지역특성 지표를 고려한 격자기반의 수해 위험지도 작성

Grid-Based Flood Risk Mapping Considering Indices of Regional Characteristics

유인상* · 김하룡** · 정상만***

Yu, Insang*, Kim, Hayong**, and Jeong, Sangman***

Abstract

This study developed a grid-based flood risk map with indices considering the regional characteristics of Daegu City, Ulsan City, Gyeongsangbuk-do, and Gangwon-do. Indices for mapping flood risk such as flood depth, population density, population ratio vulnerable to disaster, and rainwater storage capacity consist of hazard, exposure, vulnerability, and disaster coping and adaptive capacity. These four indices have a variety of sub-indices. Weights of indices and sub-indices were determined through analytic hierarchy process, and then values for the indices and sub-indices were standardized using z-score method. The flood risk was estimated by performing arithmetic operations on the four indices that were calculated through standardized values of sub-indices using the computed weight. The results show that the central and northern areas of Gangwon-do, namely Wonju City, Hoengseong-gun, Hongcheon-gun, Gangneung City, and so on were classified to be more than "high risk" throughout the area. Jung-gu and Nam-gu of Ulsan City located downtown near Taehwa river, Dalseong-gun and Dalseo-gu of Daegu City located in low-lying area near Nakdong river, and some lowlands near Hyeongsan river of Gyeongju City and Pohang City were determined to have "very high risk." The flood risk map developed in this study is expected to support decision makers in establishing countermeasures to mitigate flood disasters for grid-based small areas.

Key words : Flood Disaster, Risk, Hazard, Exposure, Vulnerability

요 지

본 연구에서는 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 강원도를 대상으로 지역의 특성지표를 고려한 격자기반의 수해 위험지도를 작성하였다. 수해 위험지도 작성을 위한 지표인 침수심, 인구밀도, 재해취약인구비율, 유수, 저류시설 저수용량 등을 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량지표로 구분하였고 각 지표는 세부지표를 포함하고 있다. 지표와 세부지표의 가중치는 계층화분석을 통해 산정하였고 지스코어 방법을 통해 표준화하였으며 표준화된 지표와 세부지표와의 연산을 통해 수해 위험지도를 작성하였다. 수해 위험지도 작성 결과, 원주시, 횡성군, 홍천군, 강릉시 등 강원 중부, 북부지역은 시군구 전 지역에 걸쳐 위험도가 높음등급 이상인 지역으로 평가되었으며 울산시 중구, 남구 태화강 인근 도심, 대구시 달성군, 달서구 낙동강 인근 저지대, 경주시와 포항시의 형산강 일부지역에서도 위험도가 매우높음 등급으로 평가 되었다. 본 연구를 통해 작성된 수해 위험지도는 읍면동 또는 격자단위 소규모 지역의 수해 방재대책 수립을 위한 의사결정 지원에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 수해, 위험도, 위해성, 노출도, 취약성

*정회원, 한국환경정책평가연구원 국가기후변화적응센터 초빙연구원(E-mail: isyu@kei.re.kr)

Member, Invited Research Fellow, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute

**교신저자, 정회원, 공주대학교 건설환경공학부 연구교수(Tel: +82-41-521-9316, Fax: +82-41-568-0287, E-mail: civilkhy@kongju.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

***정회원, 공주대학교 건설환경공학부 교수(E-mail: smjeong@kongju.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

1. 서 론

전 세계적인 인류의 발전은 우리의 삶을 양적으로 질적으로 풍요롭고 윤택하게 해주었다. 그러나 인류의 발전은 양날의 검과도 같이 지구온난화, 기후변화, 생태계 파괴 등과 같은 다양한 형태로 우리에게 위협을 가해왔다(Yu, 2017). 전 세계적인 기후변화가 지속적으로 나타남에 따라 짧은 시간동안 국소지역에 많은 양의 비가 내리는 국지성 집중호우, 호우를 동반한 강력한 태풍, 폭설, 해일, 가뭄과 같은 자연재해에 의한 피해가 빈번하게 발생하고 있다. 전 세계의 지진, 쓰나미, 허리케인, 홍수에 의한 연평균 손실액만 약 USD 3,140억(한화: 약 377조원)으로 추정되고 있으며 가뭄, 폭설과 같은 다른 자연재해까지 합쳐진다면 손실액은 더욱 크게 증가 할 것이다(UNISDR, 2011). 2008년부터 2017년까지 우리나라의 최근 10년간 자연재해 피해액은 3,486억원인 것으로 조사되었으며 재해원인별 피해액은 태풍 1,588억원(45.5%), 호우 1,494억원(42.9%), 대설 226억원(6.5%), 지진 96억원(2.8%), 풍랑 43억원(1.2%), 강풍 39억원(1.1%)으로 나타났다(MOIS, 2018a). 재해연보에서는 태풍에 의한 자연재해 피해액을 수해와 풍해로 구분하고 있지 않아 정확히 태풍 피해액 중 수해 피해액의 비율을 알 수 는 없으나 대략 절반이 수해 피해액이라고 가정하여도 수해에 의한 피해액은 약 65% 이상을 차지하고 있어 수해 피해저감을 위한 대책이 시급하다.

수해 피해를 감소시키기 위해서는 수해의 위험정도를 평가해야 한다. 수해의 위험정도는 태풍, 홍수와 같은 자연재해의 규모와 밀접한 연관성을 갖고 있지만 자연재해의 규모에 의해서만 결정되지는 않는다. 수해 위험도는 수해에 노출되는 인구, 주택, 도로 등이 수해에 대해 취약한 정도와 수해에 대한 지역의 대응 및 적응역량에 따라서도 증가하거나 감소한다. 현재 우리 인류의 기술로서는 태풍, 폭우와 같은 자연재해의 규모를 감소시킬 수 없다. 그러므로 수해 위험도를 감소시키기 위해서는 예방, 대비 차원에서 수해 위험지역을 미리 선정하여 관리해야 하며 이와 같은 재난관리는 수해에 대한 노출도 및 취약성을 감소시키거나 지역의 재해 대응 및 적응역량을 증가시킴으로써 수행할 수 있다. 이에 따라, 수해 위험감소를 위해 지역의 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응 및 적응역량 지표 산정을 통한 지표기반의 수해 위험도 평가는 매우 중요하며 필수적이라고 할 수 있다.

