



강우실황예측과 수치예보합성기법을 이용한 단기강우예측



강 부 식 |
단국대학교 토목환경공학과 조교수
bskang@dankook.ac.kr

1. 서론

강우관측을 위한 레이더의 활용은 오래전부터 있어왔지만, 이를 이용한 정량적 강수추정 및 실황예보(Nowcasting)에의 활용은 기대만큼 현업에 적극적으로 활용되지 못하였다. 이는 물론 레이더 관측장비의 우적감지능력, 공간적 해상력 미흡, 관측주파수대역, 관측스캔주기 등 장비의 문제와 이를 활용할 수 있는 소프트웨어의 부재 등이 복합적으로 존재한다. 하지만 효과적인 홍수예경보를 위해서는 신뢰성있는 강우예측이 필수적이고 특히 초단시간의 강우예측은 고해상도의 레이더관측을 이용한 외삽예측이 필수적이라고 볼 때 레이더강수관측의 활용은 집중적인 연구가 필요한 분야이다. 본고에서는 실황 강우예보시스템의 도입을 위해 실황강우예보시스템의 배경과 수준에 대해 검토 및 활용사례를 찾아보고, 수치예보자료의 연계활용방안, 실황예보와 수치예보를 연계한 관측자료 동화기법 적용을 제시하고자 한다.

2. 실황강우예보시스템의 개요

수문학적 예측(Hydrologic forecasting) 모형에는 여러 종류가 있지만, 이는 주로 리드타임이라는 예측 시간에 따라 단기 및 중장기 예측으로 구분되어진다. 수문학적인 예측은 대표적으로 단기 예측, 중장기 예측, 통계적 예측, 역학적 예측 및 실황예측 등으로 분류될 수 있다. 단기 또는 초단기, 중장기 예측은 주로 강우예측에 활용되고, 통계적 예측은 유량에 대한 장기 예측에 활용되며, 역학적 예측은 강우에 대한 중 단기 예측에 활용된다.

최근의 일기예보는 컴퓨터의 수치모형결과인 수치예보(NWP: Numerical Weather Prediction), 일기도, 그리고 예보자의 경험적 지식을 토대로 이루어진다. 일기예보 중 Nowcasting 이라고도 불리는 실황예보는 단순히 정의하면 0-3시간사이의 기상예측을 일컫는다. 이 시간동안의 예측은 특히 돌발형 집중호우나 태풍 등의 강우사상이 발생하였을 경우 홍수방재를 위한 여유시간을 확보하여야 하므로 대단히 중요한 의미를 지닌다. 6-12시간의 종관관측(Synoptic-scale Observation)에 의존하는 수치예보시스템으로는 3시간 이내의 예측에서 수치예보모델의 고유 특성인 스핀업 등의 예측 불확실성이 내제되어 있어 단시간 집중호우를 예측하는 데는 한계가 있다. 실황예보는 이러한 수치예보모델의 한계를 극복하기 위한 보완책으로서의 의미도 지니고 있다.



실황예보는 예측시간이 짧기 때문에 예측 기법 면에서 타 예보와는 비교적 쉬운 단계라거나 결과의 신뢰성이 상대적으로 낮다고 생각하기 쉽지만, 실제로는 통계적 기법과 역학적 기법이 조합된 다양한 방법이 시도되고 있는 실정이다. 실황예보에 있어서 가장 중요한 논점은 강수 클러스터의 발달과 소멸을 얼마나 자연스럽게 연속적으로 모의하는 것인가에 있다. 이를 위해서는 외삽기법만으로는 한계가 있으며, 중규모 수치예보모형이 가지는 물리적 정보와의 강제적 결합을 활용하여 예보시간을 확장하는 방법이 실황예보의 주요 이슈가 되고 있다. 최근 대기모형자체의 발전과 컴퓨터 연산능력의 획기적 발달로 말미암아 수치예보의 신뢰도가 크게 향상하였지만 수치모형의 계산격자스케일이하(sub-grid scale)에서 독립적으로 발생·소멸하는 강우세포(storm cell)를 물리적 기반의 수치모형에서 정확히 예측하기에는 아직도 미흡한 수준이다. 따라서 많은 경우 기상예보관들은 일기도와 자신의 경험을 토대로 홍수예보가 이루어지고 있다. 초단시간 예보를 보다 과학적으로 수행하려는 시도들은 대개의 경우 레이더와 인공위성 그리고 지상 관측등의 고해상도의 강수관측정보를 이용하게 된다.

