



## 기후변화에 따른 가지야마 공식 월별 보정계수 개선 및 평가

### Assessment and Improvement of Monthly Coefficients of Kajiyama Formular on Climate Change

서지호<sup>a</sup> · 이동준<sup>b</sup> · 이관재<sup>c</sup> · 김종건<sup>d</sup> · 김기성<sup>e</sup> · 임경재<sup>f, †</sup>

Seo, Jiho · Lee, Dongjun · Lee, Gwanjae · Kim, Jonggun · Kim, Ki-sung · Lim, Kyoung Jae

#### Abstract

The Kajiyama formula, which is an empirical formula based on the maximum flood data at Korean watersheds, has been widely used for the design of hydraulic structures and management of watersheds. However, this formula was developed based on meteorological data and flow measured during early 1900s so that it could not consider the recently changed rainfall pattern due to climate changes. Moreover, the formula does not provide the monthly coefficients for 5 months including July and August (flood season), which causes the uncertainty to accurately interpret runoff characteristics at a watershed. Thus, the objective of this study is to enhance the monthly coefficients based on the recent meteorological data and flow data expanding the range of rainfall classification. The simulated runoff using the enhanced monthly coefficients showed better performance compared to that using the original coefficients. In addition, we evaluated the applicability of the enhanced monthly coefficient for future runoff prediction. Based on the results of this study, we found that the Kajiyama formula with the enhanced coefficients could be applied for the future prediction. Hence, the Kajiyama formula with enhanced monthly coefficient can be useful to support the policy and plan related to management of watersheds in Korea.

**Keywords:** Climate changes; kajiyama formula; monthly coefficient; runoff

## 1. 서 론

최근 기후변화로 인하여 국내에도 극한강우, 집중호우와 같은 이상기후현상이 빈번하게 발생하고 있다(Jang et al., 2012). 이상기후현상으로 인해 발생하는 강우패턴 변화는 유출 및 침투에 직접적으로 영향을 미치기 때문에, 하천유량과 지하수 함양 등 수문순환 전 과정에 큰 영향을 미치게 된다(Stocker et al., 2013). 기후변화에 의해 변화된 하천유량은 유역관리뿐만 (이수·치수대책 및 하천정비계획) 아니라 저수지와 댐의 용량 결정, 하천 유지유량 결정 등과 같은 하천 관

리에도 크게 영향을 미칠 것으로 예상된다(Ahn et al., 2008). 따라서 기후변화 패턴을 고려한 새로운 하천관리 방안에 대한 연구가 필요하다. Han et al. (2012)은 기후변화 관련 재해들을 (기온 상승, 열파빈도 증가, 집중호우빈도 증가, 가뭄피해지역 증가, 강력한 열대성 저기압 활동 증가 등) 정의하였으며, 그 중 집중호우에 의해 발생하는 홍수가 가장 많은 경제적·사회적 피해를 야기할 것으로 예측하였다. 홍수를 예방하기 위해서는 하천 내에 수리구조물의 설치가 필수적이고, 이러한 구조물의 규모는 과하거나 부족하지 않도록 유역의 수문학적 특성을 (침투유량, 유출량 등) 규명하여 적절한 규모로 설치하여야 한다. 수리구조물 설계 시, 침투유량을 산정하기 위한 방법으로는 탱크모형, 저류함수법, HEC-1모형 등이 사용되어 왔다(Jang, 2003). 이 방법들은 수문자료와 기상자료, 지형 및 공간자료와 같은 입력 자료를 필요로 하고, 모형을 통해 산정된 결과를 실무에 적용하기 위해선 반드시 실측 데이터와 비교·분석을 통해 검증되어야 한다.

하지만, 저수지 설계 및 하천관리를 위해 사용되는 모형들은 많은 입력자료와 GIS 지식 및 모형경험 등을 필요로 하기 때문에 사용상 어려움이 많다(Shin et al., 2007). 따라서 많은 실무자들이 모형의 입력 자료구축 및 구동된 결과 검증과 같은 복잡한 과정을 대신해 간단한 가지야마공식, 고재용 공식, 비유량법 등 비교적 간단한 방법을 사용하고 있다 (Kim et al., 2008; Jung et al., 2004). 실무에 적용된 공식들 중 주로 사용되는 가지야마 공식은 국내의 중·대 하천 내 25 개소의

<sup>a</sup> Administrative Manager, Taeseong Construction Co., Ltd.

<sup>b</sup> Graduate Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

<sup>c</sup> Graduate Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

<sup>d</sup> Postdoctoral Research Fellow, Institute of Agricultural and Life Science, Kangwon National University

<sup>e</sup> Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

<sup>f</sup> Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

† **Corresponding author**

Tel.: +82-33-250-6468 Fax: +82-33-259-5560

E-mail: [kyoungjaelim@gmail.com](mailto:kyoungjaelim@gmail.com)

Received: June 19, 2018

Revised: August 21, 2018

Accepted: August 23, 2018

수문지점의 자료를 사용하여 유도된 경험적 월별 유출량 공식이다(Noh, 1999). 하지만 기존의 가지야마 공식은 홍수기에 해당되는 7, 8 월을 포함해서 3, 7, 8, 11, 12 월에 대한 월별보정계수( $C$ )를 제시하지 않고 있어 유역 내 유출특성 및 유출량을 예측하기에 한계점이 있다. Shin et al. (2007)의 연구결과에 따르면, 기존 가지야마 공식이 예측한 7, 8 (홍수기) 월의 월 유출량은 건기에 비해 매우 많은 차이를 보이고 있는 것으로 확인되었다. 뿐만 아니라 가지야마공식을 만들기 위해 사용되었던 기상자료는 과거 1900 년대 초반 자료로, 현재 사용되고 있는 가지야마 공식은 기후변화로 변화된 현재의 강우패턴의 특성을 고려하지 않고 유출량을 예측하는 단점이 있다. 따라서 제시된 단점들을 보완하기 위해서는 최근 기상 및 수문자료를 활용하여 월별보정계수를 개선하고, 미래 기후변화 시나리오에 따른 유출량과의 비교를 통해 개선된 월별보정계수를 검증할 필요가 있다.

이에 본 연구의 목적은 1) 최근 기상자료와 유량자료를 최적화 알고리즘에 적용하여 기존의 가지야마 공식의 월별보정계수를 개선하고, 2) 개선된 월별보정계수를 이용하여 예측한 유출량과 미래기후변화 시나리오에 따른 유출량을 비교·분석하여 미래기후변화에 따른 가지야마 공식의 적용성 평가를 하는데 있다. 본 연구에서 개선된 월별보정계수를 활용한다면 수리구조물 설계자 및 실무자들은 모델링에 대한 전문적 지식 없이도 기후변화를 고려한 유출량 산정을 할 수 있고, 이를 수자원 확보에 설치될 수리구조물 설계 기초자료에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## II. 방 법

수리구조물 설계 및 하천관리의 유출량 산정에 사용되고 있는 가지야마 공식은 최근 기후변화에 따른 강우특성을 고려하지 못하고 5 가지 월에 (3, 7, 8, 11, 12 월) 해당하는 보정계수들은 제시되어 있지 않다. 특히, 홍수기에 해당하는 7, 8 월의 부재는 유역의 유출특성을 고려한 수리구조물을 설계하는데 있어 어려움을 주고 있다. 이에 본 연구에서는 전국 4대강 별 대표 유역 3 개를 선정하고, 선정된 유역의 수문자료와 기상자료를 최적화 알고리즘에 적용하여 가지야마 공식의 월별보정계수를 개선하였다. 기존 월별보정계수와 개선된 월별보정계수를 이용해서 산정된 유출량 값들과 대표 유역 12 개 지점에서 관측된 유출량을 비교·분석하여 개선된 월별보정계수의 평가를 실시하였다. 또한 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형과 미래기후변화 시나리오를 활용하여 전국 4대강 유역 별 대표 유역 1 개에 대해 미래 유출량을 예측하고, 이를 개선된 월별보정계수를 활용하여 예측한 미래 유출량과 비교하여 미래 기후변화에 따른 적용성을 평가하였다. Fig. 1은 본 연구의 개요도를 나타낸다.

