

GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석

An Analysis of Hydrologic Changes in Daechung Dam Basin using GCM Simulation Results due to Global Warming

안 재 현* / 유 철 상** / 윤 용 남***

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

Abstract

The objective of this research is to analyze the hydrological environment changes in Daechung Dam Basin due to the global warming. GCM simulation results are used to predict the possible changes in precipitation and temperature. The changes of potential evapotranspiration, soil moisture and runoff due to the changes of precipitation and temperature are analyzed using a conceptual water balance model. From the simulation results using the water balance model for 1xCO₂ and 2xCO₂ situations, it has been found that the runoff would decrease in Winter, but increase in Summer and Fall due to the global warming. Therefore, it is predicted that the frequency of drought and flood occurrences in Daechung Dam Basin would be increased in 2xCO₂ condition.

keywords : global warming, GCM, precipitation, temperature, runoff, drought, flood

요 지

본 연구에서는 최근 들어 빈번해지고 있는 기상이변들의 가장 큰 원인으로 지목 받고 있는 지구온난화 현상이 한반도 수문환경의 변화에 끼치는 영향에 대한 분석을 시도하였다. 이를 위해 CO₂의 증가 시나리오에 따라 모의한 대기대순환모형(GCM) 모의 결과를 이용하여 대청댐 상류 유역의 강수량과 기온 변화에 따른 토양함수비, 증발산, 유출량 등의 변화를 물수지 모형을 이용하여 분석하였다. 이를 통해 CO₂ 배증에 따른 지구온난화 현상이 발생할 경우 강수량의 전반적인 증가 경향과 기온의 상승이 나타났으며, 잠재증발산량의 증가와 이로 인한 토양함수비의 감소 및 증발산량의 증가가 예측되었다. 또한, 대청댐 상류 유역의 유출량은 전반적으로 증가경향을 보였다. 그러나, 유출량의 계절적 변화는 여름과 가을의 증가 및 겨울의 감소가 뚜렷할 것으로 분석되어 가뭄과 홍수의 발생 가능성이 현재보다 높아질 것으로 예상되었다.

핵심용어 : 지구온난화, 대기대순환모형, 강수량, 기온, 유출량, 가뭄, 홍수

* (주)컨일엔지니어링 수자원부 차장

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

** 고려대학교 환경공학과 부교수

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

*** 고려대학교 토목환경공학과 교수

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

1. 서론

최근 들어 세계 각국에서는 자연적 또는 인간에 의해 야기된 지구환경변화와 사회, 경제와의 연관성에 지대한 관심을 기울이고 있는데, 이것은 비록 지구가 수백만 년에 걸쳐 변화되어 왔지만 남극의 오존감소, 대기권에서의 이산화탄소의 증가와 같은 최근의 급격한 변화에서 인간활동이 지구시스템에 영향을 미치고 또 영향을 받음을 보여주고 있는 것이기 때문이다.

지구환경은 끊임없이 변하고 있으므로 20세기에 비추어 볼 때 21세기는 상당히 다르게 변할 것이며, 이러한 변화의 일부는 인간활동에 의한 결과이면서 또한 인간이 통제할 수 없는 자연적인 현상의 결과이기도 하다. 이와 같은 지구환경의 변화를 현재의 과학으로는 정확히 이해하고 예측할 수는 없는 실정이다. 하지만, 이러한 지구환경의 변화는 엄연한 현실로 다가와 있으며 세계 각국에서는 이에 따른 영향이 전 지구적으로 어떤 식으로 나타날 것인가에 대해 연구를 지속적으로 실시하고 있다.

지구환경의 변화는 먼저 지구기상의 변화로 나타나며 일반적으로 최근의 빈번한 기상이변들이 그에 대한 근거로 여겨지고 있다. 이러한 지구환경 변화의 가장 큰 원인으로 지목 받고 있는 것이 CO₂의 증가인데, 이는 CO₂ 증가가 지구의 온실효과를 촉진하여 지구의 온난화를 가져왔다는 것이다(Jager와 Ferguson, 1991). 실제로 최근의 많은 연구들이 지구온난화의 영향으로 보다 빈번한 이상 가뭄이나 홍수의 발생가능성을 보이고 있으며, 또한 지구의 온난화는 해수면의 상승, 기상특성의 변화와 더불어 빈번한 기상이변을 유발할 수 있는 것으로 알려지고 있다(IPCC, 1990). IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990)의 연구결과에 따르면 CO₂의 농도가 두 배로 될 경우 지구 평균 기온은 1.5~4.0℃ 정도 상승하고 그 정도는 고위도로 갈수록, 하계보다 동계에 갈수록 더 뚜렷할 것으로 예상되고 있으며, 강수량의 경우는 기온의 경우보다 훨씬 더 불확실하지만 3~15%정도 증가할 것으로 예상하고 있다.

