

집합체 혼합진화 알고리즘을 이용한 도시유역 홍수유출 모형의 자동 보정에 관한 연구

A Study for an Automatic Calibration of Urban Runoff Model by the SCE-UA

강 태 옥* / 이 상 호** / 강 신 옥*** / 박 종 표****

Kang, Taeuk / Lee, Sangho / Kang, Shinuk / Park, Jongpyo

Abstract

SWMM (Storm Water Management Model) has been widely used in the world as a typical model for flood runoff analysis of urban areas. However, the calibration of the model is difficult, which is an obstacle to easy application. The purpose of the study is to develop an automatic calibration module of the SWMM linked with SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) algorithm. Generally, various objective functions may produce different optimization results for an optimization problem. Thus, five single objective functions were applied and the most appropriate one was selected. In addition to the objective function, another objective function was used to reduce peak flow error in flood simulation. They form a multiple objective function, and the optimization problem was solved by determination of Pareto optima. The automatic calibration module was applied to the flood simulation on the catchment of the Guro 1 detention reservoir and pump station. The automatic calibration results by the multiple objective function were more excellent than the results by the single objective function for model assessment criteria including error of peak flow and ratio of volume between observed and calculated flow. Also, the verification results of the model calibrated by the multiple objective function were reliable. The program could be used in various flood runoff analysis in urban areas.

Keywords : runoff, SCE-UA, SWMM, automatic calibration, multiple objective function

요 지

SWMM은 도시유역의 홍수유출 해석에 관한 대표적인 모형으로서 국·내외에서 활용도가 높은 반면, 다수의 불명확한 매개변수를 포함하고 있어 사용에 어려움이 있다. 본 연구에서는 SWMM에 집합체 혼합진화(SCE-UA) 알고리즘을 결합하여 자동 보정 모듈을 개발하였다. 최적화 문제는 목적함수에 따라 그 결과가 상이하게 도출될 수 있으므로 연구에서는 5개의 단일 목적함수를 적용하여 가장 적합한 목적함수를 도출하였다. 그리고 홍수유출 해석에는 첨두유량의 정확성이 중요하므로 이를 고려할 수 있는 다목적함수를 구성하였고, 파레토 최적해의 결정을 통해 결과를 도출하였다. 작성된 자동 보정 모듈은 구로1 빗물펌프장 유역에 내린 2009년 3개의 강우사상에 적용되었다. 다목적함수의 구성을 통해 자동 보정된 결과는 단일 목적함수에 의해 도출된 결과보다 첨두유량과 유출체적의 오차를 포함한 대부분의 모형평가 지표에서 우수한 것으로 나타났다. 또한, 다목적함수에 의해 보정된 모형의 검증 결과도 신뢰적인 것으로 분석되었다. 본 연구에서

* 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)

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

*** 한국수자원공사 물관리센터 선임연구원 (e-mail: sukang@kwater.or.kr)

Senior Researcher, Water Resources Operations Center, Korea Water Resources Corporation (Kwater), Daejeon 306-711, Korea

**** 주식회사 핵코리아 수자원부 이사 (e-mail: jppark@hecorea.co.kr)

Director, Dept. of Water Resources, HECOREA Co. Ltd, Seoul 158-741, Korea

개발된 SWMM의 자동 보정 프로그램은 도시구역의 다양한 홍수유출 해석 문제에 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

핵심용어 : 홍수유출, 집합체 혼합진화 알고리즘, SWMM, 자동 보정, 다목적함수

1. 서론

최근 들어 우리나라에는 도시구역의 대규모 홍수 피해가 자주 발생하고 있다. 가까운 예로 2009년 7월 7일과 16일에 부산시 일대에 내린 집중호우는 각각 600곳 이상의 침수 피해를 유발하였고, 특히, 7월 16일의 강우는 90억원대의 재산피해를 발생시켰다(정태훈, 2010). 그리고 2010년 9월의 서울과 수도권에 내린 집중호우는 특정 지속기간에의 경우 100년 빈도 이상의 극한 강우사상으로서 서울지역에만 총 11,744건의 주택이 침수되었고, 주택 침수에 따른 재난 지원금이 159억원에 달하였다(문영일과 윤선권, 2010). 이렇듯 도시 구역의 홍수는 밀집된 재산과 인구로 인해 그 피해 규모가 매우 커지므로, 도시구역의 홍수 대응에 대한 중요성이 부각되고 있다.

도시구역의 적절한 홍수 대응 방안을 수립하기 위해서는 구역의 홍수유출을 정확히 해석할 수 있는 모형이 필요하다. SWMM(Storm Water Management Model)은 도시구역의 홍수유출 현상을 모의하는 대표적인 프로그램으로서 전 세계적으로 널리 사용되고 있다. 최근에는 우리나라에서도 도시구역의 홍수유출 해석에 있어 SWMM을 사용하도록 권장하고 있다(한국수자원학회, 2009; 토지주택연구원, 2010). 이러한 SWMM은 많은 물리적인 매개변수에 기반하고 있어 비교적 신뢰적인 결과를 제공한다. 동시에 불명확한 매개변수도 다수 존재하므로 사용자의 매개변수 추정이 요구된다.

일반적으로 매개변수의 추정은 모형 보정을 통해 수행되고, 모형 보정은 시행착오(trial and error)에 의한 수동 보정(manual calibration)과 최적화 방법을 이용한 자동 보정(automatic calibration)으로 구분된다. SWMM에 대한 자동 보정 기법을 적용한 연구사례로서 우리나라에서는 유전자 알고리즘을 이용한 연구가 있다(채준영, 2004; 조재현과 이종호, 2006). 국외의 경우, Zaghoul and Abu Kiefa(2001)와 Barco et al. (2008)은 각각 신경망(neural network) 모형과 패턴 검색 최적화(pattern-search optimization) 방법이라 불리는 complex method를 이용하여 SWMM을 자동 보정한 바 있다. 특히, Javaheri(1998)는 SWMM에 대하여 지역 최적화 방법인 Downhill Simplex(DHS)와 전역 최적화(global optimization) 방법인 집합

체 혼합진화(Shuffled Complex Evolution- University of Arizona; SCE-UA) 기법을 이용하여 강우-유출 모의에 관한 매개변수의 최적화에 적용하였고, 집합체 혼합진화 방법에 의한 매개변수의 최적화 추정 기술이 우수함을 보였다.

본 연구에서는 다수의 선행 연구(Duan et al., 1992; Boyle et al., 2000; Madsen, 2000; Cooper et al., 2006; 강민구 등, 2002; 강신욱 등, 2004)에서 수문 모형의 자동 보정에 활용되었고, 상대적으로 우수한 결과를 제공하는 것으로 알려진 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용하여 SWMM을 자동 보정하였다. 최적화 알고리즘은 목적함수(objective function)에 따라 상이한 결과를 도출할 수 있지만 대부분의 연구(Javaheri, 1998; Boyle et al., 2000; 채준영, 2004; 조재현과 이종호, 2006)에서는 하나의 목적함수만을 이용하여 결과를 도출하였다. 연구에서는 선행 연구들에서 활용한 5개의 단일 목적함수를 적용하여 가장 적절한 목적함수를 선정하였다. 또한, 홍수유출 해석에는 침투유량의 정확성이 요구되므로 이를 반영할 수 있는 다목적함수(multiple objective function)를 구성하여 홍수유출 모의의 정확도를 향상시켰다. 그리고 서울시 구로1 빗물펌프장 구역에 내린 2009년 7~8월의 세 개 강우사상에 대하여 개발된 자동 보정 모듈로 매개변수를 추정하였고 모형을 검증하였다.

