

X-band 레이더를 이용한 도시홍수관리



이동률

수문레이더 재해연구 · 데이터 센터 센터장
한국건설기술연구원 선임연구위원
dnyl@kict.re.kr



황석환

한국건설기술연구원 수석연구원
sukany@kict.re.kr

1. 서론

기상이변으로 집중호우와 태풍 발생이 증가하고 있고, 도시화에 따라 홍수·폭설 피해 발생 가능성이 증가하고 있다. 이러한 자연재해에 대비하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며 이중 첨단레이더 장비를 이용하여 호우를 관측 및 예측 하고 이를 유출 분석하여 국지적 재해를 예측하는 것이 매우 중요해 지고 있다. 특히 돌발 홍수·폭설 피해를 예방하기 위하여 지역적으로 상세한 고해상도 초단기 예보의 중요성은 증대되고 있다. 국지적 홍수를 예측하기 위해서는 유역내 강우의 공간분포가 반영된 정량적 강우 관측, 예측과 강우 및 유역 특성의 공간분포를 반영할 수 있는 신속하고 상세한 유출해석이 필요하다.

레이더는 태풍 및 장마와 같은 광범위한 기상현상에 대한 탐지뿐만 아니라 집중호우, 우박, 강풍과 같은 강한 국지성 기후와 관련된 재해 위험을 감지하고 경보하는데 있어서도 매우 유용한 원격 탐사기기이다. 전 세계적인 기후변화 속에서 국지성 호우로 인한 돌발홍수의 가능성이 급격히 증가함에 따라, 보다 효과적인 예·경보를 위한 레이더 활용에 대한 연구의 중요성이 부각되고 있다. 현재, 기상관측을 위해 수백 킬로미터(200-300km)에 이르는 장거리 관측이 가능한 고출력의 대형 S-밴드 레이더를 보편적으로 사용하고 있다. 이는 태풍과 같은 거대 기상현상의 관측에 유리한 면은 있으나, 저고도 및 고해상도 관측이 요구되는 국지성 기상 관측에 있어서는 지구의 만곡으로 인

한 구조적 관측 한계가 존재한다. 대형 레이더의 이러한 한계를 극복하기 위해, 소형 X-밴드 이중편파레이더 활용에 대한 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 광범위한 기상현상에 대해서는 대형 S-밴드 이중편파 레이더를 이용한 관측을, 그리고 정밀한 관측이 요구되는 국지성 기상현상에 대해서는 시공간적으로 고해상도를 지원해 줄 수 있는 X-밴드 이중편파레이더의 활용이 보다 효과적이라 할 수 있다. 특히 서울과 같은 도심지역이나 강원도와 같은 산악지역에서 이러한 관측은 더욱 효율적이다. 또한, X-밴드 이중편파레이더들로 구성된 하나의 레이더망을 구축하면 더욱 정확한 정보를 얻을 수 있다. 이와 같은 레이더망은 수문학적으로 중요한 근거리 (< 40 km) 저고도 (< 1km) 관측을 가능하게 하여 강우 및 강설량의 추정을 보다 정확하게 수행할 수 있고, 다중 바람장에 대한 추정도 가능하여 바람에 대한 보다 정확한 정보를 얻을 수 있다.

우리나라는 그동안 많은 홍수관리 대책을 추진하여 인명과 재산피해의 경감성적을 달성하였다. 그러나 기후변동의 심화로 계획을 초과하는 빈번한 홍수에 의해 1998-2007년의 10년간 한강수계 388명, 낙동강수계 210명 및 금강수계 44명이 사망하였고, 2002-2006년 기간에 연간 2.7조원 홍수피해가 지속적으로 발생하고 있다. 또한 겨울철에는 극심한 폭설로 과거와 다른 교통대란과 농작물 피해 등이 심화되고 있다. 이런 자연재난에 따른 사회적 인식은 국가과학기술위원회가 실시한 대국민 설문조사 결과에 나타나고 있다. 가장 피해우려가 높은 재난은 호우와 홍수(39.4%)로 나타났으며 재난 대비 인프라 구축(71%)과 재난 예측·대응 기술 등 과학 기술 개발(67.3%)을 다른 정책에 비해 중요하게 생각하고 있는 것으로 나타났다. 기존의 지상 관측소를 이용한 호우 및 폭설 관측은 관측소가 산재되어 빈번한 돌발 홍수와 폭설이 언제, 어느 곳에 발생하는가의 감시가 매우 곤란하여 인명 및 재산 피해가 가중되고 있다. 이러한 돌발 자연재해를 예방하고 그 피해를 줄이기 위하여 홍수 및 폭



그림 1. 증가하는 도심지 돌발홍수 재해

설의 발생 지역과 시간을 적확하게 사전 예측하고 이를 경보할 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 재해방지를 위해서는 시간과 공간적으로 얼마나 자세하면서 정확한 정보를 제공하느냐가 중요한 사항이다. 특히 돌발 홍수·폭설 피해를 예방하기 위하여 지역적으로 상세한 고해상도 초단기 예보의 중요성은 증대되고 있으며 6시간 이내에 시작과 종료가 발생하는 돌발재해 특성상 지상 관측소에 의한 예·경보는 비효율적일 수 있다. 최근 레이더는 고해상도 초단기 관측에 용이하여 재해 예보의 중요한 수단으로써 각광받고 있으며, 최근 이중편파 기술을 이용한 수문레이더의 개발로 소규모 지역의 상세한 집중호우, 홍수, 폭설의 예측이 가능하게 되어 세계적으로 많은 연구가 추진되고 있다.

2. 레이더를 이용한 홍수관리 기술동향

2.1 이중편파 기상레이더 개요

레이더 (Radar)는 Radio Detection and Ranging의 약자로 초기에는 군사적 목적으로 탐지 및 위치추적을 위해 주로 사용되어졌다. 그러나 2차 세계대전 이후 비행, 항해 및 기상, 수문 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 기상레이더란 비 눈 구름 등 기상현상을 관측하고 위치나 진행방향 및 비나 눈의 내리는 양 등을 산출하는데 사용되는 원격탐사 기기를 일컫는다. 레이더는 비나 눈 등의 목표물을 향해 전자기파를 방출하고 목표물로부터 반사된 전자기파를 취합하여 전기적인 신호로 바꾼다. 이러한 전기적인 신호는 여러 단계의 신호처리 과정을 거치면서 레이더 데이터로 생산 된다. 이중편파레이더란 기존 수평편파만을 사용하는 기상레이더와 달리 수평과 수직 편파를 동시에 또는 순차적으로 송수신하여 신호를 얻는 레이더 시스템을 말한다. 수평과 수직의 두 방향으로부터 얻어진 신호로부터 강수체의 크기 및 모양 등의 여러 가지 특성을 파악할 수 있는 정보를 추출할 수 있다. 이는 단일편파 레이더와 비교에서 이중편파레이더의 커다란 장점이라 할 수 있다.

