

기후변화가 경안천 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가

Assessing Future Climate Change Impact on Hydrologic Components of Gyeongancheon Watershed

안 소 라* / 박 민 지** / 박 근 애*** / 김 성 준****
Ahn, So Ra / Park, Min Ji / Park, Geun Ae / Kim, Seong Joon

Abstract

The impact on hydrologic components considering future potential climate, land use change and vegetation cover information was assessed using SLURP (Semi-distributed Land-Use Runoff Process) continuous hydrologic model. The model was calibrated (1999 - 2000) and validated (2001 - 2002) for the upstream watershed (260.4 km²) of Gyeongancheon water level gauging station with the coefficient of determination and Nash-Sutcliffe efficiency ranging from 0.77 to 0.60 and 0.79 to 0.60, respectively. Two GCMs (MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM) future weather data of high (A2), middle (A1B) and low (B1) emission scenarios of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) were adopted and the data was corrected by 20C3M (20th Century Climate Coupled Model) and downscaled by Change Factor (CF) method using 30 years (1977 - 2006, baseline period) weather data. Three periods data of 2010 - 2039 (2020s), 2040 - 2069 (2050s), 2070 - 2099 (2080s) were prepared. To reduce the uncertainty of land surface conditions, future land use and vegetation canopy prediction were tried by CA-Markov technique and NOAA NDVI-Temperature relationship respectively. MIROC3.2 hires and ECHAM5-OM showed increase tendency in annual streamflow up to 21.4 % for 2080 A1B and 8.9 % for 2050 A1B scenario respectively. The portion of future predicted ET about precipitation increased up to 3 % in MIROC3.2 hires and 16 % in ECHAM5-OM respectively. The future soil moisture content slightly increased compared to 2002 soil moisture.

keywords : SLURP, Land Use Change, Climate Change, GCMs, Downscaling, Hydrologic components

요 지

본 연구에서는 SLURP 장기 수문모형을 이용하여 미래기후와 예측된 토지이용자료 및 식생의 활력도를 고려한 상태에서 하천유역의 수문요소에 미치는 영향을 분석하였다. 경안천 상류유역(260.4 km²)을 대상유역으로 선정하여 4개년(1999-2002) 동안의 일별 유출량 자료를 바탕으로 모형의 보정(1999-2000)과 검증(2001-2002)을 실시하였다. 모형의 보정 및 검증 결과 Nash-Sutcliffe 모형효율은 0.79에서 0.60의 범위로 R^2 는 0.77에서 0.60의 범위로 나타났다.

* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
** 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사수료
Ph. D Candidate, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
*** 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사
Post Doctor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
**** 교신저자, 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수
Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
(e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr)

미래 기후자료는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제공하는 A2, A1B, B1 기후변화시나리오의 MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM 모델의 결과 값을 이용하였다. 먼저 과거 30년 기후자료(1977-2006, baseline)를 바탕으로 각 모델별 20C3M(20th Century Climate Coupled Model)의 모의 결과 값을 이용하여 강수와 온도를 보정한 뒤 Change Factor Method로 downscaling 하였다. 미래 기후자료는 2020s(2010-2039), 2050s(2040-2069), 2080s(2070-2099)의 세 기간으로 나누어 분석하였다. 불확실성을 줄이고자 개선된 CA-Markov기법으로 미래 토지이용을 예측하였으며, 월별 NDVI와 월평균기온간의 선형 회귀식을 도출하여 미래의 식생지수 정보를 추정하였다. 모형의 적용결과, 미래 유출량은 MIROC3.2 hires는 A1B(2080s) 시나리오에서 연 유출량이 21.4% 증가, ECHAM5-OM은 A1B(2050s) 시나리오에서 8.9% 증가하였다. 증발산량은 MIROC3.2 hires가 3%, ECHAM5-OM은 16% 증가하였다. 미래 토양수분량은 현재에 비해 약 1% 정도 증가하였다.

핵심용어 : SLURP, 토지이용변화, 기후변화, GCMs, 축소기법, 수문요소

1. 서론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서에 의하면 현재 지구온난화가 발생하고 있는 것은 자명한 사실이며 기후변화는 자연적 요인이 아닌 인간 활동에 인한 것이라고 지목하였으며 급세기에는 심각한 기후변화를 겪게 될 것이라고 발표하였다(IPCC, 2001). 지구온난화로 인하여 지난 100년(1906~2005) 동안 지구의 평균기온은 약 0.74°C 상승하였으며, 이러한 추세는 1990년 이후 더욱 급격해지고 있다(IPCC, 2007). 우리나라는 지난 20세기에 평균 기온이 약 1.5°C 상승한 것으로 나타나 온난화 추세는 전 지구적인 온난화 추세를 상회하고 있음을 알 수 있다(기상연구소, 2004). 또한 1990년 이후 대부분의 지역에서 강수량이 장기적인 추세가 보고되고 있으며 북부 및 중앙아시아에서 강수량의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다(IPCC, 2007). 우리나라는 최근 강수일수의 감소와 강수량 및 집중호우의 증가추세가 보고되고 있다(기상연구소, 2004). 이러한 지구온난화에 의한 미래 기온의 상승과 강수량의 패턴변화는 증발산이나 토양수분 등의 변화로 이어져 궁극적으로는 물순환의 변화를 초래하며 유출량 변화로 이어지게 된다(안재현 등, 2001a; 유철상과 이동률, 2000). 이처럼 가속화 되고 있는 기후변화와 더불어 나타나게 될 수문 순환의 변화는 우선적으로 해결되어야 하는 중요한 문제일 것이다. 심각해지고 있는 수자원 문제에 대해 원활하고 효과적으로 수자원을 활용하기 위해서는 기후변화에 의한 수문환경의 변화에 대한 정확한 파악이 필수적이라고 할 수 있다.

기후변화로 인한 수자원의 영향을 분석하는 방법으로는 크게 과거 관측 자료를 이용해 변화 경향을 분석하는 방법, 기후모형을 이용하는 방법, 그리고 기후모형과 결정론적 수문모형을 이용하는 방법으로 나눌 수 있

다. 관측 자료를 이용하는 방법은 주로 기후변화의 징후나 증거 분석에 이용되는 방법으로 과거의 실제 현상을 통해 기후변화의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있으나, 관측치만으로 불확실성이 큰 미래 기후변화에 대한 영향을 분석하기에는 한계가 있다. 기후모형만을 이용하는 방법은 기후모형의 결과를 이용하여 비교적 쉽게 미래의 변동성을 평가할 수 있는 장점이 있으나 공간해상도 문제와 복잡한 지역차원의 수자원 변동성 분석에는 한계가 있다. 따라서 대부분의 연구에서는 기후모형에서 생산되는 기후자료를 수문모형에 입력하여 수자원의 영향을 평가하는 방법을 사용하고 있다(배덕효와 정일원, 2005). 하지만 유역규모의 기후변화에 대한 영향을 연구하는데 있어서 저해상도의 기후모형은 기후변화의 지역적인 결과를 평가하기에는 어려우며(Snell *et al.*, 2000), 또한 수문모형을 이용하여 수자원의 변화를 예측하기 위해서는 고해상도 강수 예측 자료가 필요하다. 따라서 저해상도의 기후모형의 한계를 극복하여 기후변화에 의한 영향을 잘 묘사하기 위해서는 유역스케일의 고해상도 자료 생성을 위한 축소기법(downscaling)이 필수적으로 수행되어야 한다(Zhang *et al.*, 2007).

이에 관한 대표적인 연구로 국외의 경우 Sefton and Boorman(1997)은 2CO₂ 배증상황에서 GCM모의 결과를 IHACRES 모형에 적용하여 영국의 39개 유역에 대해 유출을 분석한 결과 영국의 중부와 동부지역이 유출 감소로 인한 가뭄피해가 증가할 것으로 모의되었다. Andersson *et al.*(2006)은 4개의 GCM과 Pitman 수문모형을 이용하여 Okavango 강 유역에서 기후변화 시나리오의 영향을 평가하였는데 월평균 유출감소의 영향이 연평균 유출감소보다 훨씬 더 크게 작용할 것이라고 분석하였다. Merritt *et al.*(2006)은 3개 GCM의 A2, B2 시나리오 결과 값을 UBC 유역모형에 적용하여

Okanagan 지역의 기후변화 영향을 분석한 결과 봄 용설의 이른 시작과 유출량의 감소를 예측하였다. Zhang *et al.* (2007)은 HadCM3와 CGCM2의 A2, B2 시나리오 결과 값을 SWAT 모형에 적용하여 Luohe 강 지역에서 기후변화로 인한 유출의 영향을 평가한 결과 2050년에는 10%의 평균유출증가와 봄에 60%의 유출증가를 예측하였다. 국내에서도 기후변화가 수자원에 미치는 영향에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 안재현 등(2001)은 기후변화가 수문환경에 미치는 영향 분석을 목적으로 CO₂ 증가 시나리오에 따른 GCM 모의 결과를 이용하여 대청댐 지역의 유출량 변화를 각각 NWS-PC모형과 물수지 모형을 이용하여 분석하였으며, 김병식 등(2004)은 YONU GCM모의 결과 값을 이용하여 통계학적 축소기법으로 상세화한 뒤 2CO₂ 배증 상황에서 SLURP 모형에 적용하여 용담댐 지역의 유출량을 모의하였다. 안소라 등(2008)은 CCCma CGCM2 모의 결과 값을 이용하여 Stochastic Spatio-Temporal Random Cascade Model(SSR-RCM) 기법을 적용하여 downscaling 한 뒤 SLURP 모형에 적용하여 경안천 상류지역의 유출변화를 분석한 바 있다.

본 연구의 목적은 기후변화에 의한 하천유역의 수문 요소에 대한 영향을 평가하는데 있다. 불확실성을 줄이기 위한 방안으로 미래 토지이용과 식생의 변화를 고려하기 위해 과거 시계열 Landsat TM, ETM⁺ 위성영상을 이용하여 개선된 CA(Cellular Automata)-Markov 기법으로 미래 토지이용을 예측하였으며, NOAA/AVHRR 위성영상을 이용하여 구축한 월별 NDVI와 월 평균 기온과 선형 회귀식을 이용하여 미래 식생정보를 예측하였다. 또한 오차보정과 CF(Change Factor) method를 이용한 simple downscaling 기법을 제시하고 GCMs(MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM) 모의 결과 값과 SLURP 수문모형을 연계하여 기후변화에 의해 영향을 받게 되는 유출 및 증발산량, 지하수 함양에 미치는 영향을 평가하였다.

2. GCMs(General Circulation Models)과 기후변화 시나리오

기후변화의 영향을 예측하고 평가하기 위해서는 영향 예측의 목적에 적합한 모형을 구축하고, 적절한 방법으로 장래의 기후시나리오를 설계하여 기후변화에 따른 영향평가를 실시하게 된다. GCM은 기후시나리오 작성 시 가장 중요한 정보를 제공하며 가장 광범위하게 적용되고 있다. 지구의 기후를 연구하기 위하여 1970년대 중반을 전후하여 개발되기 시작한 GCM은 대기의 3차원 운동을 유체역학적, 열역학적으로 모의하는 순환

모형으로 대기, 해양, 해빙, 지표면 뿐 만 아니라 에어로졸, 탄소순환, 대기 화학과정 등 거의 거의 대부분의 기후 시스템 요소를 포함하는 총체적 모형이다.

