

CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석

Analysis of Hydrological Impact Using Climate Change Scenarios and the CA-Markov Technique on Soyanggang-dam Watershed

임혁진* / 권형중** / 배덕효*** / 김성준****

Lim, Hyuk Jin / Kwon, Hyung Joong / Bae, Deg Hyo / Kim, Seong Joon

Abstract

The objective of this study was to analyze the changes in the hydrological environment in Soyanggang-dam watershed due to climate change results (in years 2050 and 2100) which were simulated using CCCma CGCM2 based on SRES A2 and B2. The SRES A2 and B2 were used to estimate NDVI values for selected land use using the relation of NDVI-Temperature using linear regression of observed data (in years 1998~2002). Land use change based on SRES A2 and B2 was estimated every 5- and 10-year period using the CA-Markov technique based on the 1985, 1990, 1995 and 2000 land cover map classified by Landsat TM satellite images. As a result, the trend in land use change in each land class was reflected. When land use changes in years 2050 and 2100 were simulated using the CA-Markov method, the forest class area declined while the urban, bareground and grassland classes increased. When simulation was done further for future scenarios, the transition change converged and no increasing trend was reflected. The impact assessment of evapotranspiration was conducted by comparing the observed data with the computed results based on three cases supposition scenarios of meteorological data (temperature, global radiation and wind speed) using the FAO Penman-Monteith method. The results showed that the runoff was reduced by about 50% compared with the present hydrologic condition when each SRES and periods were compared. If there was no land use change, the runoff would decline further to about 3~5%.

keywords : SLURP, GCMs (Generation Climate Models), CA (Cellular automata), Markov-Chain, Evapotranspiration

요 지

본 연구는 CCCma CGCM2 기후모형을 이용하여 SRES A2, B2 시나리오 모의를 통한 기후변화가 2050년, 2100년

* 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과 석사

Graduate Student, Dept. of Rural Engrg., Univ., Seoul 143-701, Korea

** 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후 연구원

Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil & Env. System Engrg., Konkuk Univ., Seoul 143-701, Korea
(e-mail: kwonhj@konkuk.ac.kr)

*** 세종대학교 토목환경공학부 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Sejong Univ., Seoul 143-747, Korea

**** 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil & Env. System Engrg., Konkuk Univ., Seoul 143-701, Korea
Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3749 (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr)

소양강댐유역의 수문환경에 미치는 변화양상을 SLURP 수문모형을 이용하여 분석하는데 목적이 있다. 수문영향을 평가하기 위해 사용된 모형의 입력자료는 NDVI의 경우, 1998년부터 2002년까지 5개년에 걸친 월별 NDVI를 사용하여 기온-NDVI와의 선형회귀분석을 통해 A2, B2 각 시나리오별 NDVI 값을 추정하였으며 대상유역의 토지이용에 따른 각 항목의 경년변화를 분석하기 위해 Landsat TM 위성영상을 이용하여 1985년부터 2000년의 5년 시간간격을 갖는 4장의 토지피복도를 생성하였다. 생성된 토지피복도를 사용하여 CA-Markov 연쇄기법을 통한 향후 50년, 100년 후의 토지이용변화상태를 모의하였다. 각 시나리오별 50년, 100년 후의 추정된 기상, NDVI, 토지이용도를 통하여 SLURP 모형에 적용한 결과, 토지이용현황은 CA-Markov 연쇄기법을 통해 모의된 향후 50년, 100년의 이용현황은 산림의 분포면적은 감소하는 반면 주거지, 나지, 초지 등은 두드러지게 증가하였다. 또한, 연쇄기법의 모의 시간간격이 관측값의 모집단의 시간해상도에 비해 지나치게 클 경우 각 항목별 추이경향은 일정부분에서 수렴되었다. 또한, 기후변화에 따른 수문영향을 분석하기 위해 가상시나리오에 대한 증발산량 평가를 실시하였다. 증발산량 평가는 FAO Penman-Monteith 산정 공식을 통하여 기온, 일사량, 풍속에 대한 가상시나리오를 적용하여 분석하였다. 기후변화와 가상시나리오에 따른 수문분석 결과, 모의유출량은 SRES A2, B2 시나리오상에서 현재의 관측자료보다 대략 50%의 감소를 보이고 있으며 토지이용변화가 현재와 동일할 경우 SRES 시나리오를 적용한 경우보다 약 3~5%가량 더 감소됨을 확인하였다.

핵심용어 : SLURP, 기후변화모형, CA (Cellular Automata), Markov-Chain, 증발산

1. 서 론

댐, 하천 그리고 유역간의 원활한 이·치수를 위한 수리 구조물과 운영과정, 수로 건설 및 하천정비, 산지 개간, 도시화 등의 유역개발 등은 수문환경에 큰 영향을 미치게 된다. 수문환경의 변화는 이런 인위적인 결과 외에 자연적인 변화로 나누어 생각할 수 있다. 자연적인 원인으로는 최근 지구온난화에 따른 국지기후의 변화 또는 토지피복의 변화에 중점을 들 수 있다. 특히, 기후변화(Climate Change)란 용어 자체가 '인간의 활동으로 야기되는 대기 조성변화'로 기후변화협약에서 정의하고 있는바, 향후 기후변화에 따른 수문환경의 변화는 과거의 기후 및 수자원의 관측자료의 분석 및 연구 결과를 통해 변화될 것이라는 것은 자명한 사실이다. 이는 자연적인 원인에 의한 기후변화에 따른 영향은 미미한 것을 나타내고 있으며, 대부분의 기후변화가 인간의 활동에 일어난다고 볼 수 있다.

지구온난화에 따른 대표적인 변화인 기온 상승, 강수 패턴 변화 등은 증발산량의 증가 및 유출의 계절적 변동 등을 초래하여 미래의 수문순환과정은 과거와는 다른 양상으로 변화될 수 있음을 직접 또는 간접적으로 보여주고 있다. 특히 우리나라는 그동안 매년 발생하는 봄가뭄, 몬순기후에 의한 장마시기, 그리고 가을 태풍에 의한 호우동반 등의 기상 사이클에 의존하는 지표수 위주의 수자원 개발과 관리에 의존하여 왔는데, 이는 향후 작은 기후변동으로도 심각한 수자원 문제를 발생시킬 수 있는 위험에 노출될 가능성이 높다고 판단된다. 따라

서 기후변화에 따른 수문환경의 변화가 유출에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 수문분석 및 예측을 통해 수자원의 장기적인 계획수립에 검토되어야 할 것이다.

본 연구에서는 장기적인 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 유출측면에서 정량적으로 평가하기 위해서 IPCC (International Panel Climate Change)에서 제시하고 있는 SRES (Special Report Emission Scenarios)에 대해 CCCma (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) CGCM2 (Coupled Global Climate Model)기후모형의 모의 결과 값을 수문기상자료로 사용하여 준분포형 모형인 SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Process)에 적용하여 기후변화에 따른 장기적인 유출영향을 분석하고자한다. 본 연구의 연구절차는 Fig. 1과 같다.

미래에 유출의 변화에 지배적인 인자로 작용하는 토지이용현황을 CA-Markov 연쇄기법을 통하여 Landsat TM 위성영상으로부터 1985년부터 2000년까지의 5년단위의 토지피복도를 작성하여 2050년과 2100년의 토지피복도를 모의하였다.

