

NRCS-CN 방법을 이용한 유효우량 산정기법의 비교분석: 가중평균방법과 경사도 도입을 중심으로

문건우* · 유지영** · 김태웅***

Moon, Geon-Woo*, Yoo, Ji-Young**, Kim, Tae-Woong***

Comparing Calculation Techniques for Effective Rainfalls Using NRCS-CN Method: Focused on Introducing Weighted Average and Slope-based CN

ABSTRACT

The NRCS-CN method is generally used to estimate effective rainfalls in a basin. However, since the curve number which plays a critical role in the NRCS-CN method was originally developed for US watersheds, it is limited to be directly applied to other basins outside the United States. Therefore various modifications have been suggested to revise the NRCS-CN for specific watershed condition. This study introduced the weighted average method and the slope-based CN to estimate effective rainfalls available for Korean watersheds and compared with the observed direct runoff. The overall results achieved from this study indicated that the adjusted slope-based CN considerably increases effective rainfalls in general and makes the duration of effective storm longer. Based on the statistical error analysis performed for various modifications of NRCS-CN, the weighted average method with the adjusted slope-based CN has highest precision with the observed direct runoff. In addition, after analyzing the relation between the initial loss estimated from rainfall-runoff observations and the potential maximum retention from GIS-based data, it turns out that the assumption of linear relationship between the initial loss and the potential maximum retention is not available for Korean watersheds.

Key words : NRCS-CN, Weighted average, Slope, Curve number, Effective rainfall

초록

유역의 유효우량을 산정할 경우 NRCS-CN 방법을 이용하는 것이 보통이다. NRCS-CN 방법에서 유역의 유출특성을 나타내는 중요한 인자인 유출곡선지수(CN)은 미국 유역을 대상으로 개발되어졌기 때문에, 미국 이외의 국가에서 적용될 경우 지역의 강우-유출 특성을 반영하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 이에 많은 연구에서 유역의 CN값을 보정하는 방법을 제시하고 있다. 본 연구에서는 우리나라에 적절한 유효우량 산정방법을 제시하기 위하여 유역의 CN값을 가중평균하는 방법과 유역의 경사도를 고려하여 CN값을 보정하는 방법을 적용하여 유효우량을 산정하고 이를 관측 유효우량과 비교분석을 수행하였다. 본 연구 결과, 경사도를 고려하여 CN값을 보정할 경우 유효우량이 전반적으로 크게 산정되었으며, 유효우량의 지속시간 또한 길어지는 것으로 나타났다. 유효우량의 산정방법에 따른 통계학적 오차 분석을 수행한 결과, 경사도로 보정한 CN값을 적용한 가중평균 유효우량 산정방법이 관측 직접유출량과 높은 정확성을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 관측 자료를 이용하여 추정된 초기손실량과 GIS 자료를 이용하여 추정된 최대잠재보유수량과의 관계를 분석한 결과, NRCS-CN 방법에서 적용되고 있는 선형가정은 실제 강우-유출 관계와 큰 차이를 가지고 있는 것으로 나타났다.

검색어 : NRCS-CN 방법, 가중평균법, 경사도, 유출곡선지수, 유효우량

* 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (Hanyang University · mgw10@hanyang.ac.kr)

** 정희원 · 전북대학교 공과대학 토목공학과 연구교수 (Chonbuk National University · jyyoo84@gmail.com)

*** 정희원 · 교신저자 · 한양대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 부교수 (Corresponding Author · Hanyang University · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received March 15, 2014/ revised April 16, 2014/ accepted June 18, 2014

1. 서론

유역에서의 수문해석을 위한 기본 입력자료인 유효우량 또는 초과강우량은 강우, 지면지류, 증발, 침투 등 기상학적 인자와 유역 경사, 형상, 유로연장 등 지형학적 인자를 비롯하여 다양한 인자에 영향을 받는다. 강우로 인하여 발생하는 유역의 유출량에 해당하는 유효우량을 산정하는 방법으로는 침투지수법을 이용하는 ϕ -지수법, W-지수법, 유출곡선지수(Curve Number (CN))를 이용하는 NRCS (Natural Resources Conservation Service) 방법, 강우주상도를 이용하는 일정비법, 일정손실률법, 초기손실-일정손실률법 등이 있다. 이 중 NRCS 방법은 우리나라 수자원 실무에서 유효우량을 산정할 때 일반적으로 적용되는 방법으로 계측 및 미계측 유역에서 유효우량을 산정할 수 있는 방법이다. 토양의 특성, 침투율, 식생피복처리상태, 토지이용현황 등을 고려한 유출곡선지수(CN)를 바탕으로 유효우량을 산정하기 때문에 NRCS-CN 방법으로도 불린다. 미계측 유역에서 토양 자료 및 토지이용 자료만으로 유효우량을 산정할 수 있는 NRCS-CN 방법은 적용이 편리하다는 장점으로 인해 유효우량 산정에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 NRCS-CN 방법은 개발 당시 미국 내 유역의 토양 특성, 식생피복처리상태, 토지이용현황 등을 고려하여 유출곡선지수가 개발되었기 때문에, 국내 유역에 그대로 적용할 경우 여러 가지 문제를 야기할 수 있다.

Yoon (1991)은 우리나라 유역의 유효우량을 산정하기 위해서 NRCS-CN 방법을 적용할 경우 CN II (보통 상태의 선행토양함수 조건에서의 CN)와 CN III (습윤 상태의 선행토양함수 조건에서의 CN)를 3:7로 가중평균한 값을 유역의 평균 CN값으로 사용할 것을 제안하였다. 또한, 강우-유출 자료가 계측이 가능한 유역에 대해서 Hawkins et al. (1985)가 제안한 관측 CN (Observed CN)을 사용할 것을 제안하였다. 이와 더불어 미계측 유역에서의 CN 산정 및 적용에 대한 많은 선행연구들이 수행되었다(Kim and Choi, 2004; Cho et al., 2004; Oh et al., 2005; Kim et al., 2008), 특히 Cho et al. (2004) and Kim et al. (2007)은 유역의 경사도를 이용하여 CN값을 보정한 후 유효우량을 산정하여 기존의 CN과 비교분석을 수행한 결과 경사도를 이용하여 CN을 보정하여 유효우량을 산정하는 것이 정확한 결과를 얻는다는 연구결과를 제시하였다. 또한, 관측 CN값을 이용하여 선행토양함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition (AMC))에 대한 선행강우량 및 선행강우일수에 대한 타당성 검토도 수행되었다(Park et al., 2005; Lee et al., 2005).

