태풍내습 시 실시간 수위차를 활용한 유량산정

Estimating Discharge During Typhoons Using Real-Time Water-Level Difference

추태호* · 최연웅** · 원창희*** · 추연문****

Choo, Taiho*, Choe, Yeonwoong**, Won, Changhee***, and Choo, Yeonmoon****

Abstract

As stream discharge changes rapidly during a typhoon or stormy weather, it is very difficult to measure and calculate the real-time flow rate to create an effective disaster response plan in a short span of time. Existing bed slopes and energy slopes in particular are tricky to measure as they experience abrupt changes in their flow profiles. However, when the water level changes as the flow rate changes, the measurement is relatively simple. Therefore, an acoustic Doppler current profiler (ADCP) was installed at approximately 400 m north of Gangchang Bridge on the Geumho River to compare the measured flow rate with the actual flow rate. The mean velocity and the discharge were reflected in the Manning's mean velocity equation, and the water surface slopes were compared with the measured discharge using the ADCP data. The accuracy verification with R-squared yielded a fairly good result (0.8 to 0.9). The results of this study could help deliver quick and effective disaster forecasts in the future.

Key words : Discharge, Water Surface Slope, ADCP, Manning's Equation, Mean Velocity

요 지

태풍내습 시 하천에서 유량은 급격하게 변하기 때문에 실제 재난예보나 대응에 대한 골든타임 확보가 매우 어렵고 대응에 필요한 실시간 유량 산정을 위한 수리학적 인자 측정이 쉽지 않다. 기존에 사용하는 하상경사, 에너지경사는 측정이 까다롭기 때문에 해당 인자가 변화함에 따라 매번 재측정을 실시하기가 힘들다. 하지만 수위는 유량이 변화함에 따라 같이 변하고 측정이 비교적 간단하다. 따라서 본 연구에서는 실시간으로 변화하는 수위를 고려하기 위하여 Manning의 평균유속공식에 수면경사를 반영하여 평균유속과 유량을 금호강의 강창교에 설치된 성서관측소의 데이터와 강창교로부터 북쪽으로 약 400 m 지점에 설치된 ADCP데이터를 사용하여 산정한 유량값과 실측된 유량값을 비교하였다. R-square로 정확도 검증한 결과 값은 0.8~0.9로 상당히 좋은 결과가 나타났다. 추후 본 연구결과를 활용한다면 신속한 재난 예보 및 골든타임 확보에 도움이 될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유량, 수면경사, 음향도플러유속계, Manning 식, 평균유속

*정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수(E-mail: thchoo@pusan.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

**부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

M.S. Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

***국립재난안전연구원 방재연구실 선임연구원

Senior Researcher, National Disaster Management Research Institute

****교신저자, 정회원, 부산대학교 BK21+사업단 계약교수(Tel: +82-51-510-7654, E-mail: chooyean@naver.com)

Corresponding Author, Member, Contract Professor, Brain Korea 21 Plus, Pusan National University

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

매년 이상기후로 인해 전 세계적으로 하천의 범람 등이 큰 문제로 대두되고 있다. 하천 범람은 주택과 차량, 공공시설물 등의 침수로 이어지고, 이것은 개인 및 국가적인 큰 재산피해로 이어지며 인명피해 또한 만만치 않은 실정이다. 하천 범람을 막기 위해 가장 기초적이며 중요한 것은 정확하고 신속한 하천 유량의 측정이라고 볼 수 있다. 유량을 측정하기 위해 다양한 방법 및 장비들 중 대표적으로 프로펠러유속계, 전자파표면유속계, 초고속카메라, 레이저유속계, Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP), Large Scale Particle Image Velometry (LSPIV) 등이 있다. 최근에는 하천을 횡단하면서 순간적으로 유속을 측정하는 ADCP를 많이 사용하는 추세이다.

