

SWAT 모형을 이용한 기후와 식생 활력도 변화가 수자원에 미치는 영향 평가

Assessment of Climate and Vegetation Canopy Change Impacts on Water Resources using SWAT Model

박민지* · 신형진* · 박종윤* · 강부식** · 김성준*,†

Park, Min Ji* · Shin, Hyung Jin* · Park, Jong Yoon* · Kang, Boo Sik** · Kim, Seong Joon*,†

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the future potential climate and vegetation canopy change impact on a dam watershed hydrology. A 6,661.5 km² dam watershed, the part of Han-river basin which has the watershed outlet at Chungju dam was selected. The SWAT model was calibrated and verified using 9 year and another 7 year daily dam inflow data. The Nash-Sutcliffe model efficiency ranged from 0.43 to 0.91. The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma) Coupled Global Climate Model3 (CGCM3) data based on Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) SRES (Special Report Emission Scenarios) B1 scenario was adopted for future climate condition and the data were downscaled by artificial neural network method. The future vegetation canopy condition was predicted by using nonlinear regression between monthly LAI (Leaf Area Index) of each land cover from MODIS satellite image and monthly mean temperature was accomplished. The future watershed mean temperatures of 2100 increased by 2.0 °C, and the precipitation increased by 20.4 % based on 2001 data. The vegetation canopy prediction results showed that the 2100 year LAI of deciduous, evergreen and mixed on April increased 57.1 %, 15.5 %, and 62.5% respectively. The 2100 evapotranspiration, dam inflow, soil moisture content and groundwater recharge increased 10.2 %, 38.1 %, 16.6 %, and 118.9 % respectively. The consideration of future vegetation canopy affected up to 3.0%, 1.3%, 4.2%, and 3.6% respectively for each component.

Keywords: Climate change; MODIS LAI; Evapotranspiration; Soil moisture; SWAT

1. 서 론

인류의 산업화, 공업화에 따른 화학연료 증가로 인한 기후변화가 기정사실화 되고 있다. 전 세계적으로 20세기 약 0.6±0.2 °C 정도 상승에 따른 기상이변 피해가 잇따라 보고되고 있다. 수자원 분야에 있어 온도와 강수량 변화로 인한 직접적인 영향 외에도 식생의 종 뿐 아니라 이에 따른 식생의 성장기간, 엽면적 지수 같은 속성에 영향을 끼쳐 식생 변화로 인한 간접

적인 영향을 받기도 한다. 이러한 이유로 1990년대부터 잦은 홍수와 가뭄이 반복되어 안정적인 물 공급을 위한 수자원 계획 수립에 불확실성을 증대시키고 자연재해의 대비책 마련에 어려움을 가중시키고 있다. 또한 IPCC (2007) 보고서에 따르면 장기적으로 2080년대는 해수면 상승으로 해안지역의 30 % 이상이 유실되고 전 세계 인구의 20 % 이상이 홍수로 인한 위협에 노출될 것이라는 비관적인 미래를 예측하고 있어 향후 이에 따른 대비책 마련이 시급할 수 있다. 기후변화에 따른 수자원 정책 수립을 위해서 수문 환경에 영향 파악이 우선되어야 한다.

기상요소와 관련하여 변화되는 식생 정보는 수문 모형에 입력되어 유출변화 해석시에 사용되며 식생의 변화 분석과 지표 환경을 효과적으로 분석하기 위해 원격탐사 기법이 매우 유용하게 사용되고 있으며, 이는 시계열적인 공간 변화에 대한 신속하고 정확한 정보 확보 및 처리를 가능하게 한다. 이러한 원격탐사를 이용한 식생 정보 추출에 대한 연구도 활발하게 진행

* 건국대학교 사회환경시스템공학과

** 단국대학교 토목환경공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3749

Fax: +82-2-444-0186

E-mail address: kimsj@konkuk.ac.kr

2009년 7월 21일 투고

2009년 9월 1일 심사완료

2009년 9월 23일 게재확정

중이다, 국내에서는 가뭄 홍수 등의 재해현상에 대한 파악을 위해 NOAA 위성영상으로부터 추출된 식생 및 증발산량 자료를 이용하여 기후학적 물수지를 분석한 연구가 발표된 바 있다 (Kwon et al., 2005). 또한 토지피복 변화에 따른 식생지수 (NDVI)의 분포나 변화에 관한 연구(Sung and Park, 2000)에 원격탐사 기법을 사용하거나, NDVI 및 기온정보를 조합한 증발산량을 산정하는데 NOAA AVHRR 위성자료로부터 얻어지는 NDVI를 활용하였다 (Shin et al., 2006). Kim and Yim (2005)은 도시화 등의 환경변화에 따른 지역기후변화 특성을 분석하기 위해 NDVI 값의 변화 추세를 비교 분석 하였다. 또한 Ha et al. (2007)은 NOAA AVHRR 위성영상과 MODIS의 NDVI와 온도와의 상관관계를 분석하여 미래 식생정보 예측 기법을 제안하였으며, Ahn et al. (2008)은 다양한 GCM 기후변화 시나리오와 토지이용 변화 및 NOAA NDVI를 이용하여 경안천 유역의 미래 수문 변화를 예측하였다. 국외의 경우, Yingxin et al. (1999)은 수문모델인 MIKE-SHE 모형의 입력자료로 사용되는 LAI의 추정을 위하여 Myneni and Williams (1994)이 제안한 식을 사용한 바 있다.

따라서, 본 연구에서는 MODIS 센서에 의한 영상에서 추출된 식생정보 (LAI)와 온도의 비선형 회귀식을 추출하고 인공신경망 방법을 이용하여 다운스케일된 캐나다 전지구모형인 CGCM3의 온실가스 배출 시나리오에 따른 기후변화 값을 예측하여 매개 변수가 최적화된 SWAT 모형에 적용하여 미래 기후에 따른 수문 상황을 평가하고자 한다.

