

## 홍수유출 모형 자동 보정의 벌칙함수를 이용한 기능 향상 연구

### Application of a Penalty Function to Improve Performance of an Automatic Calibration for a Watershed Runoff Event Simulation Model

강 태 옥\* / 이 상 호\*\*  
Kang, Taeuk / Lee, Sangho

#### Abstract

Evolutionary algorithms, which are frequently used in an automatic calibration of watershed runoff simulation models, are unconstrained optimization algorithms. An additional method is required to impose constraints on those algorithms. The purpose of the study is to modify the SCE-UA (shuffled complex evolution-University of Arizona) to impose constraints by a penalty function and to improve performance of the automatic calibration module of the SWMM (storm water management model) linked with the SCE-UA. As indicators related to peak flow are important in watershed runoff event simulation, error of peak flow and error of peak flow occurrence time are selected to set up constraints. The automatic calibration module including the constraints was applied to the Milyang Dam Basin and the Guro 1 Pumping Station Basin. The automatic calibration results were compared with the results calibrated by an automatic calibration without the constraints. Error of peak flow and error of peak flow occurrence time were greatly improved and the original objective function value is not highly violated in the automatic calibration including the constraints. The automatic calibration model with constraints was also verified, and the results was excellent. In conclusion, the performance of the automatic calibration module for watershed runoff event simulation was improved by application of the penalty function to impose constraints.

**Keywords** : penalty function, constraint, automatic calibration, SCE-UA, SWMM

#### 요 지

유역유출 모의 모형의 자동 보정에 주로 사용되는 진화계열의 알고리즘은 무제약 최적화 알고리즘이다. 이러한 진화계열 알고리즘에 제약조건을 반영하기 위해서는 제약조건을 다룰 수 있는 별도의 방법이 요구된다. 본 연구의 목적은 진화계열 알고리즘의 일종인 집합체 혼합진화 알고리즘에 벌칙함수를 적용하여 제약조건을 고려할 수 있도록 하는 것이다. 또한, 제약조건을 고려할 수 있는 집합체 혼합진화 알고리즘을 SWMM의 자동 보정 모듈에 적용하여 기존 자동 보정 모듈의 기능을 개선하는 것이다. 홍수유출 해석에서는 첨두유량과 관련된 지표가 중요하므로 첨두유량의 오차와 첨두유량 발생시간의 오차를 제어할 수 있는 제약조건을 구성하였다. 제약조건을 포함하여 구성된 자동 보정 모듈은 밀양댐 유역과 구로1 빗물펌프장 배수유역의 홍수유출 모의 모형에 대하여 적용되었다. 자동 보정의 결과는 제약조건 포함 유무에 따른 결과를 비교하여 제시되었다. 그 결과, 제약조건을 고려함에 따라 본래의 목적함수를 크게 위배하지 않으면서, 첨두유량과 첨두유량 발생시간의 오차가 크게 개선되었다. 또한, 검증을 통해서도 제약 최적화를 통한 자동 보정의 적절성이 검토되었다. 결론적으로 벌칙함수를 이용한 제약조건 반영을 통해 자동 보정 모듈의 기능을 향상시킬 수 있었다.

\* 부경대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (e-mail: ktw62@hanmail.net)

Ph.D., Candidate, Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

\*\* 교신저자, 부경대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: peterlee@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6076)

Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

## 1. 서 론

모형 보정(calibration)이란 모형이 실제 현상을 모사하도록 매개변수를 추정하는 과정이다. 유역유출 모의 모형(watershed runoff simulation model)의 보정 목적은 과거의 유출 현상을 충실히 재현하고, 동시에 미래에 나타날 유출 현상을 보다 잘 예측할 수 있도록 하는데 있다(Bae and Cho, 1995). 이러한 모형의 보정은 시행착오(trial and error)에 의한 수동 보정(manual calibration)과 최적화 방법(optimization method)을 이용한 자동 보정(automatic calibration)으로 구분된다. 수동 보정의 경우, 많은 시간과 노력이 요구되고 매개변수가 많아질수록 보정의 어려움을 겪게 될 뿐만 아니라 정확성도 자동 보정에 비해 떨어진다.

유역유출 모의 모형의 자동 보정에 자주 사용되는 알고리즘은 유전자 알고리즘(genetic algorithm)과 아리조나 대학의 집합체 혼합진화 알고리즘(shuffled complex evolution-University of Arizona)과 같은 진화 계열 알고리즘(evolutionary algorithms)이다. 하지만 이러한 진화 계열 알고리즘은 무제약 최적화(unconstrained optimization) 알고리즘으로서, 최적화 과정 내에 제약조건(constraint)을 반영할 수 없다. 따라서 제약조건이 포함된 최적화 문제를 해결하기 위해서는 제약조건을 다룰 수 있는 추가적인 기법이 필요하다(Mallipeddi and Suganthan, 2010).

국내·외에서 기 수행된 유역유출 모의 모형의 자동 보정에 관한 연구에서 제약조건을 반영한 연구는 매우 희소하다. 즉, 진화 계열 알고리즘을 이용한 대부분의 연구에서는 목적함수만을 이용하여 자동 보정을 수행하였다(Javaheri, 1998; Kang et al., 2002; Kang et al., 2004; Chae, 2004; Cho and Lee; 2006). 그리고 단일 목적함수만을 이용한 자동 보정은 한계가 있으므로, 다목적함수를 적용한 연구가 다수 진행되었다(Yapo et al., 1998; Madsen, 2000; Vrugt et al., 2003; Lee et al., 2005; Koo, 2006; Barco et al., 2008; Kang et al., 2012). 하지만 다목적함수를 이용할 경우, 파레토 최적해(Pareto optimal solution)와 같이 다수의 해가 존재하게 되어 도출된 해들 가운데 적절한 해를 선정하기 위한 추가적인 노력이 요구된다.

연구의 목적은 홍수유출 모의 모형(watershed runoff event simulation model)의 자동 보정에 제약조건을 반영하여 자동 보정의 기능을 개선하는 것이다. 제약조건을 고

려 하기 위해 연구에서는 가장 단순하면서 일반적으로 사용되는 벌칙함수(penalty function)를 사용하였다(Tessema and Yen, 2009; Yeniay, 2005). 사용된 유역유출 모의 모형은 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 SWMM(storm water management model)이고, SWMM의 자동 보정에는 집합체 혼합진화 알고리즘이 사용되었다. 홍수유출 해석에서는 침투유량의 정확성이 중요하므로 침투유량과 관련된 요소를 제약조건으로 설정하였다. 그리고 구성된 홍수유출 모의 모형의 자동 보정 모듈을 도시유역인 구로 1 빗물펌프장 배수유역과 진원유역인 밀양댐 유역의 2009년 홍수사상에 적용하여 자동 보정 기능의 개선 여부를 검토하였다.

## 2. 제약조건을 고려한 자동 보정 모듈의 구성

### 2.1 SWMM의 자동 보정 모듈

#### 2.1.1 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘

연구에서 사용된 SWMM은 미 환경보존국(Environmental Protection Agency)의 지원 아래 개발된 개념적 도시유역 유출(conceptual urban runoff) 모형으로서, 도시유역에 대한 배수체계의 설계와 계획에 많이 사용되고 있다(Javaheri, 1998). 뿐만 아니라 Cho et al. (2007)은 진원유역의 홍수유출 현상에도 적용성이 높은 것으로 제시하는 등, 국내·외에서 활용도가 매우 높은 유역유출 모의 모형이다. 연구에서는 SWMM의 다양한 버전 가운데 미 환경보존국에서 제공하고 있는 최신의 SWMM5가 사용되었다.

집합체 혼합진화 알고리즘은 Duan (1991)에 의해 개발되고, Duan et al. (1992; 1994)에 의해 연구된 전역 최적화 알고리즘으로서 다양한 유역유출 모의 모형의 자동 보정과 수자원 분야의 다양한 최적화 문제에 활용되고 있다. 실제로 집합체 혼합진화 알고리즘은 미국 국립 기상국의 NWSRFS(National Weather Service river forecasting system)의 보정 모듈로 사용되고 있다(Duan et al., 1994).

Kang et al. (2012)은 SWMM의 자동 보정을 위하여 집합체 혼합진화 알고리즘을 적용한 모듈을 구성하였다. 본 연구는 해당 자동 보정 모듈에 제약조건을 반영하여 자동 보정의 기능을 향상시키는데 목적을 두고 있다.

