

# HydroKorea - 실측 기반 한반도 증발산 지도 제작



**김수진**  
연세대학교 지구환경연구소 전문연구원  
sujin@hydrokorea.yonsei.ac.kr



**김준**  
연세대학교 대기과학과 교수  
joon-kim@yonsei.ac.kr



**김승**  
한국건설기술연구원  
수자원의 지속적 확보기술개발 사업단 단장  
skim@kict.re.kr

## 1. 머리말

우리나라 과거 역사를 살펴보면 가뭄으로 인한 식량부족, 민란, 전염병 창궐, 그리고 국가의 몰락과 같은 기록이 남아 있다. 예로부터 위정자(爲政者)의 가장 큰 덕목으로 치수(治水)를 손꼽을 만큼 국가의 흥망성쇠와 물 문제는 항상 부존(賦存)하였다. 인류 역사에서도 수자원의 확보는 국가 간 혹은 지역 간 전쟁의 주원인이 되어 왔으며, 이러한 문제는 산

업화와 더불어 용수의 수요가 급증하는 현대에도 마찬가지로 국가 간의 분쟁과 지역 간의 마찰의 원인을 제공하고 있다. 따라서 전 세계적으로 나타나는 물 부족현상과 이에 기인한 물 위기는 단순한 수자원의 양적 부족현상을 초월하여 인간사회를 지탱하여 온 하나의 축이 붕괴됨을 의미하며, 결과적으로 심각한 사회적·문화적 반향을 일으키고 있다.

우리 선조들은 일찍이 조선시대부터 측우기를 이용한 전국 강수 네트워크를 구축하였다. 그러나 이러한 네트워크 구축에도 불구하고 자료의 활용은 극히 제한적이어서 널리 활용이 되지 못하였다. 이는 학제간 연구의 부족으로 인하여 물순환 전체에 대한 이해가 부족한 현재 우리나라의 연구 실정에 시사하는 바가 크다. 그렇다면 현재 우리는 과연 얼마나 가뭄으로 인한 재해에 준비가 되어 있는 것일까?

물 순환의 이해를 위해서는 물 수지의 구성 성분인 강수, 유출, 증발산, 지하수, 토양 수분 등에 대한 정량화가 동시에 수행되어야 한다. 그러나 지난 수십 년을 되돌아보면 학제 간의 연계 활동이 부족한 결과로 인하여 각 분야의 특성에 맞는 물 수지 성분들만을 집중해서 정량화 하였다. 수문분야의 경우 수자원 개발과 계획 수립에 관련된 물 수지 평가에서 중요한 부분을 차지하는 증발산 값을 현장 실측의 어려움 때문에 관측 값을 사용하기보다는 단순한 가정이나 경험식에 의한 추정값을 사용해 오고 있어 자료의 신뢰성에 문제가 있을 수 있다. 또한,

기상분야에서는 물수지 평가에 있어서 지하수 등을 포함한 정량적인 평가 등을 고려하지 않았다.

지난 반세기 동안 지속된 국내 산림의 증가 및 농경지의 감소와 관련하여 물 순환 및 지표 에너지 수지에서 증발산이 차지하는 중요성이 인식되면서 실측을 통해 증발산을 정량화하려는 노력이 빠르게 증가하고 있다. 이미 국내에서도 교육과학기술부 21세기 프론티어사업 "수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(단장 : 김 승)"의 지원으로 2004년 9월부터 한반도 증발산 지도 제작을 목표로 수행 중인 "HydroKorea 개발"에서 산림과 농업 생태계에서 증발산의 실측을 수행 중이다. 본고에서는 실측기반 한반도 증발산 지도 제작을 목표로 연구가 진행 중인 HydroKorea 개발의 주요 연구내용을 소개하고자 한다.

## 2. 증발산의 정의와 관측

우리가 일상생활에서 사용하는 증발산(evapotranspiration)은 증산(transpiration)과 증발(evaporation)에 의해 수증기가 대기 중으로 방출되는 현상을 총칭하는 말이다. 증발산은 전지구적으로 볼 때 총 육상강수량의 약 60%로 물 순환 과정에 매우 중요한 부분을 차지한다.

