

## 기후변화 시나리오 편의보정 기법에 따른 강우-유출 특성 분석

금동혁 · 박윤식\* · 정영훈 · 신민환 · 류지철\*\* · 박지형\*\* · 양재의\*\*\* · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과  
\*공주대학교 지역건설공학과  
\*\*국립환경과학원 유역총량과  
\*\*\*강원대학교 바이오자원환경학과

### Analysis of Rainfall-Runoff Characteristics on Bias Correction Method of Climate Change Scenarios

Donghyuk Kum · Younsik Park\* · Young Hun Jung · Min Hwan Shin · Jichul Ryu\*\* · Ji Hyung Park\*\* ·  
Jae E Yang\*\*\* · Kyoung Jae Lim†

*Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University*

*\*Department of Rural construction Engineering, Kongju National University*

*\*\*Water Pollution Load Management Division, National Institute of Environmental Research*

*\*\*\*Department of Biological Environment, Kangwon National University*

*(Received 9 January 2015, Revised 17 April 2015, Accepted 22 April 2015)*

#### Abstract

Runoff behaviors by five bias correction methods were analyzed, which were Change Factor methods using past observed and estimated data by the estimation scenario with average annual calibration factor (CF\_Y) or with average monthly calibration factor (CF\_M), Quantile Mapping methods using past observed and estimated data considering cumulative distribution function for entire estimated data period (QM\_E) or for dry and rainy season (QM\_P), and Integrated method of CF\_M+QM\_E(CQ). The peak flow by CF\_M and QM\_P were twice as large as the measured peak flow, it was concluded that QM\_P method has large uncertainty in monthly runoff estimation since the maximum precipitation by QM\_P provided much difference to the other methods. The CQ method provided the precipitation amount, distribution, and frequency of the smallest differences to the observed data, compared to the other four methods. And the CQ method provided the rainfall-runoff behavior corresponding to the carbon dioxide emission scenario of SRES A1B. Climate change scenario with bias correction still contained uncertainty in accurate climate data generation. Therefore it is required to consider the trend of observed precipitation and the characteristics of bias correction methods so that the generated precipitation can be used properly in water resource management plan establishment.

**Key words** : Bias Correction, Change Factor, Climate Change Scenarios, Runoff, Quantile Mapping

## 1. Introduction

최근 온실효과 현상으로 기온의 증가, 강수패턴 변화 등을 기후변화를 초래하고 있다. 특히 기후변화로 인해 전지구 평균기온이 역대 최고 기록을 갱신하고, 세계 곳곳에 극심한 가뭄과 홍수가 빈번히 발생되고 있고(Jung, 2013), 이렇듯 환경적/경제적 피해가 발생하면서 국내·외적으로 기후변화가 큰 이슈가 되고 있다. 특히 유엔 산하 정부간 기후변화 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)에서

2007년 발표한 4차 보고서에 따르면 기상이변으로 인하여 자연재해 발생횟수가 지속적으로 증가할 것으로 예측하였다(IPCC, 2007). 이에 국내·외적으로 기후변화에 대응하고자 기후변화 관련 정책 개발 등에 대한 많은 노력이 이루어지고 있으며(No et al., 2013; Praskiewicz and Chang, 2011). 정부에서는 다양한 물관리 정책 및 사업 등을 통해 기후변화에 따른 홍수 및 가뭄 피해를 예방하고 있다. 이 외에 기후변화 시나리오를 활용한 미래 수자원의 양적 질적 영향 평가 연구가 활발히 진행되고 있으며, 하천 수질변화 연구, 홍수 취약성 분석 등에 활용되었다(Ahn et al., 2009; Kim et al., 2012; Park et al., 2011). 기후변화 시나리오는 기상청 산하 기후변화정보센터(Climatic Change Information Center: CCIC)에서 제공하고 있다. 그러나 기후변화 시나리오는 미래 가상 시나리오 선정과 다양한 자연조건에 대한 불완전한 물리적 이해, 그리고 연산 능력 등의 한계로 기후변화에 대한 매우 높은

† To whom correspondence should be addressed.  
kjlim@kangwon.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

불확실성(uncertainty)이 내포되어 있다(Aggarwal and Mall, 2002; Giorgi and Francisco, 2000; Mark and Mike, 2000). 이러한 불확실성은 안정적인 수자원 확보 및 관리 계획 수립에 어려움을 가중시키고 있다. 이에 기후변화 시나리오의 불확실성을 최소화하기 위한 편의보정이 수행될 필요가 있다(Muerth et al., 2013). 특히 기후변화정보센터에서 제공하는 고해상도의 일단위 기후변화 시나리오 자료는 실측치에 비해 예측치가 과소 추정되어 있고, 한반도와 같이 시계열(예. 월별/계절별) 강수 특성이 뚜렷한 지역에서는 편의보정을 통한 결과값들의 정확도 향상보다는 경향성 향상을 목적으로 편의보정을 통한 기후변화 시나리오의 재가공이 필수적으로 선행되어야 한다. 이에 기후변화 시나리오의 불확실성을 최소화하기 위한 다양한 편의보정 기법들이 개발되어 활용되고 있다(Schmidli et al., 2006; Wood et al., 2004). 국내에서 주로 사용되는 기후변화 시나리오 편의보정기법에는 과거 관측 자료의 기본 평균 통계에 대한 동기간 기후모델 결과의 편의 정도를 연별/월별로 적용하는 Change Factor (CF) 기법과 누적 분포 함수(Cumulative Distribution Function: CDF)를 이용한 Quantile Mapping (QM) 방법이 있다. 그러나 CF와 QM의 편의보정기법은 편의 추정 방법이 달라 강우일수, 강우크기 등이 다르게 나타나고 유출해석에도 영향을 미치기 때문에 이에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 1) 국내에서 기후변화 시나리오의 불확실성을 최소화하기 위해 활용되고 있는 CF 기법과 QM 기법을 적용하여 기후변화 시나리오를 재가공하고, 2) 재가공된 기후변화 시나리오를 활용한 강우-유출 해석 시 편의보정기법에 따른 유출 해석 특성을 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 이용하여 평가하고자 한다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. 연구대상지역

갑천유역은 금강권역에 속하며 충청남도 계룡시, 논산시,

금산군, 대전광역시를 포함하고 있다. 유역면적은 648.3 km<sup>2</sup>이며 유로연장은 73.7 km로 대전광역시의 3대 하천인 대전천, 갑천, 유등천이 흐르고 있다(Fig. 1). 유역 상류지역에 속하는 계룡시, 논산시, 금산군은 대부분 산림지역이며 하류지역에 속하는 대전광역시는 도시화 지역이다. 여름철 장마철을 제외하고는 유등천과 대전천은 갈수기와 홍수기의 유량 차이가 커 하상계수가 높고, 이와 반대로 갑천은 연중 유량변화가 크지 않다(Lee et al., 2006). 그리고 대전 기상 관측소(1981년~2010년)를 기준으로 연평균 강수량은 1,458 mm로 국내 연평균 강수량 1,331 mm에 비해 높으며 계절별 평년값은 봄 241.0 mm, 여름 869.7 mm, 가을 258.2 mm, 겨울 91.0 mm로 국내 계절별 평년값 봄 262.9 mm, 여름 721.2 mm, 가을 276.4 mm, 겨울 113.4 mm에 비해 여름철 강수량이 높은 것으로 나타났다(KMA, 2011).

### 2.2. 기후변화 시나리오

#### 2.2.1 기후변화 시나리오 개요

IPCC에서는 Data Distribution Center(DDC)를 통해 미래 기후변화 예측을 결정하는 사회·경제적 가정에 대한 정보와 미래의 인구·국민총생산·이산화탄소 농도 및 순환 등을 가정하는 시나리오를 제공하고 있다. 최근 IPCC 5차 평가보고서에 도입한 온실가스 시나리오를 통해 작성된 Representative Concentration Pathways(RCP) 기후변화 시나리오가 제공되고 있지만, IPCC의 3차 평가보고서에서 사용된 온실가스 증가 시나리오를 기반으로 작성된 Special Report on Emission Scenarios(SRES)가 기후변화에 대응하기 위한 과학적 기초자료 구축에 널리 활용되어 왔다(Arnell et al., 2004; Parry et al., 2004; Robert, 2004). SRES 시나리오는 이산화탄소 배출 양에 따라 A1, A2, B1, B2 시나리오로 재분류되는데(Fig. 2), 4개의 스토리라인은 각각에 대한 기본 특성 및 추진력에 따라 개별적인 시나리오로 전개된다(Shin, 2013).

