

지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여 : 2. 물수지
모형을 이용한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석
On the Change of Hydrologic Conditions due to Global Warming : 2. An
Analysis of Hydrologic Changes in Daechung Dam Basin using
Water Balance Model

안 재 현* / 윤 용 남** / 유 철 상***

Ahn, Jae Hyun / Yoon, Yong Nam / Yoo, Chulsang

Abstract

Global warming has begun since the industrial revolution and it is getting worse recently. Even though the increase of greenhouse gases such as CO₂ is thought to be the main cause for global warming, its impact on global climate has not been revealed clearly in rather quantitative manners. The objective of this research is to predict the hydrological environment changes in the Daechung Dam basin due to the global warming. A mesoscale atmospheric/hydrologic model (IRSHAM96 model) is used to predict the possible changes in precipitation and temperature in the Daechung Dam basin. The simulation results of IRSHAM96 model and a conceptual water balance model are used to analyze the changes in soil moisture, evapotranspiration and runoff in the Daechung Dam basin. From the simulation results using the water balance model for 1xCO₂ and 2xCO₂ situations, it has been found that the runoff would be decreased in dry season, but increased in wet season due to the global warming. Therefore, it is predicted that the frequency of drought and flood occurrences in the Daechung Dam basin would be increased in 2xCO₂ condition.

keywords : global warming, hydrologic changes, Daechung Dam, water balance model

요 지

1900년대 이후 지구의 대기 중에서 뚜렷하게 나타나고 있는 현상은 산업화에 따른 온실가스의 증가인데, 이와 같은 온실가스의 증가는 지구온난화 현상을 야기해서 지구의 기후를 변화시키고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 지구온난화 현상이 지구환경에 미치는 영향에 대한 정확한 분석은 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화를 분석 및 예측하고자 하였다. 이를 위해 국지규모 수문-대기

* (주)전일엔지니어링 수자원부 차장

Vice Director, Kunil Engineering Co., 891-44 Daechi-Dong, Seoul 135-280, Korea(E-mail: wrr@korea.com)

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

*** 고려대학교 환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Environmental Eng., Korea Univ., Chungnam 339-700, Korea

모형을 통해 모의된 지구온난화에 따른 한반도의 기상 및 수문 특성의 변화를 고려하여 본 연구의 대상 유역으로 선정된 대정댐 상류 유역의 강수량과 기온 변화를 파악하였고, 물수지 모형을 이용하여 이에 따른 토양함수비, 증발산, 유출량 등의 변화에 대한 분석을 시도하였다. 이를 통해 지구온난화 현상이 심화될 경우 토양함수비가 감소하며, 증발산량은 약간 증가하면서 가을철의 증가와 봄철의 감소가 두드러질 것으로 예측되었고, 유출량도 여름철을 제외하고는 감소할 것으로 분석되었다. 또한, CO₂ 배증에 따른 강수량과 유출량의 변동은 건기의 감소와 우기의 증가 추세가 뚜렷하게 나타났다. 따라서, CO₂ 증가에 따른 지구온난화 현상이 심화될 경우, 한반도에서는 가뭄과 홍수와 같은 극치 기상이 지금보다 더욱 빈번하게 발생할 가능성이 높은 것으로 예측되었다.

핵심용어 : 지구온난화, 수문환경변화, 대정댐, 물수지 모형

지난 수십 년간에 걸쳐 진행되어 왔던 지구온난화에 대한 연구는 지구의 평균온도의 변화 추정 및 원인 규명에서부터 시작하여 이에 따른 지구규모의 기상변화 예측에까지 다양하게 이루어져 왔다.

먼저, 1900년대 이후 지구의 대기 중에서 뚜렷하게 나타나고 있는 현상은 산업화에 따른 온실가스의 증가인데(Mitchell, 1989), 이와 같은 온실가스의 증가는 지구의 기후를 변화시키고 있는 것으로 알려져 있다(IPCC, 1990). 이러한 온실가스 중에서 지구온난화의 주원인으로 손꼽히는 것이 대기중 이산화탄소(CO₂)인데, 산업혁명 이후로 현재까지 대기 중 CO₂의 농도는 약 25% 정도 증가하였으며 이로 인해 지구의 평균 기온이 약 0.5℃ 정도 상승한 것으로 추정되고 있다(IPCC, 1990). 현재 각국의 CO₂ 배출억제노력 등을 고려하는 경우 배증 CO₂, 즉 CO₂의 양이 현재의 두배가 되는데 소요되는 시간은 대략 60년 정도로 추정되고 있으며, 기후변화에 따른 각 분야에의 영향평가는 이상태를 기준으로 하는 것이 일반적이다(오재호와 홍성길, 1995; 日本 土木研究所, 1996).

