기후변화 적응을 위한 격자기반의 풍해 위험도 평가

Assessment of a Grid-Based Wind Disaster Risk for Climate Change Adaptation

유인상* · 정휘철** · Rubio, Christabel Jane P.*** · 김하룡**** · 정상만*****

Yu, Insang*, Jung, Huicheul**, Rubio, Christabel Jane P.***, Kim, Hayong****, and Jeong, Sangman*****

Abstract

In this study, a wind disaster risk assessment model applying the concept of risk for adaptation to climate change, established by the Intergovernmental Panel on Climate Change, was developed, and a risk assessment was conducted for Daegu City, Ulsan City, Gyeongsangbuk Province, and Gangwon Province. Four proxy variables, including hazard, exposure, vulnerability, and adaptive capacity, were developed, and the risks were mapped through analysis of the proxy variables. The results from the analysis of average risk across administrative districts showed that the risk severity of the seven administrative districts, which makes up 13.0% of the total 54 administrative districts, is 'very high'. One administrative district that is 1.9% of the total administrative districts shows a 'high' risk severity, and eight administrative districts that make up 14.8% of the total administrative districts were rated as 'moderately high'. The mean of the proxy variables in these regions was calculated to be "very high" for hazard, "low" for exposure, "moderately high" for vulnerability, and "moderate" for adaptive capacity. Therefore, the increase in risk in these regions was found to be highly influenced by hazard and vulnerability. On the other hand, the number of administrative districts whose risk level is rated below 'low' risk severity was 17, which is about 31.5% of the total administrative districts. The mean of the proxy variables in these regions was estimated to be "moderately low" for hazard, "very low" for exposure, "moderately high" for vulnerability, and "moderately low" for adaptive capacity. Therefore, the decrease in risk in these regions was found to be highly influenced by hazard and exposure.

Key words : Climate Change, Adaptation, Wind Disaster, Risk Assessment, Socioeconomic, Grid, Index

요 지

본 연구에서는 기후변화에 관한 정부간 협의체에서 정립한 기후변화 적응을 위한 위험도의 개념을 적용하여 풍해 위험도 평가모형을 개발하고 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 강원도를 대상으로 위험도를 평가하였다. 네 개의 대리변수인 위해성, 노출도, 취약성, 적응역량 자료를 구축하였고 대리변수간의 연산을 통해 위험지도를 작성하였다. 행정구역별 위험도 평균 분석 결과, 전체 54개 행정구역 중 13.0%인 7개 행정구역의 위험도 등급이 '매우위험', 1.9%인 1개 행정구역이 '위험', 14.8%인 8개 행정구역이 '약간위험' 등급으로 평가되었다. 이 지역들의 대리변수 평균 등급은 위해성 '매우높음', 노출도 '낮음', 취약성 '약간높음', 적응역량 '보통' 등급으로 위해성과 취약성이 위험도 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, 위험도 등급이 '약간낮음' 등급 이하인 행정구역은 31.5%인 17개로 분석 되었다. 이 지역들의 대리변수 평균 등급은 위해성 '약간낮음', 노출도 '매우낮음', 취약성 '약간높음', 적응역량 '약간낮음' 등급으로 위해성과 노출도가 위험도 감소에 큰 영향을 미치는 것으로 분석 되었다.

핵심용어 : 기후변화, 적응, 풍해, 위험도 평가, 사회경제적, 격자, 지표

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

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

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

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

***정회원, 공주대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: cjrubio@kongju.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University

****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

지구온난화로 인해 지난 1880년~2012년 동안 지구의 평균 기온이 0.85°C ($0.65^{\circ}\text{C}\sim 1.06^{\circ}\text{C}$) 상승하였으며 최근 수십 년간 기상 관련 재해로 인한 직접적 손실 및 보험 측면의 손실 모두 전 지구적으로 현저히 증가하고 있다(IPCC, 2015). 기후변화에 의한 부정적인 영향은 온실가스 배출량 감축과 같은 완화(mitigation)와 기후변화 적응(adaptation)을 통해 경감시킬 수 있다. 기후변화 적응과 완화는 상호보완적인 전략으로서 어느 하나에 치우치지 않고 균형 있게 수립되어야 시너지 효과가 나타난다. 완화는 기후변화에 주된 요인이 되는 온실가스의 발생원을 감소시키거나, 온실가스 흡수원을 확대하여 온실 가스 배출총량을 줄이는 노력을 의미하며 적응은 기후변화를 피할 수 없는 현실로 인식하고 이로 인해 발생하는 부정적인 영향을 최소화하여 지역의 복원력을 구축하는 노력이다(GTC, 2015). 자연재해는 현재 우리 인류의 기술로 그 크기를 감소시키는데 한계가 있으며 피해 양상이 즉각적으로 나타나기 때문에 피해를 저감하기 위해서는 단기적으로 효과적인 적응 능력을 강화하는 것이 매우 중요하다. 자연재해에 대한 기후변화 적응을 위해서는 예방, 대비 차원에서 자연재해에 위험한 지역을 미리 선정하여 관리해야 한다(Yu, 2017). IPCC (2015)에서는 기후변화의 영향으로 인한 위험은 기후 관련 위험(hazard) 요소와, 인간 및 자연계의 노출(exposure), 취약성(vulnerability) 및 적응역량(adaptive capacity)과의 상호작용에 의해 발생한다고 하였다. 그러므로 기후변화에 의한 자연재해에 적응하기 위해서는 위험도 평가를 통해 위험 지역을 선정하고 해당지역의 노출도와 취약성을 감소시키면서 적응역량을 증가시켜 위험을 저감해야 한다.

