

원격영상자료와 수치고도모형으로부터 하폭-유량 관계식 도출

Deriving Channel Width-discharge Relationship from Remote Sensing Imagery and Digital Elevation Models

김 종 천* / 백 경 록**

Kim, Jong Chun / Paik, Kyungrock

Abstract

We propose a method for deriving the relationship between channel width and discharge from remote sensing products. Stream widths at points distributed along a river network can be measured from high-resolution remote imagery. Further, corresponding drainage area for these points can be calculated using digital elevation models, making it possible to construct width-drainage area relation. On the other hand, the relationship between the flow discharge and the drainage area is obtained from historical data measured at ground stations. By coupling these two relationships, we can finally derive the width-discharge relationship which comprises an important component of downstream hydraulic geometry. The proposed method was tested for the Nakdong River and the Seomjin River, successfully capturing power-law exponents in the width-discharge relationships reported in earlier studies. The proposed approach can serve as an alternative for obtaining the hydraulic geometry relationship under the limits of ground data.

Keywords : hydraulic geometry, digital elevation models, remote sensing imagery, river network

요 지

본 논문에서는 원격탐사자료를 이용하여 하천의 하폭-유량 관계식을 도출하는 방법을 제안하였다. 고해상도 원격영상으로부터 하천의 여러 단면에 대해 수면 폭을 측정하였다. 각 단면 지점에 해당하는 유역면적은 수치고도모형으로부터 계산하여 하폭-유역면적 관계식을 구하였다. 한편, 지상 관측소의 유량자료를 이용하여 측정된 유량과 관측소 별 유역면적 사이의 관계식을 구하고, 이렇게 얻어진 두 개의 관계식을 짝지어 수리기하 관계식 중 하나인 하폭-유량 관계식을 도출하였다. 본 방법의 타당성을 확인하고자 낙동강과 섬진강을 대상으로 하폭-유량 관계식의 지수 값을 살펴보았다. 그 결과, 지상관측자료의 회귀식에서 얻은 하폭과 유량 사이의 관계식과 비교하여, 비슷한 범위의 지수 값이 계산되었다. 본 연구의 접근법은 실측자료에 의존했던 전통적인 수리기하 분석 방법을 탈피하여 현장 자료의 한계를 극복할 수 있는 대안이라고 할 수 있다.

핵심용어 : 수리기하, 수치고도모형, 원격영상, 하천망

* 고려대학교 건축사회환경공학과 석박통합과정 (e-mail: arz6oiof@naver.com)

School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

** 교신저자, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 (e-mail: paik@korea.ac.kr, Tel: 82-2-3290-4860)

Corresponding Author, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

1. 서 론

하천의 기하학적 구조와 수리학적 특성에서 발견되는 일련의 질서는 많은 수문학자의 관심을 끌었다. Leopold and Maddock (1953)은 하천의 수면 폭(W), 수리심(hydraulic depth)(H), 평균 유속(V)이 각각 유량(Q)의 멱함수(power function)로 표현될 수 있음을 제시하고, 이를 수리기하(hydraulic geometry)관계라 이름 지었다. 이어서, 하상경사(S) 및 조도계수(n) (Manning, 1891)도 유량의 멱함수로 표현되면서(Leopold and Langbein, 1962), 수리기하는 하천의 형상을 정량화하거나 수리학적 특성을 결정하는 다양한 변량과 유량 사이의 관계를 아우르는 개념으로 확대되었다. 이들의 멱함수 관계는 그 변화를 바라보는 관점에 따라 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 서로 다른 발생빈도(F)의 유량에 따라, 고정된 지점에서 관찰되는 폭, 수심, 유속, 경사 및 조도의 시간적 변동성을 나타낸 것이다(지점수리기하, at-a-station hydraulic geometry) (Eq. (1)). 두 번째는 동일한 F 에 대해 하류방향으로 수리기하 변량의 공간적 변화를 살펴보는 것이다(하류수리기하, downstream hydraulic geometry) (Eq. (2)).

$$W \propto Q^{b_s}; H \propto Q^{f_s}; V \propto Q^{m_s}; S \propto Q^{p_s}; \text{ and } n \propto Q^{q_s} \quad (1)$$

$$W \propto Q^{b_d}; H \propto Q^{f_d}; V \propto Q^{m_d}; S \propto Q^{p_d}; \text{ and } n \propto Q^{q_d} \quad (2)$$

Eqs. (1) and (2)로 표현된 수리기하 관계는 유역의 반응을 살피는데 중요한 역할을 하는데, 유역의 유입시간(inlet time), 유하시간(travel time), 집중시간(time of concentration) 등을 산정하기 위한 경험식(e.g., Kirpich, 1940; Clark, 1945; Kerby, 1959)에 수리기하 변량이 포함되어 있는 것이 한 예이다. 또한, Robinson et al. (1995)은 사면과 하도에서의 작용이 전체 유역 반응에 미치는 영향을 살펴보았는데, 사면과 하도의 수리학적 특성을 결정하는 데 수리기하 관계식이 핵심적인 역할을 하였다. Saco and Kumar (2002)는 유역의 반응 함수에서 중요한 역할을 하는 동적 확산(kinematic dispersion)의 존재를 수리기하 관계를 통해 발견했다. 또한, 단위도의 비선형성과 수리기하의 지수 값이 밀접한 관련이 있음도 알려졌다(Paik and Kumar, 2004). 이처럼 수리기하를 분석한다는 것은 하천의 기하학적 형태나 변량 사이의 멱함수 관계를 이해함은 물론이거니와, 유역의 수문 현상이 하천망을 통해 어떻게 발현하는지에 관한 총체적인 이해를 모두 포괄하는 것으로, 그 중요성이 이미 많은 연구를 통해 강조되었다.

