

SWAT을 이용한 충주댐 유역의 유출곡선지수 산정 방안

Estimation of Runoff Curve Number for Chungju Dam Watershed Using SWAT

김 남 원* / 이 진 원** / 이 정 우*** / 이 정 은****

Kim, Nam Won / Lee, Jin Won / Lee, Jeongwoo / Lee, Jeong Eun

Abstract

The objective of this study is to present a methodology for estimating runoff curve number(CN) using SWAT model which is capable of reflecting watershed heterogeneity such as climate condition, land use, soil type. The proposed CN estimation method is based on the asymptotic CN method and particularly, it uses surface flow data simulated by SWAT. This method has advantages to estimate spatial CN values according to subbasin division and to reflect watershed characteristics because the calibration process has been made by matching the measured and simulated streamflows. Furthermore, the method is not sensitive to rainfall-runoff data since CN estimation is on a daily basis. The SWAT based CN estimation method is applied to Chungju dam watershed. The regression equation of the estimated CN that exponentially decays with the increase of rainfall is presented.

keywords : runoff curve number, SWAT, asymptotic CN method

요 지

본 연구에서는 기후조건, 토지이용 및 토양조건 등의 유역의 비균질성을 고려할 수 있는 SWAT 모형을 이용하여 홍수량 계산에 활용될 수 있는 유출곡선지수를 산정하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 Hawkins 등(1993)이 제시한 점근 유출곡선지수 산정법을 기반으로 하되, 실측 홍수량 시간자료를 직접 이용하지 않고 SWAT에 의한 모의 지표 유출량 일자료를 이용하는 점이 특징이다. SWAT 모형이 지표유출성분량을 산정할 수 있고 소유역 분할에 따른 공간모의 및 유역의 비균질 특성을 반영할 수 있는 장점을 이용한 것이며, 또한 일자료를 이용함으로써 단기사상 자료의 오류에 따른 영향을 최소화할 수 있다. 이 방법에 의해 산정된 유출곡선지수는 모형에 의한 유출량 모의치와 관측치의 적합 과정을 거친 것으로 대상 유역의 유출 특징이 반영된 것이다. 본 제안 방법을 충주댐 상류유역에 대해 적용하여 전체유역 및 임의 소유역의 유출곡선지수를 산정하였고, 이를 강우량에 따라 지수함수형으로 감소하는 회귀식을 제시하였다.

핵심용어 : SWAT, 유출곡선지수, 지표유출성분

* 한국건설기술연구원 책임연구원
Research Fellow, Hydrology Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggy-Do 411-712, Korea
** 한국건설기술연구원 선임연구원
Senior Researcher, Hydrology Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggy-Do 411-712, Korea
*** 교신저자, 한국건설기술연구원 선임연구원
Senior Researcher, Hydrology Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggy-Do 411-712, Korea
(e-mail: ljw2961@kict.re.kr)
**** 한국건설기술연구원 연구원
Researcher, Hydrology Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggy-Do 411-712, Korea

1. 서론

유역내 토지 이용 및 피복 상태와 토양 특성에 관한 자료를 이용하여 총강우량으로부터 직접유출량을 이루는 초과우량을 계산하는 유출곡선지수(runoff curve number, CN) 산정법은 강우-유출관계를 이용한 단기 사상모의(event simulation)에 널리 이용되고 있으며 장기유출해석을 위한 연속모의(continuous simulation)에도 그 활용성이 높아지고 있다. 이 유출곡선지수법을 이용하고 있는 대표적인 단기사상모형으로 TR-20(NRCS, 1984), TR-55(NRCS, 1986), HEC-1(U.S. Corps of Engineers, 1985) 등을 예로 들 수 있으며, 장기유출모형으로는 CREAMS(Knisel, 1980), GLEAMS(Leonard *et al.*, 1987), AGNPS(Young *et al.*, 1989), EPIC(Williams, 1990), SWAT(Arnold *et al.*, 1993; Arnold and Fohrer, 2005), HELP(Schroeder *et al.*, 1994), PRZM(Carsel *et al.*, 1997), SWIM(Krysanova *et al.*, 2000), CELTHYM(Choi *et al.*, 2002) 등 다양하다.

유출곡선지수는 정의하는 방식에 따라 몇 가지로 구분할 수 있는데, NEH-4(National Engineering Handbook, Section 4)에서 제시한 토지이용상태, 토양형, 수문학적 조건에 따른 테이블 유출곡선지수(table CN), 여기에 토양형과 토지이용별 면적 가중된 유역 평균 유출곡선지수(weighted design CN), 강우-유출모형에 의한 모의유출량이 관측유출량에 적합할 때까지 모형의 검보정 과정을 거쳐 산정된 최적유출곡선지수(best CN), 사상별 강우량과 유출량 관측치를 이용하여 역산하는 실측자료 기반의 유출곡선지수(measured data based CN), 사상별 강우량과 유출량 관측치를 이용하여 각각 크기순으로 정렬하여 재조합된 자료를 이용하여 역산하는 Hawkins *et al.*(1993)에 의해 개발된 점근 유출곡선지수(asymptotic CN) 등이 있다. 설계홍수량 산정을 위해서는 관측치 기반의 유출곡선지수를 이용하는 것이 가장 이상적이거나, 국내에서는 미계측 유역이거나 관측치가 있더라도 시간 홍수량 자료가 극히 제한적이기에 NEH-4 테이블 값에 기초한 유역평균 유출곡선지수 사용에 거의 의존하고 있는 실정이다. 실제로 국내의 기후, 지형 및 토양 특성, 선행강우조건 등이 유출곡선지수법 개발 국가인 미국과 상이하서 유출특성이 확연히 다름에도 불구하고 동일한 값을 사용하고 있는 문제점을 지니고 있다. 이를 해소하기 위한 노력으로 국내에서는 강우유출자료를 이용하여 국내 유역특성이 반영된 유출곡선지수를 산정한 연구(윤태훈, 1991; 오경두 등, 2005; 유철상 등, 2005)가 수행되었으나, 대부분

의 연구가 지리정보시스템이나 위성영상을 이용한 유출곡선지수 산정(김경탁, 1998; 조홍제와 김정식, 1997; 신계종과 김연준, 2000; 조홍제 등, 2001; 김홍태와 신현석, 2003; 배덕효 등 2003; 육승우 등, 2003; 이병주 등, 2003; 김현식 등, 2004; 정인균과 장은미, 2004)에 집중되었다.

따라서 본 연구에서는 국내 유역의 유출특성을 최대한 반영할 수 있는 유출곡선지수 산정방법을 제시하고자 하였다. 본 방법은 유역수문모형 SWAT(Arnold *et al.*, 1993)의 수문성분 모델링 결과를 이용하여 유출곡선지수를 산정하는 것으로, 모형이 지표유출성분량을 산정할 수 있고 소유역 분할에 따른 공간모의 및 유역의 비균질 특성을 반영할 수 있는 장점을 이용한 것이다. 또한 시간스케일이 일 단위로 커짐에 따라 사상별 강우유출자료에 크게 민감하지 않아 단기사상 자료의 이상치에 따른 유출곡선지수 산정결과의 왜곡을 줄일 수 있는 잇점이 있다. 충주댐 유역에 대해서 SWAT의 모델링 결과와 Hawkins *et al.*(1993)이 제시한 점근유출곡선지수(asymptotic CN)법과 접목하여 그 결과를 제시하였다.

2. 유출곡선지수 산정 방법

2.1 SCS 유출곡선지수법

현재 NRCS 유출곡선지수 산정법으로 명명되는 SCS-CN 방법은 강우량으로부터 초과우량을 분리해내는 경험적인 방법으로 Eq. (2) and Eq. (3)과 같은 두 가지 가정 하에 Eq. (1)의 물수지 방정식으로부터 만들어졌다.

$$P = I_a + F + Q \quad (1)$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

여기서, P 는 총강우량(mm), Q 는 초과우량 또는 직접 유출량(mm), I_a ($\approx 0.2S$)는 유출 이전의 지면저류, 염면차단, 증발, 침투를 포함하는 초기손실량(mm), F 는 I_a 를 제외한 침투량 (mm), S 는 최대잠재보유수량 (mm), 그리고 λ 는 초기손실계수이다. Eq. (1) and Eq. (2)를 결합하면 Eq. (4)와 같이 초과우량과 강수량간의 관계식을 유도할 수 있다.

$$Q = \frac{(P - I_u)^2}{(P - I_u) + S} \quad (4)$$

Eq. (4)에서 초기손실량 I_u 를 $0.2S$ 로 근사화하면 강우-유출모형에서 주로 이용되는 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (5)$$

그리고 S 는 유역의 유출능력을 표시한 유출곡선지수 CN 과 다음 Eq. (6)과 같은 관계로 정의된다.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6)$$

