



Robust parameter set selection of unsteady flow model using Pareto optimums and minimax regret approach

Li, Li^a · Chung, Eun-Sung^{b*} · Jun, Kyung Soo^a

^aDepartment of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University

^bDepartment of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Paper number: 17-011

Received: 21 January 2017; Revised: 20 February 2017 / 28 February 2017; Accepted: 28 February 2017

Abstract

A robust parameter set (ROPS) selection framework for an unsteady flow model was developed by combining Pareto optimums obtained by outcomes of model calibration using multi-site observations with the minimax regret approach (MRA). The multi-site calibration problem which is a multi-objective problem was solved by using an aggregation approach which aggregates the weighted criteria related to different sites into one measure, and then performs a large number of individual optimization runs with different weight combinations to obtain Pareto solutions. Roughness parameter structure which can describe the variation of Manning's n with discharges and sub-reaches was proposed and the related coefficients were optimized as model parameters. By applying the MRA which is a decision criterion, the Pareto solutions were ranked based on the obtained regrets related to each Pareto solution, and the top-rated one due to the lowest aggregated regrets of both calibration and validation was determined as the only ROPS. It was found that the determination of variable roughness and the corresponding standardized RMSEs at the two gauging stations varies considerably depending on the combinations of weights on the two sites. This method can provide the robust parameter set for the multi-site calibration problems in hydrologic and hydraulic models.

Keywords: Minimax regret approach, Pareto optimum, Robust parameter set selection, Unsteady flow model, Variable roughness coefficient

파레토 최적화와 최소최대 후회도 방법을 이용한 부정류 계산모형의 안정적인 매개변수 추정

Li, Li^a · 정은성^{b*} · 전경수^a

^a성균관대학교 수자원대학원 수자원학과, ^b서울과학기술대학교 건설시스템공학과

요지

본 연구에서는 부정류 계산모형의 안정적인 매개변수를 선정하기 위하여, 다수 지점의 관측치를 고려한 모형보정의 결과로부터 얻은 파레토 최적화와 최소최대 후회도 방법(minimax regret approach, MRA)을 결합하는 방법을 제안하였다. 여러 지점의 관측치를 고려한 모형의 보정은 다목적 최적화 문제로서, 통합접근법을 적용하여 최적해를 구하였다. 통합접근법은 여러 지점에 대한 가중치를 결합하여 하나의 목적함수를 얻고, 여러 번의 개별 최적화를 수행함으로써 다수의 파레토 최적해들을 구하는 방법이다. 이때 유량에 따른 조도계수의 가변성을 나타내는 두 개의 매개변수로 구성된 관계식을 이용하여 두 구간에 대한 매개변수들을 모형의 추정 대상 매개변수로서 최적화하였다. 이후 각기 다른 홍수사상에 대해 보정과 검증을 수행하였으며 각각에 대한 평가지표의 후회도를 정량화하였고 이를 결합한 결합후회도를 산정하였다. 이를 기준으로 파레토 최적해들의 순위를 결정하였다. 계산결과 추정된 모형의 가변조도계수와 그로부터 얻은 두 개 지점에서의 표준화된 RMSE들은 두 지점에 대한 가중치의 조합에 따라 선택되는 매개변수 값에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시한 방법은 수문 및 수리모형의 다수의 관측지점의 자료를 이용한 매개변수 산정문제에 있어서 안정적인 해를 도출할 수 있다.

핵심용어: 최소최대 후회도방법, 파레토 최적해, 안정적 매개변수 선정, 부정류 계산모형, 가변 조도계수

*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-9017
E-mail: eschung@seoultech.ac.kr (E.-S. Chung)

1. 서론

홍수추적 모형의 적절성을 결정하는 중요한 요소 중 하나는 모형의 매개변수이다. Saint-Venant 방정식을 이용한 1차원 부정류 계산모형의 경우에는 운동량 방정식의 에너지 경사, 또는 마찰 경사 항에 포함되는 조도계수가 지배적인 매개변수가 된다. 특히 자연하천에 관한 부정류 계산모형의 조도계수는 하상재료의 특성에 따라 좌우되는 표피마찰뿐만 아니라 하상의 굴곡 등 단면형의 변화에 따른 형상손실 및 하천의 사행에 따른 손실 효과 등을 포괄적으로 내포하고 있기 때문에 모든 하천구간에 대하여 일반적으로 적용할 수 있는 조도계수의 값을 하나로 결정하기는 어렵다(Hwang and Jun, 1997). 또한 조도계수는 흐름조건, 즉 유량 또는 수위의 변화에 따른 가변성을 갖고 있기 때문에, 흐름이 시간 및 공간적으로 변화하는 부정류 계산모형에 있어서는 더욱 그러하다(Chow, 1959; Rouse, 1965; Coon, 1998). 조도계수의 산정에 관하여 많은 연구가 진행되었지만(e.g., Khatibi et al., 1997; Atanov et al., 1999; Ramesh et al., 2000), 대부분의 연구들은 조도계수가 시간적 혹은 시공간적으로 일정한 값을 갖는 것으로 가정하였다.

모형의 매개변수는 일반적으로 수동(manual) 혹은 자동(automatic) 보정의 방법에 의해 산정된다. 최근에 많은 복잡한 자동보정방법들이 적용되고 있는 수문모형들과 달리, 수리학적 모형에서는 관측수위 혹은 유량을 보정하기 위하여 수동보정방법들이 흔히 사용되고 있다(Dung et al., 2011). 대부분의 수리학적 모형의 경우 우수한 연산능력을 가진 컴퓨터로도 연산시간이 오래 걸려서 자동보정을 다룬 연구는 극히 드물다. 부정류 계산모형의 보정과 검증을 위하여 관측치가 사용된다. 이때 복수의 지점의 관측자료를 이용하여 매개변수를 추정할 수 있는데 이때 다목적함수의 최적화 방법이 사용된다(Horritt, 2000; Seibert et al., 2000; Hunter et al., 2005). 다목적함수를 이용한 수문모형의 보정은 근래 빈번하게 사용되고 있으나(Khu and Madsen, 2005), 수리학적 모형에서의 적용은 많지 않다. 단일 목적함수를 적용한 보정은 한 개 지점의 관측치로부터 하나의 최적 매개변수를 산정할 수 있지만 다목적함수를 적용한 보정은 파레토 최적해의 집합을 얻을 수 있다. 만약 세 개 이상의 목적함수가 보정에 포함되면, 파레토 최적해의 개수가 기하급수적으로 늘어나게 된다. 따라서 다목적 함수를 이용한 최적화 문제는 다수의 파레토 최적해들 중에서 하나 또는 소수의 우수한 해를 결정해야 하는 의사결정 문제로 변화하게 된다(Khu and Madsen, 2005).

