 쉽지 않다. 따라서 효과적인 도시재해 예방 및 경보를 위해선 높은 시공간 해상도의 관측과 정확한 강우 산정 기법이 필수적으로 수반되어야 한다.

신뢰성 높은 재해 예경보 시스템 구축을 위해 세계적으로 기존의 관습적인 주요 지점 중심 우량계 등의 의존에서 벗어나 보다 효과적인 관측 방법을 찾고 있으며, 최근 레이더를 이용한 강우 및 악기상 추정 방법이 주요 대안으로써 활발하게 연구되고 있다. 우리나라에서는 1969년 기상청 관악산 S 밴드 레이더 운영 이래 기상 관측 목적으로 주로 운영되고 있으며, 최근 국토해양부를 중심으로 강우 관측 및 주요 자연재해 예경보를 위한 레이더 운영 사업을 점차 확장해나가고 있다. 그러나 이는 전 국토의 고른 관측에 대한 것으로 전술한 환경적 특수성을 가지고 있는 도시지역에 동일하게 적용하기에는 어려움이 따른다.

이 글에서는 방재기술 선진국인 미국에서 최근 동일한 목적으로 추진하고 있는 소형 이중편파 레이더망과 이를 이용한 발전된 소유역 강수추정 시스템을 소개하고자 한다.



임 상 훈  
한국건설기술연구원

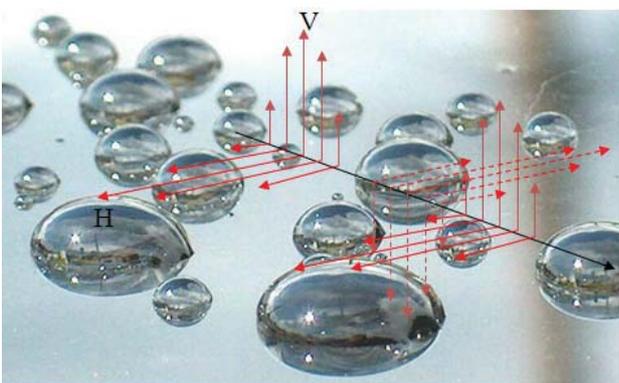


V. Chandrasekar  
Colorado State University

## II. 이중편파 레이더

지난 수십년간 현업에서 운영된 단일편파 레이더는 관측 변수로 반사도(Reflectivity, Z)만을 제공한다는 한계를 가지고 있었다. 주로 반사도-강우 관계를 이용한 경험적인 방법을 이용하여 강우 추정을 할 수밖에 없었고 이로 인해 강우 추정에 다소 큰 오차를 야기하였다. 그러나 최근 기술의 발전으로 수평편파(horizontal polarization)와 수직편파(vertical polarization)를 각각 관측할 수 있는 이중편파(dual polarization) 레이더 기술이 개발됨에 따라 단일편파 레이더로부터 관측할 수 있었던 반사도 외에도 차등반사도(Differential reflectivity,  $Z_{dr}$ ), 위상편이(Differential propagation phase,  $\Phi_{dp}$ ), 비차등위상(Specific differential propagation phase,  $K_{dp}$ ), 교차상관계수( $\rho_{hv}$ ) 등 다양화된 편파 변수를 이용함으로써 물리적인 강우 추정이 가능해지게 되었다. <그림 1>은 구형에서 타원형까지 실제 내리는 비의 다양한 모습을 보여준다. 이는 단일편파에 의한 강우 관측 시 왜 오차가 발생할 수 밖에 없는지, 따라서 왜 이중편파 관측이 필요한지를 말해 준다.

