

유역의 강우-유출 특성을 고려한 NRCS-CN 방법의 선행토양함수조건의 재설정: 선행5일강우량을 기준으로

유지영* · 문건우** · 안재현*** · 김태웅****

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

Re-establishing the Antecedent Moisture Condition of NRCS-CN Method Considering Rainfall-Runoff Characteristics in Watershed Based on Antecedent 5-Day Rainfall

ABSTRACT

The amount of antecedent 5-day rainfall (P5) is usually used to determine the antecedent soil moisture condition for estimating effective rainfall using the NRCS-CN method. In order to re-establish the threshold of P5 considering basin characteristics, this study investigated the sensitivity of the threshold of P5 to effective rainfall by comparing the corresponding observed direct runoff. The overall results indicate that the direct runoff estimated using the re-established threshold of P5 has smaller mean error (RMSE of 27.3 mm) than those using the conventional threshold (RMSE of 35.2 mm). In addition, after evaluating the effectiveness of threshold of P5 using the improvement index, the threshold re-established in this study improved the ability to estimate the direct runoff by 30% on average. This study also suggested to employ regression models using topographic indices to re-establish the threshold for ungauged basins. When using the re-established threshold from the regression model, the RMSE decreased ranging from 0.4 mm to 15.1 mm and the efficiency index of Nash and Sutcliffe increased up to 0.33.

Key words : Antecedent moisture condition, Antecedent 5-day rainfall, Direct runoff, NRCS-CN method

초 록

유역강우량을 산정하는 NRCS-CN 방법의 선행토양함수조건을 결정하기 위하여 일반적으로 선행5일강우량이 사용된다. 본 연구에서는 유역의 유출특성을 고려하여 선행5일강우량의 기준값을 재설정하기 위해서 선행5일강우량의 기준값을 변화시키면서 실제 관측 직접유출고와의 오차에 대한 비교·분석을 실시하였다. 그 결과, 전체 18개 대상유역에서 본 연구에서 재설정된 기준값을 적용하여 산정한 직접유출량의 평균오차(RMSE = 27.3 mm)는 일반적으로 적용되는 기준값을 적용하여 산정한 직접유출량의 평균오차(RMSE = 35.2 mm)보다 감소하는 것으로 확인되었다. 또한, 향상 지수를 바탕으로 유역별 선행5일강우량의 기준에 대한 효율성을 평가한 결과, 본 연구에서 재설정된 선행5일강우량의 기준값을 활용하여 직접유출량을 추정하였을 경우, 평균적으로 약 30% 정도의 정확도가 향상되는 것으로 확인되었다. 이와 더불어 본 연구에서는 미계측 유역에 대한 선행5일강우량의 기준값을 재설정하기 위하여 지형지표를 활용한 선형회귀모형을 제안하였다. 회귀모형을 이용하여 재조정된 선행5일강우량의 기준값을 적용할 경우, RMSE가 감소(최소 0.4 mm에서 최대 15.1 mm)함과 동시에 Nash and Sutcliffe의 효율성 계수는 최대 0.33까지 증가하였다.

검색어 : 선행토양함수조건, 선행5일강우량, 직접유출량, NRCS-CN 방법

* 정희원 · 전북대학교 공과대학 토목공학과 연구교수 (jyoo84@gmail.com)

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

*** 정희원 · 서경대학교 이공대학 토목건축공학과 부교수 (wrr@skuniv.ac.kr)

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

Received February 5, 2014/ revised March 6, 2014/ accepted May 2, 2014

1. 서론

현재 우리나라에서는 하천기본계획, 내배수처리계획, 각종 수해 복구사업계획, 중·대규모 다목적댐 건설계획, 유역종합치수계획 등을 수립하는 과정에서 객관적이고 일관성 있는 방법을 통해 설계홍수량을 산정하기 위한 노력이 국가적인 차원에서 지속적으로 이루어지고 있다(MLTM, 2012). 일반적으로 적용되는 설계홍수량 산정방법은 유역의 강우빈도해석을 통해 설계강우량을 산정하고 NRCS-CN 방법을 이용하여 설계강우량으로부터 유효우량을 산정한 후 강우-유출모형을 이용하여 유효우량을 홍수수문곡선으로 전환하는 방법이다. 이 때 NRCS-CN 방법을 이용하여 산정한 유효우량은 직접유출량이 된다. NRCS-CN 방법은 실제 계측된 강우-유출 자료가 없는 경우에도 유역 내 토양의 종류 및 토지이용도, 토양의 수문학적 조건들이 직접유출에 미치는 영향을 정량적으로 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 우리나라 수자원 실무에서도 NRCS-CN 방법을 기반으로 강우-유출해석을 수행하는 것을 권장하고 있다(MLTM, 2012).

1930년대 중반 수문자료 수집의 중요성이 부각됨에 따라 미국 정부는 토양보존국(Soil Conservation Service, 이하 SCS)을 설립하고 여러 시험유역에 대해 강우, 유출 및 기타 수문자료를 수집하여 강우-유출모형을 개발하였다. Sherman (1949)은 강우사상과 직접유출 간의 관계에 대한 단위도 이론을 제시하였으며, Mockus (1949)는 지표면 유출이 토양의 특성, 토지 이용도, 선행강우량, 강우량과 강우기간 및 평균 온도 등에 영향을 받는다고 가정하여 유출해석을 수행하였다. Andrews (1954)는 SCS-CN 방법의 기초 이론을 구축하였으며, 이를 바탕으로 Mockus (1964)는 강우-유출 자료를 분석하여 유역의 평균조건에서 구한 유출곡선지수(Curve Number, 이하 CN)를 제안하였고, 실제 강우강도에 따른 CN의 변화를 무시하기 위해 평균토양함수조건을 사용하여 평균조건을 설정하도록 하였다. 이러한 선행연구성과를 바탕으로 SCS는 선행토양함수조건(Antecedent Moisture Condition, 이하 AMC)에 따른 CN 값의 환산표를 제시하였다(SCS, 1971). 그 후, 미국 중서부 농업지대의 서로 다른 피복형태 및 토양형을 가지고 있는 여러 시험유역을 대상으로 연최대 호우계열자료(일 강우-유출량 자료)를 수집하여, CN 값을 제시하였다(Rallison and Miller, 1982; Ponce and Hawkins, 1996).