기후변화 시나리오는 IPCC의 배출 시나리오에 대한 특별 보고서(SRES)에 기초하여 미래 기후변화 시나리오 생산이 이루어지고 있다. SRES는 인구, 기술 경제발전 등 미래 배출문제의 원동력이 되는 요소들을 광범위하게 다루며 크게 4개 그룹(A1, A2, B1, B2)의 배출 시나리오를 제시한다(Table 1). 이 중에서 A1 시나리오는 D, G, B, T로 나누어지며 각각 밸런스형, 석탄주도형, 가스 주도형, 고효율 에너지 기술 주도형을 뜻한다. A2 시나리오는 혼합세계를 설정하고 인구의 지속적인 증가를 가정하여 2100년에는 CO₂가 830ppm에 도달할 것을 예상하고 있다. 최근 IPCC AR4에서 제시하고 있는 시나리오인 A1B 시나리오는 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오로 그 적용 사례가 늘고 있으며 2100년까지 CO₂가 720ppm에 도달할 것으로 예상하며 에너지 공급원이 균형을 이루게 된다. B1 시나리오는 경제, 사회, 환경 분야의 지속가능성에 대한 전지구적 해결을 강조하고 있는 시나리오로 2100년에 CO₂는 550ppm 정도로 예상된다. Table 1에서 A-B축은 경제지향인가, 환경지향인가를 나타내고 1-2축은 지구주의지향인가, 지역주의지향인가를 나타내고 있다. 하지만 SRES 배출 시나리오 역시 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상당한 불확실성이 포함될 수밖에 없다(IPCC-TGCLIA, 1999). 따라서 미래 특정 시점의 기후를 정확하게 예측하는 것보다는 미래에 발생 가능한 확률빈도의 형태를 재구성 해내는 것에 초점을 맞춰야 할 것이다.

현재 IPCC의 정보분배센터(Data Distribution Center)에서는 기후변화에 의한 일관된 영향연구를 위해 SRES 시나리오에 의한 수개의 GCM 결과들을 제공하고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 시나리오에 (A2, A1B, B2) 대한 GCM 결과 값을 이용하여 서로 비교분석 하고자 한다.

3. SLURP 모형의 개요

SLURP 모형은 크고 복잡한 모형의 대안으로서 캐나다의 중·대규모유역에 사용하기 위하여 처음 Simple LUmped Reservoir Parametric (Kite, 1975)으로 개발되었으며 이후 Semi-distributed Land-Use Runoff Process model (Kite, 1998)로 발전되었다. SLURP 모형은 준 분포형 모형의 형태를 띠고 있지만 분포형 모형에 사용가능한 개념적 모형이다. 이는 집중형 모형과 같이 모의에 필요한 물리적 현상을 단순하게 통합하며

Table. 1. SRES(Special Report on Emission Scenario) scenarios (IPCC, 2001)

| Driver | A1 | | | | A2 | B1 | B2 |
|---|------------|------------|-----------|-----------|-------------|--------|--------|
| | A1C | A1G | A1B | A1T | | | |
| Population Growth | Low | Low | Low | Low | High | Low | Medium |
| GDP Growth | Very High | Very High | Very High | Very High | Medium | High | Medium |
| Energy Use | Very High | Very High | Very High | Very High | High | Low | Medium |
| Land-Use Changes | Low-Medium | Low-Medium | Low | Low | Medium-High | High | Medium |
| Availability of Conventional and Unconventional Oil and Gas | High | High | Medium | Medium | Low | Low | Medium |
| Pace of Technological Change | Rapid | Rapid | Rapid | Rapid | Slow | Medium | Medium |

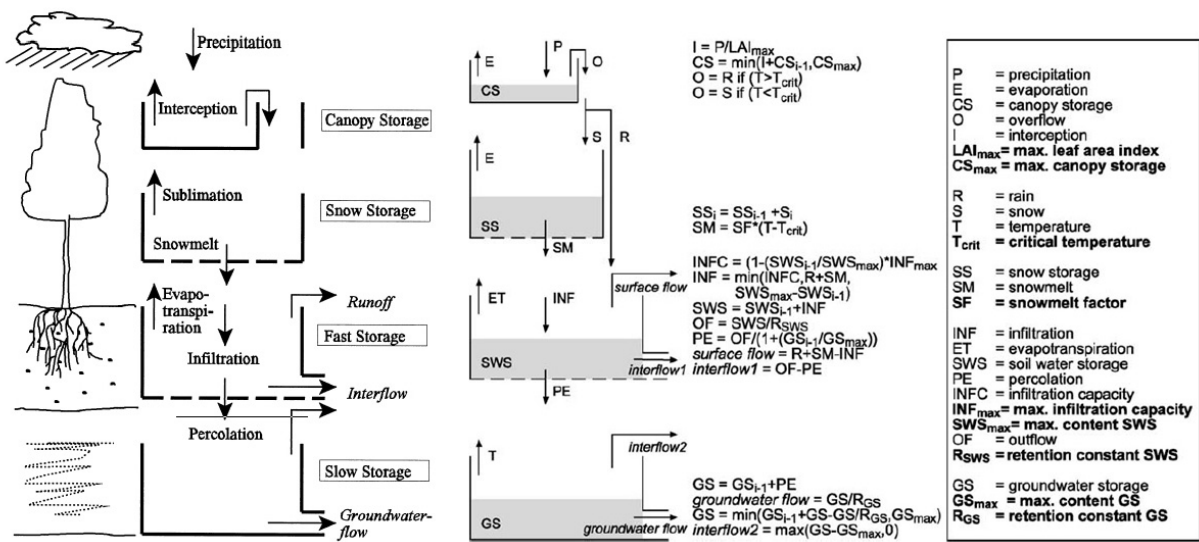


Fig. 1. Vertical Water Balance of the SLURP Model

분포형 모형을 사용하였을 때 오는 자료의 손실과 초과에 대한 유역특성을 모의할 수 있는 물리적 해석 모형으로 중규모 또는 대단위 유역의 일별 유출량해석에 있어서 연직방향물수지 연구에 적합하다. 특히 기후변화 시나리오와 연계하여 산악지역에 적용하기 위하여 RS, GIS 자료를 최대한 활용할 수 있게 설계되었다(Kite, 1993).

SLURP 모형은 토지피복별로 세분화되는 ASAs (Aggregated Simulation Areas) 공간 단위로부터 일단위 강우-유출을 수문해석하며, 모형의 유출모의는 각각의 토지피복별 격자매트릭스와 ASAs 소유역에 대한 연직방향 물수지 해석에 의하여 이루어지며, 이는 수관저류, 강설초기저류, 급속저류(지표면저류, 토양층저류 등), 완속저류(지표하저류 등)의 네 가지 수직구조로 구성된다(Kite et al., 1996) (Fig. 1).

4. SLURP 모형의 적용

4.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 경안천(561.1 km²)의 경안수위 관측소를 기준으로 한 상류유역(260.4 km²)으로 팔당호의 유입하천이며(Fig. 2), 지난 20여년간 도시화에 의해 산림과 농경지가 감소하는 등 토지이용의 변화가 꾸준히 진전된 유역이다. 본 유역은 전체면적의 60% 이상이 산림으로 이루어져 있으며 논이 10%, 밭이 13%를 차지하고 나머지 도시와 초지, 나지 등은 5%~7% 정도를 차지한다. 토양특성은 사토 8%, 사양토 40%, 미사식양토 8%, 식양토 45%로 이루어져 있다. 과거 30년 평균 강수량은 1371.1 mm이고 연평균 기온은 10.9°C, 연평균 상대습도는 72%, 연평균 증발량은 465.6 mm로 우리나라의 평균적인 기후 특성을 나타내고 있다. 평균고도와 경사는 각각 115 m, 23°이다.

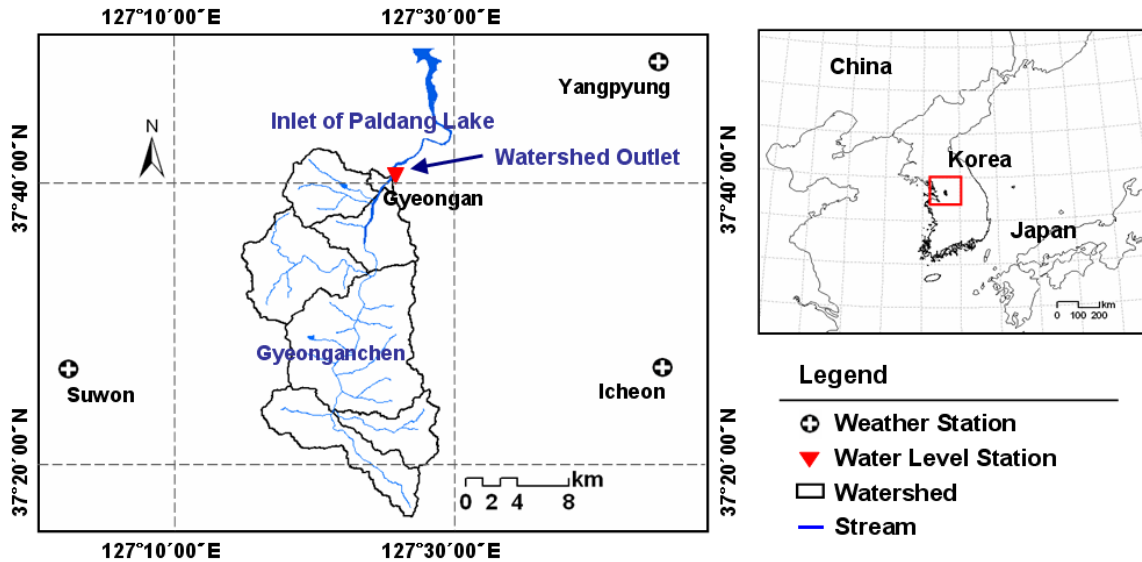


Fig. 2. The Study Watershed

4.2 GIS/RS 자료 및 수문기상자료

본 연구에서는 1:5,000 NGIS(National Geographic Information System) 수치지도를 사용하여 해상도 30 m × 30 m의 DEM(Digital Elevation Model)을 구축하였다(Fig. 3(a)). 대상유역의 유역경계와 하천망은 Garbrecht and Martz(1997)이 개발한 TOPAZ(TOPographic PARameterIZtion) 프로그램을 사용하여 생성하였다(Fig. 3(b)). 토지이용도는 Landsat TM, ETM+ 위성영상을 사용하여 5장(1987년, 1991년, 1996년, 2000년, 2004년)의 시계열 토지이용도를 7개의 항목(수역, 산림, 도시, 초지, 나지, 논, 밭)으로 최대우도 감독분류(Maximum Likelihood Supervised Classification)하여 작성하였으며 1987년, 1991년, 1996년, 2000년, 2004년 토지피복도의 분류정확도는 각각 92.1%,

97.5%, 93.4%, 95.7%, 98.0%로 분석되었다.

토양특성 입력을 위해 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도(Fig. 3(c) and 3(d))를 이용하여 유역 내 총 19개의 토양통에 대한 4가지 토양종류(사토, 사양토, 미사식양토, 식양토)로부터 토지피복별 토양수분함유량, 시들음점, 공극률과 같은 토양의 물리적 매개변수를 추출하였다(Table 2).

