

Monte Carlo Simulation을 이용한 도시하천의 고수위 Rating Curve 개발

김종석* · 윤선권** · 문영일***

Jong-Suk Kim*, Sun-Kwon Yoon**, Young-Il Moon***

Development of Rating Curve for High Water Level in an Urban Stream using Monte Carlo Simulation

ABSTRACT

In this study, we proposed a methodology to develop Rating Curves for high water level using rainfall generation by the Monte Carlo Simulation (MCS) technique, optimized rainfall-runoff model, and flood routing model in an urban stream. The developed stage discharge Rating Curve based on observed data was contained flow measurement errors and uncertainties. The standard error (S_e) for observations was 0.056, and the random uncertainty ($2S_{mr}$) was analyzed by $\pm 1.43\%$ on average, and up to $\pm 4.27\%$. Moreover, it was found that the Rating Curve extensions by way of logarithmic and Stevens methods were overestimated to compare with the urban basin scale. Finally, we confirmed that the high water level extension by random generation of hydrological data using MCS can be reduced uncertainty of the high water level, and it will consider as a more reliable approach for high water level extension. In the near future, this results can be applied to real-time flood alert system for urban streams through construction of the high water level extension system using MCS procedures.

Key words : Monte Carlo Simulation, Urban Stream, Rating Curve, High Water Level

초 록

본 연구에서는 도시하천을 대상으로 Monte Carlo Simulation (MCS)에 의한 모의발생 기법 적용으로 최적화된 강우-유출 모형과 홍수위 추적 모형 연계를 통한 고수위 Rating Curve 작성법을 제안하였다. 대상유역의 관측 자료로부터 작성된 수위-유량곡선식은 유량측정의 오차와 더불어 고수위에 대한 불확실성을 내포하고 있음을 확인할 수 있었으며, 관측치와의 표준오차(S_e)는 0.056으로, 무작위 불확실성($2S_{mr}$)은 평균 $\pm 1.43\%$, 최대 $\pm 4.27\%$ 로 분석되었다. 또한, 전대수지법과 Stevens방법에 의한 고수위 연장은 도시하천 유역 규모에 비하여 수위에 따른 홍수량이 과대 산정되는 문제점이 있는 것으로 분석되었다. 마지막으로, MCS에 의한 다량의 수문자료군 확보를 통한 수위-유량 관계곡선의 연장방법은 고수위에 대한 불확실성을 감소시키며, 보다 신뢰성 있는 고수위 연장이 가능하였다. 향후 본 연구의 결과는 MCS에 의한 고수위 연장 시스템 구축을 통한 도시하천유역의 실시간 홍수 예·경보 활용에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

검색어 : MCS, 도시하천, 수위-유량 관계곡선, 고수위연장

1. 서론

정확한 유량자료의 확보는 하천의 이수치수환경 등 수자원 관리에 있어서 가장 기본이 되며 중요한 일이라고 할 수 있다(Bailey and Ray 1966; Rantz et al. 1982; Clarke 1999). 수위-유량관계 곡선의 개발 및 보정은 관측이 용이한 수위를 측정함으로써

* 서울시립대학교 토목공학과 연구교수 (jongsuk@uos.ac.kr)

** 정회원 · APEC 기후센터 연구본부 기후변화연구팀 선임연구원 (skyoona@apcc21.org)

*** 정회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · University of Seoul · ymoon@uos.ac.kr)

Received March 26 2013, Revised April 16 2013, Accepted May 6 2013

유량을 쉽게 산정할 수 있다는데 장점을 가지고 있으며, 강우-유출모형의 입력자료 구축 및 검증 자료로서 활용되고 있다. 또한 거시적인 수자원 관리 및 계획을 위한 기초자료가 되며, 축적된 자료는 갈수량, 평수량, 홍수량 산정으로 이·치수 및 지속적인 하천 운용에도 사용될 수 있다(DeGagne et. al. 1996; Moyeed and Clarke 2005; Apel et al. 2006). 미국과 유럽, 일본 등 대부분의 선진국에서는 하천의 유량측정에 있어 많은 노력을 기울이고 있으며, 매년 홍수기 수위-유량 관측 등 기초자료 수집에 많은 투자를 하고 있다. 수위-유량관계에 대한 연구는 19세기부터 본격적으로 시작되었으며 20세기 전반부에는 많은 기술적 발전을 이룩하였다. 현재 지수형태의 수위-유량 관계곡선식은 가장 널리 알려져 있고, 하나의 지수식으로 특정지점의 유량을 분석할 수 없을 경우에는 수위를 여러 구간으로 구분하여 각각의 구간에 각기 다른 지수식을 적용하고 있다(ISO, 1998). 그러나, 이러한 연구 개발의 지속적인 발전에도 불구하고 수위-유량관계 곡선식의 형태 및 물리적 의미와 기존방법의 문제점 및 개선방안에 대한 연구는 그리 많지 않은 실정이다.

국외의 경우, Bailey and Ray (1966)는 수위-유량관계의 개발 혹은 곡선식을 구하기 위해 하류부의 수위-유량 관계를 추정하고 상류부의 수위 관측소까지 수면형을 추적하는 방식의 축차-배수 방법을 제안하였으며, Rantz (1982)는 침투유량의 산정이 가능하지 않을 경우 최대 관측유량의 2배 이상을 외삽할 수 없다는 조건을 전제로 수위-유량관계곡선의 연장에 대한 방법을 제안한바 있다. DeGagne et. al. (1996)은 수위-유량 관계곡선의 연장을 위해 경험적 적합모형과 동수반경과 평균유속간의 경험적 모형과 Manning의 방정식을 이용한 연장을 제안하였다. Clarke (1999)는 수위-유량관계곡선의 적합 추정식의 매개변수 산정으로부터 연간 평균홍수량 추정의 불확실성을 분석하였으며, Moyeed and Clarke (2005)는 Bayesian MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 적합 기법을 이용하여

수위-유량 관계곡선식의 매개변수 추정과 불확실성을 분석한바 있다. Apel et al. (2006)은 German Research Network National Disaster project를 통하여 독일의 Rhine River를 대상으로 Monte Carlo Simulation 방법에 의하여 Weibull-distribution으로 모의발생 시킴으로 제방의 파괴확률을 산정하여 홍수 위험도를 분석하였으며, Afshar et al. (2009)는 Genetic Algorithms 기법과 Monte Carlo Simulation에 의한 위험도 기반 최적의 홍수위 추적 기법을 제안하였다.

국내의 경우, Yoo (1999)는 금강수계의 4개 주요 수위표 지점에 대하여 하천 유수의 통제기능을 고려한 수위-유량 곡선을 작성하여 기존의 성과와 비교검증 하였으며, Moon et al. (2003)은 비매개변수적 Kernel 회귀모형을 통한 수위-유량 관계곡선 작성의 방법론을 제시하였다. Kim and Lee (2008)는 베이지안 회귀분석을 이용하여 수위-유량 관계곡선의 불확실성을 분석하였다. 또한 Lee (2008)는 낙동 분류 5개 수위표 지점을 대상으로 수위로부터 유량으로(model 1) 유량으로부터 수위로(model 2) 그리고 양방향으로(model 3) 회귀분석을 수행하여 수위-유량 관계식의 새로운 모형을 제시한바 있으며, Lee et al. (2009)은 낙동강 적포교 및 진동 지점을 중심으로 수위-유량 관계곡선을 이용한 정년별 수리특성량 변동에 관한 연구를 한 바 있다. Kim et al. (2009)은 한강대교에 설치된 ADVM을 이용한 연속적인 유량측정 자료와 비교하여 수치모형에 의한 간접유량 산정의 적용성을 검증하였으며, Lee and Kwon (2010)은 쌓치 수위 관측소의 12년간 관측한 수위-유량 관계곡선을 바탕으로 RMA2 모형으로 수면곡선을 모의하여 수위-유량관계곡선을 안정화시키기 위한 기초연구를 하였다. Kim et al. (2011)은 복단면 개수로 및 불규칙한하상을 보이는 홍수터 식생을 고려한 횡단면 상에서의 수위-유량곡선 및 단위 유량행분포예측을 위하여 유한요소모형을 개발한바 있으며, Kim et al. (2012)은 모래하천의 수위-유량 관계가 고려형을 이룬다는 점을 착안하여 자갈 및 암반 하상의 산지하천의

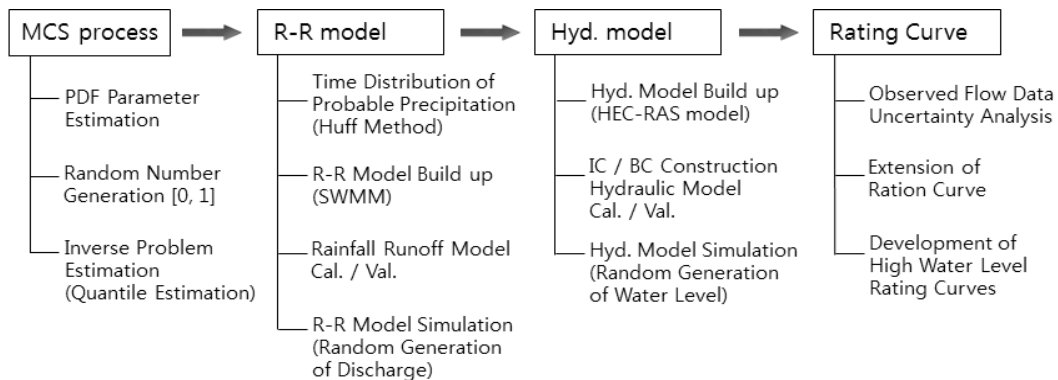


Fig. 1. Flow chart of high water level Rating Curves using MCS procedure

고리형 수위-유량 관계를 분석한 바 있다.

