

## 기후변화와 유역유출특성을 고려한 미래하천환경 평가 Assessment of Future River Environment considering Climate Change and Basin Runoff Characteristics

안정민\* / 임태효\*\* / 이인정\*\*\* / 천세억\*\*\*\*  
Ahn, Jung Min / Im, Toe Hyo / Lee, In Jung / Cheon, Se Uk

### Abstract

This study evaluated the environmental impact based on watershed characteristics and climate change using RCP climate change scenarios provided by the Korea Meteorological Administration. Future dam inflow was estimated by the SWAT model. Dam safety evaluation and downstream duration curve analysis was performed using HEC-ResSim model. Trends of water quality was analyzed through seasonal-Kendall Test using existing water quality observation data. Release discharge and tributary runoff derived SWAT and HEC-ResSim models applied to Qual2E and the future change in water quality trends were analyzed. Integrated environmental review watershed following techniques will be able to obtain the river environment management system and environmental issues such as climate change, new guidelines for preemptively response will be provided.

**Keywords** : climate change, watershed runoff, reservoir routing, water quality, Kendall test

### 요 지

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 RCP 기후변화시나리오를 이용하여 기후변화와 유역유출특성에 따른 환경영향을 평가하였다. SWAT모형을 이용한 미래 댐 유입량 평가, HEC-ResSim 모형을 이용한 댐 안전성 평가 및 하류 유황분석을 수행하였다. 또한, 기존 수질관측자료를 이용하여 Seasonal-Kendall Test를 통해 수질변화 추세에 대해 분석하였고, SWAT과 HEC-ResSim 모형으로 도출된 방류량 및 지류유출량을 Qual2E모형에 적용하여 미래 수질변화 추세에 대해 분석하였다. 다음과 같은 유역 통합환경검토 기법은 하천환경에 대한 과학적 물환경 관리 체계를 확보하고, 기후변화 등 새로운 환경문제에 선제적으로 대응하기 위한 지침을 마련할 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 기후변화, 유역유출, 저수지추적, 수질예측, Kendall test

\* 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 환경연구사 (e-mail: jahn@korea.kr)

Nakdong River Environment Research Center

\*\* 교신저자, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 환경연구관 (e-mail: imtoehyo@korea.kr)

Corresponding Author, Nakdong River Environment Research Center

\*\*\* 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 환경연구사 (e-mail: ijlee5344@korea.kr)

Nakdong River Environment Research Center

\*\*\*\* 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 소장 (e-mail: sucheon@korea.kr)

Nakdong River Environment Research Center

## 1. 서론

최근 문제가 되고 있는 기후변화에 관한 정부간협의체인 IPCC (International Panel on Climate Change, 2007)는 4차 기후변화에 관한 평가 보고서에서 지구온난화현상은 관측자료를 통해 분석한 결과, 논란의 여지없이 명백하다고 평가하였고 이상기후에 따라 극심한 가뭄과 홍수가 빈발하여 수자원관리환경을 더욱 어렵게 할 것이라 예상하였다. 기후변화(Climate Change)란 용어 자체가 '인간의 활동으로 야기되는 대기 조성변화'로 기후변화협약에서 정의하고 있는바, 향후 기후변화에 따른 수문환경은 변화될 것이다. 우리나라는 기후변화에 따른 영향을 최소화하기 위한 많은 연구를 진행하고 있다. 1999년 「제1차 기후변화협약 대응 정부 종합대책」을 시작으로 2010년 10월 「저탄소 녹색성장 기본법」에 의한 「국가 기후변화 적응대책(2011~2015)」을 수립하는 등 기후변화 관련 정책을 수립하여 추진하고 있다(Korea Environment Institute, 2010). National Institute of Environmental Research (2008; 2010)에서는 한국기후변화 백서 발간을 위한 방안 마련 및 기초연구와 기후변화에 의한 유역환경영향 통합평가를 수행하였고, Korea Rural Economic Institute (2011)에서는 NHERI Report에서 기후변화와 농업의 대응에 대한 연구를 수행하였다. 산재된 기후자료를 통합관리하고 국가적으로 활용할 수 있는 인프라를 구축하기 위해 기상청에서는 2011년 기후변화정보센터를 설립하여 국내외에서 생산되는 다양한 기후자료를 통합적으로 관리하고, 누구라도 손쉽게 이를 이용할 수 있도록 제공하고 있다. 이처럼 기후변화에 대한 다방면의 연구가 진행되고 있고, 특히 수자원분야에서는 온실가스 증가에 따른 지구 온도 증가와 강수량의 변화로 인한 국지성 돌발호우뿐만 아니라 홍수와 가뭄의 취약성이 더욱 증가될 것으로 전망되고 있다.

미국의 캘리포니아 주의 경우 기후변화 적응대책으로 통합수자원관리가 반드시 필요하다고 하였으며 이를 구체적으로 실현하기 위해 광역적통합물관리(Integrated Regional Water Management, IRWM)를 지역별로 수립하여 실행한 바 있다(Chung et al., 2011). 또한 Integrated Water Management (IWM)이 치수중심으로 적용될 때 이를 통합홍수관리(Integrated Flood Management, IFM)라 하여 전 세계적으로 뜨겁게 연구되고 적용하려는 시도가 있다(Chung et al., 2009). 우리나라 역시 향후 심각해질 가능성이 높은 기후변화에 대해 적응하기 위한 물관리 전략이 반드시 필요하고 기후변화에 따라 심각해지고 있

는 수자원문제에 대응하기 위해서는 우선 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 정량적으로 파악하여 평가하는 것이 필요하다. 기후변화에 대한 영향평가를 위해서는 기후시나리오, 전지구모형(GCMs, General Circulation Models), 다운스케일링(downscaling) 기법, 강우-유출모형, 저수지군 운영모형, 환경평가 모형의 순으로 매우 많은 과정을 거쳐야 하며, 각 과정을 거치면서 불확실성이 점점 커지고 있다. 이렇게 발생한 불확실성은 미래 기후변화에 따른 적응전략에 영향을 줄 수밖에 없기 때문에 기후변화에서의 불확실성을 인정하고 줄여나가는 연구가 필요하다(Lee et al., 2009). 현재 국내에서 미래 기후변화에 대한 유역의 수문평가 연구(Ministry of Science and Technology, 2007, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2007)가 진행되고 있지만, 서로 다른 배출시나리오, GCM, 수문모형, 상세화기법을 사용하는 등 기후변화 연구의 불확실성으로 인해 동일유역이라 하더라도 매우 상이한 결과를 제시하고 있어 실제 관련정책에는 반영되지 못하고 있는 실정이다(K-water Institute, 2010). 기존의 연구는 기후변화, 유출, 저수지운영, 수질이 분리 되어 연구되어왔다. 따라서 본 연구에서는 기후변화, 유출, 저수지운영, 수질을 종합적으로 분석하였다. 섬진강유역을 대상으로 신뢰성 있는 기후변화시나리오를 사용하기 위하여 Climate Change Information Center (2013)에서 제공하는 공간해상도 1km 지역규모의 RCP8.5 시나리오를 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)모형에 적용하여 미래 유출량 전망을 분석하였다. 또한, 미래 유출량을 HEC-ResSim 및 Qual2E 모형에 적용하여 저수지군 운영에 따른 각 주요 지점별 유황분석을 통해 수문학적 거동 특성을 분석하였고 환경영향에 대한 검토를 통해 유역 관리를 위한 지침을 마련하고자 하였다.

