침투량 산정 방법에 따른 유역유출 연속모의의 정확성 평가

Evaluation of Accuracy for Watershed Runoff Continuous Simulation by Infiltration Methods

강태욱* · 고동근** · 정태훈*** · 이상호****

Kang, Taeuk · Ko, Donggeun · Jung, Taehoon · Lee, Sangho

Abstract

Infiltration separate precipitation into overland flow and the portion penetrating from the ground surface into the soil. Thus, infiltration is an important component of a hydrologic model. A proper infiltration method may increase accuracy of watershed runoff simulation. The purpose of the study is to compare watershed runoff simulation results by the NRCS (U.S. Natural Resources Conservation Service) method with those by the Green-Ampt equation. The NRCS method is empirically derived from land cover conditions and soil types of the USA, whereas the Green-Ampt equation is derived from physical law of groundwater flow. The SWMM (storm water management model) is used to evaluate the results by the two infiltration methods. We conducted watershed runoff continuous simulations, and calibrated the model automatically for objective comparison. Watershed runoff simulation results by the Green-Ampt equation is more accurate in runoff volume and peak flow than those by the NRCS method. The study results have significance to evaluate applicability of the Green-Ampt equation that is rarely used in Korea, and to suggest an application method.

Key words : Infiltration, Green-Ampt equation, Watershed runoff continuous simulation, Automatic calibration, SWMM

요 지

강수는 침투에 의하여 지표류와 땅속으로 스며드는 부분으로 분리되므로 침투는 수문 모형의 중요 성분이다. 따라서 적절한 침투량 산정 방법을 사용하면 유역유출 모의의 정확성을 높일 수 있다. 본 연구에서는 미국의 토지 피복 상태와 토양의 종류에 따라 경험적으로 개발된 NRCS 방법과 토양 내 지하수 흐름의 물리적인 법칙에 의해 유도된 Green-Ampt 식에 의한 유역유출 해석 결과를 비교하였다. 두 방법에 의한 유출해석 결과를 비교하기 위해 SWMM으로 유역유출 연속모의를 수행하였고, 계산된 결과의 객관적인 비교를 위해 자동 보정을 수행하였다. 그 결과, Green-Ampt 식에 의한 유역유출 해석의 결과가 NRCS 방법에 의한 결과보다 유출체적과 침투유량 측면에서 관측값을 보다 잘 모사하는 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과는 우리나라에서 활용빈도가 적은 Green-Ampt 식의 적용 가능성을 평가하고, 적용 방법을 제시한 것에 의의가 있다.

핵심용어 : 침투, Green-Ampt 식, 유역유출 연속모의, 자동 보정, SWMM

1. 서 론

유역유출 모의 모형은 수자원 분야의 다양한 의사결정을 위하여 주요 도구로 활용된다. 홍수유출 모의 모형은 홍수량 산정을 통해 치수 대책 수립을 가능하게 하고, 유역유출 연속모의 모형은 유역의 물 순환 분석에 의한 이수 계획 수립 등에 활용된다. 따라서 유역유출 모의 모형의 정확성은 합리

적인 수자원 정책 결정을 위한 필수적인 요소이다.

유역유출 모의 모형은 유역과 하도의 다양한 물리적 현상을 구현하고 있는데, 이 가운데 침투현상은 강수 중에서 지표류의 양과 땅속으로 스며드는 양을 결정하므로 매우 중요하다. 하지만 토양을 통한 침투는 계측이 어렵고, 토지의 피복 상태와 토양의 종류 등에 따라 달라지므로 불확실성이 크다. 수자원 분야에서 대표적으로 사용하는 침투량 산정 방법

*정회원, 부경대학교 토목공학과 박사 후 연구원(E-mail: ktw62@hanmail.net)
Member, Post Doctor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

**부경대학교 토목공학과 석사 후 연구원
Post Master, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

***부경대학교 대학원 토목공학과 박사수료
Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

****교신저자, 정회원, 부경대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-51-629-6076, Fax: +82-51-629-6063, E-mail: peterlee@pknu.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

으로서 NRCS(U.S. Natural Resources Conservation Service) 방법, Horton 식, Green-Ampt 식이 있다(Bedient and Huber, 2002). 이 가운데 NRCS 방법과 Horton 식은 경험 또는 실험에 의해 정립된 방법이고, Green-Ampt 식은 지하수 흐름의 물리적 법칙으로부터 유도된 식이다.