## 2.1.2 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘의 연계

Kang et al. (2012)은 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용하여 SWMM을 자동 보정하기 위해 우선 두 모형을 Fig. 1과 같이 연계하였다. 즉, 집합체 혼합진화 알고리즘에 의해 초기에 발생된 표본 요소(매개변수 조합)와 진화 과정에서 생성된 새로운 요소에 대하여 SWMM을 반복적으로 수행할 수 있도록 연결하였다. 그리고 각각의 매개변수 조합에 의해 계산된 수문곡선과 관측 수문곡선을 비교한 후, 목적함수의 값을 계산하여 집합체 혼합진화 알고리즘으로 전달해주는 모듈을 구성하였다. 연구에서는 해당 모듈을 이용하였고, 여기에 제약조건을 고려할 수 있도록 벌칙함수를 추가하였다.

## 2.2 목적함수와 제약조건식

### 2.2.1 벌칙함수

벌칙함수는 제약을 가진 문제를 무제약 문제로 변환하는 방법의 하나로써, 형태에 따라 다양하게 존재한다(Yeniay, 2005). 본 연구에서는 그 가운데 가장 일반적인 형태인 Eq. (1)과 같은 정적(static) 벌칙함수를 사용하였다.

$$f_p(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m r_j p_j(\mathbf{x}) \quad (1)$$

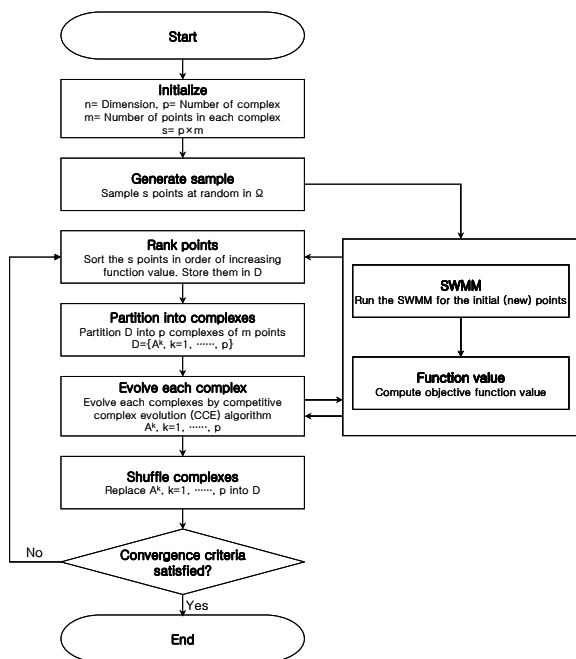


Fig. 1. The Schematic Diagram for a Connection between the SWMM and the SCE-UA

여기서,  $\mathbf{x}$ 는 매개변수의 조합을 의미한다.  $f_p(\mathbf{x})$ 는 벌칙 포함 목적함수(penalized objective function)이고,  $f(\mathbf{x})$ 는 본래(original)의 목적함수인 벌칙 없는 목적함수(unpenalized objective function)이다.  $p_j(\mathbf{x})$ 는 벌칙함수이고,  $r_j$ 는 벌칙 매개변수(penalty parameter)이며,  $m$ 은 제약조건 수이다. 즉, 제약조건 수만큼 벌칙이 각각 부과된다. 그리고 Eq. (1)의 우변 두 번째 항과 같이 벌칙함수를 포함한 항은 벌칙 항(penalty term)으로 명명된다(Rao, 1996).

Eq. (1)에서 벌칙 매개변수는 목적함수의 구성 시 벌칙함수의 반영 정도를 결정하므로 최적해 산정에 직접적으로 영향을 준다. 즉, 벌칙 매개변수가 커질수록, 본래의 목적함수에 비해 벌칙함수의 영향이 커지게 되고, 반대로 벌칙 매개변수가 작아질수록, 벌칙함수의 영향은 작아지게 된다. 하지만 이러한 벌칙 매개변수를 객관적으로 산정하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라, 문제 의존적(problem dependant)이므로 벌칙함수를 사용하는데 어려운 요인이 된다. 연구에서는 사전 모의를 통해 벌칙 매개변수를 결정하였고, 해당 내용은 3.2.2절에 기술되어 있다.

### 2.2.2 목적함수와 제약조건식의 구성

연구에서는 벌칙 없는 목적함수로서 Eq. (2)를 이용하였다. Eq. (2)는 관측 유량 수문곡선과 계산된 유량 수문곡선을 적합시키기 위한 목적함수로서, Kang et al. (2004)과 Kang et al. (2012)에서 비교적 좋은 결과를 도출한 목적함수이다.

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{t=1}^N \left( \sqrt{q_t^{obs}} - \sqrt{q_t^{cal}} \right)^2 \quad (2)$$

Eq. (2)에서  $q_t^{obs}$ 와  $q_t^{cal}$ 는 관측 및 계산된 유량 시계열(time series)이고,  $N$ 은 유량 값의 개수를 나타낸다.

한편, 홍수유출 해석에서는 침투유량에 관한 요소가 중요한 검토 지표이다. 이에 따라 연구에서는 침투유량과 관계된 제약조건을 구성하였고, 이를 고려할 수 있도록 벌칙함수를 이용하였다. 연구에서 설정된 벌칙함수는 침투유량의 오차( $p_1(\mathbf{x})$ )와 침투유량의 발생시간 오차( $p_2(\mathbf{x})$ )이다(Eq. (3)). 침투유량의 오차에 관한 벌칙함수는 관측 및 계산된 침투유량의 오차에 대한 절대값으로 설정하였고, 침투유량 발생시간의 오차에 관한 벌칙함수는 제약의 위배 여부에 따라 벌칙을 갖거나 갖지 않도록 구성하였다. 그리고 각각의 벌칙함수는 Eq. (1)과 같이 벌칙 매개변수( $r_1, r_2$ )와 선형 조합하여 벌칙 없는 목적함수에 더하였다.

$$p_1(\mathbf{x}) = |q_{\max}^{\text{obs}} - q_{\max}^{\text{cal}}|,$$

$$p_2(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \text{for } t_{q_{\max}}^{\text{obs}} = t_{q_{\max}}^{\text{cal}} \\ 1, & \text{for } t_{q_{\max}}^{\text{obs}} \neq t_{q_{\max}}^{\text{cal}} \end{cases} \quad (3)$$

Eq. (3)에서  $q_{\max}^{\text{obs}}$ 와  $q_{\max}^{\text{cal}}$ 은 각각 관측 및 계산된 첨두유량을 나타내고,  $t_{q_{\max}}^{\text{obs}}$ 와  $t_{q_{\max}}^{\text{cal}}$ 는 관측 및 계산된 첨두유량의 발생시간을 나타낸다.

### 3. 홍수유출 모의 모형의 자동 보정

#### 3.1 대상유역

연구에서 구성한 홍수유출 모의 모형의 대상유역은 두 곳으로서, 도시유역에 해당하는 구로1 빗물펌프장 배수유역과 전원유역에 해당하는 밀양댐 상류의 유역이다. SWMM으로 두 유역에 대한 홍수유출 모의를 수행하기 위해 Table 1과 같은 분석 조건을 구성하였다. 우선, 유역추적에는 두 유역 모두 비선형 저류방정식(nonlinear storage equation)을 이용하였다. 하도추적의 경우, 밀양댐 유역은 운동파(kinematic wave) 모형을 이용하였고, 구로1 빗물펌프장 배수유역은 관거의 역경사와 배수효과 등을 고려하기 위해 동역학파(dynamic wave) 모형을 이용하였다. 한편, 밀양댐 유역은 전원유역으로서 지하수 유출(groundwater flow)이 활발하므로 이를 고려하기 위해 SWMM의 지하수 유출 계산 모듈을 포함하여 구성하였다.

홍수유출 모의 모형의 계산 시간간격은 유역의 규모를 고려하여 결정하였다. 상대적으로 유역면적이 큰 밀양댐 유역의 경우, 유역추적은 1시간, 하도추적은 10분으로 하였다. 유

역면적이 1.36 km<sup>2</sup>인 구로1 빗물펌프장 배수유역의 경우, 유역추적은 10분, 하도추적은 20초로 구성하였다.

