

# 1950년 이후 한국, 중국, 일본의 식생변화 및 이에 따른 수문순환 변화 분석

송성욱·조은샘·유철상<sup>†</sup>

고려대학교 건축사회환경공학과

## Analysis of change in hydrological cycles of South Korea, China and Japan due to the change of their vegetation since 1950

Sung-uk Song·Eunsaem Cho·Chulsang Yoo<sup>†</sup>

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea  
(Received : 23 October 2017, Revised: 06 November 2017, Accepted: 06 November 2017)

### 요약

산림면적의 변화와 같은 토지피복 또는 토지 이용의 변화는 물과 에너지 순환의 변화를 유발하여 궁극적으로 하천 유량, 증발산, 토양수분, 기저유량과 같은 수문순환 전반에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 대규모 지표수문모형과 다양한 토양, 토지이용, 식생, 기상 등의 자료를 이용하여 과거 장기간에 걸쳐 나타난 수문순환의 변화를 모의하였다. 이를 위해 본 연구에서는 동아시아에 해당하는 중국, 일본, 남한에서 나타난 과거 50여 년 간(1955–2010년)의 수문순환 변화를 모의하고 그 결과를 평가하였다. 특히, 본 연구에서는 시기별 동아시아 국가들의 식생분포를 적절히 반영하는 토지피복도를 선별하여 이용하였다. 수문순환 모의 결과, 전 기간에 걸쳐 중국의 유출률 평균이 47.0%로 나타나고, 일본의 경우에는 62.7%, 남한의 경우에는 49.4%로 나타났다. 전체 모의 기간에 따른 토양수분의 평균을 국가별로 살펴보면, 중국이 22.2%, 일본이 35.6%, 남한은 23.9%로 나타났다. 마지막으로 증발산의 경우, 중국의 경우 모의기간 전체에 대한 증발산을 평균은 52.7%, 일본은 37.3%, 남한은 50.4%로 모의되었다. 특히, 중국에서는 모의 시기별(1955–1990년, 1991–2000년, 2001–2010년)로 수문순환의 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 일본은 식생 안정화에 따른 안정적인 수문순환 성분을 확인할 수 있었다. 아울러 남한에도 식생 안정화에 따른 수문순환 성분의 안정화가 다소 이루어지고 있는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 동아시아, 수문순환, VIC 모형, 식생 변화

### Abstract

Changes in land cover or land use, such as changes in forest area, can cause changes in water and energy circulation, ultimately affecting overall hydrological cycle including stream flow, evapotranspiration, soil moisture, and base flow. In this study, the changes of the hydrological processes over the past long period were simulated by using large-scale surface hydrologic model along with various soil, land use, vegetation, and meteorological data. For this purpose, this study simulated and evaluated the changes in the hydrological cycle for the past 50 years (1955–2010) in East Asia including China, Japan and South Korea. In particular, this study used the land cover maps which can properly reflect the vegetation condition for each simulation period. As results, the mean runoff ratio of China was estimated to be 47.0% over the entire period, 62.7% in Japan and 49.4% in South Korea. The mean soil moisture of China was estimated to be 22.2%, 35.6% in Japan and 23.9% in South Korea. Finally, the mean evapotranspiration rate was estimated to be 52.7% in China, 37.3% in Japan and 50.4% in South Korea. Especially, in China, the hydrological cycle was found to be changed very much for the entire simulation period. However, in Japan, the hydrological cycle was found to be very stable for the entire simulation period. The hydrological cycle was also found to become stable mainly due to the stabilization of the vegetation.

Key words : East Asia, Hydrologic Cycle, VIC Model, Vegetation Change

## 1. 서론

산림 면적의 변화와 같은 토지피복 또는 토지 이용의 변

화는 물과 에너지 순환의 변화를 유발하여 궁극적으로 하천 유량, 증발산, 토양수분, 기저유량과 같은 수문순환 과정 전반에 영향력을 미치게 된다. Costa and Foley (1997)는 식생 조건의 변화에 따른 아마존 강 유역의 물 순환을 모의하고, 산림이 초지로 변화함에 따라 하천 유량이 증가함을 보인 바 있다. Matheussen et al. (2000)은 콜롬비아 강 유역의 수중 교체 및 벌목에 의한 하천 유량의 변화를 모의하고

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea  
E-mail: envchul@korea.ac.kr

산림 면적의 감소가 증발산의 감소 및 하천 유량의 증가를 유발하였음을 보인 바 있다. Guo et al. (2008)도 중국의 Poyang 호 유역을 대상으로 6개의 토지피복 변화 시나리오에 따른 우기/건기 별 유출량 변화를 모의하고 역시 산림 면적의 감소가 유량의 증가를 야기함을 나타낸 바 있다. Sterling et al. (2012)은 전 세계의 1,500여 증발산 관측소에서 수집된 데이터베이스를 활용하여 토지피복 변화에 따른 증발산 및 직접 유출의 증감을 분석하고 이를 지표수문 모형 결과와 비교하기도 하였다.

최근 다양한 기관에서의 DB 확충 노력으로 지형, 토양, 식생, 토양수분 등의 자료를 전구규모로 획득하는 것이 가능해졌다. 이에 따라 대규모 지표수문해석 모형을 이용하여 유역 단위를 넘어 국가 단위의 수문순환을 모의하고 이를 비교하는 것 또한 가능해졌다. 예를 들어, Bonan (1998)은 기후 모형이 결합된 지표수문해석 모형을 이용하여 1978년부터 1993년까지의 전지구 기온, 강수 및 토양수분을 모의하였다. Fan and Dool (2004)는 전지구 기상자료와 지표수문해석 모형을 이용하여 전지구 토양수분을 모의하고 이를 분석한 바 있다. Oki and Kanae (2006) 또한 지표수문해석 모형을 이용하여 전지구 유출을 모의하고, 물부족지수(water scarcity index)를 계산하여 전지구 수문 현황을 평가하였다. Qian et al. (2006)은 전지구 기상 자료와 지표수문해석 모형을 이용하여 전지구 유출 및 토양수분을 모의하고, 이를 주요 지점의 관측 자료와 비교하여 모형의 적용성을 평가하였다. Li et al. (2013)는 전지구 규모 수문해석이 가능한 지표수문해석 모형을 개발하고, 미국 Columbia 강 유역의 관측 자료를 이용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 최근 Al-Shrafany et al. (2014)은 위성 관측 자료와 지표수문해석 모형을 이용하여 영국 Brue 유역의 토양수분을 모의하고, 모의 결과를 관측 자료와 비교하였다.

그러나 이러한 연구들은 기본적으로 모형의 적용성 평가 및 검증을 포함해, 현 상황에서의 물순환 구조 평가, 국가별 또는 지역별 수문 상황의 비교 평가에 한정되어 있음을 파악할 수 있다. 아울러 이러한 모형을 이용하여 미래 기후 변화 상황에서의 수문특성 변화를 추정하려는 시도도 찾아볼 수 있다(Jiang et al., 2006; Cornelissen et al., 2013). 그러나, 오히려 과거로 돌아가, 특정 국가 또는 지역이 어떤 수문순환 특성의 변화를 겪어 왔는지를 살펴본 연구는 매우 제한적이었다. 이러한 이유는 기본적으로 과거의 수문순환 특성은 그 정상성에 기초하여 변화하지 않았을 것이라는 가정과 과거 상황의 분석은 기본적으로 관측자료의 분석으로 수행된다는 믿음 때문이다. 그러나 이러한 가정과 믿음이 유효한 지역은 제한적이다. 한참 중요한 이슈인 지구온난화 및 이에 따른 기후변화는 200년의 역사를 가지는 진행형의 사건이며, 현재까지 정상성을 보인 수문순환특성이 갑자기 비정상적인 거동을 보인다는 것도 받아들이기 어렵다. 특히, 과거 많은 나라에서 급속한 산업화, 도시화 변화를 겪어왔고, 현재 이러한 변화 속에 있는 나라들도 많

다. 거시적인 측면에서 이러한 변화가 가져오는 수문순환의 변화는 추측이 가능하기는 하지만 정교하지는 않다. 이에 본 연구에서는 그동안 다양한 시도를 통해 그 적용성을 보여주었던 대규모 지표수문순환 모형과 다양한 기관으로부터 획득 가능한 토양, 토지이용, 식생, 기상 등의 자료를 이용하여 과거 장기간에 걸쳐 나타난 수문순환 특성의 변화를 모의해 보고자 한다. 이러한 시도의 일환으로 본 연구에서는 동아시아의 중국, 일본, 남한에서 나타난 과거 50여년 간(1955-2010년)의 수문순환 특성 변화를 모의하고 그 결과를 평가해 보고자 한다.

최근 50여 년간 남한과 중국, 일본을 비롯한 동아시아의 주요 국가들은 급격한 경제적 변화를 겪어왔다. 제 2차 세계대전 직후 황폐화된 동아시아에서 가장 먼저 경제적 위기를 극복하고 극적인 성장을 이루어낸 나라는 일본이다. 한국전쟁이 발발한 1950년부터 1980년대 초 까지 경제 구조의 개혁과 높은 경제 성장을 이루며 무사히 선진국에 진입하였다(Takada, 1999). 이후 1980년대 후반부터 '거품경제'가 붕괴된 1990년 중반까지 '잃어버린 10년'이라 불리는 경제 위기를 겪었으며(Hayashi et al, 2002), 현재는 이를 다시 회복하는 추세이다. 한반도에서 남한은 1970년대 이후 급속한 경제성장을 이룬 것으로 나타난다. 남한이 1980년대부터 1990년대에 급격한 성장을 이루었으며, 1990년대 말 경제위기를 겪기도 했으나 이후 꾸준한 경제성장으로 2000년대 선진국에 진입하였다(WB, 2015). 중국은 경제정책의 개혁 및 문호 개방 이후 전 세계적으로 가장 빠르게 성장하는 국가 중 하나로 변화했으며, 1979년부터 2014년까지 GDP 성장률이 평균 10%에 육박하는 것으로 알려졌다(Morrison, 2015).

경제적 상황의 변화는 토지피복상태 및 식생, 특히 산림에 크게 영향을 미치고 있으며 동아시아의 주요 국가들 역시 경제적 상황의 변화가 산림면적의 변화를 야기한 것으로 나타난다. 가장 먼저 경제적 성장을 이루어 낸 일본의 경우, 제 2차 세계대전으로 인해 황폐화된 산림을 복구하고자 1950년대 중반부터 조림지 조성을 시작하였다(Himiyama, 1997). 일본 정부의 사업 중단 이후로도 산림이 방치됨에 따라 조림지 면적은 1980년대 이후로도 증가하였으며, 최근에는 이러한 방치된 조림지에 대해 적정 수준의 벌목을 통해 관리하려는 모습을 보이고 있다(FAO, 2007). 남한의 경우는 경제 성장 과정에서 추진한 산림녹화 사업의 성공하여 산림 비율이 차츰 증가해왔다. 중국의 경우, 토지의 소유권과 이용권의 분리에 따라 1990년대를 전후로 토지이용양상이 변화하였다(Lin and Ho, 2004). 그러나 2000년도 초기까지 농경지의 방치 문제 및 불모지화 문제가 지속적으로 나타나며 20세기 말에 이르러서야 훼손된 산림의 20%까지 복원하는데 성공한 것으로 나타난다(FAO, 2016).

