

## 토양수분의 추계학적 거동과 기후변화가 미치는 영향

### The Stochastic Behavior of Soil Water and the Impact of Climate Change on Soil Water

한 수 희\* / 안 재 현\*\* / 김 상 단\*\*\*

Han, Suhee / Ahn, Jae Hyun / Kim, Sangdan

#### Abstract

For the better understanding of the temporal characteristics of soil water, this study is to suggest a stochastic soil water model and to apply it for impact assessment of climate change. The loss function is divided into 3 stages for more specified comprehension of the probabilistic behavior of soil water, and especially, the soil water model considering the stochastic characteristics of precipitation is developed in order to consider the variation of climatic factors. The simulation result of soil water model confirms that the proposed soil water model can re-generate the observation properly, and it also proves that the soil water behaves with consistent cycle based on the precipitation pattern. Moreover, with the simulation results with a climate change scenario, it can be predicted that the future soil water will have higher variations than present soil water.

**keywords** : Climate change, Cumulant expansion theory, Fokker-Planck equation, Soil water

#### 요 지

토양수분에 관한 관심이 급증하면서 토양수분의 시공간적 특성을 이해하고자 하는 연구가 최근 꾸준히 일어나고 있다. 토양수분의 보다 나은 이해를 위해, 본 연구에서는 이에 대한 동역학을 추계학적 기법을 이용하여 기후변화에 따른 영향평가에 대한 적용을 염두에 둔 추계학적 토양수분모형을 제시하고자 하였다. 보다 현실적인 적용을 위하여 손실항을 세 가지로 구분하여 고려하였고 강우의 추계학적인 특성 역시 고려하였다. 모의 결과 본 연구에서 유도한 토양수분 모형으로 관측 자료를 적절하게 재현 할 수 있으며 토양수분이 계절별로 강우의 패턴에 따라 일정한 순환의 형태를 가짐을 재현하였다. 또한 CGCM3.1 자료를 이용한 미래 토양수분 상태 예측으로, 토양수분의 변동성이 현재보다 커질 것으로 예측되었다.

**핵심용어** : 기후 변화, Cumulant 급수 이론, Fokker-Planck 방정식, 토양수분

\* 부경대학교 환경시스템공학부 박사과정

Graduate Student, Dept. of Environmental System Engrg., Pukyong National Univ., Busan, Korea

\*\* 서경대학교 이공대학 토목공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Seokyeong Univ., Seoul, Korea

\*\*\* 교신저자, 부경대학교 환경시스템공학부 조교수

Corresponding Author, Assistant Professor, Dept. of Environmental System Engrg., Pukyong National Univ., Busan, Korea

(e-mail: skim@pknu.ac.kr)

## 1. 서 론

물이 지배하는 환경 시스템은 아주 복잡한 구조를 지니고 있을 뿐 아니라 이를 구성하는 요인들의 특성과 이들의 동역학적 관계는 기후와 토양, 식생 사이에 존재하는 여러 상호작용에 의존하며 시간에 따라 진화하게 된다. 따라서 환경 보호와 적절한 자원 관리와 같은 주요 현안들에 접근하는데 이러한 동역학을 정량적으로 이해하는 것이 매우 중요하다(Rodriguez-Iturbe *et al.*, 2001). 토양수분에 관한 관심은 최근 생태 수문학자들을 위주로 꾸준히 연구되고 있는데(Eagleson, 1978; Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1999, 2001), 이는 토양수분이 기후, 토양, 식생에 큰 영향을 미치며, 화재나 영양염 부족 등의 여러 요인들이 있지만, 그 중 식생의 구조와 생리에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있기 때문이다(Rodriguez-Iturbe *et al.*, 2001).

토양수분의 정량적인 해석에 있어 시공간적 변동성이 현저히 크기 때문에 토양수분의 전체적인 동역학을 지배하는 과정을 이해하기 위해 그 특성을 확률밀도함수로 요약, 해석해 볼 필요가 있다. 또한 토양수분 특성 연구에 필요한 관측 자료가 부족한 현실을 고려할 때 토양수분 모형화 연구가 선행되어야 할 것이며 이를 바탕으로 토양수분에 대한 관측 설계도 가능할 것이다(Jackson and Le Vine, 1996; Njoku and Entekhabi, 1996). 모형화를 통한 토양수분 특성에 관한 기존의 연구의 일부를 살펴보면, Yoo and Kim(2004)이 토양수분의 공간적 특성의 시간적 변화를 EOF를 통하여 논한 있으며, Yoo *et al.*(2006)은 토양수분 동역학과 강우모형과의 연계를 통하여 가뭄에 대한 적용 가능성을 연구한 바 있다.

추계학적 모형 사용을 통한 토양수분 동역학 연구는 이미 여러 연구자들에 꾸준히 진행되어 오고 있다(Eagleson, 1978; Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1999; Laio *et al.*, 2001; Porporato *et al.*, 2004). 또한 Kim *et al.*(2008)은 토양수분과 강우 사이의 관계를 살펴본 후, 특정 조건 하에서 추계학적 토양수분 물수지 방정식에 대한 해석적인 해를 유도하기도 하였다.

본 연구에서는 상기 연구들을 바탕으로 한 한수희와 김상단(2008)의 추후 연구로서 기존의 토양수분 방정식을 좀 더 현실적으로 접근하기 위하여 손실 항목을 세 가지 단계로 나누었으며 강우의 추계학적인 특성 역시 반영하여 지배 방정식을 유도한 후 이를 수치적 기법으로 해석하고자 하였다. 또한 구축된 모형을 토대로 하여 기후변화 시나리오를 적용, 기후변화 시에 미래 토양수분이 어떠한 형태로 거동하게 될 것인지 예측하고

자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 토양수분 동역학에 대한 추계학적 모형의 유도

토양수분에 있어 강수 및 지형조건에 따른 시공간적 특성이 중요한 역할을 하기 때문에 이러한 특성을 적절히 반영해 주는 것이 토양수분 동역학을 모형화하는데 핵심사항이 될 것이다. 본 연구에서는 Rodriguez-Iturbe *et al.*(1999)에 의해 제안된 아래와 같은 토양수분 동역학 지배방정식에 기초하여 추계학적 모형을 유도하고자 하였다.

$$nZ_r \frac{ds}{dt} = -L(s) + nZ_r(k\nabla^2 s) + I(R, s) \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 토양의 공극비이며,  $Z_r$ 은 지표면 근처 식생 뿌리가 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 연구에서는 모형의 단순화를 위하여 토양수분의 공간적 확산현상은 크지 않다고 가정하여 토양수분 동역학의 공간적 변동성을 무시함으로써 Eq. (1)은 다음과 같이 간단하게 나타내었다.

