

工學碩士 學位論文

유역 스케일에서 수문분할과
식생반응에 대한 기후 및 지형특성의
영향분석



2013年 8月

釜慶大學校 大學院

環境工學科

朴允京

工學碩士 學位論文

유역 스케일에서 수문분할과
식생반응에 대한 기후 및 지형특성의
영향분석

共同指導教授 姜 壬 錫

共同指導教授 金 上 旦

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2013年 8月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

朴 允 京

朴允京의 工學碩士 學位論文을
認准함

2013年 8月



主 審 工學博士 李濟根



委 員 工學博士 金一奎



委 員 工學博士 姜壬錫



목차

I. 서론	1
II. 연구 방법	7
1. 연구 대상구역	7
2. 자료구축방법	8
가. 기상 자료	8
나. 유출량 자료	12
다. 수문지수 산정	14
라. 지형특성 자료	15
마. 식생 자료	17
III. 결과 및 고찰	21
1. 기후상태에 따른 수문분할요소 특성 분석	21
가. 연구적용지역 및 연구기간	22
나. 기후상태에 따른 수문분할에 대한 기후특성의 영향	24
다. 기후상태에 따른 수문분할에 대한 기후 및 지형특성의 영향	33
2. 수문분할요소에 대한 기후 및 지형특성의 상대적 역할분석	42
가. 연구적용지역 및 연구기간	43
나. 유역 수문분할과 기후특성의 관계	44
다. Horton 지수와 기후 및 지형특성과의 관계	48
3. 수문요소와 식생반응에 대한 기후 및 지형특성과의 관계	55
가. 자료구축	56
나. 유역 수문분할과 기후특성의 관계	59
다. Horton 지수와 기후 및 지형특성과의 관계	63
라. 식생반응과 수문분할요소와의 관계	71

IV. 결론 77

참고문헌 80

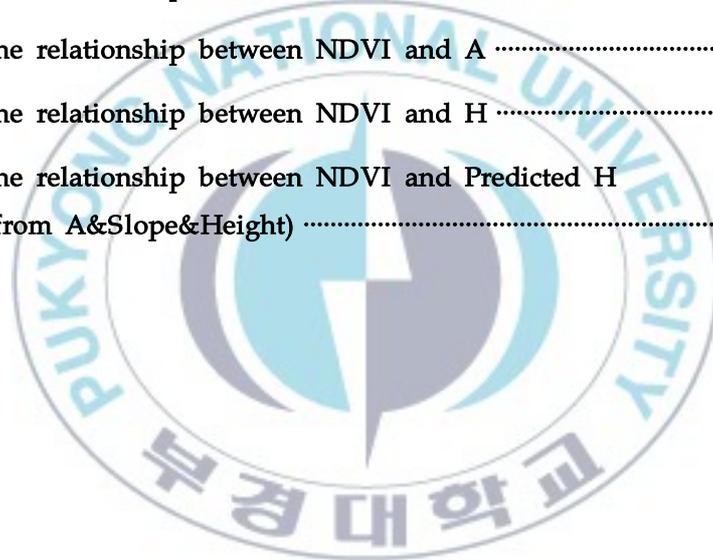


List of Figures

Fig. 1.1 Hydrologic partitioning at the land surface	2
Fig. 2.1 Study area	7
Fig. 2.2 WAMIS homepage (www.wamis.go.kr)	8
Fig. 2.3 Thiessen polygons	12
Fig. 2.4 ASTER homepage (http://asterweb.jpl.nasa.gov/)	15
Fig. 2.5 NDVI download website (http://free.vgt.vito.be/)	18
Fig. 2.6 Comparison between NDVI in summer and NDVI in winter	18
Fig. 3.1 Study area	22
Fig. 3.2 The relationship between P and V (separated by Aridity index)	25
Fig. 3.3 The relationship between P and V (separated by Horton index)	25
Fig. 3.4 The relationship between PET and V (separated by Aridity index)	27
Fig. 3.5 The relationship between PET and V (separated by Horton index)	27
Fig. 3.6 The relationship between P and W (separated by Aridity index)	29
Fig. 3.7 The relationship between P and W (separated by Horton index)	29
Fig. 3.8 The relationship between PET and W (separated by Aridity index)	30

Fig. 3.9 The relationship between PET and W (separated by Horton index)	30
Fig. 3.10 A comparison of V and predicted V(from P)	35
Fig. 3.11 A comparison of V and predicted V(from P&Slope)	35
Fig. 3.12 A comparison of V and predicted V(from P&Height)	36
Fig. 3.13 A comparison of V and predicted V(from P&CN)	36
Fig. 3.14 A comparison of W and predicted W(from P)	39
Fig. 3.15 A comparison of W and predicted W(from P&Slope)	39
Fig. 3.16 A comparison of W and predicted W(from P&Height)	40
Fig. 3.17 A comparison of W and predicted W(from P&CN)	40
Fig. 3.18 Study area in Nakdong river	43
Fig. 3.19 The relationship between V and PET	46
Fig. 3.20 The relationship between W and P	46
Fig. 3.21 The relationship between H and A	47
Fig. 3.22 A comparison of H and predicted H(from P)	52
Fig. 3.23 A comparison of H and predicted H(from P&Slope)	52
Fig. 3.24 A comparison of H and predicted H(from P&Height)	53
Fig. 3.25 A comparison of H and predicted H(from P&CN)	53
Fig. 3.26 Study area	57
Fig. 3.27 The relationship between V and PET	61
Fig. 3.28 The relationship between W and P	61
Fig. 3.29 The relationship between H and A	62
Fig. 3.30 A comparison of H and predicted H(from A)	67

Fig. 3.31 A comparison of H and predicted H(from A&Slope)	67
Fig. 3.32 A comparison of H and predicted H(from A&Height)	68
Fig. 3.33 A comparison of H and predicted H(from A&CN)	68
Fig. 3.34 A comparison of H and predicted H(from A&Slope&Height)	69
Fig. 3.35 The relationship between NDVI and P	73
Fig. 3.36 The relationship between NDVI and W	73
Fig. 3.37 The relationship between NDVI and V	74
Fig. 3.38 The relationship between NDVI and A	74
Fig. 3.39 The relationship between NDVI and H	75
Fig. 3.40 The relationship between NDVI and Predicted H (from A&Slope&Height)	75



List of Tables

Table. 3.1 Geometry data in study area	23
Table. 3.2 Result of relationship between V and P	32
Table. 3.3 Result of relationship between W and P	32
Table. 3.4 Result of relationship between V and Predicted V	37
Table. 3.5 Result of relationship between W and Predicted W	41
Table 3.6 Geometry data in study area	43
Table 3.7 Result of climate-hydrologic partitioning model	49
Table 3.8 Result of climate-landscape-hydrologic partitioning model	54
Table 3.9 Geometry data in study area	58
Table 3.10 Result of climate-hydrologic partitioning model	64
Table 3.11 Result of climate-landscape-hydrologic partitioning model	70
Table 3.12 Result of hydrologic partitioning-NDVI model	76

유역 스케일에서 수문분할과 식생반응에 대한 기후 및 지형특성의 영향분석



요 지

기온과 강수에 대한 변화는 어떤 방향으로든지 유역의 수문분할에 변화를 가져오게 되는데, 이러한 수문분할이 다시 유역의 식생에 어떠한 영향을 미칠 것인지에 관해서는 아직까지 명확한 결론이 내려져있지 않다. 이에 본 연구에서는 유역 스케일에서 수문분할에 미치는 요소들을 살펴보고, 유역의 습윤량과 기화량(즉, 증발산량)으로부터 추정된 식생 반응 지수와 원격 탐사된 식생 지수를 비교해보았다. 유역의 수문분할정도를 확인하기 위하여 사용된

수문학적 지수로는 Horton 지수를 사용하였다. 이 때, 식생에 의해 이용된 습윤량의 비로 표현되는 Horton 지수는 지표면에서 이용가능한 물의 양에 대한 이용 가능한 에너지의 비인 건조지수와 강한 상관성이 있다. 또한 본 연구를 통하여 Horton 지수는 유역의 평균경사, 고도, 토지이용상태의 함수임을 살펴볼 수 있으며, 따라서 Horton 지수는 유역에서 물을 얼마나 많이 그리고 얼마나 오랫동안 보유할 수 있는지를 제어하는 지형특성과도 관련이 있음을 알 수 있다. 우리나라 13개 유역 최근 10년 자료를 바탕으로 식생 생산량을 대변하는 정규화 식생지수(NDVI)를 예측하는데 있어서의 물-에너지 수지를 구성하는 성분들과 지형특성들의 상대적인 공헌도를 비교하였다. 통계분석결과로부터 NDVI의 예측성능은 Horton 지수를 이용하는 것이 강수량, 잠재증발산량, 건조지수 등을 이용하는 것보다 더 우수함을 살펴볼 수 있다. 이로부터 식생 생산량과 수문작용의 관계를 보다 올바르게 이해하기 위해서는 강수량보다는 기후와 지형특성이 복합된 식생 입장에서 이용가능한 물의 양이 중요하게 다루어져야 함을 알 수 있다. Horton 지수와 관련된 주요한 연구결과를 정리하면 아래와 같다. (1) 건조한 기후조건에서 유역의 수문분할특성은 기후적인 요소가 강하게 제어하고 있다. (2) 습윤한 기후조건으로 갈수록 유역의 수문분할특성은 기후적인 요소뿐만 아니라 지형적인 요소의 영향을 많이 받게 된다. (3) 식생 생산량은 기후적인 요소로 설명하는 것보다는 수문분할의 입장에서 설명하는 것이 예측성능을 보다 증진시킬 수 있다.

I. 서론

기후변화는 현재의 기후계가 자연적인 요인뿐만 아니라 인위적인 요인으로 인하여 변화하는 것을 의미한다. 현재 산업화, 도시화 등의 인위적인 요인으로 인한 기후변화가 빠르게 진행되고 있는 실정이다. 기후변화는 강수와 기온의 변화를 야기하고 유역의 수문학적 반응을 예측하기 어렵게 만든다 (Wagener et al. 2007). 유역의 생태수문학적 반응을 예측하는 기존의 방법들은 대부분 과거 관측값에 기초한 정상성의 가정을 기본으로 하고 있다. 이러한 가정은 미래 기후변화에 따른 수문반응을 예측하는데 신뢰성 있는 결과를 제공한다고 볼 수 없다(Milly et al., 2008). 또한 유역 내 수문요소는 단순히 기후에 의해서만 결정되는 것이 아니라 유역의 지형특성과 유역에 존재하는 식생간의 복잡한 상호작용까지 함께 고려되어 결정된다. 이러한 사실은 Fig. 1.1을 통해서도 확인가능하다. 유역에 유입된 강수가 지면에 도달하게 되면 유역의 경사, 토양 종류, 유출계수 등에 따라 토양을 적시는 토양 습윤량이 되거나 토양에 스며들지 못하고 다양한 경로로 지면 위를 경유하여 하천으로 흘러가는 지표면 유출로 분할된다. 토양 습윤량은 다시 대기 및 식생에 의해 결정되는 기화량과 중력에 의해 지중 내에서 흐름을 형성하는 지하수 유출량으로 분할된다.

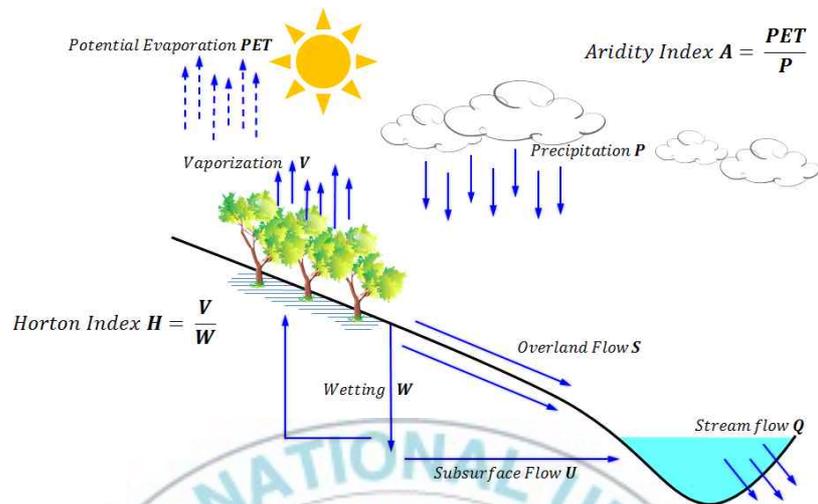


Fig. 1.1 Hydrologic partitioning at the land surface.

그렇기 때문에 유역의 수문구조는 기후특성 뿐 아니라 유역의 지형적인 특성에도 영향을 받게 된다. 따라서 기후변화를 예측하고 이를 바탕으로 하는 유역의 홍수조절, 물공급, 육상생태계 관리 등의 유역관리를 위해서는 유역 물수지에 영향을 미치는 식생의 물이용과 유역의 물리적 특성 역할에 대해 명확하게 이해할 필요가 있다.

과거 유역 물수지에 대한 연구는 주로 기후특성을 이용하여 진행되었다. Budyko(1974)는 연평균 물수지를 연평균 잠재 증발산량(PET, 대기기온, 상대습도, 지표면 순복사량의 함수)과 강수량(P)의 비인 건조지수(Aridity Index)로 정량화를 시도하였다. 전 세계의 다수의 유역 관측자료를 기반으로, 그는 실제 기화량(V) 대 강수량(P)의 비는 건조지수에 의해 산출될 수 있다고 제시하였으며(즉, $V/P=f(PET/P)$), 또한 이를 통해 지역의 연간 수문 상태 및 기후 특성을 설명하고자 하였다. 이후, 여러 수문학자(Milly, 1994; Farmer et al., 2003; Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004)들은 Budyko의

건조지수를 이용하여 기후-토양-식생의 상호작용을 설명하고자하였다. 또한 최근 연구에서는 발생시간(timing), 지속기간, 강우 사상의 계절적 변동, 식생 동역학, 토양 수분, 지형특성과 같은 요인이 기화량의 중요한 조절인자임(특히 건조기후에서)을 발견하였다(Donohue et al., 2006; Gerrits et al., 2009; Porporato et al., 2004; Yang et al., 2009; Zhang et al., 2008). 그러나 식생이 존재하는 유역에서 기화량을 정량화하는 것은 어려운 문제였다. 왜냐하면 유역 내에 존재하는 식생이 증산작용을 통해 유역의 물수지에 영향을 미치기 때문이다(Brutsaert, 1988). 증산량은 식생 종류, 밀도, 식물의 생화학적 생리학적 특성, 영양상태, 토양 및 지형특성, 기온, 이산화탄소의 농도, 습도 등에 의해서 복잡하게 결정된다(L'vovich, 1979; Shuettleworth, 1988). 따라서 현대 생태수문학분야에서 증발산량의 정량화는 매우 중요한 관심 주제 중 하나이기도 하다(Kim et al., 2011, Thompson et al., 2011).

기존에 제시된 건조지수는 기후특성 이외의 특성을 반영하고 있지 않기 때문에 건조지수가 유역 물수지를 설명하기에는 부족하다 판단을 하게 된다. 이를 보완하고자하는 노력이 여러 연구를 통해 이루어지고 있다. Zhang et al.(2001)과 Yang et al.(2007)에서는 기존의 공식에 토양 습윤량, 산림율 및 토양수분의 저류능력을 포함시켜 이를 확장하였다. Troch et al.(2009)과 Voepel et al. (2011)에서는 기화량(V)과 습윤량(W)의 비인 Horton 지수(V/W)(Horton, 1933)이라는 새로운 지표를 도입하여 유역의 물수지를 설명하였다.

Horton(1933)은 1905년부터 1929년까지 뉴욕주 헨콕시에 있는 텔라웨어강 서쪽 지류를 대상으로 물수지 성분을 측정하여 유역의 기화량과 습윤량의 비(Horton 지수)를 계산하였는데, 강수량의 큰 변동성에도 불구하고 그 비가 일정함을 발견하였다. 이를 통해 Horton은 자연유역에서 침투된 물을 저장하고 다시 대기에 환원하는 역할이 주로 식생에 의해서 제어되고 물수지 연

간변동성에 큰 영향을 준다고 생각하였으며, 식생은 이용할 수 있는 최대한의 토양수분량을 사용할 수 있을 정도로 성장한다는 가설을 세우게 된다. 이러한 가설은 물수지 변동성을 이해함에 있어서 효과적인 접근 방법에도 불구하고, 과학기술 한계로 인한 자료부족으로 인해 연구가 지속되지 못하였다. 하지만 최근 들어 장기간의 자료가 구성되고 관측하기 힘든 식생자료들이 원격탐사기술의 발전으로 인해 자료가 획득됨에 따라 물수지 변동성에 대한 연구가 다시 부각되고 있으며 이를 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다. 식생과 유역물수지가 어떠한 관계를 가지는 지 확인위하여 기본적인 접근 방법 중 하나인 강수량과 식생과의 관계 탐색에 대한 연구가 실시되었다. 일반적으로 강수량과 식생 사이에는 양의 상관관계가 있는 것으로 알려져 있으며(Frank and Inouye, 1994; Knapp and Smith, 2001; Bai et al., 2008), 지역에 따라서 강수량에 대한 식생의 반응은 조금씩 차이가 존재하는 것으로 알려져 있다(Guo et al., 2006). 하지만 강수량에 대한 식생의 반응은 아직까지 논란에 여지가 많다. Huxman et al.(2004)에서는 기후가 건조할수록 식생이 물에 대해 민감하게 반응한다고 주장하였으나, Knapp and Smith (2001), Bai et al (2008), Hu et al (2010)에서는 오히려 강수량이 증가할수록 식생의 민감도가 증가한다고 주장하였다. 특히 Knapp and Smith (2001)에서는 강수량과 식생 사이에는 밀접한 관계가 있으나 이들의 연간변동성에 있어서는 상관성이 떨어진다고 제시하였다.