이러한 배경에서 지난 반세기 동안 세계 각국의 수많은 하천을 대상으로 수리기하 특성에 관한 연구가 수행되었다. Leopold and Maddock (1953)은 미국 중서부 지역의 하천에 대해 수리기하를 분석하여 b_d, f_d, m_d 의 평균이 각각 0.5, 0.4, 0.1라고 제시하였다. 여기서 $b_s + f_s + m_s = 1$ 또는 $b_d + f_d + m_d = 1$ 의 조건을 만족시켜야 함은 Eqs. (1) and (2)에 $Q = WHV$ 를 고려하면 이해할 수 있다. Stall and Fok (1968)과 Stall and Yang (1970)은 지점수리기하와 하류수리기하를 한 번에 표현할 수 있는 유역수리기하(basin hydraulic geometry) 관계식을 제시하고, 각각 미국 일리노이 주의 18개 하천과 미국 전역에 분포한 12개 하천에 적용하였다. Park (1977)은 선행 연구의 자료를 총정리하여 기후 및 지질 조건이 수리기하 지수에 미치는 영향을 살펴보고, 그 의미에 대해 고찰하였다. 그 밖의 자연 하천에서 관찰되는 수리기하 관계식의 경향성을 분석한 수많은 연구들은 Singh (2003)에 의해 자세히 정리된 바 있다.

국내 하천에 대해서는 Kim (1991)이 신리천, 사천내, 군선강을 대상으로 수리기하 특성을 살펴본 것을 시작으로, Woo et al. (1994)이 안성천, 내성천 등 18개 하천에 대해, Kim (1999)이 영동과 영서 지역에 위치한 8개 하천에 대해 수리기하 분석을 수행하였다. 그 밖에도 Lee and Lee (2003)의 섬강과 홍천강을 대상으로 한 연구, Paik et al. (2010)의 섬진강에 대한 연구, Jung et al. (2013)의 낙동강을 대상으로 한 연구 등이 진행된 바 있다.

여러 가지 수리기하 관계식 중에서도 학자들은 Eq. (2)로 표현되는 하류수리기하를 집중적으로 연구하였으며, 그 중에서도 하폭-유량 관계가 특히 많은 관심을 끌었다. 하류수리기하의 지수 값 b_d, f_d, m_d 이 하천에 따라 차이를 보이지만 그 중에서 가장 편차가 적은 것이 하폭관계식의 지수 b_d 로 알려졌다. 전 세계 많은 하천에서 b_d 는 대체로 Leopold and Maddock (1953)이 미국 중서부 하천에 대해 얻은 값인 0.5에 가까운 것으로 알려졌다(Leopold et al., 1964). 주목할 사실은 국내 하천에 대해 보고된 b_d 값이 대체로 외국 하천의 b_d 값 보다 크다는 것이다(Jung et al., 2013). 이러한 차이를 가져오는 이유를 강한 하천 침식력, 강도가 약한 하안의 구성 물질(Kim, 1991), 유량과 부유사 농도 사이의 경향성 차이(Jung et al., 2013) 등 여러 물리적 요소에서 찾는 연구가 이어지고 있다. 하천의 수면 폭에 관한 수리기하 관계는 수면식생(bank vegetation)의 발달(Hey and Throne, 1986) 및 하식(fluvial incision) 작용과도 깊은 관련이 있는 것으로 알려졌다(Finnegan et al., 2005).

앞서 언급한 연구들은 모두 실측한 자료를 바탕으로 수리기하 관계를 도출하였는데, 이런 접근법은 다음과 같은 몇 가지 한계점을 갖는다. 먼저, 관측 지점 위치의 적절성 문제다. 수위 관측소를 설치할 때 주로 고려하는 것은 해당 지점이 얼마나 하천 구간의 특성을 잘 대변하느냐보다는, 관측을 위한 접근이 얼마나 쉬운지의 여부다. 그 결과, 관측소가 설치된 지점은 하천 구간 전체의 지형특성을 잘 대변할 수 없는 경우가 많고(Leopold, 1994), 이에 따라 지상관측자료를 바탕으로 구해진 수리기하 관계식은 실제와 상당한 차이를 가질 수 있다(Ibbitt, 1997). 두 번째는 가용할 수 있는 자료의 개수 및 시간적인 해상도의 문제이다. 경제적인 이유로 유역에 설치할 수 있는 관측소의 개수는 한정적이기 마련이다. 또한, 대부분의 지점에서 변량의 측정이 연속적으로 진행되는 것이 아니라 간헐적으로만 진행된다는 문제가 있다. 이러한 한계는 수리기하 특성을 제대로 이해하는 데에 제약이 된다. 특히, 유역 전반에 걸쳐 측정되는 자료가 있어야 하는 하류수리기하를 분석할 경우, 제한된 관측소의 자료만으로는 분석의 한계가 있을 수밖에 없다(Dodov and Foufoula-Georgiou, 2004).

이러한 근본적인 한계를 극복하기 위해서는 실측자료를 대체할 수 있는 방법이 강구되어야 할 것이다. 본 연구에서 주목하는 것은 항공 및 위성영상자료를 포함한 간접측정 자료의 활용가능성이다. 실제로 원격탐사를 통한 간접자료를 활용하여 하천의 수리학적 특성을 파악하는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 영상자료로부터 시베리아에 위치한 Lena 강의 유효하폭을 측정하여 유량을 추정된 Smith and Pavelsky (2008)의 연구, 위성영상으로부터 Mekong 강의 하폭을 측정하여 이를 기준으로 강우-유출 모형의 매개변수를 추정된 Sun et al. (2010)의 연구를 들 수 있다. 이러한 선행 연구는 하천의 수면 폭을 원격영상자료로부터 추출하는 것이 가능하다는 것을 보여준 사례이다. 본 연구는 이에 더 나아가 수리기하 관계식의 하나인 수면 폭과 유량 사이의 관계를 유도하고자 한다.

