

식생 물 부족 지수의 추계학적 거동과 기후변화가 그에 미치는 영향

한수희 · 유가영* · 김상단†

부경대학교 환경시스템공학부
*경희대학교 환경학 및 환경공학과

Stochastic Behavior of Plant Water Stress Index and the Impact of Climate Change

Suhee Han · Gayoung Yoo* · Sangdan Kim†

Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

*Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University

(Received 18 February 2009, Revised 7 May 2009, Accepted 22 May 2009)

Abstract

In this study, a dynamic modeling scheme is presented to describe the probabilistic structure of soil water and plant water stress index under stochastic precipitation conditions. The proposed model has the form of the Fokker-Planck equation, and its applicability as a model for the probabilistic evolution of the soil water and plant water stress index is investigated under a climate change scenario. The simulation results of soil water confirm that the proposed soil water model can properly reproduce the observations and show that the soil water behaves with consistent cycle based on the precipitation pattern. The simulation results of plant water stress index show two different PDF patterns according to the precipitation. The simple impact assessment of climate change to soil water and plant water stress is discussed with Korean Meteorological Administration regional climate model.

keywords : Climate change, Ecohydrology, Fokker-Planck equation, Plant water stress index, Soil water

1. 서론

물이 지배하는 환경은 매우 복잡한 구조를 가지고 있으며, 그 구성성분들 사이의 동역학적 관계는 기후-토양-식생 시스템의 상호작용에 영향을 받게 된다. 특히, 추계학적 기후 조건에서의 식생 거동에 관한 확률적인 구조는 생태수문학 분야의 매우 중요한 연구주제이기도 하다(Baudena et al., 2007; Eagleson, 1978; Kim et al., 2008; Laio et al., 2001; Nordbotten et al., 2007; Porporato et al., 2001; Rodriguez-Iturbe et al., 1999, 2001). 식생의 추계학적 거동은 주로 강우의 간헐성과 확률적인 특성에 기인하게 되는데, 이는 식물의 생리학적 작용에 영향을 미치는 토양수분이 강수현상에 매우 의존적이기 때문이다. 따라서 토양수분 또는 그에 따른 식생의 물 부족 스트레스를 분석하고자 할 경우 그 시공간적인 변동성이 매우 크기 때문에 확률적인 접근방법이 이들 동역학의 전체적인 양상을 이해하는데 매우 적절한 방향성을 제공할 수 있다. 더구나 이러한 접근방법은 기후변화 시나리오에 따른 토양수분 및 물에 의한 식생 스트레스 영향을 평가하는데 매우 유용한 것으로 파악되고 있다.

이에 본 연구는 토양수분 동역학의 확률적인 거동을 살펴본 한수희와 김상단(2008, 2009)의 후속 연구로서, 추계학적 강수에 대한 물에 관한 식생 스트레스의 동역학적 거동과 기후변화가 이에 미치는 영향을 살펴보는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 연구방법

2.1. 토양수분 동역학

본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 한수희와 김상단(2008)에 의해 사용된 아래와 같은 토양수분 동역학 지배방정식에 기초하고 있다.

$$nZ_r \frac{ds}{dt} = -L(s) + I(R, s) \quad (1)$$

여기서 n 은 토양의 공극비이며, Z_r 은 지표면 근처 식생 뿌리가 존재하는 토양층의 두께[L], L 은 기후, 토양 및 식생 조건에 따른 토양수분의 손실과 관련된 함수이며, I 는 강수 R 로부터 토양에 공급되는 수분 양, s 는 토양수분이다. 토양수분 이득함수 $I(R, s)$ 의 확률분포함수(Probability Distribution Function, PDF)는 아래와 같이 토양수분의 현재 상태 및 강수량에 따라 크게 세 가지로 구분된다.

† To whom correspondence should be addressed.
skim@pknu.ac.kr

$$\begin{aligned}
 f_I(i) &= 1 - \lambda & , \quad \text{for } i = 0 & \\
 &= \frac{\lambda}{R_m} e^{-i/R_m} & , \quad \text{for } 0 < i < (1-s)nZ_r & \\
 &= \lambda e^{-(1-s)nZ_r/R_m} & , \quad \text{for } i > (1-s)nZ_r &
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서, i 는 침투량, R_m 는 비가 온 날의 강수량 평균값이며, λ 는 강수일의 확률이다. 이득함수 $I(R,s)$ 의 PDF를 도시하면 Fig. 1과 같다.

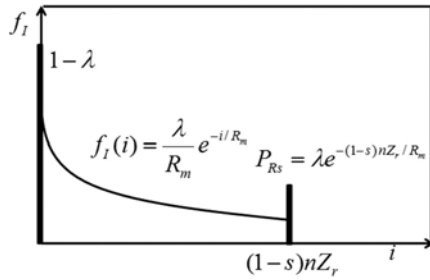


Fig. 1. Infiltration probability distribution function.

토양수분 손실함수 $L(s)$ 는 토양수분의 상태에 따라 아래와 같이 크게 세 가지로 구분된다.

$$\begin{aligned}
 L(s) &= \frac{E_{\max} s}{s^*} & , \quad \text{for } 0 < s < s^* & \\
 &= E_{\max} & , \quad \text{for } s^* < s < s_l & \\
 &= \frac{K_s s}{1 - s_l} - \frac{K_s s_l}{1 - s_l} + E_{\max} & , \quad \text{for } s_l < s < 1 &
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서, s^* 와 s_l 은 토양수분 상태의 임계값을 나타내며, E_{\max} 와 K_s 는 각각 잠재증발산량과 포화투수계수를 의미한다. 손실함수 $L(s)$ 를 도시하면 Fig. 2와 같다.