본 연구에서는 대규모 지표수문해석모형의 하나인 VIC 모형을 이용하여 수문순환 해석을 시도하고자 한다. VIC 모형은 Liang et al. (1994)에 의해 개발된 모형이다. 이 모형은 토양수분 모의, 강우-유출 해석 및 물수지 평가 등과

같은 다양한 분야에 대한 적용사례를 가지고 있다(Hamlet et al., 2007; Sheffield and Wood, 2008; Te Linde et al., 2008; Su and Lettenmaier, 2009; Bowling and Lettenmaier, 2010; Wang et al., 2011; Ford and Quiring, 2013; Cai et al., 2014; Meng et al., 2016). 특히 지상 관측자료가 가용하지 않은 지역의 수문순환 해석에 성공적인 적용 사례를 가지고 있다(Huang and Liang, 2006; Xie et al., 2007; Wu et al., 2007; Zhao et al., 2012). 이런 측면에서 관측 자료의 수집이 어려운 북한지역이나 중국의 극서부 지역의 수문순환 모의에 적합한 모형으로 판단할 수 있다. Bae et al. (2015)와 Haddeland et al. (2007) 등도 이러한 관측 자료의 수집이 어려운 대규모 유역에 대한 VIC 모형의 적용 사례를 보여주고 있다. 그러나 이들 연구는 수문특성의 변화 과정이 아닌 분석 당시의 수문순환 현황 파악에 초점을 맞추고 있어 본 연구의 목적과는 다르다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 본 논문의 2장에서는 지표수문해석 모형 중 하나인 VIC 모형의 구조 및 매개변수 결정 방법에 대해 정리하였다. 이 중 매개변수의 결정 방법은 특성에 따라 토양과 식생으로 구분하여 정리하였다. 이후 본 논문의 3장에서는 동아시아 주요 국가들에 대한 VIC 모형의 토양 및 식생 매개변수를 결정하였다. 특히 본 연구의 목적인 경제 성장과정에 따른 식생의 변화가 수문순환 모의를 위한 입력 자료에서 어떻게 반영이 되는지 정리하였다. 다음으로 4장에서는 동아시아의 주요 국가들에 대한 수문순환 모의 결과를 비교하는 내용을 작성하였다. 각 국가들의 전체적인 지표유출, 토양수분, 증발산 모의 결과를 비교하고, 각 수문순환 과정의 분산과 변동계수 또한 비교하였다. 본 논문의 마지막 장인 5장에서는 본 논문의 전체적인 내용과 주요 결과들을 정리하였다.

## 2. 지표수문해석모형의 적용

### 2.1 VIC 모형의 구조

본 연구에서는 동아시아에 대한 수문순환을 모의하기 위해 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모형(Liang et al. 1994)을 이용하였다. VIC 모형은 1994년 미국 University of Washington의 Dennis Lettenmaier 박사 연구팀에 의해 개발된 모형으로 중규모 이상의 유역에 대한 적용성이 검증된 지표수문해석모형이다. VIC 모형은 특히 모의 시간단위를 쉽게 조정할 수 있으며 직접유출, 증발, 증산, 토양수분의 상호작용을 적절히 고려하여 장기적 수문순환의 분석에 있어 강점을 보인다. VIC 모형은 다양한 적용사례를 가지고 있다. 예를 들어, Xie et al. (2007)은 VIC 모형을 이용하여 중국 주요 하천에 대한 유량을 모의하고, 실측 자료와 비교하여 모형의 적용성을 검증한 바 있다. Sheffield and Wood(2008)은 VIC 모형을 이용하여 전지구 토양수분을 모의하고, 이를 바탕으로 가뭄의 심화과정을 분석하였고, Wang et al. (2012)은 기후변화 시나리오와 VIC 모형을 이용하여 중국 125개 유역에 대한 물수지 전망을 제시하기도 하였다.

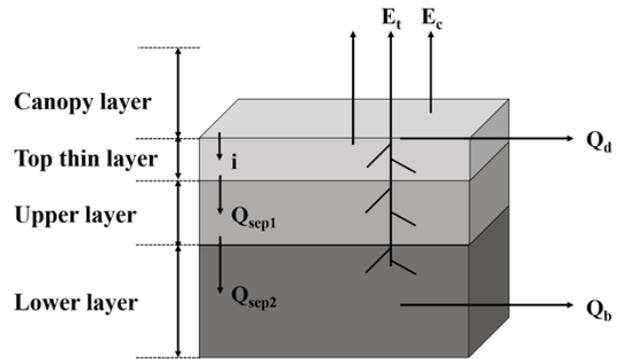


Fig. 1. Structure of VIC model's water budget model.

VIC 모형은 대기, 식생, 토양의 상호작용을 고려하여 물과 에너지의 유동을 모의하는 모형으로, 크게 물수지, 하도 추적, 에너지수지 모듈로 구성되어 있다. 본 연구에서는 유출, 증발산, 토양수분을 모의하기 위해 기상, 토양, 식생 자료를 이용하여 수문순환을 모의하는 VIC 모형의 물수지 모듈을 이용하였다. Fig. 1은 VIC 모형의 물수지 모형 구조를 간단한 모식도로 나타낸 것이다.

### 2.2 VIC 모형의 수문순환 모의 방법

VIC 모형은 강우로 인해 포화되는 면적을 고려하여 격자별 지표유출을 시간에 따라 모의하는 모형이다. 포화면적은 격자의 토양수분에 따라 격자별 토양의 단면적 중 토양수분에 의해 포화된 수직면적으로 결정된다. 본 연구의 VIC 모형에서는 아래와 같은 식을 이용하여 격자별 토양수분을 모의한다.

$$w = w_{\max} [1 - (1 - A)^{1/b_{m,fill}}] \tag{1}$$

위 식에서  $w$ 는 토양수분(mm),  $w_{\max}$ 은 최대토양수분(mm),  $A$ 는 토양단면에서 토양수분이  $w$  이하인 면적의 비율,  $b_{m,fill}$ 는 침투형상계수이다.

VIC 모형은 식생에서의 증발( $E_c$ ), 나대지에서의 증발( $E$ ), 그리고 토층 내에 식생뿌리로부터의 증산( $E_i$ )을 합산하여 증발산량을 산정한다. 먼저, 식생에서의 증발( $E_c$ )은 차단층에서 발생하며 산정공식은 다음과 같다.

$$E_c = \left(\frac{W_i}{W_{im}}\right)^{2/3} E_p \frac{r_w}{r_w + r_a} \tag{2}$$

위 식에서  $W_i$ 는 차단된 수분의 총량(mm),  $W_{im}$ 은 차단층에서 보유할 수 있는 총보유수량(mm),  $E_p$ 는 Penman-Monteith의 잠재증발산,  $r_a$ 는 식생과 공기의 수분함량 차이로 인해 발생하는 식생구조저항(s/m),  $r_w$ 는 공기역학적저항(s/m)을 나타내며 기체 농도차를 확산속도로 나눈 값으로 나타난다.

나대지에서의 증발( $E$ )은 토양 최상부토층에서 발생하는 증발을 의미한다. 나대지 증발량은 Franchini and Pacciani

(1991)가 제시한 식을 이용하여 다음과 같이 산정한다.

$$E = E_p \left\{ \int_0^{S_s} dS + \int_{S_s}^1 \frac{i_0}{i_m [1 - (1-S)^{1/b_{soil}}]} dS \right\} \quad (3)$$

위 식에서  $i_m$ 은 최대 침투능(mm/day),  $i_0$ 은 모의 시점에서 침투능(mm/day),  $S_s$ 는 포화면적비를 의미한다.

식생뿌리로부터의 증산( $E_t$ )은 Blondin(1991)과 Ducoudre et al. (1993)의 혼합공식을 이용하여 산정된다.

$$E_t = [1 - (\frac{W_i}{W_{im}})^{2/3}] E_p (\frac{r_w}{r_w + r_a + r_c}) \quad (4)$$

위 식에서  $r_c$ 는 식생피복저항(s/m)을 나타낸다.

VIC 모형은 강우로 인해 포화되는 격자의 면적을 고려하여 지표유출을 시간에 따라 모의하는 모형이다. 이 때 포화되는 격자의 면적은 모의 시점 강우와 침투능을 이용하여 결정한다. 이 때 지표유출을 산정하는 식은 다음과 같다.

$$Q_d = P + w - w_{max} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{i_0 + P}{i_{max}} \right)^{1+b_{infiltr}} \right] \quad (5)$$

VIC 모형에서는 토양수분량과 증발산량의 차이와 잔여 토양수분량과의 관계를 고려하여 침루( $Q_{sep}$ )를 모의한다. 침루를 계산하는 식은 Brooks and Corey(1964)가 제안한 식을 이용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$Q_{sep} = K_{sat} \left[ \frac{w - \theta_r}{w_{max} - \theta_r} \right]^c \quad (6)$$

Eq. (6)에서  $K_{sat}$ 은 포화수리전도도(mm/day),  $\theta_r$ 은 잔여 토양수분량(mm),  $c$ 는 침루계수이다.

VIC 모형의 기저유출( $Q_b$ )은 Francini and Pacciani (1991)가 제안한 식을 이용하여 산정된다. 다음과 같이 상하부

토층의 관계식에 따라 산정된다.

$$Q_b = \begin{cases} d_1 \times w_p & w_2 \leq w_{l,max} \\ d_1 \times w_l + d_2(w_l - w_s w_{l,max}) & w_2 \geq w_{l,max} \end{cases} \quad (7)$$

여기서,  $Q_b$ 는 기저유출(mm),  $d_1$ 은 선형저류상수,  $d_2$ 는 비선형저류상수,  $w_l$ 는 하부토층의 토양수분함량(mm),  $w_s$ 는 비선형기저유출이 발생하는 지점에서의 최대토양수분의 비,  $w_{l,max}$ 는 하부토층의 최대토양수분(mm)이다.

### 2.3 VIC 모형의 매개변수 결정 방법

VIC 모형의 매개변수 토양 매개변수와 식생 매개변수로 구분하여 볼 수 있다. 본 연구에서는 전지구 토양도와 유효토심도의 정보를 이용하여 VIC 모형의 격자별 토양 매개변수를 결정하였다. 토양도를 통해 결정할 수 있는 매개변수는 공극률( $n$ ), 포화투수계수( $K_{sat}$ ), 침루계수(exp), 토양부피밀도( $\gamma_{bulk}$ ), 임계토양수분( $w_{cr}$ ), 위조토양수분( $w_{pwp}$ ), 비선형기저유출비( $D_s$ ), 최대비선형기저유출( $D_{s,max}$ )이며, 이들은 기저유출의 거동과 양을 조절한다. 또한 유효토심도를 이용하여 침투형상계수( $b_{infiltr}$ )와 토양깊이( $z$ )를 결정할 수 있으며, 이들은 토양수분 및 지표유출 산정에 이용되는 매개변수이다.

