

## 수면경사를 반영한 하천 유량산정에 관한 연구

### A Study on Development of Estimation for Discharge Rate Reflecting Water Surface Slope

추태호, 홍순헌, 박상진, 김영환  
부산대학교 건설융합학부

Tai Ho Choo(thchoo@pusan.ac.kr), Soon Heon Hong(hsh1963@pusan.ac.kr),  
Sang Jin Park(tkdwls39@pusan.ac.kr), Young Hwan Kim(dorsikim@daum.net)

#### 요약

우리나라는 갈수와 홍수의 유량차이가 극심하여 수자원 관리에 대한 중요성이 대두되고 있는 실정이다. 하천의 특성을 파악하기 위해 정확한 유량을 산정해야 한다. 유량을 산정하기 위해서는 유량을 구하고자 하는 하도의 단면적을 산정하고, 해당 단면에서의 유속을 측정해 연속방정식을 이용하여 유량을 산출해야 한다. 보편적으로 수위-유량관계식으로부터 유량을 산정하지만, 이 경우에는 동일한 수심 동일한 유량만을 산출할 수밖에 없다는 단점이 있다. 그래서 본 연구에서는 낙동강 교량 강창교 지점의 성서관측소의 수심과 ADVM를 이용하여 측정된 수심을 이용한 수면경사와 ADVM지점의 수심을 이용하여 유량산정식을 개발하였다. 자연하천의 흐름은 정류나 등류가 아닌 부정류 흐름이기 때문에 하상경사가 아닌 수면경사를 반영하고자 본 연구에서는 두 지점의 측정된 수심으로부터 손쉽게 유량을 산정하는 방법을 제안하였다.

■ 중심어 : |도플러방식 초음파 유속계 | 부정류 | 수위관측소 | 수면경사 | 하천유량산정식 |

#### Abstract

There is a big difference of discharge rate between drought and flood period in Korea since the importance of water resources management has come to the fore. To know a river characteristics, it needs to estimate river discharge accurately. River discharge is calculated using the measured velocity of cross section and the estimated area of watercourse as input parameters into continuity equation. Generally, flow rate over a river is estimated from the relation equation between level and discharge, in this case, there are weakness for only the equal depths and the equal discharge estimated. In the present study, therefore, water surface slope was estimated using measured water level of Seongseo water level observation station and measured water level using ADVM at Gangchang Bridge. And then, we developed the discharge calculation equation using water surface slope. A method to easily calculated flow rate from the measured depth of the two points that are suggested by reflecting water surface slope because natural stream is unsteady flow, not uniform flow or not steady flow.

■ keyword : | ADVM | Unsteady flow | Stage station | Water surface | Estimation of river discharge |

\* 본 연구는 K-Water 연구원의 지원에 의해 수행되었습니다.

접수일자 : 2016년 11월 07일

수정일자 : 2016년 12월 21일

심사완료일 : 2017년 02월 14일

교신저자 : 김영환, e-mail : dorsikim@daum.net

## I. 서론

기후 변화로 홍수 및 가뭄 등 물과 관련된 피해가 증가하고, 도시화의 진전으로 물에 대한 수요가 지속적으로 확대되는 반면, 깨끗하고 안전한 물의 공급은 한정됨에 따라 효율적인 물 관리의 중요성이 더욱 강조되고 있다[3][15]. 이에 따라 우리나라에서도 수자원에 대한 연구가 끊임없이 이루어지고 있으며, 특히 우리나라는 갈수기와 홍수기의 유량 차이가 극심하여 수자원 관리에 대한 중요성이 대두되고 있는 상황이다. 수자원을 확보하고 이를 적절하게 분배하는데 효율적인 구조물은 댐과 보를 들 수 있다. 우리나라에 설치되어 운영 중인 다양한 댐과 4대강 사업 후 만들어진 보는 하천의 수량을 제어함으로써 홍수나 가뭄의 피해를 저감시키는데 일조하고 있다. 이런 하천의 수리구조물들을 설치하기 위해서는 하천에 얼마만큼의 유량이 흐르고, 수위는 얼마만큼 차는지 오랜 관측을 통해 알 수 있으나, 타수문자료 취득에 비하여 유량자료의 취득에 대한 신뢰도 및 실효성에 많은 의문점이 제기되고 있는 것이 현실이다[12].