구형일 경우에는 수직과 수평의 반사도 및 위상차가



<그림 1> 비의 실제모습과 수평과 수직편파의 관측 모식도

**DCAS (Distributed Collaborative Adaptive Sensing) 시스템은 기존의 대형 S 밴드 레이더를 이용한 넓은 지역의 시공간상의 저해상도 관측으로 인해 오는 악기상 감시 및 강우추정의 부정확성 및 변동성을 보완하기 위한 방편으로써 복수의 소형 X 밴드 레이더를 대상 지형에 적합하게 배치하고 네트워크를 형성하였다.**

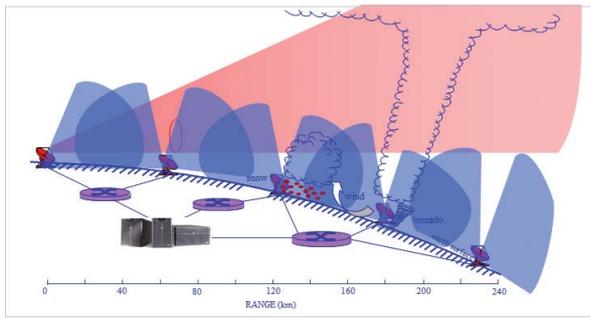
동일하지만 빔방울의 크기가 증가할수록 수평크기가 연직크기보다 커짐에 따라 수신되는 파워뿐만 아니라 위상값도 차이가 발생한다. 수평과 수직 반사도의 비인  $Z_{dr}$ 은 레이더 관측 부피내에서 입자의 형태와 방향에 대한 정보를 제공하고 수평과 수직파의 위상차이를 나타내는  $\Phi_{dp}$ 는 레이더 관측거리에 따라 누적되는 양으로 빔방울이 존재할 경우 하나의 방위각에서 시선방향으로 멀

어지면서 증가한다. 단위 거리에 따른 위상차인  $K_{dp}$ 는 강수입자의 형태뿐만 아니라 강수입자의 질량 및 강우량에 대한 정보를 제공한다

## III. DCAS 레이더 관측 시스템

US National Academy의 보고서에 의하면 미국 역시 홍수에 의해 가장 큰 물질적 피해를 입고 있다.<sup>[2]</sup> 미국의 도시지역에서 일어나는 홍수 양상 역시 우리나라의 발생 경로와 유사하며, 도시지역의 신속하고 정확한 재해 예경보를 위해 레이더를 이용한 높은 시공간해상도의 관측 및 정확한 강우 산정 기법의 적용이 요구되었다. CASA(Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere)에서는 현업에서의 기술적 요구를 더욱 진보된 기술로써 보완하고자 하였으며, 이러한 맥락에서 최근 괄목할 만한 기술적 발전을 이루어낸 고해상도 X 밴드 이중편파 레이더를 이용한 고밀도 네트워크 기반 레이더 관측 패러다임을 제시하였다.<sup>[3]</sup> DCAS (Distributed Collaborative Adaptive Sensing) 시스템은 기존의 대형 S 밴드 레이더를 이용한 넓은 지역의 시공간상의 저해상도 관측으로 인해 오는 악기상 감시 및 강우추정의 부정확성 및 변동성을 보완하기 위한 방편으로써 복수의 소형 X 밴드 레이더를 대상 지형에 적합하게 배치하고 네트워크를 형성하였다 <그림 2>.

관측 중복 지역은 실시간으로 목적에 맞게 구조적으로 더욱 정확한 정보를 제공할 수 있도록 설계되었다.



