

유효우량 산정을 위한 NRCS-CN 모형의 초기손실량 산정방법 개선

Improving Initial Abstraction Method of NRCS-CN for Estimating Effective Rainfall

박 동 혁* / 무하마드 아즈말** / 안 재 현*** / 김 태 응****

Park, Dong-Hyeok / Ajmal, Muhammad / Ahn, Jae-Hyun / Kim, Tae-Woong

Abstract

In order to improve the runoff estimation accuracy of the Natural Resources Conservation Service (NRCS) curve number (CN) model, this study incorporated rainfall and maximum potential retention as contributors for initial abstraction. The modification was proposed based on 658 rank-order data of rainfall and subsequent runoff from 15 watersheds. The NRCS-CN model (M1), one of its inspired modified model (M2), and the proposed model (M3) were analyzed employing different CN approaches. Using tabulated, calculated and least squares fitted CNs (CN_T , CN_C , CN_{LSF} , respectively), the models' performances were evaluated based on Root Mean Square Error (RMSE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), and Percent Bias (PBIAS). Applications of model M1, M2, and M3, respectively exhibited watershed cumulative mean [RMSE (23.60, 18.12, 16.04), NSE (0.54, 0.73, 0.79), and PBIAS (36.54, 20.25, 12.00)]. Similarly, using CN_C (for M1 and M2 model) and CN_{LSF} (for M3 model), the performance of three models respectively were assessed based on watershed cumulative mean [RMSE (17.17, 15.88, 13.82), NSE (0.76, 0.80, 0.85), and PBIAS (3.06, 4.47, 0.11)]. The proposed model (M3) that linked all of the NRCS-CN variants showed more statistically significant agreement between the observed and estimated data.

Keywords : effective rainfall, initial abstraction, NRCS-CN model, performance evaluation

요 지

본 연구는 NRCS-CN 방법이 산정하는 유출량의 정확성을 향상시키기 위하여 강우량과 최대잠재보유수량을 초기손실량 계산과정의 주요 기어인자로 고려하였으며, 우리나라 15개 유역에서 관측된 658개의 강우량과 유출량 자료를 이용하여 초기손실량의 수정모형을 제안하였다. 유효우량을 산정하는 방법으로는 NRCS-CN 방법(M1), NRCS-CN 방법에서 초기손실량계수를 감소시킨 방법(M2), 관측 강우-유출 관계를 바탕으로 본 연구에서 제안하는 방법(M3)을 적용하였다. 또한 USDA에서 제시하는 CN값(CN_T), 관측자료로부터 계산된 CN값(CN_C) 그리고 최소자승법으로 추정된 CN값(CN_{LSF})을 각각의 방법에 적용하였다. 적용 결과는 RRMSE, NSE 그리고 PBIAS 등을 이용하여 평가되었다. 그 결과 CN_T 를 M1, M2, M3에 적용한 경우 각 유역에서 평균적으로 [RMSE (23.60, 18.12, 16.04), NSE (0.54, 0.73, 0.79), PBIAS (36.54, 20.25, 12.00)]로 나타났다. 이와 비슷하게 CN_C 를 M1과 M2에 적용하고, CN_{LSF} 를 M3에 적용하였을 경우 각 유역에서 평균적으로 [RMSE (17.17, 15.88, 13.82), NSE (0.76, 0.80, 0.85), PBIAS (3.06, 4.47, 0.11)]로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안된 M3 방법을 사용하여 추정된 유효우량이 관측된 직접유출량과 통계학적으로 가장 가까운 값을 제공하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 유효우량, 초기손실량, NRCS-CN 모형, 성능평가

* 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: smilehyuki@hanyang.ac.kr)

PhD Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

** 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: engr_ajmal@uetpeshawar.edu.pk)

PhD Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

*** 서경대학교 공과대학 토목건축공학과 부교수 (e-mail: wrt@skuniv.ac.kr)

Associate Professor, Dept. of Civil and Architecture Engineering, Seokyeong Univ., Seoul 136-704, Korea

**** 교신저자, 한양대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 부교수 (e-mail: twkim72@hanyang.ac.kr, Tel: 82-31-400-5184)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Ansan 426-791, Korea

1. 서 론

미국의 자연자원보호청(Natural Resources Conservation Service)의 유출곡선지수(curve number) 방법은 강우량으로부터 유효우량을 계산하는 단일변수 기반의 수문학적 모형이다(McCormick and Eshleman 2011). 간단히 NRCS-CN 모형이라 불리는 이 방법은 총강우량으로부터 유효우량을 산정하는 과정이 매우 간단하여 작은 유역에 널리 사용되어 왔다(Mishra and Singh 2003; Mishra et al., 2006; Soulis et al., 2009; Stewart et al., 2012). CN은 NRCS-CN 모형의 주요 변수이며, 누적강우량, 토지이용 및 선행함수조건(Antecedent Moisture Condition, AMC)에 따라 달라지며, 선행함수조건은 5일 선행강우량을 바탕으로 결정된다(Mishra et al. 2006; Hawkins et al. 2009; D'Asaro and Grillone 2012; Stewart et al., 2012).

NRCS-CN 모형의 정확성과 한계점, 잘못된 적용 사례 등에 관한 많은 연구가 수행되었으며(McCormick and Eshleman, 2011), 다음과 같은 항목에 대한 개선사항들이 제기되고 있다(Ponce and Hawkins 1996; Chung et al., 2010); (1) CN값의 민감도, (2) 선행함수조건 적절한 구분, (3) 공간적 변동성, (4) 0.2로 고정된 초기 손실 등. 미국에서 개발된 NRCS-CN 모형을 CN값에 대한 검증없이 우리나라 유역에 적용하게 되면 급경사 유역과 대륙 계절풍 기후를 갖는 우리나라의 지형·기후학적 특성으로 인해 정확한 유출량을 산정이 불가능하다. 여름의 강한 강우강도와 낮은 토양 수분 저장능력, 상대적으로 짧은 도달시간과 같은 우리나라 유역의 특징은 갑작스러운 유속 및 첨두유량 증가의 주된 원인이다(Kim et al. 2010). NRCS의 AMC-II를 적용하여 산정한 유출량은 실제 관측값보다 상당히 작으며 CN값의 조정을 위해서는 충분한 기간의 홍수 자료가 필요하다(Kim and Lee 2008; Kim et al., 2010). 그러나 우리나라의 유역 및 유량 자료는 충분하지 않기 때문에 미국과 다른 조건을 갖고 있음에도 불구하고 미국에서 개발된 CN값에 의존할 수밖에 없다. 또한 CN값을 산정하기 위해 사용할 수 있는 자료가 충분하다고 해도 초기손실은 정확한 직접 유출량 추정을 위해 반드시 필요하다.

