韓國水資源學會論文集
第48卷 第3號·2015年 3月
pp. 185~196

J. Korea Water Resour. Assoc.
Vol. 48, No. 3:185-196, March 2015
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.3.185
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

기후변화에 따른 황룡강 유역의 오염부하 유출량 변화 분석

Nn Evaluation of Climate Change Effects on Pollution Loads of the Hwangryong River Watershed in Korea

박 민 혜* / 조 홍 래** / 구 본 경***

Park, Min Hye / Cho, Hong-Lae / Koo, Bhon Kyoung

Abstract

A conceptual watershed model HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) was applied to the Hwangryong river watershed to evaluate climate change effects on pollution loads of the river. For modeling purposes, the Hwangryong river watershed was divided into 7 sub-watersheds. The model was calibrated and validated for the river discharges against the data observed in 2011 at several monitoring stations. The RCP scenarios were set up for the model simulations after being corrected by change factor method. The simulation results of the RCP 4.5 scenario indicate that the annual river discharge and concentrations of BOD, TN, TP of the Hwangryong river will continually increase during the second-half of the 21st century. As for the RCP 8.5 scenario, the simulations results imply that the pollution loads will increase during the middle of the 21st century reflecting the pattern of precipitation. Monthly distributions of the pollution loads for the RCP 4.5 and the RCP 8.5 scenarios show it will increase the most in September and February, respectively.

Keywords : watershed model HSPF, Hwangryong river watershed, pollution loads, climate change, RCP scenarios

요 지

본 연구에서는 황룡강 유역에 유역모델 HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran)를 적용하여 기후변화에 따른 오염부하 유출 변화량을 분석하였다. 황룡강 유역을 7개 소유역으로 분할하고 2011년에 관측된 유량, SS, BOD, TN, TP 농도자료를 이용하여 모델 보정 및 검정을 실시하였다. 기후변화에 따른 황룡강 유역의 환경변화를 예측하기 위해 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 이용하였으며, 과거 기간 동안의 강우와 기온에 대한 모의치와 관측치간 월별 평균을 비교하여 미래 기상 자료에 대한 편의 보정을 수행하였다. 기후변화 시나리오의 기상 자료 분석 결과, 21세기 전반기와 비교하여 중, 후반기에 상대적으로 많은 연강수량과 연평균기온을 보이는 것으로 분석되었다. 기후변화에 따른 황룡강 유역에서의 오염물질 유출량 분석 결과, RCP 4.5 시나리오에서는 2020년대 대비 2080년대에 평균 연간 강우, BOD, TN, TP 유출량이 각각 47%, 24%, 21%, 27% 증가율을 보여 21세기 후반기로 갈수록 연간 오염부하 유출량이 전반적으로 증가하는 것으로 분석되었다. RCP 8.5 시나리오에서는 2020년대 대비 2050년대에 평균 연간 강우, BOD, TN, TP 유출량이 각각 34%, 20%, 20%, 21% 증가율을 보이며 21세기 중반기에 연간 오염부하 유출량이 상대적으로 가장 많이 증가할 것으로 분석되었다. 이는 연강수량 변화와 동일한 패턴의 변화로서 기후변화에 따른 강우량 변화가 오염물질 유출량에 그대로 반영된 결과를 보여준다. 한편, 월별 오염물질 유출량은 RCP 4.5에서는 9월에, RCP 8.5에서는 2월에 상대적으로 크게 증가할 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 유역모델 HSPF, 황룡강 유역, 오염부하, 기후변화, RCP 시나리오

* (주)하이드로코어 책임연구원 (e-mail: mhpark@hydrocore.co.kr)
Senior Research scientist, HydroCore Ltd, 1104 Byuksan Digital Valley 6, Gasan, Gumcheon, Seoul, Korea
** 교신저자, (주)하이드로코어 이사 (e-mail: hlcho@hydrocore.co.kr, Tel: 82-2-2627-3575)
Corresponding Author, Director, HydroCore Ltd. 1104 Byuksan Digital Valley 6, Gasan, Gumcheon, Seoul, Korea
*** (주)하이드로코어 대표이사 (e-mail: bkkoo@hydrocore.co.kr)
CEO, HydroCore Ltd. 1104 Byuksan Digital Valley 6, Gasan, Gumcheon, Seoul, Korea

1. 서 론

최근 인간 활동에 따른 대기 중 온실 가스 농도의 증가로 인해 기후가 변화하고 있으며, 이러한 기후변화는 자연생태계와 인간, 사회, 경제 활동에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 인류가 대응해야 할 중요한 과제 중 하나로 자리 매김하고 있다(NIMR, 2012). 지난 100년(1911~2010년) 동안 전 지구의 평균기온은 0.75℃ 상승하였으며, 기후변화로 인하여 집중호우, 폭염, 가뭄 등 이상기후의 발생 빈도 및 강도가 전 지구적으로 증가하고 있다(KMA, 2012). 우리나라도 지난 1912~2010년 동안 기온이 0.18 ℃/10 year의 속도로 상승하였으며, 강수량은 21 mm/10 year의 비율로 증가하였다. 그리고 21세기 말에는 세계 평균 기온이 1.1~6.4℃ 상승할 것으로 전망되고 있다(NIMR, 2012).

이러한 온실 가스 농도 증가로 인한 기온의 상승과 강수량의 패턴 변화는 유역에서의 유출량과 비점오염원에 의한 오염물질 거동의 시공간적 변화를 초래하며, 결과적으로 하천의 수질과 생태계에 영향을 미치게 된다. 따라서 이에 대한 대응으로 기후변화에 따른 환경변화 예측 필요성이 대두되고 있다. 기후변화에 따른 환경변화 예측 방법은 크게 과거 관측 자료를 이용하여 변화의 경향을 분석하는 방법, 기후모델을 이용하여 예측하는 방법, 기후모델과 결정론적 수문모델을 이용하여 예측하는 방법으로 구분할 수 있다. 이 중 관측 자료를 이용하는 방법은 불확실성이 큰 미래 기후변화에 대한 영향을 분석하기에는 한계가 있으며, 기후모델을 이용하는 방법은 지역차원의 복잡한 수자원 변동성을 분석하기에는 한계가 있다. 따라서 각각의 방법이 가지는 장점에도 불구하고 대부분의 연구에서는 기후모델에서 생산되는 기후자료를 수문모델에 입력하여 수자원의 영향을 예측하는 방법을 사용하고 있다(Bae and Jung, 2005).

