



분위사상법을 적용한 RCP 시나리오 기반 시군별 홍수 위험도 평가

Flood Risk Assessment Based on Bias-Corrected RCP Scenarios with Quantile Mapping at a Si-Gun Level

박지훈* · 강문성**† · 송인홍***

Park, Jihoon · Kang, Moon Seong · Song, Inhong

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios-based flood risk at a Si-Gun level. A bias correction using a quantile mapping method with the Generalized Extreme Value (GEV) distribution was performed to correct future precipitation data provided by the Korea Meteorological Administration (KMA). A series of proxy variables including CN80 (Number of days over 80 mm) and CX3h (Maximum precipitation during 3-hr) etc. were used to carry out flood risk assessment. Indicators were normalized by a Z-score method and weighted by factors estimated by principal component analysis (PCA). Flood risk evaluation was conducted for the four different time periods, i.e. 1990s, 2025s, 2055s, and 2085s, which correspond to 1976~2005, 2011~2040, 2041~2070, and 2071~2100. The average flood risk indices based on RCP4.5 scenario were 0.08, 0.16, 0.22, and 0.13 for the corresponding periods in the order of time, which increased steadily up to 2055s period and decreased. The average indices based on RCP8.5 scenario were 0.08, 0.23, 0.11, and 0.21, which decreased in the 2055s period and then increased again. Considering the average index during entire period of the future, RCP8.5 scenario resulted in greater risk than RCP4.5 scenario.

Keywords: Climate change; RCP scenarios; quantile mapping; flood; risk assessment

1. 서 론

국제재해경감전략기구 (The United Nations International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR)에 따르면, 홍수에 의한 기상재해의 발현빈도가 최근 들어 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다 (UNISDR, 2012). 이러한 기상재해의 급격한 증가의 저변에는 지구 온난화로 인한 기후변화가 하나의 원인으로 자리 잡고 있다. 우리나라의 최근 기후를 살펴보면 온도는 1912~2010년 동안 0.18 °C/10년, 강수량은 21 mm/10년의 추세로 증가하였는데, 이는 기후변화에 의한 영향으로 보인다 (NIMR, 2011). 특히 홍수에 의한 영향을 살펴보기 위해 우리나라의 1일 100 mm 이상의 집중호우가 발생한 빈도를 살펴보면 1992~2001년 동안 총 325회를 기록하여 1970~1980년대의

220회에 비해 1.5배가 증가하였다. 이러한 강우강도의 증가는 홍수피해의 증가를 야기하였다 (MOLIT, 2006; Kim et al., 2009).

기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화로 인한 영향을 최소화하기 위한 대응조치로 완화와 적응을 명시하였으며 이 중 적응에 대한 중요성을 강조하였다 (IPCC, 2007). 우리나라도 기후변화에 대한 국가차원의 적응정책으로 녹색성장 기본법 시행에 따른 국가기후변화적응대책 (2011~2015)을 수립하였다 (ME, 2012).

기후변화에 적응대책을 올바르게 수행하기 위해서는 기후변화로 인한 영향을 나타낼 수 있는 취약성 평가 (Vulnerability assessment)를 실시해야 한다. 일반적으로 기후변화에서 산정하는 취약성은 노출, 결과, 적응능력을 통합하는 개념으로 인위적으로 발생하는 외부 스트레스를 저감하고, 시스템 내부의 적응능력을 강화하는 것을 의미한다 (Füssel and Klein, 2006; ME, 2012). 취약성을 평가하는 방법은 전지구 기후 시나리오를 사용하는 하향식 평가 방법 (Top-down approach)과 대리변수 (Proxy variable)를 사용하는 상향식 평가방법 (Bottom-up approach)으로 나눌 수 있다.

기후변화 홍수 위험도 평가 (Flood risk assessment)에 대한 연구는 대부분 지표를 활용하는 방법으로 수행되었다. Myeong et al. (2010)은 기상청에서 SRES (Special report on emissions

* 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부
 ** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부 부교수,
 농업생명과학연구원 겸무연구원
 *** 서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수
 † Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582
 Fax:
 E-mail: mskang@snu.ac.kr

2013년 4월 11일 투고
 2013년 6월 11일 심사완료
 2013년 6월 27일 게재확정

scenarios) 시나리오 중 A1B 시나리오에 대해 생산한 동아시아 및 한반도 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 기후사상에 대해 전망하고, 전국을 대상으로 사회기반시설에 대한 기후변화 취약성 지도를 구축하였다. 하천시설, 주거시설, 도로, 항만 등과 같은 기반시설이 취약한 것으로 나타났으며, 기후변화에 따른 적절한 적응대책 수립의 필요성과 효율적인 자연재해 대응체계의 필요성을 제안하였다. 국립재난안전연구원 (2011)은 IPCC에서 제안하는 취약성 개념에 입각하여 홍수피해저감지수에 대한 개념을 제시하고 이를 낙동강 유역에 적용하여 검증하였다. 홍수 취약성 평가를 통해 산정한 홍수피해저감지수를 소하천 정비사업과 같은 재난예방사업 시행 시 우선순위 결정의 기준으로 제시한 바 있다. Koh (2009)는 SRES 시나리오 중 A1B 시나리오를 사용하여 경기도의 기후변화를 전망하고, 경기도의 31개 시군을 대상으로 하여 홍수, 가뭄 등에 대해 상대적인 취약성 평가를 실시하였다. 취약성 평가 결과 취약성 지수는 과거 발생한 자연재해의 피해 규모 및 재해 지수와 어느 정도의 관련이 있음을 제시하였고, 영향 지수와 적응능력 지수에 따른 경기도 지역의 취약성을 4개의 유형으로 분류하였다. Brooks et al. (2005)은 문헌 및 전문가 설문조사를 통해 주요 국가수준의 평가 지표를 선정하고 국가별 취약성 분석을 수행하였다. 기상재해와 관련된 사망자수와 높은 연관성을 가지는 11개의 지표를 선정하였고, 국가별 취약한 정도를 순위로 이용하여 나타내었다. Moss et al. (2001)은 SRES 시나리오 중 A1v2, B2h, A2A1 시나리오를 대상으로 취약성을 민감도와 적응역량의 함수로 정의한 다음 VRIP (Vulnerability-resilience indicator prototype) 모형을 이용하여 국가별 기후변화 취약성을 비교 분석하였다. 이들 연구는 기존의 제4차 평가보고서에서 사용한 SRES 시나리오를 사용하여 미래의 사회, 경제 형태를 먼저 결정한 다음 순차적으로 배출량 시나리오를 산출하였다. 이러한 순차적 방법은 정보 전달의 지연을 초래하므로 기후변화에 따른 정확한 영향을 평가하기 위해서는 개선된 시나리오의 적용이 필요하다 (NIMR, 2011). 대표농도 경로 (Representative Concentration Pathways, RCP)는 온실가스 농도를 먼저 결정한 다음 기후변화, 사회, 경제적 시나리오를 동시에 병행적으로 산출할 수 있어 정보 전달의 지연을 배제할 수 있는 국가표준 기후변화 시나리오이나 이에 대한 연구는 아직 부족한 상황이다.

