



Using asymptotic curve number regression method estimation of NRCS curve number and optimum initial loss ratio for small watersheds

Yu, Ji Soo^a · Park, Dong-Hyeok^a · Ahn, Jae-Hyun^b · Kim, Tae-Woong^{c*}

^aDepartment of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

^bDepartment of Civil Engineering, Seokyeong University

^cDepartment of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University (ERICA)

Paper number: 17-057

Received: 6 July 2017; Revised: 10 September 2017 / 26 September 2017; Accepted: 26 September 2017

Abstract

Two main parameters of NRCS-CN method are curve numbers and initial loss ratio. They are generally selected according to the guideline of US National Engineering Handbook, however, they might cause errors on estimated runoff in Korea because there are differences between soil types and hydrological characteristics of Korean watersheds and those of United States. In this study, applying asymptotic CN regression method, we suggested eight modified NRCS-CN models to decide optimum runoff estimation model for Korean watersheds. RSR (RMSE-observations standard deviation ratio) and NSE (Nash-Sutcliffe efficiency) were used to evaluate model performance, consequently M6 for gauged basins (Avg. RSR was 0.76, Avg. NSE was 0.39) and M7 for ungauged basins (Avg. RSR was 0.82, Avg. NSE was 0.31) were selected. Furthermore it was observed that initial loss ratios ranging from 0.01 to 0.10 were more adequate than the fixed $\lambda = 0.20$ in most of basins.

Keywords: Asymptotic regression method, Curve number, Initial loss, Ungauged basin

점근유출곡선지수법을 이용한 소유역 유출곡선지수 산정 및 최적 초기손실률 결정

유지수^a · 박동혁^a · 안재현^b · 김태웅^{c*}

^a한양대학교 대학원 건설환경공학과, ^b서경대학교 공과대학 토목건축공학과, ^c한양대학교 공학대학 건설환경공학과

요 지

NRCS-CN 방법을 이용해서 유출량을 결정하는 과정에 가장 큰 영향을 주는 변수는 유출곡선지수와 초기손실률이다. 수자원 실무에서 유출곡선지수와 초기손실률은 대부분 미국 National Engineering Handbook의 지침에 따라 결정하지만, 우리나라 유역의 토양 및 수문학적 특성은 미국과 다르기 때문에 유출량을 과대 또는 과소 산정하게 된다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 유역특성에 적합한 유출우량을 산정하기 위하여 점근유출곡선지수법을 이용하여 총 8개의 유출우량 산정 모형(M1~M8)을 제시하였다. RSR (RMSE-observations standard deviation ratio)과 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)의 두 가지 지표를 이용하여 모형을 평가하였으며, 그 결과 계측 유역에서는 M6 (평균 RSR: 0.76, 평균 NSE: 0.39), 미계측 유역에서는 M7 (평균 RSR: 0.82, 평균 NSE: 0.31)이 최적의 모형으로 선정되었다. 또한 대부분의 유역에서 기존에 사용되고 있던 초기손실률 0.20보다 더 작은 값(0.01-0.10)을 적용할 때 더 좋은 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

핵심용어: 미계측 유역, 유출곡선지수, 점근유출곡선지수법, 초기손실률

*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184
E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (T.-W. Kim)

1. 서론

NRCS-CN 방법은 유역 내의 토지 이용 및 토지피복, 토양 특성, 수문학적 조건 등을 이용하여 총 강우량으로부터 유효 강우량을 계산하는 방법이다. 유효강우량은 유출곡선지수(runoff curve number, CN)로 표현되는 유역의 유출 특성에 따라 총 강우량에서 손실량을 제외함으로써 산정된다. 따라서 NRCS-CN 방법을 이용하여 유역의 유효우량을 결정하는데에 가장 큰 영향을 주는 변수는 유출곡선지수(CN)와 초기손실률(initial loss ratio, λ)이다. CN 값은 토지이용 및 피복, 토양특성, 수문학적 조건 등에 따라 결정되며, 미국의 National Engineering Handbook Chapter 4 (NEH-4)에서 제시된 지침과 절차에 의하여 산정된다. 그러나 우리나라의 토지피복 및 토지이용상태는 현황은 미국과 다르기 때문에 유출량을 과대 또는 과소 산정하는 경우가 많다.

Kim et al. (2014)는 암석노출지의 비율이 높은 우리나라 산악지역에서 NRCS-CN 방법을 적용할 때 CN 값이 기존보다 높게 산정되었으며, 이로 인해 유효우량이 과소 추정되고 있음을 밝혔다. Moon et al. (2014)는 유역의 경사도를 고려하여 CN 값을 보정한 결과 유효우량이 기존보다 크게 산정되는 결과를 나타냈으며, Park et al. (2016) 또한 유전자 알고리즘을 통해 CN 값을 재산정한 결과 기존 값보다 높게 산정되는 결과를 제시했다.