2. 연구수행 방법

2.1 사용된 모형

2.1.1 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘

본 연구는 도시 구역의 대표적인 홍수유출 모형인 SWMM의 자동 보정에 목적을 두고 있다. 미 환경보호국(Environmental Protection Agency; EPA)의 지원 아래 개발된 SWMM은 도시구역 내에서 강우사상으로 인해 발생하는 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에 대한 유출량추적, 저류지 모의, 과적(surcharge)흐름, 배수(backwater), 압력류, 오염물질에 대한 처리 등을 모의할 수 있다(Huber and Dickinson, 1988). SWMM은 개발된 기관에 따라 다양한 버전이 존재하는데, 연구에서 자동 보정에 사용한

SWMM은 미 환경보존국에서 최근에 개발한 SWMM5이다 (Rossman, 2009).

SWMM5에서 유역추적의 경우 비선형저류방정식과 단위도 방법을 사용할 수 있고, 하도추적은 운동파 (kinematic wave)모형과 동역학과 (dynamic wave) 모형을 사용할 수 있다. 연구에서는 유역의 물리적 특성에 근거한 비선형저류방정식을 유역추적 방법으로 이용하였고, 하도추적 방법은 홍수 시 도시유역의 관거 내 흐름 특성을 고려하고 2.3절에서 후술되는 대상유역 내 관거의 일부 구간에서 발생하는 역경사를 고려하기 위해 동역학과 모형을 사용하였다.

본 연구에서는 SWMM의 자동 보정에 집합체 혼합진화 알고리즘을 사용하였다. 자연 진화의 과정을 최적화 탐색과정에 도입한 집합체 혼합진화 알고리즘은 Duan et

al. (1992; 1994)에 의해 개발되었고, 다양한 강우-유출 모형의 자동 보정과 매개변수의 추정에 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).

집합체 혼합진화 알고리즘은 최적해를 탐색하기 위해 s개의 선정된 점을 이용하여 하나의 모집단을 구성하고, 모집단을 p개의 집합체 (complex)로 분할한다. 각 집합체는 downhill simplex 알고리즘을 사용하여 독립적으로 진화된다. 진화를 거친 집합체는 다시 혼합되고, 새로운 집합체들이 생성되며, 진화와 혼합의 과정은 수렴조건이 만족될 때까지 반복된다 (강신욱, 2011). 초기에 설정되는 s개의 점은 집합체의 개수 (p)와 집합체 내부의 점 개수 (m)

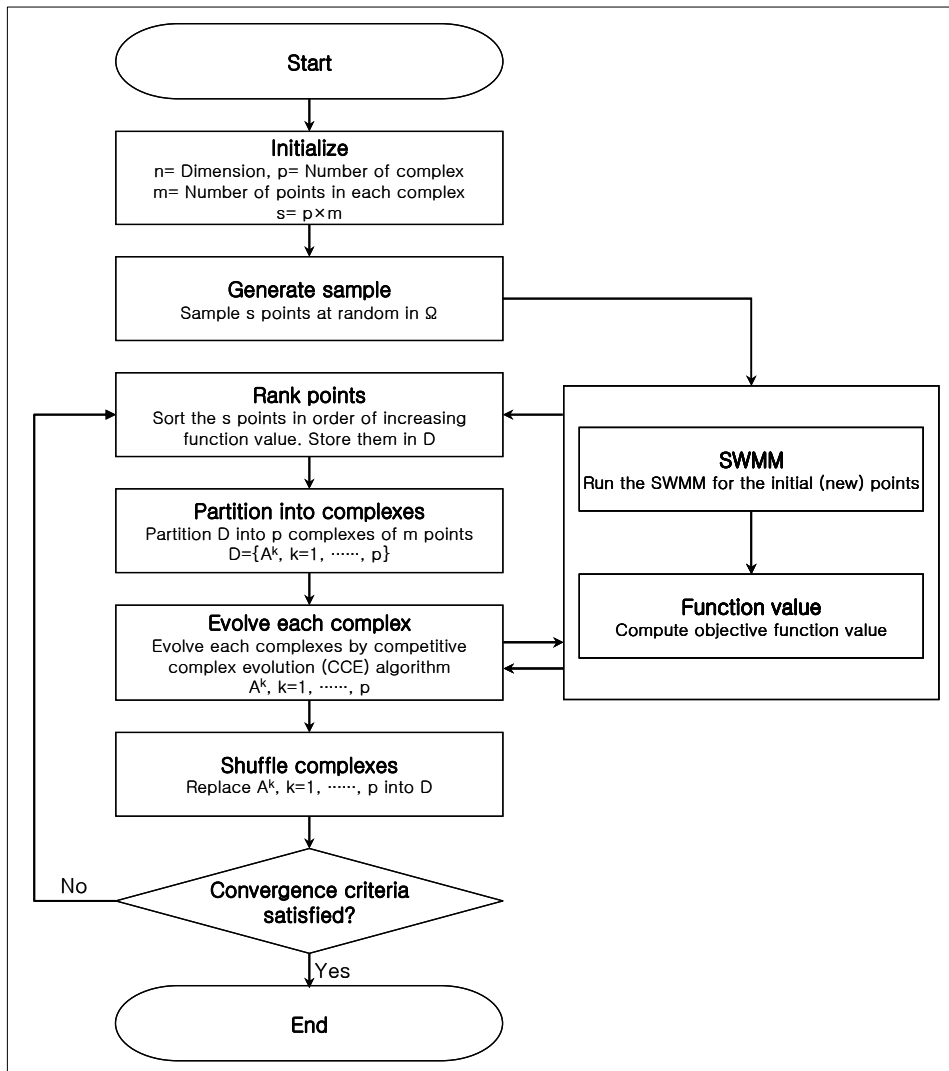


Fig. 1. The Schematic Diagram for a Connection between the SWMM and the SCE-UA

의 곱과 같은데, Duan et al. (1994)의 연구 결과를 참고하여 집합체의 개수는 2개, 집합체 내부의 점의 개수는 $2n+1$ 개로 설정하였다. 여기서 n 은 추정대상 매개변수의 개수이다. 집합체 혼합진화 알고리즘의 계산과정은 2.1.2절의 Fig. 1을 참고할 수 있다.

2.1.2 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘의 연계

집합체 혼합진화 알고리즘을 이용하여 SWMM을 자동 보정하기 위해 우선 두 모형을 Fig. 1과 같이 연계하였다. 즉, 집합체 혼합진화 알고리즘을 주 프로그램으로 설정하여 집합체 혼합진화에 의해 난수 발생된 표본 요소(매개변수의 조합)와 진화과정에서 생성된 새로운 요소에 대하여 SWMM을 수행할 수 있도록 연계하였다. 그리고 각각의 매개변수의 조합에 의해 생성된 수문곡선과 관측 수문곡선을 비교한 후, 목적함수의 값을 계산하여 집합체 혼합진화 알고리즘으로 전달해주는 모듈을 구성하였다.

2.2 목적함수의 구성과 모형의 평가지표

2.2.1 단일 목적함수의 구성과 모형의 평가지표

최적화 문제는 목적함수에 따라 그 결과가 상이하게 나타날 수 있다. 이를 감안하여 선행 연구들에서 매개변수 자동 추정에 활용한 목적함수들을 선별하여 적용하였고, 결과를 비교하였다. 연구에서 사용한 목적함수는 Sefe and Boughton (1982), 강신욱 등 (2004), 이종태 등 (2004)에서 사용한 다섯 가지이다 (Table 1).

