

## 대표농도경로 (RCP) 시나리오에 따른 회야강 유역의 미래 유출 및 유사 변화 분석

### Impact of IPCC RCP Scenarios on Streamflow and Sediment in the Hoeya River Basin

황창수\* · 최철웅\*\* · 최지선\*\*\*

Hwang, Chang Su · Choi, Chul Uong · Choi, Ji Sun

#### 요 旨

본 연구는 미래 기후변화 및 토지피복변화가 유역 내 유출량과 유사량의 거동에 가져올 영향을 분석하는데 목적이 있다. 기상자료는 IPCC 5차 평가보고서를 위해 새롭게 논의된 RCP 시나리오 중 서로 상반되는 4.5 및 8.5 시나리오의 기후전망 (2011~2100년) 이 사용되었으며, 토지피복지도는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오의 사회·경제 스토리라인과 로지스틱 회귀모형 (LR)을 이용하여 개발된 모델에 의해 구축되었다. 기후변화만 고려한 경우, 토지피복변화만 고려한 경우, 기후변화 및 토지피복변화 모두 고려한 경우의 세 가지 시나리오를 설정하고, 각 시나리오에 따른 유출량 및 유사량을 모의한 결과 계절적으로 매우 명확한 변화를 나타내었다. 기후변화는 봄과 겨울에 유출량을 증가시키고 여름과 가을에 유출량을 감소시키는 것으로 나타났으며, 유사량 역시 유출량과 동일한 변화의 양상을 보였다. 토지피복변화는 유출량을 증가시키는 반면 유사량은 감소시키며, 이는 도시화로 인한 불투수 면적의 증가에 의한 것으로 판단된다. 토지피복변화는 기후변화에 비해 유출량에 적은 영향을 끼치나, 기후변화에 의해 초래된 유출량 문제를 더욱 극대화시킬 수 있다. 따라서 지속적인 수자원 관리를 위하여 기후변화의 잠재적 영향을 파악하고, 토지피복변화에 따른 적절한 수자원 대응 정책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : SWAT, 기후변화, RCP 시나리오, 유출량, 유사량

#### Abstract

This study is analyze future climate and land cover change affects behaviors for amount of streamflow and sediment discharge within basin. We used the climate forecast data in RCP 4.5 and 8.5 (2011-2100) which is opposite view for each other among RCP scenarios that are discussed for 5th report for IPCC. Land cover map built based on a social·economic storyline in RCP 4.5/8.5 using Logistic Regression model. In this study we set three scenarios: one scenario for climate change only, one for land cover change only, one for Last both climate change and land cover change. It simulated amount of streamflow and sediment discharge and the result showed a very definite change in the seasonal variation both of them. For climate change, spring and winter increased the amount of streamflow while summer and fall decreased them. Sediment showed the same pattern of change steamflow. Land cover change increases the amount of streamflow while it decreases the amount of sediment discharge, which is believed to be caused by increase of impervious Surface due to urbanization. Although land cover change less affects the amount of streamflow than climate change, it may maximize problems related to the amount of streamflow caused by climate change. Therefore, it's required to address potential influence from climate change for effective water resource management and prepare suitable measurement for water resource.

Keywords : SWAT, Climate Change, RCP Scenario, Streamflow, Sediment

Received: 2014.06.11, revised: 2014.08.06, accepted: 2014.08.29

\* 정회원 · 국립해양조사원 해양관측과 주무관(Member, Oceanographic Observation Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, csh0509@korea.kr)

\*\* 정회원 · 부경대학교 공간정보시스템공학과 교수(Member, Professor, Spatial Information Engineering, Pukyong National University, cuchoi@pknu.ac.kr)

\*\*\* 교신저자 · 정회원 · 부경대학교 공간정보시스템공학과 박사과정(Corresponding author, Member, Spatial Information Engineering, Pukyong National University, ssun33023@naver.com)

## 1. 서론

지구온난화는 인간과 자연 생태계에 막대한 영향을 끼치는 전 지구적인 문제로 관심의 집중이 되고 있다. 지난 100년간 (1912~2008년) 전 지구 평균기온은 0.74 °C 상승하였으며, 우리나라의 경우 전 지구 평균의 두 배 이상 (1.7 °C) 으로 기온이 상승하면서 기상재해의 빈도 역시 급격히 증가하는 추세에 있다. 특히 집중강우 및 호우빈도의 증가, ‘루사’, ‘매미’와 같은 태풍강도의 상승, 대규모 홍수의 발생 등 수자원에 심각한 문제를 야기할 수 있는 재해는 더욱더 심화되고 있다. 이러한 극한강우의 발생은 유출 특성의 변화와 직결되어 수자원의 효율적 관리 및 안정적인 공급에 어려움을 증대시킬 것으로 전망된다.

한편, 강우-유출에 의한 유역의 토양침식은 하천의 부유사 발생의 주원인으로, 토사 내 함유된 질소·인과 같은 영양염류를 하천으로 단시간에 다량 유입시켜 부영양화, 투과능저하 등의 수질악화를 발생시킬 뿐만 아니라 저수지퇴적, 하구폐색 등 다양한 문제를 초래할 수 있다 (Ye et al., 2008). 대부분의 토양침식은 자연적인 현상에 의해 발생하나, 최근 기후변화에 의한 이상강우의 증가와 식생의 변화, 유역의 개발 등 복합적인 원인에 의해 그 문제가 점차 가중되고 있는 실정이다 (Lee et al., 2010). 특히 유역 내 각종 개발과 경작에 의한 토양 및 토지이용특성의 인위적인 변화는 유사의 발생에 밀접한 연관을 가지므로, 유역차원의 토양유실 저감 대책이 필수적이다 (Choi et al., 2005).

