



Flood damage cost projection in Korea using 26 GCM outputs

Kim, Myojeong^a · Kim, Gwangseob^{a*}

^aSchool of Architecture, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University

Paper number: 18-057

Received: 31 July 2018; Revised: 30 October 2018 / 12 November 2018; Accepted: 12 November 2018

Abstract

This study aims to predict the future flood damage cost of 113 middle range watersheds using 26 GCM outputs, hourly maximum rainfall, 10-min maximum rainfall, number of days of 80 mm/day, daily rainfall maximum, annual rainfall amount, DEM, urbanization ratio, population density, asset density, road improvement ratio, river improvement ratio, drainage system improvement ratio, pumping capacity, detention basin capacity and previous flood damage costs. A constrained multiple linear regression model was used to construct the relationships between the flood damage cost and other variables. Future flood damage costs were estimated for different RCP scenarios such as 4.5 and 8.5. Results demonstrated that rainfall related factors such as annual rainfall amount, rainfall extremes etc. widely increase. It causes nationwide future flood damage cost increase. Especially the flood damage cost for Eastern part watersheds of Kangwondo and Namgang dam area may mainly increase.

Keywords: Flood damage cost, Constrained Multiple Linear Regression, RCP Scenarios, GCM

26 GCM 결과를 이용한 미래 홍수피해액 예측

김묘경^a · 김광섭^{a*}

^a경북대학교 건설환경에너지공학부

요 지

본 연구는 우리나라 113개 중권역에 대한 기후변화에 따른 미래 홍수 피해액의 예측을 위하여 26개 GCM 모형에서 생산한 강우자료와 1시간 최대 강수량, 10분 최대 강수량, 1일 강수량이 80 mm 초과한 일수, 일 최대 강수량, 연강수량, 유역고도, 시가화율, 인구 밀도, 자산 밀도, 도로와 같은 사회 간접 시설, 하천개수율, 하수도 보급률, 배수펌프시설, 유수지용량 및 과거 홍수 피해액 자료를 활용하였다. 구축된 자료에 대하여 구속 다중선형회귀 모형(Constrained Multiple Linear Regression Model)을 적용하여 홍수 피해액과 여타 입력자료 사이의 상관관계를 구축하고 RCP 4.5와 8.5에 대한 26개 GCM 모형 산정자료를 활용하여 미래 홍수 피해액을 예측하였다. 홍수피해에 주된 요인이 되는 연강수량, 극치 강수량 등 강우관련 요소들이 전반적으로 증가하며 이로 인하여 과거 홍수로 인한 피해액이 광범위하게 증가할 것으로 판단되고 특히 동해안 및 남강댐 유역에 미래의 홍수피해액이 높게 예측되는 경향을 보인다.

핵심용어: 홍수 피해액, 구속 다중선형회귀, RCP 시나리오, GCM

1. 서 론

최근 기후변화의 영향으로 인하여 기온과 해수면 온도의 상승과 배기가스의 증가와 미세먼지의 증가는 호우발생 조건

을 용이하게 하여 태풍 규모 증가와 집중호우의 발생 빈도 및 강도가 증가하게 한다. 태풍의 규모 및 집중호우의 발생 빈도와 강도의 증가는 수재해로 인한 피해에 노출되게 하여 유역 내의 홍수로 인한 피해 규모를 증가시키는 결과로 이어진다. 증가하는 홍수 피해 규모를 감소시키기 위하여 홍수 피해 현황 및 홍수 위험 정도를 분석하고, 분석한 결과와 미래의 강우 시나리오를 이용하여 수재해 저감을 위한 대응체계구축과 개

*Corresponding Author. Tel: +82-53-950-5614
E-mail: kims@knu.ac.kr (G. Kim)

선을 필요로 한다. 이를 위하여 국내외 다양한 기관에서 홍수 위험도 현황 파악에 필요한 각종 지수들을 개발하여 적용하고 있으며, 여러 형태의 홍수위험 관련 지도가 제작되어 사용되고 있다. 홍수 위험 지수 및 취약성 지수의 산정 및 분석 관련 연구는 국내외적으로 지속해서 이루어지고 있으며, Kandilioti and Makropoulos (2012)는 도시에서의 홍수 위험을 계량화하기 위해 사용되는 주요 방법을 간략히 제시하고, 이를 바탕으로 가장 적절한 위험 정량화 방법을 위한 공간 분석 방법을 개발하였으며, 지형 기준을 사용하여 홍수 위험을 정량화하는 방법을 제안하였다. Masood and Takeuchi (2012)는 다카 지역에 대하여 DEM (Digital Elevation Model) 자료와 수문학 현장 관찰 데이터를 기반으로 한 1D 유체 역학 실험을 통해 홍수 위험지도를 개발하여 홍수 위험을 평가하였다. Aronica *et al.* (2012)는 다른 홍수 원인과 연관하여 도시 홍수 침수 모델에 대한 경계 조건 불확실성의 영향을 평가하고, 평가 결과를 고려한 가중 홍수 위험지도의 생산을 위한 객관적인 방법론을 정의하였다. Jun *et al.* (2013)은 홍수 위험도를 계량함에 있어 기후변화의 영향을 고려하는 체계적인 절차를 개발하였다. Ettinger *et al.* (2016)은 페루의 아레퀴파 지역에서 발생한 돌발홍수에 대하여 logistic 회귀법을 사용하여 건물의 취약성에 대해 평가하였다. Zachos *et al.* (2017)은 농촌과 도시 공동체에서 기존의 제방 구조에서 침수가 발생하였을 때, 침수로 인한 취약성 평가를 위한 절차에 초점을 두고 연구를 진행하였다. Hatzikyriakou and Lin (2017)은 폭풍 해일이 발생시키는 구조적 취약성을 평가하기 위하여 동수역학적 모형을 사용하여 홍수위험지도를 제시하였다.

국내에서 활용하고 있는 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD) 지수는 국토교통부에서 수립한 수자원장기 종합계획(2000)에서 제시하였으며, 점 개념이 아닌 면 개념을 도입하여 치수 단위구역의 치수특성과 사회경제적인 가치를 함께 평가할 수 있도록 고안된 지수로서 전국 150개 치수 단위구역별로 홍수피해의 잠재적 위험성을 분석하고 유역 단위로 치수안전도를 평가한 방법이다. Kim *et al.* (2003)은 계산 홍수위의 신뢰도에 영향을 미치는 다양한 요인에 대해 분석한 후 확률론적 홍수위 계산 결과를 제시하여 하천 단면에서의 월류 위험도를 정량화하는 연구를 진행하였다. Kim *et al.* (2011)은 홍수에 노출된 지역의 인구수, 경제적 활동의 형태, 홍수가 발생하였을 때 2차적 피해를 불러올 수 있는 설비 등을 활용하여 홍수 취약도 지표를 정량적으로 산정하여 평가하였다. Kim *et al.* (2011)은 Fuzzy 집합이론을 적용하여 각종 변수가 가지는 불확실성, 댐 하류 지점에서의 홍수 조절 효과, 수자원 시스템에서 허용 가능한 부분적 실패를 고려한 홍수

