

Horton 지수의 재논의를 통한 수문분할의 변동성

최 대 규* / 최 민 하** / 안 재 현*** / 박 무 중**** / 김 상 단*****⁺

Variability of Hydrologic Partitioning revisiting Horton Index

Daegyoo Choi* / Minha Choi** / Jaehyeon Ahn*** / Moo Jong Park**** / Sangdan Kim*****⁺

요약 : 기후변동에 따른 식생반응 및 그에 따른 물수지 동역학의 변화를 살펴볼 목적으로 본 연구에서는 식생의 물 이용가능성과 식생 생산량의 지역별 연별 변동성을 분석하였다. 유역의 식생 물이용의 대리변수로서 습윤량에 대한 기화량의 비로 표현되는 Horton 지수의 계산을 통하여 유역에서의 수문 분할과 그에 따른 식생의 물 이용 가능성에 대한 정량화를 시도하였다. 연별 Horton 지수의 추정결과 기후의 변동성과 비교하여 볼 때 상대적으로 일정한 값을 유지하고 있는 것을 살펴볼 수 있다. 이와 더불어 Horton 지수와 식생의 강우이용효율을 비교한 결과, 물 이용가능성에 따른 식생의 물 이용에 대한 흥미로운 패턴이 있음을 살펴볼 수 있었다. 물이 식생 성장에 제한요소가 될 경우 식생의 강우이용효율은 공통적인 최대값으로 수렴한다는 선행연구들의 결과를 본 연구를 통해서도 확인할 수 있다.

핵심용어 : 지면 순 일차생산량, 생태수문학, Horton 지수, 수문분할, 강우이용효율

Abstract : In order to explore vegetation adaptation to climate variability and the impacts on water balance dynamics, the inter-regional and the inter-annual variability of both water availability and vegetation productivity are investigated. The Horton index, which is the ratio between actual evapotranspiration and catchment wetting as a measure of vegetation water use at catchment-scale, is revisited to quantify the effects of growing-season water availability on hydrologic partitioning at catchment scale. It is shown that the estimated Horton index is relatively constant irrespective of inter-annual climate variability. In addition, the Horton index is compared with catchment-scale vegetation rain use efficiency. The results show that there is an interesting pattern in the response of vegetation water use to water availability. When water becomes the limiting factor for vegetation productivity, the catchment-scale vegetation rain use efficiency converges to a common maximum value in agreement with earlier findings at the ecosystem level.

Keywords : Aboveground net primary production, Ecohydrology, Horton index, Hydrologic partitioning, Rain use efficiency

1. 서 론

현재까지 수문순환 구조와 각 수문순환 과정에 대한 이해와 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 Robert E. Horton은 그의 대표적인 논

문 중에 하나인 "The Role of Infiltration on the Hydrologic Cycle" (Horton, 1933)을 통하여 전체 수문순환에서 침투를 통한 유역의 습윤량(wetting)의 역할에 대한 매우 심도 깊은 논의를 제기하였다. Horton은 1905년부터 1929년까지

+ Corresponding author: skim@pknu.ac.kr

* 비희원 · 부경대학교 환경해양대학 환경공학과 박사과정 · E-mail : aidhim@pknu.ac.kr

** 정희원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 조교수 · E-mail : mcchoi@hanyang.ac.kr

*** 정희원 · 서경대학교 공과대학 토목공학과 조교수 · E-mail : wrr2li@naver.com

**** 정희원 · 한서대학교 공과대학 토목공학과 교수 · E-mail : mjpakr@hanseo.ac.kr

***** 정희원 · 부경대학교 환경해양대학 환경공학과 부교수 · E-mail : skim@pknu.ac.kr

뉴욕 주 헨콕시에 있는 델라웨어강 서쪽 지류를 대상으로 성장기 물 수지 성분을 측정하여 유역의 기화량(vaporization)과 습윤량의 비(Horton 지수, H)를 계산하였는데, 강수량의 큰 변동성에도 불구하고 H 가 상대적으로 일정함을 발견하였다. 이를 통해 Horton은 자연 유역에서 침투된 물을 저장하고 다시 대기로 환원할 수 있는 유역의 능력은 주로 식생에 의해서 제어되고 물 수지의 연간 변동성에 매우 큰 영향을 준다고 생각하였다. 그는 또한 식생은 이용할 수 있는 최대한의 토양수분량을 사용할 수 있을 정도로 성장한다는 가설을 세웠다(Fig. 1).