유역 물수지를 이해하기 위하여 기후특성을 이용하거나 식생반응을 이해하는 연구 방법 이외에 다양한 시각에서의 접근방식이 시도되고 있다. Zanardo et al.(2012)은 프로세스기반의 연간변동성 평가분석을 적용하여 증발 지수에 대한 기후와 지형특성의 역할을 탐색하였다. Harman et al.(2011)에서는 기후특성의 변화에 대한 물수지의 지역 변동성과 연간 변동성의 민감도 분석 및 탄성도 분석을 실시하였다. 더 나아가, 단일유역 뿐만 아니라

다른 기후 및 생태특성을 보이는 다양한 유역들을 대상으로 물수지 변동성 분석한 뒤, 이를 비교하고 대조함으로써 폭넓은 수문학적 반응에 대한 이해를 시도한 바 있다(Sivapalan, 2009; Sivapalan et al., 2011). 앞서 언급한 바와 같이 Vopel et al.(2011)와 Troch et al.(2009)은 Horton 지수를 이용하여 기후, 지형특성간의 경험적인 관계를 탐색해보고자 하였다. Horton 지수는 유역에서 식생이 이용 가능한 물이 주로 지형과 토양에 영향을 받는다는 점을 제외하면, Horton 지수와 건조지수는 개념적으로 유사한 측면을 가지나 Horton 지수 자체에서 유역의 식생과 물리적 특성들이 고려된 상태이므로 건조지수보다 진보된 물수지 변동성을 나타내는 수문학적 지표라고 할 수 있다(Troch et al., 2009). 따라서 Horton 지수는 유역 스케일에서 생태학과 수문학 프로세스 사이의 상호작용을 탐색하는 생태수문학적인 이론을 정립할 때 중요하게 적용될 수 있다(Troch et al., 2009; 최대규와 김상단, 2010; 최대규 등, 2011). 또한 Horton 지수를 구성하는 토양 습윤량과 증발산량의 변화 속에서 독립적으로 관측된 식생자료를 살펴봄으로서 식생과 수문분할에 대한 기후와 지형의 상호작용 및 상대적인 중요도를 살펴보는 도구로 제공될 수 있다(Thompson et al., 2011).

따라서 본 연구에서는 Horton 지수를 이용하여 유역 생태계의 물 순환에 대한 기후와 지형의 역할을 평가하고자 한다. 분석은 기후의 변동성, 식생 프로세스, 물리적인 지형 특성 등이 통합된 유역 스케일에서 이루어진다. 연구 대상지역을 우리나라 주요 13개 댐 상류유역으로 선정하여 수문분할에 있어 기후 및 지형특성의 전반적인 영향력을 확인하고자 하였다. 이를 위해 기후 특성을 대변하는 지수로서 건조지수를, 기후 및 지형특성이 함께 고려된 지수로서 Horton 지수를 도입하였다. 건조지수를 기준으로 자료를 4개 구간으로 분리한 후, 각 구간별 수문분할요소와 기후특성 간의 관계를 확인하였으며, Horton 지수 또한 4개 구간으로 자료를 분리하여 수문분할요소와 기후특

성의 관계성을 확인하였다. 이러한 두 가지 기준에 따른 분석으로부터 수문 분할에 미치는 기후적인 영향과 지형적 영향을 일차적으로 살펴볼 수 있다. 또한 기후 및 지형특성이 고려된 Horton 지수 구간별로 기후와 지형특성의 상대적인 역할을 비교분석함으로써 건조한 상태와 습윤한 상태에서 수문 분할에 미치는 기후와 지형의 상대적인 공헌도가 어떻게 변화되는지 확인할 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 유역에서의 수문분할의 연간변동성을 설명하는데 있어서 기후특성과 지형특성의 상대적인 역할이 어느 정도 될 것인지에 관한 분석이 낙동강 유역 5개 댐 상류 유역을 대상으로 수행된다.

마지막으로 유역의 연평균적인 측면에서 수문분할특성과 식생반응에 대한 기후와 지형의 역할을 확인하고자 하였다. 이는 기후의 연간변동성에 따른 수문분할특성에 미치는 영향을 제거하여 보다 직접적으로 기후와 지형의 역할을 살펴볼 수 있을 것으로 판단되기 때문이다. 또한 식생반응에 대한 수문 분할요소의 예측력을 확인하여, 식생반응에 대한 기후 및 지형특성의 영향을 추정하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상구역

비교적 양질의 강수량과 유출량 자료를 제공하고 있는 댐 상류유역을 설정하였다. 해당 지역은 인간 활동에 의한 환경적 교란이 적어 자연 생태계가 잘 유지되고 있는 지역이며, 유역 면적의 80%이상이 산림으로 분포되어 있다. Fig. 2.1은 연구에 적용한 유역을 나타낸 것이다. 각 유역에 대한 지형적 특성은 3절에서 보다 자세하게 언급할 예정이다.

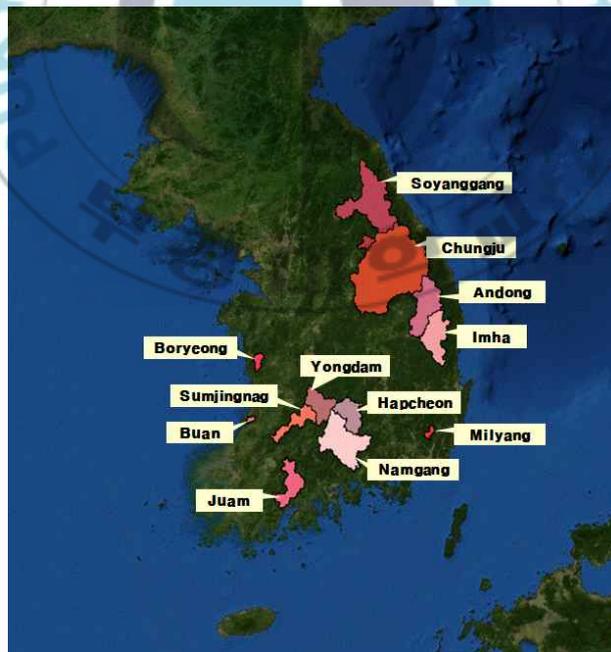


Fig. 2.1 Study area.

2. 자료구축방법

가. 기상 자료

유역에 수분을 공급하는 강수량(mm/day)은 국가 수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 관측 자료를 이용하였다(Fig. 2.2 참조).



Fig. 2.2 WAMIS homepage (www.wamis.go.kr).

잠재증발산량 자료는 Penman 방법(Penman, 1947)을 적용하였다. Penman 은 잠재증발산량을 보다 정확하게 산정하기 위하여 에너지수지 방법과 공기동력학적방법이 동시에 고려된 식(1)을 고안하였다.

$$E_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (1)$$

여기서 E_o 는 증발산량(cm/day), E_n 은 에너지수지방법에 의해 산정한 증발량(cm/day), E_a 는 공기동력학적 방법에 의해 산정한 증발량(cm/day), Δ 은 온도 대 포화증기압곡선의 기울기, γ 는 습도계 상수(mb : 0.66, mmHg : 0.485)이다. 온도 대 포화증기압곡선의 기울기는 온도 T_a 에서 온도변화에 대한 증기압변화의 기울기이므로 식(2)와 같이 표현이 가능하다.

$$\Delta \simeq (0.00815 T_a + 0.8912)^7 \quad (2)$$

에너지수지방법에 의한 증발량(E_n)은 식 (3)로 구성된다.

$$E_n = Q_n / 590 \quad (3)$$

여기서 Q_n 은 순에너지복사(cal/cm²/day)이다. 1cm³를 증발시키는데 필요한 열량이 590cal 이므로 Q_n 을 590cal/cm³으로 나누어 cm/day 단위로 환산할 수 있다. Q_n 은 식 (4)을 통해서 구할 수 있다.

$$Q_n = I_o(1 - 0.06) \left(0.18 + 0.55 \frac{n}{N} \right) - (117.74 \times 10^{-9}) T_a^4 (0.47 - 0.077 \sqrt{e_a}) \left(0.2 + 0.8 \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

I_0 는 태양상수(cal/cm²/day), T_a 는 대기의 절대온도(°C+273), e_s 는 대기온도에서의 실제증기압(mb), n 은 해당 일에 관측된 일조시간(hr), N 은 해당지역에서 최대 가능일조시간(hr)을 나타낸다.

$$E_a = (0.013 + 0.00016 W_2)(e_s - e_a) \quad (5)$$

식 (5)는 공기동력학적 방법에 의한 증발량(E_a)을 산정하는 식이다. 여기서 W_2 는 수표면으로 부터 2m 상공에서의 풍속이며, e_s 는 수표면에서의 포화증기압(mb), e_a 대기온도에서의 실제증기압(mb)이다. 잠재증발산량 산정에 보다 자세한 내용은 이재수(2006)을 참고할 수 있다.

에너지수지 방법과 공기동력학적 방법이 동시에 고려된 잠재증발산량을 산정하기 위해 필요한 일별 기상자료는 평균 기온, 풍속, 상대습도, 일조시간, 일사량 등이다. 본 연구에서는 연구 대상유역에 영향을 미치는 기상청 기상관측소 지점 자료를 이용하여 각 지점별 일별 잠재증발산량을 계산한 후, 이를 티센 평균한 잠재증발산량 자료를 구성하였다. Fig. 2.3은 우리나라 주요 기상청 관측지점을 이용하여 구축한 티센 다각형이다.

나. 유출량 자료

유출량의 자료는 관측에 필요한 비용이 많이 들기 때문에 축적된 자료 자체가 적다. 그러나 댐 상류유역의 경우에는 댐 유입량이 곧 유역의 유출량이 되므로 양질의 유출량 자료가 장기간 연속적으로 존재하게 된다. 따라서 본 연구에서는 유역의 유출량, 정확히는 댐 유입량을 유역의 유출량으로 적용하였다. 해당 자료는 WAMIS 에서 제공하고 있다.

$$Q = S + U \quad (6)$$

유역의 유출량은 식 (6)처럼 두 가지 성분으로 분할이 가능하다. Q 는 총 유출량을 의미하며 S 는 지표유출량, U 는 기저유출량이다. 현재 관측되고 있는 자료는 총 유출량이며, 해당 자료를 기저유출량과 지표유출량으로 구분하기는 어렵다. 따라서 총 유출량에서 기저유출량과 지표유출량을 분리해내고자 하는 다양한 연구들이 진행되어져 왔다. 본 연구에서는 여러 가지 방법 중에서도 Digital Filter 를 적용하였다.

Digital Filter 는 Lyne and Hollick(1979)가 개발한 기법으로서 유출량 중 지표유출량을 고주파수 영역의 신호로, 기저유출량은 저주파수 영역의 신호로 간주하여 일 유출량을 두 개의 수문성분으로 분리하는 방법이다(한국건설기술연구원, 2004).

$$U_t = aU_{t-1} + \frac{1-a}{2}(Q_t - Q_{t-1}), \quad U_t \leq Q_t \quad (7)$$

식 (7)은 Digital Filter 를 이용하여 기저유출량을 산정하는 식이다. 여기서

U_t 는 특정 t 일의 기저유출량(mm/day), Q_t 는 t 일에서의 총 유출량(mm/day), a 는 Digital Filter 계수로서 일반적으로 0.925의 값이 적용된다. 본 연구에서도 a 를 0.925로 적용하였다. 또한 유출량 자료를 시계열 역방향과 순방향으로 2번의 필터링을 수행함으로써 자료가 가지는 수치적인 오차를 줄이고자 하였다. 식 (7)을 통해서 산정된 기저유출량과 총 유출량을 식 (6)에 적용하여 유역의 지표유출량을 산정하게 된다.



다. 수문지수 산정

Horton 지수는 기화량과 토양 습윤량의 비로 구성된다.

$$H = \frac{V}{W} = \frac{P-Q}{P-S} \quad (8)$$

식 (8)은 Horton 지수를 산정하기 위한 식으로서, 연간 수문량을 기준으로 산정하게 된다. W 은 식생이 이용할 수 있는 수분의 총량인 토양 습윤량, V 는 기화량(또는 증발산량)으로서 식생이 실제로 이용한 수분량이다. 토양 습윤량은 강수량(P)에서 지표유출량(S)을 제외한 값으로, 기화량은 강수량(P)에서 총 유출량(Q)를 제외한 값으로 계산할 수 있다.

Horton 지수와 더불어 유역의 물 순환 현상을 표현하는 지수 중 하나인 건조지수는 유역의 잠재증발산량(PET)과 강수량(P)의 비로 나타낼 수 있으며 이는 식 (9)와 같이 표현가능하다.

$$A = \frac{PET}{P} \quad (9)$$

라. 지형특성 자료

유역의 지형적 특성을 나타내는 지표로 선정된 자료는 유역의 평균 표고, 평균 경사, 유출곡선지수이다.

유역의 평균표고와 평균경사는 NASA 에서 제공하는 인공위성자료인 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)로부터 도출된 자료를 이용하였다(Fig. 2.4 참조). ASTER 은 1999년 NASA 에서 발사된 Terra satellite 의 5개 감지기 중 하나이며, 2000년 2월부터 지구 표면 자료를 수집하기 시작하였다. 2009년 6월 29일부터 ASTER GDEM(Global Digital Elevation Model)이 일반인에게 공개되었으며, 전 지구의 약 99%에 해당하는 지역의 자료를 제공하고 있다. 참고로 NASA 에서 제공하는 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)의 경우 미국을 제외한 지역에서는 해상도 90 m 간격으로 자료가 제공되고 있는 반면에, ASTER 은 전 지구의 자료를 30 m 의 고해상도로 제공하고 있다. 유역의 평균경사는 앞서 구한 ASTER 표고자료를 Arc GIS 의 기본 모듈을 통해 계산하여 획득할 수 있다.

유출곡선지수(runoff curve number, CN)는 미자연자원보존국(Natural Resources Conservation Service, NRCS)에서 강수량을 침투량과 유효우량을 분리하기 위해서 개발된 경험적 지수이다. CN 크기에 영향을 미치는 인자로는 토양의 종류, 토지이용상태, 식생의 피복상태 및 선행토양함수조건 등으로 유역의 유출량과 직접적인 상관성을 가지게 된다. 따라서 CN 이 유역의 지형적 특성을 충분히 반영하고 있음을 판단하여 연구에 적용하였다. 유역의 평균 CN 은 WAMIS 에서 제공하는 자료를 이용하였다.



Fig. 2.4 ASTER homepage (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>).

마. 식생 자료

유역의 식생반응을 대변하는 지수로서 식생정규화지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)를 이용하였다. NDVI는 단위가 없는 복사 값으로 녹색 식물의 상대적인 분포량과 활동성, 엽록소 함량 및 엽량 등과 관련된 자료로 활용되고 있으며 현재까지 식생상태를 평가하는 지표 중 가장 보편적으로 사용되고 있다. -1 ~ 1 사이 값을 가지며, 1에 가까울수록 식물의 활성도가 높은 것을 의미한다. NDVI는 적외영역의 채널과 근적외영역의 채널에서 발생하는 분광 차를 이용하여 지면에 존재하고 있는 식생 특성을 파악하고자 개발된 지수이다. 식(10)은 NDVI를 구하는 식으로서 *NIR*(Near infrared ray)은 근적외선영역의 채널이며, *red*(Resolution red)는 적외영역의 채널을 의미한다.

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (10)$$

본 연구에서는 SPOT/VEGETATION(Fig. 2.5 참조)에서 제공하는 NDVI로 선정하였다. 해당 자료는 SPOT 위성의 Vegetation 감지기를 통해 촬영된 원격탐사자료로서 1 km의 공간해상도로 관측된다. 자료는 10일 간격으로 1998년부터 관측되었으며 현재에도 관측이 실시되고 있다.

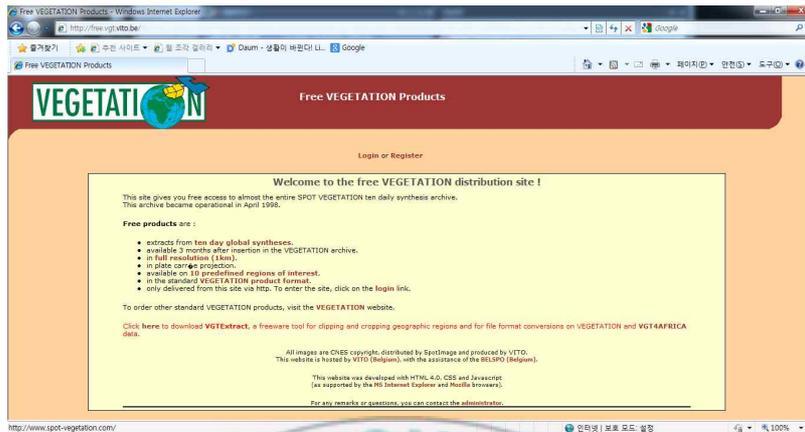


Fig. 2.5 NDVI download website (<http://free.vgt.vito.be/>).

Fig. 2.6은 2011년 8월 1일(여름)과 12월 1일(겨울)에 한반도 부근의 NDVI를 나타낸 그림으로서 초록색 부근이 식생활동이 활발한 곳이며, 붉은 색 부분은 비교적 식생활동이 활발하지 않은 곳이다. 위도가 높아지면 높아질수록 겨울에 식생활동이 적어지는 것을 시각적 자료를 통해 확인할 수 있다.

