

토양수분과 식생의 물 압박에 대한 생태수문학적 해석 : 추계학적 모형의 유도과 적용을 중심으로

한수희 · 김상단[†]

부경대학교 환경시스템공학부

Ecohydrologic Analysis on Soil Water and Plant Water Stress : Focus on Derivation and Application of Stochastic Model

Suhee Han · Sangdan Kim[†]

Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

(Received 19 November 2007, Accepted 2 January 2008)

Abstract

With globally increasing interests in climate-soil-vegetation system, a new stochastic model of soil water and plant water stress is derived for better understanding of the soil water and plant water stress dynamics and their role in water-controlled ecosystem. The steady-state assumption is used for simplifying the equations. The derived model is simple yet realistic that it can account for the essential features of the system. The model represents the general characteristics of rainfall, soil, and vegetation; i.e. the soil moisture constitutes the decrease form of the steady-state and the plant water stress becomes increasing with the steady state when the rainfall is decreased. With this model, further deep study for the effects of soil water and plant water stress on the system will be accomplished.

keywords : Ecohydrology, Plant water stress, Soil water dynamics, Stochastic model

1. 서론

기후-토양-식생 시스템의 동역학적 관계에 대한 관심은 최근 많은 연구자들에 의해 증폭되어 왔으며, 특히 토양수분과 그에 따라 식생이 받는 식생의 물 압박(plant water stress)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Eagleson, 1978; Rodriguez-Iturbe et al., 1999, 2001). 토양수분은 식생의 구조와 조직에 큰 영향을 주는 등 물이 지배하는 생태계에서 핵심적인 요소이며, 식생의 물 압박 역시 물이 제한되는 조건에서 식물의 수분 potential에 큰 영향을 미치는 등 주요 요소로 작용한다(Porporato et al., 2004; Rodriguez-Iturbe et al., 2001). 따라서 토양수분과 식생의 물 압박을 시공간적으로 이해하는 것은 생태 수문학에 있어 큰 부분을 차지한다고 하겠다.

토양수분과 식생의 물 압박에 대한 이해의 일환으로 결정론적 수문모형은 여러 연구자들에 의해 연구되어 왔으나, 결정론적 모형은 강우의 변동성을 충분히 반영하는데 어려움이 있다(Kim et al., 2005). 실제 강우 자료가 확률적으로 해석되고 또한 수문모형에 있어 여러 매개변수들과 외력이 무작위하게 반응하기 때문에 이러한 현상을 이해하는데 있어 추계학적 모형을 사용하는 것이 보다 나은 해결책일 것

이다(Kim and Jang, 2007).

본 연구에서는 Kim and Jang (2007)에 의해 수행된 토양수분 동역학에 관한 연구를 바탕으로 보다 진보된 추계학적 모형을 제시하고자 한다. 본 연구에서 중점을 두고 있는 사항은 기존 모형의 손실 항목을 두 가지 형태로 구분하여 토양수분 확률밀도함수를 유도하며, 또한 식생의 물 압박이라는 식생 관련 인자를 이에 도입하여 식생이 받는 물에 대한 압박상태의 확률적인 거동을 살펴보는 데 있다. 모형화의 관점에서 보면 토양수분 동역학과 그에 따른 식생 반응의 중요한 특징을 구현하기 위하여 비교적 간단한 구조의 모형이 적용될 수 있으며, 특히 이로부터 유도된 토양수분 지배방정식의 해석적인 해(analytical solution)로부터 상대적으로 중요한 매개변수들의 역할을 보다 명확하게 이해하는데 도움이 될 수 있을 것이다. 또한 이는 식생의 반응과 같은 보다 복잡한 현상에의 적용을 가능하게 하는 기본적인 토대가 될 수 있다.

본 연구에서 추구하는 토양수분 동역학은 일 단위로 해석되며, 토양은 추계학적으로 거동하는 일련의 강우사상에 의해 간헐적으로 수분을 공급받는 선형 저수지로 모형화된다. 따라서 일중 변화하는 기상 및 토양 상태의 변화특성은 고려대상에서 제외된다. 보다 간단한 모형의 구성을 위하여 토양은 공간적으로 동질성을 가진 것으로 가정하며, 일 단위에서는 강우발생 시 식생이 존재하는 토양깊이 내에서의 wetting front 현상 및 강우 종료 시 토양수분의 수

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

직적 재분포 현상은 무시된다고 가정하게 된다. 또한 토양 저수지로의 토양수분 공급은 오직 강우에 의한 수직방향 침투에 의해서 이루어지는 것으로 가정함으로써, 식생의 뿌리 깊이 정도의 상부토양층에서의 토양수분을 주요 고려 대상으로 하였다. 토양수분의 손실과 관련된 증발산량은 토양수분이 풍족할 경우 최대 증발산량까지 상승할 수 있으며, 토양수분이 부족할 경우에는 선형적으로 감소하는 것으로 가정함으로써 대기로의 토양수분의 손실이 토양 내 수분 자체의 양에 의존하는 현상을 고려하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 토양수분 동역학에 대한 추계학적 모형의 유도

토양수분에 있어 시공간적 특성이 중요한 역할을 하기 때문에 이러한 특성을 적절히 반영해 주는 것이 토양수분 동역학을 모형화하는데 핵심사항이 될 것이다. 본 연구에서는 토양수분의 유입과 유출을 선형 저수지 이론에 근간을 두고 있는 Entekhabi and Rodriguez-Iturbe(1994)에 의해 제안된 모형을 채택하고자 한다. 토양수분 동역학의 지배 방정식은 다음과 같다.

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

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, R 은 강우, s 는 토양수분, k 는 공간적 확산계수이다.

본 연구에서는 모형의 단순화를 위하여 토양은 공간적으로 균질하다고 가정하여 토양수분 동역학의 공간적 변동성을 무시함으로써 식 (1)은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

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

위 식을 보다 더 간단하게 나타내면, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{ds}{dt} = -W(s) + ZR \quad (3)$$

여기서 $W(s) = \frac{L(s)}{nZ_r}$ 이며, $Z = \frac{1}{nZ_r}$ 이다.