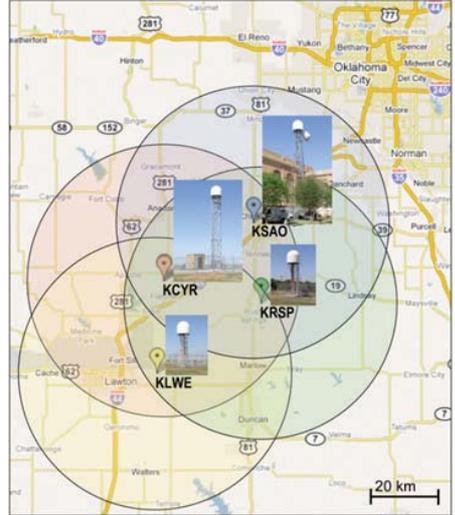
〈그림 2〉 DCAS 시스템의 개념도

관측 대상 지역 및 목적에 적합하도록 복수의 지역에 소규모 레이더 장비를 설치함으로써 비용을 절감하고 정확도 및 효율성을 높이게 되었다. 또한 보다 짧은 파장을 이용하여 관측을 할 수 있게 되었으며, 이로 인해 강우 관측 등이 더욱 용이해졌다. X 밴드 레이더는 S, C 밴드보다 강우에 더욱 민감하기 때문에 강우 산정시 단일편파의 반사도-강우 관계를 이용한 강우 산정치보다 더욱 정확하다는 장점을 가지고 있다.<sup>[4]</sup> 또한 다른 대형 레이더 시스템에 비해 높은 시공간 해상도를 가지기 때문에 도시지역 등 소유역의 강우를 관측하기에 용이하다.

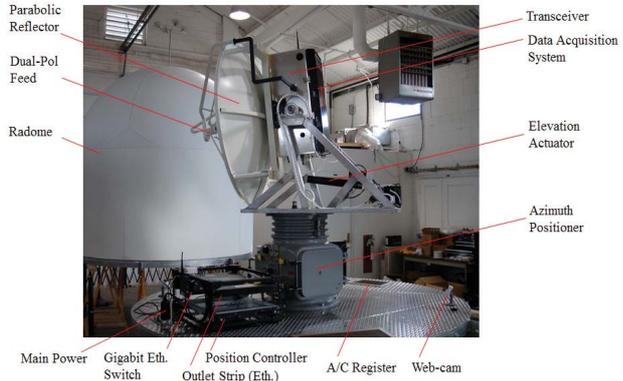
DCAS 시스템의 구현을 위해 CASA에서는 Integrated Project 1(IP1)으로써 뇌우, 강우, 강풍의 규모가 크고 강한 미국 오클라호마 주 남서부 지역에 테스트베드를 구성하고 〈그림 3〉과 동일한 네 대의 X 밴드 레이더를 설치했다 〈표 1〉. 테스트베드 지역의 면적은 총 7,000km<sup>2</sup>로 연평균 4회의 토네이도, 53

〈표 1〉 CASA X 밴드 이중편파 레이더 규격

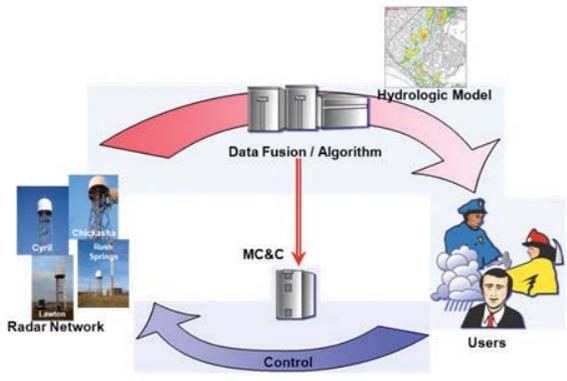
Transmitter		Receiver	
Type	Magnetron	Type	Parallel, dual channel, linear output I/Q
Center frequency	9410 ± 30 MHz	Dynamic range referenced at input (BW=1.5 MHz)	103 dB
Peak power output	8.0 kW	Noise Figure	5.5 dB
Average power output	12 W	DAQ sampling rate	100 MSps
Pulse width	660 ns	DAQ dynamic range (BW=1.5 KHz)	113dB
Polarization	Elliptical (Hybrid mode)	DAQ data transfer rate	88.3 MBps
Max. Duty Cycle	0.16%	Video Bandwidth	Adjustable
Antenna and Pedestal			
Type (diameter)	Dual-polarized parabolic reflector (1.2 m)		
3-dB Beamwidth	1.80°		
Gain	38.0 dB		
Azimuth scan rate	Up to 240°/s		
Elevation scan rate	Up to 30°/s		
Acceleration	Up to 120°/s <sup>2</sup>		



