기후변화를 고려한 폭설 리스크 평가: 교통시설 및 건축물 피해를 중심으로

Risk Assessment of Heavy Snowfall Considering Climate Change: Focusing on Damage to Roads and Buildings

이상혁* · 강정은**

Lee, Sang-hyeok*, and Kang, Jung Eun**

Abstract

As the amount of snowfall and clouds is increasing due to climate change, the severity of resulting damages is also increasing. According to the climate change scenario, the frequency and intensity of snowfall are expected to increase, for which proper adaptation efforts are needed. In Korea, although studies have focused on the high temperature phenomenon and wind/flood disasters, little research using various approaches has been conducted on heavy snowfall. Therefore, this study examines both the present and future heavy snowfall risks as well as high-risk areas in terms of damages to roads and buildings. The current heavy snowfall risk is assessed based on previously reported data using the Bayesian inference, whereas future risk is assessed using the snow cover data calculated for climate change scenarios. Current risks are high in some areas located near the coasts of Gangwon-do, Jeollanam-do, and Chungcheongnam-do. In the future, heavy snowfall risk will expand over time to the southern and inland regions of the Korean peninsula.

Key words : Heavy Snowfall, Risk Assessment, Climate Change Scenario

요 지

최근 기후변화로 인해 구름과 눈의 양이 증가하고, 이에 따라 폭설의 강도가 늘면서 피해도 증가하고 있다. 기후변화 시나리오에 따르면 적설 빈도와 강도는 증가할 것으로 전망하고 있어 적절한 적응 노력이 필요하다. 국내에서는 기온상승에 따른 고온 현상과 풍수해에 대한 심도 깊은 연구가 진행된 반면, 폭설에 대한 연구는 부족한 실정으로 정량적 평가를 포함한 다양한 연구가 필요하다. 이에 본 연구는 현재와 미래의 폭설 리스크를 교통시설과 건축물 피해 측면에서 평가해보고, 폭설로 인한 피해가 우려되는 위험지역을 도출하고자 한다. 현재의 폭설 리스크는 과거정보를 기반으로 베이지안 확률통계기법을 활용했으며, 미래 폭설 리스크 평가를 위해서 기후변화 시나리오에서 도출된 적설량 자료를 활용하였다. 현재는 강원도, 충청남도 및 전라도의 연안지역에서 높은 폭설 리스크를 보였으며, 기후변화 시나리오를 고려하면 단기미래(2030년)에서 장기미래(2080년)로 갈수록 한반도 남부와 내륙지역으로 리스크가 확장되어 위험지역이 증가되는 것을 확인 할 수 있었다.

핵심용어 : 폭설, 리스크 평가, 기후변화 시나리오

1. 서 론

기후변화는 전세계적으로 사회, 경제, 환경 전반에 영향을 미치는 중요한 화두가 되었다. 매년 세계의 주요 이슈를

논의하는 다보스 세계경제포럼(World Economic Forum)은 극한 기상 현상, 기후변화 대응(저감 및 적응) 실패, 주요 자연재해 등을 환경 분야 최상위 리스크로 발표하였다(WEF, 2017). 극한기상, 자연재해는 기후변화의 심화와 함께 그

*정회원, 부산대학교 도시공학과 박사과정(E-mail: ubscott@pusan.ac.kr)

Member, Ph.D Candidate, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

**교신저자, 정회원, 부산대학교 도시공학과 부교수(Tel: +82-51-510-2451, Fax: +82-51-513-9108, E-mail: jekang@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

빈도와 강도가 증가한다. 지금까지 기후변화로 발생하는 다양한 극한기상 현상들 가운데, 폭염, 열대야 등 고온과 관련된 현상과 집중 강우, 태풍, 홍수 등 풍수해에 대해서는 다양한 분야의 연구들이 수행되어 오고 있다(Yoo and Kim, 2008; Lee and Kang, 2012; Kim et al., 2013; Lee, 2014; Park, Jeong et al., 2014; Koo, Kim et al., 2015; Kim and Sung, 2016; Lee et al., 2016). 그러나 우리나라의 겨울철에 그 강도가 강해지고 있는 폭설 및 한파에 대한 연구는 아직 다양한 접근이 부족한 실정이다.

폭설은 짧은 시간에 많은 양의 눈이 오는 자연현상으로 일반적으로 육지와 바다의 온도차가 큰 지역이나 산지가 높아 구름의 상승이 잘 일어나는 지역, 기단이 따뜻한 바다위에서 변질이 일어나는 지역 등에서 자주 발생한다(Kim et al., 2012). 국내에서는 폭설과 관련하여 강도와 지속정도를 기준으로 대설주의보와 대설경보로 구분하여 특보를 발령하고 있다. 대설주의보는 24시간 신적설이 5 cm 이상 예상될 때를 발령하며, 대설경보는 24시간 신적설이 20 cm 이상 예상되거나, 산지는 24시간 신적설이 30 cm 이상 예상될 때 발령된다(Han, 2011).

다른 극한 기상 현상처럼 과거에는 경험하지 못한 폭설로 인한 다양한 피해들이 세계 곳곳에서 발생하고 있다. 2014년 미국 북동부(뉴욕, 보스턴, 시카고, 워싱턴 DC 등)의 폭설, 2013년 중국 동북부의 헤이룽장성, 지린성 등에서도 폭설이 발생하였다(Oh et al., 2015; Han, 2014). 이러한 현상은 국내에서도 마찬가지이다. 대표적인 예로 2014년 2월 경주에서는 예상치 못한 적설(50 cm)이 발생하였고, 또한 수분을 머금은 습설(젖은 눈)로 무게가 가중되었다. 이로 인해 20~30 cm(1 m² 당 약 50 kg 적설하중)의 적설기준으로 설계된 건축물인 마우나리조트 강당의 지붕이 붕괴되는 사고가 발생하였다(Sudokwon News, 2014; KSilbo News, 2014). 이 사고로 10명이 사망하고 105명의 부상자가 발생하여 폭설에 대한 위험을 환기시키는 기회가 되었다. 또한 2016년 1월에는 기록적인 폭설로 제주공항이 이틀 동안 폐쇄되고, 비닐하우스 등 시설물에 185억 원 이상의 피해가 발생한 바 있다(MPSS, 2014; MOIS, 2016). 기상청은 당시의 상황에 대해 북극지역의 온도가 높아지면서 북극의 찬 공기를 감싸고 있던 polar vortex가 약화되어 차가운 저기압이 우리나라가 있는 중위도 지역까지 내려왔기 때문이라고 설명했다.