$$nZ_r \frac{ds}{dt} = -L(s) + I(R, s) \quad (2)$$

본 연구가 기존에 수행된 연구(한수희와 김상단, 2008)와 가장 차별화되는 부분 중 하나는 토양수분의 이득함수  $I(R, s)$ 와 손실함수  $L(s)$ 의 보다 현실적인 표현이라 할 수 있다. 토양수분의 이득함수  $I(R, s)$ 의 확률밀도함수(Probability Distribution Function, PDF)는 아래와 같이 토양수분의 현재 상태 및 강수량에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다.

$$f_I(i) = \begin{cases} 1 - \lambda & , \text{ for } i = 0 \\ \frac{\lambda}{R_m} e^{-i/R_m} & , \text{ for } 0 < i < (1-s)nZ_r \\ \lambda e^{-(1-s)nZ_r/R_m} & , \text{ for } i > (1-s)nZ_r \end{cases} \quad (3)$$

여기서,  $i$ 는 침투량,  $R_m$ 은 비가 온 날의 강수량 평균값이며,  $\lambda$ 는 어떤 날의 강수 확률이다. 이는 일강수량을 혼합 지수 확률밀도함수로 나타내었음을 의미하며, 따라서 토양이 포화되도록 비가 올 확률은 아래와 같다.

$$P_{Rs} = \int_{(1-s)nZ_r}^{\infty} \frac{\lambda}{R_m} e^{-r/R_m} dr \quad (4)$$

$$= \lambda e^{-(1-s)nZ_r/R_m}$$

이득함수  $I(R,s)$ 의 PDF를 도시하면 Fig. 1과 같다.

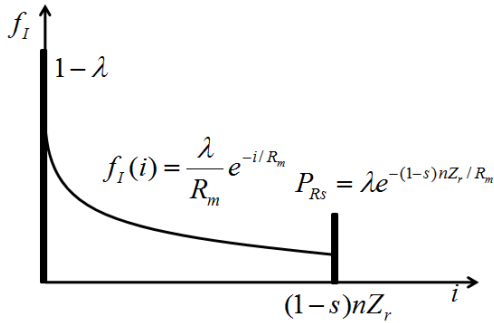


Fig. 1. Infiltration Probability Distribution Function

토양수분의 손실함수  $L(s)$ 는 토양수분의 상태에 따라 아래와 같이 크게 세 가지로 구분하였다. 즉,

$$L(s) = \frac{E_{\max}s}{s^*}, \quad \text{for } 0 < s < s^* \quad (5)$$

$$= E_{\max}, \quad \text{for } s^* < s < s_l$$

$$= \frac{K_s s}{1-s_l} - \frac{K_s s_l}{1-s_l} + E_{\max}, \quad \text{for } s_l < s < 1$$

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.

$I(R,s)$ 와  $L(s)$ 에 관한 모형에 대한 연구는 Rodriguez-Iturbe *et al.*(2004)에서 사용된 바 있다.

Eq. (2)의 확률평균(ensemble average) 형태는 cumulant 급수이론을 이용하여 직접 구할 수도 있으나 (Kavvas, 2003), 상태변수의 확률밀도에 관한 해를 얻기 위해서는 cumulant 급수이론을 사용하기 전에 먼저

Eq. (2)의 확률공간에서의 연속방정식인 추계학적 Liouville 방정식(Kubo, 1963)을 고려할 필요가 있게 된다. 이러한 확률공간에서의 확률평균은 기존 식(본 연구의 경우 Eq. (2))의 상태변수(본 연구의 경우 토양수분)의 확률밀도함수가 된다(Van Kampen, 1981). 유도에 관한 보다 상세한 사항은 Kavvas (2003)을 참조할 수 있으며, 본 연구의 경우 토양수분 확률밀도함수의 시간적 거동을 나타내는 Fokker-Planck 방정식은 아래 Eq. (6)과 같이 유도될 수 있다.

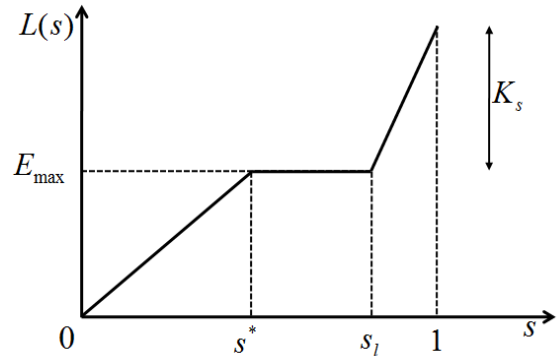


Fig. 2. Loss Function Divided into 3 Phases

여기서,  $T$ 는 강우 관측 scale(본 연구의 경우 1일)이며,  $p(s,t)$ 는 시간  $t$ 에 따른 상태변수  $s$ 의 확률밀도함수,  $\theta$ 는 일강수량 시계열의 변동 scale로서 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = 2 \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau \quad (7)$$

여기서  $\rho(\tau)$ 는 일 강수량 시계열의 자기상관함수이다.

## 2.2 추계학적 모형에 대한 수치해석기법

위에서 유도한 추계학적 모형을 수치적으로 해석하기 위하여 Eq. (6)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial p(s,t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial s} \left[ \left( \frac{1}{nZ_r} \lambda R_m \left( 1 - e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right) - \frac{1}{nZ_r} L(s) + \frac{\theta(1-s)\lambda}{2T^2} e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{R_m T}} \right. \right. \quad (6)$$

$$\left. \left. - \frac{\theta \lambda^2 R_m}{2T \cdot nZ_r} \left( 1 - e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right) e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{R_m T}} \right) p(s,t) \right]$$

$$+ \frac{\partial}{\partial s} \left[ \left( \frac{\lambda R_m \theta}{2(nZ_r)^2 T} 2TR_m \left( 1 - e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right) - 2nZ_r (1-s) e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right. \right.$$

$$\left. \left. - \lambda R_m T \left( 1 - e^{-\frac{(1-s)nZ_r}{TR_m}} \right)^2 \right) \times \frac{\partial p(s,t)}{\partial s} \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial s}(Bp) + \frac{\partial}{\partial s}\left(C\frac{\partial p}{\partial s}\right) \\ &= -\frac{\partial}{\partial s}\left(Bp - C\frac{\partial p}{\partial s}\right) = -\frac{\partial J}{\partial s} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $B$ 와  $C$ 는 Eq. (6)을 간략히 나타내기 위하여 사용된 항이다.