우리나라의 최근 10년간(2008년~2017년) 자연재해 피해액을 조사해 보면, 태풍에 의한 피해액이 1,588억원으로 전체 피해액의 45.5%를 차지하고 있으며 이어서 호우 1,494억원(42.9%), 대설 226억원(6.5%), 지진 96억원(2.8%), 풍랑 43억원(1.2%), 강풍 39억원(1.1%)인 것으로 나타났다(MOIS, 2018). 태풍에 의한 피해는 강풍에 의한 풍해와 폭우에 의한 수해가 포함되어 있으며 두 재해를 구분하여 집계하고 있지 않아 이를 구분할 수는 없으나 풍해는 사회·경제적으로 많은 영향을 주는 자연재해 중 하나임에는 틀림없다. 그러나 자연재해에 대한 위험도 평가 관련 기존의 연구를 살펴보면 수해에 대한 위험도 평가 연구(Kim et al., 2012; Park, 2013; Song, 2012; KEI, 2014; Park et al., 2014; Cho, 2015; Han et al., 2015; Hwang, 2015; Nam, 2015)는 많은 진척이 있었으나, 풍해에 대한 위험도 평가 연구는 많은 연구가 수행되지 않았다. 지표를 적용하여 행정구역의 풍해 위험도를 분석하는 연구로 Park (2012)은 태풍을 고려한 도시위험도평가 방법에 관한 연구를 수행하였다. 태풍을 고려한 도시위험지수의 기본개념으로 4개의 주요소인 위험성, 노출성, 취약성,

대응복구성을 선정하였고 도시위험도 평가를 통해 도시위험도 순위를 산정하였으며 도시위험도 주요소와 세부지표 분석을 통해 어떠한 원인에 의해 위험도가 높게 산정되는지 분석 하였다. Lee and Yoon (2013)은 Integrated Rapid Visual Screening (IRVS)을 활용하여 건축물 높이별로 복합시설과 업무시설을 구분하여 위험도 평가를 수행하였다. 위험도 평가를 위한 대리변수로 자산가치를 의미하는 Consequences (C), 손실이나 피해를 야기하는 잠재적인 조짐인 Threat (T), 자산의 취약성인 Vulnerability (V)를 활용하였다. 현재까지 수행된 대부분의 풍해 위험도 평가 관련 연구에서는 공간적으로 세분화 된 지역이 아닌 시군구를 대상으로 위험도를 평가하여 시군구 전체에 동일한 위험도 등급이 산정되었다. 이는 위험도 평가 대리변수 중 하나인 위해성 산정 시 시군구별 태풍 주의보 횟수, 순간풍속 20 m/s 이상인 날의 횟수 등 시군구 통계자료를 사용했기 때문이다. 위험도 평가를 위해 시군구별로 동일한 위해성을 적용하면 지역의 세부적인 지형 및 재해특성을 반영하지 못한다는 문제점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 시군구별로 동일한 위해성이 아닌 격자단위의 세부적인 위해성을 활용해야 한다. 위해성뿐만 아니라 노출도, 취약성, 적응역량도 과거에는 시군구별로 산정하여 위험도에 적용하였으나 최근에는 집계구 단위로 자료가 생성되고 있어 이를 활용하면 보다 공간적으로 세분화된 자료를 구축하고 위험도를 산정할 수 있다.

본 연구는 풍해 위험도 평가모형의 입력 자료를 구축하는 단계와 위험도평가 모형을 연구 대상지역에 적용하여 위험도를 평가하고 결과를 분석하는 단계로 구성된다. 이에 따라 본 논문도 ‘2장 풍해 위험도 평가모형’, ‘3장 풍해 위험도 평가 및 결과분석’으로 구분하여 기술 하였다. 2장 풍해 위험도 평가 모형에서는 지역의 기상 및 지형 특성을 고려한 30m 격자기반의 풍해 위해성과 집계구, 행정구역 기반의 노출도, 취약성, 적응역량 자료 선정 및 구축 결과에 대해 다루었으며 3장 풍해 위험도 평가 및 결과분석에서는 2장에서 구축한 자료를 입력 자료로 활용하여 풍해 위험도를 평가하고 지역별 위험도 특성에 대해 분석한 결과를 기술하였다. 풍해 위험도 평가 결과를 활용하여 위험지역을 선정할 수 있었으며 대리변수 분석을 통해 해당 지역의 위험도를 경감하기 위한 요인을 결정할 수 있었다. 본 연구를 통한 도출한 풍해 위험도 평가 결과는 풍해에 대한 기후변화 적응 대책 수립을 위한 우선순위 결정 및 의사결정 지원에 활용 가능할 것으로 판단된다.

2. 풍해 위험도 평가 모형

세계 여러 국가 및 기관에서는 위험도의 개념을 다양하게 정립하여 사용해 왔다. Benouar and Mimi (2001)는 위험도를 재해위험과 재해취약성, 재해관리가 조합된 결과라고 하였

고 FEMA (2001)에서는 재해의 발생, 강도, 심각성, 노출도에 대한 확률과 빈도 측면에서 어떤 특정 위해성과 연관된 재해 위험도를 평가하기 위한 과정이나 방법 이라고 하였으며 UN ISDR에서는 인명과 재산, 지역사회, 환경에 대한 위협 또는 피해를 야기 시키는 위해성(hazard)을 분석하고 현재의 취약성과 수용능력 수준을 평가하는 과정이라고 하였다(SDI, 2006). 기후변화에 의한 위험도 및 취약성 평가 연구에 가장 선진화된 기관 중 하나인 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 위험도의 개념을 Fig. 1과 같이 정립하였다(IPCC, 2014). 기후현상은 외적인 위해 요소로서 자연적인 변이(natural variability)와 인위적 기후변화(anthropogenic climate change)로 구성된다. 사회경제적 과정은 사회경제적 경로(socioeconomic pathways), 적응 및 감축 행동(adaptation and mitigation action), 거버넌스(governance)로 구성되며, 기후 영향을 받는 그 사회 내 노출대상과 취약성을 결정한다. 사회경제적 과정은 온실가스를 배출하고 토지이용에 변화를 가져옴으로써 기후에 다시 영향을 미친다. 또한 기후변화로 인해 어떠한 위험이 발생하면 이는 다시 기후와 사회경제에 영향을 미쳐 지속적인 상호작용 관계를 형성한다.