기상청의 연간 보고서인 이상기후 보고서(2018)에 따르면 2018년 겨울철 적설일은 최근 5년 평균 적설일수의 82.2%에 해당하며, 1981년 이후 감소하는 추세를 보였다. 그러나 대설 특보 횟수의 경우 최근 5년(2013~2017년)간 발생횟수는 최근 10년(2008~2017년) 대비 104.4% 수준으로 증가하는 추세에 있어, 적설일의 빈도는 줄어들었으나 강도가 증가한 것으로 나타났다(OPC and KMA, 2018).

이러한 폭설의 증가는 기후변화와도 밀접한 관계가 있다. 기후변화의 영향으로 상승한 기온은 극지방의 빙하가 녹으

면서 다량의 구름이 발생하고 북반구 지역의 적설량이 증가시킨다. 증가한 적설량과 구름으로 인해 지표의 온도가 변하고 찬 공기가 남하하게 되면서, 우리나라를 포함한 고위도 북반구의 폭설 발생빈도가 높아지게 된다(OPC and KMA, 2010; Ahn et al., 2015). IPCC 5차 평가 보고서(IPCC, 2014)는 전 지구적으로 온실가스 감축과 기후변화 적응 노력을 기울이지 않는다면 이전에 예측했던 것보다 기후변화가 더욱더 빠른 속도로 진행될 것으로 예측하고 있다. 폭설, 한파와 같은 극한 기상현상들의 강도도 급격하게 증가할 것으로 예상되는 가운데, 적절한 적응 노력이 요구되므로 다양한 방법과 시각에서 연구가 필요하다.

폭설은 인명과 재산에 대한 직접적인 피해와 함께 교통마비, 사회기반시설 단절로 인한 소득 감소, 실업, 시장 수급 등의 불안전성을 포함한 간접적인 사회·경제적 피해까지 다양한 영향을 준다(Jeong and Lee, 2014). 직접적인 재산 피해는 주로 교통시설 등과 같은 사회기반시설, 농작물, 주택 등에 대한 피해를 의미하여, 2003년~2012년 동안 우리나라의 자연재해 피해액 중 눈과 관련된 피해는 연평균 1,700억 원으로 전체 자연재해 피해액의 약 12%에 해당된다(MOIS, 2017). 우리나라의 자연재해 가운데 홍수에 이어 두 번째로 규모가 큰 피해다. 특히, 충청남·북도와 전라남·북도의 폭설피해가 전국피해의 약 81%를 차지하고 있어 지역적으로도 차이가 큼을 확인할 수 있었다(Han, 2014). 폭설로 인한 피해 가운데 도로 등 기반시설과 주택, 건물, 비닐하우스 등에 많은 적설량으로 인한 적설하중의 영향으로 인한 시설물 피해가 가장 크게 나타나고 있다.

따라서 폭설로 인한 피해를 줄이기 위한 적절한 대책이 마련될 필요가 있다. 폭설에 대한 대응책 마련을 위한 전체 조건으로 폭설 리스크가 어떠한지, 어떤 지역이 취약한지 파악할 수 있어야 한다. 이러한 리스크의 정도, 위험지역에 대한 정보는 지역맞춤의 효율성이 높은 정책마련과 대책별 우선순위 결정에 중요한 근거가 될 수 있다. 또한 기존의 연구들이 과거 데이터에 근거한, 지표기반의 평가(Yoo and Kim, 2008; Won et al., 2013; Lee, 2014; Koo, Lee et al., 2015; Lee et al., 2015)였다면 앞으로는 미래의 전망을 포함한 보다 정밀하고, 정량적인 리스크 평가가 수행될 필요가 있다.

이에 본 연구는 현재와 미래의 폭설 리스크를 교통시설과 건축물 피해 측면에서 평가해보고, 폭설로 인한 피해가 우려되는 위험지역을 도출하고자 한다. 미래 폭설 리스크 평가를 위해서 기후변화 시나리오에서 도출된 적설량 자료를 활용하였다. 폭설과 관련한 다양한 대책이 시군구의 기초지자체 단위로 마련됨을 고려하여 분석단위는 시군구 단위이며 전국을 대상으로 분석이 수행되었다.

2. 폭설 관련 취약성 및 리스크 평가 선행연구

폭설과 관련된 선행연구는 자연재해와 기상·기후 분야

에서 주로 이루어져왔다. 자연재해 분야에서는 주로 폭설 재해와 연관된 피해 현황 파악(Jung and Lee, 2014) 및 대응 방안(Won et al., 2014; Kwon et al., 2016; Oh et al., 2017)에 대한 연구들이 주로 수행되고 있다. 최근에는 피해 저감을 위한 시설별 대책에 관한 연구(Won et al., 2013; Ahn et al., 2015)와 대설 피해 정보 발령을 위한 적설심 기준 마련 연구(Oh et al., 2017)가 수행되기도 했다.

폭설 및 강설 자체에 대해 초점을 맞춘 연구는 주로 기상·기후 분야를 중심으로 수행되고 있다. 과거 데이터를 기반으로 우리나라의 적설량의 변화를 분석(Kim et al., 2012)하거나 기후변화와 연계한 폭설의 경향에 대한 연구(Ahn et al., 2015; Hwang et al., 2016)가 최근 발표되어 기후변화 시나리오별 폭설 증가경향이 구체적으로 예측되기도 했다.