3. 국외 개발 및 운영사례

이상 기상현상으로 인한 피해에 대비를 위해 전 세계적으로 이들 기상현상에 대한 예측능력을 향상시키기 위해 지형특성을 좀 더 실제와 비슷하게 상세화하고 다양한 관측자료 동화기술을 잘 반영할 수 있는 수치예보시스템의 구축을 비롯한 실황예보에 관한 많은 연구와 활용성 검토가 활발히 진행 중이다. 국외의 대표적인 실황예보시스템 종류와 활용 예는 표 1과 같으며 그림 1은 S-PROG와 WDSS-II의 강수에 측장을 보여주고 있다.

ANC는 NCAR에 의해서 개발·운영되고 있다. ANC는 대류성 호우사상(Convective storm)의 실황예보를 위해 개발되었다. 호우의 발달과정에 대한 물리적 이해를 바탕으로 퍼지로지식을 응용한 전문가시스템(Expert system)의 형태로 개발되었다. Tracking Radar Echoes by Correlation(TREC)라 불리는 지역추적자(area tracker)를 사용하여 레이다 반사도를 외삽하게 된다. 반사도 패턴으로부터 에코모션을 획득하기에 자료가 부족할 경우에는 풍속장에 대한 사운딩 자료를 사용하기도 한다. 호우사상의 발생, 발달, 소멸과정은 레이다에 의해 관측된 경계층 수렴선(Boundary layer convergence line)을 갖는 층적운과 호우사상간의 상호작용, 수치모형에 의해 계산된 바람장등을 이용하여 모의된다. 바람장 계산은 VDRAS(Variational Doppler Radar Analysis)를 이용하여 수행된다. 매 10분마다 3 km 수평격자, 연직 400 m 간격의 격자체계에서 경계층 풍속을 계산한다. ANC는 매 5분마다 1 km 격자에 대한 30분, 60분 선행시간을 갖는 반사도와 강우실황예측 정보를 생산해 낸다.

Gandolf는 대규모 다세포(multicellular) 대류성 호우사상의 실황예측을 위하여 개발되었다. Gandolf는 대류현상의 분석을 위한 3D 반사도를 해석하는 객체지향적 전문가시스템이다. 호우이동궤적은 기상자료동화 모형인 LAPS로부터 제공받는 스티어링 수준에서의 풍속을 이용하여 계산된다. 호우발생은 NWP의 경계층대류조건을 이용하여 개념적 모형으로부터 추정되어진다. Gandolf는 2 km 격자에 대하여 매 10분마다 0-2시간의 선행시간을 갖는 실황예보를 생산한다.

Nimrod는 전선형 강우에 대한 실황예측을 위하여 개발되었다. 연결된 수치예보모형의 모의능력에 따라서는 대류성 호우사상에 대한 실황예측도 가능하다. 하지만 여타의 실황예측모형과 마찬가지로 대류성 호

