

< 2009 SWAT-KOREA 컨퍼런스 특별호 논문 >

## SWAT을 이용한 미계측 유역의 유출곡선지수 산정

### Estimation of Runoff Curve Number for Ungaged Watershed using SWAT Model

이진원\*<sup>†</sup> · 김남원\* · 이정우\*\* · 서병하\*\*\*

Lee, Jinwon\* · Kim, Namwon\* · Lee, Jeongwoo\*\* · Seo, Byungha\*\*\*

#### ABSTRACT

This study is to suggest the SWAT model as inputs for the estimation of CN (Curve number) if we do not have hourly rainfall and runoff data in the ungaged watershed. The daily CNs were estimated by using SWAT model for Chungju dam watershed and the CNs by hourly rainfall and runoff data in the same period with daily CN estimation were also estimated. Then the daily and hourly CNs were compared each other. The CNs by SWAT model were larger than the actual CNs. 7.4% larger in AMC-I, 1.2% in AMC-II, and 6.3% in AMC-III respectively. If we consider various uncertainties in the estimation of CN, the error of 6.8% could be acceptable for the application in the field.

**Keywords:** Runoff curve number; SWAT model; ungaged watershed; HEC-HMS model

#### 1. 서 론

유역의 토지 이용도 및 피복도, 토양도를 이용하여 강우량으로부터 직접유출에 기여하는 유효우량을 산정하는 유출곡선지수 (runoff curve number, CN)는 주로 단일사상의 시강우량 자료를 이용하여 산정해 왔다. 이는 미국 농무성의 토양보전국 (SCS)에서 농업용 소규모 시험유역에서의 강우-유출자료를 이용하여 개발된 방법으로 미계측 유역의 유출해석에 많이 이용해 왔다.

설계홍수량 산정을 위해서는 관측치 기반의 유출곡선지수를 이용하는 것이 가장 이상적이나, 국내에서는 미계측 유역이거나 관측치가 있더라도 시간 홍수량 자료가 극히 제한적이기에

거의 National Engineering Handbook, Section 4 (NEH-4) Table에 기초한 유역평균 유출곡선지수를 사용하고 있는 실정이다. 그러나 국내의 기후, 지형 및 토양 특성, 선행강우조건 등이 유출곡선지수법을 개발한 미국과 상이하여 유출특성이 확연히 다름에도 불구하고 동일한 값을 사용하고 있는 문제가 있다. 이를 해소하기 위한 노력으로 국내에서는 강우-유출자료를 이용하여 국내 유역특성이 반영된 유출곡선지수를 산정한 연구 (Yoon, Taehoon 1991; Oh, K.D et al., 2005; Yoo, C.S. et al., 2005)도 수행되었으나, 대부분의 연구는 지리정보시스템이나 위성영상을 이용한 유출곡선지수 산정 (Kim, K.T, 1998; Bae, D.H. et al., 2003)에 집중되어 있다.

본 연구에서는 미계측 유역에서 유역수문모형 SWAT (Arnold et al., 1993)의 수문성분 모델링 결과를 이용하여 유출곡선지수 산정방법을 제시하였다. 그리고 충주댐의 운영자료로 유입량을 계산하고 실측우량으로 간주하여 HEC-HMS 모형으로 최적화해 매개변수를 산정한 후 연 최대치 계열의 사상을 추출하여 CN을 산정하였다. 또한 기상자료와 SWAT 모형을 이용하여 일유출량을 모의한 결과에서 실측치와 같은 사상을 추출하여 유출곡선지수를 산정하였다. 실측치와 모의치를 비교·검

\* 한국건설기술연구원 책임연구원

\*\* 한국건설기술연구원 선임연구원

\*\*\* 인하대학교 토목공학과 교수

† Corresponding author. Tel.: +82-31-910-0262

Fax: +82-31-910-0251

E-mail address: jwlee@kict.re.kr

2009년 7월 24일 투고

2009년 7월 14일 심사완료

2009년 11월 1일 게재확정

토하여, SWAT 모델을 이용한 유출곡선지수 산정방법의 이용성을 검토하였다.