유역차원의 관리대책을 마련하기 위해서는 유역 내 기후 및 토지이용 특성변화를 이해하고, 장단기 유역모형을 통해 유출과 유사의 이송 및 퇴적양상을 분석하여 유역관리를 위한 자료를 구축할 필요가 있다. 선행 연구자들의 연구 결과에 따르면 장기 유출 및 유사 분석을 위한 수문모형으로는 SWAT 모형이 높은 적용성을 가지는 것으로 나타났고 (Heo et al., 2008; Lee et al., 2013; Ji et al., 2014) 장기 수문분석을 위한 미래 기상자료로 SRES (Special Report on Emission Scenarios)가 가장 폭넓게 이용되어 왔다. 그러나 SRES는 1990년대 말 개발된 시나리오로 최근의 경향을 반영하지 못한다는 문제점이 있다. 이에 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 다양한 예측기술의 발전과 최근의 온실가스농도 변화경향을 반영한 미래 기후 전망으로 RCP (Representation Concentration Pathway) 시나리오를 도입하였고, 한반도를 위한 기후변화 시나리오도 새롭게 산출되었다 (IPCC, 2013).

따라서 본 연구에서는 새로운 기후변화 시나리오인

RCP를 적용하여, 기후와 토지피복의 상호연관적인 관계를 고려할 수 있도록 RCP 시나리오의 스토리라인을 기반으로 한 미래 기후 및 토지피복지도를 구축하고, 이것이 유출량 및 유사량에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 회야강 하구를 최종 유출지점으로 하여 유역의 강우-유출과 이로 인해 하천으로 유입되는 유사량의 상호관계를 분석하고, 하천하구지역의 유사 유출특성 기구를 파악함으로써 효율적 수자원 사용을 위한 유역관리의 측면에서 나아가 하구 및 연안과정을 이해하는데 기초자료를 제공하고자 한다. 미래 예측은 기후변화만 고려한 경우 (시나리오 1), 토지피복변화만 고려한 경우 (시나리오 2), 기후변화 및 토지피복변화 모두 고려한 경우 (시나리오 3) 로 시나리오를 설정하여 기후변화 및 토지피복변화의 단일 또는 복합적 영향을 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 대상유역 및 자료구축

울산광역시와 양산시 일대에 걸쳐 소재하는 회야강 유역을 대상유역으로 선정하였다 (Fig. 1).

유역 면적은 약 214.1 km<sup>2</sup> 으로 산지와 농지의 면적이 각각 66.5 %, 18.9 % 로 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 유역 연장은 약 43 km, 유역평균표고는 174.1 m, 유역평균경사는 17.5°이다.

본 유역은 동아시아 몬순기후의 영향으로 여름에는 집중호우가 계속되는 고온 다습한 기후를 가지는 반면, 겨울은 시베리아 기단의 영향으로 한랭 건조한 기후가 계속되어 계절적으로 뚜렷한 변화가 나타난다 (Bae et al., 2011; Kim et al., 2013). 강수량은 장마가 지속되는 7월에서 9월에 집중되어 있으며, 12월에서 2월은 강수량이 매우 적다. 이러한 국지성 집중호우의 영향으로 유역의 계절적 유량 차이가 매우 크게 나타나며, 이에

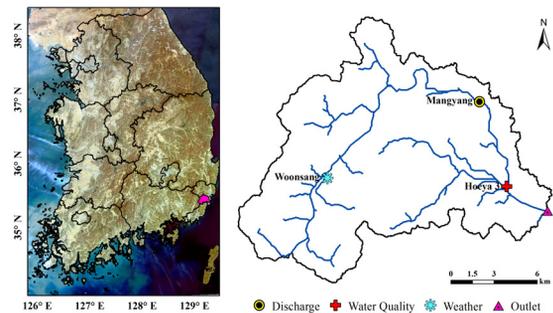


Figure 1. Study area and hydro-meteorological station

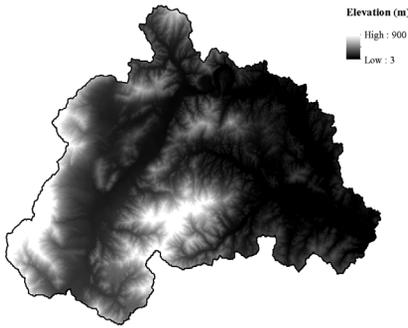


Figure 2. DEM

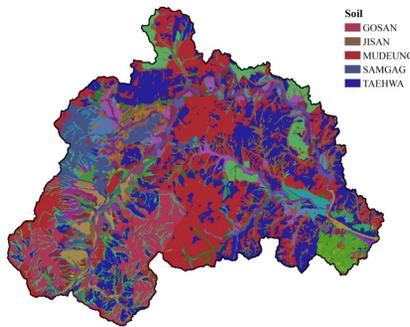


Figure 3. Soil map

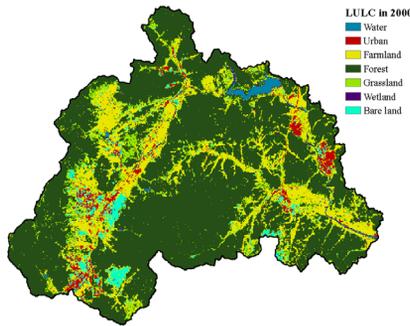


Figure 4. LULC map in 2000

따라 수자원의 공급이 매우 불규칙적이고, 홍수의 위험 또한 크다. 유역 내 연평균 강수량은 1,578 mm 이며, 연 평균 기온은 14.1 °C 이다.

