

기후변화 시나리오에 따른 지역 물수지 추정

김 만 규

공주대학교 지리학과 지역개발연구소

Estimation of Regional Water Balance in Various Climate Change Scenarios

Man Kyu Kim

Dept. of Geography, Regional Development Institute, Kongju National University

요 약

기후변화와 이에 따르는 식생변화, 인위적인 토지이용 변화 등 '지역환경생태시스템의 변화'에 대한 '지역 물수지변화' 추정은 오직 필자가 개발한 BROOK_{TOP}과 같은 '물리기반 물수지 모델(Physical based Water Balance Model)'류에 의해서만 가능하다. 본 연구에서는 독일 중북부 농업지대와 산림지대에 대해서 BROOK_{TOP} 소프트웨어를 이용하여 정립된 물리기반 지역물수지모델에 독일 포츠담 기후변화연구소(PIK) 시나리오와 체코 프라하대학에서 개발한 중부유럽 대상 GCM 기후변화 시나리오를 적용하여 물수지변화를 추정하였다. 이와 같은 기후와 지표·지하조건을 고려한 지구온난화에 따른 수자원변화 예측시스템 개발은 하천수·지하수 개발 및 수질 관리, 농업경작관리, 환경생태계 관리, 자연 재해 관리, 토지이용계획 및 지역개발계획 등을 위한 시스템개발의 기반이 된다.

주요어 : 기후변화, 지역 물수지 추정, BROOK_{TOP} 모델, GCM & PIK 시나리오

ABSTRACT

It is only possible by Physical based Water Balance Models such as BROOK_{TOP} developed by me to estimate regional water balances caused by changes of regional ecosystem, which result in climate change, change of vegetation due to climate change, artificial landuse change, etc. This study estimates regional water balances of mid-north agricultural and forest regions in Germany using BROOK_{TOP}-Water Balance Model with climate change scenarios developed by PIK in Germany and GCM Scenarios developed by Praha University in Czech. Developing Water Resource Change Estimation System such as this study for global warming with considering climate, surface and underground conditions provides the basis of system development for surface-, groundwater-, cultivation-, ecosystem-, natural emergency-management, landuse and regional planing.

Keyword : Climate change, Estimation of regional water balance, BROOK_{TOP} model, GCM & PIK scenarios

* 본 논문은 발표자의 박사학위논문(Man Kyu Kim, 1997) 중 기후변화와 물수지 관련 부분만을 정리하고 보완하여 국문으로 작성한 것이다.

연구배경

연구개발의 사회·경제·과학기술적 중요성

최근 우리 나라에서 빈번히 발생하고 있는 기상이변과 함께 급격한 산업화와 인구의 도시 집중화, 생산성 증대 등으로 기후변화와 연관된 국토환경이 크게 변하고 있다. 기후변화 영향에 관한 각종 연구는 지금까지 주로 선진국에서만 수행되어 왔다. 유럽·미국·일본뿐만 아니라, UN 가입 대다수 국가가 국토개발에 따른 복지공간 훼손, 하천의 수질보존, 산업발전에 따른 국토개발 수요, 해수면 상승에 대응하는 연안해역 개발 등 많은 분야에서 '자국의 국토환경변화를 기후변화와 연계하여 조사 연구' 하고 있다. 우리 나라에서는 관련학회를 중심으로 기후변화에 대한 토지이용영향 연구와 산림, 수자원 등 국토환경 생태변화 조사와 예측에 관한 연구가 제기되고 있으나 실시된 바가 없다(오성남 외 3인, 1998).

정보통신기술의 발전에 따라, 생태계 지상관측과 인공위성 관측자료가 고도로 이용되고 GIS 구축이 용이하게 진행될 수 있는 환경이 조성되고 있다. '지구온난화에 대한 수자원변화 영향평가 시스템'은 생태계뿐만 아니라 해양과 토지이용, 대기환경의 정화와 보건환경의 예방 분야까지 평가되고 예측될 수 있는 각종 단위 시스템에 대한 기반을 구축하는 대단히 중요한 사업이다. 각 나라는 이러한 각 분야의 시스템에 의한 예측 자료를 기후변화 협약을 위한 회의에 제시할 것이며, 특히 자원과 산업 수출 등 경제정책에 크게 이용할 것이다(오성남, 김만규, 1999).

기후예측과 달리 '지구온난화에 의한 수자원변화 예측'은 각국의 지역적 자연생태조건과 사회·문화·경제구조가 각기 독특한 특성이 있기 때문에, 독립적 조사와 평가모델링 시스템이 개발되어야 한다. 기후현상과 지표, 지하조건을 종합한 [지구온난화에 대한 한반도 수자원 변화 예측 평가 시스템] 개발은 농업경작 관리, 환경생태계 관리, 하천수·지하수 개발 및 수질보존 관

리, 토지이용계획 및 지역개발계획과 재난방재 시스템 등에 널리 이용할 기반을 조성하게 될 것이다.

연구개발 실적

국 외

독일, 미국, 일본 등은 지구온난화에 따른 기후변화의 생태계에 미치는 영향을 모형화하여 국토이용기술과 GCM(General Circulation Model) 개발 연구에 접합하고 있다. 독일과 미국의 유역수문관리를 위한 전국규모 및 지방 자치규모의 GIS 구축과 인공위성 관측 영상자료 이용은 매우 잘 되어 있다. GIS기반의 수자원 모형의 이용과 예측 시스템도 효과적인 국토이용 시스템과 연계되어 활용하고 있다.

미국은 기후변화에 적응할 수 있는 식생의 보존과 농작물의 품종 개발을 위하여 1990년에 설립된 US Global Change Research Program (GCRP)을 미 농무성과 환경청 산하에 두고 '기후 모델의 시나리오 이용', '지구 환경계의 수분과 에너지 순환', '이산화탄소 순환', '자연환경 생태계 변화 및 국토이용 평가'에 관하여 2020년까지 조사 연구하고 있다. US Global Change Research Program(GCRP)에는 서유럽뿐만 아니라 헝가리, 체코, 러시아, 우크라이나 등 동유럽 국가의 관련 정부기관과 연구소에서 협력하고 있다. 아울러, 서유럽 국가들은 독자적으로 이 분야의 연구를 이미 상당히 진척시키고 있다. 일본의 경우 국가의 최우선 정책설정이 기후변화 영향 평가에 주어져 있음을 상기하여야 한다.

