

유역유출 및 수질모의에 관한 SWMM의 자동 보정 모듈 개발

Development on an Automatic Calibration Module of the SWMM for Watershed Runoff Simulation and Water Quality Simulation

강 태 옥* / 이 상 호**
Kang, Taeuk / Lee, Sangho

Abstract

The SWMM (storm water management model) has been widely used in the world and is a watershed runoff simulation model used for a single event or a continuous simulation of runoff quantity and quality. However, there are many uncertain parameters in the watershed runoff continuous simulation module and the water quality module, which make it difficult to use the SWMM. The purpose of the study is to develop an automatic calibration module of the SWMM not only for watershed runoff continuous simulation, but also water quality simulation. The automatic calibration module was developed by linking the SWMM with the SCE-UA (shuffled complex evolution-University of Arizona) that is a global optimization algorithm. Estimation parameters of the SWMM were selected and search ranges of them were reasonably configured. The module was validated by calibration and verification of the watershed runoff continuous simulation model and the water quality model for the Donghyang Stage Station Basin. The calibration results for watershed runoff continuous simulation model were excellent and those for water quality simulation model were generally satisfactory. The module could be used in various studies and designs for watershed runoff and water quality analyses.

Keywords : SWMM, automatic calibration, SCE-UA, watershed runoff continuous simulation, water quality simulation

요 지

SWMM은 홍수유출 해석, 유역유출 연속모의, 수질모의가 가능한 모형으로서 전세계적으로 널리 사용되고 있는 모형이다. 하지만 유역유출 연속모의와 수질모의에는 다수의 불명확한 매개변수가 포함되어 있으므로 이는 SWMM의 사용에 제약이 되고 있다. 본 연구의 목적은 SWMM을 이용한 유역유출 연속모의와 수질모의의 정확도를 높이고 효율성을 향상시킬 수 있도록 자동 보정 모듈을 개발하는 것이다. SWMM의 자동 보정 모듈은 전역최적화 알고리즘인 집합체 혼합진화 알고리즘과 SWMM을 연계하고, SWMM 내 추정대상 매개변수의 선정 및 적절한 탐색 범위를 설정함으로써 개발되었다. 개발된 자동 보정 모듈의 적절성은 동향 수위관측소 유역에 대하여 구성된 유역유출 및 수질모의 모형의 보정 및 검증을 통해 검토되었다. 그 결과, 자동 보정 모듈을 통해 보정된 모형은 유역의 유출현상을 매우 잘 모사하였고, 수질의 경우에도 비교적 양호한 결과를 도출하였다. 개발된 자동 보정 모듈은 향후 유역유출 모의와 수질해석에 관한 다양한 연구와 설계 등에 활용될 수 있을 것이다.

* 한국수자원공사 K-water연구원 위촉선임연구원 (e-mail: ktw62@hanmail.net)
Postdoctoral Research Associate, K-water Research Institute, K-water, Daejeon 305-730, 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

1. 서 론

유역 유출수의 유량과 수질모의 모형은 이수, 치수, 환경 등 다양한 수자원 계획과 정책 수립에 활용되고 있다. 특히, SWMM (storm water management model)은 도시 유역의 홍수유출 해석뿐만 아니라 유역유출 연속모의와 수질모의의 기능을 갖추고 있다. 또한, Kang and Lee (2012)는 SWMM 내의 지하수 유출 모듈을 이용할 경우, SWMM이 전역유출의 홍수유출 해석에서도 우수한 결과를 제공하는 것으로 제시한 바 있다. 이러한 SWMM은 유역유출 모의에 많은 물리적인 매개변수를 활용하므로 비교적 신뢰적인 결과를 제공한다. 하지만 지하수 유출 모듈과 수질모의 모듈에는 객관적으로 정의하기 어려운 매개변수가 다수 존재하므로, 사용자들은 물 순환 해석을 위한 유역유출 연속모의와 수질모의에 어려움을 겪을 수밖에 없다. 따라서 해당 매개변수들을 적절하게 추정하여 모형을 보정할 수 있는 도구가 요구된다.

모형의 보정은 시행착오(trial and error)에 의한 수동 보정(manual calibration)과 최적화 방법을 이용한 자동 보정(automatic calibration)으로 구분된다. 수동 보정의 경우, 많은 시간과 노력이 요구되고 매개변수가 많아질수록 보정의 어려움이 겪게 될 뿐만 아니라 정확성도 자동 보정에 비해 떨어진다(Kang, 2013). 이에 따라 연구에서는 수자원 분야에서 최적화 문제 해석에 많이 사용되고 있는 집합체 혼합진화 알고리즘(shuffled complex evolution-University of Arizona; SCE-UA)을 이용하여 SWMM의 자동 보정 모듈을 개발하였다.

과거 국내·외의 많은 연구자들이 SWMM의 자동 보정에 관한 연구를 수행하였다(Javaheri, 1998; Wan, 2001; Choi and Ball, 2002; Chae, 2004; Cho and Lee, 2006; Fang and Ball, 2007; Barco et al., 2008; Kang et al., 2012). 선행 연구들의 공통된 특징은 SWMM의 자동 보정에 있어 홍수 유출 모의만을 대상으로 한 점이다. 일반적으로, 홍수유출 모의 모형의 자동 보정에는 지하수 유출과 증발과 관련된 매개변수들이 제외되므로 상대적으로 유역유출 연속모의 모형의 자동 보정보다 단순하고, 보정도 용이하다. 그리고 SWMM을 이용한 수질모의는 오염물질의 축적(buildup)과 유실(washoff)에 관한 개념적(conceptual) 수식에 의해 수행되므로 관련된 매개변수의 적절한 값을 정의하기

가 매우 어렵다.

본 연구의 목적은 SWMM을 이용한 유량 및 수질모의의 정확도 향상과 효율성 제고를 위해 자동 보정 모듈을 개발하는 것이다. 이때 유량모의는 선행 연구들에서 다루지 않았던 유역유출 연속모의를 대상으로 하였다. SWMM의 자동 보정 모듈을 구성하기 위해 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘을 연계하였고, 유량 및 수질모의 모형의 자동 보정에 필요한 매개변수를 선정하였으며 각각의 매개변수에 대한 적정 추정 범위를 설정하였다. 그리고 개발된 모듈의 적절성은 동향 수위관측소 유역에 대하여 구성된 유역유출 모의 모형과 수질모의 모형의 자동 보정을 통해 검토되었다.

2. 연구방법

2.1 SWMM의 유역유출 및 수질모의 기능

2.1.1 SWMM을 이용한 유역유출 모의의 적용 범위

미 환경보존국(Environmental Protection Agency)의 지원 아래 개발된 SWMM은 유역에 내린 강우로 인해 발생하는 지표면 유출 및 지하수 유출, 배수관망에 대한 유출을 추적할 수 있다. 또한, 저류지(storage), 과적(surcharge) 흐름, 배수(backwater), 압력류, 오염물질에 대한 계산과 오염물질의 처리 등을 모의할 수 있다(Huber and Dickinson, 1992). SWMM은 개발된 기관에 따라 다양한 버전이 존재하는데, 연구에서 자동 보정에 활용한 SWMM은 미 환경보존국에서 최근에 개발한 SWMM5이다(Rossman, 2010).

