

# 기후변화에 따른 A1B 시나리오의 유출 및 증발산량 영향 평가

## Assessment of Streamflow and Evapotranspiration Influence on the Climate Change under SRES A1B Scenario

안소라\*, 박민지\*\*, 박근애\*\*\*, 김성준\*\*\*\*

So-Ra AHN, Min-Ji PARK, Geun-Ae PARK, Seong-Joon KIM

### 요 지

본 연구에서는 SLURP 수문모형을 이용하여 미래기후와 예측된 토지이용자료 및 식생의 활력도를 고려한 상태에서 하천유역의 유출 및 증발산량에 미치는 영향을 분석하였다. 경안천 상류유역(260.04 km<sup>2</sup>)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 나타났다. 미래 기후자료는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제공하는 A1B 기후변화시나리오의 MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM, HadCM3 모형의 결과값을 이용하였다. 먼저 과거 30년 기후자료(1977-2006, baseline)를 바탕으로 각 모형별 20C3M(20th Century Climate Coupled Model)의 모의 결과값을 이용하여 강수와 온도를 보정한 뒤 Change Factor Method로 Downscaling하였다. 미래 기후자료는 2020s(2010-2039), 2050s(2040-2069), 2080s(2070-2099)의 세 기간으로 나누어 분석하였다. 미래 토지이용은 과거 시계열 Landsat 토지이용도를 이용하여 CA-Markov기법으로 예측된 토지이용을 사용하였으며, 미래의 식생정보 예측을 위하여 NOAA/AVHRR 위성영상으로부터 추출된 월별 NDVI(1998-2002)와 월평균기온간의 선형 회귀식을 도출하여 미래의 식생지수 정보를 추정하였다. 모형의 적용결과, 미래기후변화에 따른 연평균 하천유출은 현재보다 최대 2020s는 23.9%, 2050s는 40.7%, 2080s는 39.5% 증가하였다. 봄 강수량 패턴의 변화로 유출량 증가하는 것으로 나타났으며 여름에는 유출량은 감소하고 증발산량은 증가하는 결과를 보였다.

**핵심용어 : SLURP, 기후변화, GCMs, Downscaling, 유출, 증발산량**

## 1. 서 론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서에 의하면 현재 지구온난화가 발생하고 있는 것은 자명한 사실이며 이러한 지구 온난화는 물의 순환과 직접 연관된 현상으로 기후변화는 곧 수문 순환의 변화를 야기한다고 볼 수 있다(Arnell, 1999; IPCC, 2001). 다가오는 21세기에는 물이라는 자원으로 인한 국제분쟁이 발생할 것으로 국제적인 기관들은 경고하고 있으며 특히, 물 부족 국가로 분류된 우리나라의 경우 물 문제는 우선적으로 해결되어야 하는 중요한 문제일 것이다. 심각해지고 있는 수자원 문제에 대해 원활하고 효과적으로 수자원을 활용하기 위해서는 기후변화에 의한 수문의 변화에 대한 정확한 파악이 필수적이라고 할 수 있다. 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하는데 있어 GCM(General Circulation Model) 결과는 가장 믿을 수 있는 수단이며 최근 수문모형과 GCM을 결합하여 기후변화에 대한 영향을 평가하는 연구가 많이 진행되고 있다. 또한 토지이용의 변화는 직접적으로 증발산, 침투, 지표수와 지하수의 함양을 변화시키고, 식생의 변화는 토양으로부터의 증발과 식물로부터의 증산에 영향을 미치는 요인이 된다. 따라서 기후변화와 함께 토지이용과 식생의 계절적 변화도 고려해야만 기후변화에 의한 수문의 변화를 정확하게 파악하고 더욱 심각해지는 기후변화에 적절히 대응할 수 있을 것이다.

