

기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석 Effects of Climate Change on the Streamflow for the Daechung Dam Watershed

김 옹 태* / 이 동 루** / 유 철 상***

Kim, Ung Tae / Lee, Dong Ryul / Yoo, Chulsang

Abstract

Climate change mainly due to the increase of green house gases cause different patterns of water cycle within the basin. However, it is common that current planning and management practices do not consider the effect of the climate change. So, this study evaluated the effect of climate change on the water circulation within the watershed. This study used several GCM simulations for the double CO₂ condition for the generation of temperature and rainfall series using the Markov chain. Daily runoff series for 100 years were generated using a rainfall-runoff model. As results, annual temperature increase by +3.2~+4.6 °C, annual precipitation change -7~+8 %, annual runoff change -14~+7 %, and potential evapotranspiration amount change +3~+4 % for the change of 1 °C are found to be expected depending on GCM simulations. Even though the simulation results are very dependent on the GCM predictions considered, overall variability of runoff is expected to become higher than the current state.

Keywords : Climate Change, double CO₂ condition, GCM, Markov chain, random generation, rainfall-runoff model, flow duration analysis

요 지

온실기체의 증가에 따른 기후변화로 인해 유역에서의 물순환이 과거와는 다른 패턴을 보이고 있다. 그러나 현재의 수자원 계획 및 관리에는 기후변화의 영향이 포함되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 기후변화의 영향이 유역의 물순환에 어떻게 영향을 주는지를 검토하였다. 본 연구는 기존의 여러 가지 배증 CO₂ 상태의 GCM(General Circulation Model) 모의결과를 이용하여 기온 및 강수량 자료를 Markov 연쇄에 의해 모의발생 하였다. 또 강우-유출 모형을 이용하여 100년동안의 일단위 유출을 계산하였다. 그 결과 GCM 시나리오별로 연평균기온은 +3.2~+4.6 °C, 연평균강수량은 -7~+8 %, 연평균유출은 -14~+7 % 그리고 기온 1 °C 변화에 따른 잠재증발산량은 +3~+4 %의 변화를 보였다. 기후변화에 따른 영향의 평가는 GCM 모의결과에 크게 의지하지만 유황분석결과 기후변화에 따른 유출의 변동가능폭은 현재 상태보다 커질 것으로 예상된다.

핵심용어 : 기후변화, 배증 CO₂ 상태, GCM, Markov 연쇄, 모의발생, 강우-유출 모형, 유황분석

* 고려대학교 부설 방재과학기술연구센터 선임연구원
Senior Researcher, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University
1, 5-ka, Anam-dong, Sungbuk-ku, Seoul, 136-701, Korea
(E-mail: hydro71@chol.com)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, Water Resource Research Department, Korea Institute of Construction Technology
2311, Daewha-Dong, Ilsan-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
(E-mail: dryi@kict.re.kr)

*** 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 부교수
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Korea University
1, 5-ka, Anam-dong, Sungbuk-ku, Seoul, 136-701, Korea
(E-mail: envchul@korea.ac.kr)

1. 서론 및 연구배경

산업혁명 이후 급격한 온실기체의 증가는 지구의 온난화를 가속시키고 있으며 이러한 현상은 세계 각 국에서 발견되고 있다. 지구 온난화가 수자원에 미칠 수 있는 영향은 지구상의 기후 및 물순환의 변화에서 찾아볼 수 있다. 지구온난화가 계속됨에 따라 강수량 및 강수 특성 그리고 증발산량 등이 변화하면 유역에서의 물 순환도 변하게 된다. 대기중 온실가스의 증가에 따라 수문환경에 많은 변화를 주고 있다는 연구들이 최근 들어 활발하게 이루어지고 있다. 우선 대표적인 온실기체인 CO₂의 증가로 인한 지구온난화로 기온이 증가하고 있어 강수 및 증발산의 패턴이 과거와는 다른 양상으로 바뀌어 가고 있고 이에 따라서 지금보다 홍수와 가뭄이 극심해질 것이라는 연구결과도 나오고 있다(Rind, 1993; Rowntree, 1993).

그러나 현재의 수자원 계획은 이러한 기후변화에 따른 영향은 고려되지 않고 있는 상황이며 기후변화의 영향을 수자원 계획에 반영하기 위한 예측기술의 개발 역시 활발히 이루어지지 않고 있는 상황이다. 본 연구에서는 기후변화의 영향을 수자원 계획에 반영할 수 있는 토대를 마련하는 일환으로 유역 규모 강수량 및 강수특성 변화를 예측하고 이에 따른 유출특성의 변화를 예측하고자 한다. 대기중의 CO₂ 농도가 현재 상태의 두 배가 되는 미래 상황의 배중 CO₂ 상황에 대한 기상학적인 모의는 최근 GCM(General Circulation Model)을 이용하는 추세다. 기후변화에 따른 기온 및 강수량의 변화가 유출에 어떠한 영향을 주는지에 대한 정량적인 분석을 위해 본 연구에서는 기존에 실시된 한반도의 배중 CO₂ 상태에서의 GCM자료 분석결과를 활용하여 배중 CO₂ 상태의 강수량과 기온의 변화를 파악하였다. 또 이들 자료의 특성을 고려한 모의발생을 통하여 강우-유출 모형 입력자료를 작성하고 유출특성의 변화를 분석하였다.

