

## 미호천유역 홍수모의 예측을 위한 SSARR 모형의 매개변수 보정 및 추정

이명진·김범준\*·김종성·김덕환·이동률\*\*·김형수<sup>†</sup>

인하대학교 토목공학과

\*한국시설안전공단

\*\*한국건설기술연구원

### Parameter Calibration and Estimation for SSARR Model for Predicting Flood Hydrograph in Miho Stream

Lee, Myungjin·Kim, Bumjun\*·Kim, Jongsung·Kim, Duckhwan·Lee, Dong ryul\*\*·Kim, Hung Soo<sup>†</sup>

Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

\*Korea Infrastructure Safety Corporation, Jinju, Korea

\*\*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Korea

(Received : 04 September 2017, Revised: 10 October 2017, Accepted: 11 October 2017)

#### 요약

본 연구는 SSARR모형을 이용해 금강유역의 미호천 유역에 대하여 홍수모의예측을 수행하였다. 먼저 모형의 매개변수의 특성을 알고, 범위를 설정하기 위해 모형의 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 매개변수 보정을 위하여 유전자 알고리즘, 패턴탐색, SCE-UA 등의 최적화 방법을 이용하였고, 목적함수로는 WSSR과 SSR를 적용하였으며, 최적화 방법과 목적함수에 따른 결과를 비교, 분석하였다. 본 연구 결과 최적화 방법으로는 패턴탐색이, 목적함수로는 WSSR을 사용하였을 때, 홍수 예측이 가장 정확하였다. 본 연구 결과를 활용하여 각 모형의 매개변수를 최적화한다면, 홍수 예측 및 홍수 예경보와 같은 의사결정에 유용하게 활용 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : SSARR 모형, 목적함수, 패턴탐색, 유전자 알고리즘

#### Abstract

This study used SSARR model to predict the flood hydrograph for the Miho stream in the Geum river basin. First, we performed the sensitivity analysis on the parameters of SSARR model to know the characteristics of the parameters and set the range. For the parameter calibration, optimization methods such as genetic algorithm, pattern search and SCE-UA were used. WSSR and SSR were applied as objective functions, and the results of optimization method and objective function were compared and analyzed. As a result of this study, flood prediction was most accurate when using pattern search as an optimization method and WSSR as an objective function. If the parameters are optimized based on the results of this study, it can be helpful for decision making such as flood prediction and flood warning.

Key words : SSARR Model, Objective Function, Pattern Search, Genetic Algorithm

## 1. 서 론

우리나라는 국토의 68%가 산지로 구성되어 있어서 강우 발생 시 지표면에 떨어진 강우는 급속하게 하천으로 유출되는 특성을 가지고 있다. 이러한 지리적, 기후적 특성으로 매년 장마와 태풍 등이 발생하며, 이로 인한 홍수 때문에 엄청난 인명 및 재산 피해를 겪고 있다 (Kim et al., 2008). 최근에는 기후변화로 인해 홍수 및 가뭄 빈도가 증가하고 있고,

이는 자연재해를 사전에 예방하는 의사결정에도 큰 어려움을 가중시키고 있다 (Kim et al., 2016). 홍수 시 하류에서 수위나 유량의 정확한 예측은 홍수예보 및 댐의 운영 등을 위해 매우 중요하다고 할 수 있으며, 수자원 계획 및 관리를 위해서도 중요한 입력 정보자료로 이용할 수 있다. 홍수를 예측하기 위해서는 강우-유출 모형의 특성을 대표하는 매개변수의 추정이 필요하며, 정확한 매개변수의 추정은 모형의 신뢰도를 결정하는 중요한 요소이다.

매개변수 자동보정에 대한 국외 연구를 살펴보면 Duan et al.(1992)은 개념적 강우-유출 모형의 전역해(Global Optimum)를 구하기 위한 방법으로 SCE-UA를 제시하고,

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
Department of Civil Engineering, Inha University.  
E-mail: sookim@inha.ac.kr

이를 SIXPAR모형의 매개변수 보정에 적용하여 Adaptive Random Search와 Multi-Start Simplex법을 비교하였다. Cheng et al.(2002)은 Xinanjiang모형 보정에 GA와 퍼지최적모형(Fuzzy Optimization Model, FOM)을 결합하여 성공적으로 보정하였다. Y.Chen et al.(2016)은 물리적 기반의 분포형모형인 Liuxihe 모형의 매개변수를 최적화하기 위하여 군집최적화 알고리즘을 사용하였다. 중국 남부지역의 2개의 유역을 대상으로 매개변수 최적화의 성능을 평가한 결과 철두 유량의 상대오차가 2.4% 감소하는 것을 확인하였다. J.Huo et al.(2017)은 기존에 존재하는 최적화 기법인 Artificial Bee Colony(ABC) 알고리즘을 향상시킨 modified ABC algorithm(ORABC) 알고리즘을 개발하여 수문학적 모형의 매개변수 최적화 모듈을 개발하였다. Xinanjiang 수문 모형과 연계하여 매개변수의 최적화를 수행하였고, 그 효율성과 효과성을 입증하였다.

국내의 경우 Lee and Kim(2001)은 낙동강 유역에 SSARR모형을 적용하고, 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 매개변수를 보정하였다. 2가지 목적함수를 사용한 결과 시기적 구분을 둔 목적함수가 더 좋은 결과를 나타내었고, GA를 사용한 보정결과가 수동보정의 보정결과보다 관측유량과 가까운 계산유량을 모의함을 확인하였다. Sung et al.(2004)은 다양한 목적함수에 Pattern Search Multi-Start, SCE-UA 그리고 GA로 SIMHYD와 Tank모형의 매개변수 보정에 대한 적용성을 연구하였다. Song et al.(2006) 및 Kim et al.(2008)은 저류함수모형의 매개변수의 특성을 알기 위해 민감도 분석을 수행하고, 패턴탐색, 유전자알고리즘, SCE-UA를 사용하여 매개변수를 최적화한 뒤, SSR(Sum of Squared of Residual) 및 WSSR (Weighted Sum of Squared of Residual)의 목적함수를 적용하여 그 성능을 평가하였다. Gang and Lee(2014)는 전역최적화 알고리즘인 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용하여 SWMM 모형 내 매개변수의 적절한 탐색범위를 설정하였다. 보정된 모형의 적절성을 평가하기 위해 Moreiasi et al. (2007)이 제안한 평가지표를 활용한 결과, 유역유출의 보정 및 검증 결과는 대체로 '매우 좋음'(Very good)의 기준을 만족하였다. Im et al.(2016)은 SWMM 모형의 신뢰도를 확보하기 위해 화음탐색법(Harmony Search) 알고리즘을 결합하여 매개변수의 적정 범위를 설정하고, 매개변수를 추정하였다.