유출곡선지수 CN 값은 미계측 유역인 경우는 토양의 종류 및 수문학적 조건, 토지이용 및 피복의 처리상태, 선행토양함수조건 등을 종합적으로 고려하여 결정하게 되며, 강우-유출자료가 있는 계측 유역인 경우는 Eq. (5)로부터 유도된 Eq. (7)을 이용하여 S 를 구하고 이를 Eq. (6)에 대입하여 CN 을 산정할 수 있다.

$$S = 5 \left[(P + 2Q) - \sqrt{Q(4Q + 5P)} \right] \quad (7)$$

2.2 SWAT의 수정 SCS 유출곡선지수법

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소 (USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold *et al.* (1993)에 의해 개발된 것으로 토지이용변화에 따른 물과 물질 순환 변화를 해석할 수 있는 준 분포형 유역 수문-수질해석 모형이다. 이 모형에서는 일 단위 지표 유출량을 계산하기 위해서 SCS 유출곡선지수법을 근간으로 하고 있으며, 토양 및 토지피복 등에 따라 공간적으로 변할 뿐만 아니라 토양수분량의 변화에 따라 시간적으로도 변하는 CN 값을 사용하는 것이 특징이다. 일별 CN 값을 산정하기 위해서 일별 S 값을 계산하고 있으며 토양층의 포장용수량, 위조점, 포화수분량 등의 토양 특성을 고려하여 다음 Eq. (8)과 같은 $SW-S$ 관계식을 사용하고 있다.

$$S = S_{mx} \left(1 - \frac{SW}{[SW + \exp(w_1 - w_2 SW)]} \right) \quad (8)$$

여기서, S_{mx} 는 위조점일 때의 S 값, SW 는 위조점에서 토양수분량(WP)을 제외한 전체 토양층의 수분함량이고, 그리고 w_1 과 w_2 는 $SW-S$ 관계곡선 형태를 결정하는 형상계수로 포장용수량 (FC), 포화수분량

(SAT) 등에 따라 결정된다. 이 형상계수는 Eqs. (9)-(11) 조건하에 Eq. (12) and Eq. (13)과 같이 유도할 수 있다.

$$S = S_{mx} \quad \text{for } SW = WP \quad (9)$$

$$S = S_3 \quad \text{for } SW = FC \quad (10)$$

$$S = 2.54 \quad \text{for } SW = SAT \quad (11)$$

여기서, S_3 는 토양수분량이 포장용수량일 때 S 값, 2.54는 토양수분량이 포화수분량일 때 즉, $CN=99$ 에 해당하는 S 값이다.

$$w_1 = \ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 S_{mx}^{-1}} - FC \right] + w_2 FC \quad (12)$$

$$w_2 = \frac{\left(\ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 S_{mx}^{-1}} - FC \right] - \ln \left[\frac{SAT}{1 - 2.54 S_{mx}^{-1}} - SAT \right] \right)}{(SAT - FC)} \quad (13)$$

2.3 시간가중평균 유출곡선지수법

SWAT 모형에서는 일 별 CN 값을 산정하기 위해서 앞서 기술한 바와 같이 시간적으로 변하는 토양수분량에 따라 CN 값을 결정할 수 있도록 개선된 형태의 유출곡선지수 산정법을 사용하고 있다. 토양의 물리적인 특성을 반영할 수 있고 CN 값의 시변성을 표현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 모의된 일 단위 유출수문곡선에서 침투부가 관측치에 비해 과소하게 산정되는 경향이 있다. 이는 모형내의 지표유출 성분을 계산하는 모듈의 약점, 즉 금일 발생한 강수의 영향은 전혀 고려하지 않고 전날 종점시 토양수분량에 따라 CN 값이 결정되어 지표유출이 과소하게 계산되는 데서 기인한다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 Kim and Lee (2008)는 금일 발생한 강수로 인한 토양수 증가를 고려할 수 있도록 시간적으로 가중 평균된 유출곡선지수 산정법을 개발하여 모의 유출량의 정확도를 개선하였다. 이 방법에서는 Eq. (14)와 같이 시간 t 에서 $t + \Delta t$ 사이에서 발생한 지표유출량 $Q_{t,t+\Delta t}$ 과 침투량 $F_{t,t+\Delta t}$ 는 금일 시점(=전날 종점)시 CN_t 와 금일 종점시 $CN_{t+\Delta t}$ 의 가중합의 함수로 결정된다.

$$Q_{t,t+\Delta t} = f(CN_w), \quad F_{t,t+\Delta t} = f(CN_w) \quad (14)$$

$$CN_w = \alpha CN_t + (1 - \alpha) CN_{t+\Delta t} \quad (15)$$

여기서 CN_w 은 시간가중평균 CN 이고, α 는 0~1 사

이의 값을 갖는 시간 가중치로서 관측치와의 비교를 통해서 보정해야 할 매개변수이다. Eq. (15)에서 $CN_{t+\Delta t}$ 는 Eq. (16)과 같이 저류매개변수 $S_{t+\Delta t}$ 의 함수이고, $S_{t+\Delta t}$ 는 Eq. (17)과 같이 종점시 토양수분량 $SW_{t+\Delta t}$ 의 함수이다. $SW_{t+\Delta t}$ 는 시점시 토양수분량 SW_t 에 급 일 발생한 침투량 $F_{t,t+\Delta t}$ 의 합이다.

$$CN_{t+\Delta t} = f(S_{t+\Delta t}) \quad (16)$$

$$S_{t+\Delta t} = f(SW_{t+\Delta t}) = f(SW_t + F_{t,t+\Delta t}) \quad (17)$$

Eqs. (11) ~ (16)으로부터 $CN_{t+\Delta t}$ 와 $F_{t,t+\Delta t}$ 는 음해적인 관계를 나타내고 있음을 알 수 있고, 따라서 반복 절차로 이들 값을 구하여야 한다. 반복해를 구하는 절차는 다음 Table 1과 같다.

본 연구에서는 모의 수문곡선을 관측 수문곡선에 더욱 가깝게 적합시킬 수 있게 하기 위해서 시간가중유출 곡선지수법을 SWAT에 탑재하였다.

2.4 SWAT 모의치 기반의 유출곡선지수 산정법

강우-유출관계에 의해 홍수량을 산정할 때에는 CN 값을 합리적으로 추정해야 하며, 이를 위해서는 충분히 확보된 시간적인 홍수량 자료를 이용하는 것이 바람직하다. 그러나 국내의 경우, 대상 유역이 미계측 유역이거나 제한된 년 수의 홍수량 자료만 있어 CN 값 추정이 어려운 경우가 대부분이다. 또한 유역 규모나 토양 특성과 같은 유역의 비균질성에 따른 유출 특성을 분석할 수 있을 정도의 자료가 확보되어 있지 않아 국내 유역에 적합한 독자적인 CN 테이블을 만들기는 더욱 어려운 문제이다. 이로 인해 기후, 토양조건 등이 우리나라와 상이하더라도 미국 기준의 테이블 CN 값을 사용할 수밖에 없는 게 현실이다. CN 을 추정할 수 있

을 만큼의 시간 홍수량 자료가 있다하더라도 호우사상의 시간적 불규칙성과 홍수수문곡선의 복잡한 형태로 인하여 기저유출을 정확하게 분리하기 어렵고, 기저유출 분리방법에 따라 유효우량이 크게 변하기 때문에 이에 대한 해석이 쉽지 않다. 또한 작은 시간스케일로 인하여 사상별 강우-유출자료에 이상이 있을 때에는 그 결과가 크게 왜곡될 수도 있다.

이상과 같은 단점을 극복하고자 본 연구에서는 SWAT 모형을 이용한 유출곡선지수 산정법을 제안하였다. 여기서 논하는 유출곡선지수는 2.2와 2.3절에서 기술한 일별 유출곡선지수를 의미하는 것이 아니라, 강우-유출사상으로부터 유도되는 사상 유출곡선지수로서 각 사상에 대하여 지속기간동안 일별 강우량과 지표유출량을 각각 합산하여 얻어진 강우총량과 유출용적을 이용하여 Eq. (6) and Eq. (7)로부터 유도되는 사상 유출곡선지수를 의미한다. 본 연구에서 제시하는 유출곡선지수 산정법은 SWAT 모형이 일별로 지표유출량, 토양수분량, 증발산량, 중간유출량, 함양량, 지하수유출량 등 각종 수문성분을 계산할 수 있는 점과, 기후, 토지이용, 토양조건 등 유역의 비균질적인 특성을 반영할 수 있어 공간적인 해석이 가능하다는 점을 최대한으로 이용한 것이다. 본 제안 방법은 첫 번째 장점을 살려 일 단위로 모의 생성된 지표유출수문곡선으로부터 사상별 지표유출량을 구하고, Hawkins *et al.*(1993)의 방법을 도입하여 사상별 강우량과 지표유출량을 각각 크기 순으로 재정렬하여 새로운 강우량과 지표유출량의 조합을 만든 후에 Eq. (6) and Eq. (7)로부터 강우량 크기에 따른 유출곡선지수를 산정하는 절차를 따른다. 두 번째 장점과 같이 분포형 모형의 장점인 공간 해석이 가능하기 때문에 대유역내의 소유역별 유출곡선지수의 변화를 추정할 수 있어 대상 유역의 대푯값뿐만 아니라 분할된 소유역 각각의 대표값도 추출해낼 수 있다.