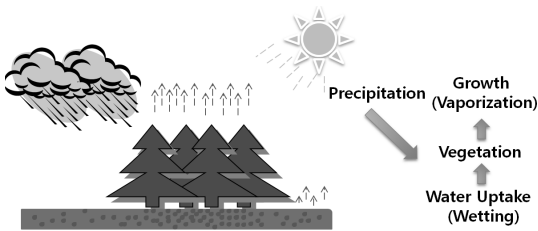


Fig. 1. The relationship between hydrological components and vegetation.

유역단위의 식생에 대한 정량적인 접근이 힘든 관계로 가설로서 멈춰있었으나 원격탐사와 같은 자연환경에 대한 모니터링 기술의 발달로 인해 1980년대 이후부터 활발하게 연구가 진행되고 있다. 구체적으로 수문현상과 식생 반응 사이의 연계작용(한수희 등, 2008; Kim 등, 2010), 수문기상특성에 대한 생태계 구조의 변화관계(Rinehart 등, 2008; Veatch 등, 2009)에 대한 연구, 그리고 식생의 변동을 지면 순 일차 생산량(Aboveground Net Primary Production, ANPP)으로 정량화 시켜 수문현상과의 관계를 알아보려는 연구가 진행(Bai 등, 2008; Guo 등, 2006; Knapp과 Smith, 2001)되고 있다.

강수량은 ANPP의 연간 변동성에 가장 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으며(Boutton 등, 1988; Deshumukh, 1984; Fang 등, 2001) 일반적으로 강수량과 ANPP간에는 양의 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다(McNaughton 등,

1993; Sala 등, 1988). 나아가 Webb 등(1986)은 식생의 성장기 동안 실제 증발산량과 ANPP는 높은 상관관계가 있음을 밝혔다. 종합해보면 수문 성분과 식생은 서로에게 영향을 주고 동시에 영향을 받는 피드백 관계를 보이고 있으며(Donohue 등, 2007), 따라서 기후와 식생의 강수이용효율 연간 변동성에 대한 식생 반응을 이해하는 것이 매우 중요한 사항으로 부각된다(Troch 등, 2009).

본 연구에서 추구하려는 목적은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, Horton 지수를 통하여 우리나라 지역의 수문분할 특성에 대해 살펴보고 둘째, 식생과 수문특성과는 어떠한 관계가 있는지에 대해서 살펴볼 것이다. 이를 위해 비교적 양질의 수문자료를 확보할 수 있는 8개 댐 상류 유역을 대상으로 최근 10년간(2000~2009년) 관측 강수량 및 유량을 분석하여 연별 Horton 지수를 산출하고 이에 대한 변동성을 살펴볼 것이다. 또한 Webb 등(1986)에서 제안된 ANPP 경험식을 통하여 식생량을 산정한 뒤 식생과 Horton 지수와 상관성을 알아볼 것이다.

2. 연구 방법

2.1 대상지역

연구 대상유역으로 한강수계내의 춘천댐, 횡성댐, 괴산댐, 소양강댐과 낙동강수계내의 안동댐, 임하댐, 합천댐 그리고 섬진강수계내의 섬진강댐, 총 8곳을 선정하였다(Fig. 2). 댐 상류 유역은 다른 지역에 비해 상대적으로 신뢰성 있는 장기간의 관측자료를 확보할 수 있으며, 또한 인위적인 간섭이 비교적 적어 자연 유역의 상태를 잘 보전하고 있기 때문에 본 연구의 목적에 적합하다고 판단하였다. 유역면적이나 지표유출량에 쓰이는 CN 값은 국가수자원관리시스템(WAMIS, 2010)의 홈페이지에서 자료를 획득하였으며, 기상자료는 유역 인근에 있는 기상관측소 자료를 대상으로 티센 가중평균법을 이용하여 유역별로 공간 평균한 뒤에 이용하였다(Fig. 2). Table 1은 유역특성 및 적용된 수문기법의 매개변수를 정리한 것이다.

Table 1. Characteristics of study watersheds

Name	Area(km ²)	CN	α	Station		
				Thiessen Coefficient		
Hoingsung	209	75	0.9175	Wonju	Hongcheon	
				0.122	0.878	
Goisan	671	78	0.9276	Moongyeong	Boeun	Chungju
				0.058	0.476	0.466
Choonchun	4,736	78	0.9899	Choonchun		
				1.000		
Soyanggang	2,703	80	0.9416	Imsil	Jeongeup	
				0.902	0.098	
Andong	1,584	75	0.7870	Yeongju	Euisung	
				0.438	0.562	
Imha	1,361	74	0.6370	Yeongduk	Euisung	
				0.102	0.898	
Habcheon	925	80	0.9545	Geochang	Sancheong	Habcheon
				0.325	0.158	0.517
Seomjingang	763	80.3	0.9001	Inje	Choonchun	
				0.377	0.623	



Fig. 2. Study watersheds

2.2 Horton 지수

Horton은 유역의 기화량과 유역 습윤량의 비 (Horton 지수, *H*)를 계산하였는데, 연 강수량의 큰 변동성에도 불구하고 *H*가 일정함을 발견하였다(Horton, 1933).

$$H = \frac{V}{W} \tag{1}$$

여기서 *V*는 증발, 차단, 증산을 통한 물의 기화량, *W*는 유역 습윤량(즉, 기화 가능한 물)이다.

