

# RCPs 시나리오 자료를 이용한 비매개변수적 갈수빈도 해석: 광동댐 유역을 중심으로

윤선권\* · 조재필\*\* · 문영일\*\*\*

Yoon, Sun Kwon\*, Cho, Jae Pil\*\*, Moon, Young Il\*\*\*

## Non-Parametric Low-Flow Frequency Analysis Using RCPs Scenario Data : A Case Study of the Gwangdong Storage Reservoir, Korea

### ABSTRACT

In this study, we applied an advanced non-parametric low-flow frequency analysis using boundary kernel by Representative Concentration Pathways (RCPs) climate change scenarios through Arc-SWAT long-term runoff model simulation at the Gwangdong storage reservoir located in Taeback, Gangwondo. The results show that drought frequency under RCPs was expected to increase due to reduced runoff during the near future, and the variation of low-flow time series was appeared greatly under RCP8.5 scenario, respectively. The result from drought frequency of Median flow in the near future (2030s) compared historic period, the case of 30-year low-flow frequency was increased (the RCP4.5 shows +22.4% and the RCP8.5 shows +40.4%), but in the distant future (2080s) expected increase of drought frequency due to the reduction of low-flow (under RCP4.5: -4.7% and RCP8.5: -52.9%), respectively. In case of Quantile 25% flow time series data also expected that the severe drought frequency will be increased in the distant future by reducing low-flow (the RCP4.5 shows -20.8% to -60.0% and the RCP8.5 shows -30.4% to -96.0%). This non-parametric low-flow frequency analysis results according to the RCPs scenarios have expected to consider to take advantage of as a basis data for water resources management and countermeasures of climate change in the mid-watershed over the Korean Peninsula.

**Key words** : RCPs, Boundary kernel function, Arc-SWAT, Low-flow frequency analysis, Gwangdong storage reservoir

### 초 록

본 연구는 광동댐 유역을 대상으로 RCPs (Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오의 Arc-SWAT 적용으로 평균유출량과 저유량 계열을 구축하고 경계핵함수(Boundary Kernel)를 이용하여 비매개변수적 갈수빈도 해석을 수행하였다. 분석결과, RCPs 시나리오 하에서 가까운 미래의 유출량 감소로 인한 가뭄발생빈도가 증가하였으며, RCP8.5에서 저유량 계열의 변동폭이 크게 나타났다. Median flow의 갈수량 빈도해석결과 가까운 미래(2030s)의 30년 빈도 갈수량의 경우 Historic 기간에 비하여 증가(RCP4.5: +22.4%, RCP8.5: +40.4%)하였으나, 먼 미래(2080s)에는 갈수량 감소(RCP4.5: -4.7%, RCP8.5: -52.9%)로 인한 가뭄발생빈도가 커지는 것으로 분석되었다. 또한 Quantile 25% flow 저유량 계열의 경우 먼 미래에 빈도별 갈수량이 감소(RCP4.5: -20.8% ~ -60.0%, RCP8.5: -30.4% ~ -96.0%)하여 극심한 가뭄의 발생빈도가 커질 것으로 분석되었다. RCPs 시나리오 적용에 따른 비매개변수적 갈수빈도 해석 결과는 한반도 중권역별 수자원개발계획 수립과 기후변화 대응책 마련을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

**검색어** : RCPs, 경계핵함수, Arc-SWAT, 갈수빈도해석, 광동댐

\* 정희원 · APEC 기후센터 연구본부 기후변화연구팀 선임연구원 (APEC Climate Center · skyoon@apcc21.org)

\*\* APEC 기후센터 연구본부 기후변화연구팀 선임연구원 (APEC Climate Center · jpcho89@apcc21.org)

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Corresponding Author · University of Seoul · ymoon@uos.ac.kr)

Received December 18, 2013/ revised February 4, 2014/ accepted May 2, 2014

## 1. 서론

많은 기후학자들은 지구 기온의 증가와 더불어 극한 현상이 더욱 빈번하게 발생할 것으로 예상하고 있으며, 최근의 기후변화와 강우패턴의 변화를 고려한 강수 전망 연구는 홍수나 가뭄, 대설 등 지역적으로 상반되는 변화를 예상한다(KMA, 2012; Yoon et al. 2013). 특히 여러 기후현상 중에서 평균이하의 강수량과 토양수분의 부족으로 인하여 발생하는 가뭄은 전 지구적 기후변화 영향과 밀접한 관련성이 있으며, 자연현상과 물에 대한 수요 간의 상호작용으로 인해 사회에 커다란 영향을 미친다. 이러한 가뭄은 인간이 극복하기 힘든 자연재해 중 하나이며, 지역 경제를 어렵게 만들거나 생태계까지 파괴하기 때문에 갈수해석을 통한 가뭄발생을 미리 전망하고 대처하는 일은 매우 중요하다. 따라서 장기적이며 주기적인 발생 특성을 가지고 있는 가뭄에 대한 정확한 분석과 예측을 실시하여 미래 발생할 수 있는 재해에 대비해야 한다.

가뭄과 관련한 연구사례로는, Palmer (1965)는 기후가 상이한 미국 중부의 Kansas지역과 미국 중서부의 Iowa 지역을 대상으로 현재 대표적인 가뭄 판단 지수로 사용하고 있는 기상학적 가뭄지수인 PDSI (Palmer Drought Severity Index)를 개발하였으며, Rao and Padamanabhan (1982)은 Palmer가 분석을 수행하였던 Kansas 지역과 Iowa의 기상관측 자료를 대상으로 가뭄 특성분석을 위한 시계열 모형 구축으로 PDSI를 모의발생 한 바 있다. Adamowski (1996)는 Monte-carlo 모의실험에 의한 저유량 계열(low-flow series)의 비매개변수적 빈도해석 방법을 제안하여 기존의 매개변수적 방법인 Normal, Log-Pearson Type II 그리고 Weibull분포에 비하여 보다 신뢰할 만한 결과를 얻었으며, Guo et al. (1996)은 비매개변수적 Kernel 추정법을 적용한 저유량 계열의 가뭄빈도해석 수행을 위하여 Monte-carlo 모의실험을 실시하였으며, 모의 발생된 연간 저유량 계열의 빈도해석결과를 기존의 Weibull 분포에 의한 결과와 비교하여 Kernel에 의한 빈도해석 방법이 관측 값에 비하여 보다 적은 편차(bias)와 RMSE (root mean square error)를 보임을 확인하였다. 또한 Yoon and Park (1997)은 지속기간별 가뭄우량 계열을 작성하여 L-moment 기법을 적용한 지역가뭄빈도 해석을 수행하여 우리나라 수자원 장기종합계획 및 댐 개발계획시 사용하고 있는 10대 하천의 10년 빈도 기준 이수안전도를 조정할 것을 제시한 바 있으며, Moon (2000)은 경제해밀도함수를 이용하여 특정 분포형의 가정이 없이 자료의 특성을 반영한 비매개변수적 빈도해석 방법을 제안하였다. 또한 Cha et al. (2001)은 가뭄빈도해석에서 매개변수적 방법은 분포형 선정에 따라 100년 빈도 가뭄의 경우 서울지점은 최대 45%, 대구지점은 30% 정도의 차이가 발생하였으나, 경제해밀도함수를 이용할 경우 비교적 일관된 값을 가짐을 밝힌바 있으며, Yeon et al. (2007)은 이변수 감마분포를 이용하여

표준강수지수(SPI, Standardized Precipitation Index) 분석을 통한 가뭄심도와 지속기간의 결합확률밀도함수를 추정하여 가뭄의 이변수 재현기간을 산정하였다. Jeong et al. (2008)은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서의 A1B 시나리오자료를 대상으로 대청댐 유역의 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 통한 기후변화에 따른 유출량의 민감도 분석을 실시하였으며, Kyoung et al. (2009)은 기후변화가 서울지역의 기온 및 가뭄에 미치는 영향을 평가를 위하여 최근린법(K-NN)과 인공신경망을 적용하여 AR4 SRES A2 시나리오를 대상으로 분석한바 있다. Kim et al. (2010)은 A2시나리오 자료와 NDVI (normalized difference vegetation index)를 이용하여 기후변화와 토지피복 변화를 고려한 한강유역의 수자원 영향 평가를 실시하였으며, Lee and Kim (2011)는 가뭄심도-지속기간-생기빈도(Severity-Duration-Frequency, SDF) 곡선을 통하여 한반도에서 발생하였던 과거 가뭄사상을 정량적으로 평가하였고, Oh et al. (2011)은 서울과 대구 관측 지점을 대상으로 PDSI, SPI, EDI (Effective Drought Index)를 산정하여 경제 해밀도 함수를 이용하여 가뭄빈도해석을 수행한 바 있다. 또한 Kim et al. (2011)은 한반도의 66개 기상관측 지점을 대상으로 경향분석을 통한 이상기후에 따른 계절별 한반도 극한사상(강우, 기온)의 최근 변동특성을 분석하였으며, Lee et al. (2012)은 우리나라의 59개 기상관측소 지점을 대상으로 기상학적 가뭄지수인 SPI를 산정하여 가뭄빈도해석을 수행하였고, 가뭄우심도 재해 지도작성을 통한 남한지역의 가뭄심도의 사공간적 분포특성을 분석하였다. Jang and Ahn (2012)는 낙동강 유역의 수문과 수질 영향 분석을 위하여 강우 시나리오 기반 장기유출 모형을 구축하여 기후변화에 따라 극한 가뭄과 홍수의 발생으로 가뭄 발생 시 낙동강 유역의 SS 농도와 T-P 농도가 증가할 것으로 분석하였으며, Yoo et al. (2013)은 가뭄빈도해석을 위하여 이변량 확률분포함수를 사용하여 Copula 함수 적용을 통한 가뭄재현특성에 대한 이변량 고려의 문제와 짧은 관측기간으로 인한 불확실성 문제를 검토한바 있다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 우리나라의 가뭄발생 재현기간과 가뭄 심도 분석을 위하여 최근에 새롭게 제시된 IPCC 5차 평가보고서에서 대표농도경로(RCPs: Representative Concentration Pathways) 전망을 통하여 대기 중 온실가스 농도를 추정한 RCP4.5, RCP8.5자료를 대상으로 갈수빈도해석을 수행하였다. 대상유역은 최근들어 가뭄 피해가 심각하였던 강원도 태백의 광동댐 유역을 선정하였으며, Arc-SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 장기유출 모형을 구축하였다. 또한 Historic 기간에 대하여 Arc-SWAT 모형의 검보정을 실시한 후 최적화된 모형을 통하여 현재 (1989-2011년) 유출량과 미래(Future I: 2011-2040년) Future II: 2041-2070년, Future III: 2071-2100년) 유출량에 대한 장기유

출 분석을 실시하고, 저유량계열(Low-flow time series data)을 대상으로 경계핵함수(Boundary Kernel Function)를 적용하여 갈수빈도해석(Low-flow Frequency Analysis)을 수행하여 미래 극치 가뭄발생의 재현기간에 따른 기후변화 위험도 및 취약성 분석을 실시하였다.

