

# 기후와 지형 특성이 수문분할과 식생반응에 미치는 영향

## Effect of Climate and Landscape Characteristics on Hydrologic Partitioning and Vegetation Response

박 윤 경\* / 최 민 하\*\* / 안 재 현\*\*\* / 김 상 단\*\*\*\*

Park, Yoonkyung / Choi, Minha / Ahn, Jaehyun / Kim, Sangdan

### Abstract

The effect of climate and landscape characteristics on hydrologic partitioning and vegetation response is analyzed in this study. After quantifying hydrologic partitioning using the Horton index, the relation between regional climate characteristics and the Horton index is investigated. In addition, using the comparison between the predictability of the Horton index with only regional climate characteristics and the predictability of the Horton index with landscape characteristics as well as regional climate characteristics, the relative contribution of landscape characteristics on hydrologic partitioning is analyzed. Finally, investigating the predictability of the aridity index and Horton index on the normalized difference vegetation index, the effect of climate and landscape characteristics on vegetation response is estimated.

**Keywords** : Eco-hydrology, climate, Horton index, hydrologic partitioning, landscape, vegetation

### 요 지

본 연구에서는 기후와 지형특성에 따라 유역의 수문학적 분할과 식생이 어떠한 영향을 받는지가 분석된다. 수문학적 분할은 Horton 지수를 이용하여 정량화되며, 지역의 기후특성과 Horton 지수 사이의 관계가 탐색된다. 또한 지역 기후특성을 이용한 Horton 지수의 예측력과 지역 기후특성뿐만 아니라 지형특성을 이용한 Horton 지수의 예측력을 비교함으로써 지형특성이 수문학적 분할에 미치는 상대적인 공헌도가 분석된다. 마지막으로 정규화 식생지수에 대한 건조지수와 Horton 지수의 예측력을 살펴봄으로써, 식생반응에 대한 기후 및 지형특성의 영향이 추정된다.

**핵심용어** : 생태수문, 기후, Horton 지수, 수문분할, 지형, 식생

### 1. 서 론

식생은 증산작용을 통하여 토양수분 동역학에 매우 많

은 영향을 미치며, 따라서 유역 물 순환 작용에 있어서도 중요한 역할을 한다(Brutsaert, 1988). 식생에 의하여 기화되는 물의 양은 식생의 종류와 밀도, 식물의 생화학적 생리

\*부경대학교 환경해양대학 환경공학과 석사과정 (e-mail: myminey@hanmail.net)

Master's Course, Dept. of Environmental Engrg., Pukyong National Univ., 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

\*\*한양대학교 공과대학 건설환경공학과 조교수 (e-mail: mchoi@hanyang.ac.kr)

Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

\*\*\*서경대학교 이공대학 토목건축공학과 부교수 (e-mail: wr@skuniv.ac.kr)

Associate Prof., Dept. of Civil and Architectural Engrg., Seokyeong Univ., 16-1 Jungneung-dong Sungbuk-gu, Seoul 136-704, Korea

\*\*\*\*교신저자, 부경대학교 환경해양대학 환경공학과 부교수 (e-mail: skim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Environmental Engrg., Pukyong National Univ., 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

리학적 특성, 영양상태, 토양 및 지형특성, 기온, 이산화탄소 농도, 습도 등에 영향을 받아 매우 복잡하게 결정되나, 주된 결정요소는 증산에 이용할 수 있는 에너지의 양과 강우에 의해 공급받는 토양 습윤량이다(L'vovich, 1979; Shuttleworth, 1988). 그러나 기후변화에 의해 야기되는 기온과 강수량의 변화는 지상 생태계의 수문학적 반응 예측을 더 복잡하게 만든다(Wagener et al., 2007).

기후변화에 대한 예측뿐만 아니라 홍수방어, 용수공급, 생물다양성 확보 등을 위한 일상적인 유역관리 차원에서 도 지상 생태계가 물을 이용하는 프로세스를 정확하게 이해하는 것은 필수적인 일이다. 증발산은 주로 토양수분의 양, 지면에서의 순 일사량 수치, 대기의 수분 요구량 등에 영향을 받게 되는데, 이들 요소들은 대체적으로 Budyko의 건조지수에 의해 설명되는 지역 기후의 연 평균적인 상태에 의해 결정된다(Budyko, 1974). 특히 지면의 다양한 식물 생태계에서 증발산량을 정확하게 정량화하는 것은 아직까지도 매우 어려운 문제로 남겨져있으며, 현대 생태수문학분야의 주된 연구주제이기도 하다(Kim et al., 2011; Thompson et al., 2011).

Horton 지수는 Horton (1933)에서 처음 등장한 개념으로서 유역의 증발산량과 토양 습윤량의 비로 정의된다(Fig. 1). Horton은 연 강수량의 큰 변동성에도 불구하고 Horton 지수가 상대적으로 일정함을 발견하였으며, 이로부터 식물 생태계는 이용가능한 물과 에너지로부터 Horton 지수를 최대화시키는 방향으로 적응한다는 가설을 세우게 된다. 기후특성으로부터 유도된 잠재적으로 이용가능한 물과 에너지의 비인 건조지수와 비교할 때, Horton 지

수에서 식생이 이용 가능한 물은 주로 지형과 토양에 영향을 받는다는 점을 제외하면 Horton 지수는 건조지수와 개념적으로 유사한 측면이 있다. 따라서 Horton 지수는 유역 스케일에서 생태학과 수문학 프로세스 사이의 상호작용을 탐색하는 생태수문학적인 이론을 정립할 때 중요하게 적용된다(Troch et al., 2009; Choi and Kim, 2010; Choi et al., 2011a). 또한 식생과 수문분할에 대한 기후와 지형의 상호작용 및 상대적인 중요도를 살펴보기 위한 도구로 제공될 수 있다(Thompson et al., 2011).

Horton 지수를 구성하는 토양 습윤량과 증발산량의 변화 속에서 독립적으로 관측된 식생자료를 살펴보는 것은 생태계의 반응을 예측하는 도구로서의 Horton 지수의 적용성을 평가하는데 유용하다. 과거에는 광범위한 유역 스케일에서 식생자료를 측정하고 정량화하는 것이 매우 어려웠으나, 최근에는 원격 탐사된 식생 지수들을 이용할 수 있음에 따라서 이를 이용한 다양한 응용 연구들이 활발하게 일어나고 있다(Brooks et al., 2011; Choi et al., 2011b; Choi et al., 2012a).