이와 같은 CO₂ 증가로 인한 국지적 기후 변화와 긴 지구적 기후 변화가 중요한 기후 변화 문제로 인식되고 있으며, 특히 전 지구적 기후 변화로 발생하는 현상에 대한 연구들은 주로 대기대순환모형(GCM)을 이용한 모의를 통해 이루어져 왔다. 이러한 모의는 몇몇 시나리오에 근거한(예를 들어, IPCC(1990)의 4가지 시나리오) CO₂의 증가양상을 대기순환의 외력항(External Forcing Term)으로 하여 수행되고 있으며, 이와 같은 연구를 통해 CCO₂가 현재보다 2배 증가하면 지구의 평균기온은 약 2~5℃ 정도 상승할 것으로 예측되고 있다(Manabe와 Wetherald, 1975; Schlesinger와 Mitchell, 1987; Mitchell 등, 1987; Boer와 Lazare, 1988; Hansen 등, 1988; Washington과 Meehl 등, 1989; Manabe 등, 1991). 또한 IPCC(2001)의 최근 발표에서는 2100년까지 지구 평균온도가 약 1.4~5.8℃

의 범위내에서 상승할 것으로 예측하였다.

지구온난화로 인해 발생하는 기후변화는 기온의 상승과 함께 지표면의 에너지와 수문 상태를 변화시키게 된다. 지표면은 대기의 열과 수분의 공급원으로서 지구온난화가 진행되면서 지표면의 증발이 증가하고, 이로 인해 대기 중의 수분량이 증가하면서 토양수분과 구름의 상태를 변화시켜서 집중호우와 가뭄 등을 유발할 수 있다(Gregory 등, 1997; Meehl, 1994). 또한, 이와 같은 지구온난화로 인한 강수와 증발, 그리고 토양수분량의 변화는 궁극적으로 유출의 변화를 초래하게 되며 이는 수자원 부족량의 변화로 이어지게 된다(Gregory 등, 1997; Wetherald와 Manabe, 1995).

국내의 경우 한국과학기술연구원(1993)에 의하면 CO₂가 2배 증가할 경우 한반도의 평균기온은 1~4℃ 범위 내에서 상승하는 것으로 예상되었으며, 평균 강수량의 경우는 -5~20%의 범위에서 변화할 것으로 예측된 바 있다. 또한, 안재현 등(2001b)은 기존의 5개 GCM으로 모의된 한반도의 기온과 강수량의 변화율을 물수지 모형에 적용해서 대정댐 상류 유역의 수문환경을 분석하였으며, 지구온난화 현상이 심화될수록 극치 기상이 나타날 가능성이 높아질 수 있음을 보였다. 그러나 이와 같은 연구 결과의 차이를 통해 알 수 있는 것은 지구온난화가 한반도의 기상 변화에 어떤 영향을 끼칠 수 있다는 가능성의 파악이지, 결코 정량적인 변화를 밝혀내지는 못한다는 사실이다.

본 연구에서는 지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화를 분석 및 예측하고자 하였다. 이를 위해 단순히 GCM의 결과를 이용하는 것이 아닌, 안재현 등(2001c)이 GCM의 결과를 국지규모 수문-대기 모형으로 downscaling을 실시해서 모의한 지구온난화에 따른 한반도의 기상 및 수문 특성의 변화를 고려하여 본 연구의 대상 유역으로 선정된 대정댐 상류 유역의 강수량과 기온 변화를 파악하였고, 물수지 모형을 이용하여 이에 따른 토양함수비, 증발산, 유출량 등의 변화에 대

한 분석을 시도하였다.

2. 국지규모 모형

GCM(General Circulation Model)의 해상도는 공간적으로 약 300 km × 300 km, 시간적으로 약 7.5분 정도이다. 이 경우 한반도는 1~2개의 작은 격자에 포함되고, 따라서 한반도 내부의 변화를 살펴보는 것은 불가능하다. 수문학에서의 관심사항인 유역규모의 변화를 살펴보기 위해서는 지표면과정과 대기과정 사이의 상호작용이 적절히 고려되어야 하고 이를 위해서는 최소 수십km 정도의 해상도를 필요로 한다.

이와 같은 해상도의 분석은 국지규모 모형(regional scale model)의 이용을 통해서 가능하게 된다. 국지규모 모형은 일반적으로 GCM의 결과를 경계조건으로 하며, 지형, 토지이용, 식생, 토양수분 등의 조건을 고려하여 내부의 상태변화를 모의하게 되는데, 내부의 상태 변화에는 증발산과정을 통한 지표면과정과 대기과정간의 상호작용이 고려된다. 국지적으로는 총 강수의 최대 70% 정도가 증발산과정을 통한 수분공급에 의해 이루어진다는 것을 고려할 때 이와 같은 지표면-대기의 상호작용의 중요성을 짐작할 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 이러한 국지규모 모형을 통해 얻어진 CO₂ 배증 시나리오에 따른 대형담 상류 유역의 강수량, 기온의 변화 특성 자료를 이용하였다. 이를 위해 Kavvas 등(1995)에 의해 일본에 적용되었던 IRSHAM96 모형을 안재현 등(2001c)이 한반도에 적용해서 모의한 결과를 이용하였다.