SWMM에 대한 잘못된 선입견은 도시유역에만 적용하는 모형으로 이해하고 있는 것이다. James et al. (2005)은 지하수 유출 모듈의 개발 배경에 대하여 설명하면서, 미 개발 지역에 대한 적용과 개발된 지역일지라도 지하수의 영향이 큰 지역의 홍수유출의 해석을 위해 개발되었음을 제시하고 있다. 또한, Rossman (2010)도 SWMM의 적용 범위를 지하수 유출이 고려되어야 하는 전역유출과 유역유출 연속모의를 대상으로 할 수 있음을 명시하고 있다. 즉, SWMM은 관거 내 흐름 모의가 가능하여 도시유역의 유출 해석에 강점을 가진 모형이면서, 전역유출에도 적용할 수 있는 모형이다.

2.1.2 SWMM의 수질모의에 관한 수식

SWMM의 수질모의는 유역 내 오염물질의 축적과 유실 현상을 정의하여 수행된다. SWMM5 내에 탑재된 축적과 유실에 관한 수식은 Table 1과 같다. 축적과 유실에 관한 수식에서 동일한 개념의 변수가 사용됨에도 적용되는 단위(unit)가 상이한 변수가 있으므로 주의해서 사용할 필요가 있다.

Fig. 1은 적용되는 수식에 따른 축적의 예를 나타낸 그

림이다. 그림을 통해 가능 최대 축적(maximum buildup possible)에 이르기까지 축적률의 차이가 일부 존재할 뿐 대체로 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 실제로 SWMM의 사전 모의를 수행한 결과, 축적을 정의하는 세 가지 식에 의한 결과는 큰 차이를 보이지 않았다. 반면에, 유실의 경우 오염물의 축적 부하량과 유량이 함께 고려된 지수(exponential)식을 적용하는 경우가 유량의 함수로만 정의된 수식(Table 1의 rating curve와 EMC)보다 실제 현상을 보다 잘 묘사하는 것으로 나타났다. 이에 따라 연

Table 1. Equations and Variables for Buildup and Washoff

Buildup/Washoff	Type	Equation	Variable
Buildup	Power	$B = \text{Min}(b_1, b_2 t^{b_3})$	B : Buildup load (mass per area or curb length) b_1 : Maximum buildup possible (mass per area or curb length)
	Exponential	$B = b_1(1 - \exp^{-b_4 t})$	b_2 : Buildup rate constant (mass/days) b_3 : Time exponent (dimensionless) b_4 : Buildup rate constant (1/days)
	Saturation	$B = \frac{b_1 t}{b_5 + t}$	b_5 : Half-saturation constant (days to reach half of the maximum buildup)
Washoff	Exponential	$W = w_1 q^{w_2} B'$	W : Washoff load (Exponential: mass per hour, Rating curve: mass per sec) w_1 : Washoff coefficient (dimensionless)
	Rating curve	$W = w_1 Q^{w_2}$	w_2 : Washoff exponent (dimensionless) w_3 : Washoff coefficient (mass per liter)
	Event mean concentration (EMC)	$W = w_3 Q$	q : Runoff rate per unit area (e.g., mm/hr) B' : Pollutant buildup load (mass) Q : Runoff rate in user-defined flow unit (e.g., m/s)

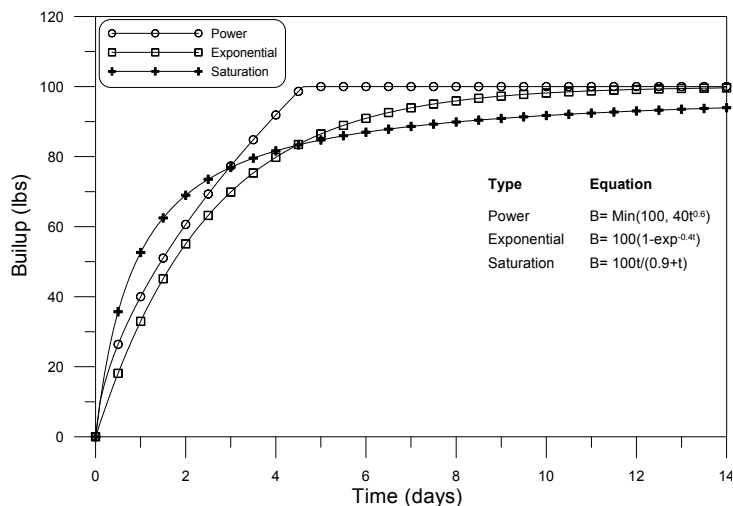


Fig. 1. Comparison of Buildup Equations for Water Quality Model in the SWMM (James et al. 2005)

구에서는 상대적으로 축적의 정도를 정량적 수치로 정의하기 용이한 멱함수를 포함한 수식(power equation)을 축적의 수식으로 사용하였고, 유실의 수식은 지수식으로 결정하였다.

2.2 SWMM의 자동 보정 모듈

2.2.1 집합체 혼합진화 알고리즘

자연 진화의 과정을 최적화의 탐색 과정에 도입한 집합체 혼합진화 알고리즘은 Duan (1991)에 의해 개발되었다. Duan et al. (1992)에 따르면, 집합체 혼합진화 알고리즘은 Nelder and Mead (1965)의 심플렉스 방법(simplex procedure), Price (1987)의 조절 난수 탐색 방법(controlled random search), Holland (1975)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. 실제로 집합체 혼합진화 알고리즘은 미국 국립 기상국의 NWSRFS (National Weather Service river forecasting system)의 보정 모듈로 사용되고 있다(Duan et al., 1994).

2.2.2 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘의 연계

SWMM의 자동 보정 모듈을 개발하기 위해서는 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘의 연계가 요구된다. 하지만 연구에서 사용된 SWMM5는 윈도우즈 환경 기반의 C 언어로 구성된 프로그램인 반면, 집합체 혼합진화 알고리즘은 포트란(Fortran) 언어로 구성되어 있으므로 두 프로그

램의 단순 결합은 불가능하다. 또한, 서로 다른 언어로 구성된 두 프로그램을 하나의 언어로 구성하는 것은 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 연구에서는 두 프로그램을 하나의 언어로 구성하지 않고, 연계를 통해 자동 보정 모듈을 구성하였다(Fig. 2).

SWMM5의 자동 보정 모듈은 집합체 혼합진화 알고리즘을 주프로그램(main program)으로 설정하여 구성되었고, 크게 두 부분으로 구분된다. 첫 번째는 집합체 혼합진화 알고리즘에 의해 초기에 무작위로 발생된 표본 요소(randomly generated sample point; parameter set)와 진화 과정 후에 생성된 새로운 요소(new point)에 대하여 SWMM5를 실행할 수 있도록 하였다. 두 번째는 각각의 매개변수 조합에 대하여 SWMM5를 실행하고, 해당 매개변수의 조합으로 생성된 수문곡선과 관측 수문곡선을 비교한 후, 목적함수의 값을 계산하여 집합체 혼합진화 알고리즘으로 전달해 주도록 하였다. Fig. 3은 구체적으로 집합체 혼합진화 알고리즘 내부에 SWMM5를 연결한 모식도를 나타낸다. SWMM5는 집합체 혼합진화 알고리즘의 시작 단계에서 생성된 초기의 무작위 발생 요소에 대하여 실행되고, 이후에는 경쟁적 진화 알고리즘 내부에서 반복적으로 수행된다.