United States Department of Agriculture (USDA) (2004)는 National Engineering Handbook의 NRCS-CN 방법을 개정하면서, CN을 이용하여 유효우량 산정할 경우 2가지 방법을 적용할

것을 제안하였다. 토지이용종류에 따른 CN을 가중평균하여 유역의 평균 CN값을 산정한 후 유효우량을 산정하는 방법(The weighted CN method 또는 가중평균 CN 방법)과 토지이용종류에 따른 유효우량을 먼저 산정한 후 이를 가중평균하여 유역의 유효우량을 산정하는 방법(The method of weighted Q 또는 가중평균 유효우량 방법)을 제시하였다. 두 방법을 비교 및 분석한 선행연구의 결과 가중평균 유효우량 방법이 가중평균 CN 방법보다 유역의 유효우량을 크게 산정할 뿐만 아니라 관측된 직접유출량에 보다 정확한 유효우량을 산정하는 것으로 확인되었다(Mogeln, 2000; Paudel et al., 2009; Ebrahimian et al., 2012; Moon et al., 2014).

유역의 지형학적 인자를 도입하여 CN을 개선하기 위한 노력 또한 이루어졌다. 예를 들어, Sharpley and Williams (1990)은 유역 평균 경사도를 이용하여 CN값을 보정하고 유출량을 계산하였으며, 경사도와 CN과의 관계를 도출하여 경사도를 이용한 CN 보정식을 제안하였다. 또한, Huang et al. (2006)은 유역 평균 경사도를 산정하고 CN (AMC-II 조건)과 경사도와의 관계를 도출하여 보정계수를 제시하였다. Ebrahimian et al. (2012) and Deshmukh et al. (2013)은 보정계수를 적용하여 직접유출량과 비교분석한 결과 경사도를 이용하여 보정한 CN이 Soil Conservation Service (SCS)가 제시한 CN 보다 정확한 유출량을 산정하는 데에 기여한다는 연구결과를 제시하였다.

본 연구에서는 USDA (2004)에서 제안한 가중평균 CN 방법과 가중평균 유효우량 방법, 그리고 경사도를 이용하여 CN을 보정하는 방법을 우리나라 유역에 적용하여 유효우량을 산정하고, 관측된 강우-유출 자료를 이용하여 비교분석을 실시하여 국내 유역에 적절한 유효우량 산정방법을 제시하였다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 NRCS-CN 방법 배경이론

NRCS-CN 방법은 지표면 유출이 토양의 특성, 토지이용현황, 선행강우량, 강우량과 강우지속시간 및 평균 온도 등에 영향을 받는다고 가정하고, 이를 유출 해석에 도입하여 직접유출량을 산정하는 공식으로 개발된 것이다. SCS (1972)는 강우의 초기손실량(I_a)과 최대잠재보유수량(S)의 관계는 선형관계이고, 초기손실량은 최대잠재보유수량의 20% ($I_a = 0.2S$)라고 가정하고, 유효우량(Q)와 총강우량(P)의 관계를 최대잠재보유수량(S)과 유출곡선지수(CN)를 이용하여 Eq. (1)과 같이 제시하였다.

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, & P \geq I_a \\ 0 & P < I_a \end{cases} \quad (1a)$$

$$I_a = 0.2S \quad (1b)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1c)$$

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (2a)$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}} \quad (2b)$$

여기서, Q, P, I_a, 그리고 S는 강우량 깊이(mm)로 표현된다.

SCS (1985)는 초기토양수분량을 나타내기 위하여 선행토양함수조건(AMC)을 도입하였다. 1년을 성수기(6월~9월)와 비성수기(10월~익년 5월)로 나누어 구분하고 호우사상 이전 5일 누적 강우량인 선행5일강우량(Antecedent 5 Days Rainfall (P₅))을 기준으로 선행토양함수조건을 3가지로 구분하였다. AMC-I 조건(성수기 기준으로 P₅ < 35.56 mm)은 유역의 토양이 전반적으로 건조상태에 있어 유출률이 대단히 낮은 상태를 나타내고, AMC-II 조건(성수기 기준으로 35.56 ≤ P₅ < 53.34 mm)은 유출률이 보통인 상태, 그리고 AMC-III 조건(성수기 기준으로 P₅ ≥ 53.34 mm)은 유출률이 대단히 높은 상태를 나타낸다. Sobhani (1975)는 최대잠재보유수량(S)과 AMC 조건은 서로 선형적인 관계를 가지고 있다는 연구결과를 바탕으로 AMC 조건에 따른 CN 변환식을 Eq. (2)와 같이 제시하였다.

여기서, CN_I, CN_{II}, CN_{III}는 각각 AMC-I, AMC-II, AMC-III 조건에 대한 유출곡선지수이다.

2.2 대상유역 및 수문자료

본 연구에서는 관측된 강우 및 유량 자료를 확보할 수 있는 27개의 수위관측지점(한강 유역 16개, 낙동강 유역 1개, 금강 유역 8개, 영산강 유역 2개)을 기준으로 대상유역을 선정하였다(Fig. 1). 대상유역은 42.32~724.89 km²의 유역면적, 7.5~47.8%의 유역 평균경사, 13.93~72.84 km의 유로연장의 범위를 갖고 있다. 2005년부터 2012년까지 성수기(6월~9월)의 30분 단위 강우량 및 유량 자료를 수집하였다. 기상청에서 제공하는 지점별 강우량 자료를 기반으로 Thiessen 방법을 이용하여 대상유역의 평균 강우량을 산정하였으며, 수위관측소에서 측정된 수위자료를 통해 수위-유량 관계곡선을 이용하여 유량 자료를 구축하였다(유량 측정성과