폭설로 인해 다양한 인명 및 재산 피해가 나타나고, 피해정도도 증가하면서 폭설 취약지역 또는 위험지역 평가 연구도 증가되고 있는 추세이다. Koo, Lee et al. (2015)은 부산시를 대상으로 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 활용한 중첩분석을 활용하여 취약지역 분석을 수행했다. 이 연구는 지형적 특성(경사도, 향, 표고), 사회적 특성(인구밀도, 유인시설), 적응요인(제설함 개수, 공무원 수)을 주요 지표로 연구를 수행하였으나 기상요인인 적설 자체를 고려하지 못한 한계점이 존재했다. Park et al. (2014)는 울산광역시를 대상으로 설해 위험지수 산정 연구를 수행하면서 Pressure, State, Response (PSR) 프레임워크를 기반으로 지표를 산정하였다. 이 연구에서는 상태(State) 요소로 다양한 적설량(일최심신적설량, 연평균 일최심적설량, 연최대 일최심적설량, 5 cm 이상 적설일수) 요인을 고려하였다.

Oh et al. (2015)은 폭설의 위험요소 평가기준을 선정하고, 전문가 설문조사 등을 통해 평가기준의 중요도를 선정한 후, 다기준 의사결정 기법 중 하나인 PROMETHEE를 활용하여 폭설 위험도를 평가했다. 이 연구에서는 위험평가기준은 위험성, 취약성, 대응·복구성으로 구분하여 위험성에는 기상위험(연최대 최심신적설량의 평균, 신적설량 5 cm 이상 연간일수의 증가율, 확률적설량)과 재난위험(폭설피해 연간횟수)으로 평가기준을 선정하고 취약성은 인문사회(인구밀도, 재해취약인구밀도, 사업체밀도, 자동차등록대수밀도)와 사회기반시설(시가화면적률, 도로연장밀도, 취약건물밀도)로 구분하여 각각의 평가기준을 포함하였다. 대응·복구성은 의료시설밀도와 재정자립도로 평가기준 지표를 선정하여 강원도 18개 시·군을 대상으로 평가하였다.

기존의 취약지역 및 위험지역 평가 연구들은 주로 지표법을 기반으로 지표에 대한 데이터를 수집하여 평가하는 방식을 주로 활용하였다. 연구별로 차이가 있지만 지표 또는 평가기준은 대체로 기상과 관련된 위험요소, 피해에 영향을 주는 취약성 요소, 대응 및 적응역량과 관련된 요소를 고려하고 있다. 지표법은 지표 및 가중치의 선택, 통합 방법 등에 따라 결과가 달라질 수 있으며, 전문가 의견을 기반으로

가중치를 활용할 경우, 전문가들의 주관적 의견에 결과가 좌우될 수 있다는 약점이 존재한다(Lee and Kang, 2012; Lee et al., 2015).

이러한 지표 중심의 평가 방법이 가지는 약점을 보완하기 위해 홍수 등과 같은 다른 자연재해에서는 다양한 정량적인 평가가 이루어지고 있으나 폭설에 대해서는 이러한 시도가 거의 이루어지지 못했다. 이에 본 연구는 다양한 자연재난에 적용 가능한 방법론으로 확률통계 기반의 리스크 평가에 주목하였다. 특히, 베이지 이론 기반의 베이지안 확률통계 모형은 재해에 관계없이 적용 가능할 뿐 아니라 과거 경험 데이터를 기반으로 미래를 예측할 수 있으므로 기후변화와 같은 불확실성이 높은 사상에 대한 예측에 활용 가치가 높다(Oh, 2012; Shin et al., 2012). 또한 지표법과 달리 모형에 대한 적합성과 신뢰성 검증이 가능한 장점이 존재한다. 최근 기후변화와 연계하여 홍수(Lee and Kang, 2012; Kim et al., 2013; Kim and Sung, 2016; Lee et al., 2016)와 해수면 상승(Park, Lee et al., 2014; Nam, 2014)에 대해 확률통계 모형이 적용된 바 있다. 국외의 기후변화 취약성 및 리스크 평가인 Applied multi Risk Mapping of Natural Hazard for Impact Assessment (ARMONIA, 2007)나 Climate Change and Urban Vulnerability in Africa (CLUVA, 2012)도 베이지안을 기반으로 마르코프체인몬테카를로(MCMC) 시뮬레이션을 기반으로 기후변화 리스크를 평가하였다.

기후변화와 자연재해를 연구하는 학자들은 취약성과 리스크에 대한 다양한 연구를 수행해왔으나 취약성과 리스크 평가는 개념적으로 차이가 존재한다. IPCC 5차 평가보고서(IPCC, 2014)와 특별보고서(IPCC, 2018)에서는 기후변화 리스크를 기후변화로 생기는 위험요인(hazard), 이에 대한 해당 조직이나 시스템의 노출(exposure) 정도, 취약성(vulnerability)의 결과물로 정의하고, 취약성을 한 구성요소로 포함한 리스크 평가를 강조하고 있다(Park, Song et al., 2014).

본 연구는 이러한 최근 추세에 맞추어 IPCC 5차 평가보고서의 리스크의 개념에 준하여 리스크 평가를 수행하고자 한다. 폭설을 위험요인(hazard)으로 고려하고 이러한 폭설 위험요인에 노출(exposure)된 교통시설과 건축물의 취약성(vulnerability)에 따라 피해의 정도가 결정됨을 고려하여 리스크 평가를 수행하였다.

