

유출곡선지수의 선행토양함수조건 선정 기준 연구

김 지 상* / 안 재 현**†

A Study on the Selection of AMC of Curve Number

Jee-Sang Kim* / Jaehyun Ahn**†

요지 : 하천유역의 수문현상 분석 및 예측에서 강우-유출 모형의 신뢰성 제고를 위해 대상유역에 적합한 매개변수의 선정은 매우 중요하다. 특히 단위도 이론을 이용한 유역의 홍수량 결정인자 중 하나는 유효우량이며, 이를 계산하기 위해 NRCS의 유출곡선지수방법이 주로 사용된다. 여기서 유효우량에 직접적인 영향을 미치는 인자는 선행토양함수조건(AMC 조건)이다. 본 연구에서는 국내 상황에 적합한 선행토양함수의 선정기준을 찾고자 하였다. 이를 위해 홍수량 실측자료가 양호한 댐 유입량을 이용하였으며, 유역면적을 고려해서 보령댐, 합천댐, 남강댐 등이 선정되었다. 홍수량 산정모형의 홍수사상별 적정 매개변수 검정을 위해 최적화 기법을 적용했으며, 목적함수와 매개변수에 따른 CN의 변동성을 살펴보았다. 이를 통해 SCS에서 제안한 CN이 유역의 물리적인 특성에 따른 결정론적 변수지만 실제로는 강우의 사상에 따라 달라질 수 있으며, 매개변수의 최적화 수행시에 꼭 포함되어야 함을 알 수 있었다. 강우사상별 CN의 변동성은 매우 크게 나타났지만 대부분의 상한값이 AMC-III 조건의 범위 내에 위치하였다. 이는 설계 홍수량의 산정을 위한 선행토양함수조건은 AMC-III가 적절한 기준임을 의미하는 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 유효우량, 선행토양함수, 유출곡선지수, 최적화

Abstract : In order to establish a rainfall-runoff model, calibration of hydrological parameters for the model is very important. Especially, Curve Number(CN), estimated by NRCS method, is a main factor to apply unit hydrograph theory to calculation of peak discharge. For using NRCS method, it is needed selecting AMC because CN is strongly connected with that. In this study, we focus our concern on finding a applicable standard for selecting AMC for CN. For this, three dams which are Boryeong, Habchon, Namgang are selected as target basins to use observed data including rainfall and dam inflow. As a result of this research, it is found that CN must be included as a calibrated parameter to calculate effective rainfall for the rainfall-runoff model. Also, it is preferred to use PWRMSE of HEC-HMS program as a objective function for optimizing hydrological parameters. From the analyzing result of variation of AMC for peak discharge, it is recommended to apply AMC-III to estimation of CN for calculating effective rainfall of design hydrograph.

keywords : *Effective rainfall, Antecedent Moisture Condition(AMC), Curve Number, Optimization*

1. 서 론

수문해석을 위한 여러 매개변수 중 선행토양함수조건(Antecedent Moisture Condition : AMC)

에 따른 유출곡선지수(Runoff Curve Number : CN)의 변화는 유출해석시 유출량의 크기에 큰 영향을 미치게 된다(Hawkins, 1978). 미국 자연자원보호청(US. National Resources Conservation

+ Corresponding author : wrr@skuniv.ac.kr

* 서경대학교 토목건축공학과 조교수

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Seokyeong University

** 교신저자, 서경대학교 토목건축공학과 부교수

Corresponding Author, Associate professor, Department of Civil Engineering, Seokyeong University

Service, NRCS)에서는 미계측 유역의 토양특성과 식생피복상태 및 선행강수조건 등에 대한 상세한 자료의 분석을 통해 강우로부터 유효우량을 추정하는 인자로서 Curve Number(CN)를 제안하였다(SCS, 1972). 유출곡선지수는 유효우량 관련 여러 인자를 하나의 값으로 표현할 수 있기에 국내 실무에서 폭넓게 사용되고 있다.

유출곡선지수를 이용하여 유효우량을 산정할 경우에는 선행토양함수조건에 따라 이를 결정할 후 유출이 모의된다. 이러한 유출곡선지수의 이용 시 토지이용도와 토양도의 축척에 따라 자료의 특성이 변하게 되며 강우-유출모형에 적용시 오차를 발생하게 된다(Hawkins, 1978). 이의 원인으로 조홍제 등(2001)은 “CN은 그 이론적 배경으로 볼 때 토지이용도와 토양도로부터 추출된 값을 주요 매개변수로 두고 있으므로 실제 국내 지형에서 고려되어야 할 그 이외의 인자들이 고려되지 않은 한계성을 지니고 있다”고 언급한 바 있다.

현재 국내에서 설계홍수량을 산정하기 위해서 NRCS방법을 사용할 때에 주로 사용되는 선행토양함수조건은 AMC-III 조건이다. AMC-III 조건은 가장 큰 유출율을 나타내며 AMC-II 조건에 비해 안전이 고려된 설계라는 측면이 있다. 그러나 우리나라의 유역 및 기후특성은 NRCS방법이 개발된 미국과 여러가지로 다름을 고려할 때 우리나라의 유역특성을 제대로 반영하고 있는지에 대한 검토가 필수적이다.

이러한 문제점과 관련하여 국내에 맞는 적절한 기준을 찾기 위해 윤태훈(1991)은 개략토양도를 이용한 CN을 사용하여 유효강우량의 산정에 SCS 유출곡선번호법의 적용에 대하여 연구한 바 있으며, 미계측 유역에서의 유효강우량산정을 위해서는 AMC-II와 AMC-III를 3:7의 비로 사용하는 방법을 제시하였다. 박정훈 등(2005a, 2005b)은 SCS 방법의 개발 및 AMC의 도입과 관련한 배경을 살펴보고, AMC의 특성변화 및 그 설정기준인 선행강우량에 대한 분석을 실시하였으며 강우조건에 따른 총강우량 및 선행강우에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 유철상 등(2005)은 AMC조건의

발생빈도를 검토하여 AMC조건의 적절성을 판단하였고, 선행강우량 기준에 따른 AMC의 구분기준을 탐색하였다. 또한 기후변화로 인해 강우의 특성이 달라지는 경우에 AMC조건의 변화에 대해 평가하였다. 그러나 이러한 연구성과들이 설계홍수량 결정을 위한 선행토양함수조건 결정의 객관적인 기준이 되지는 못하고 있는 실정이다.

이외에도 CN이 유역의 물리적인 특성에서 도출할 수 있는 값이므로, 실측자료를 이용한 매개변수의 검정(Calibration)시에 제외시켜야 한다는 의견도 다수 존재하고 있다. 그러나 박정훈 등(2005b)과 유철상 등(2005)의 연구를 통해서도 알 수 있듯이 대상 강우의 특성에 따라 CN은 변화할 수 있으므로, 이에 대한 추가적인 검토도 필요할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 유출곡선지수(CN)의 매개변수 검정(calibration) 과정이 필요한지를 검토하고, 매개변수 검정을 위한 최적화 기법 적용시 이용되는 목적함수들의 성능을 평가하였다. 이를 통해 최종적으로는 설계홍수량의 산정시 적용되는 선행토양함수조건의 기준을 제시하고자 한다.

2. 모형의 이론

2.1 NRCS 유출곡선지수법

NRCS에서 제안한 유효우량 산정방법은 강우량으로부터 직접유출량을 분리해내는 경험적인 방법으로 Eq. (1)과 (2)와 같은 두 가지 가정과 Eq. (3)의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$F = (P - I_{\alpha}) - Q \quad (1)$$

$$\frac{Q}{P - I_{\alpha}} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_{\alpha} = \lambda S \quad (3)$$

여기서, P는 총강우량(mm), Q는 유효우량 또

는 직접유출량(mm), $I_a(\approx 0.2S)$ 는 초기손실량(mm), F 는 I_a 를 제외한 침투량(mm), S 는 최대잠재보유수량(mm), 그리고 λ 는 초기손실계수이다. SCS 방법에서는 강우시점부터 어떤 시각까지의 총 유량 P 에 대한 유효우량 Q 의 비는 토양의 최대잠재보유수량 S 에 대한 실제 보유수량 F 의 비와 같다고 가정하였다. Eq. (1)와 (2)를 결합하면 Eq. (4)와 같이 유효우량과 강수량간의 관계식을 유도할 수 있다.