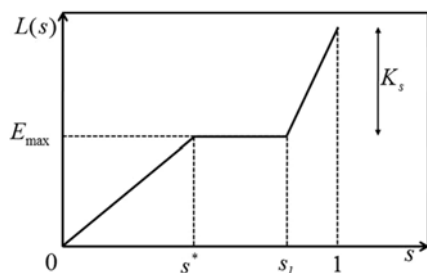


Fig. 2. Loss Function.

따라서 토양수분 PDF의 시간적 거동을 나타내는 Fokker-Planck 방정식은 Cumulant 급수이론을 이용하여 식 (4)와 같이 유도될 수 있다.

여기서, $p(s,t)$ 는 시간 t 에 따른 상태변수 s 의 PDF이며, θ 는 강수의 변동 scale이다. 식 (4)의 해가 PDF이기 때문에 발생하는 제반 제약조건을 해결할 목적으로 본 연구에서는 Chang and Cooper(1970)가 제안한 수치기법을 이용하여 식 (4)의 해를 수치적으로 구하게 된다. 이에 대한 보다 자세한 설명은 한수희와 김상단(2009)을 참조할 수 있다.

2.2. 식생 물 부족 지수의 동역학

토양 내 수분의 양이 식생의 정상적인 생리학적 과정에 영향을 줄 정도로 작아지면 식생은 물에 대한 스트레스를 받게 된다(한수희와 김상단, 2008). 즉, 식생에 부과되는 물에 관한 스트레스는 추계학적 성분을 지닌 토양수분 동역학에 크게 지배를 받고 있으며, 토양수분의 어떤 임계값을 적용함에 의해 특성화 될 수 있다(Porporato and Rodriguez-Iturbe, 2001). 식생이 물에 관한 스트레스를 받는 경우는 토양수분이 특정 임계값 s^* 보다 작게 될 경우라고 가정하여 식생 물 부족 지수(plant water stress index)를 아래와 같은 두 가지 단계로 정의할 수 있다(Hsiao, 1973).

$$\begin{aligned}
 \zeta &= \frac{s^* - s}{s^*} & , \quad \text{for } 0 \leq s \leq s^* & \\
 &= 0 & , \quad \text{for } s^* \leq s \leq 1 &
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

즉, 토양수분이 특정 임계값보다 클 경우 식생은 물에 관한 스트레스를 받지 않는 것으로 가정하게 된다.

토양수분과 식생 물 부족 지수에 대한 관계를 바탕으로 식생 물 부족 지수에 대한 PDF는 derived probability distribution function에 관한 이론(Fig. 3 참조)을 이용하여 산정하게 된다. 이에 대한 보다 자세한 설명은 한수희와 김상단(2008)을 참조할 수 있다.

2.3. 기후변화 시나리오

유엔 산하기구인 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC)은 2001년 보고서(IPCC, 2001)를 통해 지난 20세기 전 지구 평균기온은 약 0.6°C 상승하였으며 21세기에는 전 지구 평균기온이 1.4~5.8°C까지 상승할 수 있다고 보고하였다. 이에 본 연구에서는 기후변화 시나리오를 바탕으로 변화된

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p(s,t)}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial s} \left[\left(\frac{1}{nZ_r} \lambda R_m \left(1 - e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right) - \frac{1}{nZ_r} L(s) \right) + \frac{\theta(1-s)\lambda}{2T^2} e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{R_m T}} \right. & (4) \\
 &\quad \left. - \frac{\theta \lambda^2 R_m}{2T \cdot nZ_r} \left(1 - e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right) e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{R_m T}} \right] p(s,t) \\
 &\quad + \frac{\partial}{\partial s} \left[\left(\frac{\lambda R_m \theta}{2(nZ_r)^2 T} 2TR_m \left(1 - e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right) - 2nZ_r(1-s) e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \lambda R_m T \left(1 - e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right)^2 \right) \times \frac{\partial p(s,t)}{\partial s} \right]
 \end{aligned}$$

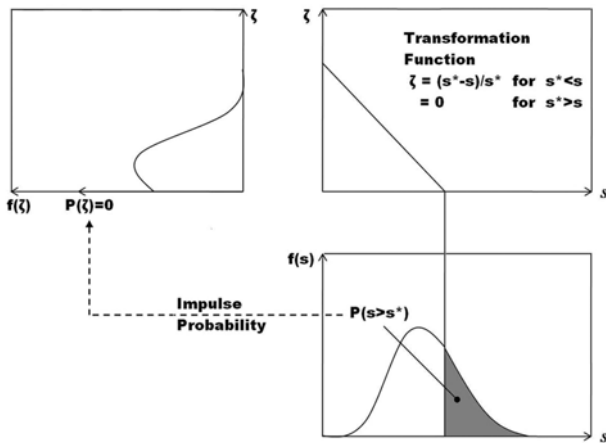


Fig. 3. Derived probability distribution function.

