

산악지역을 위한 한국형 지형수문단위도 개발

Development of Korean Geomorphological Unit Hydrograph for Mountain Basins

김 홍 태* / 신 현 석**

Kim, Hong Tae / Shin, Hyun-Suk

Abstract

The development of the method for flood runoff analysis representing Korean mountain basins have been one of big concerns for Korean hydrologists for several decades. Several traditional methods dealing with unit hydrograph have been restricted to be used in Korea basins, because of its drawbacks due to its originality from other countries and the uncertainties of control parameters as well as its linearity assumption between rainfall and runoff relationship. In this paper, several geomorphological similarity relationships for Korean mountain basins was developed by using the experimental data over 40 Korean basins. Then those were applied directly to geomorphological unit hydrograph theory to meet Korean geomorphological unit hydrograph. The developed method was applied to Andong Dam basin. The results show the applicability and simplicity of the developed Korean geomorphological unit hydrograph generally for Korean mountain basins in future. It might be needed for more validations and applications of this method over Korean regions.

keywords : Geomorphology, Similarity, Horton, Korean geomorphological unit hydrograph, mountain basin

요 지

본 연구의 목적은 한국 산악유역에서의 지형 상사를 규명하여 보고, 이를 이용하여 한국형 지형수문단위도를 유도하고 검증하는 데 있다. 실제로 실무에서는 홍수분석을 위하여 가장 일반적으로 단위도법이 사용되어 왔으나, 한국 유역에의 적합성, 조절 매개변수 산정의 불확실성 등에 있어서 많은 어려운 점을 내포하고 있었다. 본 연구에서는 한국의 40여개의 산악 소유역의 지형자료를 수집하고 분석하여 다양한 한국 지형상사를 규명하여 보았다. 다음에는 기존의 지형수문곡선 이론에 이를 적용하여 한국형 지형수문단위도 기법을 개발하고 검증하여 보았다. 개발된 공식은 각각 한국형 지형형태학적 순간단위도, 한국형 지형형태-기후학적 순간단위도, 그리고 한국형 지형 형태-기후학적 단위도로 구분할 수 있다. 이들 기법은 한국형 단위도법, 강우-유출 관계의 비선형성, 기상자료의 사용, 그리고 적용의 간편성 등의 장점을 가지고 있으며, 앞으로 한국 산악 미계측 유역의 홍수 분석을 위하여 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 지형형태학, 상사이론, Horton, 한국형 지형수문단위도, 산악 유역

* 국립환경과학원 환경연구사

Environmental Researcher., National Institute of Environmental Research, South Korea

** 교신저자, 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학 전공 부교수

Corresponding Author, Associate Professor, Dep. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National University, South Korea
(e-mail: hsshin@pusan.ac.kr)

1. 서 론

최근 우리나라에서는 기후변화 및 엘니뇨와 같은 기상이변에 의한 홍수패턴의 변화 및 그에 따르는 피해가 증가되고 있다. 이러한 홍수의 유형을 살펴보면 복잡적이긴 하지만, 공간적으로는 대하천에서 소하천으로 이동되는 경향이 있고 시간적으로는 짧은 시간에 집중호우에 의한 홍수피해가 발생되고 있으며, 이를 산악지역의 게릴라성 호우에 의한 돌발 홍수로 정의하기도 한다. 이러한 산악 소유역의 돌발홍수의 사례는 1996년의 연천댐 상류지역의 집중호우로 인한 댐의 붕괴, 1998년 지리산 산악지형 계곡에서 발생한 돌발홍수로 인한 인명피해, 경기도 중랑천 상류지역의 침수, 2002년 태풍 '루사'로 인한 강원도 지방의 홍수 피해 등이 있었으며 우리나라에서 이에 대한 피해는 계속 증가하고 있는 추세이다. 이러한 산악지역 돌발홍수에 따른 피해가 급증하는 이유는 크게 두 가지 원인으로 정의할 수 있을 것이다. 하나는 산악지역의 홍수방어시스템의 구조적인 또는 비구조적인 대책의 부족이 있으며, 다른 하나는 산악지역의 급격한 호우특성과 비선형적인 수문특성에 있다.

기존에는 국내에서는 아직까지도 산악지역의 지형, 강우 및 수문 특성을 제대로 반영하기 곤란한 외국의 단위도법 (Snyder법, SCS법, Clark법 등)이 주로 소하천정비나 재해영향평가 등을 위하여 사용되어 온 것이 현실이다. 계측유역에서는 그나마 모형 매개변수의 분석 및 모형의 검증을 통하여 전통적인 단위도법의 적용이 고려될 수는 있으나, 미계측 유역에서의 적용에는 모형자체의 한계성뿐만 아니라 조절 매개변수 등의 임의 선정으로 인하여 홍수량 산정에 많은 불확실성을 가지고 있었다. 실제로 산악지역의 임의 유역에 대한 강우-유출 현상의 규명은 강우의 시·공간적 불규칙한 특성과 지형의 3차원 공간성과 침투와 차단 등의 손실 특성, 그리고 비선형성 유출반응 등의 문제로 인하여 수문학 분야에서는 해결하기 쉽지 않은 문제이다.

세계적으로 지형 수문학 분야는 지난 30년간 꾸준히 발달되어 왔다. 지형수문학의 기초는 유역, 하천의 특성을 바탕으로 비선형적인 수문반응을 도출하고자 하는 노력은 지금도 많은 연구 분야에서 수행되고 있다. 이러한 기존의 연구결과들은 Rodriguez-Iturbe and Rinaldo (2003)에 의하여 체계적으로 하천유역의 상사 이론 (similarity theory), 프랙탈이론 (fractal theory), 그리고 지형형태학적 수문분석 (geomorphometry-hydrology relationship) 등의 분야에 대하여 방대하게 집대성 되었으며, 본 연구의 대부분의 이론은 이 문헌

을 참고할 수 있을 것이다.

이러한 지형수문학은 간략하게 정의하면 유역의 수문학적인 반응을 지형변수와 수문변수화의 상관관계가 존재하며 이는 상사될 수 있어 다른 유역에 제한적으로 적용할 수 있다는 가정에서 시작한다. 이러한 연구는 20세기 초반부터 폭넓게 연구되어 왔다. 실제로 단위도와 지형형태학과의 연관성을 연구는 근래 들어 Rodrigues-Iturbe and Valdes (1979)의 연구가 이론적인 근거와 활용 가능성을 열었다. 이 연구의 의의는 과거의 전통적인 단위도법에서 적용되었던 지형-수문 상관관계를 일정상수에 의하여 정의되는 지형변수에 의한 하천유량의 조절이라는 앙상블(ensemble average) 개념이라면, Rodrigues-Iturbe and Valdes(1979)가 제안한 지형형태학적 순간단위도(Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH) 이론은 하천 및 유역 수문 반응이 지형형태학적인 양적평가(quantitative assessment) 개념에 기초한다는 점에는 큰 의의가 있었다.

특히, 개발된 GIUH는 Horton의 지형변수와 평균하도유속에 의하여 결정된다. 여기서 Horton 지형변수는 유역의 형상 및 하천의 특성에 따른 변동변수로서 동적인 유역특성을 유기적으로 반영할 수 있으며, 더불어 평균하도유속의 도입은 산정되는 침투홍수량이 시간적인 강우의 특성이나 양에 따라 반응한다는 것이 장점이다.

더불어, Rodrigues-Iturbe *et al.*(1982a,b)에서는 강우 변동 특성을 고려하는 평균하도유속을 기상학적으로 강우강도와 지속시간의 함수로 전개한 지형형태-기후학적 순간단위도(Geomorpho-Climatic Instantaneous Unit Hydrograph, GCIUH)와 더불어 단위도법과 같이 간편하게 사용할 수 있는 순간단위도를 지형형태-기후학적 단위도(Geomorpho-Climatic Unit Hydrograph, GCUH)를 정의하였는데 기존의 전통적인 단위도법은 유역면적 및 경사 등에 직접적인 변동특성을 반영하여 유역형상 특성을 고려할 수 없으며, 더구나 비례가정과 중첩가정을 내포하는 선형성으로 인하여 시간별 강우에 따른 다른 수문반응과 강우 크기에 따라 다르게 반응한 실제 유역에서의 반응을 고려할 없으나, GCIUH 기법은 이를 크게 개선하였다.

우리나라에서도 지형수문학을 적용한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 이순탁, 박종권(1987)은 하천 유출량 산정을 위한 GIUH모델 연구에서 유역의 지형인자를 대기행렬이론(queueing theory)에 적용하여 하천유역의 강우-유출 관계를 해석하고, 미 계측 유역이나 자료가 결핍된 유역에 적용할 수 있는 GIUH 모델의 매개변수

를 결정하는데 그 목적을 두고 낙동강 위천 유역에 적용하였다. 이원환, 전민우(1989)는 지형수문학적 특성 인자를 이용한 유출모형의 연구는 하천망크기를 이용한 유출모형을 기초로 하여 하도저류만을 고려한 저류상수를 결정하여 각 소유역 출구에서의 유출을 예측하기 위한 방법을 연구하였다. 이혁규 등(1995)은 GIUH의 지체시간 산정을 위한 수문학적 해석 연구는 지형형태학적 순간단위도를 산정하는데 있어서 주된 매개변수인 지체시간을 수문학적으로 해석하였다. 최홍식(1997)은 원주천의 하천형태학적 및 수리학적 특성연구에서 소하천 수계인 원주천의 지형형태학적 특성은 Horton-Strahler의 하천 차수법칙에 따라 산정하였다.

김상단 등(2000)은 지형형태학적 순간단위도의 특성 속도에 대한 고찰에서 GIUH의 동역학적 매개변수인 특성속도를 위천의 고노, 통곡, 효령 유역에 적용하고, 실측 자료를 근거로 최적화 과정을 통하여 특성속도를 산정하였다. 그렇게 구한 특성속도는 GCIUH 및 기타 집중시간에 관한 경험공식과의 비교를 통해 가장 적절한 방법을 선정할 수 있도록 하였다. 신현석 등(2001)은 GIS를 이용한 GIUH의 매개변수 산정에서 GIS기법을 이용해서 Horton 차수비 등의 유역특성과 GIUH의 매개변수 간의 상관분석을 통하여 GIUH식의 국내 적용성을 검토하였다. 허창환, 이순탁(2002)은 하천유역에서 GIS를 이용한 GIUH 모형의 해석은 미 계측유역이나 자료가 결핍된 유역에서 지리정보시스템을 이용하여 GIUH를 해석으로 IHP 위천대표시험유역에 대하여 강우-유출해석을 실시하였다. 김기욱 등(2003)은 GIUH 특성속도에 대한 강우의 영향 분석 연구에서 설마천 유역에서 관측된 여러 강우-유출사상을 분석하여, 각 사상마다 GIUH의 특성속도를 추정하고, 이를 분석하여 그 변동특성을 살펴보았다. 조효섭 등(2003)은 수치지형도상의 실제 하천망 및 임계점(threshold)을 추출한 경우와 정방행렬의 고도수치를 표현하는 DEM으로부터 하천망을 추출한 경우의 통계적 변동성을 검토하였고 DEM의 격자 크기와 하천망 추출에 필요한 임계점의 변화에 대한 유역 특성 고유치의 민감도를 분석하였다. 이찬주 등(2004)은 지형 인자를 이용한 하천분류 체계의 검토에서 지형형태학적 특성을 고려한 하천 정비 기법에 응용될 수 있는 기존의 외국 하천 분류 체계를 검토하였고 지형 인자를 이용하여 하천 분류 체계를 개발하였는데 개발된 분류 체계는 지류의 유입이 없는 하도를 분류 단위로 하고 있다.

