

개념적인 토양수분수지 모형을 이용한 Horton 지수의 재논의

Revisiting Horton Index Using a Conceptual Soil Water Balance Model

최대규* · 김상단**

Choi, Daegyul · Kim, Sangdan

Abstract

In this study, the variability of the Horton index which is ratio of vaporization and wetting water is investigated using a conceptual soil water balance model. From the proposed model, the steady-state soil water probabilistic density function is derived through meteorological and watershed characteristics and then the sensitivity of Horton index to the precipitation occurrence rate and the mean of wet day precipitation is examined. As a result, the inter-annual variability of the Horton index is lower than that of precipitation and they showed the strong negative correlation. It is also shown that although precipitation is not varied, the Horton index can be varied due to the fluctuation of the precipitation occurrence rate and the mean of wet day precipitation. In addition, it is presented that there is a non-linear relationship which has a critical point switching proportional or inverse relationship between the Horton index and two main characteristics of precipitation process.

Keywords : *ecohydrology, horton index, soil water*

요 지

본 연구에서는 개념적인 토양수분수지 모형을 구성하여 유역에서의 물의 기화량과 유역의 습윤량의 비인 Horton 지수의 변동성을 살펴보고 있다. 제안된 모형으로부터 다양한 수문기상학적 변수들 및 유역 특성변수를 반영한 토양수분 확률밀도함수가 유도되며, 강수현상을 구성하는 두 가지 주요 인자인 강수발생빈도와 우기일의 평균 강수량의 변화에 따른 Horton 지수의 민감도가 탐색된다. 수치모의결과를 통하여 Horton 지수는 강수량의 연간변동성보다 약 절반가량 낮았으며 둘 사이에는 강한 역 상관관계가 있음을 살펴볼 수 있다. 또한 강수량이 일정하더라도 강수발생빈도와 우기일 강수량 평균에 따라 서로 다른 Horton 지수를 가질 수 있음이 보여진다. 마지막으로 Horton 지수와 강수 프로세스를 구성하는 두 가지 주요 성분과는 어떤 한계점을 기준으로 비례/반비례 관계가 전환되는 비선형적인 관계를 가지고 있음을 살펴볼 수 있다.

핵심용어 : 생태수문학, Horton 지수, 토양수분

1. 서 론

기후변화는 다양한 경로를 통하여 지표면의 수문학적 반응에 영향을 미치게 된다. 수문 순환에 있어서 이러한 영향을 이해하고 예측하는 것이 사회적으로 매우 중요한 사안으로 부각되고 있으나(Jackson *et al.*, 2001), 지금까지 우리나라에 적용될 수 있는 기후-생태환경-수문성분 사이의 명확한 관계를 규명하려는 노력은 아직까지 충분히 이루어지고 있지 못한 실정이다. 여러 연구자들을 통하여 금세기 동안 기온 및 강수량의 변화가 예측되고 있으며 이는 필연적으로 유역의 전반적인 수문순환구조 및 극한수문현상에 영향을 미치게 될 것이다(Milly *et al.*, 2002; Dai *et al.*, 2004; Barnett *et al.*, 2005).

기후변화는 또한 생태환경의 변화를 수반하여 생태계의 구조와 기능에 변화를 추인하게 되며(Walter *et al.*, 2002), 이

는 다시 결과적으로 국지적인 수문기상특성에 영향을 미치게 된다(Breshears *et al.*, 2005). 인간 활동으로부터 기인된 토지이용변화에 대한 수문학적인 영향은 그동안 광범위하게 논의되어 왔으나(예를 들어, Hurkmans *et al.*, 2009), 기후변화에 따른 자연유역의 식생에 미치는 영향은 아직까지 명확하게 규명되고 있지 못하다(Allen and Breshears, 1998). 식생변화는 탄소, 물, 에너지의 교환을 통하여 이루어지는 기후-생태계-수문 피드백 시스템에서 매우 중요한 동인을 제공하게 된다(Adams *et al.*, 2009). 최근 들어서 세계적으로 수문기상변수들과 생태계 반응 사이의 연계작용(예를 들어, Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004) 또는 지역의 수문기상특성에 대한 생태계 구조의 영향(예를 들어, Rinehart *et al.*, 2008; Veatch *et al.*, 2009) 등을 살펴보려는 생태수문학 분야의 연구가 시작되고 있지만, 아직까지 식생이 물과 에너지 수지의 변화에 어떠한 방식으로 반응할 것인지에 대

*부경대학교 환경공학과 박사과정 (E-mail : aidhim@nate.com)

**정회원 · 교신저자 · 부경대학교 환경공학과 부교수 (E-mail : skim@pknu.ac.kr)

한 포괄적인 이해가 부족한 실정이다.

식생 생산량은 지면으로부터 섭취된 순 탄소량 또는 지상 순 일차 생산량(ANPP, aboveground net primary production)으로 계량화될 수 있는데, 이는 성장기 실제 증발산량과 강하게 연관되어 있는 것으로 알려져 있다(Webb *et al.*, 1986). 또한 실제 증발산량은 대부분의 생태계 물 수지에 있어서 가장 큰 구성성분중 하나이기 때문에(Zhang *et al.*, 2001), 유역 수문성분들의 연간 변동성은 생태계의 기능과 생산량에 크게 영향을 미치게 되고 이는 다시 유역 수문성분의 구성에 영향을 주게 된다(Donohue *et al.*, 2007). 그러므로 수문현상에 있어서의 변화를 정확하게 이해하고자 하거나 특정 지역의 고유한 수문 특성을 식별 또는 변화 정도의 감지·예측을 위한 모든 연구에 있어서 기후와 식생의 물 이용가능성의 연간 변동에 대한 식생 반응을 이해하는 것이 매우 중요한 사항으로 부각된다(Troch *et al.*, 2009).

