

기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향 Impact of Climate Change on Yongdam Dam Basin

김 병 식* / 김 형 수** / 서 병 하*** / 김 남 원****

Kim, Byung Sik / Kim, Hung Soo / Seoh, Byung Ha / Kim, Nam Won

Abstract

The main purpose of this study is to investigate and evaluate the impact of climate change on the runoff and water resources of Yongdam basin.

First, we construct global climate change scenarios using the YONU GCM control run and transient experiments, then transform the YONU GCM grid-box predictions with coarse resolution of climate change into the site-specific values by statistical downscaling techniques. The values are used to modify the parameters of the stochastic weather generator model for the simulation of the site-specific daily weather time series. The weather series fed into a semi-distributed hydrological model called SLURP to simulate the streamflows associated with other water resources for the condition of 2CO₂. This approach is applied to the Yongdam dam basin in southern part of Korea. The results show that under the condition of 2CO₂, about 7.6% of annual mean streamflow is reduced when it is compared with the observed one. And while Seasonal streamflows in the winter and autumn are increased, a streamflow in the summer is decreased. However, the seasonality of the simulated series is similar to the observed pattern.

Keywords : Climate change, GCM, Statistical Downscaling, WGEN, SLURP model

요 지

본 연구는 기후변화가 유역의 유출량과 수자원에 미치는 영향을 조사하고 평가하는데 목적이 있다. 이를 위하여 먼저, YONU GCM의 제한실험과 점증실험을 실시하여 전구적 규모의 기후변화 시나리오를 작성하였으며, 통계학적 축소기법과 추계학적 일기발생기법을 이용하여 대상지점의 일 수문기상 시계열을 모의하였다. 이렇게 얻은 시계열 자료를 2CO₂ 상황에서의 유출량자료로 변환하기 위해 준 분포형 강우-유출 모형인 SLURP 모형에 입력하였다. 본 연구에서는 이 방법을 용담댐 유역에 적용하였으며, 그 결과, 기후변화시 연 평균 유출량의 경우 현재상황에 비해 약 7.6% 감소하는 것으로 모의되었으며, 계절적으로 볼 때 겨울철과 가을철에는 유출량이 증가하였으나 여름철에는 감소하였다. 그러나, 유출량의 계절적 패턴은 변화가 없는 것으로 모의되었다.

핵심용어 : 기후변화, GCM, 축소기법, 일기발생모형, SLURP 모형

* 인하대학교 토목공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea
(E-mail : hydrokbs@orgio.net)

** 인하대학교 토목공학과 조교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea
(E-mail: sookim@inha.ac.kr)

*** 인하대학교 토목공학과 교수
Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea
(E-mail : seohydro@inha.ac.kr)

**** 한국건설기술연구원 수석연구원
Senior Researcher, KICT, Koyang, Kyungido, 411-712, Korea
(e-mail: nwkim@kict.re.kr)

1. 서론

GCM과 수문모형을 결합하여 유출량을 산정하는 방법은 크게 One-way 방법과 Two-way 방법으로 대별할 수 있다. One-way 방법은 단순히 GCM에서 출력값이 수문모형에 받아들여져 계산을 하는 일방적인 방법이며 Two-way 방법은 이와는 다르게 GCM과 수문모형이 서로 결과를 주고 받는 구조로 되어 있는 것이다. 2CO₂상황에서의 유출량을 산정하기 위해 가장 이상적인 것은 Two-way 방법의 GCM-수문결합 모형을 개발하는 것이지만, 불행하게도 아직까지는 GCM과 수문모형의 해상도 차이와 구조적 차이 때문에 개발수준이 초기단계이며, 실제 적용된 사례는 거의 없는 실정이다 (Kite, 1999). 반면에, One-way 방법은 세계적으로 많은 프로젝트와 논문들을 통하여 소개되고 있고 현재, 가장 보편적으로 쓰이고 있는 방법이다.

먼저, 국내의 경우를 보면, 안재현 등(2001)은 GCM 결과를 이용하여 대청댐 유역의 유출량 변화를 파악하기 위해 물수지 모형을 이용하였으며, 한국건설기술연구원(2000)에서는 NWS-PC모형을 이용하여 유출량을 산정한 바 있다. 그러나, 두 경우 모두 사용한 유출 모형이 집중형 모형으로써 유역내에서의 토지 피복의 변화를 고려하지 못하기 때문에 유출량의 변화요인이 기

후적인 것인지 아니면 인위적인 것인지에 대한 구분을 할 수 없다는 약점을 지니고 있다. 국외의 경우를 살펴 보면, Chiew와 Pitman(1996)은 GCM의 결과를 축소하지 않고 그대로 MODHYDROLOG 모형에 입력하여 오스트레일리아의 28개 유역에 대하여 2030년과 2070년의 유출 및 토양 함수량으로 모의하였다. Kwadijk 등(1995)은 GCM과 RHINFLOW를 연계하여 라인강의 유출에 대한 기후영향평가를 수행하였다. Gellens 등(1998)은 벨기에의 8개 유역에 대한 유출량에 대한 기후변화의 영향을 분석하기 위해 7개의 GCM과 IRMB(Integrated Runoff Model)을 이용하였다(Kite, 1999). Kite(1994; 1999)는 캐나다 Mackenzie 유역과 Columbia 유역을 대상으로 SLURP 모형과 CCC-GCM을 연계하여 유출량을 산정하였으며, Miller와 김진원(2001)은 TOPMODEL을 이용하여 중국의 Xixian 유역의 일 유출량을 모의하였다.