최근에 신현석 등(2004a,b)은 GCUH가 산악지역의 유출량과 돌발홍수 기준우량을 산정하는데 적절한지를 검토한 것으로 산악지역의 유출량을 산정하는데 적절한

방법인지를 덕천강 유역에 대해 확률강우량으로 GCUH의 침투우량과 기존 보고서의 확률 홍수량 자료를 비교하는 방법과 실측 호우사상을 HEC-HMS 모형과 GCUH에서 산정된 침투 유량을 태수지점의 실측자료와 비교함으로써 GCUH의 타당성을 검증은 시도했는데, 여기서 GCUH와 NRCS방법을 이용하여 돌발홍수 기준우량을 산정함으로써 산악지역의 돌발홍수 기준우량 산정 방법을 제시했고 실유역 적용을 통해 산악지역에서의 돌발홍수 경보발령 기준우량 산정 방법을 검증하였다. 이병운 등(2004)은 GIUH-Clark 모형의 유도에 관한 연구에서 강우-유출과정의 수문학적 현상을 보다 정확히 분석하고 예측하는 기법으로 Clark방법과 GIUH를 이용하여 계측유역의 강우-유출반응을 모의하였고, 이를 관측된 값과 비교하여 미계측유역의 적용성 여부를 검토했다.

이러한 다방면의 연구결과에도 불구하고 지형수문학 이론을 우리나라 실유역에 폭 넓게 적용하기 위해서는 두가지 문제점이 있었다. 하나는 적용되는 Horton 지형변수들을 포함하는 다양한 지형변수들이 미계측 유역에서 현장계측 또는 GIS 분석을 통하여 도출하기가 곤란하거나 방대한 작업이 요구된다는 점이었으며, 다른 하나는 우리나라 산악지역의 비선형적인 강우-유출 상관을 고려할 수 있는 범용의 지형수문학적 공식은 개발되지 못하였다는 것이었다.

기존의 전통적인 단위도법과 같이 기본적인 지형정보로도 손쉽게 적용할 수 있고 더불어 우리나라 산악지형 특성을 반영하여 우리나라의 수문반응을 대표할 수 있으며, 마지막으로 지형수문학적 이론의 비선형성 강우변동성을 고려할 수 있는 한국형 지형형태-기후학적 단위도의 개발이 본 연구의 궁극적인 목적이다. 본 연구에서는 우선적으로 사용된 지형수문학적인 이론을 정리하였으며, 가급적 전국을 대표할 수 있는 국내 산악유역 40개여 이상의 유역의 현장을 직접 조사하였으며, 대상유역의 DEM 및 GIS 기법을 이용한 유역수문분석을 수행하였다. 이들 수집된 자료들을 이용하여 한국 산악유역에 적합한 지형상사분석(geomorphological similarity analysis)을 수행하고 기존의 결과들과 비교 평가하였다. 이어 개발된 다양한 한국형 지형상사 공식들을 GIUH, GCIUH 및 GCUH 공식들에 직접 대입하여 한국의 산악지역에 대표될 수 있는 한국형 지형형태-기후학적 단위도를 개발하였다. 마지막으로 본 연구에서는 비록 광범위하지는 못하였으나 개발된 모형의 적용 가능성을 안동댐 실제 유역을 대상으로 검토하고 검증하여 보았다.

2. 배경 이론

2.1 Horton 하천차수 법칙

하천유역 지형형태학의 적용을 위한 가장 우선적인 작업은 대상하는 하천유역의 하천망을 구성하고 배수체계의 순서를 결정하여 차수를 부여하는 작업이다. 본 연구에서 활용된 하천차수법칙을 개략 아래와 같이 정리하였으며, 상세한 이론은 Rodrigueg-Iturbe and Rinaldo(2003)을 참조할 수 있을 것이다. 하천차수 연구는 Horton(1932)에 의하여 최초로 제안되었으며 Stahler에 의하여 수정되어 일반적으로 Horton-Stahler 하천차수법이라고 정의되며, 지형수문학 분야에서 가장 일반적으로 적용되는 차수법칙이다. Fig. 1. (a)는 하천차수법칙을 설명하기 위한 가상적인 하도망을 보여주고 있다. 이 하도망은 오로지 하나의 출구점(outlet)을 가지고 있으며, 하천망 내의 내절점(internal node)들은 선으로 표시된 각 하천들이 합쳐지는 지점이고, 외절점(external node)들은 하천의 발원 지점이다. 여기서 링크는 절점들 사이의 연결부분으로 내부링크는 내절점을 연결하고, 외부링크는 외절점과 그 하류의 내절점을 연결한다. 위의 사항들을 바탕으로 아래와 같은 절차로 하천의 차수를 부여한다.

- 1) 최상류 근원점에서 시작되는 하도는 1차 하천이라 정의한다.
- 2) 차수가 w 인 두 하천이 합류하면 합류된 하류의 하천의 차수는 $(w+1)$ 이 된다.
- 3) 만약 차수가 다른 두개의 하천이 합류될 때, 하류의 하천차수는 상류의 두 개 하천 중 큰 차수를 따른다.

4) 유역의 차수는 최고하천차수 Ω 로 정의한다.

Horton의 하천법칙은 대상하는 유역의 하도망의 각 하천링크에 부여된 하천개수, 하천 길이, 하천지배면적과 하천차수와의 일정한 상관관계가 있다는 기본적인 상사가정에서 출발한다. 또한, 이는 하천망의 무차원 특성을 표시하는 변수로 정의될 수 있으며 하천지형의 자기상사성(self-similarity)을 의미한다고 할 수 있다. 우선 하천개수법칙 (stream number law)은 임의의 하천차수와 하천개수는 역상관관계를 갖는다는 것으로 Eq.(1)과 같이 표현된다.

$$N_w = R_B^{\Omega-w} \quad (1)$$

여기서, w 는 하천차수, N_w 는 w 차 하천개수, Ω 는 유역 내 최고차수를 하천을 표시한다. 일반적으로 w 에 대한 N_w 의 대수 값을 도시하면 음의 기울기를 갖는 직선을 얻을 수 있는 데, 기울기를 R_B 라고 정의하며 이를 분기율(bifurcation ratio)이라고 한다.

또한, 분기율 R_B 는 아래 Eq.(2)와 같이 표현되며, 이 식은 $(\Omega-1)$ 차의 하천은 평균적으로 R_B 개의 하천을 가진다는 것을 의미한다.

$$R_B = \frac{N_{w-1}}{N_w} \quad (2)$$

하천길기와 지배면적에 대한 Horton 법칙은 하천수 법칙과 동일하게 적용될 수 있으며. 다음 Eq.(3)과 (4)와 같이 각각 정의된다.

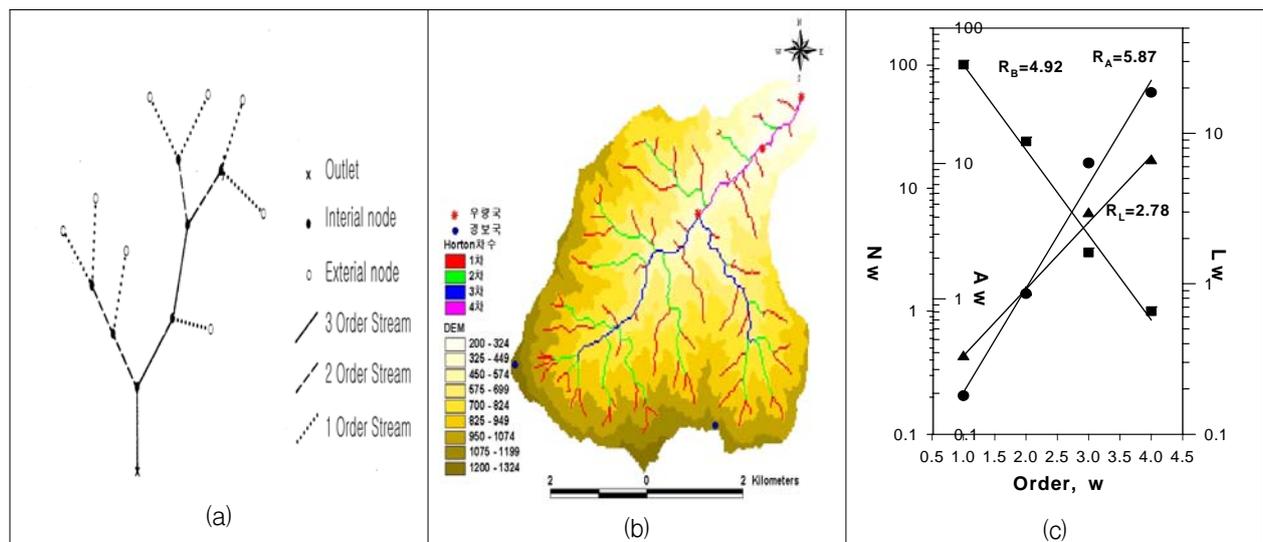


Fig. 1. Description of Horton-Strahler Method

(a) Ordering system, (b) Example of GIS ordering, (c) Horton' law for Dukchun basin, Korea

$$R_L = \frac{\overline{L_w}}{\overline{L_{w-1}}} \quad (3)$$

$$R_A = \frac{\overline{A_w}}{\overline{A_{w-1}}} \quad (4)$$

여기서 R_L 은 길이비(length ratio)이고 R_A 는 면적비(area ratio)라고 정의되며, $\overline{L_w}$ 와 $\overline{A_w}$ 는 각각 w 차 하천의 평균길이와 평균면적으로 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{L_w} = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} L_{wi} \quad (5)$$

$$\overline{A_w} = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} A_{wi} \quad (6)$$

일반적으로 R_B 값은 3에서 5사이의 값을 가지며 4에 가까우며, R_L 값은 1.5에서 3.5 사이 값을 가지며 2에 가깝고, R_A 값은 5를 갖는다고 알려져 있다. Fig. 1.(a)에는 본 연구에서 조사되었던 대상유역 중의 하나인 지리산 덕천강 유역에서의 Horton-GIS 분석 예시이며, 유역의 고도DEM과 동시에 1차에서 4차까지 구축된 하천망을 보여주고 있다. 이때 구축된 하천망자료를 통하여 Horton하천법칙을 적용하여본 결과, Fig. 1.(c)에서와 같이 각각 분기비 $R_B = 4.92$, 길이비 $R_L = 2.78$ 그리고 면적비 $R_A = 5.87$ 로 산정되었다.