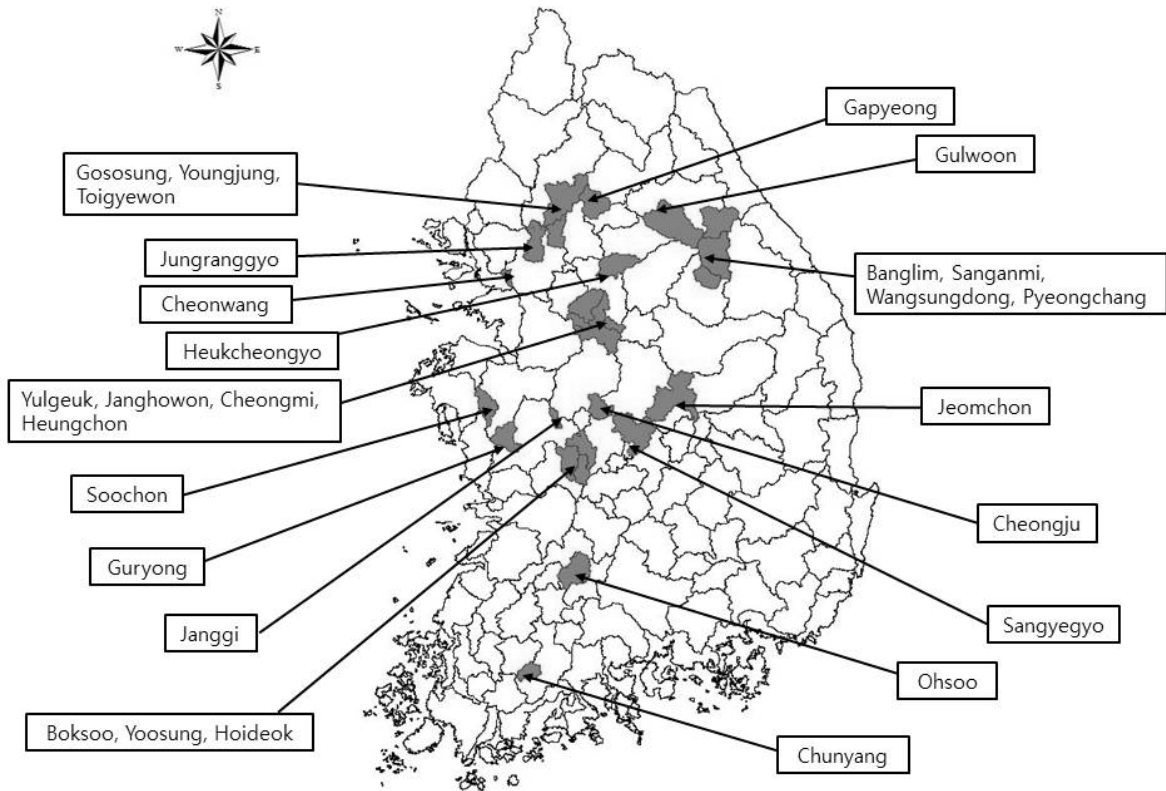


Fig. 1. Location of Study Watersheds

Table 1. Basic Information of Watersheds and Data

Watershed	Main River	Area (km ²)	Length (km)	Mean Slope (%)	Observation Period (Year)	No. of Rainfall-Runoff events
Gapyeong	Han River	305.12	39.36	45.4	2008, 2009, 2011	9
Gososung	Han River	551.2	42.92	27.1	2009, 2010, 2012	23
Guryong	Geum River	199.74	50.51	26.6	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	33
Gulwoon	Han River	724.89	63.66	41.5	2008, 2009, 2010, 2011	18
Banglim	Han River	527.12	55.61	40.2	2009, 2010, 2011	20
Boksoo	Geum River	161.9	36.31	35.5	2009, 2011	9
Sangyegyo	Geum River	482.29	56.21	29.4	2009, 2010, 2011	12
Sanganmi	Han River	392.93	48.49	39.4	2010, 2011	10
Soochon	Geum River	223.19	27.65	15.4	2007, 2008, 2009, 2010, 2011	31
Youngjung	Han River	465.88	56.67	27	2007, 2010, 2011, 2012	28
Ohsoo	Youngsan River	350.09	35.1	24.6	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	23
Wangsungdong	Han River	387.67	42.1	47.8	2009, 2010, 2011	10
Yoosung	Geum River	249.63	42.02	27.3	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	13
Yulgeuk	Han River	179.95	31.61	7.5	2009, 2010, 2011	5
Janggi	Geum River	63.09	20.53	21.5	2007, 2008, 2009, 2010, 2011	17
Janghowon	Han River	431.23	40.57	16.8	2008, 2009, 2010, 2011	26
Jeomchon	Nakdong River	614.53	37.62	37.8	2007, 2008, 2010	17
Junranggyo	Han River	208.41	27.26	17.3	2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	39
Cheonwang	Han River	42.32	13.93	13.4	2009, 2010	18
Cheongmi	Han River	514.66	45.16	16.7	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	30
Cheongju	Geum River	161.44	32.84	20.1	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	19
Chunyang	Youngsan River	143.1	16.74	34.3	2006, 2007, 2008, 2009	17
Toigyewon	Han River	200.45	27.92	26.7	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	47
Pyeongchang	Han River	695.67	72.84	40.3	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	32
Hoideok	Geum River	601.02	45.95	25.7	2005, 2006, 2007, 2008, 2010	32
Heukcheongyo	Han River	307.82	41.79	32.7	2006, 2007, 2008, 2009, 2010	14
Heungcheon	Han River	294.44	28.42	13.8	2008, 2009, 2010, 2011	21

는 유량조사사업단(www.hsc.re.kr)에서 제공. 대상유역별 수집된 강우-유량 자료를 바탕으로 총 573개의 단일호우사상을 선정하였다. 본 연구에서 수집한 대상유역별 유역 면적, 유역 평균경사, 유로 연장, 자료 수집 연도, 강우-유출사상의 갯수 등을 Table 1에 정리하였다.

2.3 GIS 기법을 이용한 유출곡선지수(CN) 산정

NRCS-CN 방법은 미계측 유역에서 수문학적 토양군과 토지이용상태, 식생피복 처리상태 등을 이용하여 유효우량을 산정하는 방법이다. 수문학적 토양군은 토양의 구성과 특성, 침투율 등을 기준으로 4가지(Type A (침투율 7.62-11.43 mm/hr), B (침투율 3.81-7.62 mm/hr), C (침투율 1.27-3.81 mm/hr), D (침투율

0.0-1.27 mm/hr))로 분류된다(Hoggan, 1989). 토지이용상태 및 식생피복 처리상태는 크게 농경지, 도시지역, 산림, 도로, 수면 등으로 구분되며, 수문학적 조건은 수직배수처리에 따라 유출률이 높은 조건인 불량(Poor), 유출률이 중간인 보통(Fair), 유출률이 낮은 양호(Good)로 분류된다(SCS, 1972).

본 연구에서는 대상유역별 수문학적 토양군을 분류하기 위하여 정밀토양도(농업진흥청 제공, 1:25000)를 이용하였으며, 중분류 수치지토지피복도(환경부 제공, 1:25000)을 이용하여 토지이용현황을 분류하였다. 우리나라 국토해양부(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM)) (2012)에서 제시한 국내 토지이용현황 및 수문학적 토양군에 따른 유출곡선지수표(AMC-II 조건) 및 산정절차에 따라 GIS 기법을 이용하여 유출곡선지수(CN)를

산정하였다(Moon et al., 2014 참고). 단, 논외의 경우 MLTM (2012)에서 제안한 비와 같이 수문학적 토양군에 관계없이 CN=79 (AMC-II)를 사용하였다. 산림의 경우 미국 산림청(U.S. Forest Service)에서 제시한 부식토의 깊이와 압밀정도에 따라 수문학적 조건의 등급 (Hydrologic condition Class (HC))을 결정하였다. 우리나라의 산림(Forest)의 유출률이 수림(Woods)보다 상대적으로 높은 점을 감안하여 산림의 유출곡선지수는 HC=2(Type A: 48, B: 69, C: 79, D:85)를 적용하였다.