Horton 지수를 구하기 위해선 유역의 *V* 및 *W*를 측정해야한다. 하지만 이들을 직접 측정하는 것은 현실적으로 매우 힘든 일이며 또한 다른 수문요소를 통해 유역 규모에서 *V*와 *W*는 직접적인 계산을 하지 않아도 다른 수문요소를 통하여 추정할 수 있다(Fig. 3 참조). 기화량인 *V*는 강수량에서 하천유출량을 제하여(*V* = *P* - *R*) 계산할 수 있다. 다만 이는 토양수분에 의한 저류가

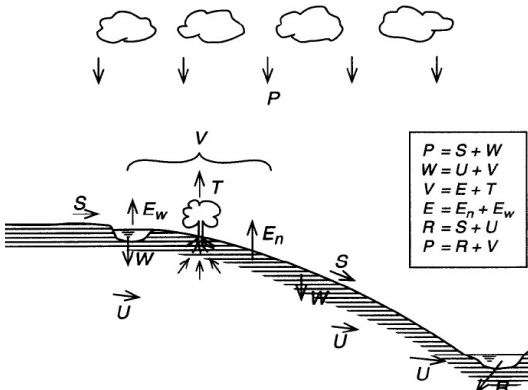


Fig. 3. Hydrologic partitioning(P: precipitation, S: surface runoff, W: wetting, U: subsurface runoff, V: vaporization, E: evaporation, T: transpiration, En: evaporation from bare soil surface, Ew: evaporation from water surface, R: runoff).

고려되지 않았기 때문에 이 값은 실제 증발산량의 최소 추정치가 될 것이다. 따라서 식 (1)에 의해 추정되는 H 는 성수기 기간에 식생의 물이용에 대한 최소 추정치로 보아야 할 것이다. 유역 습윤량 W 는 유역에 내린 강수량 중 유역에 저류되는 양으로 표현할 수 있으며 이는 강수량에서 지표면 유출량을 뺀 값($W = P - S$)을 의미한다. 참고로 습윤량 W 는 결국 기저유출량 U 와 기화량 V 의 형태로도 변환될 수 있다.

태양에너지가 극단적으로 적은 지역은 물을 기화시킬 수 있는 에너지가 부족하기 때문에 대부분의 강수량이 하천 유출량으로 전환될 것이고, 따라서 $H \cong 0$ 이 될 것이다. 반대로 물이 제한요소로 작용하는 건조 또는 반 건조 기후지역의 경우 습윤량의 대부분이 기화되며 일부의 직접유출만이 하천유출량으로 변환되기 때문에 $H \cong 1$ 이 될 것이다.

반 건조 지역의 경우 식생은 강수량에 대해 최대 민감도를 갖게 되어(Huxman 등, 2004) 약간의 강수량 증가가 ANPP 및 증발산량의 증가에 직접적으로 기여하게 될 것이므로(Scanlon 등, 2005) H 는 1에 가깝고 일정한 값을 갖게 될 것이다. 반면 습윤한 지역은 강수량의 증가가 증발

산량 또는 식생량의 증가로 바로 이어지지 않기 때문에(Schimel 등, 1997) H 의 변동성이 반건조 지역보다 클 것으로 예상된다. 참고로 Huxman 등(2004)에 따르면 습윤 지역의 식생 또한 가뭄 기간 동안에는 물에 대한 스트레스를 받게 되며, 극심한 가뭄이 발생할 경우, 반 건조 지역에 있는 식생과 비슷한 물이용 효율을 보임을 밝혔다.

2.3 수문학적 기법

Horton 지수 산정에 필요한 각 수문요소를 계산하기 위해 NRCS 유출곡선법과 Digital Filter 기법이 사용되었다. 또한 잠재증발산량을 산정하기 위해 Penman 기법을 적용하였다. NRCS 유출곡선법은 강수량에서 손실량과 유효유량을 분리하기 위해 사용되는 방법이며 현재 우리나라에서 유효유량 산정 시에 가장 널리 사용되는 방법이다. Penman 기법 또한 잠재증발산 산정 시에 우리나라에서 널리 사용되는 방법이다. 이들 기법에 대한 자세한 계산절차는 이재수(2006)와 같은 일반적인 수문학 교과서를 참고할 수 있다.