이러한 예측에는 GCM(General Circulation Model)의 모의결과에 따라 많은 불확실성이 내재되어 있으므로 본 연구에서는 예측의 변동가능폭을 제시함으로써 하나의 GCM 결과만 사용할 경우 발생할 수 있는 불확실성

을 보완하였다.

2. GCM과 자료의 모의발생

2.1 GCM 시나리오의 결정

기후변화 시나리오는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990)에 의해 제안된 표 1과 같은 4가지 시나리오를 가정하는 것이 일반적이며 이 중 가장 유력한 시나리오는 시나리오 C로 알려져 있다. 통상 지구온난화에 대한 영향 평가는 이 시나리오에 근거하는 것이 일반적이며 대략 60여년 후에 이산화탄소의 농도가 현재의 두 배(배중 CO₂ 상태)에 이를 것으로 추정되고 있다. 다른 시나리오에 근거하더라도 이산화탄소의 농도가 현재의 두 배가 되는 것은 피할 수 없으며 다만 그 시기가 언제가 되는가 만이 다를 뿐이다.

배중 CO₂ 상태의 예측에는 일반적으로 GCM이 이용된다. 그러나 GCM은 기후변화관련 연구에 있어서 만능의 도구는 아니며, 특히 수문관련 연구에 있어서는 몇 가지 문제점을 나타내고 있다 (Lettenmaier와 Sheer, 1991). 이 중 가장 큰 문제로서 먼저 GCM의 공간해상도 문제를 들 수 있다. GCM의 공간해상도는 최소 수백 km정도로서 수문해석에 직접 적용은 불가능하다. 따라서 GCM결과를 수문해석에 적용하기 위해서는 물리적인 중규모/소규모 모형이나 통계학적인 다중회귀모형을 이용한 해상도의 향상이 필요하다. 둘째 문제는 어느 GCM을 사용하느냐에 따라 그 결과가 상이하다는 점이다. 이는 각 모형에서 채택하고 있는 구름의 모형화나 해양-대기 상호작용 등 실제 현상을 표현하고 또한 단 순화하는 방법의 차이에서 비롯된다. 셋째로는 각 기후 변수에 따라 모의결과의 정도 차이가 아주 크다는 점이다. 일반적으로 온도의 경우는 그 정도가 높은 것으로 나타나고 있으나 강수량의 경우는 그 정도가 현저히 떨어지는 것으로 나타난다. 따라서 지구온난화의 영향을 판단하는 경우 온도는 정량적(절대적인 양의 증감)으로 강수량은 상대적인 비(ratio)로서 고려하게 되며 수문해석에도 동일한 방법이 적용된다.

배중 CO₂ 상태의 기상상황을 모의하기 위한 GCM은 모델에 따라 다른 결과를 발생하게 된다(오재호와 홍성

표 1. IPCC의 기후변화 시나리오

구분	시나리오 내용
시나리오 A	현재상태로 진행
시나리오 B	에너지원은 저탄소원료 및 천연가스로 전환, 에너지 효율증대, 산림복구
시나리오 C	재생가능한 에너지 및 핵연료로 전환 (21세기 후반기)
시나리오 D	재생가능한 에너지 및 핵연료로 전환 (21세기 전반기)

표 2. GCM별 현상태 CO₂ 와 배증 CO₂ 상태의 강수량 변화율

월	R30	CCC	GISS	UKMO	GFDL	평균	최소	최대
1	1.10	0.70	1.00	1.00	1.00	0.96	0.70	1.10
2	1.10	0.60	1.10	1.10	0.90	0.96	0.60	1.10
3	1.00	0.90	1.10	0.80	1.10	0.98	0.80	1.10
4	1.10	1.00	1.20	1.30	0.90	1.10	0.90	1.30
5	1.00	1.00	1.40	0.80	1.20	1.08	0.80	1.40
6	0.90	1.20	0.70	0.80	0.80	0.88	0.70	1.20
7	1.00	1.20	0.90	1.50	1.10	1.14	0.90	1.50
8	1.20	1.00	1.20	0.80	1.00	1.04	0.80	1.20
9	1.70	1.50	1.20	1.20	0.90	1.30	0.90	1.70
10	1.20	1.40	1.00	0.90	0.80	1.06	0.80	1.40
11	1.20	0.70	0.90	0.90	1.00	0.94	0.70	1.20
12	1.30	0.70	1.20	1.10	1.00	1.06	0.70	1.30
년	1.13	1.04	1.06	0.99	0.94	1.03	0.94	1.13

표 3. GCM별 현상태 CO₂ 와 배증 CO₂ 상태의 기온 변화(°C)

계절	CCC	GISS	UI	GFDL	평균	최소	최대
봄	4.2	3.5	4.3	4.8	4.2	3.5	4.8
여름	4.5	3.5	4.4	3.6	4.0	3.5	4.5
가을	3.7	3.0	4.9	4.3	4.0	3.0	4.9
겨울	3.1	2.7	4.7	4.7	3.8	2.7	4.7
년	3.9	3.2	4.6	4.3	4.0	3.2	4.6