강수량과 기온을 적용하여 향후 100년의 기후변화가 토양 수분과 식생 물 부족 지수에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

본 연구를 위해 확보된 기후변화 시나리오 자료는 기상청 기상연구소에서 독일 막스플랑크 기상연구소에서 개발된 전지구 기후변화모델(ECHAM4/ HOPE-G, ECHO-G)을 한반도에 적용하여 지역 상세화한(downscaling) RCM(Regional Climate Model)으로부터의 결과(KMA RCM)이다. 2001년부터 2100년 사이의 변화된 월별기온과 강수량이 제공되고 있으며 이들은 과거 30년(1971~2000년) 평균 월별 값에 대한 편차자료로서 제공되고 있다(기상연구소, 2004). 참고로, 적용된 기후변화의 정도는 IPCC SRES A2 기후변화 시나리오이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상구역 및 매개변수 추정

충청북도 옥천군의 농업기상관측소 지점을 연구지점으로 선정하여 연구를 진행하고자 하였다. 먼저 토양수분 모형의 매개변수들을 산정하기 위하여 농업기상정보시스템(<http://weather.rda.go.kr/>)과 기상청(www.kma.go.kr)에서 제공하고 있는 자료를 이용하였으며, 토양수분 모형의 매개변수 중

하나인 E_{max} 의 산정을 위해 2004년과 2005년의 청주 기상청 기온, 습도, 일조, 풍속 자료를 획득하여 Penman 법으로 산정하였으며, 월별로 산정된 각 매개변수 값은 Table 1에 나타내었다.

또한 유효토양심에 해당하는 매개변수 nZ_r 과 포화투수계수 K_s , 토양수분 상태의 임계값인 s^* 와 s_l 을 추정하기 위하여 최적화 매개변수 추정기법 중 하나인 유전자 알고리즘을 사용하였는데, 이 때 기후, 토양 및 식생의 특성에 따라 Table 2와 같이 두 가지 기간으로 나누어 각각 산정하였다.

Table 2. Soil and plant parameters estimation

| | Jan. ~ May, Oct. ~ Dec. | Jun. ~ Sep. |
|----------------|-------------------------|-------------|
| nZ_r (mm) | 329.0663 | 454.4283 |
| K_s (mm/day) | 239.0482 | 141.4387 |
| s^* | 0.66916 | 0.38614 |
| s_l | 0.87864 | 0.52643 |

매개변수 추정의 적절성을 살펴보기 위하여 위에서 산정된 매개변수 값들을 적용하여 모의된 값과 관측된 값을 비교해 보았다. 관측자료는 농업정보시스템에서 2004년부터 2005년까지 관측한 일 강수량과 토양수분 자료를 이용하였다(Fig. 4). 그림에서 보여 지는 것처럼 모의자료와 관측자료가 완벽하게 일치하는 것은 아니나 전체적으로 관측치를 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있으며 이들의 상관성을 조사해 본 결과, R^2 는 0.58, 모형효율계수(Nash-Sutcliffe coefficient, Nash and Sutcliffe, 1970)는 0.55로서 관측자료와 모의된 값이 어느 정도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 참고로 토양수분은 정확한 모형화가 매우 어려운 수문변수 중 하나인 것으로 알려져 있다(Yoo and Kim, 2004).

3.2. 토양수분 및 식생 물 부족 지수의 확률적 거동

위에서 산정된 매개변수를 적용하여 식 (4)를 수치적으로 해석하면 토양수분 PDF의 시간적인 변화를 모의할 수 있으며, 이를 관측 자료로부터 얻어진 PDF와 함께 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 모형은 토양수

Table 1. Climatic parameters estimation

| Month | E_{max} (mm/day) | R_m (mm/day) | θ | λ |
|-----------|--------------------|----------------|----------|-----------|
| January | 0.8895 | 1.2273 | 0.5843 | 0.1774 |
| February | 1.5430 | 3.7813 | 0.7117 | 0.2807 |
| March | 2.6023 | 8.0538 | 0.5088 | 0.2097 |
| April | 4.0140 | 8.0000 | 0.6837 | 0.2500 |
| May | 4.6499 | 8.4250 | 0.6267 | 0.3226 |
| June | 4.5886 | 26.143 | 0.7421 | 0.3500 |
| July | 4.1465 | 23.264 | 0.6550 | 0.4516 |
| August | 4.3846 | 24.310 | 0.7681 | 0.4677 |
| September | 3.5779 | 11.600 | 0.6093 | 0.4167 |
| October | 2.5309 | 4.7857 | 0.5000 | 0.1129 |
| November | 1.3292 | 5.2917 | 0.5120 | 0.2000 |
| December | 0.7835 | 5.3636 | 0.5023 | 0.1774 |

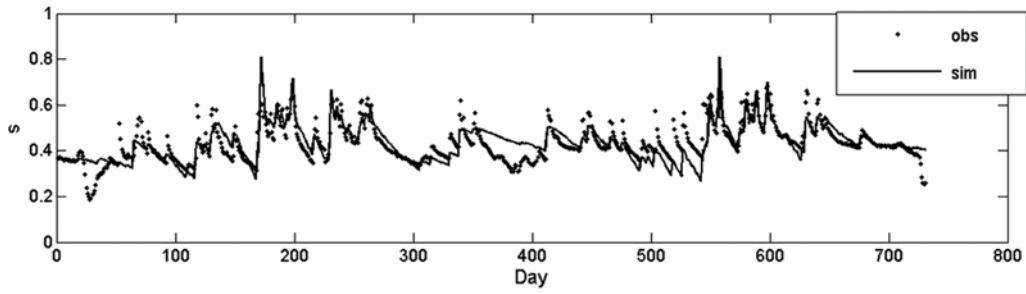


Fig. 4. Comparison between simulated and measured soil water in 2004 and 2005.