본 연구에서는 원격영상자료(remote sensing imagery)와 수치고도모형(Digital Elevation Models; DEM)을 활용한 수리기하 분석 방법을 제안하고자 한다. 원격영상자료 및 DEM은 넓은 지역에 걸쳐 공간적으로 연속적인 자료의 획득이 가능하다는 장점이 있다. 이 점은 일정한 생기빈도에 대해 공간적 변화를 살펴보는 하류수리기하, 그 중에서도 하폭-유량 관계식 분석에 유용하게 쓰일 수 있다. 원격탐사자료를 활용하는 최근의 연구 경향을 수리기

하 분석에 접목하여 지상관측자료에 의존적이었던 기존 수리기하 분석 방법의 상당 부분을 원격탐사자료로 대체할 수 있는 방법을 제안하고 그 타당성을 검토하는 것이 본 연구의 핵심이다. 이에 관한 자세한 내용은 이어지는 절에서 서술한다.

2. 연구방법

본 연구에서 제안하는 방법은 실측자료에 의존했던 기존 방법에 비해 영상자료와 DEM을 함께 활용한다는 점에서 차별된다. 특히, 본 연구에서 초점을 맞추는 것은 하폭과 유량 관계의 규모를 결정하는 지수 값 b_d 의 측정이다. 선행 연구에서 하폭과 유역면적(A_d) 사이의 관계가 멱함수($W \propto A_d^\beta$)를 따름이 알려졌고(Stall and Fok, 1968), 유량과 유역면적 사이의 관계 또한 멱함수($Q \propto A_d^\gamma$)로 표현될 수 있음을 확인하였다(Brush, 1961). 이상의 두 관계식으로부터 $b_d = \frac{\beta}{\gamma}$ 임을 알 수 있다. 각각의 멱함수 관계를 계산하는 세부과정은 아래에서 설명한다.

전술한대로 하류수리기하는 동일한 빈도 F 에 해당하는 유량이 하천을 따라 흐르는 상태에서 정의된다. 주어진 F 에 해당하는 유량을 지점별로 정확하게 파악하기 위해서는 장기간의 실측된 유량 값을 바탕으로 유황분석이 선행되어야 한다. 이것이 여의치 않을 경우, 대안으로 상·하류에 걸쳐 동일한 순간에는 유량의 F 가 동일할 것이라는 전제로 분석을 수행하기도 한다. 이 가정은 유량의 시간별 변화가 급격한 홍수기 등에는 적절하지 않을 수 있으나, 장기간 강우가 발생하지 않아 하천을 흐르는 유량이 기저유량에 가까워졌을 때에는 적절하다고 할 수 있다. 이 개념은 낙동강과 섬진강의 수리기하 특성을 분석한 선행 연구에서 이미 적용된 적이 있다(Paik et al., 2010; Jung et al., 2013). 또한, 이와 유사한 방법을 수문학적으로 동질하지 않은 조건에서 관측된 유량자료를 안정화하기 위해 후처리기법에 적용한 경우도 있다(e.g., McKerchar et al., 1998). 이러한 개념을 이용해 하폭-유량 분석을 하려면 비홍수기에 유역을 촬영한 영상을 확보하여야 한다. 또한, 이 영상은 가급적 촬영범위가 넓어서 한 영상 내에 되도록 하천의 넓은 영역이 포함되어야 할 것이다.

다음 단계는 확보된 하천 영상에서 하폭과 유역면적을 측정할 지점을 정하는 것이다. 여기서 제시하는 방법은 기존 지상 관측소에 한정된 방법과 달리 측정지점 개수에 제한이 없다. 측정 지점을 선정할 때 주관이 개입되면 하천 일부에 국한된 특성이 전체 분석 결과에 영향을 줄 수 있으므로 지점을 선정하는 기준을 명확하게 설정할 필요

가 있다. 본 연구에서는 United States Geological Survey에서 제공하는 매뉴얼(Turnipseed and Sauer, 2010)을 바탕으로 다음과 같이 하폭 측정지점 선정에 있어서 준수해야 할 기준을 설정하여 객관성을 확보하였다.

- 사주(sand bar)와 같이 하폭을 측정하는데 방해가 되는 요소 없이 하폭이 특정 구간에 걸쳐(하폭의 5배 이상) 일정하게 유지되는 곳을 선정한다.
- 만곡도가 크거나 제방 및 수리구조물이 설치되는 등 하천이 인위적으로 정비된 구간을 제외한다.
- 지류가 합류하거나 하천이 분기되면서 유역면적이 급격하게 변화하는 곳은 피한다.

일반적으로 영상자료와 DEM은 공간해상도 및 사용하는 좌표체계의 기준점이 다르다(영상자료의 공간해상도가 훨씬 높음). 따라서 유역면적을 추출할 기준이 될 DEM 셀을 어떻게 선정할지의 문제가 생긴다. 본 연구에서는 하천을 가로지르는 복수의 DEM 셀 중에서 하천 중심점을 통과하는 셀을 소유역의 출구로 정했다. 만약, 특정 지점에서 하천 중심선을 통과하는 DEM 셀을 구하기 어려운 경우, 그 지점은 측정지점으로 고려하지 않았다. 이렇게 선정된 지점에서 하폭을 측정할 때는 하천을 가로지르는 선과 하천 경계선이 최대한 직각이 되도록 하여, 하천 양안 경계선 사이의 최단 거리를 영상자료가 제공하는 수평 해상도 내에서 최대한 정밀하게 측정한다(Fig. 1).