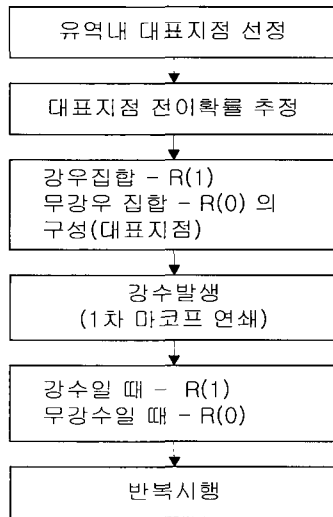


그림 1. 다지점 점강우 모의

길, 1995). 한국과학기술연구원(1995)에서는 5개의 GCM(GFDL-R30, CCC, GISS, UKMO와 GFDL) 모의 결과에 근거하여 표 2와 같이 한반도의 연강수량 변화를 추정하였으며, 배증 CO₂ 에 따라 연강수량은 약 -5~+13%, 월별로는 -30~+70%의 변화율을 제시하였다. 또한, 강인식(1993)은 표 3과 같이 배증 CO₂ 에 따

른 한반도의 계절별 기온은 최소 +2.7 °C, 최대 +4.7 °C의 상승예측 결과를 제시하였다. 이들 결과는 GCM결과와 과거 관측자료를 다중회귀 분석을 이용한 축소(downscaling)기법으로 얻은 것이다.

본 연구에서는 이들 배증 CO₂ 상태의 시나리오를 이용하였으며, 여러 가지 GCM결과의 평균(GCM-AVG.),

최소치(GCM-LOW) 및 최대치(GCM-HIGH)에 대하여 수문자료 모의를 수행함으로써 현상태(BASE)에 대한 불확실한 미래 상황의 변동 가능폭을 추정해 볼 수 있도록 하였으며 상황에 따라 과거 관측치(HIST.)와 비교하였다.

2.2 자료의 모의발생

기온은 각 GCM 시나리오의 최소, 최대 그리고 평균의 변동폭을 정량적으로 고려하여 마코프 연쇄 과정에 의해 모의발생 하였다. 강수는 지점별 강수량 분포의 공간적인 특성을 고려하기 위하여 강수와 무강수 일수를 고려한 다지점 점강우 Markov 연쇄에 GCM 시나리오별 강수량의 월별 변화율(%)을 고려하여 모의발생한 후 연자료(100년분)로 구성하였다(유철상과 이동률, 2000). 또, Penman방법에 의한 잠재증발산량 추정을 위한 기후자료(상대습도, 풍속 등)는 기후변화에 따른 변화의 폭을 고려하기 어려우므로 현재의 특성이 계속 유지된다고 보고 강수와의 상관관계와 마코프 연쇄에 의해 모의발생 하였다.

3. 유출 모형 및 대상유역

본 연구에서는 장기간의 일단위 유출모의를 위해 기존 연구성과나 모형의 인지도, 그리고 연구의 적합성 등을 고려하였으며, 특히 본 연구에서 수행하는 100년간에 걸친 장기유출모의는 기후변화에 따른 토양함수의 변동이 유출변화의 중요한 요소가 되므로 토양함수를 비교적 자연상태에 가깝게 모의 할 수 있다고 알려져 있는 NWS-PC모형을 최종적으로 선정하였다. 본 연구에서 선정된 NSW-PC 모형은 토양함수 뿐만 아니라

식생 및 투수지역, 불투수 지역, 그리고 임시불투수 지역의 면적비 등 자연환경의 변화를 고려할 수 있는 매개변수가 포함되어 있다(강병석, 1997).

3.1 NWS-PC 모형의 구조

NWS-PC 모형은 크게 토양함수 부분과 흐름에 대한 추적부분으로 나누어지는데, 토양함수부분의 계산은 기존에 개발된 SAC-SMA(Sacramento Soil Moisture Account)모형이며, 유역 및 하도 흐름의 추적은 HEC-1 모형의 운동파(kinematic wave)와 Muskingum 방법을 이용한다. 토양함수계산은 토양층을 상층부(upper zone)와 하층부(lower zone)로 구분하여 자유수(free water)와 부착수(tension water) 개념을 도입하였다. 모의되는 유출성분은 크게 직접 유출(direct runoff), 지표면 유출(subsurface runoff), 중간 유출(interflow), 보조지하수 유출(supplemental baseflow), 그리고 기저지하수 유출(primary baseflow)로 구분되며 처음 3가지 성분은 하도로 유입되는 성분이고 나머지 2가지 성분은 지하수 유출로 계산되어 유역의 출구에서 하도유출량과 합산된다(Tabios III, 1991; 윤용남 등, 1998a; 윤용남 등, 1998b).