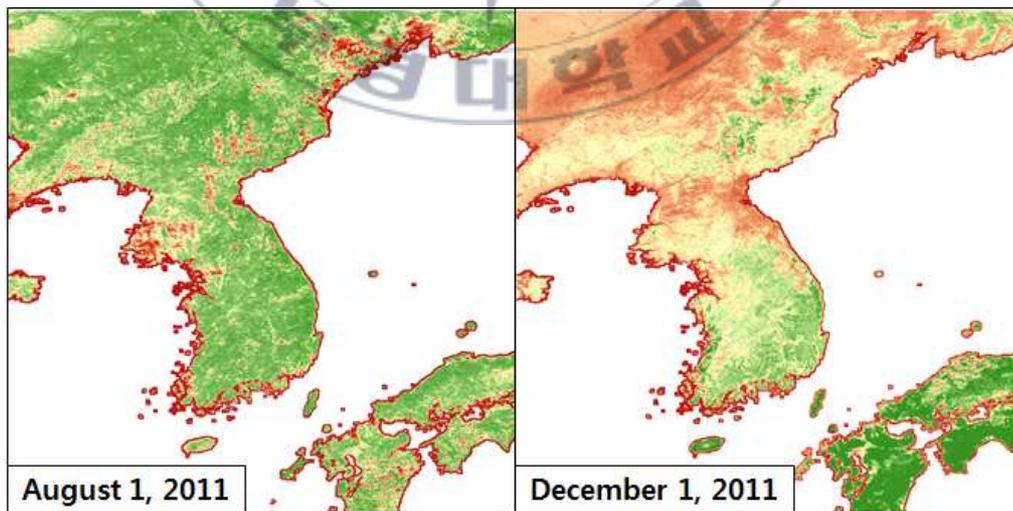


Fig. 2.6 Comparison between NDVI in summer and NDVI in winter.

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 존재하더라도 신뢰할 수 없는 자료, 즉 이상치 자료로 존재하기 때문에 자료의 신뢰성이 떨어진다. 이러한 이유 때문에 원격탐사자료의 검증이 필요하게 된다. 최치현 등(2012)은 검증 대상의 일 자료와 이 자료의 선행 2개 시계열과 후행 2개 시자료를 평균한 값의 차이가 절반 미만 또는 2배 초과가 될 경우 이를 이상치로 보고 원자료에서 제거하였다. 이후 자료의 비정상적인 잡음을 줄이기 위하여 $2n+1$ 의 이동평균(즉, 해당 일 기준으로 앞의 2개 자료, 뒤의 2개자료, 해당 일 자료 등 4개의 자료의 평균)을 계산하여 이를 해당 일의 값으로 간주하였다. 만약 이때 이동평균을 위해 필요한 선행 및 후행 자료들 중 1개라도 존재하지 않으면 해당 일은 결측된 것으로 간주하였다.

이러한 과정을 거쳐 수정된 10일 간격 NDVI 자료는 같은 월에 해당되는 자료 중에서 최고 값을 해당 월을 대표하는 값으로 하여 NDVI 월 자료를 구축하였다. 이 때 만약 해당 월에 10일 간격 NDVI 자료가 하나라도 존재하지 않는다면 월 NDVI 자료는 결측으로 처리하였다. 마지막으로 월 NDVI의 결측값이 있을 경우에는 코사인 함수를 이용하여 결측된 자료를 내삽하였다. 식 (11)은 자료의 결측값을 보완하기 위한 코사인 함수이다. 수정된 NDVI 월 자료를 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RSME)를 최소화하는 방향으로 매개변수 α 와 β 를 찾아 식을 완성한 뒤, 이를 이용하여 자료를 보완하였다.

$$NDVI_{edited,m} = \overline{NDVI} + \alpha \cos\left(\frac{2\pi}{12}t_m + \beta\right) \quad (11)$$

여기서 $NDVI_{edited,m}$ 은 추정된 m 월 NDVI 값을 나타내며 \overline{NDVI} 는 수정된 NDVI m 월 자료의 평균, α 는 NDVI 평균 값으로부터 최대 및 최소 편차, β 는 NDVI가 최대가 되는 월을 의미하며, t_m 은 월이다.



Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 기후상태에 따른 수문분할요소 특성 분석

기후특성을 대변하는 지수로서 건조지수를, 기후 및 지형특성을 모두 포괄하는 지수로서 Horton 지수를 도입하여 수문분할에 미치는 기후와 지형의 상대적인 역할을 살펴보고자 한다. 건조지수를 기준으로 자료를 4개 구간으로 분리한 후, 각 구간별 수문분할요소와 기후성분들 사이의 관계를 살펴보았다. 또한 Horton 지수 역시 건조지수와 동일하게 4개의 구간으로 분리한 후, 각 구간별 수문분할요소와 기후성분들 사이의 관계를 살펴보았다. 이러한 두 가지 기준에 따른 분석으로부터 수문분할에 미치는 기후적인 영향과 지형적 영향을 일차적으로 살펴볼 수 있다. 또한 기후 및 지형특성이 고려된 Horton 지수 구간별로 기후와 지형특성의 상대적인 역할을 비교분석함으로써 건조한 상태와 습윤한 상태에서 수문분할에 미치는 기후와 지형의 상대적인 공헌도가 어떻게 변화되는지 확인하였다.

가. 연구적용지역 및 연구기간

연구 유역은 한강 수계에서 충주댐, 횡성댐, 소양강댐, 금강수계에서 용담댐, 보령댐, 부안댐, 섬진강 수계에서 섬진강댐, 주암(본)댐, 낙동강 수계에서 안동댐, 임하댐, 밀양댐, 남강댐, 합천댐으로 하여 총 13개의 주요 댐 상류유역을 설정하였다. Fig. 3.1은 연구유역을 나타내었으며, Table 3.1은 각 유역의 지형적 특성을 정리하였다. 연구기간은 2002년부터 2011년까지 총 10년간이며, 이때의 기후특성의 자료는 2절의 방법으로 연 자료로 구축하였다.

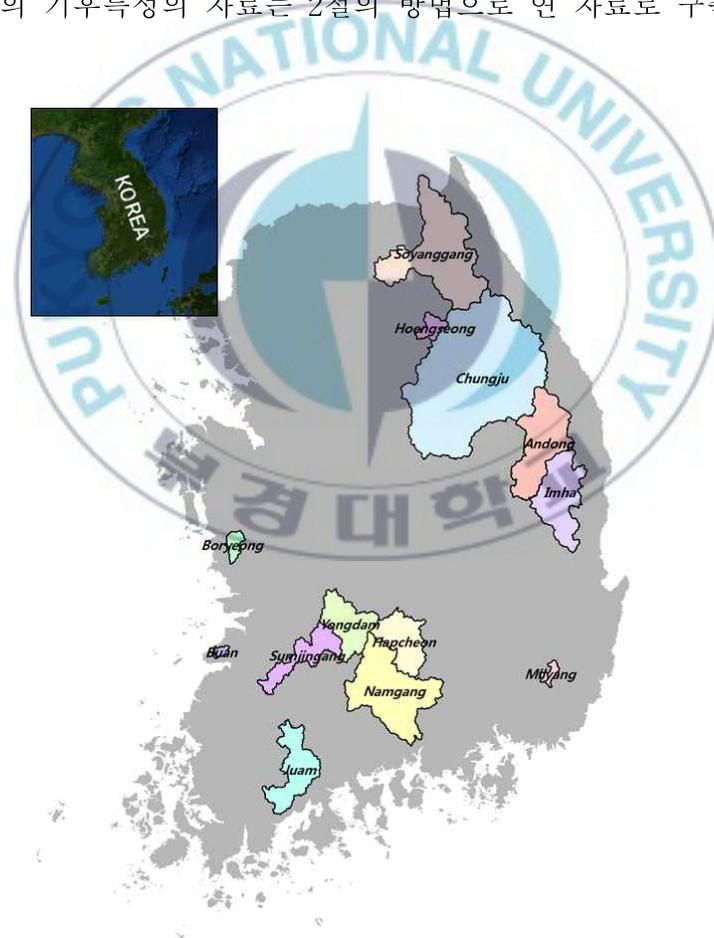


Fig. 3.1 Study area.

Table. 3.1 Geometry data in study area

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

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

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

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

나. 기후상태에 따른 수문분할에 대한 기후특성의 영향

기화량과 관련있는 것으로 알려진 기후변수인 강수량은 연증발산량 예측을 위한 설명변수로 자주 적용된다. 실제 우리나라 지역을 대상으로 연별 자료에 적용한 결과, 문헌에서와 같은 관련성을 살펴보기 어려웠다. 그러나 Fig. 3.2와 같이 건조지수를 기준으로 구간을 분할한 분석에서 건조지수가 1보다 큰 경우, 즉 건조한 기후상태에서는 강수량과 기화량이 양의 상관관계를 맺고 있음을 살펴볼 수 있다. 이는 건조한 기후상태에서 강수량의 증가가 기화량의 증가로 직접적으로 연결되지만 습윤한 기후상태에서는 강수량의 증가가 반드시 기화량의 증가로 귀결되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 참고로 본 연구에서 적용한 자료의 기준으로 할 경우 연 강수량 1,000mm 이하일 경우에는 건조지수가 1보다 큰 값을 가지는 것으로 나타난다. 건조지수 구간별 분석에서는 건조한 기후상태의 경우에만 강수량과 기화량이 서로 양의 상관관계를 맺고 있었으나, Horton 지수 구간별 분석의 경우(Fig. 3.3)에는 모든 구간에서 일정한 강도의 양의 상관성을 보여주고 있다. 또한 Horton 지수가 보다 큰 값을 갖는 구간에서 기화량은 강수량에 비례하여 증가하고 있다. Horton 지수가 크다는 것은 유역의 대기로부터 받은 물에 비교하여 다시 대기로 환원시키는 물의 양이 많다는 것인데, 이는 곧 식생이 주어진 물을 보다 효율적으로 사용한다는 의미로 해석될 수 있다.

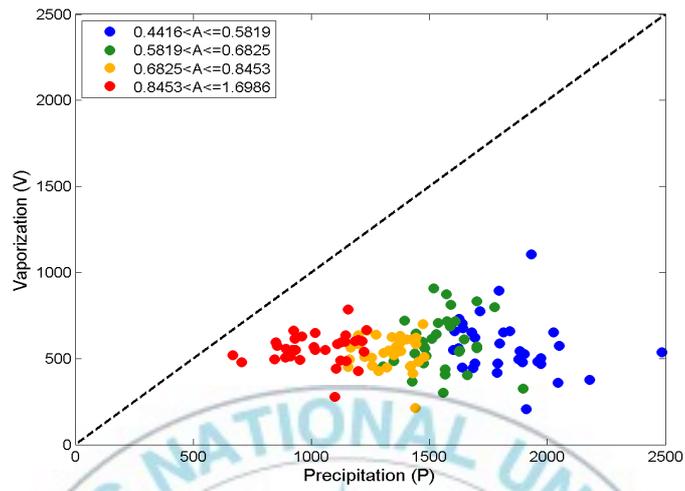


Fig. 3.2 The relationship between P and V(separated by Aridity index).

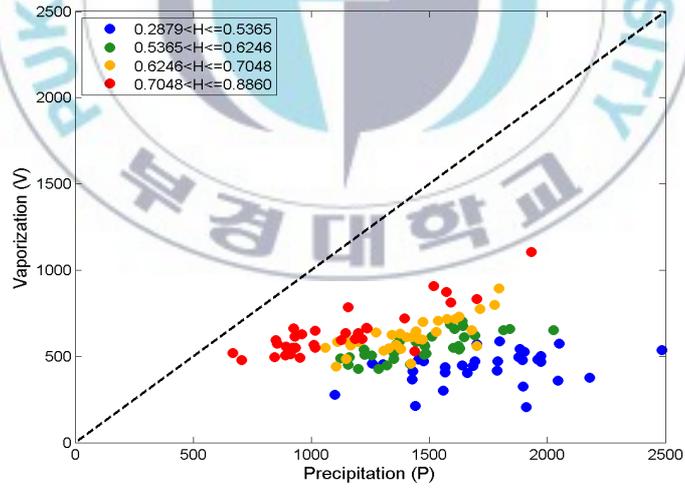


Fig. 3.3 The relationship between P and V(separated by Horton index).

선행연구에 따르면 잠재증발산량과 기화량은 서로 강한 상관성이 있다고 하였으나(Chow et al. 1988), 실제 우리나라 지역을 대상으로 연별 자료에 적용한 결과, 기존 문헌들과 달리 잠재증발산량과 기화량은 거의 상관성이 없는 것을 확인하였다. Fig. 3.4는 잠재증발산량과 기화량을 건조지수 구간별로 분석한 것이고, Fig. 3.5는 Horton 지수 구간별로 잠재증발산량과 기화량을 분석한 것이다. 건조지수 구간별, Horton 지수 구간별 분석에서도 뚜렷한 상관관계를 찾기는 힘들었다. 따라서 잠재증발산량과 기화량이 서로 강한 상관성이 있다고 보고된 많은 연구결과들은 우리나라에서는 적절하지 않음을 확인하였다.



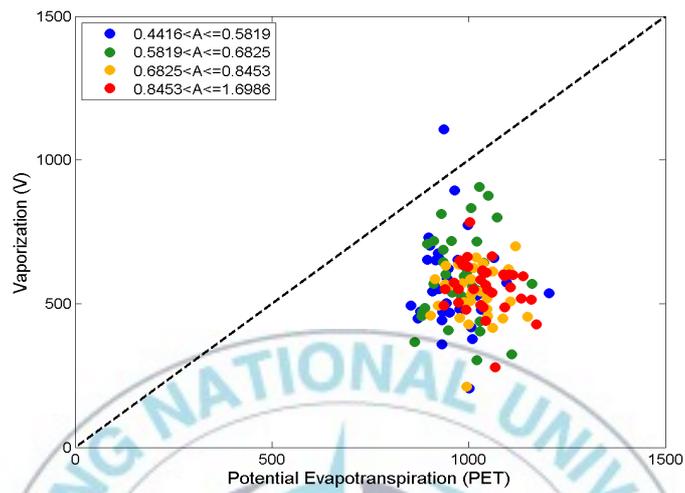


Fig. 3.4 The relationship between PET and V(separated by Aridity index).

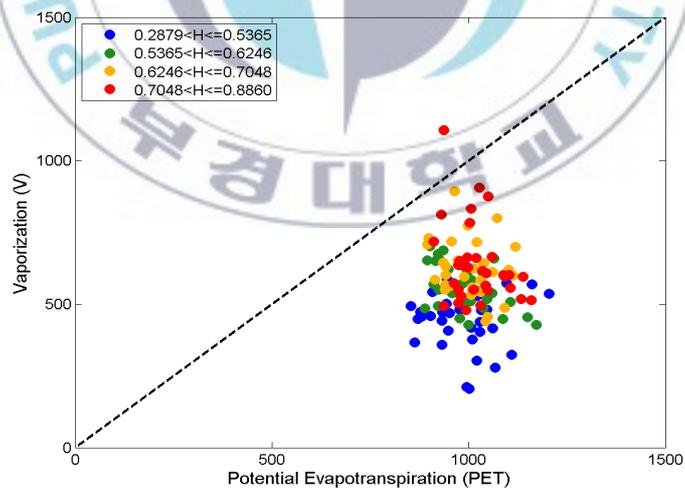


Fig. 3.5 The relationship between PET and V(separated by Horton index).

Fig. 3.6은 강수량과 토양 습윤량을 건조지수 구간별로 분석한 것이고, Fig. 3.7은 강수량과 토양 습윤량을 Horton 지수 구간별 분석을 실시한 것이다. Fig. 3.6과 3.7을 통해 토양 습윤량과 강수량은 서로 양의 상관관계를 갖고 있으며 습윤한 기후상태로 갈수록 상관성은 줄어들고 있음을 살펴볼 수 있다. 이는 토양 습윤량의 변동성을 설명하고자 할 때 비교적 습윤한 기후상태에서는 강수량의 정보만으로는 토양 습윤량의 변동성을 설명할 수 없는 부분이 많아진다는 것을 의미한다. 건조지수 구간별 분석 및 Horton 지수 구간별 분석 모두 습윤한 기후 상태로 갈수록 상관성은 줄어들고 있다. 그러나 건조지수 구간별 분석보다는 Horton 지수 구간별 분석에서 상관성이 더 크게 나타나고 있다. 이로부터 우리나라와 같이 습윤하고 강수량과 잠재증발산량의 연간 변동이 서로 영향을 미치지 않는 지역에서 유역 특성에 관한 정보가 유역의 연간 물수지 변화에 미치는 영향이 상대적으로 더 큰 것으로 판단된다.

Fig. 3.8과 3.9는 토양 습윤량과 잠재증발산량 사이의 관계를 각각 건조지수 구간별, Horton 지수 구간별로 구분하여 분석한 결과이다. 기화량과 잠재증발산량 사이의 상관성과 마찬가지로 토양 습윤량과 잠재증발산량 사이에도 특별한 상관성을 찾아볼 수 없었다. 이를 통해 우리나라 유역의 경우 수문성분과 잠재증발산량 사이의 밀접한 관계를 찾아보기는 매우 어려운 것으로 판단된다.