표 1. 국외 실황예보시스템 개발 현황

시스템	외삽기법	생성 모의능력	발달/소멸 모의능력	개 요	개발자	운영기관
ANC (Auto NowCaster)	Area/Cell/ winds	Yes	Yes	Expert system with fuzzy logic	Mueller et al., 2003	NCAR
Gandolf (General Advanced Nowcasts for Development in Operational Land-surface Flood Forecasts)	Winds	Yes	Yes	Expert system with conceptual model based on NWP	Pierce et al., 2000	Met Office
Nimrod (Nowcasting Initialisation for Modeling using Regional Observation Data System)	Area/ winds	No	Yes	Area tracker with NWP	Golding, 1998	Met Office
S-PROG (Spectral Prognosis)	Area	No	No	Area tracker with scale evolution	Seed, 2003	BMRC (Bureau of Meteorology Research Center)
TITAN (Thunderstorm Identificazion, Tracking, Analysis and Nowcasting system)	Cell	No	No	Cell tracker	Dixon and Wiener, 1993	BMRC
WDSS-II (Warning Decision Support System)	Area	Yes	Yes	K-means clustering	Lakshmanan et al., 2003	NSSL CIMMS

우사상에 대한 예측선행시간은 매우 제한적일 수밖에 없다. Nimrod의 외삽은 기왕의 예코모션과 NWP의 바람장의 조합을 통해 계산된다. NWP의 spin-up 영향을 최소화하기 위하여 초기 1시간 동안은 NWP자료는 제한적으로 사용된다. 대신에 이 시간대에서의 NWP는 호주 기상청에서 운영하는 LAPS(Local Area Prediction System) 자료동화모델 자료가 이용된다. Nimrod는 매 30분 5 km 격자에 대하여 0-6시간의 선행시간을 갖는 실황예보장을 생산한다.

S-PROG시스템은 대표적인 지역추적자(Area Tracker) 모형이다. S-PROG에서는 어떠한 기상특성의 생존시간은 특성의 스케일과 관련된다는 가정을 사용한다. 각 스케일의 발달은 lag-2의 단순 자기회귀식을 이용한다. 실황예보의 불확실성이 높아지면

예측장은 평활화된다. S-PROG는 매 5분마다 1 km의 격자에 대하여 0-1시간의 선행시간을 갖는 실황예보장을 생산한다.

TITAN시스템은 대류성 호우의 실황예측을 위해 개발되었다. 기왕의 추세를 이용하여 특정셀에서의 예코의 발달·소멸을 계산하는 셀추적자(Cell tracker) 모형이다. BMRC(Bureau of Meteorology Research Center)에 의하여 운영되고 있으며, 이 모형에서는 주어진 기준반사도에 대한 경계만을 계산하고 있다. TITAN은 매 10분마다 10-60분 선행시간을 갖는 실황예보장을 생산하고 있다.

WDSS-II는 미국 NWS의 NSSL(National Severe Storm Lab; 국립약기상연구소)에서 개발된 차세대 Nowcasting기법이다. WDSS-II에서는 K-

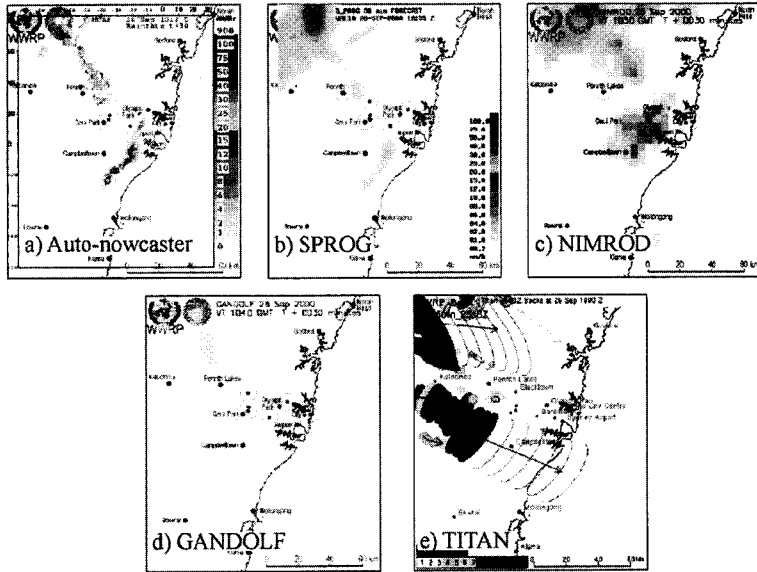


그림 1. 각 실황예보시스템에서 추정된 30분 실황예측 예 (Wilson et al., 2004)

