

기존의 GCM 모의 결과를 이용한 CO₂ 증가에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석

An Analysis of Hydrologic Changes in Daechung Dam Basin
using GCM Simulation Results due to CO₂ Increasing

안재현¹⁾/유철상²⁾/윤용남³⁾

1. 서론

최근 들어 세계 각국에서는 자연적 또는 인간에 의해 야기된 지구환경변화와 사회, 경제와의 연관성에 지대한 관심을 기울이고 있는데, 이것은 비록 지구가 수백 만년에 걸쳐 변화되어 왔지만 남극의 오존감소, 대기권에서의 이산화탄소의 증가와 같은 최근의 급격한 변화는 인간활동이 지구 시스템에 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 예측 할 수는 없는 실정이다. 하지만, 이러한 지구환경의 변화는 염연한 현실로 다가와 있으며 세계 각국에서는 이에 따른 영향이 전 지구적으로 어떤 식으로 나타날 것인가에 대해 연구를 지속적으로 실시하고 있다.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990)의 연구결과에 따르면 CO₂의 농도가 두배로 될 경우 지구 평균 기온은 1.5~4.0°C 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.

우리나라의 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 변화를 추정하여 CO₂의 배증에 따라 연평균 약 -5%~25%의 증감을, 계절별로는 -30%~35%의 증감을 예측한 바 있다.

오재호와 홍성길(1995)은 3개의 GCM(CCC, UI와 GFDL GCM) 모의 결과에 근거한 한반도의 연 강수량 변화를 CO₂의 배증에 따라 봄, 여름, 가을철에 10%, 13%, 24%의 증가를, 겨울철에는 현재보다 약간의 감소를 추정한 바 있으며, 윤용남 등(1999)은 GCM(MRI GCM)으로 얻은 결과를 중·소규모 대기-수문모형에 적용하여 CO₂ 배증에 따라 금강유역의 봄철 강수량이 감소할 것으로 분석하였다. 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.

1) (주)건일엔지니어링 수자원부 차장

2) 고려대학교 환경공학과 부교수

3) 고려대학교 토목환경공학과 교수

본 연구에서는 지구온난화에 따른 한반도 수문환경의 변화를 분석 및 예측하고자 하였다. 이를 위해 지구온난화에 따른 한반도에서의 기온변화, 강우, 토양수분 등의 기상 및 수문 특성을 CO_2 의 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. 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 침루, 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). 그러나, 이러한 여러 인자의 영향을 받는 유출을 양적으로 따져본다면 다음 식(1)과 같은 간단한 물수지 방정식의 형태로 표시할 수 있다.

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

여기서, Z 는 토양수분량(L), α 와 β 는 매개변수, S 는 토양함수비, P 는 강수량(L/T), ET 는 잠재증발산량(L/T)을 의미하며, S 는 토양수분량 Z 와 최대 토양수분량 Z_{\max} (L)의 비이다.

2.2 잠재증발산

잠재증발산량을 산정하는 방법에는 Pan 증발량을 이용하는 방법, Penman 방법(Penman, 1948), Thornthwaite 방법(1948), Blaney-Criddle 방법(1950) 등이 있는데, 일반적으로 Pan 증발량을 이용하는 방법과 Penman 방법이 잠재증발산량의 산정에 주로 이용되고 있다(Bras, 1990).

본 연구에서는 잠재증발산량의 산정에 식(2)와 같은 Penman 방법을 이용하였으며, 실측 Pan 증발량과의 비교를 통해 그 적합성을 검토하였다. 식(2)에서 우변의 첫 번째 항은 에너지수지 항을, 두 번째 항은 공기동역학적 항을 의미한다.

$$ET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (2)$$

여기서, ET 는 증발산량(mm/day), Δ 는 포화수증기압의 곡선의 기울기 $\Delta e_a / \Delta T(\text{kPa}/^\circ\text{C})$ 이며, γ 는 습도증정상수(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(2)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. 이러한 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 결과를 보여주었다.

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.

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°C 정도의 기온 상승이 발생할 것으로 예측되었는데, 이는 자연적인 변동폭을 훨씬 뛰어 넘는 값으로써 이에 따른 전 지구적인 기상 메카니즘의 변화로 인해 추가적인 변동이 발생할 것임을 강력하게 시사하고 있다.

본 연구에서는 지구온난화의 결과로 유발되는 강수량과 기온의 변화(GCM 결과에 근거해 추정한 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. 강인식(1994)은 4개의 GCM(GFDL, GISS, CCC, UI)을 이용하여 CO₂ 배증에 따른 한반도의 온도변화를 예측한 결과 연평균 3.5~4.7°C 정도의 증가를 예측하였으며, 이를 계절별로 정리하면 표 2와 같다.

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

표 1. GCM에 근거한 남한내 월별 강수량의 변화($2xCO_2/1xCO_2$)

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 (0.7~1.5)	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 $2xCO_2$ 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)

3.2 GCM 계산결과에 근거한 대청댐 상류 유역 수문환경의 변화 분석

GCM 계산결과에 근거한 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 3에 나타내었다.

표 3으로부터 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. 잠재증발산량은 최소 10% 이상씩 모든 계절에서 증가하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 토양함수비는 전반적으로 감소할 것으로 분석되었고 증발산량은 -6~23% 범위내에서 증감을 보여주고 있다.

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

어찌면, 최근 들어 우리 나라에서 되풀이되는 홍수 및 가뭄재해(안재현 등, 2000)도 이러한 지구온난화의 영향이 반영되기 시작하기 때문에 나타나는 현상일지도 모른다는 생각이 들며, 이러한 현상에 대한 장기적인 관점에서의 분석과 대책은 필수적일 것이다.

표 3. 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)

4. 결론

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

- 1) 강수량과 잠재증발산량의 변화에 따른 유역의 토양함수비, 증발산량, 유출량 등의 변화를 추정 할 수 있는 물수지 모형을 개발하였으며, 대상 유역인 대청댐 상류 유역의 기상관측소 자료와 대청댐 유입량 자료를 이용하여 매개변수를 검정 및 검증하였다.
- 2) 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.

- 3) 지구온난화에 따른 기온의 상승으로 인해 잠재증발산량은 평균 14.7%가 증가할 것으로 분석되었으며, 이로 인해 토양함수비의 감소 및 증발산량의 증가가 예측되었다.
- 4) 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.
- 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.

참 고 문 헌

- 장인식(1994). “지구온난화와 동반된 한반도 기온변화의 시나리오 연구(I).” *한국기상학회지*, 한국기상학회, 제30권, 제2호, pp. 247-260.
- 안재현, 김태웅, 유철상, 윤용남(2000). “자료기간 증가에 따른 확률강우량의 거동특성 분석.” *한국수자원학회 논문집*, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 569-580.
- 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 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 165-168.
- 한국과학기술연구원(1994). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(I), 과학기술처.
- 한국과학기술연구원(1995). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(II), 과학기술처.
- 한국수자원공사(1992). 전국 하천조사서, 건설부.
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D.(1950). *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*, U.S. Department of Agriculture Soil Conservations Service. Technical Document No. 96.
- Bras, R.L.(1990). *Hydrology: An introduction to hydrologic science*, Addison-Wesley, Mass.
- Intergovernmental Panel on Climate Change(1990) *Climate Change : The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge.
- 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.
- Thornthwaite, C.W.(1948). "An Approach Toward a Rational Classification of Climate." *Geograph. Rev.*, 38, pp. 55-94.