목적함수의 구성 조건에 따라 계산된 결과의 적절성을 검토하기 위해서는 평가 지표가 필요하다. 이를 위해 연구에서는 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), 평균편차의 비율 (percent bias; PBIAS), 오차비율 추정량 (proportional error of estimate; PEE), 체적비 (ratio of volume; ROV), 평균제곱오차의 제곱근 (root mean square error; RMSE), 침투유량의 차이를 검토하였다 (Table 2).

Table 1 and 2에서 q_t^{obs} 와 q_t^{sim} 는 관측 및 모의된 유량 시계열, N 은 시계열 값의 개수, q_{mean}^{obs} 은 관측 유량의 평균값을 의미한다.

2.2.2 다목적함수의 구성과 파레토 최적해

도시유역의 홍수유출 해석은 주로 홍수량의 추정과 저류지 설계 등을 목적으로 하므로 침투유량과 유출체적의 정확도가 중요하다. Table 1에 제시된 목적함수들은 계산된 수문곡선이 관측 수문곡선에 적합 (fit)되도록 설정된

Table 1. Objective Functions Used in the Study

Objective Function Type	Equation of Objective Function
Type-1	$\text{Min} \sum_{t=1}^N \frac{ q_t^{obs} - q_t^{sim} }{q_t^{obs}}$
Type-2	$\text{Min} \sum_{t=1}^N q_t^{obs} - q_t^{sim} $
Type-3	$\text{Min} \sqrt{\sum_{t=1}^N \left(\frac{q_t^{obs} - q_t^{sim}}{q_t^{obs}} \right)^2}$
Type-4	$\text{Min} \sum_{t=1}^N \left(\sqrt{q_t^{obs}} - \sqrt{q_t^{sim}} \right)^2$
Type-5	$\text{Min} \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{sim})^2}{N}}$

Table 2. Criteria for Model Assessment

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

목적함수로서 이는 유출체적의 오차를 줄이도록 하는 요소가 지배적이다. 연구에서는 침투유량에 대하여 보다 정교한 결과를 도출하기 위해 Table 1의 목적함수 중 가장 좋은 결과를 도출한 목적함수를 선정하였고, 해당 목적함수에 침투유량의 오차를 최소화하는 목적함수를 추가한 다목적함수를 구성하였다.

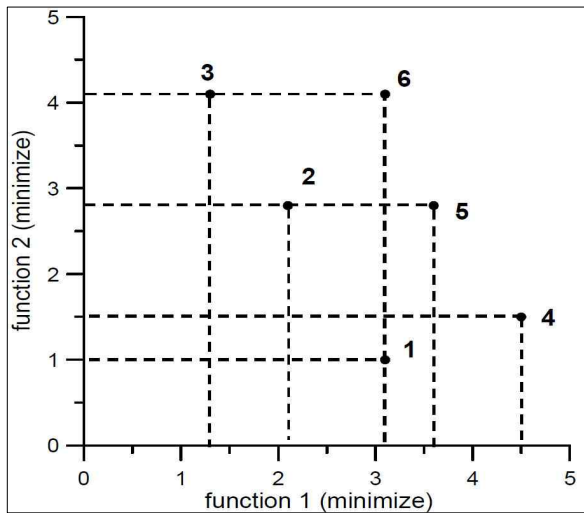


Fig. 2. An Estimation of Pareto Optimum

일반적으로 다목적함수를 이용하여 최적화 문제를 해결하기 위해서는 단일 목적함수 간의 관계 정의가 필요하다. 이는 단일 목적함수 간의 상충 (trade-off) 관계로 인해 여러 목적함수를 동시에 최적의 상태로 만족시킬 수 없는데 기인한다. 위의 상충 문제를 해결하기 위한 방법에는 목적함수 간의 중요도를 고려하여 가중치를 적용하는 가중치 방법 (weighted sum method), 일부의 목적함수를 제약식으로 변환하는 방법, 목적함수들의 우선순위와 목표를 설정하여 해를 구하는 목표 계획법 (goal programming), 파레토 최적해 (Pareto optimal solution) 산정 방법 등이 있다. 연구에서는 다목적함수의 파레토 최적해를 결정하여 모형을 자동 보정하였다.

파레토 최적해는 더 이상 개선될 수 없는 해의 집합을 의미한다. 여기서, 개선이란 어떠한 목적함수의 값도 나빠지지 (worse-off) 않으면서, 하나의 목적함수 값이라도 좋아지는 (better-off) 상태를 의미한다. 두 개의 목적함수 값에 의해 결정된 해 집합을 나타낸 Fig. 2 (구보영, 2006)를 이용하여 설명하면, 점 1, 2, 3은 모두 하나의 목적함수 값이 좋아지면, 다른 목적함수의 값이 나빠지는 점에 해당된다. 즉, 더 이상 개선될 수 없는 점이다. 반면에, 점 5와 6은 함수 2의 값을 유지하면서 각각 점 2와 3으로 개선될 수 있고, 점 4의 경우 함수 1과 2가 모두 개선될 수 있는 점 1이 존재한다. 따라서 점 1, 2, 3이 파레토 최적해가 되는 것이다. 연구에서는 이러한 방법을 이용하여 파레토 최적해를 결정하였다.

2.3 대상유역

개발된 SWMM의 자동 보정 모듈은 구로1 빗물펌프장

배수유역에 적용되었다. 구로1 빗물펌프장 배수유역은 유역면적이 1.36 km²이고, 일반주택지가 40%, 상업·업무지가 13%, 고층주택지가 12%, 공공용지 및 도로 등이 25%로 전형적인 도심지이다. 유역 말단부에 위치한 구로1 빗물펌프장은 홍수 시 구로구 일대의 원활한 홍수배제를 위하여 설치된 구조물로서 29,100 m³의 우수지와 1,015 m³/min의 펌프용량을 갖추고 있다. Fig. 3은 구로1 빗물펌프장의 유역경계와 주요 관거를 나타낸 그림이다.

3. 연구결과

3.1 홍수유출 모형의 입력자료 구축

3.1.1 빗물펌프장 운영 실적을 이용한 유입량의 추정

구로1 빗물펌프장 배수유역 내에는 유량 측정 시설이 없다. 그리고 구로1 빗물펌프장에서는 내수위가 외수위인 도림천 수위보다 높을 경우 4개의 배수문 (2.0 × 2.0)을 통해 자연 방류한다. 반대로 내수위가 외수위보다 낮을 경우, 수문을 닫고 우수를 우수지로 유입시켜 펌프시설을 이용하여 강제 배수한다. 구로1 빗물펌프장에서는 이러한 홍수 시 운영을 위해 우수지의 수위를 관측하고 있고, 펌프시설의 운영 실적을 관리하고 있다. 연구에서는 이를 이용하여 구로1 빗물펌프장의 홍수 시 실제 유입량을 추정하였다. 즉, 연구에서 추정된 유입량은 자연 방류가 전혀 없는 기간인 배수문을 닫고 펌프시설을 운영한 기간에 대한 유입량이다. 따라서 배수문을 통해 자연 방류된 초기 강우에 대해서는 유입량이 추정되지 못하였다.

