

유역통합 물관리를 위한 기상정보의 활용과 수문기상 연구동향



고 익 환 >>

한국수자원공사 수자원환경연구소 소장
ihko@kwater.or.kr



정 창 삼 >>

인덕대학 토목과 전임강사
csjeong@mail.induk.ac.kr



김 태 국 >>

한국수자원공사 물관리센터 선임위원
tkim@kwater.or.kr

데, 향후 기후변화가 가속화되어 극한 기상현상이 보다 빈번히 발생한다면 수자원 관리의 측면에서는 점점 더 불리하고 어려운 상황에 처하게 될 것이다.

수문기상 분야의 국제 연구동향을 살펴볼 때 선진국에서는 기상수치예보를 활용한 정량적 강우예측기법과 통계적 분석기법에 근거한 확률기상예보 등의 복잡한 과정을 통한 최적의 기상예측정보를 활용하여 미래에 발생할 유출량 및 댐유입량 예측을 단기, 중기, 장기의 다양한 기간에 걸쳐 수행하고 있다. 국내에서는 최근까지 기상 및 수자원 전문가들이 각각 독립적 실무 및 연구 분야에 종사하고 있는 상황으로 실제적인 교류가 부족하여 이들의 연계기술 개발도 거의 전무한 실정이었다. 2001년 말부터 시작된 수자원의 지속적 확보를 위한 국가 프론티어 연구개발 사업 중 유역통합물관리기술개발분야에서 본격적으로 강우, 수량, 수질, 저수지운영 등 물관리를 구성하는 각각의 요소들을 통합적으로 고려하는 유역물관리운영시스템이 개발되기 시작하였다(한국수자원공사, 2004, 2007).

여기서 개발된 한국형 유역물관리 운영시스템인 IRWMS(Integrated Real-time Basin Water Management System)는 미국, 유럽, 일본 등의 선진국 물관리기관들의 시스템에 대한 장단점들을 조사하고 검토하여 국내 물관리 실정에 맞게 개발되었다. 특히 모형전체의 시발점이 되는 강우유출예측모델(RRFS)의 신뢰도 향상을 위하여 기상예보의 단순정보 활용개념에서 보다 적극적인 유역 강우예측개념(Hydrological Forecast)으로 확장하여 기존 연구와는 차별화 되는 종합적인 시스템으로 개발하였으며, 현재 실제 물관리 현업에의 활용도를 극대화 할 수 있도록 시험운영 및 안정화에 박차를 가하고 있다.

1. 서론

지구온난화에 따른 전 지구적 기후변화, 그에 따른 이상기상의 빈번한 발생으로 지구촌 곳곳이 몸살을 앓고 있다. 세계적으로 과거와는 사뭇 다른 형태의 극한 홍수와 가뭄이 교차적으로 반복되어 나타나고 있으며, 우리나라만 보더라도 최근 몇 년 사이에 50년, 100년, 500년 빈도의 홍수사상이 수시로 발생하며 홍수발생 빈도의 개념을 무색케 하고 있다. 연간 강수량의 3분의 2 이상이 여름철에 집중되는 몬순기후의 특징을 보이는 한반도의 기후특성상 여름철 물관리의 결과가 1년 물 농사의 성패를 좌우하게 되는

본 고에서는 IRWMS의 초기개발과 관련하여 수문 분야에서 다소 생소하였던 기상예측분야, 즉 유역단위 통합수자원관리의 핵심이 되는 정량적 강우예측(Quantitative Precipitation Forecast, QPF)기술의 활용성과 한계점을 살펴보고, 수문학과 기상학이 중첩되는 미래 수문기상분야 연구의 발전방향에 대하여 국내외 연구사례와 함께 제안하고자 한다.