따라서 본 연구는 두 지점의 관측수위를 고려한 다목적 함수

를 통해 도출한 파레토 최적해 집합과 최소최대 후회도 접근법(minimax regret approach, MRA)을 결합하여 부정류 계산모형을 위한 안정적인 매개변수 산정방법(RObust Parameter Selection, ROPS)을 개발하는 것이다. 다목적 함수에 사용되는 각각의 지점에 대한 가중치는 소수점 이하 첫째 자리까지 고려한 11개의 조합을 이용하여 최적화를 수행하였다. 이렇게 도출된 11개의 최적해는 파레토 최적해 집합에 포함되는 데 이 중 적절한 하나의 매개변수를 추정하기 위해 다수의 평가지표를 사용하여 검증과정을 수행하였다. 이때 최종 매개변수를 추정하기 위해 MRA 방법을 이용하여 종합적인 순위를 도출하였다. MRA는 완전 불확실한 의사결정 상황에서 유용한 방법으로 알려져 있는데 가장 나쁜 순위가 가장 좋은 것을 선택할 수 있게 하는 보수적인 의사결정기법이다(Kim and Chung, 2014; Kim et al., 2015a; Kim et al., 2015b). 지금까지 수리학적 모형은 물론 수문모형에서도 복수 지점의 관측자료를 활용하여 안정적인 매개변수 값을 도출하기 위해 MRA를 적용한 연구는 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 조도계수의 공간적 변화를 고려하기 위하여 전체 대상 하천구간을 두 개의 구간으로 구분하였고, 조도계수가 유량에 따른 변화를 고려하기 위하여 멱함수를 이용하였다. 따라서 구간별 유량-조도계수 관계식에 포함된 계수가 최적화 대상 매개변수가 된다.

2. 계산모형 및 모형의 적용

한강분류에 대한 부정류 계산모형으로서 폐합형 수계모형을 적용하였다. 이는 폐합형 수계모형이 지천 유입지점, 월류형 수공구조물 등의 내부 경계를 간편하게 처리할 수 있다는 장점이 있기도 하지만, 무엇보다도 잠실 및 신곡수중보가 고정보와 가동보로 이루어져 이들 지점에서는 하도형 및 월류형 흐름이 동시에 발생할 수 있다는 한강 분류의 특수한 상황 때문이다(Hwang and Jun, 1997).

2.1 지배방정식 및 수치해법

폐합형 수계에 관한 계산모형의 지배 방정식은 수로 지배방정식과 절점 지배방정식들로 구성된다. 수로 지배방정식은 하도형 흐름에 관한 것과 월류형 흐름에 관한 것으로 구분되는데, 하도형 흐름에 관한 수로 지배방정식은 Eqs. (1) and (2)와 같은 연속방정식 및 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{QQ}{K^2} = 0 \quad (2)$$

여기서, $Q=Q(x, t)$ 및 $y=y(x, t)$ 는 각각 유량과 수위를 나타내며, A 와 K 는 흐름단면적과 통수능으로서 각각 y 의 함수이다. α 는 운동량 보정계수, g 는 중력가속도이며, x 와 t 는 각각 공간 및 시간좌표를 나타낸다. 통수능 K 는 Manning의 조도계수 (n)를 사용하면 다음의 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (3)$$

여기서 R 는 동수반경이며, n 은 Manning의 조도계수이다. 월류형 흐름에 관한 수로 지배방정식은 다음과 같다.

$$Q_u = Q_d \quad (4)$$

$$Q_u = \mu b_w \sqrt{2g} \sqrt{y_u - y_d} (y_d - y_w) \quad (y_d - y_w \geq \frac{2}{3}(y_u - y_w)) \quad (5a)$$

$$= \mu b_w \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2g}{3}} (y_u - y_d)^{3/2} \quad (y_d - y_w < \frac{2}{3}(y_u - y_w)) \quad (5b)$$

여기서 μ 는 월류유량계수, y_w 는 월류부의 바닥표고, b_w 는 월류부의 바닥폭이다. y_u 및 y_d 는 각각 월류구조물 상류 및 하류 측 수위를, Q_u 및 Q_d 는 월류유량을 나타낸다.

절점 지배방정식은 다음의 연속방정식 Eq. (6)과 등수위 조건식 Eq. (7)로 구성된다.

$$\sum_{k=1}^{L_j} Q_{j,k} + Q_{ext}(j, t) = 0, \quad j = 1, \dots, J \quad (6)$$

$$y_{j,k} = y_j, \quad k = 1, \dots, L_j; \quad j = 1, \dots, J \quad (7)$$

여기서 J 는 절점의 총수, L_j 는 절점 j 에 연결된 수로의 총수이다. $Q_{j,k}$ 는 수로 k 로부터의 유입량 또는 수로 k 로의 유출량이며 $Q_{ext}(j, t)$ 는 시각 t 에서의 기지의 외부 유출입량으로서 지천 유입량, 상류단 경계에서의 유입량, 하류단 경계에서의 유출량 등이 여기에 포함된다. $Q_{j,k}$ 와 $Q_{ext}(j, t)$ 는 양의 값일 경

우 절점에서의 유입량을, 음의 값일 경우 유출량을 각각 의미한다. $y_{j,k}$ 는 절점 j 와 k 를 연결하는 수로의 절점 j 측 끝단 계산점에서의 수위를 나타낸다.

하도형 흐름에 관한 수로 지배방정식을 한 시간 시간증분 (time step)에 대한 Preissmann의 4점 음해법(Liggett and Cunge, 1975; Cunge et al., 1980)을 적용하여 차분화하면 수로상의 각 계산점에서의 수위 및 유량과 절점 수위에 관한 비선형 연립방정식이 구성되며, 그 해는 Newton-Raphson 방법을 적용하여 구한다. Newton-Raphson 방법을 적용하여 구성되는 수위 및 유량 보정치에 관한 선형 연립방정식의 해법으로는 수로에 대한 forward sweep으로 구성되는 폐합형 double-sweep 알고리즘을 사용한다. 월류흐름의 처리기법에 관한 상세한 내용에 관해서는 Jun (1996)에, 전반적인 계산모형에 관한 상세한 내용은 Holly et al. (1990)에 기술되어 있다.