증산은 식물의 뿌리로부터 흡수된 액체상태의 물이물관부(xylem)를 거쳐 잎의 기공(stomata)을 통해 기체 상태로 대기 중으로 방출되는 현상이다. 식물로 흡수된 대부분의 물(~95%)은 증산을 통해 대기 중으로 손실되며, 증산이 일어나는 동안 물의 이동과 함께 식물의 뿌리로 흡수된 영양소가 식물로 전달된다. 증발은 나지, 호수면, 해수면 등과 같이 식생이 없는 지역이나 또는 식생에 의해 차단된 강수 또는 관개(irrigation)로 인해 젖은 식물표면으로부터 액체상태의 물이 기체상태(기화, vaporization)로 바뀌어 대기로 방출되는 현상이다. 증산과 증발의 합인 증발산은 복사, 온도, 바람,

대기의 증발 수요(evaporative demand)인 포차(飽差), 뿌리를 통해 공급되는 토양 수분, 기공의 상태 및 식생 분포 등에 의해 조절될 뿐 아니라 광합성 작용과도 밀접하게 연결되어 있다. 증발산은 크게 3종류로 구분할 수 있다.

**실제증발산(actual evapotranspiration) :** 어떤 지역에서 실제 일어나는 증발산

**가능증발산(potential evapotranspiration) :** 어떤 지역에서 물 공급이 제한 받지 않는 상태에서 일어날 수 있는 최대 증발산

**평형증발산(equilibrium evapotranspiration) :** 어떤 지역에서 물 공급이 제한 받지 않고 대기가 포화된 상태에서 일어나는 증발산

증발산 산출 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 증발산을 직접 관측하는 방법으로서, 관측 기기를 사용하여 실제 증발산을 직접 관측하거나, 증발산 방정식(예를 들면 Penman-Monteith 복합 방정식)에 사용되는 증발산 관련 인자(예를 들면 기온, 복사, 포차, 전도도 등)를 직접 측정하여 산출하게 되는데 이때 기상 관측 자료, 위성자료, 동위원소 등의 자료를 활용할 수 있다. 두 번째는 실제 증발산이 아닌 자유 수면으로부터의 가능 증발산을 (증발 접시 등을 이용하여) 관측하거나 기상 자료로부터 계산하여 작물계수 등의 경험 상수를 적용하여 증발산을 추정하는 방법이다. 이 외의 간접적인 방법으로는 에너지 수지나 물 수지가 닫힌다는 가정 아래 수지 방정식의 다른 성분들을 관측하여 그 나머지를 증발산으로 추정하는 방법이 있으나 물 수지나 에너지 수지가 닫히지 않을 경우 불확실성이 커진다.

현재 HydroKorea 연구팀은 국내 대표 식생 3개소(광릉 활엽수 및 침엽수, 해남 농경지)를 대상으로 에디 공분산 기술을 이용하여 2004년부터 실제증발산 관측을 수행 중이다(그림 1). 특히 광릉 산림의 경우 국립산림과학원과 국립수목원의 협조

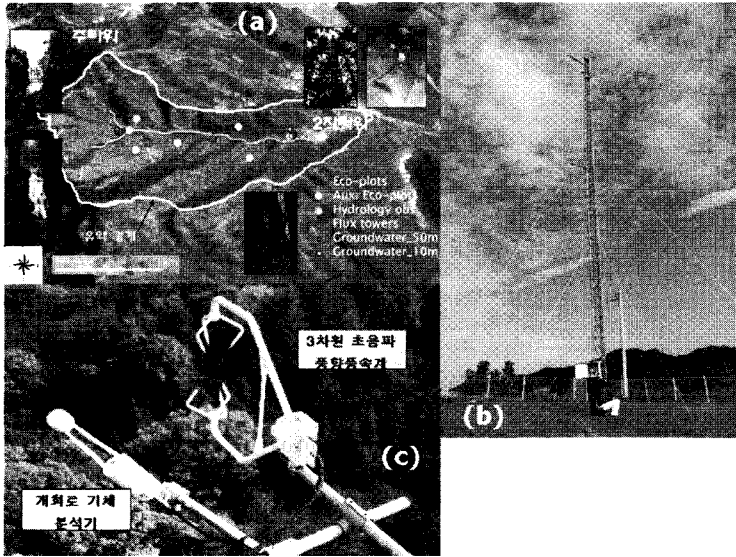


그림 1. HydroKorea 광충(a) 및 해 남(b) 관측지와 에디 공 분산 시스템(c)

