

# 토양수분과 식생 스트레스 동역학에 기후변화가 미치는 영향

## The Impact of Climate Change on the Dynamics of Soil Water and Plant Water Stress

한수희\*, 김상단\*\*  
Suhee Han, Sangdan Kim

---

### Abstract

In this study a dynamic modeling scheme is presented to derive the probabilistic structure of soil water and plant water stress when subject to stochastic precipitation conditions. The newly developed 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 is investigated under climate change scenarios. This model is based on the cumulant expansion theory, and has the advantage of providing the probabilistic solution in the form of probability distribution function (PDF), from which one can obtain the ensemble average behavior of the dynamics. The simulation result of soil water confirms that the proposed soil water model can properly reproduce the results obtained from observations, and it also proves that the soil water behaves with consistent cycle based on the precipitation pattern. The plant water stress simulation, also, shows two different PDF patterns according to the precipitation. Moreover, with all the simulation results with climate change scenarios, it can be concluded that the future soil water and plant water stress dynamics will differently behave with different climate change scenarios.

*Key words:* Climate change, Cumulant expansion theory, Fokker-Planck equation, 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. 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. 더욱이 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. 연구 방법

---

\* 부경대학교 환경공학과 박사과정 · E-mail : [doha0703@hotmail.com](mailto:doha0703@hotmail.com)

\*\* 정희원 · 부경대학교 환경시스템공학부 교수 · E-mail : [skim@pknu.ac.kr](mailto:skim@pknu.ac.kr)

## 2.1 토양수분 동역학

본 연구에서는 한수희와 김상단(2008)에 의해 사용된 아래와 같은 토양수분 동역학 지배방정식에 기초하여 추계학적 모형을 유도하고자 하였다.

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

여기서  $n$ 은 토양의 공극비이며,  $Z_r$ 은 지표면 근처 식생뿌리가 존재하는 토양층의 두께[L]이다.  $L$ 은 기후, 토양 및 식생 조건에 따른 토양수분의 손실과 관련된 함수이며,  $I$ 는 강수  $R$ 로부터 토양에 공급되는 수분 양,  $s$ 는 토양수분,  $k$ 는 공간적 확산계수이다.

본 연구가 기존에 수행된 연구와 가장 차별화되는 부분 중 하나는 토양수분의 이득함수  $I(R, s)$ 와 손실함수  $L(s)$ 의 보다 현실적인 표현이라 할 수 있으며, 이들을 고려하여 토양수분 확률밀도함수의 시간적 거동을 나타내는 Fokker-Planck 방정식은 아래와 같이 유도될 수 있다.

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

## 2.2 추계학적 모형에 대한 수치해석기법

식 (2)의 수치학적 해석을 위하여 초기 조건으로 초기에는 토양수분이 전 영역에 걸쳐 균등하게 분포되어 있는 것으로 가정하였으며, 시스템 내에서 확률밀도가 경계들을 통하여 흩어지는 것을 막기 위하여 경계 조건으로는 확률 flux가 0이 됨을 선택하였다(Gardiner, 1986). 또한 확률밀도가 음수가 될 수 없기 때문에 항상 양의 값을 갖는다는 것을 이용한 Chang and Cooper(1970)의 특별한 방법을 적용하여 다음과 같은 일반적인 해를 유도하였다.

$$\begin{aligned} P_j^n = & \left[ -\frac{\Delta t}{\Delta s} \delta_{j-\Delta s}^{n+1} B_{j-1/2\Delta s}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta s^2} C_{j-1/2\Delta s}^{n+1} \right] P_{j-\Delta s}^{n+1} \\ & + \left[ 1 + \frac{\Delta t}{\Delta s} \delta_j^{n+1} B_{j+1/2\Delta s}^{n+1} + \frac{\Delta t}{\Delta s^2} C_{j+1/2\Delta s}^{n+1} \right] P_j^{n+1} \\ & \left[ -\frac{\Delta t}{\Delta s} (1 - \delta_{j-\Delta s}^{n+1}) B_{j-1/2\Delta s}^{n+1} + \frac{\Delta t}{\Delta s^2} C_{j-1/2\Delta s}^{n+1} \right] \\ & + \left[ \frac{\Delta t}{\Delta s} (1 - \delta_j^{n+1}) B_{j-1/2\Delta s}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta s^2} C_{j+1/2\Delta s}^{n+1} \right] P_{j+\Delta s}^{n+1} \end{aligned} \quad (3)$$

경계 조건의 경우에는 경계조건인 flux가 0인 것을 이용하여 구할 수 있다.