2.2 가변 매개변수 모형

Eq. (3)의 조도계수 n 은 가변 매개변수로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$n = n[x, Q(x, t)] \quad (8)$$

즉, 각 계산점에서의 조도계수는 그 계산점의 위치 및 유량에 따라 결정되며, 유량은 시간에 따라 변하므로 조도계수는 일반적으로 시간 및 공간적으로 변화하게 된다. 유량과 조도계수의 관계식으로서 본 연구에서는 멱함수를 적용하였으며, 조도계수의 공간적 변화에 대해서는 소구간 별로 다른 멱함수를 갖는 것으로 하였다. Newton-Raphson 보정량방정식의 계수값 산정 시, 조도계수는 이전 반복계산 단계에서 구한 유량에 따라 그에 해당하는 값을 유량-조도계수의 관계식으로부터 구하여 부여하도록 하였다.

본 연구에서 조도계수는 다음의 Eq. (9)와 같이 주어지며, 따라서 α_i 와 β_i 가 추정 대상 매개변수가 된다(Kim and Jun, 2004). 한강 본류 구간을 왕숙천 유입지점 상류 및 하류의 2개의 구간으로 나누어 각 구간마다 서로 다른 멱함수를 갖도록 하여 총 4개의 매개변수($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$)를 갖는 모형을 구성하였으며 그에 대한 추정을 수행하였다. 왕숙천 유입지점을 기준으로 하도구간을 구분한 것은 하천단면 자료의 검토 결과 왕숙천 유입지점의 상류 구간이 하상변동과 횡단면의 변화가 심하여 하류구간과는 상당히 다른 하도특성을 나타내는 것으로 판단되었기 때문이다(Fig. 3).

$$n_i = \alpha_i Q^{\beta_i}, \quad i = 1, \dots, I \quad (9)$$

여기서 α_i 와 β_i 는 i 번째 구간에서의 멱함수의 매개변수를 나타내고, I 는 구간의 총 개수로서 본 연구에서의 값은 2이다.

2.3 대상하천 구간 및 모형의 구성

본 연구에서는 팔당댐부터 가장 하류측에 위치한 수위 관측지점인 전류까지의 69.431 km 구간을 대상으로 하였다 (Fig. 1). 모형의 구성을 나타내는 모식도는 Fig. 2와 같다. 모형의 상류단 및 하류단인 팔당댐 및 전류지점과 왕숙천, 탄천, 중랑천 및 안양천 등 4개 지천의 유입지점, 잠실 및 신곡 수중보의 직상류 및 직하류에 각각 절점이 위치하도록 하였다. 수중보 직상류 및 직하류의 절점들은 두 개의 수로로 연결되며, 그 밖의 절점들은 인접 절점들과 각각 한 개의 수로로 연결된다. 따라서 전체 모형은 총 10개의 절점과 11개의 수로로 구성된다. 계산점간 평균 간격은 약 500 m이다.

앞에서도 언급한 바와 같이 잠실 수중보와 신곡 수중보는 고정보와 가동보의 복합형으로 되어 있다. 홍수 소통 및 보의 구조적 안전의 문제 때문에 가동보는 홍수시에는 완전 개방된 상태로 운영되어 오고 있다. 따라서 홍수시 흐름의 경우 고정보 측에서는 월류형 흐름이, 가동보 측에서는 하도형 흐름이 각각 발생하게 된다. 따라서 이들을 분리하여 모의하기 위하여 두 개의 수로로 연결되는 폐합형 수계 모형을 구성하였다 (Fig. 2).



Fig. 1. Study area: Han River

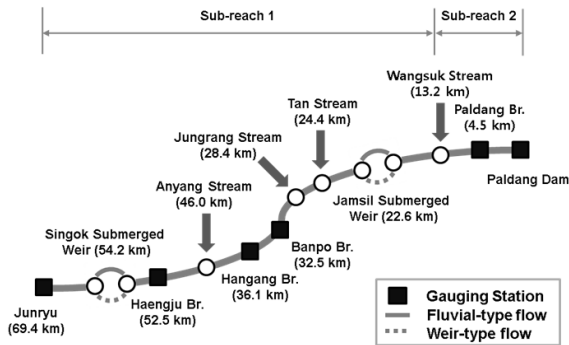


Fig. 2. Schematic representation of the modeled river reach

2.4 홍수사상 자료

2004년 7월 및 2008년 7월 홍수사상 자료를 모형의 보정 및 검증에 각각 사용하였다 (Table 1). 사용 자료로는 상류단 경계조건인 팔당댐 방류량, 하류단 경계조건인 전류 관측소의 관측수위, 유입지천의 관측수위 및 수위-유량 관계식으로 부터 산정된 지천유입량, 매개변수의 추정을 위한 팔당대교와 반포대교의 관측수위가 포함된다.

하천수로내 각 계산점에서의 횡단면 자료는 한강 하천정비기본계획(2002)의 하천측량 자료를 사용하였다. Fig. 3은 팔당댐에서 전류구간의 최심 하상고를 나타낸 것인데 팔당댐에서 왕숙천 유입지점 상류구간(13.2 km)의 하상경사가 하류구간에 비하여 큰 것을 알 수 있다.

