



기후변화 및 토지이용변화 시나리오를 고려한 황구지천 유역의 설계홍수량 평가

Design Flood Estimation in the Hwangguji River Watershed under Climate and Land Use Changes Scenario

김지혜* · 박지훈* · 송정현* · 전상민* · 강문성**,†

Kim, Jihye · Park, Jihoon · Song, Jung-Hun · Jun, Sang Min · Kang, Moon Seong

Abstract

Extreme floods occur more often recently as the frequency of extreme storm events increase due to the climate change. Because the extreme flood exceeding the design flood can cause large-scale disasters, it is important to predict and prepare for the future extreme flood. Flood flow is affected by two main factors; rainfall and land use. To predict the future extreme flood, both changes in rainfall due to the climate change and land use should be considered. The objective of this study was to simulate the future design flood in the Hwangguji river watershed, South Korea. The climate and land use change scenarios were derived from the representative concentration pathways (RCP) 4.5 and 8.5 scenarios. Conversion of land use and its effects (CLUE) and hydrologic modelling system (HEC-HMS) models were used to simulate the land use change and design flood, respectively. Design floods of 100-year and 200-year for 2040, 2070, and 2100 under the RCP4.5 and 8.5 scenarios were calculated and analyzed. The land use change simulation described that the urban area would increase, while forest would decrease from 2010 to 2100 for both the RCP4.5 and 8.5 scenarios. The overall changes in design floods from 2010 to 2100 were similar to those of probable rainfalls. However, the impact of land use change on design flood was negligible because the increase rate of probable rainfall was much larger than that of curve number (CN) and impervious area.

Keywords: Climate change; land use change; RCP scenarios; design flood; CLUE; HEC-HMS

1. 서론

최근 기후가 급변하면서 극한 강수 사상의 발현빈도가 점차 증가하고 있다. 특히 과거의 설계강우량을 초과하는 극한 강수 사상의 발생은 수공구조물의 안전성을 저해하고 재산 및 인명 피해를 유발하는 원인이 되므로 (Kim and Ryu, 2011), 이를 대비하기 위해서는 기후변화를 고려한 미래 홍수량을 예측하여 분석할 필요가 있다.

미래 홍수량을 예측하기 위해서는 미래 기후에 대한 분석이 필수적이며 이를 위해서는 기후변화 시나리오를 선정하고 사용하는 것이 바람직하다. 기상청은 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP)를 국가표준기후변화 시나리오로 선정하여 미래 기후자료를 제공하고 있다. 또

한, 홍수 유출은 대상 유역의 기후뿐만 아니라 토지이용에도 영향을 받으므로 미래의 토지이용변화도 고려해야한다 (Cuo et al., 2011).

기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하는 방법으로 기후변화 시나리오와 GCM (General Circulation Model, GCM)의 모의 결과를 수문모형에 입력하여 유출량을 산정하는 방법이 주로 사용되고 있다 (Heo and Nam, 2010). 그동안 기후변화에 따른 미래의 일 또는 월 유출량을 산정하는 연구는 수차례 이루어져왔다. Bergstrom et al. (2001)은 분포형 수문 모형인 HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning, HBV) 모형에 GCM 및 RCM (Regional Climate Model, RCM) 모의 결과를 적용하여 일/월/년별 유출량과 증발산량을 산정하였으며, Gul et al. (2010)은 MIKESHE 모형으로 월별 유출량을 산정하였다. Kim et al. (2004)은 SLURP 모형에 YONU GCM 자료를 적용하여 일/월/계절/년 단위의 유출량을 분석하였고, Choi et al. (2009)은 SWAT 모형에 CGCM 3.1 (T63) 자료를 적용하여 일/월/년 단위의 유출량, 증발산량, 토양수분 등을 산정하였다. 반면, 기후변화에 따른 극한 홍수량에 대한 연구는 미흡한 실정으로, Kay et al. (2006a, 2006b)은 Probability distributed rainfall-runoff model (PDM) of Moore를 이용하여 기후변화에 따른 극한홍수량을 분석하였고, Na (2010)는 HEC-1 모형으로 SRES A2 기후변화 시나

* Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture & Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: January 29, 2015

Revised: November 16, 2015

Accepted: January 19, 2016

리오에 따른 극한홍수량을 산정한 연구 등이 있다.

기후변화 및 토지이용변화가 수자원에 미치는 영향에 대해서도 국내외에서 많은 연구가 이루어졌다. 국외에서는 Bronstert et al. (2002)이 도시화 및 대공극 효과 등에 의한 토지이용변화와 ECHAM4/OPYC3 GCM의 기후변화 자료를 BROOK 모형에 적용하여 미래 홍수량을 산정하였으며, Cuo et al. (2011)은 multi-GCM에 의한 양상불 기후변화 자료와 UrbanSim 모형에 따른 토지이용변화 모의 결과를 DHSVM 모형에 적용하여 일 유출량을 산정하였다. 국내에서는 Kim et al. (2010)이 CA-Markov 기법으로 토지이용변화를 추정하고 RegCM3 RCM 기후변화 자료를 적용하여 SLURP 모형으로 일/월/계절/년 단위의 유출량을 분석하였으며, Kim et al. (2011)이 CA-Markov 모형으로 미래의 토지이용변화에 따른 농촌소유역의 수문 영향을 분석하는 연구를 수행하였다. 그러나 대부분의 연구가 홍수량이 아닌 일 유출량 예측에 그쳤으며, 홍수량을 예측한 Bronstert et al. (2002)의 경우에도 미래의 도시화율이나 대공극 효과 등을 가정하여 토지이용변화를 모의하였기 때문에 사회경제·환경적인 요인에 따른 실제 토지이용변화를 반영하지 못하는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 사회경제의 변화를 반영할 수 있는 RCP 시나리오를 기반으로 산출한 토지이용변화 시나리오를 선정하였으며, 3시간 단위의 강수량 자료를 구축하여 농촌소유역의 미래 수문 영향을 분석하고자 한다.

본 연구의 목적은 RCP 시나리오 기반의 기후변화 및 토지이용변화 시나리오를 사용하여 미래의 설계 홍수량을 평가하는데 있다.

II. 재료 및 방법

기후변화 및 토지이용변화에 따른 미래의 설계홍수량을 분석하기 위하여, RCP4.5와 8.5 시나리오 기반의 기후변화 및 토지이용변화 시나리오를 토대로 미래의 설계홍수량을 산정하였다. 미래 기간별로 산정한 확률강우량을 HEC-HMS 모형의 입력 자료로 대입하여 설계홍수량을 분석하였다. CN과 불투수율은 과거와 미래 특정 연도를 기준으로 분석한 다음 이를 HEC-HMS 모형의 매개변수로 대입하여 설계홍수량을 산정하였다. 각각의 결과에 따른 설계홍수량 결과를 비교 분석하여 기후변화와 토지이용변화가 미래 홍수량 변화에 미치는 영향과 기여율을 분석하였다. Fig. 1은 본 연구의 연구 흐름도를 나타내고 있다.