## 2. 대상유역 및 자료

### 2.1 대상유역

광동댐은 한강유역의 동남쪽인 강원도 삼척시 하장면 광동리(경도: 37°20'40"N, 위도: 128°56'50"E)에 위치하고 있으며, 한강의 제1지류인 골지천 수계 최상류유역에 속하며, 유역면적 125km<sup>2</sup>, 총 저수량 11백만m<sup>3</sup>, 유효저수량 8백만m<sup>3</sup>의 소규모 저수지에 해당한다(Fig. 1). 건설당시 태백권 광산지역 종합개발계획의 일환으로 자체수원 확보가 곤란한 해발 600m이상의 도시에 대한 광역상수도 시설의 수원설비로 계획되었다. 광동댐의 설계당시 계획 용수

공급량은 생공용수 일 70,000m<sup>3</sup>을 공급할 수 있는 규모로 계획되었지만 1980년대 후반 석탄 소비량의 감소와 이에 따른 태백권역 탄광의 폐광으로 지역주민들이 타 지역으로 이동하게 되면서 상대적으로 댐의 실제 용수공급량은 상당히 감소하였다. 광동댐 유역내 수문 관측소는 존재하지 않으나, 유역 인근 기상관측소로는 기상청(KMA: Korean Meteorological Administration, www.kma.re.kr) 산하 동해(106) 관측소와 태백(216) 관측소가 위치해 있다.

수문분석을 위하여 동해 기상관측소와 태백 기상관측소 지점에 Thiessen Network을 적용하여 지배면적을 산정한 결과, 동해 기상관측소는 Thiessen Polygon의 면적이 30.5km<sup>2</sup>, 태백 기상관측소는 94.5km<sup>2</sup>에 해당하여, 대상 자료에 면적가중치(동해: 0.244, 태백: 0.756)를 각각 적용하여 분석하였다(Table 1). 현재 광동댐은 강원도 태백시 삼수동, 황연동, 상장동, 황지동, 장성동, 문곡소도동, 구문송동, 철암동과 정선군 고한읍 고한리 그리고 삼척시 도계읍의 내륙 산악외원 지역에 용수를 공급하고 있다. 그러나 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS; Water Management Information

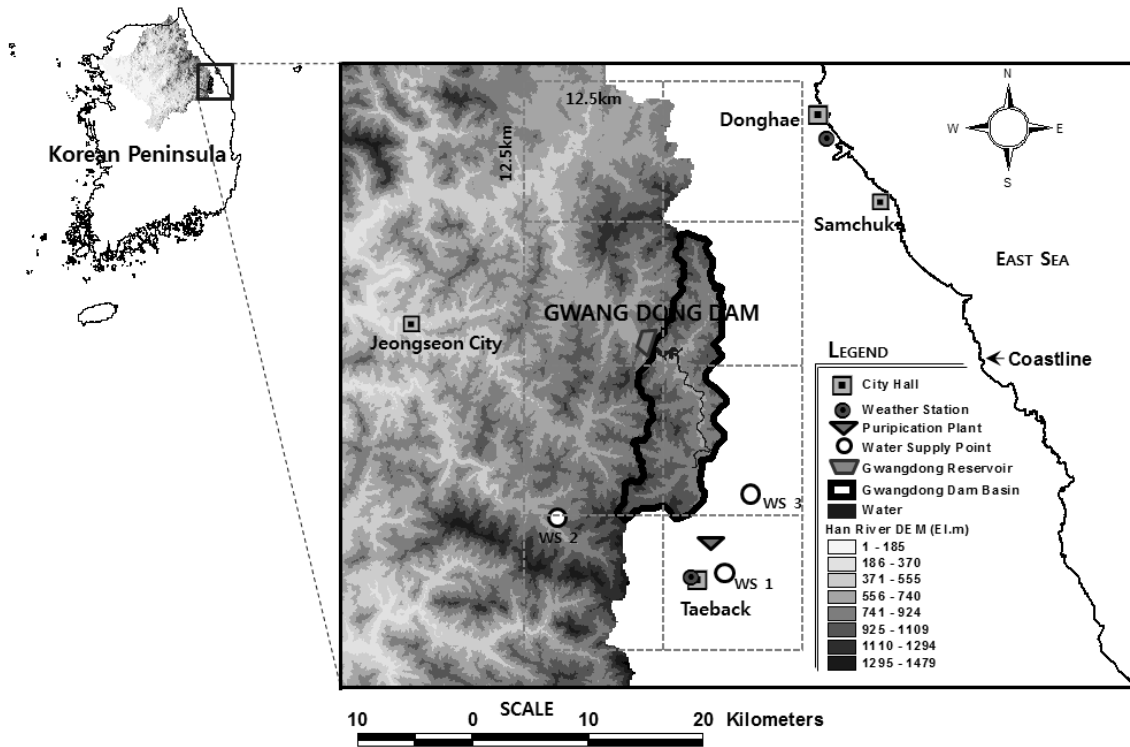


Fig. 1. The Location of Study Area and RCP Grid Matrix. The Gwangdong Dam Reservoir is Located in the East of the Han River Basin

Table 1. Basic Watershed Information of Gwangdong Dam Reservoir, South Korea

Catchment Area	Total Storage Volume	Location		Thiessen Network	
		Long.	Lat.	Donghae	Taebaek
125 km <sup>2</sup>	11 million m <sup>3</sup>	37°20'40"N	128°56'50"E	30.5 Km <sup>2</sup> (24.4%)	94.5 Km <sup>2</sup> (75.6%)

System, www.wamis.go.kr)의 유역조사결과에 의하면 최근 1995년, 2001년 그리고 2008년 등 여러 차례 가뭄으로 인한 농작물 피해와 제한급수 등 심각한 물부족 현상을 겪으면서 용수공급 문제해결 및 수자원관리의 중요성이 크게 대두되고 있는 지역으로, 본 연구의 실증을 위한 최적의 지역이라 할 수 있다. 다음 Fig. 1은 광동댐 유역의 위치도와 상수관망 모식도이며, Table 1은 광동댐의 기본현황 및 유역정보이다.

다음으로, 광동댐유역의 수문학적 특성(Hydrological Characteristics) 분석을 위하여 댐 건설당시(1989년)부터 2011년까지의 23개년 동안의 관측기간의 연평균강수량과 댐 유입량 자료를 기상청과 국가수자원관리시스템으로부터 취득하였다. 광동댐 유역의 수문 특성을 분석한 결과 연평균강수량은 1,303.9mm이며, 댐 총유입량은 74,169,140.9ton으로 나타났다. 광동댐 유역의 홍수기(wet-season)에 해당하는 6~9월(JJAS; June to September)의 강수량은 동아시아 몬순의 영향으로 전형적인 여름철 강수특성을 보이고 있으며, 여름철 평균강수량은 863.8mm로 연평균강수량의 66.2%에 해당한다. 또한 여름철 댐 유입량은 53,587,158.3ton으로 연평균 유입량의 72.2%를 차지하는 것으로 분석되었다. 그러나 이와는 대조적으로, 비수기(dry-season)에 해당하는 10월에서 이듬해 5월까지의 평균 강수량은 440.1mm (33.7%)에 불과하며, 댐 유입량은 20,581,982.6ton (27.8%)으로 겨울철과 이듬해 봄철 가뭄피해를 예방하기 위한 수자원확보가 절실히 필요한 지역이라 할 수 있다. 다음 Fig. 2는 광동댐유역의 1989년부터 2011년까지의 연평균 강수량과 댐 유입량평균을 계절별로 구분하여 나타낸 결과이며, 댐유역 일 유입량이 여름철(6월 중순에서 9월말)에 집중하여 나타나고 이듬해 4월에서 6월 중순 사이에는 댐 유입량이 현저히 감소하고 있음을 확인 할 수 있다.

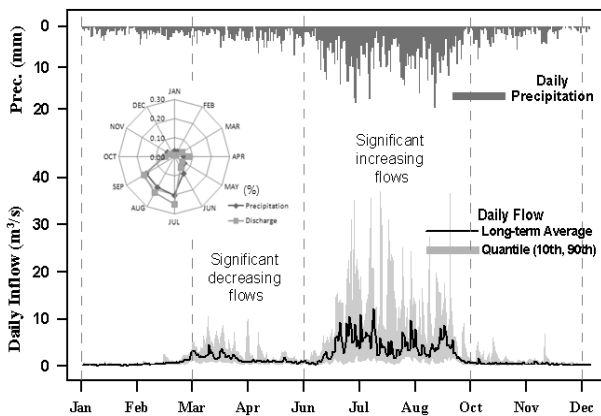


Fig. 2. Seasonal Cycle of Daily Precipitation and Daily Discharge Over the Gwangdong Dam Reservoir. The Blue Bars Represent Seasonal Mean Precipitation

## 2.2 대상 자료

광동댐 유역의 기후변화에 따른 가뭄 평가를 위하여 관측기간동안 기상청에서 제공하는 기상자료를 사용하였으며, 강수량 자료는 태백(216) 기상관측지점과 동해(106) 기상관측지점의 일별 강수량에 Thiessen 면적 가중치를 적용하여 산정한 면적평균강수량 값을 사용하였다(Fig. 3(a)). 또한 증발산량(Evapotranspiration) 자료는 태백과 동해 관측소의 최고온도( $T_{max}$ ), 평균온도( $T_{mean}$ ), 최소온도( $T_{min}$ ), 상대습도(Relative Humidity), 풍속(m/s) 자료를 수집하여 FAO Penman-Monteith 방법을 적용하여 산정하였다(Fig. 3(b)). FAO Penman-Monteith 방법은 작물의 기공과 공기역학 특성과 관련된 저항과 기상변수로부터 증발량을 산정하는 방법으로 수관(canopy)저항을 포함하도록 기존의 Penman식을 수정한 것이다. 수관저항은 식생수관이 증산율에 미치는 영향력을 나타내고 이는 잎기공의 개폐로 이루어지며, FAO Penman-Monteith 식은 다음 Eq. (1)과 같다(Jensen et al. 1990).