1933년 Robert E. Horton은 지금까지도 많은 인용횟수를 보이고 있는 논문인 “The Role of Infiltration on the Hydrologic Cycle”(Horton, 1933)을 출판하였다. 대부분의 전문가들이 위 논문을 자연 유역 또는 경작지에서의 토양 침투능에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 연구라 생각하고 있지만, 위 논문은 전체 수문순환에서 침투를 통한 유역의 습윤량(wetting)의 역할에 대한 매우 심도 깊은 논의를 포함하고 있다. 침투된 물을 저장하고 다시 대기로 환원할 수 있는 유역의 능력은 주로 식생에 의해서 제어되며 물 수지의 연간 변동성에 매우 큰 영향을 미친다. Horton은 1905년부터 1929년까지 뉴욕 주 헨콕시에 있는 델라웨어강 서쪽 지류의 성장기 물 수지 성분을 분석하여 유역으로부터의 기화량(vaporization)과 습윤량(wetting)의 비(Horton 지수, H)를 계산하였는데, 강수량의 큰 변동성에도 불구하고 H 가 거의 일정함을 발견하였다. 이로부터 Horton은 자연 유역에서의 식생은 침투되어 이용 가능한 토양수분의 최대 가능량을 사용할 수 있을 정도로 존재하려고 한다는 가설을 세우게 된다.

이에 본 연구에서는 먼저 개념적인 토양수분수지 모형을 구성하여 Horton 지수의 연간 변동성을 살펴볼 것이다. 또한 개발된 토양수분수지 모형을 이용하여 토양수분에 관한 확률밀도함수를 유도한 후, 이를 통하여 다시 Horton 지수가 유도되는 과정을 기술할 것이다. 유도된 Horton 지수 모형을 이용하여 강수발생빈도와 우기일 강수량 평균과 같은 강수 프로세스의 주요 변수들의 변화될 때 Horton 지수가 어떻게 반응하는지를 분석할 것이다. 이를 통하여 식생이 짧은 주기의 기후 변동에 어떻게 반응하는지에 대한 이해를 높일 수 있을 것이며, 이로부터 추후 장기간에 걸친 기후변화에 따른 식생 반응을 이해하는데 도움이 되고자 한다.

2. 연구방법

2.1 개념적인 토양수분수지 모형

본 연구에서 적용한 토양수분수지 모형은 아래와 같은 동역학 지배방정식에 기초하고 있다.

$$nZ_r \frac{ds}{dt} = W(P, s) - V(s) - K(s) \quad (1)$$

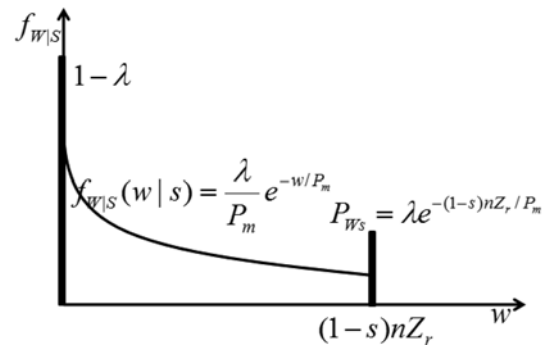


Fig. 1 Conditional wetting probability distribution function

여기서 n 은 토양의 공극비이며, Z_r 은 지표면 근처 식생뿌리가 존재하는 토양층의 두께이다. W 는 강수 P 로부터 토양에 공급되는 수분 양, 즉 습윤량이며, V 은 토양 및 식생 조건에 따른 토양수분의 대기 중으로의 손실 양, 즉 기화량(vaporization)이다. K 는 지표면 근처 토양층으로부터 보다 깊은 토양층으로의 토양수분의 손실되는 양이며, s 는 토양수분, t 는 시간으로 본 연구에서는 일 단위를 기준으로 하였다.

토양수분의 충전량은 강수 직전의 토양수분과 강수량에 따라 결정되는데, 강수가 발생한 날의 일 강수량이 지수분포를 따른다고 가정하고 선행 토양수분 s 가 주어질 경우 습윤량 W 의 조건부 확률분포함수 $f_{w|s}(w|s)$ 는 아래와 같이 세 가지 형태로 구분될 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{w|s}(w|s) &= 1 - \lambda, & \text{for } w = 0 \\ &= \frac{\lambda}{P_m} e^{-w/P_m}, & \text{for } 0 < w < (1-s)nZ_r \\ &= \lambda e^{-(1-s)nZ_r/P_m}, & \text{for } w > (1-s)nZ_r \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, w 는 습윤량, P_m 는 우기일 강수량 평균이며, λ 는 강수일의 확률이다. 습윤량 W 의 조건부 확률분포함수를 도출하면 Fig. 1과 같다.