2.2.3 집합체 혼합진화 알고리즘의 수행 조건

Fig. 3에서 초기에 설정되는 s 개의 점은 집합체의 개수 (p)와 각각의 집합체가 가지는 점의 개수 (m)의 곱과 같은데, 본 연구에서는 Duan et al. (1994)의 연구 결과를 참고하여 집합체의 개수는 2개, 집합체 내부의 점의 개수는 $2n_d + 1$ 개로 설정하였다. 여기서 n_d 는 추정대상 매개변수의 개수이다. 한편, Fig. 3의 경쟁적 집합체 진화(competi-

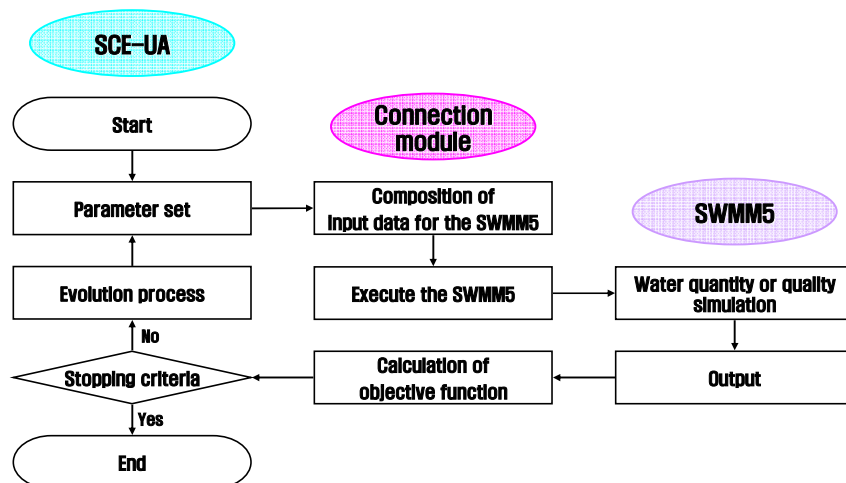


Fig. 2. A Connection Module between the SCE-UA and the SWMM5

tive complex evolution; CCE) 알고리즘에서는 부집합체 (subcomplex)를 구성하는데, 1회의 부집합체 구성으로부터 생성하는 신규점의 수는 한 개로 하였고, 집합체를 혼합하기 전에 각각의 집합체를 진화시키는 횟수는 집합체 내부에 위치하는 점의 개수와 동일하게 하였다.

집합체 혼합진화 알고리즘은 N 회의 진화 과정 동안 γ 만큼 개선되지 않으면, 수렴되는 것으로 정의된다. 연구에서는 반복횟수를 10회로 하였고, 수렴한계를 0.01로 수행하였다. 즉, 10회의 반복횟수 동안 목적함수의 값이 1% 이상 개선되지 않으면, 계산을 종료하는 것으로 설정하였다. 또한, 최대 반복횟수를 50,000회로 매우 크게 설정하여 최대 반복횟수에 구애받지 않고 수렴될 수 있도록 충분한 반복 횟수를 부여하였다.

2.3 유역유출 모의 모형과 수질모의 모형의 단계적 자동 보정

유역 유출수의 수질은 농도(concentration)의 개념이므로 유량의 크기에 크게 좌우된다. 따라서 수질모의에 대한 보정은 유역유출 모의 모형의 보정 후에 수행되는 것

이 적절하고, 수질모의 모형의 정확성을 높이기 위해서는 유역유출 모의 모형의 정확성을 높이는 것이 필수적이다. 한편, 유량과 수질은 단위와 상대적 크기 등이 상이하기 때문에 자동 보정에 있어 유량과 수질을 동일한 목적함수 내에 포함시킬 수 없다. 따라서 유역유출 및 수질모의에 관한 매개변수를 동시에 추정하는 것은 매우 어렵다.

이를 고려하여 연구에서는 유역유출 모의 모형과 수질 모의 모형을 순차적으로 보정하였다. 즉, 유역유출 모의 모형의 보정을 통해 결정된 수량과 관계된 매개변수는 수질모의 모형에서 고정된 매개변수로 설정되고, 수질모의 모형의 자동 보정에서는 수질과 관련된 매개변수만이 추정되도록 하였다(Fig. 4).

3. 연구내용

3.1 대상유역과 SWMM의 모의 방법

유역유출 모의와 수질모의에 관한 SWMM의 자동 보정 모듈을 개발하기 위해 장기간의 유량과 수질이 모두 측정된 지역을 대상유역으로 설정하였다. Korea Water

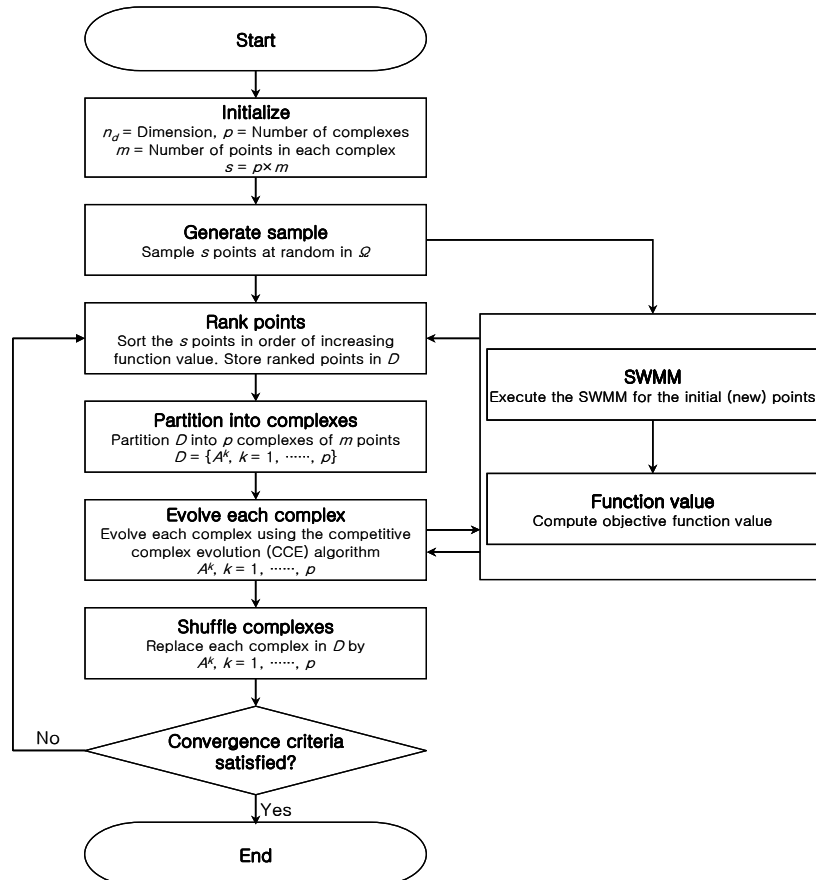


Fig. 3. Schematic Diagram of Connection between the SWMM and the SCE-UA



Fig. 4. Procedure of Automatic Calibration for Watershed Runoff and Water Quality Models