NRCS-CN 방법은 초기손실량을 최대잠재보유수량의 20%라고 가정하였으나, Woodward et al. (2003)은 5%를 사용할 것을 제안하였다. 이후 많은 연구에서 감소된 초기손실량계수(λ)를 사용하는 것이 더 정확한 유출량을 산정한다는 것이 증명되었지만 유역의 특성을 고려하여 변동가능한 계수를 사용하는 것이 바람직하다. λ 와 CN의

가변적인 특성은 초기손실(I_a)-최대잠재보유수량(S) 관계가 대체되거나 수정될 수 있는 여지가 있다는 것을 보여준다. 따라서 본 연구에서는 (1) 유역 특성과 강우-유출량 자료로부터 초기손실량계수(λ) 산정하고, (2) 기존의 I_a - S 관계 대신 P - I_a - S 의 관계를 반영할 수 있도록 NRCS-CN 모형을 개선하고, (3) 기존의 NRCS-CN과 수정 모형에 대한 비교 평가를 수행하여 제안 모형에 대한 타당성을 평가하였다.

2. NRCS-CN 모형의 개선

2.1 NRCS-CN 모형(M1)

NRCS-CN 모형은 최소한의 입력자료를 사용하여 강수량으로부터 직접유출량을 추정한다(USDA-NRCS 2004b).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad P > I_a, \quad \text{else } Q = 0 \quad (1)$$

$$I_a = \lambda S \quad (2)$$

여기서, Q 는 직접유출에 해당하는 유효우량(mm), P 는 강수량(mm), I_a 는 초기손실량(mm), S 는 최대잠재보유수량(mm), λ 는 초기손실계수이다. NRCS는 소규모의 농업 유역에 적용하기 위해서 $\lambda=0.2$ 를 권장하였고, $\lambda=0.2$ 일 경우 Eq. (1)은 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad P > 0.2S, \quad \text{else } Q = 0 \quad (3)$$

S 는 Eq. (4)와 같이 CN으로 변환될 수 있다(USDA-NRCS 2004b).

$$CN = \frac{25400}{254 + S} \quad 0 \leq CN \leq 100 \quad (4)$$

강우량과 유출량의 측정이 가능한 경우 Eq. (3)를 이용하여 Eq. (5)와 같이 S 를 결정할 수 있다(Hawkins et al., 1985; Ponce and Hawkins 1996; Hawkins et al. 2009).

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

전 세계적으로 널리 사용되고 있는 NRCS-CN 모형은 유역의 매개변수와 기후인자를 결합한 방법이며(Ebrahimiyan et al., 2012), 토지이용도를 이용한 CN값은 미국 National Engineering Handbook (NEH-4)에서 제시된 표를 사용하여 결정할 수 있다(USDA-NRCS 2004a). CN의 정확성은 알 수 없으나 여러 가지 적용 사례를 검토해 본 결과

NEH-4의 CN값을 사용하여 수문설계를 할 경우 과잉 설계되는 경향이 있다(Schneider and McCuen, 2005). 토지 이용현황을 바탕으로 CN에 대한 적절한 값을 선택할 수 있지만, 관측된 강우-유출 모형을 이용하여 CN을 평가하는 것이 좋다(Soulis and Valiantzas, 2012).

NRCS-CN 모형에서 $\lambda=0.2S$ 로 설정되었으나 0.2가 아닌 다른 값을 사용하는 것도 가능하다(Tedela et al., 2012). 여러 연구자들은 지역이나 식생에 따라 $\lambda=0.2$ 의 근거가 명확하지 않다고 주장하였으며, 0.01과 0.05 사이의 값이 더 현실적이라고 주장하였다(Woodward et al., 2003; Mishra et al., 2004; Baltas et al., 2007; Beck et al., 2009; Hawkins et al., 2009; Shi et al., 2009; D'Asaro and Grillone, 2012; Yuan et al., 2014). 또한 Mishra and Singh(1999)와 Mishra et al. (2003)에 의하면 수학적 근거를 바탕으로 λ 는 S 보다 S와 P에 더 밀접한 상관관계를 가진다.

2.2 NRCS-CN의 수정 모형(M2)

Woodward et al. (2003)이 NRCS-CN 모형을 재평가하기 위하여 최소제곱법을 반복적으로 사용한 결과 $I_a=0.05S$ 의 관계를 적용했을 경우 307개 대상구역 중 252개 구역에서 결정계수(R^2)가 가장 높게 나타나고 표준오차가 가장 적은 것으로 나타났다. 여기서 $\lambda=0.05$ 를 Eq. (2)에 적용하면 수정된 NRCS-CN 방법(Eq. (6))이 된다.

$$Q = \frac{(P - 0.05S)^2}{P + 0.95S} \quad P > 0.05S, \quad \text{else } Q = 0 \quad (6)$$

2.3 초기손실량 계산 과정을 수정한 NRCS-CN 수정 모형(M3)

본 연구에서는 Woodward et al. (2003)이 적용한 최소제곱법을 바탕으로 NRCS-CN 공식을 수정하였다. 이 방법의 목적은 측정된 값과 계산된 값 사이의 차이에 대한 제곱의 합을 최소화함으로써 λ 와 S를 결정하는 것이다. 즉,

$$\sum_{events} (Q_0 - Q_C)^2 = \sum_{events} \left\{ Q_0 - \left\{ \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S} \right\} \right\}^2 \Rightarrow \text{Minimum} \quad (7)$$

이 과정에서 NRCS-CN 모형의 매개변수들을 재설정하여 수정된 I_a 에 대한 P와 S와의 관계를 Eq. (8)과 같이 표현하였다.

$$I_a = \lambda \left(\frac{P^2}{S} \right) \quad (8)$$

Eq. (1)에 Eq. (8)을 대입하면 초기손실량 계산 과정을 수정한 NRCS-CN 수정 모형(Eq. (9))이 된다.

