

기후변화에 따른 미래 극한호우사상이 소양강댐 유역의 유량 및 유사량에 미치는 영향

한정호 · 이동준 · 강부식* · 정세웅** · 장원석*** · 임경재 · 김종건†****

강원대학교 지역건설공학과

*단국대학교 토목환경공학과

**충북대학교 환경공학과

***University of Colorado Boulder, USA

****강원대학교 농업생명과학 연구소

Potential Impacts of Future Extreme Storm Events on Streamflow and Sediment in Soyang-dam Watershed

Jeong Ho Han · Dong Jun Lee · Boosik Kang* · Se Woong Chung** ·
Won Seok Jang*** · Kyoung Jae Lim · Jonggun Kim†****

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

*Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

**Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

***University of Colorado Boulder, U.S.

****Institute of Agriculture and Life Science, Kangwon National University

(Received 12 December 2016, Revised 1 March 2017, Accepted 14 March 2017)

Abstract

The objective of this study are to analyze changes in future rainfall patterns in the Soyang-dam watershed according to the RCP 4.5 scenario of climate change. Second objective is to project peak flow and hourly sediment simulated for the future extreme rainfall events using the SWAT model. For these, accuracy of SWAT hourly simulation for the large scale watershed was evaluated in advance. The results of model calibration showed that simulated peak flow matched observation well with acceptable average relative error. The results of future rainfall pattern changes analysis indicated that extreme storm events will become more severe and frequent as climate change progresses. Especially, possibility of occurrence of large scale extreme storm events will be greater on the periods of 2030-2040 and 2050-2060. In addition, as shown in the SWAT hourly simulation for the future extreme storm events, more severe flood and turbid water can happen in the future compared with the most devastating storm event which occurred by the typhoon Ewiniar in 2006 year. Thus, countermeasures against future extreme storm event and turbid water are needed to cope with climate change.

Key words : Climate change, Extreme storm event, Hourly simulation, Sediment, SWAT, Streamflow

1. Introduction

지구온난화로 인한 기후변화는 전 지구적으로 수문순환 특성을 변화시키고 있다. 수문순환의 변화는 강수량 증감, 집중호우 증가, 홍수 증가, 가뭄 증가 등 기상패턴 변화의 원인이 되고 있으며, 기상패턴 변화는 심각한 자연재해를 초래하여 경제적·사회적으로 많은 피해를 발생시키고 있다 (Lee et al., 2016). 자연재해로 인한 경제적·사회적 피해의

대표적인 예로 2006년 발생한 태풍 에위니아에 의한 피해가 있다. 소양강댐 유역에서 태풍 에위니아의 영향으로 200년 빈도를 초과하는 극한호우사상(시간당 강수량 최대 88 mm, 월강수량 832 mm)이 발생했으며, 이로 인해 상류 고랭지 농업지역에서 다량의 토양이 유실되었다(Yum et al., 2011). 이렇게 유실된 다량의 토사가 하천으로 유입되면서 고농도의 흙탕물을 발생시켰으며, 발생한 흙탕물이 하류 소양호로 유입되어 8개월이 넘는 장기 탁수 문제를 야기했다(Lee, 2008). 이로 인해 하류 하천과 호소의 수질악화 및 생태계 훼손, 상수도 정수 처리비용 증가, 자연경관 훼손, 어족자원 감소 등 심각한 피해가 발생했었다. 이후 소양강댐의 탁수 발생을 저감하기 위해 정부에서는 다양한 유역관리 대책(발 기반 정비사업, 사방댐 건설, 고랭지밭에 대한 최적관리기법 도입 등)과 댐 내 대책(선택취수 시설

† To whom correspondence should be addressed.
kimjg23@gmail.com

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

설치, 탁수자동측정 장치 설치 등)을 추진하였다(Yum et al., 2011). 하지만 점점 더 가속화되고 있는 기후변화로 인해 최근 여러 연구에서 2006년 태풍 예위니아에 의해 발생한 극한호우사상보다 더 큰 규모의 극한호우사상이 발생할 가능성이 있다고 보고되고 있다(Kim, 2015; Kwon et al., 2011; Park et al., 2014; Yang, 2007).

이러한 자연재해를 예측하고 그로 인한 피해를 사전에 대응하기 위한 전략 수립을 위해서 유역의 수문순환에 대한 기후변화의 영향을 분석하고 평가하는 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 유역에 대한 장기적인 기후변화의 영향을 모의를 위해 다양한 모형이 사용되고 있다. 대표적으로 Variable Infiltration Capacity(VIC), Soil and Water Assessment Tool(SWAT), Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF), watershed-scale Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model(watershed-scale L-THIA) 등의 수문 모형이 기후변화에 따른 수문·수질 분석을 위해 널리 사용되고 있다 (Abdulla et al., 2009; Beyene et al., 2010; Cuo et al., 2009; Ryu, Jang, Kim, and Choi et al., 2016; Ryu, Jang, Kim and Jung et al., 2016; Verma et al., 2015). 그 중에서 SWAT 모형은 이미 많은 선행연구들을 통해 국내 유역에 대한 적용성이 검증된 수문모형으로, 유역에서의 수문·수질에 대한 기후변화의 영향을 분석하는데 널리 이용되고 있다. 국내 선행연구들을 살펴보면, Lee et al. (2016)은 SWAT 모형과 VIC 모형을 이용하여 기후변화에 따른 수자원 영향평가 시 발생할 수 있는 불확실성 요인을 정략적으로 평가하였으며, Jeong et al. (2013)은 SWAT 모형을 이용해 기후변화가 충주댐과 충주 조정지댐의 저수량에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 Ahn et al. (2013)은 SWAT 모형을 이용하여 설마천 혼호림 유역의 증발산과 토양수분에 대한 기후변화의 영향을 평가하였다.

하지만 이러한 대부분의 선행연구에서는 일강우량 자료를 이용하여 일단위로 유량, 증발산, 수질 등을 평가하였다.

그러나 일단위 강우량 자료는 실제 강우사상의 강우강도를 고려하는데 한계가 있기 때문에 강우사상에 따른 정확한 침투유출량 산정은 불가능하다. 강우사상의 강우강도를 고려하고 침투유출량 모의 정확도를 향상시키기 위해서는 일 단위 이하(sub-daily) 시간해상도에 대한 모의가 필요하다. 또한, 유사량, 비료, 농약과 같은 대부분의 비점오염원의 거동은 유출량에 매우 큰 영향을 받기 때문에 일 단위 이하 시간해상도에 대한 모의를 통해 상세한 비점오염원 예측이 가능하다(Jang et al., 2015). 이를 위해서 Jeong et al. (2010)은 SWAT 모형의 유출 모의 성능을 향상시키고자 시간 단위 이하(sub-hourly) 시간해상도에 대한 유량 및 수질 모의 모듈을 개발하고 이를 SWAT 모형에 적용하였다. 그리고 Jeong et al. (2010)은 개선된 SWAT 모형을 이용하여 텍사스 오스틴의 Lost Creek Golf course Area 유역(1.94 km²)을 대상으로 15분, 시간 단위, 일 단위 간격 모의에 대한 유출량 모의 정확도를 평가 하였다. 정확도 평가 결과 시간해상도가 높을수록 일 단위보다 정확한 모의 결과를 나타냈으며, 특히 고유량(high flow)에 대한 모의 정확도가 크게 향상되었다고 보고하였다. 별미천 유역(1.17 km²)을 대상으로 한 Jang and Kim (2016)과 자운리 유역 내 소유역(0.008 km²)을 대상으로 한 Maharjan et al. (2013)의 연구에서도 SWAT 모형의 시간 단위 모의가 일 단위 모의보다 높은 정확도를 나타냈다. 하지만 기존 연구에서는 소규모 유역만을 대상으로 시간 단위 모의 정확도를 평가하였으며, 현재 까지 대규모 유역을 대상으로 한 시간 단위 모의의 정확도 평가는 수행되지 않았다.