우리 나라의 경우에는 한국과학기술연구원(1994, 1995), 오재호와 홍성길(1995), 윤용남 등(1999)이 지구온난화에 따른 한반도 기후의 변화를 연구한 바 있다. 한국과학기술연구원(1994, 1995)에서는 5개의 GCM(GFDL-R30, CCC, GISS, UKMO와 GFDL GCM) 모의 결과에 근거해서 한반도의 연강수량 변화

를 추정하여 CO₂의 배중에 따라 연평균 약 -5%~25%의 증감을, 계절별로는 -30%~35%의 증감을 예측한 바 있다. 또한, 오재호와 홍성길(1995)은 3개의 GCM(CCC, UI와 GFDL GCM) 모의 결과에 근거한 한반도의 연 강수량 변화를 CO₂의 배중에 따라 봄, 여름, 가을철에 10%, 13%, 24%의 증가를, 겨울철에는 현재보다 약간의 감소를 추정한 바 있으며, 윤용남 등(1999)은 GCM으로부터 얻은 결과를 중·소규모 대기-수문모형에 적용하여 CO₂ 배중에 따라 금강유역의 봄철 강수량이 감소할 것으로 분석하였다. 그러나 이와 같은 연구 결과의 차이를 통해 알 수 있는 것은 지구 온난화가 한반도의 기상 변화에 어떤 영향을 끼칠 수 있다는 기능성의 파악이지, 결코 정확한 변화를 밝혀내지는 못한다는 사실이다.

본 연구에서는 지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화를 분석 및 예측하고자 하였다. 이를 위해 지구온난화에 따른 한반도에서의 기온변화, 강우, 토양수분 등의 기상 및 수문 특성을 CO₂의 증가 시나리오에 따라 모의한 대기대순환모형(General Circulation Model, GCM) 모의 결과를 이용하여 분석하였다. 유역 단위의 수문환경 변화를 살펴보기 위해서는 대기대순환모형(GCM)을 통해 모의된 한반도의 기상 및 수문 특성의 변화를 고려하여 본 연구의 대상 유역으로 선정된 대청댐 상류 유역의 강수량과 기온 변화를 분석하였고, 물수지 모형을 이용하여 이에 따른 토양함수비, 증발산, 유출량 등의 변화를 파악하였다. 또한, 이러한 분석 과정을 통해 최종적으로 지구온난화에 의한 대청댐 유역의 수문환경 변화에 대한 분석 및 예측을 실시하였다.

2. 물수지 모형

2.1 물수지 방정식

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 유로의 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,

2001).

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

여기서, Z 는 토양수분량(L), S 는 토양함수비, P 는 강수량(L/T), ET_p 는 잠재증발산량(L/T)을 의미하며, α 와 β 는 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).

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

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

본 연구에서는 대청댐 유역의 실측 월 강수량 및 월 유출량 자료를 사용해서 매개변수 α 와 β 를 결정하였으며, 식(1)을 이용하여 댐 건설 전후의 유출량, 증발산량, 토양함수비를 산정하여 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화를 분석하였다.

2.2 잠재증발산

만약, 저수지 증발의 경우처럼 물이 무한정 공급된다면 증발산량은 기상학적인 변수(복사에너지, 기온, 증기압, 풍속 등)들에 의하여 영향을 받게 되며, 이렇게 물 공급이 제한되지 않는 상태의 증발산을 잠재증발산(potential evapotranspiration)이라 한다. 이것은 일반적인 기상학적 조건하에서의 최대 가능손실량을 의미한다.

Thornthwaite(1948)에 의하면 잠재증발산량은 유역의 토양이 수분으로 완전 포화되어 있는 상태에서의 증발산량을 의미하며, 지표면의 성질이나 조건에는 전혀 무관하다. 따라서 잠재증발산량은 유역이 식생으로 완전 피복되어 있을 경우에는 저수지면으로부터의 증발량과 다를 것이 없다. 본 연구에서는 잠재증발산량의 산정에 식(4)와 같은 Penman 방법(Penman, 1948)

을 이용하였으며, 실측 pan 증발량과의 비교를 통해 그 적합성을 검토하였다.

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

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.

2.3 모형의 검정 및 검증

본 연구는 대청댐이 위치해 있는 금강유역을 대상으로 하였다. 금강유역은 한반도의 중서부에 위치하며, 충청남도, 충청북도의 절반 정도와 전라북도의 약 1/4 및 경기도 및 경상북도 일부를 포함하는 유역 면적 9,886km²의 대유역으로서, 대략 남한면적의 1/10정도인 남한 제3의 유역이며 본류의 유로 연장이 393.9km에 이른다(한국수자원공사, 1992).

대청댐 상류유역의 강수량 자료 및 잠재증발산량 계산에 필요한 기상자료를 제공하는 청주, 대전, 전주, 보은, 거창 등 5개 기상관측소의 자료를 이용하였으며, 가장 최근에 관측을 시작한 보은과 거창관측소의 경우 1973년부터 관측이 시작되었다. 본 연구에서는 대청댐의 완공이 1980년 12월에 이루어졌고, 댐 유입량 자료가 1981년부터 사용 가능하기 때문에, 1981-1999년의 기간에 대해 수문환경의 변화에 대한 분석을 실시하였다.

대청댐 상류 유역의 5개 기상관측소의 기상자료를 이용해서 식(4)의 Penman 방법으로 잠재증발산량을 산정하였으며, 티센가중법으로 대청댐 상류 유역의 평균 잠재증발산량을 산정하였다. 일반적으로 유역의 잠재증발산량은 측정된 pan 증발량의 70% 정도이다(Bras, 1990). 따라서, 산정된 잠재증발산량을 측정된 1973-1990년 기간의 Pan 증발량과 비교하였으며, 잠재증발산량이 pan 증발량의 71.2% 정도로 나타났다. 이를 통해 잠재증발산량이 적절하게 산정된 것으로 판단할 수 있었다.