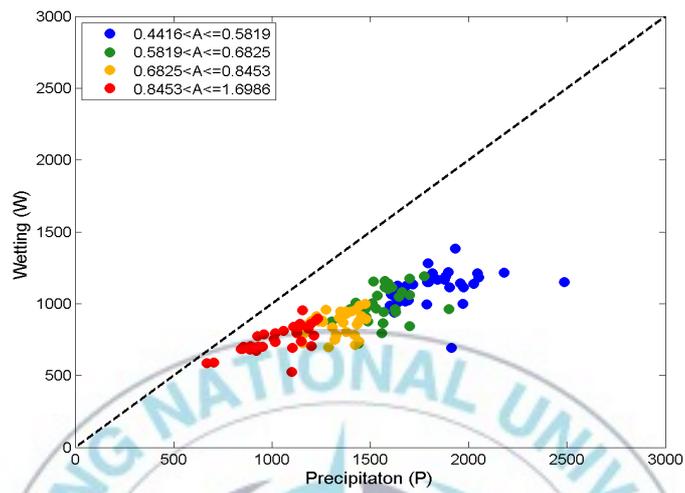


Fig. 3.6 The relationship between P and W(separated by Aridity index).

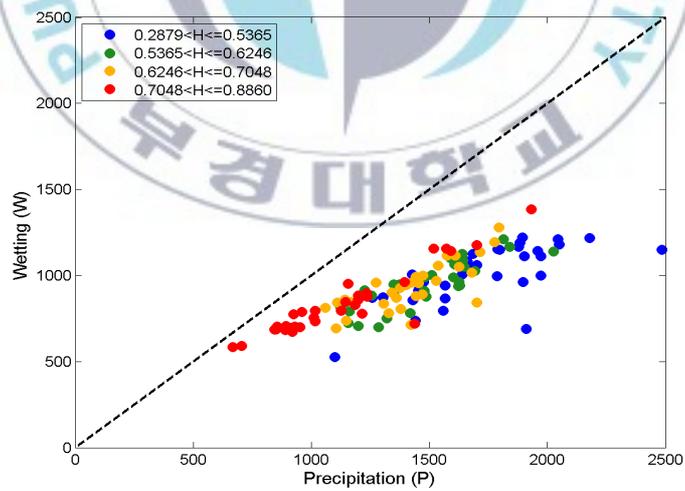


Fig. 3.7 The relationship between P and W(separated by Horton index).

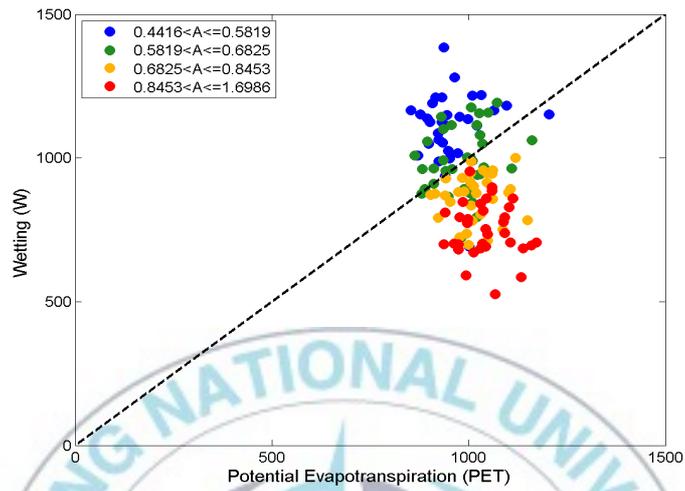


Fig. 3.8 The relationship between PET and W(separated by Aridity index).

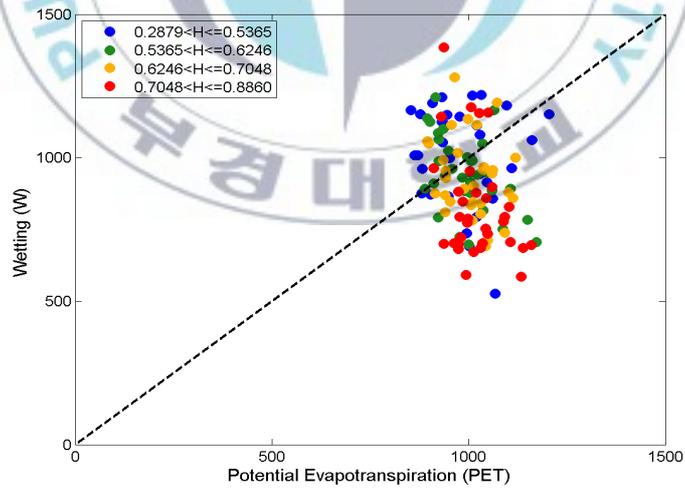


Fig. 3.9 The relationship between PET and W(separated by Horton index).

수문성분의 주요한 구성성분인 기화량과 토양 습윤량은 모두 강수량과 유의한 상관성이 있음을 알 수 있다. Table 3.2는 강수량을 이용하여 기화량의 회귀 분석 모의 결과를, Table 3.3은 강수량을 이용한 토양 습윤량의 회귀 분석 모의결과를 각각 건조지수 구간별과 Horton 지수 구간별로 구분하여 나타낸 것이다. 전체적으로 Horton 지수 구간별로 계산한 상관성이 더 크게 나오고 있음을 살펴볼 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 유역의 연간 물수지 상태를 구분할 때, 기존의 건조지수에 따른 구분보다는 유역특성이 반영된 Horton 지수에 따른 구분이 보다 더 합리적일 것이라는 결론을 얻을 수 있다. Horton 지수 구간별 모의결과를 서로 비교할 때, Horton 지수 값이 큰 구간일수록 상관성이 더 커지고 있다. Horton 지수가 크다는 것은 유역이 대기로부터 받아들이는 물의 양에 비해서 유역이 사용하는 물의 양이 더 크다는 것으로 식생이 물을 보다 더 효율적으로 이용하는 상태를 의미한다. 즉, 식생 성장에 필요한 수분이 충분하지 않게 공급될수록 식생은 물을 보다 더 효율적으로 이용하게 되며, 이 경우 수문분할특성(습윤량, 기화량 또는 Horton 지수)의 연간 변동성은 기후조건에 관한 정보(강수량, 잠재증발산량 또는 건조지수)로부터 보다 더 정확하게 예측할 수 있게 된다. 그러나 Horton 지수가 작아지게 되면, 즉 유역이 대기로부터 받아들이는 물의 양과 비교할 때 유역이 사용하는 물의 양이 작을 경우, 식생 성장에 필요한 수분공급이 충분히 많아짐에 따라 식생 성장에 사용되지 않는 물의 양이 많아진 상태가 된다. 따라서 식생은 물을 효율적으로 사용할 필요가 없어지게 되며, 이러한 경우 수문분할 특성(습윤량, 기화량 또는 Horton 지수)의 연간 변동성은 기후조건에 관한 정보(잠재증발산량, 강수량, 또는 건조지수)만으로는 명확하게 설명할 수 없게 되는 것이다.

Table. 3.2 Result of relationship between V and P

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

Table. 3.3 Result of relationship between W and P

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

다. 기후상태에 따른 수문분할에 대한 기후 및 지형 특성의 영향

수문분할요소에 대한 기후특성의 영향분석을 통하여 건조기후조건에서 습윤한 기후조건으로 갈수록 유역의 수문분할 특성은 기후적인 요인만으로 설명할 수 없는 부분이 커짐을 확인하였다. 이러한 현상은 기후특성 이외의 유역이 가지는 지형적 특성에 의해 설명될 수 있을 것으로 예측된다. 따라서 유역의 지형특성 중 가장 먼저 고려해볼 수 있는 요소는 고도, 경사, 토지이용특성, 토양특성 등이 될 것이다. 고도 및 경사는 위성자료로부터 추출이 가능하며, 토지이용특성과 토양특성은 CN 을 통하여 통합적으로 살펴보는 것이 가능할 것이다.

분성방법은 기후특성과 유역특성이 고려된 회귀모형을 통해 수문분할요소를 예측하고자 하였다. 먼저 기화량에 대한 기후 및 유역특성의 영향 분석결과는 다음과 같다. Fig. 3.10~13까지는 지형적 특성에 대한 항목을 달리하여 예측된 기화량에 대한 결과를 나타낸 그림이다. Fig. 3.10은 지형적 특성에 대한 개선율을 비교하기 위하여 단순히 강수량만을 이용하여 기화량을 모의한 결과를 나타내었다. Horton 지수가 낮은 구간에서 기화량 예측정도가 다른 구간에 비해 떨어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.11은 강수량과 유역 평균경사를 이용하여 기화량을 모의한 결과이다. 강수량만을 이용하였을 때 보다 나은 상관성을 보이고 있으나 육안으로는 그 차이를 확인하기가 힘들다. 강수량과 유역 평균 고도를 이용하여 기화량을 예측한 결과(Fig. 3.12)에서도 기후특성 단독으로 기화량을 예측하는 것보다 나은 예측력을 보여주고 있다. 예측된 기화량과 관측된 기화량의 선형상관성은 평균 CN 을 포함하여 분석하는 것이 가장 높은 결과(Fig. 3.13)를 보이고 있으나, 강수량만으로 기화량을 예측하는 경우에 보다 예측 정확도가 개선되었음을 알 수 있다.

Table 3.4는 이러한 예측항목별 모의결과를 Horton 지수 구간별로 구분하여 정리한 것이다. 예측 정확도 측면에서 가장 개선되는 경우인 유역의 평균 CN 값을 고려하여 기화량을 예측한 결과, Horton 지수가 가장 큰 구간의 경우 강수량만을 이용하여 예측할 경우의 결정계수 0.6720에서 유역 평균 CN 이 포함된 경우에는 0.7154로 증가하였다. 반면에 Horton 지수가 가장 작은 구간의 경우에는 0.0886에서 0.2883로 대폭 결정계수가 증가하였음을 살펴볼 수 있다.



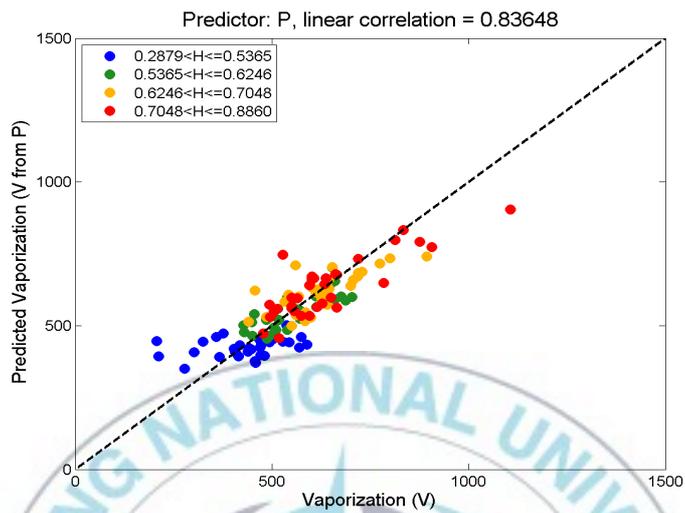


Fig. 3.10 A comparison of V and predicted V(from P).

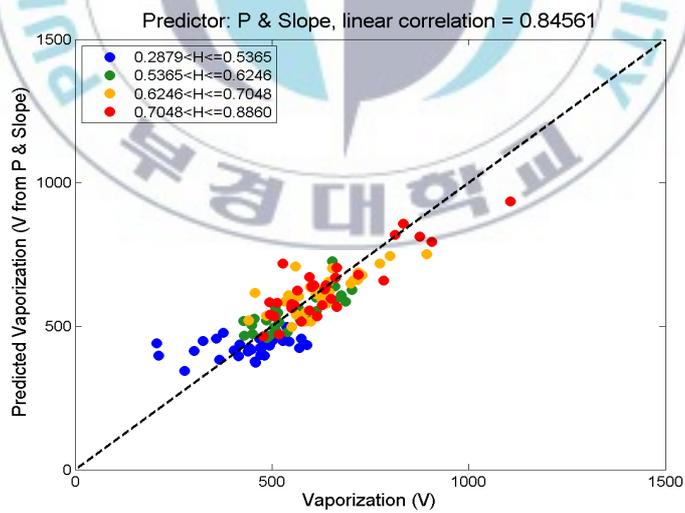


Fig. 3.11 A comparison of V and predicted V(from P&Slope).

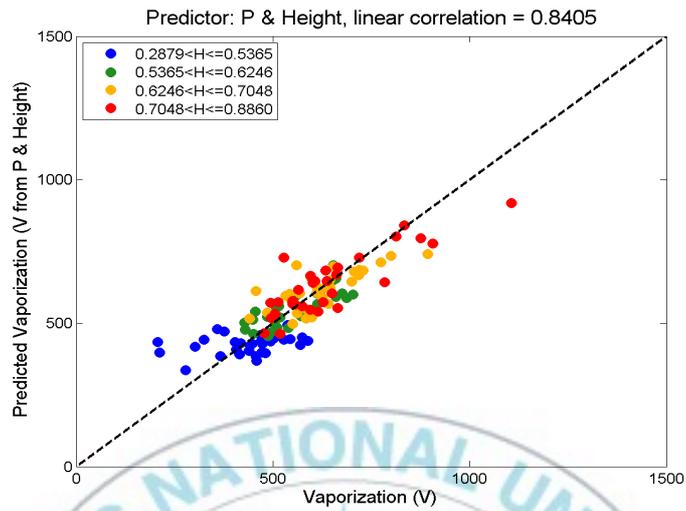


Fig. 3.12 A comparison of vaporization and predicted vaporization(from P&Height).

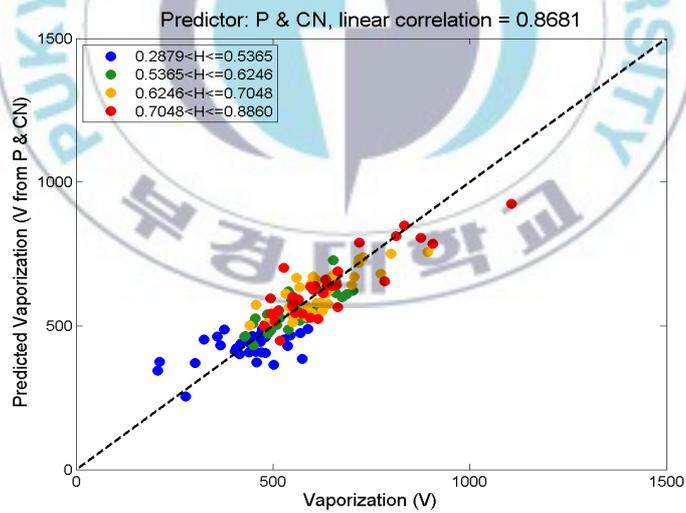


Fig. 3.13 A comparison of vaporization and predicted vaporization(from P&CN).

Table. 3.4 Result of relationship between V and Predicted V

Range of Horton index	Predictor			
	P	P & Slope	P & Height	P & CN
$0.2879 < H \leq 0.5365$	0.0886	0.0904	0.0935	0.2883
$0.5365 < H \leq 0.6246$	0.5821	0.5973	0.5822	0.6663
$0.6246 < H \leq 0.7048$	0.5009	0.5048	0.5092	0.6167
$0.7048 < H \leq 0.8860$	0.6720	0.7038	0.6894	0.7154

Fig. 3.14는 강수량을 이용하여 토양 습윤량을 모의한 결과이다. 강수량과 토양 습윤량 사이의 선형상관계수는 0.8519로서 강수량에 의해 예측된 기화량보다 나은 상관성을 보여주고 있다. Fig. 3.15는 강수량과 유역평균경사를 함께 고려하여 토양 습윤량을 예측한 결과이다. 단순히 기후특성만을 고려해 줄 때 보다 지형적 특성이 고려되었을 때 보다 나은 예측력을 보여주고 있다. Fig. 3.16은 강수량과 유역 평균 고도를 이용하여 토양 습윤량을 모의한 결과이다. Horton 지수 낮은 구간에서의 예측 성능이 보다 개선됨을 Fig. 3.14와 비교하여 육안으로 확인가능하다. Fig. 3.17은 토양 습윤량을 예측하기 위해서 강수량과 유역 평균 CN을 이용하여 분석한 결과이다. 예측된 토양 습윤량과 관측된 토양 습윤량의 상관성이 가장 높게 산정되었다. 또한 강수량만으로 토양 습윤량을 예측하는 경우보다 예측 정확도가 개선되었음을 알 수 있다.

Table 3.5는 각 예측항목별로 토양 습윤량 모의결과를 Horton 지수 구간별로 구분하여 나타낸 것이다. 예측 정확도의 측면에서 가장 개선되는 경우인 유역의 평균 CN 값을 고려하여 토양 습윤량을 예측한 결과 Horton 지수가 가장 큰 구간의 경우 강수량만을 이용하여 예측할 경우의 결정계수 0.8550에서 유역의 평균 CN이 포함된 경우 0.8858로 예측력이 소폭 증가한 반면에 Horton 지수가 가장 작은 구간의 경우에는 0.5086에서 0.7892로 결정계수가 대폭 개선되었음을 살펴볼 수 있다.

기후특성과 지형특성을 함께 고려하여 유역 수문분할요소인 기화량과 토양 습윤량을 모의한 결과, 두 수문분할 항목은 Horton 지수가 작은 구간에서 예측 정확도가 대폭으로 개선됨을 확인하였다. 이는 Horton 지수가 작은 구간, 즉 습윤한 유역상태가 될 경우 수문분할 특성에 미치는 유역 특성의 상대적인 역할이 더 커지고 있음을 나타내는 결과라고 판단된다.