본 연구에서 사용되는 기상자료는 기상청에서 제공하는 수원, 이천, 양평 기상관측소의 강수량(mm), 평균온도(°C), 최저온도(°C), 최고온도(°C), 풍속(m/s), 상대습도(%), 일조시간(hr)에 대한 과거 30년(1977-2006) 자료를 이용하였으며, 한강홍수통제소에서 제공하는 경안수위관측소의 4개년(1999-2002) 동안의 유출량 자료를 이용하여 모형의 보정(1999-2000)과 검증(2001-2002)에 사용하였다.

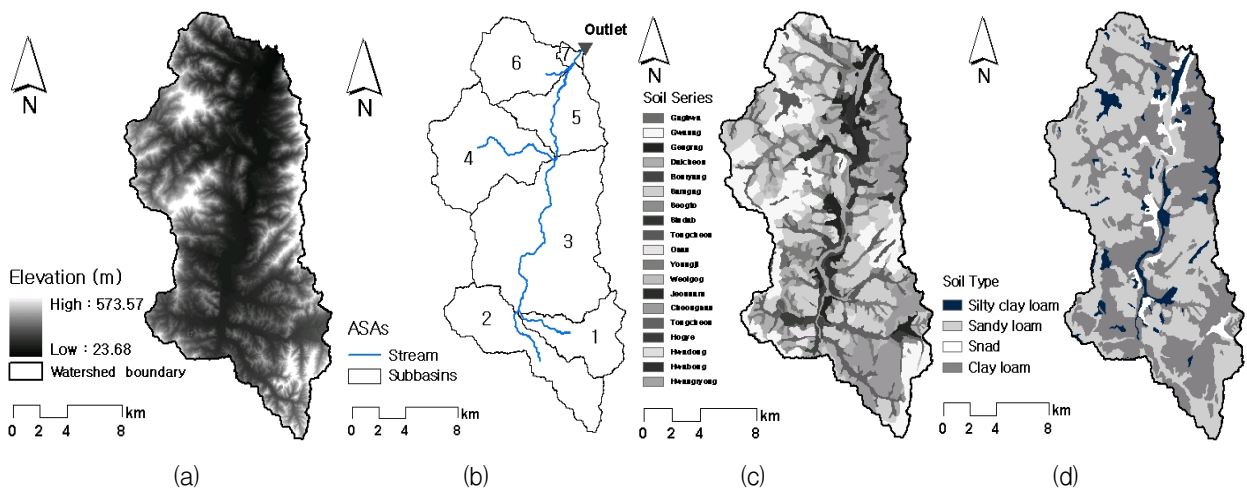


Fig. 3. GIS Data (a) Elevation, (b) Sub-basins, (c) Soil series, (d) Soil type

Table 2. Soil Parameters of 3 Major Land Use Classes

| Land use | Soil parameter | | Percent covered for soil type | | | |
|-------------|-----------------|------|-------------------------------|------------|-----------|-----------------|
| | | | Sand | Sandy loam | Clay loam | Silty clay loam |
| Forest | F _c | 0.24 | 5.7 | 58.3 | 35.7 | 0.3 |
| | W _p | 0.13 | | | | |
| | PO _e | 0.38 | | | | |
| Paddy rice | F _c | 0.27 | 7.1 | 34.5 | 46.4 | 11.9 |
| | W _p | 0.15 | | | | |
| | PO _e | 0.37 | | | | |
| Upland crop | F _c | 0.26 | 7.9 | 36.0 | 47.7 | 8.3 |
| | W _p | 0.15 | | | | |
| | PO _e | 0.37 | | | | |

F_c: Field capacity (cm³/cm³), W_p: Wilting point (cm³/cm³), PO_e: Effective porosity (cm³/cm³)

Rouse *et al.*, (1974) 등이 개발한 정규화 식생지수 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)는 식생의 활력도를 평가하기 위한 지표로 현재 가장 보편적으로 사용되고 있으며 SLURP 모형은 Sib 작물계수에 의해 분류된 월별 NDVI로부터 모형 내에서 LAI(Leaf Area Index)를 계산하게 된다. 본 연구에서는 8개년(1997~2004)에 걸친 적설의 영향을 받는 겨울철 자료를 제외한 3월~11월까지의 NOAA/AVHRR 위성영상을 사용하여 월별 NDVI를 산출하였다.

4.3 모형의 보정 및 검증

본 연구에서는 모형의 보정 및 검증을 위해 4개년

(1999~2002) 동안의 유출량 자료를 이용하였으며, 먼저 매개변수들의 특성을 민감도 분석을 통해 정리하고, SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) 최적화 기법(Duan *et al.*, 1994)을 이용하여 매개변수에 대한 1차적인 기준값을 선정하였으며, 모형에서 민감한 매개변수를 중심으로 시행착오법에 의하여 최적화 하였다. 모형의 목적함수로는 Nash and Sutcliffe(1970)가 제안한 모형효율계수(Model Efficient, ME)와 결정계수(R^2)를 사용하였다. SLURP 모형은 각 토지이용별로 선택적 매개변수와 Calibration을 위한 매개변수가 요구된다(Table 3). 본 연구에서는 상대적으로 민감도가 낮은 선택적 매개변수에 대한 값은 다른

Table 3. The Calibrated Parameters for the SLURP Model

| Parameter | Sensitivity | Value | | |
|---------------------------------------|-------------|---------|------------|-------------|
| | | Forest | Paddy rice | Upland crop |
| Canopy capacity (mm) | Low | 5 | - | - |
| Albedo* ¹ | Medium | 0.11 | - | - |
| Canopy resist (s/m)* ² | Medium | 48.1 | - | - |
| Max. Crop height (m)* ³ | Low | 15 | - | - |
| Crop start and end date* ³ | Low | - | 6/1 - 9/10 | - |
| Initial constants of snow store (mm) | Medium | 32.0 | 20.0 | 20.0 |
| Initial constants of slow store (%) | Medium | 35.3 | 55.8 | 6.25 |
| Maximum infiltration rate (mm/day) | High | 32.8 | 15.5 | 36.26 |
| Manning roughness, n | Low | 0.05 | 0.01 | 0.08 |
| Retention constant for fast store | Medium | 10.5 | 6.3 | 7.95 |
| Maximum capacity for fast store (mm) | High | 230.8 | 100.5 | 141.2 |
| Retention constant for slow store | High | 55725.0 | 58935.0 | 84035.0 |
| Maximum capacity for slow store(mm) | Medium | 21400.0 | 30660.0 | 48670.0 |
| Precipitation factor | High | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Rain/snow division temperature (°C) | Low | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

*¹ Zhou *et al.* (2003)

*² National Institute Crop Science

*³ Korean Forest Research Institute

Table 4. Summary of Model Calibration and Verification

| Period | P (mm) | Observed | | Simulated | | | RMSE (mm/day) | R^2 | ME | |
|-------------|--------|----------|-------|-----------|-------|--------|---------------|-------|------|------|
| | | Q(mm) | QR(%) | Q(mm) | QR(%) | ET(mm) | | | | |
| Calibration | 1999 | 1346.6 | 752.8 | 56 | 697.3 | 52 | 643.1 | 3.5 | 0.79 | 0.77 |
| | 2000 | 1198.8 | 615.2 | 51 | 620.0 | 52 | 586.1 | 3.0 | 0.76 | 0.68 |
| Validation | 2001 | 982.0 | 492.2 | 50 | 511.3 | 52 | 545.3 | 3.2 | 0.71 | 0.69 |
| | 2002 | 1414.4 | 813.5 | 58 | 820.1 | 58 | 715.1 | 11.6 | 0.60 | 0.60 |
| Average | | 1234.0 | 668.4 | 54 | 662.2 | 54 | 429.3 | 5.3 | 0.72 | 0.69 |

P: Precipitation, Q: Streamflow, QR: Runoff ratio, ET: Evapotranspiration, RMSE: Root mean square error, R^2 : Coefficient of Determination, ME: Nash-Sutcliffe Model Efficiency

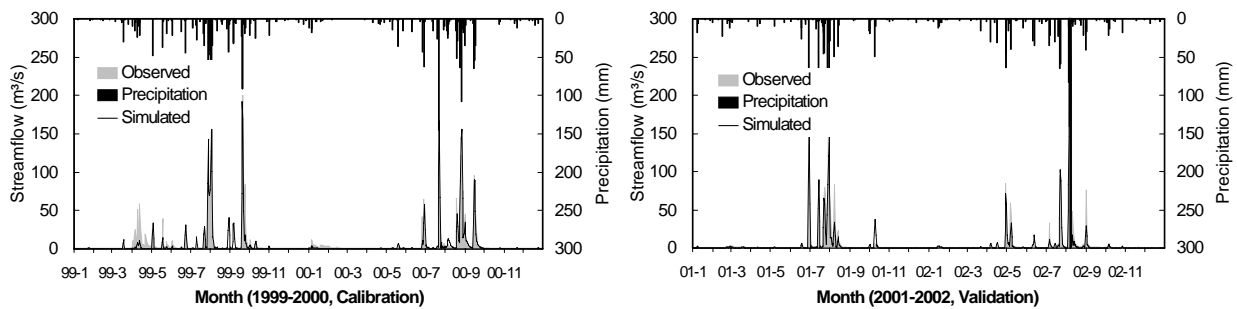


Fig. 4. The Calibration and Verification Results for Streamflow

연구결과를 참고하였다. Calibration을 위한 10개의 매개변수 중 6개의 매개변수(지표하 초기저류량, 최대침투율, 지표수 보존상수, 지표수 최대저류량, 지표하 보존상수, 지표하 최대저류량)가 민감도가 높게 나타났고 특히 지표하 초기저류량이 증발산량에 가장 민감하게 반응하였다. 증발산량 산정방법으로는 FAO Penman-Monteith 방법, 하도추적은 Muskingum 방법을 이용하였다. Fig. 4와 Table 4는 보정 및 검정기간에 대한 모의결과를 나타낸 것으로 보정 결과 모형효율계수는 0.77~0.68, R^2 는 0.79~0.76, 검정 결과 모형효율계수는 0.69~0.60, R^2 는 0.71~0.60으로 관측치와 모의치의 유사거동이 거의 유사함을 알 수 있다.

(Japan), ECHAM5-OM(Germany), CSIRO Mk3.0 (Australia), ECHO-G(Germany), CGCM3_T63 (Canada), HadCM3(UK), CGCM2.3.2(Japan) 이다. 이후 모의 결과 값을 우리나라로 추출하여 분석한 결과 가장 현실에 부합되는 최종 2개의 GCM(MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM)을 선정하였다. GCM 미래 기후 자료는 IPCC Data Distribution Center (www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/index.html)에서 제공받을 수 있다. 본 연구에서 사용된 GCM의 격자크기는 Fig. 5과 같으며 자세한 내용을 Table 5에 정리하였다.

