수재해 취약성 지수(WDVI) 개발 및 아시아 몬순지역 수재해 취약성 평가

Development of the Water Disaster Vulnerability Index and Evaluation of Water Disaster Vulnerability in the Asian Monsoon Region

김민국* · 김정배** · 배덕효***

Kim, Min-Kuk*, Kim, Jeong-Bae**, and Bae, Deg-Hyo***

Abstract

The purpose of this study was to develop the Water Disaster Vulnerability Index (WDVI), which was applied to 30 countries located in the Asian monsoon region. For the development of the index, vulnerability was evaluated by sensitivity and exposure. Hydrological, meteorological, social, and economic data suitable for each classification were selected and used as indicators. To evaluate the flood damage vulnerabilities in the Asian monsoon region, the percentiles of the index results in 30 countries were compared, and to investigate the change in vulnerability due to climate change, the variation in the flood and drought vulnerability index was compared. The result of the WDVI evaluation showed that Southeast Asia had the highest index value and growth rates. In the case of drought vulnerability, the index values and growth rates were the highest in Central Asia, while in Southeast Asia, drought vulnerabilities were relatively low, but the index growth rate was the second highest in Asia. It was found that future climate change is expected to cause variation in precipitation characteristics and increase the flood and drought vulnerability.

Key words : WDVI, Flood Vulnerability, Drought Vulnerability, Climate Change

요 지

본 연구에서는 수재해 취약성 지수를 개발하고, 아시아 몬순 지역의 30개 국가에 대해 적용 및 평가하고자 하였다. 지수 개발을 위해 민감도와 노출로 취약성을 구분하였으며, 각 구분에 적합한 수문·기상학적 자료와 사회·경제학적 자료를 선정하여 세부지표로 사용하였다. 각 국가별 취약성을 평가하기 위해 30개 국가에 대한 지수 산정결과 값의 백분위를 산정하여 비교하였으며, 기후변화에 따른 홍수 및 가뭄 취약성의 변화를 판단하기 위해 과거 관측자료를 활용하여 국가별 1960년대 대비 2006년의 지수 변화율을 산정하였다. 평가 결과 홍수 취약성의 경우 동남아시아 지역에서 지수 값과 증가율이 가장 크게 나타났다. 가뭄 취약성의 경우 중앙아시아 지역에서 지수 값과 증가율이 가장 크게 나타났으며, 동남아시아 지역의 경우 가뭄 취약성은 비교적 적은 것으로 나타났으나 지수 증가율이 중앙아시아 다음으로 크게 나타났다. 이는 기후변화로 인한 강우 특성의 변화가 가져온 결과로 판단되며, 이로 인해 향후 수재해 취약성은 기후변화에 따라 점차 증가할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수재해 취약성 지수, 홍수 취약성, 가뭄 취약성, 기후변화

*정회원, 세종대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail: mk4223@naver.com)

Member, M.S Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

**정회원, 세종대학교 건설환경공학과 박사과정

Member, Ph.D Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

***교신저자, 정회원, 세종대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-2-3408-3814, Fax: +82-2-3408-4332, E-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

1. 서론

최근 전 지구적으로 자연재해의 발생 빈도 및 피해가 증가하고 있는 추세이며, 1980년을 기점으로 피해가 더욱 심각해지고 있다(EM-DAT, 2018). 특히 홍수와 가뭄은 가장 빈번히 발생하는 자연재해로 발생건수의 약 53%를 차지하며, 대규모 인명피해를 야기한다(Adikari and Yoshitani, 2009). 최근 기후변화로 인해 지난 100년(1906~2005년) 동안 지구의 평균기온은 약 0.7 °C 상승하였으며, 홍수 및 가뭄 위험이 증가하였다(Lee et al., 2011). 이는 전 지구적으로 홍수 및 가뭄 취약성이 증가함을 의미하며, 이러한 홍수, 가뭄 재해에 효과적으로 대비하기 위해서는 국가별 특성보다는 전 지구적인 지형, 인문·사회적 특성과 기상현상의 공간적인 분포를 반영한 홍수 및 가뭄 취약성 평가를 수행할 필요가 있다.