국 내

국내 학회를 중심으로 기후변화에 대한 토지이용영향 연구와 산림, 수자원 등 국토환경 생태변화 조사와 예측에 관한 연구가 제기되고 있으나 실시된 바 없다. 단지 산업개발과 재해방지를 위한 GIS 기술이 단편적으로 개발되고 있는 형편이다.

기후변화영향 평가에 대한 우리 나라에서의 중요한 기반조성 연구로서는 1992년 10월에 시작한 환경부와 과학 기술부가 주도한 G-7 환경공학 기술 개발 과제의 1단계 (1993~1995) 사업의 오성남 등이 지구환경감시 및 기후변화 예측 기술 과제의 '기후변화 영향평가 및 영상처리 기술 개발'을 들 수 있다. 그러나 이 연구는 기후변화 예측 시나리오를 바탕으로 한 GCM의 예측능력을 평가하는 단계로서 한정적으로 농업, 수자원 그리고 해수면 영향에 대한 개념도입 단계였다(오성남, 김만규, 1999).

연구의 성격과 연구대상지역

한반도 수자원변화 예측평가 시스템의 개발을 위해서는 우선 지역규모(regional scale)의 수문·기후학적 연구가 필요하다. 이들 연구는 다양한 분야의 전문가들에 의해 수행되어 왔다. 그러나 단순히 기상 관측자료에만 주로 의존하고 인문 조건이나 지형, 토양 등 자연 조건을 단순하게 취급한 연구가 있는 가하면, 여러 조건을 고려한 연구라 하더라도 장비와 실험이 집중된 특정연구지역에 대한 모델화란 한계가 있다. 기존의 연구에서 인문 및 자연현상에 대한 지역화를 시켜주고 공간변이(Spatial Variation)의 문제를 다룬 것들은 드문 편이다. 한편, 대류권에서의 열 교환에는 여러 가지가 있지만 이 중 실증발산에 따른 잠열 수송은 전체 열 교환에서 차지하는 양과 성격에 있어서 매우 중요하다. 이것은 지형, 식생, 토양 등 자연지리학의 주 연구대상 들인 지역생태환경 요소들의 파악이 없이는 계산될 수 없는 특성이 있다.

지역적 규모의 지리공간에서 나타나는 기후현상은 수문현상에 직접적인 영향을 미친다. 동시에 지표 및 지하의 지리적 조건 들(지형, 토양, 수리지질, 식생, 토지이용)은 주어진 기후조건에 따라 토양의 수분함량, 지하수의 유입-유출 및 하천유출을 조절할 뿐만 아니라 실증발산량(actual evapotranspiration) 즉 잠열을 결정하는 중요한 역할을 한다. 기후현상과 지표, 지하조

건을 종합한 기후-수문모델은 농업, 생태계 관리, 지하수 개발 및 수질보전, 토지이용 및 지역개발 등에 널리 이용될 수 있다.

아울러 자연현상에 대한 인문현상의 영향을 지역환경·생태시스템 전체의 맥락에서 이해하는 연구들도 찾아보기가 쉽지 않다. 이러한 문제점을 극복하여 실제 우리 생활 및 지역개발 등에 장기적으로 이용할 수 있도록 기후현상과 관련된 지표, 지하의 수리시스템(지형지질토양구조에 따른 수리체계) 및 식생 그리고 토지이용 상황 등 인문-자연현상을 종합적으로 고려하기 위한 필요성에서 본 연구(Man Kyu Kim, 1997)는 시작하였고, 본 논문은 그 결과 중 기후변화와 관련된 부분만을 재정리한 것이다.

연구 대상지역은 습곡, 단층과 절리계가 복잡하게 발달한 (변성)퇴적암 지대인 중부독일 산악의 수자원 보호지역(하르쯔)과 중,북부 제 3, 4기 지질의 농업 지역(독일 북부 하이데 평원)이다.

연구 방법 및 목적

연구목적

연구목적은 삼림 및 농업지역의 물리기반 수문 모델을 정립하고, 기후 변화 시의 유출량과 증발산량 변화 등 지역물수지를 예측하는 것이다. 본 연구에서는 '예측'을 변화된 환경 조건에 대한 감도 분석(sensitive analysis)으로, 즉 주어진 기후변화시나리오에 따르는 결과량 산정으로 규정하였다.

연구목적을 달성하기 위해서는 우선 시범연구지역에 대해 수행된 방사성 동위원소 분석, 토양 및 수리지질 조사, 식생 그리고 유역 내 토지이용 상황 등 인문, 자연환경조사를 기초로 연구된 증발산 및 수문현상에 대한 개념적이고 서술적인 연구 결과들을 본 연구의 일환으로 발표자가 개발한 물리 결정적 물수지 모델 BROOK_{TOP}(Man Kyu Kim, 1997)을 이용하여 수학적인 모델¹⁾로 재건하여야 했다. 즉 중북부 독일의 중, 고생대 지층과 신생대 지역에 있어서의 실험실적인 또는

분석학적으로 밝혀진 '물순환시스템의 물리적 과정'을 수확모델로 재건설하는 것이 필요하였다. 그리고, '원천적으로 삼림지대의 수자원 예측을 위하여 개발된 BROOK 모델(Federer, 1995)이 지하수 관정과 관개 시스템이 존재하는 농업지역에서도 신뢰할 수 있는 시뮬레이션 결과를 제공할 수 있는가?'를 테스트하는 일이다. 관개용수량을 간접적으로 결정하기 위하여 강우-유출 모델인 SACRAMENTO-모델(Burnash et al., 1973)을 동시에 사용하여 비교하였다. 총유출량을 계산하는 이 응용수문학 계통의 모델은 식생, 토지이용 등 유역의 지리적 상황에 구애됨이 없이 사용할 수 있기 때문이었다.