자동 보정에 활용한 강우자료의 경우, 밀양댐 유역에서는 한국수자원공사에서 운영하는 원격측정 강우관측소인 선리관측소와 밀양댐관측소의 자료가 사용되었고, 구로1 빗물펌프장 배수유역에서는 서울기상관측소의 자동 관측 자료가 활용되었다. 그리고 밀양댐의 관측 유입량은 한국수자원공사와 국가수자원관리 종합정보시스템으로부터 확보하였고, 구로1 빗물펌프장의 유입량은 측정된 자료가 없으므로 우수지의 수위 기록과 펌프시설의 운영 실적을 이용하여 추정하였다. 구로1 빗물펌프장의 유입량 추정에 관한 내용은 Kang et al. (2012)을 참고할 수 있다.

Fig. 2는 밀양댐 유역의 소유역 및 하도 분할도를 나타내고, Fig. 3은 구로1 빗물펌프장 배수유역의 전체 유역 경계와 주요 관거를 나타낸다.

#### 3.2 추정 대상 매개변수

##### 3.2.1 홍수유출 모의 모형의 매개변수

자동 보정은 매개변수를 추정하면서 수행된다. 따라서 추정 대상 매개변수의 선정과 개별 매개변수가 가질 수 있는 적절한 범위의 설정이 필요하다. 연구에서는 SWMM의 사용자 설명서(Huber and Dickinson, 1992; James et al., 2005; Rossman, 2009)와 관련된 문헌을 통해 적절한 매개변수의 범위를 설정하여 집합체 혼합진화 알고리즘의 입력자료로 활용하였다. Tables 2 and 3은 각각 밀양댐 유역과 구로1 빗물펌프장 배수유역의 추정 대상 매개변수와 해당 매개변수의 최적해 탐색 영역을 나타낸다.

Table 1. Analysis Components and Conditions of Watershed Runoff Event Simulations

Classification		Basin	
		Milyang Dam	Guro 1 Pumping Station
Catchment and Channel (Conduit)	Catchment Area (km <sup>2</sup> )	94.4	1.36
	No. of Subcatchment	24	147
	No. of Channel (Conduit)	26	147
	Rainfall Station	Seolli and Milyangdam Station (Telemetry Station)	Seoul Meteorological Observation Station (Automatic Weather System)
Simulation Method	Watershead Routing	Nonlinear Storage Equation	
	Channel Routing	Kinematic Wave	Dynamic Wave
	Groundwater Calculation	Yes	No
	Infiltration Method	NRCS Method	Green-Ampt Equation
	Calculation Time Step	Catchment	1 hour
Channel (Conduit)		10 min	20 sec

즉, 자동 보정을 통해 추정되는 각각의 매개변수는 Tables 2 and 3에 제시된 범위 내에서 탐색된다.

밀양댐 유역에 대한 홍수유출 모의 모형의 자동 보정은 총 19개의 매개변수를 추정하여 수행되었다. 추정 대상 매개변수는 8개의 유역 매개변수, 1개의 하도 매개변수, 10개의 지하수 매개변수이다. 대부분의 매개변수는 모든 유역과 하도에서 동일한 값을 갖도록 설정되었다. 다만, 불투수 지역의 면적비, 유역폭, 유출곡선 지수(runoff curve number; CN)는 유역마다 추정된 고유의 값이 있으므로, 해당 유역의 값들을 상·하 20%의 범위 내에서 변화시켜 최적해를 찾도록 하였다. 참고로 초기의 유출곡선 지수는 선행강우조건(antecedent soil moisture condition; AMC)-II로 가정하였다. 그리고 초기 지하수위는 초깃값을 하도의 바닥고로 설정하였고, 이로부터 -1~1m 범위에서 추정되도록 설정하였다.

구로1 빗물펌프장 배수유역은 밀양댐 유역과 달리 도시유역으로서 지표면 유출(surface runoff)이 지배적이다. 따라서 지하수 유출은 모의하지 않았다. 이에 따라 구로1 빗물펌프장 배수유역에 대한 홍수유출 모의 모형의 추정 대상 매개변수는 총 11개이다. 그리고 밀양댐 유역에 대한 매개변수 추정 방법과 동일하게 불투수 지역의 면적비와 유역폭은 해당 유역의 값들을 특정한 비율로 변화시켜 최적해를 찾도록 하였고, 나머지 매개변수들은 유역과 하도에서 동일한 값을 갖도록 설정하였다.

### 3.2.2 벌칙 매개변수

벌칙함수를 사용함에 있어서 벌칙 매개변수는 제약 위치 벌칙의 반영 정도를 결정하므로 매우 중요한 변수이다. 연구에서는 벌칙 매개변수를 추정하기 위해 벌칙 매개변수 값의 변화에 따른 자동 보정의 결과를 검토하였다. 벌칙 매개변수 값의 변화에 따른 자동 보정은 밀양댐 유역과 구로1 빗물펌프장 배수유역에 대하여 각각 하나의 홍수사상에 대하여 수행되었다.

우선, 침투유량의 오차를 제어하기 위해 설정된 벌칙 항의  $r_1$  값을 Table 4와 같이 0.1~1,000 범위에서 변화시켰다. 그 결과, 밀양댐 유역과 구로1 빗물펌프장 배수유역의 홍수유출 모의 모형에서 공통적으로  $r_1$ 이 0.5~5 사이의 값을 가질 때 적절한 모의가 이루어지는 것으로 검토되었다. 즉, 해당 범위에서는 본래의 목적함수를 크게 위배하지 않으면서, 침투유량의 오차를 잘 제어하는 것으로 나타났다. 이에 반해 두 유역에 대하여  $r_1$ 을 0.1로 적용할 경우, 침투유량의 오차를 줄이기는 하였지만, 보다 큰 값을 적용한 경우에 비해 상대적으로 침투유량의 오차가 크게 나타