## II. 유출곡선지수 산정 방법

### 1. SCS 유출곡선지수법

현재 NRCS 유출곡선지수 산정법으로 명명되는 SCS-CN 방법은 강우량으로부터 유효우량을 분리하는 경험적인 방법으로 식 (1)의 물수지 방정식에서 식 (2)와 같이 가정하여 유도할 수 있다.

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

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

여기서,  $P$ 는 총강우량(mm),  $Q$ 는 유효우량 또는 직접유출량(mm),  $I_a$  ( $\approx 0.2S$ )는 유출 이전의 초기손실량(mm),  $F$ 는  $I_a$ 를 제외한 침투량(mm),  $S$ 는 최대잠재보유수량(mm), 그리고  $\lambda$ 는 초기손실계수이다. 식 (1)과 식 (2)를 결합하면 식 (3)과 같이 유효우량을 강수량과 초기손실, 최대잠재보유수량의 관계로 유도할 수 있다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (3)$$

식 (3)에서 초기손실량  $I_a$ 를  $0.2S$ 로 가정하면 강우-유출모형에서 주로 이용되는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (4)$$

그리고  $S$ 와 유출곡선지수  $CN$ 은 다음 식 (5)와 같은 관계로 정의된다.

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

유출곡선지수  $CN$ 값은 미계측 유역인 경우는 토양의 종류 및 수문학적 조건, 토지이용 및 피복의 처리상태, 선행토양함수조건 등을 종합적으로 고려하여 결정한다. 그리고 강우-유출자료가 있는 계측 유역인 경우는 식 (4)로부터 유도된 식 (6)을 이용하여  $S$ 를 구하고 이를 식 (5)에 대입하여  $CN$ 을 산정

할 수 있다.

$$S = 5[(P + 2Q) - \sqrt{Q(4Q + 5P)}] \quad (6)$$

### 2. SWAT 모형의 수정 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 지표유출량을 계산하기 위해서 SCS 유출곡선지수법을 이용하고 있으며, 토양 및 토지피복 등에 따라 공간적으로 변할 뿐만 아니라 토양수분량의 변화에 따라 시간적으로도 변하는  $CN$  값을 사용한다. 일별  $CN$  값을 산정하기 위해서 일별  $S$  값을 계산하고 있으며 토양층의 포장용수량, 위조점, 포화수분량 등의 토양 특성을 고려한다.

모의된 일 단위 유출수문곡선에서 첨두부가 관측치에 비해 과소하게 산정되는 경향이 있는데 이는 모형내의 지표유출 성분을 계산하는 모듈의 약점, 즉 금일 발생한 강수의 영향은 전혀 고려하지 않고 전날 종점시 토양수분량에 따라  $CN$  값이 결정되어 지표유출이 과소하게 계산되는데서 기인한다. 이러한 문제는 금일 발생한 강수로 인한 토양수 증가를 고려할 수 있도록 시간적으로 가중 평균된 유출곡선지수 산정법(Kim & Lee, 2008)을 이용하여 모의 유출량의 정확도를 개선하였다.

### 3. 실측자료 기반의 유출곡선지수 산정법

유출곡선지수는 총유출 수문곡선에서 기저유출을 분리한 유출수문곡선을 나타내는 유효우량을 산정하는 지표로 실측유출수문곡선에서 기저유출을 분리하는 방법에 많은 영향을 받는다. 그러나 본 연구에서는 기저유출이 유출곡선지수에 미치는 영향 분석은 연구범위에서 제외하고, 수평직선분리법으로 기저유출을 분리하여 단위도법을 이용하였다. 실측자료와 HEC-HMS의 최적화 과정을 이용하여 실측기반유출곡선지수를 산정하였다.

HEC-HMS 모형은 관측된 강우자료와 유출자료가 있을 경우 유출모의를 위한 매개변수를 자동적으로 추정할 수 있는 최적화 기능을 가지고 있다. HEC-HMS를 통한 최적화된 강우-유출 매개변수를 유도하기 위해 물리적으로 타당한 범위의 강우-유출 매개변수 ( $CN$ , 집중시간, 저류상수, 초기기저우량, 감수상수, threshold 유량 등)를 초기값으로 입력하고, 최적화 과정을 수행하여 매개변수가 물리적으로 타당한 범위에 해당되는지와 도해적 판단을 실시하여 최종 매개변수를 산정하였다. Fig. 1은 HEC-HMS모형으로 실측자료와 함께 최적화 결과를 도시한 것이다.