본 연구가 기존에 행해진 연구(Kim and Jang, 2007)와 가장 차별화되는 부분은 토양수분의 손실함수 $L(s)$ 를 토양수분의 상태에 따라 아래와 같이 크게 두 가지로 구분한다는 점이다. 즉,

$$L(s) = \frac{E_{\max}}{s^*} s, \quad \text{for } s \leq s^* \\ = E_{\max}, \quad \text{for } s^* \leq s \leq 1 \quad (4)$$

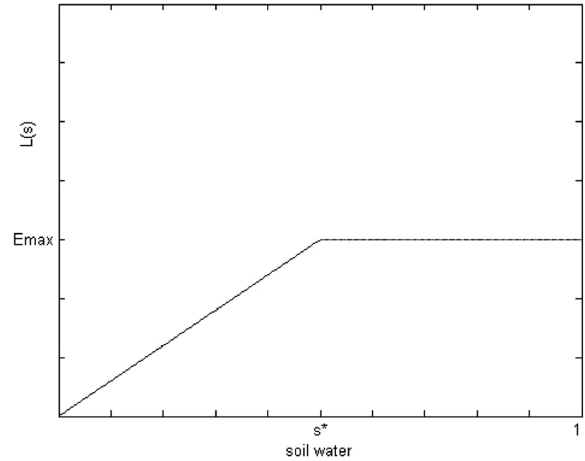


Fig. 1. Loss function divided into 2 phases.

여기서, s^* 는 토양 수분 상태의 임계값을 나타내며, E_{\max} 는 최대 증발산량을 나타낸다. 손실함수 $L(s)$ 를 도시하면 Fig. 1과 같다.

식 (3)의 확률평균(ensemble average) 형태는 cumulant 급수이론을 이용하여 직접 구할 수도 있으나(Kavvas, 2003), 상태변수에 대한 확률밀도에 관한 해를 얻기 위해서는 cumulant 급수이론을 사용하기 전에 먼저 식 (3)의 확률공간에서의 연속방정식인 추계학적 Liouville 방정식(Kubo, 1963)을 고려할 필요가 있게 된다. 이러한 확률공간에서의 확률평균은 기존 식(본 연구의 경우 식 (3))의 상태변수(본 연구의 경우 토양수분)의 확률밀도함수가 된다(Van Kampen, 1981). 유도에 관한 보다 상세한 사항은 Kim and Jang (2007)을 참조할 수 있으며, 본 연구의 경우 토양수분 확률밀도함수의 시간적 거동을 나타내는 Fokker-Planck 방정식은 아래와 같이 유도될 수 있다.

$$\frac{\partial p(s,t)}{\partial s} = -\frac{\partial}{\partial s} [\{-W(s) + Z\langle R \rangle\} p(s,t)] \\ + \frac{\partial}{\partial s} \left[\left\{ \frac{1}{2} Z^2 \theta \text{Var}[R] \right\} \frac{\partial p(s,t)}{\partial s} \right] \quad (5)$$

여기서, $p(s,t)$ 는 시간 t 에 따른 상태변수 s 의 확률밀도 함수이며, $\langle R \rangle$ 은 강우평균, $\text{Var}[R]$ 은 강우분산, θ 는 강우의 변동 scale로서 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = 2 \int_0^\infty \rho(\tau) d\tau \quad (6)$$

여기서 $\rho(\tau)$ 는 강우강도의 자기상관함수이다. 정상상태에서의 토양수분 확률밀도함수를 얻기 위하여 식 (5)의 시간 항을 영으로 놓으면 아래와 같다.

$$\frac{d}{ds} [\{-W(s) + Z\langle R \rangle\} p(s)] = \frac{d}{ds} \left[\left\{ \frac{1}{2} Z^2 \theta \text{Var}[R] \right\} \frac{dp(s)}{ds} \right] \quad (7)$$

위 식을 적분하여 정상상태 토양수분의 확률밀도함수를 구하면 다음과 같다.

$$p(s) = \frac{1}{C} \exp \left[\int_0^s \left(\frac{-2W(s) + 2Z\langle R \rangle}{Z^2 \theta \text{Var}[R]} \right) ds \right] \quad (8)$$

여기서 C는 아래 식을 만족시키는 정규화 상수이다.

$$\int_0^1 p(s) ds = 1 \quad (9)$$

식 (10)에 손실함수를 직접 고려하게 되면, 아래와 같은 정상상태 토양수분 확률밀도함수를 얻을 수 있게 된다.

$$p(s) = \frac{1}{C} \exp \left[\frac{2}{Z^2 \theta \text{Var}[R]} \left(-\frac{E_{\max} Z s^2}{2s^*} + Z\langle R \rangle s \right) \right], \quad (10)$$

for $0 \leq s \leq s^*$

$$= \frac{1}{C} \exp \left[\frac{E_{\max} Z s^* - 2s(E_{\max} Z - Z\langle R \rangle)}{Z^2 \theta \text{Var}[R]} \right],$$

for $s^* \leq s \leq 1$

2.2. 식생의 물 압박에 대한 정상상태 확률밀도함수의 유도

토양 내 수분의 양이 식생의 정상적인 생리학적 과정에 영향을 줄 정도로 작아지면 식생은 물에 대한 압박(water stress)을 받게 된다. 즉, 식생에 부과되는 물 압박은 추계학적 성분을 지닌 토양수분 동역학에 크게 지배를 받고 있으며, 토양수분의 어떤 임계값을 적용함에 의해 특성화 될 수 있다(Porporato and Rodriguez-Iturbe, 2001). 식생이 물 압박을 받는 경우는 토양수분이 특정 임계값 s^* 보다 작게 될 경우라고 가정하고, 토양수분에 대한 모형을 유도할 때 손실함수를 두 가지 단계로 나누었던 것처럼, 이에 대한 식생의 물 압박도 두 가지 단계로 나눌 수 있다(Hsiao, 1973).

$$\zeta = \frac{s^* - s}{s^*}, \quad \text{for } 0 \leq s \leq s^*, 0 < s < s^* \quad (11)$$

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

즉, 토양수분이 특정 임계값보다 클 경우 식생은 물에 대한 압박을 받지 않는 것으로 가정하고 있음을 알 수 있다.