본 연구에서는 용담댐 유역을 대상으로 YONU-GCM에 의한 기후모의 실험과 통계학적 축소기법을 통해 얻은 수문기상자료를 준 분포형 강우-유출모형인 SLURP 모형에 입력 자료로 사용하여 유출량을 산정한 후 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 분석하였다. 즉, YONU GCM의 기후변화실험에 의해 작성된 우리나라의 기후변화 시나리오를 전이함수 모형(Wilby 등, 2001)

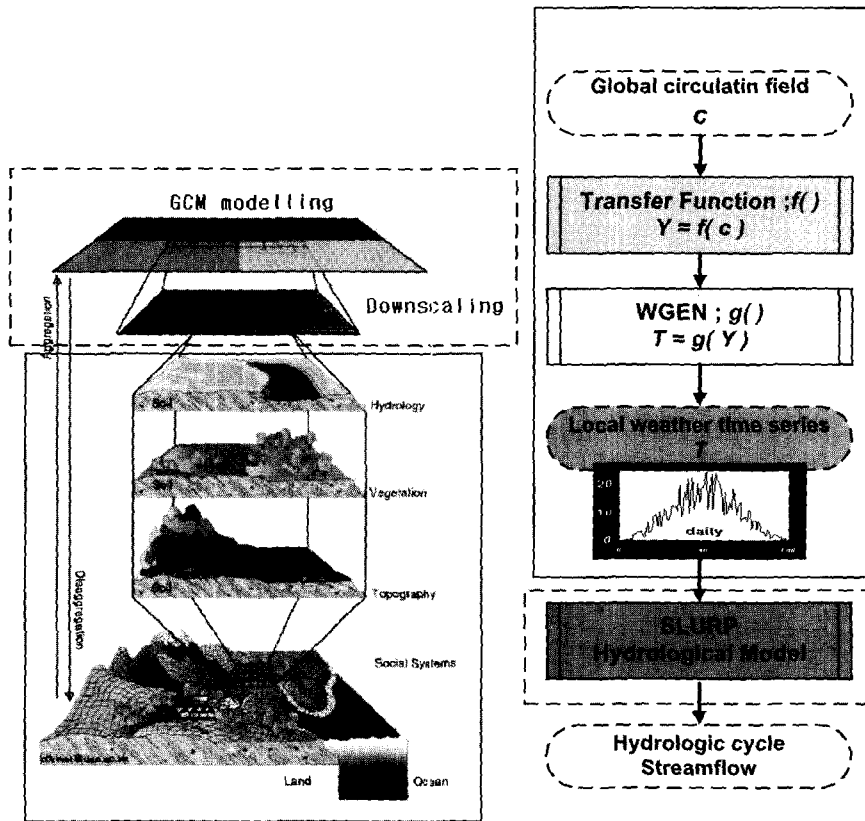


그림 1. 기후변화에 따른 유출분석 절차

을 이용하여 용담댐 지역의 기후변화 시나리오로 축소(downscaling)하였으며, 이 시나리오를 이용하여 일기발생 모형(Weather Generation model, WGEN)(Dubrovsky, 2001)의 매개변수를 수정, 2CO₂ 상황의 일 수문시계열자료를 모의하였다. 또한, 여기서 작성된 일 수문기상 시계열을 준 분포형 강우-유출 모형인 SLURP 모형에 입력하여 기후변화가 용담댐 지역의 유출량 및 수자원에 미치는 영향을 평가하였다. 그림 1은 본 연구의 절차를 도식적으로 표현한 것이다.

2. 기후변화 시나리오 작성

2.1 GCM 시나리오

1CO₂ 제어실험(control run)과 2CO₂ 배증실험을 실시하였으며, 현재의 CO₂의 농도는 345ppm으로 처방하였다. 또한, 2CO₂의 상황의 점증실험은 CO₂의 농도를 매년 1%씩 증가시켜 70년이 되는 해(IPCC, 1996)에 CO₂가 배증되도록 적분하였으며, CO₂가 배증되는 70년을 전후로 하여 61년부터 80년까지의 20년 기간에 대한 기후를 추정하였다. 그러므로, 본 연구에서 실시한 기후변화실험의 기간은 현재(1CO₂)는 1961년부터 1980년이며 미래(2CO₂)는 2031년부터 2050년을 의미한다.