본 연구의 주된 목적은 유역 생태계의 물 순환에 대한 기후와 지형의 역할을 평가하는 것이다. 분석은 기후의 변동성, 식생 프로세스, 물리적인 지형 특성 등이 통합된 유역 스케일에서 이루어진다. 유역 스케일에서의 지형특성과 기후특성이 Horton 지수의 유역별 차이를 얼마나 설명할 수 있는지, Horton 지수의 유역별 차이점에 대한 기후와 지형특성 각각이 가지는 상대적인 공헌도는 어느 정도 되는지를 살펴볼 것이다. 또한 식생에 대한 Horton 지수의 예측력은 어느 정도인지를 추가적으로 추정함으로써,

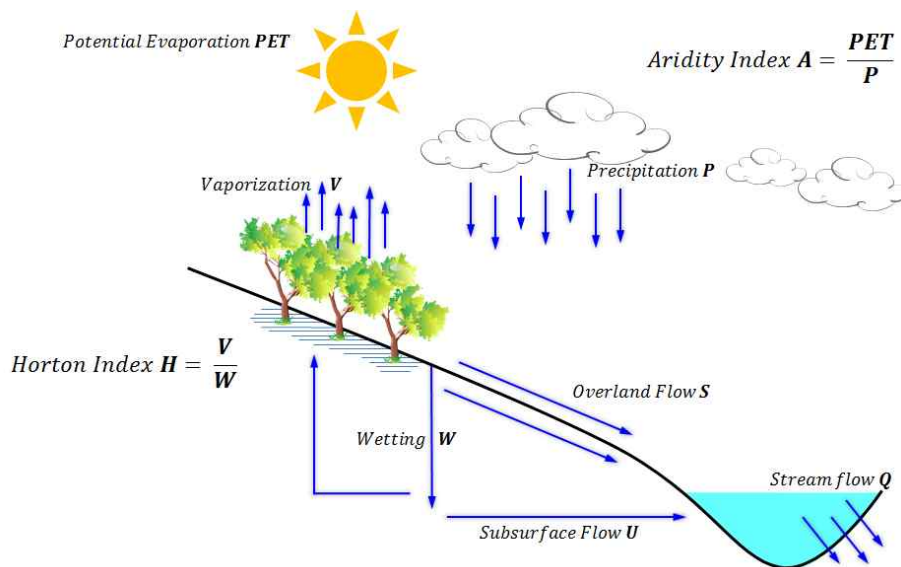


Fig. 1. Hydrologic Partitioning at the Land Surface

기후와 지형특성이 수문분할과 식생반응에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 자료구축

#### 2.1.1 연구적용지역

적용 대상유역은 장기간 동안의 양질의 강수량과 유출량 자료를 확보할 수 있으며 인간 활동에 의한 환경적 교란이 적은 낙동강, 한강, 금강, 섬진강 유역의 주요 11개댐(안동댐, 임하댐, 밀양댐, 합천댐, 충주댐, 횡성댐, 소양강댐, 용담댐, 보령댐, 부안댐, 섬진강댐) 상류 유역으로 결정하였다(Fig. 2). 각 유역의 면적은 작게는 57.06 km<sup>2</sup> (부안댐)에서 크게는 6664.36 km<sup>2</sup> (충주댐)로 다양하나 11개댐 유역 모두 유역면적의 약 80%가 산림으로 분포되어 있다. 연구에 적용된 수문자료, 식생 및 유역 특성자료를 Table 1에 정리하였다. 지형자료를 제외한 나머지 자료의 기간은 11개 유역 모두 2001년부터 2011년까지 11년간 자료를 이용하여 총 10년간의 수문년(water year)으로 자료를 정리하였다. 수문년은 특정 지역의 물수지를 취급할 때, 수문자료에 의한 물수지의 오차가 최소가 되도록 역년(曆年)과는 별도로 수문학적으로 구분하기 좋은 기간을 선택한 1년의 주기를 의미한다. 현재 우리나라에서는 수문년이 정해지지 않았으며 본 연구에서는 당해 10월 1일부터 이듬해 9월 30일까지를 1주기의 수문년으로 선정하였다.

#### 2.1.2 수문학적 요소

Horton 지수를 산출하기 위한 수문학적 요소는 강수량, 유출량, 잠재증발산량 자료이다. 유역별 평균 강수량 및 유출량(정확히는 댐 유입량) 자료는 국가수자원관리종합

정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 2001년부터 2011년까지의 관측 자료를 이용하였다. 유역의 지표유출량의 경우, Digital Filter 기법을 이용하여 산정하였다. Digital Filter는 Lyne and Hollick (1979)이 사용하였으며, 지표유출량에 관련된 다양한 연구에서도 Digital Filter가 적용되는 것을 확인하였다. 연구에 사용된 Digital Filter는 유출량 중 지표 유출량을 고주파수 영역의 신호로 처리하고, 기저 유출량은 저주파수 영역의 신호로 간주하여 일 유출량을 두 개의 수문성분으로 분리하는 방법이다(KICT, 2004). Eq. (1)은 Digital Filter를 이용한 기저유출량  $U$ 를 산정하는 식으로서 본 식으로 산정된 기저유출량을 통해 지표유출량  $S$ 를 산정할 수 있다( $S = Q - U$ ).