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273.2} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

여기서,  $ET_0$ 는 기준 증발산량(mm/day),  $R_n$ 은 작물표면에서 순 복사에너지( $MJm^{-2}day^{-1}$ ),  $G$ 는 토양 열흐름밀도( $MJm^{-2}day^{-1}$ ),  $T$ 는 지상 2m에서 공기의 일평균온도( $^{\circ}C$ ),  $u_2$ 는 지상 2m에서 풍속(m/s),  $e_s$ 는 포화증기압(kPa),  $e_a$ 는 실제증기압(kPa),  $(e_s - e_a)$ 는 포화증기압부족량(kPa)이다(Yoon, 2011).

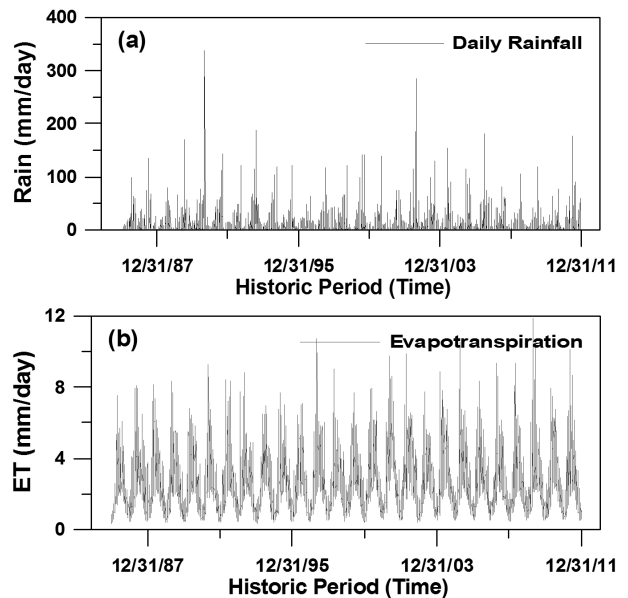


Fig. 3. Daily Time Series Data During Historic Period in Gwangdong Dam Basin

모의기간(Future Period, 2011~2100년)에 해당하는 기후변화 시나리오 자료는 기상청 산하 기후변화정보센터(CCIC; Climate Change Information Center, www.climate.go.kr)의 한반도 규모 자료해상도 12.5km×12.5km의 남한상세 RCM (Regional Climate Model)을 사용하였으며, 강수량과 증발산량은 관측기간에서 산정한 방법을 동일하게 적용하였다. 본 연구에서는 RCP4.5, RCP8.5 시나리오를 적용하였으며, 기상청에서 제공하는 전지구 기후변화 예측자료는 영국 기상청 해들리센터에서 개발한 HadGEM2-AO (Hadley center Global Environment Model version 2; Atmosphere-Ocean coupled model)로서 대기-해양-해빙-에어로졸 과정들이 상호 결합된 최신 기후모델의 결과이다.

대상자료 분석기간은 현재 기후값(1989-2005년), 미래 기후값 Case I (2011-2040년), Case II (2041-2070년), 그리고 Case III (2071-2100년)으로 구분하여 적용하였다. 한반도 규모의 기후변화 시나리오 자료 중 광동댐 유역을 포함하는 경도 37°20'40"N, 위도 128°56'50"E 지점의 2×4의 8개 격자망이며, 각 격자망으로부터 추출한 미래 기후변화 자료는 2100년까지 시나리오별 모의된 일강수량, 최고온도, 최저온도, 평균온도, 상대습도, 풍속자료이다.

### 3. 연구수행절차 및 방법

#### 3.1 연구수행절차

광동댐 유역의 장기유출모의를 위하여 사용된 수문모형은 자연유역 유출분석에 대표적으로 사용되고 있는 개념적 수문모형(conceptual hydrological model)인 Arc-SWAT을 사용하였고, 모형의 신뢰성 확보 및 검증을 위하여 관측 수문자료를 바탕으로 매개변수 최적화를 실시하였다. 또한 Arc-SWAT 모형의 주요 입력자료 중 하나인 증발산량은 FAO Penman-Montaiith방법을 적용하여 산정하였으며, 최적화된 장기유출모형을 통하여 모의된 일단위 유출결과에 대한 연도별 유허곡선(flow duration curve)을 작성하여 Median flow와 Quantile 25% flow 유출량 계열을 구축하였다. 또한 구축된 시계열 자료에 대하여 분석기간을 관측기간과 미래 3개의 자료구간으로 구분하여 갈수빈도해석(Low-flow Frequency Analysis)을 수행하였으며, 갈수량계열의 빈도해석에는 특정 분포형을 따르지 않고 관측자료 고유의 특성을 살릴 수 있는 비매개변수적(non-parametric) 가뭄빈도해석을 수행하였다. 비매개변수적 가뭄빈도 해석에는 경계핵밀도함수(boundary kernel density function)가

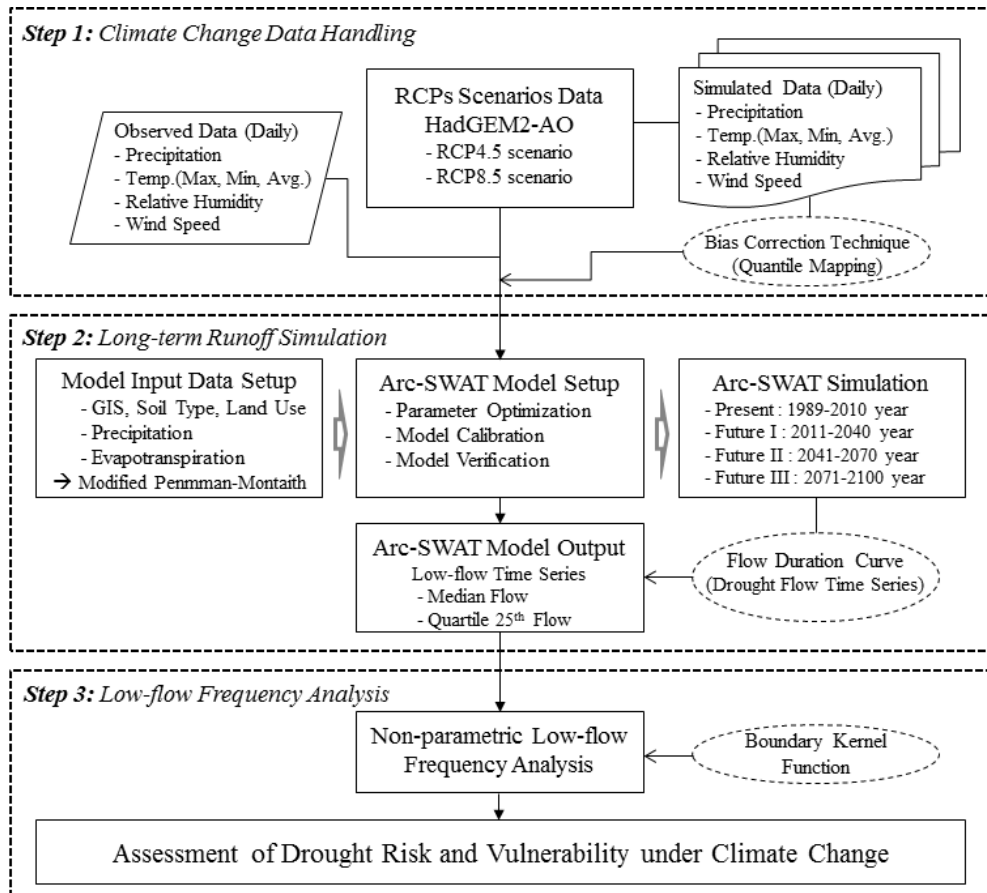


Fig. 4. Flow Chart of the Non-Parametric Low-Flow Frequency Analysis

이용되었다.

본 연구의 분석 절차는 3가지 단계로 구분된다. 첫 번째로 Step 1은 기후변화 시나리오 자료 구축 단계이며, RCPs 기후변화 시나리오 자료의 각 수문 변수에 대하여 관측자료(Historic Periods) 기간에 대한 편의 보정(Bias Correction)을 수정하였다. 다음으로 Step 2는 장기유출모의 단계이며, 유출 모형의 입력자료 구축과 모형구축 및 매개변수 최적화를 위한 모형 검증(Validation and Calibration) 그리고 각 모의 기간별 장기유출량 분석과 유허분석을 통한 갈수량 계열 구축이 포함된다. 마지막으로 Step 3는 경계핵함수를 이용한 비매개변수적 갈수빈도해석 단계이며, 기후변화에 따른 가뭄발생 재현기간과 가뭄 심도 분석을 수행하여 미래 극치 가뭄에 따른 기후변화 영향평가 및 위험도, 취약성 분석을 수행하였다. 전체적인 연구 흐름도는 Fig. 4와 같다.

### 3.2 분석방법

#### 3.2.1 Boundary Kernel Function을 이용한 빈도해석

평균보다 적은 강수량과 토양수분의 부족이 장기간 지속되어 댐 저수량과 하천유량이 감소하게 되는 원인으로 인하여, 책정된 물수요에 대한 공급부족으로 가뭄이 발생하게 된다. 가뭄은 홍수와 달리 점진적이고 광역적인 발생 특성을 보이며 그 규모와 강도를 정량적으로 측정하는 것은 불가능하다. 이러한 가뭄은 장기간에 걸쳐 연속해서 일어나는 경향이 있으며 수문학적 지속성(hydrological persistence) 여부에 대한 판단이 선행되어야 하며, 추계학적 모형에 의한 예측 및 주기해석을 통한 분석이 요구된다(Yoon et al., 2009). 따라서 본 연구에서는 특정 분포형의 가정이 필요 없고 자료가 가지고 있는 특성에 가중치를 부여하는 빈도해석 방법으로 여러 선행 연구에서도 그 적용성이 입증된 경계핵밀도함수를 이용한 비매개변수적 가뭄빈도해석을 수행하였다.

