

## 미래의 물관리 - 기상정보 활용



배 덕 효 >>

우리학회 수문기상분과위원장  
세종대학교 토목환경공학과 교수  
dhbae@sejong.ac.kr

### 1. 머리말

필자는 얼마 전 일본 동경에서 개최된 제2회 아시아 물순환 심포지엄(Asia Water Cycle Symposium)과 전지구관측 아시아-태평양 지역 심포지엄(GEOSS AP Symposium)에 다녀 온 적이 있다. 아시아 물순환 심포지엄은 아시아 지역의 효율적인 물관리와 홍수위험관리를 위해서 정확하고 시의적절한 장기간의 물순환 정보와 모형결과를 구축하여 공유하고자 하는 것이 주목적인 AWCI(Asia Water Cycle Initiative)와 관련된 행사이고, 이를 실제적으로 주도하는 사람은 동경대학 토목공학과와 Koike 교수이다. 이에 비해 GEOSS(Global Earth Observations System of System)는 전지구상의 지구관측 자료를 공동 관리할 수 있는 시스템을 구축하는 사업(www.prime-intl.co.jp/geoss)으로 이들 두 사업은 어떻게 보면 수문기상관측에서 불가분의 연관 관계가 있는 사업이라 할 수 있다.

매년 연중 행사로 참석하는 국외 학술행사지만, 굳이 여기서 이번 방문을 언급하는 이유는 필자 개인적으로는 이전의 학회 참석때와는 분명 다른 특별한 느낌을 받았기 때문이기도 하지만 어떻게 보면 앞으로 우리나라 수문기상분야가 홍수방재와 수자원관리 및 하천환경을 위해서 해 나가야 할 사항을 일목요연하

게 요약하여 제시해 준 느낌을 받았기 때문이다. 보다 구체적인 내용은 후술하겠지만, 이번 학술발표회의 참석은 분명 의미있는 일이었다.

주지하는 바와 같이 매년 전세계적으로 홍수 및 돌발홍수에 의해 많은 인명과 재산피해를 입고 있다. 우리나라도 예외는 아니어서 1998, 1999년의 임진강 홍수피해, 2002년의 태풍 루사 및 2003년의 태풍 매미에 의해 많은 피해를 입었다. 현재까지 대부분의 홍수피해에 대한 대응책은 사후복구 중심이지만, 이들 피해를 최소화하기 위해서는 이들 피해를 사전에 예방할 수 있는 예방책을 마련해야 한다는 데는 이견이 없다. 이들 홍수피해를 사전에 예방하기 위해서는 기상예보정보의 활용이 필수적인 사항이다.

또한, 우리나라는 2018년에 18억톤의 물부족이 예상되어 이를 해결하기 위한 다양한 노력이 경주되고 있다. 이들 노력 중에 하나가 국가 프론티어 연구개발 사업으로 시행되고 있는 지속가능한 수자원개발기술이며, 이 사업으로 예상되는 주요 연구결과 중에 하나가 수자원통합관리이다. 이들 수자원 통합관리에 서로 어떻게 보면 기상정보의 활용이 수자원통합관리의 시발점이라 할 수 있다.

이렇듯 기상과 수자원은 필수불가결의 관계이지만, 학문적 근원이 서로 다르고 이들 두 분야를 병행하여 다루기는 어렵다는 이유로 국내에서는 그 동안 미개척 분야로 남아 있었다고 할 수 있다. 그러나 이제는 우리의 경우에도 국내 전문가가 많아지고 있고, 또한 이들 두 학문의 연계분야의 중요성으로 인해 관심도가 그 어느 때보다 높은 실정이다. 따라서 본고에서는 이수, 치수 및 하천환경관리를 위해서 시급히 요구되는 수문기상분야의 현황과 향후 수행되어야 할 연구방향 등을 제시하고자 한다.