국내에서는 모형의 정확한 예측을 하는 연구보다는 기후변화에 따른 치수대책에 대한 연구(Han et al.(2016), Choi et al.(2016))나 다양한 최적화 및 보정 기법을 사용한 유출 해석에 관한 연구(Kim et al.(2010), Kim et al.(2014), Lee et al.(2014))가 진행되고 있다.

기존 국내·외의 선행연구를 살펴보면 매개변수를 최적화하기 위해 다양한 최적화 기법을 사용하였지만, 유역 특성에 맞는 매개변수의 범위를 제시하지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 SSARR 모형의 매개변수들의 민감도를 분석함으로써 각각의 매개변수들의 특징을 살펴보고, 매개변

수의 적정 범위를 설정하였다. 또한, 매개변수들을 여러 가지 최적화 기법과 목적함수를 달리 이용하여 보정하여 그 결과를 비교·분석을 실시하였다.

## 2. SSARR 모형 및 매개변수 결정 방법

### 2.1 SSARR 모형

SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) 모형은 미국 공병단의 북태평양지부에서 수자원시스템의 설계, 계획 및 관리를 위해 개발한 수학적 수문모형으로서 1956년 처음 개발된 이래, 지속적인 보정이 이루어지고 있는 모형이며, 저수지 조작, 대유역의 실시간 일유출예보 등의 목적으로 널리 사용되고 있는 모형이다. 이 모형은 미국의 Columbia 강과 베트남의 Mekong 강 등에 성공적으로 적용되어진 바 있으며, 강우뿐만 아니라 강설에 따른 유출도 가능한 모형으로 다른 강우-유출 모형보다 장점을 가지고 있다.

SSARR 모형은 1975년 유역 및 하도추적에 대한 기본 골격을 갖추었으며(SSARR-4), 이후 Integrated Snowband 유역모형과 운영 예보(Operational Forecasting) 기능이 추가되어(SSARR-8) 현재에 이르고 있다. SSARR-8은 산악지역에서의 강설에 대한 유출해석을 대폭 강화시킨 것으로 강우만을 해석하는 경우 저수유출관리와 같은 장기적인 유출관리 모의와 증발산 기능이 보완 되어진 모형이다.

SSARR 모형의 유역수문모형과 하도모형에서 채택하고 있는 기본적인 추적 방법은 Nash 모형과 유사한 Cascade of Reservoir 방법으로서, 홍수파가 연속적인 일련의 저수지를 통과하면서 평행이동과 지체효과를 갖게 되는 방법이다. 모형에서 채택하고 있는 기본 추적방정식은 유역이나 하도 혹은 저수지를 통한 홍수류의 연속방정식인 저류방정식으로, 이는 각각 식 (1)과 식 (2)와 같다. 식 (1)에서 저류량과 유출량은 식 (2)과 같이 선형이라고 가정한다.

$$I_t = O_t + \frac{dS_t}{dt} \quad (1)$$

$$S_t = T_s O_t \quad (2)$$

여기서,  $I_t$ ,  $O_t$ 는 각각 임의의 시간 t에서 유입량, 유출량이며,  $S_t$ 는 저류량,  $T_s$ 는 저류상수(Storage Constant)이다. 식 (1)은 식 (3)으로 표현할 수 있으며, 식 (2)을 식 (3)에 대입하면 식 (4)과 같은 추적식을 얻게 된다.

$$[(I_1 + I_2)/2 - (O_1 + O_2)/2]\Delta t = S_1 - S_2 \quad (3)$$

$$O_2 = O_1 + \Delta t(I_m - O_1)/(T_s + \Delta t/2) \quad (4)$$

여기서, 아래첨자 1, 2는 각각 계산 시작점과 종점을 나타내며,  $I_m$ 은  $\Delta t$  시동안 평균유입량이며,  $\Delta t$ 는 계산시간 간격이다. 식 (4)에서 계산된 계산종점의 유출량  $O_2$ 를 다음 추적기간의 시작점 유입량으로 하고 계산과정을 반복하여 유출량을 계산한다.

## 2.2 목적함수

목적함수는 모형거동의 측정치 역할을 하며, 그 값은 참값에 대한 추정값의 근접정도를 나타낸다. 그러나 특정한 목적함수가 다른 목적함수보다 모형보정에 더 적절하다고 명확하게 주장할 수 없으며, 목적함수에 따라서는 대상구역의 최상의 매개변수를 찾을 수 없는 경우도 있다 (Kim et al., 2008). 본 연구에서의 목적함수는 일반적으로 사용되는 SSR과 Song et al.(2006)과 Kim et al.(2008)에 의해 제안된 WSSR을 적용하였다.

### 2.2.1 SSR(Sum of Squared of Residual)

첫 번째로 실측유량과 계산유량의 편차의 제곱의 합을 사용하였으며, SSR의 목적함수 식은 식(5)와 같다.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_c(i)]^2 \quad (5)$$

여기서,  $n$ 은 자료의 수,  $Q_o$ 는 실측유량,  $Q_c$ 는 계산유량을 각각 나타낸다. 수문모의모형의 매개변수 최적화시 목적함수로 가장 보편적으로 쓰이는 지표이다. 단순히 오차를 누가한다는 개념이어서 자료의 개수에 영향을 받고 이상 자료에 의한 영향이 크다.

### 2.2.2 WSSR (Weighted Sum of Squared of Residual)

두 번째로 목적함수 SSR에 첨두값과 침두값 발생시간에 대한 가중치를 준 WSSR을 사용하였으며 WSSR의 목적함수는 식 (6)과 같다(Song, 2006).

$$F = \left[ \sum_{j=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i))^2 \right] \times W_1 \times W_2 \quad (6a)$$

$$W_1 = 1 + \frac{|Q_{obs,peak} - Q_{sim,peak}|}{Q_{obs,peak}} \quad (6b)$$

$$W_2 = 1 + \frac{|T_{obs,peak} - T_{sim,peak}|}{T_{obs,peak}} \quad (6c)$$

여기서  $i$ 는 관측자료의 개수이고  $Q_{obs}$ 는 관측유량,  $Q_{sim}$ 은 모의유량,  $Q_{obs,peak}$ 는 관측첨두유량,  $Q_{sim,peak}$ 는 모의 첨두유량,  $T_{obs,peak}$ 는 관측첨두유량 발생시간, 그리고  $T_{sim,peak}$ 는 모의 첨두유량 발생시간이다.