지구온난화에 따른 식생에 대한 수문환경의 변화를 고려하여 유출을 해석하고자 1998년부터 2002년 정규식생지수(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)를 사용하여 FAO Penman-Monteith 증발산량 산정기법을 통해 증발산량을 평가하였으며, 기온-NDVI의 선형회귀식으로부터 CGCM2의 모의 월평균기온을 사용하여 각 토지피복별 향후 2050년, 2100년의 NDVI를 모의하였다. 가상시나리오를 사용하여 증발산량에

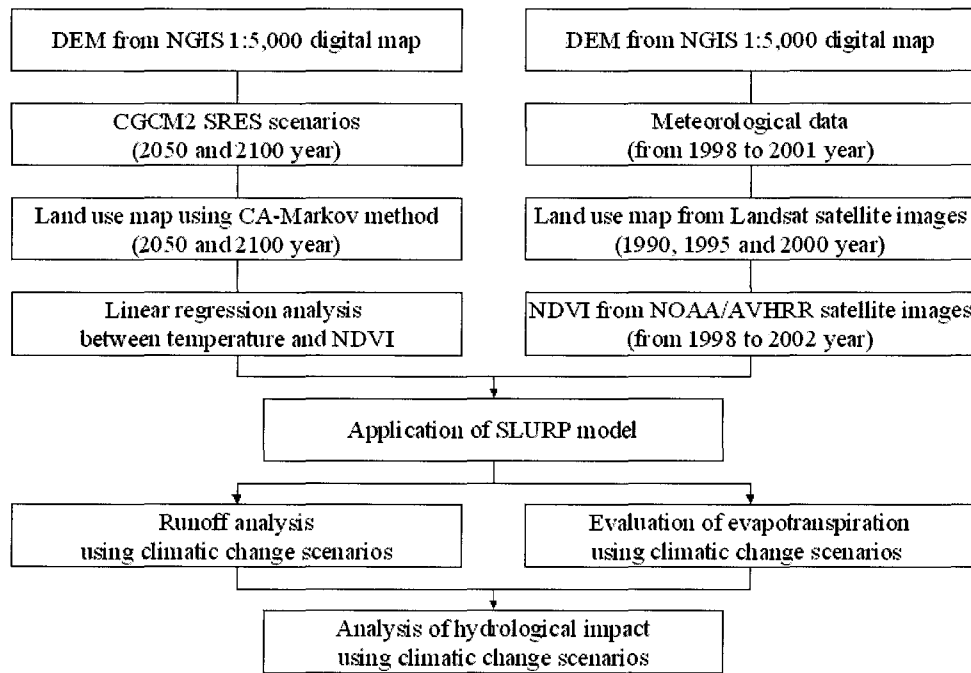


Fig. 1. Flowchart of Study Procedure

영향을 미치는 기온, 일사량, 풍속의 변화량과 증발산량의 관계를 분석하였다.

지금까지의 기후변화에 따른 수문환경변화의 연구동향은 국내·외에서 활발히 연구가 수행되고 있다. 이런 연구동향을 살펴보면, 다음과 같이 크게 세 가지로 분류할 수 있다(한국환경정책·평가연구원, 2004).

- 과거 기상자료를 사용하여 기후인자와 유출의 장기 변동에 관한 해석
- One-way 기법을 통한 각 시나리오별 GCMs의 모의 결과를 이용한 직접적 유출해석
- Two-way 기법을 통한 수문모형과 기후모형이 연계된 결합모형의 유출해석

과거의 기상자료를 사용하여 기존의 기상패턴과 수문현상과의 관계를 고찰하는 방법은 널리 시행되고 있으며, 현재에는 기후모형과 수문모형의 시·공간해상도의 괴리 및 제한으로 인해 두 모형이 연계된 결합모형의 분석은 미진한 단계이며 IPCC 시나리오에 대한 GCMs의 모의 결과값을 이용하여 기후와 수문특성의 변화를 직접 추정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이런 One-way 기법은 GCMs의 모의 결과를 통계적 축소기법 또는 다중회귀분석을 사용하여 수문모형에 적용하는 방법으로 국내에서는 한국환경정책·평가연구원(2004)에서 기상청 기상연구소에서 국내 5 대강 유역에 GCMs를 적용하여 모의한 결과값을 사용하여 유출량을

추정한 결과 평균적으로 약 25%정도의 유출증가를 예측한 바 있으며, 한국과학기술연구원(1995)에서는 국내 6개 댐 유역에 대해 물수지 산출모형을 개발하고 이 모형에 근거해 유출량을 추정한 결과 강수량 증가에 비해 약 2.4 배의 유출량 증가가 예측된다고 보고하고 있다. 오성남 등(1998)은 기후변화가 동북아시아 지역의 지표 물수지에 미치는 영향을 현재의 상태와 비교하여 지표의 수문변화를 정량적으로 파악하였으며, 안재현 등(2001)은 물수지모형을 이용하여 CO₂ 배증에 따른 대형 댐 유역의 유출의 영향을 평가하였다. 김병식 등(2004)은 YONU GCM을 이용하여 CO₂ 배증상태의 모의결과를 이용하여 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향을 SLURP 모형을 사용하여 모의하였다. 대부분의 국내의 연구는, 관측자료 및 GCMs의 모의결과를 이용한 수문 기상인자의 장기변동의 해석과 CO₂ 배증상태의 기준실험과 제한실험의 결과를 통해 유출의 영향을 평가하고 있다.

국외의 경우, 1990년대의 이후 GCMs를 수문모형과 연계하여 기후변화로 인한 수자원연구를 수행한 사례가 많이 있으며 Khul and Miller(1992)는 GCMs를 이용하여 전 세계 16개 대하천에 대해 현재 유출량 모의하여 실제 GCMs를 사용한 직접유출의 모의한계를 분석하였으며 Lins(1994)는 11개 미국내 하천유출을 분석한 결과, 1940년 이후 개발이 이루어지지 않은 거의 모든 하천에서 지구온난화로 인한 유출이 증가하는 결과를 도출하였다. 또한, Kite et al.(1994)은 Machenzie 유역의

CCCma GCM2 자료를 사용하여 하천유량의 변화를 분석하였으며 Chiew(1993)는 5개의 GCMs을 이용하여 오스트레일리아 28개 유역에 대해 2030년과 2070년에 대한 유출과 토양함수비를 모의하였다.

현재의 GCMs에 대한 모의 결과값을 이용한 수문유출변화 분석에 대한 연구는 개발된 각각의 GCMs의 결과값의 불확실성 및 시·공간해상도의 제한으로 인해 많은 차이가 나타나나 IPCC(1990)에 따르면 전반적으로 현재에 비해 대기중의 CO₂ 농도가 배증된다면 지구 전체적으로 2~5°C 정도의 기온 상승이 발생할 것으로 예측하고 있다.

2. 기본이론

2.1 GCMs과 기후변화 시나리오

GCMs는 대기의 3차원 운동을 유체역학적, 열역학적으로 모의하는 순환모형으로 강수를 발생시키는 수증기의 응결과정, 대류, 구름과 복사 등 대기물리과정의 효과 및 산악지역의 영향을 포함한다. 또한 지표면 및 해양에서의 현열, 잠열수송, 설빙, 식생분포에 의한 알베도 차이 등을 포함하는 총체적 모형이다. GCMs은 일반적으로 대기대순환모형(AGCMs), 해양대순환모형(OGCMs), 기타 순환모형으로 분류되며 대기-해양 대순환모델(AOGCMs)들은 기후시스템을 포괄적으로 묘사된다.

IPCC에서는 AOGCMs의 모의 결과값의 정확성과 불확실성을 평가하고 있으며 GCMs의 모의 결과값을 수문모형에 직접 적용하기 위해서는 유역단위의 수자원 해석에 사용하기 위한 공간해상도의 자료를 얻기 위하여 통계적 내삽기법과 다중회귀분석을 통한 자료의 재생성을 통하여 적용되게 된다.

기후변화에 대한 수문영향을 평가하기 위해서는 목적에 적합한 모형을 구축하고, 적절한 방법으로 장래의 기후시나리오를 설계하여 기후변화에 따른 영향평가를 실시하여야 한다.

IPCC에서 제시하고 있는 기후변화시나리오는 IS92a와 SRES 시나리오가 있으며 현재 IPCC의 정보분배센터(Data Distribution Center)에서는 기후변화에 의한 일관된 영향연구를 위해 IS92a 및 SRES 시나리오에 의한 다수의 GCMs 결과들을 제공하고 있다. SRES 시나리오는 기존의 IS92a 6개의 시나리오를 기본으로 선진국 연구자의 사고에 의해 작성되어 사회 발전방향을 반영하지 못하는 한계성을 보완하였다. 온난화의 정도와 대책은 과거와 크게 다르다는 것을 중점으로 2002년 사회, 경제, 환경 등을 고려한 4가지 골격의 온실가스배출시나리오를 작성하여 크게 A-B축(경제지향-환경지향), 1-2

축(지구주의지향-지역주의지향)으로 분류하였다.

본 연구에서는 SRES 시나리오 중 다원화 사회 시나리오(A2)와 지역 공존형 사회 시나리오(B2) 시나리오를 대상으로 CCCma CGCM2 모의 결과값을 사용하여 소양강댐유역의 수문분석을 실시하였다.