2.3 하천밀도 및 빈도

하천밀도(drainage density)는 단위면적당 하천절편(stream segment)의 길이로 정의되며 Eq.(7)과 같이 표현되며, 다시 Horton차수법칙을 이용하여 Eq.(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$D = \frac{L_T}{A_\Omega} = \frac{\sum_{\omega=1}^{\Omega} \sum_{i=1}^{N_\omega} L_{\omega i}}{A_\Omega} = \sum_{\omega=1}^{\Omega} \frac{N_\omega \overline{L_\omega}}{A_\Omega} \quad (7)$$

이때 L_T 는 전체유역면적 A_Ω 내에 있는 하천의 총 연장이다.

$$D = \frac{\overline{L_1} \cdot R_B^{\Omega-1}}{A_\Omega} \frac{R_{LB}^\Omega - 1}{R_{LB} - 1} \quad (8)$$

여기서, $R_{LB} = R_L/R_B$ 이며 하천밀도의 단위는 길이의 역 $[1/L, 1/\text{km}, 1/\text{mile}]$ 으로서 지도의 해상도의 수준에 따라 변화할 수 있는 양이다. Horton은 하천밀도를 유

역 내에서의 하천의 발달 정도를 나타내는 지표로서 정의하였다. 다음 하천빈도(stream frequency)는 단위 면적당의 하천절편들의 개수로 Eq.(9)와 같이 표시된다.

$$F = \frac{\sum_{\omega=1}^{\Omega} N_\omega}{A_\Omega} \quad (9)$$

비록 하천밀도와 하천빈도는 서로 다른 특성을 의미하지만 Melton(1958)은 하천 밀도와 빈도사이에 다음과 같은 Eq.(10)의 관계가 있음을 밝혔다.

$$F = 0.694 D^2 \quad (10)$$

여기서 무차원의 비율인 F/D^2 은 축척에 상관없이 0.694라는 상수 값을 갖는다. 그러나 이들은 모두 Horton수의 함수로서 표현될 수 있으며 이는 궁극적으로 Horton수들은 유역과 독립적인 특성을 가지지 않고 종속적인 상관을 가진다는 것을 의미한다. 이는 다음절에서 Horton수가 유역의 면적, 길이, 경사 등의 특성과 무관하지 않으며, 자기상사성이 있음을 의미한다.

2.4 하천길이와 유역면적 지형상사

유역면적과 하천길이상이에는 지형형태학적인 상사가 존재한다는 이론은 Hack(1957)에 의하여 처음 제기되었다. 실제로 기하학적 상사성을 갖는 물체의 길이 L , 면적 A , 체적 V 사이에 다음 Eq.(11)과 같은 관계식이 존재한다.

$$L \propto A^{1/2} \propto V^{1/3} \quad (11)$$

이 관계는 입방체의 측면이 2 만큼 증가하면, 측면의 면적은 2^2 만큼 증가하고, 체적은 2^3 만큼 증가한다. 다시 말하면 같은 양은 같은 2의 요소에 의해 증가되어진다. 측면이 2배로 될 때 2^D 의 요소에 의해 증가되어지는 X 에 어떤 양이 존재하면 X 는 D 차수를 갖는다고 하고 이를 프랙탈차수(fractal dimension)이라고 하며 (Takayasu,1990), 다음 Eq.(12)의 관계식이 성립된다.

$$L \propto A^{1/2} \propto V^{1/3} \propto X^{1/D} \quad (12)$$

지형형태학에서 단일하천과 하천망을 고정성 자기상사(strictly self-similar)로 가정하면, 분기점의 단일하천의 평균 프랙탈차수를 평가하기 위한 두 번째 식은 A 가 유역면적일 때 Eq.(13)로부터 얻어질 수 있다.

$$L \propto A^{d/2} \quad (13)$$

만약 $d=2\beta$ 라면 Eq.(13)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$L = \alpha A^\beta \quad (14)$$

이때 Eq.(14)를 Hack의 법칙(1957)이라고 정의하며, Shenandoah 강의 자료를 이용하여 $L=1.44A^{0.6}$ 이라는 상관관계를 유도하였으며(mile, mile² 단위), L을 km 그리고 A를 km²의 단위로 환산하면 $L=1.544A^{0.6}$ 가 된다. 여기서 Hack(1957)에 의하면 이론적으로는 β 는 Eq.(12)에서와 같이 0.5가 되어야 하나 그렇지 못한 이유는 자연에서의 유역의 크기가 커지면 유역의 형상이 유지되는 것이 아니라 더 길어지면서 좁아지는 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다.

2.5 하천폭 지형상사

일반적으로 임의 유역의 하천의 폭은 유역의 유역면적, 유로연장 및 유역경사 등의 지형특성인자와 지형형태학적 상사를 가지며, 이와 같은 상관관계는 계획하폭을 계획하기 위한 하천설계에 널리 사용되어 왔다. 우리나라 하천설계기준에는 중소하천을 위하여 다음의 공식들을 사용하도록 권장하고 있다.

$$(\text{남부지방, 호남 영남}) b_\Omega = 1.698 \frac{A^{0.318}}{S^{0.5}} \quad (15)$$

$$(\text{중부지방, 경기, 강원, 충청북}) b_\Omega = 1.303 \frac{A^{0.318}}{S^{0.5}} \quad (16)$$

여기서 b_Ω 는 유역 하구의 하폭(m), A는 유역면적(km²), 그리고 S는 하상경사이다. 그러나 이 공식은 출처가 불분명하며, 본 연구의 대상유역인 산악 소유역을 위하여 개발된 공식이 아니므로 사용하는 데 주의를 요한다. 따라서 본 연구에서는 대상유역에서 현장 관측한 하폭 자료와 GIS 분석을 통하여 얻어진 유역면적, 하도길이, 그리고 하상경사를 이용하여 산악 소유역에 적합한 하천폭 지형상사식을 개발하고자 한다. 특히, 지형수문학 변수에 직접 적용할 수 있도록 최고차 하천폭 b_Ω 을 종속변수로, 유역면적 A, 하천길이 L, 유역경사 S를 독립변수로 하는 비선형 상관분석을 수행하여 최적식을 다음과 같은 기본식을 이용하여 산정한다.

$$b_\Omega = f(A, L, S) \quad (17)$$

2.6 Horton 차수비의 지형 상관분석

앞에서 언급하였듯이 Horton의 차수비는 유역의 지

형형태학적 특성을 무차원으로 표현하는 것으로 유역면적, 하천길이 및 유로경사 등과 자기상사가 존재한다. 그러므로 이러한 Horton차수비인 분기비, 길이비 그리고 면적비들의 지형상관관계는 다음 Eq.(18)과 같이 각각 표현될 수 있다.

$$R_B = f(A, L, S), R_L = f(A, L, S), R_A = f(A, L, S) \quad (18)$$

우리나라 유역에서의 관련된 선행연구인 신현석 등(2004b)에서는 지형특성인자와 GIUH매개변수들과의 상관관계를 분석하는 과정에서 Horton 차수비의 지형상사 특성이 존재함을 규명하였다. 여기서 Eq.(18)에서의 비선형상관분석은 전차(step-forward)상관분석기법에 의하여 수행되며, 우선 대상 독립변수들 중에서 상관이 가장 우수한 변수들을 최적 선정하고, 다음 매개변수를 산정하는 순서로 분석될 수 있다(Salas *et al.*, 1994).

2.7 지형형태-기후학적 단위도 이론

앞에서 언급하였듯이 Rodriguez-Iturbe와 Valdes(1979)는 삼각형 순간단위도 가정에 의한 지형형태학적 순간단위도(Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)를 개발하였다. 여기서 GIUH의 침투유량과 침투시간을 산정하기 위한 공식은 다음 Eq.(19)과 Eq.(20)과 같이 유도되었다.

$$q_p = \frac{1.31}{L_\Omega} R_L^{0.43} V \quad (19)$$

$$t_p = \left(\frac{0.44L_\Omega}{V} \right) \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} \quad (20)$$

여기서, R_A , R_B , R_L 는 각각 Horton의 면적비, 분기비, 연장비이며, L_Ω 는 km단위의 최고차 하천길이이다. 또한 V는 m/sec단위의 예측되어지는 침투속도이며, 침투유량 q_p 는 hr⁻¹의 단위를 가지고, 침투시간 t_p 는 hr의 단위를 가진다.

그러나 지형형태학적 순간단위도를 사용함에 있어 곤란한 점은 침투유량과 침투시간이 침투속도로 표현되어 있으며 이에 지배적이라는 점이다. 실제로 침투유속은 하천특성에 따라 주관적으로 산정되기 쉬운 매개변수로서의 산정에 문제가 있다. 이어 Rodriguez-Iturbe *et al.*(1982a)은 침투속도를 유효강우강도와 강우지속기간의 함수로 유도하여 q_p 와 t_p 를 각각 Eq.(3)과 Eq.(4)와 같이 다시 유도하였으며, 이를 지형형태-기후학적

순간단위도(Geomorpho-Climatic Instantaneous Unit Hydrograph, GCIUH)라 정의하였다.

$$q_p = \frac{0.871}{\Pi_i^{0.4}} \quad (21)$$

$$t_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} \quad (22)$$

여기서,

$$\Pi_i = \frac{L_\Omega^{2.5}}{(i_r A_\Omega R_L a_\Omega^{1.5})} \quad (23)$$

$$a_\Omega = \frac{S_\Omega^{0.5}}{(n b_\Omega^{2/3})} \quad (24)$$

그리고 i_r 는 평균 유효강우강도, n 은 Manning의 조도계수에 해당한다. 다음으로 q_p 와 t_p 가 삼각형순간단위도를 가지며, 이들을 유효강우강도 i_r 과 강우지속기간 t_r 을 가지는 균등한 사각형 강우주상도를 이용해 회전적분하면, 유출수문곡선의 첨두특성치들은 각각 Eq.(25)와 Eq.(26)과 같이 유도된다(Rodriguez -Iturbe *et al.*, 1982a).

$$\frac{Q_p}{Q_e} = t_r q_p \left(1 - \frac{t_r q_p}{4} \right) \quad , \quad t_r \leq t_c = t_B \quad (25)$$

$$Q_p = Q_e = i_r A, \quad t_r = t_c \quad (26)$$

여기서, Q_e 는 평형유출량(m^3/sec), t_r 은 강우지속시간(hr), t_B 는 순간단위유량도의 기저시간(hr)으로 유역 도달시간 t_c 와 같다. 다시 Eq.(21)과 (22)를 Eq.(25)와 (26)에 대입하면 다음과 같이 일반적인 단위도의 첨두유량 및 첨두시간 산정을 위한 식으로 각각 나타내어진다.

$$Q_p = 2.42 \frac{i_r A_\Omega t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.218 t_r}{\Pi_i^{0.4}} \right) \quad (27)$$

$$T_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} + 0.75 t_r \quad (28)$$

이들 두식을 지형형태-기후학적 단위도(Geomorpho-Climatic Unit Hydrograph, GCUH)라고 정의한다. 이와 같은 GCUH는 기존의 단위도법들과는 큰 차이를 가지고 있다. 우선 강우와 유출의 관계를 정의함에 있어서 조정 매개변수를 필요로 하지 않으며, 이론적으로 입력 변수들은 유역의 지형형태학적인 변수들과 기후학적인

강우특성 변수들로만으로 구성됨을 알 수 있다. 또한, 기존의 단위도법들은 선형가정에 의하여 동일한 강우에는 동일한 유출반응을 갖는다는 원리이나 지형형태-기후학적 단위도는 식에서 볼 수 있듯이 강우와 유출은 비선형적인 관계를 가지고 있으며 이는 실제 산악유역에서의 기상현상과 유출현상을 보다 정밀하게 모의할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 상기에서 유도된 지형형태학적 순간단위도(GIUH), 지형형태-기후학적 순간단위도(GCIUH) 그리고 지형형태-기후학적 단위도(GCUH)를 통틀어 지형수문단위도(geomorphological unit hydrograph, GUH)라고 정의하기로 한다.