홍수 위험도는 지역별 특성에 따라 다르게 나타나므로 어느 지역과 부문이 기후변화에 취약한지 파악하기 위해서는 지역별로 비교 평가할 필요가 있다. 근래 들어서 급격히 증가하고 있는 홍수피해에 대한 적응정책을 수립하기 위해서는 지역별 위험도 평가를 실시하여 객관적인 기준을 제시해야 하나, 홍수피해에 초점을 맞춘 전국 시군별 홍수 위험도 평가는 아직 미흡한 실정이다.

홍수 위험도 평가에는 IPCC에서 표준 온실가스 시나리오로 새롭게 선정된 RCP 시나리오를 이용하여 국립기상연구소에서 하향식 평가 방법으로 다운 스케일링한 지역기후변화 시나리오가 우선적으로 적용된다. 기후변화모형으로부터 축소된 지역기후변화 시나리오는 어느 정도의 체계적 오차 (Systematic bias)를 내재하고 있으며 이는 모형 내부에서 해결하기가 쉽지 않다. 따라서 분위사상법 (Quantile mapping)을 사용한 편의보정을 수행하여 지역기후변화 시나리오에 내재되어 있는 편의를 감소시킨 다음 지표를 선정하여 지수를 산정하는 상향식 평가 방법으로 홍수 위험도 평가를 수행할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 편의보정을 적용한 RCP 기반 지역기후변화 시나리오에 따른 시군별 홍수 위험도 평가를 통해 홍수피해에 대한 적응대책이 우선적으로 필요한 지역을 선별하여, 미래에 발생하는 홍수피해에 대해 국가 차원의 적응정책을 수립하기 위한 적절한 기준을 제시하는데 있다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 하향식 평가방법과 상향식 평가방법을 절충하여 홍수 위험도 평가를 수행하였다. 하향식 평가방법은 강수량 등 미래 기후자료 도출에 사용하였고, 상향식 평가방법은 대리변수를 산정을 통한 홍수 위험도 평가에 적용하였다. 미래 기후자료는 기상청에서 국가표준 기후변화 시나리오로 선정하여 제공하고 있는 RCP 시나리오를 사용하였다. 국립기상연구소는 전지구 기후모형 (General Circulation Model, GCM)인 HadGEM2-AO 모형에 RCP 시나리오를 입력자료로 사용하여 약 135 km 해상도를 가지는 전지구 기후변화 시나리오를 산출하였다. 이 값을 지역기후모형 (Regional Climate Model, RCM)인 HadGEM3-RA 모형에 입력자료로 사용하여 12.5 km 해상도를 가지는 지역 기후변화 시나리오를 산출하였다 (NIMR, 2011).

국립기상연구소에서 산출한 지역기후변화 시나리오는 과거강수도의 (1950~2005년) 자료와 RCP 시나리오에 기반한 미래강수도의 (2006~2100년) 자료로 나누어서 제공되며 본 연구에서는 1976~2100년 동안의 자료를 사용하였다 (Table 1). 우리나라의 시군별 강수량 자료는 과거 및 미래강수도의 자료를 이용해서 시군 행정구역 경계 안에 포함되는 12.5 km 해상도의 격

Table 1 Precipitation data period of this study (Park et al., 2012)

Data	Period	Duration
Observed Historical Precipitation	1976~2005	30 years
Simulated Historical Precipitation	1976~2005	30 years
Simulated Future Precipitation (using RCP Scenarios)	2006~2100	95 years

자를 산술평균하여 계산하였고, 최종적으로 분위사상법을 적용하여 강수량 자료에 내재되어 있는 편의를 보정하였다. 편의보정은 대표 관측소 5개 지점을 선정한 후, 과거 기간 (1976~2005)을 대상으로 수행하여 최적화된 매개변수를 도출한 다음, 이 값을 과거 및 미래 기간 (1976~2100) 지역기후변화 시나리오에 일괄적으로 적용하여 미래 강수량의 편의보정을 수행하였다.

편의보정을 실시한 강수자료를 이용하여 홍수 위험도 지표 (Flood risk indicator)를 산정하였다. 홍수 위험도 지표의 공간적 범위는 시군이고, 시간적 범위는 과거 30년 1개 기간 (1990s:

1976~2005), 미래 30년씩 3개 기간 (2025s: 2011~2040, 2055s: 2041~2070, 2085s: 2071~2100)으로 설정하였다. 홍수 위험도 지표 (Flood risk index)를 구하기 위해 각각의 지표에 대해 표준화 (Normalization)를 수행하고, 과거 자료에 대해 주성분분석 (Principal Component Analysis, PCA)을 실시하여 지표별 가중치를 산정하였다. 주성분분석을 통해 산정한 가중치를 미래 30년 3개 기간에 동일하게 적용하여 홍수 위험도 지수를 산정하였다. Fig. 1은 본 연구의 전체적인 순서도를 나타내고 있다.