## 2. 기상정보의 이해

흔히 기상과 관련해서 자주 듣는 이야기로 대기현상은 비선형이 매우 강하여 현재의 기상상태로는 2주일 후에 기상현상이 어떻게 변할지 아무도 모른다는 것이다. 그럼에도 불구하고 기상청에서는 월간예보, 계절예보 및 6개월 예보정보를 내고 있다. 또한 몇십년 후의 기후변화를 이야기하고 있다. 도대체 어떤 근거로 어떤 과학적 지식을 이용하여 이들 정보를 생산하는 것일까? 또한 이들 정보를 수자원관리 또는 홍수방재에 어떻게 활용 가능할 것인가? 또한 그렇게 불확실한 기상예보정보를 과연 물 관리에 활용할 것인가? 수많은 질문과 의문이 있겠지만 이들에 대한 개요는 그림 1로 요약할 수 있다. 이는 동경대학의 Koike교수가 제2회 아시아 물순환 심포지엄에서 발표한 자료이다. 물론 이 그림은 Koike교수의 전유물이 아니다. 수문기상에 관심있는 학자라면 누구라도 한번쯤 보고 느꼈을 수 있는 그림이다.

기상정보를 보다 효율적으로 물관리에 활용하기 위해서는 무엇보다 먼저 기상정보에 대한 이해가 필

요하다. 물론 물관리를 위해서 우리가 원하는 시기에 원하는 장소에 정확한 기상예측자료를 제공해 준다면 물관리에서 해결하고 있지 못하는 많은 부분이 해결될 것이다. 그러나 불행히도 수자원분야에서도 아직 해결하지 못하는 많은 물문제가 있듯이 기상예보정보 역시 그렇게 정보를 제공해 줄 수가 없다. 비록 기상청에서는 최신의 슈퍼컴퓨터를 활용하고 기상인들이 동원할 수 있는 모든 과학적 지식을 동원해도 그러한 정보를 생산할 수는 없는 것이다. 이는 현대과학의 한계이기도 하거니와 컴퓨팅 기술의 제약 때문이라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 중요한 점은 현재의 기상정보를 잘만 활용한다면 이전에 해결하지 못한 많은 물관리 분야에서 상당부분 향상시킬 수 있는 열쇠가 담겨 있다는 것이다. 이런 관점에서 기상정보의 생산과정을 우선 살펴보자.

과거 우리나라의 기상예보는 주로 종관관측자료를 기본으로 예보관들의 주관에 의존하였다. 그러나 1990년 3월 기상청에 수치예보과가 신설되고 이듬해 F-LAM 수치모델이 최초로 운영되면서 수치예보의 기틀이 마련되었다. 그 후 1999년 6월 기상청 슈퍼컴

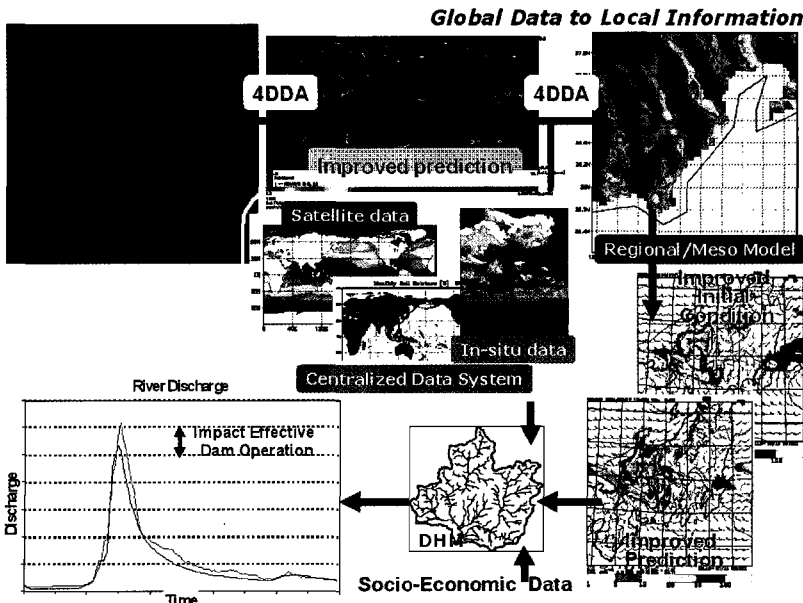


그림 1. 수자원관리를 위한 기상정보활용 개념도(Koike 2007)

퓨터가 가동되면서 수치예보에 많은 진전을 가져왔으며, 지금은 T106, T213 GDAPS 전구모형, RDAPS 지역모형, 태풍모형 BATS, 파고모형 WAM 등이 운용되고 있으며, 또한 이들 정보를 2차 가공하는 수많은 통계모형들(예, 최고최저기온모형, 강수확률모형)이 운영되고 있다.

