

선진국의 기후변화 연구동향(Ⅱ)

- 수자원관리에 대한 영향을 중심으로 -

김 영 오 (서울대학교 지구환경시스템공학부 전임강사)

서 용 원 (서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정)

1. 머리말

앞서 '선진국의 기후변화 연구동향(I)'에서 살펴본 바와 같이 기후변화가 수문현상에 미치는 영향에 대한 연구는 1980년대이후 급속히 진행되어왔다. 그러나 기후변화에 대비한 수자원의 효율적 관리에 대한 연구는 선진국에서도 미비한 실정이며, 대다수 수자원관리에 관한 연구도 현존 수자원시스템이 유량의 변화에 어떻게 반응할 것인가에 대한 민감도 분석에 그치고 있다.

'지구 온난화'라는 대명제와 이에 따른 수문현상의 변화에 대부분의 학자가 동의하고 있으나 실제 수자원관리에 능동적으로 대처하지 못하고 있는 이유로는 다음의 몇 가지를 생각해 볼 수 있다. 첫째로, 새로운 수자원정책의 수립이 사회에 미치는 파급효과를 생각할 때, 기후변화에 대한 일반 대중들의 인식이 아직도 확고하지 못한 상태에서 지구 온난화를 가정한 수자원정책으로의 전환은 시기상조라고 보는 견해가 지배적이기 때문이다. 둘째로는 현재까지도 인구증가 등 기후변화 이외의 변수들이 수자원관리에 있어 상대적으로 더 중요하기 때문이다. Klemes(1990)는 기후변화에 대한 정확한 예측은 현재 과학수준으로는 그 능력 밖이며 기후변화에 대한 정확한 예측이 이루어지기 전까지는 오히려 비기후학적(non-climatic) 변수의 예측에 주력해야함을 강조했다. 물론 이런 주장이 기후변화에 대한 현재의 연구가 필요 없음을 의미하지는 않는다. 왜냐하면, 지구온난화는 그 진실의 여부가 시간이 지날수록(비

록 긴 시간의 소요가 예상되지만) 점점 밝혀질 것이 분명하기 때문이다. 그러므로 현재의 연구성과는 미비하지만 미래를 대비하기 위한 기반을 제시할 것이고, 이런 적응전략으로 Fiering and Rogers(1989)는 베이지안 결정이론(Bayesian Decision Theory)을 제시하였다. 즉, 베이지안 결정이론(Bayesian Decision Theory)에 입각한 수자원관리 방안은 기후변화에 대한 새로운 정보가 제공될 때마다 그 운영률을 개선할 수 있다는 장점이 있다.

현재까지 수자원시스템의 설계와 운영은 이 시스템에 유입하는 유량이 시간에 대해 정상(stationarity)이라는 가정에서 출발하였지만, 기후변화를 고려한 수자원관리는 유량의 비정상성(nonstationarity)을 고려해야 한다. 그러므로 기후변화에 대한 연구는 '유량의 정상성'이라는 기본전제에 의구심을 품기 시작할 시점으로 올라간다. Lettenmaier and Burges(1978)는 '장기 지속성(long-term persistence)을 지닌 유량의 정상 시계열'과 '평균이 비정상인 시계열'을 구별하기는 어렵지만, 두 시계열이 수자원시스템에 미치는 영향은 현저히 다를 수 있음을 보여주었다. 이 연구는 수자원분야의 연구 중 앞으로 언급될 Schwarz(1977)의 연구와 함께 기후변화의 영향을 고려한 최초의 연구로 추정된다. 기후변화에 대비한 수자원관리의 필요성을 일반적으로 서술한 문헌으로는 Matalas and Fiering(1977), Riebsame(1988), Fiering(1993), Klemes(1993), Stakhiv(1993), Kaczmarek(1996), Kaczmarek, Strzepek and Somlyody(1996), Kaczmarek, Kundzewicz and

Priazhinskaya(1996) 등이 있으며, Arnell(1998)은 수자원관리의 실무자에 대한 설문조사를 바탕으로 영국의 미래 수자원관리 방안에 대한 광범위한 진단을 수행하였다.

이어지는 절에서는 기후변화와 수자원관리에 대한 연구사례를 서술하였으며, 끝으로 현재 전 세계에서 수행되고 있는 기후변화 연구과업을 정리하였다.