기화량 V 는 토양수분의 상태에 따라 아래와 같이 개념화하였다.

$$\begin{aligned} V(s) &= \frac{ET_{\max}}{s^*} & \text{for } s < s^* \\ &= ET_{\max} & \text{for } s > s^* \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ET_{\max} 는 최대 기화량으로 흔히 언급되는 잠재 증발산량과 같은 개념으로 볼 수 있다. 깊은 토양층으로의 손실량 K 는 아래와 같이 모의된다.

$$K(s) = K_s \cdot s^\alpha \quad (4)$$

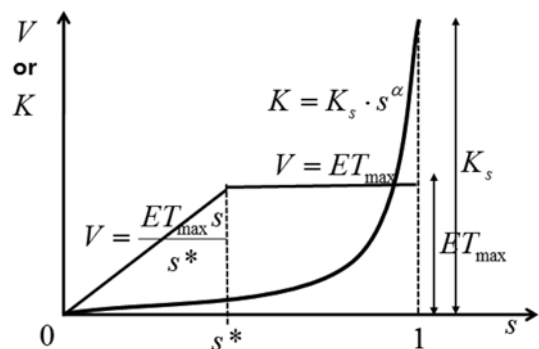


Fig. 2 Vaporization and percolated loss

여기서, K_s 는 포화투수계수를 의미하며, α 는 토양수분에 따른 손실지수이다. 기화량 V 와 깊은 토양층으로의 손실량 K 를 도시하면 Fig. 2와 같다.

2.2 Horton 지수

Beven(2006)을 참조하여 Horton 지수는 아래와 같이 정의된다.

$$H = \frac{E[V]}{E[W]} \quad (5)$$

여기서 V 는 증발, 차단, 증산을 통한 물의 기화량, W 는 유역 습윤량 즉, 기화 가능한 물의 양이 되며, $E[\cdot]$ 은 평균 연산자로서 두 변수 모두 성수기 기간에 대하여 연 단위 이상의 기간을 두고 계산된다. 태양에너지를 극단적으로 매우 적게 받는 지역에서는 기화될 수 에너지가 부족하기 때문에 대부분의 강수량이 하천 유출로 손실될 것이므로 $H \approx 0$ 이 될 것이며, 반대로 건조 또는 반 건조 기후지역에서는 하천 유출량은 강수량에 비하여 훨씬 작을 것이므로 $H \approx 1$ 이 될 것이다. 우리나라를 포함한 습윤 다우 지역의 경우 $H < 1$ 이 될 것이다.

일반적으로 반 건조 지역에서는 H 가 보다 더 일정한 값을 갖게 되는데, 이러한 경우 생태계는 강수량에 대해 최대 민감도를 갖게되어(Huxman *et al.*, 2004) 약간의 강수량 증가가 ANPP 및 증발산량의 증가에 직접적으로 기여하게 될 것이다(Scanlon *et al.*, 2005). 상대적으로 습윤한 지역에서는 H 의 변동성이 보다 클 것이며, 이러한 지역의 경우 강수량의 증가가 증발산량의 증가 또는 식생 생산량의 증가로 바로 이어지는 않을 것이다(Schimel *et al.*, 1997). Huxman *et al.*(2004)에 따르면 습윤 지역의 식생 또한 가뭄기간동안에 물에 대한 스트레스를 받게 되며, 극심한 가뭄의 경우 반 건조 지역에 있는 식생과 비슷한 물이용 효율을 보임을 제시하였다.

식 (2)와 (3)에 따라서 Horton 지수에서 $E[V]$ 와 $E[W]$ 는 각각 아래와 쓸 수 있다.

$$E[V] = \int_0^1 V(s) \cdot p(s) ds \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E[W] &= \int_0^1 \left\{ \int_0^\infty w f_{W|s}(w|s) dw \right\} p(s) ds \\ &= \int_0^1 \left\{ \int_0^{(1-s)nZ_r} w \frac{\lambda}{P_m} e^{-w/P_m} dw + (1-s)nZ_r \lambda e^{-(1-s)nZ_r/P_m} \right\} p(s) ds \\ &= \int_0^1 \lambda P_m (1 - e^{-(1-s)nZ_r/P_m}) p(s) ds \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $p(s)$ 는 지배방정식 (1)을 따르는 토양수분의 확률밀도 함수(Probability Density Function, PDF)이다. 따라서 Horton 지수는 아래와 같이 정리된다.

$$H = \frac{B \left\{ \int_0^{s^*} \frac{s \cdot p(s)}{s^*} + \int_{s^*}^1 s \cdot p(s) ds \right\}}{\int_0^1 (1 - e^{-(1-s)nZ_r/P_m}) p(s) ds} \quad (7)$$

여기서 $B = ET_{\max}/\lambda/P_m$ 은 Budyko 건조지수(dryness index)로서 강수량에 대한 최대 가능 기화율의 비로 정의된다(Budyko, 1974).

식 (7)에서 알 수 있듯이 지배방정식 (1)을 따르는 토양수분의 PDF를 구할 수 있다면 Horton 지수의 정량화가 가능하다.

2.3 토양수분 확률밀도함수

식 (1)로부터 Kim *et al.*(2008)의 연구에 기초하여 토양수분 PDF $p(s,t)$ 의 시간적 거동을 나타내는 Fokker-Planck 방정식은 Cumulant 급수이론을 이용하여 아래와 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(s,t)}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{1}{nZ_r} (E[W|s] - V(s) - K_s s^\alpha) p(s,t) \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{Var[W|s] \cdot \theta \partial p(s,t)}{2(nZ_r)^2} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $p(s,t)$ 는 시간 t 에 따른 상태변수 s 의 PDF이며, θ 는 일 강수량 시계열의 변동 스케일이다. $E[W|s]$ 와 $Var[W|s]$ 는 각각 토양수분 s 가 주어질 경우에 대한 습윤량의 평균과 분산으로 아래와 같다.