\* 정회원-건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정-E-mail : [ahnsora@konkuk.ac.kr](mailto:ahnsora@konkuk.ac.kr)

\*\* 정회원-건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정-E-mail : [iang@konkuk.ac.kr](mailto:iang@konkuk.ac.kr)

\*\*\* 정회원-건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정-E-mail : [dolpin2000@konkuk.ac.kr](mailto:dolpin2000@konkuk.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원-건국대학교 사회환경시스템공학과 교수-E-mail : [kimsi@konkuk.ac.kr](mailto:kimsi@konkuk.ac.kr)

## 2. SLURP 모형의 적용

### 3.1 대상유역 및 방법론

본 연구의 대상유역은 경안천 상류유역(260.04km<sup>2</sup>)으로 지난 20여년간 도시화에 의해 토지이용의 변화가 꾸준히 진행된 유역이다(Fig. 1). 본 유역은 전체면적의 60% 이상이 산림으로 이루어져 있으며, 과거 30년 평균 강수량은 1371.1mm이고 연평균 기온은 10.9℃로 우리나라의 평균적인 기후 특성을 나타내고 있다. 본 연구에서는 토지이용변화와 식생변화를 고려하여 기후변화가 유출 및 증발산량에 미치는 영향을 평가하였다. Landsat TM, ETM+ 위성영상으로부터 작성된 토지이용도를 이용하여 개선된 CA-Markov 기법으로 미래 토지이용변화를 예측하고 NOAA AVHRR 위성영상으로부터 추출된 월별 NDVI (1997-2004)를 이용하여 기온-NDVI와의 선형회귀분석을 통해 미래의 식생정보를 예측하였다. 미래 기후자료로 SRES A1B 시나리오에 대한 3개의 GCM(MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM, HadCM3) 모의결과 값을 SLURP 모형에 적용하여 기후변화가 유출 및 증발산량의 변화를 정량적으로 분석하였다.

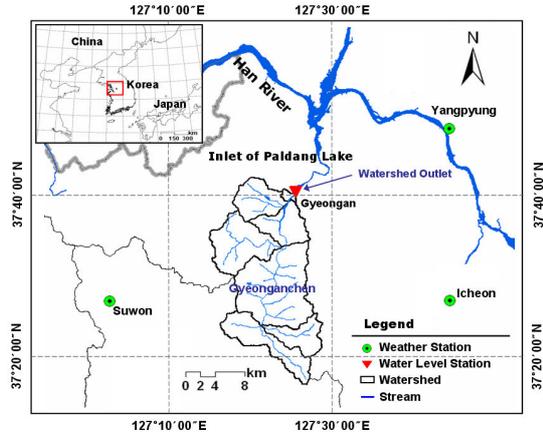


Fig. 1. The Study Watershed

### 3.2 GIS/RS 자료 및 수문기상자료

본 연구에서는 1:5,000 NGIS(National Geographic Information System) 수치지도를 사용하여 해상도 30m×30m의 DEM(Digital Elevation Model)을 구축하였다. 토지이용도는 Landsat TM, ETM+ 위성영상을 사용하여 5장(1987년, 1991년, 1996년, 2000년, 2004년)의 시계열 토지이용도를 작성하였다. 토양특성 자료는 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 토지피복별 토양수분함유량, 시들음점, 공극률과 같은 토양의 물리적 매개변수를 추출하였다. 식생정보로 8개년(1997~2004)의 3월~11월까지의 NOAA AVHRR 위성영상을 사용하여 월별 NDVI를 산출하였다. 연구에 사용된 기상수문자료는 기상청에서 제공하는 수원, 이천, 양평 기상관측소의 강수량, 평균/최저/최고온도, 풍속, 상대습도, 일조시간 자료(1977-2006)를 이용하였으며, 한강홍수통제소에서 제공하는 경안수위관측소의 유출량 자료(1999-2002)를 이용하였다.

### 3.3 모형의 보정 및 검증

본 연구에서는 모형의 보정을 위해 2개년(1999-2000) 동안의 유출량 자료를 이용하여 모형에서 민감한 매개변수를 중심으로 시행착오법에 의하여 최적화 하였다. 6개의 매개변수(지표하 초기저류량, 최대침투율, 지표수 보존상수 및 최대저류량, 지표하 보존상수 및 최대저류량)가 민감도가 높게 나타났고 특히 지표하 초기저류량이 증발산량에 가장 민감하였다. 증발산량 산정방법으로는 FAO Penman-Monteith 방법을 이용하였다. 보정 결과 모형효율계수는 0.77~0.68, 검증 결과 모형효율계수는 0.69~0.60 이었다 (Table 1).