### 1. 가지야마 공식 개요

가지야마(Kajiyama) 공식은 우리나라에서 12 년 동안 (1916년~1927년) 관측된 강우량과 73 개 지점에서 관측된 유출량 관측 자료 중 정확도가 높다고 판단되는 25 개 지점의 자료를 분석하여, 월 강수량과 월 유출고 간의 관계를 도출한

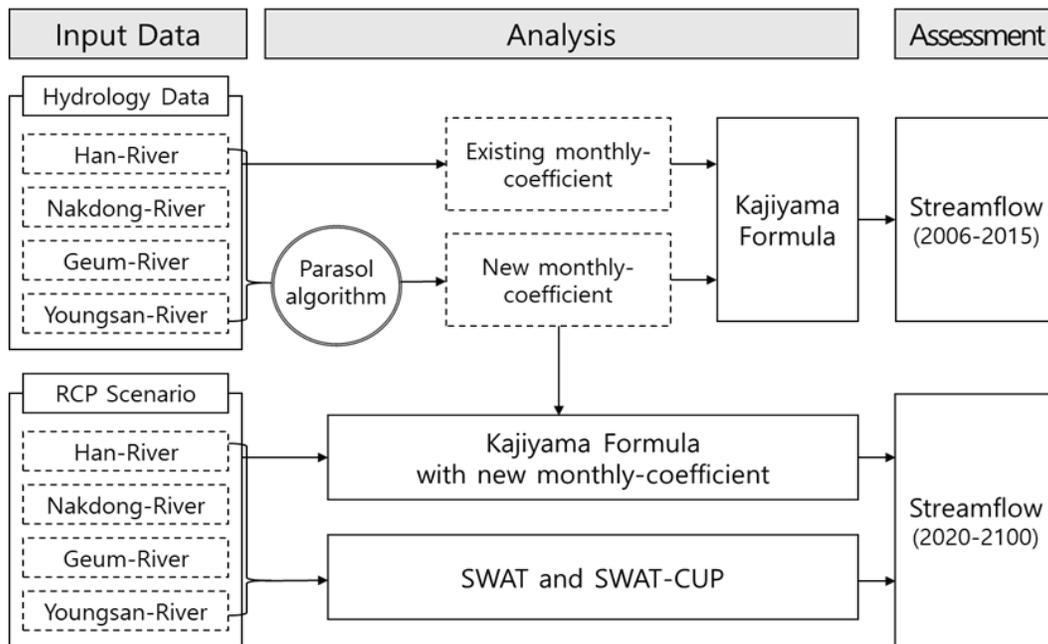


Fig. 1 Overview of this study: Assessment of improved monthly-coefficient of Kajiyama formula

경험식이다 (Kajiyama, 1928). 가지야마 공식의 월별 유출량 공식은 식(1)과 같다.

$$R = \sqrt{P^2 + (138.6 \times f + 10.2)^2} - 138.6 \times f + E \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 월 유출고(mm),  $P$ 는 월 강수량(mm),  $f$ 는 유출특성계수, 그리고  $E$ 는 월별보정계수(mm)를 나타낸다. 유출특성계수( $f$ )는 유역 경작지 및 임야의 비율 및 경사도에 의해 결정되고, 월별 보정계수( $E$ )는 각 월별로 강수량에 따라 결정되며, 총 7 개에 (1 월, 2 월, 4 월, 5 월, 6 월, 9 월, 10 월) 해당되는 월별보정계수만 제시되어 있다. Table 1과 Table 2는 각각 유출특성계수와 월별보정계수를 나타낸다.

## 2. 최적화 알고리즘을 이용한 가지야마공식 월별보정계수 개선 및 평가

### 가. 연구지역 대상지역 및 입력자료 구축

본 연구에서는 기존 가지야마공식 월별보정계수를 개선하기 위해서 4대강 유역 별로 (한강, 낙동강, 금강, 영산강 유역) 각각 대표 3 개 유역을 선정하였다. 대표 유역 선정 기준은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 유량정보를 제공하는 있는 유량관측소 중 10 년 이상의 연속된 유량실측 데이터가 존재하고 있는 관측소를 우선 선정하였으며, 선정된 관측소를 기준으로 생성된 유역이 최대한 겹치지 않는 곳으로 최종 선정하였다. 한강 유역 내에서 선정된 유량관측지점은 영춘, 영주시(여주대교), 안성시(건천리) 지점이며, 낙동강 유역 내 선정된 유량관측지점은 안동, 금호, 소천 지점이

**Table 1** Runoff coefficient( $f$ ) of Kajiyama formula (Kajiyama, 1928)

Basin Characteristics	Runoff coefficient
There are many cultivated land and forests in the basin, gentle slope and excessive amount of rainfall loss	1.4
There are many cultivated land and forests in the basin, gentle slope and large amount of rainfall loss	1.2
There are many cultivated land and forests in the basin, gentle slope and medium amount of rainfall loss	1
There are few cultivated land and forests in the watershed, steep slope and small amount of rainfall loss	0.8
There are few cultivated land and forests in the watershed, steep slope and minimum amount of rainfall loss	0.6

다. 금강 유역 내에서 선정된 유량관측지점은 무주, 유성, 기산 지점이며, 영산강 유역 내에서 선정된 유량관측지점은 광주, 능주, 함평 지점이다. Fig. 2는 본 연구에서 선정된 지점을 기준으로 생성한 유역 위치를 나타낸다. 금강과 영산강 내 생성된 유역은 서로 겹치지 않지만, 한강 유역(영춘, 영주시)과 낙동강 유역(안동, 소천) 내 생성된 유역은 서로 같은 지역을 공유하고 있다.

가지야마 공식을 활용하여 선정된 유역의 월별 유출량을 산정하기 위해서는 월별 강수량(mm), 유역면적, 가지야마 유출특성계수( $f$ ), 월별 보정계수( $E$ )가 필요하다. 각 유역 별 강

**Table 2** Monthly coefficient( $E$ ) of Kajiyama formula (Kajiyama, 1928)

Monthly Rainfall (mm/mon)	Monthly Coefficient( $E$ )							Note
	Jan.	Feb.	Apr.	May.	Jun.	Sep.	Oct.	
0	-2.5	-2.5	5.0	-	-2.0	6.0	7.0	There are no coefficient on Mar., Jul., Aug., Nov., Dec. ( $E=0$ )
10	-2.0	-2.0	5.5	-	-3.0	6.4	6.3	
20	-1.5	-1.5	6.0	-	-4.0	6.8	5.6	
30	-1.0	-1.0	7.5	-	-6.0	6.8	4.9	
50	-	-	8.5	-2.4	-9.0	7.2	3.5	
70	-	-	9.0	-3.6	-12.0	8.0	2.1	
80	-	-	10.5	-6.0	-17.0	8.8	1.4	
100	-	-	5.0	-12.0	-20.0	9.2	-	
150	-	-	-	-6.0	-26.0	10.0	-	
200	-	-	-	-	-30.0	11.0	-	
250	-	-	-	-	-22.5	9.0	-	
300	-	-	-	-	-15.0	6.0	-	