구로1 빗물펌프장의 추정된 유입량은 10분 단위의 평균 유입량 (m³/s)으로서 추정식은 Eq. (1)과 같다.

$$Q_{in} = \frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} + O_{pump} \quad (1)$$

여기서, Q_{in} 은 현재 시간까지의 유입량 (m³/10 min), S_t 와 S_{t-1} 는 각각 현재 및 이전 시간 (10분 전)의 우수지 저류량 (m³), O_{pump} 는 10분간 펌프 토출량을 나타낸다.

Eq. (1)을 이용하기 위해서는 우수지의 시간에 따른 저류량을 알아야 한다. 이를 위해 우선 수위에 따른 수표면적 계산이 요구되는데, 서울시 구로구 (2003)는 구로1 빗물펌프장의 우수지 제원으로 저수위 (low water level), 홍수위 (high water level), 홍수위의 수표면적, 총 저수용량을 Table 3과 같이 제시하고 있다. 연구에서는 Fig. 4(a)에 제시된 양단면 평균법을 이용하여 저 (低)수위의 수표

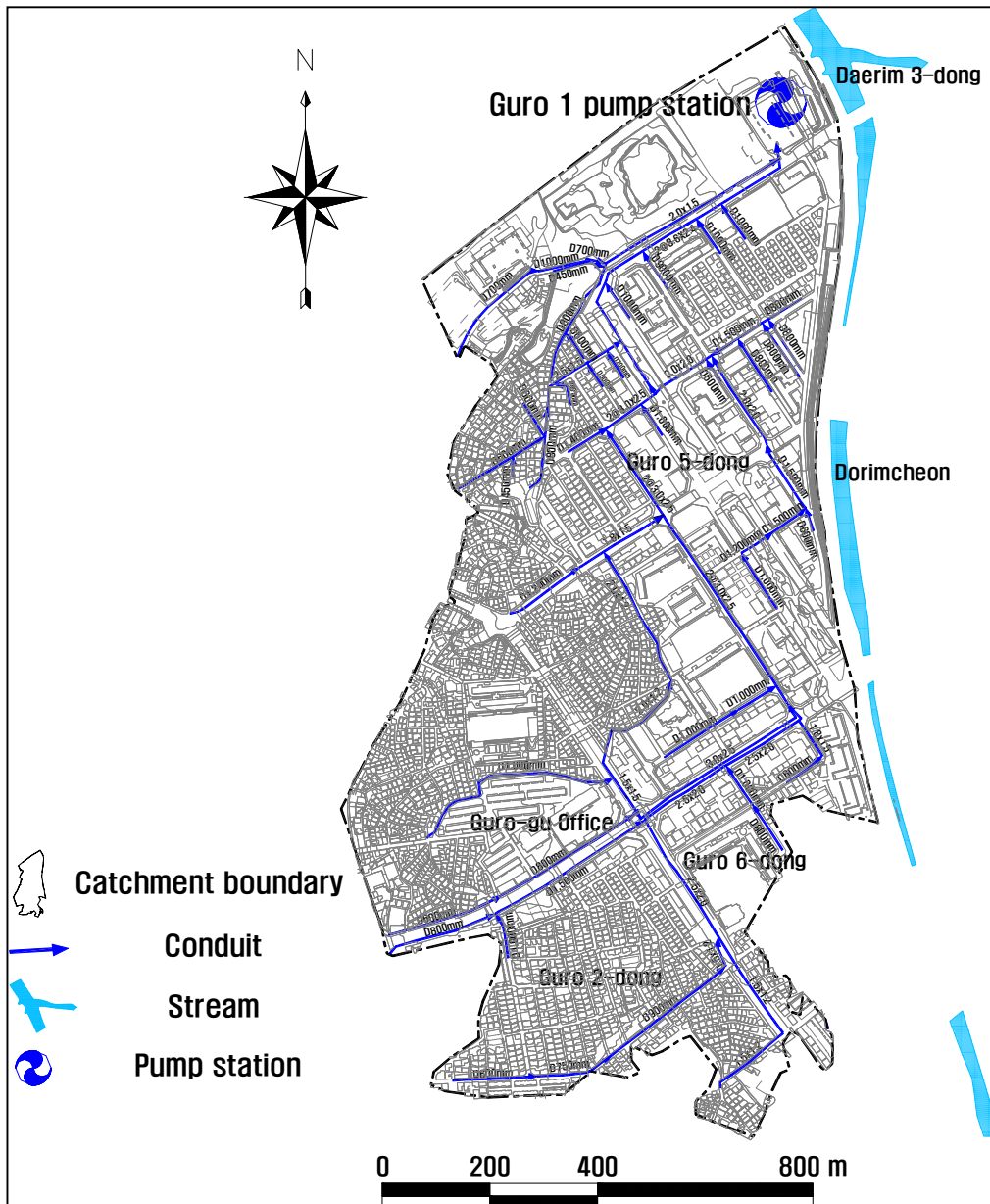


Fig. 3. The Catchment Boundary and Conduits in the Guro 1 Pump Station Basin

면적을 계산하였고, 수위에 따른 수표면적을 선형으로 가정하여 수위별 저류용량을 추정하였다 (Fig. 4(b)). 이를 이용하여 관측된 수위별 저류량을 산정하였고, 실제 펌프 운영 기록을 고려하여 Eq. (1)로부터 구로1 빗물펌프장의 홍수 시 유입 수문곡선을 추정하였다.

3.1.2 SWMM의 입력자료 구축과 추정 대상 매개변수

효과적인 홍수유출 해석을 위해 Fig. 3에 제시된 구로1 빗물펌프장 배수유역에 대하여 소유역과 관거를 각각 147개로 분할하였다. 그리고 대상유역의 인근에는 구로기상

관측소와 서울기상청이 위치하고 있다. 연구에서는 각각의 강우자료를 이용하여 사전 모의하였고, 상대적으로 서울기상청의 강우자료가 구로기상관측소의 강우자료보다 대상유역의 강우-유출 현상을 보다 잘 구현하는 것으로 나타났다. 이에 따라 연구에서는 서울기상청의 1분 단위 관측 강우자료를 이용하였고, 대상유역의 규모를 고려하여 10분 단위 강우자료로 변환하여 사용하였다. 홍수유출 모의의 시간 간격은 강우 시간 간격과 동일하게 10분이고, 하도추적의 시간간격은 20초로 하였다. 유역의 침투 모의에는 Green-Ampt 식이 사용되었다.

