Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 34, No. 3: 785-794/ June, 2014
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.3.0785

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Water Engineering 수공학

수문지수를 이용한 유역의 수문반응 분석

박윤경* · 김상단**
Park, Yoonkyung*, Kim, Sangdan**

Analysis of Watershed Hydrologic Responses using Hydrologic Index

ABSTRACT

Hydrologic responses in watershed are determined by complex interactions among climate, land use, soil and vegetation. In order to effectively investigate hydrologic response in watershed, one needs to analyze the characteristics of climate as well as other factors. In this study, the relative contribution of climate factors and watershed characteristics on hydrologic response is investigated by using hydrologic indexes such as the aridity index and the Horton index. From preliminary analysis, it is shown that the Horton index is proper in terms of classifying hydrologic responses in main natural watersheds of south Korea. While climate and watershed characteristics both contributes to hydrologic responses, the degree contributed from each factor is changed depending on annual climatic humid conditions. In dry conditions, the climate factor is the predominant influence on hydrologic responses. However, in wet conditions, the contribution of watershed characteristics on hydrologic responses is relatively increased.

Key words : Aridity index, Climate, Horton index, Hydrologic response, Watershed characteristics

초 록

유역에서의 수문반응은 기후요소뿐만 아니라 토지이용, 토양, 식생 등의 여러 가지 요소에 의한 복합적 상호작용에 의해 결정된다. 따라서 유역의 수문반응을 효과적으로 파악하기 위해서는 기후요소와 다른 외부요소에 대한 특성이해가 필요하다. 본 연구에서는 수문지수(건조지수, Horton 지수)를 적용하여 유역 수문반응에 영향을 미치는 기후 및 유역 특성의 상대적 영향력을 확인하고자 하였다. 우리나라 자연 유역에서는 건조지수보다는 Horton 지수를 이용하여 유역의 수문반응을 평가하는 것이 효과적이었다. 또한 기후상태에 따라 기후요소와 유역특성이 미치는 상대적인 영향력이 달라지는데, 건조한 기후상태에서는 기후요소가 지배적으로 수문반응에 영향을 미쳤으나 기후가 습윤한 상태로 갈수록 유역특성의 역할이 상대적으로 증가하고 있음을 확인하였다.

검색어 : 건조지수, 기후, Horton 지수, 수문반응, 유역특성

1. 서 론

최근 들어 인간 활동에 의해 전 세계적으로 기상이변 및 이상기온이 발생하고 있으며, 이에 따라 육상의 수문반응에 대한 예측이 더욱더 복잡해지고 있는 실정이다(Wagener et al., 2007). 기후변화에 따른 수문반응의 변화를 예측하는 기존의 방법은 대부분 과거 관측 값에 기초한 정상성 가정을 기본으로 하고 있다. 그러나 이러한 가정은 미래 기후변화에 따른 수문반응을 예측하는데 신뢰성 있는 결과를 제공한다고 할 수 없다(Milly et al., 2008). 왜냐하면 유역의 수문반응은 단순히 기후에 의해서만 결정되는 것이 아니라

* 부경대학교 환경공학과 박사과정 (myminey@hanmail.net)
** 정회원 · 교신저자 · 부경대학교 환경공학과 부교수 (**Corresponding Author** · Pukyong National University · skim@pknu.ac.kr)

Received November 12, 2013/ **revised** December 23, 2013/ **accepted** February 18, 2014

Copyright ⓒ 2014 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

토지이용, 토양 등 유역의 물리적 특성과 유역에 존재하는 식생간의 복잡한 상호작용에 의해 결정되기 때문이다(Fig. 1 참고). 인간 생활과 밀접하게 연관되어 있는 홍수조절, 물 공급, 육상생태계 관리 등을 위해서는 복잡한 상호작용으로 결정되는 수문반응을 정확하게 이해하여야 한다.

일찍이, 유역 수문반응의 변동성을 수문지수를 이용하여 살펴보려는 시도가 있었다. Budyko (1974)는 연평균 잠재증발산량(기온, 상대습도, 지표면 순복사량의 함수)과 강수량의 비인 건조지수(Aridity Index)를 이용하여 지역의 연간 수문상태 및 기후 특성을 설명하고자하였다. 이후, Budyko의 건조지수를 이용하여 기후-토양-식생의 상호작용을 설명하고자하는 연구가 진행되었다(Farmer et al., 2003; Milly, 1994; Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004).

건조지수 이외에 또 다른 수문지수인 Horton 지수(Horton, 1933)는 뉴욕 헨콕시에 있는 델라웨어강 서쪽 지류의 물수지 성분을 측정하여 유역의 기화량과 습윤량의 비가 강수량에 상관없이 일정함에 기인한 것이다. 이를 통해 Horton은 자연유역에서 침투된 물을 저장하고 다시 대기로 환원하는 역할이 주로 식생에 의해 제어되고 수문반응의 연간 변동성에 큰 영향을 준다고 생각하였으며, 식생은 토양수분량을 최대한으로 사용할 수 있을 정도로 성장한다는 가설을 세우게 된다. 기후학적 기반의 건조지수와 비교하여 Horton 지수는 유역 수문반응의 변동성을 평가하기에 매우 효과적인 접근방법임에도 불구하고, 수문관측자료 부족으로 연구가 지속되지 못하였다. 그러나 장기간의 자료가 구축되고 광범위한 지역의 식생을 관측할 수 있는 원격탐사기술의 발전으로 Horton 지수를 이용한 유역 수문반응의 변동성에 대한 연구가 다시 활발하게 진행되고 있다. 관련연구로 수문지수와 식생, 유역의 물리적 특성 사이의 상관성 분석을 실시하여 유역의 물수지 변동성에 대한 일반적인 관계를 도출하고자 하는 연구가 진행되었으며, 이를 점차 다양한 기후조건하에 놓인 유역으로 확대하려는 움직임이 있다(Choi and Kim, 2010; Choi et al., 2011; Knapp and Smith, 2001; Troch et al., 2009; Sivapalan et al., 2011).