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

Eq. (4)에서 초기손실량 I_a 를 $0.2S$ 로 근사화하면 강우-유출모형에서 주로 이용되는 유효우량 산정공식을 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (5)$$

S 는 유역의 유출능력을 표시한 유출곡선지수 CN 과의 관계로부터 Eq. (6)과 같이 정의될 수 있다.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6)$$

CN 은 미계측 유역인 경우에는 토양의 특성 및 수문학적 조건, 식생피복상태, 선행토양함수조건 등을 종합적으로 고려해서 결정하게 되며, 강우-유출자료가 있는 계측 유역인 경우에는 Eq. (5)로부터 유도된 Eq. (7)을 이용하여 S 를 구하고 이를 Eq. (6)에 대입하여 산정할 수 있다.

$$S = 5[(P + 2Q) - (\sqrt{Q(4Q + 5P)})] \quad (7)$$

여기서 CN 은 AMC-II 조건에 대한 유출곡선지수로서 AMC-I과 AMC-III의 조건하에서의 값으로 조정하기 위해 Eq. (8) 및 Eq. (9)와 같은

관계식을 사용한다.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (8)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (9)$$

2.2 최적화기법

유역특성에 따른 수문지형인자 및 매개변수의 추출은 유역의 유출해석에 큰 영향을 미치며, 동일 유역에 대해서도 지형인자, 강우사상 또는 산정된 매개변수의 값에 따라 결과에 많은 차이가 발생한다. 따라서 수학적 또는 수치적 해석을 이용한 최적화 기법을 적용하여 유역의 특성에 맞게 매개변수를 보정하는 것이 일반적이다.

매개변수를 보정하는 방법은 시행착오에 의한 수동보정(manual calibration)과 최적화기법을 사용하는 자동보정(automatic calibration)으로 구분되며, 대부분의 수문모형 보정에서는 이들 두 방법을 병용하고 있다. 일반적으로 보정의 복잡성은 매개변수의 수에 좌우되며, 적은 수의 매개변수 보정은 실측치와 모의치의 수문곡선을 비교하거나 오차를 최소화하는 등의 시행착오법을 이용한 수동보정의 적용이 가능하다. 그러나, 다수 매개변수의 보정은 변수들의 상호간섭 때문에 자동보정의 적용이 필요하다(Duan 등, 1994; Liong 등, 2001). 또한 모형을 보정하는 목적에 따라 적절한 목적함수가 선정되어야 한다(Gupta 등, 1999).

강우-유출모형의 매개변수 자동보정에 대한 국내연구 중 홍수추적모형의 매개변수 자동보정에 대한 연구로는 Pattern Search법을 사용한 저류함수모형의 자동보정 방안과 매개변수 추정에 유전자 알고리즘의 적용성을 평가한 방법 등이 있다(윤재홍 등, 1991; 박봉진 등, 1997). 국외에서는 Shuffled Complex Evolution-University of Arizona(SCE-UA)법(Duan 등, 1994)과 다목적최적화 알고리즘(MOCOM-UA)이 개발 및 적용되었으며(Yapo 등, 1998), 유전자알고리즘과 퍼지최

적모형(Fuzzy Optimal Model, FOM)을 결합한 연구 등이 수행된 바 있다(Cheng 등, 2002).

본 연구에서는 강우-유출량 관계를 모의하기 위해 미육군공병단 수문연구소(HEC)에서 개발한 HEC-HMS 프로그램을 이용하였다. 이 모형에서 매개변수 추정은 특정 지점에서 관측자료와 계산된 값 사이의 최적화 과정을 통하여 원하는 매개변수의 자동보정을 수행하면서 진행된다. 최적화의 양적인 정확성은 목적함수로 나타낼 수 있는데, 목적함수 값은 계산치와 관측치의 차이에 따르며 관측자료와 계산된 값이 완전히 일치한다면 0이 된다. 자동적인 매개변수의 추정에서 중요한 것은 최적화를 위해 선택된 매개변수가 수정되고, 수정된 매개변수에 의한 새로운 수문곡선 및 목적함수 값이 최소화되면 탐색이 종료되는 것이다.

본 연구에서는 강우의 손실량 계산을 위해 NRCS 유효우량산정법, 유출변환은 Clark 단위도, 기저유량은 감수곡선방법을 사용하였다. 최적화기법의 탐색방법은 단일변량증감법(Univariate Gradient Method, UG)과 Nelder-Mead법(N&M)을 적용하였다.

2.3 목적함수

본 연구를 위해 사용한 HEC-HMS 프로그램에서 매개변수 최적화를 위한 목적함수는 다음과 같이 총 6개가 주어지며, 이들은 오차에 대한 가중치의 비중을 각각 다르게 주면서 최적화에 적용 및 평가된다.

2.3.1 Peak-Weighted RMS Error (PWRMSE)

PWRMSE에 의한 방법은 오차에 크기에 비례하여 가중치를 준다. 유량이 평균유량보다 클 때에는 1보다 큰 값을 가지며 유량이 평균유량보다 작을 때에는 0.5에서 1.0의 값을 갖는다.

$$Z = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_0(t) - Q_s(t))^2 \frac{(Q_0(t) + Q_A)}{2Q_A}}{n}}$$

$$Q_A = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Q_0 \quad (10)$$

여기서, Z는 목적함수이며, $Q_0(t)$ 와 $Q_s(t)$ 는 t시간에서의 관측치와 모의치, Q_A 는 관측치의 평균값을 나타낸다.

2.3.2 Sum of Squared Residuals (SSR)

목적함수 SSR에 의한 방법은 큰 오차에 대해서는 큰 가중치를 주며 작은 오차에 대해서는 가중치를 덜 주며 관측치와 모의치 차의 제곱의 합으로 나타낸다. 목적함수는 다음과 같다.

$$Z = \sum_{t=1}^n (Q_0(t) - Q_s(t))^2 \quad (11)$$

2.3.3 Sum of Absolute Residuals (SAR)

SAR은 잔차의 절대값에 대한 합으로 나타나며 관측치와 계산치의 차에 대해 동일한 가중치를 적용한다. 목적함수는 다음과 같다.

$$Z = \sum_{t=1}^n |Q_0(t) - Q_s(t)| \quad (12)$$

2.3.4 Percent Error in Peak Flow (PEPF)

목적함수 PEPF는 첨두유량에 대한 퍼센트 오차로 계산치와 관측치의 첨두유량만을 고려하며, 첨두시간과 총 유출량에 대해서는 분석하지 못하는 단점이 있다.

$$Z = 100 \left| \frac{Q_0(peak) - Q_s(peak)}{Q_0(peak)} \right| \quad (13)$$

여기서, Z는 목적함수이며, $Q_0(peak)$ 와 $Q_s(peak)$ 는 관측치와 모의치의 첨두유량을 나타낸다.

2.3.5 Percent Error in Volume (PEV)

PEV는 관측치와 모의치의 총 유출량의 퍼센트 오차를 나타내며, 침투시간과 침투유량에 대해서는 분석하지 못하는 단점이 있다.

$$Z = 100 \left| \frac{V_o - V_s}{V_o} \right| \quad (14)$$

여기서, Z는 목적함수이며, V_o 와 V_s 는 관측치와 모의치의 총유출량을 나타낸다.

2.3.6 RMS Log Error (RMSLE)

RMSLE 목적함수는 큰 유량에 대한 작은 유량을 강조하기 위해 대수변환된 유량의 평균제곱오차를 사용한다.

$$Z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(Q_o) - \log(Q_s))^2} \quad (15)$$

여기서, Z는 목적함수이며, V_o 와 V_s 는 관측치와 모의치의 총유출량을 나타낸다.

3. 대상유역 및 자료

3.1 대상유역

본 연구의 대상유역으로 보령댐, 합천댐, 남강

댐 유역을 선정하였다. 이는 유역의 면적에 따른 강우-유출관계의 변화를 적절하게 고려하기 위한 것으로 보령댐은 소유역(500km²이하), 합천댐은 중유역(500-1,000km²), 남강댐은 대유역(1,000km²이상)을 대표한다.

대상유역의 유역 경계 구분 및 유역 특성인자를 추출하기 위해 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)에서 제공하는 수치표고모델(digital elevation model)에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 배덕효 등(2003), 이병주 등(2003)이 토지피복항목별 CN값 산정에 대해 연구한 결과를 인용하여 대상유역에 대한 CN값을 산정하였다. 토양도는 농업과학기술원에서 제공하는 정밀토양도(1:25000)를 수집하여 수문학적 토양군으로 변환하였다. 이외에도 1:25,000 축척의 토지이용도를 이용하여 과업대상 유역의 평균 CN값을 산정하였다. GIS 분석은 ArcGIS 프로그램을 이용하였으며, 각 유역별로 유역면적, 유로연장 및 유로경사 등을 추출하였다. 도달시간은 Kraven(I) 또는 Kraven(II) 공식으로 산정하였으며, 저류상수는 Sabol 공식으로 결정하였다. 매개변수 추정에 사용될 초기 CN은 AMC-III 조건으로 지정하여 유출해석을 수행하였다. 추출된 유역경계 및 유역 특성인자는 각각 Fig. 1, Table 1과 같다. 각 댐 유역의 면적은 보령댐 162.30km², 합천댐 928.90km², 남강댐 2293.42km²이며 남강댐의 유역평균경사가 가장 급한 것으로 분석되었다.