Table 2. Major Input Data of Subcatchments

Subcatchment Name	Area (km ²)	Characteristic Width (m)	Impervious Area (%)	Slope (%)	Curve Number			Remark
					AMC-II	AMC-I	AMC-III	
B01	9.32	8,399	1.36	52.7	49.50	29.16	69.27	
B02	3.52	8,307	6.22	21.3	65.17	44.01	81.15	
..... (Omitted)								
B22	8.96	10,051	1.98	36.9	64.70	43.50	80.83	
B23	3.70	5,922	6.07	29.9	65.28	44.12	81.22	

Resources Corporation (2009; 2010)은 금강수계의 수자원 및 환경기초조사 차원에서 용담댐 등 7개 지점에 대하여 유량 및 수질을 측정하였다. 본 연구에서는 이 가운데 동향 수위관측소 지점에서 측정한 유량 및 수질 자료를 자동 보정에 활용하였다. Fig. 5는 동향 수위관측소 지점의 전체 유역도와 소유역 및 하도 분할도를 나타낸다. Fig. 5에서 유역의 유출 방향은 동에서 서쪽이고, 유역 출구인 동향 수위관측소는 C22 하도의 출구에 위치한다. Table 2는 분할된 소유역의 면적, 유역폭, 불투수율 등 주요 입력 자료의 추정결과를 나타낸다.

Table 3은 동향 수위관측소 유역에 대하여 구성된 유역 유출 연속모의 모형의 구성 및 모의 방법을 나타낸다. 모형의 유역추적에는 비선형 저류방정식(nonlinear storage equation)을 이용하였고, 하도추적의 경우 운동파(kinematic wave) 모형을 이용하였다. 그리고 유역유출 연속모의를 수행하기 위해 지하수 유출 계산 모듈을 고려하였다. 한편, 유역유출 연속모의에는 증발량 자료가 필수적이다. 동향 수위관측소 유역에 대한 증발량 자료는 대전지방기상청 자료를 이용하였다. 기상청에서 제공하는 증발량 자료는 증발 접시계(pan evaporation)를 통해 산정된 결과로서, 실제 증발량(actual evaporation)은 증발 접시계 계수(pan coefficient)를 곱하여 추정된다. 연구에서는 증발 접시계 계수를 0.7로 적용하여 실제 증발량을 추정하였다.

3.2 추정대상 매개변수

3.2.1 추정대상 매개변수의 선정과 범위 결정 방법

일반적으로 모형의 수동 보정에는 민감도 분석을 통해

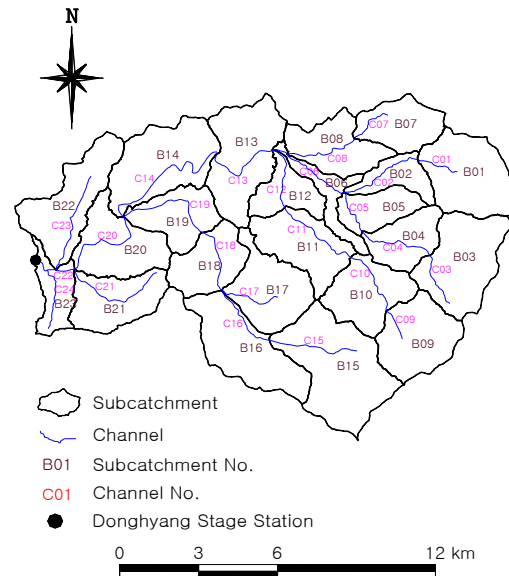


Fig. 5. Subcatchments and Channels of the Donghyang Stage Station Basin

주요 매개변수를 선정하는 과정이 포함된다. 이는 상대적으로 영향을 크게 받는 매개변수를 선별하여 모형의 보정에 소요되는 시간을 줄이기 위함이다. 이와 달리 연구에서는 자동 보정을 목적으로 하므로 상대적으로 시간 제약이 작다. 따라서 별도의 민감도 분석을 통한 추정 대상 매개변수를 선별하는 과정은 포함하지 않았다. 또한, 민감한 매개변수는 대상유역, 강우 조건, 유출 계산 방법 등에 따라 달라질 수 있으므로, 연구에서는 추정이 어렵고 불명확한 매개변수를 대부분 포함하여 자동 보정에 활용하였다.

모형의 자동 보정에서는 매개변수가 가질 수 있는 적절한

Table 3. Composition Method of Watershed Runoff Continuous Simulation Model for the Basin

Catchment, Channel, and Aquifer		Simulation Method	
Catchment area (km ²)	160.05	Watershed routing method	Nonlinear storage equation
Number of subcatchments	23	Channel routing method	Kinematic wave
Number of channels	24	Infiltration method	NRCS method
Number of aquifers	4	Rainfall data	Hourly data
Rainfall station	Anseongjang station (Telemetering (TM) station)	Evaporation data	Monthly averages
Evaporation station	Daejeon Regional Meteorological Office	Calculation time step	Basin 10 minutes
			Channel 10 minutes

범위를 설정하는 것이 매우 중요하다. 연구에서는 SWMM의 사용자 설명서(Huber and Dickinson, 1992; James et al., 2005; Rossman, 2010)와 관련된 문헌을 통해 유역유출모의 모형의 자동 보정에 관한 추정대상 매개변수와 해당 매개변수의 최적해 탐색 영역을 결정하였다.

3.2.2 유역유출 연속모의 모형의 매개변수

유역유출 연속모의 모형의 자동 보정은 총 22개의 매개변수를 추정함으로써 수행되었다(Table 4). 추정대상 매개변수는 9개의 유역 매개변수, 1개의 하도 매개변수, 12개의 지하수 매개변수이다. 대부분의 매개변수는 모든 유역과 하도에서 동일한 값을 갖도록 설정되었다. 이는 매개변수별로 유역과 하도마다 다른 값을 추정하게 되면, 추정해야 할 매개변수가 급격히 늘어나는 것에 근거한 설정이다. 다만, 불투수지역의 면적비, 유역폭, 유출곡선 지수(runoff curve number; CN)는 유역마다 추정된 고유의 값이 있으므로 해당 유역의 값들을 상·하 20%의 범위 내에서 변화시켜 최적해를 찾도록 하였다. 예를 들어, 소유역 1과 2에 대하여 입력된 불투수 지역의 면적비가 각각 10%와 20%이면, 소유역 1과 2에 대한 불투수 지역의 면적비는 각각 8~12% 및 16~24% 범위에서 탐색되는 것이다. 이는 해당 값들의 불확실성을 감안한 정도의 범위이다. 참고로 초기의 유출곡선 지수는 선행강우조건(antecedent soil moisture condition; AMC)-II로 가정하였다. 초기 지하수위는 초기값을 지하수 유출부 하도의 바닥으로 설정하였고, 이로부터 -1~1 m 범위에서 추정되도록 설정하였다.