지형공간자료로서 수치표고모델 (DEM : Digital Elevation Model) 은 고도, 경사도, 경사향 그리고 하천의 흐름을 결정짓는 중요한 요소로 본 연구는 환경부에서 제공받은 10 m 격자간격 (Grid) 의 DEM을 사용하였다 (Fig. 2). 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀도토양도를 이용하였으며, 이에 미국 NRCS (The U.S. Natural Resource Conservation

Service formerly the Soil Conservation Service) 토양 분류기준 (Soil Survey Staff, 1996) 의 수문학적 토양 그룹에 따른 속성 값을 할당하여 재구축하였다 (Fig. 3). 토지피복도 (Land Use and Land Cover map, LULC map) 는 10년 간격으로 제공하고 있는 환경부의 대분류 토지피복지도를 이용하였고, 총 7개의 항목 (수역, 도시, 농지, 산림, 초지, 습지, 나지) 으로 구성되어 있다 (Fig. 4).

회야강 유역 내에는 웅상 기상관측소가 위치하고 있고, 이로부터 관측된 일별 강수량, 최대·최소 기온, 상대습도, 태양복사량, 풍속 (2000~2009) 자료를 기상청으로부터 제공받아 이용하였다. 또한 기후변화에 따른 수문환경의 변화를 비교하기 위하여 서로 상반되는 시나리오인 RCP 4.5와 8.5 시나리오 하의 12.5 km 격자 간격의 한반도 기후전망자료를 미래 기상자료로 이용하였다.

모형의 검·보정을 위하여 망양 유량관측소에서 관측되는 일별 자료 및 회야강 유역의 장기유출 자료를 제공받았으며, 유사량 자료는 회야강3 수질관측소에 대하여 월 1회 측정되는 농도자료를 부하량 값으로 환산하였다.

## 2.2 SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소에서 개발된 준분포형 장기 강우-유출 모형으로, 대규모 유역에서 장기간에 걸쳐 다양한 종류의 토양 및 토지이용에 따른 유출, 유사, 영양물질 거동의 일 단위 모의가 가능하다 (Arnold et al., 1998).

SWAT 모형은 유역의 서로 다른 공간적 특성을 반영하기 위하여 DEM을 기반으로 대규모 유역을 몇 개의 소유역으로 분할하며, 각각의 소유역은 단일한 토지 이용과 토양의 특성 및 지형을 가지는 수문학적 반응단위 (HRU : Hydrologic Response Unit) 로 세분화된다. 유역의 모의는 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모형에 의해 구분되며, 각각의 HRU에서 계산되어 주 하도로 유입된다 (Shen et al., 2009).

수문 부모형은 저류방정식에 의해 물 수지를 산정하며, 차단, 지표면 유출, 측방 유출, 침투, 기저 유출, 증발산 등으로 구성된다. 이 중 지표면 유출은 SCS (Soil Conservation Service) 유출곡선법 (RCN : runoff Curve Number) (USDA-SCS, 1972) 과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 산정하며, 측방 유출은 동역학적 저류모형 (Kinematic Storage Model) (Sloan et al., 1983) 을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산

하며, 잠재증발산 산정을 위하여 Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith 방법을 이용한다.

토양침식 및 퇴적에 따른 유사량은 수정범용토양유실공식 (MUSLE : Modified Universal Soil Loss Equation) 에 의해 추정된다 (Williams, 1975). MUSLE는 범용토양유실공식 (USLE : Universal Soil Loss Equation) 의 수정버전으로 USLE에서는 강우에너지의 함수로서 평균 연간 총 침식량을 예측하는 반면, MUSLE에서는 강우에너지 인자가 유출인자로 대체됨으로써 유사량 예측이 개선되고 각각의 호우사상에 대하여 적용이 가능하다.

### 2.3 기후변화 시나리오

기후변화의 영향을 평가하기 위하여 IPCC 4차 평가보고서에 사용된 온실가스 배출 시나리오인 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 는 미래 사회·경제 형태를 우선적으로 설정하고 이에 따른 복사강제력과 기후변화 전망이 순차적으로 정해지는 방법을 따른다. 이러한 방법은 정보 산출에 있어 많은 시간이 소요되며, 기후변화 완화 정책이 반영되지 못한다는 문제점이 있었다.