$$E[W|s] = \lambda P_m (1 - e^{-(1-s)nZ_r/P_m}) \quad (9)$$

$$Var[W|s] = \lambda P_m \left\{ \begin{aligned} &2P_m (1 - e^{-(1-s)nZ_r/P_m}) - \lambda P_m (1 - e^{-(1-s)nZ_r/P_m})^2 \\ &- 2nZ_r e^{-(1-s)nZ_r/P_m} (1-s) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

따라서, 정상상태 토양수분의 확률밀도함수는 아래와 같이 유도될 수 있다.

$$p(s) = \frac{1}{C} \exp \left[\int_0^s \frac{2nZ_r (E[W|\xi] - V(\xi) - K_s \xi^\alpha)}{Var[W|\xi] \cdot \theta} d\xi \right] \quad (11)$$

여기서 C 는 적분상수 또는 정규화 상수로서 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$C = \int_0^1 \exp \left[\int_0^s \frac{2nZ_r (E[W|\xi] - V(\xi) - K_s \xi^\alpha)}{Var[W|\xi] \cdot \theta} d\xi \right] ds \quad (12)$$

식 (11)에서 알 수 있듯이 정상상태 토양수분의 PDF는 강우발생빈도, 강수일의 평균 강수량, 일 강수량 시계열의 변동 스케일, 최대 가능 기화율 등과 같은 수문기상변수들과 유효토양깊이, 포화투수계수 및 손실지수 등과 같은 유역의 토양 및 식생관련변수들의 함수로 표현되며, 식 (9)-(12)로부터 토양수분 PDF를 수치적으로 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Horton 지수의 연간 변동성

개념적인 토양수분수지 모형을 이용하여 Horton 지수를 구하기 위한 유역의 토양 및 식생과 관련된 매개변수들은 총 5개로 이를 정리하면 다음과 같다: n, Z_r, K_s, α, s^* . 관련 문헌들을 참고하여 $n=0.4$, $Z_r=350$ mm, $K_s=200$ mm/day, $\alpha=8.6$, $s^*=0.53$ 으로 결정하였으며, 이는 양토 및 초지를 대표하는 값으로 알려져 있다(Jackson *et al.*, 2000; Poporato *et al.*, 2001; Schenk and Jackson, 2002).

모형 실행에 필요한 유역의 수문기상정보들은 모두 확실한 성수기에 해당하는 서울지점 7월 및 8월 기간 동안의 자료

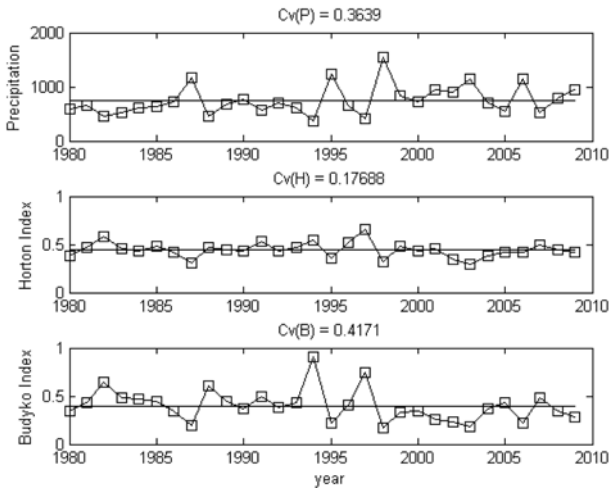


Fig. 3 Inter-annual variation of precipitation, Horton index, and Budyko aridity index

로부터 산출하였는데, 이 중 ET_{max} 는 Penman 방법을 이용하여 1980-2009년 사이의 일 기상관측자료로부터 계산하였으며, 같은 기간의 일 강수량 시계열을 적용하였다.

식 (1)을 이용하여 일 별로 계산된 습윤량 W 와 기화량 V 를 연별로 평균하여 연별 Horton 지수를 구한 결과를 Fig. 3에 연별 강수량 및 Budyko 건조지수와 함께 도시하였다. 참고로 Fig. 3에서 수평선은 자료기간동안의 평균값이다. 주목할 만한 결과는 강수량의 변동계수가 36% 정도인 반면에 Horton 지수의 변동계수는 18% 정도로 변동 폭이 강수량의 절반 정도이라는 사실이다. 평균값 대비 최소값과 최대값의 비를 살펴볼 경우 강수량은 30년간 0.50-2.07의 범위를 갖는 반면에 Horton 지수는 0.67-1.48의 범위를 보여주고 있다. 이러한 결과는 어떤 지역의 수문기상특성을 대표하는 변수로서 Horton 지수가 유용하게 활용될 수 있을 것이라는 추론을 가능하게 한다. 유사한 지수로서 기상학 분야에서 많이 적용되는 Budyko 건조지수의 경우에는 30년간 연간 변동성이 42% 정도로 강수량보다도 연간 변동성이 크을 알 수 있으며, 따라서 Budyko 건조지수를 문순 기후 특성을 지닌 우리나라의 수문기상 특성을 대변하는 지수로 활용하기에는 많은 무리가 따를 수 있다.

Fig. 3에서 살펴볼 수 있는 또 다른 사항은 강수량과 Horton 지수 사이의 반비례 관계일 것이다. 연별 강수량과 산출된 연별 Horton 지수의 관계는 Fig. 4로부터 보다 구체적으로 살펴볼 수 있다. 연별 강수량과 Horton 지수의 교차상관계수는 -0.74 정도로 비교적 강한 역 상관을 맺고 있는 것을 알 수 있으며, 회귀분석을 통하여 강수량과 Horton 지수의 관계를 도출한 결과 아래와 같은 경험적인 관계식을 얻을 수 있었다.

$$H_g = \exp[-0.0010396P_g] \quad (13)$$

여기서 P_g 는 확실한 성수기(7월과 8월) 기간 동안의 강수량 (mm)이며, H_g 는 같은 기간 동안에 산출된 Horton 지수이다. 강수량이 증가할 경우 Horton 지수는 작아지며, 강수량이 극단적으로 감소할 경우 Horton 지수는 1로 수렴되는 식의 형태를 가지고 있다.