이와 같이 계산된 잠재증발산량과 실측된 강수량 및 유출량 자료를 이용해서 물수지 방정식 식(1)의 매개변수 α 와 β 를 결정하였다. 강수량은 5개 기상관측소의 월강수량 자료를 티센가중법으로 평균하여 구했으며, 유출량은 대청댐의 유입량 자료를 사용하였다. 이

러한 자료를 이용하여 1981-1990년 기간에 대해서 매개변수의 검정을 실시하였고, 1991-1999년 기간에 대해 검증을 실시하였다. 1981-1990년 기간의 잠재증발산량, 강수량, 유출량 자료를 이용해서 최적 매개변수를 산정한 결과 $\alpha=0.67$, $\beta=0.55$ 로 나타났으며, 1991-1999년 기간의 잠재증발산량, 강수량 자료를 이용한 결과도 검정시의 결과와 유사한 결과가 나타남을 통해 적절한 매개변수가 결정되었음을 판단할 수 있다.

3. GCM 계산결과에 근거한 수문환경의 변화 분석

3.1 GCM 계산결과에 근거한 한반도 강수량과 기온의 변화

수문분야에서 지구온난화와 관련한 연구는 지구환경의 변화에 따른 강수량의 변화, 증발산량의 변화와 같은 양적인 변화뿐만 아니라 궁극적으로는 홍수나 가뭄과 같은 극단기상의 빈도변화까지 다양하다. 이들 중 연평균 강수량이나 평균온도의 변화에 따른 증발산량의 변화는 대부분 대기대순환모형(General Circulation Model, GCM)을 이용하여 지구규모로 예측되고 있다.

GCM은 지구의 대기를 3차원의 불연속 격자 시스템으로 구성하고 각 격자점에서의 대기 상태를 지배하는 방정식(운동량, 연속, 정역학, 열역학, 상태 방정식 등)을 시간적분하여 지구의 대기 상태를 재현 및 예측하는 모형이다. 이러한 GCM에는 해양, 육지, 빙하, 산악 등의 지표면 상태가 고려되며, 대기 내의 물리과정들인 복사, 강수, 혼합 등이 복잡하게 매개변수화 되어 있다(강인식, 1994).

GCM을 이용하여 지구온난화에 따른 변화를 Manabe와 Wetherald(1975)가 처음 실시한 이후로 전 세계적으로 GCM을 이용한 연구를 활발히 수행하고 있으며, 사용한 GCM과 모델에 따라 그 결과의 차이는 있지만 전반적으로 현재에 비해 대기중의 CO₂ 농도가 배증된다면 지구 전체적으로 2~5℃ 정도의 기온 상승이 발생할 것으로 예측되었는데, 이는 자연적인 변동폭을 훨씬 뛰어넘는 값으로써 이에 따른 전 지구적인 기상 메커니즘의 변화로 인해 추가적인 변동이 발생할 것임을 강력하게 시사하고 있다. IPCC(1990)에 의해 보고된 CO₂ 배증 상황이 발생할 경우 현재에 비해 전 지구적인 평균온도가 1.5~4.0℃ 정도 상승하

며, 그 공간적 변화도 훨씬 심각해질 것이라는 예측도 GCM 모의 결과에 대한 분석을 통해 도출된 결과이다.

GCM은 개발한 기관에 따라 격자 크기와 매개변수화 과정이 다르며, 이에 따른 모의 결과도 다르게 나타난다. 일반적으로 GCM에서 사용되는 격자의 크기(grid size)는 GCM의 종류에 따라 2.0~7.5°의 범위를 가지고 있으며 이를 거리로 환산하면 평균적으로 300km×300km의 범위를 포함하고 있는데, 이러한 규모는 수문기상학적 분석을 실시하기에는 너무 큰 것이 사실이다. 따라서, GCM을 이용한 수문기상학적 분석을 실시하기 위해서는 통계적인 방법을 통한 상관분석을 이용하여 작은 규모의 유역에 대한 분석을 실시하거나, GCM 결과를 경계조건으로 한 후 국지규모 모형(regional scale model)을 사용하여 국지 규모에 대한 분석을 실시하는 방법(downscaling) 등이 주로 이용되고 있다.

국내의 경우에는 주로 국외에서 개발되고 운영중인 여러 GCM의 결과를 수집, 한반도 주변 또는 동아시아 주변에 대해 각각의 결과를 개별적으로 또는 평균적으로 분석하여 결과를 얻고 있는데, 그 분석은 주로 통계적인 내삽방법이나 다중회귀분석을 이용하여 추정하고 있으며(한국과학기술연구원, 1993a, b; 한국과학기술연구원, 1994, 1995; 한국과학기술연구원과 시스템공학연구소, 1993, 1994, 1995), 이러한 연구는 주로 지구온난화의 주 원인으로 여겨지는 대기 중의 이산화탄소 가스의 양이 현재의 두 배가 되는 시점을(대략 60여년으로 추정) 기준으로 하는 것이 일반적이다(오재호와 홍성길, 1995; 日本 土木研究所, 1996).

본 연구에서는 이와 같은 지구온난화의 결과로 유발되는 강수량과 기온의 변화(GCM 결과에 근거해 추정된 변화)에 따른 수문환경의 변화에 대한 분석을 실시하였으며, 이를 위해서는 기존의 GCM을 이용한 연구를 통해 분석된 한반도의 강수량과 기온의 변화를 정량화 해야한다.