II. SWAT 모형 개요

본 연구에서 활용하고자 하는 SWAT (Soil Water Assessment Tool) 모형은 장기 강우-유출모형 (Continuous Rainfall-Runoff Model)으로 장기간에 걸친 다양한 토양속성과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 유역의 유출량 및 비점원오염을 추정하기 위해 미국 농무성 농업연구소 (USDA ARS)에 의해 개발된 이후 30년간 보정된 유역 모델이다. SWAT은 일단위 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 장기강우유출모형으로서 4가지 부모형 (수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형)으로 구성되어있다. 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위 (HRU: Hydrologic Response Unit)를 기본으로 하며 각 HRU는 수문학적 동질성을 가진다. 물수지는 차단능, 응설, 토양단면, 알고 깊은 대수층이 고려되어 모의된다. 토양단면은 여러 층으로 분류되며, 토양 수분은 침투, 증발, 작물이행, 측방유출, 침투 과정이 포함된다. 기저유량은 대수층에서 하천으로 지체시간으로 계산된다. 얇은 대수층은 깊은 대수층에서 침투, 관정, 증발로 고려된다. SCS 유출

곡선법과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 Kinematic Storage Model로 모의된다.

III. 대상유역 및 입력자료 구축

1. 대상유역

본 연구의 대상 유역인 충주댐 유역의 면적은 6,661.5 km²이며, 유역둘레는 471.6 km, 유역평균폭은 23.5 km, 유역평균표고는 609.1 m, 유역평균경사는 36.9 %로 국내 북동부 산악지역에 위치해있으며 산림면적이 5,481.7 km²으로서 유역면적의 83.0 %에 이르는 산림유역이다. 5개 기상관측소 (원주, 영월, 충주, 대관령, 제천)가 근접하여 있다. 본 유역은 남한강상류, 평창강, 충주댐 세 개의 중권역 유역이 합류되어 대표성을 가지며, 모형의 검보정과 입력자료 구축을 위한 과거 수문 및 기상 자료의 신뢰성이 우수한 지역이다. 행정구역상으로는 강원도, 충청북도, 경상북도가 각각 69.9 %, 28.4 %, 1.7 %를 차지하고 있다. 연평균 강수량은 1,359.5 mm이며, 온도는 9.4 °C이다. 토양특성은 식양토 45 %, 사양토 40 %, 미사질식양토와 사토가 8 %로 이루어져 있다. 유역 내 수위관측소 위치를 고려하여 25개 소유역, 148개의 HRU로 분할하였다 (Fig. 1).

2. 입력자료 구축

SWAT 구동에는 최고, 최저온도, 풍속, 일사량, 상대습도, 강수량의 기상자료가 필요하다. 충주, 제천, 영월, 대관령, 원주 기상청 5개 기상대의 강수량을 포함한 기상자료를 구축하였으며, 수주, 영월1, 상동, 영춘, 단양, 청풍, 임계, 정선, 대화, 사북, 진부, 황계, 안흥, 제천, 충주댐, 방림, 미탄, 왕산, 하장 19개 관측소 (Fig. 1)에서 87년부터 신림, 연덕, 하동, 어상천,

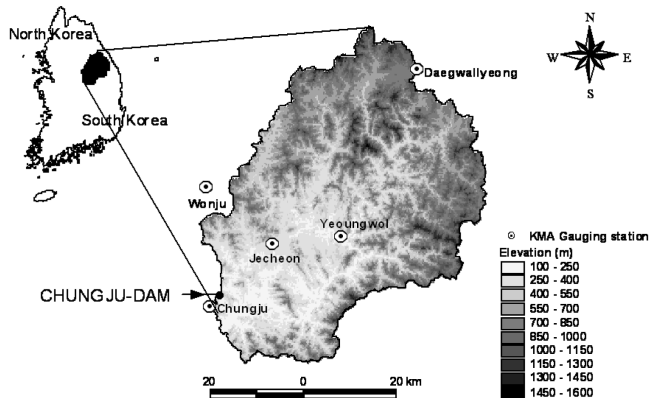


Fig. 1 The study watershed

Table 1 Data sets for SWAT model

| Data Type | Source | Scale | Data Description / Properties |
|------------------|--|----------|--|
| Terrain | Korea National Geography Institute | 1/5,000 | Digital Elevation Model (DEM) |
| Soil | Korea Rural Development Administration | 1/25,000 | Soil classifications and physical properties such as bulk density, texture, and saturated conductivity. |
| Vegetation cover | Terra MODIS satellite image | 1 km | Leaf Area Index (LAI) |
| Weather | Korea Meteorological Administration | - | Daily precipitation, minimum and maximum temperature, mean wind speed and relative humidity data from 1977 to 2006 |
| Land Use | Water Management Information System | 30 m | Landsat land use classification (2000 yr., 9 classes) |
| Dam inflow | Han River Flood Control Office | - | Daily dam inflow data from 1987 to 2006 |

봉양, 덕산, 문곡, 수항, 유천, 청옥산, 덕암 관측소의 92년 6월부터 2006년의 강우자료를 구축하였다. 1987년부터 2006년까지의 충추댐의 댐유입량 자료를 검토정에 사용하였다. 미래 유출 모의를 위해 CCCma (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) CGCM3 (The third generation Coupled Global climate Model) 대기-해양결합모형을 통하여 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) SRES (Special Report on Emissions Scenarios) 시나리오 B1의 일별 자료를 구축하였다. B1 온실 가스 배출 시나리오는 지속발전형 사회 시나리오로서 교육을 포함한 급속한 사회발전에 의해 급속한 인구 동태에 변화가 생기며, 경제 활동의 탈물질화나 물질 집약적, 에너지 집약적 활동의 포화 상태, 에너지 효율 개선책의 실행에 의해 에너지 수요의 증가가 상대적으로 작으며, 비화석 연료 개발이 행해진다는 가정 하에 모의된다. 모형 구동을 위해 구축된 입력 자료는 Table 1과 같다. 토지이용도는 전체 검토정 기간에 2000년 자료를 사용하였다.

IV. 결 과

1. MODIS LAI 구축

가. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer) 자료 취득의 용이성과 경제성 그리고 촬영 주기를 고려하였을 때 식생 지표 추출에 있어서 변화 분석에 유용하게 사용되는 위성영상으로는 미국 해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA) 에 의해 운영되고 있는 NOAA 위성의 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 센서와 미국 우주항공국 (NASA)이 추진하고 범지구 환경모니터링 (Earth Observing System: EOS) 프로그램의 일환으로 미국 Vandenberg 공군기지에서 발사된 Terra 위성 탑재된 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer) 센서가 있다. 여기서, MODIS 센서는 AVHRR 센서에 비해 다양한 파장대 영상을 얻을 수 있고, 보다 획기적으

로 향상된 공간 해상도를 가지며, 자료 획득이 쉬워 식생 변화를 비롯한 각 분야에서의 활용도와 분석 정확도가 높을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 MODIS 센서를 선정하여 LAI (Leaf Area Index)를 하였다.