2.2 수문모형의 선택

수문영향을 평가하기 위해서 현재 국내의 적용성 및 자료의 활용도를 고려하여 일단위 준분포모형인 SLURP 모형을 선택하였다. SLURP 수문모형은 토지피복별로 세분화되는 ASAs(Aggregated Simulation Areas)로 알려진 공간 단위로부터 일 단위 강우-유출을 수문해석하며, 입력자료는 지형자료(ASA 평균고도값, 수로연장, 토지피복상태 등), 시계열자료(기온, 강수 등), 물리적 매개변수(조도계수, 차단계수) 등을 이용한다. 지형자료의 경우 GIS와 수치지형분석모형기법을 사용하여 획득할 수 있다. 시계열 자료는 기상관측소에서 실측한 값을 사용하며 매개변수들은 측정·추정·보정된 값을 사용한다. 모형의 유출모의는 각각의 토지피복별 격자매트릭스와 ASAs 소유역에 대한 연직방향 물수지해석에 의하여 이루어지며 이는 수관저류, 강설초기저류, 급속저류(지표면저류, 토양층저류 등), 완속저류(지표하저류 등)의 네 가지 수직구조로 구성된다(Fig. 2).

3. 자료 및 방법

3.1 대상유역의 개요

소양강댐 수위관측소를 유역출구로하는 소양강댐 유역은 유역면적은 2,694.4km²이며 유역둘레는 383.6km, 유역평균폭은 16.5km, 유역평균고도는 650.5m, 유역평균경사는 46.0%로 국내 북동부 산악지역에 위치해있으며 산림면적은 2,478.5km²으로서 유역면적의 92.0% 이른다(Fig. 3). 따라서 인위적인 토지이용현황 상태가 적어 이·치수 및 용수 제어용량이 적고 자연적인 강수-수문상태의 회귀수량 역시 댐지점을 유역출구로하기 때문에 자연유출량에 가깝다고 할 수 있다. 이는 소양강댐 수위관측소의 유입량은 곧 자연적인 수문패턴을 가지고 유출이 발생한다고 볼 수 있어 자료의 신뢰성이 우수하다고 판단된다. 소양강댐은 높이 123m, 길이 530m, 체적 960만m³로 연간 관개·생활·공업용수로 12억m³을 공급하고, 관개면적은 7,500ha, 홍수조절 용량은 5억m³, 시설발전용량 20만KW의 수력발전소를 가동하는 북한강 유역의 유일한 다목적댐으로 설악산에서 발원한 유로연장 160km의 북한강 최대 지류인 소양강과 북한강 합류점에서 12km 떨어진 지점에 위치한다.

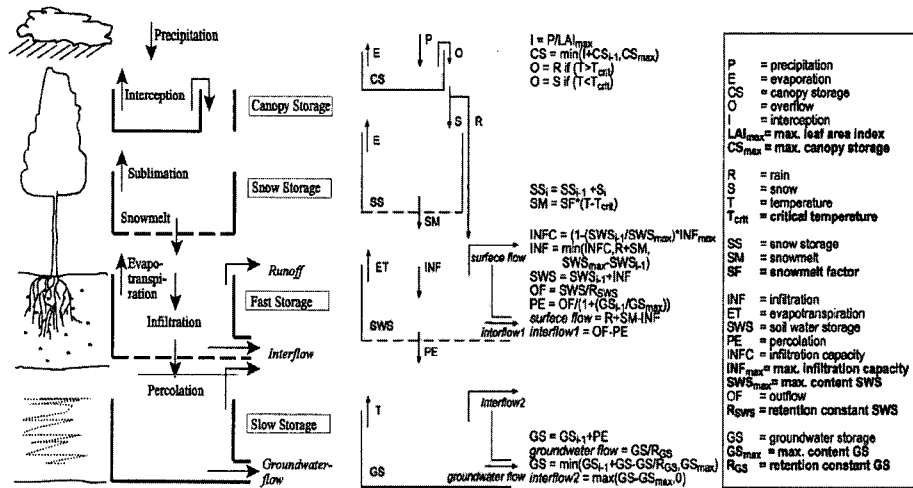


Fig. 2. The Vertical Water Balance Applied to Each Land Class within ASAs

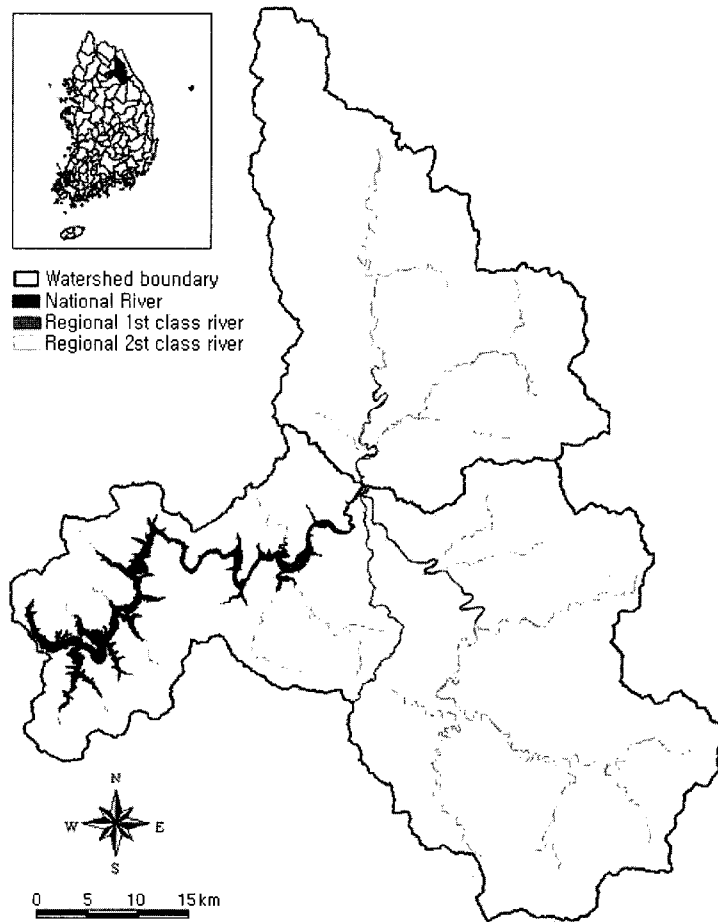


Fig. 3. Study Area

3.2 SLURP 모형의 입력자료 구축

SLURP 모형은 시계열자료(일 강수량, 일 평균기온, 이슬점 온도 또는 상대습도, 일사량 또는 일조시간,

NDVI 등) 및 지형자료(DEM, 토지피복도)를 사용하여 유출을 해석한다.

3.2.1 DEM 및 소유역분할

DEM은 일반적으로 지형의 표고를 나타내는데 가장

많이 이용되며 수문모형에서 입력자료로 사용되어 지형 및 지표면의 특성을 분석함으로써 지형적 매개변수를 결정하는 방법으로 이용된다. 즉, 유역의 지표면 경사, 경사향 등의 매개변수를 결정하여 수문모형에 활용, 정확한 유출량 등을 예측한다. 본 연구에서는 1:5,000 NGIS 수치지도를 사용하여 공간해상도 100m × 100m의 DEM을 구축하였다(Fig. 4).

3.2.2 수문기상자료 및 GIS 자료구축

SLURP 모형에서 사용되는 기상자료는 일별 강우량, 일 평균기온, 이슬점온도 또는 상대습도, 일조시간 또는 태양복사량 등이 기본적으로 이용되며 그 외의 일 평균 풍속, 구름분포정도, 강설량, 저수지 수위, 일 평균유출량, 연평균강수량 등이 필요에 따라 선택적으로 사용된다. 시간경과에 따른 향후 50년, 100년 후의 토지이용도 및 NDVI는 CA-Markov 연쇄기법과 기온-NDVI의 상관관계를 이용하여 추정하였다.

대기해양결합 모형인 CCCma CGCM2 A2, B2 기후변화 시나리오 결과값을 통해 향후 기후변화에 따른 수문변화의 영향을 알아보려고 2050년, 2100년의 기상자료를 획득하였다. 1971년부터 2000년 동안의 기상기상 관측소로부터의 각 기상요소의 30년 간의 일 평균값과 CGCM2의 모의 결과값의 비교는 Fig. 5와 같다.