유속을 측정하는 방법은 직접측정법과 간접측정법으로 구분되며 다양한 방법들이 기 개발되었거나 개발 중에 있다. 국내에 알려진 방법들을 살펴보면, 프로펠러유속계, 전자파표면유속계, 초고속카메라, 전자부자 시스템, HF radar, LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)기법, ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler), 레이저 유속계 등을 이용해 유속을 측정하는 방법들이 있다.

국내에서는 위와 같은 다양한 방법 중에서 프로펠러 유속계와 전자파표면유속계를 활용하여 여러 기관에서 하천의 유량을 산정하고 있는 실정이다. 강우사상 동안에 하천의 유속을 측정하고, 수심을 관측하여 몇 개 내지 몇 십 개의 성과를 바탕으로 수위를 구분한다. 최종적으로 수위-유량곡선을 개발하여 수위에 따른 유량을 추정하는 방법을 사용한다.

그러나 유속을 측정하는 순간에도 수위가 유동적으로 변하기 때문에 하천 폭이 넓은 경우에는 신뢰성에 의문점이 생기며, 그 지점의 수위가 같다고 하더라도

수면경사를 반영하지 못하기 때문에 한계성이 존재한다고 볼 수 있다. 그 이유는 수면경사가 다르지만 관측된 수위는 같은 경우 하나의 유량이 추정되기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 수면경사를 반영하고자 수위 관측소 지점과 이 지점에서 상류로 400m 떨어진 ADVM지점의 관측된 수심을 이용하여 신속하고 간편하게 유량을 산정하는 방법을 제시하고, 이를 검증하고자 한다.

## II. 연구동향

유량은 하천의 횡단면을 단위시간에 통과하는 물의 체적으로 측정한다[9]. 수위-유량관계법은 다양한 주제를 가지고 많은 연구가 진행되어 왔다. 수위-유량관계법의 개발은 1800년대까지 거슬러 올라가며, 현대적인 방법의 대부분은 1950년대 이전에 개발되었다[1][3]. 유량산정방법에 관한 연구를 살펴보면 김경훈 등(2008)이 수위-유량곡선식 개발 시 사용되는 전통적인 비선형최소제곱모형(NLSM)을 제안하였고, 권현한 등(2008)은 Hierarchical Bayesian방법을 도입하여 불확실성과 함께 저수위-고수위를 정량적으로 구분할 수 있는 수위-유량 관계곡선식을 유도하여 기존 방법의 개선안을 제시하였다. 장대정(2013)은 수위-유량곡선식의 불확실도를 평가하기 위하여 실측유량과 환산유량을 비교분석하여 유량추정 자료에 대한 신뢰성을 평가했고, 유주환(1999)은 금강수계의 4개 주요 수위표 지점에 대하여 하천 유수의 통제기능을 고려한 수위-유량곡선을 새로 작성하였고 곡선의 적용성과를 비유량 곡선 상에서 기존 연구 성과와 비교검증 하였다. 김성훈 등(2003)은 섬강시험유역의 주요 관측지점에서 유량을 측정하고, 수위와 유량 측정성과의 신뢰도를 검토, 분석하여 수위-유량관계곡선식을 개발하였다. 그러나, 황만하 등(2003)은 경사면적법으로 산정한 유량과 Rating Curve로 환산한 유량을 비교한 결과 Rating Curve로 환산한 유량이 실측값에 비하여 과대하게 계산된다고 분석하였으며, 경사면적법이 직접유량추정치에 거의 일치하는 연구결과를 도출하였다. 그리고 Asgeir and Trond

(2009)은 홍수가 빈번한 지점에 부정확한 수위-유량 산정에 대한 방안으로 최우도법(maximum likelihood method)을 기반으로 하는 방법을 이용하였다.