3. 한국형 지형단위도 개발 및 적용

3.1 연구 절차

본 절에서는 상기에서 정리되었던 지형상사 이론 및 지형수문단위도 기법을 이용하여 한국형 지형수문단위도를 개발하였다. 이는 두 가지 측면에서 의의를 가질 수 있다. 첫째는 한국 산악유역의 지형 특성의 분석을 통한 한국형 단위도를 유도한다는 것이고, 둘째는 기존의 지형수문단위도의 입력변수인 Horton 차수비 및 지형특성 자료들은 GIS 등의 복잡한 과정을 통하여 선정되어야 하나 제안되는 기법에서는 단순한 지형특성자료만으로도 지형수문곡선을 성공적으로 유도할 수 있다는 점에서 시사하는 바가 크다. 한국형 지형수문단위도를 유도하는 과정은 Fig. 2와 같다.

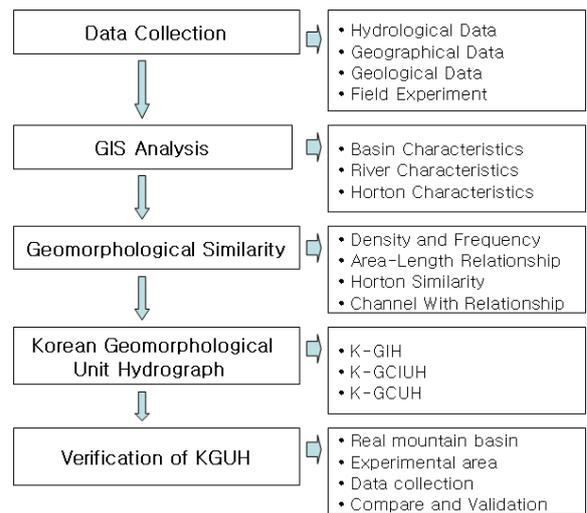


Fig. 2. Procedure of Developing Korean Geomorphological Unit Hydrograph

본 연구에서는 우선적으로 우리나라 전국의 산악유역을 대표할 수 있는 지역들을 선정하였다. 이들 지역은 유역의 크기나 형상 등에 있어서 가급적 상이한 특

성을 가질 수 있도록 하였으며, 대표성을 가질 수 있는 최소한 40개 지역 이상의 지점을 선정하였다. 다음은 각 대상유역에 대한 수문학적, 기상학적, 수리학적, 지형형태학적 그리고 지질학적인 기초자료 들을 하천정비 기본계획을 비롯한 다양한 문헌 자료를 통하여 수집하여 정리하였다. 더불어 유역 출구의 하도폭 및 조도계수의 정밀도를 높이기 위하여 모든 대상유역에 대한 현장답사와 실측을 수행하였다. 다음 각 대상유역들의 DEM 자료를 국립지리원으로부터 입수하여 수문 GIS 분석을 수행하였다. 이 분석을 통하여 유역면적, 유역경사, 하도망, 하도특성 그리고 Horton 하천차수등의 분석을 일괄적으로 수행하여 분석을 위한 기초자료를 준비하였다. 이와 같이 구축된 지형특성자료들을 이용하여 상기에서 언급한 하천밀도와 하천빈도, Hack의 법칙, 하천폭 지형상사 공식, Horton 차수비 지형상사 분석을 수행하였다. 마지막으로 제안된 지형수문단위도에 위에서 선정된 상사공식들을 직접 대입하여 지형형태학적 순간단위도(GIUH), 지형형태-기후학적 순간단위도(GCIUH) 그리고 지형형태-기후학적 단위도(GCUH) 등의 한국형 지형수문단위도 공식들을 유도하였으며, 이들의 적용 가능성을 다양한 방법으로 검증하였다.

3.2 대상유역 및 자료 구축

본 연구의 대상 유역은 모두 우리나라의 국립공원 및 각 지자체의 주요 관광지로 모든 유역이 하천의 최상류에 위치하는 산악지역이며 유역경사 자체가 매우 급해 빠른 유출 특성 나타내는 지역들이다. 대상유역을 선정하는 기본 원칙은 유역면적 9~200 km² 이내를 가지는 한국의 대표적인 산악유역을 포함할 수 있도록 하였으며 이들 유역이 지형특성상 집중되지 않도록 하는 것이었다. Fig. 3에 각 대상유역의 대략적인 위치를 원으로 표시하였으며 원 안의 숫자는 Table 2에서와 같이 유역 및 산지명 또는 행정구역상의 위치를 나타내는 구분기호로 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 대상유역은 우리나라의 대표적인 산악지역인 지리산, 덕유산, 속리산 등을 모두 포함하고 있다.

각 대상유역에 대하여는 앞에서 개략적으로 언급하였듯이 두 가지 방법으로 지형자료들을 수집하였다. 첫째는 직접 현장을 답사하여 Manning의 조도계수와 최고차 하천의 하도폭을 실측하였다. 이때, Manning 조도계수는 현장의 하상재료들을 수집하고 Cowen의 기법을 적용하여 경험적으로 산정하였으며, 최고차 하천의 하도폭은 유역의 하구지점에서 상·하류로 근거리 5지점 이상에 대한 현장 측량을 수행하고 이들을 평균하여 산정하였다. 다음은 각 대상유역의 유역면적, 최고차하

도 평균경사, 최고차하도 연장, 분기비, 연장비, 면적비는 최근에 널리 사용되고 있는 Arcview를 모형내의 수문GIS분석기법을 활용하여 산정하였다. 참고로 모든 유역에 대하여 DEM 분석 시에 30 × 30 m 해상도와 임계점 픽셀수 100개를 활용하여 하도망을 구축하고 이를 이용하여 유역특성, 하도특성 및 Horton차수비를 산정하였다. 임계점 픽셀수에 대하여는 이론적으로 유역면적 및 특성에 따라 각 대상유역에 대하여 선정되어야 하나, 분석되는 대상유역 자료의 일관성 및 상대 비교성을 위하여 다양한 픽셀수 분석에 의하여 선정된 일괄적인 픽셀수를 전 대상유역에 적용하였다. 본 연구에서는 모든 대상유역에 대한 분석과정과 결과를 지면상 보여주기 곤란하므로 Fig. 2에 대표적으로 대상유역 중의 하나인 충청북도 남천상류 지점에 대하여 정리한 자료를 보여주고 있다.

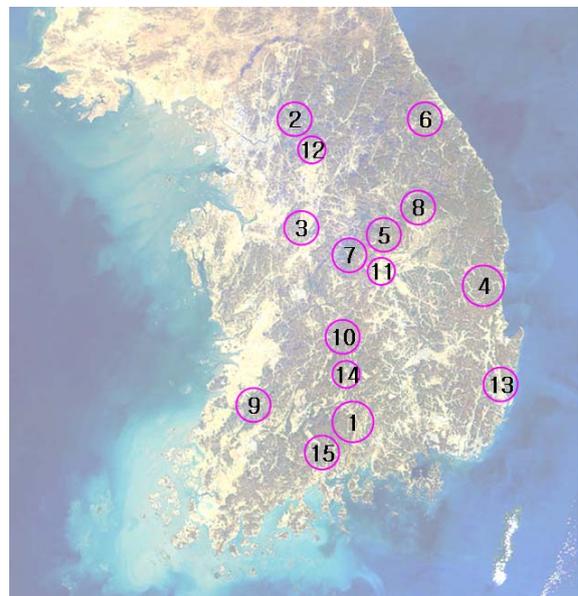
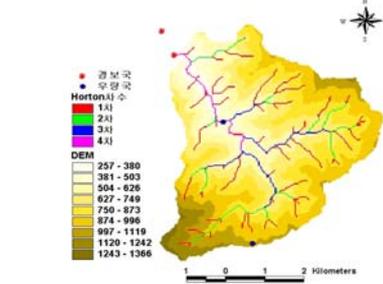


Fig. 3. Locations of Study Regions

이상과 같이 구축된 각 대상유역의 자료를 Table 2에 정리하였다. 표에서 볼 수 있듯이 대상유역들은 유역면적이 9 ~ 162 km²의 범위를 나타내었고 평균적으로 약 40 km²를 나타내고 있다. 하천길이는 최소 3 km에서 약 40 km의 범위를 나타내었고 평균적으로 약 12km를 나타내는 유역들이다. 또한 최고차 하천길이는 평균 5.3 km 정도로 최소 1 km에서 14 km의 범위에 있다. 최고차하천의 하폭의 크기는 평균적으로 약 22 m 이었으며 최소 12 m에서 최대 66 m를 나타내고 있다.

한국산악유역에서의 분기비는 Fig. 2에서와 같이 3.0에서 4.9의 범위를 나타내고 있으며 평균적으로 약 4.1

Table 1. Sample Results of Field Experiment and GIS Analysis for Namchun, S. Korea

Basin Name	Namchun	Location	Namchun-ri, Chungcheongbuk-do, South Korea						
Items	Area (A_{Ω} , km ²)	Stream length (L , km)	width for highest order stream (b_{Ω} , m)	slope for highest order stream (S_{Ω} , m/m)	length for highest order stream (L_{Ω} , km)	Bifurcation (R_B)	Length ratio (R_L)	Area ratio (R_A)	Manning coefficient (n)
분석결과	22.959	9.528	13	0.118	4.064	3.965	2.232	4.584	0.072
Field picture					Horton order network				

을 나타내었다. 이는 이론적인 분기비가 자연하천에서 4.0임을 감안하면 한국의 산악하천은 Horton의 지형상사의 의존적임을 알 수 있다. 또한, 길이비는 평균 2.2를 가지며 1.5에서 3.0의 범위 안에 있으므로 Horton의 일반적인 길이비의 범위에 있다. 마지막으로 면적비는 3.0에서 5.0의 사이에 존재하며 평균적으로는 약 4.2의 값을 나타내었다. 결론적으로 대상인 한국의 산악유역에서 발견된 지형법칙에 관련된 대푯값들은 일반유역에서 관측된 범위 내에 포함되므로 Horton의 지형법칙을 사용할 수 있다고 가정하였으며, 이는 한국하천의 자기상사성을 입증하는 결과로서 의미가 있다.

3.3 한국 산악유역 지형상사분석 결과

본 연구에서는 위에서 수행한 GIS를 이용한 Horton 하천망 분석 결과를 사용하여 각 차수별 하천수 N_w , 유역면적 A_{Ω} 을 산정하였으며, 이들을 Eq.(7)과 (9)에 각각 대입하여 하천밀도 및 하천빈도를 각 대상유역에 대하여 산정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 보여주고 있다. 하천 밀도는 유역의 하천망의 발달을 나타내는 척도로 결과적으로 한국의 산악 유역에서는 평균적으로 2.006이며 표준편차가 0.323으로 대략적으로 평균 근처에 밀집되어 있고 하천망이 고르게 발달해 있음을 알 수 있었다. 또한 하천 빈도는 단위 면적당의 하천절편의 수로서 평균 2.868로 대체로 높은 편이나 표준편차가 0.640로 하천밀도보다는 표준편차가 다소 큰 것으로 평가되었다. 이는 유역별로 하천밀도 보다는 하천의 빈도의 편차가 큰 한국산악유역의 하천 발달 특성을 잘

표현한다고 볼 수 있다. 또한, Melton의 결과에서는 하천밀도와 하천빈도 사이에 $F/D^2=0.694$ 의 결과가 산출되었고(Rodrigueg-Iturbe와 Rinaldo, 2003), 우리나라의 산악 하천에서도 $F/D^2=0.693$ 으로 산정되어 Melton의 결과와 거의 일치하므로 한국의 산악하천도 Melton의 법칙을 따름을 간접적으로 알 수 있었다.