위 식은 그 형태가 이송-확산의 방정식과 유사하기 때문에  $B$ 와  $C$ 를 각각 이동과 확산의 계수라 볼 수 있으며, 본 연구에서 유도한 추계학적 모형인 Eq. (6)과 연관시켜 각각 추정할 수 있다.

위 식을 해석하기 위한 초기 조건으로 초기에는 토양수분이 전 영역에 걸쳐 균등하게 분포되어 있는 것으로 가정하였으며, 이러한 초기 균등분포의 효과는 추후 다시 살펴보게 될 것이다. 초기 조건을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$p(s,0) = 1 \text{ for all } s \quad (9)$$

적절한 경계조건을 결정하기 위해서는 Eq. (8)의 상태변수의 거동을 자세히 살펴볼 필요가 있다. 본 연구의 경우 상태변수가 확률밀도로 존재하므로, 모의 시 어떠한 evolution time step에서도 시스템 내의 확률질량이 보존되어야 한다. 따라서 시스템 내에서 확률질량이 경계들을 통하여 흩어지는 것을 막기 위하여 경계 조건으로는 확률 flux가 0이 됨을 선택할 수 있으며(Gardiner, 1960), 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$J(0,t) = J(L,t) = 0 \quad (10)$$

여기서  $L$ 는 최대 토양수분 양이며 본 연구에서는 1이다.

또한 확률밀도가 음수가 될 수 없기 때문에 항상 양의 값을 갖는다는 것을 이용하여 Chang and Cooper (1970)는 특별한 방법을 개발하였는데 이를 살펴보면 다음과 같다. 우선 Eq. (8)은 다음과 같이 다시 표현될

수 있다.

$$\frac{p_j^{n+1} - p_j^n}{\Delta t} = -\frac{J_{j+\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1} - J_{j-\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1}}{\Delta s} \quad (11)$$

여기서  $J=0, 1, 2, \dots, I$  이이며, 본 연구에서는  $\Delta s$ 를 0.1로 하여 계산하였다. 가상의 경계 지점인  $j=-1/2$ 와  $j=I+1/2$ 에서 확률 flux가 0인 경계조건이 적용되며, 이러한 분리법은 시스템 내에서의 확률 질량을 보존하게 된다. 즉,

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{j=0}^I (p_j^{n+1} - p_j^n) \Delta s}{\Delta t} &= -\sum_{j=0}^I \left( J_{j+\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1} - J_{j-\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1} \right) \\ &= -\left( J_{I+\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1} - J_{-\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1} \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 시스템 내의 확률질량은 계산이 진행되면서 변하지 않게 되는데 이는 다음과 같이 경계 밖의 절단 지점에서 flux가 0인 경계 조건 때문이다.

$$J_{-\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1} = J_{I+\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1} = 0 \quad (13)$$

두 번째로 해의 안정성을 위하여 다음과 같은 수치적 가중인자  $\delta$ 가 적용된다.

$$p_{j+\frac{1}{2}\Delta s}^{n+1} = (1 - \delta_j^{n+1}) p_{j+\Delta s}^{n+1} + \delta_j^{n+1} p_j^{n+1} \quad (14)$$

여기서,  $\delta_j^{n+1}$ 는 가중인자로서 Chang and Cooper (1970)는 확률 값이 항상 양수임을 확실하게 하기 위하여 다음과 Eq. (15)와 같이 산정하도록 하였다.

이러한 수치기법을 이용하면  $J$ 는 다음 Eq. (16)과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta_j^{n+1} = \frac{C_{j+1/2\Delta s}^n - (C_{j+1/2\Delta s}^n - \Delta s \cdot B_{j+1/2\Delta s}^n) \exp\left[\Delta s \frac{B_{j+1/2\Delta s}^n}{C_{j+1/2\Delta s}^n}\right]}{\Delta s \cdot B_{j+1/2\Delta s}^n \left( \exp\left[\Delta s \frac{B_{j+1/2\Delta s}^n}{C_{j+1/2\Delta s}^n}\right] - 1 \right)} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} J_{j+1/2\Delta s}^{n+1} &= \left[ (1 - \delta_j^{n+1}) B_{j+1/2\Delta s}^{n+1} - \frac{1}{\Delta s} C_{j+1/2\Delta s}^{n+1} \right] p_{j+\Delta s}^{n+1} \\ &+ \left[ \delta_j^{n+1} B_{j+1/2\Delta s}^{n+1} + \frac{1}{\Delta s} C_{j+1/2\Delta s}^{n+1} \right] p_j^{n+1} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
p_j^n = & \left[ -\frac{\Delta t}{\Delta s} \delta_{j-\Delta s}^{n+1} B_{j-1/2\Delta s}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta s^2} C_{j-1/2\Delta s}^{n+1} \right] p_{j-\Delta s}^{n+1} \\
& + \left[ 1 + \frac{\Delta t}{\Delta s} \delta_j^{n+1} B_{j+1/2\Delta s}^{n+1} + \frac{\Delta t}{\Delta s^2} C_{j+1/2\Delta s}^{n+1} \right. \\
& \quad \left. - \frac{\Delta t}{\Delta s} (1 - \delta_{j-\Delta s}^{n+1}) B_{j-1/2\Delta s}^{n+1} + \frac{\Delta t}{\Delta s^2} C_{j-1/2\Delta s}^{n+1} \right] p_j^{n+1} \\
& + \left[ \frac{\Delta t}{\Delta s} (1 - \delta_j^{n+1}) B_{j-1/2\Delta s}^{n+1} - \frac{\Delta t}{\Delta s^2} C_{j+1/2\Delta s}^{n+1} \right] p_{j+\Delta s}^{n+1}
\end{aligned} \tag{17}$$

따라서 일반적인 해는 Eq. (17)과 같으며,

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

### 2.3 기후 변화 시나리오

유엔 산하기구인 기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC)은 2001년 보고서를 통해 지난 20세기 전 지구 평균기온은 약 0.6°C 상승하였으며 21세기에도 전 지구 평균기온이 1.4 ~ 5.8°C 상승할 수 있다고 보고하였다. 이에 본 연구에서는 기후변화 시나리오를 바탕으로 변화된 강수량과 기온을 적용하여 향후 100년의 기후변화가 토양수분에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

본 연구를 위해 확보된 GCM 자료는 Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis(CCCma)의 세 번째 GCM인 CGCM3.1이다. 본 연구에서 확보된 CGCM3.1은 IPCC 4차 평가 보고서에서 사용된 바 있다. CGCM3.1은 두 가지 해상도에서 실행되는데 본 연구에 적용된 T63은 지표면의 경우 경위도 2.81°×2.81°의 수평적 해상도와 수직적으로는 31개 층으로 구성되어 있으며, 해양의 경우 경위도 1.4°×0.94°의 수평적 해상도로 구성되어 있다.