Digital Filter기법(Lyne 등, 1979)은 하천유량에서 직접유출량을 고주파수 영역의 신호로 처리하고, 기저유출량은 저주파수 영역의 신호로 간주하여 분리하는 방법이다(Fig. 4)(한국건설기술연구원, 2004).

$$f_t = \alpha f_{t-1} + \frac{1+\alpha}{2}(y_t - y_{t1}) \quad (2)$$

식(2)는 Digital Filter의 기본식이다. 여기서 y_t 는 t 일에서의 유출량, f_t 는 직접유출량이며, α 는 filter 상수로서 일반적으로 0.3에서 1.0사이의 값이 적용된다. Digital Filter기법에서 유일한 매개변수인 α 는 최적화 기법중 하나인 Sequential Quadratic Programing(SQP)방법(Gill, 1999)을 이용하여 추정하였으며 NRCS 유출곡선법을 통하여 계산된 지표유출량의 합과 Digital Filter를 통하여 계산된 지표유출량의 합이 같을 때까지 매개변수를 찾아가는 방식으로 진행되었다. 산정된 각 유역의 α 는 Table 1에 나타내었다.

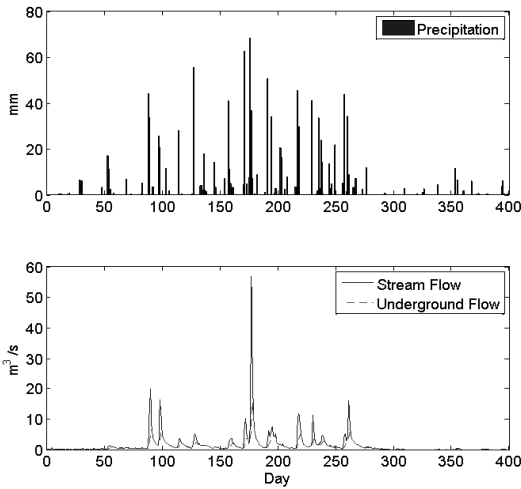


Fig. 4. Separated streamflow into groundwater and direct runoff by digital filter method

2.4 지면 순 일차 생산량(ANPP)

지면 순 일차생산량(ANPP)은 광합성 작용을 통하여 식생이 만들어낸 유기물 중 식생의 호흡량을 제외한 양을 의미하며 단위면적당 탄소량으로 표현된다. 일반적으로 ANPP는 삼림, 농경지, 초원 순으로 그 양의 크기가 관측되며 기후 및 토양 등의 자연조건을 반영하는 것으로 알려져 있다(김해동 등, 1999).

Webb 등(1986)은 미국의 14곳의 유역에서 수집된 ANPP자료와 증발산량 자료를 이용하여 경험적인 관계식(식 3)을 산정하였다. 이는 비록 실제 우리나라를 대상으로 구한 관계식은 아니지만 이후 Horton 지수와 관계를 알아보기 위하여 본 연구에 적용하여 보았다.

$$ANPP = 496 - 666 \exp(-0.0025 \times ET) \quad (3)$$

여기서 ANPP는 연간 지면 순 일차생산량 ($g/m^2/yr$)이며 ET는 연간 증발산량(mm/yr)이다. 추가적으로 식생이 얼마나 물을 효율적으로 이용하는지를 판단하는 식생의 강수이용효율(Rainfall Use Efficiency, RUE) 지표를 식 (4)와 같이 산

정하였으며(Troch 등, 2009), 이는 ANPP를 강수량으로 나눈 값이다.

$$RUE = \frac{ANPP}{P} \quad (4)$$

2.5 습도 지수

습도지수는 Budyko(1974)에서 제안되었으며 지역의 수문기상특성을 설명하는 지수로써 식 (5)와 같이 연강수량을 연 잠재증발산량으로 나눈 값으로 정의된다. 습도지수가 낮을수록 건조한 상태를 의미하며 일반적으로 0.25에서 1사이는 반건조 기후상태를 의미한다.

$$Humidity \in dex = P/PE \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 유역 수문분할 변동성

최근 10년간의 관측 자료를 이용하여 8개의 유역에 대하여 Horton 지수를 산정해보았다. Table 2는 유역별 Horton 지수 및 수문요소에 대해서 정리한 것이며 크게 연별, 성수기(6~9월)로 구분하여 제시하였다. 강수량의 비중으로 보았을 때, 성수기가 전체강우에 70~80% 가량을 차지하고 있었으며 Penman 방법으로 계산된 잠재증발산의 경우에는 약 절반가량이 성수기에 집중되고 있다. 유역별 Horton 지수를 살펴보면 연평균 0.59~0.85, 성수기의 경우에는 0.56~0.86로 유역별로는 차이가 있었으나 성수기와 연별에는 큰 차이가 없었다.