$$Q = \frac{\left[P - \lambda \left(\frac{P^2}{S} \right) \right]^2}{\left[P - \lambda \left(\frac{P^2}{S} \right) + S \right]} \quad P > \lambda \left(\frac{P^2}{S} \right) \quad \text{and } S \neq 0, \quad (9)$$

else $Q = 0$

Eq. (9)를 최소제곱법에 적용하면 Eq. (10)과 같다.

$$\sum_{events} (Q_0 - Q_C)^2 = \sum_{events} \left\{ Q_0 - \frac{\left[P - \lambda \left(\frac{P^2}{S} \right) \right]^2}{P - \lambda \left(\frac{P^2}{S} \right) + S} \right\}^2 \Rightarrow \text{Minimum} \quad (10)$$

본 연구에서는 15개 구역의 658개 강우-유출 자료를 Eq. (10)에 적용하였다. 그 결과 Eq. (9)에 가장 적합한 λ 값($=0.009 \approx 0.01$, $R^2=0.997$ (결정계수), $SE=0.134$ (표준오차))을 도출하였다. 또한, 같은 기법을 각각의 구역에 적용한 결과, 15개 구역 중 11개 구역에서 $\lambda=0$ 이 가장 적합한 값으로 나타났다(평균: 0.013, 중앙값: 0). Table 1은 본 연구에서 사용한 모형을 정리한 것이다.

CN(또는 S)의 최적화 방법은 각각의 구역에 모형 선택과 매개변수를 추정하여 λ 값을 산정하였고, $\lambda=0$ 인 경우 Eqs. (1) and (9)는 Eq. (11)과 같은 형태로 단순화된다.

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (11)$$

3. 연구 지역

NRCS-CN 모형은 작은 유역을 대상으로 개발되었기 때문에 유역면적이 250 km^2 보다 큰 지역에 적용할 경우 주의해야 한다(Ponce 1989; Ponce and Hawkins 1996). 이러한 제약조건을 고려하여 본 연구에서는 250 km^2 이하의 면적을 갖는 유역을 대상으로 선정하였다(Fig. 1). Table 2에서 볼 수 있듯이 각 유역의 면적은 $48.86 \sim 249.63 \text{ km}^2$ 이며 유역 경사는 $7.50 \sim 48.13\%$ 이다. 대상 유역의 토지이용 현황은 총 면적의 60.36%가 산림지역(낙엽수림 20.18%, 침엽수림 26.74%, 혼효림 12.84%)이며, 25.36%가 농업지역(논 14.57%, 밭 9.78%, 과수원 0.53%,

Table 1. Description of Models and Parameters Used in This Study

| Model ID | Parameters | | Model Expression | Remarks |
|----------|------------|---------------------------------|------------------|---|
| | λ | CN | | |
| M1 | 0.2 | NEH-4 Tables, Storm-events data | Eq. (3) | Original NRCS-CN Model |
| M2 | 0.05 | -do- | Eq. (6) | Modified NRCS-CN Model [Woodward et al. (2003)] |
| M3 | Variable | NEH-4 Tables, Constrained LSF | Eq. (9) | Proposed Model |

-do- means similar as above, LSF stands for Least Square Fitting

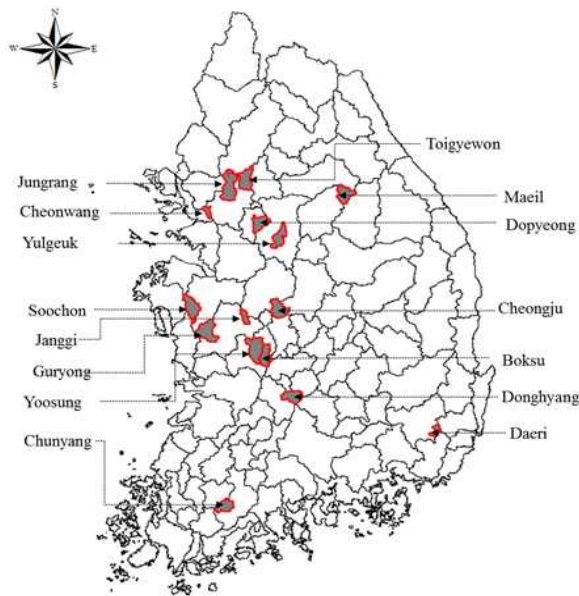


Fig 1. Location of Selected Watersheds in the Study

농가 0.03%, 기타 작물 0.45%), 9.44%가 도시지역(주거지역 6.02%, 공업지역 0.68%, 상업지역 0.45%, 레저시설 0.07%, 교통시설 1.12%, 공공장소 1.10%), 초원은 1.79%를 차지하며, 그 외 나지 1.50%, 수역 1.19%, 습지 0.36%가 있다. 유역의 토양은 주로 롬(loam)과 실트질 롬(silt loam)으로 구성되어 있다. 대상 지역에 대한 추가적인 정보는 Table 2에 정리하였다.

4. 모형 선정 및 매개변수 추정

본 연구에서는 유량조사사업단(HSC)에 의해 수집된 유량자료를 사용하였으며, 수평직선분리법을 이용하여 수문곡선으로부터 직접유량을 분리하였다. 연구에 사용된 강우자료는 단일 사상에 대한 총 강우량을 사용하였으며, Hawkins et al. (2009)이 제안한 바와 같이 총강우량이 25.4 mm 이하인 강우사상은 제외하고, 5일 선행강수량

(P5)을 고려하여 AMC 조건을 결정하였다.

본 연구에서 적용한 모형의 매개변수를 추정하는 방법은 다음과 같다.

- 1) M1 모형과 M2 모형의 경우, 두 가지 CN값을 적용하였다. 즉, 유역의 토지피복을 고려하여 NEH-4에서 제시한 CN값(CN_T) 그리고 관측된 강우-유출 모형으로부터 Eqs. (4) and (5)를 이용하여 산정한 CN값(CN_C) (Table 3).
- 2) M3 모형(본 연구에서 제안된 모형)의 경우, 강우사상의 발생순서에 관계없이 관측된 강우-유출 자료를 내림차순으로 정리하고, Eq. (9)의 매개변수 λ 와 S를 결정하기 위하여 마퀴트 알고리즘(Marquardt 1963)을 적용하였다. λ 와 S(또는 CN)의 초기값은 0.01과 60(또는 50)으로 설정하고 (0, 1)과 (0, ∞) (또는 0 to 100) 범위를 제약조건으로 설정하였다. 15개 유역에 대하여 적용한 결과, 11개 유역에서 λ 는 0.0으로 결정되었다(Table 3).