이 후, 이와 같은 문제를 보완하여 IPCC 5차 평가보고서를 위한 새로운 시나리오로 RCP가 선정되었다. RCP 시나리오는 복사강제력 수준을 먼저 결정하고, 기후전망 및 배출·사회·경제 시나리오를 동시에 개발하는 평행적 방법을 사용함으로써 단계마다 증가되는 불확실성을 분산할 수 있으며, 각 단계 사이의 피드백을 고려할 수 있어 일관성 있는 시나리오의 확보가 가능하다 (Baek et al., 2011). 또한 RCP 시나리오는 인위적 강제력에 온실가스와 에어로졸뿐만 아니라 토지이용 강제력이 추가되었으며, 최근의 온실가스 농도 변화 경향을 반영하고 해상도 등을 업데이트하였다.

RCP 시나리오에서는 기후변화 대응정책과 그 이행여부에 따라 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 4개의 시나리오를 제시하고 있다. RCP 2.6은 인간의 활동을 지구 스스로 회복 가능한 최대 한계값, RCP 4.5 및 RCP 6.0은 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우, 그리고 RCP 8.5는 온실가스의 저감없이 현재추세 (BAU : Business As Usual) 로 배출되는 경우로 설정되었다.

국립기상연구소는 국제 기후변화 사업에 참여하여, 국내 기후변화 대응지원을 위해 해상도 135 km의 전 지구 기후변화 시나리오에 근거한 한반도지역에 상세화된 지역 기후변화 시나리오를 개발하였다. 이 시나리오의 해상도를 가지며, 전 지구 시나리오에

서 표현할 수 없는 복잡한 지형의 효과를 더욱 잘 반영할 수 있다.

### 2.4 토지피복변화 시나리오

토지피복지도 예측을 위한 스토리라인은 IPCC 5차 평가보고서에 제시된 RCP 시나리오의 사회·경제 스토리라인을 기반으로 설정되었다. RCP 4.5 시나리오의 스토리라인은 인구증가율이 감소하고, 지속가능한 발전을 통해 경제성장이 이루어지며, 환경보호에 가치를 두는 사회로 강력한 토지이용 규제가 이루어지는 환경보호 측면의 스토리라인이다. 반면에 RCP 8.5 시나리오의 스토리라인은 인구가 증가하여 미래 도시 수요량이 높아지며, 낮은 경제성장을 이루고, 환경보전보다는 개발 중심적 사회를 나타낸다 (Van Vuuren et al., 2011).

도시성장모형은 Kim and Park (2013b) 에 의해 개발된 모델을 사용하였다. 이 모델은 RCP 시나리오의 스토리라인 하에 미래 도시수요량을 추정하고, 로지스틱 회귀분석에 의해 작성된 도시성장확률지도를 이용하여 미래 도시 면적을 공간적으로 배분하는 것으로 구분된다.

회귀분석은 한 개의 종속변수와 관련 있는 다른 요인들을 독립변수로 하여 이들 간의 상호관련성을 분석하는 통계기법으로 변화요인과 변화 간의 분석력과 적응성이 뛰어난 특성을 가진다. 그러나 일반적인 회귀분석은 종속변수가 독립변수에 대해 선형적으로 변화한다고 가정하기 때문에 도시성장의 발생 유무를 예측하려는 시도에는 적합하지 않다 (Kim and Park, 2013a; Lee et al., 2006). 따라서 종속변수가 도시의 발생 또는 미발생과 같은 이항적 변수일 때, 독립변수와 종속변수의 관계는 로지스틱 함수에 의해 설명될 수 있다. 이 함수에서는 독립변수의 값이 아무리 커지더라도 예측된 확률 값은 0과 1 사이에 제한되게 되며, 도시성장이 발생할 경우와 그렇지 않을 경우를 예측하는 것을 넘어 도시성장이 일어날 확률을 산정해 줌으로써 다양한 독립변수를 고려한 미래 도시성장 예측에 가장 이상적인 통계 분석법이라 할 수 있다. Eq (1) 은 로지스틱 회귀모형의 기본 식으로  $p$ 는 도시성장이 일어날 확률,  $X_i$ 는 독립변수,  $\alpha$ 와  $\beta_i$ 는 회귀계수를 나타낸다.

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \sum \beta_i X_i \quad (1)$$

도시성장모형의 적용을 위해 향후 수역 면적은 변하지 않고, 도시지역은 비도시지역으로 전환되지 않는다

고 가정하였다. 미래 도시수요량 결정을 위한 인구수 및 GDP (Gross Domestic Product) 진행경로는 통계청에서 제시한 장래인구추이 및 국회예산정책처의 실질 GDP 장기예측자료를 통해 산정되었다 (Park, 2013).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 토지피복변화 산정

도시수요량은 1975년부터 2000년까지의 1인당 도시 면적을 종속변수, 실질 GDP를 설명변수로 하는 이중 로그모델에 의해 정립된 회귀식에 RCP 시나리오별 인구수와 GDP를 대입하여 산정하였다.

공간데이터베이스 작성을 위한 도시성장 관련 인자는 물리적 (고도, 경사도, 경사향, 토지피복), 접근성 (도로와의 거리, 기존 도시와의 거리), 사회경제적 (인구, 인구밀도), 정책적 (환경생태적보전지역, 법제적보전지역) 요인에 따라 공간해상도 30m×30m의 래스터 (raster) 형식으로 구축되었다. 정책적 요인인 환경생태적평가지도와 법제적평가지도의 적용 유무에 따라 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 구분하고 로지스틱 회귀분석을 실시하여 도시성장 확률지도를 작성하였다.