1. 기후변화 및 토지이용변화 시나리오

가. RCP 시나리오

RCP 시나리오는 기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 5차 기후변화 평가 보고서 (The Fifth Assessment Report, AR5)를 위해 선정된 표준 온실가스 시나리오이다. RCP 시나리오는 온실가스 농도를 먼저 결정한 다음 이를 기준으로 인간 사회·경제적 시나리오를 병행적으로 동시에 산출하여 기후 변화로 인해 발생하는 부정적인 영향을 완화하고 저감하는 것으로 목표로 한다(NIMR, 2012). RCP 시나리오에 따른 전지구 기후변화 시나리오 산출을 위해 국제사업인 CMIP5 (The Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project)가 착수되었으며, 2012년 현재 우리나라를 포함한 미국, 영국 등 14 개

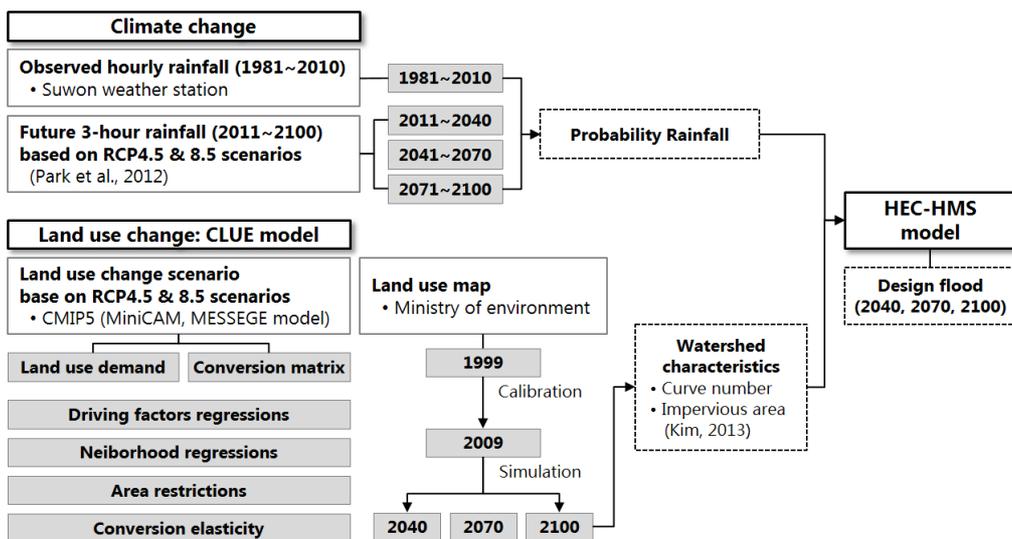


Fig. 1 Flow chart of this study

국가가 참여하고 있다.

RCP 이전의 시나리오는 SRES (The Special Report on Emissions Scenarios, SRES) 시나리오는 미래의 사회경제 형태를 결정하고 이에 따른 온실가스 배출량을 산출한 시나리오이기 때문에, 기후변화 영향 취약성 평가 및 적응 등으로 분리된 각 시나리오 간의 정보 전달이 지연되는 문제점이 있다 (NIMR, 2011). 반면에 RCP 시나리오의 경우 ‘대표 (representative)’적인 복사 강제력에 따라 기후변화 시나리오 및 사회경제 시나리오가 산출되며, 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 ‘경로 (pathway)’라는 의미를 포함한다 (NIMR, 2011).

RCP 시나리오는 대표 복사강제력에 따라 네 종류 (RCP 2.6, RCP4.0, RCP6.0, RCP8.5)로 구분된다. 2.6~8.5의 숫자는 2100년에 도달하는 복사강제력을 의미하여 단위는 W/m^2 이다. RCP2.6은 지구가 최대의 회복력을 가지는 시나리오, RCP4.5와 RCP6.0은 온실가스 저감 정책이 실현되는 시나리오, RCP8.5는 온실가스 저감 대책 없이 현재의 추세로 온실가스를 배출하는 시나리오이다.

본 연구에서는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 선정하여 미래의 설계홍수량을 분석하였다.

나. 기후변화 시나리오

기상청 국립기상연구소는 2009년부터 CMIP5에 참여하여 RCP 시나리오에 근거한 전지구 기후변화 시나리오 개발에 착수하였다. 기상청은 영국 기상청 해들리센터의 전지구 기후모형 (GCM)인 HadGEM2-AO 모형을 도입하여 국가 표준 기후변화 시나리오를 산출하였다 (NIMR, 2011). 135 km 격자의 HadGEM2-AO 모형의 전지구 기후변화 시나리오 결과를 HadGEM3-RA에 입력하여 12.5 km 격자의 한반도 시나리오를 산출하였다. 12.5 km 격자의 한반도 기후변화 시나

리오는 3시간 단위의 미래 기상 자료를 제공한다.

한반도 기후변화 시나리오는 1950~2005년의 기왕 모의자료 (historical)와 2006~2100년의 RCP4.5와 8.5 시나리오 모의자료로 구성된다. 이 중, 강수량의 기왕 모의자료는 동일 기간의 관측 강수량에 비해 약 18% 정도 작으며 (수원 기상관측소의 1981~2005년 연평균 강수량 기준), 2006년부터 시작되는 RCP 시나리오의 미래 모의자료 역시 관측 강수량보다 작은 값을 나타낸다. 이와 같이 관측 자료와 모의 자료 사이에 편의 (bias)가 존재할 경우, 분위사상법 (quantile mapping) 등의 편의보정 방법으로 모의 자료를 보정해야 한다. Park et al. (2012)은 한반도 기후변화 시나리오의 3시간 단위 강수량 자료에 분위사상법을 적용하여 편의보정을 수행한 바 있다. 분위사상법을 수행하기 위해 필요한 확률분포형은 GEV 분포를 선정하였다. GEV 분포의 매개변수는 정상 연 평균강수량과 강우일수를 기준으로 최적화하였다. 본 연구에서는 기후변화에 따른 미래 강수량 자료로 Park et al. (2012)의 연구 결과를 이용하였다.

다. 토지이용변화 시나리오

RCP4.5와 8.5 토지이용변화 시나리오는 HYDE (History Database of the Global Environment) 3.1 모형의 모의 결과 (1500년~2005년)와 MiniCAM 및 MESSAGE 모형의 모의 결과 (2005년~2100년)를 이용하여 산출하였다. 시나리오의 공간해상도는 경도와 위도 모두 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 이며, 각 격자 내에서 1년 단위로 시가지 (urban land), 목초지 (pasture), 농경지 (cropland), 1차 토지 (primary land), 2차 토지 (secondary land)의 변화량을 표현한다 (Hurtt et al., 2011).

Fig. 2는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 기반을 둔 기후변화 및 토지이용변화 시나리오의 산출 과정을 보여주고 있다.

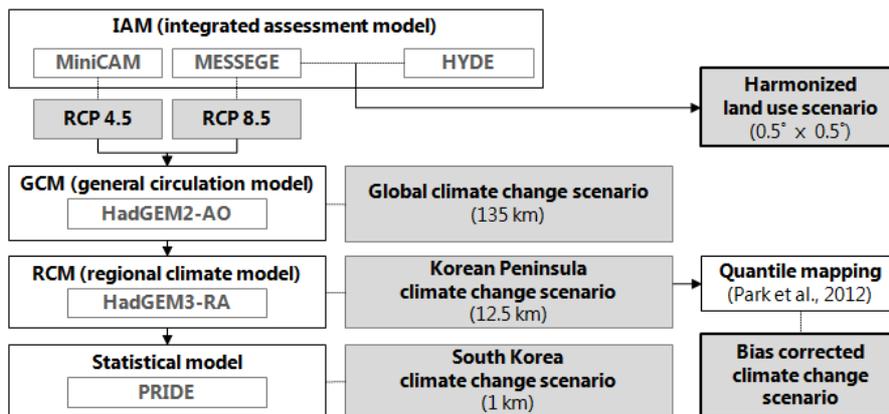


Fig. 2 Building process of climate and land use change scenarios

2. 강수량 자료 분석

가. 확률강우량 산정

확률강우량은 1981~2010년 (1995s)의 관측 강수량과 RCP4.5와 8.5 기후변화 시나리오의 2011~2100년 강수량 자료를 이용하여 산정하였다. 미래 강수량 자료는 기상청에서 제공하는 RCP4.5와 8.5 시나리오에 근거한 3시간 단위 미래 강수량을 편외보정하여 활용하였다 (Park et al., 2012). 미래 강수량 자료는 30년을 기준으로 2011~2040년 (2025s), 2041~2070년 (2055s), 2071~2100년 (2085s)에 대해 분석하였다. 본 연구에서는 2011~2015년의 과거 기간을 미래범주로 포함하여 산정하였다. 일정 기간의 과거 자료를 미래기간에 포함하여 산정한 이유는 근 미래부터 먼 미래까지 토지이용변화에 따른 설계홍수량 변화를 평가하기 위해서 동일한 기간을 설정하여 미래를 구분하는 것이 필요하였기 때문이다.