5. 기후변화에 따른 수문분석

5.1 미래 기후자료의 수집 및 오차보정(Bias Correction)

본 연구에서는 미래 기후자료로 IPCC AR4 기후변화 시나리오(A2, A1B, B1)의 GCM(MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM) 월 모의 결과 값을 이용하였다. 미래 기후자료를 준비하기 위해서는 GCM을 선정해야 하는데 IPCC AR4에서 제시하고 있는 23개의 GCM 중에서 시나리오와 기상자료가 잘 구축되어있고 비교적 해상도가 높은 상위 8개의 GCM을 수집하여 분석하였다. 수집된 기후모델은 GFDL CM2.1(USA), MIROC3.2 hires

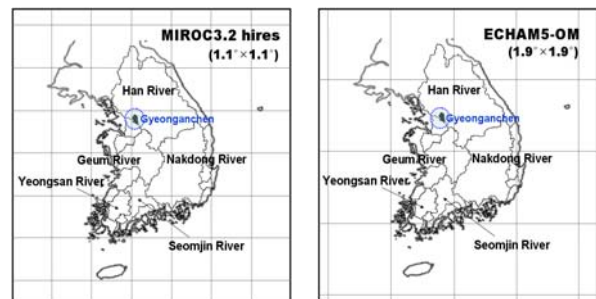


Fig. 5. Grid Size of Two GCMs Used in This Study

기후 모델이 현재 기후를 잘 모사(Simulation)할 수 없다면 미래 기후를 전망한 것에 대해 확신할 수 없기 때문에(Viner and Mayer, 1994) 기후모델의 결과물을

Table 5. Details of GCMs data (AR4) used in this study

| Model | Center | Country | Scenario | Grid size |
|----------------|--|---------|-------------|------------------------|
| MIROC3.2 hires | NIES (National Institute for Environmental Studies) | Japan | A1B, B1 | 320×160 (1.1°×1.1°) |
| ECHAM5-OM | MPI-M (Max-Planck-Institut for Meteorology) | Germany | A2, A1B, B1 | 192×96 (1.9°×1.9°) |

연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 기후 모델 결과를 현재 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다(Carter *et al*, 1999). 본 연구에서는 과거 30년 (1977-2006, baseline) 자료와 각 GCM 모델별로 제공되는 20세기 모의 결과인 20C3M(20th Century Climate Coupled Model)의 1977년~2099년의 자료를 비교하였다. 그 결과 GCM 모의 값은 해상도 문제로 인해 모델별로 차이를 보이며 일률적으로 낮거나 높게 추정된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 가장 중요한 상태 변수인 온도, 강수 자료를 이용하여 다음의 방법으로 통계적인 유사성을 가지도록 보정하였다(Droogers and Aerts, 2005). 온도의 경우,

$$T'_{GCMfut} = T_{meas} + (\overline{T_{GCMfut}} - \overline{T_{GCMhis}}) \quad (1)$$

여기서, T'_{GCMfut} 는 보정된 미래의 온도, T_{meas} 는 과거 30년 기준기간 동안 관측된 온도, $\overline{T_{GCMfut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 온도의 평균, $\overline{T_{GCMhis}}$ 는 과거 기준기간 동안의 GCM에서 모의된 온도의 평균을 말한다. 강수량의 경우,

$$P'_{GCMfut} = P_{meas} \times (\overline{P_{GCMfut}} / \overline{P_{GCMhis}}) \quad (2)$$

여기서, P'_{GCMfut} 는 보정된 미래의 강수량, P_{meas} 는 과거 30년 기준기간 동안 관측된 강수량, $\overline{P_{GCMfut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 강수량의 평균, $\overline{P_{GCMhis}}$ 는 과거 기준기간 동안의 GCM에서 모의된 강수량의 평균을 말한다. 이 기법에 의해 각 시나리오별로 추출된 보정계수는 Table 6과 같다. 온도보정 결과 MIROC3.2 hires의 경우 온도가 30년치 관측 자료에 비해 일률적으로

과대 추정되어 A1B, B1 시나리오에 대하여 각각 -1.26°C, -1.22°C를 더해 주어 보정하였고, ECHAM5-OM의 경우는 과소 추정되어 Table 6의 보정계수를 더해 주었다. 강수보정 결과 해상도가 뛰어난 MIROC3.2 hires의 경우 1에 가까운 보정계수 값을 나타냈으며, ECHAM5-OM의 경우 모두 과소 추정되어 각각 1.33~1.36 만큼 곱해 주어 보정하였다. Fig. 6에는 1차적으로 보정된 A2, A1B, B1 시나리오의 온도와 강수량을 보정 전과 비교하여 나타내었다. 그 결과 다소 높게 또는 낮게 모의되었던 온도는 관측 값과 유사하게 보정되었고 강수량 역시 관측 강수의 패턴을 잘 반영하고 있었다.

5.2 CF(Change Factor) Method에 의한 미래 기상자료의 downscaling

본 연구에서는 유역규모의 기후변화 시나리오를 작성하기 위한 downscaling 방법으로 1차적으로 보정된 GCM 모의 값에 CF(Change Factor) Method를 이용하여 관측소별로 downscaling 하였다. 이 기법은 현재 기후의 공간패턴이 미래에는 변화가 없다고 가정하고, 특정 년도를 기준으로 비교할 수 있는 장점을 가지며 기후변화 영향평가에 대한 많은 연구에 적용되어 왔다(Diaz-nieto and Wilby, 2005; Wilby and Harris, 2006). Fig 7에는 CF(Change Factor) Method의 과정을 나타내었다. 수원, 양평, 이천 기상관측소별로 강수량, 온도, 상대습도, 풍속의 6개 기상인자에 대하여 기준기간이 되는 과거 30년(1977-2006) 동안의 월 평균값을 준비하고, 미래 기상자료로 2개 GCM에 대한 A2, A1B, B1 시나리오별 결과 값을 2030s(2016-2045), 2060s(2046-2075), 2090s(2071-2100)로 구분하여 각각의 30년 월 평균값을 구축하였다. 그 후 과거 30년 평균값에 대한 월 변화율과 미래 30년 평균값의 월 변화율간의 차이 값

Table 6. Calculated Bias Correction Factor by Two GCMs Data

| Scenarios | MIROC3.2 hires | | ECHAM5-OM | | |
|---------------|----------------|-------|-----------|------|------|
| | A1B | B1 | A2 | A1B | B1 |
| Temperature | -1.26 | -1.22 | 0.20 | 0.35 | 0.28 |
| Precipitation | 1.00 | 1.01 | 1.35 | 1.36 | 1.33 |

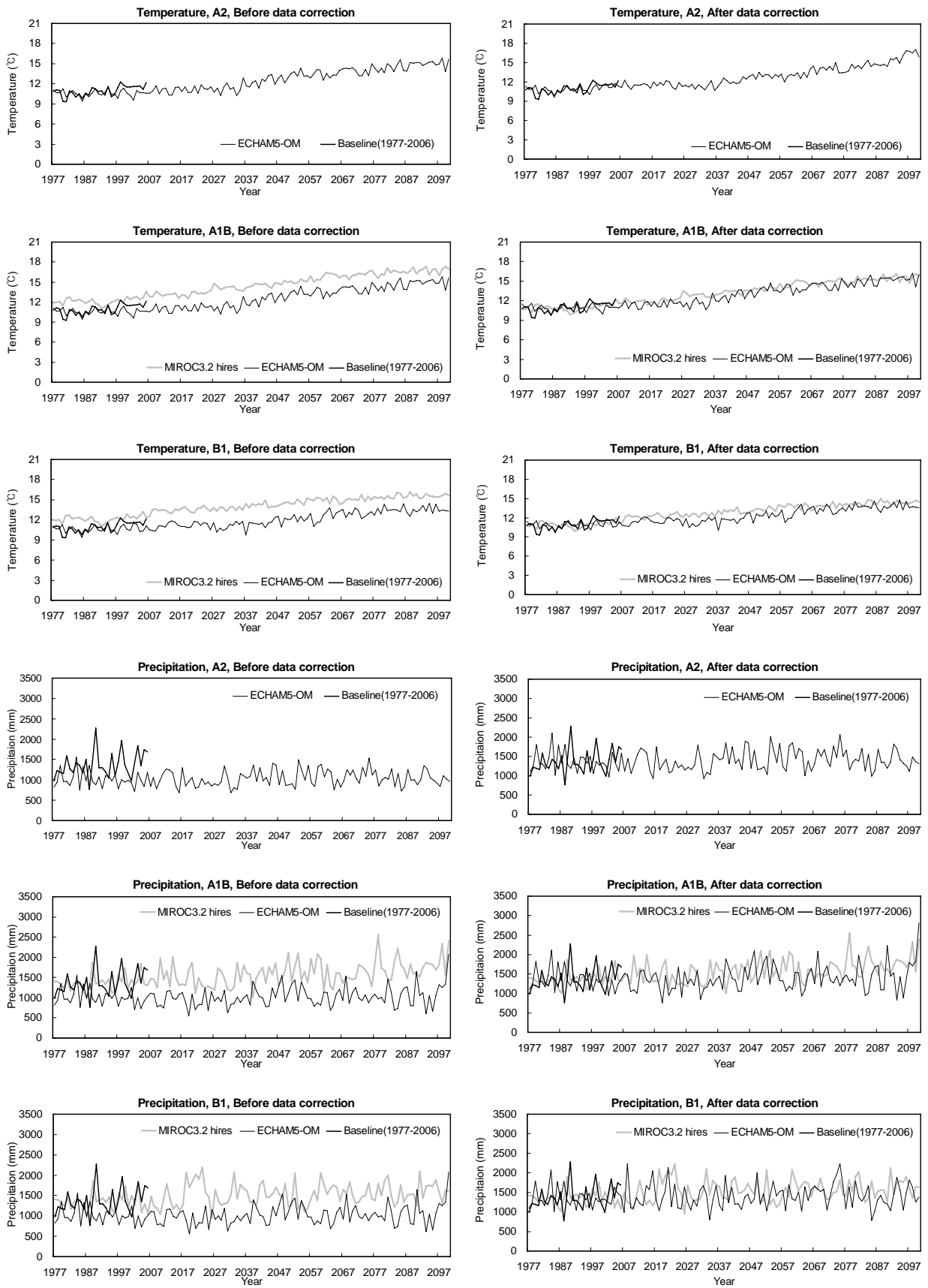


Fig. 6. Adjusted Temperature and Precipitation Data for Two GCMs Data using 30 Years (1977–2006) Historical Observed Data

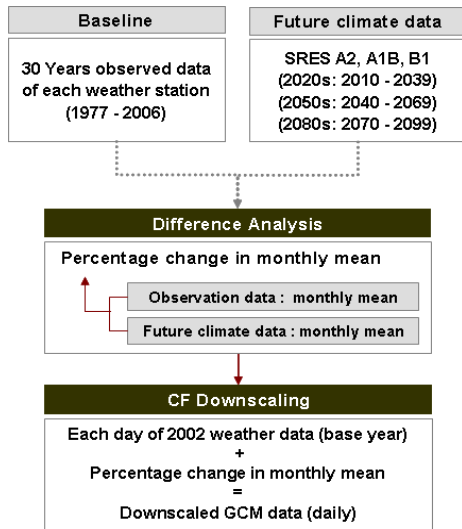


Fig. 7. Flowchart of CF Downscaling

분석(Difference analysis)을 하고 기준년을 평수년으로 대변되는 보정년도인 2002년으로 선정하여 기상관측소 별 일 자료에 매월의 변화율을 각각 반영하여 유역규모의 일 기상자료로 재구축하였다. Fig. 8에는 CF Method로 downscaling된 2050s와 2080s의 매월 온도와 강수량의 변화를 나타내었다.