5. 모형의 평가와 비교

모형의 성능을 평가하기 위해 관측된 유출량과 계산된 유출량을 세 가지 척도(Root Mean Square Error (RMSE), Nash Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent Bias (PBIAS))를 이용하여 평가하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_0 - Q_c)_i^2} \quad (12)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_0 - Q_c)_i^2}{\sum_{i=1}^N (Q_0 - \bar{Q}_0)_i^2} \quad (13)$$

Table 2. Description of Watersheds and Data

| ID | Name | Record (Years) | N | Area (km ²) | P _m (mm) | \bar{Q}_0 (mm) | SD (mm) |
|-----|-----------|-----------------|----|-------------------------|---------------------|------------------|---------|
| W1 | Boksu | 2009, 2011 | 25 | 161.9 | 76 | 32.86 | 41.19 |
| W2 | Cheongju | 2006-2011 | 70 | 197.32 | 52.19 | 17.9 | 20.29 |
| W3 | Cheonwang | 2009-2010 | 28 | 48.86 | 69.32 | 37.33 | 45.25 |
| W4 | Chunyang | 2006-2009 | 40 | 140.2 | 73.73 | 32.48 | 34.14 |
| W5 | Daeri | 2006-2011 | 39 | 50.25 | 59.15 | 29.96 | 22.17 |
| W6 | Donghyang | 2006-2011 | 68 | 165.84 | 63.88 | 21.11 | 30.71 |
| W7 | Dopyeong | 2009-2010, 2012 | 34 | 158.72 | 79.41 | 47.61 | 56.28 |
| W8 | Guryong | 2006-2011 | 33 | 245.5 | 81.33 | 39.64 | 37.41 |
| W9 | Janggi | 2007-2011 | 42 | 65.74 | 68.49 | 30.75 | 30.76 |
| W10 | Jungrang | 2005, 2007-2011 | 42 | 208.41 | 78.72 | 38.75 | 38.44 |
| W11 | Maeil | 2005, 2007-2011 | 59 | 174.86 | 69.31 | 33.29 | 38.75 |
| W12 | Soochon | 2007-2011 | 31 | 213.44 | 85.37 | 47.21 | 39.64 |
| W13 | Toigyewon | 2005-2011 | 44 | 201.31 | 82.72 | 39.6 | 38.65 |
| W14 | Yoosung | 2005-2011 | 65 | 249.63 | 84.37 | 44.74 | 56.81 |
| W15 | Yulgeuk | 2009-2011 | 38 | 179.95 | 81.05 | 39.44 | 42.71 |

N=No. of events, P_m=Events mean rainfall, \bar{Q}_0 =Event mean observed runoff, SD=Standard deviation of observed runoff

Table 3. Estimated Model's Parameters

| ID | NEH-4 Tables | Storm-Events (Median) | | Least Square Fitting (LSF) Technique (for Model M3) | | | | | | |
|-----|--------------|-----------------------|-------------------------|---|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------------------|
| | | CN _T | CN _C (λ=0.2) | CN _C (λ=0.05) | CN _{LSF} | SE (CN _{LSF}) | LB (CN _{LSF}) | UB (CN _{LSF}) | λ _{LSF} | SE (λ _{LSF}) |
| W1 | 60 | 84 | 79 | 65.74 | 1.98 | 62.98 | 68.49 | 0 | 0.027 | 0.969 |
| W2 | 69 | 85 | 79 | 75.59 | 1.3 | 72.99 | 78.2 | 0.09 | 0.008 | 0.957 |
| W3 | 78 | 87 | 81 | 76.94 | 2.38 | 72.04 | 81.84 | 0 | 0.016 | 0.983 |
| W4 | 60 | 83 | 79 | 71.73 | 2.32 | 67.03 | 76.43 | 0 | 0.025 | 0.973 |
| W5 | 75 | 88 | 84 | 84.51 | 0.66 | 83.17 | 85.84 | 0.05 | 0.004 | 0.99 |
| W6 | 64 | 75 | 65 | 62.22 | 0.86 | 60.51 | 63.51 | 0 | 0.01 | 0.996 |
| W7 | 64 | 83 | 76 | 81.86 | 2.24 | 77.31 | 86.41 | 0 | 0.01 | 0.984 |
| W8 | 65 | 81 | 75 | 74.49 | 1.88 | 70.65 | 78.32 | 0.03 | 0.009 | 0.963 |
| W9 | 70 | 86 | 82 | 73.05 | 1.94 | 69.12 | 76.98 | 0 | 0.02 | 0.965 |
| W10 | 67 | 83 | 77 | 72.53 | 2.11 | 68.27 | 76.78 | 0 | 0.017 | 0.964 |
| W11 | 53 | 83 | 74 | 76.23 | 1.62 | 72.98 | 79.47 | 0 | 0.013 | 0.981 |
| W12 | 73 | 85 | 81 | 76.7 | 2.53 | 71.54 | 81.86 | 0 | 0.019 | 0.951 |
| W13 | 64 | 82 | 76 | 70.15 | 2.13 | 65.49 | 74.81 | 0 | 0.02 | 0.958 |
| W14 | 71 | 82 | 73 | 79.37 | 1.25 | 76.87 | 81.86 | 0.03 | 0.003 | 0.981 |
| W15 | 71 | 82 | 77 | 67.92 | 2.07 | 63.78 | 72.06 | 0 | 0.019 | 0.975 |

CN_T, CN_C, SE, LB, and UB stand for tabulated CN, calculated CN, standard error, lower bound, and upper bound, respectively

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_c)_i}{\sum_{i=1}^N (Q_o)} \right] \times 100 \quad (14)$$

여기서, Q_o는 관측된 유출고(mm), Q_c는 계산된 유출우량 (mm), \bar{Q}_0 는 관측된 유출고의 평균값, N은 강우-유출 사상의 갯수이다.

RMSE, NSE 및 PBIAS를 이용하여 모형의 성능평가를 실시하였으며, “very good”, “good”, “satisfactory”, 그리고 “unsatisfactory”로 분류하였다. 분류기준은 Table 4에 제시하였다. RMSE와 PBIAS의 최적값은 0이며, NSE의 최적값은 1이다. RMSE의 값이 0에 가까울수록 그 모형은 정확하다고 할 수 있으며, NSE의 경우는 1에 가까워질수록 모형이 정확하다고 할 수 있다. Moriasi et al. (2007)과 Van Liew et al. (2007)에 따르면, PBIAS의 값이 양에 가까울수록 과소산정되는 경향을 나타내고, 음에 값으로 갈수록 과대산정하는 경향을 나타낸다.