이어서 하천 폭을 측정할 각 지점에 대해 유역면적을 구한다. 이를 위해 먼저 DEM에서 유로를 탐색한다. 이 과정에서 유로를 결정하는 다양한 방법(e.g., O'Callaghan and Mark, 1984; Tarboton, 1997; Paik, 2008)이 적용될 수 있

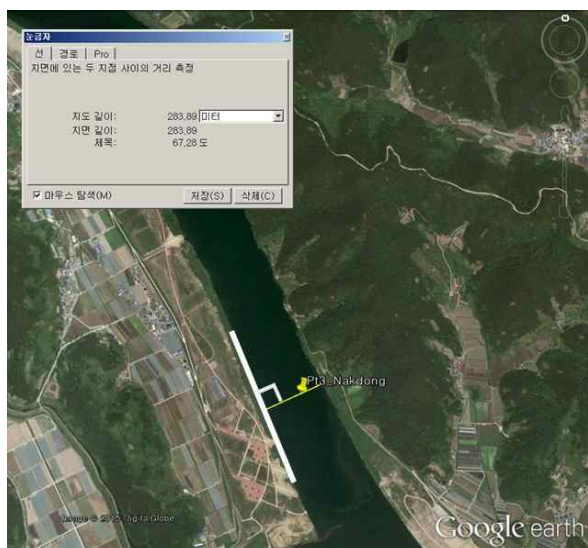


Fig. 1. Illustration of Measuring Channel Width on the Remote Imagery

다. 이 과정은 해당 하천유역 전체를 포함하는 충분히 큰 DEM을 이용해 이루어져야한다. 그래야 모든 지점의 유역면적을 제대로 구할 수 있기 때문이다. 유로를 따라 DEM 각 셀의 유역면적이 구해지면, 하폭측정지점에서 구한 하폭 W 와 그 지점에 해당하는 DEM 셀의 유역면적 A_d 를 짝짓는다. 여러 지점에 대한 이 두 변량 사이의 관계로부터 $W \propto A_d^\beta$ 의 회귀식을 구하게 된다.

다음은 Q 와 A_d 사이의 관계를 구하는 과정이다. 서론에서 언급한 바와 같이 유효하폭으로부터 유량을 추정하는 기법(e.g., Smith and Pavelsky, 2008)이 제시되고 있지만, 아직까지는 원격탐사자료로부터 하천의 유량을 추정하는 것은 다양한 오차를 동반하게 된다(Conesa-Garcia et al., 2010). 따라서 본 연구에서는 지상 관측소에서 측정된 과거 유량 자료를 바탕으로 유량과 유역면적 관계를 도출하였다. 즉, 하천을 따라 가용한 모든 관측소에서 동일한 순간에 측정된 유량과 각 관측소의 유역면적을 이용해 $Q \propto A_d^\gamma$ 의 회귀식을 구하는 것이다.

원칙적으로는 위 유량-유역면적 관계를 구할 때 쓰인 유량의 발생빈도가 $W-A_d$ 관계를 구한 영상에 해당하는 F 와 같아야 두 관계식($W-A_d$, $Q-A_d$)을 결합할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 하폭 측정에 사용할 영상을 고를 때와 마찬가지로 장기간 강수가 발생하지 않아 관측소 유량이 기저유량에 충분히 가까워졌다고 판단될 수 있는 시점의 유량 자료를 사용하여 관측소 별 유역면적 값과의 관계를 살펴보았다. 그런데 이렇게 하더라도, 실제로는 이 두 독립적인 관계식이 도출된 자료의 발생빈도가 같을 확률은 낮다.

본 연구에서는 비록 두 관계식이 도출된 자료의 발생빈도가 다르더라도 두 관계식의 멱함수 지수 값(β , γ)은 빈도에 관계없이 일정하다고 보았다. 그래서 두 멱함수 비례관계($W \propto A_d^\beta$, $Q \propto A_d^\gamma$)를 결합할 수 있고, 결합된 $W \propto Q^{b_d}$ 관계의 지수 b_d 도 발생빈도에 관계없이 일정하다고 본다. 이러한 가정의 근거는 Stall and Fok (1968)과 Singh and Broeren (1989)의 연구에 바탕을 둔다. Stall and Fok (1968)은 실측 자료를 바탕으로 하여, 각각 $0.1 \leq F \leq 0.9$ 의 넓은 범위에서 수리기하 멱함수의 지수들이 거의 상수임을 보였다. 즉, 극심한 가뭄이나 홍수기를 제외한 넓은 범위에서 어느 시기의 자료로 수리기하 관계를 구축하더라도 지수는 큰 변화를 보이지 않는다는 것이다. 이어서, Singh and Broeren (1989)는 멱함수의 지수가 상수인 범위를 더욱 보수적으로 ($0.3 \leq F \leq 0.7$) 제시했으나, 여전히 넓은 범위에 속한다. 이 연구결과는 본 연구에서 제시하는 방법론을 적용하는데 훌륭한 근거를 제시한다.

진술한 바와 같이 독립적으로 구한 두 개의 멱함수 지수 값(β 와 γ)으로부터 최종적으로 b_d 를 도출하는 접근법은 기존의 수리기하 분석 기법과 비교할 때, 또 다른 이점을 갖게 된다. 그것은 하폭과 유량을 측정하는 지점이 반드시 일치할 필요가 없다는 것이다. 이 점은 서론에서 제기했던 관측소의 위치가 하천 구간의 특성을 얼마나 잘 대변할 수 있는지의 문제에서 자유로울 수 있다는 의미를 가진다. 이어지는 절에서는 실제 유역을 대상으로 앞서 제안된 방법의 적용성을 검토하고자 한다.