Table 1. Summary of model calibration and verification

Period	P (mm)	Observed		Simulated			RMSE (mm/day)	R <sup>2</sup>	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

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

## 4. 기후변화에 따른 수문분석

### 4.1 미래 기후자료의 downscaling

본 연구에서는 미래 기후자료로 IPCC A1B 기후변화시나리오의 3개 GCM(MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM,

HadCM3) 월 모의 결과 값을 이용하였다(Table 2). 유역규모의 기후변화 시나리오를 작성하기 위해 첫째로, 20세기 모의 결과인 20C3M(20th Century Climate Coupled Model)의 결과 값과 과거 30년(1977-2006, baseline) 관측 자료를 이용하여 온도, 강수 자료에 대해 통계적인 유사성을 가지도록 보정하였다(Droogers 와 Aerts, 2005) (Fig. 2). 둘째로, 1차적으로 보정된 GCM 모의 값을 CF(Change Factor) Method를 이용하여 관측소별로 downscaling 하였다(Fig. 3). 이 기법은 현재 기후의 공간패턴이 미래에는 변화가 없다고 가정하고, 특정 년도를 기준으로 비교할 수 있는 장점을 가지며 기후변화 영향평가에 대한 많은 연구에 적용되어 왔다(Wilby와 Harris, 2006). 미래 기상자료는 2030s(2016-2045), 2060s(2046-2075), 2090s(2071-2100)로 구분되었다. 연평균 온도는 2080s에 MIROC3.2 hires의 경우 4°C, ECHAM5-OM의 경우 3.7°C, HadCM3의 경우 4.7°C 상승하였다. 연평균 강수량은 MIROC3.2 hires의 경우 19.9%, ECHAM5-OM의 경우 2.9%, HadCM3의 경우 32.5% 상승하였다. MIROC3.2 hires의 경우 2080s에 겨울 온도가 6.2°C, ECHAM5-OM의 경우 2080s에 4.6°C 상승하였다. 2080s에 봄 강수량이 MIROC3.2 hires가 47.8%, ECHAM5-OM이 55.3%, HadCM3가 56.6% 증가하였다. 반면 2080s에 여름 강수량은 HadCM3만이 14.6% 증가하였고 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM은 각각 11.8%, 59.8% 감소하는 것으로 나타났다.

Table 2. Details of GCMs data used in this study

AR4 (2007)	Model	Center	Country	Scenario	Grid size
	MIROC3.2 hires	NIES	Japan	A1B	320×160 (1.1°×1.1°)
	ECHAM5-OM	MPI-M	Germany	A1B	192×96 (1.9°×1.9°)
	HadCM3	UKMO	UK	A1B	96×73 (3.7°×2.5°)

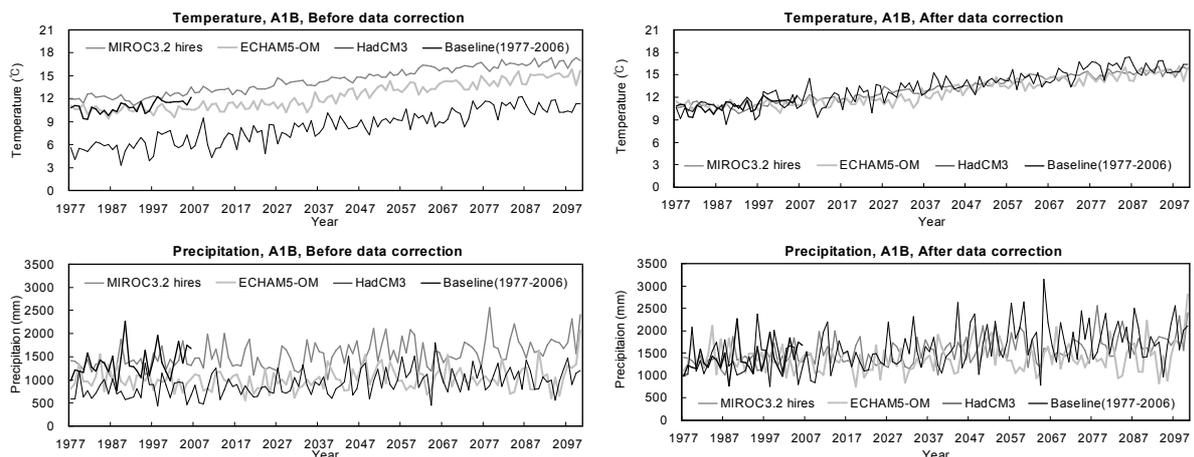


Fig. 2. Adjusted temperature and precipitation data for three GCMs data using 30 years (1977-2006) historical observed data