연구방법

지구온난화에 의하여 발생할 수 있는 기후변화는 기온의 상승과 더불어 지표의 에너지 및 수문 상태를 변화시킨다. 지표는 대기의 열 및 수증기 공급의 근원으로서 온난화가 진행되면 증발산이 가속되고 대기의 수증기량이 증가되어 강수와 토양수분 및 지하수위를 변화시켜 가뭄과 집중호우 등으로 지역의 물수지에 연쇄적으로 영향을 초래할 수 있다(오성남 외 3인, 1998). 본 논문은 자연지리학에서 중요한 위치를 차지하는 기후학, 지역환경생태학 그리고 수문학의 복합적 주제 중 하나인 '기후 변화 시의 지역수문 예측'에 목표를 두었다.

지표 부근에서 이루어지는 수문기후학적인 현상을 파악하기 위하여 현지 조사와 측정 그리고 실험이 필요하였고, 한편으로는 소유역내에서도 위치에 따라 대단히 다양하게 나타나는 여러 특성들을 체계적(공간통계학적)으로 정리하기 위하여 GIS를 이용한 분석(Kriging and Up-

and downscaling)이 절대적으로 필요하였다. 이렇듯 GIS를 이용하는 공간통계 기법으로 구분된 정적인 Hydrotop들은 타 지역에 응용할 때 아주 편리하다. 물수지를 생각할 때, 제일 먼저 고려되어야 하는 것은 동적인 기상, 기후현상이 지표(지형, 식생, 토지이용) 및 지하(토양, 지하수층) 환경에 의해 지역시스템 내부에서 상호 작용하여 결과되는 증발산(potential and actual evapotranspiration)에 대한 문제이다. 지하수위는 토양수 함량과 더불어 실증발산량을 결정하는 중요한 인자이다.

방법상으로는 지표의 제반 상황(토양, 지형, 수리지질, 토지이용, 식생 등)에 대한 야외조사 및 측정과 실험 결과들을 GIS Arc/Info를 이용하여 정리하고, 정리된 결과를 파라미터(모델)화 하였다. 연구과정에서는 장소에 따라 차이를 보이는 기후-수문 환경과 이를 바탕으로 모델화시킬 수 있는 기후-수문단위(Climatic-Hydrological Unit)들의 지역화(Regionalization)에 중점을 두었다. 또한 시간적으로는 현재와 같은 자연인문 체계가 지속된다 할 때, 또는 예상되는 가능한 기후변화 시의 지역적인 증발산량과 토양수분, 지하수 함량량의 예측 및 홍수와 가뭄 등의 문제에 관심을 가졌다.

한편, 인간 활동에 의해 변화되는 환경 조건, 그에 대응하는 물 수지 변화에 대한 모델화는 오직 자연계 내의 증발산과 유출 형성(evapotranspiration and Runoff Formation) 과정에 대한 물리적인 프로세스를 수학적으로 묘사하는 방법에 의해서만 가능하다. 증발산 및 유출형성 과정이 제대로 규명되지 않은 상태에서 개발되어 온 개념적인 '강우 손실 모델' 또는 '강우-유출 모델'등 응용수문학 분야에서 주로 사용하는 블랙

1) BROOK_{TOP}(Man Kyu Kim, 1997)에서 증발산 모듈은 Pennmann-Monteith Model을 개량한 Stuttleworth & Wallace Model (Stuttleworth & Wallace, 1995)을 채택하였다. 이 증발산 모듈은 토양수리 모듈과 외연적(Explicitical)으로 결합되어 작동하며, 기후자료 뿐만이 아니라 지표의 여러 지리적 조건을 반영하여야만 한다. 소공극 조건의 토양수 유동을 파악하기 위해서 Clapp & Hornberger Model(1978)을 사용하였고, 대공극 조건의 토양수유동 모델화를 위해서는 Federer(1995)에 의해 개량된 Euler-Iteration 모듈을 채택하였다. 지하수유동 모듈은 Federer(1995)의 BROOK90 '선형 지하수 모듈'을 GIS와 GRIDTAB(Digital Terrain Model, Beven et al., 1994)을 사용하는 Darcy법칙에 기반한 TOP-비선형모델(Beven et al., 1994)을 사용하였다.

박스 결정모델류와 추계모델(stochastic model) 류는 지역 환경생태시스템 구조의 변화시 증발산 및 토양수와 지하수의 유동에 대하여 어떠한 예측결과도 제공할 수 없다. 아울러 이런 모델류는 많은 경우, '물 수지 구성 성분'에 대한 방사성 동위원소 분석 결과와는 다른 결과를 제공하기도 하였다. 1960년 대 이후 각 나라의 실험 유역들에 대한 환경 추적자 이용 기법과 수리 분석기법을 이용한 연구 결과는 평상시 뿐만 아니라 홍수 시

에도 '지하수 유출량'이 총 홍수량의 70~90%에 달하는 주 구성 성분임을 밝혀왔다(Skalash & Farvolden, 1979; Herrmann et al., 1989; Skalash, 1990; Schoeniger, 1990; Fio & Deverel, 1991; Jordan, 1994; Sommerhaeser, 1994; Buch et al., 1996; Herrmann, 1997). 따라서 총 유출량 산정이 주목적인 응용수문학 분야모델을 사용한 결과를 이용하여 지하공간에서의 물질이동을 시뮬레이션하면 상당한 오류를 발생시킨다.