MODIS는 태양동주기궤도를 가지고 있으며, 위성의 고도는 705 km이다. MODIS는 하루 혹은 이틀에 한번씩 지구 표면을 관측하며, 순간시야각은 $\pm 55^\circ$, 주사폭은 2,330 km이다. MODIS는 지구 전 지역에 대한 주간에 반사된 태양 복사에너지와 주간 및 야간에 지표면의 복사에너지에 대한 정보를 12비트의 자료로 획득한다. 또한 cross-track 주사 거울, 집광부 (collecting optics), 그리고 4개의 초점판에 분광 간섭 필터가 있는 선형 감지기 배열 세트로 구성된 휘스크브롬 스캐닝 영상 복사계 등으로 구성되어 있다. 또한, 0.4~3 μm 사이에 파장영역에서 20개 밴드와 3~15 μm 파장영역에서 16개 밴드 등 총 36개 밴드에 대한 자료가 획득된다.

LAI는 NDVI와 함께 식생정보를 대표적으로 제공하는 지표이며, 수문 모형의 입력자료로서 사용되어진다. 단위 지표 면적당 (m^2) 수목에 대하여 투영되는 전체 잎의 면적 (m^2)에 대한 비율로 정의되며, 식물의 엽층에서 발생하는 에너지, 이산화탄소, 질소의 교환과 상호작용 등 식물의 구조적 특징을 나타내는 중요한 지수로서 환경생태나 기상 및 수문분야에서 다양하게 활용되고 있다.

MODIS LAI 추정 알고리즘은 보스턴 대학과 몬타나 대학 연구진에 의해 개발되었다. MODIS LAI의 추정을 위한 주 알고리즘 공식은 식 (1), (2)와 같이 식생 임관의 3차원 복사전달 모델의 역변환 방식으로 LAI를 산출하는 수학적 모형이다.

$$\rho_c = f(\rho_v, \rho_b, LAI, CC, L(\theta, \theta)): \text{역변환} \quad (1)$$

$$LAI = f'(\rho_c) \quad (2)$$

여기서, ρ_c 는 임관층 반사율 (RS signal), ρ_v 은 잎 반사율, ρ_b

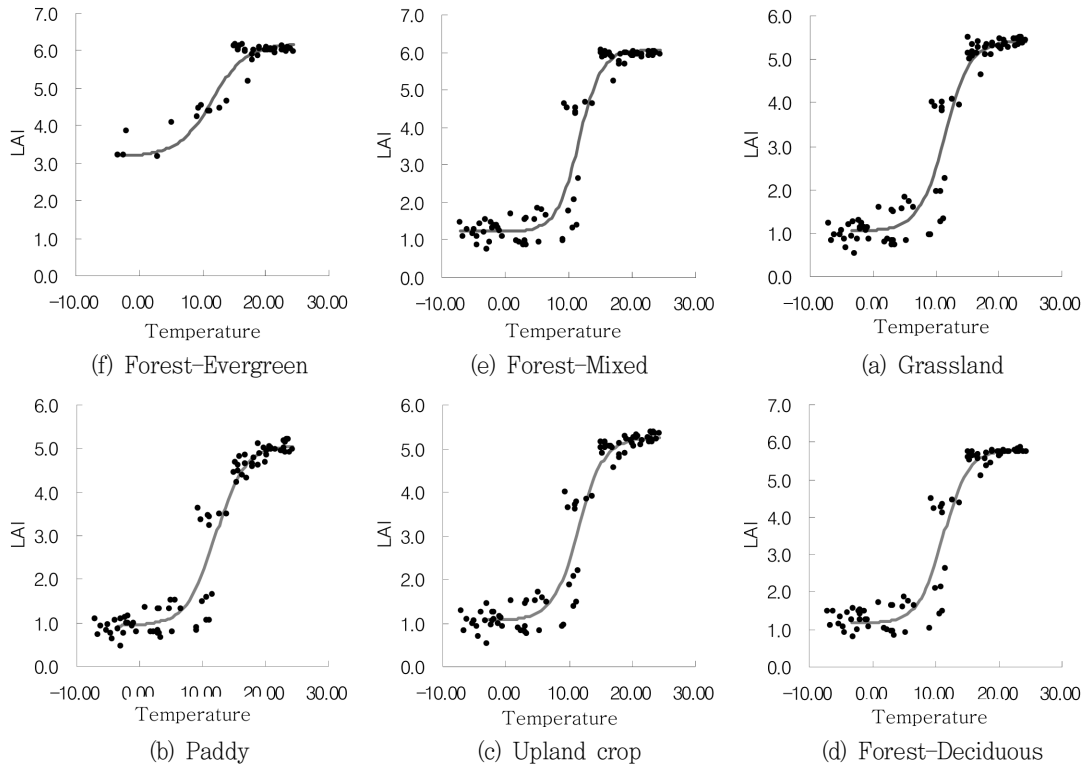


Fig. 2 The derived Boltzmann nonlinear regression equation

는지상부 반사율 (토양, 하층식생), CC는 임관율폐도 (canopy closure percent), $L(\theta, \phi)$ 는 태양과 센서의 기하학 정보 (방위각, 천정각 등), LAI는 엽면적지수를 말한다.

MODIS LAI의 주 알고리즘에서 사용하고 있는 3차원 복사 전달 모델은 태양과 센서의 방위각 및 천정각 정보와 식생의 임관구조, 토양 패턴 등의 정보를 이용하여 대상지역의 구조적 특징을 모델링한 것으로 이를 통해 대기 보정된 식생 임관부의 양방향 반사율 (BRDF) 수치를 구할 수 있다. 모델링된 양방향 반사율과 센서에 의해 관측된 양방향 반사율 수치를 비교하여 성공적으로 모델링이 진행된다면, 모델링된 양방향 반사율은 식생임관부의 복사전달 상수를 저장한 LUT (Look-up Table)를 적용하여 최종 LAI가 산출된다. 본 연구에서는 위에 식으로 구축된 월단위 MODIS LAI를 사용하였다.