이들 각종 수치모델 결과와 레이더 및 위성영상과 같은 원격탐사 정보 등을 이용하여 기상청에서는 3시간/6시간 예보, 48시간 단기예보, 일주일간의 주간예보, 순별로 1개월간의 예보정보를 제시하는 1개월예보, 월별로 향후 3개월의 정보를 제공하는 계절예보, 6개월 예보정보를 생산·발표하고 있다. 사실 만약 우리가 원하는 장기간 예측기간(10일 또는 월별, 계절별)동안 원하는 정도의 공간적 해상도(예, 5x5km 또는 10x10km)로 정량적으로 강수 및 온도와 같은 기상정보를 줄 수 있기를 수자원 전문가들은 기대하지만, 기상분야를 조금이라도 이해하려고 한다면 현실적으로 현대의 과학에서는 불가능하다는 것을 잘 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 수문기상 전문가 입장에서 보면 현대의 기상정보는 수자원관리, 홍수 및 가뭄방재와 같은 이수, 치수 및 하천환경문제에 충분히 활용 가치가 있다는 것이다(Bae, 2006). 이와 같은 관점에서 이들 정보를 활용하여 보다 효율적인 물관리를 할 수 있도록 노력하여야 할 것이다.

### 3. 기상예보정보의 홍수방재 활용

우리나라 홍수방재의 경우 지역적으로 차이는 있겠지만 일반적으로 도시 내배수 및 하천의 경우 1~2시간, 산악지역의 경우 2~3시간, 일반 농촌유역 하천을 포함한 대하천 유역의 경우 2~3일 정도의 선행시간을 확보할 수 있는 정확한 강수예보 자료를 확보할 있다면 홍수피해의 상당부분을 저감할 수 있을 것이다. 그림 2는 예측선행시간에 따른 강수예보의 정확도를 나타낸 곡선이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 통상 48시간 이내의 단기간 예보의 정확도는

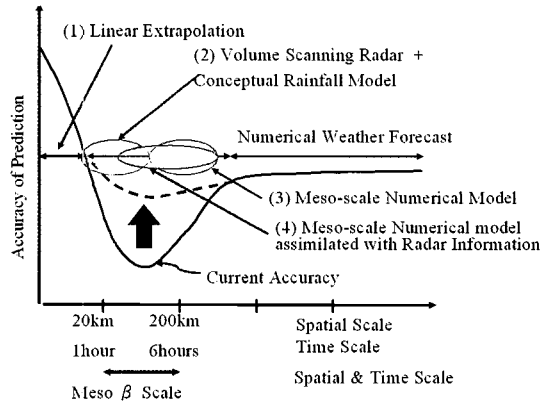


그림 2. 강수예보의 정확도 곡선

중규모 수치모델이 정확도가 가장 우수한 것으로 알려져 있으나, 6시간 이내의 초단시간 강수예보의 경우에는 수치예보의 정확도가 spinup 시간 등의 이유로 정확도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이를 위해 통상 일본의 경우 초단시간 예보(VSRF; Very Short Range Forecast) 모형을 별도로 운영하고 있으며, 우리나라 기상청에서도 최근에 초단시간 예보 모형을 완성한 것으로 알려져 있다. 이들 초단시간 예보에는 그림 2에 제시된 바와 같이 단지 현재의 기상상태를 상호상관 등을 이용하여 외삽하는 방법과 레이더 자료 및 개념적 강우모델 등을 활용하는 방법이 있다.

최근에는 실황예보를 활용한 홍수예보 및 초단시간, 단시간 강수예보를 홍수예보에 활용하려는 노력이 경주되고 있다(배덕효, 2005). 이제 기상청에서도 방재기상분야의 필요성을 절감하고 기상레이더 분야의 정확도 향상에 많은 노력을 기울이고 있으며, 특히 건설교통부 하천정보센터에서는 자체적으로 수문기상 레이더를 설치하여 보다 양질의 기상정보를 획득하여 이를 홍수예보에 활용하려는 노력이 경주되고 있다(김양수, 2006). 이들 사업이 성공적으로 완수된다면 우리나라 5대강 수계의 홍수예보에 활용될 뿐 아니라 국내 주요 지천의 홍수예보 및 돌발홍수 예경보에도 일대 혁신이 일어날 것이다.