기존에는 하상경사나 에너지경사를 이용해서 유속 및 유량을 산정하고 있다. 하지만 하상경사와 에너지경사는 변화가 일어날 때 마다 매번 측정하기가 힘들다. 그렇기 때문에 태풍내습 시 급격히 밀려오는 토사 등으로 유역에 변화가 일어나더라도 변화되기 전의 자료를 이용할 수밖에 없다. 하지만 수위는 유량이 변화할 때마다 같이 변하고, 기상조건이 나쁘더라도 간단하고 신속하게 측정할 수 있기 때문에 수위를 이용한다면 이러한 문제를 해결할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실시간으로 변화하는 수위를 고려하기 위하여 Manning의 평균유속공식에 수면경사를 반영하여 평균유속과 유량을 금호강의 강창교에 설치된 성서관측소의 데이터와 강창교로부터 북쪽으로 약 400 m 지점에 설치된 ADCP데이터를 사용하여 비교 및 검증하였다.

1.2 연구동향

하천 범람을 막기 위해 다양한 방면으로 각종 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 국내에서 Yoo (1999)은 금강수계의 4개 주요 수위표 지점에 대하여 하천 유수의 통제기능을 고려한 수위-유량곡선을 통해 적용성결과를 비유량 곡선 상에서 기존 연구 성과와 비교검증 하였다. Kim et al. (2003)은 섬강 시험유역의 주요 관측지점에서 유량을 측정하고, 수위와 유량 측정성과의 신뢰도를 검토, 분석하여 수위-유량관계곡선식을 개발하였다. 하지만 Hwang et al. (2003)은 경사면적법으로 산정한 유량과 Rating Curve로 환산한 유량을 비교한 결과 환산한 유량이 실측값에 비하여 과대하게 계산된다고 분석하였으며, 경사면적법이 직접유량측정치에 거의 일치하는 연구 결과를 도출하였다. 유량산정방법에 관한 연구로 Kim et al. (2008)이 수위-유량곡선식 개발 시 사용되는 비선형최소제곱모형(NLSM)을 제안하였고, Kwon et al. (2008)은 Hierarchical Bayesian방법을 도입하여 불확실성과 함께 저수위-고수위를 정량적으로 구분할 수 있는 수위-유량 관계곡선식을 유도하여 기존 방법의 개선안을 제시하였다. Oh (2012)는 수리학적 측면에서 수리구조물의 설계와 관련 있는 설계홍수량과 수문

학적 측면에서 수생태계를 고려한 하천유지유량, 하도형성에 영향을 미치는 지배유량을 정량적으로 산정해 유량산정에 관하여 새로운 방법을 제시하였으며, Jang (2013)은 수위-유량곡선식의 불확실도를 평가하기 위하여 실측과 환산유량을 비교분석하여 측정 자료의 신뢰성을 평가했다.

Velez et al. (2000)은 콜롬비아의 수문연구소에서 측정된 최소 일일 유량 산정을 제시한다. Petersen-Overleir and Reitan (2009)은 홍수가 빈번한 지점에 부정확한 수위-유량 산정에 대한 방안으로 최우도법을 기반으로 하는 방법을 이용하였다. Yang et al. (2012)은 에너지 손실과 전이 작용의 유효 전단응력을 참고한 운동량 이동 작용의 역학적 분석에 기반한 분석으로 에너지 개념을 기반으로 한 곧고 대칭적인 복단면 개수로의 새로운 모델을 개발하였다. Chen et al. (2014)은 음향 도플러 유속계를 전단면적 유속측정방법을 만들기 위해 사용하고, 유속정보에 의한 최대 유속 계산, 관개 수로의 최대 유속, 평균 유속의 엔트로피의 정수비 관계에 기반한 Chiu방정식을 사용하여 타이완의 직선수로에서 유량산정을 위한 새로운 방법과 기술을 적용하였다. Tourian et al. (2017)은 데이터베이스를 이용하는 수문학적 모델링을 이용해 일일 유량을 추정하는 방법을 제안하고, 이를 니제르 유역에서 검증하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 대구광역시 달서구와 달성군 사이를 지나는 금호강의 강창교 지점에서 상류 방향으로 약 400 m 지점에 위치하고 있는 ADCP를 통해 관측된 10분 단위 수위, 유량 및 하천단면자료 5개년(2014년~2018년) 분량의 자료를 낙동강홍수통제소를 통해 수집하였고, 대구광역시 강창교 지점에 설치된 성서관측소의 1시간 수위자료를 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)을 통해 수집하였다. 이렇게 수집한 자료와 본 연구의 개발식을 통해 산정한 유량과 유량의 실측치를 비교 및 분석하였으며, 결과 그래프를 통해 본 연구에서 제시하는 새로운 유량 산정식의 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 1. Study Area