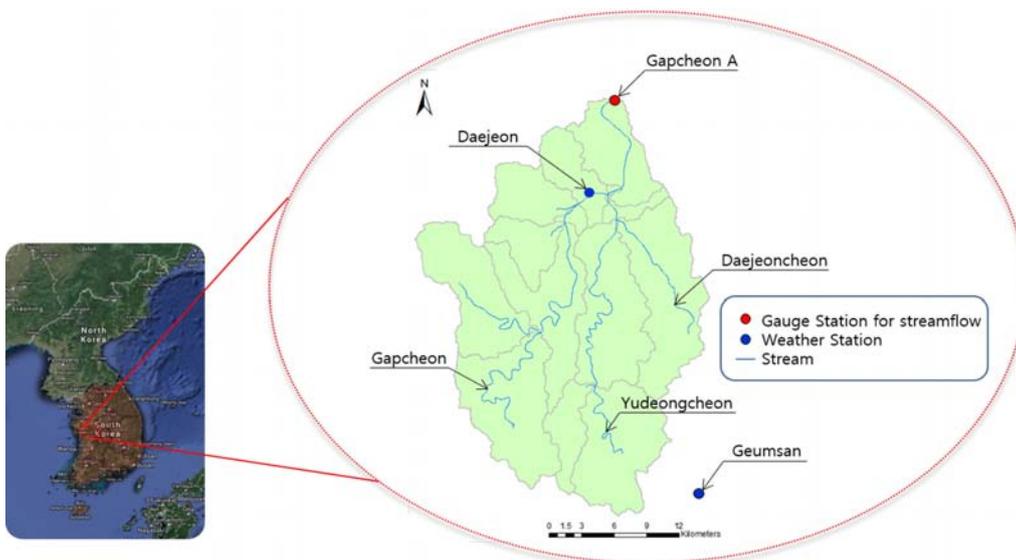


Fig. 1. Location of study area, Gapcheon watershed in South-Korea.

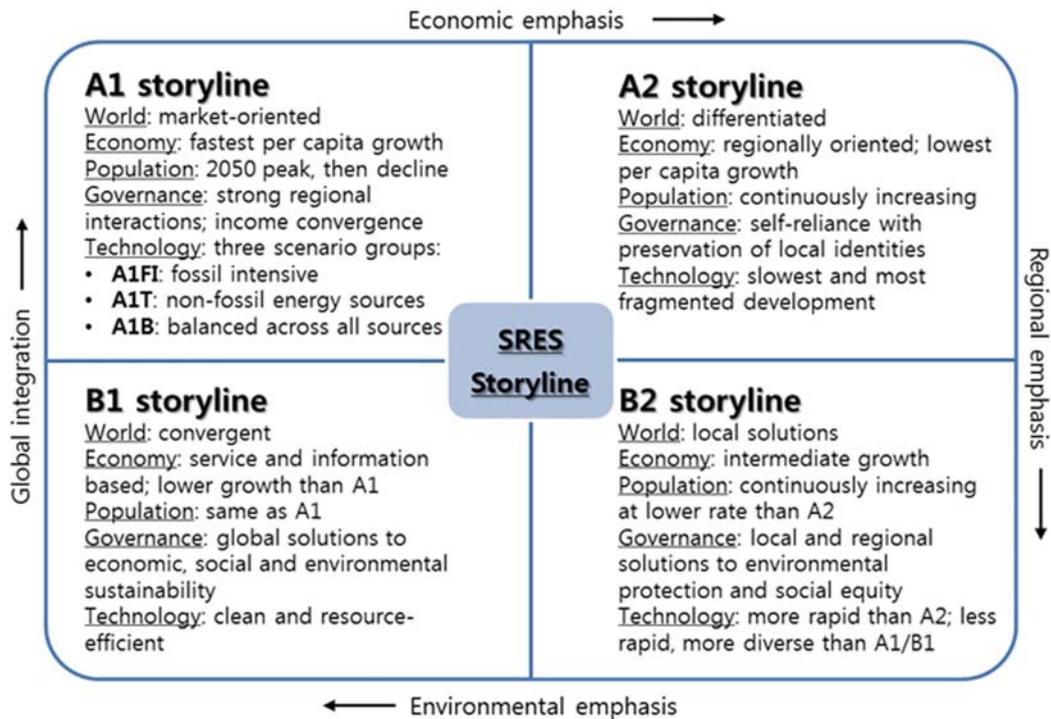


Fig. 2. Summary of the four SRES storylines (IPCC, 2007).

A1 스토리라인에 속하는 A1B 는 현재의 이산화탄소 배출량이 점차 증가하여 2050년경에 정점에 도달 후 감소하는 시나리오로 가장 현실에 부합하는 시나리오로 평가받고 있고(Kwon et al., 2007; Yun et al., 2011), 다양한 지역 기후변화 연구에 활용되고 있다(Goergen et al., 2013; Lee et al., 2012; Mollema and Antonellini, 2013). 이에 본 연구에서는 기상청에서 제공하고 있는 A1B 시나리오를 활용하여 편의보정 기법에 따른 강우-유출 특성을 분석하였다.

2.2.2. 기후변화 시나리오 편의보정 기법

CCIC에서 제공하는 A1B 시나리오의 한반도를 27 km × 27 km 격자로 표현한 RCM (Regional Climate Model)으로 일단위 강수량 자료 형태로 제공되고 있다. 그러나 대진 관측소를 기준으로 1984년부터 2013년 사이의 기상청 관측 자료와 기후변화 시나리오의 연평균 강수량을 비교했을 때 관측 자료는 1406.4 mm, 시나리오는 729.4 mm로 약 1.9 배의 차이를 보였다. 이처럼 기후변화 시나리오는 관측자료 대비 과소 추정되는 주 원인은 GCM (Global Climate Model) 자료를 경계조건으로 사용함으로써 GCM의 오차가 RCM을 이용한 지역기후 모의 결과의 불확실성으로 전파되기 때문이다(Ryu et al., 2014). 이에 따라 RCM자료를 활용하기에 앞서 관측 자료와의 편차를 보정하는 편의보정의 선행 과정이 필요하다. 기후변화 시나리오 편의보정으로 사용되는 기법들 가운데 CF 기법은 적용이 단순하고 기후변화 시나리오의 예측치 특성 및 경향을 보정 후에도 그대로 유지할 수 있으며, QM기법은 기후변화 시나리오의 예측치와 관측 자료간에 동일한 확률분포를 갖는 특징이 있다.

CF 기법은 식(1)과 같이 편의보정 기간 동안의 연평균이

나 월평균을 이용하여 교정계수를 산정하고, 이를 미래기간에 적용하는 방법이다(Alcamo et al., 1997). 국내와 같이 월별 강수 특성이 뚜렷한 지역에서는 월평균 교정계수를 산정하는 방법이 주로 이용되고 있다(Ahn et al., 2009; Park et al., 2009).

$$P'_{RCM,fut} = P_{RCM} \times (\bar{P}_{meas,his} / \bar{P}_{RCM,his}) \tag{1}$$

여기서  $P'_{RCM,fut}$ 는 보정된 미래 강수량이며,  $P_{RCM}$ 은 RCM의 모의된 미래 강수량,  $\bar{P}_{meas,his}$ 는 과거 관측 자료의 평균 강수량,  $\bar{P}_{RCM,his}$ 는 과거 동안 모의된 RCM 평균 강수량을 의미한다.