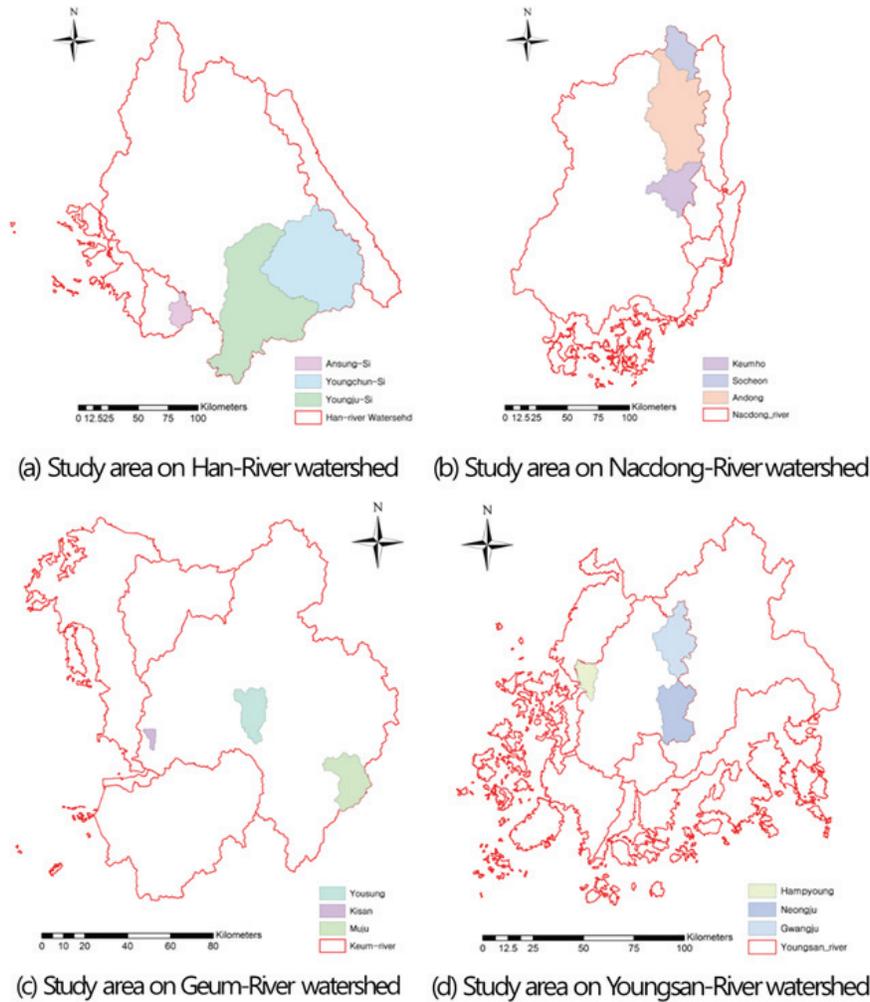


Fig. 2 Locations of Study Areas for enhancement of monthly coefficients

수량 데이터는 전국 97 개 기상지점 중 유역과 가장 가까운 기상지점을 선정하여 데이터를 수집하였으며, 각 유역면적 산정은 GIS 프로그램을 활용하였다(Table 3). 또한 가지야마 유출특성계수( $f$ : 0.6~1.4)의 경우, 기준이(Table 1) 수치적으로 명확하게 표현되어 있지 않아 각 유출계수 별 유출량을 산정 후 실측값과 비교하여 실측값을 가장 잘 모의하는 유출 특성계수를 선정하였다.

나. Parameter Solution (Parasol) 알고리즘 개요

최적화 알고리즘은 특성인자 및 통계적 방법을 이용하여 목적함수를 만들고, 이를 통해 최적 매개변수를 도출한다. 최적화 알고리즘 중 Parasol 알고리즘은 Griensven and Meixner (2007)에 의해 제안된 방법이며, the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) 알고리즘을 사용하여 매개변수를 변환하고, 목적함수(OF's: Objective Functions)로 Sum of the

Table 3 Selected stream gauging stations, weather stations, and sub-watershed areas in four major river watersheds

Watershed	Stream gauging Station	Weather Station	Area (km <sup>2</sup> )
Han-River	Youngchun	Jeochen	4,690
	Yeoju	Icheon	11,096
	Ansung	Cheonan	368
Nacdong-River	Andong	Andong	3,590
	Keumho	Youngchoen	1,002
	Socheon	Youngju	697
Geum-River	Muju	Keumsan	389
	Yousung	Daejeon	251
	Kisan	Gunsan	66
Youngsan-River	Gwangju	Gwangju	423
	Neongju	Jeonju	408
	Hampyeong	Mokpo	130

squares of the residuals(SSQ)를 사용하여 최적매개변수를 도출한다. SCE-UA 알고리즘은 사용자가 입력한 Parameters의 범위 안에서 랜덤으로 여러 그룹들을 생성한다. 이 그룹들은 Nelder and Mead (1965)와 Holland (1975)가 제안한 방법들에 의해 진화하고 서로 정보를 공유하게 된다. 이러한 과정 이후에 생성된 매개변수들은 통계기반의 Bayesian 이론(Box and Tiao, 1973)에 적용되어 점차 최적화된다. 설정된 매개변수들이 목적함수인 SSQ의 기준에 만족할 때까지 반복 연산이 되며, Parasol 알고리즘에서 사용되는 SSQ의 공식은 식(2)와 같다.

$$SSQ = \sum_{n=1}^n (x_{n,measured} - x_{n,simulated})^2 \quad (2)$$

여기서,  $x_{measured}$  은 실측치,  $x_{simulated}$  모의치를 나타낸다. Parasol 알고리즘에 사용되는 SCE-UA 알고리즘은 SWAT과 같은 수문 및 유역 모델 보정에 널리 사용되어 왔다(Daun, 2003). 따라서 본 연구에서도 수문모형에 널리 사용되어진 SCE-UA 알고리즘이 포함된 Parasol 알고리즘을 가지야마 공식의 최적 월별 보정계수(E)를 도출하는 방법으로 선택하였으며, 월별 보정계수를 매개변수로 하여 유출량을 산정하는 프로그램을 만든 후, Parasol 알고리즘에 적용하였다.

다. Parasol 알고리즘을 활용한 월별 보정계수 개선 및 평가

기후변화 이슈와 관련하여 국내에도 기상이변 현상이 점점 증가하고 있으며, 특히 홍수기(7 월~8 월)의 가지야마공식의 월별 보정계수 부재는 유역의 유출량을 모의하는데 있어 기존 공식의 한계점을 보여준다. 따라서 본 연구에서는 변화된 기후에 맞춰 전체 12 개월에 해당하는 월별 보정계수를 개선하였다. Parasol 알고리즘을 활용하여 월별 보정계수를 개선하기 위해서는 월별 보정계수를 매개변수로 하여 유출량을 산정하는 프로그램이 필요하다. 따라서 Fortran 프로그래밍 언어를 사용하여 입력자료를 (월강수량, 유역면적, 유출특성계수) 읽고, 매개변수에 (월별 보정계수) 따라 결과자료를 (월 유출량) 산정하는 프로그램을 개발하였다. 월별 보정계수의 개선을 위해 선정된 12 개의 유량관측소 지점에서 관측된 유량자료와 유량관측소로부터 생성한 유역에서 가장 가까운 기상지점의 자료를 (2006~2015 년) 입력 자료로 활용하였다. 이후 개발된 프로그램을 Parasol 알고리즘에 적용하여 기존 월별보정계수를 개선하였다.