수문 예측의 정확도를 높이기 위해서는 수문관측 자료의 양적 확보와 더불어 질적인 측면에서도 고려되어야 한다. 그러나 우리나라의 경우 아직까지 중소규모 하천유역까지의 지속적인 수문관측은 미흡한 실정이며 이를 보완할 수 있는 방안에 대한 연구가 지속적으로 수행 되어야 할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 위험도 기반 수문변수 (hydrological variable)의 모의발생 기법인 MCS 기법을 이용하여 고수위에 대한 불확실성을 제거하고 관측 수위-유량관계곡선을 보완함으로써, 도시하천에서의 홍수발생에 대비한 치수계획 수립과 홍수 예경보 체계구축의 기초자료로 활용하고자 하였다. 다음 Figure 1은 본 연구에서 실시한 MCS를 이용한 도시하천의 고수위 Rating Curve 개발의 연구 흐름도이다.

2. Monte Carlo simulation

2.1 Random Number Generation

본 연구에서는 위험도 기반 홍수량 모의 발생을 위하여 MCS 기법을 이용하였으며, 이는 불확실성을 다루는 수단으로서 다양한 확률분포로부터 특정 변수(variable)의 확률분포를 모의하는데 이용되고 있다. MCS를 시행하기 위한 기본조건은 어떤 한 구성요소의 변화가 다른 구성요소에 영향을 미치지 않는 독립적인 구성요소라는 가정이다. 다만, 만약 변수들간의 상관성이 무시할 정도로 작게 존재한다면 독립의 가정을 전제로 한 MCS는 큰 오류를 발생시키지 않게 된다. 그러나 만일 이러한 변수들간의 상관성이 비교적 큰 경우에는 상관계수를 바탕으로 다변량확률밀도함수를 이용하여 변수들간의 연관성을 유지시키는 것이 중요하다고 할 수 있다. 이러한 관점에서 MCS기법은 불확실성 분석을 위한 기본 확률분석기법 도구로서 불확실성을 갖는 공학적인 모형의 각 구성요소들인 임의의 변수에 대해 확률적인 특성을 고려한 해석을 가능케 하는 해석방법으로 인식되고 있다. 이러한 MCS 과정에서 각 확률변수의 분포형태에 적합한 난수를 발생시키는 것이 가장 기본이 되며, 이를 위해서는 일단 0과 1사이에서 균일하게 분포하는 난수를 추출한 다음 이 난수를 적절히 변환하여 특정한 확률분포를 따르는 난수로 바꾸어주는 방법이 무엇보다 중요하다(Kim, 2008).

MCS기법은 그 분포특성이 알려진 확률변수들의 함수로 정의되는 새로운 확률변수의 통계적 특성과 분포함수를 추정할 수 있으므로 자연계의 불확실성을 분석하는데 적합한 방법으로 알려지고 있다. 연속 확률 변수를 위한 난수를 추출하는데 사용되는 방법으로 대표적인 방법은 역변환법(inverse transformation method)이 있으며 대부분의 MCS에서 주로 사용되는 방법이며 이는 누가분포함수가 $F_X(x)$ 인 연속확률변수 X 에 대해 누적분포확률이 u 일 때의 확률변수 X 의 값 x 는 다음 Eq. (1)과 같이 누가분포함수를 역변환

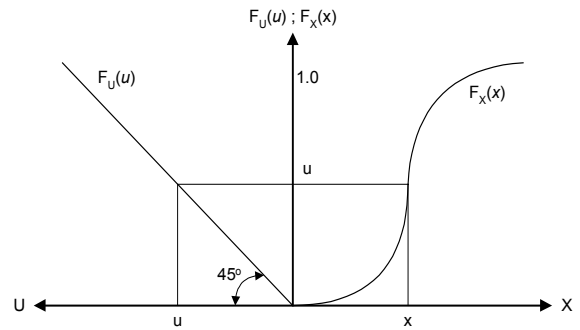


Fig. 2. Relationship of random number u and quantile value x

하여 얻을 수 있다. Figure 2는 역변환법을 모식적으로 나타내었다.

$$x = F_X^{-1}(u) \tag{1}$$

한편 0과 1사이의 균등분포(uniform distribution) 확률변수 U 의 누적분포확률이 u 이면 다음 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_U(u) = u \tag{2}$$

Eq. (2)를 이용하여 임의의 연속확률변수(continuous random variable) X 를 위한 난수를 추출할 수 있다. 즉 0과 1사이의 균등분포 난수 u_i 를 추출하여 위의 Eq. (2)와 같이 연속 확률변수 X 의 확률분포함수의 역변환 Eq. (1)에 대입하면 연속확률변수 X 의 확률분포를 따르는 난수를 발생시킬 수 있다. 이와 같이 역변환법은 0과 1사이에서 추출된 균등분포 난수를 각 연속 확률분포의 Quantile 함수에 대입하여 간단히 모의할 수 있으므로 대부분의 연속확률분포에 대하여 주어진 확률분포를 어려움 없이 발생시킬 수 있다.

2.2 Quantile Estimation

도시하천 제방의 MCS에 의한 홍수위 추정치에 대한 불확실성 규명과 고수위 Rating Curve연장을 위하여 임의의 분포형을 적정 분포형으로 가정하여 위험도의 불확실성을 정량적으로 해석하는 과정을 사용하였다. 일반적으로 빈도해석을 통하여 계산되는 재현기간 $T=1/p$ 에 대한 설계홍수량은 가정된 누가분포함수 $F(x_q) = q = 1 - p$ (여기서, q 는 비초과확률이며, p 는 발생확률임)의 역함수를 이용한 해를 산정함으로써 추정할 수 있다. 본 연구에서는 연속확률변수로부터 Quantile 값을 산정하기 위하여 관측강수량 자료의 적합성 평가를 실시하였으며, 최적분포형으로 Gumbel 분포형을 채택하였고, 분포형별로 난수[0, 1] 발생의 과정을 통하

여 추정된 임의 비초과 확률에 대한 역변환추정법(inverse problem estimation)에 의한 Quantile을 추정하였다. 채택된 Gumbel 분포형의 누가분포함수(CDF: cumulative distribution function)는 다음 Eq. (3)과 같다.

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-x_0}{\alpha}\right]\right\} \quad (3)$$

여기서, x_0 와 α 는 각각 Gumbel 분포형의 위치매개변수(location parameter)와 규모매개변수(scale parameter)이며, 표본자료 X_1, \dots, X_N (N 은 자료개수)로부터 추정된 매개변수의 추정치를 각각 \hat{x}_0 와 $\hat{\alpha}$ 로 정의한다.

위의 Eq. (3)로부터 계산되는 임의의 비초과확률 \hat{q} 에 대한 설계홍수량 x_q 는 다음 Eq. (4)와 같다.

$$\hat{q} = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x_q - \hat{x}_0}{\hat{\alpha}}\right]\right\} \quad (4)$$

이 경우 설계연한 n 년에 대한 수공구조물의 위험도 \hat{R} 는 다음 Eq. (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{R} = 1 - (1 - \hat{p})^n = 1 - \hat{q}^n \quad (5)$$

위의 Eq. (5)로부터 추정되는 위험도 \hat{R} 의 기댓값 $E(\hat{R})$ 을 Taylor 급수를 이용하여 산정하면 Eq. (6)과 같으며, 비초과확률(non-exceedance probability)에 대한 기댓값 $E(\hat{q})$ 는 다음 Eq. (7)과 같다.

$$E(\hat{R}) \approx 1 - [E(\hat{q})]^n \quad (6)$$

$$E(\hat{q}) \approx \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x_q - E(\hat{x}_0)}{E(\hat{\alpha})}\right]\right\} \quad (7)$$

3. 대상 하천 유역 및 유량측정

3.1 대상하천 유역

본 연구의 대상유역은 우이천 유역이며, 유역면적 28.76km², 유로연장 11.75km인 도시하천 유역이다. 이 지역은 1998년, 2001년 과 2003년에 홍수피해가 있었던 곳으로 재해관리상 지속적인 모니터링이 필요한 유역이다. 우이천 시험유역의 유역경계는 서쪽으로는 북한산, 북쪽으로 도봉산, 남쪽으로는 성북구와 경계를 이루고 있으며, 유역의 분수령은 서·북쪽으로 경기도 의정부시와 경계를 이루는 북한산(EL.386m), 도봉산(EL.721m)에서 각 유역의 분수령을 형성하고 있다. 하천의 유로형상은 대체적으로 수지상이며, 하류로 진행함에 따라 유역 폭이 좁아 대부분의 유역이 상류에 편중되어 있으며, 일부 구간은 S자형의 사행을 이루고 있으나 대체로 굴곡이 없는 구간이다. 우이천은 대동천, 가오천, 화계천의 지류와 각각 만나 중랑천으로 흘러 들어가는 하천으로서 중랑천 제1지류이다. 다음 Figure 3는 적용대상유역의 위치도 및 소 배수분구별 하수관거 시스템의 배수체계도이며, 다음 Table 1은 우이천유역의 수계현황이다.