우리나라에서는 Yoon and Shim (1976)에 의해 IHP 시험유역에서의 설계홍수량을 추정하기 위하여 SCS-CN 방법이 처음으로 도입되었으며, 그 이후 국내 유역에 대한 적용성 검토를 위한 지속적인 연구가 수행되었다(Sonu et al., 1977; Kim, 1989). Yoon (1991)은 강우-유출 자료가 존재하는 계측유역에서는 강우-유출 자료에서 역으로 추정된 관측 CN 값을 사용할 것을 권장한 반면

강우-유출 자료가 없는 미계측 유역에서는 AMC에 따른 보통 상태의 CN 값과 습윤 상태의 CN 값을 3:7의 비율로 가중평균하여 사용하는 것이 적절하다고 제시한 바 있다.

NRCS-CN 방법은 미국 내 다양한 유역의 특성(강우-유출 관계, 토양특성, 피복상태 등)을 분석하여 도출된 경험식을 기반으로 개발되었기 때문에, 우리나라를 비롯한 미국 이외의 여러 국가에서 유역의 유출특성을 반영하기에는 다소 어려움이 발생할 수 있다. 또한, NRCS-CN 방법에서 제시하고 있는 AMC의 구분기준인 선행5일강수량(Antecedent 5-day Rainfall, 이하 P5)의 기준값은 물리적인 이론에 근거하기보다는 주관적인 판단에 의해 결정되었을 가능성이 있으며, 사실상 이론적 근거가 명확하지 않다(Miller, 1979; Chen, 1981; Ponce and Hawkins, 1996). Park et al. (2005) and Yoo et al. (2005)는 국내 유역의 강우-유출 사상을 대상으로 NRCS-CN 방법에서 제시하고 있는 기존의 AMC를 바탕으로 CN 값을 직접 산정한 결과, 초기 개발자 의도에 따른 AMC의 발생빈도와 상이한 빈도특성이 나타났다. 즉, AMC를 구분하는 P5의 기준이 적절하지 검토할 필요가 있음을 확인하였다. 이처럼 모든 대상유역에 대하여 NRCS-CN 방법에서 제시하는 동일한 AMC의 구분 기준을 적용하고, 이에 따라 결정된 CN 값을 기반으로 추정된 직접유출량은 실제 관측유출량과 비교하여 과다산정될 가능성이 있어 결과적으로 유출해석 결과의 신뢰성이 저하되는 문제가 있다(Miliani et al., 2011). 또한, Jo and Kim (1997)은 NRCS-CN 방법을 적용할 경우, 우리나라 유역의 토지이용 특성 중 유역사면의 경사효과를 고려할 수 없는 한계가 있다고 지적하고, 유역사면의 경사효과를 고려하여 직접유출량을 산정하는 것이 합리적임을 증명하였다.

본 연구에서는 우리나라 유역에서 NRCS-CN 방법을 기반으로 계산된 직접유출량의 신뢰성을 향상시키기 위한 두 가지 방안을 제시하고자 한다. 우선, 선행토양함수조건을 결정할 때 활용되는

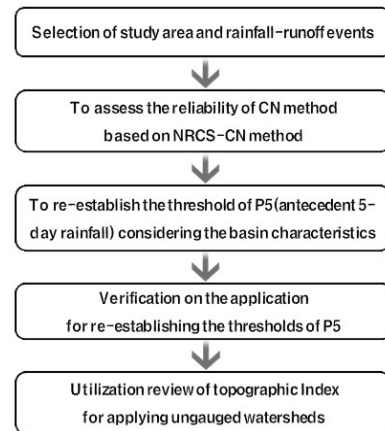


Fig. 1. Flow of Research

선행5일강수량에 대한 적절성을 검토한 후, 우리나라의 실제 유출 특성을 고려할 수 있는 선행5일강수량의 새로운 기준을 재설정하였다. 또한, 강우-유출량 미계측 유역에서도 선행5일강수량의 기준을 적용할 수 있는 방안을 마련하기 위해 지형지표의 활용성을 추가로 검토하였다(Fig. 1 참고).

2. 연구방법

2.1 NRCS-CN 방법

NRCS 방법은 물수지 평형의 원리를 바탕으로 총강우량(P)을 강우의 초기손실(I_a), 최대잠재보유수량(S), 실제보유수량(F)의 합수로 Eq. (1)과 같이 표현한다(Andrews, 1954). SCS (1972)는 총강우량에서 초기손실량(I_a)은 최대잠재보유수량(S)의 20%라고 가정하였고, 직접유출고(Q)는 총강우량(P)과 유역의 최대잠재보유수량(S)의 합수로 표현할 수 있어 Eq. (2)를 이용하여 쉽게 계산이 가능하다. 최대잠재보유수량(S)는 유역의 유출특성을 나타내는 유출곡선지수(CN)를 이용하여 산정할 수 있다. 여기서, CN은 1에서 100의 범위의 값을 갖고, 만일 CN=100이면 S=0이고, CN=1이면 S=25,146이다. 따라서 강우의 손실부분인 유역의 최대잠재보유수량(S)은 유출곡선번호(CN)에 반비례한다.

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

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

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2b)$$

이처럼 대상유역의 유출곡선지수(CN)가 주어지면 총강우량(P)에 대하여 직접유출고(Q)의 계산이 가능하게 된다. SCS (1985)는 1년을 성수기(6월~9월)와 비성수기(10월~익년 5월)로 구분한 후, 실제 호우발생 전의 초기토양수분량을 대변하는 지표로 선행5일강수량(P5)를 이용하였다. 일반적으로 P5를 기준으로 선행토양함수조건(AMC)을 3가지로 구분한다. 즉, 성수기의 경우, P5 < 35.56 mm이면 AMC-I, 35.56 mm ≤ P5 < 53.34 mm이면 AMC-II, P5 ≥ 53.34 mm이면 AMC-III가 된다. 여기서 AMC-I은 유역의 토양이 대체로 건조상태에 있어서 유출률이 상대적으로 낮은 상태, AMC-II는 유출률이 보통인 상태, AMC-III는 유역의 토양이 대체로 수분으로 포화된 상태로 유출률이 높은 상태를 의미한다. Sobhani (1975)는 최대잠재보유수량(S)과 AMC-I, II, III 사이에 선형적인 관계를 가지고 있음을 밝혔으며, 이를 근거로 하여 AMC에 따른 CN의 변환식을 Eq. (3)과 같이 제시하였다.