2. 기후변화와 수자원관리

(1) 유량 시나리오의 발생

기후변화가 수자원시스템에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구는 통상 기후변화로 예측되는 유량 시나리오를 수자원시스템 모형에 입력하여 그에 대한 수자원시스템의 거동을 살펴본다. 유량 시나리오를 간단히 작성할 수 있는 기법으로는 기후변화가 가져올 유량의 특성변화를 통계변수의 변화로 표현하는 방법이다. Schwarz(1977)는 lag-1 Markov모형으로 유량을 모의발생시킨 후 유량의 평균, 분산, 왜곡도, 자기상관계수를 일정한 비율로 증가 또는 감소시켜 가면서, 각 경우에 있어 미국 동부지역의 용수공급시스템의 민감도를 검토하였다. 이러한 기법은 앞서 설

표 1. 기후변화와 수자원관리에 대한 연구사례

Title	1st Author	Year	Basin	Climate Scenario	Flow Scenario	WRM*/type	Time Scale
Climatic Change and Water Supply : How Sensitive is the Northeast	Schwarz	1977	Potomac River in USA	-	AR(1)	FORTTRAN-based /simulation	monthly
Sensitivity of Southeastern Inland Water Resources to Climate Change	Miller	1990	TVA in USA	GCM	EPA Change Ratio	Weekly Scheduling Model /simulation	weekly
Climate Sensitivity of California Water Resources	Lettenmaier	1991	California CVP in USA	GCM	Spatial Disaggregation Mmodel	WRMI /simulation	monthly
Sensitivity of Pacific Northwest Water Resources to Global Warming	Lettenmaier	1992	American River in USA	GCM	NWS snowmelt & Topmodel	heuristic rule, fill-and spill rule, & ELQG optimal rule	monthly
Potential Effects of Climate Warming on the Water Resources of the Columbia River Basin	Sias	1994	Columbia Basin in USA	GCM	Snowmelt/ Evapotranspiration Model & Topmodel	Water Resources Screening Model	monthly
Water Resources Implications of Global Warming: A U.S. Regional Perspective	Lettenmaier	1999	Boston in USA	GCM	NWSRFS snowmelt & Soil Moisture Accounting	STELLA-based /simulation	weekly
			Tacoma in USA			STELLA-based /simulation	weekly
			Savannah River in USA			FORTTRAN-based /simulation	weekly
			ACF in USA		NWS snowmelt & VIC-2L	STELLA-based /simulation	monthly
			Columbia River in USA			HEC-PRM /optimization	monthly
			Missouri River in USA			HEC-PRM /optimization	monthly
Sensitivity of Water Resources in the Delaware River Basin to Climate Variability and Change	Mehrotra	1999	3 Basins in India	Synthetic	Conceptual Rainfall-Runoff Model	HEC-PRM Single Hypothetic Reservoir	monthly

*1. Water Resources Model

명한 GCM과 수문모형 등이 개발되기 전에도 비교적 간단히 현재 운영 중인 시스템의 기후변화에 대한 민감도를 유량특성 변화의 관점에서 살펴볼 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 유량발생 모형이 미래에 발생 가능한 기후 및 수문현상에 근거하고 있지 않으며, 변화시키는 통계특성외의 유량특성은 과거자료와 동일하다는 비현실성이 큰 단점이다.

일반적으로는 앞서 설명한 바와 같이 GCM과 수문모형을 차례로 이용하여 유량 시나리오를 발생시키는 기법이 널리 사용되고 있으나 많은 연구에도 불구하고 아직도 각 모형화 단계마다 불확실성이 상당히 존재하는 것으로 알려져있다.

(2) 수자원시스템 모형

일반적인 수자원시스템연구와 마찬가지로, 기후변화에 대한 연구 역시 모의모형(simulation model)과 최적화모형(optimization model)을 수자원시스템 모형으로 사용할 수 있다. 모의모형에 사용되는 수자원시스템의 운영률은 현재 사용중인 실제 운영률 또는 최적화모형에서 산출된 최적 운영률로 대표될 수 있다. 그러나 지금까지 진행된 기후변화에 대한 연구는 표 1.에 나타난 바와 같이 현재 운영률을 이용한 수자원시스템의 민감도 분석이 주류를 이루고 있는데, 그 이유는 수자원시스템 모형이 현재의 운영을 위하여 이미 개발되어있어 쉽게 이용할 수 있기 때문이다. 예를 들면, Schwarz(1977), Miller(1990), Lettenmaier and Sheer(1991), Sias and Lettenmaier(1994) 등의 연구에서는 다른 연구에서 개발된 수자원시스템 모의모형을 이용하여 기후변화에 대한 연구를 수행하였다.