위와 같이 국내에서 사용하는 유량산정에 관한 방법이 제시되었지만, 본래 기본적으로 수위-유량 관계는 1:1을 유지한다는 가정 하에 수위-유량 관계곡선이 이루어지는데 이는 정상류 상태에서만 존재할 수 있다 [13]. 그러나 이러한 방법은 자연하천의 흐름인 부정류 상태에는 다소 부적절한 면이 있고, 관측하기 까다로운 에너지 경사가 아닌 간단한 바닥경사를 고려한 방법을 사용하고 있기에 시시각각 변화하는 자연하천의 상황을 고려하지 못하고 수위와 유량이 1:1대응으로 나타나게 된다[그림 1]. 뿐만 아니라 측정된 범위를 벗어난 수위가 관측되었을 경우에는 유량을 산정함에 있어 그 값이 수렴([그림 1]의 회귀곡선 4의 경우) 혹은 발산하여 잘못된 값을 유도하는 단점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 현재 관측되어 자료가 축적중인 두 지점의 수위자료를 수집하여 수위에 따른 운변, 동수경사, 단면적, 수면경사를 이용하여 자연하천의 유량을 산정하는 방법을 제안하고자 한다.

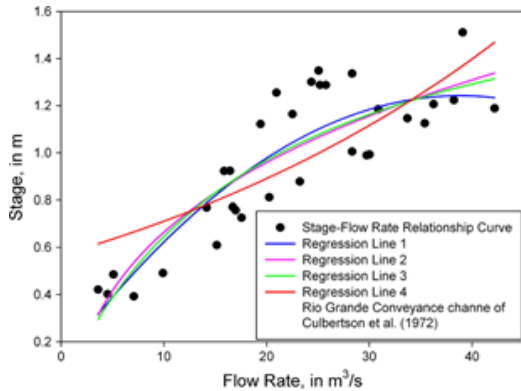


그림 1. The rating curve showing many similar regression lines in a natural open channel[12]

### III. 연구방법

본 연구에서는 [그림 2]와 같이 대구시의 금호강을

가로지르는 강창교 지점에서 직선으로 약 400m 상류에 위치하고 있는 ADVM (Acoustic Doppler Velocity Meter)을 통해 관측된 10분 단위 수위, 유량 및 하천단면자료를 낙동강홍수통제소를 통해 수집하였고, 대구 강창교 지점에 설치된 성서관측소의 1시간 단위 수위 자료를 WAMIS를 통해 수집하였다.

이렇게 수집한 자료와 개발식을 통해 산정된 유량과 실제 관측된 유량을 비교하였으며, 유량산정식의 정확성을 제시하였다.

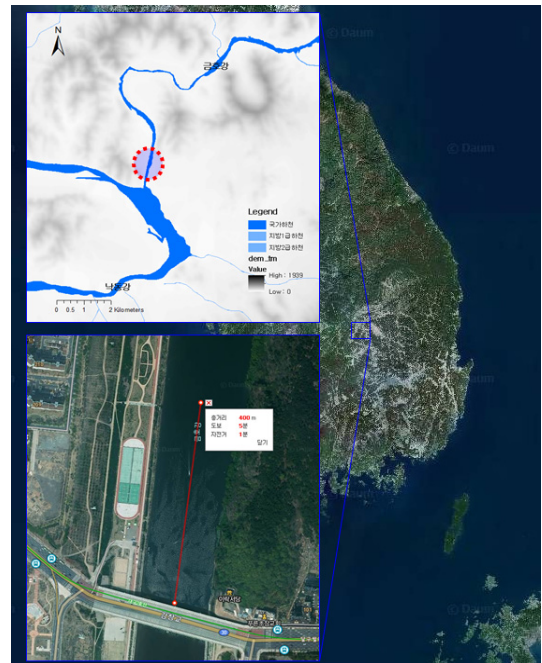


그림 2. Study area(stage station)

## IV. 유량산정식 개발

### 1. 연속방정식을 통한 유량산정

유선을 s방향으로 하고 1개의 유관을 생각한다. 미소 길이  $ds$  만큼 떨어진 I, II 단면에 있어서의 단면적을 각각  $A$ 와  $A' = A + \frac{\partial A}{\partial s} ds$ , 유속을  $v$ 와  $v' = v + \frac{\partial v}{\partial s} ds$ , 밀도를  $\rho$  및  $\rho' = \rho + \frac{\partial \rho}{\partial s} ds$ 라고 하면 미소시간  $dt$ 시