세 가지 성능지표를 바탕으로 세 가지 모형에 대해서

비교평가를 수행하였으며, 그 결과를 Figs. 2 and 3에 나타내었다. Fig. 2는 유역특성으로부터 구한 CN (CN_T)을 적용한 결과이며, Fig. 3은 계산된 CN (CN_C)을 적용한 결과이다. M3 모형에 대한 RMSE는 M1과 M2 보다 상대적으로 작게 나타났으며, 이는 유출량을 추정하는데 더 적합하다고 할 수 있다. Fig. 2(b)를 살펴보면 모든 유역에서 M3는 M2 보다 높은 NSE 값을 나타내었고, M1은 모든 유역에서 가장 작은 값을 나타내었다.

NSE 기준에 따라 모형의 성능을 판단하였을 때, M3 모형은 15개 유역 중 11개 유역에서 “very good”, 2개 유역에서 “good”, 나머지 2개 유역에서 “satisfactory”로 나타났고,

Table 4. Evaluation criteria using NSE, RMSE and PBIAS

| Performance rating | NSE | | RMSE (mm) | PBIAS (%) |
|--------------------|------------------------|------------------------|--|------------------------------|
| Very good | $0.75 < NSE \leq 1.00$ | $NSE \geq 0.90$ | $SD \geq 3.2 \times RMSE$ | $-10 \leq PBIAS < +10$ |
| Good | $0.65 < NSE \leq 0.75$ | $0.80 \leq NSE < 0.90$ | $SD = 2.2 \times RMSE - 3.2 \times RMSE$ | $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ |
| Satisfactory | $0.50 < NSE \leq 0.65$ | $0.65 \leq NSE < 0.80$ | $SD = 1.2 \times RMSE - 2.2 \times RMSE$ | $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ |
| Unsatisfactory | $NSE \leq 0.50$ | $NSE < 0.65$ | $SD < 1.2 \times RMSE$ | $PBIAS \geq \pm 25$ |

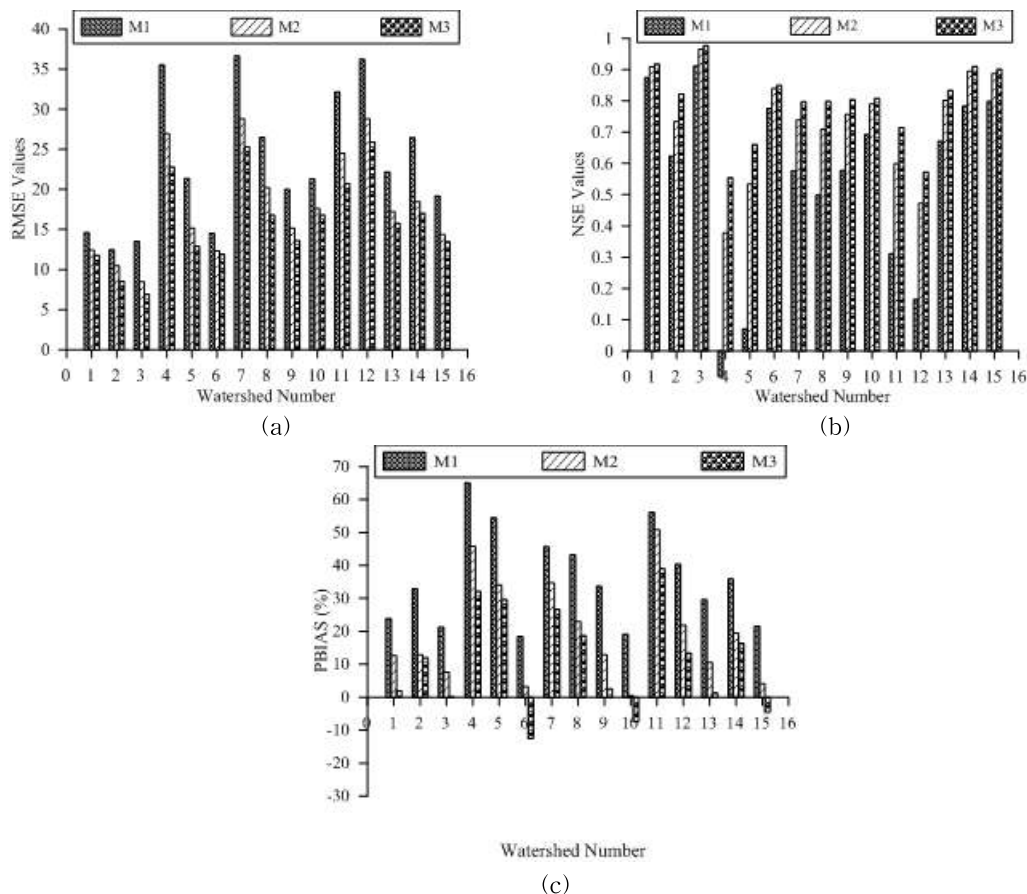


Fig. 2. Model Performance Comparison Based on Three Performance Indicators; (a) RMSE, (b) NSE, and (c) PBIAS using CN Obtained from Watershed Characteristics

M2 모형은 7개 유역에서 “very good”, 4개 유역에서 “good”, 2개 유역에서 “satisfactory”, 2개 유역에서 “unsatisfactory”로 M1 보다 좋은 것으로 나타났다. 마지막으로 M1은 4개 유역에서 “very good”, 2개 유역에서 “good”, 4개 유역에서 “satisfactory”, 5개 유역에서 “unsatisfactory”로 나타났다. RMSE 기준을 이용하여 평가하는 경우, M1은 15개 유역 중 8개 유역에서 “unsatisfactory”, 1개 유역에서 “very good”, 2개 유역에서 “good”, 4개 유역에서 “satisfactory”로 나타났고, M2는 2개 유역에서 “very good”, 4개 유역에서 “good”, 5개 유역에서 “satisfactory”, 4개 유역에서 “unsatisfactory”로 나타났다. 또한, M3는 4개 유역에서 “very good”, 7개 유역에서 “good”, 2개 유역에서 “satisfactory”, 2개 유역에서 “unsatisfactory”로 나타났다. RMSE 방법을 이용하여 모형의 성능을 평가한 결과 M1이 가장 낮은 성능을 가지는 것으로 나타났다.