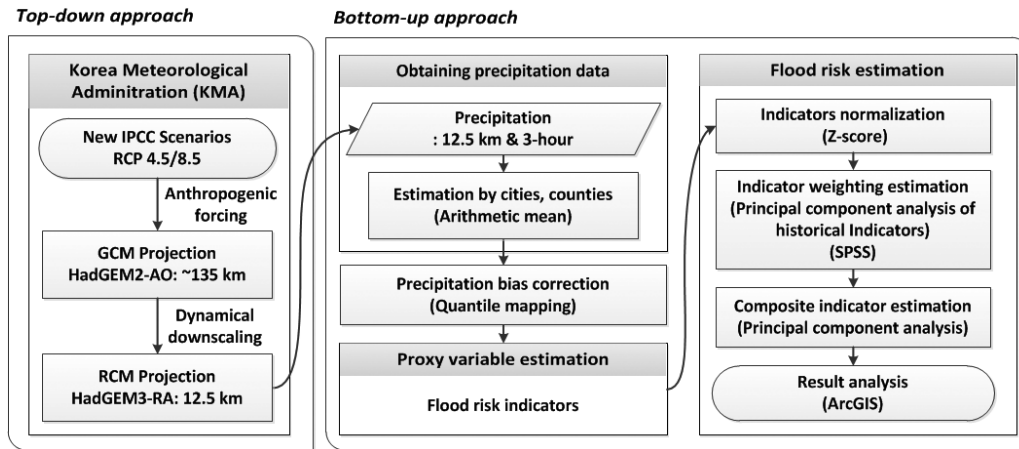


Fig. 1 Procedure of flood risk assessment

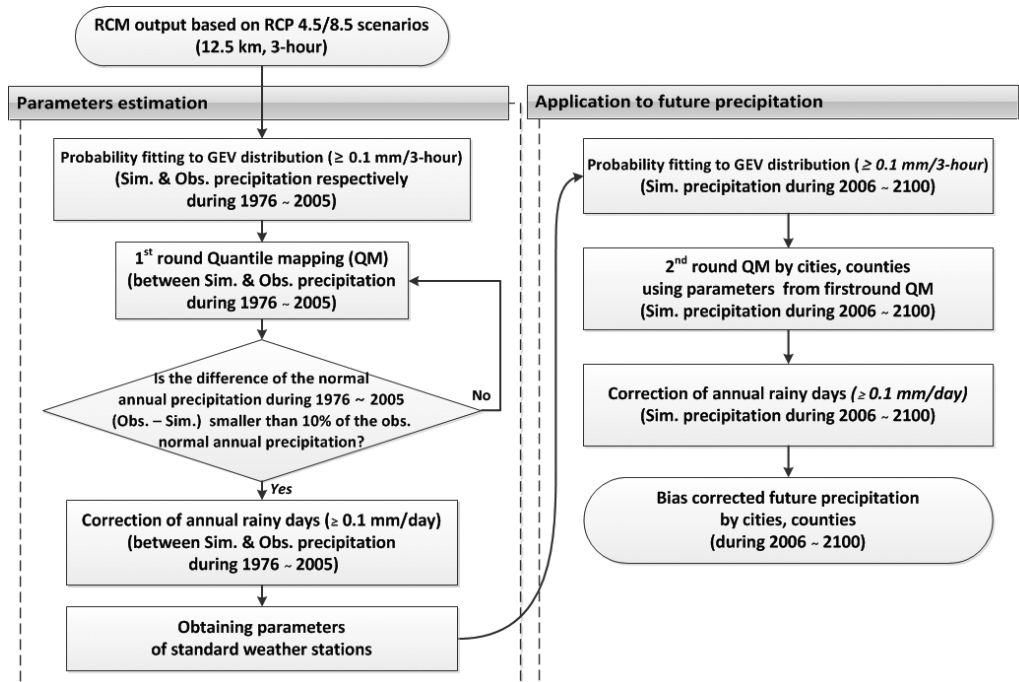


Fig. 2 Flow chart of the bias correction procedure (Park et al., 2012)

* Sim.: Simulated, * Obs.: Observed

Table 2 Proxy variables for flood risk assessment (Park, 2013)

Index	Indicator	Description	Reference
Flood risk	CN80	Number of days > 80 mm (day)	(Koh, 2009; Kim et al., 2013)
	CX3h	Maximum precipitation during 3-hr (mm)	
	CX24h	Maximum precipitation during 24-hr (mm)	(ME, 2012)
	CP24h200y	Maximum probable precipitation (24-hr duration, 200-year frequency) (mm)	
	C90th	90th percentile of rainy day amounts (mm/day)	(CRU, 2005)
	CSDI	Simple daily intensity (mm/day)	
	CX5d	Greatest 5-day total rainfall (mm)	
	CPL90th	% of total rainfall > long-term 90th percentile of rainy days (%)	
CNL90th	Number of days > long-term 90th percentile of rainy days (day)		

1. 편의보정

Fig. 2는 편의보정의 전체적인 흐름을 보여주고 있다. 편의보정은 과거 1990s 기간 동안 3시간동안의 누적 강수량이 0.1 mm 이상인 사상의 모의치와 관측치를 분위사상법을 이용하여 실시하였다. 분위사상법을 실시하기 위한 확률분포형은 GEV (Generalized Extreme Value, GEV)분포를 선정하였다. GEV 분포의 매개변수 최적화는 모의치와 관측치의 정상 연 평균강수량 (Normal annual precipitation)의 오차가 10 % 이내로 만족할 때까지 수행하였고, 이후 강우일수를 보정하였다. 과거 1990s 기간 동안의 강수량 자료에 대한 편의보정을 실시하여 구한 매개변수를 미래 기간 (2025s, 2055s, 2085s)에 일괄적으로 적용하여 미래 강수량의 편의보정을 실시하였다 (Park et al., 2012).

2. 홍수 위험도 평가

가. 홍수 위험도 지표 선정

홍수 위험도를 평가하기 위한 지표로 대리변수를 선정하였다. 문헌연구를 통해 기존에 정의된 대리변수 중 홍수 위험도에 적합한 대리변수를 선별하여 정의하였다. Table 2는 홍수 위험도에 해당되는 대리변수를 나타내고 있다.

나. 홍수 위험도 지표 표준화

홍수 위험도 지표로 선정된 대리변수는 다양한 범위와 단위를 가진다. 일관된 취약성 평가를 실시하기 위해서는 각각의 대리변수에 대해 표준화를 실시할 필요가 있다. 본 연구에서는 표준화 방법으로 가장 일반적으로 사용하는 Z-score 방법을 사용하였다. Z-score 방법은 모든 자료의 평균은 0, 표준편차는 1로 변환하는 방법으로 자료를 표준화된 확률변수인 Z값으로 나타낸다 Eq. (1).

$$Z\text{-score} = \frac{\text{Actual value} - \text{Mean}}{\text{Standard deviation}} \quad (1)$$

다. 홍수 위험도 지표 가중치 선정

홍수 위험도 지표로 선정한 대리변수를 종합적으로 분석하기 위해서는 각각의 지표를 대표할 수 있는 지수를 산정할 필요가 있다. 서로 상관관계가 있는 다변량자료의 종합적인 지표를 산정하기 위해서는 복잡한 분석이 필요하다. 주성분분석은 서로 상관관계가 높은 변수들의 선형결합을 이용하여 복합지표를 생성하는 다변량 통계 분석방법이다. 주성분분석의 종류에는 표준화하지 않은 원자료에 대해 주성분분석을 수행하는 방법과 표준화한 자료에 대해 주성분분석을 수행하는 방법이 있다. 본 연구에서는 표준화한 자료에 대해 주성분분석을 실시하는 방법을 사용하였다. Eq. (2)는 주성분분석의 방법을 간단히 요약하여 나타내고 있다.

$$u = \sum_{i=1}^N C_i X_i \quad (2)$$

N 은 지표의 개수, C_i 는 $\sum_{i=1}^N C_i^2 = 1$ 을 만족하는 계수, X_i 는 변량을 의미한다. u 는 합성변량으로 주성분 (Principal component)이라 정의하며, 합성변량 u 의 분산인 s_u^2 가 최대가 되는 계수 C_i 를 산정한다.