Table 1. CN_w 계산을 위한 반복절차

Step 1. Eq. (8)로부터 S_t 를 구하고, Eq. (6)으로부터 CN_t 계산
Step 2. $CN_{t+\Delta t} = CN_t$ 가정
Step 3. Eq. (15)로부터 CN_w 계산
Step 4. Eq. (5) and Eq. (6)으로부터 $Q_{t,t+\Delta t}$ 계산
Step 5. 강우량 $P_{t,t+\Delta t}$ 에서 $Q_{t,t+\Delta t}$ 를 감하여 $F_{t,t+\Delta t}$ 계산
Step 6. SW_t 에 $F_{t,t+\Delta t}$ 를 더하여 $SW_{t+\Delta t}$ 계산
Step 7. $SW_{t+\Delta t}$ 와 Eq. (8)로부터 $S_{t+\Delta t}$ 를 구하고, Eq. (6)으로부터 $CN_{t+\Delta t}$ 계산
Step 8. Eq. (15)로부터 CN_w 계산
Step 9. 계산된 CN_w 값이 수렴할 때까지 Step 3 ~ Step 8 과정 반복

3. SWAT을 이용한 유출모의

3.1 SWAT 모형의 개요

유역수문모형 SWAT은 토지 이용 및 관리에 따른 장기유출, 유사량, 비점오염부하량 등의 변화를 일 단위로 모의할 수 있다. 모의를 위한 입력자료로 강수량 외에 기온, 일사량, 상대습도, 풍속 등의 기상자료와 지형, 토양 및 토지이용 등에 대한 정보가 필요하다. 지표유출, 중간유출, 지하수유출, 증발산 등의 수문성분별 모의를 위해서 전체 유역을 소유역으로 구분하고 각각의 소유역에 대해 동일한 토지피복과 토양형을 갖는 수문 응답단위인 HRU(Hydrologic Response Unit)별로 물수지를 계산하게 된다. 각 소유역내 HRU별 수문성분량은 합산되어 해당 소유역의 주하도로 유입되며 하도추적 과정을 거쳐 유출량이 산정된다.

SWAT으로 모의할 수 있는 주요 성분요소는 수문, 기상, 유사, 토양온도, 작물성장, 영양물질, 살충제, 농업 관리 등이며, 이 중 수문성분 모의 절차는 강수차단, 지표유출 및 침투, 증발 및 증산, 중간유출 및 침투, 함양, 지하수유출 순으로 이루어지며, 다음 Eq. (18)과 같이 토양수분 변화량에 따른 물수지 방정식을 기본으로 하고 있다.

$$\Delta SW = P - Q - ET - DP - QR \quad (18)$$

여기서, ΔSW 는 토양층의 수분변화량, P 는 강수량, Q 는 지표유출량, ET 는 증발산량, DP 는 침투량, QR 은 하천으로의 회귀수를 나타낸다. 지표유출량은 앞서 기술한 바와 같이 토양수분량에 따라 CN 을 계산하는 수정 SCS 유출곡선지수법을 근간으로 산정되며, 이 외에 Green-Ampt 방식에 의해서도 산정될 수 있다. 잠재증발산량은 Penman-Montieth, Priestley-Taylor, Hargreaves 방식의 3가지 중 하나를 선택하여 계산할 수 있다. 중간유출량은 토양층의 포화수리전도도, 경사장 및 경사 등의 함수인 운동학적 저류모형(kinematic storage model)로 계산되며, 연직하향으로의 침투량은 저류추적법(storage routing method)을 이용하여 중간유출량과 동시에 계산된다. 토양층 최하단부를 통과한 물이 얇은 대수층까지 도달하는 지하수 함양량은 시간적 지체를 고려하기 위해서 지수형 감쇠 가중함수로 나타내고 있으며, 지하수 유출량 역시 감쇠 가중함수를 사용하여 금일 배출량과 지연배출량의 가중합으로 계산된다. 상기 절차에 따라 계산된 각 소유역내 HRU별 지표유출, 중간유출, 지하수 유출량은 합산되어 해당 소유역의 주하도로 보내지고 Muskingum 또는 변동저류법

에 따라 하도추적이 이루어진다. 본 연구에서는 수문곡선의 정확도를 향상시킬 목적으로 지표유출량은 시간가중평균 유출곡선지수법(Kim and Lee, 2008)을, 하도추적은 비선형저류추적법(김남원 등, 2007)을 SWAT에 탑재하여 모의하였다.

3.2 대상유역 및 모형의 입력자료 구축

충주댐 상류유역을 대상으로 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 설계 유출곡선지수를 산정하였다. SWAT 모형의 입력자료로서 강수량 자료는 영월 외 31개 우량관측소, 기타 기상자료는 충주 외 7개 기상관측소 자료를 이용하였다. 수치표고모델(DEM)은 국가수자원관리종합정보에서 제공하는 30m × 30m 해상도의 DEM을 SWAT 모형의 계산 효율을 고려하여 ArcInfo에 의해 100m × 100m로 가공하여 사용하였으며, 토지피복도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도, 토양도는 농업과학기술원에서 제공하는 1:25,000 해상도의 정밀토양도를 사용하였다. 보다 자세한 대상유역 및 입력자료에 관한 내용은 과학기술부 (2007) 보고서와 김남원 등(2007)의 논문에 수록되어 있다. 모의는 1986년부터 1999년까지 14년간 모의하였으며, 이 중 1986년은 모형의 안정화를 위한 워밍업 기간으로 설정하여 분석에서 제외하였다. 2000년 이후 관측 자료는 도암댐의 유역 외 방류 영향 등으로 유량자료의 질이 낮은 것으로 판단되어 모의 기간을 1999년까지로 제한하였다.

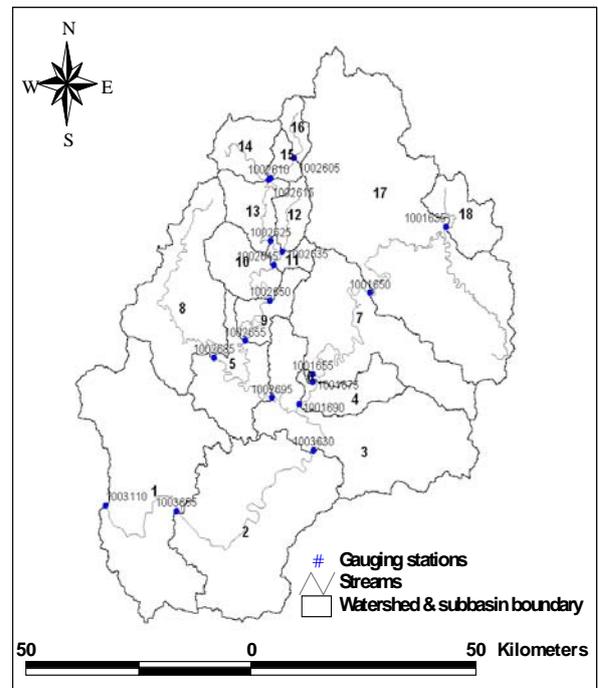


Fig. 1. Study Area
(Extracted from Kim *et al.*, 2007)

3.3 모형의 검보정

충주댐 관측 유입량 자료를 이용하여 모형의 검보정을 실시하였다. 자세한 검보정 절차 역시 과학기술부(2007) 보고서와 김남원 등(2007)의 논문에 수록되어 있어 본 고에서는 핵심적인 것만 간략하게 기술하였다. 연평균 유출고와 일 유출수문곡선에 대하여 모의치와 관측치의 적합이 잘 이루어질 때까지 수동 검보정을 실시하였다. 연평균 유출고를 적합시킴으로써 강우량 대비 유출량과 증발산량이 적절하게 배분하였으며, 일 유출수문곡선을 적합시킴으로써 지표, 중간, 지하수 유출 등의 물수지 성분을 합리적으로 산정하였다. 주요 검보정 변수는 토지피복 및 토양조건에 따라 입력된 AMC-II일 때의 유출곡선지수(CN2), 측방흐름과 관계된 경사장(SLSOIL), 지하수 감수계수 (GWALPHA), 토양 증발 보상계수(ESCO) 등이다. 유역 경사가 25%를 초과하였을 경우에 SWAT은 자동적으로 유역경사 길이(SLSUBBSN)를 0.05m로 매우 작게 설정하고 있다. 이 값은 중간유출량과 관련된 SLSOIL 변수에 영향을 미쳐 비현실적으로 수문성분량이 계산될 수 있으며, 특히 충주댐 유역과 같이 유역경사가 클수록 그러한 현상은 두드러진다. 따라서 본 연구에서는 임경재(2007) 등이 개발한 Eq. (19)와 같은 경사와 경사장 간의 회귀

식을 모형에 탑재하였다.

$$SLSUBBSN = 120.51 \times \exp(-0.0978 \times SLOPE \times 100) \quad (19)$$

Table 2에는 주요 매개변수의 검보정한 값을 제시하였다.