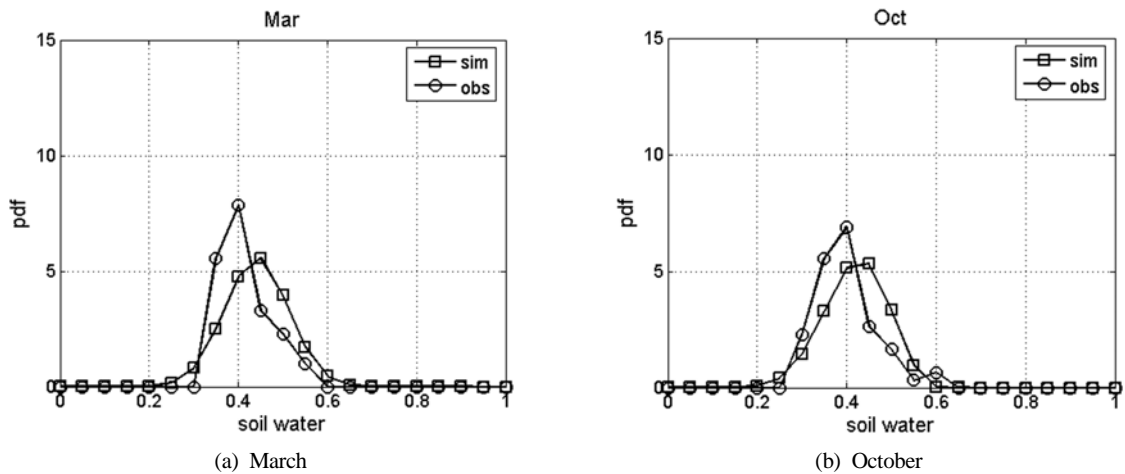


Fig. 5. Comparison of simulated and observed soil water PDFs.

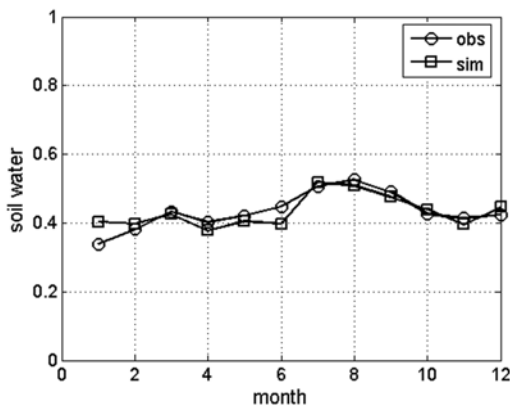


Fig. 6. Comparison of monthly average soil water.

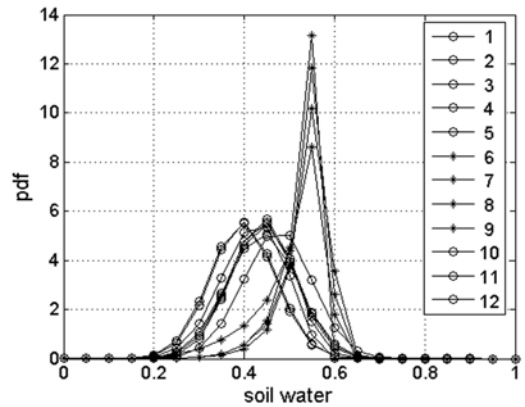


Fig. 7. Monthly soil water PDFs.

분의 확률적 거동을 비교적 잘 재현하고 있다. Fig. 6에 관측치와 모의치의 월별 평균적인 거동을 추가로 나타내었다.

Fig. 7은 토양수분 PDF의 시간적 거동을 월별로 표현한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 토양수분 PDF는 크게 두 가지 패턴으로 구분할 수 있는데, 하나는 6월에서 9월까지의 우기에서의 3변수 대수정규확률밀도함수 형태이며 다른 하나는 건기 시의 정규확률밀도함수 형태이다. 이는 시기별로 토양수분의 거동을 추인하는 주된 인자들의 상대적 역할 변동을 나타내는 것으로, 다시 말해서 우기 시에는 강수가 토양수분의 거동을 추인하는 주된 영향인자로 작용하는 반면에 건기 시에는 토양과 식생의 특성이 토양수분의

거동에 주된 영향을 미치게 됨을 의미한다. 참고로, 이러한 결과는 Entekhabi and Rodriguez - Iturbe(1994)과 Yoo and Kim(2004)의 연구결과와도 부합하는 결과이다.

Fig. 8은 식생 물 부족 지수 PDF의 시간적인 거동을 월별로 나타낸 그림이다. 토양수분 PDF와 한 가지 다른 점은 식생 물 부족 지수 PDF는 $\zeta=0$ 에서 확률질량을 갖는다는 점이다. 그림에서 알 수 있듯이 식생 물 부족 지수 PDF 또한 토양수분 PDF와 같이 우기와 건기로 확연하게 구분되는 형태를 나타내어, 우기 시에는 혼합 지수 PDF의 형태 (Fig. 9 참고)를 보이는 반면에 건기에는 정규확률밀도함수의 형태를 띠고 있다. 특히 Fig. 9에 도시하였듯이 우기의

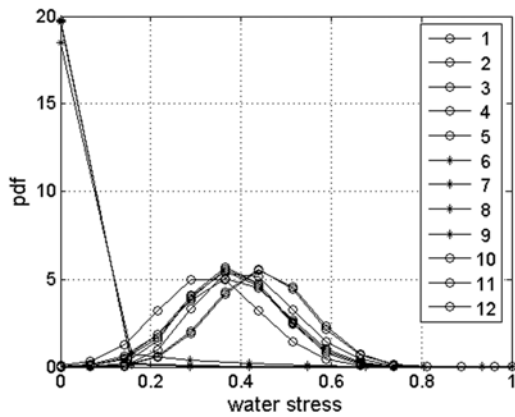


Fig. 8. Monthly plant water stress PDFs.