QM 기법은 식(2)와 같이 과거 일정기간의 관측치와 예측치의 누적확률분포(Cumulative Distribution Function)를 이용하는 기법으로 모의치의 특정자료에 대한 누적확률분포를 산정하고 이 값을 관측치의 누적확률분포 역함수(inverse function)에 대입하여 관측치에 사상(mapping)시킨다(Panofsy and Brire, 1963). QM기법은 데이터의 개수와 분포(distribution)가 중요한 요소인데, QM기법을 월별로 적용하기에는 데이터의 개수 및 분포의 한계로 인하여 다수의 연구에서 총 보정기간이나 계절별 구분하는 방법을 주로 활용하고 있다(Hashino et al., 2006; Leung et al., 1999; Wood et al., 2002).

$$Z_i = F_{oi}^{-1}(F_{si}(\hat{Y}_i)) \tag{2}$$

여기서  $Y_i$ 를 i번째 지점의 기상 변수값이라고 하면  $Z_i$ 는 오차 보정된 값을 의미하고,  $F_{oi}(\cdot)$ 와  $F_{si}(\cdot)$ 는 각각 해당

**Table 1.** Description of Bias Correction Methods used in this study

CF_year (CF_Y)	Change Factor method using past observed data and estimated data by the estimation scenario with average annual calibration factor
CF_month (CF_M)	Change Factor method using past observed data and estimated data by the estimation scenario with average monthly calibration factor
QM_entire period (QM_E)	Quantile Mapping method using past observed data and estimated data considering CDF for entire estimated data period
QM_period division (QM_P)	Quantile Mapping method using past observed data and estimated data considering CDFs for dry and rainy season
CF + QM (CQ)	Integrated method of CF_M and QM_E

변수의 예측값과 관측값에 대한 경험적 확률 분포이다.

그리고 Kum et al. (2014)은 두 편의보정 기법(CF기법, QM 기법)은 일별/월별 강우특성을 고려하기에 한계점이 있어 두 편의보정 기법을 연계한 CF+QM(CQ)기법을 제안하였다. 이 기법은 CF 기법을 통해 기후변화 시나리오의 강우 예측치에 월별 강우 특성을 반영한 편의보정 후, QM 기법을 통해 다시 한 번 과거 일정기간동안의 강수발생일수, 최대 일 강수량 등을 고려한 확률분포를 반영하는 방법이다. 이에 본 연구에서는 A1B 시나리오와 대전기상관측소 및 금산기상관측소의 1984년 부터 2013년까지의 시나리오 예측 강수량과 관측 강수량 자료 활용하여 연평균과 월평균 교정계수를 산정하여 편의보정을 수행한 CF 기법과 총 편의보정 기간과 우기(4월~10월)와 비우기(11월~3월)를 구분하여 누적확률분포를 고려한 QM기법 그리고 Kum et al. (2014)이 제안한 CF+QM 기법 총 5가지의 편의보정 기법에 대해 편의보정을 수행하였다(Table. 1).

## 2.3. 강우-유출해석 모형

### 2.3.1 SWAT모형 개요

SWAT모형은 대규모 유역에서 토양과 토지이용 등의 특성과 시공간적 특성을 고려하여 장기 수문 및 수질 변화를 모의 및 예측하는 유역 단위 모형으로, 미국 농무부 농업연구소(United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, USDA ARS)에 의해 개발되었다(Arnold, 1992; Arnold and Srinivasan, 1994; Arnold et al., 1998). Luo et al. (2013), Xu et al. (2013)은 SWAT모형을 이용하여 기후변화가 수리/수문에 미치는 영향을 분석하였고, 국내에서는 1990년대 후반 이후, 유출량 해석을 중심으로 한 연구에 활용되기 시작했다(Ji et al., 2014; Lee et al., 2008; Park et al., 2011). 이처럼 SWAT모형은 장기적인 유출 특성 분석에 지속적으로 활용되고 있어, 본 연구에서 기후변화 시나리오 편의보정기법에 따른 장기적인 유출 특성 분석에 매우 유용한 모형으로 판단된다.

### 2.3.2 SWAT모형 입력자료

SWAT 모형은 시간적 변화와 공간적 분포를 고려하여 유출 특성을 분석하는데, 시간적 변화를 고려하기 위한 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도)와 공간적 분포를 고려하기 위한 토양속성, 토지이용현황 그리고 지형 자료를 필요로 한다. 기상자료는 갑천유역 내 위치한 대전관측소와 인근 금산관측소의 관측자료를 기상청을 통해 구

축하였는데, Lee et al. (2013)의 연구에서 SWAT모형에 적용되는 5가지 기상자료가 유출해석에 미치는 영향을 분석한 결과 강수량에 대해 가장 민감한 것으로 나타났고, 강수량 자료를 제외하고는 유출 해석에 큰 영향을 주지 않는다고 하였다. 이에 본 연구에서 기후변화 시나리오를 적용한 미래 장기 유출 해석시 강수 자료를 제외한 기온, 풍속, 일사량, 상대습도는 과거 자료(1980년~2011년)를 활용하였다. 그리고 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 개략토양도(1:50,000)를 사용하였고(Fig. 3), 토지이용도는 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 2005년 대분류 토지피복도(1:25,000)를 사용하였다(Fig. 4). Digital Elevation Model(DEM)은 국립지리원에서 제공하는 수치지도(1:5,000)를 이용하여 구축하였다(Fig. 5).

### 2.3.3. 모형 매개변수 보정

유역단위 모형은 가정한 가설과 매개변수 사이의 복잡한 상호관계가 존재하여 불확실성이 발생할 수 있다(Kim et al., 2013). SWAT모형 역시 물수지방정식을 근거로 다양한 매개변수를 통해 수문 및 수질을 예측하는데 모형을 활용하기에 앞서 이러한 매개변수에 대한 보정 작업이 필요하다. 하지만 매개변수 사이의 복잡한 상호관계가 존재하여 Swiss Federal institute of Aquatic Science and Technology의 Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz(Eawag)에서는 SWAT모형의 자동 보정을 보조하기 위한 SWAT-CUP을 개발하였다(Abbaspour, 2007). SWAT-CUP은 5개의 최적화 알고리즘(SUFI-2, PARASOL, MCMC, PSO, GLUE)을 이용하여 SWAT모형의 매개변수를 보정할 수 있는데 이 중 SUFI-2(Sequential Uncertainty Fitting ver.2)는 순차적으로 매개변수를 추정하는 방법으로서 Ryu et al. (2012)은 SUFI-2 알고리즘이 SWAT모형의 매개변수에 가장 적합하다고 하였다. 이에 본 연구에서는 SWAT모형의 매개변수 보정에 SUFI-2 알고리즘을 이용하였다. 그리고 갑천유역의 말단지점인 갑천A지점을 대상으로 2007년 1월부터 2008년 12월 까지를 보정 기간으로 2010년 1월 부터 2011년 12월 까지를 검증 기간으로 하였으며, 매개변수는 SWAT모형의 유량 관련 매개변수 25개를 대상으로 민감도 분석을 수행하고 P-value를 이용하여 선정하였다. P-value는 유의확률을 나타내는 것으로 P-value가 클 경우 귀무가설이 받아들여져 통계적으로 차이가 발생되지 않음을 의미한다. 이와 반대로 P-value가 작을 경우 귀무가설이 기각되고 대립가설이 채택되어 해당 매개

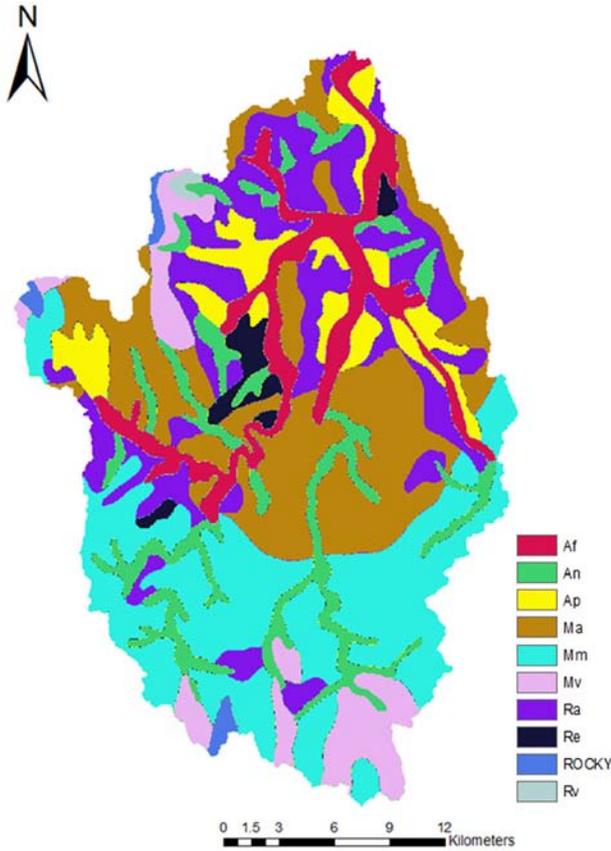


Fig. 3. Soil type of study area.