상기의 세 가지 침투량 산정 방법 가운데 우리나라에서는 주로 NRCS 방법을 사용하고 있다. 이는 우리나라의 여러 설계 문서에서 NRCS 방법의 적용을 위해 구체적인 지표를 제시하고 있는 반면, Horton 식이나 Green-Ampt 식에 대한 적용 기준은 제시되어 있지 않기 때문이다. 하지만 NRCS 방법은 미국의 토지 피복 상태와 토양의 특성에 따라 제시된 방법으로서 우리나라의 토지 피복 상태와 토양의 특성에 대한 적용성은 구체적으로 검증된 바 없다. 반면에 Green-Ampt 식은 토양 내 지하수 흐름의 물리적 현상을 단순화하여 제안된 식으로서 범용적 적용이 가능하다. 본 연구의 목적은 Green-Ampt 식과 NRCS 방법에 의한 유역유출 모의 결과를 비교하여 우리나라에서 잘 활용되고 있지 않은 Green-Ampt 식의 적용 가능성과 적용 방법을 제시하는데 있다.

Green-Ampt 식을 적용한 대표적인 연구 사례로서 Rawls et al.(1983)은 약 1,200개의 토양자료(5,000개의 토양층)로부터 Green-Ampt 식의 사용에 필요한 매개변수를 토양의 종류에 따라 제시하여 이후 많은 연구자들에게 적용의 편의를 제공하였다. 그리고 Rawls and Brakensiek(1986)은 17개 유역의 330개 홍수사상에 대하여 Green-Ampt 식과 NRCS 방법에 의한 유출량을 비교하였고, Green-Ampt 식이 NRCS 방법보다 관측된 유출체적을 보다 잘 모사하는 것으로 제시하였다. 유사하게 Van Mullem(1991)은 12개 유역의 99개 홍수사상에 대하여 Green-Ampt 식과 NRCS 방법을 적용하여 Green-Ampt 식에 의한 유출해석 결과가 침투유량과 유출체적의 정확도면에서 NRCS 방법보다 우수한 것으로 기술하였다. 한편, 우리나라에서는 Yoon and Cho(1996)가 위천 유역에 발생한 두 개의 홍수사상에 대하여 분석하여 Green-Ampt 식에 의한 유출 수문곡선이 NRCS 방법에 의한 결과보다 관측 수문곡선을 보다 잘 모사하는 것으로 분석한 바 있다. 한편, Green-Ampt 식과 NRCS 방법을 유역유출 연속 모의에 적용하여 비교한 사례로서, King et al.(1999)은 SWAT 모형에 탑재되어 있는 두 가지 방법으로 8년간 모의한 결과, Green-Ampt 식과 NRCS 방법에 의한 유출 모의의 큰 차이가 없음을 제시하였다. 하지만 해당 연구에서는 모형 보정을 수행하지 않았기 때문에 두 방법에 의한 유역유출의 비교에 한계가 있다.

본 연구에서는 King et al.(1999)에서 수행한 연구의 한계를 보완하고자 Green-Ampt 식과 NRCS 방법을 유역유출 연속모의를 통해 비교하였고, 객관적인 비교를 위해 두 방법에 의해 구축된 모형을 자동 보정하여 검토하였다. 연구에서는 유역유출 연속모의가 가능하면서 Green-Ampt 식과 NRCS 방법을 모두 포함하고 있는 SWMM을 이용하였다. 그리고 대상유역은 다수의 관측자료가 확보된 밀양댐 유역으로 선정하였다.

2. 연구 방법

2.1 침투량 산정식

2.1.1 NRCS 방법과 Green-Ampt 식

수자원 분야에서 활용되는 대표적인 침투량 산정 방법은 Green-Ampt 식, NRCS 방법, Horton 식이다. 이 가운데 우리나라에서는 주로 미국의 토양 보존국(U.S. Soil Conservation Service)에서 제시한 NRCS 방법을 사용하고 있는데, 이는 우리나라의 여러 설계 기준 등에서 적용 방법을 기술하고 있고, 토지이용도와 토양도를 통해 쉽게 매개변수를 결정할 수 있기 때문이다. NRCS 방법은 유출곡선 지수(curve number; CN)의 추정을 통해 유효 강우량을 결정하는 과정으로 이를 결정하는 수식은 Eq. (1)과 같다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

여기서, P 는 강수량(mm), I_a 는 초기 차단(mm)이고, S 는 잠재 보유수량(potential maximum retention)이다. 잠재 보유수량은 유역의 토지이용 상태와 토양 종류에 따라 결정되는 유출곡선 지수에 의해 Eq. (2)와 같이 결정된다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Eq. (1)에서 초기 차단은 일반적으로 0.25로 가정하여 사용되고 있지만, 다수의 연구들에서는 지역적 특성을 고려하여 추정하거나 보다 정도 높은 추정 방법을 제시하였다(Mishra et al., 2006; Beck et al., 2009; Shi et al., 2009). 또한, 최근의 연구에서는 NRCS 방법에 의한 적용의 한계를 극복하기 위해 Green-Ampt 식을 결합한 연구가 진행되었다(Grimaldi et al., 2012; 2013).