3. 유량 산정식의 제안

3.1 부등류 기본 방정식

일반적으로 부등류는 정상류(정류)의 일종이고 개수로 흐름은 대부분이 부등류이다. 부등류는 유량이 일정하고 유속이 흐름방향으로 변화하는 흐름이며 수로의 단면, 경사가 변하는 경우에 생긴다. 또 단면 및 경사가 일정하고 균일한 수로인 경우에도 수로의 도중에 구조물 등의 장애물이 있거나 횡 방향에서 유입, 유출 등이 있을 경우에도 수심이 변하고 부등류가 된다.

Fig. 2와 같이 경사각 θ 인 개수로에 물이 흐르는 경우의 부등류 기본방정식은 다음과 같다. 즉, 한 단면에서의 전수두는 기준면에서의 수로바닥까지의 높이를 z , 유수단면의 수심을 h , 평균유속을 v 라 하면 Eq. (1)과 같이 된다.

Fig. 2. Derivation of The Non-uniform Flow Equation

$$H_t = z + h \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

손실수두를 고려하면 Eqs. (1)은 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$H_t = z + h \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} + h_L = \text{const} \quad (2)$$

전수두 H 의 흐름방향 거리 x 의 변화율을 구하기 위해서 거리 x 에 대해 Eq. (2)를 미분하면 Eq. (3)이 된다.

$$\frac{dH_t}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dh}{dx} \cos \theta + \frac{d}{dx} \left(\alpha \frac{V^2}{2g} \right) + \frac{dh_L}{dx} = 0 \quad (3)$$

Eq. (3)에서 $\frac{dH_t}{dx}$ 는 에너지선의 경사이고 $\frac{dz}{dx}$ 는 수로바닥의 경사이며 Eq. (4)와 같다.

$$\frac{dz}{dx} = -\sin \theta \quad (4)$$

Eq. (3)에서 $\frac{dh_L}{dx}$ 는 손실수두의 변화율이며 Chezy평균유속계수 C 로 표시하면 Eq. (5)와 같다.

$$\frac{dh_L}{dx} = \frac{V^2}{C^2 R} \quad (5)$$

Eqs. (4)와 (5)를 Eq. (3)에 대입정리하면 Eq. (6)이 된다.

$$-\sin \theta + \frac{dh}{dx} \cos \theta + \frac{d}{dx} \left(\alpha \frac{V^2}{2g} \right) + \frac{V^2}{C^2 R} = 0 \quad (6)$$

Eq. (6)에 $V = \frac{Q}{A}$ 를 대입하면 Eq. (7)과 같다.

$$-\sin \theta + \frac{dh}{dx} \cos \theta + \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{A^2} \right) + \frac{Q^2}{C^2 R A^2} = 0 \quad (7)$$

일반적인 환경사인 경우는 $\theta \approx 0$, $\cos \theta \approx 1$, $\sin \theta \approx \tan \theta = i$ 이므로 Eq. (8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-i + \frac{dh}{dx} + \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{A^2} \right) + \frac{Q^2}{C^2 R A^2} = 0 \quad (8)$$

통상 $C^2 = \frac{1}{n^2} R^{1/3}$ 이므로 이것을 Eq. (8)에 대입하면 Manning의 평균유속식을 사용한 경우의 부등류 기본식이 된다.

$$-i + \frac{dh}{dx} + \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{A^2} \right) + \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3} A^2} = 0 \quad (9)$$

여기서 i 는 수로바닥의 경사이다. 또한 I 를 동수경사 또는 수면경사라 하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$I = \sin \theta - \frac{dh}{dx} \cos \theta \quad (10)$$

