

도시유출 모형의 매개변수 자동보정 기법에 따른 유출 분석

이보람, 금호준, 주재승, 김예림, 이훈석, 김학수
국립재난안전연구원 방재기준평가센터
e-mail:borma1024@korea.kr

Runoff Analysis according to Automatic Parameter Calibration Technique of Urban Runoff Models

Bo-Ram Lee, Ho-Jun Keum, Jae-Seung Joo, Ye-Rim Kim, Hoon-Seok Lee, Hak-Soo Kim
National Disaster Management Research Institute, Disaster Prevention Assessment Center

요약

본 연구는 도시유역의 강우유출 모형의 매개변수 자동보정 시 최적화 기법 적용에 따른 유출 특성을 분석하였다. 이를 위해 도시유역의 유출 및 배수시스템 모의에 널리 사용되고 있는 SWMM을 사용하였으며 자동보정 시 사용되는 최적화 알고리즘에는 전역최적화 알고리즘인 집합체 혼합진화 알고리즘과 차분 진화 알고리즘을 사용하였다. 두 최적화 알고리즘에 따른 SWMM 모형의 매개변수 자동보정 결과, 두 최적화 알고리즘 모두 해당 유역의 유출량 관측치를 비교적 잘 모사하고 있는 것으로 확인되었다. 알고리즘의 성능을 정량적으로 평가하기 위한 평가지표 검토 결과, 집합체 혼합진화 알고리즘이 차분 진화 알고리즘보다 해당 유역의 유출량 측정치를 더 잘 모사하고 있는 것으로 확인되었다.

2. 연구방법

1. 서론

지속적인 개발과 기후변화의 영향으로 도시지역의 내수침수 방지를 위한 강우-유출 해석은 더욱 더 복잡해지고 있다. 이와 관련하여 미 환경보호국(USEPA)에서는 도시지역의 유출수 및 배수시스템을 모의할 수 있는 SWMM(Storm Water Management Model)을 개발하였으며 현재까지 가장 널리 활용되고 있는 수치모델 중 하나이다[9]. 기본적으로 SWMM은 강우량과 유출수, 배수 시스템 등 대상 유역의 복잡한 관계를 표현하기 위해 다양한 매개변수(parameters)를 기반으로 실행된다[7]. 결국 대상 유역의 유출 특성 등을 정확히 파악하기 위해서는 SWMM의 매개변수 보정이 필수적이다[12]. SWMM의 매개변수 보정은 실무자의 경험과 전문성에 의존하는 “시행착오(trial and error)” 방법, 수동보정(manual calibration)과 모델의 최적 매개변수 값을 식별하는 자동보정(automatic calibration)으로 구분된다[1]. 본 연구에서는 자동보정을 통해 SWMM 모형의 매개변수를 추정하였으며, 자동보정에 사용되는 최적화 알고리즘 가운데 집합체 혼합진화 알고리즘과 차분 진화 알고리즘을 각각 적용하여 그에 따른 유출 특성을 분석하였다.

2.1. SWMM 모형과 최적화 알고리즘 연결

본 연구에서는 오픈소스 분석도구인 R을 통해 집합체 혼합진화 알고리즘을 구현한 hydromad 패키지와의 차분 진화 알고리즘을 구현한 DEoptim 패키지를 활용하여 SWMM 모형과 각각의 최적화 알고리즘을 연결하였다. 또한 매개변수 최적화를 위한 목적함수는 Root Mean Square Error를 최소화 하도록 하였다(식 1).

$$\text{Minimize} \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,cal})^2}{N}} \quad (\text{식 1})$$

여기서 $q_{t,obs}$ 와 $q_{t,cal}$ 는 관측 및 모의된 유량의 시계열, N 은 시계열 자료의 개수를 의미한다. 또한, 보정된 모형의 성능을 평가하기 위해 Nash-Sutcliffe Efficiency를 사용하였다(식 2).

$$1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{t,cal})^2}{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - \bar{q}_{obs})^2} \quad (\text{식 2})$$

2.2. 최적화 알고리즘

2.2.1 집합체 혼합진화 알고리즘

[5]에 따르면, 집합체 혼합진화 알고리즘은 [8]의 심플렉스 방법(simplex procedure), [10]의 조절 난수 탐색 방법(controlled random search), [6]의 경쟁적 진화 방법(competitive evolution)의 강점과 집합체 혼합(complex shuffling)이라는 새로운 개념을 결합하여 구성된 알고리즘이다. 집합체 혼합진화 알고리즘은 개발된 이후, 알고리즘의 효과와 효율이 알려지면서 다양한 유역유출 모의 모형의 자동 보정과 최적화 해석에 관한 연구에서 활용되었다[1].

2.2.2 차분진화 알고리즘

[11]에 의해 제안된 차분진화 알고리즘은 비선형, 미분 불가능한 연속공간함수를 빠르게 탐색하여 최적해를 구하기 위한 목적으로 제안되었다[4]. 차분진화 알고리즘은 성능은 [13]에 의해 그 효과성과 정확성이 보고되었다.