표 1. 독일 하르쯔 산악지역과 중북부 하이데 평원지역의 여러 연구유역에서의 물수지와 그 구성성분에 대한 연구결과

[mm/y]	연구유역과 입력자료의 수집기간							
	LB (Nov. 82- Oct. 86)	LB (Nov. 80- Oct. 87)	LB (Jan. 83- Dec. 90)	WT (Nov. 82- Oct. 86)	DB (Nov. 82- Oct. 86)	SB (Nov. 82- Oct. 86)	K (26. March- 3. Apr. 95)	EI (Nov. 88- Oct. 94)
강수량	1310	1300	1318	1310	1310	1310	—	623¹ 140²
증발산량	556	570	671	477	614	626	—	249
증발량	244	—	261	223	246	248	—	124
발산량	312	—	410	254	368	378	—	125
유출량	728	700	607	963	644	439	100 %	534
직접유출	530 (72.8%)	80 (11.4%)	70 (10.4%)	658 (68.3%)	479 (74.4%)	353 (80.4%)	12.3%	40 (7.5%)
지표면 유출	83	—	44	154	74	38	—	24
Bypass-유출			19					16
토양수 유출 (Interflow)	447	0	7	504	405	315		0
간접유출 (지하수 유출)	198 (27.2%)	620 (88.6%)	536 (88.7%)	305 (31.7%)	165 (25.6%)	86 (19.6%)	86.7 %	494 (92.5%)
지하수대수층에서 의 유입량 (+)	—	—	—	149	—	—	—	19³
지하수대수층에서 의 유출량 (-)	—	30	34	—	18	199	—	—
연구자	Finke (1988)	Herrmann et al. (1989)	Man Kyu Kim (1997)	Teyke (1988)	Teyke (1988)	Teyke (1988)	Buch et al. (1996)	Man Kyu Kim (1997)

연구지역 명 LB: Lange Bramke 유역, WT: Wintertal 유역, DB: Dicke Bramke 유역, SB: Saukappenquelle 유역, K: Krummbach 유역, EI: Eisenbach 유역; 1 = 실측 강수량, 2 = 농경지대 가뭄시의 추정 물 살포량, 3 = 지하수층에서의 (지하수유입량 - 지하수 유출량)

물리결정모델들은 단위 기후-수문시스템을 수학적으로 재건할 때, 실증발산 과정(process for actual evapotranspiration) 및 유출과정을 조절하는 모델 파라미터들의 지역화(regionalization of modelparameter)가 필요하다. 토지이용변화 등 '지역생태시스템의 자체 변화'에 대한 물 수지 예측 모델화는 오직 '물리기반 결정 물수지모델(Physical based deterministic Waterbalance Model)'에 의해서만 가능하다. 실험 지역(pilot study area)에서 획득된 시스템 파라미터들의 인근 유사지역 시스템에의 전이와 적용은 GIS 분석을 통해 획득된 기후-수문 지역 단위(Cli-mate-Hydrological Unit)를 매개로 하여 이루어지며 이것들을 받아들일 수 있는 것도 오직 물리 결정모델류 뿐이다. 이러한 관점에서 Federer (1995)가 개발한 BROOK90 모델이나 Pfuetzner 등 (1996)에 의해서 개발된 Arc/EGMO 모델은 증발산 발생과 유출 형성 및 유출의 물리적 프로세스를 반영하고 있으며, 모델의 물리 결정적 파라미터들이 단위 시스템을 반영하기 위하여 공간통계학과 GIS를 이용할 수 있거나 이용하여야 하는 지역화 기법(regionalization of climate-hydrotops)에 기반하고 있다는 점에서 주목할 가치가 충분히 있다.

연구 결과

필자가 개발한 BROOK_{TOP}을 이용하여 평가한 두 연구지역의 물수지 구성 성분(표 1)은 Finke(1988), Teyke(1988)에 의해서 수행된 모의조작(Simulation)결과와는 달리 Herrmann 등 (1989) 및 Buch 등 (1996)에 의해 수행된 방사성 동위원소 분석 결과와 지하수 수리적 연구 결과의 유출량 성분(표 1) 및 Brechtel & Balazs(1976), Herrmann(1978) 그리고 Rohrberk (1988) 등에 의해 연구된 증발산량 성분 등과 동일한 결과를 보여주었다(Man Kyu Kim, 1997).

따라서 BROOK_{TOP}은 중, 소 유역의 상대적인 증발산 성분들과 유출 성분을 도출하는 데 유용

한 도구의 하나임을 증명하였으며, 홍수경보시스템에의 적용은 물론 유출량 측정이 전혀 이루어지지 않은 유역을 위해서도 사용할 수 있게 되었다. 이러한 모델의 우수한 물리적 성격에 근거하여 기후변화 시나리오를 적용한 연구를 수행할 수 있는 기반과 근거가 마련되었음이 증명되었다(2. 연구목적 참조).

물수지에 대한 대기기온 상승효과 예측에 있어서 증발산량 예측은 결정적인 미래에 대한 불확실성을 예측한다는 중요성을 갖는 일이다. 이에 따라 우선적으로 기온 변화만을 고려하는 시뮬레이션을 산림 및 농업지역에 대하여 시행하였다. 매 1°K의 기온상승 시나리오에 의한 시뮬레이션 결과는 각 연구지역에서 식생 및 지형, 지질과 관계없이 현재와 비교하여 절대량은 다르지만 2.5%의 증발산량 증가를 결과하였다(그림 1).