나. 충주댐 유역 온도-LAI 회귀식 구축

충주댐 유역의 토지이용별 LAI 구축을 위해서 2000년 토지 이용도를 IDRISI 프로그램을 이용하여 유역 평균 LAI를 추출하였다. 추출 결과 겨울철에 침엽수의 LAI특징을 반영하지 못하는 경향을 보여 경안천 유역의 실측 LAI자료 (Lee, 2007)와 Park (2005)이 연구발표한 보고서 및 논문 내용을 참고하여 적정한 침엽수의 값을 입력하였다.

Table 2 The derived Boltzmann nonlinear regression equation between monthly mean temperature and MODIS monthly LAI for each land use class

| Land use class | Nonlinear Regression equation | R ² |
|------------------|---|----------------|
| Grassland | $LAI = \frac{1.056 - 5.425}{1 + e^{(Temp - 11.382)/2.042}} + 5.425$ | 0.93 |
| Paddy | $LAI = \frac{0.933 - 5.071}{1 + e^{(Temp - 12.081)/2.326}} + 5.071$ | 0.93 |
| Upland crop | $LAI = \frac{1.063 - 5.244}{1 + e^{(Temp - 11.471)/2.023}} + 5.244$ | 0.93 |
| Forest-Deciduous | $LAI = \frac{1.167 - 5.8}{1 + e^{(Temp - 11.211)/1.990}} + 5.8$ | 0.92 |
| Forest-Mixed | $LAI = \frac{1.224 - 6.06}{1 + e^{(Temp - 11.632)/1.742}} + 6.06$ | 0.93 |
| Forest-Evergreen | $LAI = \frac{3.19 - 6.18}{1 + e^{(Temp - 11.551)/2.640}} + 6.18$ | 0.90 |

2000~2006년까지의 월 MODIS LAI와 유역 월평균 온도의 상관관계를 선형 회귀식과 Boltzmann 비선형 회귀식으로 도출하여 미래 기후 변화에 따른 온도 변화에 대한 LAI 변화를 예측하고자 하였다. 결정계수 (R²)는 일차선형회귀식과 Boltzmann 비선형 회귀식을 비교해본 결과 일차선형회귀식이 0.82~0.85로 나타났으며, Boltzmann 비선형 회귀식의 경우 0.90~0.93

Table 3 The calibrated parameters for the SWAT model

| Parameter | Description | Range | Optimal value | Zhang et al. (2007) | Heuvelmans et al. (2006) | Muleta et al. (2005) | Bärlund et al. (2007) |
|-----------|--|------------|---------------|---------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|
| CN2 | Curve number adjustment ratio | 0 ~ 10 | -8 | -4 ~ +2 | (forest) 55 | - | -16 ~ +24 |
| CH_K2 | Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr) | 0 ~ 50 | 50 | - | - | - | - |
| ESCO | Soil evaporation compensation | 0 ~ 1 | 0.2 | 0.4 | - | 0.0882 | - |
| EPCO | Plant uptake compensation factor | 0 ~ 1 | 0.2 | 0.2 | - | 1 | - |
| ALPHA_BF | Base flow recession constant | 0 ~ 1 | 0.2 | 0.43 | 0.5 | - | 0.15 ~ 0.46 |
| SMFMX | Maximum snowmelt factor | 0 ~ 10 | 6 | 8.3 | -0.2 | - | - |
| SMFMN | Minimum snowmelt factor | 0 ~ 10 | 2 | 5.5 | -0.1 | - | - |
| TIMP | Snow pack temperature lag factor | 0 ~ 1 | 0.5 | - | 0.5 | - | - |
| SNOCVMX | Threshold depth of snow, above which there is 100 % cover | 0 ~ 500 | 50 | - | 10 | - | - |
| SNO50COV | Fraction of snow volume represented by SNOCVMX that corresponds to 50 % snow cover | 0 ~ 1 | 0.5 | - | - | - | - |
| GW_REVAP | Coefficient controlling water movement between root zone and shallow aquifer | 0.02 ~ 0.2 | 0.2 | - | - | - | 0.10 ~ 0.18 |
| REVAPMN | Threshold depth of water in the shallow aquifer for 're-evap' to occur (mm) | 0 ~ 500 | 400 | - | - | 28.2478 | 0 ~ 45 |

의 범위를 보여 Boltzmann 비선형회귀식의 경우 더욱 정확하게 온도와 LAI의 관계를 설명하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에는 Boltzmann 비선형 회귀식에 의해 추정된 LAI를 모형에 입력하였다 (Fig. 2, Table 2).

2. 모형의 검 · 보정

모형의 보정은 Park et al. (2009)와 Kim et al. (2006)의 논문과 민감도 분석을 참고하고 충주댐의 10개년 (1997~2006)간의 댐 유입량 자료와 비교하여 실시하였으며, 모형의 검증은 보정된 매개변수를 적용하여 7개년 (1990~1996)에 대하여 실시하였다. 미래 기후변화에 대한 모의를 위해 장기간 검토정을 하였으며, 최근 자료로 보정을 실시하여 모형의 미래 예측에 신뢰성을 높이고자 하였다. 검토정시에 토지이용도는 2000년 자료를 사용하였으며, 식생 활력도 정보는 모형 값을 사용하였다. 모형의 보정시 시행오차 방법을 이용하여 매개변수를 최적화하였다. 최적화된 매개변수는 Table 3과 같다. 지표수흐름과 관련된 CN2, ESCO, EPCO, CH_K2와 융설은 SMFMX, SMFMN, TIMP, SNOCVMX, SNO50COV, 지하수 흐름과 관련된 GW_REVAP, REVAPMN와 감수곡선에 민감한 ALPHA_BF을 조정하여 보정하였다. 모형의 목적함수로는 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모델효율계수 (Model Efficient: ME)와 R²를 사용하였다. 보정기간에 대한 평균 ME는 0.45~0.91, RMSE는 1.4~2.9mm, R²는 0.70~0.92로 나타났으며, 검증기간에 대한 ME는 0.43~0.88 RMSE는 1.0~2.2mm, R²는 0.59~0.88이었다 (Fig. 3, 4, Table 4). ME가 0.5이하인

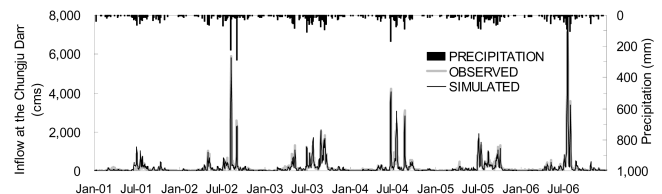


Fig. 3 Calibration results (1997-2006)

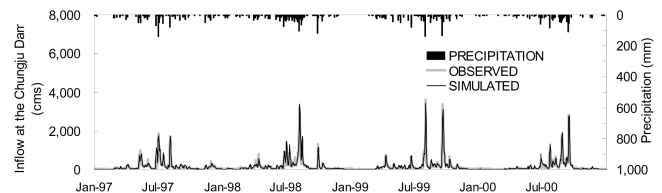


Fig. 4 Validation results (1990-1996)

1994년과 2001년은 전국적인 가뭄이 든 해로서 본 연구에 구축된 미래 기후변화 자료는 평수년 이상의 강수 조건을 보이므로 검토정된 매개변수 사용에 적절하다고 판단된다.