2.3. 추정 대상 매개변수 및 범위 설정

본 연구에 사용된 SWMM의 매개변수 및 탐색 범위는 선행 연구들을 참고하여 표 1과 같이 설정하였다.

[표 1] 추정 대상 매개변수 및 탐색 범위

Parameter	Description	Lower	Upper
Pcnt. Imperv	Percent of Impervious area	0.5	1.5
Width	Characteristic width of the overland flow path	0.5	1.5
N-Imperv	Manning's n of impervious area	0.011	0.02
N-Perv	Manning's n of pervious area	0.1	0.35
S-Imperv	Depth of depression storage on impervious area	1.6	3.8
S-Perv	Depth of depression storage on pervious area	3.8	6.4
Pct Zero	Percent of the impervious area with no depression storage	10	30
Max_R	Maximum rate on the Horton infiltration curve	76	254
Min_R	Minimum rate on the Horton infiltration curve	2.5	25.4
Decay	Decay constant for the Horton infiltration	1	4
Manning N	Manning's roughness coefficient	0.011	0.02

3. 사례 연구

3.1 대상유역 현황

본 연구의 대상유역은 울산광역시 남구 삼호동 일원으로 해당 유역은 국립재난안전연구원의 선행연구[2][3]를 통해 우수유출 모니터링 시범유역으로 구축·운영 중에 있다. 해당 유역의 전체 면적은 62.7ha이며 태화강의 하류에 위치하고 있다(그림 1). 삼호동 일원은 주거지역, 공원, 학교 등 인구 밀집 지역이며 주거지 33.2%, 배후산지 32.4%로 구성되어 있다.



[그림 1] 대상유역 현황

3.2. 우수관망 및 지형·토지이용 특성

SWMM 모형 구축을 위해 대상유역의 하수도 대장을 수집하여 모형 구축에 필요한 주요 정보 등을 추출하였다. 또한 대상유역의 수치표고 및 유역경사도 분석은 국립지리정보원에서 제공하는 수치지형도를 적용하였으며 지형정보시스템(GIS)를 통해 수치표고모형(DEM), 유역경사분석도를 작성하였다. 토지이용 특성은 국립지리정보원 및 국립농업과학원에서 제공하는 토지이용도 및 정밀토양도를 활용하였다[2][3].

3.3. 대상유역의 강우사상

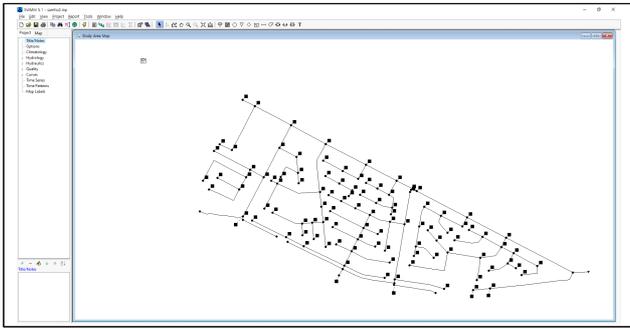
본 연구의 수행을 위해 선택된 대상유역의 강우사상은 표 2와 같다. 우수유출 시범유역에 구축된 옥현초등학교 강우관측소에서 분 단위 계측 자료를 본 연구에 활용하였다.

[표 2] 대상유역의 강우사상 개요

강우관측소	기간	총 강우량	최대 강우강도 (발생시기)
옥현초등학교	2019.10.02. 00:00 ~ 2019.10.04. 00:00	218.9mm	1.9 mm/hr (2019.10.02. 21:50)

3.4. SWMM 구축

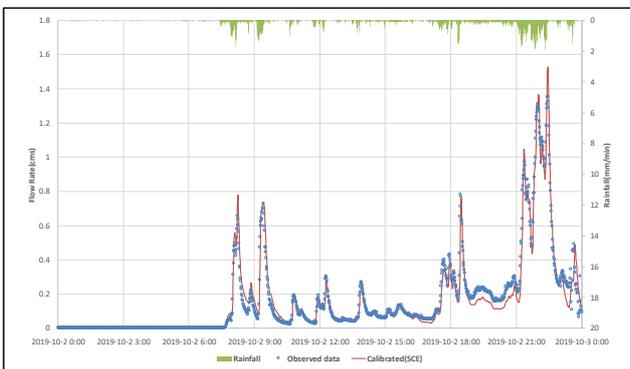
대상유역에 대한 특성 분석 결과를 SWMM에 적용하여 모형을 구성하였다(그림 2). 모형을 통해 대상 유역은 107개의 소유역, 111개의 하수관거, 112개의 노드 및 1개의 방류부로 구성되었다. 각각의 소유역, 하수관거에 입력되어야 하는 초기 매개변수 값은 앞서 수행된 우수관망 및 지형·토지 현황 정보를 기반으로 입력되었다.