유출모의 결과에 대하여 Fig. 2와 같이 관측치와의 도시적인 적합성을 비교하였고, 통계치인 일 단위 관측 유출량과 모의 유출량간 통계치인 결정계수(R^2)값이 0.7을 초과하였으며 연평균 유출량 오차가 3% 미만으로 모의 결과가 양호한 것으로 분석되었다.

4. SWAT을 이용한 유출곡선지수 산정법의 적용 및 고찰

2.4절에서 기술한 방법론에 따라 충주댐 전체유역 및 소유역별 유출곡선지수를 산정하였다. Fig. 3은 충주댐 지점의 실측 강우량과 SWAT으로 모의한 지표유출량의 일별 변화를 나타낸 것으로 모의기간 중 임의 기간에 대해서만 도시하였다.

일반적으로 설계홍수량은 연최대치 계열을 중심으로 분석된다. 따라서 설계에 이용되는 유출곡선지수도 연최대치 홍수사상에서 유도되거나 합성하여 활용되고 있

Table 2. Calibrated Model Parameters

Variable name	Description	Actual value used
CN2	Curve number	+10 % for all basins
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.9
GW_REVAP	Groundwater revap coefficient	0.001
GWALPHA	Groundwater recession coefficient (d^{-1})	0.01
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow (m)	Eq. (14)

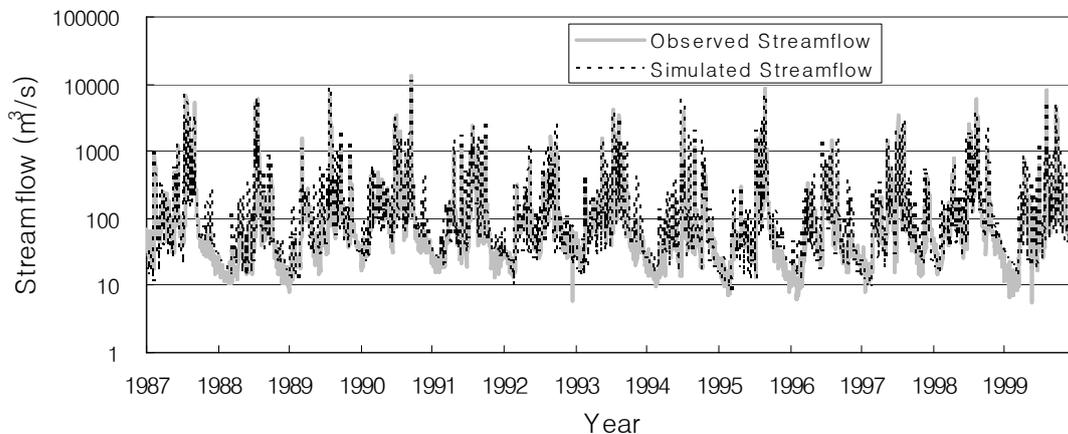


Fig. 2. Comparison of Observed and Simulated Streamflows at Outlet of Chungju Dam Watershed

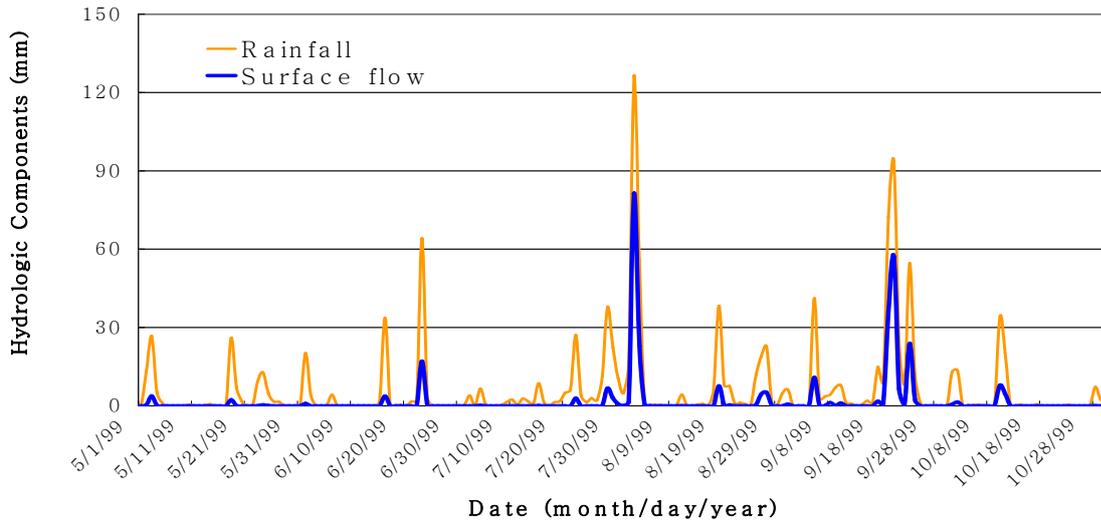


Fig. 3. Surface Flow Simulated by SWAT

다. 그러나 토양수분이 높은 것과 같이 유출률이 크게 되는 조건에 대해 항상 큰 강우가 발생하는 것이 아니며, 오히려 유출률이 작게 되는 조건에서 큰 강우사상이 발생할 수도 있다. 따라서 다양한 유출조건을 반영하여 유출곡선지수를 산정하는 것이 합리적일 수 있다. 본 연구에서는 연 최대치 계열이 아닌 다양한 유출조건이 반영되도록 모의기간에 대하여 지표유출이 크게 발생한 큰 사상을 선별하여 유출곡선지수 산정에 활용하였다.

Hawkins (1993)는 강우-유출관계로 홍수량을 산정할 때의 기본 가정사항인 강우와 홍수발생빈도가 같아야 한다는 점에 착안하여 빈도적합(frequency matching) 과정을 도입하였으며, 이에 따라 관측치로부터 유출곡선지수를 역산할 때 강우량과 유출량을 크기 순으로 재정렬하는 절차를 포함하였다. 미국의 37개 유역에 대해 재정렬된 강우-유출자료로부터 유출곡선지수를 산정하여 강우량 대비 도시한 결과, 3가지 패턴으로 구별되는 것을 확인하였다. 첫째는 강우량 증가에 따라 유출곡선지수가 감소하다가 일정 값에 접근해 가는 Standard 형, 둘째는 강우량 증가에 따라 유출곡선지수가 감소하지만 접근하지 않는 Complacent 형, 셋째는 강우량 증가에 따라 유출곡선지수가 증가하다가 일정 값에 접근해 가는 Violent 형으로 구별하였고, 대부분의 유역이 Standard 형임을 밝혔으며, 점근형에 대해서는 강우량에 따른 유출곡선지수의 회귀식을 제시하였다. 본 연구에서는 Hawkins (1993)의 점근유출곡선지수 산정법과 SWAT 모의치 기반의 유출곡선지수 산정법을 접목하였다.

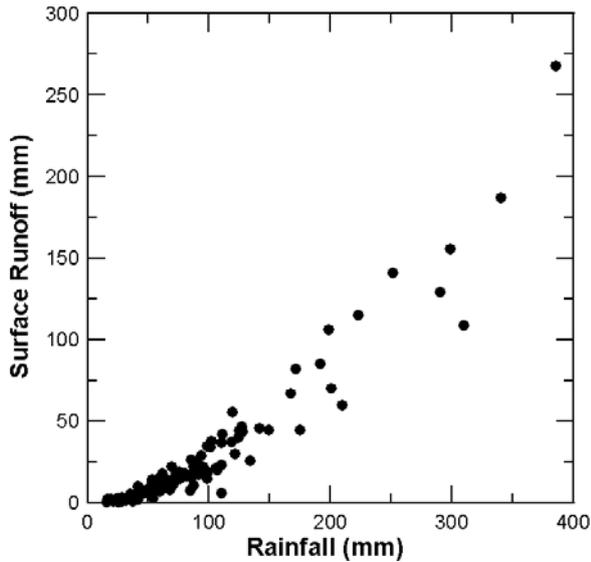
1987년에서 1999년에 발생한 상위 108개 강우-유출 사상을 추출하여 강우량에 대한 지표유출량을 도시하

면 Fig. 4(a)와 같다. 강우량과 지표유출량 사이에 비선형적인 관계를 나타내고 있다. Fig. 4(a)의 강우량과 지표유출량 자료를 각각 크기 순으로 재정렬하면 Fig. 4(b)와 같다. 산포도가 감소하였고 강우량 증가에 따라 완만하게 비선형적으로 증가하고 있는 양상을 보이고 있다.