식생의 물 압박과 토양수분에 대한 관계를 바탕으로 식생의 물 압박에 대한 확률밀도함수를 유도하기 위해 derived probability density function에 관한 이론이 적용된다 (Fig. 2 참조). 식생의 물 압박이 두 가지 상태로 나누어져 있으므로 식생 물 압박에 대한 누가확률밀도함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F(\zeta) = \int_{s^* - s^* \zeta}^{s^*} p(s) ds + \int_{s^*}^1 p(s) ds \quad (12)$$

여기서 토양수분에 대한 확률밀도함수를 식생의 물 압박

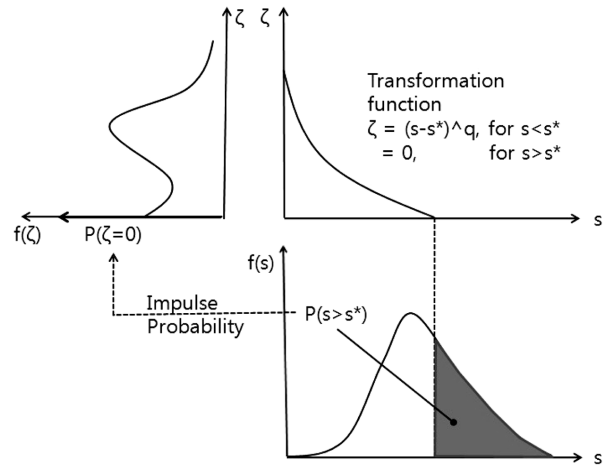


Fig. 2. Derived probability density function.

과 연관시켜 적분하여야하므로 그 구간이 변하는 것에 주의해야한다. 또한 derived probability density function의 유도 시 토양수분이 $s^* < s < 1$ 인 경우, 식생의 물 압박 ζ 는 토양수분의 값에 상관없이 0의 값을 갖는 것으로 가정하였으므로, 이때의 ζ 값에 대한 식생의 물 압박 확률밀도함수는 토양수분 확률밀도함수에서 $s^* < s < 1$ 일 때의 확률밀도와 동일하게 되어 아래와 같은 확률질량(probability mass)이 발생하게 된다.

$$P(\zeta = 0) = P(s^* < s < 1)$$

$$= -\frac{1}{C} \left[\frac{Z\theta \text{Var}[R] \left\{ \exp \left(\frac{2\langle R \rangle + 2E_{\max}s^*}{Z\theta \text{Var}[R]} \right) - \exp \left(\frac{2\langle R \rangle + s^* + 2E_{\max}}{Z\theta \text{Var}[R]} \right) \right\}}{2(E_{\max} - \langle R \rangle)} \right] \cdot \exp \left(-\frac{E_{\max}(2 + s^*)}{Z\theta \text{Var}[R]} \right) \quad (13)$$

식생이 물 압박을 받을 경우, 즉 $\zeta > 0$ 인 경우의 물 압박에 대한 정상상태 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(\zeta) = \frac{1}{C} \left(s^* \exp \left[-\frac{s^*(\zeta - 1)(E_{\max}\zeta + 2\langle R \rangle - E_{\max})}{Z\theta \text{Var}[R]} \right] \right) \quad (14)$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 유도한 토양수분과 식생 물 압박에 관한 모형의 적용으로 대구광역시의 자료를 이용하고자 하였다. 대구는 대한민국 동남쪽에 위치한 분지 형태의 도시로서 우리나라에서 가장 건조한 기후를 가진 곳으로 알려져 있다. 또한 1994년과 1995년에 역사상 가장 심한 가뭄 중 하나가 발생한 바 있으며, 이는 기상조건의 계절성을 배제할 수 있는 조건이 되어 제안된 모형의 적용에 있어 최적의 조건이라 할 수 있다. 본 연구에서는 토양수분과 그에 따른 식생의 물 압박의 확률적인 거동을 살펴보는 것으로 목적으로 하고 있으므로 식생의 성장기간, 즉 4월부터 10월까지의 일 강우 자료를 이용하여 토양수분을 모의하였으며,

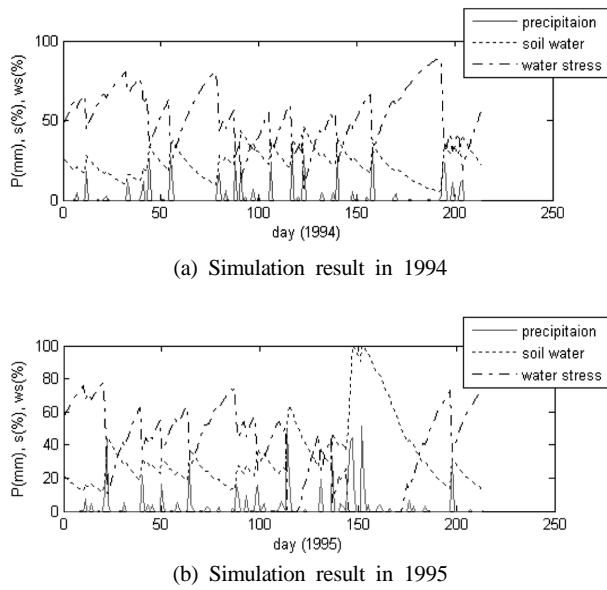


Fig. 3. Simulation of soil water and water stress using observed daily rainfall data in 1994 and 1995 in Daegu, ROK.

그와 동시에 식생의 물 압박 또한 모의하였다. 토양수분과 식생의 물 압박의 모의는 Fig. 3을 통하여 살펴 볼 수 있는데, 식생 물 압박의 정의에 따라 강우 발생이 적은 동안 식생은 물에 대한 압박을 강하게 느끼게 되며, 강우가 많이 내릴 시에는 반대로 식생의 물 압박이 감소함을 알 수 있다.