과거 30년 기간 (1990s)의 홍수 위험도 지표에 대해 주성분분석을 실시하여 얻은 성분행렬 주성분의 성분부하를 세부지표의 가중치로 설정하여 미래 홍수 위험도 지표에 일괄적으로 적용하였다.

주성분분석을 실시하는 통계 프로그램으로 SPSS (IBM SPSS Statistics, Version 20, USA)를 이용하였다.

라. 홍수 위험도 지수 선정

Fig. 3은 홍수 위험도 지수를 산정하는 과정을 보여주고 있다. 홍수 위험도 지표에 대해 표준화를 실시하고 통합하여 홍수 위험도 지수를 산정한다.

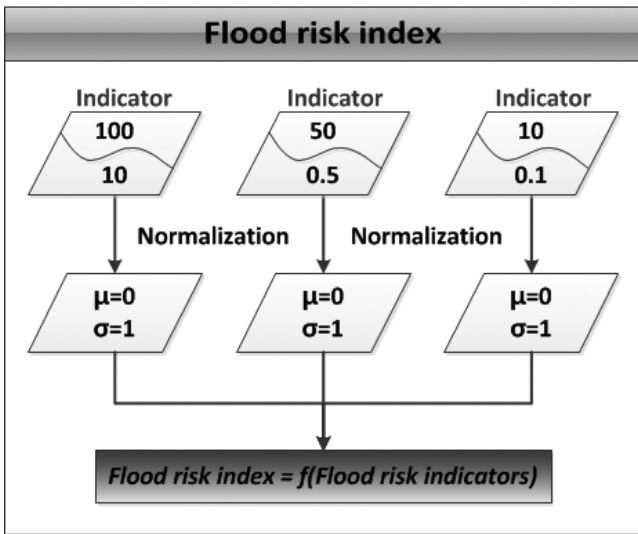


Fig. 3 Procedure of flood risk index estimation

홍수 위험도 지수는 주성분분석으로 산정한 성분 부하량 (Factor loading)을 가중치 W_i 로, 홍수 위험도 지표를 I_i 로 입력하여 Eq. (3)과 같이 산정하였다.

$$Flood\ risk\ index = \sum_{i=1}^N W_i I_i \quad (3)$$

III. 결과 및 고찰

1. 강수량 편의보정

Fig. 4는 과거 1990s 기간 동안 대표 관측소 5개 지점에 대한 편의보정 결과를 결정계수를 이용하여 나타내고 있다. 3시간 단위로 편의보정한 강수량을 월별평균값으로 정리하여 나타낸 결과 결정계수가 모두 0.95 이상으로 높은 상관관계를 보이는 것