Fig. 1. Concept of Risk by Intergovernmental Panel on Climate Change

Source: Intergovernmental Panel on Climate Change (2014)

기존의 취약성 및 위험도 평가 관련 연구(Lung et al., 2013; UN ISDR, 2013; Toufique and Islam, 2014)에서는 가중치를 적용한 대리변수와의 연산을 통해 취약성 및 위험도를 평가하였으며 이와 같은 분석방법론은 부문별, 지역별, 상대적 취약성과 위험성을 파악하는 데 유용해 정책의 우선순위 결정에 필요한 정보를 제공해 왔다(KEI, 2017). 본 연구에서는 기존 연구에서 정립한 위험도의 개념을 적용하여 가중치를 고려한 위해성(hazard), 노출도(exposure), 취약성(vulnerability), 적응역량(adaptive capacity) 대리변수 및 세부대리변수를 산정하고 대리변수 간의 연산을 통해 풍해 위험도를 평가하는 모형을 적용하고자 한다.

2.1 풍해 위험도 평가 기법

풍해 위험도 평가를 위한 대리변수는 앞서 서술한 바와 같이 위해성, 노출도, 취약성, 적응역량이며 위해성, 노출도, 취약성 대리변수는 위험도와 정비례하고 적응역량은 반비례하는 관계이다. 위험도와 가중치를 적용한 네 가지 대리변수와의 상관관계를 수식으로 나타내면 Eq. (1)과 같이 덧셈과 뺄셈, Eq. (2)와 같이 덧셈과 나눗셈, Eq. (3)과 같이 곱셈과 나눗셈으로 표현 할 수 있다. Eqs. (2)와 (3)의 경우 대리변수가 음수로 산정될 경우 위험도가 역전되는 경우가 있어 본 연구에서는 Eq. (1)을 적용하여 위험도를 산정하였다. 예를 들어, 위해성과 취약성이 매우 낮아 두 대리변수가 음수로 산정 될 경우 서로 곱하게 되면 양수로 바뀌어 오히려 위험도가 증가하게 되어 위험도의 기본 개념에 위배되기 때문이다.

$$R = \alpha H + \beta E + \gamma V - \delta C \quad (1)$$

$$R = \frac{\alpha H + \beta E + \gamma V}{\delta C} \quad (2)$$

$$R = \frac{\alpha H \times \beta E \times \gamma V}{\delta C} \quad (3)$$

여기서, H 는 위해성(hazard), E 는 노출도(exposure), V 는 취약성(vulnerability), C 는 적응역량(adaptive capacity), α 는 위해성의 가중치, β 는 노출도의 가중치, γ 는 취약성의 가중치, δ 는 적응역량의 가중치이다.

위험도는 위해성, 노출도, 취약성, 적응역량 대리변수와의 연산을 통해 산정된 표준화되지 않은 풍해 위험도[Eq. (4)]를 지스코어(z-score) 방법을 통해 표준화함으로써 산정 할 수 있다[Eq. (5)]. 위해성, 노출도, 취약성, 적응역량 대리변수는 각 대리변수의 세부대리변수를 표준화한 값과 대리변수 및 세부대리변수의 가중치를 적용하여 Eqs. (6)~(9)와 같이 연산함으로써 산정할 수 있다.

$$R_{non} = H + E + V - C \quad (4)$$

$$R = \frac{R_{non} - \bar{x}_{R_{non}}}{s_{R_{non}}} \quad (5)$$

여기서, R_{non} 은 표준화 되지 않은 풍해 위험도(non-standardized wind disaster risk), R 은 풍해 위험도(wind disaster risk), $\bar{x}_{R_{non}}$ 은 표준화 되지 않은 풍해 위험도의 평균, $s_{R_{non}}$ 은 표준화 되지 않은 풍해 위험도의 표준편차 이다.

$$H = \alpha \{S(H1)a + S(H2)b + S(H3)c\} \quad (6)$$

$$E = \beta \left\{ \begin{array}{l} S(E1)d + S(E2)e + S(E3)f \\ S(E4)g + S(E5)h + S(E6)i \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$V = \gamma \{ S(V1)j + S(V2)k + S(V3)l + S(V4)m \} \quad (8)$$

$$C = \delta \left\{ \begin{array}{l} S(C1)n + S(C2)o + S(C3)p + \\ S(C4)q + S(C5)r \end{array} \right\} \quad (9)$$

여기서, H 는 위해성, E 는 노출도, V 는 취약성, C 는 적응역량, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 는 대리변수의 가중치, Hn, En, Vn, Cn 은 세부대리변수 $a \sim r$ 은 세부대리변수의 가중치, $S(\cdot)$ 는 $\cdot$ 를 표준화 한 값 이다.