CN 값은 유역의 수문학적 특성에 맞게 재조정되어야 할 필요가 있으며, 이에 따라 Hawkins (1993)는 관측 강우-유출 사상을 이용하여 새로운 CN 값을 정의할 수 있는 점근 유출곡선지수법(asymptotic CN regression method)을 제안한 바 있다. 점근 유출곡선지수법은 CN과 강우량 사이의 비선형적 관계를 고려하여 강우량에 따라 변화하는 CN 값을 산정하여 유효우량을 계산하는 방법이다. 이와 같이 실측값을 기반으로 하여 산정된 CN은 유역의 수문학적 특성을 직접적으로 반영할 수 있고 토양특성 및 토지이용상태와 상관없이 적용이 가능하며, 그 효율성이 많은 선행연구에서 입증되었다(Tedela et al., 2012; D'Asaro et al., 2014; Kowalik and Walega, 2015; Ryu et al., 2016).

또 하나의 주요 변수인 초기손실률은 최대잠재보유수량의 20% ($\lambda = 0.2$)로 고정되어 적용되고 있다. NRCS-CN 방법의 개발 단계에서 결정된 초기손실률은 물리적 근거가 명확하지 않기 때문에 우리나라뿐 아니라 외국에서도 재산정의 필요성이 제기되었다(Baltas et al., 2007; Beck et al., 2009; Shi et al., 2009; Yuan et al., 2014). 특히 Mishra et al. (2006)은 초기손실량과 최대잠재보유수량 사이의 선형적 관계에 대해 의문을

제시하고 새로운 관계식을 제시하였다. 국내 유역을 대상으로 한 선행연구에서는 초기손실률을 0.01~0.05 사이의 값으로 하향 조정하는 것이 더 타당하다는 것을 예증한 바 있다(Ajmal et al., 2015; Park et al., 2015).

따라서 본 연구에서는 우리나라 유역에 적합한 유효강우량 산정 모형을 결정하기 위해 NRCS-CN 모형의 두 가지 주요 변수를 조정하여 8개의 수정 모형을 제시하였다. 각 모형의 변수는 CN 값과 초기손실량이며, CN 값의 조정은 점근유출곡선지수법을 통해 수행되었고 초기손실량은 초기손실률과 Mishra and Singh (2003) 모형을 통해 조정되었다. 최적의 수정 모형은 실측값과 모형 결과값 사이의 오차를 통해 선정하였다. 그러나 실측 강우-유량 자료가 없거나 부족한 유역에서는 점근유출곡선지수법의 적용이 불가능하기 때문에, 미계측 유역에서도 적용할 수 있는 수정 모형 또한 선정하였다. 미계측 유역에서의 적용 가능성을 평가하기 위해, 임의의 계측 유역을 미계측 유역으로 가정하고 모형의 검증을 수행하였다. 최종적으로 계측 및 미계측 유역에 적용 가능한 최적의 수정 NRCS-CN 모형을 확정하고 그에 따른 유역의 초기손실률을 결정하였다.

2. 연구방법

2.1 NRCS-CN 모형

우리나라에서는 홍수량 산정을 위한 유효우량을 계산할 경우 유출곡선지수법을 이용하는 것을 권장하고 있으며 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012), Eq. (1)을 NRCS-CN 방법의 기본 가정으로 한다.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_u} \quad (1)$$

여기서, F 는 침투량, S 는 잠재보유수량, Q 는 직접유출량, P 는 총 강우량, I_u 는 초기손실량이다. 초기손실량은 차단, 침투, 지면저류 등을 포함하여 유역의 최대잠재보유수량 S 와 밀접한 관계가 있으며, Eq. (2)와 같이 산정된다. 최종적으로 강우량에서 손실량을 제하여 Eq. (3)과 같이 유효우량이 결정된다.

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

$$Q = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S} \quad (3)$$

2.2 점근유출곡선지수법

점근유출곡선지수를 정의하기 위해서는 우선 관측된 강우-유출 사상을 빈도에 따라 정렬하여 새로운 강우(P)-유출(Q) 자료를 생성해야 한다(Hawkins, 1993). 이러한 과정은 단순히 강우 자료와 유출량 자료를 각각 크기에 따라 오름차순으로 정렬한 후 결합하여 수행되며, 이를 통해 유역에서 발생했던 강우사상과 유출사상의 빈도가 일치하는 새로운 자료를 구성할 수 있다. 이때의 P-Q 자료는 원래의 순서와 일치하지 않아도 된다. 이후 새롭게 정의된 자료를 이용하여 관측 강우량과 관측 CN 사이의 관계식을 도출하여 각 유역마다 점근유출곡선지수 회귀식을 산정할 수 있다.