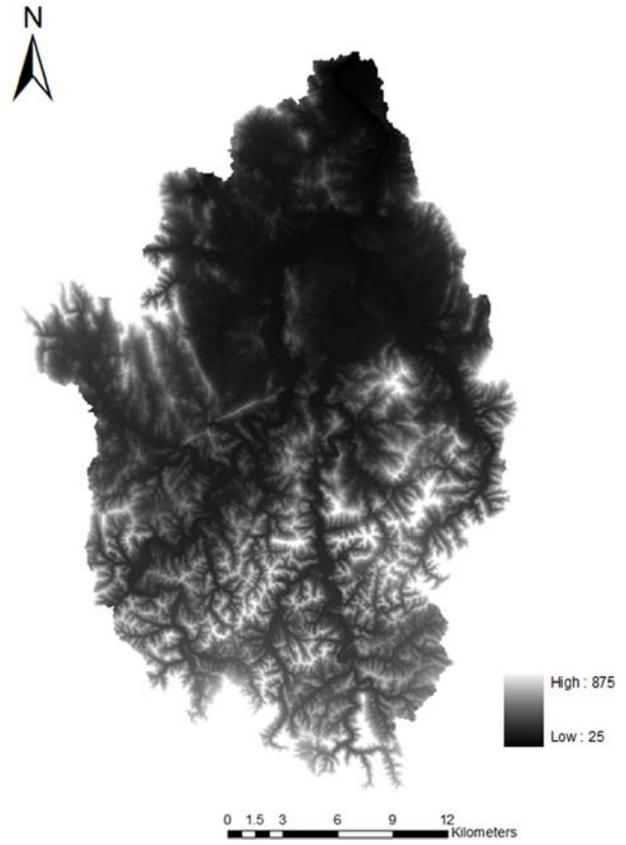


Fig. 5. DEM of study area.

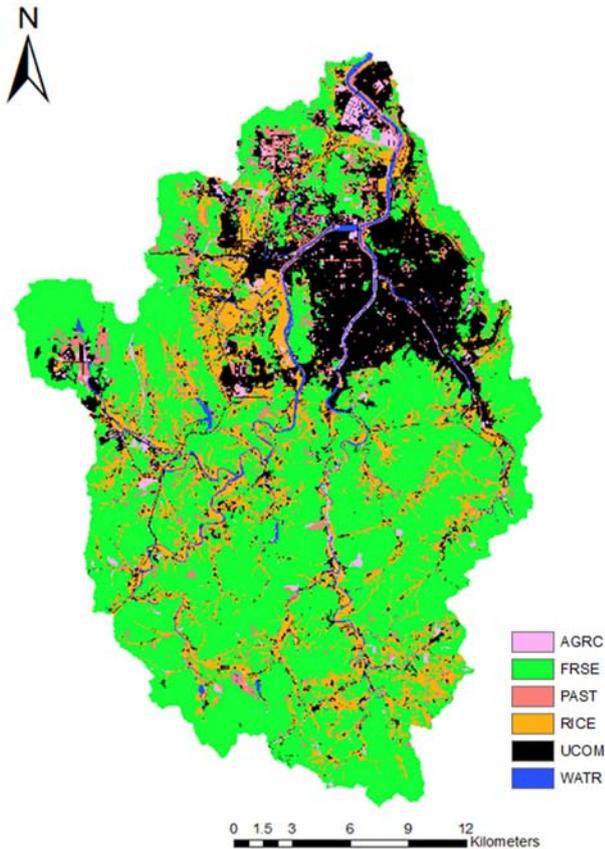


Fig. 4. Landuse of study area.

변수 변화에 따라 통계적 차이가 발생되며 이는 해당 매개 변수가 결과에 민감하게 반응함을 의미한다. 적용성 평가는 결정계수( $R^2$ )와 유효지수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)(식 3)를 사용하였다.

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

여기서  $P_i$ 는 SWAT모형에서 예측된 각 모의값이고,  $O_i$ 는 실측값이며,  $\bar{O}_i$ 는 모든 실측값의 평균이다. 또한  $n$ 은 데이터의 개수이다.

NSE는 1에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 반영하는 것을 의미하며, 0보다 작을 경우 모델의 예측결과가 실측값과 적합성이 없음을 의미하며, 효율 범위와 신뢰 구간은 다음과 같다(Table 2)(Donigian, 2000).

Table 2. Criteria to evaluate model performances (Donigian, 2000)

Class	Poor	Fair	Good	Very good
NSE	< 0.6	0.60 ~ 0.70	0.70 ~ 0.80	> 0.80

### 2.3.4. 미래 강우-유출 특성 분석

5가지 편의보정 기법에 따라 편의보정 된 미래 기후변화 시나리오의 예측 강수량자료를 활용한 미래기간에 대한 강우-유출 특성을 분석은 2021년~2100년 까지 20년씩 기간을

구분하여 각 기간별 첨두유량의 크기, 평균 유량, 총 유량을 비교하였다. 그리고 유량조건을 확률적으로 파악하기 위해 식 4와 같이 일유량 자료를 최대유량에서 최소유량 순으로 배열하여 특정유량을 초과하는 일수를 백분율로 계산하는 유량지속곡선(Flow Duration Curve, FDC)을 작성하고 이를 토대로 구간별 최대유량, 평균유량 등을 비교 분석하였다. 본 연구에서는 Cleland (2003)이 정의한 것과 같이 초과 유량 확률에서 10%까지는 고유량(High-Flow), 10~40%는 습한상태(Moist-conditions), 40~60%는 중간유량(Mid-range-Flow), 60~90%는 건조상태(Dry-conditions), 90% 이상은 저유량(Low-Flow)으로 구분하였다.

$$Percent\ of\ Days\ Flow\ Exceeded(\%) = Rank / Number\ of\ data \times 100 \quad (4)$$

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. 편의보정 결과

본 연구에서는 CF기법에서 연평균 보정계수(CF\_Y)와 월평균 보정계수(CF\_M)를 이용하는 방법과 QM기법에서 총 보정기간 동안을 고려하여 확률분포를 산정하는 방법과 우

기와 비우기를 구분하여 확률분포를 산정하는 방법(QM\_E, QM\_P) 그리고 Kum et al. (2014)이 제안한 CF기법과 QM기법을 연계한 CF+QM기법(CQ) 총 5가지 기법을 이용해 각각 편의보정을 수행하고 계절별/월별 특성을 분석하였다 (Table 3). 1984년 부터 2013년 까지 총 30년에 대한 편의보정 결과 보면 이 기간 대전관측소 기준 총 관측 강수량 42,192.6 mm은 CF\_Y 42,200.7 mm, CF\_M 42,193.4 mm, QM\_E 42,348.3 mm, QM\_P 42,291.5 mm, CQ 42,042.9 mm로 총 강수량에서는 큰 차이가 발생되지 않았다. 그러나 금산관측소는 총 강수량 39,806.3 mm, CF\_Y 39,804.1 mm, CF\_M 39,805.5 mm, QM\_E 39,859.0 mm, QM\_P 41,487.9 mm, CQ 39,626.0 mm로 QM\_P에서 16,81.6 mm 크며 편의보정되는 것으로 나타났다. 그리고 봄(3월~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)로 강수량을 비교한 결과 대전 관측소와 금산관측소 모두 여름 강수량이 전체 강수량에 58%를 차지하고, 가을 18%, 봄 16%, 겨울 7% 순으로 강수량이 분포하지만 CF\_Y, QM\_E 는 기존 기후변화 시나리오의 강수 분포를 그대로 유지하여 여름 39%, 봄 28~29%, 가을 19%, 겨울 12% 순으로 봄과 여름 강수량 차이가 크지 않은 것을 나타냈다. 이를 제외한 CF\_M, QM\_P, CQ는 과거 관측 강수 분포와 비슷한 분포를 나타내어 계절별 편의보정에

**Table 3.** Comparison of Precipitation before and after five different bias correction result each weather station (1984–2013)

