

# 유역 유출 연속모의 모형의 자동 보정을 위한 목적함수 구성에 관한 연구

## A Comparison Study of Objective Functions for Automatic Calibration of a Watershed Runoff Continuous Simulation Model

고동근\*, 이상호\*\*, 강태욱\*\*\*

Donggeun Ko, Sangho Lee, Taek Kang

### 요 지

유역 유출 연속모의 모형은 수자원 계획과 효율적인 물 관리 정책 수립에 중요한 도구가 된다. 유역 유출 연속모의 모형에는 다수의 매개변수가 있으며, 이러한 매개변수는 모형 보정을 통해 추정된다. 연구에서 사용한 모형은 SWMM이며 집합체 혼합 진화 알고리즘으로 자동 보정하였다. 자동 보정에 사용되는 최적화 알고리즘은 목적함수에 따라 상이한 결과를 도출하기도 한다. 이에 따라 본 연구에서는 유역 유출 모형의 자동 보정에 적합한 목적함수를 선정하기 위하여 4개의 목적함수를 구성하였고, 밀양댐 유역에 적용하였다. 그리고 목적함수에 따른 자동 보정의 결과를 평가하기 위해 5가지의 평가지표를 활용하였다. 보정의 결과, 모든 목적함수에서 공통적으로 침투유량의 오차는 다소 크게 발생하였다. 그리고 잔차 절대값의 합이 최소가 되도록 구성한 목적함수가 다른 목적함수에 비해 상대적으로 양호한 결과를 도출하였지만, 목적함수에 따른 큰 차이는 없었다. 또한, 유역 유출 연속모의에서는 유역의 물수지가 중요한 요소이므로 향후, 보다 정확도 높은 유역 유출 연속모의 모형의 자동 보정을 위해서는 침투유량과 물수지와 관련된 오차를 제어할 수 있는 추가적인 기법이 요구된다.

**핵심용어 : 목적함수, 유역 유출, 자동 보정, 집합체 혼합 진화 알고리즘, SWMM**

### 1. 서론

수자원 계획과 효율적인 물 관리를 위해 중요한 도구가 되는 유역 유출 연속모의 모형은 다수의 매개변수를 포함하고 있어서 사용에 어려움이 있다. 이러한 매개변수 추정의 편의를 위해 국내·외에서는 많은 최적화 기법들을 사용하여 자동 보정하여 왔다. 최적화 알고리즘은 목적함수의 구성에 따라 결과가 달라질 수 있다. 연구에서는 4 개의 목적함수를 구성한 후, 모형보정에 이들을 적용한 결과를 비교하여 보다 적합한 목적함수를 제시하였다.

연구에서 사용된 유역 유출 연속모의 모형은 SWMM(storm water management model)이고, 유역 유출 연속모의 모형의 자동 보정은 전역최적화 알고리즘인 집합체 혼합 진화 알고리즘(shuffled complex evolution-University of Arizona; SCE-UA)이며, 이 두 모듈을 연결한 강태욱 등(2011)의 프로그램을 사용하였다.

본 연구의 대상유역은 다수의 수문자료가 확보되어 있는 밀양댐 유역이다. 그리고 각각의 목적함수를 통해 구성된 자동 보정 모형은 2001~2009년에 대하여 적용되었고, 2010년의 자료로 검증

\* 부경대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail: jumbot3@nate.com

\*\* 정회원 · 부경대학교 토목공학과 교수 · E-mail: peterlee@pknu.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 부경대학교 토목공학과 박사수료 · E-mail: ktw62@hanmail.net

되었다. 그리고 보정과 검증된 결과를 검토하기 위해 5가지의 모형평가 지표를 활용하였다.

## 2. 연구에 사용된 모형

### 2.1 SWMM과 SCE-UA의 연결 모형

강태욱 등(2011)은 SWMM을 자동 보정하기 위해 집합체 혼합 알고리즘을 이용하였고, 그림 1과 같이 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘을 연결하였다. 집합체 혼합 진화 알고리즘은 표본 요소(매개변수의 조합)를 몇 개의 집합체로 구분하고, 각 집합체를 독립 진화 시킨 후 다시 혼합하여 새로운 집합체를 생성한다. 이러한 진화와 혼합의 과정은 수렴조건을 만족될 때 까지 반복된다. 강태욱 등(2011)은 이러한 과정에서 새롭게 생성되는 매개변수 조합에 대한 SWMM의 수행과 목적함수의 평가 결과를 집합체 혼합 진화 알고리즘으로 전달해주는 모듈을 구성하였다.