〈그림 4〉 DCAS IP1 레이더 네트워크 지역

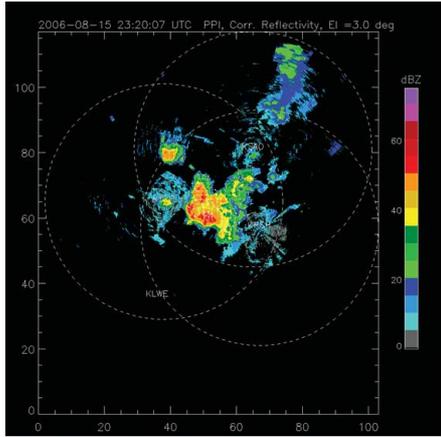


〈그림 3〉 CASA X 밴드 이중편파 레이더 시스템



〈그림 5〉 CASA IP1 시스템 구조

회의 뇌우 정보가 발효되는 지역이다. 4대의 레이더는 각각 오클라호마 주 Chickasha(KSAO), Rush



〈그림 6〉 CASA IP1 레이더망에 의한 반사도 관측 예

Springs(KRSP), Cyril(KCYR), Lawton(KLWE)에 위치해 있고 레이더 반경은 40km, 인접 레이더 노드와의 거리는 약 30km이다 〈그림 4〉.

각 레이더 노드는 인터넷으로 연결되어 있고 각 노드로부터 관측되는 데이터는 실시간으로 중앙 서버로 전송된다 〈그림 5〉. 중앙 서버에는 제어 및 명령 시스템인 MC&C(Meteorological Command and Control)가 설치되어 있으며, 시스템을 통해 폭풍우 순환 양상 및 발생 지역 관측, 사용자 요구에 맞는 관측 자원 최적화, 모든 레이더 노드를 고려한 상황에 따른 관측 업무 재설정 등이 이루어진다.<sup>[5]</sup> 시스템 업데이트 시간은 레이더의 관측 지역이나 관측 전략에 따라 달라지지만 30초에서 1분 사이로 신속하게 이루어진다.

CASA IP1의 DCAS 관측전략은 1°에서 30° 사이의 고도각으로써 최적화된 관측을 수행하며, 이 중 2° 고도각 관측은 감시관측(Surveillance scan)을 위해 이용된다.<sup>[6]</sup> 강우 산정을 위한 Kdp 값은 2° 관측자료를 이용하여 구해진다. 이 고도각에서는 측면돌출파(Sidelobe)로부터의 클러터 유발 우려가 있으나 클러터 필터링을 통해 이를 최소화할 수 있다. 〈그림 6〉은 CASA IP1 레이더망에 의해 관측된 반사도 사례를 보여준다.

#### IV. 정량적 강우 산정 기법 및 실무 응용

레이더 관측 자료를 이용한 강수량 산정은 레이더의 정확한 관측 측면 및 수문기상학적 과정에서의 높은 변동성 등으로 인해 상당히 어려운 것으로 인식되고 있다. Cifelli와 Chandrasekar (2010)는 이러한 오차 원인을 물리적 관점과 공학적 관점의 두 가지 관점으로 나눠서 해결하고자 하였다.<sup>[7]</sup> 미시물리적 변동성에 대해서는 이중편파 레이더로부터 관측되는 편파 변수 ( $Z_{dr}$ ,  $\Phi_{dp}$ ,  $K_{dp}$ ,  $\rho_{HV}$  등)를 이용하여 해석하고자 하였다. 특히 단위 길이당 위상의 차를 나타내는  $K_{dp}$ 는 X 밴드 레이더에서 감쇄 보정에서의 불확실성이 야기되지 않는다는 점, 약한 강우에도 민감하다는 점, 레이더 노드에서의 기계적 보정이 불필요하다는 점 등을 이유로 주로 이용되는 관측 변수이다.