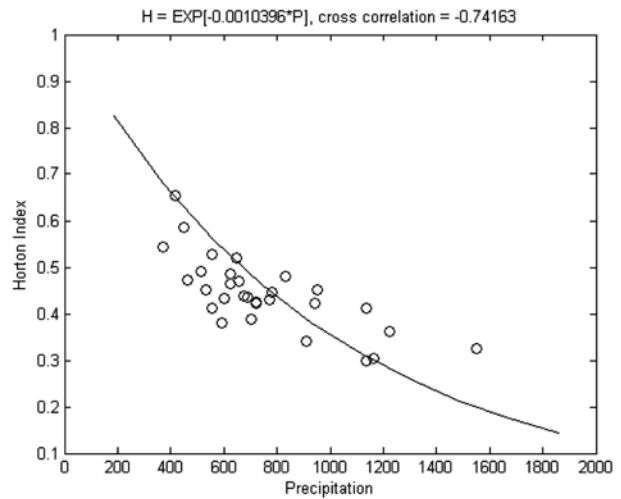


Fig. 4 Relationship between precipitation and Horton index

3.2 토양수분 PDF의 검증

상기 분석과 같이 성수기 유역의 Horton 지수는 강수량의 변화에 매우 민감하게 반응하고 있는 것을 알 수 있는데, 강수의 간헐성 때문에 크게 두 가지 특성으로 그 민감 정도를 파악하는 것이 바람직 할 것으로 판단하였다. 즉, 강수 현상을 구성하는 두 가지 주요 프로세스를 강수발생빈도와 강수가 발생하였을 때의 강수량으로 분할하여 Horton 지수의 민감 정도를 파악해 보고자 하였다.

이를 위해 유역의 수문기상 특성을 대변하는 매개변수 ET_{max} , λ , P_m , θ 를 3.1절에 적용한 자료로부터 산출하였는데, 이 중 ET_{max} 는 Penman 방법을 이용하여 4.2361 mm/day를 적용하였으며, 일 강수량 시계열로부터 $\lambda=0.4946$, $P_m=24.4540$ mm/day, $\theta=1.3026$ day를 각각 적용하였다.

이로부터 2.3절에 제안된 토양수분 PDF를 계산할 수 있었으며, 3.1절에서 모의된 토양수분 시계열들로부터 산출된 히스토그램과 비교함으로써 제안된 기법의 타당성을 검증해 보고자 하였다. Fig. 5에 모의된 토양수분을 도시하였으며, 이로부터 산출한 히스토그램과 제안된 토양수분 PDF를 Fig. 6에 비교하였다. 참고로 수치적으로 모의된 토양수분의 경우 평균은 0.5373, 표준편차는 0.1691이며, 제안된 PDF로부터 도출된 토양수분의 경우 평균은 0.5462, 표준편차는 0.1686

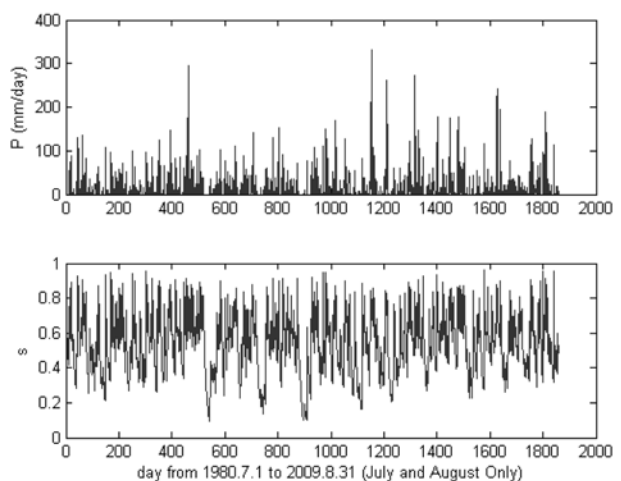


Fig. 5 Soil water simulation

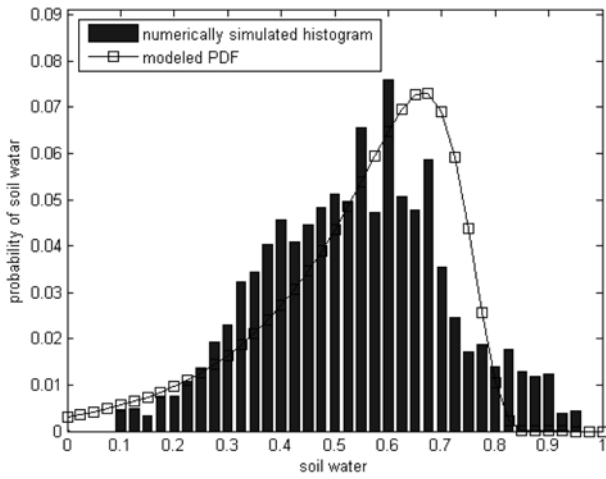


Fig. 6 Comparison of numerically simulated histogram and modeled PDF

로 제안된 PDF가 수치적으로 모의된 토양수분의 통계학적인 특성을 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