한국과학기술연구원(1994, 1995)에서는 5개의 GCM(GFDL-R30, CCC, GISS, UKMO와 GFDL GCM) 모의 결과에 근거한 한반도의 연강수량 변화를 추정하였으며 CO₂의 배증에 따라 연평균 약 -5%~25%의 증감을, 계절별로는 -30%~35%의 증감을 예측하고 있으며, 이를 월별로 정리하면 표 1과 같다. 또한, 강인식(1994)은 4개의 GCM(GFDL, GISS, CCC, UI)을 이용하여 CO₂ 배증에 따른 한반도의 온

표 1. GCM에 근거한 남한내 월별 강수량의 변화(2xCO₂/1xCO₂)

GCM \ 월별	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년
GFDL-R30	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	1.2	1.7	1.2	1.2	1.3	1.13
CCC	0.7	0.6	0.9	1.0	1.0	1.2	1.2	1.0	1.5	1.4	0.7	0.7	1.04
GISS	1.0	1.1	1.1	1.2	1.4	0.7	0.9	1.2	1.2	1.0	0.9	1.2	1.06
UKMO	1.0	1.1	0.8	1.3	0.8	0.8	1.5	0.8	1.2	0.9	0.9	1.1	0.99
GFDL	1.0	0.9	1.1	0.9	1.2	0.8	1.1	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	0.94
Mean (Min- Max)	0.96 (0.7- 1.1)	0.96 (0.6- 1.1)	0.98 (0.8- 1.1)	1.1 (0.9- 1.3)	1.08 (0.8- 1.4)	0.88 (0.7- 1.2)	1.14 (0.9- 1.5)	1.04 (0.8- 1.2)	1.3 (0.9- 1.7)	1.06 (0.8- 1.4)	0.94 (0.7- 1.2)	1.06 (0.7- 1.3)	1.03 (0.94- 1.13)

표 2. GCM에 근거한 2xCO₂ 상황에서의 남한내 계절별 기온의 변화(°C)

GCM \ 계절	봄	여름	가을	겨울	년
CCC	4.2	4.5	3.7	3.1	3.9
GISS	3.5	3.5	3.0	2.7	3.2
UI	4.3	4.4	4.9	4.7	4.6
GFDL	4.8	3.6	4.3	4.7	4.3
Mean (Min ~Max)	4.2 (3.5~4.8)	4.0 (3.5~4.5)	4.0 (3.0~4.9)	3.8 (2.7~4.7)	4.0 (3.2~4.6)

도변화를 예측한 결과 연평균 3.5~4.7°C 정도의 증가를 예측하였으며, 이를 계절별로 정리하면 표 2와 같다.

이와 같이 사용되는 GCM에 따라 CO₂ 배증에 의한 강수량 및 기온의 변화량이 달라지는 것은 각 GCM 모의 결과의 차이를 나타내는 것이며, 이는 각 GCM속의 역학적, 물리적 과정의 차이뿐만 아니라 전환합수를 산출하는 방법도 충분히 객관적이지 못하다는 점을 그 원인으로 생각할 수 있다. 따라서 각 GCM의 결과에는 상당한 불확실성이 내재되어 있다는 데 주의할 필요가 있다. 하지만 현재까지 GCM이외에 기후변화를 예측할 수 있는 적절한 도구는 없는 실정이며 관련연구도 이러한 결과에 근거할 수밖에 없는 실정이다. 그러므로 GCM의 종류에 따라 그 결과가 달라지는 하지만, 표 1과 2에 정리된 지구온난화에 따른 우리 나라의 강수량과 기온의 변화량을 이용한 분석을 시도하였다.

표 1과 2에서 알 수 있듯이 GCM의 종류에 따라 CO₂ 배증 상황에서의 강수량과 기온의 변동폭이 달라지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 각각의 GCM에 근

거한 계산결과의 평균(Mean)과 최소(Min), 최대(Max) 값을 현재 상태의 기술 수준으로 분석할 수 있는 CO₂ 배증 상황에서의 발생 가능한 값의 범위로 가정하여 각각의 3가지 경우에 대해서 대상 유역에서의 수문환경 변화에 대해 분석하였다. 즉, GCM에 근거한 발생가능 강수량과 기온이 평균인 경우(Mean), 최소(Min)인, 그리고 최대인 경우(Max)의 3가지 시나리오를 설정해서 각각의 시나리오에 따라 대상 유역의 강수량과 기온을 계산한 후에, 물수지 모형을 이용하여 그 결과에 따라 달라지는 잠재증발산량, 토양함수비, 증발산량과 유출량을 계산하여 기존의 GCM 분석 결과로부터 도출해낼 수 있는 가능한 변동폭의 분석을 시도하였다.