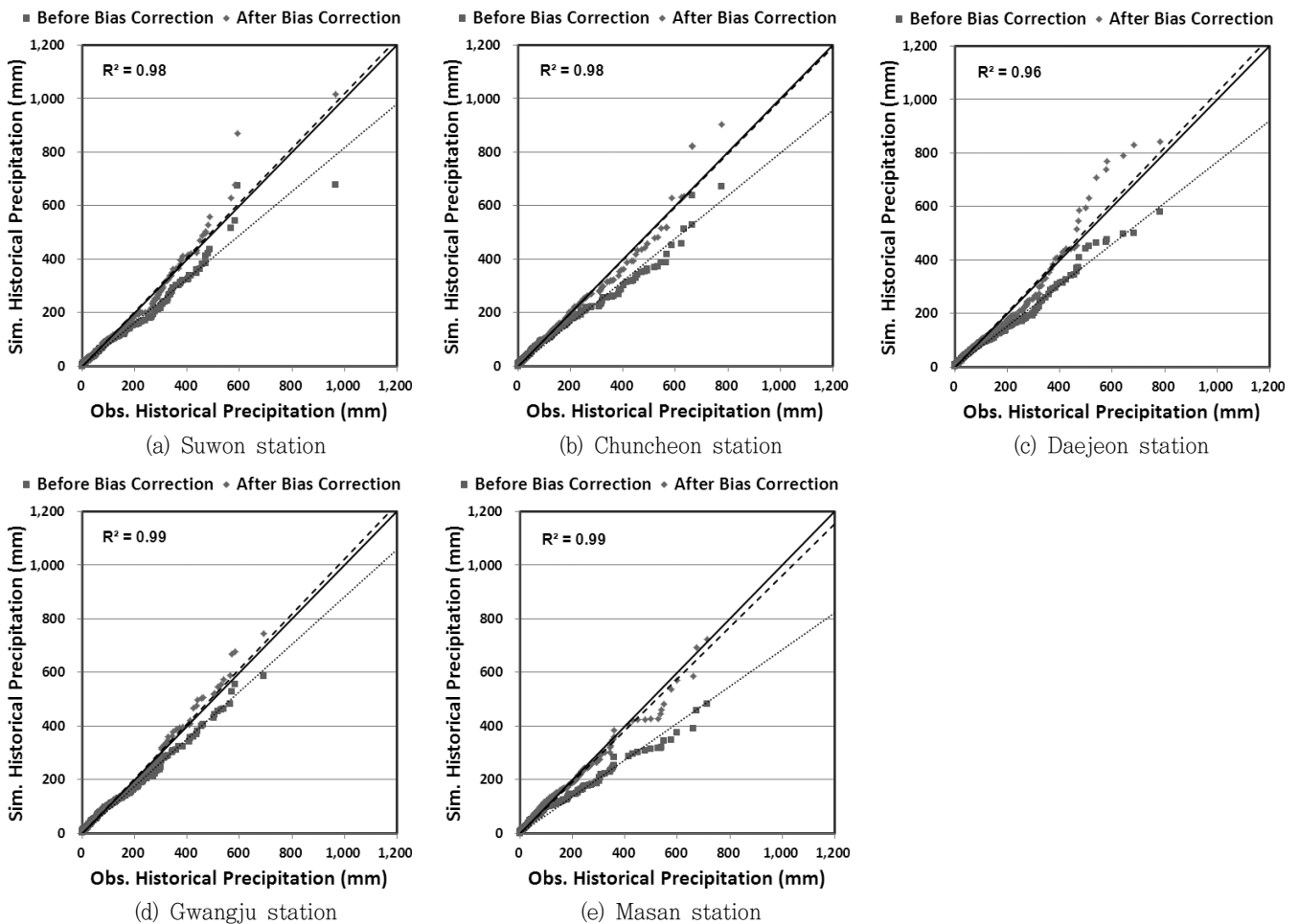


Fig. 4 Correlation of observed and bias corrected precipitation for the six selected weather stations (Park et al., 2012)

* Sim.: Simulated, * Obs.: Observed

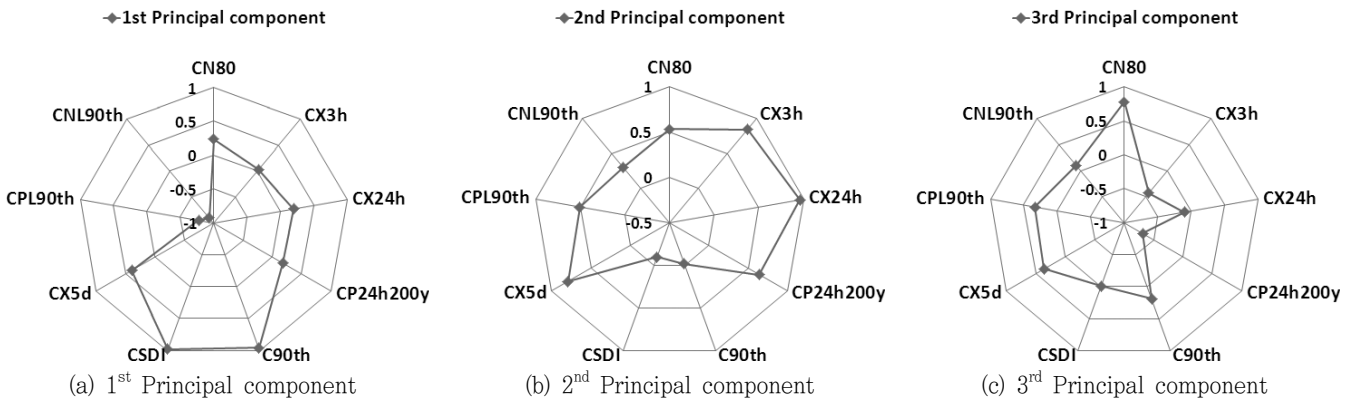


Fig. 5 Factor loadings of flood risk indicators for 1990s (Park, 2013)

* CN80: Number of days > 80 mm (day), CX3h: Maximum precipitation during 3-hr (mm), CX24h: Maximum precipitation during 24-hr (mm), CP24h200y: Maximum probable precipitation (24-hr duration, 200-year frequency) (mm), C90th: 90th percentile of rainy day amounts (mm/day), CSDI: Simple daily intensity (mm/day), CX5d: Greatest 5-day total rainfall (mm), CPL90th: % of total rainfall > long-term 90th percentile of rainy days (%), CNL90th: Number of days > long-term 90th percentile of rainy days (day)

으로 나타났다. 이는 지역기후변화 시나리오 모의치에 대한 편차의 보정이 관측치의 경향성을 보다 정확하게 반영한 것임을 의미한다.

2. 과거 홍수 위험도 평가

가. 주성분분석

홍수 위험도 지표들의 가중치를 산정하기 위해 과거 지표들에 대한 주성분분석을 수행하였다. Table 3은 1990s 기간 동안의 홍수 위험도 지표의 주성분분석을 실시하여 산정한 성분 부하량과 분산 설명량 (Total variance explained)을 나타내고 있다.

분산 설명량은 제 3 주성분까지 산출되었으며, 제 1 주성분이 39.8 %, 제 2 주성분이 36.8 %, 제 3 주성분이 17.4 %로 제 1 주성분과 제 2 주성분이 대부분의 지표를 대표하고 있는 것으로 나타났다. 분산 설명량은 각 주성분이 자료를 어느 정도 설명하고 있는지를 나타내는 값으로 주성분의 기여율이라 정의된다. 일반적으로 주성분분석에서는 80 % 누적기여율을 기준으로 채택하며, 본 연구에서는 제 3 주성분까지의 누적기여율이 94.0 %이므로 제 3 주성분까지 채택하였다.

각각의 주성분에서 성분 부하량의 분포 특성을 Fig. 5에 도시하였다. 성분 부하량은 각 주성분에서 각 지표에 대한 가중치를 의미한다. 큰 성분 부하량을 가지는 지표를 살펴보면 제 1 주성분에서는 C90th, CSDI 등이, 제 2 주성분에서는 CX24h, CX3h, CX5d 등이, 제 3 주성분에서는 CN80 등이 주요 지표로 선정되었다.

1990s 기간 동안의 홍수 위험도 지표들에 대해 주성분분석을 실시하여 제 3 주성분까지 산출하였다. 각 주성분별 산정된 성분 부하량을 지표의 가중치로 대입하여 각 주성분 점수를 구한 다

Table 3 Factor loadings and total variance explained of flood risk indicators for 1990s (Park, 2013)

Indicator	1 st Principal component	2 nd Principal component	3 rd Principal component
	Total variance explained		
	39.8 %	36.8 %	17.4 %
CN80	0.2384	0.53364	0.7815
CX3h	0.03209	0.84386	-0.4319
CX24h	0.20128	0.95839	-0.0984
CP24h200y	0.18214	0.6417	-0.6854
C90th	0.96214	-0.0212	0.19015
CSDI	0.97978	-0.0971	-0.0066
CX5d	0.39415	0.79147	0.3626
CPL90th	-0.7759	0.50751	0.33169
CNL90th	-0.899	0.29674	0.09989

* CN80: Number of days > 80 mm (day), CX3h: Maximum precipitation during 3-hr (mm), CX24h: Maximum precipitation during 24-hr (mm), CP24h200y: Maximum probable precipitation (24-hr duration, 200-year frequency) (mm), C90th: 90th percentile of rainy day amounts (mm/day), CSDI: Simple daily intensity (mm/day), CX5d: Greatest 5-day total rainfall (mm), CPL90th: % of total rainfall > long-term 90th percentile of rainy days (%), CNL90th: Number of days > long-term 90th percentile of rainy days (day)

음, 각 주성분 점수에 주성분별 기여율인 분산 설명량을 곱한 뒤 모두 더해 과거 홍수 위험도 지수를 산정하였고, 1990s 기간 동안의 주성분분석을 통해 구한 성분 부하량과 분산 설명량을 미래 3개 기간 (2025s, 2055s, 2085s)에 적용하여 미래 홍수 위험도 지수를 산정하였다.