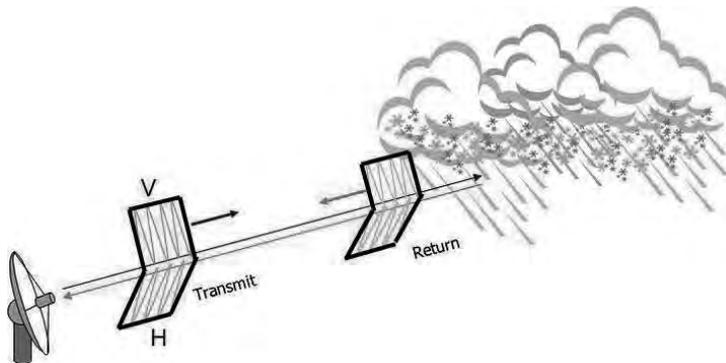


그림 2. 이중편파 기상레이더의 원리

2.2 레이더를 이용한 홍수 관리 및 활용 예

가) 미국립해양기상청 산하 수문기상 연구팀(NOAA HMT)

미국립해양기상청(NOAA) 산하 수문기상(Hydrometeorology Testbed)팀은 강우·강설에 대한 보다 정확한 추정·예측과 이를 바탕으로 수자원 및 재해 관리를 보다 효율화 하는 연구를 목적으로 미국 전역에 걸쳐 여러 테스트베드를 설치하고 있다. 첫 HMT의 테스트베드인 HMT-West는 복잡한 지형특성을 가지고 있는 북캘리포니아의 겨울기상을 연구하기 위해 북캘리포니아의 아메리카강 유역에 설립되었다. 이 지역은 주로 산악지역으로서, 겨울철에 저지대에는 비가 오는 반면 고지대에는 눈이 내린다. 이러한 복잡한 지형 및 기후적인 여건 속에서 효과적인 강우 및 강설추정을 위해 기존의 S 밴드 단일편파레이더(NEXRAD 레이더) 외에 공백채움(gap-filling)을 위한 레이더로서 C 밴드 단일편파레이더와 X 밴드 이중편파레이더로 레이더망을 구축하였다. 이지역의 겨울철 강우 추정을 위해서는 고도 1km 이하의 관측이 특히 중요하다. 따라서 저고도 관측에 갭 보강 레이더가 효과적으로 사용되었다 (Matrosov 2010). HMT에서 수행된 강우 및 강설에 대한 연구결과는 수자원관리 및 홍수조절을 위해 중요한 정보를 제공하고 있다. HMT의 주요 활동분야로는 강우추정 및 예측, 강설 그리고 수문모델 적용 및 결정 도구이다.

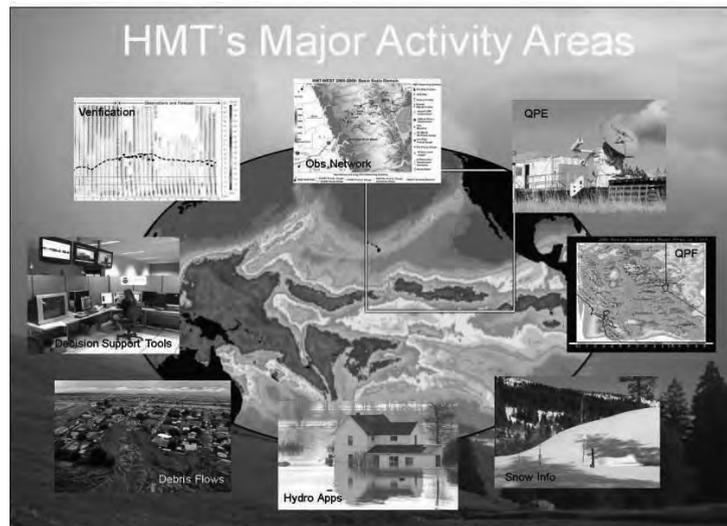


그림 3. 미국 NOAA-HMT의 연구 및 활동 부문

나) 일본방재과학기술연구소의 도시홍수감시시스템

도쿄지역은 5개의 대도시로 이루어진 지역으로 3천 4백만 명의 인구가 반경 50km 안에서 살고 있다. 동경은 습한 아열대의 기후 및 태풍의 영향으로 홍수 정보가 매우 중요한 대표적 지역이다.

심각한 도시홍수는 10분이나 20분 정도의 경보시간 차이에 의해서도 인명과 재산피해에 큰 차이를 보일 수 있다. 일본방재과학기술연구소는 이러한 도시홍수에 대한 효율적인 경보시스템을 구축하기 위해 2006년부터 레이더망을 이용한 도시홍수경보시스템의 연구개발을 수행하고 있다. 이 시스템은 X-밴드 및 C-밴드레이더들로 구성된 레이더망을 중심으로 구축되었고, 이 시스템의 핵심요소 중의 하나는 다양한 도시지역에서 초단기홍수예경보를 위해 레이더강우추정과 수문모델의 융합에 있다(Maki et al. 2008; Chandrasekar et al. 2009). 일본은 도쿄지역에서의 성공적인 레이더망 기반 도시홍수경보시스템을 바탕으로 이러한 레이더망을 나고야, 오사카 및 카나자와 등에도 설치할 예정이다.

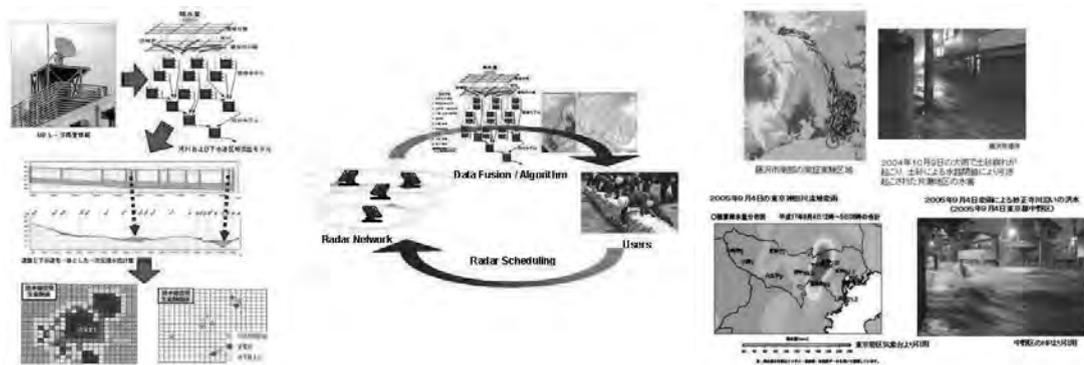


그림 4. 일본 레이더망 기반 도시홍수경보시스템 및 관측 예(CASA-NIED자료)