2.2 기후변화 시나리오에 따른 기상자료 모의

본 절에서는 통계학적 축소기법(statistical downscale technique)을 이용하여 유역규모의 기후변화시나리오를 작성하였으며, WGEN기법(Wilks, 1992)에 의하여 일 강수량, 최고기온, 최저기온같은 기상 자료계열을 작성하기로 한다(김병식 등, 2003). 이 기법은 Richardson(1981)에 의해 개발되었으며 처음에는 단순히 정상상태(stationarity) 기상변수를 추계학적으로 모의하기 위해 사용되었다. 그러나, Wilks(1992) 이후 기후변화를 반영할 수 있는 모형으로 개발되었으며 지금까지 계속해서 발전하고 있는 중이다. 이 모형의 타당성은 CCIS(Canadian Climate Impacts and Scenarios)에서 이미 증명되었으며, 기후변화가 농업에 미치는 영향을 평가하기 위해 생육모형(crop growth model)인 "CERES_Wheat"와 연계하여 사용된 적이 있다. 또한, 강우-유출모형인 SAC-SMA 모형과 연계하여 사용된 적도 있다(Dubrovsky, 2001). 본 연구에서는 용담댐 지역의 장수, 무주, 진안, 계북 관측소에 대하여 YONU GCM의 기후모의실험 기간과 동일한 20년치의 일 강수량과 최고 최저 기온을 모의하였다. 표 1은 축소기법을 이용하여 얻은 용담댐 지역의 기후변화시나리오를 수록한 것이며, 그림 2와 3은 각 지점별 모의결과 중 장수와 무주지점을 나타낸 것이다. 분석 결과 강수사상의 경우 전반적으로 월 평균강수량의 양적 변화는 두드러지지 않았지만 건·습일 지속기간의 경우 현재에 비해 각각 짧아지고 길어짐을 알 수 있었다.

표 1. 용담댐 지역의 기후변화 시나리오

Data	m.rain	wet	dry	tem	sd
Jan	1.084	1.067	1.046	0.774	1.065
Fen	1.03	1.107	1.017	0.832	1.462
Mar	1.105	1.312	0.967	1.052	2.155
Apr	1.045	1.208	0.943	1.085	1.422
May	1.064	1.103	0.868	1.08	1.179
Jun	0.85	0.807	1.208	1.09	1.46
Jul	1.020	1.142	0.915	1.071	1.799
Aug	1.077	1.137	0.961	0.866	0.782
Sep	0.935	0.821	1.119	1.017	1.285
Oct	1.258	1.342	0.952	1.059	1.387
Nov	0.986	1.016	0.911	1.155	1.406
Dec	1.152	1.313	0.967	1.438	1.108

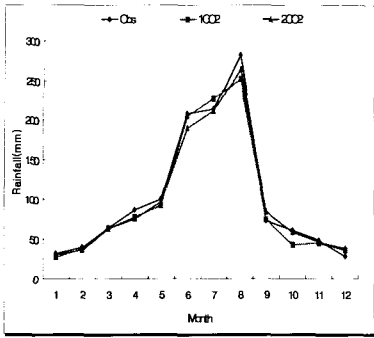
주) Climate Change Scenario derived from YONU GCM experiment

Control run 1961-1980, Perturb run "2031 - 2050"

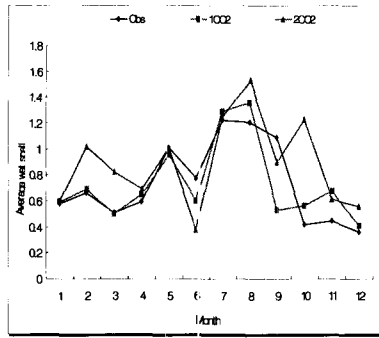
m.rain - relative change in monthly mean rainfall

wet / dry - relative change in duration of wet and dry spell

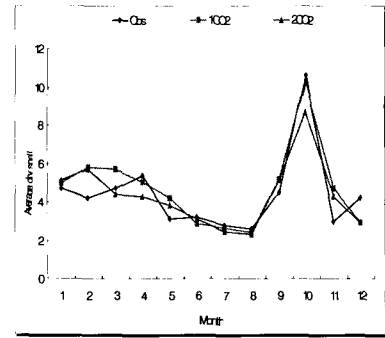
tem and sd - relative change in daily temperature and absolute changes in its standard deviation



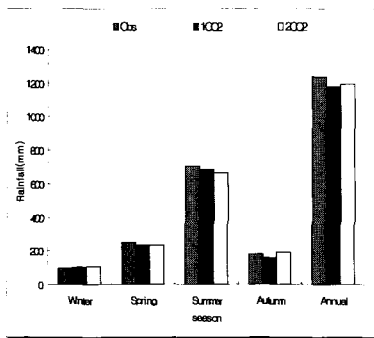
(a) 월 평균 강수량(mm)



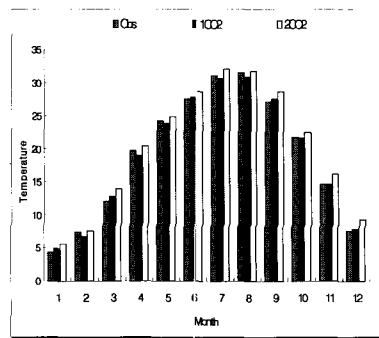
(b) 월 평균 습윤지속기간(days)



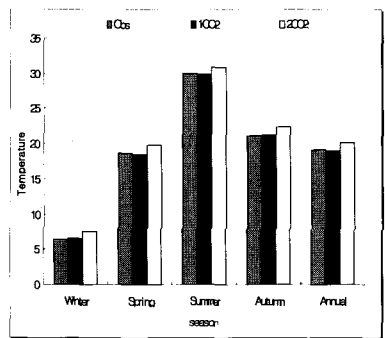
(c) 월 평균 건조지속기간(days)