경계핵밀도함수에 의한 비매개변수적 갈수 빈도해석 추정식의 구성은 관측자료의 경험적 발생확률값과 핵함수의 핵완화와 초과 확률에 대한 경계 핵함수에 근거를 두고 있다. 경험적 발생확률은 임의의 표준도시위치공식을 통하여 산정할 수 있으며, 본 연구에서는 표준도시위치공식으로 Adamowski (1981)가 제안한 다음의 Eq. (2)를 사용하였다.

$$P_i = \frac{i - 0.25}{n + 0.5} \quad (2)$$

여기서,  $i(i = 1, 2, \dots, n)$ 는 내림차순의 배열이고,  $P_i$ 는 표준도시위치공식을 이용하여 경험상으로 추정되는 확률값이다.

핵밀도 함수를 이용한 빈도해석의 분위값(quantile)  $\hat{x}(p)$ 는 Gasser and Muller (1984)가 제시한 다음 Eq. (3)의 회귀추정식으

로 부터 산정 할 수 있다.

$$\hat{x}(p) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} \int_{S_{i-1}}^{S_i} y_i K\left(\frac{p-u}{h}\right) du = \sum_{i=1}^n y_i w_i \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 광역폭(bandwidth),  $K(\cdot)$ 는 핵함수(Kernel function)이며,  $S_i = (p_i + P_{i+1})/2$ , ( $i = 1, \dots, n-1$ ),  $S_0 = 0$ ,  $S_n = 1$ 이다. 이때  $p$ 는 초과확률(probability of exceedance)을 나타내는 구간  $[0, 1]$ 에서의 임의의 확률값이다.

핵함수는 일반적으로 Gaussian, Rectangular, Epanechnikov 및 Cauchy 등이 많이 사용되고 있으며, 핵함수  $K(t)$ 는  $t=0$ 에서 최대이며 연속이고 대칭이다. 본 연구에서는 Epanechnikov 핵함수를 사용하였으며 Epanechnikov 핵함수는 다음 Eq. (4)와 같다.

$$K(t) = 0.75(1 - t^2) \quad (4)$$

여기서,  $t = (x - x_i)/h$ 이고,  $|t| < 1$ 이다. 이 때  $x$ 는 임의의 점이고,  $x_i$ 는 실제 관측된 자료이다.

일반적으로 가뭄빈도해석 수행 시 하위 비초과확률( $0 < p < 0.1$ )을 사용하여야 한다. 결과적으로 재현기간별 빈도해석 시 주어지는 자료를 홍수해석에는  $p > p_n$ 에 대한 외삽이 필요하게 되고, 반대로 가뭄빈도해석에서는  $p > p_1$ 의 외삽이 필요하다(Moon, 2000). 그러나 Epanechnikov 핵함수와 같이 내부 핵(Internal Kernel) 함수를 사용하면 한정된 확률구간을 벗어나므로 구간  $[0, 0+h]$  내에서 가중된 편의를 제거하기 위해 경계핵밀도함수가 필요하다. 내부 핵함수에 대응하는 경계 핵함수를 평균제곱오차(MSE)의 최적화에 따라 산정할 수 있으며, 여기에 Epanechnikov 핵함수를 사용하여 경계 핵함수를 다음 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K(q,t) = 6(1+t)(q-1) \frac{1}{(1+q)} \times \left\{ 1 + 5 \left( \frac{1-q}{1+q} \right) + 10 \frac{1-q}{(1+q)^2} \right\} \quad (5)$$

여기서,  $t = (p - p_i)/h$ 이며, 가뭄빈도해석에 적용되는  $K(q,t)$ 는 왼쪽 경계면 구간  $[0, h]$ 에서  $q = p/h$ 이다. 이때  $q=1$ 이면 경계 핵함수 Eq. (5)는 내부 핵함수에 해당하는 Eq. (4)과 동일하다.

광역폭  $h$ 는 경계 핵함수법에 의한 빈도해석 시 중요한 인자로 추정되는 회귀식의 완만함과 거칠기를 결정하며, 일반적으로 광역폭이 증가함에 따라 편의(bias)는 증가하고 분산은 감소한다.  $h$ 의 값은 핵밀도함수 추정에 있어서 중요하지만 실제로는 정확하게 구하기가 쉽지 않다(Yoon et al. 2012). 본 연구에서 적용한 광역폭의 결정 방법은 Solve the equation plug in (SIPI)를 사용하였으며,

이는 기준이 되는 미지의  $R(\hat{f}_h'')$ 의 추정치를 산정하여 최적의 광역폭을 결정하는 방법으로 Sheather and Jones (1991)는 광역폭  $h$ 를 다음 Eq. (6)과 같이 제시하였다.

$$h = \left[ \frac{R(K)}{nR(\hat{f}_{g(h)}'') \left( \int x^2 K(x) dx \right)^2} \right] \quad (6)$$

여기서,  $n$ 은 자료의 개수,  $x$ 는 임의의 실수,  $K(\bullet)$ 는 핵밀도함수,  $R(\bullet)$ 는 최적의 광역폭 결정을 위한 미지의 추정치를 의미한다.

## 4. 분석 결과

### 4.1 시나리오 자료의 편의 보정

본 연구에서는 시나리오자료의 편의 보정을 위해서 분위 사상법(Quantile Mapping)을 사용하였으며, 모수적(parametric) 방법과 비모수적(non-parametric) 방법 중 비모수적 방법을 사용하였다. 비모수적 분위사상법은 확률분포함수의 가정 없이 모의 및 관측 자료의 실제 분포를 직접 사용하기 때문에 오차를 줄여 보다 정확한 편의보정을 할 수 있다는 장점이 있다(Gudmundsson, 2012). 본 연구에서 사용한 비모수적 분위사상법은 과거 관측기간에 대하여 실제 관측 자료와 모델에 의한 모의 자료를 크기순으로 정렬한 후 두 자료 사이의 분위별 차이를 맵핑하고, 기후변화 미래 전망 자료 또한 크기순으로 정렬한 후 과거기간으로부터 도출된 분위별 차이를 고려하여 미래기간에 대한 시나리오 자료를 보정하였다(Cho, 2013).

다음 Fig. 5는 기상청 태백관측소(ID: 216)와 동해관측소(ID:

106)의 관측기간 강수량 자료에 대한 RCM자료의 편의 보정 전후를 비교하여 나타낸 결과이다. 태백 관측소의 경우 관측기간의 관측(observed)과 편의보정 전 RCM (original RCM) 자료와의 표준편차가 62.94mm로 나타났으나, 편의보정 후(bias-corrected RCM)에는 5.47mm로 관측과의 표준편차가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 월별 변동특성 또한 관측과 매우 유사한 패턴을 보임을 확인할 수 있다. 또한 동해 관측소의 경우 관측과 편의보정 전 RCM 자료와의 표준편차가 45.16mm로 나타났으나, 편의보정 후에는 관측과의 표준편차가 3.12mm로 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 관측과 거의 일치하는 패턴을 보임을 확인할 수 있다. 따라서 시나리오 자료를 통한 미래 수문해석 시 관측기간에 대한 편의보정이 반드시 필요하며, 이를 반영한 수자원 전망은 수자원의 절대적인 양 뿐만 아니라 수자원 계절변동 특성 반영과 극치값(극치 홍수량 및 극치 갈수량) 모의에 보다 신뢰할만한 결과를 제공하리라 사료된다.

### 4.2 SWAT 모형 검·보정 결과

일반적으로 자연유역의 유입량(inflow)은 토지이용 및 토지피복 상태에 따라 달라지게 된다. SWAT모형은 미국농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 준분포형 장기유출모형으로 일단위 입력자료 구축을 통한 물과 유사 등의 수문모의 및 비료·농약 등 오염물질 거동 예측을 통한 수질 모의가 가능한 모형이다. 또한 Arc-SWAT 모형은 GIS와 연계된 호환모델로서 유역의 복잡·다양한 종류의 토지 특성을 반영하여 기상관련 입력자료 구축을 통한 장기간에 걸친 지면에서의 수문학적 유출거동특성을 모의하는데 적합하다. Arc-SWAT모형의 입력

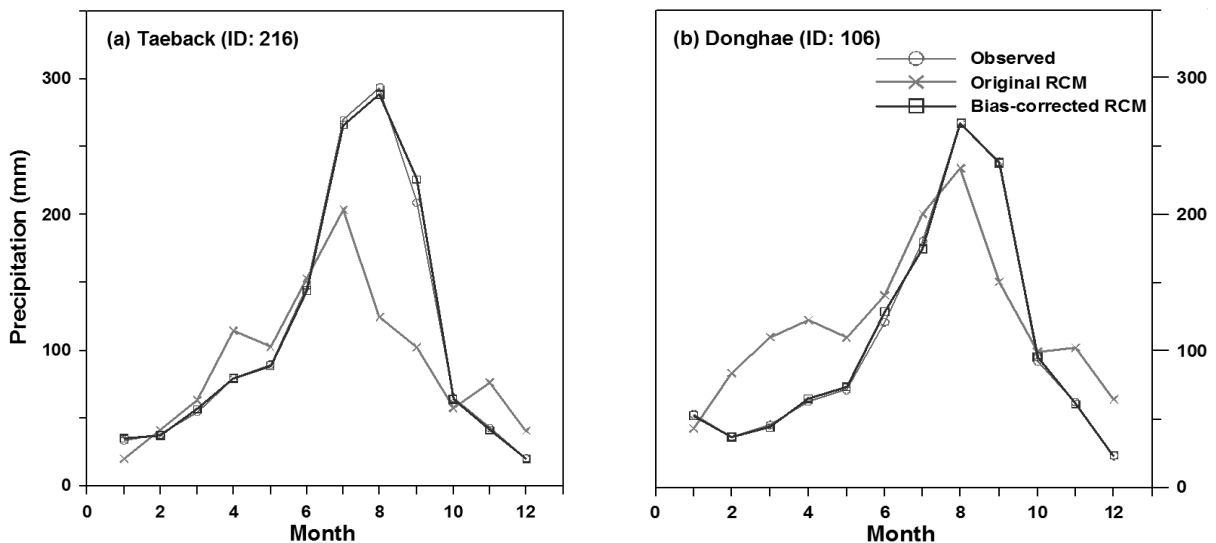


Fig. 5. Comparison of Original and Bias-Corrected RCM Data for Monthly Precipitation During Historic Period