그에 비해 우리나라는 수문반응의 변동성을 이해하고자 하는 연구가 거의 이루어지지 않은 상태이며, 해외 연구적용지역의 기후와 달리 우리나라의 기후는 여름철 장마와 태풍으로 인해 강우가 집중되며 겨울철에는 건조 상태가 지속되어 계절적으로 뚜렷한 차이를 보이는 전형적인 몬순기후이다. 더욱이 우리나라는 몬순기후지대에서도 공간적 변동성이 큰 지역(가까운 곳에 위치하더라도 유역특성 및 기후특성이 다른 지역)이기 때문에 외국에서 연구된 수문반응 변동성에 대한 연구와의 비교 분석이 필요하다 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기후특성을 대변하는 지수로서 건조지수를, 기후 및 유역특성을 모두 포괄하는 지수로서 Horton 지수를 도입하여 기후상태에 따른 유역 수문반응을 평가하고자 한다. 또한 이를 이용하여 유역 수문반응에 기후 및 유역특성이 얼마나 영향을 미치는지를 파악해 보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역 및 적용된 자료의 기간

연구대상지역은 비교적 양질의 연속적인 강수량과 유출량을 제공하고 있는 댐 상류유역으로 설정하였다. 해당 지역은 인간 활동에 의한 환경적 교란이 적어 비교적 자연 생태계가 잘 유지되고 있는 지역이며, 유역 면적의 80%이상이 산림으로 분포되어 있다. 선정된 연구지역은 우리나라 주요 13개 댐 상류유역이다(Fig. 2).

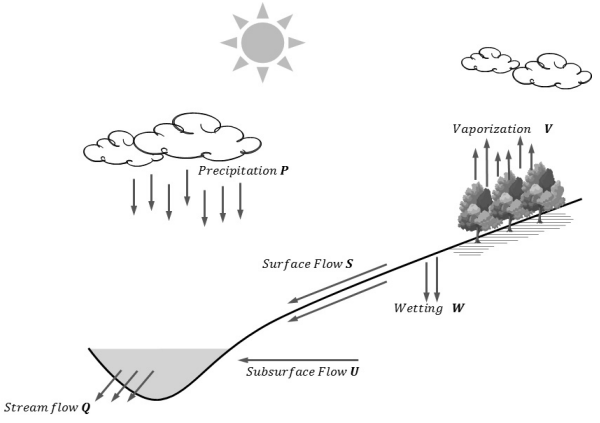


Fig. 1. Hydrologic Partitioning in Watershed

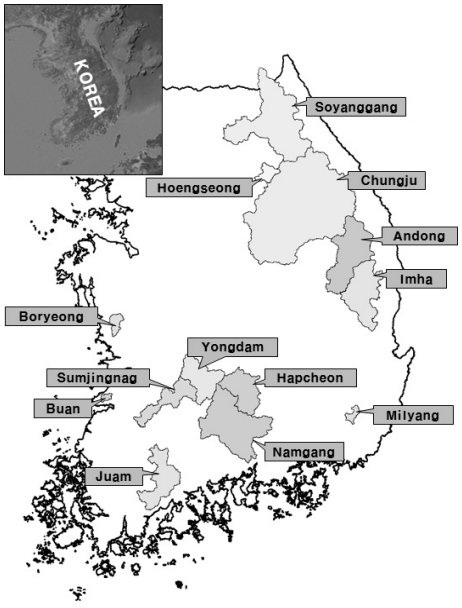


Fig. 2. Study Area

Table 1. Geometry Data

Han river			
Watershed	Soyangang	Chungju	Hoengseong
Average Slope (%)	34.6	32.7	44.4
Average Elevation (m)	237.6	430.5	549.5
Runoff Curve Number	55	59	55

Geum river			
Watershed	Boryeong	Buan	Yongdam
Average Slope (%)	31.4	40.5	38.1
Average Elevation (m)	361.9	644.0	180.0
Runoff Curve Number	63	76	62

Sumjin river		
Watershed	Sumjingang	Juam
Average Slope (%)	37.1	33.7
Average Elevation (m)	551.1	512.9
Runoff Curve Number	74	64

Nakdong river					
Watershed	Namgang	Milyang	Andong	Imha	Hapcheon
Average Slope (%)	32.2	39.3	35.3	30.0	35.2
Average Elevation (m)	509.3	616.1	394.7	269.9	445.0
Runoff Curve Number	61	72	55	66	55

한강 수계에서 소양강댐, 충주댐, 횡성댐, 금강 수계에서 보령댐, 부안댐, 용담댐, 섬진강 수계에서 섬진강댐, 주암(본)댐, 낙동강 수계에서 남강댐, 밀양댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐 상류지역을 선정하였으며, Table 1에 각 유역의 지형적 특성을 정리하였다. 연구에 적용된 자료의 기간은 13개 지역 모두 2002년부터 2011년까지 최근 10년으로 동일하게 설정하여 자료 크기에 따른 차이를 줄이고자 하였다.

2.2 연구자료 구축

2.2.1 수문지수

건조지수 A는 Budyko (1974)가 제안한 식을 이용하였다. 건조지수는 Eq. (1)과 같이 유역의 연 잠재증발산량(PET, mm/yr)과 강수량(P, mm/yr)의 비로 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{PET}{P} \tag{1}$$

잠재증발산량을 산정방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 증발접시 증발량을 이용하여 잠재증발산량을 산정하는 방법과 여러 가지 기상인자를 이용하여 잠재증발산량을 산정하는 방법으로 나뉠 수 있다. 증발접시의 관측 자료를 이용하는 것이 가장 이상적이나, 해당 자료의 경우 제공하고 있는 관측 지점이 적으며 기상적인 요인에 의하여 관측이 힘든 경우가 많다. 따라서 보다 정확하고 연속적인 잠재증발산량을 산정하기 위하여 여러 가지 기상인자를 이용하여 잠재증발산량을 산정하고자 하였다. 본 연구에서는 에너지수지 방법과 공기동력학적 방법이 함께 고려된 Penman 방법(Penman, 1948)을 적용하였다. Penman방법에 대한 자세한 설명은 Lee (2006)를 참조할 수 있다. 기상청에서 제공하는 일자료(온도, 상대습도, 풍속, 일조시간)를 이용하여 일 잠재증발산량을 산정하고 최종적으로 연 단위 자료로 구축하였다. 강수량 역시 기상청에서 제공하는 일자료를 이용하여 연자료로 정리하였다. 기상청에서 제공하는 자료는 지점자료로써 유역을 대표하는 값이라고 할 수 없으므로 기상청 지점에서 획득 또는 산정한 자료를 티센공간평균하여 유역의 공간평균값을 산출하였다.

Horton 지수 H는 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \frac{V}{W} = \frac{P-Q}{P-S} \tag{2}$$

이 때, V는 기화량 또는 실제증발산량으로 연 강수량(P, mm/yr)에서 연 유출량(Q, mm/yr)을 제외함으로써 간접적으로 산정된다. W는 토양 습윤량이며 강수량(P)에서 지표면 유출량(S, mm/yr)를 제외한 값으로 산정할 수 있다. 유출량(보다 정확하게 말하면 댐 유입량) 일자료는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAter Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 지표면 유출량 S은 유출량 Q에서 지표하 유출량 U을 제외시킨 값으로 산정하였다(Eq. (3) 참고).

$$S = Q - U \tag{3}$$

지표하 유출량은 Lyne and Hollick (1979)가 개발한 Digital Filter를 사용하여 유출량에서 추출하였다. Digital Filter는 Eq. (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$U(t) = \alpha \times U(t-1) + \frac{1-\alpha}{2}\{Q(t) + Q(t-1)\},$$
$$U(t) \le Q(t) \tag{4}$$

여기서 $U(t)$는 특정 t일의 지표하 유출량(mm/day), $Q(t)$는 t일에서의 유역 출구에서 관측되는 유출량(mm/day), α는 Digital Filter 계수로서 일반적으로 0.925가 적용되며 본 연구에서도 동일

한 값을 적용하였다. 또한 유출량 자료를 시계열 역방향과 순방향의 2번의 필터링을 통해 자료가 가지는 수치적인 오차를 줄이고자 하였다.