Green-Ampt 식은 토양 내에서 물의 물리적 거동을 단순화하여 유도된 방법으로서 Green and Ampt(1911)에 의해 처음 소개된 침투량 산정 방법이다. 이후 무수히 많은 연구들에서 Green-Ampt 식을 발전시켜 현재에는 많은 유역유출 모의 모형에 탑재되어 있다. 하지만 우리나라에서는 Green-Ampt 식의 사용에 관한 지침이 없고, 검증된 바 없으므로 사용의 제약이 되고 있다. Green-Ampt 식은 Eq. (3)과 같다.

$$f(t) = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (3)$$

여기서, $f(t)$ 는 시간 t 에서 침투율(mm/hr), K 는 포화투수계수(saturated hydraulic conductivity), ψ 는 흡인수두(suction head), $\Delta \theta$ 는 초기 함수비 부족분(initial moisture deficit), $F(t)$ 는 시간 t 의 누가 침투량이다.

2.1.2 Green-Ampt 매개변수 결정 방법

Green-Ampt 식에 의한 침투량을 결정하기 위해서는 Eq. (3)에서 기술한 바와 같이 포화 투수계수, 흡인수두, 초기 함수비 부족분만 결정하면 된다. 이에 대하여 Rawls et al. (1983)은 11개의 토양 종류에 따른 대략값을 제시하였다. 한

Table 1. Green-Ampt parameters by soil textures (Rawls et al., 1983)

토양의 종류		포화 투수 계수 (mm/hr)	흡인수두 (mm)	유효 간극비 (초기 함수비 부족분)
우리나라	미국			
사토	Sand	120.396	49.022	0.417
양질사토	Loamy sand	29.972	60.960	0.401
양질 세사토				
양질 조사토				
사질점토	Sandy loam	10.922	109.982	0.412
사양토				
세사양토				
양토	Loam	3.302	88.900	0.434
미사질 양토	Silty loam	6.604	169.926	0.486
사질 식양토	Sandy clay loam	1.524	219.964	0.330
식양토	Clay loam	1.016	210.058	0.309
미사질 식양토	Silty clay loam	1.016	270.002	0.432
사질식토	Sandy clay	0.508	240.030	0.321
실트질 점토	Silty clay	0.508	290.068	0.423
식토	Clay	0.254	320.040	0.385

편, 우리나라의 국립농업과학원에서는 토양을 15가지로 분류하여 제시하고 있다. 본 연구에서는 Rawls et al.(1983)이 제시한 토양별 Green-Ampt 식의 매개변수를 결정하기 위해

국립농업과학원에서 분류한 15가지의 토양을 Rawls et al.(1983)이 제시한 11개의 토양 분류체계에 맞추어 재분류하였다(Table 1). 그리고 유역별 매개변수의 대푯값을 산정하기 위해 Eq. (4)와 같이 유역 내 토양 유형에 대한 면적 가중치를 이용하였다.

$$P_{value} = \frac{\sum (A_{soil} \times V_{soil})}{A_{total}} \quad (4)$$

여기서, P_{value} 는 유역별 매개변수의 대푯값이고, A_{total} 은 유역 면적, A_{soil} 은 해당 유역 내 특정 토양 유형의 면적, V_{soil} 은 토양 유형별 매개변수의 대푯값이다.

2.2 자동 보정 모듈

본 연구에서는 NRCS 방법과 Green-Ampt 식에 의한 장기간의 유출 계산 결과를 비교하기 위해 두 가지의 침투량 산정 방법을 모두 포함하고 있고, 유역유출 연속모의가 가능한 SWMM을 이용하였다. 그리고 NRCS 방법과 Green-Ampt 식에 의한 유출 모의의 객관성을 확보하기 위해 자동 보정을 수행하였다. 본 연구에서 SWMM의 자동 보정에 사용한 모듈은 Kang(2013)에 의해 제시된 SWMM과 집합체 혼합진화 알고리즘(shuffled complex evolution-University of Arizona; SCE-UA)을 연계한 모듈이다.

Kang(2013)은 SWMM의 자동 보정을 위하여 Fig. 1과 같이 두 모듈을 연계하였다. Duan(1991)에 의해 개발된 집합

Fig. 1. A schematic diagram for a connection between the SWMM and the SCE-UA (Kang, 2013)

체 혼합 진화 알고리즘은 표본 요소(매개변수 조합)를 몇 개의 집합체로 구분하고, 각 집합체를 독립 진화 시킨 후 다시 혼합하여 새로운 집합체를 생성한다. 이러한 진화와 혼합의 과정은 수렴조건을 만족할 때까지 반복된다. Kang(2013)은 이러한 과정에서 새롭게 생성되는 매개변수 조합에 대해 SWMM의 수행과 목적함수의 평가 결과를 집합체 혼합 진화 알고리즘으로 전달하는 모듈을 구성하였다.