이에 본 연구의 목적은 1) 소양강댐 유역의 미래 강수 패턴 변화를 분석하고, 2) 소양강댐 유역을 대상으로 대규모 유역에 대한 SWAT 모형의 시간 단위 모의 기능의 적용성을 평가하고, 3) 이를 이용해 기후변화에 따른 극한호우사상에 대한 유량과 유사량을 전망하여 장기적인 미래 댐운영 계획 수립을 위한 기초자료를 제공하는 데 있다.

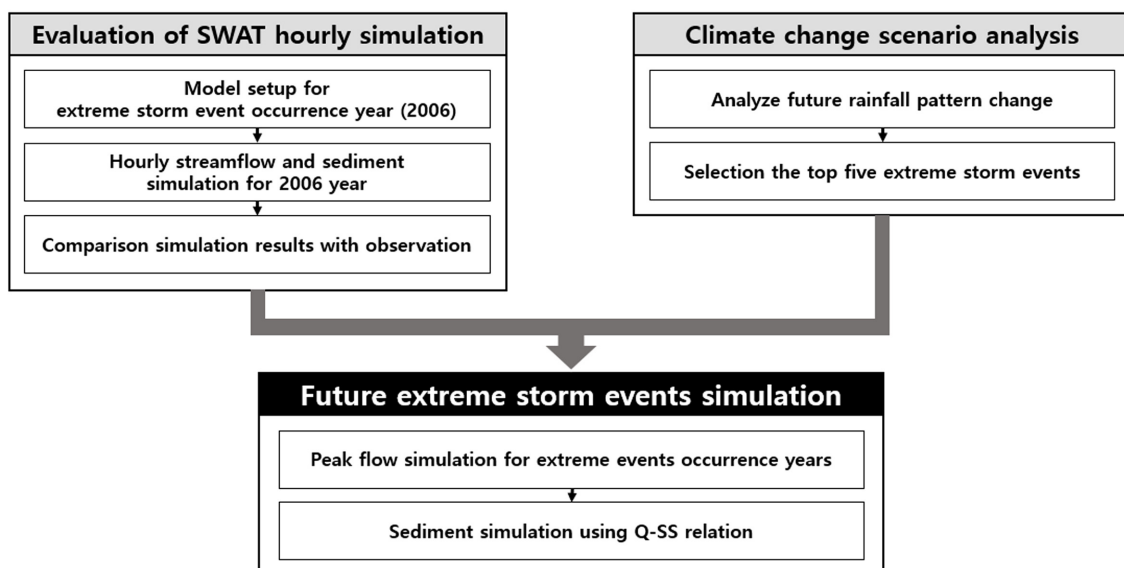


Fig. 1. Flow chart to accomplish research objectives.

2. Materials and Methods

본 연구에서는 과거 소양강댐 유역에서 발생했던 가장 극심한 극한호우사상을 선정하고, 선정된 극한호우사상이 발생한 연도에 대해 대규모 유역(소양강댐 유역)에 대한 SWAT 모형의 시단위 모의 성능을 평가하였다. 또한 기후 변화 시나리오를 분석하여 미래 소양강댐 유역의 강수 패턴 변화를 분석한 후, 전체 분석 기간 중에서 발생한 상위 5개 극한호우사상을 선정하여 해당 극한호우사상에 따른 침투유출량과 유사량을 모의하였다. 모의 결과를 통해 기후 변화에 따른 소양강댐 유입지점에서의 침투유출량과 유사량의 변화를 전망하였다. Fig. 1은 본 연구의 전체적인 흐름도를 나타낸 그림이다.

2.1. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성(United States Department of Agricultural, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 준분포형 유역단위 수문모형이다(Arnold, 1992; Arnold et al., 1998). SWAT 모형은 다양한 토양과 토지이용을 고려하여 장기간에 대한 유역단위 유출 및 수질 모의가 가능하다. SWAT 모형의 입력 자료는 크게 기상자료와 지형자료가 있으며, 기상자료에는 강수량, 기온, 풍속, 일사량, 상대습도가 필요하며, 지형자료에는 수치표고 모형(Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도, 토양도가 필요하다.

SWAT 모형의 구성은 크게 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 4가지 부모형으로 구성되어 있다. 수문 부모형은 동일한 토양과 토지이용도의 조합인 수문학적 반응 단위(Hydrologic Response Unit, HRU)를 기본 모의 단위로 지표 유출수를 산정한다. 지표 유출수 산정 과정에서 일단위

모의와 시단위 모의는 서로 다른 방법이 이용되는데, 일단 위 지표 유출수 모의에는 미국 농촌 소유역에서의 강우-유출 관계를 나타내는 경험식으로 다양한 토지이용과 토양특성에 따라 유출량을 산정하는 방법인 SCS 유출곡선법(Soil Conservation Service Curve Number)이 이용된다(Jeong et al., 2010; Neitsch et al., 2011). 이와 달리 시단위 모의에서 지표 유출수 산정은 Green-Ampt 침투 방법이 이용된다(Jeong et al., 2010; Neitsch et al., 2011). Green-Ampt 침투 방법은 지표면에서의 과잉수를 가정하여 침투를 예측하기 위해 개발된 방법으로, SWAT 모형에서는 저류가 발생되는데 걸리는 시간(ponding time)을 모의하기 위해 Mein and Larson (1973)이 개발한 Green-Ampt Mein-Larson 초과 강우 방법을 이용한다. 또한 강우사상에서의 최대 유출율을 의미하는 침투유출량은 수정합리식(Modified Rational Method)을 이용하여 산정된다.

2.2. 연구대상지역

연구대상지역은 북한강의 상류인 소양강댐 유역(Fig. 2)으로 유역면적 2,694 km², 유역평균표고 650 m, 유역평균경사 46%이며, 유역면적 중 90% 이상이 산림으로 구성되어 있다. 소양강댐의 주요 유입하천은 인북천과 내린천이 있으며, 인북천과 내린천의 합류지점인 인제군 사구미교 지점에서의 유량은 소양강댐으로 유입되는 유량의 90% 이상을 차지한다(Chung et al., 2011). 또한, 주요 유입하천(인북천과 내린천)의 상류지역인 양구군 해안면 지역과 흥천군 내면 지역에서는 대부분 고랭지 농업이 이루어지고 있다. 이로 인해 여름 집중강우 시 토양유실 문제가 매년 반복해서 발생되고 있으며, 유실된 토양이 하천으로 유입되어 인북천과 내린천에 심각한 탁수문제를 야기하고 있다.