Kavvas 등(1995)이 지표면 과정과 증규모 대기모형을 결합하여 개발한 국지규모 수문-대기모형(Integrated Regional Scale Hydrologic/Atmospheric Model, IRSHAM96)은 기후 사상과 같은 대규모의 대기 상태를 10° km 안팎의 국지 규모로 전환하기 위해 개발한 국지규모(regional scale)에서의 수문과 대기과정의 조합모형이다. 이 모형은 증규모 대기모형과 국지규모 지표수문모형으로 구성되어 있으며 대기모형은 대기동역학, 수분 및 열역학의 보존방정식을 기본으로 한 정수(hydrostatic)모형이고 대기 경계층모형을 통하여 국지지표 수문모형과 조합된다. 안재현 등(2001c)은 일본 MRI-GCM의 모의 결과를 IRSHAM96 모형의 입력자료로 사용하여 1 × CO₂와 2 × CO₂ 상태에서 각각 3년(36개월)씩 모의하였으며, 그 결과를 평균하여 한반도 기온의 변화를 시·공간적으로 분석한 바 있다.

MRI-GCM은 UCLA 모형을 기초로 하여 1980년

대 초에 개발되었으며, 운동량, 질량, 열, 수분 방정식 등을 이용해서 대기상태를 구하는 모형으로 4.0×5.0°의 격자크기를 가지고 있다. 또한, 연직방향으로 대류권의 5층 모형과 성층권의 12층 모형으로 구성되어 있으며, 각 층에서 기온, 혼합비, 수평풍속, 바람, 고도 등을 계산하게 된다(日本 土木研究所, 1996).

본 연구를 위해 모의된 MRI-GCM 결과는 U & V(중·횡 방향의 수평 풍속), T(기온), Q(혼합비), 고도(Φ) 등의 자료로 구성되어 있으며, 이러한 자료들은 연직방향으로 10개의 압력층(150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000mb)별로 기록되어 있다. 또한, 이들 자료 외에 지표면 기온(Ts), 월평균 해수면온도(Tsea)와 월평균 해수면 혼합비(Qsea) 등의 자료가 포함되어 있다. 이러한 자료들은 12시간 간격으로 계산되어 있으며, IRSHAM96 모형에서 계산 영역별 입력 자료를 준비해서 모의하게 되면 다음 단계의 계산에 필요한 자료들을 생성하게 된다.

3. 물수지 모형

유역의 유출은 강수로 인한 물의 증발과 증산, 침투와 침투, 지하수 등의 성분과정을 거치면서 발생하게 되며, 이러한 유출은 그 유역의 지상학적 인자와 기후학적 인자의 영향에 따라 그 양상을 달리하게 된다. 유역의 유출에 영향을 끼치는 지상학적 인자로는 유역의 면적, 경사, 방향성, 형상, 고도 등과 유역의 특성이 있으며, 기후학적 인자로는 강수, 차단, 증발과 증산 등이 있다(윤용남, 1998). 이러한 여러 인자의 영향을 받는 유출을 양적으로 따져본다면 식(1)과 같은 간단한 물수지 방정식의 형태로 표시할 수 있다(안재현 등, 2001a).

$$\frac{dZ}{dt} = (1 - \alpha S^\beta)P - \left(\frac{.5S - 2S^2}{3} \right) ET_p \quad (1)$$

여기서, Z는 토양수분량(L), S는 토양함수비, P는 강수량(L/T), ET_p는 잠재증발산량(L/T)을 의미하며, α와 β는 매개변수이다.

식(1)을 이용하여 유역의 유출량 R(L/T)은 강수량과 토양함수비의 함수인 식(2)로부터 산정할 수 있으며(Rodriguez-Iturbe 등, 1991), 증발산량 ET(L/T)는 잠재증발산량과 토양함수비로 구성된 식(3)으로부터 구할 수 있다(Kaczmarek, 1990; Yates 등, 1998).

$$R = \alpha S^\beta \cdot P \quad (2)$$

$$ET = \left(\frac{5S - 2S^2}{3} \right) ET_p \quad (3)$$

안재현 등(2001a)은 대청댐 유역의 실측 월 강수량 및 월 유출량 자료를 사용한 식(1)에 대한 검정 및 검증과정을 통해 매개변수 α 와 β 를 각각 0.67과 0.55로 결정하였으며, 잠재증발산량은 식(4)와 같은 Penman 방법(Penman, 1948)을 이용하여 산정하였다.

$$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (4)$$

여기서, ET 는 증발산량(mm/day), Δ 는 포화수증기압의 곡선의 기울기 $\Delta e_a / \Delta T$ (kPa/°C)이며, γ 는 습도측정상수(kPa/°C), R_n 는 순복사에너지(mm/day), E_a 는 증발량(mm/day)이다.