## 2.3 식생 물 부족 지수의 동역학

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).

$$\zeta = \frac{s^* - s}{s^*}, \quad \text{for } 0 \leq s \leq s^* \quad (4)$$

$$= 0, \quad \text{for } s^* \leq s \leq 1$$

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

## 2.4 기후변화 시나리오

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)와 Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis(CCCma)의 세 번째 GCM인 CGCM3.1이다. 구체적인 기후변화 시나리오로는 IPCC SRES A2 기후변화 시나리오가 본 연구를 위하여 채택되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 대상유역 및 매개변수 추정

본 연구를 통해 유도된 토양수분 모형의 적용성을 살펴보기 위하여 충청북도에 속한 옥천군을 대상유역으로 선정하여 옥천군에서 관측된 농업 및 기상 자료를 이용하여 연구를 진행하였다.

매개변수들 중 일부인 유효토양심에 해당하는 매개변수  $nZ_r$ 과 포화투수계수  $K_s$ , 토양수분 상태의 임계값인  $s^*$ 와  $s_l$ 을 추정하기 위하여 최적화 기법 중 하나인 유전자 알고리즘을 사용하였는데, 이 때 기후, 토양 및 식생의 특성에 따라 Table 1과 같이 두 가지 상황에 대하여 각각 산정하였다.

Table 1. Parameter Estimation (II)

	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

유도된 토양수분 모형의 정확성을 살펴보기 위하여 위에서 산정된 매개변수 값들을 적용하여 모의된 값과 관측자료의 값을 비교해 본 결과  $R^2$ 는 0.58, 모형효율계수(Nash-Sutcliffe coefficient)는 0.55로서 관측자료와 모의된 값이 어느 정도 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 토양수분 및 식생 물 부족 지수의 확률적 거동

위에서 산정된 매개변수를 적용하여 식 (2)를 수치적으로 해석하면 토양수분 PDF의 시간적인

변화를 모의할 수 있으며, 이를 관측 자료로부터 얻어진 PDF와 함께 비교해 본 결과 제안된 모형은 토양수분의 확률적 거동을 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. Fig. 1과 2는 토양수분과 식생 스트레스 PDF의 시간적 거동을 월별로 표현한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 토양수분 PDF는 6월에서 9월까지의 우기에서 3변수 대수정규확률밀도함수 형태를, 건기 시에는 정규확률밀도함수 형태를 보여준다. 또한 식생 물 부족 지수 PDF는  $\zeta=0$ 에서 확률질량을 가지며, 우기 시에는 혼합 지수 PDF의 형태를 보이는 반면에 건기에는 정규확률밀도함수의 형태를 띠고 있다.

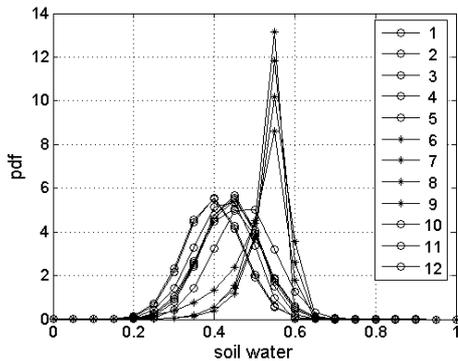


Fig. 1. Monthly soil water PDFs

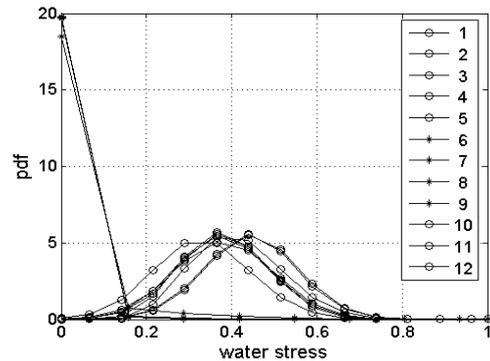


Fig. 2. Monthly plant water stress PDFs

### 3.3 기후변화 시나리오에 따른 기후 매개변수 추정

기후변화 시나리오에 따른 토양수분 및 식생 물 부족 지수의 확률적 거동을 모의하기 위해서는 먼저 기후관련 매개변수인  $E_{max}$ ,  $R_m$ ,  $\lambda$ 를 기후변화 시나리오에 부합하도록 재 추정하여야 한다. 현재 자료와의 비교를 위하여 1971년부터 2000년까지의 30년 기간 동안의 청주 지역 기온, 습도, 풍속, 일조, 강수량 자료를 획득하여 사용하였다. Fig. 3에 기후변화 시나리오를 적용하여 추정한 상기 매개변수의 변화를 도시하였다.

