

수위-유량관계곡선의 자동구간분할을 위한 변동계수 활용기법의 개선

Improvement of the Method using the Coefficient of Variation for Automatic Multi-segmentation Method of a Rating Curve

김 연 수* / 김 정 엽** / 안 현 옥*** / 정 관 수****

Kim, Yeonsu / Kim, Jeongyup / An, Hyunuk / Jung, Kwansue

Abstract

In general, the water stage-discharge relationship curve is established based on the assumptions of linearity and homoscedasticity. However, the relationship between the water stage and discharge is affected from geomorphological factors, which violates the basic assumptions of the water stage-discharge relationship curve. In order to reduce the error due to the violations, the curve is divided into several sections based on the manager's judgement considering change of cross-sectional shape. In this research, the objective-splitting criteria of the curve is proposed based on the measured data without the subjective decision. First, it is assumed that the coefficient of variation follows the normal distribution. Then, if the newly calculated coefficient of variation is outside of the 95% confidential interval, the curve is divided. Namely, the groups is divided by the characteristics of the coefficient of variation and the reasonable criteria is provided for establishing a multi-segmented rating curve. To validate the proposed method, it was applied to the data generated by three artificial power functions. In addition, to confirm the applicability of the proposed method, it is applied to the water stage and discharge data of the Muju water stage gauging station and Sangegyo water stage gauging station. As a result, it is found that the automatically divided rating curve improves the accuracy and extrapolation accuracy of the rating curve. Finally, through the residual analysis using Shapiro-Wilk normality test, it is confirmed that the residual of water stage-discharge relationship curve tends to follow the normal distribution.

Keywords : automatic multi-segmented method, rating curve, coefficient of variation

요 지

일반적으로 수위-유량관계 곡선식은 선형성과 등분산성 가정을 기반으로 구축되지만, 측정단면의 형태, 단면 상·하류의 지형요인 등으로 인하여 영향을 받기 때문에 실질적인 수위 및 유량의 관계는 관계식 구축에 이용되는 가정에 위배된다. 이로 인한 오차를 줄이기 위하여 곡선식을 분할하여 이용하고 있으나, 측정단면의 변화를 고려한 관계자의 주관적인 판단이 구간분할의 주요 근거로 이용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 주관성을 배제하고 관측데이터를 기반으로 객관화된 분할근거를 제시하고자 한다. 곡선식의 구간 분할을 위하여 변동계수를 이용한 기존의 연구를 바탕으로 변동계수가 정규분포를 따르는 것으로 가정하여, 계산된 변동계수가 전 단계에서 계산된 95% 신뢰구간 이내에 존재하지 않는 경우 구간을 분할하였다. 즉, 변동계수를 이용하여 집단 간의 특성을 비교하였으며, 변동계수의 분포를 이용하여 분할을 위한 기준 값을 제시하였다. 방법론의 추정능력 검토를 위하여 가상의 곡선으로부터 생성된 데이터에 제안된 방법론을 적용하였고, 실제 유역에 적용성 검토를 위하여 금강에 위치한 무주 및 산계교 수위관측소 지점에 적용하였다. 결과적으로 자동으로 분할된 관계곡선식을 사용하여 추정의 정확도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 외삽을 하는 경우 역시 그 정확도를 향상할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 실측값을 활용한 수위-유량관계 곡선식의 구축 시 구간 분할 전·후의 잔차 데이터에 대하여 Shapiro-wilk 정규성 검정을 수행하였으며, 구간분할 후 잔차가 정규성을 갖게 되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 자동구간분할, 수위-유량관계 곡선식, 변동계수

* 충남대학교 국제수자원연구소 연구원 (e-mail: yeonsu0517@gmail.com)

Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National Univ., Daejeon, Korea

** 국토교통부 금강홍수통제소 연구사 (e-mail: kgy@cnu.ac.kr)

Researcher, Geum River Flood Control Office, Gong-ju, Korea

*** 충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목과 조교수 (e-mail: hanlight20@hotmail.com)

Assistant Professor, Dept. of Agricultural and Rural Eng., Chungnam National Univ., Daejeon, Korea

**** 교신저자, 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr, Tel: 82-42-821-5675)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon, Korea

1. 서 론

유역의 효율적인 수자원관리와 홍수관리를 위하여 대 상 유역 출구지점에서의 정확한 유출량 산정이 필수적 이며, 이를 위하여 수위와 유량이 일대일 관계를 갖는 수위- 유량관계 곡선식이 활용되고 있다. 일반적으로 수위-유량 관계 곡선식은 산발적으로 측정된 유속 및 수위자료를 바 탕으로 먹함수 혹은 2차 다항식의 형태를 갖는 최적화된 상관식을 결정함으로써 얻어진다. 그러나 홍수기와 같은 관측이 어려운 시기에는 자료수집에 여러 제약사항이 따 르며, 루프형태의 관계를 단일 관계의 곡선식으로 표현하 게 되면 실제의 수위-유량관계 곡선식에 의해 추정된 유 량에는 큰 차이가 발생하게 된다. 따라서 Kim et al. (2013) 과 같이 앙상블 수리모델 결과를 활용하는 등의 자료수집 에 대한 대안을 마련하고, 결정론적인 수위-유량관계 곡 선식의 불확실성을 평가 및 구간분할 등을 통하여 유량자 료의 신뢰도를 높일 필요가 있다.

불확실성을 유발하는 요소로는 홍수의 부정류적 특성 과 하천 상태의 지속적인 변화 등이 있다. 첫째, 하천의 수 위와 유량을 단일관계로 표현하는 일반적인 수위-유량관 계 곡선식은 홍수의 부정류적 특성을 반영할 수 없기 때 문에 이로 인한 불확실성이 매우 크게 발생할 수 있다. Pelletire (1987) 및 Di Baldassarre and Montari (2009)는 단일 관계의 수위 유량관계 곡선식과 관측 유량의 오차가 상승기 또는 하강기에 95% 신뢰구간에서 최대 오차가 약 43%에 이르는 것을 보인 바 있으며, 국내에서는 Cho et al. (2004)이 2003년 측정데이터를 바탕으로 수위-유량관 계 곡선식의 불확실성이 $\pm 20\%$ 에 이르는 것을 보인 바 있 다. 최근 국내의 수문조사의 질이 향상되었지만, Choi et al. (2012)은 흐름의 부정류적 특성으로 인하여 동수위에서 상승기 유량(7130CMS)과 하강기 유량(5870CMS)의 차 가 1260CMS만큼 차가 발생할 수 있음을 보인 바 있다.