$$U_k = aU_{k-1} + \frac{1-a}{2}(Q_k - Q_{k-1}) \quad (1)$$

$$U_k \leq Q_k$$

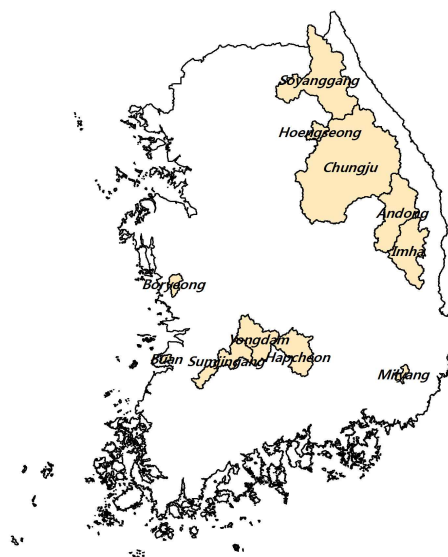


Fig. 2. Study Watersheds

Table 1. Summary of Study Watershed Data and Sources

Hydrometeorological data	Source or Method
Daily precipitation (mm)	WAMIS
Daily streamflow (mm)	WAMIS
Daily surface runoff (mm) from streamflow	Lyne and Hollick (1979)
Annual Horton index	Horton (1933)
Daily potential evapotranspiration (mm)	Penman (1947)
Annual aridity index	Budyko (1974)
Landscape and remote sensing data	Source or Method
Normalized Difference Vegetation Index	SPOT/VEGETATION
Mean catchment slope (percent)	ASTER
Mean elevation (m)	ASTER

여기서,  $U_k$ 는 특정  $k$ 일의 기저유출량(mm/day),  $Q_k$ 는 총 유출량(mm/day),  $a$ 는 Digital Filter 계수로서 보통 0.925를 사용하며 본 연구에도 동일한 값을 적용하였다.  $S$ 는 지표유출량(mm/day)을 의미한다. Eq. (1)에 적용 시 기저 유출량은 총 유출량 이상 산정될 수 없음에 유의하여야 한다. 기저 유출량이 최대가 되는 경우는 지표 유출이 발생하지 않는 시점의 유출량과 동일하기 때문이다. 또한 본 연구에서는 Digital Filter의 적용 시에 유출량 자료를 시계열 역방향과 순방향으로 총 2번의 필터링을 수행함으로써 자료가 가지고 있을지 모르는 오차를 줄이고자 하였다.

기화량과 습윤량의 비로 구성되는 Horton 지수  $H$ 는 Eq. (2)와 같다.

$$H = \frac{V}{W} = \frac{P-Q}{P-S} \quad (2)$$

여기서,  $W$ 은 토양 습윤량,  $V$ 는 증발산량이다. 토양 습윤량은 강수량( $P$ )에서 지표유출량( $S$ )을 제외한 값으로 추정할 수 있으며, 증발산량은 강수량( $P$ )에서 유역의 총 유출량( $Q$ )을 제외한 값으로 계산할 수 있다.

잠재증발산량 자료는 Penman 방법(Penman, 1947)을 이용하여 산출하였는데, 이를 위해 필요한 일별 기상자료는 평균기온, 풍속, 상대습도, 일조시간, 일사량 등이다. 본 연구에서는 11개년 각각의 유역에 영향을 미치는 기상청 기상관측소 지점 자료를 이용하여 각 지점별 일별 잠재증발산량을 계산한 후, 이를 티센 평균한 잠재증발산량 자료로 구성하였다. 이를 다시 연별로 합산하여 연별 잠재증발산량 자료를 산출하였다. Penman 방법과 관련된 내용은 Lee (2006)를 참고할 수 있다. 건조지수( $A$ )는 유역의 강수량( $P$ )에 대한 잠재증발산량( $PET$ )의 비이며, Eq. (3)과 같다.

$$A = \frac{PET}{P} \quad (3)$$

### 2.1.3 식생자료 및 유역 특성자료

식생자료는 SPOT/VEGETATION에서 제공하는 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)를 사용하였다. 해당 자료는 SPOT 위성의 Vegetation 감지기를 통해 촬영된 원격탐사자료로서 1 km의 공간해상도로 관측된다. 자료는 10일 간격으로 1998년부터 관측되었으며 현재에도 관측이 실시되고 있다(Fig. 3). 원격탐사자료를 통해 획득된 자료는 아직까지 일부 기술적인 한계로 인하여 많은 불확실성을 내포하고 있으며(Falge et al. 2001, Vargas et al. 2007) 또한 촬영시점에서의 구름 등의 기상현상으로 인해 자료가 관측되지 않거나 이상치로 관측되어 자료의 신뢰

성이 떨어지게 된다. 따라서 SPOT/VEGETATION에서 제공하는 NDVI 위성자료를 그대로 이용하기 보다는 보정 과정을 거친 후에 이용하여야 한다. 본 연구에서는 Choi et al. (2012b)이 수행한 위성자료 보정 방법을 적용하여 SPOT NDVI자료를 보정하여 이용하였다.

유역의 평균 표고는 인공위성자료인 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)으로부터 도출된 자료를 이용하였다. ASTER은 1999년 NASA에서 발사된 Terra satellite의 5개 감지기 중 하나이며, 2000년 2월부터 지구 표면 데이터를 수집하기 시작하였다. 2009년 6월 29일, ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model)이 일반인에게 공개되었으며 전 지구의 약 99%에 해당하는 지역의 자료를 제공하고 있다. 참고로 NASA에서 제공하는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)의 경우 미국을 제외한 지역에서는 해상도 90 m 간격으로 자료가 제공되고 있는 반면에 ASTER는 전 지구의 자료를 30 m의 고해상도로 제공하고 있다. 유역의 평균 경사(%)는 앞서 획득한 ASTER 표고자료를 Arc GIS의 기본모듈을 이용하여 획득할 수 있다.

## 2.2 통계적 분석

2.1절에서 획득한 자료는 수문년으로 정리된 10년간의 자료로서 이를 다시연평균 하였다. 유역 내 평균적인 Horton 지수에 기후 및 지형적인 요소가 얼마나 반영되는지를 확인하기에 앞서서 우선적으로 Horton 지수와 기후의 관계성에 대해서 분석하였다. Horton 지수를 구성하는 요소인 토양 습윤량과 증발산량 및 Horton 지수에 대한



Fig. 3. The corresponding SPOT/VEGETATION image over the Korea Peninsula area acquired in 01 July, 2011

기후요소인 강수량, 잠재증발산량, 건조지수와의 관계성을 살펴보기 위하여 선형회귀분석을 실시하였다.