온도는 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM은 모든 계절에서 전반적으로 온도가 상승하였고 특히 겨울에 온도가 가장 많이 상승하는 것으로 나타났다. MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM은 A1B 시나리오의 경우 2080s

에 겨울온도가 각각 6.2°C, 3.9°C 상승하였다. 강수량의 경우 여름철에 감소하는 경향이 나타났고 봄, 가을, 겨울에는 모두 증가하는 것으로 나타났다. MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM은 A1B 시나리오의 경우 2080s에 겨울에 각각 60.1%, 60.8%의 증가를 보였다(Table 7 and 8).

5.3 개선된 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용자료

기존의 CA-Markov기법은 토지이용의 변화를 추이 경향을 통해 잘 반영하지만 수학 통계적이기 때문에 시간이 변하더라도 전이 확률은 항상 일정하며 모든 위치에 동일하게 적용된다. 이 때문에 분류항목에 대한 일반적인 내용을 포함하지 못하며 인위적인 토지이용의 변화에 따른 전이확률의 변화를 고려하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 이용준과 김성준 (2007)의 연구결과를 토대로 개선된 CA-Markov 기법을 이용하여 미래 토지이용을 예측하였다.

Ahn *et al.* (2008)은 경안천 상류유역을 대상으로 과거 시계열 Landsat TM, ETM⁺ 위성영상을 이용하여 개선된 CA-Markov 기법으로 미래 토지이용을 예측한 바 있다. 과거부터 미래까지의 토지이용 경향을 분석한 결과 산림의 경우 1987(152.3 km², 58.5%)년부터 지속적으로 감소하여 2080년에는 128.4 km²(49.3%)으로 예

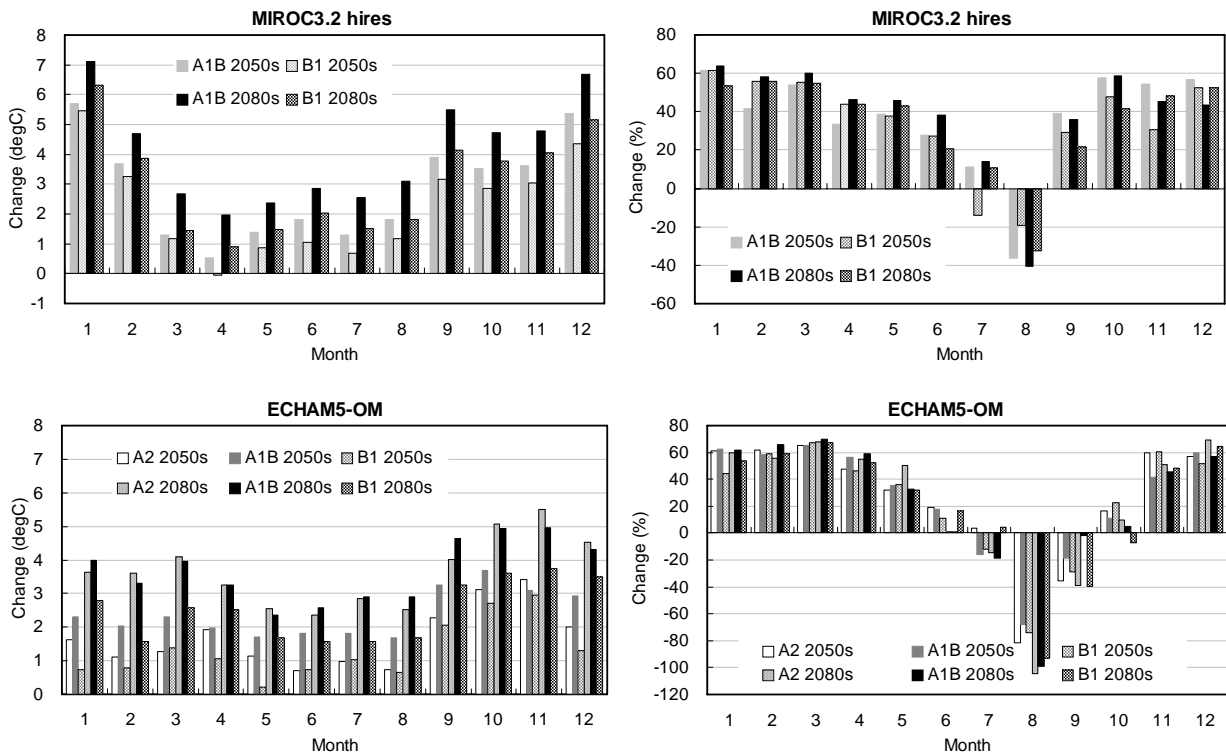


Fig. 8. Changes in Temperature(left) and Precipitation(right) by CF Downscaling for Two Different GCMs

Table 7. Changes in Degree for Future Seasonal Temperature through the CF Downscaling

| Period | Scenario | MIROC3.2 hires | | ECHAM5-OM | | |
|----------------------------------|----------|----------------|------|-----------|------|------|
| | | A1B | B1 | A2 | A1B | B1 |
| Spring (March - May) | 2020s | -0.4 | -0.4 | +0.2 | +0.2 | -0.3 |
| | 2050s | +1.1 | +0.7 | +1.4 | +2.0 | +0.9 |
| | 2080s | +2.3 | +1.3 | +3.3 | +3.2 | +2.3 |
| Summer (June - August) | 2020s | 0.0 | +0.2 | -0.3 | -0.1 | 0.0 |
| | 2050s | +1.6 | +1.0 | +0.8 | +1.8 | +0.8 |
| | 2080s | +2.8 | +1.8 | +2.6 | +2.8 | +1.6 |
| Autumn (September - November) | 2020s | +2.1 | +2.2 | +1.3 | +1.7 | +1.5 |
| | 2050s | +3.7 | +3.0 | +2.9 | +3.3 | +2.6 |
| | 2080s | +5.0 | +4.0 | +4.9 | +4.8 | +3.5 |
| Winter (December - February) | 2020s | +3.0 | +2.9 | 0.0 | -0.2 | -0.1 |
| | 2050s | +4.9 | +4.4 | +1.6 | +2.4 | +0.9 |
| | 2080s | +6.2 | +5.1 | +3.9 | +3.9 | +2.6 |

Table 8. Changes in Percent for Future Seasonal Precipitation through the CF Downscaling

| Period | Scenario | MIROC3.2 hires | | ECHAM5-OM | | |
|----------------------------------|----------|----------------|-------|-----------|-------|-------|
| | | A1B | B1 | A2 | A1B | B1 |
| Spring (March - May) | 2020s | +34.5 | +43.8 | +49.4 | +43.0 | +49.4 |
| | 2050s | +37.3 | +43.4 | +46.0 | +52.5 | +46.4 |
| | 2080s | +41.4 | +44.7 | +55.1 | +55.3 | +49.7 |
| Summer (June - August) | 2020s | -14.3 | -19.3 | -52.0 | -60.5 | -55.9 |
| | 2050s | -13.4 | -12.4 | -37.8 | -40.8 | -43.6 |
| | 2080s | -11.8 | -13.0 | -60.1 | -59.8 | -42.6 |
| Autumn (September - November) | 2020s | +27.9 | +38.4 | -2.5 | +7.4 | +19.1 |
| | 2050s | +53.8 | +43.4 | +13.3 | +7.9 | +18.5 |
| | 2080s | +54.1 | +38.1 | +5.5 | +7.2 | -7.1 |
| Winter (December - February) | 2020s | +62.3 | +58.0 | +56.0 | +54.6 | +53.9 |
| | 2050s | +59.7 | +59.3 | +60.3 | +61.6 | +47.3 |
| | 2080s | +60.0 | +53.4 | +62.5 | +60.8 | +57.0 |

측되었고, 논은 1987년 45.2 km²(17.3%)에 비해 2080년에는 11.1 km²(4.3%)로 감소하고, 도시의 경우 1987년 11.5 km²(4.4%)에 비해 2080년에는 50.1 km²

(19.2%)로 증가하는 것으로 예측되었다. 초지 또한 골프장의 개발 등으로 인하여 증가하는 경향을 나타내었다(Table 9).

Table 9. The Landsat Classified Land Use from 1987 to 2004 and the CA-Markov Predicted Land Use of 2020, 2050 and 2080

| Year | Land use class | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|-----------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| | Water | Forest | Urban | Grassland | Bare ground | Paddy rice | Upland crop | Total | |
| Landsat (km ² [%]) | 1987 | 0.7 [0.3] | 152.3 [58.5] | 11.5 [4.4] | 5.3 [2.0] | 11.8 [4.5] | 45.2 [17.3] | 33.6 [12.9] | 260.4 [100.0] |
| | 1991 | 0.7 [0.3] | 156.9 [60.2] | 10.6 [4.1] | 9.7 [3.7] | 27.6 [10.6] | 40.4 [15.5] | 14.5 [5.6] | 260.4 [100.0] |
| | 1996 | 1.1 [0.4] | 149.2 [57.3] | 11.3 [4.3] | 7.3 [2.8] | 17.2 [6.6] | 42.4 [16.3] | 31.9 [12.2] | 260.4 [100.0] |
| | 2001 | 0.5 [0.2] | 156.6 [60.1] | 13.1 [5.0] | 13.2 [5.1] | 16.6 [6.4] | 27.1 [10.4] | 33.3 [12.8] | 260.4 [100.0] |
| | 2004 | 0.8 [0.3] | 141.8 [54.4] | 14.7 [5.7] | 21.7 [8.4] | 22.3 [8.6] | 25.4 [9.7] | 33.7 [12.9] | 260.4 [100.0] |
| CA-Markov (km ² [%]) | 2004 | 1.4 [0.5] | 146.0 [56.1] | 36.9 [14.2] | 23.2 [8.9] | 12.4 [4.8] | 19.3 [7.4] | 21.2 [8.1] | 260.4 [100.0] |
| | 2020 | 1.5 [0.6] | 135.9 [52.2] | 47.5 [18.2] | 24.9 [9.6] | 20.8 [8.0] | 13.7 [5.3] | 16.1 [6.2] | 260.4 [100.0] |
| | 2050 | 1.6 [0.6] | 132.5 [50.8] | 50.8 [19.5] | 28.1 [10.9] | 19.6 [7.5] | 12.8 [4.9] | 15.0 [5.8] | 260.4 [100.0] |
| | 2060 | 1.6 [0.6] | 128.4 [49.3] | 50.1 [19.2] | 31.8 [12.2] | 21.0 [8.1] | 11.1 [4.3] | 16.4 [6.3] | 260.4 [100.0] |

5.4 NOAA/AVHRR NDVI-온도와의 상관회귀식에 의한 미래 식생자료

미래 식생정보 예측을 위해 앞서 NOAA/AVHRR 위성영상을 이용하여 구축한 8개년(1977~2004)에 걸친 월별 NDVI와 월평균 기온과의 변동양상에 중점을 두어 기온-NDVI의 선형회귀식을 도출하였다(Table 10). 기온-NDVI 선형회귀식을 통해 산출된 선형방정식을 토대로 2개 GCM(MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM) A2, A1B, B1시나리오의 CF downscaling된 월 평균기온(2020s, 2050s, 2080s)을 사용하여 미래의 토지피복별 월 NDVI를 예측하였다. Table 11에는 예측된 미래 식생지수를 나타내었으며 식생 활력도의 최대 값은 현재의 0.51에서 미래 2080년에는 2개의 GCM이 0.56(MIROC 3.2 hires, A1B)과 0.57(ECHAM5-OM, A2 and A1B)로 나타났다.