CGCM3.1의 모의 결과는 128×64 Gaussian 격자(대략적으로 2.81°×2.81°)로 제공된다. 월별 자료는

2001-2100년 동안의 자료에 대하여 이용 가능하며, 일별 자료는 2046-2065년과 2081-2100년 동안의 자료만 제공된다. 단, 일 최대·최소기온과 강수량과 같은 일부 2차원 변수들의 경우 2001-2100년 동안의 일별 자료만 이용 가능하다. 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.

유도된 토양수분 모형에서 사용되는 매개변수들을 산정하기 위해 농업기상정보시스템(<http://weather.rda.go.kr>)과 기상청([www.kma.go.kr](http://www.kma.go.kr))에서 제공하고 있는 자료들을 이용하였다. 모형 매개변수 중 하나인  $E_{max}$ 의 산정을 위해 2004년과 2005년의 청주 지역 기온, 습도, 일조, 풍속 자료를 획득하여 Penman 법으로 산정하였다.

월별로 산정된 각 매개변수 값은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Parameter Estimation (I)

Month	$E_{max}$ (mm/day)	$R_m$ (mm/day)	$\theta$	$\lambda$
January	0.89	1.23	0.584	0.177
February	1.54	3.78	0.712	0.281
March	2.60	8.05	0.509	0.210
April	4.01	8.00	0.684	0.250
May	4.65	8.43	0.627	0.323
June	4.59	26.14	0.742	0.350
July	4.15	23.26	0.655	0.452
August	4.38	24.31	0.768	0.468
September	3.58	11.60	0.609	0.417
October	2.53	4.79	0.500	0.113
November	1.33	5.29	0.512	0.200
December	0.78	5.36	0.502	0.177

또한 유효토양심에 해당하는 매개변수  $nZ_R$ 과 포화 투수계수  $K_s$ , 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 2와 같이 두 가지 상황에 대하여 각각 산정하였다.

Table 2. Parameter Estimation (II)

	Jan. ~ May, Oct. ~ Dec.	Jun. ~ Sep.
$nZ_r$ (mm)	329.1	454.4
$K_s$ (mm/day)	239.0	141.4
$s^*$	0.669	0.386
$s_l$	0.879	0.526

### 3.2 관측자료와의 비교

유도된 토양수분 모형의 정확성을 살펴보기 위하여 위에서 산정된 매개변수 값들을 적용하여 모의된 값과 관측자료의 값을 비교해 보았다. 관측자료는 농업정보 시스템에서 2004년부터 2005년까지 관측한 일 강수량과 토양수분 자료를 이용하였다. 토양수분을 측정하는 기기는 석고블록토양수분계이며 토양에 매설되어 토양과 수분이 평형을 이루었을 때 전기저항을 측정하여 토양수분 값을 백분율(%)로 관측한다. 본 연구에서 사용되

는 값은 백분율에 100을 나눈 0과 1 사이의 값이다. 토양수분의 관측은 Fig. 3과 같이 현장에서 이루어진다.



Fig. 3. Observation Site in Okchun

Fig. 4는 2년 동안 내린 일강수량을 나타낸 것이며 Fig. 5는 관측된 토양수분의 값과 모의된 토양수분의 값을 비교해 놓은 것이다.

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.

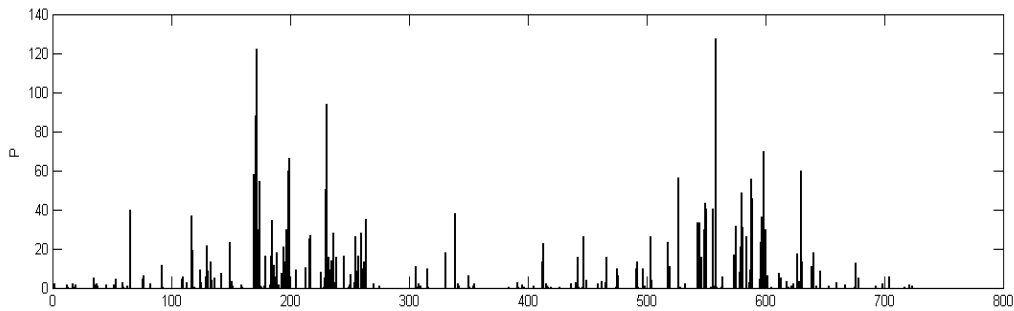


Fig. 4. Precipitation in 2004 and 2005

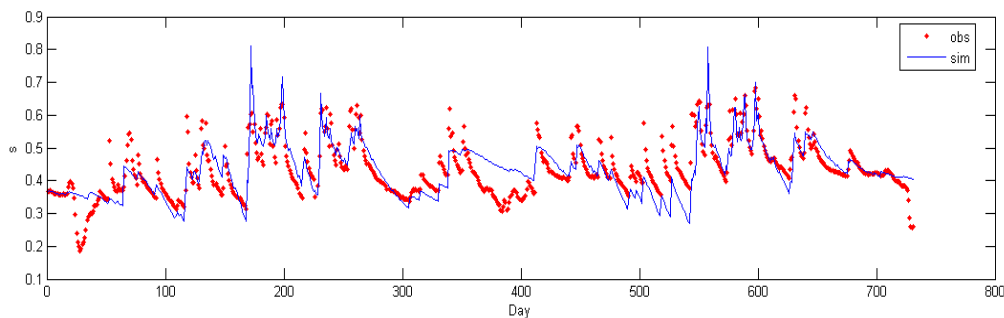


Fig. 5. Comparison between Simulated and Measured Soil Water in 2004 and 2005

### 3.3 수치해 모의 결과

우선 모형 모의에서 초기 효과를 알아보기 위하여 4년간의 모의 결과를 연별로 비교하였으며, 그 중 1년, 2년, 4년 후의 모의 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 주목할 만한 사실은 모의 2년 후와 4년 후의 모의결과가 거의 동일하다는 사실이다. 이로부터 토양수분의 모의에 있어 warming-up 단계로 1년만 시험 모의를 해주어도 모의 시 초기 토양수분의 분포에 대한 효과를 배제할

수 있음을 알 수 있다.