3. 유출곡선지수 및 유효우량 산정

USDA (2004)에서는 NRCS-CN 방법으로 대상지역의 유효우량을 산정할 경우 가중평균 CN 방법과 가중평균 유효우량 방법을 적용할 것을 권장하고 있다.

가중평균 CN 방법은 토지이용종류 또는 토지피복종류별로 CN을 면적가중평균하여 지역 평균 CN을 Eq. (3)을 이용하여 산정하고, Eq. (1)을 이용하여 지역의 유효우량을 산정한다.

$$\overline{CN} = \frac{1}{A_{total}} \sum_{i=1}^n (A_i \times CN_i) \quad (3)$$

여기서, \overline{CN} 은 지역 평균 CN, A_{total} 은 지역 전체 면적(km²), A_i 는 토지피복종류별 면적(km²), 그리고 CN_i는 수문학적 토양군을 고려한 토지피복종류별 유출곡선지수를 나타낸다.

가중평균 유효우량 방법은 수문학적 토양군을 고려한 토지이용종류 또는 토지피복종류에 따라 산정된 CN값을 이용하여 먼저 Eq. (1)을 이용하여 유효우량을 각각의 토지피복종류별로 산정한

다. 그 다음에, 각각의 토지피복종류별로 산정된 유효우량을 Eq. (4)를 이용하여 토지피복종류별 면적가중평균하여 지역의 유효우량을 산정한다.

$$\overline{Q} = \frac{1}{A_{total}} \sum_{i=1}^n (A_i \times Q_i) \quad (4)$$

여기서, \overline{Q} 는 지역의 유효우량(mm)이고 Q_i 는 수문학적 토양군을 고려한 토지피복종류별 유효우량(mm)이다.

3.1 유출곡선지수표를 이용한 유효우량 산정

3.1.1 가중평균 CN 방법(W-CN method)

본 연구에서 가중평균 CN 방법을 적용하여 유효우량을 산정한 결과는 다음과 같다. 총 27개 지역에서 유효우량은 0.0~372.76 mm의 범위를 가지며, 이 중 AMC-I에 해당하는 호우사상은 0.0~105.56 mm, AMC-II는 0.0~372.76 mm, 그리고 AMC-III는 0.84~275.64 mm의 유효우량을 가지는 것으로 나타났다. 또한 Hawkins et al. (1985)가 제안한 총 강우량(P)와 최대잠재보유수량(S)와의 관계에서 도출한 홍수규모(Storm Scale) 기준을 적용하여 분석한 결과, 큰 홍수규모(P/S ≥ 0.465)에서는 2.92~372.76 mm, 작은 홍수규모(P/S < 0.465)에서는 0.0~17.86 mm가 나타났다.

3.1.2 가중평균 유효우량 방법(W-Q method)

본 연구에서 가중평균 유효우량 방법을 적용한 결과, 총 27개 지역에서 유효우량은 0.21~369.53 mm의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 이 중, AMC-I에 해당하는 호우사상은 0.21~108.33 mm, AMC-II는 0.86~369.53 mm, 그리고 AMC-III는 1.90~

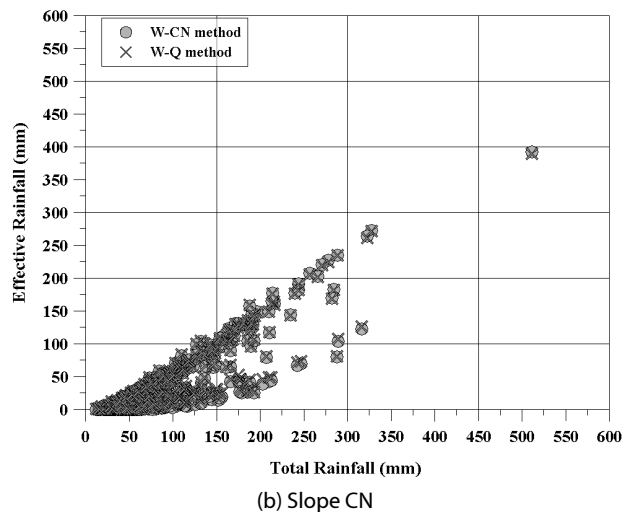
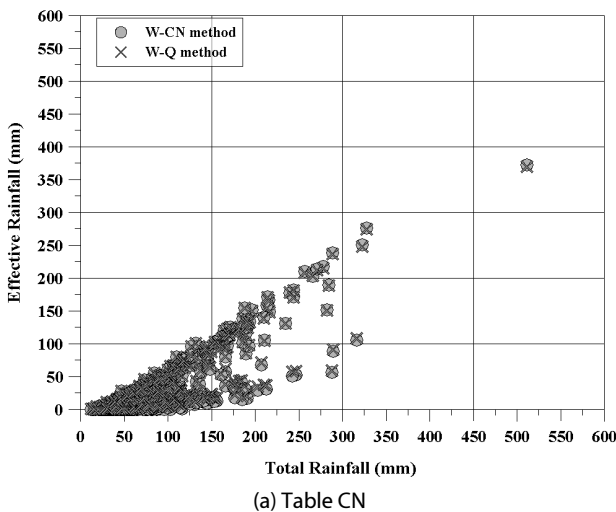


Fig. 2. Relationship of Total Rainfall and Effective Rainfall

274.56 mm의 유효우량을 가지는 것으로 나타났다. 홍수규모에 따른 유효우량은 큰 홍수규모에서는 3.7~369.53 mm, 작은 홍수규모에서는 0.21~23.01 mm로 나타났다.

가중평균 CN 방법(W-CN method)와 가중평균 유효우량 방법(W-Q method)을 비교분석한 결과, 가평과 복수 유역을 제외한 모든 유역에서는 전반적으로 가중평균 유효우량 방법이 유효우량을 크게 산정하였다(최소 -10.55 mm, 최대 11.87 mm) (Fig. 2 (a)). 특히, 가중평균 CN 방법은 초기손실량 조건(Eq. (1b))에 의해 유효우량이 발생하지 않는 호우사상이 다수 존재한다. 유효우량이 발생하지 않는 호우사상에 가중평균 유효우량 방법을 적용하면 유효우량이 발생하는 경우가 있는데, 이는 토지피복종류별 CN에 따라 초기손실량이 소구역별로 각각 다르기 때문이다.