Table 1은 미래 도시수요량과 시나리오 별 도시성장 확률지도에 의해 추정된 미래 토지피복의 항목별 변화

율 (%) 을 나타낸다. 2000년 현재 유역 내 산지와 농지가 전체 면적의 67%, 19%를 차지하고 있으며, 상대적으로 도시는 3%의 적은 부분을 차지하고 있다. 그러나 도시면적은 지속적으로 증가하여 RCP 4.5 및 8.5하의 2050년대에는 2000년 면적 대비 각각 207%, 305% 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 도시성장은 유역 내 농지를 중심으로 도시가 확장될 것으로 예측되었다.

#### 3.2 모형의 보정 및 검증

SWAT의 구동을 위한 최적의 매개변수를 추정하고 모형의 보정을 수행하기 위하여 SWAT-CUP (Calibration Uncertainty Program) 을 사용하였다. SWAT-CUP은 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), Parasol (Parameter Solution), MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 의 4가지 알고리즘을 포함하고 있으며, 본 연구에서는 이 중 다양한 연구자들 (Faramarzi et al., 2009; Lee and Seo, 2011) 에 의해 적용성을 검증 받은 SUFI-2 알고리즘을 채택하여 분석하였다. 모형의 보정과 검증은 2000~2004년, 2005~2009년 각각 5개년으로 설정하였으며, 검·보정 결과에 따른 적합성 및 상관성을 평가하기 위해 결정계수 ( $R^2$  : coefficient of determination) 와 모형효율계수 (NS : Nash-Sutcliffe

Table 1. Areas of future LULC under RCP 4.5 and 8.5 scenarios (unit: km<sup>2</sup>). Figures in brackets represent future LULC class change (%) compared to 2000 LULC.

	Baseline	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2000	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Water	2.19	2.19(0)	2.19(0)	2.19(0)	2.19(0)	2.19(0)	2.19(0)
Urban	6.82	17.11(151)	19.91(192)	20.95(207)	18.04(165)	23.38(243)	27.61(305)
Farmland	40.40	33.25(-18)	31.27(-23)	30.52(-24)	32.28(-20)	28.51(-29)	25.54(-37)
Forest	142.40	141.88(0)	141.66(-1)	141.57(-1)	141.77(0)	141.30(-1)	140.88(-1)
Grassland	14.61	13.89(-5)	13.62(-7)	13.51(-8)	13.83(-5)	13.40(-8)	13.01(-11)
Wetland	0.63	0.60(-5)	0.59(-7)	0.58(-8)	0.59(-8)	0.56(-12)	0.53(-16)
Bare land	7.03	5.15(-27)	4.84(-31)	4.75(-32)	5.38(-23)	4.75(-32)	4.31(-39)

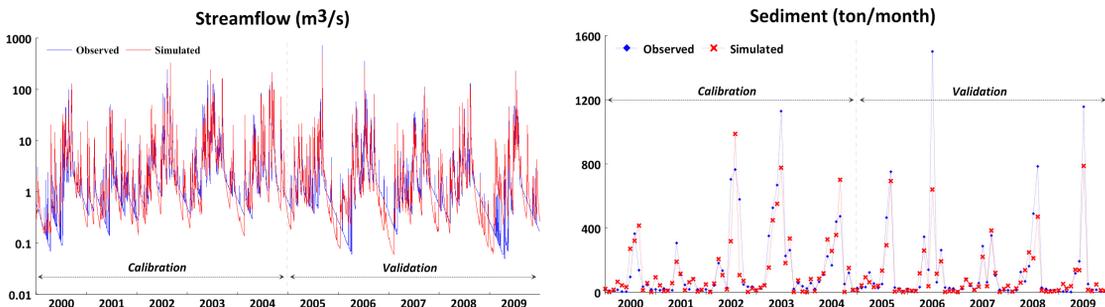


Figure 5. Observed and simulated daily streamflow and monthly sediment for the calibration and validation periods.

coefficient) (Nash and Sutcliffe, 1970) 를 사용하였다.

유출량의 R<sup>2</sup>과 NS는 보정기간에 각각 0.90, 0.90로 나타났고, 검증기간에 각각 0.95, 0.88로 나타났다 (Fig. 5). 유출량에 대한 모형의 검 · 보정 후, 유사량에 대한 보정을 실시하였다. SWAT 모형에서 유사의 이동은 유출량의 이동에 의해 영향을 받기 때문에 유출량의 보정이 선행된 후 유사량의 보정이 실시되어야 한다. 검 · 보정기간의 유사량에 대한 R<sup>2</sup>과 NS는 모두 0.73 이상으로 나타나, 모의값이 유역의 실측값을 잘 묘사하는 것으로 간주할 수 있다. 검 · 보정에 의해 결정된 최적 매개변수는 미래 기후 변화에 따른 유역 내 유출 및 유사의 모의에 활용되었다.