다음은 Eq.(14)와 같은 멱함수로 표현되는 Hack의 유역면적과 하천길이의 상관분석을 수행하였다. 여기서 분석 결과를 설명하기 이전에 이후의 여러 상관분석에 사용된 도구를 설명하면 다음과 같다, 우선 한 개의 종속변수에 대한 다양한 독립변수가 존재하는 경우에는 우선 최적의 독립변수를 선정하여야 한다. 이의 과정은 Salas *et al.*(1994)의 FORSEL(Foreward Selection Method)프로그램에 의한 선행변수선정법을 적용하였다. 이들 기법에 대한 상세한 설명은 문헌을 참고할 수 있을 것이며, 이후에는 기법에 대한 설명을 생략하기로 한다. 결과적으로 유역면적과 유로연장의 상관관계를 Table 2의 자료를 이용하여 분석한 결과는 다음 식과 같으며 Fig. 4.(a)에 보여주고 있다.

$$L = 1.156A^{0.663} \quad (29)$$

결과적으로 산정된 매개변수들은 각각 $\alpha = 1.156$, $\beta = 0.663$ 이었으며 이때 상관계수는 0.93으로 상당히 높음을 알 수 있었다. Hack의 α 값이 1.54 이고 β 값이 0.6인 점을 감안하면 한국 산악유역에서의 α 값은 다소 작은 경향을 보이고 있으며, β 값은 다소 큰 경향을 보이

Table 2. Total Results of Field Experiments and GIS Analysis for All Subjected Regions

Region No.	Site No.	Basin Name	Area A_{Ω} (km ²)	Length L (km)	Stream Width b_{Ω} (m)	Stream Slope S_{Ω} (m/m)	Length L_{Ω} (km)	Bif. R_B	Length ratio R_L	Area ratio R_A	Manning n
1	1-1	Daewon	34.600	14.989	27	0.099	8.880	4.450	2.790	3.390	0.055
	1-2	Dukchun1	21.810	6.564	19	0.030	2.530	4.010	1.890	4.660	0.055
	1-3	Dukchun2	71.394	20.412	51	0.024	3.420	3.980	2.050	4.500	0.040
	1-4	Dukchun3	103.562	23.070	66	0.037	8.060	4.290	2.260	4.870	0.040
	1-5	Dukchun4	33.383	13.019	27	0.079	6.570	4.920	2.780	3.870	0.055
	1-6	Dukchun5	103.773	23.603	60	0.044	10.230	4.270	2.330	4.820	0.045
	1-7	Chungam	40.198	13.969	31	0.078	13.100	4.980	2.930	3.780	0.055
	1-8	Hagae1	21.318	8.707	19	0.098	2.170	4.310	2.050	3.060	0.055
	1-9	Hagae2	113.374	22.153	58	0.055	13.640	4.230	2.370	4.820	0.038
	1-10	Munsu	22.520	10.824	20	0.129	4.860	4.210	2.490	3.130	0.055
	1-11	Bamsa1	43.692	14.778	35	0.089	10.540	4.760	2.980	3.900	0.055
	1-12	Bamsa2	100.388	22.690	64	0.077	7.920	4.130	2.270	4.790	0.040
	1-13	Samjung1	23.147	7.064	20	0.096	3.150	3.960	1.950	4.700	0.055
	1-14	Samjung2	21.677	9.949	19	0.131	4.830	4.070	2.300	4.910	0.055
	1-15	Dukchun6	30.318	12.746	27	0.124	4.531	4.335	2.226	3.027	0.078
	1-16	Nawon	26.847	12.836	23	0.133	7.431	4.330	2.655	3.111	0.068
	1-17	Jungsan	17.782	7.593	43	0.129	1.224	3.882	1.673	4.523	0.083
	1-18	Gulim	30.218	10.475	34	0.114	4.291	4.266	2.257	4.990	0.068
2	2	Gapung	103.774	20.496	66	0.100	12.159	3.931	2.182	4.412	0.080
3	3	Miho	64.623	39.464	46	0.015	7.414	3.465	1.736	3.942	0.064
3	4	Juwang	16.738	7.445	14	0.147	1.648	3.728	1.685	4.336	0.068
5	5	Youngha	39.928	10.722	18	0.081	7.478	4.789	2.708	3.646	0.068
6	6-1	Sogeum1	24.871	8.800	24	0.112	3.164	4.487	2.091	3.201	0.078
	6-2	Sogeum2	30.647	11.797	24	0.060	3.780	4.991	2.503	3.785	0.065
7	7	Sanggok	27.506	8.748	17	0.061	4.579	4.277	2.146	4.906	0.073
8	8	Namchun	22.959	9.528	13	0.118	4.064	3.965	2.232	4.584	0.072
9	9	Namchang	12.411	6.302	16	0.056	1.991	3.031	1.847	3.733	0.068
10	10-1	Ansung	12.299	3.464	15	0.094	1.863	3.205	1.591	3.712	0.073
	10-2	Guchun	20.991	10.312	18	0.085	1.999	4.184	1.920	4.998	0.075
	10-3	Dukyu	21.090	7.431	17	0.085	4.873	3.984	2.375	4.655	0.058
11	11	Sujae	9.901	3.467	13	0.045	1.062	3.157	1.605	3.833	0.053
12	12-1	Jangheung	33.830	11.684	28	0.157	8.295	4.639	2.816	3.449	0.068
	12-2	Danwol	17.800	8.567	19	0.075	2.583	3.704	1.939	4.392	0.073
	12-3	Youngmun	71.953	24.697	31	0.181	2.870	4.017	1.906	4.504	0.063
	12-4	Seojong	13.222	3.630	23	0.108	2.368	3.669	1.858	4.245	0.075
	12-5	Okchun	19.773	8.887	21	0.087	4.179	3.774	2.275	4.518	0.068
13	13-1	Banae	13.647	6.684	14	0.053	2.997	3.846	1.860	4.407	0.063
	13-2	Suknam	18.469	6.978	14	0.047	2.246	3.793	1.731	4.381	0.068
14	14-1	Bujun	13.381	7.486	12	0.066	3.267	3.868	2.210	4.473	0.068
	14-2	Namgang	162.949	28.807	46	0.040	13.946	4.642	2.351	3.221	0.072
	14-3	Yongchu	29.038	10.198	20	0.116	7.666	4.184	2.607	4.962	0.063
15	15-1	Donggok	20.969	8.080	22	0.087	4.106	3.810	2.206	4.445	0.079
	15-2	Uchi	19.714	9.796	20	0.074	2.715	3.843	2.355	4.743	0.078
Minimum			9.901	3.464	12	0.015	1.062	3.031	1.591	3.027	0.038
Maximum			162.949	39.464	66	0.181	13.946	4.991	2.980	4.998	0.083
Average			39.593	12.533	28	0.086	5.365	4.102	2.209	4.194	0.063
Standard deviation			31.897	5.893	8	0.037	2.889	0.502	0.347	0.540	0.006

Table 3. Results of Stream Density(D) and Frequency(F) for Korean Mountain Streams

Site No.	D	F	F/D ²	Site No.	D	F	F/D ²
1-1	2.040	2.888	0.694	6-2	1.819	2.296	0.694
1-2	2.129	3.145	0.694	7	2.043	2.897	0.694
1-3	2.154	3.221	0.694	8	2.017	2.824	0.694
1-4	2.167	3.258	0.694	9	2.316	3.722	0.694
1-5	2.078	2.998	0.694	10-1	2.317	3.726	0.694
1-6	2.075	2.988	0.694	10-2	2.028	2.855	0.694
1-7	2.107	3.082	0.694	10-3	2.002	2.780	0.694
1-8	2.039	2.886	0.694	11	2.006	2.793	0.694
1-9	2.025	2.652	0.647	12-1	1.798	2.245	0.694
1-10	1.844	2.360	0.694	12-2	2.142	3.184	0.694
1-11	1.900	2.506	0.694	12-3	1.996	2.764	0.694
1-12	1.924	2.569	0.694	12-4	2.146	3.195	0.694
1-13	2.220	3.420	0.694	12-5	2.124	3.132	0.694
1-14	2.005	2.789	0.694	13-1	2.016	2.821	0.694
1-15	1.851	2.378	0.694	13-2	2.100	3.060	0.694
1-16	2.051	2.921	0.694	14-1	1.989	2.746	0.694
1-17	2.169	3.265	0.694	14-2	2.266	3.563	0.694
1-18	2.582	4.626	0.694	14-3	1.969	2.691	0.694
2	2.029	2.858	0.694	15-1	1.913	2.540	0.694
3	2.194	3.339	0.694	15-2	1.741	2.102	0.693
4	2.018	2.826	0.694	Mean	2.006	2.868	0.693
5	1.902	2.512	0.694	Standard Deviation	0.323	0.640	0.007
6-1	1.824	2.310	0.694				

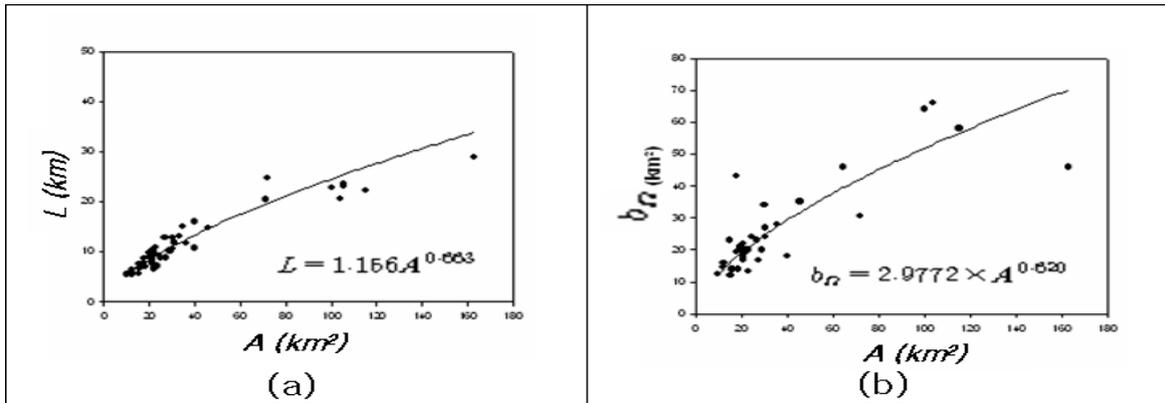


Fig. 4. Self-Similarity Properties on Korean Mountain Region
 (a) Basin Area and Stream Length and (b) Basin Area and Stream Width

고 있다. 이러한 Hack의 법칙은 유역의 기하학적인 유사성이 유역의 형상이 동일하다는 가정 하에서 성립된다는 것을 의미한다. 그러나 그가 언급하였듯이 일반적으로 하천의 유역형상은 정확하게 상사하는 것은 아니며, 유역면적이 증가할수록 A/L^2 은 오히려 감소하며, 이는 다시 말하면 유역형상은 유역면적이 커질수록 더 길어지기(enlongation) 때문이라는 것이다. 따라서 본 연구의 대상유역의 면적이 200 km²이하의 산악 소유역임을 감안하면, β 값이 0.6보다 증가하는 결과는 이러한 원인이라고 추론할 수 있을 것이나 보다 구체적인 연구가 차후에 수행되어야 할 것이다.