수해를 포함한 자연재해 위험도 평가에 대한 연구는 다양하게 수행되어 왔다(Kim et al., 2012; Park, 2012; Song, 2012; KEI, 2014 ; Park et al., 2014; Cho, 2015; Han et al., 2015; Hwang, 2015; Nam, 2015). 그러나 대부분 국가단위, 행정구역을 대상으로 위험도를 평가 해왔으며 각 연구마다 위험도를 구성하는 요소가 다르다. 또한, 기존의 위험도 관련 연구에서는 위험도를 구성하는 핵심요소 중 하나인 위해성(hazard) 산정 시 집중호우 임계점 초과일수, 최대풍속 30 m/s 이상의 태풍풍속 발생확률 등과 같은 행정구역별

통계 값을 적용하여 동일한 행정구역에서는 지역특성에 관계없이 동일한 위험도가 산정되었다. 그러므로 행정구역 단위로 산정하는 기존의 위험도를 지역의 재해특성을 반영하여 격자단위의 위험도로 세분화할 필요가 있다.

본 연구에서는 국내외 위험도 평가관련 문헌을 검토하여 객관적이고 합리적이며 우리나라에 적용 가능한 위험도 평가기법을 결정하였다. 우리나라 자연재해 피해액 중 대부분을 차지하고 있는 수해를 대상으로 위험도 평가기법을 적용하여 지역특성 지표를 고려한 격자기반의 수해 위험도를 평가하고 이를 지도로 작성하였다. 본 연구를 통해 작성된 수해 위험지도는 수해 방재대책지원을 위한 읍면동 또는 격자단위 소규모 지역의 재해저감대책 수립과 수해 위험도를 가중시키는 요인과 감소시키는 요인을 세부적으로 분석하여 수해 위험도 감소대책 수립을 위한 의사결정 지원에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수해 위험도 평가모형 개발

2.1 위험도의 개념

국내외 연구에서의 위험도(risk)의 개념에 대해 살펴보면, Fournier d'Albe (1979)는 위험도 평가는 재해에 의해 발생한 위험의 강도를 정량적으로 평가하는 것으로 위험도를 위해성(hazard), 피해가능성(damage potential), 대처능력(coping capacity)에 의해 산정된다고 하였고, Cutter (2001)는 재해 위험도 수준을 결정하기 위해 위험성을 추정하고 계량화하는 것이라고 정의하였다. 위험도 평가를 위해 취약성(vulnerability)을 이용하기도 하였는데, Benouar와 Mimi (2001)는 위험도를 재해위험과 재해취약성 그리고 재해관리가 조합된 결과로 나타낸 바 있고, Nimpuno (1998)는 인명과 재산피해 취약성을 고려하여 재해위험요소에 대한 인명과 재산피해 발생 확률로 위험도를 정의 하였다. Allen Consulting Group (2005), Schroter와 ATEAM consortium (2004)은 기후변화에 따른 지역의 위험도를 기후노출(exposure), 취약성(vulnerability), 적응능력(adaptation)으로 구분하여 정의하였다(Son et al., 2013). 이와 같이 위험도뿐만 아니라 기후변화의 취약성 평가에 대한 연구는 최근 들어 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다(IPCC, 2001; Kelly and Adger, 2000; Moss et al., 2001; Brooks et al., 2005; Eriksen and Kelly, 2007). 이와 같이 위험도의 개념은 각 나라마다 기관마다 서로 다르며 평가 방법 또한 다르다. 위험도와 관련하여 최근까지 가장 활발한 연구를 수행하고 있는 기관은 UNISDR과 IPCC로 두 기관에서는 위험도를 위해성(hazard), 노출도(exposure), 취약성(vulnerability), 재해대응및적응역량(disaster coping and adaptive capacity)의 함수로 개념을 정립하였다(IPCC, 2012; Yu, 2017).

본 연구에서는 위험도의 구성요소를 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량으로 결정하였다. 위험도는 자연재해의

크기(위해성), 자연재해에 노출될 수 있는 인구, 시설물 등(노출도), 자연재해에 의한 피해를 가중시킬 수 있는 재해취약인구, 불투수율 등(취약성), 자연재해에 의한 피해를 감소시킬 수 있는 재정자립도, 하천개수율 등(재해대응및적응역량)을 산정하여 평가 될 수 있다. 위험도를 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량, 네 가지 지표로(index) 구성 하였으며, 네 가지 지표는 각각의 다양한 세부지표(sub-index)를 가지고 있다.

2.2 수해 위험도 세부지표 선정

본 연구에서는 격자 기반의 수해 위험지도를 작성하는 것이 주목적이기 때문에 수해와 관련 있는 세부지표를 선정해야 한다. 또한, 위험지도를 공간적으로 세분화된 30 m 격자 기반의 공간정보로 표출해야하기 때문에 공간정보자료로 구축이 가능한 자료이어야 한다. 이와 같은 조건을 만족시키는 세부지표를 선정하기 위해 수해 전공 분야와 GIS 전공 분야 연구경력이 10년 이상인 전문가 15명과

논의 및 설문조사를 통해 세부지표로서 Table 1과 같이 20개 세부지표를 선정하였다. 위해성 3개 세부지표, 노출도 5개 세부지표, 취약성 6개 세부지표, 재해대응및적응역량 6개 세부지표로 구성되어 있다.