다) 미국 CASA-ERC

CASA-ERC(Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere - Engineering Research Center) 센터는 2003년 9월에 미 국립 과학 재단의 후원을 바탕으로 설립되었다. 이 연구센터는 주도적인 역할을 하는 4개 대학 (매사추세츠대학교, 콜로라도주립대학교, 오클라호마대학교, 푸에르토리코대학교)의 컨소시엄 및 산업체 그리고 정부기관들의 참여를 바탕으로 10년 동안 총 연구비 4천만 달러를 지원받아 운영되고 있다. 이 프로젝트의 주요한 목적은 여러 소형 X-밴드 레이더들을 이용하여 기상현상에 대한 분산 협력 적응 탐사(Distributed Collaborative Adaptive Sensing)를 하는 것으로, 여러 대의 분산된 레이더로 망을 형성하여 서로 협력하면서 최적의 기상탐사를 하는 것이다(McLaughlin et al. 2009). 고해상도로 저고도를 관측하는 CASA는 토네이도에 대한 경보 시스템 구축과 강우추정 및 단기예보에서의 정확성을 향상시키는데 지대한 공헌을 하였다. 다음 그림 5은 현재 일반적인 대형 S 밴드 레이더에 의한 관측모형 및 기상현상을 보여준다. 그림에서 보듯이 토네이도 및 강풍 그리고 눈 등의 기상현상은 주로 지상으로 부터 고도 1 km 범위에서 발생함을 알 수 있다. 그런데 대형레이더를 이용해 관측을 하면 약 100 km 이상의 원거리에서는 대부분의

중요한 기상현상이 발생하는 고도 1 km 미만의 관측이 불가능함을 알 수 있다. CASA는 여러 소형 X-밴드 레이더들을 이용한 레이더망을 구축하여 이러한 공백을 극복하였다(Chandrasekar et al, 2011). 여러 대의 분산된 레이더로 망을 형성하여 서로 협력하면서 최적의 기상탐사를 한다는 개념(DCAS; Distributed Collaborative Adaptive Sensing)이다. 이 방법은 시·공간적인 고해상도의 탐사능력 뿐만 아니라 비용이 상대적으로 저렴하여 경제적인 측면에서도 효용성이 증명되고 있다. 특히 토네이도 및 강풍의 추적 그리고 강우추정에서 그 우수성이 증명되었다.

(1) Integrated Phase 1(IPI) Testbed

IPI 테스트베드는 미국 오클라호마 주의 남서부 지역에 설치되었다. 4개의 소형 X-밴드 레이더로 구성되었다. CASA IPI 이중편파 X-밴드레이더망을 이용한 강우추정 및 검증 결과 기존의 어떤 강우추정방법보다도 정확성에서 뛰어난 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 새로 적용된 비차등위상 산출방법 뿐만 아니라 레이더망을 이용한 데이터의 병합을 통해 도출되었다.

(2) Dallas Fort Worth (DFW) Urban Demonstration Network

도시지역의 경우 개발에 따른 포장도로 및 기타 건축물 등의 증가로 인해 불투수층이 증가하고 홍수도달시간은 짧아지고 있다. 이에 따라 짧은 기간의 집중호우에 의해서 도시홍수가 유발될 수 있는 가능성이 점점 높아지고 있다. 돌발호우에 의한 도시홍수 피해를 효과적으로 방지하기 위해서는 무엇보다 빠르고 정확한 예·경보가 중요하다. 이를 위해서는 시공간적으로 뛰어난 해상도를 갖춘 자료가 필요하나 기존의 우량계 등에 의한 관측 정보만으로는 시·공간적인 제약이 수반된다. 이를 극복하기 위해 미국 일본 등의 여러 국가에서는 시·공간적으로 고해상도를 가진 기상레이더 자료를 이용하여 강우량 추정 및 예측 시스템에 대한 연구개발을 진행하고 있다. 특히 도시홍수를 위해서는 X 밴드 단일편파 및 이중편파레이더로 망을 구성하여 기상현상을 관측하고 있다. 이처럼 레이더망을 구성하면 강우추정에서 중요한 저고도 관측이 가능할 뿐만 아니라 도심지 빌딩들에 의한 전파 차단 효과를 최소화할 수 있는 이점이 있다.

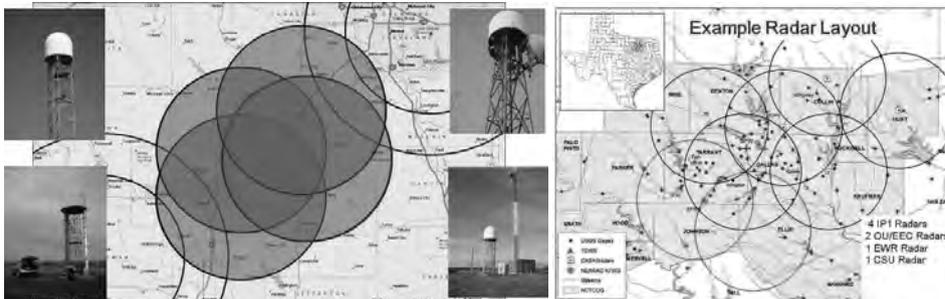


그림 5. CASA IPI 배치도 (좌)CASA DFW 레이더망 구축 예(우), CASA 자료(2003, 2011)

3. X-밴드 이중편파 소형레이더에 의한 관측 및 해석

3.1. X-밴드 이중편파 소형레이더의 특성

수십 년 간 실무에서 이용된 단일편파 레이더는 반사도의 관측만이 가능함에 따라 반사도-강우강도 관계를 이용한 경험적인 방법으로 오차가 큰 강우추정 자료를 생산할 수밖에 없었다. 그러나 최근 이중편파 레이더 기술의 발전으로 수평과 수직 편파의 관측이 가능해짐에 따라 반사도 외에도 차등반사도, 위상편이, 비차등위상, 교차상관 계수 등 다양화된 변수를 활용할 수 있게 되었다. 이러한 기술의 발전에 발맞추어 미국 Next Generation Weather Radar(NEXRAD), 유럽 Operational Programme for the Exchange of Weather Radar Information(OPERA) 등 세계 주요 레이더 네트워크를 중심으로 단일편파 레이더를 이중편파레이더로 교체하는 사업이 진행되고 있다. 우리나라 또한 국토교통부, 기상청, 공군 등 실무기관을 중심으로 장비 교체 및 업그레이드를 통해 보다 활용성 높은 양질의 수문 데이터를 확보하기 위한 사업이 진행되고 있다. 현재 국내외 실무에서 일반적으로 쓰이는 레이더는 대형 S 밴드 레이더로, 200-300km에 이르는 장거리 관측에 적합하기 때문에 태풍과 같은 거대 강우현상의 관측에 유리하다. 그러나 지상으로부터 1km 이하에 이르는 저고도 및 고해상도 관측이 요구되는 국지성 호우나 폭설 관측에는 지구의 만곡에 따른 기기 자체의 근본적인 제약을 가지고 있다. 또한 대형 기상레이더는 5-10분의 관측주기를 가지며, 중장거리(100km 이상)에서 1km 이상의 공간해상도를 가지기 때문에 지역단위의 상세 관측에는 기술적 한계가 존재한다.