2.3 대상유역

본 연구에서는 유역유출 연속모의를 위해 장기간의 관측자료가 확보되어 있는 밀양댐 상류의 유역을 대상유역으로 선정하였다. 밀양댐 유역에 대한 강우량과 유출량은 한국수자원공사와 국가 수자원관리 종합정보시스템을 통해 수집하였다. 그리고 증발량은 밀양지역 내 관측시설이 없으므로, 인접하면

Table 2. Analysis conditions of watershed runoff continuous simulation model

구 분		밀양댐 유역
유역과 하도	유역 면적 (km ²)	94.4
	소유역의 개수	24
	하도의 개수	26
기상 자료	강우량 자료	선리, 밀양댐 관측소
	증발량 자료	진주 기상대
모의 방법	유역 추적	비선형 저류 방정식
	하도 추적	운동과 모형
	침투량 산정	NRCS 방법/Green-Ampt 식
	모의 시간 간격	1일
	모의 기간	보정 2002~2009년
		검증 2010년

Fig. 2. Subcatchments, channels, and stations of the Milyang Dam Basin

서 기후조건이 유사한 진주기상대의 측정자료를 활용하였다.

대상유역에 대하여 적절한 유역유출 모의를 수행하기 위해 소유역과 하도를 세분화 하였고, 유역추적에는 비선형 저류방정식을 하도추적에는 운동과 추적법을 적용하였다. 대상유역에 대한 정보와 모의 방법은 Table 2와 같다. Fig. 2는 밀양댐 유역의 소유역 및 하도 분할과 주요 관측소의 위치를 나타낸 그림이다. 한편, 대상유역인 밀양댐 유역에 대한 유입량은 댐의 수위와 저류량 및 방류량 등을 통해 추정되는데, 밀양댐 수위관측소는 유역 유출부에 위치하고 있다.

3. 연구내용

3.1 SWMM의 매개변수 결정 및 추정

3.1.1 침투량 산정식의 매개변수 결정

Green-Ampt 식과 NRCS 방법에 의한 유출계산 결과를 비교하기 위해 두 침투량 산정 방법의 적용을 위한 매개변수를 결정하였다. SWMM에서 Green-Ampt 식을 적용하기 위한 매개변수는 투수계수, 흡인수두, 초기함수비 부족분이다. 각각의 매개변수는 Table 1과 Eq. (4)에 의해 결정되었다. NRCS 방법을 적용하기 위한 매개변수는 유출곡선 지수와 지표면이 포화된 후 완전히 건조되는데 소요되는 시간이다. 유출곡선 지수는 지리정보시스템 분석 프로그램을 이용하여 토지이용도와 토양도를 통해 산정하였고, 선행강우조건 (antecedent soil moisture condition; AMC)-II를 적용하였다. 지표면이 포화된 후 완전히 건조되는데 소요되는 시간은 SWMM에서 2~14일의 범위를 가지는 것으로 제시하고 있지만, 명확한 결정이 어려운 매개변수이므로 연구에서는 중간값 정도인 7일로 설정하였다.

한편, SWMM은 유역의 매개변수 가운데 지면 저류량 (Table 4)을 정의하여 사용한다. 이는 Eq. (1)에서 제시된 NRCS 방법의 초기 차단(I_a) 양 중 일부를 나타내는 것으로 볼 수 있다. 이에 따라 SWMM에서는 NRCS 방법의 적용 시 Eq. (1)의 초기 차단을 고려하지 않는다. 이는 사용자 설명서 상에는 기술되어 있지 않는 내용으로서, 원시 코드를 통해 확인된 사항이다. Table 3은 밀양댐 유역의 소유역별 Green-Ampt 식과 NRCS 방법의 매개변수를 결정한 결과를 요약한 표이다.

3.1.2 추정대상 매개변수

SWMM의 자동 보정에 의한 추정대상 매개변수는 Table 3의 침투량 산정 방법별 매개변수를 제외하여 Table 4와 같이 선정하였다. 그리고 각각의 매개변수는 SWMM의 사용자 설명서(Huber and Dickinson, 1988; James et al., 2005; Rossman, 2009)와 관련된 문헌을 통해 적절한 매개변수의 탐색 범위를 설정하여 이상치가 결정되지 않도록 하였다.