토양수분과 식생의 물 압박의 모의에 필요한 매개변수들 중 최대 증발산량은 대한민국 기상청(www.kma.go.kr)에서 대구지역의 1993년부터 1995년의 4월부터 10월까지의 증발량 자료로부터 그에 대한 평균값을 사용하였으며, 모형에서 사용되는 강우의 변동 scale θ 는 Poisson 구형파동 점강우모형(Rodriguez-Iturbe et al., 1984)을 사용하여 추정되었다. 매개변수들 중 주관적인 판단이 많이 요구되는 nZ_r 의 경우 Entekhabi and Rodriguez-Iturbe (1994)이 적용한 $n = 0.3$ 과 $Z_r = 500$ mm를 적용하였다. 이 값은 국내에 적용된 Yoo 등(2000)에서도 이미 사용된 바 있다. 이와 같이 선정된 매개변수들을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \langle R \rangle &= 2.5811 \text{ mm/day} \\ \text{Var}[R] &= 55.5759 (\text{mm/day})^2 \\ \theta &= 0.9254 \text{ hr} \\ E_{\text{max}} &= 4.6164 \text{ mm/day} \\ nZ_r &= 150 \text{ mm} \end{aligned}$$

또한 식생 물 압박의 임계값인 s^* 값은 0.5로 설정하여 모의를 진행시켰다. 여기서 s^* 값이 1이면 Kim and Jang (2007)에서 연구된 사항과 완전히 일치하게 된다.

토양수분과 식생 물 압박 시계열을 수치적으로 모의하기 위해 적용된 차분방정식은 아래와 같다.

$$nZ_r \frac{s_{t+1} - s_t}{\Delta t} = - \frac{L(s_{t+1}) + L(s_t)}{2} + R_{t+1} \quad (15)$$

여기서 s_t 는 시간 t 에서의 토양수분을 말하며, s_{t+1} 은 시간 $t+1$ 에서의 토양수분을 의미한다. 여기서 주의할 사항은 s^* 와 s_t, s_{t+1} 사이의 관계이다. 각 관계에 따라 식 (15)는 아래와 같은 네 가지 경우로 구성될 수 있다.

$$s_{t+1} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta t E_{\text{max}}}{2nZ_r s^*}\right) s_t + \frac{\Delta t}{nZ_r} R_{t+1}}{1 + \frac{\Delta t E_{\text{max}}}{2nZ_r s^*}}, \quad \text{for } s_t < s^*, s_{t+1} < s^* \quad (16)$$

$$s_{t+1} = - \frac{\Delta t E_{\text{max}}}{2nZ_r} + \left(1 - \frac{\Delta t E_{\text{max}}}{2nZ_r s^*}\right) s_t + \frac{\Delta t}{nZ_r} R_{t+1}, \quad \text{for } s_t < s^*, s_{t+1} > s^* \quad (17)$$

$$s_{t+1} = \frac{s_t - \frac{\Delta t E_{\text{max}}}{2nZ_r} + \frac{\Delta t}{nZ_r} R_{t+1}}{1 + \frac{\Delta t E_{\text{max}}}{2nZ_r s^*}}, \quad \text{for } s_t > s^*, s_{t+1} < s^* \quad (18)$$

$$s_{t+1} = s_t - \frac{\Delta t E_{\text{max}}}{nZ_r} + \frac{\Delta t}{nZ_r} R_{t+1}, \quad \text{for } s_t > s^*, s_{t+1} > s^* \quad (19)$$

이와 같은 방법으로 시간에 따른 토양수분을 모의한 후 이에 대한 확률밀도함수를 구하면 Fig. 4와 같으며 Fig. 5는 토양수분의 누가 확률밀도함수를 나타낸다. Fig. 4에서 검은색 히스토그램으로 나타나 있는 부분은 본 연구의 사례 적용 지역인 대구 지역에서 수치적으로 모의된 토양수분 자료를 기반으로 한 상대 빈도 히스토그램이다. 토양수분의 시계열 자료 모의에서 사용된 자료는 대구 지역에서 관측된 일 강우자료로서 1993년부터 1995년인 총 3년간

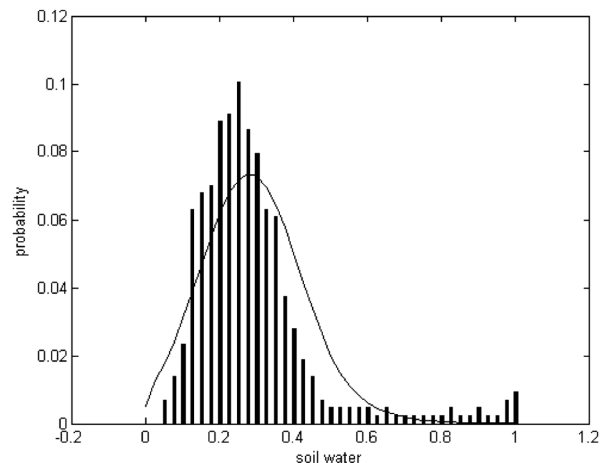


Fig. 4. Probability density function of soil water. The black bar represents the numerically generated data, and the line is for the analytically derived data.

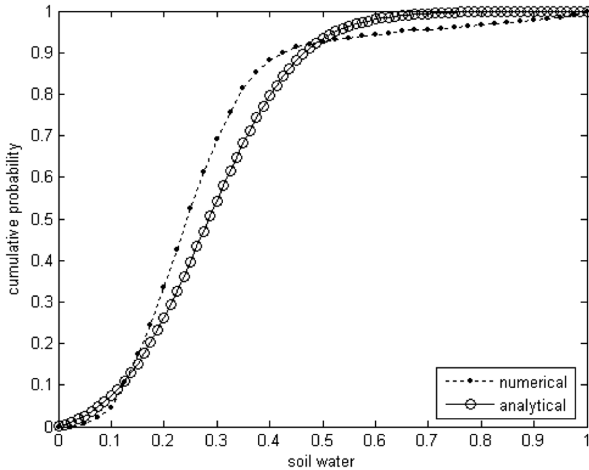


Fig. 5. Cumulative probability density function of soil water.

