

연구논문

SWMM의 유출량 보정을 위한 매개변수 최적화

조재현 · 이종호*

관동대학교 환경방재학과, 청주대학교 도시계획학과*
(2006년 12월 1일 접수, 2006년 12월 14일 승인)

Parameter Optimization for Runoff Calibration of SWMM

Jae-Heon Cho · Jong-Ho Lee*

Department of Environment and Disaster Prevention, Kwandong University
Department of Urban Planning, Cheongju University*
(Manuscript received 1 December 2006; accepted 14 December 2006)

Abstract

For the calibration of rainfall-runoff model, automatic calibration methods are used instead of manual calibration to obtain the reliable modeling results. When mathematical programming techniques such as linear programming and nonlinear programming are applied, there is a possibility to arrive at the local optimum. To solve this problem, genetic algorithm is introduced in this study. It is very simple and easy to understand but also applicable to any complicated mathematical problem, and it can find out the global optimum solution effectively. The objective of this study is to develop a parameter optimization program that integrate a genetic algorithm and a rainfall-runoff model. The program can calibrate the various parameters related to the runoff process automatically. As a rainfall-runoff model, SWMM is applied. The automatic calibration program developed in this study is applied to the Jangcheon watershed flowing into the Youngrang Lake that is in the eutrophic state. Runoff surveys were carried out for two storm events on the Jangcheon watershed. The peak flow and runoff volume estimated by the calibrated model with the survey data shows good agreement with the observed values.

Key words : Automatic calibration, Genetic algorithm, Parameter optimization, SWMM, Jangcheon watershed

1. 서론

최근 홍수시의 강우유출로 인해 도시지역에서는 하수도의 범람으로 인한 침수피해가 자주 발생하고 있다. 이와 같은 강우로 인한 지표면유출량을 예측하고 하수도시스템의 정비를 위해 유출모형을 적용하고 있다. 또한 강우시 배수구역내 지표물질의 쓸림에 의해 발생하는 비점원오염부하량을 산정하고, 하수처리장의 처리용량을 초과해서 발생하는 CSO(합류식하수도 월류수)량을 예측하고, 방류수계에 미치는 영향을 평가하고, 그에 대한 대책을 강구하기 위해서도 유출모형이 활용되고 있다.

이와 같은 유출모형을 적용할 때 유출과정 및 수질과 관련된 다양한 매개변수들 값의 적용 여하에 따라 모델결과에 큰 차이가 생긴다. 매개변수 값의 결정을 위해 매개변수의 보정절차를 거치는데 보통의 경우 시행착오법에 의한 수동보정을 하고 있으나 매개변수의 중요성에 비추어 볼 때 보정자료의 실측치와 계산치의 오차를 최소화하는 최적화기법을 이용한 자동보정법이 필요하다.

자동보정으로 강우-유출모형을 보정할 때는 매개변수의 수가 많아지면, 선형계획법과 비선형계획법등의 수학적모형에 기초한 최적화방법들은 국지 최대 또는 국지최소에 도달하게 할 가능성이 많은 것으로 알려져 있다(이길성·김상욱, 2001). 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 효과적으로 전역적 탐색을 할 수 있고, 수학적인 어려움이나 복잡함이 없는 유전알고리즘(Cho *et al.*, 2004; Gen and Cheng, 1997; Goldberg, 1989)을 이용한 자동보정기법을 이용해서 강우-유출모형을 보정할 수 있는 프로그램을 개발한다. 특히 본 연구에서는 유출과 관련된 다양한 매개변수를 총괄해서 자동보정하는 유전자연산과 강우-유출모형이 통합된 프로그램을 개발한다. 강우-유출모델로서는 도시지역 유출 특성을 잘 묘사하는 SWMM을 사용한다(국립환경연구원, 1997; 서규우·조원철, 1998; 조재현·조남홍, 2003; 이범희·이길성, 1998; 이종태·강태호, 1997; Huber and Dickinson, 1988; Tsihrintzis and Hamid, 1998).