2.3 수해 위험도 지표 가중치 산정방법 선정

수해 위험도 평가모형 설계를 위해서는 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량과 같은 위험도 지표 및 세부지표에 대한 가중치가 산정되어야 한다. 가중치 산정을 위한 정량적인 자료가 있을 경우에는 이 자료들을 기반으로 가중치를 산정하고, 정량적인 자료가 없을 경우에는 의사결정방법을 통해 가중치를 산정 할 수 있다. 수해 위험도의 지표 및 세부지표 산정을 위한 정량적인 자료는 존재하지 않기 때문에 이에 대한 가중치는 의사결정방법을 통해 산정 한다. 수해에 대한 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량 각각의 지표가 위험도 산정에 얼마나 큰 비중을 차지하는지

Table 1. Indices and Sub-indices for Flood Risk

Indices			Sub-indices		
Contents	Indices symbol	Weight symbol	Contents	sub-Indices symbol	Weight symbol
Hazard	H	α	Mean of annual daily maximum rainfall (mm/d)	$H1$	a
			Flood depth (m)	$H2$	b
			Mean of annual 60 minutes rainfall intensity (mm/hr)	$H3$	c
Exposure	E	β	Road area ratio (%)	$E1$	d
			Railway area ratio (%)	$E2$	e
			The number of houses (houses/km ²)	$E3$	f
			Population density (people/km ²)	$E4$	g
			The number of cars (cars/km ²)	$E5$	h
Vulnerability	V	γ	Elevation (El.m)	$V1$	i
			Impervious surface ratio (%)	$V2$	j
			Urban area ratio (%)	$V3$	k
			Population ratio vulnerable to disaster (%)	$V4$	l
			Past natural disaster damage (in million KRW)	$V5$	m
			River area ratio (%)	$V6$	n
Disaster coping and adaptive capacity	C	δ	Rainwater storage capacity (m ³ /m ²)	$C1$	o
			River maintenance ratio (%)	$C2$	p
			Gross regional domestic product per capita (in million KRW/person)	$C3$	q
			Financial independence ratio (%)	$C4$	r
			The number of medical and rescue personnel (people/thousand of people)	$C5$	s
			The number of construction equipment (equipment/thousand of people)	$C6$	t

는 정량적인 자료로 구축이 되어 있지 않기 때문이다. 가중치를 산정하는 다양한 의사결정방법 중 산정 목적에 적합한 방법을 선정해야 한다. 가중치 산정방법에는 척도 표시법, 순위 척도법, 전문가에 의한 점수 할당법, 다중회귀 분석법, 교차 분석법, 계층화분석법 등 다양한 방법이 있다.

가중치 산정방법은 의사결정방법론과 통계적방법론으로 구분할 수 있다. 의사결정방법론의 대표적인 방법은 다속성효용이론(Multi-Attribute Utility Theory), 계층화분석법(Antalytic Hierarch Process), 퍼지집합이론(Fuzzy Set Principle), 델파이기법(Delphi Technique)이 있고, 통계적방법론의 대표적인 방법은 요인분석(Factor Analysis), 주성분분석(Principal Component Analysis), 프로빗모형(Probit Model) 등이 있다. 의사결정방법론과 통계적방법론 중에서 위험도 지표 및 세부지표들의 가중치 산정을 위한 방법으로는 전문가 의견을 기반으로 결과를 도출하는 의사결정 방법론이 널리 활용되고 있다. 의사결정방법론 중에서도 계층화분석법에 의해 가중치를 산정하는 연구가 주로 진행되고 있다 (Lee and Chang, 2014; Shin et al., 2014; Choi et al., 2015; Oh et al., 2015; Jeong et al., 2016; Park et al., 2016; Shin, 2016). 수해에 대한 위험도 지표와 세부지표들의 가중치(중요도)를 정량적으로 판단할 수 있는 활용 가능한 자료가 없어 본 연구에서는 의사결정 방법론 중 국내외 적으로 가장 널리 활용되는 계층화분석법(Antalytic Hierarchy Process, AHP)을 통해 가중치를 산정한다.

2.4 수해 위험도 산정 기법

수해 위험도는 Eq. (1)과 같이 각 재해에 대한 위해성(hazard), 노출도(exposure), 취약성(vulnerability) 세부지표들 서로 더하고 재해대응및적응역량(disaster coping and adaptive capacity) 세부지표를 빼서 산정되는 표준화 되지 않은 수해 위험도(non-standardized risk, R_{non})를 Eq. (2)와 같이 지스코어(z-score) 방법을 통해 표준화함으로써 산정할 수 있다. 지스코어 방법은 지역별 측정지표 값에서 평균을 빼고 표준편차로 나누어 평균은 0 표준편차는 1인 표준정규분포로 변환하여 표준화 하는 방법이다. 각 재해에 대한 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량 지표는 가중치를 적용한 세부지표의 연산을 통해 산정되며 각 지표의 가중치는 서로 다르기 때문에 Eq. (2)와 같이 표준화 과정을 거쳐 최종적으로 각 재해에 대한 수해 위험도(R)를 산정한다.

$$R_{non} = H + E + V - C \quad (1)$$

$$R = \frac{R_{non} - \bar{x}_{R_{non}}}{s_{R_{non}}} \quad (2)$$

여기서, R_{non} 은 표준화 되지 않은 수해 위험도(non-standardized

risk), R 은 수해 위험도(risk), H 는 위해성(hazard), E 는 노출도(exposure), V 는 취약성(vulnerability), C 는 재해대응및적응역량(disaster coping and adaptive capacity), $\bar{x}_{R_{non}}$ 은 표준화 되지 않은 수해 위험도의 평균, $s_{R_{non}}$ 은 표준화 되지 않은 수해 위험도의 표준편차 이다.

위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량 지표는 Table 1의 세부지표를 표준화하고 세부지표의 가중치와 곱한 후 각항을 더한 다음 각 지표의 가중치를 곱하여 산정한다 (Eqs. (3)~(6)).

$$H = \alpha\{S(H1)a + S(H2)b + S(H3)c\} \quad (3)$$

$$E = \beta\{S(E1)d + S(E2)e + S(E3)f + S(E4)g + S(E5)h\} \quad (4)$$

$$V = \gamma\{S(V1)i + S(V2)j + S(V3)k + S(V4)l + S(V5)m + S(V6)n\} \quad (5)$$

$$C = \delta\{S(C1)o + S(C2)p + S(C3)q + S(C4)r + S(C5)s + S(C6)t\} \quad (6)$$

여기서, $\alpha \sim \delta$ 는 각 지표별 가중치, $H1 \sim H3$ 은 위해성 세부지표, $E1 \sim E5$ 는 노출도 세부지표, $V1 \sim V6$ 는 취약성 세부지표, $C1 \sim C6$ 은 재해대응및적응역량 세부지표, $a \sim t$ 는 세부지표의 가중치이다(Table 1).