로 증발산 뿐만 아니라 강수, 유출량, 지하수, 토양 수분 등의 물수지 평가를 위한 수문 성분을 집중적으로 관측하고 있다. 에디 공분산은 열, 수증기 또는 기체의 연직 플럭스를 직접 측정하는 방법으로 관측지가 균질하고 평탄한 지역이라는 조건을 기본 가정으로 하고 있다. 따라서 복잡지형의 플럭스 관측을 위해서는 난류 플럭스항 뿐만 아니라 저류항과 관측이 어려운 연직 및 수평 이류항을 추가로 관측해야한다. 또한 비균질하고 복잡한 지형에서는 이상적인 관측지보다 더 심각한 에너지의 불균형이 예상되기 때문에 관측된 자료의 해석이 쉽지 않다. 복잡지형인 광충 산림을 대상으로 2004년부터 수증기 플럭스 및 농도의 프로파일 자료를 분석한 결과, 연직 이류항과 수평 이류항의 크기가 작지 않았으나 부호가 반대가 되어 두 항이 대략 서로 상쇄됨을 보였다. 수증기와 온도 저류항도 일변화 주기를 가지며, 하루 단위로 적산할 경우 0 에 가까운 값을 보인다. 따라서, 약 10% 내의 불확실성을 감수한다면, 기본적인 난류 플럭스항 하나만을 관측해서도 지표 플럭스를 대표할 수 있다.

2004년부터 우리나라 최초로 장기간 증발산량 실측조사를 수행한 결과 에너지 수지의 경우, 평탄

하고 식생의 높이가 낮은 해남 농경지는 5% 이내에서 거의 닫혔으나, 복잡지형인 광충 산림의 경우에는 에너지의 불균형이 평균 35%로 매우 컸다. 한편, 2006년 광충 산림 유역의 물 수지를 확인한 결과 에너지 수지와는 달리 약 5% 이내에서 물 수지가 닫힘을 확인하였다. 선행 연구 결과를 종합해 볼 때, 에너지 수지의 불균형은 증발산 관측의 오차라기보다는 에너지 수지 성분 전반에 걸친 관측오차 및 불확실성이 복합적으로

작용한 결과로 해석된다.

이와 같이 에디 공분산 방법은 복잡한 계산 과정과 함께 많은 가정을 필요로 함에도 불구하고, 가장 직접적으로 플럭스를 관측할 수 있는 방법이다. 에디 공분산 관측 기술은 그 적용 영역과 기준 범위가 급속하게 확장되고 있으므로 이에 따른 기술의 개선과 더불어 앞으로 많은 분야에서 적용이 가능하다. 그러나 많은 설치비용과 관리 인원이 필요한 이런 시스템을 우리나라 전역에 설치하는 데에는 한계가 있다. 따라서 한반도 전체를 감시하는 인공위성에서 관측한 지표 영상자료를 지상에서 실제로