건조지수는 0 보다 큰 값을 가지며 그 값이 0에 가까워지면 유역에 유입되는 수분에 비해 대기에서 유역으로부터 받아들이고자 하는 수분의 양이 극히 적어 비교적 습윤한 기후상태를 의미하며 반대로 그 값이 커지면 커질수록 유역에 유입된 수분보다 더 많은 양의 수분이 대기로부터 요구된다는 것을 의미한다. 즉, 증발산활동이 활발한 건조한 기후상태라고 평가할 수 있다. Horton 지수는 유역에서 식생이 이용한 가능한 물이 주로 지형과 토양에 영향을 받는다는 점을 제외하면 건조지수한 유사한 개념의 수문지수이다. 때문에 Troch et al. (2009)는 Horton 지수가 기후적 측면 뿐 아니라 유역의 식생과 물리적 특성이 고려된 상태이므로 건조지수보다 진보된 수문지수라고 평가하였다. 유역에 수분이 유입되면 토양 내에 저류되면서 식생이 성장하는데 사용된다. 식생의 성장정도는 증발산량으로 나타낼 수 있으며 이에 Horton은 토양에 저장된 토양 습윤량과 식생에 의한 증발산량을 이용하여 유역의 수문반응을 평가하였다. 유역의 증발산량에 비해 토양 습윤량이 많다는 것은 식생이 성장하기에는 충분한 수분이 공급되어 잉여의 토양 습윤량의 많음을 의미하며, 이때의 Horton 지수는 0에 가까운 값을 가지는 비교적 습윤한 기후상태를 가진다고 평가할 수 있다. 반대로 증발산량에 비해 토양 습윤량이 적다는 것은 식생이 성장하는데 필요한 수분을 유역이 가진 토양 습윤량으로는 충분하게 공급받지 못한다는 것을 의미한다. 이는 곧 유역에 수분이 충분히 공급되지 않는 건조한 기후상태를 나타내며, 이 경우 Horton 지수는 1에 가까운 값을 나타내게 된다.

2.2.2 유역특성자료

유역의 특성을 나타내는 자료는 해당 유역의 특성을 대표하며 정량적으로 나타낼 수 있는 자료로 선정하고자 하였다. 이에 우선적으로 유역의 지형적 특성을 나타내는 유역 평균 표고와 평균 경사를 선정하였다. 유역의 평균 표고와 경사는 NASA에서 제공되는 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)로부터 도출하였다. ASTER은 1999년 발사된 Terra satellite의 5개 감지기중 하나이며, 2000년부터 지구 표면 자료를 수집하였으며 2009년 6월부터 일반인에게 자료가 공개되었다. 공개된 자료 중 유역 평균 표고는 ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model)을 이용하였으며, 해당 자료는 전 지구의 약 99%를 30m의 고해상도로 제공하고 있다. 평균 경사는 앞서 획득한 ASTER 표고자료를 ArcGIS 기본모듈을 통해 계산하여 획득하였다.

추가적으로 유출곡선지수(Runoff Curve Number, CN)를 유역특성자료로써 선정하였다. CN은 미자연자원보존국(Natural Resources Conservation Service, NRCS)에서 강수량을 침투량과 유효우량으로 분리하기 위해서 개발된 경험적 지수로써 토양종류, 토지이용상태, 식생피복 상태 및 선행토양함수조건 등이 그 값에 영향을 미친다. 이러한 영향요인은 유역의 유출량과 직접적인 상관성을 가지기 때문에 유역의 지형적 특성을 충분히 반영하고 있다고 판단하였다. 유역의 평균 CN은 WAMIS에서 제공하는 자료를 이용하였다.

2.3 수문지수를 이용한 유역수문반응의 특성분석

건조지수와 Horton 지수를 이용하여 유역의 상대적 기후상태(건조 또는 습윤)에 따른 수문성분(기화량, 토양 습윤량)과 기후성분(강수량, 잠재증발산량) 사이의 관계 분석을 실시하고자 한다. 이러한 분석을 통해 유역 수문반응에 미치는 기후적인 영향과 지형적인 영향을 일차적으로 살펴볼 수 있다. 해당 분석을 바탕으로 하여 우리나라에 보다 적합한 수문지수를 선정한다. 선정한 지수를 이용하여 보다 정량적으로 유역 수문반응에 기후 및 유역지형특성의 상대적 영향력을 확인하고자 회귀모형을 적용하였다. 기후요소와 유역특성을 회귀모형에 적용하여 수문성분을 예측하고, 모형의 결정계수를 통해 해당 모형의 성능을 평가하고자 하였다.

$$\ln(\text{수문성분}) = a + b \times \ln(\text{기후요소}) + c \times (\text{유역특성}) \tag{5}$$

Eq. (5)는 기후요소와 유역특성을 이용하여 수문성분을 예측하고자 하는 회귀모형이며, 여기서 a, b, c는 회귀계수이다.