또한, CN은 AMC의 변화에 따라 매우 민감하게 변화하는 특성이 있으며, 유역의 유출특성을 고려하지 못한 선행5일강수량을 기준으로 결정된 AMC에 따라 CN을 산정하기 때문에 상당한 오차가 발생할 수 있다고 지적하였다.

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.334 - 0.01334CN_{II}} \quad (3a)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.4036 + 0.005964CN_{II}} \quad (3b)$$

여기서, CN_I, CN_{II}, CN_{III}은 각 AMC-I, II, III에 대한 유출곡선지수를 나타내며, CN_I과 CN_{III}는 유역의 유출률이 보통상태(AMC-II)에 대한 CN_{II}를 결정한 후 변형공식을 적용하여 계산된다.

2.2 대상유역 및 수문자료

본 연구에서는 한강, 낙동강, 금강, 영산강 유역에 있는 25개(한강 14개, 낙동강 1개, 금강 8개, 영산강 2개)의 수위관측지점을 기준으로 대상유역을 선정하고(Fig. 2 참고), 유량조사사업단(www.hsc.re.kr)의 협조를 얻어 강우량과 유량의 관측자료(2005-2012년)를 확보하였다. 유량자료는 성수기(6월~9월)에 측정된 30분 단위의 수위관측자료를 수위-유량 관계곡선을 이용하여 유량 자료로 환산한 것이다. 강우량 자료는 유역 인근 지점 자료를 Thiessen 방법을 이용하여 유역 평균강우량으로 환산한 것을 이용하였다.

본 연구에서 구축된 강우-유량 관측자료를 이용하여 전체 25개 유역에 대하여 총 551개의 단일호우사상을 추출하였다. Table 1은 유역의 면적, 자료 기간, 지형적 특성, 단일호우사상의 개수 등을 정리한 것이다. 호우사상의 수가 너무 적은 경우(15개 미만인 유역, Table 1에서 강우-유출 사상수가 굵게 표기된 유역)에는 분석결과를 왜곡시킬 우려가 있기 때문에 제외하고 총 18개 유역의 481개 호우사상을 주요 분석사상으로 선정하였다.

2.3 GIS 기법을 이용한 유출곡선지수(CN) 산정

SCS (1972)에서는 토지피복(land cover)상태를 유역별 토지이용상태, 식생피복 처리상태, 수문학적 조건에 따라 분류하여 유출곡선지수(CN)를 제시하였다. 우리나라의 경우 토지이용상태 및 식생피복 처리상태는 시가지 건조지역, 농경지, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역 등으로 구분된다. 또한, 수문학적 조건을 고려하기 위해, SCS (1972)에서 제시한 배수조건에 따라 유출률이 높은 조건을 불량(Poor), 유출률이 중간 조건인 보통(Fair), 유출률이 낮은 조건을 양호(Good)로 구분한다.

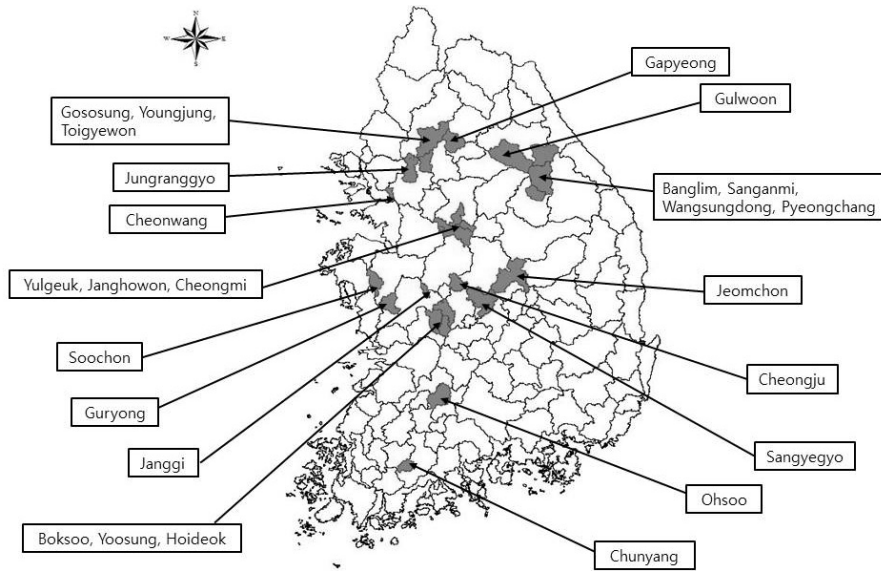


Fig. 2. Location of Study Watersheds

Table 1. Hydro-geometric Characteristics of the Watersheds Selected for the Study

Watershed	Main Stream	Area (km ²)	Year of Observation	Mean Topographic Slope (%)	No. of events
Gapsyeong	Han River	305.12	2008, 2009, 2011	45.4	11
Gososung	Han River	551.2	2009, 2010, 2012	27.1	24
Guryong	Geum River	199.74	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	26.6	33
Gulwoon	Han River	724.89	2008, 2009, 2010, 2011	41.5	18
Banglim	Han River	527.12	2009, 2010, 2011	40.2	21
Boksoo	Geum River	161.9	2009, 2011	35.5	9
Sangyegygo	Geum River	482.29	2009, 2010, 2011	29.4	12
Sanganmi	Han River	392.93	2010, 2011	39.4	9
Soochon	Geum River	223.19	2007, 2008, 2009, 2010, 2011	15.4	31
Youngjung	Han River	465.88	2007, 2010, 2011, 2012	27	29
Ohsoo	Youngsan River	350.09	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	24.6	24
Wangsungdong	Han River	387.67	2009, 2010, 2011	47.8	10
Yoosung	Geum River	249.63	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	27.3	13
Yulgeuk	Han River	179.95	2009, 2010, 2011	7.5	6
Janggi	Geum River	63.09	2007, 2008, 2009, 2010, 2011	21.5	19
Janghowon	Han River	431.23	2008, 2009, 2010, 2011	16.8	26
Jeomchon	Nakdong River	614.53	2007, 2008, 2010	37.8	18
Jungrang	Han River	208.41	2005, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	17.3	39
Cheonwang	Han River	42.32	2009, 2010	13.4	18
Cheongmi	Han River	514.66	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	16.7	32
Cheongju	Geum River	161.44	2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	20.1	19
Chunyang	Youngsan River	143.1	2006, 2007, 2008, 2009	34.3	18
Toigyewon	Han River	200.45	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	26.7	48
Pyeongchang	Han River	695.67	2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011	40.3	32
Hoideok	Geum River	601.02	2005, 2006, 2007, 2008, 2010	25.7	32