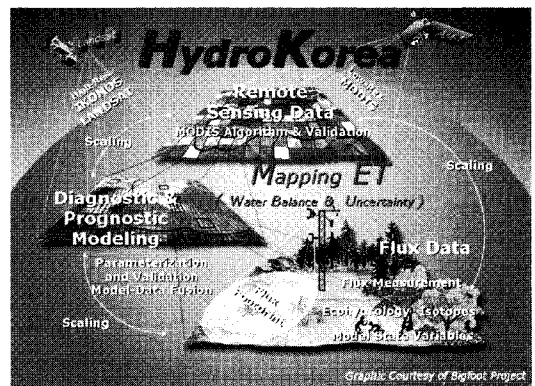


그림 2. HydroKorea 연구 개념도

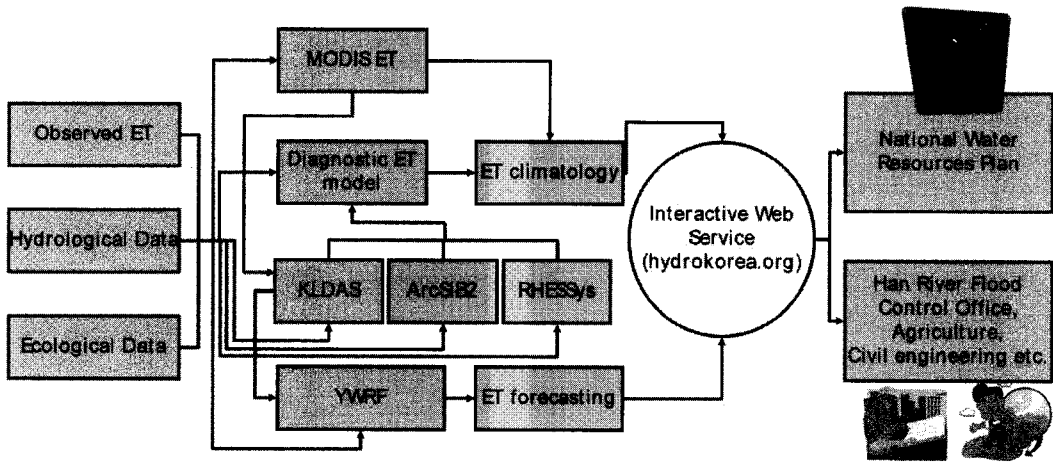


그림 3. HydroKorea 증발산 지도 제작 과정 모식도

측정한 자료와 생태수문 모형을 통해 비교분석해서 증발산을 비롯한 물 순환 정보를 산출하고 있다. 즉 관측지의 다양한 영상 자료의 특성과 실측 증발산량을 토대로 검증된 생태수문 모형 결과와 상관관계계를 만들고, 스케일링 기술을 위성영상과 수치예보모형에 적용하여 관측이 이루어지지 않는 한반도의 대부분 지역에 적용이 가능하다(그림 2).

### 3. 실측 기반 모형과 위성영상을 이용한 증발산 지도 작성

그림 3은 현재 추진 중인 HydroKorea 개발의 실측기반 증발산 지도 제작 과정을 나타낸 모식도이다. HydroKorea 관측지에서 수집된 고품질 실측자료는 MODIS 위성영상과 모형을 이용한 증발산량 산출과정에서 입력변수와 검증자료로 활용된다. 증발산지도 제작과정을 요약하면 증발산 기후도는 진단 모형과 MODIS 위성 영상을 활용하여 제작하며, 수치예보 모형은 증발산 예보에 활용될 예정이다. 이 중에서 MODIS와 개선된 한반도 지표자료동화체계(KLDAS)를 활용한 증발산 지도 제작과정과 2006년 한반도 증발산 지도 예비 결과와

현 시점에서의 문제점을 살펴보겠다.

#### MODIS 위성영상을 활용한 증발산 지도 제작

MODIS는 하루나 이틀 동안 전지구를 연속적으로 스캔하기 때문에 동시간대의 넓은 영역에 대한 정보를 얻을 수 있어 증발산의 공간적 분포 패턴을 비교적 쉽게 알 수 있다는 장점이 있다. 무엇보다도 MODIS 기반 증발산 지도제작 과정에서 가장 큰 이점은 증발산을 추정과정에 필요한 입력자료의 획득이 용이하다는 것이다.

1990년대 중반 이후 지표의 에너지수지관계 혹은 지표저항계수를 위성영상으로부터 해석하는 방식으로 증발산을 추정하려는 일련의 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 예를 들면 Boegh 등(2002)은 위성영상으로부터 추출한 지표온도와 식생지수 자료를 에너지 수지방정식의 입력자료로 사용함으로써 증발산을 추정하는 알고리즘을 개발하였고, Nishda 등(2003)은 MODIS 자료를 바탕으로 Jarvis의 식을 이용해 계산한 표면저항계수를 이용하여 증발산비율(evapotranspiration ratio, EF)를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 이들 방법은 계산에 필요한 기상자료를 최소화하는 방식으로 고

안된 것으로, 단지 일평균기온과 수증기압 자료를 이용한다. 최근에는 MODIS 영상자료로부터 순복사량(Rn)을 높은 정확도로 추출하는 알고리즘들이 개발되고 있어 EF로부터 증발산량 산출이 가능하게 되었다.