조절 효과 정량화 지표를 개발하였다. Kim *et al.* (2012)는 취약성 평가의 국내적용 일환으로서 기후변화와 대규모 하천 정비사업 영향에 의한 취약성 변화를 낙동강 유역에 대하여 평가하였다. Sung *et al.* (2012)는 서울 지역을 대상으로 하여 기후변화 및 기후변동으로 인한 홍수취약도를 분석하고, 비정상성을 고려한 FVI (Flood Vulnerability Index)를 활용하여 미래의 홍수취약도를 전망하였다. Park *et al.* (2013)은 도시홍수에 직접적인 영향을 미치는 인자를 활용한 산술적인 도시홍수 취약성 평가방법의 적합성을 평가하였다. Lee *et al.* (2013)은 극한강우 사상과 홍수 피해 유형별 홍수피해의 상관 분석을 통해 홍수피해 취약성 지수(Flood Damage Vulnerability Index, FDVI)를 제안하였다. Yoon *et al.* (2014)은 홍수 관리에 대한 정성적 효과와 홍수 위험에 대한 몇 가지 지표의 양적 효과를 분석하여 정책 기준을 향상시키고 개발도상국에서의 홍수에 대한 위험을 줄이려는 조치를 수립하였다. Kim *et al.* (2014)는 기존의 홍수방어시설이 작동하지 않았을 경우 특정 지역의 지형적인 요인 등으로 인해 필연적으로 홍수피해를 입어야만 하는 지역을 고유홍수취약성이 높은 지역이라고 정의하고, 제안된 고유홍수취약성과 현재의 홍수위험도를 나타내기 위한 방법으로 경영전략 분야에 자주 사용되는 BCG 매트릭스를 변형한 홍수방어시설용량-피해 매트릭스(Flood Protection Capacity and Damage Matrix, PCD Matrix)를 제안하였다.

홍수 피해에 대하여 효율적으로 대처하기 위하여 유역의 특성 및 중요도에 따라 홍수방어대책을 수립하고 지속한 모니터링 및 평가가 필요로 한다. 홍수위험에 합리적으로 대처하기 위한 모니터링 및 평가는 유역 내에서 홍수 피해와 관련된 다양한 기능을 종합적으로 진단하고, 진단한 결과를 객관적으로 정량화하여 판단하여야 한다. 기존에 제시된 정량화하는 방법으로는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시한 기후변화 취약성 평가 이론(Flood Vulnerability Index, FVI), OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)에서 개발한 PSR (Pressure State Response) 모형, EEA (European Environmental Agency)에서 개발한 DPSIR (Driving force Pressure State Impact Response) 모형 등이 있다(IPCC, 2007; OECD, 1993; EEA, 1999). 그러나 기존에 제시된 모형들은 각 홍수 피해 유형에 대하여 기후변화에 따른 미래의 홍수 피해 정도를 파악하기 보다는 포괄적으로 홍수 위험 정도를 제시하고 있어 홍수 피해 유형별 치수대책 수립에 한계가 있다. 본 연구에서는 대표적인 홍수피해관련 지표인 홍수피해액과 관련 변수들 사이에 다중선형회귀모형을 적용하여 과거자료에 기초한 상관성을

구축하고, 이를 바탕으로 RCP 시나리오에 대한 GCM 결과를 적용하여 중권역 단위에 대한 미래의 홍수 피해액을 산정하고 분석하였다. 홍수 피해액 예측에 필요한 각종 관측자료들은 2000년부터 2015년까지 수집하여 행정구역 및 지점자료로 구성된 자료를 113 중권역 단위의 자료로 구축하였으며, 미래 예측을 위한 입력자료는 26개 GCM 결과를 기초로 구성하였다.

2. 자료 수집 및 회귀분석

2.1 자료 수집

홍수 피해액에 대한 미래의 예측치를 산정하기 위해서는 현황 파악이 필수적이며, 홍수 피해 관련 현황 파악을 위해서 현재까지 발생한 홍수로 인한 홍수 피해액뿐만 아니라 홍수 피해를 유발하는 인자와 홍수 피해를 경감시킬 수 있는 인자들의 현황 자료를 수집하였다. 홍수 피해를 유발하는 관련 인자들은 수문 특성과 유역 특성이 있으며, 수문 특성에는 1시간 최대 강수량, 10분 최대 강수량, 1일 강수량이 80 mm 초과한 일수, 일 최대 강수량 등이 있고, 유역 특성에는 유역고도, 시가 확률, 인구 밀도, 자산 밀도, 도로와 같은 사회 간접 시설 등이 포함된다. 또한, 본 연구에서는 홍수로 인한 외수범람 및 내수 배제에 대비하는 대책 변수로 하천개수율, 하수도 보급률, 배수펌프시설, 우수지용량 등의 자료를 수집하였다.

우리나라에서는 기상청 중관기상관측시스템에서 관측하는 시간별 강수량을 제공하고 있어 제공하는 자료에서 지점

별 일 최대 강수량, 1시간 최대 강수량, 10분 최대 강수량을 알 수 있으며, 가용자료를 활용하여 1일 강수량 80 mm 초과 일수, 연평균 강수량을 산정하였다. 역거리 가중법을 이용하여 지점 별 수문 특성 자료를 각 중권역에 대한 수문 특성자료로 구축하였다. 사회 특성 중 인구 밀도의 경우 통계청에서 5년 마다 조사하는 인구주택총조사와 행정안전부에서 매년 제공하고 있는 주민등록 인구통계를 통하여 인구밀도를 산정할 수 있으며, 인구주택총조사와 주민등록 인구통계는 행정동 단위로 자료를 제공되어져 있다. 본 연구에서는 행정안전부의 주민등록 인구통계 자료를 사용하여 인구밀도를 산정하였다. 자산밀도는 국토교통부에서 제공하는 ‘부동산 가격공시에 관한 연차보고서’와 지가변동률 통계 자료를 활용하였으며, 시군구 단위로 제공되는 ‘부동산 가격공시에 관한 연차보고서’의 지가변동률 자료도 활용하였다. 국토교통부의 한강홍수통제소에서 운영하고 있는 하천이력관리시스템에서 제공하는 한국하천일람을 통하여 각 중권역 내에 있는 하천에 대한 하천개수율을 파악하였으며 하수도 보급률, 배수펌프 시설 및 우수지 용량은 환경부에서 연도별로 제공하고 있는 하수도 통계를 이용하여 중권역별로 산정하였다(Table 1).