관측 CN은 강우에 의해 발생된 유출량을 이용하여 역으로 산정되는 값으로 최대잠재보유수량과 CN 사이의 관계식을 이용하여 계산할 수 있다. Hawkins et al. (2009)는 정해지지 않은 초기손실률에 대하여 최대잠재보유수량을 산정하는 공식을 Eq. (4)와 같이 제시한 바 있으며, 따라서 관측 강우-유출 자료를 이용하여 Eqs. (4) and (5)를 통해 관측 CN을 산정할 수 있다.

$$S = \frac{[2\lambda P + Q(1-\lambda) - \sqrt{Q(1-\lambda)^2 + 4\lambda QP}]}{2\lambda^2} \quad (4)$$

$$CN = \frac{25,400}{254 + S} \quad (5)$$

CN 값은 보통의 경우 증가하는 강우량에 대하여 일정한 값으로 수렴하는 경향성을 갖는다. CN과 강우량의 관계는 (1) Complacent (2) Standard (3) Violent의 세 가지 형태가 있다. Complacent형의 경우 CN 값이 강우량의 증가에 따라 감소하지만 값이 수렴되지 않으며, 대부분의 경우를 차지하는 Standard형 관계는 CN 값이 강우의 증가에 따라 감소하는 것은 Complacent형과 같지만 그 값이 하나로 수렴된다. 반면, Violent형의 관계는 CN 값이 강우량의 증가에 따라 동시에 증가하다가 일정한 값으로 수렴된다. 점근유출곡선지수 회귀식을 산정할 수 있는 것은 P-CN 관계가 Standard와 Violent형일 때이며, 수학적 공식은 Eq. (6)과 같다.

$$CN(P) = CN_o + (100 - CN_o)\exp(-k_1P) \text{ (Standard형)} \quad (6a)$$

$$CN(P) = CN_o[1 - \exp(-k_2P)] \text{ (Violent형)} \quad (6b)$$

여기서, CN_o 는 P가 무한대로 수렴함에 따라 수렴되는 일정한 값이며, k_1 및 k_2 는 지수함수의 감소계수이다.

2.3 Mishra and Singh (MS) model

점근유출곡선지수 회귀식은 기존의 NRCS-CN 방법보다 관측 유출량과 유사한 결과를 나타내지만, 기존의 방법과 다르게 선행강수량을 고려할 수 없는 단점이 있다. Mishra and Singh (2003)은 선행함수(antecedent moisture, M_c)의 개념을 도입하여 NRCS-CN의 공식을 수정했으며, 선행강수량을 고려해 유출량을 산정할 수 있는 방안을 Eq. (7)과 같이 제시하였다. 또한 초기손실량과 선행함수와의 높은 상관관계를 고려하여 초기손실량 공식을 수정하여 Eq. (8)과 같이 제시하였다.

$$Q = \frac{(P - I_a)(P - I_a + M_c)}{P - I_a + M_c + S} \quad (7a)$$

$$M_c = 0.5[-(1 + \lambda)S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_3 S}] \quad (7b)$$