## 2. 연구범위

기후변화에 따른 섬진강유역의 미래 유출량 전망을 파악하고 기존 댐의 운영에 의한 하류 수질의 변동 여부를 파악하는 것은 지속적인 물의 흐름 상태를 알고 수계 통합 물관리를 위해 필수적이다. 본 연구에서는 기후변화정보센터에서 제공하는 2000년 1월 1일부터 2100년 12월 31일 기간 동안의 RCP8.5 남한상세 공간해상도 1km 기후변화 시나리오를 유역유출모형에 적용해서 섬진강수계 물이용을 고려한 각 주요지점의 유출량을 산정하였다. 산정된 유출량을 저수지운영모형에 적용하여 각 수리시설물 운영기법에 따른 하류 유량을 평가하였으며 수질모형

을 이용하여 수리시설물 운영에 따른 하류 수질 변화를 검토하였다. 유출량 산정에서는 댐내 용수이용 및 취수 등은 HEC-ResSim 모형에서 고려하기 위해 반영하지 않았고 각 소유역별 용수이용량은 고려하였다. 1973년부터 2010년까지 38개년 사상을 대상으로 SWAT 모형으로 유출량을 산정하였으며 산정된 유출량을 토대로 관측값과의 비교를 통해 매개변수를 보정하였다. RCP8.5 기후변화 시나리오를 SWAT 모형에 적용하여 각 수리시설물, 지류 그리고 소유역에서 유입되는 유량을 산정하였다. HEC-ResSim (Klipsch and Hurst, 2007)모형을 이용하여 섬진강수계 및 인근 권역에 대하여 안정적인 물공급을 최적화 시킬 수 있도록 댐 상·하류간의 연계운영 네트워크를 구축하고 댐의 최적 연계운영을 통한 각 댐의 방류량 및 하류단의 유량을 계산하였다. 먼저, 1994년부터 2012년까지 관측된 수질자료를 이용하여 Seasonal-Kendall 기법을 이용하여 기후변화에 따른 경향성을 분석하였고, SWAT 모형으로 계산된 지류 유입유량과 HEC-ResSim 모형으로 계산된 방류량을 Qual2E모형에 적용하여 수리시설물 운영에 따른 하류 수질 변동을 검토하였다. Fig. 1 은 이상 기술된 연구방법에 대한 절차를 나타낸 것이다.

### 3. 대상유역

한반도의 남해안 중서부에 위치하고 있는 섬진강 유역은 우리나라 5대강 유역의 하나로서, 동경 126° 51' 50" ~ 127° 53' 05", 북위 34° 40' 26" ~ 35° 50' 0" 사이에 위치하고 있으며, 동쪽으로 낙동강유역, 서쪽으로 영산강유역과 동진강유역, 북쪽으로 금강유역 및 만경강유역과

각각 경계를 이루고 있다. 섬진강의 유역현황은 Fig. 2와 같고 섬진강 하구지점의 유역면적은 4,911.89 km<sup>2</sup>, 유로연장은 223.86 km, 유역평균폭은 21.94 km, 형상계수는 0.1이고, 평균고도는 EL. 301.58 m이다. 섬진강은 우리나라에서도 양호한 수질과 수려한 자연환경이 잘 보전되어 패류의 산란지이자 생태하천의 보고로 유명하다.

## 4. 연구내용

### 4.1 기후변화 강우자료

기후변화는 지금도 진행 중인 것으로 보고되고 있으며, 향후에도 지속적으로 진행되고 가속화될 것으로 판단된다(IPCC 2007). IPCC 제4차 평가보고서에 사용된 온실가

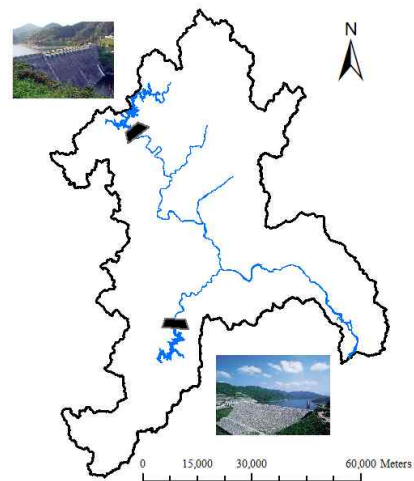


Fig. 2. Seomjin Basin

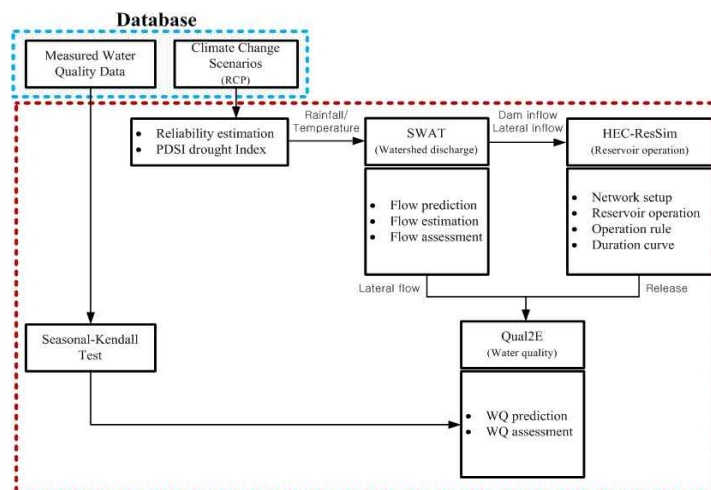


Fig. 1. Assessment Procedure of Future River Environment considering Climate Change and Basin Runoff Characteristics

스 배출시나리오(SRES) 자료의 노후화 및 해상도 문제를 보완하고 정확도 향상 및 다양한 부문에 이용할 수 있는 새로운 시나리오 도입의 필요성이 제기되었다. 이에 따라 IPCC 세계표준 온실가스 농도 시나리오 전문가 회의(2007. 9월)를 거쳐 대표농도경로(RCP) 시나리오 개발이 진행되었다. 이에 대표 농도 4개를 선정하여, 농도에 따른 시나리오를 산출하였는데, 선정된 4개 농도는 복사강제력( $W/m^2$ ) 기준으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5이다(Korea Meteorological Administration, 2010). IPCC AR4에서 사용된 SRES에서는 미래의 사회·경제 형태가 가장 먼저 결정되고 이에 따른 배출량 시나리오로 온실가스 농도가 정해진다. 이러한 순차방법은 분리된 각 시나리오 간의 정보 전달시 시간 지연이 일어나는 문제점이 있었다(IPCC, 2007). 대표농도경로로 명명된 RCP는 IPCC AR5를 위한 새로운 온실가스 배출시나리오로서 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였다. 하나의 대표적인 복사 강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있는데, 유사한 복사강제력과 배출 특성을 가진 여러 다른 시나리오 중의 하나라는 측면에서 ‘대표(Representative)’라는 의미를 가진다. 또한 온실가스 농도가 시간에 따라 변화하는데, 시간에 따른 변화를 강조하기 위하여 ‘경로(Pathway)’라는 의미를 포함한다(IPCC, 2007). RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는  $W/m^2$  지상에 도달되는 태양복사가 약  $238 W/m^2$ 이므로 RCP 8.5/6.0/4.5/2.6의 복사강제력은 입사 태양복사량의 약 3.6%, 2.5%, 1.9%, 1.1%에 해당된다. 남한 상세 공간해상도 1km 기후변화 시나리오는 지역기후모델을 통해 생산된 한반도(12.5km) 기후변화 시나리오를 바탕으로 통계적 상세화 과정을 통해 생산된다. 기후변화정보센터에서는 73개 주요지점 및 230개 시군구에 대해 기후변화 자료를 제공하고 있으며, 주요지점에 해당하는 자료는 지점과 가장 근접한 격자점의 값이며, 230개 시군구자료는 영역이 평균된 값이다. 또한, 200년

제어적분의 RCP 4.5/8.5 자료만 제공되고 있다. RCP4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우이고 RCP8.5는 현재 탄소 배출 추세를 지속적으로 유지할 경우의 시나리오를 바탕으로 산출된 경우예측 값이다. RCP 기후변화 자료는 2005년을 초기조건으로 하여 2006년 부터를 모의하고 있으며, 이전 자료는 RCP 미래전망 자료가 아닌 과거기후모의의 자료이다. 본 연구에서는 온실가스 저감 정책에 의해 개선된 상황이 아닌 현 상황이 지속되었을 때 발생할 수 있는 미래하천환경을 평가하기 위해 RCP8.5를 채택하였다. Fig. 3에 도시되어 있는 섬진강유역에 해당하는 3개 관측소를 선정하고 Fig. 4와 같이 2000년 1월 1일부터 2010년 12월 31일 까지 RCP8.5 기후변화 강우 자료를 관측자료와 비교하여 신뢰성을 평가하였다. RCP8.5 강우 시나리오는 남원과 주암 지점의 경우 상관계수가 0.9999로 나타나 상세화 처리가 잘 된 것으로 나타났고, 임실의 경우 상관계수가 0.6924로 상대적으로 상세화 처리가 낮은 것으로 나타났다.