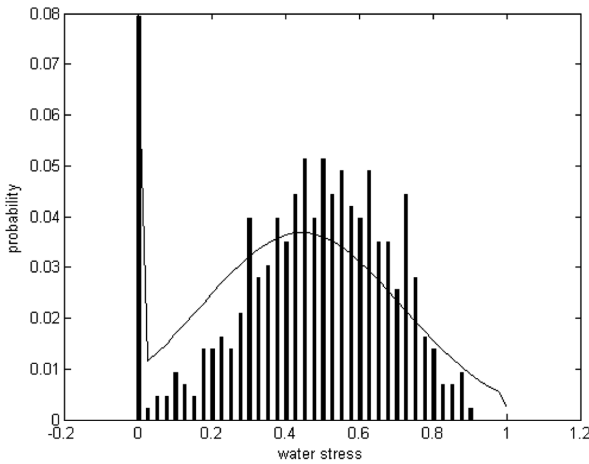


Fig. 6. Probability density function of water stress. The black bar represents the numerically generated data, and the line is for the analytically derived data.

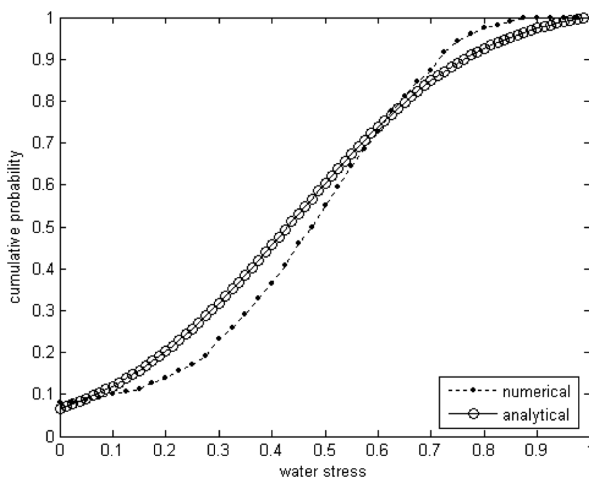


Fig. 7. Cumulative probability density function of water stress.

자료이며 1993년 자료는 모형의 warming-up을 위하여 사용되었으므로 실제로는 1994년과 1995년 자료만이 토양수분의 시계열 자료로서 분석되었다. Fig. 4와 5에서 보이는 바와 같이 해석적으로 유도된 토양수분 확률밀도함수가 수

치적으로 발생한 자료와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

유사한 방법으로 식생 물 압박에 대한 시계열도 구할 수 있다. 사용된 자료와 방법 역시 토양수분에서 사용된 것과 동일하다. Fig. 6과 7에 식생 물 압박에 대한 확률밀도함수와 누가 확률밀도함수를 각각 도시하였다. 그림을 통해서 알 수 있듯이 식생의 물 압박에 대한 해석 자료와 수치 자료의 확률밀도함수가 적절히 부합하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에서 특히 주목할 점은 앞서 모형 유도에서 설명한 것처럼 식생의 물 압박에 대한 확률밀도함수는 $\zeta=0$ 에서 확률질량을 갖게 되는데, 이러한 특성 또한 수치 해와 해석 해 사이에 좋은 일치를 보이고 있다.

본 연구에서는 또한 각 매개변수에 변화를 주었을 경우 그에 대한 확률밀도함수의 반응을 살펴볼 목적으로, 각 매개변수를 1/2로 하였을 경우와 2배로 증가시켰을 경우에 대한 확률밀도함수를 작성하여 비교를 수행하였다.

Fig. 8은 다른 매개변수들은 일정하게 유지한 채 강우자료에서 파생되는 매개변수인 강우의 평균과 분산 즉, $E[R]$ 과 $Var[R]$ 만을 변화시킨 후의 누가 확률밀도함수를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 강우의 평균값이 증가하면 토양수분은 보다 큰 값에서 정상상태를 형성하려고 하며, 주목할 것은 평균값이 반으로 줄어드는 것과는 그 정도가 훨씬 크게 토양수분의 값이 증가한다는 것이다. 또한 식생의 물 압박의 경우는 토양수분과 반대로 거동하고 있음을 알 수 있다. 즉, 강우의 평균 값이 두 배로 증가하였을 경우 식생에 부과되는 물 압박은 거의 없게 되며, 평균값이 반으로 줄었을 경우 상대적으로 식생은 매우 큰 물 압박을 겪게 됨을 알 수 있다. 이는 토양에 수분이 많은 경우 식물이 수분에 대해 스트레스를 그다지 받지 않기 때문으로, 이러한 현상이 모형에서 적절히 고려되고 있음을 의미한다. 강우의 평균값이 토양수분과 식생의 물 압박의 평균적인 거동을 제어한다면, 강우의 분산은 토양수분과 식생의 물 압박의 변동성에 영향을 미친다고 하겠다. 그림에서 보듯이, 강우의 분산이 증가하면, 토양수분의 변동성 또한 증가하며, 강우의 분산이 감소하면 토양수분의 변동성 또한 작아진다. 물 압박의 경우를 살펴보면, 강우의 분산이 작아짐에 따라 식생의 물 압박의 변동성이 작아지며, 강우의 분산이 커지면 식생의 물 압박에 대한 변동성도 역시 커짐을 알 수 있다. 강우 분산에 대한 식생 물 압박의 누가 확률밀도함수의 거동에서 주목할 점은, 강우의 분산이 작아짐에 따라 식생이 느끼는 물 압박 상태가 영이 될 ($\zeta=0$) 확률 역시 작아진다는 점이다. 즉, 식생이 물 압박을 받을 전체적인 확률은 더 커짐을 의미한다. 이와 반대로 강우의 분산이 커지면, 식생이 물 압박을 받지 않은 확률이 상대적으로 커짐을 알 수 있다. 이는 강우의 분산이 식생의 물 압박의 기간 등에 영향을 줄 수 있음을 시사하는 것으로 이러한 사항을 살펴보기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 기후 및 토양과 관련된 매개변수인 최대 증발산량과 식물뿌리층의 토양두께의 역수 즉, E_{max} 와 Z 의 변화에 따른 누가 확률밀도함수를 토양수분과 식생 물 압박의