간 동안  $A$ 를 통과하여  $ds$ 부분에 유입한 질량은  $\rho Avdt$ ,  $A'$ 를 통해 유출하는 질량은  $\rho' A' v' dt$ 가 되고 그 차이만큼  $ds$ 부분의 질량이 증가한다.  $ds$ 부분의 질량의  $dt$ 시간 동안의 증가는  $\frac{\partial(\rho A ds) dt}{\partial t}$ 가 되므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\rho Avdt - \rho' A' v' dt = \frac{\partial}{\partial t}(\rho A ds) dt \quad (1)$$

$\rho', v', A'$ 을 위의 Eq. (1)에 대입하고 2차 이상의 항을 생략하면,

$$\begin{aligned} -(Av \frac{\partial \rho}{\partial s} ds + A\rho \frac{\partial v}{\partial s} ds + \rho v \frac{\partial A}{\partial s} ds) &= \frac{\partial}{\partial t}(\rho A) ds \\ \therefore \frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial s}(\rho v A) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Eq. (2)의  $\rho$  대신에 단위중량  $w$ 를 사용하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(wA) + \frac{\partial}{\partial s}(wvA) = 0 \quad (3)$$

Eq. (3)은 유관 내의 유체가 도중에서 없어지지 않는 것을 나타내는 것으로 이를 연속방정식이라고 한다.

비압축성 유체에 대해서는  $\rho = const$ 이므로 연속방정식 Eq. (3)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s}(Av) = 0 \quad (4)$$

또한 흐름이 정상류인 경우에는  $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$ 이므로 다음 Eq. (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{ds}(Av) = 0 \quad (5)$$

Eq. (5)를 적분하면

$$Av = const = Q$$

$$\therefore Q = A \cdot V \quad (6)$$

즉, 유관의 단면적과 그 점에서의 유속을 곱한 것은 그 유관에 있어서는 항상 일정하다. 그리고 이것을 유량이라고 부른다.

## 2. Manning 공식을 이용한 새로운 유량 산정식 유도

정류나 등류흐름으로 가정하여 개수로의 평균유속을 산정하는 Manning 공식은 Eq. (7)과 같다. 또한 [그림 3]과 같이 측정된 수위가 같다고 하더라도 수면경사를 반영하지 못하면 ①, ②, ③의 유량은 동일하게 산정될 것이다. 따라서, 본 연구에서는 Manning 공식에서 수면경사를 반영하기 위해 하상경사 대신 수면경사를 적용하였다(Eq. (8)).

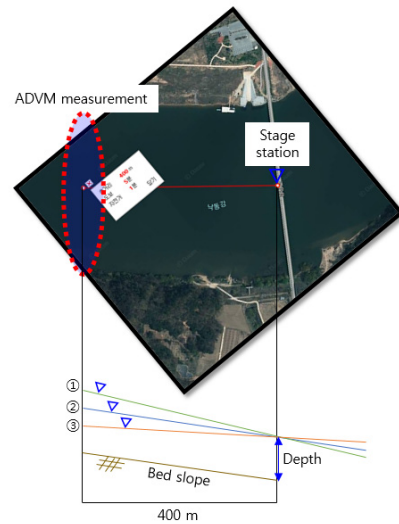


그림 3. The relationship between same measured depth and each water slope

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \times R_h^{\frac{2}{3}} \times I_b^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \times R_h^{\frac{2}{3}} \times I_w^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

여기서,  $n$ 은 조도계수,  $R_h$ 은 동수반경,  $I_b$ 는 하상경사,  $I_w$ 는 수면경사를 뜻한다.

부정류의 흐름일 경우에는 Eq. (9)와 같이 에너지경사( $I_f$ )를 적용해야 하지만 자연하천에서 이를 측정하거나 산정하는 것은 매우 난해하다. 따라서 본 연구에서는 수면경사( $I_w$ )를 반영하여 부정류상태의 하천 유량을 산정하고자 한다.