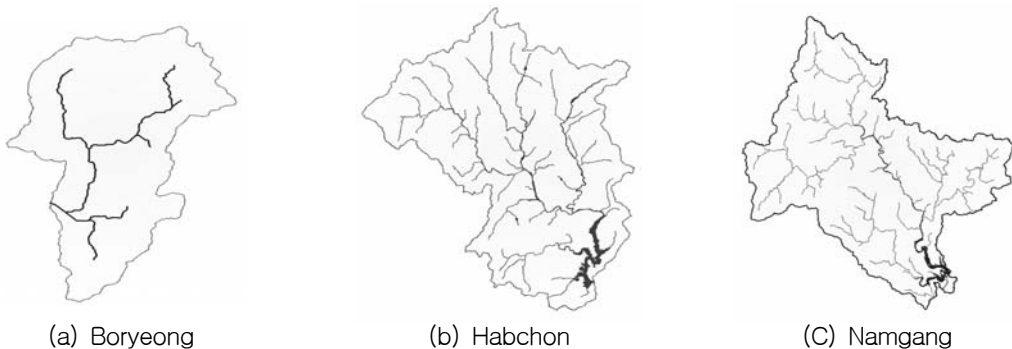


Fig. 1. 3 selected basins

Table 1. Hydrological informations of selected basins

Basin	A(km ²)	L(km)	CN(AMC-II)	CN(AMC-III)	Tc(hrs)	K(hrs)
Boryeong	162.30	23.924	63	80	1.893	1.637
Habchon	928.90	65.812	56	75	5.223	4.956
Namgang	2293.42	113.220	64	81	7.875	8.088

3.2 대상 수문사상

유출모형의 매개변수 추정시 실측 유량자료가

있는 경우에는 적절한 검정(calibration)과 검증(verification) 과정을 통해 최적의 값을 도출할 수 있다. 본 과업에서는 댐 유입량 자료를 이용해

Table 2. Selected peak discharges of basins

Basin	Event	Representative event	P_5 (mm)	AMC	Peak discharge (m ³ /s)	Basin	Event	Representative event	P_5 (mm)	AMC	Peak discharge (m ³ /s)
Boryeong Dam (7)	1	20000823 22:00 -20000825 22:00	0	1	513.0	Namgang Dam (13)	8	20070901 00:00 -20070903 00:00	0	1	1322.2
	2	20000826 02:00 -20000829 02:00	9	1	1028.0		1	19900412 00:00 -19900415 00:00	0	1	2134.0
	3	20000915 00:00 -20000916 23:00	45	2	226.0		2	19910417 00:00 -19910420 00:00	0.4	1	1967.0
	4	20020806 01:00 -20020809 01:00	29.8	1	529.0		3	20000710 00:00 -20000713 00:00	0	1	1886.5
	5	20050710 18:00 -20050712 00:00	0	1	373.3		4	20000714 00:00 -20000718 00:00	10.7	1	6524.1
	6	20060711 12:00 -20060713 18:00	0	1	367.6		5	20000912 00:00 -20000920 00:00	55.8	3	3257.5
	7	20070831 22:00 -20070902 22:00	0	1	204.4		6	20010705 00:00 -20010708 00:00	0	1	3363.5
Habchon Dam (8)	1	19980816 02:00 -19980820 02:00	0.2	1	1318.0		7	20010711 00:00 -20010715 00:00	2.9	1	2941.4
	2	19980928 09:00 -19981002 09:00	52.1	2	2366.0		8	20020705 00:00 -20020707 20:00	3.5	1	5792.0
	3	20000912 14:00 -20000914 14:00	51.1	2	1627.0		9	20020805 00:00 -20020809 13:00	80.3	3	5442.4
	4	20010624 00:00 -20010627 00:00	1.4	1	1386.0		10	20020830 00:00 -20020902 00:00	17.1	1	14818.0
	5	20020831 01:00 -20020902 00:00	3.8	1	4066.0		11	20030529 19:00 -20030601 20:00	0	1	3778.6
	6	20030911 16:00 -20030915 06:00	4.6	1	2414.8		12	20030818 00:00 -20030823 00:00	6.6	1	1549.2
	7	20060710 00:00 -20060712 00:00	0	1	3202.5	13	20030911 00:00 -20030915 00:00	8.9	1	12082.0	

서 최적 매개변수를 추정하였다. 이용된 수문사상은 대상 댐의 준공이후부터 2007년까지 자료를 이용하였으며, 일 우량자료를 이용해서 크기순으로 약 20개 정도씩의 사상을 선정하였다. 선정된 사상에 대해 강우량 대비 유출율의 타당성, 우량 주상도와 유출수문곡선 형태의 적절성 등을 고려해서 사용가능한 사상을 최종 선정하였다. 각 유역별로 보령댐 7개, 합천댐 7개, 남강댐 14개가 최종 채택되었으며 이를 Table 2에 나타내었다. 이들 자료들은 단일호우사상들이며, 자료의 수에서도 충분하지 못한 상황이다. 활용가능한 호우사상에 제한으로 인한 부분으로 이에 대한 한계를 감안할 필요가 있다.

4. 적용 및 분석

4.1 목적함수 적합성 분석

4.1.1 목적함수 분석 방법

HEC-HMS 프로그램의 최적화 단계에서는 두 가지의 탐색방법이 주어지고 탐색방법 별로 각각 6개의 목적함수를 결정할 수 있다. 목적함수의 차이는 가중치를 어디에 두느냐의 차이로 구분되는데, 선택된 목적함수는 오차에 대한 가중치 비중을 다르게 주며 매개변수에 따라 홍수량이 산정된다. 본 연구에서는 각 목적함수에 따라 단위도의 형태나 기저시간 등의 변화 형태를 검토하고, 첨두홍수량의 관측치와 모의치의 오차를 확인하면서 적합한 목적함수를 선정하였다. 각 사상은 단일유역에 적용하였고, 탐색방법은 단일변량증감법(Univariate Gradient Method, UG)과 Nelder-Mead법(N&M)을 사용하였다. 최적화대상 매개변수 중 도달시간(T_c)과 저류상수(K)는 각각 Kraven(I), Kraven(II) 공식과 Sabol공식으로 산정된 값을 적용하였으며 CN에 대해서만 최적화를 수행하였다.

4.1.2 분석결과

Table 3과 Fig. 2~4에서 각 유역별로 목적함수를 달리하여 산정된 최적 CN의 변동성을 살펴볼 수 있다. 오차크기에 비례하여 가중치를 주는 PWRMSE의 목적함수는 홍수량에 대한 CN의 분포범위가 넓지 않은 반면, 나머지 목적함수는 분포범위가 넓거나 CN이 99 등과 같은 이상치가 나타나는 등 적절하지 못한 결과를 보여주었다. 또한 AMC-III 조건에서의 CN은 최대값을 가지는 CN보다 적은 값을 가지고는 있지만 AMC-III 조건의 값을 중심으로 다른 사상의 CN들이 고루 분포되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 2에 나타낸 보령댐의 경우 원래 AMC-III 조건의 CN인 80에 유사한 값이 산정된 목적함수는 PWRMSE, SAR 등이며, Fig. 3에 나타낸 합천댐의 CN인 75에 근사한 결과가 도출된 목적함수는 PWRMSE, SAR, SSR 등이고, Fig. 4에 나타낸 남강댐의 CN인 81 근처의 값이 계산된 목적함수는 PWRMSE가 있다. 그러나 AMC-III조건에 따른 CN을 설계홍수량의 산정을 위해 사용하기에는 관측치와 계산치의 오차가 너무 크게 나타났다.

특히, 남강유역과 같이 큰 유출량이 발생했을 경우에는 T_c 와 K 을 고정하고 CN만의 최적화를 통한 유출량 산정에는 관측치와 계산치의 홍수량 차이가 크게 발생되고 있음을 알 수 있었다. 이는 T_c , K 을 고려하지 않고 CN만 최적화를 수행했을 경우 어느 정도의 일관성은 보이지만 적절한 홍수량을 산정할 수 없음을 의미하며, 모든 매개변수가 최적화되어야 할 것으로 판단되었다.