3.2 GCM 계산결과에 근거한 수문환경의 변화 분석

3.2.1 강수량과 기온의 변화

3.1절에서 선정한 GCM 계산결과(Mean, Min, Max)를 근거로 하여 대청댐 상류 유역에서의 강수량

표 3. GCM 계산결과에 근거한 대청댐 상류 유역의 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 월별 강수량(mm)

시나리오 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년	
1xCO ₂	27.5	34.8	55.8	73.3	92.5	164.9	288.5	283.9	143.8	55.1	52.3	25.1	1297.5	
2xCO ₂	Min	19.2	20.9	44.6	66.0	74.0	115.4	259.6	227.1	129.4	44.1	36.6	17.6	1054.5
	Mean	26.4	33.4	54.7	80.7	99.9	145.1	328.9	295.3	187.0	58.4	49.2	26.6	1385.6
	Max	30.2	38.3	61.4	95.3	129.6	197.8	432.7	340.7	244.5	77.2	62.8	32.7	1743.2

표 4. GCM 계산결과에 근거한 대청댐 상류 유역의 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 월별 기온(°C)

시나리오 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년	
1xCO ₂	-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	
2xCO ₂	Min	0.1	2.4	8.5	15.3	20.5	24.8	28.0	28.3	22.5	15.9	9.3	2.9	14.9
	Mean	1.2	3.5	9.2	16.0	21.2	25.3	28.5	28.8	23.5	16.9	10.3	4.0	15.7
	Max	2.1	4.4	9.8	16.6	21.8	25.8	29.0	29.3	24.4	17.8	11.2	4.9	16.4

표 5. GCM 계산결과에 근거한 대청댐 상류 유역의 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 월별 잠재증발산량(mm)

시나리오 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년	
1xCO ₂	14.8	25.6	51.5	85.7	113.1	116.8	118.4	115.0	79.8	50.8	23.6	14.6	809.7	
2xCO ₂	Min	16.9	28.9	59.0	96.2	125.9	129.5	131.4	128.8	89.0	57.7	27.2	16.7	907.2
	Mean	17.8	30.2	60.5	98.3	128.4	131.3	133.3	130.7	92.0	60.0	28.5	17.5	928.5
	Max	18.5	31.3	61.8	100.0	130.6	133.1	135.1	132.7	94.8	62.2	29.7	18.3	948.1
변화율 (%)	Min	14.2	12.9	14.6	12.3	11.3	10.9	11.0	12.0	11.5	13.6	15.3	14.4	12.1
	Mean	20.3	18.0	17.5	14.7	13.5	12.4	12.6	13.7	15.3	18.1	20.8	20.0	14.7
	Max	25.0	22.3	20.0	16.7	15.5	14.0	14.1	15.4	18.8	22.4	25.8	25.3	17.1

과 기온을 다음과 같이 산정하였다. 먼저, 대상유역인 대청댐 상류 유역의 5개 기상관측소의 1981~1999년 기간 동안의 강수량과 기온 자료를 현재 상태(1xCO₂)로 가정하였다. 가정된 강수량과 기온에 표 1과 2의 월별 또는 계절별 Mean, Min, Max 값을 고려하여 2xCO₂ 상황에서 각각의 시나리오에 따른 월별 강수량과 기온을 표 3과 4와 같이 계산하였다. 즉, 표 1에 나타난 시나리오에 따른 월 강수량의 변화율을 19년 동안의 월별 강수량에 곱해서 시나리오별 강수량을 구했으며, 표 2에 나타난 월 기온의 변화율을 같은 기간의 월별 기온에 더해 줌으로써 각각의 기온을 산정한 것이다.

이와 같이 계산된 각각의 시나리오에 따른 19년

(1981~1999년) 동안의 강수량과 기온을 식(1)~(3)의 물수지 모형에 입력해서 잠재증발산량, 토양함수비, 증발산량과 유출량을 계산하여 CO₂ 배중에 따른 대청댐 상류 유역에서의 수문환경 변화의 분석을 시도하였다.

3.2.2 잠재증발산량의 변화

CO₂ 배중 상황에서 시나리오에 따른 기온 변화량은 그 변동폭은 다르지만 증가하는 것만은 사실이며, 이러한 기온의 증가에 따라 잠재증발산량도 증가하는 것은 당연하다. CO₂ 배중에 따라 표 4와 같이 증가하는 시나리오별 기온을 대청댐 상류 유역의 19년(1981~1999년) 동안의 기상자료와 함께 이용해서 잠재증발산을 산정하였다. 즉, 식(3)의 Penman방법에 따라 시나

표 6. GCM 계산결과에 근거한 대형댐 상류 유역의 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 월별 토양함수비의 변화

시나리오	월	년												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1xCO 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
2xCO ₂	Min	0.56	0.54	0.50	0.45	0.38	0.38	0.56	0.61	0.60	0.56	0.56	0.55	0.52
	Mean	0.67	0.65	0.61	0.54	0.46	0.46	0.67	0.72	0.72	0.68	0.68	0.67	0.63
	Max	0.75	0.73	0.68	0.60	0.54	0.55	0.79	0.81	0.82	0.77	0.77	0.77	0.72
변화	Min	-0.14	-0.15	-0.15	-0.14	-0.13	-0.15	-0.11	-0.12	-0.12	-0.13	-0.14	-0.14	-0.14
	Mean	-0.03	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	-0.07	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03
	Max	0.05	0.04	0.03	0.01	0.03	0.02	0.08	0.08	0.10	0.08	0.07	0.08	0.06

표 7. GCM 계산결과에 근거한 대형댐 상류 유역의 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 월별 증발산량(mm)의 변화