자료는 각 소유역별로 HRU (hydrologic response unite) 산정을 통한 자동입력 방식과, GIS와 연동한 기상자료, 소유역자료, 하천특성자료, 지하수자료 등의 수동입력 방식을 병행하고 있다. 또한 모형의 출력자료는 각 HRU별로 유역경계에 의해 구분된 소유역자료, 하도추적자료 및 수문수질 분석 결과치 자료 등으로 구분된다. Arc-SWAT모형의 수문학적 모의는 차단, 지표수, 토양과 뿌리대의 침투, 증발산과 토양과 눈의 증발, 지하수 분석의 과정을 거쳐지며, 토양수분 변화량에 따른 기본 물수지 방정식은 Eq. (7)과 같다.

$$\Delta SW = P - Q - ET - DP - QR \quad (7)$$

여기서,  $P$ 는 강수량,  $Q$ 는 유출량,  $ET$ 는 증발산량,  $DP$ 는 침투량,  $QR$ 은 하천으로의 회귀수를 의미한다(Kim et al. 2006). 많은 선행 연구에서 수문량 모의에 적합한 것으로 검증된 Arc-SWAT 모형의 구조 및 이론적 배경과 관련한 구체적인 사항은 SWAT 홈페이지(<http://swat.tamu.edu/>)의 SWAT2009 Theoretical Documentation과 SWAT2009 Input/Output File Documentation을 참고할 수 있다.

본 연구에서는 SWAT 모형의 매개변수 최적화를 위하여 광동댐 유역의 2007년과 2010년 댐 유입량 자료를 대상으로 검정(Calibration) 하였으며, 2008년과 2011년을 대상으로 모형을 검증(Validation) 하였다. 다음 Fig. 6은 광동댐 유역의 관측(observed) 일유입량

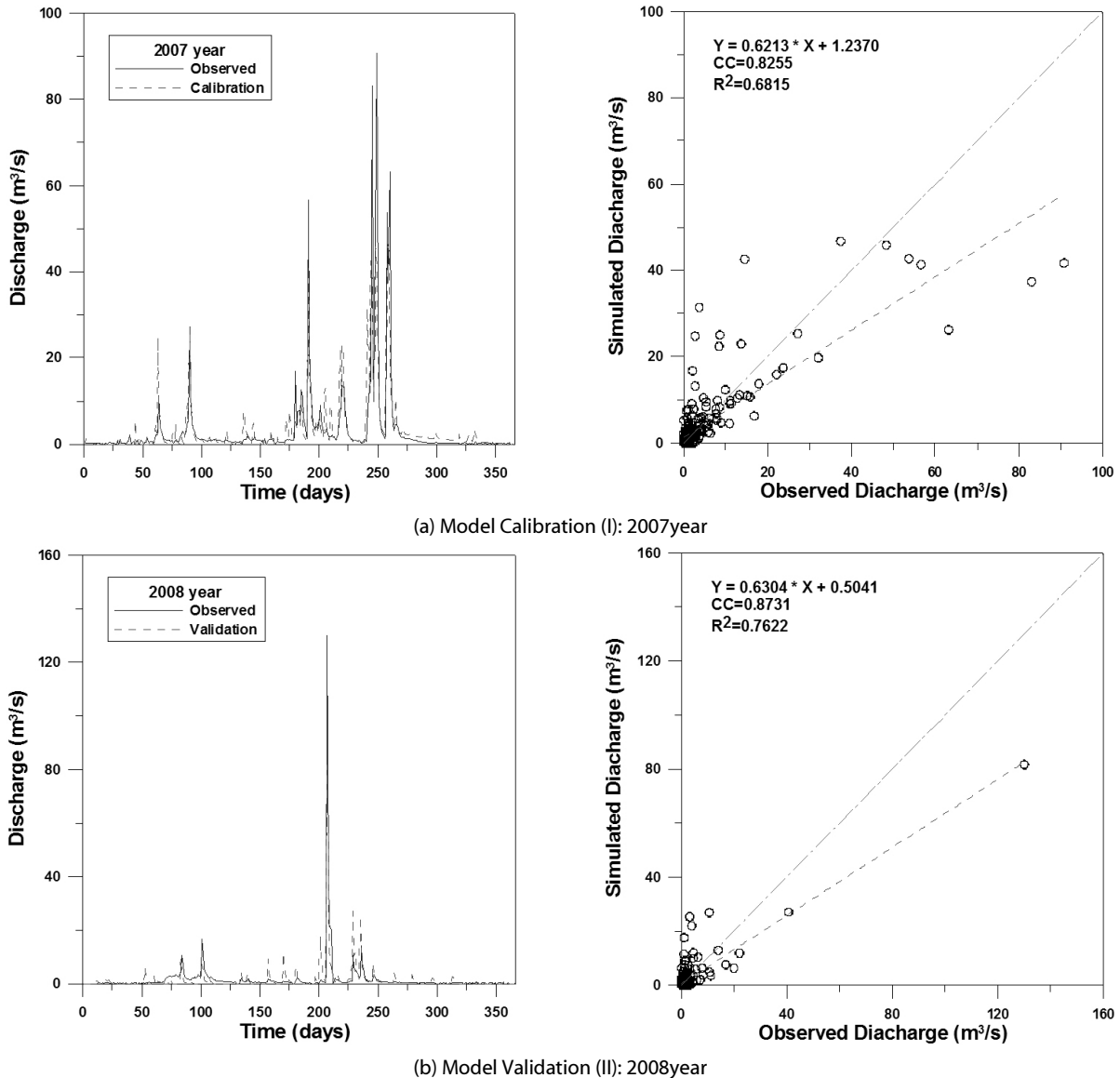


Fig. 6. Comparison of Rainfall Runoff Model Calibration and Validation Results



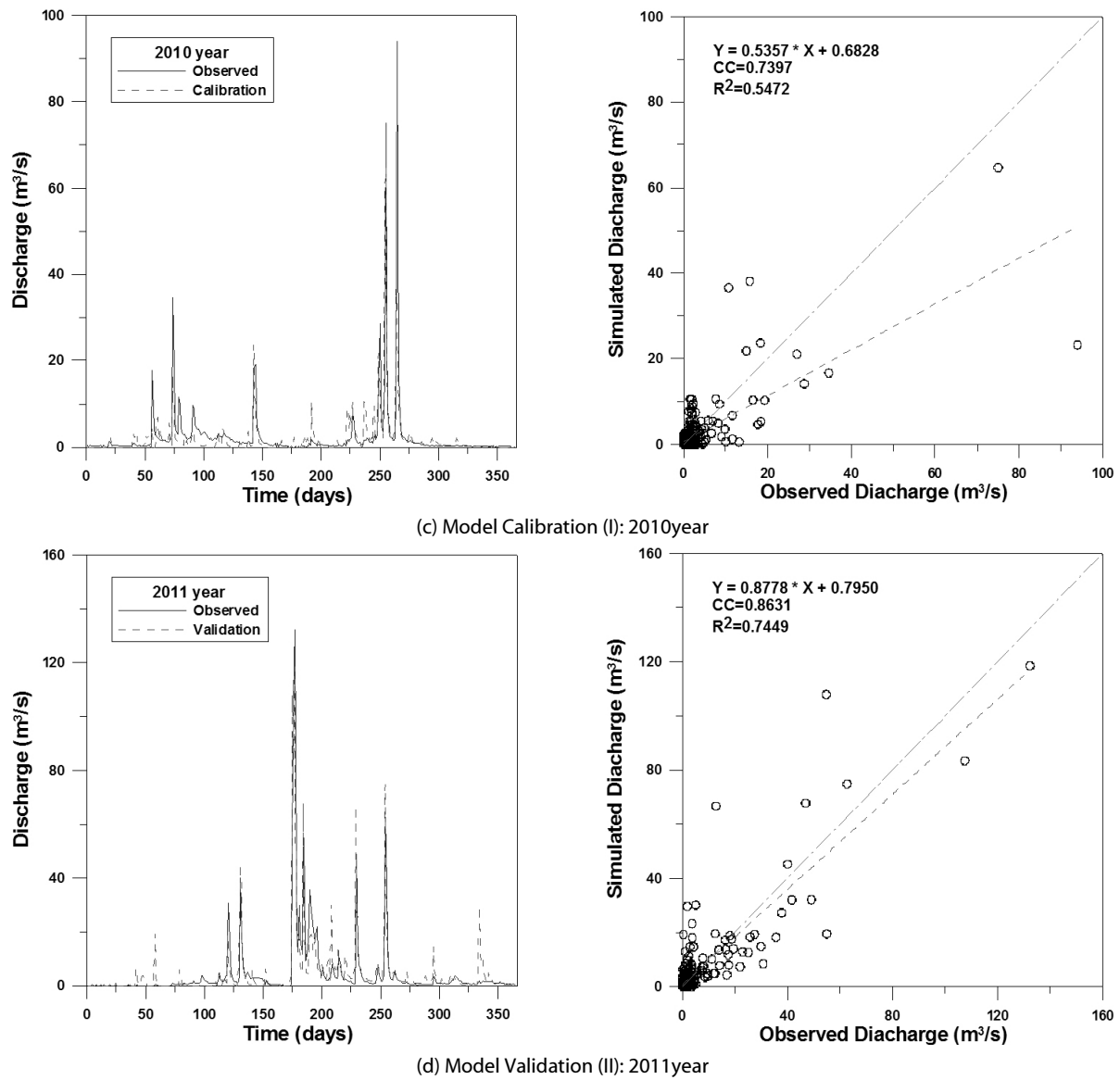


Fig. 6. Comparison of Rainfall Runoff Model Calibration and Validation Results (continue)

Table 2. Statistics of Model Calibration and Validation Results

Observed Year	Statistics				Note
	NSE	PEV	RMSE	R2	
2007	0.676	1.789	5.338	0.681	<i>Cal.</i>
2008	0.739	-4.842	3.784	0.762	<i>Val.</i>
2010	0.544	-16.707	4.906	0.547	<i>Cal.</i>
2011	0.721	6.509	6.373	0.745	<i>Val.</i>

\* NSE: Nash-Sutcliffe Model Efficiency;  $(NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2})$ , Percent Error in Volume (PEV) =  $(\frac{\sum Q^- - \sum Q^{obs}}{\sum Q^{obs}}) \times 100(\%)$ , Root Mean Square Error (RMSE) =  $\sqrt{\frac{\sum (Q^{obs} - Q^{sim})^2}{n}}$ , Coefficient of Determination ( $R^2$ ) =  $SSR/SST$ , where SSR is regression sum of squares and SST is total sum of squares.  $Q^{obs}$  is observed data, and  $Q^{sim}$  is simulated data. Where *Cal.* and *Val.* mean Calibration and Validation.