관측된 유출량과 계산된 유효우량 사이의 차이를 평가하기 위하여 PBIAS을 이용하여 분석하였다. Fig. 2(c)에서 PBIAS의 값을 비교한 결과 M3가 M2 보다 유출예측이 정

확하다고 할 수 있다. NRCS-CN 모형인 M1 모형은 가장 많은 10개 유역에서 “unsatisfactory”를 나타냈으며, 나머지는 “satisfactory”를 나타내었고, “good”과 “very good”은 나타나지 않았다. M2 모형은 4개 유역에서 “very good”, 4개 유역에서 “good”, 3개 유역에서 “satisfactory”, 4개 유역에서 “unsatisfactory”를 나타내었다. 본 연구에서 제안된 모형인 M3 모형은 M1과 M2에 비해서 더 나은 결과를 보였으며, 6개 유역에서 “very good”, 3개 유역에서 “good”, 2개 유역에서 “satisfactory”, 4개 유역에서 “unsatisfactory”를 나타내었다.

추가적으로 모형의 성능을 평가하기 위해 M1과 M2는 CN_c (Table 3)를 적용하였으며, M3는 CN_{LSF} (Table 3)의 값을 사용하였다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 M3 모형은 모든 유역에서 비교적 낮은 RMSE와 높은 NSE를 나타내었다. M2 모형의 성능은 그 다음이었으며, M1 모형은 높은 RMSE와 낮은 NSE를 나타내어 가장 성능이 낮은 것으로 나타났다.

NSE를 이용하여 성능 평가를 한 경우, M3 모형은 15개

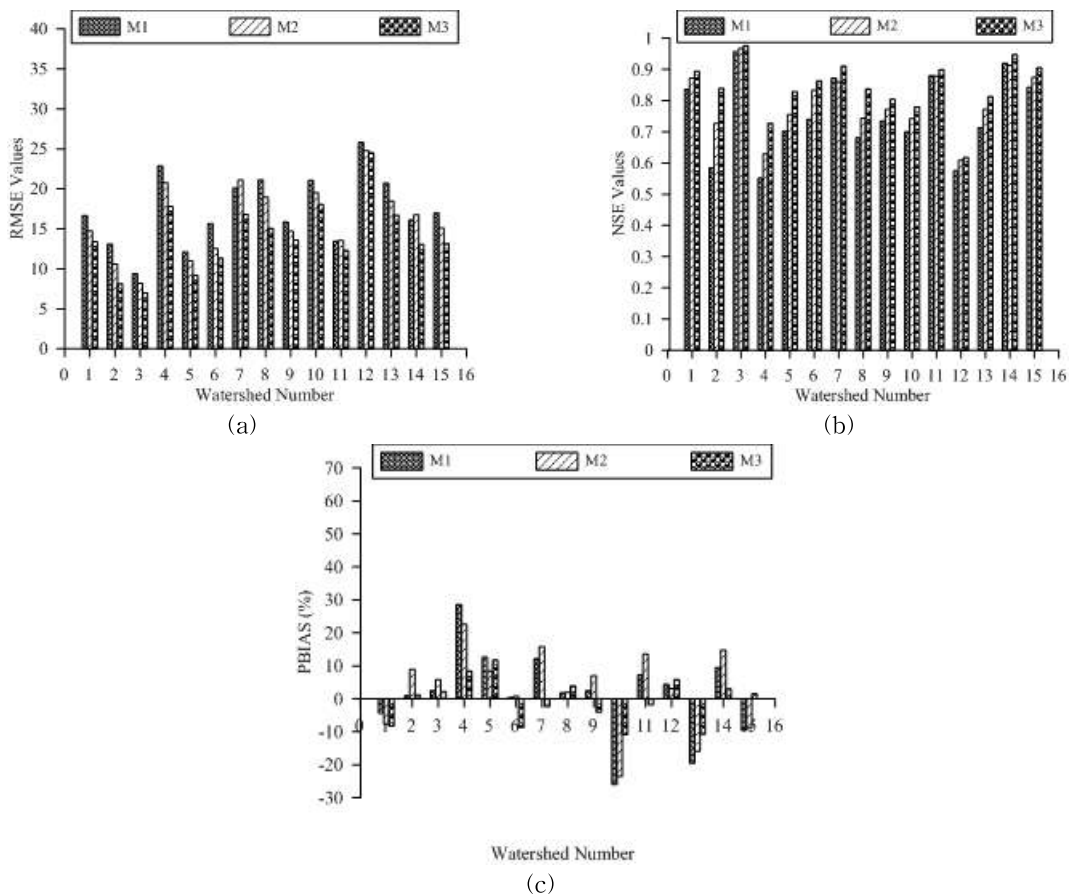


Fig. 3. Model Performance Comparison Based on Three Performance Indicators; (a) RMSE, (b) NSE, and (c) PBIAS using CN Estimated from Observed Rainfall-runoff Data

유역 중 13개 유역에서 “very good”, 1개 유역에서 “good”, 1개 유역에서 “satisfactory”로 나타났다. M2 모형은 8개 유역에서 “very good”, 4개 유역에서 “good”, 3개 유역에서 “satisfactory”로 나타났으며, M1 모형은 5개 유역에서 “very good”, 6개 유역에서 “good”, 2개 유역에서 “satisfactory”를 나타내어 비교적 성능이 좋지 않은 것으로 나타났다. Ritter and Muñoz-Carpena (2013)의 제안에 따라 NSE와 RMSE를 이용하여 성능을 평가하면 M3, M2, M1 순으로 나타났다.