기후변화에 따른 미래 홍수 피해액 예측을 위하여 26개 GCM 모형에서 생산된 강우자료를 사용하였으며 본 연구에 사용한 GCM모형의 목록은 Table 2에서 제시하였다. 수집한 자료들은 0과 1사이의 값으로 정규화하기 위하여 Eq. (1)를 이용하였다. 수공학 분야에서 흔히 사용되는 정규화하는 방법으로 최대, 최소값을 이용하는 방법과 평균과 표준편차를

Table 1. List of input data

	Indicators	Source	Type of data
(a) Hydrological characteristics	Hourly maximum rainfall (mm/hr)	Korea Meteorological Administration	Point
	Ten minute maximum rainfall (mm/10min)		
	Aotal days of heavy rainfall (day)		
	Annual precipitation (mm/year)		
	Daily maximum rainfall (mm/day)		
(b) Basin characteristics	DEM (m)	WAMIS	Basin
	Density of population (人/km ²)	Ministry of the Interior and Safety	Dong, Eup, Meon
	Density of asset (₩/km ²)	Ministry of Land, Infrastructure and Transport	City, Gun, Gu
	Urbanization ratio (%)	KOSIS	
	Road statistics (km)		
(c) Flood Defense Measures	River maintenance ratio (%)	Han River Flood Control Office	Basin
	Supply ratio of water supply and sewerage (%)	Ministry of Environment	City, Gun, Gu
	Pumping capacity (m ³ /min)		
	Reservoir capacity (m ³)		
(d) Status of disaster	Damage cost (₩)	Ministry of the Interior and Safety of Korea	City, Gun, Gu

Table 2. List of used GCMs

No.	GCMs	Resolution	Institution
1	CMCC-CM	0.750 × 0.748	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
2	CCSM4	1.250 × 0.942	National Center for Atmospheric Research
3	CESM1-BGC	1.250 × 0.942	
4	CESM1-CAM5	1.250 × 0.942	
5	BCC-CSM1-1-M	1.125 × 1.122	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
6	MRI-CGCM3	1.125 × 1.122	Meteorological Research Institute
7	CNRM-CM5	1.406 × 1.401	Centre National de Recherches Meteorologiques
8	MIROC5	1.406 × 1.401	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo)
9	HadGEM2-AO	1.875 × 1.250	Met Office Hadley Centre
10	HadGEM2-CC	1.875 × 1.250	
11	HadGEM2-ES	1.875 × 1.250	
12	INM-CM4	2.000 × 1.500	Institute for Numerical Mathematics
13	IPSL-CM5A-MR	2.500 × 1.268	Institut Pierre-Simon Laplace
14	CMCC-CMS	1.875 × 1.865	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
15	MPI-ESM-LR	1.875 × 1.865	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
16	MPI-ESM-MR	1.875 × 1.865	
17	FGOALS-s2	2.813 × 1.659	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
18	NorESM1-M	2.500 × 1.895	Norwegian Climate Centre
19	GFDL-ESM2G	2.500 × 2.023	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
20	GFDL-ESM2M	2.500 × 2.023	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
21	IPSL-CM5A-LR	3.750 × 1.895	Institut Pierre-Simon Laplace
22	IPSL-CM5B-LR	3.750 × 1.895	
23	BCC-CSM1-1	2.813 × 2.791	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
24	CanESM2	2.813 × 2.791	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
25	MIROC-ESM-CHEM	2.813 × 2.791	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
26	MIROC-ESM	2.813 × 2.791	

사용하는 방법이 있으며, 본 연구에서는 재조정된 변수가 음의 값을 가지지 않는 최대, 최소값을 이용하는 방법을 사용하였다.

$$x_{nor} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

시군구 단위 또는 행정동 단위 등 행정구역으로 되어 있는 홍수피해 현황이 포함된 재해연보, 주민등록 인구통계 자료, 부동산 가격공시에 관한 연차보고서 및 하수도 보급률, 배수 펌프시설, 우수지 용량 정보를 포함하고 있는 하수도 통계 자료를 유역단위인 중권역으로 전처리하기 위하여 Arc GIS의 intersect 툴을 사용하였다. Intersect 툴을 이용하여 행정구역과 중권역이 중첩되는 면적을 산정하여 중첩된 면적에 해당하는 면적비로 세부 지표를 중권역 단위로 환산하였다.

2.2 구속 다중선형회귀모형(Constrained Multiple Linear Regression Model)

본 연구에서는 홍수 피해액의 미래예측을 위한 관련변수 사이의 관계식을 구성하기 위하여 구속 다중선형회귀(CMLR)모형을 사용하였다.

$$f = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j X_j + \epsilon \quad (2)$$

여기서, f 는 홍수로 인한 피해액, X_j 은 수문특성, 유역특성, 치수대책 등을 반영하는 변수, β_j 는 계수이다. 본 연구에서 구성하는 다중선형회귀모형의 입력 변수는 5개의 수문변수(1시간 최대 강수량, 10분 최대 강수량, 1일 강수량이 80 mm 초과한 일수, 일 최대 강수량, 연 평균 강수량)와 5개의 유역특성(유역고도, 시가화율, 인구 밀도, 자산 밀도, 도로와 같은 사회

간접 시설), 4개의 홍수 대응 능력관련 변수(하천 개수율, 하수도 보급률, 배수펌프시설, 우수이용량)을 입력자료로 사용하였으며 수문변수와 유역특성관련 변수는 양의 회귀계수를 가지도록, 홍수대응 능력 관련 변수의 회귀계수는 음의 값을 가지도록 구속 다중선형회귀모형을 구성하였다. 이러한 접근법의 필요성을 분석하기 위하여 기존에 제시된 홍수 위험 지수로 IPCC에서 제시한 FVI 모형, OECD에서 개발한 PSR 모형, EEA에서 PSR 모형을 수정하여 개발한 DPSIR 모형 등을 이용하여 홍수위험도를 산정하였다(IPCC, 2007; OECD, 1993; EEA, 1999). FVI 모형은 민감도(Sensitivity), 노출도(Exposure), 저감성(Adaptation)으로 홍수 취약성과 관련된 요소들을 분류하여 유역의 홍수 취약성 정도를 나타낸다. 민감도(sens), 노출도(expo), 저감성(adap) 지표들은 정성적인 개념으로 세부지표를 활용하여 정량적으로 표현하며, FVI 모형은 정량적으로 표현된 지표들을 활용하여 유역의 홍수 취약도 현황을 제시하는 방법으로 Eq. (3)으로 산정할 수 있다. 민감도는 홍수 피해에 직접적인 영향을 주는 수문특성이고, 노출도는 위험성 요소에 의한 피해에 노출된 정도로 유역특성을 의미하며, 저감성은 민감도 및 노출도 요소에 방어하는 능력으로 치수 대책 등이 포함된다. PSR 모형은 인과 관계적으로 평가지표를 구분하는 대표적인 방법으로 국제기구나 각국의 지표 설정에 주로 활용되고 있으며 압력지수(Pressure, P), 현상지수(State, S), 대책지수(Response, R)로 평가지표가 구성되고, 각 지수에 해당하는 입력자료를 구성하여 홍수 피해 특성을 분석에 활용할 수 있다. PSR 모형을 산정하는 방법은 Eq. (4)와 같다. 압력지수는 홍수 피해에 대해 물리·환경적 압력을 평가하기 위한 수단인 수문 및 유역 특성이 포함되고, 현상지수는 홍수에 노출된 수준 판단 및 홍수 피해 현황을 파악하는 홍수 피해 밀도 및 침수 면적, 사망자 및 피해자수 등이 해당한다. 대책지수는 홍수 재해 발생 시 대응할 수 있는 능력을 판단하는 지표로 각 종 치수대책 등이 해당한다. DPSIR 모형은 보다 상세하게 지표를 구성하였으며 추진력(Driving force, D), 압력(Pressure, P), 상태(State, S), 영향(Impact, I), 반응(Response, R)으로 구성되며 Eq. (5)를 이용하여 산정할 수 있다. 추진력지수는 홍수와 직·간접적으로 영향을 주는 인자로 인구, 거주자수, 수문 특성 등이 해당한다. 압력지수는 환경의 상태에 직접 영향을 미치는 자연적인 요소로 치수·방재의 필요성을 요구하는 지수이다. 상태지수는 홍수에 의해 상태의 변화가 예상되는 지표로 도시지역비율, 범람 위험지역 등이 포함된다. 영향지수는 홍수, 재해로 인하여 야기되는 영향을 나타내며 인명 피해, 홍수 피해액, 홍수발생빈도 등이 해당한다. 반응지수는 홍수 등의 재해에 대한 치수에 대한 대책