4. 지구온난화에 따른 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화

4.1 국지규모 모형으로 분석된 지구온난화에 따른 강수량과 기온의 변화

안재현 등(2001c)은 국지규모 수문-대기 모형인 IRSHAM96 모형은 이용하여 지구온난화에 따른 한반도에서의 기온 변화를 살펴보았는데, 분석 결과 CO2 배증시에 한반도에서는 연평균 2.5°C 정도의 기온 상승 현상이 발생할 것으로 예측되었다. 따라서, 본 연구에서는 지구온난화에 따른 한반도의 기온 변화로 인해 추가적으로 발생하게 되는 수문환경(강수량, 증발산량, 토양

습수비, 유출량 등)의 변화에 대한 분석을 실시하였다.

수문환경의 변화를 살펴보기 위해 3.3절에서 분석된 금강 유역의 대청댐 상류 유역을 대상 유역으로 선정하였으며, IRSHAM96 모형의 모의 결과로 분석되어진 지구온난화에 따른 대청댐 상류 유역에서의 기온과 강수량의 변화율을 이용해서 CO2 배증에 따른 대청댐 상류 유역의 강수량과 기온의 변화를 표 1에 월별로 정리하였다. 이것은 IRSHAM96 모형의 모의 결과 나타난 1×CO2와 2×CO2 상황에서 대청댐 상류 유역 강수량과 기온의 변화율을 분석해서, 실제 대청댐 상류 유역의 1981-1999년 기간 동안 월 평균 강수량과 기온을 1×CO2 상태라 가정한 후, 앞의 변화율을 고려하여 2×CO2 상태의 강수량과 기온을 산정한 것이다.

즉, 1981-1999년 기간 중 대청댐 상류 유역에 내린 강수량 중 CO2 배증시의 강수량 변화율(%)을 반영하여 2×CO2 상황으로 변화시킨 후, 표 1과 같이 월평균 강수량을 재 산정하였으며, 마찬가지로 같은 기간의 기온에 CO2 배증에 따른 기온 변화를 고려하여 2×CO2 상황의 월평균 기온을 나타낸 것이다. 표 1에서 알 수 있듯이 CO2 배증시의 강수량을 산정한 결과는 1×CO2 상황으로 가정한 1981-1999년 기간의 연평균 강수량 1297.5 mm에 비해 -2.2% 감소한 1269.1 mm로 나타났다.

본 연구에서는 표 1과 같이 IRSIAM96 모형의 결과를 이용하여 산정한 CO2 배증에 따른 대청댐 상류 유역의 강수량과 기온 자료를 3장에서 검정 및 검증된 물수지 모형의 입력자료로 사용하여 지구온난화에 따른 대청댐 상류 유역에서의 수문환경 변화에 대한 분석을 실시하였다.

표 1. 대청댐 상류 유역에서 1xCO2와 2xCO2 상황의 강수량과 기온의 변화

구분	월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년
		강수량 (mm)	27.5	34.8	55.8	73.3	92.5	164.9	288.5	283.9	143.8	55.1	52.3	
	2×CO2	13.7	16.4	37.3	67.2	111.6	188.7	294.6	278.0	176.4	51.9	20.0	13.3	1269.1
	변화(%)	-50.1	-52.7	33.1	-8.4	20.6	14.4	2.1	-2.1	22.6	-5.8	-61.7	-47.2	-2.2
기온 (°C)	1×CO2	-2.6	-0.3	5.0	11.8	17.0	21.3	24.5	24.8	19.5	12.9	6.3	0.2	11.7
	2×CO2	-2.0	4.0	5.4	14.2	19.2	23.3	26.8	26.8	23.1	15.4	12.0	2.3	14.2
	변화(°C)	0.6	4.3	0.4	2.4	2.2	2.0	2.3	2.0	3.6	2.5	5.7	2.1	2.5

표 2. 대청댐 상류 유역에서 1xCO2와 2xCO2 상황의 잠재증발산량(mm) 변화

구분	월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년
		1×CO2	14.8	25.6	51.5	85.7	113.1	116.8	118.4	115.0	79.8	50.8	23.6	
2×CO2	15.3	30.8	52.8	93.0	121.4	124.3	127.1	123.1	90.8	56.6	30.8	16.2	882.2	
변화(%)	3.4	20.6	2.5	8.5	7.3	6.4	7.3	7.0	13.8	11.4	30.5	11.0	9.0	

4.2 물수지 모형으로 분석된 지구온난화에 따른 수문환경의 변화

4.2.1 잠재증발산량의 변화

표 1로부터 CO₂ 배증에 따라 대청댐 상류 유역의 연평균 기온은 2.5°C가 상승하는 것을 알 수 있었다. 또한, 기온이 증가하면 잠재증발산량이 증가하는 것은 당연하며, CO₂ 배증 상황에서 잠재증발산량의 증가는 피할 수 없는 사실이다. 따라서, 표 1의 2×CO₂ 조건 하의 기온을 이용하여 식(6)의 Penman 방법으로 대청댐 상류 유역의 잠재증발산량을 산정하였으며, 이를 2×CO₂ 상황으로 가정하고 1×CO₂ 상황(1981-1999년)에서의 잠재증발산량과 비교하여 표 2에 나타내었다.