4. 결과 및 고찰

IPCC SRES 시나리오에 따른 CCCma CGCM2의 모의 결과값을 SLURP 모형에 적용하였다. 입력자료는 Landsat TM 영상으로부터 획득한 1985년부터 2000년

까지의 5년 단위의 토지피복도를 사용하여 CA-Markov 연산기법을 통해 기후변화에 따른 유출평가를 수행하고자 2050년, 2100년 토지피복도를 구축하였으며, CGCM2 A2, B2 시나리오의 평균기온의 결과값을 사용하여 1998년부터 2002년의 5개년의 NDVI의 자료를 사용하여 2050년, 2100년 NDVI를 추정하여 수문모형에 적용하였다.

4.1 모형의 적용

4.1.1 모형의 보정과 매개변수 결정

본 연구에서는 갈수년, 평년, 홍수기로 대변되는 각각의 사상들에 대해 1998년 1월 1일부터 2000년 12월 31일까지의 3년 간의 유출량 자료를 이용하여 모형 보정을 실시하였다.

SLURP 모형의 매개변수 최적화를 위해 민감도분석과 SCE-UA 최적화기법(Duan et al., 1994)을 이용하였으며 매개변수추정의 최적화 척도로 Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) 모형효율, WMO 통계값을 사용하였다. 각각의 사상들에 의해 추정된 매개변수의 평균값은 Table 1과 같다.

매개변수는 각 토지이용별로 산정하게 되는데 수문 반응시간과 유출량에 가장 많은 영향을 미치는 매개변수는 각 토지이용상태에 따른 지표저류상수, 최대지표저류량, 지표하저류상수 및 최대지표하저류량이다. 특히 SLURP 모형은 토양에 대한 입력자료가 토성의 비율에 따른 추정값을 사용하기 때문에 기저유출에 대한 지표하저류상수가 크게 나타난다.

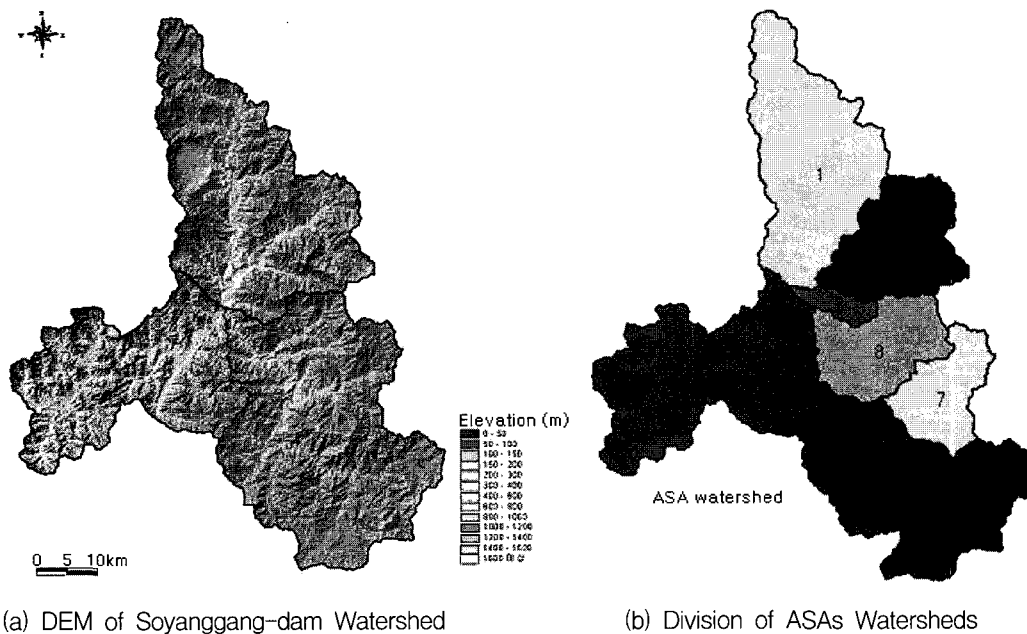


Fig. 4. DEM and Division of ASAs sub-basins

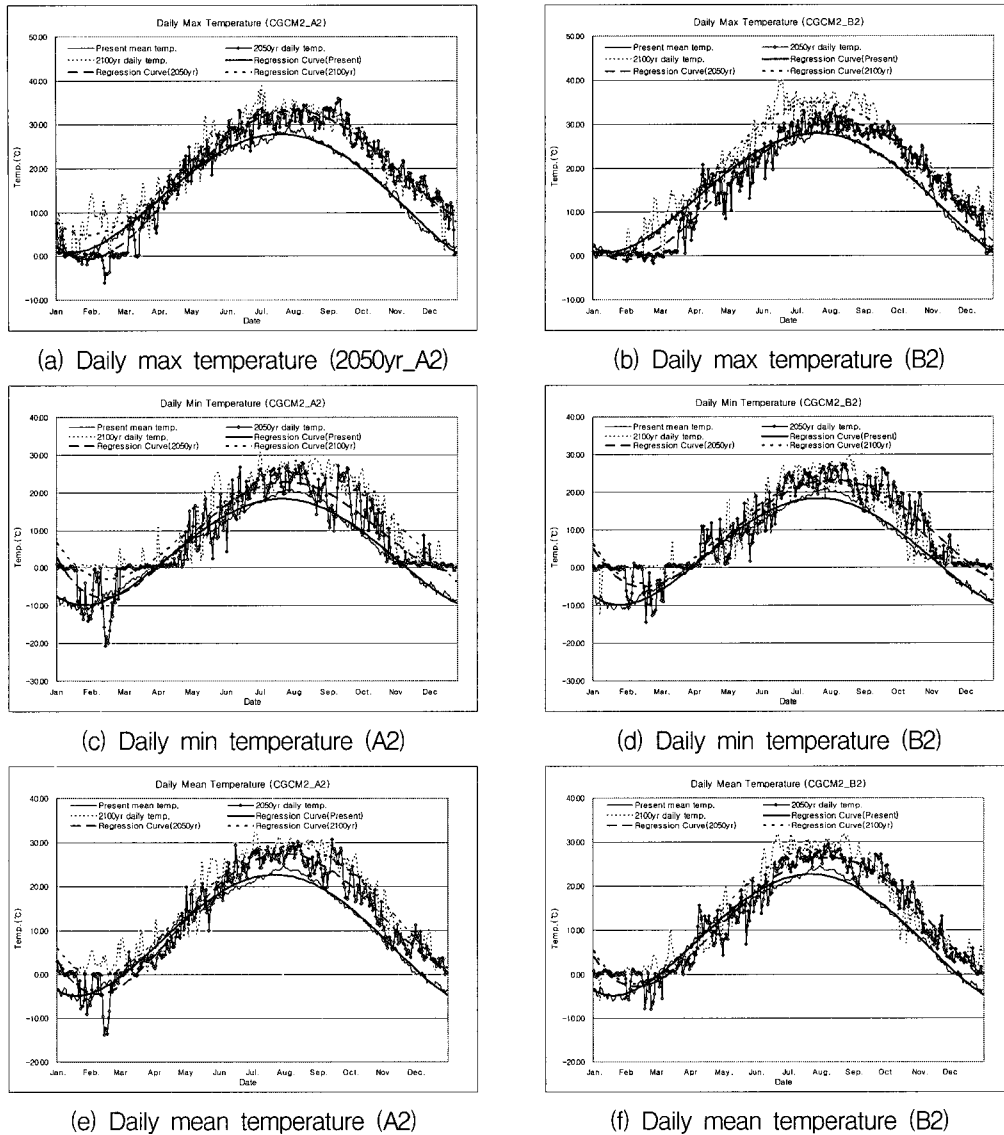


Fig. 5. Meteorological Data Based on SRES A2, B2

Table 1. Summary of Model Calibration and Mean Parameters

No.	Description	Urban	Bare-ground	Grass-land	Forest	Paddy	Upland
1	Initial contents of snow store(mm)	39.8	99.2	66.4	83.1	147.0	92.0
2	Init. contents of slow store (% of max)	29.3	56.1	40.6	56.4	33.5	61.6
3	Maximum infiltration rate (mm/day)	121.9	91.9	66.3	69.3	93.3	118.7
4	Manning roughness, n	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
5	Retention constant for fast store	17.3	24.0	17.3	29.5	17.3	1.0
6	Maximum capacity for fast store(mm)	204.9	224.0	470.0	314.8	238.3	94.0
7	Retention constant for slow store	40,247.7	41,284.3	49,423.3	77,323.3	47,746.7	75,276.7
8	Maximum capacity for slow store(mm)	67,253.3	40,581.7	53,293.3	33,556.7	43,700.0	53,280.0
9	Precipitation factor	1.5	1.0	1.3	1.0	1.3	1.3
10	Rain/snow division temperature (°C)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4.1.2 모형의 검증

각각의 사상들에 대한 매개변수의 평균값들을 통해 2001년 유출량을 모의한 결과는 다음과 같으며 검증기간에 대한 강수에 따른 유출 모의는 그 유량과 경향을 잘 반영하고 있다(Fig. 6).