3. 연구방법

3.1 연구 범위 및 리스크 평가 방법론

본 연구의 공간적 범위는 전국이며, 시군구 단위로 분석이 수행되었다. 분석단위의 결정은 다양한 요소에 의해 영향을 받을 수 있으나 본 연구는 현재 국내의 재해관련 데이터가 시군구를 단위로 수집되고, 연구결과가 활용될 수 있는 정책 수립 주체도 지자체인 경우가 많아 시군구를 분석단위로 결정하였다.

리스크 평가는 베이지안 확률통계 모형을 기반으로 수행되었다. 베이지안 추정은 미지의 모수를 확률변수로 가정하고, 관찰된 자료를 바탕으로 사후분포를 추론함으로써 분포의 무수히 많은 표본을 추출하고 실험하는 과정을 뜻한다. 관심을 가지는 모수의 과거 자료가 구축되거나 주어진 경우에 관측값(폭설피해)이 나타날 조건부 확률을 계산하고, 사전분포와 조건부 확률을 베이지 정리(Bayes Theorem)를 통해 사후분포를 구하고 추정에 활용하게 된다(Kim, 2013).

베이지 정리는 두 확률변수 사이의 관계를 나타내며 (Eq. 1)과 같이 정리가 가능하다. A를 새로운 사건, 이후의 사건을 B라고 할 때 확률 A인 P(A)는 사전확률(Prior prob.), P(A|B)를 사후확률(Post prob.)이라고 하며, P(B|A)를 우도라고 한다(Eq. 1). 사후확률을 직접적으로 도출하기 힘든 상황일 경우 우도와 사전확률을 이용해 도출이 가능하다. 본 연구에서는 사후분포 추정에 있어 복잡한 확률분포를 반영하며, 난수생성 및 학습에 효과적인 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 시뮬레이션을 활용하였다.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(A) \cdot P(B|A) + P(\bar{A}) \cdot P(B|\bar{A})} \quad (1)$$

본 연구에서는 폭설로 인한 피해 대상을 도로시설과 건축물로 구분하여 평가를 수행하였다. 이들의 피해규모에 영향을 미치는 요인으로는 기상조건(5 cm 이상 눈이 온 날수, 일 최대적설량)과 해당지역의 지형적 특성(경사도, 고도), 도로시설과 건축물의 취약여건으로 정하고, 1986년부터 2014년까지의 과거 데이터를 구축하였다. 과거 자료를 기반

으로 베이지안 추정을 통해 변수별 가중치가 산정되었고 이들을 고려하여 평가모형이 구축되고 현재 폭설 리스크가 도출되었다. 샘플링된 자료(15,000개/burn-in Observation: 5,000)를 바탕으로 사후예측 P(Posterior predictive P-value, 0.5에 가까울수록 적합)를 통해 모형적합성을 검증하였다. 구축된 모형을 기반으로 기후변화를 고려하기 위해 미래 기후시나리오인 RCP4.5/8.5에서 도출된 미래 적설량을 반영하여 단기미래(2030년대), 중기미래(2050년대), 장기미래(2080년대)로 구분하여 미래 폭설 리스크를 추정하였다.

3.2 폭설 리스크 평가 변수 및 자료

앞서 언급했듯이 폭설 리스크 평가에 포함된 변수는 Tables 1, 2와 같다.

폭설 리스크로 고려된 도로시설 피해와 건축물 피해에 영향을 미치는 변수는 크게 위험요인과 취약성으로 구분할 수 있다. 폭설 위험요인은 두 리스크 모두 적설과 관련된 변수들로 적설 변수는 신적설 평균, 최고, 누적, 신적설 5 cm, 20 cm, 50 cm 이상일수의 형태로 구축될 수 있으며, 이 가운데 도로와 건축물 피해를 설명하는 데 유의성을 나타낸 신적설 5cm 이상일수와 최고적설량이 모형에 반영되었다. 적설지표의 유의성은 출현정보와 비출현 정보가 정확히 구분된 것인지 판단하는 값인 Area Under the Curve (AUC, 1에 가까울수록 설명력이 높음)를 통해 검증하였으며, 신적설 5 cm 이상일수와 최고 적설량은 각각 0.696 (p-value: 0.001*), 0.660 (p-value: 0.001*)의 설명력을 보였다.

도로시설 피해에 영향을 미치는 취약성 요인으로는 해당 지역의 지형적 특성인 경사와 고도가 포함되었고, 도로망

Table 1. Variables of Road Damage Risk Assessment

Classification		Variables	Period
Risk	Damage	Damage to transportation networks	2006-2014
Hazard	Meteorological factors	Days of snow cover over 5cm	2006-2014
		The highest snowfall (cm)	
Vulnerability	topography/geography	Slope	2015
		Elevation	
	Vulnerable Infrastructure	Area of roads	2012

Table 2. Variables of Building Damage Risk Assessment

Classification		Variables	Period
Risk	Damage	Damage to building	1986-2014
Hazard	Meteorological Information	Days of snow cover over 5cm	1986-2014
		The highest snowfall (cm)	
Vulnerability	topography/geography	Slope	2015
		Elevation	
	Vulnerable Structures	Space of old buildings (more than 30yr)	1986-2014

자체의 특성인 도로면적이 포함되었다. 건축물 피해에 영향을 미치는 취약성 요소로 해당지역의 지형적 특성인 경사와 고도가, 건축물 자체의 취약성으로 30년 이상 노후건축물 건축면적이 고려되었다. 데이터는 수집가능성을 고려해 폭설로 인한 도로시설 피해 리스크는 2006-2014년 자료를, 건축물 피해 리스크는 1986-2014년 기간의 자료를 활용하여 분석되었다.