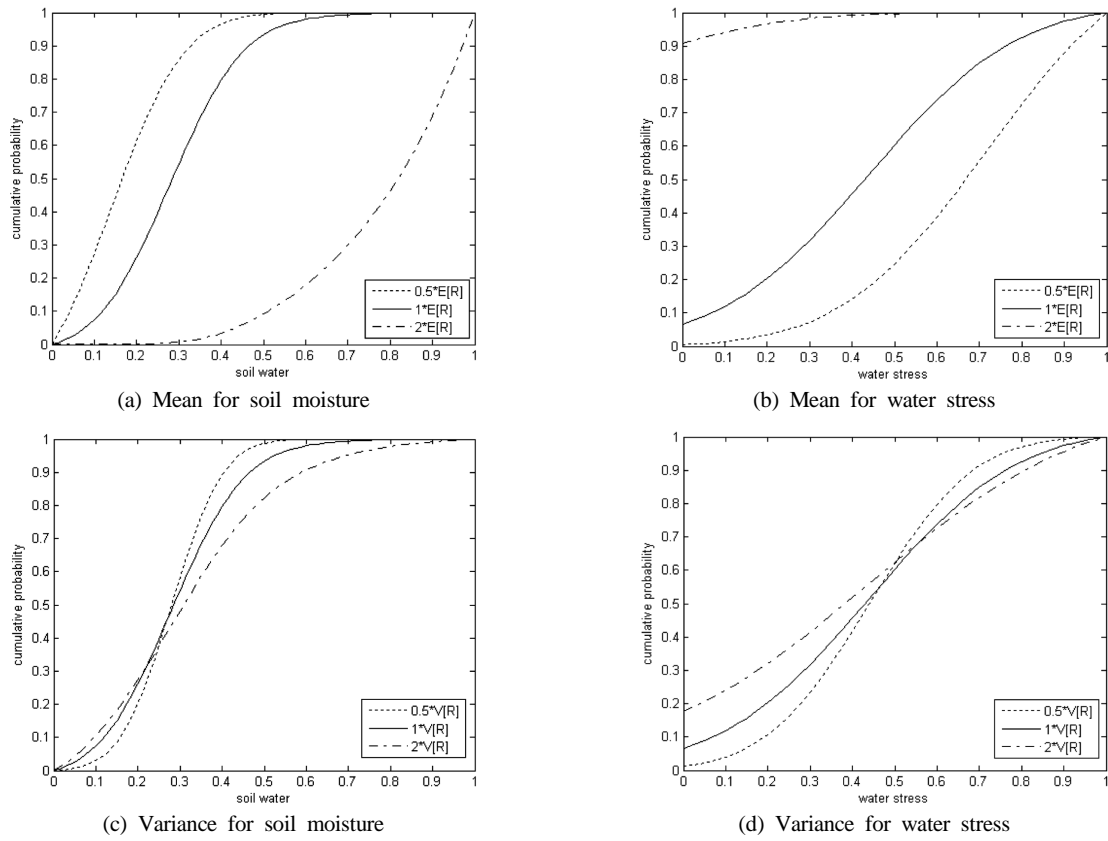


Fig. 8. Cumulative probability distribution function of soil water and water stress based on the changes in mean and variance of precipitation rate.