자료와 매개변수 최적화 과정을 거쳐 모의된 모의(simulated) 유량을 비교하여 나타난 결과이다. 모형의 감보정 결과 모의 결과와 관측이 비교적 잘 적합하고 있음을 알 수 있으며, 모형의 최적화를 평가하기 위한 기초통계분석의 척도로는 자료의 개수에 관계없이 절대적으로 평가할 수 있는 Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970)의 모형효율성계수(NSE, Nash-Sutcliffe Model Efficiency coefficient)와 백분위용적오차(PEV, Percent Error in Volume), 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error), 결정계수( $R^2$ )를 사용하였다. 분석결과 관측 값과 모의 값이 비교적 높은 상관관계를 보이고 있으며, 평균제곱근오차와 용적오차 등이 허용치 안에 있는 것으로 분석 된다. 모형 검정 시에는 NSE: 0.54~0.68, PEV: -16.71~1.79, RMSE: 4.91~5.34,  $R^2$ : 0.55~0.68로 모의 되었으며, 모형 검정결과 NSE: 0.72~0.74, PEV: -4.84~6.51, RMSE: 3.78~6.37,  $R^2$ : 0.75~0.76으로 분석 되었다(Table 2).

### 4.3 장기유출 모의 결과

RCPs 기후변화 시나리오 자료를 바탕으로 근래에 가뭄발생이 심각하였던 강원도 태백의 광동댐의 미래 물수요 전망을 실시하고, 향후 기후변화에 대응하여 댐유역의 물수요 공급을 보다 합리적으로 대처하기위한 능력을 제고하고자 한다. 댐유역의 가뭄빈도 분석

을 위하여 Arc-SWAT 최적화된 장기유출 모형을 사용하여 유출분석을 실시하였고, 향후 2100년까지 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 바탕으로 관측기간(Historic Period: 1989-2005)과 3개의 자료기간(Future I: 2011-2040, Future II: 2041-2070, Future III: 2071-2100)으로 구분하여 유출 모의를 실시하였다. Arc-SWAT을 이용한 광동댐유역의 장기유출 모의 결과 Median flow의 평균유출량의 경우, RCP4.5 시나리오 하에서, Future (I)은  $0.418m^3/s$ , Future (II)는  $0.539m^3/s$ , Future (III)는  $0.545m^3/s$ 로 관측기간에 비하여 각각 40.0%, 22.0%, 21.1% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 RCP8.5 시나리오 하에서 Future (I)은  $0.522m^3/s$ , Future (II)는  $0.524m^3/s$ , Future (III)는  $0.613m^3/s$ 로 관측기간에 비하여 각각 24.4%, 24.2%, 11.3% 감소하는 것으로 분석되었다. 다음으로 Quantile 25% flow의 평균유출량의 경우, RCP4.5 시나리오 하에서, Future (I)은  $0.158m^3/s$ , Future (II)는  $0.160m^3/s$ , Future (III)는  $0.176m^3/s$ 로 관측기간에 비하여 각각 37.7%, 37.0%, 30.4% 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 RCP8.5 시나리오 하에서 Future (I)은  $0.143m^3/s$ , Future (II)는  $0.133m^3/s$ , Future (III)는  $0.171m^3/s$ 로 관측기간에 비하여 각각 43.6%, 47.5%, 32.5% 감소하는 것으로 분석되었다(Fig. 7).

Arc-SWAT에 의한 광동댐 유역의 장기유출분석 결과를 종합해

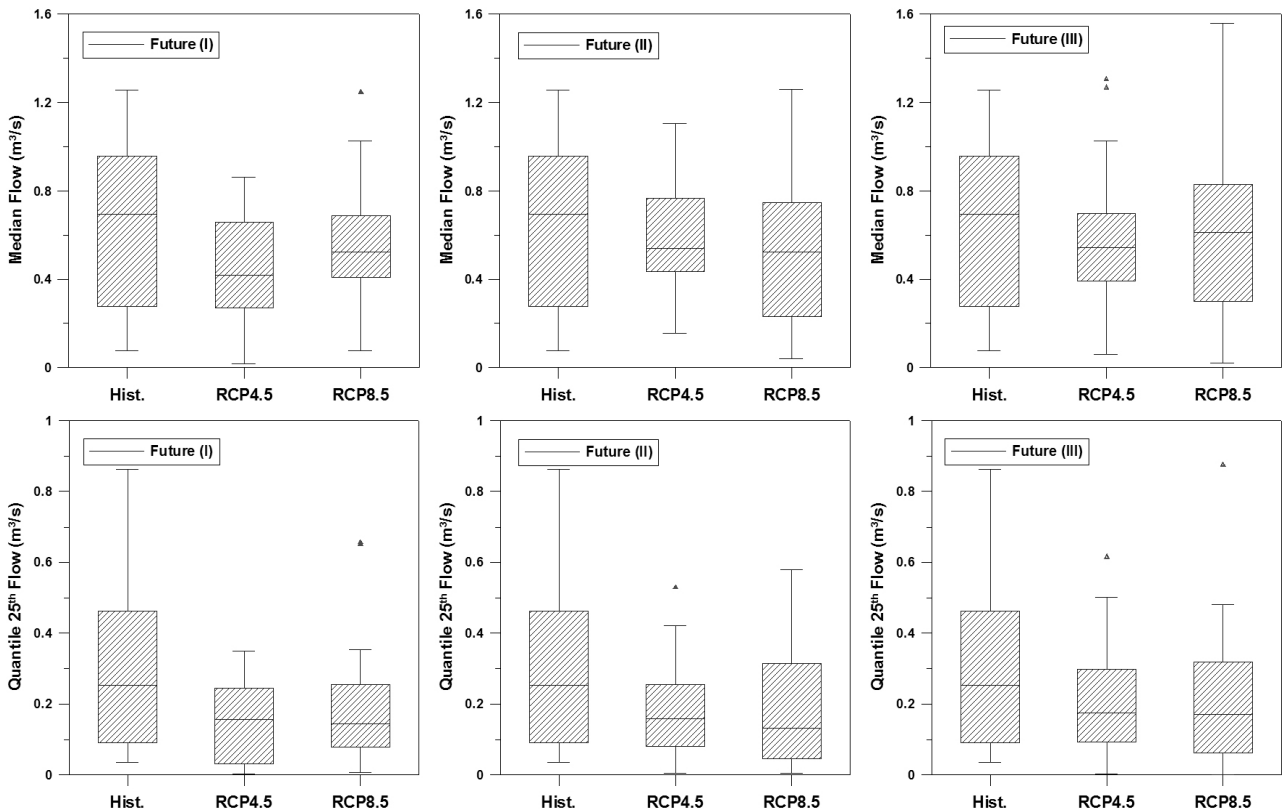
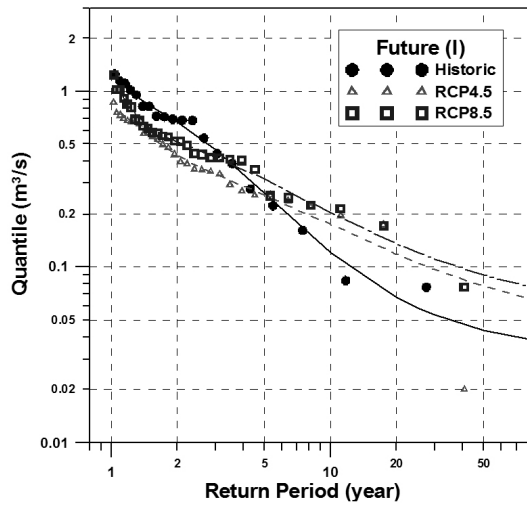
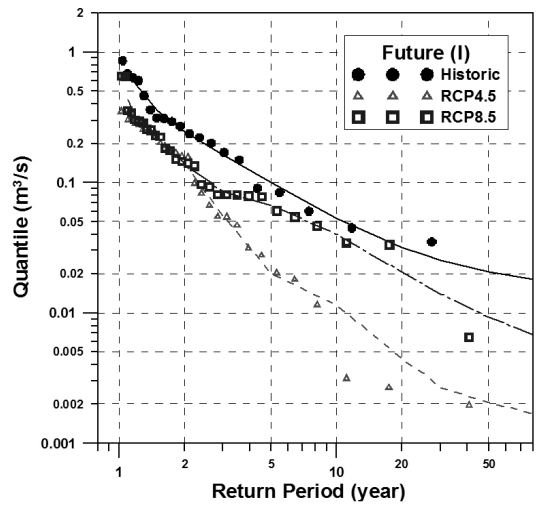