3. 미래 기후 변화 자료 구축

기후변화 시나리오의 다운스케일 기법은 거친 해상도를 가진 기후변화시나리오를 지역규모 혹은 유역규모의 시·공간적인 특성을 반영하기 위하여 개발된 기법이다. 다운스케일 기법은 모델링방법에 따라 역학적 다운스케일 기법 (dynamic downscaling approaches)과 통계적 다운스케일 기법 (혹은 경험적 다운스케일 기법; empirical or statistical downscaling approach)으로 구분되며, 최근에는 비선형성을 고려하는 인공지능망이 이

Table 4 Summary of model calibration and validation

| Year | Observed | | | Simulated | | | Statistical summary | | | Note |
|---------|----------|--------|--------|-----------|--------|---------|---------------------|------|------|------|
| | P (mm) | Q (mm) | QR (%) | Q (mm) | QR (%) | ET (mm) | RMSE (mm/day) | R2 | ME | |
| 1990 | 1837.8 | 1038.2 | 56.5 | 974.0 | 53.0 | 531.2 | 2.1 | 0.88 | 0.88 | V |
| 1991 | 1447.7 | 527.6 | 36.4 | 639.8 | 44.2 | 481.5 | 1.2 | 0.77 | 0.70 | V |
| 1992 | 1281.8 | 506.8 | 39.5 | 576.8 | 45.0 | 481.7 | 1.1 | 0.69 | 0.64 | V |
| 1993 | 1538.1 | 751.7 | 48.9 | 788.5 | 51.2 | 470.2 | 1.6 | 0.83 | 0.82 | V |
| 1994 | 1208.6 | 381.5 | 31.6 | 442.6 | 36.6 | 392.7 | 1.4 | 0.59 | 0.43 | V |
| 1995 | 1262.9 | 661.4 | 52.4 | 774.2 | 61.3 | 433.7 | 2.2 | 0.87 | 0.83 | V |
| 1996 | 1042.5 | 384.7 | 36.9 | 448.2 | 43.0 | 432.5 | 1.0 | 0.71 | 0.58 | V |
| Average | 1374.2 | 607.4 | 43.2 | 663.4 | 47.8 | 460.5 | 1.5 | 0.76 | 0.76 | - |
| 1997 | 1394.4 | 631.2 | 45.3 | 751.5 | 53.9 | 500.6 | 1.7 | 0.78 | 0.67 | C |
| 1998 | 1778.2 | 856.3 | 48.1 | 948.2 | 53.3 | 538.8 | 1.7 | 0.89 | 0.86 | C |
| 1999 | 1595.1 | 792.4 | 49.7 | 881.3 | 55.2 | 515.5 | 2.1 | 0.87 | 0.86 | C |
| 2000 | 1187.0 | 587.1 | 49.4 | 718.6 | 61.4 | 410.7 | 1.6 | 0.87 | 0.83 | C |
| 2001 | 919.8 | 296.6 | 32.2 | 346.1 | 37.6 | 410.7 | 1.1 | 0.70 | 0.45 | C |
| 2002 | 1718.6 | 821.8 | 47.8 | 895.9 | 52.1 | 516.8 | 2.2 | 0.91 | 0.91 | C |
| 2003 | 1856.7 | 1018.4 | 54.8 | 1086.7 | 58.5 | 560.1 | 1.7 | 0.84 | 0.85 | C |
| 2004 | 1503.8 | 892.3 | 59.3 | 958.5 | 63.7 | 528.2 | 2.4 | 0.88 | 0.86 | C |
| 2005 | 1469.6 | 726.9 | 49.5 | 802.9 | 54.6 | 522.7 | 1.4 | 0.86 | 0.84 | C |
| 2006 | 1613.7 | 936.3 | 58.0 | 1093.3 | 67.7 | 493.5 | 2.9 | 0.92 | 0.90 | C |
| Average | 1568.6 | 807.0 | 51.3 | 904.1 | 57.8 | 509.7 | 2.0 | 0.87 | 0.84 | - |

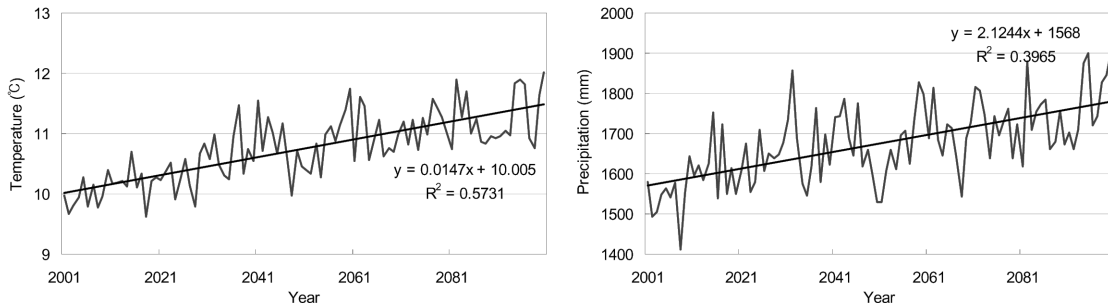


Fig. 5 The trend in annual average for temperature and precipitation

용하는 다운스케일 기법이 연구되어 오고 있다. 본 연구에서는 CCCma CGCM3 B1 시나리오의 2100년까지 일별 자료로 인공 신경망을 이용하여 다운스케일을 실시하였다. 인공신경망의 학습 자료로 사용된 기후변화시나리오는 20C3M시나리오 (reference scenario)의 2D변수들을 이용하였다. 다운스케일 후 구축된 기후변화 자료는 Fig. 5와 같다. 온도와 강수량 모두 증가를 보였으며, 2100년의 온도와 강수량이 2001년과 비교하여 각각 2.0 °C, 20.4 % 증가하였다.