식생 물 부족 지수 PDF는 스트레스를 받지 않을 확률이 매우 큼을 아울러 알 수 있다.

3.3. 기후변화 시나리오에 따른 기후 매개변수 추정

기후변화 시나리오에 따른 토양수분 및 식생 물 부족 지수의 확률적 거동을 모의하기 위해서는 먼저 기후관련 매개변수인 E_{max} , R_m , λ 를 기후변화 시나리오에 부합하도록 재 추정하여야 한다.

미래 기후조건에 부합하는 E_{max} 는 Penman 법에 의해 추정되었으며, 이 때 KMA RCM에서 제공하는 미래 기후의 월별 기온자료가 입력자료로서 적용되었다.

전술하였듯이 KMA RCM은 미래 기후와 현재 기후의 월별 편차만을 제공하기 때문에 강우 관련 매개변수 R_m 과 λ 를 미래 기후에 부합하게 추정하기 위해서 본 연구에서는 현재 강우의 분산과 평균 사이의 관계는 미래 기후변화 시에도 일정할 것이라는 가정을 도입하였다. 이를 위해 우선 아래와 같은 회귀관계를 적용하여 현재 강우의 분산과 평균의 관계를 추정하였다.

$$Y = \alpha X^\beta \tag{6}$$

여기서 X 는 특정 월의 일 강수량의 평균값(mm)이며, Y 는 분산, α 와 β 는 회귀계수이다. Fig. 10에 10월의 경우에 대한 예를 도시하였다.

KMA RCM에서는 미래 기후에 대한 일 강수량의 월별 평균값 R 을 제공하므로 식 (6)을 이용하여 미래 기후에 대한 일 강수량의 월별 분산 σ^2 을 추정할 수 있으며, 이를 이용하여 미래 기후에 대한 λ 는 아래와 같은 관계를 이용하여 계산된다.

$$\lambda = \frac{2R^2}{\sigma^2 + R^2} \tag{7}$$

미래 기후에 대한 λ 가 추정되고 나면, R_m 은 아래 관계를 이용하여 계산된다.

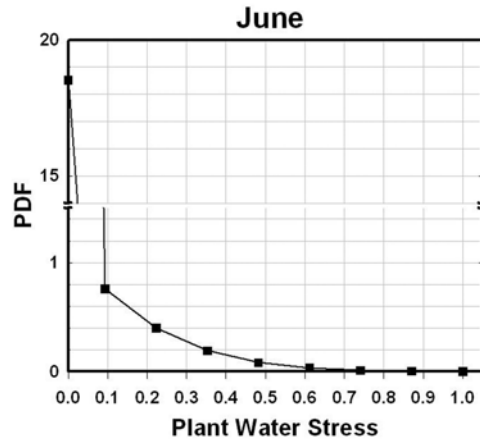


Fig. 9. Plant water stress PDF in wet season.

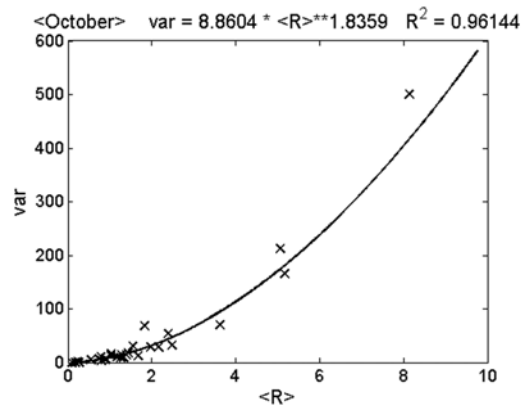


Fig. 10. Relation of the mean and variance of daily precipitation for October.

$$R = \lambda \cdot R_m \tag{8}$$

Fig. 11에 기후변화 시나리오를 적용하여 추정된 상기 매개변수의 변화를 도시하였다. 그림에서 'present'는 현재 기후조건을 적용하여 추정된 매개변수 값을 의미하며, 'KMA1'은 2051년에서 2060년까지의 KMA RCM 미래 기후조건을 적용하여 추정된 매개변수 값이고 'KMA2'는 2091년에서 2100년까지의 KMA RCM 미래 기후조건을 적용하여 추정된 매개변수 값이다.

Fig. 11(a) R_m 의 추정결과로부터 여름철의 경우 미래에는 강수일에 지금보다 더 많은 양의 강수가 내릴 가능성이 큰 것으로 예상되며, 이는 100년 후의 결과에서 보다 명확하게 나타나고 있다. 잠재증발산의 경우에는 Fig. 11(b)에 나타났듯이 7월을 제외하고는 모두 증가할 가능성이 있는 것으로 예측되고 있으며, 강수 발생 확률인 λ 의 경우에는 기후변화 시에도 큰 변화를 찾아볼 수 없었다.