개선된 월별 보정계수의 신뢰성 검증을 위하여 기존 가지야마 공식의 월별 보정계수와 개선된 월별 보정계수를 활용한 유량을 산정하고, 이를 실측 유량값과 비교분석하였다. 신

뢰성 검증에 활용된 방법은 유효지수(Nash-Stucliff Efficiency; NSE)(Nash and Sutcliffe, 1970), 결정계수(Coefficient of determination;  $R^2$ ) 이다. NSE,  $R^2$ 의 산정공식은 각각 다음 공식(3), (4)와 같다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(S_i - \bar{S}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2} \quad (4)$$

여기서,  $O_i$ 는 실측값,  $\bar{O}_i$  는 실측값의 평균,  $S_i$ 는 모의값,  $\bar{S}_i$ 는 모의값의 평균이다. NSE,  $R^2$  값은 1에 가까울수록 모형의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 Donigian and Love (2003)가 제시한 모형의 신뢰구간 및 효율 범위를 기준으로 개선된 월별 보정계수를 평가하였다 (Table 4).

Table 4 Criteria for evaluating model performance

	Poor	Fair	Good	Very Good
NSE	< 0.60	0.60~0.70	0.70~0.80	> 0.80

3. 미래 기후에 따른 가지야마공식 월별보정계수 적용성 평가

개선된 월별 보정계수의 활용하기 위해서는 미래 기후변화에 따른 적용성 평가가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 월별보정계수를 산정하기 위해 선정한 유역을 제외하고 환경부 총량측정망 유역 중 4곳을 (4대강 유역별 1곳) 선정하였다. 이후 각 유역별로 Representative Concentration Pathways (RCP) 기후변화 시나리오와 SWAT 모형을 활용하여 선정된 유역의 미래 유출량을 산정하였다. 미래 유출량을 실측값으로 가정하기 위해 선정된 유역에서 측정되었던 유량자료 (2004 년~2014 년)를 활용하여 검·보정을 실시하였다. 보정 시 SWAT 모형의 자동보정프로그램인 SWAT-CUP 프로그램을 활용하였고, 유역 별 유량에 민감한 매개변수를 도출하였다. 유역별 모형의 검·보정을 실시한 후 RCP 시나리오에 따른 기후자료를 적용하여 산정된 유출량을 실측값으로 가정하고, 이를 개선된 가지야마 월별 보정계수를 활용하여 산정된 유출량 값과 비교분석하였다.

#### 가. RCP 기후변화 시나리오 및 기후변화자료 개요

본 연구에서는 미래 기후변화에 따른 유출량을 산정하기 위해 IPCC 5차 보고서에서 제안한 기후변화 시나리오를 활용하였다. IPCC 5차 보고서에서는 이전에 사용된 Special Report on Emission Scenario (SREC) 시나리오의 순차방법에서 발생된 문제점을 보완한 RCP 시나리오를 제안하였다. RCP 시나리오는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 결정하며(Stocker et al., 2013), 복사강제력( $W/m^2$ )을 기준으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5로 구분된다(NIMR, 2011). 각 기후변화 시나리오는 기후변화모델들에 의해 격자별, 해상도별 다양한 기상자료로 변환되며, 국내·외적으로 기후변화에 따른 예측 전망에 관한 연구에 많이 활용되고 있다(Park et al., 2014; Hwang et al., 2014; Kim et al., 2015).

본 연구에서는 RCP 기후변화 시나리오에 따른 미래 강수량을 산정하기 위해 HadGEM3-RA 모형과 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 활용하였다(Jo et al., 2013). Jo et al. (2013)은 비모수적 분위사상법을 (Non-parametric Quantile Mapping) 이용하여 미래 기후변화에 대한 편의보정을 실시하였다. 비모수적 분위사상법은 확률분포함수 없이 모의 및 관측 자료의 실제 분포를 직접 사용하여 오차를 줄이기 때문에 정확한 편의보정을 할 수 있는 것으로 알려져 있다(Gudmundsson et al., 2012). HadGEM3-RA 모형과 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 활용하여 예측한 미래기후는 강수량뿐만 아니라 강우강도도 증가하였다. 특히, 강우량의 경우 6~9 월에 가장 많이 증가하는 경향을 보였다(Jo et al., 2013). 증가된 강우량과 강우강도는 수리구조물을 위한 설계강우의 증가를 의미하며, 이는 미래 유역관리 및 수리구조물 설계에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 증가된 강우량과 강우강도를 예측한 HadGEM3-RA 모형의 기후변화자료가 유역관리 및 저수지 설계에 사용되고 있는 가지야마 공식을 평가할 수 있는 지표로 적합하다고 판단하였다.

#### 나. 미래 기후변화에 따른 유량 산정을 위한 SWAT 모형 자료 구축 및 평가

##### 1) SWAT 모형의 개요 및 입력자료 구축

SWAT 모형은 수문·수질모의를 위한 모델로 미국 농무성 농업연구소 (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service)에서 개발된 준 분포형 유역단위 모형으로서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상에 따른 수질과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법 등의 영향 예측과 유역의 수문 거동을 모의하기 위해 개발되었다(Arnold, 1992; Aronld et al., 1998; Neitsch et al., 2005). SWAT 모형을 이용하여 수문 거동

을 시·공간적으로 모의하기 위해서는 시간적으로 변화하는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와 공간적으로 다르게 분포하는 토지이용현황 및 토양속성 및 유역의 지형적 특성을 보여주는 수치표고모형(DEM, Digital Elevation Map)이 필요하다. SWAT 모형은 설계 및 유역관리 등의 다양한 목적으로 수문분야 연구에 널리 활용되고 있다(Ra et al., 2007; Lee et al., 2009). 본 연구에서는 개선된 가지야마 월별보정계수의 미래 기후변화에 따른 유출량 모의 적용성 평가를 위해 SWAT 모형을 이용하였다.

개선된 가지야마 월별 보정계수 검증을 위해 선정된 유역은 4대강 유역 별로 각 1개 유역을 선정하였고, 선정 기준은 환경부 총량지점 중 10년 이상의 실측자료를 보유하고 있는 유역으로 선정하였다. 선정된 유역은 한강유역의 평창A, 낙동강 유역의 반변A, 금강 유역의 금본A, 영산강 유역의 오수A이다. SWAT 모형의 입력 자료는 수치표고모형(DEM), 토지이용도, 토양도, 그리고 기상자료가 있으며, 각각 국립지리원, 환경부, 농촌진흥청, 그리고 기상청에서 자료를 제공받아 구축하였다. Fig. 3은 각 유역별 구축된 입력자료를 (DEM, 토지이용도, 토양도) 나타낸다. 기상자료는 각 유역별 인근에 위치한 기상지점을 대상으로 2001년부터 2014년까지 일별 기상자료를 구축하였다.

##### 2) SWAT-CUP 프로그램을 활용한 검·보정

SWAT 모형에 기후변화 시나리오의 기후자료를 적용하기 전에, 먼저 각 유역별 실측자료를 활용하여 검·보정을 실시하였다. 각 유역별 보정 및 검정을 위해 자동보정 프로그램인 SWAT-CUP 모형을 이용하였고, 유량에 민감한 매개변수 23가지 매개변수에 대해 민감도 분석을 실시하여 유량 보정에 민감하지 않는 매개변수들을 제외하고 보정을 실시하였다. 각 유역별 유량 보정은 2010년 2014년까지 일별 관측값을 활용하여 보정을 실시하였고, 2004년부터 2009년까지 일별 관측값을 활용하여 검정을 실시하였다. 신뢰성 검증을 위해 앞에 제시된 유효 지수(NSE)와 결정계수( $R^2$ ), 그리고 Donigan and Love (2003)이 제시한 모형의 신뢰구간 및 효율 범위를 활용하여 평가를 실시하였다.