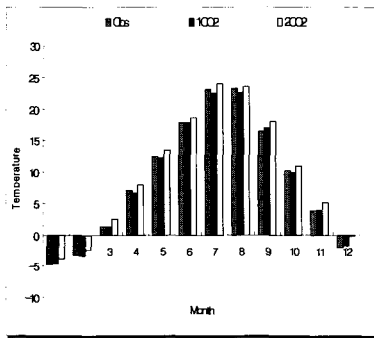
(d) 계절별 평균강수량(mm)



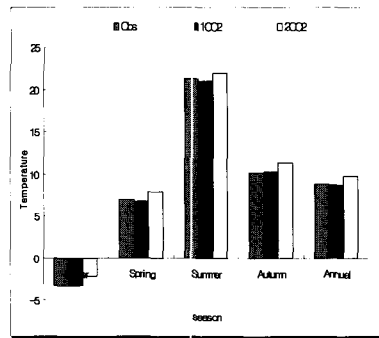
(e) 월 평균 최고 기온(°C)



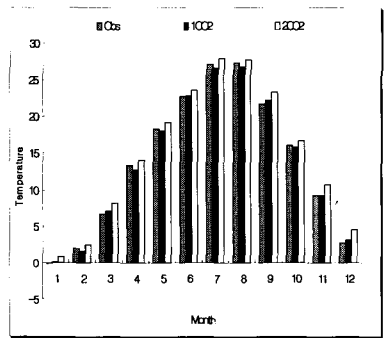
(f) 계절별 평균 최고 기온(°C)



(g) 월 평균 최저 기온(°C)

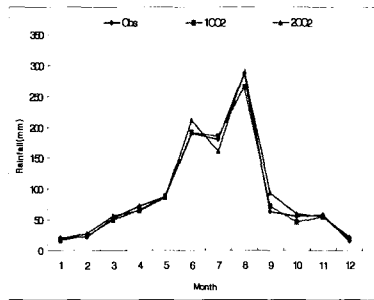


(h) 계절별 평균 최저 기온(°C)

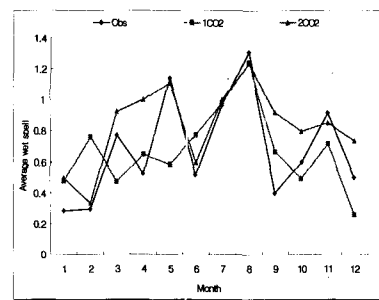


(i) 월 평균 기온(°C)

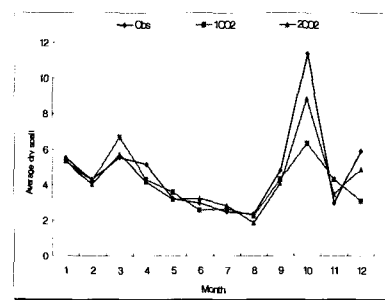
그림 2. 장수 지점의 모의 결과



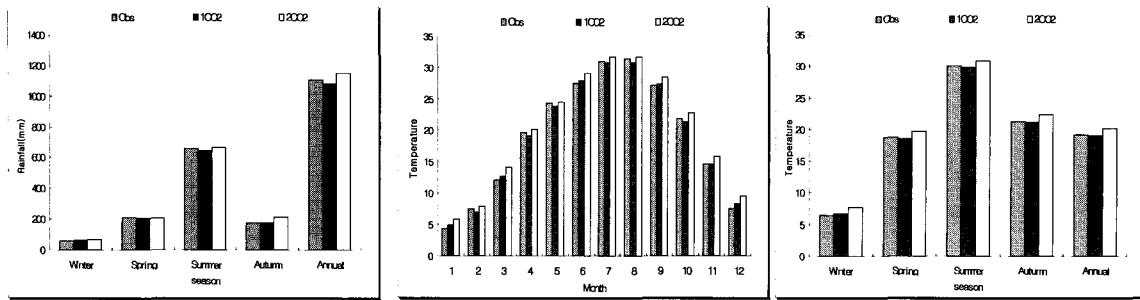
(a) 월 평균 강수량(mm)



(b) 월 평균 습윤지속기간(days)



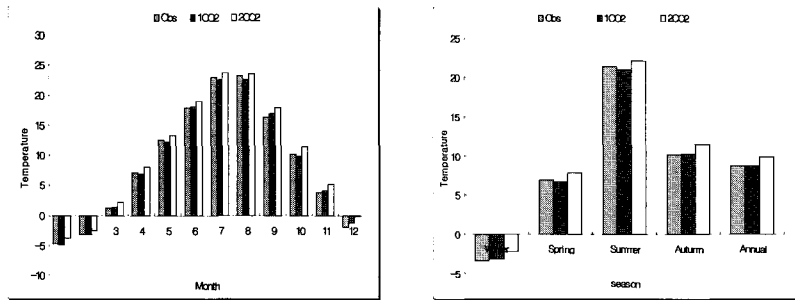
(c) 월 평균 건조지속기간(days)



(d) 계절별 평균 강수량(mm)

(e) 월 평균 최고 기온(°C)

(f) 계절별 평균 최고기온(°C)



(g) 월 평균 최저 기온(°C)

(h) 계절별 평균 최저기온(°C)