국내외에서는 다수의 재해 취약 특성을 정량적으로 나타내기 위한 수단으로 취약성 지수를 많이 활용하고 있으며 국가 및 지역 간 비교가 용이하다. 국내에서는 Son et al. (2011)이 Drive-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) 개념을 토대로 홍수 취약성 지수를 개발해 국내 6개 중권역에 적용 및 평가하였다. 또한 Yang et al. (2012)은 총 10가지 가뭄 취약 지표를 선정해 가뭄 취약성 지수를 개발하였으며 국내 10개 보 유역에 적용해 가뭄 취약성을 평가하였다. Song et al. (2013)은 Pressure-State-Response (PSR) 지표체계를 도입해 총 17가지 지표를 활용한 홍수 위험 지수를 개발하였다. 또한 Lee et al. (2013)은 PSR 지표체계를 적용해 통합 수자원 평가 지수를 개발했다. Moon et al. (2014)은 홍수 노출, 민감도, 피해저감능력, 지역사회 대비 능력과 관련된 수문 및 인문·사회적 지표를 활용해 홍수 피해 저감 지수를 개발 및 평가하였으며, 주관적인 세부지표 선정보다는 타당성 검증을 통한 세부 지표 선정이 필요함을 제시하였다. 국외에서는 Balica et al.

(2009)은 취약성을 노출, 민감, 회복력으로 정의하였으며, 70여 개의 수문 및 인문·사회적 지표를 선정해 홍수 취약성 지수를 개발하였다. Balica and Wright (2010)은 지수 값의 정확도 향상을 위해 지표 간의 상관분석을 통해 홍수 취약성 지수의 지표를 28개로 재구성한 바 있다. Fernandez et al. (2016)은 사회, 지리적 지표만을 활용해 Flood Vulnerability Index (FloodVI)를 개발하였으며, K-means 군집분석을 통해 지수 결과 값을 구분하여 평가하였다.

국내외 연구사례의 경우 주로 수문·기상학적 지표와 인문·사회적 지표를 병용해 홍수 및 가뭄 취약성 지수를 개발하였다. 하지만 적용 범위가 단일국가 또는 지역에 국한되어 있어 대규모 국가별 기후패턴의 공간적인 분포를 분석하는 데에는 한계가 있다. 또한, 구성 지표가 가용한 지역이 제한적이므로 전 지구적으로 적용하기에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 전 지구적으로 활용 가능한 지표를 선정해 수재해 취약성 지수를 개발하고, 아시아 몬순 지역에 적용 및 평가하고자 한다.

2. 대상지역 및 자료수집

2.1 대상지역

본 연구에서는 아시아 몬순 지역을 연구 대상 지역으로 선정하였다. 아시아 몬순 지역의 경우 건기와 우기가 존재해 홍수 및 가뭄에 취약하며, 높은 인구밀도로 재해에 의한 피해가 크게 발생한다. 적용 범위로는 위도 S9.75°~N54.75°, 경도 E60.25°~E149.75°에 해당되며, 크게 동아시아, 동남아시아, 남아시아, 중앙아시아 지역으로 구분된다. 해당 국가로는 중국, 일본, 한국, 인도, 베트남, 필리핀 등 총 30개 국가가 포함되어 있으며, Fig. 1은 대상 지역의 국가별 인구분포를 도시한 것이다.

Fig. 1. The study area and population density distribution

2.2 자료수집

본 연구에서는 아시아 몬순지역의 국가별 수재해 취약성 지수를 산정하기 위해 격자별 일 강수량 자료, 일 유출량 자료, 인문·사회 자료를 활용하였다. Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation (APHRODITE) 자료는 아시아 지역에 고해상도 일 단위 강수 및 기온자료를 제공하기 위해 Research Institute for Humanity and Nature (RIHN)과 Meteorological Research Institute of Japan Meteorological Agency (MRI/JMA)에 의해 생산된 격자 자료로 1950~2006년 기간에 대해 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 공간해상도 자료를 수집하였다. 일 유출량 자료는 Bae et al. (2015)이 수행한 Variable Infiltration Capacity (VIC) 모형의 모의 결과를 활용하였으며, 이는 APHRODITE 강수량 자료를 입력으로 하여 모의된 격자별 유출량이다. 인문·사회 자료는 World Bank의 지형학적, 사회·경제학적 자료를 1960~2006년 기간에 대해 수집하였다.