확률강우량의 산정에는 국립방재연구원의 FARD2006 (Frequency Analysis of Rainfall Data 2006) 프로그램을 이용하였다. 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 24시간 등 10 개 지속시간에 대해 100년 및 200년 빈도 확률강우량을 산정하였으며, 적합도 검정을 통해 최적의 확률분포형과 매개변수 추정방법을 선정하였다.

기후변화 시나리오에 따른 미래 강수량 자료의 경우 시간 간격이 3시간이므로, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24시간 등 3의 배수 지속시간에 대해 우선적으로 확률강우량을 산정하였다. 이를 통해 확률강우강도 (I) - 지속시간 (D) - 재현기간 (F)의 관계식을 도출하여 1, 2, 4 시간의 확률강우량을 산정하였다.

나. 강우의 시간분포

강우의 시간분포는 홍수수문곡선의 모양과 첨두홍수량에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 시간별 홍수수문곡선을 산정하기 위해서는 확률강우량의 시간분포를 고려해야 하며, 본 연구에서는 Huff의 4분위를 사용하였다.

3. 토지이용변화 모의

토지이용변화를 모의하는 대표적인 모형으로 CLUE (Conversion of Land Use and its Effects) 모형이 있다. CLUE 모형은 1996년에 네덜란드 Wageningen 대학에서 개발한 모형으로 이후 CLUE-S 모형 (Verburg et al., 2002)과 Dyna-CLUE 모형 (Verburg & Overmars, 2009)으로 발전하였다. CLUE 모형은 먼저 토지이용과 구동 요인 간의 경험적인 관계를 정량화한 다음 이 관계를 이용하여 공간 및 시간에 따른 미래의 토지이용변화를 동역학적으로 모의한다 (Verburg et al., 2002). CLUE 모형은 대규모를 유역을 저해상도로 모의

하는 반면, CLUE-S 모형은 보다 소규모 유역의 단위에서도 모의가 가능하다. CLUE-S와 Dyna-CLUE 모형에서는 미래 토지이용을 과거의 토지이용과 구동 요인간의 관계를 바탕으로 할당할 다음 전체 토지이용 요구량을 조절하는 피드백 과정을 통해 토지이용변화를 모의한다. Dyna-CLUE 모형은 토지이용과 구동 요인간의 관계뿐만 아니라 이웃 격자와의 관계도 고려하여 모의한다. Dyna-CLUE 모형은 위치 적합성, 토지이용변화 요구량, 변화 특성, 제한 조건 등으로 구성되어 있다. 토지이용의 위치 적합성은 주변 토지이용과의 관계를 이분형 로지스틱 모형을 이용하여 분석한다. 토지이용변화 요구량은 RCP4.5와 8.5 토지이용변화 시나리오를 환경부에서 정한 대분류 항목을 기준으로 재분류하여 산정한다. 토지이용의 변화 특성은 다른 토지이용으로 변화할 수 있는 가능성과 토지이용간의 상호 변화할 수 있는 가능성을 행렬로 구성하여 결정한다. 토지이용의 제한 조건은 정책과 법에 의해 토지이용을 제한하는 구역을 구분하여 설정한다 (Kim et al., 2013).

본 연구에서는 Kim et al. (2013)이 Dyna-CLUE 모형을 이용하여 모의한 미래 토지이용변화 결과를 이용하였다.

4. 설계홍수량 모의

설계홍수량은 수공구조물의 건설을 계획하는데 기준이 되는 홍수량으로, 구조물의 수문학적 특성에 따라 첨두홍수량 또는 홍수수문곡선을 의미한다. 하천 제방과 같이 홍수의 소통을 목적으로 하는 구조물의 경우 첨두홍수량 형태의 설계홍수량이 필요하다. 본 연구에서는 기후변화와 토지이용변화가 유역의 설계홍수량에 미치는 영향을 평가하기 위해 동일한 기준을 설정하여 적용하였다. 국토교통부 (2012)에서 제안한 설계홍수량 산정 기준을 적용하여 설계홍수량을 산정하였다. 설계홍수량을 산정할 모형은 소유역 및 하도 구간의 분할, 단위도법, 하도홍수추적 등이 가능한 HEC-HMS 모형을 선정하였다.

HEC-HMS 모형은 미 육군공병단에서 개발한 강우-유출 모형으로 대규모 유역의 홍수추적 및 도시 소유역, 농촌 유역의 유출량 추정에 이용된다. HEC-HMS 모형은 유역 모형 (basin model), 기상 모형 (meteorologic model), 계산제어설정 (control specifications)으로 구성되어 있다.

HEC-HMS 모형에서 손실량 산정은 SCS 유출곡선지수 방법을, 직접유출량 산정에는 Clark 단위도법을 이용하였다. 이를 이용하여 각 자료기간 별 100년 빈도 및 200년 빈도 설계홍수량을 산정하였다.

III. 대상 유역 및 자료 구축

1. 대상 유역

본 연구의 대상 유역은 안성천의 제2지류인 황구지천을 선정하였다. 황구지천은 경기도 수원시와 화성시에 걸쳐 흐르고 있으며, 유역면적은 261.11 km², 유로연장은 37.52 km이다. 황구지천 유역의 토지이용은 시가화건조지역 36%, 논 19%, 밭 7%, 산림 31%로 구성되어 있다 (Kim et al., 2013). Fig. 3과 Table 1은 황구지천의 유역과 특성을 나타내고 있다.

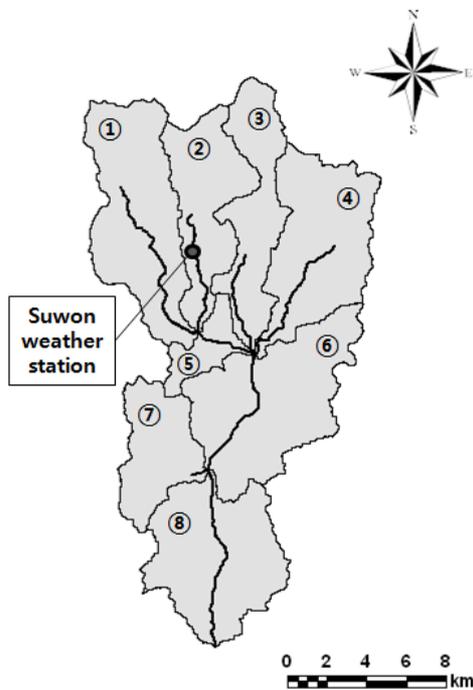


Fig. 3 Map of the study watershed and subbasins (Kim et al., 2013)

Table 1 Characteristics of the study watershed

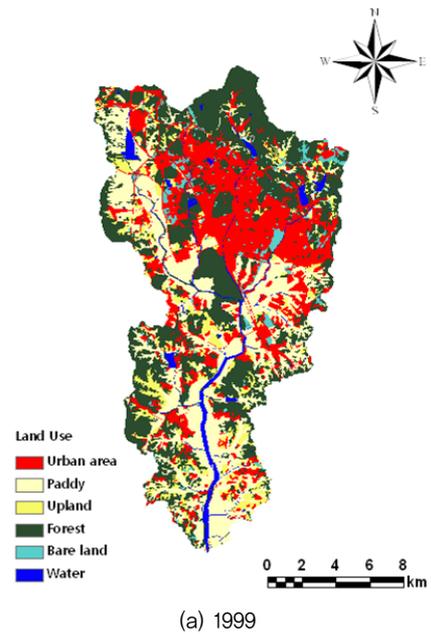
Subbasins	Area (km ²)	t_c (hr)	K (hr)	CN (III)	Impervious area (%)
1	44.31	2.26	2.47	91	25.33
2	28.56	1.75	2.06	90	33.37
3	39.92	1.93	2.01	92	44.65
4	28.05	1.72	2.70	89	34.14
5	8.96	0.48	0.35	90	19.74
6	47.86	1.27	0.93	91	31.59
7	21.45	0.67	0.55	88	15.08
8	42.01	1.77	1.42	91	20.15

* t_c and K denote time of concentration and storage coefficient, respectively.