나. 홍수 위험도 지수

Fig. 6은 1990s 기간 동안의 홍수 위험도 지수를 시군별로 산

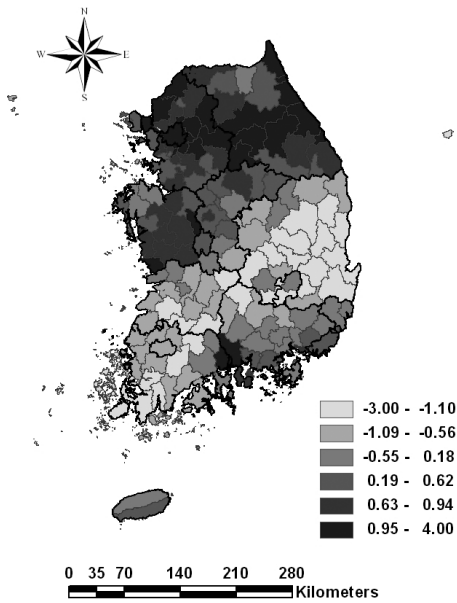


Fig. 6 Flood risk index for 1990s (Park, 2013)

정한 결과를 보여주고 있다. 홍수 위험도 지수는 경기도, 강원도 중부, 강원도 영동 지방이 제일 높게 산정되었고, 경상북도 인근이 상대적으로 낮게 산정되었다. 각 지표를 분석하여 홍수 위험도 지수의 분포경향을 살펴보면, 경기도는 최대 5일 총강우량(CX5d)이 기간 평균에 비해 10.0 % 높게 나타났다. 강원도는 24시간 지속기간 200년 빈도의 확률강우량(CP24h200y), 강우발생일의 90 %양(C90th), 단일강우강도(CSDI)가 기간 평균에 비해 각각 50.2 %, 35.6 %, 45.9 % 높게 산정되었다. 서울특별시는 일강우량이 80 mm 이상인 날 평균횟수(CN80), 강우발생일의 90 %양(C90th), 단일강우강도(CSDI)가 기간 평균에 비해 각각 52.9 %, 36.8 %, 42.2 % 크게 산정되어 높은 홍수 위험도 지수를 나타내는 것으로 사료된다.

3. 미래 홍수 위험도 평가

Fig. 7의 (a), (c), (e)는 RCP4.5 시나리오에 따른 미래 3개 기간(2025s, 2055s, 2085s) 동안의 홍수 위험도 지수를 시군별로 산정한 결과를 보여주고 있다. 기간별로 홍수 위험도 지수의 변화경향을 살펴보면 2055s 기간에 들어서면서 경기도 북부 지역과 강원도 영서지역 일부의 홍수 위험도 지수가 증가하였고, 2085s 기간에 들어서면서 강원도 영동지방의 홍수 위험도 지수는 일부 감소하고 경기도와 충청북도 인근 지역의 홍수 위험도 지수는 산발적으로 증가하였다. 시간이 경과함에 따라 전반적으로 점차 높은 홍수 위험도 지수를 나타내는 지역이 증가하였고, 제주특별자치도 서귀포시는 높은 홍수 위험도 지수를, 경상북도는 낮은 홍수 위험도 지수를 유지하였다. 각 지표를 분석하여 홍

수 위험도 지수의 변화경향을 살펴보면, 강원도는 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안 3시간 동안의 최대강우량(CX3h)이 61.4 mm, 71.1 mm, 69.5 mm의 변화경향을 나타내고, 24시간 지속기간 200년 빈도의 확률강우량(CP24h200y)이 1036.1 mm, 1071.3 mm, 1042.6 mm로 나타났다. 이러한 변화경향이 2055s 기간에 강원도의 홍수 위험도 지수가 증가하고 2085s 기간에 감소하는데 영향을 미쳤을 것이라 사료된다. 경기도는 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안 최대 5일 총강우량(CX5d)이 286.8 mm, 307.2 mm, 381.2 mm로 나타났다. 충청남도는 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안 최대 5일 총강우량(CX5d)이 292.7 mm, 307.4 mm, 417.8 mm로 나타났다. 이러한 증가 경향이 홍수 위험도 지수 변화에 반영된 것으로 사료된다.

Fig. 7의 (b), (d), (f)는 RCP8.5 시나리오에 따른 미래 3개 기간(2025s, 2055s, 2085s) 동안의 홍수 위험도 지수를 시군별로 산정한 결과를 보여주고 있다. 기간별로 홍수 위험도 지수의 변화경향을 살펴보면 2055s 기간에 들어서면서 경기도 동부 지역과 충청북도 충주의 홍수 위험도 지수가 증가하였고, 2085s 기간에 들어서면서 강원도 영동지방의 홍수 위험도 지수는 일부 감소하고 경기도 화성시의 홍수 위험도 지수는 증가하였다. 경기도는 2055s기간에 가장 높은 홍수 위험도 지수를 나타낸 후 2085s기간에 들어서는 감소하였고, 경상북도는 시간이 지남에 따라 점차 낮은 홍수 위험도 지수를 가지는 지역이 증가하는 것

Table 4 Flood risk index based on RCP4.5 and 8.5 scenarios (Index range: -3.00~4.00)