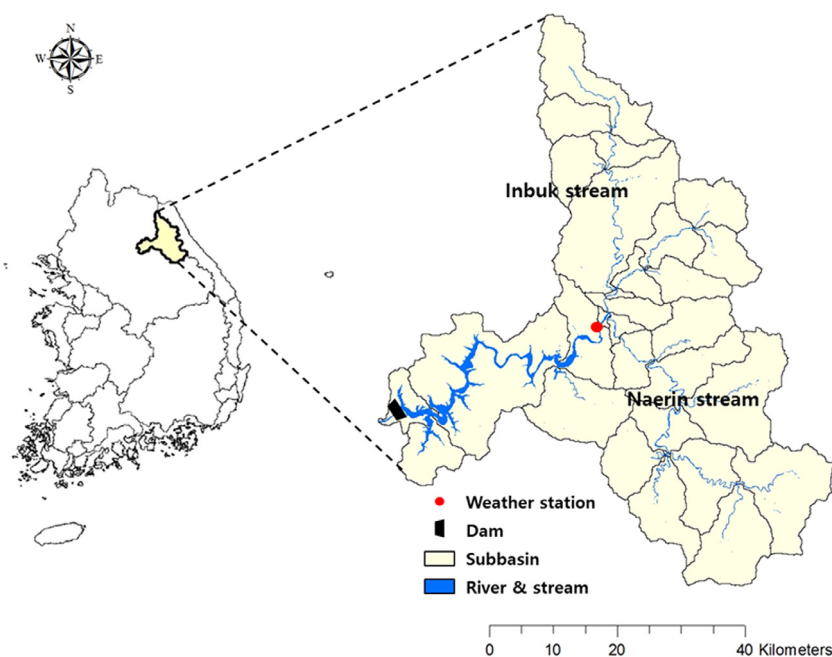


Fig. 2. Soyang-dam watershed.

2.3. 모형 입력자료 구축

본 연구에서는 SWAT 모형의 시단위 모의를 위해 소양강댐 유역 내 위치한 인제 기상관측소 자료를 수집하여 기상자료를 구축하였다. 기상자료 수집 기간은 모델 안정화 기간(warm-up)을 고려하여 2002년부터 2006년까지 5년에 대한 자료를 구축하였다. 최고·최저 기온, 상대습도, 풍속, 일사량 자료는 기상청에서 제공하는 자료를 이용하였으며, 시단위 모의를 위한 시단위 강우자료는 기상자료개방포털에서 제공하는 시단위 강우자료를 이용하였다.

지형입력 자료인 DEM은 International Centre for Tropical Agriculture(CIAT)에서 제공하는 Shuttle Radar Topography Mission(SRTM) DEM 자료를 이용하였다. 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 자료를 가공하여 격자크기 90 m의 raster 형식으로 가공한 토양도를 이용하였으며, 토지이용도는 환경부에서 제공하는 9개의 토지이용(침엽수림, 낙엽수림, 혼성림, 논, 밭, 시가화 건조지역, 초지, 나지, 수역)으로 구분된 2008년 토지이용도를 사용하였다. 소양강댐 유역의 토지이용 현황은 2008년 기준으로 산림이 전체 유역면적의 90% (2,425 km²)로 가장 많은 토지이용을 차지하고 있으며, 농업지역인 논과 밭이 각각 2% (54 km²), 4% (108 km²)를 차지하고 있다.

2.4. 기후변화 시나리오

미래 기후변화에 따른 소양강댐 유역에서의 강수량 변화를 분석하기 위해서 Chung et al. (2015)이 생산한 기후변화 시나리오 자료를 이용하였다. Chung et al. (2015)는 기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제 5차 평가 보고서(5th Assessment Report, AR5)에서 발표한 새로운 온실가스 배출 시나리오인 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathway, RCP)를 다양한 CMIP5(the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project)모형들에 적용하여 일단위 기후변화 시나리오를 생성하였다. 그 중 본 연구에서는 우리나라 국가표준 시나리오인 HadGEM2-AO 모형을 이용하여 온실가스 저감 정책이 상당히 실현된 경우인 RCP 4.5 시나리오에 따른 기후변화 시나리오 자료를 이용하였다. 또한 본 연구에서는 현재로부터 상당히 시간이 경과된 먼 미래일수록 기후변화 시나리오의 불확실성이 증가된다는 점을 고려하여 기후변화 시나리오 자료의 전체 기간인 2010년-2100년 중에서 2010년부터 2060년까지 연구를 진행하였다.

2.5. Huff의 4분위법 이용한 시단위 강우자료 생성

SWAT 모형의 시단위 모의를 위해서는 시단위 강우자료

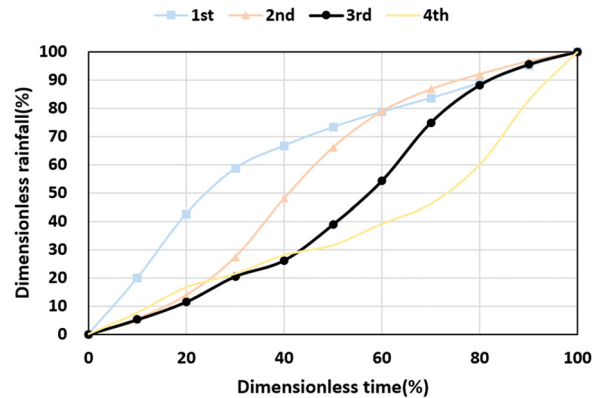


Fig. 3. Huff distributions of Inje-gun.

가 필요하다. 본 연구에서는 미래 기간에 대한 시단위 모의를 위해 Huff 4분위법(Huff, 1967)을 이용하여 기후변화 시나리오의 일단위 강수량 자료를 시단위 강수량 자료로 가공하였다.

Huff 4분위법은 미국 일리노이 주의 다양한 유역을 대상으로 12년 동안의 강우관측 자료를 바탕으로 4분위법(quartile classification)에 따른 시간분포 누가확률곡선을 제시한 것이다. Huff 4분위법은 설계 강우의 시간분포를 위해 실무에서 많이 사용되고 있다(MLTMA, 2013). 국내 수공구조물 설계를 위한 설계홍수량 산정요령(MLTM, 2011)에서도 Huff 4분위법을 제안하고 있으며, 1-4분위 중에서 1, 2분위는 초기손실이 많이 발생하여 홍수유출량이 낮게 산정되기 때문에 3분위를 사용할 것을 제안하고 있다. 이를 참고하여 본 연구에서도 Huff 3분위를 적용하였다. 인제 기상관측소의 설계 강우 시간적 분포는 ‘지역별 설계강우의 시간적 분포(MCT, 2000)’를 참고하였다. Table 1은 인제군 지역의 각 분위별 발생확률 50%에 해당하는 누가우량이며, Fig. 3은 인제군의 각 분위별 무차원 누가곡선이다.