	Spring (mm)			Summer (mm)			Fall (mm)			Winter (mm)			
	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	
Dae-jeon	Obs.	75.6 (16.1%)			273.7 (58.4%)			87.3 (18.6%)			32.1 (6.8%)		
		53.0	75.0	98.9	177.8	332.1	311.3	164.2	50.2	47.6	28.9	29.5	37.9
	Orig. Scenario	74.1 (29.3%)			98.6 (38.9%)			49.4 (19.5%)			31.3 (12.3%)		
		48.6	76.5	97.2	78.6	99.8	117.4	50.4	46.9	50.9	41.2	25.4	27.2
	CF_Y	137.2 (29.3%)			182.5 (38.9%)			91.4 (19.5%)			57.9 (12.3%)		
		90.0	141.6	179.9	145.4	184.8	217.3	93.2	86.8	94.1	76.2	47.0	50.4
	CF_M	75.6 (16.1%)			273.7 (58.4%)			87.3 (18.6%)			32.1 (6.8%)		
		75.0	98.9	177.8	332.1	311.3	164.2	50.2	47.6	28.9	29.5	37.9	53.0
	QM_E	136.9 (29.1%)			188.2 (40.0%)			91.7 (19.5%)			53.8 (11.4%)		
		85.0	140.7	185.0	149.0	193.4	222.1	95.9	86.4	92.7	74.4	42.1	45.0
	QM_P	76.0 (16.2%)			280.7 (59.7%)			81.2 (17.3%)			32.1 (6.8%)		
		49.9	78.4	99.7	223.7	284.1	334.1	143.4	48.1	52.1	42.2	26.1	27.9
CQ	82.5 (17.7%)			261.9 (56.1%)			90.0 (19.3%)			32.7 (7.0%)			
	56.9	80.8	109.9	179.3	310.4	296.1	162.4	55.6	51.9	29.7	29.7	38.7	
Geum-san	Obs.	73.7 (16.7%)			256.3 (57.9%)			79.9 (18.1%)			32.4 (7.3%)		
		52.8	77.5	90.8	175.3	318.1	275.5	142.8	48.6	48.4	28.9	29.6	38.7
	Orig. Scenario	81.2 (28.4%)			113.2 (39.6%)			55.4 (19.4%)			36.4 (12.7%)		
		55.4	83.1	105.2	86.3	117.2	136.3	56.8	51.3	58.1	46.4	30.6	32.2
	CF_Y	125.5 (28.4%)			175.0 (39.6%)			85.6 (19.4%)			56.2 (12.7%)		
		85.6	128.3	162.6	133.3	181.1	210.6	87.8	79.2	89.7	71.6	47.2	49.7
	CF_M	73.7 (16.7%)			256.3 (57.9%)			79.9 (18.1%)			32.4 (7.3%)		
		52.8	77.5	90.8	175.3	318.0	275.5	142.8	48.6	48.4	28.9	29.6	38.7
	QM_E	125.3 (28.3%)			181.3 (41.0%)			85.6 (19.3%)			50.7 (11.4%)		
		79.3	126.6	169.9	137.3	190.9	215.8	89.2	79.7	87.9	68.7	40.5	42.8
	QM_P	82.8 (18.0%)			260.3 (56.5%)			80.7 (17.5%)			37.1 (8.0%)		
		56.5	84.7	107.3	198.3	269.4	313.3	130.7	52.3	59.2	47.3	31.2	32.8
CQ	77.2 (17.5%)			250.6 (57.0%)			81.5 (18.5%)			31.0 (7.0%)			
	23.1	81.0	97.5	180.7	303.3	267.9	143.2	51.0	50.2	27.7	27.5	37.8	

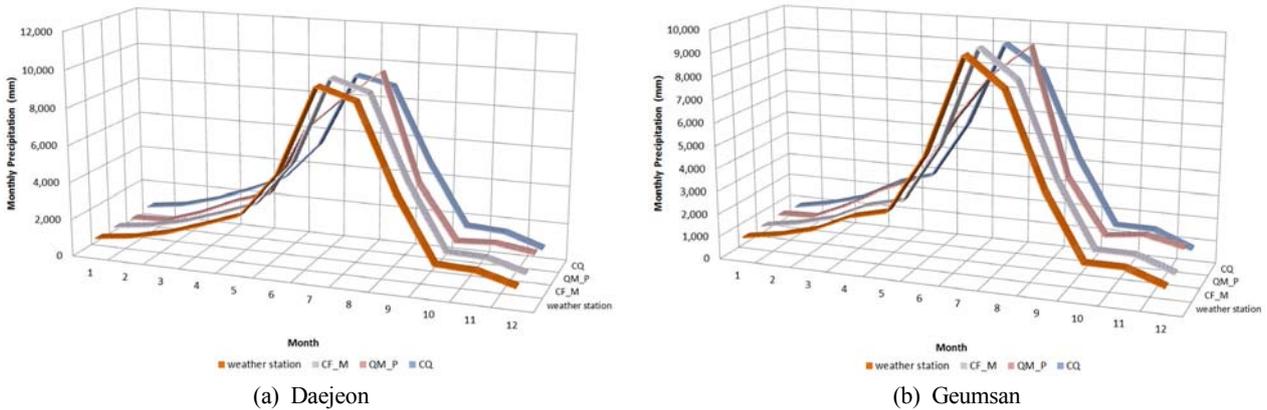


Fig. 6. Comparison of monthly precipitation by three bias correction methods.

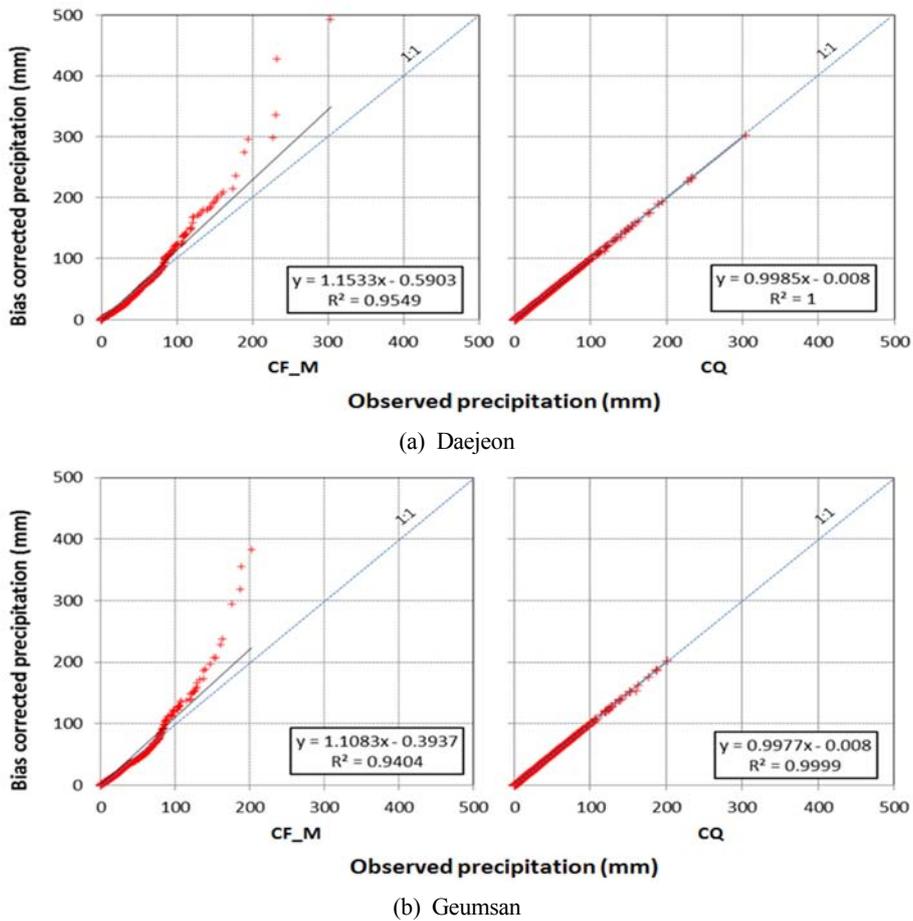


Fig. 7. Comparison of daily precipitation by two bias correction methods

적합한 것으로 나타났다. 하지만 월별 편의보정 결과를 비교한 결과에서 QM\_P는 월별 강수 발생 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 특히 강수가 집중되는 여름에 CF\_M, CQ는 기상청 관측자료와 같이 7월에 가장 많은 강수량이 발생되고 8월부터 강수량이 감소하지만, QM\_P는 8월에 가장 많은 강수량이 발생되고 9월 급격히 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 6). 이러한 결과는 미래기간에 대해 강우-유출 분석시 월별 유출 분석에 큰 차이가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 Kum et al. (2014)은 기후변화 시나리오의 일별