2. 정량적 강우예측의 현황, 한계 및 활용

정량적 강우예측은 기상예측분야에서 가장 어려운 분야 중의 하나이다. 특히 여름철 국지성 호우 등의 초단기 예측이나 증장기 계절예측 등은 현재의 기상예측기술 수준에서 그 신뢰도가 아직도 많이 낮은 것이 사실이다. 여기서는 강우예측을 예측시간 범위에 따라 단기(48시간 이내)와 초단기(1~6시간)로 나누어 언급하도록 한다.

2.1 초단기 예측

1~6시간 이내의 초단기 수치예측분야는 아직까지는 신뢰도가 낮은 상태이며, 이 때문에 초단기 예측은 관측에 근거한 것이 주류를 이룬다. 그러나 관측에 근거하더라도 단순 관측만으로는 미래의 강우를 예측할 수 없으며, 체계적인 자료동화기법 등을 통하여 보다 현실적인 관측 자료의 활용이 가능할 것이다. 기상청에서는 이 분야에 대해 VSRF(Very Short-Range Forecast)와 실황예보시스템(Nowcasting)의 형태로 두 가지 예측시스템을 현재 운영 중이거나 또는 차후 구축 운영될 예정이다.

2.1.1 VSRF (Very Short-Range Forecast)

현재 기상청에서는 초단기 강우예측을 위하여 일본 기상청의 현업모형인 VSRF 모형을 활용하여 6시간 강수를 예측하고 있다. VSRF는 지속성 강수 개념을 기초로 강수 이동 패턴이 6시간 동안 지속된다는

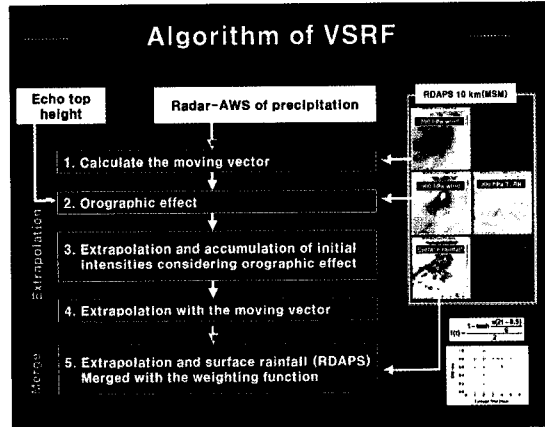


그림 1. VSRF 단기강우예측의 기본 알고리즘

가정 하에 현재의 강수량 패턴을 이동시키고 지형효과 등의 보정을 하여 강수량을 예측한다(그림 1). 입력 자료는 실시간 레이더 강우자료 및 지상관측 강우자료와 지역수치예보자료 등이 활용되며, 현재시간에 가까울수록 관측강우의 가중치가 높고 미래시간으로 갈수록 모델 예측 강우의 가중치를 높여가는 방식이다. 이 방법은 예측의 편리성이 돋보이기는 하나 예측에 사용된 가정의 물리적 한계 때문에 그 정확도에 대한 신뢰도는 아직 낮은 것으로 보인다. 현재 국내에서 호우예측에 대한 신뢰도 확보가 되어있지 않은 상태이며, 향후 특정 유역의 강우관측소(건교부 및 기상청) 관측 자료와 VSRF 예측 자료를 비교 검증하여 유역 강수량 예측에 활용 가능한 정확도를 갖는지 검토가 된 후에 활용 여부를 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

2.1.2 실황예보시스템(Nowcasting)

실황예보시스템은 관측에 근거한 예보로써 현재로서는 초단기 예측분야에서 가장 신뢰할만한 방법이다. 실황예보시스템의 구성으로는 우선 고해상도의 강우관측시스템(기상레이더, 기상위성, 자동기상관측소, 윈드프로파일러, 레디오존데 등)을 구축하고, 이를 정확하게 해석할 수 있는 자료동화체계를 갖추어 자료를 해석한 후, 전문 예보관에 의한 분석 및 예측(extrapolation)을 통하여 사용자에게 통보 또는 시