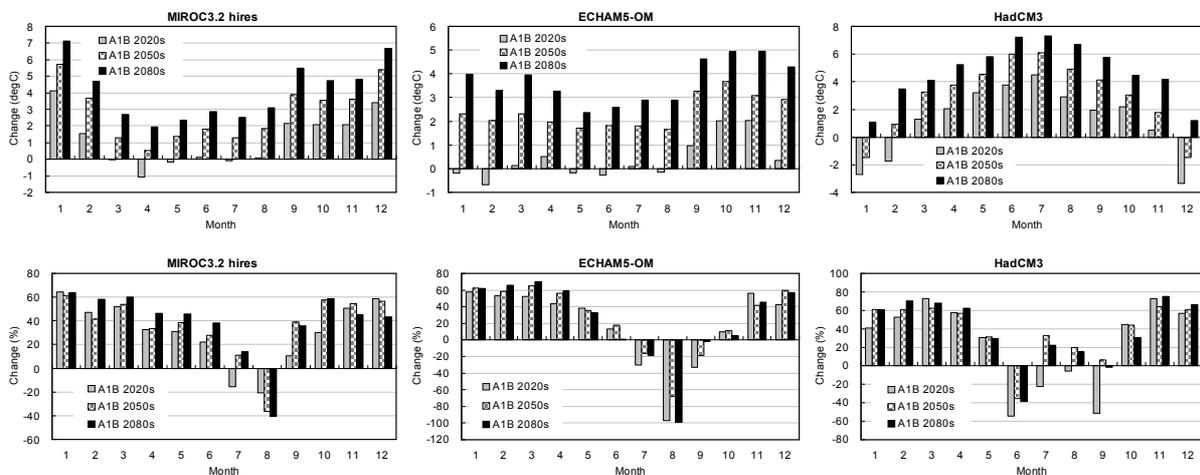


Fig. 3. Changes in temperature and precipitation for the CF method

#### 4.2 개선된 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용자료

기존의 CA-Markov기법은 토지이용의 변화를 추이경향을 통해 잘 반영하지만 분류항목에 대한 일반적인 내용을 포함하지 못하며 인위적인 토지이용의 변화에 따른 전이확률의 변화를 고려하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 이용준 과 김성준 (2007)의 연구결과를 토대로 개선된 CA-Markov 기법을 이용하여 미래 토지이용을 예측하였다. 과거부터 미래까지의 시계열 토지이용 경향을 분석한 결과 산림의 경우 1987(152.3km<sup>2</sup>, 58.5%)년부터 지속적으로 감소하여 2090년에는 128.4km<sup>2</sup>(49.3%)으로 예측되었고, 논은 1987년 45.2km<sup>2</sup>(17.3%)에 비해 2090년에는 11.1km<sup>2</sup>(4.3%)로 감소하고, 도시의 경우 1987년 11.5km<sup>2</sup>(4.4%)에 비해 2090년에는 50.1km<sup>2</sup>(19.2%)로 증가하는 것으로 예측되었다.

#### 4.3 NOAA/AVHRR NDVI-온도와의 선형 회귀식에 의한 미래 식생자료

미래 식생정보 예측을 위해 앞서 구축한 8개년(1997~2004)에 걸친 월별 NDVI와 월평균 기온과의 선형회귀식을 통해 3개 GCM의 2020s, 2050s, 2080s에 대해 CF method로 downscaling된 월 평균기온을 사용하여 미래의 토지피복별 월 NDVI를 예측하였다. 식생 활력도의 최대값은 과거(1997-2004)의 0.51에서 MIROC3.2 hires는 미래 2080s에는 연평균온도가 4℃ 상승함에 따라 0.56으로 나타났고 ECHAM5-OM의 경우 연평균온도가 3.7℃ 상승함에 따라 0.57, HadCM3는 연평균온도가 4.7℃ 상승함에 따라 0.64로 나타났다(Table. 3).