3. 매개변수의 추정

3.1 ROPS의 산정절차

여러 지점의 관측자료를 고려한 다목적함수의 최적화를 위하여 각 지점에 대한 평가지표를 하나의 다목적함수로 결합하였다. 다목적 함수의 적용에 있어서 가장 어려운 점은 각각의 목적함수에 합리적인 가중치를 부여해야 한다는 것이다 (Dung et al., 2011). 여러 지점에 부여한 가중치의 값은 안정적

Table 1. Descriptions of two flood events used in this study

Flood Event	Period (mm/dd/yyyy hh:mm)	Peak time (mm/dd/yyyy hh:mm)	Peak runoff (m ³ /s)
1	07/24/2008 10:00 to 07/27/2008 04:00	07/25/2008 00:10	16,146
2	07/12/2004 10:00 to 07/15/2004 00:00	07/13/2008 10:00	9,909

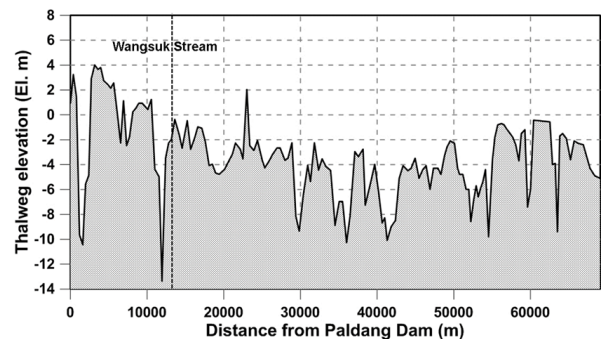


Fig. 3. Thalweg elevation for the study river

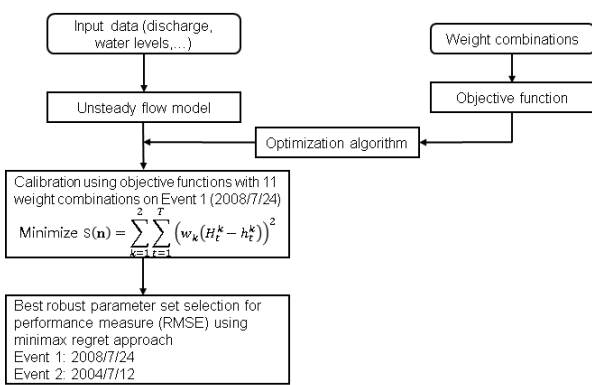


Fig. 4. Flowchart for the proposed methodology

인 매개변수 값의 산정에 직접적인 영향을 주기 때문에 신중하게 결정하여야 한다. Shinma and Reis (2014)는 동일한 가중치를 주는 방법은 대부분의 경우 간단하고 합리적일 수 있지만, 복수의 강우사상이나 복수의 관측지점을 고려하는 최적화 문제에 대하여 적합하지 않음을 제시하였다. 본 연구에서는 소수점 이하 첫째 자리까지 고려한 모든 가중치들의 조합을 이용하였으며 MRA를 사용하여 안정적인 매개변수를 산정하였다. Fig. 4는 본 연구에서 제안한 방법의 흐름도이다. 이 방법의 주요절차는 다음과 같다.

- 1) 부정류 계산모형에 대해 두 지점의 관측자료를 고려한 매개변수 최적화 문제를 구성한다.
- 2) 매개변수의 추정을 위하여 두 개 지점에 대한 소수점 이하 첫째 자리까지 고려한 가중치들의 모든 조합에 대한 목적함수들을 최적화한다.
- 3) 모형의 보정과 검증에 사용된 두 개 사상에 대하여 얻은 파레토 최적해들의 평가지표에 근거하여 MRA를 위한 후회도를 계산한다. 평가지표로는 매시각 계산순위와 관측순위간의 RMSE를 채용한다. 각각의 홍수사상에 대한 순위값의 크기범위가 상이하므로, MRA를 적용하기 이전에 Eq. (10)과 같이 평가지표들을 표준화한다.

$$P_i = \frac{p_i - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \quad (10)$$

여기서, p_i 는 평가지표인 RMSE를 나타내고, p_{\max} 와 p_{\min} 는 각각 p_i 의 최대치 및 최소치를 나타내며, P_i 는 표준화된 RMSE를 나타낸다.

- 4) 보정과 검증으로부터 얻은 후회도를 결합한 결합후회도를 계산하고 가장 안정적인 매개변수를 결정한다.

3.2 복수 지점의 관측치에 대한 다목적함수

복수 지점의 관측치에 대한 다목적함수는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min F_1(\theta), F_2(\theta), \dots, F_n(\theta) \quad \theta \in \Theta \quad (11)$$

여기서 $F_1(\theta), F_2(\theta), \dots, F_n(\theta)$ 는 n 개의 서로 다른 목적함수를 나타내며, 매개변수 벡터 θ 에 대하여 이러한 목적함수들을 동시에 최소화하여야 한다. Θ 는 가능한 모든 매개변수 벡터의 집합을 나타낸다.

매개변수 보정의 목적은 두 개 지점에서의 계산순위와 관측순위 사이의 가중 간차의 제곱의 합을 최소화하는 최적 매개변수 벡터 θ 를 얻는 것이며, Eq. (11)은 다음의 Eq. (12)과 같이 구체적으로 나타낼 수 있다.

$$\min S(\theta) = \sum_{k=1}^2 \sum_{t=1}^T (w_k(H_t^k - h_t^k))^2 \quad (12)$$

여기서 H_t^k 와 h_t^k 은 각각 관측소 k 에서 시간 t 에서의 관측순위와 계산순위를 나타내고, $k=1$ 과 2 는 각각 팔당대교와 반포대교를 나타낸다. θ 는 두 개 목적함수의 4개 계수를 포함한 매개변수 벡터를, w_k 는 k 번째 지점의 가중치($w_1 + w_2 = 1$)를 나타낸다. 본 연구에서는 총 11개의 가중치 조합들을(1.0과 0.0; 0.9와 0.1, ..., 0.0과 1.0) 고려하였다.

최적화 모형매개변수를 결정하기 위하여 Gauss-Marquardt-Levenberg 기법을 사용하였다. 이 방법은 Gauss-Newton 방법과 steepest descent 방법들의 장점을 결합하여 최적해를 보다 빠르게 도출할 수 있다(Liu et al., 2005).

3.3 Minimax regret approach (MRA)

가능한 결과가 명확하지 않고 효용함수가 확실하지 않은 경우, MRA가 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있다고 알려져 있다(Loulou and Kanudia, 1999; Chung and Kim, 2014). MRA는 완전히 불확실한 상황에서(under complete uncertainty) 각 대안들의 평가지표를 고려함으로써 최대 후회도를 최소화할 수 있는 대안을 선택할 수 있는 의사결정 기준이다(Stevenson and Ozgur, 2007). 후회도 이론은 사람들이 어떠한 의사결정을 함에 있어서 불확실한 상황이 해소되었을 경우의 후회 가능성을 예상하고, 이러한 예상을 의사결정에 포함하는 것을 가리킨다. 후회도 이론은 Loomes and Sugden (1982)에 의해 개발되었으며, 여러 분야의 연구들에 적용되었다(e.g. Loulou

and Kanudia, 1999; Chung and Kim, 2014).