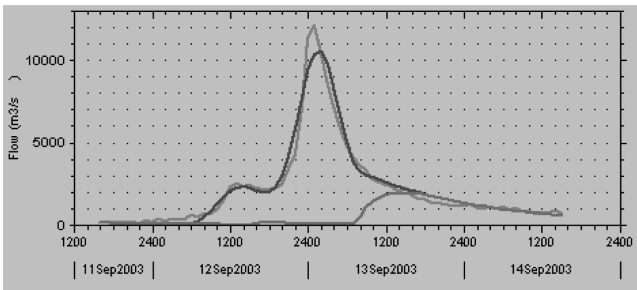


Fig. 1 Optimization Hydrograph Sample by HEC-HMS Model

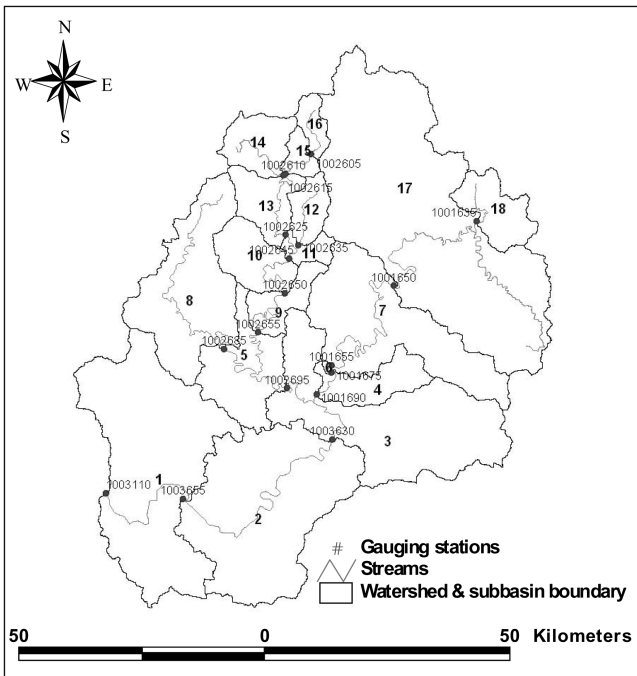


Fig. 2 Research Watershed

### III. 유출곡선지수 산정

#### 1. 대상유역 및 대상기간

SWAT 모형을 이용한 CN산정방법의 이용성을 검토하기 위하여 충주댐 유역을 대상유역으로 선정하였다. 충주댐은 남한강 상류에 위치하고 있는 다목적댐으로 유역면적은 6,648km<sup>2</sup>이다. 충주댐 유역을 Fig. 2와 같이 18개 소유역으로 분할하여 SWAT 모형의 적용을 위한 공간자료를 구축하였다. 또한 대상기간은 댐 완공후 정상적인 강우-유출 패턴을 보이는 1997년부터 2007년까지 자료로 제한하였다.

#### 2. HEC-HMS에 의한 충주댐 유역의 유출곡선지수 산정

충주댐 운영자료에서 결측치 및 정상성을 검토한 후 침투유

량을 기준으로 매년 1~3순위의 사상을 선정하였다. 선정된 자료의 순유출률이 20% 이하이거나 100% 이상인 사상은 자연상태의 정상적 유출특성이 아니라고 판단하여 분석에서 제외하였다.

이렇게 선정된 사상의 댐유입량 자료를 HEC-HMS 모형을 이용하여 유출곡선지수를 산정하였다. 산정결과 유출곡선지수가 30 이하이거나 95 이상인 사상은 최종적인 분석에서 제외하였다.