모의된 값과 관측된 값이 어느 정도 유사성을 가지는 지 알아보기로 각 월별로 비교를 수행하였고, 그 결과 중 하나인 10월의 경우가 Fig. 7에 나타나 있다. 전반적으로 살펴보았을 때, 관측 자료가 가지는 패턴을 모형이 잘 재현하고 있음을 파악하였다. 전체적인 비교를 위하여 월별 모의된 토양수분의 평균값과 관측된 토양수분의 평균값을 Fig. 8에 도시하였다.

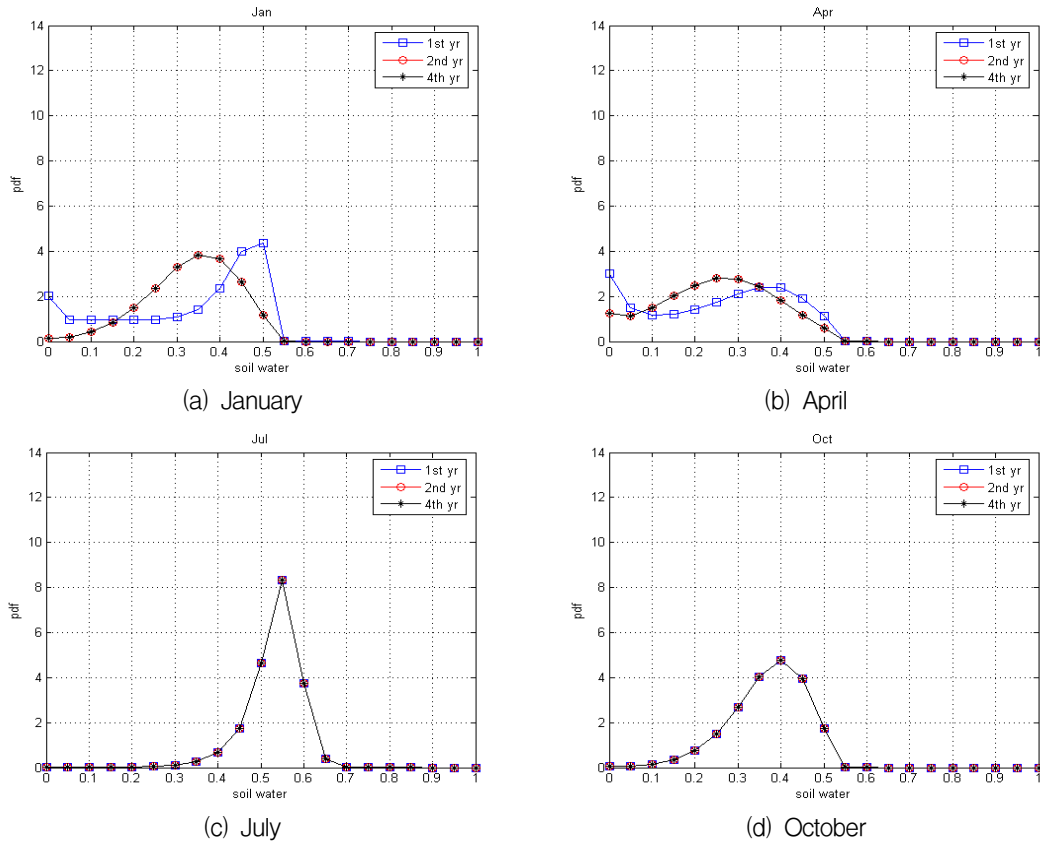


Fig. 6. Warming-up Simulation for 1, 2, and 4 Years

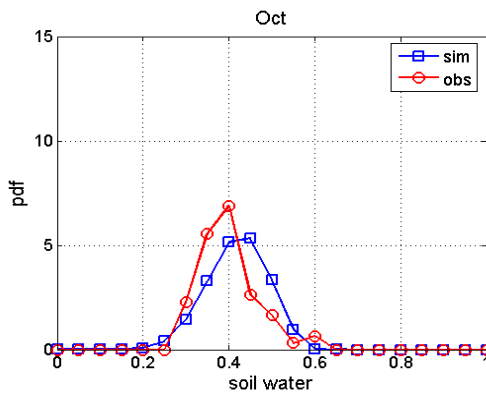


Fig. 7. Monthly Probability Density Function (PDF) of Soil Moisture for Simulation and Observation in October

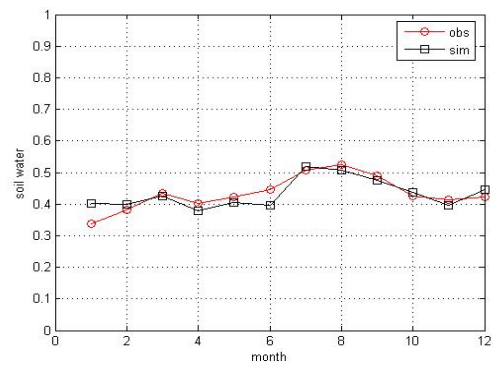


Fig. 8. Comparison of Monthly Average Soil Water

Fig. 9를 통하여 토양수분의 확률밀도함수가 각 월별로 어떻게 거동하는지 알아보고자 하였다. 토양수분의 확률분포는 크게 두 가지 형태로 거동함을 알 수 있는데, 10월에서 5월까지의 비성수기와 6월에서 9월까지의 성수기가 그것이다. 성수기 때의 토양수분 PDF는 상한계가 있는 3변수 대수정규 확률밀도함수의 형태를 띠며 비성수기 때는 정규확률밀도함수의 형태를 띤다고 볼 수 있다. 또한 토양수분의 확률밀도함수는 성수기인 경우 0.5와 0.6 사이에서 mode를 가지며 비성수기의 경우 0.4 정도로 떨어지게 된다. 주목할 것은 모든 경우에 있어 토양의 수분이 0.7 이상이 되는 시기가 거의 없다는 것인데, 즉 옥천군의 토양은 포화상태이기 보다는 항상 수분이 부족한 경향이 있는 것으로 모의가 된다는 사실이다. 참고로 작물의 이상적인 성장을 위해서는 토양수분이 0.75이하인 경우 인위적이니 수분공급이 필요하다고 추천되어있다(농업기상정보시스템, <http://weather.rda.go.kr/>).