시스템 연계되는 체계이다(그림 2). 기상청에서는 현재 실황예보의 구성 요소의 일부는 상당한 능력을 갖추었으나(관측과 자료동화) 체계적 실황예보 시스템은 아직 구축되어 있지 않고, 특히 한반도 호우 시스템에 대한 이해는 아직도 다소 미흡한 수준이다. 이 체계가 확보되기까지는 향후 2~3년 이상 시간이 소요될 것으로 판단되며, 실제로 실황예보에 근거한 정량 강수 예측이 이루어질 경우에는 1~3시간 이내의 초단기 유역 강수량 예측에 매우 유용한 자료가 될 것으로 기대된다.

2.2 단기예측

48시간 이내의 단기강우예측은 주로 수치예보모델에 의해 계산되어지는 정량적 예측 강우로 이는 대기의 움직임을 만족하는 물리 법칙에 따르는 기본적인 지배방정식계(수치모델)를 구성하고, 관측 값과 초기 값들을 모델에 입력한 후 이 방정식들을 슈퍼컴

퓨터 등을 통해 적분(계산)하여 미래의 기압, 기온, 강수량 등의 예측 값을 계산하는 체계이다. 수치예보 모델을 활용하는 단기예측에서는 초기에 모델에 입력되는 초기장의 오차가 예측 오차를 발생시키는 가장 중요한 부분으로 지적되고 있으며, 특히 구름규모(수 km ~ 수 십 km) 정도의 현상이 발생하는 지역에서의 초기장의 오차가 클 수 있다. 또한 모델 내에서 강수를 유발하고 계산하는 물리과정 처리의 불완전성 특히 아격자 물리과정(적운대류, 미세물리과정 등)의 처리는 실제 대기상태와 잘 부합되지 않은 부분들이 많아 예측 오차의 상당 부분이 이 문제점에 기인하고 있는 현실이다.

그러나 수치예보모델의 예측 강우량은 광역에 대한 강수 가능성의 예측으로서는 상당한 신뢰도를 보일 수 있다. 이는 중부지방 정도의 공간규모에서 집중호우의 발생 가능성은 그 신뢰도가 어느 정도 확보된다는 것이다. 단 집중호우가 발생할 지점의 예측과 강수량 분포 예측은 아직 낮은 신뢰도를 보이나, 강