본 연구에서 후회도 $R(\theta)$ 는 매개변수 벡터 θ 에 대한 평가지표 값과 평가지표 최소화치의 차를 나타내며 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$R(\theta) = P(\theta) - \min P(\theta), \theta \in \Theta$$

여기서, $P(\theta)$ 는 매개변수 벡터 θ 에 대한 평가지표 값을 나타내며, 본 연구에서는 표준화된 RMSE를 나타낸다.

최소최대 후회도(MMR)는 다음의 Eq. (14)와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 만족하는 매개변수 벡터를 구하게 된다.

$$MMR = \min \{ \max R(\theta) \} \tag{14}$$

4. 결과 및 토론

4.1 파레토 최적해의 도출

본 연구에서는 11개의 가중치 조합에 대하여 두 지점에 대한 목적함수를 최적화 하였다. 왕숙천 유입지점 상류 및 하류 구간에 대하여 조도계수와 유량의 관계식을 나타내는 두 개의 멱함수에 포함된 4개의 계수를 산정하였으며, Table 2는 각각의 가중치 조합에 대하여 산정된 계수 값들을 정리한 것이다. Fig. 5는 각각의 구간에 대하여 11개의 가중치 조합별로 결정된 유량-조도계수 관계식들을 나타낸 것이다. 이러한 결과들은 대부분의 경우, 두 구간에서 모두 유량이 커짐에 따라 조도계수가 감소함을 보이고 있다. 또한 유량이 2,000 m³/s보다 클 경우, 상류의 조도계수가 하류보다 큼을 볼 수 있다.

Table 2. Estimated parameters using different combinations of weights

No.	Combinations of weights		α_1	β_1	α_2	β_1
	w_1	w_2				
1	0.0	1.0	0.0551	-0.0842	0.1187	-0.1858
2	0.1	0.9	0.0518	-0.0772	0.1089	-0.1761
3	0.2	0.8	0.0523	-0.0775	0.0930	-0.1587
4	0.3	0.7	0.0507	-0.0745	0.0666	-0.1224
5	0.4	0.6	0.0516	-0.0752	0.0451	-0.0792
6	0.5	0.5	0.0493	-0.0699	0.0330	-0.0448
7	0.6	0.4	0.0565	-0.0846	0.0286	-0.0293
8	0.7	0.3	0.0998	-0.1463	0.0221	-0.0008
9	0.8	0.2	0.1065	-0.1530	0.0213	0.0029
10	0.9	0.1	0.1250	-0.1703	0.0176	0.0238
11	1.0	0.0	0.1366	-0.1796	0.0170	0.0276

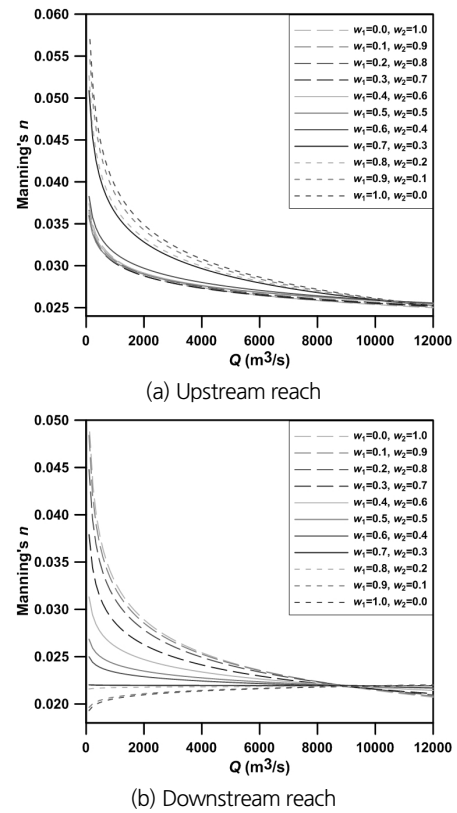


Fig. 5. Estimated relationships between Manning's n and discharge

Fig. 6은 각각의 가중치 조합에 대하여 추정된 매개변수를 적용하여 계산된 수위 수문곡선을 관측 수문곡선과 함께 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 각각의 가중치 조합별로 산정된 RMSE를 나타낸 것으로서, 모든 경우에 대하여 반포대교 지점에 대한 RMSE가 팔당대교의 경우보다 크게 나타나고 있다. 각 경