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \times R_h^{\frac{2}{3}} \times I_f^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

[그림 3]에서 ADVM과 성서수위관측지점의  $H_1$ 과  $H_2$ 를 이용하여 Eq. (10)에 대입하면 하천의 수면경사를 산정할 수 있다.

$$I_w = \frac{H_1 - H_2}{\ell} \quad (10)$$

여기서,  $H_1$ 은 성서관측소에서 측정한 수위,  $H_2$ 는 ADVM지점에서 측정한 수위,  $\ell$ 은 두 지점간의 거리이다.

연구지역의 하천의 횡단면을 이용하여 수위에 따른 수리학적 매개변수를 손쉽게 산정하는 식을 개발하였다. Eq. (11)은 수위에 따른 윤편, Eq. (12)은 수위에 따른 횡단면적, Eq. (13)은 수위에 따른 수리반경을 산정하는 식이다.

$$P = 0.579h^2 + 2.1896h + 55.943 \quad (11)$$

$$A = 6.0735h^2 + 24.82h + 30.9664 \quad (12)$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{6.0735h^2 + 24.82h + 30.9664}{0.579h^2 + 2.1896h + 55.943} \quad (13)$$

수면경사를 반영하는 Manning 공식에 위 Eq. (11), Eq. (12), Eq. (13)을 대입하면 Eq. (14)와 같이 수위에 따른 평균유속공식을 유도하였다.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0.025} \times \left( \frac{6.0735h^2 + 24.82h + 30.9664}{0.579h^2 + 2.1896h + 55.943} \right)^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Eq. (14)을 연속방정식에 대입하면 Eq. (15)와 같이 수면경사를 반영하며, 수위만을 매개변수로 하는 평균

유량산정공식을 유도하였다.

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_w^{\frac{1}{2}} A = \frac{1}{0.025} \times \left( \frac{6.0735h^2 + 24.82h + 30.9664}{0.579h^2 + 2.1896h + 55.943} \right)^{\frac{2}{3}} \times I_w^{\frac{1}{2}} \times (6.0735h^2 + 24.82h + 30.9664) \quad (15)$$

### V. 결과분석

낙동강홍수통제소에서 ADVM으로 산정된 유량과 본 연구에서 산정한 개발식을 통해 산정된 유량을 다음 [그림 4][그림 5]과 같다.

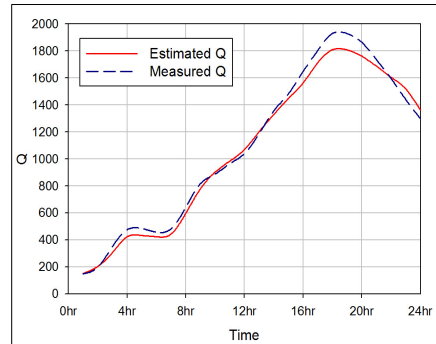


그림 4. Measured and estimated flow hydrograph (2013.07.05)

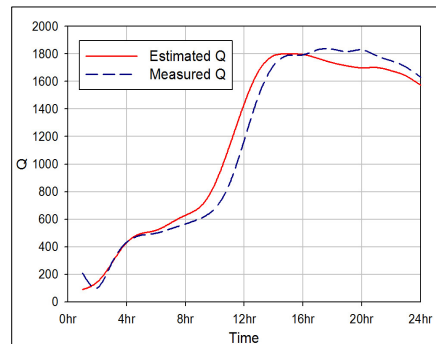


그림 5. Measured and estimated hydrograph (2014.08.18)

[그림 4][그림 5]는 ADVM으로 측정된 유량과 Eq. (15)로 산정한 유량을 시간순으로 도시화 하였다. 여기서, x축은 시간, y축은 유량이다.

본 연구에서 개발된 유량산정식의 신뢰도를 평가하기 위해 [그림 5][그림 6]과 같이 Eq. (15)에 의해 산정된 유량과 측정유량을 비교하였다. x축에는 개발식을 통해 산정한 유량이며, y축은 실제 ADVM지점의 횡단면을 통과하는 유량이다.  $R^2$ 값이 0.97 이상으로 잘 일치함을 알 수 있었다.