〈표 2〉는 독일 중북부 하르쯔 지방의 산림고산지대, 〈표 3〉은 독일 북부 하이데 평원의 농경지

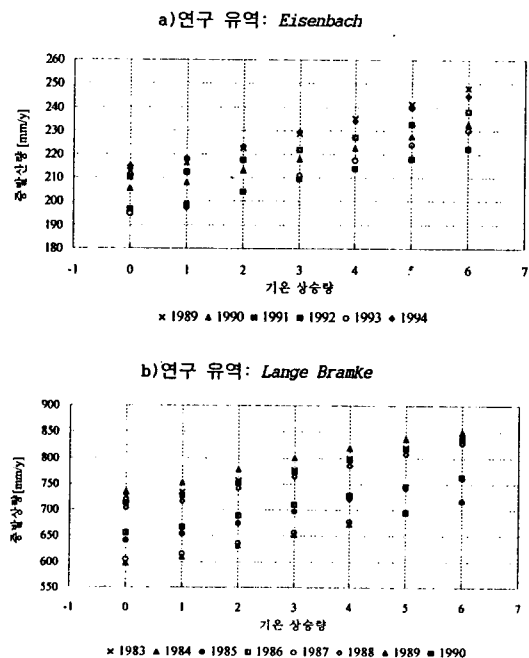


그림 1. 두 연구 지역에 대한 대기기온(°C) 상승만을 고려한 증발산량 시뮬레이션(모의예측) 결과

표 2. 두 곳의 Harz지방 독일 기상청(DWD)-측후소 지역에 대한 기후변화 시나리오(Schmidt, 1995)

자료 관측 기간: Jan 1965~Dec. 1994	독일 기상청 측후소 번호: #3980, 이름: Schulenberg, 해발고도: 504m				독일 기상청 측후소 번호: #3982 이름: Clausthal-Zellerfeld, 해발고도: 590m			
	평균 기온		월 평균 강수량		평균 기온		월 평균 강수량	
	현재 (℃)	시나리오 (℃)	현재 (mm)	시나리오 (%)	현재 (℃)	시나리오 (℃)	현재 (mm)	시나리오 (%)
년 평균	6.4	0	1189.0	101	6.4	-0.1	1341.0	100
Jan.	-1.23	+0.08	111.77	94	-1.61	+0.18	132.76	95
Feb.	-1.38	-1.38	74.91	93	-1.54	+0.10	93.87	98
Mar.	1.61	-0.08	101.07	99	1.46	-0.10	109.96	94
Apr.	4.68	0	83.23	114	4.84	0	93.87	98
May	10.06	0	85.61	99	10.29	-0.24	89.85	98
Jun.	12.98	-0.08	111.77	111	13.13	-0.21	128.74	111
Jul.	14.75	-0.15	104.63	99	14.98	-0.31	112.64	95
Aug.	14.36	-0.08	93.93	98	14.67	-0.23	104.60	102
Sep.	10.98	-0.08	87.99	101	11.14	-0.17	97.89	96
Oct.	7.3	0	87.99	95	7.22	-0.04	97.89	96
Nov.	2.38	0	110.58	102	2.07	-0.03	124.71	110
Dec.	-0.15	0	133.17	101	-0.46	+0.01	152.87	100

- a) 연구 구역: Eisenbach
- b) 연구 구역: Lange Bramke

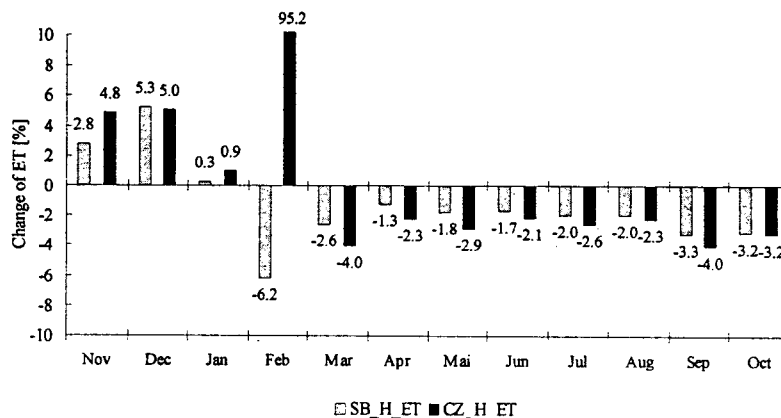


그림 2. Schulenberg(SH)와 Clausthal-Zellerfeld(CZ) 측후소 기상관측자료를 이용한 기후변화시나리오 (표 2)를 두 측후소 중간에 위치한 하르쯔 연구지역(Lange Bramke 구역) 물수지 모델(Man Kyu Kim, 1997)에 적용한 월별 증발산량 변화 시뮬레이션(모의예측) 결과

표 3. 하이데 평원 농작지대 유역(Eisenbach)에 적용한 월별 기후변화 시나리오(KALVOVA et al. 1996) : General Circulation Model GFDL = 2030년경에 대한 시나리오(CO₂ 50 % 증가), GISS = 2075년 경에 대한 기후변화 시나리오(CO₂ 100 % 증가)

기준 수치: 현재 (1989~1994)	평균 기온 (°C)		평균 강수량 (%)		태양열 복사량 (%)
	GFDL	GISS	GFDL	GISS	
년 평균	1.96	4.18	105.2	118.0	97.8
Jan.	2.26	6.2	116	118	89
Feb.	1.79	5.7	114	140	
Mar.	1.69	4.9	99	120	99
Apr.	1.46	4.0	117	147	
May	1.41	3.2	92	120	102
Jun.	1.60	2.7	95	104	
Jul.	2.54	2.6	92	110	101
Aug.	2.73	2.7	103	109	
Sep.	2.68	3.2	98	102	89
Oct.	1.88	4.1	104	119	
Nov.	1.5	5.0	115	119	
Dec.	1.97	5.8	117	108	

대의 물수지 변화를 추정하기 위해 사용한 월별 기후변화 시나리오의 내용이다. 기온 및 강수량 그리고 일사량 변화량에 대한 월별 복합적 기후변화 시나리오(표 2, 표 3)에 의한 물 수지 예측 결과는 두 연구지역 모두 주로 겨울철에 강수 빈도와 강도가 심해지리라는 예측과 기온 상승에 의한 적설층 발달의 불량화로 인하여 유출량이 증대할 것으로 나타났다(그림 2, 3).