Table 1. Watershed Present condition of Wooyi stream basin

| Watershed Name | Watershed Area (km ²) | Watershed Length (km) | River length (km) | |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------|-------|
| | | | Local river | Total |
| Wooyi | 28.76 | 11.75 | 8.33 | 8.33 |
| Daedong | 4.18 | 3.47 | 1.60 | 1.60 |
| Gaoh | 2.24 | 2.81 | 2.02 | 2.02 |
| Whagye | 4.40 | 2.80 | 2.80 | 2.80 |

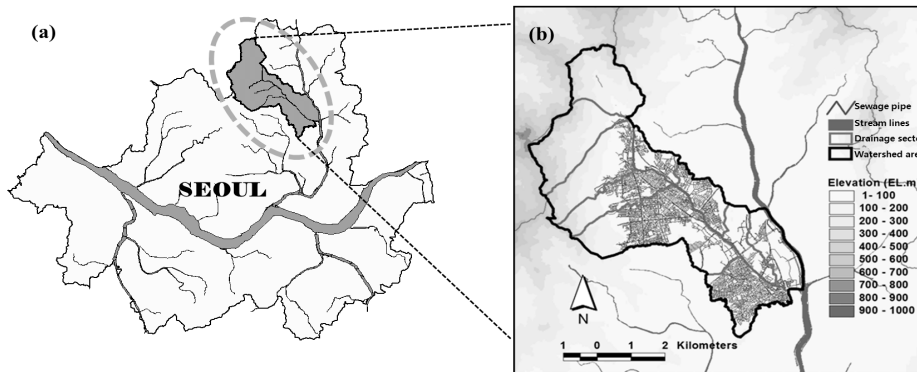


Fig. 3. The study area of the Wooyi stream basin located in the North-east Seoul, South Korea. (a) represents location of Wooyi stream in Seoul, and (b) is drainage sewer system.

3.2 유량측정 성과

수위-유량관계 곡선은 지속적인 하천 모니터링을 통해서 개발/보완 되어져야 하나 아직까지 국내 하천의 경우 수문관측 자료가 충분하지 않으며 일부 구축이 되어 있다고 하더라도 고수위에 대한 자료가 확보되지 못한 경우가 대부분이다. 본 연구의 적용 대상 하천은 서울시 관내 지방 하천인 우이천 유역으로 하천 하류부 장월교 지점에 자기수위 관측기(T/M)가 설치 운영되고 있으며, 서울시의 대학과 연계한 하천관리 연구용역'의 일환으로 유량측정이 지속적으로 실시되고 있다(Yoon *et al.* 2008).

수위-유량관계를 결정하기 위해서는 대수변환을 통해서 관계식을 선형화하는 것이 편리하다. 일반적인 수위-유량식은 다음 Eq.

(8)과 같이 유량을 수위의 지수함수로 가정한방법을 사용한다 (Lambie, 1978).

$$Q = k(H - z)^b \tag{8}$$

여기서, H 는 수위, k 와 b 는 상수이다. z 는 유량이 0이 되는 수위를 나타내는 기준면 보정치이다. 다음 Figure 4는 하천의 유역 응답에 중요한 관측 자료로 활용되는 2000~2010년까지의 우이천 장월교지점의 수위-유량관계곡선이며, Figure 4(b)와 Figure 4(c)는 장월교지점 유량측정구간의 횡단측량 단면(Station No. 24, Station No. 25)으로 각 횡단면 간의 거리는 50m이다.

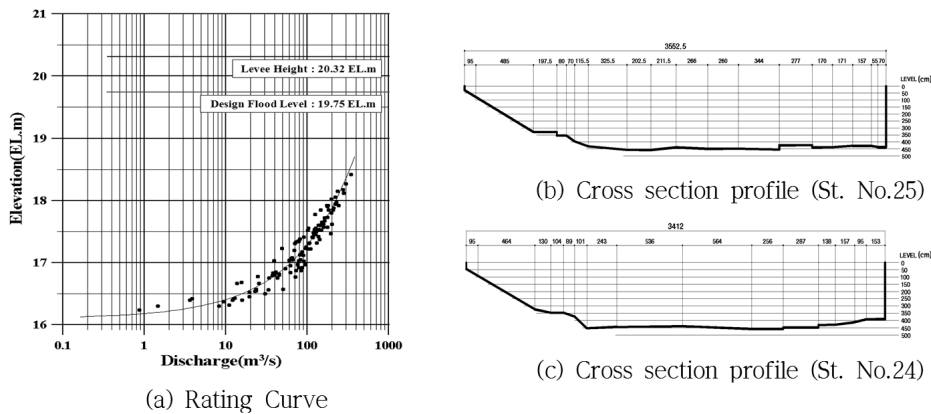


Fig. 4. Development of the Rating Curve

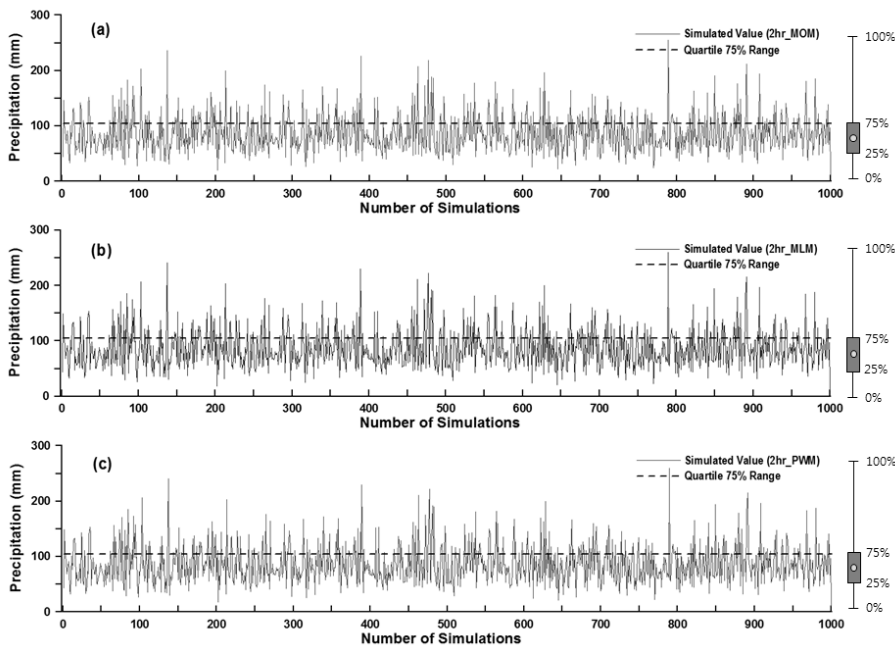


Fig. 5. Result on precipitation generation by Monte Carlo Simulation. (a), (b), and (c) represent method of moments (MOM), method of maximum likelihood (ML), and method of probability weighted moments (PWM), respectively.

Table 2. Development of the Rating Curve Equations (Unit; $Q = m^3/s$, $H = EL. m$)

| Observed year | # of Obs. data | Rating Curve Equation | R^2 |
|---------------|----------------|---|--------|
| 2000~2004 | 83 | $Q = 82.96(H - 16.20)^{1.534223}$ [16.24 ≤ H ≤ 18.15] | 0.9614 |
| 2000~2006 | 114 | $Q = 81.52(H - 16.1514)^{1.635047}$ [16.24 ≤ H ≤ 18.42] | 0.9164 |
| 2000~2008 | 122 | $Q = 75.41(H - 16.10312)^{1.696408}$ [16.24 ≤ H ≤ 18.42] | 0.9597 |
| 2000~2010 | 140 | $Q = 79.55(H - 16.12189)^{1.629327}$ [16.24 ≤ H ≤ 18.42] | 0.9463 |

Table 3. Stochastic characteristics of observed and simulated precipitation

| Statistics | Observed UQR Series (1961 ~ 2010 year) | Simulated UQR Series | | |
|--------------|--|----------------------|--------|--------|
| | | MOM | ML | PWM |
| Max. | 208.1 | 255.2 | 260.3 | 259.3 |
| Min. | 102.3 | 104.4 | 105.2 | 104.9 |
| Average | 134.0 | 132.6 | 134.2 | 133.7 |
| Median | 127.2 | 124.8 | 126.1 | 125.7 |
| Std. Dev. | 26.93 | 26.53 | 27.30 | 27.19 |
| CV | 0.2010 | 0.2000 | 0.2034 | 0.2033 |
| Quartile 75% | 102.3 | 104.3 | 105.1 | 104.8 |

* Observed UQR means upper quartile range of annual maximum rainfall series obtained from Seoul meteorological observatory. Simulated UQR means generated upper quartile range data from MCS., Quantile estimation performed method of moments (MOM), method of maximum likelihood (ML), and method of probability weighted moments (PWM).