#### 다. 기후변화 시나리오를 활용한 가지야마 월별보정계수 적용 및 유출량 예측 평가

본 연구에서는 미래 기후변화에 따른 유출량을 산정하기 위해 IPCC 제 5차 기후변화 평가보고서에 활용된 온실가스 대표농도경로(RCP) 시나리오 자료를 사용하였다. 본 연구에서는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오 자료 중에서 모든 전 지구 기후 모형(Global Climate Model, GCM)인 HadGEM2-CC 모델을

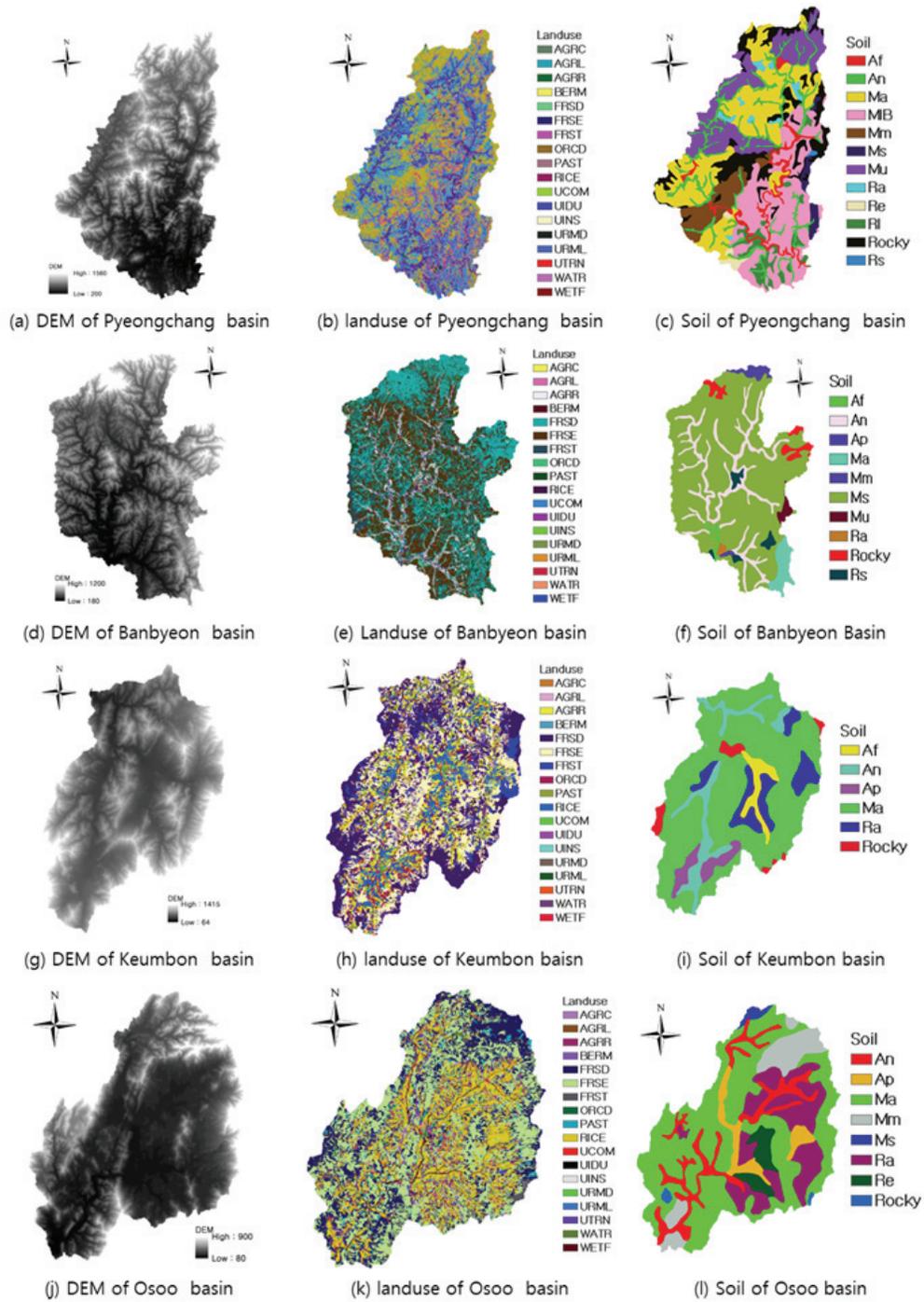


Fig. 3 SWAT input data of study areas for assessment runoff prediction under the climate change

활용하여 구축된 기상자료를 활용하였다(Jo et al., 2013). 2020년부터 2100년까지 일별 기상데이터(강수, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 상대습도, 일사량)를 연구대상 지역인 4 대강 유역 별 1 개 유역(평창A, 반변A, 금본A, 오수A)에 적용하여 미래 월별 유량을 산정하였다. 본 연구에서 개선한 가지야마 공식의 월별보정계수 평가를 위하여 SWAT 모델에서 산정된

미래 월별 유량 값을 실측값이라 가정하고, 미래 기상자료와 개선된 가지야마 월별 보정계수를 활용하여 산정된 유출량 값과 비교분석을 실시하였다. 미래기후 변화에 따른 유출량 평가 또한 유효 지수(NSE)와 결정계수( $R^2$ )를 이용하였으며, 앞서 제시된 Donigan and Love (2003)의 신뢰구간 및 효율 범위를 활용하여 평가를 실시하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. Parosol 알고리즘을 활용한 가지야마 월별 보정계수( $E$ ) 개선

각 유역별 수문 및 기상 데이터를 활용하여 월별 보정계수를 개선하기 위해서는 가지야마 공식의 유출계수가 필요하다. 하지만 유출계수의 경우, 기준이 수치적으로 명확하게 표현되지 않은 실정이다 (Table 1). 따라서 본 연구에서는 각 유역별 유출계수를 산정하기 위해 기준에 제시된 유출계수를 (0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4) 사용하여 유역마다 유출계수별 유출량을 산정하고, 실측 유출량을 가장 근접하게 예측하는 유출계수를 유역 별 최적 유출계수( $f$ )로 선정하였다. 각 유역별 선정된 유출계수( $f$ ) 값은 Table 5와 같다.

유역 별로 선정된 유출계수와 10 년간(2006 년~2015 년) 기상데이터를 Parosol 알고리즘에 적용하여 가지야마 월별보정계수를 개선하였다. 본 연구에서 선정된 가지야마 월별 보정계수( $E$ )는 기존 제시되지 않은 3 월, 7 월, 8 월, 11 월, 12 월의 보정계수뿐만 아니라 월별 강수범위도 확장되었다. 기존의 월별 보정계수( $E$ )와 개선된 가지야마 월별 보정계수( $E$ )는 Table 6과 같다.

#### 2. 개선된 가지야마 월별 보정계수( $E$ ) 평가

개선된 가지야마 월별 보정계수 평가를 위하여 기존 월별 보정계수를 사용하여 12 개 유역에 대한 월별 유출량 값과 개선된 월별보정계수를 사용하여 산정된 월별 유출량 산정하

Table 5 Runoff for each study area

Watershed	Stream Gauging Station	Runoff coefficient( $f$ )
Han-River	Youngchun	1.4
	Yeoju	1.4
	Ansung	1.0
Nacdong-River	Andong	0.6
	Keumho	1.4
	Socheon	1.4
Geum-River	Muju	0.6
	Yousung	0.8
	Kisan	1.4
Youngsan-River	Gwangju	1.4
	Neongju	0.8
	Hampyeong	0.6

였고, 실측값과 비교·분석을 실시하였다. 사용된 지표는 NSE,  $R^2$ 이며, 결과는 Table 7과 같다. 6 월을 제외한 대부분의 경우에서 개선된 월별보정계수를 사용하여 예측한 유출량을 기존의 월별보정계수를 사용할 때보다 높은 수치를 보여주었다. 특히, 1 월에 해당하는 NSE 값의 경우 0.38의 차이로 가장 크게 개선되었다. 비록 홍수기에 해당하는 7 월, 8 월의 NSE와  $R^2$ 의 수치는 크게 개선되지 않았지만, 전체 유역에서 발생하는 유량을 양적으로 비교하였을 때 기존의 공식보다 실측치를 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 전체 유역에서 7월에