수문학적 토양군은 토양의 구성과 특성 및 침투율을 기준으로 총 4가지(Type A (침투율 7.62-11.43mm/hr), B (침투율 3.81-7.62mm/hr), C (침투율 1.27-3.81mm/hr), D (침투율 0.0-1.27 mm/hr))로 구분된다(Hoggan, 1989). NIAST (2007)은 Jung et al. (1995)이 제시한 수문학적 토양군 분류를 개선하여 우리나라 전역에 분포되어 있는 1,200여개의 토양통에 토양부호를 부여하고 Hoggan (1989)가 제안한 침투율을 고려하여 4가지의 수문학적 토양군을 부여하고 있다.

본 연구에서는 농촌진흥청에서 제공하고 있는 정밀토양도(1:25000)을 사용하여 대상유역의 수문학적 토양군을 분류하고, 환경부에서 제공하는 수치토지피복도-중분류(1:25000)를 이용하여 대상유역의 토지이용을 분류한 후, GIS 기법을 이용하여 각 유역의 유출곡선 지수(CN_{th})를 산정하였다.

2.4 유역의 강우유출 특성을 고려한 AMC 기준값 재설정 방법

일반적으로 NRCS-CN 방법에서 제시하는 토양함수조건은 호우발생 이전 5일 동안의 누적강수량(선행5일강수량)의 2가지 기준값(threshold 1, threshold 2)을 이용하여 건조상태(AMC-I), 보통상태(AMC-II), 습윤상태(AMC-III)로 구분된다. 성수기일 경우에는 건조상태와 보통상태를 구분하기 위해 35.56 mm의 기준값(threshold 1), 보통상태와 습윤상태를 구분하기 위해 53.34 mm의 기준값(threshold 2)을 적용한다. 본 연구에서는 대상 유역별 강우에 따른 유출특성을 차별적으로 고려하여 실제 관측된 CN과 직접유출고와의 오차를 줄일 수 있도록 선행5일강수량을 재설정하여 선행토양함수조건을 구분하고자 한다. 즉, 기존의 방법에서는 고정된 선행5일강수량 기준값에 따라 모든 유역의 선행토양함수조건을 구분하지만, 본 연구에서는 유역의 유출특성을 고려하여 유역별 선행5일강수량 기준값을 재설정하기 위해 다음과 같은 순서로 연구를 수행하였다.

(1) 전체 25개 유역 중 주요 분석대상으로 선정된 18개 유역(481개의 호우사상)을 대상으로 GIS 기법을 이용하여 산정된 유출곡선 지수(CN_{th})를 활용하여 선행5일강수량의 기준값(threshold 1과 threshold 2)에 따라 AMC를 결정한 후, 각 호우사상별 직접유출고(Q_{est})를 계산한다.

(2) 선행5일강수량의 두 가지 기준값(threshold 1, threshold 2)을 매회 0.5 mm 씩 증가시키면서 (1)과 같은 방법으로 직접유출고(Q_{est})를 계산하였다. 여기서 두 가지 기준값의 분석범위(1 < threshold 1 < 60, 20 < threshold 2 < 150)는 NRCS-CN 방법에서 제시한 구분기준 값을 모두 포괄할 수 있도록 설정하였다. 이처럼 추정된 직접유출고(Q_{est})는 해당유역의 호우사상(강우-유출 자료)으로부터 계산된 관측 직접유출고(Q_{obs})와 비교하여 오차를 확인하

였다.

(3) 최종적으로 재설정되어질 유역별 선행5일강수량의 기준값(threshold 1과 threshold 2)은 (2)의 결과를 바탕으로 관측 직접유출고(Q_{obs})와의 추정된 직접유출고(Q_{est})의 오차가 가장 작고 효율성이 큰 경우의 값으로 결정하였다.

(4) 미계측 유역에 대한 선행5일강수량의 기준을 제시하기 위하여 선행5일강수량 기준값과 지형지표(Topographic index)와의 회귀관계식을 추정하였다. 지형지표가 존재하는 모든 유역에서는 유역의 지형지표와 회귀모형에 따른 선행5일강수량의 기준값을 추정하는 것이 가능하다. 이를 위하여 주요 분석대상 유역에서 제외된 7개의 유역(호우사상의 수가 15개 미만인 유역)을 대상으로 하여 회귀모형의 활용성을 검토하였다.

3. 연구 결과 및 분석

3.1 NRCS-CN 방법의 적용성 평가

본 연구에서는 직접유출고(Q)의 산정을 위한 NRCS-CN 방법의 타당성을 평가하기 위해 전체 25개 유역 중 18개 유역의 호우사상(481개)에 대한 분석을 수행하였다. 호우사상의 특성(총강우량(P), 선행5일강우량(P5), AMC 조건)과 GIS 기법을 이용하여 산정된 유역별 평균 유출곡선지수(CN_{th})를 이용하여 NRCS-CN 방법으로 산정한 직접유출고(Q_{est})와 관측된 직접유출고(Q_{obs})를 비교하였다. 여기서 관측된 직접유출고(Q_{obs})는 관측된 강우-유출 자료를 이용하여 총유출량에서 기저유출을 제외하여 산정된 직접유출량을 해당유역의 면적으로 나누어 계산된다. 본 연구에서는 다양한 수문곡선 분리방법(주 지하수 감수곡선법, 수평직선분리법, N-day법, 수정 N-day법, 가변경사법 등) 중 상대적으로 간편하고 실무에서 많이 적용하고 있는 수평직선분리법을 이용하여 기저유출을 분리하였다.