하천폭 유역특성과 상관성을 가지고 있다는 것은 일반적인 이론으로, 미세측유역의 하폭의 산정이나 설계를 위하여 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 유역면적, 유역경사 그리고 하천길이와의 상관분석을 수행하여 결과적으로 Eq.(30)을 얻었으며, Fig. 4.(b)에 보여주고 있다.

$$b_{\Omega} = 2.9772 \times A^{0.620} \quad (30)$$

앞에서 언급하였듯이 사용된 대상유역의 하천폭 자료는 43개 대상유역을 직접 현장 측량하여, 그리고 유

역면적, 유역경사 그리고 하천길이는 수문GIS 분석을 통하여 분석된 Table 2의 결과를 사용하였다. 우선 FORSEL 분석을 수행한 결과 유역면적 단독 변수만으로도 한국 산악유역 하천의 하폭을 산정하기 위한 유의한 상관식을 얻을 수 있었으며, 이때 상관계수는 0.871이었다. 이와 같이 산정된 공식은 기존에 산악 소유역의 설계에 반영할 공식이 부재하였다는 측면에서 앞으로 유용하게 활용될 수 있는 결과라고 판단된다.

Eq.(18)과 Table 2의 결과를 이용하여 Horton 차수비(분기비, 면적비 그리고 길이비)와 유역특성자료(유역면적, 하천길이, 그리고 유역경사)간의 자기상사성을 검토하였다. 이와 같은 분석은 이미 신현석 등(2004)에서 지리산 유역을 대상으로 수행되었으며, 본 연구에서는 이들 연구를 전국의 산악유역을 대상으로 확장하여 보다 우리나라에 적용할 수 있는 범용의 상관관계식을 유도하고자 하였다. Horton 차수비와 유역특성과의 상관관계의 분석을 수행하던 중에 본 연구에서는 상당히 의미가 있는 우리나라 산악유역의 지형상사특성을 발견할 수 있었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, Horton차수비 특성이 개략 유역면적에 대해서는 50 km² 정도에서, 그리고 하천길이에 대해서는 개략 12 km 정도에서 분리되는 것이 명확하게 나타났다. 본 연구에서는 이들을 각각 임계유역면적(threshold basin area)과 임계유로연장(threshold stream length)로 정의하기로 한다. 이 결과가 의미하는 것은 우리나라의 산악유역의 유역 및 하천 특성은 임계점을 가지며, 이는 유출 및 유사분석을 포함한 하천유역의 수리수문학적인 특성이 임계점을 보다 작은 유역과 큰 유역이 상이할 수 있다는 것을 의미한다. 이를 지형형태학에서는 다중상사(multi-similarity)라고 정의하기도 한다(Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 2003). 이와 같은 결과는 외국의 문헌에서도 언급되고 있으며, 특히 Smith(1992)의 연구에서 임계유역면적 51.8 km², 259 km² 에서 유출특성이 분리되는 현상과

Gupta *et al.*(1994)의 연구에서 임계유역면적 23.9 km², 51.8 km², 259 km² 에서 분리되는 현상에 대한 연구가 있었다. 본 연구에서는 면적과 길이의 임계기준 중에서 편의를 위하여 임계유역면적을 준용하기로 하였으며 이에 따라서 Horton 차수비들과 유역 특성 값들 간의 상관관계를 분석하여 Fig. 6 및 Table 4와 같이 최적한 상관공식들을 유도하였다. 그림에서와 같이 임계유역면적으로 선정한 50 km² 이상인 경우와 이하인 경우의 분기비, 길이비 그리고 면적비에 대한 각각의 공식이 유도되었으며, 이들은 다음에 지형형태학적 수문단위도를 유도하는 데 사용되었다.

Table 4. Results of Relationship between Horton Ratios and Geophysical Factors

Threshold basin area	Relation Equations	Correlation coefficients
below 50 km ²	$R_L = 0.668L^{0.538}$	0.8697
	$R_A = 1.802A^{0.314}$	0.9318
	$R_B = 1.540A^{0.312}$	0.9228
above 50 km ²	$R_L = 0.495A^{0.322}$	0.8661
	$R_A = 1.578A^{0.236}$	0.8519
	$R_B = 1.387A^{0.237}$	0.8533

3.4 한국형 지형수문단위도 개발

3.4.1 개요

본 연구에서는 앞 절에서 설명된 지형수문학적인 단위도 기법을 이용하여 우리나라에 적합한 홍수량 산정식을 개발하고자 한다. 이를 위해서 우선적으로 앞 절에서 다루었던 다양한 한국 산악지역의 상사성 분석 결과들, 특히 Horton의 차수비 상관식과 하천폭 상관식을 활용하였다. 한 가지 특이할 점은 전 절에서 연구된 우리나라의 Horton특성의 다중상사성으로 한국형 지형수문단위도의 유도를 위해서도 유역면적 50 km² 미만과 이

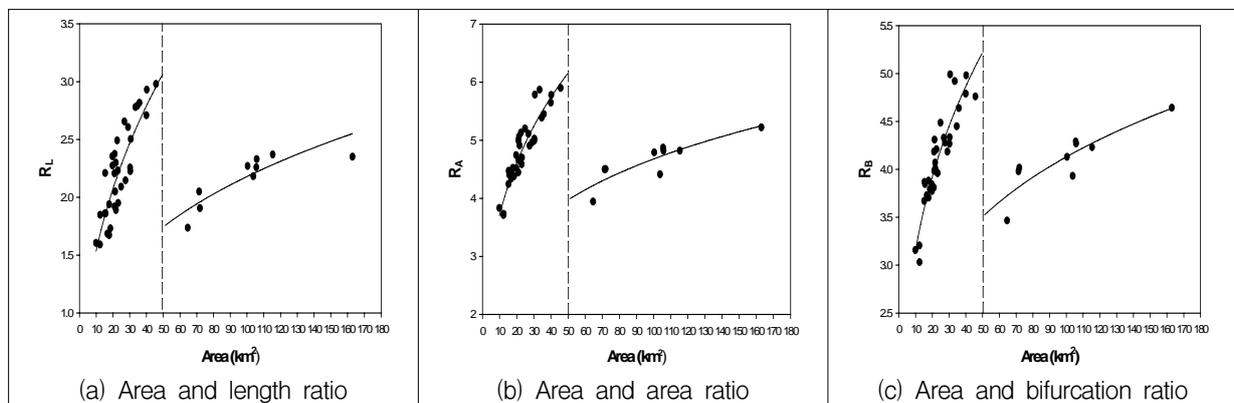


Fig. 5. Relationships between Basin Area and Horton Ratios : Finding Threshold Area (50 km²)

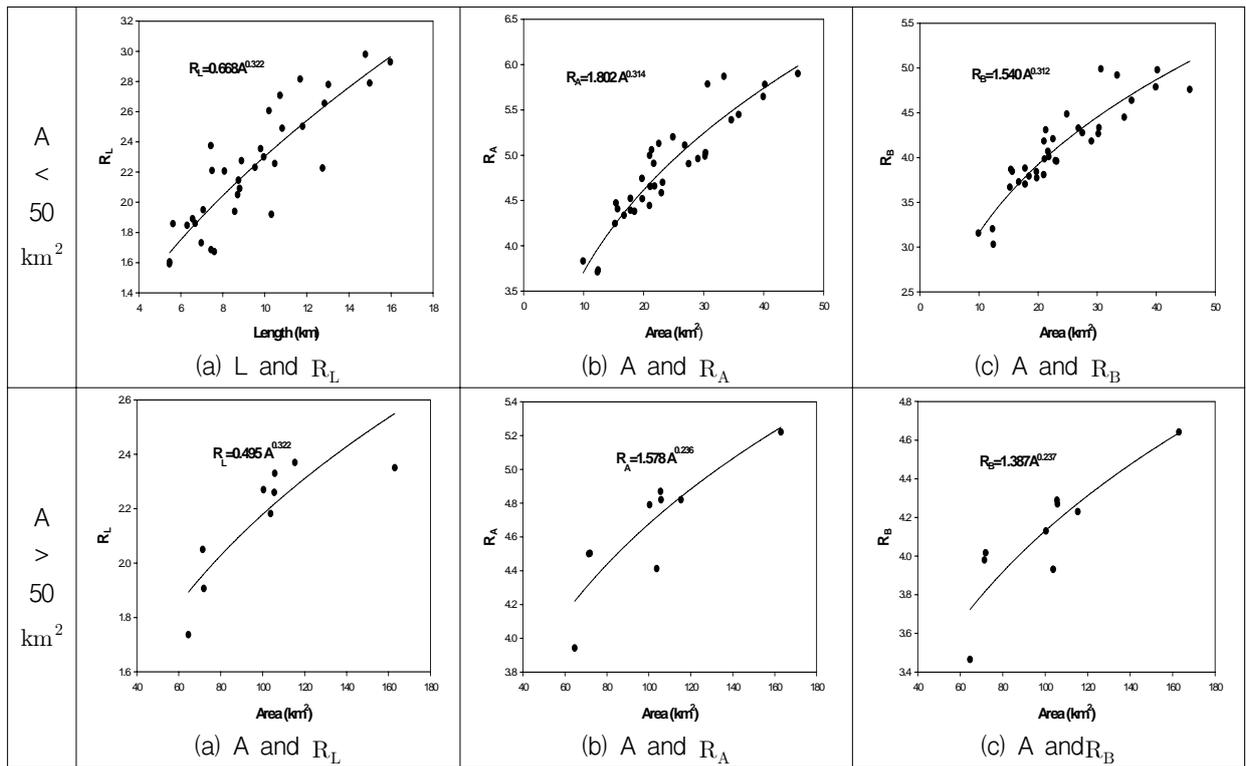


Fig. 6. Results of Relationship between Horton Ratios and Geophysical Factors

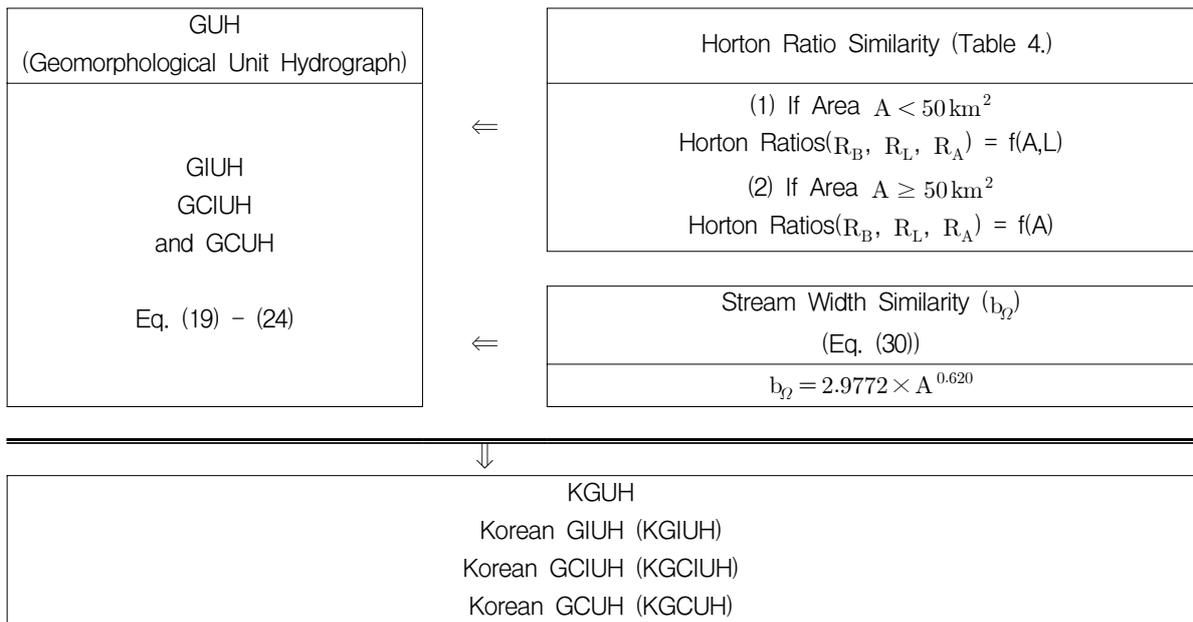


Fig. 7. Procedure of Developing Korean Geomorphological Unit Hydrograph Equations