그림 3. 무주 지점의 모의 결과

3. 2CO₂ 상황에서의 유출량 모의

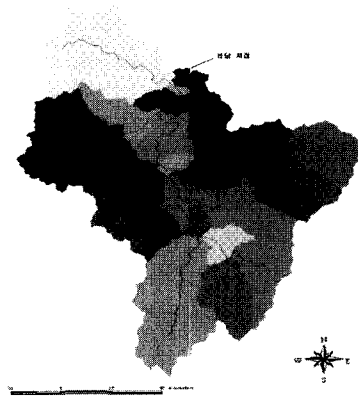
본 연구에서는 기후변화가 용담댐 유역의 수자원에 미치는 영향을 평가하기 위해 앞 절에서 기후변화시나리오와 WGEN을 통해 모의된 일 수문기상자료를 입력자료로 하여 강수-유출모의를 실시하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 문헌과 연구사례 조사를 통해 적절한 유출모형을 선택하였다. 2CO₂ 상황에서의 유출모의를 위해 기존 국내외의 연구성과나 유출모형의 인지도, 그리고 연구의 적합성 등을 고려하여 SLURP 모형을 선정하였다(김병식 등, 2003).

3.1 SLURP 모형

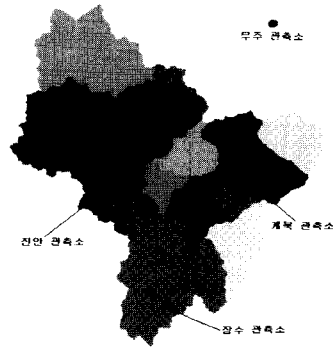
SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) 모형은 준 분포형 모형이지만, 분포형 모형으로 사용이 가능한 물리적 해석 모형으로써 강수사상을 강우사상과 강설사상으로 분리하여 고려할 수 있다. SLURP 모형은 전체유역을 ASA(Aggregated Simulation Area)라는 소유역으로 구분하여 모의하는 일 단위(daily time step) 유출 모형이며 지상학적 매개변수(ASA의 평균고도, 하도길이, 토지피복특성 등), 시계열 자료(온도, 강수 등) 그리고 물리적 매개변수(Manning 조도계수, 침투율 등)를 입력자료로 이용한다. 특히, 지

상학적 매개변수들은 수작업 또는 수치지형분석(digital terrain analysis) 모형을 이용하여 추출할 수 있다. SLURP 모형의 유출모의는 ASA별로 연직방향 물수지(vertical water balance)분석을 실시한 후 다시 각각의 ASA들에 대하여 하도 추적을 통해 전체유역의 출구지점에서의 유출량을 얻게 된다. SLURP 모형의 연직방향 물수지는 4개의 층 구조로 구성되어 있으며, 주요 매개변수는 강설 초기 저류량, 지표하 초기 저류량, 최대 침투율, Manning 조도계수 n, 지표수 보존상수와 지표하 보존상수 및 최대 저류량, 강수 보정계수, 융설온도 등이 있다. 그림 4는 용담댐 유역의 ASA 분할과 관측소의 위치를 나타낸 것이며, 그림 5은 SLURP 모형의 연직방향물수지 구조를 나타낸 것이다(김병식 등, 2003).

김병식 등 (2003)은 용담댐 유역에 대하여 SLURP 모형의 매개변수를 추정하고 용담댐 유역에 대해 모형의 적용성을 검토한 바 있으며 그 결과는 그림 6~7과 같다. 그림 6은 SCE-UA 최적화 기법을 통해 매개변수를 보정(calibration)한 후 관측치와 비교한 것이며, 그림 7은 보정된 매개변수를 이용하여 1996년의 일 유출량을 모의한 결과이다.