#### 4.2 미래 유출량 예측

수자원영향평가를 위한 유출분석은 고해상도 기후변화

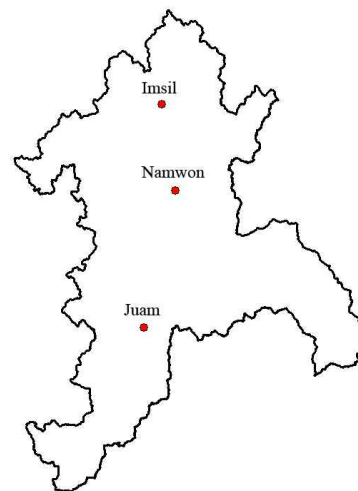


Fig. 3. Meteorological Station

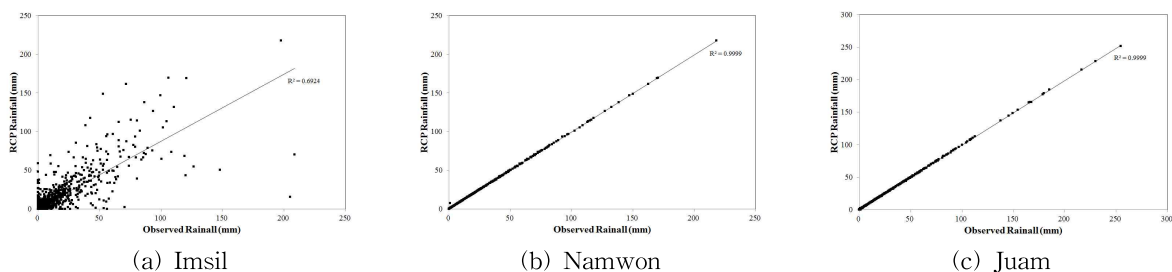


Fig. 4. Comparison of Observed Rainfall Data with RCP 8.5 Rainfall Data

시나리오를 유출모형에 적용하여 유역별 유출 시나리오를 생산하고 분석하여 수자원의 변동성을 정량적으로 평가하는 것이다. 이를 위해서는 장기유출분석을 수행할 수 있는 유출모형의 선정 및 입력 자료의 구축이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 RCP8.5시나리오에서의 일단위 유출모의를 위해 기존 국내외의 연구성과나 유출모형의 인지도, GIS자료의 활용성, 그리고 연구의 적합성 등을 고려하여 미국 농무성에서 개발한 준분포형모형인 최신 버전의 ArcSWAT (Neitsch et al., 2002)모형을 선정하였다. SWAT모형은 일단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 강우-유출 모형으로 대규모 유역에서 장기간에 걸친 토지이용에 따른 유출량을 평가할 수 있도록 개발되었고, 계속적으로 기능이 확장되고 있으며, 강우-유출해석, 기후변화에 따른 수문응답예측, 유역의 비점오염물질 거동해석, 유역관리대책의 평가 등에서 활발한 연구가 수행되고 있다.

모형 구축을 위한 수치표고모형(DEM) 자료는 국토지리정보원에서 제공하는 25000:1 수치지도 파일을 ARC-GIS 9.2 프로그램을 이용하여 30×30 m Raster 파일로 변환시켰다. Cho et al. (2003)은 선행연구를 통해 DEM의 격자크기는 25×25m~50×50m가 가장 적당함을 제시한 바 있다. 좌표체계는 Transverse-Mercator 법(Bessel 타원체)을 사용하였으며, 매개변수는 한국측지계의 중부원점 값을 적용하였다. 토지이용현황은 수자원관리종합정보시스템(WAMIS) 제공하는 중분류 토지피복도를 사용하였다. 토지피복도는 shape 파일의 형태를 Grid 형태로 변환하여 사용하였으며, 속성부호를 SWAT의 입력자료 속성 값(SWAT Land use Class)으로 변환하였다. 섬진강 유역의 토지이용 분류결과, 전체 유역면적 중 수역 1.51%, 시가지지역 3.42%, 나지 0.08%, 습지 0.01%, 초지 3.11%, 산림 72.89%, 논 16.65%, 밭 2.33로 나타났다. 토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 정밀토양도를 사용하였다. Kim (2003)은 개략토양도와 정밀토양도의 적용에 따른 모의결과의 오차를 연구한 바 있으며, 모델의 정확성 향상을 위해서는 정밀토양도를 사용할 것을 제안하였다. 토양의 속성자료에는 각 토양통의 정보와 해당 토양을 이루는 Layer의 수, 배수그룹 및 토심, 용적밀도, 투수계수 및 알베도 등의 정보가 포함된다. 또한, 각 토양 Layer별 토성함량 및 유기물 함량, 토양수분 함유 가능량인 AWC (Available Water Capacity) 등의 정보가 포함되어 있다. 따라서 본 연구의 토양 속성자료는 National Academy of Agricultural Science (2000)에서 제공하는 정밀 토양도 속성자료를 활용하여 입력하였다. 제공하지 않는 속성자

료는 농업과학기술원에서 제공하는 자료를 기본으로 하여 사용자지침서에서 제시하는 식을 이용하여 산정하였다.

유출모의를 위해 Fig. 5와 같이 주요 지류를 합류점을 반영하여 총 19개의 소유역으로 구분하였다. 모형의 매개변수를 보정하기 위하여 Fig. 3에 도시된 임실, 남원, 주암관측소의 1973년부터 2010년까지 38개년 강우 및 기상사상을 이용하여 유출량을 모의하였고, 공간적으로는 최상류 유역부터 순차적으로 보정을 실시하였으며, 하류 합류점에서 보정할 때는 이미 보정된 상류 유역의 매개변수를 고정하고 나머지 유역에 대하여 보정을 실시하였다. 또한, 유역의 정확한 유출량 산정을 위하여 섬진강댐과 주암댐의 일 방류량을 유량계조건(Reservoir option)으로 입력하였다(Fig. 6). Fig. 7은 섬진강수계의 기점 수위표인 송정수위관측소의 관측값과 비교하여 보정을 수행한 결과를 도시한 것이다. 일반적으로 SWAT 모델을 이용하여 유출해석을 할 때, 초기 1~2년은 시스템의 초기화와 안정화를 위해 사용하고 결과 해석에는 포함하지 않기 때문에 본 연구에서는 1973년과 1974년의 유출모의 결과를 제외하고 보정하였다. 소유역별 물 수지와 유출량 보정에 사용된 기본 주요 매개변수는 Table 1과 같다. ESCO, GW\_REVAP, REVAPMN, GWQMN, ALPHA\_BF에 대해서 매개변수 보정을 수행하였으며, 각 매개변수에 대한 민감도를 분석하였다. ESCO는 0.95에서 0.5를 감한 결과, 침투값은 낮아지고 유출 총량도 작아졌고, GW\_REVAP을 0.2에서 0.05로 감한 결과, 침투 값은 낮아지고 유출 총량도 작아지나 영향은 미미한 것으로 나타났다. REVAPMN을 1에서 0.5로 감한 결과, 유출 총량은 ESCO 변수만큼 작아졌지만 침투 값의 차이는 미미하였고 GWQMN을 0에

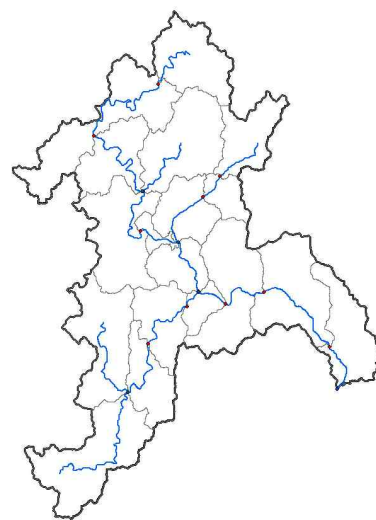


Fig. 5. Divided Basin

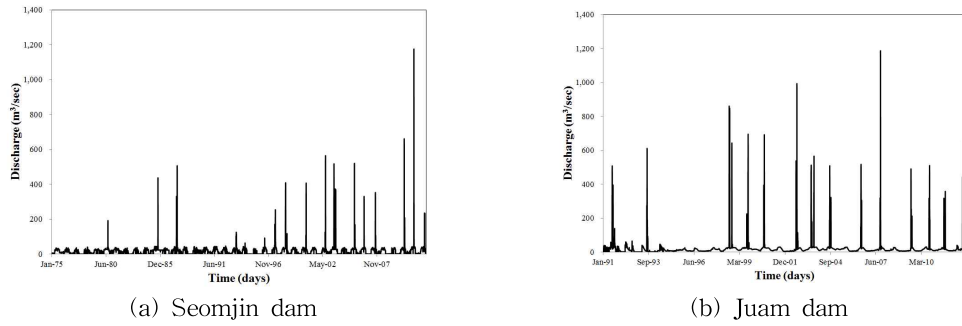


Fig. 6. Observed Release

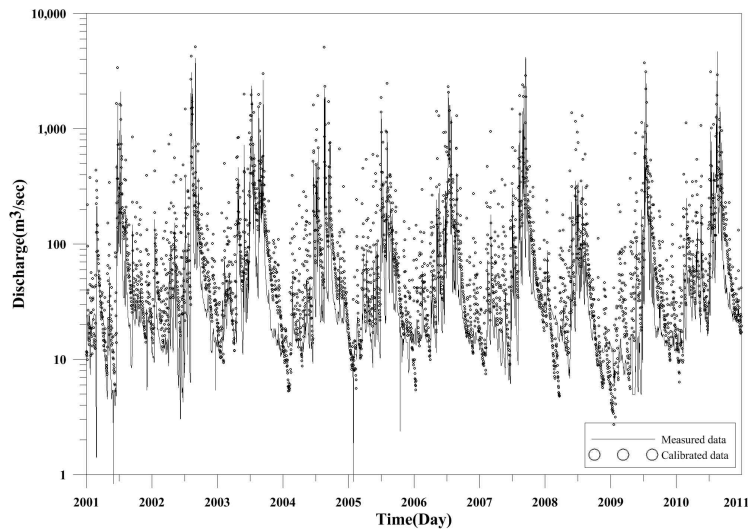


Fig. 7. Results of Calibration Parameter with Observed Flow (Songjung gauging station)