표 1.에서 주목할만한 또 한가지 사항은 Mehrotra(1999)의 연구를 제외하고는 모두 미국의 연구사례라는 점이다. 그러므로, 기후변화가 수자원관리에 미치는 영향에 대한 평가는 미국을 제외하고는 아직 미비한 실정임을 다시 한번 알 수있다. Lettenmaier et al.(1999)은 미국의 대표적인 수자원시스템 6개를 선택하여 GCM으로부터 수자원시스템모형까지 광범위하고 체계적인 연구를 수행하였는데, 이 연구

에서는 STELLA라는 '객체지향적 모의모형'을 주로 사용하였다는 점이 주목할만 하다. 객체지향적 모의모형은 계산능력에 있어서는 기존의 FORTRAN 등을 이용한 모의모형에 비하여 뒤떨어지나, 모형을 개발하고 수정하기에 매우 편리하므로 기후변화 연구에 이용될 경우 다양한 유량변화 시나리오를 수자원시스템 모형에 쉽게 입력할 수 있다는 장점이 있다.

기후변화가 유량의 변화를 가져온다면, 이에 적절히 대응하기 위한 수자원시스템의 최적 운영률이 필요할 것이나 기후변화 연구에 최적화모형에서 산출한 최적 운영률을 사용한 사례는 매우 드물다. Lettenmaier et al.(1992)은 가상의 저수지를 설정하고 그 운영률로 간단한 운영률인 'heuristic rule'과 최적 운영률인 'ELQG(Extended Linear Quadratic Gaussian) rule'을 비교하였다. 이들의 연구는 온난화를 가정한 경우 발전에 의한 수입은 최적 운영률을 사용하면 상당히 증가할 것으로 예측하였으나, 물공급의 신뢰도는 지구온난화의 경우 heuristic rule과 최적 운영률이 거의 차이가 없음을 보여주었다. 최적 운영률을 사용한 또 다른 연구로는 Lettenmaier et al.(1999)의 6가지 사례 중 Columbia와 Missouri System의 경우인데, 이들은 HEC-PRM 모형에 발전량을 최대화 하는 목적함수를 사용하였다.

(3) 수자원시스템의 거동 평가

수자원시스템의 거동(performance)은 그 시스템이 지향하는 목적을 얼마나 도달하였는가로 평가될 수 있다. 예컨대, 발전용 댐의 경우에는 발전요구량을 충분히 충족시켜야 하며, 홍수조절용 댐은 하류의 홍수피해를 최대한 줄일 수 있어야 한다. 이러한 거동을 정량화하는 척도로는 일반적으로 절대척도와 상대척도가 있다. 절대척도는 시스템의 상태나 출력인 발전량, 저수위, 하류수위 등의 절대량을 표현하는 반면, 상대척도는 시스템의 상태나 출력을 정해진 목표값(target)에 비교한다. 상대척도에 대표적으로 사용되는 지표로는 Reliability, Resilience, Vulnerability 등이 있으며, 이에 대한 자세한 설명은 Hashimoto et

al.¹⁾을 참조하기 바란다.

Schwarz(1977)는 당시의 연구 결과를 토대로 Potomac River의 경우 기후변화가 수자원시스템에 많은 영향을 주고 있지 않다고 결론지었으나, 그 외의 대부분의 연구에서는 기후변화의 영향이 상당한 것으로 밝혀지고 있다. Lettenmaier 등이 1991년 이후 연속적으로 수행한 연구들을 살펴보면, 산악지역으로 둘러 쌓인 미국 서부지역의 경우 지구온난화는 겨울철 강설을 상당 부분 강우로 변화시켜 겨울철 유출을 증가시킨다고 예측했다. 이러한 경우 Lettenmaier and Sheer(1991)가 연구한 CVP (Central Valley Project)에서는 겨울철 홍수의 위험이 증가하고, 여름과 가을에는 가뭄의 위험이 커지므로 급수의 신뢰성이 감소할 것이라 예측하였으나, Sias and Lettenmaier(1994)가 연구한 Columbia River Basin에서는 홍수의 위험과 급수의 신뢰성이 모두 향상된다는 결과를 발표하였다. 발전의 경우 많은 연구에서 지구 온난화로 그 생산량이 증가한다고 예측하였으나, Lettenmaier et al.(1999)은 그렇지 않은 사례를 포함하였다. 그러므로, 기후변화에 대한 수자원시스템의 거동은 연구대상시스템의 물리적 특성과 운영목적, 그리고 사용된 GCM시나리오에 따라 다양하게 나타나고 있다고 할 수 있다(Lettenmaier et al., 1999).