(a) ASA 분할



(b) 우량관측소 위치

그림 4. 용담댐 유역의 ASA 분할과 관측소의 위치

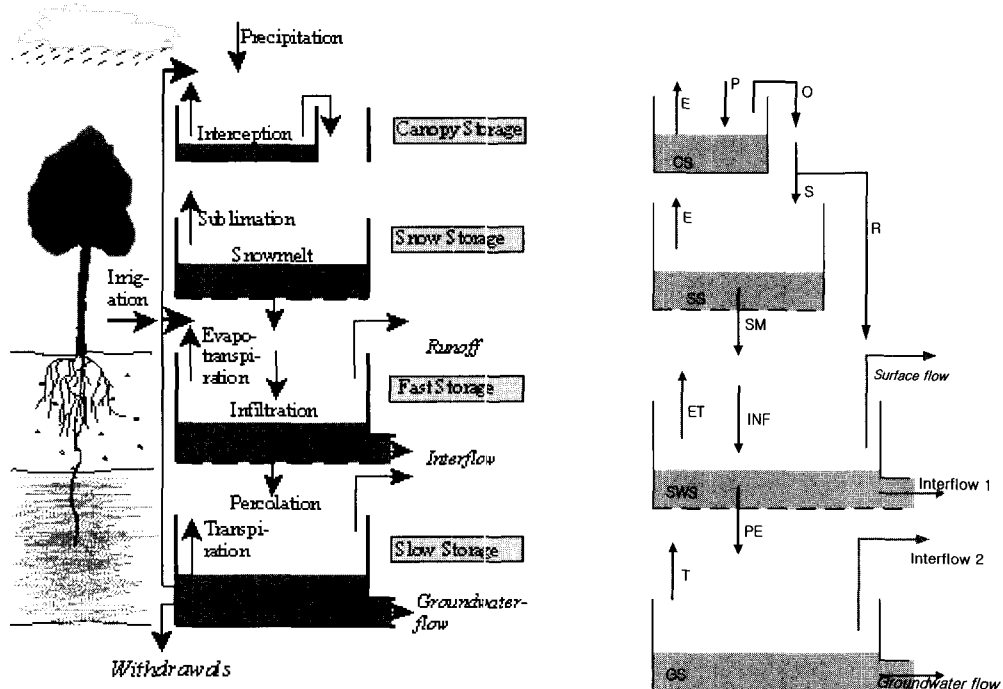


그림 5. SLURP 모형의 연직방향 물수지 구조

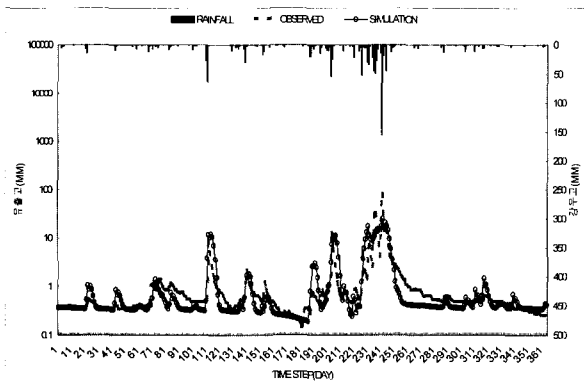


그림 6. 용담댐 지점의 1995년 일 유출 수문곡선(보정)

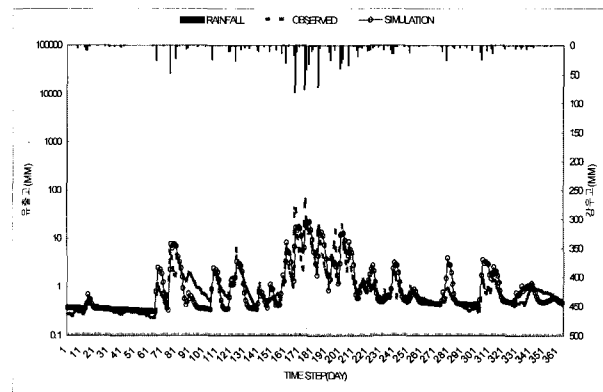


그림 7. 용담댐 지점의 1996년 일 유출 수문곡선(검정)

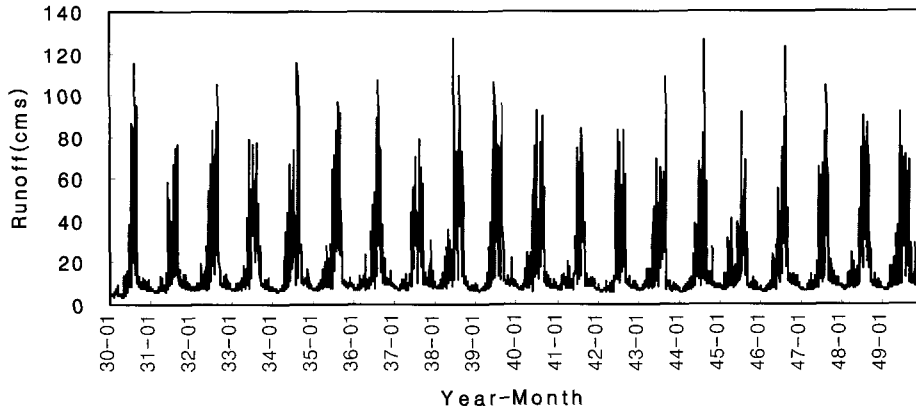


그림 8. 2CO₂ 상황에서의 일 유출량 수문곡선

3.2 SLURP 모형을 이용한 2CO₂ 상황의 유출량 모의

본 절에서는 앞에서 작성된 2CO₂ 상황에서의 일 강수량, 일 최고기온, 일 최저기온 그리고 일 일사량 자료를 SLURP 모형에 입력자료로 사용하여 2CO₂ 상황에서의 유출량을 모의하였다. 이때 SLURP 모형의 매개변수는 현재의 지상학적 인자가 미래에도 변화가 없다는 가정 하에서 앞 절에서 추정된 현재의 매개변수를 이용하였다. 그림 8은 SLURP 모형에 의해 모의된 2CO₂ 상황에서의 유출량 수문곡선을 나타낸 것이다.

3.3 관측 및 기후변화에 따른 유출량 자료의 비교 분석

그림 9와 그림 10은 용담댐 유역의 월 유출량, 계절

별 유출량을 나타낸 것으로 기후변화시(2CO₂) 용담댐 유역의 연 유출량은 6,920.7 cms에서 6,390.1 cms로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 월 유출량의 경우 7월과 8월의 유출량은 감소하였고 계절별 유출량은 겨울철과 가을철에 관측 유출량보다 증가하였으며 여름철에는 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 산정된 모의 일 유출량 자료를 이용하여 이수관련 계획변수를 추정할 경우 현재와 기후변화시 어떠한 차이가 있는지를 판단하고자 용담수위표 지점의 관측 일 유출량 자료(1963.1.1 ~1998.12.31)와 모의 일 유출량 자료(2031.1.1 ~2050.12.31)를 이용하여 유황분석 결과를 비교하여 보았으며 표 2와 그림 11은 그 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기후변화시 관측치에 비해 평균 풍수량과 평수량은 작아지는 반면에 평균 갈수량이 커짐을 알 수 있다.