### 3. SWAT 모형을 이용한 유출모의

#### 가. 모형의 입력자료 구축

충주댐 상류유역에 대한 SWAT 모형을 적용하였다. 입력자료로서 강수량 자료는 영월 외 31개 우량관측소, 기상자료는 충주 외 7개 기상관측소 자료를 이용하였으며, 이때 강수량 및 기상자료는 Thiessen방법에 의하여 소유역별 평균치를 산정하였다. 수치지표고모델 (DEM)은 국가수자원관리종합정보에서 제공하는 30m×30m DEM을 모형의 계산 효율을 고려하여 ArcInfo로 100m×100m DEM으로 가공하여 이용하였다. 여기서 가공의 의미는 리샘플링을 말하는 것으로서 input grid (30m 격자크기)의 지형정보를 적용하여 output grid (100m 격자크기)의 새로운 지형정보값을 추출하는 작업이다. 토지피복도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도, 토양도는 농업과학기술원에서 제공하는 1:25,000 해상도의 정밀토양도를 사용하였다. 입력자료에 관한 내용은 과학기술부 (MOST, 2007) 보고서와 Kim, N.W. et al. (2007) 에 자세하게 수록되어 있다.

#### 나. 모형의 검보정

충주댐 관측 유입량 자료를 이용하여 모형의 검보정을 실시하였다. 연평균 유출고와 일 유출수문곡선에 대하여 모의치와 관측치의 적합이 잘 이루어질 때까지 수동 검보정을 실시하였다. 연평균 유출고를 적합시킴으로써 강우량 대비 유출량과 증발산량을 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), 토양 증발 보상계수 (ESCO), 지하수 감수계수 (GWALPHA), 측방흐름과 관계된 경사장 (SLSOIL) 등 검보정 값은 Table 1과 같다. 특히 경사장 SLSOIL 값은 충주댐 유역과 같이 경사가 급한 유역에 대해 합리적인 값이 도출되도록 Lim(2007)가 개발한 경사 (SLOPE)와 경사장 (SLSUBBSN) 간의 회귀식을 이용하였다.

관측치와의 적합성을 Fig. 3과 같이 도시하여 비교하였다. 일 단위 관측 유출량과 모의 유출량간 통계치인 결정계수 ( $R^2$ )값

Table 1 Examination and correction of parameter

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

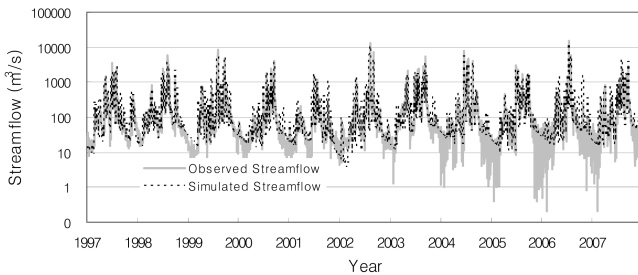


Fig 3 Chungju-dam hydrograph by observed and simulated streamflow

이 0.7을 초과하였으며 연평균 유출량 오차가 3% 미만으로 모의 결과가 양호한 것으로 분석되었다. 검증 후 일유출량을 모의치를 이용하여 HEC-HMS에서 선정된 사상들에 대해 유출곡선지수를 산정하였다.

#### IV. SWAT 모형을 이용한 유출곡선지수의 적용성 검토

충주댐 유입량 자료를 확보할 수 있는 1997년부터 2007년까지 첨두유출량을 기준으로 강우-유출 사상을 매년 3순위까지 추출하였고, HEC-HMS로 최적화된 CN을 산정한 결과는 Table 2와 같다.

충주댐 유역의 시간단위 실측자료를 기반으로 HEC-HMS 모형으로 최적화하여 산정한 결과와 SWAT 모형을 이용해 추정된 수문학적 조건별 CN 평균값은 Table 3과 같다. 여기서 SWAT에 의한 결과는 각 사상에 대하여 지속기간동안 강우총량과 모의 유출용적을 이용하여 Eq. (5) and Eq. (6)으로부터 유도되는 유출곡선지수값이다. 모의 유출용적은 대유역인 점을 감안하여 지표유출량과 중간유출량의 합이다.