2.2 위험도 평가를 위한 대리변수 및 가중치

풍해 위험도를 평가하기 위해서는 위해성, 노출도, 취약성, 적응역량 대리변수의 세부대리변수를 선정하고 가중치를 산정해야 한다. 세부대리변수는 지리정보시스템을 활용하여 공간정보로 표출 가능하도록 전산화 된 자료이어야 하며 특히, 위험도 평가에 많은 영향을 미치는 위해성 대리변수의 경우 30 m 격자로 표출하여 지역의 지형 및 재해 특성이 반영되어야 한다. 노출도, 취약성, 적응역량 대리변수는 지역의 지형 및 통계자료를 활용하여 구축하였으며

표고 세부대리변수의 경우 30 m 격자단위, 인구관련 세부대리변수는 집계구, 재정자립도와 같은 행정구역의 특성을 나타내는 세부대리변수는 시군구 단위로 Table 1과 같이 구축하였다. 초기 세부대리변수의 개수는 18개 이상이었으나 위에 언급한 사항을 만족하는 대리변수와 서로 중복되는 대리변수를 제거하여 최종적으로 Table 1과 같이 18개의 대리변수를 선정하였다.

가중치의 경우 피해액과 같이 정량적인 자료가 있을 경우 이 자료를 사용하여 객관적으로 산정할 수 있으나, 그렇지 않을 경우 의사결정방법을 통해 산정 한다. 의사결정방법 중 위험도 및 취약성 평가 관련 연구에서는 계층화분석법 (Analytical Hierarchy Process, AHP)을 통한 가중치 산정에 관해 많은 연구가 수행되어 왔다(Lee and Chang, 2014; Shin et al., 2014; Oh et al., 2015). 본 연구에서는 풍해를 포함한 자연재해와 위험도 평가 관련 분야에서 10년 이상의 실무경력을 갖고 있는 전문가 15명을 대상으로 계층화분석 설문조사를 실시하였다. 전문가 15명 중 학계에 종사하는 전문가는 5명, 공공기관은 5명, 산업계는 5명 이었다. Table 1과 같이 위해성 3개, 노출도 6개, 취약성 4개, 적응역량 5개의 세부대리변수를 선정하고 가중치를 산정하였다. 계층화 분석은 전문가를 대상으로 실시하는 질적인 연구의 속성이 강하므로 얼마나 많은 설문조사를 수집했는지 보다 어떤 전문가를

Table 1. Weights of Indices and Sub-indices for Grid-Based Wind Disaster Risk

Indices	Weights	Sub-indices		Weights $a \sim r$
Hazard H	0.4706 α	Mean of annual maximum 10 minutes wind speed (m/s)	$H1$	0.1504
		Mean of annual maximum instantaneous wind speed (m/s)	$H2$	0.2202
		Design ratio of wind speed for greenhouses (%)	$H3$	0.1000
Exposure E	0.1649 β	Road area ratio (%)	$E1$	0.0193
		Railway area ratio (%)	$E2$	0.0133
		The number of houses (houses/km ²)	$E3$	0.0187
		Population density (people/km ²)	$E4$	0.0406
		The number of cars (cars/km ²)	$E5$	0.0203
		Farm area ratio (%)	$E6$	0.0527
Vulnerability V	0.1929 γ	Urban area ratio (%)	$V1$	0.0502
		Population ratio vulnerable to disaster (%)	$V2$	0.0419
		Past natural disaster damage (in million KRW)	$V3$	0.0481
		The number of dilapidated house ratio (%)	$V4$	0.0527
Adaptive capacity C	0.1716 δ	Gross regional domestic product per capita (in million KRW/person)	$C1$	0.0351
		Financial independence ratio (%)	$C2$	0.0429
		The number of medical and rescue personnel (people/thousand of people)	$C3$	0.0437
		The number of construction equipment (equipment/thousand of people)	$C4$	0.0181
		The number of civil servant (people/thousand of people)	$C5$	0.0318
Total	1.0000	-	-	1.0000

선정하느냐가 중요하며 이들 전문가 집단의 응답결과가 일관성을 갖고 있느냐가 분석의 중요한 기준이 될 수 있다. 또한, 계층화분석을 적용하기 위해 필요한 문제에 대한 실무 지식과 전문적 경험이 있는 집단의 규모는 집단의 특성이 동질적일 때 10명 이내로도 충분하다(Lee, 2000).

계층화분석 결과, 대리변수의 비일관성(inconsistency)은 Table 2와 같이 0%~9.75%로 나타났으며 세부대리변수의 비일관성은 0%~9.88%로 산정되어 모든 대리변수의 비일관성이 10%미만인 것으로 나타나 일관성이 있는 것으로 분석되었다. 대리변수의 가중치는 내림차순으로 위해성 0.4706, 취약성 0.1929, 적응역량 0.1716, 노출도 0.1649로 산정되었다. 대리변수 및 세부대리변수의 가중치는 그 크기에 상관없이 지역별 재해특성을 위험도에 반영하기 위해 매우 중요한 요소 중 하나이며 대리변수별 가중치가 큰 세부대리변수의 특성을 분석한 결과를 서술하면 다음과 같다. 위해성 대리변수의 세부대리변수 중 건축물, 온실 등의 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 평균 연최대 순간풍속(mean of annual maximum instantaneous wind speed)의 가중치가 0.2202로 가장 높게 산정되었다. 노출도의 경우 단위면적당 농업지역면적 비율(farm area ratio)의 가중치가 0.0527로 가장 높게 나타났으며 이는 풍해에 노출되는 대상 중 농업지역에 포함되는 온실, 농작물, 과수원등의 피해가 크기 때문이다. 취약성의 경우 총단독주택 수 대비 노후단독주택 수 비율(the number of dilapidated house ratio)의 가중치가 0.0527로 가장 높게 산정되었다. 이는 동일한 풍속이 발생하여도 노후단독주택은 일반단독주택과 비교하여 구조물 자체와

창호 등이 바람에 취약하고 사고 발생 시 이차적으로 인명피해까지 발생할 수 있기 때문이다. 적응역량 대리변수에서는 인구천명당 의료 및 구급 인력수(the number of medical and rescue personnel) 세부대리변수의 가중치가 0.0437로 가장 높게 산정되어 1인당 지역내총생산, 재정자립도와 같은 간접적인 적응역량 보다 직접적인 적응역량의 중요도가 더 큰 것으로 나타났다.