편의보정에서 일자별로 강수량을 정확히 보정하기에는 기후변화 시나리오의 한계로 인해 불가능하며, 최대한 편의보정을 통해 과거 강수량의 크기, 발생 분포 및 빈도 등을 기후변화 시나리오에 재현 및 적용하는 것이 중요하다고 하였다. 본 연구에서도 관측 강수량의 재현 관점에서 관측 강수량과 편의보정 결과를 소팅(sorting) 비교 한 결과 Kum et al.(2014)이 분석한 결과와 같이  $R^2=1$ 로 CQ가 CF\_M에 비해 과거 편의보정 기간 동안 관측 강수 크기 및 분포를 가장 잘 재현 및 적용하는 것으로 나타났다.

3.2. SWAT모형 보정 결과

SWAT 모형을 통해 기후변화 시나리오 편의보정 기법에 따른 유출 특성을 분석하기에 앞서 SWAT-CUP을 이용한 SWAT모형의 매개변수 최적화 작업을 수행하였다. 매개변수는 민감도 분석을 통해 P-value 0.1 이하의 10개 매개변수를 선정하였다.

갑천A 지점의 2007년 부터 2008년까지의 8일 간격 유량자료와 선정된 10개의 매개변수를 이용하여 SWAT 모형을 보정한 결과 Table 4와 같이 최적 매개변수가 산정되었고, 이에 대한 SWAT모형에 의한 예측치는 실측치에 대해 NSE가 0.71, R<sup>2</sup>가 0.81로 나타났다. 이 매개변수를 이용하여 검증한 결과(2009년~2010년), NSE는 0.81, R<sup>2</sup>는 0.86으로 Donigian (2000)이 제시한 기준에도 매우 높은 적용성 결과를 보였다(Fig. 8).

3.3. 미래기간 유출 분석 결과

본 연구에서는 5가지 편의보정기법에 따라 2021년~2040년

(2030s), 2041년~2060년(2050s), 2061년~2080년(2070s), 2081년~2100년(2090s) 총 5개 기간으로 구분하여 미래기간에 대한 강우-유출 해석 특성을 비교 분석하였다. 기간별 평균유량을 비교한 결과 2030s에 21.1 m<sup>3</sup>/s ~ 22.14 m<sup>3</sup>/s, 2050s에 23.79 m<sup>3</sup>/s ~ 25.12 m<sup>3</sup>/s, 2070s에 22.63 m<sup>3</sup>/s ~ 23.75 m<sup>3</sup>/s, 2090s에 24.32 m<sup>3</sup>/s ~ 25.29 m<sup>3</sup>/s로 편의보정 기법에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Table 5). 하지만 본 연구에서 사용한 SRES A1B 시나리오는 이산화탄소 배출량이 점차 증가하여 2050년경에 정점에 도달 후 감소한다는 시나리오인데, 시나리오의 기본 특성을 유지하여 강우-유출 해석이 이루어지는 편의보정 기법은 CF\_Y와 CQ인 것으로 나타났다. 다른 편의보정 기법은 2090s에 평균 유량이 가장 큰 것으로 나타났다.

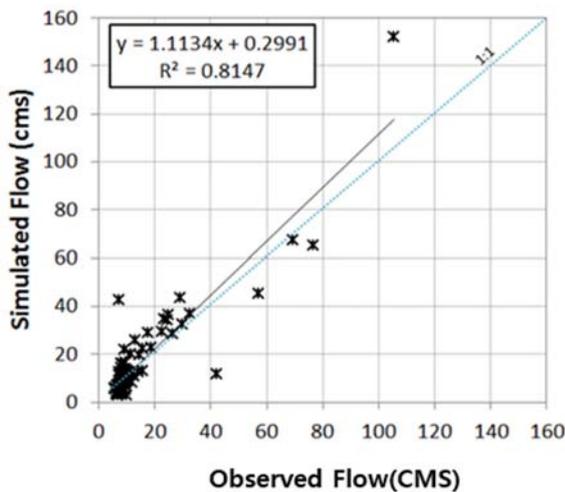
유량조건별 분석 결과 고유량에서 편의보정 기법에 따라 침투유출, 평균유량에 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다

Table 4. Ten parameters used in calibration/validation for flow estimation

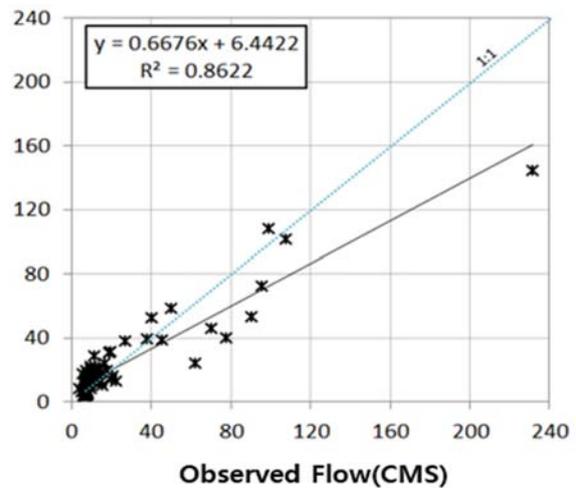
Parameter	Description	Variation Method	Fitted Value
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	Add by Value	7.7667
CH_N2	Manning's "n" value for main channel	Replace by Value	0.2875
ALPHA_BF	Baseflow recession constant	Replace by Value	0.0003
ALPHA_BNK	Baseflow alpha factor for bank storage	Replace by Value	0.1443
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace by Value	17.5417
SOL_BD	Moist bulk density	Multiply by Value	0.5285
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	Multiply by Value	0.4623
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	Multiply by Value	-0.03613
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	Add by Value	-47.3333
ESCO	Soil evaporation compensation factor	Replace by Value	0.1237

Table 5. Estimated annual stream flow (m<sup>3</sup>/s) by five bias correction methods

	CF_Y	CF_M	QM_E	QM_P	CQ
2030s	21.1	21.8	21.5	22.1	21.4
2050s	24.7	25.1	24.2	23.8	25.0
2070s	22.8	23.8	23.2	22.6	22.9
2090s	24.5	25.3	24.4	24.3	24.9



(a) Calibration



(b) Validation

Fig. 8. Scatter plots of simulated and measured flow.

(Table 6). 2050s의 첨두유량을 비교해 보면 CF\_Y는 1,710 m<sup>3</sup>/s, CF\_M은 3,223 m<sup>3</sup>/s, QM\_E는 1,811 m<sup>3</sup>/s, QM\_P는 3,528 m<sup>3</sup>/s, CQ는 1,796 m<sup>3</sup>/s로 CF\_M과 QM\_P이 다른 편의보정 기법에 비해 약 2배 정도 큰 첨두유량을 보이는 것으로 나타났으며, 다른 기간에 대해서도 같은 경향의 결과를 보였다. 그리고 고유량 조건에서 CF\_M과 QM\_P가 CF\_Y, QM\_E, CQ에 비해 평균 유량이 크지만, 다른 유량조건에서는 평균 유량이 작게 나타났다. 이는 다른 기법보다 CF\_M과 QM\_P에 의해 더욱 크게 보정된 첨두유량의 결과로 극한 기후의 유량 분석시에 적합한 편의보정 기법으로

판단된다. 하지만 앞서 편의보정에 따른 강수자료 분석에서 CF\_M이 QM\_P에 비해 월별 편의보정에 더 적합한 결과를 보였기 때문에 극한 강우에 따른 극한 홍수/가뭄 분석에 CF\_M이 더 적합한 것으로 사료된다. 하지만 다른 한편으로는 지속 가능한 수자원 관리 계획 수립을 위한 현실적인 강우-유출 해석 방안도 필요한데 앞서 유량 분석 결과에서 CF\_M과 QM\_P는 극한 기후에 적합한 것으로 나타났고, CF\_Y와 CQ가 기존 기후변화 시나리오의 기본 특성을 유지한 강우-유출 해석이 이루어지는 것으로 나타났다. 그러나 편의보정 기간 동안의 강수 특성 분석과 Kum et al. (2014)