3. 적용 및 토의

이 절에서는 본 연구에서 제시한 방법을 이용해 하폭-유량 관계를 도출하는 과정을 실제 하천의 사례를 통해 설명한다. 본 연구의 적용대상 하천은 기존 방법을 통해 하폭-유량 관계의 지수 값이 알려진 곳으로 선정했다. 이렇게 알려진 지수 값과 비교하여, 본 연구의 방법을 통해 도출한 관계식이 합리적인지 검증하고자 한다.

3.1 연구대상 지역 및 자료

본 연구에서는 국내 하천 중에서 기존 문헌을 통해 하폭-유량 관계식이 알려진 낙동강(유역면적: 23,690.3 km²) (Jung et al., 2013)과 섬진강(유역면적: 4,914.3 km²) (Paik et al., 2010)에 대해 새로운 방법을 적용하고 그 결과를 비교하였다. 본 연구에서 제시한 방법을 응용하는 데에는 다양한 종류의 원격영상자료와 DEM이 활용될 수 있다. 아래 분석에서는 Google Earth의 High-Resolution Imagery Archive를 영상 자료로 사용하였다. Google Earth에서는 IKONOS, Quick Bird, Landsat 등 다양한 영상자료를 결합하여(지역에 따라 다르지만 대략) 0.5~1m의 수평해상도로 제공한다(Potere, 2008).

유역면적 산정을 위한 DEM은 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)을 이용하였다. SRTM은 원래 NASA(National Aeronautics and Space Administration)가 만든 자료로, 3-arc seconds(위도에 따라 값이 변하지만, 대략 90m에 해당)의 수평해상도와 1m의 수직해상도를 가지며, 지구 대부분(남위 60°~북위 60°)을 범위로 한다. 여기서는 결측 지역의 고도 값을 보정하여 제공하는 CGIAR-CSI(Consortium for Spatial Information of the Consultative Group on International Agricultural Research)의 SRTM version 4를 사용하였다(<http://srtm.csi.cgiar.org/>). DEM에서 유로를 결정하는 방법으로는 평평한 지역에서도 물의 흐름 방향이 결정될 수 있도록 임의로 경사를 부여

하는 Imposed gradient 방법(Grabrecht and Martz, 1997)을 사용하여 유역 출구까지 가장 가파른 방향을 연결하여 유로를 구성하였다. 마지막으로 유량과 유역면적의 관계를 살펴보기 위해서 WAMIS(WATER Management Information System)에서 제공하는 일단위의 유량측정성과(http://www.wamis.go.kr/WKW/wkw_flwsrrs_1st.aspx) 자료를 활용하였다.

3.2 분석 결과

2003년 4월 28일 낙동강 유역의 일부분을 촬영한 Google Earth 영상으로부터 선별 기준에 부합하는 8개의 관측 지점(Fig. 2a)을 선정하였다. 이 때 측정된 하폭과 계산된 유역면적은 멱함수의 관계를 잘 따르는 것으로 나타났으며(Fig. 2b), 그 때의 지수 값은 $\beta=0.32$ 였다. 진술한대로 본 연구에서는 하폭-유역면적 관계와 유량-유역면적 관계가 다른 빈도에 대해 구해지더라도 멱함수 지수를 구하는 데에는 문제가 없다는 배경지식을 갖고 접근했다. 따라서 하폭-유역면적 관계 구축에 쓰인 영상자료의 촬영날짜와 유량-유역면적 관계 구축에 쓰인 유량관측 날짜가 같을 필요는 없다. 그럼에도, 마침 낙동강 유역 관측소 14곳에서 영상자료와 같은 날짜(2003년 4월 28일)에 측정된 유량이 가용하였으므로 이를 사용하였다.

동일한 날짜에 하천을 따라 관측된 유량과 유역면적 사이의 관계는 멱함수 형태를 잘 따르는 것으로 나타났다(Fig. 2b; $\gamma=0.99$). 전술했듯이, 선행연구(Paik et al., 2010; Jung et al., 2013)에서 강수기간이 아니라면 동일한 날짜에 하천을 따라 기록된 유량은 빈도가 비슷할 것이라는 가정 하에 수리기하 분석을 실시했었다. 이 가정의 적합성을 알아보기 위해 낙동강 유역 관측소에서 2001년 1월 1일부터 2014년 12월 31일까지의 기간에 대해 결측 값을 제외한 일유량 자료에 대해 유행분석을 수행하였다. 그 결과, 2003년 4월 28일에 14개 지점에서 관측된 유량의 F 는 0.33~0.76의 범위에 걸치는 것으로 나타났다. 이는 당초 예상보다 넓은 범위이며 장기간 강우가 발생하지 않은 일자에는 유량이 기저유량에 가까워졌기 때문에 공간적으로 F 가 동일할 것이라는 가정에 의문을 갖게 한다.

이러한 현상의 원인으로 댐의 영향을 들 수 있다. 낙동강에 건설된 4개 다목적 댐의 위치를 고려했을 때, 14개 유량 관측지점 중에서 안동·임하 댐 하류에 위치한 관측소는 7개(Q3, Q5, Q7, Q8, Q9, Q13, and Q14), 그리고 합천댐과 남강댐 하류에 놓인 관측소는 각각 2개(Q13 and Q14)와 3개(Q12, Q13, and Q14)이다(Fig. 2a). 댐 하류에서 관측되는 유량은(특히 장기간 강우가 발생하지 않은

경우) 댐의 방류량에 영향을 받기 때문에 동일한 일자임에도 F 값의 차이가 크다.