표 2로부터 지구온난화에 의해 CO₂가 현재보다 배증되어 기온이 상승할 경우, 대청댐 상류 유역의 연평균 잠재증발산량은 약 882.2 mm가 발생하여 1×CO₂ 상황의 809.7 mm에 비해 약 9.0% 정도 상승할 것으로 분석되었다. 이것은 CO₂ 배증 상황에서 2.5°C의 연평균 기온 상승이 예측된 것을 감안할 때 1°C의 기온 상승에 의해 약 3.6%가 증가한 것으로 Manabe와 Wetherald (1975)가 제시한 3%/°C 상승과 Budyko(1982)가 제시한 4%/°C 상승의 결과를 만족하는 것이라 할 수 있다.

월별 잠재증발산량의 변화를 살펴보면, 최대 증가한 월은 11월의 30.5%이며 최소 증가한 월은 3월의 2.5%로, 11월의 기온 상승이 5.7°C로 가장 높았고 3월의 기온 상승이 0.4°C로 가장 낮았던 결과를 고려하면 당연한 것이라 할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 지구온난화에 따른 잠재증발산량의 변화량과 표 1에 나타낸 강수량의 변화량을 식(5)의 물수지 방정식에 입력하여 대청댐 상류 유역에서의 수문환경(토양함수비, 증발산량과 유출량 등)의 변화에 대한 분석을 실시하였다.

4.2.2 토양함수비와 증발산량의 변화

IRSHAM96 모형의 모의 결과를 고려하여 산정된 2×CO₂ 상황의 강수량과 CO₂ 배증에 따른 기온의 변화에 의해 산정된 잠재증발산량을 식(1)의 물수지 방정식에 입력하여 대청댐 상류 유역의 토양함수비와 이에 따른 증발산량 및 유출량을 계산하였으며, 이를 표 3~5에 나타내었다.

식(1)의 물수지방정식으로 토양함수비, 증발산량 및 유출량을 산정하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 계산기간의 첫 번째 월에서의 토양수분량 Z_1 을 적절히 가정한

후 $S_i = Z_i / Z_{max}$ 의 관계로부터 S_i 을 구한다. 여기서 아래첨자는 해당 월을 의미하며, $Z_{max}=500mm$ 를 사용하였다.

$dZ/dt = Z_{t+1} - Z_t$ 이므로 위에서 구한 Z_1 , S_1 과 실측 자료로부터 얻어진 강수량 P_1 과 잠재증발산량 ET_{p1} 을 식(1)에 대입하면 두 번째 월의 토양수분량 Z_2 와 토양함수비 S_2 를 얻게된다. 이러한 과정을 축차적으로 반복하게 되면 대상 기간에 대한 월별 Z_i 와 S_i 를 얻게되며, 식(2)의 $R = aS^b \cdot P$ 관계로부터 해당 월의 유출량 R_i 을 구하고, 식(3)을 이용해서 증발산량을 산정할 수 있게 된다.

표 3에 나타낸 토양함수비의 변화를 살펴보면 1×CO₂ 상황에서 연평균 0.66이었으나, 2×CO₂ 상황에서는 0.60으로 감소하고 있으며, 월별로는 9월에만 그 변화가 없고 나머지 월에서는 모두 0.11~0.01의 범위에서 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이는 CO₂ 배증에 따른 기온의 증가로 인한 잠재증발산량의 증가와 강수량의 전반적인 감소가 토양함수비의 감소를 유발하기 때문에 발생하는 것으로서, 지구온난화에 따른 한반도에서의 기온의 증가와 강수량의 감소로 인해 가뭄의 발생 가능성이 높아질 수 있음을 의미하는 것이다. 이것은 표 4의 증발산량 변화들 통해서도 확인할 수 있는데, 연평균 증발산량이 1×CO₂의 621.0 mm에서 2×CO₂ 상황의 634.9 mm로 증가하고 있으며, 이러한 증발산량의 증가가 토양함수비의 감소와 직접적으로 연결되고 있음을 보여주는 것이다.

이러한 강수량과 증발산량의 변화에 따른 2×CO₂ 상황에서 대청댐 상류 유역의 유출량의 변화를 표 5에 나타내었는데, 1×CO₂ 상황의 연평균 유출량이 667.9 mm였으나, 2×CO₂ 상황에서는 625.3 mm로 -6.4%가 감소하고 있다. 월별로는 5월, 6월, 7월과 9월의 강수량이 CO₂ 배증에 따라 0.3~20.3%의 범위에서 증가하고 있으며, 나머지 월에서는 최대 -62.4%에서 최소 -3.4%의 범위에서 감소하고 있다.