DEM, 토지피복도, NDVI, 수문기상자료를 이용하여 1998년부터 2001년까지 SLURP 모형을 이용하여 일별 유출량을 모의한 결과는 Table 2와 같다.

4.2 CCCma CGCM2 SRES 기후변화시나리오를 통한 수문분석

4.2.1 기후변화를 통한 유출량분석(2050, 2100yr)

CCCma CGCM2의 대기해양결합모형을 사용하여 SRES 시나리오(A2, B2)에 대한 2050년, 2100년의 일 단위 기상자료를 획득하였다. CGCM2 모의 결과값을 통해 소양강댐유역의 2050년, 2100년 유출량을 모의하

였다(Fig. 7).

CA-Markov 연쇄기법을 사용하여 5년 시간단위의 토지피복도를 사용하여 구축된 2050년, 2100년의 토지피복도와 Landsat TM 위성영상을 이용하여 작성된 2000년 토지이용도를 사용하여 토지이용변화가 현재와 동일하다고 가정하고 분석한 결과를 비교하였다(Table 3).

다원화시나리오로 대변되는 A2 시나리오의 경우, 2050년의 강수량과 2100년의 강수량의 양적 측면에서 매우 많은 변화를 나타내고 있다. 2000년과 비교하여 유출량은 감소되고 있으나 강수일수가 적은 반면 국지성 호우의 양이 증가하는 추세를 보이고 있다. 따라서, 전체에 걸쳐 강수량의 빈도가 일정하지 않으며 현재의 강수상태 경향을 반영하지 못 하고 있다. 그러므로 홍수의 민감도가 미래의 수문조건에서는 현재보다 클 것으로 예상된다.

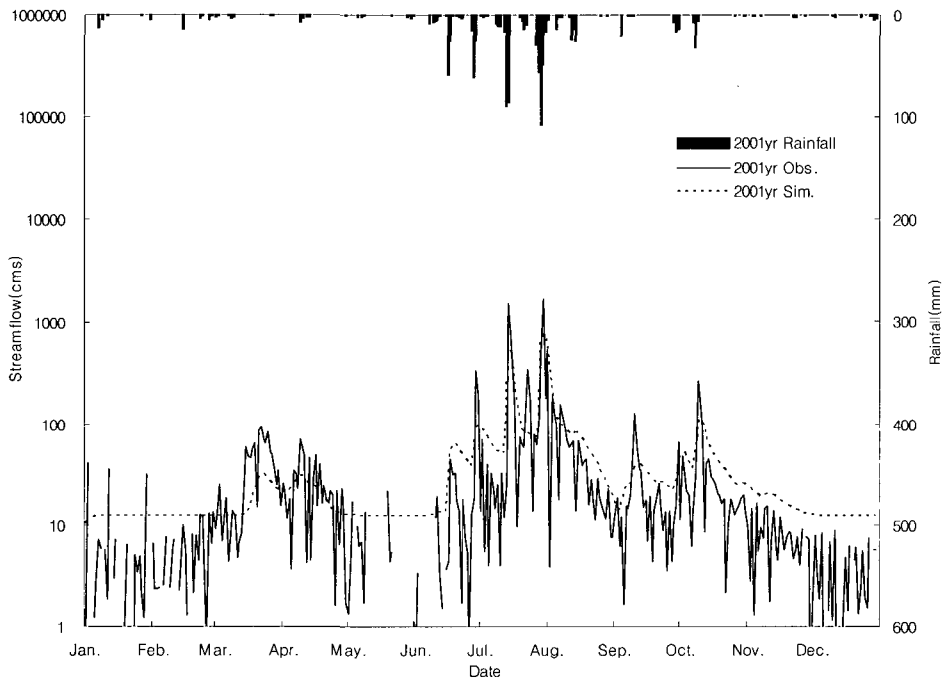
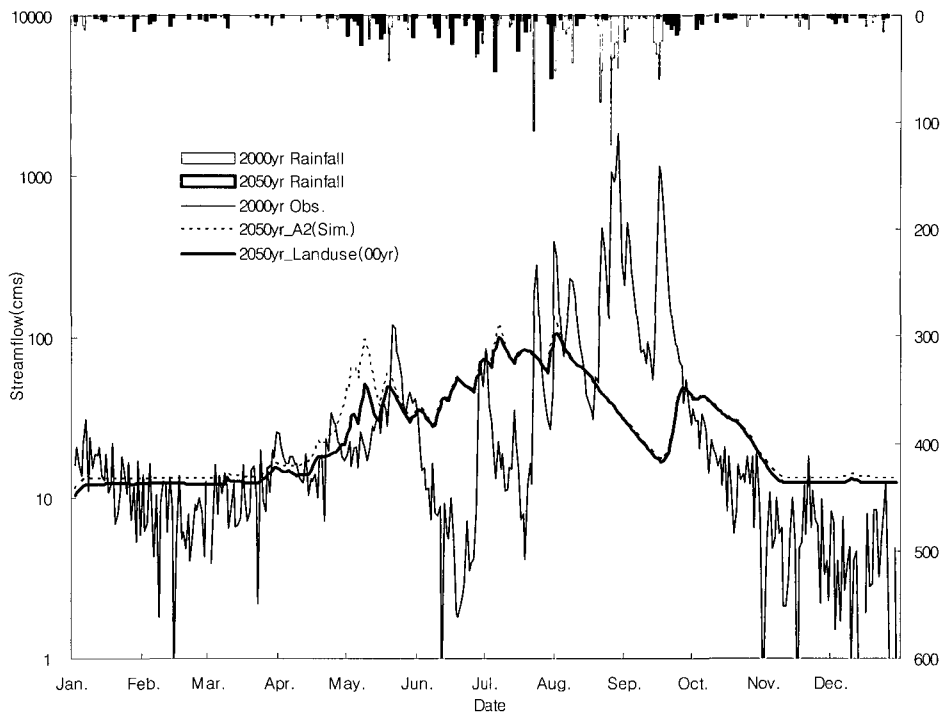


Fig. 6. Comparison Simulated Result with Observed Streamflow in 1998yr (Verification)

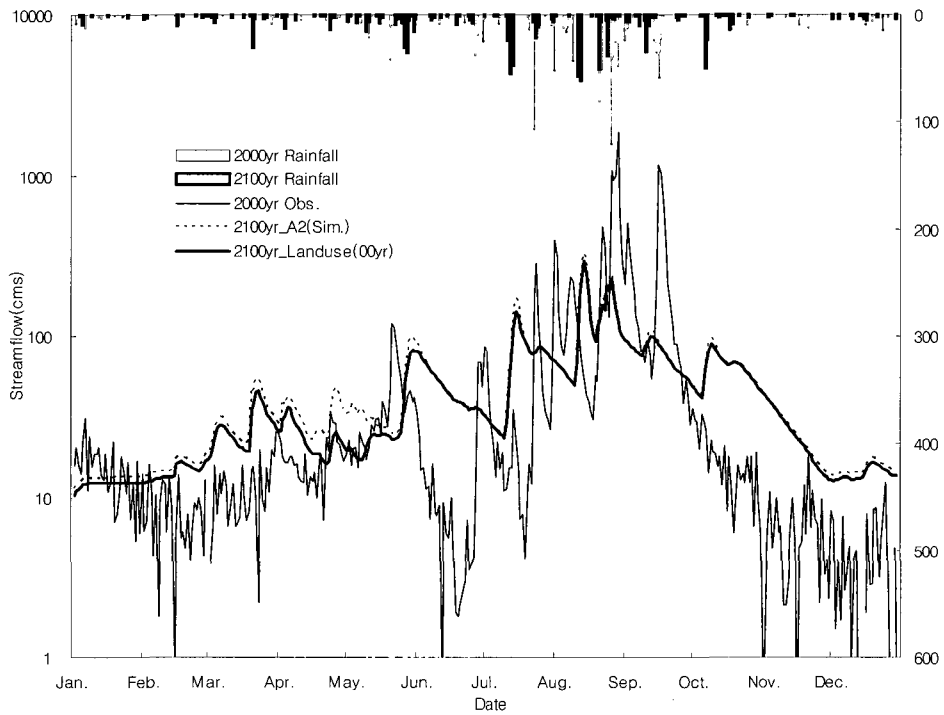
Table 2. Comparison Simulated Results with Observed Discharge