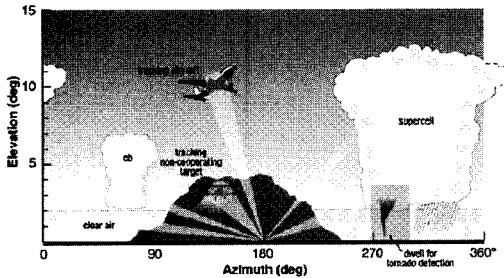


그림 2. 신속한 스캐닝능력을 갖추고 있는 위상배열레이다(Phased array radar)는 일기, 풍속단면, 비행물체추적등 다양한 분야에 활용되고 있다.

means clustering이라는 영상처리기법(Image processing)을 이용하여 예측을 수행하고 있다. 여기서는 계층화된 스케일분석을 통하여 강우클러스터를 정의하고 있으며, 강우 클러스터는 배경속도장에 따라 독립적으로 이동한다고 가정하고 있다. 따라서 평균운동장은 수치모델동화자료나 도플러 속도장을 통하여 추정한다.

미국의 NSSL은 NWS산하기관중 미국내에서 악기상과 관련된 연구가 가장 많이 수행되는 곳이며, WDSS-II를 포함하여 실황예측기술도 활발히 개발중에 있다. 레이더 기술에 있어서도 기존 NEXRAD에서 사용하는 도플러방식의 WSR88-D로부터 진일보하여 스캐닝속도를 획기적으로 개선한 위상배열레이다(Phased Array Radar)를 기상관측에 활용하기 위한 연구를 수행중에 있다. 신속한 스캐닝능력을 갖추고 있는 위상배열레이다(Phased array radar)는 일기, 풍속단면, 비행물체추적등 다양한 분야에 활용되고 있다.

4. 국내 연구사례

국내에서도 근래 들어 이상기후로 소위 계절라식 집중호우 또는 태풍으로 인한 돌발홍수가 국지적으로 발생하고 있어, 기존의 지점관측방식의 우량관측망

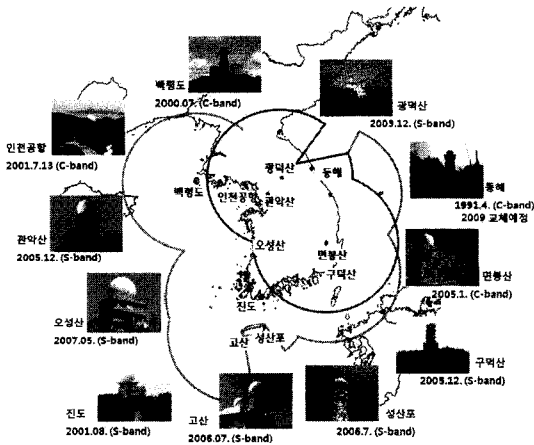


그림 3. 한반도 강우레이더 현황(2004년기준)

으로는 홍수예측이 어려워지고 있다. 또한 중소규모 하천 및 산악지역의 집중호우로 인명과 재산피해가

해마다 증가되고 있어 국가방재의 중요한 문제로 대두되고 있으며, 기존의 우량계가 점관측 자료를 제공하는 것과는 달리 유역별 면적강우자료가 홍수예보에 필수적인 요소라 할 수 있다. 따라서 기존의 강우관측소가 제공하지 못하는 강우의 공간분포와 이동 및 발달상황 등을 우수한 해상도를 가진 강우레이더를 제공 받음으로서 집중호우에 의한 피해를 사전에 대비하고 경감할 수 있다. 아래의 그림 3과 표 2는 2009년도 현재 한반도 기상청 강우레이더 분포와 사양을 나타내고 있다.