Table 3. Dimensions of Pondage in the Guro 1 Detention Reservoir and Pump Station

Criteria	Elevation (El. m)	Surface Area (m ²)	Storage Capacity (m ³)
Low Water Level	6.05	-	0
High Water Level	8.50	13,261	29,100

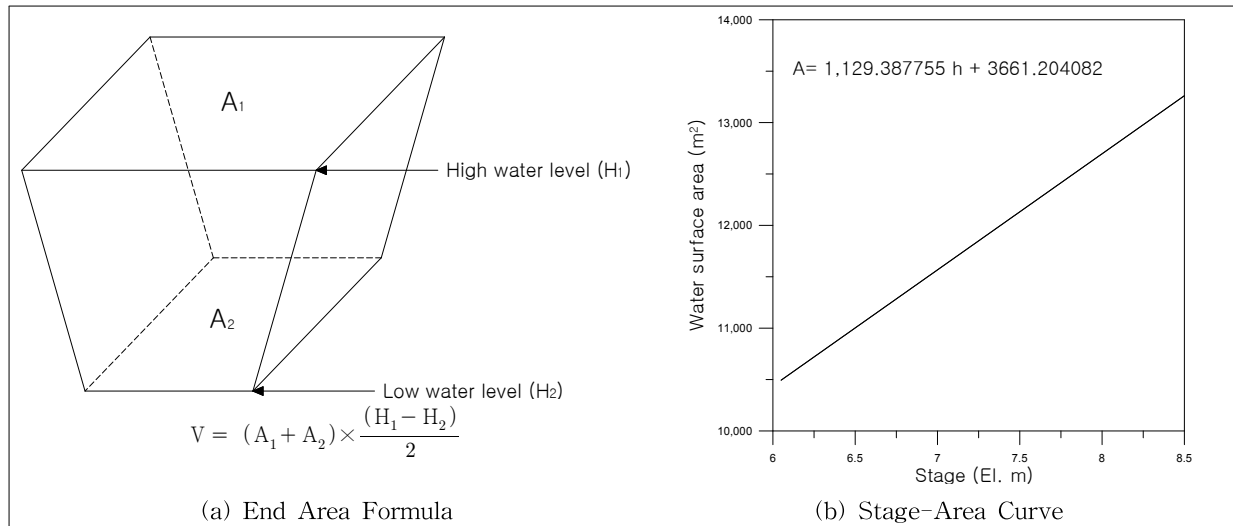


Fig. 4. A Estimation of Stage-Area Curve by the End Area Formula

Table 4. Major Parameters of Subcatchments and Channels

Subcatchment					Channel					
Name	Area (ha)	Slope (%)	Impervious Area (%)	Characteristic Width (m)	Name	Channel Type	Width (m)	Height (m)	Length (m)	Slope
B01	0.66	0.86	74.78	270.53	C01	Closed Rectangular	4.5	1.2	29.92	0.0027
..... (Omitted)				 (Omitted)					
B80	0.16	0.10	71.30	16.03	C80	Closed Rectangular	5.4	1.5	124.71	0.0038
B81	0.33	0.36	73.03	129.68	C81	Circular	0.8 (Diameter)		31.21	0.0035
..... (Omitted)				 (Omitted)					
B147	0.09	1.04	70.43	10.46	C147	Closed Rectangular	21.6	2.4	172.88	0

SWMM의 유역과 하도(관거) 매개변수는 물리적 매개변수 (physical parameters)와 수문학적 매개변수 (hydrologic parameters)로 구분된다. 물리적 매개변수는 유역 면적, 관거의 제원과 같이 해석적으로 정의될 수 있는 매개변수를 의미하고, 수문학적 매개변수는 정확한 값을 파악할 수 없어 추정이 필요한 매개변수이다. Table 4는 구분된 소유역과 관거의 주요 입력자료를 일부분만 나타낸 표이다.

연구에서는 주로 수문학적 매개변수를 모형의 자동 보정에 의한 추정 대상 매개변수로 선정하였다. 연구에서

선정한 추정 대상 매개변수는 총 11개이고, 후술되는 Table 7에 제시되어 있다. Table 7에 제시된 매개변수 가운데 불투수지역의 면적비, 유역폭, 불투수 유역 중 지면 저류가 없는 지역의 면적비는 임의로 범위를 가정하였고, 나머지 매개변수들은 여러 문헌을 이용하여 적정 범위를 도출하였다. 이 가운데 불투수지역의 면적비와 유역폭은 지형정보시스템에 의해 유역마다 추정된 고유의 값이 있으므로(Table 4), 해당 유역의 값들을 특정한 비율로 변화시켜 최적해를 찾도록 하였다. 이는 추정대상 매개변수가 지나치게 많아지는 것을 제어하기 위함이다.

3.2 목적함수의 선정에 따른 모형 보정

3.2.1 단일 목적함수에 의한 보정 결과

2.2절에서 제시한 5가지의 단일 목적함수를 이용하여 구로1 빗물펌프장 유역에 대한 홍수유출 모형의 자동 보정을 수행하였다. 자동 보정에는 2009년 7월 14일에 내린 강우사상이 적용되었는데, 해당 강우의 누가 강우 깊이는 112.5 mm이고, 시간 최대 강우는 28.0 mm/hr이다.

단일 목적함수별 자동 보정 결과는 Table 5와 같다. 자동 보정의 효과를 확인하기 위해 자동 보정 전의 결과도 함께 제시하였다. 자동 보정 전의 결과는 Table 7에 제시된 매개변수의 초기값에 의해 도출된 결과이다. 모든 단일 목적함수에 의한 자동 보정 후의 결과는 보정 전의 결과보다 NSE, 평균제곱오차의 제곱근 (RMSE), 침투유량의 오차에서 공통적으로 크게 개선되는 것으로 나타났다. 그리고 적용된 목적함수에 따라 평균편차의 비율 (PBIAS)과 체적비 (ROV)에서도 개선 효과를 확인할 수 있다. 또한, 단일 목적함수의 적용에 따른 자동 보정의 결과를 모형평가 지표의 최적값 (Table 2)과 비교하면, 모든 목적함수에서 신뢰할만한 수준의 결과를 보인 것으로 판단된다.

Table 5에 분석된 결과 가운데 가장 적절한 목적함수를 선정하기 위해 각 지표별로 가장 양호한 결과를 나타낸 목적함수에 음영을 표시하였다. 그 결과, Type-4의 경우 6가지의 지표 가운데 평균편차의 비율, 체적비, 침투유량의 오차가 가장 양호한 것으로 나타났다. 평균편차의 비율과 체적비는 모두 유출체적과 관련된 지표이므로 Type-4에서 침투유량과 유출체적이 가장 관측값에 근사한 것으로 판단할 수 있다.

상대적으로 가장 좋은 결과를 나타낸 Type-4를 목적함수로 사용하더라도 SWMM의 자동 보정에는 큰 문제는 없다. 하지만 2.2절에서 언급한 바와 같이 연구에서는 보다 정확도 높은 결과를 도출하기 위해 Type-4와 침투유량의 오차 최소화를 고려한 다목적함수에 대하여 확장하여 검토하였다.

3.2.2 다목적함수에 의한 보정 결과

연구에서는 관측 및 계산된 침투유량의 오차와 수문곡선의 오차를 최소화하는 두 가지의 목적함수를 Eq. (2)와 같이 가중치를 동일하게 적용하여 결합하였고, 최적해를 찾아가는 과정에서 도출된 결과를 비교하여 파레토 최적해를 결정하였다.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^N \left(\sqrt{q_t^{\text{obs}}} - \sqrt{q_t^{\text{sim}}} \right)^2 + |q_{\text{max}}^{\text{obs}} - q_{\text{max}}^{\text{sim}}| \quad (2)$$

Fig. 5는 두 목적함수에 의해 결정된 파레토 최적해를 도시한 그림이다. 최적해를 도출하기 위해 생성된 점은 총 1,507개이고, 그 중 6개의 파레토 최적해를 찾을 수 있었다. 결정된 파레토 최적해의 편차는 두 가지 목적함수 모두에서 크지 않은 것으로 분석되었다. 이는 각각의 파레토 최적해에 대하여 분석된 모형의 평가 결과 (Table 6)와 각각의 파레토 최적해에 의해 도출된 매개변수의 조합이 유사한 것을 통해서도 확인할 수 있다 (Table 7).