## 2.3 매개변수 최적화 기법

### 2.3.1 유전자 알고리즘(GA)

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)이란 “적자생존”의 생물학 원리에 바탕을 둔 최적화 기법 중 하나로 자연계의 생명체 중 환경에 잘 적응한 개체가 좀 더 많은 자손을 남길 수 있다는 자연선택 과정과 자연계의 생명체의 설계도와 같은 유전자의 변화를 통해서 좋은 방향으로 발전해 나간다는 자연 진화의

과정인 자연계의 유전자 메카니즘에 바탕을 둔 탐색알고리즘이다. 탐색의 방향이나 영역의 초기값에 의해서 결정되지 않고 세대마다 확률적으로 결정되므로 지역 최소점에 빠질 가능성이 적어 전역 최적화가 가능한 알고리즘으로 알려져 있다. 유전자 알고리즘은 초기 군집을 랜덤하게 생성한 뒤, 초기 유전자집단에 대한 적합도를 계산한다. 그 후, 유전자 알고리즘 연산자와 선택된 개체들로부터 교배(Crossover), 변이(Mutation), 선택(Selection) 등의 과정을 거쳐 다음 세대를 생성한다. 생성된 새로운 개체에 대한 적합도를 계산하고, 개체에 대한 적합도가 만족할 때까지 수행되는 과정이다.

### 2.3.2 패턴탐색(Pattern Search)

패턴 탐색(Pattern Search)은 직접 탐색법으로 다중 변수함수로 확장이 가능하고 직접 탐색법 중 효율이 비교적 높고 강력한 기능을 가졌다(이철균, 2001). 패턴 탐색은 동적인 방법으로 여러 차원의 탐색 방향을 유지하고 생성하는 체계적인 직접 탐색법이다. 목적함수 값의 향상을 위해서 이동이 수행된다. 시험적인 이동의 성공 또는 실패는 목적함수의 변화에 대한 기본적 지식을 제공한다. 만약 패턴의 이동이 성공적이었다면 단계의 증분이 변화하여 최저점에 이르게 하는 최적화 방법이다. 패턴탐색은 시작점에서 목적함수가 작아지는 방향으로 이동하고, 증분이 변하면서 최적해를 탐색한다. 식 (7)은 패턴의 방향과 크기, 패턴의 이동 과정을 나타내는 패턴 탐색의 기본 식이다.

$$[S_1, S_2] + \Delta \times [a, b] = [S_2, S_2] \quad (7)$$

여기서  $S_1$ 과  $S_2$ 는 시작점을 나타내며,  $\Delta$ 는 증분을 나타낸다.  $[a, b]$ 는 이동 방향을 나타내는 방향 벡터를 나타내고,  $a$ 와  $b$ 는 -1, 0, 1 값을 갖는다. 계산 결과인  $S_1$ 과  $S_2$ 는 다른 탐색의 시작점이 되며, 이는 종료 조건에 만족할 때 까지 변한다. 즉 결과인  $[S_1, S_2]$ 의 목적함수가 작아지는 방향과 크기로  $\Delta$ 와  $[a, b]$ 가 변하며, 만족할 만한 목적함수 값을 구하거나 종료 조건에 도달할 때 까지  $[S_1, S_2]$ 를 반복 계산한다.

### 2.3.3 SCE-UA

전역 탐색법 중 하나인 SCE-UA법은 개념적 수문모형의 매개변수 보정 시 발생하는 문제인 한 개의 수렴영역 보다 많은 유인 영역 존재, 각각 영역에 존재하는 다수의 국부 최적치의 존재, 불연속적인 도함수를 갖는 거친 반응표면의 존재, 목적함수에 대한 민감도가 낮은 매개변수의 존재, Non-convex 표면의 존재 등의 문제를 해결하기 위해 Duan et al.(1992)에 의해 제안 되었다.

SCE-UA법은 Simplex법, Controlled Random Search법, 경쟁적 진화 등과 같은 기존 탐색기법의 장점에 집합체의 혼합(Complex Shuffling)이라는 새로운 개념을 도입한 혼합형의 전체 탐색법이다. SCE-UA법은 자연진화의 과정에 최적해 탐색과정을 도입한 것으로,  $s$ 개의 선정된 점을 하나의 모집단(Population)으로 구성하며, 이 모집단은 몇 개의 집합체로 나누어지고, 이들은 독립적으로 서로 다른 방향으로 탐색공간을 찾아서 진화하게

된다. 진화한 몇 세대 후, 이들 집합체들은 혼합되어 재분할과정을 거쳐 재형성된다. 이 과정 통하여 각각의 집합체에서 독립적으로 얻은 탐색공간에 대한 정보를 공유함으로써 부모세대의 생존가능성을 높게 된다. 진화과정의 경쟁성을 보장하기 위하여 양호한 부모세대가 불량한 부모세대 보다 자손세대의 생성에 기여할 확률을 높이기 위해서 삼각형 확률분포를 이용한다. 삼각형 확률분포는 단 세 가지의 값, 즉 최소값, 최빈값, 최대값만 가지고 있으면 그려낼 수 있는 분포이다(Kim, 2005).

$$f(x) = \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, \quad \text{if } a \leq x \leq b \quad (8a)$$

$$f(x) = \frac{2(c-x)}{(c-a)(c-b)}, \quad \text{if } b < x \leq c \quad (8b)$$

$$f(c) = 0, \quad \text{otherwise} \quad (8c)$$

(a : 최소값 b : 최빈값 c : 최대값)

Nelder와 Mead(1965)의 Simplex법을 부집합체의 진화에 적용하여 진화가 발전된 방향으로 진행하도록 하였으며, 가능해 공간의 탐색 중에 예상치 않은 영역에서 진화가 멈추지 않게 하기 위해서 자손의 개념의 도입되었다. 이것은 자연의 생물학적 진화에서 일어나는 스트레스에 대한 반응인 돌연변이와 유사하다. 이러한 개념은 모집단에 저장된 정보량을 증가시키게 되며, 새로운 자손들은 부모세대가 바뀌거나 소멸되기 전에 재생산에 기여할 최소한의 기회를 주기 위해 부집합체에 존재하는 불량한 점들을 대체한다.

### 3. 적용 및 결과

#### 3.1 대상유역 및 기초자료 수집

본 연구에서의 대상유역은 미호천유역으로서 이 유역은 금강유역의 북쪽 중앙부에 위치하고 있다. 유역의 북쪽 및 동쪽은 한강 유역, 북서쪽은 안성·삽교천 유역, 남쪽은 금강과 접하고 있으며, 그 유역면적은 1850km<sup>2</sup>로서 금강 전 유역면적의 18.8%를 점하고 미호천의 유로연장은 87.3km이다. Fig. 1은 대상유역인 금강의 미호천과 유역도를 나타낸 그림이다. 유역도에 있는 번호는 소유역 번호를 나타낸다. 미호천 유역은 각각 4개의 소유역과 하도로 분할되어 있으며, 각 소유역은 SSARR모형에서 유역매개변수(SMI<sub>o</sub>, BII<sub>o</sub>, KSS, T<sub>s</sub>, T<sub>ss</sub>, n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>) 7개, 그리고 각 하도는 하도매개변수(KTS, n, n<sub>1</sub>) 3개가 존재하며, 총 60개의 매개변수가 존재한다.