그러나 X-밴드 소형레이더는 동일 지역에 대해 여러 개의 소형레이더로 이루어진 네트워크를 구성함으로써 비용 및 설치, 운영 측면에서의 이점은 물론, 저고도 관측이 가능하고 2분 이하, 100m 이하의 고해상도 자료를 제공할 수 있기 때문에 대형 레이더의 지형적 제약성 및 시공간적인 저해상도를 극복하기 위한 방안으로써 제시되고 있으며, 이에 따른 최근 관련 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다(McLaughlin 등, 2005; National Research Council, 2005). 우리나라의 경우, 국토의 대부분을 이루는 서울 등 도심지역 및 산지 지역에 대한 효율적인 관측이 가능하기 때문에 그 적용성이 매우 높다. 실제 현업에 쓰이고 있는 기상청 대형 레이더 관측망은 대부분 대도시에서 저층관측이 어렵고 관측 사각지역이 존재하는 등의 단점이 있다.

3.2 KICT X-밴드 이중편파 소형레이더 설치 및 운영

가) 설치 개요

한국건설기술연구원(KICT)에서는 레이더의 세계적 기술 발전 추세에 따라 국제적인 선도 기술을 확보하기 위한 관련 사업을 적극적으로 추진하고 있다. 연구 인프라 사업을 통해 최신행레이더인 소

형 X밴드 이중편파 레이더를 설치, 운영함으로써 소형 이중편파 강우레이더 시스템 운영 기반을 구축하였다. 설치된 X밴드 이중편파 레이더 특성으로 9.41GHz 주파수, 3.0m 높이, 1.8m 안테나 지름, 612kg 무게이고 시간해상도 1분의 공간해상도는 60-100m의 상세격자 공간으로 반경 60km 거리까지 관측이 가능하다. 본 KICT 레이더는 소형으로서 초고속의 상세한 시공간 고해상도로 운영되어 게릴라성의 돌발 호우, 홍수 및 폭설 등의 예·경보에 유리하다. KICT 레이더는 연구원을 중심으로 대략40km 반경을 관측하며 여기에 포함되는 지자체로는 서울시, 인천시, 부천, 시흥, 파주, 김포, 강화, 과천, 양주 일대와 임진강 하류의 접경지역과 북한의 개성 지역까지 포함된다. 관측 영역에 대한 정밀한 관측을 수행하고 이 결과를 지자체 현업 재해관리에 도움이 되도록 지원할 예정이다. 2013년 7월 설치 이후 지속적인 관측을 통해 다양한 연구를 진행 중이다. KICT 레이더는 현 설치 위치에서 서울 주요 지역 등 대도시 및 고양시, 파주시 등 중소도시에 대한 고해상도 관측이 가능해져 향후 실무 활용 시 도시지역에 대한 홍수예측 시스템이 보다 정확하고 상세화 될 것으로 기대된다. 또한 임진강 유역의 관측이 용이해짐에 따라 유역 규모 수문순환 분석 및 예측 정확도가 향상될 수 있으며, 북동부 산지지역에 대한 관측을 통해 다양한 환경 조건에 대한 강우·강설 모의가 가능해질 것으로 전망된다.

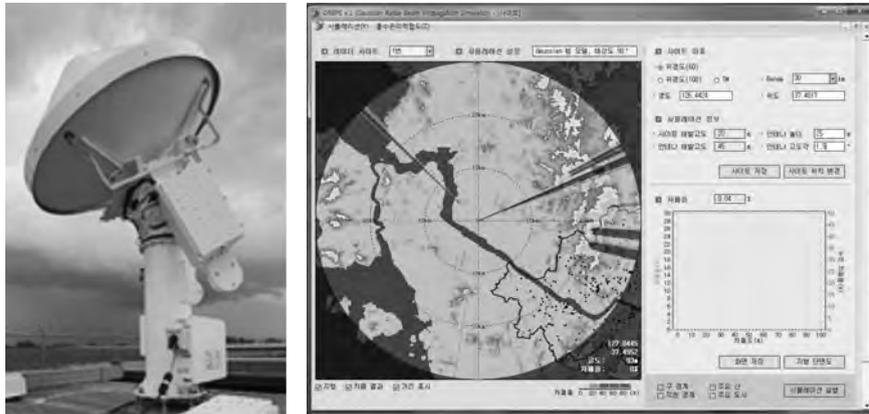


그림 6. KICT 수문레이더 전경 및 관측범위

나) KICT 수문레이더의 이중편파 관측 변수

그림 7은 KICT 수문레이더에 의한 2013년 7월 23일 호우사상에 대한 수평관측(PPI)과 연직관측(RHI) 예로 관측반경은 40 km이고 빔폭은 빔폭은 1.4°, 거리해상도는 약 60m이다. PPI 관측의 경우 왼쪽부터 반사도(Reflectivity), 시선속도(Velocity), 상관계수(Copolar Correlation Coefficient), 차등위상(Differential Phase), 스펙트럼폭이다. 연직관측(RHI) 결과는 저층강우와 층운형 강우에 대한 상세 구조를 보여주며 거리 약 15-25 km 사이에 강한 저층 강우가 존재함을 알 수 있어 저고도 관측의 중요성을 말해 준다.

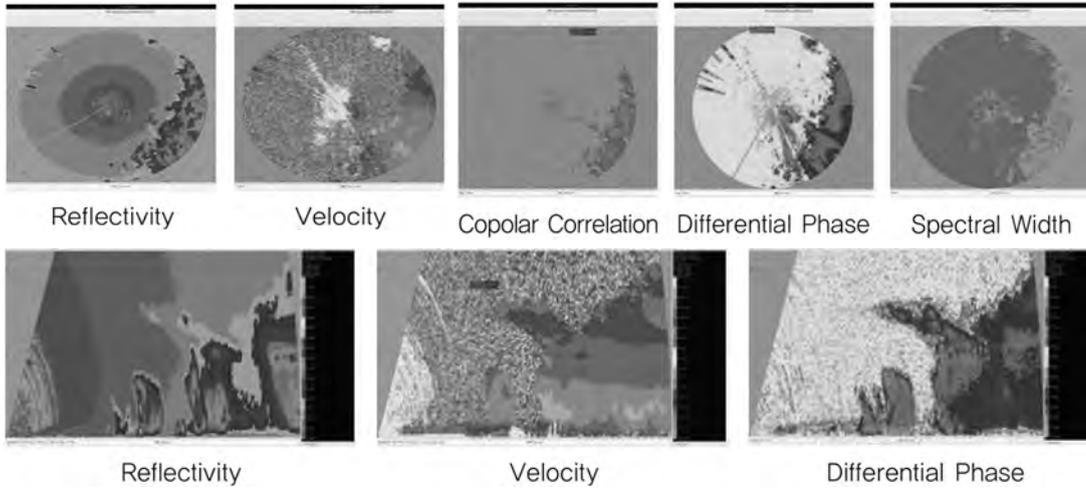


그림 7. KICT 수문레이더의 주요 관측 변수(위 PPI 모드, 아래 RHI 모드)