3. 수자원 분야 기후변화 연구과업 현황

(1) 아시아와 오스트레일리아

· GAME(The GEWEX Asian Monsoon Experiment)

▶ <http://www.ihias.nagoya-u.ac.jp/game/index.html>

1990년 초반이후 WCRP(World Climate Research Programme), GEWEX(the Global Energy and Water Cycle Experiment(GEWEX)) 등의 과업들이 수립되어 아시아와 오스트레일리아

지역에 대한 세계적인 기후 시스템과 연관된 물리적 현상에 대한 연구가 이루어지고 있다. WCRP 일본 위원회(The Japanese National Committee of the WCRP)는 몬순현상을 연구하기 위해 GEWEX의 범위안에서 장기간의 국제 실험을 계획하였는데 이것이 GAME(The GEWEX Asian Monsoon Experiment)이다. GAME의 연구 프로그램은 1993년 1월 최초로 수립되었으며 이후 중국(1994)과 태국(1995)에서 개최된 학술발표회에서 더욱 논의 되었다. GAME의 주된 연구 과제로는 연구범위와 연구방법 이외에다른 국제적 과업들과의 협조이며, 현재 구체적인 프로그램과 연구 계획을 준비하고 있다.

GAME의 연구목표는 몬순현상에 대한 이해 향상, GCM과 수치예측모형을 이용한 몬순의 계절 모형화, 그리고 수문순환에 대한 몬순의 영향평가 등이 다. 다음은 GAME에서 집중하고 있는 분야이다.

1. 아시아 몬순 시스템의 에너지물 순환에 대한 관측(Observation of the Energy and Water Cycle)
2. 지상관측과 위성관측자료를 통합한 아시아 몬순지역에 해당하는 대기와 육지 열의 균형(Observation of the Heat Balance)
3. 대기-육지의 상호작용에 대한 대규모의현장조사(Macro-scale Field Investigations of the Land Atmosphere Interaction)
4. 중규모의 대류현상과 지역 수문순환에 대한 현장기반 관측및 모형화(Modelling and Field-based Studies of Meso-scale Convective Systems and Regional Hydrological Cycles)
5. 육지-대기-해양의시스템 모형을 결합한 몬순연구(Studies of Monsoon Using Coupled Land/Atmosphere/Ocean System Models: Related to GCM)
6. 모든프로그램을 종합하여 수평해상도 50km

1) Hashimoto, T., Stedinger, J., and Loucks, P. (1982). "Reliability, Resilience, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation". Water Resources Research Vol. 18 No. 1, pp. 14-20.

의 신뢰할만한 예측도출(Createa Reliable Forecasting Model with a Horizontal Resolution of 50km and to Improve the Modelling of the Effects of Clouds and Underlying Surface Parametrization)

GAME의 구조는 다음과 같은 요소들로 이루어져 있다.

1. 위성관측(Satellite Observations)
2. 물리적 과정에 대한 연구와 지역별 현장실험 (Studies of Process and Regional Field Experiments)
 - i) 동남아시아의 열대우림
 - ii) 아열대 지역
 - iii) 티벳고원
 - iv) 영구동토층, 타이가, 툰드라 지역
3. 모형연구(Model Studies)
4. 자료수집과 관리(Data Collection and Management)

(2) 북아메리카

· EOS(The Earth Observing System)

▶<http://eospso.gsfc.nasa.gov/>

EOS는 기후 시스템에 대한 부족한 정보를 보완하기 위해 NASA, 미국정부기구, 기타 국제 기관이 수립한 'Mission to Planet Earth' 계획(1991)에 포함되어 있다. 현재 EOS의 연구는 현존하는 위성자료의 사용 및 EOS에 선행하였던 위성계획으로부터 얻을 수 있으리라 예상되는 새로운 형식의 자료이용에 대한 준비작업에 집중되고 있다.

· ISLSCP(First International Satellite Land Surface Climatology Project), FIFE(Field Experiment)

▶<http://esm.versar.com/fife/ISLSCP.htm>

▶<http://esm.versar.com/fife/FIFEHome.htm>

일반적으로 수문현상에 대한 기후변화의 영향을

평가하는데 있어 기후모형은 가장 중요한 요소로 꼽히고 있다. 그러나 한편으로는 복잡한 기후현상에 대한 불완전한 모의로 인해 이에 대한 보완책으로 원격탐사(Remote Sensing)을 이용한 자료구축의 필요성이 제기되었고 이는 FIFE로 시작되었다. FIFE의 목적은 지표면과 대기의 상호작용에 미치는 생물학의 영향을 파악하는 것과 주어진 지표면의 각종 모수값들의 추정에 있어 원격탐사의 이용방법 등을 연구하는 것이다.