Table 4의 공극률(porosity), 시들음점(wilting point) 등 지하수 유출과 관련된 다수의 매개변수는 대상유역의 토양형에 따라 정의될 수 있다. 이에 연구에서는 동향 수위관측소 유역의 토양도를 이용하여 유역 내 토양 유형별

지배 면적을 산정하였다. 그 결과, 동향 수위관측소 유역에서는 양토(loam)와 실트질 양토(silty loam)가 지배적인 것으로 나타났고, 연구에서는 Rossman (2010)이 제시한 양토와 실트질 양토에 해당하는 매개변수 값을 이용하여 추정 범위를 설정하였다.

3.2.3 수질모의 모형의 매개변수

수질모의 모형의 자동 보정은 총 9개의 매개변수를 추정하여 수행되었다. 추정대상 매개변수는 4개의 오염물질 정보에 관한 매개변수, 축적에 관한 3개의 매개변수와 유실에 관한 2개의 매개변수이다(Table 5).

오염물의 축적과 관련된 매개변수는 Choi (2004)와 National Institute of Environmental Research (2006) 등의 문헌을 통해 우리나라의 토지이용별 원단위 발생 부하량을 참고하되, 불확실성을 고려하여 다소 넓은 범위에서 탐색되도록 설정되었다. 우선, 대상유역은 전원유역이므로 토지이용을 논, 밭, 산지로 한정하였고, 축적률 계수(buildup rate constant)를 각각의 토지이용별 1일 원단위 발생 부하량에 대한 최소값의 1/5배와 최대값의 5배를 적용하였다. 그리고 최대 축적(maximum buildup)은 무 강우 30일을 고려하여 축적률 계수의 30배에 해당하는 범위를 적용하였고, 초기 축적(initial buildup)도 0부터 무 강우 30일을 고려하여 적용하였다. 한편, 강우에 포함된 오염물의 농도는 James et al. (2005)에서 제시한 적용 범위를 이용하되, 하한의 1/2배, 상한의 2배를 탐색 영역으로 적용하였다. 그 외에 지하수 내 오염물의 농도, 오염물 감소계수 등은 참고할 수 있는 기준이 없어 사전 모의를 통해 적정 범위를 설정하였다. 그리고 유실에 관한 매개변수는 James et al. (2005)에서 특정한 범위를 제시하고 있지만, 해당 범위 내의 값들은 양호한 결과를 얻지 못하였다. 이

Table 4. Estimation Range of Parameters for the Watershed Runoff Continuous Simulation Model

Class	Variable	Parameters	Lower Bound	Upper Bound	Class	Variable	Parameters	Lower Bound	Upper Bound
Basin	Pcnt. Imperv*	Percent of impervious area (%)	0.8	1.2	Ground-water	Field Capac	Field capacity (soil moisture content after all free water has drained off)	0.232	0.284
	Width*	Characteristic width of the overland flow path (m)	0.8	1.2		Hyd Cond	Soil's saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	3.3	6.6
	N-Imperv	Manning's n of impervious area	0.01	0.016		Cond Slop	Average slope of log (conductivity) versus soil moisture deficit curve	1	10
	N-Perv	Manning's n of pervious area	0.15	0.4		Tens Slop	Average slope of soil tension versus soil moisture content curve (mm)	1,000	5,000
	S-Imperv	Depth of depression storage on impervious area (mm)	1.6	3.8		Upper Evap	Fraction of total evaporation available for evapotranspiration in the upper unsaturated zone	0.3	0.7
	S-Perv	Depth of depression storage on pervious area (mm)	3.8	6.4		Lower Evap	Maximum depth into the lower saturated zone over which evapotranspiration can occur (m)	0.5	3
	Pct Zero	Percent of the impervious area with no depression storage (%)	10	30		Water Table**	Elevation of the water table in the aquifer at the start of the simulation (El. m)	-1	1
	CN*	NRCS runoff curve number	0.8	1.2		Upper Moist	Moisture content of the unsaturated upper zone of the aquifer at the start of the simulation	0.116	0.501
Ground-water	Dry T	Days it takes a fully saturated soil to dry (day)	2	14	Upper Moist	Groundwater flow coefficient	0.0001	0.1	
	Porosity	Porosity (volume of voids/total soil volume)	0.463	0.501	B1	Groundwater flow exponent	1	5	
	Wilt Point	Wilting point (soil moisture content at which plants cannot survive)	0.116	0.135	Channel	Manning N	Manning's roughness coefficient	0.02	0.05

* A specific value of subcatchment × estimated value

** A specific value of subcatchment + estimated value

The others: estimated value

Table 5. Estimation Range of Parameters for the Water Quality Simulation Model

Class	Parameter	BOD		COD		TN		TP		Reference
		Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound	
Pollutant information	Rain concentration (mg/L)	0.5	26	2	44	0.1	3	0.005	0.3	James et al. (2005)
	Groundwater concentration (mg/L)	0	26	0	44	0	3	0	0.3	Arbitrary
	Decay coefficient (1/day)	0	10	0	10	0	10	0	10	
	Initial buildup (kg/ha)	0	3.452	0	9.288	0	14.158	0	0.912	
Buildup equation	Maximum buildup (kg/ha)	0.056	3.452	0.153	9.288	0.132	14.158	0.009	0.912	National Institute of Environmental Research (2006) and Choi (2004)
	Buildup rate constant (kg/ha)	0.0019	0.115	0.0051	0.310	0.0044	0.472	0.0003	0.03	
	Time exponent	0.01	10	0.01	10	0.01	10	0.01	10	
Washoff equation	Washoff coefficient	0	10	0	10	0	10	0	10	Arbitrary
	Washoff exponent	0	10	0	10	0	10	0	10	

에 연구에서는 보다 넓은 영역에서 탐색되도록 하였다.

3.3 목적함수와 모형 평가지표

연구에서 자동 보정에 활용된 유량 및 수질 자료는 주로 강우 시 측정된 자료이다. 이에 따라 규모가 큰 유량 및 수질의 적합에 장점을 가진 평균제곱오차의 제곱근(root mean square error; RMSE)을 최소화 하는 목적함수를 이용하였다(Eq. (1)).

$$\text{Minimize } \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_t - X_t)^2}{N}} \quad (1)$$

여기서 Q_t 는 관측된 유량 또는 수질 시계열이고 X_t 는 모의된 유량 또는 수질 시계열이며, N 은 시계열 자료의 개수를 나타낸다.

한편, 보정된 모형의 적절성을 평가하기 위해 Tables 6 and 7의 Moriasi et al. (2007)이 제안한 평가지표를 활용하였다. Moriasi et al. (2007)은 다수의 선행 연구 결과를 검토하여 관측자료의 표준 편차에 대한 평균제곱오차 제

곱근의 비율(ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data; RSR), NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), 평균편차의 비율(percent bias; PBIAS)을 이용한 모형의 성능 평가기준을 제시하였다.