토양분류 체계에 따라 결정되는  $n$ ,  $K_{sat}$ ,  $c$ ,  $\gamma_{bulk}$ ,  $w_{cr}$ ,  $w_{pwp}$ 은 Table 1과 같이 정리된다. 이렇게 결정된  $n$ 은 공극률로  $D_s$  및  $b_{infiltr}$  매개변수를 산정하는데 이용된다.  $K_{sat}$ 은 포화투수계수로  $D_{s,max}$ 를 산정하는데 이용되며,  $c$  매개변수는 침루량을 결정하는데 이용된다.  $\gamma_{bulk}$ 는 토양분류에 따른 부피 밀도로 공극률에 영향을 미치는 인자이다.  $w_{cr}$  및  $w_{pwp}$  매개변수는 각각 임계점과 시들점에 해당하는 조건에서의 토양수분비를 의미한다. 본 연구에서는 FAO에서 제공하는 토양 정보를 USDA의 토양분류 체계에 맞게 재분류하여 앞서 언급된 6개의 매개변수를 다음과 같이 결정하였다.

이들 6개의 매개변수 외에 기저유출과 관련된 매개변수로

**Table 1.** Soil Parameters according to Soil Classification System

USDA Class	Soil Type	Porosity ( $n$ )	Saturated Hydraulic Conductivity ( $K_{sat}$ )	Exponent of Brook-Corey Equation (exp)	Bulk Density ( $\gamma_{bulk}$ )	Critical Point ( $w_{cr}$ )	Wilting Point ( $w_{pwp}$ )
1	sand	0.43	38.41	4.1	1.49	0.08	0.03
2	loamy sand	0.42	10.87	3.99	1.52	0.15	0.06
3	sandy loam	0.40	5.24	4.84	1.57	0.21	0.09
4	silty loam	0.46	3.96	3.79	1.42	0.32	0.12
5	silt	0.52	8.59	3.05	1.28	0.28	0.08
6	loam	0.43	1.97	5.3	1.49	0.29	0.14
7	sandy clay loam	0.39	2.40	8.66	1.6	0.27	0.17
8	silty clay loam	0.48	4.57	7.48	1.38	0.36	0.21
9	clay	0.46	1.77	8.02	1.43	0.34	0.21
10	sandy clay	0.41	1.19	13.00	1.57	0.31	0.23
11	silty clay	0.49	2.95	9.76	1.35	0.37	0.25
12	clay	0.47	3.18	12.28	1.39	0.36	0.27

$D_s$ 와  $D_{s,max}$ 가 있다.  $D_{s,max}$ 는 토양분류에 따라 결정된  $K_{sat}$ 를 이용하여 산정할 수 있다.  $D_s$ 는 앞서 결정된  $n$ 과  $D_{s,max}$ 의 관계로부터 산정할 수 있다. 이와 관련된 관계식은 아래와 같다.

$$D_{s,max} = K_{sat} \times S \tag{9}$$

$$D_s = \frac{w_s \times n}{D_{s,max}} \tag{10}$$

위 식에서  $S$ 는 분석 격자의 평균 경사,  $w_s$ 는 비선형기저 유량이 발생하는 지점에서의 최대토양수분 비다.

격자별 토양깊이에 해당하는  $z$ 는 유효토심으로부터 결정하였다. 본 연구에서는 유효토심 범위의 최댓값과 최솟값의 평균을 이용하여 격자별 토양깊이를 결정하였다. 격자별 토양깊이가 결정되면 이를 이용하여 VIC 모형의 토양수분에 관여하는 매개변수인  $b_{infiltr}$ 를 결정할 수 있다.  $b_{infiltr}$ 는 토양수분의 수직분포에 결정적인 영향을 미치는 매개변수이다. 침투형상계수  $b_{infiltr}$ 는 토양깊이별 토양수분함량(soil moisture capacity)  $w_z$ 과 토양깊이별 토양수분함량의 비  $A_z$ 의 관계식인 2.2절의 Eq. (1)에 따라 결정된다.

본 연구에서 토지피복도를 이용하여 결정한 식생 매개변수로는 식생구조저항( $r_a$ ), 공기역학저항( $r_w$ ), 엽면적지수(LAI; Leaf Area Index), 알베도(Albedo), RGL 등이다. 먼저  $r_a$ ,  $r_w$ 은 수증기, 이산화탄소 등의 기체 확산과정에서 식생의 엽면 및 줄기가 받는 저항에 관련된 매개변수로 기체 농도차를 기체의 확산속도로 나눈 값으로 나타난다. Albedo는 태양광 반사도를 나타내는 매개변수이다. RGL은 증산작용의 발생 조건에 해당하는 최소 단파 복사 유입량(minimum incoming shortwave radiation)를 의미한다. 5개의 매개변수는 식생 종류에 따라 다음 Table 2와 같이 결정된다.

VIC 모형은 식생의 종류에 따라 결정되는 매개변수 이외에도 격자별 식생의 조건을 나타내는  $Nveg$ ,  $Vegclass$ ,  $CV$ ,  $root_{depth}$ ,  $root_{frac}$ ,  $fetch$ ,  $vegcover$  등을 결정하여

입력해야 한다.  $Nveg$ 는 하나의 격자 내에 포함된 식생 종의 개수를 의미한다.  $Vegclass$  매개변수는 식생의 종류를 나타내며,  $CV$ 는 각각의  $Vegclass$ 에 대응하는 식생별 지배면적의 비를 나타낸다.  $root_{depth}$ ,  $root_{frac}$ 는 식생 뿌리의 깊이와 그 뿌리의 면적비를 나타내는 매개변수로 사면경사에 대한 함수로써 산출하였다.  $fetch$ 는 바람이 어떠한 물리적 방해 없이 진행할 수 있는 거리를 수치로 나타낸 것으로 수문순환에 대한 영향이 적어 VIC 모형의 기본 값을 적용하였다.  $vegcover$ 는 1개의 격자 내에서 실제 식생이 차지하는 면적의 비를 나타내는 매개변수로 격자별 면적과 수집한 식생자료로부터 산정하여 입력하였다.

### 3. 모형 매개변수 결정 및 입력자료 구축

#### 3.1 매개변수의 결정

##### 3.1.1. 토양자료 및 식생자료

VIC 모형의 토양 매개변수를 결정하기 위해 필요한 자료는 토양도가 있다. 본 연구에서는 FAO의 토양도를 이용하여 토양 종류에 따라 매개변수를 결정하여 입력하였다. FAO 토양도의 해상도는  $0.0083^\circ \times 0.0083^\circ$ 로 본 모의에서 적용된 격자의 크기보다 조밀하다. 아울러 본 연구에서는 VIC 모형의 매개변수를 결정하기 위해 FAO 토양도를 USDA의 토양체계에 맞게 재분류하여 이용하였으며 재분류된 토양도는 Fig. 2(a)와 같이 나타난다.

VIC 모형의 토양 매개변수에는 토양 종류뿐만 아니라 해발 고도(elevation) 등 지형 인자들도 역시 매개변수로 입력된다. 이들 매개변수를 결정하고자 본 연구에서는 동북아시아 전역에 대한 DEM(digital elevation map)을 수집하였다. 본 모의에서 사용된 DEM 자료는 Consortium for Spatial Information(CGIAR-CSI)에서 제공하고 있는 것으로, 이는 NASA의 Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)에서 제공하고 있는 전 지구 고도 데이터를 약  $0.25' \times 0.25'$  ( $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ )의 해상도로 재구성(resample)한 자료이다(Fig. 2(b)).

**Table 2.** Vegetation Parameters according to Vegetation Classification System

VIC Vegetation Class	$r_a$	$r_w$	LAI	Albedo	RGL
Evergreen Needleleaf	60	250	3.40~4.40	0.12	30
Evergreen Broadleaf	60	250	3.40~4.40	0.12	30
Deciduous Needleleaf	60	150	1.52~5.00	0.18	30
Deciduous Broadleaf	60	150	1.52~5.00	0.18	30
Mixed Cover	60	200	1.52~5.00	0.18	50
Woodland	60	200	1.52~5.00	0.18	50
Wooded Grasslands	40	125	2.00~3.85	0.19	75
Closed Shrublands	50	135	2.00~3.85	0.19	75
Open Shrublands	50	135	2.00~3.85	0.19	75
Grasslands	25	120	2.00~3.85	0.20	100
Crop land (corn)	25	120	0.02~5.00	0.10~0.20	100

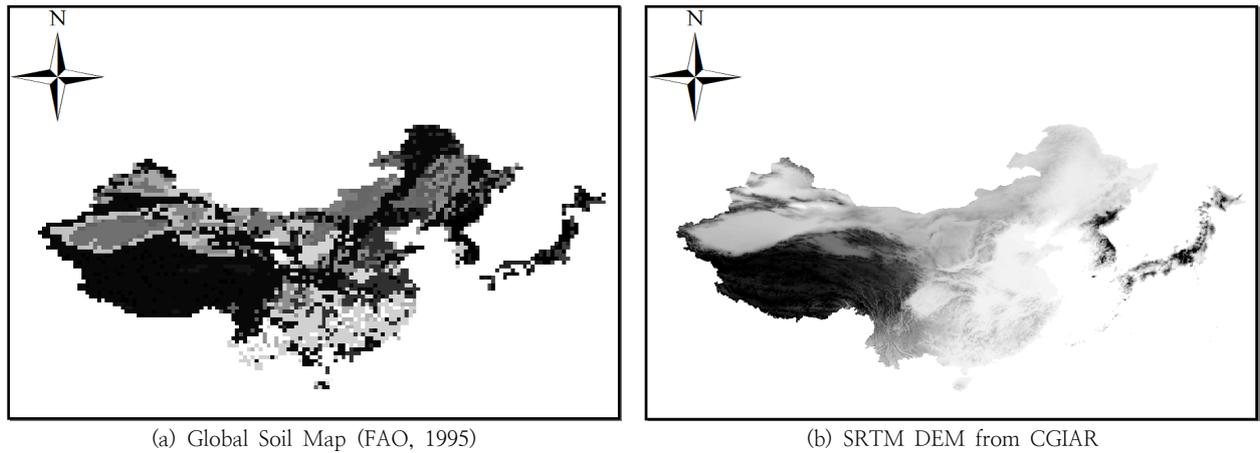


Fig. 2. Soil map and DEM used in this study.