둘째, 하도형태 및 식생분포는 지속적으로 계절에 따라 혹은 시간의 흐름에 따라 변화 하게 되므로 하도의 흐름 저항력 역시 변화하게 된다. 이러한 흐름 저항력 변화는 수위와 유량의 관계에 커다란 영향을 끼치기 때문에 그에 맞추어 곡선식의 지속적인 개선이 필요하다. MLIT (2008) 에 따르면, 주수로의 조도계수 추정에 있어서 하천 바닥 재료 조사를 통한 추정조도계수와, 시뮬레이션을 이용한 역산조도계수의 차는 상당한 차이가 있을 뿐만 아니라 홍 수사상에 따라 서로 크게 달라짐을 보인 바 있다. 또한, Kim and Jung (2005) 및 Kim et al. (1995)은 역시 하천의 조도계수와 수위가 밀접한 관련을 갖고 있음을 보인바 있

으며, 적용 사상에 따라 적절한 조도계수의 범위가 변화 함을 보인 바 있다.

결과적으로 상술한 수위-유량관계 곡선식의 불확실성 은 관측 유량에 커다란 오차를 포함시킬 뿐만 아니라, 홍 수예측에 사용되는 각종 수치모델의 불확실성을 야기한 다. 예를 들어, 수문모델의 파라메타 최적화는 수위-유량 관계 곡선식에 의하여 생성된 수문곡선의 재현성을 바탕 으로 추정된다. 따라서 수위-유량관계 곡선식의 불확실성 이 수문모델을 활용한 홍수 예측에 전달되는 것은 자명하 다. 즉, 수위-유량관계 곡선식의 정확성 향상 및 불확실성 평가를 위한 연구는 수문해석 및 수리해석 등의 분야에 비하여 부족한 실정으로 데이터의 부족, 정확성 향상 등 을 보완할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

수위-유량관계 곡선식과 관련된 기존의 연구로 Jung et al. (1988)은 하상의 변화를 고려한 수위-유속, 수위-통 수단면의 관계를 기반으로 수위-유량관계 곡선식의 정확 도를 향상할 수 있는 방안을 제안하였으며, Tawfik et al. (1997) 및 Lee (2002)는 수위-유량관계 곡선식의 추정을 위하여 각각 신경회로망과 비선형최적화 기법을 활용하 는 방법을 제안하였다. 또한, Lee et al. (2001)은 하천단면 과 수위자료 및 수리학적 하도추적개념을 활용하여 간접적 으로 유량을 추정할 수 있는 방법을 제안하였고, Westphal et al. (1999)은 흐름의 부정류적 특성을 표현하는 루프형 태의 수위-유량관계 곡선식을 제시한 바 있다. 수위와 유량의 비선형적 관계를 설명하기 위하여 Gergov and Karagiozova (2003)는 수위 및 하폭을 활용한 제 3의 변 수와 유량과의 관계를 식으로 표현하였다.

관계 곡선식의 불확실성의 추정을 위하여 Kim and Lee (2008)은 베이지안 회귀분석을 활용하였으며, Lee and Kwon (2010)은 수위-유량관계곡선의 전이에 대한 문제 를 해결하기 위하여 2차원 수리모델을 활용하여 해당지점 의 수위-유량관계곡선의 적정 매개변수 범위를 제안하였 다. Reitan and Petersen-Øverleir (2009)는 베이지안 기법 을 활용한 수위-유량관계곡선의 분할 및 곡선식의 매개변 수 추정 및 그에 대한 불확실성에 대한 연구를 수행하였으 며, Reitan and Petersen-Øverleir (2011)은 Ornstein-Uhlenbeck process를 활용하여 실제 하천에서 발생하는 흐름의 부정류적 특성을 표현할 수 있도록 루프형 수위- 유량관계 곡선식을 제안하였다. 마지막으로 Le Coz (2012) 는 수위-유량관계 곡선과 관련된 다양한 연구에 대하여 소개하였고, 불확실성 추정을 위한 연구에 대하여 정리한 바 있다.

앞서 언급한 기존의 연구와 같이 제한된 관측 자료를

활용하여 수위-유량관계곡선식의 정확도 향상 및 불확실성의 평가를 위하여 많은 연구가 수행되어왔으나, 수위-유량관계곡선의 구간분할을 수행함에 있어서는 수심에 따른 통수단면적의 변화 혹은 관계자의 주관적 판단이 주를 이루고 있어 Cho (2003)와 Reitan and Petersen-Øverleir (2009) 등에 의하여 수행된 연구와 같이 측정데이터를 기반으로 흐름특성변화를 고려할 수 있도록 보다 객관적인 평가 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 Cho (2003)가 제시한 수위-유량관계 곡선식의 분할기법을 기반으로 국가수문조사보고서에 수록된 수위-유량자료를 활용하여 관계 곡선식의 최적매개변수추정과 구간분할을 동시에 수행할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다. 곡선식의 매개변수 최적화를 위해서는 황금비 탐색기법을 이용하였으며, 구간분할을 위해서는 데이터를 추가함에 따라 변화되는 변동계수 분포를 활용하였다. Cho (2003)에서 변동계수 변화의 한계치를 임의적으로 설정하였던 한계를 극복하기 위하여 수위-유량관계 곡선식과 변동계수와 관련된 이론을 검토하여 정규분포가정을 수립하였고, 변동계수가 이전 단계에서 계산된 95% 신뢰구간 외부에 존재하는 경우 서로 다른 특성을 갖는 것으로 판단하고 구간분할 하였다. 실제 관측데이터를 활용하여 검증을 수행하는 경우 많은 불확실성이 내포되어있기 때문에 가상의 곡선식을 활용하여 제안된 방법론의 타당성을 검증하였고, 적용성 평가를 위하여 실제 유역에 적용하였다. 마지막으로 곡선식을 분할하기 전후의 데이터에 대한 잔차분석을 수행하여 곡선식의 분할에 따른 타당성을 검토하였다.