3.2 경사도를 이용한 유효우량 산정

3.2.1 경사도를 이용한 CN 산정

SCS (1972)는 유출량에 대한 유역 경사도의 영향을 고려하지 않았다. 그러나 NRCS-CN 방법을 이용하여 정확한 유출량을 계산하기 위하여 경사도를 고려하여 CN값을 보정하는 모형들이 제안된 바 있다(Sharpely and Williams, 1990; Huang et al., 2006). Sharpely and Williams (1990)이 제안한 Eq. (5)의 경우 유역경사 5%에 대해서 CN II와 CN III를 이용하여 보정하는 방법이다.

$$CN_{II\alpha} = \frac{(CN_{III} - CN_{II})}{3} \times [1 - 2 \times \exp(-13.86 \times \alpha)] + CN_{II} \quad (5)$$

여기서, $CN_{II\alpha}$ 는 AMC-II 조건에서 경사도에 의해 보정된 유출곡선지수이고 α 는 유역의 경사도이다.

Huang et al. (2006)이 제안한 Eq. (6)는 CN_{II} 만을 이용하여 CN값을 보정하는 방법으로, 경사도와 CN의 관계를 이용하여 보정계수를 도출한 연구결과에 따른 방법이다.

$$CN_{II\alpha} = CN_{II} \times K \quad (6a)$$

$$K = \frac{322.76 + 15.63 \times \alpha}{\alpha + 323.52} \quad (6b)$$

본 연구에서는 경사도를 이용하여 보정된 유출곡선지수를 산정하기 위해 수치표고모형 DEM (Digital Elevation Model)와 Arc/Info를 이용하여 대상유역의 DEM 자료를 경사도 래스터로 변환하여 산정하였다. 경사도를 고려한 CN을 산정하기 위해서 정밀도양도 및 토지피복도를 래스터로 변환한 다음에 변환된 경사도 래스터와 중첩시켰다. 이 자료를 이용하여 MLTM (2012)에서 제시한

유출곡선지수표와 Eq. (6)을 이용하여 유출곡선지수를 보정하였다.

3.2.2 가중평균 CN 방법(W-CN method)

3.2.1절에서 경사도를 이용하여 보정한 유출곡선지수를 이용하여 3.1.1절에서 산정한 가중평균 CN 방법을 적용하여 대상유역별 유효우량을 산정하였다. 그 결과, 총 27개 유역에서 유효우량은 0.0~391.69 mm의 범위를 가지는 것으로 나타났으며, 이 중, AMC-I에 해당하는 호우사상은 0.0~122.71 mm, AMC-II는 0.0~391.69 mm, 그리고 AMC-III는 0.0~272.21 mm의 유효우량을 가지는 것으로 나타났다. 또한 홍수규모에 따른 유효우량은 큰 홍수규모에서는 2.92~391.69 mm, 작은 홍수규모에서는 0.0~28.71 mm가 나타났다.

3.2.3 가중평균 유효우량 방법(W-Q method)

경사도로 인해 보정된 CN을 이용하여 가중평균 유효우량 방법을 이용하여 유역의 유효우량을 산정한 결과 총 27개 유역에서 유효우량은 0.22~389.15 mm의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 이 중, AMC-I에 해당하는 호우사상은 0.22~126.37 mm, AMC-II는 1.04~389.15 mm, 그리고 AMC-III는 2.09~271.82 mm의 유효우량을 가지는 것으로 나타났다. 또한 홍수규모에 따른 유효우량은 큰 홍수규모에서는 3.65~389.15 mm, 작은 홍수규모에서는 0.22~31.29 mm로 나타났다.

경사도를 이용하여 보정된 CN을 이용하여 산정된 유효우량을 비교한 결과, 5개 유역(굴운, 복수, 상안미, 왕성동, 울극)을 제외한 유역에서는 전반적으로 가중평균 유효우량 방법이 크게 산정되었다(최소 -3.55 mm, 최대 9.22 mm)(Fig. 2(b)).

3.3 강우유출 자료를 이용한 직접유출량 및 관측 유출곡선지수 추정

3.3.1 관측 직접유출량 추정

본 연구에서는 관측된 강우-유출 자료를 활용하여 관측 직접유출량을 추정하고 NRCS-CN 방법을 이용하여 산정된 유효우량과 비교분석을 수행하였다. 관측된 유출 자료에서 직접유출량을 추정하기 위해서는 총유출량에서 기저유량을 제외함으로써 직접유출량을 추정할 수 있다. 유출수문곡선에서 직접유출량과 기저유량을 분리하기 위해서 수문곡선 분리방법이 적용되고 있으며, 주 지하수 감수곡선분리법, 수평직선분리법, N-day법, 수정 N-day법, 가변경사법을 비롯하여 WHAT (Web-based Hydrograph Analysis Tool) 등의 방법들이 있다. 우리나라에서 설계홍수량을 산정할 경우 유출수문곡선에서 기저유량과 직접유출량을 분리하기 위해서 수평직선분리법을 권장하고 있다(MLTM, 2012). 본 연구에서는 간편한 방법인면서 국내 실무에 많이 적용되고 있는 수평직선분리법을

적용하여 기저유량과 직접유출량을 분리하였다. 유출수문곡선에서 분리한 직접유출수문곡선을 적분하여 유역면적으로 나누어 주어 직접유출고(Direct runoff depth)를 산정하였다. 또한, Hawkins et al. (1985)가 제안한 강우량(P)과 직접유출량(Q)의 관계를 이용하여 Eq. (7)과 같이 관측 최대잠재보유수량(S₀) 및 관측 유출곡선지수(CN₀)를 산정하였다.

$$S_0 = 5(P + 2Q - \sqrt{4Q^2 + 5PQ}) \quad (7a)$$

$$CN_0 = \frac{25400}{254 + 5P + 10Q - 10\sqrt{Q^2 + 1.25QP}} \quad (7b)$$

대상유역 전체를 대상으로 총 강우량에 따른 관측 직접유출량을 산포도로 작성하여 Fig. 3(a)에 도시하였다. 전반적으로 강우량이 증가함에 따라 관측 직접유출량 또한 증가하는 경향을 나타내었으며, 같은 강우량이 나타났음에도 불구하고 관측 직접유출량이 다른 이유는 대상유역에 따라 강우-유출에 대한 특성이 다르기 때문에 발생한 것으로 확인되었다. Fig. 3(b)는 총 강우량에 따른 관측 유출곡선지수(CN₀)를 나타내었으며, 각 강우-유출 사상별로 총 강우량과 관측 직접유출량을 Eq. (7b)에 적용하여 산정하였다. 관측 유출곡선지수는 80~90 사이에서 가장 많이 분포(약 46%)되어 있으며, 그 다음으로 90~100 사이에서 분포(약 23%)되어 있는 것으로 확인하였다.