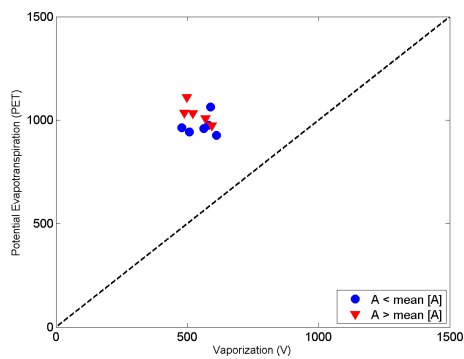
앞서 산정된 Horton 지수와 기후요소 사이의 관계식들 중 가장 적합하다고 판단되는 기후-Horton 지수 모형에 지역의 지형특성을 나타내는 표고와 경사를 이용하여 기후특성뿐만 아니라 지형특성이 Horton 지수에 얼마나 영향을 미치는지 확인하고자 하였다. 또한 추가적으로 식생에 대해서 기후와 지형적인 요인의 상대적 중요성을 선형회귀분석을 통하여 분석하고자 하였다. 이때, NDVI, Horton 지수, 건조지수는 무차원으로 차원이 같으며, 서로 비슷한 스케일을 가지고 있으나 기후자료의 경우 차원이 존재하며, NDVI 등과의 스케일에 차이가 있기 때문에 각 자료의 평균으로 정규화된 자료를 분석에 적용하였다.

### 3. 연구결과

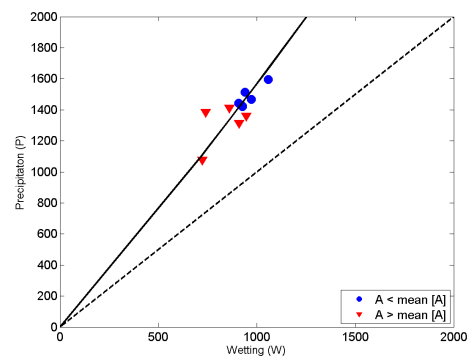
#### 3.1 Horton 지수와 기후-지형특성과의 관계

Horton 지수와 기후-지형 특성 분석에 앞서서 Horton 지수가 얼마나 지역의 생태수문구조를 설명할 수 있는지에 대해서 확인하고자 하였다. Fig. 4는 증발산량, 토양 습

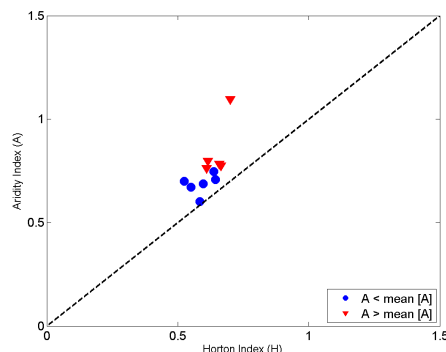
윤량, Horton 지수 등 수문학적 요소들과 기후요소와의 관계성을 분석하여 나타낸 그림이다. 기후특성에 대해 설명하기 위하여 연구대상 지역의 건조지수를 평균하여 그 평균보다 개별 지역의 건조지수가 작다면( $A < \text{mean}[A]$ ) 그 지역은 다른 지역에 비해서 비교적 습윤한 지역(●)으로 표기하였으며 이와 반대인 경우에는 상대적으로 건조한 지역(▼)이라 구분하였다. 증발산량과 지역의 잠재증발산량을 비교해 본 결과(Fig. 4a), 비교적 습윤 지역에서 증발산량과 잠재증발산량이 상대적으로 비슷한 값을 가진다. 이는 상대적으로 건조한 지역에서는 증발산량을 훨씬 초과하는 잠재증발산량을 가지고 있기 때문이다. 따라서 건조한 지역에서 식생의 성장은 에너지보다는 물이 성장의 제한요소가 될 가능성이 높다고 할 수 있다. 지표면 유출의 경우 건조한 지역의 토양 습윤량이 강수량과 보다 더 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 습윤한 지역에서는 강수량의 상당 부분이 지표면 유출로 빠져나가기 때문에 토양 습윤량에 비해서 강수량이 비약적으로 커지게 된다(Fig. 4b). 잠재증발산량과 강수량의 비로 산정되는 건조지수와 증발산량과 토양 습윤량으로 산정되는 Horton 지수 사이에는 어느 정도의 상관성을 가지게 된다(Fig. 4c). 상대적으로 건조한 지역에서는 잠재증



(a) The relationship between V and PET



(b) The relationship between W and P



(c) The relationship between H and A

Fig. 4. The Relationship between Hydrologic Partitioning Component and Climate Factors

발산량이 매우 크나 그에 비해 증발산량은 비교적 작은 값을 가지며 강수량과 토양 습윤량의 경우에는 비교적 비슷한 값을 가지기 때문에, Horton 지수에 비해 건조지수가 훨씬 큰 값을 가지게 된다. 이와는 반대로 습윤한 지역에서는 기화량과 잠재증발산량이 상대적으로 비슷한 값을 가지며 지표면 유출의 증가로 인하여 강수량이 토양 습윤량에 비해 훨씬 큰 값을 가지기 때문에 건조지수와 Horton 지수의 차이가 보다 작게 됨을 확인할 수 있다.

Table 2는 Horton지수를 구성하는 증발산량과 토양 습윤량 및 Horton 지수에 대해서 기후요소가 얼마나 영향을 미치는지 살펴볼 목적으로 선형회귀분석을 실시한 결과이다. 증발산량과 토양 습윤량의 변동성에 대한 설명력은 두 성분 모두 강수량이 잠재증발산량보다 약간 좋게 나타나고 있다. 반대로 Horton 지수에 대한 설명력의 경우에는 강수량( $R^2=0.3207$ )보다는 잠재증발산량의 설명력( $R^2=0.4765$ )이 더 좋을 것을 확인할 수 있다. 또한 잠재증발산량 단독으로 Horton 지수를 설명하기보다 강수량과 잠재증발산량이 결합된 Horton지수의 설명력( $R^2=0.5025$ )이 약 5% 정도 증가하고 있음을 살펴볼 수 있다. 따라서 Eq. (4)와 같은 모형을 구성할 수 있을 것이다.