2. 수위-유량관계 곡선식의 자동구간분할

2.1 수위-유량관계 곡선식

수위-유량관계 곡선식은 일반적으로 횡축에 유량을 종축에 수위를 나타내는 그래프를 통하여 표현되며, 주로 관계식은 지수형(Eq. (1)) 또는 포물선형(Eq. (2)) 형태를 갖는다. 수위-유량관계 곡선식 중 포물선형은 영유량 또는 갈수 유량의 처리에 있어 장점이 있으나 지수형 관계식과 같이 물리적 특성을 반영할 수 없다는 단점이 있다.

$$Q = a(h \pm b)^c + d \quad \text{또는} \quad Q = a(h \pm b)^c \quad (1)$$

$$Q = ah^2 + bh + c \quad (2)$$

여기서, Q 와 h 는 유량(m^3/s)과 수위(m)를 나타내며, a, b, c , 그리고 d 는 각 식의 매개변수를 의미한다.

지수형의 식을 전대수지에 표현함으로써 식의 선형화가 가능하며 관측 자료를 기반으로 수위-유량관계 곡선식을 선형회귀식의 형태로 구할 수 있다. 그러나 Eq. (1)에서 보인 바와 같이 유량이 0이 되는 매개변수인 b 를 조정함에 따라 식의 형태가 많이 달라질 수 있어(USGS, 1982), Johnson (1952) 등에 의하여 도해적으로 매개변수 b 를 추정할 수 있는 방안이 제시된 바 있다. 즉, 유량이 0이 되는 수위를 조정하는 매개변수 b 의 경우 수위와 유량을 표현하는데 있어 명확한 물리적 특성을 설명할 수는 없다(Cho, 2003). 따라서, 본 연구에서는 b 의 상하한 값으로 $h \pm b$ 에 로그를 취했을 때 0 이상의 값을 갖도록 설정하였다.

2.2 수위-유량관계 곡선식의 매개변수 추정

특히, 지수형 수위-유량관계 곡선식의 경우는 통수 단면의 형태에 따른 유량변화에 대한 물리적 특성을 고려할 수 있다는 특징이 있으며, 이로 인한 c 의 물리적 범위 역시 간접적인 추정이 가능하다. Cho (2003)의 경우 c 에 대한 범위를 1.5~2.5로 제시한 바 있으며, Retian과 Petersen-Øverleir (2008)은 베이저안 개념을 도입한 모형을 이용하여 적용한 결과 c 의 범위가 2.1~2.6을 갖으며, c 와 b 그리고 a 와 b 선형적 관계를 갖는 것을 보인 바 있다. 또한, c 와 a 가 b 의 설정에 의하여 민감하게 작용할 수 있음을 보인 바 있으며, c 와 a 는 선형화한 수위-유량관계 곡선식을 변형 후 관측 수위와 유량을 대입하여 다음과 같이 계산하였다.

$$c = \frac{n \sum_{i=1}^n \log \hat{Q}_i \sum_{i=1}^n \log H_i - \sum_{i=1}^n (\log \hat{Q}_i \log H_i)}{\left[\sum_{i=1}^n \log H_i \right]^2 - n \sum_{i=1}^n (\log H_i)^2} \quad (3)$$

$$a = 10^{\frac{\sum_{i=1}^n \log \hat{Q}_i - b \sum_{i=1}^n \log H_i}{N}} \quad (4)$$

여기서, H 는 $h+b$ 이며, \hat{Q}_i 와 H_i 는 각각 i 번째 계산유량과 보정수위이다.

위 식에서 c 와 a 를 추정하기 위해서 b 를 결정할 필요가 있으며, 최적의 b 는 황금비 탐색기법(Golden Section Search)에 의하여 계산 유량과 관측 유량의 절대오차의 합이 최소가 되도록 다음과 같은 식으로 결정된다.

$$\text{Min} \sum (\hat{Y} - Y)^2 = \sum \{ \log(Q) - \log a - c \times \log H \}^2 \quad (5)$$

여기서, \hat{Y} 와 Y 는 각각 계산유량과 관측유량이다.

c 의 추정 후 곡선식의 물리적 특성을 반영하지 못하는

것에 대한 평가를 위하여 Cho (2003) 및 Retian과 Petersen-Øverleir (2008)이 제시한 결과 값 범위를 대신하여 Retian and Petersen-Øverleir (2008)이 사전확률의 95%신뢰구간 범위인 0.7-4.3을 기준으로 신뢰구간 이내에 존재하지 않는 경우 부적절한 매개변수로 간주하였다.

2.3 수위-유량관계 곡선식의 구간분리

Cho (2003)에서는 수위-유량관계 곡선식의 구간분할을 위하여 상대적인 산포도를 추정할 수 있는 변동계수 (Coefficient of variation, C_v) (Eq. (6))를 기반으로 수위 자료의 크기순으로 자료를 배열하여 데이터의 추가에 따른 각각의 변동계수의 차 (Eq. (7))에 대한 임계값을 설정하여 구간분할을 수행하였다.

$$C_v = S_y / \bar{Y} \quad (6)$$

여기서, S_y 는 모집단의 표준편차이며, \bar{Y} 는 모집단의 평균이다.

$$D_i = |C_{v(i)} - C_{v(i+1)}| \quad (7)$$

여기서, i 는 1에서 $n-6$ 까지 6이상의 수이며, $C_{v(i)}$ 는 i 번째 그룹의 변동계수, D_i 는 i 번째와 $i+1$ 번째 그룹의 변동계수들 간의 차이이다.

즉, D_i 가 특정한 임계값(φ)을 벗어나면, i 번째까지의 자료와 $i+1$ 번째 자료는 동질성이 없는 것으로 판단하여, i 번째와 $i+1$ 번째에서 구간분리를 수행하였다. Cho (2003)는 이와 같이 데이터의 변동계수에 근거하여 구간분리를 수행하는 방법을 제안하였으나, 임계값을 제시함에 있어 객관적인 지표를 제시하지 못한 바 있다.