시나리오	월	년												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1xCO 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
2xCO ₂	Min	12.0	20.5	41.0	63.9	76.7	69.0	69.3	90.5	66.8	43.0	19.4	11.9	584.0
	Mean	14.3	24.3	47.9	74.5	89.6	81.8	81.6	103.4	77.0	50.3	23.0	14.2	681.9
	Max	16.1	27.2	52.8	81.9	99.0	92.3	94.7	116.2	85.5	56.0	26.0	16.1	763.8
변화율 (%)	Min	-1.6	-3.3	-3.1	-6.4	-8.8	-12.2	-13.9	-1.5	-1.5	0.7	0.5	-1.7	-5.9
	Mean	17.2	14.6	13.2	9.1	6.5	4.1	1.4	12.5	13.6	17.8	19.2	17.4	9.8
	Max	32.0	28.3	24.8	19.9	17.7	17.4	17.6	26.4	26.1	31.1	34.7	33.1	23.0

리오별 잠재증발산량을 산정할 때, 다른 계산인자들(일조시간, 상대습도, 풍속 등)은 대형댐 상류 유역의 실측자료를 그대로 적용하고, 기온자료만 시나리오별로 변화된 값을 사용하여 잠재증발산량을 계산한 것이다.

이와 같이 계산되어 월별로 평균하여 표 5에 나타난 잠재증발산량의 변화를 통해서 지구온난화가 심화되는 어떤 경우에도 잠재증발산량은 증가할 것임을 알 수 있다. 그러므로 CO₂ 배증 상황에서 잠재증발산량의 증가는 피할 수 없는 사실인 것이다.

표 5에 나타난 월별 잠재증발산량의 변화율을 살펴보면 최대 증가한 월은 11월의 25.8%, 최소 증가한 월은 6월의 10.9%이며, 연 잠재증발산량은 12.1~17.1%의 범위내에서 평균 14.7%가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 잠재증발산량의 증가는 유역의 토양함수비를 감소시키며, 이에 따라 증발산량이 변화하면서 최종적으로는 유역의 유출량의 변화를 유발할 것임을 예상할 수 있다.

3.2.3 토양함수비, 증발산량과 유출량의 변화

GCM 계산결과에 근거해서 산정된 강수량과 3.2.2

절에서 기온의 변화에 따라 산정된 잠재증발산량을 식(1)의 물수지 방정식에 입력하여 토양함수비와 이에 따른 증발산량 및 유출량을 계산하였으며, 이를 표 6~8에 나타내었다.

표 6에 나타난 토양함수비의 변화를 살펴보면 1xCO₂ 상황에서 연 평균 0.66이었으나, 2xCO₂ 상황에서는 0.52~0.72의 범위에서 연 평균은 0.63으로 감소하고 있음을 알 수 있으며, 그 변동폭도 월별로는 최소 -0.15에서 최대 0.08의 범위에서 변화하면서 연 평균은 -0.14~0.06의 범위에서 평균적으로 -0.03 정도 감소하게 나타나고 있다.

이는 3.2.2절에서 언급한 것처럼 CO₂ 배증에 따라 기온이 증가하는 것은 피할 수 없는 현실이며, 이로 인한 잠재증발산량의 증가는 강수량의 변화에 따라 달라지기는 하겠지만 궁극적으로 토양함수비의 감소를 유발하게 된다는 사실을 의미하는 것이다. 또한 잠재증발산량과 토양함수비의 변화는 실제 증발산량의 변화에도 영향을 미치게 된다.

표 7에서는 이러한 증발산량의 변화를 나타내었는데, 1xCO₂ 상황에서 연 평균 621.0mm였으나, 2xCO₂ 상황

표 8. GCM 계산결과에 근거한 대청댐 상류 유역의 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 월별 유출량(mm)의 변화

시나리오	월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년
	1xCO 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
2xCO ₂	Min	9.0	9.9	21.0	29.8	31.6	45.8	101.6	109.9	66.0	22.2	17.6	8.3	472.7
	Mean	13.8	17.8	28.7	40.5	47.4	64.5	142.9	157.5	104.4	32.6	26.2	14.1	690.4
	Max	17.1	22.0	34.5	51.2	65.8	94.9	208.5	199.0	146.5	45.5	36.0	18.8	939.8
변화율 (%)	Min	-38.5	-47.5	-30.4	-22.4	-31.4	-40.7	-25.1	-28.0	-18.9	-27.6	-37.8	-38.7	-29.2
	Mean	-6.1	-6.1	-5.0	5.4	3.0	-16.6	5.3	3.2	28.3	6.1	-7.3	4.1	3.4
	Max	16.3	16.2	14.0	33.2	42.8	22.9	53.6	30.4	80.0	48.2	27.0	38.5	40.7

에서는 584.0~763.8mm의 범위에서 연 평균은 681.9mm로 증가하고 있음을 알 수 있으며, 그 변동폭도 월별로는 최소 -13.9%에서 최대 34.7%의 범위에서 변화하면서 연 평균은 -5.9~23.0%의 범위에서 평균적으로 9.8% 정도 증가하는 것으로 나타나고 있다.

이러한 증발산량의 전반적인 증가 경향은 기온의 증가에 따른 잠재증발산량의 증가가 토양함수비를 감소 시키기는 하지만 전체적인 증발산량의 증가에 크게 기여하고 있음을 보여주는 것이며, 기온이 증가하는 2xCO₂ 상황에서 만약 강수량이 감소하는 시나리오로 우리나라의 상태가 변화한다면 그에 따른 가뭄의 발생은 지금의 상황보다는 훨씬 극심하게 다가올 수 있음을 시사한다고 할 수 있을 것이다.