3.4. 기후변화가 토양수분 및 식생 물 부족 지수에 미치는 영향

Fig. 12에 KMA RCM으로 모의된 미래 기후조건의 토양수분 모의결과를 도시하였다. 그림에서 가로축은 현재

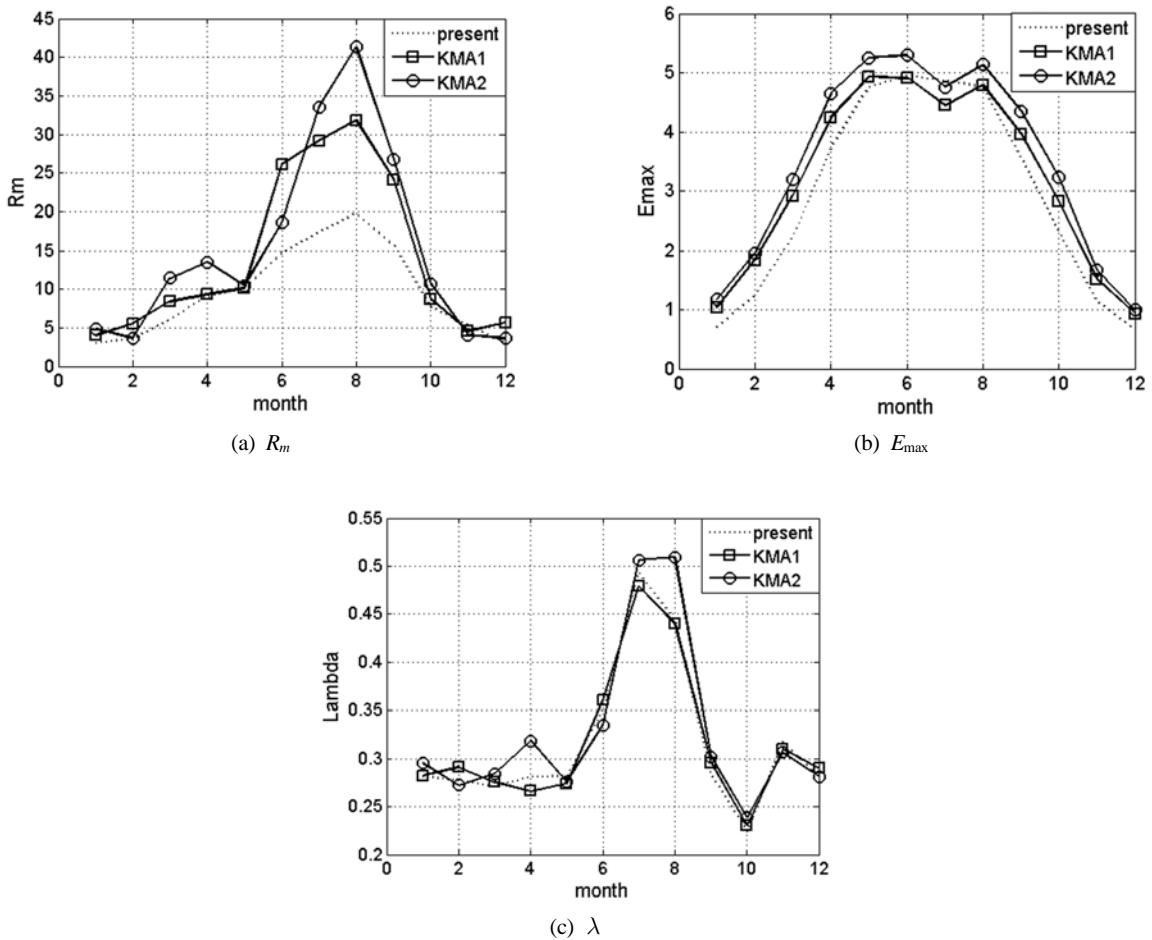


Fig. 11. Comparison of parameters for two climate change models.

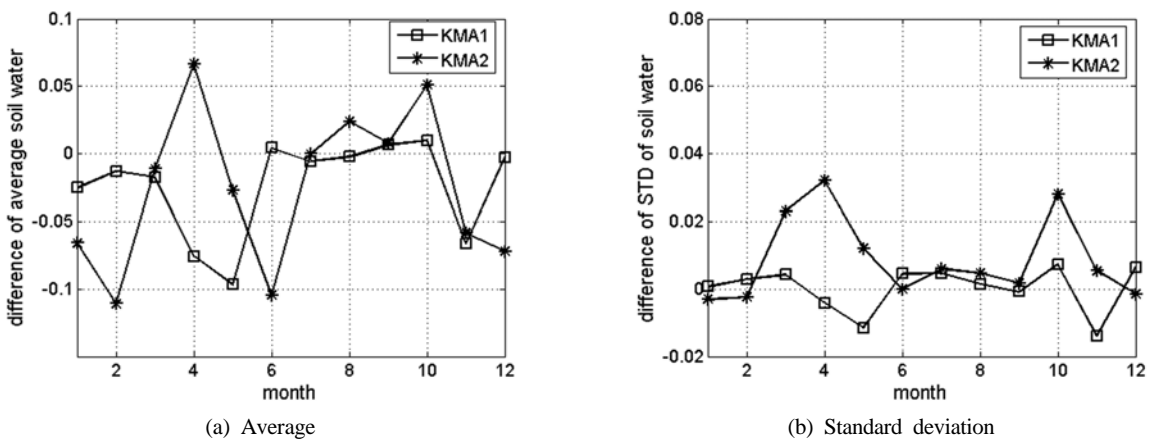


Fig. 12. Difference of statistics of soil water between present and future climate conditions

(1971~2000년) 기후조건의 월별 토양수분 통계치(Fig. 12(a)의 경우는 평균, Fig. 12(b)의 경우에는 표준편차)를 의미하며, 'KMA1'은 현재와 2051~2060년 기후조건의 통계치 편차를, 'KMA2'는 현재와 2091~2100년 기후조건의 통계치 편차를 각각 나타낸다.