3. 연구수행 절차

Fig. 2는 수재해 취약성 지수 개발을 위한 연구 절차를 나타낸 순서도이다. 본 연구에서는 아시아 몬순 지역의 국가별 수재해 취약성 지수를 산정하기 위해 취약성을 민감도와 노출로 구분하였으며, 일 단위 강수량 자료와 VIC 모형을 통해 모의된 일 단위 유출량 자료를 활용해 극한 강수 및 유출지수를 산정하였다. 산정된 극한지수와 인문·사회 자료를 토대로 각 구분(민감도, 노출)에 적합한 세부지표를 선정하였다. 선정된 세부지표의

Fig. 2. The flowchart of WDWI

적합성을 판단하기 위해 분산팽창지수(Variance Inflation Factor, VIF)를 활용하여 공선성 검토를 실시하였다. 또한 국가 내 취약성 지수의 공간적 분포를 고려하기 위해 연구 대상 지역을 K-means 기법을 통해 군집화하고 홍수 취약성 지수 (Flood Vulnerability Index, FVI) 및 가뭄 취약성 지수 (Drought Vulnerability Index, DVI)를 산정하였다. 산정된 국가별 취약성을 평가하기 위해 지수 값을 백분위로 환산하여 비교하였으며, 지수 증가율을 통해 평가기간 내에서 기후 변화에 따른 취약성의 변화를 파악하였다.

4. 방법론

IPCC (2001)에서는 취약성을 민감도(sensitivity), 노출(exposure), 적응(adaptation)의 함수로 표현하였다. 민감도의 경우 시스템이 기후변화에 얼마나 큰 영향을 받는지를 나타내는 것으로 예를 들어 기온의 변화로 인해 융설에 대한 영향이 큰 지역이 적은 지역보다 봄철 유출량의 변화에 민감하다고 할 수 있다. 노출의 경우 기후변화에 민감한 시스템이 기후와 접촉되어 있는 정도를 나타내는 것으로 저지대에 위치한 도시의 경우 고지대에 위치한 도시에 비해 상대적으로 홍수에 대한 노출 정도가 크다고 할 수 있다. 적응은 기후변화와 같은 외부 자극에 대해 시스템이 견딜 수 있는 능력을 말하며, 제방 및 홍수방어 구조물이 잘 구축되어 있는 지역의 경우 그렇지 못한 지역보다 홍수에 대한 적응 능력이 크다고 볼 수 있다(Bae et al., 2005). 본 연구에서는 자료의 가용성을 고려해 Eq. (1)과 같이 민감도와 노출의 함수로 취약성을 정의하고 세부지표를 선정하였으며, 적응의 경우 국가별로 공통적으로 사용할 수 있는 자료의 부재로 인해 제외하였다.

취약성 지수 산정에 활용한 세부지표 간에 큰 상관성이 존재할 경우 특정 세부지표의 증감에 의해 다른 세부지표 값에 영향을 미쳐 편향된 지수 값이 산정된다. 이러한 현상을 공선성이라 하며, 본 연구에서는 공선성 진단을 위해 VIF를 활용하였다. 10 이상의 VIF 값이 산정될 경우 공선성이 존재하는 것으로 판단해 다른 적합한 세부지표로 대체 또는 제거하였다(Kutner et al., 2004). Eq. (2)는 VIF를 산정하는 공식으로 여기서 R^2 은 결정계수를 의미한다. 또한 세부지표는 자료의 특성에 따라 범위 및 단위가 상이하며, 동일한 세부지표여도 국가에 따라 값의 범위가 다르게 나타난다. 상대적으로 값의 범위가 넓은 세부지표의 경우 지수 산정 시 영향력이 크다. 이를 동일한 단위와 범위를 갖도록 하기 위해 Re-scaling 방법을 통해 표준화를 실시하였다. Eqs. (3), (4)는 Re-scaling 공식으로 여기서 x_i 는 기준 기간의 세부지표 값이며, $x_{\min}$ 과 $x_{\max}$ 는 각 세부지표의 최댓값과 최솟값을 의미한다.

면적이 상대적으로 넓은 국가의 경우 국가 내에서도 상이한 강우특성으로 인해 국가별로 취약성을 하나의 지수값으로 산정할 경우 서로 다른 강우 특성이 혼합되어 지수 산정

결과가 왜곡될 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 Hartigan et al. (1975)이 제안한 K-means 군집분석방법을 통해 강우 특성을 구분한 후 지역별 홍수 및 가뭄 취약성 지수를 산정하였다.

다수의 지표를 사용하여 취약성 평가를 하는 경우 각 지표의 중요도를 적절하게 반영하는 것은 어려움이 있다. 기존 연구에서는 부적절한 가중치의 적용으로 인한 결과의 왜곡을 방지하기 위해 각 지표마다 동일한 가중치를 적용하는 방법론을 제시하였다(Lee et al., 2010; Lee et al., 2013). 본 연구에서는 Eq. (5)와 같이 수재해 취약성 지수를 홍수와 가뭄 취약성 지수로 구분하였으며, 동일한 가중치를 적용하였다. 여기서, I_{sx} 와 I_{ex} 는 각각 민감도와 노출 세부지표를 의미하며, w_{sx} 와 w_{ex} 는 민감도와 노출 세부지표에 적용되는 가중치를 의미한다. 수재해 취약성 평가를 위해 Table 1과 같이 지수 값의 백분위에 따라 4개의 구간으로 구분하였다. 또한 취약성이 높게 나타난 국가의 세부지표를 통해 각 재해에 영향을 크게 미치는 인자를 도출하였으며, 과거기간 동안의 지수 변화율을 산정하여 향후 기후변화에 따라 홍수 및 가뭄 취약성 증가가 예상되는 국가를 도출하였다.