2.6. 미래 시단위 모의 기간 선정

장기간에 대한 시단위 모의는 일단위 모의에 비해 소요되는 모형 구동시간이 매우 길다는 단점이 있다. 또한 시단위 모의 결과는 일단위 모의 결과에 비해 용량이 매우 크고 방대하기 때문에 자료 처리와 분석에 있어 많은 노력과 시간이 요구된다. 이 때문에 기존 선행연구에서도 장기간에 대한 시단위 모의는 비효율적이며, 시단위 모의는 장기간 분석보다는 강우사상별 분석에 적합하다고 제시한 바 있다(Jang et al., 2015; Jang and Kim, 2016; Jeong et al., 2010). 이점을 고려하여 본 연구에서는 전체 기간(2010년 ~ 2060년) 중에서 가장 큰 극한호우사상 5개를 선정하고

Table 1. Cumulative rainfall of Inje-gun(50% occurrence possibility)

Inje		Duration time (%)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Cumulative rainfall(%)	1st	19.9	42.6	58.6	66.7	73.3	78.7	83.6	88.9	95.0	100
	2nd	5.6	13.8	27.3	48.0	66.1	78.8	86.7	92.0	96.6	100
	3rd	5.2	11.5	20.5	26.2	38.9	54.3	74.9	88.2	95.5	100
	4th	7.6	16.6	21.4	28.0	31.5	39.1	46.1	60.0	82.8	100

선정된 극한호우사상이 발생한 5개 연도에 대하여 시단위 모의를 하였다. 극한호우사상의 선정은 당일 최대 강수량과 선행 5일 강수량(Antecedent 5 Days Rainfall)을 기준으로 선정하였다. 여기서 선행 5일 강수량은 선행 5일 강수량으로 선행토양함수조건을 결정하고, 이를 통해 유효우량을 산정하기 위한 유출곡선지수(Curve Number)를 산정하는 SWAT 모형의 특징을 고려하여 선정하였다. 또한 소양강댐 유역과 같이 유역의 규모가 큰 유역에서는 강우사상 시 발생한 지표 유출과 토층으로부터의 유출(지표하 유출 또는 중간유출)이 유출구까지 도달하는데 하루 이상의 시간이 소요되기 때문에(Neitsch et al., 2011) 이 점을 고려하여 선행 5일 강수량을 함께 고려하여 극한호우사상을 선정하였다.

2.7. 모형의 보정

본 연구에서는 모형 안정화를 위해 2002년부터 2005년까지를 모형 안정화 기간(warm-up)으로 설정하였으며, 태풍 에위니아가 발생한 2006년에 대하여 SWAT 모형을 보정하였다. 보정을 위해 K-water 공공데이터개방포털에서 제공하는 시단위 소양강댐 유입량 자료를 활용하였으며, 이를 통해 SWAT 모형의 시단위 모의 정확도를 평가하였다.

하지만 대규모 유역을 대상으로 한 시단위 모의의 정확도 평가를 위해서 동일한 시계열에서의 실측값과 모의값을 일대일로 비교하는 것은 한계가 있다고 판단하였다. 이는 시단위 모의를 적용한 기존 여러 선행연구(Jang et al., 2015; Jang and Kim, 2016; Jeong et al., 2010; Maharjan et al., 2013)가 소규모 유역만을 대상으로 한 이유와 관련이 있다. 대규모 유역에서는 유역 내 침투, 저류, 증발 등 수문순환에 영향을 주는 다양한 요인들이 복잡하게 얽혀 상호영향을 준다. 따라서 대규모 유역을 대상으로 일단위 이하 시간해상도에 대한 모의는 이러한 요인들을 고려한 정확한 도달시간(유입시간 + 유하시간) 산정이 요구된다. 하지만 소유역 내 토지이용도의 공간적 분포가 반영되지 않는 HRU를 기본 단위로 수문모의를 하는 SWAT 모형의 모의 특성 상 높은 시간해상도 모의에서 도달시간의 산정은 많은 불확실성을 내포한다. 이에 본 연구에서는 소양강댐 유역을 대상으로 강우지속시간 내에서의 시간별 일대일 유량 비교는 한계가 있을 것으로 판단하고, 이를 대신해 해당 강우사상의 침투유출량을 실측 자료와 비교하여 시단위 모의 정확도를 평가하였다.

또한 앞서 설명한 바와 같이 SWAT 모형은 시단위 모의와 일단위 모의에서 서로 다른 방법을 이용하여 지표유출을 산정한다. 이 때문에 시단위 모의 보정을 위해 사용되

는 매개변수는 일단위 모의 보정에서의 매개변수와 차이가 있다. 이에 본 연구에서는 선행연구를 참고하여 시행 착오 방법으로 보정 매개변수를 결정하였다. Table 2는 Jang and Kim (2016), Jang et al. (2015), Jeong et al. (2010), Yang et al. (2016)의 연구를 참고하여 본 연구에서 보정에 사용한 매개변수를 정리한 것이다.

2.8. 유량-SS 관계식을 이용한 유사량 모의

현재 우리나라에서는 연구를 위해 일부 대학 및 특정 기관에서 보유하고 있는 시단위 측정수질자료를 제외하면 시단위로 수질 항목이 측정되고 있는 곳은 전무한 실정이다. 또한 본 연구와 같이 대규모 유역을 대상으로 장기간에 대한 시단위 분석에 활용할 수 있는 수질자료의 측정은 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 모의 결과를 보정하기 위한 시단위 유사량 실측자료가 없기 때문에 Chung et al. (2011)이 개발한 유량-SS 관계식을 이용하여 극한호우사상에서의 시단위 유사량을 모의하였다. Chung et al. (2011)은 소양강댐 유입 지점인 인북천과 내린천의 합류지점인 인제군에 위치한 사구미교 지점(인제 기상관측소 부근)에서 강우시 연속 실측한 자료를 바탕으로 유량-SS 관계식을 개발하였다. Chung et al. (2011)이 개발한 유량-SS 관계식은 유량 상승기와 하강기에 발생할 수 있는 이력현상(hysteresis)을 고려하여 개발한 식으로써, 기존의 유량-SS 관계식에 비해 신뢰도를 개선한 식이다.

$$SS = 3.6325Q^{0.5539} \text{ (rise)} \tag{1}$$

$$SS = 0.018Q^{1.283} \text{ (fall)} \tag{2}$$

식 (1)은 유량 상승기에서의 유량-SS 관계식이며, 식 (2)는 유량 하강기에서의 유량-SS 관계식이다. Chung et al. (2011)에 따르면 상승기 식 (1)과 하강기 식 (2)의 결정계수(R²)를 산정한 결과 각각 0.45, 0.65로 하강기 식 (2)이 상승기 식 (1)에 비해 상대적으로 정확한 것으로 나타났다. 하지만 두 식 모두 유량 및 유사량에 대해서 높은 상관성을 나타내지는 못하였다. 이는 동일한 지점에서 측정을 해도 같은 유량에서 SS의 양이 측정 시기에 따라 큰 차이가 발생할 수 있기 때문에 유량-SS 관계식의 정확도를 향상시키기 위해서는 장기간의 유량-SS 관계 분석 자료가 필요하다(Warrick et al., 2013). 하지만 국내에서는 장기간 유량-SS 관계 관측 자료가 거의 없는 실정이기 때문에 본 연구에서는 Chung et al. (2011)이 개발한 유량-SS 관계식을 이용하였다.