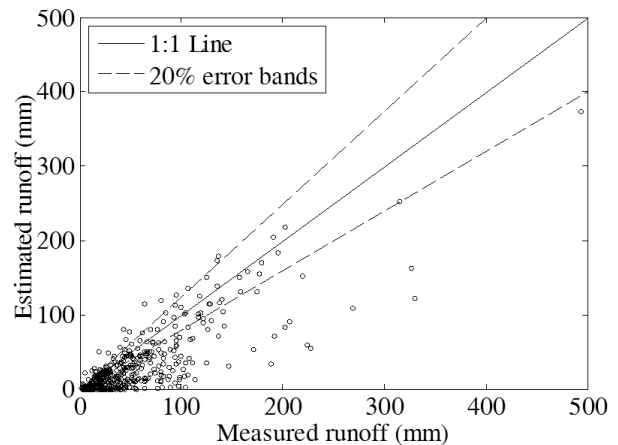


Fig. 3. Comparison of Direct Runoffs from the NRCS-CN Method

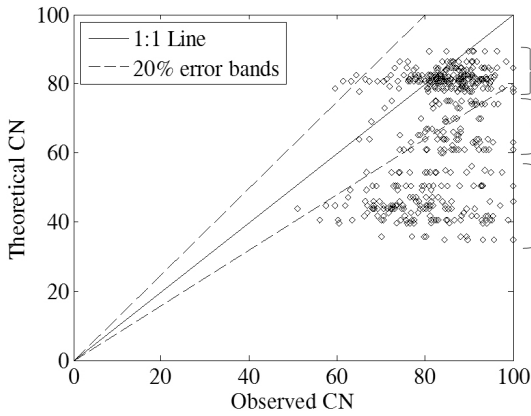


Fig. 4. Comparison of CN According to AMC

그 결과, NRCS-CN 방법으로 추정된 직접유출고(Q_{est})와 관측된 직접유출고(Q_{obs})는 Fig. 3과 같이 도시하여 비교가 가능하며, NRCS-CN 방법으로 추정된 직접유출고(Q_{est})는 관측된 직접유출고(Q_{obs})에 비해서 과소추정되는 경향이 있는 것으로 확인되었다. 즉, Fig. 3에 보인 바와 같이, 추정된 직접유출고(Q_{est})와 관측된 직접유출고(Q_{obs})는 오차의 20% 범위(점선)에서도 상당히 벗어난 경우가 다수 있는 것으로 확인된다.

일반적으로 NRCS-CN 방법에서 추정된 직접유출고(Q_{est})는 P5의 기준에 따라 AMC가 결정된 후, 이에 따른 유출곡선지수(CN)가 계산된다. 따라서, 추정된 직접유출고(Q_{est})는 CN과 P5를 이용한 AMC 구분결과에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 AMC를 구분하는 기준인 P5와 CN의 상호관계에 대한 검토가 필요하다고 판단하여, 실제 관측된 호우사상(강우-유출 사상)을 이용하여 계산된 관측 CN(CN_{obs})과 유역별 CN_{th} 의 차이를 검토하였다. 그 결과, Fig. 4에 나타난 바와 같이, AMC-III에 따른 CN이 가장 큰 빈도로 나타났으며, 상대적으로 AMC-II에 따른 CN은 가장 적은 빈도로 나타났다. Mockus (1964)가 제시한 CN의 개발 과정 및 AMC의 적용 배경에 따르면, 유역 내 CN의 빈도는 평균 조건인 AMC-II에서 가장 많이 발생해야 하며, AMC-I이나 AMC-III의 CN은 상대적으로 적은 발생빈도를 가지는 것이 타당하다. 즉, 미국에서 개발된 NRCS-CN 방법의 P5 기준을 그대로 국내 유역에 적용했을 경우 AMC에 따른 CN의 발생빈도가 개발자의 의도와 큰 차이를 가지게 된다.

3.2 선행토양함수조건 결정을 위한 선행5일강수량의 기준 값 재설정

특정 유역의 유출특성을 충분히 고려하여 신뢰도 높은 유출량을 추정하기 위해서는 우선적으로 유역의 유출특성을 대표하는 CN의 신뢰성을 확보하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기준에 모든

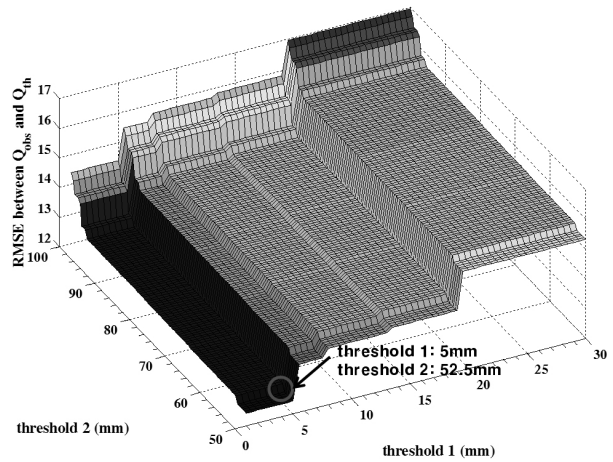


Fig. 5. Error Surface of Estimated Direct Runoff for Hoideok. The Point with the Lowest Error Becomes New Thresholds

Table 2. Re-established Thresholds, RMSE and E. The Thresholds were Determined so as to have the Lowest Value in the 2-D Error Surface

Watershed	Threshold 1 (mm)	Threshold 2 (mm)	RMSE (mm)		Efficiency (E)	
			NRCS	New	NRCS	New
Gosung	1	56.5	64.8	53.1	0.2	0.5
Guryong	5	59.5	26.9	23.2	0.5	0.6
Gulwoon	3.5	87	55.0	34.6	-0.1	0.6
Banglim	9.5	50.5	36.8	27.9	0.2	0.5
Soochon	2	52.5	34.8	23.2	0.2	0.6
Youngjung	1	53	42.5	36.5	0.7	0.8
Ohsoo	1	52.5	35.6	29.3	0.4	0.6
Janggi	1	68.5	34.2	27.7	-0.1	0.3
Janghowon	4.5	53	19.2	16.1	0.5	0.7
Jeomchon	22	52.5	37.3	35.0	-1.4	-1.1
Jungrang	1	58	23.7	19.7	0.6	0.7
Cheonwang	2	51	14.7	9.2	0.9	1.0
Cheongmi	2	52.5	44.9	29.1	0.5	0.8
Cheongju	1	52	15.4	12.7	0.5	0.7
Chunyang	8.5	56.5	62.5	53.5	-1.2	-0.6
Toigyewon	1.5	51	40.5	28.2	0.8	0.9
Pyeongchang	10.5	50.5	28.5	20.3	0.5	0.8
Hoideok	5	52.5	15.5	12.4	0.6	0.8
Mean	4.6	56.1	35.2	27.3	0.2	0.5

유역에 동일하게 적용되던 P5 기준값을 유역의 유출특성을 고려하여 결정하였다. 즉, 국내 유역의 유출특성을 반영할 수 있도록 유역별 P5 기준값을 재설정하고 이에 따라 AMC를 결정하고 CN를 산정하여 직접유출고를 계산하는 방안을 제안하였다.