삼림고산 지대인 하르쯔 지방은 미약하나마 여름철 기온하강 현상이 발생할 것이라는 시나리오(표 2)에 따라 증발산량이 감소할 것으로 예측된다. 반면 겨울철에는 그 반대의 시나리오 결과에 의해 적설층 발달이 상대적으로 취약해지고 증발산량이 늘어날 것으로 예측된다(그림 2). 일반적으로 여름철에는 유출량이 증가하는 결과가 예측된다. 이는 주로 시나리오 상의 기온하강 효과보다는 강수량 증대에 따른 것으로 판단된다(그림 3).

하르쯔 포어랜드 지방(독일 북부 하이데 평원)에서는 여름철에 있어서 증발산량이 미약한 증가로 예측되었다(그림 4). 이는 하르쯔 지방보다 상대적으로 크게 예상되는 기온상승의 효과로 판단된다(표 3). GFDL-시나리오(2030년대: CO₂ 100% 증가)에 의한 농업지역인 하르쯔 포어랜드(하이데 평원)에서의 여름철 유출량은 현재(19-

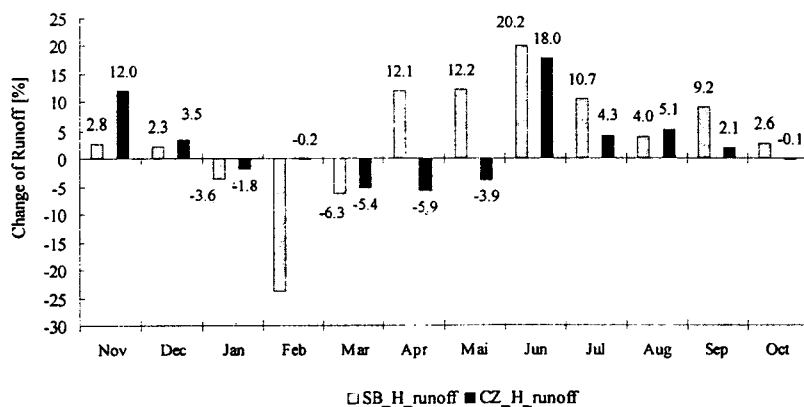


그림 3. Schulenberg(SH)와 Clausthal-Zellerfeld(CZ) 측후소 기상관측자료를 이용한 기후변화시나리오(표 2)를 두 측후소 중간에 위치한 하르쯔 연구지역(Lange Bramke 유역) 물수지 모델(Man Kyu Kim, 1997)에 적용한 월 별 하천유출량 변화 시뮬레이션(모의예측) 결과

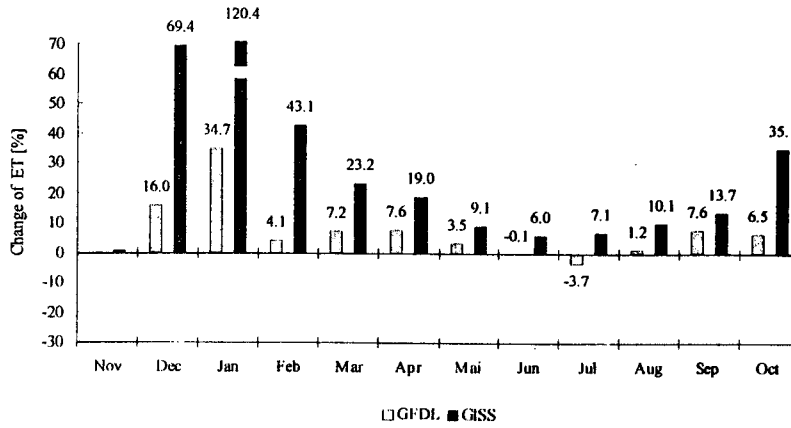


그림 4. GFDL와 GISS 기후변화시나리오(표 3)를 사용하여 추정된 하이테평원 농작지대(Eisenbach 유역) 월별 증발산량(ET) 변화 시뮬레이션(모의예측) 결과

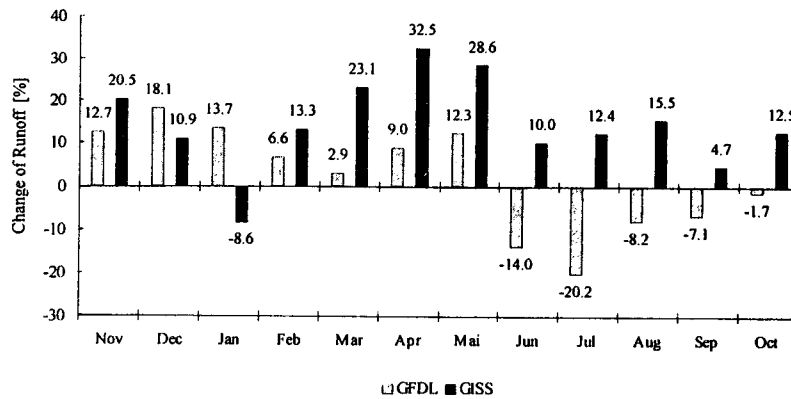


그림 5. GFDL와 GISS 기후변화시나리오(표 3)를 사용하여 추정된 하이테평원 농작지대(Eisenbach 유역) 월별 하천유출량(Runoff) 변화 시뮬레이션(모의예측) 결과

89~1994)보다 20 % 정도 감소할 것이다. 가뭄 대비 관개시설의 정비와 확충이 필요할 것이다. 반면 GISS-시나리오(2070년대: CO₂ 200% 증가)에 의하면 이 지역에서 여름철 유출량이 현재보다 10~15% 증가할 것으로 예측되었다(그림 4, 5). 이는 여름철 강수량이 이 시기가 되면 상당히 늘어나기 때문이다(표 3).

지하수 함양량은 적용한 모든 시나리오들에 있어서 겨울철에 현재보다 모든 지역에서 증가할 것으로 판단된다(표 4). 겨울과 봄철에 컴바인

등 경작기계의 투입이 용이하도록 토양층내의 배수 설비시설의 확충이 필요할 것이다. 농업지역에 있어서 겨울철 지하수 함양량의 증가는 토양 잔존비료와 농약의 지하수층으로의 유입과 확산을 가속화시키게 된다. 이 연구결과를 3D 지하수 수질 시뮬레이션에 활용한 연구가 기대된다.