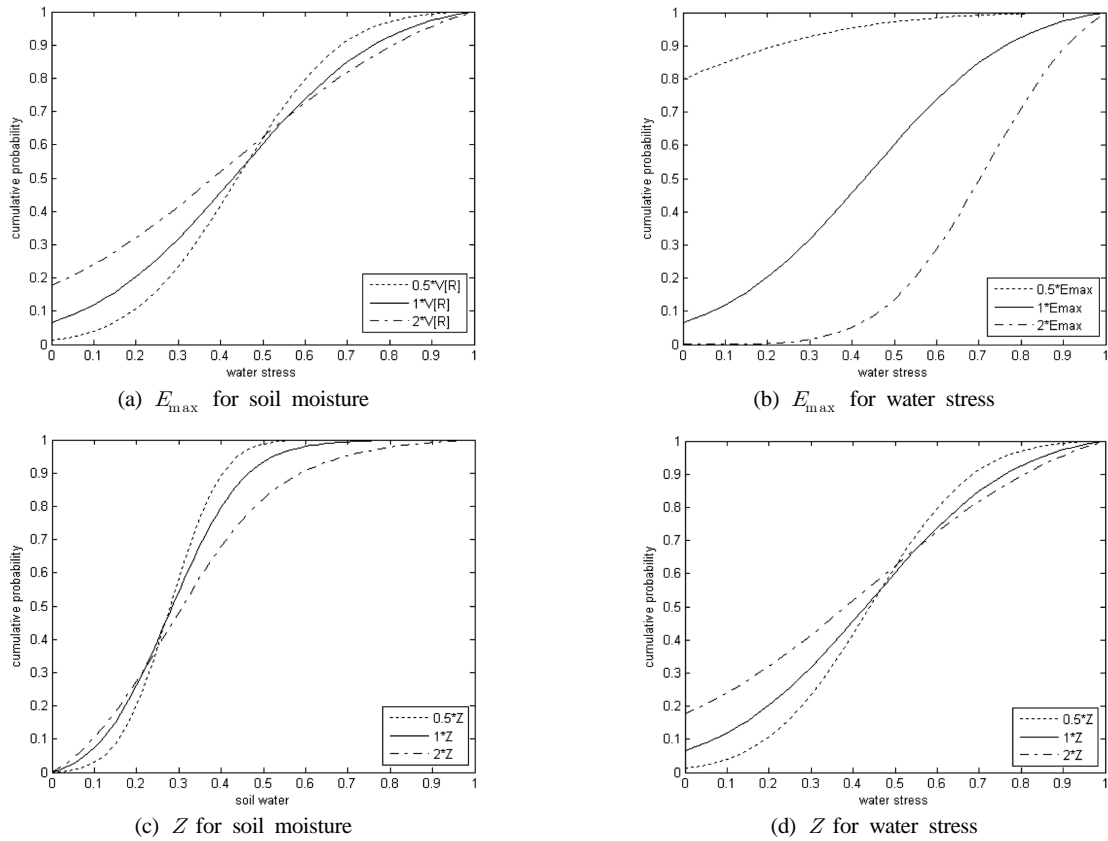


Fig. 9. Cumulative probability distribution function of soil water and water stress based on the changes in maximum evapotranspiration and depth.

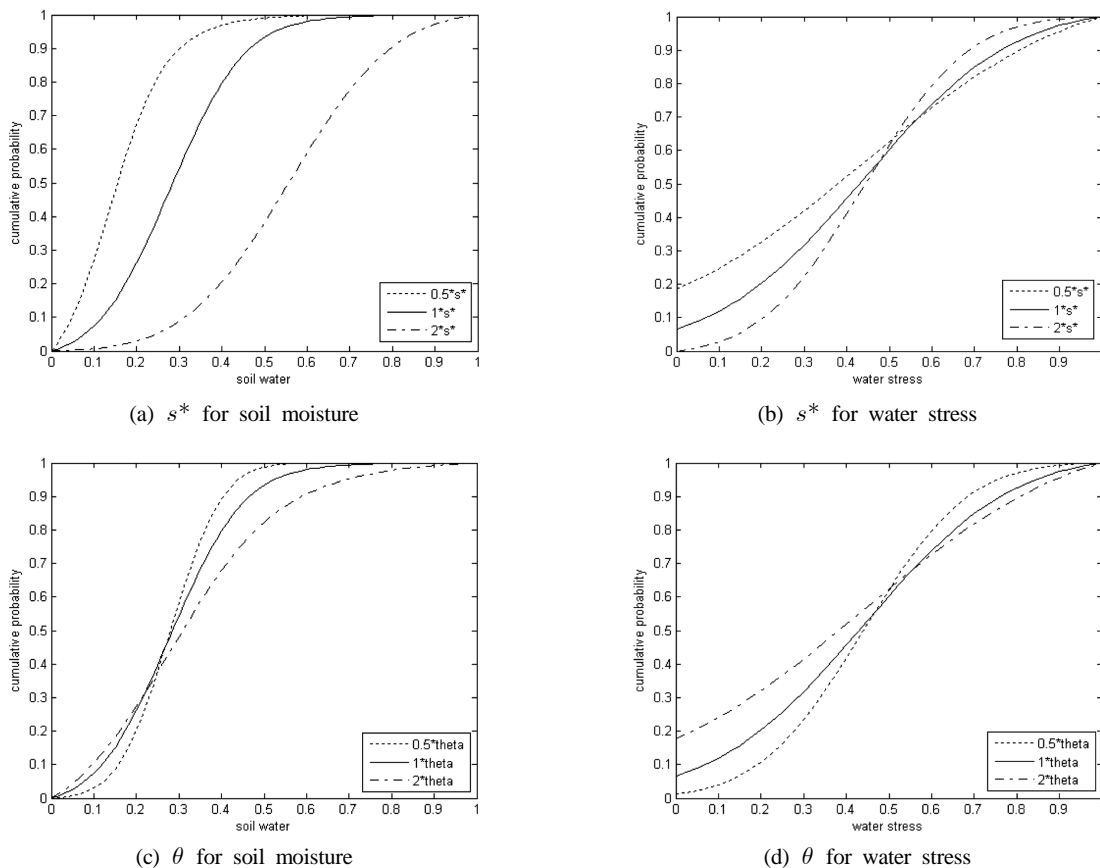


Fig. 10. Cumulative probability distribution function of soil water and water stress based on the changes in s^* and θ .

경우에 따라 나타난 것이다. 최대 증발산량이 증가함에 따라 토양수분의 이용성이 떨어지기 때문에, 토양수분의 양도 작아지는 방향에서 정상상태를 이루고 있음을 알 수 있으며, 최대 증발산량이 감소하면 토양수분의 이용성이 증가하여 토양수분 역시 큰 값에서 정상상태를 이루고 있음을 알 수 있다. 식생의 물 압박의 경우 토양수분과 반대로 거동하고 있음을 알 수 있다. 즉, 최대 증발산량이 두 배로 증가하였을 경우 식생에 부과되는 물 압박이 보다 심한 상태에서 정상 상태를 형성한다. 토양관련 매개변수인 Z 의 경우는 강우의 분산과 마찬가지로 토양수분과 식생의 물 압박의 변동성에 영향을 미친다. Z 의 값이 감소한다는 것은 토양두께가 증가한다는 것을 의미하며, 그림에서 보듯이 이 경우에 토양수분의 분산이 작아짐을 알 수 있다. 이는 토양두께가 깊어짐에 따라 강우에 따른 토양수분의 변동성이 줄어들음을 의미한다. 반대로 Z 의 값이 증가할 경우, 강우에 따른 토양수분의 변동성이 커짐을 알 수 있다. Z 가 식생의 물 압박에 미치는 영향을 도시한 누가 확률밀도함수는 토양수분에 대한 것과 동일한 거동을 보이고 있다.