$$Vulnerability = f(sensitivity, exposure) \quad (1)$$

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (2)$$

$$Re-scaling_{(p)} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3)$$

$$Re-scaling_{(n)} = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad (4)$$

$$WDVI = \sum_{x=1}^n I_{sx} w_{sx} + \sum_{x=1}^n I_{ex} w_{ex} \quad (5)$$

5. 결과 및 분석

5.1 아시아 몬순지역 군집분석 결과

아시아 몬순 지역에 군집 구분을 적용하기 위해 APHRODITE 격자별 일 강수량 자료를 활용하여, 비 교사 방법인 K-means 방법을 적용하였다. 군집의 개수를 6개부터 20개까지 조정하여 분석을 수행 하였으며, 적정 군집 개수는 코펜 기후대 구분과 가장 유사한 구분을 나타내는 값으로 선정하였다. 최종적으로

선정된 가장 적합한 군집의 개수는 6개로 나타났으며, Fig. 3은 6개 군집구분을 적용한 결과이다. 적용 국가로는 중국, 인도, 미얀마로, 중국의 경우 사막 지역, 황허강 남부, 북부 지역, 양쯔강 지역, 펠강 상류지역으로 구분하였다. 인도의 경우 서고츠 지역, 데칸고원 북부, 남부지역, 아라발리 구릉 지역, 브람푸트라 지역으로 구분하였다. 미얀마의 경우 국가 면적이 인도, 중국에 비해 상대적으로 작지만, 군집 구분 시 산맥 지역과 고원지역이 명확하게 구분되어 군집 구분을 적용하였다.

5.2 세부지표 선정결과

Table 2는 홍수 및 가뭄 취약성 지수를 구성하는 세부지표를 나타낸 표이다. 홍수 취약성 지수의 민감도 지표는 PN90, WETM, PX1D, RX1D, PR90M을 선정하였다. PN90의 경우 홍수 발생에 영향을 주는 강우의 발생 빈도를 파악하기 위해 적용하였다. WETM은 연속적인 강우는 토양의 수분 포화도와 직접적인 연관이 있어 선정하였다. 특히 PX1D와 RX1D의 경우 강우와 유출의 침투 값은 홍수와 밀접한 관계가 있다고 판단하여 선정하였다. PR90M은 해당 지역 유출량의 침투 값의 변화를 통해 홍수에 대한 취약성을 판단하기 위해 선정하였다. 가뭄 취약성 지수의 민감도 지표는 ANNUAL, PN01, DRYM, MDRY, 7D_MR을 선정하였다. ANNUAL은 강수량의 총량을 통해 가뭄에 대한 취약성을 판단하기 위해 선정하였다. PN01은 동일한 양의 강수에서도 강수일수에 따라 가뭄에 대한 취약성이 상이하므로 이를 반영하기 위해 선정하였으며, DRYM과 MDRY는 무강우 기간에 따라 가뭄의 정도가 상이하므로 이를 반영하기 위해 선정하였다. 7D_MR은 기준 기간 동안의 최소 유출량을 나타내는 지표로 해당 연도의 최소 유출량을 통해 가뭄에 대한 취약성을 판단하기 위하여 선정하였다. 이와 같은 수문·기상학적 세부지표는 홍수 및 가뭄에 직접적인 영향을 미치는 인자로써 연도별 변화에 따라 홍수 및 가뭄에 대한 취약성을 시공간적으로 판단할 수 있다.

홍수 취약성 지수의 노출 지표는 GDP, POPUL, URBANP, ELEV를 선정하였다. GDP는 해당 국가의 경제규모를 반영하기 위한 지표이며, POPUL과 URBANP는 면적에 따른 인구를 통해 동일한 홍수 피해 면적에 대한 인구 피해를 반영하기 위해 선정하였다. ELEV의 경우 지형학적으로 낮은 고도에 위치한 지역이 높은 고도에 위치한 지역보다 홍수에 취약함을 반영하기 위해 선정하였다. 가뭄 취약성 지수의 노출 지표는 MSOIL과 RURALA를 선정하였으며, MSOIL은 토양층의 수분량을 통해 가뭄의 취약성을 판단하기 위해 선정하였다. RURALA는 농촌지역의 경우 저수지 및 댐을 통한 용수 수요량을 적용하기 위해 선정하였다.