이처럼 MODIS를 활용한 증발산량 추정 은 이제 기술적으로 거의 가능한 단계에 이르렀으며, 지역 규모의 지표 및 기후특성을 반영하여 높은 예측력을 가진 증발산 알고리즘이 개발되었다. MODIS를 활용한 증발산량 추정기법에서 새롭게 대두되는 문제는 구름 혹은 눈 등이 지표를 피복한 경우의 자료결손 문제를 해결하여 연속 자료를 산출하는 것이다. 이를 해결하기 위해서 미항공우주국(NASA)에서는 전구 규모의 기상예보값을 증발산 추정을 위한 기상입력값으로 사용하고 있지만, 지역규모에서는 공간 해상도 및 예측 신뢰도 등이 부적합한 편이다. 따라서 지역 규모의 상시적인 증발산 예측에는 가능한 한 위성영상 기반의 기상입력자료를 개발하여 사용하고 자료결손시 중규모기상예보모형과의 자료동화에 의해 고해상도의 신뢰도 높은 기상자료를 제공받는 것이 필요하다.

### AKLDAS를 이용한 증발산 추정

지표자료동화체계(Land Data Assimilation System)란 검증된 지표물리모델, 관측 및 분석장 기반의 지표부근 기상조건, 그리고 위성으로부터의 지표성질변수를 통합하여 증발산을 포함한 현실조건이 반영된 지표변수를 산출하는 방법이다. 현재 NASA 및 미국 기상국에서도 같은 방법을 이용해 농업 및 수문학 분야에 활용하고 있다. HydroKorea 개발에서는 한반도에서 활용가능한 자료들을 사용하여 개선된 한국형 지표자료동화체계(Advanced Korea Land Data Assimilation System; AKLDAS)를 구축하고 이를 이용하여 추정된 증발산 지도를 실측 및 위성자료와 비교·평가한 후 공간규모를 확장하여 한반도 지역의 증발산 지도를

작성한다. 또한, AKLDAS를 통해 산출된 고해상도 지표조건은 차세대 수치예보모형(Yonsei Wether Research and Forecasting; YWRF)의 지표초기 조건으로 활용하여 개선된 지역규모 증발산 예측에 활용할 수 있다.

그러나 우리나라와 같이 복잡 지형에 기인한 국지적인 호우가 빈번한 지역에서는 고려해야 할 요소들이 많아지기 때문에 정확한 예측이 어려운 실정이다. 현재 기상청에서는 고해상도 예측을 목적으로 개발된 WRF의 현업화를 통하여 국지적 규모의 강수량 예측력 향상을 위해서 노력중인데 이 과정에서 우선적으로 해결해야 할 과제들이 있다. 그 중 WRF의 지표-대기 상호작용을 고려한 모듈(Land Surface Model) 구동을 위한 지표 및 토양 초기조건(토양 수분, 토양 온도, 지표온도, 쌓인 눈 깊이 등) 입력자료 획득이 어렵다는 점을 들 수 있다. 이를 해결하기 위하여 HydroKorea에서는 한국의 대표 식생 3개 지점에서 직접 관측된 값을 이용하거나 MODIS와 기타 위성자료를 이용한 복원 알고리즘을 통한 추정을 통하여 지면모형에 적합한 모형을 이용하여 자료를 생산하고 있다.

또한 관측시스템에서의 시-공간적 규모의 제약, 위성의 경우 식생 및 구름이 있을 때 추정값의 정확성 문제, 그리고 생산된 값들은 수치예보모형의 정확도에 의존한다는 문제점들을 노출하고 있다. 이에 대한 대체방안으로 토양 조건에 중요한 강제역할을 하고 관측이나 위성의 복원이 비교적 정확한 강수량이나 지면도달일사량 자료를 이용하여 지면모형을 강제시켜 간접적으로 관측정보가 포함된 지표 및 토양 조건을 산출할 수 있다. 이 방법은 NASA, NCEP, NCAR 등과 같은 미국의 여러 연구기관들을 통해 개발 운영중이며, 산출된 초기조건을 현업용 WRF에 접합시켜 예측성 향상에 노력 중이다. 우리나라에서도 지난 수년간 AKLDAS를 시험 구축하여 한반도의 수집 가능한 과거 강제자료를 이용하여 실험하고자 하는 날짜의 지표조건을 생산한 후, 지역수치모형 WRF와의 연동이 수행되