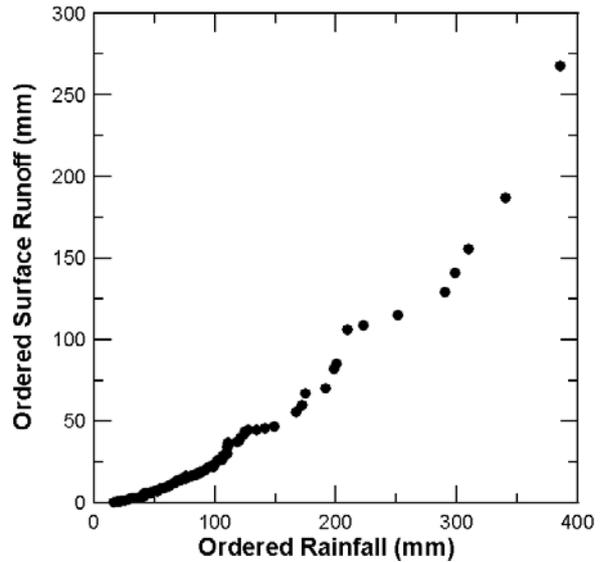
Fig. 4(b)에 나타난 강우량-지표유출량 조합에 대해 Eq. (6) and Eq. (7)로부터 대상 유역인 충주댐 상류유역의 유출곡선지수를 산정하면 Fig. 5(a)와 같다. 강우량 증가에 따라 유출곡선지수가 지수함수적으로 감소하여 약 58의 값으로 접근해 가고 있으며, AMC-II 조건의 유출곡선지수 약 55와 AMC-III 조건의 유출곡선지수 약 74 사이에 위치해 있음을 알 수 있다. 그림에서 AMC-II 라인은 환경부의 중분류 토지피복도와 정밀토양도를 기준으로 Arcview SWAT interface (DiLuzio *et al.*, 2001)을 이용하여 산정한 GIS 기반의 유출곡선지수값이다. AMC-III 조건의 유출곡선지수로 환산하는 몇 가지 경험식이 있는데 본 연구에서는 SWAT Theoretical Documentation (2000)에서 제시한 Eq. (20)을 이용하였다.

$$CN_3 = CN_2 \times \exp [0.00673(100 - CN_2)] \quad (20)$$

한강유역조사보고서(2004)에서 산정한 충주댐 유역의 GIS 기반의 유출곡선지수는 76으로서 본 연구에서의 AMC-II 값인 55와는 크게 차이를 보이고 있다. 이는 사용한 GIS 자료의 차이와 토양 Type의 차이 등에서 기인한 것으로 판단되며, GIS 자료만을 이용하여 유출곡선지수를 산정할 때 사용자에게 따라 결과는 큰 차이를

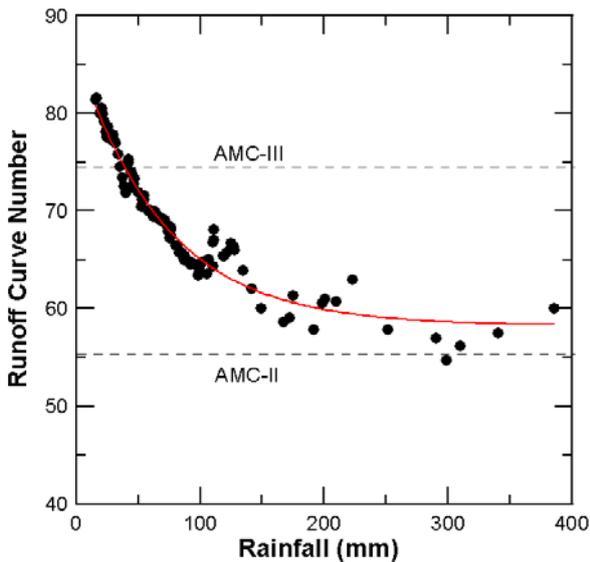


(a) rainfall-surface runoff

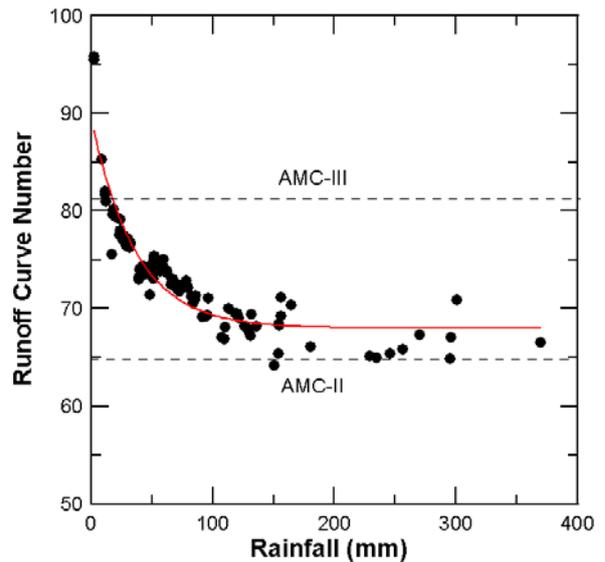


(b) reordered rainfall-surface runoff

Fig. 4. Measured Rainfall and Simulated Surface Runoff for Chungju Dam Watershed



(a) total watershed



(b) subbasin 2

Fig. 5. Curve Number as a Function of Rainfall

보일 수 있음을 시사한다. Fig. 5(b)는 소유역 2번에 대한 결과로서 강우량 증가에 따라 약 68의 값으로 접근해가고 있고 이 역시 AMC-II, III 범위 내에 위치해 있다. 유출곡선지수가 강우량에 대해 비선형적으로 감소하는 결과를 보였는데, 이는 물리적인 관점에서 보면 강우 지속기간이 길어 증발산으로 인한 토양수의 손실과 토양층을 빠져나가는 침투량의 증가에 따른 토양수분량 감소 영향이 반영되어 나타난 현상으로 판단되며, 수학적으로는 Eq. (7)이 큰 강우량과 유출량에 대해서는 S 가 크게 계산되는 데서 기인한다. 동일 유출률에 대해서 강우량, 유출량이 큰 경우와 작은 경우를 대입

해보면 쉽게 확인할 수 있다. 본 연구결과와 유사한 연구로 Hawkins (1993)가 적용한 37개 유역 중 4개만이 Violent 형으로 강우량 증가에 따라 유출곡선지수가 증가하였고, 나머지는 Standard 형과 Complacent 형으로 강우량 증가에 따라 유출곡선지수가 감소하는 특성을 보였다. Mishra *et al.* (2008)도 강우량과 유출량 관측 일자료로부터 유출곡선지수를 역산한 결과 지속기간 증가에 따라 유출곡선지수가 감소함을 보였다.

SWAT이 소유역 분할에 따른 각종 분포형 수문정보를 생성해낼 수 있어 소유역 출구에 관측 유출량 값이 존재하지 않는 미계측 유역이라도 모의 생성값을 이용

하여 유출곡선지수를 추정할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 5의 결과를 Eq. (21)과 같은 지수함수 형태로 나타내면 Table 3과 같다.

$$CN(P) = a + b \exp(cP) \quad (21)$$

Eq. (21)과 Table 3을 이용하면 강우량에 따라 유역을 대표할 수 있는 유출곡선지수 값을 추정할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5(a)의 결과 중에서 강우의 지속기간이 2-4일 일 때의 유출곡선지수 값만을 추출한 것으로서 모두 지수함수형으로 감소하고 있으며, 특히 지속기간 별로 함께 도시한 Fig. 6(d)에서와 같이 강우량 증가에 따른 유출곡선지수의 변화가 지속기간에 크게 민감하지 않음을 알 수 있다. 이는 Eq. (16)의 회귀식을 지속기간에 크게 구애받지 않고 활용될 수 있음을 의미한다.