3. 풍해 위험도 평가 및 결과분석

3.1 풍해 위험도 평가

풍해 위험도 평가 모형을 도시, 농촌, 산악, 해안 지역 등이 다양하게 분포하고 있는 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 강원도에 적용하여 위험도를 평가 하였다.

대구광역시의 풍해 위험도 평가 결과(Fig. 2), 대구 전 지역의 위험도 평균은 ‘보통’ 등급으로 산정되었으며 이 중 서구와 남구의 위험도 평균이 ‘약간높음’ 등급으로 산정되어 위험한 지역으로 분석 되었다. 서구의 위해성, 노출도, 취약성은 타 지역들과 큰 차이가 없으나 적응역량이 매우 낮아 위험도가 ‘약간높음’ 등급으로 산정되었으며 남구는 서구 보다 적응역량이 높아 서구 보다 위험도가 낮게 산정되었다. 세부적으로 위험도가 높은 지역을 살펴보면 달성군 서부, 남부에 위치한 낙동강 인근, 동부에 위치한 신천 인근, 금호강 일대에서 위험도 등급이 ‘약간높음’ 이상으로 산정되었다. 이는 위해성의 영향으로 하천 또는 호수 인근에서는 지표의 거칠기가 거의 없어 지표고도분포계수에 의해 풍속

Table 2. Inconsistency of Sub-Indicies for Wind Disaster Risk

No.	Inconsistency of indices (%)	Inconsistency of sub-indices (%)				
		Hazard	Exposure	Vulnerability	Adaptive capacity	Average
1	1.82	0.00	0.67	1.22	3.14	1.37
2	0.11	0.00	2.49	0.87	4.73	1.64
3	0.68	0.79	2.89	3.56	4.18	2.42
4	2.79	4.62	2.50	8.53	2.04	4.10
5	1.82	0.00	0.67	1.22	2.72	1.29
6	6.83	2.12	9.67	9.88	9.00	7.50
7	1.25	1.58	3.19	2.93	3.17	2.42
8	1.33	1.58	2.91	2.67	3.68	2.43
9	9.75	7.39	9.14	6.64	9.56	8.50
10	2.79	4.62	2.50	3.96	0.00	2.77
11	0.00	0.00	2.57	1.55	2.02	1.23
12	9.73	7.39	9.66	9.15	9.50	9.09
13	6.71	7.39	3.39	0.20	1.14	3.77
14	0.00	0.00	2.54	1.55	2.97	1.41
15	2.14	0.00	3.05	3.05	2.11	2.07
Average	3.18	2.50	3.86	3.80	4.00	3.47

이 높게 산정되었기 때문이다. 동구 북부의 산골짜기와 계곡에서도 위험도가 높게 산정되었는데 이는 지형계수에 의한 영향으로 풍속이 높아 위험성이 높게 산정되었기 때문이다.

Fig. 2. Daegu's Map of Grid-Based Wind Disaster Risk

울산광역시의 풍해 위험도 평가 결과(Fig. 3), 울산 전 지역의 위험도 평균은 보통 등급으로 산정되었으며 이 중 중구의 위험도 평균이 ‘약간높음’ 등급으로 산정되어 위험한 지역으로 분석 되었다. 중구의 경우 다른 지역 보다 비교적 노출도가 높고 적응역량이 낮아 위험도가 높게 산정된 것으로 분석 되었다. 세부적으로 위험도가 높은 지역을 살펴보면 태화강을 따라 중구 남부, 울주군 중부 지역 인근과 울주군 서부 및 중부에 위치한 사연댐, 대암댐 인근, 특히 연안과 접해 있는 북구, 동구, 남구, 울주군의 남부지역에서 위험도가 ‘약간높음’ 등급으로 산정 되었다. 울산광역시의 경우 대부분 위험성이 높은 지역의 위험도가 높게 산정 되었으며 앞서 서술한 바와 같이 하천, 호수, 연안지역은 지표 거칠기가 낮아 지표고도분포계수의 영향으로 풍속이 높게 산정되어 위험성이 높게 산정 되었다.

경상북도의 풍해 위험도 평가 결과(Fig. 4), 경상북도 전 지역의 위험도 평균은 보통 등급으로 산정되었으며 이 중 울릉군, 울진군, 영덕군, 영양군, 경주시의 위험도 평균이 ‘약간높음’ 등급으로 산정되어 위험한 지역으로 분석 되었다. 울릉군과 울진군은 매우높은 풍속이 관측되는 지역으로 위험성이 높아 위험도가 높게 산정되었다. 영덕군, 영양군, 경주시는 일부 지역에서 위험성이 높게 산정 되었고 이와 함께 취약성이 높아 위험도가 높게 산정 되었다. 세부적으로 위험도가 높은 지역을 살펴보면 상주시 남부, 김천시 북부 지역의 경우 높은 위험성에 의해 위험도가 높게 산정 되었으며 영주시 중부는 적응역량이 낮아 위험도가 높게 산정 되었다. 그밖에 내륙에 위치한 일부지역은 하천 또는 호수 인근에 위치하여 높은 풍속에 의해 위험성이 높게 산정된 것으로 분석되었다.