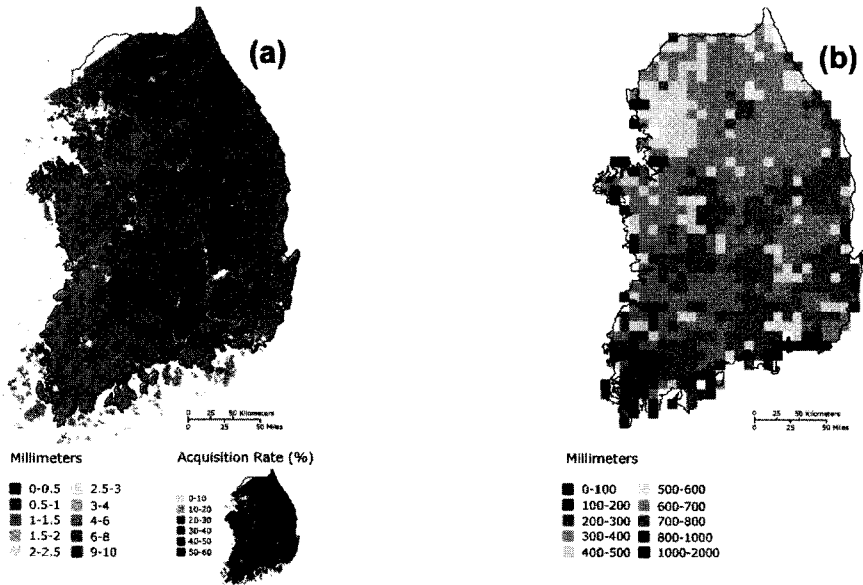


그림 4. 2006년 MODIS 일평균 증발산 지도(a)와 2006년 AKLDAS 연적산 증발산 지도(b) 예비 결과

었다. 이에 따라 우리나라와 같이 복잡 지형 및 지표성질의 비균질성이 나타나는 지역에서도 현실적인 지면 초기조건을 제공하여 국지적으로 발달하는 강수의 예측성 향상을 기대할 수 있게 되었다. 아울러 위성 및 관측 자료의 결여를 실시간으로 꾸준히 수행되는 AKLDAS의 결과로 보완하여 시공간적인 제약에서 벗어난 안정된 통합 물관리 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 2006년 증발산 지도 예비 결과에서 본 문제점

MODIS 증발산 지도의 경우 광학 또는 열적의 위성의 최대 약점인 구름 등에 의한 자료 결측은 연속적인 모니터링이라는 의미에서 많은 제한 요소로 작용하고 있다. 그림 4(a) MODIS 증발산 지도 예비 결과는 천청일 관측자료 수득율이 낮은 관계로 관측자료만으로 일평균 증발산량을 산출하였다. 그 결과 전국 평균 약 2mm/day의 증발산이 발생하는 것으로 추정되었고 이 값을 단순히 1년 단위로 환산할 경우 연간 730mm 이상의 증발산 값을 나타내

어 과대 평가된 값을 보인다. 위 결과는 천청일 자료를 대상으로 분석하기 때문에 관계배수로 인하여 물공급이 많은 서남해안 평야지역을 중심으로 높은 증발산 값을 보인다. 따라서 MODIS로부터 얻어지는 누적 증발산량은 과대 평가될 가능성이 있다.

한편, 2006년 AKLDAS 증발산 지도 분석 결과 우리나라에서는 강수대비 약 49%의 물이 증발산을 통하여 대기로 되돌아가는 것으로 나타났다(그림 4(b)). 현재 AKLDAS는 수평 격자 분해능이 10km로 동아시아 전체를 대상으로 하기 때문에 소규모 지표 특성 효과 반영이 미흡하다. 그리고, 하나의 지면 모형에 근거하기 때문에 모형 자체의 성능과 입력자료에 영향을 받는다. 2006년을 대상으로 시험제작한 증발산 지도에서는 도시 지역에 대한 지면 정보와 증발산 관련 정보가 부족하며, 이를 표현하는 모형의 알고리즘 개선이 요구된다. 또한 AKLDAS 경우에 농경지의 인위적인 물 공급과 사용 문제를 다루고 있지 않아 이에 따른 오차가 발생할 수 있는 문제점이 지적되었고 이에 대한 개선작업이 진행 중이다.