「레이더 및 강우수치예보자료를 이용한 초단기 강우-유출예측시스템 개발(박진혁, 강부식, 2007)」에서 레이더 실황예보와 강우수치예보의 합성예측자료를 이용한 초단시간의 강우-유출예측시스템을 이용하여 남강댐에서의 유입량예측을 수행한 바 있다.

표 2 기상청 기상레이더의 기계적 사양

Radar site Name	Kwanaksan	Cheju	Pusan	Donghae	Kunsan	Chungju (METRI)	Baekyungdo	Inchon Airport	Jindo
Observ. Start Time	1970. 2	1991. 1	1991. 1	1991. 4	1992. 3	1997. 12	2000. 7	2001. 3	2001. 8
Observ. Range (km)	120, 240, 480	120, 240, 480	120, 240, 480	120, 240, 480	120, 240,480	60, 120, 240	120, 240, 480	120, 240, 480	120, 240, 480
Type	C-band	C-band	C-band	C-band	C-band	X-band	C-band	C-band	S-band
Transmitter Tube	Magnetron	Magnetron	Magnetron	Magnetron	Magnetron	Magnetron	Klystron	Klystron	Klystron
Altitude (m)	637	81	532	53	227	3	185	145	494
Peak Power (kw)	250	250	250	250	250	200	250	250	750
Frequency (MHz)	5340	5340	5340	5340	5340	9360	5637	5637	2690
PRF (Hz)	250, 1180	250, 1180	250, 1180	250, 1180	250, 1180	550 ~ 2000	250 ~ 2000	250 ~ 1120	250 ~ 1200
Beam Width (°)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.9	0.7	1.0
Pulse Width (μs)	0.8, 2.0	0.8, 2.0	0.8, 2.0	0.8, 2.0	0.8, 2.0	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 18	1 ~ 2	0.8 ~ 2.5



「레이더 강우 자료와 분포형 모형을 이용한 홍수 유출량 산정(김병식 등, 2007)」에서 강우 레이더에 의하여 관측된 강우자료의 수문학적 활용성을 평가하기 위하여 안성천유역을 대상으로 지상강우와 레이더 강우량을 적용하여 홍수 유출량을 산정하였으며, 「고해상도 레이더 분석 강우강도 실시간 산출 및 검증(석미경 등, 2005)」, 「HyGIS와 연계한 수문통합 모형의 개발 및 적용(2005년도 한국수자원학회 학술발표, 한건연 등)」등에서 강우레이더를 활용한 사례가 있다. 이와 같이 우리나라에서는 레이더에 의한 강우 관측연구가 시작되는 단계라고 볼 수 있으며, 실황예측기법의 개발 연구가 필요한 시점이다.

레이더 강우관측소를 선정한다. 유출분석에 필요한 격자기반의 유역을 구성하기 위하여 ArcView와 같은 GIS tool을 이용하여 지형분석 및 지형특성 매개변수 추출을 수행한다. 레이더 자료와 지상 강우관측자료와의 보정을 통하여 강우자료를 생성하며, 유출분석 프로그램을 검증하기 위하여 복수의 사상을 선택하여 적용할 수도 있다. 유출분석 프로그램과 연계되는 단기 또는 초단기 예측강우를 생성하기 위하여 K-means 등 실황예측 알고리즘을 이용한 JQPF(Java Quantitative Precipitation Forecast) 등의 외삽기법을 적용한다. 가능한 실황 강우예보시스템의 구성안을 그림 4에 제시하였다.

5. 실황강우예측시스템 구성

실황강우예보시스템의 구성을 위해서는 우선 대상 유역 및 호우사상을 선정하고, 레이더강우 자료의 활용을 위해 대상유역을 포함하는 레이더 범위를 가진

6. 레이더 및 수치예보모델과 연계된 형태의 초단기 강우예측시스템 활용방안

일반적으로 레이더 기반의 강우실황예측은 1시간 이내의 초단시간 예측에 효과적으로 알려져 있다. 그

러나 현업에서의 홍수에 경보를 위한 홍수량예측에 있어서는 적어도 3시간 이상의 예보선행시간의 확보를 필요로 하므로 실황예측만으로는 충분한 예보선행시간을 확보하기가 용이하지 않다. 따라서 강우수치예보와의 합성을 통하여 예보선행시간의 확장할 수 있다. 일반적으로 강우수치 모형은 초기시간에서의 스피엄으로 인하여 수치해가 불안정성을 보이는