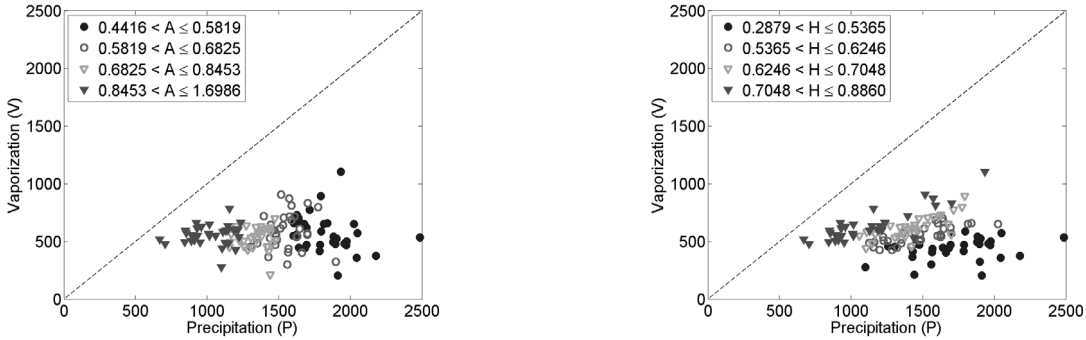
3. 결과 및 고찰

3.1 기후상태에 따른 유역수문반응 평가

우선적으로 강수량과 기화량 사이의 관계를 분석하였다. Fig. 3은 건조지수와 Horton 지수를 이용하여 강수량과 기화량 사이의 관계를 살펴본 결과이다. 연구유역에서 가장 작은 수문지수(건조지수 또는 Horton 지수) 값에서 가장 큰 지수의 값 사이를 4등분하여 지수의 값이 가장 작은 구간을 "●"으로 표현하였으며, 지수 값이 점점 커질수록 "○", "▽", "▼"의 순으로 나타냈다. 이렇게 수문지수를 4개의 구간으로 구분한 이유는 유역의 상대적인 기후상태(건조 또는 습윤)를 확인하기 위해서이다. 연구에 적용된 건조지수와 Horton 지수의 값이 작아질수록 비교적 습윤한 기후상태를 나타내며, 반대로 그 값이 커질수록 해당 유역은 비교적 건조한 기후상태임을 의미한다. Fig. 3(a)는 건조지수 구간별 강수량과 기화량 사이의 관계를 타나낸 그림으로, 건조지수 구간별로 강수량-기화량 관계가 유의한 특징을 가진다고 보기는 어려우며, 오히려 건조지수가 강수

량과 일정 정도의 상관성을 갖고 있음을 살펴볼 수 있다. 즉, 강수량이 작을수록 건조지수는 큰 값을 가지며, 강수량이 커지게 되면 건조지수는 작은 값을 나타내게 된다. 이는 강수량이 적으면 건조한 기후상태가 되며, 강수량이 많으면 습윤한 기후상태가 대체적으로 형성되므로 당연한 결과라고 할 수 있다. 참고로 본 연구에서 적용한 자료를 기준으로 할 경우 연 강수량 1,000mm 이하일 경우에는 건조지수가 1보다 큰 값(즉, 비교적 건조한 기후 상태)을 가지는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)는 Horton 지수를 이용하여 강수량과 기화량 사이의 관계를 살펴본 것으로 건조지수와는 다르게 Horton 지수 값이 가장 작은 구간을 제외한 모든 구간에서 일정강도 이상의 양의 상관관계를 확인할 수 있다. Horton 지수의 값이 가장 작은 구간에서는 다른 구간과 비교할 때 산발적인 경향을 보이고 있는데 이는 습윤한 지역에서는 강수량만으로는 기화량을 설명하기에 부족하다는 것을 의미한다. 또한 대체적으로 Horton 지수의 값이 클수록 양의 상관관계의 강도도 커지는 방향성을 탐지할 수 있으며, 이는 식생이 이용가능한 물을 가능한 최대한 사용할수록, 즉 건조한 기후상태로 갈수록 강수량과 기화량의 동조화가 더욱 명확해지고 있음을 나타낸다고 볼 수 있다. Table 2는 상기 분석과 같은 강수량과 기화량의 관계를 정량적으로 평가하기 위하여 건조지수와 Horton 지수 구간별로 강수량과 기화량 사이의 회귀분석 결과를 정리한 것이다. 건조지수와 비교할 때, Horton 지수의 구간별 상관성이 월등히 높음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 건조지수와 Horton 지수를 이용하여 잠재증발산량과 기화량 사이의 관계를 살펴본 결과로서, Figs. 3 and 4를 비교할

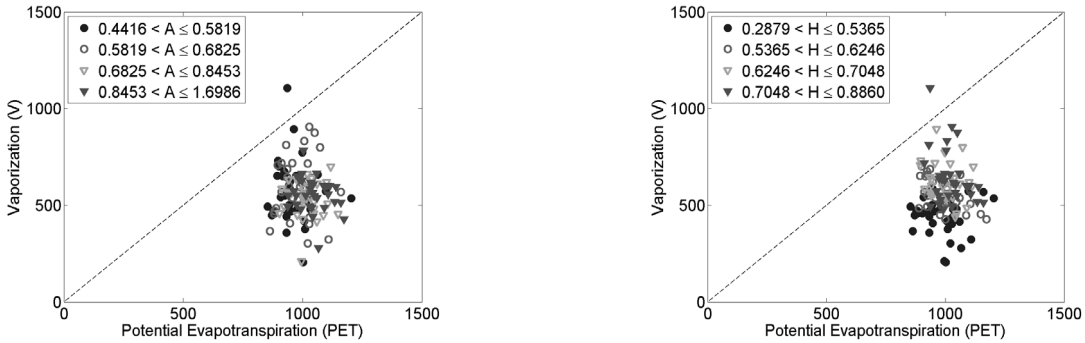


(a) Classified by Aridity Index (b) Classified by Horton Index

Fig. 3. Relationship between Precipitation and Vaporization

Table 2. Relationship between Vaporization and Precipitation

Range of Aridity index	R^2	Range of Horton index	R^2
0.4416 < A ≦ 0.5819	0.0681	0.2879 < H ≦ 0.5365	0.0886
0.5819 < A ≦ 0.6825	0.0014	0.5365 < H ≦ 0.6246	0.5821
0.6825 < A ≦ 0.8453	0.0096	0.6246 < H ≦ 0.7048	0.5009
0.8453 < A ≦ 1.6986	0.0098	0.7048 < H ≦ 0.8860	0.6720



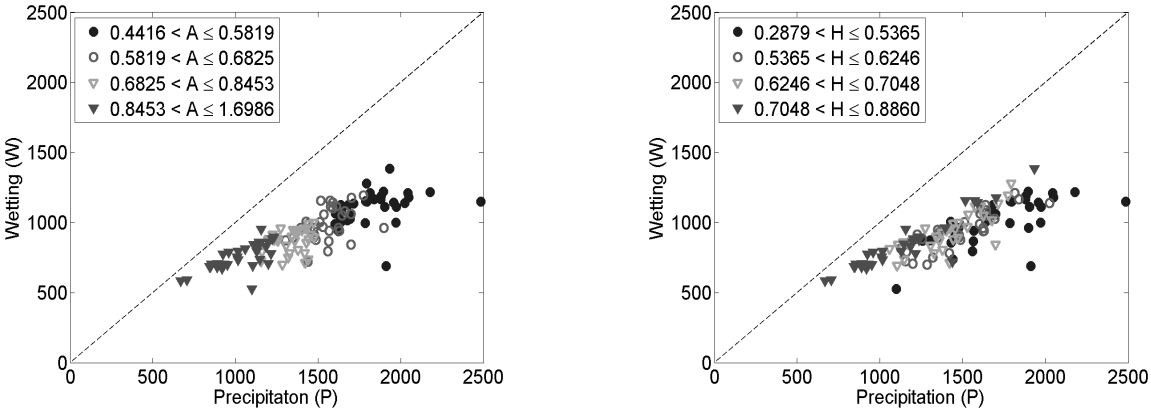
(a) Classified by Aridity Index (b) Classified by Horton Index

Fig. 4. Relationship between Potential Evapotranspiration and Vaporization

때, 어떤 수문지수를 사용하더라도 잠재증발산량보다는 강수량과 기화량의 상관관계가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 선행연구들에서는 잠재증발산량과 기화량이 서로 강한 상관성이 있으며 이에 따라 잠재증발산량을 이용한 기화량 산정 등과 같은 연구를 다수 찾아볼 수 있으나(Chow et al., 1988; Choi et al., 2011; Kim et al., 2011; Zhang et al. 2004), 실제 우리나라 유역을 대상으로 연별자료를 적용한 결과 상기와 같은 문헌들과는 상이하게 두 요소 사이의 강한 관계성을 찾아볼 수는 없었다.