강수량과 증발산량의 변화에 따른 2xCO₂ 상황에서 대청댐 상류 유역의 유출량의 변화를 표 8과 그림 1에 나타내었는데 1xCO₂ 상황에서 연 평균 667.9mm였으나, 2xCO₂ 상황에서는 472.7~939.8mm의 범위에서 연 평균은 690.4mm로 증가하고 있음을 알 수 있으며, 그 변동폭도 월별로는 최소 -47.5%에서 최대 80.0%의 범위에서 변화하면서 연 평균은 -29.2~40.7%의 범위에서 평균적으로 3.4% 정도 증가하는 것으로 나타나고 있다. 따라서, GCM 계산결과에 근거한 연 평균 유출량의 변화로부터 판단해볼 때 대청댐 상류 유역에서 2xCO₂ 상황에서는 전반적으로 유출량이 증가할 것으로 판단할 수 있을 것이다.

그러나, 유출량은 전반적인 연 평균의 변화도 중요

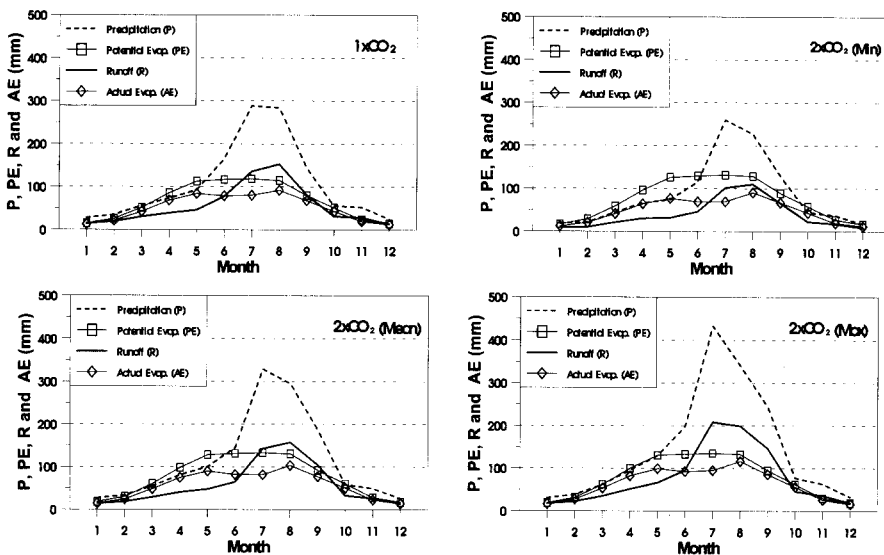


그림 1. 대청댐 상류 유역 1xCO₂와 2xCO₂ 상황의 월별 강수량(P), 잠재증발산량(PE), 유출량(R)과 증발산량(AE)의 변화

표 9. GCM 계산결과에 근거한 2xCO₂ 상황에서 대청댐 상류 유역 수문인자의 계절별 변화

구 분		봄	여름	가을	겨울	년
강수량 (%)	Mean (Min~Max)	6.2 (-17~29)	4.3 (-18~32)	17.3 (-16~53)	-1.1 (-34~16)	6.8 (-19~34)
기 온 (°C)	Mean (Min~Max)	4.2 (3.5~4.8)	4.0 (3.5~4.5)	4.0 (3.0~4.9)	3.8 (2.7~4.7)	4.0 (3.2~4.6)
잠재증발산량 (%)	Mean (Min~Max)	14.7 (12~17)	12.9 (11~14)	17.1 (13~21)	19.1 (14~24)	14.7 (12~17)
토양함수비	Mean (Min~Max)	-0.04 (-0.14~0.03)	-0.02 (-0.12~0.08)	-0.01 (-0.13~0.09)	-0.03 (-0.14~0.06)	-0.03 (-0.14~0.06)
증발산량 (%)	Mean (Min~Max)	8.9 (-7~20)	6.3 (-9~21)	15.8 (0~29)	16.0 (-2~31)	9.8 (-6~23)
유출량 (%)	Mean (Min~Max)	1.7 (-28~32)	-0.2 (-30~37)	16.2 (-25~62)	-3.2 (-42~23)	3.4 (-29~41)

주) 봄(3-5월), 여름(6-8월), 가을(9-11월), 겨울(12-2월)

하지만 계절적인 변화도 큰 의미가 있다. 왜냐하면 가뭄과 홍수가 반복되고 있는 우리 나라의 현실에서 우기와 건기의 유출량의 변화는 단순히 연 유출량의 변화와는 다르게 다가올 것이기 때문이다. 이러한 관점에서 월별 유출량의 변화를 살펴볼 때, 주로 건기인 1, 2, 3, 6, 11, 12월에는 유출량의 감소 경향이, 주로 우기인 4, 5, 7, 8, 9, 10월에는 유출량의 증가 경향이 두드러지게 나타나는 표 8의 결과로부터 2xCO₂ 상황에서 건기의 유출량 감소와 우기의 유출량 증가가 예상되었다.