Fig. 3(c)의 PBIAS는 Fig. 2(c)에 나타난 것과는 다른 경향을 보여준다. M1 모형은 15개 유역 중 10개 유역에서 “very good”, 2개 유역에서 “good”, 1개 유역에서 “satisfactory”, 2개 유역에서 “unsatisfactory”를 나타내었으며, M2 모형은 9개 유역에서 “very good”, 2개 유역에서 “good”, 나머지 4개 유역에서 “satisfactory”를 나타내었다. 제안된 모형인 M3의 경우 PBIAS의 수치가 +10~-10 사이로 12개 유역에서 “very good”을 나타내었고, 나머지 3개 유역에서 “good”을 나타내었다. PBIAS의 기준으로

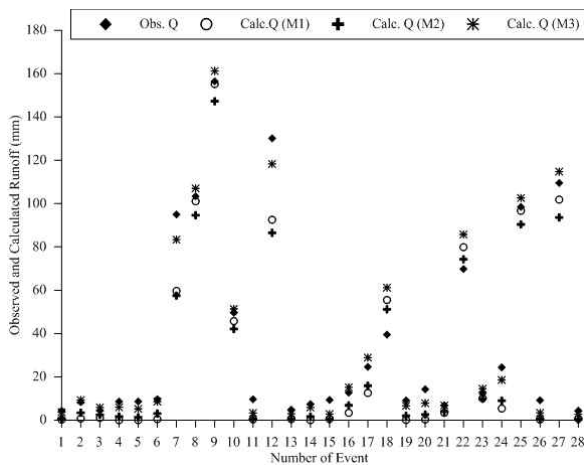


Fig. 4. Comparison of Observed and Calculated Runoff Based on CN_T for Individual Events in Cheonwang Watershed

평가하면 M1 모형이 M2 모형보다 좋은 성능을 가졌지만, 두 모형 모두 M3 모형(제안된 모형)보다는 성능이 좋지 않았다. 이에 비추어 볼 때 CN_T 와 CN_C 에 대한 PBIAS의 변화를 비교해 본 결과, M3 모형은 유출을 추정하기 위한 가장 좋은 방법으로 나타났다.

Table 5에 각 모형에 대한 성능지표의 최대값, 최소값, 평균값을 제시하였다. PBIAS의 경우, 부호의 영향을 고려하여 0에 가장 가까운 값을 최소값(Min)으로 결정하였다. 관측된 강우-유출 자료로부터 얻은 CN값을 이용한 경우 M3, M2, M1 순으로 성능이 좋은 것으로 나타났다. 또한 계산된 CN값을 사용한 경우 M1 모형이 M2 모형 보다 좋은 것으로 나타났으나, 두 모형 모두 M3에 비하여 성능이 좋지 않은 것으로 나타났다.

M1과 M2 모형의 경우 CN_T 를 이용하는 것보다 CN_C 를 이용하는 것이 RMSE는 낮추고 NSE는 높이는 것을 알 수 있다. 또한 Hawkins et al. (2009)은 그 지역의 강우-유출 자료를 이용하여 CN값을 검증할 것을 권장하고 있다. 마찬가지로 M3 모형은 CN_T 대신에 CN_{LSF} 방법을 이용하여 개선된 성능을 보였으며, M3 모형을 천왕 유역에 적용한 결과, 28개 사상 중 17개 사상에서 관측된 유출값과 추정된 유출값이 크게 차이가 나지 않은 것으로 나타났다(Fig. 4). M2와 비교해 보면, M1 모형(NRCS-CN)은 상대적으로 큰 $\lambda(=0.2)$ 을 사용한 결과 비교적 맞지 않는 것으로 나타났다. 따라서 최적화된 λ 와 CN_{LSF} 를 이용하거나 낮은 $\lambda(=0.05)$ 를 사용하는 것이 더 정확한 결과를 제공한다는 사실은 매우 중요하다.

6. 결론

본 연구는 NRCS-CN 모형(M1), 수정된 Woodward et al. (2003) 모형(M2) 및 본 연구에서 제안된 모형(M3)의 성능을 평가하였다. 유역 특성으로부터 얻은 CN_T 와 관측된 강우-유출 자료로부터 얻은 CN_C , 그리고 최소제곱법으로

Table 5. Models Comparison Based on Cumulative Maximum, Mean, and Minimum Performance Indices

| CN Method | Performance Index | M1 | | | M2 | | | M3 | | |
|------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | | Max. | Mean | Min | Max. | Mean | Min | Max. | Mean | Min |
| CN_T | RMSE | 36.64 | 23.6 | 12.45 | 28.79 | 18.12 | 8.47 | 25.91 | 16.04 | 6.91 |
| | NSE | 0.91 | 0.54 | -0.82 | 0.96 | 0.73 | 0.38 | 0.98 | 0.79 | 0.55 |
| | PBIAS | 65.1 | 36.54 | 18.41 | 50.84 | 20.25 | 0.54 | 39.01 | 12.00 | 0.14 |
| CN_C / CN_{LSF} | RMSE | 25.84 | 17.17 | 9.38 | 24.79 | 15.88 | 8.17 | 24.51 | 13.82 | 7.01 |
| | NSE | 0.96 | 0.76 | 0.55 | 0.94 | 0.8 | 0.61 | 0.98 | 0.85 | 0.62 |
| | PBIAS | 28.58 | 3.06 | 0.41 | 22.59 | 4.47 | 0.84 | 11.73 | 0.11 | 1.16 |

인은 CN_{LSF} 를 사용하여 연구를 수행하였다. 각각의 유역의 RMSE와 NSE를 기반으로 성능을 평가한 결과, Woodward et al. (2003)에 의해서 제안된 NRCS-CN 모형($\lambda=0.05$)은 CN_T 와 CN_C 를 적용했을 경우 모두 기존의 NRCS-CN($\lambda=0.2$)과 비교하여 좋은 값을 나타내었다. 그러나 PBIAS의 경우 CN_C 를 적용한 NRCS-CN 모형(평균 PBIAS=3.06)은 Woodward et al. (2003)의 모형(평균 PBIAS= 4.47)보다 낮게 나타났다. 세 가지 성능지표를 바탕으로 평가한 결과 본 연구에서 제안된 모형(M3)은 관측된 값과 가장 근사한 값을 보였으며, 기존의 NRCS-CN 모형이 가장 부정확한 것으로 나타났다. 결론적으로 본 연구에서 제안된 모형에 최적화된 CN_{LSF} 와 λ 를 적용할 경우 가장 많은 유역에서 통계적으로 신뢰성이 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제공하는 결과는 고정된 $\lambda(=0.2)$ 와 CN_T 를 적용한 NRCS-CN 모형의 예측능력이 좋지 않다는 것을 의미하며, 적절한 CN값을 추정하기 위하여 NEH-4에서 제시된 CN값들은 개선되어야 하고 강우-유출 사상을 기반으로 하는 분석이 이루어져야 한다는 것을 의미한다. CN과 λ 는 유출과 큰 상관성을 가지고 있으며, 본 연구의 결과는 유출량 추정의 정확도를 향상시키기 위해서는 두 매개변수의 최적화가 중요하다는 것을 입증하였다. 또한 본 연구에서는 NRCS-CN의 λ 와 S를 추정하는 방법을 개선하였으며, 최적화를 통한 λ 의 중앙값을 이용하여 하나의 매개변수로 단순화하여 신뢰성과 정확도를 향상시켜 유출추정에 적합하게 하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 [설계홍수량 산정방법개발(11-기술혁신-C06)] 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

Baltas, E.A., Dervos, N.A., and Mimikou, M.A. (2007). Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 11, No. 6, pp. 1825-1829.