대상하천유역의 유량측성 성과를 바탕으로 수위-유량 관계곡선을 작성한 결과 Figure 5에서 보는바와 같이 계획홍수위에 근접하거나 이를 상회하는 홍수는 발생하지 않았으며, 여전히 고수위에 대한 불확실성(uncertainty)이 존재함을 확인할 수 있어 지속적인 모니터링을 통한 수문자료의 확충이 요구된다. 우이천 장월교 지점에서 현재까지 관측된 최고수위는 EL.18.42m이며, 이때의 최대 유속은 4.08m/s이다. 또한, 2010년까지의 자료를 바탕으로 개발된 수위유량 관계곡선 식은 $Q = 79.55(H - 16.12189)^{1.629327}$, [16.24 ≤ H ≤ 18.42]이며, 관측자료와 곡선식과의 결정계수(R^2)는 0.9463으로 분석되었다(Table 2)

4. 분석 결과

4.1 MCS 모의 결과

MCS에 의한 강우자료의 모의발생 방법에 따라, 대상하천 유역의 홍수량 부하가 가장 크게 발생하는 임계지속기간(2시간)에 대하여 위험도 해석에 사용되는 변수의 실측치와 모의된 결과의 극대치 수문량 발생을 위하여 상위 75% 모의발생 강수량을 적용하여 통계적 특성치를 분석하였다(Table 3). 관측자료와 모의발생 자료

의 UQR (Upper Quartile Range) 강수량 값을 비교한 결과 평균과 분산, 표준편차 등의 기초통계량은 모의발생 자료와 거의 일치하는 값을 보여주고 있으나, 최대치의 경우 관측자료에 비하여 모의발생 자료가 각 매개변수 추정 방법별로 22.6%~25.1%까지 크게 나타나 상위 75% 모의발생 강수량에 대하여 MCS에 의한 모의 발생 방법이 극대치 수문량 평가에 유리하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있다. 다음 Figure 5는 모멘트법(MOM; method of moments)과 최우도법(ML; method of maximum likelihood), 그리고 확률가중모멘트법(PWM; method of probability weighted moments)에 의한 모의발생자료와 상위 75% 모의발생 강수량의 하한계 값 설정의 기준이 되는 Quartile 75%값을 나타내었다.

4.2 모형의 검·보정 결과

4.2.1 강우-유출모형 및 검·보정 결과

유역의 유출과정은 토지이용과 선행 수문사상 등에 따라 달라지는 매우 복잡한 양상을 띠며, 유역의 강우-유출관계가 비선형성을 내포하고 있어서 유역의 유출의 정확한 예측은 매우 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 전 세계적으로 널리 사용하고 있으며, 도시유역의 우수 및 오수 처리 시스템의 보다 정확한 해석과 신뢰성

있는 결과를 기대할 수 있는 U.S. EPA의 SWMM (Storm Water Management Model)을 사용하여 도시하천수계에서의 홍수유출의 예측정도를 높이고자 하였다.

본 연구에서는 강우-유출모형의 감보정을 위하여 2001년 7월 30일 호우사상과 2003년 7월 22일 호우사상을 선택하였다(Kim *et al.* 2005). 일반적으로 강우-유출 모형의 적합성을 평가하기 위한 많은 통계적 적합도 기준이 제안되었으나 적합도 기준보다는 모의 발생된 값과 측정된 값 사이의 불일치에 더 중점을 두고 있다. 관측과 모의의 통계적 평가 수단으로 무차원 계수인 Eq. (9)와 같은 모형 효율성 계수 (CME: coefficient of model efficiency)와 Eq. (10)~(12)과 같은 무차원 계수로서 첨두유량의 %오차 (PEP: percent error of peak)와 유출용적의 %오차 (PEV: percent error of volume) 및 첨두유량 발생시간(Tp)의 %오차 (PETP: percent error of time of peak)를 적용하여 모형의 적합성을 평가하였다. 모형 효율성 계수는 통계적 기준으로 편의를 줄일 수 있는 무차원계수이며 모의된 수문곡선이 실측 수문곡선과 잘

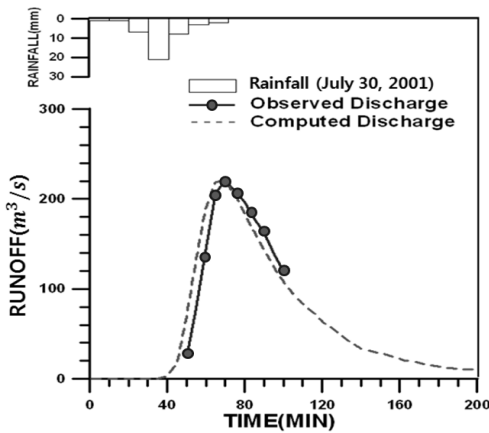
일치할수록 1에 가까워지는 성질이 있다. 이 기준은 무차원양으로서 자료의 개수에 관계없이 절대적 평가기준이 될 수 있다.

$$CME = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \quad (9)$$

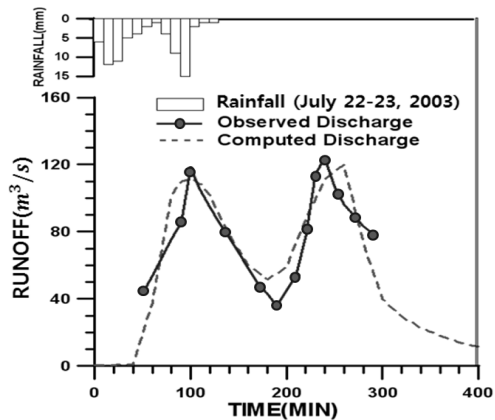
여기서, $F^2 = \sum_{i=1}^n [q_0 - q_s]_i^2$ 이고 $F_0^2 = \sum_{i=1}^n [q_0 - \bar{q}]_i^2$ 이다. F^2 는 실측치와 예측치 사이의 불일치 지표(unconformity index)이고, F_0^2 는 실측유량의 초기분산을 나타내며, q_0 는 실측유량을 q_s 는 모의 유량, \bar{q} 는 관측유량의 평균을 의미한다.

$$PEP = \frac{q_{ps} - q_{p0}}{q_{p0}} \times 100 \quad (\%) \quad (10)$$

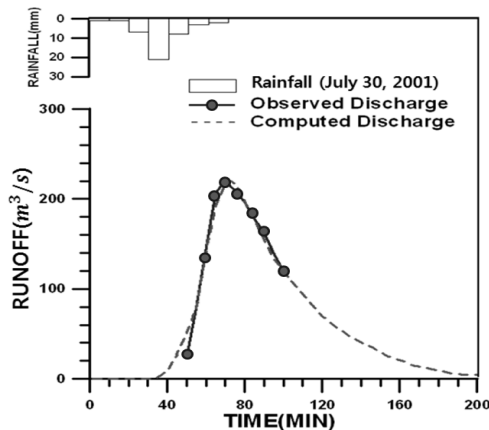
$$PEV = \frac{V_c - V_0}{V_0} \times 100 \quad (\%) \quad (11)$$



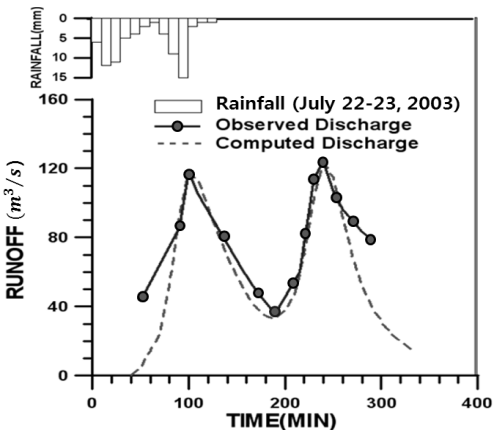
(a) Model I calibration



(b) Model I verification



(c) Model II calibration



(d) Model II verification

Fig. 6. Model calibration and verification for Model I (Runoff) and Model II (Runoff+Extran)

$$PETP = \frac{T_{pc} - T_{p0}}{T_{p0}} \times 100 \quad (\%) \quad (12)$$

여기서, q_{ps} 와 q_{p0} 는 예측 및 실측 침투유량이고 V_c 와 V_0 는 예측 및 실측 유출용적이며 T_{pc} 와 T_{p0} 는 예측 및 실측 침투유량의 발생시간이다. 강우-유출 모의의 적합성을 평가하기 위해서 Figure 6에 실측치와 모의 결과를 도시적으로 분석하였다. 다음 Table 4의 통계적 지표에서 보논비와 같이 연계모형(Model II: Runoff+Extran)이 단일모형(Model I: Runoff)을 적용하였을 때보다 침투유량의 발생시간, 침투유량에서 비교적 우수한 결과를 보였다. SWMM의 Model II를 통하여 모의한 결과는 모형효율성계수가 거의 1에 가깝게 산정되어 수문곡선의 예측뿐만 아니라 침투시간과 침투유량의 모의에서도 우수한 것으로 분석되었다.