· BOREAS(Boreal Ecosystem-Atmosphere Study)

▶http://daacl.esd.ornl.gov/BOREAS/boreas_home_page.html

FIFE의 뒤를 이어 비슷한 연구방법을 이용하여 다른 지역에 수행한 것이 BOREAS이다. BOREAS는 1990년 아한대 삼림 지역(Breal Forest Region)을 연구지역으로 선택하여 시작되었다. BOREAS의 목적은 침엽수 삼림이 지구 온난화에 미치는 영향에 대한 이해를 향상시키는데 있다. 이 과정은 현재 캐나다의 침엽수림의 남방, 북방 한계선 근처에 위치한 두개의 지점에서 실시되고 있다.

· GCIP(GEWEX Continental-scale International Project)

▶<http://ecpc.ucsd.edu/gcip/>

FIFE와 BOREAS와 같은 과업들은 수 킬로미터 단위의 작은 지역에서의 기후, 수문과정에 대한 이해를 돕는 목적을 가지고 있다 그러나 GCM과 같은 대규모 모형의 적용을 위해서는 중규모나 대륙규모로 확장할 필요가 있다. GCIP은 WCRP(The World Climate Research Programme)의 시작과제로서 광대한 지역에 대한 물과 에너지 수지를 연구하기 위해 계획되었다. GCIP의 주된 과제는 기후예측을 목적으로 기후변화에 대한 이해와 모형의 능력을 향상시키는 일이다. 현재 GCIP의 과제는 미국의 Mississippi 유역에 집중되고 있다.

GCIP의 과학적 계획은 육지-대기-해양의 상관관

계 및 에너지 순환에 대한 이해를 향상시키기 위한 여러 가지 문제들을 제시하고 있는데 주된 과업목표는 다음과 같다.

1. 대륙규모로 공간적, 시간적 수문학적 변동과 에너지 수지 결정
2. 고해상도의 대기모형과 수문-대기 결합모형과 연관한 중규모의 수문모형 개발 및 검증
3. 위성자료와 지상관측을 결합한 자료 수정 방법의 개발
4. 지역규모로 수자원시스템에 미치는 미래의 기후변화의 영향평가 능력을 제공

지표면에서 일어나는 물리적, 동적 현상에 대한 모형화 및 이해에 대한 스케일의 영향도 이 과업의 주된 요소이다. 개발된 기술은 GCM의 예측해상도에 적합한 것이어야 하며 따라서 지상에서 일어나는 현상들의 높은 불균등성을 통합하여 표현할수 있어야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 GCIP의 연구 노력은 다음과 같은 네 가지 규모에 집중될 것이다.

1. CSA(Continental-scale Area) Activities - Size of the Mississippi River Basin, 3.2 million km²
2. LSA(Large-scale Area) Activities - Four LSAs Covers the Mississippi River Basin
3. ISA(Intermediate-scale Area) Activities - Order of 10³-10⁴ km²
4. SSA(Small-scale Area Activities - less than 10² km²

GCIP의 연구 목적을 달성하기 위해 수많은 주 연구 분야들이 정의되었다. 이러한 주 연구분야 및 목적은 다음과 같다.

1. Diagnostic Studies : Mississippi 유역의 연수문현상의 순환에 대한 향상된 이해를 도모
2. Coupled Modelling : GCM에 있어 지표면 요소 설명을 향상
3. Data Assimilation : 모형과 자료 이용기술을 향상

4. Project for the Intercomparison of Land Surface Parameterization Schemes (PILPS) : 대기모형에 있어 지표면 부분모형의 향상
5. Water Resources Research: 대기모형과 수문모형을 결합한 결과를 수자원 관리의 입력값으로 사용하여 다양한 시간 스케일에 대해 적용
6. Precipitation : 미시시피 유역의 시공간적 강수 특성에 대한 이해 향상
7. Streamflow and Runoff Research: GCIP연구 대상지역의 시공간적 유출특성에 대한 이해 향상
8. Soil Moisture: 모형을 이용한 예측과 관측치를 결합한 시공간적 토양함수량 특성에 대한 예측 및 이해 향상
9. Land Surface Characteristics: 지표면과정(Land Process)의 모형모수와 지표면 특성사이의 연관성에 대한 양적인 이해 향상, 모형 개발 및 검증에 사용될 자료의 이용성을 향상
10. Clouds and Radiation Research : 구름현상의 물리적 이해와 기술 향상

1996년 이후 GCIP의 연구는 LSA 남서부에서 진행되고 있으며 특히 Arkansas와 Red River 유역에 집중되고 있다. 1996년 후반에 LSA 북부, 1997년 후반에 LSA 동부에 대한 연구로 이어지고 있다.