Table 3. The future predicted monthly NDVIs for A1B scenarios of three GCMs

Period	Baseline		MIROC3.2 hires		ECHAM5-OM		HadCM3	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
1977-2004	0.51	0.15	-	-	-	-	-	-
2020s	-	-	0.52	0.15	0.52	0.14	0.60	0.12
2050s	-	-	0.54	0.17	0.55	0.16	0.59	0.14
2080s	-	-	0.56	0.18	0.57	0.19	0.64	0.18

#### 4.4 기후변화에 따른 유출 및 증발산량 분석

연 유출량 변화의 범위는 2020s에는 -17.5%(ECHAM5-OM)에서 23.9%(HadCM3)로 나타났고, 2050s에는 +6.5%(ECHAM5-OM)에서 +40.7%(HadCM3), 2080s에는 +0.8%(ECHAM5-OM)에서 +39.5%(HadCM3)로 나타났다. 봄 유출량은 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM이 증가하는 것으로 나타났고 HadCM3는 봄과 여름에 모두 증가하는 것으로 나타났다. 연 증발산량은 미래 강수가 증가함에 비슷하거나 높게 예측되었지만 강수량에 대한 증발산량의 비는 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다. 여름과 겨울에 미래 온도가 증가함에 따라 증발산량도 증가하였다. 또한 연 증발량은 유출이 증가함에도 불구하고 작아지는 경향을 보였는데 이는 여름에 유출이 큰 폭으로 감소함에 따라 여름 증발량이 감소했기 때문으로 판단된다. 연 증발량은 온도와 유출이 증가함에 따라 전체적으로 증가하였다. Table 4와 Fig. 4에는 3개의 GCM에 대한 모의된 유출과 증발산량을 나타내었다.

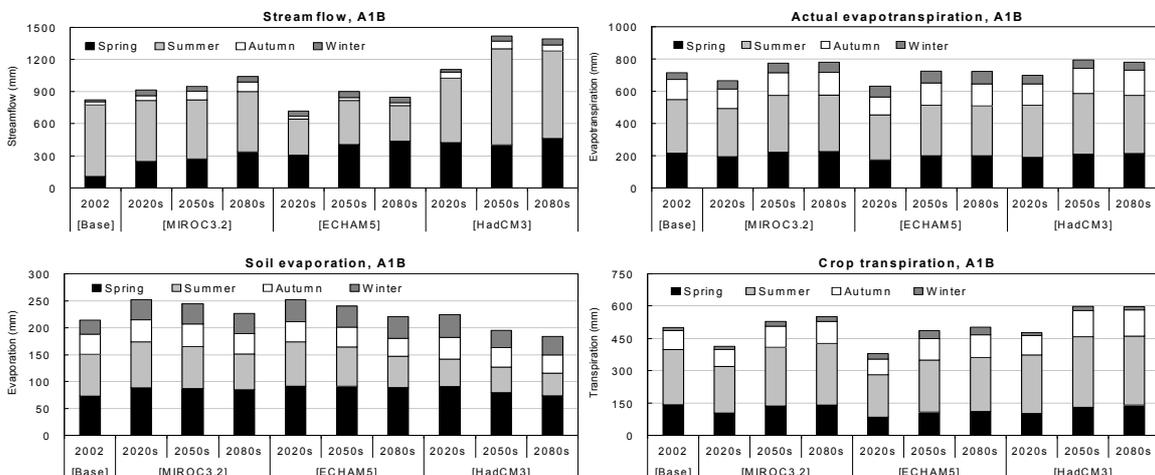


Fig. 4. The future seasonal mean streamflow and evapotranspiration of three GCMs

Table 4. Summary of future predicted annual streamflow and evapotranspiration of three GCMs