단시간 예보정보 역시 수자원의 이수 및 치수에 활용 가능성이 매우 높다. 현재 기상청에서는 중규모지

역 모델의 결과를 이용하여 해상도 30x30km의 48시간 예보정보를 하루에 두 번 생산하고 있다. 통상 기상정보의 정확도를 평가하는 방법에는 정량적 평가법과 정성적 평가법 등 그 방법이 다양하여 한마디로 말하기는 어렵지만 기존의 연구결과(예, 과학기술부, 2004)에 의하면 단기 48시간 예보자료의 경우 12시간 이전의 강수량 자료는 spinup 시간 등의 이유로 관측강수량보다 과소 예측하는 것으로 나타났고, 24시간 이후에서 48시간까지는 관측강수량 보다 다소 과다 예측하나 12시간~24시간의 강수량자료가 가장 정확한 것으로 나타났다. 이 경우 bias score 0.8~0.9, treat score 0.4, rmse 2mm/12hr인 것으로 나타났다. 또한, 건설교통부(2003)에서는 이들 정보가 댐운영의 홍수관리에 유용함을 제시한 바 있다. 이들 기상정보를 활용한 홍수관리를 위해서는 보다 많은 연구와 실무적용이 필요한 것으로 판단된다.

#### 4. 중장기 기상정보의 물관리 활용

어떤 면에서 보면 10일 정도의 중기예보가 기상예보에서 가장 어려운 일인지도 모른다. 한달 또는 계절예보를 하는 장기예보의 경우 GDAPS와 같은 전구모형의 결과에도 의존하지만, 통계모형 또한 장기예보에 많이 활용되고 있다. 또한, 장기예보는 예보자료를 생산하는 방법도 단기예보와는 사뭇 다르고 생산되는

정보의 깊이도 단기예보와는 아주 차이가 있다. 그럼에도 불구하고 이들 정보를 잘 활용한다면 물관리에 아주 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 예를 들어, Bae et. al(2007)은 Neuro-fuzzy 모형인 ANFIS 모형을 이용하여 댐유입량을 산정할 수 있는 방법을 구축하고, 기상청의 월간예보정보를 활용하여 댐유입량을 예측할 경우 그렇지 않은 경우보다 예측의 정확도를 매우 향상시킬 수 있음을 제안한 바 있다.

최근에는 월단위의 장기 물관리를 위해서 ESP(Ensemble Streamflow Prediction) 기법이 많이 응용되고 있다. 이 기법을 보다 정교하게 활용하기 위해서는 궁극적으로 장기기상예보 및 산업기상예보 정보의 활용이 필수적일 것이다(서울대학교, 2005). 이 분야에도 향후 기상정보의 정확도 향상과 병행하여 많은 연구과제가 남겨있는 분야이기도 하다. 댐운영을 포함한 물관리를 위하여 궁극적인 방향 가운데 하나는 그림 3으로 요약될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 5. 기후변화에 대한 영향평가

이제 기후변화는 기상인들조차 고정사실로 받아들이고 있다. 세계기상기구와 유엔환경계획이 1988년 공동 설립한 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 2001년 보고서에 의하면 향후 100년 동안 지구의 기온이 1.4~5.8도 상승할 것이라고 예상하였으나, IPCC 제4차 평가보고서를 인용한 기상청 보도자료에 의하면 지금과 같이 화석연료에 의존한 인간 활동이 지속된다면 21세기말(2090~2099년)에 지구의 평균기온은 최대 6.4℃ 상승하고, 해수면은 59cm 상승할 것으로 전망했다.

기후변화에 대한 최근의 분석과 21세기 기후에 대한 전망을 담은 이번 보고서는 지구온난화로 인해 지난 100년간(1906~2005년) 지구의 평균기온이 0.74(0.56~0.92)℃ 올랐으며, 특히 1850년 관측 이래 가장 따뜻했던 12년 중 11년이 최근 12년 동안에

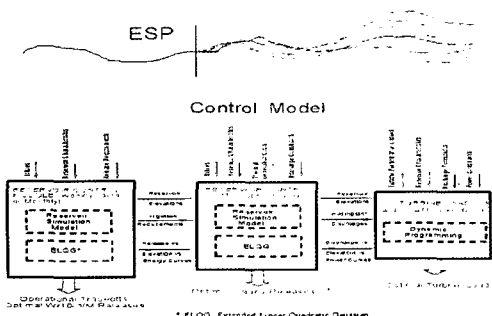


그림 3. 장단기 기상예보를 활용한 댐운영 및 물관리(Georgakakos, 1996)