4. 미래 식생 활력도 변화 자료 구축

위에 구축된 온도-LAI의 비선형회귀식에 2001년과 미래

2100년의 온도 자료를 입력하여 식생 활력도 변화에 따른 매개 변수를 예측하였다 (Fig. 9). SWAT에 입력되는 식생 관련 매개변수는 생장 시기와 LAI가 있다. 회귀식에 따라 예측된 LAI의 변화로 최적의 엽면적성장곡선의 첫 번째와 두 번째 점에 해당하는 성장기간의 잠재온도비와 FRGRW1, 2, 엽면적 지수의 비인 LAIMX1,2와 최대 LAI (BLAI), 식생이 시들 때의 잠재온도 비율 (DLAI)에 대한 매개변수가 입력된다. 비선형회귀식으로 추출되어 BLAI의 경우 온도의 증가에 따라 증가하지 않지만 성장시기와 관련된 4월의 LAI의 경우 15.5~62.5 % 증가하였으며, 이에 따라 LAIMX1의 값이 2000년에 비해 침엽수, 활엽수와 혼효림이 각각 15.5 %, 57.1 %, 62.5 % 증가하여 Table 5와 같이 입력하였다.

5. 미래 기후, 식생 활력도 변화에 따른 수문변화 분석

미래 수문 요소의 변동성을 분석하기 위해 미래 기후변화에 따른 연 댐유입량, 토양수분, 증발산량과 지하수 충전량의 수문

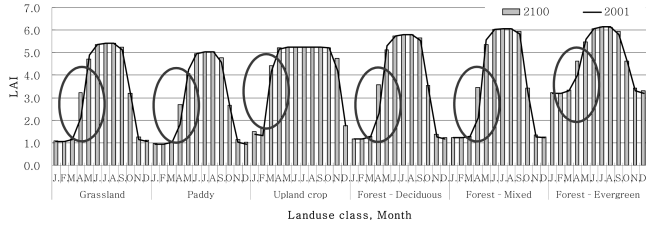


Fig. 6 Monthly LAI of 2100 and 2001 using the derived Boltzmann nonlinear regression equation

Table 5 The default and future predicted vegetation parameters

| Year | Land use class | BLAI | FRGRW1 | LAIMX1 | FRGRW2 | LAIMX2 | DLAI |
|---------------|------------------|------|--------|--------|--------|--------|------|
| Model-default | Upland crop | 3.00 | 0.15 | 0.05 | 0.50 | 0.95 | 0.70 |
| | Forest-Mixed | 5.00 | 0.05 | 0.05 | 0.40 | 0.95 | 0.99 |
| | Forest-Deciduous | 5.00 | 0.05 | 0.05 | 0.40 | 0.95 | 0.99 |
| | Forest-Evergreen | 5.00 | 0.15 | 0.70 | 0.25 | 0.99 | 0.99 |
| | Grassland | 4.00 | 0.05 | 0.05 | 0.49 | 0.95 | 0.99 |
| | Paddy | 5.00 | 0.30 | 0.01 | 0.70 | 0.95 | 0.80 |
| 2000 | Upland crop | 5.20 | 0.13 | 0.17 | 0.25 | 0.90 | 0.75 |
| | Forest-Mixed | 6.10 | 0.13 | 0.16 | 0.25 | 0.94 | 0.75 |
| | Forest-Deciduous | 5.80 | 0.13 | 0.14 | 0.25 | 0.94 | 0.75 |
| | Forest-Evergreen | 6.10 | 0.25 | 0.71 | 0.42 | 0.97 | 0.75 |
| | Grassland | 5.40 | 0.13 | 0.17 | 0.25 | 0.92 | 0.75 |
| | Paddy | 5.00 | 0.13 | 0.16 | 0.25 | 0.82 | 0.75 |
| 2100 | Upland crop | 5.20 | 0.13 | 0.22 | 0.25 | 0.90 | 0.88 |
| | Forest-Mixed | 6.10 | 0.13 | 0.26 | 0.25 | 0.94 | 0.75 |
| | Forest-Deciduous | 5.80 | 0.13 | 0.22 | 0.25 | 0.94 | 0.75 |
| | Forest-Evergreen | 6.10 | 0.25 | 0.82 | 0.42 | 0.97 | 0.75 |
| | Grassland | 5.40 | 0.13 | 0.26 | 0.25 | 0.92 | 0.75 |
| | Paddy | 5.00 | 0.13 | 0.24 | 0.25 | 0.82 | 0.75 |

변화를 분석하였다. 각 항목에 대한 Fig. 7과 같이 관계식을 비교한 결과 강수량과 댐유입량의 증가 기울기가 비슷한 경향을 나타냈으며 2001년과 2100년을 비교하였을 때 댐유입량과 증발산량이 각각 38.1 %, 10.2 % 증가하였다. 토양수분의 경우 그 절대량은 16.6 % 증가하였지만 강수량 대비 5.6 % 감소하는 것으로 나타났으며, 100년 동안 소폭 감소하는 추세를 보였다. 지하수 충전량은 118.9 % 증가하였다. 또한 경향성을 파악하기 위해 Mann-Kendall test (Mann, 1945; Kendall, 1975)를 이용하였다. Mann-Kendall test는 관찰치의 차이를 상대적인 크기로 계산하는 비모수 통계방법으로 통계치를 산정하고 이를 유의수준의 표준 통계치와 비교하여 경향을 파악한다. 이 방법은 비정규 분포를 가지는 자료의 분석에 적합하며 시계열 자료의 경향성을 판단하는 유용한 비표로 사용된다. 각 수문항목 및 기후 자료에 대한 Mann-Kendall test 분석 결과는 Table 6과 같다. 연중 선형 비교를 한 것과 같이 토양수분을 제외한 모든 수문 구성요소에 대해 모든 수준 (10 %, 5 %, 1 %)에서 증가하는 경향을 나타냈으며 계절적으로는 온도가 모든 수준과 계절에서 증가하였다. 하지만 가을에 모든 수준에서 강수량 감소 추세를 보이며, 댐유입량과 증발산량도 같은 경향을 보였고 토양수분은 10 %에서 감소하는 추세를 보였다. 가을의 댐유입량 감소와 여름의 증가 추세로 인해 수자원 사용에 대한 적절한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