그러나, 지구온난화의 영향으로 발생하는 유출량의 변화를 분석할 때 연평균 유출량의 변화도 중요하지만, 우리나라와 같이 건기와 우기의 유출량의 편차가 상당히 큰(하상계수가 보통 300정도 되는) 경우에는 오히려 월별 또는 계절별 변화가 더 큰 의미를 가질 수 있다. 이것은 우기와 건기의 유출량 변화가 연평균 유출량에 비해서 홍수나 가뭄과 같은 극치 기상 현상에 더 큰 영향을 줄 수 있기 때문이다.

이러한 관점에서 월별 유출량의 변화를 살펴볼 때,

표 3. 대청댐 상류 유역에서 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 토양함수비 변화

구분 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년
1×CO ₂	0.70	0.69	0.65	0.59	0.51	0.53	0.67	0.73	0.72	0.69	0.70	0.69	0.66
2×CO ₂	0.62	0.58	0.54	0.48	0.45	0.51	0.66	0.71	0.72	0.67	0.64	0.63	0.60
변화	-0.08	-0.11	-0.11	-0.11	-0.06	-0.02	-0.01	-0.02	0.00	-0.02	-0.06	-0.06	-0.06

표 4. 대청댐 상류 유역에서 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 증발산량(mm) 변화

구분 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년
1×CO ₂	12.2	21.2	42.3	68.3	84.1	78.6	80.5	91.9	67.8	42.7	19.3	12.1	621.0
2×CO ₂	11.8	23.5	38.8	65.3	78.4	75.9	84.0	97.0	75.7	47.1	24.7	12.7	634.9
변화(%)	-3.3	10.8	-8.3	-4.4	-6.8	-3.4	4.3	5.5	11.7	10.3	30.0	5.0	2.2

표 5. 대청댐 상류 유역에서 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 유출량(mm) 변화

구분 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년
1×CO ₂	14.7	18.9	30.2	38.4	46.1	77.3	135.7	152.6	81.4	30.7	28.3	13.6	667.9
2×CO ₂	6.9	8.3	18.4	31.7	50.0	82.1	136.2	147.5	97.9	28.8	10.7	6.8	625.3
변화(%)	-53.2	-56.2	-39.0	-17.6	8.5	6.2	0.3	-3.4	20.3	-6.3	-62.4	-50.1	-6.4

표 6. 대청댐 상류 유역 1xCO₂와 2xCO₂ 상황에서 건기와 우기의 강수량과 유출량 변화

구분	강수량 (mm)			유출량 (mm)		
	건기	우기	합	건기	우기	합
1×CO ₂	416.4	881.1	1297.5	220.9	447.0	667.9
2×CO ₂	331.4	937.7	1269.1	161.6	463.7	625.3
변화율(%)	-20.4	6.4	-2.2	-26.8	3.7	-6.4

주) 건기(1~5월, 10~12월), 우기(6~9월)

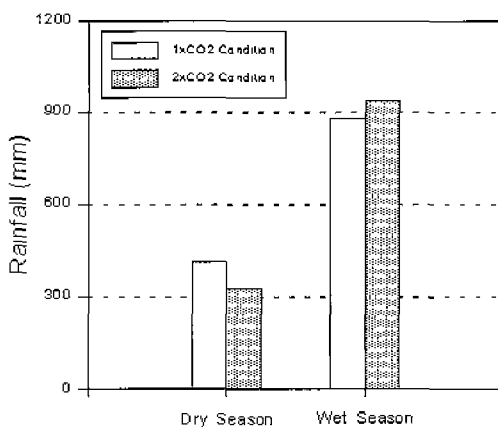


그림 1. 대청댐 상류 유역 1xCO₂와 2xCO₂ 상황에서 건기와 우기의 강수량 변화

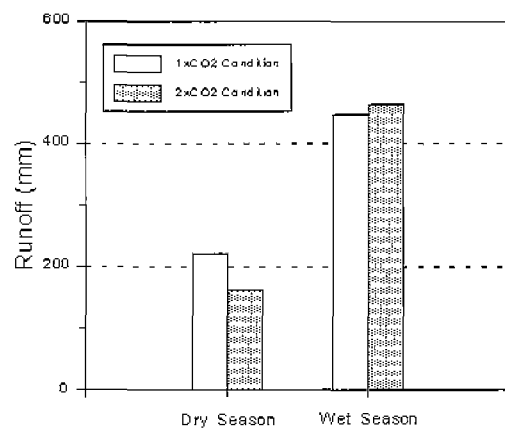


그림 2. 대청댐 상류 유역 1xCO₂와 2xCO₂ 상황에서 건기와 우기의 유출량 변화

주로 건기인 1~4월과 10~12월의 유출량 감소와 주로 우기인 5~7월과 9월의 유출량 증가는 CO₂ 배증 상황에서 홍수와 가뭄 재해의 발생 가능성이 높아질 수 있음을 의미할 수 있다.