**Table 6.** Comparison of stream flow (m<sup>3</sup>/s) in five flow regimes

		CF_Y (avg.)		CF_M (avg.)		QM_E (avg.)		QM_P (avg.)		CQ (avg.)	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
2030s	High-Flow	68.4		92.5		79.9		93.1		89.0	
		683.3	34.5	1681	31.0	1077	32.4	1880	31.0	961.2	33.1
	Moist-conditions	25.8		22.1		24.2		22.5		23.5	
		34.5	19.0	30.9	16.3	32.4	17.9	31.0	16.5	33.0	16.9
	Mid-range-Flow	17.7		14.0		16.4		14.5		14.9	
		19.0	16.4	16.3	11.8	17.9	14.9	16.5	12.5	16.8	12.9
	Dry-conditions	11.9		8.3		10.1		8.7		8.6	
		16.4	8.5	11.8	6.3	14.9	7.3	12.4	6.5	12.9	6.3
	Low-Flow	7.3		5.7		6.3		5.8		5.7	
		8.5	4.9	6.3	4.9	7.3	4.9	6.5	4.9	6.3	4.9
2050s	High-Flow	85.0		122.3		105.5		121.6		109.0	
		1710	35.8	3223	34.0	1811	35.9	3528	34.6	1796	36.8
	Moist-conditions	26.3		23.7		26.0		24.2		25.2	
		35.8	19.1	34.0	16.7	35.9	18.6	34.5	17.0	36.8	17.3
	Mid-range-Flow	17.7		14.5		17.1		14.9		15.3	
		19.1	16.2	16.7	12.3	18.5	15.7	17.0	12.8	17.3	13.1
	Dry-conditions	12.0		8.6		10.7		8.9		8.7	
		16.2	9.0	12.3	6.5	15.7	7.6	12.7	6.9	13.1	6.5
	Low-Flow	7.5		5.8		6.6		6.0		5.8	
		9.0	4.9	6.5	4.9	7.6	4.9	6.9	4.9	6.5	4.9
2070s	High-Flow	71.3		98.8		88.8		96.0		93.7	
		920.6	34.6	2644	33.5	1119	35.2	2189	33.8	1292	36.5
	Moist-conditions	25.9		23.7		25.5		23.9		25.4	
		34.5	18.9	33.5	16.9	35.2	18.6	33.8	17.0	36.4	17.8
	Mid-range-Flow	17.6		15.1		17.3		15.4		16.0	
		18.9	16.4	16.9	13.3	18.6	16.1	17.0	13.7	17.8	14.2
	Dry-conditions	12.8		9.3		11.6		9.5		9.7	
		16.4	9.7	13.3	7.2	16.1	8.5	13.6	7.4	14.2	7.3
	Low-Flow	8.0		6.3		7.2		6.5		6.5	
		9.7	4.9	7.2	4.9	8.5	4.9	7.4	4.9	7.3	4.9
2090s	High-Flow	77.2		109.5		96.5		105.7		100.6	
		844.4	36.96	1916	34.62	1081	36.08	1804	34.79	1178	37.11
	Moist-conditions	27.2		24.2		26.4		24.6		25.8	
		36.92	19.91	34.6	17.05	36.06	19.34	34.78	17.32	37.07	17.85
	Mid-range-Flow	18.3		15.2		17.9		15.5		16.1	
		19.9	16.82	17.04	13.39	19.33	16.42	17.31	13.73	17.84	14.41
	Dry-conditions	13.5		9.4		12.3		9.7		9.8	
		16.81	10.1	13.38	7.343	16.41	9.093	13.72	7.604	14.4	7.405
	Low-Flow	8.4		6.6		7.7		6.8		6.6	
		10.09	4.899	7.341	4.91	9.087	4.89	7.6	4.849	7.404	4.926

연구에서 CF\_Y와 QM\_E는 월별 강수 특성 및 일별 강수 크기의 재현과 반영에 한계점이 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서 적용한 5가지 편의보정 기법 중에 월별 강수 특성을 반영하면서, 동시에 일별 강수 크기를 가장 잘 반영하는 CQ가 가장 적합한 편의보정 기법으로 판단된다.

#### 4. Conclusion

본 연구에서는 기후변화 시나리오를 활용한 강우-유출 분석시 CF, QM, CQ기법에 따른 강우-유출 해석 특성을 분석하였다. 편의보정 기간은 1984년 부터 2013년 까지를 대상으로 하였으며 CF, QM기법에서는 조건을 2개로 세분화하여 총 5가지의 편의보정 기법을 적용하였다. 과거 기간에 대한 편의보정 결과 CF\_M, QM\_P, CQ가 과거 계절별 관측 강수 분포와 비슷한 분포를 나타냈으나 CF\_M과 QM\_P는 침투유량이 다른 기법에 비해 2배 이상 크게 나타나 극한 사상에 따른 강우-유출 분석에 적합한 편의보정 기법으로 판단된다. 하지만 QM\_P는 과거 관측자료와 다르게 가장 많은 강수량이 8월에 발생되는 것으로 나타나 월별 유출 분석시 큰 오류가 발생될 수 있을 것으로 판단된다. 일별 강수자료 비교 분석 결과에서는 과거 강수 크기, 발생 분포 및 빈도 등 재현에 CQ가  $R2 = 1$ 로 CF\_M에 비해 편의보정 효과가 매우 우수한 것으로 나타났다. 이러한 편의보정 결과를 바탕으로 미래기간에 대한 강우-유출 분석 결과 CF\_Y와 CQ가 A1B시나리오의 기본 특성을 유지한 강우-유출 해석이 이루어졌지만, CF\_Y는 과거 강수 크기, 발생 분포 등의 재현에 한계점이 있는 것으로 분석되어 월별 강수 특성과 일별 강수 크기 등을 가장 잘 반영하여 편의보정이 이루어지는 CQ가 강우-유출 해석에 가장 적합한 편의보정 기법으로 판단된다. 기후변화 시나리오를 활용한 연구를 통해 자연적인 현상을 정확하게 모의하기에는 어려움이 많고 불확실성 역시 크며 본 연구의 한계점이기도 하다. 하지만 과거 관측자료를 활용한 편의보정을 통해 과거 강수발생 경향이나 특성 등을 반영하거나 활용 목적에 맞는 편의보정 기법 적용이 이루어진다면 의사결정 및 지속가능한 수자원 관리 계획 수립에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

#### Acknowledgement

본 연구는 한국환경산업기술원 GAIA Project (No:20140 00540003) “한국형 표토 침식 조사 평가 기술개발”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

Abbaspour, K. C. (2007). *User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs*, Swiss federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Deubendorf, Switzerland, pp. 1-33.

Aggarwal, P. K. and Mall, R. K. (2002). Climate Change and Rice Yields in Diverse Agro-environments of India. II. Effect of Uncertainties in Scenarios and Crop Models on Impact Assessment, *Climate Change*, 52, pp. 331-343.

Ahn, S. R., Park, M. J., Park, G. A., and Kim, S. J. (2009). Assessing Future Climate Change Impact on Hydrologic Components of Gyeongancheon Watershed, *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(1), pp. 33-50. [Korean Literature]

Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F., and Siebert, S. (1997). *Global Change and Global Scenarios of Water Use and Availability: an Application of Water Cap 1.0. Report A9701*, Center for Environmental System Research, University of Kassel, Germany.

Arnell, N. W., Livermore, M. J. L., Kovats, S., Levy, P. E., Nicholls, R., Parry, M. L., and Gaffin, S. R. (2004). Climate and Socio-economic Scenarios for Global-scale Climate Change Impacts Assessments: Characterizing the SRES Storylines, *Global Environmental Change*, 14(1), pp. 3-20.

Arnold, J. G. (1992). *Spatial Scale Variability in Model Development and Parameterization*, ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN.

Arnold, J. G. and Srinivasan, R. (1994). Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS, *American Water Resources Association*, 30(3), pp. 453-462.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Sssessment: Part I: Model Development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.