Table 2. Statistics for Climate-Horton Model

Response	Predictor	Estimate	R <sup>2</sup>
ln V	Intercept	3.5316	0.1935
	ln P	0.3821	
ln V	Intercept	9.5081	0.0881
	ln PET	-0.4648	
ln V	Intercept	3.905	0.1939
	ln P	0.3681	
	ln PET	-0.0394	
ln W	Intercept	0.5742	0.5852
	ln P	0.8595	
ln W	Intercept	17.3379	0.5678
	ln PET	-1.5263	
ln W	Intercept	9.1519	0.7028
	ln P	0.5378	
	ln PET	-0.9048	
ln H	Intercept	2.969	0.3207
	ln P	-0.4772	
ln H	Intercept	-7.7292	0.4765
	ln PET	1.0488	
ln H	Intercept	-5.0329	0.5025
	ln P	-0.1771	
	ln PET	0.8441	
ln H	Intercept	-0.3738	0.4858
	ln A	0.3916	

$$\ln H = -5.0329 - 0.1771 \times \ln P + 0.8441 \times \ln PET \quad (4)$$

이 때, 강수량과 잠재증발산량의 회귀계수의 부호가 서로 다름을 살펴볼 수 있다. 이는 강수량과 잠재증발산량을 결합하여 ln A, 즉 건조지수를 독립변수로서 Eq. (5)와 같이 모형구성이 가능하다는 것을 의미한다.

$$\ln H = -0.3738 + 0.3916 \times \ln A \quad (5)$$

건조지수-Horton 지수 모형이 잠재증발산량-강수량-Horton지수 모형에 비해 설명력은 약간 떨어지나, 차원의 측면에서는 보다 합리적인 모형인 것으로 볼 수 있다. 따라서 건조지수가 수문분할을 설명하는데 있어 보다 더 적절한 것으로 판단되며, 이는 Budyko (1974) 및 Shuttleworth (1988)의 결과와도 부합된다.

Fig. 5는 기상특성과 더불어서 지형특성과 결합될 경우 Horton 지수에 대한 설명력이 얼마나 증가할 것인지에 대하여 분석한 결과이다. 지형요소는 지역의 특성을 대표할 수 있으며 정량적인 수치로 표현 가능한 표고(Z)와 경사( $\beta$ )를 적용하였다. 이 경우 역시 유역 평균 건조지수보다 개별 유역의 건조지수가 낮으면 비교적 습윤한 지역으로, 그 반대의 경우에는 비교적 건조한 지역으로 구분하였다. Fig. 5(a)는 건조지수만을 이용하여 Horton 지수를 예측하였을 경우이며, Fig. 5(b)는 건조지수와 함께 평균표고를 결합하여 Horton 지수를 예측한 경우이다. 기후요소와 지형적 특성을 함께 고려한 Horton 지수의 설명력( $R^2=0.5978$ )이 개선되었음을 확인할 수 있다. 유역의 평균경사를 고려하게 되면(Fig. 5c) 평균표고를 이용했을 때 보다 Horton 지수의 예측성능이 보다 증진되고 있음을 확인할 수 있다. 특히 비교적 습윤한 지역에서의 Horton 지수의 개선정도가 더 높으며, 이로부터 습윤한 기후조건으로 갈수록 유역의 수문분할특성은 기후적인 요소뿐만 아니라 지형적인 요소의 영향을 많이 받게 되고 있음을 추론할 수 있다. 유역의 평균경사와 표고자료를 동시에 건조지수와 결합하여 Horton 지수를 예측한 결과는 Fig. 5(d)에 도시되어있다( $R^2=0.7413$ ). 이러한 결과로부터 수문분할은 기후특성 이외에도 유역의 지형적 특성이 유의하게 영향을 미치고 있음을 살펴볼 수 있으며, 최종적인 모형을 Eq. (6)과 같이 구성하였다.

$$\ln \hat{H} = -0.76249 + 0.60892 \times \ln A + 0.01210 \times \beta + 0.00003 \times Z \quad (6)$$