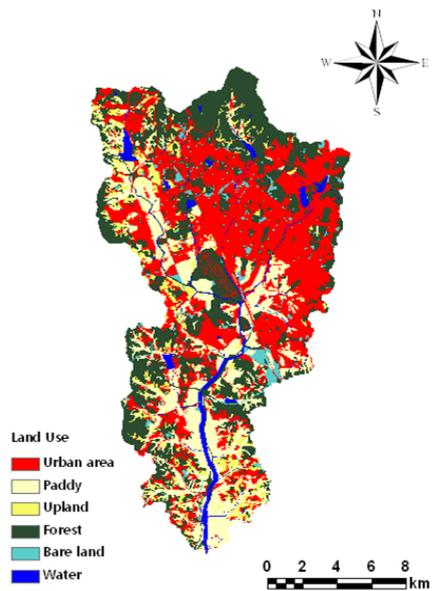
2. 지형자료

가. 토지이용도

Fig. 4는 환경부에서 제공하는 황구지천 유역의 1999년, 2009년 중분류 토지이용도를 보여주고 있다. 먼저 중분류 토지이용도를 대분류 항목을 기준으로 재분류한 다음, 대분류 항목 중 산림과 초지, 습지와 수역을 각각 하나 토지이용으로 적용하여 시가화건조지역, 논, 밭, 산림 (산림 및 초지), 나지,



(a) 1999



(b) 2009

Fig. 4 Land use maps of the study watershed (Kim et al., 2013)

수역(습지 및 수역)의 6 개 토지이용으로 재분류하였다. 토지 이용변화 시나리오 항목 중 시가지 (urban land)는 토지이용도의 시가화건조지역, 농경지 (crop land)는 논과 밭, 1차 토지 (primary land)와 목초지 (pasture)는 산림으로 분류하였다. 2차 토지의 면적은 각 토지이용에 분배한 다음 남은 면적을 나지로 설정하였다. CLUE 모형을 모의하기 위해서는 하나의 토지이용 면적이 일정하게 유지되어야 한다. 지적공부 등록 지목별 면적을 검토한 결과 2009년의 수역 면적이 현실을 가장 잘 반영하는 것으로 분석되어 2009년의 수역 면적을 기준으로 1999년 수역면적을 동일하게 변경하였다 (Kim et al., 2013).

1999년과 2009년의 토지이용도를 사용하여 CLUE 모형의 모의 능력을 평가한 다음, 이를 기준으로 2040년, 2070년, 2100년의 토지이용변화를 모의하였다 (Kim et al., 2013).

나. 토양도

토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:50,000 개략토양도를 사용하였다. 개략토양도는 토양통명, 토양배수 등급, 토양깊이, 토양종류 등의 자료를 포함하고 있다.

다. 수치지형도

수치지형도는 국가지리정보원에서 제공하는 1:25,000 수치지형도를 사용하였다. 수치지형도로부터 등고선, 도로망, 주요 기관의 위치 등을 추출하였다. 등고선 자료는 30 m × 30 m 격자의 수치표고모형 (Digital Elevation Map, DEM)을 생성하는데, 도로망, 주요 기관의 위치 등은 구동요인의 구축에 사용하였다.

3. 강수량 자료

가. 강수량 자료 구축

1) 관측 자료 (1981~2010년)

황구지천 유역 내에 위치하는 기상관측소로는 기상청 산하의 수원 기상관측소가 있다. 과거 30년의 홍수량을 분석하기 위하여 수원 관측소의 1981년부터 2010년까지 30년 시단위 강수량 자료를 구축하였다.

2) 미래 자료 (2011~2100년)

Fig. 5는 1981년부터 2100년까지 과거 관측 강수량 자료와 기후변화에 따른 미래 연평균 강수량 자료를 보여주고 있다. 연평균 강수량은 2100년으로 갈수록 점차 증가하는 추세를 보이며 연강수량의 극값은 RCP4.5 시나리오에서 나타났다. Fig. 6은 계절별 연평균 강수량 자료를 나타내고 있다.

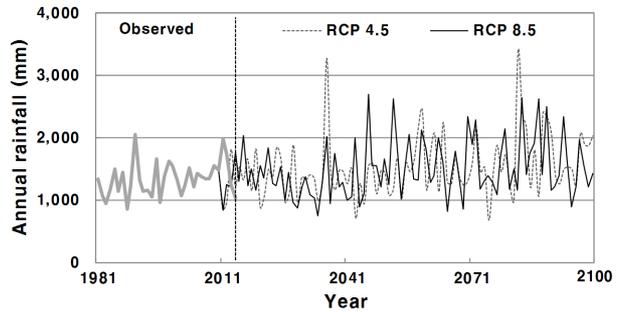


Fig. 5 Annual rainfall from 1981 to 2100

나. 확률강우량 산정

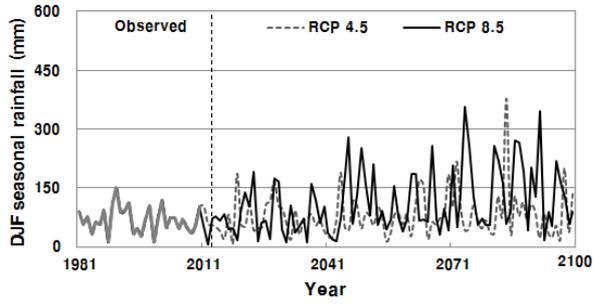
FARD2006 모형으로 최적의 확률분포와 매개변수 추정 방법을 분석하고, 100년 및 200년 빈도 확률강우량을 산정하였다. 최적의 확률분포와 매개변수 추정방법으로는 Gumbel 분포와 확률가중모멘트법을 선정하였다. 지속시간 1, 2, 4시간의 확률강우량은 3시간 단위의 미래 강수량 자료로부터 I-D-F 곡선식을 도출하여 산정하였다.

Fig. 7~Fig. 8은 확률강우량의 산정 결과를 보여주고 있다. RCP4.5 시나리오의 경우 2025s 기간에 확률강우량이 증가하고 2055s 기간에 소폭 감소하였으나, 2085s 기간에는 1995s 기간에 비해 2배 가까이 증가하였다. RCP8.5 시나리오의 경우 확률강우량이 계속해서 증가하는 추세를 보였으며, 2085s 기간에는 1995s 기간에 비해 2.5배 가까이 증가하였다. 이는 2085s 기간에 극한 강수 사상의 발현 빈도가 증가하였기 때문이라 사료된다.