Table 7은 월 단위로 구성된 모형의 평가에 사용되는 지표인 반면, 본 연구에서는 시간 단위의 결과를 이용하였다. 일반적으로 분석 기간의 단위가 짧아질수록 오차는 커지므로 Moriasi et al. (2007)의 기준은 연구에서 수행한 결과를 평가하기에는 엄격한 기준이 될 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 분석 기간의 단위에 구애받지 않고, 해당 기준을 그대로 모형 평가지표로 활용하였다. 실제로 시간 단위의 분석 모형도 Table 7의 ‘매우 좋음’(very good)의 기준인 NSE가 0.75 이상, PBIAS가 $\pm 10\%$ 이하의 성능을 가질 수 있다.

3.4 SWMM의 자동 보정 모듈에 대한 적절성 검토

3.4.1 유역유출 연속모의 모형의 자동 보정과 검증

동향 수위관측소 유역에 대한 유역유출 연속모의 모형의 자동 보정은 2009년의 측정자료(총 67개)를 모두 포함

Table 6. Indexes for Model Assessment

Index	Equation	Optimal Value
RMSE-Observations Standard Deviation Ratio (RSR)	$\frac{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_t - X_t)^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_t - \bar{Q})^2}}$	0
Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)	$1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t - X_t)^2}{\sum_{t=1}^N (Q_t - \bar{Q})^2}$	1
Percent Bias (PBIAS)	$\frac{\sum_{t=1}^N (Q_t - X_t)}{\sum_{t=1}^N Q_t} \times 100 (\%)$	0

Table 7. General Performance Ratings for Recommended Statistics for a Monthly Time Step (Moriasi et al., 2007)

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS (%)
Very good	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Good	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfactory	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$
Unsatisfactory	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

하기 위해 2009년 3월 1일부터 12월 31일까지 수행되었다. 그리고 모형의 검증은 모형의 연속성을 고려하여 보정의 종료 시점 직후인 2010년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 89개의 측정자료에 대하여 수행되었다.

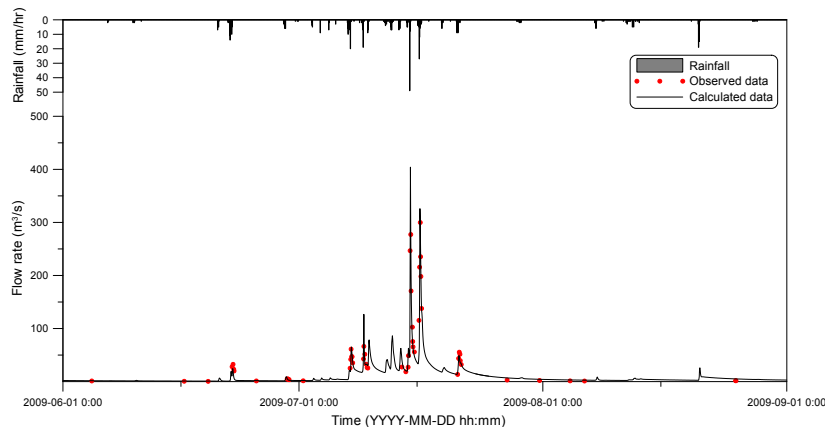
Table 8은 유역유출 모의 모형의 보정 및 검증 결과를 나타낸 표이다. 우선, 보정된 결과를 보면, RSR이 0.23, NSE가 0.95, PBIAS가 2.64 %로 분석되었다. 연구에서 보정된 결과를 Moriasi et al. (2007)이 제시한 기준에 따라 평가하면, 모든 지표에서 '매우 좋음'의 기준에 해당되는 것으

로 분석되었다. 그리고 측정된 최대유량에 대한 계산된 유량의 상대 오차도 1.74 %로서 매우 좋은 결과를 보였다. 모형의 검증에서는 모형 보정의 결과보다는 다소 개악된 상태를 보였다. 하지만 Moriasi et al. (2007)이 제시한 기준에 따라 평가했을 때, PBIAS에서 '좋음' (good)의 상태를 보였을 뿐, RSR과 NSE는 '매우 좋음'의 기준을 만족하였다. 또한, 검증 기간에 측정된 최대유량에 대한 상대 오차도 2.75%로 분석되어 매우 우수한 결과를 보였다.

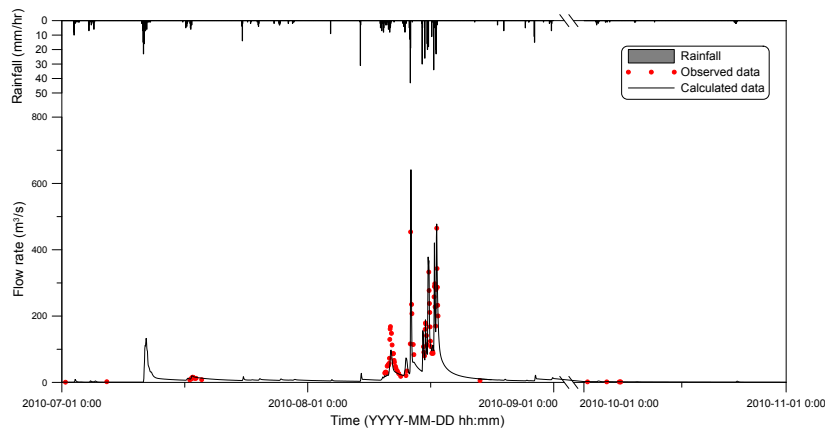
Fig. 6은 측정된 유량자료와 유역유출 모의 모형의 보

Table 8. Calibration and Verification Results for the Watershed Runoff Simulation Model

Classification	Simulation Period	Number of Measured Data	RSR	NSE	PBIAS (%)	Observed Maximum Flow (m ³ /s)		
						Occurrence Time	Absolute Error (m ³ /s)	Relative Error (%)
Calibration	2009.03.01. ~2009.12.31.	67	0.23	0.95	2.64	2009.07.16. 10:00	5.23	1.74
Verification	2010.01.01. ~2010.12.31.	89	0.34	0.89	12.54	2010.08.17. 06:00	12.77	2.75



(a) Calibration Result



(b) Verification Result

Fig. 6. Runoff Hydrographs Derived by Calibration and Verification of the Watershed Runoff Simulation Model

정 및 검증에 의해 도출된 수문곡선을 비교한 그림이다. 측정된 자료가 홍수기에 집중되어 있으므로 이를 감안하여 전체기간 중 홍수기를 포함하여 일부만 제시하였다. 모형 평가지표로부터 아주 좋은 보정 및 검증 상태를 보인 것과 동일하게 보정 및 검증된 수문곡선은 관측자료를 매우 잘 모사하는 것을 볼 수 있다. 다만, Fig. 6에서 보정과 검증에 의해 도출된 수문곡선의 침투유량이 측정자료와 일치하지 않는 것처럼 보이는데, 이는 보정 및 검증된 결과가 매 시간 계산된 반면, 측정된 자료는 연속적이지 않기 때문이다. 즉, 계산된 침투유량 발생시간에서는 측정이 이루어지지 않았기 때문이다. 이에 따라 Table 8에서도 전체 수문곡선의 침투유량을 비교하지 않고, 측정된 최대 유량에 대한 상대오차를 비교하였다. 한편, Table 9는 모형 보정을 통해 결정된 유역유출 연속모의 모형의 매개변수를 나타낸다.