따라서, 본 연구에서는 보다 객관적인 구간 분할의 제시를 위하여 변동계수의 분포와 관련된 Lee and Kang (2008) 및 Iglewiz (1970) 등의 연구를 검토하였다. Reh와 Scheffler (1996)은 확률변수가 양수이며, 정규분포를 따르는 경우 변동계수의 평균과 분산을 다음과 같이 계산할 수 있음을 보인 바 있다.

$$E(C_{v(i)}) \approx C_{v(i)} \left[1 + \frac{1}{n} (C_{v(i)}^2 - \frac{1}{4}) + \frac{1}{n^2} (3C_{v(i)}^4 - \frac{C_{v(i)}^2}{4} - \frac{7}{32}) + \frac{1}{n^3} (15C_{v(i)}^6 - \frac{3C_{v(i)}^4}{4} - \frac{7C_{v(i)}^2}{32} - \frac{19}{128}) \right] \quad (8)$$

$$Var(C_{v(i)}) \approx C_{v(i)}^2 \left[\frac{1}{n} (C_{v(i)}^2 + \frac{1}{2}) + \frac{1}{n^2} (8C_{v(i)}^4 + C_{v(i)}^2 + \frac{3}{8}) + \frac{1}{n^3} (69C_{v(i)}^6 + \frac{7C_{v(i)}^4}{2} + \frac{3C_{v(i)}^2}{4} + \frac{3}{16}) \right] \quad (9)$$

수위-유량관계 곡선식 역시 정규성 가정 및 양수로 구성되어 있으므로 상기의 식을 활용하면 $C_{v(i)}$ 의 평균과 분

산을 결정할 수 있으며, 이를 이용하여 데이터의 분포에 근거한 객관적인 구간분리 기준을 적용할 수 있다. 본 논문에서는 $C_{v(i+1)}$ 의 값이 $C_{v(i)}$ 의 평균으로부터 95% 확률 구간 밖에 존재하는 값으로 추정되는 경우 서로 다른 특성을 갖는 것으로 간주하여 수위-유량관계 곡선식에 대한 구간분할을 수행하도록 하였다.

제안된 방법의 타당성 검토를 위하여 실제 유역에 적용한 경우 분할 전후의 수립된 수위-유량관계 곡선식에 대한 잔차 분석을 수행하였다. 잔차의 분포 및 정규성을 검토를 위하여 Q-Q플롯 및 Shapiro-Wilk 테스트를 이용하였다.

3. 모의결과 및 분석

3.1 가상의 구간 분할 곡선을 활용한 방법론의 검토

제시된 방법론에 대한 검토를 위하여 수위별 가상의 지수곡선식을 수립하였고, 곡선식을 활용하여 Fig. 1의 DATA1, DATA2 및 DATA3과 같이 33개의 수위 및 유량조합을 생성하였다. 주어진 데이터를 순차적으로 정렬하여 자료군을 형성하고 제안된 방법론을 적용하였다. Fig. 1에 보인 바와 같이 모의결과가 주어진 값과 근사한 값을 도출하는 것으로 확인할 수 있었다. 주어진 곡선의 각 변화점 값은 데이터로 활용되지 않았음에도 불구하고, Table 1에 제시된 바와 같이 각 변화점, 수위-유량관계 곡선식의 영점수위, 매개변수 등을 근사하게 추정한 것으로 판단된다. 데이터에 대하여 하나의 곡선식으로 추정하는 경우 RMSE (Root Mean Square Error)가 24.26CMS에서 구간 분할을 하는 경우 1.38CMS로 줄었다. 단일 곡선식을 사용하는 경우 변동계수는 0.028에서 0.053이었으며, 분할된 곡선식을 이용하는 경우 4.0×10^{-6} 에서 $6.9 \times$

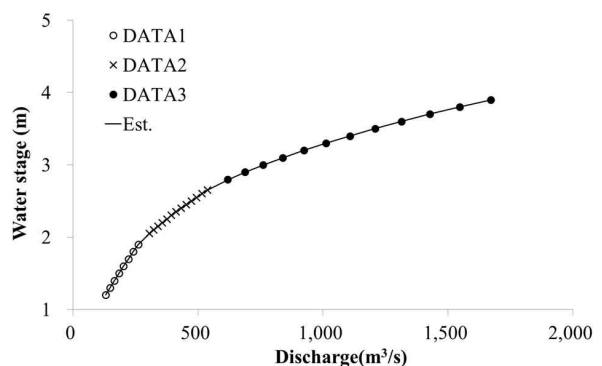


Fig. 1. Comparison between the Given Data and the Estimated H-Q Curve using the Test Case

Table 1. Test Conditions for the Automatic Multi-segmented Method

Section	The range of water stage (m)		The range of discharge (m ³ /s)		Equation		
	Given condition	Estimated values	Given condition	Estimated values	Given condition	Multi-segmented equations	One segment equation
1	≤ 2.0	≤ 1.98	≤ 285	≤ 284	$Q = 100(h)^{1.5}$	$Q = 100.2(h - 0.002)^{1.499}$	$Q = 0.007(h - 3.888)^{6.004}$
2	≤ 2.7	≤ 2.73	≤ 555	≤ 578	$Q = 63.09(h)^{2.2}$	$Q = 31.094(h + 0.394)^{2.562}$	
3	≤ 3.9	≤ 3.9	≤ 1671	≤ 1673	$Q = 28.18(h)^3$	$Q = 31.094(h + 0.528)^{3.456}$	

10⁻³으로 줄어드는 것으로 나타났다. 즉, 변동계수에 대한 95% 신뢰구간 계산을 통하여 효율적으로 곡선식을 분할할 수 있을 뿐만 아니라 곡선식의 정확도 역시 개선할 수 있음을 확인하였다. 그러나 분할되는 각 구간에서의 데이터의 수가 적을 경우 불안정성이 나타나기도 하였기 때문에 충분한 데이터를 확보한 후 제안된 방법론을 적용하는 것이 필요하다고 판단된다.

3.2 실측자료에 적용을 위한 대상지점 및 구간선정

대상지점은 Fig. 2에 보인 바와 같이 금강수계에 위치하고, 2년 동안 유량자료의 측정이 수행되어 비교적 많은 양의 데이터를 보유하고 있는 지역인 무주 수위관측소와 산계교 수위관측소 지점을 선정하였다. 그리고 큰 홍수가 발생하였던 시기의 관측 유량 및 수위자료를 포함하고 있는 데이터의 활용을 위하여 2011년과 2012년에 발간된 국가수문조사 보고서인 MOLIT (2011, 2012)를 참고하였다.