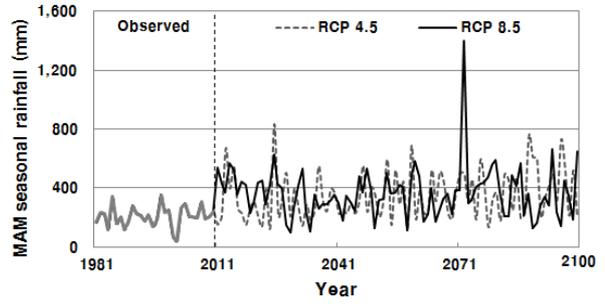
IV. 미래 토지이용변화 모의 결과

Fig. 9~Fig. 10은 1995s 기간을 기준으로 2025s, 2055s, 2085s 기간의 토지이용변화를 모의한 결과를 나타내고 있다. 1995s 기간을 기준으로 비교한 이유는 과거를 기준으로 미래 토지이용변화 변화의 경향을 파악하기 위함이다. 시나리오 별로 살펴보면, RCP4.5 시나리오는 2085s 기간에 시가화건조지역의 면적이 약 12% 정도 증가하고 산림이 약 16% 정도 감소하는 것으로 산출되었고, RCP8.5 시나리오는 시가화건조지역의 면적이 약 16% 정도 증가하고 산림이 약 18% 정도 감소하는 것으로 산출되었다 (Kim et al., 2013).

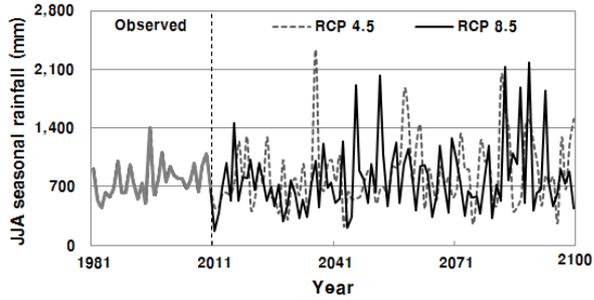
Table 2는 토지이용변화 모의 결과에 따른 CN (III)의 변화를 보여주고 있다. 소유역 3, 5에서만 CN (III)이 2085s 기간에 1 증가하였고, 나머지 소유역에서는 큰 변화가 발생하지 않았다. RCP4.5와 8.5 시나리오 모두 시가화건조지역과 산림의 면적이 2085s 기간에 약 10~20% 정도 변화하였음에도



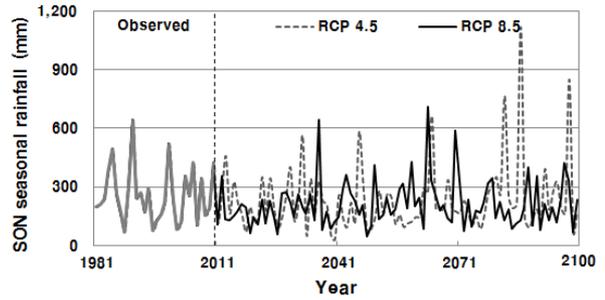
(a) Winter season rainfall (D: December, J January, F: February)



(b) Spring season rainfall (M: March, A: April, M: May)

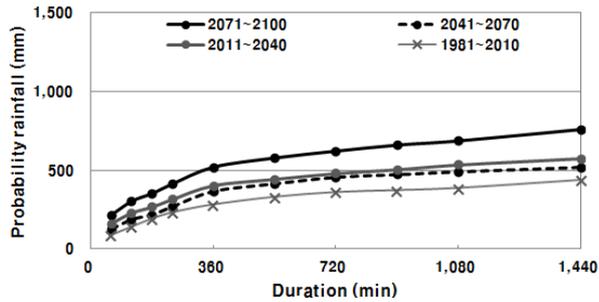


(c) Summer season rainfall (J: June, J: July, A: August)

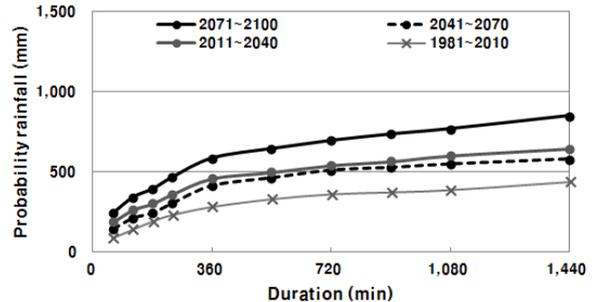


(d) Fall season rainfall (S: September, O: October, N: November)

Fig. 6. Seasonal rainfall from 1981 to 2100

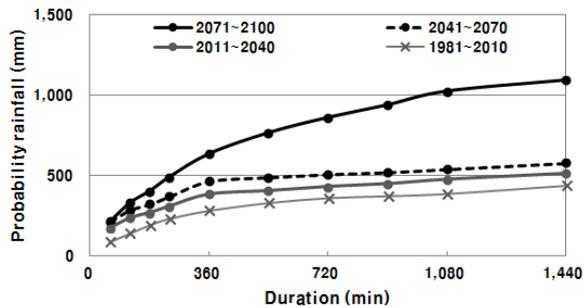


(a) 100-year frequency

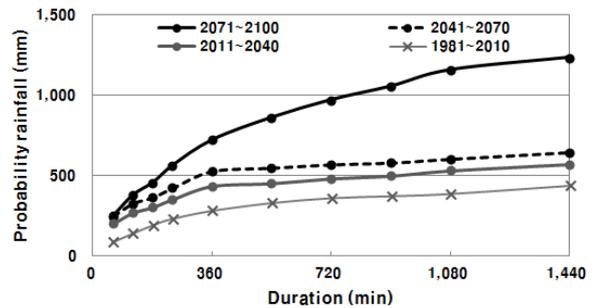


(b) 200-year frequency

Fig. 7. Probable rainfall under the RCP4.5 scenario



(a) 100-year frequency



(b) 200-year frequency

Fig. 8. Probable rainfall under the RCP8.5 scenario

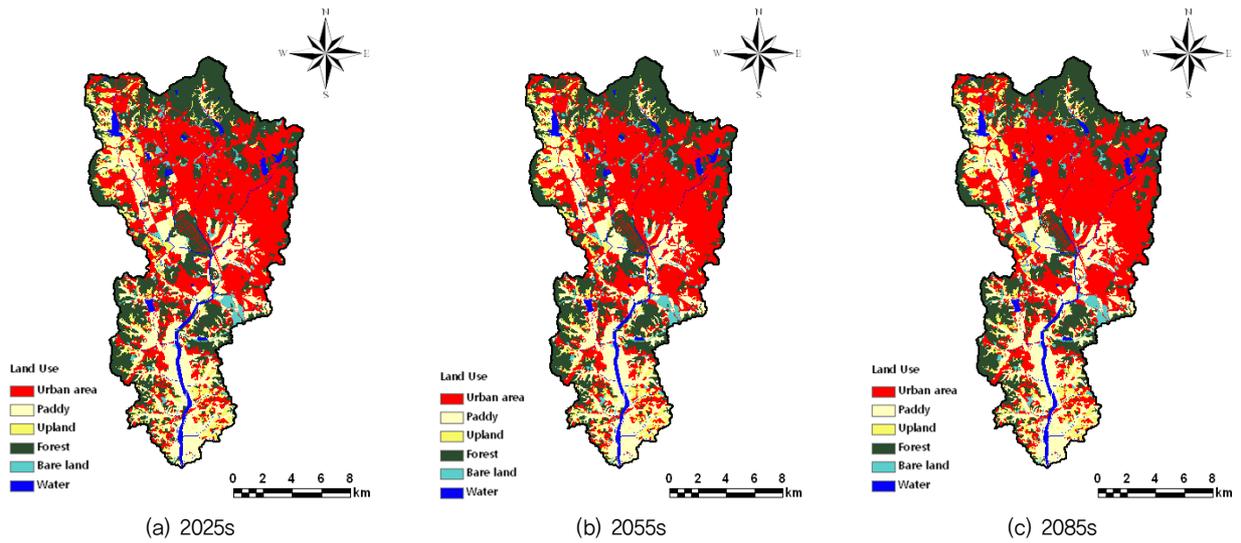


Fig. 9 Predicted land use maps under the RCP4,5 scenario (Kim et al., 2013)