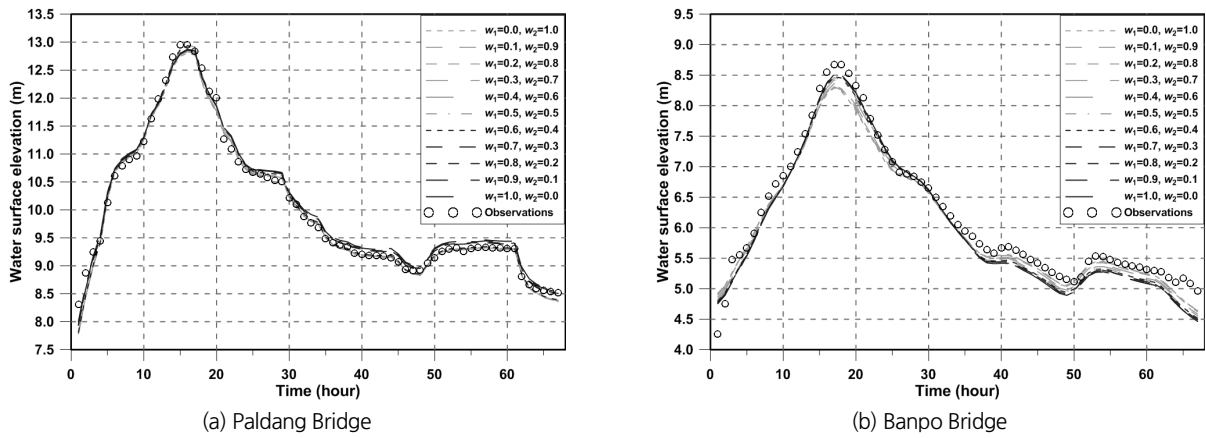


Fig. 6. Calibrated hydrographs (lines) using 11 optimized parameter sets

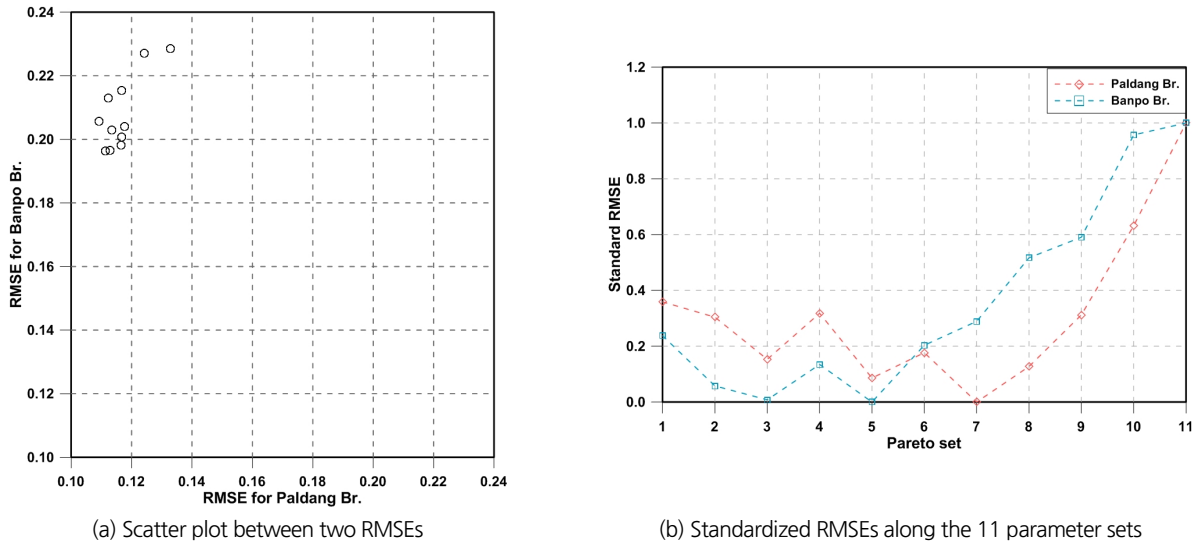


Fig. 7. RMSEs for two sites with 11 parameter sets

Table 3. Robust ranking based on the minimax regret approach (MRA) for the calibration

Combinations of weights		Calibration	
w_1	w_2	Regret	Rank
0.4	0.6	0.086	1
0.2	0.8	0.153	2
0.5	0.5	0.204	3
0.6	0.4	0.289	4
0.1	0.9	0.304	5
0.3	0.7	0.318	6
0.0	1.0	0.359	7
0.7	0.3	0.517	8
0.8	0.2	0.591	9
0.9	0.1	0.957	10
1.0	0.0	1.000	11

우에 대하여 산정된 표준화된 RMSE는 Fig. 7(b)에 나타내었다. Table 3은 모형의 보정에서 얻은 가중치 조합의 순위를 보여주고 있다. MRA를 적용하여 얻은 첫 번째 홍수사상에 대한 가장 우수한 가중치 조합은 후회도가 0.086인 (0.4, 0.6)이다.

4.2 보정결과 및 후회도 산정

모형의 검증절차로 모형의 보정에서 추정된 가중치 조합별 역함수의 매개변수를 두 번째 홍수사상에 적용하여 후회도를 산정하고 그로부터 얻은 가장 우수한 가중치 조합의 변동을 검토하였다. Fig. 8은 관측치(검은색 원)와 모형의 검증에서 계산된 수위의 전체적인 차이가 모형의 보정결과보다 큼을 보여주고 있다. 모형의 보정결과와 마찬가지로 모형의 검증 결과에서는 반포대교의 RMSE가 팔당대교의 RMSE보다 확

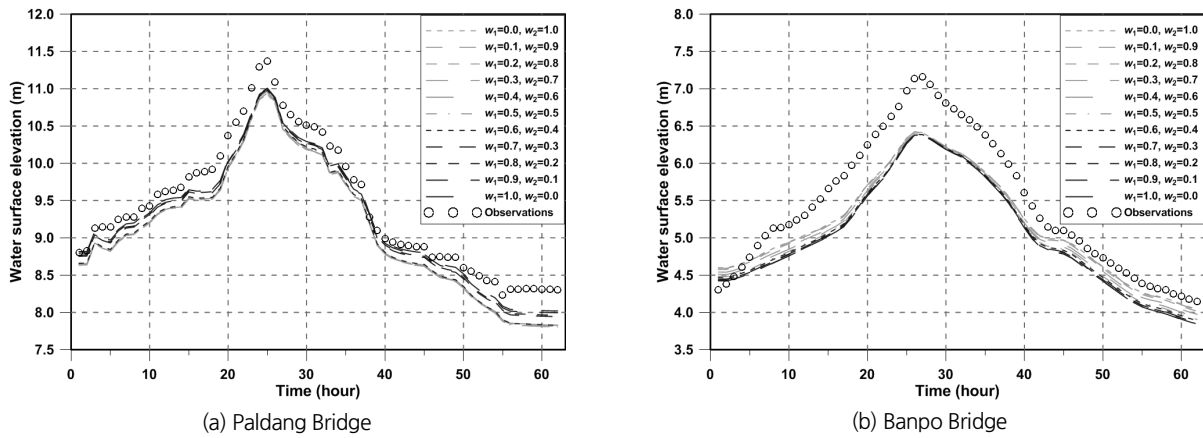
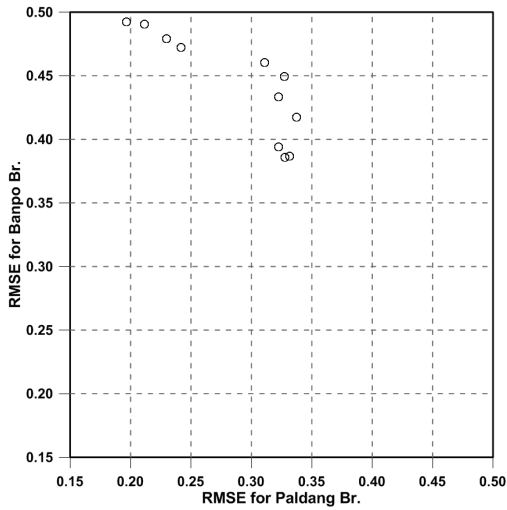
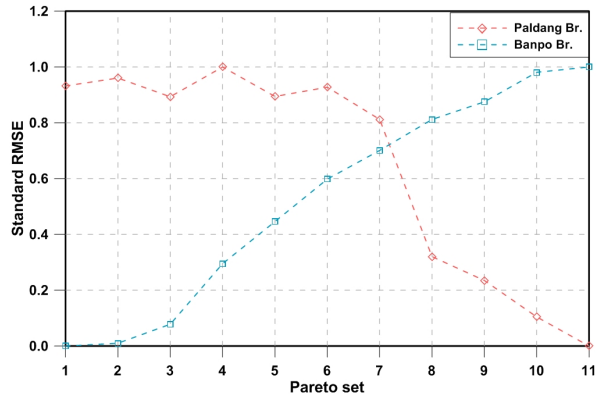