미래 기후자료를 유역모델에 적용한 연구사례는 다수 보고되고 있다. Javan et al. (2013)은 이란의 북서부에 위치한 Gharehsoo 강 유역을 대상으로 PRECIS 지역기후모델에서 생산한 B2 기후변화 시나리오를 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 모델에 적용하여 유출량 변화 양상을 파악하였다. 2071~2100년에는 모든 계절에서 Gharehsoo 강 유역에서의 강우 유출량이 감소하는 것으로 분석되었으며, 기온 증가로 인한 융설로 인해 첨두 유량이 1개월 정도 예상보다 일찍 발생하는 것으로 분석되었다. Booth et al. (2005)은 캐나다에 위치한 Duffins Creek 유역에 AGNPS 모델을 적용하여 기후변화에 따른 수질 변화를 예측하였다. CGCM1과 HadCM2 기후모델에 의한 시나리오와 2020년까지의 도시지역의 확장을 반영한 토지이용 변화 시나리오를 비교하였으며, 기후변화가 하천 수질에 미치는 영향이 도시개발에 의한 영향보다 크다고 보고하였다. 국내에서는 No et al. (2013), Lee et al. (2012), Shon et al. (2010)이 각각 금강 유역, 남강댐 유역, 낙동강 유역에 SWAT 모델을, Ahn et al. (2009) 경안천 유역에 SLURP 모형을 적용하여 기후변화에 따른 유출량 변화를 예측하였다. 금강 유역에서는 RCP 4.5와 8.5 시나리오 하에서 각각 평균 47.76%, 36.52% 가량 유출증가가 일어날 것으로 예측되었으며, 특히 가을철과 겨울철 증가율이 높은 것으로 분석되었다. 남강댐 유역에서는 현재를 기준으로 여름과 겨울철 증가가 두드러지며, 홍수기 최대 63%까지 댐 유입량이 증가되는 것으로 분석되었다. 낙동강 유역에는 전 지구기후모델인 CSMK과 CT47의 A2, B1, A1B 시나리오를 적용하였으며, 전체 시나리오에서 유량이 현재보다 증가하는 것으로 분석되었다. 경안천 유역에는 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM 모델의 A2, B1, A1B 시나리오를 적용하였으며, MIROC3.2 hires은 A1B (2080년대) 시나리오에서 연 유출량이 21.4% 증가하며, ECHAM5-OM은 A1B (2050년대) 시나리오에서 8.9% 증가하는 것으로 분석되었다. 증발산량은 MIROC3.2 hires와 ECHAM5-OM 각각 3%와 16% 증가한 것으로 분석되었다. 한편, Park et al. (2009)과 Choi et al. (2009)은 각각 충주댐과 병성천 유역에 SWAT 모델을 적용하여 기후변화가 하천수질에 미치는 영향을 평가하였다. 충주댐 유역에 ECHAM5-OM 모델의 A2, B1, A1B 시나리오를 적용하였으며, 기후변화에 의해 유사와 TP는 전반적으로 감소하는 것으로 분석되었다. TN은 우기 시에는 20%내외의 증가와 감소를, 건기 시에는 2020년대를 제외하고는 전반적으로 증가하는 것으로 분석되었다. 병성천 유역에는 CGCM 3.1 T63의 A2 시나리오를 적용하였으며, 미래기후조건에서 유량과 SS는 강수량의 연중 변동과 동조하였으나 TN은 강수량이 늘어난 2051~2060년 기간에 오히려 13% 감소한 것으로 분석되었다.

한편, 영산강 말단에 위치한 영산호의 수질악화 문제가 지속적으로 대두되고 있다. 영산강의 말단에는 1981년 준공된 하구둑에 의해 조성된 영산호가 위치하고 있으며, 영산호는 하구둑 완공 이후 강에서 해역으로의 물의 흐름이 차단되어 부영양화 및 수질오염 수준이 심각한 상태이다. 따라서 수질개선과 동시에 향후 발생 할 수 있는 기후변화에 따른 수량, 수질, 생태계 변화 등을 고려한 종합적인 관리대책 마련이 시급히 요구되는 상황이다. 영산강과 같은 대규모 유역의 하류 수질은 상류의 크고 작은 지류

의 영향을 많이 받는다. 따라서 본 연구에서는 영산강유역 면적의 약 16%를 차지하며, 영산호로 유입하는 오염물질 부하량에 상당한 영향을 미치는 황룡강 유역을 대상으로 유역모델 HSPF를 적용하여 기후변화에 따른 유출과 수질 변화를 예측하였다. HSPF는 유역 내에서 발생하는 수문, 수질과정을 시간별로 장기간에 걸쳐 모의할 수 있는 준분포형, 개념적 유역모델로 국내외 다양한 연구지역에 광범위하게 적용되어 왔다. HSPF는 유역관리를 위한 환경 분석 시스템인 BASINS (Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Source Pollution)와 연계되어 운영되며, BASINS를 통해 모델 구동에 필요한 공간자료의 분석시간을 줄이고, 다양한 정보를 쉽게 확보할 수 있다. HSPF를 이용한 본 연구의 결과는 향후 영산강유역에서의 기후변화에 따른 환경변화에 대응할 수 있는 종합적이고 체계적인 관리대책 마련을 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상지역

영산강의 제1지류인 황룡강은 유로연장 58.6 km의 국가하천으로 영산강유역에서 두 번째로 큰 지류이다(Fig 1). 황룡강의 유역면적은 564.3 km^2, 유역의 평균 폭은 9.6 km이며, 유출특성을 대변하는 지표인 형상계수는 0.164, 유역의 평균고도는 EL.175.4 m이다(MLTM, 2009). 황룡강은 장성군 북하면 용흥리에 위치한 병풍산에서 발원하여 북쪽으로 유하하다 장성댐 수몰지 상류부에서 유향을 180° 급선회하여 장성댐을 지나 남쪽으로 유하하며 장성읍에서 우안쪽으로 개천이 합류한다. 개천 합류 후 장성읍을 관류한 뒤 계속 남쪽으로 유하하여 황룡강 직할하천 시점부 직상에서 우안측으로 평림천이 유입되며 남동류하여 영산강 우안측 광주광역시 광산구 송대동에서 영산강 본류에 합류된다(MOCT, 1998).

황룡강 상류에 위치한 장성댐은 「영산강유역 농업종합개발사업 Ⅰ단계 사업('71～'79)」의 일환으로 70년대 중반에 건설되었으며, 만수면적 6.87 km^2, 총 저수용량 8,970만 m^3, 유효저수용량 8,480만 m^3이며, 유역면적은 122.8 km^2으로 농업용 저수지임에도 불구하고 제당높이, 저수용량 기준으로 대규모댐에 해당되는 큰 규모를 가진다(MLTM, 2009).

2.2 입력자료 분석 및 모델구축

HSPF는 미국 환경청(USEPA)에서 개발한 유역모델로서 투수층(PERLND), 불투수층(IMPLND), 하천(RCHRES)의 3가지 주요 응용모듈로 구성된다. PERLND과 IMPLND 모듈은 각각 유역 내 투수 지역과 불투수 지역에서 발생하는 주요 수문 현상과 수질을 모의하며, RCHRES 모듈은 하도구간이나 호소에서의 수문, 유사이동, 수질 기작을

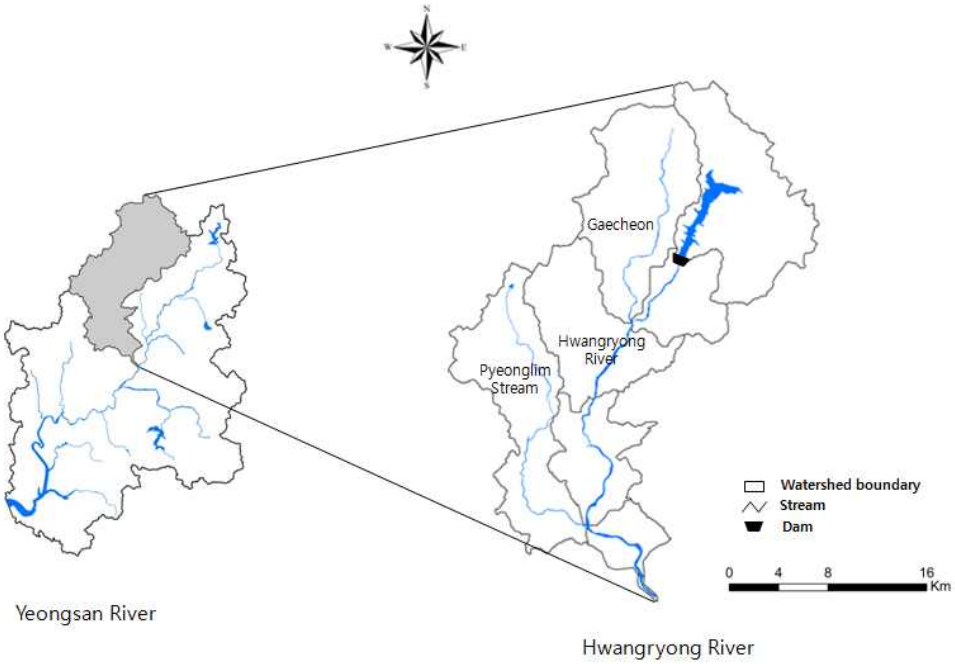


Fig. 1. Stream Networks of the Hwangryong River and the Sub-watershed Boundaries

모의한다. 각 모듈의 주요 기능과 구조에 대한 구체적인 내용은 Bicknell et al. (2001)에 상세히 기술되어 있다.