개발된 자동보정 프로그램을 부영양상태에 있는 석호인 속초 영랑호유역의 장천수계에 적용하였다. 과거에 주변 시가지지역의 하수가 미처리된 상태로 유입될 때, 영랑호는 극심한 수질오염을 겪었고, 속초 하수종말처리장 완공이후에는 가장 큰 유입원인 장천유역과 영랑호 주변의 시가지지역으로부터의 강우 유출수가 주된 오염원이 되고 있다. 장천수계의 강우시 유출조사 결과를 이용해서 SWMM의 유출과 관련된 중요한 매개변수들을 자동보정하였다.

II. 유전알고리즘과 SWMM의 통합

1. 유전알고리즘

유전알고리즘(Gen and Cheng, 1997)은 자연적 선택(natural selection)과 유전학의 기작에 기초한 추계학적 탐색기법이다. 유전알고리즘은 전통적인 탐색 기법과 달리 개체군(population)이라 불리는 초기 무작위 해(random solutions)와 함께 시작한다. 개체군의 각 개체는 염색체(chromosome)라고 불리고, 제시된 문제에 대한 하나의 해가 될 수 있다. 염색체는 일반적으로 이진수 열(binary bit string)로 표현된다. 염색체 들은 세대라 불리는 연속적인 반복 연산을 통해서 진화한다. 각 세대의 염색체는 적합도(fitness)의 척도에 의해 평가된다(evaluated). 다음 세대를 형성하기 위해서, 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)에 의해 자손(offspring)이라 불리는 새로운 염색체 들이 만들어진다. 적합도에 따라 부모와 자손의 일부를 선택하고, 개체군수를 유지하기 위해 나머지를 도태시켜서 새로운 세대가 형성된다. 보다 더 적합한 염색체는 선택될 확률이 높아진다. 여러 세대 후에 가장 좋은 염색체로 수렴해 가고, 어떤 문제에 대한 최적해를 구할 수 있다.

2. SWMM의 구성

본 연구에서는 도시유역에서 강우로 인해 발생하는 유출과 배수관망내에서의 유출량 추적, 저류량산정 및 오염부하량을 모의할 수 있어 도시 유출모의에

널리 사용되는 SWMM모델(Huber and Dickinson, 1988)을 유역모델로서 적용하였다. SWMM은 단일 강우사상은 물론 연속적인 모의도 가능하며, 다양한 토지이용상태를 고려하여 수로에서의 유출량과 수질을 예측할 수 있다. SWMM모델의 지표면유출은 비선형저류방정식을 이용해서 계산하고, 침투량산정은 Horton 또는 Green-Ampt식을 사용하여 계산한다. 수리계산은 Runoff block의 경우 비선형저류방정식을 이용하고, Transport block은 Kinematic 방정식, Extran block은 Dynamic 방정식을 이용한다.

Runoff block은 초기 연산이 수행되는 부분으로 강우사상에 의한 배수구역에서의 유출현상과 수질 변화를 모의하며, 매개변수는 침투 및 요지저류와 같은 수문학적 매개변수와 오염물질의 축적(buildup) 또는 쓸림(washoff)과 같은 수질매개변수로 구분할 수 있다. Transport block은 Runoff block에서 연산된 결과를 기본 자료로 사용하여 강우 및 건기시 배수시스템 내에서 유량과 오염물질을 추적하고 배수시스템으로의 침투를 계산한다.

3. 유전알고리즘과 SWMM의 통합

SWMM을 자동보정하기 위해 최적화기법으로 상기의 유전알고리즘(Carroll, 2004)을 이용하였다. 이를 위해 SWMM의 source code를 수정하여 유전알고리즘과 통합되도록 하였다. 초기에 유전알고리즘의 매개변수를 설정하고, 강우 유출 조사결과와 유량관측치를 읽어들이 다음 임의의 초기 세대 개체들을 생성한다. 이후 SWMM을 실행하고, SSQ (Residual sum of squares) 계산결과로 적합도를 평가하고, 선택, 교배, 돌연변이의 과정을 거쳐 각 세대를 완성하고, SWMM의 최적 매개변수를 선정한다. GA와 SWMM의 통합프로그램의 흐름도는 그림 1과 같다.