$$I_a = \frac{\lambda S^2}{S + M_c} \quad (8)$$

3. 연구 자료 및 지역

본 연구를 위해서 한강 권역의 16개 소유역의 강우-유출 자료를 수집하였다. 본 연구에서 사용된 실측 강우-유출 자료는

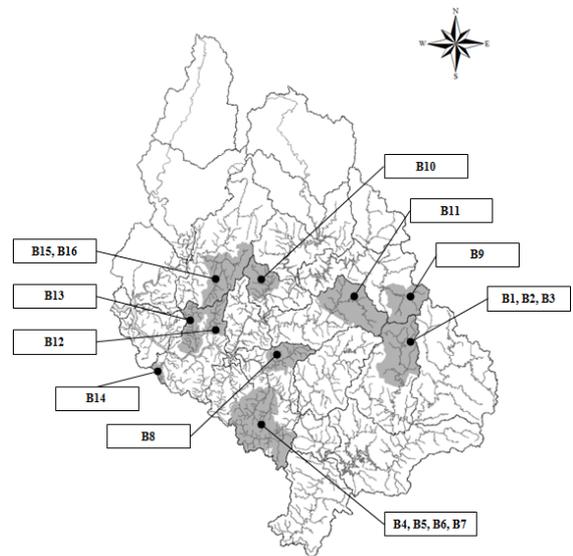


Fig. 1. Selected watersheds in study area

Table 1. Basin information

Basin no.	Basin	Data	Area (km ²)	No. of events	NEH-4 tables		
					CN-I	CN-II	CN-III
B1	Sanganmi	2010-2011	392.93	26	39.65	61.00	78.00
B2	Bangrimgyo	2009-2013	527.12	64	41.70	63.00	80.00
B3	Pyeongchang	2005-2014	697.67	134	42.75	64.00	80.00
B4	Janghowon	2008-2012	431.23	21	43.82	65.00	81.00
B5	Cheongmi	2006-2014	514.66	72	44.91	66.00	82.00
B6	Yulgkuk	2009-2014	179.95	41	50.70	71.00	85.00
B7	Heungcheon	2008-2014	294.44	50	46.03	67.00	82.00
B8	Heukcheongyo	2006-2014	307.82	52	37.67	59.00	77.00
B9	Waeongseongdong	2009-2014	378.67	40	39.65	61.00	78.00
B10	Gapyeong	2008-2014	305.12	34	48.32	69.00	84.00
B11	Gyulwun	2008-2014	724.89	63	34.83	56.00	75.00
B12	Toegyewon	2005-2014	200.45	88	42.75	64.00	80.00
B13	Jungranggyo	2005, 2007-2014	208.41	90	46.03	67.00	82.00
B14	Cheonwang	2009-2010	42.32	13	59.82	78.00	89.00
B15	Yeongjung	2007, 2010-2014	465.88	54	39.65	61.00	78.00
B16	Gososeong	2009-2013	551.20	29	39.65	61.00	78.00

유량조사사업단에 의해 관측되었으며, 신뢰성 높은 자료 확보를 위해 세심한 검증이 수행되었다(Ahn and Lee, 2017). 각 유역의 정보는 Fig. 1 및 Table 1에 나타난 것과 같다. 유역의 크기는 42.33~724.89 km²이며 평균 면적은 약 390 km²이다. 각 유역은 대부분 산림지역(평균 64.22%)이 차지하고 있으며 그 외에는 농업지역(평균 22.93%), 시가화건조지역(평균 8.72%), 기타(평균 1.03%) 순으로 이루어져있다. 유역의 강우-유출 자료의 평균 기록연한은 약 6년이며, 각 유역에서 분리된 강우사상의 개수는 평균 54개이다. 기저유량은 N-day 방법 중 하나인 HYSEP local minimum method를 이용하여 분리되었다. 이 방법은 일별 유량을 일정 간격($T=0.5(2N-1)$, $N=0.83A^{0.2}$)으로 그 크기를 비교하여 평가되며, 인접한 최저 값들을 직선으로 연결하여 기저유량을 결정한다(Sloto and Crouse, 1996). 강우 분리 기준은 강우 지속기간이 3시간 이상, 무강우 지속기간이 6시간 이하인 강우사상으로 설정하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 NRCS-CN 수정 모형

Ryu et al. (2016)에 의하면, 점근유출곡선지수법은 우리나라의 유역에서 유효유량을 산정하는데 있어 기존의 방법보다 우수한 것으로 나타났다. 또한 Ajmal and Kim (2015)는 점근

유출곡선지수법을 포함한 여러 모형을 비교하여 최적의 초기 손실량을 산정한 바 있다. 그러나 Ajmal and Kim (2015)에서 비교한 8개의 모형은 각각 서로 다른 CN 산정 및 유출량 산정 방법을 적용한 것이며, 점근유출곡선지수법을 적용한 모형의 초기손실률을 각각 0.05와 0.20으로 고정하였고, 기존의 NRCS-CN 방법과 직접적으로 비교분석을 수행하지는 않았다. 따라서 본 연구에서는 NRCS-CN 모형의 주요 변수인 유출곡선지수와 초기손실률을 조정할 수 있는 점근유출곡선지수법의 장점을 이용하여 우리나라 유역에 적합한 유효유량 산정 모형을 선정하기 위해 Table 2에 나타난 것과 같이 기존의 모형(M1)과 더불어 7개의 수정모형(M2~M8)을 검토하였다.

M3, M4, M6 및 M8 점근유출곡선지수법으로 산정된 CN 값을 사용하며, 그 외의 모형은 비교를 위해 기존의 NEH-4에서 제시하는 CN Table을 적용하였다. 또한 각각의 수정모형은 각기 다른 초기손실량 산정방법을 사용한다. 손실량은 차단, 증발산, 지표면 저류, 침투 등 다양한 원인에 의해 발생하며 유역의 식생 및 지역 특성에 따라 차이가 발생하기 때문에, 초기손실량은 NRCS-CN 모형의 일부가 아닌 별개의 사항으로 고려해야한다(Jain et al., 2006). 이를 위해 Mishra and Singh (2003)이 제안한 비선형적 I_a -S 관계식을 적용하였으며, 초기 손실률 또한 기존에 사용되고 있던 $\lambda=0.20$ 를 포함하여 다양한 범위(0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40)의 값을 적용하였다.