Cleland, B. R. (2003). *TMDL Development from the "Bottom up" - PartIII: Duration Curve and Wet Weather Assessment*, National TMDL Science and Policy 2003-WEF Specialty Conference, Chicago, IL

Donigian, A. S. (2000). *HSPF Training Workshop Handbook and CD, Lecture #19, Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22*, EPA Headquarters, Washington Information Center, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C., USA.

Giorgi, F. and Francisco, R. (2000). Evaluating Uncertainties in the Prediction of Regional Climate Change, *Geophysical Research Letters*, 27(9), pp. 1295-1295.

Goergen, K., Beersma, J., Hoffmann, L., and Junk, J. (2013). ENSEMBLES-based Assessment of Regional Climate Effects in Luxembourg and their Impact on Vegetation, *Climate Change*, 119, pp. 761-773.

Hashino, T., Bradley, A. A., and Schwartz, S. S. (2006). Evaluation of Bias-correction Methods for Ensemble Streamflow Volume Forecasts, *Hydrology and Earth System Science*, 3, pp. 561-594.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, pp. 1-976.

Ji, U., Kim, T. G., Lee, E. G., Ryoo, K. S., Hwang, M. H., and Jang, E. K. (2014). Analysis of Sediment Discharge by Long-term Runoff in Nakdong River Watershed Using SWAT model, *Journal of Environmental Science International*, 23(4), pp. 723-735.

Jung, K. Y. (2013). Flood Management of K-water for the

- Climate Change, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(4), pp. 17-28. [Korean Literature]
- Kim, H. S., Park, G. J., Kim, S. D., Choi, M. H., Park, M. J., and Yoon, J. Y. (2012). Assessment of Flood Vulnerability Considering Climate Change and Large-scale River Restoration Project, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(2), pp. 107-113. [Korean Literature]
- Kim, M. H., Heo, T. Y., and Chung, S. W. (2013). Uncertainty Analysis on the Simulations of Runoff and Sediment Using SWAT-CUP, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(5), pp. 681-690. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2011). *Climatological Normals of Korea 1981~2010*, pp. 663. [Korean Literature]
- Kum, D. H., Lim, K. J., Jang, C. H., Ryu, J. C., Yang, J. E., Kim, S. J., Kong, D. S., and Jung, Y. H. (2014). Projecting Future Climate Change Scenarios Using Three Bias-correction Methods, *Advances in Meteorology*, 2014, pp. 1-13.
- Kwon, Y. A., Kwon, W. T., Boo, K. O., and Choi, Y. E. (2007). Future Projections on Subtropical Climate Regions over South Korea Using SRES A1B Data, *Journal of the Korean Geographic Society*, 42(3), pp. 355-367. [Korean Literature]
- Lee, C. K., Kim, J. W., Shon, J. Y., Yang, W. H., Woon, Y. H., Choi, K. J., and Kim, K. S. (2012). Impacts of Climate Change on Rice Production and Adaptation Method in Korea as Evaluated by Simulation Study, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 14(4), pp. 207-221. [Korean Literature]
- Lee, H. S., Hur, J., Jeong, S. A., Hwang, S. J., and Shin, J. K. (2006). Spatial Characterization of Water Pollution in the Urban Stream Watershed (Gap Stream), Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(5), pp. 943-951. [Korean Literature]
- Lee, J. M., Kum, D. H., Kim, Y. S., Kim, Y. J., Kang, H. W., Jang, C. H., Lee, G. J., and Lim, K. J. (2013). Prediction of SWAT Stream Flow Using Only Future Precipitation Data, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(1), pp. 88-96. [Korean Literature]
- Lee, Y. J., An, S. R., Kang, B. S., and Kim, S. J. (2008). Assessment of Future Climate and Land Use Change on Hydrology and Stream Water Quality of Anseongcheon Watershed Using SWAT Model(II), *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 28(6B), pp. 665-673. [Korean Literature]
- Leung, L. R., Hamlet, A. F., Lettenmaier, D. P., and Kumar, A. (1999). Simulations of the ENSO Hydroclimate Signals in the Pacific Northwest Columbia River Basin, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11), pp. 2313-2328.
- Luo, Y., Ficklin, D. L., Liu, X., and Zhang, M. (2013). Assessment of Climate Change Impacts on Hydrology and Water Quality with a Watershed Modeling Approach, *Science of the Total Environment*, V.450-451, pp. 72-82.
- Mark, N. and Mike, H. (2000). Representing Uncertainty in Climate Change Scenarios: a Monte-carlo Approach, *Integrated Assessment*, 1(3), pp. 203-213.
- Mollema, P. N. and Antonellini, M. (2013). Seasonal Variation in Natural Recharge of Coastal Aquifers, *Hydrogeology Journal*, 21(4), pp. 787-797.
- Muerth, M. J., St-Denis, M. J., Ricard, S., Velázquez, J. A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R., and Turcotte, R. (2013). On the Need for Bias Correction in Regional Climate Scenarios to Assess Climate Change Impacts on River Runoff, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp. 1189-1204.
- No, S. H., Jung, K. S., Park, J. H., and Ryoo, K. S. (2013). Water Supply Change Outlook for Geum River Basin Considering RCP Climate Change Scenario, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(5), pp. 505-517. [Korean Literature]
- Panofsy, H. A. and Brice, G. W. (1963). *Some Application of Statistics to Meteorology*, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, pp. 224.
- Park, J. H., Kwon, H. H., and No, S. H. (2011). Outlook of Discharge for Daecheong and Yongdam Dam Watershed Using A1B Climate Change Scenario Based RCM and SWAT Model, *Journal of Korea Water Resources Association*, 44(12), pp. 929-940. [Korean Literature]
- Park, J. Y., Park, M. J., Ahn, S. R., and Kim, S. J. (2009). Watershed Modeling for Assessing Climate Change Impact on Stream Water Quality of Chungju Dam Watershed, *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(10), pp. 877-889. [Korean Literature]
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., and Fischer, G. (2004). Effects of Climate Change on Global Food Production under SRES Emissions and Socio-economic Scenarios, *Global Environmental Change*, 14(1), pp. 53-67.
- Praskiewicz, S. and Chang, H. (2011). Impacts of Climate Change and Urban Development on Water Resources in the Tualatin River Basin, Oregon, *Annals of Association of American Geographers*, 101, pp. 249-271.
- Robert, J. N. (2004). Coastal Flooding and Wetland Loss in the 21st Century: Changes under the SRES Climate and Socio-economic Scenarios, *Global Environmental Change*, 14(1), pp. 69-86.
- Ryu, J., Kang, H. W., Choi, J. W., Kong, D. S., Kum, D. H., Jang, C. H., and Lim, K. J. (2012). Application of SWAT-CUP for Streamflow Auto-calibration at Soyang-gang Dam Watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(3), pp. 347-358. [Korean Literature]
- Ryu, J. C., Park, Y. S., Han, M. D., Ahn, K. H., Kum, D. H., Lim, K. J., and Park, B. K. (2014). Enhancement of Land Load Estimation Method in TMDLs for Considering of Climate Change Scenarios, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(2), pp. 212-219. [Korean Literature]
- Schmidli, J., Frei, C., and Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM Precipitation: a Benchmark for Dynamical and Statistical Downscaling Methods, *International Journal of Climatology*, 26(5), pp. 679-689.
- Shin, M. H. (2013). *Study on the Reduction of Non-point Source Pollution Loads and Greenhouse Gas Emission from Upland Crop Area by Climate Change Impact*, Ph. D. Dissertation, Kangwon National University, pp. 1-174. [Korean Literature]
- Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., and Lettenmaier, D. P. (2004). Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs, *Climate Change*, 62, pp. 189-216.
- Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A., and Lettenmaier, D. P. (2002). Long-range Experimental Hydrologic Forecasting for

- the Eastern United States, *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), pp. 4429.
- Xu, Y. P., Zhang, X., and Ran, Q. (2013). Impact of Climate Change on Hydrology of Upper Reaches of Qiantang River Basin, East China, *Journal of Hydrology*, 483, pp. 51-60.
- Yun, D. K., Chung, S. O., and Kim, S. J. (2011). Climate Change Impacts on Paddy Water Requirement, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(4), pp. 39-47. [Korean Literature]