Table 1. Calibrated Value of Parameter

variable	Definition	Calibrated value
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.01
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.2
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" or percolation to the deep aquifer to occur (mm)	1
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	1

서 100으로 증가시킨 결과, 유출 총량은 ESCO 변수만큼 작아졌지만 침투 값의 차이는 미미하였다. ALPHA\_BF를 0.048에서 0.01로 감한 결과, 유출 총량과 침투값에서 큰 차이가 발생하지 않으나, 모형 효율계수가 상승하였다. 매개변수 보정 방법은 ESCO, GW\_REAP, REVAPMN, GWQMN, ALPHA\_BF 순으로 매개변수를 조정하면서 유출총량, 침투유량, 모형효율지수(NSEC), 결정계수( $R^2$ ),

RMSE를 분석하여 최적값을 선정하였다. REVAPMN과 GWQMN의 값을 조정하여 모의 하더라도 모형 유출량의 값 변화가 미미하여 Default 값을 적용하였다. 매개변수를 보정한 모형의 평가는 Eq. (1)의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 Eq. (2)의 모형효율성지수(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSEC), 결정계수를 사용하였다. NSEC는 Nash and Sutcliffe (1970)에 의해

제안되었으며, Servat and Dezetter (1991)은 연구를 통해 수문모델의 효율성 산정 지표로써 Nash의 목적함수가 가장 적합한 것을 밝힌바 있다. Margaret and Indrajeet (2010)은 SWAT 모형으로 특정 지역 및 사상에 대해 모의했을 경우, NSEC를 통해 모의 정확도를 평가할 수 있도록 가이드라인을 제시하였다. Margaret and Indrajeet (2010)은 Saline와 Illinois River를 대상으로 SWAT의 성능분석을 수행한 결과, 모형효율성지수 NSEC가 0.5보다 크면 Good, 0.75보다 크면 Signify Good, 0.85보다 크면 Very Good으로 평가하였다. Ramanarayanan et al. (1997)은 결정계수( $R^2$ )가 0.5 이상이고 모형효율성지수(NSEC)가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의한다고 제안한 바 있다. Table 2는 매개변수 보정 결과를 토대로 송정 수위표 관측값과의 오차분석을 수행한 결과이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - X_i)^2} \quad (1)$$

$$NSEC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_M)^2} \quad (2)$$

여기서,  $O_i$ 는 관측수위,  $X_i$ 는 계산수위, N은 데이터 개수,

$O_M$ 는 관측평균값이다.

2000년 1월 1일부터 2100년 12월 31일 기간 동안의 RCP8.5 남한상세 공간해상도 1km 기후변화 시나리오를 보정된 유역유출모형에 적용해서 섬진강수계 물이용을 고려한 각 주요지점의 유출량을 산정하였다. 본 연구에서는 강우와 기온의 변화만 고려하였으며, 토지이용변화 및 인구 변동에 따른 용수 수요 변동은 고려하지 않았다.

RCP8.5 시나리오에 의한 미래 강우량 및 유출량을 비교한 결과 Table 3과 같으며 연대별 유출량을 그래프로 나타내었다(Fig. 8). RCP8.5 시나리오 분석결과, 2011년에서 2055년까지 섬진강댐 유역의 경우는 2000년에서 2010년의 평균 유출량을 기준으로 2011년에서 2055년까지는 유입량이 39% 증가하고, 2056년에서 2100년까지는 49%로 지속적으로 증가하는 것으로 전망되었다. 한편 주암댐 유역은 2000년에서 2010년의 평균 유출량을 기준으로 2011년에서 2055년까지 40%, 2056년에서 2100년까지는 52%로 갈수록 증가하는 것으로 나타나는 등 전반적인 유출량의 증가경향이 예측되었다. Tables 4 and 5는 기후변화 시나리오별 월 댐 유입유출량을 분석한 것이다. 주목할 점은 우리나라의 홍수기인 7~9월의 유입량 증분 보다 10~4월의 유입량 증분이 더 크게 나타났다. 이는 전반적인 물 순환 체계의 변동을 의미하는 것으로 이전과는 다른 계절적 특

Table 2. Error Results of Calibration Parameters using SWAT

Group	RMSE	NSEC	The coefficient of determination
Total	242.12	0.526	0.5
2001	230.06	0.599	0.41
2002	333.36	0.284	0.56
2003	326.45	0.058	0.36
2004	312.34	0.690	0.33
2005	174.26	0.697	0.45
2006	180.15	0.890	0.58
2007	251.28	0.441	0.54
2008	140.32	0.836	0.55
2009	200.77	0.517	0.64
2010	260.17	0.321	0.49

Table 3. Analysis of Dam Inflow Calculated by RCP 8.5 Scenarios

Division	2000~2010		2011~2055		2056~2100	
	Rainfall (mm)	Discharge (cms)	Rainfall (mm)	Discharge (cms)	Rainfall (mm)	Discharge (cms)
Seomjin dam	1393.85	21.25	1697.40	29.62	1851.79	31.77
Juam dam	1604.01	34.88	1969.92	48.99	2163.13	53.03

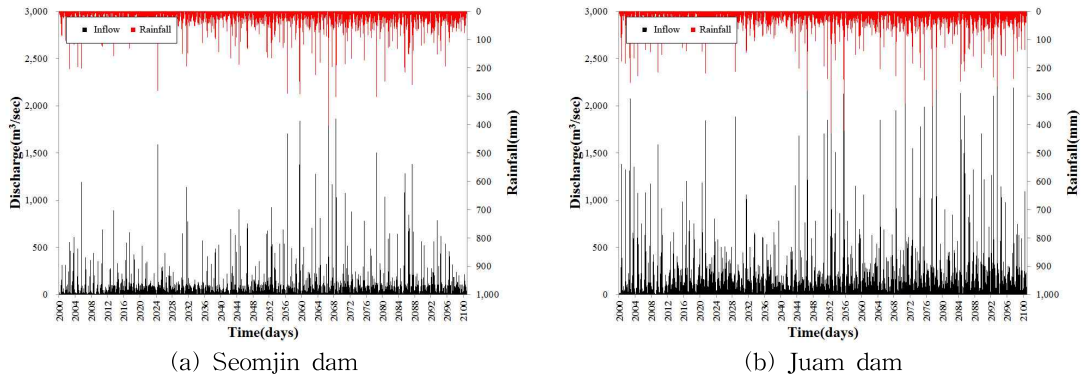


Fig. 8. Results of Dam Inflow Calculated by RCP 8.5 Scenarios using SWAT

Table 4. Analysis of Monthly Seomjin Dam Inflow (unit : cms)

Date	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000~2010	3.49	5.64	5.34	9.59	13.28	19.08	59.46	64.73	41.93	17.85	8.75	4.31
2011~2055	10.49 (2.01)	10.80 (0.91)	14.00 (1.62)	21.75 (1.27)	24.32 (0.83)	35.38 (0.85)	62.14 (0.05)	65.84 (0.02)	47.83 (0.14)	28.44 (0.59)	19.05 (1.18)	13.87 (2.22)
2056~2100	11.46 (2.29)	16.36 (1.90)	18.95 (2.55)	27.50 (1.87)	27.62 (1.08)	36.57 (0.92)	70.69 (0.19)	61.50 (-0.05)	49.26 (0.17)	28.34 (0.59)	18.35 (1.10)	13.42 (2.11)

( )는 2000~2010년 유입량 대비 증분

Table 5. Analysis of Monthly Juam Dam Inflow (unit : cms)