Fig. 7은 AMC 조건으로 판별하고 있는 선행5일강우

Table 3. Coefficients of Regression Equation for CN

Coefficient	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Total watershed	58.2	28.2	-0.014
Subbasin 2	67.9	21.6	-0.028

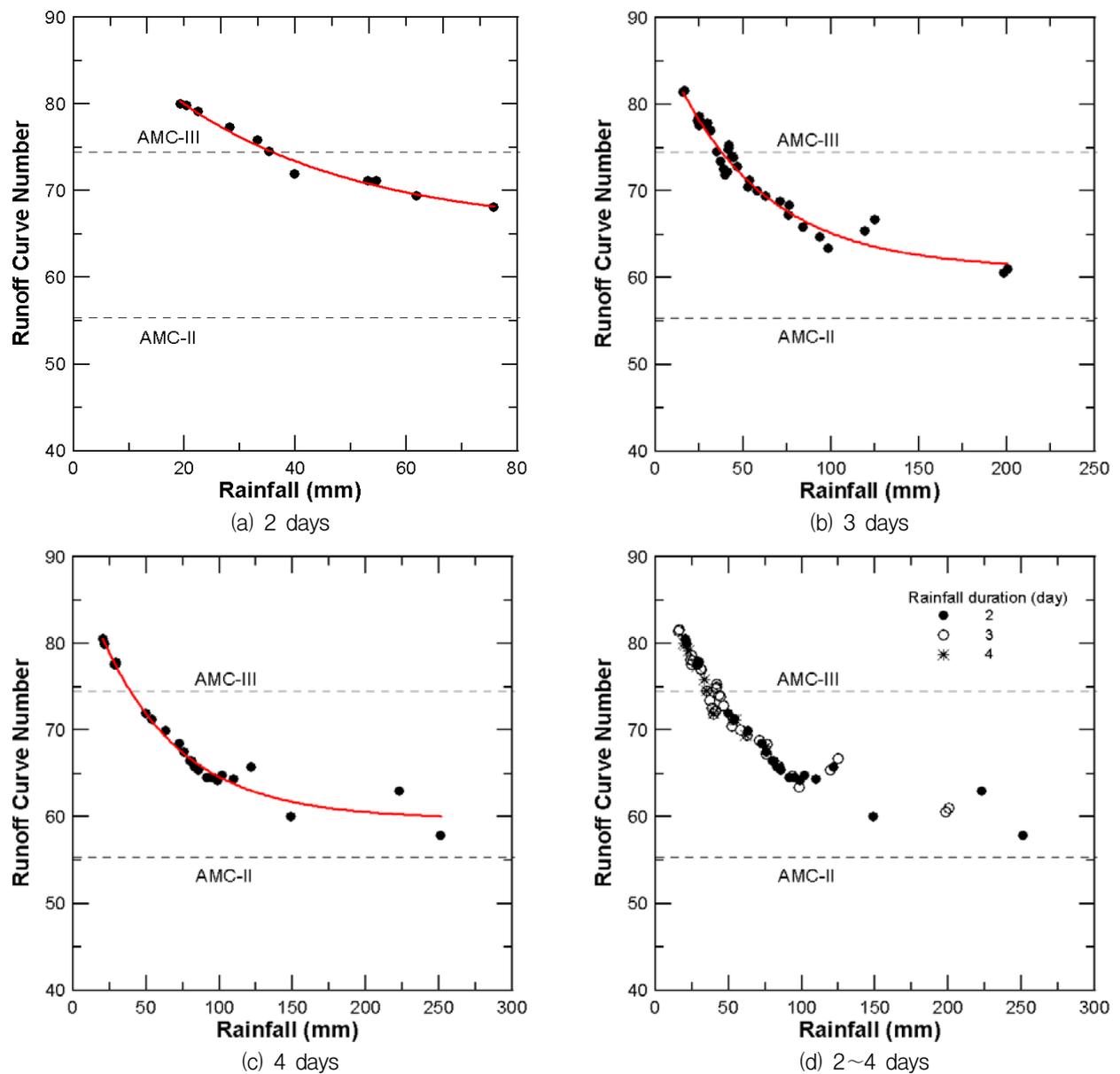
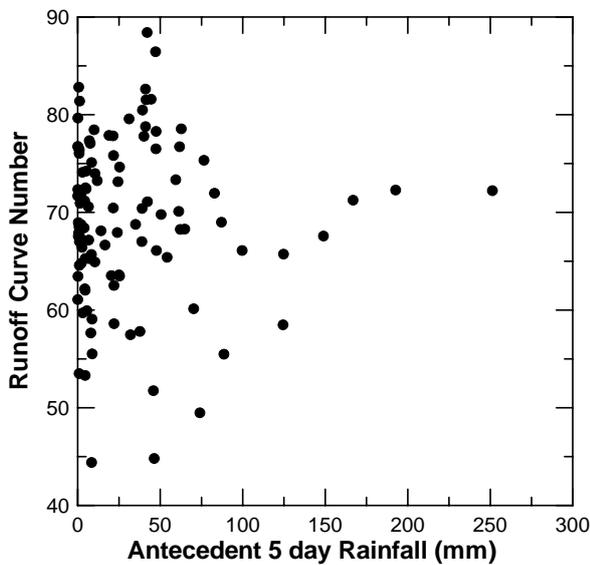


Fig. 6. Curve Number as a Function of Rainfall for Different Duration

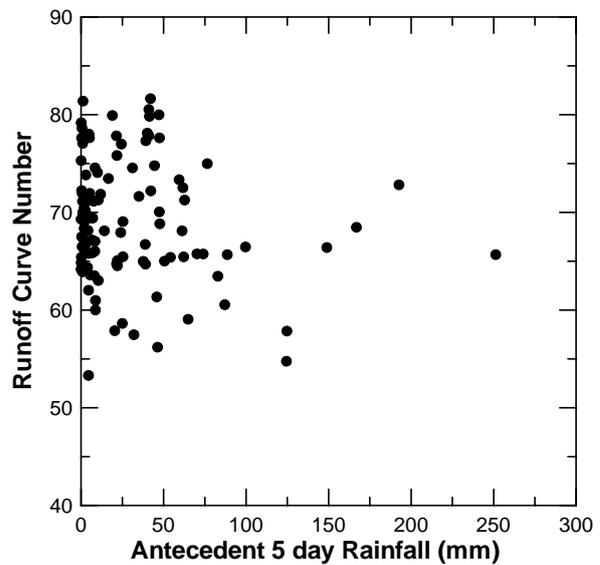
량에 따른 유출곡선지수를 도식한 것으로서 Fig. 7(a)와 7(b)는 각각 재정렬 강우-유출량 자료를 사용하지 않았을 때와 사용하였을 때의 결과이다. 선행강우량이 커질수록 분산도가 감소하고 있으나 뚜렷한 상관성을 나타내고 있지 않다. 따라서 미국에서 개발된 AMC 조건이 본 연구대상 유역에는 적절치 않은 것으로 판단된다. 이러한 결과는 박정훈 등 (2005)과 오경두 등 (2005)의 연구결과에서도 찾아볼 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 선행3일, 1일 강우량에 따른 유출곡선지수를 도식한 것으로 역시 특별한 경향을 나타내고 있지 않다.

직접유출을 이루는 성분 즉, 유효우량은 지표유출과 조기지표하유출성분의 합으로 구성된다. 그러나 일반적

으로 단기 사상모의에서는 조기지표하유출성분 즉 조기 중간유출성분을 고려하지 않고 유효우량과 초과우량을 같게 보고 있다. SCS-CN 법이 강우량으로부터 침투량을 분리해내는 초과우량 개념을 근간으로 하기 때문에 Fig. 5의 결과는 이론적으로는 타당하다. 그러나, 지속 기간이 긴 호우사상으로 인하여 발생한 홍수사상인 경우, 직접유출량에 지표유출성분 뿐 아니라 중간유출성분의 기여를 무시하기에는 유출곡선지수가 과소 산정될 우려가 있다. 따라서 Fig. 10과 Fig. 11에서와 같이 강우량에서 지표유출과 조기중간유출 성분의 합을 추출하여 상기 절차의 따라 유출곡선지수를 산정하여 Fig. 12에 나타내었다. 조기중간유출량은 중간유출수문곡선에