일반적으로 에너지경사를 표시되는 I_e 는 Eq. (11)과 같다.

$$I_e = \sin \theta - \frac{dh}{dx} \cos \theta - \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{A^2} \right) \quad (11)$$

한편 하천경사가 매우 작은 경우(환경사인 경우)에 θ 는 동수경사 또는 수면경사인 I 와 에너지경사인 I_e 는 각각

Eqs. (12)와 (13)과 같이 표시된다.

$$I = i - \frac{dh}{dx} \quad (12)$$

$$I_e = i - \frac{dh}{dx} - \frac{aQ^2}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{A^2} \right) \quad (13)$$

Eqs. (12)와 (13)을 Eq. (9)에 대입하면 Eq. (14)이 된다.

$$-I_e + \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} = 0 \quad (14)$$

따라서 Eq. (14)를 평균유속인 v 항으로 정리하면 Eq. (15)가 되면 이 식이 Manning 공식이다.

$$V = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times I_e^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

물의 흐름이 등류일 때는 $\frac{dh}{dx} = 0$, $\frac{d}{dx} \left(a \frac{V^2}{2g} \right) = 0$ 이므로 에너지경사 I_e , 수면경사 I , 하상경사 i 가 모두 같아 Eq. (16)과 같이 된다.

$$I_e = I = i \quad (16)$$

따라서 Eqs. (16)을 (17)에 대입정리 하면 Eq. (17)이 되면 이 식이 등류 흐름에 일반적으로 사용되는 Manning의 평균 유속공식이다.

$$V = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times I_e^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

3.2 Manning의 식을 통한 유량 산정식의 제안

Fig. 3에서 수면경사를 반영하지 못한다면 다른 수위라도 ①, ②, ③의 유량은 동일하게 산정될 것이다.

본 연구에서는 Manning 식에서 수면경사를 반영하기 위해 하상경사 대신 수면경사를 적용하였다.

$$V = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times I_w^{\frac{1}{2}} \quad \because I = I_w \quad (18)$$

여기서, n 은 Manning 조도계수, R 은 동수반경, I_w 는 수면경사를 뜻한다. 부정류의 흐름일 경우에는 Eq. (9)와 같이 에너지경사(I_e)를 적용해야 하지만 자연하천에서 이를 측정하거나 산정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 수면경사(I_w)를 반영하여 실시간 상태에 준하는 하천 유량을 산정하였다. Fig. 3에서 ADCP의 수위를 H_1 이라

하고, 성서수위관측지점 수위를 H_2 라 하여 Eq. (19)에 대입 하면 하천의 수면경사를 산정할 수 있다.

$$I_w = \frac{H_1 - H_2}{\ell} \quad (19)$$

여기서, H_1 은 ADCP 지점에서 측정한 수위, H_2 는 성서관측소지점에서 측정한 수위, ℓ 은 두 지점간의 거리이다.

Fig. 3. The Relationship Between Same Measured Depth and Each Water Slope

따라서 하천의 횡단면을 이용하여 수위에 따른 수리학적 매개변수를 손쉽게 산정하는 식을 추가하였다. Eq. (20)은 수위에 따른 윤변, Eq. (21)은 수위에 따른 횡단면적, Eq. (22)은 수위에 따른 수리반경을 산정하는 식이다.

$$P = 0.6h^2 + 2.2h + 55.9 \quad (20)$$

$$A = 6.1h^2 + 24.8h + 31 \quad (21)$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{6.1h^2 + 24.8h + 31}{0.6h^2 + 2.2h + 55.9} \quad (22)$$

수면경사를 반영하는 Manning 공식에 Eq. (22)를 대입하면 Eq. (23)과 같이 수위에 따른 평균유속공식을 유도할 수 있다.

$$\bar{u} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_w^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0.025} \times \left(\frac{6.1h^2 + 24.8h + 31}{0.6h^2 + 2.2h + 55.9} \right)^{\frac{2}{3}} \times I_w^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

Eq. (23)을 연속방정식에 대입하면 Eq. (24)와 같이 수면경사를 반영하며, 수위만을 매개변수로 하는 평균유량산정공식을 유도할 수 있다.