상을 가지는 유역에 대해서는 상이한 공식을 유도할 수 있었다. 또한, 본 연구에서는 적용성의 다양화를 위하여 기존에 제안된 3가지 형태의 지형수문단위도 기법, 즉 GIUH, GCIUH 그리고 GCUH에 대한 한국형 공식을 KGIUH, KGCIUH 그리고 KGCUH로 명명하여 개발하였으며, 개발 과정의 상세는 Fig. 7과 같다.

3.4.2 한국형 지형형태학적 순간단위도 (KGIUH)
우선 Eq. (19)와 (20)의 지형순간단위도 공식들에 Table 4의 Horton 차수비 상관식과 Eq. (30)의 하천폭 상관식을 유역면적 50 km^2 미만과 이상으로 분리하여 정리하여 다음과 같은 한국형 지형형태학적 순간단위도 (KGIUH)식을 유도하였다.

유역면적이 50 km² 미만일 때,

$$q_P = \frac{0.84}{L_\Omega} L_\Omega^{0.23} V \quad (31)$$

$$t_P = \frac{0.47 L_\Omega^{0.796}}{V A_\Omega^{0.0011}} \quad (32)$$

유역면적이 50 km² 이상일 때,

$$q_P = \frac{0.968 A_\Omega^{0.138}}{L_\Omega} V \quad (33)$$

$$t_P = \frac{0.535 L_\Omega}{V A_\Omega^{0.122}} \quad (34)$$

와 같다.

3.4.3 한국형 지형형태-기후학적 순간단위도 (KGCIUH)

마찬가지로 Eq. (21)에서 (24)의 지형형태-기후학적 순간단위도 공식들에 Table 4의 Horton 차수비 상관식과 Eq. (30)의 하천폭 상관식을 유역면적 50 km² 미만과 이상으로 분리하여 정리하여 다음과 같은 한국형 지형형태-기후학적 순간단위도(KGCIUH)식을 유도하였다.

유역면적이 50 km² 미만일 때,

$$\Pi_i = 1.497 \frac{L_\Omega^{2.5}}{(i_r A_\Omega L_\Omega^{0.538} a_\Omega^{1.5})} \quad (35)$$

유역면적이 50 km² 이상일 때,

$$\Pi_i = 2.179 \frac{L_\Omega^{2.5}}{i_r A_\Omega^{1.322} a_\Omega^{1.5}} \quad (36)$$

여기서, 공통인자는 Eq. (21), (22)와 다음 Eq. (37)과 같다.

$$a_\Omega = 0.483 \frac{S_\Omega^{0.5}}{(n A_\Omega^{0.414})} \quad (37)$$

3.3.4 한국형 지형형태-기후학적 단위도 (KGCUH)

마지막으로 Eq. (27)과 (28)의 지형형태-기후학적 단위도 공식들을 유도하면 다음과 같이 Eq. (38), (39)의 한국형 지형형태-기후학적 단위도(KGCUH) 공식을 얻을 수 있었다. Table 5에는 기존의 GCUH와 KGCUH를

비교하여 정리하였다. 두 공식의 차이점은 크게 두 가지로 나누어질 수 있을 것이다. 첫째는 기존의 GCUH에서는 Horton의 길이비가 사용된 반면에, 제안된 KGCUH에서는 사용되는 입력변수가 모두 직접측정이 가능한 지형변수로 구성되었다는 점이다. 이는 기존에 대상유역에 대한 불확실한 GIS-Horton 분석의 노력을 줄일 수 있는 간편법이 될 수 있을 것이다. 두 번째는 한국 산악지형의 지형상사를 이용하여 한국형 지형형태에 직접 적용할 수 있는 모형을 제시하였다는 점으로, 기존의 단위도법의 매개변수의 산정에 따른 불확실성을 줄일 수 있으며, 다양한 지형형태에 따른 단위도 반응을 고려할 수 있을 것이다.

3.5 KGCUH 검증

본 절에서는 제안된 한국형 지형형태-기후학적 단위도와 기존의 전통적으로 사용되어오고 있는 Snyder, SCS 및 Clark 기법을 사용하여 기법적인 측면뿐만 아니라 활용성 측면에서의 적용성을 검증하여 보았다. 검증 유역으로는 모형개발에 사용되지 않았던 안동댐 유역을 대상으로 하였다. 본 모형의 적용을 위해서는 가급적 산악의 소유역의 적용이 검토되었으나, 우리나라의 자료 관리 실정상 다수의 신뢰성 있는 홍수사상 자료를 수집하기에 한계가 있었다. 안동댐 유역의 적용을 위하여 사용된 홍수사상 자료는 Table 6과 같이 6개의 대표적인 강수사상을 추출하여 정리하였다. 특히, 강수량 자료는 유역내의 풍산, 의촌, 고선, 영양, 안동 및 춘양의 기상청 및 국토해양부 강우관측망 자료를 사용하여 Kriging, 기법을 사용한 유역평균강우량을 생성하여 적용하였다. 그리고 단위도 유도를 위한 유역 특성 자료는 Table 7과 같이 산정하여 제시하였다.

우선 안동댐유역의 1시간 대표단위도를 매트릭스단위도법을 사용하여 유도하였다. 이때, 유도된 대표단위도의 첨두유량은 20.5 m³/sec 이었으며, 첨두발생시간은 12hr 이었다. 다음은 제안된 KGCUH 기법과 전통적인 Clark, Snyder, SCS 기법을 이용한 단위도를 각각 유도하였다. 여기서 KGCUH 기법은 단위도의 첨두유량을 Eq. (49), 그리고 첨두도달시간은 Eq. (50)에 Table 7의 자료를 사용하여 직접 도출하였으며, 기법의 특성상 변수의 최적화 과정은 없었다. Clark 단위도법은 도달시간 결정을 위한 산정식, 저류상수를 다양하게 변환하면서 다양한 최적화 과정을 통하여 첨두유량 및 첨두도달시간을 결정하였다. 다음 Snyder 단위도는 다양한 유역 특성상수와 저류상수의 최적화 과정을 통하여 단위도를 유도하였다. 마지막으로 SCS 단위도 다양한 도달시간 및 지체시간 공식을 최적화하여 단위도를 유도하였다.

Table. 5 Descriptions of Korean Geomorpho-Climatic Unit Hydrograph Equations

구분	단위도	입력 변수
GCUH	<p>첨두유량</p> $Q_p = 2.42 \frac{i_r A_\Omega t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.218 t_r}{\Pi_i^{0.4}} \right)$ <p>첨두시간</p> $T_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} + 0.75 t_r$ $\Pi_i = \frac{L_\Omega^{2.5}}{(i_r A_\Omega R_L a_\Omega^{1.5})}$ $a_\Omega = \frac{S_\Omega^{0.5}}{(n b_\Omega^{2/3})}$	<p>Q_p = 첨두유량(m³/sec) T_p = 첨두시간(hr) t_r = 강우지속시간(hr) R_L = Horton 길이비 i_r = 유효강우강도(mm) A_Ω = 유역면적(km²) L_Ω = 최고차하천길이(km) S_Ω = 최고차하도경사(m/m) b_Ω = 최고차하천폭(m) n = Manning 조도계수</p>
KGCUH	<p>(1) 유역면적이 50km²미만</p> $\Pi_i = 1.497 \frac{L_\Omega^{1.962}}{(i_r A_\Omega a_\Omega^{1.5})}$	(38)
	<p>(2) 유역면적이 50km²이상</p> $\Pi_i = 2.179 \frac{L_\Omega^{2.5}}{i_r A_\Omega^{1.322} a_\Omega^{1.5}}$	(39)
	<p>(3) 공통인자</p> $Q_p = 2.42 \frac{i_r A_\Omega t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.218 t_r}{\Pi_i^{0.4}} \right)$ $T_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} + 0.75 t_r$ $a_\Omega = 0.483 \frac{S_\Omega^{0.5}}{(n A_\Omega^{0.414})}$	

Table 6. The Flood Events Used for UH Analysis at Andong Dam Site

Events #	Period	Duration (days)	호우원인	Runoff Rate
e1	89/07/22 ~08/08	18	Judy Typhoon	0.72
e2	90/09/08 ~09/17	10	Storm	0.88
e3	99/07/31 ~08/15	16	Olga Typhoon	0.88
e4	00/09/06 ~09/24	19	Saomai Typhoon	0.75
e5	02/08/06 ~08/16	11	Storm	0.75
e6	03/09/11 ~09/16	3	Maemi Typhoon	0.79

Table 8 및 Figure 8에서는 실측자료를 이용하여 유도된 1 시간 대표단위도와 4가지의 단위도법을 통하여 유도된 첨두유량 및 첨두도달시간 결과와 단위유량도들을 보여 주고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 첨두유량은 4가지 기법이 모두 오차범위 이내에서 적절하게 산정되었다. 그러나 첨두도달시간은 KGCUH 기법이 11.5hr, Clark 기법이 13hr 로 실측에 가까운 반면, Snyder와 SCS의 15.3 hr과 15.9 hr로서 도달시간이 3시간 이상 길게 산정되었음을 알 수 있었다. 결과적으로, 매개변수의 최적화 과정 없이 지형변수만으로 직접 유도된 KGCUH가 실측 대표단위도와 상당히 근접하고 있으며, 오히려 전통적인 기법들보다 우수한 단위도 생성 결과를 보여주어 앞으로 활용성 측면에서의 가능성을 보여 주고 있다.