Table 2. Calibration parameters for SWAT hourly simulation

Parameter	Description	Default value	Range	
			Min	Max
CN2	SCS moisture condition II curve number for pervious areas	each	25	98
LAT_TIME	Lateral flow travel time (days)	0	1	180
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity of first soil layer (mm/hr)	each	0	2000
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	each	0	1
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	each	0	1

3. Results and Discussion

3.1. 시단위 모의 정확도 검증

SWAT 모형의 시단위 모의 정확도를 검증하기 위하여 2006년 발생했던 가장 큰 4개의 강우사상을 선정하고, 각 강우사상에 대하여 실측 침투유출량과 모의 침투유출량을 비교하였다. 연속된 강우사상을 개별적인 강우사상으로 분리하기 위해 Joo et al. (2013)이 국내 농촌유역을 대상으로 제시한 최소 무강우 시간 결정(Inter-Event Time Definition, IETD) 방법을 참고하여, 11시간 이상 무강우가 지속된 경우를 하나의 독립강우사상이 끝난 것으로 고려하였다. Table 3은 선정된 강우사상을 발생 기간 순으로 정리한 것이다. 가장 큰 강우사상은 3번 강우사상으로 총 강수량은 395.5 mm, 침투유출량은 11,364 m³/sec이었다. 3번 강우사상은 2006년 소양호 장기탁수 문제에 가장 직접적인 원인이 되었던 강우사상이다.

선정된 4개의 강우사상에 대하여 모의된 침투유출량의 정확도를 평가하기 위해 실측값과 모의값의 상대오차(relative error)를 산정하였다(Table 3). 4개의 강우사상에 대한 상대오차 산정 결과 평균 상대오차는 -8%였으며, 최소 1%에서 최대 -16%의 범위를 나타냈다. 극한호우사상(3번 강우사상) 시 발생한 침투유출량에 대한 실측값과 모의값의 상대오차는 -11%로 높은 정확도를 나타냈다. 또한 강우사상 별 침투유출량에 대한 실측값과 모의값을 비교한 결과 1번 강우사상을 제외한 3개의 강우사상에서 모의값이 실측값보다 작게 나타나 SWAT 모형이 침투유출량 모의에 있어 실제 침투유출량에 비해 과소평가하는 경향을 보였다. 본 연구의 분석 결과를 통해 SWAT 모형의 시단위 침투유출 모의는 대규모 유역을 대상으로도 적용 가능한 것으로 판단되었다.

3.2. 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 강수 패턴 변화

기후변화 시나리오에 따른 소양강댐 유역에서의 미래 강수 패턴 변화를 분석하였다. 이를 위해 연도별로 연중 최대 일강수량과 연중 최대 5일 강수량을 선정하여 과거 25년(1990-2015년) 동안의 평균값과 비교하였다. Fig. 4(a)는 과거 25년 평균 연중 최대 일강수량과 2016년부터 2060년까지의 연중 최대 일강수량의 차이를 나타낸 그래프이며, Fig. 4(b)는 연중 최대 5일 강수량의 차이를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 막대는 25년 평균값과의 차이를 의미하며, 빨간색 점선은 전체 기간에 대한 연중 최대 일강수량

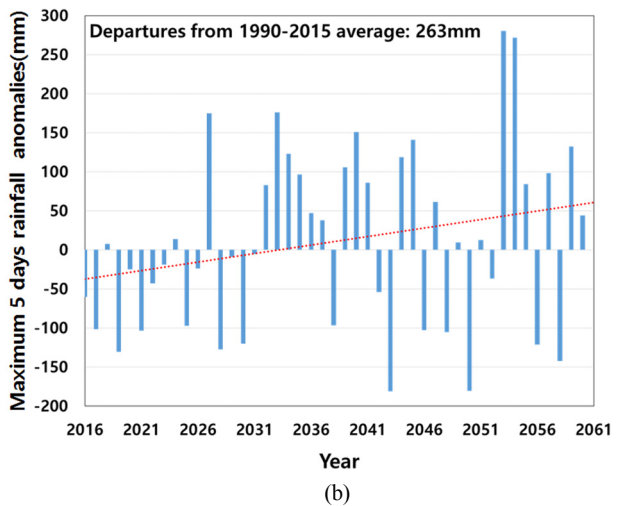
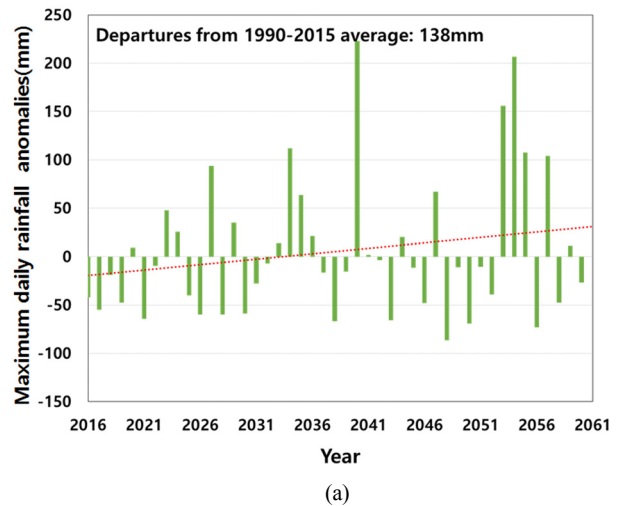


Fig. 4. Anomalies of maximum daily rainfall(a) and maximum 5 days rainfall(b).

의 변화 양상을 의미하는 추세선이다. 두 그림에서 추세선을 보면 연중 최대 일강수량과 연중 최대 5일 강수량의 규모가 기후변화가 지속됨에 따라 증가하는 양상을 나타냈다. 연중 최대 일강수량과 연중 최대 5일 강수량은 강우사상의 규모를 예측할 수 있는 지표이다(Choi et al., 2011). 그러므로 이 두 가지가 증가하는 경향을 보인다는 것은 강우사상의 규모가 증가되고 있다는 것을 나타낸다. 이를 통해서 기후변화가 지속됨에 따라 호우사상의 규모가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 실제로 앞서 언급한 바와 같이 Fig. 4(a)에서 연중 최대 일강수량의 크기는 시간이 경과됨

Table 3. Comparison between observed and simulated peak flow

No	Period (mm.dd.)	Rainfall event		Peak flow		
		Amount (mm)	Duration (hr)	Obs. (m ³ /sec)	Sim. (m ³ /sec)	Absolute error (%)
1	06.30.-07.01.	126.5	69	1,432	1,444	1
2	07.12.-07.13.	184.5	38	2,440	2,045	-16
3	07.14.-07.16.	395.5	54	11,247	10,102	-11
4	07.16.-07.21.	90.0	45	1,613	1,506	-7

Obs: observation, Sim: simulation

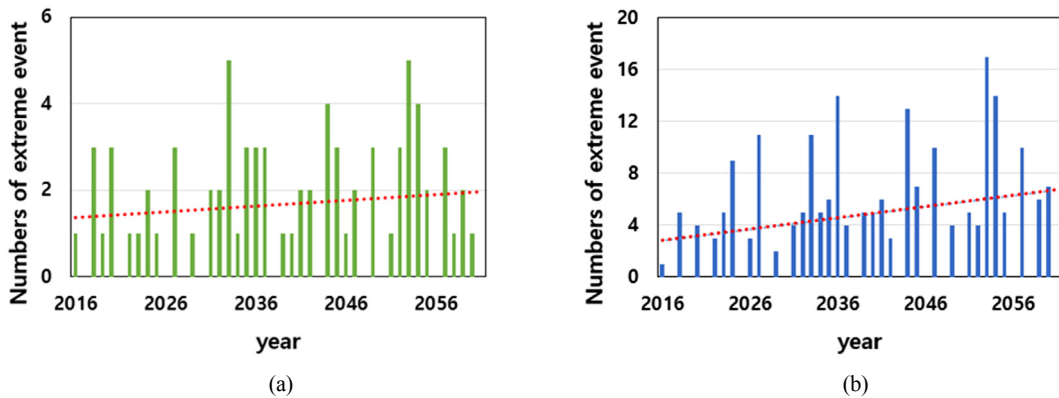


Fig. 5. The number of extreme storm events based on daily rainfall(a) and 5 days rainfall(b) of each year.