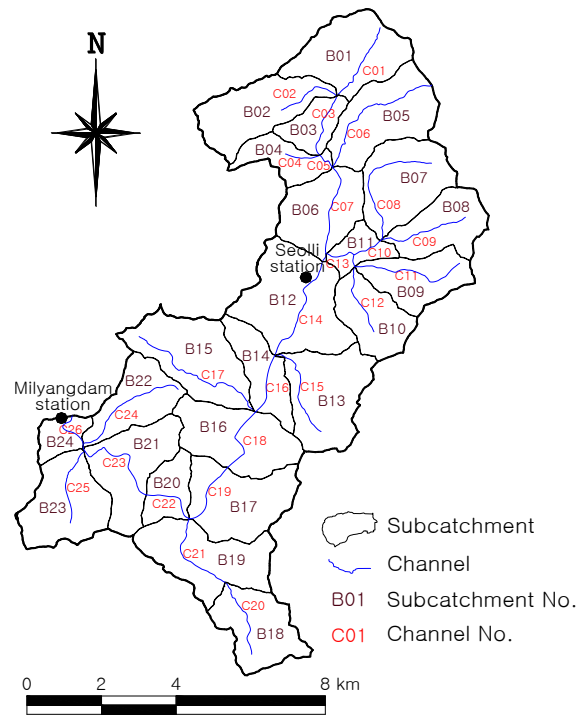


Fig. 2. Subcatchments and Channels in the Milyang Dam Basin

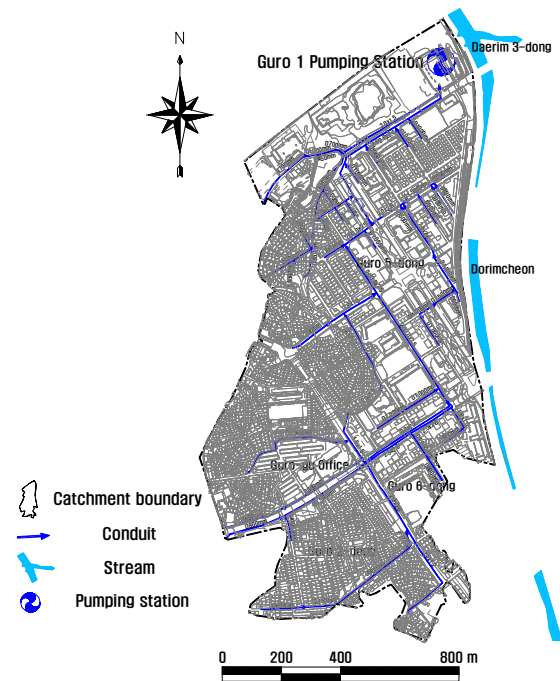


Fig. 3. The Catchment Boundary and Conduits in the Guro 1 Pumping Station Basin

났다. 반대로,  $r_1$ 을 10 이상의 값으로 설정한 경우에는 침투유량의 오차는 줄일 수 있으나, NSE (Nash-Sutcliffe

**Table 2. Estimation Parameters of the SWMM for the Milyang Dam Basin**

Class	Variable	Parameters	Lower Bound	Upper Bound	Class	Variable	Parameters	Lower Bound	Upper Bound
Basin	Pct. Imperv	Percent of impervious area (%)	0.8	1.2	Ground-water	Porosity	Porosity (volume of voids/total soil volume)	0.453	0.463
	Width	Characteristic width of the overland flow path (m)	0.8	1.2		Wilt Point	Wilting point (soil moisture content at which plants cannot survive)	0.085	0.116
	N-Imperv	Manning's n of impervious area	0.01	0.016		Field Capac	Field capacity (soil moisture content after all free water has drained off)	0.19	0.232
	N-Perv	Manning's n of pervious area	0.15	0.4		Hyd Cond	Soil's saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	3.3	10.92
	S-Imperv	Depth of depression storage on impervious area (mm)	1.6	3.8		Cond Slop	Average slope of log (conductivity) versus soil moisture deficit curve	1	10
	S-Perv	Depth of depression storage on pervious area (mm)	3.8	6.4		Tens Slop	Average slope of soil tension versus soil moisture content curve (mm)	1,000	5,000
	Pct Zero	Percent of the impervious area with no depression storage (%)	10	30		Water Table	Elevation of the water table in the aquifer at the start of the simulation (El. m)	-1	1
	CN	SCS runoff curve number	0.8	1.2		Upper Moist	Moisture content of the unsaturated upper zone of the aquifer at the start of the simulation	0.15	0.4
Channel	Manning N	Manning's roughness coefficient	0.02	0.05	A1	Groundwater flow coefficient	0.0001	0.1	
					B1	Groundwater flow exponent	1	5	

**Table 3. Estimation Parameters of the SWMM for the Guro 1 Pumping Station Basin**

Class	Variable	Parameters	Lower Bound	Upper Bound	Class	Variable	Parameters	Lower Bound	Upper Bound
Basin	Pct. Imperv	Percent of impervious area (%)	0.8	1.2	Basin	Pct Zero	Percent of the impervious area with no depression storage (%)	10	30
	Width	Characteristic width of the overland flow path (m)	0.8	1.2		Suction	Suction head (mm)	88.9	110.0
	N-Imperv	Manning's n of impervious area	0.010	0.016		Hyd Cond	Soil saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	3.3	10.9
	N-Perv	Manning's n of pervious area	0.15	0.4		IMDmax	Initial moisture deficit of soil	0	0.3
	S-Imperv	Depth of depression storage on impervious area (mm)	1.6	3.8		Conduit	Manning N	Manning's roughness coefficient	0.011
	S-Perv	Depth of depression storage on pervious area (mm)	3.8	6.4					

efficiency) 등 다른 모형 평가지표가 나빠지는 것으로 분석되었다. 이는 벌칙함수에 비해 상대적으로 본래 목적함수의 비중이 작아진 것에 기인한다. 참고로 Table 4에 제시된 평가 지표 중 NSE와 체적비(ratio of volume; ROV)의 최적값은 1이고, 평균편차의 비율(percent bias; PBIAS), 오차비율 추정량(proportional error of estimate; PEE), 평균제곱오차의 제곱근(root mean square error; RMSE)의 최적값은 0이다.

침투유량 발생시간의 오차는 밀양댐 지역의 홍수사상에 서만 발생하였다.  $r_2$ 의 값을 1로 설정한 경우에는 벌칙함수의 가중치가 작아서 침투유량 발생시간의 오차가 제어되지 못하였지만,  $r_2$ 를 5 이상으로 설정함에 따라 침투유량 발생시간의 오차가 제어되었다. 중요한 점은  $r_2$ 의 값을 5 이상으로 설정할 경우, 모든 경우에서 유사한 결과가 도출되었

고, 특히  $r_2$ 를 5,000 이상의 큰 값으로 설정하는 경우, 모형의 거동이 완전히 동일해지는 것으로 나타났다.

이상의 사전 모의 결과를 통해 벌칙 매개변수의 값을 결정하였다. 침투유량의 오차에 관한 벌칙 매개변수( $r_1$ )는 Tables 2 and 3에서 제시한 SWMM의 추정 대상 매개변수와 같이 0.5~5 사이에서 탐색되도록 결정변수로 설정하였다. 그리고 침투유량 발생시간에 관한 벌칙 매개변수( $r_2$ )는 10,000으로 고정하여 사용하였다. 이는 침투유량 발생시간의 경우 일치 또는 불일치로 명확히 구분되고, 보정에서는 일치시키는 것을 목적으로 하므로 위배 시 큰 벌칙을 부과하도록 설정한 것이다. 이렇게 매우 큰 벌칙을 부과하여 불가능해(infeasible solution)를 갖지 않도록 설정하는 벌칙함수는 사(death) 벌칙함수에 해당한다(Yeniay, 2005).

Table 4. Calibration Results by Values of Penalty Parameters

Basin and Storm Event	Condition		NSE	PBIAS (%)	PEE	ROV	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow Occurrence Time (Time Step)	
Milyang Dam Basin ('09.07.07)	Unconstrained Optimization		0.98	0.35	2.19	1.00	8.47	12.08	1	
	Constrained Optimization	r <sub>1</sub>	0.1	0.98	-1.38	2.56	1.01	8.16	4.39	1
			0.5	0.98	-4.56	2.13	1.05	9.38	0	1
			1	0.98	-4.84	2.10	1.05	9.72	0	1
			5	0.96	-4.84	2.44	1.05	12.00	0.01	0
			10	0.94	-2.93	4.12	1.03	15.30	0.15	0
			50	0.90	4.61	5.95	0.95	19.80	0.04	0
			100	0.92	7.70	2.98	0.92	18.05	0.91	0
			500	0.76	22.95	4.80	0.77	30.66	0.05	0
			1,000	0.75	24.89	4.83	0.75	31.33	0.01	0
			r <sub>2</sub>	1	0.98	0.67	2.29	0.99	8.45	12.22
	5	0.98		1.02	2.40	0.99	9.21	15.38	0	
	10	0.99		0.08	2.91	1.00	7.72	14.07	0	
	50	0.98		1.39	2.59	0.99	8.71	15.80	0	
	100	0.98		1.30	2.63	0.99	8.86	17.55	0	
	500	0.98		1.02	2.99	0.99	8.10	13.28	0	
	1,000	0.98		0.62	2.67	0.99	8.98	13.54	0	
	5,000	0.98		0.88	2.63	0.99	8.41	16.14	0	
10,000	0.98	0.88	2.63	0.99	8.41	16.14	0			
Guro 1 Pumping Station Basin ('09.07.14)	Unconstrained Optimization		0.95	-0.08	2.57	1.00	0.83	0.30	0	
	Constrained Optimization	r <sub>1</sub>	0.1	0.95	1.13	2.56	0.99	0.84	0.06	0
			0.5	0.94	0.86	2.58	0.99	0.86	0	0
			1	0.94	0.84	2.58	0.99	0.86	0	0
			5	0.94	-0.38	2.65	1.00	0.91	0	0
			10	0.92	-2.05	2.78	1.02	0.99	0	0
			50	0.92	-2.88	2.85	1.03	1.03	0	0
			100	0.91	-3.19	2.91	1.03	1.07	0	1
			500	0.91	-3.28	2.91	1.03	1.06	0	1
			1,000	0.91	-3.75	2.94	1.04	1.08	0	1

### 3.3 자동 보정

#### 3.3.1 밀양댐 유역의 자동 보정

밀양댐 유역의 홍수유출 모의 모형에 대한 자동 보정은 2009년 7월 7일과 7월 15일의 홍수사상에 대하여 적용되었다. 2009년 7월 7일과 15일의 총 강우량은 각각 126.9 mm와 114.5 mm이다. Fig. 4는 보정된 결과로서 제약조건 포함 유무에 따른 자동 보정의 결과를 나타낸 그림이다. 전체적인 수문곡선의 양상은 제약조건 포함 유무에 관계없이 유사한 것을 볼 수 있다. 하지만 제약조건을 고려하지 않은 경우, 관측 및 계산된 침투유량의 오차와 침투유량 발생시간의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 제약조건을 포함하는 경우, 침투유량의 오차는 감소하고 침투유량 발생시간은 정확히 같아졌다.