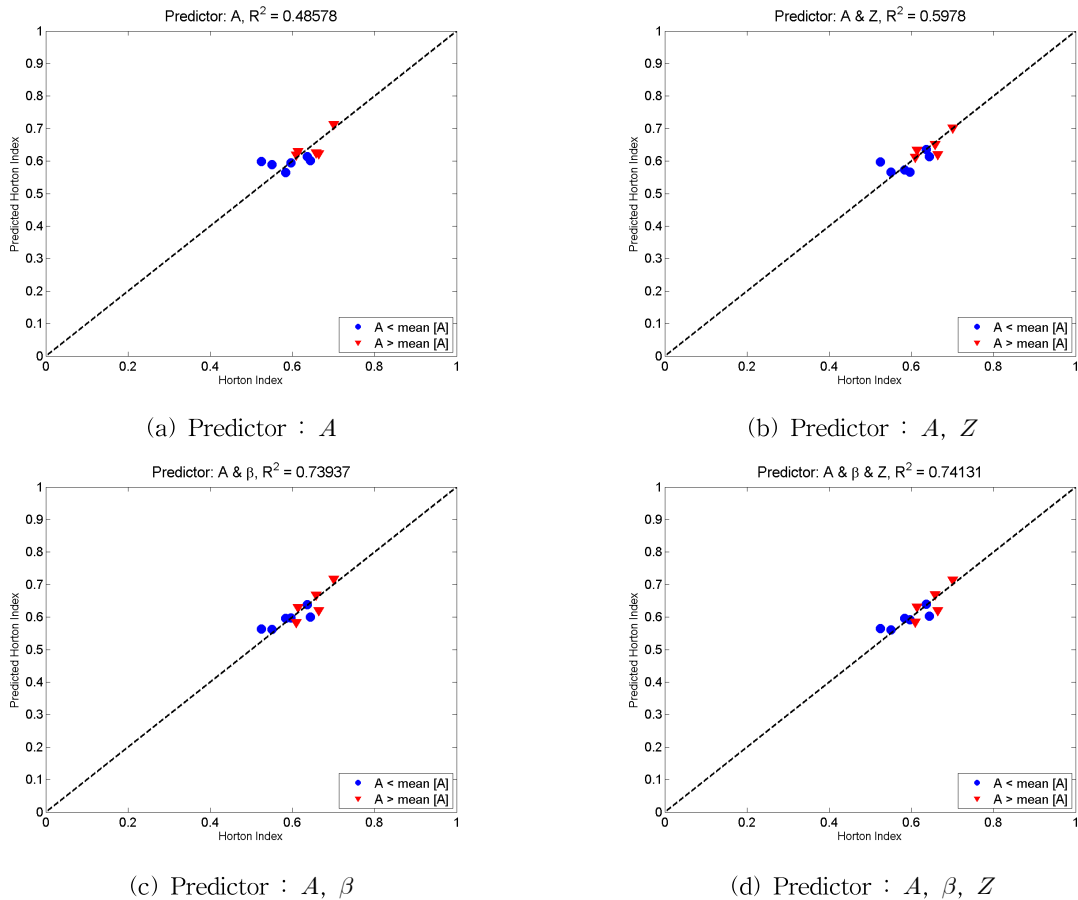


Fig. 5. A Comparison of the Calculated and Model Predicted Horton Index

여기서,  $\hat{H}$ 은 기후와 지형특성이 고려되어 예측된 Horton 지수,  $A$ 는 건조지수,  $\beta$ 는 경사,  $Z$ 는 표고를 의미한다.

### 3.2 수문분할과 식생반응에 대한 기후와 지형특성의 관계

본 절에서는 식생에 대한 Horton 지수의 예측력은 어느 정도 될 것인지 분석함으로써, 기후와 지형특성이 식생반응에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. Fig. 6은 식생반응을 나타내는 지표로 사용된 NDVI를 종축으로, 식생반응에 연관이 있을 것으로 판단되어지는 요소를 횡축으로 하여 각각의 항목에 대하여 나타낸 산포도이다. 횡축의 요소로 선정된 항목은 강수량( $P$ ), 토양 습윤량( $W$ ), 증발산량( $V$ ), 건조지수( $A$ ), Horton 지수(관측값,  $H$ ), 기후와 지형특성으로부터 예측된 Horton 지수( $\hat{H}$ )이다.

기후요소 및 수문요소만을 이용하여 NDVI와 관계를 확인한 결과, 강수량( $R^2=0.1338$ , Fig. 6a)과 토양 습윤량( $R^2=0.2883$ , Fig. 6b)의 경우에는 약간의 상관성을 보이고 있으나 NDVI를 설명한다고 하기에는 설득력이 떨어지며,

증발산량과 NDVI는 서로 관계성이 거의 없는 것으로 나타나고 있다(Fig. 6c).

강수량과 잠재증발산량이 결합된 건조지수의 경우 다른 기상 및 수문요소와 비교할 때 모형의 결정계수가 0.3485로서 상대적으로 NDVI에 대한 상관성이 높게 나타나고 있으며(Fig. 6d), 증발산량과 토양 습윤량이 결합된 Horton 지수의 경우에는 건조지수와 비교하여 NDVI에 대한 예측력이 보다 우수함을 확인할 수 있다( $R^2=0.4918$ , Fig. 6e). 건조지수보다 Horton 지수가 식생에 대한 예측 성능이 우수하다는 결과는 Troch et al. (2009) 및 Choi et al. (2011a)의 결과와도 부합된다. 또한 건조지수가 유역의 기후적인 특성만을 고려한 지수인 반면에 Horton 지수는 전술한 바와 같이 유역의 기후 및 지형을 동시에 고려한 지수라는 측면에서 볼 때, 유역의 식생반응은 기후요소뿐만 아니라 지형특성에도 매우 민감하게 영향을 받고 있음을 살펴볼 수 있다.