미래기후변화 조건에서 식생에 대한 정보를 각각 2001년과 2100년을 입력하여 비교하였을 때 수문 변화에 값이 크게 차이를 보이지는 않았지만 2001년보다 2100년 식생 정보 입력 시 연단위 댐유입량, 토양수분과 지하수 충전량은 각각 최고 1.3 %, 4.2 %, 3.6 %까지 증가하였으며, 증발산량은 2.8 %까지 감소하였다. 월단위로 비교해본 결과 증발산량이 가장 민감한 것으로 분석되었으며, 그 중 7월에 증발산량이 3.5 %로 가장 높게 감소하였다. 댐 유입량에 경우 1월에 2.4 % 감소하지만 나머지 달에는 모두 증가하는 것으로 나타났다. 지하수 충전량과 토양수분 역시 2 % 내외로 증가하는 것으로 나타났다.

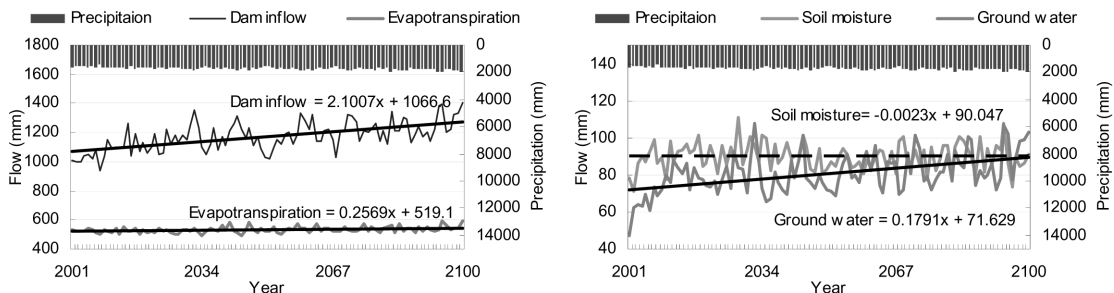


Fig. 7 The predicted dam inflow, watershed average Penman-Monteith evapotranspiration, groundwater recharge and soil moisture from 2001 to 2100 yr.

Table 6 Results of Mann-Kendall test for the trend in annual average and seasonal average for each hydrologic components

| Components | Period | Test statistic (Z) | Result by significance level | | |
|---------------------------|--------|--------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | $\alpha=0.1$ (1.645) | $\alpha=0.05$ (1.960) | $\alpha=0.01$ (2.576) |
| Precipitation (mm) | Spring | 8.25 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Summer | 1.36 | - | - | - |
| | Fall | - 3.80 | ▼ | ▼ | ▼ |
| | Winter | 5.55 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Annual | 6.60 | △ | △ | △ |
| Temperature (°C) | Spring | 2.85 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Summer | 7.33 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Fall | 5.92 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Winter | 4.19 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Annual | 7.67 | △ | △ | △ |
| Dam inflow (mm) | Spring | 8.27 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Summer | 2.32 | ▲ | ▲ | - |
| | Fall | - 2.99 | ▼ | ▼ | ▼ |
| | Winter | 5.81 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Annual | 6.37 | △ | △ | △ |
| Evapotranspiration (mm) | Spring | 7.61 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Summer | 1.88 | ▲ | - | - |
| | Fall | - 4.04 | ▼ | ▼ | ▼ |
| | Winter | 0.66 | - | - | - |
| | Annual | 4.13 | △ | △ | △ |
| Soil moisture (%) | Spring | 6.13 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Summer | 1.61 | - | - | - |
| | Fall | - 2.10 | ▼ | ▼ | - |
| | Winter | 2.00 | ▲ | ▲ | - |
| | Annual | - 0.50 | - | - | - |
| Groundwater recharge (mm) | Spring | 7.94 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Summer | 6.81 | ▲ | ▲ | ▲ |
| | Fall | 0.29 | - | - | - |
| | Winter | - 1.77 | ▼ | - | - |
| | Annual | 4.41 | △ | △ | △ |

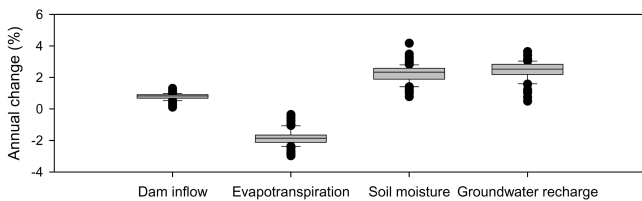


Fig. 8 Change in each hydrologic component by vegetation parameters change

이는 엽면적 지수의 비인 LAIMX1의 증가가 엽면적과 수관높

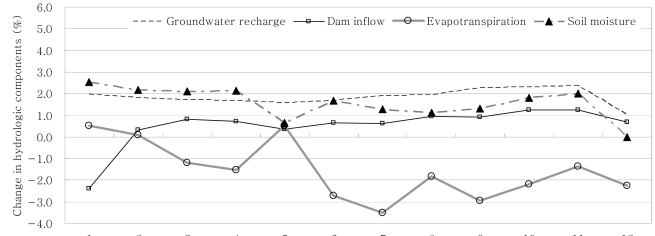


Fig. 9 Change in monthly hydrologic components by vegetation parameters change

이 성장에 영향을 주어서 피복 저항에 입력되는 LAI를 감소시켜 증발산량도 감소하여 다른 수문 요소를 감소시키는 것으로 판단된다 (Fig. 8, 9).

V. 결 론

본 연구는 충주댐 유역에 대한 SWAT 모형의 검보정을 실시하여 적용성을 판단한 후 IPCC에서 제공하는 CGCM3의 B1 시나리오 자료를 다운스케일링 한 후 기후와 식생 활력도 변화에 따른 미래 수문 변화량을 예측하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 모형의 검보정을 통해 충주댐 유역에 대한 SWAT 모형에 적용성을 평가하기 위해 댐 17년 간의 댐 유입량 자료를 이용하였다. 10년 (1997~2006)의 보정 결과 ME는 0.45~0.91, RMSE는 1.4~2.9 mm, R²는 0.70~0.92, 검증기간에 대한 ME는 0.43~0.88 RMSE는 1.0~2.2 mm, R²는 0.59~0.88로 실측치와 모의치의 수문 거동이 유사함을 확인할 수 있었다.