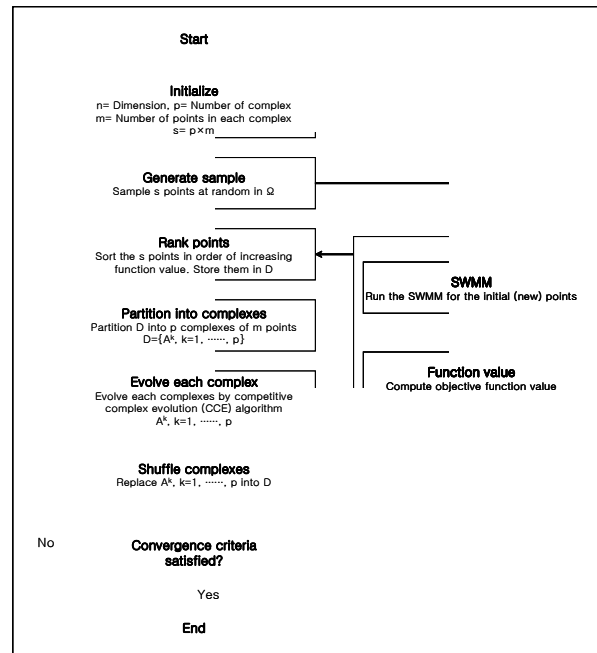


그림 1. SWMM의 자동 보정 모듈(강태욱 등, 2011)

### 2.2 목적함수 및 모형의 평가지표

자동 보정에 사용되는 최적화 알고리즘은 목적함수에 따라 상이한 결과를 도출하기도 한다. 이에 따라 본 연구에서는 선행 연구에서 매개변수의 자동 보정에 사용된 목적함수를 검토하였다(강신욱 등, 2004; 이종태 등, 2004; 강태욱 등, 2011; Diskin and Simon, 1977). 표 1은 해당 연구들을 참고하여 연구에서 구성한 목적함수들이다. 한편, 연구에서는 목적함수에 따른 자동 보정의 결과를 평가하기 위해 5가지의 평가지표를 활용하였다(표 2). 평가지표는 NSE(Nash-Sutcliffe efficiency), 평균편차의 비율(percent bias; PBIAS), 유출 체적비(ratio of volume; ROV), 평균제곱오차의 제곱근(root mean square error; RMSE), 첨두유량의 오차(error of peak flow)이다.

표 1. 연구에서 사용된 목적함수

Objective Function Type	Equation of Objective Function
Type-1	$\text{Min} \sum_{t=1}^N  q_t^{\text{obs}} - q_t^{\text{cal}} $
Type-2	$\text{Min} \sum_{t=1}^N (q_t^{\text{obs}} - q_t^{\text{cal}})^2$
Type-3	$\text{Min} \sum_{t=1}^N (\sqrt{q_t^{\text{obs}}} - \sqrt{q_t^{\text{cal}}})^2$
Type-4	$\text{Min} \sum_{t=1}^N (\sqrt[3]{q_t^{\text{obs}}} - \sqrt[3]{q_t^{\text{cal}}})^2$

표 2. 모형의 평가지표

Criteria	Equation	Optimal Value
Nash-Sutcliffe Efficiency	$1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{\text{obs}} - q_t^{\text{cal}})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{\text{obs}} - q_{\text{mean}}^{\text{obs}})^2}$	1
Percent Bias	$\frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{\text{obs}} - q_t^{\text{cal}})}{\sum_{t=1}^N q_t^{\text{obs}}} \times 100 (\%)$	0
Ratio of Volume	$\frac{\sum_{t=1}^N q_t^{\text{cal}}}{\sum_{t=1}^N q_t^{\text{obs}}}$	1
Root Mean Square Error	$\frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{\text{obs}} - q_t^{\text{cal}})^2}{N}$	0
Error of Peak Flow	$ q_{\text{max}}^{\text{obs}} - q_{\text{max}}^{\text{cal}} $	0

### 3. 유역 유출 연속모의 모형의 자동 보정

#### 3.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 비교적 다수의 수문자료가 확보되어 있는 밀양댐 상류 유역이다. 유역 유출 연속모의 모형을 구성하기 위해 밀양댐 상류 유역을 24개의 소유역과 26개의 하도로 구분하였다(그림 2).