지금까지의 분석을 통해 CN을 산정하기 위해서 6가지 목적함수 중 PWRMSE의 적용이 추천되며, CN만이 아닌 도달시간과 저류상수 등의 매개변수를 포함한 최적화 수행이 타당할 것으로 분석되었다. 따라서 매개변수 T_c , K , CN의 조합에 따른 관측 및 계산 유출량 비교와 이에 따른 CN의 변동성에 대한 분석을 수행하였다.

Table 3. Optimization results of CN according to the objective function on Namgang Dam Basin

Event		초기/관측	PWRMSE	PEPF	PEV	RMSLE	SAR	SSR
'90.4.12	CN 초기값	80.609	81.386	86.126	75.869	72.864	75.166	78.780
	침투홍수량	2134.00	1791.10	2026.90	1554.60	1438.30	1526.60	1675.50
	침투홍수량 오차율(%)		16.07	5.02	27.15	32.60	28.46	21.49
'91.4.17	CN 초기값	80.609	59.535	64.852	59.535	99.000	57.178	58.310
	침투홍수량	1967.00	1730.40	1962.50	1730.40	4023.70	1633.20	1679.50
	침투홍수량 오차율(%)		12.03	0.23	12.03	-104.56	16.97	14.62
'00.7.10	CN 초기값	80.609	57.015	65.064	55.321	72.846	53.815	55.689
	침투홍수량	1886.50	1546.10	1890.80	1479.40	2274.60	1421.50	1493.70
	침투홍수량 오차율(%)		18.04	-0.23	21.58	-20.57	24.65	20.82
'00.7.14	CN 초기값	80.609	82.567	97.901	99.000	82.550	99.000	89.863
	침투홍수량	6524.10	4283.00	5094.90	5128.60	4281.90	5128.60	4715.80
	침투홍수량 오차율(%)		34.35	21.91	21.39	34.37	21.39	27.72
'00.9.12	CN 초기값	80.609	81.760	92.831	74.371	77.235	75.090	80.212
	침투홍수량	3257.50	2936.50	3261.80	2676.80	2780.10	2703.00	2884.10
	침투홍수량 오차율(%)		9.85	-0.13	17.83	14.66	17.02	11.46
'01.7.05	CN 초기값	80.609	86.237	99.000	85.956	81.861	80.609	84.089
	침투홍수량	3363.50	2693.50	3681.60	2675.70	2427.60	2356.10	2559.80
	침투홍수량 오차율(%)		19.92	-9.46	20.45	27.83	29.95	23.89
'01.7.11	CN 초기값	80.609	81.728	95.008	80.609	74.266	80.609	79.857
	침투홍수량	2941.40	2384.40	2950.00	2336.20	2069.90	2336.20	2304.00
	침투홍수량 오차율(%)		18.94	-0.29	20.58	29.63	20.58	21.67
'02.7.05	CN 초기값	80.609	81.021	91.934	72.864	71.000	66.916	75.869
	침투홍수량	5792.00	4813.00	5790.80	4030.70	3848.60	3447.70	4322.20
	침투홍수량 오차율(%)		16.90	0.02	30.41	33.55	40.47	25.38
'02.8.05	CN 초기값	80.609	81.635	82.566	73.840	72.864	72.864	76.468
	침투홍수량	5442.40	3999.40	4033.10	3688.90	3647.10	3647.10	3798.60
	침투홍수량 오차율(%)		26.51	25.89	32.22	32.99	32.99	30.20
'03.5.29	CN 초기값	80.609	82.605	82.590	99.000	99.000	99.000	82.554
	침투홍수량	14818.00	8091.80	8090.70	8976.30	8976.30	8976.30	8088.10
	침투홍수량 오차율(%)		45.39	45.40	39.42	39.42	39.42	45.42
'01.6.29	CN 초기값	80.609	79.641	89.100	79.801	81.770	75.869	77.417
	침투홍수량	3778.60	3129.60	3715.60	3139.00	3257.50	2909.50	2998.80
	침투홍수량 오차율(%)		17.18	1.67	16.93	13.79	23.00	20.64
'03.8.18	CN 초기값	80.609	72.912	73.513	75.869	76.994	73.649	72.889
	침투홍수량	1549.20	1522.60	1541.70	1617.70	1654.80	1547.40	1521.80
	침투홍수량 오차율(%)		1.72	0.48	-4.42	-6.82	0.12	1.77
'03.9.11	CN 초기값	80.609	82.564	82.557	90.065	82.597	79.687	82.405
	침투홍수량	12082.00	6425.70	6427.40	6793.60	6428.50	6265.70	6418.00
	침투홍수량 오차율(%)		46.82	46.80	43.77	46.79	48.14	46.88

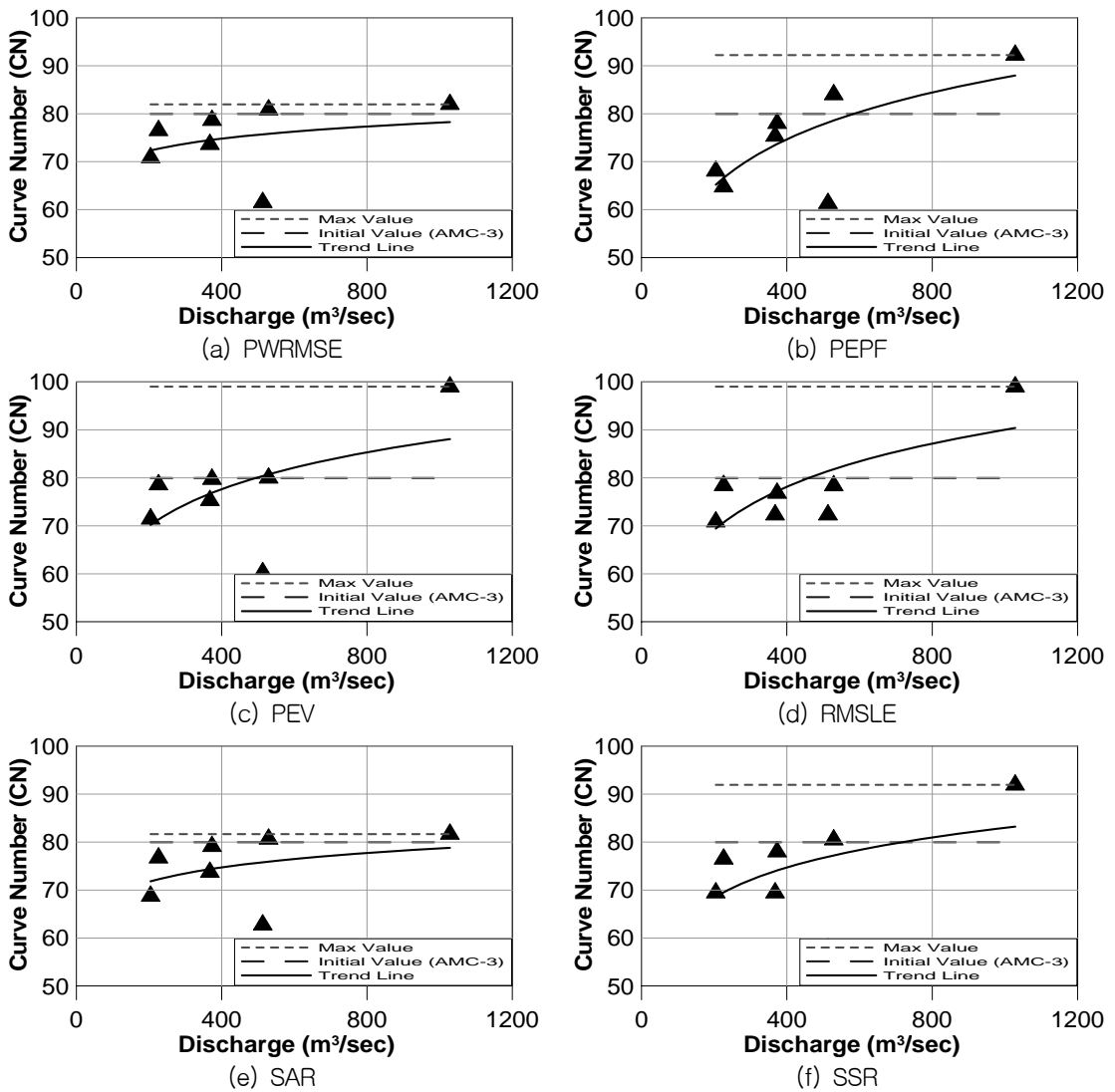


Fig. 2. Optimization results of CN according to the objective function on Boryeong Dam Basin