3.2 대상 유역

본 연구에서 선정된 대청댐 유역은 금강의 중상류를 포함하는 유역으로서 면적이 약 4,134 km²이며 금강 유역면적의 42 %를 차지하고 대청댐 유역 상류부에는 용담댐이 위치하고 있는데 유역면적은 약 1,052 km²이며 대청댐 유역면적의 약 25 %를 차지한다. 대청댐 유역 내에는 장수, 진안 등 40개 이상의 우량관측소와 추풍

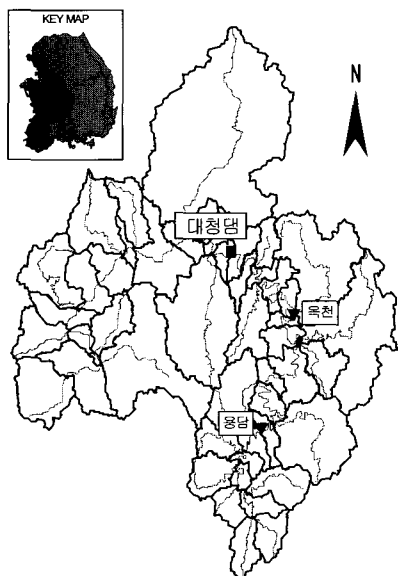


그림 2. 대청댐 유역 및 소유역 분할도

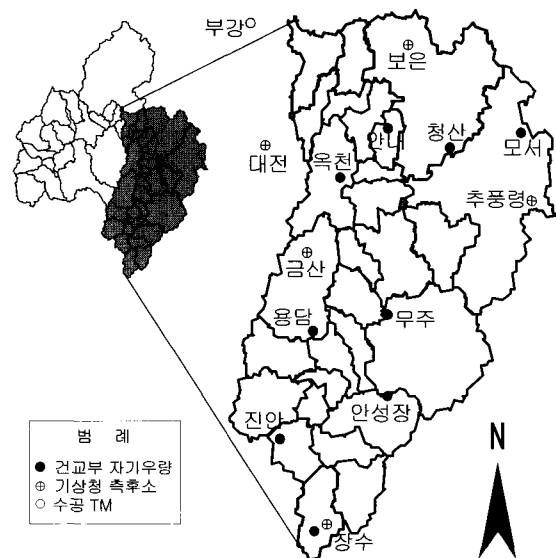


그림 3. 유역내 강우 및 기상관측소

령, 금산 등 4개의 기상청 측후소 그리고 용담, 옥천 등 16개의 수위관측소가 운영 중에 있다. 연평균 기온은 11.5 °C이며 측후소별 증발량은 1,070~1,292 mm 정도이다(한국수자원공사, 1997). 본 연구에서는 그림 2와 같이 NWS-PC 모형의 적용을 위해 대청댐 상류 유역의 주요 지천을 고려하여 30개의 소유역으로 분할하였으며 소유역의 분할 및 지형학적인 매개변수는 강병석(1997)의 결과를 그대로 이용하였다. 연구대상 유역에서 선정된 주요 수위관측지점은 용담, 옥천 그리고 대청댐 지점이다. 또 연구에 이용된 강우 및 기상관측소의 위치는 그림 3과 같으며 토양함수계산그룹별 평균강수량은 티센망을 이용하였다.

3.3 매개변수 추정

NWS-PC 모형의 매개변수는 크게 SAC-SMA 계산을 위한 매개변수와 유출의 추적을 위한 매개변수로 나눌 수 있다. 각 SAC-SMA 매개변수는 지형도, 토양도, 토지이용도 혹은 인공위성 영상을 이용하여 추정할 수 있고 유역 추적을 위한 지형학적인 매개변수는 지형도, 측량성과, 하천정비 기본계획 혹은 GIS를 이용하여 구할 수 있다(윤용남 등, 1998b).

매개변수의 입력은 강병석(1997)이 금강유역에 대하여 구한 매개변수를 그대로 이용하되 강병석(1997)은

대청댐 상류의 토양함수를 계산함에 있어 총 11개 그룹으로 나누었는데 본 연구에서는 유출모의 대상지점을 중심으로 그림 2와 같이 대청댐 상류부를 상중하로 나누어 용담, 옥천, 대청댐 지점을 출구로 하는 SAC-SMA 계산그룹으로 재조정하였다.

증발산량의 계산은 비교적 정확한 결과를 주는 것으로 알려진 Penman의 방법을 이용하였다.

3.4 모형의 보정

강병석(1997)은 비교적 일평균 수위자료의 상태가 양호한 4~11월의 수위자료와 해당연도의 수위-유량관계 곡선을 수집하여 모형보정을 수행하였다. 본 연구에서는 모형보정이 완료된 매개변수 중 연구의 목적에 맞게 최근의 유출상태를 반영하는 1995년의 토양함수 및 매개변수를 초기조건으로 하여 유출을 모의하였다. 이렇게 모의된 모의치와 관측치를 비교한 결과 그림 4와 같이 상관계수가 0.88~0.96으로 만족할 만한 결과를 보여주고 있으며, 그림 5에서와 같이 관측치와의 미소한 첨두차이를 제외하면 대청댐 유역의 일단위 유출을 잘 재현하고 있으므로 본 연구에서 최종적으로 결정된 NWS-PC 모형은 기후변화에 따른 미래시점의 대청댐 유역 일단위 유출을 모의하기에 적합하다고 판단된다.