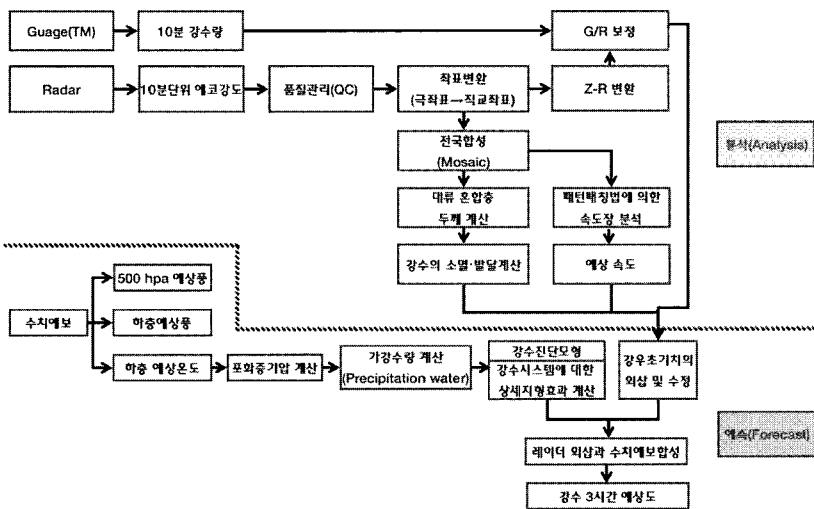


그림 4. 실황강우예보시스템 구성안

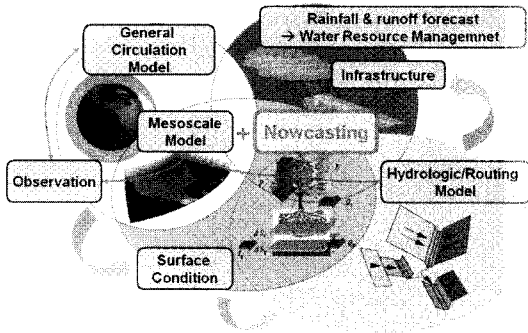


그림 5. 레이더기반의 Nowcasting과 중규모 강우수치모형과의 연계구성

경향이 있는데 이를 실황예측에 의한 외삽예측으로 대체해 주어 전체적인 예측의 신뢰성을 높일 수 있다는 점에서 바람직한 조합으로 인정되고 있다. 다음 그림 5는 레이더기반의 실황예측과 강우수치모형과의 연계구성을 모식적으로 표현하고 있다. 실황예측과 강우수치모형의 합성은 선형적 합성과 비선형적 합성으로 구분될 수 있다. 그림 6은 선형적 합성의 예를 설명하고 있다.

한편 실황예측과 강우수치모형의 합성을 현업에서 효과적으로 홍수예측에 활용하는 데는 현실적인 장애요소가 있다. 첫째는 기상청의 현업수치예보와 레이더의 공간해상도와 자료주기의 차이가 매우 커서 이를 단순한 자료간 합성으로는 매끄러운 합성이 이루어지기 곤란할 것으로 보인다. 기상청 RDAPS의 경우 48시간까지의 3시간 누적강수가 제공된다. 공간해상도는 5 km 또는 30 km 이다. 반면 레이더는 매 10분마다 들어오며, 공간해상도는 2 km 이다. 둘째는 RDAPS는 강우발생시각에 상관없이 기상청으로부터 정해진 시각(00UTC, 12UTC)에 계산되어 사용기관에 공급된다. 이마저도 계산된 수치예보자료가 사용자에게 전달되기까지는 4-5시간의 지체시간이 소요되고 있다. 이는 사용자로서는 이용상의 결정적인 제약이 될 수 있는 부분이다. 다목적댐 관리기관