III. 통합모형의 적용

1. 대상지역 및 강우유출조사

본 연구의 대상지역인 영랑호 유역은 유역면적

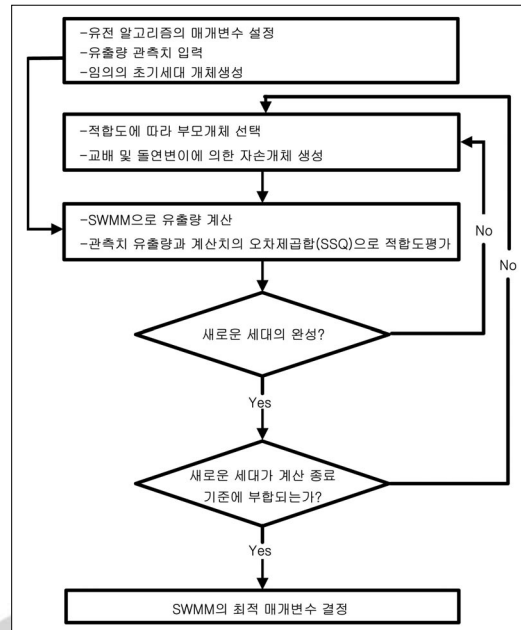


그림 1. 유전알고리즘과 SWMM의 통합프로그램의 흐름도

7.79km²이며, 호수주변에 리조트와 주거지가 발달되어 있으며, 영랑호로 유입되는 지천 중 가장 규모가 큰 장천은 유역면적 4.75km²의 하천으로 상류에는 리조트와 골프장이 조성되어 있으나 대부분이 임야로 구성되어 있다. 중·하류부에는 농경지와 임야가 대부분을 차지하는 전형적인 농촌지역이다. 장천유역의 토지이용 형태를 보면 장천유역의 경우 임야가 67.7%로 거의 대부분이며, 농경지가 16.5%, 주거지역이 3.1%, 리조트와 골프장이 12.6%의 비율로 이용되고 있다. 그림 2는 영랑호 유역의 수계도 및 수질조사 지점을 나타낸다.

유전알고리즘으로 SWMM을 자동보정할 때 2005년에 수행된 2회의 강우 유출조사 결과를 이용



그림 2. 영랑호 유역의 수계도 및 수질조사 지점도

표 1. 강우유출 조사기간의 강우사상

구 분	강우시작시간	강우량(mm)	선행무강우일수(day)	강우강도(mm/hr)	강우지속시간(hr)
1차(6월30일~7월1일)	6월 30일 23:40	19.6	3.2	0.2~7.6	5
2차(8월24일~26일)	8월 24일 19:30	96.2	2.5	0.2~19.1	28.2

하였다. 장천유역의 강우시 유출을 조사하기 위해서 장천 중하류부 지점에서 강우초기와 강우강도가 높은 시점은 15분 간격으로 그 외의 시점은 30분~2시간 간격으로 유량측정을 하였다. 표 1에는 2차레에 걸친 강우사상을 나타내었다.

2. SWMM의 적용

본 연구에서는 SWMM모델의 Runoff block과 Transport block을 이용하여 장천유역의 강우유출과 유출수질을 모의하고, 유전알고리즘과 연계해서 SWMM의 매개변수를 최적화한다. 토지이용을 고려하여 배수구역을 세분화하였고, 하천 구간의 수리적 특성을 감안해서 수로의 Network를 형성하였다. 이와 같은 SWMM의 적용을 위한 수로의 Network는 ArcView GIS를 이용한 공간분석을 통하여 설정되었으며, 설정된 수로의 Network는 그림 3과 같다. 또 각 배수구역의 투수 불투수역을 평가하기 위해 환경부의 토지이용도를 이용하였고, 토지이용도는 그림 4와 같다. 또한 SWMM의 적용을 위해 각 배수구역에 대한 유역면적, 유역경사, 유역폭, 불투수면적비 등의 입력 자료를 ArcView GIS를 이용하여 계산하였다. 강우량 자료는 장천 중·하류부의 장천마을에 Weather Station을 설치하여 10분 간격의 강우량자료를 확보하여 SWMM의