Table 3. Information on Land Cover Data Collected for the Simulation

Name	NASA Global Land Cover	UMD Land Use Map	ESA-CCI Land Cover
Institution	NASA Goddard Institute for Space Studies	University of Maryland	European Space Agency - Climate Change Institute
Resolution	1° × 1°	0.01° × 0.01°	0.0083° × 0.0083°
Year of Production	1983	1995	2005

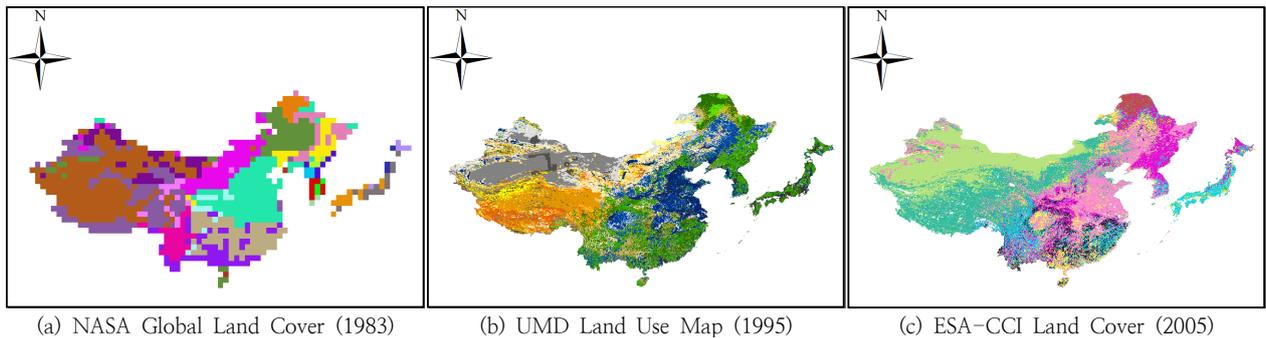


Fig. 3. Three different land cover data used in this study.

본 연구에서는 식생 매개변수를 결정하기 위해 NASA, UMD, ESACCI에서 제공하는 토지피복도를 이용하였다. 토양과는 달리 동아시아 주요 국가 내 식생 분포는 시간에 따른 변동성이 크며, 특히 각 국가의 경제적 상황과 맞물려 있는 특징이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 모의기간 전체에 대해 한 가지 토지피복도를 이용하지 않고, 시기별 동아시아 국가들의 식생분포를 적절히 반영하는 토지피복도를 선별하여 이용하였다. 그 결과 1955-1990년을 대표하는 식생분포로는 1983년 NASA의 토지피복도, 1991-2000년은 1995년의 UMD의 토지피복도, 2001-2010년은 2005년의 ESACCI의 토지피복도가 동아시아 국가들의 식생분포를 잘 반영할 수 있는 것으로 확인되었다. NASA의 토지피복도는 1° × 1°, UMD의 토지피복도는 0.01° × 0.01°, ESACCI의 토지피복도는 0.0083° × 0.0083°의 해상도를 가지고 있다. Table 3은 수집된 토지피복도 자료의 제공기관, 해상도 및 제작년도 등의 정보를 요약한 것이다. 이들 자료로부터 파악한 식생피복은 Fig. 3과 같다.

### 3.1.2 국가별 식생의 변화

본 연구의 목적은 VIC 모형을 이용하여 수문순환 모의를 수행하고, 국가 별 경제적 상황에 따라 수문순환이 어떻게 변모하였는지 파악하는데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 동아시아 국가들의 경제적 조건이 각 국가의 토지피복 및 식생 상태에 영향을 미쳤을 것으로 가정하였다. 또한 시기별 각 동아시아 국가들의 식생상태를 적절히 반영하는 토지피복도를 선별하고 이들로로부터 매개변수를 결정하였다. VIC 모형을 이용한 모의에 앞서, 본 연구에서는 이러한 가정 하에 각 국가들의 식생 조건이 시기별로 어떻게 변해왔는지 먼저 파악하였다.

먼저 중국의 경우, 정책적으로는 1980년도부터 토지의 소유권과 이용권을 분리하였으며 그 영향으로 1990년대 이전과 이후로 토지이용 양상이 변화하였다(Lin and Ho, 2004). 1990년도는 중국이 문호 개방을 시작한 시기와 거의 일치한다. 1990년대는 중국의 1인당 GDP가 \$2,000달러를 돌파하고 급속한 성장을 이룩한 시기이기도 하다. 경제적

성장과 맞물려 산림과 식생 또한 이 시기를 전후로 변화하는 양상을 보인다. 실제로 1990년도 이후 일부 지역에서 농경지의 손실 비율이 낮아졌으나 한편으로 농경지의 불모지화 문제 또한 지속적으로 나타났다. FAO(2016)에 의하면 중국의 재식림 및 조림(reforestation and afforestation) 프로그램에 따라 20세기 말에 훼손된 산림의 20% 까지 복원하는데 성공한 것으로 나타난다.

수집된 자료를 살펴보면 1983년 자료를 기준으로 위도 상 30 - 42도에 해당하는 중국 동부 지역은 상록 침엽수 및 경작지로 구성되었으며, 위도 42도 이상의 북동부 지역은 초지로 구성되었다. 홍콩, 상하이 등이 위치한 위도 30도 이하의 중국의 남동부 지역은 상록 활엽수, 중부지방은 초지로 분류되어있으며, 중국의 서부 지역은 사막지역으로 분류되었다. 1995년의 토지피복 자료를 살펴보면 중국의 동부 지역은 경작지 및 숲으로 분류되어있으며, 남서부 지역은 초지, 서부 및 북서부 지역은 불모지 또는 사막으로 분류되었다. 2005년의 중국 토지피복 자료를 살펴보면 중국 동부 지역은 상록 침엽수, 경작지 및 혼합지로 구성된다. 이 중 혼합지 면적의 경우, 1995년의 토지피복 자료상으로 경작지로 분류된 면적의 일부가 혼합지로 변화한 것으로 나타난다. 서부 지역은 불모지와 사막으로 분류되어있으며, 그 면적이 소폭 증가한 것으로 나타난다. 한편 남부 지역은 상록 활엽수와 상록 침엽수로 구성된 것으로 나타나며, 그 면적은 전반적으로 증가한 것으로 나타난다. 북부 지역의 경우에는 1995년의 앞선 모의시기의 토지피복 조건에서 유의한 변화가 없었으며 초지로 분류되어 있다. 동부 지역의 상록 침엽수, 남동부 지역의 상록 활엽수 역시 그 면적이 소폭 증가한 것으로 나타난다. 요약한다면, 중국의 남동부 지역은 일부 지역이 도심지역으로 변화하고 있으며, 서부 지역의 사막은 소폭 확대됨을 확인할 수 있다. 또한 중국 동부지역의 경작지가 혼합지 또는 초지로 변화하는 양상 또한 확인할 수 있다.

일본의 경우에는 1980년도 이전부터 식생의 상태가 안정화 된 것으로 나타났다. 1950년과 1985년 사이에 일본의 서부 지역에서 산림이 증가하고 북부 지역에서 반대로 산림이 감소하였으나 전체적으로는 총 국토 면적 중 산림 비율이 66.9%에서 66.6%로 소폭 감소하였다고 보고되고 있다(Himiyama, 1997). 이는 일본이 1950년대 중반부터 정부 차원에서 'Expansion of Reforestation'을 추진했기 때문이다. 한국전쟁 이후 일본의 경제가 안정화되면서 2차 세계대전 이후 황폐화된 산림을 복원하고자 일본 정부에서는 조림지(plantation)를 조성하였다(Yamaura et al. 2009). 조성된 산림은 큰 변화 없이 유지되었으며, 2007년에는 국토면적의 약 68%가 산림으로 구성되었다(FAO, 2007). 한편 국토 면적 중 도심지역의 비율은 1980년도 후반에 1.5배로 증가하였는데, 특히 암석지 및 불모지로 추정되는 지역(rough land)이 도심 지역으로 변화한 것으로 나타났다.

본 연구에서 수집된 자료를 살펴보면 1983년을 기준으로 남서부지역은 상록 활엽수, 혼수 섬은 상록 활엽수와 낙엽

활엽수의 혼합지역으로, 북부의 홋카이도 지방은 상록 침엽수로 분류되었다. 1995년의 토지피복 상태를 살펴보면 일본은 혼수 지방의 도쿄 등을 비롯한 일부 도시지역이 불투수지역 또는 불모지로 분류된 것과 홋카이도 지방에 냉대성 침엽수로 분류되는 지역을 제외하면 대체로 상록 활엽수 및 상록 침엽수로 분류됨을 알 수 있다. 2005년 역시 일본의 중서부 일부 지역에서 낙엽성 활엽수가 나타나나, 전체적으로 대도시 및 북부의 홋카이도 지방, 경작지로 분류되는 지역 외에는 대부분 상록 침엽수로 분류됨을 확인할 수 있다. 전반적으로 대도시 밀집지역 및 홋카이도 지방을 제외한 대다수의 지역은 상록 침엽수 및 상록 활엽수로 나타나는 특성이 있으며 이러한 특성들은 문헌을 통해 확인한 정보와 일치한다.

남한의 경우는 경제 성장 과정에서 국가 정책적으로 식목일을 지정하는 등의 노력으로 국토면적 중 식생의 비율이 차츰 증가해왔다. 1970년대 이전까지 남한에서는 일제 강점기의 산림수탈과 한국 전쟁에 의한 산림 파괴로 인해 훼손된 산림이 방치되었다. 이는 당시 남한으로서는 산림복원에 투자할 경제적 여건이 마련되지 못하였기 때문으로 볼 수 있다. 이후 1971년 이후 경제성장의 발판이 된 새마을운동과의 연계를 통해 산림녹화사업이 진행되었다(Kim, 2003). 제 1차 및 2차 계획 기간인 1973년부터 1987년 사이에 약 200만 헥타르의 산림이 조성되었다(산림청, 1997). 참고로 이 시기는 한국의 1인당 GDP가 급격한 성장을 이룩한 시기로 1980년대 이전 남한의 1인당 GDP는 \$5,000 이하였으나, 그 이후로 빠른 성장에 성공하여 1990년대에 \$10,000를 넘는 등 산림면적이 증가하는 시기와 경제적 성장이 이루어지는 시기가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 1998년 이후로는 산림의 조성보다는 조림지의 관리를 목적으로 숲 가꾸기 사업을 시행하고 수목 품종을 관리하는 등의 양상이 나타났다.

본 연구에서 수집된 자료를 살펴보면 1983년의 토지피복 자료를 기준으로 서해안에는 낙엽성 활엽수가, 소백산맥, 태백산맥을 따라서 상록 활엽수가 지배적인 것으로 나타났다. 1995년의 토지피복 상태를 살펴보면, 서울 및 주요 광역시가 불투수지역으로 분류되어 있으며, 북동부 지역의 강원도는 낙엽성 활엽수로 분류되어있다. 또한 충청도와 경상도의 일부 지역은 경작지로 분류되어 있다. 또한 1983년 자료와 비교하였을 때 서해안 지역의 낙엽성 활엽수로 분류되었던 지역이 초지 및 경작지로 변화하였음을 확인할 수 있다. 2005년의 토지피복 자료를 살펴보면 불투수면적으로 분류되는 대도시를 제외할 때, 남한 지역에서는 상록 침엽수와 낙엽성 활엽수가 지배적인 것으로 나타났다.