2.5 수해 위험도 등급화 방안

수해 위험도는 식 2와 같이 지스코어(z-score) 방법을 통해 지역별 위험도의 분포를 평균은 0, 표준편차는 1인 표준정규분포로 표준화 한 값이다. 위험도 등급 범위는 수치를 표준화하여 등급을 부여한 기존의 연구들을 참고하여 구분할 수 있다. 수치를 표준화하여 등급화한 지수로는 가뭄의 상태를 지수화 하기 위해 개발된 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)와 팔머가뭄심도지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI) 등이 있다. 표준강수지수는 7개 등급으로 구분된다. 정상등급(near normal)의 경우 지수의 범위가 -0.99 ~ 0.99로 2단위이며 나머지 등급은 0.5단위로 등급을 구분한다. 팔머가뭄심도지수는 가뭄의 등급이 11개 등급으로 구분되며 0.5단위 또는 1.0단위로 구분 된다.

표준강수지수의 경우 지수 등급의 최대값과 최소값의 범위가 -2.0에서 +2.0까지 분포되어 있으며 팔머가뭄심도지수의 경우 -4.0에서 +4.0까지 분포되어 있다. 본 연구를 통해 산정된 지표기반 위험도의 경우 대부분 -1.8에서 +1.8의 범위 내에 포함되기 때문에 팔머가뭄심도지수 보다는 표준강수지수의 등급 체계를 적용하는 것이 합리적이다. 이에 따라 지표기반 위험도의 등급은 Table 2와 같이 평균인 0을 중심으로 -0.25초과 0.25이하 범위를 보통(moderate) 등급으로 결정하고, 보통등급을 기준으로 0.5단위로 등급을 구분하였다.

Table 2. Classification of Index Based Flood Risk

Color	Range	Classification	Symbol
$1.25 < R$	very high	$R7$
$0.75 < R \leq 1.25$	high	$R6$
$0.25 < R \leq 0.75$	moderately high	$R5$
$-0.25 < R \leq 0.25$	moderate	$R4$
$-0.75 < R \leq -0.25$	moderately low	$R3$
$-1.25 < R \leq -0.75$	low	$R2$
$R \leq -1.25$	very low	$R1$

3. 격자기반의 수해 위험지도 작성

3.1 대상지역

수해 위험지도 작성을 위한 연구대상지역으로 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 강원도를 선정하였다. 해당 지역은 도시, 농촌, 산악, 해안 등 다양한 지형조건과 기후조건을 갖고 있고 국가하천, 지방하천, 소하천 등이 다양하게 분포되어 있어 지역특성에 따른 수해 위험도의 변화양상을 분석하기 적합하다.

3.2 세부지표 산정

수해 위험도는 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량 지표의 연산을 통해 산정되며 이 네 개의 지표는 세부지표의 연산을 통해 산정된다. 수해 위험도 산정을 위해 선정된 20개 세부지표 값들은 지스코어(z-score) 방법을 통해 표준화 된다. 현재 다양한 표준화 방법 중 위험도 산정 연구에 가장 적합한 표준화 방법은 정립된바 없어 표준화 방법 중 일반적으로 가장 널리 활용되는 지스코어 방법을 활용한다. 20개 세부지표의 결과 값은 GIS 연산을 통해 30 m 격자기반의 레스터(raster) 형태의 지도로 작성된다.

위해성의 세부지표는 평균 연최대 일강우량[Fig. 1(a)], 설계빈도에서의 침수심[Fig. 1(b)], 평균 연최대 60분 지속기간 강우강도[Fig. 1(c)]가 있으며 세 가지 지표 모두 30 m 격자기반의 공간정보자료로 구축된다. 평균 연최대 일강우량[Fig. 1(a)]은 20년 이상의 연최대 일강우량을 평균한 값이며 연최대 일강우량은 기상관측소에서 1년 동안 관측한 24시간 지속기간 강우량 중 가장 큰 값의 강우량을 나타낸다. 설계빈도에서의 침수심[Fig. 1(b)]은 홍수위험도 제작에 관한 지침(MLTMA, 2008)과 재해지도 작성 기준 등에 관한 지침(MPSS, 2015)에 따라 MOIS (2018b)에서 작성한 하천설계빈도 시나리오에서의 홍수범람지도를 통해 산정된다. 평균 연최대 60분 지속기간 강우강도[Fig. 1(c)]는 20년 이상의 연최대 60분 지속기간 강우강도를 평균한 값이며 연최대 60분 지속기간 강우강도는 기상관측소에서 1년 동안 관측된 60분 지속기간 강우량 중 가장 큰 값의 강우량을 말한다.

노출도의 세부지표는 단위면적당 도로면적 비율[Fig. 1(d)], 단위면적당 철도면적 비율[Fig. 1(e)], 단위면적당 주택수[Fig. 1(f)], 인구밀도[Fig. 1(g)], 도로면적 대비 자동차등록수[Fig. 1(h)]가 있다. 도로면적 대비 자동차등록수[Fig. 1(h)]는 행정구역별로 산정되며 나머지 세부지표들은 집계구별로 산정 된다. 노출도 세부지표 산정을 위한 통계 자료는 통계청의 센서스 공간 DB자료와 통계지리정보서비스(Statistical Geographic Information Service, SGIS)에서 제공하는 자료를 통해 구축하였다.

취약성의 세부지표는 표고[Fig. 1(i)], 불투수율[Fig. 1(j)], 단위면적당 도시면적 비율[Fig. 1(k)], 총인구 대비 재해취약인구 비율[Fig. 1(l)], 최근 20년간 자연재해피해액[Fig. 1(m)], 단위면적당 하천면적 비율[Fig. 1(n)]이 있다. 표고는 30 m 격자, 최근 20년간 자연재해피해액은 행정구역별로 산정되며 나머지 세부지표들은 집계구를 기준으로 산정된다. 표고는 국토지리원에서 제공하는 30 m 격자기반의 수치표고모델(Digital Elevation Model) 자료를 통해 산정하였고 불투수율(%)은 2013년 환경부에서 수행한 전국 불투수면적률 조사 및 개선방안 연구 결과인 전국 특별시, 광역시, 시, 군의 불투수면적률 산정결과 자료를 통해 구축하였으며 최근 20년간 자연재해피해액(백만원)은 국민안전처(MPSS, 2006; 2016)의 2015 재해연보와 2005 재해연보에서 제공하는 자료를 통해 시군별로 구축하였다. 나머지 통계지표들은 통계청의 센서스 공간 DB자료와 통계지리정보서비스에서 제공하는 자료를 통해 구축하였다.