Fig. 3. Ulsan's Map of Grid-Based Wind Disaster Risk

Fig. 4. Gyeongbuk's Map of Grid-Based Wind Disaster Risk

강원도의 풍해 위험도 평가 결과(Fig. 5), 강원도 전 지역의 위험도 평균은 ‘보통’ 등급으로 산정되었으며 이 중 서부지역은 ‘약간낮음’ 등급 이하, 중부지역은 ‘보통등급’, 동부지역은 ‘약간높음’ 등급 이상으로 산정되었다. 강원도의 시군 구간 노출도와 적응역량 차이는 크지 않으며 취약성 또한 강릉시, 삼척시를 제외하고 그 차이가 크지 않아 위험성의 크기가 위험도 크기에 가장 큰 영향을 미친 것으로 분석 되었다. 풍속 산정 모형을 적용하면 지표의 거칠기가 거의 없는 해안가나 산 정상에서 풍속이 높게 산정되기 때문에

강원도의 경우 Fig. 5와 같이 해안가 인근 지역에서 위험도가 높게 산정 되었다.

Fig. 5. Gangwon's Map of Grid-Based Wind Disaster Risk

3.2 풍해 위험도 평가 결과 상세분석

풍해 위험도 평가 결과 상세분석 대상지역으로 울진군을 선정하였다. 풍해 위험도는 울릉군이 가장 높으나 울릉군은 면적이 넓지 않아 지역별로 위해성, 노출도, 취약성, 적응역량 대리변수의 특성이 다양하지 않고 위해성이 풍해 위험도에 가장 큰 영향을 미쳐 풍해 위험도 평가 과정을 서술하는데 한계가 있다. 이에 따라, 풍해 위험도가 높으면서 위해성, 노출도, 취약성, 적응역량이 지역별로 다양하게 나타나는 울진군을 풍해 위험도 평가 결과 상세분석 대상지역으로 선정하였다. 울진군의 풍해 위험도 분석 결과, 위해성 대리변수 평균은 1.58(매우높음), 노출도 대리변수 평균은 -1.59(매우낮음), 취약성 대리변수 평균은 1.27(매우높음), 적응역량 대리변수 평균은 -0.99(낮음)로 산정되었으며 위험도 평균은 1.64(매우높음)로 산정되었다(Fig. 6). 울진군의 풍해 위험도가 높게 산정된 원인은 위해성, 취약성이 높게 산정되고 적응역량이 낮게 산정되었기 때문이다.

위해성(hazard)의 경우 평균 연최대 10분 평균풍속 세부대리변수 평균이 1.83(매우높음), 평균 연최대 순간풍속 세부대리변수 평균이 1.82(매우높음), 온실 설계기준 대비 풍속 세부대리변수 평균이 -1.04(낮음)로 나타나 울진군 전 지역에 대해서는 평균 연최대 10분 평균풍속, 연최대 순간풍속 세부대리변수가 위험도 증가에 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다(Fig. 7). 울진군의 풍속은 높으나 온실 설계를 위한

기준풍속도 높게 설정되어 온실설계기준 대비 풍속 세부대리변수 평균이 낮게 산정되었다. 울진군의 풍해 위험도[Fig. 8(a)], 평균 연최대 10분 평균풍속 세부대리변수[Fig. 8(b)], 평균 연최대 순간풍속 세부대리변수[Fig. 8(c)]는 거의 유사한 형태로 산정 되었다. 두 세부대리변수는 울진군 서부 지역과 남부 지역에서 '보통' 등급에서 '높음' 등급으로 산정되었으며 나머지 대부분의 지역에서 '매우높음' 등급으로 산정 되었다. 온실 설계기준대비 풍속 세부대리변수[Fig. 8(d)]는 대부분의 지역에서 '보통' 등급 미만으로 산정되었고 울진군과 동해바다가 접하는 해안가 인근 지역에서 '높음' 등급에서 '매우높음' 등급으로 산정 되었다. 풍해 위험도와 평균 연최대 10분 평균풍속 및 평균 연최대 순간풍속 세부대리변수와 매우 유사한 양상을 보여 두 세부대리변수가 풍해 위험도에 가장 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 6. Uljin's Grid-Based Risk and Indices for Wind Disaster

Fig. 7. Sub-indices of Hazard From Wind Disaster in Uljin

노출도(exposure)의 경우 Fig. 9와 같이 단위면적당 도로 면적 비율 세부대리변수 평균이 -1.24(높음), 단위면적당 철도면적 비율 세부대리변수 평균이 -0.19(보통), 단위면적당 주택 수 세부대리변수 평균이 -0.82(낮음), 인구밀도 세부대리변수 평균이 -0.89(낮음), 도로면적 대비 자동차등록대수 세부대리변수 평균이 -0.60(약간낮음), 단위면적당 농업 지역면적 비율 세부대리변수 평균이 -0.29(약간낮음)로 나타나 대부분의 세부대리변수가 울진군의 풍해 위험도 감소

(a) Grid-Based wind disaster risk

(b) Mean of annual maximum 10 minutes wind speed

(c) Mean of annual maximum instantaneous wind speed

(d) Design ratio of wind speed for greenhouse

Fig. 8. Risk and Sub-indices Map of Hazard for Wind Disaster in Uljin

에 영향을 미친 것으로 분석 되었다. 그러나 단위면적당 농업지역면적 비율 세부대리변수는 평해읍에서 ‘매우높음’ 등급까지 산정되어 위해성이 높음등급인 평해읍의 위험도를 ‘매우높음’ 등급으로 증가시키는 원인이 된 것으로 나타났다.