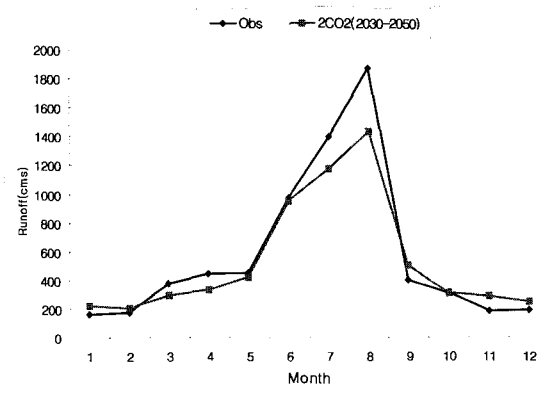


그림 9. 용담댐 유역의 월 유출량

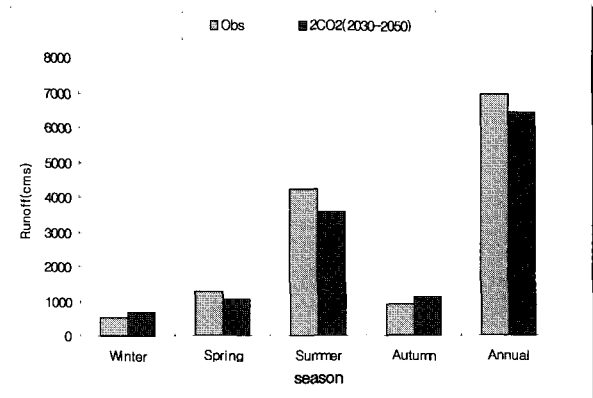


그림 10. 용담댐 유역의 계절별 유출량

표 2. 유황분석 평균 비교 (cms)

유황	종류	관측치(30년)	모의치(20년)
평균풍수량		21.1	17.89
평균평수량		12.3	9.87
평균저수량		8.1	7.82
평균갈수량		4.5	6.55

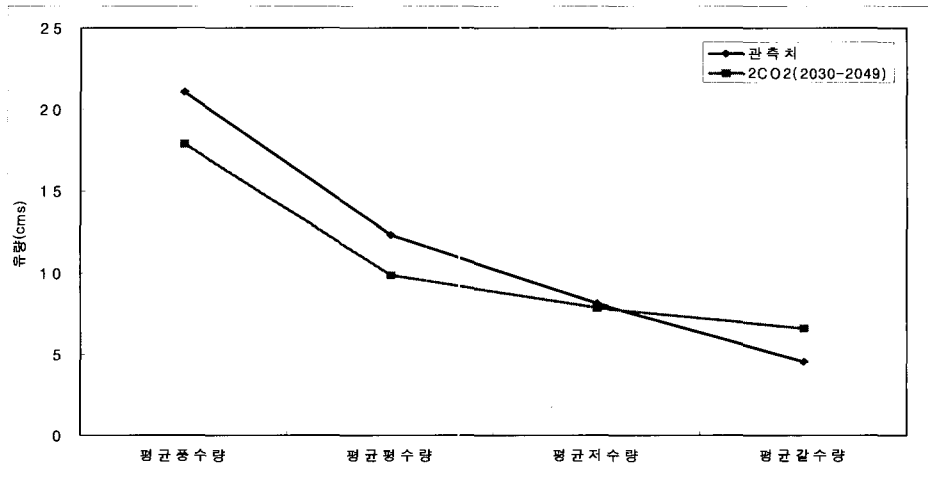


그림 11. 유황분석 평균 비교

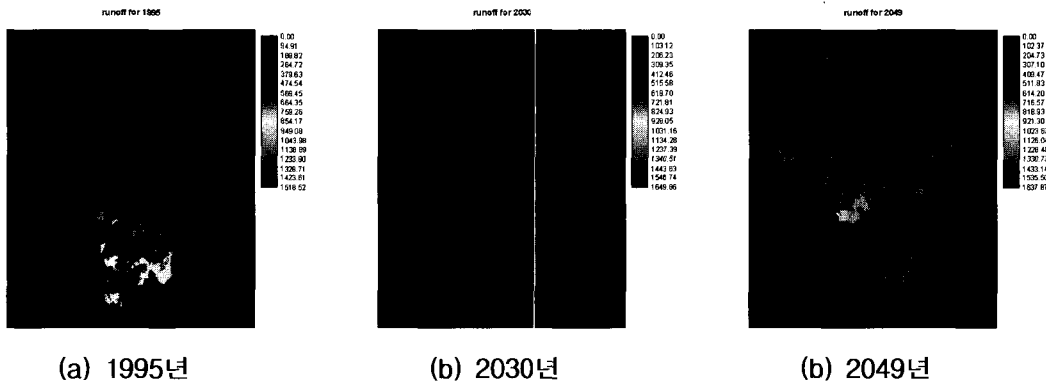


그림 12. 기후변화에 따른 용담댐 유역의 연 유출량의 공간적 분포변화

그림 12는 1995년(현재), 2030년, 20049년의 용담댐 유역내에서의 연 유출량의 공간적 분포를 나타낸 것으로 현재에 비해 유출량이 약간 감소함을 확인 할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 YONU GCM에 의한 기후변화 실험을 실시한 후 통계학적 축소기법과 일기발생 모형(WGEN)을 이용하여 일 강수량 및 일 최고 온도, 일 최