2051~2060년 기후조건의 결과를 살펴보면(Fig. 12(a)) 평균적인 개념에서 봄철 토양수분의 감소를 예측해 볼 수 있다. 이러한 결과는 우리나라 농업의 중요한 부분을 차지하

고 있는 벼농사의 경우 봄철 관개용수의 의존도를 고려할 때, 50년 뒤에는 현재보다 인위적인 관개용수에의 의존도가 더 커질 가능성이 있음을 의미한다.

2061~2100년 기후조건의 경우에는 현재와 비교하여 월별로 변화가 매우 클 것임을 예측해 볼 수 있다(Fig. 12(a)). 즉, 1월, 2월, 6월, 11월, 12월의 경우 토양수분의 감소가 예측되고 있으며, 4월과 10월의 경우에는 토양수분의 증가가 예측되고 있다. 또한 Fig. 12(b)에서 알 수 있듯이 2051~2060

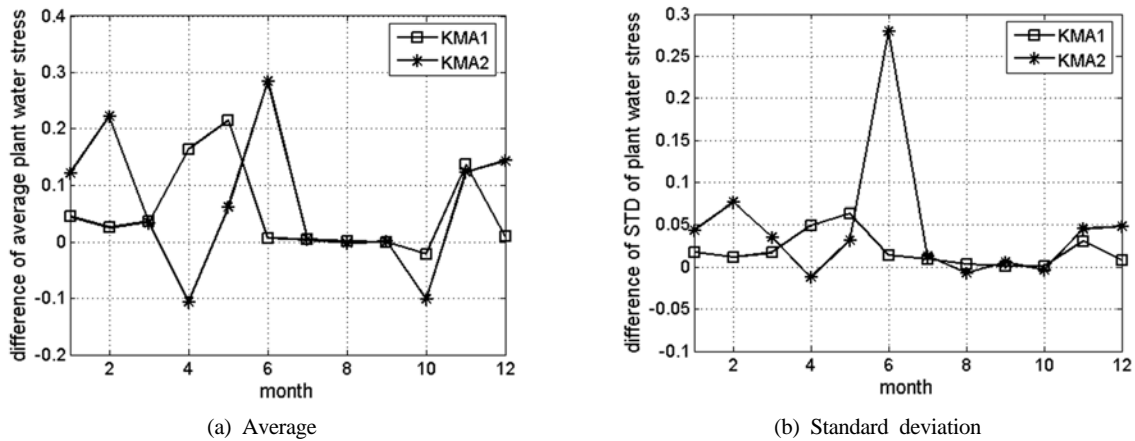


Fig. 13. Difference of statistics of plant water stress index between present and future climate conditions

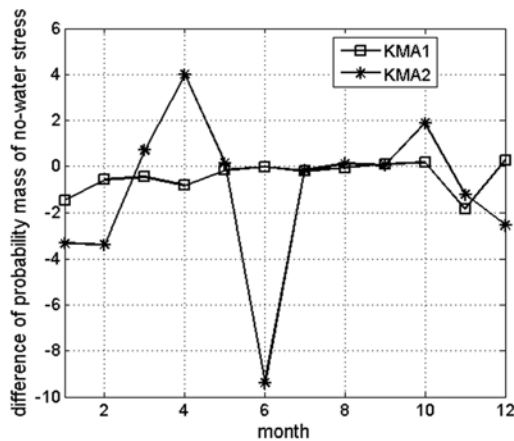


Fig. 14. Difference of probability mass values at $\zeta=0$ between present and future climate conditions.

년 기후조건인 경우 토양수분의 표준편차는 현재와 크게 다르지 않다고 예측되는 반면에, 2091~2100년 기후조건인 경우 봄철 토양수분이 표준편차가 증가할 가능성이 있는 것으로 예측되고 있으며, 이는 봄 가뭃의 빈도가 더 증가할 개연성이 있음을 의미한다.

Fig. 13은 미래 기후조건인 식생 물 부족 지수의 모의 결과를 보여주고 있다. 2051~2060년 기후조건인 경우 봄철 식생 물 부족 지수가 증가하는 패턴을 예측하고 있으며, 2060~2100년 기후조건인 경우 겨울철에 식생이 물에 관한 스트레스에 노출될 확률이 보다 큼을 알 수 있다(Fig. 13(a)). 또한 Fig. 13(b)에서 알 수 있듯이 2051~2060년 기후조건인 경우 봄철 식생 물 부족 지수의 표준편차가 현재보다 크게 예측되고 있는 반면에, 2091~2100년 기후조건인 경우 겨울철 식생 물 부족 지수의 표준편차가 증가할 가능성이 있는 것으로 예측되고 있으며, 이는 평균적인 지수의 증감 패턴과 함께 고려할 때, 미래에는 특히 봄철과 겨울철에 가뭃을 경험할 확률이 높은 방향으로 기후가 전개되고 있음을 의미한다.