3.3 시나리오에 따른 유출 변화

3.3.1 시나리오 1: 기후변화의 적용

기후변화가 유출특성에 미치는 영향을 예측하기 위해 RCP 4.5 및 8.5 시나리오하의 기상자료를 입력 자료로 하고, 토지피복은 2000년 그대로 유지된 상태에

서 2030년대, 2040년대, 2050년대의 유출량 분석을 실시하였다 (Fig. 6). 분석 결과, 일반적으로 유출량은 강수량의 증감과 유사하게 나타나 강수량의 영향에 지배적인 것을 알 수 있었다. 봄과 겨울의 유출량은 모두 증가하였으며, 여름과 가을의 유출량은 전반적으로 감소하였고, 가을의 유출량 감소는 여름에 비해 급격하게 나타났다. 연평균 유출량의 변화는 -19.6%에서 6.6%로 계절적 변화에 비하여 매우 작은 것으로 분석되며, 이를 통해 기후변화가 유출량의 연간 변화량보다는 시기별 변화에 주로 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 향후 기후변화는 여름철 집중호우의 증가, 봄철 태풍 등의 발생을 일으켜 계절별 유출량 변화에 뚜렷한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

기후변화에 따른 유출량 분석을 바탕으로 기후변화가 회야강 유역의 유사량에 미치는 영향을 예측하였다. 유사량의 변화는 유출량과 비슷한 경향으로 봄과 겨울에는 최대 188% 까지 증가하는 반면 여름과 가을에는 최소 -65.4% (RCP 4.5 2050년대 가을)에서 최대

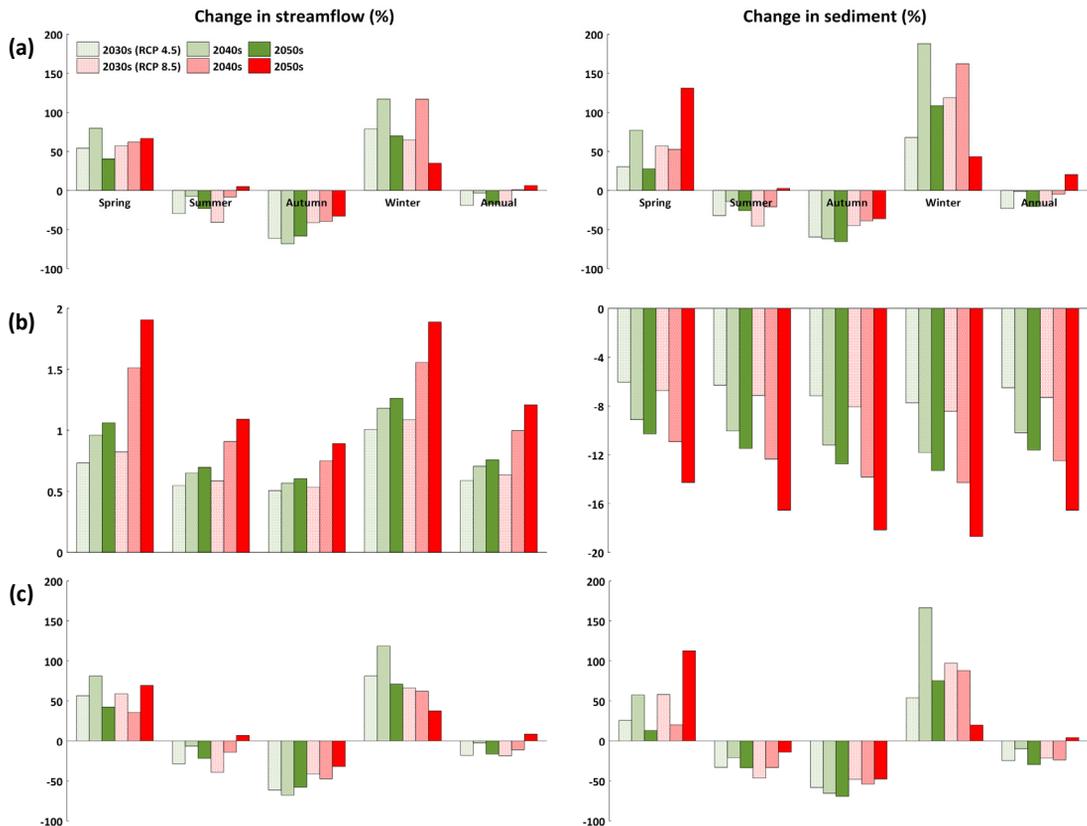


Figure 6. Changes in mean seasonal streamflow and sediment under RCP 4.5 and 8.5 scenarios for the future periods relative to the baseline period. (a) Scenario 1. (b) Scenario 2. (c) Scenario 3

-14.2% (RCP 4.5 2040년대 여름) 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 유사량의 이동이 강우로 인한 토양침식과 지표유출 등에 큰 영향을 받는다는 것을 보여준다.

### 3.3.2 시나리오 2: 토지피복변화의 적용

미래의 기상조건이 현재와 같다는 가정 하에 기상을 기준년도 (2000~2009) 와 동일하게 설정하고, RCP 4.5 및 8.5 스토리라인에 따라 구축된 미래 토지피복지도 (2030년대, 2040년대, 2050년대) 에 따른 유역 내 유출 변화를 분석하였다.