Table 7. The Properties of Basin and River at Andong Dam Site

유역면적 (km ²)	유로연장 (km)	평균경사 (m/m)	고도차 (m)	Lca (km)	CN		
					AMC-II	AMC-III	
1590.850	171.600	0.0085	1453	71.961	65	81	
분기비 R_B	연장비 R_L	면적비 R_A	최고차 하도길이 L_Ω (km)	최고차 하도경사 S_Ω (m/m)	최고차 유역면적 A_Ω (km ²)	조도계수 n	최고차 하도 평균폭 b_Ω (m)
4.116	2.511	4.526	66.880	0.070	1590.850	0.027	481

Table 8. Comparison of Peak Discharges and Times for Various Unit Hydrographs

Observed UH		KGCUH		Clark		Snyder		SCS	
T _p (hr)	Q _p (m ³ /sec)	T _p (hr)	Q _p (m ³ /sec)	T _p (hr)	Q _p (m ³ /sec)	T _p (hr)	Q _p (m ³ /sec)	T _p (hr)	Q _p (m ³ /sec)
12.0	20.5	11.5	20.8	13.0	21.4	15.3	20.5	15.9	20.8

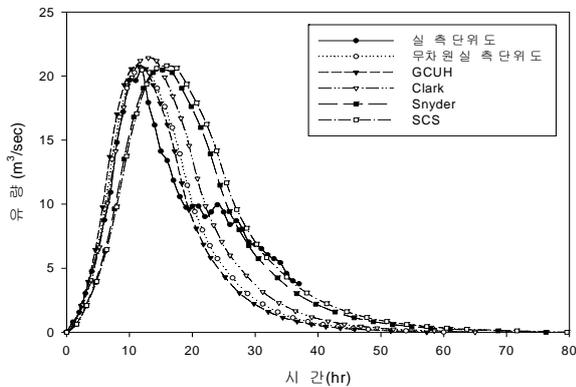


Fig. 8. Comparison of Derived 1-hr Unit Hydrographs for Andong Dam Site Based on KGCUH, Clark, Snyder and SCS Methods

위에서와 같이 안동댐 유역에 대하여 실험적으로 제안된 KGCUH 기법과 전통적인 단위도 기법들을 적용하여 다음과 같이 이론적인 측면뿐만 아닌 활용적인 측면에서 KGCUH 기법의 장점을 살펴 볼 수 있다. 우선, 이론적으로는 GCUH 기법과 동일하게 강우강도를 직접 단위도에 적용하여 기상학적인 변동성을 유출에 고려할 수 있으며, 특히 강우강도와 유출량의 관계가 기존의 선형단위도법에서와 같이 선형적인 비례가 아닌, 자연적인 현상과 유사한 비선형적인 특성을 고려할 수 있다. 특히, KGCUH 기법은 기존의 GCUH 기법과 다르게 한국 산악유역의 지형상사 특성을 반영하여 유도된 기법으로 한국유역에 직접 적용할 수 있다. 더불어, GCUH에서는 Horton의 법칙을 복잡한 GIS기법을 사용하여 유도하여야 되나 실제로 많은 미계측 유역에서 이러한 자료를 구축하기가 어려운 반면, KGCUH 기법은 기본적인 유역자료 만으로도 직접 적용이 가능한 간편성이 있다. 그리고 기존의 Clark 등의 기법을 적용하여 단위도를 유도하는 경우에는 다양한 매개변수들의 최적화 과정이 필요하고, 이 과정에서 다양한 불확실성이 발생할 수 있다. 그러나 KGCUH는 유역면적(A_b), 최고차하천길이(L_c), 최고차하도경사(S_c), 유로연장(L) 그리고 Manning 조도계수(n) 만 강우변수와 동시에 대입하여 침투유량과 침투도달시간을 계산하여 주며, 특별한 지역특성 변수나 매개변수의 최적화 과정이나 선정

과정을 별도로 필요로 하지 않는다.

4. 결 론

국내에서는 홍수 관리 및 분석을 위하여 다양한 국내외의 수문학적 기법들이 개발되고 사용되어 왔으며, 궁극적으로 많은 수문학자들의 목적은 우리나라의 지형에 적합하면서도 간편한 홍수분석기법을 찾아내는데 있었다. 특히 대부분의 수문학적 대상 유역이 미계측 유역인 점을 감안하면, 복잡한 수문모형화 기법보다는 아직도 실무에서는 전통적인 단위도법에 의한 홍수량 산정이 일반화되어 있다. 이는 미계측 유역의 지형 및 기상 자료를 단기간에 구축하기가 곤란하고 또한 강우-유출 특성을 정량적으로 분석하기 어렵다는 한계에 기인한다고 할 수 있겠다.

본 연구의 목적은 국내 산악지역의 다양한 지형 분석을 바탕으로 국내의 미계측 유역에 적용할 수 있는 적합한 한국형단위도법을 개발하는 데 있었다. 우선, Horton 이론에서부터 지형수문단위도 이론까지의 기존의 사용된 이론들을 체계적으로 정리하였다. 다음 한국형 지형수문단위도를 개발하기 위한 절차를 체계적으로 제시하고 수행하였다. 아마도 이는 차후 다양한 후속 연구를 위하여 참고가 될 수 있을 것으로 본다. 우선 한국의 산악 유역을 대표할 수 있는 43개 소유역에 대하여 GIS 분석 뿐만 아니라 직접 관측을 통하여 지형 변수들을 추출하였다. 다음은 산정된 지형변수들을 사용하여 한국 산악유역에 적합한 지형상사 법칙을 유역면적-하도길이, 유역면적-하도폭, 그리고 유역면적-하도길이-Horton법칙에 대하여 유도하여 유의한 결과를 도출하였다. 마지막으로 한국 산악유역에서 도출된 지형상사 결과를 이용하여 한국형지형수문단위도를 유도하였다. 이때 한국형 지형형태학적 순간단위도(KGIUH), 한국형 지형형태-기후학적 순간단위도(KGCIUH), 그리고 한국형 지형형태-기후학적 단위도(KGCUH)를 각각 유도하여 차후에 활용할 수 있도록 제시하였다. 이 중에서 특히 KGCUH를 이용하여 안동댐 유역의 단위도를 유도하여 기존의 전통적인 기법들과 비교하여 활용성을 검증하여 보았다.

아직 다양한 실험과 적용을 통한 검증을 수행하지 않은 단계에서 결과를 도출하기는 어려운 점이 있으나, 제안된 한국형 지형수문단위도법은 다음과 같은 장점을 가지고 있었다. 우선 한국유역 특성 상사를 직접 적용하여 유도하여 한국 유역에 이론적으로 적합한 모형이다. 다음은 기존의 지형수문단위도 이론에 바탕으로 특히 산악유역의 비선형적인 유출특성을 고려할 수 있으며 기상학적인 변동을 강우강도와 도달시간에 직접 적용할 수 있는 기법이다. 더불어 활용적인 측면에서는 기존의 기법들이 다양한 매개변수의 산정 과정의 불확실성을 가지고 있고 최적화하기 위한 노력이 필요한 반면에, 제안된 기법은 단위도가 지형변수만의 함수로서 간편하게 사용할 수 있다.

앞으로 제안된 한국형 지형수문단위도법은 보다 다양한 계측 및 미계측 유역에의 적용을 통한 검증과정이 필요할 것이다. 또한, 한국형 지형상사를 보다 폭넓은 자료의 수집 및 구축을 통하여 일반화할 수 있는 연구도 동반되어야 할 것이다. 결론적으로 본 연구는 시작 단계의 연구로서 앞으로 많은 수정과 노력을 통하여 외국의 단순한 단위도법을 통한 수문구조물의 설계 및 관리가 아닌 한국에 적합한 수문기법을 개발하기 위한 기초연구로서 지속될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2007-2009년 부산대학교 연구비 지원에 의하여 수행된 연구입니다.

참고 문헌

김기욱, 노정환, 전용운, 유철상 (2003). "GIUH 특성속도에 대한 강우의 영향 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권 제4호, pp. 533-545.

김상단, 유철상, 윤용남(2000). "지형형태학적 순간단위도의 특성속도에 대한 고찰." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권 제3호, pp. 315-330.

신현석, 박무중, 장중경(2001). "GIS를 이용한 GIUH의 매개변수 산정." **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 1-4.

신현석, 김홍태, 박무중(2004a). "GIS 및 GCUH를 이용한 돌발홍수 기준우량 산정의 타당성 검토 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제5호, pp. 407-424.

신현석, 김홍태, 박무중(2004b). "GIUH 매개변수와 지형특성인자의 상관성 검토에 관한 연구." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제24권 제1B호, pp.

55-62.

이병운, 장대원, 김형수, 서병하 (2004). "GIUH-Clark 모형의 유도에 관한 연구." **한국수자원학회 학술발표회 특별세션/국제세션/발표논문 초록집**, 한국수자원학회, pp. 144-144.

이순탁, 박종권 (1987). "하천 유출량 산정을 위한 GIUH모형." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제20권, 제4호, pp. 267-278.

이원환, 전민우 (1989). "수로망 크기를 이용한 유출모형." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제9권, 제2호, pp. 83-90.

이혁규, 윤석영, 김재한 (1995). "GIUH의 지체시간 산정을 위한 수문학적 해석." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제28권, 제4호, pp. 155-169.

이찬주, 이두한, 김규호(2004). "지형인자를 이용한 하천분류 체계의 적용성 검토." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제1호, pp. 1-11.

조효섭, 정관수, 김재한(2003). "GIUH적용을 위한 DEM 격자크기 및 threshold basin area의 민감도 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 799-810.

최홍식 (1997). "원주천의 하천형태학적 및 수리학적 특성연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권 제1호, pp. 75-82.

허창환, 이순탁 (2002). "하천유역에서 GIS를 이용한 GIUH 모형의 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권 제3호, pp. 321-330.

Gupta, Vijay K., Mesa, Oscar J., Dawdy, David R. (1994). "Multiscaling theory of flood peaks: Regional quantile analysis." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 3405-3421.

Hack, J. T. (1957). "Studies of longitudinal profiles in Virginia and Maryland", U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 294-B.

Horton, R.E. (1932). "Drainage Basin Characteristics." *Trans. Amer. Geophys. Union*. 13, pp. 350-361.

Jose D. Salas, Ricardo A. Smith, Guillermo Q. Tabios, Jun-Haneng Heo (1994). "Statistical computer techniques in water resources and environmental engineering." Department of civil engineering Colorado state university.

Melton, M. A. (1958). "Geometric properties of mature drainage systems and their representation in an E4 phase space", *J. Geol.*, 66, pp. 35-54.

Rodriguez-Iturbe, I., Valdes, J. B. (1979). "The

- Geomorphologic Structure of Hydrologic Response." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.
- Rodriguez-Iturbe, I., Rinaldo, L. (2003), *Fractal River Basins : Chance and Self-Organization*. Cambridge University Press.
- Rodriguez-Iturbe, I., Sanabria, M. G. and Bras, R. L. (1982a). "A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 877-903.
- Rodriguez-Iturbe, I., Sanabria, M. G. and Camaano, G. (1982b). "On the Climatic Dependence of the IUH: A Rainfall-Runoff Analysis of the Nash Model and the Geomorphoclimatic Theory." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 887-903.
- Smith, J.A. (1992). "Representation of basin scale in flood peak distributions." *Water Resour. Res.*, Vol. 28, No. 11, pp. 2993-2999,
- Strahler, A.N. (1957). "Quantitative Analysis of Watershed geomorphology." *Trans. Am. Geophys. Union*. Vol. 38, No. 6, pp. 913-920.
- Takayasu, H. (1990). *Fractal in the Physical Sciences*, Manchester University Press, Manchester.
- Vijay K. Gupta, Oscar J. Mesa, David R. Dawdy (1994). "Multiscaling theory of flood peaks: Regional quantile analysis." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 3405-3421.
- (논문번호:08-107/접수:2008.11.10/심사완료:2008.12.30)