Table 2. Description of models and parameters

Model	Method	Runoff	Initial loss ratio	Initial loss	Curve number	Antecedent moisture
M1	NRCS-CN	$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$	Varying (0.01/0.05/ 0.1/0.2/0.4)	$I_a = \lambda S$	NEH-4	NEH-4
M2	NRCS-CN	$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$		$I_a = \frac{\lambda S^2}{S + M_c}$	NEH-4	$M_c = 0.5[-(1 + \lambda)S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_3 S}]$
M3	Asymptotic CN Regression	$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$		$I_a = \lambda S$	Asymptotic CN	NEH-4
M4	Asymptotic CN Regression	$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$		$I_a = \frac{\lambda S^2}{S + M_c}$	Asymptotic CN	$M_c = 0.5[-(1 + \lambda)S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_3 S}]$
M5	MS Model	$Q = \frac{(P - I_a)(P - I_a + M_c)}{P - I_a + M_c + S}$		$I_a = \lambda S$	NEH-4	$M_c = 0.5[-(1 + \lambda)S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_3 S}]$
M6	MS Model	$Q = \frac{(P - I_a)(P - I_a + M_c)}{P - I_a + M_c + S}$		$I_a = \lambda S$	Asymptotic CN	$M_c = 0.5[-(1 + \lambda)S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_3 S}]$
M7	MS Model	$Q = \frac{(P - I_a)(P - I_a + M_c)}{P - I_a + M_c + S}$		$I_a = \frac{\lambda S^2}{S + M_c}$	NEH-4	$M_c = 0.5[-(1 + \lambda)S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_3 S}]$
M8	MS Model	$Q = \frac{(P - I_a)(P - I_a + M_c)}{P - I_a + M_c + S}$		$I_a = \frac{\lambda S^2}{S + M_c}$	Asymptotic CN	$M_c = 0.5[-(1 + \lambda)S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 S^2 + 4P_3 S}]$

4.2 모형의 검정 및 평가

점근유출곡선지수법을 통한 asymptotic-CN의 산정은 P-CN 관계식(Eq. (6))을 통해 수행되며, 먼저 두 개의 매개변수 (CN₀와 k)를 결정해야 한다. 본 연구에서 사용한 16개의 유역에서는 모두 강우량과 관측 CN의 관계가 Violent형으로 나타났으며 각각의 초기손실률에 대하여 회귀곡선을 산정하였다. CN 회귀곡선은 Fig. 2에 나타난 것과 같다.

본 연구에서는 모형의 유출량 산정 능력을 평가하기 위해 Eqs. (9) and (10)과 같이 RSR (RMSE-observations standard

deviation ratio)와 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency)의 두 가지 지표를 이용하였다. RSR은 RMSE와 관측 자료의 표준편차와의 비율을 나타내는 지표로서 표준화 과정을 거치기 때문에 RMSE보다 여러 모형에 대한 비교가 용이하다. RMSE와 같이 RSR도 0.0에 가까울수록 최적의 모형을 나타낸다. NSE는 잔차와 관측 자료의 분산 사이의 상대적 크기를 비교하여 나타내는 지표이며, (-∞, 1) 사이의 값을 갖는다. NSE = 1.0일 때 계산값과 관측값이 정확하게 일치한다는 것을 나타내며, 일반적으로 0 이상의 값을 가지면 수용할 수 있는 범위로 간주한다.

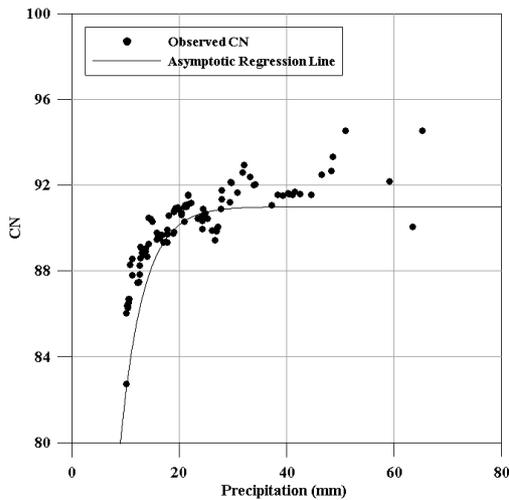


Fig. 2. Asymptotic CN regression line of Gapyeong

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{cal})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}} \quad (9a)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{cal})^2} \quad (9b)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (10)$$

여기서, Q_{obs} 는 관측 유출량, Q_{cal} 은 모형에 의해 계산된 유출량이다. $\overline{Q_{obs}}$ 는 관측 유출량의 평균이고 $STDEV_{obs}$ 는 관측 유출량의 표준편차이다.