적용을 위해 미호천 유역 내의 모든 관측지점에서 홍수의 특성을 나타내고 홍수량의 변화가 심하지 않은 사상을 홍수사상으로 선정하였다. 총 6개의 홍수사상을 선정하여 1997년~2003년까지의 총 4개의 사상으로 보정을 실시하고, 2004년과 2006년의 홍수사상으로 검증을 수행하였다. Table 1은 적용된 홍수사상에 대한 자료와 기간을 나타내고 있다. 적용을 사용한 경우는 티센면적강우량을 사용하였으며, 기저유량은 ‘용담발전 및 미호천에 대한 금강홍수예경보 시스템’(건설교통부, 2004)에 제시된 소유역 별 기저유량을 사용하였다.

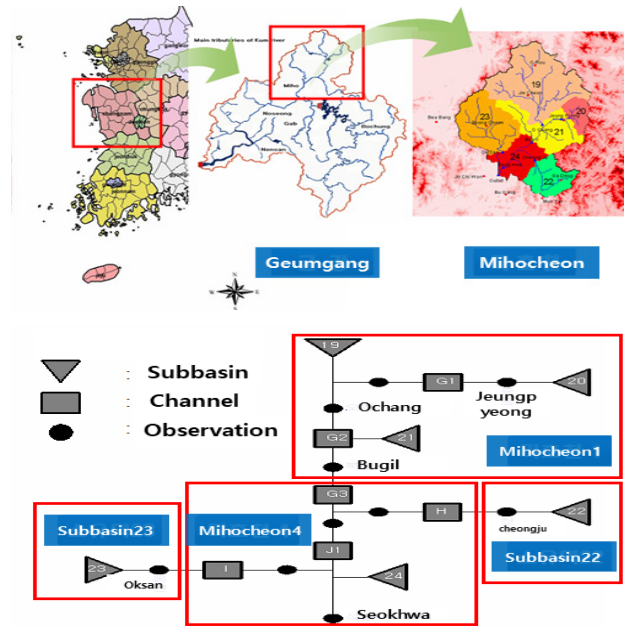


Fig. 1. Study area and runoff map of Miho stream.

Table 1. Flood event

	Data Period	
	Calibration Event	1997. 06. 30 ~ 1997. 07. 10
1999. 08. 01 ~ 1999. 08. 06		
2002. 08. 04 ~ 2002. 08. 12		
Validation Event	2003. 07. 20 ~ 2003. 07. 27	
	2004. 06. 18 ~ 2004. 06. 24	
	2006. 07. 09 ~ 2006. 07. 25	

Table 2. Average runoff curve number(CN) of subbasin

Subbasin Number	Average Runoff Curve Number (CN)	Subbasin Number	Average Runoff Curve Number (CN)
19	69.03	22	71.59
20	70.10	23	66.32
21	71.65	24	75.99

SSARR 모형의 유역매개변수에서 SMI-ROP 관계곡선은 토양의 습윤 상태를 나타내는 지표로서 가로축에는 토양수분깊이(Soil moisture Index)와 세로축에는 유출율(Runoff Percent)을 나타내어 강우에 의해 발생 가능한 총 유출률을 결정할 수 있고, BII-BFP 관계곡선은 SMI-ROP관계에 의해 산정된 총 유출량을 직접유출과 기저유출로 분리하기 위한 관계곡선으로 SSARR 모형에서 민감한 변수 중 하나이다. 본 연구에서는 ‘실시간 물관리 운영시스템 구축개발’(과학기술부, 2004)에서 제시된 금강유역의 소유역 별 SMI-ROP 관계곡선과 BII-BFP 관계곡선을 사용하였으며, 최적화 기법을 사용한 보정 시에는 각각 관계곡선에서 초기 SMI값과 초기 BII값을 매개변수로 사용하였다.

소유역의 평균유출곡선지수(CN)값에 따라 다음과 같이 3가지로 나누었다. CN값이 68~70인 소유역은 SMI-a와

BII-a, CN값이 71~73인 소유역은 SMI-b와 BII-b, 그리고 CN값이 73 이상인 소유역은 SMI-c와 BII-c 관계를 각각 적용하였다. 여기서 소유역의 CN값은 ‘용담법 및 미호천에 대한 금강홍수예경보 시스템’ (건설교통부, 2004)에서

소유역 별로 제시된 CN값을 사용하였다. Table 2는 대상 유역인 미호천 유역의 소유역 별 평균유출곡선지수를 나타낸 표이다. 그리고 Table 3과 Table 4는 각각 소유역 별 SMI-ROP 관계와 BII-BFP 관계를 나타낸 표이다.

**Table 3.** SMI-ROP relationship

SMI (cm)	ROP(%)		
	SMI-a	SMI-b	SMI-c
0	7	8	9
1	18	19	21
2	41	43	49
3	65	68	79
4	83	85	91
5	91	93	98
10	100	100	100
999	100	100	100