Fig. 6은 시나리오2에 따른 유출량의 변화를 나타낸 것으로 연간 유출량이 2000년을 기준으로 2030년대에 0.6% 증가하였으며, 2040년대와 2050년대에 각각 1%, 1.2% 증가하는 것으로 분석되었다. 계절별 유출량의 변화는 2050년대로 갈수록 뚜렷하게 증가하였으며, RCP 4.5에 비해 RCP 8.5에서의 증가량이 더욱 크게 나타났다. 이것은 유역 내 도시성장률이 RCP 4.5에 비해 8.5에서 더욱 큰 것 설명될 수 있으며, 도시성장률과 유출량 변화율 간의 상관성 분석 결과  $R^2$ 이 0.98로 분석되어 도시성장이 유출량변화에 매우 밀접하게 작용한다는 것을 알 수 있다 (Kim and Choi, 2013).

반면 유사량은 2030년대, 2040년대 그리고 2050년대에서 모두 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 LR에 의해 구축된 미래 토지피복지도가 도시성장만을 고려하고 있기 때문에, 유사량의 주배출원인 산림과 농지, 나지의 영향을 고려하지 못한 것으로 보인다. 따라서 이러한 지역의 토양유실 감소가 도시화로 인한 오염퇴적물의 증가보다 유사량의 발생에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3.3.3 시나리오 3: 기후 및 토지피복변화의 적용

기후변화 및 토지피복변화의 복합적인 영향에 대한 분석 결과, RCP 4.5와 8.5의 모든 기간에서 기후변화 시나리오만 적용한 경우와 매우 유사한 변화의 경향을 나타냈다. 시나리오 3의 유출량은 봄과 겨울에 증가하는 반면, 여름과 가을에는 감소하였으며, 시나리오 1과의 차이는 미래 토지피복 변화에 따른 것으로 그 영향이 매우 적다. 또한 다수의 기간에서 변화율은 시나리오 1보다 증가하였으며, 이것은 도시화로 인한 불투수 지역의 증가가 강수의 토양침투를 억제시키고 지표유출을 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 토지피복변화가 유출량에 미치는 영향은 기후변화에 비해 다소 적으나, 기후변화에 의해 초래된 유출량 문제를 더욱 악화시키는 원인이 될 수 있다 (Praskievicz and

Chang, 2011).

유사량의 경우 기후변화만 적용한 경우에 비해 전체적으로 양이 감소하는 것을 알 수 있다. 시나리오 3의 유사량 변화율은 시나리오 1에 비하여 2030년대 RCP 4.5 및 RCP 8.5에서 각각 -1.8%, -1.9% 감소하였으며, 2040년대와 2050년대에는 RCP 4.5에서 각각 -9%, -9.1%, RCP 8.5에서 각각 -19.2%, -16.1% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지표가 도로, 건물과 같은 불투수층으로 피복되고 산지, 농지, 나지의 면적이 줄어들어 따라 손실되는 유사량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구는 새로운 기후변화 시나리오인 RCP 하의 미래 기후변화 및 토지피복변화가 회야강 유역의 유출 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다. 따라서 RCP 시나리오 중 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현된 상태를 나타내는 RCP 4.5 시나리오와 온실가스의 저감이 없는 극한의 상황인 RCP 8.5 시나리오에 대하여 2000년대를 기준년도로 2030년대, 2040년대, 2050년대에 대한 미래 유출량 및 유사량의 변화를 평가하였다.

SWAT 모형의 모의에 앞서 회야강 유역 내 유량 및 수질관측소의 실측값을 이용하여 검·보정을 수행하고, 모의값이 대상 유역의 실측값을 잘 묘사할 수 있도록 최적의 매개변수를 선정하였다. 선정된 매개변수를 적용하여 유역 내 유출량 및 유사량을 예측한 결과, RCP 시나리오 및 기간에 따라 변화량은 상이하나, 기후변화는 전반적으로 여름과 가을의 유출을 감소시키고, 봄과 겨울의 유출을 증가시키는 것으로 분석되었다. 이는 RCP 4.5와 8.5 하의 계절적 강우변화추세와 일치하는 것으로 유역 내 유출량은 강우에 지배적인 영향을 받고, 유사량은 유출로 인한 토양침식과 비점오염물질의 이동에 기인한다는 것을 나타낸다. 토지피복변화는 유역 내 산림과 농지를 불투수지역인 도심으로 변화시켰으며, 이로 인한 지표유출의 증가 및 강우의 토양침투 억제로 모든 기간에서 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 산림과 농지의 감소는 유역 내 토양유실의 발생을 억제하여 유사량은 감소하는 것으로 나타났다. 2030년대에서 2050년대로 갈수록, 그리고 RCP 4.5보다 RCP 8.5에서의 도시성장은 더욱 크게 발생하였으며, 유출량의 증가 및 유사량의 감소 역시 이와 마찬가지로 변화하였다. 시나리오 3의 결과는 토지피복변화가 유역 내 유출특성에 미치는 영향이 기후변화에 비해 상

대적으로 적은 것을 보여준다. 그러나 토지피복변화는 도시화에 따른 지표의 유출특성변화를 명확히 반영하며, 기후변화와 더불어 유역 내 유출량을 증가 혹은 감소시킬 수 있는 중요한 고려 인자임은 분명하다.