HEC-HMS에 의해 산정된 유출곡선지수의 평균은 81.7 이었다. 선행5일강수량에 의한 수문학적 조건인 AMC- I , II , III으로 분류하면 각각 78.2, 85.5 84.2로 산정되었다. 여기서

Table 2 Measurement CN of flood events at chungju dam watershed

Order	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	Mean	SD
1	96.2	이상	78.4	87.9	68.1	77.4	96.2	61.0	84.2	80.4	86.2	82.1	11.8
2	76.9	98.2	87.4	이상	97.5	86.8	92.6	83.8	84.6	93.6	82.0	88.9	5.99
3	92.3	98.0	78.6	74.2	-	-	88.0	60.9	84.6	-	90.7	84.1	12.60

주) 음영이 있는 사상은 유출곡선지수가 95를 넘어 분석에서 제외하였으며, “-”는 비정상적인 유출률을 보여서 분석에서 제외한 사상임.

Table 3 Calculation CN values by HEC-HMS and SWAT model

CN Method	AMC- I	AMC- II	AMC-III	Mean
HEC-HMS	78.2	85.5	84.2	81.7
SWAT	84.0	86.5	89.5	87.3

AMC- I 과 III는 각 10개의 사상이 포함되어 있는데 AMC- II 구간에는 3개의 사상이 위치하고 있다. Table 3에서 AMC- II 의 CN값이 AMC-III보다 큰 값을 가지는 것은 사상수가 작기 때문에 하나의 큰 사상에 영향을 많이 받았기 때문이라고 생각할 수 있으며, 정상적이라면 AMC- I 과 III의 중간값 정도가 적당할 것으로 판단된다. 또한 동일 사상에 대해 SWAT 을 이용하여 산정한 유출곡선지수도 수문학적 조건에 따라 산정하였다. 산정결과 평균 87.3이며, AMC에 따라 분류하면 각각 84.0, 86.5, 89.5로 나타났다.

본 연구에서는 HEC-HMS에 의하여 산정된 유출곡선지수 값을 기준으로 하고 SWAT을 이용하여 모의된 CN값을 비교·검토하였다. Table 3에서와 같이 선행토양함수조건에 따라서 실측과 SWAT 모형에 의한 유출곡선지수 평균에는 다소 차이가 있으며, AMC 조건별 각 방법에 의한 유출곡선지수를 Fig. 4와 같이 도시하였다.

AMC- I 조건의 Fig. 4(a)에서 보면 실측 CN값은 SWAT 모의치보다 작게 나왔는데, 이는 자료 중 3개 사상이 실측치에 의한 CN값보다 SWAT에 의한 CN값이 지나치게 크게 산정되었다. 이 3개 사상을 제외하면 결정계수가 0.66으로 약한 선형 상관관계를 이루는 것으로 나타났다. Fig. 4(b)의 AMC- II 조건에 속하는 실측사상은 3개 밖에 없기 때문에 상관관계를 구하는 것은 무의미하다. 그리고 AMC-III 조건의 Fig. 4(c)에서도 실측 CN값은 SWAT에 의한 CN값보다 작게 나왔는데, SWAT에 의한 CN값이 크게 산정된 2개의 사상을 제외하면 결정계수가 0.61로 약한 선형 상관관계를 이룬다. 전체적으로 보아 실측치를 이용하여 산정한 유출곡선지수보다 SWAT 모의에 의한 일유출곡선지수가 약간 큰 경향이 있으며, 실측자료에 의하여 산정한 것과 같은 CN값을 얻기 위해서는 모의치에 환산 계수 0.94를 곱해주면 실측치에 근사한 값을 얻을 수 있다.