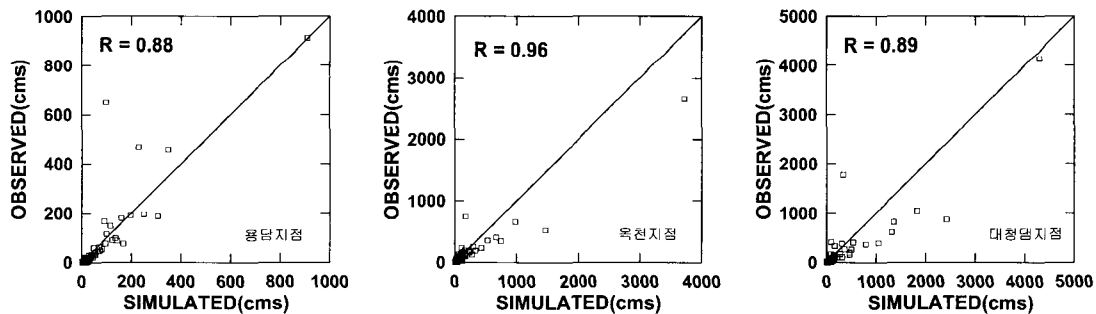


그림 4. 각 지점 관측치와 모의치의 상관관계

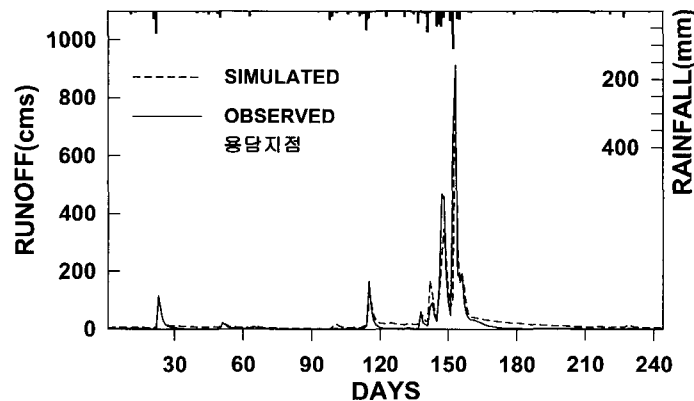


그림 5. 대청댐 유역 주요 지점의 관측수문곡선과 모의수문곡선 비교(계속)

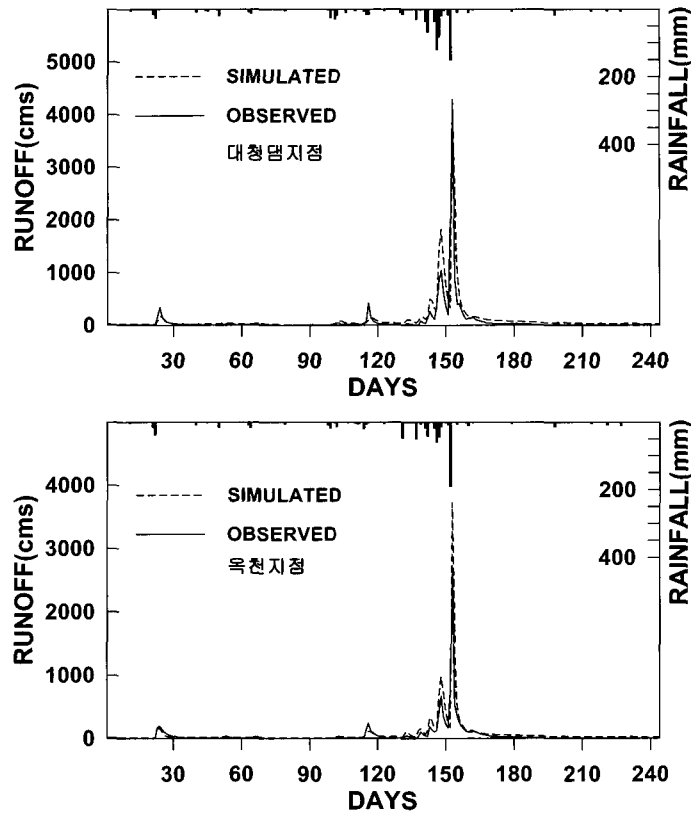


그림 5. 대청댐 유역 주요 지점의 관측수문곡선과 모의수문곡선 비교

4. 결과 및 분석

4.1 기온 및 증발산

그림 6~그림 8은 GCM 시나리오에 따라 일단위로 모의발생된 기상자료와 Penman의 방법을 이용하여 계산된 잠재증발산량을 월별로 정리하여 나타낸 것인데 BASE 시나리오에 의한 월별 수문 및 기상특성이 과거 관측자료의 월별 특성을 잘 재현하고 있다. 따라서 BASE 시나리오를 기준으로 GCM-AVG., GCM-LOW, 그리고 GCM-HIGH 시나리오의 수문 및 기상자료의 변동특성을 분석하여도 큰 무리는 없을 것으로 사료된다.

현재 상태의 CO₂ 농도가 계속 유지되는 BASE 시나리오와 비교한 GCM-AVG., GCM-LOW, 그리고 GCM-HIGH의 변동특성은 표 4와 같다. 연 평균기온은 +3.2~+4.6 °C의 변화를 보였고 연평균 강수량은 -7.3~+8.1 %의 변화를 보였으며 Penman의 방법으로 계산한 잠재증발산량은 +9~+13 %의 변화를 보였다. 본 연구에서 계산된 기온변화에 따른 증발산의 변화율은 평균 +3 %/°C로서 이는 Wetherald와 Marabe(1975)가 제시한 +3 %/°C, 그리고 Budyko(1982)가 제시한 +4 %/°C의 결과와 흡사하여 모의발생된 수문·기상자료의 적절성을 확인할 수 있다.