5.5 과거 수문요소의 변화 분석

기후변화에 의한 수문순환의 변화에 효율적으로 대처하기 위해서는 미래기후변화에 따른 수문분석에 앞서 과거 수문요소의 변화 분석이 선행되어야 한다. 기후란 매일 매일 나타나는 날씨를 오랜 기간 평균했을 때 나타나는 대기의 상태를 말한다. 여기서 오랜 기간이란 보통 30년을 말하는데 이것은 한 세대의 활동기간을 의

미한다. 그러므로 기후변화에 대한 언급은 적어도 30년 이상의 자료가 있어야 의미를 가진다(김성준, 2002). 따라서 본 연구에서는 과거 30개년(1977-2006)의 수문기상 자료와 GIS 자료를 수집하여 SLURP 모형에 적용하였다. 이후 기후변화로 인해 영향을 받는 수문학적 변수들인 온도, 강수량, 유출량, 증발산량, 토양수분량, 지하수 충전량 등에 대해 과거 30년 동안의 변화를 연, 계절별로 나누어 분석하였다.

각 과거 30년을 3기간(1977-1986, 1987-1996, 1997-2006)으로 나누어 수문요소별 연평균 변화를 분석한 결과 온도는 30년(1977-2006) 평균온도인 10.9°C와 비교하여 1977-1986 기간에는 -0.6°C, 1987-1996 기간에는 -0.2°C, 1997-2006 기간에는 +0.7°C 변화하였다. 계절별 온도는 변화는 모든 계절에서 증가하는 것으로 나타났으며 봄철에 -0.5°C(1987-1996)에서 +0.9°C(1997-2006), 겨울철에 -1.3°C(1977-1986)에서 +1.0°C(1997-2006)로 봄과 겨울철에 가장 많이 따뜻해지고 있음을 알 수 있다. 연평균 강수량은 30년 평균 강수량인 1371.1 mm와 비교하여 1977-1986 기간에는 -9.2%, 1987-1996 기간에는 -0.9%, 1997-2006 기간에는 +8.5%로 점차 증가하였고, 연평균 유출량은 30년 평균 유출량인 721.8mm와 비교하여 1977-1986 기간에는 -20%, 1987-1996 기간에는 0.0%, 1997-2006 기간에는 +14.3%

Table 10. The Derived Linear Regression Equation between Monthly Mean Temperature and NOAA Monthly NDVI for Each Land Use Class

| Land use class | Regression equation | R ² |
|----------------|-------------------------------|----------------|
| Forest | NDVI = 0.0160 · temp + 0.1245 | 0.68 |
| Urban | NDVI = 0.0143 · temp + 0.0844 | 0.66 |
| Grassland | NDVI = 0.0152 · temp + 0.1093 | 0.68 |
| Bare ground | NDVI = 0.0147 · temp + 0.1085 | 0.71 |
| Paddy rice | NDVI = 0.0155 · temp + 0.0919 | 0.69 |
| Upland crop | NDVI = 0.0154 · temp + 0.1112 | 0.70 |

Table 11. The Future Predicted Monthly NDVIs for A1B, A2 and B1 Scenarios of GCMs

| Period | | Baseline | MIROC3.2 hires | | ECHAM5-OM | | |
|-----------|------|----------|----------------|------|-----------|------|------|
| | | | A1B | B1 | A2 | A1B | B1 |
| 1997-2004 | Max. | 0.51 | - | - | - | - | - |
| | Min. | 0.15 | - | - | - | - | - |
| 2020s | Max. | - | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 0.53 |
| | Min. | - | 0.15 | 0.15 | 0.13 | 0.14 | 0.13 |
| 2050s | Max. | - | 0.54 | 0.53 | 0.54 | 0.55 | 0.54 |
| | Min. | - | 0.17 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 |
| 2080s | Max. | - | 0.56 | 0.55 | 0.57 | 0.57 | 0.55 |
| | Min. | - | 0.18 | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.17 |

로 강수량이 증가함에 따라 마찬가지로 증가하는 것으로 나타났다. 특히 여름철 강수는 -17.3%(1977-1986)에서 +11.6%(1997-2006) 가장 많은 증가를 보였고 모든 계절에서 최근 10년(1997-2006) 동안 강수량은 30년 평균 계절강수량 보다 모두 증가하는 변화가 나타났다. 여름철 유출량 역시 -33.6%(1977-1986)에서 +18.3%(1997-2006)로 가장 큰 변화를 보였다. 연평균 증발산량은 30년 평균 증발산량인 456.6 mm와 비교하여 1977-1986 기간에는 +4.5%, 1987-1996 기간에는 -6.5%, 1997-2006 기간에는 +1.4% 변화하였고, 연평균 토양수분 함유량은 큰 변화 없이 유지되고 있었지만 증발산량이 +4.5% 증가했던 시기인 1977-1986 기간에는 -0.1%, 증발산량이 -6.5% 감소했던 시기인 1987-1996 기간에는 +0.2%, 증발산량이 +1.4% 증가했던 시기인 1997-2006 기간에는 -0.1% 정도의 변화를 보였고 이는 증발산량이 토양수분에 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다. 연평균 지하수 충전량은 30년 평균 지하수 충전량인 371.6 mm와 비교하여 1977-1986 기간에는 -7.4%, 1987-1996 기간에는 +0.6%, 1997-2006 기간에는 +6.0%

로 강수량의 패턴을 따라가고 있음을 알 수 있다. Fig. 9에서 나타나듯이 경안천 유역에서는 세 기간 동안 주기적으로 발생한 가뭄으로 인해 온도의 상승에도 불구하고 증발산량이 감소하고 이로 인해 토양수분과 지하수 충전량이 감소하는 변화가 나타났다. 이처럼 21세기에 이와 같은 현상이 발생한다면 물공급에 직접적인 영향을 끼치게 될 것으로 판단된다.

과거 수문요소의 변동성 분석은 현재 수자원의 상황을 이해하고 미래 수자원의 계획과 관리를 위해 꼭 필요하다. 경안천 유역의 수문요소에 대한 변동성 분석을 위해 Mann-Kendall test(Mann, 1945; Kendall, 1975)를 이용하였다. Mann-Kendall test는 관찰치의 차이를 상대적인 크기로 계산하는 비모수 통계방법으로 통계치 Z를 산정하고 이를 유의수준의 표준 통계치와 비교하여 경향을 파악한다. 이 방법은 비정규 분포를 가지는 자료의 분석에 적합하며 시계열 자료의 경향성을 판단하는 유용한 지표로 사용된다. Table 12에 Mann-Kendall test 결과를 정리하였다. 연 평균 온도는 모든 수준(10%, 5%, 1%)에서 증가하는 것으로 나타났고 여름철

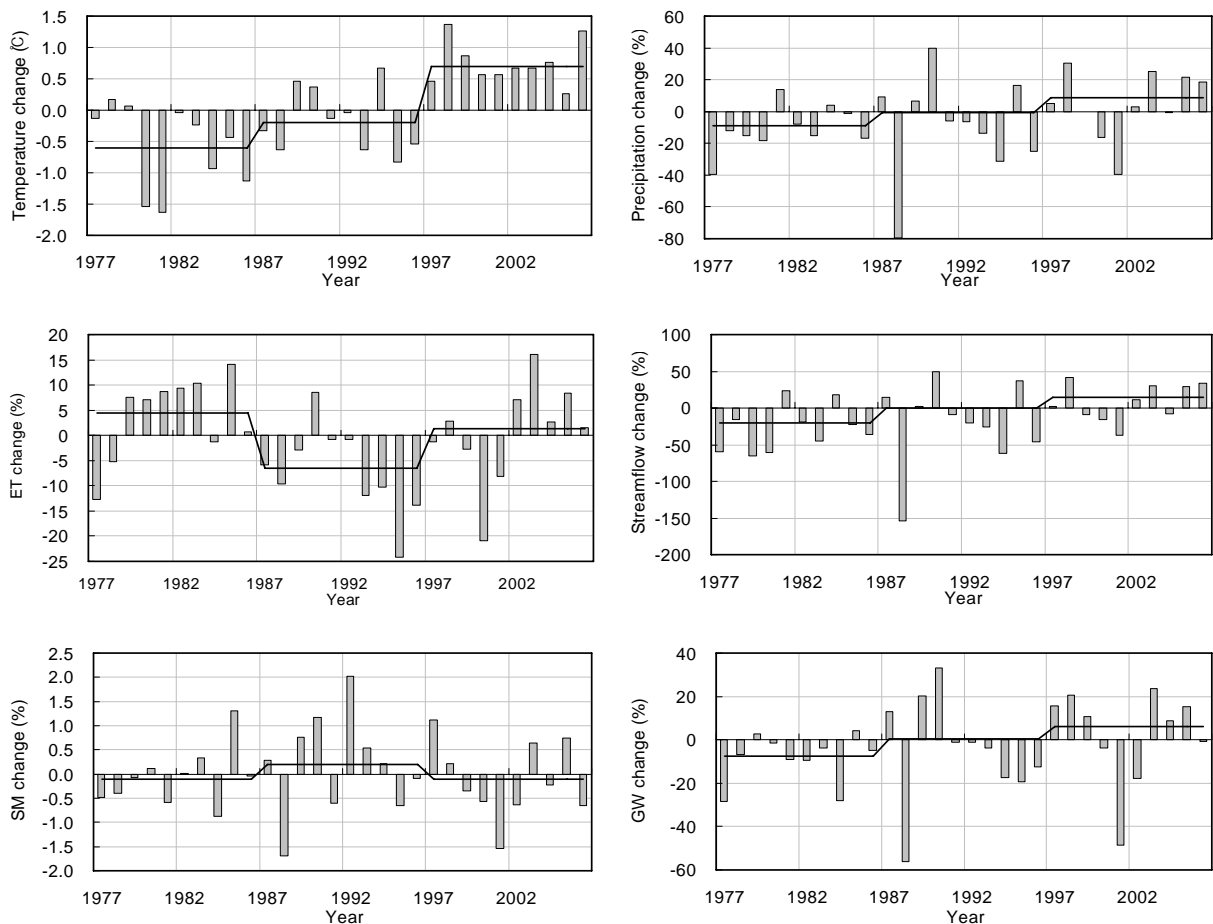


Fig. 9. Decadal Variations of the Historical Simulated Hydrological Components from SLURP Model Results as Compared with 30 Years (1977-2006) Average