4.2.2 홍수위 추적 모형 및 검·보정 결과

대상 하천 하도의 홍수위추적을 위하여 일차원 에너지 방정식을 기본으로 하여 에너지 손실은 마찰과 단면 수축/확장에 의해 구하는 방법을 사용하였다. 한 단면에서 다음 단면까지의 수면 종단면도는 미지의 수위를 산정하기 위한 표준축차계산법(standard step method)으로 상류부와 하류부 단면에 대해 반복적으로 에너지 방정식을 풀어서 얻을 수 있으며, 다음 Eq. (13)은 한단면의

수위를 가정해서 다음단면의 수위를 에너지방정식으로 구하는 모형의 홍수위 추적계산식이다.

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e \quad (13)$$

여기서, Z 는 기준면(datum)으로부터 하천바닥까지의 거리이며, Y 는 구간 단면 수위, V 는 구간 양단에서의 평균유속, α 는 구간 양단에서의 에너지 보정계수, g 는 중력가속도, h_e 는 에너지 손실수두이다. 에너지손실수두에 대한 방정식은 Eq. (14)와 같다.

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \cdot \left[\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right] \quad (14)$$

여기서, L 은 유량가중 구간거리, \bar{S}_f 는 구간의 평균마찰경사, C 는 단면 확대 및 축소에 의한 손실계수이다. 수위는 위 두 방정식을 반복하여 해를 계산함으로써 얻을 수 있으며 계산과정은 상류단면의 수위를 가정(사류구간에서는 하류 단면수위 가정)하여, 가정수위에 대하여 통수능(K)과 속도수두를 구하고, 이 값을 이용하여 \bar{S}_f 를 산출한 위의 Eq. (14)을 이용하여 h_e 를 구하며, Eq. (13)에 의한 상류단면의 수위와 가정한 수위가 상대오차 범위내로 수렴할 때까지 축차적으로 반복 계산한다.

Table 4. Statistical evaluation and model calibration and verification of runoff model

| Applied models | Rainfall event (2001/07/30) | | | | Rainfall event (2003/07/22) | | | | Remark |
|----------------|-----------------------------|---------|---------|----------|-----------------------------|---------|---------|----------|--------|
| | CME | PEP (%) | PEV (%) | PETP (%) | CME | PEP (%) | PEV (%) | PETP (%) | |
| Model I | 0.96 | 0.36 | 19.70 | 12.86 | 0.77 | 3.01 | - 17.08 | -8.33 | Cal. |
| Model II | 0.96 | 0.27 | 4.29 | 4.29 | 0.85 | -0.84 | -2.01 | -4.17 | Ver. |

* Model I : Kinematic Wave Model, Model II : Kinematic Wave+Dynamic Wave Model, Cal: Model Calibration, Ver: Model Verification

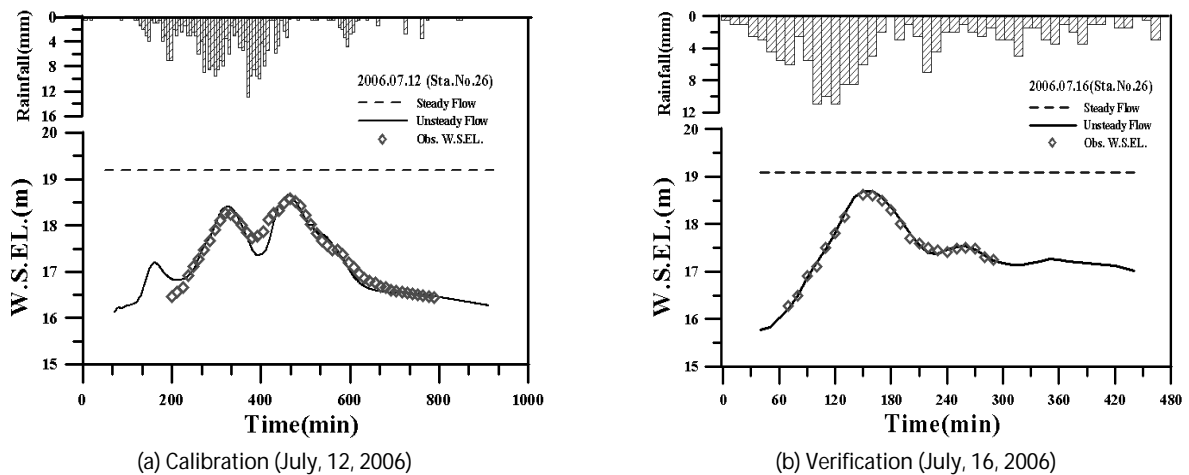


Fig. 7. Calibration and verification of flood events

Table 5. Model calibration and verification results from two extreme rainfall events

| Rainfall Events | Observed Data | | | Simulated | | | | RMSE | | Note |
|-----------------|---------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|---------------|-------------|-----------|-------------|------|
| | | | | Steady Flow | | Unsteady Flow | | | | |
| | Q_p (m ³ /s) | H_p (EL.m) | V_m (m/s) | H_p (EL.m) | V_m (m/s) | H_p (EL.m) | V_m (m/s) | H_p (m) | V_m (m/s) | |
| July, 12, 2006 | 344.37 | 18.65 | 3.27 | 19.18 | 3.01 | 18.62 | 3.16 | 0.020 | 0.012 | Cal. |
| July, 16, 2006 | 338.12 | 18.72 | 3.02 | 19.08 | 2.99 | 18.70 | 2.98 | 0.014 | 0.002 | Ver. |

* Q_p : Peak Discharge, H_p : Peak Water Surface, V_m : Average Velocity, RMSE: Root Mean Square Error, Cal: Calibration, Ver: Verification

MCS 결과 모의 발생된 지점별 홍수량을 상류단 경계조건으로 하고 하류단 경계조건은 등류수심(normal depth)으로 하여 홍수위를 산정하였다(Yoon, 2012). 다음 Figure 7은 2006년 7월 12일 호우사상에 대한 홍수위 관측값에 대한 정상류해석과 부정류해석의 보정(calibration)과 검증(verification)결과를 나타내었다. 관측 수위에 대한 분석결과 정상부등류 해석결과는 약간 크게 나오며, 실제 홍수사상은 홍수과의 감소효과로 인하여 전체적으로 부정류 해석결과와 유사한 양상을 나타내고 있다. 수리학적 홍수추적 모형을 통한 홍수위 추적 결과 기존의 정상류(steady flow) 해석모형보다 부정류(unsteady flow) 해석모형에서 24% 작게 산정되었으나, 부정류 해석 모형을 통한 수리학적 홍수추적에 의한 계산 수위(h)가 실제 홍수위조건을 보다 우수하게 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 MCS에 의한 고수위 모의발생을 위하여 부정류 해석에 의한 홍수위 추적값을 사용하였다.

실측호우사상에 대한 장월교 지점의 수위, 유량 관측자료를 바탕으로 주요지점에 대한 홍수량을 산정하였으며, 모형의 상류단 경계조건으로 적용하였다. 또한 장월교 지점의 실측된 수위자료를 하류단 경계조건으로 적용하여 정상부등류 및 부정류 해석을 실시하였다. 실측(observed)수위와 부정류 해석에 의한 모의(simulated) 수위의 비교를 위하여 통계적 방법으로 RMSE (root mean square error)를 사용하였다. 실측 수위 자료를 토대로 호우사상을 추출하여 모형을 감보정한 결과는 다음 Table 5와 같다.

4.3 수위유량관계곡선의 불확실도 분석

수위-유량 관계곡선의 불확실도는 크게 무작위 오차(random error), 계통 오차(systematic error), 우연 오차(mistakes, spurious error)가 있다. 여기서, 무작위 오차는 보통 실험오차로 간주되며 관측치들은 기회의 법칙에 따라 평균을 따라 분포되고 정규분포(normal distribution)를 이룬다. 이것들은 수문관측에 있어서 가장 중요한 오차로 여겨진다. 또한, 계통 오차는 기기나 장치가 교체되지 않는 한 측정값의 수를 늘려서는 감소되지 않는 오차이다. 수문관측에 있어서 계통 오차는 기준척, 기준점, 유속계, 그리고 수위 기록계에 존재한다. 이 오차는 일반적으로 자치만 경우에 따라서는 그 영향이 수위-유량관계에까지 오차를 유발하게 된다. 또한 부정확한

기준점은 작은 값의 유량일 경우 웨어의 마루부분에 있어서 수위 측정에 심각한 오차를 유발한다. 마지막으로 우연 오차는 측정을 수행하는 관측원 등에 의해서 발생하는 오차로 통계적으로 분석이 불가능한 오차이다. 그러므로 관측치 중에서 이러한 오차가 발생하였을 경우에는 제외해야만 한다. 수위-유량관계는 하천의 주요 지점에서 수위와 유량을 동시에 측정하여 이들의 관계를 식으로 나타낸 것이다. 수위-유량관계의 불확실도는 수위-유량관계에 의해 계산된 유량이 실측 유량과의 차이에서 발생하는 불확실도(S_{mr})와 수위-유량관계곡선에 대한 실측 유량의 표준오차(S_e)에 의해서 계산될 수 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2007). 수위-유량관계의 표준오차 S_e 는 다음 Eq. (15)와 같다 (ISO 1100-2, 1998).