Table 4에서 대부분의 매개변수는 모든 유역과 하도에서 동일한 값을 갖도록 설정하였다. 이렇게 단순화 한 이유는 매개변수별로 유역과 하도마다 다른 값을 추정하게 되면, 추정해야할 매개변수가 급격히 늘어나기 때문이다. 다만, 불투수 지역의 면적비, 유역 폭은 유역마다 추정된 고유의 값이

Table 3. Parameters of infiltration methods for the basin

소유역 번호	Green-Ampt 식			NRCS 방법	
	투수계수 (m/hr)	흡인수두 (mm)	초기함수비 부족분	유출곡선 지수	지표면이 포화된 후 완전히 건조되는데 소요되는 시간 (day)
B1	3.71	98.45	0.438	75.57	7
B2	3.99	99.84	0.440	73.47	7
B3	4.09	93.93	0.434	75.64	7
중략					
B22	3.33	89.60	0.434	72.01	7
B23	3.34	89.43	0.434	77.99	7
B24	3.94	91.73	0.433	79.27	7

Table 4. Search boundary of parameters for an automatic calibration

구 분	매개변수	추정 범위		적용 방법 적용 방법
		하한	상한	
유역 추적	불투수 지역의 면적비(%)	0.8	1.2	고유값×추정값
	유역폭(m)	0.8	1.2	고유값×추정값
	불투수 지역의 Manning 계수	0.01	0.016	추정값
	투수 지역의 Manning 계수	0.15	0.4	추정값
	불투수 지역의 지면 저류량(mm)	1.6	3.8	추정값
	투수 지역의 지면 저류량(mm)	3.8	6.4	추정값
	불투수 지역 중 지면 저류량이 0인 지역의 면적비(%)	10	30	추정값
지하수 유출	간극률	0.453	0.463	추정값
	식물의 시들음점	0.085	0.116	추정값
	포장용수량(Field capacity)	0.19	0.232	추정값
	(log)투수계수-토양수분 부족분 곡선의 평균 기울기	1	10	추정값
	토양 장력-토양 함수의 곡선의 기울기	1,000	5,000	추정값
	상위 지역(upper zone)의 증발산량 비율	0.5	0.9	추정값
	하위 지역(lower zone)의 증발산 발생 깊이	1	5	추정값
	초기 지하수위(El. m)	-1	1	고유값+추정값
	불포화층의 초기 함수비	0.15	0.4	추정값
	지하수 유출식의 계수	0.0001	0.2	추정값
	지하수 유출식의 지수	1	5	추정값
하도 추적	하도에 대한 Manning 조도계수	0.02	0.05	추정값

있으므로 해당 유역의 값들을 임의의 비율(상·하 20%) 내에서 변화시켜 최적값을 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. 그리고 초기 지하수위는 처음 가정된 수위(하도의 바닥고)로부터 -1~1 m 변화될 수 있도록 설정하였다.

3.2 Green-Ampt 식과 NRCS 방법에 의한 유출모의 비교

3.2.1 자동 보정의 수행 방법

최적화 알고리즘을 이용한 자동 보정에는 목적함수가 요구된다. 본 연구에서는 유역유출 연속모의를 수행하므로 상대적으로 저(低)유량의 적합에 강점이 있는 Eq. (5)를 목적함수로 활용하였다. 해당 목적함수는 Kang et al.(2004)과 Kang et al.(2012)의 연구에서 유역유출 모의 모형의 자동 보정에 적합한 목적함수임이 제시된 바 있다.

$$\text{Minimize} \sum_{t=1}^N \left(\sqrt{q_t^{obs}} - \sqrt{q_t^{cal}} \right)^2 \quad (5)$$

Eq. (5)에서 q_t^{obs} 와 q_t^{cal} 은 관측과 계산된 유량 시계열이고, N 은 유량 값의 개수를 말한다.

한편, 자동 보정된 모형을 평가하기 위해 NSE(Nash-Sutcliffe efficiency), 평균 편차의 비율(percent bias; Pbias), 유출 체적비(ratio of volume; ROV), 평균제곱오차의 제곱근(root mean square error; RMSE)을 지표로 사용하였다(Table 5). NSE와 체적비의 최적값은 1이고, 평균 편차의 비율과 평균제곱오차의 제곱근의 최적값은 0이다. Table 5에서 q_{mean}^{obs} 은 관측 유량의 평균값을 나타낸다. 여기서 NSE와 평균제곱오차의 제곱근은 수문곡선의 적합 정도를 나타내는 지표이고, 평균편차의 비율과 체적비를 통해서는 물 수지에 관한 정보와 계산된 결과의 과소 또는 과대 추정의 편향 정도를 파악할 수 있다.