4.2.3 대청댐 상류 지역의 수문환경 변화 분석

4.2.2절에서 언급한 것처럼 우리 나라와 같이 하상계수가 큰 경우에는 건기와 우기의 변화가 가뭄과 홍수와 같은 극치 기상 현상에 더 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 건기와 우기의 강수량과 유출량을 분리하여 분석하는 것이 큰 의미를 가질 수 있을 것이다. 따라서, 표 1과 5에 나타난 CO₂ 배증에 따른 지구온난화로 인해 발생하는 월별 강수량과 유출량의 변화를 건기(1~5월, 10~12월)와 우기(6~9월)로 구분하여 표 6에 수록하였으며, 그림 1과 2에 도시하였다.

건기의 강수량과 유출량의 변화를 살펴보면 CO₂ 배증에 따라 강수량은 416.4 mm에서 331.4 mm로 -20.4% 감소하며, 유출량도 220.9 mm에서 161.6 mm로 -26.8%나 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 우기의 강수량과 유출량의 변화를 분석해보면, 강수량의 경우는 CO₂ 배증에 따라 881.1 mm에서 937.7 mm로 6.4%의 증가를, 유출량의 경우는 447.0 mm에서 463.7 mm로 3.7%의 증가가 예상되었다.

이러한 결과는 대청댐 상류 지역에서 지구온난화에 따른 전반적인 가뭄 재해의 발생 가능성이 높아지는 것과는 반대의 현상으로, 우기에는 오히려 홍수재해의 가능성도 높아질 수 있음을 시사하는 것이다. 따라서, 이러한 분석 결과로부터 판단해볼 때 지구온난화 현상이 심화될수록 대청댐 상류 지역에서의 가뭄과 홍수 재해의 가능성이 동시에 증가하는 재해의 양극화 현상이 발생할 가능성이 높아질 수 있으며, 이것은 단지 대청댐 상류 지역에 국한된 것이 아니라 한반도 전체에서 벌어질 수 있는 현상인 것이다.

최근 들어 더욱 빈번하게 발생하는 홍수와 가뭄 등과 같은 재해로 인한 피해가 급증하고 있는 우리나라의 현실에서 앞으로 지구온난화와 같은 기후변화에 의해 발생할 수 있는 여러 가능성에 대한 대비가 더욱 절실히 되고 있음을 시사하는 것이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 들어 빈번해지고 있는 기상이변들의 가장 큰 원인으로 지목 받고 있는 지구온난화 현상이 한반도 수문환경의 변화에 끼치는 영향에 대한 분

석을 시도하였다. 이를 위해 본 연구에서는 국지규모 대기-수문 모형을 통해 모의된 지구온난화에 따른 한반도의 기상 및 수문 특성의 변화를 고려하여, 본 연구의 대상 유역으로 선정된 대청댐 상류 유역의 강수량과 기온 변화에 따른 토양함수비, 증발산, 유출량 등의 변화를 불수지 모형을 이용하여 분석하였다.

따라서, 본 연구에서는 이상과 같은 분석 과정을 통해서, 최종적으로 지구온난화에 의한 한반도 수문환경의 변화에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 강수량과 기온의 변화에 따른 유역의 토양함수비, 증발산량, 유출량 등의 변화를 추정할 수 있는 불수지 모형을 개발하였으며, 대상 유역인 대청댐 상류 유역의 기상관측소 자료와 대청댐 유입량 자료를 이용하여 매개변수를 검정 및 검증하였다.
- 2) 안재현 등(2001c)이 국지규모 대기-수문 모형을 이용해서 모의한 지구온난화에 따른 강수량과 기온의 변화율을 고려해서 재 산정된 강수량을 통해 CO₂ 배증시 대청댐 상류 유역의 강수량은 연평균 -2.2%가 감소하며, 5월, 6월, 7월과 9월 강수량이 증가할 것으로 분석되었다. 또한 기온은 연평균 2.5°C가 상승할 것으로 예측되었으며, 이에 따라 잠재증발산량이 연평균 9.0% 정도 증가할 것으로 분석되었다.
- 3) CO₂ 배증에 따른 대청댐 상류 유역의 강수량 및 기온의 변화에 따른 잠재증발산량을 입력해서 불수지 모형을 모의하였다. 이를 통해 토양함수비가 감소하며, 증발산량은 약간 증가하면서 가을철의 증가와 봄철의 감소가 두드러질 것으로 예측되었다. 또한, 유출량도 여름철을 제외하고는 감소할 것으로 분석되었다.
- 4) 건기와 우기의 강수량과 유출량의 변화 특성이 상대적으로 큰 우리 나라의 현실을 감안하여 CO₂ 배증에 따른 강수량과 유출량의 변화를 건기와 우기로 구분하여 분석하였다. 이를 통해 CO₂ 배증에 따른 강수량과 유출량의 변동은 건기의 감소와 우기의 증가 추세가 뚜렷하게 나타났다.
- 5) 이상과 같은 분석을 통해 CO₂ 증가에 따른 지구온난화 현상이 심화될 경우, 한반도에서는 가뭄과 홍수와 같은 극치 기상이 지금보다 더욱 빈번하게 발생할 가능성이 높은 것으로 예측되었으며, 이에 대한 지속적인 관심과 대책이 필수적임을 알 수 있었다.