3.3.2 산정된 유효우량과 관측 직접유출량과의 비교 분석

3.1.1~3.2.2절에서 산정된 유효우량과 3.3.1절에서 추정된 관

측 직접유출량과 비교분석을 위해 본 연구에서는 Eq. (8)과 같이 RMSE (Root Mean Squared Error), RRMSE (Relative RMSE), 그리고 MAE (Mean Absolute Error)를 이용하였다.

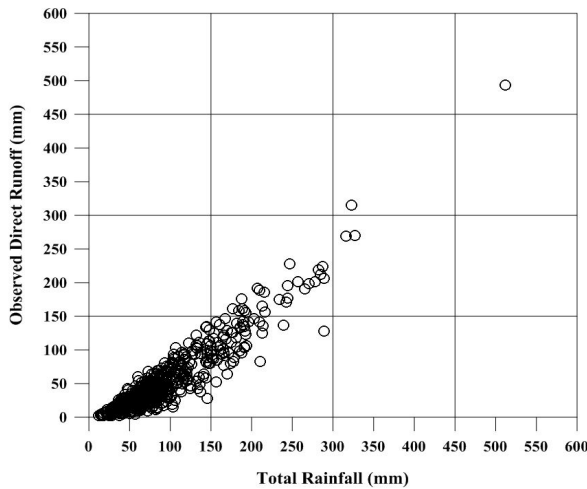
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{est})_i^2} \quad (8a)$$

$$RRMSE = \frac{1}{Q_{obs}} \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{est})_i^2} \times 100 \quad (8b)$$

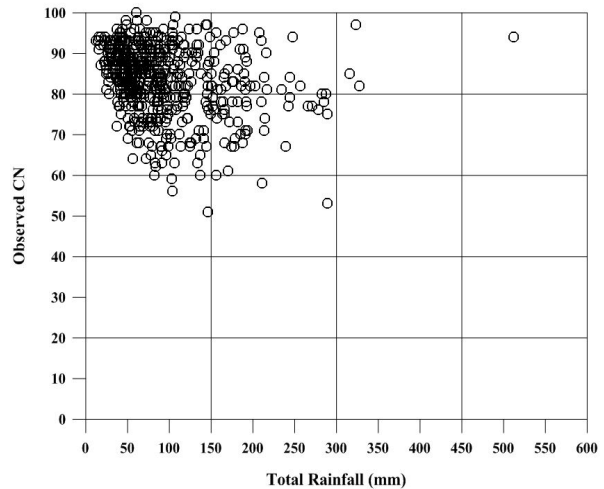
$$MAE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |Q_{obs} - Q_{est}|_i \quad (8c)$$

여기서, N은 강우-유출 사상의 수, Q_{obs}는 관측된 직접유출량, Q_{est}는 계산된 유효우량, i는 강우-유출 사상의 번호를 나타낸다.

총 27개 유역에서의 573개의 강우-유출 사상을 대상으로 오차평가를 수행하였으며, MLTM (2012)의 유출곡선지수표를 이용하여 산정한 가중평균 CN 방법의 오차 분석 결과, RMSE는 34.9 mm, RRMSE는 66.8%, MAE 23.6 mm로 나타났다. 가중평균 유효우량 방법의 경우, RMSE는 33.3 mm, RRMSE는 63.6%, MAE는 22.1 mm로 가중평균 유효우량 방법이 가중평균 CN 방법보다 관측 직접유출고와의 오차가 작은 값을 얻는다는 것을 확인하였다. 경사도를 이용하여 보정된 CN을 이용하여 산정한 가중평균 CN 방법의 오차 분석으로 RMSE는 32.3 mm, RRMSE는 61.7%, MAE는 21.7 mm로 나타났다. 가중평균 유효우량 방법의 경우, RMSE는 30.7 mm, RRMSE는 58.6%, MAE는 20.2 mm가 나타



(a) Direct Runoff



(b) Curve Number

Fig. 3. Relationship Among Total Rainfall, Direct Runoff, and Curve Number

Table 2. Error Measures of Effective Rainfall for Various Methods

	MLTM (2012) Curve Number						Adjusted Slope Curve Number					
	RMSE		RRMSE		MAE		RMSE		RRMSE		MAE	
	W-CN	W-Q	W-CN	W-Q	W-CN	W-Q	W-CN	W-Q	W-CN	W-Q	W-CN	W-Q
Total (Mean)	34.9	33.3	66.8	63.6	23.6	22.1	32.3	30.7	61.7	58.6	21.7	20.2
AMC-I	51.0	47.9	112.9	106.2	37.7	34.3	47.3	44.4	104.7	98.2	35.3	31.8
AMC-II	36.8	35.7	58.9	57.1	30.0	28.4	33.4	32.4	53.5	51.8	27.6	26.0
AMC-III	18.2	18.1	33.5	33.3	13.3	13.0	16.7	16.6	30.8	30.6	11.8	11.6
Large Scale	34.8	33.8	53.7	52.2	21.6	20.9	31.8	30.9	49.1	47.8	19.5	19.0
Small Scale	35.2	32.3	117.7	107.9	27.2	24.2	33.0	30.2	110.3	100.8	25.5	22.5

Table 3. Skill Score of Various Methods for Calculating Effective Rainfall

	Curve Number from MLTM (2012)		Curve Number with Adjusted Slope	
	W-CN	W-Q	W-CN	W-Q
Total (Mean)	0.524	0.568	0.594	0.633
AMC-I	-0.181	-0.045	-0.017	0.105
AMC-II	0.713	0.730	0.763	0.778
AMC-III	0.850	0.851	0.873	0.875
Large Scale	0.623	0.643	0.684	0.701
Small Scale	-0.953	-0.642	-0.716	-0.433

났으며, 마찬가지로 가중평균 유효우량 방법이 가중평균 CN 방법보다 관측 직접유출고와의 오차가 작은 값을 얻는다는 것을 확인하였다. 또한 대상 유역별, AMC 조건별, 홍수규모별 오차분석을 통해 가중평균 유효우량 방법이 오차가 작다는 것을 확인하였다. 특히 경사도를 이용하여 보정된 CN으로 산정된 가중평균 유효우량 방법이 관측 직접유출고와의 오차가 작다는 것을 확인하였다 (Table 2 참고).