우선 대상 지역의 호우사상에 대하여 P5의 두가지 기준값 (threshold 1과 threshold 2)을 각각 0.5 mm씩 증가시키면서 CN_{th} 를 산정하였다. 그 후, 매회 추정된 CN_{th} 를 이용하여 계산한 직접유출고(Q_{est})와 해당지역의 실제 호우사상(강우-유출 자료)으로부터 계산한 관측 직접유출고(Q_{obs}) 사이의 오차를 RMSE(Root Mean Squared Error, Eq. (4))를 이용하여 계산하였고, Fig. 5와 같은 2차원의 오차그래프를 작성하였다. 이를 바탕으로 구역별로 RMSE를 가장 작게 하는 threshold 1과 threshold 2를 결정하였고, 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 각 구역별 재설정된 P5 기준값 중 threshold 2는 굽은구역에서 가장 큰 값(87 mm)을 가지지만, 기존의 기준값(53.34 mm)과 평균적으로는 유사한 값(56.1 mm)으로 재설정되었다. 반면, threshold 1은 기존의 기준값(35.56 mm)에 비해 상당히 낮은 값(18개 구역 평균 : 4.6 mm)으로 결정되었다. 예를 들어, 점촌구역에서는 가장 큰 값(22 mm)으로 재설정되었으나, 기존의 기준값과 비교하였을 경우에는 역시 매우 낮은 값이다. Park et al. (2005) 역시 AMC-I과 AMC-II를 구분짓는 P5의 기준값(특히 threshold 1)은 하향될 필요가 있다고 주장한 바 있어 본 연구결과와 일관성 있는 결과임을 확인할 수 있다.

이처럼 재설정된 P5의 기준값을 적용하여 추정된 직접유출고(Q_{est})와 관측된 직접유출고(Q_{obs})는 Fig. 6과 같이 도시하여 비교분석을 수행하였다. 또한 계산된 직접유출고의 정확성의 향상 정도를 평가하기 위해 RMSE와 더불어 Nash and Sutcliffe (1970)의 효율성 계수(E) (Eq. (5))를 계산하였으며 Table 2에 RMSE 결과와 같이 제시하였다. 여기서, RMSE는 값이 작을수록, 효율성 계수(E)는 값이 '1'에 근접한 값일수록 오차가 적고 효율성이 크다고 해석된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs,j} - Q_{est,j})^2} \quad (4)$$

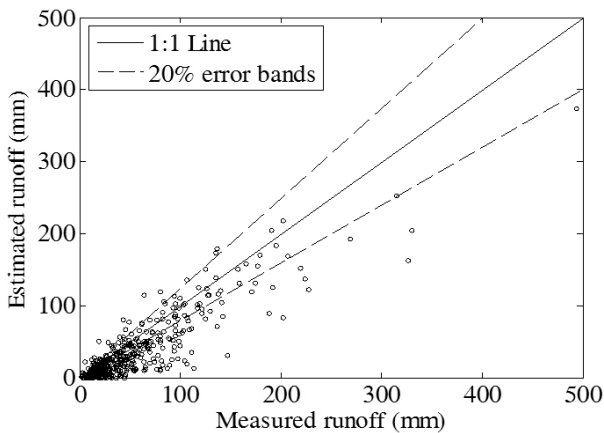


Fig. 6. Comparison of Direct Runoff using Re-established Thresholds

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,j} - Q_{est,j})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,j} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5)$$

P5에 대한 기존의 기준값을 적용하는 경우와 비교하여 본 연구에서 재설정된 구역별 기준값을 적용하였을 경우에는 18개 모든 구역에서 오차가 감소하는 것으로 확인되었다. 기존의 기준값 적용한 경우 오차의 평균은 35.2 mm이고, 본 연구에서 재설정된 기준값을 적용한 경우 오차의 평균은 27.3 mm로 나타났다. 또한, 효율성 계수(E)를 계산한 결과에서도 기존의 기준값을 적용한 경우와 비교하여 본 연구에서 재설정된 기준값을 적용한 경우, 18개 모든 구역에서 최소 0.1에서 최대 0.7까지의 범위로 증가하는 것이 확인되었다(Table 2 참고).

Fig. 7은 재설정된 P5 기준값으로 구분된 AMC에 따른 CN 값의 분포를 보여준다. Fig. 4와 비교해 보면, AMC-III에 따른 CN의 빈도특성이 가장 크게 나타나지만, P5 기준값이 재설정됨으로 인해 AMC-I에 따른 CN의 발생빈도는 현저히 줄어들면서 AMC-II에 따른 CN 값으로 변화되어진 것을 확인할 수 있다. 즉, 선행 강우의 특성에 따라 CN 값은 변할 수 있기 때문에, Park et al. (2005) and Yoo et al. (2005)에서 주장한 바와 같이 실제 AMC의 기준을 재설정하여, 구역의 유출특성을 고려하여 CN 값을 추정하는 것은 신뢰성 있는 유출해석을 위한 중요하다.

본 연구에서는 향상지수(Improvement, I)를 이용하여 구역별 P5 기준값에 대한 효율성을 평가하였다. 향상지수 I는 새로운 기준값을 이용하여 계산된 직접유출고와 기존의 기준값을 이용하여 계산된 직접유출고가 실제 관측된 직접유출고의 20% 오차범위 (Fig. 3 and 6에서의 점선) 내로 포함되는 정도를 평가하는 것으로 Eq. (6)과 같이 계산된다. 그 결과, 총 18개 구역에서 재설정된 기준값을 이용하여 직접유출량을 추정하였을 경우 평균적으로 약