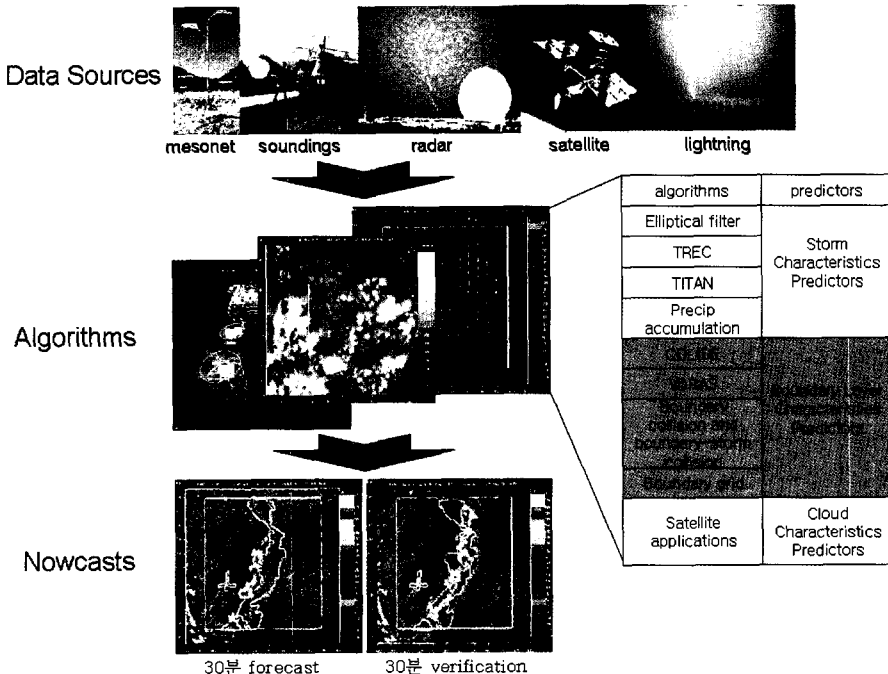


그림 2. 실황예보시스템의 구성

수가 예측된 광역 지역과 어떤 유역의 범위가 일치할 때는 12~48시간 유역 강수량 예측에 유용한 정보가 될 것으로 판단된다.

2.3 디지털예보의 활용

디지털예보는 지역수치예보모델에 기반을 둔 것으로 초기수치예보자료를 예보전문가가 웹기반의 그래픽편집모듈을 이용하여 격자점자료를 수정하고 각 격자점마다의 예보를 확정하게 된다. 현재 디지털예보는 남한 전체에 대하여 5 km 격자마다 자료가 제공되고 있다. 그러나 수치모델 기반에 따른 강수량 예측

의 신뢰도가 확보되어야만 실제 유역 강수량 예측에 활용이 가능할 것이다. 장기적으로는 수치모델에 의한 단기수치예측의 정확도가 상당한 개선 가능성이 있으므로 디지털예보자료가 향후에는 유역 강수량 예측에 상당히 유용한 정보가 될 가능성이 있다고 판단된다(그림 3, 표 1).

2.4 강수진단모델(QPM)의 활용

수치예보모델에서 격자 크기가 산 폭(mountain width)의 최대 1/4 이하이어야 그 산의 효과를 적절히 재현해낼 수 있다. 그러나 현재 수치예보모델의 격자가 10km 정도 이므로 상당부분에서 지형의 효과가 제대로 모의되지 못하고 있다. 바람, 안정도, 습도 등의 수치 예보자료와 상세 지형 자료를 이용하여 지형 효과를 고려하면서 강수 발생 지역과 강수량 예측에 대한 보완을 해 줄 필요가 있다. 이를 위해, 수치예보모델의 결과를 이용하여 상세 지역의 지형 효과에 의한 강수량을 산출하는 강수진단모델이 QPM(Quantitative Precipitation Model)이다.

QPM은 일반적으로 수치예보모델로부터 계산된 수평 바람, 고도, 기온, 강우 강도, 그리고 상대습도 등의 예측 자료를 이용하고, 수치예보모델에서는 격자크기 때문에 잘 표현되지 않는 소규모 지형 효과를

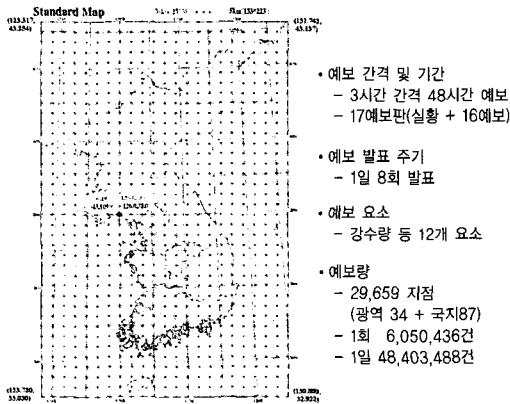


그림 3. 디지털예보의 영역 및 예보내용

표 1. 디지털예보와 기존예보와의 비교

내 용	기존(단기, 3시간)	디지털예보
요소 다양화	기상개황, 기온, 하늘상태, 강수확률, 풍향/풍속 등	기존요소+상대습도, 12시간누적강수, 신적설 등 12개 요소(특이기상은 다음 추가)
공간 상세화	광역(34)/국지(87) 기상관서 중심 (42지점)	29,659 지점(약 245배)
정 량 화	일 단위(오늘, 내일, 오늘-내일)	정량예보(12h강수/신적설)
예보 형식	문자/그래픽(시계열)	그래픽, 시계열, 테이블, 문자, 음성, 격자점 자료
예보 전달	일방적 전달(FAX, HP)	양방향 대화형(Web)
활 용 성	날씨 정보 단순 사용	응용 및 가공 활용 가능
예보 생산	1일 4/8회 예보관 입력	1일 8회 그래픽, 시계열 및 문자 수정
보조 자료	수치예보(일 2회)	수치예보(일 4회), MOS 등