에 따라 증가되고 있다. 특히 과거 25년 평균 최대 일강수량(138 mm)을 100 mm 이상 초과하는 규모의 일강수량의 발생 빈도가 2050년 이후 크게 증가된 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(b)에서도 2050년 이후에 5일 강수량의 25년 평균값인 263 mm을 200 mm 이상 초과하는 큰 규모의 5일 강수량이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 극한호우사상의 발생 빈도 변화를 분석하였다. WMO(World Meteorological Organization)에 따르면 극한기후사상은 상위 95와 99 percentile과 하위 1과 5 percentile로 정의된다(Beyene et al., 2007). 강수량에 대해서 이 기준을 적용하면 극한호우사상은 95에서 99 percentile에 해당하는 값으로 정의할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Choi et al. (2011)이 전국 14개 기상관측소에서 제공하는 1954-2010년 동안의 강우자료를 분석하여 제시한 99 percentile에 해당하는 87.3 mm를 기준으로 극한호우사상을 선정하였다. 추가적으로 이미 위에서 언급한 바와 같이 SWAT 모형의 선행 토양함수조건 결정 방법을 고려하여 5일 강수량이 200 mm를 초과한 경우 또한 극한호우사상으로 간주하고 이에 따라 발생빈도를 분석하였다. Fig. 5(a)는 일강수량 기준으로 선정한 연간 극한호우사상 발생 횟수, Fig. 5(b)는 5일 강수량 기준으로 선정한 연간 극한호우사상 발생 횟수를 나타낸 것이다. 두 그래프의 추세선 모두 극한호우사상의 발생 빈도가 시간이 지남에 따라 증가되는 양상을 나타냈으며, 상대적으로 다른 연도에 비해 2030년-2040년과 2050-2060년에 극한호우사상의 발생빈도가 높게 나타났다.

또한 미래 극한호우사상에 따른 소양강댐 지역의 유량 및 유사량에 대한 영향을 분석하기 위해서 최대 일강수량과 최대 5일 강수량을 기준으로 연구기간 내 발생한 가장 큰 5개의 극한호우사상을 선정하였다. Table 4는 선정된 5개

개의 극한호우사상을 발생 연도 순서로 정리한 것이다. 본 연구에서는 이렇게 선정된 5개 극한호우사상이 발생한 연도를 대상으로 SWAT 모형의 시단위 모의를 이용하여 각 극한호우사상에서의 침투유출량과 유사량을 모의하였다.

3.3. 연도별 극한호우사상 시단위 모의 결과

선정된 5개의 극한호우사상이 발생한 연도(2027년, 2040년, 2053년, 2054년, 2055년)에 대하여 시단위 모의를 통해 미래 극한호우사상에 대한 침투유출량을 모의하였다. Table 5는 5개의 극한호우사상에 대한 모의 결과와 2006년 모의 결과를 분석하여 각 연도별 극한호우사상에서의 침투유출량을 큰 순서대로 정리한 것이다. 모의 결과 가장 큰 침투유출량은 19,130 m³/sec로 2054년 9월 13일 발생한 1번 극한호우사상에서 나타났다. 여기서 1번 극한호우사상의 일강수량은 345 mm로 2040년 9월 15일에 발생한 2번 극한호우사상 다음으로 두 번째로 큰 일강수량을 가졌다. 하지만, 1번 극한호우사상의 5일 강수량(484 mm)이 가장 큰 일강수량을 나타낸 2번 극한호우사상의 5일 강수량(411 mm)보다 73 mm크기 때문에 1번 극한호우사상의 침투유출량이 더 크게 모의된 것으로 판단되었다.

침투유출량에 대한 일강수량과 5일강수량의 상관관계를 분석하기 위하여 침투유출량과 일강수량, 침투유출량과 5일 강수량의 상관계수를 산정하였다. 상관계수 산정 결과 침투유출량과 일강수량의 상관계수는 0.87로 높은 상관관계를 나타냈으며, 침투유출량과 5일 강수량의 상관계수도 0.75로 비교적 높은 상관관계를 나타냈다. 이를 통해 침투유출량에 대한 5일 강수량의 영향은 일강수량보다는 작지만, 일강수량이 작거나 비슷한 경우에는 5일 강수량이 침투유출량에 충분히 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되었다.

침투유출량에 대한 일강수량과 5일 강수량의 영향은 4번, 5번, 6번 극한호우사상에서도 확인할 수 있다. 4번, 5번, 6번 중에서 가장 큰 일강수량은 245 mm로 6번 극한호우사상에서 발생하였지만, 6번 극한호우사상의 침투유출량은 7,074 mm로 4번, 5번 극한호우사상의 침투유출량과 비교하여 각각 3,396 m³/sec, 3,028 m³/sec 만큼 작게 모의 되었다. 이는 5일 강수량의 영향으로, Table 5에서 6번 극한호우사상의 5일 강수량은 4번과 5번 극한호우사상에 비해 작게

Table 4. Selection of extreme storm events

No	Year	Date	Daily rainfall (mm)	5 days antecedent rainfall (mm)
1	2027	07. 07.	232	438
2	2040	09. 15.	361	411
3	2053	08. 26.	294	367
4	2054	09. 13.	345	484
5	2055	08. 08.	245	309

Table 5. Peak flow and sediment simulation results of each extreme storm event

No	Date	Peak flow (m ³ /sec)	Sediment (mg/l)	Daily rainfall (mm)	5 days antecedent rainfall (mm)
1	2054.09.13.	19,130	5,607	345	484
2	2040.09.15.	18,320	5,304	361	411
3	2053.08.26.	11,250	2,837	294	367
4	2027.07.07.	10,470	2,587	232	438
5	2006.07.14.	10,102	2,471	202	395
6	2055.08.08.	7,074	1,565	245	309

나타났다. 특히 5번과 6번 극한호우사상의 일강수량 차이는 43 mm로 큰 차이를 보였지만, 5일 선행강수량의 차이는 이보다 더 큰 86 mm를 나타냈다.