Fig. 9. Sub-indices of Exposure from Wind Disaster in Uljin

취약성(vulnerability)의 경우 단위면적당 도시면적 비율 세부대리변수 평균이 -1.49(매우낮음), 총인구 대비 재해취

약인구 비율 세부대리변수 평균이 2.50(매우높음), 최근 20년간 자연재해피해액 세부대리변수 평균이 -0.16(보통), 총 단독주택 수 대비 노후단독주택 수 비율 세부대리변수 평균이 1.43(매우높음)으로 나타나 총인구 대비 재해취약인구 비율, 총단독주택 수 대비 노후단독주택 수 비율 세부대리변수가 울진군의 위험도 증가에 가장 큰 영향을 미친 것으로 분석 되었다(Fig. 10). 단위면적당 도시면적 비율 세부대리변수와 최근 20년간 자연재해피해액 세부대리변수는 울진군 대부분의 지역에 대해 보통등급 이하로 산정되어 위험도를 감소시키는 것으로 분석 되었다. 반면, 총인구 대비 재해취약인구 비율 세부대리변수는 울진군 대부분의 지역에서 ‘매우높음’ 등급으로 산정되었으며, 북면, 죽변면, 울진읍 일부 지역에서 ‘보통’ 등급 이하로 산정 되어 위험도를 증가시키는 것으로 분석 되었다. 총단독주택 수 대비 노후단독주택 수 비율 세부대리변수는 총인구 대비 재해취약인구 비율 세부대리변수 보다 ‘매우위험’ 등급인 지역이 적지만 대부분의 지역에서 ‘약간높음’ 등급 이상으로 산정되어 위험도를 증가시키는 요인 중 하나인 것으로 분석 되었다.

Fig. 10. Sub-indices of Vulnerability from Wind Disaster in Ulsan

적응역량(adaptive capacity)의 경우 인구당 지역내총생산 세부대리변수 평균이 -0.10(보통), 재정자립도 세부대리변수 평균이 -0.83(낮음), 인구천명당 의료 및 구급 인력수 세부대리변수 평균이 -0.28(약간낮음), 인구천명당 건설장비수 세부대리변수 평균이 -0.70(약간낮음), 인구천명당 공무원수 세부대리변수 평균이 -0.04(보통)로 나타나 다섯 가지 세부대리변수 모두 울진군의 위험도 증가 및 감소에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 분석 되었으며 다섯 세부대리변수 중 재정자립도 세부대리변수가 울진군의 위험도 감소에 가장 큰 영향을 미친 것으로 나타났다(Fig. 11). 적응역량 세부대리변수들은 울진군내에 모든 지역이 동일한 수치로 산정 된다.

Fig. 11. Sub-indices of Adaptive Capacity from Wind Disaster in Ulsan

4. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)에서 정립한 기후변화 적응을 위한 위험도의 개념을 적용하여 풍해 위험도 평가 모형을 개발하고 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 강원도를 대상으로 위험도를 평가하였다. 본 연구를 통해 도출한 연구결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 풍해 위험도 평가를 위해 위해성, 노출도, 취약성, 적응역량 대리변수의 가중치와 각 대리변수의 세부대리변수 18개를 선정하고 계층화분석을 통해 가중치를 산정하였다. 대리변수의 비일관성 분석결과 0%~9.75%로 나타났으며 세부대리변수의 비일관성은 0%~9.88%

로 산정되어 모든 대리변수의 비일관성이 10%미만인 것으로 나타나 일관성이 있는 것으로 분석되었다. 가중치 산정 결과, 위해성 0.4706, 취약성 0.1929, 적응역량 0.1716, 노출도 0.1649 순으로 높게 산정되었다. 각 대리변수 중 가중치가 가장 높게 산정된 세부대리변수는 위해성의 경우 평균 연최대 순간풍속으로 0.2202, 노출도의 경우 단위면적당 농업지역면적 비율로 0.0527, 취약성의 경우 총단독주택 수 대비 노후단독주택 수 비율로 0.0527, 적응역량의 경우 인구천명당 의료 및 구급 인력수로 0.0437인 것으로 나타났다. 풍해에 의해 시설물, 농작물, 건축물 등에 직접적으로 영향을 미치는 세부대리변수와 직접적으로 풍해 피해 저감을 위한 세부대리변수의 가중치가 단위면적당 철도면적 비율, 재정자립도와 같은 간접적인 세부대리변수들의 가중치 보다 높게 산정되었다.

- (2) 풍해 위험도평가 결과, 시군구별 위험도 평균 등급이 ‘매우위험’인 지역은 울릉도, 속초시, 강릉시, 울진군, 양양군, 고성군, 삼척시로 전체 행정구역 중 13%, ‘위험’인 지역은 동해시로 1.9%, ‘약간위험’인 지역은 평창군, 영덕군, 영양군, 대구광역시 서구, 남구, 울산광역시 중구, 경주시, 정선군으로 14.8%인 것으로 나타났다. 이 지역들의 대리변수 평균 등급은 위해성 ‘매우높음’, 노출도 ‘낮음’, 취약성 ‘약간높음’, 적응역량 ‘보통’ 등급으로 위해성과 취약성이 위험도 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 이 지역들 중 대부분은 동해에 위치하여 동해바다와 인접하거나 지대가 높은 지역들로 위해성이 높은 지역들이다. 한편, 위험도가 ‘약간낮음’ 이하인 지역은 의성군, 군위군, 고령군, 성주군, 영천군, 홍천군, 태백군, 칠곡군, 철원군, 문경시, 양구군, 화천군, 횡성군, 구미시, 춘천시, 영월군, 원주시로 전체 행정구역의 31%인 것으로 나타났다. 이 지역들의 대리변수 평균 등급은 위해성 ‘약간낮음’, 노출도 ‘매우낮음’, 취약성 ‘약간높음’, 적응역량 ‘약간낮음’ 등급으로 위해성과 노출도가 위험도 감소에 큰 영향을 미치는 것으로 분석 되었다.
- (3) 인구밀도가 높은 도시지역인 대구광역시와 울산광역시의 경우 위해성 평균은 각각 ‘보통’, ‘약간높음’ 등급으로 전반적으로 높진 않았으나 금호강, 낙동강, 태화강, 동천, 인근 일부 지역은 지표의 거칠기가 거의 없어 지표고도분포계수의 영향으로 풍속이 높아 위해성이 높게 산정되었다. 또한, 이 지역들의 대부분은 도시화된 지역들로 인구, 주택 등이 밀집되어 노출도가 높게 나타나 대구광역시와 울산광역시의 평균 위험도 등급은 보통 등급임에도 불구하고 위험도가 ‘높음’ 등급 이상으로 나타났다. 대구광역시와 울산광역시의 위험도는 위해성, 노출도, 취약성 어느 한 대리변수에 종속적이지 않고 세 가지 대리변수가 모두 높은 일부지