또한 강수량과 Horton 지수의 변동성을 비교하기 위해 변동계수(표준편차/평균)를 이용하여 살펴해보았다(Table 3). 비교 결과, 강수량에 비해 약 30~40% 가량 낮은 변동성이 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이는 Horton(1933)의 연구와도 부합되는 결과이다.

Table 2. The mean Horton Index and Hydrological components in each watershed

Name	Horton Index		Mean Precipitation (mm)		PET (mm)	
	Annual	Wet Season	Annual	Wet Season	Annual	Wet Season
Hoingsung	0.651	0.608	1497.18	1130.37	992.05	492.59
Goisan	0.658	0.642	1295.20	943.25	1033.53	497.39
Choonchun	0.849	0.864	1396.93	1053.89	950.25	472.06
Andong	0.596	0.567	1240.74	902.77	1062.60	490.48
Imha	0.654	0.625	1139.35	826.54	1005.65	476.06
Habcheon	0.667	0.652	1376.74	1023.12	1067.76	493.95
Soyanggang	0.590	0.557	1357.57	1015.99	972.01	481.64
Seomjingang	0.644	0.591	1363.19	975.10	1022.20	499.80

Table 3. The coefficients of variability of precipitation in 8 watersheds

Name	Annual		Wet Season	
	CvP	CvHI	CvP	CvHI
Hoingsung	0.2274	0.1507	0.2271	0.1873
Goisan	0.2375	0.1298	0.2615	0.1647
Choonchun	0.1670	0.0736	0.1725	0.0400
Andong	0.2755	0.1746	0.2754	0.2184
Imha	0.3159	0.2331	0.3220	0.2859
Habcheon	0.2552	0.1868	0.3505	0.1965
Soyanggang	0.1771	0.1203	0.1744	0.1745
Seomjingang	0.1771	0.1203	0.2170	0.1993

3.2 식생을 고려한 수문분할 관계

식생과 수문분할과정은 서로 영향을 주고받는 관계이다. 강수로 공급된 수분을 통해 식생은 성장하고 증산작용을 통해 수문분할에 기여한다. 먼저 Fig. 5를 통해 강수량과 식생량의 관계를 살펴보았다. Fig. 5에서 굵은 점선은 모든 댐 구역의 연강수량과 ANPP의 관계를 나타내는 최적 곡선을 의미하는데, 강수량 변화에 대한 ANPP의 변화가 강수량이 작을 때 더 크다는 것을 살펴볼 수 있다. 이는 강수량이 적을 경우 약간의 강수량 변화에도 ANPP가 보다 더 민감하게 반응하며 반대로 강수

량이 상대적으로 많을 경우에는 강수량 변화에 대한 ANPP의 변화율이 둔감하는 것을 의미한다.

추가적으로 횡성댐, 안동댐, 임하댐, 주암댐 등 4개 댐 상류 유역을 대상으로 연별 습도지수와 Horton 지수와의 관계를 비교해보았다(Fig. 6). Fig. 6을 살펴보면, 기울기가 $-0.28 \sim -0.13$ 사이로 반비례하는 현상을 볼 수 있으며, 이는 상대적으로 건조한 기후상태에서 실제 보유한 물에 비하여 실제증발산과정이 보다 활성화되어 있음을 보여주는 것이다. 이를 통해 식생이 이용가능한 수분이 적을 때 좀 더 효율적으로 물을 이용하고 있는 것을 추측해 볼 수 있다.

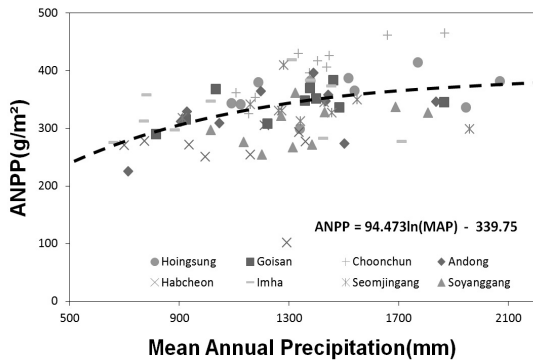


Fig. 5. Inter-annual variation in ANPP as a function of mean annual precipitation.