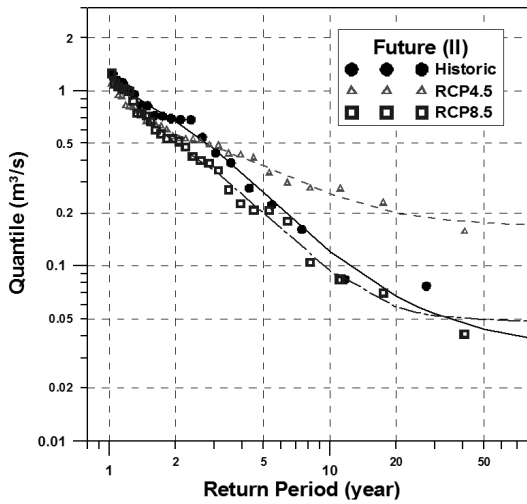
Fig. 7. Long-Term Rainfall Runoff Simulations for the Median and the Quartile 25<sup>th</sup> flow Using RCPs Scenarios in Each Research Period



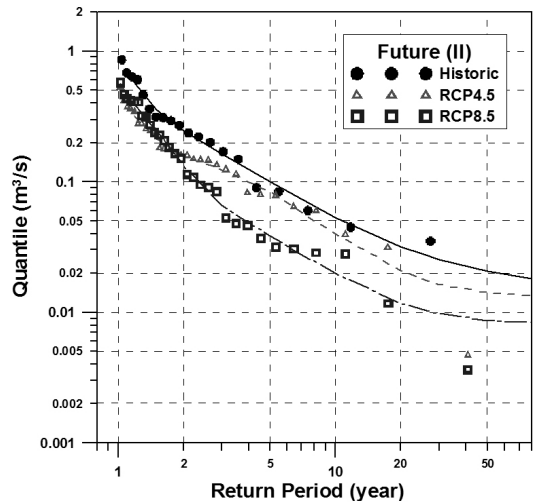
(a) Median Flow: Future (I)



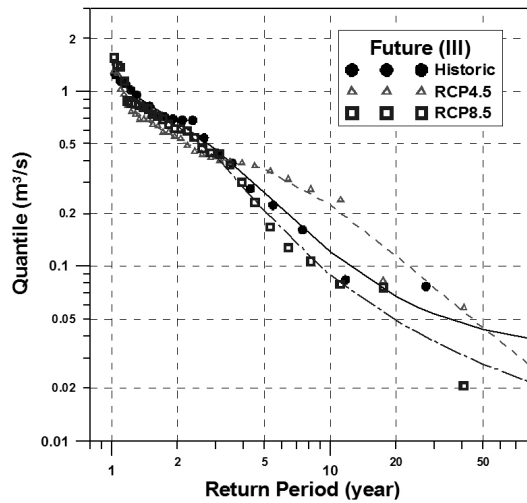
(b) Quantile 25<sup>th</sup> Flow: Future (I)



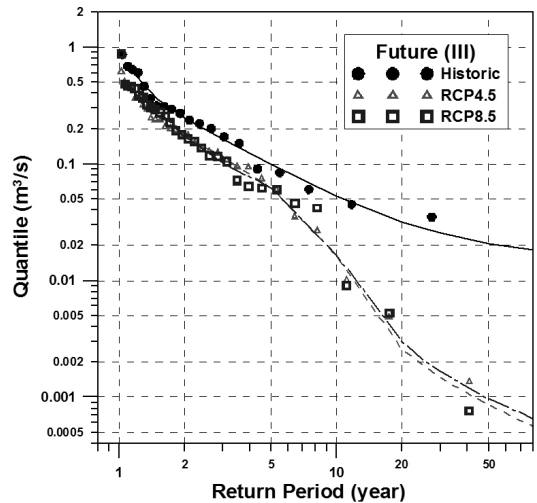
(c) Median Flow: Future (II)



(d) Quantile 25<sup>th</sup> Flow: Future (II)



(e) Median Flow: Future (III)



(f) Quantile 25<sup>th</sup> Flow: Future (III)

Fig. 8. Current and Future Low-Flow Frequency Analysis (LFA) for the Median Flow and the Quantile 25<sup>th</sup> Flow Under RCP4.5 and RCP8.5 Scenarios Over the Gwangdong Dam Reservoir Using Boundary Kernel Function

보면, Median flow의 경우 미래 유출량이 현재에 비하여 감소할 것으로 분석되었으며, RCP4.5시나리오 하에서 Future (I)의 경우 유출량 감소폭이 큰 것으로 분석된다. 특히 Median flow와 Quantile 25% flow 모두 장기유출분석 결과의 변동폭은 RCP4.5보다 RCP8.5시나리오 하에서 더욱 크게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 Quantile 25% flow의 경우 미래 광동댐 유역의 장기유출량이 현재에 비하여 모두 감소할 것으로 분석되었으며, RCP8.5시나리오 하에서 Future (II)의 경우 유출량 감소가 큰 것으로 분석된다.

**4.4 비매개변수적 가뭄빈도해석 결과**

RCP4.5, RCP8.5 기후변화 시나리오 자료를 바탕으로 Median flow와 Quantile 25% flow 유출량 계열에 대하여 경계함밀도 함수를 이용한 비매개변수적 갈수빈도해석을 수행하였다. Fig. 8은 경계함밀도 함수를 이용한 기후변화 시나리오별 가뭄빈도해석을 수행한 결과이며, Tables 3 and 4는 RCP4.5, RCP8.5 기후변화 시나리오에 따른 갈수빈도해석 결과 재현기간별 Quantile값을 나타내고 있다.

광동댐 유역 Median flow의 자료기간별 시계열에 대한 갈수빈도 해석결과, 30년 빈도의 경우 RCP4.5일 때는 Historic기간에 비하여 갈수빈도 값은 +22.4%(F1), +135.8%(F2), -4.7%(F3)로 분석되었으며, RCP8.5일 때는 +40.4%(F1), -34.1%(F2), -52.9%(F3)로 분석되었다. 50년 빈도의 경우 RCP4.5일 때는 +22.4%(F1), +135.8%(F2), -4.7%(F3)로 분석되었으며, RCP8.5일 때는 +40.4%(F1), -34.1%(F2), -52.9%(F3)로 분석되었다. 또한 100년 빈도의 경우 RCP4.5일 때는 Historic기간에 비하여 갈수빈도 값은 -19.5%(F1), +117.5%(F2), -71.7%(F3)로 분석되었으며, RCP8.5일 때는 -5.9%(F1), -37.5%(F2), -74.3%(F3)로 분석되었다. 따라서 Median flow 계열의 경우 30년, 50년, 100년 빈도 모두 가까운 미래에는 갈수량 증가가 예상되나 비교적 먼 미래에는 갈수량 감소로 인하여 가뭄이 더 심해질 확률이 클 것으로 분석된다.

다음으로 광동댐 유역 Quantile 25<sup>th</sup> flow의 자료기간별 시계열에 대한 갈수빈도해석결과, 30년 빈도의 경우 RCP4.5일 때는 Historic기간에 비하여 갈수빈도 값은 -20.8%(F1), -35.5%(F2), -94.3%(F3)로 분석되었으며, RCP8.5일 때는 -44.9%(F1), -61.7%

**Table 3. Low-Flow Frequency Analysis (LFA) for the Median Flow Time Series by Current and Future Situations Under RCP4.5 and RCP8.5 Scenarios Over the Gwangdong Dam Reservoir Using Boundary Kernel Function**

Return Periods (year)	Prob. $P=1-\frac{1}{T}$	Drought Frequency Analysis for Median Flow ( $m^3/s$ )						
		Historic Period	RCP4.5			RCP8.5		
			F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
2	0.50	0.6878	0.4309	0.5606	0.5345	0.5139	0.5044	0.6367
5	0.80	0.2418	0.2580	0.3751	0.3598	0.3160	0.2016	0.2067
10	0.90	0.1100	0.1751	0.2584	0.2243	0.2042	0.0940	0.0887
20	0.95	0.0820	0.1184	0.2014	0.1144	0.1358	0.0585	0.0490
30	0.97	0.0789	0.0966	0.1861	0.0752	0.1108	0.0520	0.0372
50	0.98	0.0785	0.0778	0.1761	0.0444	0.0899	0.0493	0.0276
100	0.99	0.0783	0.0630	0.1702	0.0222	0.0736	0.0489	0.0201

\* F<sub>1</sub>: 2011 to 2040-year, F<sub>2</sub>: 2041 to 2070-year, F<sub>3</sub>: 2071 to 2100-year, respectively.

**Table 4. Same as Table 3, Except Showing Low-Flow Frequency Analysis (LFA) for the Quantile 25<sup>th</sup> Flow Time Series**

Return Periods (year)	Prob. $P=1-\frac{1}{T}$	Drought Frequency Analysis for Quantile 25 <sup>th</sup> Flow ( $m^3/s$ )						
		Historic Period	RCP4.5			RCP8.5		
			F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
2	0.50	0.2455	0.1590	0.1583	0.1684	0.1389	0.1326	0.1709
5	0.80	0.1002	0.0401	0.0837	0.0620	0.0669	0.0384	0.0624
10	0.90	0.0531	0.0314	0.0400	0.0161	0.0401	0.0198	0.0164
20	0.95	0.0319	0.0245	0.0208	0.0025	0.0205	0.0117	0.0030
30	0.97	0.0255	0.0202	0.0165	0.0015	0.0141	0.0098	0.0017
50	0.98	0.0207	0.0158	0.0141	0.0009	0.0093	0.0087	0.0010
100	0.99	0.0173	0.0117	0.0132	0.0006	0.0061	0.0083	0.0007

(F2), -93.5%(F2)로 분석되었다. 50년 빈도의 경우 RCP4.5일 때는 Historic기간에 비하여 갈수빈도 값은 -23.7%(F1), -31.8%(F2), -95.8%(F3)로 분석되었으며, RCP8.5일 때는 -55.2%(F1), -57.9%(F2), -95.4%(F3)로 분석되었다. 또한 100년 빈도의 경우 RCP4.5일 때의 Historic기간에 비하여 갈수빈도 값은 -32.2%(F1), -23.7%(F2), -96.8%(F3)로 분석되었으며, RCP8.5일 때는 -64.9%(F1), -52.1%(F2), -96.2%(F3)로 분석되었다. 따라서 Quantile 25<sup>th</sup> flow 계열의 경우 30년, 50년, 100년 빈도 모두 현재 보다 건조해질 가능성이 큰 것으로 분석되었고 비교적 먼 미래로 갈수록 극심한 가뭄의 발생빈도가 커질 것으로 분석된다.