본 연구는 기후변화를 고려하여 미래의 폭설 리스크가 어떻게 변화하는지 분석하는 것을 주요 내용으로 포함하므로 미래 폭설에 대한 전망데이터가 필요하다. 현재 기상청에서 제공하고 있는 Representative Concentration Pathway (RCP) 시나리오는 적설에 대한 값이 별도로 존재하지 않아 본 연구는 선행연구(MOIS, 2017)에서 강수량을 기반으로 강설 값을 추출한 자료를 활용하였다. 이 연구에서는 3시간 강수, 지상 평균 기온자료를 활용해 snow ratio를 산정하고 강수량을 곱해 3시간 적설량을 산출하였다. RCP 시나리오 가운데 현재 추세로 온실가스 저감 노력 없이 그대로 온실가스가 배출되는 것을 가정한 RCP8.5 (CO₂ 농도 940 ppm)와 적극적인 온실가스 저감 노력으로 온실가스가 상당히 저감된 시나리오인 RCP4.5 (CO₂ 농도 540 ppm)의 두 가지 시나리오를 활용하여 미래의 변화를 살펴보았다.

Figs. 1과 2는 RCP 시나리오별 최대 적설량과 신적설 5 cm 이상일수를 단기(2030s), 중기(2050s), 장기(2080s)로 나타내었다. 각각의 시나리오별 지역적 차이를 보였다. 최대 적설량의 RCP4.5 시나리오에서는 단기에 한반도 남부일부에서 높은 적설량을 보였으며, 중기에 한반도 남부와 내륙, 강원지역에서 증가하는 추세를 보였다. 반면 장기에서는 중기에 비해 최대 적설량이 감소하는 것으로 나타났다. RCP8.5에서는 단기에서 중기로 갈수록 동해를 접한 일부지역을 제외한 내륙과 한반도 전반에서 최대적설량이 감소했으나, 장기로 가면서 남부와 내륙지역에서 최대 적설량이 급격하게 증가하였다.

신적설 5 cm 이상일수의 RCP4.5 시나리오에서는 단기에 제주와 강원지역에서 높은 빈도를 보였으며, 중기에는 강원 지역, 영남권, 호남권 전반에서 신적설 5 cm 이상일수가 증가하였다. 그러나 장기에는 중기보다는 적설일수가 상대적으로 줄어드는 것으로 나타났다. RCP8.5의 단기에서는 전라도와 제주에서 높은 빈도를 보였으며, 중기는 단기보다 신적설 5 cm 이상일수가 줄어들었다. 그러나 장기로 가면서 단기·중기와 비교해 높은 빈도수를 보이는 지역이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 1. Future Highest Snowfall Depth

Fig. 2. Future Number of Snow Days Over 5 cm

4. 연구결과

4.1 폭설 피해 현황 및 적설 특성 분석

폭설로 인한 리스크 평가에 앞서, 구축된 기상요소(적설 DB) 및 피해 DB를 지리정보시스템을 통해 공간정보화하여 피해 현황과 적설 특성을 살펴보았다. 1986-2014년 기간 동안 대설로 인한 인명피해는 16명이며 대설로 인한 이재민 수는 33,163명에 달한다. 같은 기간 동안 경제적 피해액은 약 1조4천6백억 원에 달한다. 폭설로 인한 피해를 시간대별로 살펴보면, 1989년에 충청도에서 주로 피해가 발생했고 1990년에는 서울과 인천, 제주를 제외한 전국에서 피해가 발생하였다. 이후 92년과 93년에는 경기도에서, 96년도에는 강원도와 경북에서 피해가 발생하였으며, 2000년대 들어 피해발생의 빈도와 규모가 크게 증가하였다.

특히, 2004년, 2005년에 피해가 크게 나타나 2004년에는 약 6,739억 원의 재산피해가, 2005년에는 약 5,499억 원의 피해가 발생했다. 2004년에는 충청남도과 충청북도 지역에서 피해가 크게 나타났으며, 2005년에는 전라도 지역에서 높은 피해액을 보였다. 이 시기의 피해가 1986-2014년 동안의 전체 피해규모에 가장 크게 영향을 미쳤으며, 전체적으로 높은 피해를 나타낸 지역은 충청남·북도와 전라남·북도, 대전 일부지역과 강원도 강릉시, 광주 광산구, 경북 문경시

순으로 나타났다. 이후 2010년(약 663억 원), 2011년(약 479억 원), 2012년(약 195억 원), 2013년(약 113억 원), 2014년(약 324억 원), 2015년(약 130억 원)에도 지속적으로 피해가 발생하고 있다.

적설빈도와 적설량의 특성은 다음과 같다. 적설의 빈도를 확인하기 위해 적설량 5 cm 이상 일수, 20 cm 이상 일수를 살펴보면 강원도의 동해안 인접 지역과 전라도 해안지역 및 충청도의 해안지역에서 적설의 빈도가 높게 나타났다. 내륙에서는 강원도 및 경기, 충북 순으로 적설빈도가 높았다. 경남권에서는 1986년부터 2014년까지 5 cm 이상일수가 울릉도를 제외하고는 0~7로 눈이 내리는 빈도가 상대적으로 낮게 나타났으며, 적설 빈도는 시간이 흐름에 따른 뚜렷한 증감 경향을 보이지 않았다.

극값을 나타내는 최대 적설량은 1986년에는 강릉 및 평창 등 강원도 지역, 전라도 일부와 거창, 함양 등 내륙지역에서도 많은 양의 눈이 내렸다. 이후 1990년대에는 내륙에 최대 적설량이 20 cm 이상인 경우가 3회, 2000년대 이후는 6회 발생했으며, 2003년에는 경남과 경북 전체에서, 2004년에는 문경, 영주, 예천 등 경북과, 청주, 청원 등 충북에서, 2005년에는 부산과 경북해안, 전라남도에서 최대적설량이 높게 나타났다. 2010년에는 경기도 내륙지역, 2012년에는 경남과 전남의 해안지역에서 상대적으로 많은 눈이 내렸다.