HSPF 모델 구동을 위한 주요 공간입력 파일은 BASINS의 GIS 기능을 이용하여 구축하며, 기상자료를 포함한 시계열 자료는 USEPA에서 개발된 자료관리 프로그램 WDM (Watershed Data Management)을 이용하여 구축한다. 공간자료는 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도, 토성 등을 포함하며, 기상자료는 강수량, 온도, 풍속, 증발량, 일사량, 이슬점 온도, 운량 등을 포함한다. 본 연구를 위한 DEM은 환경부에서 제공하는 30 m 해상도 자료를 이용하였으며, 토지이용도는 2009년에 제작된 환경부 중분류 토지 피복도를 대분류 항목으로 재구성하여 이용하였다. 단, 농업지역은 재배환경에 따라 강우유출현상이 다를 것으로 예상하여 논과 밭으로 세분화하였다. 토성자료는 국립농업과학원에서 제공하는 개략토양도를 이용하였다.

기상자료는 기상청에서 운영 중인 광주지방기상청에서 2011년 1년간 1시간 단위로 관측된 기상 자료를 이용하였다. 강우자료는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 삼서, 장성댐 2개 관측소와 기상청에서 운영 중인 자동기상관측소(AWS, Automatic Weather Station)에서 제공하는 광산, 장성 2개 관측소에서 관측된 2011년 1년간 1시간 단위 자료를 이용하였다. 점오염원 자료는 환경부에서 제공하는 2010년 동리별 배출유량 및 BOD, TN, TP 배출부하량을 수집하여 소유역별로 재산정 후 모델 내 입력하였다. 일반적으로 1년 사이에 토지이용 및 인구가 크게 변동되지 않기 때문에 2010년과 2011년의 점오염원 배출부하량이 동일하다는 가정 하에, 2010년을 기준으로 분석된 점오염원 자료를 모델에 입력하였다. 또한, 황룡강 유역 상류에 위치한 장성댐의 2011년 일단위 하천유지용수량, 방류량 자료를 한국농어촌공사로부터 수집하여 모델 내 반영하였다. 모델 보검정을 위한 유량자료는 WAMIS에서 제공하는 선암 관측지점에서의 2011년 기간에 대한 일단위 관측 자료와 환경부 총량측정지점인 황룡A 관측지점에서의 평균 8일에 1회 관측하는 자료를 이용하였다. 수질자료는 물환경정보시스템에서 제공하는 환경부 수질측정지점인 황룡강 3-1에서 월 1회 제공하는 관측 자료와 총량측정지점 황룡A에서 평균 8일에 1회 관측하는 자료를 이용하였으며, 황룡강 유역을 표준유역도와 단위유역경계를 고려하여 총 7개의 소유역으로 구성하였다(Fig. 2).

2.3 기후변화 시나리오 구축

기후변화에 따른 황룡강 유역의 환경변화를 예측하기

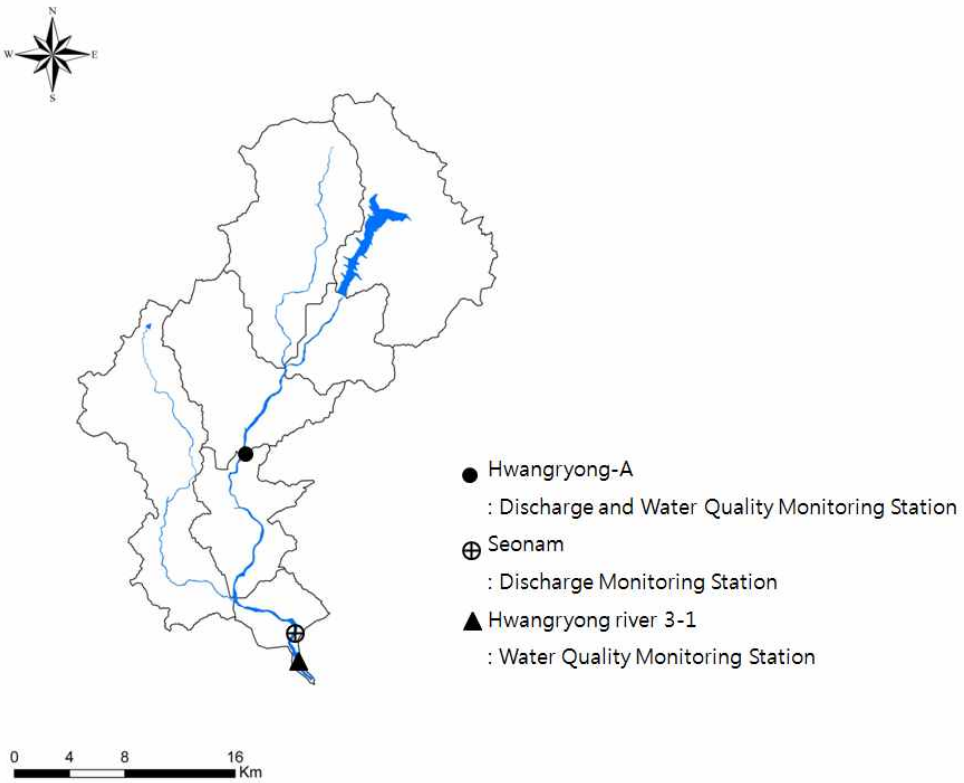


Fig. 2. Locations of the Stream Water Quality Monitoring Stations within the Hwangryong River Watershed

위해 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP) 시나리오를 이용하였다. RCP 시나리오는 IPCC 5차 기후변화 평가 보고서 작성을 위해 선정된 국제적인 온실가스 시나리오로서 국립기상연구소는 영국 기상청 해들리센터와 협력하여 RCP 4종(2.6/4.5/6.0/8.5)에 대한 기후변화 시나리오를 생산하였다. 기후변화 시나리오는 135 km 해상도의 전지구 기후변화 시나리오, 12.5 km 해상도의 한반도 기후변화 시나리오, 1 km 해상도의 남한 상세 기후변화 시나리오 순으로 산출되었으며, 전지구 기후변화 시나리오와 한반도 기후변화 시나리오를 산출하기 위해 각각 HadGEM2-AO, HadGEM3-RA 모델이 이용되었다. 본 연구에서는 국립기상연구소에서 제공하는 12.5 km 해상도의 한반도 지역 기후변화 시나리오를 이용하였으며, 4종의 시나리오 중 온실가스 저감 정책이 크게 상이한 상황인 RCP 4.5와 8.5 시나리오 자료를 이용하였다. RCP 시나리오는 온실가스 농도 산출과정에 기후변화 대응정책과 연계한 사회 경제적 가정을 적용하였으며, RCP 4.5 시나리오는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우, RCP 8.5 시나리오는 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 가정한다. 본 연구에서는 미래 환경변화 예측 시 기후변화에 의한 영향만을 고려하기 위해 기상자료를 제외한 인구, 토지이용, 식생 등의 변화요인은 현재시점으로 고정하여 모델을 구축하였다. 기준년도에 대한 모델 보정과 검정 시에는 농경지 비료 투입량을 고려하였으나, 기후변화 시나리오 평가 시에는 비료 투입에 따른 토양 내 축적 등의 영향을 배제하기 위해 비료 투입량을 제외하여 모델을 구축하였다.