Location	1990s	RCP4.5 scenario			RCP8.5 scenario		
		2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Seoul	1.12	1.17	0.95	1.14	1.12	1.18	0.71
Incheon	-0.05	0.23	1.14	0.68	0.60	0.13	0.84
Daejeon	0.45	0.23	0.12	0.29	0.53	-0.32	-0.13
Gwangju	-0.60	-0.37	-0.63	-0.51	-0.48	-0.26	-0.46
Ulsan	-0.42	-0.08	-0.20	-0.72	-0.36	-0.48	-0.34
Busan	0.44	0.85	1.25	0.60	1.50	1.01	1.10
Gyeonggi	0.85	0.85	0.85	1.03	0.87	0.83	0.76
Gangwon	1.16	0.62	0.69	0.32	0.70	0.56	0.37
Chungbuk	0.39	0.39	-0.01	0.46	-0.03	0.09	-0.12
Chungnam	0.62	0.53	0.69	0.63	0.40	0.27	0.22
Jeonbuk	-0.87	-0.75	-0.50	-0.45	-0.83	-0.16	-0.72
Jeonnam	-0.88	-0.30	-0.59	-0.35	-0.38	-0.24	0.13
Gyeongbuk	-1.20	-1.35	-1.31	-1.39	-1.25	-1.39	-1.42
Gyeongnam	-0.11	-0.10	-0.15	-0.34	0.06	0.01	0.23
Jeju	0.29	0.52	0.96	0.56	1.00	0.36	1.94
Average	0.08	0.16	0.22	0.13	0.23	0.11	0.21
Maximum	1.16	1.17	1.25	1.14	1.50	1.18	1.94
Minimum	-1.20	-1.35	-1.31	-1.39	-1.25	-1.39	-1.42

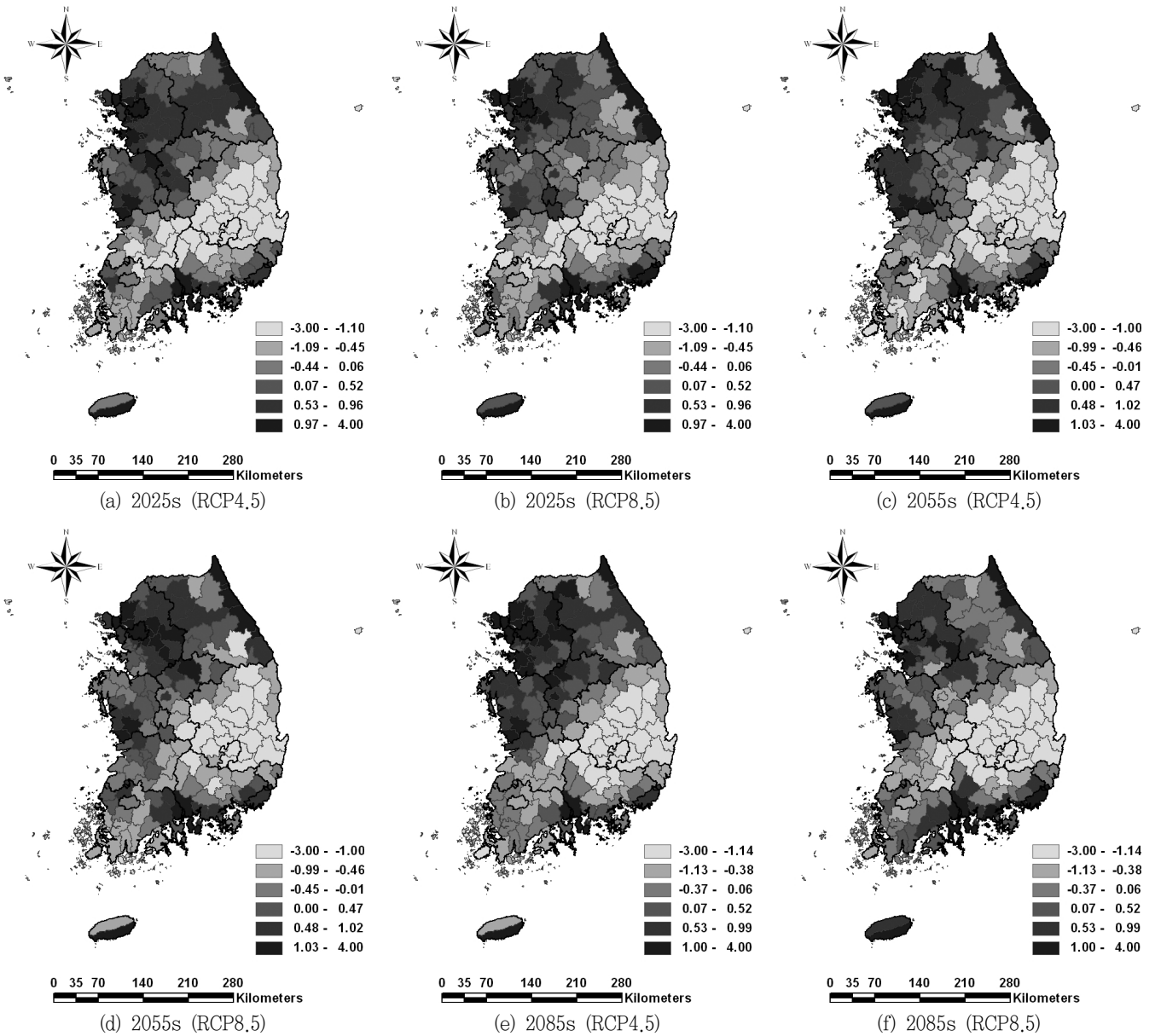


Fig. 7 Future flood risk index based on RCP4.5 and 8.5 scenarios (Park, 2013)

으로 나타났다. 각 지표를 분석하여 홍수 위험도 지수의 변화경향을 살펴보면, 강원도는 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안 최대 5일 총강우량 (CX5d)이 245.4 mm, 309.4 mm, 300.8 mm 값을 나타냈다. 최대 5일 총강우량 (CX5d)이 2085s 기간에 소폭 감소하는 것이 강원도 홍수 위험도 지수를 감소시킨 것으로 사료된다. 경기도는 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안 최대 5일 총강우량 (CX5d)이 272.5 mm, 350.1 mm, 377.7 mm, 24시간 동안의 최대강우량 (CX24h)은 167.8 mm, 223.8 mm, 267.5 mm로 두 지표 모두 2055s 기간에 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 변화경향이 2055s 기간 동안 경기도의 홍수

위험도 지수가 크게 증가하는데 영향을 미쳤다고 사료된다.