Table 1. The classification indicator of WDVI

Range	0-25(%)	25-50(%)	50-75(%)	75-100(%)
Class	Extreme vulnerability	Serious vulnerability	Normal vulnerability	Low vulnerability

Fig. 3. The results of the Asia Monsoon region classification

선정된 세부지표의 적합성을 판단하기 위해 공선성 검토를 실시하였으며, 검토 결과는 Fig. 4와 같다. 민감도 세부지표 내에서는 PN90과 PN01, RX1D와 PX1D, PR90M과 RX1D 간의 VIF 값이 높게 산정되었다. 이는 극한강수지수 산정 시 동일한 데이터를 활용하여 산정함으로 인해 나타나는 현상으로 판단된다. 다만, VIF 값이 모두 10이하로 산정

되어 공선성이 존재하는 세부지표는 없는 것으로 나타났다. 노출에 포함된 세부지표의 경우 모든 세부지표에서 VIF 값이 2이하로 산정되어 세부지표 간의 상관성이 존재하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 최종적으로 Table 2와 같이 9개 홍수관련 세부지표와 7개 가뭄 관련 세부지표를 선정하였다.

Fig. 4. The result of indicator collinearity check

Table 2. The WDI indicators configurations

Classify			Indicator		Unit
WDVI	FVI	Sensitivity	PN90	Number of days above 90 percentile precipitation	day
			WETM	Average number of days continuous rain	day
			PX1D	Maximum precipitation in 1 day	mm
			RX1D	Maximum runoff in 1 day	mm
			PR90M	Mean value above 90 percentile runoff	day
		Exposure	GDP	GDP per 1 person	US\$/P
			POPUL	Population per unit area	P/km ²
			URBANP	Urban population per unit area	P/km ²
			ELEV	Mean elevation	m
	DVI	Sensitivity	ANNUAL	Annual precipitation	mm
			PN01	Events of precipitation	day
			DRYM	Average number of days without continuous rain	day
			MDRY	Maximum number of days without continuous rain	day
			7D_MR	Minimum value about 7 days runoff	mm
		Exposure	MSOIL	Minimum soil moisture	mm
			RURALA	Rural area percentage	%

5.3 아시아 몬순지역 수재해 취약성 지수 산정결과

Table 3은 1960~2006년까지의 아시아 몬순 지역에 대한 홍수 및 가뭄 취약성 지수의 평균값과 각 지수 값의 백분위수를 나타내며, E.A.는 동아시아, S.E.A.는 동남아시아, S.A.는 남아시아, C.A.는 중앙아시아 W.A.는 서아시아를 의미한다. 홍수 취약성의 경우 상위 25% 내에 총 9개 국가가 포함되며, 상위 25~50% 내에 속하는 국가의 경우 총 11개 국가로 나타났다. 홍수에 취약한 국가는 대부분 동남아시아와 남아시아에 속하는 것으로 나타났으며, 중앙아시아의 경우 전체 국가에서 상위 75%를 초과해 상대적으로 홍수 취약성이 낮은 것으로 나타났다.

가뭄의 경우 상위 25% 내에 9개 국가가 포함되며, 상위 25~50% 내에 속하는 국가의 경우 13개 국가가 포함된다. 가뭄에 취약한 국가의 경우 중앙아시아, 남아시아, 동아시아에 분포해 있으며, 이중 인도와 중국의 경우 내륙에 위치한 지역이 가뭄에 취약한 것으로 나타났다. 해안가에 위치한 지역의 경우 홍수에 취약한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 강우 특성에 따른 군집 구분으로 인해 건조한 기후를 가지는 대륙성 기후와 습윤한 기후를 가지는 해양성 기후가 구분되어 나타나는 현상으로 판단된다.