### 3.2 입력자료의 구축

수문순환 모의에 있어 입력에 해당하는 기상자료는 모의 결과 중 직접유출, 토양수분 및 증발산에 직접적으로 연관이 있는 인자다. 기상자료에 해당하는 정보로는 일 강수량, 일 최대 기온, 일 최저 기온, 평균 풍속이 있다. 본 연구에서

이용한 기상자료는 미국 NCDC(National Climate Data Center, 현 National Centers for Environmental Information)에서 제공하고 있는 일 강수량, 일 평균 기온과 NASA Surface Meteorology and Solar Energy (NASA SSE) Release Dataset의 평균 풍속 자료이다.

먼저, NCDC에서 가용한 강수량 및 평균 기온 자료는 1901 - 2016년 사이의 것이다. 본 연구에서는 이 자료 중 1950년부터 2010년까지의 기상관측자료를 입력자료로 이용하였다. NCDC 자료는 전 세계의 다양한 기관에서 제공하고 있는 기상관측 자료를 이용하여 구축한 일 단위 자료이다. 관측소의 밀도는 국가 및 지역에 따라 편차가 크게 나타났다. 한국의 경우, 남한과 북한의 관측소를 합쳐서 14개의 관측소의 자료가 가용한 반면, 일본은 총 163개, 중국은 216개의 기상 관측소의 자료가 가용하다 (Fig. 4). 관측소의 공간분포도 고르지 못하여, 특히 중국의 서부지역을 비롯한 일부 지역에서는 주어진 격자 내에 가용한 자료가 없는 경우도 존재한다. 격자 내 관측소가 가용한 경우 그 자료가 격자를 대표하는 것으로 하였다. 가용한 자료가 여러 개인 경우에는 주어진 자료를 산술평균하여 대푯값이 결정되도록 하였다. 격자 내 가용한 자료가 없는 경우에는 인근 관측소의 값을 산술평균하여 입력 자료를 구축하였다.

VIC 모형을 이용한 수문순환의 모의에서 특히 증발산에 영향을 미치는 인자로 풍속이 있다. 본 연구에서 필요한 일 단위의 풍속자료도 NCDC에서 가용하기는 하나, 극히 일부 지점에서만 가용하다는 문제점이 있다. 이와 같이 풍속 자료가 제한적으로 가용한 경우 수문순환 모의 결과 중 특히 증발산량에 대한 정도 확보가 어려워진다. 본 연구에서는 이와 같은 풍속자료의 부족 문제를 해결하기 위해 추가적으로 NASA Surface Meteorology and Solar Energy (NASA SSE) Release Dataset의 월 풍속 자료를 수집하였다.

NASA SSE Dataset은 1983년부터 1993년까지 해발 10 m에서 측정된 풍속, 풍향, 일사량 등의 기상관측을 월 별로 평균값을 산정하여 1° × 1° 격자 형태로 재구성한 자료이다. 이에 본 연구에서는 NASA SSE의 월 자료를 일 자료로

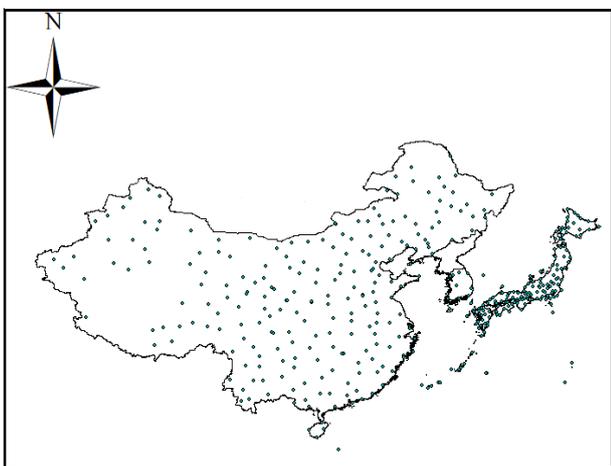


Fig. 4. NCDC Distributed Meteorological Observatories

(즉 매월 동일한 풍속을 적용) 사용할 수 있는지의 여부를 파악하고자 가설검정을 수행하였다. 이를 위한 대상지역으로 본 연구진에게 자료의 획득이 용이한 한반도를 고려하였다. 즉, 과거 33년간의 일 풍속 관측 기록과 NASA SSE에서 제공하고 있는 월 평균 풍속 자료를 비교하여 통계학적 가설검정을 수행하였으며, 그 결과 3월과 4월을 제외한다면 나머지 월에서는 유의수준 5%에 대해 유의한 차이를 보이지 않았다. 3월과 4월은 계절적으로 연중 증산량의 산정에 아주 중요한 역할을 하지는 않으므로 모의 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.

## 4. 수문순환 모의 및 결과 검토

### 4.1. 모의방법 및 조건

본 연구에서는 VIC 모형을 활용한 동아시아 수문순환 모의를 위해 먼저 중국, 일본, 남한을 0.5° × 0.5° 크기의 정사각형 격자로 분할하였으며, 각 격자별로 3장에서 다루어진 토양, 식생 매개변수를 격자별로 결정하고 기상자료를 입력하였다. 먼저 중국의 격자 개수는 일본과 남한에 비해 월등히 많은 6,037개로, 그 범위는 위도 상으로 18.5° 부터 54.0°, 경도 상 73.5° 부터 123.0°에 해당한다. 일본의 경우에는 위도 31.5° 부터 45.0°, 경도 130.0° 부터 145.5°에 포함된 152개의 격자로 분할되었으며, 일본 남쪽의 오가사와라 제도 및 난세이 제도의 일부 섬의 경우 모의 격자 단위보다 실제 면적이 작은 경우에는 해수면으로 가정하여 모의에 반영하지 않았다. 남한의 경우에는 격자수가 39개로 가장 적었으며, 그 범위는 위도 33.0° 부터 38.0°, 경도 126.0° 부터 129.0°에 해당한다. 남한의 경우 일본의 경우와 유사하게 모의 격자 단위보다 실제 면적이 작게 나타난 울릉도 및 독도의 경우 모의 결과에 반영하지 않았다.

모의 기간은 1955년부터 2010년으로, 모의 기간 동안의 식생 변화를 고려하기 위하여 3개의 구간으로 전체 모의 기간을 나누었다. 1983년 이전에는 전 지구 단위로 가용한 식생 자료가 없어 1955년부터 1990년까지는 1983년의 식생 자료와 동일할 것으로 가정하여 모의를 수행하였으며, 1991년부터 2000년, 2001년부터 2010년까지는 각각 10년 정도를 주기로 새로운 식생 자료를 입력하여 모의를 수행하였다. 모의 시간단위는 1일로, 1955년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지의 일 강수량 및 일 평균온도로부터 지표 유출, 토양수분, 증발산을 일 단위로 산출하였다.

### 4.2 모의결과의 국가별 비교

#### 4.2.1 유출

Fig. 5는 중국, 일본, 남한의 연 유출률을 비교한 것이다. 참고로 연 유출률은 연 강수량에 대한 연 유출고의 비로 산정하였으며, 중국, 일본, 남한의 국토 면적에 포함된 격자 전체의 유출률을 평균한 값이다. 특히 유출률은 연강수량의 크기에도 민감하므로, 연강수량을 함께 도시하여 비교가 될 수

있도록 하였다. 아울러 Table 4은 전 모의기간에 걸친 유출률의 평균 및 표준편차를 비교한 것이다. 이를 통해 각국의 유출률 변화를 살펴볼 수 있도록 하였다. 참고로, 모형의 입력자료로 사용된 식생자료가 크게 3개 구간으로 구분되어 다름에도 불구하고 (1955-1990, 1991-2000, 2001-2010), 유출모의 결과에 이들 기간의 구분이 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 나타난다. 즉, 기간별로 출처가 다른 식생자료를 사용하고 있기는 하나 그 영향이 전체적인 모의 결과에 크게 영향을 주고 있다고 판단하기는 어렵다.

Fig. 5에 나타난 유출률의 비교를 통해 알 수 있는 것은, 먼저, 모든 국가에 있어 연강수량의 변동과 유출률의 변동이 매우 유사하다는 점이다. 강수량의 변동에 따른 유출률의 변동정도가 다르기는 하지만 그 상관성은 예외 없이 일관된 것으로 나타난다. 전체적으로 중국의 유출률 평균은 47.0%로 나타나고, 일본의 경우에는 62.7%, 남한의 경우에는 49.4%로 나타난다. 강수량이 상대적으로 큰 일본의 경우에 유출률이 60%대 중반으로 매우 크게 나타나는데 반해, 강수량이 작은 중국의 경우가 40%대 후반을 나타내고 있다. 남한의 경우는 중국보다 약간 큰 정도의 유출률을 보이고 있다. 그러나 중국의 경우에는 80년대까지 강수량과 유출률의 증가 및 이후 감소경향, 일본의 1970년대 이후 강수량 및 유출률의 지속적 감소경향을 보이고 있는데

반해 남한의 경우에는 오히려 강수량 및 유출률의 꾸준한 증가 경향을 보인다는 차이가 있다.

중국의 유출률을 더 자세히 살펴보면, 전체 모의 기간에 걸쳐 유출률이 평균 47.0%, 표준편차는 4.9%로 나타나고 있음을 확인하였다. 모의 기간 동안 중국의 유출률 추세를 자세히 살펴보면, 1955년부터 1980년까지는 증가추세, 1981년 이후로는 감소추세가 나타났다. 특히 1955년부터 1980년까지 중국의 유출률이 매우 일정하지 않게 모의되는 것을 확인할 수 있다. 모의 시기별 유출률을 보면 1990년대 이전 중국의 평균 유출률은 46.9%였지만, 1990년대에 들어서 48.6%까지 상승한 것으로 나타났다. 반면, 증가했던 평균 유출률은 2000년대에 들어서 다시 45.3%까지 감소하였다.

일본의 경우 전체 모의 기간 동안에 대한 유출률의 평균은 62.7% 표준편차는 2.5%로 나타났다. 특히, 일본의 유출률은 전체적으로 소폭 감소하고 있으며, 표준편차 또한 감소하는 경향을 보였다. 모의 시기별로 살펴보면, 1990년대 이전까지 일본의 평균 유출률은 63.0%로 나타났다. 이후 1990년대와 2000년대에는 약 0.9% 감소한 62.1%로 평균 유출률이 계산되었다. 0.9%의 유출률 감소는 중국이나 남한의 유출률 변화에 비해서는 상당히 낮은 수준이다. 하지만, 소폭의 감소추세가 전체 모의 기간 동안 지속되는 것으로 확인되었다.