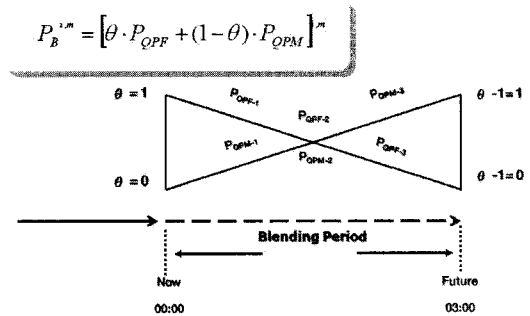


그림 6. Nowcasting과 강우수치예보의 선형적 합성

에서는 적어도 수문방류 3시간 전에 방류시각과 방류량에 관한 의사결정이 이루어져 방류승인요청이 이루어져야 한다. 이러한 부분은 실무적인 부분으로서 제도와 시스템의 개선이 요구되는 부분이다. 또는 수자원관리기관에서 직접 운영할 수 있는 강우수치예보시스템의 구축이 필요한 이유라고도 할 수 있다. 최근 한국수자원공사에서는 자체적인 정량적 강우예측시스템의 구축을 위한 장기계획을 수립하고 있으며, 이를 위하여 슈퍼컴퓨터의 구매계획을 확정하였다.

7. 맺음말

홍수예측을 위한 강우실황예측(Nowcasting)과 수치예보합성에 관하여 간단히 살펴보았다. 강우실황예측은 목적에 따라 여러 가지기법이 가능하지만 가장 중요한 것은 예측에 사용되는 레이더자료의 신뢰성이라 할 수 있다. 우리나라 기상청에서 운영하고 있는 레이더는 현재 과거 C-band가 주를 이루었으나 점차로 강수관측에 효과적인 S-band로 교체가 이루어지고 있다. 또한 우리나라는 산지가 많은 관계로 지형에코와 차폐가 심하여 레이더 자료의 품질관리가 대단히 어려운 여건을 갖추고 있다. 국토해양부



의 수문레이더사업이 완성된다면 현재보다 고해상도를 갖는 양질의 레이더 원시자료의 획득이 가능해 질 것으로 기대하며, 현재부터라도 실황예측시스템기술을 확보하려는 노력이 병행되어야 할 것이다. ☞

참고문헌

- 김병식, 홍준범, 김원, 윤석영 2007: 레이더 강우 자료와 분포형 모형을 이용한 홍수 유출량 산정, 2007년 한국수자원학회 학술발표회
- 박진혁, 강부식, 2007: 레이더 및 강우수치예보자료를 이용한 초단기 강우-유출예측시스템 개발, 2007년 한국수자원학회 학술발표회, 강원도 평창 휘닉스파크
- 석미경, 남경엽, 남재철, 2005: 고해상도 레이더 분석 강우강도 실시간 산출 및 검증, 한국기상학회 학술대회 논문집
- Dixon, M., and G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting--A radar-based methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, 785-797.
- Golding, B. W., 1998: Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. *Meteor. Appl.*, 5, 1-16.
- Mueller, C. K., T. Saxon, R. D. Roberts, J. W. Wilson, T. Betancourt, S. Dettling, N. Oien, and J. Yee, 2003: NCAR Auto-Nowcast system. *Wea. Forecasting*, 18, 545-561.
- Pierce, C. E., P. J. Hardaker, C. G. Collier, and C. M. Hagget, 2000: GANDOLF: A system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Meteor. Appl.*, 7, 341-360.
- Seed, A. W., 2003: A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. *J. Appl. Meteor.*, 42, 381-388.
- Wilson, J.W, E.E. Ebert, T.R. Saxon, R.D. Roberts, C.K. Mueller, M. Sleight, C.E. Pierce and A. Seed, 2004: Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: Convective Storm Nowcasting, *Weather and Forecasting*, 19, 131-150.