Table 6 Improved Monthly Coefficients of Kajiyama Formula

Monthly Rainfall (mm/month)	Monthly Coefficient of Kajiyama Formula							
	Jan.		Feb.		Mar.		Apr.	
	Original Coefficient	Improved Coefficient	Original Coefficient	Improved Coefficient	Original Coefficient	Improved Coefficient	Original Coefficient	Improved Coefficient
0	-2.5	10.0	-2.5	10.0	-	-	5	-
10	-2	10.0	-2	10.0	-	10.0	5.5	19.3
20	-1.5	-26.5	-1.5	-3.0	-	4.2	6	-4.5
30	-1	-30.0	-1	-2.4	-	-2.3	7.5	13.3
50	-	4.2	-	8.9	-	0.6	8.5	-0.6
70	-	-11.6	-	5.8	-	1.7	9	19.6
80	-	-	-	5.3	-	-2.5	10.5	12.0
100	-	-	-	0.8	-	0.7	5	-3.8
150	-	-	-	-2.0	-	4.9	-	-1.4
200	-	-	-	-	-	-	-	2.3
250	-	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-	-

Monthly Rainfall (mm/month)	May		Jun.		Jul.		Aug.	
	Original Coefficient	Improved Coefficient						
0	-	-	-2	-	-	-	-	-
10	-	-	-3	4.9	-	-	-	-
20	-	6.2	-4	-12.5	-	-	-	-
30	-	-6.0	-6	-31.8	-	-	-	-5.4
50	-2.4	9.4	-9	-23.3	-	-	-	7.7
70	-3.6	-8.5	-12	-19.9	-	-13.0	-	-4.8
80	-6	-1.2	-17	-32.4	-	0.9	-	0.4
100	-12	6.2	-20	-14.6	-	-7.4	-	-16.9
150	-6	-20.0	-26	4.6	-	-6.4	-	-4.7
200	-	7.1	-30	-35.2	-	9.5	-	-19.6
250	-	4.7	-22.5	-22.6	-	-12.6	-	-2.2
300	-	-	-15	-36.7	-	2.8	-	9.8
Monthly Rainfall (mm/month)	Sep.		Oct.		Nov.		Dec.	
	Original Coefficient	Improved Coefficient						
0	6	-	7	-	-	3.3	-	-
10	6.4	10.0	6.3	10.0	-	10.0	-	10.0
20	6.8	2.5	5.6	8.1	-	4.2	-	2.5
30	6.8	2.6	4.9	2.0	-	-2.3	-	2.6
50	7.2	0.3	3.5	9.7	-	0.6	-	0.3
70	8	1.3	2.1	0.8	-	1.7	-	1.3
80	8.8	4.4	1.4	4.4	-	-2.5	-	4.4
100	9.2	2.7	-	3.7	-	0.7	-	2.7
150	10	-3.6	-	-5.0	-	4.9	-	-
200	11	-0.4	-	4.0	-	-	-	-
250	9	-4.1	-	-	-	-	-	-
300	6	-3.3	-	-	-	-	-	-

발생한 평균 유량은  $11,081.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mon}$ 이다. 기존계수를 활용한 공식은  $14,961.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mon}$ 로 실측유량과 비교했을 때 135% 과도하게 유량을 예측하였고, 개선된 계수를 활용한 공식은  $13,475.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mon}$ 로 실측유량과 비교했을 때 121% 과도하게 유량을 예측하였다. 전체 유역에서 8월에 발생한 평균 유량은  $6,413.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mon}$ 이다. 기존계수를 활용한 공식은  $6,067.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mon}$ 로 실측유량과 비교했을 때 95%이며, 개선된 계수를 활용한 공식은  $6,360.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mon}$ 로 실측유량과 비교했을 때 99%로 실측유량을 거의 비슷하게 예측하였다(Fig. 4). 분석 결과, 개선된 가지야마 월별보정계수는 기존 제시되었던 월별보정계수의 범위를 확장하고 제시되어 있지 않던 월별 보정계수를 제시함에 따라 유량 산정 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

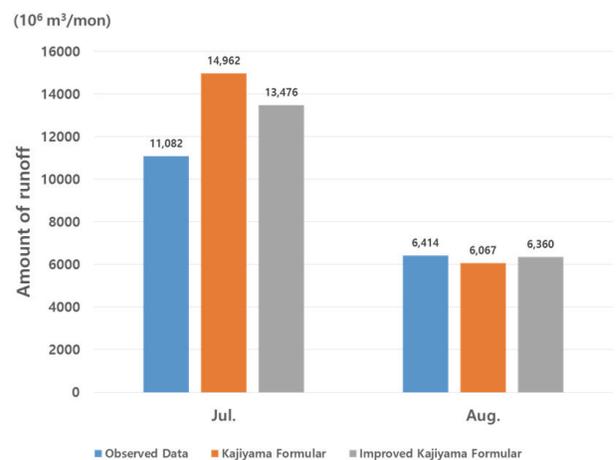


Fig. 4 Comparison of observed and simulated (original and improved) runoff (averaged) at Jul. and Aug.

**Table 7** Evaluation of simulated runoff using original and improved coefficients of Kajiyama Formula

Month	result using original monthly coefficients		result using improved monthly coefficients	
	<i>NSE</i>	$R^2$	<i>NSE</i>	$R^2$
Jan.	0.391	0.785	0.771	0.804
Feb.	0.517	0.728	0.792	0.792
Mar.	0.471	0.521	0.632	0.635
Apr.	0.752	0.776	0.790	0.810
May	0.715	0.722	0.731	0.773
Jun.	0.832	0.855	0.819	0.871
Jul.	0.780	0.884	0.822	0.887
Aug.	0.548	0.577	0.551	0.587
Sep.	0.859	0.862	0.862	0.864
Oct.	0.632	0.676	0.688	0.702
Nov.	0.612	0.722	0.776	0.776
Dec.	0.320	0.575	0.552	0.590

### 3. SWAT 모형을 활용한 기후변화에 따른 보정계수 평가

#### 가. SWAT 모형의 검·보정 결과

본 연구에서는 SWAT-CUP 프로그램에서 제공하는 알고리즘 중 SUFI-2를 사용하여 대표 유역별 최적 매개변수를 산정하였다. 유역별로 유량에 관련된 23 가지의 매개변수를 민감도 분석을 통해 보정에 사용할 매개변수를 결정하였다. 민감도 분석 결과, 한강유역과 영산강유역은 총 16 개의 매개변수, 낙동강유역과 금강유역은 23 개의 매개변수 유량에 민감한 것으로 판단되었다. 민감도 분석을 통해 결정된 매개변수들과 2010년부터 2014년까지 5년 동안의 실측값을 활용하여 유역별 최적매개변수를 산정하였다. 산정된 매개변수와 유역별 보정 결과는 Table 8과 같다. Table 8에서 값이 제시하지 않은 매개변수 값들은 SWAT-CUP 모델의 민감도 분석에 의해 제거된 매개변수이다.