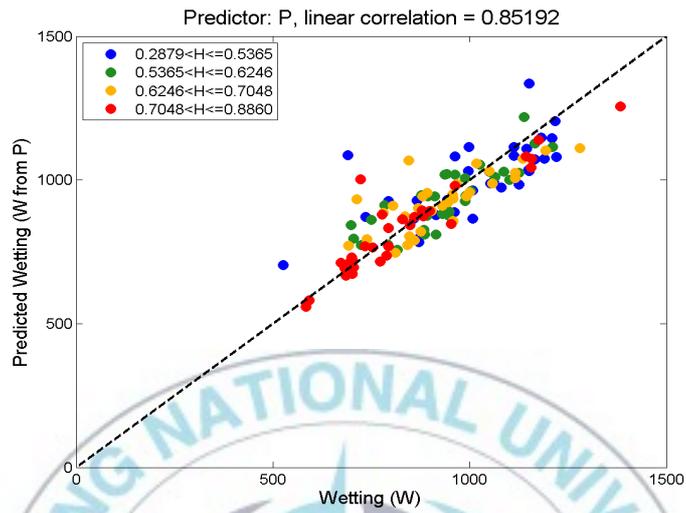


Fig. 3.14 A comparison of W and predicted W(from P).

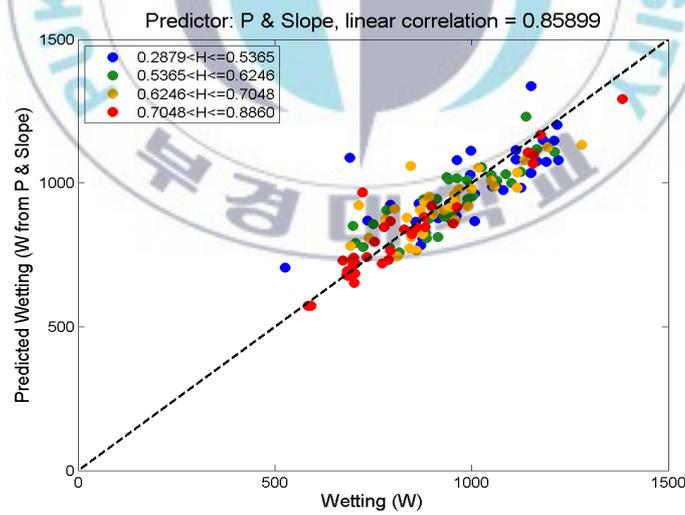


Fig. 3.15 A comparison of W and predicted W(from P&Slope).

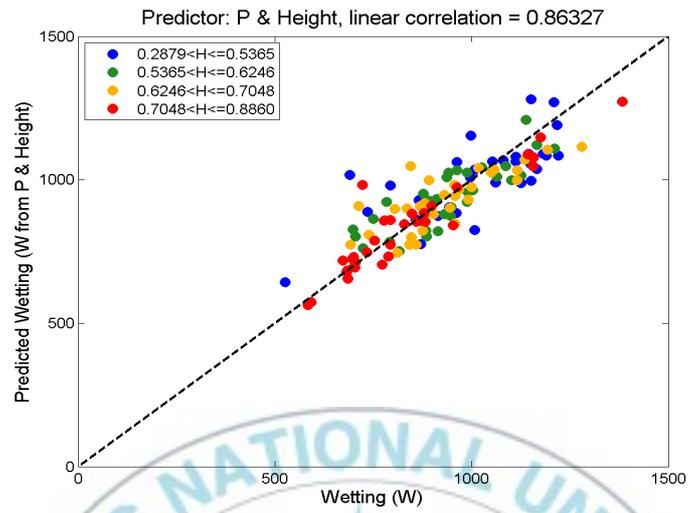


Fig. 3.16 A comparison of W and predicted W(from P&Height).

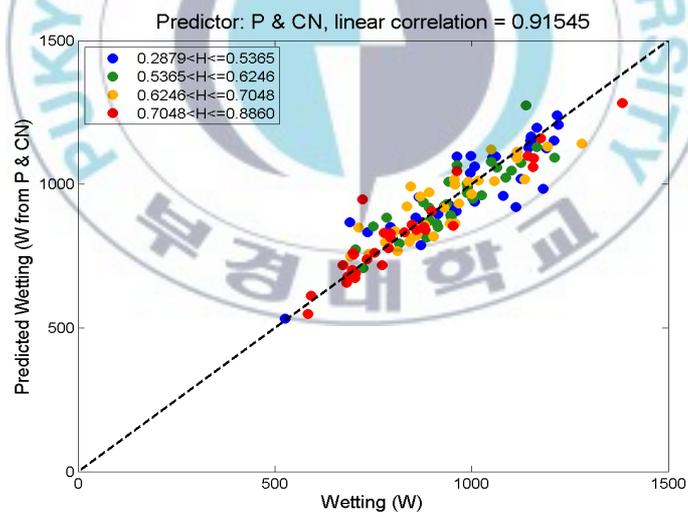


Fig. 3.17 A comparison of W and predicted W(from P&CN).

Table. 3.5 Result of relationship between W and Predicted W

Range of Horton index	Predictor			
	P	P & Slope	P & Height	P & CN
$0.2879 < H \leq 0.5365$	0.5086	0.5087	0.5658	0.7892
$0.5365 < H \leq 0.6246$	0.6739	0.6750	0.6793	0.7976
$0.6246 < H \leq 0.7048$	0.5657	0.5751	0.5865	0.7350
$0.7048 < H \leq 0.8860$	0.8550	0.8759	0.8649	0.8858

2. 수문분할요소에 대한 기후 및 지형특성의 상대적 역할 분석

3.1절에서는 우리나라 전역의 수문분할요소를 설명하는데 있어 기후특성의 영향력을 건조지수와 Horton 지수 각각을 4개의 구간별로 구분하여 분석을 실시하였다. 건조지수보다는 Horton 지수를 이용하여 수문분할요소를 설명하는 것이 보다 효과적이었다. 또한 유역이 건조한 지역일수록 수문분할요소를 모의하는데 있어 기후특성의 영향력이 컸으며 그에 비해 습윤한 지역에서는 그렇지 못함을 확인하였다. 추가적으로 기후특성이 수문분할요소를 설명하지 못하는 부분이 지형특성이 영향을 미칠 것으로 판단하여 기후특성과 더불어 지형특성을 함께 고려하여 수문분할요소를 재 모의하였다. 유역의 건조, 습윤 정도에 상관없이 기후특성과 지형특성이 함께 모의되었을 때 보다 나은 모의력을 보여주고 있었다. 특히 습윤한 유역에서는 건조한 유역에 비해서 수문분할요소를 모의함에 있어서 보다 높은 개선력을 보였다.

본 절에서는 낙동강 유역 5개 댐 상류 유역에서의 수문분할의 연간변동성을 설명하는데 있어서 기후특성과 지형특성의 상대적인 역할이 어느 정도 될 것인지를 확인하고자 하였다. 수문분할의 연간변동성을 Horton 지수로 표현하였으며, 기후 및 지형특성과 Horton 지수의 회귀분석을 통하여 Horton 지수에 기후특성과 지형특성의 영향력을 정량적으로 나타내고자 하였다.

가. 연구적용지역 및 연구기간

낙동강 수계 내에 위치하는 5개 댐 상류유역에 대해서 기후 및 지형특성을 확인하기 위하여 Fig. 3.18과 같이 연구지역을 선정하였다. 선정된 유역은 안동댐, 임하댐, 밀양댐, 남강댐, 합천댐으로서 각 유역의 지형적 특성은 Table 3.6에 정리하였다. 연구기간은 3.1절과 동일하게 2002년부터 2011년까지 총 10년간이며, 기후특성의 시계열 자료는 2.2절의 방법으로 구축하였다. 자료의 단위는 연단위로서 각 유역 마다 총 10개의 기후 시계열 자료가 존재하게 된다.



Fig. 3.18 Study area in Nakdong river.

Table 3.6 Geometry data in study area

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

나. 유역의 수문분할과 기후특성의 관계

수문분할에 대한 기후와 지형특성의 상대적인 중요도를 분석하기에 앞서, 우선은 Horton 지수에 유의한 영향을 미치는 기후특성에 대한 분석을 수행할 필요가 있다. 수문분할에 대한 기후특성의 영향이 어느 정도인지 파악되고 나면, 지형특성의 정보가 추가됨으로써 수문분할이 얼마나 더 잘 설명될 수 있는지를 살펴보는 것이 가능할 것이기 때문이다.

낙동강 5개 댐 유역을 대상으로 수문분할에 따른 수문성분요소와 기후특성 사이 관계성을 분석하였다. 이 때, 유역별 기후특성에 따른 차이를 살펴보기 위하여 연구대상유역을 대상으로 연별 유역별 건조지수의 평균값을 구한 후, 해당 년에서 개별 유역의 건조지수가 상기 산출한 평균 건조지수보다 작다면 그 해에 그 유역은 상대적으로 습윤한 기후상태(●)로 표기하였으며, 이와 반대로 어떤 해에 어떤 유역의 건조지수가 평균 건조지수보다 크다면 상대적으로 건조한 기후상태(▼)로 구분하였다.

Fig. 3.19는 잠재증발산량과 기화량의 관계를 분석한 결과이다. 분석 결과 앞선 연구결과와 마찬가지로 잠재증발산량과 기화량은 서로 상관성이 없음을 확인하였다. Fig. 3.20은 토양 습윤량과 강수량사이의 상관성을 나타낸 결과이다. 상대적으로 건조한 기후상태에서는 강수량과 토양 습윤량이 비슷한 값을 보이고 있다. 건조한 기후상태에서는 토양이 상대적으로 메말라 있는 상태여서 유역에 떨어지는 강수의 대부분이 토양 내로 침투되어 지표면 유출이 발생할 가능성이 줄어들기 때문이다. 반대로 상대적으로 습윤한 기후상태에서는 건조한 기후상태인 경우와 비교할 때 토양이 가지는 수분이 상대적으로 많기 때문에 지표면 유출량이 발생한 가능성이 보다 증가하게 된다. 따라서 토양 습윤량은 강수량보다 훨씬 작은 값을 갖게 된다. 전체적으로 토양 습윤량과 강수량은 서로 양의 상관관계를 갖고 있으며, 습윤한 기후상태

로 갈수록 두 자료 사이의 상관성은 점차적으로 줄어들고 있음을 또한 관찰할 수 있다. 이는 토양 습윤량의 변동성을 설명하고자 할 때, 건조한 기후상태에서보다 습윤한 기후상태에서 강수량의 정보만으로는 토양 습윤량의 변동성을 설명할 수 없는 부분이 많아진다는 것을 의미한다.

유역에서 수문분할을 나타내는 지표로 사용되는 Horton 지수와 건조지수는 상당한 상관성을 보이고 있다(Fig. 3.21). 상대적으로 건조한 기후상태에서는 두 지수의 분자 성분인 기화량이 잠재증발산량보다 훨씬 작은 반면에, 두 지수의 분모 성분인 토양 습윤량과 강수량은 상대적으로 비슷한 값을 가지므로 건조지수가 Horton 지수보다 훨씬 크게 된다. 이와는 반대로 상대적으로 습윤한 기후상태에서는 건조지수와 Horton 지수의 차이가 상대적으로 작음을 살펴볼 수 있다.



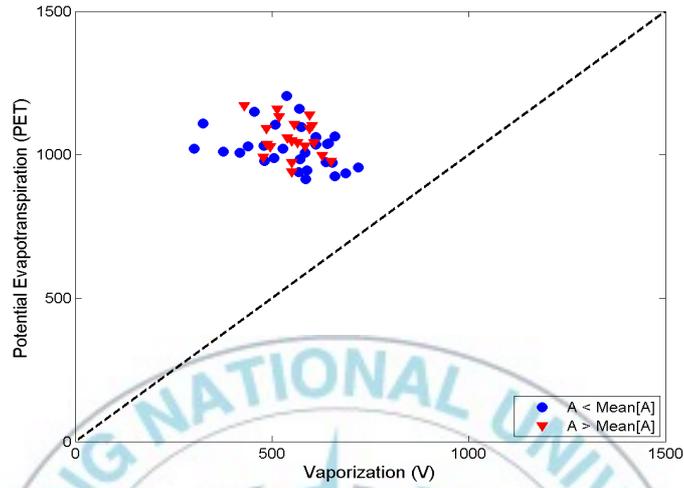


Fig. 3.19 The relationship between V and PET.

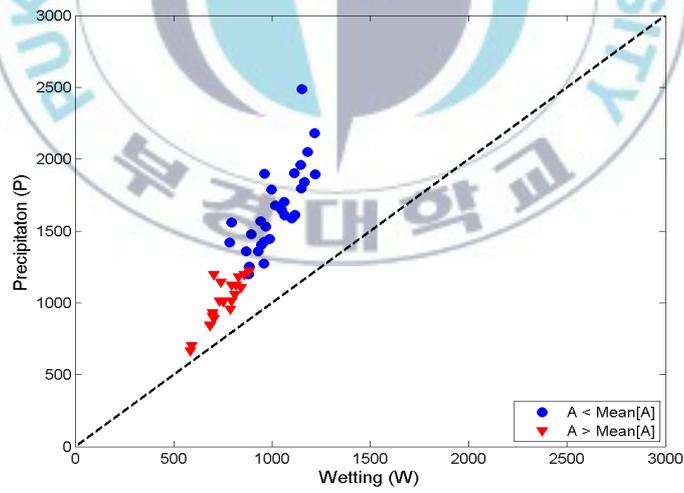


Fig. 3.20 The relationship between W and P.

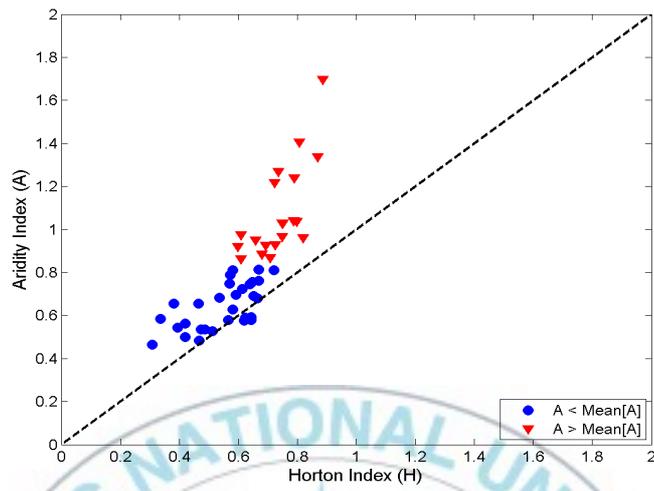
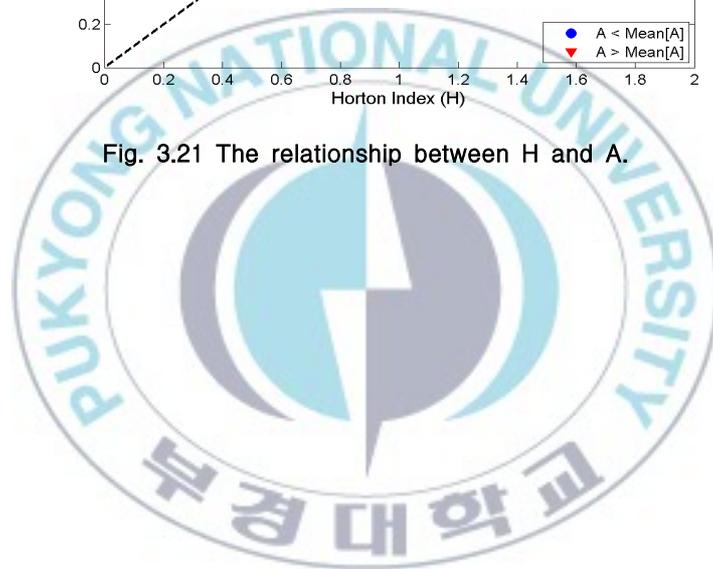


Fig. 3.21 The relationship between H and A.



다. Horton 지수와 기후 및 지형특성과의 관계

수문분할, 즉 Horton 지수에 대한 기후와 지형특성의 영향을 각각 분리하여 명확하게 살펴보는 것은 이들 변수들 사이의 복잡한 상호작용으로 인하여 매우 어려운 일이다. 예를 들어, 기온과 잠재증발산량은 고도가 올라갈수록 감소하는 경향이 있게 되며, 유역의 평균경사의 경우에는 높은 고도일수록 더 급하게 되는 경향이 있다. 따라서 단순히 단변량 회귀분석을 수행할 경우 잠재증발산량과 유역의 평균경사는 강한 역 상관관계가 있는 것으로 잘못 분석될 가능성도 존재하게 된다. 따라서 기후 및 지형특성을 함께 고려하여 Horton 지수를 예측하고자 하였다. 우선적으로 유역의 수문분할은 기후특성에 의해 일차적으로 결정된다는 선행연구의 결과를 바탕으로 기후특성을 이용하여 Horton 지수를 모의하고자 하였다. 연구에 사용된 기후특성은 강수량, 잠재증발산량이다. 이 때, Horton 지수 모의 뿐만 아니라 Horton 지수를 구성하는 수문분할요소를 기후특성으로 모의하여 Horton 지수에 기후특성이 미치는 영향을 확인하는 것과 마찬가지로 수문분할요소에 기후특성이 미치는 영향력을 확인하고자 하였다. Horton 지수와 Horton 지수의 구성성분을 모의하기 위한 방법으로 회귀분석을 적용하였다. 해당 분석결과는 Table 3.7에 나타내었다.