레이더를 이용한 정량적 강우 산정 기법(QPE, Quantitative Precipitation Estimation)은 기본적으로 비의 미소물리적 특성과 레이더 관측자료를 이용한 강우 입자 크기 산정 과정을 기반으로 이루어진다. 강우와  $K_{dp}$ 와의 관계는 다음 지수식으로써 표현된다.

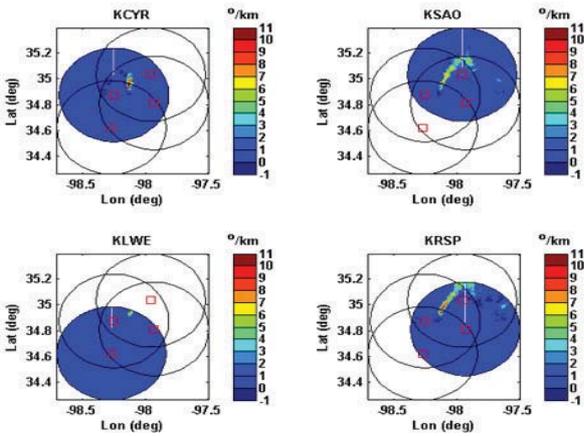
$$R = aK_{dp}^b \quad (1)$$

여기서 R은 강우강도, a, b는 기계, 지역, 환경 특성을 고려한 계수이다. IP1 테스트베드에서의 계수 값은  $a=18.15$ ,  $b=0.791$ 를 적용하였다.<sup>[8]</sup>

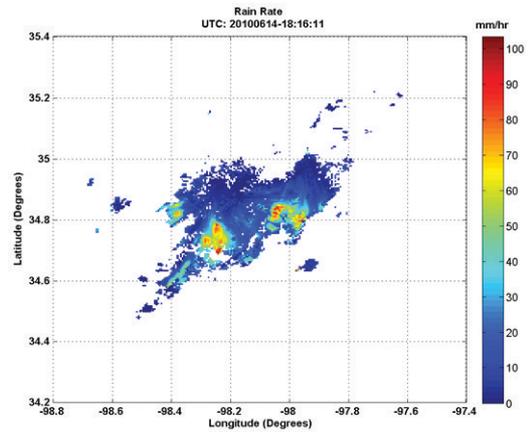
강우- $K_{dp}$  관계는 주파수에 따라 다른 특성을 보인다. 낮은 강우강도에서  $K_{dp}$ 는 X 밴드에서 S 밴드보다 높은 반응성을 보인다.  $K_{dp}$ 는 낮은 강우강도에서 보이는 큰 변동 때문에 필터를 이용하여 억제하지만 필터 이용시

최고값 범위가 완화되며, 이로 인해 높은 강우강도에서는 오차를 유발하는 주요 원인이 된다.<sup>[9]</sup> CASA QPE 시스템에서는 이러한 점을 보완하고자 공간적인  $K_{dp}$  증감률 자동 조정 처리 장치를 추가함으로써 약한 강우에서

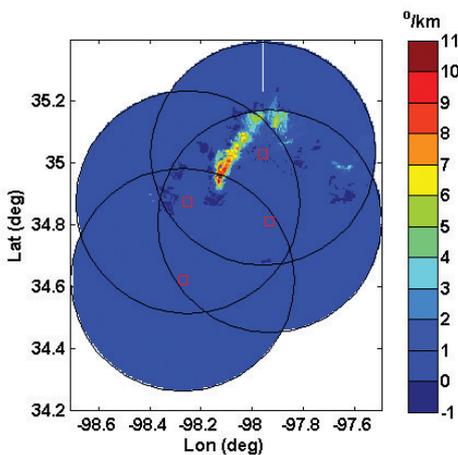
**레이더를 이용한 정량적 강우 산정 기법(QPE, Quantitative Precipitation Estimation)은 기본적으로 비의 미소물리적 특성과 레이더 관측자료를 이용한 강우 입자 크기 산정 과정을 기반으로 이루어진다.**