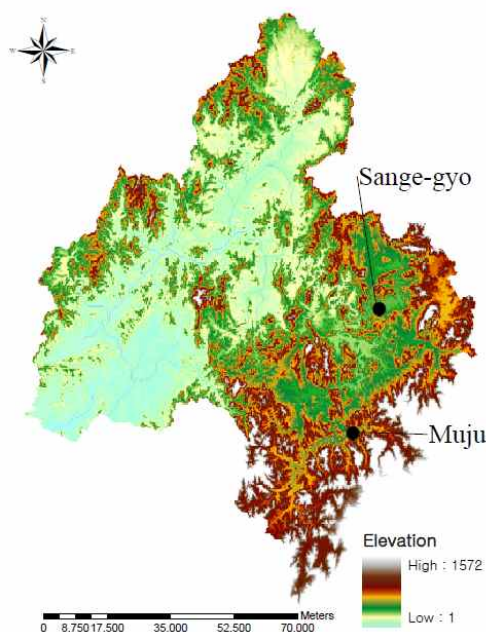


Fig. 2. Locations of the Water Gauging Stations

MOLIT (2011, 2012)에 수록된 각 수위관측소에 관련된 내용을 다음과 같이 정리하였다.

무주 수위관측소의 유역면적은 약 384.52 km²이고, 금강의 지류인 무주남대천의 최하류 지점에 위치하고 있으며, 행정구역상으로는 전라북도 무주군 무주읍 읍내리 칠리교에 위치하고 있다. 1973년부터 수위를 관측하였으며, T/M(레이더식)수위계로 2006년부터 수위를 측정하고 있다. 계획홍수위는 191.13이고, 수위표의 영점표고는 EL. 184.022 m이다. 홍수기 유량측정은 하류 850 m 지점에 위치한 무주대교에서 부자를 이용하여 실시한다.

산계교 수위관측소는 보청천 유역에 위치하고 있으며 유역면적은 약 484.77 km²이다. 행정구역상으로는 충청북도 옥천군 청성면 산계리 산계교에 위치하고 있다. 1982년부터 관측을 개시하였고, 2005년부터 T/M(부자식)수위표로 전환하여 수위를 측정하고 있다. 계획홍수위는 EL. 102.06 m이고, 수위표의 영점표고는 EL. 96.792 m이다. 저수위 유량측정에는 도섭법, 중수위에서는 산계교 상류방향에서 교량법, 그리고 고수위에서는 산계교 하류방향으로 부자법으로 유량이 측정된다.

Table 2와 같이 무주 수위관측소와 산계교 수위관측소에서는 각 해에 40개 내외의 관측자료가 존재하고 있으며, 수위-유량관계 곡선식에 대한 관측유량의 표준오차는 각각 약 15% 이내와 약 8.5% 이내로 나타났다. 실질적인 적용을 위하여 각 실험조건별로 Table 3과 같이 각 케이스를 구분하였다. 2011년 무주 수위관측소와 산계교 수위관측소의 관측자료를 활용한 경우를 각각 M1과 S1으로 표기하였으며, 2012년의 무주수위관측소와 산계교 수위관측소의 관측자료를 활용한 것을 각각 M2 및 S2로 표기하였다. 마지막으로 데이터의 부족으로 인하여 수위-유량관계 곡선식의 추정에 어려움이 있는 것을 해결하기 위하여 2011년과 2012년의 관측자료를 모두 사용하는 것에 대하여 각각 M1&M2 및 S1&S2로 표기하였다.

또한, 수위-유량관계 곡선식에서 변화점이 발생하는 지점과 관련된 몇 가지 주요 요인 중 하나로 하천의 흐름을

측정하는 하상단면의 수심에 따른 통수면적의 변화양상을 들 수 있다. 이에 대한 검토를 위하여 Fig. 3과 같이 단면자료를 검토하였으며, 홍수터가 존재하는 지점에서 수심에 따른 면적의 변화가 크게 발생할 수 있음을 확인하였다. 또한, 무주관측소 및 산계교 관측소 지점에서는 각각 1개소 이상의 흐름 변화점이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 제시된 방법론을 적용하여 그 적용성을 검토하였다.

3.3 변동계수에 따른 자동구간분할 및 모의 결과

Table 3에 제시된 각각의 조건에 대하여 제안된 방법을 적용한 결과는 Fig. 4 및 Table 4 and 5와 같다. Fig. 4에 보인 바와 같이 점으로 표시된 관측 자료로부터 추정된 단일 곡선식은 점선으로 분할 곡선식은 실선으로 표시되었으며, MOLIT (2011, 2012)에 제시되어있던 수위-유량관계 곡선식은 빨간색 실선으로 표현하였다. M1과 S1의 경우에 대해서는 2010년에 수립된 수위-유량관계 곡선식과 비교하여 외삽에 따른 정확성의 향상뿐만 아니라 구간분할로 인하여 관측치의 변동특성도 정확히 인지하

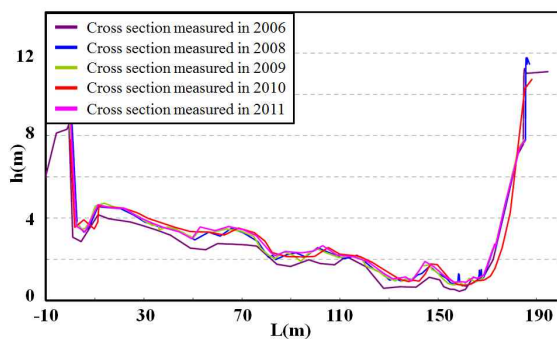
여 자동으로 분할할 수 있음을 보였다. 또한, M2의 경우는 2012년에 수립된 수위-유량관계 곡선식과 유사한 경향을 보였으나, S2의 경우에 있어서는 타 실험조건에 비하여 자료의 수가 부족할 뿐만 아니라 관측 자료가 특정 구간에 밀집하여 2012년에 수립된 수위-유량관계 곡선식에 비하여 오차가 크게 발생할 수 있음을 확인하였다. 앞서 설명한 자료의 부족으로 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위하여 무주지점(M)과 산계교(S)지점에 대한 2011년 및 2012년의 관측값을 모두 사용한 M1&M2 및 S1&S2의 결과를 검토하였다. 비록 관측한 연도는 다르지만, Fig. 3에 보인 바와 같이 하상변동이 작은 산계교 관측소에서는 자료부족으로 인하여 발생할 수 있는 관계곡선 추정의 오차를 줄일 수 있음을 확인하였다. 마지막으로, 무주관측소와 산계교 관측소의 추정된 식의 각 계수, RMSE 및 AAPE (Averaged Absolute Percentile Error)를 Table 4 and 5에 정리하였다. Fig. 4에 하나의 곡선을 활용하여 추정시 M1, M2, M1&M2, S1, S2 및 S1&S2에 대한 RMSE (AAPE)가 각각 75.9CMS (27.7%), 27.13CMS (17.7%), 81.6