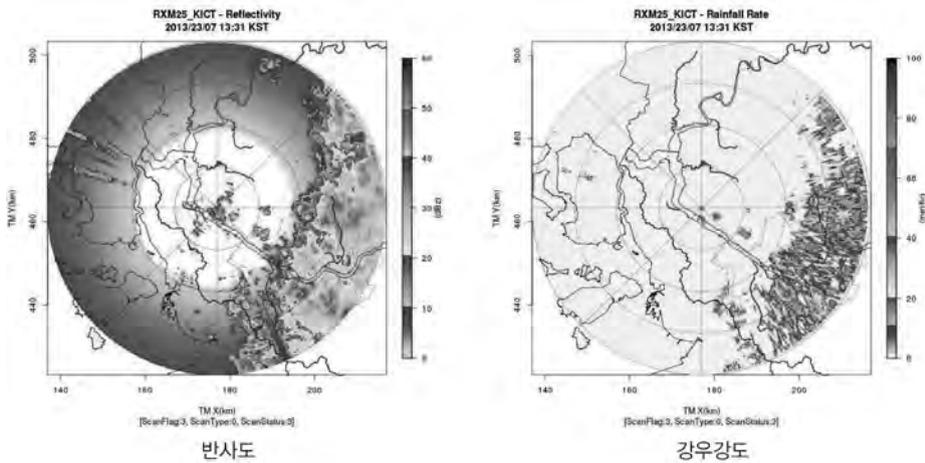


그림 8. KICT 수문레이더의 관측 반사도와 강우량 산정(R-KDP) 예

3.3 KICT 수문레이더 기반 홍수 재해 관리 연구

수문레이더의 설치로 재해관리의 연구 및 응용을 위한 기반 인프라 시설을 구축하는 데 이어 한국 건설기술연구원은 정확한 홍수 및 폭설의 실시간 추정, 예측 및 경보 기술 개발을 목표로 2013년부터 총 5년간의 연구사업을 추진하고 있다. 본 연구는 국제적으로 최고 성능을 가진 X-밴드 이중편파 레이더를 이용하여 「최고의 정확(的確)한 홍수의 실시간 추정, 홍수 예측 및 경보 기술개발」에 목적을 두고 있다. 기초기술 분야에서는 수문레이더의 안정적인고 효율적인 최적 운영 방안과 이를 통한 양질의 자료 생산 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다. 핵심기술 분야에서는 레이더 관측자료를

이용하여 기초 및 응용분야에 쓰일 수문변수를 정확하게 추정하고, 이를 바탕으로 소규모 지역을 고해상도로써 짧은 시간 간격으로 예측할 수 있는 기술을 개발하고자 한다. 레이더 관측자료 기반의 신뢰성 높은 고해상도 수문변수가 생산되면 이를 입력자료로 이용함으로써 다양한 지역 및 유역 규모에 적용되는 실시간 고해상도 홍수예측모형을 개발할 것이다. 최종적으로 개발되는 홍수예측모형은 실무에 적용됨으로써 보다 정확한 재해예경보에 주로 활용될 전망이다. 마지막으로 응용기술 분야에서는 기초 및 핵심기술 분야에서 개발된 주요 수문인자 및 재해 예·경보 정보 서비스를 제공하기 위한 연구가 이루어진다. 최근 그 이용률이 가장 높은 웹 및 모바일 환경에서 적용 가능한 주요 정보 표출 기술과 시스템 연계 기술의 개발이 이루어질 것이다.

3.4 KICT의 수문레이더 재해연구·데이터 센터(HRDRC)의 설립

가) HRDRC의 설립 목적 및 기능

본 센터는 게릴라성 호우, 홍수 및 폭설 등의 재해관리에 수문레이더 기술을 융합하여 새로운 실시간 관측과 예측 연구를 활성화하기 위하여 설립되었다. 한국건설기술연구원에 수문레이더를 설치·운영하여 집중호우, 홍수, 폭설 등이 언제 어디에 발생하는 가를 실시간으로 모니터링하고 사전 예측기술을 개발하는 것이 주목적이며 이를 활용하여 침수, 범람, 산사태, 교통, 농업 등에 미치는 효율적인 재해관리기법 연구를 통해 막대한 사회·경제적 피해를 예방할 것이다. 또한 국토교통부 강우레이더 자료의 효율적인 유통을 통한 관·산·학·연 기관간의 협력체계를 구축하여 레이더를 이용한 재해관리의 기술 개발 및 교류 등의 제고를 위하여 수문레이더 정보의 자료유통 국가허브를 구축·운영할 것이다. 이와 함께 KICT 수문레이더를 활용하여 서울, 고양, 파주, 김포 및 인천시 등의 현업 재해관리를 지원하게 될 것이다.

본 센터의 주요업무는 레이더를 이용한 재해관리 연구를 최고의 업무로 추진하고 있다. 주요 연구방향은 WBT(World Best Technology) 강우·홍수·강설 추정 및 예보 기술, 수문모형과 연계한 고정확도 단기홍수 예측기술, 레이더를 이용한 산사태, 폭설 등의 자연재해 탐지 기술 개발, 강우레이더망과 GIS 및 모바일 시스템을 연계한 재해 예경보 기술 등이다. 또한 국토교통부 강우레이더의 정보 DB 구축하여 유통허브 역할을 수행할 것이다. 마지막으로 수문레이더 활용 교육, 전문가 육성 및 국제 워크숍 개최하여 우리나라의 레이더를 이용한 재해관리기술을 실용화하고 국제화하는데 기여하게 될 것이다. 본 센터는 타 기관과 차별화 된 연구, 레이더 운영, 연구성과 확산 등을 추진할 것이다. 첫째, 재해피해가 가장 심한 도시·산지 지역에 특화된 재해연구를 할 것이다. 서울, 인천 등 대도시 및 산악지역에 적합한 국내 최초 X-밴드 이중편파 소형레이더망 활용 기술 개발 및 보급할 예정이다. 이를 위하여 1분 간격 100m격자의 시공간적인 고해상도 관측 및 예보, 레이더기반 도시재해 예·경보 기술 개발에서 제품화까지 통합적 운영이 가능하도록 추진할 것이다. 둘째는 국토

부나 기상청의 경우 고정된 현업 레이더 운영에 초점이 맞추어져 있어 실험운영을 통한 다양한 레이더 관련 핵심 기술개발은 미흡하고 게릴라성 도시홍수대응 연구가 미진한 상황을 고려하여 연구가 부족한 레이더기반 도시·산지 재해 예·경보 기술에 대한 연구개발에 집중할 것이다. 셋째는 국토부 한강홍수통제소와 “강우레이더 자료유통센터” 운영을 위한 업무협약 체결로 국내 최초 레이더 자료 유통 허브기능 보유하게 되어 레이더를 이용한 관·산·학·연 기관 간의 현업 재해관리 연구의 가교 역할을 수행할 것이다. 넷째는 출연기관의 사회적 책무로서 KICT 수문레이더의 관측범위에 있는 서울시, 인천시, 고양시, 파주시, 김포시 등의 현업재해관리를 지원할 것이다. 마지막으로 국토부는 2016년까지 11기의 레이더를 설치예정이나 운영·관리를 위한 전문가가 부족한 상황으로 본 센터에서는 수문레이더를 활용한 재난관리 연구의 활성화, 인력양성 및 국제화를 추진할 것이다.