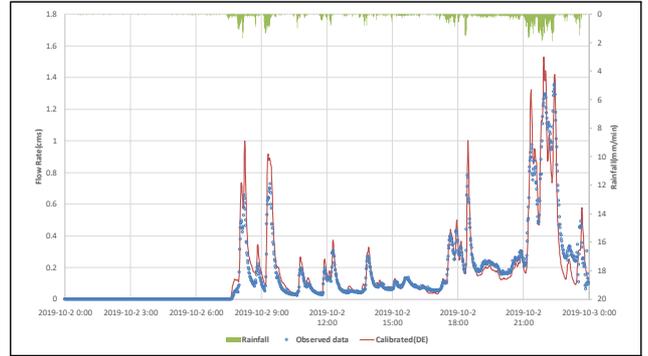
[그림 2] 대상유역의 SWMM 모형 구축 현황

3.5. 연구결과

본 연구에서는 삼호동 유역에 구축된 총 8개의 지점 중 4번 지점에서 계측된 유출량을 대상으로 SWMM 모형의 매개변수 자동보정을 수행하였다(그림 3, 4). 매개변수 자동보정 결과, 두 가지 최적화 알고리즘 모두 대상지점에서 계측된 유출량을 비교적 잘 모사하고 있는 것으로 확인되었다. 다만, 계측된 유출량의 침투값에 대한 보정이 집합체 혼합진화 알고리즘에서 더 잘 모사되었으며, 그에 따라 본 연구에서 목적함수로 사용한 RMSE 값에서 집합체 혼합진화 알고리즘이 차분 진화 알고리즘보다 더 나은 결과를 도출되었다. 최적화 알고리즘의 적용성 검토를 위해 NSE 지표를 검토한 결과, 집합체 혼합진화 알고리즘이 차분 진화 알고리즘보다 우수한 성능을 보이는 것으로 확인되었다.



[그림 3] 매개변수 자동보정 결과(집합체 혼합진화 알고리즘)



[그림 4] 매개변수 자동보정 결과(차분 진화 알고리즘)

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 집합체 혼합진화 알고리즘과 차분 진화 알고리즘을 이용하여 SWMM 모형의 도시 유출에 관한 자동보정을 수행하였다. 대상 유역은 국립재난안전연구원에서 구축·운영하고 있는 삼호동 유역으로 하였고, 모형의 보정 및 검증에 위해 8개의 모니터링 지점 중 4번 지점의 계측자료를 활용하였다.

계산된 유출량 및 수문곡선의 확인을 통해 본 연구에 사용된 두 가지 최적화 알고리즘 모두 대상 지점의 계측자료를 비교적 잘 모사하고 있는 것으로 확인되었다. 알고리즘의 성능에 관한 정량적 비교를 위해 NSE 지표를 사용하여 검토한 결과 집합체 혼합진화 알고리즘이 차분 진화 알고리즘보다 우수한 성능을 보이는 것으로 확인되었다. 본 연구는 두 가지 최적화 알고리즘의 탐색 특성과 장점을 검토함으로써 연구 상황에 따른 최적화 알고리즘의 선택에 시사점을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 강태욱, 이상호 “유역유출 및 수질모의에 관한 SWMM의 자동 보정 모듈 개발”, 한국수자원학회 논문집, 제 47권 4호, pp. 343-56, 2014년.
- [2] 국립재난안전연구원, “도시방재시설물 영향분석 및 실험 모형 검토를 위한 모니터링 사이트 구축”, 2019년.
- [3] 국립재난안전연구원, “우수유출 저감시설 영향분석 및 홍수도달시간 산정을 위한 시범유역 구축”, 2020년.
- [4] 이동건, 송기일, 강경남, 이상연, 최창순, “굴착 계측데이터와 차분진화 알고리즘을 이용한 다층지반 역해석 기법”, 2021년 대한토목학회 정기학술대회, 2021년.
- [5] Duan Q., Soroosh S., Gupta V., “Effective and Efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models”, Water Resources Research, 제 28권4호, pp. 1015-1031, 2020년.
- [6] Holland J. H., “Adaptation in Natural and Artificial

- Systems”, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975년.
- [7] Mina S. B., Zhenduo Z., L. Shawn Matott, Alan J. R., “A new tool for automatic calibration of the Storm Water Management Model(SWMM)”, Journal of Hydrlogy, 제 581권, 2020년.
- [8] Nelder J. A. and Mead R., “A simplex method for function minimization”, Computer Journal, 제 7권4호, pp. 308-313, 1965년.
- [9] Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B. R., Tryby, M., Massoudieh, A., “Storm water management model: performance review an dgap analysis”, J. Sustain. Water Built Envrion., 제 3권, 2017년.
- [10] Price W. L., “Global optimization algorithms for a CAD workstation”, Journal of Optimization Theory and Applications, 제 55권1호, pp. 133-146, 1987년.
- [11] Storn, R. and Price, K., “Deffierential Evolution-a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces”, Journal of Global Optimization, 제 11권 4호, pp. 341-359, 1997년.
- [12] Shamsi, U.S., Koran, J., “Continuous calibration”, J. Water Manage. Model, 제 25권, pp. 1-9, 2017년.
- [13] Vesterstrom, J. and Thomsen, R., “A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems”, In Proceedings of the 2004 congress on evolutionary computation, 제 2권, pp. 1980-1987, 2004년.