Table 2. Summary of the Observed Data and the Uncertainties

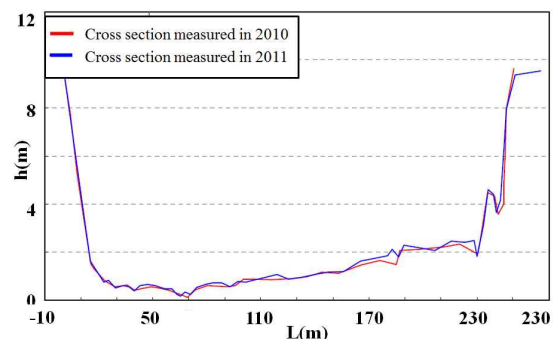
	Muju water stage station			Sangegyo water stage station		
	The number of data	Peak Q	S.D. against H-Q (%)	The number of data	Peak Q	S.D. against H-Q (%)
2011	37	1832	13.83	39	1341	8.24
2012	45	1489	14.40	24	971	8.42

Table 3. Classification of the Case Studies

Classification	Muju	Sangyegyo
2011	M1	S1
2012	M2	S2
2011&2012	M1&M2	S1&S2



(a) Muju station



(b) Sangyegyo station

Fig. 3. Cross Section of the Muju Station and the Sangyegyo Station (MOLIT, 2012)

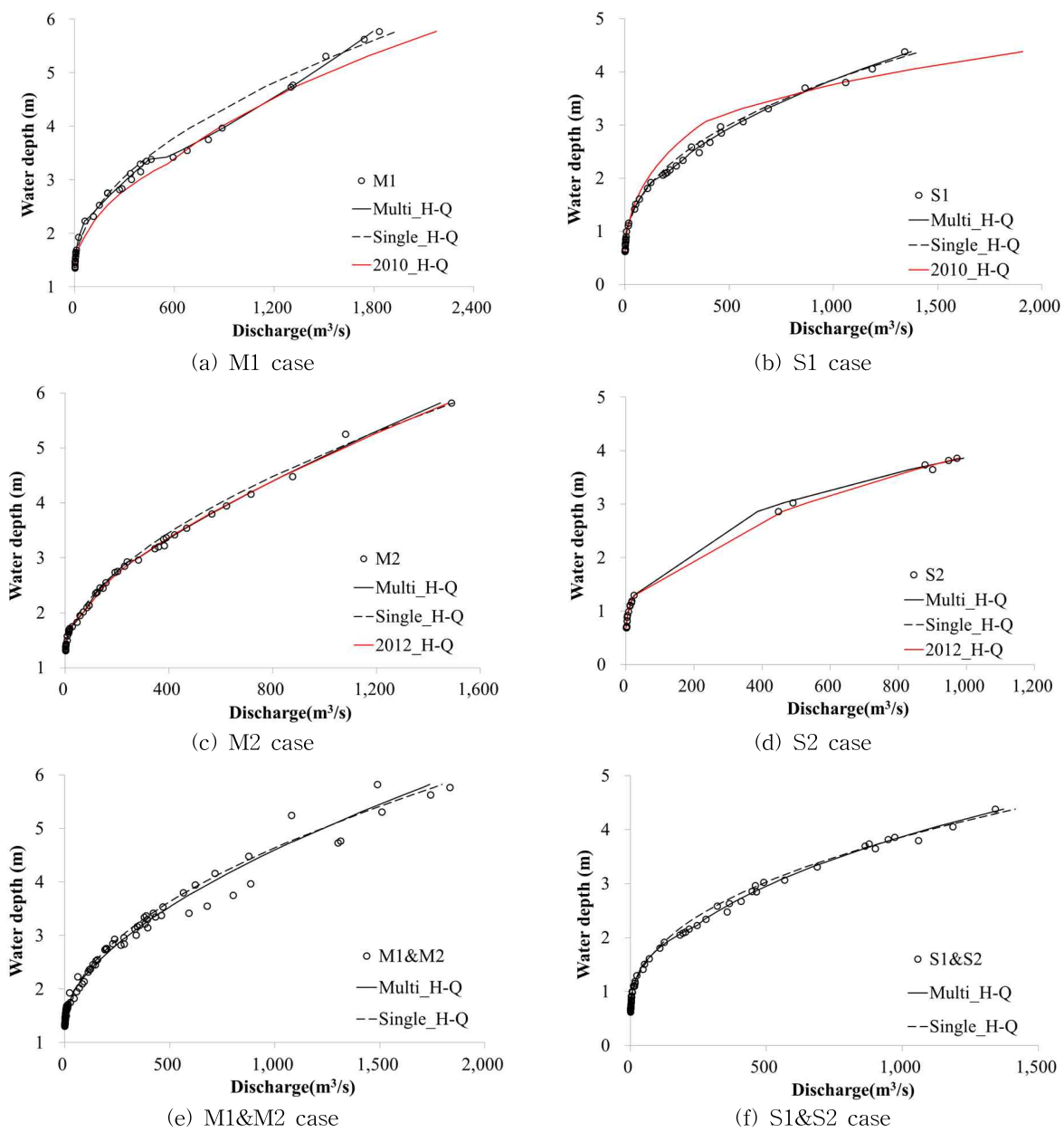


Fig. 4. Automatically Estimated Water Stage Discharge Relationship Curves

Table 4. Estimated Equations for each Case in Muju Water Stage Gauging Station

Section	$Q = a(h+b)^c$														
	M1					M2					M1&M2				
	h	a	b	c	AAPE/ RMSE	h	a	b	c	AAPE/ RMSE	h	a	b	c	AAPE/ RMSE
1	≤ 2.23	41.086	-1.089	2.991	6.68% /21.8	≤ 1.72	73.049	-1.226	2.124	6.45% (18.1)	≤ 1.83	98.392	-1.255	1.959	15.1% (74.6)
2	≤ 3.38	283.19	-1.922	1.217		≤ 2.38	155.87	-1.659	0.768		≤ 5.82	0.593	2.477	3.798	
3	≤ 5.77	808.49	-2.822	0.7375		≤ 2.93	56.212	-0.911	2.066						
4						≤ 5.82	216.35	-1.783	1.361						