결 론

21세기는 정보기식기반산업과 더불어 환경생

표 4. GCM GFDL und GISS시나리오를 이용하여 추정된 하이데평원 농작지대(Eisenbach 유역) 월별 지하수함양량 변화 시뮬레이션(모의예측) 결과

월	현재(1983~1986) 월 평균지하수 함양량(mm)	GFDL(2030년 경)		GISS(2075년 경)	
		추정 월 평균지하수 함양량(mm)	현재와의 비교 (-)	추정 월 평균지하수 함양량(mm)	현재와의 비교 (-)
Nov.	57.6	52.3	0.908	55.8	0.969
Dec.	59.9	69.4	1.158	64.9	1.083
Jan.	62.1	71.7	1.154	56.3	0.906
Feb.	35.7	39.8	1.113	40.8	1.143
Mar.	44.5	45.7	1.025	54.6	1.226
Apr.	37.0	25.2	0.681	30.8	0.831
May	22.0	7.9	0.357	9.9	0.449
Jun.	21.9	5.8	0.265	7.7	0.354
Jul.	25.9	11.7	0.451	16.0	0.620
Aug.	29.8	19.9	0.668	25.5	0.855
Sep.	33.3	23.2	0.696	25.9	0.776
Oct.	36.5	22.5	0.616	25.9	0.711

태보전형 기술·산업의 개발 시대가 될 것이다. 기후변화 영향에 대한 평가와 예측은 국내·외 경제발전과 첨단기술 개발 등 모든 분야에 연관되어 있으며, 모든 국가가 필수적으로 연구하여 이용하여야 한다. UN의 UNEP를 비롯하여 WMO, ICSU, WCRP 그리고 미국의 GCRP, 독일의 PIK 등은 지구온난화에 의한 월별, 계절별 및 년별 강수 및 기온변화를 기후변화의 가장 큰 요소로서 판단하고 있다. 최근(1995년 이래)에는 El Nino와 지구온난화의 상호작용을 매우 밀접하게 연관시키고 있다. 지구 온난화는 El Nino의 강도와 주기에도 영향을 미쳐 최근 기상이변이 심화되는 것으로 추정되고 있다(오성남, 김만규, 1999).

본 논문에서 제시한 수자원변화 영향평가 시스템을 위한 연구방법과 결과들은 가능한 토지이용의 변화와 기후변동에 의한 수질 변화 예측, 그리고 토사운반과정에 대한 모델화에도 이용할 수 있다.

본 연구개발을 통해 얻어진 경험과 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 가능한 토지이용변화와 기후변동에 대한 수량, 수질 변화 예측 그리고 토사운반과정에 대한 모델화 및 지역 수자원 관리 및 미래예측 방재시스템 구축에는 이러한 물리기반 모델링 시스템의 연구 결과만이 이용될 수 있다.
- 토지이용 별로 계산되는 증발산량은 지역(국지)기상모델링시스템에 잠열수송량이란 형태 등으로 Feedback 적용될 수 있으며, 계산되는 지하수 함양량은 GIS를 통해 3차원 유한요소 지하수 유동 모델링에 직접 이용할 수 있다.
- 기후변화시 발생할 지역 식생변화의 내용이 파라미터화 되어 이러한 물리기반 물수지모델에 투입될 경우 더 정교한 물수지의 추정이 가능해질 것이다.

한편, 유역 규모(소유역 또는 우리나라 4대강

유역 같은 대유역)별로 합당한 모델링 시스템의 선택과 개발의 Know-How는 매우 중요하다. 본 논문에서 채택한 시스템의 중심모델(BROOKTOP 모델)은 물순환시스템의 상세한 프로세스를 연구하는 장점이 있는 반면에, 소유역(100 km² 이하)에 적용되는 한계가 있다. 중대규모의 유역 수문기후모델링에서는 BROOK_{TOP} 모델보다는 앞서 소개한 2, 3차원 기반의 ArcEGMO 등 Distributed model류가 훨씬 유용하다.

이러한 연구에서 GIS 기법과 GIS 시스템을 사용하는 것은 지리공간과 관련하여 다양한 인문, 자연지리적 인자들을 체계적으로 고려하고 그 결과를 지역화(Regionalization)하기 위한 것이다. GIS 시스템을 사용할 경우, 이 지역화된 인자들은 지리좌표계(공간정보)와 맞물려서 점형, 선형, 격자형 또는 폴리곤형 속성정보로서 저장되므로, 지구온난화의 결과로서 예상되는 식생과 토지이용의 변화상황에 관한 Data 관리가 대단히 용이하다. 아울러, 이러한 연구에서 사용되고 개발되는 '수자원 모사 모델링 시스템'은 GIS 기반이 많다. 본 연구에 필요한 각종 데이터는 독일의 각종 Inter /IntraNet기반 DB에서 공급되었다. 또한, 각종 조사연구에서 얻어진 자료와 정보들은 데이터 공급 사용자 인터페이스(모듈)를 통해 이러한 DB에 재 저장될 수 있다.

이제 우리 정부에서는 건설교통부(수자원공사)와 농림부(농어촌진흥공사), 환경부 등의 자연환경생태 관련 데이터베이스를 제도적 그리고 기술적으로 통합하려는 사업을 적극적으로 추진하고 있다. 이러한 국가공공 DB 등과 본 논문에서 하나의 예로서 제시한 각종 응용시스템들이 Inter- /IntraNet을 통해 연계될 기반을 마련하고 있는 것이다. 본 연구와 같은 성과들이 우리나라에서도 적용되어 정부에서 시범적으로 구축해 가고 있는 하천수·지하수 개발 및 수질보전 관리, 환경생태관리, 농업경작관리, 토지이용·지역개발계획 수립 및 자연재난방재시스템 구축 분야에 기여되기를 기대한다.