year	Observation		Simulation				Statistical summary				Note
	P(mm)	Q(mm)	P(mm)	Q(mm)	QR(%)	ET(mm)	Relative error (mm)	Coefficient variation	Nash-Sutcliffe	WMO ratio	
2001	1,090.0	537.9	912.0	482.3	44.25	477.5	-1.03	3.56	0.62	-0.10	V
2000	1,282.0	700.0	1,124.0	710.8	55.44	486.6	1.55	2.87	0.77	0.02	C
1999	1,778.0	1,139.0	1,453.0	1,125.0	63.27	420.9	-1.27	4.12	0.61	-0.01	C
1998	1,770.0	1,093.0	1,493.0	1,038.0	58.65	456.2	-5.04	2.02	0.72	-0.05	C

note) P: Precipitation, Q: Streamflow, QR: Ratio of sim. Q/obs. P, V: verification, C: calibration, ET: Evapotranspiration

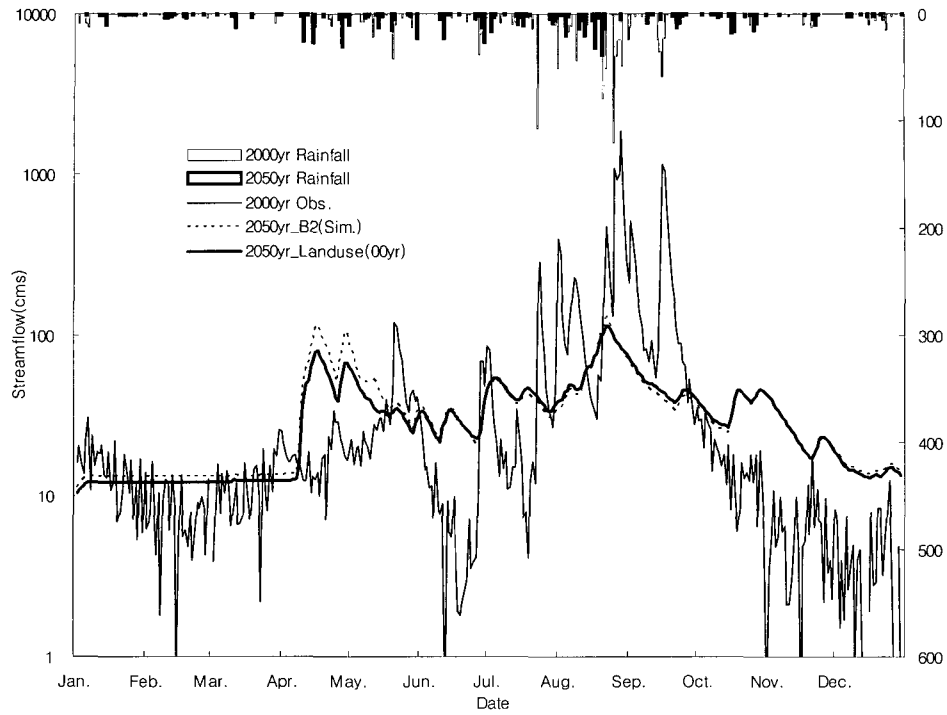


(a) Comparison SRES_A2 simulated result with observed streamflow using 2000yr land cover in 2050yr

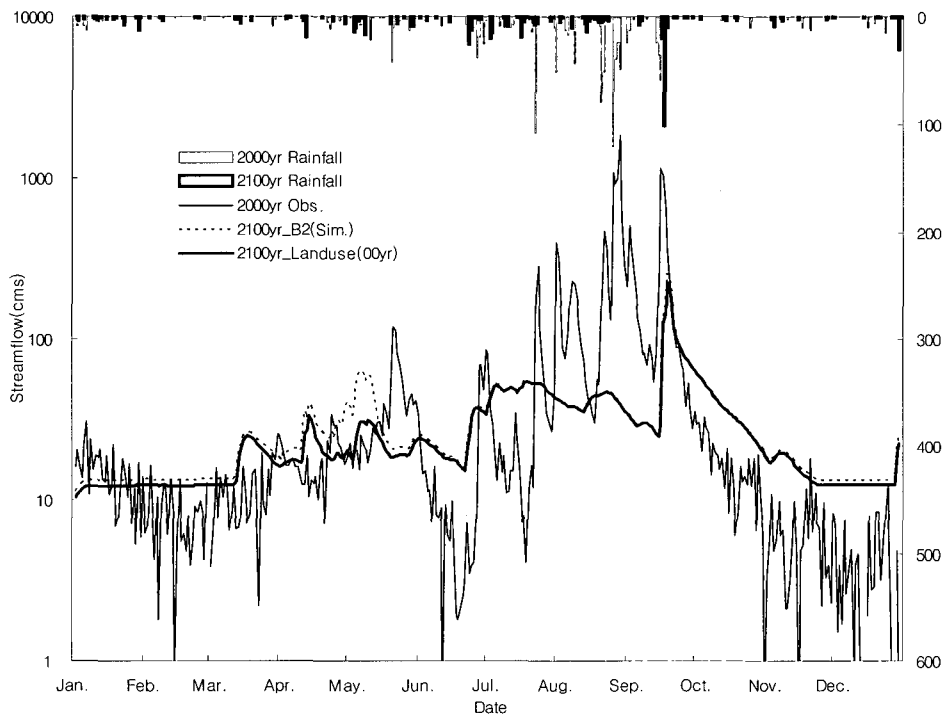


(b) Comparison SRES_A2 simulated result with observed streamflow using 2000yr land cover in 2100yr

Fig. 7. Comparison SRES Simulated Result with Observed Streamflow Using 2000yr Land cover(continued)



(c) Comparison SRES_A2 simulated result with observed streamflow using 2000yr land cover in 2050yr



(d) Comparison SRES_B2 simulated result with observed streamflow using 2000yr landcover in 2100yr

Fig. 7. Comparison SRES Simulated Result with Observed Streamflow Using 2000yr Land cover

Table 3. Comparison Simulated Results with Observed Discharge about SRES

Description		Simulation				
year		P(mm)	Adjusted P(mm)	Q(mm)/ Relative error(%)	QR(%)	ET(mm)
Obs.	2000	1,282.0	1,124.0	700.0	54.60	486.6
A2	2050_C	794.8	671.1	380.4(45.66)	47.91	338.6
	2050_L	794.8	665.0	352.4(49.66)	44.34	311.4
	2100_C	1,159.0	976.8	559.1(20.13)	48.24	335.4
	2100_L	1,159.0	970.7	525.0(25.00)	45.30	306.7
B2	2050_C	904.7	764.7	398.7(43.04)	44.07	382.1
	2050_L	904.7	757.8	383.2(45.26)	42.36	331.3
	2100_C	716.6	642.0	353.8(49.46)	49.37	339.3
	2100_L	716.6	638.0	328.7(53.04)	45.87	310.2

note) P : Precipitation, Q : Runoff, QR : Runoff rate, ET : Evapotranspiration, C : predicted land cover map using CA-Markov, L: simulated using present 2000yr land cover map

지역 공존형 사회 시나리오로 대변되는 B2 시나리오의 경우, 2050년과 2100년의 강수량이 양적 측면에서 감소되는 경향을 나타내고 있다. CA-Markov 연쇄기법과 토지이용이 현재와 동일하다고 가정하였을 때, 2050년과 2100년의 A2, B2 시나리오 모의 결과 CA-Markov 연쇄기법을 통한 2050년, 2100년의 토지이용변화를 고려한 경우가 유출량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 도시화에 따른 불투수면적의 증가에 기인한 것으로 볼 수 있다.