CMS (23.2%), 29.0CMS (17.5%), 20.3CMS (10.7%), 28.3 CMS (17.1%)이다. 6개의 케이스 중 S2를 제외한 나머지 케이스에 대해서는 구간 분할시 정확성을 향상할 수 있음을 보였다(Table 4 and 5). 즉, 충분한 관측 데이터가 확보되는 경우 제시된 방법론을 사용하여 자동으로 구간분할을 수행할 수 있음을 확인하였다.

3.4 구간 분할된 곡선의 잔차분석을 통한 정규성 검토 결과

Fig. 4에 보인 바와 같이 제안된 방법을 활용하여 구간의 분할이 가능함을 확인하였다. 그러나 하나의 곡선으로 수위-유량관계 곡선식을 구축함에 따라 발생하던 비정규성 및 이산성에 대한 보완이 이루어졌는지에 대한 검토가 필요하다. 따라서, 회귀곡선으로부터 관측치까지의 잔차를 활용하여 Q-Q plot과 Shapiro-Wilk 정규성 검정을 수

행하였다. 각 분할된 수위-유량관계 곡선식에 대한 관측 자료의 잔차를 활용하여 산정된 W , p -value, 정규성 여부를 Table 6 and 7에 정리하였다. 관측 자료가 일부구간에 밀집되어 있으며 자료가 부족하였던 S2의 경우와 S2의 데이터가 포함된 S1&S2의 구간을 제외하고는 잔차가 정규성을 갖는 것을 확인하였다. 특히, Fig. 5에 보인 바와 같이 M1&M2의 경우에 대한 Q-Q plot을 통하여 잔차의 분포를 검토하였다. 검토결과 단일 곡선으로 추정되는 경우에 대한 잔차의 Q-Q plot인 Fig. 5(a)에 비하여 분할된 곡선에 대한 잔차의 Q-Q plot이 Fig. 5(b) and 5(c)로 개선될 수 있음을 확인하였으며, 다른 케이스의 경우에 대해서도 자료의 분포와 정확성에 문제가 없는 경우 제안된 방법이 기존에 문제가 되던 수위-유량관계 곡선식의 가정의 위배문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 효율적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 5. Estimated Equations for each Case in Sangegyo Water Stage Gauging Station

Section	$Q = a(h + b)^c$														
	S1					S2					S1&S2				
	h	a	b	c	AAPE/RMSE	h	a	b	c	AAPE/RMSE	h	a	b	c	AAPE/RMSE
1	≤ 1	19.09	-0.379	2.295	4.5% /22.3	≤ 3.86	31.256	-0.387	2.777	10.7% /20.3	≤ 2.23	19.289	-0.219	3.666	7.59% /21.24
2	≤ 1.92	94.08	-0.753	1.882							≤ 4.38	32.783	-0.037	2.543	
3	≤ 2.34	392.10	-1.737	0.677											
4	≤ 4.38	86.37	-0.618	2.088											

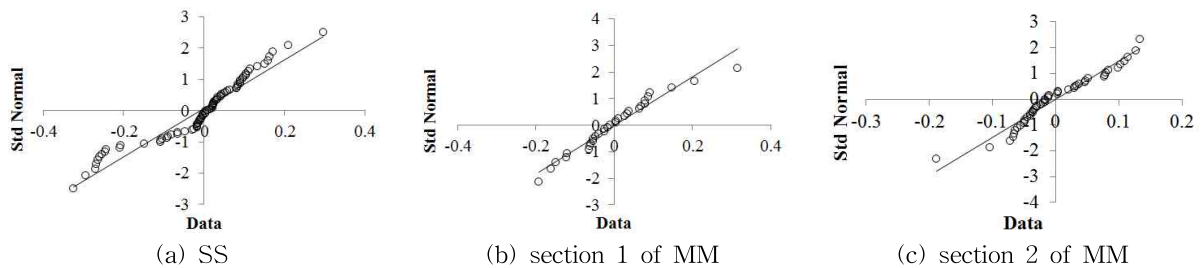


Fig. 5. Q-Q Plot for M1&M2 Data using Single Curve (SS) and Multi-segmented Curve (MM)

Table 6. Results of Shapiro Wilk Test at the Muju Water Stage Gauging Station

Classification	Section															
	1				2				3				4			
	W	p	a	Normality	W	p	a	Normality	W	p	a	Normality	W	p	a	Normality
M1	0.908	0.128	0.05	Yes	0.915	0.283	0.05	Yes	0.958	0.790	0.05	Yes	-	-	-	
M2	0.934	0.322	0.05	Yes	0.970	0.900	0.05	Yes	0.969	0.886	0.05	Yes	0.957	0.711	0.05	No
M1&M2	0.959	0.283	0.05	Yes	0.954	0.058	0.05	Yes								

Table 7. Results of Shapiro Wilk test at the Sangegyo water stage gauging station

Classifi- cation	Section															
	1				2				3				4			
	W	p	a	Noma lity	W	p	a	Noma lity	W	p	a	Noma lity	W	p	a	Noma lity
S1	0.935	0.400	0.05	Yes	0.918	0.495	0.05	Yes	0.968	0.866	0.05	YES	0.952	0.670	0.05	YES
S2	0.880	0.010	0.05	No												
S1&S2	0.944	0.037	0.05	No	0.956	0.544	0.05	Yes								

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 변동계수의 변화를 계산하여 자동으로 수위-유량관계 곡선식의 구간 분할을 수행할 수 있는 방법론에 대하여 95% 신뢰구간의 계산을 통하여 구간분할의 기준을 제시하였고, 잔차의 정규성 검정을 통하여 제안된 방안의 타당성 역시 확인하였다.