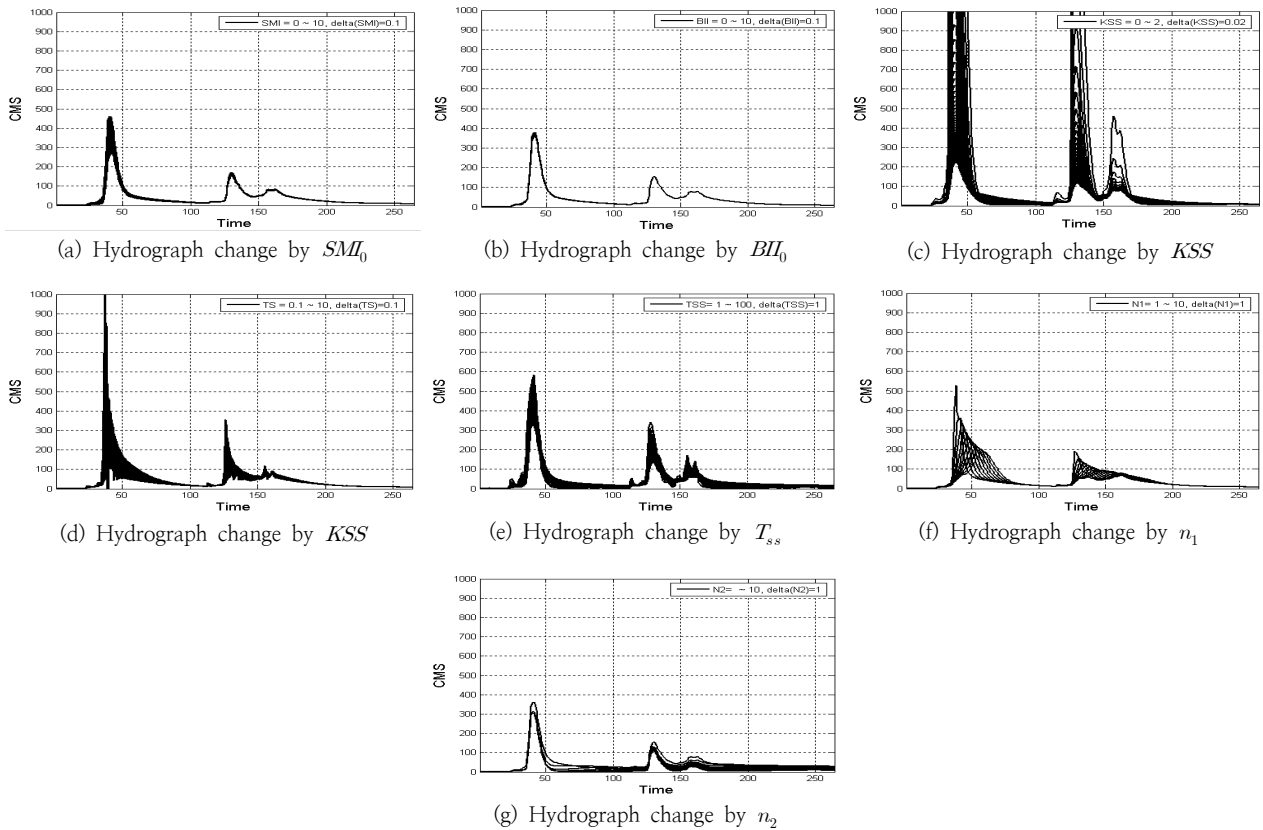
**Table 4.** BII-BFP Relationship

BII (cm/day)	BFP(%)		
	BII-a	BII-b	BII-c
0.0	46	45	42
1.0	17	16	15
1.5	15	14	12
2.0	13	13	11
2.5	12	12	10
3.0	11	11	10
5.0	10	10	10
100.0	10	10	10

**3.2 매개변수 민감도 분석**

강우-유출모형의 매개변수를 최적화 기법을 사용하여 보정하는데 있어서 적절한 매개변수의 범위를 설정하는 것이 필요하다. 매개변수의 범위의 설정에 따라 다른 결과가 나타나는 경우도 발생하므로, 강우-유출모형의 매개변수 범위를 산정하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 매개변수의 보정을 실시하기 전에, 매개변수의 범위를 설정하는 민감도 분석은 각 모형의 매개변수에 대한 특성을 파악하고, 대상유역 관측지점의 유량에 영향을 미치는 소유역과 매개변수를 파악할 수 있게 한다.

민감도 분석은 각 유역에서 수동 보정을 통하여 적절한 매개변수 set을 설정한 뒤, 각각의 매개변수가 가질 수 있는 범위 내에서 수문곡선의 변화를 알아본다. 민감도 분석의 대상인 매개변수는 범위 내에서 일정한 간격으로 변화를 주고 나머지 매개변수는 설정된 set의 매개변수를 사용하였다. 그리고 관측유량과 계산유량의 체적유량상대오차 (Relative Volume Error)를 알아봄으로써 적절한 매개변수의 범위를 설정하였다. 식 (9)는 체적유량상대오차를 나타낸 식이다. 여기서 RVE는 체적유량상대오차이고,  $Q_{obs}$ 는 관측유량,  $Q_{sim}$ 은 계산유량을 나타낸다.



**Fig. 2.** Hydrograph change by parameter change

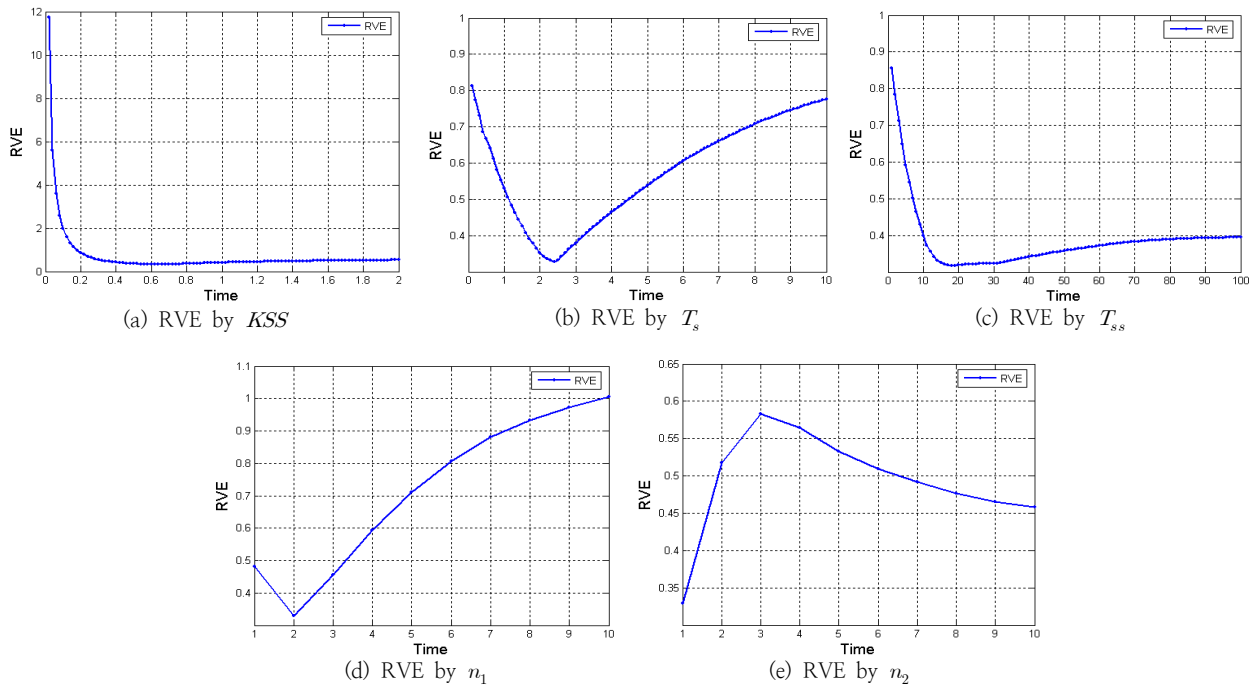


Fig. 3. RVE value by parameter change.