변수가 해당한다. FVI, PSR 및 DPSIR 기법을 적용하여 산정한 홍수위험지수와 홍수 피해액의 선형상관성을 분석하였다.

$$FVI = \frac{sens \times expo}{adap} \quad (3)$$

$$PSR = \frac{P \times S}{R} \quad (4)$$

$$DPSIR = \frac{D \times P \times S \times I}{R} \quad (5)$$

3. 홍수 위험 지수 산정 결과 및 분석

FVI, PSR, DPSIR를 적용한 홍수위험지수는 수집한 홍수 영향 인자 및 방어 인자로 산정하였으며, 각 기법에 따라 산정한 홍수위험지수는 동일기간에 발생한 홍수 피해액과 비교하였다. 2000년부터 2015년까지 우리나라 113 중권역 단위로 FVI, PSR, DPSIR 방법론을 적용하여 산정한 홍수위험지수의 평균은 Fig. 1과 같다. 우리나라에서 상대적으로 인구밀도 및 자산밀도가 높은 서울을 포함하고 있는 유역과 부산을 포함하고 있는 유역에 각각의 방법론으로 산정한 홍수위험지수가 공통적으로 높게 산정되고, 치수대책이 제대로 수립되지 않은 전라남도 서남해 유역 또한 홍수위험지수가 높게 산정되는 경향을 보인다. 홍수로 인한 피해액은 2002년과 2003년에 발생한 태풍 루사와 매미로 재산피해가 많이 발생한 강원도 동해안 유역에 높게 발생하였다. FVI 방법으로 산정한 홍수 위험 지수는 민감도 지수에 민감하게 반응하며, PSR 방법은 현상 지수, DPSIR 방법은 상태 지수 등에 민감하게 반응하여 홍수 위험 지수를 산정한다. FVI 방법의 민감도 지수는 광범위하게 높은 값을 나타내며, PSR 모형의 현상 지수는 민감도 지수에 비하여 지역이 한정적이고, DPSIR 방법의 상태 지수는 국한된 지역에서 높은 값을 나타낸다. 이러한 각 모형별로 민감한 지수에 의하여 홍수 위험 지수가 광범위하게 또는 한정적인 지역에 높은 값을 보였다. FVI, PSR, DPSIR 지수는 인구밀도가 높은 지역을 중심으로 높게 나타나는 반면 홍수 피해액은 전술한 바와 같이 2002년과 2003년에 발생한 태풍 루사와 매미로 재산피해가 많이 발생한 강원도 동해안 유역에 높게 나타나므로 기존의 방법을 활용한 미래 홍수 피해액 예측에는 한계가 있음을 알 수 있다.

Table 3은 FVI, PSR, DPSIR 방법의 홍수위험지수와 홍수

로 인한 홍수 피해액과의 상관계수를 나타낸 표이다. FVI 방법과 홍수 피해액의 상관계수는 $-0.25\sim 0.60$ 이고, PSR 방법과 홍수 피해액의 상관계수는 $-0.07\sim 0.89$ 이며, DPSIR 방법과 홍수 피해액의 상관계수는 $-0.12\sim 0.72$ 의 범위를 가진다. PSR 방법은 다른 모형보다 홍수 피해액과의 상관관계를 잘 구현하며, 2015년에 가뭄의 영향으로 인하여 홍수가 다른 해에 비하여 홍수가 상대적으로 적게 발생하였고 그로 인하여 각각의 모형의 홍수위험지수와 홍수 피해액과는 음의 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 각 모형의 결과로 산정된 홍수 위험지수들은 실제로 발생한 홍수 피해 현황을 반영하기에는 한계가 있다고 판단하여 본 연구에서는 구속 다중선형회귀모형을 사용하여 홍수 피해액과 변수들 사이의 선형상관모형을 구축하고 RCP 4.5와 8.5에 대한 26개 GCM 자료를 활용하여 미래의 홍수 피해액을 중규모 구역별로 예측하였다.

Fig. 2는 2000년부터 2015년까지 CMLR 방법을 이용하여

홍수 피해액에 대한 현황과 홍수위험지수를 나타낸 그림이다. 홍수로 인한 피해액 또한 2002년과 2003년에 발생한 태풍 루사와 매미로 재산피해가 많이 발생한 강원도 동해안 유역에 높게 나타난다. Table 4는 Fig. 2에 나타난 홍수로 인한 피해액의 홍수위험지수와 홍수로 인한 피해 현황의 검정통계량을 기존의 FVI, PSR, DPSIR 방법과 비교하였다. 사용된 검정통계량은 평균 제곱근 오차 RMSE (Root Mean Square Error), 상관계수 R, 평균 절대 백분율 오차 MAPE (Mean Absolute Percentage Error)를 사용하였다. 피해액의 현황과 홍수위험지수의 RMSE의 평균은 0.26, R은 0.48, MAPE는 0.12로 산정되어, FVI 방법의 RMSE 1.86, R 0.22, MAPE 1.51이고, PSR 방법의 RMSE 0.71, R 0.49, MAPE 0.51이고, DPSIR 방법은 RMSE 0.48, R 0.26, MAPE 0.11이다. 기존의 방법론 FVI, PSR, DPSIR에 비하여 검정 통계량이 전반적으로 높은 것으로 나타나 홍수 피해액 예측을 위한 CMLR 방법의 적용