재해대응및적응역량 세부지표는 하천면적 대비 유수, 저류시설 저수용량[Fig. 1(o)], 하천개수율[Fig. 1(p)], 인구당 지역내총생산[Fig. 1(q)], 재정자립도[Fig. 1(r)], 인구천명당 의료 및 구급 인력수[Fig. 1(s)], 인구천명당 건설장비수[Fig. 1(t)]가 있다. 재해대응및적응역량의 모든 세부지표는 국가통계포털(Korean Statistical Information Service, KOSIS) 시스템에서 제공하는 자료를 통해 시군별로 구축하였다.

3.3 지표 가중치 산정

수해 위험도 지표 및 세부지표의 가중치는 계층화분석법을 통해 산정하였다. 계층화분석을 위한 설문조사 대상을 선정하는 것은 매우 중요하다. 계층화분석은 전문가를 대상으로 실시하는 질적인 연구의 속성이 강하므로 얼마나 많은 설문조사를 수집했는지 보다 어떤 전문가를 선정하느냐가 중요하며 이들 전문가 집단의 응답결과가 일관성을 갖고 있느냐가 분석의 중요한 기준이 될 수 있다. 또한, 계층화분석을 적용하기 위해 필요한 문제에 대한 실무지식과 전문적 경험이 있는 집단의 규모는 집단의 특성이 동질적일 때 10명 이내로도 충분하다. 본 연구에서는 지표기반 위험도에 대한 이해도가 높은 수해를 포함한 자연재해 전문가 등 해당전공분야에서 10년 이상의 실무경력을 갖고 있는 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였으며 비밀판도

Fig. 1. Results of Developing Sub-indices for Risk Assessment

(inconsistency)가 10% 미만인 15명의 설문조사 결과를 분석하여 각 지표별 가중치를 산정하였다.

수해 위험도 지표 및 세부지표 산정 결과(Table 3), 위험도 지표의 가중치는 위해성 0.4333, 취약성 0.1981, 재해대응및적응역량 0.1950, 노출도 0.1736 순으로 높게 산정되었으며 세부 지표의 가중치는 평균 연최대 60분 지속기간 강우강도 0.1885, 평균 연최대 일강우량 0.1391, 설계빈도에서의 침수심 0.1057, 인구밀도 0.0607, 하천면적 대비 유수, 저류시설 저수용량 0.0511 순으로 높게 산정 되었다. 가중치 산정 결과에서 알 수 있듯이 위해성에 대한 세부지표 가중치가 타 가중치 보다 적게는 3.1배에서 높게는 11.2배 정도 크게 산정되었다.

3.4 격자기반의 수해 위험지도 작성 결과

수해 위험도는 수해에 대한 위해성(H), 노출도(E), 취약성(V)을 서로 더한 값에서 재해대응및적응역량(C)을 빼고 이 결과 값을 표준화하여 산정한다. 연구대상지역인 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 강원도의 수해에 대한 위험지

도를 30 m 격자 기반의 레스터(raster) 형태로 Fig. 2~5에 나타내었으며 시군구별 위험도 평가 결과를 Table 4에 제시하였다.

대구광역시의 수해 위험지도 작성결과(Fig. 2), 대구광역시 전 지역의 위험도 평균은 약간높음 등급으로 산정되었으며 대구광역시 중에서도 서구, 달서구, 달성군, 남구의 위험도가 높게 산정되었다. 서구는 타 지역과 비교하여 취약성이 높고 재해대응및적응역량이 낮아 위험도가 높게 산정되었으며 달서구의 경우 비교적 위해성, 노출도가 높아 위험도가 다른 지역보다 높게 산정되었다. 또한, 달성군은 위해성과 취약성이 달서구 보다 높으나 재해대응및적응역량도 높아 달서구 보다는 위험도가 낮게 산정되었으며 마지막으로 남구는 비교적 취약성이 높고 재해대응및적응역량이 낮아 위험도가 높은 것으로 산정되었다. 세부적으로 위험도가 높은 지역을 살펴보면 국가하천인 낙동강 인근 저지대에 위치한 달서구와 달성군 서부지역의 위험도가 높은 것으로 분석되었으며 특히 하빈천과 차천 인근에서 위험도가 매우

Table 3. Weights of Indices and Sub-indices for Flood Risk

Indices			Sub-indices		
Contents	Indices symbol	Weight symbol	Contents	sub-Indices symbol	Weight symbol
Hazard	H	0.4333	Mean of annual daily maximum rainfall (mm/d)	$H1$	0.1391
			Flood depth (m)	$H2$	0.1057
			Mean of annual 60 minutes rainfall intensity (mm/hr)	$H3$	0.1885
Exposure	E	0.1736	Road area ratio (%)	$E1$	0.0198
			Railway area ratio (%)	$E2$	0.0169
			The number of houses (houses/km ²)	$E3$	0.0424
			Population density (people/km ²)	$E4$	0.0607
			The number of cars (cars/km ²)	$E5$	0.0338
Vulnerability	V	0.1981	Elevation (El.m)	$V1$	0.0290
			Impervious surface ratio (%)	$V2$	0.0322
			Urban area ratio (%)	$V3$	0.0310
			Population ratio vulnerable to disaster (%)	$V4$	0.0310
			Past natural disaster damage (in million KRW)	$V5$	0.0526
			River area ratio (%)	$V6$	0.0223
Disaster coping and adaptive capacity	C	0.1950	Rainwater storage capacity (m ³ /m ²)	$C1$	0.0545
			River maintenance ratio (%)	$C2$	0.0443
			Gross regional domestic product per capita (in million KRW/person)	$C3$	0.0208
			Financial independence ratio (%)	$C4$	0.0323
			The number of medical and rescue personnel (people/thousand of people)	$C5$	0.0263
			The number of construction equipment (equipment/thousand of people)	$C6$	0.0168

Table 4. Area of Classified Flood Risk According to Administrative Districts

(Unit: km²)