3.3 수문기상변수의 변화에 따른 Horton 지수의 반응

본 절에서는 3.2절에서 검증된 지배방정식 (1)을 따르는 토양수분 PDF를 이용하여 Horton 지수를 정량화하고, 이를 이용하여 강수 현상을 구성하는 두 가지 주요 프로세스, 즉 강수발생빈도와 강수가 발생하였을 때의 강수량에 따른 Horton 지수의 민감 정도를 살펴보았다. 즉, 성수기 기간 동안의 총 강수량의 장기간 평균이 $\lambda \cdot P_m$ 이라 할 때, 강수량이 동일하다면 강수발생빈도 λ 가 크다면 우기일의 P_m 은 작을 것이며 반대로 λ 가 작다면 그에 비례하여 P_m 은 큰 값을 가질 것이다. 적용된 일 강수량 시계열에서 λ 와 P_m 의 연간 변동성을 Fig. 7에 도시하였으며, 참고로 λ 와 P_m 의 교차상관계수는 0.2 정도로 강수발생빈도와 우기일의 강수량 평균값은 서로 높은 상관관계를 맺고 있다고 할 수는 없는 것으로 조사되었다. 평균값 대비 최소값과 최대값의 비를 살펴볼 경우 강수발생빈도는 30년간 0.68-1.27의 범위를 갖는 반면에 우기일 강수량 평균의 경우에는 0.62-1.67의 범위를 나타내어 강수발생빈도보다는 우기일 강수량 평균이 보다 큰

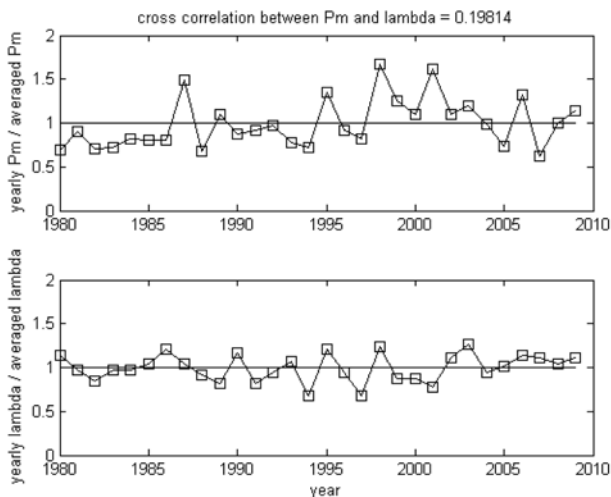


Fig. 7 Inter-annual variation of wet day precipitation and precipitation occurrence rate

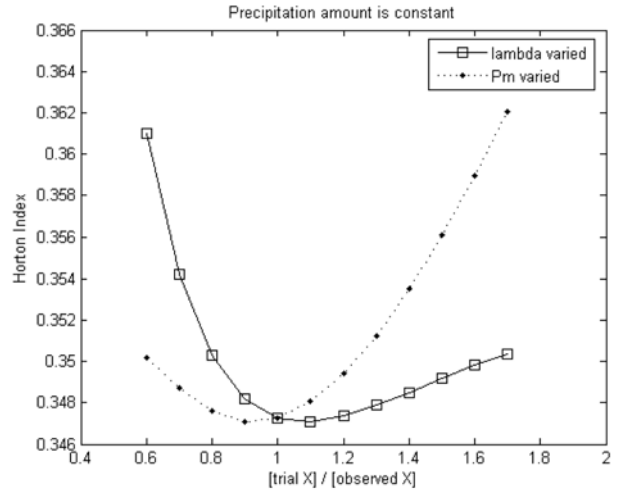


Fig. 8 Sensitivity of Horton index to precipitation parameters

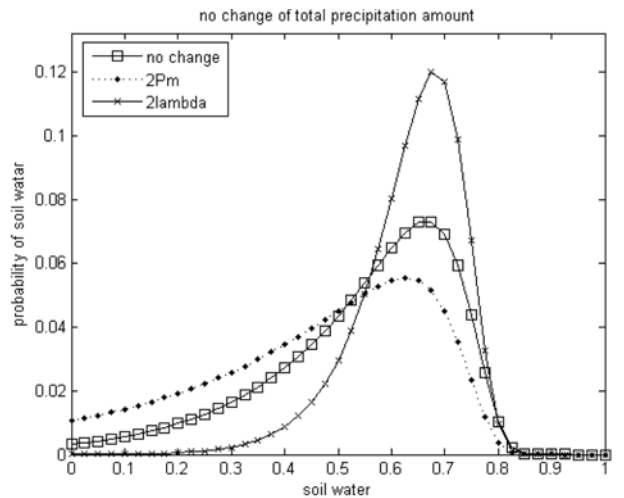


Fig. 9 Sensitivity of soil water PDF to precipitation parameters

연간 변동성을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

상기 분석결과에 기초하여 강수량을 일정하게 유지하면서 강수발생빈도를 평균값 대비 0.6에서 1.7배까지 변화시켜가며 Horton 지수를 계산하였다. 즉, 우기일 강수량 평균인 P_m 은 강수량을 일정하게 유지하기 위하여 λ 가 증가할 때, 그에 맞추어 감소시켜 계산을 수행하였다. 반대로 우기일 강수량 평균을 0.6에서 1.7배까지 변화시켜가며 Horton 지수의 계산 또한 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 주목해야할 것은 강수량이 일정하다라도 강수발생빈도와 우기일 강수량 평균에 따라 서로 다른 Horton 지수를 갖는다는 것이다. 이는 다시 말하면 Horton 지수는 식 (13)과 같이 단순히 강수량만의 함수로 표현될 수 없음을 의미하는 것이다.