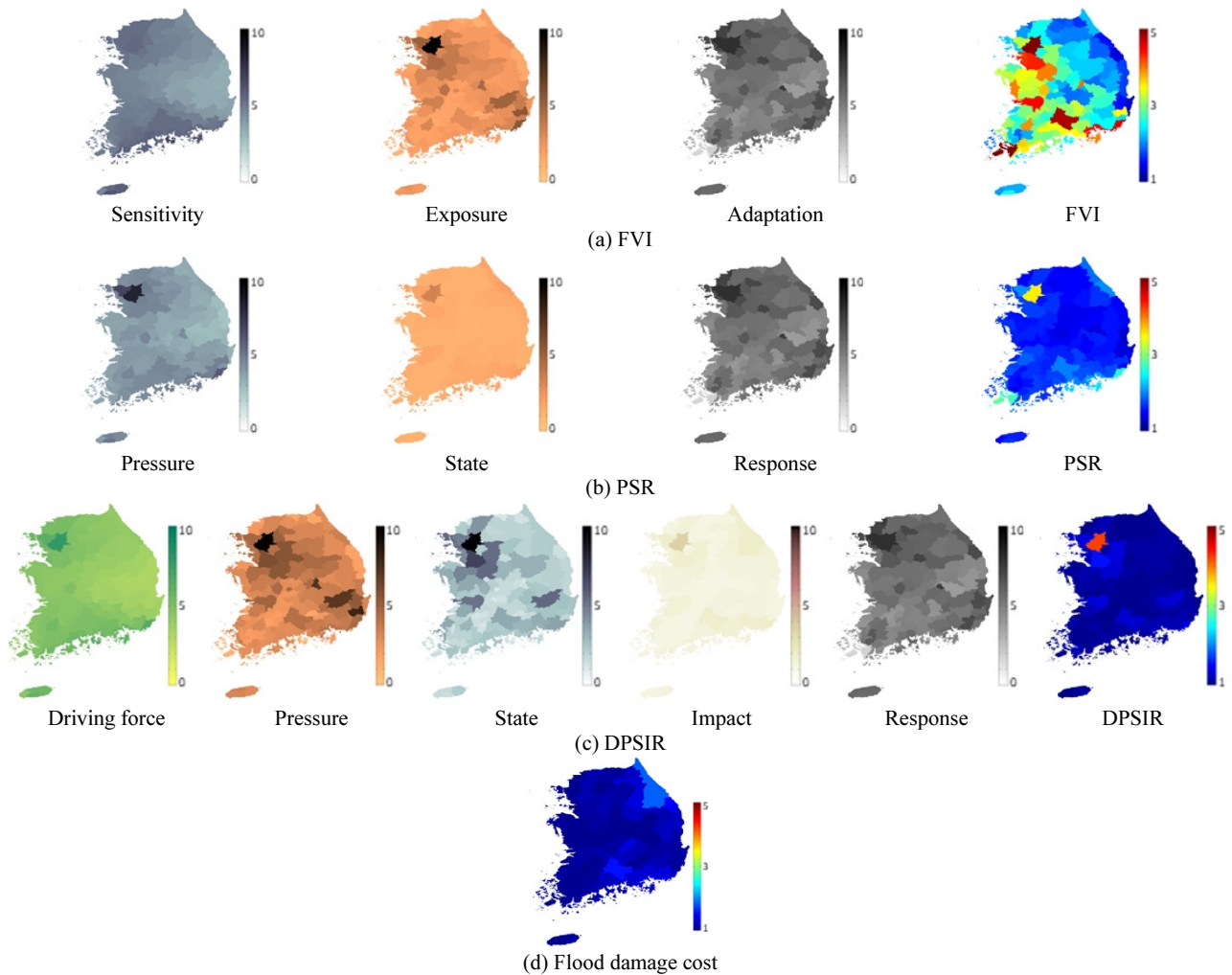


Fig. 1. Average Flood Risk Index According to FVI, PSR, and DPSIR Methods (2000-2015) (Kim and Kim, 2018)

Table 3. Correlation Coefficient by Flood Damage Cost According to FVI, PSR, and DPSIR Methods

Year	FVI	PSR	DPSIR
2000	0.25	0.48	0.43
2001	0.34	0.61	0.72
2002	0.13	0.89	0.50
2003	0.19	0.72	0.30
2004	0.00	0.18	0.08
2005	0.03	0.47	0.03
2006	0.06	0.67	0.17
2007	0.35	0.66	0.13
2008	-0.01	0.06	-0.01
2009	0.49	0.51	0.34
2010	0.57	0.61	0.43
2011	0.37	0.59	0.44
2012	0.10	0.49	0.01
2013	0.24	0.26	0.18
2014	0.60	0.77	0.58
2015	-0.25	-0.07	-0.12
2000-2015	0.14	0.66	0.16
Average	0.22	0.49	0.26

이 적합한 것으로 나타났다. 그림에도 불구하고 물리적 의미를 훼손하지 않기 위하여 수문변수와 유역특성관련 변수에 양의 회귀계수 값을 한정하고 홍수대응과 관련한 변수에 음의 회귀계수 값을 한정하는 한계로 인하여 일반적인 다중선형회귀 모형 적용시 기대되는 상관계수에 미치지 못하는 한계를 가진다.

Fig. 3은 현황 및 목표 년도에 따른 RCP 4.5와 RCP 8.5 전체 수문 특성(1시간 최대 강수량, 10분 최대 강수량, 1일 강수량이 80 mm 초과한 일수, 일 최대 강수량) 변화를 나타낸 그림이다. 기후변화에 따라 전반적으로 극한 강수량이 증가하는 경향을 보이며, 특히 남해안 및 중부 유역에서 심화되는 것을 알 수 있다. 또한, RCP 4.5보다 RCP 8.5에서 수문 특성이 악화됨을 알 수 있다. Figs. 4~5는 26개 GCM 적용에 따른 미래의 홍수 피해액 평균 및 표준편차 평균의 현황과 본 연구에서 사용한 RCP 4.5와 8.5에 대한 26개 GCM 모형의 극치 강우량을