토양 습윤량과 기후요소 사이의 관계를 분석한 결과, 기화량 분석 시와 유사하게 잠재증발산량과 토양 습윤량 사이의 상관성을 찾아보기는 어려웠다. 따라서 토양 습윤량과 강수량 사이 관계에 대해서 보다 자세하게 언급하고자 한다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 토양 습윤량과 강수량은 서로 양의 상관관계를 가지고 있다. 이 때, 주목할 사항은 전반적으로 보다 습윤한 기후상태(● 또는 ◯)로 갈수록 두 요소 사이의 상관성이 줄어들고 있다는 점이다. 이는 토양 습윤량의 연간 변동성을 설명하고자 할 때, 건조한 기후상태에서보다 습윤한 기후상태에서는 강수량의 정보만으로는 습윤량의 변동성을 설명할 수 없는 부분이 많아진다는 것을 의미한다. Table 3은 수문지수 구간별 토양 습윤량과 강수량 사이의 회귀분석결과를 나타낸 것이다. 결정계수의 값은 기화량-강수량 관계보다 전반적으로 더 높게 나타나 기화량-강수량 관계보다는 토양 습윤량-강수량 관계가 더욱 밀접하다는 것을 확인할 수 있다. Horton 지수를 구분인자로 사용하여 그 값이 가장 큰 구간은 건조한 기후상태인 경우이며 결정계수는 0.8550로 매우 높게 나타나고 있다. 이는 건조한 기후상태에서는 토양 습윤량의 대부분이 강수량에 의해 결정됨을 의미한다.

기후상태에 따라서 유역수문반응이 어떻게 달라지는지를 확인하기 위하여 건조지수와 Horton 지수를 4개의 구간으로 구분하여 분석하였다. 기화량과 토양 습윤량을 설명하기 위해서는 잠재증발산량보다는 강수량이 보다 적합하다는 것을 확인할 수 있었으며, 건조지수보다는 Horton 지수를 이용하는 것이 높은 설득력(결정계수 기준)을 가짐을 알 수 있었다. Horton 지수만을 이용하여 결과를 다시 살펴보게 되면 Horton지수 값이 큰 구간인 비교적 건조한 기후상태에서는 강수량(기후요소)만으로도 유역의 수문상태를 비교적 잘 설명할 수 있었다. 그러나 Horton 지수 값이 작은 구간인 습윤한 기후상태에서는 건조한 기후상태일 때보다 설명력이 떨어졌다. 이로부터 습윤한 기후상태일 때는 기후요소만으로는 유역의 수문반응을 평가하기에는 부적합하며 기후요소 이외의 요인이 작용하고 있음을 유추할 수 있다. 기후요소 이외의 요인은 우선적으로 유역특성으로 볼 수 있으며, 유역 특성 중 가장 먼저 고려해볼 만한 특성은 유역 평균 표고, 유역 평균 경사, 토지이용특성, 토양특성 등의 지형적 특성일 것이다. 이 중에서 토지이용특성과 토양특성은 유역 평균 CN을 이용하여 통합적으로 살펴보는 것이 가능할 것이다.



(a) Classified by Aridity Index (b) Classified by Horton Index

Fig. 5. Relationship between Precipitation and Wetting

Table 3. Relationship between Wetting and Precipitation

Range of Aridity index	R^2	Range of Horton index	R^2
0.4416 < A ≦ 0.5819	0.0877	0.2879 < H ≦ 0.5365	0.5086
0.5819 < A ≦ 0.6825	0.1622	0.5365 < H ≦ 0.6246	0.6739
0.6825 < A ≦ 0.8453	0.0571	0.6246 < H ≦ 0.7048	0.5657
0.8453 < A ≦ 1.6986	0.4564	0.7048 < H ≦ 0.8860	0.8550

3.2 수문분할의 변동성에 미치는 기후 및 유역특성의 상대적인 역할 분석

앞서 연구를 수행한 결과, 건조한 기후조건에서 습윤한 기후조건으로 갈수록 유역의 수문분할 특성은 기후적인 요인만으로는 설명할 수 없는 부분이 커짐을 확인하였다. 따라서 기후요소만으로 설명할 수 없는 부분을 유역의 지형적 특성과 연관이 있을 것으로 판단되어 유역의 지형적 특성을 정량적으로 나타낼 수 있는 유역의 평균 표고, 평균 경사, 평균 CN을 이용하여 기후요소와 더불어 살펴보고자 하였다. 유역 수문반응과 비교적 연관성이 높은 유역의 강수량과 유역의 지형적 특성을 함께 고려한 회귀모형을 통해 수문분할요소(기화량, 토양 습윤량)를 예측하였다. 이 때, 건조지수보다는 Horton 지수에 따른 구분이 보다 우수한 설명력을 가지고 있는 것으로 판단되어, 상기 분석과 같이 Horton 지수를 4개의 구간으로 구분하여 유역의 기후상태를 구분하였다. Horton 지수의 값이 가장 작은 구간은 "●"으로, Horton 지수 값이 가장 큰 구간은 "▼"으로 표현하였다.