· MAGS(Mackenzie GEWEX Study)

▶ <http://www.tor.ec.gc.ca/GEWEX/MAGS.html>

캐나다의 GEWEX는 국제적 GEWEX 계획에 기여하고 기후변화로 인한 캐나다 수자원의 변화에 대한 예측과 이해를 향상시키고자 계획되었다. 이 과업의 주요 목표는 특히 고위도, 한대 지역에 대한 자료를 제공하여 모형을 향상시키고자 하는 것이다. MAGS는 캐나다 GEWEX의 주요구성 요소이며 북부로 흘러가는 Mackenzie 유역을 대상으로 하고 있다. Mackenzie 유역은 Mississippi 유역과 함께

GCIP의 대규모 수문모형(Macroscale Hydrological Model)의 테스트와 검증에 위한 대륙규모의 면적을 이루고 있으며 유역 내에서는 한대지역에서 발생하는 많은 현상들-Snow Ice Process, Permafrost, Ice Jams., Cloud Radiation Interactions-이 일어나고 있다. MAGS의 중심목표는 100km의 공간규모와 월 단위의 시간간격으로 캐나다 극지역의 물수지 및 에너지 균형을 모의할 수 있는 모형 개발에 있다.

· ACSYS(Arctic Climate System Study)

▶http://www.npolar.no/acsys/reports/dmip_rpt1.htm

극지방에서 일어나는 물리적 과정은 전세계 기후에 큰 영향을 미친다. 특히 극지방 해양은 전세계 해양의 열염 순환(Thermohaline Circulation)에 큰 영향을 미친다. ACSYS는 극지방 유역의 기후과정 및 수문과정에 대한 이해를 향상시키고자 1992년 수립된 과제이다. ACSYS의 주요목적은 Global Atmosphere-ocean Model을 이용한 극지방 모의의 과학적 기반을 제공하는 것이다.

· SALSAMEX(Semi-Arid Land Surface-Atmosphere Mountain Experiment)

▶<http://tucson.ars.ag.gov/salsa/archive/publications/igarrs/salsamex.html>

SALSAMEX는 반건조 산악지대의 지표면-대기 상호작용을 예측하고, 다양한 스케일로 수문기상학적 과정에 대한 지형학적 영향을 연구하기 위해 1995년 수립된 과업으로 현재 진행 중이다. FIFE나 BOREAS와 같은 단기 생물군계에 대한 연구과업과는 달리 SALSAMEX는 3-10년의 긴 기간으로 계획되었다. 과업을 위해 선택된 곳은 Arizona 남동부와 멕시코 Sonora 북부지방 으로 전체면적은 약 12,000km²이다.

(3) 남아메리카

· ARME(The Amazon Region Micrometeorological Experiment)

▶<http://atitiaia.cptec.inpe.br/lba/prelba/arme.html>

ARME(1983)는 2년 간격으로 지표면-대기의 물과 에너지 변화를 연구하기 위해 마련되었다. 이 연구를 위해 45m 높이의 관측탑을 세워 강수량, 차단, 증산, 흙의 함수량, 그리고 Ground Heat Flux에 대한 연속적인 관측을 시행하였다. ARME의 자료에 따르면 아마존 중앙 우림지역에서의 지표복사는 12-13%, 증산량은 연 강수량의 50%인 것으로 나타났다.

· ABRACOS(The Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study)

▶<http://yabae.cptec.inpe.br/abracos/index.html>

ABRACOS는 식생과 대기권의 관계를 물과 에너지 순환을 중심으로 연구하고자 1990년 시작되었다. 이 과업은 영국의 Overseas Development Agency, Institute of Hydrology와 브라질 정부, 관련 브라질 연구기관(INPE, INPA, CENA)에 의해 후원되고 있다.

· CAMREX(Carbon in the Amazon River Experiment)

▶<http://boto.ocean.washington.edu/camrex/index.html>

University of Washington과 INPA 그리고 CENA(National Center Nuclear Energy in Agriculture)는 아마존 유역의 생화학적 과정에 대한 장기간에 걸친 대규모 실험을 진행해오고 있다. 이 연구의 목적은 물과 용해물질, 기타 관련된 활성 물질들에 대한 의 시공간적 분포에 대한 정량화를 포함하고 있다.