나) 국토교통부 강우레이더 자료유통 허브로 자리 매김

2013년 10월 21일 KICT와 국토교통부의 한강홍수통제소는 강우레이더 자료의 효율적인 유통으로 관·산·학·연 기관간의 협력체계 구축을 위한 업무협력 합의를 체결하였다. 국토교통부에서 운영하는 임진강, 비슬산, 소백산 레이더의 품질관리 전후의 기본 관측자료 및 합성강우량 자료 등을 일차적으로 저장하고 대학 및 연구기관에 자료를 제공하는 역할을 수행한다. 이를 통해 레이더 기술 개발 및 교류 등의 현업 재해관리 연구의 시너지 증대를 이룰 수 있을 것이다.

다) KICT 수문레이더 재해연구·데이터 센터의 현재와 미래

‘수문레이더 재해연구·데이터 센터’는 KICT의 SOC 통합관제센터 1층에 위치하고 약180m² 면적에 국토교통부, 기상청, 본 연구원 레이더를 실시간으로 모니터링하는 레이더 모니터링실, 레이더 관련 이론 및 실습을 위한 교육실, 레이더 운영자들이 상주하는 운영실, 연구실 등으로 구성되어 있으며 2014년부터 순차적으로 모니터링 장비를 구축해 오고 있다. 센터에서는 국내 레이더 관련 연구를 선도하고 국제 레이더 연구기관과의 교류를 위한 워크숍을 2013년 10월 21~22일에 개최하였고 2017년에는 국제 기상-수문레이더 활용 워크숍인 WRaH(Weather Radar and Hydrology)를 개최가 확정되어 현재 준비 중이다. 이러한 국제 워크숍을 지속적으로 개최하여 국제교류의 틀을 마련하고 레이더 연구분야에서 한국의 위상을 높일 계획이다. 레이더 운영 및 연구, 센터 설립을 통해 정확한 도심 홍수 및 겨울철 폭설 예측으로 수재해 방지를 위한 정부출연연구기관으로써의 사회적 책무를 수행함과 동시에 사전 홍수·폭설 경보로 재해로 인한 직간접피해를 절감하게 할 것이다.



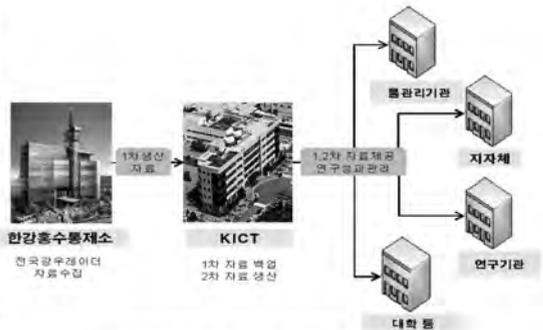
<센터 개소식>



<국제 강우레이더활용 워크숍 개최>



<국토교통부 레이더 자료유통 MOU 체결>



<국토교통부 레이더 자료유통 흐름>

그림 9. KICT 수문레이더 재해연구·데이터 센터의 설립 및 역할

4. KICT 수문레이더의 운영 및 관측 사례

4.1 KICT 수문레이더 운영

2013년 소형 X-밴드 이중편파 레이더를 도입하였다. 경기도 일산에 위치한 한국건설기술연구원 신관옥상에 반경 50km까지 기상관측이 가능한 수문레이더를 설치하고 이를 관제할 수 있는 다양한 자료가 표출되는 상황실을 구축하였다.



그림 10. KICT 수문레이더 설치 및 운영(상황실)

4.2 KICT 수문레이더를 이용한 호우 관측

KICT 수문레이더를 이용하여 다양한 국지적 강우/폭설을 관측하였다(서울 경기지역 폭설사상: 2014년 12월 12일, 일산 용오름현상 최초관측: 2014년 6월 10일 등). 특히, 일산 용오름 현상은 국내 레이더 관측 역사상 최초로 관측된 자료로써 많은 연구가 진행되고 있으며 그 실측자료의 중요성이 입증되었다.

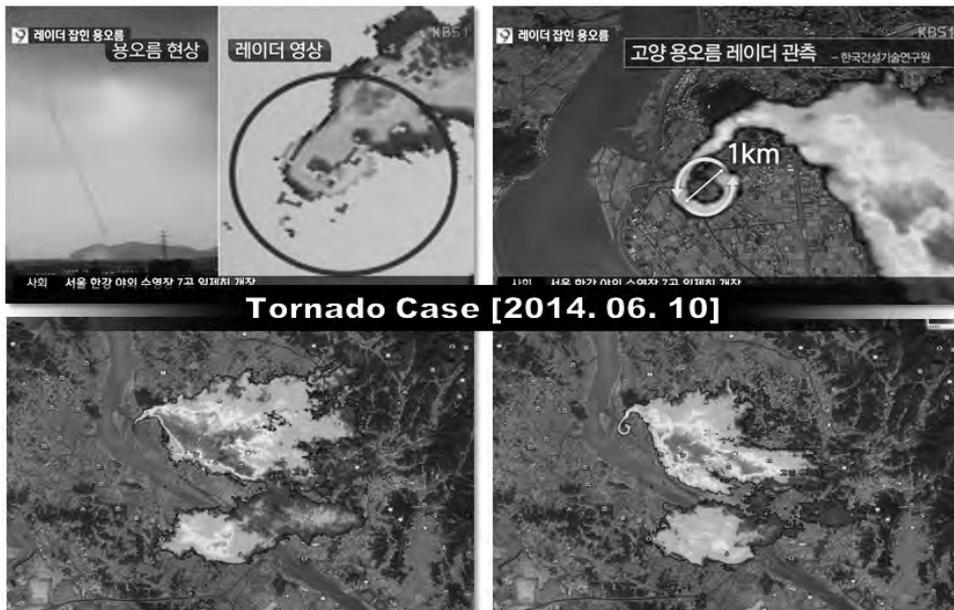


그림 11. 국내최초 용오름 레이더 관측(2014/06/10)

4.3 KICT 수문레이더 웹 모바일 시스템

KICT 수문레이더 웹시스템은 KICT 수문레이더로부터 관측된 원시 데이터를 수집하고, 원시 데이터를 이용하여 레이더 자료 품질관리를 수행하고 레이더 자료를 가공하며 강우 추정을 수행한다. 표출분석 시스템은 품질관리·강우산정 시스템의 각 단계별 산출을 웹으로 표출하는 시스템으로서 레이더 자료를 영상표출하며 단계별 다양한 자료 품질관리를 수행한다.