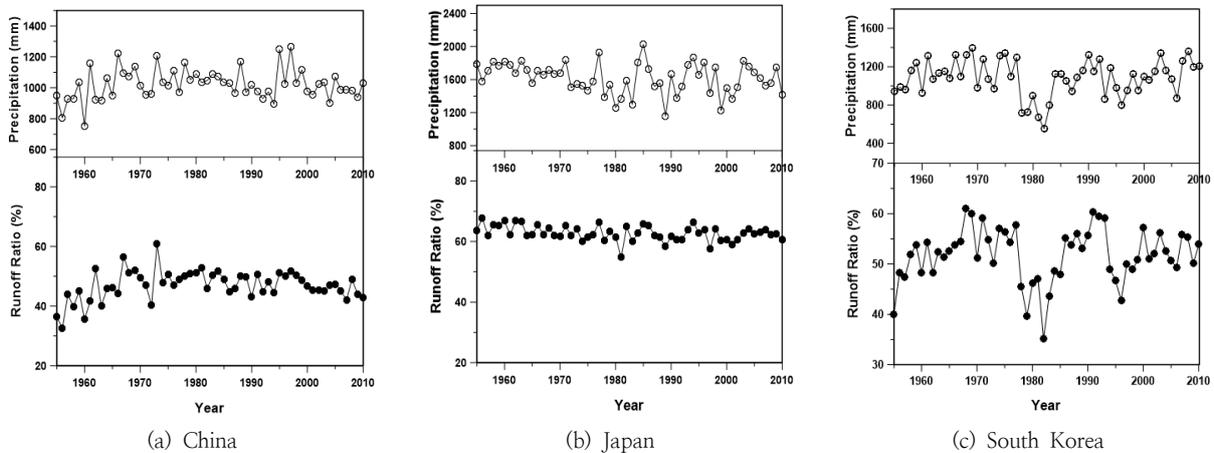


Fig. 5. Runoff Ratio Change in China, Japan and South Korea

Table 4. Comparison of Statistical Properties of Runoff Ratio in China, Japan and South Korea (Mean, Standard Deviation, Coefficient of Variation)

	China		Japan		South Korea	
	Precipitation (mm)	Runoff Ratio (%)	Precipitation (mm)	Runoff Ratio (%)	Precipitation (mm)	Runoff Ratio (%)
Whole Period	1022.6 (99.7, 0.10)	47.0 (4.9, 0.10)	1617.8 (184.9, 0.11)	62.7 (2.5, 0.04)	1177.5 (246.6, 0.21)	49.4 (4.8, 0.10)
1955-1990	1025.7 (101.8, 0.10)	46.9 (5.8, 0.10)	1630.6 (188.2, 0.12)	63.0 (2.7, 0.04)	1123.2 (211.7, 0.19)	48.0 (4.3, 0.09)
1991-2000	1043.1 (126.5, 0.12)	48.6 (2.6, 0.05)	1588.8 (213.1, 0.13)	62.1 (2.6, 0.04)	1186.2 (269.5, 0.23)	50.9 (5.0, 0.10)
2001-2010	991.0 (50.9, 0.05)	45.3 (2.1, 0.05)	1600.6 (154.3, 0.10)	62.1 (1.6, 0.03)	1364.5 (272.0, 0.20)	53.0 (4.6, 0.09)

모의 기간 전체에 걸쳐 남한의 유출률은 평균 49.4%, 표준편차는 4.8%로 나타났다. 유출률은 1990년대 이전부터 2000년대에 들어서기까지 증가 추세를 보였다. 유출률을 모의 시기별로 자세히 살펴보면 1990년대 이전의 평균 유출률은 48.0%로 나타났으며, 1990년대에 들어서면서는 50.9%로 증가하였다. 이후 유출률은 지속적으로 증가하여 2000년대에 53.0%까지 도달하였다. 이는 1990년대 이전의 평균 유출률보다 5.0% 증가한 값으로, 남한에 대한 유출률의 변동 정도가 중국과 일본 보다 상당히 큰 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 중국, 남한, 일본의 유출률의 변동계수를 강수량의 변동계수와 함께 비교하여 분석해보았다. 먼저, 중국의 경우에는 강수량과 유출률의 변동계수가 1990년대 이전에는 0.10 이상이었으나 1990년대 이후 0.05로 급격하게 감소하였다. 이는 1990년대 중국 남부, 동부 및 남동부 지역에 산림면적이 증가하면서 유출률이 안정화되었기 때문에 나타난 현상으로 해석할 수 있다. 일본의 강수량과 유출률의 변동계수는 중국과 다른 경향을 보인다. 일본 강수량의 변동계수는 1980년대 이전에 0.12, 1990년대에 0.13으로 약간 높아졌다가 2000년대에는 다시 0.10으로 약간 감소하였다. 이에 반해, 유출률의 경우 1990년대까지 0.04를 유지하다, 2000년대에 들어서 0.03으로 약간 감소한 것으로 나타났다. 이는 전체 모의 기간에 걸쳐 일본의 식생이

안정화되어 있어, 이들이 유출률을 안정화시키는 일종의 완충역할을 하고 있기 때문일 것으로 판단된다. 마지막으로, 남한의 경우에는 모의 기간 동안 강수량의 변동계수는 0.19-0.23으로 나타났으며, 유출률의 변동계수는 그 절반에 다소 못 미치는 0.09-0.10 정도로 나타났다. 남한의 유출률은 안정화가 이루어진 일본 보다 두 배 가까이 나타났다. 하지만, 남한의 강수량의 변동계수 또한 일본의 두 배 가까이 나타나기 때문에 남한 역시 산림녹화 사업을 통해 유출률이 어느 정도 안정화된 것으로 해석할 수 있다.

4.2.2 토양수분

Fig. 6은 중국, 일본, 남한의 연 평균 토양수분을 비교한 것이다. 유출률의 경우와 유사하게 토양수분의 경우도 연강수량의 크기에 민감하므로, 연강수량과 함께 도시하였다. 아울러 Table 5는 전 모의기간에 걸친 토양수분의 평균 및 표준편차를 비교한 것이다. 이를 통해 각국의 토양수분 변화를 살펴볼 수 있도록 하였다. 토양수분의 경우에도 모형의 입력자료로 사용된 식생자료가 크게 3개 구간으로 구분되어 다름에도 불구하고 특별한 점이 나타나지 않는 것으로 확인된다. 즉, 기간별로 출처가 다른 식생자료를 사용하고 있기는 하나 그 영향이 전체적인 모의 결과에 크게 영향을 주고 있지 않다고 판단할 수 있다.

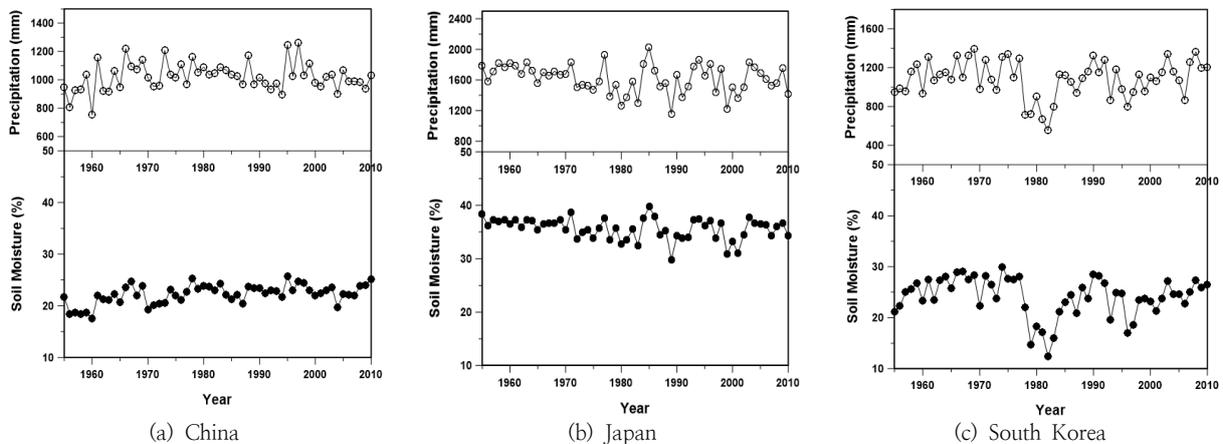


Fig. 6. Soil Moisture Change in China, Japan and South Korea

Table 5. Comparison of Statistical Properties of Soil Moisture in China, Japan and South Korea (Mean, Standard Deviation, Coefficient of Variation)

	China		Japan		South Korea	
	Precipitation (mm)	Soil Moisture (%)	Precipitation (mm)	Soil Moisture (%)	Precipitation (mm)	Soil Moisture (%)
Whole Period	1022.6 (99.7, 0.10)	22.2 (1.9, 0.08)	1617.8 (184.9, 0.11)	35.6 (2.0, 0.06)	1177.5 (246.6, 0.21)	23.9 (3.5, 0.14)
1955-1990	1025.7 (101.8, 0.10)	21.8 (2.0, 0.09)	1630.6 (188.2, 0.12)	35.8 (2.0, 0.06)	1123.2 (211.7, 0.19)	23.5 (3.5, 0.14)
1991-2000	1043.1 (126.5, 0.12)	23.3 (1.3, 0.05)	1588.8 (213.1, 0.13)	35.0 (2.2, 0.06)	1186.2 (269.5, 0.23)	24.0 (4.1, 0.17)
2001-2010	991.0 (50.9, 0.05)	22.8 (1.5, 0.07)	1600.6 (154.3, 0.10)	35.4 (1.9, 0.05)	1364.5 (272.0, 0.20)	25.5 (3.5, 0.14)

Fig. 6에 나타난 각 국가의 토양수분의 변화를 살펴보면, 먼저, 모든 국가에 있어 연 강수량의 증감 경향과 토양수분의 증감 경향이 유사하게 나타나는 점이 두드러진다. 모의 기간 동안의 토양수분 평균치를 국가별로 살펴보면 중국의 경우 22.2%, 일본은 35.6%, 남한은 23.9%로 나타난다. 전반적으로 강수량이 가장 큰 일본의 토양수분이 35% 전후로 가장 높게 유지되고 있으며, 중국의 경우 20%대 초반으로 나타나며, 남한의 경우 20%대 중반으로 나타난다. 다만 남한의 경우 다른 국가에 비해 강수량의 변동이 크게 나타나면서 토양수분 역시 상대적으로 크게 변화하고 있는 것으로 나타난다.

중국의 경우에는 모의 기간 전반적으로 토양수분이 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타난다. 이러한 경향은 1990년대 이전 변동계수가 특히 높게 나타났던 유출률의 특성과는 확연히 대비된다. 모의 시기별로 살펴보면 1990년대 이전 중국의 토양수분 평균은 21.8%로 나타났으며, 1990년대 들어서 23.3%로 소폭 상승하며 2000년대에 들어서 22.8%로 소폭 감소하였다. 전반적으로 연 강수량의 증감 경향과 유사하게 토양수분이 변화하고 있다. 모의 전 기간 동안 토양수분은 평균 22.2%, 표준편차 1.9%로 나타났다.