저 온도 자료를 모의하였으며, SLURP 모형을 일 유출 모형으로 선택한 후 용담댐 유역에 적용하여 국내 유역에서의 적용성을 확인하였다. 또한, 2CO₂상황에서의 일 강수량, 최고, 최저 온도 자료를 SLURP 모형에 입력자료로 이용하여 2CO₂상황에서의 일 유출 모의를 실시하였으며, 이수관련 계획변수를 추정할 경우 현재와 기후변화시 어떠한 차이가 있는지를 판단하고자 유황분석을 실시하였다. 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 용담유역의 기후변화 시나리오와 WGEN 모형을

- 이용하여 무주, 장수, 진안, 계북 지점에 대하여 각각 일 강수량, 최고 온도, 최저 온도 자료계열을 20년치 모의하였으며 그 결과 온도의 경우 현재에 비해 약간 상승함을 확인할 수 있었다. 강수사상의 경우 양적인 면에서는 거의 차이가 없었으나 습윤지속기간은 길어지고 건조지속기간이 짧아짐을 확인하였다.
- (2) SLURP 모형을 이용하여 용담댐 유역에서 1996년부터 1998년까지의 일 유출모의를 실시하여 최적 매개변수를 추정하였다. 또한, 관측 유출량과 비교해 본 결과 SLURP 모형의 모의 유출량이 관측치를 잘 재현함을 확인하였다.
- (3) SLURP 모형을 이용하여 2CO₂상황에서의 용담 유역의 유출량을 모의하였으며, 그 결과 연 평균 유출량이 감소하였고 특히, 겨울철과 가을철의 유출량은 관측 유출량에 비해 증가하고 여름철은 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 이수관련 계획변수를 추정할 경우 현재와 기후변화시 어떠한 차이가 있는지를 판단하고자 용담수 위표 지점의 관측 일 유출량 자료(1963.1.1 ~ 1998.12.31)와 모의 일 유출량 자료(2031.1.1 ~ 2050.12.31)를 이용하여 유황분석을 실시해 본 결과, 기후변화시 관측치에 비해 평균 풍수량과 평수량은 작아지는 반면에 평균 갈수량이 커짐을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 “수자원의 지속적 확보기술 개발사업단”의 연구비 지원(2-2-1)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

김병식, 서병하, 김남원(2003). 전이함수 모형과 일기발생 모형을 이용한 유역규모 기후변화시나리오의 작성, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회 제 36권 제 3호, pp. 345~363.

김병식, 서병하, 김형수, 김남원(2003) SLURP 모형을 이용한 하천유출량 모의, 大韓土木學會論文彙, 대한토목학회 제 23권 제 4B호, pp. 289~303.

안재현, 유철상, 윤용남 (2001). GCM결과를 이용한 지구 온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석, 한국수자원학회논문집, 한국수문학회, 제 34권, 제4호, pp. 335-345

한국건설기술연구원 (2000). 수자원계획의 최적화 연구 (IV) ; 기후변화에 따른 수자원계획의 영향 평가. 건설교통부

Dubrovsky, M. (2001). "Interdiurnal And Interannual Variability in Stochastic Daily Weather Generator: Modelling and the Role in Agricultural And Hydrologic Studies." *8th international Meeting on the Statistical*

IPCC. (1996). *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations And Mitigation of Climate Change*

Kite, G.W., Dalton, A. and Dion, K. (1994) Simulation of streamflow in a macro-scale watershed using GCM data. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 5, pp. 1546~1559.

Kite, G. W. and Haberland, U. (1999). Atmospheric model data for macroscale hydrology, *Journal of Hydrology*, Vol. 217, pp. 303~313.

Miller, N. L. and Jin won, Kim(2001). "Coupled Precipitation-Streamflow Simulations at the GAME/HUBEX Site:Xixian Basin" *Journal of the Meteorological Society of Japan.*, Vol(79), pp885-998

Pitman, A.J. and Chiew, F.H. (1996). Testing a GCM land surface scheme against catchment-scale runoff data, *Climate Dynamics.*, Vol(12), pp685-699

Richardson, C. W. (1981). "Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature and Solar radiation." *Water Resources Research.*, Vol. 17, pp. 182-190

Wilks, Daniel S. (1992). "Adaptic Stochastic Weather Generation Algorithms Climate Change Studies." *Climat Change.*, Vol. 22, pp. 67-84.

Wilby, R. L., Wigley, M. L., and Conway, D. (2001). "Statistical downscaling of GCM simualtions to Streamflow." *Journal of Hydrology.*, Vol. 252 pp. 221-236

(논문번호:03-87/접수:2003.10.17/심사완료:2004.02.17)