한편, 기후변화 시나리오를 유역모델에 적용하기 위해서는 모의치와 관측치 간 나타나는 차이를 줄임으로써 미래 기후자료에 대한 불확실성을 최소화 하여야 한다. 편의보정 방법에는 관측치와 모의치의 차이를 2차 함수 선형회귀식으로 산정하여 모의치에 적용하는 기법, 월별 평균 및 표준 편차를 비교하여 보정하는 Chang factor 기법, 추계학적 일기발생기를 사용하는 Weather generator 기법, 관측치와 모의치의 누적확률분포를 이용하여 보정하는 분위사상법(Quantile Mapping) 기법 등이 있다(Park et al., 2012). 본 연구에서는 모의치와 관측치간 월별 평균을 비교하여 편의 보정을 수행하였으며, 이러한 Change factor 기법은 기존의 지역기후모델(Regional Climate model; RCM)에서 도출된 기후특성을 그대로 반영하기 때문에 불확실성이 적은 장점이 있다.

편의보정은 강우와 기온을 대상으로 수행하였다. 미래의 강우량은 과거 30년(1976~2005년) 동안 광주지방기상청에서 관측된 강우 자료와 HadGEM3-RA 모델에서 모의된 동일 기간에 대한 강우 자료를 분석하여 Alcamo et al. (1997)이 제시한 아래 Eq. (1a)를 이용하여 보정하였다.

$$P'_{RCM,fut} = P_{RCM,fut} \times P_{CF} \tag{1a}$$

$$P_{CF} = \frac{\overline{P_{OBS,his}}}{\overline{P_{RCM,his}}} \tag{1b}$$

여기서, $P'_{RCM,fut}$는 보정된 미래의 강우량, $P_{RCM,fut}$는 RCM에서 모의된 미래 강우량, P_{CF}는 강우의 월별 보정계수를 나타낸다. 이때, P_{CF}는 Eq. (1b)로 계산되며, $\overline{P_{OBS,his}}$는 과거 30년 동안 광주지방기상청에서 관측된 강우량의 월평균, $\overline{P_{RCM,his}}$는 과거 30년 동안 RCM에서 모의된 강우량의 월평균 값을 의미한다.

미래의 기온은 과거 25년(1981~2005년) 동안 광주지방기상청에서 관측된 기온 자료와 HadGEM3-RA 모델에서 모의된 동일 기간에 대한 기온 자료를 분석하여 Alcamo et al. (1997)이 제시한 아래 Eq. (2a)를 이용하여 보정하였다.

$$T'_{RCM,fut} = T_{RCM,fut} + T_{CF} \tag{2a}$$

$$T_{CF} = \overline{T_{OBS,his}} - \overline{T_{RCM,his}} \tag{2b}$$

여기서, $T'_{RCM,fut}$는 보정된 미래의 기온, $T_{RCM,fut}$는 RCM에서 모의된 미래 기온, T_{CF}는 기온의 월별 보정계수를 나타낸다. 이때, T_{CF}는 Eq. (2b)로 계산되며, $\overline{T_{OBS,his}}$는 과거 25년 동안 광주지방기상청에서 관측된 기온의 월평균, $\overline{T_{RCM,his}}$는 과거 25년 동안 RCM에서 모의된 기온의 월평균 값을 의미한다.

기후변화 시나리오 편의 보정을 위해 산정한 강우 보정계수는 월별로 0.6~2.1의 범위를, 기온 보정계수는 월별로 0.9~2.8의 범위를 보인다(Fig. 3). 과거 기간에 대한 모의 값의 편의보정 전과 후를 비교해 보면, 보정 전에는 모의치와 관측치 간 차이가 크게 나타난 반면, 월별 보정계수를 적용하여 보정한 후에는 모의치가 관측치를 합리적으로 재현하는 것으로 나타났다(Fig. 4 and 5).

3. 연구 결과

3.1 모델 보정 및 검정

황룡강 유역에서 관측된 유량과 수질 자료를 이용하여

모델을 보정하고 검정하였다. 보정은 유량, SS, BOD, TN, TP 농도의 순서로 수행하였으며, 보정 방법으로는 시행착오법을 사용하였다. 유량 보검정의 정확성은 결정계수 R^2 (Coefficient of determination)와 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient; Nash and Sutcliffe, 1970)를 사용하여 평가하였다. NSE는 $-\infty$ 와 1사이의 값을, R^2 값은 0~1사이의 값을 갖는다. SS, BOD, TN, TP 농도는 환경부 일반측정지점에서는 월 1회, 총량측정지점에서는 평균 8일에 1회 간격으로 관측하기 때문에 강우 시 나타나는 피크 값을 재현하는데 한계가 있다. 따라서 유량과 달리 정량적 평가보다는 전체적인 경향성을 재현하는 것에 초점을 두고 보정을 수행하였다. 모의기간은 2011년으로 설정하였으며 보정은 1월 1일부터 7월 31일 까지, 검정은 8월 1일부터 12월 31일까지의 기간을 대상으로 하였다.

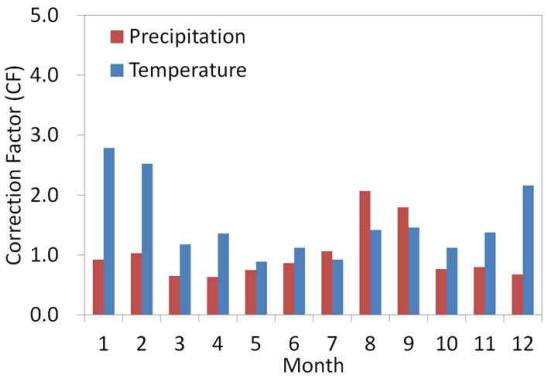
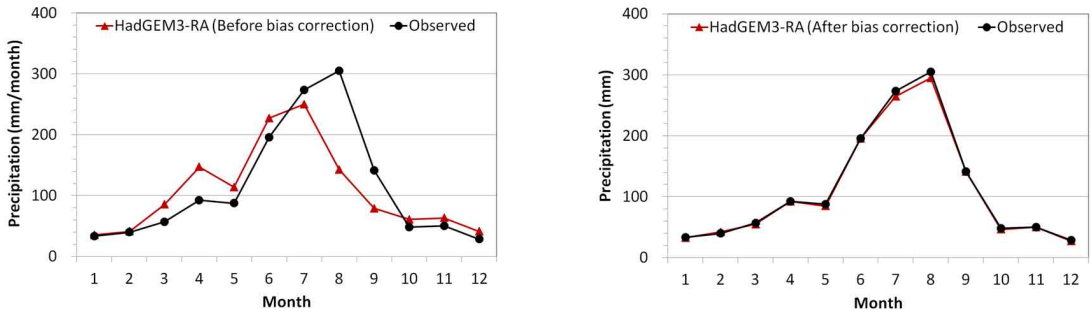


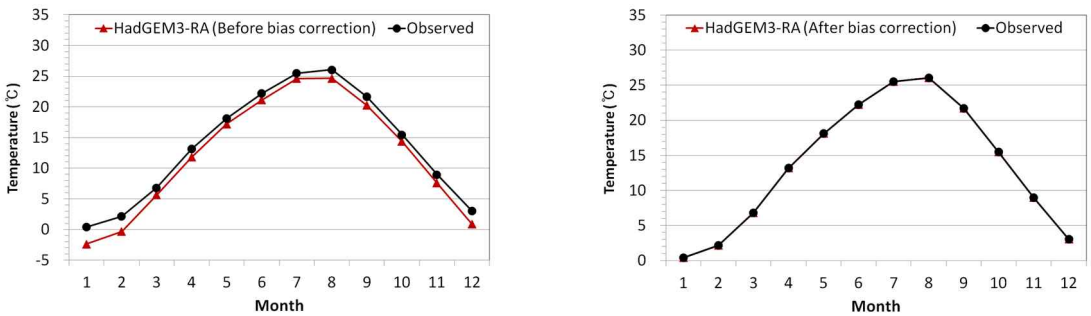
Fig. 3. Monthly Correction Factor (CF) for Precipitation and Temperature