제안된 방법론의 검토를 위하여 구간 별로 세 개의 가상 지수형 곡선을 가정하여 생성된 가상의 수위 및 유량 데이터를 활용하였다. 추정된 관계식을 활용하여 계산된 결과가 입력 자료와 매우 유사함을 확인할 수 있었으며, 추정된 곡선식의 매개변수 역시 가상의 지수형 곡선과 유사한 값을 얻을 수 있었다.

추가적으로, 개발된 방법론의 적용성 검토를 위하여 금강수계에 위치한 무주 및 산계교 지점의 수위 및 유량 자료를 확인하였다. 제안된 방법을 활용하여 자동으로 구간이 분할된 수위-유량관계 곡선식을 구축할 수 있었으며, 구간의 분할로 수위-유량관계 곡선식의 정확도 향상뿐만 아니라 관계 곡선 구축시 기본가정이 위배되던 사항에 대한 개선이 가능함을 확인하였다.

또한, 관측 자료가 부족하거나 편중되어 있는 경우에는 추정시 많은 오차가 존재함을 확인할 수 있었으며, 단면의 변화가 심하지 않은 경우 경년의 데이터를 모두 활용하여 데이터 부족으로 발생할 수 있는 수위-유량관계 곡선식의 정확도를 향상할 수 있는 방법임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(14AWMP-B079364-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Cho, M., Kim, M.S., Choi, H., and Park, J. (2004). "Uncer-

tainty analysis of flow measurement data in sum river experimental watershed." Conference proceeding of Korean Society of Civil Engineers, pp. 4114-4119.

Cho, Y.D. (2003). The automated program in deriving the stage-discharge curve by applying coefficient of variation, Master thesis, Chungnam national university.

Choi, S., Kwon, B., and Lee, S. (2012). "Accuracy of the annual prediction of the stage-discharge relationship." *Conference Proceeding of Korean Water Resources Association*, Vol. 5, pp. 516-520.

Di Baldassarre, G., and Montanari, A. (2009). "Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 13, pp. 913-921.

Gergov, G., and Karagiozova, T. (2003). "Unique discharge rating curve based on the morphology parameter Z." *International Association of Hydrological Sciences, Publication*, Vol. 278, pp. 3-8.

Iglewicz, B., and Raymond, H.M. (1970). "Comparisons of Approximations to the Percentage Points of the Sample Coefficient of Variation." *Technometrics*, Vol. 12, No. 1, pp. 166-169.

Johnson, L.H. (1952). "Nomography and empirical equation." Johnson Willey, New York, p. 150.

Jung, H.S., and Lee, W.H., and Lee, J.J. (1988). "Analysis on the Stage-Discharge Curve with the Temporal Variation of the River Bed." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 8, No. 3, pp. 61-71.

Kim, S., and Jung, K. (2005). "Manning's n calibration and sensitivity analysis using unsteady flood routing model." Conference proceeding of Korean Water Resources Association, pp. 324-328.

Kim, W., Kim, Y., and Woo, H. (1995). "Estimation of Channel Roughness Coefficients in the Han River Using Unsteady Flow Model." *Magazine of Korea*

- Water Resources Association*, Vol. 28, No. 26, pp. 133-146.
- Kim, Y., Tachikawa, Y., Kim, S., Shiiba, M., Yorozu, K., and Noh, S.J. (2013). "Simultaneous Estimation of Inflow and Channel Roughness Using 2d Hydraulic Model and Particle Filters." *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 6, No. 2, pp. 112-123.
- Kim, S.U., and Lee, K.S. (2008). "Identification of Uncertainty in Fitting Rating Curve with Bayesian Regression." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 9, pp. 943-958.
- Le Coz, J. (2012). "A literature review of methods for estimating the uncertainty associated with stage-discharge relations." WMO initiative on Assessment of the Performance of Flow Measurement Instruments and Techniques-Project output.
- Lee, C.H. (2002). "Nonlinear Optimization of Rating Curves with VBA." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 1-B, pp. 43-55.
- Lee, J.H., and Kang, C.U. (2008). "CV control chart using CUSUM scheme." Proceedings of Korea industrial systems engineering spring conference, pp. 275-278.
- Lee, J.J., and Kwon H.H. (2010). "A Basic Study of Stage-discharge Rating Stabilization at the Ssang-chi Gauging Station." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1B, pp. 81-87.
- Lee, S.H., and Gang, S.U. (2001). "Stream Discharge Estimation by Hydraulic Channel Routing and Stage Measurement." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 5, pp. 543-549.
- MLIT (2008). Technical report of the Yodo River basin (volume of the Katsura River), Ministry of Land Infrastructure Transport and Tourism, Japan (in Japanese)
- MOLIT (2011, 2012). Hydrological survey report: I. the part of discharge investigation, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Republic of Korea (in Korean)
- Pelletier, M.P. (1987). "Uncertainties in the determination of river discharge: a literature review." *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 15, p. 834-850.
- Tawik, M., Ibrahim, A., and Fahmy, H. (1997). "Hysteresis sensitive neural network for modeling rating curves." *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 3, pp. 206-211.
- Reh, W., and Scheffler, B. (1996). "Significance and tests confidence intervals for tests and coefficient of variation." the statistical software newsletters
- Reitan, T., and Petersen-Overleir, A. (2008) "Bayesian power-law regression with a location parameter, with applications for construction of discharge rating curves." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 22, No. 3, pp. 351-365.
- Reitan, T., and Petersen-Overleir, A. (2009), "Bayesian Methods for Estimating Multi-segment Discharge Rating Curves." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 23, No. 5, pp. 627-642.
- Reitan, T., and Petersen-Overleir, A. (2011). "Dynamic Rating Curve Assessment in Unstable Rivers Using Ornstein-Uhlenbeck processes." *Water Resources Research*, Vol. 47, W02524, No. 14, doi:10.1029/2010WR009504
- USGS (1982). Measurement and computation of stream-flow: Vol. 2, Computation of discharge, Water Supply Paper 2175
- Westphal, J.A., Stevens, G.T., and Strauser, C.N. (1999) "Stage-Discharge Relations on the Middle Mississippi River." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, No. 1, pp. 48-53.

paper number : 15-050

Received : 6 July 2015

Revised : 25 August 2015 / 27 August 2015

Accepted : 27 August 2015