Date	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000~2010	5.07	10.71	11.15	18.20	29.32	42.42	98.70	92.54	65.28	23.40	12.88	6.74
2011~2055	13.68 (1.70)	16.10 (0.50)	24.90 (1.23)	39.86 (1.19)	41.70 (0.42)	62.94 (0.48)	110.0 (0.11)	105.0 (0.13)	76.01 (0.16)	44.07 (0.88)	30.14 (1.34)	20.98 (2.11)
2056~2100	16.76 (2.31)	26.58 (1.48)	33.12 (1.97)	43.57 (1.39)	44.22 (0.51)	60.02 (0.41)	129.1 (0.31)	103.0 (0.11)	83.98 (0.29)	43.70 (0.87)	29.09 (1.26)	21.04 (2.12)

성의 출현과 함께 가용수자원의 편재현상을 지적하고 있다. 따라서 보다 효율적인 수자원관리를 위해서는 지속적인 모니터링과 함께 거동특성의 변동에 대한 분석이 필요하고 또한, 이러한 경향이 미래에 현실화된다면 효율적으로 물관리를 수행할 수 있도록 필요한 시점에 효율적으로 배분할 수 있는 체계로의 전환과 저수지군의 운영에 대한 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

미래의 수문환경 자료는 여러 가지 불확실성이 내포된 자료를 바탕으로 예측된 자료이기 때문에 정확한 시기별 결과를 예측하는 것은 아니며, 본질적으로 과거의 자료를 가지고 미래를 예측하는 것은 어느 정도 한계성과 불확실성이 내포되어 있다. 수확 통계적인 기법과 몇 가지 인자만을 가지고 복잡한 현실의 세계를 분석하기 때문에 기후변화에 따른 정확한 예측은 어렵다. 하지만 차츰 기후변

화가 일어나는 것은 명확한 사실이다. 따라서 그에 따라 수문환경의 전반적인 변화에 따른 유출·영향의 평가가 필요하다라고 판단되고 향후 수자원 분배와 물자원 관리 등의 기후변화 적응전략을 수립하는데 있어 본 연구가 도움이 될 것이라고 판단된다.

### 4.3 미래 댐 방류량 산정

HEC-ResSim모형은 미공병단의 차세대 소프트웨어 개발 프로젝트(Next Generation)의 일환으로 개발된 프로그램으로 다양한 요구사항과 제약사항을 반영하여 저수지를 모의할 수 있도록 개발된 모형이다. HEC-ResSim 모형은 저수지의 홍수조절, 용수공급계획, 세부 저수지 제약사항 및 실시간 의사결정을 지원할 수 있도록 개발되었다. 이 프로그램은 여러 개의 저수지와 조절점으로 구성



된 저수지 시스템의 특성 및 문제점에 따라 부과되는 각종 구속조건하에서 용수공급, 수력발전, 주운 등의 이수목적과 홍수조절 등의 치수목적의 요구를 최대한 충족시킴으로서 수자원 활용 전반에 걸친 저수지 시스템운영을 최적화하는데 그 목적이 있다. 국외 연구로는 대표적으로 미국 Western States (2009)에서 the Western Governors Association (WGA)와 the Western States Water Council (WSWC)이 공동으로 기후변화와 관련하여 댐 운영을 통한 미래 지속가능한 용수공급과 전략 수립을 위해 연구를 수행하였고 Minville et al. (2010)은 PERIBONKA 유역을 대상으로 HEC-ResSim을 이용하여 불확실한 기후변화에 대비한 저수지 추적을 수행하여 이수, 홍수, 발전량을 종합적으로 검토하였다. Chung (2004)은 저수지 플러싱 방류에 따른 하류 수질 영향을 평가하기 위해 Koriv1-win 모형을 이용하여 플러싱 방류 사상 동안 하천의 수리 특성과 수질변화를 모의하고 실측자료와 비교하는 연구를 수행하였다. Ahn et al. (2011)은 4대강 살리기 사업으로 건설된 16개 다기능보와 기존댐의 통합운영을 위해 금강수계를 대상으로 HEC-ResSim모형을 이용하여 기존 댐과 다기능보의 연계운영에 관한 연구를 진행하였으며 다기능보의 운영률을 제안하였다. 이처럼 다양한 연구가 수행되고 있으나, 기존의 연구는 기후변화, 유출, 저수지 운영, 수질이 분리 되어 연구되었다.

섬진강수계를 대상으로 HEC-ResSim모형을 이용하여 구축한 수계 네트워크는 Fig. 9에 도시하였으며, 상세댐 제원은 Korea Water Resources Corporation (2012)에 제시되어 있는 값을 적용하였다(Table 6). 일반적으로 댐 및 저수지 운영은 각 댐과 저수지에 대한 제한조건을 만족시키고 하류 조절점에서의 유지유량을 만족시키며, 시스템을 조화롭게 유지시키기 위해 운영되어 진다. 조절방류 가능한 각 저수지의 제약조건은 저수지의 방류능 및 하류 조절점의 하도 통수능을 초과하지 않는 범위 내에서 상시 만수위를 기준으로 운영되며 과도한 용수 공급으로 인해 저수지 수위가 저수위로 저하될 경우 방류를 중단한다. 홍수량의 방류는 규정된 하도의 통수능 이내로 하고, 초과 시는 방류능의 범위 내에서 전량 방류한다. 모형에 적

용된 섬진강댐의 계획홍수위는 EL.197.7m, 상시만수위는 EL.196.5m, 저수위는 EL.175.0m이며, 주암댐의 계획홍수위는 EL.110.5 m, 상시만수위는 EL.108.5m, 저수위는 EL.85.0m이다. 섬진강댐과 주암댐은 Fig. 10에 제시된 바와 같이 생공 용수공급을 하고 있다. 섬진강의 경우에는 다른 유역인 동진강으로, 주암댐은 보성강댐과 주암(조)으로 도수되기 때문에 섬진강 유역의 유량에서 배제된다. 보성강댐으로 도수되는 유량은 득량만으로 흘러들어가게 되고 주암(조)으로 도수된 유량은 순천만으로 흘러들어가게 된다. 따라서 이를 반영하여 댐의 운영률을 적용하였

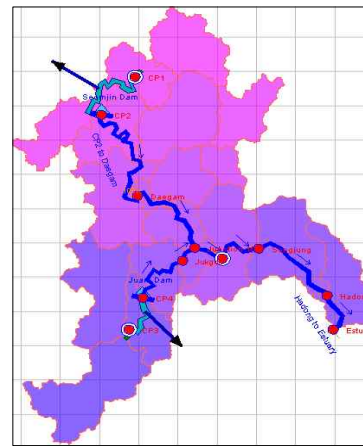


Fig. 9. HEC-ResSim

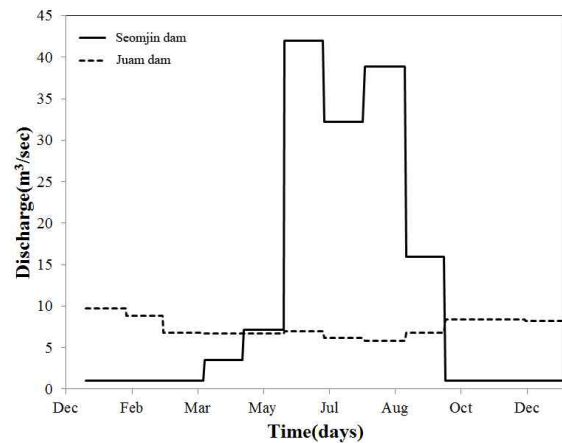


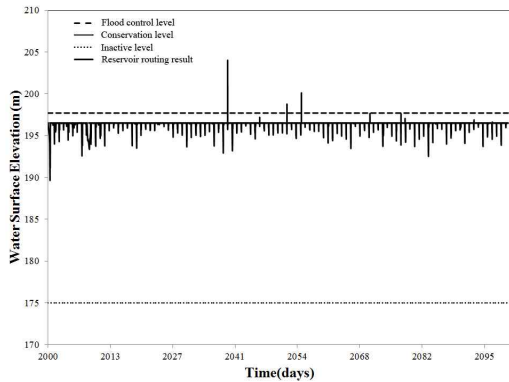
Fig. 10. Planning of Water Supply

Table 6. Specification of Dams in the Seomjin

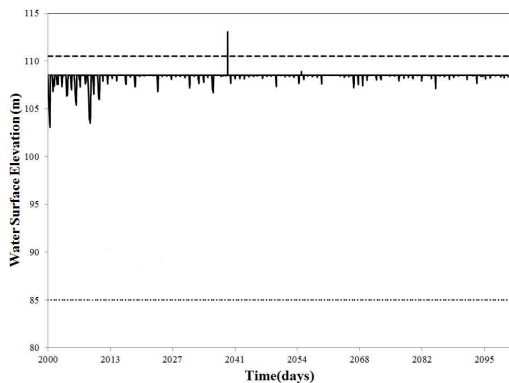
Dam	Area (km <sup>2</sup> )	Total storage capacity (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Effective storage capacity (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Flood control capacity (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Power plant capacity (10 <sup>3</sup> kw)	Annual water supply(106m <sup>3</sup> )				Dam	
						Sum	Living industry	Irrigation	Maintain	Height (m)	Length (m)
Seomjin	763.0	466.0	347.0	32.0	34.8	350.0	-	-	-	64.0	344.2
Juam	1,010.0	457.0	352.0	60.0	-	270.1	233.6	-	36.5	58.0	330.0