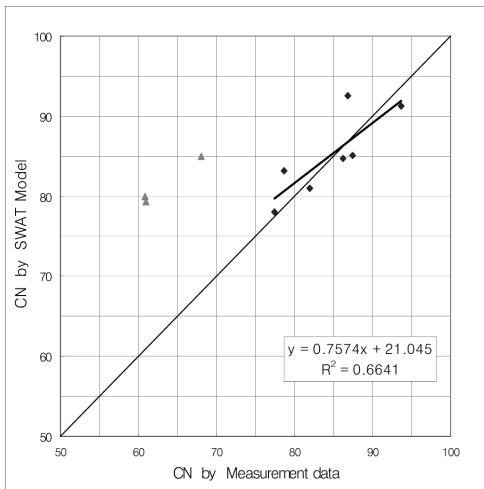


Fig. 4(a) CN(AMC-I Condition) by measurement and SWAT model simulation

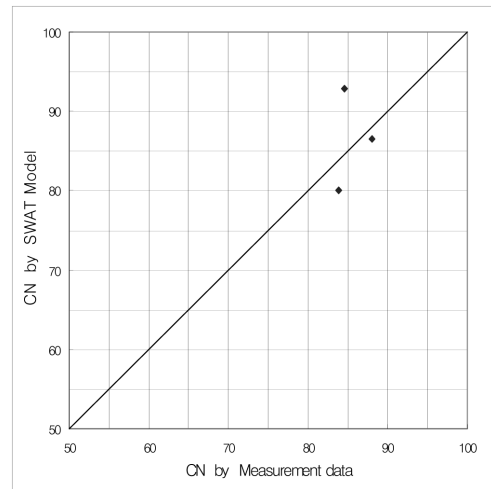


Fig. 4(b) CN(AMC-II Condition) by measurement and SWAT model simulation

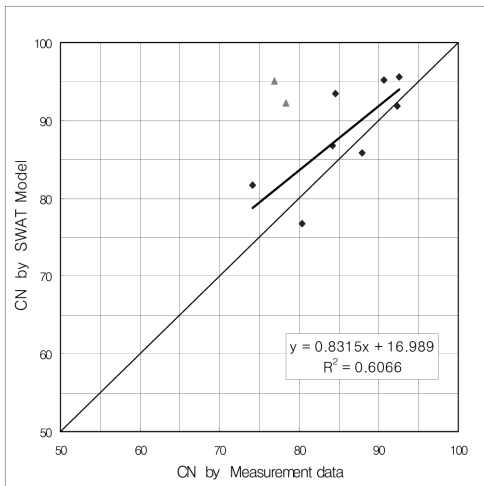


Fig. 4(c) CN(AMC-III Condition) by measurement and SWAT model simulation

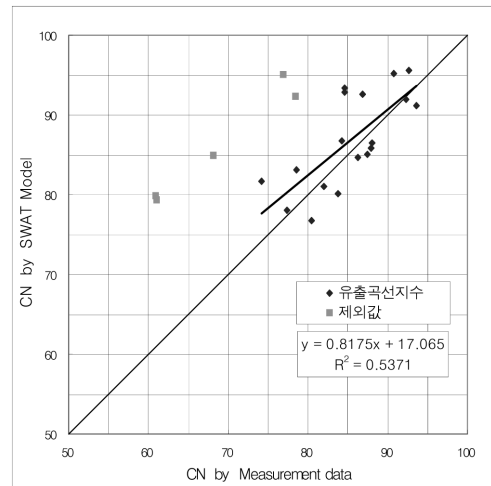


Fig. 4(d) CN by measurement and SWAT model simulation

결과적으로 충주댐 유역에서는 SWAT 모의결과를 이용해 산정한 CN 값들은 대체적으로 실측자료에 기반한 유출곡선지수와 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 값을 갖는다고 할 수 있다. 이러한 결과는 충주댐 지점만을 대상으로 한정된 기간의 사상을 대상으로 도출한 결과이지만 오차분석 결과 신뢰한계 95%에서 오차가 적어 실무의 적용성이 있다고 판단된다. 그러나 보다 더 많은 적용을 통해 실무의 적용성에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

전반적으로 일강우량과 SWAT 모형의 일유출량 모의치를 이용한 CN값은 실측기반 유출곡선지수보다 작게 산정되지만 큰 강우-유출 사상을 선정하여 CN을 산정한다면 실측기반 CN값과 거의 비슷하게 도출할 수 있다. 따라서 시간자료는 없지만

일강우량이 있을 경우나 대유역 자료는 있지만 그 내부의 소유역에 대한 유출곡선지수를 산정하고자 할 때 장기유출모형인 SWAT을 이용하여 유출곡선지수를 산정할 수 있다고 판단된다. 분포형 모형인 SWAT을 이용하여 산정한 값에는 지형특성, 토양특성, 토지이용 및 토지피복 등의 공간적 변동특성을 고려할 수 있다는 장점이 있다.