2) 미래 식생 정보를 얻고자 2000~2006년의 월단위 MODIS LAI를 이용하였으며, 과거 온도와 LAI와의 Boltzmann 비선형 회귀식을 도출하였다. 이때 결정 계수는 0.90~0.93으로 회귀식이 온도에 따른 LAI 값을 잘 표현함을 확인하였다. 미래 LAI 예측 결과 최대 엽면적 계수에는 영향을 끼치지 않았으나 성장 시기에 따른 4월에 LAI가 1.1~64.5 % 증가하는 것으로 나타났다.

3) 미래 기후변화 구축을 위해 IPCC AR4 모델인 캐나다의 CGM3 모형을 이용하였다. 이 모형의 경우 우리나라를 한 픽셀로 표현하기 때문에 인공신경망 방법을 이용하여 다운스케일링된 강수와 온도 자료를 모형에 입력하였다. 2001년에서 2100년까지 100년 동안 온도와 강수량 모두 증가는 추세를 보였으며, 2100년의 온도와 강수량이 2001년과 비교하여 각각 2.0 °C, 20.4 % 증가하였다.

4) 기후변화에 따른 모형의 구동 결과를 Mann-Kendal test를 통해 연도별 분석시 토양수분을 제외한 모든 수문 조건에서

강수 증가에 따른 증가 추세를 보였다. 계절적 분석 결과 가을 강수 감소에 따른 감소 경향을 보였다. 이러한 가을의 댐유입량 감소와 여름의 증가 추세로 인해 수자원 사용에 대한 적절한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

5) 기후변화와 식생의 활력도 변화를 동시에 고려 시, 2001년을 기준으로 2100년에 댐유입량과 증발산량이 각각 38.1 %, 10.2 % 증가하였다. 토양수분의 경우 그 절대량은 16.6 % 증가하였지만 강수량 대비 5.6 % 감소하는 것으로 나타났으며, 장기간으로 보았을 때 100년 동안 소폭 감소하는 추세를 보였다. 지하수 충전량은 118.9 % 증가하였다. 식생활력도의 고려 유무에 따라 증발산량은 최대 3.0 %, 댐유입량, 토양수분, 지하수 충전량은 각각 최대 1.3 %, 4.2 %, 3.6 % 범위의 변동성을 보였다.

미래 수문환경에 대한 연구는 많은 불확실성을 안고 있기 때문에 신뢰성이 떨어질 수 있다. 그러나 본 연구는 미래 온도와 강수 증가뿐 아니라 그에 따른 식생 변화에 대한 수자원에 반응 범위를 정량화하여 향후 기후변화에 대한 수자원 관리 대책에 활용될 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 미래 온도에 대한 식생 활력도 예측은 미래 식생 중에 대한 예측이 수반되지 않아 그 한계가 있으므로 향후 식생과 기후변화에 대한 여러 가지 반응 기작에 대한 연구가 꾸준히 진행되어야 할 것이다.

이 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 2-2-3)에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

1. Ahn, S. R., M. J. Park, G. A. Park, and S. J. Kim, 2008. Assessing future climate change impact on hydrologic components of Gyeongancheon watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(1): 33-50 (in Korean).
2. Bårland, I., T. Kirkkala, O. Malve, and J. Kämäri, 2007. Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment. *Environmental Modelling & Software* 22: 719-724.
3. Ha, R., H. J. Shin and S. J. Kim, 2007. Proposal of prediction technique for future vegetation information by climate change using satellite image. *Journal of the Korean Association of Geographic information studies* 10(3): 58-69 (in Korean).
4. Heuvelmans, G., B. Muys, and J. Feyen, 2006. Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology* 319: 245-265.
5. 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. Tigor and H. L. Miller (Eds.). Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. and NY., USA.
6. Kendall, M. G., 1975. Rank Correlation Methods. Griffin, London.
7. Kim, G. S. and T. K. Yim, 2005. Assessment of Characteristics of Regional Climate Change : Urban Effect or Environmental Change, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, 912-915 (in Korean).
8. Kim, N. W., B. J. Lee and J. E. Lee, 2006. An evaluation of snowmelt effects using SWAT in Chungju dam basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 39(10): 833-844 (in Korean).
9. Kwon, H. J., S. C. Shin and S. J. Kim, 2005. Climatic Water Balance Analysis Using NOAA/AVHRR Satellite Images. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(1): 3-9 (in Korean).
10. Lee, S. H., H. K. Jo, J. H. Im, J. H. Chun, M. S. Won, and G. S. Lee, 2007. Development of applied technique and forest information analysis of hyperspectral image. Dongdaemun-gu, Seoul: Korea Forest Research institute, ISBN: 978-89-8176-375-6 (in Korean).
11. Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13: 245-259.
12. Muleta, M. K. and J. W. Nicklow, 2005. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology* 306, 127-145.
13. Myneni R. B. and D. L. Williams, 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment* 49(3): 200-211.

14. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models; Part 1-A discussion of principles. *Journal Hydrology* 10(3): 282-290.
15. Park, M. J., H. J. Shin, M. S. Lee, G. A. Park, N. W. Kim, K. J. Lim, and S. J. Kim, 2009. Assessment of Future Climate and Vegetation Canopy Changes and Their Impacts on Hydrological Behavior of Dam Watershed Using the SWAT Model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* (Submitted).
16. Park, J. H., 2005. Analysis of vegetation net primary production algorithm based on MODIS satellite data, Master's Thesis in Inha University (in Korean).
17. Shin, S. C., S. Jeong, K. T. Kim, J. H. Kim and J. S. Park, 2006. Drought detection and estimation of water deficit using NDVI. *Journal of Geographic information system Association of Korea* 9(2): 102-114 (in Korean).
18. Sung, H. H. and O. J. Park, 2000. A Study on distribution and change of NDVI with Land-Cover change in City of Sunnam. *Journal of Geographic information system Association of Korea* 8(2): 275-288 (in Korean).
19. Yingxin Gu, Stéphane Bélair, Jean-Francois Mahfouf and Godelieve Deblonde. 2006. Optimal interpolation analysis of leaf area index using MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 104(3): 283-296.
20. Zhang, G. H., 2007. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River Basin Using the SWAT model. *Trans. of ASAE* 50(3): 901-910.