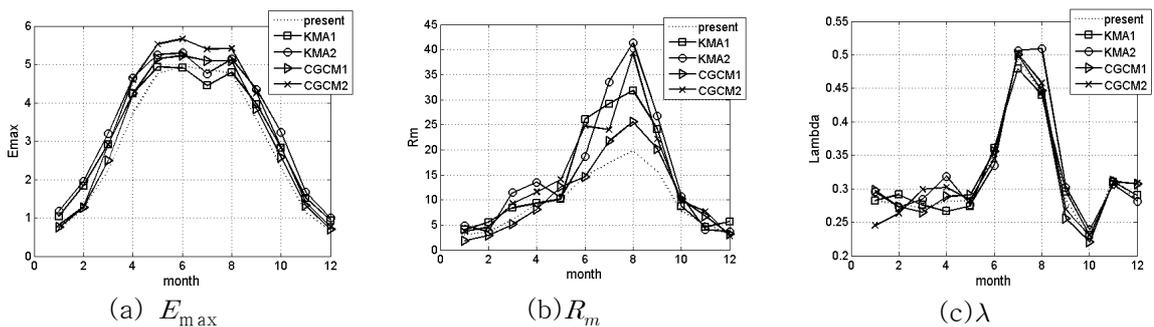


Figure 3. Comparison of parameters for two climate change models

### 3.4 기후변화가 토양수분 및 식생 물 부족 지수에 미치는 영향

CGCM에 따른 토양 수분의 월 평균 거동을 현재와 미래에 대해 비교하고자 Fig. 4를 살펴보면, 토양수분이 50년 후와 100년 후에 다소 다른 결과를 보인다는 것을 명백히 알 수 있다. 10월에서 1월까지의 기후가 변화되면 토양 수분이 현재보다 평균적으로 상승함을 보이는 반면, 2월부터

터 5월로 대표되는 봄철의 경우 50년 후의 토양 수분은 현재보다 줄어들지만 100년 후의 토양 수분은 현재보다 상승함을 알 수 있다. Fig. 5에 KMA RCM으로 모의된 미래 기후조건 토양수분 모의결과를 도시하였다. 50년 후 결과를 살펴보면 봄철 토양수분의 감소를 예측해 볼 수 있다. 100년 후 기후조건인 경우에는 현재와 비교하여 월별로 변화가 매우 클 것임을 예측해 볼 수 있다

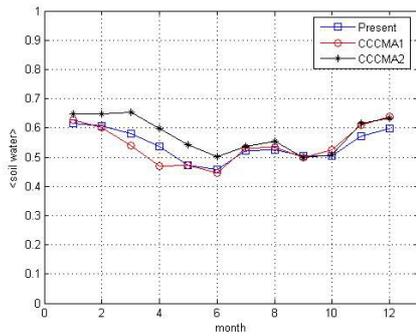


Fig. 4. Average monthly Soil water PDFs with CGCM3.1 climate change scenario

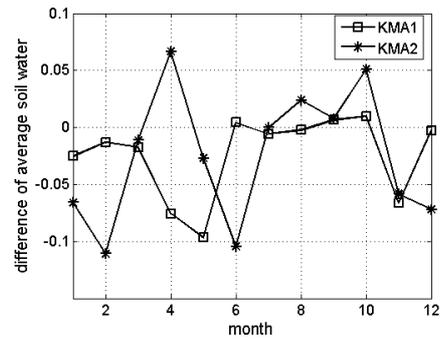


Fig. 5. Difference of statistics of soil water between present and future climate conditions

미래 기후조건 토양수분 부족 지수의 모의 결과를 통해서 뚜렷하게 들어난 것은 식생 스트레스 PDF가 거동하는 패턴을 비교할 때, 현재의 식생 스트레스가 나타내는 세 가지 분포 형과 기상청 자료의 식생 스트레스 PDF가 유사하게 거동함에 반해, CGCM3의 경우 겨울철에 그 패턴이 바뀌게 됨을 알 수 있다. 즉, 식생이 받는 스트레스의 PDF가 겨울철에 혼합 gamma 분포를 띄어, 식생 스트레스에 영향을 미치는 요인들 사이의 상호관계가 CGCM3에서 변화됨을 알 수 있다.

### 3. 결 론

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.

### 참 고 문 헌

1. 한수희, 김상단, (2008). 토양수분과 식생의 물 압박에 대한 생태수문학적 해석 : 추계학적 모형의 유도과 적용을 중심으로, 한국물환경학회, 제24권, pp. 99-106.
2. Chang, J.S., and Cooper, G. (1970). A practical difference scheme for Fokker-Planck equations, Journal of Computational Physics, 6, pp. 1-16.
3. Gardner, W.R. (1986). Dynamic aspects of water availability of plants, *Soil Sc.*, 89, pp. 63-73.
4. Hsiao, T.C. (1973). Plant responses of water stress, Annual Review of Plant Physiology, 24, pp. 519-590.