Table 12. Results of Mann-Kendall Test for the Trend Analysis

| Components | Period | Mean | Max | Min | Statistic Z | Slope | Trend significant level (α) | | |
|---------------------------|--------|--------|--------|-------|-------------|-------|--------------------------------------|----|----|
| | | | | | | | 10% | 5% | 1% |
| Temperature (°C) | annual | 10.9 | 12.3 | 9.3 | 3.47 | 0.06 | UP | UP | UP |
| | spring | 10.9 | 12.8 | 9.7 | 2.56 | 0.05 | UP | UP | NO |
| | summer | 23.5 | 25.0 | 21.6 | 0.86 | 0.01 | NO | NO | NO |
| | autumn | 12.1 | 14.1 | 10.2 | 2.24 | 0.06 | UP | UP | NO |
| | winter | -2.6 | -0.6 | -7.7 | 2.18 | 0.09 | UP | UP | NO |
| Precipitation (mm) | annual | 1371.1 | 2273.3 | 764.6 | 1.75 | 11.62 | UP | NO | NO |
| | spring | 211.9 | 356.5 | 41.0 | -0.21 | -0.97 | NO | NO | NO |
| | summer | 854.8 | 1489.7 | 478.9 | 2.18 | 11.42 | UP | UP | NO |
| | autumn | 237.1 | 644.6 | 84.6 | 0.14 | 0.94 | NO | NO | NO |
| | winter | 68.1 | 141.8 | 5.9 | 0.00 | -0.01 | NO | NO | NO |
| Streamflow (mm) | annual | 721.8 | 1436.3 | 284.3 | 2.14 | 11.66 | UP | UP | NO |
| | spring | 66.4 | 160.3 | 15.0 | -0.62 | -0.93 | NO | NO | NO |
| | summer | 517.5 | 1087.9 | 182.9 | 2.75 | 11.78 | UP | UP | UP |
| | autumn | 120.0 | 585.8 | 18.7 | 0.61 | 0.65 | NO | NO | NO |
| | winter | 18.2 | 36.5 | 11.9 | 1.91 | 0.18 | UP | NO | NO |
| Evapotranspiration (mm) | annual | 615.1 | 690.3 | 481.8 | 1.03 | 0.83 | NO | NO | NO |
| | spring | 169.2 | 201.7 | 137.7 | 1.71 | 0.75 | UP | NO | NO |
| | summer | 286.0 | 326.4 | 220.9 | 0.00 | -0.08 | NO | NO | NO |
| | autumn | 118.1 | 148.4 | 84.5 | 0.52 | 0.17 | NO | NO | NO |
| | winter | 42.1 | 55.9 | 24.8 | -0.02 | -0.02 | NO | NO | NO |
| Soil moisture (%) | annual | 17.2 | 18.6 | 15.9 | 0.86 | 0.01 | NO | NO | NO |
| | spring | 16.3 | 17.9 | 14.9 | 0.00 | 0.00 | NO | NO | NO |
| | summer | 19.6 | 21.9 | 16.9 | 0.89 | 0.03 | NO | NO | NO |
| | autumn | 17.1 | 20.0 | 15.1 | 0.39 | 0.01 | NO | NO | NO |
| | winter | 15.8 | 18.3 | 14.6 | 0.34 | 0.01 | NO | NO | NO |
| Groundwater recharge (mm) | annual | 269.1 | 404.1 | 173.9 | 0.79 | 0.75 | NO | NO | NO |
| | spring | 45.9 | 75.2 | 15.6 | -0.46 | -0.21 | NO | NO | NO |
| | summer | 128.3 | 204.3 | 61.7 | 0.86 | 0.70 | NO | NO | NO |
| | autumn | 63.2 | 117.6 | 23.0 | 0.32 | 0.29 | NO | NO | NO |
| | winter | 10.7 | 24.0 | 2.4 | -0.20 | -0.03 | NO | NO | NO |

에는 경향이 없는 것으로 분석되었고, 봄과 가을, 겨울철에 유의수준 10%와 5%에서 증가경향이 나타났다. 봄철 증가하는 온도는 농작물들에 더욱 심한 영향을 끼칠 수 있으며 관개용수 공급에도 어려움이 생길 것으로 생각된다. 연평균 강수량은 10% 유의수준에서 증가경향을 보였고, 연평균 유출량은 10%, 5% 유의수준에서 증가경향을 보였다. 이에 따라 연평균 지하수 충전량은 10% 유의수준에서 증가 경향이 나타났다. 특히 여름철 강수와 유출의 증가경향(유의수준 10%와 5%)은 홍수의 규모가 더욱 커질 수 있음을 나타낸다. 증발산량과 토양수분 함유량은 유의수준의 경향성을 찾아보기 어려웠다.

5.6 기후변화에 따른 수문요소의 영향 분석

기후변화와 토지이용, 식생의 변화를 고려하여 유출

량, 증발산량, 토양수분량, 지하수충진량 등과 같은 수문요소의 평가를 위하여 downscaling된 기후자료를 이용하여 SLURP 모델을 구동하였다. Table 13에는 2개 GCM의 A2, A1B, B2 시나리오에 대한 미래 수문요소들의 결과를 정리하였다. 유출량은 2020s에 MIROC3.2 hires B1 시나리오는 +12.8%, 2020s에 ECHAM5-OM A1B 시나리오는 -14.5%의 변화를 보였고, 2050s의 경우 MIROC3.2 hires B1 시나리오는 +19.1%, ECHAM5-OM A1B 시나리오는 +8.9%의 변화를 나타냈다. 2080s의 경우에는 MIROC3.2 hires A1B 시나리오가 +21.4%, ECHAM5-OM A1B 시나리오가 +3.3%의 변화를 보였다. Fig. 10에서와 같이 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM 모두 봄 유출량은 증가하였고 여름 유출량은 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM 모두 감소경향을 보였다. 이러한 매월의 유출량 변화는 강수량의

변화와 직접적으로 관련된다. 증발산량은 현재(2002년) 35%로 분석되었고, MIROC3.2 hires는 35~38%, ECHAM5-OM은 46~51%로 각각 분석되었다. 2개 GCM은 모든 계절에서 증가경향을 보였지만 특히 봄과 여름에 큰 증가를 나타냈다. 이러한 미래 증발산량의 증가는 여름철 온도의 증가와 봄철 강수량의 증가 때문으로 사료된다. 미래 토양수분량은 현재(2002년)와 비교해서 약간 증가하였는데, 증발산량의 큰 증가에도 불구하고 토양수분량이 1% 정도의 증가를 보인 이유는 여름을 제외한 나머지 계절 동안의 강수가 크게 증가했기

때문으로 판단된다. 또한 토양수분량의 증가는 ECHAM5-OM을 제외한 MIROC3.2 hires의 지하수 충전량을 증가시켰는데, 이러한 결과가 나타난 이유는 ECHAM5-OM은 MIROC3.2 hires 보다 강수량이 상대적으로 적었기 때문으로 설명될 수 있다.

비록 이러한 시나리오로 미래를 예측하는 것은 높은 불확실성을 포함하고 있지만 여름철 강수의 증가 또는 감소, 증발산량의 증가, 지표수 흐름과 지하수 함양에 대해 기후변화에 대비하여 장기적인 측면에서의 하천유역관리에 대한 대책수립이 요구된다고 할 수 있다.

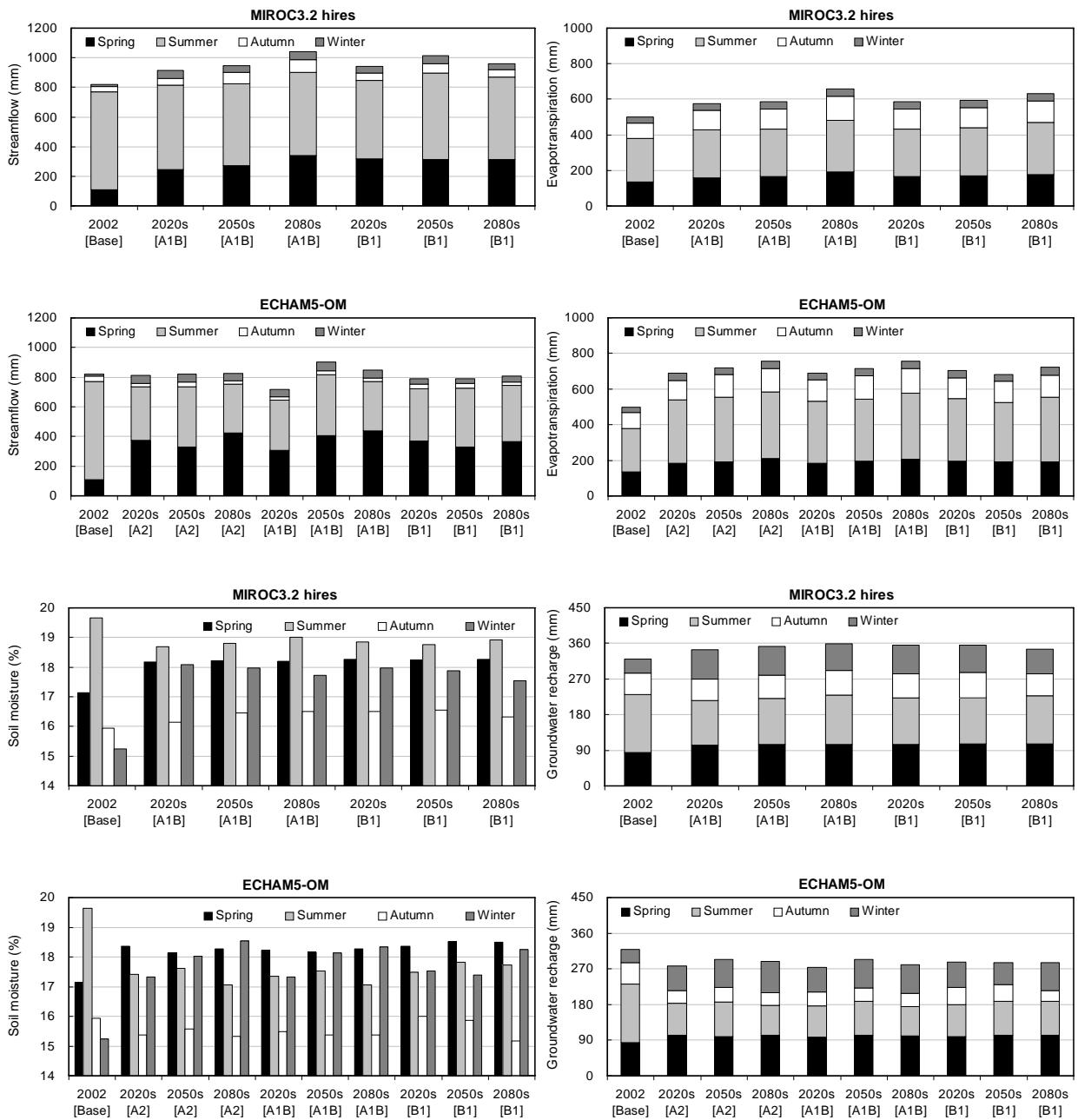


Fig. 10. The Future Seasonal Mean Hydrologic Components for A2, A1B and B1 Scenarios of Two GCM Models