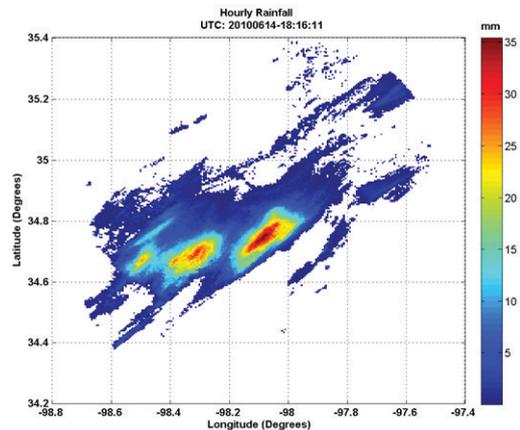
〈그림 7〉 CASA IP1 레이더 지점에서의  $K_{dp}$  분포(2008년 5월 27일 8시 12분(세계표준시))



〈그림 9〉 CASA IP1 테스트베드의 순간강우강도 지도 (2010년 6월 14일)



〈그림 8〉 CASA IP1  $K_{dp}$  합성도(2008년 5월 27일 8시 12분 UTC(세계표준시))

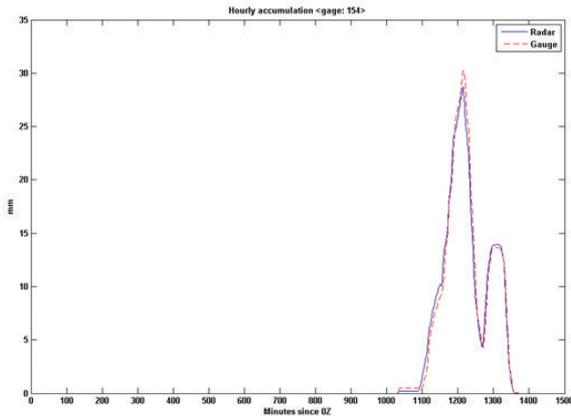


〈그림 10〉 CASA IP1 테스트베드의 1시간 누적강우 지도 (2010년 6월 14일)

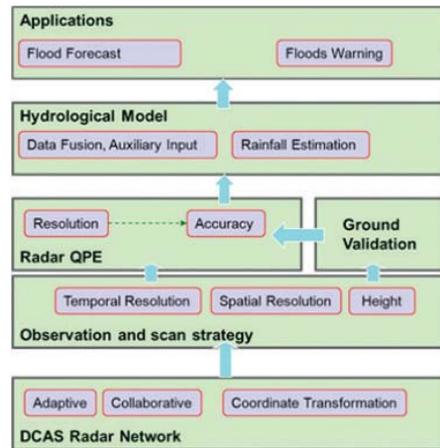
는  $K_{dp}$ 의 변동을 줄이고 강한 강우에서는 오차를 줄이고자 하였다.<sup>[10]</sup> 〈그림 7〉은 각 CASA IP1 레이더 지점에서의  $K_{dp}$  분포를 나타낸 것으로 저강우 지역의 값은 상당히 고르게 분포되어 있는 반면 폭풍우 중심 지역 부분은 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 〈그림 8〉는 CASA IP1 네 지점에서 얻어지는  $K_{dp}$  분포를 이용하여 합성한 자료이다. 복수의 레이더로부터 얻어지는 중복지점  $K_{dp}$  산정 방법은 자료 품질을 기반으로 하며, 자료 품질은 빔 최저고도와 관련 깊은 관측 범위를 이용하여 주로 결정된다. 보통 관측 방향마다 신호 감쇠가 다르게 나타나는 X 밴드 특성상 감쇠가 가

장 적게 나타나는 자료를 이용하게 되며, 이를 이용하여 강우 산정시 정확도를 높게 된다.