제약조건 반영에 따른 자동 보정의 효과를 보다 정량

적으로 검토하기 위해 Table 5의 모형평가 지표를 검토하였다. 기본적으로 침투유량의 오차와 침투유량 발생시간의 오차는 제약조건을 사용함에 따라 크게 개선되었다. 반면에 다른 지표에서는 제약조건을 반영하지 않은 자동 보정의 결과에 비해 미소하게 개악되거나 유사한 값을 도출하였다. 이는 제약조건을 만족함에 따라 별칭 없는 목적함수의 비중이 작아진 것에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 제약조건을 고려함에도 본래의 목적함수를 크게 왜곡하지 않았고, 침투유량 및 침투유량 발생시간의 오차를 감소시켰으므로 개선된 결과로 볼 수 있다.

Fig. 4(b)의 2009년 7월 15일의 홍수사상에서 무제약 최적화에 의해 결정된 침투유출 발생시간의 오차가 29시간으로 매우 큰 것은 관측값에서는 첫 번째 침투부에서 최대값이 나타난 반면, 계산된 결과에서는 두 번째 침투부에서 침투유량이 결정된 것에 기인한다.

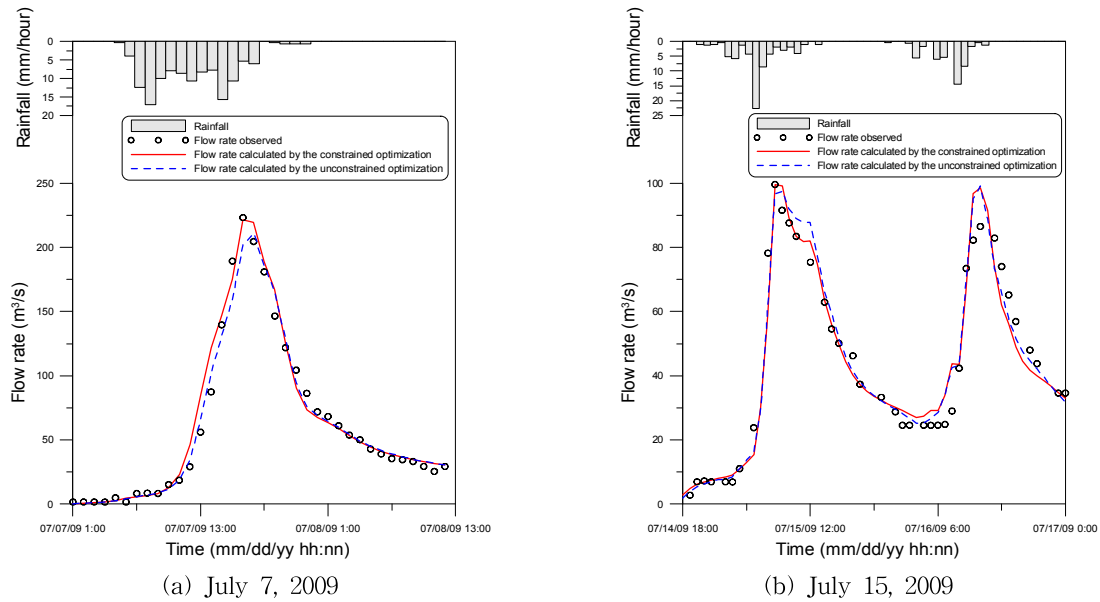


Fig. 4. Hydrographs for the Milyang Dam Basin by the Automatic Calibration Methods

Table 5. Model Calibration Results for the Milyang Dam Basin by the Optimization Methods

Storm Event	Optimization Method	NSE	PBIAS (%)	PEE	ROV	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow Occurrence Time (hour)
2009.07.07	Unconstrained optimization	0.98	0.35	2.19	1.00	8.47	12.08	1
	Constrained optimization	0.97	-4.27	2.49	1.04	10.29	1.86	0
2009.07.15	Unconstrained optimization	0.95	-1.53	1.02	1.02	6.21	0.54	29
	Constrained optimization	0.95	-0.28	1.29	1.00	6.70	0	0

### 3.3.2 구로1 빗물펌프장 배수구역의 자동 보정

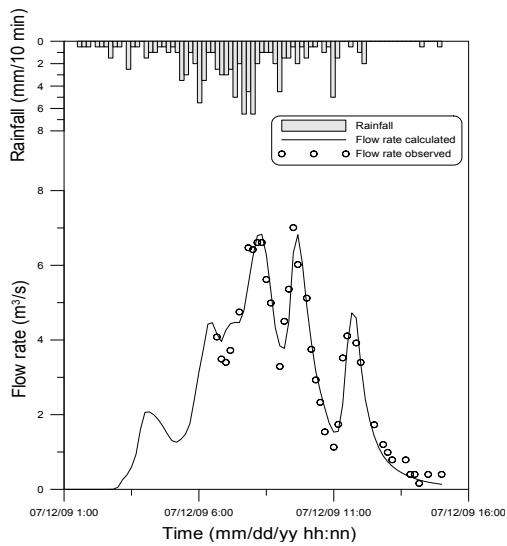
구로1 빗물펌프장 배수구역의 홍수유출 모의 모형에 대한 자동 보정은 2009년 7월 12일과 7월 14일의 홍수사상에 대하여 적용되었다. 7월 12일과 7월 14일에 내린 총 강우량은 각각 104.5mm 및 112.5mm이다.

Figs. 5 and 6은 각각의 홍수사상에 대한 자동 보정의 결과를 나타낸 그림이다. Fig. 5에 제시된 2009년 7월 12일의 자동 보정 결과에서는 제약조건을 고려하지 않았을 때, 첨두유출 발생시간이 일치하지 않는 것을 확인할 수 있다. 관측된 첨두유출의 발생시간은 7월 12일 09시 30분인 반면, 자동 보정된 첨두유출 발생시간은 08시 20분인 것으로 검토되었다. 이에 반해, 제약조건을 반영한 자동 보정에서는 첨두유출 발생시간이 정확히 일치된 것을 볼 수 있다. 첨두유출의 오차는 제약조건을 고려함에 따라 미소하게 개선되었다. Fig. 6의 2009년 7월 14일의 경우에

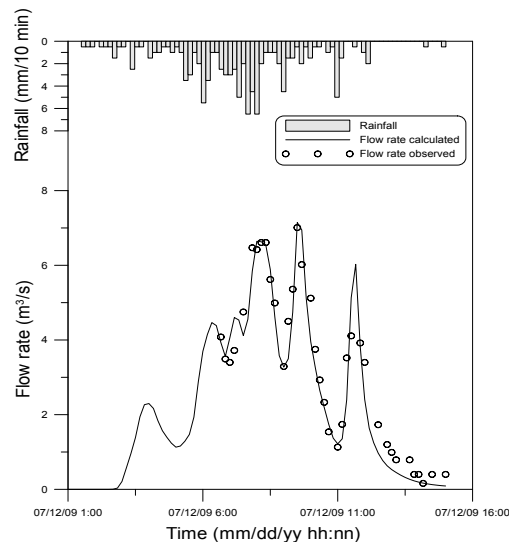
는 제약조건을 고려하지 않더라도 첨두유출의 발생시간은 일치하는 것으로 나타났다. 첨두유출 오차의 경우, 제약조건을 반영함에 따라 소수점 이하 셋째 자리까지 정확히 일치하였다.