이번에는 F 를 각각 0.3, 0.7로 고정하고, 이에 해당하는 유량을 지점별로 산출한 다음 이렇게 구한 유량을 이용해 유량-유역면적 관계를 구해보았다. 이렇게 구한 유량-유역면적 관계도 멱함수 관계를 잘 따르는 것으로 나타났으며, 지수 값은 $\gamma=0.97$ ($F=0.3$), $\gamma=1.02$ ($F=0.7$)로 나타났다. 이렇게 매우 다른 빈도에서 구한 두 지수 값이 비슷한 것은 선행 연구결과(Stall and Fok, 1968; Singh and Broeren 1989)를 뒷받침하는 것이다. 2003년 4월 28일 관측치를 이용해 구한 지수 값 0.99는 $F=0.3, 0.7$ 에 대해 구한 값의 중간 정도에 해당하며 이 세 가지 지수 값 자체에 큰 차이가 없음을 알 수 있다(Fig. 2b). 요약하면 각 지점에서 유황분석을 실시한 결과 관측유량의 빈도는 지점에 따라 차이를 보이지만, 하류로 진행하면서 이러한 차이가 어떠한 경향성을 보이는 것은 아니기 때문에 전체적인 회귀식의 지수 값은 빈도에 무관하게 비슷하다는 결론을 내릴 수 있다. 흥미로운 점은 γ 가 1에 가깝다는 것이다. 이는 낙동강 유역에 대해 주어진 빈도 범위 내에서는 유량과 유역면적 사이의 관계가 거의 선형임을 의미한다. 두 개의 멱함수식(하폭-유역면적, 유량-유역면적)을 짝지어 최종적으로 계산된 b_d 는 0.32로, Jung et al. (2013)이 실측 자료를 바

탕으로 낙동강의 수리기하 분석 결과인 0.19~0.32의 범위에 든다(Table 1).

동일한 방법으로 섬진강 유역에 대해 분석하였다. 2011년 9월 23일 촬영된 영상자료로부터 8곳에서 하폭과 유역면적의 관계($\beta=0.37$)를, 그리고 2011년 9월 23일에 섬진강 유역의 6개 유량 관측소에서 측정된 유량자료를 바탕으로 유량과 유역면적의 관계($\gamma=1.05$)를 각각 도출하였다(Fig. 3a-b). 섬진강댐과 주암댐의 방류에 영향을 받는 관측소 각각 4개(Q2, Q3, Q5, and Q6)와 3개(Q4, Q5, and Q6)를 포함하여 (Fig. 3a) 총 6개 지점에서 측정된 유량의 F 값 역시 0.37~0.69의 범위로 낙동강의 경우와 비교해 다소 좁은 범위지만 변동성을 보였다. 마찬가지로 F 가 0.3과 0.7로 고정된 경우의 γ 값을 구한 결과, 0.95, 0.93로 나타났다. 이 세 γ 값의 하한-상한 값인 0.93, 1.05에 대해 계산된 b_d 는 0.40과 0.35로 Paik et al. (2010)이 선행연구에서 제시된 0.28~0.41 범위에 모두 속한다(Table 1).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 위성영상자료와 DEM을 사용하여 하천의 하폭-유량 관계식을 유도할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 실측자료에 의존하는 기존 방법이 가진, 측

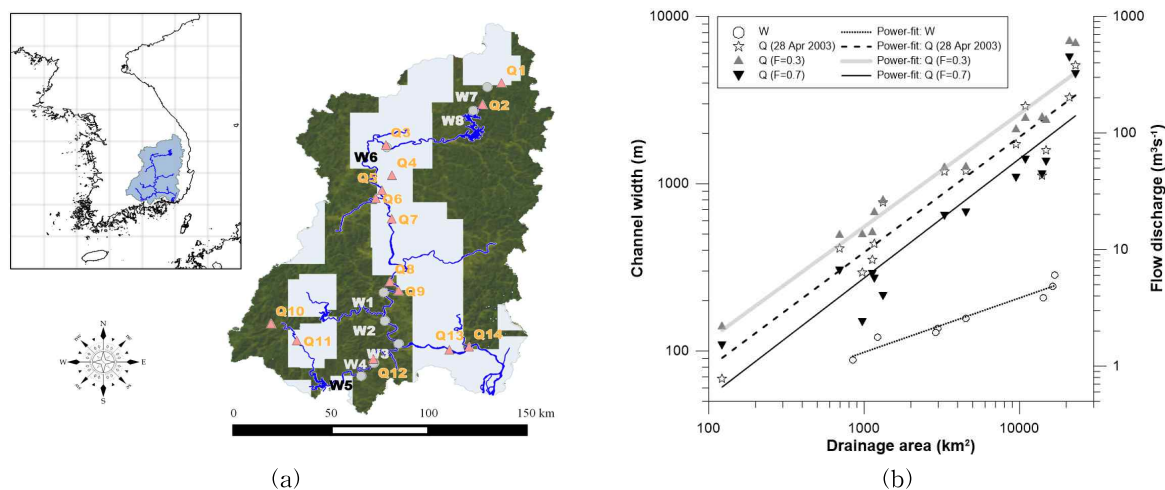


Fig. 2. (a) Location of the Nakdong River Basin and Measuring Points of Channel Width (points W1 to W8) and Discharge (points Q1 to Q14). Patches Indicate Remote Imagery Taken on a Same Date. (b) Fitted Power-law Relationships of $W \propto A_d^\beta$ and $Q \propto A_d^\gamma$

Table 1. Comparison of b_d Values Obtained in This Study with Those from Previous Studies

| | Nakdong River | Seomjin River |
|--------------------------------------|---------------|---------------|
| Jung et al., 2013; Paik et al., 2010 | 0.19~0.32 | 0.28~0.41 |
| This study | 0.32 | 0.40 |