Administrative districts		Very low	Low	Moderately low	Moderate	Moderately high	High	Very high	Total
Dae gu City	Buk	0.00	0.00	0.39	64.08	24.86	3.92	0.54	93.79
	Dalseo	0.00	0.00	0.03	24.44	20.16	13.53	4.73	62.89
	Dalseong	0.00	0.00	1.51	205.85	121.94	63.81	29.55	422.66
	Dong	0.00	0.25	27.67	126.09	22.76	4.65	0.25	181.66
	Jung	0.00	0.00	0.08	4.63	2.21	0.13	0.04	7.09
	Nam	0.00	0.00	0.85	7.76	7.79	1.27	0.08	17.75
	Seo	0.00	0.00	0.00	1.63	11.63	3.33	0.75	17.34
	Suseong	0.00	0.00	0.16	46.65	24.41	4.80	0.61	76.63
Ul san City	Buk	0.00	0.00	0.00	0.00	56.46	86.64	14.22	157.32
	Dong	0.00	0.00	0.00	0.00	24.92	7.75	2.76	35.42
	Jung	0.00	0.00	0.00	0.00	1.29	22.69	12.98	36.97
	Nam	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	45.06	26.00	71.10
	Ulju	0.00	0.00	0.00	35.08	389.74	303.87	22.57	751.25
Gyeong sang buk-do	Andong	1009.68	445.10	72.34	0.83	0.31	0.02	0.04	1528.33
	Bonghwa	0.00	133.50	555.52	486.69	24.23	1.25	0.60	1201.79
	Cheongdo	0.00	0.00	0.28	28.77	246.07	358.25	58.25	691.62
	Cheongsong	11.92	744.35	90.48	0.64	0.20	0.05	0.01	847.65
	Chilgok	8.54	249.85	182.23	7.94	1.48	0.33	0.26	450.63
	Gimcheon	0.64	21.87	142.16	381.92	308.46	144.82	3.02	1002.89
	Goryeong	0.00	0.00	16.58	130.32	184.00	48.27	6.55	385.72
	Gumi	421.71	174.93	9.73	6.22	1.14	0.01	0.11	613.86
	Gunwi	1.06	589.04	22.88	0.67	0.07	0.02	0.00	613.73
	Gyeongju	0.00	0.08	266.36	658.85	340.71	51.17	2.42	1319.59
	Gyeongsan	0.00	60.79	191.83	154.95	3.40	0.31	0.01	411.29
	Mungyeong	0.00	40.72	555.10	255.52	57.12	2.37	0.00	910.82
	Pohang	0.00	171.76	470.04	455.01	18.25	7.73	0.86	1,123.65
	Sangju	0.00	0.94	91.58	710.63	301.23	135.35	9.79	1249.52
	Seongju	1.16	57.31	223.74	301.17	24.27	3.92	1.26	612.83
	Uiseong	17.02	442.78	652.89	40.00	7.10	9.77	1.00	1170.56
	Uljin	24.89	790.91	166.00	8.78	0.29	0.05	0.00	990.92
	Ulleung	72.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.53
	Yecheon	0.03	29.81	491.20	136.99	5.31	1.12	0.26	664.72
	Yeongcheon	0.00	364.89	546.18	4.67	0.29	0.06	0.00	916.10
	Yeongdeok	14.56	646.23	80.60	0.76	0.12	0.01	0.00	742.27
	Yeongju	0.00	20.91	180.68	275.62	184.98	8.10	2.00	672.29
	Yeongyang	1.36	753.01	65.13	0.51	0.08	0.01	0.00	820.09
Gang won-do	Cheorwon	0.00	0.00	27.25	347.50	343.76	103.44	0.00	821.96
	Chuncheon	0.00	0.00	0.17	126.26	812.95	157.44	17.36	1114.18
	Donghae	150.59	27.38	2.16	0.01	0.00	0.00	0.00	180.13
	Gangneung	0.00	0.18	12.57	34.89	70.91	210.78	709.05	1038.38
	Goseong	0.00	0.00	0.00	1.05	554.21	26.46	0.55	582.27
	Hoengseong	0.00	0.00	0.00	0.00	19.92	146.59	830.12	996.63
	Hongcheon	0.00	0.00	0.00	0.01	58.30	612.44	1146.20	1816.95
	Hwacheon	0.00	0.00	0.00	0.15	92.99	797.95	16.16	907.25
	Inje	0.00	0.00	0.15	129.07	1215.31	271.18	0.82	1616.52
	Jeongseon	62.72	328.81	407.71	316.82	99.71	3.96	0.19	1219.91
	Pyeongchang	16.55	59.69	81.08	164.02	369.77	676.91	96.32	1464.33
	Samcheok	90.23	200.15	806.96	86.63	0.51	0.02	0.00	1184.49
	Sokcho	0.00	0.00	0.00	51.17	47.19	6.60	0.31	105.27
	Taebaek	78.42	218.61	4.98	1.43	0.05	0.01	0.00	303.51
	Wonju	0.00	0.00	0.00	0.00	29.72	50.73	783.37	863.83
	Yanggu	0.00	0.00	60.70	288.01	297.33	1.03	0.01	647.08
	Yangyang	0.00	0.00	0.00	0.12	11.11	456.60	160.49	628.33
	Yeongwol	534.86	293.18	49.13	73.56	116.94	54.90	3.60	1126.17

높게 산정되었다. 달서구 북측, 서구, 북구 남측, 수서구 북서측, 동구 남측에서는 위해성뿐만 아니라 노출도와 취약성도 높게 산정되어 위험도가 높게 산정된 지역이며 특히 금호강과 차천 인근 저지대에서 위험도가 매우 높게 산정되었다.

Fig. 2. Daegu City's Grid Based Flood Risk Map

울산광역시의 수해 위험지도 작성결과(Fig. 3), 울산광역시 전 지역의 위험도 평균은 높음 등급으로 산정되어 울산광역시 내에 위치한 중구, 남구, 북구, 동구, 울주군 모두 위험도 등급이 약간높음 등급보다 높게 산정되었으며 이는 다섯 지역 모두 위해성 평균이 높음등급 이상이기 때문이다. 특히 이 지역 중 중구는 재해대응및적응역량이 낮아 위험도가

Fig. 3. Ulsan City's Grid Based Flood Risk Map

가장 높게 산정되었으며 남구는 노출도와 취약성이 상대적으로 높아 두 번째로 위험도가 높게 산정 되었다. 울산의 위해성이 높은 이유는 태화강, 회야강 인근 저지대와 태화강과 동천이 합류하는 넓은 지역에서 침수범람이 예측되기 때문이다. 특히, 2017년 4월 발생한 태풍 차비에 의한 침수피해지역인 울산 중구와 남구의 태화강 인근 저지대에서 위해성이 높게 산정되어 위험도가 가장 높게 산정 되었다.