Period		P (mm)	P variation (%)	Q (mm) [QR (%)]	Q variation (%)	AET (mm) [ETR (%)]	AE (mm)	AT (mm)
[Baseline]	2002	1414.4	-	841.3 [58]	-	715.1 [51]	214.1	501.0
MIROC3.2 hires	2020s	1578.9	+ 10.4	916.2 [58]	+ 8.2	666.1 [42]	251.8	414.3
	2050s	1640.8	+ 13.8	946.8 [58]	+ 11.1	773.6 [47]	244.7	528.9
	2080s	1765.0	+ 19.9	1043.2 [59]	+ 19.4	778.9 [44]	226.8	552.1
ECHAM5-OM	2020s	1343.6	-5.3	716.3 [53]	-17.5	630.9 [47]	252.0	378.9
	2050s	1577.0	+ 9.2	900.2 [58]	+ 6.5	726.0 [47]	239.9	486.1
	2080s	1503.7	+ 2.9	847.7 [56]	+ 0.8	723.9 [48]	220.3	503.6
HadCM3	2020s	1764.4	+ 19.8	1105.1 [63]	+ 23.9	700.8 [40]	223.9	476.9
	2050s	2121.1	+ 33.3	1417.6 [67]	+ 40.7	792.9 [37]	195.2	597.7
	2080s	2095.6	+ 32.5	1390.8 [66]	+ 39.5	780.7 [37]	183.4	597.1

P: Precipitation, Q: Streamflow, QR: Runoff ratio, AET: Actual evapotranspiration ETR: Actual evapotranspiration ratio, AE: Soil evaporation, AT: Crop transpiration

### 3. 결 론

본 연구에서는 경안천 유역을 대상으로 SLURP 모형을 이용하여 미래 토지이용변화와 식생의 변화를 고려하여 기후변화가 유출 및 증발산량에 미치는 영향을 분석하였다. 개선된 CA-Markov 기법을 이용하여 미래 토지이용을 예측한 결과 미래에 산림과 논은 각각 10.8%, 6.2% 감소한 반면 도시는 14.2% 증가하였다. 온도-NDVI 선형회귀식에 의해 추정된 식생지수의 최대값은 현재 0.51에서 미래에는 0.64로 증가하였다. SRES A1B 시나리오의 3개 GCM(MIROC3.2 hires, ECHAM5-ON, HadCM3) 결과값을 보정하고 downscaling한 결과 온도는 2080s에 4°C(MIROC3.2 hires), 3.7°C(ECHAM5-OM), 4.7°C(HadCM3) 상승하였고 강수량은 19.9%(MIROC3.2 hires), 2.9%(ECHAM5-OM), 32.5%(HadCM3) 상승하였다. 이후 GCM 모의 결과값을 이용하여 유출 및 증발산량을 분석한 결과 연 유출량 변화의 범위는 2020s에는 -17.5%(ECHAM5-OM)에서 23.9%(HadCM3)로 나타났고, 2050s에는 +6.5%(ECHAM5-OM)에서 +40.7%(HadCM3), 2080s에는 +0.8%(ECHAM5-OM)에서 +39.5%(HadCM3)로 나타났다. 연 강수량에 대한 증발산량의 비는 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다. 미래 기후변화 시나리오는 불확실성을 내포하고 있기 때문에 기후변화에 의한 수자원의 영향을 정확하게 모사하기는 어려운 것이 사실이나 본 연구의 결과는 지속적인 물의 수요와 효율적인 이용을 위한 수자원의 계획과 관리에 포함되어야 한다.

### 감 사 의 글

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2006-000-10343-0)

### 참 고 문 헌

- 이용준, 김성준(2007). 미래 토지이용변화 예측을 위한 개선된 CA-Markov 기법의 제안 및 적용, 대한토목학회논문집, 제 27권 제 6D호, pp. 509-817.
- Arnell, N. M.(1999). Climate change and global water resources. Global Environmental Change. Vol. 9, pp. S31-S49.
- 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.
- IPCC.(2001). Climate Change 2001: Scientific Basis. In: Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, B. Metz, et al. (Editors). Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change [by] Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA.
- Wilby, R. L., and Harris, I.(2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. Water Resources Research. Vol. pp. 42, 1-10.