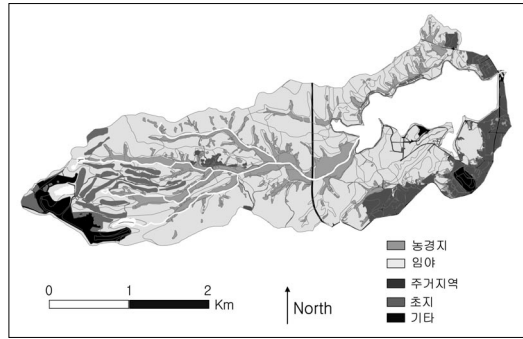


그림 4. 장천 배수구역의 토지이용도

입력자료로 적용하였다.

3. 유전알고리즘과 최적화대상의 매개변수

Carroll(2004)의 유전알고리즘에서는 Tournament selection으로 부모개체를 선택하고, 교배에서는 Single-point crossover와 Uniform crossover 중에서 택할 수 있는데 본 연구에서는 Uniform crossover를 적용하였다. 돌연변이로는 Jump mutation과 Creep mutation이 함께 적용되었고, 가장 좋은 부모개체가 복제에 반드시 사용되도록 하는 Elitism이 채택되었다. 적합도평가는 SWMM으로 부터의 유출량 계산값과 강우유출조사에 의한 관측값으로 SSQ를 계산하고 그 역수를 취하여 적합도를 산정하였다.

유출량 계산에 민감하게 작용하는 매개변수들을 유전알고리즘에 의한 최적화 대상으로 하였다. 이들 매개변수는 Runoff block에서 유역폭(subcatchment width), 불투수면적비(imperiousness of subcatchment), 투수 및 불투수지역 조도계수(perVIOUS and imperVIOUS area Manning's roughness), 최소 및 최대 침투용량(minimum and maximum infiltration rate), 투수 및 불투수지역 요지저류(perVIOUS and imperVIOUS depression storage) 등 8가지가 있고, Transport block에서 수로의 조도계

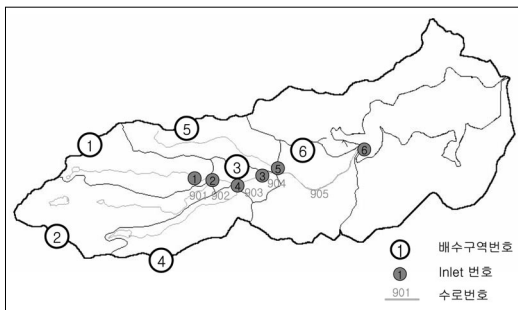


그림 3. SWMM 적용을 위한 장천 배수구역 및 수로Network

수(channel roughness coefficients)가 있다.

IV. 결과토의

유전알고리즘을 이용해서 최적화하고자 하는 매개변수의 최소 및 최대값의 적용범위는 표 2와 같다. 대부분의 매개변수 범위는 SWMM 사용설명서에 제시된 값에 기초하였다. 유역폭은 SWMM 사용설명서에 제시된 방법으로 계산할 때 오차가 있을 수 있다는 점과 유역폭이 유출량 계산결과에 민감한 것을 감안하여 원래 계산값의 $\pm 50\%$ 를 그 값의 범위로 설정하였다. 불투수면적비도 토지이용도 작성에 이용된 지형도의 제작시점과 현재와의 차이를 감안하여 $\pm 50\%$ 를 그 값의 범위로 설정하였다.

유전알고리즘의 매개변수에 대해 Carroll(2004)이 추천한 값을 적용하였고, mutation 확률은 0.01, Creep mutation 확률은 0.02, 교배확률은 0.5를 적용하였다. 2005년 6월 30일 실측한 조사결과로 보정할 때, 유전알고리즘의 개체군수를 10으로 두고 세대수를 증가시켜 가면서 최적값의 SSQ를 계산한 결과는 그림 5와 같다. 세대수 100이상에서는 최적값이 감소하지만 그 차이가 미소하므로 세대수를 100으로 하고 개체군수를 10에서 100까지 변화시키면서 최적값을 계산했을 때, 2005년 6월 30일 실측 결과로 보정했을 경우 개체군 80일 때 최적값이 계산되었고, 2005년 8월 24일 조사결과로 보정했을 경우 개체군 100일 때 최적값이 계산되었다.