· ABLE2(The Amazonian Boundary Layer Experiment), FLUAMAZ(The Amazon Moisture Flux Experiment)

▶<http://atitiaia.cptec.inpe.br/lba/prelba/fluamaz.html>

ABLE2와 FLUAMAZ는 각각 1985년과 1897년에 시작된 과제로서 아마존 지역의 대기화학 구조를 파악하기 위한 목적으로 계획되었다. 이 과업은 NASA의 대기화학 계획(The Atmospheric Chemistry Program)의 시작과업으로서 US National Science Foundation, NCAR(The National Center for Atmospheric Research), INPA와의 공동작업으로 이루어지고 있다.

· The LBA Experiment(The Large-scale Biosphere in Amazonia)

▶<http://www.pik-potsdam.de/mirror/bahc/lba/research/hidro.html>

LBA Experiment(1997)는 지역적 열, 수분, 생화학적 순환에 대한 이해를 향상시키기 위해 계획된 과제로서 WCRP/IGBP와의 공동연구로 이루어지고 있다. 또한 이 과제는 ISLSCP, IGPO/GEWEX와 UNESCO 등에 의해 지원되고 있다.

(4) 유럽

· FRIEND(Flow Regimes from International Experimental and Network Data)

▶<http://www.nwl.ac.uk/ih/www/research/mfriend.html>

FRIEND는 UNESCO의 3, 4, 5회 International Hydrological Programmes에 크게 기여를 한 국제적 협력과제로서 1985년 시작되었다. 초기에는 유럽의 북부와 서부지역에 집중적으로 연구가 이루어졌으며 현재 유럽동부와 남부지역으로 범위를 넓혀가고있는 중이다. FRIEND는 2500개의 유역-대부분 1,000km² 이하-을포함하는 The European Water Archive Data Base에 기반한 연구들로 구성되어있다.

· HAPEX-MOBILHY(The Hydrological Atmospheric Pilot Experiment-Modelisation du Bilan Hydrique)

▶<http://blg.oce.orst.edu/hapex/>

HAPEX-MOBILHY는 주요한 중규모 현장 연구(Mesoscale Field Experiment) 중의 하나로서 1986년에서 1988년 사이에 프랑스 남서부의 100×100km 지역에서 이루어졌다.

· NOPEX(The Nordic Hydrological Experiment)

▶<http://www.hyd.uu.se/nopex/>

NOPEX는 스웨덴의 Uppsala 지역(100×100 km)을 대상으로 진행중인 중규모 지표면 연구이다. NOPEX는 지역규모에서 에너지와물, CO₂의 순환을 관측, 모의하는 것을 목적으로 한다.

· BALTEX(The Baltic Experiment)

▶<http://w3.gkss.de/baltex/baltex.home.html>

BALTEX는 Baltic 해의 에너지, 물 순환관측과 모의를 목적으로 1994년 시작된 과업이다. 주요 요소로는 해양 모형과 지역 기후 모형의 결합모형 향상이 포함되어 있으며 2001년까지 주요 연구가 계획되어있다.

· MEDALUS(Mediterranean Desertification and Land Use), EFEDA(The European Field Experiment in Dsertification-Threatened Areas)

▶<http://www.cc-ab.uclm.es/idr/efeda.html>

EU의 지원을 받는 MEDALUS의 주요 목표는 사막화의 과정에 대한이해를 향상시키고 사막화를 경감시킬수 있는 방안을 찾는 데있다. 1991년 시작된 EFEDA는 삼림파괴(Deforestation) 관한 연구를 주목적으로 하는 과제이며 지표면과 대기 사이의 상호관계에 중점을 두고 있다.

(5) 아프리카

· The EPSAT-Niger Experiment

The EPSAT-Niger Experiment는 1988년 프랑

스 연구소들과 DMN(Direction de la Meteorologie du Niger)와 Niamey 대학의 협동작업으로 시작되었다. 이 과업의 주요목적은 다음과 같다.