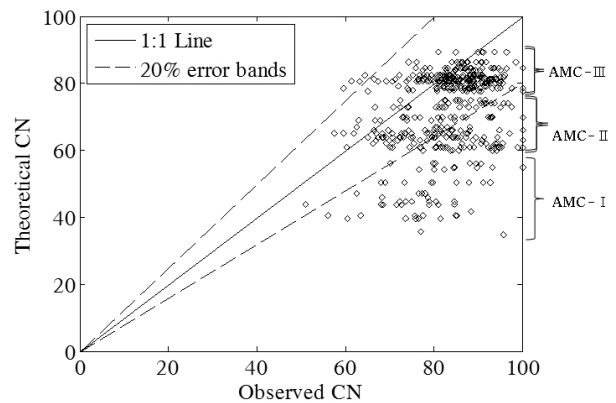


Fig. 7. Comparison of CN According to AMC using Re-established Thresholds

30% 정도의 향상능력을 보이는 것으로 확인되었다.

$$I = \frac{N_{20\%}^n - N_{20\%}^s}{N_{20\%}^s} \times 100 (\%) \quad (6)$$

여기서 $N_{20\%}^n$ 은 본 연구에서 새롭게 재설정된 유역별 P5 기준값을 이용하여 계산된 직접유출고(Q_{est}) 중에서 관측된 직접유출고(Q_{obs})의 20% 오차범위 이내에 포함되어진 갯수이며, $N_{20\%}^s$ 는 기존의 기준값을 이용하여 계산된 직접유출고(Q_{est}) 중에서 관측된 직접유출고(Q_{obs})의 20% 오차범위 이내에 포함되어진 갯수를 의미한다.

3.3 지형지표와 선행5일강수량기준 간의 관계성 분석

현재 우리나라에서 운영되고 있는 유량관측소는 매우 한정되어 있으며, 이들 유량관측소에서 제공하는 정보를 기반으로 우리나라 전체에 대한 유출특성 해석의 신뢰도를 향상시키기 위한 노력이 계속되고 있다. 최근에는 지표수 해석을 위한 목적으로 GIS (Geographic Information System) 기반으로 생성된 수문학적 지형정보의 활용이 커지고 있다. 일반적으로 수문학에서의 지형정보는 주로 유역과 하천의 지형적 특성(유역 면적, 유역 경사, 유역 평균고도, 하천 길이 및 경사 등)을 의미하며, 이는 실제 유역의 강우-유출 해석 시 물리적 및 통계적 혹은 경험적 방정식의 매개변수로 활용된다. Miliani et al. (2011)은 강우-유출 자료의 수집이 어려운 산악지역의 미계측 유역에서 유역특성을 반영하여 P5 기준값을 결정하기 위해, 배수면적과 경사의 특성을 결합하여 GIS 기반으로 계산한 지형지표(Topographic index)를 수문학적 지형정보 중 하나로서 활용하였다. 이것은 유역사면의 경사효과를 고려하기 어려운 NRCS-CN 방법의 단점을 보완하기 위한 목적으로 시도된 것이다.

본 연구에서는 Miliani et al. (2011)와 동일한 목적으로 유역의 토지이용 특성 중 유역사면의 경사효과를 추가적으로 고려한 후, 우리나라의 강우-유출 자료가 없는 미계측 유역에서도 P5 기준값을 결정할 수 있는 방안을 제시하기 위해서 GIS 기반으로 계산된 유역평균경사를 지형지표로 활용하였다. 우선, 전체 25개 유역 중 호우사상의 수가 상대적으로 적게 확인된 7개 유역을 대상으로 적용하였다. 또한, 유역별 두 개의 변수(P5 기준값과 지형지표(유역 평균경사))간의 상관성을 검토하기 위해서 Pearson 상관계수를 계산하였다. 그 결과, 재설정된 18개 유역의 threshold 1과 유역평균경사의 상관계수는 0.59이며, threshold 2와 유역평균경사는 다소 낮은 상관성(상관계수 = 0.27)을 갖고 있는 것으로 확인되었다. 이처럼 유역별 지형지표와 P5 기준값에 대하여 추정된 선형회귀식은 각 유역의 지형지표(유역평균경사)에 따른 선행5일강수량의

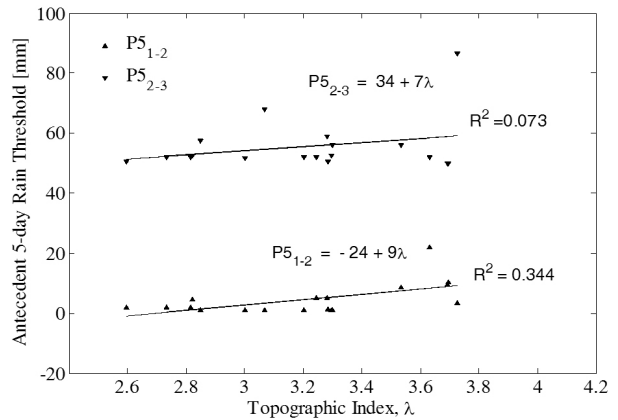


Fig. 8. Relationship Between the New Thresholds (P5) for Determining AMC Class and the Basin Mean Topographic Index

Table 3. RMSE and E for Ungauged Watersheds. The New Thresholds were Estimated From Regression Equations

Watershed	RMSE (mm)		Efficiency (E)	
	NRCS	New	NRCS	New
Gapyeong	55.9	55.5	0.41	0.41
Boksoo	17.3	25.6	0.78	0.53
Sangyegyo	31.1	16.0	0.73	0.93
Sanganmi	19.6	19.6	0.41	0.41
Wangsungdong	39.7	29.5	0.25	0.58
Yoosung	32.4	28.5	0.60	0.69
Yulgeuk	17.6	10.2	0.84	0.95

기준값(threshold 1과 threshold 2)을 결정하는데 활용될 수 있다 (Fig. 8 참고).

일반적으로 선형회귀모형 내 독립변수와 종속변수 간의 상관성 및 회귀모형의 적합도를 나타내는 설명력을 평가하기 위해 결정계수를 이용한다. 그러나 본 연구에서 추정된 두 가지 선형회귀식의 결정계수는 약 0.344 (threshold 1에 관련된 회귀식)와 0.073 (threshold 2와 관련된 회귀식)로 나타났다. 여기서 선형회귀모형의 설명력이 낮게 나타난 이유는 본 연구에서 회귀모형의 변수로 활용한 지형지표(유역평균경사)와 P5 기준값의 낮은 상관성인 것으로 확인된다. 반면에 Miliani et al. (2011)의 선행연구와 같이 유사한 지리적 특성을 갖는 유역을 대상으로 하여, 유역별 P5 기준값과의 상관성이 높은 지형지표를 활용한다면 추정된 선형회귀모형의 신뢰성은 향상될 가능성이 있다고 판단된다.