강수량과 유역특성을 이용하여 기화량을 모의한 후 관측된 기화량과의 상관계수를 확인한 결과(Fig. 6 참조), 예측인자를 강수량만을 사용하기보다는 유역특성이 함께 고려되어질 때 관측된 기화량과 모의된 기화량 사이의 상관계수가 개선됨을 확인하였다. 특히 강수량과 평균 CN을 이용한 회귀모형(Fig. 6(d))이 관측된 기화량을 비교적 높은 수준으로 예측하고 있었다. 또한 Horton 지수 구간 별로 기화량을 모의하는 회귀모형의 예측성능을 판단하기 위하여 각 구간의 회귀모형 및 모형결정계수를 Table 4에 정리하였다. 강수량만을 이용하였을 때 Horton 지수 값이 가장 작은 구간에서는 다른 구간에 비해 결정계수가 0.0886으로서 매우 낮음을 확인 할 수 있다. 그러나 강수량과 평균 CN을 함께 이용한 경우에 Horton 지수 값이 가장 작은 구간의 모형결정계수가 0.2883으로서 예측력이 다른 경우들에 비해 매우 개선되고 있음을 확인할 수 있었다. 이에 비해 Horton 지수 값이 가장 큰 구간인 건조한 기후상태(▼)에서는 예측력의 개선정도가 상대적으로 미약하였다. 건조한 기후상태에서는 기후적인 요인에 의해 수문반응이 지배적으로 결정되고 습윤한 기후상태에서는 기후적인 요인 이외에 다른 요인(본 연구에서는 유역특성)이 작용하고 있음을 의미한다.

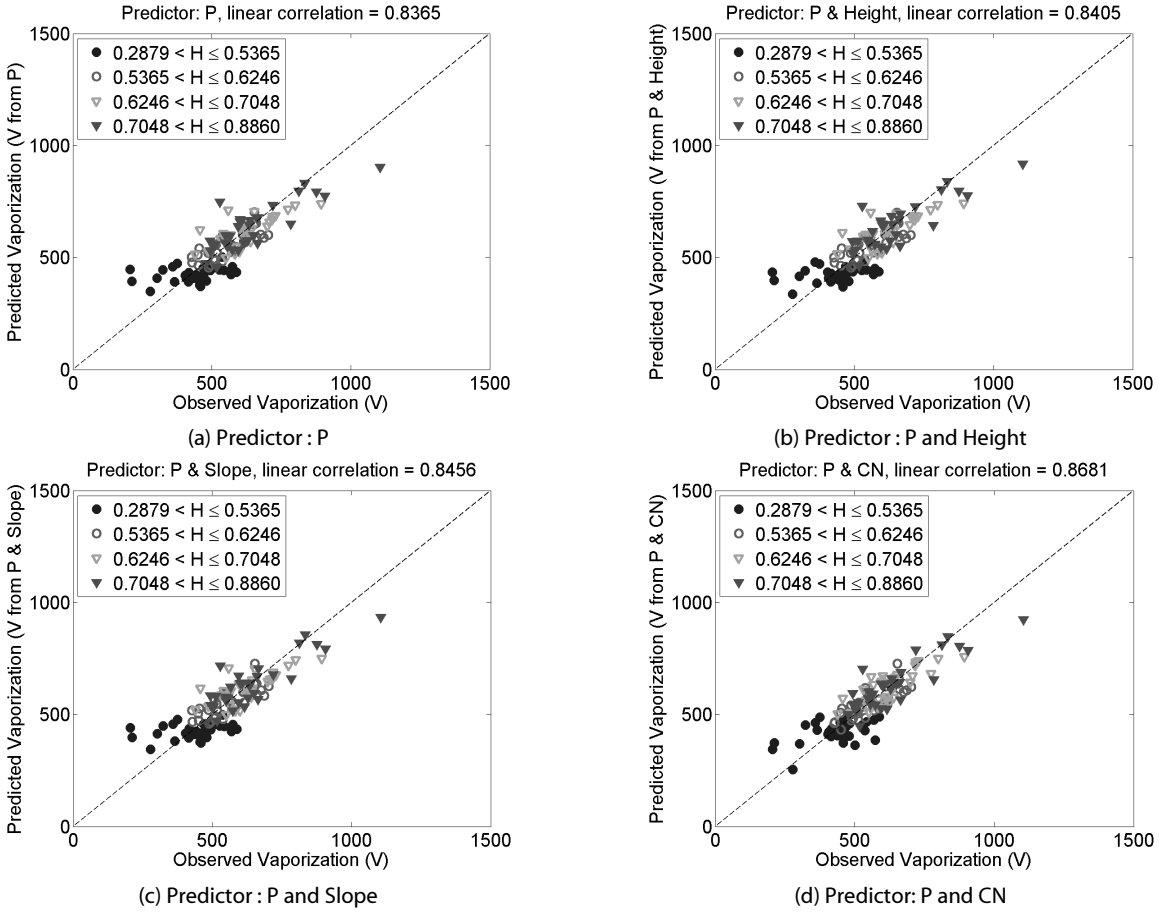


Fig. 6. Comparison of Vaporization and Predicted Vaporization

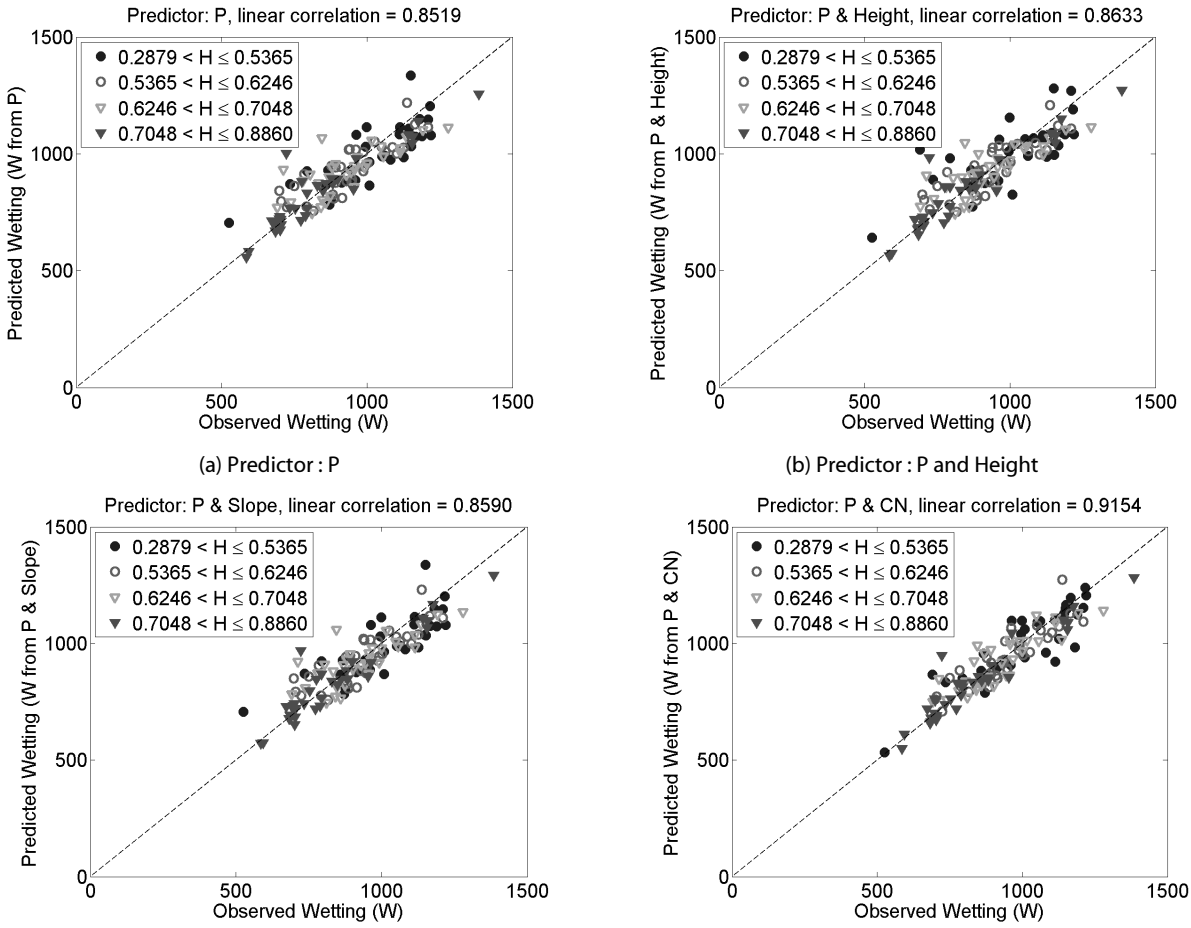
Table 4. Relationship between Vaporization and Predicted Vaporization