1. 강우량계, 레이더, 위성을 이용한 자료를 결합한 사헬지역의 강수량 예측 알고리즘의 향상
2. 기후측면에서의 자료 사용을 위한 지역규모에서 중규모로의 강우변동의 모형화 작업
3. HAPEX-Sahel의 계측작업에 기초하여, 강우변동이 사헬지역의 수문과정에 미치는 영향에 대한 연구

· The HAPEX-Sahel Experiment

▶ <http://www.orstom.fr/hapex/>

이 과업은 사헬지역의 열, 수증기플럭스 등에 대한 지식을 향상시키기 위한 목적으로 GEWEX의 시작 과제로서 시작되었다. 보다 구체적으로 이 과업은 GCM의 반건조 지역의 수문학적 현상에 대한 모의를 향상시키기 위한 목적과 지난 20년 동안 사헬지역에서 일어난 사막화 현상의 원인을 규명하는 목적을 가지고 있다. ●

〈참고 문헌〉

- Arnell, N. W.(1998). "Climate Change and Water Resources in Britain", *Climatic Change*, Vol. 39, pp. 83-110.
- Fiering, M. B.(1993). "Runoff to Management", *Proceedings of the First National Conference on Climate Change and Water Resources Management*, edited by Ballentine and Stakhiv, US Army Institute of Water Resources, Fort Belvoir, VA, USA, pp. III1-III8.
- Fiering, M. B. and Rogers, P.(1989). *Climate Change and Water Resources Planning under Uncertainty*, Report submitted to U.S. Army Institute for Water Resources, Fort Belvoir, VA, USA.
- Kaczmarek, Z., Kundzewicz, Z. and Priazhinskaya, V.(1996). "Climate Change and Water Resources Planning", *Water Resources Management in the Face of Climatic/Hydrologic Uncertainties*, edited by Kaczmarek, Strzepek and Somlyody, Water Science and Technology Library, pp. 168-193.
- Kaczmarek, Z., Strzepek, K. M., Somlyody, L. (1996). "Water Resources Management under Climate Variability", *Water Resources Management in the Face of Climatic/Hydrologic Uncertainties*, edited by Kaczmarek, Strzepek and Somlyody, Water Science and Technology Library, pp. 378-387.
- Klemes, V.(1990). "Sensitivity of Water Resource Systems to Climate Variability", *Proceedings of the Canadian Water Resources Association 43rd Annual Conference*.
- Klemes, V.(1993). "Design Implications of Climate Change", *Proceedings of the First National Conference on Climate Change and Water Resources Management*, edited by Ballentine and Stakhiv, US Army Institute of Water Resources, Fort Belvoir, VA, USA, pp. III9-III19.
- Lettenmaier, D. P. and Burges, S. J. (1978) "Climate Change: Detection and Its Impact on Hydrologic Design", *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 4, pp. 679-687.
- Lettenmaier, D. P., and Sheer, D. P.(1991). "Climatic Sensitivity of California Water Resources", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, No. 1, pp. 108-125.
- Lettenmaier, D. P., Brettman, K. L., Vail, L. W., Yabusaki, S. B., and Scott, M. J. (1992). "Sensitivity of Pacific Northwest Water Resources to Global Warming", *The Northwest Environmental Journal*, Vol. 8, pp. 265-283.

-
- Lettenmaier, D. P., Wood, A. W., Palmer, R. N., Wood, E. F., and Stakhiv, E. Z. (1999). "Water Resources Implications of Global Warming: A U.S. Regional Perspective", *Climatic Change*, Vol. 43, pp. 537-579.
- Matalas, N. C. and Fiering, M. B. (1977). "Water Resources Systems Planning", *Climate Change and U.S. Water Resources*, Wiley, NY, USA, pp. 99-110.
- Mehrotra, R. (1999). "Sensitive of Runoff, Soil Moisture and Reservoir Design to Climate Change in Central Indian River Basins", *Climatic Change*, Vol. 42, pp. 725-757.
- Miller, B. A. (1990). "Sensitivity of Southeastern Inland Water Resources to Climatic Change", *Proceedings of Southeast Regional Climate Symposium*.
- Riebsame, W. E. (1988). "Adjusting Water Resources Management to Climate Change", *Climatic Change*, 13, pp. 69-97.
- Schwarz, H. E. (1977). "Climatic Change and Water Supply: How Sensitivity is the Northeast?", *Climate, Climatic Change, and Water Supply*, National Academy of Science, Washington, DC, USA.
- Sias, J. C., Lettenmaier, D. P. (1994). *Potential Effects of Climate Warming on the Water Resources of the Columbia River Basin*, Water Resources Series Technical Report No. 142, Department of Civil Engineering, University of Washington, WA, USA.
- Stakhiv, E. Z. (1993). "Water Resources Planning and Management under Climate Uncertainty", *Proceedings of the First National Conference on Climate Change and Water Resources Management*, edited by Ballentine and Stakhiv, US Army Institute of Water Resources, Fort Belvoir, VA, USA, pp. IV20-IV35.