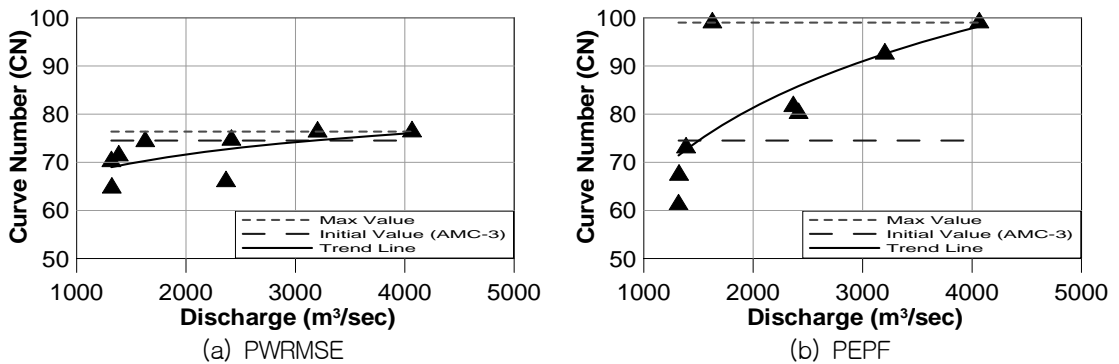


Fig. 3. Optimization results of CN according to the objective function on Habchon Dam Basin

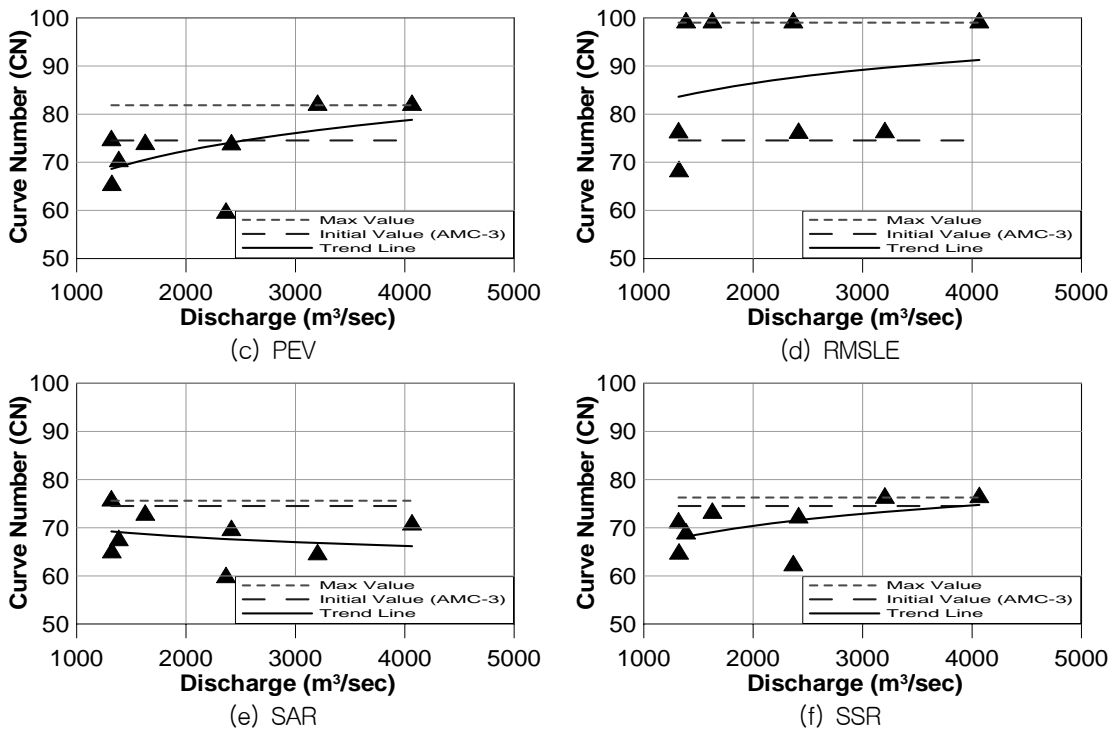


Fig. 3. Optimization results of CN according to the objective function on Habchon Dam Basin(계속)

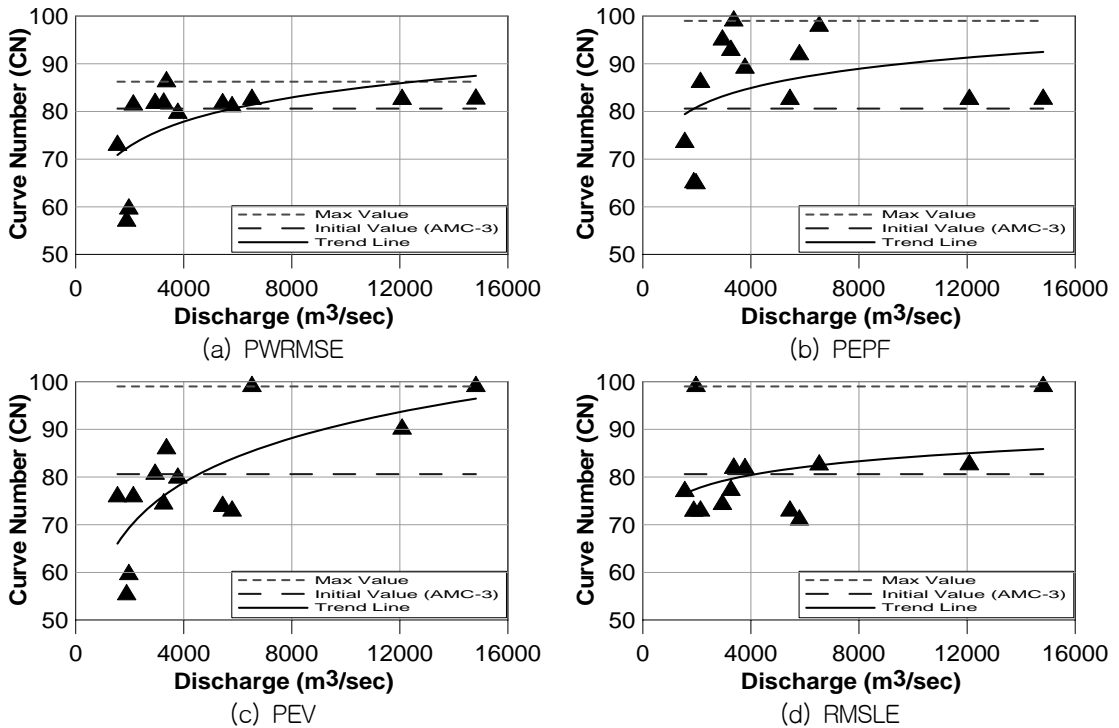


Fig. 4. Optimization results of CN according to the objective function on Namgang Dam Basin

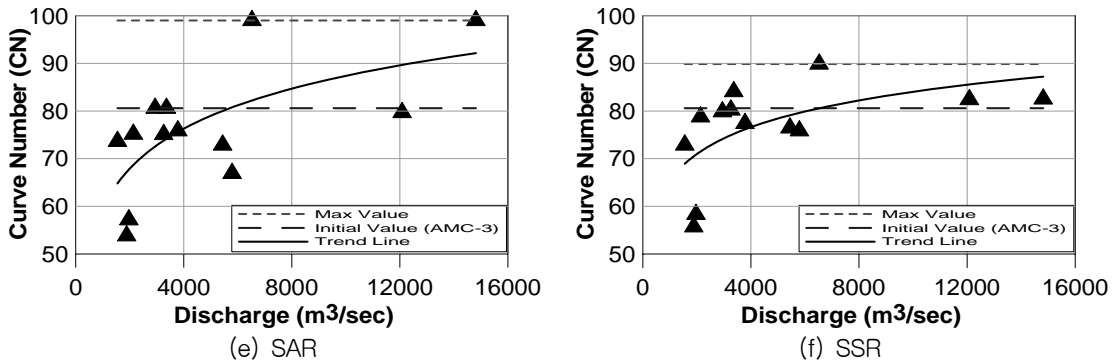


Fig. 4. Optimization results of CN according to the objective function on Namgang Dam Basin(계속)

4.2 매개변수 조합에 따른 적합성 판정

4.2.1 매개변수 조합에 따른 관측치와 계산치의 오차

본 연구에서는 앞서 조사한 자료를 바탕으로 각 댐 유역별로 Tc, K, CN의 3가지 매개변수의 포함 여부를 달리하는 4개 CASE로 구분해서 매개변수 최적화를 수행하였으며, CASE별 매개변수 조합조건은 Table 3과 같이 정리할 수 있다.