다. 섬진강댐과 주암댐의 운영률은 동진강과 보성강댐 및 주암(조)으로 도수하는 유량인 생공용수 공급(Fig. 10), 하류 발전방류(섬진강댐 :  $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 주암댐 :  $1.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ ), 유지유량 순서( $4.62 \text{ m}^3/\text{sec}$ )로 방류우선순위를 부여하였으며, 하류단 방류타입은 Guide Curve 운영을 통한 홍수 조절을 위해 Minimum 룰을 적용하였고 도수되는 방류타입은 Diverted Outlet Specified로 설정하였다. 또한, 섬진강과 주암댐의 연계운영을 위해 송정수위표 지점을 기준으로 Downstream Control룰을 적용하여  $4.62 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 유량이 유지되도록 하였다.

Fig. 11은 기후시나리오별 저수지 추적결과를 도시한 것이다. 현재 댐운영 제원과 댐운영방식을 토대로 분석한 결과, RCP8.5 시나리오의 경우에는 섬진강댐에서는 2039년 6월 15일, 2052 6월 20일, 2055 8월 25일에 계획홍수위를 초과하는 수위가 형성되었고, 주암댐의 경우에는 2039년 6월 15일에 계획홍수위를 초과하였다. 특히, 섬진강댐은 방류능보다 유입유량이 더 많이 발생하는 경우가 RCP8.5 시나리오에서는 9회 발생하였기 때문에 향후 댐안전을 위해서 추가적인 여수호가 필요할 것으로 사료된다.



(a) Seomjin dam



(b) Juam dam

Fig. 11. Results of Reservoir Routing

유황곡선은 하천의 어느 한 지점에서 일정한 시간 간격으로 측정된 유량의 크기와 순위백분율의 관계를 시각적으로 나타낸 것으로 수력에너지개발, 용수공급, 관계계획 및 설계, 수질관리를 위한 수문학적인 연구에 종종 사용되고 있다(Maidment, 1992). 기후변화에 따른 유입유량의 변화와 저수지의 운영률은 하천의 유황을 변화시키는 요인이다. 용수공급을 위해 다른 지역으로 물을 도수하는 것과 저수지의 유입 및 유출량을 조절하는 저수지 운영은 많은 하천환경에 영향을 미치기 때문에 유황분석을 이용하여 섬진강댐 하류에 대해 유황변동특성을 분석하였다(Fig. 12). 갈수량에 해당하는  $Q_{95\%}$ 의 분석결과, RCP8.5는  $8 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 산정되어 RCP8.5의 기후변화 시나리오에서  $1 \text{ m}^3/\text{sec}$  유지유량을 더 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 또한,  $C_{fd}$ 는 Lee et al. (1993)이 제안한 유황계수로서 유황변화의 척도를 나타내며 하상계수와 동일한 의미가 있다고 할 수 있다. 즉, 유황계수  $C_{fd}$ 가 클수록 유량의 변동이 크고, 작을수록 유량의 변동이 작아서 안정된다고 볼 수 있다.  $C_{fd}$  분석결과, RCP8.5는 70.25로 산정되어 기후변화 시나리오에서 상대적으로 유황변동이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

#### 4.4 미래 수질예측

기후변화에 따른 섬진강수계의 수질변화 추이를 분석하기 위하여 환경부 수질측정지점에서 측정된 월평균 수질자료 중 1994년 1월부터 2012년 12월까지 온도, BOD, TN, TP, 클로로필a를 수집하여 Seasonal-Kendall 기법을 이용하여 기후변화에 따른 경향성을 분석하였다(Table 7). 이 기법은 관찰치들 사이의 상관 측정치를 통해 경향성을 분석하는 비모수 통계방법이다. 각 계절에 대한 Kendall

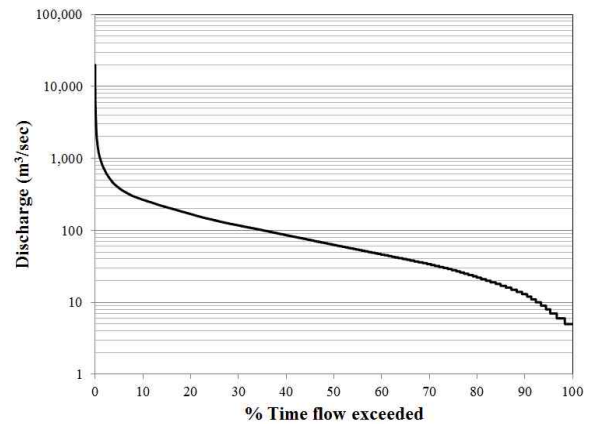


Fig. 12. Duration Curve on Songjung Gauging Station

Table 7. Results of Seasonal-Kendall Test for Reservoirs and Streams in the Seomjin Basin

Stream	Division	S	Z value	p value	Trend	Trend line equation
Seomjin dam	Temperature	-235	-2.409	0.0160	Down	$Y = 10.20 + -0.2000E-01 \times \text{Time}$
	BOD	-308	-3.337	0.0008	Down	$Y = 1.591 + -0.9091E-02 \times \text{Time}$
	TN	-105	-1.051	0.2935	-	$Y = 1.816 + -0.4892E-02 \times \text{Time}$
	TP	-286	-2.890	0.0039	Down	$Y = 0.1850E-01 + -0.2500E-03 \times \text{Time}$
	Chlorophyll-a	-574	-5.796	0.0043	Down	$Y = 6.350 + -0.2000 \times \text{Time}$
Juam dam	Temperature	-208	-2.115	0.0345	Down	$Y = 18.67 + -0.6667E-01 \times \text{Time}$
	BOD	-421	-4.286	0.0007	Down	$Y = 1.100 + -0.2000E-01 \times \text{Time}$
	TN	-119	-1.192	0.2333	-	$Y = 1.599 + -0.1443E-01 \times \text{Time}$
	TP	9	0.081	0.9355	-	$Y = 0.2150E-01 + 0.001 \times \text{Time}$
	Chlorophyll-a	-60	-1.757	0.0790	-	$Y = 2.300 + -0.1000 \times \text{Time}$
Osu	Temperature	-64	-0.643	0.5203	-	$Y = 17.00 + 0.001 \times \text{Time}$
	BOD	8	0.071	0.9431	-	$Y = 1.300 + 0.001 \times \text{Time}$
	TN	110	1.101	0.2710	-	$Y = 1.804 + 0.1313E-01 \times \text{Time}$
	TP	265	2.670	0.0076	Up	$Y = 0.3472E-01 + 0.8284E-03 \times \text{Time}$
	Chlorophyll-a	113	3.333	0.0009	Up	$Y = 1.900 + 0.2000 \times \text{Time}$
Yo	Temperature	-47	-0.473	0.6364	-	$Y = 18.00 + 0.001 \times \text{Time}$
	BOD	-246	-2.492	0.0127	Down	$Y = 1.667 + -0.1667E-01 \times \text{Time}$
	TN	86	0.859	0.3906	-	$Y = 2.598 + 0.1175E-01 \times \text{Time}$
	TP	415	4.183	0.0156	Up	$Y = 0.1005 + 0.3250E-02 \times \text{Time}$
	Chlorophyll-a	29	0.833	0.4051	-	$Y = 2.267 + 0.6667E-01 \times \text{Time}$
Gurye	Temperature	-229	-2.315	0.0206	Down	$Y = 18.65 + -0.5000E-01 \times \text{Time}$
	BOD	23	0.225	0.8222	-	$Y = 1.100 + 0.001 \times \text{Time}$
	TN	-123	-1.232	0.2179	-	$Y = 2.197 + -0.1433E-01 \times \text{Time}$
	TP	244	2.458	0.0140	Up	$Y = 0.2783E-01 + 0.6667E-03 \times \text{Time}$
	Chlorophyll-a	-12	-0.327	0.7437	-	$Y = 4.067 + -0.3333E-01 \times \text{Time}$