Range of Horton index	Predictor : P		
	$\ln V = a + b \times \ln P$		
	a	b	R^2
0.2879 < H ≦ 0.5365	2.7555	0.4428	0.0886
0.5365 < H ≦ 0.6246	0.9443	0.7369	0.5821
0.6246 < H ≦ 0.7048	0.9974	0.7487	0.5009
0.7048 < H ≦ 0.8860	1.9532	0.6414	0.6720

Range of Horton index	Predictor : P & Height			
	$\ln V = a + b \times \ln P + c \times Height$			
	a	b	c	R^2
0.2879 < H ≦ 0.5365	2.6700	0.4627	-0.0001	0.0935
0.5365 < H ≦ 0.6246	0.9372	0.7384	-0.0000	0.5822
0.6246 < H ≦ 0.7048	0.8310	0.7779	-0.0001	0.5092
0.7048 < H ≦ 0.8860	1.7032	0.6902	-0.0002	0.6894

Range of Horton index	Predictor : P & Slope			
	$\ln V = a + b \times \ln P + c \times Slope$			
	a	b	c	R^2
0.2879 < H ≦ 0.5365	2.8061	0.4486	-0.0027	0.0904
0.5365 < H ≦ 0.6246	1.0292	0.7000	0.0052	0.5973
0.6246 < H ≦ 0.7048	0.9479	0.7684	-0.0025	0.5048
0.7048 < H ≦ 0.8860	2.0240	0.6780	-0.0093	0.7038

Range of Horton index	Predictor : P & CN			
	$\ln V = a + b \times \ln P + c \times CN$			
	a	b	c	R^2
0.2879 < H ≦ 0.5365	3.0534	0.5537	-0.0183	0.2883
0.5365 < H ≦ 0.6246	1.3430	0.7309	-0.0058	0.6663
0.6246 < H ≦ 0.7048	0.6143	0.8601	-0.0067	0.6167
0.7048 < H ≦ 0.8860	2.1951	0.6671	-0.0065	0.7154



(a) Predictor : P

(b) Predictor : P and Height

(c) Predictor : P and Slope

(d) Predictor: P and CN

Fig. 7. Comparison of Wetting and Predicted Wetting

Table 5. Relationship between Wetting and Predicted Wetting

Range of Horton index	Predictor : P		
	$\ln W = a + b \times \ln P$		
	a	b	R^2
0.2879 < H ≦ 0.5365	1.0696	0.7837	0.5086
0.5365 < H ≦ 0.6246	0.9327	0.8107	0.6739
0.6246 < H ≦ 0.7048	1.3534	0.7555	0.5657
0.7048 < H ≦ 0.8860	1.3616	0.7631	0.8550

Range of Horton index	Predictor : P & Height			
	$\ln W = a + b \times \ln P + c \times Height$			
	a	b	c	R^2
0.2879 < H ≦ 0.5365	0.8544	0.8337	-0.0004	0.5658
0.5365 < H ≦ 0.6246	0.8768	0.8227	-0.0001	0.6793
0.6246 < H ≦ 0.7048	1.1025	0.7994	-0.0001	0.5865
0.7048 < H ≦ 0.8860	1.1625	0.8019	-0.0002	0.8649

Range of Horton index	Predictor : P & Slope			
	$\ln W = a + b \times \ln P + c \times Slope$			
	a	b	c	R^2
0.2879 < H ≦ 0.5365	1.0623	0.7829	0.0004	0.5087
0.5365 < H ≦ 0.6246	0.9569	0.8002	0.0015	0.6750
0.6246 < H ≦ 0.7048	1.2799	0.7847	-0.0037	0.5751
0.7048 < H ≦ 0.8860	1.4220	0.7944	-0.0080	0.8759

Range of Horton index	Predictor : P & CN			
	$\ln V = a + b \times \ln P + c \times CN$			
	a	b	c	R^2
0.2879 < H ≦ 0.5365	1.3305	0.8809	-0.0161	0.7892
0.5365 < H ≦ 0.6246	1.4271	0.8033	-0.0072	0.7976
0.6246 < H ≦ 0.7048	0.9133	0.8834	-0.0077	0.7350
0.7048 < H ≦ 0.8860	1.5766	0.7860	-0.0057	0.8858

토양 습윤량 또한 강수량과 유역특성을 이용하여 모의한 토양 습윤량과 관측된 토양 습윤량의 상관계수가 강수량을 단독으로 이용하여 모의하는 것보다 좋은 결과를 나타내었다. Fig. 7은 예측인자에 따른 토양 습윤량 모의 결과이다. 기화량을 예측할 때보다 비교적 높은 수준으로 토양 습윤량을 예측하고 있으며 특히 강수량과 평균 CN을 이용한 회귀모형의 경우 관측 토양 습윤량과 예측한 토양 습윤량의 상관계수가 0.9154로 매우 양호한 예측력을 나타내고 있다. Table 5에 Horton 지수 구간별로 회귀모형의 회귀계수 및 모형결정계수를 정리하였다. 보다 중요한 사항은 모형의 예측 개선력이 건조한 기후상태(▼)보다 습윤한 기후상태(●)일 때 상대적으로 크게 개선되었다는 점이다. 이 또한 기화량 예측의 경우와 같이 건조한 기후상태에서는 기후적인 요인에 의해 수문반응이 지배적으로 결정되고 습윤한 기후상태에서는 기후적인 요인 이외에 다른 요인(본 연구에서는 유역특성)이 작용하고 있음을 의미한다. 유역 특성 요소 중 유역의 평균 CN과 함께 모의하는 것이 가장 크게 예측성능이 개선되고 있음을 확인할 수 있으며, 그 다음으로는 유역 평균 표고, 평균 경사 순으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 비교적 양질의 장기간 수문자료를 보유하고 있는 우리나라 주요 13개 댐 상류유역을 대상으로 기후상태의 변화에 따른 유역수문반응을 보다 정확하게 살펴보고자 하였다. 건조지수와 Horton 지수를 이용하여 유역의 기후상태를 평가하였으며, 기후상태에 따른 유역 수문반응에 영향을 미치는 기후요소와 유역특성의 상대적인 역할을 분석하였다. 이 때, 기후요소는 강수량과 잠재증발산량을 사용하였고 유역특성은 유역 평균 표고, 평균 경사, 평균 CN을 적용하였다.