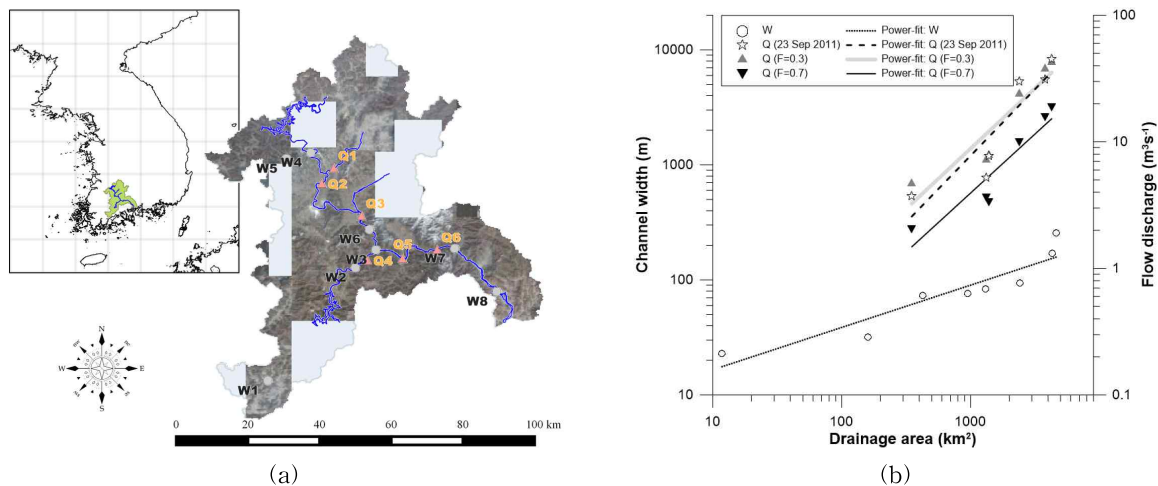


Fig. 3. (a) Location of the Seomjin River Basin and Measuring Points of Channel Width(points W1 to W8) and Discharge (points Q1 to Q6). Patches Indicate Remote Imagery Taken on a Same Date. (b) Fitted Power-law Relationships of $W \propto A_d^\beta$ and $Q \propto A_d^\gamma$

정지점의 대표성 문제 및 관측 자료가 제한적이라는 근본적인 한계를 극복하려는 시도라는 점에서 의의가 있다. 본 연구에서 제안한 방법을 낙동강 및 섬진강에 대해 적용하여 본 결과, 선행 연구의 결과와 비슷한 멱함수 관계를 구할 수 있었다.

본 방법은 실측 유량자료를 사용한다는 점에서 지상관측자료로부터 완전히 자유로운 것은 아니다. 하지만 원격탐사자료로부터 유량을 측정하는 기법의 정확성이 향상된다면, 실측자료의 필요성이 점점 줄어들게 될 것이다. 또한, 앞으로는 지점에서의 하폭측정도 더욱 자동화할 수 있을 것이다. 그렇게 수리기하 추정 방법이 향상되면 학문적으로 다양한 파급효과를 가져올 것으로 기대된다. 미세측 유역에 대한 수리기하 특성을 파악하는 시도가 가능해지고, 유역의 수문반응현상을 이해하는 데에 이바지할 수 있을 것이다. 또한, 여러 시간 간격을 두고 촬영된 복수의 영상자료를 이용하여 지점수리기하 특성도 살펴볼 수 있다. 나아가 수리기하 멱함수 관계식의 타당성, 지수 값의 변동성 및 그것의 기후, 지형 인자와의 상관관계 등, 그동안 검증이 어려웠던 과학적 쟁점들을 살펴볼 수 있는 훌륭한 수단이 될 수 있을 것이다.

추후 연구되어야 할 점은 영상자료에 해당하는 빈도를 어떻게 추정할 것인가 하는 점이다. 본 연구의 예에서 보듯이 동일한 날짜에 측정된 유량도 지점별로 상당한 발생 빈도의 차이를 보이기 때문이다. 설사 여러 지점에서 비슷한 빈도를 보인다고 하더라도, 본 연구에서 적용한 방법은 기본적으로 강수가 없는 시기에 흐르는 유량을 대상으로 하며, 최소 Singh and Broeren (1989)이 제시한 0.3

에서 0.7 사이의 빈도 범위라야 지수 값이 빈도에 무관하다는 근거를 바탕으로 한다. 그러나 실무에서 제방이나 수공구조물 등을 설계할 경우 다루는 유량은 훨씬 저빈도·고유량인 홍수기의 유량이다. 또한, 지형학에서는 하류수리기하(Eq. (2))를 저빈도·고유량 사상인 지배유량(dominant discharge) 또는 강턱유량(bankfull discharge)에 대해 흔히 적용했다(e.g., Knighton, 1987; Rhoads, 1991). 이러한 규모의 사상은 본 연구에서 영상자료 선정에 활용한 기준과는 차이가 있다. 이러한 점에서 본 연구에서 제안하는 방법을 수자원 실무 또는 지형학적 분석에 어떻게 활용할 것인지에 대해서는 향후 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A2A05001592).

References

- Brush, L.M. (1961). "Drainage basins, channels, and flow characteristics of selected streams in central Pennsylvania." *U.S. Geological Survey Professional Paper*, Vol. 282F, pp. 145-181.
- Clark, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, No. 1, pp. 1419-1446.