이러한 파레토 최적해 간의 편차가 작은 이유는 관측 및 계산된 침투유량의 차이를 최소화하는 목적함수와 수문곡선의 오차를 최소화하는 목적함수의 상충관계가 작은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 파레토 최적해 선정 방법을 이용하여 다목적함수의 해를 도출하

Table 5. Assessment Results for the Models Calibrated by the Single Objective Functions

Classification	Objective Function Type	NSE	PBIAS (%)	PEE	ROV	RMSE (m ³ /s)	Error of Peak Flow (m ³ /s)
Before Automatic Calibration	-	0.779	-9.494	3.287	1.095	1.667	2.603
After Automatic Calibration	Type-1	0.895	9.678	2.941	0.903	1.147	0.273
	Type-2	0.903	9.522	2.997	0.905	1.104	0.583
	Type-3	0.873	8.472	2.863	0.915	1.266	0.342
	Type-4	0.896	2.205	3.501	0.978	1.147	0.220
	Type-5	0.906	9.465	3.091	0.905	1.089	0.405

Shade: The Best Objective Function by the Criteria

기 위해서는 다수의 최적해 가운데 적절한 해를 찾는 노력이 요구된다. 하지만 본 연구에서 수행된 다목적함수에 의해 결정된 파레토 최적해들 간의 편차는 미미하므로 도출된 6개의 파레토 최적해 중 어느 점을 선정하더라도 결과에는 큰 영향이 없다. 연구에서는 6개의 파레토 최적해 가운데 두 목적함수의 단순 합이 최소가 되는 ④번 점을 최종해로 선정하였다.

Table 8은 최종 선정된 다목적함수의 최종해에 의한 결과가 단일 목적함수 중 가장 좋은 결과를 도출한 Type-4에 비해 개선된 효과를 나타낸 표이다. 침투유량의 오차와 평균편차의 비율이 각각 99.1%와 34.9% 개선된 것을 확인할 수 있고, 오차비율 추정량과 체적비도 개선되었다. 즉, 홍수유출 해석에서 가장 중요한 지표인 침투유량과 유출체적이 동시에 개선된 것을 확인할 수 있

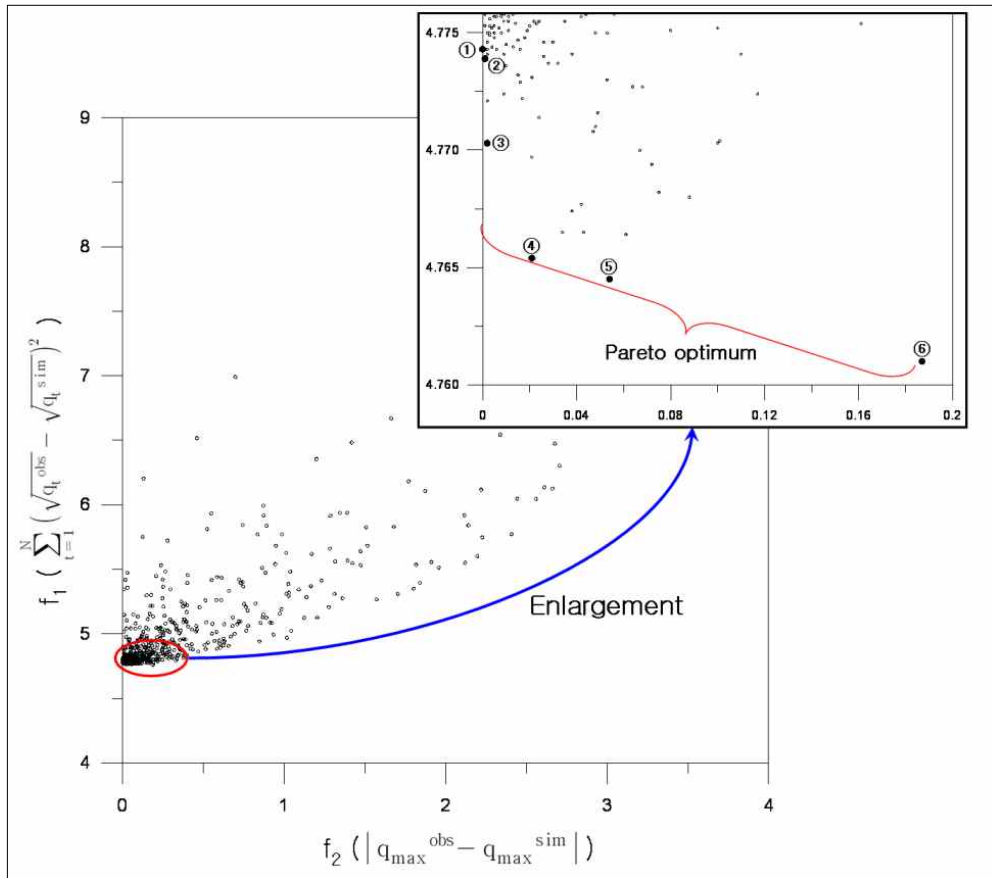


Fig. 5. Estimation of Pareto Optimum for the Multiple Objective Function

Table 6. Assessment Results for the Pareto Optimum Determined by the Multiple Objective Function

Pareto Optimum	Objective Function Value			NSE	PBIAS (%)	PEE	ROV	RMSE (m ³ /s)
	f_1 $\sum_{t=1}^N (\sqrt{q_t^{obs}} - \sqrt{q_t^{sim}})^2$	f_2 $ q_{max}^{obs} - q_{max}^{sim} $	F ($f_1 + f_2$)					
①	4.7610	0.187	4.9480	0.895	2.128	3.048	0.979	1.150
②	4.7645	0.054	4.8185	0.893	1.551	3.056	0.984	1.159
③	4.7654	0.021	4.7864	0.893	1.436	3.057	0.986	1.161
④	4.7703	0.002	4.7723	0.893	1.436	3.056	0.986	1.159
⑤	4.7739	0.001	4.7749	0.894	1.548	3.052	0.985	1.157
⑥	4.7743	0	4.7743	0.894	1.615	3.051	0.984	1.156

Table 7. Parameters Estimated by Pareto Optimum

Parameters	Pareto Optimum						Initial Value	Lower Bound	Upper Bound	Reference
	①	②	③	④	⑤	⑥				
Percent of Impervious Area (%)	0.986	0.989	0.988	0.990	0.989	0.989	1.0	0.8	1.2	Arbitrary
Characteristic Width of the Overland Flow Path (m)	0.921	0.935	1.048	0.992	0.952	0.965	1.0	0.8	1.2	
Manning's n of Impervious Area	0.013	0.014	0.013	0.014	0.013	0.013	0.012	0.010	0.014	Crawford and Linsley (1966); Engman (1986); James et al. (2005)
Manning's n of Pervious Area	0.297	0.313	0.325	0.313	0.298	0.304	0.20	0.15	0.4	
Depth of Depression Storage on Impervious Area (mm)	2.029	2.094	1.889	2.101	1.998	2.016	2.0	1.6	3.8	James et al. (2005)
Depth of Depression Storage on Pervious Area (mm)	5.109	4.554	4.953	4.502	4.654	4.610	4.0	3.8	6.4	
Percent of the Impervious Area with no Depression Storage (%)	23.64	25.38	21.35	26.06	27.58	26.27	20	10	30	Arbitrary
Suction Head (mm)	88.55	77.75	81.03	74.85	75.37	75.96	80	60.96	109.98	Rawls et al. (1983); Rossman (2010)
Soil Saturated Hydraulic Conductivity (mm/hr)	29.22	29.54	28.86	29.65	29.39	29.41	20	10.92	29.97	
Initial Moisture Deficit of Soil	0.367	0.369	0.356	0.372	0.365	0.363	0.20	0	0.39	
Manning's Roughness Coefficient	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.012	0.023	Chow (1959)