참고문헌

- 오성남, 하경자, 김기영, 김정우, 1998, "배증 이산화탄소 기후에 따른 동북아시아 지역의 수문영향", 한국기상학회지, 34, 293-305.
- 오성남, 김만규, 1999, "지구온난화에 대한 한반도 환경변화 영향평가와 적응기술 개발 연구", 환경기술연구개발 사업신청서(미발표)
- Beven, K. J., 1994, TOPMODEL and GRIDTAB Distribution Programs - A Users Guide to Version 94.03. - Cent., Resear. Environm. Sys. Statist., Inst. Environm. Biolog. Sci. Lancaster Univ., Lancaster LA1 4YQ, UK.
- Brechtel, H.M. & Balazs, A., 1976, Auf- und Abbau der Schneedecke im westlichen Vogelsberg in Abhaengigkeit von Hoehenlage, Exposition und Vegetation. - Beitr. z. Hydrol. 3, Freiburg i. Br., 35-107.
- Buch, M., Kuecke, M. & Schnug, E., 1996, The Importance of Rainfall Events for the Nutrient Input into surface Water. - IXth Intern. Symposium of CIEC, Soil Fertility and Fertilization Management - Bridge between Science, Industry and Practice, Sept. 1995, Kluwer Acad. Press, Dordrecht 1996.
- Burnash, J.C.R., Ferral, R.L. & Mcguire, R. A., 1973, A generalized streamflow simulation System. - NWS and Calif. Dept. of Water Res., Sacramento, U.S.A.
- Clapp, R.B. & Hornberger, G.M., 1978, Empirical equations for some soil hydraulic properties. - *Water Resour.* 14, 601-604.
- Federer, C.A., 1995, BROOK90 - A Simulation Model for Evaporation, Soil Water, and Streamflow, Version 3.1, Computer

- freeware and documentation. - USDA Forest Service, PO Box 640, Durham NH 03824, U.S.A.
- Finke, B., 1988, Anwendung des forsthydrologischen Einzugsgebietsmodells BROOK auf das Oberharzer Untersuchungsgebiet Lange Bramke. - *Diplomarb., Inst. Geogr.*, TU Braunschweig.
- Fio, L.F. & Deverel, S.J., 1991, Groundwater Flow and Solute Movement to Drain Laterals, Western San Joaquin Vally, California: 2. Quantitative Hydrologic Assessment. - *Water Resour. Res.* 27 (9), 2247-2257.
- Herrmann, A., 1978, Schneehydrologische Untersuchungen in einem nordalpinen Niederschlagsgebiet, Lainbachtal bei Benediktbeuern/Oberbayern. - *Muenchener Geogr. Abh.* 22.
- Herrmann, A., 1997, Global Reviews of Isotope Hydrological Investigations. In: Oberlin, G. & Desbos, E., eds., *Friend-Third Repoert 1994~1997*, UNESCO, Paris.
- Herrmann, A., Koll, J., Leibundgut, CH., Maloszewski, P., Rau, R., Rauert, W., Schoeniger, M. & Stichler, W., 1989, Wasserumsatz in einem kleinen Einzugsgebiet im palaeozoischen Mittelgebirge, Lange Bramke/Oberharz. Eine hydrologische Systemanalyse mittels Umweltisotopen als Tracer. - *Landschafts kol. u. Umweltforsch.* 17, Braunschweig.
- Jordan, J. P., 1994, Spatial and temporal variability of stormflow generation processes on a Swiss catchment. - *J. Hydrol.* 153, Amsterdam, 357-382.
- Kalvova, J. & Nemesova, I., 1996, Czech Republic's Climate Change Scenario the Country Study Version. - Proc. Regional Workshop on Climate Variability and Climate Change Vulnerability and Adaption, Prague 11.-15. September 1995.
- Man Kyu Kim, 1997, Kilma - and Landnutzungsaenderungen und deren hydrologische Auswirkungen im Harz und Harzvorland, Landschaftsoekologie und Umweltforschung, Heft 29, Institut fuer Geographie und Geoekologie der Technischen Univ. Braunschweig, Germany, ISSN 0170-7299.
- Pfuetzner, B., Becker, A. & Lahmer, W., 1996, ARC/EGMO - Programmsystem zur GIS-gestuetzten hydrologischen Modellierung. - Kurzdokumentation, Berlin
- Rohrbeck, V., 1988, Wasserabgabe aus Mittelgebirgsschneedecken. - *Diplomarb., Inst. Geogr.*, TU Braunschweig.
- Schmidt, J., 1995, Basisdaten zur Abschätzung der Klimawirkung auf die Wasserversorgung in der Region Harz. - Gesellschaft fuer Umweltforschung, -planung und -bewertung e.V., GfG, vom Potsdam-Institut fuer Klimafolgenforschung e.V.(PIK).
- Schoeniger, M., 1990, Beitrag zur Abflussbildung und Grundwasserneubildung im palaeozoischen Festgestein, Lange Bramke, Oberharz,. - *Landschafts k. u. Umweltforsch.*, 18, Braunschweig.
- Shuttleworth, W.J. & Wallace, J.S., 1985, Evapotranspiration from sparse crops - an energy combination theory. - *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 111, 839-855.
- Sklash, M.G. & Farvolden, R.N., 1979, The role of groundwater in strom runoff. - *J. Hydrol.*, 43, 1, Amsterdam, 45-65.
- Sommerhaeuser, M., 1994, Bestimmung der

Grundwasserneubildung mit Umweltisotopen in Trinkwassereinzugsgebieten im palaeozoischen Mittelgebirge, Harz. - Diplomarb., *Inst. Geogr. u. Geo kol.*, TU Braunschweig.

Teyke, M., 1988, Vergleichende Anwendung

des forsthydrologischen Wasserhaushaltsmodells BROOK auf vier Oberharzer Untersuchungsgebiete. - *Diplomarb., Inst. Geogr.*, TU Braunschweig.

(Accepted : December 8, 1999)