일본의 경우에도 토양수분은 모의 전 기간 동안 일본의 토양수분은 평균 35.6%, 표준편차 2.0%로 나타났으며, 일정 수준을 유지하고 있는 것으로 나타난다. 근래에 들어 그 변동성이 커지고 있으나, 유의한 수준의 증감은 없는 것으로 파악되었다. 토양수분 자체는 비교 대상인 중국과 남한에 비해 약 10% 이상 높은 것으로 나타났다. 그 원인으로 크게 두 가지를 꼽을 수 있다. 첫째로는 일본의 경우 공극률이 높은 화산회토양 Andosol의 면적이 혼수섬 및 후쿠오카섬의 동부에서 높은 비율로 나타나는 점이다. Andosol은 중국이나 한반도에서 높은 비율로 나타나고 있는 Acrisol이나 Lithosol에 비해 공극률이 7.0%에서 10.3%까지 높은 수준으로 나타난다. 즉 토양 자체의 조성이 중국이나 남한과 이질적이며 토양함수율이 다르기 때문이다. 둘째로 다른 국가에 비해 높은 일본의 강수량 역시 일본의 토양수분을 높게 유지한 원인으로 볼 수 있다. 일본의 강수량은 전체 모의기간에 걸쳐 1617.8 mm로 나타나고 있으며, 이는 중국(1022.6 mm)이나 남한(1177.5 mm)에 비해 27.2 - 36.8%정도 높은 수준이다.

남한의 경우 모의 전 기간 동안 토양수분의 평균은 23.9%, 표준편차는 3.5%인 것으로 나타났다. 토양수분의 평균은 중국과 유사하나, 표준편차는 중국이나 일본에 비해 약 1.5배 이상 큰 수준이다. 이는 물론 남한의 경우 강수량의 변동이 비교 국가들에 비해 크게 나타났기 때문인 것으로 판단된다. 남한의 경우에는 또한 모의 기간 전체에 걸쳐 토양수분의 증가경향이 나타났다. 특히 토양수분의 증가정도는 2%로, 다른 국가의 사례와 비교하였을 때 강수량 상승폭에 비해 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 1990년대 이전에 비해 1990년대에는 토양수분은 0.5% 증가하였는데 2000년대에는 그 3배에 해당하는 1.5%의 증가가

확인되었다. 이러한 토양수분의 변화는 일본이나 중국과 비교하였을 때 매우 높은 수준에 해당한다. 이러한 특성은 2001년부터 2010년까지의 남한에서 기록된 평균 강수량의 규모가 앞선 45년에 비해 약 200 mm 정도 증가하였기 때문으로 이해할 수 있다.

강수량과 토양수분의 변동계수를 비교해 보면 중국, 일본, 남한 사이의 차이를 추가로 살펴볼 수 있다. 먼저, 중국이 경우에는 1990년도 이전 강수량과 토양수분의 변동계수가 유사한 수준에서 이후 절반 정도로 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 농업인구의 급격한 유출로 상당량의 농지가 산림화되어 나타난 현상으로 이해된다. 일본의 경우에는 모의 전 기간에 걸쳐 토양수분의 변동계수가 강수량 변동계수의 절반수준인 것으로 나타난다. 이는 모의 시점부터 일본의 식생 상태가 안정화 단계에 있어 강수량에 대한 일종의 완충작용을 수행하고 있기 때문인 것으로 파악된다. 남한의 경우에도 일본의 경우와 유사하게 모의 기간 전체에 걸쳐 토양수분의 변동계수는 유사한 수준으로 유지되고 있는 것으로 나타나는 한다. 그러나 남한의 변동계수 자체는 전체 모의기간에 대해 0.14 정도로 중국의 0.08, 일본의 0.06에 비해 약 2배 정도로 높은 값으로 나타났다. 이는 남한 강수량의 높은 변동성과 일맥상통하는 결과로 볼 수 있다. 남한의 토양 종류가 중국과 상당 부분 유사하며 유출률을 통해 살펴본 식생의 상태 역시 1990년대 이후로는 어느 정도 안정화 단계에 접어들었다는 점을 고려하면 강수량의 변동에 따라 3 - 5년 내 단기간에 10%까지 토양수분이 증가 또는 감소하는 남한의 토양수분의 거동은 다른 국가들과 다른 특성이라고 판단할 수 있다.

#### 4.2.3 증발산

Fig. 7은 중국, 일본, 남한의 연 평균 증발산량을 총 강수량으로 나눈 증발산율을 비교한 것이다. 증발산율과 유출률의 합이 대략 1.0에 유사하므로 증발산율은 유출률과 반대의 경향을 보이게 된다. 따라서 증발산율도 연강수량의 크기에 민감하게 반응하게 된다. Table 6은 전 모의기간에 걸친 증발산율의 평균 및 표준편차를 비교한 것이다. 이를 통해 각국의 증발산을 변화할 수 있도록 하였다. 증발산율의 경우에도 모형의 입력자료로 사용된 3가지 다른 식생자료의 영향은 크지 않은 것으로 나타난다.

중국의 경우 모의기간 전체에 대한 증발산율 평균은 52.7%, 표준편차는 4.3%로 나타났다. 일본의 경우에는 증발산율의 평균은 37.3%, 표준편차는 2.4%로 중국의 경우에 비해 현저하게 작게 나타난다. 남한의 경우에는 평균이 50.4%, 표준편차는 5.3%로 나타났다. 검토한 모든 국가에 있어 유출의 변화 경향은 증발산율의 변화경향과 반대의 관계가 있으므로 구체적인 변화경향에 대한 분석은 생략하기로 한다. 다만 유출률과 증발산의 변동계수를 비교하면 일본과 남한의 경우에는 증발산율의 변동계수가 유출률의 변동계수보다 소폭 큰 값으로 나타났으나, 중국의 경우 이와 반대로 유출률의 변동계수가 증발산에 비해 다소 큰 것으로 나타나고 있다.

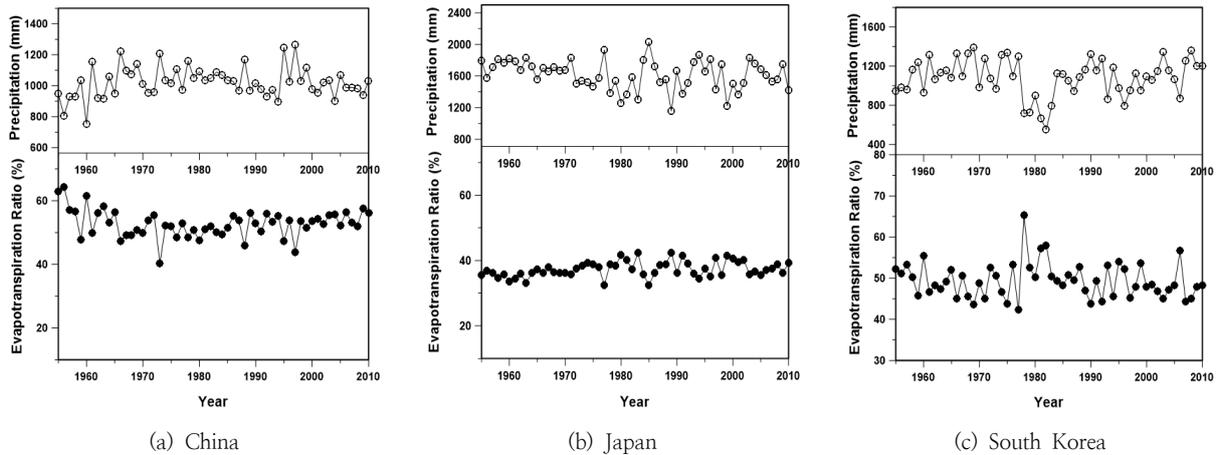


Fig. 7. Evapotranspiration Rate Change in China, Japan and South Korea

Table 6. Comparison of Statistical Properties of ET-Ratio (Evapotranspiration Ratio) in China, Japan and South Korea (Mean, Standard Deviation, Coefficient of Variation)

	China		Japan		South Korea	
	Precipitation (mm)	ET-Ratio (%)	Precipitation (mm)	ET-Ratio (%)	Precipitation (mm)	ET-Ratio (%)
Whole Period	1022.6 (99.7, 0.10)	52.7 (4.3, 0.08)	1617.8 (184.9, 0.11)	37.3 (2.4, 0.06)	1177.5 (246.6, 0.21)	50.5 (5.3, 0.10)
1955-1990	1025.7 (101.8, 0.10)	52.5 (4.9, 0.09)	1630.6 (188.2, 0.12)	37.0 (2.4, 0.07)	1123.2 (211.7, 0.19)	51.6 (4.7, 0.09)
1991-2000	1043.1 (126.5, 0.12)	51.8 (3.7, 0.05)	1588.8 (213.1, 0.13)	38.2 (2.8, 0.07)	1186.2 (269.5, 0.23)	49.1 (6.7, 0.13)
2001-2010	991.0 (50.9, 0.05)	54.5 (2.0, 0.07)	1600.6 (154.3, 0.10)	37.6 (1.7, 0.04)	1364.5 (272.0, 0.20)	46.7 (4.3, 0.09)

### 5. 요약 및 결론

경제적 상황의 변화는 토지피복상태 및 식생, 특히 산림에 크게 영향을 주며 동아시아의 주요 국가들 역시 경제적 상황의 변화가 산림면적의 변화를 초래한 것으로 알려져 있다. 예를 들면 남한의 경우 경제성장 이전까지 황폐화된 산림을 방치한데 반해, 같은 시기 일본은 이미 안정화된 산림을 관리하는 단계에 도달하였다. 남한 역시 경제적 안정화가 이루어진 다음에 본격적으로 산림을 관리하기 시작하였으며, 1인당 GDP가 \$10,000를 초과하는 1990년대에는 산림을 상당 부분 복원하는데 성공한 것으로 나타났다. 중국 역시 문호개방과 더불어 1990년대를 기점으로 급속한 경제성장을 이뤄냈으며, 1인당 GDP가 급속히 성장하는 시기와 산림의 면적이 증가하고 있는 시점이 거의 일치하고 있다. 이와 같이 경제적 상황과 산림의 조성상태 사이에는 일정 부분 상관성이 있는 것이 사실이다. 산림면적의 변화와 같은 토지피복 또는 토지 이용의 변화는 물과 에너지 순환의 변화를 유발하여 궁극적으로 하천 유량, 증발산, 토양 수분, 기저유량과 같은 수문순환 과정 전반에 큰 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 대규모 지표수문순환 모형과 다양한 기관으로부터 획득 가능한 토양, 토지이용, 식생, 기상

등의 자료를 이용하여 과거 장기간에 걸쳐 나타난 수문순환 특성의 변화를 모의해 보고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 동아시아의 중국, 일본, 남한에서 나타난 과거 50여 년간(1955-2010)의 수문순환 특성 변화를 모의하고 그 결과를 평가하였다.

특히, 본 연구에서는 시기별 동아시아 국가들의 식생분포를 적절히 반영하는 토지피복도를 선별하여 이용하였다. 1955-1990년을 대표하는 식생분포로는 1983년 NASA의 토지피복도, 1991-2000년은 1995년의 UMD의 토지피복도, 2001-2010년은 2005년의 ESACCI의 토지피복도가 동아시아 국가들의 식생분포를 잘 반영할 수 있는 것으로 확인되어 이를 모의에 이용하였다. 이를 통해 시기별 국가별 식생 및 토지피복 상태의 변화가 수문순환 모의에 반영될 수 있었다. 본 연구에서 이용한 기상자료는 미국 NCDC (National Climate Data Center, 현 National Centers for Environmental Information)에서 제공하고 있는 일 강수량, 일 평균 기온과 NASA Surface Meteorology and Solar Energy (NASA SSE) Release Dataset의 평균 풍속 자료이다.