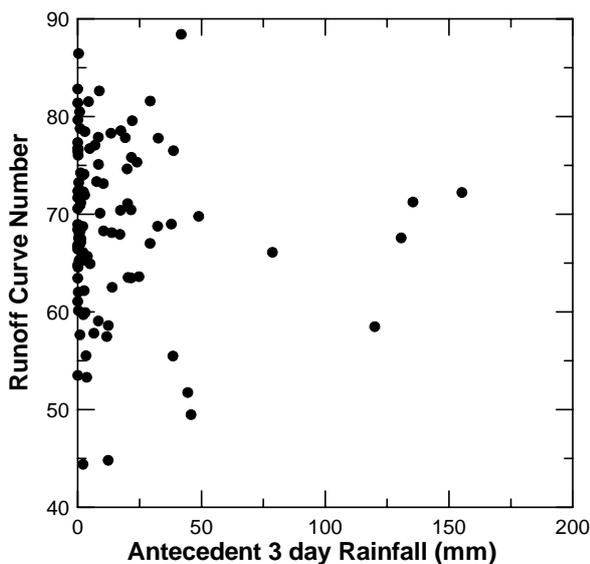


(a) using original data

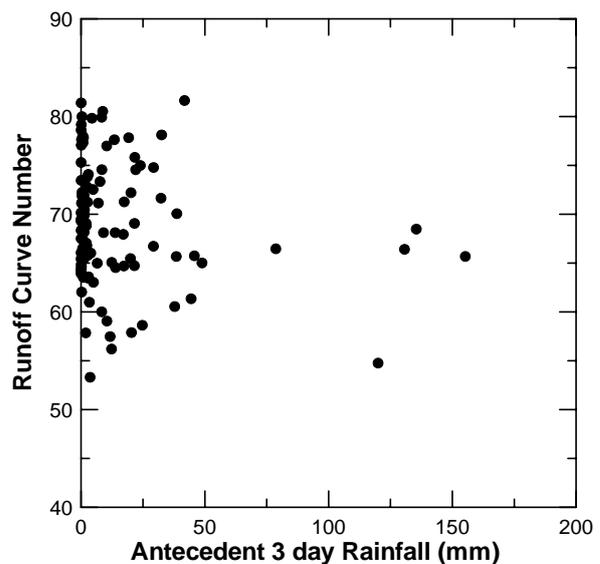


(b) using reordering data

Fig. 7. Curve Number vs. Antecedent 5days Rainfall

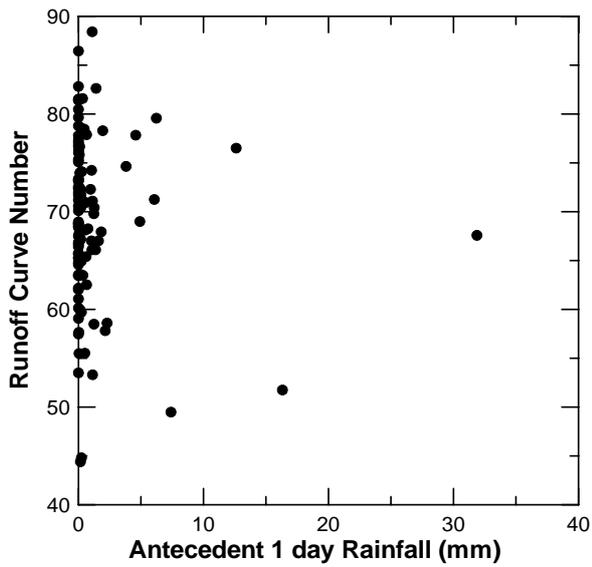


(a) using original data

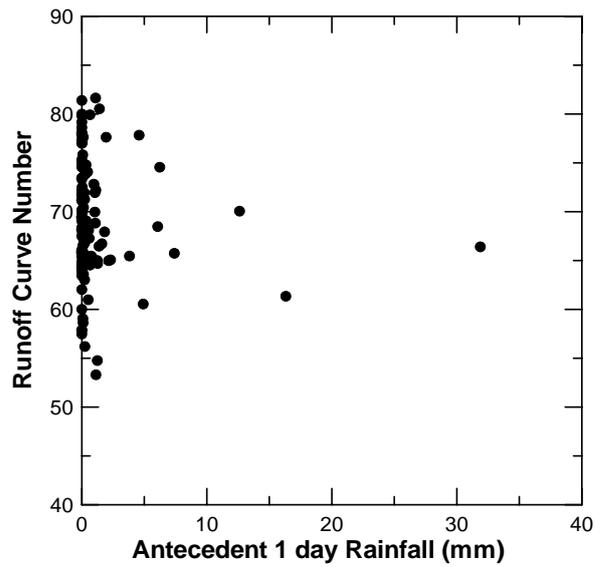


(b) using reordering data

Fig. 8. Curve Number vs. Antecedent 3days Rainfall



(a) using original data



(b) using reordering data

Fig. 9. Curve Number vs. Antecedent 1day Rainfall

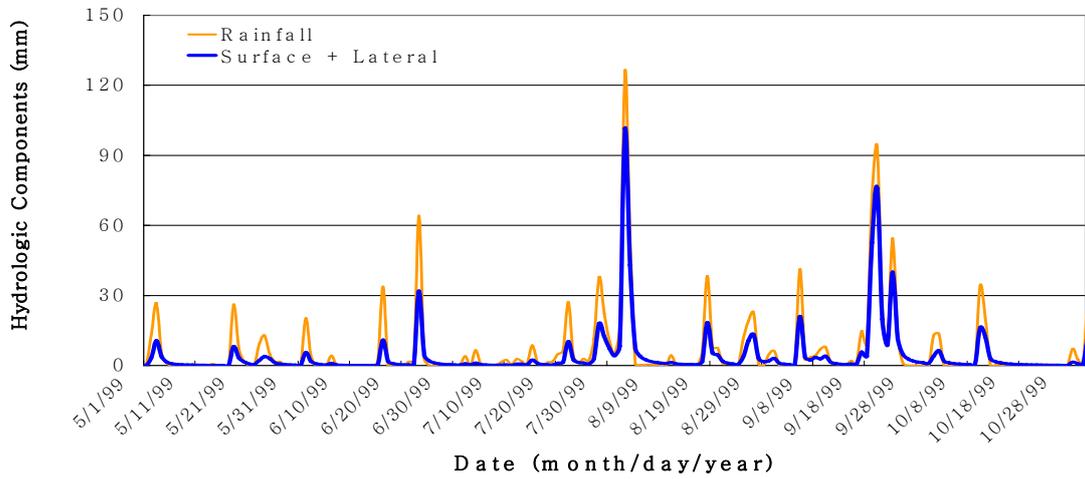
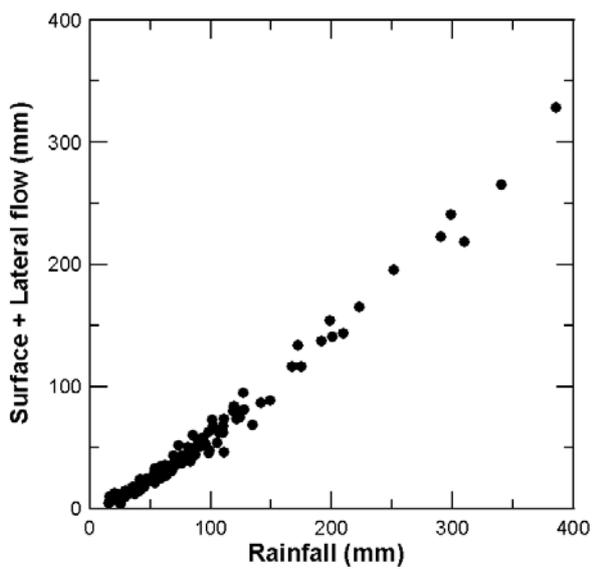
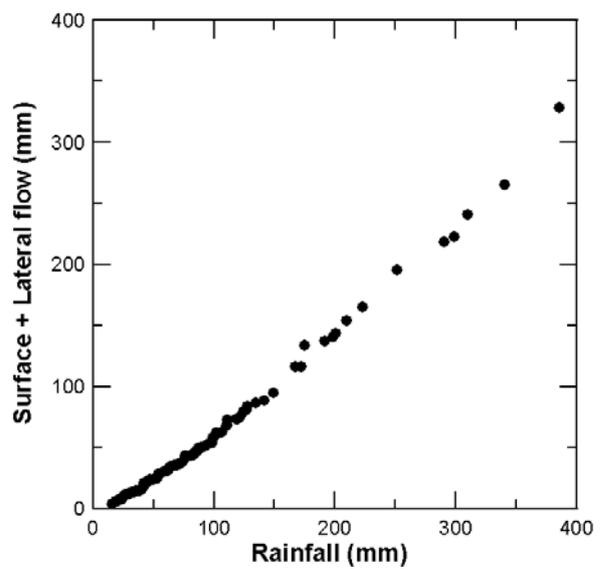


Fig. 10. Surface+Lateral Flow Simulated by SWAT



(a) rainfall-surface runoff



(b) reordered rainfall-surface runoff

Fig. 11. Measured Rainfall and Simulated Surface+Lateral Flow for Chungju Dam Watershed