Fig. 3은 16개 소유역에 대한 8개 모형의 RSR과 NSE를 상자그림(box plot)으로 나타낸 것으로 RSR은 평균값이 작을수록, NSE는 평균값이 클수록 좋은 성능을 나타낸다. 이 두 개의 지표를 통해 관측 값과 가장 잘 부합하는 예측 모형은 MS 모형과 점근유출곡선지수법을 결합한 M6 (평균 RSR: 0.76, 평균 NSE: 0.39)으로 선정되었다. 기존의 NRCS-CN 방법을 적용한 M1 (평균 RSR: 0.96, 평균 NSE: 0.05)과 M2 (평균 RSR: 0.94, 평균 NSE: 0.10)는 그 외 6개의 수정 모형(M3-M8)보다 성능이 떨어지는 것으로 평가되었다. RSE와 NSE를 이용하여 종합적으로 모형을 평가하여 나열하면 다음과 같다.

$$M6 > M3 > M4 > M8 > M7 > M5 > M2 > M1$$

상위를 차지하는 모형(M6, M3, M4, M8)은 모두 점근유출곡선지수법에 따른 CN 값을 적용한 것으로, 유출량 산정에

있어서 기존의 CN 값보다 관측 강우-유량 자료를 기반으로 산정한 CN 값을 적용하는 것이 더 적합하다고 판단할 수 있다. 그러나 Asymptotic-CN은 관측 자료를 기반으로 산정되기 때문에 점근유출곡선지수법은 미계측 유역에서는 적용할 수 없는 단점이 있다. M7은 M6과 같은 방법론을 적용하지만 NEH-4 Table에 따른 CN 값을 적용하며 평균 RSR은 0.82, 평균 NSE는 0.31로 M6과 비교하여 성능은 다소 떨어지지만 기존 모형인 M1과 M2 보다 좋은 성능을 나타낸다. 따라서 미계측 유역에 대해서는 M7을 적용하는 것이 바람직하다.

4.3 최적 초기손실률

유출량 산정을 위한 최적의 수정 NRCS-CN 모형 선정 후 각 유역의 최적 초기손실률을 결정하기 위해 M6과 M7에 대하여 각 초기손실률(0.01, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40)에 대한 RSR 및 NSE 결과를 비교하였다. Table 3은 M6에 대한 결과를 비교한 것으로 12개 유역에서 기존에 사용되고 있던 $\lambda=0.20$ 보다 더 작은 값(0.01-0.10)을 적용할 때 더 좋은 결과를 나타냈다. M6에서는 초기손실률이 하나의 값으로 뚜렷하게 결정되지

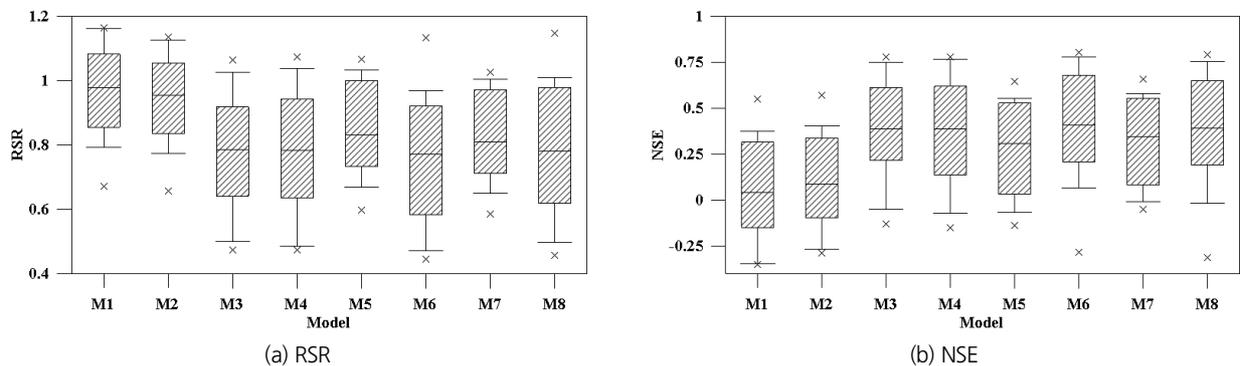


Fig. 3. Box plots of errors between observed and calculated runoff in 16 basins

Table 3. Evaluation of M6 for various initial loss ratios (λ)

Basin #	Initial loss ratio (λ)										Optimum value (λ)
	0.01		0.05		0.10		0.20		0.40		
	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	
B1	0.63	0.60	0.59	0.65	0.56	0.69	0.54	0.71	0.54	0.70	0.20
B2	0.89	0.20	0.90	0.19	0.91	0.16	0.98	0.04	1.09	-0.18	0.01
B3	0.74	0.45	0.75	0.43	0.79	0.38	0.88	0.23	0.97	0.07	0.01
B4	1.02	-0.04	0.98	0.04	0.97	0.06	0.98	0.05	0.98	0.05	0.10
B5	0.89	0.21	0.83	0.31	0.83	0.30	0.88	0.22	0.98	0.04	0.05
B6	0.78	0.39	0.77	0.41	0.78	0.40	0.80	0.36	0.86	0.26	0.05
B7	0.77	0.41	0.78	0.40	0.79	0.38	0.80	0.37	0.85	0.27	0.01
B8	0.62	0.61	0.57	0.67	0.57	0.68	0.59	0.65	0.67	0.55	0.10

Table 3. Evaluation of M6 for various initial loss ratios (λ) (Continue)