Table 8. A Comparison of Results between the Single and Multiple Objective Functions

Objective Function	NSE	PBIAS (%)	PEE	ROV	RMSE (m ³ /s)	Error of Peak Flow (m ³ /s)
Single Objective Function (Type-4)	0.896	2.205	3.501	0.978	1.147	0.22
Multiple Objective Function (Pareto Optimum ④)	0.893	1.436	3.056	0.986	1.159	0.002
Improvement Rate (%)	-0.3	34.9	12.7	0.8	-1.0	99.1

다. 반면에 NSE와 평균제곱오차의 제곱근은 미소하게 개악되었다. 이는 상대적으로 큰 수치의 영향을 많이 받는 두 지표가 침투유량의 오차를 줄이기 위해 설정된 목적함수로 인해 침투유량 인근에서 미소하게 불량해지기 때문으로 판단된다. 그리고 Fig. 6은 최종적인 모형 보정의 결과를 도시한 그림이다.

3.3 모형의 검증

다목적함수를 이용하고 집합체 혼합진화 알고리즘에 의해 보정된 모형을 2009년 7월 12일과 8월 11일의 강우에 대하여 각각 검증하였다. 2009년 7월 12일의 강우와 8월 11일의 강우에 의한 관측 유량은 모형 보정에 사용된

강우사상과 동일하게 구로1 빗물펌프장의 운영 실적을 통해 추정된 자료이다.

Fig. 7은 2009년 7월 12일과 8월 11의 강우사상에 대하여 검증한 유량 수문곡선과 관측된 유량자료를 함께 도시한 그림이다. 그 결과, 두 강우사상 모두에 대하여 대체로 실제 강우-유출 현상을 잘 모의하는 것으로 분석되었다. 그리고 상대적으로 7월 12일의 강우사상에 대한 검증 결과가 8월 11일의 강우사상에 대한 검증 결과보다 우수한 것을 확인할 수 있다. 특히, 7월 12일의 강우사상에 대한 검증 결과는 평균편차의 비율, 체적비, 평균제곱오차의 제곱근에서 보정에 사용된 7월 14일의 강우사상에 대한 결과보다도 우수한 것으로 나타났다 (Table 9).

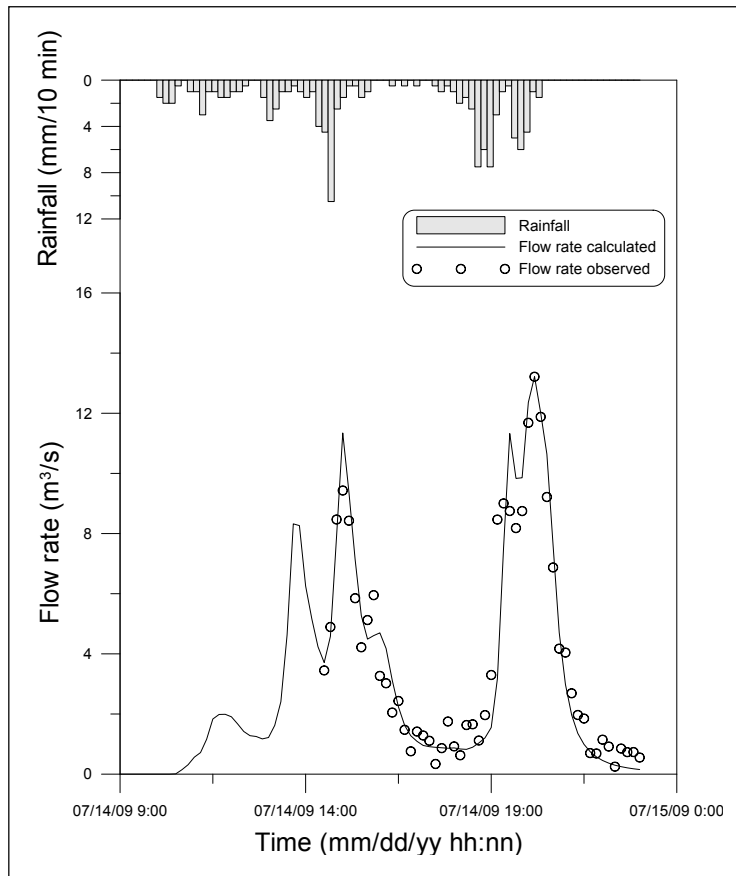


Fig. 6. The Automatic Calibration Results

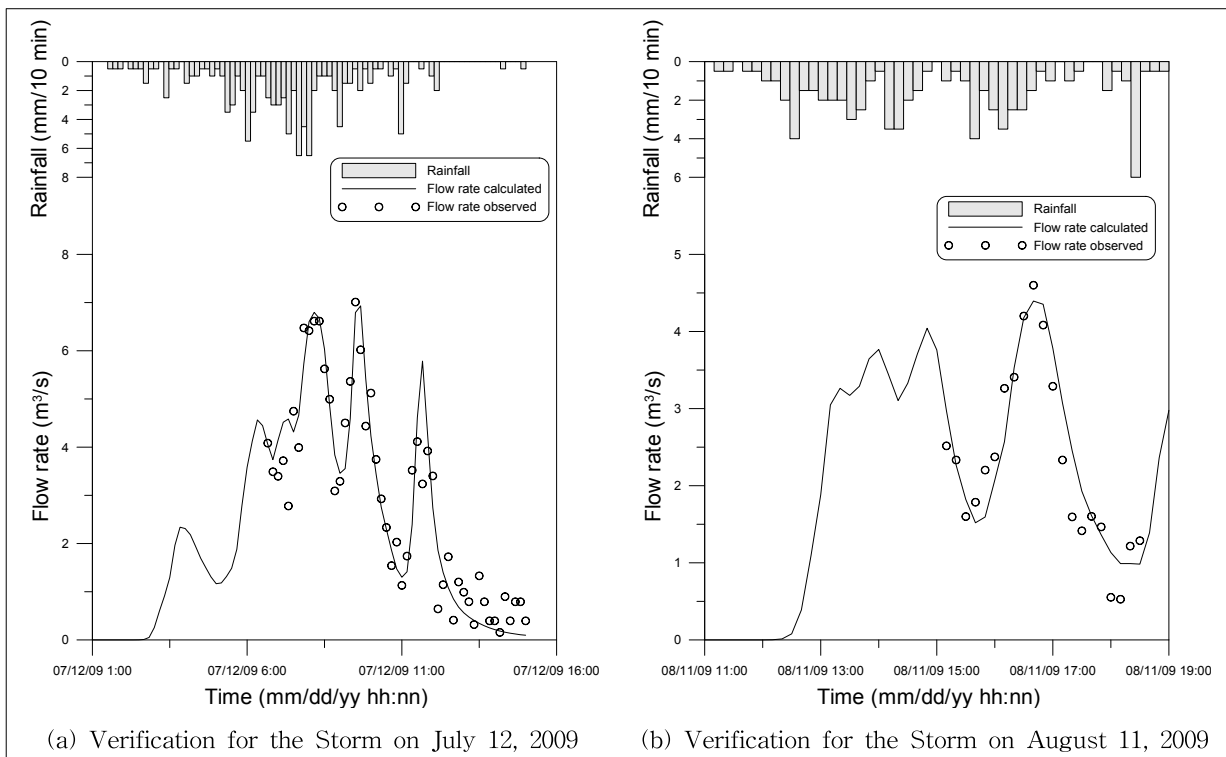


Fig. 7. Verification Results of the Model Calibrated by the Multiple Objective Function