$$S_e = \left\{ \frac{\sum (\ln Q - \ln Q_c)^2}{N-2} \right\}^{1/2} \quad (15)$$

여기서, Q 는 측정 유량이며, Q_c 는 수위-유량관계로 계산된 유량 이고, N 은 전체 유량측정 개수 이다. 평균에 대한 불확실도($2S_{mr}$)는 다음 Eq. (16)에 의해서 계산된다.

$$2S_{mr} = \pm t S_e \left\{ \frac{1}{N} + \frac{[\ln(H-z) - \overline{\ln(H-z)}]^2}{\sum [\ln(H-z) - \overline{\ln(H-z)}]^2} \right\}^{1/2} \times 100 \% \quad (16)$$

여기서, t 는 수위-유량관계에서 자료 크기에 따른 검정통계량이다. 우이천 장월교 지점의 측정에 대한 표준오차(S_e)는 0.056으로 분석되었으며 이는 평균적으로 측정치의 95%는 5.6%의 직선 범위 내에 포함된다는 것을 의미한다. 다음 Figure 8은 관측 수위-유량 자료의 무작위 불확실도 분석 결과이다. 또한, Table 6은 임의 수위 $\ln(H-z)$ 에 대한 $\ln Q_c$ 의 개별값에 대한 무작위 불확실성 ($2S_{mr,9}$) 결과를 나타내었으며, 계산 결과를 바탕으로 작성된 Rating Curve에 대한 신뢰성을 평가하기 위함이다. 계산결과 우이천 지점의 유량측정 성과는 평균 $\pm 1.43\%$, 최대 $\pm 4.27\%$ 의 불확실성이 있는 것으로 분석되었다.

4.4 수위유량 관계곡선의 연장

수위-유량관계곡선은 유량측정성과의 수위 범위 밖에서는 적용될 수 없다. 그러나 관측된 수위 범위 밖의 유량 추정이 필요한 경우, 수위-유량관계곡선의 외삽이 필요하다. 일반적으로 홍수시와 같은 고수위에서는 빠른 유속, 큰 수심 및 부유물 등으로 인하여

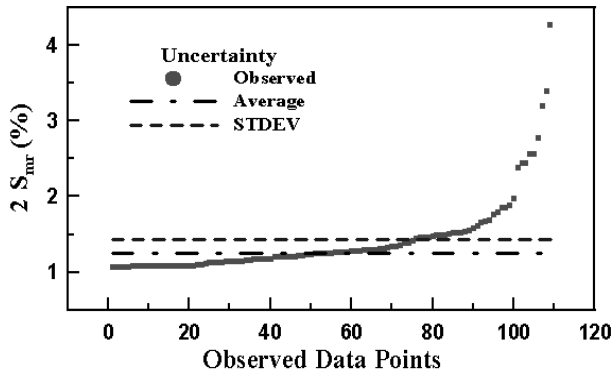


Fig. 8. Results for random uncertainty of observed discharge data

Table 6. Random uncertainty of observed discharge data

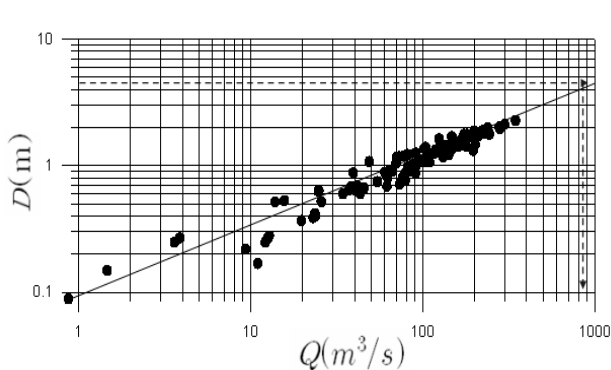
| Obs. Data | $H-z$ (m) | Q (m^3/s) | Q_c (m^3/s) | $\ln Q=y$ | $\ln Q_c=y_c$ | $(y-y_c)^2$ (m) | $2S_{mr}$ (%) |
|-----------|-----------|-----------------|-------------------|-----------|---------------|-----------------|---------------|
| 1 | 0.68 | 38.08 | 43.25 | 3.64 | 3.77 | 0.02 | 1.22 |
| 2 | 0.52 | 13.79 | 27.86 | 2.62 | 3.33 | 0.49 | 1.50 |
| 3 | 0.27 | 3.87 | 9.50 | 1.35 | 2.25 | 0.81 | 2.45 |
| 4 | 0.15 | 1.46 | 3.61 | 0.38 | 1.28 | 0.82 | 3.40 |
| 5 | 1.08 | 48.64 | 92.26 | 3.88 | 4.52 | 0.41 | 1.09 |
| | | | | ⋮ | | | |
| 108 | 1.07 | 103.26 | 90.86 | 4.64 | 4.51 | 0.02 | 1.09 |
| 109 | 0.82 | 76.33 | 58.77 | 4.34 | 4.07 | 0.07 | 1.10 |

유량측정이 어렵거나 불가능하고 위험하다. 또한 고수위를 측정할 만한 호우사상이 발생하지 않았을 경우에는 외삽을 통하여 수위-유량관계곡선을 연장해야 한다(MOLIT, 2007). 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용하고 있는 전대수지법(logarithmic method)과 Stevens (1907)방법을 적용하여 고수위에 대한 수위-유량관계곡선을 연장하였다.

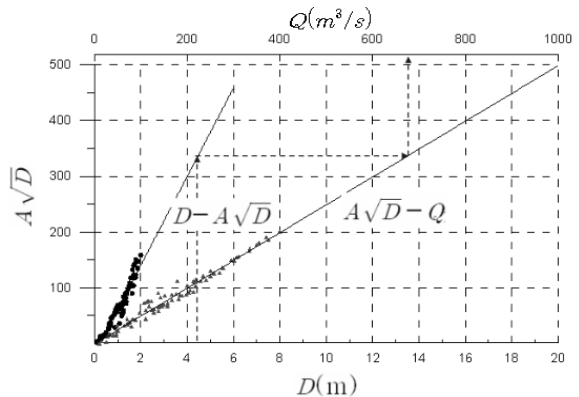
관측된 수위와 유량을 전대수지에 도시하면 Figure 9(a)와 같은 직선으로 나타나며, 이로부터 임의수위에 대한 유량을 적용할 수 있다. 다음 Figure 9는 전대수지와 Stevens 방법을 적용한 결과를 나타내고 있다. 이와 같은 외삽은 중규모와 대규모 유량에 대해서 하도통제인 경우에 적합하나 최고 측정유량의 1.5배 이상에 대해서는 외삽해서는 안 된다(MOLIT, 2007). Figure 9에서 보는바와 같이, 우이천 유역의 유량 측정 결과로부터 계산한 전대수지법 및 Stevens방법에 의한 수위-유량 관계곡선의 연장의 경우 대체적으로 수위에 비하여 유량이 과대 산정되는 것으로 나타나 고수위에 대한 Rating Curve 연장에 적용하기에는 다소 신뢰성이 떨어지는 것으로 분석된다.

4.5 MCS에 의한 고수위 Rating Curve 연장

수위-유량관계 곡선은 지속적인 하천 모니터링(monitring)을 통해서 개발/보완 되어져야 하나 아직까지 국내 하천의 경우 수문관 측 자료가 충분하지 않으며 일부 구축이 되어 있다고 하더라도 고수위에 대한 자료가 확보되지 못한 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 유출분석의 신뢰도를 향상시키고 고수위에 대한 수문자료의 확충을 위하여 위험도 기반 MCS를 통한 고수위 Rating Curve를 연장하는 방법을 개발하였다. 최적의 확률분포형으로 선정된 Gumbel분포형의 규모매개변수(scale parameter)와 위치 매개변수(location parameter)에 각각 난수[0, 1]를 적용하여 다수의 강우량군(300 set, 500 set, 800 set, 1000 set)을 모의 발생하였



(a) Logarithmic method



(b) Stevens method

Fig. 9. Extension of Rating Curve from logarithmic and Stevens method

다. 상기 모의 발생된 강우량을 바탕으로 Huff-2분위 분포에 해당하는 시간분포 강우량을 생성하였으며, 이를 대상하천 유역에 최적화된 강우-유출모형인 SWMM에 적용하여 유출분석을 실시하였다. 분석된 유출결과를 홍수위 추측 모형에 적용하여 각각의 횡단면 (cross section) 위치에서 홍수위추정을 실시하였으며, 계산된 수위와 유량 결과를 바탕으로 고수위 Rating Curve를 작성하였다. 다음 Table 7은 관측 수위-유량 자료과 MCS에 의하여 모의발생된

수위-유량 자료의 결과를 비교하여 나타내었다. 관측수위의 경우 최대 E.L.18.42m로 나타났으며, 계산된 수위-유량 관계곡선과의 상관계수는 0.957265로, RMSE는 18.1565로 나타났다. 또한 MCS에 의하여 모의발생된 수위는 1000set 모의발생한 결과 최대 E.L.20.46m로 나타났으며, 계산된 수위-유량 관계곡선과의 상관계수는 99.8%로, RMSE는 5.7719로 나타났다.