Table 3.7 Result of climate-hydrologic partitioning model

Response	Predictor	Model	R ²
Vaporization	• Precipitation	$\ln V = 6.8683 - 0.0796 \times \ln P$	0.0177
	• Potential evapotranspiration	$\ln V = 11.0721 - 0.6879 \times \ln PET$	0.0686
	• Precipitation • Potential evapotranspiration	$\ln V = 11.8614 - 0.0887 \times \ln P - 0.7097 \times \ln PET$	0.0904
Soil wetting	• Precipitation	$\ln W = 2.5138 - 0.5950 \times \ln P$	0.8605
	• Potential evaporation	$\ln W = 11.4187 - 0.6662 \times \ln PET$	0.0561
	• Precipitation • Potential evapotranspiration	$\ln V = 6.1808 + 0.5884 \times \ln P - 0.5212 \times \ln PET$	0.8947
Horton index	• Precipitation	$\ln H = 4.3545 - 0.6746 \times \ln P$	0.6904
	• Potential evapotranspiration	$\ln H = -0.3466 - 0.0217 \times \ln PET$	0.0000
	• Precipitation • Potential evapotranspiration	$\ln H = 5.6806 - 0.6770 \times \ln P - 0.1885 \times \ln PET$	0.6932

우선적으로 수문성분요소들 중 기화량에 대한 강수량과 잠재증발산량의 영향은 매우 미약함을 확인할 수 있다. 상대적으로 잠재증발산량이 강수량보다는 기화량에 미치는 영향이 약 4배 정도 큰 것으로 되어 있으나, 두 기후특성 모두 기화량의 변동성을 유의하게 설명해주고 있지는 못하다. 토양 습윤량의 경우에는 강수량을 이용하여 모의하였을 때 모형의 결정계수가 0.8605로 매우 높게 산정된 반면에 잠재증발산량을 이용하였을 경우에는 결정계수가 0.0561로 낮게 산정된 것을 확인할 수 있다. 앞서 토양 습윤량과 강수량의 관계성 분석을 통해서도 확인할 수 있듯이 토양 습윤량과 강수량의 경우 강한 상관성을 지니고 있다. 추가적으로 강수량과 잠재증발산량을 함께 고려하여 토양 습윤량을 모의한 모형의 결정계수는 0.8947이다. 이는 낙동강 유역의 토양 습윤량을 설명함에 있어서 강수량이 주된 영향을 미치며 잠재증발산량 역시 미비하지만 일정부분 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 토양 습윤량에 대한 기화량의 비인 Horton 지수의 경우에는 잠재증발산량보다는 강수량이 훨씬 더 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. Horton 지수 역시 강수량과 잠재증발산량을 함께 고려하였을 때에 가장 높은 모형 결정계수를 가졌다. 그러나 잠재증발산량의 영향력은 아주 미비하며, 유역의 Horton 지수는 강수에 의해 대부분이 결정된다. 따라서 Horton 지수를 예측하는 모형을 식 (12)와 같이 구성할 수 있다.

$$\ln H = 4.3545 - 0.6746 \times \ln P \quad (12)$$

Horton 지수를 모의함에 있어서 기후특성과 더불어 지형특성이 어느 정도 영향을 미치는지 확인하였다. 우선적으로 기후특성, 즉 강수량만을 이용하여 Horton 지수를 모의한 경우(Fig. 3.22) 모형의 결정계수가 0.6904이다. 추가

적으로 지형특성을 지수로 표현할 수 있는 경사, 표고, CN 각각을 기후특성과 함께 고려하였다. 가장 높은 예측력 개선을 보이고 있는 지형특성은 유역 평균 경사(Fig. 3.23)로서 Horton 지수를 모의하는 회귀모형은 식 (13)과 같다.

$$\ln H = 4.0207 - 0.7288 \times \ln P + 0.0210 \times \text{Slope} \quad (13)$$

이 때, 모형 결정계수가 0.7640으로 강수량만을 이용하여 Horton 지수를 모의할 때 보다 나은 예측력을 보여주고 있다. Table 3.8에 Horton 지수를 모의하는 회귀모형과 결정계수를 항목별로 정리하여 나타내었다.



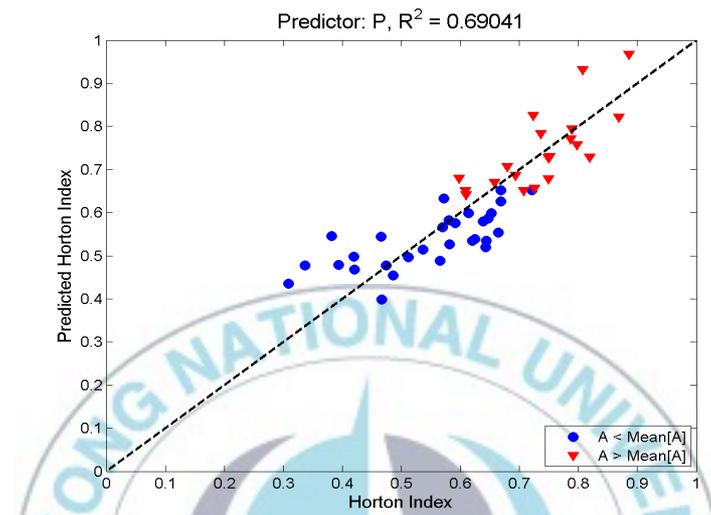


Fig. 3.22 A comparison of H and predicted H(from P).

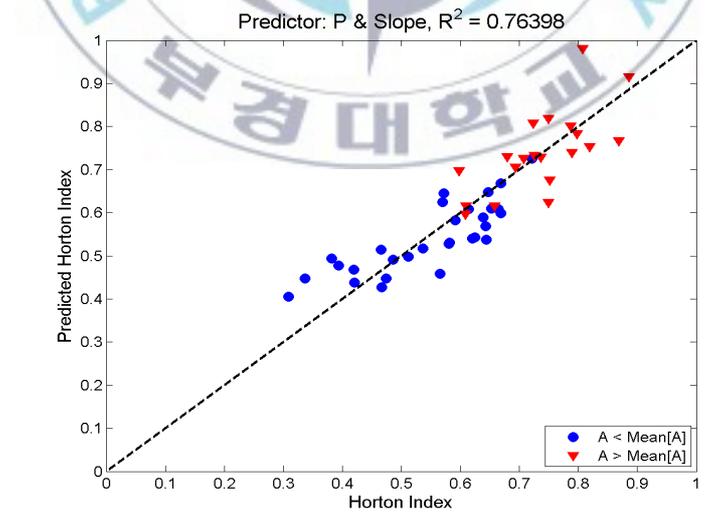


Fig. 3.23 A comparison of H and predicted H(from P&Slope).

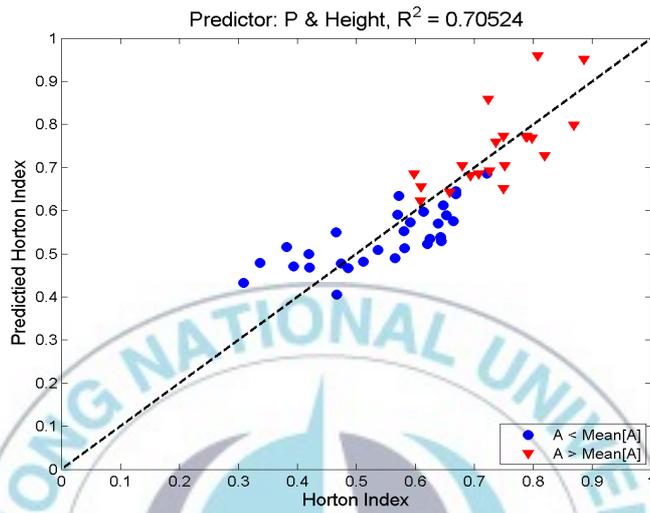


Fig. 3.24 A comparison of H and predicted H(from P&Height).

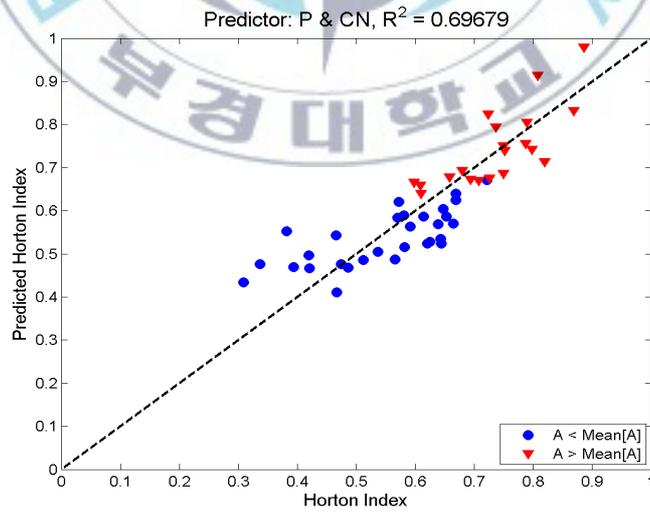


Fig. 3.25 A comparison of H and predicted H(from P&CN).

Table 3.8 Result of climate-landscape-hydrologic partitioning model

Response	Predictor	Model	R ²
Horton index	• Precipitation	$\ln H = 4.3545 - 0.6746 \times \ln P$	0.6904
	• Precipitation • Slope	$\ln H = 4.0207 - 0.7288 \times \ln P + 0.0210 \times Slope$	0.7640
	• Precipitation • Height	$\ln H = 4.5666 - 0.7213 \times \ln P + 0.0003 \times Height$	0.7052
	• Precipitation • CN	$\ln H = 4.1845 - 0.6758 \times \ln P - 0.0029 \times CN$	0.6968

3. 수문분할요소와 식생반응에 대한 기후 및 지형특성과의 관계

유역의 평균적인 측면에서 수문분할특성에 대한 기후와 지형 사이의 중요도를 살펴보고자 하였다. 이는 기후의 연간변동성에 따른 수문분할특성에 미치는 영향을 제거함으로써 보다 직접적인 기후와 지형의 역할을 살펴볼 수 있을 것으로 판단되기 때문이다. 추가적으로 유역의 물수지에 큰 영향을 미치는 식생에 대한 기후와 지형에 대해서도 살펴보고자 한다. 유역의 수문분할특성은 Horton 지수로 나타내었으며, 식생에 대한 자료는 식생반응을 지수화한 NDVI를 적용하였다. 강수량과 잠재증발산량을 기후특성으로 유역 평균 경사, 표고, CN을 지형특성으로 하여 자료를 구축하여 연구에 적용하였다.

가. 자료구축

유역 내에 존재 하는 식생은 기화량에 있어서 많은 영향을 미친다. 하지만 식생의 경우 기상자료의 연간변동성에 큰 영향을 받기 때문에 기후 및 지형 특성에 대한 식생반응과의 관계를 확인하기 위해서는 기상자료의 연간변동성의 제거가 필요하다. 따라서 유역 내 수문현상을 비교적 잘 구분해내는 수문년(水文年)을 적용하였다. 수문년 선정의 기준은 나라마다 다르게 설정되어 있으며 우리나라에서는 아직 그 기준이 정해지지 않았다. 보통은 이전 해 10월부터 당 해 9월까지의 기간을 1주기의 수문년으로 선정한다. 이에 본 연구에서도 동일한 기간을 1주기의 수문년으로 선정하였다. 2001년 10월부터 2011년 9월까지의 일 자료를 이용하여 10개의 수문년 자료를 확보하였으며, 유역의 평균적인 기후자료 획득을 위하여 확보된 10개의 수문년 자료를 다시 연 평균하여 연구에 적용하였다.

연구대상지역은 보다 평균적인 분석을 위하여 Horton 지수가 최대값, 최소값을 가지는 유역인 주암(본)댐과 남강댐 상류 유역을 제외한 우리나라 11개 주요 댐 상류유역에 적용하였다(Fig. 3.26 참조). 연구에 적용된 유역은 충주댐, 횡성댐, 소양강댐, 보령댐, 부안댐, 용담댐, 섬진강댐, 안동댐, 임하댐, 밀양댐, 합천댐 상류유역이다. Table 3.9 은 유역의 지형적 특성을 수계별로 정리한 것이다.

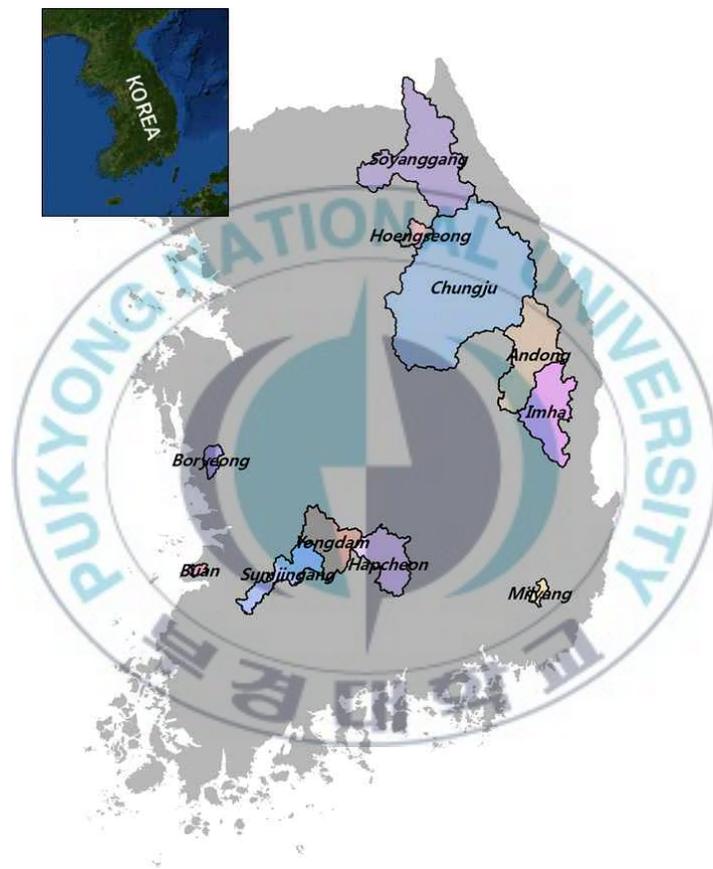


Fig. 3.26 Study area.

Table 3.9 Geometry data in study area

Han river water system					
Watershed	Chungju		Hoengseong		Soyangang
Average Slope (%)	32.7		44.4		34.6
Average Elevation (m)	430.5		549.5		237.6
Runoff Curve Number	59		55		55
Geum river water system					
Watershed	Yongdam		Boryeong		Buan
Average Slope (%)	38.1		31.4		40.5
Average Elevation (m)	180.0		361.9		644.0
Runoff Curve Number	62		63		76
Nakdong river water system					Sumjin river water system
Watershed	Andong	Imha	Milyang	Hapcheon	Sumjingang
Average Slope (%)	35.3	30.0	39.3	35.2	37.1
Average Elevation (m)	394.7	269.9	616.1	445.0	551.1
Runoff Curve Number	55	66	72	55	74

나. 유역 수문분할과 기후특성의 관계

Horton 지수와 기후 및 지형 특성 분석에 앞서서 Horton 지수가 얼마나 유역의 생태수문구조를 설명할 수 있는지에 대해서 확인하고자 하였다. Fig. 3.27~29는 증발산량, 토양 습윤량, Horton 지수 등 수문학적인 요소들과 기후특성과의 관계성을 분석하여 나타낸 그림이다. 기후상태에 따라 기후특성 차이를 설명하기 위하여 연구대상 유역의 건조지수를 평균하여 그 평균보다 개별 유역의 건조지수가 작다면 그 유역은 다른 유역에 비해서 비교적 습윤한 지역(●)으로 표기하였으며 이와 반대인 경우에는 상대적으로 건조한 지역(▼)이라 구분하였다.

증발산량과 유역의 잠재증발산량을 비교해 본 결과(Fig. 3.27), 비교적 습윤한 유역에서 증발산량과 잠재증발산량이 상대적으로 비슷한 값을 가진다. 그러나 비교적 건조한 유역에서는 증발산량에 비해서 잠재증발산량이 큰 값을 가진다. 이는 상대적으로 건조한 유역에서는 증발산량을 훨씬 초과하는 잠재증발산량을 가지고 있기 때문이다. 따라서 건조한 유역에서 식생의 성장에 에너지보다는 물이 성장의 제한요소가 될 가능성이 높다고 할 수 있다.

토양 습윤량과 강수량의 관계를 확인한 결과 건조한 유역의 토양 습윤량이 강수량과 보다 더 비슷한 값을 가졌다. 건조한 유역에서 지면에 도달한 강수의 대부분이 토양으로 스며들어 지표면 유출이 적은 반면에 습윤한 유역에서는 강수량의 상당 부분이 지표면 유출로 빠져나가기 때문에 토양 습윤량에 비해서 강수량이 비약적으로 커지게 된다(Fig. 3.28).

잠재증발산량과 강수량의 비로 산정되는 건조지수와 그리고 증발산량과 토양 습윤량으로 산정되는 Horton 지수 사이에는 어느 정도의 상관성을 가지게 된다(Fig. 3.29). 상대적으로 건조한 지역에서는 잠재증발산량이 매우 크나 그에 비해 증발산량은 비교적 작은 값을 가지며 강수량과 토양 습윤량

의 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 작아짐을 확인할 수 있다.