모델 보정을 위해 유량 및 농도에 상대적으로 민감하게 반응하는 매개변수를 HSPF 사용자 매뉴얼(Bicknell et al., 2001)에서 제시하는 값의 범위 내에서 수정하였다. 유량 보정은 LZSN, INFILT, AGWRC, UZSN, DEEPFR, INTFW, IRC 등의 매개변수를 조절하여 수행하였으며, 모의기간 동안 전반적으로 모의유량이 관측유량에 대한 기저유량 크기와 첨두유량의 크기 및 시간을 합리적으로 재현하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 유역의 말단에 위치한 선암 관측지점에서 관측된 실측 유량과 모의 유량의 R^2는 보정과 검정 기간 각각 0.97, 0.95의 값을 보여주었으며, NSE 지수는 각각 0.95, 0.82의 값을 보여주었다. 총량관측지점인 황룡A 지점에서 관측된 실측유량과 모의 유량의 R^2는 보정과 검정 기간 각각 0.99, 0.98의 값을 보여주었으



(a) Before bias correction (b) After bias correction

Fig. 4. Comparison of Monthly Precipitation before and after Bias Correction of Historical HadGEM3-RA (1976-2005)



(a) Before bias correction (b) After bias correction

Fig. 5. Comparison of Monthly Temperature before and after Bias Correction of Historical HadGEM3-RA (1981-2005)

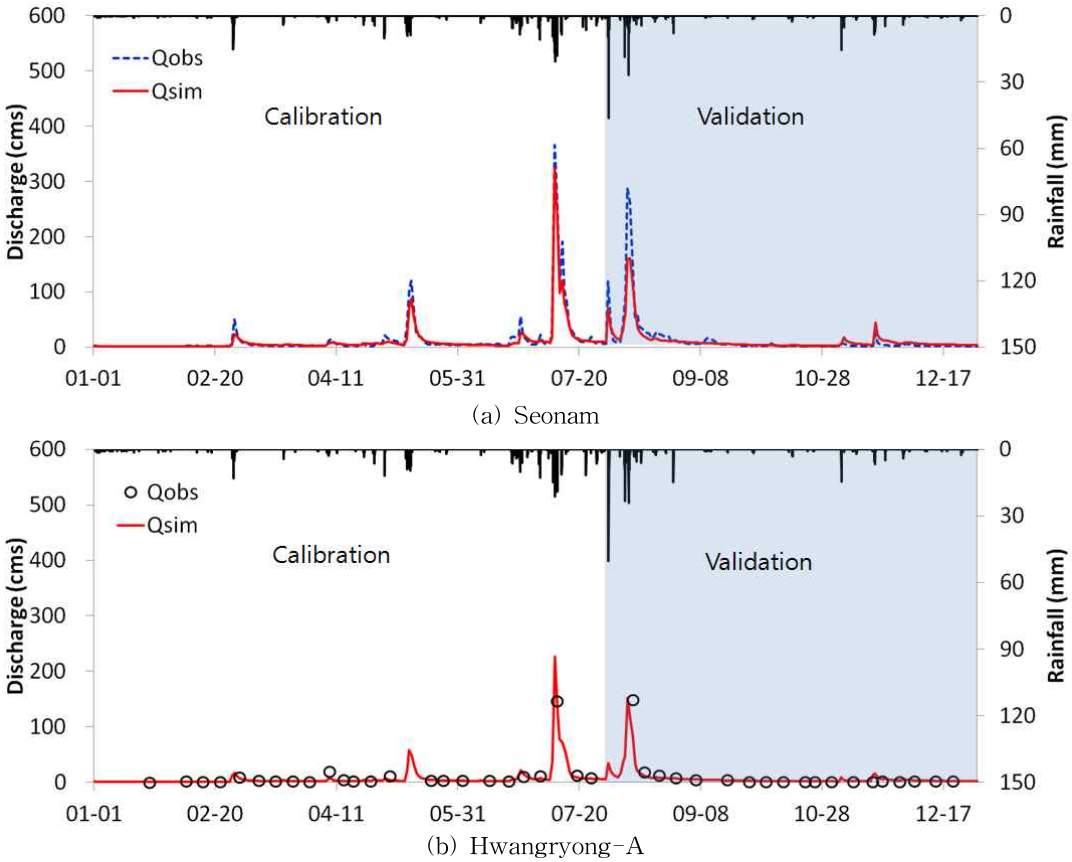


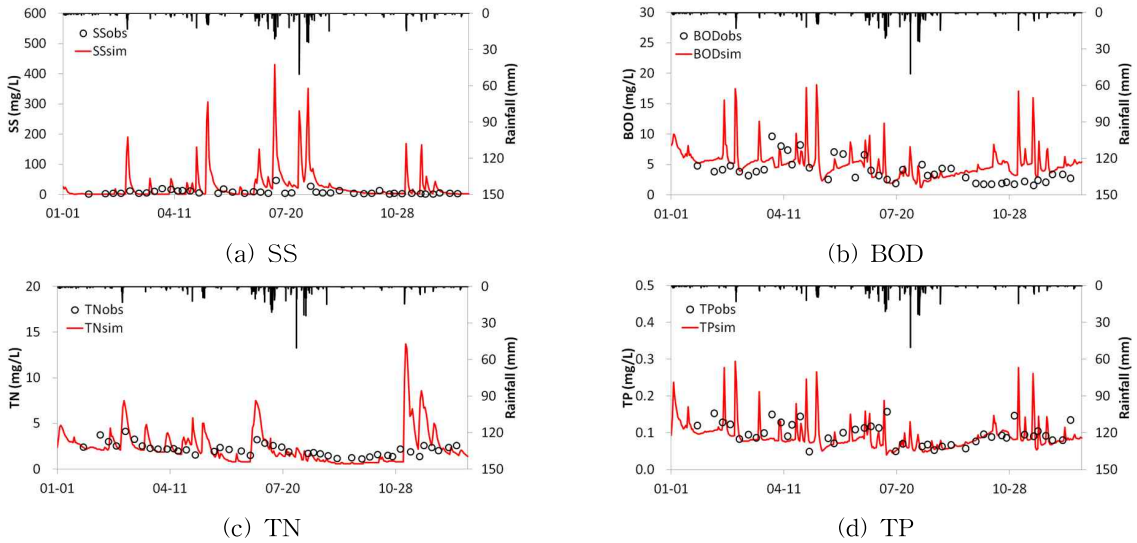
Fig. 6. Calibrated and Validated Discharges of the Hwangryong River at the Seonam and the Hwandryong-A Stations

며, NSE 지수는 각각 0.97, 0.78의 값을 보여주었다. 한편, SS 농도 보정을 위해 매개변수 KRER, JRER, KSER, JSER, TAUCD, TAUCS 등을 조절 하였다. BOD 농도 보정을 위해 PERLND 모듈의 IFLW, GRND 등의 매개변수를 월별로 조절하였으며, RCHRES 모듈의 KBOD20, KODSET 등의 매개변수를 조절하였다. 그리고 TN과 TP 농도 보정을 위해 IFLW, GRND 등의 매개변수를 월별로 조절하였으며, RCHRES 모듈의 KTAM20, KNO220, KNO320 등의 매개변수를 조절하였다. 모의 결과, 수질 농도는 시단위로 제공되지 않는 관측 자료의 한계 때문에 강우 시 나타나는 농도의 피크 값의 재현성은 확인하지 못하지만 전반적으로 모의치와 관측치의 기저농도가 잘 일치하여, 모의치가 관측치의 경향을 적절히 재현하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