토지이용현황을 고려하지 않은 경우, A2와 B2 시나리오 모두 4월에서 6월 사이의 유출량의 변화가 두드러지게 나타나고 있는데 대상유역이 북동부산악지역에 위치하고 있어 융설의 영향이 반영된 것으로 보여진다. SLURP의 경우 중대규모유역의 융설의 영향을 평가할 수 있게 설계된 수문모형으로 강수를 강우와 강설로 나누어 모의하게 되는데 기후변화에 따라 일 평균기온이 증가함으로써 적설이 융설로 변화하는 시간간격이 짧아지면서 적설 및 융설분포면적이 감소되고 4월에서 6월 사이에 융설의 양이 반영된 것으로 판단된다. 따라서, 도시화로 인한 토지이용변화가 불투수면적을 증가시킴으로써 융설에 의한 유출량이 유역에 저류되지 못하여 현재의 상태보다 4월에서 6월에 융설에 의한 하천유출량이 크게 나타난다고 볼 수 있다.

4.2.2 가상시나리오(기상적측면)에 의한 증발산량 평가

FAO Penman-Monteith 증발산량은 기상요소인 기온, 일사량, 풍속 등에 가장 많은 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 가상시나리오를 통해 2000년의 증발산량과 가상시나리오 모의 결과를 통해 기상요소가 증발산량에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 증발산량에 영향을 주는 인자를 기상요소 국한해서 해석함으로써

향후 기후변화에 따른 증발산량을 변화율을 알아보고자 하였다. 각각의 기상인자 일평균기온(°C), 일조시간(hr), 풍속(m/s)에 대하여 1%, 3%, 5%의 증가율을 통해 증발산량을 모의하였다(Fig. 8). SLURP 수문모형에서는 일조시간을 일조량으로 변화하여 증발산량을 모의하고 있다.

모의 결과 일 평균기온에 가장 민감한 유출의 변화율을 보이고 있다. 각 요소별 유출 및 증발산량의 변화율은 Table 4와 같다.

기상 요소별 유출 및 증발산량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 세 가지 경우에 대하여 분석을 실시하였다. Case_A는 각 기상요소가 2000년도에 비해 1% 증가하였을 경우, Case_B는 3%, Case_C는 5% 증가하였을 경우이다. 2000년의 증발산량에 대비하여 일 평균기온의 경우, 5개의 기상관측소의 연평균 기온인 10.28°C에서 Case_C의 5%의 증가율을 보일 때 전체적인 기온은 16.24°C로 약 6°C정도 증가하였다. 이때의 증발산량의 변화율은 103.35%로 약 두 배가량의 증발산량이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 마찬가지로 Case_A, Case_B가 각각 약 1°C, 3°C정도 상승하였다고 볼 수 있는데 이는 미래의 기상조건이 현재보다 미미한 차이로 상승하여도 거기에서 유발되는 생태적인 변화는 상당히 크다는 것을 나타내고 있다.

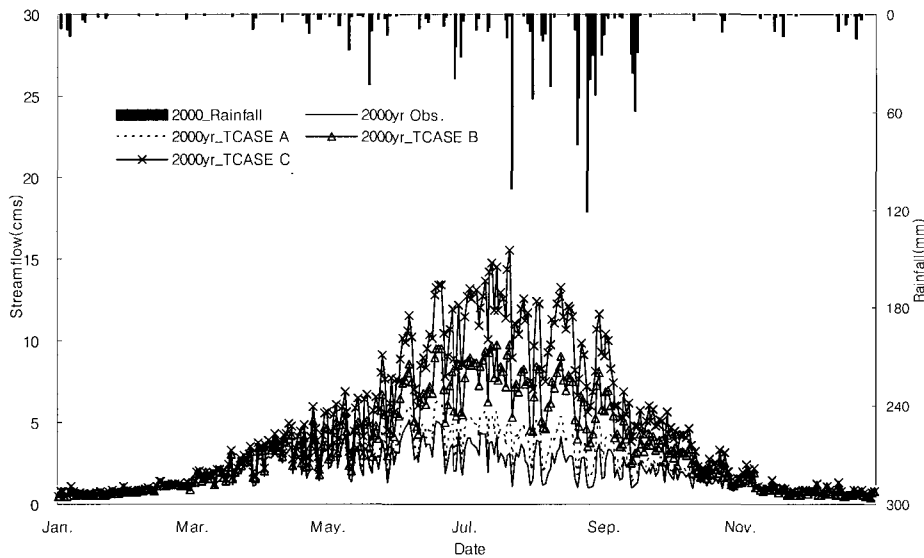
그러나 FAO Penman-Monteith 증발산량의 평가결과, 기온을 제외한 기타 기상인자(일조시간, 풍속)는 현재보다 오히려 증발산량이 감소되는 결과를 나타내고 있으나 일조시간에 대해서는 변화율이 증가할수록 미미한 증발산량의 증가를 보이고 있다. 또한, 증발산량이 감소하였음에도 불구하고 유역의 총 유출량은 풍속에 대해서는 뚜렷한 경향을 보이지 않는데 이는 FAO Penman-Monteith 증발산량의 산정식이 기온, 일사량,

풍속에 가장 많은 영향을 받으나, 기온을 제외한 인자들의 경우 그 영향은 미미하며 특히, 풍속 인자는 이슬점과 평균기온의 포화수증기압을 결정하는 인자로서 기온과 일사량이 일정하다면 풍속에 대한 수증기압의 차는 적정선에서 수렴된다고 보여진다.

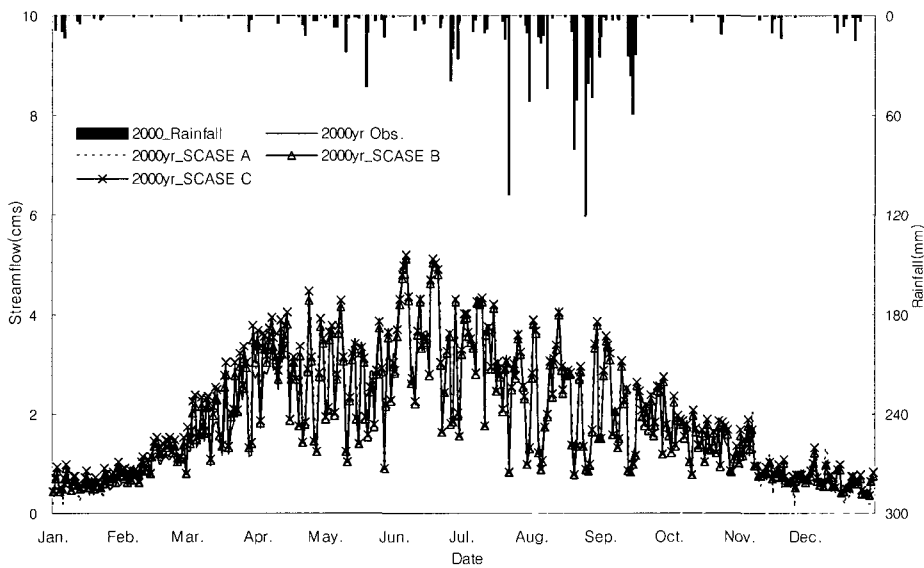
5. 요약 및 결론

본 연구는 CCCma CGCM2 대기-해양결합모형을 통하여 IPCC SRES 시나리오 A2, B2별 일별 2050년, 2100년 기후를 모의하여 수문모형에 적용함으로써 기후

변화가 수문영향에 미치는 영향을 분석하였다. 토지이용변화에 따른 수문영향을 고려하여 CA-Markov 기법을 사용하여 2050년, 2100년 토지피복도를 모의하였으며, 식생의 영향을 분석하기 위해 1998년부터 2002년의 5개년의 월 NDVI를 사용하여 기온-NDVI 상관관계를 도출하여 CGCM2에서 모의된 월평균기온으로 2050년, 2100년의 NDVI를 추정하였다. 또한, FAO Penman-Monteith 증발산량 산정방법을 이용하여 기상적측면(기온, 일사량, 풍속)의 영향인자를 사용하여 가상시나리오를 작성하여 증발산량 평가를 수행하였다.