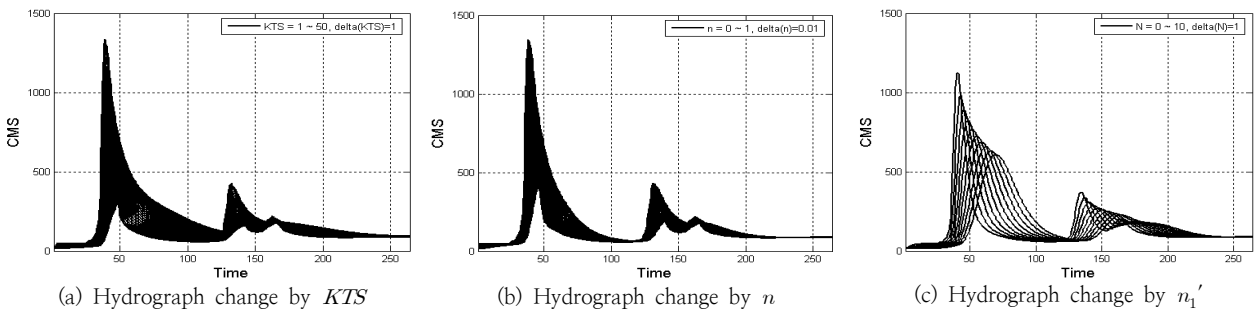


Fig. 4. hydrograph Variation by channel parameter change.

$$RVE = \frac{\sum(abs(Q_{obs} - Q_{sim}))}{\sum(Q_{obs})} \quad (9)$$

Fig. 2는 1997년 사상에 대한 각 매개변수별 민감도를 나타내는 결과이고, Fig. 3은 매개변수에 따른 RVE값을 나타낸 결과이다. Fig. 2를 통해 SSARR 모형의 유역매개변수 중에  $KSS$ ,  $T_s$ ,  $n_1$  등이 수문곡선에 영향을 많이 미침을 알 수 있다. 그러나  $SMI_0$ 와  $BII_0$ 의 매개변수는 민감도가 매우 작은 결과가 나왔다. 이는 SSARR 모형에서 SMI의 초기값인  $SMI_0$ 와 BII의 초기값인  $BII_0$ 보다 SMI-ROP 관계와 BII-BFP 관계가 중요하기 때문으로 판단된다. 지표수 유출과 지표하유출을 분리 단계는 S-SS 관계 곡선을 이용하지 않고 일반적인 식에서  $KSS$ 의 매개변수를 사용하였으며, 수문곡선에 가장 영향을 많이 미쳤다.  $T_s$ 와  $n_1$ 이  $T_{ss}$ 와  $n_2$ 보다 민감도가 큰 것은 유출수문곡선에 지표면 유출이 지표하 유출보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. Fig. 3은 유역매개변수의 변화에 따른 RVE값이다. 비교적

민감도가 큰 유역매개변수는 매개변수의 변화에 따라 RVE 값의 변화가 큰 특징을 보임을 알 수 있다.

SSARR 모형의 하도매개변수인  $KTS$ ,  $n$ ,  $n_1'$ 도 민감도 분석을 실시하였으며, Fig. 4는 하도의 매개변수에 따른 민감도를 나타낸 그림이다. SSARR 모형의 하도매개변수는 매개변수 3개 모두 민감도가 큰 것으로 나타났다.

Table 5. Parameter range of Miho stream

Basin parameter	Subbasin parameter range	Channel parameter	Channel parameter range
$SMI_0$	0 ~ 10	$KTS$	0 ~ 30
$BII_0$	0 ~ 5		
$KSS$	0.5 ~ 2	$n$	0 ~ 0.5
$T_s$	0 ~ 7		
$T_{ss}$	0 ~ 50	$n_1'$	1 ~ 5
$n_1$	1 ~ 5		
$n_2$	1 ~ 5		

민감도가 작은 매개변수의 범위는 넓게 설정하고, 큰 매개변수의 범위는 RVE의 결과에 따라서 좁게 설정하는 방법으로 미호천의 소유역과 하도의 매개변수 범위를 설정하였다. 매개변수는 각 소유역과 각 하도가 모두 만족하는 범위로 설정하였다. Table 5는 미호천의 소유역과 하도의 매개변수 범위를 나타낸 표이다.

### 3.3 보정기법 및 목적함수의 적용

본 연구에서는 SSARR모형을 미호천 유역에 적용하여 매개변수를 보정하고자 한다. 표 5에서 제시된 매개변수의 범위에서 유전자 알고리즘, 패턴탐색, SCE-UA의 최적화 방법을 적용하여 매개변수의 보정을 실시하였다. 모형거동의 측정치 역할을 하는 목적함수로는 SSR과 WSSR을 사용하여 추정값의 근접정도를 평가하였다.

보정에 대한 평가를 하기위해 결정계수인  $R^2$ (Coefficient of Determination), RMSE(Root Mean Square Error)를 관측점두 유량으로 나누어 무차원화 시킨 NRMSE(Non-dimensional Root Mean Square Error), 그리고 관측과 모의점두유량의 차를 관측점두유량으로 나눈 RE(Relative Error of Peak)의 평가함수를 사용하였다. 사용한 평가함수

의 식은 10~12와 같다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{obs,ave})(Q_{sim}(i) - Q_{sim,ave})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{obs,ave})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}(i) - Q_{sim,ave})^2}} \quad (10)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i)]^2}}{Q_{obs,peak}} \quad (11)$$

$$RE = \frac{|Q_{sim,peak} - Q_{obs,peak}|}{Q_{obs,peak}} \quad (12)$$

SSARR 모형에 보정방법인 유전자 알고리즘, 패턴탐색, SCE-UA를 적용하여 보정을 하였다. 각 보정방법별 평가함수 값은 유역별로 다음 Table 6과 같이 나타내었으며, Fig. 5는 보정방법별 보정수문곡선의 대표적인 예이다. 다음으로 목적함수 SSR과 WSSR을 소유역 22와 23에 적용하여 비교·분석하였다. 각 목적함수별 평가함수 값은 다음 Table 7에 나타내었으며, Fig. 6은 목적함수별 보정수문곡선의 대표적인 예이다.