Table 5. Indexes for model assessment

평가지표	수식	최적값
Nash-Sutcliffe efficiency	$1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{cal})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_{mean}^{obs})^2}$	1
평균 편차의 비율 (Pbias)	$\frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{cal})}{\sum_{t=1}^N q_t^{obs}} \times 100(\%)$	0
체적비 (ROV)	$\frac{\sum_{t=1}^N q_t^{cal}}{\sum_{t=1}^N q_t^{obs}}$	1
평균제곱오차의 제곱근 (RMSE)	$\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{cal})^2}{N}}$	0

3.2.2 밀양댐 유역의 적용 결과

밀양댐 유역에 대한 SWMM의 자동 보정은 2002년부터 2009년까지 수행되었다. Table 6의 보정 결과를 보면, NSE와 평균제곱오차의 제곱근은 침투량 산정 방법에 따라 차이가 작지만 Green-Ampt 식을 적용한 경우가 NRCS 방법을 이용한 경우보다 평균 편차의 비율과 유출 체적비가 크게 좋은 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 관측 수문곡선과 Green-Ampt 식을 적용하여 자동 보정된 수문곡선을 나타낸 그림이다. 대체로 건기에는 자동 보정의 결과가 관측자료를 잘 모사하고 있지 못한데, 이는 자동 보정의 문제이기보다는 상대적으로 건기의 댐 유입량 추정에 오차가 많이 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

각각의 침투량 산정 방법에 의해 자동 보정된 모형을 2010년에 대하여 검증하였다. 그 결과, Green-Ampt 식을 적용하였을 때 NSE와 평균편차의 비율이 각각 0.73과 -16.4%로 분석되었고, NRCS 방법을 적용한 결과는 0.72와 -31.59%로 나타났다. 즉, 검증에서도 Green-Ampt 식에 의한 결과가 NRCS 방법을 적용한 결과에 비해 관측자료를 보다 잘 모사하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 두 침투량 산정 방법에 의해 검증된 결과를 나타낸다.

Table 6. Model assessment results for the calibration and verification

구분	침투량 산정 방법	NSE	PBIAS (%)	ROV	RMSE (m ³ /s)
보정	Green-Ampt 식	0.86	-5.85	1.06	4.95
	NRCS 방법	0.86	-16.61	1.17	5.00
검증	Green-Ampt 식	0.73	-16.40	1.16	4.46
	NRCS 방법	0.72	-31.59	1.32	4.56

Fig. 3. Automatic calibration result by the Green-Ampt equation

Fig. 4. Verification results for the Green-Ampt equation and the NRCS method

3.3 결과 고찰

3.3.1 유출체적과 침투유량의 비교 검토

앞선 3.2절의 유역유출 연속모의 모형의 자동 보정을 통해 Green-Ampt 식에 의한 모의 결과가 NRCS 방법에 의한 결과보다 유출체적의 관점에서 관측값에 근사하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 과거 홍수사상에 대하여 Green-Ampt 식과 NRCS 방법을 비교한 Rawls and Brakensiek (1986)와 Van Mullem(1991)의 연구와 동일한 결과이다.

한편, 3.2절에서 수행된 자동 보정 결과를 이용하여 연도별 침투유량의 오차를 검토하였다(Table 7). 그 결과 8개년의 분석기간 동안 6개년에서 Green-Ampt 식에 의해 계산된 침투유량이 NRCS 방법에 의한 침투유량보다 관측값에 근사한 것으로 분석되었다. 또한, 각 연도별 침투유량의 오차를 평균 하더라도 Green-Ampt 식에 의한 침투유량의 오차가 NRCS 방법에 의한 침투유량의 오차보다 $9.39 \text{ m}^3/\text{s}$ 작은 것으로 나

타났다. 이러한 결과도 Rawls and Brakensiek(1986)가 제시했던 연구결과와 동일하다.

Fig. 5는 Green-Ampt 식과 NRCS 방법에 의해 자동 보정된 유량자료를 이용하여 유황곡선을 나타낸 그림이다. Fig. 5에서는 대수(logarithm)축 상의 그림 표현을 하여 관측오차로 인해 0으로 측정된 자료를 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 대체하여 도시하였다. 비록, 밀양댐의 경우 저유량 부분의 관측오차가 다소 포함되어 있지만, 대체로 저유량 부분에서 Green-Ampt 식에 의한 결과가 NRCS 방법에 의한 결과보다 관측자료에 부합하는 것을 볼 수 있다.