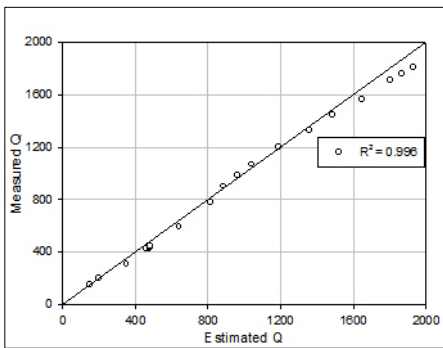


그림 6. Coefficient of determination for Estimated and Measured Q (2013.07.05)

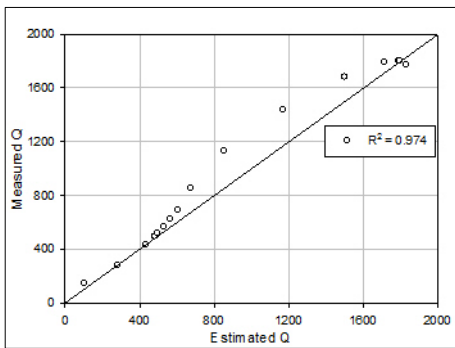


그림 7. Coefficient of determination for Estimated and Measured Q (2014.08.18)

## VI. 결론

본 연구에서는 기존에 많이 사용하는 수위-유량곡선식에 대해 검토하였으나, 자연하천은 부정류흐름이기 때문에 이 흐름을 반영하기 어렵다고 판단되었다. 따라

서, 정류상태일 경우 개수로의 평균유속공식인 Manning식에 연속방정식을 반영한 수면경사를 적용하여 수면경사를 반영한 유량산정식을 개발하였고, 이를 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 수위-유량곡선식은 다른 수면경사일지라도 같은 수위이며, 같은 유량이 추정되기 때문에 자연하천의 흐름을 표현하는데 본 연구에서 제안한 Eq. (15)가 더 적합하다고 판단된다.

둘째, Eq. (15)의 매개변수는 두 지점의 실측수위에 의해 매우 간편하고 신속하게 유량을 산정할 수 있다는 장점이 존재한다.

셋째, Eq. (15)에 의해 산정한 유량과 ADVM에 의해 산정한 유량을 비교한 결과 결정계수( $R^2$ )가 모두 0.97 이상으로 신뢰도가 높은 것으로 사료된다.

넷째, 우리나라에서는 주요 하천에 많은 수위관측소가 설치되어 운영되고 있는데, 이 수위관측소지점의 상하류에 수위관측소지점을 하나 더 설치한다면, 기존 수위-유량관계곡선으로 산정한 유량보다 더 나은 하천유량이 산정될 것으로 기대된다.

다섯째, 본 연구에서 제안한 방법은 하천에서 단면의 변화가 심하지 않으며, 직선거리에 적용가능한 방법론으로 이를 이용하여 다른 지점에서 활용한다면 손쉽게 효율성이 높은 유량을 산정할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] A. Petersen-Øverleir and T. Reitan, "Accounting for rating curve imprecision in flood frequency analysis using likelihood-based methods," *Journal of Hydrology*, Vol.366, No.1, pp.89-100, 2009.
- [2] A. R. Schmidt, *Analysis of stage-discharge relation for open-channel flows and their associated uncertainties*, Ph.D. thesis, Univ. of Ill. at Urbana-Champaign, Urbana, Ill., USA, p.329, 2002.
- [3] C. H. Kim, "How to change korean water