이는 Fig. 9에 도시한 바와 같이 토양수분의 PDF를 통해서도 파악할 수 있는데, Fig. 9는 극단적인 경우를 고려하여 강수량을 일정하게 유지하면서 강수발생빈도를 두 배 증가시킨 경우(즉, 우기일 평균을 두 배 감소)와 우기일 평균을 두 배 증가시킨 경우(즉, 강수발생빈도를 두 배 감소)에 대한 토양수분 PDF를 나타낸 그림이다. 강수발생빈도가 증가할 경우 토양수분의 변동성은 매우 감소함을 알 수 있으며, 우기일 평균이 증가할 경우에는 강수가 매우 간헐적으로 발생하면서 우기 일에 큰 강수가 내리게 됨에 따라 강수가 유

역의 습윤량에 기여하기 보다는 지표면 유출의 형태로 손실됨과 동시에 긴 건조기간에 따른 토양수분의 감소(기화 및 침투)가 일어나기 때문에 적은 양의 토양수분을 갖게 될 확률이 증가하게 된다. 이러한 토양수분 PDF의 변화가 결국 Horton 지수에 변화를 일으키게 되는 것으로 해석할 수 있다.

강수 프로세스에 대한 Horton 지수의 반응에서 주목해야 할 또 다른 사항은 강수발생빈도가 0.6에서 1.1배까지 증가할 때에는 Horton 지수가 점차적으로 감소하였지만, 1.1배 이상 증가할 경우 Horton 지수가 다시 증가하는 패턴을 보인다. 다시 말하자면, 우기일 강수량 평균이 1.7배에서 0.9배까지 감소할 때에는 Horton 지수가 점차 감소하지만, 0.9배보다 더 감소할 경우에는 Horton 지수가 증가하게 된다(Fig. 8 참조). 이는 강수 프로세스에 대한 Horton 지수의 반응이 비선형성을 보인다는 것으로 어떤 한계점(threshold point)을 기준으로 유역의 수문학적 반응이 변경될 수도 있음을 지시하는 것으로 분석될 수도 있을 것이다. 이에 대해서는 추후 보다 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 개념적인 토양수분수지 모형을 구성하여 Horton 지수의 변동성을 살펴보았다. 이를 위하여 유역의 식생 및 토양에 관한 적절한 매개변수를 산정한 후 성수기 관측 기상자료를 모형에 입력하여 수치적으로 유역의 수문성분들(토양수분, 습윤량, 기화량 등)을 모의하였다. 모의 결과 강수량의 연간 변동성보다 절반 정도 감소된 Horton 지수를 산출할 수 있었으며, 이로부터 어떤 지역의 수문기상특성을 대표하는 변수로서 Horton 지수가 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단하였다. 또한 이러한 수치모의 결과로부터 강수량과 Horton 지수의 강한 역 상관관계를 파악할 수 있었으며, Horton 지수가 유역 식생의 강수에 대한 이용효율과 관계가 있음을 상기하여 볼 때, 자연 유역에서의 식생은 이용 가능한 강수량이 줄어들 경우 보다 이용효율을 증대시켜 생존하려는 특성을 보이고 있음을 간접적으로 살펴볼 수 있었다.

Horton 지수의 연간 변동성에 대한 보다 상세한 분석을 위하여 강수 현상을 구성하는 두 가지 주요 프로세스를 강수발생빈도와 강수가 발생하였을 때의 강수량으로 분할하여 Horton 지수의 민감 정도를 파악해 보고자 하였다. 이를 위하여 Horton 지수를 모형화할 목적으로 토양수분 PDF를 유역의 다양한 수문기상적인 변수들 및 유역 특성 변수들로부터 계산할 수 있는 기법을 제안하였으며, 수치 모의 결과와 비교한 결과 비교적 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 적용된 강수자료를 분석한 결과 우기일 강수량 평균의 연간 변동성은 29% 정도였으며, 강수발생빈도의 연간 변동성은 16% 정도로 조사되었으며, 이들 사이의 상관성은 비교적 작은 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과를 바탕으로 강수량을 일정하게 유지한 상태에서 강수발생빈도와 우기일 강수량 평균을 연간 변동성의 변화 정도만큼 변경시켜가며 Horton 지수를 모의한 결과 1) 강수량이 일정하더라도 강수발생빈도와 우기일 강수량 평균에 따라 서로 다른 Horton 지수를 가질 수 있음을 파악하였으며, 2) Horton 지수와 강수 프로세스

를 구성하는 두 가지 주요 성분과는 어떤 한계점을 기준으로 비례반비례 관계가 전환되는 비선형적인 관계를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

당연히 본 연구에서 사용한 방법만으로는 연구의 최종 지향점인 기후 변동에 따른 생태계의 반응을 살펴보기에는 많은 한계점이 있는 것이 사실이며, 보다 심도 깊게 검증해야 할 문제도 많을 것이다. 본 연구성과를 토대로 GCMs로부터 산출된 미래기후자료를 이용하여 미래의 Horton 지수의 변화 또는 수문학적 반응 등을 살펴볼 수 있으며 NDVI와 같은 원격탐사자료로부터 획득된 식생 정보들을 활용하여 수문학적 특성과 식생과의 관계를 연구해 볼 수 있을 것이다. 특히 우리나라와 같은 몬순기후에서는 기후의 계절적인 특성을 명확히 설명하는 것이 다른 어떠한 사항보다도 중요할 수 있기 때문에 토양수분 확률밀도함수의 시간적 거동을 본 연구의 구조에 어떻게 포함할 것인가도 주요한 연구방향이 될 것이다.