2010년부터 2014년까지 총 5년간 일별 실측데이터를

**Table 8** SWAT model parameters estimated by SWAT-CUP

Parameter	Watershed	Han -River	Nacdong -River	Geum -River	Youngsan -River
		PyeongchangA	BanbyeonA	KeombonA	OsooA
ALPHA_BF		0.90	0.97	0.28	0.80
BIOMIX		-	0.77	0.07	-
CANMX		-	6.97	8.59	-
CH_K2		-	80.63	120.68	82.97
CH_N2		-	0.03	0.02	0.08
CN2		0.07	0.15	-0.03	0.12
EPCO		0.18	0.89	0.46	0.21
GW_DELAY		45.15	43.25	16.58	43.33
GW_REVAP		0.17	0.03	0.04	0.14
GWQMN		653.80	2121.00	2283.00	1439.40
REVAPMN		-	817.25	682.25	821.10
SFTMP		-0.10	1.67	2.02	1.18
SLSUBBSN		0.18	0.14	0.15	0.17
SMFMN		6.32	0.17	9.29	-
SMFMX		8.56	3.61	3.22	8.51
SMTMP		3.36	-0.01	0.11	-
SOL_ALB		-0.18	0.20	-0.01	0.11
SOL_AWC		-	0.03	0.03	-
SOL_K		-0.16	0.20	0.16	0.09
SOL_Z		0.05	0.20	0.15	-
SURLAG		5.85	9.63	1.32	4.50
TIMP		0.11	0.62	0.58	0.74
TLAPS		-	9.85	1.07	-

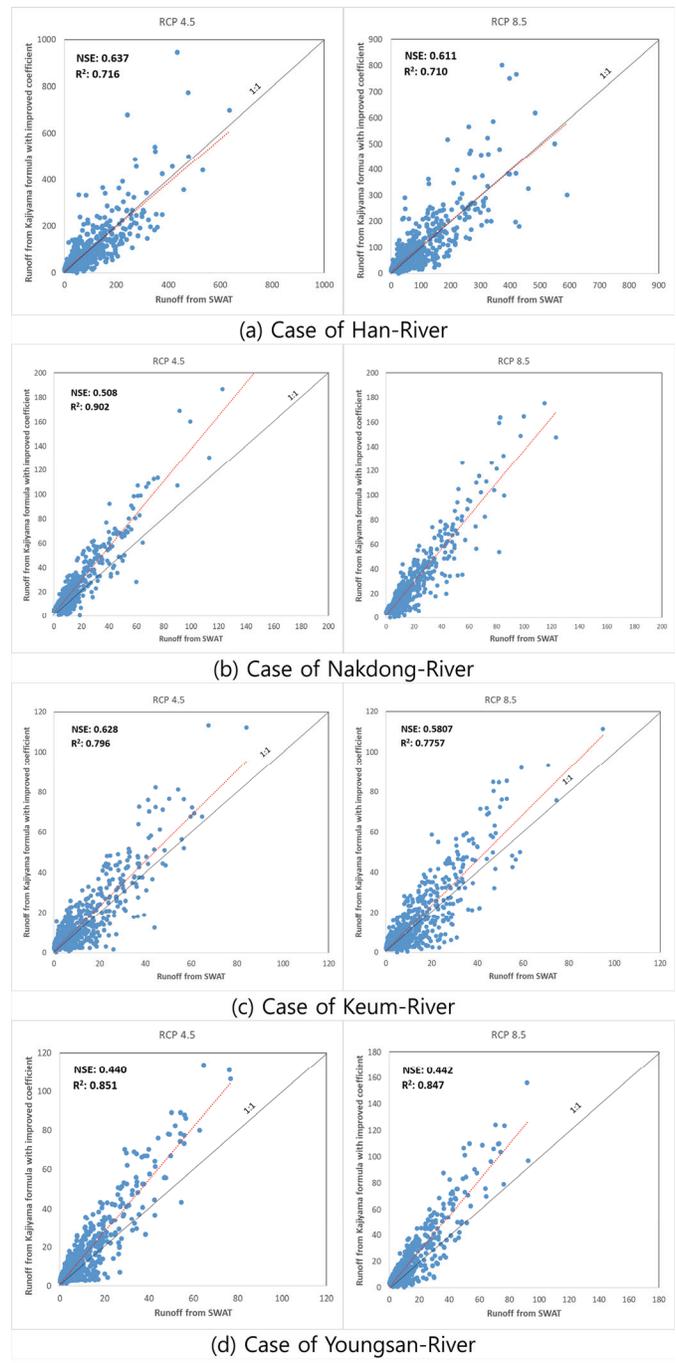
**Table 9** Calibration and Validation of runoff in SWAT

	Pyeongchang A		Banbyeon A		Keombon A		Osoo A	
	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>
Calibration	0.82	0.86	0.82	0.83	0.87	0.87	0.80	0.84
Validation	0.57	0.77	0.66	0.68	0.59	0.65	0.65	0.66

활용하여 보정을 실시하였으며, 산정된 매개변수를 2004년부터 2009년까지 총 6년간 일별 실측데이터를 활용하여 검정을 실시하였다. 유역 별 검 · 보정 결과 값은 Table 9과 같다. 각 유역 별 보정 결과는 NSE 0.80~0.87, R<sup>2</sup> 0.84~0.87으로 Donigian and Love(2003)에 제시된 기준에 충족되었으므로, 실측값을 잘 모의한다고 판단된다. 검정 결과는 NSE 0.57~0.65, R<sup>2</sup> 0.65~0.77로, 평창A를 제외한 나머지 유역은 모두 Donigian and Love(2003)에 제시된 기준에 충족되었다.

**나. 미래 기후변화 유출량에 따른 월별 보정계수 적용성 평가결과**

SWAT 모형을 활용하여 유역 별 유출량 값을 산정하고 검 · 보정을 실시한 결과 SWAT 모형이 유역별 유출량을 잘 모의한다고 판단하였다. 따라서 기후변화 시나리오를 (RCP 4.5, RCP 8.5) 활용하여 산정된 기상자료를 SWAT 모형에 적용하여 모의한 미래 유출량 값을 실측값이라 가정하고, 개선된 가지야마 월별 보정계수와 미래 기상자료를 활용하여 산정된 월별 유량 값과 비교분석하여 개선된 보정계수의 활용성을 평가하였다. RCP 4.5 시나리오와 SWAT 모형을 이용하여 모의한 유출량과의 비교 결과, NSE와 R<sup>2</sup> 값은 평창A에서 (한강) 0.64, 0.72, 반변A에서 (낙동강) 0.51, 0.90, 금본A에서 (금강) 0.63, 0.80, 오수A에서 (영산강) 0.44, 0.85 로 대부분 높은 경향성(R<sup>2</sup>)을 보여주었다. RCP 8.5 시나리오와의 비교 결과도 마찬가지로 높은 경향성을 보여주었으며, NSE와 R<sup>2</sup> 값은 평창A에서 (한강) 0.61, 0.71, 반변A에서 (낙동강) 0.61, 0.71, 금본A에서 (금강) 0.58, 0.78, 오수A에서 (영산강) 0.44, 0.85 이다(Fig. 5). RCP 4.5 시나리오의 반변A과 (낙동강) RCP 4.5와 8.5시나리오의 오수A를 (영산강) 제외한 나머지 유역에서 산정된 지표 값들은 Donigian and Love (2003)에 제시된 기준에 충족하였다. 따라서 본 연구에서 개선된 가지야마 월별보정계수는 미래 기후변화 시나리오에 따른 유출량 잘 모의할 수 있을 거라 판단된다.



**Fig. 5** Comparisons of simulated runoff from SWAT model and Kajiyama formula for RCP 4.5 and 8.5 scenarios

#### IV. 결 론

본 연구에서는 2006년부터 2015년까지 기상자료를 활용하여 가지야마 공식의 월별 보정계수를 개선하였다. 개선된 가지야마 공식은 기존에 없던 3월, 7월, 8월, 11월에 대해서도 보정계수뿐만 아니라 강우범위도 확장하여 기후변화에 따른 극한 강우에 의해서도 월별 유량을 산정할 수 있도록 개선하였다. 또한 개선된 월별 보정계수의 향후 활용성을 평가하기 위해 기후변화 시나리오 RCP 4.5 및 8.5에 적용하여 평가하였다.