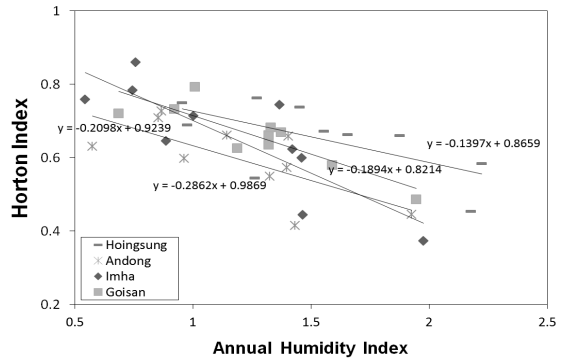


Fig. 6. Inter-annual variability of the Horton Index as a function of annual Humidity Index

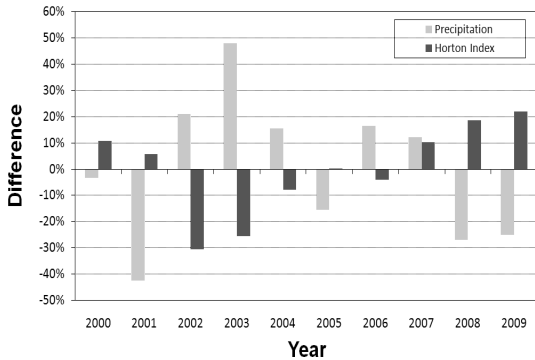


Fig. 7. The differences of precipitation and Horton Index in Andong watershed.

이러한 결과들을 종합하여 Horton 지수와 강수량과의 관계를 유추해볼 수 있다. 당연히 연 습윤량 및 증발산량은 연 강수량 변동에 따라 다르게 나타날 것이다. 연 습윤량의 경우 연 강수량 증감율과 유사한 형태를 보일 것이지만 증발산량의 경우 식생 성장에도 영향을 받기 때문에 연강수량의 증감율과는 다른 모습을 나타낼 것이다. 즉 강수량이 상대적으로 많을 경우 식생량의 증가율은 더 더지므로 증발산량의 증가폭은 작을 것이다. 예를 들어, 연 강수량이 예년 보다 20% 증가하였다면 연 습윤량 또한 20% 정도 증가할 것이지만 연 증발산량의 경우 식생량의 성장이 더더 20% 이하로 증가할 것이다. 따라서 Horton 지수와 연 강수량과는 반비례관계임을 생각해 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해 안동댐유역을 대상으로

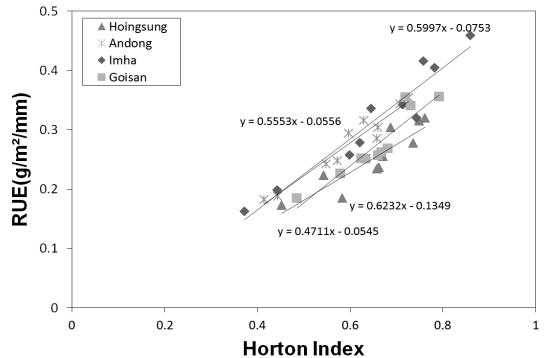


Fig. 8. Vegetation rain use efficiency against Horton Index variability of watersheds.

Horton 지수와 연 강수량의 관계를 비교해 보았다(Fig. 7). Fig. 7을 보면 2007년을 제외한 모든 해에서 연 강수량과 Horton 지수가 반비례함을 확인할 수 있다. 다만 2007년은 하천유량이 강수량의 증가에 비해 적게 관측이 되어 상대적으로 증발량이 과다 산정되어 반비례관계가 나타나지 않았다(Table 4).

마지막으로 식생의 강수이용효율과 Horton 지수와의 관계를 살펴보았다(Fig. 8). 비교해본 결과, 식생의 강수이용효율이 높을수록 Horton 지수는 1에 가깝게 나타났다. 즉 식생의 물이용 효율이 좋을 때 그 해의 총 습윤량이 모두 기화량으로 전환되고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 이는 비록 Webb 등(1986)의 경험식을 통해 산출된 ANPP로 분석을 하였기 때문에 충분히 당연한 결