또한, 본 연구에서는 각 방법의 유효우량 산정능력에 대한 평가를 위하여 평균제곱오차(MSE)를 이용하여 Skill Score (SS)를 Eq. (9)와 같이 산정하였다. 모형이 완벽한 추정값(Perfect estimate)을 얻었을 경우에는 SS=1이며, SS가 0 또는 음의 값을 갖는 경우 모형은 추정 능력이 없는 것으로 해석할 수 있다(Murphy, 1988). 본 연구에서는 Skill Score 분석을 통하여 NRCS-CN 방법으로 유효우량을 산정하는 방법 중에서 경사도로 보정된 CN으로 산정된 가중평균 유효우량 방법(평균 SS=0.63)이 다른 방법에 비하여 우수한 방법으로 확인되었다(Table 3 참고).

$$SS = 1 - \frac{MSE_F}{MSE_O} \quad (9a)$$

$$MSE_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \quad (9b)$$

$$MSE_O = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{O} - O_i)^2 \quad (9c)$$

여기서, SS는 Skill Score, MSE_F와 MSE_O는 평균제곱오차, F_i는 각 방법별 산정한 i번째 강우-유출 사상의 유효우량, O_i는 i번째 강우-유출 사상의 직접유출량, \bar{O} 는 관측 직접유출량의 평균이다.

3.3.3 산정된 유효우량의 초기손실량 비교 분석

3.1.1~3.2.2절에서 산정된 유효우량을 비교분석한 결과, 경사도로 보정한 유출곡선지수를 적용한 경우, 초기손실량은 보정하지 않은 유출곡선지수를 적용한 경우보다 전반적으로 작은 값을 산정되었으며, 유효우량의 지속시간 또한 길어지는 것으로 나타났다. 또한, 가중평균 CN 방법과 가중평균 유효우량 방법을 비교해 보면, Moon et al. (2014)에서 제시한 바와 같이 가중평균 CN 방법이 가중평균 유효우량 방법보다 유효우량 발생시간이 보다 늦게 발생하였다. 이로 인하여 초기손실량 또는 손실량은 경사도로 보정한 CN을 적용했을 때와 가중평균 유효우량 방법을 적용했을 때 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

NRCS-CN 방법은 최대잠재보유수량과 초기손실량의 선형가정을 바탕으로 최대잠재보유수량의 일정 비율(보통 20%)을 초기손실량으로 산정한다. 본 연구에서는 SCS (1972)에서 제시한 최대잠

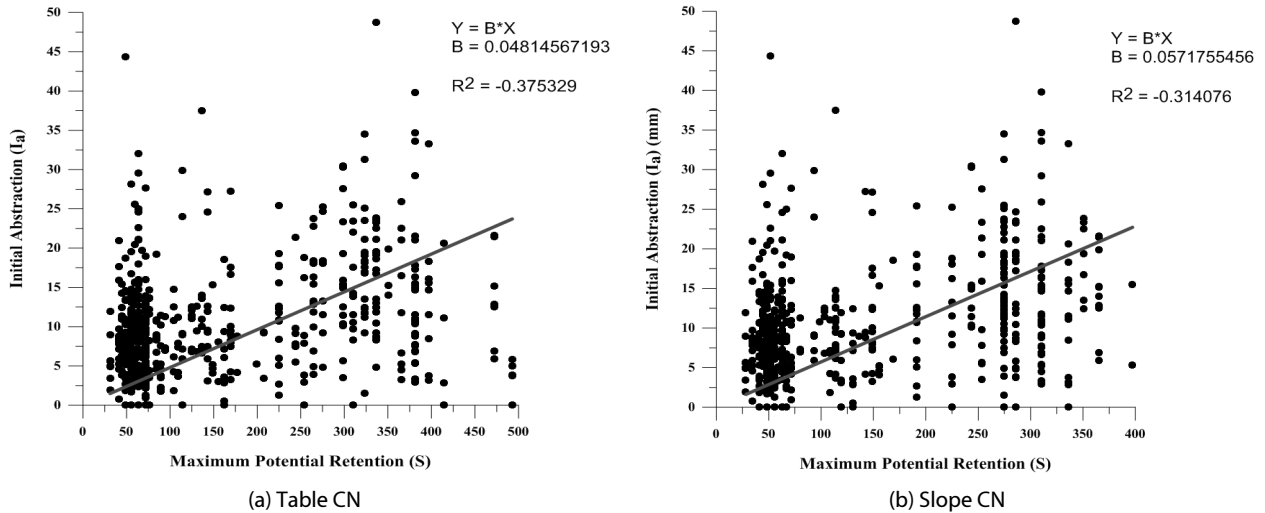


Fig. 4. Relationship Between Initial Abstraction and Maximum Potential Retention

재보유수량과 초기손실량의 선형가정을 검토하기 위하여 유출곡선지수 및 경사도로 보정한 유출곡선지수의 최대잠재보유수량과 관측 유출곡선지수로부터 산정된 초기손실량의 관계를 분석하였다 (Fig. 4 참고). 유출곡선지수표를 이용하여 얻어진 최대잠재보유수량(S)과 관측 유출곡선지수에서 얻어진 초기손실량(I_a)이 선형관계에 있다는 가정을 하였을 경우 기울기는 초기손실계수를 의미한다. 최대잠재보유수량과 관측 초기손실량의 선형적합을 한 결과 초기손실계수에 해당하는 기울기는 0.048 ($R^2=0.38$), 경사도로 보정한 유출곡선지수의 최대잠재보유수량과의 관계에서 초기손실계수는 0.057 ($R^2=0.31$)이 나타났다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 SCS (1972)에서 제시한 초기손실계수(0.2)와 관측 자료에 의한 초기손실계수(약 0.05) 사이에는 큰 차이가 있으며, 또한 상당한 비선형성을 가지고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 유역을 대상으로 NRCS-CN 방법을 이용하여 정확한 유효우량을 산정하기 위한 방법을 제시하기 위하여 기존에 제시된 유출곡선지수표와 유역의 경사도를 이용하여 보정한 유출곡선지수를 이용하여 USDA (2004)에서 제안한 산정방법에 대하여 비교분석을 수행하였다. 또한, 유효우량 산정방법의 정확성을 판단하기 위하여 관측된 강우-유출 자료를 이용하여 산정된 유효우량과의 오차분석 및 Skill Score 분석을 수행하였다. MLTM (2012)에서 제시한 유출곡선지수표와 유역의 경사도를 이용하여 보정한 유출곡선지수를 적용하여 유효우량을 산정하여 비교·분석한 결과, 경사도로 보정한 유출곡선지수를 이용하여 추정된 유효우량은 기존의 유출곡선지수표를 이용한 유효우량보다 크

게 산정됨을 확인하였다. 이는 유출곡선지수가 경사도의 도입으로 인해 유출곡선지수의 값은 증가하면서 유역에서의 최대잠재보유수량 및 초기손실량이 감소됨에 따라 유효우량이 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 또한, USDA (2004)에서 제안한 두 가지의 가중평균방법을 고려하여 가중평균 CN 방법과 가중평균 유효우량 방법을 비교분석 한 결과 기존의 유출곡선지수를 이용하여 유효우량을 산정하여 비교·분석한 연구결과(Mogeln, 2000; Moon et al., 2014)와 마찬가지로 경사도로 보정한 유출곡선지수를 이용하여 산정한 유효우량은 가중평균 유효우량 방법이 가중평균 CN 방법보다 크게 산정되는 것을 확인하였다.