CASA QPE 시스템을 통해 최종적으로 산출되어 제공되는 자료는 시공간 해상도 500m, 1분의 순간강우강도지도(그림 9), 1분 단위로 생산되는 1시간 누적강우지도(그림 10), 지점별 순간강우강도 및 1시간 누적강우 자료(그림 11) 등 총 세 가지이다. 특히 1분 단위로 생산되는 1시간 누적강우지도는 홍수 예경보에 주로 사용되며 적용 영역의 특성에 맞게 시간 단위를 변경해서 이용한다. 지점 자료는 지상강우관측자료를 이용한 검증에 쓰이며, 검증 과정을 통해 CASA QPE



〈그림 11〉 지점 단위 레이더 강우와 지상관측자료의 비교 그래프(2010년 6월 14일)



〈그림 12〉 DCAS 레이더 네트워크 기반 도시홍수 감시 시스템의 구성도

시스템이 실무 응용에 안정적인 자료를 제공할 수 있다는 것이 증명되었다.

레이더 관측 자료로부터 산정된 강우 정보는 홍수 예경보 업무와 수문 모형의 입력자료 이용 등 실무에 다방면으로 응용되고 있다(그림 12). DCAS 레이더 네트워크로부터 결정되는 관측전략에 따른 시공간 해상도 및 관측 고도각 등에 대한 지점관측자료와의 비교를 통해 레이더 QPE를 위한 최적 관측전략 및 주요 환경변수를 결정한다. 이후 생성되는 레이더 강우 자료는 수문 모형에 결합되거나 입력자료 등으로 쓰이는 등 수문 모형의 정확도 및 신뢰성을 높이기 위해 이용되며, 이를 바탕으로 홍수 예경보 등 실무에 응용된다.

## V. 결론 및 제언

최근 그 강도 및 피해가 심화되고 있는 도시홍수의 예경보 정확성 및 효율성을 높이기 위해 고해상도 레이더 관측자료를 이용한 정량적 강우 산정 기법이 집중적으로 개발되고 있으며, 미국에서는 이미 수문모형과 결합하여 정확한 유역 단위의 홍수 예경보에 큰 기여를 하고 있다. 고해상도 레이더 강우와 도시홍수

해석 및 예경보 분야를 선도하고 있는 CASA에서는 저고도 고해상도 관측이 용이한 X 밴드 레이더 기반의 DCAS 네트워크를 제안하고 IP1 사업을 통해 미국 오클라호마 주 남서부 지역에 시험적용을 수행하였다.

CASA QPE 시스템에서는 시간 해상도 1분, 공간 해상도 300m의 강우자료를 생산하고 있으며, 5년간의 시스템 검증 연구를 통해 레이더 QPE의 값 및 시간적 변화 양상이 지점 우량관측자료와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 정확성 및 지역 적용성을 바탕으로 CASA QPE 시스템에서는 현재 순간강우 강도지도, 1시간 누적강우지도, 지점별 순간강우강도 및 1시간 누적강우 자료 등 세 가지 자료를 생산하고 있다. 이 네트워크에서 생산하는 자료를 이용해 보다 큰 격자 크기를 가지고 있는 NEXRAD(Next-Generation Weather Radar) 강우자료에 Gap-filling

데이터를 제공함으로써 대형 레이더 자료의 시공간적인 상세화에 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라 대형 레이더 관측 범위에서 벗어나는 지역에 대한 관측을 지원하는 보조적인 역할을 수행하여 보다 효율적인 관측이 가능해질 것이다.