## 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 광동댐 유역을 대상으로 RCP4.5, RCP8.5 기후변화 시나리오 자료를 적용하여 Arc-SWAT모형을 통한 미래 장기 유출 분석을 실시하였으며, 저유량 계열(Median flow, Quantile 25% flow)의 경계핵함수(Boundary Kernel Function) 적용으로 비매개변수적 갈수빈도해석을 수행하여 기후변화에 따른 광동댐 유역의 가뭄평가를 실시하였다. 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 평균보다 적은 강수량과 토양수분 부족으로 인하여 발생하는 가뭄에 대하여 경계핵밀도함수를 적용하여 미래 갈수량의 빈도별 Quartile 값 산정으로 가뭄의 정량적 평가를 실시하였으며, 광동댐 유역을 대상으로 분석한 결과 미래에는 현재에 비하여 가뭄발생 강도와 빈도가 증가하고 심한 가뭄의 발생확률이 커질 수 있음을 확인하였다.
- (2) Arc-SWAT에 의한 기후변화 시나리오별 장기유출량 전망결과 RCP4.5시나리오 하에서는 가까운 미래의 유출량 감소폭이 클 것으로 분석되었으며, 장기유출량의 변동폭은 RCP4.5시나리오 보다 RCP8.5시나리오에서 더욱 크게 나타났다. 또한 Median flow와 Quantile 25% flow의 경우 광동댐 유역 장기 유출량이 현재에 비하여 감소하는 것으로 분석되었으며, RCP8.5시나리오 하에서 먼 미래의 경우에 유출량 감소가 가장 큰 것으로 분석된다.
- (3) Median flow의 경우, 30년 빈도 갈수량은 RCP4.5일 때는 Historic기간에 비하여 갈수빈도 값은 +22.4%(F1), +135.8%(F2), -4.7%(F3)로 분석되었으며, RCP8.5일 때는 +40.4%(F1), -34.1%(F2), -52.9%(F3)로 RCP8.5에서 더욱 건조해지는 특성이 있는 것으로 분석되었다. 또한 30년 빈도 이하의 저빈도에서는 현재보다 대체로 습윤한 특성을 보일 확률이 클 것으로 분석되나, 30년, 50년, 100년 재현기간의 고빈도에서는 가까운 미래에 갈수량 증가가 예상되며, 비교적 먼 미래에

는 갈수량 감소로 인하여 가뭄이 더 심해질 확률이 클 것으로 분석된다.

- (4) Quantile 25% flow의 경우, 30년 빈도 갈수량은 RCP4.5일 때는 Historic기간에 비하여 갈수빈도 값은 -20.8%(F1), -35.5%(F2), -94.3%(F3)로 분석되었으며, RCP8.5일 때는 -44.9%(F1), -61.7%(F2), -93.5%(F2)로 RCP8.5에서 더욱 건조해지는 특성이 있는 것으로 분석되었다. 또한 30년, 50년, 100년의 고빈도에서는 모두 현재 보다 건조해질 가능성이 있는 것으로 분석되었고 비교적 먼 미래로 갈수록 극심한 가뭄의 발생빈도가 커질 확률이 클 것으로 분석된다.

기후변화에 따른 갈수량 전망과 변동특성 분석은 수자원 장기종합계획에 있어 중요한 기초자료로 활용될 수 있으며, RCPs 시나리오를 적용하여 분석한 저유량 유출량 계열에 대한 비매개변수적 갈수빈도해석은 유역의 안정적인 용수공급과 지속가능한 수자원 확보를 위한 정량적 평가 결과로 활용이 가능할 것이다. 추후 다양한 기후모형과 시나리오 적용에 의한 미래 가뭄 전망과 불확실성 평가가 실시된다면 보다 신뢰성 있는 연구가 가능할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 창의적 연구사업 연구임(2012R1A1A2005304).

## References

- Adamowski, K. (1981). "Plotting formula for flood frequency." *Water Resources Bulletin*, Vol. 17, No. 2, pp. 197-202.
- Adamowski, K. (1996). "Nonparametric estimation of low-flow frequencies." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 1, pp. 46-49.
- Cha, Y. I., Moon, Y. I., Yoon, J. H. and Kim, D. K. (2001). "Drought frequency analysis using boundary kernel function." *Proceedings of Journal of Korea Water Resources Association*, pp. 116-121 (in Korean).
- Cho, J. P. (2013). *Assessment of climate change impacts on agricultural reservoirs in consideration of uncertainty*, APEC Climate Center Annual Report 2013-05 (in Korean).
- Gasser, T. and Muller, H. G. (1984). "Estimating regression functions and their derivatives by the kernel method." *Scandinavian Journal of Statistics*, Vol. 11, pp. 171-185.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E. and Skaugen, T. E. (2012). "Technical note: Downscaling RCM Precipitation to the Station Scale using Quantile Mapping-a Comparison of Methods. Hydrology and Earth System Sciences Discussions." *Hydrology*

- and *Earth System Sciences Discussions*, Vol. 9, pp. 6185-6201.
- Guo, S. L., Kachroo, R. K. and Mngodo, R. J. (1996) "Nonparametric kernel estimation of low flow quantiles." *Journal of Hydrology*, Vol. 185, No. 1-4, pp. 335-348.
- Jang, J. H. and Ahn, J. H. (2012). "Hydrologic and water quality responses to precipitation extremes in nakdong river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 11, pp. 1081-1091 (in Korean).
- Jensen, M. E., Burman, R. D. and Allen, R. G. (1990). "Evaporation and irrigation water requirements. ASCE manuals and reports on Eng. Practices No. 70." *Am. Soc. of Civil Eng.*, NY, p. 360.
- Jeong, S. M., Seo, H. D., Kim, H. S. and Han, K. H. (2008). "Sensitivity assessment on daecheong dam basin streamflows according to the change of climate components: Based on the 4<sup>th</sup> IPCC report." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 11, pp. 1095-1106 (in Korean).
- Kim, B. S., Kim, H. S., Seoh, B. H. and Kim, N. W. (2007). "Impact of climate change on water resources in Yongdam Dam Basin, Korea." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 21, No. 4, pp. 355-373.
- Kim, B. S., Kim, S. J., Kim, H. S. and Jeon, H. D. (2010). "An impact assessment of climate and landuse change on water resources in the Han River." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 3, pp. 309-323 (in Korean).
- Kim, N. W., Lee, B. J. and Lee, J. E. (2006). "An evaluation of snowmelt effects using SWAT in Chungju Dam basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 10, pp. 833-844 (in Korean).
- Korean Meteorological Administration (KMA) (2013). Available at: <http://www.kma.go.kr/> (Accessed: January 10, 2013).
- Korean Meteorological Administration (KMA), (2012). "Korea climate change prediction report." Korean Meteorological Administration, pp. 1-153.
- Kyoung, M. S., Lee, Y. W., Kim, H. S. and Kim, B. S. (2009). "Assessment of climate change effect on temperature and drought in Seoul : Based on the AR4 SRES A2 scenario." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 29, No. 2B, pp. 181-191 (in Korean).
- Lee, J. H. and Kim, C. J. (2011). "Derivation of drought severity-duration-frequency curves using drought frequency analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 11, pp. 889-902 (in Korean).
- Lee, J. H., Cho, K. J., Kim, C. J. and Park, M. J. (2012). "Analysis on the spatio-temporal distribution of drought using potential drought hazard map." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 10, pp. 983-995 (in Korean).
- Moon, Y. I. (2000). "Frequency analysis using boundary kernel function." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 1, pp. 71-79 (in Korean).
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part 1-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Oh, T. S., Moon, Y. I., Kim, S. S. and Park, G. S. (2011). "Frequency analysis of meteorologic drought indices using Boundary Kernel Density Function." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2B, pp. 87-98 (in Korean).
- Palmer, W. C. (1965). "Meteorological drought, research paper No. 45." Office of Climatology, U.S. Weather Bureau, Washington, D. C., pp. 1-58.
- Rao, A. R. and Padamanabhan, G. (1982). "Analysis and modeling of palmer's drought index series." *Journal of Hydrology*, Vol. 68, No. 1-4, pp. 211-229.
- Sheather, S. F. and Jones, M. C. (1991). "A reliable data-based bandwidth selection method for kernel density estimation." *Journal of Royal Statistical Society, B*, Vol. 53, No. 3, pp. 683-690.
- SWAT (Soil and Water Assessment Tool), (2013). Available at: <http://swat.tamu.edu/> (Accessed: October 11, 2013).
- WAMIS (Water Management Information system) (2013). Available at: <http://www.wamis.go.kr/> (Accessed: January 10, 2013).
- Yeon, J. M., Byun, S. H., Lee, J. K. and Kim, T. W. (2007). "Evaluation of droughts in Seoul using Two-dimensional drought frequency analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 4, pp. 335-343 (in Korean).
- Yoo, J. Y., Shin, J. Y., Kim, D. K. and Kim, T. W. (2013). "Drought risk analysis using stochastic rainfall generation model and Copula functions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 4, pp. 425-437 (in Korean).
- Yoon, S. K., Ahn, J. H., Kim, J. S. and Moon, Y. I. (2009). "Application to evaluation of hydrologic time series forecasting for long-term runoff simulation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 10, pp. 809-824 (in Korean).
- Yoon, S. K., Kim, J. S. and Moon, Y. I. (2012). "A study on optimal time distribution of extreme rainfall using minutely rainfall data: A case study of Seoul." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 3, pp. 275-290 (in Korean).
- Yoon, S. K., Kim, J. S., Lee, J. H. and Moon, Y. I. (2013). "Hydrometeorological variability in the Korean Han River Basin and its sub-watersheds during different El Nino phases." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Vol. 27, No. 6, pp. 1465-1477.
- Yoon, T. H. (2011). *Applied hydrology*, Cheong Moon Gak (in Korean).
- Yoon, Y. N., and Park, M. J. (1997) "Regional drought frequency analysis of monthly rainfall data by the method of L-moments." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 30, No. 1, pp. 55-62 (in Korean).