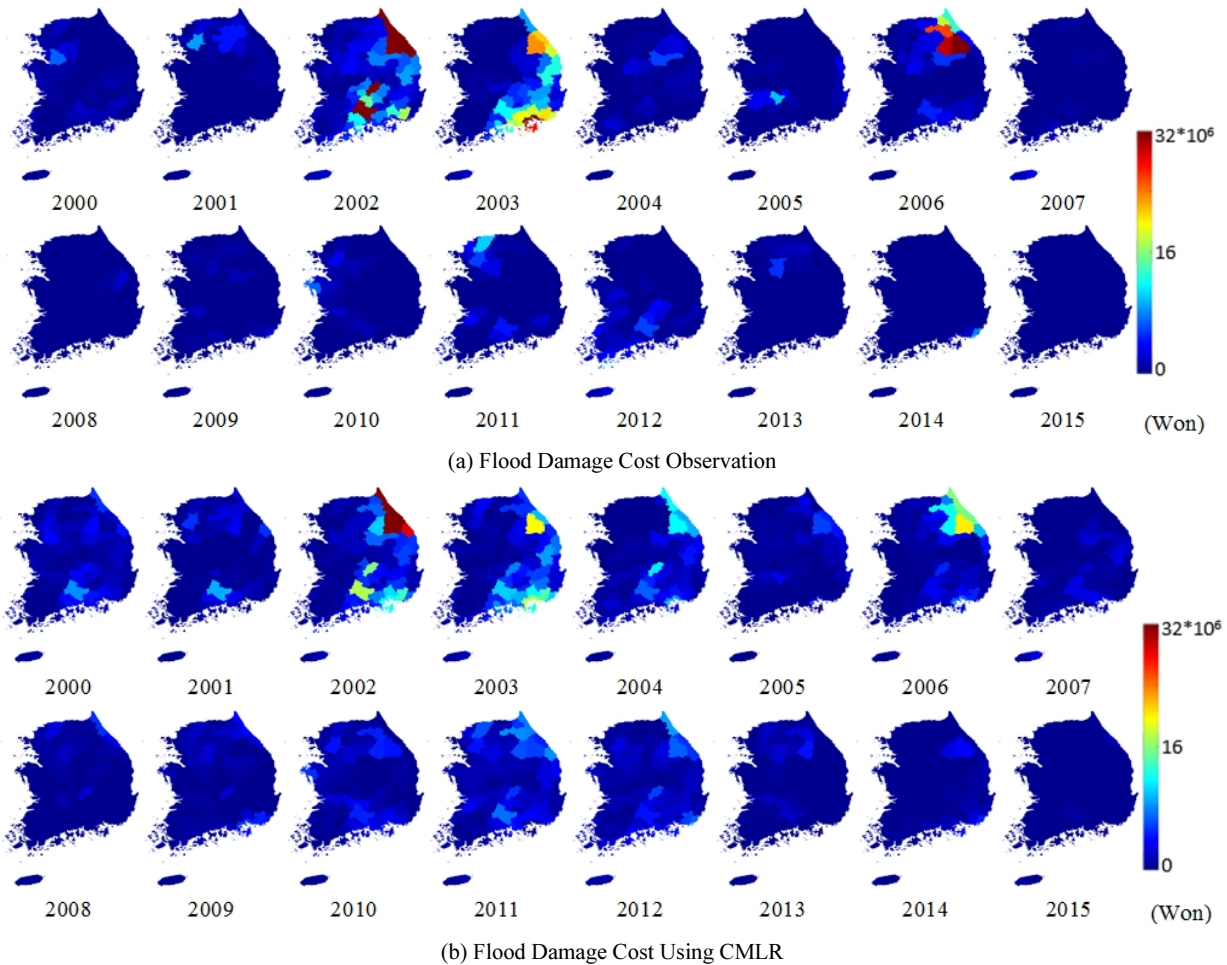


Fig. 2. Comparison between Flood Damage Cost Observation and Estimates Using CMLR Model (2000-2015)

Table 4. Test Statistics of the Flood Damage Cost Estimates by the CMLR Model

Year	RMSE	R	MAPE
2000	0.18	0.38	0.10
2001	0.24	0.37	0.12
2002	0.46	0.97	0.12
2003	0.52	0.92	0.11
2004	0.33	0.28	0.16
2005	0.24	0.34	0.13
2006	0.46	0.80	0.11
2007	0.12	0.53	0.08
2008	0.11	0.03	0.07
2009	0.14	0.57	0.07
2010	0.17	0.53	0.10
2011	0.21	0.56	0.12
2012	0.24	0.21	0.12
2013	0.21	0.34	0.12
2014	0.17	0.67	0.12
2015	0.32	-0.13	0.24
Average	0.26	0.48	0.12
FVI	1.86	0.22	1.51
PSR	0.71	0.49	0.51
DPSIR	0.48	0.26	0.11

활용한 기후변화를 고려한 목표년도별 미래 홍수 피해액 예측 결과를 평균하여 나타낸 그림이다. 미래 홍수 피해액 예측자료는 태풍 매미와 루사의 영향으로 인하여 홍수로 인한 홍수

피해액이 높았던 강원도 동해안 유역에서 현황 대비 더욱더 증가하는 경향을 보이며, 26개 GCM 모형에서 극치 강우 사상이 높게 산정되는 남강댐 유역에서 기후변화 시나리오의 영향을 받아 증가함을 알 수 있다. 산정치 표준편차의 경우 현황과 큰 차이를 보이지 않으나 남부지역을 중심으로 변화가 증가하는 경향을 보였다. 강원도 동해안 지역의 경우 태풍 매미와 루사의 영향이 해당 지역에 대한 GCM 모의 결과 적용에 반영되어 미래 홍수피해액의 증가가 상대적으로 크게 나타나는 한계를 가진다. 또한 해당 지역에 하천 개수율, 하수도 보급률, 양수량, 우수지 용량 등의 치수 대책이 타 지역에 비하여 상대적으로 미비한 상황과 복합적으로 연계되어 있을 것으로 판단되므로 미래 치수대책 수립시 이러한 한계를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 특히 Figs. 4~5에 산정된 미래 홍수피해액 예측 결과를 바탕으로 치수 대책 수립이 필요한 유역의 우선순위를 선정할 수 있고 현재의 치수 대책 수립 현황 분석을 통하여 해당 유역에 적절한 위험 관리 대응 전략을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