## V. 결 론

본 연구는 준분포형 유역수문모형인 SWAT이 이수목적의 장기유출모의 뿐만 아니라 치수목적의 설계인자를 도출할 수 있음을 입증한 것으로서 유역의 유출특성을 반영한 유출곡선지수

산정 방법을 제시하였다. 이는 일강우량과 기상자료 및 국내 토양 DB 등을 이용하여 미계측 유역의 유출곡선지수를 추정할 수 있는 것으로 나타났으며, 대유역 자료를 가지고 내부 소유역의 유출곡선지수를 산정할 수 있다.

충주댐 유역의 경우 SWAT 모형에 의해 모의된 자료를 이용해 산정한 CN값에 환산계수 0.94를 곱할 경우 실측값에 의한 CN값과 비슷하게 도출할 수 있으며, 오차 분석결과 95% 신뢰수준에서 오차가 적어 실무에 적용할 수 있는 수준으로 판단된다. 본 연구결과는 충주댐 유역에서의 적용 결과를 바탕으로 도출된 것이므로 추후 다른 유역에도 적용한다면 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 생각된다.

우리나라에서 수문계측에 많은 투자를 해 왔지만 아직도 설계시 직접 이용할 수 있는 시간자료의 획득은 쉽지 않은 일이고, 또한 측정된 자료도 신뢰성이 의문시 되는 경우, 일강우량 자료를 이용하여 유출곡선지수를 산정해도 설계 목적을 달성할 수 있을 것으로 기대한다.

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

## REFERENCES

1. Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. 1993, "A comprehensive surface-groundwater flow model.", *Journal of Hydrology* 142: 47-69.
2. Bae, D.H., B.J. Lee, and I.W. Jeong, 2003, Runoff Curve Number Estimation for Cover and Treatment Classification of Satellite Image(I)-CN Estimation-, *Journal of KWR4*, 36(6): 985-997 (in Korean).
3. Choi, J.Y., Engel, B.A. and Chung, H. W., 2002, "Daily streamflow modelling and assessment based on the curve-number technique." *Hydrological Processes* 16: 3131-3150.
4. Kim, K.T., 1998, Analysis of Runoff Response Using GIS, Ph.D. diss., Inha University (in Korean).
5. Kim, N.W., B.J. Lee and J. E. Lee, 2007, "Analysis of the characteristics of low-flow behavior based on spatial simulated flows.", *KSCE Journal of Civil Engineering* 27(4B): 431-440 (in Korean).
6. Kim, N.W., and Lee, J. 2008, "Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation." *Hydrological Processes*, 22(25): 4936-4948.
7. Lee, J.W., 2009, Estimation of Runoff Curve Number for Ungaged Watersheds, Ph.D. diss., Inha University (in Korean)
8. Lim, K.J., 2007, SWAT slope computation module, <http://www.envsys.co.kr/~swat/>
9. Ministry of Science and Technology, 2007, Analysis and modeling for surface water hydrological components, *Korea Institute of Construction Technology* (in Korean).
10. 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*, 22(7): 861-876.
11. Oh, K. D., Jun, B. H., Han, H. G., Jung, S.W., Cho, Y.H. and Park, S.Y., 2005, Curve Number for a Forested Mountainous Catchment, *Journal of KWR4* 38(8): 605-616 (in Korean).
12. Park, C.H. C.S. Yoo, and J.H. Kim, 2005, Revised AMC for Application of SCS Method: 1. Review of SCS Method and Problems in Its Application. *Journal of KWR4*, 38(1): 955-962 (in Korean).
13. Yoo, C.S. C.H. Park and J. H. Kim, 2005, Revised AMC for Application of SCS Method: 2. Revised AMC. *Journal of KWR4*, 38(11): 963-972 (in Korean).
14. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1972, *SCS-National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*, 548 pp.5. Yoon, T. H., 1991, Validity of Runoff Curve Number Method for Estimating of Effective Rainfall. *Science of Water*, 24(2): 97-108 (in Korean).