유역별로 산정된 건조지수와 Horton 지수를 4개의 구간으로 구분하여 유역의 상대적 기후상태에 따른 수문성분과 기후요소사이의 상관성을 확인하였다. 우리나라 유역에 대해서는 잠재증발산량을 이용하여 수문성분을 예측하기 보다는 강수량을 이용하여 예측하는 것이 보다 효과적이었다. 또한 건조한 기후상태에서는 강수량과 수문성분 사이의 상관성이 비교적 높은 것을 확인할 수 있었으나 습윤한 기후상태에서는 그렇지 못하였다. 이는 건조한 기후상태일 때 보다 습윤한 기후상태에는 기후요소이외의 다른 요소가 유역 수문반응에 미치는 영향력이 크다는 것을 의미한다. 이에 추가적으로 기후요소 이외에 유역 수문반응에 영향을 미치는 요인 중 우선적으로 생각할 수 있는 유역특성을 고려하여 기후요소와 더불어 유역의 수문성분을 모의하여 유역 수문반응에 기후 및 유역 특성의 상대적인 영향력을 확인하였다. 우리나라 유역에서 수문반응을 보다 효과적으로 설명할 수 있는 Horton 지수를 이용하여 기후상태를 구분한 후 주요한 기후요소는 강수량으로 선정하였다. Horton 지수를 4개의 구간으로 구분하여 유역의 기후상태에 따른 기후요소와 유역특성의 영향력을 확인한 결과, Horton 지수의 값이 큰 구간(즉, 건조한 기후상태)에서는 기후요소만을 이용하여도 유역의 수문반응을 비교적 높은 수준으로 모의할 수 있으나, Horton 지수의 값이 작은 구간(즉, 습윤한 기후상태)에서는 유역특성이 함께 고려되는 것이 유역의 수문반응을 보다 높은 수준으로 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 습윤한 기후상태인 경우가

건조한 기후상태인 경우에 비하여 유역의 수문반응에 미치는 유역 특성의 상대적인 역할이 더 커지고 있음을 의미한다.

본 연구의 연구대상지역은 산림이 80%를 차지하고 있다. 앞에서 언급하였듯이 건조지수와 달리 Horton 지수는 기후적 특성, 식생, 유역의 물리적 특성이 포함된 지수이다. 우리나라 유역의 수문반응을 평가할 목적으로는 기후학적 기반인 건조지수보다는 수문학적 기반인 Horton 지수가 더 적합할 것으로 판단되며, 추후 식생과 유역 수문반응의 관계에 관한 연구가 추가될 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 유역 수문반응에 기후 및 유역특성이 미치는 영향의 경향성을 알아보고자 연 간격 자료를 사용하였다. 그렇기 때문에 본 연구는 유역 수문반응의 계절적 변동성에 제외되고 분석이 진행되었다. 우리나라의 경우 계절 간의 변동성이 다른 지역에 비해 뚜렷하게 나타나므로, 수문반응을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 계절적 변동성 역시 고려되어져야 한다. 따라서 추후에는 이러한 계절적 변동성이 고려된 분석이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2012R1A1A4A01 011920).

References

Budyko, M. I. (1974). “Climate and life.” Academic. San Diego. Calif, p. 508.

Choi, D. and Kim, S. (2010). “Revisiting horton index using a conceptual soil water balance model.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineering, Vol. 30, No. 5B, pp. 471-477 (in Korean).

Choi, D., Choi, M., Ahn, J., Park, M. J. and Kim, S. (2011). “Variability of hydrologic partitioning revisiting horton index.” *Journal of Korean Wetlands Society*, Korean Wetlands Society, Vol. 13, No. 1, pp. 35-44 (in Korean).

Chow, W. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*, McGraw-Hill, Book Company, New York, USA.

Farmer, D., Sivapalan, M. and Jothityangkoon, C. (2003). “Climate, soil and vegetation controls upon the variability of water balance in temperate and semi-arid landscapes: Downward Approach to Hydrological Prediction.” *Water Resource Research*, Vol. 39, No. 1035, DOI:10.1029/2001WR000328.

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

Knapp, A. K. and Smith, M. D. (2001). “Variation among biomass in temporal dynamics of aboveground net primary production.” *Science*, Vol. 291, pp. 481-484.

Kim, S. D., Lee, A. Y., Lee, J. W. and Kim, T. W. (2011). “Spatio-temporal analysis of future extreme drought events using a conceptual soil water model.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 11, No. 6, pp. 349-356 (in Korean).

Lee, J. S. (2006). *Hydrology*, Goomibook (in Korean).

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.

Milly, P. C. (1994). “Climate, soil water storage, and the average annual water balance.” *Water Resource Research*, Vol. 30, No. 7, pp. 2143-2156.

Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A. and Delworth, T. L. (2008). “Climate change-Stationarity is dead: Whither Water Management?” *Science*, Vol. 319, No. 5863, pp. 573-574.

Penman, H. L. (1948). “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. 120-146.

Rodriguez-Iturbe, I. and A. Porporato (2004). “Ecohydrology of water controlled ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics.” Cambridge Univ. Press, New York.

Sivapalan, M., Yaeger, M. A., Harman, C. J., Xu, X. and Troch, P. A. (2011). “Functional model of water balance variability at the catchment scale. 1: Evidence of Hydrologic Similarity and Space-Time Symmetry.” *Water Resources Research*, Vol. 47, W02522, DOI:10.1029/2010WR009568.

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.

Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P. A. and Woods, R. A. (2007). “Catchment classification and hydrologic similarity.” *Geography Compass*, Vol. 1, No. 4, pp. 901-931, DOI:10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x.

Zhang, L., Hickel, K. Dawes, W. R., Chiew, F. H. S., Western, A. W. and Briggs, P. R. (2004). “A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration.” *Water Resources Researches*, Vol. 40, W02502, DOI:10.1029/2003WR002710.