본 연구를 통해 얻어진 수문순환 모의 결과는 다음과 같다. 먼저 유출물의 경우, 전 기간에 걸쳐 중국의 유출물 평균은 47.0%로 나타나고, 일본의 경우에는 62.7%, 남한의

경우에는 49.4%로 나타났다. 전체 모의 기간에 따른 토양 수분의 평균을 국가별로 살펴보면 중국의 경우 22.2%, 일본은 35.6%, 남한은 23.9%로 나타났다. 마지막으로 증발산의 경우, 중국의 경우 모의기간 전체에 대한 증발산을 평균은 52.7%, 일본은 37.3%, 남한은 50.4%로 모의되었다.

토지이용이나 식생의 변화에 따른 수문순환의 특성 변화는 각 수문인자의 변동계수를 통해 확인할 수 있었다. 특히 유출율의 경우는 그 영향이 더욱 직접적인 것으로 확인되었다. 예를 들어, 중국의 경우, 1990년대에 산림면적이 증가하면서 유출률의 변동계수가 0.12에서 0.05까지 감소하였다. 일본은 전체 모의 기간 동안 식생이 안정화되어 있어, 유출률의 변동계수가 0.05 아래로 유지되는 것으로 나타났다. 마지막으로, 남한 또한 강수량의 변동계수 보다 유출률의 변동계수가 상대적으로 작게 나타나 산림녹화에 의한 유출률 안정 효과가 나타나는 것으로 확인되었다.

토양수분의 변동계수 또한 산림면적의 증가에 따른 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 중국의 경우에는 1990년도에 상당량의 농지가 산림화되면서 토양수분의 변동계수가 절반 정도로 줄어들었다. 일본은 식생 상태가 안정화 단계에 있어 전 기간에 걸쳐 토양수분의 변동계수가 낮은 수치로 유지되는 것으로 확인되었다. 남한 또한 일본과 같이 전 기간에 걸쳐 토양수분의 변동계수가 상대적으로 강수량의 변동계수 보다 작게 계산되었다.

증발산율에 대한 변동계수를 분석한 결과, 유출률에 대한 분석과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 증발산의 변화 경향을 유출과 반대 관계가 있기 때문에, 유출률의 변동계수가 변할 때에 증발산율의 변동계수 또한 변하는 것으로 확인되었다. 즉, 증발산을 또한 중국의 경우에 1990년도 이후 안정화되는 것으로 나타나고, 일본은 전 기간에 걸쳐 안정적이며, 남한은 강수량의 변동계수 보다 상대적으로 작은 변동계수를 가지는 것으로 확인되었다.

이상과 같은 결과는 사용한 입력자료의 불확실성으로 인해 어느 정도의 오차가 포함될 수밖에 없다는 한계를 갖는다. 그러나 본 연구에서 파악하고자 했던 경제적 성장에 따른 식생 및 토지피복 상태의 변화가 동아시아 수문순환에 미치는 영향은 확인할 수 있었다. 특히, 중국에서는 모의 시기별로 수문순환의 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 일본은 식생 안정화에 따른 안정적인 수문순환 성분을 확인할 수 있었다. 아울러 남한에도 식생 안정화에 따른 수문순환 성분의 안정화가 다소 이루어지고 있는 것을 확인하였다. 추후 보다 정확한 자료가 구축되고, 매개변수 추정 방법의 개선이 이루어진다면 동아시아의 식생 변화가 수문순환에 미치는 영향을 더욱 자세하게 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 17A WMP-B083066-04).

## References

- Al-Shrafany, D, Rico-R, Han, D, and Bray, M. (2014). Comparative assessment of soil moisture estimation from land surface model and satellite remote sensing based on catchment water balance, *Meteorological Applications*, 21(3), pp. 521-534.
- Bae, DH, Son, KH, Ahn, JB, Hong, JY, Kim, GS, Chung, JS, Jung, US, and Kim, JK. (2012). Development of Real-Time Drought Monitoring and Prediction System on Korea & East Asia Region, *Atmosphere*, 22(3), pp. 267-277. [Korean Literature]
- Blondin, C. (1991). Parameterization of land-surface processes in numerical weather prediction, *In Land Surface Evaporation*, Springer New York, pp. 31-54.
- Bonan, GB. (1998). The Land Surface Climatology of the NCAR Land Surface Model Coupled to the NCAR Community Climate Model, *J. of Climate*, 11(6), pp. 1307-1326.
- Bowling, LC, and Lettenmaier, DP. (2010). Modeling the effects of lakes and wetlands on the water balance of Arctic Environments, *J. of Hydrometeorology*, 11, pp. 276-295.
- Brooks, RH, and Corey, AT. (1964). Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design, *Transactions of the ASAE*, 7(1), pp. 26-28.
- Cai, X, Yang, ZL, Xia, Y, Huang, M, Wei, H, Leung, LR, and Ek, MB. (2014). Assessment of simulated water balance from Noah, Noah-MP, CLM, and VIC over CONUS using the NLDAS test bed, *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(24).
- Cornelissen, T, Diekkrüger, B, and Giertz, S. (2013). A comparison of hydrological models for assessing the impact of land use and climate change on discharge in a tropical catchment, *J. of hydrology*, 498, pp. 221-236.
- Costa, MH, and Foley, JA. (1997). Water balance of the Amazon Basin: Dependence on vegetation cover and canopy conductance, *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D20), pp. 23973-23989.
- Fan, Y, and Dool, H. (2004). Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5 resolution for 1948 to present, *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D10).
- FAO. (2007). *State of the World's Forests 2007*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2007.
- FAO. (2016). *State of the World's Forests 2016 - Forests and agriculture: land-use challenges and opportunities*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2016.
- Franchini, M, and Pacciani, M. (1991). Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models, *J. of Hydrology*, 122(1-4), pp. 161-219.

- Guo, H, Hu, Q, and Jiang, T. (2008). Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China, *J. of Hydrology*, 355(1), pp. 106–122.
- Haddeland, I, Skaugen, T, and Lettenmaier, DP. (2007). Hydrologic effects of land and water management in North America and Asia: 1700 – 1992, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(2), pp. 1035–1045.
- Hamlet, AF, Mote, PW, Clark, MP, and Lettenmaier, DP. (2007). Twentieth-century Trends in Runoff, Evapotranspiration, and Soil Moisture in the Western United States, *J. of Climate*, 20(8), pp. 1468–1486.
- Hayashi, F, and Prescott, EC. (2002). The 1990s in Japan: A lost decade, *Review of Economic Dynamics*, 5(1), pp. 206–235.
- Himiyama, Y. (1998). Land use/cover changes in Japan: from the past to the future, *Hydrological processes*, 12(13-14), pp. 1995–2001.
- Huang, M, and Liang, X. (2006). On the assessment of the impact of reducing parameters and identification of parameter uncertainties for a hydrologic model with applications to ungauged basins, *J. of Hydrology*, 320(1), pp. 37–61.
- Jiang, W, Guo, Z, Sun, X, Wu, H, Chu, G, Yuan, B, Hatte, C, and Guiot, J. (2006). Reconstruction of climate and vegetation changes of Lake Bayanchagan (Inner Mongolia): Holocene variability of the East Asian monsoon, *Quaternary Research*, 65(3), pp. 411–420.
- Kim, EK. (2003). *Evolution of the National Reforestation Programme in South Korea*, Korea Rural Economic Institute, pp. 499–515. [Korean Literature]
- Li, H, Wigmosta, MS, Wu, H, Huang, M, Ke, Y, Coleman, AM and Leung, LR. (2013). A physically based runoff routing model for land surface and earth system models, *J. of Hydrometeorology*, 14(3), pp. 808–828.
- Liang, X, Lettenmaier, DP, Wood, Eric F, and Burges, SJ. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *J. of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), pp. 14415–14428.
- Lin, G, and Ho, SP(2005). The state, land system, and land development processes in contemporary China, *Annals of the Association of American Geographers*, 95(2), pp. 411–436.
- Matheussen, B, Kirschbaum, RL, Goodman, IA, O'Donnell, GM, and Lettenmaier, DP. (2000). Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada), *Hydrological Processes*, 14(5), pp. 867–885.
- Meng, Q, Chen, X, Lobell, DB, Cui, Z, Zhang, Y, Yang, H, and Zhang, F. (2016). Growing sensitivity of maize to water scarcity under climate change, *Scientific reports*, 6.
- Morrison, WM. (2013). China's economic rise: history, trends, challenges, and implications for the United States, *Current Politics and Economics of Northern and Western Asia*, 22(4), 461.
- Oki, T, and Kanae, S. (2006). Global Hydrological Cycles and World Water Resources, *Science*, 313(5790), pp. 1068–1072.
- Qian, T, Dai, A, Trenberth, KE, and Oleson, KW. (2006). Simulation of Global Land Surface Conditions from 1948 to 2004. Part I: Forcing Data and Evaluations, *J. of Hydrometeorology*, 7(5), pp. 953–975.
- Sheffield, J and Wood, EF. (2008). Global Trends and Variability in Soil Moisture and Drought Characteristics, 1950–2000, from Observation-Driven Simulations of the Terrestrial Hydrologic Cycle, *J. of Climate*, 21(3), pp. 432–458.
- Sterling, SM, Ducharme, A, and Polcher, J. (2013). The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle, *Nature Climate Change*, 3(4), pp. 385–390.
- Su, F., and Lettenmaier, DP. (2009). Estimation of surface water budget of La Plata Basin, *J. of Hydrometeorology*, 10(4), pp. 981–998.
- Takada, M(1999). Japan's Economic Miracle: Underlying Factors and Strategies for the Growth, *Lehigh University*, pp. 1–18.
- Te Linde, A, Aerts, J, Hurkmans, R, and Eberle, M. (2008). Comparing model performance of two rainfall-runoff models in the Rhine basin using different atmospheric forcing data sets, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12, pp. 943–957.
- Wang, GQ, Zhang, JY, Jin, JL, Pagano, TC, Calow, R, Bao, ZX, and Yan, XL. (2012). Assessing water resources in China using PRECIS projections and a VIC model, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), pp. 231–240.
- WB(2015). *World Bank Group and Republic of Korea : 60 Years of Partnership*, World Bank.
- Xie, Z, Yuan, F, Duan, Q, Zheng, J, Liang, M, and Chen, F. (2007). Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in China, *J. of Hydrometeorology*, 8(3), pp. 447–468.
- Yamaura, Y, Amano, T, Koizumi, T, Mitsuda, Y, Taki, H, and Okabe, K. (2009). Does land-use change affect biodiversity dynamics at a macroecological scale? A case study of birds over the past 20 years in Japan, *Animal Conservation*, 12(2), pp. 110–119.
- Zhao, F, Chiew, FH, Zhang, L, Vaze, J, Perraud, JM, and Li, M. (2012). Application of a macroscale hydrologic model to estimate streamflow across southeast Australia, *J. of Hydrometeorology*, 13(4), pp. 1233–1250.