Figs. 6(e)~6(f)를 살펴보면 Horton 지수가 낮을수록 NDVI 역시 낮게 됨을 알 수 있는데, 이는 유역의 식생활동

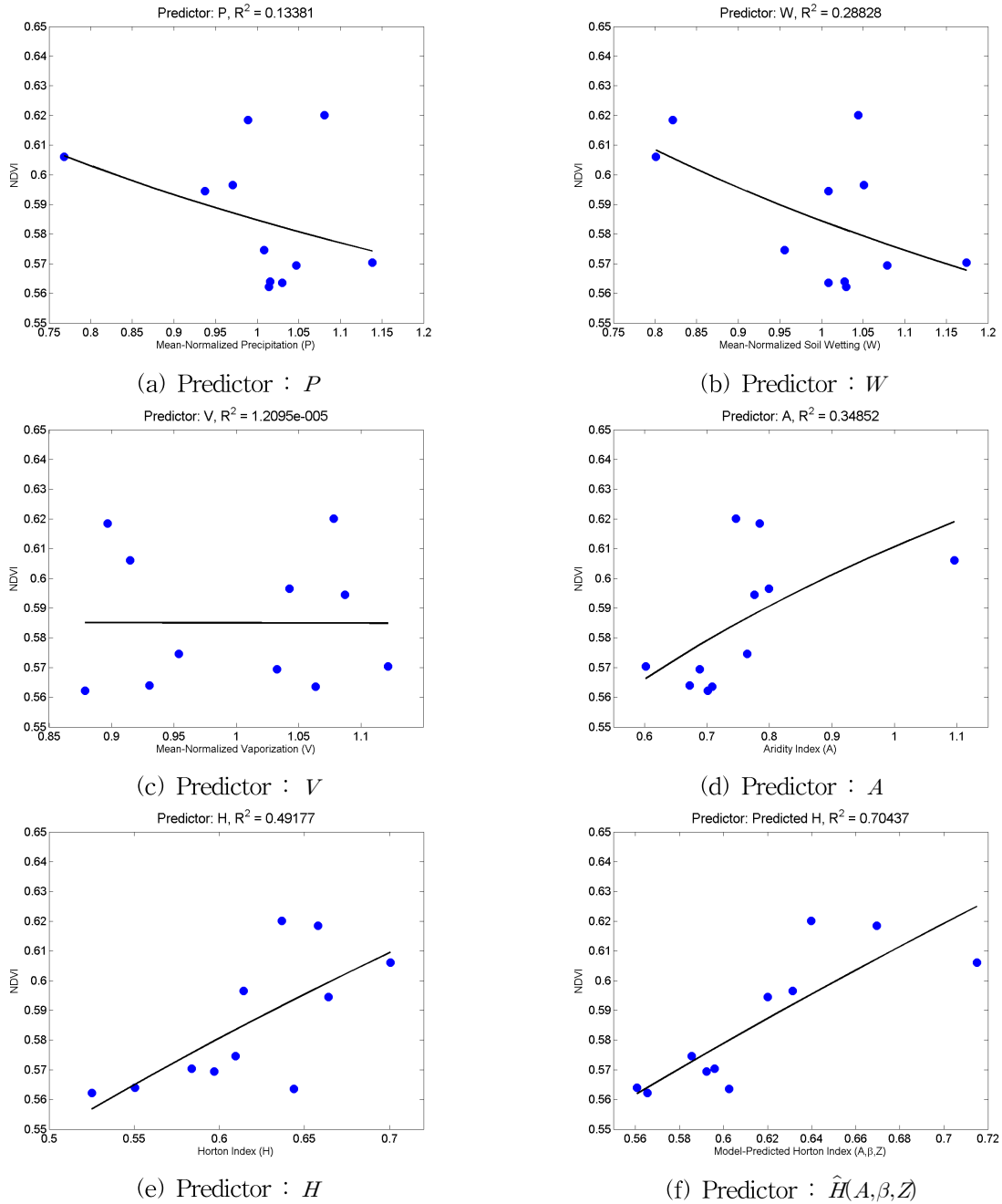


Fig. 6. The Relationship between Vegetation Productivity and Hydrologic Partitioning

과 연관시켜 설명될 수 있을 것이다. 유역의 다른 수문분할 요소들이 일정하다고 가정할 때, 유역의 증발산량이 작으면 Horton 지수를 구성하는 요소 중 분자에 해당하는 값이 작아지기 때문에 상대적으로 Horton 지수가 감소하게 된다. 유역의 증발산량에 대한 식생의 역할이 매우 크기 때문에 식생의 성장이 잘 이루어지지 않는다면 유역의 증발산량은 작아지고, 이는 유역의 Horton 지수 값의 저하를 가져오게 될 것이다. 증발산량이 활발한 지역은 그에 해당하는

큰 값의 Horton 지수를 나타낼 것이며, 이는 또한 그만큼 식생의 생장이 활발하다는 것을 의미하므로 NDVI가 비교적 높은 값을 갖게 될 것이다. 참고로 기후특성만을 고려한 건조지수보다 기후 및 지형특성을 모두 반영하여 예측한 Horton 지수의 NDVI 예측성능이 2배 이상 우수한 것을 살펴볼 수 있으며, 이는 유역의 식생반응에 대한 기후와 지형의 상대적인 공헌도가 서로 비슷함을 나타낸다고 할 수 있을 것이다.



## 4. 결 론

본 연구에서는 기후와 지형특성에 따라 유역의 수문학적 분할과 식생이 어떠한 영향을 받는지 분석하였다. 이를 위하여 안동댐, 임하댐, 밀양댐, 합천댐, 충주댐, 횡성댐, 소양강댐, 용담댐, 보령댐, 부안댐, 섬진강댐 상류 유역을 대상으로 수문자료, 식생, 유역 특성자료를 수집하여 분석에 이용하였다.

본 연구의 분석을 통하여 Horton 지수를 통하여 정량화되는 수문분할에 영향을 미치는 다양한 인자들을 경험적으로 식별하였다. 많은 선행 연구들에서 보인 바와 같이 수문분할은 건조지수로 정량화되는 지역의 기후특성에 의해서 일차적으로 지배받고 있음을 살펴보았으며, 또한 Horton 지수는 기후가 지형적인 특성과 어떻게 상호작용하고 있는지에 대한 정보를 포함하고 있음을 알 수 있었다.

유역의 경사와 고도는 연평균 하천유량에 명백하게 영향을 미치고 있으며, 기후 변동성이 수문분할에 미치는 영향은 지형에 의하여 변형될 수 있다. 특히 비교적 습윤한 지역에서 지형특성이 수문분할에 미치는 영향이 건조한 유역과 비교할 때 상대적으로 더 많았으며, 이로부터 습윤한 기후조건으로 갈수록 유역의 수문분할특성은 기후적인 요소뿐만 아니라 지형적인 요소의 영향을 많이 받게 되고 있음을 추론할 수 있다. 본 연구에서 적용한 바와 같이 상대적으로 용이하게 획득 가능한 지형특성(경사 및 고도)이 수문분할뿐만 아니라 식생 동역학의 측면에서도 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 개념은 지형 생태학자들에게는 당연한 것일 수도 있겠으나, 지형 요소들은 일반적으로 식생 동역학 모형에서 중요하게 취급되지 않는 경향이 있다. 경사와 고도와 같이 지형 요소들이 기후정보와 적절하게 결합되어 적용된다면 유역의 강수량이 어떠한 기후조건 하에서 수문학적으로 어떻게 분할되는지, 그리고 이러한 정보들이 기후변동에 대한 식물 생태계의 반응에 어떤 식으로 영향을 미칠 수 있는지를 보다 잘 이해할 수 있게 될 것이다.

유역의 경사는 수문분할에 있어서는 매우 중요한 지형 특성임을 살펴보았는데, 이러한 원인은 유역에 떨어진 강수량이 최종적으로 증발산량이 될지 또는 기저유량으로 갈지에 대하여 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 즉, 매우 경사가 심한 유역의 경우 토양 습윤량은 기저유량으로 갈 확률이 보다 높을 것이다. 경사가 심한 유역에서는 물을 토양에 저류할 수 있는 지체시간이 상대적으로 짧을 수밖에 없으며, 따라서 경사가 완만한 유역과 비교할 때 증발산 작용에 노출될 시간이 짧아지기 때문이다(Yokoo et al., 2008).