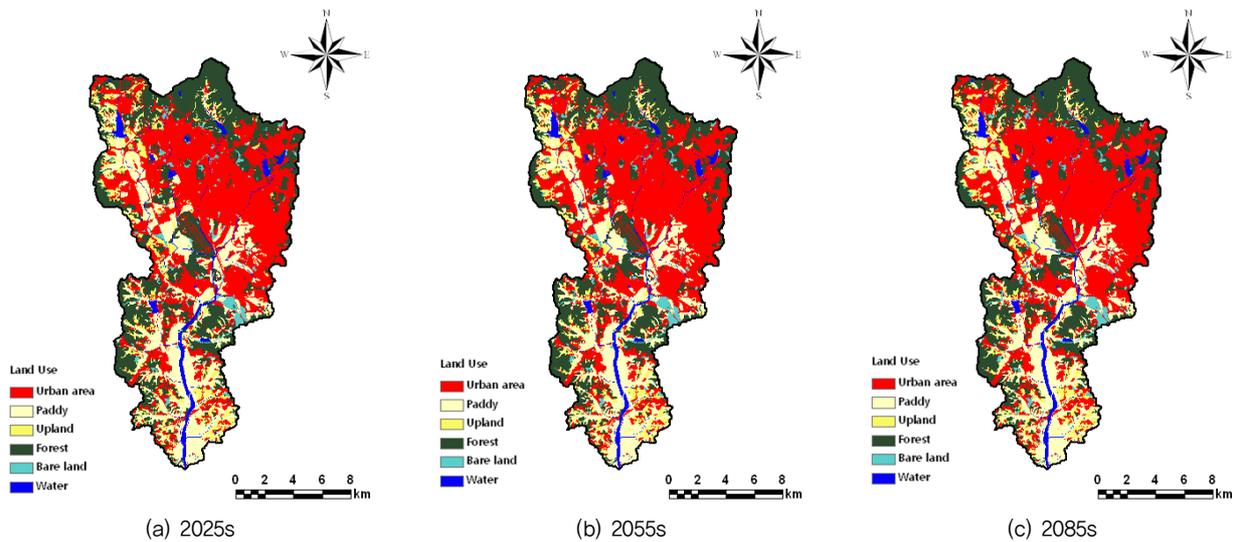


Fig. 10 Predicted land use maps under the RCP8,5 scenario (Kim et al., 2013)

Table 2 Curve number (III) under the RCP4,5 and 8,5 scenarios (Kim et al., 2013)

Sub-basins	1995s	2025s		2055s		2085s	
		RCP4,5	RCP8,5	RCP4,5	RCP8,5	RCP4,5	RCP8,5
1	91	91	91	91	91	91	91
2	90	90	90	90	90	90	91
3	89	90	90	90	90	90	90
4	92	92	92	92	92	92	92
5	90	91	91	91	91	91	91
6	91	91	91	91	91	91	91
7	88	87	88	87	88	88	88
8	91	91	91	91	91	91	91

CN (III)의 변화량이 작게 나타난 원인은 소유역별로 평균 CN (III)를 산정하는 과정을 거치면서 토지이용변화의 영향을 상쇄하였기 때문이라 사료된다 (Kim et al., 2013).

Table 3은 토지이용변화 모의 결과에 따른 불투수율의 변화를 보여주고 있다. 불투수율은 시가화건조지역의 증가율이 비교적 높게 산출된 RCP8.5 시나리오에서 높게 산출되었다. 주로 소유역 1~5에서 변화가 발생하였으며, 소유역 6~8에서는 변화가 거의 발생하지 않았다 (Kim et al., 2013).

V. 미래 홍수량 변화 분석

1. 미래 설계홍수량 산정

Table 4는 기후변화 및 토지이용변화에 따른 황구지천 유역의 설계홍수량 및 임계지속시간을, Fig. 11~Fig. 12는 유역 출구에서의 홍수수문곡선을 보여주고 있다. 1995s 기간의 100년 빈도 홍수량은 3,107 m³/s, 200년 빈도 홍수량은 3,423 m³/s로 나타났다. 전반적으로 RCP4.5에 비해 RCP8.5 시나리오에서 첨두홍수량 및 총 홍수량이 크게 나타났으며, 2011~2070년보다 2071~2100년에서 홍수량의 차이가 두드

러졌다. RCP4.5 시나리오의 경우 2025s 기간의 홍수량이 2055s 기간에 비해 크게 나타난 반면, RCP8.5 시나리오에서는 2055s 기간의 홍수량이 2025s 기간에 비해 크게 나타나 2085s 기간까지 꾸준히 증가하는 추세를 보였다. 2085s 기간에는 RCP4.5 시나리오의 경우 100년 빈도 홍수량이 6,395 m³/s, 200년 빈도 홍수량이 7,255 m³/s로 1995s 기간 홍수량의 약 2배정도 되었으며, RCP8.5 시나리오의 경우 100년 빈도 홍수량이 8,192 m³/s, 200년 빈도 홍수량이 9,229 m³/s로 1995s 기간 홍수량의 2.5배 이상인 것으로 나타났다.

2. 기후변화 및 토지이용변화의 기여율 분석

기후변화와 토지이용변화가 미래 홍수량 변화에 미치는 영향과 기여 정도를 분석하기 위하여, 1995s 기간의 확률강우량(C0)과 1995s 기간의 토지이용(L0), 2025s 기간의 확률강우량(C40)과 2040년의 토지이용(L40), 2055s 기간의 확률강우량(C70)과 2070년의 토지이용(L70), 2085s 기간의 확률강우량(C100)과 2100년의 토지이용(L100)을 조합한 경우와, C0와 L0를 고정하고 나머지를 변화시킨 경우의 설계홍수량을 산정하였다. Table 5와 Table 6은 소유역 1~5의 합

Table 3 Impervious area under the RCP4.5 and 8.5 scenarios (unit: %) (Kim et al., 2013)

Sub-basins	1995s	2025s		2055s		2085s	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
1	25.33	26.20	28.19	27.57	29.93	29.59	31.17
2	33.37	36.97	39.09	38.73	40.50	40.28	41.41
3	34.14	35.46	37.41	37.02	38.74	38.62	39.98
4	44.65	46.54	48	47.76	48.65	48.63	49.31
5	19.74	19.80	20.23	20.03	20.58	20.72	21.16
6	31.59	32.29	33.57	33.25	34.21	34.16	34.67
7	15.08	14.79	15.37	14.87	15.61	15.13	15.78
8	20.15	19.95	20.51	20.06	20.76	20.41	21.06

Table 4 Design peak flood and critical duration under the RCP4.5 and 8.5 scenarios

		100-year		200-year	
		Design peak flood (m ³ /s)	Critical duration (hr)	Design peak flood (m ³ /s)	Critical duration (hr)
Observed	1981~2010	3,107	9	3,423	9
	2011~2040	4,907	6	5,599	6
RCP 4.5	2041~2070	4,557	6	5,181	6
	2071~2100	6,395	6	7,255	6
	2011~2040	4,670	6	5,310	6
RCP 8.5	2041~2070	5,687	6	6,474	6
	2071~2100	8,192	9	9,229	9