Basin #	Initial loss ratio (λ)										Optimum value (λ)
	0.01		0.05		0.10		0.20		0.40		
	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	
B9	1.13	-0.29	1.14	-0.29	1.22	-0.50	1.29	-0.66	1.39	-0.94	0.01
B10	0.45	0.79	0.45	0.80	0.45	0.80	0.45	0.80	0.47	0.78	0.10
B11	0.96	0.07	0.99	0.03	1.04	-0.07	1.15	-0.32	1.24	-0.54	0.01
B12	0.49	0.76	0.48	0.77	0.49	0.76	0.47	0.78	0.48	0.77	0.20
B13	0.77	0.41	0.76	0.42	0.75	0.44	0.74	0.46	0.75	0.44	0.20
B14	1.04	-0.07	0.96	0.08	0.92	0.15	0.92	0.15	1.01	-0.01	0.20
B15	0.63	0.60	0.60	0.64	0.58	0.66	0.60	0.64	0.60	0.64	0.10
B16	0.82	0.33	0.80	0.36	0.81	0.34	0.86	0.26	0.86	0.27	0.05

Table 4. Evaluation of M7 for various initial loss ratios (λ)

Basin #	Initial loss ratio (λ)										Optimum value (λ)
	0.01		0.05		0.10		0.20		0.40		
	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	RSR	NSE	
B1	0.86	0.27	0.90	0.19	0.97	0.06	1.15	-0.32	2.15	-3.62	0.01
B2	1.03	-0.05	1.10	-0.20	1.21	-0.46	1.49	-1.23	2.72	-6.42	0.01
B3	0.71	0.49	0.74	0.46	0.79	0.38	0.98	0.05	2.02	-3.07	0.01
B4	0.97	0.06	1.02	-0.04	1.10	-0.21	1.32	-0.75	2.02	-3.08	0.01
B5	0.76	0.42	0.78	0.40	0.82	0.34	0.96	0.07	1.70	-1.88	0.01
B6	0.76	0.42	0.77	0.40	0.80	0.36	0.92	0.16	1.38	-0.92	0.01
B7	0.96	0.08	1.00	-0.01	1.08	-0.16	1.28	-0.65	1.66	-1.76	0.01
B8	0.65	0.58	0.67	0.55	0.72	0.48	0.89	0.21	2.08	-3.31	0.01
B9	0.99	0.01	1.03	-0.07	1.11	-0.23	1.33	-0.76	3.16	-8.99	0.01
B10	0.58	0.66	0.60	0.64	0.64	0.59	0.75	0.44	1.18	-0.38	0.01
B11	0.87	0.25	0.91	0.17	1.00	-0.01	1.27	-0.62	3.61	-12.07	0.01
B12	0.67	0.55	0.70	0.51	0.75	0.44	0.89	0.20	1.52	-1.31	0.01
B13	1.00	-0.01	1.05	-0.10	1.12	-0.25	1.30	-0.69	1.68	-1.83	0.01
B14	0.66	0.56	0.67	0.55	0.70	0.51	0.83	0.32	1.19	-0.42	0.01
B15	0.73	0.47	0.76	0.43	0.81	0.34	0.97	0.05	1.74	-2.04	0.01
B16	0.90	0.20	0.94	0.12	1.01	-0.02	1.21	-0.47	2.43	-4.91	0.01

않았으며 $\lambda=0.01$ (31%), 0.05 (19%), 0.10 (25%), 0.20 (25%)로 다양한 범위의 최적 초기손실률이 결정되었다.

반면 미계측 유역에서 적용할 수 있는 M7은 모든 유역에서 0.01이 최적 초기손실률로 결정되었다(Table 4). 유역 B2와 B13에서 모형의 효율성이 낮게 평가되었지만, 그럼에도 불구하고 M7은 기존의 NRCS-CN 모형보다 성능이 우수하기 때문에, 미계측 유역임을 가정하였을 때 최적의 대안으로 적용할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구의 목적은 계측 및 미계측 유역에서 적용 가능한 우리나라 유역 특성에 적합한 수정 NRCS-CN 방법을 제시하는 것으로, 기존 모형의 문제점으로 제시되었던 두 가지 변수인 유출곡선지수와 초기손실률을 조정하였다. 먼저 유출곡선지수의 조정은 점근유출곡선지수법을 적용하여 수행되었으며, 본 연구에서 제시한 점근유출곡선지수(asymptotic-CN)를 이용하는 것이 기존의 NEH-4에 의한 CN 값을 이용한 결과

보다 더 나은 성과를 나타내는 것을 확인하였다. 그러나 점근 유출곡선지수법은 관측 자료가 없는 유역에서는 적용이 불가능하므로, 미계측 유역에서도 적용이 가능하며 기존의 모형보다 좋은 성과를 나타내는 대안을 선택해야할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 총 8개의 모형 중 계측 유역에서는 M6, 미계측 유역에서는 M7을 적용하는 것이 가장 타당한 것으로 나타났다.