고려함으로써 중규모 예측 모형에서 생산된 상대적으로 성긴 격자의 강수량 예측 값을 상세 지역의 지형을 고려한 강수량 예측 값으로 재구성하게 된다. 현재 기상청에서 현업운영 중인 RDAPS의 경우 최소 격자 간격이 10~30 km 정도로 모든 물리적, 역학적 과정을 포함한 모형으로써 모형 구축에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 계산 효율성이 저하될 수도 있다.

반면 QPM은 RDAPS에서 계산된 자료를 초기 자료로 이용하고 1~3 km 간격의 고해상도 상세 지형을 반영하는 모형으로 유역내의 산이나 계곡 등에 의한 소규모 지형 효과를 표현함으로써 유역내의 면적 강수량 산출과 지형에 따른 강수량의 분포 파악이 용이할 뿐만 아니라 계산 효율성을 개선시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 입력 자료를 제공하는 수치모델의 정확도 향상에 따라 QPM의 정확도 역시 동반 상승하기 때문에 추후 물관리 분야에 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다.

3. 미국의 하천예보센터(RFC)의 수문기상예보

전 세계적으로 기상예보 분야의 연구개발이 가장 활발한 미국의 경우 기상-수자원 관리 연계기법을 통한 예측 산출물들을 인터넷을 통해 쉽게 접근할 수 있다. 일례로 정량적 강수량예보(Quantified Precipitation Forecast, QPF)를 통한 중·단기 하천유출량 예측, 앙상블 예보기법(ESP)과 확률적 기상 예측자료를 연계한 중·장기 하천유출량 및 댐유입량 예측이 그것이다. 이러한 대부분의 기상예측과 정보제공은 주로 NOAA NWS에서 운영하는 하천예보센터(River Forecast Center, RFC)가 그 역할을 맡고 있다. RFC에서는 하천의 상태를 예보하여 홍수에 의한 인명과 재산 피해를 줄이는데 노력하고 있으며, 더 나아가 효율적인 유역 수자원 관리를 위한 예보를 제공하고 있다.

RFC의 단기(0~7일) 하천예보는 WFO(Weather

Forecast Office) 홍수정보 산출과 고객 및 협동기관의 의사결정 과정에서 매우 중요한 입력자료로 제공된다. 단기 운영에 사용되는 예보시스템은 편리한 예보 수문곡선 출력물과 예보의 정확도를 표시한 확률정보를 생산한다. RFC 예보자들은 분석대상지역의 수문기상학적 상황을 운영 중인 예보시스템의 결과물과 함께 지속적으로 분석한다. 이들 분석을 기초로 하천홍수의 위험영역을 정의하는 5일 예보 전망을 작성한다.

4. IRWMS의 기상정보 활용시스템

수자원연구원이 국내·외 산학연 공동연구로 수행한 21세기 프론티어 연구개발사업 2단계 과업(2007)을 통하여 수량과 수질을 고려한 IWRM 구현을 목표로 구축 중인 “실시간 유역 물관리 운영 시스템(IRWMS)”에서 앞 절에서 언급한 강수진단모형(QPM)을 기상예측 모듈의 주요 요소 기술로 이용할 수 있도록 자료취득 및 이용체계를 확립하였다(그림 4).