3.2 기후변화 시나리오 기상 자료 분석

황룡강 유역에 대한 과거 30년 동안의 강우 자료와 기후변화 시나리오에 따른 2100년까지의 미래 강우 자료를 분석하여 강우량의 변화 추세를 파악하였다. 황룡강 유역에서 가장 근거리에 위치한 광주지방기상청에서 1976~2005년 동안 관측한 시강우 자료를 분석하였으며, 과거 30년 기간에 대한 평균 연강우량은 1,352 mm로 산정되었다. 한편, 기후변화 시나리오에 따른 미래의 강우 자료는 그 변화 추이를 효과적으로 파악하기 위해 2011~2100년까지 90년 동안의 기간에 대해 2020년대(2011~2040), 2050년대(2041~2070), 2080년대(2071~2100) 3구간으로 구분하여 비교하였다. 황룡강 유역에 적용한 RCP 4.5 시나리오에 따르면 2020년대, 2050년대, 2080년대 각 구간별 평균 연강수량이 1,257 mm, 1,372 mm, 1,644 mm로 21세기 후반기로 갈수록 전반적으로 연강수량이 많아지는 것으로 분석되었다(Fig 8(a)). RCP 8.5 시나리오에서는 각 구간별 평균 연강수량이 1,212, 1,482, 1,414 mm로 21세기 중반기와 후반기에서 나타나는 연 강수량이 21세기 전반기와 비교하여 상대적으로 많은 것으로 분석되었다(Fig. 8(b)).

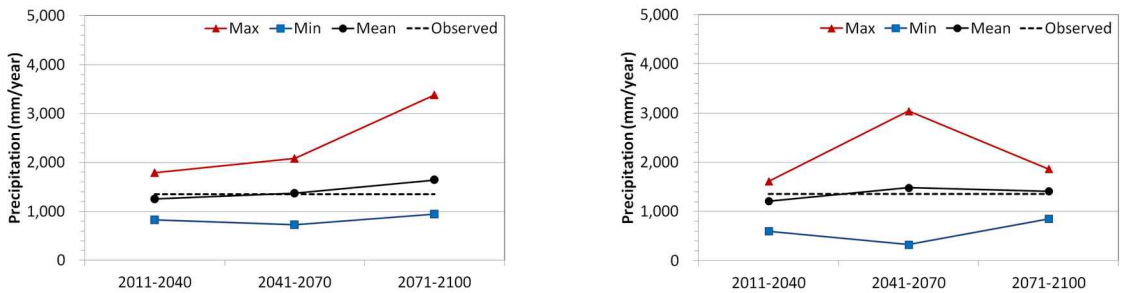
기후변화에 따른 미래 강우량의 월 변화율을 분석해 보면, 과거 30년 관측치와 비교하여 RCP 4.5 시나리오에서는 월별로 -34~68%의 변화율을, RCP 8.5 시나리오에서는 월별로 -46~93%의 변화율을 보이는 것으로 분석되



(a) SS (b) BOD

(c) TN (d) TP

Fig. 7. Calibrated and Validated Water Quality of the Hwangryong River at the Hwangryong-A Station



(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

Fig. 8. Simulated 30-year Mean Annual Precipitation for the RCP 4.5 and the RCP 8.5 Scenarios (the Dotted Line Indicates the 30-year Mean Annual Precipitation, 1976-2005, Observed at the Kwangju Station)

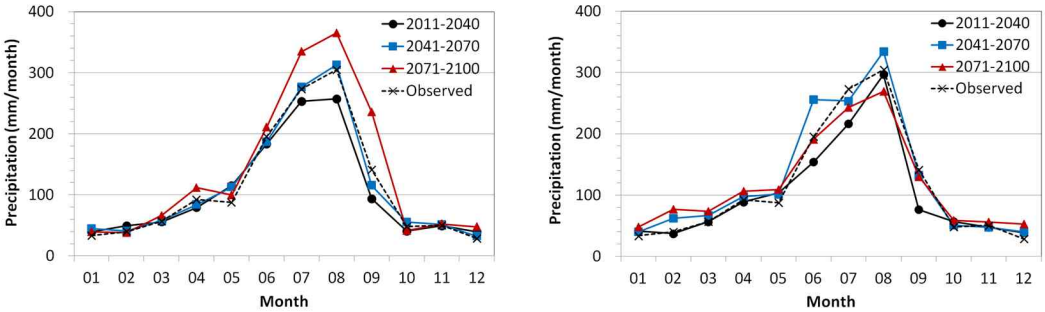
었다(Fig. 9). RCP 4.5 시나리오에서는 21세기 후반기 9월과 12월에 관측치 대비 60%가 넘는 증가율을 보여 이 시기에 강우량이 상대적으로 크게 증가할 것으로 분석되었으며, RCP 8.5 시나리오에서는 21세기 후반기 2월과 12월에 관측치 대비 80%가 넘는 증가율을 보여 이 시기에 강우량이 상대적으로 크게 증가할 것으로 분석되었다.

황룡강 유역에 대한 과거 25년 동안의 기온 자료와 기후변화 시나리오에 따른 2100년까지의 미래의 기온 자료를 분석하여 그 변화 추세를 파악하였다. 광주지방기상청에서 1981~2005년 동안 관측된 기온 자료를 분석하였으며, 과거 25년 기간에 대한 연 평균기온은 13.7℃로 산정되었다. RCP 4.5 시나리오에서는 2020년대, 2050년대, 2080년대 각 구간별 연평균 기온의 평균값은 14.7℃, 15.6℃, 16.2℃로 분석되었으며, RCP 8.5 시나리오에서는 14.8℃, 16.5℃, 18.6℃로 두 시나리오 모두 21세기 후반기로 갈수록 전반적으로 높은 연평균 기온을 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 10).

기후변화에 따른 미래 기온의 월 변화율을 분석해 보면, 과거 25년 관측치와 비교하여 RCP 4.5 시나리오에서는 월별로 -0.4~817%의 변화율을, RCP 8.5 시나리오에서는 월별로 2~1,400%의 변화율을 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 11). 두 시나리오 모두 미래에는 전 계절에서 전반적으로 월평균 기온이 상승하는 경향을 보이는 것으로 나타났으나 특히, 1월과 2월과 같은 겨울철 증가율이 큰 것으로 분석되었다.

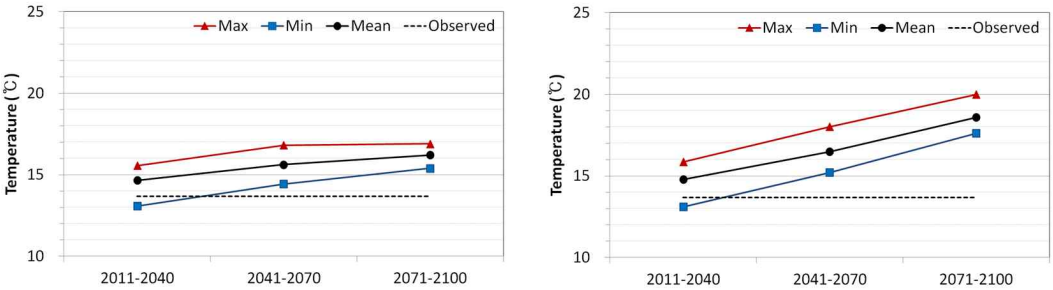
3.3 유출특성 분석

2011~2100년까지 기후변화에 따른 황룡강 유역에서의 강우, BOD, TN, TP 연간 유출량 변화 추세를 파악하기 위해, 연간 오염물질 유출량을 2020년대, 2050년대, 2080