상기의 결과를 종합해 볼 때, Green-Ampt 식은 전체적인 유출체적과 침투유량의 적합에서 NRCS 방법에 비해 나은

Table 7. Annual errors of peak flow

연도	침투유량의 절대 오차(m^3/s)	
	Green-Ampt 식	NRCS 방법
2002	1.13	19.42
2003	10.07	50.34
2004	31.53	11.73
2005	12.44	41.08
2006	74.54	53.81
2007	3.81	8.51
2008	1.35	21.90
2009	11.47	14.64
평균	18.29	27.68

Fig. 5. Comparison of flow duration curves by the infiltration methods

Fig. 6. Hydrogrphs estimation in flood season by the infiltration methods

결과를 도출하는 것으로 분석되었다. 그럼에도 불구하고 Table 6의 NSE와 평균 제곱 오차의 제공근의 경우 큰 차이가 없는 것은 해당 지표들이 고유량의 적합 정도에 크게 영향을 받는 지표이기 때문이다. 이는 곧 상대적으로 고유량에서는 Green-Ampt 식과 NRCS 방법에 의한 결과가 큰 차이가 없는 것을 의미한다. Fig. 6은 밀양댐 유역에 많은 비가 내렸던 2002년의 태풍 루사와 2003년의 태풍 매미가 발생한

홍수기에 대하여 보정된 결과이다. 두 시기 모두 첨두유량의 추정에서만 크게 차이가 날뿐 대체로 유사한 수문곡선이 도출된 것을 볼 수 있다.

3.3.2 추정된 매개변수의 비교 검토

Table 8은 Green-Ampt 식과 NRCS 방법을 각각 적용하여 구성된 모형을 자동 보정하여 추정된 매개변수를 나타낸

Table 8. Estimated parameters for the model composed by the infiltration methods

구분	매개변수	추정된 값	
		Green-Ampt 식	NRCS 방법
유역 추적	불투수 지역의 면적비(%)	1.20	0.81
	유역폭(m)	1.16	0.80
	불투수 지역의 Manning 계수	0.011	0.014
	투수 지역의 Manning 계수	0.15	0.39
	불투수 지역의 지면 저류량(mm)	1.91	3.63
	투수 지역의 지면 저류량(mm)	3.88	3.82
	불투수 지역 중 지면 저류량이 0인 지역의 면적비(%)	22.6	21.1
지하수 유출	간극률	0.460	0.458
	식물의 시들음점	0.093	0.090
	포장용수량(Field capacity)	0.248	0.231
	(log)투수계수-토양수분 부족분 곡선의 평균 기울기	10.00	1.57
	토양 장력-토양 함수의 곡선의 기울기	1,006	4,467
	상위 지역(upper zone)의 증발산량 비율	0.50	0.50
	하위 지역(lower zone)의 증발산 발생 깊이	3.86	1.95
	초기 지하수위(El. m)	-0.47	-0.45
	불포화층의 초기 함수비	0.29	0.27
	지하수 유출식의 계수	0.199	0.199
	지하수 유출식의 지수	4.99	3.74
하도 추적	하도에 대한 Manning 조도계수	0.024	0.050

다. 두 가지 침투량 산정 방법에 의한 매개변수의 추정 결과는 반대로 나타났다. 즉, Green-Ampt 식을 적용한 경우에는 대체로 지표면 유출이 커지도록 매개변수가 결정된 반면, NRCS 방법을 적용한 경우에는 지표면 유출이 작아지도록 결정되었다. 이는 Green-Ampt 식을 적용한 경우에 불투수 지역의 면적비와 유역폭은 커지도록 결정되고, 유역 및 하도의 조도계수와 지면 저류량은 작아지도록 결정된 것으로부터 파악할 수 있다.

Table 8에 제시된 침투량 산정 방법의 적용에 따라 도출된 매개변수는 3.1.2절에서 기술한 바와 같이 SWMM의 사용자 설명서 등을 통해 각각의 매개변수가 가질 수 있는 값의 범위 내에서 설정된 값들이다. 따라서 어느 침투량 산정 방법에 의해 결정된 매개변수가 보다 유역의 특징을 잘 반영한 결과인지는 판단하기 어렵다. 하지만 물수지적 관점에서 볼 때, 상대적으로 관측 유량과 유출 체적의 오차가 작은 Green-Ampt 식에 의한 유출해석 결과가 NRCS 방법에 의한 결과보다 실제 유출 현상을 보다 잘 모사한 것으로 판단된다.

4. 결 론

우리나라에서는 주로 미국의 토지 피복 상태와 토양의 종류에 따라 경험적으로 설정된 NRCS 방법을 유역유출 해석의 침투량 산정 방법으로 사용하고 있다. Green-Ampt 식은 토양 내 지하수 흐름의 물리적인 법칙을 단순화하여 유도된 수식으로서 보다 범용적으로 사용할 수 있는 침투해석 방법임에도 우리나라에서는 적용성의 평가 사례가 희소하고, 적용 방법에 관한 지침이 없어 활용되고 있지 못한 실정이다. 이에 본 연구에서는 Green-Ampt 식의 적용 방법을 제시하고 적용성을 평가하기 위해 수행되었다.