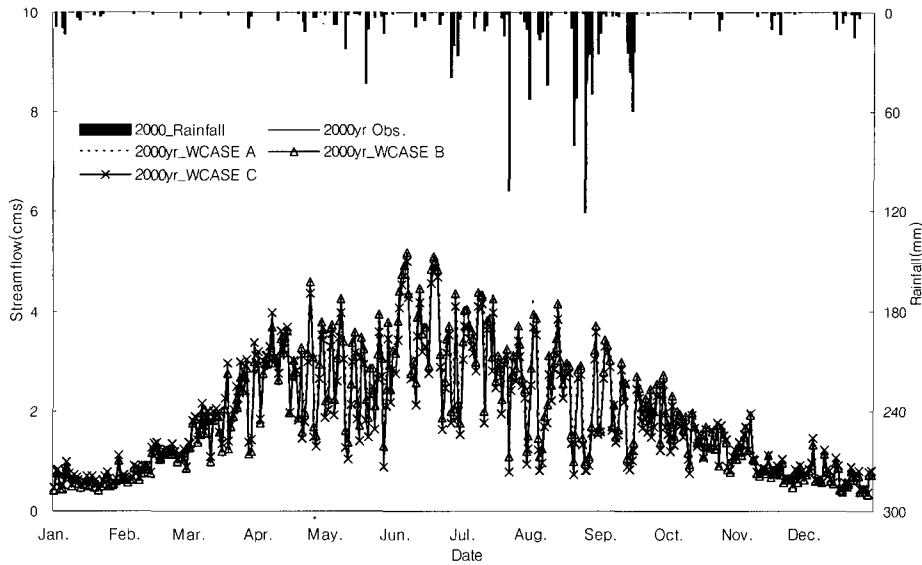


(a) Comparison mean temperature scenarios simulated results with observed evapotranspiration



(b) Comparison sun hour scenarios simulated results with observed evapotranspiration

Fig. 8. Results of Simulated Evapotranspiration Scenarios Using FAO Penman-Monteith(continued)



(c) Comparison wind speed scenarios simulated results with observed evapotranspiration

Fig. 8. Results of Simulated Evapotranspiration Scenarios Using FAO Penman-Monteith

Table 4. Summary of Simulated Evapotranspiration Scenarios

Description		Rainfall	Runoff	Evapotranspiration	Statistical summary			
		Obs./Sim. (mm)	Obs./Sim. (mm)	ET(mm)	Relative error (mm)	Coefficient variation	Nash-Sutcliffe	WMO ratio
Base	2000yr	1,282.0/ 1,124.0	700.0/ 710.8	486.6	1.55	2.87	0.77	0.02
Temp. (°C)	TCASE_A	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 585.6	553.0 (13.65)	-1.63	2.87	0.66	-0.16
	TCASE_B	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 492.5	767.5 (57.73)	-2.96	2.87	0.54	-0.30
	TCASE_C	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 411.3	989.5 (103.35)	-4.12	2.87	0.39	-0.41
Sun (hr)	SCASE_A	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 636.2	442.1 (-9.15)	-9.12	2.87	0.69	-0.09
	SCASE_B	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 631.7	460.3 (-5.40)	-9.75	2.87	0.69	-0.10
	SCASE_C	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 628.4	469.6 (-3.49)	-1.02	2.87	0.69	-0.10
Wind (m/s)	WCASE_A	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 614.8	481.2 (-1.11)	-1.22	2.87	0.68	-0.12
	WCASE_B	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 614.0	484.9 (-0.35)	-1.22	2.87	0.68	-0.12
	WCASE_C	1,282.0/ 1,073.0	700.0/ 636.5	452.6 (-6.99)	-9.07	2.87	0.69	-0.09

본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 소양강댐유역의 기후변화에 따른 유출의 영향을 평가하고자 SRES A2, B2 시나리오별 강수량, 일 평균기온, 일 최고기온, 일 최저기온, 일사량, 풍속, 상대습도의 수문기상인자를 CGCM2를 이용하여 2050년, 2100년을 모의하였으며, 그 결과 강

수량에 관하여 2050년과 2100년의 강수패턴에 대한 일정한 경향을 발견할 수 없었다. 그러나, 기온은 현재의 기상상태보다 전반적으로 4~5°C가량 상승하였으며 특히 기온의 패턴의 변화가 현재보다 봄, 가을이 시기적으로 빠르게 변화함을 나타내었다.

2. Landsat TM 위성영상을 이용한 1985년부터 2000년의 토지피복도를 사용하여 CA-Markov 연쇄기법을 통한 토지이용변화 분석을 실시하여 2000년의 토지이용상태를 검증한 결과, 추이변화의 경향을 잘 나타내고 있으나 가장 큰 표본의 거리에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 2050년, 2100년의 토지이용변화는 일정시간의 경과됨에 따라 추이변화는 수렴되었으며 도시화에 따른 산림의 감소(-328.16km²/13.3%/2050년, -32.844km²/13.3%/2100년), 시가지(+35.36km²/232.3%/2050년, +35.87km²/235.7%/2100년), 나지(+13.00km²/152.0%/2050년, +13.00km²/15.0%/2100년), 초지(32.87km²/239.8%/2050년, 31.90km²/232.7%/2100년)의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 논과 밭의 경우, 추이변화는 187%, 218%로 상당히 크게 증가함을 볼 수 있는데 이는 논과 밭의 분포가 수계와 산림에 인접하는 공간 특성을 가짐으로 보인다.
3. SLURP 수문모형을 이용한 소양강댐유역의 1998년부터 2001년의 일유출 모의를 실시한 결과, 유출의 경향이 관측치를 잘 재현함을 확인하였다. A2, B2 시나리오의 모의 결과에 따른 유출의 변화는 A2 시나리오의 경우 -45.66%(2050년), -20.13%(2100년), B2의 경우 -43.04%(2050년), -49.26%(2100년)으로 현재의 수문조건보다 약 50%가량 유출이 줄어들음을 확인하였다.
4. FAO Penman-Monteith 증발산량 산정기법을 통해 기온, 일사량, 풍속에 대해 증발산량을 평가한 결과, 기온에 대한 민감도가 가장 큼을 확인할 수 있었으며 풍속의 경우 기온과 일사량이 일정하다면 적정선에서 수렴되는 결과를 나타내었다.

기후변화에 따른 수자원의 영향평가는 수문기상인자를 모의하는 GCMs의 종류와 통계적, 역학적 축소기법에 따라 결과치가 좌우된다. 따라서, 국지적인 유역단위의 신뢰성있는 자료를 확보하기 위한 GCMs과 수문모형의 연계에 따른 공간해상도의 수준이 향상되어야 한다.

장기적인 수자원의 계획을 위해서는 본 연구에서 나타난 미래기후조건 및 토지이용의 변화에 따른 유출의 변동폭이 현재보다 상당히 큰 폭으로 나타날 것이라 예상되므로 수문환경의 전반적인 변화에 따른 유출영향의 평가가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-9-2)에 의해 수행되었습니다. DEM 및 토지피복

도는 한국수자원공사의 지원을 받아 수행된 한강 유역 조사 과업의 결과물이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). “기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제2호, pp. 185-193.
- 안재현, 유철상, 윤용남 (2001). “GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권 제3호, pp. 335-345.
- 오성남, 하경자, 김기영, 김정우. (1998). “배중 이산화탄소 기후에 따른 동북아시아 지역의 수문 영향”, **한국기후학회지**, 한국기후학회, 제34권 제2호, pp. 293-305.
- 한국과학기술연구원. (1995). 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경 관련 대책 연구, 과학기술처.
- 한국환경정책·평가연구원 (2004). 기후변화영향평가모형 개발: 물관리 부문을 중심으로. RE-10.
- Chiew, F. H. S. and McMahon, T. A. (1993). “Detection of trend or change in annual flow of Australian rivers.”, *International Journal of Climatology*, Vol. 13, pp. 643-653.
- Duan, Q., Sorooshian, S.S., and Gupta, V.K. (1994). “Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 265-284.
- IPCC. (1990). *Climate change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Kite, G. W., Dalton, A., and Dion, K. (1994). “Simulation of streamflow in a macroscale watershed using general circulation model data.”, *Water Resources Research*, Vol. 30(5), pp. 1547-1559.
- Kuhl, S. C. and Miller, J. R. (1992). “Seasonal river runoff calculated from a global atmospheric model.”, *Water Resources Research*, Vol. 28(8), pp. 2029-2039.
- Lins, H. F. (1994). “Increasing U. S. streamflow linked to greenhouse forcing”, *EOS*, Vol. 75(25), June 21.
- Nash J. E. and Sutcliffe J. V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles”, *Journal of Hydrology*, Vol. 10(1), pp. 283-29.

(논문번호:05-151/접수:2005.11.30/심사완료:2006.04.14)