3.4. 기후변화에 따른 미래 극상호우사상에 대한 유량 및 유사량 전망

앞에서 선정된 5개의 극한호우사상이 발생한 연도에 대해서 SWAT 모형의 시단위 모의를 통해 각 극한호우사상에서의 침투유출량을 모의하였다. 그리고 이렇게 모의한 침투유출량을 유량-SS 관계식에 적용하여 미래 소양강댐 유역에서 발생한 극한호우사상의 유사량을 산정하고 이를 분석하였다. Fig. 6은 Table 5를 그래프로 나타낸 것으로서, 각 극한호우사상에서 발생한 시간당 최대 침투유출량 및 유사량을 나타낸 것이다. 과거 시간 단위 관측자료 중 소양강댐 유역에서 발생한 시간당 최대 유입량은 2006년 발생한 5번 극한호우사상으로, 시간당 최대 유입량은 10,102 m³/sec, 유사량은 2,471 mg/l이었다. 하지만 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 5번 극한호우사상 제외한 5개의 극한호우사상 중 6번 극한호우사상만을 제외하고는 모두 5번 극한호우사상 보다 큰 침투유출량과 유사량을 나타냈다. 특히 1번 극한호우사상으로 인한 유입량과 유사량은 2006년 발생한 5번 극한호우사상과 비교했을 때 시간당 최대 침투유출량은 약 1.9배, 유사량은 약 2.3배로 매우 크게 나타났다. 이로 미루어 볼 때 소양강댐 유역에서 기후변화가 계속해서 진행 된다면 2040년 이후 2006년 발생한 태풍 에위니아로 인한 홍수 및 탁수 피해를 증가하는 피해를 발생시킬 수 있는 대규모의 극한호우사상이 발생할 가능성이 높다는 것을 알 수 있다.

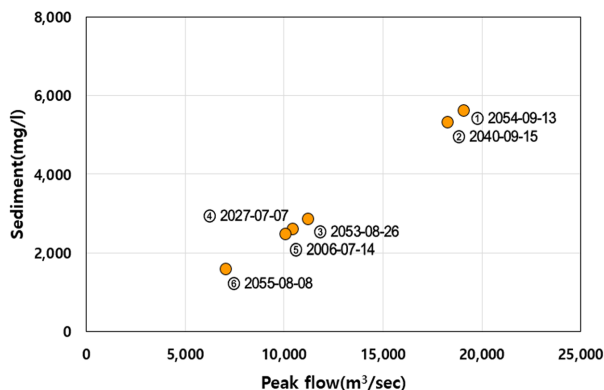


Fig. 6. Peak flow and sediment of each extreme storm event.

다만, 본 연구에서는 다양한 기후변화 시나리오 중에서 RCP 4.5 시나리오만을 적용하여 미래 소양강댐 유입지점에서의 유량 및 유사량을 전망한 것이다. 따라서 만약 RCP 4.5 시나리오가 아닌 RCP 8.5 시나리오 또는 다른 시나리오를 적용하였다면 본 연구의 결과보다 더 큰 규모의 극한호우사상이 존재했을 가능성이 있으며, 본 연구에서 제시한 극한호우사상에서의 유량 및 유사량 모의 결과보다 더 극한 상황에 대한 결과가 나타날 수 있다. 이에 따라 향후 다양한 RCP 시나리오에 대한 분석과 각 시나리오 적용에 따른 분석결과를 비교할 필요가 있다. 본 연구의 결과는 미래 소양강댐 유역에서의 유량 및 유사량의 변화를 수치적으로 정확한 값을 제시하기에는 한계가 있지만, 그럼에도 미래 소양강댐 유역에서 발생할 수 있는 극한호우사상의 발생 빈도와 규모가 어느 정도 일지에 대한 예상과 그에 따른 잠재적 영향을 예측하고 이에 대비하기 위한 자료로 활용 가능하다고 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 RCP 4.5 시나리오에 따른 소양강댐 유역의 강수량 변화를 분석하였으며, SWAT 모형의 시단위 모의 기능과 유량-SS 관계식을 이용해 미래 극한호우사상에 따른 소양강댐 유입지점에서의 침투유출량과 유사량을 전망하였다. 이를 위해 과거 가장 큰 규모의 극한호우사상이 발생한 2006년을 대상으로 대규모 유역에 대한 SWAT 모형의 시단위 모의의 정확도를 평가하였다. 또한 2060년까지 발생한 극한호우사상 중에서 가장 큰 5개의 극한호우사상을 선정하고, Huff 4분위법을 이용하여 생산한 시단위 강수량 자료를 활용하여 선정된 5개의 극한호우사상이 발생한 연도에 대하여 시단위 모의를 하였다. 이를 통해 도출된 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 흙탕물 및 장기 탁수로 인한 피해가 심각했던 2006년을 대상으로 대규모 유역에 대한 SWAT 모형의 시단위 모의 기능의 정확도를 평가한 결과, 1,000 m³/sec 이상의 침투유출량이 발생한 4개의 강우사상에 대한 침투유출량의 실측값과 모의값의 평균 절대상대오차는 8.75%로 높은 정확도를 나타냈다.
- 2) 기후변화 시나리오 분석 결과 연중 최대 일강수량과 연중 최대 5일 강수량의 규모는 기후변화가 진행됨에 따라 모두 증가하는 추세는 나타났다. 또한 일강수량과 5일 강수량을 기준으로 극한호우사상의 발생 빈도를 분

석한 결과 극한호우사상 발생빈도는 지속적으로 증가하는 추세를 보였으며, 특히 2030년-2040년과 2050-2060년에 극한호우사상의 규모와 발생빈도가 높게 나타났다.

- 3) 2060년까지 발생된 극한호우사상 중 규모가 가장 큰 극한호우사상 5개를 선정하고, SWAT 모형과 유량-SS 관계식을 이용하여 5개 극한호우사상에 대한 침투유출량 및 유사량을 모의하였다. 모의 결과 가장 큰 침투유출량은 2006년 태풍 에위니아로 인해 발생했던 시간당 최대 침투유출량의 약 1.9배인 19,130 m³/sec, 시간당 최대 유사량의 약 2.3배인 5,607 mg/l로 모의되었다.

본 연구 결과를 통해 기후변화가 계속해서 진행될 경우 미래 소양강댐 유역에서는 과거 가장 큰 극한호우사상으로 기록된 2006년 태풍 에위니아를 능가하는 대규모 극한호우사상이 발생할 가능성이 있다는 것을 확인하였다. 따라서 과거 태풍 에위니아로 발생했던 상류 고랭지 농업지역에서의 심각한 토양유실 문제와 그로 야기된 장기 탁수 문제로 심각한 경제·사회적 피해가 발생했던 2006년의 상황을 고려한다면, 현재 소양강댐의 홍수 및 탁수 대응 능력으로 대처하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 기후변화로 인해 극한호우사상의 규모가 증가되고 있다는 점을 반영하여 사전 방류, 선택취수탑 운영, 보조여수로 활용 등과 같은 기후변화 대응을 위한 장기적인 미래 댐운영 계획 수립이 필요하다.