두 번째로 유역의 최적 초기손실률은 계측 및 미계측 유역인 상황을 가정하여 RSR 및 NSE의 두 지표를 이용하여 각각 산정하였다. M6(계측 유역)을 적용할 때는 16개 소유역에서 최적 초기손실률이 다양한 범위(0.01-0.20)로 결정되었다. 그러나 대부분의 유역에서 선행연구에서의 결과와 같이 기존의 값보다 하향 조정했을 때 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 반면, M7(미계측 유역)을 적용할 경우에는 모든 유역에서 최적 초기손실률이 0.01로 선택되었다. 만약 권역별 분석을 수행하였을 때 최적 초기손실률에 대한 특정 값으로 수렴하는 경향성이 뚜렷하게 관측된다면 일반화하여 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 점근유출곡선지수법은 관측 자료를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 CN 값을 결정하기 때문에 자료의 양과 정확도에 의해 신뢰도가 크게 좌우될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구[MOIS-재난-2014-02]입니다.

References

- Ahn, J.-H., and Lee, S.-J. (2017). "Development of equations for time of concentration and storage coefficient available for Korean watersheds." *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 1, pp. 26-31.
- Ajmal, M., and Kim, T.-W. (2015). "Quantifying excess stormwater using SCS-CN-based rainfall runoff models and different curve number determination methods." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 141, No. 3, pp. 04014058.
- Ajmal, M., Moon, G.-W., Ahn, J.-H., and Kim, T.-W. (2015). "Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korea watersheds." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 592-603.
- Baltas, E. A., Dervos, N. A., and Mimikow, M. A. (2007). "Technical note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece." *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 11, No. 6, pp. 1825-1829.
- Beck, H. E., de Jue, R. A. M., Schellekens, J., van Dijk, A. I. J. M., and Bruijnzeel, L. A. (2009). "Improving curve number based strom runoff estimates using soil moisture proxies." *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 2, No. 4, pp. 250-259.
- D'Asaro, F., Grillone, G., and Hawkins, R. H. (2014). "Curve number: empirical evaluation and comparison with curve number handbook tables in Sicily." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 19, No. 12, pp. 04014035.
- Hawkins, R. H. (1993). "Asymptotic determination of runoff curve number from data." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 334-343.
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E., and Van Mullem, J. A. (2009). *Curve number hydrology: State of the practice*. American Society of Civil Engineers.
- Jain, M. K., Mishra, S. K., Suresh Babu, P., and Venugopal, K. (2006). "On the I_a -S relation of the SCS-CN method." *Hydrology Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 261-2875.
- Kim, J., Yoo, C., Park, M., and Joo, J. (2014). "Evaluation of problems to apply runoff curve number to mountain area in Korea." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 5, pp. 293-298.
- Kowalik, T., and Walega, A. (2015). "Estimation of CN parameter for small agricultural watersheds using asymptotic functions." *Water*, Vol. 7, No. 3, pp. 939-955.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012). *Design flood estimation guidelines*.
- Mishra, S. K., Sahu, R. K., Eldho, T. I., and Jain, M. K. (2006). "An improving I_a -S relationship incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology." *Water Resources Management*, Vol. 20, No. 5, pp. 643-660.
- Mishra, S. K., and Singh, V. P. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology*. Kluwer Academic Publishers.
- Moon, G.-W., Yoo, J.-Y., and Kim, T.-W. (2014). "Comparing calculation techniques for effective rainfalls using NRCS-CN method: focused on introducing weighted average and slope-based CN." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 4, pp. 1171-1180.
- Park, D.-H., Ajmal, M., Ahn, J.-H., and Kim, T.-W. (2015). "Improving initial abstraction method of NRCS-CN for estimating effective rainfall." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 6, pp. 491-500.
- Park, D.-H., Kang, D.-S., Ahn, J.-H., and Kim, T.-W. (2016). "Re-determination of curve number using genetic algorithm and CN aligner equation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 5, pp. 373-380.
- Ryu, J., Jung, Y., Kong, D. S., Park, B. K., Kim, Y. S., Engel, B. A., and Lim, K. J. (2016). "Approach of land cover based asymptotic curve number regression equation to estimate runoff." *Irrigation and Drainage*, Vol. 65, No. S2, pp. 94-104.

- 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.
- Sloto, R. A., and Crouse, M. Y. (1996). *HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis*. U.S. Geological Survey.
- Tedlela, 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." *Journal of Hydrological Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 1188-1198.
- Yuan, Y., Nie, W., McCutcheon, S. C., and Taguas, E. V. (2014). "Initial abstraction and curve numbers for semiarid watersheds in Southeastern Arizona." *Hydrological Processes*, Vol. 28, No. 3, pp. 774-783.