적용 대상하천 유역 하류부 장월교 지점의 총 11개년(2000~

Table 7. Stochastic evaluation of observed and simulated outflow data

| Data | H | | Q | | CC (Q _{obs} vs. Q _{cal}) | RMSE (Q _{obs} vs. Q _{cal}) | |
|--------------|----------|-------|--------|--------|--|--|--------|
| | Max | Min | Max | Min | | | |
| Observations | 18.42 | 16.24 | 344.37 | 0.87 | 0.957265 | 18.1565 | |
| MCS Sim. | 300 set | 20.29 | 16.04 | 511.79 | 11.31 | 0.998235 | 5.7278 |
| | 500 set | 20.29 | 16.04 | 511.79 | 11.31 | 0.998086 | 6.0285 |
| | 800 set | 20.46 | 16.04 | 541.35 | 11.31 | 0.998149 | 5.8300 |
| | 1000 set | 20.46 | 15.87 | 541.35 | 6.05 | 0.998162 | 5.7719 |

$$* CC = \frac{(\sum(Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i))/n) - (\sum Q_{obs}(i)/n) \times (\sum Q_{cal}(i)/n)}{\sqrt{SD_1 \times SD_2}}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2/n}$$

, Where n is a number of data, Q_{obs} means observed discharge data, and Q_{cal} means simulated discharge data.

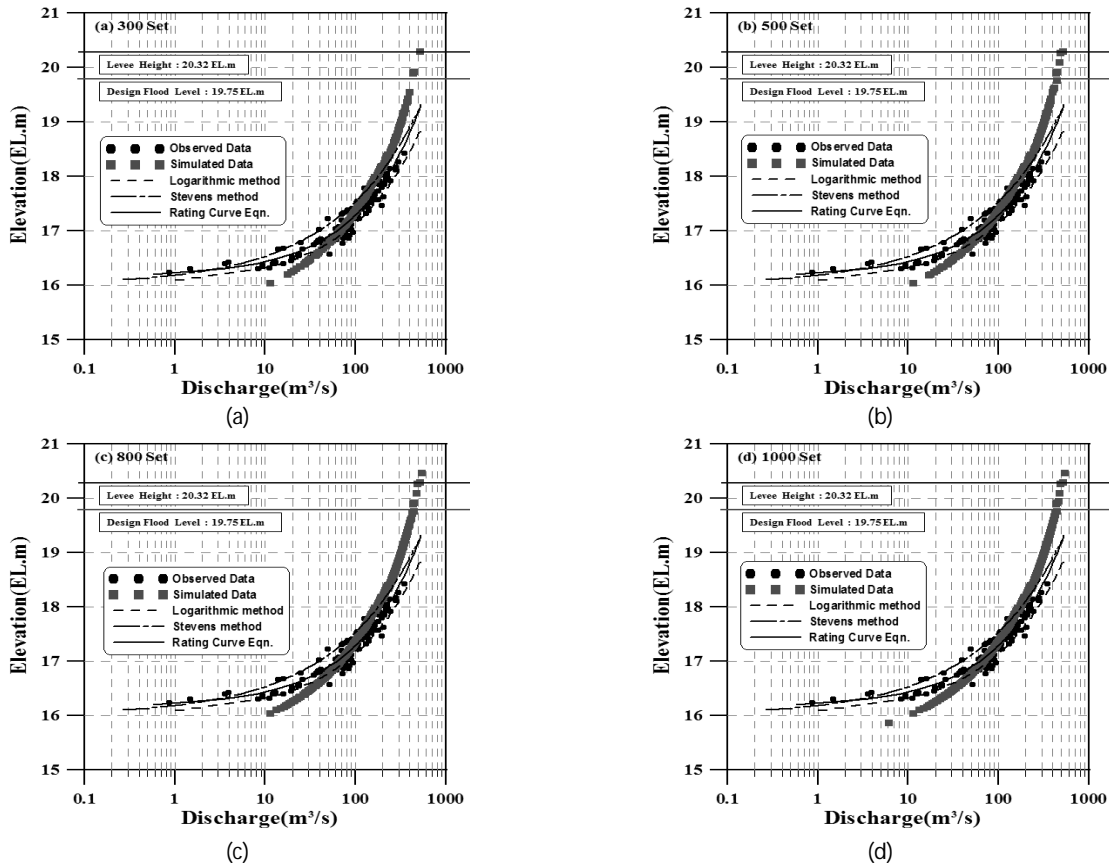


Fig. 10. Observed and simulated Rating Curves: (a) 300 set, (b) 500 set, (c) 800 set and (d) 1000 set

2010년 유량관측 자료를 바탕으로 수위-유량관계곡선을 작성하였으며, 이를 전대수지법 및 Stevens방법의 고수위 연장 결과와 MCS에 의한 모의발생 방법으로 도시하천 유역의 고수위 Rating Curve를 작성하여 비교하였다(Figure 10). 우이천 유역 장월교 지점의 실측 홍수량에 대한 홍수위 곡선식의 산정결과 실측 자료와 수위-유량곡선식과의 상관관계는 95.72%로 분석되었고, 표준편차는 20.68, R^2 는 0.9463로 분석되었다. 관측유량 중 최고수위는 2006년 7월 12일 호우사상에서 발생하였고, 이때의 유량은 $344.8\text{m}^3/\text{s}$, 최고수위는 EL.18.42m로 분석되었고, 이 후의 고수위 관측은 이루어지지 않았다. 또한, MCS를 통하여 모의 발생한 유량에 대한 홍수위 추적결과는 유출자료를 300set, 500set, 800set 및 1,000set 모의한 결과는 모두 비슷하게 나타났으며, 각각의 수위-유량곡선식은 다음 Table 8에 정리하였다. 모의 발생한 자료와 계산식과의 상관관계는 99.80~99.82 %로 높은 상관성을 보였으며, 표준편차(STDEV)는 5.74~6.03, R^2 는 0.9962~0.9965로 분석되었다. 결과를 바탕으로 분석해 볼 때, 기 개발된 관측자료의 수위-유량곡선식은 유량측정에 있어 관측오차와 더불어 고수위에 대한 불확실성을 내포하고

있다고 할 수 있다. 또한 전대수지법과 Stevens방법은 하천 유역 규모에 비하여 수위에 따른 홍수량이 너무 과대 산정되는 문제점이 있는 것으로 분석되었다. 하지만, 근회 개발된 MCS에 의한 모의발생 유량에 대한 고수위 Rating Curve 연장 방법은 유역의 매개변수 최적화된 강우-유출 모형과 홍수위 추적 모형을 연계하여 사용하여, 보다 신뢰성 있는 고수위 Rating Curve의 연장과 더불어 도시하천 유역의 고수위에 대한 불확실성을 감소시키는 효과가 있는 것으로 분석된다.

또한, 본 연구에서는 MCS를 통한 제방의 위험도를 산정하였으며, 고수위의 수위-유량관계곡선의 연장과 그에 따른 강우-수위-유량곡선을 개발하였다(Figure 11). 분석결과, 지속시간 1시간과 3시간에 대한 제방의 월류위험도는 8.0×10^{-3} 과 1.8×10^{-2} 이며, 제방 월류 가능강수량은 1시간 114.27mm, 3시간 180.45mm로 나타났다. 제방의 월류위험도가 가장 높은 지속시간은 임계지속시간인 2시간으로 분석되었으며, 월류위험도는 1.9×10^{-2} , 제방 월류 가능강수량은 143.33mm로 나타났다. 우이천과 같은 지방 2급 하천(중소하천)은 도달시간이 단시간(1~3시간)에 불과하며, 중소하천의

Table 8. Development of high water level Rating Curves

| Data | Rating Curve Equation | STDEV | R^2 |
|--------------------|--|---------|--------|
| Observations | $Q = 79.55(H - 16.12189)^{1.629327}$ ($16.24 \leq H \leq 18.42$) | 20.6754 | 0.9463 |
| MCS Simulated Data | 300 set $Q = 38.43(H - 15.59824)^{1.712739}$ ($16.04 \leq H \leq 20.29$) | 5.7374 | 0.9965 |
| | 500 set $Q = 40.23(H - 15.62808)^{1.685320}$ ($16.04 \leq H \leq 20.29$) | 6.0345 | 0.9962 |
| | 800 set $Q = 39.26(H - 15.61309)^{1.701751}$ ($16.04 \leq H \leq 20.46$) | 5.8337 | 0.9963 |
| | 1000 set $Q = 38.60(H - 15.60127)^{1.711516}$ ($15.87 \leq H \leq 20.46$) | 5.7807 | 0.9963 |