본 연구에서는 선형회귀모형의 적용성을 검토하기 위해, 미계측 유역에 대해 재설정된 P5 기준값과 기존의 기준값을 적용한 경우(총 2개의 추정된 직접유출고(Q_{est}))를 비교하였다. 즉, 전체 25개 유역 중 호우사상의 수가 적은 7개 유역의 호우사상(70개)을 대상으로

하여, 회귀모형을 통해 재설정된 유역별 P5 기준값을 적용한 후 직접유출고(Q_{est})를 계산하고, 이는 관측된 직접유출고(Q_{obs})와 비교하여 RMSE와 효율성 계수(E)를 계산하였다(Table 3 참고). 그 결과, 7개의 검증대상유역 중 1개 유역을 제외한 6개의 유역에서 기존의 기준값을 활용하는 것 보다는 본 연구에서 재조정된 기준값을 적용하는 경우 최소 0.4 mm에서 최대 15.1 mm 범위 내로 RMSE가 감소하였으며, 효율성 계수(E)도 최대 0.33까지 증가하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 우리나라의 수계별 총 25개 유역을 대상으로 하여 NRCS-CN 방법에서 제시한 선행5일강수량의 기준값을 적용하여 직접유출량을 산정하는 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 객관적으로 검토하였다. 그 결과, NRCS-CN 방법에서 제시하고 있는 선행5일강수량의 기준값을 이용하였을 경우, CN의 발생빈도가 개발자의 의도와 크게 달라지는 것으로 확인되었다. 즉, NRCS-CN 방법을 이용하여 추정된 유출해석결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 우리나라의 유역특성에 맞는 선행5일강수량의 기준값을 재설정할 필요가 있다고 판단하였다.

본 연구에서는 실제 유역별 관측된 홍수사상을 이용하여, 경험적인 강우-유출 해석을 통해, 각 유역별로 선행5일강수량의 기준값을 새롭게 재설정하였다. 이에 따라 새로운 기준값을 적용하여 산정한 직접유출고는 기존의 기준값을 이용하여 산정한 직접유출고에 비해 상대적으로 낮은 오차와 높은 효율성을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 본 연구에서 재설정된 선행5일강수량의 기준값을 미계측 유역에서도 활용할 수 있는 방안을 마련하기 위하여 유역별 지형지표(유역평균경사)의 활용성을 검토하였다. 그 결과, 유역별 선행5일강수량의 기준값과 지형지표의 관계는 선형회귀모형으로 추정이 가능하였고, 미계측 유역에서 적용가능한 선행5일강수량의 기준값의 설정이 가능하였다. 그러나 선형회귀모형을 통해 추정된 선행5일강수량의 기준값에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는, 향후 보다 많은 유역에서 관측된 강우-유출 사상을 활용하여 유역별 선행5일강수량의 기준값을 결정하기 위한 연구가 수행되어야 한다. 이와 더불어 보다 안정적인 회귀모형을 개발하기 위해서는 실제 유역별 선행5일강수량의 기준값과 높은 상관성을 갖는 유역별 지형지표를 발굴하기 위한 지속적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- Andrews, R. G. (1954). “The use of relative infiltration indices in computing runoff.” (unpublished) *Soil Conservation Service*, Fort Worth, Texas, p. 6.
- Chen, C. L. (1981). “An evaluation of the mathematics and physical significance of the soil conservation service curve number procedure for estimating runoff volume.” *Rainfall-Runoff Relationship* (ed. by V.P. Singh), Water Resources Publications, pp. 387-418.
- Hoggan, D. H. (1989). *Computer-assisted floodplain hydrology and hydraulics*, McGraw-Hill, NY.
- Jo, H. J. and Kim, J. S. (1997). “A study on the calculation of effective rainfall by the SCS method using a triangular irregular network.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 30, No. 4, pp. 357-366 (in Korean).
- Jung, J. H., Jang, S. P., Kim, H. I., Jung, Y. T., Hur, K. S. and Park, H. (1995). “Runoff rate for the estimation of hydrologic soil groups.” *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 36, No. 6, pp. 12-33 (in Korean).
- Kim, J. D. (1989). *Surface runoff computations from a small watershed using SCS triangular unit hydrograph method*, M.S. Thesis, Seoul National University, Korea.
- Miliani, F., Ravazzani, G. and Mancini, M. (2011). “Adaptation of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 218-227.
- Miller, N. (1979) *Personal communication* (unpublished), USDA, Soil Conservation Service, Lanha, Maryland.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2012). *Design flood estimation techniques* (in Korean).
- Mockus, V. (1949). “Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms.” Exhibit A in Appendix B, *Interim Survey Report Grand (Neosho) River Watershed*, USDA.
- Mockus, V. (1964). *Personnel communication to Orrin Ferris, data March 5, 1964. 5pp.*, USDA, Soil Conservation Service, Washington D.C.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models part 1 - A discussion of principles.” *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAS) (2007). *National institute of agricultural science and technology research report : Agricultural and Environmental Research* (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).
- Ponce, V. M. and Hawkins, R. H. (1996). “Runoff curve number: Has it reached maturity?” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 1, No. 1, pp. 11-19.
- Rallison, R. E. and Miller, N. (1982). “Past, resent, and further SCS runoff procedure.” *Proc., International Symposium on Rainfall-*

- Runoff Modeling*, Water Resource. Published Littleton, Col., pp. 353-364.
- Sherman, L. K. (1949). "The unit hydrograph method." In O. E. Meinzer(ed.), *Physics of Earth*, Dover Publications Inc., New York, N.Y. pp. 514-525.
- 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) (1971). *National engineering handbook*, Section 4, Hydrology. US 444 Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC.
- 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.
- Sonu, J. H., Yoon, Y. N., Shim, S. B. and Lee, S. T. (1977). "Determination of effective rainfall by US SCS method and regression analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 10, No. 2, pp. 101-111 (in Korean).
- Yoo, C. S., Park, C. H. and Kim, J. H. (2005). "Revised AMC for the application of SCS method : 2. Revised AMC." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 11, pp. 963-972 (in Korean).
- 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).
- Yoon, Y. N. and Shim, S. B. (1976). "A determination of design flood for small basin by unit hydrograph method." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 9, No. 2, pp. 76-86 (in Korean).