Table 4는 RCP4.5와 8.5 시나리오에 따른 과거 1990s 기간과 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안의 홍수 위험도 지수를 산정한 결과를 보여주고 있으며 지수의 범위는 -3.00~4.00의 값을 가진다. 기간별 평균 지수를 살펴보면, RCP4.5 시나리오는 0.08, 0.16, 0.22, 0.13으로 2055s기간까지 지속적으로 증가한 후 2085s 기간에 감소하는 경향을 나타내고 있으며, RCP8.5 시나리오는 0.08, 0.23, 0.11, 0.21으로 2025s기간에 크게 증가한 다음 2055s 기간에 감소하고 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 편의보정을 적용한 RCP 기반 지역기후변화 시나리오에 따른 시군별 홍수 위험도 평가를 수행하였다. 홍수 위험도를 대표할 수 있는 대리변수를 선정하여 지표를 산정하고, 지표에 대한 주성분분석을 통해 가중치를 산정하여 홍수 위험도 지수를 도출하였다.

1. 홍수 위험도 지수는 전반적으로 경기도, 강원도 중부, 강원도 영동 지방이 제일 크게 산정되었고, 경상북도 인근이 상대적으로 낮게 산정되었다. 지표별 홍수 위험도 지수가 분포경향을 살펴보면, 경기도는 최대 5일 총강우량 (CX5d), 강원도는 24시간 지속기간 200년 빈도의 확률강우량 (CP24h200y), 강우발생일의 90 %양 (C90th), 단일강우강도 (CSDI)로 인해, 서울특별시는 일 강우량이 80 mm 이상인 날 평균횟수 (CN80), 강우발생일의 90 % 양 (C90th), 단일강우강도 (CSDI)로 인해 높은 홍수 위험도 지수를 보였다.

2. 미래 기간별 RCP4.5 기반 홍수 위험도 지수의 평가 결과, 2055s 기간에는 경기도 북부 및 강원 영서지역 일부의 홍수 위험도가 증가하였고, 2085s 기간에는 강원 영동지방은 일부 감소하고 경기도와 충청북도 인근 지역의 홍수 위험도는 산발적으로 증가하였다. 지표별 홍수 위험도의 분포경향을 살펴보면, 강원도는 3시간 동안의 최대강우량 (CX3h), 24시간 지속기간 200년 빈도의 확률강우량 (CP24h200y)의 변화경향이 2055s 기간에 강원도의 홍수 위험도 지수가 증가하고 2085s 기간에 감소하는데 영향을 미쳤다. 경기도와 충청남도는 최대 5일 총강우량 (CX5d)의 지속적인 증가경향이 홍수 위험도 지수 변화에 반영되었다.

3. 미래 기간별 RCP8.5 기반 홍수 위험도 지수의 평가 결과, 2055s 기간에는 경기도 동부 지역과 충청북도 충주의 홍수 위험도 지수가 증가하였고, 2085s 기간에는 강원도 영동지방이 일부 감소하고 경기도 화성시는 증가하였다. 경기도는 2055s기간에 가장 높은 홍수 위험도 지수를 나타낸 후 2085s기간에는 감소하였고, 경상북도는 시간이 지남에 따라 점차 낮은 홍수 위험도 지수를 가지는 지역이 증가하는 것으로 나타났다. 지표별 홍수 위험도의 분포경향을 살펴보면, 강원도는 최대 5일 총강우량 (CX5d)이 2085s 기간에 소폭 감소하는 것이 강원도 홍수 위험도 지수를 감소시킨 것으로 사료된다. 경기도는 최대 5일 총강우량 (CX5d), 24시간 동안의 최대강우량 (CX24h)이 2055s 기간에 큰 증가 경향을 나타내어 경기도의 홍수 위험도 지수를 증가하였다.

4. 공간적인 분포 특성을 살펴보면 RCP4.5, RCP8.5 시나리오 모두 수도권 인근에서 홍수 위험도 지수가 높은 지역이 많이 분포하였다. 시간적인 변화 특성을 살펴보면 RCP4.5 시나리오의 경우 홍수 위험도 지수가 2055s 기간까지 증가하다가 2085s 기

간에 들어서면서 감소하는 경향을 보였고, RCP8.5 시나리오는 2025s 기간에 크게 증가하고 2055s 기간에 감소한 다음 2085s 기간에 다시 증가하는 경향을 보였다.

본 연구를 통해 기후변화로 인해 증가하는 홍수피해에 대해 지역별 홍수 위험도를 평가하였다. 본 연구에서 도출한 홍수 위험도 지수는 기후변화에 대비한 국가차원의 미래지향적 적응강화 전략 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 농림축산식품부 생명산업기술개발사업 기획과제인 “농업생산기반시설 통합 관리시스템 개발” 연구비지원 (과제번호: 311009-3)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Brooks, N. W., N. Agder, and P. M. Kelly. 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaption. *Global Environmental Change* 15(2): 151-163.
- Climatic Research Unit (CRU), 2005. STARDEX final report, 2-5.
- Füssel, H.-M., and Richard J. T. Klein, 2006. Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change* 75: 301-329.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Climate change 2007: impacts, adaption and vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kim, S. J., S. M. Kim, and S. M. Kim, 2013. A study on the vulnerability assessment for agricultural infrastructure using principal component analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(1): 31-38 (in Korean).
- Kim, S. M., S. Im, S. H. Lee, H. H. Kim, H. S. Ma, and W. O. Jeong, 2009. Estimation of design flood runoff in ungaged forest watershed to reduce flood damage within the national park. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(5): 107-113 (in Korean).
- Koh, K. J., 2009. A study on vulnerability assessment to climate change in Gyeonggi-Do, 75-94. Gyeonggi Research Institute (in Korean).
- Ministry of Environment and National Institute of

- Environmental Research (ME and NIER), 2012. Vulnerability map by sector to climate change, 31-40 (in Korean).
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2006. Long-term comprehensive water plan (2006~2020), 129-153 (in Korean).
 10. Moss, R. H., A. L. Brenkert, and E. L. Malone, 2001. Vulnerability to climate change a quantitative approach, 8-18. PNNL-SA-33642. The U.S. Department of Energy.
 11. Myeong, S. J., J. Y. Kim, S. H. Shin, and B. O. Ahn, 2010. Assessing vulnerability to climate change of the physical infrastructure developing adaption measures in korea II , 45-116. Korea Environment Institute (in Korean).
 12. National Disaster Management Institute (NDMI), 2011. Development of community-based flood disaster risk reduction index, 25-80 (in Korean).
 13. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2011. Climate change scenario report for IPCC AR5, 17-46 (in Korean).
 14. Park, J., 2013. Flood vulnerability based on bias-corrected RCP scenarios at a Si-Gun level. Master's thesis, Seoul National University (in Korean).
 15. 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).
 16. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2012. <http://www.unisdr.org>. Accessed 12 Mar. 2013.