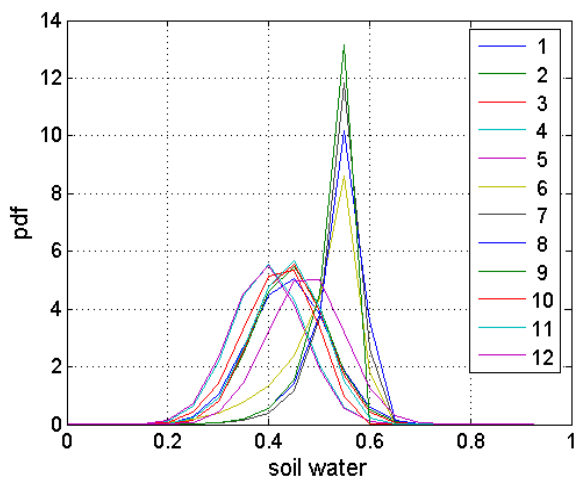


Fig. 9. Monthly Probability Distribution Function (PDF) of Soil Water in a Holistic View

### 3.4 기후변화에 따른 매개변수 산정

기후변화 시나리오에 따른 토양수분의 거동을 모의하기 위해서는 기후변화 시나리오에 의해 변화된  $E_{max}$ 와  $R_m$ ,  $\lambda$  값에 대한 재추정이 요구된다. 기후변화 시의 매개변수들을 산정하기 위해서 전술한 바와 같이 CGCM3.1을 사용하였으며 현재 자료와의 비교를 위하여 1971년부터 2000년까지의 30년 기간 동안의 청주 지역 기온, 습도, 풍속, 일조, 강수량 자료를 획득하여 사용하였다. 변화된  $E_{max}$ 의 경우 CGCM3.1의 모의결과에 의해 예측된 기온과 기존 30년 평균의 습도, 일조, 풍속 자료를 사용하여 Penman 법에 적용시켜 월별로 산정하였다.

기후변화 시의 강수 관련 매개변수인  $\lambda$ 와  $R_m$ 를 산정하기 위하여 청주 지역의 30년 평균 자료와 CGCM3.1의 모의결과에 의해 예측된 강수 자료를 이용, 비교하였다.

CGCM3.1 자료에서는 기후변화 시의 일별 강수량 자료를 제공하고 있으므로 일강수량 시계열이 혼합 지수 확률밀도함수를 따른 가정에 따라 기후변화 시나리오에 따른 강수 확률인  $\lambda'$ 를 다음과 같이 산정하였다.

$$\lambda' = \frac{2R'^2}{\sigma'^2 + R'^2} \quad (18)$$

여기서,  $\lambda'$ 과  $R'$ ,  $\sigma'$ 는 기후변화 시의  $\lambda$ ,  $R$ (일 강수량 시계열의 평균),  $\sigma$ (일 강수량 시계열의 표준편차)를 나타낸다.

또한 위 식으로 산정된 각 월별 강수 확률을 이용하여 강수가 있는 날의 평균 강수량을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$R_m' = \frac{1}{\lambda'} \cdot R' \quad (19)$$

여기서,  $R_m'$ 은 기후 변화 시  $R_m$ 이다.

Fig. 10은  $R_m$ ,  $E_{max}$ ,  $\lambda$ 를 각 시나리오 별로 구분하여 비교한 그림이다. 여기서 CCCMA CCS1은 CGCM3.1로 예측된 IPCC SRES A2 시나리오에 따른 50년 후의 시나리오, 즉 2051년부터 2060년까지의 경우를 나타내고, CCCMA CCS2는 100년 후인 2091년부터 2100년의 경우를 나타낸다. 강우 시 평균 강수량인  $R_m$ 을 살펴보면 현재에 비해 기후변화 시의 평균 강수량이 증가하고 있으며 50년 후보다 100년 후의 경우 여름철 평균 강수량이 크게 상승하여 8월의 경우 현재의 두 배까지 그 값이 상승하게 됨을 볼 수 있다.  $E_{max}$ 의 경우 역시 현재에 비해 그 값이 전반적으로 모두 상승하고 있음을 알 수 있다. 또한 100년 뒤  $E_{max}$  값이 늦봄에서 여름까지 가장 많이 상승하고 있다.  $\lambda$ 의 경우 전반적으로 기후가 변화하여도 그 값에는 큰 영향을 주지는 않으나 100년 뒤  $\lambda$  값이 봄철에 변동하는 경향이 있음을 알 수 있다.

### 3.5 CGCM3.1에 따른 토양수분 모의결과

Fig. 11은 CGCM3.1 시나리오에 따른 토양수분의 모의결과를 나타낸 것이다. 그림에서 'present'는 1971부터 2000년까지 과거 30년 기후자료에 따른 토양수분의 확률밀도함수를 나타내며, 'CCCMA CCS1'은 2051년에