Fig. 8. Validated hydrographs (lines) with 11 optimized parameter sets



(a) Scatter plot between two RMSEs



(b) Standardized RMSEs along the 11 parameter sets

Fig. 9. RMSEs for two sites with 11 parameter sets

Table 4. Robust ranking based on the MRA for the validation

Combinations of weights		Validation	
w_1	w_2	Regret	Rank
0.7	0.3	0.812	1
0.6	0.4	0.812	2
0.8	0.2	0.875	3
0.2	0.8	0.893	4
0.4	0.6	0.894	5
0.5	0.5	0.928	6
0.0	1.0	0.932	7
0.1	0.9	0.960	8
0.9	0.1	0.981	9
0.3	0.7	1.000	10
1.0	0.0	1.000	11

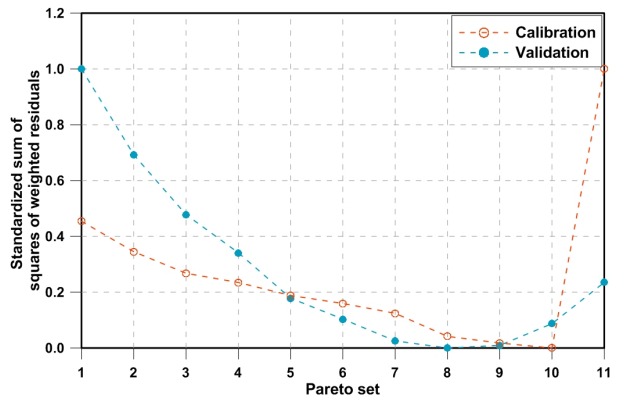


Fig. 10. Standardized sum of squares of weighted residuals from calibration and validation

실히 큼을 알 수 있으며, 두 개 지점의 표준화한 RMSE는 두 개 지점에 대한 가중치의 조합에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다(Fig. 9). Table 4는 모형의 검증에서 얻은 가중치 조합의 순위를 보여주고 있다. MRA를 적용하여 얻은 두 번째 홍수 사상에 대한 가장 우수한 가중치 조합은 제일 작은 후회도 0.812를 갖는 (0.7, 0.3)이다.

Fig. 10은 두 지점에 대한 모형의 보정과 검증에서 얻은 잔차 합계의 표준화 값을 보여주고 있다.

4.3 최소최대 후회도를 이용한 ROPS의 결정

본 연구에서는 MRA를 통한 ROPS를 위하여 모형의 보정과 검증결과 모두 사용되었다. Table 3과 4에서 볼 수 있듯이, 모형의 보정에서 얻은 대부분의 가중치 조합과 그들의 순위는 모형의 검증에서 얻은 결과와 다름을 알 수 있었다. Table 5는 모형의 검증과 보정에서 얻은 후회도를 평균하여 복합지수로 나타낼 경우의 매개변수의 순위를 보여주고 있다. 표에서 볼 수 있듯이, 두 개 지점에 대한 가중치가 (0.4, 0.6)일 경우에 선정된 매개변수가 모형의 보정결과에서 1위를 차지했으며, 최종 순위에서도 1위임을 알 수 있다. 또한, 두 개 지점에 대한 가중치가 (0.7, 0.3)일 경우에 선정된 매개변수는 모형의 검증에서 1위였지만, 최종 순위에서 8위를 차지하였다.

5. 결론

본 연구에서는 두 지점에서의 관측자료를 이용하여 부정류 계산모형의 매개변수 값을 결정함에 있어서 MRA를 적용

하여 다목적 최적함수문제의 해를 구함으로써 안정적인 매개변수집합을 추정하는 방법을 개발하였다. 이는 두 개 지점에 대한 11개의 가중치 조합들을 고려한 모형의 매개변수 최적화로부터 얻었다. 모형의 보정과 검증을 위하여 두 개의 서로 다른 홍수사상을 선택하였다. MRA를 적용하여 11개의 후보에서 최적화한 매개변수 벡터를 결정하였다.

본 연구는 모형의 보정과 검증으로부터 얻은 후회도를 가중 합산하여 안정적인 매개변수 값들을 산정할 경우, 상대적으로 작은 가중치를 첫 번째 지점에 부여하여야 하며, 이러한 결과는 두 지점에 대한 매개변수 조합 순위의 상위에서 볼 수 있었다. 최적 매개변수 값은 두 번째 지점의 가중치가 큰 가중치 조합 (0.4, 0.6)로부터 얻을 수 있었다. 최적화한 모형의 매개변수와 가중 잔차의 제곱의 합계는 일반적으로 두 지점에 대한 가중치 조합에 따라 달라짐을 볼 수 있었다. 본 연구는 MRA를 적용한 매개변수 산정은 복수의 지점의 관측자료를 고려할 경우 얻을 수 있는 최적해 중에서 다른 홍수사상에 대해서도 가장 안정적인 결과를 도출할 수 있는 매개변수를 결정할 수 있음을 보여주었다. 그러므로 자동보정 방법의 사용자들은 다목적 함수를 통해 도출한 파레토 최적해 중에서 우수한 해를 선택해야 하는 문제를 해결할 수 있다.