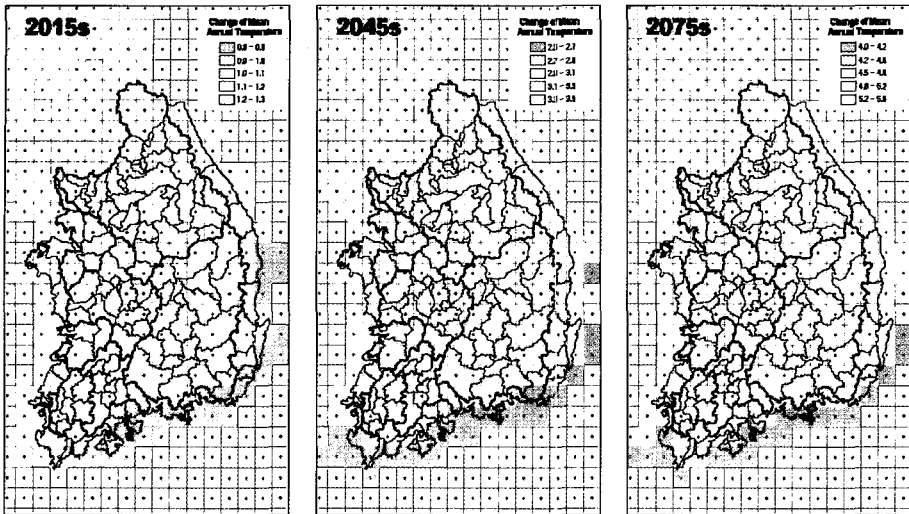


그림 4. 고해상도 A2시나리오를 활용한 한반도 온도자료의 변동성 평가. 평균적으로 2015S에 1.0°C, 2045S에 3.0°C, 2075S에 4.5°C 상승할 것으로 예상되며, 해안보다는 내륙지방에 증가율이 클 것으로 전망됨

발생하는 등 지구온난화가 가속화되고 있다고 분석했다. 이 보고서는 또한 북극 빙하가 21세기말에 완전히 녹아 없어질 것으로 예상하고 있고, 폭염과 집중호우 등은 계속적으로 빈발할 가능성이 높을 것으로 내다봤다. 이와 함께 태풍과 허리케인 같은 열대폭풍은 열대 해수면온도 상승과 더불어 그 위력은 강화될 것으로 전망하고 있다(기상청, 2007).

이와 같은 기상변화에 대하여 농업, 임업, 수산업, 수자원, 어업 등 각 분야별 기후변화에 대한 영향평가를 위한 노력이 국내에서도 관심이 집중되고 있다(환경부, 2006). 기후변화에 대한 수자원영향을 평가하려는 노력도 꾸준히 진행되고 있다. 또한, 기후변화에 대한 수자원영향평가 결과에 따라 기후변화 수자원의 취약성 및 적응방안에 대한 연구도 용수공급, 발전, 홍수 및 가뭄, 주운, 유지유량 등 다양한 수자원 분야에 대해서 평가되어야 할 것이다. 그러나 이와 같은 기후변화에 대한 수자원영향평가의 가장 큰 논란점은 평가결과의 불확실성이다. 이와 같이 불확실한 정보를 이용하여 국가 정책에 반영하기는 너무 불확실성이 크다는 점이고, 그렇다고 국가정책에 반영하지 않기는 최근의 기상이변이 너무 자주 크게 발

생하다는 것이다. 이와 같은 불확실성을 최소화하기 위해서는 기후변화 요소에 대한 이해와 보다 정확한 기후변화 시나리오의 생산, 이들 자료를 이용한 보다 정확한 수자원 분야별 평가가 이루어져야 할 것이다. 물론 이와 같은 정보생산에는 국내의 기상학적, 지형학적 특성을 고려하여 downscaling 기법에 대한 보다 심도있는 연구가 필요하다는 것은 재고의 여지가 없다.

## 6. 수문기상관측자료의 분석

기상정보를 활용하여 수문기상방재 분야에 활용하기 위해서는 과거에 실측한 다양한 수문 및 기상관측자료에 대한 분석이 요구된다. 이들에 대한 기초이론 및 응용분야는 너무나 많아 열거하기 힘들 정도지만, 대략적으로 생각해 봐도 다음과 같은 분야가 될 것이다.