제약조건을 반영에 따른 자동 보정의 효과를 보다 정량적으로 검토하기 위해 Table 6의 모형평가 지표를 검토하였다. 제약조건을 반영 유무에 따른 결과를 보면, 앞선 밀양댐 구역의 홍수유출 모형에 대한 자동 보정의 결과와 유사한 것을 확인할 수 있다. 즉, 첨두유출의 오차와 첨두유출 발생시간의 오차는 제약조건을 사용함에 따라 개선되었고, 다른 지표에서는 제약조건을 반영하지 않은 자동 보정의 결과에 비해 미소하게 개악되거나 유사한 값을 도출하였다. 하지만, 본래의 목적함수를 크게 왜곡한 결과는 아닌 것으로 판단되고, 목표로 했던 첨두유출 및 첨두유출 발생시간의 정확도를 향상시켰으므로 전체적으로는 개선된 자동 보정의 결과로 볼 수 있다.



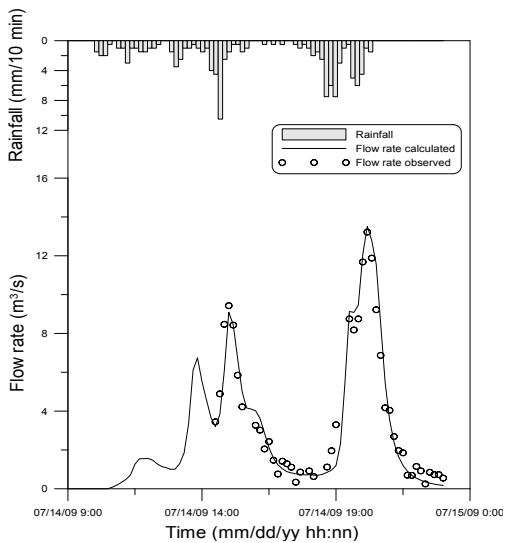


(a) Without Constraints

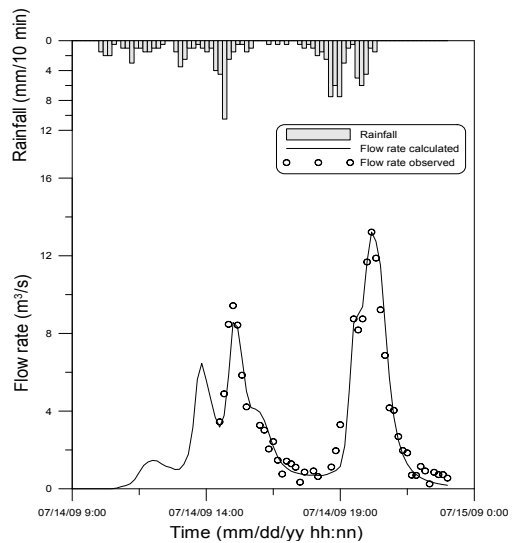


(b) With Constraints

Fig. 5. Hydrographs for the Guro 1 Pumping Station Basin by the Automatic Calibration Methods (2009.07.12)



(a) Without Constraints



(b) With Constraints

Fig. 6. Hydrographs for the Guro 1 Pumping Station Basin by the Automatic Calibration Methods (2009.07.14)

Table 6. Model Calibration Results for the Guro 1 Pumping Station Basin by the Optimization Methods

Storm Event	Optimization Method	NSE	PBIAS (%)	PEE	ROV	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow Occurrence Time (10 min)
2009.07.12	Unconstrained optimization	0.94	0.32	1.54	1.00	0.50	0.18	7
	Constrained optimization	0.93	5.88	1.84	0.94	0.56	0.14	0
2009.07.14	Unconstrained optimization	0.95	-0.08	2.57	1.00	0.83	0.30	0
	Constrained optimization	0.94	0.86	2.58	0.99	0.86	0	0

### 3.4 모형의 검증 및 결과 고찰

#### 3.4.1 홍수유출 모의 모형의 검증

제약조건을 고려한 자동 보정의 신뢰성을 확인하기 위해 밀양댐 유역에 발생한 연속된 홍수사상에 대하여 보정과 검증을 수행하였다. 검증을 위해 연속된 홍수사상을 사용한 것은 초기 지하수위와 같은 초깃값 설정의 어려움에 근거한다. 검증에는 2002년 8월 7일~10일의 홍수사상이 사용되었고, 해당 기간의 총 강우량은 501.5mm이다.

Table 7은 무제약 최적화 및 제약 최적화에 의해 도출된 자동 보정과 검증의 결과를 나타낸다. 보정의 경우, 무제약 최적화에서는 침투유량의 오차가 7.92 m<sup>3</sup>/s, 침투유량 발생시간의 오차가 1시간 발생하였다. 반면에, 제약 최적화를 통한 침투유량의 오차는 0.004 m<sup>3</sup>/s로 크게 감소하였고, 침투유량 발생시간은 정확히 일치하였다. 또한, 모든 지표에서 벌칙함수를 고려한 제약 최적화의 결과가 무제약 최적화의 결과보다 우수한 것을 볼 수 있다.

후속된 홍수사상에 대한 검증 결과는 보정 결과와 유사하였다. 무제약 최적화에서는 침투유량 발생시간의 오차가 1시간 발생하였으나, 제약 최적화에서는 일치하였다. 침투유량 오차의 경우, 무제약 최적화에서 115.6 m<sup>3</sup>/s가 발생하였고, 제약 최적화에서는 100.2 m<sup>3</sup>/s로 다소 감소하였다. 각각의 침투유량 오차는 관측 침투유량(906.2 m<sup>3</sup>/s)의 12.8%와 11.1%에 해당된다. 즉, 제약을 통해 침투유량의 발생시간은 정확히 일치되었고, 침투유량의 상대오차(relative error)는 1.7% 개선되었다. 뿐만 아니라, 오차비율 추정량(PEE)을 제외한 모든 지표에서 제약 최적화의 결과가 무제약 최적화의 결과보다 우수한 것으로 나타났고, 특히, 수문곡선의 적합과 관계된 NSE와 평균 제곱오차의 제곱근이 크게 개선되었다.

침투유량과 침투유량 발생시간의 제약으로 인해 유량 수문곡선의 적합성이 높아진 것은 홍수 수문곡선의 구성에서 침투유량이 중심적인 역할을 하는 것에 근거한 결과

이다. 즉, 무제약 최적화에서는 전체 시계열의 적합도를 높이도록 계산되는 반면, 제약 최적화에서는 침투유량을 중심으로 수문곡선이 적합됨에 따라 개선된 결과가 도출된 것으로 판단된다.

Fig. 7은 2002년 8월 7일~10일의 홍수사상 대한 보정과 검증 결과를 동시에 나타낸 그림이다. 대체로 보정 및 검증 모두에서 제약 최적화에 의한 결과가 무제약 최적화에 의한 결과보다 관측자료에 근사하는 것을 볼 수 있다.

#### 3.4.2 추정된 매개변수의 비교

연구에서는 무제약 최적화와 제약 최적화에 의해 도출된 자동 보정 결과의 차이를 검토하기 위해 추정된 매개변수를 비교하였다(Table 8). Table 8은 검증에 사용된 밀양댐 유역의 2002년 8월 홍수사상에 대하여 추정된 매개변수이다. 무제약 및 제약 최적화에 의해 도출된 매개변수 값의 차이(difference)는 Eq. (4)에 의해 계산되었다.

$$\left| \frac{p_{\text{unconst}} - p_{\text{const}}}{(p_{\text{unconst}} + p_{\text{const}})/2} \right| \times 100 (\%) \quad (4)$$

여기서  $p_{\text{unconst}}$ 와  $p_{\text{const}}$ 는 각각 무제약 및 제약 최적화에 의해 도출된 매개변수의 값이다.

Table 8을 통해 무제약 및 제약 최적화에 의한 차이는 주로 불투수 지역의 지면 저류량(S-Imperv), 하도의 조도 계수(Manning N), 초기 지하수위(Water Table), 지하수 흐름 계수(A1)에서 비롯된 것을 알 수 있다. 하지만 밀양댐 유역은 투수지역이 대부분이므로 불투수 지역의 지면 저류량의 영향은 매우 작다. 이는 Fig. 8을 통해 후술된다. 따라서 침투유량의 오차를 개선하고, 침투유량 발생시간을 일치시키기 위해 하도의 저류효과와 지하수 유출량이 조정된 것으로 판단된다.