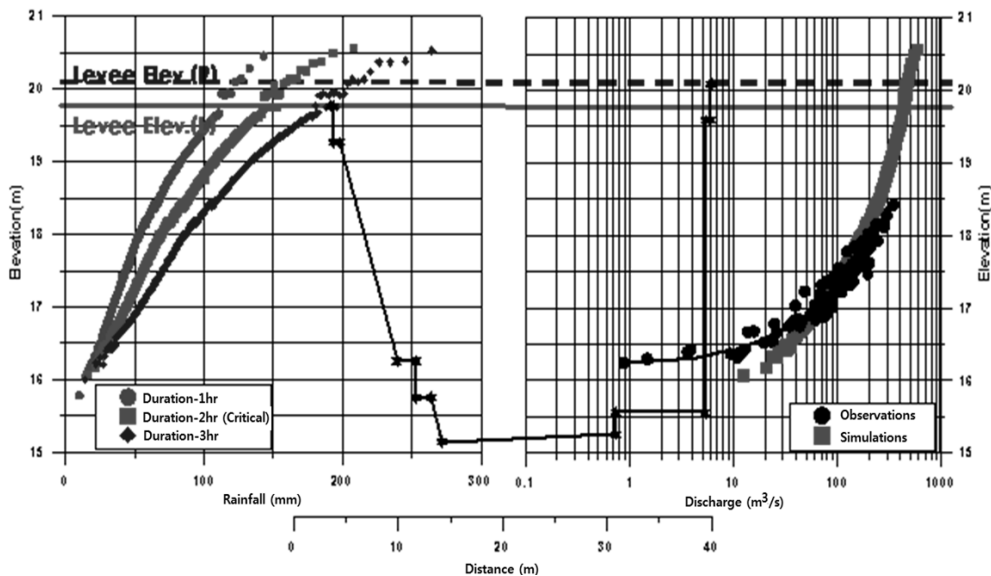


Fig. 11. Rainfall-Stage-Discharge curve developed by MCS technique considering the critical duration

경우 장기간에 걸친 강우 중에서도 1~3시간 정도의 침투강우에 의해서 침투유출이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우이천 유역의 도달시간을 감안하여 3시간 이하에 대해서 강우-수위 관계곡선을 도출하였으며, 기존의 수위-유량 관계곡선과 접목하여 강우-수위-유량 관계곡선을 개발하였다. 본 연구의 성과는 홍수에경보 시스템 구축 등 효율적인 하천방재계획 수립에 기여할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 도시하천 유역을 대상으로 MCS를 통한 적정분포형의 임계지속시간에 대하여 강우를 모의발생 시킴으로 최적화된 강우-유출 모형을 통한 유출모의를 실시하고, 이를 홍수위 추적모형과 연계하여 고수위 Rating Curve를 작성하는 방법을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 도시하천 유역의 최적화된 수리수문 모형의 입력 자료를 MCS 기법으로 모의 발생시켜 고수위 Rating Curve를 작성하는 방법을 제안하였으며, 보다 신뢰성 있는 수위-유량자료의 확보를 통한 고수위의 불확실성을 감소시켜 수위-유량 관계곡선을 연장하는 방법론을 제시하였다.
- (2) 대상 하천유역의 관측 유량자료를 바탕으로 개발된 수위-유량 관계곡선 식은 $Q = 79.55(H - 16.12189)^{1.629327}$, $[16.24 \leq H \leq 18.42]$ 이며, 관측자료와 곡선식과의 결정계수(R^2)는 0.9463으로 분석되었으며, 관측치의 표준오차(S_e)는 0.056으로, 무작위 불확실성($2S_{mr}$)은 평균 $\pm 1.43\%$, 최대 $\pm 4.27\%$ 로 분석되었다.
- (3) 기 개발된 관측자료의 수위-유량곡선식은 유량측정에 있어 관측오차와 더불어 고수위에 대한 불확실성을 내포하고 있음을 확인할 수 있으며, 전대수지법과 Stevens방법에 의한 고수위 연장은 도시하천 유역 규모에 비하여 수위에 따른 홍수량이 너무 과대 산정되는 문제점이 있는 것으로 분석되었다.
- (4) 모의된 수위 및 유량자료를 통하여 고수위에 대한 수위-유량곡선을 연장하고 이를 기존의 전대수지법과 Stevens방법의 결과와 비교분석하였다. 본 연구에서 개발된 MCS에 의한 고수위 Rating Curve연장 방법의 우수성을 입증하였으며, 고수위 연장과 유역의 임계지속시간에 따른 강우-수위-유량곡선의 개발을 통하여 도시하천의 홍수 예·경보 체계구축의 기반을 마련하고자 하였다.

본 연구의 성과는 MCS에 의한 강우의 모의발생과 유출분석의 신뢰도를 향상시키고 고수위에 대한 수문자료의 확충을 기반으로 홍수시 홍수피해 예측 및 위험시설물에 대한 대책 수립 등 효율적인

하천방재계획 수립에 기여할 것으로 사료된다. 그러나 향후 보다 신뢰성 있는 결과의 도출과 실무 활용을 위해서는 동일 유역의 관측된 자료를 바탕으로 지속적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원에 감사를 드립니다.

References

- Afshar, A., Rasekh, A. and Afshar, M. H. (2009). "Risk-based optimization of large flood-diversion systems using genetic algorithms." *Engineering Optimization*, Vol. 41, No. 3, pp. 259-273.
- Apel, H., Thieken, A. H. Merz, B. and Blöschl, G. (2006). "A probabilistic modelling system for assessing flood risks," *Natural Hazards*, Vol. 38, No. 1, pp. 79-100.
- Bailey, J. F. and Ray, H. A. (1966). "Definition of stage-discharge relation in natural channels by step-backwater analysis." *River Hydraulics*, Geological Survey Water-Supply Paper 1869-A, pp. 1-24.
- Clarke, R. T. (1999). "Uncertainty in the estimation of mean annual flood due to Rating Curve indefiniton." *Journal of Hydrology*, Vol. 222, No. 1-4, pp. 185-190.
- DeGagne, M. P. J., Douglas, G. G., Hudson, H. R. and Simonovic, S. P. (1996). "A decision support system for the analysis and use of stage-discharge rating curves." *Journal of Hydrology*, 184, 225-241.
- IOS (International Organization for Standardization) (1998). Determination of the stage-discharge relationship, *Measurement of Liquid Flow in Open Channels-Part 2: ISO Standard 1100-2*, pp. 133-153.
- Lambie, J. C. (1978). "Measurement of flowvelocity area methods. In: Hershey RW, (Ed.), *Hydrometry: Principles and Practices*." Wiley, Chichester, Chapter 1.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2007). *Streamflow Survey Report in 2006* (in Korean).
- Moon, Y. L., Cho, S. J. and Chun, S. Y. (2003). "Nonparametric Kernel Regression model for Rating curve." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 6, pp. 1025-1033 (in Korean).
- Moyeeda, R. A. and Clarke, R. T. (2005). "The use of Bayesian methods for fitting rating curves, with case studies." *Advances in Water Resources*, Vol. 28, No. 8, pp. 807-818.
- Kim, D. S., Yang, S. K. and Yu, K. K. (2012). "Analysis of loop-rating curve in a gravel and rock-bed mountain stream," *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 853-860 (in Korean).
- Kim, J. S. (2008). *Flood risk analysis and development of rainfall-stage-discharge curve using Monte Carlo simulation in urban stream*, Ph.D. Dissertation, University of Seoul (in Korean).

- Kim, J. S., Ahn, J. H., Oh, T. S. and Moon, Y. I. (2005). "Runoff analysis of urban watershed using MIKE SWMM Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 11, pp. 907-916 (in Korean).
- Kim, J. S., Kim, W., Kim, D. G. and Chi, C. Y. (2009). "Analysis on looped stage-discharge relation and its simulation using the numerical model." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 1B, pp. 1-9 (in Korean).
- 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 (in Korean).
- Kim T. B., Jang, J. Y., Shin, J. K. and Choi, S. W. (2011). "Prediction of stage discharge curve and lateral distribution of discharge in an arbitrary cross section channel with floodplain vegetation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 2, pp. 157-167 (in Korean).
- Lee, C. H. (2008). "An application of a new two-way regression model for rating curves." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 1, pp. 17-25 (in Korean).
- Lee, J. J. and Kwon, H. H. (2010). "A basic study of stage-discharge rating stabilization at the ssang-chi gauging station." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 30, No. 1B, pp. 81-87 (in Korean).
- Lee, J. J., Sol, J. S. and Kwak, C. J. (2009). "A study on the temporal variation of hydraulic characteristics by the stage-discharge relation curve." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 10, pp. 867-876 (in Korean).
- Rantz, S. E. (1982). *Measurement and computation of streamflow: Volume 2. Computation of Discharge*, Water-Supply Paper 2175, USGS, pp. 285-631.
- Seoul Metropolitan City (2010). *University-linked river management services: Measurement and Development of Rating Curves* (in Korean).
- Stevens, J. C. (1907). "A method of estimating stream discharge from a limited number of gaugings." *Engineering News*, Vol. 58, No. 3. pp. 52-53.
- Yoo, J. H. (1999). "Development and application of rating curves for the Keum River." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 19, No. II-6, pp. 665-675 (in Korean).
- Yoon, S. K., Chun, S. Y., Moon, Y. I. and Kim, J. S. (2008). "Analysis of hydraulic effects on piers and transverse overflow type structures in urban stream." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 197-212 (in Korean).
- Yoon, S. K. (2012). *Flood risk and vulnerability analysis in an urban stream by climate change*, Ph.D. Dissertation, University of Seoul (in Korean).