Table 13. Summary of Future Predicted Annual Hydrologic Components for A2, A1B and B1 Scenarios of Two GCM Models

| Period | T (°C) | T difference (°C) | P (mm) | P variation (%) | Q (mm) [QR (%)] | Q variation (%) | ET (mm) [ETR (%)] | SM (%) | GW (mm) |
|----------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------|---------|
| [Baseline] | | | | | | | | | |
| 2002 | 11.6 | - | 1414.4 | - | 820.1 [58] | - | 498.7 [35] | 17.0 | 319.4 |
| MIROC3.2 hires [A1B] | | | | | | | | | |
| 2020s | 12.7 | +1.1 | 1578.9 | +10.4 | 916.2 [58] | +10.5 | 576.2 [36] | 17.8 | 344.7 |
| 2050s | 14.4 | +2.8 | 1640.8 | +13.8 | 946.8 [58] | +13.4 | 585.0 [36] | 17.9 | 351.9 |
| 2080s | 15.6 | +4.0 | 1765.0 | +19.9 | 1043.2 [59] | +21.4 | 659.4 [37] | 17.9 | 358.6 |
| MIROC3.2 hires [B1] | | | | | | | | | |
| 2020s | 12.8 | +1.2 | 1621.6 | +12.8 | 940.1 [58] | +12.8 | 585.8 [36] | 17.9 | 355.3 |
| 2050s | 13.8 | +2.2 | 1691.3 | +16.4 | 1013.1 [60] | +19.1 | 593.5 [35] | 17.9 | 355.1 |
| 2080s | 14.6 | +3.0 | 1652.6 | +14.4 | 958.6 [58] | +14.4 | 630.4 [38] | 17.8 | 346.0 |
| ECHAM5-OM [A2] | | | | | | | | | |
| 2020s | 11.9 | +0.3 | 1438.7 | +1.7 | 810.9 [56] | -1.1 | 687.6 [48] | 17.1 | 277.5 |
| 2050s | 13.3 | +1.7 | 1487.0 | +4.9 | 820.4 [55] | 0.0 | 720.5 [48] | 17.3 | 293.6 |
| 2080s | 15.2 | +3.6 | 1499.3 | +5.7 | 827.4 [55] | +0.9 | 758.4 [51] | 17.3 | 288.4 |
| ECHAM5-OM [A1B] | | | | | | | | | |
| 2020s | 11.9 | +0.3 | 1343.6 | -5.3 | 716.3 [53] | -14.5 | 689.0 [51] | 17.1 | 279.9 |
| 2050s | 13.9 | +2.3 | 1557.0 | +9.2 | 900.2 [58] | +8.9 | 715.6 [46] | 17.3 | 294.4 |
| 2080s | 15.2 | +3.6 | 1503.7 | +2.9 | 847.7 [56] | +3.3 | 757.1 [50] | 17.3 | 279.9 |
| ECHAM5-OM [B1] | | | | | | | | | |
| 2020s | 11.8 | +0.2 | 1440.2 | +1.8 | 788.7 [55] | -4.0 | 702.6 [49] | 17.3 | 288.6 |
| 2050s | 12.9 | +1.3 | 1439.2 | +1.7 | 791.1 [55] | -3.7 | 680.8 [47] | 17.4 | 285.7 |
| 2080s | 14.1 | +2.5 | 1471.5 | +3.9 | 809.5 [55] | -1.3 | 722.7 [49] | 17.4 | 285.4 |

P: Precipitation, Q: Streamflow, QR: Runoff ratio, ET: Actual evapotranspiration
 ETR: Actual evapotranspiration ratio, SM: Soil moisture, GW: Groundwater recharge

6. 결 론

본 연구에서는 경안천 유역(260.4 km²)을 대상으로 SLURP 수문모형과 2개의 GCM(MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM)을 이용하여 미래 토지이용과 식생변화를 고려한 상태에서 기후변화에 의한 하천유역의 수문요소의 변동을 보고자하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모형의 보정 및 검정을 통하여 모형의 적용성을 평가하기 위해 경안수위관측소의 일별 하천 유출량 자료를 이용하여 2개년(1999-2000) 동안 보정한 결과 모형효율계수는 0.77~0.68, R²는 0.79~0.76 이었고, 토지이용별로 보정된 매개변수를 적용하여 2개년(2001-2002) 동안 검정한 결과 모형효율계수는 0.69~0.60, R²는 0.71~0.60으로 관측치와 모의치의 유출거동이 유사함을 알 수 있었다.
- 2) 미래의 불확실성을 줄이고자 개선된 CA-Markov

기법을 이용하여 미래 토지이용을 예측하였고, 월별 NDVI와 월평균기온간의 선형 회귀식을 이용하여 미래의 식생변화를 추정하였다. 그 결과 토지이용은 2080년에는 산림과 논이 각각 10.8%, 6.2% 감소하였고 도시는 14.2% 증가하였다. 또한 NDVI의 최대값은 현재의 0.51에서 미래 2080년에는 2개의 GCM이 0.56 (MIROC3.2 hires, A1B)과 0.57(ECHAM5-OM, A2 and A1B)로 나타났다.

- 3) 미래 기후자료 구축을 위해 IPCC AR4 모델인 MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM을 선정하였고 A2, A1B, B1 시나리오를 사용하였다. 1977년부터 2100년까지의 미래 기후자료를 준비하여 과거 30년(1977-2006, baseline) 실측자료와 통계적인 유사성을 가지도록 보정하였고, Change factor(CF) method를 이용하여 일단위로 downscaling하였다. 그 결과 미래 온도는 2개의 GCM 모두 전반적으로 모든 계절에서 상승하였고 특히 겨울에 가장

많이 상승하였다. 미래 강수량은 모든 GCM 시나리오에서 여름에 감소경향을 보였고 봄, 가을, 겨울에는 증가경향을 보였다. HMROCC3.2 hires와 ECHAM5-OM은 A1B 시나리오의 경우 2080s에 겨울에 각각 60.1%, 60.8%의 증가를 보였다

- 4) 2개 GCM(MIROCC3.2 hires, ECHAM5-OM)의 A2, A1B, B1 시나리오 모의 결과에 따른 미래 수문요소의 변화를 분석한 결과 MIROCC3.2 hires와 ECHAM5-OM 모두 봄 유출량은 증가하였고 여름 유출량은 MIROCC3.2 hires와 ECHAM5-OM 모두 감소경향을 보였다. 증발산량은 MIROCC3.2 hires가 3%, ECHAM5-OM이 16% 증가하였고 여름과 봄에 가장 크게 증가하였다. 미래 토양수분량은 현재에 비해 약 1%정도 증가하였다.

미래의 수자원 변동은 기후변화 시나리오와 GCM의 불확실성으로 인해 정확하게 묘사될 수는 없다. 그러나 본 연구를 통해 미래에는 온도의 증가와 강수의 변화로 인해 수문요소의 계절변동은 변화하게 됨을 알 수 있었다. 향후 수자원의 변동과 이에 따른 영향을 평가하는데 있어 다양한 GCM과 시나리오에 대한 연구가 꾸준히 진행되어야 할 것이다. 이에 따라 본 연구의 결과는 안정적이고 지속적인 물의 수요와 효율적인 이용을 위한 수자원의 계획과 관리에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-2-3, 50%)과 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2006-000-10343-0, 50%).

참고 문헌

기상연구소 (2004). 기후변화협약 대응 지역기후시나리오 활용기술개발(III), 기상연구소
 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). "기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회지, 제37권, 제2호, pp. 185-193.
 김성준 (2002) "수자원 분포의 시공간적 변동." **한국농림기상학회지**, 한국농림기상학회, 제4권, 제3권, pp. 175-196.
 배덕효, 정일원 (2005). "기후변화에 따른 수자원 영향 평가." **방재정보**, 한국방재협회, 제21호, pp. 16-22.
 안소라, 이용준, 박근애, 김성준 (2008). "미래토지이용

및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 215-224.
 안재현, 유철상, 윤용남 (2001). "GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 335-345.
 유철상, 이동률 (2000). "기후변화와 수자원: 국내의 연구동향." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권 3호, pp. 42-47.
 이용준, 김성준 (2007). 미래 토지이용변화 예측을 위한 개선된 CA-Markov 기법의 제안 및 적용, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제6D호, pp. 809-817.
 Ahn, S.R., Ha, R., Lee, Y.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2008). "Evaluation of future climate change impact on Gyeongancheon Watershed using SLURP hydrological model." *Korean Journal of Remote Sensing*. Vol. 24, No. 1, pp. 45-55.
 Andersson, L., Wilk, J., Todd, M.C., Hughes, D.A., Earle, A., Kniveton, D., Layberry, R., and Savenije, H.G. (2006). "Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River." *Journal of Hydrology*. Vol. 331, pp. 43-57.
 Carter, T.R., Hulme, M., and Lal, M. (1999). *IPCC-TGCIAGuidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*, version 1, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
 Diaz-nieto, J., and Wilby, R.L. (2005). "A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods impacts on low flows in the River Thames." *Climatic Change*. Vol. 69, pp. 245-268.
 Doogers, P., and Aerts, J. (2005). "Adaptation strategies to climate change and climate variability: A comparative study between seven contrasting river basins." *Physics and Chemistry of the earth*. Vol. 30, pp. 339-346.
 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.
 Garbrecht, J. and Martz, L.W. (1997). *TOPAZ*

- Version 1.20: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parameterization - Overview.* Rep.# GRL 97-2, Grazinglands Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service, El Reno, Oklahoma, pp. 21.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S.,D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC.-TGCLA (1999). *Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*, Version 1. Prepared by Carter, T. R., M. Hulme, and M. Lal, Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, pp. 69.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin, London.
- Kite, G.W. (1975). "Performance of two deterministic hydrological models." *IASH-AISH Publication*, Vol. 115, pp. 136-142.
- Kite, G.W. (1998) "Land surface parameterizations of GCMs and macroscale hydrological models." *Journal American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 6, pp. 1247-1254.
- Kite, G.W. (1993). "Application of a land class hydrological model to climatic change." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 7, pp. 2377-2384.
- Kite, G.W., Ellehoj, E., and Dalton, A. (1996). *GIS for large-scale watershed modelling*, in Geographical Information Systems in Hydrology. Singh, V.P.; Fiorentino, M (eds). Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Mann, H.B., (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. Vol. 13, pp. 245-259.
- Merritt, W.S., Alila, Y., Barton, M., Taylor, B., Cohen, S., and Neilsen. D. (2006). "Hydrologic response to scenario of climate change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia." *Journal of Hydrology*. Vol. 326, pp. 79-108.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models; Part 1 - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., and Harlan, J.C. (1974). *Monitoring the vernal advancement of natural vegetation*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, Final Rep.
- Sefton, C.E.M., and Boorman, D.B. (1997). "A Resinal Investigation of Climate Change Impacts on UK Streamflows." *Journal of Hydrology*, Vol. 195, pp. 26-44.
- Snell, S.E., Gopal, S., and Kaufmann. R.K. (2000). "Spatial interpolation of surface air temperatures using artificial neural networks: Evaluating their use for downscaling GCMs." *Journal of Climate*. Vol. 13, No. 5, pp. 886-895.
- Viner, D., and Mayer, L. (1994). *Climate Change Scenarios of Impact Studies in the UK*, Report, Contract No PECD 7/12/96, CRU, Norwich, University of East Anglia.
- Wilby, R.L., and Harris, I. (2006). "A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames." *Water Resources Research*. Vol. 42, pp. 1-10.
- Zhang, X., Srinivasan, R., and Hao, F. (2007). "Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River Basin using the SWAT model." *ASAE*. Vol. 50, No. 3, pp. 901-910.
- Zhou, L., Dickinson, R. E., Tian, Y., Zeng, X., Dai, Y., Yang, Z. L., Schaaf, C. B., Gao, F., Jin, Y., Strahler, A., Myneni, R.B., Yu, H., and Shaikh. M. (2003). "Comparison of seasonal and spatial variations of albedos from Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Common Land Model." *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108, No. 15, pp. 1-20.

(논문번호:08-106/접수:2008.11.06/심사완료:2008.12.01)