3.2.4 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석

GCM 계산결과에 근거한 3.2.1~3.2.3절에서 산정된 강수량, 기온, 잠재증발산량, 토양함수비, 증발산량과 유출량의 계절별 변화를 파악하기 위해서 각각의 시나리오에 따라 계산된 수문인자들의 월별 값을 평균하여 계절별 값을 산정하였으며, 계절별 변화를 파악하기 위하여 시나리오에 따른 계절별 변화량을 계산하여 표 9에 나타내었다.

표 9로부터 지구온난화에 따른 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화를 분석해보면, 강수량은 겨울을 제외한 나머지 계절에서 증가추세를 보이면서 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 기온은 2.7~4.9°C의 범위에서 증가할 것으로 분석되었다. 또한, 잠재증발산량은 최소 10% 이상씩 모든 계절에서 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 토양함수비는 전반적으로 감소할 것으로 분석되었고 증발산량은 -6~23% 범위내에서 증감을 보여주고 있다.

유출량은 이러한 여러 인자들의 작용에 의한 최종적인 값으로서, 전반적으로는 증가 경향이 나타났으며, 특히 우기인 여름과 가을철의 증가와 건기인 겨울철의 감소 경향이 뚜렷했는데, 이러한 결과로부터 추후 2xCO₂ 상황에서는 홍수와 가뭄과 같은 극치기상의 발생 가능성이 현재에 비해서 좀더 높아질 것으로 판단되어진다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 들어 빈번해지고 있는 기상이변들의 가장 큰 원인으로 지목 받고 있는 지구온난화 현상이 한반도 수문환경의 변화에 끼치는 영향에 대한 분석을 시도하였다. 이를 위해 본 연구에서는 CO₂의 증가 시나리오에 따라 모의한 대기대순환모형 모의 결과를 이용하여 본 연구의 대상 유역으로 선정된 대청댐 상류 유역의 강수량과 기온 변화에 따른 토양함수비, 증발산, 유출량 등의 변화를 물수지 모형을 이용하여 분석하였다. 이상과 같은 분석 과정을 통해서, 최종적으로 지구온난화에 의한 한반도 수문환경의 변화에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기존의 GCM 결과를 이용해서 분석된 한반도의 강수량과 기온의 변화 특성을 물수지 모형에 입력해서 CO₂ 배증에 따른 대청댐 상류 유역의 수문환경 변화를 분석하였으며, 이를 통해 CO₂ 배증에 따른 지구온난화 현상이 발생할 경우 강수량의 전반적인 증가 경향과 기온의 상승이 예측되었다.

2) 지구온난화에 따른 기온의 상승으로 인해 잠재증

발산량은 평균 14.7%가 증가할 것으로 분석되었으며, 이로 인해 토양함수비의 감소 및 증발산량의 증가가 예측되었다.

3) 대청댐 상류 유역의 유출량은 -29.2~40.7%의 범위에서 평균 3.4% 정도 증가할 것으로 나타났으며, 이를 통해 전반적인 유출량의 증가경향이 예측되었다. 그러나, 유출량의 계절적 변화는 여름과 가을의 증가 및 겨울의 감소가 뚜렷할 것으로 분석되어 가뭄과 홍수의 발생 가능성이 현재보다 높아질 수 있음을 보였다.

4) 이상과 같은 분석을 통해 CO₂ 증가에 따른 지구 온난화 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 연구의 결과는 기본적으로 GCM의 모의결과에 기초하여 수행된 것이다. 따라서, 예측의 신뢰도는 GCM의 결과와 이를 분석한 모형이 가지는 물리적 과정의 정확성에 좌우되게 된다. 그러나, 현재까지의 기술수준으로는 GCM 자체의 불확실성이 너무 큰 것이 사실이며, 본 연구의 결과도 이러한 GCM의 한계를 감안하면서 이해되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

강인식 (1994). “지구온난화와 동반된 한반도 기온변화의 시나리오 연구(I).” 한국기상학회지, 한국기상학회, 제30권, 제2호, pp. 247~260.

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

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

윤용남(1998). 공업수문학, 청문각, pp. 249~253.

윤용남, 이재수, 유철상, 안재현 (1999). 지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구, '99 학술 발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 165~168.

한국과학기술연구원 (1993a). 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움 : II. 해양, 수문학 분야, 기상청.

한국과학기술연구원 (1993b). 기후변화가 한반도에

미치는 영향에 관한 심포지움 : IV. 기후변화 예측 시나리오, 기상청.

한국과학기술연구원 (1994). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(I), 과학기술처.

한국과학기술연구원 (1995). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(III), 과학기술처.

한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1993). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(I), 환경부, 과학기술처.

한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1994). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(III), 환경부, 과학기술처.

한국과학기술연구원, 시스템공학연구소 (1995). 지구 환경 감시 및 기후 변화 예측 기술, 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구(III), 환경부, 과학기술처.

한국수자원공사 (1992). 전국 하천조사서, 건설부.

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豫測に関する研究報告書, 日本 建設省.

Bras, R.L. (1990). *Hydrology: An introduction to hydrologic science*, Addison-Wesley, Mass.

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

Jager, J. and Ferguson, H.L. (1991). *Climate Change: Science, Impacts and Policy*, Proceeding of the Second World climate Conference, Cambridge University Press, Cambridge.

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

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.

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.

Thornthwaite, C.W. (1948). "An Approach

Toward a Rational Classification of Climate." *Geograph. Rev.*, 38, pp. 55~94.

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:01-009/접수:2001.02.02/심사완료:2001.05.09)