우리나라의 소형 X 밴드 레이더를 이용한 소유역 강우관측망

**전국적으로 대부분을 차지하고 있는 산지 지역 및 급격히 발전하고 있는 도시 지역에 대한 정확하고 효율적인 강우자료 생산을 위해 X 밴드 레이더 기반 소유역 관측망 구성은 필수적이다.**



구축 및 관련 연구사업은 이제 시작 단계에 있다. 최근 연구 목적으로 제한된 장소에 설치되어 강우량 산정 등의 연구는 이루어지고 있지만 아직 네트워크 기반의 복합 레이더망 형식으로는 운영되고 있지 않으며, 이를 위한 관련 기술의 발전 또한 더디다. 그러나 전국적으로 대부분을 차지하고 있는 산지 지역 및 급격히 발전하고 있는 도시 지역에 대한 정확하고 효율적인 강우자료 생산을 위해 X 밴드 레이더 기반 소유역 관측망 구성은 필수적이다. 향후 레이더 관측망의 성공적인 구축 및 운영을 위해 기술적으로 앞서있는 미국 등에서 이루어지고 있는 주요 연구 성과 및 사례를 보다 집중적으로 조사할 필요가 있으며, 이를 바탕으로 우리나라의 지역 및 환경 특성에 맞는 레이더 QPE 시스템을 구축/운영함으로써 기술선진국 뿐만 아니라 방재선진국으로 도약할 수 있는 계기가 될 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Maki et al., X-band Polarimetric Radar Network in the Tokyo Metropolitan Area ? X-NET, The fifth European Conference of Radar Meteorology, Hydrology, Helsinki, Finland, ERAD, 2008.
- [2] V. N. Bringi, and V. Chandrasekar, Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and applications, Cambridge University Press, 2001.
- [3] National Research Council, Flash Flood Forecasting Over Complex Terrain: With an Assessment of the Sulphur Mountain NEXRAD in Southern California, National Academy Press, 2005.
- [4] D. J. McLaughlin et al., Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for Improved Detection, Understanding, and Prediction of Atmospheric Hazards, 9th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, American Meteorological Society, 2005.
- [5] M. Zink, E. Lyons, D. Westbrook, J. Kurose, and D. Pepyne, Closed-loop Architecture for Distributed Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere: Meteorological Command & Control, International Journal of Sensor Networks, Vol. 7, No. 1/2, pp. 4-18, 2010.
- [6] F. Junyent, V. Chandrasekar, D. McLaughlin, E. Insanic, and N. Bharadwaj, The CASA Integrated Project 1 Networked Radar System. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 27, pp. 61-78, 2010.
- [7] R. Cifelli, and V. Chandrasekar, Dual-polarization radar rainfall estimation, in Rainfall: State of the Science, Geophysical Monograph Series, Vol. 191, pp. 105-125, 2010.
- [8] A. V. Ryzhkov, S. E. Giangrande, and T. J. Schuur, Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of WSR-88D, Journal of Applied Meteorology, Vol. 44, pp. 502-515, 2005.
- [9] E. Gorgucci, G. Scarchilli, and V. Chandrasekar, Specific Differential Phase Estimation in the Presence of Nonuniform Rainfall Medium along the Path. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 16, pp. 1690-1697, 1999.
- [10] Y. Wang, and V. Chandrasekar, Algorithm for Estimation of the Specific Differential Phase. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 26, pp. 2565-2578, 2009.



임 상 훈

2002년 5월 Colorado State University,  
Electrical & Computer Engineering  
(석사)  
2006년 8월 Colorado State University,  
Electrical & Computer Engineering  
(박사)  
2006년 9월~2011년 1월  
Research Associate, CSU  
2011년 2월~2012년 2월  
Research Scientist, NOAA/CIRA  
2012년 3월~현재 연구위원, 한국건설기술연구원

<관심분야>  
레이더수문기상, 이중편파레이더신호처리및응용



V. Chandrasekar

1986년 Colorado State University (박사)  
1989년~1990년 Assistant Professor,  
University of Alabama in  
Huntsville  
1990년~1993년 Assistant Professor, Colorado  
State University  
1993년~1998년 Associate Professor, Colorado  
State University  
1998년~현재 Professor, Colorado State  
University

<관심분야>  
Radar system and networking, Radar  
Meteorology, Signal processing