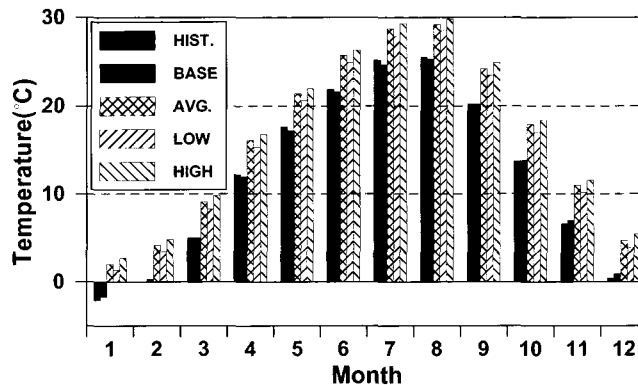


그림 6. GCM 시나리오별 기온의 모의발생 결과

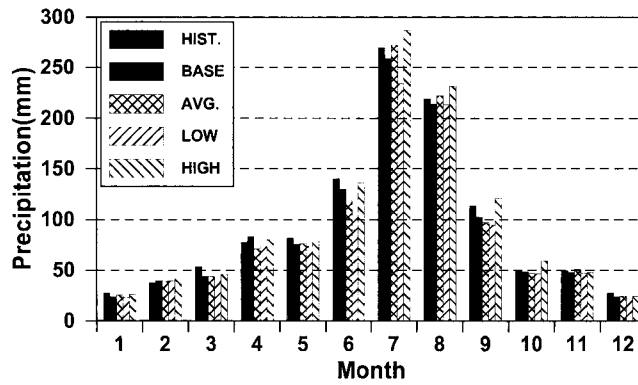


그림 7. GCM 시나리오별 강수의 모의발생 결과

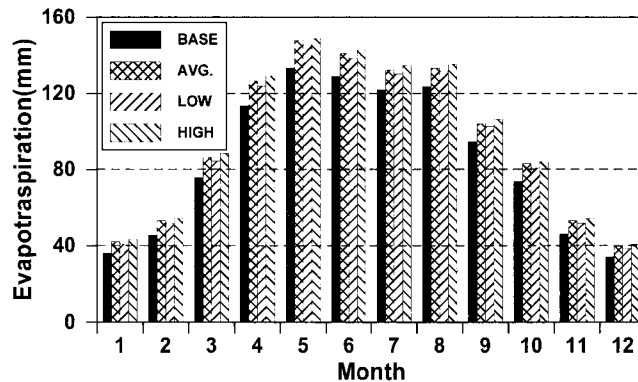


그림 8. GCM 시나리오별 잠재증발산량 추정 결과

표 4. 각 시나리오별 수문·기상자료의 BASE 시나리오에 대한 비교

시나리오	자료	봄	여름	가을	겨울	연간
GCM-AVG.	강수(%)	-5.8	+1.6	-1.7	+2.3	-0.3
	기온(°C)	+4.1	+4.0	+4.0	+3.8	+4.0
	증발산(%)	+11.9	+8.6	+12.1	+16.7	+11.3
GCM-LOW	강수(%)	-8.6	-8.2	-5.0	-3.3	-7.3
	기온(°C)	+3.3	+3.2	+3.2	+3.0	+3.2
	증발산(%)	+9.7	+7.0	+9.8	+13.3	+9.1
GCM-HIGH	강수(%)	+1.0	+8.6	+14.9	+5.9	+8.1
	기온(°C)	+4.8	+4.6	+4.6	+4.5	+4.6
	증발산(%)	+13.7	+10.2	+14.1	+19.8	+13.2

4.2 유출 및 유형

모의발생된 일단위 강수량과 Penman의 방법으로 계산된 일단위 잠재증발산량을 입력으로 하여 각 시나리오별 대청댐지점의 향후 100년간의 일유출을 모의한 결과는 그림 9와 표 5에 제시되었다. 그림 9에서 BASE 시나리오에는 과거 관측치를 비교적 잘 재현하고, 또 농

일한 모의기준을 토대로 분석하기 위하여 BASE 시나리오를 현재 상태라 가정하고 각 시나리오에 대한 변화율을 분석하였다. 연평균 유출의 경우 -14~+7%의 변화를 보였다. 미래시점에서 유역의 물리적 조건변화가 유출에 미치는 영향은 기후변화에 비하여 미소하므로(한국건설기술연구원, 2000) 본 연구에서는 기온과 강수량의 변동에 대한 유출응답의 특성을 파악하는데 중점

을 두었으며 시간에 따른 유역의 변화는 고려하지 않고 단지 기후변화만 고려하였다.

대청댐 유역뿐만 아니라 우리나라 대부분의 경우 표 5의 변동계수와 그림 9의 월평균 유출량에서 알 수 있듯이 월평균 유출의 변동폭이 크므로 표 6과 같이 GCM 시나리오에 따른 계절별 유출의 변화율을 계산하

였다. GCM-HIGH 시나리오의 경우 여름과 가을의 유출증가율이 크며 GCM-LOW 시나리오의 경우 봄과 여름의 유출감소율이 크게 나타났다. 그리고 GCM-AVG. 시나리오의 경우 봄의 유출감소율이 크며 여름철 유출은 거의 변하지 않음을 알 수 있다.