본 연구에서는 GCM의 분석결과를 이용하기 위해서 downscaling 기법을 적용하였으나, downscaling 기법을 이용한 경우에는 GCM의 모의과정에서 발생한 오차가 그대로 반영되는 한계를 가지고 있게된다. 그러나, 현재까지의 기술수준으로는 GCM 자체의 불확실성이 너무 큰 것이 사실이며, 본 연구의 결과도 이러한 GCM의 한계를 감안하면서 이해되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 “2000 신진연구인력 연구장려금 지원사업”의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

안재현, 유철상, 윤용남(2001a). “물수지 방정식을 이용한 대청댐 건설에 따른 수문환경의 변화 분석.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제34권, 제3호, pp. 217-229.

안재현, 유철상, 윤용남(2001b). “GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, 인쇄중.

안재현, 윤용남, 이재수(2001c). “지구온난화에 따른 수문환경의 변화와 관련하여 : 1. 국지규모 모형을 이용한 한반도 기온의 변화 분석.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, 인쇄중.

오제호, 홍성길(1995). “대기중 CO₂ 증가에 따른 한반도 강수량 변화.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제3호, pp. 143-157.

윤용남(1998). 공업수문학, 청문각, pp. 249-253.

한국과학기술연구원(1993). 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움 : IV. 기후변화 예측 시나리오, 기상청.

日本 土木研究所(1996). 地球温暖化が日本域における水文循環に及ぼす影響の予測に関する研究報告書, 日本 建設省.

Boer, G.J. and Lazare, M.(1988). “Some results concerning the effect of horizontal resolution and gravity-wave drag on simulated climate.” *J. of Climate*, 1, pp. 789-806.

Budyko, M.(1982). *The Earth's Climate: Past and Future*, Academic Press, New York.

Gregory, J.M, Mitchell, J.F.B. and Brady, A.J. (1997). “Summer drought in Northern midlatitudes in a time-dependent CO₂ climate experiment” *J. of Climate*, 10, pp. 662-686.

Hansen J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lcbedeff, S., Ruedy, R. and Russell, G.(1988). “Global climate changes as forecast by the Goddard Institute for Space Sciences three dimensional model.” *J. of Geophy. Res.*, 93, pp. 9341-9364.

Intergovernmental Panel on Climate Change(1990). *Climate Change : The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge.

Intergovernmental Panel on Climate Change(2001). *Summary for Policymakers : Climate Change 2001*.

Kaczmarek, Z.(1990). *On the sensitivity of runoff to climate change*, Rep. No. WP-90-58, IIASA, Laxenburg, Austria.

Kavvas, M.L., Chen, Z-Q and Tan, L.(1995). *Development of a mesoscale atmospheric model for the scale of Japan: Phase 4-Climate change study of Japan by fully coupled small domain hydrologic-atmospheric model of Japan*, Dept. of Civil & Envir. Eng., Univ. of California, Davis.

Manabe, S., Stouffer, R.J., Spelman M.J. and Bryan, K.(1991). “Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part I : Annual mean response.” *J. of Climate*, 4, pp. 785-817.

Manabe, S. and Wetherald, R.T.(1975). “The effect of doubling CO₂ concentration on the climate of a general circulation model.” *J. Atmos. Sci.*, 32, pp. 3-15.

Meehl, G.A.(1994). “Influence of the land surface in the Asian summer monsoon: External conditions versus internal feedbacks.” *J. of Climate*, 7, pp. 1033-1049.

Mitchell, J.F.B.(1989). “The greenhouse effect and climater change.” *Reviews of Geophysics*, 27, pp. 115-139.

Mitchell, J.F.B., Wilson C.A. and Cunningham, W.M.(1987). “On CO₂ climate sensitivity and

- model dependence of results." *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 113, pp. 293-322.
- Penman, H.L.(1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. Roy. Soc., London*, 193, pp. 120-145.
- Rodriguez-Iturbe, I., Entekhabi, D. and Bras, R.L.(1991). "Nonlinear dynamics of soil moisture at climate scales: 1. Stochastic analysis." *Water Resource Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1899-1906.
- Schlesinger, M.E. and Mitchell, J.F.B.(1987). "Climate model simulations of the equilibrium climate response to increased carbon dioxide." *Rev. Geophys.*, 25, pp. 760-798.
- Washington, W.M. and Meehl, G.A.(1989). "Climate sensitivity due to increased CO₂ : Experiment with a coupled atmosphere and ocean general circulation model." *Clim Dyn.*, 4, pp. 1-38.
- Wetherald, R.T. and Manabe, S.(1995). "The mechanisms of summer dryness induced by greenhouse warming." *J. of Climate*, 8, pp. 3096-3108.
- Yates, D.N. and Strzepek, M.(1998). "Modeling the Nile basin under climate change." *J. of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 98-108.

(논문번호:01-015/접수:2001.02.17/심사완료:2001.08.04)