2002년 8월 홍수사상에 대한 보정에서 무제약 최적화에 의한 도출된 침투유량은 관측 침투유량에 비해 약 8 m<sup>3</sup>/s 작고, 침투유출 발생시간은 1시간 지체되어 나타났다. 하

Table 7. Verification Results for the Model Calibrated by the Optimization Methods

Storm Event	Condition	Optimization Method	Results						
			NSE	PBIAS (%)	PEE	ROV	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow Occurrence Time (hour)
2002.08.07 ~2002.08.10	Calibration	Unconstrained optimization	0.86	2.25	2.12	0.98	25.45	7.92	1
		Constrained optimization	0.88	0.20	2.10	1.00	23.29	0.004	0
	Verification	Unconstrained optimization	0.75	7.87	2.56	0.92	88.06	115.55	1
		Constrained optimization	0.83	6.51	2.95	0.93	73.78	100.22	0

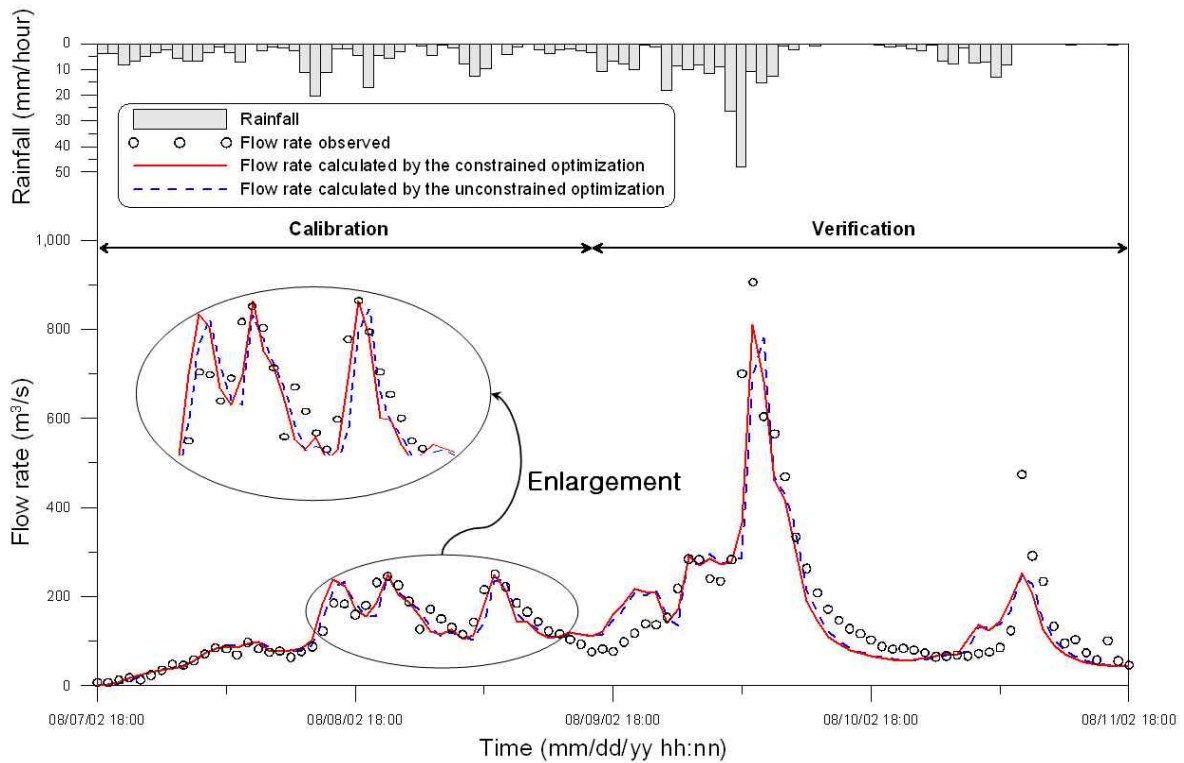


Fig. 7. Hydrographs Derived by the Model Verified for the Milyang Dam Basin

지만 제약조건을 고려함에 따라 침투유량의 오차는 0에 근사하였고, 침투유량 발생시간은 정확히 일치하였다. 제약 최적화에 의해 추정된 하도의 조도계수는 무제약 최적화에 의해 도출된 조도계수에 비해 작다. 하도의 조도계수는 작아질수록 홍수 도달이 빨라지고, 침투유량은 커진다. 이에 따라 제약 최적화에 의해 도출된 조도계수는 침투유량을 증가시키고 침투유출 발생시간을 앞당기도록 추정된 것이다.

Fig. 8은 소유역 12(Fig. 2의 B12)의 무제약 최적화 및 제약 최적화에 의해 계산된 지표면 유출과 지하수 유출을 비교하여 나타낸 그림이다. 우선, 지표면 유출의 경우 자

동 보정 방법에 관계없이 유사한 결과를 보였다. 즉, 불투수 지역의 지면 저류량과 같은 유역 매개변수가 최적화 방법에 따라 일부 다르게 결정되었지만, 해당 매개변수들에 의한 수문곡선의 변화는 거의 없었다. 지하수 유출의 경우 전체적으로 제약 최적화에 의한 유량이 무제약 최적화에 의한 유량보다 큰 것으로 분석되었다. 또한, 지하수 유출의 침투유량 발생시간도 제약 최적화에 의해 결정된 결과가 무제약 최적화에 의한 결과보다 1시간 빠르게 나타났다. 이는 제약조건을 고려함에 따라 지하수 매개변수가 하도의 조도계수와 유사하게 침투유량의 오차를 줄이고, 침투유출 발생시간을 맞추도록 조정된 것을 의미한다.

Table 8. Parameters Estimated by the Unconstrained and the Constrained Optimization

Variable	Unconstrained Optimization	Constrained Optimization	Difference (%)	Variable	Unconstrained Optimization	Constrained Optimization	Difference (%)
Pcnt. Imperv	0.819	0.800	2.35	Porosity	0.463	0.458	1.09
Width	0.800	0.801	0.12	Wilt Point	0.101	0.093	8.25
N-Imperv	0.013	0.015	14.29	Field Capac	0.190	0.192	1.05
N-Perv	0.400	0.400	-	Hyd Cond	3.313	3.308	0.15
S-Imperv	3.230	1.754	59.23	Cond Slop	9.986	9.998	0.12
S-Perv	6.368	6.395	0.42	Tens Slop	1,002	1,006	0.40
Pct Zero	20.658	19.805	4.22	Water Table	0.299	0.193	43.09
CN	0.800	0.801	0.12	Upper Moist	0.231	0.255	9.88
Manning N	0.049	0.021	80.00	A1	0.026	0.016	47.62
				B1	2.499	2.216	12.00

제약 최적화를 통해 추정된 매개변수가 무제약 최적화에 의해 추정된 매개변수보다 해당 유역과 강우의 특성을 잘 반영하여 도출된 결과로 단정할 수는 없다. 실제로 제약 최적화에 의해 추정된 하도의 조도계수는 0.021로서 설정된 범위(Table 2)의 하한 경계에 가깝다. 밀양댐 상류의 유역이 대부분 산지이고 하상경사가 급하다고 할지라도, 일반적인 하천의 조도계수에 비해서는 다소 작게 추정되었다. 그럼에도 불구하고 제약 최적화에 의한 결과는 무제약 최적화에 의한 결과에 비해 침투유량과 관련된 지표뿐만 아니라 전체적으로 개선된 수문곡선을 도출하였으므로, 제약 최적화에 의한 매개변수의 조합이 유역의 특성을 보다 잘 반영한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 집합체 혼합진화 알고리즘에 제약조건을 고려할 수 있도록 벌칙함수를 이용하여 목적함수를 구성하였다. 해당 알고리즘은 기존 SWMM의 자동 보정 모듈에 적용되어 홍수유출 모의 모형에 대한 자동 보정의 기능 향상을 위해 활용되었다. 홍수유출 해석에 있어서는 침투유량이 중요한 인자이므로 제약조건을 침투유량의 오차와

침투유량 발생시간의 오차를 제어하도록 구성하였다.