- 1) CASE 1 : Tc, K, CN 최적화, 목적함수 PWRMSE 적용
- 2) CASE 2 : Tc, K를 제외하고 CN만 최적화, 목적함수 PWRMSE 적용
- 3) CASE 3 : Tc를 제외하고 K, CN를 최적화, 목적함수 PWRMSE 적용
- 4) CASE 4 : K를 제외하고 Tc, CN를 최적화, 목적함수 PWRMSE 적용

각 CASE별 유출특성을 확인하고 관측치와 계산치의 적합성을 검증하기 위해 관측치에 대한 계산치와의 오차를 각 댐 유역별로 나누어 Fig. 5~7에 나타내었다. CASE-1과 CASE-3의 상대오차 크기가 작고 일관성을 보여주고 있으며, CASE-2

와 CASE-4의 경우는 오차 범위가 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 양상은 대상 사상이 상대적으로 많은 남강댐 유역에서 확연히 드러나며, 중소유역인 보령댐과 합천댐 유역의 경우도 유사하게 나타나고 있다. 또한, 매개변수의 조합을 살펴보면 CASE-1과 CASE-3에는 K와 CN의 매개변수가 포함되어 있고 CASE-2와 CASE-4에는 K가 포함되지 않음을 확인할 수 있다.

따라서 매개변수의 검정(calibration) 시에는 Tc, K, CN이 모두 포함되거나, 최소한 K와 CN은 반드시 포함되어야함을 알 수 있다. 이는 K가 포함되지 않은 CASE-2, CASE-4, CASE-6, CASE-8은 유출량이 커질수록 계산치가 관측치에 비해 매우 큰 값이 산정되기 때문이다.

Table 4. Cases of Parameter Optimization

Objective function	CASE	Tc	K	CN
PWRMSE	CASE-1	○	○	○
	CASE-2			○
	CASE-3		○	○
	CASE-4	○		○

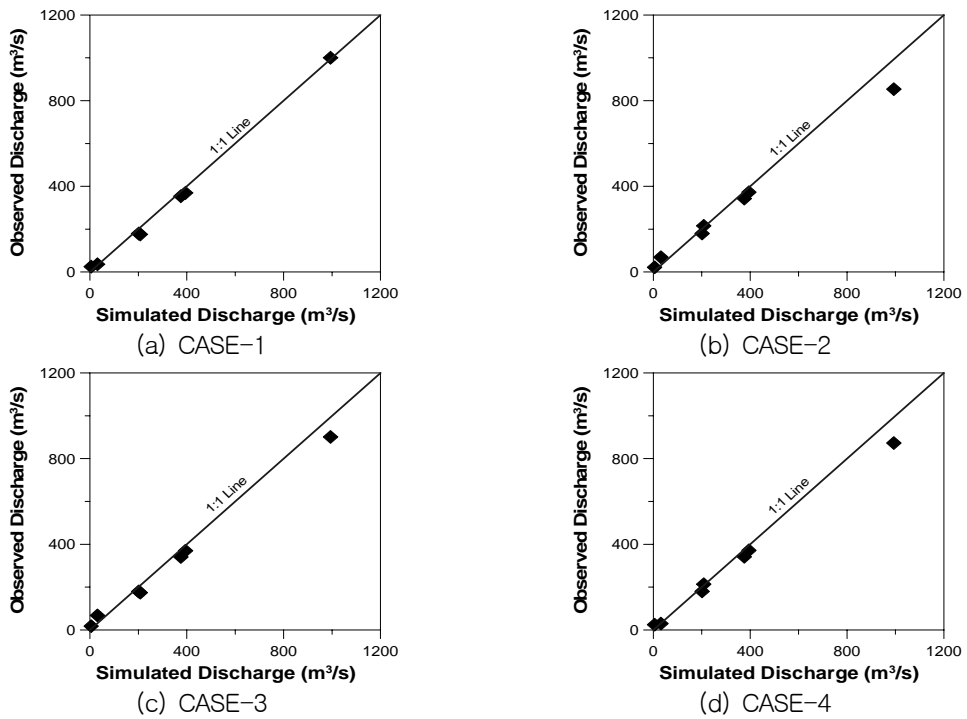


Fig. 5. Comparison between simulated discharge and observed discharge on Boryeong Dam Basin

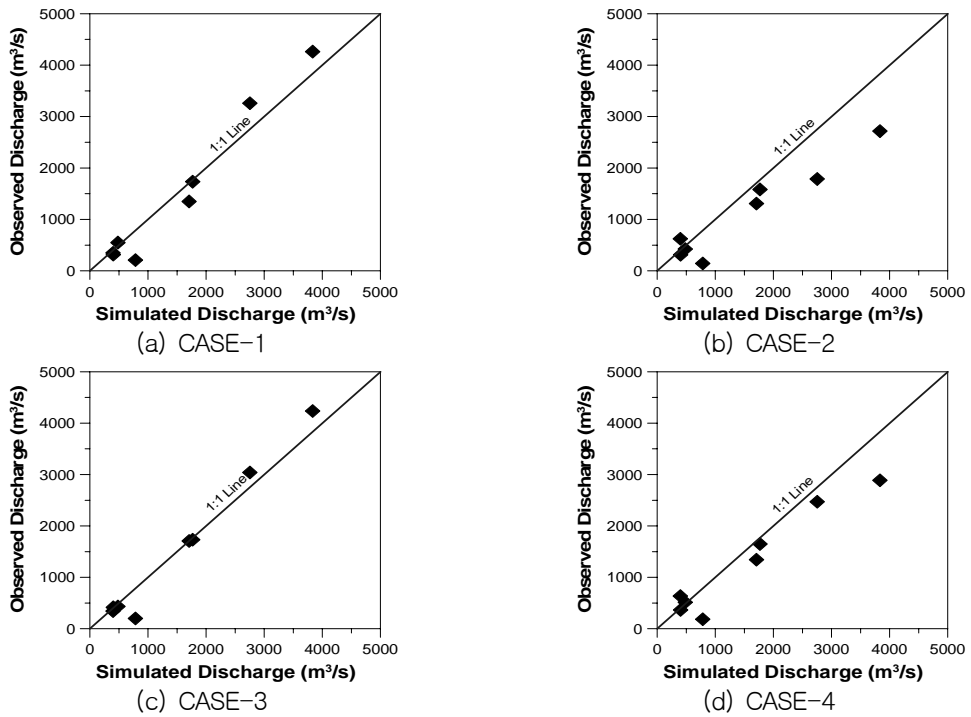


Fig. 6. Comparison between simulated discharge and observed discharge on Habchon Dam Basin

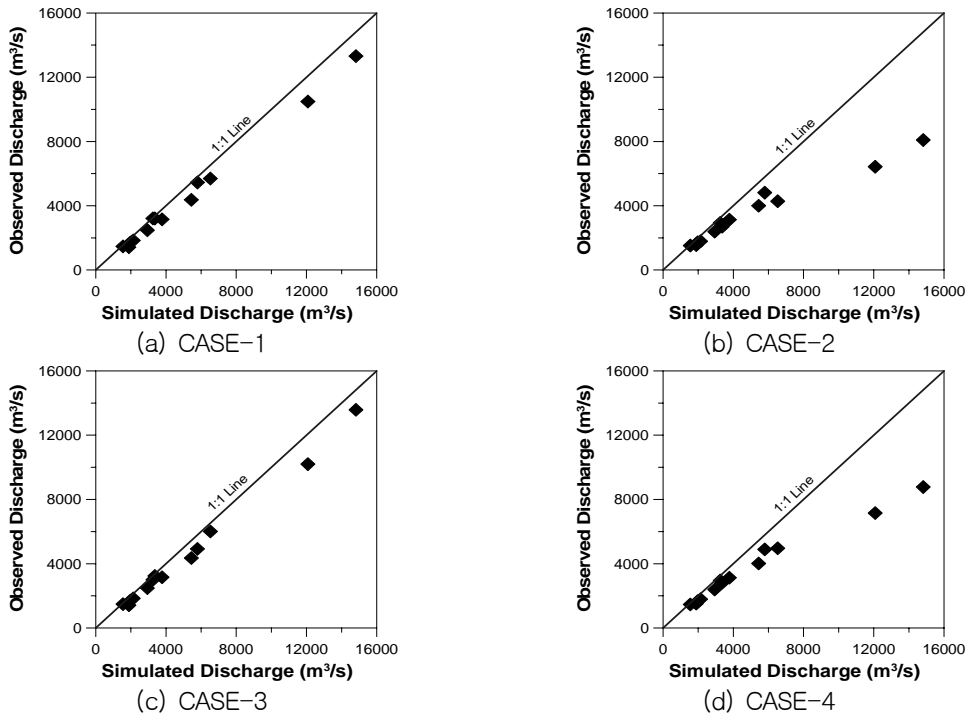


Fig. 7. Comparison between simulated discharge and observed discharge on Namgang Dam Basin

4.2.2 매개변수 조합에 따른 CN의 변동성

최적화시 목적함수 PWRMSE의 경우가 관측치와 실측치의 오차가 적으며, 매개변수는 CN과 K가 포함된 CASE-1, CASE-3, CASE-5, CASE-7의 경우가 홍수량 산출에 적합한 것으로 판단되었다. 따라서, Table 3의 조건이 모두 반영된 각각의 CASE별로 적절한 CN을 산정하였으며, 홍수량 변화에 따른 CN의 변화특성 파악 및 경향 분석을 실시하였다. 이를 통해 Fig. 8~10에 나타난 것처럼 매개변수의 적용 결과에 따른 홍수량별 CN의 변화를 쉽게 확인할 수 있다.