표 2. 최적화 대상인 SWMM의 매개변수의 최소 및 최대값의 범위

매개변수	범위
유역폭	SWMM 사용설명서에 의한 계산치의 $\pm 50\%$
불투수면적비	토지이용도에 의한 계산치의 $\pm 50\%$
불투수지역 조도계수	0.001 - 0.02
투수지역 조도계수	0.1 - 0.6
불투수지역 요지저류	0.13 - 0.8mm
투수지역 요지저류	0.5 - 1.5mm
최대 침투용량	76 - 254mm/hr
최소침투용량	2.5 - 25.4mm/hr
수로의 조도계수	0.01 - 0.2

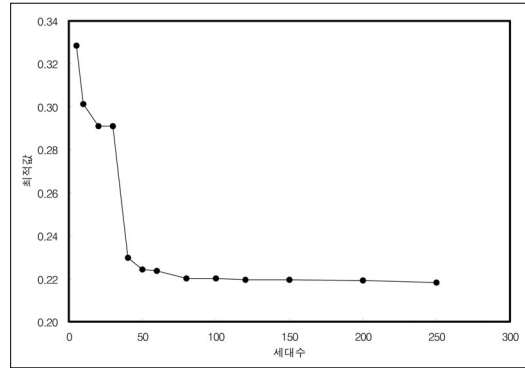


그림 5. 세대수에 따른 최적 SSQ의 변화

두차례의 실측 결과로부터 최적화된 6개 소배수구역의 매개변수값의 범위는 표 3과 같다. 표 3에서 소배수구역의 형상과 토지이용 특성을 반영하는 유역폭과 불투수면적비를 제외하고 표시하였다.

유전알고리즘을 이용해서 결정된 1차 강우와 2차 강우시의 유출량 보정결과는 그림 6, 그림 7과 같다. 1차 강우와 2차 강우시의 보정결과를 보면 모델 계산치의 유출량 변화가 실측치의 추이를 잘 나타내

표 3. 유전알고리즘으로 결정된 SWMM의 매개변수의 범위

매개변수	1차조사로부터 보정결과	2차조사로부터 보정결과
불투수지역 조도계수	0.001-0.019	0.006-0.017
투수지역 조도계수	0.23-0.57	0.10-0.58
불투수지역 요지저류	0.22-0.77	0.15-0.78
투수지역 요지저류	0.80-1.47	0.71-1.42
최대 침투용량	78.7-224.5	77.9-241.4
최소침투용량	2.9-23.4	12.1-22.8
수로의 조도계수	0.03-0.20	0.07-0.20

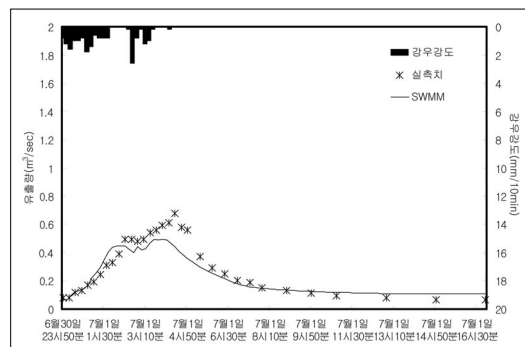


그림 6. 유전알고리즘을 이용한 1차 강우의 유출량 보정결과

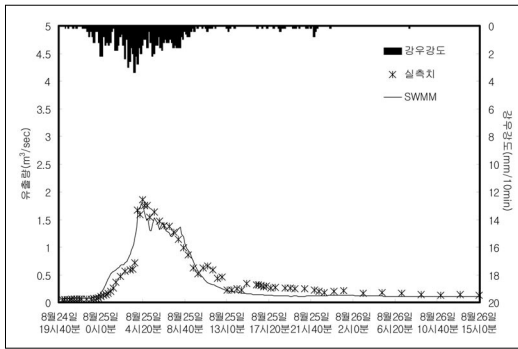


그림 7. 유전알고리즘을 이용한 2차 강우의 유출량 보정결과

표 4. 자동보정된 SWMM의 계산치와 실측치의 비교

시 기	항 목	실측치	계산치	비 율 (계산치/ 실측치)
1차강우	침투유출량(m ³ /s)	0.67	0.49	73%
	총유출량(m ³)	12978	12524	97%
2차강우	침투유출량(m ³ /s)	1.85	1.79	96%
	총유출량(m ³)	60017	53793	90%