구성된 자동 보정 모듈은 밀양댐 유역과 구로1 빗물펌프장 배수유역에 대하여 각각 적용되었다. 제약조건을 고려한 자동 보정의 효과를 검토하기 위해 벌칙함수의 포함 유무에 따른 자동 보정의 결과를 비교하였다. 그 결과, 적용된 네 개의 홍수사상 모두에서 제약조건을 고려함에 따라 침투유량의 오차는 대부분 0에 근사하였고, 침투유량 발생시간은 정확히 일치하였다. 그리고 본래의 목적함수가 가지는 특성도 반영되어 계산된 수문곡선의 형상이 관측 수문곡선에 적합되었다. 또한, 제약조건을 고려한 자동 보정 모듈은 밀양댐 유역의 연속된 홍수사상에 대한 적용을 통해 검증되었다. 검증 결과는 보정 결과와 유사하게 침투유량 발생시간을 정확히 일치시켰고, 침투유량의 오차를 무제약 최적화에 의한 결과에 비해 개선시키는 것으로 분석되었다. 즉, 연구에서는 벌칙함수를 통해 침투유량에 관한 제약조건을 반영하여 홍수유출 모의 모형의 자동 보정에 관한 정확도를 향상시킬 수 있었다.

본 연구는 벌칙함수를 이용하여 제약조건을 반영할 수 있는 방법을 제시한 연구사례로서, 유역유출 연속모의(watershed runoff continuous simulation)와 수질 모의 등 다양한 수문현상의 최적화에 적용될 수 있을 것으로 판

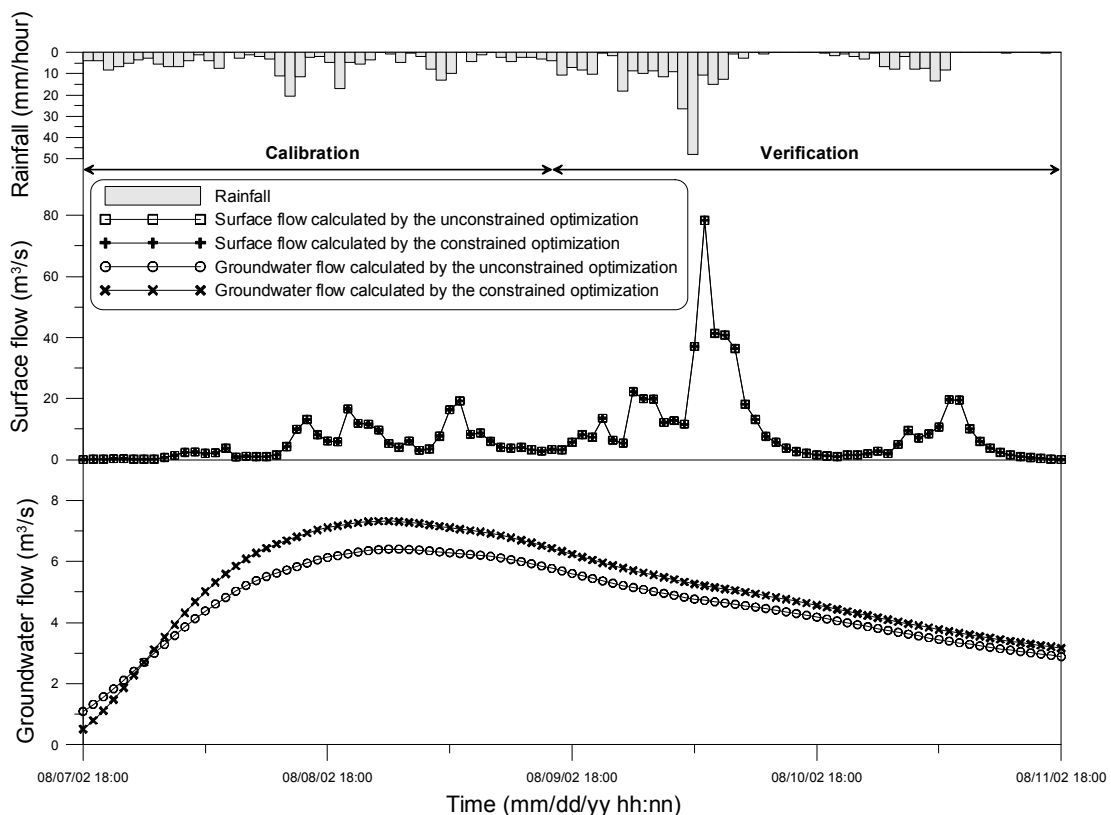


Fig. 8. Surface Flow and Groundwater Flow Calculated by the Optimization Methods for the Subcatchment No. 12 of the Milyang Dam Basin on August, 2002

단된다. 하지만 연구에서 제약조건을 고려하기 위해 적용된 정적 벌칙함수는 가장 단순한 형태의 벌칙함수로서 사용이 용이한 반면, 벌칙 매개변수를 추정해야 하는 어려움이 있다. 이러한 이유로 벌칙함수를 이용한 제약 최적화 문제에 관한 연구에서는 벌칙 매개변수의 자동 추정 등에 관한 연구들이 진행되고 있으므로, 향후 보다 효율적으로 제약조건을 고려할 수 있는 방법이 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문의 내용을 포함하고 있는 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0015 225)입니다. 연구비를 지원해 주신 한국연구재단에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

## REFERENCES

- Bae, D.H., and Cho, W.C. (1995). "Runoff analysis on the physically-based conceptual time-continuous runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 28, No. 6, pp. 193-202.
- Barco, J., Wong, K.M., and Stenstrom, M.K. (2008). "Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model for a large urban catchment." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 4, pp. 466-474.
- Chae, J. (2004). *Study of runoff management scheme in urbanization area using XP-SWMM*. M.Sc. thesis, Paichai University, Daejeon, Korea.
- Cho, J., and Lee, J. (2006). "Parameter optimization for runoff calibration of SWMM." *Journal of Environmental Impact Assessment*, Korean Society Environmental Impact Assessment, Vol. 15, No. 6, pp. 435-441.
- Cho, M.O., Yoon, J.Y., Jang, S.H., and Yoon, Y.N. (2007). "An analysis of flood runoff variations due to watershed development using SWMM." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 2B, pp. 125-132.
- Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.
- Duan, Q., Gupta, V., and Sorooshian, S. (1994). "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models." *Journal of Hydrology*, Vol. 158, pp. 265-284.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1015-1031.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1992). *Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual*. EPA/600/3-88/001a, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
- James, W., Huber, W.C., Dickinson, R.E., Pitt, R.E., James, W.R.C., Roesner, L.A., and Aldrich, J.A. (2005). *User's guide to SWMM*. CHI, Ontario, Canada.
- Javaheri, H. (1998). *Automatic calibration of urban run-off models using global optimization techniques*. M.Sc. thesis, McGill University, Montreal, Canada.
- Kang, M.G., Park, S.W., Im, S.J., and Kim, H.J. (2002). "Parameter calibration of a daily rainfall-runoff model using global optimization methods." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 35, No. 5, pp. 541-552.
- Kang, S., Lee, D., and Lee, S. (2004). "A study on calibration of Tank model with soil moisture structure." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 37, No. 2, pp. 133-144.
- Kang, T., Lee, S., Kang, S., and Park, J. (2012). "A study for an automatic calibration of urban runoff model by the SCE-UA." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 45, No. 1, pp. 15-27.
- Koo, B. (2006). *Global optimization of Tank model parameters using multi-objective genetic algorithm*. M.Sc. thesis, Sejong University, Seoul, Korea.
- Lee, K.S., Kim, S.U., and Hong, I.P. (2005). "Automatic calibration of rainfall-runoff model using multi-objective function." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 38, No. 10, pp. 861-869.
- Madsen, H. (2000). "Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives."

- Journal of Hydrology*, Vol. 235, pp. 276-288.
- Mallipeddi, R., and Suganthan, P.N. (2010). "Ensemble of constraint handling techniques." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 14, No. 4, pp. 561-579.
- Rao, S.S. (1996). *Engineering Optimization Theory and Practice*. John Wiley & Sons, N.Y., p. 488.
- Rossman, L.A. (2009). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory, Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Tessema, B., and Yen, G.G. (2009). "An adaptive penalty formulation for constrained evolutionary optimization." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 39, No. 3, pp. 565-578.
- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bastidas, L.A., Bouten, W., and Sorooshian, S. (2003). "Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 8, p. 1214.
- Yapo, P.O., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. (1998). "Multi-objective global optimization for hydrologic models." *Journal of Hydrology*, Vol. 204, No. 1-4, pp. 83-97.
- Yeniay, Ö. (2005). "Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms." *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 10, No. 1, pp. 45-56.

논문번호: 12-059	접수: 2012.06.11
수정일자: 2012.08.01/08.13	심사완료: 2012.08.13