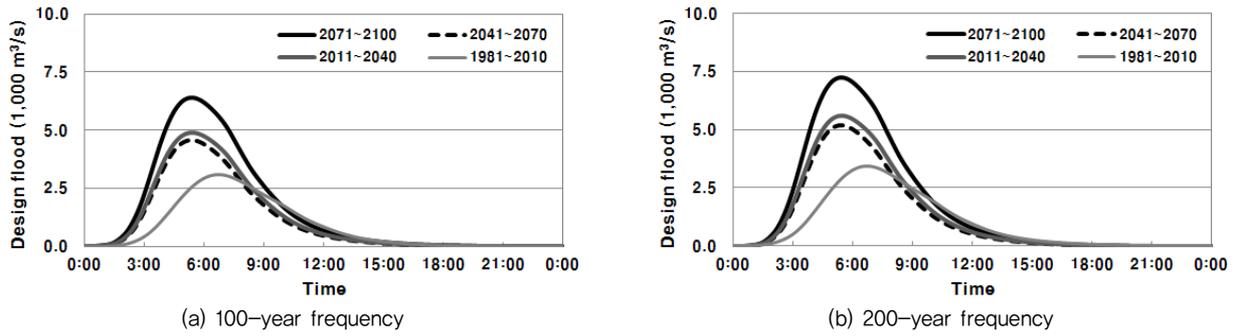


Fig. 11 Design flood hydrographs under the RCP4.5 scenario

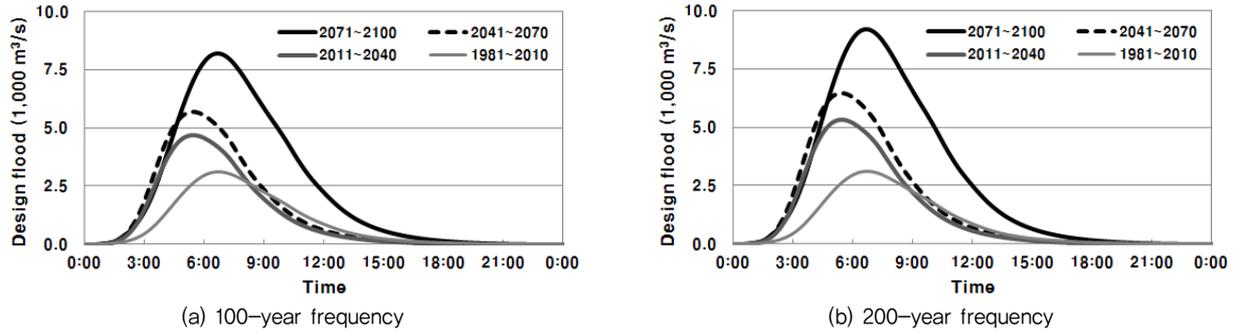


Fig. 12 Design flood hydrographs under the RCP8.5 scenario

Table 5 Design peak flood at the junction of subbasin 1 to 5 under the RCP4.5 scenario

		Design peak flood (m ³ /s)				Rate of change			
		L0	L40	L70	L100	L0	L40	L70	L100
100-year	C0	1,853	1,857	1,874	1,865	1.00	1.00	1.01	1.01
	C40	3,015	3,020	-	-	1.63	1.63	-	-
	C70	2,726	-	2,765	-	1.47	-	1.49	-
	C100	3,917	-	-	3,933	2.11	-	-	2.12
200-year	C0	2,040	2,044	2,063	2,052	1.00	1.00	1.01	1.01
	C40	3,439	3,445	-	-	1.69	1.69	-	-
	C70	3,099	-	3,142	-	1.52	-	1.54	-
	C100	4,444	-	-	4,459	2.18	-	-	2.19

Table 6 Design peak flood at the junction of subbasin 1 to 5 under the RCP8.5 scenario

		Design peak flood (m ³ /s)				Rate of change			
		L0	L40	L70	L100	L0	L40	L70	L100
100-year	C0	1,853	1,862	1,865	1,867	1.00	1.00	1.01	1.01
	C40	2,863	2,875	-	-	1.55	1.55	-	-
	C70	3,483	-	3,499	-	1.88	-	1.89	-
	C100	4,862	-	-	4,874	2.62	-	-	2.63
200-year	C0	2,040	2,049	2,052	2,054	1.00	1.00	1.01	1.01
	C40	3,256	3,267	-	-	1.60	1.60	-	-
	C70	3,965	-	3,981	-	1.94	-	1.95	-
	C100	5,479	-	-	5,490	2.69	-	-	2.69

Table 7 Design peak flood at the watershed outlet under the RCP4.5 scenario

	Design peak flood (m ³ /s)					Rate of change			
		L0	L40	L70	L100	L0	L40	L70	L100
100-year	C0	3,107	3,112	3,170	3,124	1.00	1.00	1.02	1.01
	C40	4,900	4,907	-	-	1.58	1.58	-	-
	C70	4,428	-	4,557	-	1.43	-	1.47	-
	C100	6,373	-	-	6,395	2.05	-	-	2.06
200-year	C0	3,423	3,428	3,491	3,440	1.00	1.00	1.02	1.00
	C40	5,593	5,599	-	-	1.63	1.64	-	-
	C70	5,037	-	5,181	-	1.47	-	1.51	-
	C100	7,233	-	-	7,255	2.11	-	-	2.12

Table 8 Design peak flood at the watershed outlet under the RCP8.5 scenario

	Design peak flood (m ³ /s)					Rate of change			
		L0	L40	L70	L100	L0	L40	L70	L100
100-year	C0	3,107	3,120	3,125	3,128	1.00	1.00	1.01	1.01
	C40	4,653	4,670	-	-	1.50	1.50	-	-
	C70	5,664	-	5,687	-	1.82	-	1.83	-
	C100	8,173	-	-	8,192	2.63	-	-	2.64
200-year	C0	3,423	3,435	3,441	3,444	1.00	1.00	1.01	1.01
	C40	5,293	5,310	-	-	1.55	1.55	-	-
	C70	6,450	-	6,474	-	1.88	-	1.89	-
	C100	9,210	-	-	9,229	2.69	-	-	2.70

류점에서의 침투홍수량을 나타내며, Table 7과 Table 8은 유역 출구에서의 침투홍수량을 나타내고 있다.

L0를 고정하고 확률강우량의 변화에 따른 침투홍수량의 변화를 분석한 결과, 1995s 기간에 비해 1.50~2.69배 증가하는 것으로 나타났다. 반면, C0를 고정할 때 토지이용변화에 따른 침투홍수량의 변화는 1995s 기간에 비해 1.00~1.02배 증가하여 증가폭이 매우 미미하게 나타났다. 즉, 토지이용변화가 설계홍수량 변화에 미치는 영향은 기후변화에 따른 확률강우량의 변화에 비해 매우 작은 것으로 분석된다. 이는 첫째, 유역 상류부에서 CN(III)의 증가량이 1 정도에 그쳤고 하류부에서는 거의 변화가 일어나지 않았기 때문에 CN(III)에 의한 영향이 미미하였기 때문이다. 둘째, 2100년에 불투수율의 증가율은 최대 8%에 불과하나 확률강우량은 약 2.5배정도 증가하는 등 확률강우량의 증가 폭이 너무 커서 토지이용변화의 효과가 거의 드러나지 않았기 때문이다. 셋째, 토지이용변화는 미래기간에 대한 결정론적 모의결과이며 확률강우량은 재현빈도에 따른 확률적 수치이기 때문에 설계홍수량 산정에 대한 토지이용의 기여율이 낮은 것이 적합한 결과라 생각할 수 있다.

VI. 요약 및 결론

본 연구에서는 기후변화 및 토지이용변화에 따른 설계홍수량의 변화를 분석하기 위하여, 황구지천 유역을 대상 유역으로 선정하고 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 기반의 기후변화 및 토지이용변화 시나리오를 바탕으로 미래 강수량과 토지이용변화를 예측하여 100년 및 200년 빈도의 설계홍수량을 산정하였다. 토지이용변화의 모의에는 CLUE 모형을, 설계홍수량의 산정에는 HEC-HMS 모형을 각각 적용하였다.