앞으로의 연구에서는 더 많은 홍수사상들을 고려하거나 다수 지점의 관측자료를 이용하여 가장 안정적인 매개변수를 산정하는 방법을 체계화하여 자동시스템을 구축하는 방법을 제안할 수 있다. 또한 다목적 함수문제의 최적해를 결정함에 있어서 본 연구에서 적용한 방법 외에 다른 의사결정방법들을 적용하는 연구를 수행할 수 있다.

Table 5. Robust ranking based on the aggregated regrets obtained from the calibration and validation

Combinations of weights		Calibration		Validation		Aggregated regret	Final rank
w_1	w_2	Regret	Rank	Regret	Rank		
0.4	0.6	0.086	1	0.894	5	0.490	1
0.2	0.8	0.153	2	0.893	4	0.523	2
0.6	0.4	0.289	4	0.812	2	0.551	3
0.5	0.5	0.204	3	0.928	6	0.566	4
0.1	0.9	0.304	5	0.960	8	0.632	5
0.0	1.0	0.359	7	0.932	7	0.646	6
0.3	0.7	0.318	6	1.000	10	0.659	7
0.7	0.3	0.517	8	0.812	1	0.664	8
0.8	0.2	0.591	9	0.875	3	0.733	9
0.9	0.1	0.957	10	0.981	9	0.969	10
1.0	0.0	1.000	11	1.000	11	1.000	11

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 일반연구자지원사업(NRF-2014 R1A1A2056153) 및 국토교통부 물관리 연구사업(13AW MP-B066744-01)의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 사의를 표한다.

References

- Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (2002). "Han River Master Plan Report" Technical Report.
- Atanov, G. A., Evseeva, E. G., and Meselhe E. A. (1999). "Estimation of roughness profile in trapezoidal open channel." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 125, No. 3, pp. 309-312.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Chung, E. S., and Kim, Y. (2014). "Development of fuzzy multi-criteria approach to prioritize locations of treated wastewater use considering climate change scenarios." *J. Environ. Manag.*, Vol. 146, pp. 505-516.
- Coon, W. F. (1998). "Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks." *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*, Vol. 2441, pp. 133.
- Cunge, J. A., Holly, F. M., and Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman.
- Dung, N. V., Merz, B., Bardossy, A., Thang, T. D., and Apel, H. (2011). "Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 15, pp. 1339-1354.
- Holly, F. M., Yang, J. C., Schwarz, P., Schaefer, J., Hsu, S. H., and Einhellig, R. (1990). "Numerical simulation of unsteady water and sediment movement in multiply connected networks of mobile-bed Channels." *IIHR Report*, No. 343, Iowa Inst. of Hydr. Res., Iowa.
- Horritt, M. S. (2000). "Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite imagery." *Water Resour. Res.*, Vol. 36, No. 11, 3279-3291.
- Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., De Roo, A. P. J., and Werner, M. G. F. (2005). "Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework." *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*, Vol. 9, No. 4, pp. 412-430.
- Hwang, E. J., and Jun, K. S. (1997). "Unsteady flow model for the Main Reach of the Han River: Calibration." *Korea Water Resources Association*, Vol. 30, No. 5, pp. 549-559.
- Jun, K. S. (1996). "A study on unsteady flow model including weir flow simulation." *J. Korea Water Resources Association*, Vol. 29, No. 2, pp. 153-165.
- Khatibi, R. H., Williams, J. J. R., and Wormleaton, P. R. (1997). Identification problem of open-channel friction parameter. *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 123, No. 12, pp. 1078-1088.
- Khu, S. T., and Madsen, H. (2005). "Multiobjective calibration with Pareto preference ordering: An application to rainfall-runoff model calibration." *Water Resour. Res.*, Vol. 41, No. W03004.
- Kim, H. J., and Jun, K. S. (2004). "Unsteady flow model with variable roughness coefficient" *Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 12, pp. 1055-1063.
- Kim, Y., and Chung, E. S. (2014). "An index-based robust decision making framework for watershed management in a changing climate." *Sci. Tot. Environ.*, Vol. 473, pp. 88-102.
- Kim, Y., Chung, E. S., and Jun, S. (2015a). "Iterative framework for robust reclaimed wastewater allocation in a changing environment using multi-criteria decision making." *Water Resour. Manage.*, Vol. 29, No. 2, pp. 295-311.
- Kim, Y., Chung, E. S., Won, K. J., and Gil, K. I. (2015b). "Robust parameter estimation framework of a rainfall-runoff model using pareto optimum and minimax regret approach." *Water*, Vol. 7, pp. 1246-1263.
- Liggett, J. A., and Cunge, J. A. (1975). "Numerical methods of solution of the unsteady flow equations." In: Mohmmmod, K., Yevjevich, V. (eds.), *Unsteady flow in open channels*, Water Resour. Publications, Fort Collins, Colo., pp. 89-182.
- Liu, Y. B., Batelaan, O., De Smedt, F., Poórová, J., and Velcická, L. (2005). "Automated calibration applied to a GIS-based flood simulation model using PEST." In: van Alphen, J., van Beek, E., Taal, M. (eds.), *Floods, from Defence to Management*, Taylor-Francis Group, London, pp. 317-326.
- Loomes, G., and Sugden, R. (1982). "Regret theory: An alternative theory of rational choice under uncertainty." *Econ. J.*, Vol. 92, No. 4, pp. 805-824.
- Loulou, R., and Kanudia, A. (1999). "Minimax regret strategies for greenhouse gas abatement: Methodology and application." *Oper. Res. Lett.*, Vol. 25, pp. 219-230.
- Ramesh, R., Datta, B., Bhallamudi, S. M., and Narayana, A. (2000). "Optimal estimation of roughness in open-channel flows." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 126, No. 4, pp. 299-303.
- Rouse, H. (1965). "Critical analysis of open channel resistance." *J. Hydraul. Div.*, Vol. 91, No. HY4, pp. 1-25.
- Seibert, J., Uhlenbrook, S., Leibundgut, C., and Haldin, S. (2000). "Multiscale calibration and validation of a conceptual rainfall-runoff model." *Phys. Chem. Earth*, Vol. 25, No. 1, pp. 59-64.
- Shinma, T. A., and Reis, L. F. R. (2014). "Incorporating multi-event and multi-site data in the calibration of SWMM." *Proc. Eng.*, Vol. 79, pp. 75-84.
- Stevenson, W. J., and Ozgur, C. 2007. *Introduction to management science with spreadsheets*. McGraw-Hill, New York.