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 J. Sel. Topics Appl. Earth*

Observ. Vol. 2, No. 4, pp. 250-259.

Chung, W.H., Wang, I.T., and Wang, R.Y. (2010). Theory-based SCS-CN method and its applications. *J. Hydrol. Eng.* Vol. 15, No. 12, pp. 1045-1058.

D'Asaro, F., and Grillone, G. (2012). Empirical investigation of curve number method parameters in the Mediterranean area. *J. Hydrol. Eng.* Vol. 17, No. 10, pp. 1141-1152.

Ebrahimian, M., Nuruddin, A.A.B., Soom, M.A. B.M., Sood, A.M., and Neng, L.J. (2012). Runoff estimation in steep slope watershed with standard and slope-adjusted curve number methods. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 21, No. 5, pp. 1191-1202.

Hawkins, R.H., Hjelmfelt, A.T., and Zevenbergen, A.W. (1985). Runoff probability, storm depth, and curve numbers. *J. Irri. Drain. Eng.* Vol. 111, No. 4, pp. 330-340.

Hawkins, R.H., Ward, T.J., Woodward, D.E., and Van Mullem, J.A. (2009). *Curve number hydrology-state of practice*. The ASCE/EWRI, Curve Number Hydrology Task Committee.

Kim, N.W., and Lee, J. (2008). Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation. *Hydrol. Process.* Vol. 22, No. 25, pp. 4936-4948.

Kim, N.W., Lee, J.W., Lee, J., and Lee, J.E. (2010). SWAT application to estimate design runoff curve number for South Korean conditions. *Hydrol. Process.* Vol. 24, No. 15, pp. 2156-2170.

Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters." *J. Soc. Ind. Appl. Math.* Vol. 11, No. 2, pp. 431-441.

McCormick, B.C., and Eshleman, K.N. (2011). Assessing hydrologic change in surface-mined watersheds using the curve number method. *J. Hydrol. Eng.* Vol. 6, No. 7, pp. 575-584.

Mishra, S.K., and Singh, V.P. (1999). Another look at SCS-CN method. *J. Hydrol. Eng.* Vol. 4, No. 3, pp. 257-264.

Mishra, S.K., and Singh, V.P. (2003). Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. Kluwer Academic Dordrecht, The Netherlands, ISBN 1-4020-1132-6.

Mishra, S.K., Singh, V.P., Sansalone, J.J., and Aravamuthan, V. (2003). A modified SCS-CN method: characterization and testing. *Water Resour. Manage.* Vol. 17,

- No. 1, pp. 37–68.
- Mishra, S.K., Jain, M.K., and Singh, V.P. (2004). Evaluation of the SCS–CN–based model incorporating antecedent moisture. *Water Resour. Manage.* Vol. 18, No. 6, pp. 567–589.
- 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 Resour. Manage.* Vol. 20, No. 5, pp. 643–660.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transac. of the ASABE* Vol. 50, No. 3, pp. 885–900.
- Ponce, V.M. (1989). *Engineering Hydrology, Principles and Practices*. San Diego State University, 508 San Diego.
- Ponce, V.M., and Hawkins, R.H. (1996). Runoff curve number: has it reached maturity? *J. Hydrol. Eng.* Vol. 1, No. 1, pp. 11–19.
- Ritter, A., and Muoz–Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *J. Hydrol.* Vol. 480, pp. 33–45.
- Schneider, L.E., and McCuen, R.H. (2005). Statistical guidelines for curve number generation. *J. Irrig. Drain Eng.* Vol. 131, No. 3, pp. 282–290.
- Shi, Z.H., Chen, L.D., Fang, N.F., Qin, D.F., and Cai, C.F. (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.
- Soulis, K.X., Valiantzas, J.D., Dercas, N., and Londra, P.A. (2009). Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS–CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 13, No. 5, pp. 605–615.
- Soulis, K.X., and Valiantzas, J.D. (2012). SCS–CN parameter determination using rainfall–runoff data in heterogeneous watersheds—the two–CN system approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 16, No. 3, pp. 1001–1015.
- Stewart, D., Canfield, E., and Hawkins, R.H. (2012). Curve number determination methods and uncertainty in hydrologic soil groups from semiarid watershed data. *J. Hydrol. Eng.* Vol. 17, No. 11, pp. 1180–1187.
- Tedela, N.H., McCutcheon, S.C., Rasmussen, T.C., Hawkins, R.H., Swank, W.T., Campbell, J.L., Adams, M.B., Jackson, C.R., and Tollner, E.W. (2012). Runoff curve number for 10 small forested watersheds in the mountains of the Eastern United States. *J. Hydrol. Eng.* Vol. 17, No. 11, pp. 1188–1198.
- USDA Natural Resources Conservation Service (USDA–NRCS) (2004a). National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 9: Hydrologic soil cover complexes, Washington DC.
- USDA Natural Resources Conservation Service (USDA–NRCS) (2004b). National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 10: Estimation of direct runoff from storm rainfall, Washington DC.
- Van Liew, M., Veith, T., Bosch, D., and Arnold, J. (2007). Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: comparison on USDA agricultural research service watersheds. *J. Hydrol. Eng.* Vol. 12, No. 2, pp. 173–189.
- Woodward, D.E., Hawkins, R.H., Jiang, R., Hjelmfelt, A.T., van Mullem, J.A., and Quan, Q.D. (2003). Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. World Water & Environ. Resour. Congress, June 23–26, 2003, Philadelphia, Pennsylvania, United States, pp. 1–10.
- Yuan, Y., Nie, W., McCutcheon, S.C., and Taguas, E.V. (2014). Initial abstraction and curve numbers for semiarid watersheds in southeastern Arizona. *Hydrol. Process.* Vol. 28, No. 3, pp. 774–783.

paper number : 15-020

Received : 8 March 2015

Revised : 2 May 2015

Accepted : 2 May 2015