각 재해에 대한 취약성의 요인을 파악하기 위해 홍수 및 가뭄에 취약한 국가의 세부지표를 비교하였다. Fig. 5는 국가별 세부지표를 공간적인 분포를 통해 도시한 그림으로

홍수 관련 세부지표의 경우 청색에 가까울수록 홍수 취약성이 높아지고, 적색에 가까울수록 홍수 취약성이 낮아짐을 의미한다. 가뭄 관련 세부지표의 경우 적색에 가까울수록 취약성이 증가하고, 청색에 가까울수록 취약성이 낮아진다. 홍수 관련 세부지표의 경우 민감도 관련 세부지표 중 PN90, WETM, PX1D, RX1D에서 지표 값이 크게 산정된 국가가 취약성이 높은 것으로 나타났다. 홍수에 매우 취약한 것으로 나타난 미얀마, 필리핀, 베트남, 방글라데시, 서고츠 산맥, 브람푸트라 지역의 경우 4개 세부지표에서 모두 높은 지표 값을 보였으며, 상위 25~50% 내에 포함되는 인도네시아, 말레이시아, 네팔, 데칸고원 지역 등에서도 해당 세부지표가 높은 값을 보였다. 따라서 홍수의 경우 강우빈도와 강우강도가 크게 나타나는 국가에서 취약성이 높은 것으로 나타났다. 가뭄 취약성이 가장 크게 나타난 몽골, 중국 사막 지역, 아프가니스탄, 이란 등의 경우 ANNUAL, PN01, DRYM, MDRY 세부지표에서 높은 값을 보였으며, 가뭄에 상대적으로 덜 취약한 지역인 동남아시아 지역은 해당 세부지표가 낮게 나타났다. 가뭄의 경우 강우의 발생 빈도와 가장 밀접한 관계를 보였으며, 연중 동일한 강우량에서도 강우의 발생일수가 적을수록 취약성이 큰 것으로 나타났다. 각 재해별 취약성에 영향을 주는 세부지표 검토 결과 홍수와 가뭄의 경우 수문·기상학적인 세부지표가 인문·사회학적인 세부지표보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 3. The result of drought and flood vulnerability index in Asia

Country	Region	FVI	Percentile (%)	DVI	Percentile (%)
Mongolia	E.A.	0.22	86.8	0.49	2.6
Desert region (China)	E.A.	0.23	81.5	0.46	13.1
Yellow river north region (China)	E.A.	0.26	71.0	0.38	28.9
Yellow river south region (China)	E.A.	0.27	68.4	0.37	34.2
Pearl river region (China)	E.A.	0.31	55.2	0.32	47.3
Yangtze river region (China)	E.A.	0.32	44.7	0.31	60.5
North Korea	E.A.	0.32	44.7	0.32	47.3
Japan	E.A.	0.35	26.3	0.25	86.8
South Korea	E.A.	0.40	7.8	0.31	60.5
Brunei	S.E.A.	0.30	63.1	0.14	100
Cambodia	S.E.A.	0.31	55.2	0.29	73.6
Shan plateau region (Myanmar)	S.E.A.	0.31	55.2	0.30	71.0
Mountain region (Myanmar)	S.E.A.	0.37	15.7	0.27	78.9
Thailand	S.E.A.	0.32	44.7	0.32	47.3
Laos	S.E.A.	0.33	39.4	0.27	78.9
Papua New Guinea	S.E.A.	0.33	39.4	0.15	97.3
Indonesia	S.E.A.	0.34	28.9	0.20	92.1
Malaysia	S.E.A.	0.34	28.9	0.16	94.7
Vietnam	S.E.A.	0.37	15.7	0.27	78.9
Philippines	S.E.A.	0.39	13.1	0.35	42.1
Bangladesh	S.E.A.	0.49	2.6	0.24	89.4
Afghanistan	S.A.	0.22	86.8	0.47	7.8
Pakistan	S.A.	0.26	71.0	0.46	13.1
Bhutan	S.A.	0.29	65.7	0.31	60.5
Nepal	S.A.	0.34	28.9	0.32	47.3
Sri Lanka	S.A.	0.36	21.0	0.29	73.6
Deccan plateau north region (India)	S.A.	0.36	21.0	0.40	23.6
Deccan plateau south region (India)	S.A.	0.34	28.9	0.42	21.0
Aravalli mountain region (India)	S.A.	0.32	44.7	0.47	7.8
Brahmaputra river region (India)	S.A.	0.40	7.8	0.31	60.5
West ghats mountain region (India)	S.A.	0.47	5.2	0.37	34.2
Uzbekistan	C.A.	0.21	97.3	0.39	26.3
Turkmenistan	C.A.	0.21	97.3	0.44	18.4
Kyrgyzstan	C.A.	0.22	86.8	0.35	42.1
Kazakhstan	C.A.	0.23	81.5	0.38	28.9
Tajikistan	C.A.	0.24	78.9	0.37	34.2
Iran	W.A.	0.22	86.8	0.48	5.2
Russia	-	0.25	76.3	0.32	47.3