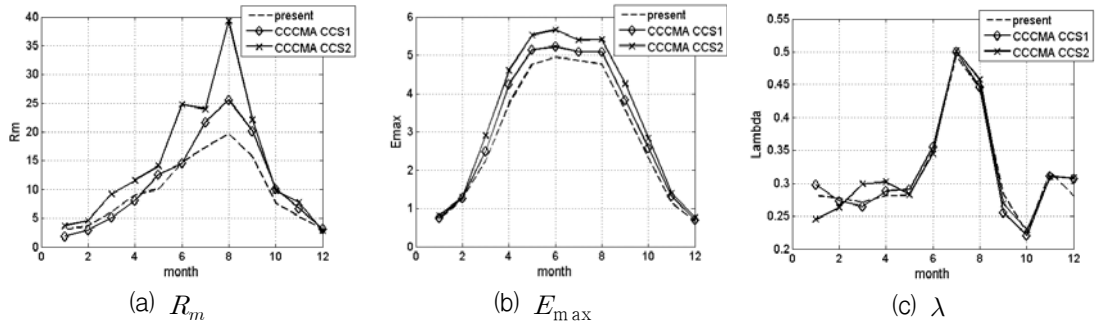


Fig. 10. Comparison of Parameters for Two Climate Change Scenarios

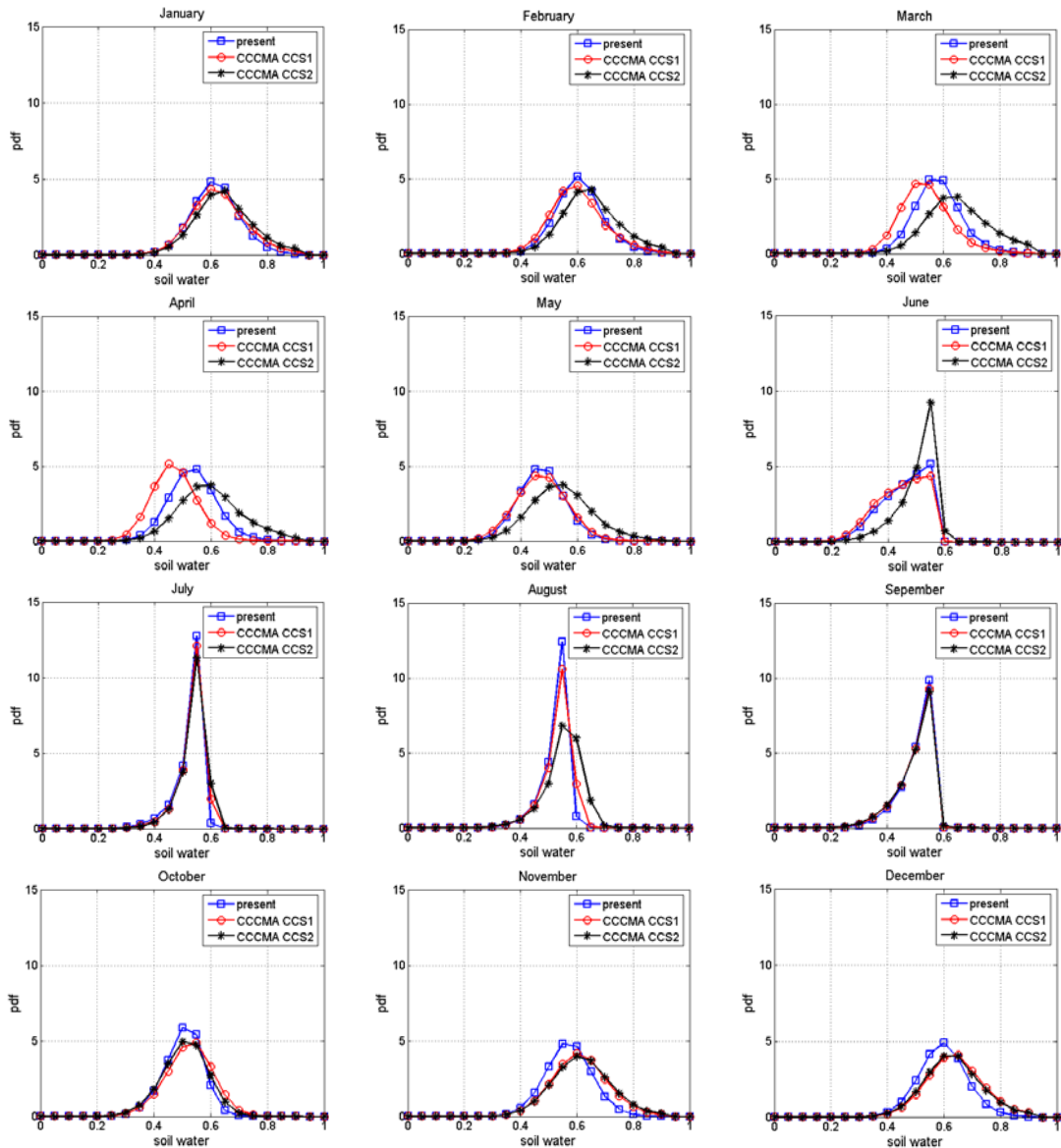


Fig. 11. Soil Water Simulation with CGCM3.1 Climate Change Scenario

서 2060년, 'CCCMA CCS2'는 2091년에서 2100년까지의 기후변화 시나리오에 따른 토양수분의 확률밀도함수를 나타낸다.

가장 큰 변화가 보이는 달은 3월과 4월로써, 50년 후와 100년 후가 상반되는 결과를 가져오고 있다. 즉, 50년 후에는 토양수분이 현재보다 작아질 것이나 100년

후에는 토양수분이 현재에 비해 더욱 많아지는 경향을 보이고 있다.

6월의 경우 현재의 토양수분 PDF와 기후변화 시의 토양수분 PDF를 비교할 경우 다소 다른 형태를 띠을 수 있는데 특히 100년 후의 경우 토양 수분이 여름철 7, 8, 9 월의 토양 수분 PDF와 흡사하게 거동하여 6월의 경우 강우의 역할이 토양수분의 거동을 설명하는데 있어서 현재보다 더욱 중요해질 것임을 예상할 수 있다.

겨울의 경우 토양수분은 기후가 변화된 후가 현재보다 더욱 많아지는 방향으로 모의가 되고 있어 겨울철 토양수분이 증가할 것이라는 결과를 보여준다.

CGCM3.1에 의한 토양수분 모의 결과 공통적으로 기후가 변화될 경우 토양 수분이 다소 증가하는 방향으로 모의가 되고 있으며, 또한 전반적으로 100년 후의 경우 토양수분 PDF가 좀 더 퍼진 형태로 분포되도록 모의가 되고 있어 기후변화 시의 토양수분의 변동 폭이 더욱 증가할 것으로 예상된다.

또한 현재의 토양수분 모의와 동일하게 CGCM3.1의 경우에도 기후가 변화하더라도 토양 수분은 크게 두 가지 패턴(성수기와 비성수기)으로 거동함을 알 수 있다.

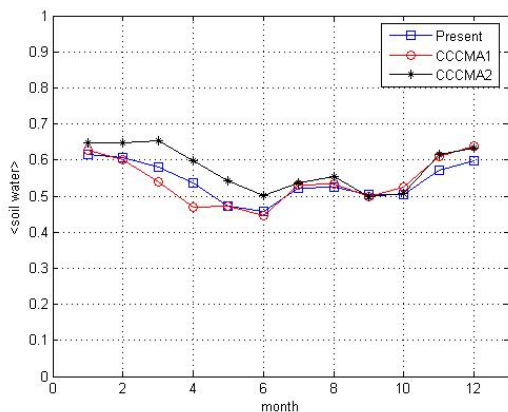


Fig. 12. Average Monthly Soil Water PDFs with CGCM3.1 Climate Change Scenario

토양 수분의 월 평균 거동을 현재와 미래에 대해 비교하고자 Fig. 12를 살펴보면, 토양수분이 50년 후와 100년 후에 다소 다른 결과를 보인다는 것을 명백히 알 수 있다. 10월에서 1월까지는 기후가 변화되면 토양 수분이 현재보다 평균적으로 상승함을 보이는 반면, 2월부터 5월로 대표되는 봄철의 경우 50년 후의 토양 수분은 현재보다 줄어들지만 100년 후의 토양 수분은 현재보다 상승함을 알 수 있다. 이는 봄철의 경우 토양수분에 미치는 요소들의 역할이 변화될 것임을 의미하는데 즉, 50년 뒤에는 기온변동이 주된 역할을 하여 증발산

량이 증가하여 토양수분이 줄어드는 결과를 가져오는 반면, 100년이 지나면 기온의 역할보다는 강우의 역할이 더욱 증폭되어 토양수분에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 토양 수분에 미치는 인자들의 역할을 눈여겨 볼 필요가 있을 것이다.