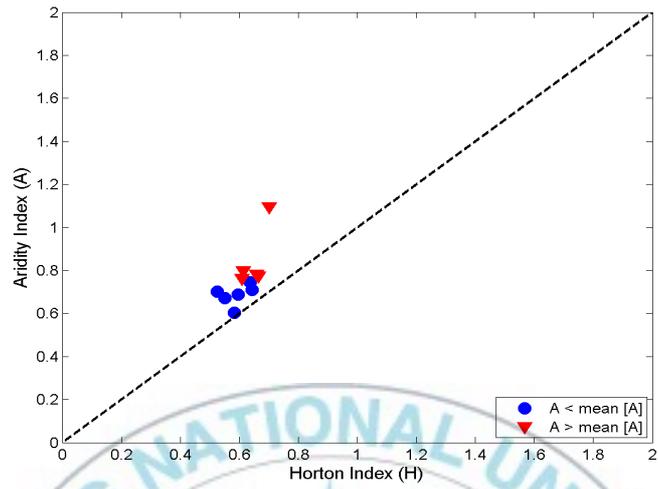
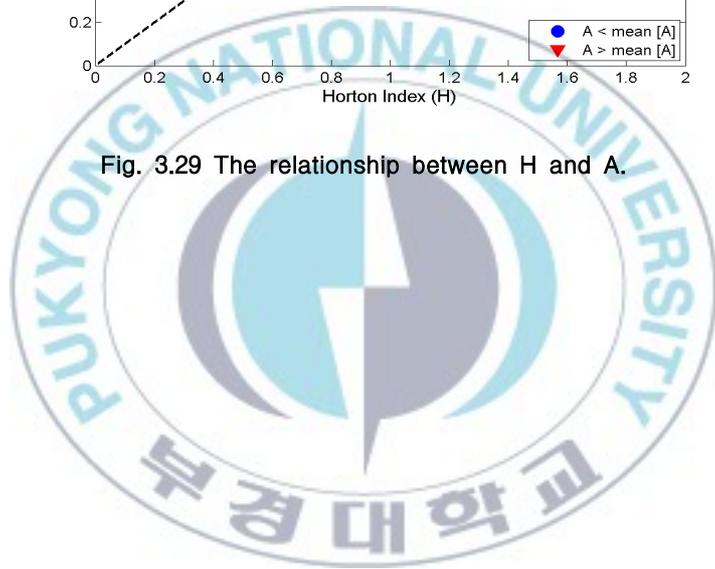


Fig. 3.29 The relationship between H and A.



다. Horton 지수와 기후 및 지형특성과의 관계

Table 3.10에서는 Horton 지수를 구성하는 기화량과 토양 습윤량 및 Horton 지수에 대해서 기후특성이 얼마나 영향을 미치는지 살펴볼 목적으로 회귀분석을 실시한 결과이다. 기화량과 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 좋음을 확인할 수 있다. 또한 잠재증발산량 단독으로 Horton 지수를 설명하기보다 강수량과 잠재증발산량이 결합된 Horton 지수의 설명력($R^2 = 0.5025$)이 증가하고 있음을 살펴볼 수 있다. 따라서 식 (14)과 같은 모형을 구성할 수 있다.

$$\ln H = -5.0329 - 0.1771 \times \ln P + 0.8441 \times \ln PET \quad (14)$$

이 때, 강수량과 잠재증발산량의 회귀계수의 부호가 서로 다름을 살펴볼 수 있다. 이는 강수량과 잠재증발산량을 결합하여 $\ln A$, 즉 건조지수를 독립 변수로서 식 (15)와 같이 모형구성이 가능하다는 것을 의미한다.

$$\ln H = -0.3738 + 0.3916 \times \ln A \quad (15)$$

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

Table 3.10 Result of climate-hydrologic partitioning model

Response	Predictor	Model	R ²
Vaporization	• Precipitation	$\ln V = 3.5316 + 0.3821 \times \ln P$	0.1935
	• Potential evapotranspiration	$\ln V = 9.5081 - 0.4648 \times \ln PET$	0.0881
	• Precipitation • Potential evapotranspiration	$\ln V = 3.9050 + 0.3681 \times \ln P - 0.0394 \times \ln PET$	0.1939
Soil wetting	• Precipitation	$\ln W = 0.5742 + 0.8595 \times \ln P$	0.5852
	• Potential evaporation	$\ln W = 17.3379 - 1.5263 \times \ln PET$	0.5678
	• Precipitation • Potential evapotranspiration	$\ln V = 9.1519 + 0.5378 \times \ln P - 0.9048 \times \ln PET$	0.7028
Horton index	• Precipitation	$\ln H = 2.9690 - 0.4772 \times \ln P$	0.3207
	• Potential evapotranspiration	$\ln H = -7.7292 + 1.0488 \times \ln PET$	0.4765
	• Precipitation • Potential evapotranspiration	$\ln H = -5.0329 - 0.1771 \times \ln P + 0.8441 \times \ln PET$	0.5025
	• Aridity Index	$\ln H = -0.3738 + 0.3916 \times \ln A$	0.4858

Fig. 3.30~34에서는 기후특성과 더불어서 지형특성과 결합될 경우 Horton 지수에 대한 설명력이 얼마나 증가할 것인지에 대하여 분석한 결과이다. 지형요소는 유역의 특성을 대표할 수 있으며 정량적인 수치로 표현 가능한 유역 평균 표고와 경사를 적용하였다. 이 경우 역시 유역 평균 건조지수보다 개별 유역의 건조지수가 낮으면 비교적 습윤한 지역으로, 그 반대의 경우에는 비교적 건조한 지역으로 구분하였다. Fig. 3.30은 건조지수만을 이용하여 Horton 지수를 예측한 경우이며, Fig. 3.31은 건조지수와 함께 평균 표고를 결합하여 Horton 지수를 예측한 경우이다. 기후특성과 지형적 특성을 함께 고려한 Horton 지수의 예측력($R^2 = 0.5978$)이 개선되었음을 확인할 수 있다. 유역의 평균 경사를 고려하게 되면(Fig. 3.32) 평균표고를 이용했을 때 보다 Horton 지수의 예측성능이 더 증진되고 있음을 확인할 수 있다. 기후특성과 CN을 함께 고려한 경우의 Horton 지수 예측력은 약 0.5937로, 개선정도는 다른 지형특성에 비해 미비하지만 어느 정도 예측성능을 증가시키고 있음을 확인할 수 있었다. 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. 3.34에 도시되어있다($R^2 = 0.7413$). 이러한 결과로부터 수문분할은 기후특성이외에도 유역의 지형적 특성이 유의하게 영향을 미치고 있음을 살펴볼 수 있으며, 최종적인 모형을 식 (16)과 같이 구성하였다.

$$\ln \hat{H} = -0.76246 + 0.60895 \times \ln A + 0.01209 \times Slope + 0.00003 \times Height \quad (16)$$

여기서 \hat{H} 은 기후와 지형특성이 고려되어 예측된 Horton 지수, A 는 건조 지수, $Slope$ 는 경사, $Height$ 는 표고를 의미한다. Table 3.11에 Horton 지수를 산정하는 기후-지형특성을 이용한 회귀모형과 그에 해당하는 모형 결정계수를 나타내었다.



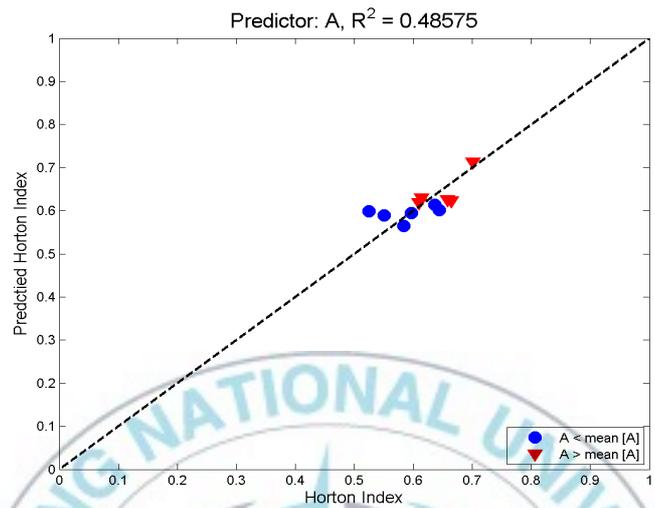


Fig. 3.30 A comparison of H and predicted H(from A).

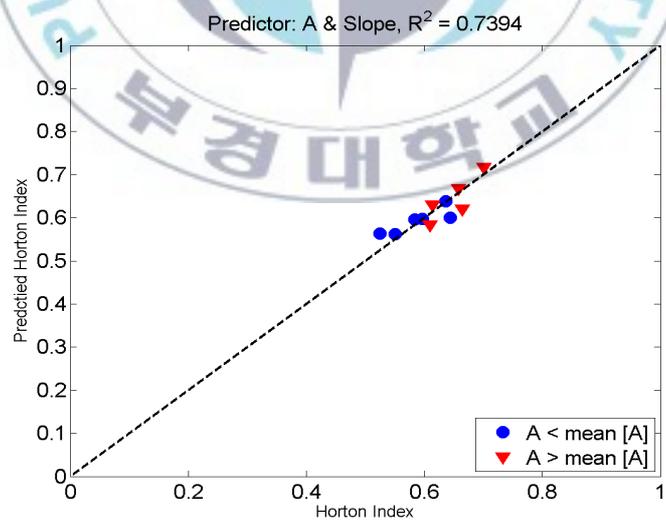


Fig. 3.31 A comparison of H and predicted H(from A&Slope).

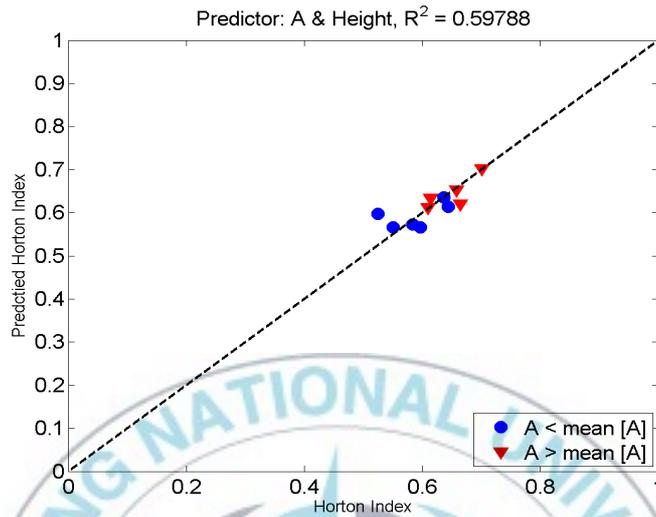


Fig. 3.32 A comparison of H and predicted H(from A&Height).

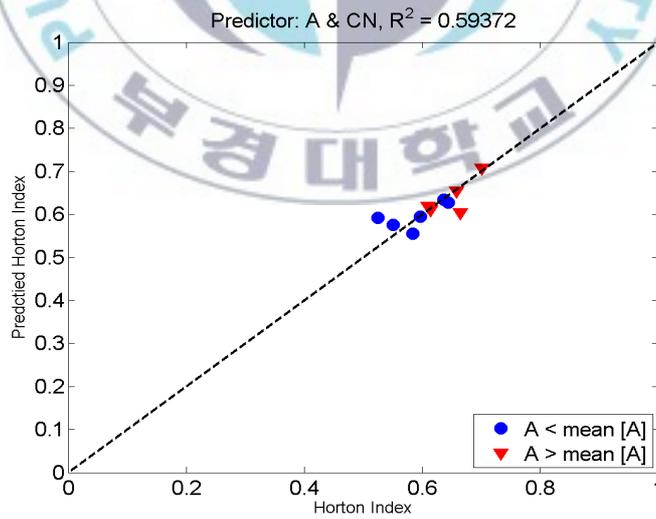


Fig. 3.33 A comparison of H and predicted H(from A&CN).

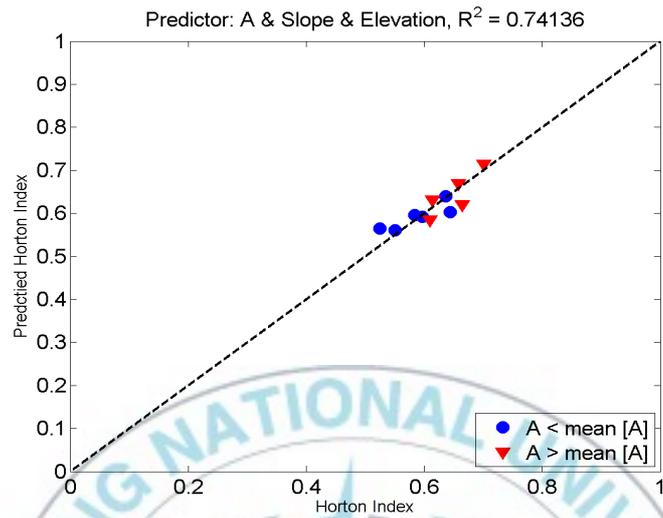


Fig. 3.34 A comparison of H and predicted H(from A&Slope&Height).

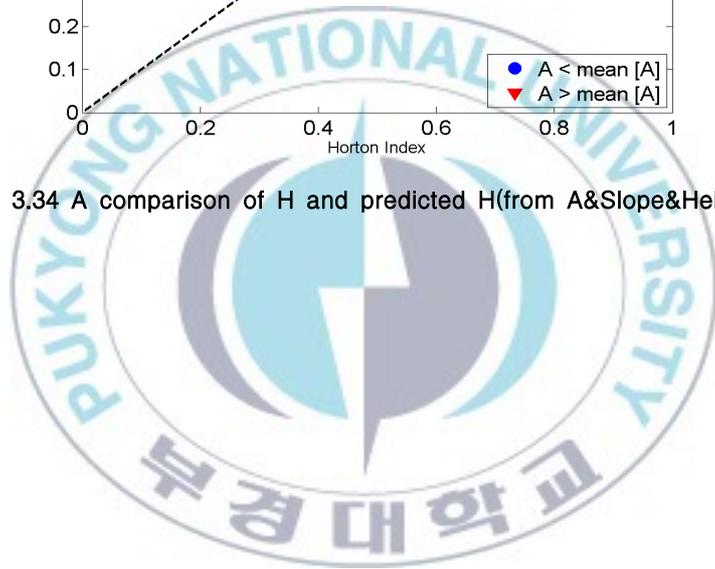


Table 3.11 Result of climate-landscape-hydrologic partitioning model

Response	Predictor	Model	R ²
Horton index	• Aridity Index	$\ln H = -0.3738 + 0.3916 \times \ln A$	0.4858
	• Aridity Index • Slope	$\ln H = -0.7774 + 0.6176 \times \ln A + 0.0129 \times Slope$	0.7394
	• Aridity Index • Height	$\ln H = -0.4425 + 0.4280 \times \ln A + 0.0002 \times Height$	0.5979
	• Aridity Index • CN	$\ln H = -0.6133 + 0.3404 \times \ln A + 0.0036 \times CN$	0.5937
	• Aridity Index • Slope • Height	$\ln H = -0.76849 + 0.60895 \times \ln A + 0.01209 \times Slope + 0.00003 \times Height$	0.7414

라. 식생반응과 수문분할요소의 관계

식생에 대한 Horton 지수의 예측력은 어느 정도 될 것인지 분석함으로써, 기후와 지형특성이 식생반응에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. Fig. 3.3 5~40은 식생반응을 나타내는 지표로 사용된 NDVI를 종축으로, 식생반응에 연관이 있을 것으로 판단되어지는 요소를 횡축으로 하여 각각의 항목에 대하여 나타낸 산포도이다. 횡축의 요소로 선정된 항목은 강수량, 토양 습윤량, 증발산량, 건조지수, Horton 지수, 기후와 지형특성으로부터 예측된 Horton 지수이다. 건조지수와 Horton 지수 이외의 항목의 경우 NDVI와의 차원적인 차이를 줄이고자 각 요소의 평균으로 정규화하여 나타내었다. Table 3.12에는 NDVI를 모의하는 요소별 회귀모형과 그에 해당하는 모형 결정계수를 정리하였다.

기후특성 및 수문요소만을 이용하여 NDVI와 관계를 확인한 결과, 강수량($R^2 = 0.1338$, Fig. 3.35)과 토양 습윤량($R^2 = 0.2883$, Fig. 3.36)의 경우에는 약간의 상관성을 보이고 있으나 NDVI를 설명한다고 하기에는 설득력이 떨어지며, 증발산량과 NDVI는 서로 관계성이 거의 없는 것으로 나타나고 있다 (Fig. 3.37).

강수량과 잠재증발산량이 결합된 건조지수의 경우 다른 기상 및 수문요소와 비교할 때 모형의 결정계수가 0.3485로서 상대적으로 NDVI에 대한 상관성이 높게 나타나고 있으며(Fig. 3.38), 증발산량과 토양 습윤량이 결합된 Horton 지수의 경우에는 건조지수와 비교하여 NDVI에 대한 예측력이 보다 우수함을 확인할 수 있다($R^2 = 0.4918$, Fig. 3.39). 건조지수보다 Horton 지수가 식생에 대한 예측성능이 우수하다 결과는 Troch et al.(2009) 및 최대규 등(2011)의 결과와도 부합된다. 또한 건조지수가 지역의 기후적인 특성만을 고려한 지수인 반면에 Horton 지수는 전술한 바와 같이 지역의 기후 및 지형

을 동시에 고려한 지수라는 측면에서 볼 때, 유역의 식생반응은 기후특성뿐만 아니라 지형특성에도 매우 민감하게 영향을 받고 있음을 살펴볼 수 있다.

Fig. 3.39과 40를 살펴보면 Horton 지수가 낮을수록 NDVI 역시 낮게 됨을 알 수 있는데, 이는 유역의 식생활동과 연관시켜 설명될 수 있을 것이다. 유역의 다른 수문분할요소들이 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 성장이 활발하다는 것을 의미하므로 NDVI가 비교적 높은 값을 갖게 될 것이다. 참고로 기후특성만을 고려한 건조지수보다 기후 및 지형특성을 모두 반영하여 예측한 Horton 지수의 NDVI 모의력이 2배 이상 우수한 것을 살펴보았는데, 이는 유역의 식생반응에 대한 기후와 지형의 상대적인 공헌도가 서로 비슷함을 나타낸다고 할 수 있을 것이다.