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_w^{\frac{1}{2}} A \quad (24)$$

$$= \frac{1}{0.025} \times \left(\frac{6.1h^2 + 24.8h + 31}{0.6h^2 + 2.2h + 55.9} \right)^{\frac{2}{3}} \times I_w^{\frac{1}{2}} \times (6.1h^2 + 24.8h + 31)$$

4. 적용

낙동강홍수통제소의 ADCP 자료와 강창교의 성서관측소의 자료를 본 연구의 새로운 유량 산정식에 적용하여 유량을 산정하였으며 실측된 유량과 비교하여 각 연도별 적용결과를 Fig. 4에 그래프로 나타내었다.

Fig. 4. Comparison of Estimated Q with Observed Q ((a)~(e))

각각의 그래프에는 추가적으로 R-square를 표시하였으며 R-square는 0과 1사이의 값으로 나타내는데 0에 가까울수록

설명력이 낮고, 1에 가까울수록 설명력이 높다고 해석할 수 있다. R-square는 Sum of Square Error (SSE)와 Sum of Square Total (SST)로 계산이 되며 Eqs. (25)와 (26)과 같으며 최종적으로 R-square 식은 Eq. (27)과 같다.

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (25)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (26)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (27)$$

이렇게 계산된 R-square중에서 값이 가장 작은 것은 0.8047 이며 가장 큰 값은 0.9598에 이른다.

4.1 정확도 검증

본 연구에서는 제안식의 설명력 검증을 위해 기본적으로 R-square를 사용하여 Fig. 4의 그래프에 나타내었으며, 추가적으로 오차분석을 통한 검증을 위해 통계적인 분석방식인 Discrepancy Ratio를 사용하였다. Discrepancy Ratio는 실측 값과 산정한 값의 비에 상용 Log를 취하는 오차분석 방식이며 Eq. (28)과 같다.

$$\log \left(\frac{\text{Estimated } Q}{\text{Observed } Q} \right) = \text{constant} \quad (28)$$

Discrepancy Ratio는 데이터 각각의 비에 상용 Log를 취한 값들을 0을 기준으로 0보다 크고 작은 일정한 범위들을 잡아주고 값들이 범위 안에 얼마나 잘 들어오는지 확인하는 것으로 오차 정도를 확인한다. 그래프에서 y축 Amount는 x축 범위에 해당하는 데이터의 개수이다. 값이 0에 가까울수록 그 신뢰성이 크다는 의미이다. 값이 0보다 작으면 과소산정을 의미하며 0보다 크면 과다산정을 의미한다.

이렇게 산정한 Discrepancy Ratio의 그래프를 Fig. 5로 나타내었으며 전체적으로 Discrepancy Ratio가 0에 가깝다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

태풍내습 시에는 하천의 유량이 순간적으로 급격하게 뛰고 수위 또한 그에 비례하게 상승한다. 기존의 하상경사나 에너지경사를 사용하는 공식은 수위 변화를 고려하지 않고 실시간 측정이 힘들기 때문에 급격한 유량증가를 따라가기가 힘들다. 하지만 유량이 변할 때마다 유동적으로 함께 변화하고, 그 측정이 비교적 간편하고 신속한 수위를 이용한 다면 이러한 문제를 해결할 수 있다.

Fig. 5. Discrepancy Ratio Graph ((a)~(e))

본 연구에서는 예측하기 쉽지 않은 홍수기의 급격한 유량 상승을 비교적 간편하고 빠르게 예측하기 위해 대중적인 Manning의 공식에 구간의 시작과 끝 지점의 수위차를 이용하는 수면경사를 적용해 최종적으로 유량을 산정하였으며 이를 그래프로 도식화하였다.

앞서 유량산정에 관한 여러 연구논문들을 살펴보면, 대부분 수위-유량관계 곡선을 이용한 산정방법들이다. 하지만 본 연구는 유역의 두 지점의 수위차를 이용하는 수면경사를 이미 그 신뢰성과 효용성이 입증된 Manning의 평균유속공식에 적용한 것이 앞선 연구들과 차별된다.