정리하면 빈도는 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이지는 않으나, 최대적설량은 내륙지역에서 과거보다 상대적으로 증가한 것을 확인 할 수 있었다. 이는 눈이 내리는 빈도는 크게 증가하지 않았지만, 한 번에 내리는 눈의 양이 증가하고 있음을 나타낸다. 폭설로 인한 피해도 빈도수가 높은 지역보다, 자주 눈이 오지 않는 지역에서 일정 수준이상의 폭설이 나타났을 때 큰 피해를 발생시켰다. 이는 폭설에 대한 경험이 많은 지역보다 적은 지역의 대응능력 부족으로 인한 결과로 판단된다.

4.2 폭설로 인한 교통시설 피해 리스크 평가

교통시설 피해 리스크 모형을 구축하기 위해 각각의 변수에 대한 가중치를 우선 산정하였으며 가중치 결과는 Table 3과 같다. 가중치 산정을 위하여 난수 생성은 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 난수생성(15,000개/burn-in Observation: 5,000) 및 추정은 10회를 진행하고 결과에 대한 평균값을 가중치로 활용하였다. 각 지표의 가중치를 반영한 모형은 (Eq. 2)와 같이 나타났으며, 2014년 자료를 입력해 현재 리스크를 도출하였다.

$$y_i = 0.043924 * x_{i1} + 0.015154 * x_{i2} + 0.001772 * x_{i3} + 0.003926 * x_{i4} - 0.01335 * x_{i5} + e \quad (2)$$

y_i : Damage of transportation
 x_1 : Days of snow cover over 5cm
 x_2 : The highest snowfall(cm)
 x_3 : Area of roads
 x_4 : Slope
 x_5 : Elevation
 e : Constant(-0.00158)

모형에 반영된 변수들 가운데 신적설 5cm 이상일수가 교통시설 피해에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그 외 신적설 최대량, 도로면적, 경사 변수는 폭설피해에 양(+)의 영향을 미쳤으며, 고도는 음의 관계를 나타냈다. 따라서 미래 위험의 결과는 적설에 대한 강도와 빈도에 따라 리스크 수준의 변화를 보였다. 평가모형의 적절성을 나타내는 사후예측P (Posterior predictive P-value)는 0.5로 적합성이 높게 나타났다.

변수별 가중치를 반영하여 구축된 현재 시점의 교통시설 피해 리스크 결과는 Natural breaks로 7개의 등급으로 나누어 Fig 3으로 표출하였다. 강원도의 고성군과 양양군, 강릉시와 당진, 태안, 서산 등 충북과 충남 일부지역, 전라남도 신안, 영암군에서 가장 높은 리스크를 보였다.

Fig. 3. Current Risk of Road Damage

Table 3. Weights of Road Damage Risk Variables

Var.	1	2	3	4	5	6
over5	0.043824	0.043875	0.043849	0.043951	0.044054	0.043972
sn_max	0.015237	0.015172	0.015201	0.015145	0.015077	0.015152
Road	0.001808	0.001782	0.001753	0.001786	0.001715	0.001776
Slope	0.003928	0.003887	0.003936	0.00395	0.003974	0.003889
Elevation	-0.01334	-0.01329	-0.01342	-0.01335	-0.01339	-0.01331
Intercepts.	-0.0016	-0.00157	-0.00158	-0.00161	-0.0016	-0.00158
Var.	7	8	9	10	Average	Std.
over5	0.043879	0.044001	0.04396	0.043879	0.043924	0.007209
sn_max	0.015175	0.015113	0.015112	0.01516	0.015154	0.005308
Road	0.001712	0.001757	0.001766	0.001867	0.001772	0.004166
Slope	0.00393	0.003897	0.003923	0.003943	0.003926	0.002892
Elevation	-0.01335	-0.01337	-0.01336	-0.01338	-0.01335	0.004077
Intercepts.	-0.00158	-0.00157	-0.00158	-0.00159	-0.00158	0.001053
over 5: Days of snow cover over 5cm , sn_max: Amount of the maximum snowfall, Road: Area of road

Fig. 4. Future Road Damage Risk Caused by Heavy Snowfalls

미래 폭설로 인한 교통시설 피해 리스크를 평가하기 위해 물리적 취약성(고도, 경사도)과 교통시설(도로면적)은 2014년 기준 현재 값을 그대로 사용하였으며, 미래 기후변화 시나리오에서 도출된 신적설량을 반영하여 2030, 2050, 2080년의 리스크를 분석했으며, 결과는 Fig. 4와 같다.

미래 리스크(RCP4.5와 8.5)는 현재 리스크와 대비하여 증가 경향이 확연하게 나타났으며, 공간적으로 한반도 남부(전라남도, 경상남도)에서 확장되는 것을 볼 수 있다. RCP4.5의 경우 강원도 양양군, 강릉시, 고성군에서는 지속적으로 높은 리스크를 보이고 있으며, 추가적으로 평창과 정선이 높은 리스크를 보였다. 중기(2050s)에는 무주, 진안군, 보성, 순천 곡성 등 전라도와 진주, 하동, 남해, 경주에서 높은 리스크가 나타났으며, 장기(2080s)에는 리스크가 감소하는 추세를 보였다.

RCP8.5의 경우, 단기(2030s)에는 강원도의 평창과 정선군에서 높은 리스크를 나타내고 있었으며, 무주, 진안, 장수군

을 포함한, 나주, 화순, 곡성 등 전라도에서 높은 리스크를 보였다.