기후변화의 지역적 영향으로 인하여 기온과 근해의 해수

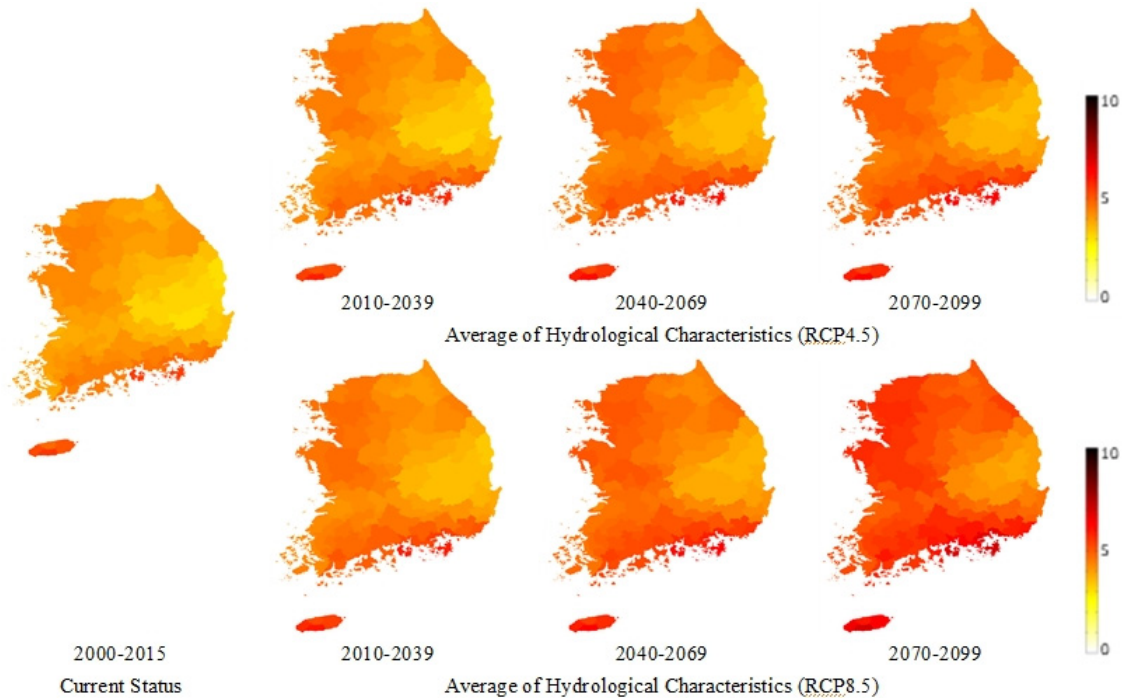


Fig. 3. Average of the Hydrological Characteristics for Different Target Periods and RCP Scenarios

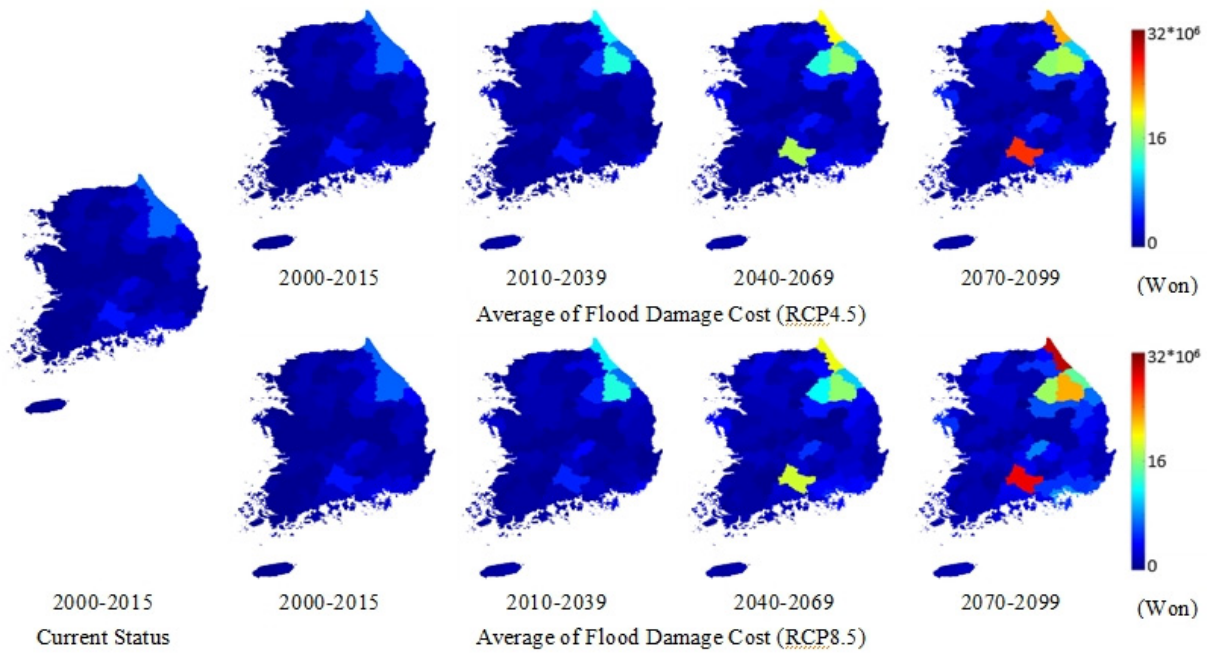


Fig. 4. Average of the Flood Damage Cost for Different Target Periods and RCP Scenarios

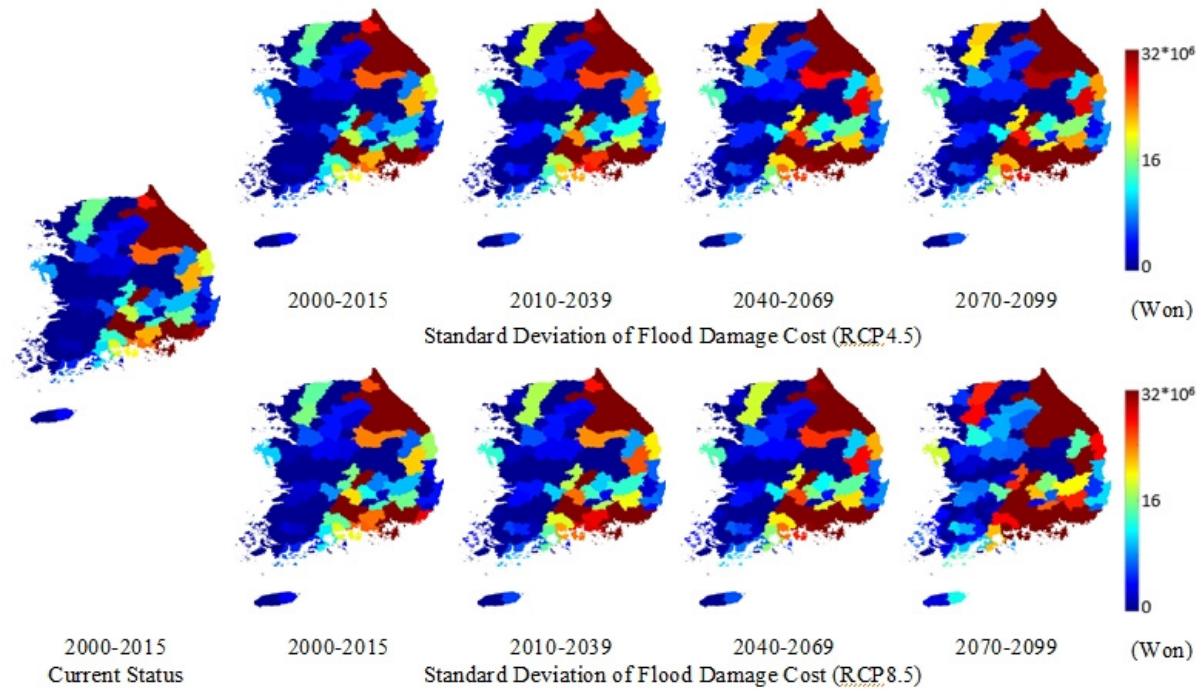


Fig. 5. Standard Deviation of the Flood Damage Cost for Different Target Periods and RCP Scenarios