경상북도의 수해 위험지도 작성결과(Fig. 4), 경상북도 전 지역의 위험도 평균은 약간낮음 등급으로 산정되었으며 이 중 청도군, 고령군의 위험도 평균이 약간높음 등급으로 산정되어 위험한 지역으로 분석 되었다. 청도군의 경우 위해성이 약간높음 등급이며 노출도와 취약성이 낮은 편이나 재해대응및적응역량이 매우낮아 위험도가 높게 산정 되었다. 고령군도 청도군과 같이 위해성이 약간높음 등급이나 재해대응및적응역량이 보통등급이라 청도군 보다는 위험도가 낮게 산정 되었다. 세부적으로 위험도가 높은 지역을 살펴보면 재해대응및적응역량이 낮은 영주시 중부지역, 취약성이 높은 상주시 서부와 김천시 남부, 태풍 이동경로에 위치하여 위해성이 높은 경주시 남부지역이 위험도가 높은 것으로 분석 되었다.

Fig. 4. Gyeongsangbuk-do's Grid Based Flood Risk Map

강원도의 수해 위험지도 작성결과(Fig. 5), 강원도 전 지역의 위험도 평균은 약간높음 등급으로 산정되었으며 이 중 강원도 중부 지역과 북동 지역의 위험도 평균이 약간높음 등급 이상으로 산정되어 강원도 전체 18개 시군중 67%인 12개의 시군이 위험한 지역으로 분석되었다. 강릉시, 삼척시

를 제외한 강원도 대부분의 지역은 노출도와 취약성이 낮으며 지역별 편차가 크지 않기 때문에 위해성의 크기가 위험도의 크기 결정에 가장 큰 영향을 미쳤다. 강원도는 경상북도와 달리 하천인근 소규모 지역이 아닌 광범위한 지역에서 위험도가 높게 산정되었는데, 이는 높은 강우강도와 강우량이 광범위하게 산정되어 위험도 증가에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 분석되었다.

Fig. 5. Gangwon-do's Grid Based Flood Risk Map

4. 결 론

본 연구에서는 격자기반의 수해위험도를 평가하고 위험지도를 작성하기 위해 지역의 특성지표를 고려한 위험도 평가 기법을 정립하고 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 강원도에 적용하였다. 본 연구를 통해 도출한 결과를 서술하면 아래와 같다.

- (1) 지역의 특성지표를 고려한 수해 위험도 평가기법을 정립하였다. 지역의 특성지표로 위해성, 노출도, 취약성, 재해대응및적응역량 지표를 선정하였고 각 지표의 세부지표로 GIS로 구축이 가능한 총 20개 세부지표를 결정하였다. 지표 및 세부지표의 가중치 산정방법은 계층화분석 기법, 표준화 방법은 지스코어 방법을 선정하였고 수해 위험도 추정 산정식을 개발하여 위험도 등급을 매우낮음, 낮음, 약간낮음, 보통, 약간높음, 높음, 매우높음 7등급으로 구분하는 방안을 제시하였다.

- (2) 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 강원도를 대상으로 위해성 3개, 노출도 5개, 취약성 6개, 재해대응및적응역량 6개 세부지표 값을 산정하여 지도로 작성하고 계층화분석기법을 통해 지표의 가중치를 산정하였다. 수해 위험도 지표 및 세부지표 산정 결과, 지표의 가중치는 위해성 0.4333, 취약성 0.1981, 재해대응및적응역량 0.1950, 노출도 0.1736 순으로 높게 산정되었으며 세부지표의 가중치는 평균 연최대 60분 지속기간 강우강도 0.1885, 평균 연최대 일강우량 0.1391, 설계빈도에서의 침수심 0.1057, 인구밀도 0.0607, 하천면적 대비 유수, 저류시설 저수용량 0.0511 순으로 높게 산정되었다. 위험도 평가에 가장 큰 영향을 미치는 지표는 위해성으로 나타났으며 위해성 세부지표 가중치가 타 가중치 보다 적게는 3.1배에서 높게는 11.2배 정도 크게 산정되었다.
- (3) 대규모 도시 지역인 대구광역시와 울산광역시의 수해 위험지도 작성 결과, 노출도와 취약성이 높아 전반적으로 위험도 등급이 보통 이상 등급으로 평가되었고, 대구광역시 낙동강, 금호강, 차천 인근 저지대에서 높음 등급 이상의 위험도가 산정되었다. 달서구 북측, 서구, 북구 남측, 수서구 북서측, 동구 남측에서는 위해성 뿐만아니라 노출도와 취약성도 높게 산정되어 위험도가 높게 산정되었다. 울산광역시의 경우 전반적으로 위험도 등급이 약간높음 등급 이상으로 평가되었고 이는 타 지역과 비교하여 위해성이 높음 등급이상으로 산정되었기 때문이다. 특히, 중구는 재해대응및적응역량이 낮아 위험도가 가장 높게 산정되었으며 남구는 노출도와 취약성이 상대적으로 높아 위험도가 높게 산정되었다. 울산광역시의 경우 태화강, 회야강 인근 저지대와 태화강과 동천이 합류하는 넓은 지역에서 홍수발생 위험이 높아 위해성이 높은 것으로 분석되었다.
- (4) 중·소 규모 도시지역과 농촌, 해안, 산악지역이 포함되어 있는 경상북도, 강원도의 수해위험지도 작성 결과, 경상북도 대부분의 지역에서 위험도 등급이 보통등급 이하인 것으로 분석되었고, 강원도 중부, 북부 대부분의 지역에서 위험도 등급이 약간높음 등급 이상으로 평가되었다. 경상북도는 대부분의 지역에서 위해성이 낮아 위험도가 낮게 산정되었으나 청도군, 고령군 일부 지역에서 위험도 등급이 약간높음 등급 이상으로 산정되었다. 청도군은 위해성이 약간높음 등급 노출도와 취약성은 낮음등급이나 재해대응및적응역량이 매우 낮아 위험도가 높게 산정되었다. 고령군의 위험도 등급은 청도군과 매우 유사하나 재해대응및적응역량이 청도군 보다 높아 청도군 보다 위험도가 낮게 산정된 것으로 분석되었다. 강원도의 경우 18개 시군 중 67%인 12개의 시군이 위험한 지역으로 분석되었다. 강원도