따라서 지속가능한 수자원 정책의 수립에 있어 기후변화뿐만 아니라 토지피복변화까지 고려하여 유역의 유출특성을 파악하고, 수자원의 시공간적 변동성을 전망하는 것이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

또한 본 연구의 연평균 분석 결과에 따르면 미래 기후변화와 토지피복변화로 인해 회야강 유역의 유출량 및 유사량은 계속해서 감소할 것으로 나타났다. 이로써 회야강 유역에서의 향후 가뭄 및 물 부족에 대응할 수 있는 유역관리 지침이 수립되어야 할 것이며, 회야강 하구에 위치하여 회야강으로 부터 해빈의 모래를 대부분 공급받고 있는 진하해수욕장의 연안침식관리에 대한 지침 역시 수립되어야 할 것으로 판단된다.

## References

1. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998, Large area hydrologic modeling and assessment Part 1: Model development, Journal of American Water Resources Association, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
2. Bae, D.H., Jung, I.W., Lettenmaier, D.P., 2011, Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea, Journal of Hydrology, Vol. 401, No. 1-2, pp.90-105.
3. Baek, H.J., Cho, C.H., Kwon, W.T., Kim, S.K., Cho, J.Y., Kim, Y.S., 2011, Development strategy for new climate change scenarios based on RCP, Journal of the Korean Society of Climate Change Research, Vol. 2, No. 1, pp. 55-68
4. Choi, J.Y., Lee, K.J., Lee, J.H., 2005, Turbidity control measures for multipurpose dam through watershed management, Korea Environment Institute.
5. Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schulin, R., Yang, H., 2009, Modelling blue and green water resources availability in Iran, Hydrological Processes, Vol. 23, No. 3, pp. 486-501.
6. Heo, S.G., Kim, N.W., Park, Y.S., Kim, J.G., Kim, S.J., Ahn, J.H., Kim, K.S., Lim, K.J., 2008, Evaluation of effects on SWAT simulated hydrology and sediment behaviors of SWAT watershed delineation using SWAT ArcView GIS extension patch, Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 24, No. 2, pp. 147-155.
7. IPCC, 2013, Climate Change 2013: The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
8. Ji U., Kim, T.G., Lee, E.J., Ryoo, K.S., Hwang, M.H., Jang, E.K., 2014, Analysis of sediment discharge by long-term runoff in Nakdong River Watershed using SWAT model, Journal of Environmental Science International, Vol. 23, No. 4, pp. 723-735.
9. Kim, J.S. and Choi, C.U., 2013, Impact of changes in climate and land use/land cover change under climate change scenario on streamflow in the basin, Journal of the Korea Society for Geospatial Information System, Vol. 21, No. 2, pp. 107-116.
10. Kim, J.S., Choi, J.S., Choi, C.U., Park, S.Y., 2013, Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea, Science of The Total Environment Vol. 452-453, pp. 181-195.
11. Kim, J.S. and Park, S.Y., 2013a, A prediction and analysis for functional change of ecosystem in South Korea, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 16, No. 2, pp. 114-128.
12. Kim, J.S. and Park, S.Y., 2013b, Urban growth prediction each administrative district considering social economic development aspect of climate change scenario, Journal of the Korea Society for Geospatial Information System, Vol. 21, No. 2, pp. 53-62.
13. Lee, E.H. and Seo, D.I., 2011, Flow calibration and validation of Daechung Lake Watershed, Korea Using SWAT-CUP, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 44, No. 9, pp. 711-720.
14. Lee, G.S., Kim, J.Y., Ahn, S.R., Sim, J.M., 2010, Analysis of suspended solid of Andong and Imha Basin according to the climate change, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 13, No. 1, pp. 1-15.
15. Lee, J.M., Kun, D.H., Kim, Y.S., Kim, Y.J., Kang, H.W., Jang, C.H., Lee, G.J., Lim, K.J., 2013, Prediction of SWAT stream flow using only future precipitation data, Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 29, No. 1, pp. 88-96.
16. Lee, Y.J., Park, G.A., Kim, S.J., 2006, Analysis of landslide hazard area using logistic regression

- analysis and AHP (Analytical Hierarchy Process) approach, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5, pp. 861-867.
17. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.E., 1970, River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
  18. Park, S.Y., 2013, Urban growth prediction under the socio-economic scenarios based on climate change in the South Korea, Ph.D. Thesis, Pukyong National University, Busan, South Korea.
  19. Praskievicz, S. and Chang, H., 2011, Impacts of climate change and urban development on water resources in the Tualatin River Basin, Oregon, *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 101, No. 2, pp. 249-271.
  20. Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Li, Y.H., Hong, Q., Xu, L., Liu, R.M., 2009, A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area, *Agricultural Water Management*, Vol. 96, No. 10, pp. 1435-1442.
  21. Sloan, P.G., Morre, I.D., Coltharp, G.B., Elgel, J.D., 1983, Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watershed, Water Resources Institute, Report 142. University of Kentucky, Lexington.
  22. Soil Survey Staff, 1996, National soil survey handbook, title 430-VI, USDA Natural resources conservation service, U.S. government printing office, Washington, D.C.
  23. USDA-SCS (Soil Conservation Service), 1972, National engineering handbook, part 630 hydrology, section 4, chapter 10.
  24. Williams, J.R., 1975, Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, pp. 244-252.
  25. Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011, The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* Vol. 109, pp. 5-31.
  26. Ye, L., Yoon, S.W., Chung, S.W., 2008, Application of SWAT for the estimation of soil loss in the Daecheong Dam Basin, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 149-162.