면 온도가 상승하고, 도시화의 가속화와 산업화에 따른 미세먼지 농도의 증가 등은 호우의 빈도와 강도의 증가를 가져오고 이에 따른 수재해의 위험성은 날로 증가하고 있다. 이러한

수재해 피해 규모 증가에 대비하기 위하여 현재 대비 미래 홍수 위험의 변화 분석이 필요하며 본 연구에서는 미래 홍수 피해액의 변화를 예측하였다. 미래 홍수 피해액 예측을 위하여

RCP 4.5와 8.5에 대하여 생산한 26개 GCM 모형의 강우자료와 1시간 최대 강수량, 10분 최대 강수량, 1일 강수량이 80 mm 초과한 일수, 일 최대 강수량, 연강수량, 유역고도, 시가화율, 인구 밀도, 자산 밀도, 도로와 같은 사회간접 시설, 하천개수율, 하수도 보급률, 배수펌프시설, 우수지용량, 홍수 피해액 등의 관측 및 유역특성자료를 수집하여 113개 중규모 유역에 대한 입력 자료를 구축하였다.

기존의 FVI, PSR, DPSIR 모형에 의하여 산정된 홍수위험지수의 경우 홍수피해유형별 예측에 한계가 있으므로 본 연구에서는 구축 다중선형회귀모형을 활용하여 미래 홍수 피해액을 예측하였다. CMLR을 이용하여 산정한 홍수 피해액의 예측 값은 기존의 FVI, PSR, DPSIR 모형에 비하여 RMSE, R, MAPE 등과 같은 검정 통계량이 개선됨을 보여 구축 다중선형회귀모형이 적합한 것으로 판단하였다. 구축된 과거자료에 대하여 구축 다중선형회귀 모형을 적용하여 홍수 피해액과 여타 입력자료 사이의 다중선형회귀모형을 구축하고 RCP 4.5와 8.5에 대한 26개 GCM 모형 산정자료를 적용하여 미래 홍수 피해액을 산정하였다. 산정된 미래 홍수 피해액의 경우 강원도 동해안 유역과 남강댐 유역에서 높아지는 경향을 보였다. 산정한 미래 홍수 피해액 예측 값을 활용하여 미래의 홍수 위험에 대하여 여러 홍수 발생 유형 중 미래의 예상 홍수 피해액 감소를 위한 치수대책 필요 유역의 우선순위를 선정할 수 있으며, 선정한 우선순위 유역에 따른 우선순위에 따른 홍수에 대한 위험 관리 대응 전략을 수립할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 사용한 1시간 최대강수량, 10분 최대 강수량, 1일 최대 강수량 등의 기후요소와 시가화율, 인구밀도, 자산밀도 등 사회간접시설 요소, 하천 개수율, 하수도 보급률, 우수지용량 등 대응 요소 등은 서로 직·간접적으로 영향을 미칠 수 있으므로 변수선택법을 이용하여 설명력이 높은 변수를 선택하는 추후 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

- Aronica, G. T., Franza, F., Bates, P. D., and Neal, J. C. (2012). "Probabilistic evaluation of flood hazard in urban areas using Monte Carlo simulation." *Hydrological Processes*, Vol. 26, No. 26, pp. 3962-3972.
- EEA (1999). *Environmental indicators: typology and overview*. Technical report No. 25.
- Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A. F., Thouret, J. C., Manville, V., Negulescu, C., Zuccaro, G., Gregorio, D. D., Nardone, S., Uchuchoque, J. A. L., Arguedas, A., and Macedo, L. (2016). "Nelida Manrique Llerena I Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression." *Journal of Hydrology*, Vol. 541, pp. 553-562.
- Hatzikyriakou, A., and Lin, N. (2017). "Simulating storm surge waves for structural vulnerability estimation and flood hazard mapping." *Natural Hazards*, Vol. 89, pp. 939-962.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Jun, K. S., Chung, E. S., Kim, Y. G., and Kim, Y. (2013). "A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in South Korea by considering climate change impacts." *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, No. 4, pp. 1003-1013.
- Kandilioti, G., and Makropoulos, C. (2012). "Preliminary flood risk assessment: the case of Athens." *Natural hazards*, Vol. 61, No. 2, pp. 441-468.
- Kim, H. S., Park, G. J., Kim, S. D., Choi, M. H., Park, M. J., and Yoon, J. Y. (2012). "Assessment of Flood Vulnerability Considering Climate Change and Large-Scale River Restoration Project." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 107-113. (in Korean)
- Kim, J. H., Han, K. Y., and Seo, K. W. (2003). "Application of Uncertainty Method for Analyzing Flood Inundation in a River." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 4, pp. 661-671. (in Korean)
- Kim, J., Choi, C., and Yi, J. (2011). "Development of Flood control Effect Index by Using Fuzzy Set Theory." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, Vol. 31, No. 5A, pp. 415-429. (in Korean)
- Kim, M., and Kim G. (2018). "Analysis of the Applicability of Flood Risk Indices According to Flood Damage Types." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 1, pp. 29-39. (in Korean)
- Kim, T. H., Han, K. Y., and Cho, W. H. (2011). "Vulnerability Analysis in the Nakdong River Basin for the Utilization of Flood Risk Mapping." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 14, No. 3, pp. 203-222. (in Korean)
- Lee, M. W., Kim, T. W., and Moon, G. W. (2013). "Assessment of Flood Damage Vulnerability Considering Regional Flood Damage Characteristics in South Korea." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 4, pp.245-256. (in Korean)

- Masood, M., and Takeuchi, K. (2012). "Assessment of flood hazard, vulnerability and risk of mid-eastern Dhaka using DEM and 1D hydrodynamic model." *Natural hazards*, Vol. 61, No. 2, pp. 757-770.
- OECD (1993). OECD core set of indicators for environmental performance reviews. *OECD Environment Monographs*, No. 83.
- Park, M., Song, Y., Joo, J., and Park, M. (2013). "A Study on Urban Flood Vulnerability Assessment." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 5, pp. 297-305. (in Korean)
- Sung, J. H., Baek, H. J., Kang, H. S., and Kim, Y. O. (2012). "The Assessment of Future Flood Vulnerability for Seoul Region." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 341-352. (in Korean)
- Yoon, S. K., Kim, J. S., and Moon, Y. I. (2014). "Integrated flood risk analysis in a changing climate: A case study from the Korean Han River Basin." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 1563-1571. (in Korean)
- Zachos, L. G., Swann, C. T., Altinakar, M. S., McGrath, M. Z., and Thomas, D. (2016). "Flood vulnerability indices and emergency management planning in the Yazoo Basin, Mississippi." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 18, pp. 89-99.