Table 4. The annual Horton Index and Hydrological components in Andong watershed

Year	Rainfall	StreamFlow	Runoff	Vaporization	Wetting	HI
2000	1198.90	552.42	220.54	646.48	978.36	0.66
2001	714.34	354.15	142.95	360.19	571.39	0.63
2002	1502.73	1064.85	446.11	437.89	1056.62	0.41
2003	1837.71	1242.28	498.66	595.43	1339.05	0.44
2004	1434.92	836.61	345.33	598.32	1089.59	0.55
2005	1047.70	540.95	199.17	506.75	848.53	0.60
2006	1444.37	815.03	345.62	629.34	1098.75	0.57
2007	1390.70	630.85	236.36	759.86	1154.34	0.66
2008	907.48	393.70	181.71	513.78	725.77	0.71
2009	928.51	375.75	168.06	552.76	760.45	0.73

과일수도 있지만, Horton 지수가 1에 가까워 질 경우 식생 강수이용효율이 대략적으로 반건조 기후의 식생 강수이용효율(0.42g/m²/yr)(Huxman 등, 2004)에 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다. 기후조건에 관계없이 Horton 지수가 1에 가까울수록 최대 식생 강수이용효율 값으로 수렴하는 현상은 유역 규모의 수문순환에서 중요한 상수로 취급할 수 있을 것이다.

상기 결과들은 대규모 유역에서의 수문 분할 과정에서 식생이 미치는 영향을 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것이며, 기후변화에 따라서 지표면에서의 수문현상 및 식생의 반응이 어떠한 방식으로 전개될 지에 대한 통찰력을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

기후변동에 따른 식생반응 및 그에 따른 물수지 동역학의 변화를 살펴볼 목적으로 식생의 물 이용가능성과 식생 생산량의 지역별 연별 변동성을 분석하였다. 수문학적 기법인 NRCS 유출곡선 법과 Digital Filter 기법을 이용하여 수문성분을 분리한 후, 이로부터 유역의 식생 물이용의 대리

변수로서 습윤량에 대한 기화량의 비로 표현되는 Horton 지수를 계산하여 유역에서의 수문 분할과 그에 따른 식생의 물 이용가능성에 대한 정량화를 시도하였다.

우리나라 댐 유역 8곳을 대상으로 분석한 결과, Horton 지수는 연 강수량의 변동성과 비교해 볼 때 상대적으로 일정한 값으로 나타나 Horton (1933)의 가설이 우리나라 유역에도 적용됨을 알 수 있었다. 또한 연강수량과 ANPP, 습도지수와 Horton 지수간의 비교분석을 통해 식생과 수문순환과의 Feedback 관계를 살펴볼 수 있었으며 안동댐유역의 연 강수량과 Horton 지수와의 비교를 통해 이들 사이에 반비례관계가 있음을 살펴볼 수 있었다.

Horton 지수와 식생의 강수이용효율을 비교해 본 결과, 강수이용효율이 높을수록 Horton 지수는 1에 가까웠으며, 이를 통해 강수이용효율이 좋을 경우 그 해의 총 습윤량이 대부분 기화량으로 전환되는 것을 알 수 있었다. 또한 Horton 지수가 1에 가까울수록 반건조 기후에서 나타나는 강수이용효율, 0.42g/m²/yr으로 수렴하고 있는 것을 살펴볼 수 있었으며, 이를 통해 습윤 및 반건조 기후조건에 상관없이 일정한 최대 RUE 값으로의 수렴 현상은 유역 규모의 수문순환에서 중요한 상

수로 취급될 수 있을 것으로 판단된다.

비록 식생을 나타내는 ANPP가 단순한 경험식을 통해 이루어져 실질적인 식생자료라고 할 수는 없지만, 본 연구를 통해 그동안 시도하지 않았던 우리나라의 유역을 대상으로 장기적인 관점에서 식생과 수문분할과의 연관성을 검토해보았다는 것에 의의를 찾을 수 있으며 추후에 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 정규화식생지수)와 같은 원격탐사자료를 이용하여 실제 우리나라의 식생량을 산정할 경우 보다 현실적인 우리나라의 식생과 수문분할 관계를 확인해 볼 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2010년도 IHP 연구사업의 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

국가수자원관리종합시스템,

<http://www.wamis.go.kr>, 2010.

김해동, 박명희, 안지숙, 우리나라의 NPP분포 추정
에 관한연구, 계명대학교 낙동강 환경원, 환경
과학논집, 제4권, 제1호, pp.171-179, 1999.

이재수, 수문학, 구미서관, 2006.

한국건설기술연구원, 지표수 수문성분 해석기술
개발, 과학기술부, 2004.

한수희, 김상단, 토양수분과 식생 물 압박에 대한
생태수문학적 해석: 추계학적 모형의 유도과
적용을 중심으로, 수질보전 한국물환경학회지,
제24권, 제1호, pp.99-106, 2008.