전체적으로 CASE-1과 CASE-3에서는 홍수량에 대한 CN의 범위가 좁은 반면 CASE-2와 CASE-4에서는 CN의 범위가 넓은 것을 볼 수 있다. Table 4에서 나타냈듯이 남강유역에서 PWRMSE를 사용한 경우 CASE-1의 표준편차는 4.53을, CASE-3의 표준편차는 4.71을 나타내었다. CASE-2와 CASE-4의 경우는 8.78 및 7.91과 같이 큰 값이

산정되었는데, 이는 최적화 과정에서 K가 매개변수에 포함되지 않아 적절한 홍수량 값을 추정할 수 없었으며 이로 인해 CN의 변동폭이 커진 것으로 판단된다. 또한 매개변수 조합에 따른 차이로 CASE-1과 CASE-3을 비교하였을 때 CASE-1이 CASE-3보다 더 작은 값을 나타내었다.

Fig. 8~10과 같이 CN은 각 사상별로 평균치와 최대치 사이에 위치해 있으며 평균치보다는 최대치에 근접하여 분포되어 있다. 모든 CASE에서 최적화를 수행한 결과 작은 CN을 가지는 사상으로 인해 평균값은 낮아지지만, 남강유역(AMC-Ⅲ의 CN : 81)은 80.3~82.6, 합천유역(AMC-Ⅲ의 CN : 75)은 71.3~75.8, 보령유역(AMC-Ⅲ의 CN : 80)은 79.7~81.3의 범위에 CN이 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 모든 경우가 AMC-Ⅲ 조건의 CN에 수렴하는 결과로서, 유역의 면적에 관계없이 큰 홍수사상을 모의할 경우 AMC-Ⅲ 조건이 합당함을 보여주는 것이라 하겠다.

Table 5. Calibration results of CN

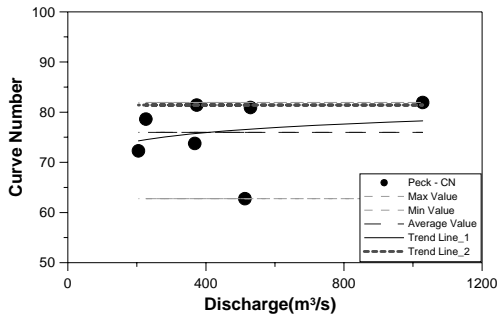
Basin	Objective function	CASE	Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
Boryeong Dam	PWRMSE	CASE-1	81.92	62.76	75.96	6.43
		CASE-2	81.96	61.51	74.84	6.54
		CASE-3	81.95	61.51	75.18	6.83
		CASE-4	81.96	61.51	75.08	6.45
Habchon Dam	PWRMSE	CASE-1	75.99	63.40	70.04	3.60
		CASE-2	76.36	64.69	71.74	4.22
		CASE-3	75.98	60.89	69.97	4.11
		CASE-4	81.40	4.26	71.64	5.44
Namgang Dam	PWRMSE	CASE-1	82.42	67.21	77.04	4.53
		CASE-2	86.24	57.02	77.74	8.78
		CASE-3	82.28	67.21	77.18	4.71
		CASE-4	86.38	59.54	78.27	7.91

따라서 CN이 유역의 여러 인자를 종합적으로 분석하여 하나의 지표로 표현한 물리적인 특성값이라 할지라도 유역내의 여러 가지 수문학적 상황에 따라 달라질 수 있으며, 최적화기법을 이용한 매개변수 추정 시에 꼭 포함되어야 정확한 강우-유출모형의 구성이 가능할 것으로 판단되었다.

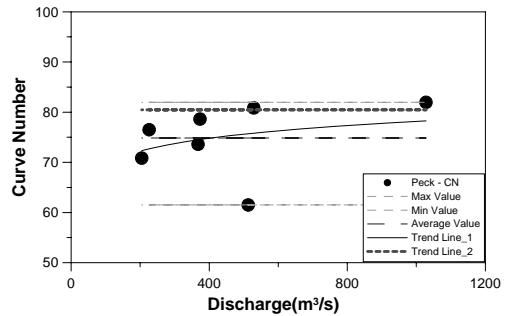
또한, 유역 내 다른 매개변수들과의 상호작용으로 인해 CN이 달라질 수 있지만 추정된 CN의 대부분이 AMC-III 조건의 범위에 위치하고 있으므로, 이는 설계홍수량의 산정시 AMC-III 조건의

CN을 사용하는 것이 안정적인 값을 도출함을 의미한다.

결론적으로, HEC-HMS 프로그램을 이용한 매개변수 추정 시에는 목적함수로 PWRMSE방법을 사용하는 것이 추천되며, 대상 매개변수의 조합은 Tc, K, CN을 모두 포함하는 것이 적합할 것으로 분석되었다. 또한, 설계홍수량의 산정에 이용되는 선행토양함수조건은 AMC-III를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

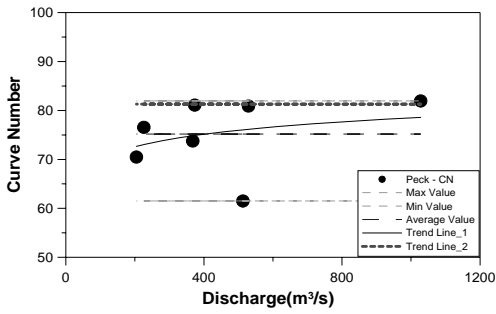


(a) CASE-1

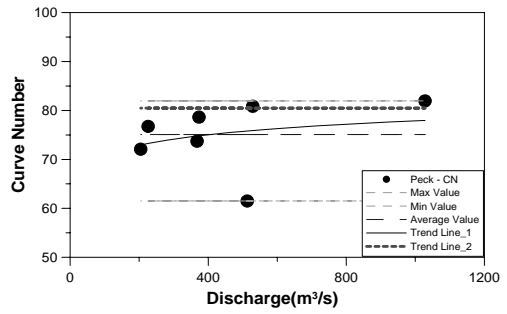


(b) CASE-2

Fig. 8. Optimization results of CN on Boryeong Dam Basin

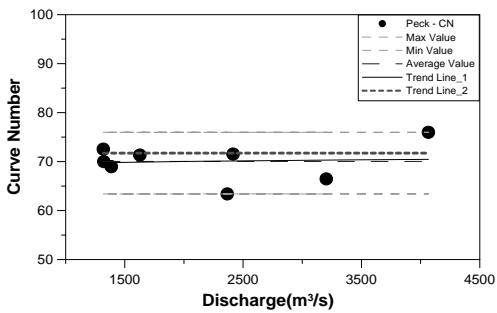


(c) CASE-3

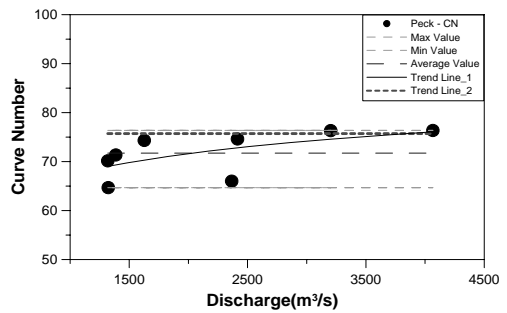


(d) CASE-4

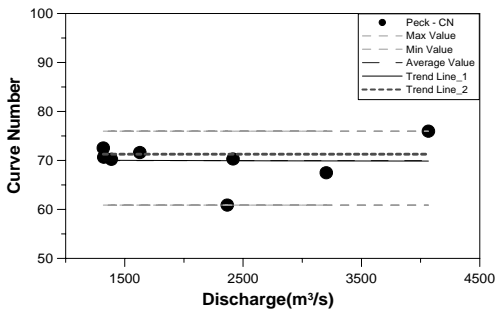
Fig. 8. Optimization results of CN on Boryeong Dam Basin (계속)