#### 4. 결론

토양수분의 보다 나은 이해를 위해, 본 연구에서는 이에 대한 동역학을 추계학적 기법을 이용하여 기후변화에 따른 영향평가에 대한 적용을 염두에 둔 추계학적 토양수분모형을 제시하고자 하였다. 이에 손실 항목을 세 가지 단계로 구분하여 강우와 손실에 따른 토양 수분의 확률적인 거동을 살펴보고자 하였으며 특히 강우의 추계학적인 성분을 고려한 토양수분 모형을 개발하여 기상학적 요소의 변동성을 보다 더 고려하고자 하였다. 토양수분 동역학의 유도과정에서 토양수분 확률밀도함수에 대한 연속 방정식을 유도하였으며, 모형화에 필요한 매개변수들은 농업기상정보 시스템 및 기상청에서 확보한 관측자료를 이용하거나 이를 이용한 최적화 기법으로 산정하여 사용하였다.

모의 결과 본 연구에서 유도한 토양수분 모형으로 관측 자료를 적절하게 재현할 수 있으며 토양수분이 계절별로 강우의 패턴에 따라 일정한 순환의 형태를 가짐을 재현하였다. 즉, 비가 많이 오는 여름철에는 모의된 토양수분이 이에 대해 적절히 반응하여 상한계를 갖는 3변수 대수 정규 확률 분포형을 보이고, 겨울과 봄이 되면서 토양수분이 다시 감소하는 방향으로 거동하여 정규확률분포의 패턴을 보였다. 토양수분의 확률적인 거동에 있어 다소 불분명한 결과도 나왔으나, 이러한 부족함에도 불구하고 토양수분의 확률적인 거동이 전반적으로 잘 모의가 된 것으로 판단되었다. 이를 통하여 시간에 따른 토양수분의 거동을 파악하여 그 확률 분포형을 파악함으로써 나아가 가뭄과 같은 보다 관리가 필요한 분야에의 적용 연구에 좋은 기반을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

기후변화에 따른 토양수분의 확률적인 거동을 살펴보고자 캐나다에서 구축된 Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis(CCCma)의 세 번째 GCM인 CGCM3.1을 본 연구에서 유도한 토양수분 모형에 50년 후(2051~2061)와 100년 후(2091~2100)의 두 가지 경우로 적용시켰다. 이를 바탕으로 모의된 기후변화 시의 토양수분은 다소 다른 양상을 보였다.

CGCM3 자료를 이용한 미래 토양수분의 상태를 예측해본 결과, 토양수분의 변동성이 현재보다 커질 것을 예측하고 있으며, 특히 50년 후 봄철에 토양수분의 상태

가 현재보다 줄어들 가능성이 있음을 나타내었으며, 100년 후에는 전 기간에 걸친 토양수분 증가가 예측되었다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 IHP 연구사업의 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참고 문헌

- 기상청, <http://www.kma.go.kr/>  
농업기상정보시스템, <http://weather.rda.go.kr/>  
한수희, 김상단 (2008). "토양수분과 식생의 물 압박에 대한 생태수문학적 해석 : 추계학적 모형의 유도와 적용을 중심으로." 수질보전 한국물환경학회지, 한국물환경학회, 제24권 1호, pp. 99-106  
Chang, J.S., and Cooper, G. (1970). "A practical difference scheme for Fokker-Planck equations." *Journal of Computational Physics*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-16.  
Eagleson, P. (1978). "Climate, soil and vegetation: 1. Introduction to water balance dynamics." *Water Resour. Res.*, Vol. 14, No. 5, pp. 705-712.  
Gardner, W.R. (1960). "Dynamic aspects of water availability of plants." *Soil Sc.*, Vol. 89, No. 2, pp. 63-73.  
IPCC, (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. J.T. Houghton et al. (eds.), Cambridge University Press. 881 pages.  
Jackson T.J., and Le Vine, D.E. (1996). "Mapping surface soil moisture using an aircraft-based passive microwave instrument: algorithm and example." *Journal of Hydrology*, Vol. 184, No. 1-2, pp. 85-99  
Kavvas, M.L. (2003). "Nonlinear hydrologic processes: Conservation equation for determining their means and probability distribution." *J. of Hydrol. Eng. ASCE*, Vol. 8, No. 2, pp. 44-53.  
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 J. Hydrol. Eng.*, Vol. 13, No. 11, pp. 1069-1077.  
Kubo, R. (1963). "Stochastic Liouville equation." *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 4, pp. 174-183.  
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*, Vol. 24, No. 7, pp. 707-723.  
Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles." *Jour. of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.  
Njoku, E., and Entekhabi, D. (1996). "Passive microwave remote sensing of soil moisture." *Journal of Hydrology*, Vol. 184, No. 1-2, pp. 101-129.  
Porporato, A., Daly, E., and Rodriguez-Iturbe, I. (2004). "Soil water balance and ecosystem response to climate change." *Am. Nat.*, Vol. 164, No. 5, pp. 625-633.  
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." *Adv. Water Resour.*, Vol. 24, No. 7, pp. 697-705.  
Rodriguez-Iturbe, I., and Porporato, A. (2004). *Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics*. Cambridge Univ. Press. 442 pages.  
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." *Proc. R. Soc. Ser. A*, Vol. 455, No. 1990, pp. 3789-3805.  
Van Kampen, N.G. (1981). *Stochastic processes in physics and chemistry*. Elsevier, North-Holland, Amsterdam.  
Yoo, C., and Kim, S. (2004). "EOF analysis of surface soil moisture field variability." *Advances in Water Resources*, Vol. 27, No. 8, pp. 831-842.  
Yoo, C., Kim, S., and Kim, T. W. (2006). "Assessment of drought vulnerability based on the soil moisture PDF." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 21, No. 2, pp. 131-141.

(논문번호:09-004/접수:2009.01.07/심사완료:2009.05.08)