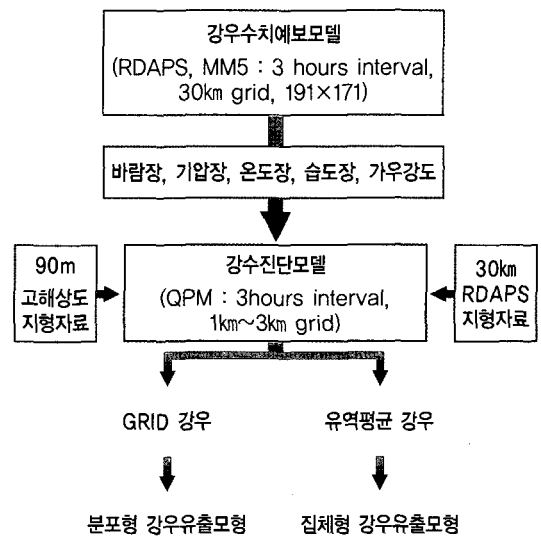


그림 4. 강우수치예보모형-강수진단모형-수문/유출모형연계도

그림 5는 IRWMS의 개념도를 나타낸 것으로 우측 상단에 보이는 PRECIP MODEL이 QPM에 해당하는 모듈로서 QPM의 예측 강우가 유역유출 모듈인 RRFS 시스템의 입력 자료로 사용될 수 있도록 인터페이스를 구성하였다. 또한 IRWMS와 기상정보 간 실시간 D/B 연동 위해 서버를 구축 운영하였다. IRWMS에서 PRECIP MODEL은 장단기 강우시나리오를 유출모듈인 RRFS에 제공해 주고 유출모듈인 RRFS에서는 이를 바탕으로 시공간적인 유출정보를 저수지운영 모듈에 제공, 이를 수질 환경 모듈과 저수지군 운영 의사결정정보를 상호 교환하는 통합적인 시스템으로 구성된다.

5. 유역통합물관리를 위한 수문기상분야 연구 방향

5.1 유역 강수량 관측 능력 확보

현재 운영되고 있는 레이더 관측망이 각 유역을 충분히 감시할 수 있는지에 대한 검토가 필요하며, 그 결과에 따라 레이더 관측 자료로부터 유역 강수량 추출이 가능할 것이다. 유역 내에 레이더 관측망이 불충분한 경우 해당 유역에 별도의 강우 레이더 설치를 고려해야 할 것으로 판단되나, 현재 건교부에서 2010년까지 주요유역에 레이더 관측망 설치사업을 시행 중이어서 머지않아 레이더 관측 자료를 활용한 유역 강우추정 및 강우예측분야에 활용도가 많이 높아지리라 사료된다.