F
L
O
O
D

(a) PN90

(b) WETM

(c) PX1D

(d) RX1D

D
R
O
U
G
H
T

(e) ANNUAL

(f) PN01

(g) DRYM

(h) MDRY

Fig. 5. The flood and drought effecting indicators

5.4 아시아 몬순지역 수재해 취약성 지수 변화율 분석

각 국가별 수재해 취약성 지수의 증가율을 파악하기 위해 Fig. 6과 같이 1960년 대비 2006년의 국가별 홍수 및 가뭄 취약성 지수 값의 변화율을 그래프로 표출하였다. 적색 실선은 DVI 변화율을 나타내며, 청색 실선은 FVI 변화율을 나타낸다. 홍수 취약성 지수의 경우 동남아시아 지역이 평균 5.4%의 증가율을 보였으며, 남아시아의 경우 -2.6%, 동아시아의 경우 -3.2%, 중앙아시아 지역은 -10.4%로 대부분 지역에서 홍수 취약성이 감소하는 것으로 나타났다. 대상 지역의 전체 국가 중 동남아시아 지역의 필리핀이 25.0%로 가장 높은 증가율을 보였으며, 남아시아의 방글라데시가 23.0%로 두 번째로 높은 증가율을 보였다. 지수 값의 증가율이 높게 나타나는 지역은 동남아시아로, 6개 국가에서 취약성이 증가하고, 남아시아에서는 5개 국가 및 지역에서 취약성이 증가하는 것으로 나타났다. 동아시아에서는 한국을 제외한 대부분 국가에서 취약성이 감소하는 것으로 나타났으며, 중앙아시아의 경우 모든 국가에서 취약성이 감소하는 것으로 나타났다.

가뭄 취약성의 경우 중앙아시아 지역이 약 21.0%로 가장 높은 증가율을 보였으며, 동아시아, 남아시아의 경우 각각 5.3%, 3.0%의 증가율을 보였다. 동남아시아의 경우 1.5%로 증가율이 가장 낮은 것으로 나타났다. 국가별 증가율의 경우

카자흐스탄이 29.2%로 가장 높은 증가율을 보였으며, 브루나이가 -31.7%로 가장 큰 감소율을 보였다. 동남아시아 지역에 속하는 필리핀, 방글라데시, 태국의 경우 가뭄 취약성이 약 8.0% 증가한 것으로 나타났으며, 홍수 취약성 또한 증가하였다. 동남아시아는 높은 강도의 강우사상 발생 빈도는 증가하지만 강우발생 빈도는 줄어들어 홍수와 가뭄에 대한 취약성이 모두 증가한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 아시아 몬순 지역에 대한 30개 국가의 수재해 취약성 지수를 산정하였으며, 수재해 취약성을 민감도와 노출로 구분하였다. 각 구분에 적합한 세부지표를 적용하기 위해 수문·기상학적 자료와 지형학적, 사회·경제학적 인자를 사용하였다. 수문·기상학적 자료의 경우 APHRODITE 격자 일 강수량 자료를 활용하였으며, 사회·경제학적 자료의 경우 World Bank 자료를 활용하였다. 세부지표 값의 범위와 단위를 통일하기 위해 Re-scaling 방법을 적용하여 0~1 사이의 값으로 변환하였으며, 이를 활용해 홍수, 가뭄 취약성 지수를 산정하였다. 또한, 면적이 상대적으로 큰 국가의 경우 강수 특성이 지역에 따라 상이하게 나타나 이를 구분하기 위해 K-means 방법을 활용해 기후대 구분을 적용하였다.