3.4.2 수질모의 모형의 자동 보정

2.3절에서 기술한 유역유출 및 수질모의 모형의 순차적

자동 보정 방법에 따라 수질모의 모형의 자동 보정은 전 절에서 자동 보정을 통해 결정된 유역유출 연속모의 모형을 토대로 수행되었다. 이에 따라 수질모의 모형에 대한 자동 보정의 기간은 유역유출 모의 모형의 자동 보정 기간과 동일하다. 한편, 수질모의 모형은 2010년에 측정된 수질 자료 개수의 제약으로 보정만 수행되었다. 수질모의 모형의 보정에 사용된 측정자료의 수는 이상치로 판단되는 수치를 제외하고 수질 항목에 따라 47~48개가 사용되었다.

Fig. 7은 BOD, COD, TN, TP의 보정된 결과를 나타낸 그림이다. 각각의 수질 항목에 대한 보정 결과는 측정값을 정확히 모사하지는 못하였지만, 대체로 측정값의 경향을 따르고 있는 것을 볼 수 있다. 보정된 수질모의 모형에 대한 정량적 평가 결과는 Table 10과 같다. 우선, 수질모의 모형에 대한 보정의 경우, 모든 수질인자에 대하여 PBIAS는 '매우 좋음'의 기준을 만족하였다. 특히, COD의 경우 모든 지표에서 '매우 좋음'의 기준에 부합하였다. 반면에 BOD와 TP는 RSR과 NSE에서 '좋음'으로 나타났고,

Table 9. Estimated Values for Parameters of Watershed Runoff Continuous Simulation Model

Class	Variable	Estimated Value	Class	Variable	Estimated Value
Basin	Pcnt. Imperv	1.117	Groundwater	Field Capac	0.248
	Width	0.944		Hyd Cond	5.016
	N-Imperv	0.013		Cond Slop	6.834
	N-Perv	0.380		Tens Slop	2,425
	S-Imperv	2.338		Upper Evap	0.698
	S-Perv	6.381		Lower Evap	2.703
	Pct Zero	18.282		Water Table	-0.034
	CN	0.845		Upper Moist	0.265
	Dry T	4.656		A1	0.008
Groundwater	Porosity	0.473	B1	4.360	
	Wilt Point	0.124	Channel	Manning N	0.020

Table 10. Calibration and Verification Results for the Water Quality Simulation Models

Classification	Simulation Period	Number of Measured Data	RSR	NSE	PBIAS (%)	Observed Maximum Flow (m ³ /s)		
						Occurrence Time	Absolute Error (m ³ /s)	Relative Error (%)
BOD	2009.03.01. ~2009.12.31.	47	0.52	0.73	-0.05	2009.07.16. 1400	1.83	27.4
COD		47	0.50	0.75	-0.43	2009.07.17. 16:00	0.36	2.63
TN		47	0.62	0.62	-0.14	2009.07.09. 07:00	0.23	5.92
TP		48	0.52	0.73	-1.53	2009.07.16. 10:00	0.08	38.4

TN은 그 보다 낮은 '만족' (satisfactory)의 기준에 부합하였다. 측정된 최대 수질의 상대오차는 수질 항목별로 2.63~38.4%인 것으로 분석되어 수질 항목별로 편차가 다소 크게 나타났다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 수행한 수질모의 모형에 대한 자동 보정의 경우, 대체로 Moriasi et al. (2007)이 제시한 '좋음'의 기준을 만족하는 것으로 판단되었다. 한편, Table 11은 각각의 수질 항목에 대하여

추정된 매개변수의 값과 보정 결과를 나타낸다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 SWMM을 이용한 유역유출 연속모의와 수질모의의 효율성을 높이고, 정확성을 향상시키기 위해 자동 보정 모듈을 개발하였다. 자동 보정 모듈은 SWMM

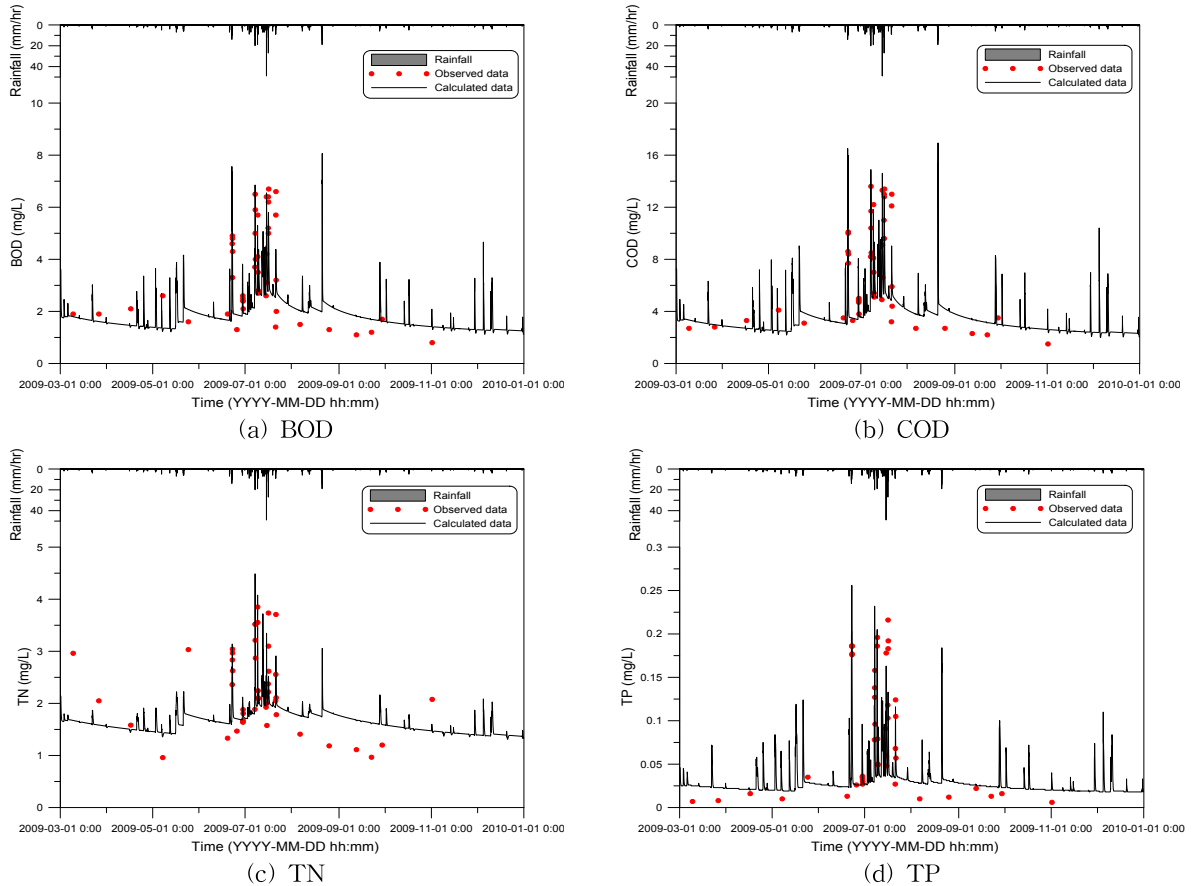


Fig. 7. Calibration Results for Water Quality Simulation Models

Table 11. Estimated Parameters and Average Relative Errors for Water Quality Simulations