중기(2050s)는 단기보다 높은 리스크 등급을 보이는 지역이 감소하였다가, 장기(2080s)에 경상남도와 전라도 충청남도를 포함해 크게 확장하는 것으로 나타났다. RCP8.5는 RCP4.5와 달리 중기에서 장기로 시간이 흐를수록 리스크가 계속해서 증가하는 추세를 보이고 있다. 전반적으로 교통시설 리스크는 장기로 갈수록 한반도 남쪽으로 리스크가 확장되어 나타나며, 이는 기후변화가 심화되면서 폭설과 같은 극한기상도 남부지역을 포함한 국내 전역에 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 우리나라 남부지역은 폭설의 영향이 많지 않았던 지역이므로 폭설이 발생하는 경우, 폭설의 발생이 빈번해 대비가 잘 된 다른 지역에 비해 대응능력의 부족하다. Figs. 1, 2에서 나타났듯이 남부지역에서는 기후변화 시나리오에 따른 적설 빈도와 강도가 모두 증가할 것으로 예상되었고, 이러한 영향으로 미래의 교통시설 피해 리스크

의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다(Fig. 4).

4.3 폭설로 인한 건축물 피해 리스크 평가

건축물 피해 리스크 평가를 위해 각 변수별 가중치를 우선 산정하였다. 가중치 산정을 위한 난수생성 및 학습에는 1986-2014년 데이터를 기반으로 교통시설 피해 리스크와 동일하게 MCMC 시뮬레이션을 활용해 10회 추정 후 평균값을 가중치(Table 4)를 이용하였다. 구축된 모형(Eq. 3)에 2014년 자료를 반영해 현재 리스크를 도출하였다.

$$y'_i = 0.045538 * x'_{i1} + 0.016666 * x'_{i2} + 0.010788 * x'_{i3} + 0.002358 * x'_{i4} - 0.01226 * x'_{i5} + e' \quad (3)$$

y'_i : Damage of building

x'_1 : Days of snow cover over 5cm

x'_2 : The highest snowfall (cm)

x'_3 : Space of old building

x'_4 : Slope

x'_5 : Elevation

e' : Constant(-0.00286)

건축물 리스크 가중치 산정결과 기상요인과 노후 건축물의 면적이 건축물 피해를 가중하는 데 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지리적으로 경사가 심할수록 피해도 심해지는 것으로 나타났다. 이에 반해 지역의 평균고도는 건축물 피해에 음의 영향을 보였다. 평가모형의 적절성을 나타내는 사후예측P (Posterior predictive P-value)은 0.51로 모형은 적합한 것으로 나타났다.

가중치를 반영하여 2014년 기준 현재 폭설로 인한 건축물 피해 리스크를 평가해보면 Fig. 5와 같이 나타난다. 6-7등급의 상대적 위험지역은 총 18개의 지역으로 전국 대비 약

7.8%를 차지한다. 지리적으로 강원도의 고성군과 양양군, 강릉시와 태안, 보령시 등 충남 일부지역, 전라남도 신안, 나주, 영암군, 경남에서는 경주시에서 가장 높은 리스크가 분포하는 것으로 나타났다.

Fig. 5. Current Risk of Building Damage

미래 기후변화 시나리오에서 도출된 신적설량을 반영하여 계산한 2030, 2050, 2080년 리스크 결과는 Fig. 6과 같다. 미래의 폭설로 인한 건축물 피해 리스크 평가를 위해 물리적 환경(고도, 경사도)과 노후 건축물은 2014년 기준 현재 값을 고정하여 분석을 수행하였다.

미래 리스크는 RCP4.5와 8.5 모두 장기로 갈수록 위험한 지역이 한반도 남쪽에서 북쪽과 내륙으로 확산되는 것으로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4. Weights of Building Damage Risk Variables

Var.	1	2	3	4	5	6
over5	0.045776	0.045449	0.045531	0.045585	0.045532	0.04549
sn_max	0.016493	0.016785	0.016712	0.016714	0.016652	0.01663
Old_buildings	0.010784	0.01079	0.010823	0.010776	0.010793	0.010769
Slope	0.00238	0.002329	0.002369	0.002366	0.002336	0.002351
Elevation	-0.01227	-0.01226	-0.01227	-0.01227	-0.01224	-0.01223
Intercepts.	-0.00286	-0.00285	-0.00287	-0.00287	-0.00285	-0.00285
Var.	7	8	9	10	Average	Std.
over5	0.045424	0.045604	0.045487	0.045504	0.045538	0.007124
sn_max	0.016686	0.016604	0.016669	0.016711	0.016666	0.0053
Old_buildings	0.010821	0.01075	0.010768	0.010801	0.010788	0.00241
Slope	0.002338	0.002332	0.002401	0.002379	0.002358	0.00288
Elevation	-0.01224	-0.01221	-0.01232	-0.01229	-0.01226	0.003969
Intercepts.	-0.00286	-0.00284	-0.00286	-0.00286	-0.00286	0.001062
over 5: Days of snow cover over 5cm , sn_max: amount of the maximum snowfall

Fig. 6. Future Risk of Building Damage Caused by Heavy Snowfalls

RCP4.5의 경우 현재 리스크 결과와 비교할 때 한반도 전반의 리스크가 상승하는 것으로 나타났다. 특히 강원도와 경주시, 전라남도 나주와 영암군에서는 높은 리스크를 보였다. 이들 지역외에도 충남지역과 전라남도 해안지역에서는 리스크가 심화되는 것으로 나타났다. 또한 RCP4.5의 단기(2030s)에는 경남 진주, 사천, 거제 등과 부산시에서 상대적으로 높은 리스크가 새롭게 나타났으며, 중기(2050s)에는 한반도 남부지역의 리스크가 크게 증가하였다가 장기(2080s)에 약간 감소하는 경향을 보였다.

RCP 8.5의 경우, 단기(2030s)에는 리스크가 높은 지역의 공간적 패턴은 RCP 4.5의 결과와 유사하게 나타나고 있으나, 거창, 함양, 의령과 같은 경남지역 내륙과 무주, 장수, 진안군과 같은 전북내륙에서도 높은 리스크를 보이는 지역이 특징적으로 나타났다. 또한 RCP 4.5와 달리 시간이 흐를수록 리스크가 계속 증가하는 추세를 보였으며, 장기로 갈수록 한반도 남부와 내륙에서도 높은 리스크를 보이는 지역이

나타나, 리스크의 확대되는 경향을 보였다.