NRCS-CN 유효우량 산정방법의 정확성을 판단하기 위하여 관측된 강우-유출 자료에서 추정된 관측 직접유출량과의 비교 및 오차분석을 수행한 결과 경사도로 보정한 유출곡선지수가 기존의 제시된 유출곡선지수표를 이용한 것 보다 전반적으로 작은 오차를 나타내었다. 또한, USDA (2004)에서 제안한 두 가지 산정방법의 오차 분석을 통하여 가중평균 유효우량 방법이 가중평균 CN 방법보다 관측 직접유출량과 작은 오차를 나타내었다. Skill Score 분석을 통하여 4가지 방법의 평균제곱오차를 이용하여 기능평점을 부여한 결과 경사도로 보정한 유출곡선지수의 가중평균 유효우량 방법이 우수한 방법으로 평가되었다. 대상유역, AMC 조건, 홍수규모별로 구분하여 4가지의 방법을 분석하여 경사도로 보정한 유출곡선지수를 이용한 가중평균 유효우량 방법이 관측된 직접유출량과의 가까운 값을 갖는 방법임을 확인할 수 있었다.

유효우량 산정방법별 초기손실량과 가능최대잠재보유수량과의 비교를 수행한 결과, NRCS-CN 방법에서 적용되고 있는 선형 가정 및 초기손실계수 0.2는 실제 강우-유출 관계와 큰 차이를 가지고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 국내 유역에 대한 초기손

실량 산정방법의 개발에 대한 후속연구가 필요하다는 것을 제안하였다.

감사의 글

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

References

- Cho, H. J., O, J. H., Nam, B. H. and Jung, K. T. (2004). "A study on the determination of SCS-CN using GIS." *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, KOGIS, Vol. 12, No. 1, pp. 39-44 (in Korean).
- Deshmukh, D. S., Chaube, U. C., Ekube, A. H., Aberra, D. G. and Tegene, M. K. (2013). "Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope." *Journal of Hydrology*, Vol. 492, pp. 89-101.
- Ebrahimian, M., Nuruddin, A. A., Soom, M. M. and Sood, A. M. (2012). "Application of NRCS-curve number method for runoff estimation in a mountainous watershed." *Caspian Journal of Environmental Sciences*, Vol. 10, No. 1, pp. 103-114.
- Hawkins, R. H., Hjelmfelt, A. T. and Zevenbergen, A. W. (1985). "Runoff probability, storm depth, and curve numbers." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 330-340.
- Hoggan, D. H. (1989). *Computer-assisted floodplain hydrology and hydraulics*, McGraw-Hill, NY.
- Huang, M., Jacgues, G., Wang, Z. and Monique, G. (2006). "A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China." *Hydrological Processes*, Vol. 20, No. 3, pp. 579-589.
- Kim, J. G., Lim, K. J., Park, Y. S., Heo, S. G., Park, J. H., Ahn, J. H., Kim, K. S. and Choi, J. D. (2007). "The effect of slope-based curve number adjustment on direct runoff estimation by L-THIA." *Journal of Korean Society on Water Quality*, KSWQ, Vol. 23, No. 6, pp. 897-905 (in Korean).
- Kim, K. T. and Choi, Y. S. (2004). "A study on the estimation of effective precipitation using detailed soil map." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, KAGIS, Vol. 7, No. 2, pp. 1-15 (in Korean).
- Kim, N. W., Lee, J. W., Lee, J. W. and Lee, J. E. (2008). "Estimation of runoff curve number for Chungju dam watershed using SWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 12, pp. 1231-1244 (in Korean).
- Lee, M. W., Yi, C. S., Kim, H. S. and Shim, M. P. (2005). "Determination of suitable antecedent precipitation day for the application of NRCS method in the Korean basin." *Journal of the Korean Wetlands Society*, KWS, Vol. 7, No. 3, pp. 41-48 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2012). *Design flood estimation techniques* (in Korean).
- Mogeln, G. E. (2000). "Effect of orientation of spatially distributed curve numbers in runoff calculations." *Journal of the American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 36, No. 6, pp. 1391-1400.
- Moon, G. W., Yoo, J. Y., Ahn, J. H. and Kim, T. W. (2014). "Comparative analysis of estimation methods for basin averaged effective rainfall using NRCS-CN methods." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 2, pp. 493-503 (in Korean).
- Murphy, A. H. (1988). "Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient." *Monthly Weather Review*, Vol. 116, No. 12, pp. 2417-2424.
- Oh, K. D., Jun, B. H., Yang, G. G., Ahn, W. S. and Cho, Y. H. (2005). "Curve number for urbanized areas." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 12, pp. 1009-1020 (in Korean).
- Park, C. H., Yoo, C. S. and Kim, J. H. (2005). "Revised AMC for the application of SCS method : 1. Review of SCS method and problems in GIS application." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 11, pp. 955-962 (in Korean).
- Paudel, M., Nelson, E. J. and Scharffenberg, W. (2009). "Comparison of lumped and quasi-distributed Clark runoff models using the SCS curve number equation." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 1098-1106.
- Sharpley, A. N. and Williams, J. R. (1990). "EPIC-erosion/productivity impact calculator : 1. Model determination." *US Department of Agriculture*, Technical Bulletin, No. 1768.
- Sobhani, G. (1975). *A review of selected small watershed design methods for possible adoption to Iranian conditions*. M.S. Thesis, Utah State University, Logan, UT.
- Soil Conservation Service (SCS) (1972). *National engineering handbook*, Section 4, Hydrology. US 444 Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Soil Conservation Service (SCS) (1985). *National engineering handbook*, Section 4, Hydrology. US 444 Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC.
- United States Department of Agriculture (USDA) (2004). *Part 630 hydrology national engineering handbook*, Chapter 10 : Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall.
- Yoon, T. H. (1991). "Validity of runoff curve number method for estimating of effective rainfall." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 24, No. 2, pp. 97-108 (in Korean).