개선된 가지야마 월별 보정계수를 평가 결과 NSE,  $R^2$  값 모두 기존의 월별 보정계수를 활용하여 산정한 월별 유량 값보다 실측값을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 미래 기후변화 시나리오에 적용한 결과 한강 수계의 (평창 A) 경우 NSE = 0.64,  $R^2 = 0.72$ , 금강 수계의 (금본 A) 경우 NSE = 0.63,  $R^2 = 0.80$  으로 Donigian and Love(2003)에 제시된 기준에 충족하는 것으로 나타났다. 이는 개선된 가지야마 월별 보정계수가 기후변화에 따른 유량 값 역시 잘 모의할 수 있는 것으로 판단된다.

최근 유출량 산정 방법으로 모형을 활용한 모델링, 유출량 산정 공식을 이용한 유출량 산정이 있지만 모형을 활용한 유출량 산정은 모델에 대한 전문지식, 각종 수문 자료를 수집, 결과 값에 대한 검·보정을 필요로 함으로써 모델에 대한 비전문가는 사용하기 어려운 점이 존재한다. 반면 유출량 산정공식 중 가지야마의 유출량 산정공식은 간단한 유역자료만 (강수량, 유역면적) 있으면 누구든 쉽게 유출량을 산정할 수 있다. 본 연구에서 개선한 가지야마 월별 보정계수를 활용하면 최근 변화하는 기상요건에 맞추어 적절한 유출량을 산정을 할 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 본 연구에서는 유출량에 영향을 미치는 유출계수  $f$  값을 결정하는데 있어 명확한 기준을 제시하지 못하였다. 본 연구에서는 각 유출계수 (0.6~1.4) 별 유출량을 산정하여 실측값과 비교하였을 때 NES,  $R^2$ 가 높은 경향을 나타내는 유출계수를 이용하였지만 유역의 경사도, 임야의 비율, 유출의 크기를 정확한 지표로 나타내지는 못하였다. 유출계수  $f$ 는 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4까지 있으며 이것은 유출량에 변화를 줄 수 있기에 좀더 명확한 기준을 제시해야 할 것으로 사료된다. 따라서 가지야마 유출량 산정공식을 활용하여 유역의 정확한 유출량을 산정하기 위해서 경사도, 임야의 많고 적음의 비율, 유출 많고 적음의 기준을 세울 수 있는 연구가 필요하다고 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ012549032018)의 지원을 받아 수행되었음.

#### REFERENCES

- Ahn, S. R., Y. J. Lee, G. A. Park, and S. J. Kim, 2008. Analysis of future land use and climate change impact on stream discharge. *Journal of Civil Engineering* 28(2B): 215-224 (in Korea).
- Arnold, J. G., 1992. Spatial scale variability in model development and parameterization, ph.D, Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1): 73-89 (in United States). doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
- Box, G. E., and G. C. Tiao, 2011. *Bayesian inference in statistical analysis* 40. doi:10.1002/9781118033197.
- Duan, Q., 2003. Global optimization for watershed model calibration. in *Calibration of Watershed Models* 89-104. doi:10.1002/9781118665671.ch6.
- Griensven, A. V., and T. Meixner, 2007. A global and efficient multi-objective auto-calibration and uncertainty estimation method for water quality catchment models. *Journal of Hydroinformatics* 9(4): 277-291 (in United Kingdom). doi:10.2166/hydro.2007.104.
- Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen, and T. Engen-Skaugen, 2012. Technical note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping-a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9: 6185-6201. doi:10.5194/hess-16-3383-2012.
- Han, W. S., W. B. Sim, B. J. Lee, and J. H. Yoo, 2012. The proposal of evaluation method for local government infrastructure vulnerability relating to climate change driven flood. *Journal of Climate Change Research* 3(1): 25-37 (in Korea).
- Holland, J. H., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. Michigan, Ind.: University of Michigan Press 183 p. 975.

10. Hwang, C. S., C. U. Choi, and J. S. Choi, 2014. Impact of IPCC RCP scenarios on streamflow and sediment in the Hoeya river basin. *Journal of the Korean society for geo-spatial information system* 22(3): 11-19 (in Korea). doi:10.7319/kogsis.2014.22.
11. Jang, D. W., B. S. Kim, and J. H. Kim, 2012. The quantification of disaster impact of extreme rainfall under climate change in Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12(4): 169-178 (in Korea). doi:10.9798/KOSHAM.2012.12.4.169.
12. Jang, J. S., 2003. Introduction of hydrologic models and parameters. *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 10(1): 95-102 (in Korea).
13. Jo, J. P., I. W. Jung, J. Y. Lee, J. P. Kim, S. K. Yoon, and E. J. Lee, 2013. *Analysis of CMIP5 data in the water resources considering uncertainty*, Korea Water Resources Association (KWRA).
14. Jung, B. H., B. C. Koo, I. Y. Jung, C. K. Park, G. S. Park, D. S. Oa, S. G. Shin, Y. K. Jo, M. W. Kim, and Y. J. Park, 2004. Improving the hydraulic and structural safety of reservoir spillways for flood, 14-35. Rural Research Institute (in Korea).
15. Kajiyama, A., 1928. Flood forecasting for Han, Nakdong, and Daedong Rivers in Korea. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Japan.
16. Kim, H. N., E. R. Lee, S. U. Kang, and H. G. Choi, 2015. Long-term natural flow prediction based on RCP climate change scenarios in Geumho river watershed. *Journal of Korean Review of Crisis and Emergency Management* 11(5): 151-166 (in Korea).
17. Kim, K. C., M. H. Shin, Y. H. Choi, J. Y. Seo, and J. D. Choi, 2008. Comparison of water resources by Kajiyama and SWAT models for an ungauged small watershed. *Proceedings of the 2008 Korea Water Resources Association Conference*, Korea Water Resources Association, 2244-2248 (in Korea).
18. Lee, J. W., N. W. Kim, J. W. Lee, and B. H. Seo, 2009. Estimation of runoff curve number for ungauged watershed using SWAT. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(6): 11-16 (in Korea). doi:10.5389/KSAE.2009.51.6.011.
19. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principal. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
20. National Institute of Meteorological Research, 2011. *Climate change scenario report 2011 to respond to the IPCC 5th Assessment Report*, 11-1360395-000233-01, NIMR.
21. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*, USDA, ARS, Temple, Texas, 1-647.
22. Nelder, J. A., and R. A. Mead, 1965. Simplex method for function minimization. *Computer Journal* 7: 308-313.
23. Noh, J. K., 1999. Generalization of Kajiyama formula for estimating monthly discharges. *Proceedings of the 1999 Korea Water Resources Association Conference*, Korea Water Resources Association, 221-226 (in Korea).
24. Shin, Y. C., M. H. Shin, W. K. Kim, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2007. Estimation of streamflow discharges using Kajiyama equation and SWAT Model. *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 14(1): 41-49 (in Korea).
25. Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, 2013. *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, IPCC, Cambridge University Press, United Kingdom, 1535.
26. Park, J. Y., H. Jung, C. H. Jang, and S. J. Kim, 2014. Assessing climate change impact on hydrological components of Yongdam dam watershed using RCP emission scenarios and SWAT Model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(3): 19-29 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2014.56.3.019.
27. Ra, Y. H., D. S. Yoo, J. G. Kim, Y. S. Park, Y. C. Park, S. G. Heo, K. S. Kim, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2007. Analysis of flow-resources using the SWAT model in the YeongWol watershed. *Journal of Agriculture and Life Sciences Research Institute* 18: 147-154 (in Korea).