SWMM을 이용한 유역 유출 연속모의 모형의 유역 추적은 비선형 저류방정식을 이용하였고, 하도 추적은 운동파(kinematic wave) 방법을 사용하였으며, 침투계산은 Green-Ampt 식을 사용하였다. 그리고 분석 시간 간격은 일 단위로 하였다.

밀양댐 유역의 강우자료는 밀양댐 및 선리관측소의 일 단위 자료를 사용하였다. 유역 유출 연속모의의 경우, 증발량도 중요한 매개변수이다. 하지만 밀양댐 유역에 있는 밀양 기상대에는 증발량 측정 시설이 없다. 이에 따라 인근의 기상청(대) 중 증발량에 영향을 주는 평균온도, 풍속, 습도 등이 밀양 기상대와 가장 유사한 진주 기상대의 월 평균 증발량 자료를 이용하였다.

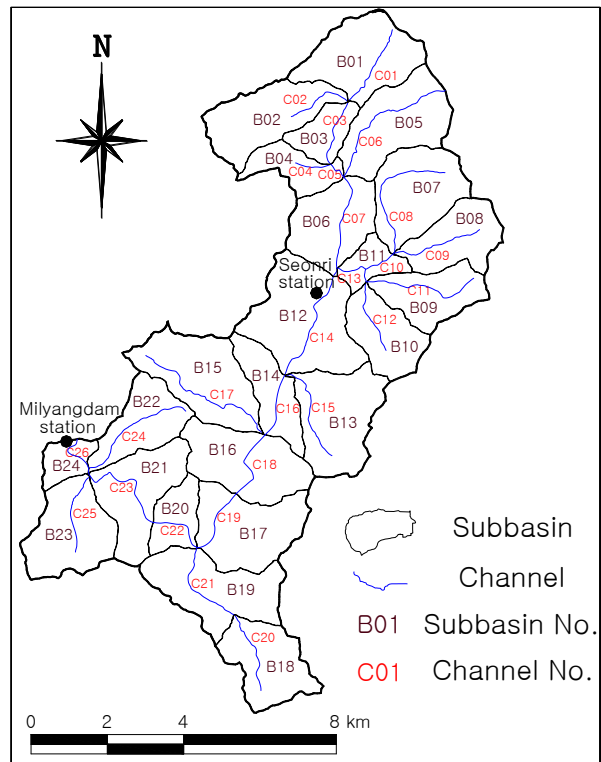


그림 2. 대상유역의 소유역과 하도 구분

#### 3.2 추정대상 매개변수

연구에서 자동 보정에 사용된 매개변수는 수문학적 매개변수(hydrologic parameter)가 대부분으로 총 22개이다. 이 가운데 불명확한 매개변수가 다수 포함되어 있는 지하수 유출 관련 매개변수가 11개이고, 불투수지역 면적비 등의 유역관련 매개변수가 7개이다. 그리고 Green-Ampt 식을 구성하고 있는 3개의 매개변수와 하도에 대한 Manning의 조도계수가 추정대상 매개변수이다.

#### 3.2 자동 보정의 결과

연구에서는 밀양댐 유역에 대하여 구성된 유역 유출 연속모의 모형을 2001년~2009년에 대하여 자동 보정하였다. 표 3은 목적함수에 따른 자동 보정의 결과로서, 모형의 평가지표를 나타낸다. 표 3에서 제시된 지표 중 NSE와 ROV의 최적값은 1이고, 나머지 지표의 최적값은 0이다.

표 3에 제시된 자동 보정 전에 대한 모형 평가 결과는 자동 보정의 효과를 확인하기 위해 보정 대상 매개변수들이 가지는 적용 범위의 중간값 정도를 SWMM에 입력하여 계산된 결과이다. 목적함수에 따른 모든 자동 보정의 결과는 자동 보정 전보다 크게 개선된 것을 확인할 수 있다. 반면에, 4가지의 목적함수에 의한 보정 결과는 거의 유사하게 나타난 것을 볼 수 있다. 즉, 특별히 우수한 자동 보정의 결과를 도출한 목적함수는 없었다. 표 3에는 모형 평가 지표별로 가장 좋은 결과를 도출한 목적함수에 음영 표시를 하였고, Type-1의 목적함수가 평균편차의 비율, 유출 체적비, 침투유량의 오차에서 가장 좋은 결과를 도출한 것으로 분석되었다.