Green-Ampt 식의 적용 방법은 Green-Ampt 식의 사용에 필요한 매개변수에 대하여 유역의 토양 유형에 따른 대략값을 제시하여 기술하였다. Green-Ampt 식의 적용성 평가는 Green-Ampt 식과 NRCS 방법을 각각 적용한 유역유출 연속 모의 모형에 대한 보정의 정확성을 통해 검토하였다. 연구에서는 유역유출 연속모의 모형의 구성에 SWMM을 활용하였고, 밀양댐 유역을 대상으로 하였다. 그리고 객관적인 모형의 보정을 위해 자동 보정을 수행하였다.

자동 보정을 수행한 결과, Green-Ampt 식에 의한 유역유출 해석결과가 NRCS 방법에 의한 결과보다 유출체적의 적합에 있어서 약 10% 개선된 결과를 도출하는 것으로 분석되었다. 또한, Green-Ampt 식은 침투유량과 저유량의 적합에 있어서도 NRCS 방법보다 우수한 것으로 검토되었다. 이는 과거 홍수사상에 대한 적용성을 검토한 국외의 연구 사례와도 유사한 결과이다.

본 연구는 Green-Ampt 식의 적용 방법과 적용의 적절성을 평가한 연구로서, 기존 수자원 분야에서 획일적으로 사용된 침투량 산정 방법에 하나의 적용 대안을 제시한 것에 의의가 있다. 그리고 물리적인 법칙에 근거한 침투량 산정 방법의 적절성을 제시함에 따라 관련 분야에 보다 정확한 수자원 평가 및 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 본 연구의 결과는 SWMM 내에 탑재된 침투량 산정 방법에 대한 모의 결과를 통해 도출된 것으로서, 향후 다양한 모형 내에 포함되어 있는 침투량 산정 방법에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다. 또한 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0015225)입니다. 연구비를 지원해 주신 국토해양부와 한국연구재단에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

References

- Beck, H.E., de Jeu, R.A.M., Schellekens, J., van Dijk, A.I.J.M., and Bruijnzeel, L.A. (2009) Improving Curve Number based storm runoff estimates using soil moisture proxies. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 2, No. 4, 250-259.
- Bedient, P.B., and Huber, W.C. (2002) *Hydrology and Floodplain Analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Duan, Q. (1991) *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrology models*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.
- Green, W.H., and Ampt, G.A. (1911) Studies on soil physics. *Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-24.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., and Romano, N. (2012) Green-Ampt Curve Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins. *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.9303.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., and Romano, N. (2013) Curve-Number/Green-Ampt mixed procedure for streamflow predictions in ungauged basins: Parameter sensitivity analysis. *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.9749.
- 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.
- Kang, S., Lee, D., and Lee, S. (2004) A study on calibration of Tank model with soil moisture structure. *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 37, No. 2, pp. 133-144.
- 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., Kang, S., and Park, J. (2012) A study for an automatic calibration of urban runoff model by SCE-UA. *Journal of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, Vol. 45, No. 1, pp. 15-27.
- King, K.W., Arnold, J.G., and Bingner, R.L. (1999) Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin creek watershed using SWAT. *Transactions of the ASAE*, Vol. 42, No. 4, pp. 919-925.
- Mishra, S.K., Sahu, R.K., Eldho, T.I., and Jain, M.K. (2006) An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in

- SCS-CN methodology. *Water Resources Management*, Vol. 20, pp. 643-660.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Miller, N. (1983) Green-Ampt infiltration parameters from soil data. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 62-70.
- Rawls, W.J., and Brakensiek, D.L. (1986) Comparison between Green-Ampt and curve number runoff predictions, *Transactions of the ASAE*, Vol. 29, No. 6, pp. 1597-1599.
- Rossman, L.A. (2009) *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Shi, Z., Chen, L., Fanga, N., Qinc, D., and Cai, C. (2009) Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *Catena*, Vol. 77, No. 1, pp. 1-7.
- Van Mullem, J.A. (1991) Runoff and peak discharges using Green-Ampt infiltration model. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 3, pp. 354-389.
- Yoon, H., and Cho, H. (1996) Computation of Runoff and peak discharge using Green-Ampt infiltration model. *Research Report of the Institute of Industrial Technology*, Yeungnam College of Science & Technology, Industry Technology Research Center, Vol. 9, pp. 69-78.
-
- © Received March 15, 2013
 © Revised March 19, 2013
 © Accepted April 17, 2013