하지만 본 연구는 Huff 4분위법을 이용하여 시단위 강수량 자료를 생성하였기 때문에 기후변화로 인한 강수량의 시간적 분포와 강우강도의 변화를 반영하기에는 한계가 있었다. 그리고 유량-SS 관계식을 이용하여 유사량을 모의했기 때문에 미래 유사량 예측 결과 역시 불확실성을 내포하고 있다. 또한 도시화로 인한 지표의 불투수층 면적의 증가 등의 토지피복변화를 반영하지 못하였다는 한계점이 있다. 따라서 기후변화에 따른 미래 수문 및 수질 예측에 대한 신뢰도 향상을 위해서는 다양한 불확실성 요소들을 고려하여 모형 모의 과정과 해석 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 최소화시킬 수 있는 기술 개발이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWM PB082564-01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Abdulla, F., Eshawi, T., and Assaf, H. (2009). Assessment of the Impact of Potential Climate Change on the Water Balance of a Semi-arid Watershed, *Water Resources Management*, 23(10), 2051-2068.
- Ahn, S. R., Park, G. A., Jang, C. H., and Kim, S. J. (2013). Assessment of Climate Change Impact on Evapotranspiration and Soil Moisture in a Mixed Forest Catchment Using Spatially Calibrated SWAT Model, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(6), 569-583. [Korean Literature]
- Arnold, J. G. (1992). *Spatial Scale Variability in Model Development and Parameterization*, Ph. D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, U.S.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I: Model Development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Beyene, T., Lettenmaier, D. P., and Kabat, P. (2010). Hydrologic Impacts of Climate Change on the Nile River Basin: Implications of the 2007 IPCC scenarios, *Climatic Change*, 100(3-4), 433-461.
- Choi, Y., Kim, M. G., Kim, Y. J., and Park, C. (2011). Characteristics and Changes of Extreme Precipitation Events in the Republic of Korea, 1954~2010: Their Magnitude, Frequency, and Percent to Total Precipitation, *Journal of Climate Research*, 6(1), 45-58. [Korean Literature]
- Chung, I. W., Eum, H. I., Kim, O. Y., and Lee, E. J. (2015). Generation of MME Climate and High Resolution Medium and Long Term Hydrology Scenario based on AR5 RCP and Development of Evaluation Method, *Water for future, Magazine of Korea Water Resources Association*, 48(5), 10-16. [Korean Literature]
- Chung, S. W., Lee, J. H., Lee, H. S., and Jin, M. S. (2011). Uncertainty of Discharge-SS Relationship Used for Turbid Flow Modeling, *Journal of Korea Water Resources Association*, 44(12), 991-1000. [Korean Literature]
- Cuo, L., Lettenmaier, D. P., Alberti, M., and Richey, J. E. (2009). Effects of a Century of Land Cover and Climate Change on the Hydrology of the Puget Sound basin, *Hydrological Processes*, 23(6), 907-933.
- Huff, F. A. (1967). Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms, *Water Resources Research*, 3(4), 1007-1019.
- Jang, S. S., Ahn, S. R., Choi, J. D., and Kim, S. J. (2015). Hourly SWAT Watershed Modeling for Analyzing Reduction Effect of Nonpoint Source Pollution, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(1), 89-97. [Korean Literature]
- Jang, S. S. and Kim, S. J. (2016). Comparison of Hourly and Daily SWAT Results for the Evaluation of Runoff Simulation Performance, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 58(5), 57-67. [Korean Literature]
- Jeong, H. G., Kim, S. J., and Ha, R. (2013). Assessment of Climate Change Impact on Storage Behavior of Chungju and the Regulation Dams Using SWAT Model, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(12), 1235-1247. [Korean Literature]
- Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J., Glick, R., Gosselink, L., and Srinivasan, R. (2010). Development and Integration of Sub-hourly Rainfall-runoff Modeling Capability within a Watershed Model, *Water Resources Management*, 24(15), 4505-4527.
- Joo, J., Lee, J., Kim, J. H., Jun, H., and Jo, D. (2013). Inter-event Time Definition Setting Procedure for Urban Drainage Systems, *Water*, 6(1), 45-58.
- Kim, S. Y. (2015). *Analysis of the Future Discharge in Soyang River Dam Watershed Using Climate Change Scenarios*, Master's Thesis, Kyonggi University. [Korean Literature]
- Kwon, H. H., Sivakumar, B., Moon, Y. I., and Kim, B. S.

- (2011). Assessment of Change in Design Flood Frequency under Climate Change using a Multivariate Downscaling Model and a Precipitation-runoff Model, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 567-581.
- Lee, M. H., So, J. M. and Bae, D. H. (2016). Development of climate change uncertainty assessment method for projecting the water resources, *Journal of Korea Water Resources Association*, 49(8), pp. 657-671. [Korean Literature]
- Lee, J. Y. (2008). A Hydrological Analysis of Current Status of Turbid Water in Soyang River and Its Mitigation, *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 13(6), pp. 85-92. [Korean Literature]
- Maharjan, G. R., Park, Y. S., Kim, N. W., Shin, D. S., Choi, J. W., Hyun, G. W., Jeon, J. H., OK, Y. S., and Lim, K. J. (2013). Evaluation of SWAT Sub-daily Runoff Estimation at Small Agricultural Watershed in Korea, *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 7(1), 109-119.
- Mein, R. G. and Larson, C. L. (1973). Modeling Infiltration during a Steady Rain, *Water Resources Research*, 9(2), 384-394.
- Ministry of Construction and Transportation (MCT). (2000). *Regional Temporal Distribution of Design Storm of Korea*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). (2011). *Design Flood Estimation Method*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA). (2013). *Design Flood Estimation Tips*. [Korean Literature]
- Neitsch, S. L., Williams, J. R., Arnold, J. G., and Kiniry, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*, Texas Water Resources Institute.
- Park, K. W., Lee, J. J., Kwon, D. J., and Kim, J. H. (2014). A Comparative Study on Inflow Calculation of Soyanggangdam by Climate Change, *Proceedings of 2014 Korean Society of Civil Engineers*, 985-986. [Korean Literature]
- Ryu, J., Jang, W. S., Kim, J., Choi, J. D., Engle, B. A., Yang, J. E., and Lim, K. J. (2016). Development of a Watershed-Scale Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model with the Asymptotic Curve Number Regression Equation, *Water*, 8(4), 153.
- Ryu, J., Jang, W. S., Kim, J., Jung, Y., Engel, B. A., and Lim, K. J. (2016). Development of Field Pollutant Load Estimation Module and Linkage of QUAL2E with Watershed-Scale L-THIA ACN Model, *Water*, 8(7), 292.
- Verma, S., Bhattarai, R., Bosch, N. S., Cooke, R. C., Kalita, P. K., and Markus, M. (2015). Climate Change Impacts on Flow, Sediment and Nutrient Export in a Great Lakes Watershed Using SWAT, *CLEAN·Soil, Air, Water*, 43(11), 1464-1474.
- Warrick, J. A., Madej, M. A., Goñi, M. A., and Wheatcroft, R. A. (2013). Trends in the Suspended-Sediment Yields of Coastal Rivers of Northern California, 1955-2010, *Journal of Hydrology*, 489, 108-123.
- Yang, H. (2007). Water Balance Change of Watershed by Climate Change, *The Korean Geographical Society*, 42(3), 405-420. [Korean Literature]
- Yang, X., Liu, Q., He, Y., Luo, X., and Zhang, X. (2016). Comparison of Daily and Sub-daily SWAT Models for Daily Streamflow Simulation in the Upper Huai River Basin of China, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(3), 959-972.
- Yum, K. T., Ko, Y. S., Lee, P. J., and Kim, H. S. (2011). Current Status of Turbidity Reduction Planning in Soyanggang-dam, *Water for future, Magazine of Korea Water Resources Association*, 44(12), 93-97. [Korean Literature]