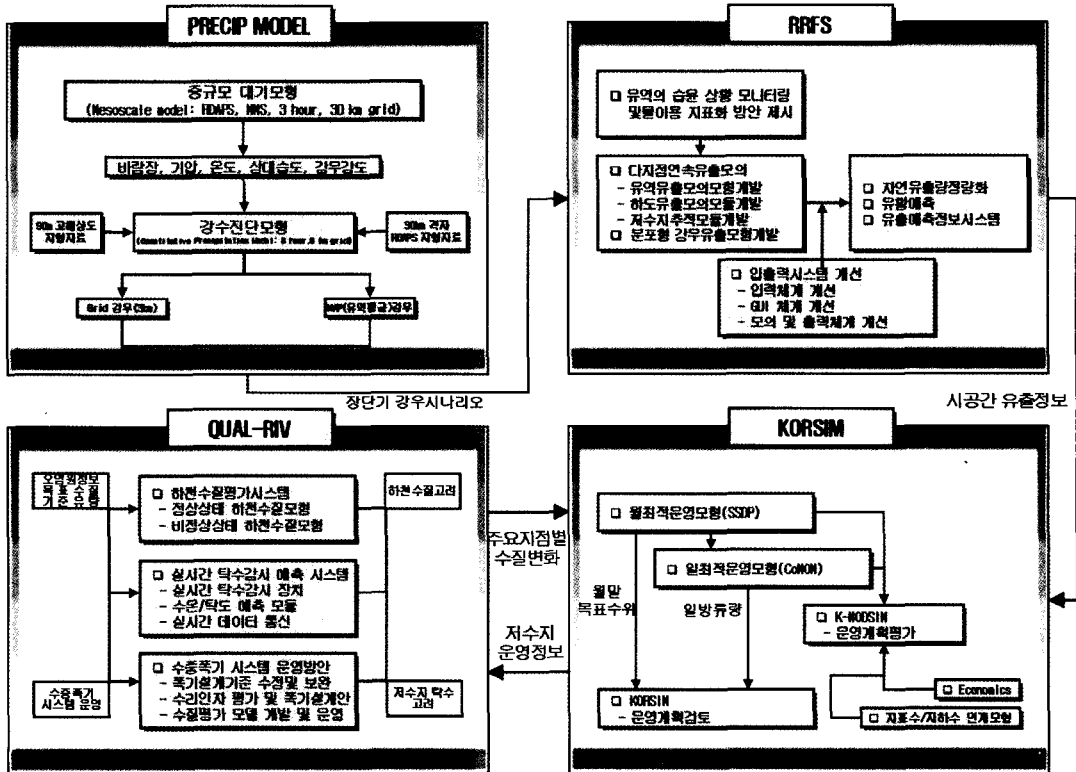


그림 5. IRWMS의 주요 모듈 (좌측 상단부터 시계방향으로 기상, 유출, 저수지, 수질 모듈)

그리고 건교부(한국수자원공사 포함) 산하 강수량 관측소와 기상청 관측소(유인 및 AWS 관측소) 자료를 결합한 유역별 관측 자료 시스템을 구축하고, 이 관측망에 대한 신뢰도 검증 및 확보가 요구될 것이다. 이 부분 또한 최근 기상청 관측 표준화 사업 시행으로 향후 강우 관측자료 공유 및 공동 활용이 가능할 것이며, 이 자료를 토대로 유역별 정량 강수 예보의 평가와 문제점 파악하여 지형 효과 보완은 물론 독자적 실황 예보 능력 확보에도 상당한 도움이 될 것으로 판단된다.

5.2 지형효과를 고려한 유역실황예보체계 구축

기상청 실황예보 체계가 가동되기 시작하면 기상청은 유역별이 아닌 일반 지역에 대한 예측을 제공하기 때문에 유역별 정량 강수 예측을 위해서는 기상청 실황예보를 활용하여 해당 물관리 전문기관에서 자체 유역강우 실황예보를 할 수 있는 체계 구축이 필요하게 된다. 특히 홍수조절 등 치수측면에서 높은 신뢰성이 확보될 것으로 전망되며, 그 활용도도 매우 높을 것으로 판단된다. 중장기적으로 기상청의 디지털 예보 자료의 신뢰도가 상당히 발전할 것으로 기대되며, 단기와 초단기 유역 강수량 예측에 쉽고 매우 유용하게 활용될 것으로 전망된다. 다만, 강수량 예보와 산악 지역에서의 기상예측은 일반 평지에 비해 상대적으로 정확도가 낮을 가능성이 있다. 결국 대부분의 유역이 산악을 포함하고 있으므로 디지털 예보자료에 대한 유역별 검증을 통해 문제점을 파악하고 보완을 한다면 물관리에 대단히 중요한 자료가 될 것으로 예상된다. 특히 상세 지형의 효과가 수치 모델 자료에 미흡할 수 있기 때문에 지형 효과를 유역별로 평가하고 보완하는 기술도(예를 들면, 강수진단모델 활용)를 함께 개발해야 할 것으로 판단된다.