기존의 강우관측 자료를 활용하여 수문설계에 필요한 확률강우량을 산정하고 강우강도식을 유도하여야 한다. 사실 이 분야는 많은 연구가 진행된 것 같지만, 아직도 학자들마다 사용하는 확률분포형이 다르

며 산정결과도 산정 분포형의 선정에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 또한, 도시지역의 경우 30분 이내의 짧은 강우지속 시간에 대한 확률강우량이 필요하지만 이에 대한 연구는 미진한 실정이다. 한편, 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitation)에 대한 연구도 꾸준히 병행해 나아가야 할 것이다. 면적강수량의 산정과 면적감소계수(Areal Reduction Factor)에 관한 문제는 수자원계획에서 항상 첨예한 논란거리를 제공하고 있다.

최근에는 인공위성영상 등 원격탐사 자료의 보급으로 인해 이들 자료의 수문기상분야 응용에 관심이 집중되고 있다. 특히, 이와 같은 분야는 머지않아 국내에서도 국내 고유 기상위성을 발사할 계획을 가지고 있어 이들 정보를 활용한 수자원 연계 연구가 본격적으로 필요한 시기가 올 것이다. 원격측정기술의 발달은 수문현상에 대한 2차원 공간자료의 획득을 용이하게 하였고 정규식생지수(NDVI)와 같은 장기간의 관측치는 유역 기후의 시공간분포 특성 해석을 용이하게 하였다. 또한, 관측기간이 짧음에도 불구하고 기후예측 모형 및 수문모형의 검증 및 개선을 위해서 유용한 토양수분의 관측은 기후예측 향상 가능성을 제공하고 있다. 엘니뇨 및 라니냐에 대한 연구, 기후변화 수자원의 teleconnection에 관한 연구도 지속적으로 병행되어야 할 것이다.

### 7. 전지구관측과 국제협력

전지구관측(GEO; Group on Earth Observation)과 같은 국제적 활동은 향후 수문기상분야에 많은 발전을 가져 올 것이다. 통상 수문기상분야에서 가장 어려운 문제 중에 하나는 전지구규모-지역규모-수문유역규모의 기상 및 지표수문정보를 측정·활용하는 것이다. 그러나 실제 이와 같은 모든 규모영역에서의 고층 및 지표관측은 한계가 있기 때문에 지구상의 상당히 많은 부분이 미계측 유역으로 남아 있고, 이들 지역이 기후예측 및 수자원관리의 불확실을

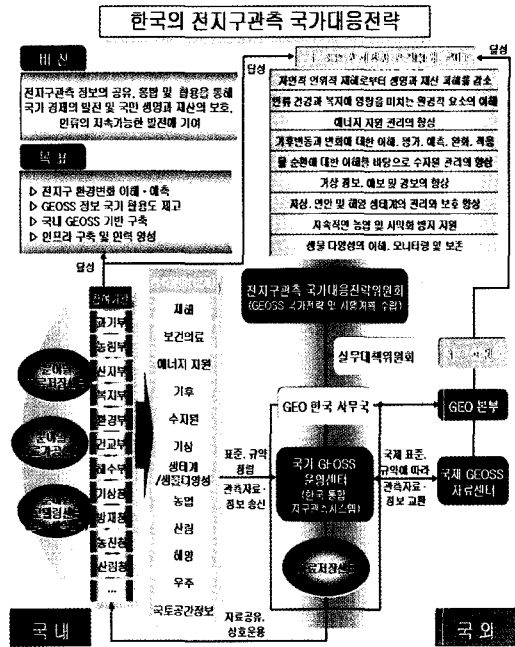


그림 5. 한국의 GEOSS 목표, 각 분야별 관측 분야 및 사회적 편익과의 연계

증대시키고 있다. 전지구관측시스템이 구축되고 여가서 생산된 각종 수문기상정보를 공유할 수 있다면 국내 물관리에서도 불확실성을 많이 줄일 수 있을 것이다.

전지구관측시스템(GEOSS; Global Earth Observation System of Systems)은 대기, 해양, 육지, 생태계 등 모든 지구시스템에 대한 현장관측(in-situ observations), 공중관측(airborne observations), 우주 기반을 둔 관측(space-based observations)을 망라하는 통합시스템으로 세부 관측요소들의 데이터에 기반을 두며, 개별 국가보다는 큰 규모의 지구시스템 과정에 주안점을 두고 있다(과학기술부 등, 2005).