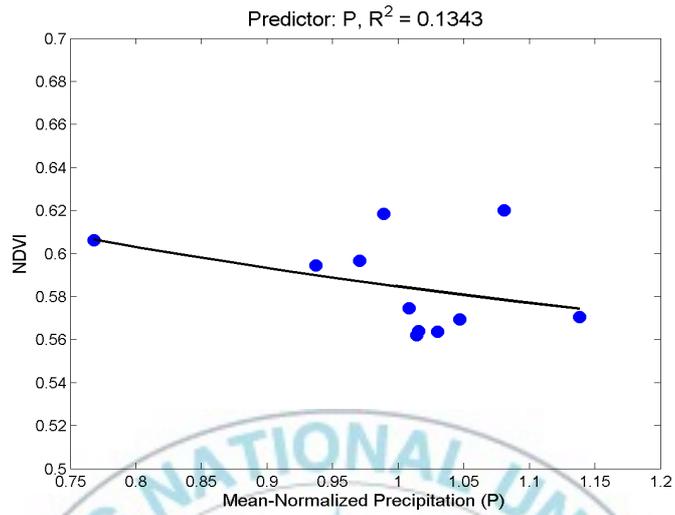


Fig. 3.35 The relationship between NDVI and P.

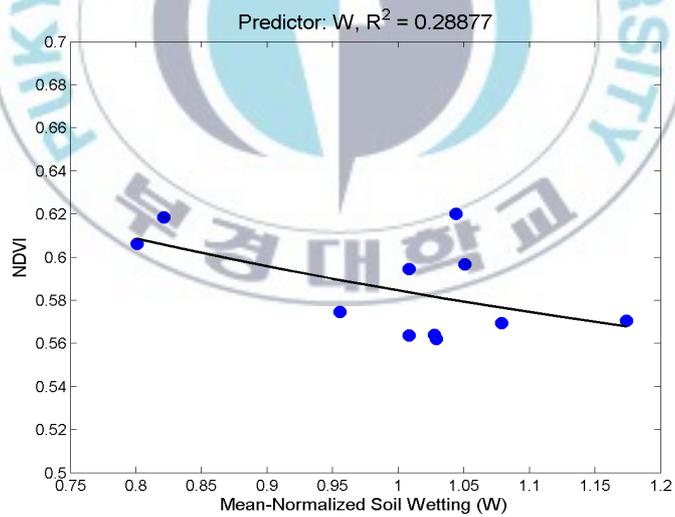


Fig. 3.36 The relationship between NDVI and W.

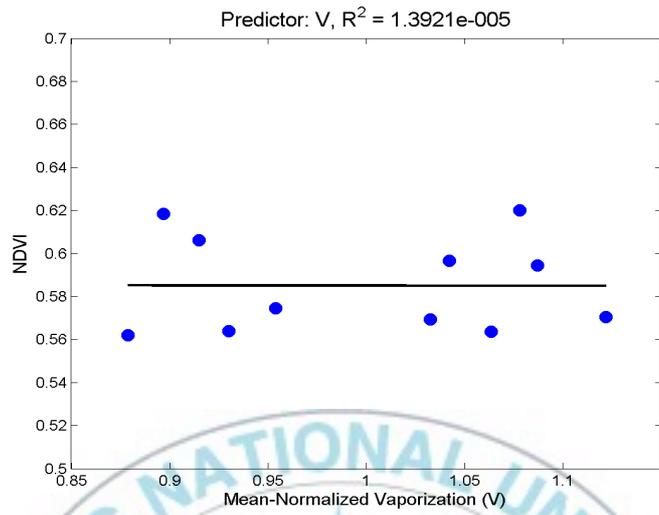


Fig. 3.37 The relationship between NDVI and V.

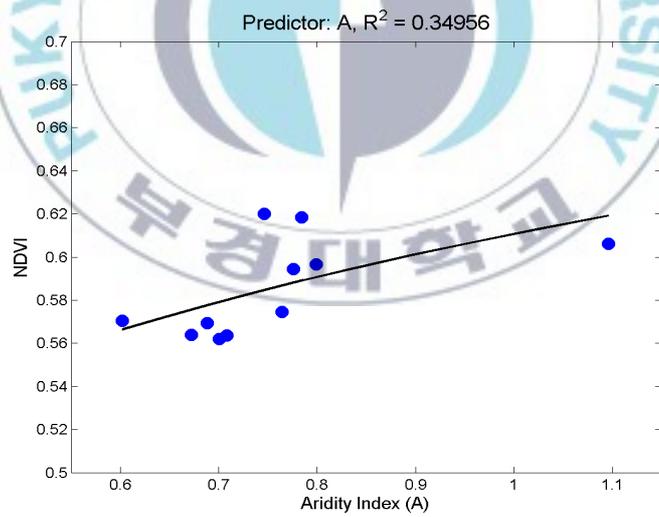


Fig. 3.38 The relationship between NDVI and A.

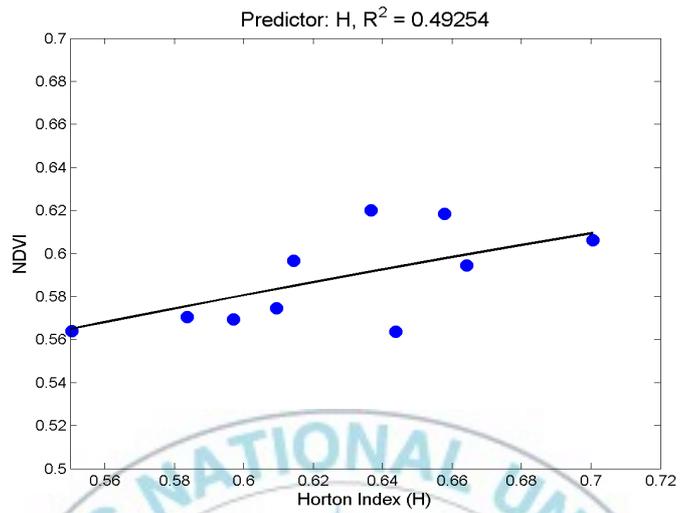


Fig. 3.39 The relationship between NDVI and H.

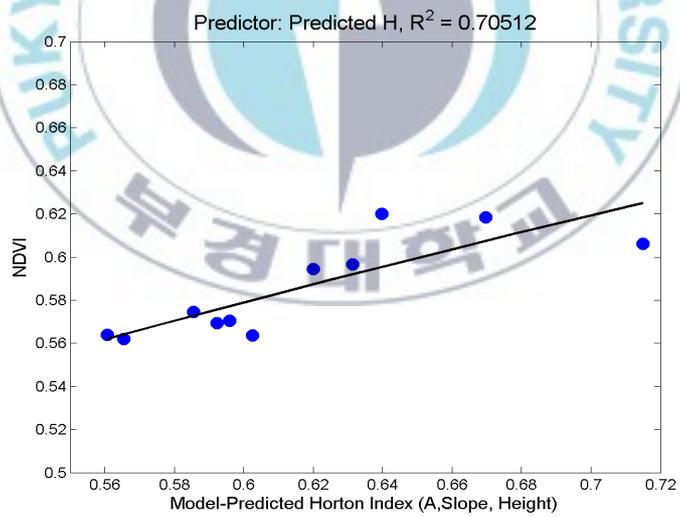


Fig. 3.40 The relationship between NDVI and Predicted H(from A&Slope&Height).

Table 3.12 Result of hydrologic partitioning-NDVI model

Response	Predictor	Model	R ²
NDVI	• Precipitation	$\ln NDVI = -0.5367 - 0.1385 \times \ln P$	0.1343
	• Soil Wetting	$\ln NDVI = -0.5371 - 0.1808 \times \ln W$	0.2888
	• Vaporization	$\ln NDVI = -0.5361 - 0.0016 \times \ln V$	0.0000
	• Aridity Index	$\ln NDVI = -0.4931 + 0.1490 \times A$	0.3496
	• Horton Index	$\ln NDVI = -0.3829 + 0.3147 \times \ln H$	0.4925
	• Predicted Horton Index (from Aridity Index, Slope, Height)	$\ln NDVI = -0.3232 + 0.4373 \times \ln \hat{H}$	0.7051

IV. 결 론

유역의 수문학적 분할에 있어서 기후 및 지형적 특성이 어떠한 영향을 미치는지에 대해 분석하기 위하여 우리나라 전국 13개 댐 상류 유역을 대상으로 수문자료 및 유역 특성자료를 수집하여 연구에 적용하였다.

수문분할요소와 기후특성 사이의 상관관계를 건조지수와 Horton 지수를 이용하여 평가한 결과, Horton 지수가 건조지수에 비해서 유역 수문분할요소와 기후특성간의 상관성이 보다 높음을 확인하였다. 이를 통해 유역의 연간 물수지 상태를 구분할 때는 기후조건만 고려된 건조지수가 아니라 추가적으로 유역의 지형적 특성까지 고려된 Horton 지수에 따른 구분이 더 합리적일 것으로 판단된다.

유역의 습윤상태에 따른 Horton 지수의 설명력을 확인하고자 Horton 지수를 4개의 구간으로 구분하여 수문분할요소와 기후특성간의 상관관계를 살펴본 결과, Horton 지수가 큰 구간일수록 수문분할요소와 기후특성간의 상관성이 커지는 반면에 Horton 지수가 작은 구간일수록 그 상관성도 작아지는 것을 확인하였다. Horton 지수가 크다는 것은 대기로부터 받아들이는 물의 양에 비해 유역이 사용하는 물의 양의 비가 크다는 것으로 식생이 물을 보다 더 효율적으로 사용하는 비교적 건조한 상태를 나타낸다. 즉, 식생성장에 필요한 수분이 공급되지 않는다면 식생은 물을 보다 더 효율적으로 이용하게 되며, 이는 유역의 수문분할 특성의 연간 변동성을 기후조건에 관한 정보만을 이용하여 보다 정확하게 예측할 수 있음을 의미한다. 이와 반대로 Horton 지수가 작은 구간에서는 식생성장에 필요한 수분이 충분히 공급되고 있으며 식생성장에 사용되지 않는 여분의 수분 양이 증가한다. 따라서 습윤한 지역에서는 기후조건에 관한 정보만으로는 유역의 수문분할 특성을 일정수준 이

상으로 설명할 수 없으며, 이는 기후특성이외의 정보가 추가되어야 함을 시사하고 있다. 본 연구에서는 지형특성을 추가적인 정보로 사용하여 습윤한 지역의 수문분할요소에 대한 예측력을 높이고자 하였으며, 그 결과 기후정보만을 이용했을 때보다 수문분할요소의 예측력이 우수해짐을 확인하였다.

이를 바탕으로 유역에서의 수문분할의 연간변동성을 설명하는데 있어서 기후특성과 지형특성의 상대적인 역할이 어느 정도 될 것인지에 관한 분석이 낙동강 유역 5개 댐 상류 유역을 대상으로 연구가 수행되었다. 낙동강 유역에서 Horton 지수는 강수에 의해서 일차적인 영향 받는다. 기후특성 즉, 강수와 더불어 지형특성을 고려하여 Horton 지수를 모의하게 되면 기후특성으로 설명할 수 없었던 부분을 지형특성이 보완하게 되고, 이는 곧 Horton 지수 예측력이 개선됨을 의미한다. 이를 통해 유역의 수문분할은 기후특성 뿐 아니라 지형특성이 일정부분 영향을 미치고 있음을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

유역 평균적인 측면에서 수문분할특성에 대한 기후 및 지형 사이의 역할을 분석해본 결과, 건조지수로 설명되는 기후특성에 의해 Horton 지수가 일차적으로 결정이 되며, 건조지수가 설명하지 못하는 부분에 대해서는 유역의 지형특성이 일부 설명하고 있음을 확인하였다. 특히, 건조지수와 유역 경사를 함께 고려할 경우에 Horton 지수의 예측력이 다른 지형특성을 이용하였을 때 보다 높게 나타났다. 유역의 지형특성 중 평균경사가 수문분할에 있어서 중요한 요소로 작용하고 있다. 매우 경사가 심한 유역에서 토양이 물을 저류할 수 있는 지체시간은 경사가 완만한 유역에 비해 상대적으로 짧아지면서 증발산 작용에 노출될 시간도 함께 짧아진다(Yokoo et al., 2008). 이러한 현상으로 경사는 유역에 공급된 물을 얼마나 오랫동안 보유할 수 있는지에 대한 제한요인으로 작용하여 수문분할에 영향을 미칠 것으로 추측된다.

마지막으로 Horton 지수와 기후, 지형 사이의 관계로부터 이를 식생 동역

학과 연결시키고자 하였다. 물과 에너지가 제한된 조건하에서 식생에 의하여 결정되는 기화량은 일반적으로 유역의 물수지에서 매우 큰 부분을 차지하고 있다. 이 때 토양 습윤량은 유역 스케일에서 식생이 이용가능한 물의 최대량이 되며, 유역의 경사는 토양 습윤량이 기저유출량과 기화량으로 분할됨에 있어서의 시간적인 제어작용을 하게 된다. 분석결과 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.

참고문헌

- 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.
- 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., pp. 508.
- Chow, W. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*, McGraw-Hill, Book Company, New York, USA.
- Donohue, R. J., M. L. Roderick, and T. R. McVicar (2006). "On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. Vol. 3, pp. 1517-1551.
- 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.
- 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.
- Frank, D. A. and Inouye, R. S. (1994). “Temporal Variation in Actual Evapotranspiration of Terrestrial Ecosystems: Patterns and Ecological Implications.” *Journal of Biogeography*, Vol. 21, No. 4, pp. 401–411.
- Gerrits, A. M. J., Savenije, H. H. G., Veling, E. J. M. and Pfister, L. (2009). “Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple vaporation model.” *Water Resources Research*, Vol. 45, W04403, doi:10.1029/2008WR007308.
- 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.
- Harman, C. J., Troch, P. A. and Sivapalan, M. (2011). “Functional model of water balance variability at the catchment scale: 2, Elasticity of fast and slow runoff components to precipitation change in the continental United States.” *Water Resources Research*, W02523, doi:10.1029/2010WR009656.
- Horton, R. E. (1933). “The role of infiltration in the hydrologic cycle.” *American Geophysical Union*, Vol. 14, pp. 446–460.
- Hu, Z., Yu, G., Fan, J., Zhong, H., Wang, S. and Li, S. (2010). “Precipitation–use efficiency along a 4500km grassland transect.” *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 19, pp. 842–851. DOI: 10.1111/j.1466–8238.2010.00564.x.
- 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, No. 6992, 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.
- 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.
- L’vovich, M. I. (1979). “World water resources and their future.”
American Geophysical Union, Washington, D. C.
- 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. (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.
- Porporato, A., Daly, E. and Rodriguez–Iturbe, I. (2004). “Soil water balance and ecosystem response to climate change.” American Naturalist, Vol. 164, No. 5, pp. 625–632.
- Rodriguez–Iturbe, I., and A. Porporato (2004). “Ecohydrology of Water

Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics.” Cambridge Univ. Press, New York.

Shuttleworth, W. J. (1988). “Macrohydrology—the new challenge for process hydrology.” *Journal of Hydrology*, Vol. 100, No. 1–3, pp. 31–56.

Sivapalan, M. (2009). “The secret to “doing better hydrological science” : Change the question!” *Hydrological Processes*, Vol. 23, pp. 1391–1396, doi:10.1002/hyp.7242.

Sivapalan, M., M. A. Yaeger, C. J. Harman, X. Xu, and P. A. Troch (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.

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.

- Voepel, H., Ruddell, B., Schumer, R., Troch, P. A., Brooks, P. D. Neal, A., Durcik, M. and Sivapalan, M. (2011). "Quantifying the role of climate and landscape characteristics on hydrologic partitioning and vegetation response." *Water Resources Research*, Vol. 47, W00J09, doi:10.1029/2010WR009944.
- 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.
- Yang, D., F. Sun, Z. Liu, Z. Cong, G. Ni, and Z. Lei (2007). "Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis." *Water Resources Research*, Vol. 43, W04426, doi:10.1029/2006WR005224.
- Yang, D. W., Shao, D. W., Yeh, P. J.-F., Yang, H., Kanae, S. and Oki, T. (2009). "Impact of vegetation coverage on regional water balance in the nonhumid regions of China." *Water Resources Research*, Vol. 45, W00A14, doi:10.1029/2008WR006948.
- 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*, 357, pp. 255-269.
- Zanardo, S., Harman, C. J., Troch, P. A., Rao, P. S. C. and Sivapalan, M. (2012). "Intra-annual rainfall variability control on interannual variability of catchment water balance: A stochastic analysis." *Water Resources Research*, Vol. 48, W00J16, doi:10.1029/2010WR009869.
- 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.

Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y. and Shao, Q. (2008). “Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework—Model development and testing.” Journal of Hydrology Vol. 360, No. 1-4, pp. 117-131.

이재수 (2006). “수문학.”

최대규, 김상단 (2010). “개념적인 토양수분 수지모형을 이용한 Horton지수의 재논의.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제43권, pp.709-719.

최대규, 최민하, 안재현, 박무중, 김상단 (2011). “Horton 지수의 재논의를 통한 수문분할의 변동성.” 한국습지학회지, 한국습지학회, 제13권, pp. 35-44.

최치현, 최대규, 최현일, 김경현, 김상단 (2012). “평균기온과 식생의 영향을 고려한 격자기반 일 지표토양온도 예측 모형 개발.” 수질보전 한국물환경학회지, 한국물환경학회, 제28권, pp. 137-147.

한국건설기술연구원 (2004). “지표수 수문성분 해석기술 개발.”