Fig. 6. The FVI and DVI growth rate by country

지수 산정 결과 해양성 기후에 영향을 받는 남아시아, 동남아시아 지역이 홍수에 가장 취약한 지역으로 나타났으며, 대륙성 기후에 영향을 받는 중앙아시아, 몽골, 중국 사막 지역이 가뭄에 가장 취약한 것으로 나타났다. 세부지표 검토 결과 홍수에 취약한 국가의 경우 공통적으로 PN90, WETM, PX1D, RX1D 세부지표 값이 크게 산정되었으며, 강우빈도와 강우강도가 크게 나타나는 국가에서 취약성이 높은 것으로 나타났다. 가뭄 관련 세부지표의 경우 ANNUAL, PN01, DRYM, MDRY 지표 값이 크게 산정되어 강우의 발생 빈도와 가장 밀접한 관계를 보였으며, 연중 동일한 강우량에서도 강우의 발생일수가 적을수록 취약성이 큰 것으로 나타났다. 분석 기간의 홍수 및 취약성 지수 증가율을 검토한 결과 동남아시아 지역에서 홍수 취약성의 증가율이 가장 크게 나타났으며, 중앙아시아 지역에서는 가뭄 취약성 증가율이 가장 크게 나타났다. 하지만 동남아시아 지역에 해당하는 필리핀, 방글라데시, 태국의 경우 가뭄 취약성이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기후변화로 인해 강우 특성이 변화함을 의미하며, 단기간의 집중적인 강우 사상이 증가함에 따라 무강우 일수 또한 증가하여 홍수, 가뭄 취약성이 증가하는 양극화 현상으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 수재해 취약성 지수는 격자별 수문·기상 자료를 주로 활용한 지수로 각 지역 및 국가내의 격자에 대해 개별적인 홍수 및 가뭄 취약성을 평가할 수 있다. 또한, 전 지구적으로 활용 가능한 세부지표를 선정하여 국가, 대륙 등 적용 가능한 범위가 넓으며, 강우 특성이 다양하게 나타나는 일부 국가의 경우 군집구분을 적용해 수재해 취약성을 보다 적합하게 평가한다는 점에서 가치가 있다. 향후 연구에서는 기후변화 시나리오를 활용하여 기후변화로 인한 전 지구적인 강우 특성의 변화를 고려함으로써 대륙 규모의 미래기간 수재해 취약성 지수를 산정할 필요가 있으며, 이를 과거기간의 수재해 취약성 지수와 비교해 과거 대비 미래의 취약성 변화를 파악할 필요가 있다. 또한 수재해 취약성 지수의 정확도 개선을 위해 세부지표의 선정 및 가중치 산정에 관한 후속 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호18AWMP-B083066-05)과 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0030040)을 받아 수행된 연구임.

References

Adikari, Y., and Yoshitani, J. (2009). *Global trends in water-related disasters: An insight for policymakers*. United Nations World Water Development Report

- 3: Water in a Changing World, ICHARM, pp. 3-17.
- Bae, D.H. (2005). The Effect and Problems of Climate Change on Water Resources. *Planning and Policy*, Korea Research Institute for Human Settlements, Vol. 281, pp. 32-38.
- Bae, D.H., Toshio, K., Awan, J.A., Lee, M.H., and Son, K.W. (2015). Climate change impact assessment on water resources and sSusceptible zones identification in the Asian Monsoon region. *Water Resource Management*, Vol. 29, No. 14, pp. 5377-5393.
- Balica, S.F., and Wright N.G. (2010). Reducing the complexity of flood vulnerability index. *Environmental Hazard*, Vol. 9, No. 4, pp. 321-339.
- Balica, S.F., Douben, N., and Wright, N.G. (2009). Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Science & Technology*, Vol. 60, No. 10, pp. 2571-2580.
- EM-DAT. (2018). *The Emergency Events Database*. Retrieved from https://www.emdat.be/emdat_db/
- Fernandez, P., Mourato, S., Moreira, M., and Pereira, L. (2016). A new approach for computing a flood vulnerability index using cluster analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 94, pp. 47-55.
- Hartigan, J.A. (1975). *Clustering algorithms*. John Wiley & Sons, pp. 85-87.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kutner, M., Nachtsheim, C., Neter, J., and Li, W. (2004). *Applied linear statistical models* (4th ed.). McGraw-Hill Irwin, pp. 408-409.
- Lee, D.R., Choi, S.J., and Moon, J.W. (2013). Development of integrated water resources evaluation index. *Korea Water Resource Association*, Vol. 46, No. 10, pp. 1017-1028.
- Lee, J.H. Ryu, C.H., and Chung, T.Y. (2010). Calculate the weight of indicator for science and technology innovation capability index. *The Journal of Industrial Innovation*, Vol. 26, No. 3, pp. 1-34.
- Lee, M.H., Jung I.W., and Bae, D.H. (2011). Korean flood vulnerability assessment on climate change. *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 653-666.
- Moon, S.R., Yang, S.M., and Choi, S.H. (2014). Development and the application of flood disaster risk reduction index. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 29, No.

1, pp. 64-69.

Son, M.W., Sung, J.Y., Jung, E.S., and Jun, K.S. (2011). Development of flood vulnerability index considering climate change. *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248.

Song, J.H., Kim, S., Park, M.J. and Choi, H.I. (2013). Estimation of flood risk index for the Nakdong river watershed. *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 46, No. 1, pp. 35-45.

Yang, J.S., Park, J.H. and Kim, N.K. (2012). Development of drought vulnerability index using trend analysis. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3B, pp. 185-192.

Received	■ August 29, 2018
Revised	■ August 31, 2018
Accepted	■ September 18, 2018