그림 3은 상대적으로 가장 좋은 결과를 도출한 Type-1의 목적함수에 의해 자동 보정된 결과

를 나타낸 그림이다. 전체적으로 모의된 결과가 관측값의 분포와 유사한 것을 확인할 수 있다.

표 3. 목적함수에 따른 모형의 보정 결과

Classification	Objective Function Type	NSE	PBIAS (%)	ROV	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow (m <sup>3</sup> /s)
Before Automatic Calibration	-	0.643	-15.519	1.155	7.441	27.04
After Automatic Calibration	Type-1	0.832	-7.780	1.078	5.040	10.74
	Type-2	0.838	-8.073	1.081	4.951	11.29
	Type-3	0.834	-8.007	1.080	5.008	10.82
	Type-4	0.829	-11.814	1.118	5.088	11.06

Shade: The Best Objective Function by the Criteria

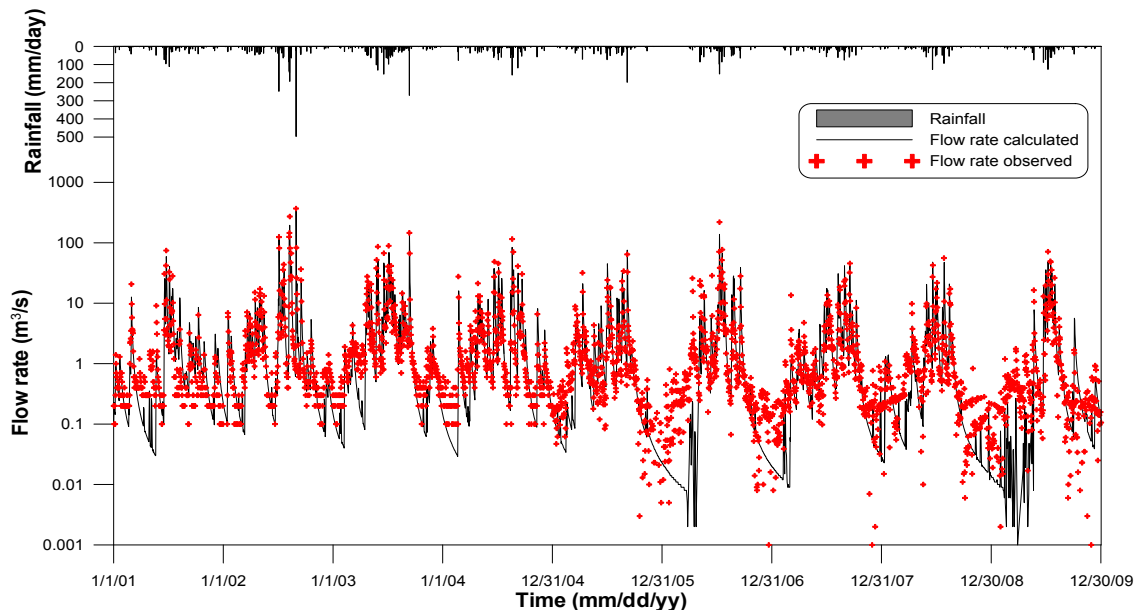


그림 3. 연속유출 모형의 자동 보정 결과(Type-1)

### 3.3 모형의 검증

2001~2009년에 대하여 각 목적함수별로 자동 보정된 모형을 2010년에 적용하여 검증하였다 (표 4). 모형 검증의 결과는 자동 보정의 결과에 비해 평균제곱오차의 제곱근을 제외한 모든 지표에서 다소 나빠진 것을 볼 수 있다. 특히, 첨두유량의 경우, 관측 및 계산된 값의 오차가 약 40 m<sup>3</sup>/s로서 매우 크게 발생하였다. 하지만, 첨두유량을 제외한 나머지 지표들의 경우, 어느 정도 적절한 값을 도출한 것으로 판단되었다. 그리고 목적함수에 따른 영향은 미미한 것으로 분석되었다.

그림 4는 Type-1의 목적함수에 의해 보정된 모형의 검증 결과를 나타낸 그림이다. 전체적으로 모의된 값과 관측값의 분포가 유사하지만, 첨두유량의 오차가 크게 발생한 것을 확인할 수 있다.