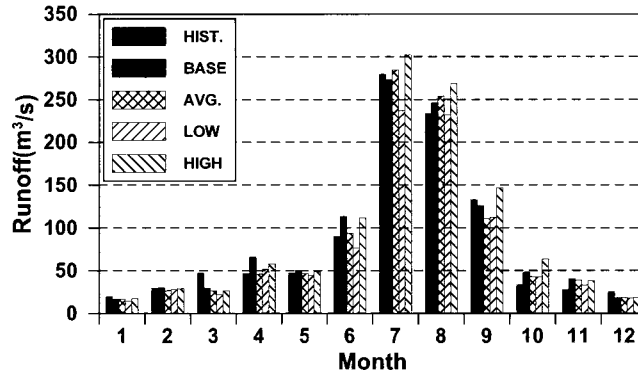


그림 9. GCM 시나리오별 월평균 유출

표 5. GCM 시나리오별 연평균 유출의 변화

시나리오	연평균 유출(m³/s)	연평균변화(m³/s)	변동계수
BASE	88.2	194.1	2.19
GCM-AVG.	83.9(-4.8%)	192.5	2.28
GCM-LOW	75.9(-13.9%)	162.6	2.13
GCM-HIGH	94.1(+6.8%)	206.6	2.18

표 6. 각 시나리오의 BASE 시나리오에 대한 계절별 유출의 변화율(%)

시나리오	봄	여름	가을	겨울	년
GCM-AVG.	-18.2	-0.1	-10.1	-3.7	-4.8
GCM-LOW	-19.0	-13.9	-12.3	-7.3	-13.9
GCM-HIGH	-8.3	+7.9	+15.8	+0.3	+6.8

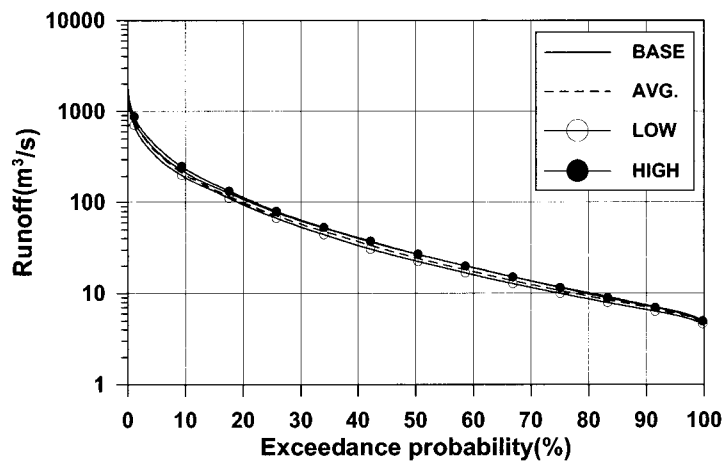


그림 10. GCM 시나리오별 유황곡선

본 연구의 결과를 종합적으로 분석하면 연평균기온 +4 °C, 강수 -7~+8 %, 그리고 유출은 -14~+7 %의 변화를 보였다. Nash와 Gleick(1991)는 Colorado 유역에 대한 기후변화에 따른 유출의 변화분석에서 기온 +4 °C 변화에 따라 연평균 유출이 -4~+21 % 변할 것으로 추정했는데 본 연구에는 기온변화뿐만 아니라 기온변화에 따른 증발산의 변화와 강수량의 변화에 따른 유출의 변화가 시나리오에 모두 포함되어 있어 기온과 강수의 변화가 유출의 변화에 미치는 기여도를 각각 분리하여 정량적으로 나타내기는 어렵다. 이는 기온변화에 따른 증발산량의 변화가 장기유출에 많은 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다.

수자원의 관리 및 계획에 있어서는 유황의 파악이 중요하므로 그림 10과 같이 GCM 시나리오별로 100년 평균유황곡선을 작성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 기후변화에 따른 유황의 커다란 변동은 없으나 GCM-HIGH 시나리오의 경우 임의초과확률에 해당하는 유량이 전반적으로 증가하고 GCM-LOW 시나리오는 전반적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 기후변화에 따라 유량의 변동가능폭이 현재보다 커질 것이라는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 GCM과 수문자료의 모의발생을 통하여 기후변화에 따른 유출특성의 변화를 고찰하였다. 유출을 모의함에 있어 시간에 따른 자연환경의 변화는 고려하기 어려우므로 기후변화만을 고려하여 유출의 변화를 분석하였다. 지금까지의 연구결과를 요약 및 결론하면 다음과 같다.