마지막으로 Horton 지수와 기후, 지형 사이의 관계로부터

터 이를 식생 동역학과 연결시키고자 하였다. 물과 에너지의 제한된 조건하에서 식생에 의하여 결정되는 증발산량은 일반적으로 유역의 물수지에서 매우 큰 부분을 차지하고 있다. 이 때 토양 습윤량은 유역 스케일에서 식생이 이용가능한 물의 최대량이 되며, 유역의 경사는 토양 습윤량이 기저유출량과 증발산량으로 분할됨에 있어서의 시간에 관한 제어작용을 하게 된다. 통계분석결과 기후특성만이 반영된 건조지수보다는 기후 및 지형특성이 고려된 Horton 지수의 NDVI 예측성능이 더 우수함을 확인할 수 있었다. 건조지수가 식생의 생산량과 밀접한 관련이 있다는 여러 연구결과가 있으나(Huxman et al., 2004), Horton 지수가 식생의 변동성을 더 잘 설명하고 있으며, 특히 상대적으로 습윤한 기후조건으로 갈수록 이러한 현상은 더 두드러지고 있음을 살펴볼 수 있었다.

본 연구를 통하여 유역의 수문학적 분할에 기후특성과 함께 지형특성 또한 상당한 기여를 하고 있으며, 식생반응을 예측함에 있어서도 기후특성과 지형특성이 함께 고려되는 경우에 보다 높은 예측력을 보이고 있음을 확인하였다. 이러한 연구 결과를 통하여 유역에서의 수문분할과 식생반응을 기후특성만으로 이해하려하기 보다는 유역의 지형특성이 반영된 생태수문학적인 시각에서의 연구접근이 보다 바람직할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 IHP 연구사업의 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

- Brooks, P.D., Troch, P., Durcik, M., Gallo, E., and Schlegel, M. (2011). "Quantifying regional scale ecosystem response to changes in precipitation: Not all rain is created equal." *Water Resources Research*, Vol. 47, W00J08, doi:10.1029/2010WR 009762.
- Brutsaert, W. (1988). "The parameterization of regional evaporation—some directions and strategies." *Journal of Hydrology*, Vol. 102, No. 1-4, pp. 409-426.
- Budyko, M.I. (1974). "Climate and Life." *Academic. San Diego*, Calif., p. 508.
- Choi, C., Choi, D., Choi, H.I., Kim, K., and Kim, S. (2012b). "Development of a Grid-Based Daily Land Surface Temperature Prediction Model considering the Effect

- of Mean Air Temperature and Vegetation.” *Journal of Korean Society on Water Environment, Korean Society on Water Environment*, Vol. 28, No. 1, pp. 137-147.
- Choi, D., and Kim, S. (2010). “Revisiting Horton Index Using a Conceptual Soil Water Balance Model.” *Journal of Korean Society of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 5B, pp. 471-477.
- Choi, D., Choi, H., and Kim, S. (2011b). “Preliminary Analysis of the Relationship between Annual Precipitation and Vegetation using MODIS NPP Remotely Sensed Data in Korea.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 4, pp. 171-178.
- Choi, D., Choi, H., Kim, K., and Kim, S. (2012a). “Development of the Ecohydrologic Model for Simulating Water Balance and Vegetation Dynamics.” *Journal of Korean Society on Water Environment, Korean Society on Water Environment*, Vol. 28, No. 4, pp. 582-594.
- Choi, D., Choi, M., Ahn, J., Park, M.J., and Kim, S. (2011a). “Variability of Hydrologic Partitioning revisiting Horton Index.” *Journal of Korean Wetlands Society, Korean Wetlands Society*, Vol. 13, No. 1, pp. 35-44.
- Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burda, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grunwald T., Hollinger, D., Jensen, N., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., and Wofsy, S. (2001). “Gap filling strategies for long term energy flux data sets.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 107, No. 1, pp. 71-77.
- Horton, R.E. (1933). “The role of infiltration in the hydrologic cycle.” *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 14, pp. 446-460.
- 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., and Weltzin, J.F. (2004). “Convergence across biomes to a common rain-use efficiency.” *Nature*, Vol. 429, pp. 651-654.
- Kim, S., Han, S., and Kim, E. (2011). “Stochastic modelling of soil water and plant water stress using cumulant expansion theory.” *Ecohydrology*, Vol. 4, pp. 94-105.
- KICT (Korea Institute of Construction Technology). (2004). Analysis and Modeling for Surface Water Hydrological Components.
- Lee, J. (2006). *Hydrology*. Goomibook.
- L’vovich, M.I. (1979). “World water Resources and Their Future.” *American Geophysical Union*, Washington D.C., pp. 415.
- Lyne, V., and Hollick, M. (1979). *Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling*. Paper presented at Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers Australia, Perth.
- Penman, H.L. (1947). “Natural evaporation from open water, bare soil and grass.” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 193, No. 1032, pp. 120-145.
- Shuttleworth, W.J. (1988). “Macrohydrology—the new challenge for process hydrology.” *Journal of Hydrology*, Vol. 100, No. 1-3, pp. 31-56.
- Thompson, S.E., Harman, C.J., Troch, P.A., Brooks, P.D., and Sivapalan, M. (2011). “Spatial scale dependence of ecohydrologically mediated water balance partitioning: A synthesis framework for catchment ecohydrology.” *Water Resources Research*, Vol. 47, W00J03, Doi:10.1029/2010WR009998.
- Troch, P.A., Martinez1, 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.
- Vargas, R., Cook, R., Agarwal, D., Boden, T., Papale, D., Van Ingen, C., Yang, B., and Baldocchi, D. (2007). *The future of the world-wide flux tower database*. FLUXNET Workshop, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.
- Wagner, T., Sivapalan, M., Troch, P., and Woods, R. (2007). “Catchment classification and hydrologic similarity” *Geography Compass*, Vol. 1, No. 4, pp. 901-903, doi:10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x.
- Yokoo, Y., Sivapalan, M., and Oki, T. (2008). “Investigating the roles of climate seasonality and landscape characteristics on mean annual and monthly water balances.” *Journal of Hydrology*, Vol. 357, pp. 255-269.

논문번호: 13-020	접수: 2013.02.18
수정일자: 2013.04.08/04.19	심사완료: 2013.04.19