표 4. 목적함수에 따른 모형의 검증 결과

Objective Function Type	NSE	PBIAS (%)	ROV	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	Error of Peak Flow (m <sup>3</sup> /s)
Type-1	0.714	-9.348	1.093	4.517	39.78
Type-2	0.726	-9.392	1.094	4.471	43.32
Type-3	0.718	-9.550	1.095	4.541	40.77
Type-4	0.703	-13.569	1.136	4.659	40.33

Shade: The Best Objective Function by the Criteria

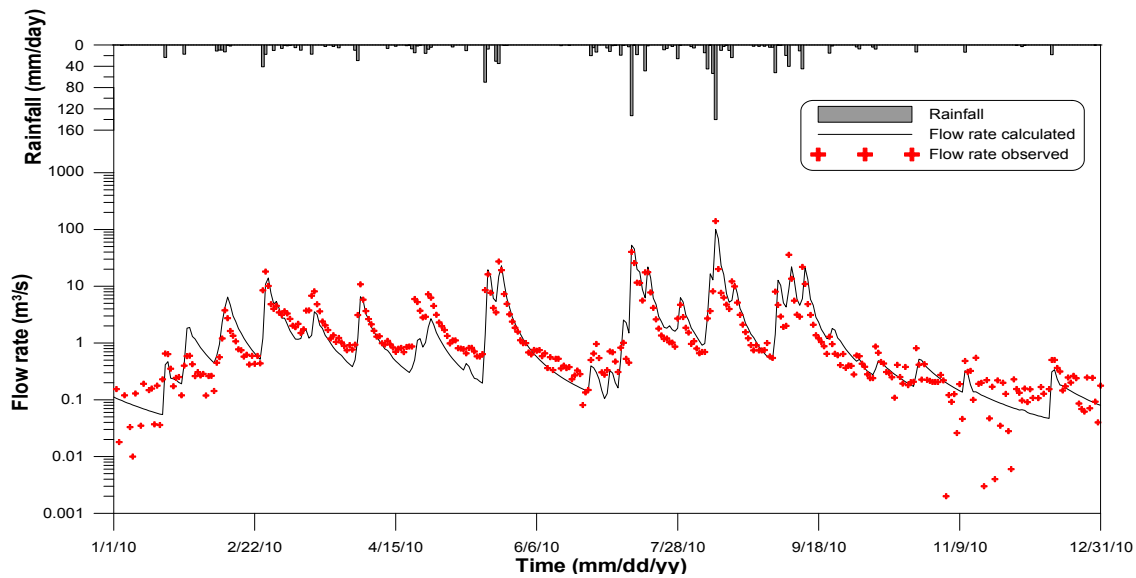


그림 4. 연속유출 모형의 검증 결과(Type-1)

#### 4. 결론

본 연구에서는 4가지 다른 목적함수에 대한 유역 유출 연속모의 모형의 자동 보정결과를 비교하였다. 사용된 유역 유출 모형은 SWMM이고, 자동 보정에는 집합체 혼합진화 알고리즘이 사용되었다. 각각의 목적함수에 의해 구성된 자동 보정 모형은 2001~2009년의 밀양댐 자료에 대하여 적용되었고, 2010년 자료에 대하여 검증되었다. 그 결과, 잔차 절대값의 합이 최소가 되도록 구성된 목적함수가 다른 목적함수에 비하여 다소 양호한 것으로 나타났다. 향후, 보다 정확도 높은 유역 유출 연속모의 모형의 보정을 위해서는 침투유량과 유역 유출 연속모의 시 중요한 요소인 물수지(water balance)를 함께 제어할 수 있는 추가적인 기법이 요구된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0015225)의 일부 결과입니다. 연구비를 지원해 주신 한국연구재단에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고 문헌

1. 강신욱, 이동률, 이상호 (2004). "토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 보정에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 133-144
2. 강태욱, 이상호, 강신욱, 박종표 (2011). "집합체 혼합진화 알고리즘을 이용한 도시유역 홍수유출 모형의 자동 보정에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제45권, 제1호, pp. 15-27.
3. 이종태, 허성철, 김태화 (2004). "도시유출모형(SWMM) 매개변수의 최적화." **2004 대한토목학회 정기 학술대회**, 대한토목학회, pp. 737-742.
4. Diskin, M.H., and Simon, E. (1977). "A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models." *Journal of Hydrology*, Vol. 34, No. 1-2, pp. 129-149.