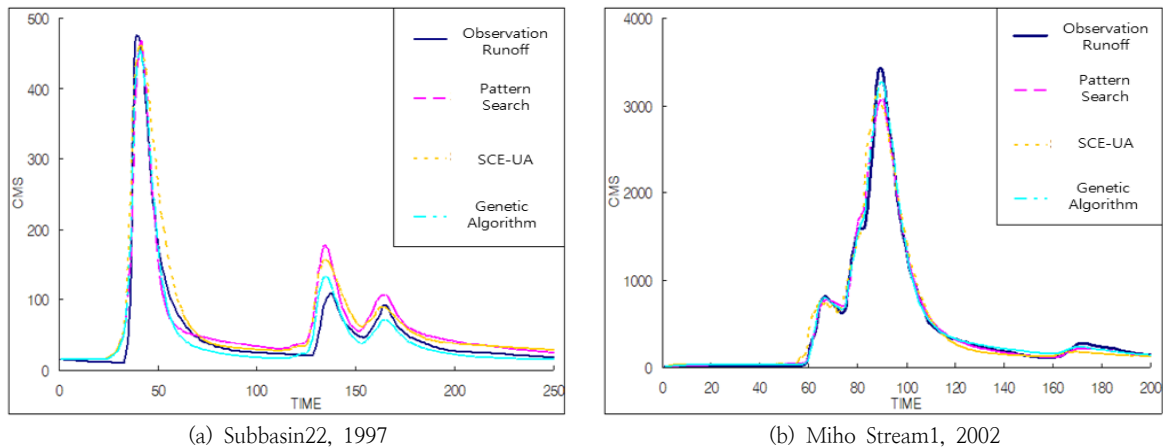


Fig. 5. Hydrograph by Calibration Method

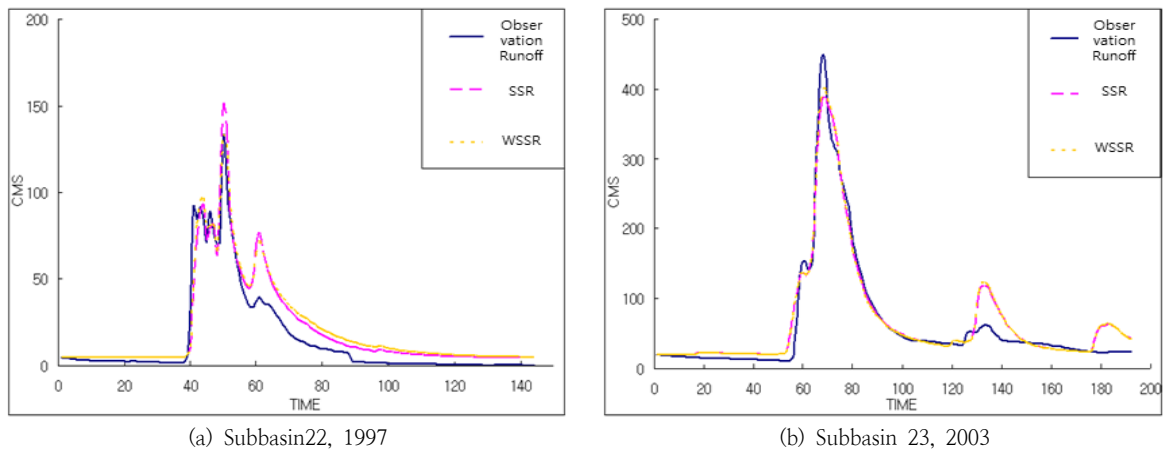


Fig. 6. Hydrograph by Objective Function

**Table 6.** Evaluation Function Value by Calibration Method

(a) Subbasin 22

Objective Function	Rain Event	Evaluation Function	Calibration Method		
			Genetic Algorithm	Pattern Search	SCE-UA
SSR	1997	$R^2$	0.9655	0.9633	0.9638
		NRMSE	0.0375	0.0367	0.0412
		RE	0.0008	0.0005	0.0614
	2002	$R^2$	0.9288	0.9337	0.8854
		NRMSE	0.0644	0.0610	0.0781
		RE	0.1744	0.1645	0.0073

(b) Miho Stream1

Objective Function	Rain Event	Evaluation Function	Calibration Method		
			Genetic Algorithm	Pattern Search	SCE-UA
SSR	1997	$R^2$	0.9739	0.9785	0.9391
		NRMSE	0.0425	0.0349	0.0676
		RE	0.0484	0.0906	0.0584
	2002	$R^2$	0.9953	0.9910	0.9743
		NRMSE	0.0147	0.0217	0.0352
		RE	0.0420	0.1005	0.0633

**Table 7.** Evaluation Function Value by Objective Function

(a) Subbasin 22

Calibration Method	Rain Event	Evaluation Function	Objective Function	
			SSR	WSSR
Pattern Search	1997	$R^2$	0.9633	0.9552
		1999	0.0367	0.0382
		2002	0.0005	0
	2002	$R^2$	0.9337	0.9337
		NRMSE	0.0610	0.0598
		RE	0.1645	0.1441

(b) Subbasin 23

Calibration Method	Rain Event	Evaluation Function	Objective Function	
			SSR	WSSR
Pattern Search	1997	$R^2$	0.9362	0.9303
		1999	0.0470	0.0544
		2002	0.0092	0.1070
	2002	$R^2$	0.7996	0.7991
		NRMSE	0.1396	0.1367
		RE	0.3879	0.3727

보정 방법별, 목적함수별 결과는 Table 6, Table 7과 같다. SCE-UA를 제외한 패턴 탐색과 유전자 알고리즘이 평가함수의 값이 0.01 이내로 근소한 결과를 보여주었다. 목적함수별 차이에서는 WSSR이 SSR에 비하여 침투 홍수량과 침투 시간에 대해서 좋은 결과를 나타내고 있었다.

**3.4 적용결과 분석**

보정방법들에 대한 적용결과를 요약하면 다음과 같다.

SSARR 모형에 유전자 알고리즘, 패턴탐색, SCE-UA의 3가지 보정방법을 적용하였고, SSR과 WSSR의 2가지 목적함수를 적용하여 비교하였다.

① 유전자 알고리즘과 패턴탐색의 보정방법이 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 미호천 1, 4의 유역에 대해서는 관측 침투유량 약  $1900m^3/s$ 에 대해 패턴탐색의 결과가 약  $1800m^3/s$ 로 약 95%의 정확도를 보이며 다른 보정방법에 비해 좋은 결과를 보였다.



② SCE-UA의 보정방법이 가장 좋지 않은 결과를 보였다. SCE-UA의 보정방법을 사용하였을 때 침투 유량이 발생하는 시간이 다른 두 기법에 비해 정확도가 떨어지는 결과가 도출되었다. 하지만 어느 사상과 유역이든지, 세 가지 보정방법에 따른 결과는 크지 않았다.

③ 시간적인 면에서는 SCE-UA의 보정방법이 가장 빠르게 계산이 되었으나, 유전자 알고리즘은 계산 시 많은 시간을 소요하였다.

④ 따라서 어느 보정방법이 가장 효율적인지는 판단하기 어렵다. 그러나 결과값의 정확도나 계산시간을 고려하였을 때, 3가지 보정방법 중에 패턴탐색이 가장 효율적인 보정방법이라 판단된다.

목적함수에 대한 적용결과를 요약하면 다음과 같다.

① 홍수예측 시 중요시 되는 침투 홍수량 측면에서는 WSSR의 목적함수가 좋은 결과를 보였다. 하여 평가함수인 RE값이 SSR의 목적함수를 적용한 RE값보다 좋았다. 하지만 모든 사상에 대해서 좋은 침투 홍수량을 갖는 것은 아니었다.