Fig. 14는 식생이 물에 관한 스트레스를 받지 않을 확률을 별도로 도시한 그림이다. 2051~2060년 기후조건인 경우 현재와 비교해 볼 때 그다지 큰 변화를 찾아볼 수 없으나,

2091~2100년 기후조건인 경우에는 겨울철에 스트레스를 받지 않을 확률이 감소하고 있음을 알 수 있으며, 6월에도 비정상적으로 스트레스를 받지 않을 확률이 작아졌음을 보여주고 있다. 토양수분의 예측결과(Fig. 12(a))와 같이 고려해 볼 때 100년 후에는 6월 수분 패턴의 비정상적인 감소가 조심스럽게 예측되고 있는 결과이다.

4. 결론

본 연구에서는 토양수분과 물에 관한 식생 스트레스를 보다 잘 이해하려는 목적으로 한수희와 김상단(2008, 2009)의 연구를 바탕으로 토양수분과 식생 물 부족 지수를 모의하기 위한 확률 모형이 제안되었으며, 기후변화 시나리오에 대한 기초적인 영향평가가 수행되었다.

현재 기후조건 상의 토양수분 모의 결과는 본 연구에서 제안된 모형이 관측 자료를 비교적 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있었으며, 또한 시기별로 토양수분의 거동을 추인하는 주된 인자들에 상대적 역할 변경이 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 우기 시에는 강수가 토양수분의 거동을 추인하는 주된 영향인자로 작용하는 반면에 건기 시에는 토양과 식생의 특성이 토양수분의 거동에 주된 영향을 미치게 됨을 의미하며, 이는 식생 물 부족 지수의 모의 결과에서도 잘 나타나고 있다.

기후변화에 대한 기초적인 영향평가를 수행하기 위하여 기상청 기상연구소에서 개발한 지역기후모형을 적용하여 토양수분과 식생 물 부족 지수에 대한 미래 기후조건에서의 변화 정도를 살펴본 결과, 토양수분과 식생 물 부족 지수 모두 미래 기후조건에서는 변동성이 현재보다 증가될 것으로 예측되었으며, 2051~2060년 기후조건인 경우에는 봄철 가뭃이 2091~2100년 기후조건인 경우에는 겨울철 가뭃이 발생할 개연성이 커지는 것으로 분석되었다. 그러나 미래 기후조건에 대한 영향은 사실 어떤 기후모형을 적용하였는가에 따라 매우 크게 좌우되기 때문에 한 가지 기후모형의 결과로 그 진위여부를 판별하기에는 부족함이 많을 것으로 판단되며, 정확한 예측을 위해서는 양적 질적으로 보다 진보적인 연구 결과들이 필요하다는 점을 아울러 밝혀둔다.

사 사

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-10364-0).

참고문헌

- 기상연구소(2004). 기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출기술개발. 기상연구소 연구보고서, 기상청.
- 한수희, 김상단(2008). 토양수분과 식생의 물 압박에 대한 생태수문학적 해석: 추계학적 모형의 유도과 적용을 중심으로. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**, pp. 99-106.
- 한수희, 김상단(2009). Cumulant 급수이론을 이용한 추계학적 토양 물수지 방정식의 확률 해. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**, pp. 106-113.
- Baudena, M., Boni, G., Ferraris, L., von Hardenberg, J., and Provenzale, A. (2007). Vegetation response to rainfall intermittency in drylands: Results from a simple ecohydrological box model. *Advances in Water Resources*, **30**, pp. 1320-1328.
- Chang, J. S. and Cooper, G. (1970). A practical difference scheme for Fokker-Planck equations. *Journal of Computational Physics*, **6**, pp. 1-16.
- Eagleson, P. (1978). Climate, soil and vegetation: 1. Introduction to water balance dynamics. *Water Resources Research*, **14**, pp. 705-712.
- Entekhabi, D. and Rodriguez-Iturbe, I. (1994). Analytical framework for the characterization of the space-time variability of soil moisture. *Advances in Water Resources*, **17**, pp. 35-45.
- Hsiao, T. C. (1973). Plant responses of water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, **24**, pp. 519-590.
- IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. J. T. Houghton et al. (eds.). Cambridge University Press, NY.
- Kim, S., Han, S., and Kavvas, M. L. (2008). Analytical derivation of steady-state soil water probability density function coupled with simple stochastic point rainfall model. *ASCE Journal of Hydrological Engineering*, **13**, pp. 1069-1077.
- Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L., and Rodriguez-Iturbe, I. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress. II: Probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in Water Resources*, **24**, pp. 707-723.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**, pp. 282-290.
- Nordbotten, J. M., Rodriguez-Iturbe, I., and Celia, M. A. (2007). Stochastic coupling of rainfall and biomass dynamics. *Water Resources Research*, **43**, W01408, doi:10.1029/2006WR005068.
- Porporato, A., Laio, F., Ridolfi, L., and Rodriguez-Iturbe, I. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress. III: Vegetation water stress. *Advances in Water Resources*, **24**, pp. 725-744.
- Porporato, A. and Rodriguez-Iturbe, I. (2001). Ecohydrology of water-controlled ecosystems. Cambridge.
- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A., Laio, F., and Ridolfi, L. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: Active role in hydrologic processes and response to water stress. I: Scope and general outline. *Advances in Water Resources*, **24**, pp. 697-705.
- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A., Ridolfi, L., Islam, V., and Cox, D. (1999). Probabilistic modeling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation. *Proceedings of Royal Society, Series A*, **455**, pp. 3789-3805.
- Yoo, C. and Kim, S. (2004). EOF analysis of surface soil moisture field variability. *Advances in Water Resources*, **27**, pp. 831-842.