본 연구의 신뢰성을 최대화하기 위하여 총 5개년(2014년~2018년) 간의 금호강 ADCP관측지점과 성서관측소의 실측된 수위, 유량 등의 자료를 데이터베이스로 사용하였으며, 유역의 실제 횡단면적을 고려해 회귀분석을 실시하여 어떠한 수위가 관측되더라도 신속하고 정확한 횡단면적을 계산할 수 있다. 그렇게 계산된 횡단면적과 수면경사를 고려한 Manning의 평균유속공식을 이용해 유량을 산정하였다.

본 연구에서 제안하는 유량 산정방식의 정확도 검증은 첫 번째로 R-square를 이용 하였으며, 대부분의 R-square가 0.8 ~ 0.9를 상회하는 결과를 나타내고 있다. 그래프의 형상 또한 산정한 유량이 실측된 유량을 거의 따라가고 있는 모습을

보여준다.

또한 Discrepancy Ratio를 통한 실시한 오차분석에서 대부분의 값이 0에 근접하기 때문에 이는 수면경사를 이용하는 본 연구의 유량 산정방식이 이론적으로 타당하며, 실제 하천의 관측자료를 활용하였기 때문에 신뢰성이 높다고 판단되며 추후 본 연구결과를 활용한다면 태풍내습 시 신속한 재난 예보 및 골든타임 확보에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 제원으로 재난안전기술사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-05].

References

- Chen, Y.C., Kuo, J.J., Yu, S.R., Liao, Y.J., and Yang, H.C. (2014). Discharge estimation in a lined canal using information entropy. *Entropy*, MDPI, Vol. 16, pp. 1728-1742.
- Hwang, M.H., Park, J.I., Maeng, S.J., Ko, I.H., and Kim, W.G. (2003). Stream discharge calculation by the water-surface slope. *Proceedings of 2003 Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2099-2102.
- Jang, D.J. (2013). Uncertainty assessment of rating curve equation in the Nam River dam major site. *Journal of Construction and Environment Research Institute of Cheongun University*, Vol. 8, No. 2, pp. 175-183.
- Kim, G.H., Park, J.I., and Shin, C.K. (2008). Development of rating curves using a maximum likelihood model. *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 83-93.
- Kim, S.H., Choi, H.S., Kim, S.H., and Lee, P.J. (2003). Development of rating-curve on the Sum River experimental watershed. *Proceedings of 2003 Annual Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2830-2834.
- Kwon, H.H., Moon, Y.I., Choi, B.K., and Kim, S.M. (2008). Derivation and uncertainty analysis of rating curve using hierarchical bayesian model. *Proceedings of 2008 Annual Conference*, Korea Water Resources Association, pp. 1211-1214.
- Oh, J.H. (2012). *Estimation of design discharge for close-to-nature river restoration*. Master's thesis, Seoul National University.
- Petersen-Overleir, A., and Reitan, T. (2009). Accounting for rating curve imprecision in flood frequency

- analysis using likelihood-based methods. *Journal of Hydrology*, Vol. 366, No. 1-4, pp. 89-100.
- Tourian, M.J., Schwatke, C., and Sneeuw, N. (2017). River discharge estimation at daily resolution from satellite altimetry over an entire river basin. *Journal of Hydrology*, Vol. 546, pp. 230-247.
- Vélez, M.V., Smith, R.A., Rodríguez, E.M., and Bedoya, J.A. (2000). Minimum discharges estimation on a scarce-information basis: A case study. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. 15 No. 2, pp. 19-28.
- Yang, S.Q., Tan, S.K., and Wang, X.K. (2012). Mechanism of secondary currents in open channel flows. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, No. F4, doi:10.1029/2012JF002510
- Yoo, J.H. (1999). Development and application of rating curves for the Keum River. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. II-6, pp. 665-675.

Received	October 10, 2019
Revised	October 14, 2019
Accepted	November 4, 2019