역에서만 위험도 등급이 ‘약간높음’ 등급 이상으로 산정되는 것으로 분석 되었다.

- (4) 인구밀도가 높지 않은 지역인 경상북도와 강원도의 경우 위해성의 크기는 동해바다와 접한 지역에서 ‘보통’등급 이상으로 높게 산정 되었으나 내륙지역에서는 ‘보통등급’ 이하로 산정되어 지역별 편차(표준편차: 1.1)가 컸으며 노출도, 취약성, 적응역량은 지역별 편차(표준편차: 0.41~0.93)가 크지 않은 것으로 분석되었다. 이에 따라, 위해성이 높은 동해바다와 접한 지역의 위험도가 ‘약간위험’ 등급 이상으로 높게 산정되었고 상주시 남부, 김천시 북부 지역의 경우 추풍령 관측소에서 높은 풍속이 관측되어 위해성이 높고 노출도와 취약성 또한 다른 지역에 비해 비교적 높아 위험도가 높게 산정 되었으며 영주시 중부는 적응역량이 낮아 위험도가 높게 산정 되었다. 경상북도와 강원도 지역의 위험도는 대부분 위해성에 매우 종속적인 것으로 분석 되었으나 상주시, 김천시, 영주시와 같이 노출도, 취약성, 적응역량이 비교적 크거나 작은 지역은 이 대리변수들에 의해서도 위험도가 높게 산정되는 것으로 나타났다.

행정구역별 위험도 평가 결과는 기초지자체 차원의 방재 대책 수립에 활용하기에는 한계가 있기 때문에 격자기반의 위험도 평가 기법이 지속적으로 요구되어 왔다. 이에 따라, 본 연구에서는 행정구역이 아닌 보다 공간적으로 세분화된 격자기반으로 풍해 위험도를 평가하고 분석하는데 그 의의가 있다. 본 연구결과를 활용하여 풍해와 관련된 완벽한 방재대책을 수립하기에는 한계가 있으나 보다 위험도 높은 지역을 감지하고 어떠한 요인이 위험도를 높게 하는지에 대한 정보를 제공하여 방재대책 수립을 위한 의사결정 지원에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 격자단위의 풍해 위험도 평가를 수행하기 위해 위해성자료와 취약성 세부대리지표 중 하나인 표고 자료만을 격자자료로 사용하였다. 그러나 향후에는 격자기반의 총인구, 재해취약인구 자료 등의 노출도, 취약성, 적응역량 자료 또한 격자자료로 사용하여 보다 완성도 높은 격자기반의 위험도 평가가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

Benouar, D., and Mimi, A. (2001). Improving emergency

management in Algeria. *Global Alliance International Workshop on Disaster Reduction*, Reston, VA.

Cho, D.I. (2015). *Developing a multi-regional flooding risk index to a disaster management*. Master's thesis, Sungkyunkwan University.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2001). *Understanding your risks: Identifying hazards and estimating losses*. State and Local Mitigation Planning How-To Guide FEMA 386-2.

Green Technology Center (GTC). (2015). *Big data analysis of disaster caused by climate change*.

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.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Summary for policymakers. In: Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland.

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.

Korea Environment Institute (KEI). (2014). *Review on sewer flood risk assessment method considering climate change*.

Korea Institute of Environment (KEI). (2017). *Evidence-*

based climate change risk management framework for customized adaptation.

- Lee, C.H. (2000). *Group decision making theory*. Seoul: Sejong Books.
- 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.
- Lee, S.K., and Yoon, S.W. (2013). Risk evaluation of wind-induced damage in domestic building by IRVS. *Proceeding of 2013 Annual Spring Symposium*, Korean Association for Spatial Structures, pp. 79-80.
- Lung, T., Lavalle, C., Hiederer, R., Dosio, A., and Bouwer, L.M. (2013). A multi-hazard regional level impact assessment for Europe combining indicators of climatic and non-climatic change. *Global Environmental Change*, Vol. 23, No. 2, pp. 522-536.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2018). *2017 Annual disaster report*.
- 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. (2013). *Flood risk estimation on Gamcheon River basin Using MCDM*. Master's thesis, Kyungpook National University.
- Park, J.H. (2012). *A study on city risk assessment method considering the typhoon*. Master's thesis, University of Seoul.
- 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.
- Seoul Development Institute (SDI). (2006). *Development of the regional safety assessment model in Seoul: Focusing on flood*. SDI 2006-R-37.
- 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.
- Song, J.H. (2012). *Study on flood risk assessment in medium and small river watersheds for flood protection alternatives*. Master's thesis, Yeungnam University.
- Toufique, K.A., and Islam, A. (2014). Assessing risks from climate variability and change for disaster-prone zone in Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 10, pp. 236-249.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2013). *Global assessment report on disaster risk reduction*.
- 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	December 13, 2018
Revised	December 14, 2018
Accepted	December 31, 2018