본 연구는 궁극적으로는 수문성분 분석을 통하여 식생이 짧은 주기의 기후 변동에 어떻게 반응하는지에 대한 이해를 높이고자 한 것이며, 이로부터 추후 장기간에 걸친 기후변화에 따른 식생 반응을 이해하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업”의 일환으로 2010년 기후과학연구관리단의 지원을 받아 수행된 연구임(RACS 2010-4006).

참고문헌

- Adams, H.D., Guardiola-Claramonte, M., Barron-Gafford, G. A., Villegas, J.C., Breshears, D.D., Zou, C.B., Troch, P.A., and Huxman, T.E. (2009) Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality: implications for regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 106, pp. 7063-7066.
- Allen, C.D. and Breshears, D.D. (1998) Drought-induced shift of a forestwoodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 95, pp. 14839-14842.
- Barnett, T.P., Adam, J.C., and Lettenmaier, D.P. (2005) Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, Vol. 438, pp. 303-309.
- Beven, K. (2006) Benchmark Papers in Storm Runoff Generation. *IAHS Press*, Wallingford, UK.
- Breshears, D.D., Cobb, N.S., Rich, P.M., Price, K.P., Allen, C.D., Balice, R.G., Romme, W.H., Kastens, J.H., Floyd, M.L., Belnap, J., Anderson, J.J., Myers, O.B., and Meyer, C.W. (2005) Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 102, pp. 15144-15148.
- Budyko, M.I. (1974) Climate and life. *Academic*, New York.
- Dai, A.G., Trenberth, K.E., and Qian, T.T. (2004) A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, pp. 1117-1130.
- Donohue, R.J., Roderick, M.L., and McVicar, T.R. (2007) Vegetation dynamics and Budyko' hydrological model. *Hydrology*

- and *Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 983-995.
- Horton, R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*. Vol. 14, pp. 446-460.
- Hurkmans, R.T.W.L., Terink, W., Uijlenhoet, R., Moors, E.J., Troch, P.A., and Verburg, P.H. (2009) Effects of land use changes on stream flow generation in the Rhine basin. *Water Resources Research*, Vol. 45, W06405, DOI:10.1029/2008WR007574.
- Huxman, T.E., Smith, M.D., Fay, P.A., Knapp, A.K., Shaw, M.R., Loik, M.E., Smith, S.D., Tissue, D.T., Zak, J.C., Weltzin, J.F., Pockman, W.T., Sala, O.E., Haddad, B.M., Harte, J., Koch, G.W., Schwinning, S., Small, E.E., and Williams, D.G. (2004) Convergence across biomes to a common rain use efficiency. *Nature*, Vol. 429, pp. 651-654.
- Jackson, R.B., Carpenter, S.R., Dahm, C.N., McKnight, D.M., Naiman, R.J., Postel, S.L., and Running, S.W. (2001) Water in a changing world. *Ecological Applications*, Vol. 11, pp. 1027-1045.
- Jackson, R.B., Sperry, J.S., and Dawson, T.E. (2000) Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science*, Vol. 5, pp. 482-488.
- 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 Hydrologic Engineering*, Vol. 13, pp. 1069-1077.
- Milly, P.C.D., Wetherald, R.T., Dunne, K.A., and Delworth, T.L. (2002) Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, Vol. 415, pp. 514-517.
- 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. *Advanced in Water Resources*, Vol. 24, pp. 725-744.
- Rinehart, A.J., Vivoni, E.R., and Brooks, P.D. (2008) Effects of vegetation, albedo and radiation sheltering on the distribution of snow in the Valles Caldera, New Mexico. *Ecohydrology*, Vol. 1, pp. 253-270.
- Rodriguez-Iturbe, I. and Porporato, A. (2004) *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems*. Cambridge University Press, New York.
- Scanlon, B.R., Levitt, D.G., Reedy, R.C., Keese, K.E., and Sully, M.J. (2005) Ecological controls on water-cycle response to climate variability in deserts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 102, pp. 6033-6038.
- Schimel, D.S., Braswell, B.H., and Parton, W.J. (1997) Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 94, pp. 8280-8283.
- Schenk, H.J. and Jackson, R.B. (2002) The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, Vol. 72, pp. 311-328.
- Troch, P.A., Martinez, G.F., Pauwels, V.R.N., Durcik, M., Sivapalan, M., Harman, C., Brooks, P.D., Gupta, H., and Huxman, T. (2009) Climate and vegetation water use efficiency at catchment scales. *Hydrological Process*, Vol. 23, pp. 2409-2414.
- Veatch, W., Brooks, P.D., Gustafson, J.R., and Molotch, N.P. (2009) Quantifying the effects of forest canopy cover on net snow accumulation at a continental, mid-latitude site. *Ecohydrology*, DOI:10.1002/eco.45.
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O., and Bairlein, F. (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, Vol. 416, pp. 389-395.
- Webb, W., Szarek, S., Lauenroth, W., Kinerson, R., and Smith, M. (1986) Primary productivity and water use in native forest, grassland, and desert ecosystems. *Ecology*, Vol. 59, pp. 1239-1247.
- Zhang, L., Dawes, W.R., and Walker, G.R. (2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, Vol. 37, pp. 701-708.

(접수일: 2010.5.31/심사일: 2010.6.27/심사완료일: 2010.6.27)