우리나라는 지금까지 분야별로 지구관측을 수행하여 왔고 관측자료를 개별적으로 외국과 교환하는 등 국제 협력사업을 추진하여 왔다. 그러나 정부에서는 각 부처별로 구축된 자료를 각자가 국제협력함으로써 업무의 효율성이 저하되었다고 판단하였다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 각 부처에 산재된 관측시스

템을 통합·운영하고, 전지구 관측자료를 통합·해석하여 정보의 선진화를 꾀하고자 하고 있다. 그림 5는 우리나라의 관측분야와 전지구관측시스템의 사회경제 편익분야와의 연계를 기술한 것이다. 이들 분야 가운데 수자원 분야는 기상 및 기후정보를 타분야에 연계하는 중계자 역할로서 매우 중요한 의미를 갖는다. 이에 대한 수문기상인의 역할이 강조되고 있으며, 특히 이들 정보를 활용한 홍수 및 가뭄방재, 수질 관리, 통합수자원관리 등에 활용 가능성이 매우 클 것으로 판단되어 세심한 지속적인 관심과 연구가 필요할 것이다.

## 8. 맺는말

불과 10여 년 전만 해도 기상분야와 수자원분야는 별개의 분야로 생각하고 연구결과나 지식 및 인적교류가 활발하지 않은 것은 사실이다. 이제는 보다 효율적인 이수, 치수 및 하천환경관리를 위해서는 기상정보의 활용이 필수적이란 사실을 수문학자들은 믿고 있으며, 기상분야 역시 기상예보의 정확도도 중요하지만 기상분야에서 생산한 정보가 각종 산업분야, 특히 물관리를 위해 활용되는 것이 중요하다는 것을 인식하고 있다.

보다 합리적인 물관리를 위해서는 일차적으로 우수한 기상정보가 예측기간별로 생산되어야 하지만, 이들 정보를 이해하고 효율적으로 활용하는 일 역시 예보정보의 정확도 향상 못지않게 중요하다. 본고에서는 각각의 기상정보에 대한 활용 가능성과 향후의 발전방향 등을 기술하였다. 그렇지만 이 분야는 이제 걸음마 단계라 할 수 있다. 이 분야가 보다 견고히 뿌리를 내리기 위해서는 이들 분야를 연계할 수 있는 고급 인력의 양성이 중요하며, 또한 이들 두 학문분야의 인적교류가 절실한 것으로 판단된다.

마지막으로 본 원고가 이들 수문기상방재 분야의 향후 발전과 연구의 기초자료로 활용되기를 기대한다.

## 참고문헌

- Bae, D.-H. (2006) Application of the NWP Data I -Water Resources Management-, ASEAN-ROK Cooperation Training Workshop, Korea Meteorological Administration, Oct. 30-Nov. 3, 2006, Seoul, Korea
- Bae, D.-H., Jeong, D.M., Kim, G. (2007) Monthly dam inflow forecasts using weather forecasting information and neuro-fuzzy technique, Hydrologic Sciences Journal, 52(1), pp. 99-113.
- Georgakakos, K.P. (1996) Advances in the Operational Management of Reservoir Hydrosystems, Hydrologic Research Center, Georgia Tech., June 1996.
- Koike, T. (2007) Country proposals-Japan, The 2nd Asian Water Cycle Symposium, Tokyo, Japan, 9-10 January 2007.
- 건설교통부 (2003) 수계별 계절예측강우의 댐운영 적용방안, 연구보고서, 한국수자원공사.
- 과학기술부 (2004) 장단기 기상예보 활용기술 개발, 21세기 프론티어연구개발사업 -수자원의 지속적 확보기술개발사업.
- 과학기술부 등 (2005) 전지구관측시스템(GEOSS) 국가대응전략(안), 국무회의 보고자료, 과학기술부 외 10개 부처, 2005. 8. 30.
- 기상청 (2007) 기상청 보도자료, 기후정책과
- 김양수 (2006) 건설교통부 강우레이더 관측망 구축 및 운영, 제1회 레이더 수문 워크샵, 2006. 11. 13, 한국과학기술회관, 한국수자원학회
- 배덕효 (2005) 국내 홍수예보 현황 및 개선방향, 2005 홍수대비 정기교육, 한강홍수통제소.
- 서울대학교 (2005) Ensemble Streamflow Prediction Workshop, 2005. 7. 8, 서울대학교 수문학연구실.
- 환경부, 기상청 (2006) 제3차 기후변화정책포럼, 2006. 11. 24, 제주도, 한국기후변화협의체(KPCC). 