5.3 중기예측자료의 활용

현재의 기상기술개발은 단기를 넘어서 중기(3~7

일)에 대한 예측 능력 확보 단계로 진입하고 있다. 다만 강수 예측의 정확도는 여전히 개선이 쉽지 않은 부분이나 현재의 발전으로 보아 이 부분에서도 개선이 가능할 수 있다. 이에 대해 기상기술발전의 추이를 살피면서 물관리에 필요한 강우예측 정보로의 전환 가능성을 지속적으로 검토하여 활용하여야 할 것이다.

6. 결론

지금까지 유역단위 통합 수자원관리의 핵심이 되는 정량적 강우예측기술의 활용성과 한계점을 살펴보고, 수문기상분야의 국내외 연구사례 및 미래 수문기상분야의 발전방향에 대하여 언급하였다. 현재 물관리 측면에서 국내외 가용한 기상정보들 가운데 단기 예측에서 가장 활용성이 높은 자료는 초단기(0~6시간 이내)에서는 레이더 강우자료가 가장 신뢰도와 활용도가 높으며, 단기예보(6시간 이후)에는 수치강우 예측자료가 가장 활용도가 높을 것으로 판단된다. 따라서 미래 수문기상분야의 화두는 크게 강우레이더 활용기술과 강우수치예보모델 운용기술로 대변될 것이다. 레이더 강우자료와 수치예보자료를 접목하여 물관리기관의 실황예측분야에 최적화하여 활용한다면 치수분야에서는 가장 신뢰성을 높일 수 있는 예측 체계라 판단된다.

또한 현재 기상청에서 시험운영하고 있는 디지털 예보의 향후 신뢰도가 상당히 발전할 것으로 기대되며, 단기와 초단기 유역 강수량 예측에 쉽고 매우 유용하게 활용될 것으로 전망된다. 특히 상세 지형의 효과가 수치 모델 자료에 미흡할 수 있기 때문에 지형 효과를 유역별로 평가하고 강수진단모델(QPM) 등을 활용하여 보완한다면 보다 유용할 것으로 판단된다.

미래 지구촌의 기상이변은 이번이러기보다는 자연스러운 일상이 될 것이다. 21세기에는 수문기상 예측 능력 향상을 포함한 보다 과학적인 유역단위의 통합

수자원 관리가 향후 기후변화와 맞물려 일어날 각종 물 문제를 해결하면서 지속가능하고 효율적인 물관리를 가능케하는 유일한 대안이 될 것이다. 이를 위해 수문과 기상의 연계가 되는 수문기상분야의 기술개발에 더욱 더 집중해 나가야 할 시점으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

고익환, 정세웅 (2002). 통합 수자원 관리 기반 기술 구축 방안 (I): 선진국의 하천 유역 통합 물관리 기술 개발 동향, 한국수자원학회지, 1738-9488, 제 35권 6호, pp.61-70.

고익환, 정세웅 (2002). 통합 수자원 관리 기반 기술 구축 방안 (II): 우리나라의 하천 유역 통합 물관리 기반 기술 구축 방안, 한국수자원학회지, 1738-9488, 제35권 6호, pp.71-78.

고익환 (2004). 유역 통합 수자원 관리 기술 개발, 한국수자원학회지, 1738-9488, 제37권 3호, pp. 10-15.

국내 기상청 KMA, <http://www.kma.go.kr>, <http://www.digital.go.kr>.

배덕효 (2007). 미래의 물관리-기상정보 활용, 한국수자원학회지, 1738-9488, 제40권 1호, pp.26-32.

정창삼, 허준행, 배덕효 (2004). 국내 유역에 대한 GCM 정보의 확률론적 불확실성 분석, 한국수자원학회논문집, 1226-6280, 제37권 3호, pp.173-184.

한국수자원공사 (2004). 실시간 물 관리 운영 시스템 구축 기술 개발 (프론티어 1단계 최종보고서).

한국수자원공사 (2007). 유역 물 관리 운영 기술 개발 (프론티어 2단계 최종보고서). 