대부분의 지역은 노출도와 취약성이 낮아 위해성의 크기가 위험도 크기에 가장 큰 영향을 미쳤으며 하천인 근 소규모 지역이 아닌 광범위한 지역에서 위험도가 높게 산정 되었다. 이는 지역적 편차가 크지 않은 높은 강우강도와 강우량이 발생했기 때문이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(환경부, 교육부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화대응환경기술개발사업(2018001310004)과 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2017R1D1A1B03034387)의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

- Allen Consulting Group (2005). *Climate change risk and vulnerability: Promoting an efficient adaptation response in Australia*. Final Report. Australian Greenhouse Office.
- Benouar, D., and Mimi, A. (2001). Improving emergency management in Algeria. *Global Alliance International Workshop on Disaster Reduction*, Reston, VA.
- Brooks, N., Adger, W.N., and Kelly, P.M. (2005). The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change*, Vol. 15, No. 2, pp. 151-163.
- Cho, D.I. (2015). *Developing a multi-regional flooding risk index to a disaster management*. Master's thesis, Sungkyunkwan University.
- Choi, J.R., Kim, G.W., Jee, Y.G., and Park, I.C. (2015). Development and application of precise debris-flow risk assessment index in urban area. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 107-113.
- Cutter, S.L. (2001). The changing natural of risks and hazards. In *American hazardscapes: The regionalization of hazards and Disaster* (Chapter 1, pp. 1-12), Washington, D.C.: Joseph Henry Press.
- Eriksen, S.H., and Kelly, P.M. (2007). Developing credible vulnerability indicators for climate adaptation policy assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 12, No. 4, pp. 495-524.
- Fournier d'Albe, E.M. (1979). Objectives of volcanic monitoring and prediction. *Journal of the Geological Society*, Vol. 136, No. 3, pp. 321-326.
- Han, S.R., Kang, N.R., and Lee, C.S. (2015). Disaster risk evaluation for urban areas under composite hazard factors. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 33-43.
- Hwang, D.J. (2015). *A research on the assessment of disaster risk in Kangwon region using climate change scenario and disaster risk index*. Ph.D. dissertation, Kangwon National University.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jeong, D.H., Cho, Y.S., Ahn, K.H., Choi, I.C., Chung, H.M., and Lee, J.K. (2016). A study on AHP application of selection method for the best treatment technology of public sewage treatment works. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 30, No. 4, pp. 427-440.
- Kelly, P.M., and Adger, W.N. (2000). *Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation*. *Climate Change*, Vol. 47, No. 4, pp. 325-352.
- Kim, J.H., Park, M.J., Lee, J.H., and Jun, H.D. (2012). An evaluation of inundation risk of urban watershed using data envelopment analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 4, pp. 179-186.
- KEI (Korea Environment Institute) (2014). *Review on sewer flood risk assessment method considering climate change*.
- Nimpuno, K. (1998). *Disaster management glossary*. Delft, the Netherlands: Disaster and Emergency Reference Center.
- Lee, J.B., and Chang, S.R. (2014). Assessment of risk of unit work in nuclear power plant construction using AHP. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 29, No. 2, pp. 62-67.
- MLTMA (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2008). *Guideline for development of flood risk map*.
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety) (2018a). *2017 Annual disaster report*.
- MOIS (2018b). *Insurance rate making and mapping based on natural disaster risk*.
- MPSS (Ministry of Public Security and Safety) (2006). *2005*

Annual disaster report.

- MPSS (2015). *Guideline for development of disaster map.*
- MPSS (2016). *2015 Annual disaster report.*
- Moss, R.H., Brenkert, A.L., and Malone, E.L. (2001). *Vulnerability to climate change: A quantitative approach.* U.S. Department of Energy.
- Nam, Y.G. (2015). *Study on identification of flood risk areas by flood risk assessment.* Master's thesis, Yeungnam University.
- Oh, S.M., Kim, G.H., Jung Y.H., Kim, D.H., and Kim, H.S. (2015). Risk assessment of heavy snowfall using PROMETHEE: The case of Gangwon province. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 1, pp. 87-98.
- Park, G.P. (2012). *Flood risk estimation on Gamcheon river basin using MCDM.* Master's thesis, Kyungpook National University.
- Park, H.S., Lee, S.J., Yu, I.S., Jeong, S.M., and Chung, G.H. (2014). Snow disaster risk index in the Ulsan metropolitan city. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 2, pp. 97-106.
- Park, J.J., Chung, H.Y., Moon, J.B., Choi, H.S., and Lee, I.M. (2016). Overall risk analysis of shield TBM tunnelling using Bayesian Networks (BN) and Analytic Hierarchy Process (AHP). *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 5, pp. 453-467.
- Schröter, D., and the ATEAM Consortium (2004). *Global change vulnerability: Assessing the European human-*

environment system. Potsdam Institute for Climate Impact Research.

- Shin A.K. (2016). *Flood disaster risk evaluation of reservoir.* Master's thesis, University of Seoul.
- Shin, J.Y., Park, Y.J., and Kim, T.W. (2014). Evaluation of inland inundation risk in urban area using fuzzy AHP. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 9, pp. 789-799.
- Son, M.S., Park, J.Y., and Kim, H.S. (2013). Urban environmental risk: Evaluation flooding risk indices of Seoul. *Seoul Studies*, The Seoul Institute, Vol. 14, No. 4, pp. 127-140.
- Song, J.H. (2012). *Study on flood risk assessment in medium and small river watersheds for flood protection alternatives.* Master's thesis, Yeungnam University.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction) (2011). *Disaster risk reduction in the United Nations.*
- Yu, I.S. (2017). *Development of an index based risk assessment model: Focused on flood, wind and snow disaster.* Ph.D. dissertation, Kongju National University.

Received	October 23, 2018
Revised	October 24, 2018
Accepted	November 13, 2018