Fig. 10은 강우의 변동 scale θ 와 식생 물 압박의 임계값인 s^* 의 변화에 따른 누가 확률밀도함수의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서 가장한 손실함수의 특성에 따라 s^* 의 값이 증가하면 손실 자체가 작아지기 때문에 토양수분이 큰 상태에서 정상상태를 형성하려는 거동을 보이게 된다. 반대로 s^* 의 값이 감소하면 손실은 증가하게 되고 따라서

토양수분은 작은 상태에서 정상상태를 이루게 된다. 또한 s^* 의 경우 다른 매개변수들의 거동과 다르게 토양수분과 식생의 물 압박의 거동에 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 토양수분의 경우 s^* 의 값이 증가함에 따라 큰 값에서 정상 상태를 이루고 있으나 식생의 물 압박의 경우는 값 자체에 대한 변화보다는 그 변동성이 커짐을 알 수 있다. s^* 에 대한 식생 물 압박의 누가 확률밀도함수의 거동에서 주목할 사항은 s^* 의 값이 증가할 경우 식생 물 압박의 분산이 작아지는 것이며 따라서 식생이 물 압박을 받지 않을 확률 또한 감소하게 되며, 반대로 s^* 의 값이 감소할 경우는 식생이 물 압박을 받지 않을 확률이 증가하고 있음을 알 수 있다. 강우의 변동 scale θ 는 Fig. 8의 강우의 분산과 거의 유사한 거동을 보이고 있는데 이는 강우의 변동 scale이 강우의 분산과 거의 같은 개념이기 때문이다.

4. 결론

토양수분과 그에 따른 식생의 물 압박에 대한 보다 나은 이해를 돕기 위해, 본 연구에서는 이에 대한 동역학을 추계학적 기법을 이용하여 정상상태에서의 확률밀도함수를 유도하였다. 유도된 모형은 간단하면서도 시스템의 중요한 거동을 비교적 잘 반영할 수 있으며, 토양수분과 식생의 물 압박이 미치는 영향에 대한 보다 심도 있는 연구가 추후에 이루어질 수 있도록 그 기반을 제공한다.

본 연구에서 제안된 모형은, 강우량이 작아짐에 따라 토양수분 역시 작아지는 상태에서 정상상태를 이루고 이와 반대로 식생의 물 압박은 더 커지는 방향으로 정상상태를 형성하게 되는 등 일반적인 강우와 토양, 식생의 특성을 잘 반영하고 있다. 또한 기후와 토양의 특성을 반영하는 증발산량과 토양의 유효 두께에 대한 분석에 대해서도 일반적으로 알려진 사실들을 잘 재현하고 있음을 파악하였다. 즉, 증발산량이 증가할 경우 토양수분의 손실이 증가되어 토양수분은 감소하고 식생의 물 압박은 증가하는 형태를 보이며, 토양의 유효 두께가 증가할 경우 토양수분과 식생 물 압박의 변동성은 감소한다. 본 연구에서 임의로 사용한 토양수분 상태인 s^* 는 본 연구에서 적용한 손실함수의 특성에 따라 그 값이 감소하면 토양수분 역시 감소하게 된다. 도출된 결과에서 한 가지 주목할 점은 강우의 분산이 현재보다 커지거나, 유효 토양두께가 작아질 경우 식생이 느끼는 물에 대한 압박을 느끼지 않을 확률이 보다 커진다는 것이다. 이는 강우의 분산이나 토양의 유효두께 등이 식생의 물 압박의 발생주기 및 발생지속기간 등에 영향을 줄 수 있음을 시사하는 것으로 이러한 사항을 살펴보기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 매개변수의 추정에 있어 그 현실성을 얼마나 고려하고 있는지에 대해 여전히 연구의 한계점을 가지고 있다. 본 연구는 사실 이러한 부분에 대한 문제를 추후로 넘긴 상태에서 모형화의 형태와 민감도 분석 결과로 식생에 끼치는 물 압박의 정도가 어떠한 식으로 정량화 되는지에 대해 보여주고자 한 것으로, 추후 토양수분 및 식생 관련된 관측 자료의 확보 등 국내 연구의 기반이 보다 잘 이루어질 경우 생태수문학적 접근에 관한 보다 자세한 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

사 사

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

참고문헌

- 기상청 (1993~1995). <http://www.kma.go.kr>.
- Eagleson, P. (1978). Climate, soil and vegetation: 1. Introduction to water balance dynamics. *Water Resour. Res.*, **14**, pp. 705-712.
- Entekhabi, D. and Rodriguez-Iturbe, I. (1994). Analytical framework for the characterization of the space-time variability of soil moisture. *Adv. Water Resour.*, **17**, pp. 35-45.
- Hsiao, T. C. (1973). Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, **24**, pp. 519-590.
- Kavvas, M. L. (2003). Nonlinear hydrologic processes: Conservation equation for determining their means and probability distribution. *J. of Hydrol. Eng. ASCE*, **8**, pp. 44-53.
- Kim, S. and Jang, S. H. (2007). Analytical derivation of steady state soil water probability distribution function under rainfall forcing using cumulant expansion theory. *KSCE J. Civil Engr.*, **11**, pp. 227-232.
- Kim, S., Kavvas, M. L. and Chen, Z. (2005). A root water uptake model under heterogeneous soil surface. *J. of Hydrol. Eng. ASCE*, **10**, pp. 160-167.
- Kubo, R. (1963). Stochastic Liouville equation. *J. Math. Phys.*, **4**, pp. 174-183.
- Porporato, A., Daly, E., and Rodriguez-Iturbe, I. (2004). Soil water balance and ecosystem response to climate change. *Am. Nat.*, **164**, pp. 625-633.
- Porporato, A. and Rodriguez-Iturbe, I. (2001). *Ecohydrology of water-controlled ecosystems*, Cambridge.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V. K., and Waymire, E. (1984). Scale consideration in the modeling of temporal rainfall. *Water Resour. Res.*, **20**, pp. 1611-1619.
- 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.*, **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. *Proc. R. Soc. Ser. A*, **455**, pp. 3789-3805.
- Van Kampen, N. G. (1981). *Stochastic processes in physics and chemistry*, Elsevier North-Holland, Amsterdam.
- Yoo, C., Kim, S. and Kim, T. W. (2006). Assessment of drought vulnerability based on the soil moisture PDF. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, **21**, pp. 131-141.