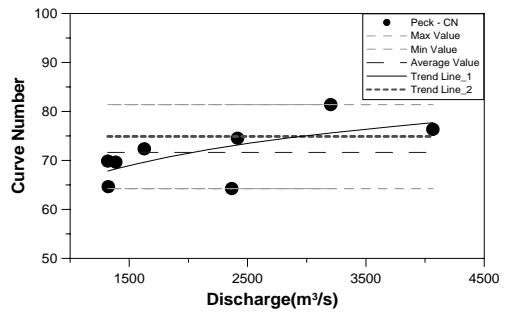
(a) CASE-1



(b) CASE-2

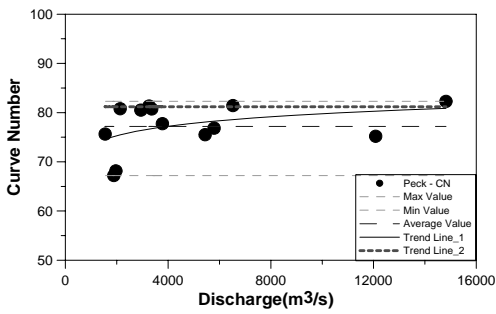


(c) CASE-3

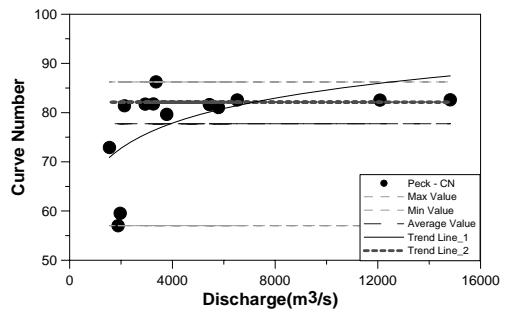


(d) CASE-4

Fig. 9. Optimization results of CN on Habchon Dam Basin



(a) CASE-1



(b) CASE-2

Fig. 10. Optimization results of CN on Namgang Dam Basin

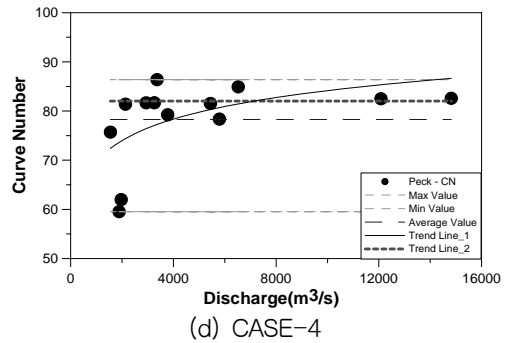
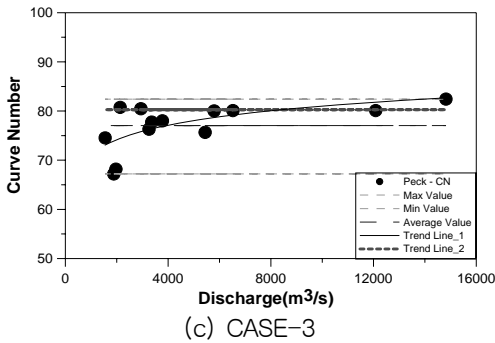


Fig. 10. Optimization results of CN on Namgang Dam Basin (계속)

6. 결 론

본 연구에서는 유출곡선지수(CN)의 매개변수 검정(calibration) 과정이 필요한지에 대한 검토를 수행하고, 유출곡선지수 매개변수 검정의 최적화 기법 수행 시에 이용되는 목적함수들을 평가하였다. 이를 통해 설계홍수량의 산정시 적용되는 선행토양함수조건의 기준을 제시하고자 하였으며, 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) Tc와 K는 유역의 물리적인 인자로부터 계산한 후, CN에 대해서만 최적화를 수행하였을 때 목적함수들 중 PWRMSE만 적절한 결과를 도출하는 것으로 나타났다. 또한, 최적화시 매개변수를 CN만으로는 설정하였을 경우에는 홍수량 오차가 크게 발생하여 최적 매개변수가 추정되지 못함을 알 수 있다.
- 2) 정확한 홍수량 산정을 위해 매개변수는 CN, Tc, K를 모두 최적화 시키는 것이 가장 적합한 방법이며 특히 매개변수 CN과 K가 홍수량 산정에 많은 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 따라서 CN은 유역의 여러 인자 중 하나의 지표로 표현한 물리적인 특성값이라고 할지라도 최적화기법을 이용한 홍수량 산정대상 매개변수에 포함되어야 할 것으로 판단된다.
- 3) 매개변수 최적화를 위한 목적함수를 검토하기 위해 매개변수 CN, Tc, K를 모두 포함

한 최적화를 실행한 결과 오차의 범위가 가장 적은 PWRMSE가 적합한 목적함수로 선정되었다. 따라서 HEC-HMS 프로그램에 이용한 매개변수 최적화 수행시에는 PWRMSE를 목적함수로 사용하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

- 4) 같은 유역이라 할지라도 강우사상 및 매개변수들로 인해 CN이 달라질 수 있다. 그러나, 여러 조건별로 CN의 분포를 분석했을 때 대부분이 AMC-III 조건에 수렴하는 것으로 나타났다으며, 안정적인 설계홍수량의 산정을 위한 CN의 선행토양함수조건으로 AMC-III를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
- 5) 이상의 연구과제는 보령, 합천, 남강 유역을 대상으로 유도한 결과로서 한정된 자료와 한정된 조건으로 분석된 결과를 모든 설계홍수량 산정의 기준을 하기에는 한계가 있다. 따라서 보다 많은 유역을 대상으로 한 추가연구가 필요하며, 강우분포의 선정과 소유역 분할에 따른 영향을 고려하는 부분을 연계해서 연구한다면 보다 객관적인 결과의 도출이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

국가수자원관리종합정보시스템

(<http://www.wamis.go.kr>)

박봉진, 차형선, 김주환 (1997). “유전자 알고리즘을 이용한 저류함수모형의 매개변수 추정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, pp. 347-355.

박정훈, 유철상, 김중훈 (2005a). “SCS 방법을 위한 선행토양함수조건 재설정 : 1. SCS 방법 검토 및 적용성 문제점.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제11호, pp. 955-962.

박정훈, 유철상, 김중훈 (2005b). “강우조건에 대한 유출곡선지수의 민감도 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제6B호, pp. 501-508.

배덕효, 이병주, 정일원 (2003). “위성영상 피복분류에 대한 CN값 산정(I): CN값 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 985-997.

윤재홍, 고석구, 김양일 (1991). “최적화 기법에 의한 저류함수 유출모델의 자동보정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, pp. 88-101.

유철상, 박정훈, 김중훈 (2005). “SCS 방법을 위한 선행토양함수조건 재설정 : 2. 선행토양함수조건 재설정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제11호, pp. 963-972.

윤태훈 (1991). “유효강우량 산정을 위한 곡선번호방법의 적용성.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제24권, 제2호, pp. 97-108.

이병주, 배덕효, 정창삼 (2003). “위성영상 피복분류에 대한 CN값 산정(II) : 적용 및 검증.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 999-1012.

조홍제, 김광섭, 이충희 (2001). “LANDSAT 영상

을 이용한 CN값 산정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 735-743.

Cheng, C. T., Ou, C. P., and Chau, K. W. (2002). “Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration.” *Journal of Hydrology*, Vol. 268, pp. 72-86.

Duan, Q., “Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models.” *Journal of Hydrology*. 158, 265-284.

Gupta, H. V., Sorooshian S., and Yapo P. O. (1999). “Status of automatic calibration for hydrologic model : Comparison with multilevel expert calibration.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.

Hawkins. R.H. (1978). Runoff curve number relationships with varying site moisture. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE, Vol. 104, pp. 389-398.

Liong, S. Y., Khu S. T., and Chan W. T. (2001). “Derivation of Pareto front with genetic algorithm and neural network.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(1), 52-61.

Soil Conservation Service (1972). *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology.
Yapo. P. O., Gupta, H. V., and Sorooshian, S. (1998). “Multi-objective global optimization for hydrologic models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 204, pp. 83-97.

○ 논문접수일 : 2012년 06월 11일

○ 심사의뢰일 : 2012년 06월 22일

○ 심사완료일 : 2012년 09월 13일