Table 9. Assessment Results for the Models Verified by the Multiple Objective Function

Storm Event	NSE	PBIAS (%)	PEE	ROV	RMSE (m ³ /s)	Error of Peak Flow (m ³ /s)
2009. 07. 12.	0.880	-0.063	3.425	1.001	0.707	0.080
2009. 08. 11.	0.855	-4.056	1.654	1.041	0.431	0.205

4. 결론

본 연구에서는 집합체 혼합진화 알고리즘을 이용하여 SWMM의 홍수유출에 관한 자동 보정을 수행하였다. SWMM의 자동 보정은 도시구역인 서울의 구로1 빗물펌프장 배수유역을 대상으로 하였고, 모형 보정 및 검증에 사용된 유역 유출량은 빗물펌프장의 운영 실적을 이용하여 추정하였다. 그리고 SWMM의 자동 보정에 활용된 매개변수는 유역폭, Manning 계수, 지면 저류량, Green-Ampt 침투식에 포함된 매개변수 등 11개이다.

최적화 문제는 사용된 목적함수에 따라 그 결과가 상이한 바, 연구에서는 계산된 수문곡선이 관측 수문곡선에 적합되도록 하는 5개의 단일 목적함수에 대하여 SWMM을 자동 보정한 후 가장 적절한 목적함수를 선정하였다. 선정된 목적함수는 관측 및 계산된 침투유량의 오차와 체적비가 가장 우수한 것으로 분석된 $\text{Min} \sum_{t=1}^N (\sqrt{q_t^{\text{obs}}} - \sqrt{q_t^{\text{sim}}})^2$

이다. 또한, 수문곡선의 적합만으로는 침투유량의 정확도를 높이기 어렵기 때문에 선정된 단일 목적함수와 침투유량의 오차를 최소화하는 목적함수를 결합한 다목적함수를 구성하여 파레토 최적해를 산정하였다. 그 결과, 6개의 파레토 최적해가 도출되었고, 파레토 최적해 간의 편차는 작았다. 이는 두 목적함수 간의 상충 관계가 미소한 것에 기인한 것으로 판단되었다.

연구에서는 다목적함수의 구성에 사용된 두 목적함수의 단순 합이 최소가 되는 파레토 최적해를 최종적인 모형 보정의 결과로 선택하였다. 다목적함수에 의한 보정 결과는 단일 목적함수에 의한 보정 결과에 비해 침투유량의 오차와 평균편차의 비율에서 각각 99.1%와 34.9% 개선된 것으로 평가되었고, 오차비율 추정량과 체적비도 일부 개선되었다. 그리고 다목적함수에 의해 최종 보정된 모형을 2개의 호우 사상에 대하여 검증한 결과, 유의한 결과를 얻을 수 있었다. 즉, SWMM의 자동 보정이 적절히 수행된 것으로 검토되었다. 따라서 연구에서 개발된 SWMM의 자동 보정 프로그램은 도시구역의 정확도 높은 홍수유출 해석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 하나의 배수유역에 대하여 제한된 홍수

사상에 대한 해석만을 수행하여 결과를 도출하였다. 이로 인해 대상유역에 대한 대표 매개변수의 추정을 통한 검증과 개발된 모형의 임의 유역에 대한 범용성은 검토되지 못하였다. 이와 관련하여 본 연구에서는 문제되지 않았지만 침투유량 발생시간을 제어할 수 있는 제약 방법과 추정 대상 매개변수의 선정에 따른 모형의 정확도 평가 등은 모형의 완성도를 위해 향후 필요한 연구내용이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0015225) 결과입니다. 연구비를 지원해 주신 한국연구재단과 빗물펌프장의 운영실적 자료를 제공해 주신 현대엔지니어링에 심심한 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

강민구, 박승우, 임상준, 김현준 (2002). “전역최적화 기법을 이용한 강우-유출모형의 매개변수 자동보정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp. 541-552.

강신욱, 이동률, 이상호 (2004). “토양수분 저류구조를 가진 탱크모형의 보정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 133-144.

강신욱 (2011). 차원변화 탐색기법을 이용한 장기 저수지 운영의 수위구간 결정 방법 개발 및 적용. 박사학위논문, 부경대학교.

구보영 (2006). 다목적 유전자 알고리즘을 적용한 Tank 모형 매개변수의 전역최적화. 석사학위논문, 세종대학교.

문영일, 윤선권 (2010). “9.21 국지성 집중호우에 의한 도심 홍수 피해 원인분석과 대응방안 -서울특별시를 중심으로.” **2010년 9월 도시홍수 심포지엄**, 한국수자원학회, 제43권, 제12호, pp. 23-32.

서울시 구로구 (2003). 구로1 빗물펌프장 건설공사 실시계획 보고서. 건화엔지니어링.

- 이종태, 허성철, 김태화 (2004). “도시유출모형 (SWMM) 매개변수의 최적화.” **2004 대한토목학회 정기 학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 737-742.
- 정태훈 (2010). SWMM과 FLUMEN을 연계한 수영·망미 저지대의 침수분석. 석사학위논문, 부경대학교.
- 조재현, 이종호 (2006). “SWMM의 유출량 보정을 위한 매개변수 최적화.” **한국영향평가**, 한국환경영양평가학회, 제15권, 제6호, pp. 435-441.
- 채준영 (2004). XP-SWMM을 이용한 도시화 유역에서의 유출 관리 방안 연구. 석사학위논문, 배재대학교.
- 토지주택연구원 (2010). 사전재해 영향성검토제도의 합리적 평가기준 수립 -홍수조절방안 중심으로. 한국토지주택공사.
- 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준·해설. p. 215.
- 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.
- Boyle, D.P., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. (2000). “Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods.” *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 12, pp. 3663-3674.
- Chow, V.T. (1959). *Open-channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Cooper, V.A., Nguyen, V.T.V., and Nicell, J.A. (2006). “Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimisation methods with hydrologic process-based parameter constraints.” *Journal of Hydrology*, Vol. 334, pp. 455-466.
- Crawford, N.H., and Linsley, R.K. (1966). *Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Technical report No. 39, Civil Engineering Department, Stanford University, CA.
- 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.
- Engman, E.T. (1986). “Roughness coefficients for routing surface runoff.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 39-53.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). *Stormwater management model, version 4: user's manual Ver. 2.1*. U.S. Army Corps of Engineers.
- 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.
- Madsen, H. (2000). “Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives.” *Journal of Hydrology*, Vol. 235, pp. 276-288.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Miller, N. (1983). “Green-Ampt infiltration parameters from soils data.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 62-70.
- Rossman, L.A. (2009). *Storm water management model*. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory, Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Sefe, F.T., and Boughton, W.C. (1982). “Variation of model parameter values and sensitivity with type of objective function.” *Journal of Hydrology (N.Z.)*, Vol. 21, No. 2, pp. 117-132.
- Zaghloul, N.A., and Abu Kiefa, M.A. (2001). “Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulations.” *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, No. 7, pp. 587-595.

논문번호: 11-109	접수: 2011.09.26
수정일자: 2011.11.01	심사완료: 2011.11.01