- 가. 미래 시점 CO₂ 상태의 기온 및 강수량의 변화는 GCM에 따라 각기 다른 결과를 보이고 있어 본 연구에서는 각 GCM중 온도와 강수의 변화폭에 따라 최고(GCM-HIGH), 최저(GCM-LOW), GCM 평균(GCM-AVG.), 그리고 현재상태(BASE)로 시나리오를 구성하여 온도, 강수 및 유출의 변동가능폭을 고찰하였다.
- 나. 다지점 강수량의 모의를 통하여 강수의 공간적인 특성을 고려하였으며 기온과 기타 기상자료를 모의를 통하여 Penman의 방법으로 잠재증발산량을 추정하였는데 시나리오별로 연평균 기온은 +3.2~+4.6 °C 변화, 연평균 강수량은 -7~+8 % 변화, 그리고 연평균 잠재증발산은 +9~+13 %의 변화를 보였다. 또 기온 1 °C 증가에 따른 잠재증발산량의 변화는 약 +3 %정도로써 기존의 연구와 비슷한 결과를 보였다.

를 보였다.

- 다. 본 연구에서는 기온과 강수가 동시에 변하는 시나리오를 구성하였으므로 각각이 유출의 변화에 미치는 영향을 명확하게 정량적으로 나타낼 수는 없었으나 대략적으로 기온 +4 °C 변화에 대해 강수는 -7~+8 %, 그리고 유출은 -14~+7 %의 변화를 보였다.
- 라. 미래시점 유출의 변화에 있어서 봄에는 유출이 감소하고 여름철은 시나리오에 따라 -14~+8 %의 변화를 보였으며 겨울에는 유출이 감소하는 결과를 보였다. 이것은 겨울철 강수량의 변화율보다 기온 상승에 따른 증발산의 증가율이 더 크기 때문인 것으로 분석되었다.
- 마. 기후변화를 고려하여 모의발생된 100년 동안의 일 단위 유출을 유황분석한 결과 미래시점의 유출은 현재보다 그 변동가능폭이 커지는 것으로 나타났다.

기후변화에 따른 수자원의 영향평가는 GCM 모의결과와 스케일 축소기법에 따라 크게 달라지므로 우리나라의 기후를 잘 재현하는 보다 신뢰성 있는 중규모의 GCM 개발이 시급하다고 할 수 있다. 미래시점의 기후변화 뿐만 아니라 유역의 장기간의 자연환경변화를 고려한 유출모의에 관한 연구가 수반되어야 할 것이며 온실기체의 증가에 따른 유출특성변화의 분석은 향후 수자원의 계획과 활용면에서 반드시 선행되어야 하고, 그 결과를 수자원정책의 결정에 활용가능한 형태로 제공될 수 있는 연구가 절실히 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- Budykom M.I. (1982). "The Earth's Climate: Past and Future. International Geographics Series." Academic Press, New York, Vol. 29, pp. 307-308.
- International Panel on Climate Change(IPCC) (1990). "Climate Change." The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- 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.
- Nash, L.L., and Gleick, P.H. (1991). "Sensitivity of streamflow in the Colorado basin to climate changes." *Journal of Hydrology*, ASCE, Vol. 125, pp. 221-241.
- Rind, D. (1993). "Models see hard rain, drought if CO₂

- doubles." *Climate Alert Newsletter*, Vol. 6, No. 2, pp. 120-125.
- Rowntree, P. (1993). "Climate Change and extreme weather events." Workshop on Socio-Economic Aspects of changes in Extreme Weather Events, Free University, Amsterdam, pp. 15-18.
- Tabios III, J.T. (1991). "Forecasting and Control of Water resource Systems." National Weather Service, pp. 2-8.
- Weatherald, R.T., and Marabe, S., (1975). "The effects of changing the solar constant on the climate of a general circulation model." *Journal of Atmospheric Science*, Vol. 32, pp. 2044-2059.
- 강병석 (1997). 댐 건설전후 상하류 장기 유출특성 변화의 분석. 석사학위논문, 고려대학교, pp. 55-100.
- 강인식 (1993). "기온변화 예측." 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움, 기상청, pp. 3-33.
- 오재호, 홍성길 (1995). "대기중 CO₂ 증가에 따른 한반도 강수량 변화." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제 28권, 제3호, pp. 143-157.
- 유철상, 이동률 (2000). "기후변화에 따른 강수일수 및 강수강도의 변화연구." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권, 제4-B호, pp. 535-544.
- 윤용남, 강병석, 김웅태, 김재형, 고익환 (1998a). "댐 건설전후 유역의 장기유출특성변화의 분석: II. 모형의 매개변수 산정을 통한 유역 장기유출특성변화 분석." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제18권, 제II-5호, pp. 461-468.
- 윤용남, 유철상, 안재현, 양인태, 고덕구 (1998b). "댐 건설전후 유역의 장기유출특성변화의 분석: I. GIS를 이용한 NWS-PC 모형의 매개변수 추정." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제18권, 제II-5호, pp. 449-459.
- 한국건설기술연구원 (2000). **수자원계획의 최적화 연구 (IV) : 기후변화에 따른 수자원 계획의 영향 평가**. 건설교통부, 한국수자원공사, pp. 344-347.
- 한국과학기술연구원 (1995). **지구환경감시 및 기후변화 예측 기술 : 기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발 연구**. 제1단계 3차년도 단계보고서, 환경부, 과학기술처, pp. 120-122.
- 한국수자원공사 (1997). **댐 건설전후 자연환경변화에 관한 연구**. 한국수자원공사, pp. 15-20.

(논문번호:04-03/접수:2003.11.19/심사완료:2004.03.25)