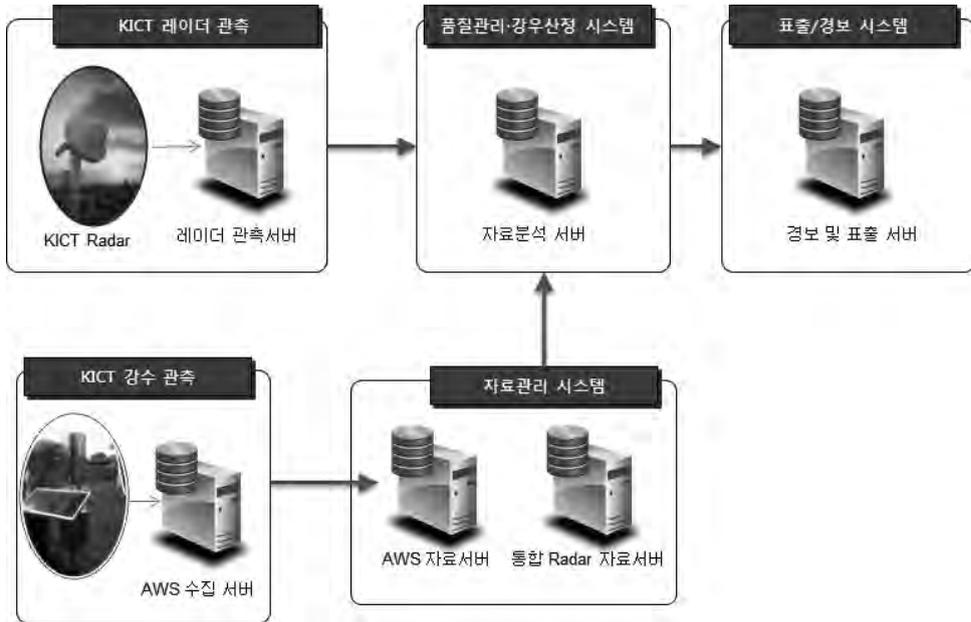


그림 12. KICT 수문레이더 강우표출 시스템 구성도

KICT 수문레이더 강우표출 웹은 「수문레이더 재해연구·데이터 센터」 홈페이지 내(www.hrdr.kict.re.kr)에 구축하였으며 홈페이지의 주요내용은 센터소개, 연구실적, 운영자료, 교육/견학, 행사, 수문레이더(기기설명)이다. 다양한 레이더 관측자료의 표출은 운영자료 항목에 구성되어 있다.



그림 13. KICT 수문레이더 강우표출 웹시스템

또한 웹 시스템을 모바일에서도 효과적으로 활용하기 위해 모바일 앱 시스템을 구축하였다. 레이더 반사도, 순간강수량, 10분강수량, 1시간강수량 행정구역별 강수량 자료를 실시간으로 제공한다.

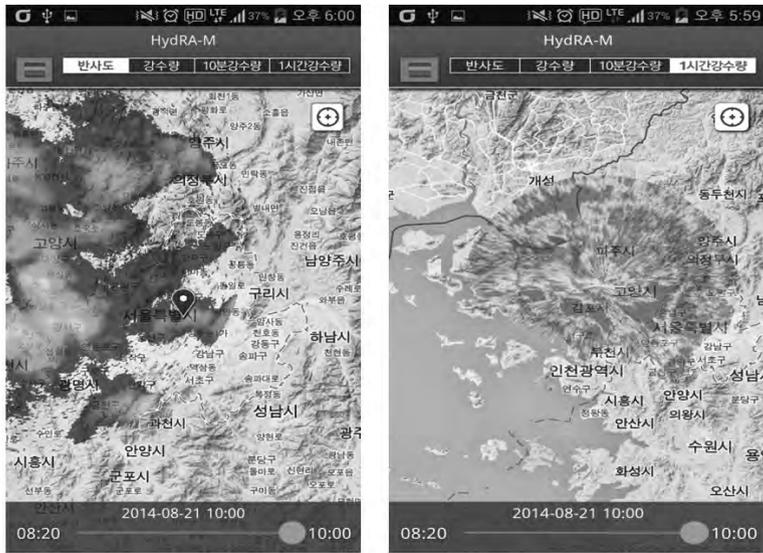


그림 14. 위치기반 기상재해 경보를 위한 모바일 앱 개발

그리고 레이더 자료포맷인 Netcdf 자료의 경우 자료형식이 복잡하여 일반사용자가 사용하기 어려운 형태이다. 그래서 쉽게 이용하기 위해 JAVA를 이용한 윈도우 기반으로 사용할 수 있는 프로그램(KICTRadar4WIN)을 개발하였다. 레이더 자료 품질관리, 레이더 자료관리, 레이더 자료 추출, 레이더 자료 표출의 기능이 있다.

수문레이더 운영 및 활용 기술과 레이더 웹·모바일 경보시스템 관련 다양한 교육자료를 만들어 수문레이더 센터를 방문한 개발도상국의 기상 및 방재 담당자들에게 교육하였고 「UNESCO/ WMO 태풍위원회」기술 초청강연 등으로 외국에 전파하고 있다. 또한 다양한 ODA사업 진출을 토대로 보급을 진행하고 있다.

4.4 KICT 수문레이더 활용 연구성과

KICT 수문레이더를 이용한 재해방재 기술 개발로서 홍수 대응 가능한 요소기술 개발을 중점 목표로 X-밴드 레이더 도입과 함께 관련 기술 개발 논문 및 특허 등의 성과를 지속적으로 도출하고 있다.