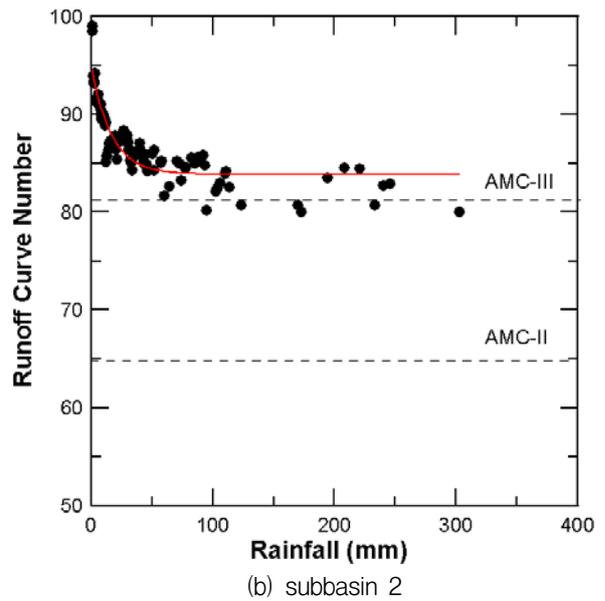
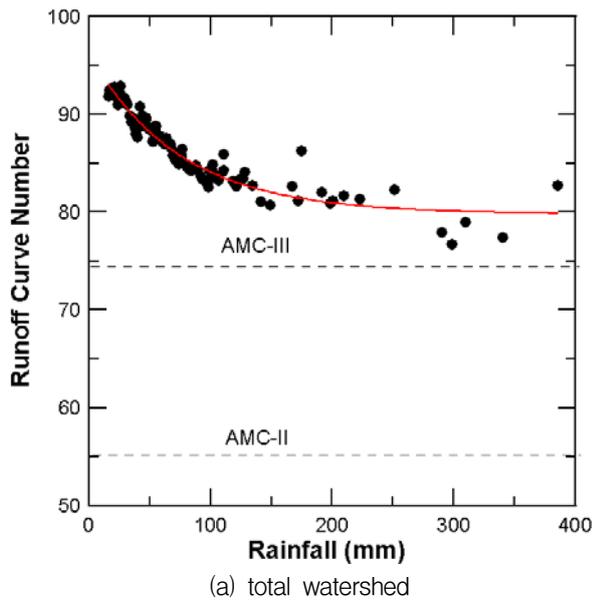


Fig. 12. Curve Number as a Function of Rainfall

Table 4. Coefficients of Regression Equation for CN

Coefficient	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Total watershed	79.8	16.4	-0.013
Subbasin 2	83.8	11.0	-0.059

서 지표유출이 종료될 때까지의 중간유출량으로 간주하였다. 따라서 지표유출이 종료된 후 발생한 중간유출량은 유출곡선지수 계산에서 고려되지 않았다.

지표유출만 고려하였을 때에 비해서 약 20 정도 CN 값이 증가하였다. 강우량에 따른 유출곡선지수를 회귀식의 형태로 나타내면 Table 4와 같다. 중간유출 성분 포함여부에 대한 논의가 더 이루어져야 하겠지만 이상의 결과는 설계홍수량의 안정성이라는 측면을 고려해 볼 때 유출곡선지수의 상한계로 활용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구는 준분포형 유역수문모형인 SWAT이 이수 목적의 장기유출모의 뿐만 아니라 치수목적의 설계인자를 도출할 수 있음을 입증한 것으로서 유출모델링 결과와 Hawkins *et al.*(1993)의 접근 유출곡선지수산정법을 접목하여 유역의 유출특성을 반영한 유출곡선지수 산정 방법을 새롭게 제시하였다. SWAT에서 국내 토양 DB를 입력함으로써 국내 유역 특성을 반영할 수 있으며 일 유량만 있으면 접근이 가능하며 대유역 자료를 가지고 소유역의 유출곡선지수를 산정할 수 있는 장점이 있다.

본 제안 방법을 충주댐 상류유역에 적용한 결과, 전체유역 및 임의 소유역의 유출곡선지수가 강수량 증가에 따라 지수함수형으로 감소하여 일정 값에 접근하는 특성을 나타내었다. 강수량에 따른 유출곡선지수 회귀식은 홍수량 산정시 유효우량 산정에 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 3단계 연구비(과제번호 2-2-3) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 과학기술부 (2007). 지표수 수문성분 해석기술 개발, 한국건설기술연구원.
- 김경탁 (1998). GIS 적용에 따른 유출응답에 관한연구, 인하대학교 대학원 박사학위 논문.
- 김남원, 이병주, 이정은 (2007). “공간모의유량을 이용한 갈수량 거동 특성에 관한 연구.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제4B호, pp. 431-440.
- 김남원, 이정우, 이병주, 이정은 (2007). “비선형 저류방정식을 이용한 일단위 하도추적법.” **대한토목학회**

- 논문집, 대한토목학회, 제27호, 제4B호, pp. 534-542.
- 김현식, 오윤근, 윤연중, 김한준 (2004). "GIS 기법을 활용한 유출곡선지수(CN) 산정." **한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1251-1256.
- 김홍태, 신현석 (2003). "신경망기법으로 분류한 토지피복도의 CN값 산정 적용성 검토." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 633-645.
- 박정훈, 유철상, 김중훈 (2005). "SCS 방법 적용을 위한 선행토양함수조건의 재설정: 1. SCS 방법 검토 및 적용상 문제점." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제11호, pp. 955-962.
- 배덕효, 이병주, 정일원 (2003). "위성영상 피복분류에 대한 CN값 산정(I) -CN값 산정-." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 985-997.
- 신계중, 김연준 (2000). "직접유출량 산정을 위한 GIS 기법의 적용." **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제18권, 제2호, pp. 199-209.
- 육승우, 조용재, 김재호, 김상용 (2003). "CN값 산정시 GIS 활용에 관한 연구." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 963-966.
- 오경두, 전병호, 한형근, 정성원, 조영호, 박수연 (2005). "산지 소유역 유출곡선지수." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제8호, pp. 605-616.
- 유철상, 박정훈, 김중훈 (2005). "SCS 방법 적용을 위한 선행토양함수조건의 재설정: 2. 선행토양함수조건의 재설정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제11호, pp. 963-972.
- 윤태훈 (1991). "유효우량산정을 위한 곡선번호방법의 적용성." **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제24권, 제2호, pp. 97-108.
- 이병주, 배덕효, 정창삼 (2003). "위성영상 피복분류에 대한 CN값 산정(II)-적용 및 검토-." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 999-1012.
- 임경재 (2007). SWAT slope computation module, <http://www.envsys.co.kr/~swat/>
- 정인균, 장은미 (2004). "공간해상도에 따른 유역평균 SCS-CN값 변화에 관한 연구." **한국GIS학회 GIS/RS 공동 춘계학술대회 논문집**, 한국GIS학회, pp. 215-220.
- 조흥제, 김정식 (1997). "TIN을 이용한 SCS법에 의한 유효강우량 산정에 관한 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제4호, pp. 357-366.
- 조흥제, 김광섭, 이충희 (2001). "LANDSAT 영상을 이용한 CN값 산정에 관한 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 735-743.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Arnold, J.G. and Fohrer, N (2005). "SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling." *Hydrological Processes*, Vol. 19, No. 3, pp. 563-572.
- Carsel, R., Imhoff, J., Hummel, P., Cheplick, J., and Donigan, A. (1997). *PRZM 3.1 Users Manual*, National Exposure Research Lab, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
- Choi, J.Y., Engel, B.A. and Chung, H.W. (2002). "Daily streamflow modelling and assessment based on the curve-number technique." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 3131-3150.
- DiLuzio, M., Srinivasan, R., and Arnold, J. (2001). *ArcView Interface for SWAT2000: User's Guide*, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Hawkins, R.H. (1993). "Asymptotic determination of runoff curve numbers from data." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 334-345.
- HEC-1 flood hydrograph package, users manual. (1985). U.S. Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Sacramento, Calif.
- Kim, N.W., and Lee, J. (2008). "Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation." *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 25, pp. 4936-4948.
- Knisel, W.G. (1980). *CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*, USDA Conservation Research Report, Vol. 26, p. 643.
- Krysanova, V., Wechsung, F. and Arnold, J.G. (2000). *SWIM User Manual*, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.
- Leonard, R.A., Knisel, W.G., and Still, D.A. (1987). "GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems." *Trans. ASAE*, Vol. 30, No. 5, pp. 1403-1428.
- Mishra, S.K., Pandey, R.P., and Jain, M.K. (2008).

- "A Rain Duration and Modified AMC-dependent SCS-CN Procedure for Long Duration Rainfall-runoff Events." *Water resources management*, Vol. 22, No. 7, pp. 861-876.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS) (1984). *Computer program for project formulation-hydrology*, Technical Release No. 20, Washington, D.C.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS) (1986). *Urban hydrology for small watersheds*, Technical Release 55, Washington, D.C.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. (2002). *Soil and water Assessment Tool, Theoretical Documentation, Version 2000*, Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, USDA Temple Texas. Published by Texas Water Resources Institute, College Station, TX. TWRI Report TR-191.
- Schroeder, P.R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjostrom, J.W., and Peyton, R.L. (1994). *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3*, EPA/600/R-94/168b, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1972). *SCS-National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*, p. 548.
- Williams, J.R. (1990). "The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: A Case History." *Phil. Trans. Royal Soc. London (Part B: Biol. Sci.)* 329(1255), pp. 421-428.
- Young R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D, and Anderson, W.P. (1989). "AGNPS: a nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds." *J. Soil and Water Cons.*, Vol. 44, No. 2, pp. 168-173.

(논문번호:08-109/접수:2008.11.11/심사완료:2008.11.25)