Bai, Y., Wu, J., Qi, X., Pan, Q., Huang, J.,
Yang, D. and Han, X. (2008). Primary
production and rain use efficiency across
a precipitation gradient on the Mongolia
plateau. *Ecology*, Vol. 89, No. 8, pp.
2140-2153.

Boutton, T.W., Tieszen, L.L. and Imbamba,
S.K., Biomass dynamics of grassland
vegetation in Kenya. *African Journal of
Ecology*, Vol .26, pp. 89-101, 1988.

Budyko, M. I., *Climate and life*. Academic,
New York, 1974.

Deshmukh, I. K., A common relationship
between precipitation and grassland peak
biomass for east and southern Africa.
African Journal of Ecology, Vol. 22, pp.
181-186, 1984.

Donohue, R. J., Roderick, M. L. and McVicar,
T. R., Vegetation dynamics and Budyko'
hydrological model. *Hydrology and Earth
System Sciences*, Vol. 11, pp. 983-995,
2007.

Fang J., Piao, S., Tang, Z., Peng, C. and Ji,
W., Interannual variability in net primary
production and precipitation. *Science*, Vol
293, pp. 479-480, 2001.

Gill, P.E., Murray, W. and Saunders, M.A.,
User's Guide for SNOPT 5.3: A FORTRAN
Package for Large-scale Nonlinear
Programming. University of California, San
Diego, 1999.

Guo, R., Wang, X., Onyang, Z. and Li, Y.
(2006). Spatial and temporal relationships
between precipitation and ANPP of four
types of grasslands in northern China.
Journal of Environmental Sciences, Vol.
18, No. 5, pp. 1024-1030.

Horton, R. E., The role of infiltration in the
hydrologic cycle. *Transactions of the
American Geophysical Union*, Vol. 14, pp.
446-460, 1933.

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., Convergence across biomes to a common rain use efficiency. *Nature*, Vol. 429, pp. 651-654, 2004.
- Kim, S., Han, S. and Kim, E., Stochastic modelling of soil water and plant water stress using cumulant expansion theory. *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.127, 2010.
- Knapp, A. K. and Smith, M. D. (2001). Variation Among Biomes in Temporal Dynamics of Aboveground Primary Production, *Science*, Vol. 291, pp. 481-484.
- Lyne, V. and Hollick, M., Stochastic Time Variable Rainfall Runoff Modeling. *Hydrology and Water Resources Symposium Berth. Preceedings, National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institution of Engineers, Australia*, pp. 89-92, 1979.
- McNaughton, S. J., Sala, O. E. and Oesterheld, M., Comparative ecology of African and South American arid to subhumid ecosystems. *Biological relationships between Africa and South America*. New Haven: Yale University Press. pp. 548-567, 1993.
- Porporato, A., Laio, F., Ridolfi, L. and Rodriguez-Iturbe, I., 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, 2001.
- Rinehart, A. J., Vivoni, E. R. and Brooks, P. D., Effects of vegetation, albedo and radiation sheltering on the distribution of snow in the Valleys Caldera, New Mexico. *Ecohydrology*, Vol. 1, pp. 253-270, 2008.
- Sala, O. E., Parton, W. J., Joyce, L. A. and Lauenroth, W. K., Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, Vol. 69, pp. 40-45, 1988.
- Scanlon, B. R., Levitt, D. G., Reedy, R. C., Keese, K. E. and Sully, M. J., 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, 2005.
- Schimel, D. S., Braswell, B. H. and Parton, W. J., Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 94, pp. 8280-8283, 1997.
- Troch, P. A., Martinez1, G. F., Pauwels, V. R. N., Durcik, M., Sivapalan, M., Harman, C., Brooks, P. D., Gupta, H. and Huxman, T., Climate and vegetation water use efficiency at catchment scales. *Hydrological Process*, Vol. 23, pp. 2409-2414, 2009.
- Veatch, W., Brooks, P. D., Gustafson, J. R. and Molotch, N. P., Quantifying the effects of forest canopy cover on net snow accumulation at a continental, mid-latitude site. *Ecohydrology*, DOI:10.1002/eco.45, 2009.
- Webb, W., Szarek, S., Lauenroth, W., Kinerson, R. and Smith, M., Primary productivity and water use in native forest, grassland, and desert ecosystems. *Ecology*, Vol. 59, pp. 1239-1247, 1986.
- 논문접수일 : 10년 07월 24일
○심사의뢰일 : 10년 07월 30일
○심사완료일 : 11년 03월 15일