주고 있다. 표 4에서는 자동보정된 모델에 의해 산정된 침투유출량과 총유출량을 실측치와 비교하였다. 대부분의 경우 90% 이상의 일치도를 보였고, 다만 1차 강우시의 침투유출량의 계산치가 실측치의 73%로 계산되었다.

본 연구에서 개발된 유전알고리즘과 SWMM의 통합프로그램을 이용해서, SWMM의 계산결과를 정확하게 반영해서 실측치와 계산치의 오차를 계산할 수 있었고, 이를 바탕으로 유전알고리즘을 이용해서 주어진 매개변수 값의 범위내에서 최적의 매개변수 값을 결정할 수 있었다.

V. 결 론

1) SWMM의 유출량 계산에 민감하게 작용하는 Runoff block의 8가지 매개변수와 Transport block의 1개 매개변수에 대해서 유전알고리즘을 이용해서 최적값을 결정하는 통합프로그램을 개발하고 영랑호유역의 장천에 적용하였다.

2) 유전알고리즘의 세대수를 100으로 두었을 때 1차 강우조사 실측 결과로 보정할 경우 개체군 80일

때 최적값이 계산되었고, 2차 조사결과로 보정시는 개체군 100일 때 최적값이 계산되었다.

3) 자동보정된 모델에 의해 산정된 침투유출량과 총유출량을 실측치와 비교했을 때, 대부분의 경우 90% 이상의 일치도를 보였다.

4) 본 연구와 같이 유전알고리즘을 이용해서 SWMM의 유출과 관련한 최적 매개변수를 먼저 결정하는 다음에, 수질에 관련된 매개변수들도 유전알고리즘을 이용해서 최적화할 수 있다.

5) 매 강우사상에 대한 독립된 강우 유출 조사결과에 유전알고리즘을 적용해서 SWMM의 최적 매개변수들을 계산했을 때 이들 자료로 보정과 검증 절차를 어떻게 마무리할 것인가에 대한 것도 향후의 연구과제이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2005-000-10983-0)지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 국립환경연구원, 1997, 하수도시설 개축 및 기능개선 전략 연구, 3-54.
- 서규우, 조원철, 1998, 유역특성 변화에 따른 도시 유출모형의 매개변수 민감도 분석(I), 한국수자원학회논문집, 31(3), 243-252.
- 이길성, 김상욱, 2001, 유전자알고리즘을 사용한 SSARR 모형의 자동보정, 대한토목학회논문집, 21(3-B), 171-183.
- 이범희, 이길성, 1998, 매개변수 추정방법의 개선을 위한 전문가 시스템의 개발, 한국수자원학회논문집, 31(6), 641-655.
- 이종태, 강태호, 1997, 도시배수유역의 유출-수질 특성 인자의 민감도 분석, 한국수자원학회논문집, 30(1), 83-93.
- 조재현, 조남홍, 2003, SWMM을 이용한 황구지천 유역의 비점원오염부하량 평가, 환경영향평

- 가, 12(5), 349-358.
- Carroll, D. L., 2004, <http://cuaerospace.com/carroll/ga.html>.
- Cho, J. H., Sung, K. S., and Ha, S. R., 2004, A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment cost using a genetic algorithm, *Journal of Environmental Management*, 73(3), 229-242.
- Gen, M. and Cheng, R., 1997, *Genetic Algorithms and engineering design*, John Wiley & Sons, 1-2.
- Goldberg, D. E., 1989, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Massachusetts, Addison-Wesley.
- Huber, W. C. and Dickinson, R. E., 1988, *Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual*. U.S. EPA.
- Tsihrintzis, V. A., and Hamid, R., 1998, Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM, *Hydrological Processes*, 12, 311-329.

최종원고채택 06. 12. 15