1. 수원 기상관측소의 1981~2010년 관측 강수량과 RCP4.5와 RCP8.5 기후변화 시나리오의 2011~2100년 강수량 자료를 이용하여 1995s 기간, 2025s 기간, 2055s 기간, 2085s 기간의 확률강우량을 산정하였다. 확률강우량은 RCP4.5 시나리오의 경우 2025s 기간에는 증가하고 2055s 기간에는 약간 감소하였으나 RCP8.5 시나리오의 경우 계속해서 증가하는 추세로 나타났다. 2085s 기간의 확률강우량은 1995s 기간에 비해 2~2.5배 정도 증가하는 것으로 나타났다.
2. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 기반한 CLUE 모형을 이용하여 토지이용변화 모의한 결과, 시가화권조지역은

2100년까지 12~16 % 증가하였고, 산림은 16~18 % 감소 하였으며 RCP8.5 시나리오에서 변화 폭이 크게 나타났다. 소유역별 CN (III)는 2100년까지 1 정도로 미미하게 증가 하였으며, 불투수율은 약 0~8 % 정도 증가하는 것으로 산 출되었다.

3. 미래의 확률강우량과 토지이용변화 모의 결과를 HEC-HMS 모형에 적용하여 설계홍수량을 산정하였다. 1995s 기간의 100년 빈도 홍수량은 3,107 m³/s, 200년 빈도 홍수량은 3,423 m³/s로 나타났다. RCP4.5 시나리오의 경우 2025s 기 간에 홍수량이 증가하였다가 2055s 기간에 소폭 감소하였 고, RCP8.5 시나리오의 경우 계속해서 증가하는 추세를 보 였다. 2085s 기간에는 RCP4.5 시나리오의 경우 100년 빈 도 홍수량이 6,395 m³/s, 200년 빈도 홍수량이 7,255 m³/s 로 1995s 기간 홍수량의 2배가량 되었으며, RCP8.5 시나 리오의 경우 100년 빈도 홍수량이 8,192 m³/s, 200년 빈도 홍수량이 9,229 m³/s로 1995s 기간 홍수량의 2.5배 이상인 것으로 나타났다.
4. 설계홍수량의 변화에 대한 기후변화와 토지이용변화의 기 여율을 분석하기 위하여, 1995s 기간의 토지이용을 고정하 고 2025s 기간, 2055s 기간, 2085s 기간의 확률강우량을 고 려한 경우와 1995s 기간의 확률강우량을 고정하고 2025s 기간, 2055s 기간, 2100년의 토지이용변화를 고려한 경우 에 대해 각각 첨두홍수량을 산정하였다. 토지이용을 고정 하여 확률강우량 변화의 기여율을 분석한 결과 1995s 기 간을 기준으로 첨두홍수량이 1.50~2.69배 증가하였으며, 확 률강우량을 고정하고 토지이용변화의 기여율을 분석한 결 과 첨두홍수량이 1.00~1.02배 증가하는 것으로 나타나, 토 지이용변화가 설계홍수량의 변화에 미치는 영향이 기후변 화에 따른 확률강우량의 변화에 비해 매우 작은 것으로 분 석되었다. 이는 확률강우량에 비해 CN (III)와 불투수율의 증가폭이 극히 미미하였고, 독립변인을 산정하는 방법론 이 다르기 때문으로 사료된다. 또한 본 연구에서 선정한 대 상 유역이 시가화건조지역 36 %, 논 19 %, 밭 7 %로 모든 농촌소유역을 대표한다고 할 수 없으므로 향후 다양한 토 지이용 비율을 가지는 농촌소유역에 대한 추가 연구를 수 행하여 토지이용변화가 설계홍수량에 미치는 광범위한 영 향에 대한 평가가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 기후변화 및 토지이용변화를 고려한 설계 홍수량을 예측하는 방법론을 정립하였다. 이를 기반으로 미 래의 극한 홍수에 대비함으로써 하천 시설물 및 지역 사회의 안전을 대비할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한 국연구재단의 이공분야기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A1A2009313).

REFERENCES

1. Bergstrom, S., B. Carlsson, M. Gardelin, G. Lindstrom, A. Pettersson, and M. Rummukainen, 2001. Climate change impacts on runoff in Sweden - assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research* 16: 101-112.
2. Bronstert, A., D. Niehoff, and G. Burger, 2002. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes* 16: 509-529.
3. Choi, D., M. S. Keem, N. W. Kim, and S. Kim, 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* 42(11): 921-931 (in Korean).
4. Cuo, L., T. K. Beyene, N. Voisin, F. Su, D. P. Lettenmaier, M. Alberti, and J. E. Richey, 2011. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound basin, Washington. *Hydrological Processes* 25: 1729-1753.
5. Gul, G. O., D. Rosbjerg, A. Gul, M. Ondracek, and K. Dikgola, 2010. Assessing climate change impacts on river flows and environmental flow requirements at catchment scale. *Ecohydrology* 3(1): 28-40.
6. Heo, J.-H., and W. Nam, 2010. Study of extreme flood discharge considering climate change. *Magazine of Korea Water Resources Association* 43(8): 28-35 (in Korean).
7. Hurtt, G. C., L. P. Chini, S. Frolking, R. A. Betts, J. Feddema, G. Fischer, J. P. Fisk, K. Hibbard, R. A. Houghton, A. Janetos, C. D. Jones, G. Kindermann, T. Kinoshita, K. K. Goldewijk, K. Riahi, E. Shevliakova, S. Smith, E. Stehfest, A. Thomson, P. Thornton, D. P. van Vuuren, and Y. P. Wang, 2011. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climate Change* 109: 117-161.
8. Kay, A. L., N. S. Reynard, and R. G. Jones, 2006a. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and validation. *Journal of Hydrology* 318: 151-162.
9. Kay, A. L., R. G. Jones, and N. S. Reynard, 2006b. RCM rainfall

- for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. *Journal of Hydrology* 318: 163-172.
10. Kim, B. S., H. S. Kim, B. H. Seoh, and N. W. Kim, 2004. Impact of climate change on Yongdam dam basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(3): 185-193 (in Korean).
 11. Kim, B. S., S. J. Kim, H. S. Kim, and H. D. Jun, 2010. An impact assessment of climate and landuse change on water resources in the Han river. *Journal of Korea Water Resources Association* 43(3): 309-323 (in Korean).
 12. Kim, H. K., M. S. Kang, E. J. Lee, and S. W. Park, 2011. Climate and land use changes impacts on hydrology in a rural small watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6): 75-84 (in Korean).
 13. Kim, J., J. Park, I. Song, J.-H. Song, S. M. Jun, and M. S. Kang, 2015. Analysis of land use change using RCP-based Dyna-CLUE model in the Hwangguji river watershed. *Journal of the Korean Society of Rural Planning* 21(2): 33-49 (in Korean).
 14. Kim, W. G., and T. S. Ryu, 2011. Strategy of flood control capacity enhancement on existing multipurpose dams to the effect of climate change. *Journal of the Korean Professional Engineers Association* 44(2): 23-28 (in Korean).
 15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2012. Calculation of design flood (in Korean).
 16. Na, Y.-S., 2010. A study on the variation of design rainfall and flood due to climate change. Master's thesis, Sejong University (in Korean).
 17. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2011. Climate change scenario report for IPCC AR5, 17-46 (in Korean).
 18. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2012. Climate change scenarios corresponding to IPCC assessment report 5th in 2012 (in Korean).
 19. Park, J., M. S. Kang, and I. Song, 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* 54(6): 133-142 (in Korean).
 20. Verburg, P. H., and K. P. Overmars, 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology* 24: 1167-1181.
 21. Verburg, P. H., W. Soepboer, A. Veldkamp, R. Limpiada, V. Espaldon, and S. S. A. Mastura, 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental Management* 30(3): 391-405.