② 평가함수인  $R^2$ 과  $NRMSE$ 값은 SSR의 목적함수를 적용한 결과가 WSSR을 적용한 결과보다 좋은 결과를 도출하였다. 하지만, 홍수에 대한 예방 및 대비를 고려하였을 때, WSSR의 목적함수를 사용하여 홍수예보와 같은 의사결정을 하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 미국의 Columbia강과 베트남의 Mekong 강 등에서 사용하고 있는 강우-유출모형인 SSARR 모형을 금강유역의 미호천 유역에 적용하여 매개변수 보정과 홍수 수문곡선을 예측하여 모의결과를 비교하였다. SSARR 모형을 대상유역에 적용하기 위해서는 정확한 모형의 매개변수를 산정하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 적절한 매개변수의 범위를 산정하고 특성을 파악하기 위해 매개변수 민감도 분석을 수행하였다. 또한 민감도 분석 후 설정된 범위에서 유전자 알고리즘 등의 매개변수 보정방법과 WSSR 등의 목적함수를 홍수사상에 적용하여 결과를 비교하였다.

민감도 분석 결과, 모형의 매개변수에 따른 민감도의 정도를 파악할 수 있었으며, 매개변수 변화에 따른 체적유량 상대오차 변화의 규칙성이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 매개변수 민감도의 결과로 매개변수의 범위를 설정할 수 있었다. 그리고 유전자 알고리즘, 패턴 탐색, SCE-UA의 보정방법을 적용하였는데, 그 결과 세 가지 보정 방법 모두 좋은 결과를 보였으며, 어느 보정 방법이 좋은 결과를 도출한다고 할 수 없을 만큼 결과의 차이는 크지 않았다. 또한 SSR과 WSSR의 목적함수 적용에 따른 결과, WSSR의 목적함수는 침투유량에 대해서는 SSR보다 좋은 결과를 도출하였으나, 유출 용적이나 수문곡선 형태 등으로 표시되는 다른 평가지표에서는 SSR보다 좋지 않은 결과를 얻었다.

집중호우 및 홍수에 대한 피해가 점점 대형화 되어가는 현 시점에서 이를 사전에 대비할 수 있는 홍수예보는 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서 사용한 보정방법과 목적함수 등을 적용하여 해당 유역에 적합한 매개변수를 추정하여 홍수예보를 시행한다면 홍수피해 발생을 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 (수문레이더 기반 홍수예보 및 폭설 추정 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Cheng, C.T, Ou, CP and Chau, KW(2002), Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration, *J. of hydrology*, 268(1-4), pp. 72-86.
- Choi, CH, Han, DG, Kim, JW, Jung, JW, Kim, DH and Kim, HS(2016), Mega flood simulation assuming successive extreme rainfall events, *J. of Wetlands Research*, 18(1), pp. 76-83. [Korean Literature]
- Chung, GH, Park, HS, Sung, JY and Kim, HY (2012), Determination and evaluation of optimal parameters in storage function method using SCE-UA, *J. of Korea Water Resources Association*, 45(11), pp. 1196-1186. [Korean Literature]
- Duan,, Q, Sorooshian,, S and Gupta, VK(1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *J. of Hydrology*, 158, pp. 265-284.
- Gang, TU and Lee, SH(2014), Development on an automatic calibration module of the SWMM for watershed runoff simulation and water quality simulation, *J. of Korea Water Resources Association*, 47(4), pp. 343-356. [Korean Literature]
- Han, DG, Choi, CH, Kim, DH, Jung, JW, Kim, JW and Kim, SJ(2016), Determination of flood reduction alternatives for responding to climate change in Gyeongan watershed, *J. of Wetlands Research*, 18(2), pp. 154-165. [Korean Literature]
- Im, OS, Yoo, DG, Lee, EH, Lee, YS and Kim, JH(2016), Application of metaheuristic algorithms for estimating SWMM parameters, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, pp. 124-125 [Korean Literature]
- Jiuyuan, H, Yaonan, Z, Lihui, L, Yinping, L and Zhengfang, H. (2017), Model parameter optimization method research in Heihe River open modeling environment (HOME), *J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 31(9), pp. 31-53

- Kim, BJ, Kawk, JW, Lee, JH and Kim, HS (2008), Calibration and estimation of parameter for storage function model, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 28(1B), pp. 21–32. [Korean Literature]
- Kim, BS, Kim, HS, Seoh, BH and Kim, NM(2005), Impact assessment of climate change on hydrologic components and water resources in watershed, *J. of Korea Water Resources Association*, 2005(1), pp. 143–148. [Korean Literature]
- Kim, DH, Hong, SJ, Han, DG, Choi, CH and Kim, HS(2016), Analysis of future meteorological drought index considering climate change in Han-River Basin, *J. of Wetlands Research*, 18(4), pp. 432–447. [Korean Literature]
- Kim, SJ, Kwon, YS, Lee, KH and Kim, HS(2010), Radar rainfall adjustment by artificial neural network and runoff analysis, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 30(2B), pp. 159–167. [Korean Literature]
- Kim, YS, Kim, SJ, Gang, NR, Kim, TG and Kim, HS(2014), Estimation of frequency based snowfall depth considering climate change using neural network, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 30(2B), pp. 159–167. [Korean Literature]
- Lee, JH, Joo, HJ, Kim, HS and Jun, HD(2014), Evaluation of a stream gauge network using multiobjective optimization method, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(4), pp. 143–154. [Korean Literature]
- Lee, KS and Kim, SU(2001), Automatic calibration of SSARR model with genetic algorithm, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 21(3B), pp. 171–183. [Korean Literature]
- Madsen, H (2000) Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *J. of hydrology*, 235, pp. 276–288.
- Oh, GC, Lee, GS and Lee, SH (1999), Calibration and sensitivity analysis of LRCS rainfall-runoff model(I): theory, *J. of Korea Water Resources Association*, 32(6), pp.657–664. [Korean Literature]
- Song, JH (2006), *Parameter Calibration of Storage Function Model for the Simulation of Flood Hydrograph*, Master's Thesis, Inha University, Incheon, Korea. [Korean Literature]
- Song, JH, Kim, HS, Hong, IP and Kim, SY(2006), Parameter calibration of storage function model and flood forecasting (1) calibration methods and evaluation of simulated flood hydrograph, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(1B), pp. 27–38. [Korean Literature]
- Sung, YG, Kim, SH, Kim, HJ and Kim, NY (2004), The applicability study of SYMHYD and TANK model using different type of objective functions and optimization methods, *J. of Korea Water Resources Association*, 37(2), pp. 121–131. [Korean Literature]
- Y.Chen, J.Li and H.Xu (2016), Improving flood forecasting capability of physically based distributed hydrological models by parameter optimization, *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1), pp.375–392