Classification	BOD	COD	TN	TP	Remark
Rain concentration (mg/L)	7.343	15.229	2.666	0.164	
Groundwater concentration (mg/L)	3.617	7.057	2.144	0.046	
Decay coefficient (1/days)	3.683	3.782	1.016	2.944	
Initial buildup (kg/ha)	0.021	0.281	0.241	0.020	
Maximum buildup (kg/ha)	0.124	0.281	0.204	0.009	
Buildup rate constant (kg/ha)	0.002	0.005	0.005	0.011	
Time exponent	7.616	5.092	8.666	7.367	
Washoff coefficient	4.104	3.879	0.034	0.203	
Washoff exponent	9.976	9.989	4.470	2.590	

과 집합체 혼합진화 알고리즘의 연계를 통해 개발되었고, SWMM 내 추정대상 매개변수의 결과와 각각의 매개변수의 탐색 범위를 결정하여 최적의 매개변수 조합을 찾도록 구성하였다.

개발된 SWMM의 자동 보정 모듈은 동향 수위관측소 유역의 2009년과 2010년의 측정자료를 이용하여 적절성이 검토되었다. 유역유출 연속모의는 측정된 유량의 수가 충분하여 보정 및 검증이 모두 수행된 반면, 수질모의에서는 2010년의 측정 자료의 수가 적어 BOD, COD, TN, TP에 대하여 보정만이 수행되었다. 각각의 모형에 대한 보정 및 검증 결과에 대한 평가는 Moriasi et al. (2007)이 제시한 모형평가 지표가 활용되었다. 그 결과, 유역유출 연속모의의 보정 및 검증 결과는 대체로 Moriasi et al. (2007)의 '매우 좋음' (very good)의 기준을 만족하는 것으로 분석되었고, 수질모의의 경우, 수질 항목별로 다소 차이가 있지만 평균적으로 ' 좋음' (good)의 기준에 부합하는 것으로 평가되었다.

본 연구의 결과로부터 개발된 SWMM의 자동 보정 모듈이 적절히 수행됨을 검토하였다. 특히, 유역유출 모의 모형의 경우에는 보정과 검증 모두에서 매우 좋은 결과를 도출하는 것으로 분석되었다. 하지만 수질모의 모형의 경우, 측정된 자료수의 제약에 따라 보정만 수행되었고 보정의 결과도 측정자료를 아주 잘 모사하지는 못하는 것으로 분석되었다. 이에 따라 수질모의 모형의 자동 보정 모듈의 경우, 본 연구의 결과만으로 적절성을 논하기 어렵다. 따라서 향후 많은 양질의 측정자료를 이용하여 자동 보정 모듈의 기능을 엄밀히 검토하고, 필요 시 개선될 필요가 있을 것으로 판단된다.

연구에서 사용된 SWMM은 우리나라에서 주로 도시유역에 대한 홍수해석과 유역개발에 따른 도시화의 영향 분석 등에 사용되고 있다. 하지만 우리나라 대부분의 도시유역은 미계측 지역으로서 이러한 지역에 대하여 SWMM을 적용하기 위해서는 사용자의 주관적인 매개변수의 추정이 불가피하다. 본 연구에서 개발된 SWMM의 자동 보정 모듈을 이용하여 다양한 유역과 다수의 조건에 대하여 자동 보정을 수행하고 자동 보정의 경험이 축적될 경우, 보다 명확한 매개변수의 적용 범위를 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-

0015225)입니다. 연구비를 지원해 주신 한국연구재단에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 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.
- Chae, J. (2004). *Study of runoff management scheme in urbanization area using XP-SWMM*. M.Sc. thesis, Paichai University, Daejeon, Korea.
- Cho, J., and Lee, J. (2006). "Parameter optimization for runoff calibration of SWMM." *Journal of Environmental Impact Assessment*, Korean Society Environmental Impact Assessment, Vol. 15, No. 6, pp. 435-441.
- Choi, J.Y. (2004). *Emission characteristic and management plan of non point source*. Water Journal.
- Choi, K., and Ball, J.E. (2002). "Parameter estimation for urban runoff modelling." *Urban Water*, Vol. 4, No. 1, pp. 31-41.
- Donigian, A.S., Jr., Imhoff, J.C., Bicknell, B.R., and Kittle, J.L., Jr. (1984). *Application guide for Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)*. EPA-600/3-84-065, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
- Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.
- 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.
- Fang, T., and Ball, J.E. (2007). "Evaluation of spatially variable parameters in a complex system: an application of a genetic algorithm." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 9, No. 3, pp. 163-173.

- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1992). *Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual*. EPA/600/3-88/001a, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
- 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 runoff models using global optimization techniques*. M.Sc. thesis, McGill University, Montreal, Canada.
- Kang, T. (2013). *Embedding an adaptive penalty function in the SCE-UA and its application to parameter estimation of a watershed runoff simulation model*. Ph.D. dissertation, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea.
- Kang, T., Lee, S. (2012) "A Study for a Reasonable Application of the SWMM to Watershed Runoff Event Simulation." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 6, pp. 247-258.
- Kang, T., Lee, S., Kang, S., and Park, J. (2012). "A study for an automatic calibration of urban runoff model by the SCE-UA." *Journal of Korea Water Resources Association, Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 15-27.
- Korea Water Resources Corporation. (2009). *Survey of Water Resources and Environment for the Geumgang Basin in 2010*. Chungcheong Regional Council.
- Korea Water Resources Corporation. (2010). *Survey of Water Resources and Environment for the Geumgang Basin in 2010*. Chungcheong Regional Council.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- National Institute of Environmental Research. (2006). *Evaluation of Non-Point Sources Loadings (1)-Impervious Land-*. NIER No. 2006-34-816, Environmental Cap System Research Department, p. 18.
- Nelder, J.A., and Mead, R. (1965). "A simplex method for function minimization." *Computer Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 308-313.
- Price, W.L. (1987). "Global optimization algorithms for a CAD workstation." *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 55, No. 1, pp. 133-146.
- Rossman, L.A. (2010). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory, Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Wan, B. (2001). *Auto-calibration of SWMM RUNOFF using sensitivity-based genetic algorithm*. M.Sc. thesis, University of Guelph, Canada.

논문번호: 13-101	접수: 2013.12.16
수정일자: 2014.03.04/03.17	심사완료: 2014.03.17