- Conesa-Garcia, C., Caselles-Miralles, V., Tomas, J.M. S., and Garcia-Lorenzo, R. (2010). "Hydraulic geometry, GIS and remote sensing, techniques against rainfall-runoff models for estimating flood magnitude in ephemeral fluvial systems." *Remote Sensing*, Vol. 2, No. 11, pp. 2607-2628.
- Dodov, B., and Foufloula-Georgiou, E. (2004). "Generalized hydraulic geometry: Derivation based on a multi-scaling formalism." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 6.
- Finnegan, N.J., Roe, G., Montgomery, D.R., and Hallet, B. (2005). "Controls on the channel width of rivers: Implications for modeling fluvial incision of bedrock." *Geology*, Vol. 33, No. 3, pp. 229-232.
- Garbrecht, J., and Martz, L.W. (1997). "The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models." *Journal of Hydrology*, Vol. 193, No. 1-4, pp. 204-213.
- Hey, R.D., and Thorne, C.R. (1986). "Stable channel with mobile gravel beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 8, pp. 671-689.
- Ibbitt, R.P. (1997). "Evaluation of optimal channel network and river basin heterogeneity concepts using measured flow and channel properties." *Journal of Hydrology*, Vol. 196, No. 1, pp. 119-138.
- Jung, D., Paik, K., and Kim, J.H. (2013). "Relationship between downstream hydraulic geometry and suspended sediment concentration characteristics." *Journal of Hydro-Environment Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 243-252.
- Kerby, W.S. (1959). "Time of concentration for overland flow." *Civil Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 60.
- Kim, J.-W. (1991). "Functional relationship between factors of fluvial morphology." *Journal of the Korean Geographic Society*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-29. (in Korean)
- Kim, J.-W. (1999). "A Study of channel slope and grain size of coarse bed materials instreams in the Youngseo and Youngdong area, Korea." *Journal of the Korean Geographic Society*, Vol. 34, No. 4, pp. 355-370. (in Korean)
- Kirpich, P.Z. (1940). "Time of concentration of small agricultural watersheds." *Civil Engineering*, Vol. 10, No. 6, pp. 362.
- Knighton, A.D. (1987). "River channel adjustment—the downstream dimension." in Richards, K.S. (ed.), *River channels: Environment and process*, Blackwell, Oxford, pp. 95-128.
- Lee, H.C., and Lee, E.T. (2003). "A study on the channel forming discharge estimation and the hydraulic geometry characteristics of the alluvial stream." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 823-838. (in Korean)
- Leopold, L.B. (1994). *A view of river*. Harvard University Press.
- Leopold, L.B., and Langbein, W.B. (1962). "The concept of entropy in landscape evolution." *U. S. Geological Survey Professional Paper*, Vol. 500-A.
- Leopold, L.B., and Maddock, T.J. (1953). "The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications." *U. S. Geological Survey Professional Paper*, Vol. 252.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P. (1964). *Fluvial Process in Geomorphology*. W. H. Freeman, New York.
- Manning R. (1891). "On the flow of water in open channels and pipes." *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, Vol. 20, pp. 161-207.
- McKerchar, A.I., Ibbitt, R.P., Brown, S.L.R., and Duncan, M.J. (1998). "Data for Ashley River to test channel network and river basin heterogeneity concepts." *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 1, pp. 139-142.
- O'Callaghan, J.F., and Mark, D.M. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 28, No. 3, pp. 323-344.
- Paik, K. (2008). "Global search algorithm for nondispersive flow path extraction." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, No. F4.
- Paik, K., and Kumar, P. (2004). "Hydraulic geometry and the nonlinearity of the network instantaneous response." *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 3.
- Paik, K., Jung, D., and Kim, J.H. (2010). "Flow variability and channel geometry of the Seonjin river." Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Hanoi, Vietnam, 8-9 November, pp. 79-84.

- Park, C.C. (1977). "World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: an analysis and some observations." *Journal of Hydrology*, Vol. 33, pp. 133-146.
- Potere, D. (2008). "Horizontal positional accuracy of Google Earth's high-resolution imagery archive." *Sensors*, Vol. 8, No. 12, pp. 7973-7981.
- Rhoads, B.L. (1991). "A continuously varying parameter model of downstream hydraulic geometry." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 1865-1872.
- Robinson, J.S., Sivapalan, M., and Snell, J.D. (1995). "On the relative roles of hillslope processes, channel routing, and network geomorphology in the hydrologic response of natural catchments." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 12, pp. 3089-3101.
- Saco, P.M., and Kumar, P. (2002). "Kinematic dispersion in stream networks 1. Coupling hydraulic and network geometry." *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 11, pp. 26-1-26-4.
- Singh, K.P., and Broeren, S.M. (1989). "Hydraulic geometry of streams and stream habitat assessment." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 115, No. 5, pp. 583-597.
- Singh, V.P. (2003). "On the theories of hydraulic geometry." *International Journal of Sediment Research*, Vol. 18, No. 3, pp. 196-218.
- Smith, L.C., and Pavelsky, T.M. (2008). "Estimation of river discharge, propagation speed, and hydraulic geometry from space: Lena River, Siberia." *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 3.
- Stall, J.B., and Fok, Y.S. (1968). "Hydraulic geometry of Illinois streams." *University of Illinois Water Resources Center Research Report*, Vol. 15.
- Stall, J.B., and Yang, C.T. (1970). "Hydraulic geometry of 12 selected stream systems of the United States." *University of Illinois Water Resources Center Research Report*, Vol. 32.
- Sun, W., Ishidaira, H., and Bastola, S. (2010). "Towards improving river discharge estimation in ungauged basins: calibration of rainfall-runoff models based on satellite observations of river flow width at basin outlet." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 7, No. 3, pp. 3803-3836.
- Tarboton, D.G. (1997). "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models." *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 309-319.
- Turnipseed, D.P., and Sauer, V.B. (2010). "Discharge measurements at gaging stations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods book 3." No. A8, pp. 87- (Also available at <http://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/>)
- Woo, H., Yu, K.K., and Park, J.-K. (1994). "A preliminary study of the hydraulic-geometrical relations of bed slope in some selected alluvial rivers." *Journal of the Korean Geographic Society*, Vol. 29, No. 3, pp. 253-265. (in Korean)

| |
|---|
| <p>paper number : 15-043 Received : 19 May 2015 Revised : 3 August 2015 Accepted : 3 August 2015</p> |
|---|