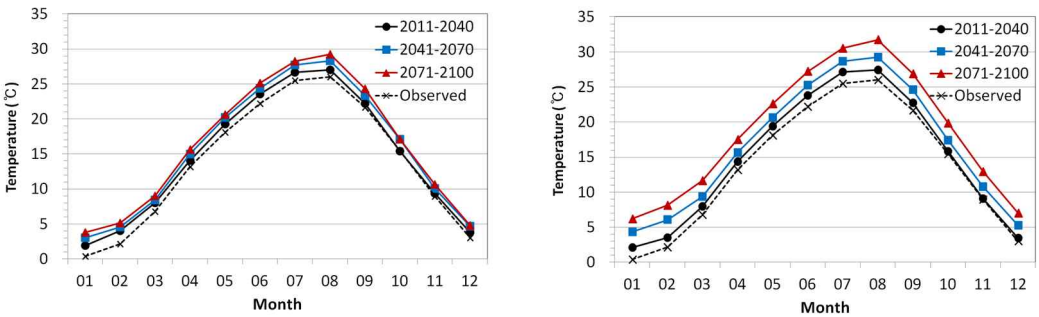
(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

Fig. 9. Simulated 30-year Mean Monthly Precipitation for the RCP 4.5 and the RCP 8.5 Scenarios (the Dotted Line Indicates the 30-year Mean Monthly Precipitation, 1976 - 2005, Observed at the Kwangju Station)



(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

Fig. 10. Simulated 30-year Mean Annual Temperature for the RCP 4.5 and the RCP 8.5 Scenarios (the Dotted Line Indicates the 25-year Mean Annual Temperature, 1981-2005, Observed at the Kwangju Station)



(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

Fig. 11. Simulated 30-year Mean Monthly Temperature for the RCP 4.5 and the RCP 8.5 Scenarios (the Dotted Line Indicates the 25-year Mean Monthly Temperature, 1981 - 2005, Observed at the Kwangju Station)

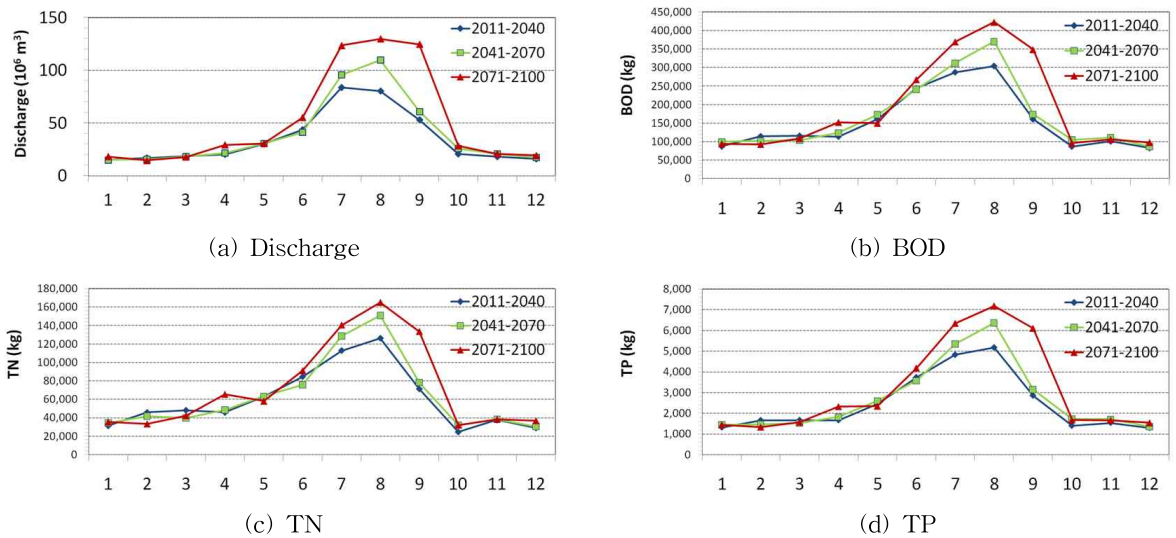
년대로 구분하여 각 구간별 평균값을 비교하였다(Table 1). RCP 4.5 시나리오 분석 결과, 강우는 각 구간별로 연간 약 41,707만 m^3, 47,218만 m^3, 61,265만 m^3가 유출되는 것으로 산정되었다. BOD는 각 구간별로 연간 약 1,859톤, 2,003톤, 2,306톤이 유출되며, TN은 각 구간별로 연간 약 718톤, 763톤, 872톤이 유출되는 것으로 산정되었다. 또한, TP은 각 구간별로 연간 약 30톤, 32톤, 38톤이 유출되는 것으로 산정되어 오염물질 항목에 상관없이 21세기 후반기로 갈수록 연간 오염부하 유출량이 전반적으로 증가하는 것으로 분석되었다. RCP 8.5 시나리오 분석 결과, 강우는 각 구간별로 연간 약 39,570만 m^3, 53,198만 m^3, 46,046만 m^3가 유출되는 것으로 산정되었다. BOD는 각 구간별로 연간 약 1,784톤, 2,132톤, 2,062톤이 유출되며, TN은 각 구간별로 연간 약 671톤, 802톤, 764톤이 유출되는 것으로 산정되었다. TP는 각 구간별로 연간 약 28톤, 34톤, 33톤으로 산정되어 오염물질 항목에 상관없이 21세기 전

Table 1. Simulated Annual Discharge and Pollution Loads of the Hwangryong River for the RCP 4.5 and the RCP 8.5 Scenarios

	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2011~2040	2041~2070	2071~2100	2011~2040	2041~2070	2071~2100
Discharge (10^6 m^3/yr)	417	472	613	396	532	460
BOD (ton/yr)	1,859	2,003	2,306	1,784	2,132	2,062
TN (ton/yr)	718	763	872	671	802	764
TP (ton/yr)	30	32	38	28	34	33

반기보다 21세기 중반기와 후반기에 연간 오염부하 유출량이 전반적으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 다만, RCP 4.5 시나리오에서는 2080년대에 평균적으로 연간 오염물질 유출량이 가장 많을 것으로 분석된 것에 반해 RCP 8.5 시나리오에서는 상대적으로 2050년대에 평균적으로 연간 오염물질 유출량이 가장 많을 것으로 분석되었다. 이는 시나리오별로 분석된 연강우량 변화와 동일한 경향을 보이는 결과로서, 기후변화에 따른 강우량 변화가 오염물질 유출량에 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

한편, 기후변화 시나리오에 따른 황룡강 유역에서의 2020년대, 2050년대, 2080년대 각 30년 동안의 월별 오염물질 유출량을 산정하여, 그 연 평균값에 대한 변화량을 비교하였다. RCP 4.5 시나리오 분석결과, 21세기 중반기와 후반기에는 전반기와 비교하여 월별로 강우유출량은 -14~135%, BOD 유출량은 -19~117%, TN 유출량은 -27~88%, TP 유출량은 -20~113%의 변화율을 보이는 것으로 분석되었다. 오염물질 항목에 상관없이 2080년대 2월에 가장 큰 감소율을, 2080년대 9월에 가장 큰 증가율을 보였으며, 특히, 9월에는 TN을 제외한 오염물질 유출량이 100% 이상의 증가율을 보여 이 시기에 오염물질이 상대적으로 가장 많이 증가할 것으로 분석되었다(Fig. 12). 한편, RCP 8.5 시나리오 분석결과, 21세기 중반기와 후반기에는 전반기와 비교하여 월별로 강우유출량은 -18~84%, BOD 유출량은 -16~79%, TN 유출량은 -22~112%, TP 유출량은 -17~87%의 변화율을 보이는 것으로 분석되었다. 오염물질 항목에 상관없이 2080년대 8월에 가장 큰 감소율을 보였으며, 2050년대 6월에 가장 큰 증가율을 보인 강우 유출량을 제외하고, 나머지 수질항목에서는 2080년대 2월에 가장 높은 증가율을 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 13). 이는 각 시나리오의 월 강우량 변화와 동일한 경향을 보이는 결과로서, 기후변화에 따른 강우량 변화로 인해 계절별로 오염물질 유출 패턴이 크게 달라질 수 있음을 시사한다.