검정을 독립적으로 시행한 후, 각 결과들의 가중합을 구함으로써 하나의 경향 분석 결과를 도출하여 계절성을 배제하는 방법이다. 분석을 위해 USGS Seasonal-Kendall Test (Kendall.exe Code)을 사용하였다(Hesel et al., 2006). 본 프로그램은 기존의 상업용 프로그램과 동일하게 관찰값의 차이를 상대적 크기로 산정하여 증(+), 감(-), 무변화 정도를 나타내며 이에 대한 유의수준의 표준통계값( $p$ ), 기울기인 Tau( $\tau$ ) 값을 비롯하여 S(통계량), Z(표준화변수)값을 제공하고 있어 경향성과 특성을 비교하는데 매우 적절한 프로그램이다. Table 7의 5, 6열은 각각 유의수준 및 경향성을 나타낸다. 수온은 섬진강댐, 주암댐 그리고 구례에서 감소하는 경향을 보였으며, 그 이외의 지점에서는 경향이 없는 것으로 나타났다. BOD는 구례와 오수천을 제외하고 감소하는 경향을 나타냈다. TN은 모든 지점에서 경향이 없는 것으로 나타났고, 클로로필a는 섬진강에서는

감소하였으나, 오수천에는 증가하는 것으로 나타났다. TP는 섬진강댐에서는 감소하는 것으로, 오수천, 요천 그리고 구례에서는 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 TP는 조류발생 원인으로 알려져 있기 때문에 지속적으로 증가가 예상되는 TP에 대한 저감 방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Qual2E 모형을 이용하여 미래 수질을 예측할 수 있는 시스템을 개발하기 위해 섬진강댐과 주암댐을 포괄하는 섬진강수계 전체를 대상으로 선정하여 Qual2E모형을 구축하였다. 대표적인 지류로는 오수, 요천, 황천강이 합류한다(Fig. 13). 총 Reach 개수는 18개이고 Element 개수는 164개이다. 수질항목으로는 수온, BOD, COD, 조류, 질소 계열, 인 계열, DO를 고려하였다. 모형의 보정은 모의 결과의 신뢰도를 향상시키기 위하여 하천에서의 실측치를 오차가 없는 기준 수질로 가정하였다.

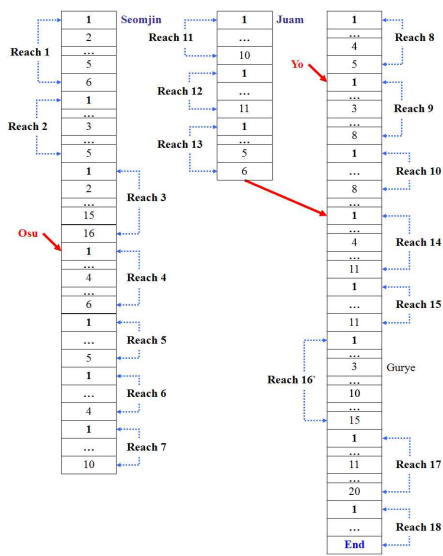


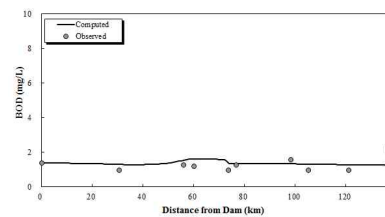
Fig. 13. Qual2E Flow Chart

이것은 수질모의 결과치에 영향을 주는 반응계수를 포함한 수질영향인자를 조정하여 자연현상과 수학적인 해석간의 차이를 최소화시키는 작업을 함으로써, 대상하천에 대한 모형의 정확도를 높이기 위한 것이다. 하천의 수질 모형의 매개변수 결정은 현장 조사를 통해서 산출하고 검토하여 적정 값을 사용하는 것이 좋지만, 본 연구에서는 실측치와 모형에 의한 계산치의 차이가 최소가 될 때 까지 반복하는 방법으로 보정을 실시하였다. 구축한 모형의 매개변수 보정을 위하여 환경부 수질관측소의 수질자료를 이용하였다. 하천에서 발생하는 수질악화 시기는 하천에서 많은 용수를 점용하게 되는 농번기이다. 삼진강 유역에서 최근에 발생한 가뭄시기는 2008년으로 나타났다. 따라서 Fig. 14와 같이 2008년 4월을 대상으로 BOD, TN, TP, 클로로필a의 수질항목에 대하여 Qual2E 모형 매개변수 보정을 실시하였다.

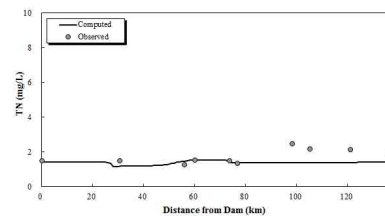
구축된 Qual2E를 포함하는 시스템은 댐 하류 유역 및 지류에서 발생하는 오염원 유출과정 해석을 위한 수문모델링과 저수지군 운영모델링간 연계, 오염부하량 산정을 통한 하천수질모델의 입력자료 자동생성, 호소 수질예측을 위한 하천모델의 유입농도 산정, 호소 모델을 통한 호소 장래 수질예측에 이르는 전 과정이 시스템 내에서 일괄처리 되도록 하였다. 시스템이 탑재한 기능은 SWAT, HEC-ResSim 모형 결과의 연동, 수질예측이다. 시스템은 SWAT모형 결과를 활용하여 각종 수문자료를 확보하고 HEC-ResSim 모델 결과를 이용한 저수지군 방류량을 활용하도록 하였으며 이를 통해 발생된 예측 유출량과 의사결정을 통해 결정된 방류량을 시스템에 연계하여 수질예

측을 수행하게 된다. 두 개의 서로 다른 목적으로 사용되는 모형을 연계하여 사용자에게 효율적인 의사결정을 위한 정보를 제공하며 편리한 수문 및 수질 모델링이 가능하도록 하였다.

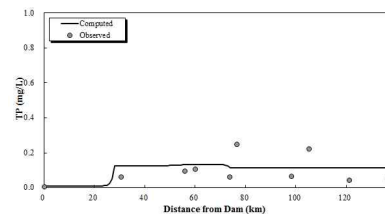
Fig. 15에 도시된 바와 같이 개발된 시스템을 이용하여 기후시나리오와 유역유출특성을 고려한 미래 수질예측을 수행하였다. RCP8.5 기후변화시나리오에 의한 4월 및 5월의 수질분석 결과는 BOD, TP, 클로로필a는 증가하는 추세로 나타났고, TN은 감소하는 것으로 예측되었다(Fig.



(a) BOD



(b) TN



(c) TP

Fig. 14. Parameter Calibration (2008. 4)