이상의 예비 결과는 관측 자료를 이용한 최적화를 수행하지 못하여서 이에 따른 관측값에 대한 상대적 오차가 발생할 수 있음을 시사한다. 실제로 2006년 광릉 산림과 해남 농경지의 증발산량 비교에서 MODIS와 AKLDAS를 이용한 증발산량 추정치가 모두 관측된 증발산량보다 높은 값을 나타내고 있으며, 현재 원인 분석 작업 중이다.

#### 4. 증발산 지도 활용성과 전망

HydroKorea 개발에서는 현재 2006년을 대상으로 실측, 모형, 위성영상을 융합한 증발산 지도를 시험제작하였으나, 장기간 증발산 기후도 제작을 위해서는 모형의 입력자료 입수가 시급한 실정이다. 또한, 고해상도의 관측 자료가 확보될 경우 입력자료 및 산출자료에 대한 해상도 확장이 가능할 것이다. AKLDAS에서 생산한 기상자료를 YWRF의 입력자료로 활용함으로써 단기간 증발산 예보의 실현이 기대된다. 현재 AKLDAS를 통해 산출된 현실적인 지표조건을 YWRF의 지표초기조건으로 사용하여 특정 강수사례에 대한 YWRF에서의 지표초기조건이 강수 및 증발산에 미치는 영향을 파악 중에 있다. 향후 한반도 전 지역에 대한 증발산 지도를 산출하기 위해 AKLDAS-YWRF를 적분하여 24시간 후의 3km 이하의 해상도를 가지는 일 증발산량을 연속적으로 산출할 수 있는 시스템을 구축

하고, 차후 이를 물관리 기관의 현업에 적용하기 위한 기반 구축을 계획 중이다.

현장 관측으로 산출되는 생태수문요소들은 모두 점 자료(point data)이므로 3차원 공간과 4차원 시간의 변화를 고려하여 해석, 예측하기 위해서는 규모에 따른 변화를 평가할 수 있는 스케일링 논리의 개발이 필수적이다. 즉, 소유역 단위의 물수지 연구를 대유역과 한반도 전체를 아우르는 수자원 관리 도구로 활용하기 위해서는 위성영상, 생태수문 모형 및 지리정보시스템의 연계 및 활용기술이 요구된다. HydroKorea 개발의 연구결과는 전 세계적으로 현 단계의 수문순환 연구가 당면하고 있는 현장 관측값의 공간적인 제약성을 극복할 수 있게 할 것이다. 아울러 본 연구의 목표인 실측, 모형, 위성자료에 의한 물수지의 예보가 현 단계에서 문제시되고 있는 수자원의 개발 및 평가(예측) 분야에 실질적인 평가체계(protocol)를 제시할 뿐만 아니라, 나아가 효율적이며 체계적인 수자원 관리의 세계적인 선도 기술로 자리매김 하는 날을 기대해 본다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 21세기 프론티어연구 개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호, 1-8-3)으로 수행되었다. ☺

#### 참고문헌

- 김 준 외, 2009: HydroKorea 개발 3단계 2차년도 연구 보고서.  
 HydroKorea 개발 홈페이지, 2009: <http://www.hydrokorea.org>  
 Hong, J., J. Kim, D. Lee, and J.-H. Lim, 2008: Estimation of the storage and advection effects on H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> exchanges in a hilly KoFlux forest catchment. *Water Resources Research*, 44, W01426.  
 Jones, J. A. A., 1997: *Global Hydrology*. Addison Wesley Longman Ltd., Essex, UK, 399pp.

- Kang, M., S. Park, H. Kwon, J. Hong, J. Lim, K. Kim, Y. Choi, and J. Kim, 2009: Evapotranspiration from a deciduous forest in a complex terrain and a heterogeneous farmland under monsoon climate. *Asian-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 45, in press.
- Kim, J., D. Lee, J. Hong, S. Kang, S.-J. Kim, S.-K. Moon, J.-H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, B.-L. Lee, and S. Kim, 2006: HydroKorea and CarboKorea: cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecological Research*, 21, 881-889.
- Oki, T., and S. Kanae, 2006: Global Hydrologic cycle and world water resources. *Science*, 313, 1068-1072.