- management system? : Focused on expert's recognition analysis," The Korea Contents Association, Vol.13, No.10, pp.266-277, 2013.
- [4] C. Y. Kim, "Development of Velocity Profile Method for Streamflow Estimation and Its Applicability," M. S. Thesis, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea, 2010.
- [5] D. J. Jang, "Uncertainty Assessment of Rating Curve Equation in the Nam River Dam Major site," Journal of the Construction and Environment Research Institute, Vol.8, No.2, pp.175-183, 2013.
- [6] G. H. Kim, J. I. Park, and C. K. Shin, "Development of Rating Curves Using a Maximum Likelihood Model," Journal of Environmental and Sanitary Engineering, Vol.23, No.4, pp.83-93, 2008.
- [7] H. H. Kwon, Y. I. Moon, B. K. Choi, and S. M. Kim, "Derivation and Uncertainty Analysis of Rating Curve Using Hierarchical Bayesian Model," Proceedings '08 of Korea Water Resources Association, pp.1211-1214, 2008.
- [8] J. H. Yoo, "Development and Application of Rating Curves for the Keum River," Korean Society of Civil Engineers, Vol.19, No.1-6, pp.665-675, 1999.
- [9] J. S. LEE, C. G. Kim, E. G. You, and H. W. Lee, "Derivation of Relationships for Flow-Total Load at Medium and Small Streams in Agrarian Basin," Proceedings '15 of the Korea Contents Association, pp.369-370, 2015.
- [10] M. H. Hwang, J. I. Park, S. J. Maeng, I. H. Ko, and W. G. Kim, "Stream Discharge Calculation by the Water-Surface Slope," Proceedings '03 of Korea society of civil Engineers, pp.2099-2102, 2003.
- [11] S. H. Kim, H. S. Choi, S. H. Kim, and P. J. Lee, "Development of Rating-curve on the Sum River Experimental Watershed," Korean Society of Civil Engineers, pp.2830-2834, 2003.
- [12] T. H. Choo and S. K. Lee, "Measurement of Discharge Using the Entropy Concept," Proceedings '06 of the Korea Contents Association, Vol.4, No.1, pp.342-347, 2006.
- [13] T. H. Choo and S. K. Chae, "A Study on Discharge Estimation by Representative Parameter Method in Open Channels," Journal of Korean Wetlands Society, Vol.14, No.4, pp.637-644, 2012.
- [14] T. H. Choo, S. H. Hong, H. C. Yoon, G. S. Yun, and S. K. Chae, "The estimation of discharge in unsteady flow conditions, showing a characteristic loop form," Environmental Earth Sciences, Vol.73, No.4, pp.4451-4460, 2015.
- [15] T. H. Choo, J. K. Son, Y. B. Kwon, S. H. Ahn, and G. S. Yun, "The Estimation of Friction Velocity by Hydraulic Parameters Reflecting Turbulent Flow Characteristics in a Smooth Pipe Line," The Journal of the Korea Contents Association, Vol.16, No.4, pp.614-623, 2016.

#### 저 자 소 개

#### 추 태 호(Tai Ho Choo)

#### 정희원



- 1990년 12월 : Pittsburgh 대학교 토목공학과(공학석사)
  - 1998년 12월 : Pittsburgh 대학교 환경토목공학과(공학박사)
  - 1984년 2월 ~ 2002년 9월 : K-Water 연구원 책임연구원 등
  - 2002년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 건설융합학부 교수
- <관심분야> : 댐, 수리학, 하천

홍 순 현(Soon Heon Hong)

정회원

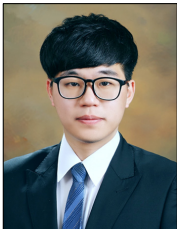


- 1986년 2월 : 동아대학교 토목공학  
학과(공학석사)
- 1993년 2월 : 동아대학교 토목공학  
학과(공학박사)
- 2002년 9월 ~ 현재 : 부산대학  
교 건설융합학부 교수

<관심분야> : 지형공간정보, 도시계획

박 상 진(Sang Jin Park)

준회원



- 2016년 2월 : 동서대학교 토목공학  
학과(공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 부산대학교  
사회환경시스템공학과 석사과정

<관심분야> : 수문학, 하천

김 영 환(Hwan Young Kim)

정회원



- 1998년 2월 : 부산대학교 환경공학  
학과(공학사)
- 2000년 2월 : 부산대학교 청정공학  
협동과정(공학석사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : 부산대학교  
사회환경시스템공학과(박사수료)

<관심분야> : 수문학, 하천