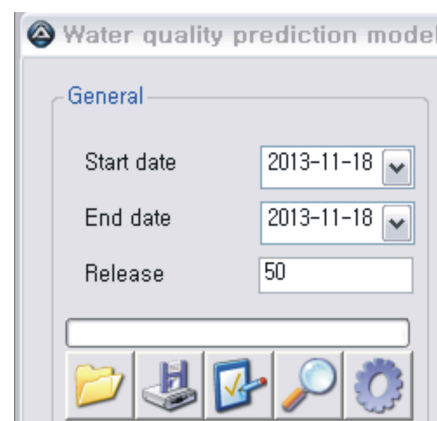


Fig. 15. Water Quality Prediction System

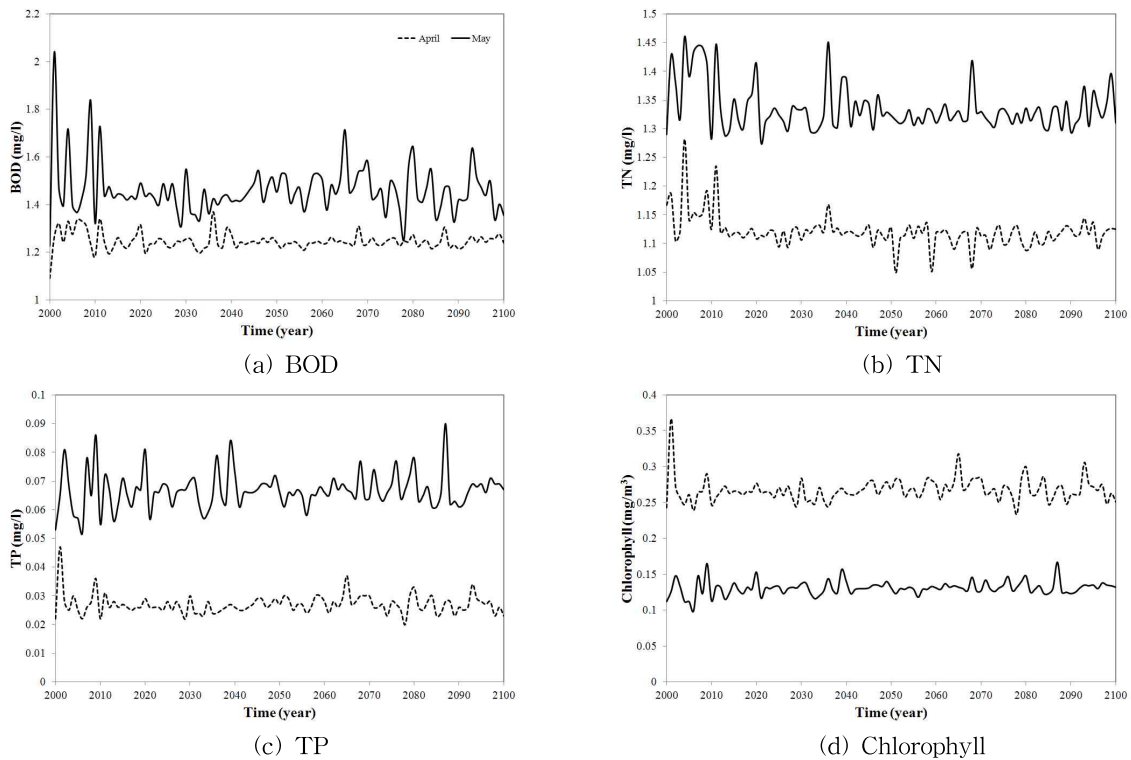


Fig. 16. Results of Water Quality Prediction During Farming Season (April~May) Caused by Climate Change

16). Seasonal-Kendall Test로 분석한 경향성 분석결과와 같은 추세의 결과가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 분석해 볼 때, 향후 기후변화 영향으로 하천의 BOD와 TP는 점진적으로 증가할 것이며, 조류에 취약해질 것으로 판단된다. 조류는 수체 내 용존산소의 농도를 떨어뜨리고 수생태계의 건강성을 크게 악화시키기 때문에 향후 각 호소나 수체에서 발생하는 조류의 생리적, 독성학적, 물리화학적 제한인자 그리고 조류발생 대책 및 관리방안 등에 관한 장기적이고 종합적인 연구가 진행되어야 할 것이며, 지속적인 모니터링 체계를 확립하여 조류관련 피해를 최소화해야 할 것이다. 더불어 갈수기에 반복되는 수질사고를 예방하기 위해서는 하천의 수량을 확보하는 것이 중요하며, 이를 위해 유역 내 물순환시스템을 최적화하여 하천의 자정능력을 향상시키고 하천의 건강성 회복을 이루어야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기상청의 기후변화정보센터에서 제공하는 RCP8.5 기후변화시나리오를 채택하였고 기후변화와 유역유출특성에 따른 미래 환경영향을 평가하였다. 온실가스 저감정책에 따라 RCP 기후변화 시나리오는 달라질

수 있기 때문에 시나리오의 채택에 따라 미래 환경영향 평가는 상이하게 나타날 수 있다.

- 1) RCP8.5 강우시나리오의 상세화 처리는 신뢰성이 높은 것으로 나타났고, RCP8.5 강우시나리오에서 예측된 유입량은 각각 점진강댐은 2011년에서 2055년까지 39%, 2056년에서 2100년까지 49%, 주암댐은 2011년에서 2055년까지 40%, 2056년에서 2100년까지 52% 증가되는 것으로 전망되었다. 주목할 점은 우리나라의 홍수기인 7~9월의 유입량 증분보다 10~4월의 유입량 증분이 더 크게 나타났다.
- 2) RCP8.5시나리오를 적용하여 HEC-ResSim을 이용한 미래 저수지 추적 결과, 점진강댐과 주암댐은 홍수위를 초과하는 수위가 발생하였기 때문에 잠정적으로 위험을 내포하고 있으며, 향후 댐 안전을 위해서 추가적인 여수호가 필요할 것으로 사료된다.
- 3) RCP8.5 기후변화시나리오로 Seasonal-Kendall Test와 Qual2E를 이용한 미래 수질예측을 수행한 결과, 기후변화 영향으로 하천의 BOD와 TP는 점진적으로 증가할 것이며, 조류에 취약해질 것으로 판단된다. 따라서 장기적이고 종합적인 연구가 진행되어 조류관련 피해를 최소화해야 할 것으로 사료된다.

## References

- Ahn, J.M., Cha, K.U. Ryoo, K.S., and Lyu, S. (2011). "Study of the lower duration curve characteristic by reservoir and weir couple-operating system in Geum River basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 4, pp. 285-293.
- Cho, H.S., Jung, K.S., and Kim, J.H. (2003). "Sensitivity analysis of GIUHmodel applied to DEM resolutions and threshold areas." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 799-810.
- Chung, E., Lee, J., and Ko, I.W. (2011). "California water plan; Integrated water management." *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 8, pp. 76-82.
- Chung, E., Lee, G., and Lee, K. (2009). "Introduction of APFM and Integrated Flood Management concept and apply." *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 8, pp.70-78.
- Chung, S.W., (2004). "Application of an unsteady river water quality model for the analysis of reservoir flushing effect on downstream water quality." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 10, pp. 857-868.
- Climate Change Information Center. (2013). www.climate.go.kr.
- Helsel, D.R., Mueller, D.K., and Slack, J.R. (2006) *Computer Program for the Kendall Family of Trend Tests*. U.S. Geological Survey, Scientific Investigation Report 2005-5275.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY. USA.
- Klipsch, J.D., and Hurst, M.B. (2007). *HEC-ResSim, Reservoir System Simulation User's manual*.
- Korea Environment Institute. (2012). *River management and ecological restoration in response to climate change*.
- Korea Meteorological Administration (2010). *Climate Change Handbook*.
- Korea Rural Economic Institute. (2011). *Response to climate change in agriculture*.
- Korea Water Resources Corporation. (2012). *Practical manual of dam*.
- K-water Institute (2010). Derived from the research for countermeasures to climate change for future water management plan.
- Lee, J.W., Kim, H.S., and Woo, H.S. (1993). "An analysis of the effect of damming on flow duration characteristics of five major rivers in Korea." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 3, pp. 79-91.
- Lee, J., Kim, Y., and Lee, K. (2009). "A study on combining climate change scenarios." 2009 Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, pp. 621-626.
- Maidment, D.R. (1992). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, pp. 18.53-18.54.
- Margaret W. Gitau and Indrajeet Chaubey. (2010). "Regionalization of SWAT Model Parameters for Use in Ungauged Watersheds." *Journal of Water*, Vol. 2, pp. 849-871.
- Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R. (2010). "Impacts and Uncertainty of Climate Change on Water Resource Management of the Peribonka River System (CANADA)." *J of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 136, No. 3, pp. 376-385, 2010.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2007). *Development study report for assessment techniques on over the flood*. Inha University.
- Ministry of Science and Technology. (2007). The 21st century frontier R&D program; Sustainable water resources research program; Technology for climate change impact assessment on water resources.
- National Institute of Environmental Research. (2008). Plans prepared for the climate change a white paper and basic research.
- National Institute of Environmental Research. (2010). Integrated impact assessment of climate change on watershed environment.
- National Academy of Agricultural Science. (2000). Taxonomical classification of Korean soils.

Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual model; Part 1-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 398-409.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., and Williams, J.R. (2002). Soil and Water Assessment Tool, SWAT: User's Manual-version 2000, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas.

Ramanarayanan, T.S., Williams, J.R., Dugas, W.A., Heuck, L.M., and McFarland, A.M.S. (1997). Using APEC to

identify alternative practiced for animal waste management. Minnea-polis, MN. ASAE Paper No. 97-2209.

Servat, E., and Dezetter, A. (1991). "Selection of calibration objective functions in the context of rainfallrunoff modeling in a Sudanese savannah area." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 307-330.

Western States. (2009). *Climate Change and Reservoir Rule Curves*.

논문번호: 13-092	접수: 2013.11.19
수정일자: 2014.01.02/02.05	심사완료: 2014.02.05