(a) Discharge (b) BOD

(c) TN (d) TP

Fig. 12. Simulated Mean Monthly Discharge and Pollution Loads of the Hwangryong River for the RCP 4.5 Scenario

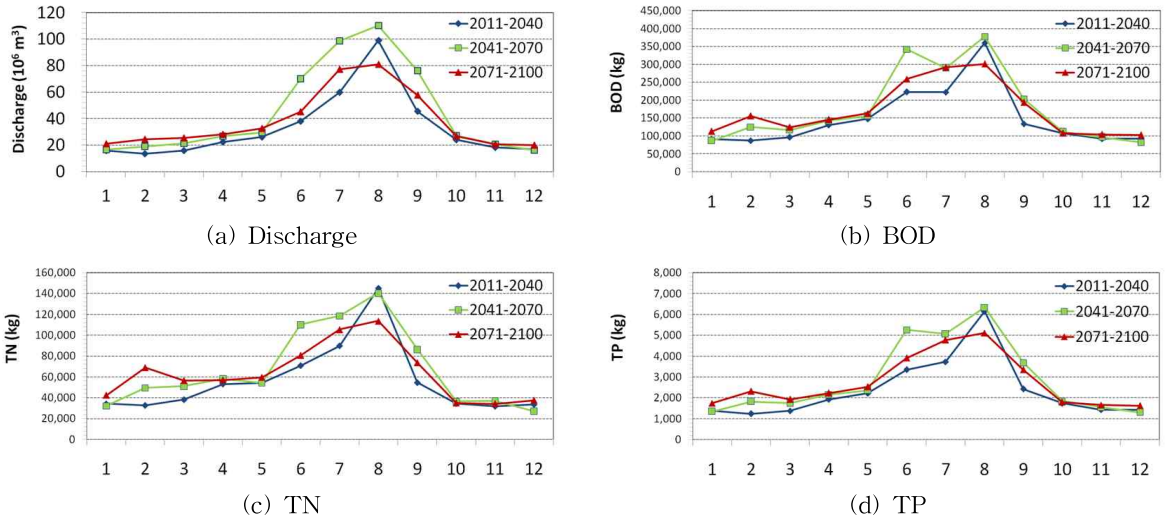


Fig. 13. Simulated Mean Monthly Discharge and Pollution Loads of the Hwangryong River for the RCP 8.5 Scenario

4. 결 론

유역모델 HSPF를 이용하여 기후변화에 따른 황룡강 유역에서의 오염물질 유출특성 변화를 분석하였다. 유역모델 구축을 위해 황룡강 유역을 7개 소유역으로 분할하였으며, 2011년에 관측된 유량과 SS, BOD, TN, TP 농도 자료를 이용하여 모델 보정 및 검정을 실시하였다. 기후변화에 따른 황룡강 유역의 환경변화를 예측하기 위해 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 이용하였으며, 기후변화 시나리오가 가지는 불확실성을 최소화하기 위해 과거 기간 동안의 강우와 기온 자료에 대한 모의치와 관측치간 월별 평균을 비교하여 편의 보정을 수행하였다. 기후변화 시나리오의 기상 자료 분석 결과, 21세기 전반기와 비교하여 중, 후반기에 상대적으로 많은 연강수량과 연평균기온을 보이는 것으로 분석되었다. 강우량은 RCP 4.5와 8.5 시나리오 각각 9월과 12월, 2월과 12월에 상대적으로 크게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 월평균 기온은 전 계절에서 전반적으로 상승하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 기후변화에 따른 황룡강 유역에서의 강우, BOD, TN, TP 유출량 분석 결과, RCP 4.5 시나리오에서는 오염물질 항목에 상관없이 21세기 후반기로 갈수록 연간 오염부하 유출량이 전반적으로 증가하는 것으로 분석되었으며, RCP 8.5 시나리오에서는 21세기 중반기에 평균적으로 연간 오염부하 유출량이 상대적으로 가장 많이 증가할 것으로 분석되었다. 이는 연강수량 변화와 동일한 패턴의 변화로서 기후변화에 따른 강우량 변화가 오염물질 유출량에 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 또한, 월별 오염물질 유출량도 월별 강수량 변화 패턴과 동일하게 RCP 4.5 에서는 9월에, RCP 8.5 에서는 2월에 상대적으로 크게 증가 할 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 영산호로 유입하는 오염부하에 큰 기여를 하는 황룡강 유역에 HSPF 모델을 적용하여 기후변화에 따른 오염부하 유출량 변동성을 예측하고 월별로 집중적으로 유출되는 시기를 효과적으로 파악하였다. 구축된 모델은 향후 기후변화에 대응할 수 있는 영산강 유역에 대한 종합적인 관리대책 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서는 보정과 검정이 특정연도에 국한되어 수행되었으며 향후 장기간에 걸친 충분한 적용 과정을 통해 모델 결과의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다. 그리고 편의 보정을 통해 기후변화 시나리오가 가지는 불확실성을 최소화 하였으나, 편의보정 방법 또는 기상청에서 제공하는 RCM이 가지는 불확실성을 여전히 내포하고 있어 향후 지속적인 연구를 통해 이에 대한 불확실성에 대한 최소화가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(하구역 종합관리시스템 개발 연구)

References

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*, Vol. 42, No. 1, pp. 33-50.

Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F., and Siebert, S. (1997). *Global change and global scenarios of water use and availability: an application of WaterGAP1.0.* Report A9701, Center for Environmental System Research, University of Kassel, Germany.

Bae, D.H., and Jung, I.W. (2005). "Assessing the climate change impacts on water resources." *Disaster Prevention Review* No. 21. Korea Disaster Prevention Association, pp. 16-22.

Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jobes, T.H., and Donigian, A.S. (2001). "Hydrological Simulation Program-Fortran: User's manual for version 12." *U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory.*

Booty, W., Lam, D., Bowen, G., Resler, O., and Leon, L. (2005). "Modelling Changes in Stream Water Quality Due to Climate Change in a Southern Ontario atershed." *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 211-226.

Choi, D.G., Keem, M.S., Kim, N.W., and Kim, S.D. (2009). "An analysis of the effect of climate change on Byeongseong stream's hydrologic and water quality responses using CGCM's future climate information." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 11, pp. 921-931.

Javan, K., Saleh, F., and Shahraiyni, H. (2013). "The Influences of climate change on the runoff of Gharehsoo river watershed." *American Journal of Climate Change*, Vol. 2, No. 4, pp. 296-305.

KMA. (Korea Meteorological Administration). (2012). *Projection of climate change for Gwangju·Jeolanam-do.*

Lee, J.M., Kim, Y.D., Kang, B.S., and Yi, H.S. (2012). "Impact of climate change on runoff in Namgang dam watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 6, pp. 517-529.

MLTM. (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2009). T*he basic plan for Yeongsan River (Change).*

MOCT. (Ministry of Construction and Transportation). (1998). *The basic plan for Yeongsan River maintenance.*

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.

NIMR. (National Institute of Meteorological Research). (2012). *Report of global climate change 2012.*

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*, Vol. 46, No. 5, pp. 505-517.

Park, J.H., Kang, M.S., and Song, I.H. (2012). "Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method; for 20-weather Stations of South Korea." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 6, pp. 133-142.

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*, Vol. 42, No. 10, pp. 877-889.

Shon, T.S., Lee, S.D., Kim, S.D., and Shin, H.S. (2010). "An analysis of the effect of climate change on flow in Nakdong river basin using watershed-based model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 10, pp. 865-881.

paper number : 14-069
Received : 31 July 2014
Revised : 21 January 2015 / 11 February 2015
Accepted : 11 February 2015