- ① X-밴드 수문레이더 도입(9.6GHz, 무선국)
- ② KICT 고유의 강우추정 기법 개발
- ③ 고해상도 홍수해석 기술의 개선 및 시범 적용
- ④ SCI 및 SCI-E급 논문 14편, KCI 및 국제 논문지 21편 (2013~2015)
- ⑤ 국내 특허 8건, S/W 등록 20건 (2013~2015)
- ⑥ 국토교통부와 MOU를 통해 「수문레이더 재해연구·데이터 센터」 개소
- ⑦ 국제 레이더 연구기관과의 교류를 위한 정기 워크숍 개최
- ⑧ 기상청, 국토교통부 및 수자원공사 연계 소형레이더망 구축사업 진행 중
- ⑨ “필리핀 메트로 마닐라 홍수조기경보 및 모니터링체계 구축” ODA 사업에 수문레이더 구축 및 활용 기술 지원 중



그림 15. UNESCO/WMO 태풍위원회 해당기술 초청강연

5. 결론 및 발전 방향

기존의 지상 관측소를 이용한 호우 및 폭설 관측은 관측소가 산재되어 빈번한 돌발 홍수와 폭설이 언제, 어느 곳에 발생하는가의 감시가 매우 곤란하여 인명 및 재산 피해가 가중되고 있다. 이들 재해를 예방하기 위하여 홍수 및 폭설의 발생 지역과 시간을 정확하게 사전 예측하고 이를 경보할 수 있는 기술의 개발이 시급하다. 한국건설기술연구원에서는 세계적인 추세에 발맞추어 첨단 소형 X-밴드 이종편파 레이더를 설치하고 이를 이용한 신뢰성 높은 수문변수의 생산을 목표로 하는 연구개발 사업을 진행하고 있다. 본 연구를 통해 세계적인 수준의 고해상도·고정확도 홍수 및 폭설 추정·예측 시스템이 구축되며, 이 시스템을 기반으로 유역 특성을 고려한 상세공간 홍수예측 기술, 위성, 레이더 및 지상 수문관측정보 수집, 분석 및 관리 통합 시스템 등의 개발이 이루어질 것이다.

또한 본 연구를 통해 수재해 방지를 위한 정부출연연구기관으로써의 사회적 책무를 수행함과 동시에 사전 홍수/폭설 정보로 재해로 인한 직간접피해를 절감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

공공시설 및 수자원 관리 시스템은 사회기반시설의 운영과 수자원 배분 결정을 하기 위해 정확한 강수정보가 필요로 하며 공공의 안전과 함께 교통, 상하수도 등의 시설 또한 장단기적인 호우사상에 의해 심각한 영향을 받는다. 각 도시들은 도시의 특성에 따라 다양한 문제에 직면하며 예를 들면 대형 기상레이더는 산악지역의 특성에 의한 레이더관측 차폐 문제와 필요 이상의 관측범위 문제가 발생한다. 기후변화의 영향으로는 극한 강우사상이 더욱 극심해지고 가뭄의 강도 및 기간도 증가할 것이며 대도시 지역의 집중호우에 의한 침수가 우려되기 때문에 재해 예방 및 피해 감소를 위한 비상 운영에 강우 관측 자료의 신속한 업데이트가 요구된다. 다양한 도시지역에서의 발전된 강우 모니터링 및 예측 기술은 보다 빠른 예·경보를 가능하게 하여 기상재해로부터 공공의 안전을 높일 수 있다. 특히 관측(Monitoring), 자료동화와 분석(Assimilation and analysis), 예측(Prediction), 그리고 시스템통합(System integration)으로 이루어진 일체형 예보 시스템은 앞으로 세계적으로 모든 주요도시에서 돌발호우 등에 의한 도시홍수의 피해를 저감시키는데 중요한 역할을 할 것이다. 서울과 같은 도시화가 심각한 곳에서는 이와 같은 시스템이 보다 효과적일 것이다.

감사의 글

본 원고는 국토교통부 물관리연구사업(16AWMP-B079625-03)의 연구비지원에 의해 작성되었습니다.

참고문헌

1. 소방방재청 (2011). 재해연보 2011.
2. Chandrasekar, V., Y. Wang, M. Maki, and K. Nakane, 2009: "Urban Flood Monitoring using Xband Dual-polarization Radar Network: Program of the CASA-NIED Partnership", Preprints, 34th Conf. on Radar Meteor., Williamsburg, VA, Amer. Meteor. Soc., October 5-9, 20
3. Chandrasekar, V., M. Martinez, and S. Zhang, 2010: CASA dual-Doppler system. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, USA, 25-30 July, 2010
4. Chandrasekar, V., Yanting Wang, Sanghun Lim, Francesc Junyent, Nitin Bharadwaj,

- David McLaughlin, Brenda Philips, Mike Zink, Eric Lyons, David Westbrook, Jerry Brotzge, and Sandra Cruz-Pol, 2011: "Accomplishments, challenges and opportunities in developing network based radar systems for high-impact small-scale weather events," 2011 IEEE RadarCon (RADAR) (May 2011), pg. 1056-1061.
5. Collier, C.G. (1989). Applications of Weather Radar Systems—A guide to uses of radar data in meteorology and hydrology, Ellis Horwood Limited, England.
 6. Maki, M, T. Maesaka, R. Misumi, K. Iwanami, S. Suzuki, A. Kato, S. Shimizu, K. Kieda, T. Yamada, H. Hirano, F. Kobayashi, A. Masuda, T. Moriya, Y. Suzuki, A. Takahori, D. Lee, D. Kim, V. Chandrasekar, Y. Wang, 2008: X-band Polarimetric Radar Network in the Tokyo Metropolitan Area – X-NET, The fifth European Conf. Radar Meteor. Hydrology, Helsinki, Finland.
 7. Matrosov, S. Y., 2010: Evaluating Polarimetric X-Band Rainfall Estimators during HMT, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 122-134, doi:10.1175/2009JTECHA1318.1.
 8. McLaughlin, D., D. Pepyne, V. Chandrasekar, B. Philips, J. Kurose, M. Zink, K. Droegemeier, S. Cruz-Pol, F. Junyent, J. Brotzge, D. Westbrook, N. Bharadwaj, Y. Wang, E. Lyons, K. Hondl, Y. Liu, E. Knapp, M. Xue, A. Hopf, K. Kloesel, A. Defonzo, P. Kollias, K. Brewster, R. Contreras, B. Dolan, T. Djaferis, E. Insanic, S. Frasier, and F. Carr, 2009: "Short-Wavelength Technology and the Potential For Distributed Networks of Small Radar Systems", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 1797-1817.
 9. National Research Council. "Summary." *Weather Radar Technology Beyond NEXRAD*. Washington, DC: The National Academies Press, 2002.
 10. National Research Council. "Summary." *Observing Weather and Climate from the Ground Up: A Nationwide Network of Networks*. Washington, DC: The National Academies Press, 2009.
 11. National Research Council. *When Weather Matters: Science and Service to Meet Critical Societal Needs*. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.
 12. Philips, B. J., V. Chandrasekar, F. H. Carr, J. Brotzge, P. Rees, C. E. League, and A. Bajaj, 2012: "Dallas Fort Worth Urban Demonstration Network." 2nd Conf. on Transition of Research to Operations, AMS 92nd Annual Meeting, 22-26 January 2012, New Orleans, LA, paper #TJ25.5.
 13. Wang, Y., V. Chandrasekar, 2010. Quantitative Precipitation Estimation in the CASA Xband Dual-Polarization Radar Network, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 1665-1676.