5. 결 론

본 연구는 기후변화로 인해 증가하는 극한 기상인 폭설에 의한 리스크를 평가하고자 하였다. 폭설에 의한 리스크는 교통시설과 건축물을 대상으로 평가를 수행하였으며, 각각의 폭설피해에 영향을 미치는 변수를 선정하고, 베이지안 추정을 통해 가중치를 산정하였다. 베이지안 추정은 난수생성 및 학습에 효과적인 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 시뮬레이션을 활용해 10회 실시 후 평균값을 활용하였으며, 추정된 가중치를 바탕으로 현재(2014년 기준) 리스크와 미래 리스크를 평가하였다. 미래 추정을 위한 기상자료는 기후변화 시나리오인 RCP 4.5/8.5를 바탕으로 한 미래 적설량을 2030년, 2050년, 2080년의 단기, 중기, 장기로 구분하여 평가를 진행하였다.

평가결과, 교통시설 및 건축물의 현재 리스크 모두 강원도와 충남, 전라도의 해안 지역에서 높은 것으로 나타났다. 미래 리스크는 교통시설 및 건축물 모두 시나리오와 시간에 흐름에 따라 한반도 남부지역과 내륙지역에서 고위험지역이 확대되는 것으로 나타났다. RCP4.5의 경우 중기(2050s)에 고위험지역이 가장 많이 나타났다가 장기(2080s)에 줄어 들었으며, RCP8.5의 경우는 중기에서 장기로 갈수록 한반도 남부와 내륙지역에 높은 리스크가 지속적으로 증가하고 위험지역이 급격히 확대되었다. 이러한 경향은 기후변화의 심화에 따른 적설량의 증가가 직접적인 영향으로 보이며, 이외에도 기존에 폭설 빈도가 적었던 한반도 남부와 내륙지역은 적설량이 많아졌을 때 피해에 대한 대응력 부족으로 오히려 그 피해규모가 급격하게 높아지게 된 것을 원인으로 들 수 있다.

본 연구에서 수행한 확률통계모형 및 공간정보를 활용한 폭설피해 리스크 평가는 기후변화 시나리오를 반영해 현재 및 미래의 리스크를 지자체별로 평가하여 해당지역의 특성을 고려한 맞춤형 리스크 관리 전략의 근거자료로 활용될 수 있다. 또한 본 연구의 분석방법은 기후변화와 같은 다양한 불확실성을 고려할 수 있으며, 아직 정량적인 리스크 평가접근이 미흡한 폭설에 대한 평가를 실시했다는 점에서 의미가 있다. 그러나 추후 연구에서는 시설별 세분화된 목록 자료를 활용하고, 피해에 영향을 미치는 다양한 변수를 추가하여 분석모형을 더욱 세밀화하고 고도화할 필요가 있으며, 폭설피해 저감을 위한 구체적인 대책에 관한 연구도 수행될 필요가 있겠다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Ahn, S.R., Lee, J.W., and Kim, S.J. (2015). Projection of future snowfall and assessment of heavy snowfall vulnerable area using RCP climate change scenarios. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 3, pp. 545-556.
- ARMONIA. (2007). *Assessing and mapping multiple risk for spatial planning: Approaches, methodologies and tools in Europe*. EU Contract No. FP6-2003-Global-2-511208.
- CLimate change and Urban Vulnerability in Africa (CLUVA). (2012). *An integrated multi-risk framework: considering climate change impacts on African cities*.
- Han, W.S. (2011). A study on the current state of heavy snowfall and response. *Planning and Policy*, Vol. 355, pp. 39-47.
- Han, W.S. (2014). Increase and countermeasure of heavy snowfall areas due to climate change. *KRIHS Policy Brief*, No. 450, pp. 1-6.
- Hwang, D.J., Lee, S.H., Kim, M.M., and Kim, B.S. (2016). Predicting disaster vulnerability in Gangwon Province using the disaster risk index based on RCP 8.5 climate change scenarios. *Crisisonomy*, Vol. 12, No. 11, pp. 85-97.
- IPCC. (2001). *Climate change 2001: Impact, adaptation and vulnerability*. UK: Cambridge university press.
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: Impact, adaptation and vulnerability*. UK: Cambridge university press.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impact, adaptation and vulnerability*. UK: Cambridge university press.
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C*.
- Jeong, J.H., and Lee, S. (2014). Estimating the direct economic damages from heavy snowfall in Korea. *Journal of Climate Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 125-139.
- Kim D.H. (2013). *Bayesian statistics using R and WinBUGS*. Paju: FreeAcademy.
- Kim, H.M., Lee, D.G., and Park, C. (2013). A study on selection for vulnerable area of urban flooding adaptable capacity using MaxEnt in Seoul. *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 48, No. 4, pp. 205-217.
- Kim, J.Y., and Sung, S.Y. (2016). Forecasting possibility of flood occurrence in Suwon under climate change applying stochastic simulation. *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 51, No. 2, pp. 255-265.
- Kim, S.B., Shin, H.J., Ha, R., and Kim, S.J. (2012). Spatio-temporal analysis of snowfall for 5 heavy snowfall areas in South Korea. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 2B, pp. 103-111.
- Koo, Y.S., Kim, J.E., Kim, J.S., and Lee, S.H. (2015). Study on the improvement of adaptation ability by vulnerability analysis of heat wave: The case of Busan Metropolitan City. *Journal of the Korean Regional Development Association*, Vol. 27, No. 5, pp. 331-347.
- Koo, Y.S., Lee, S.H., Lee, D.B., and Jung, J.C. (2015). A study on mitigation measure by classification of areas based on risk factors of snowfall. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 2, pp. 393-398.
- Ksilbo News. (2014). *Roof collapse of Gyeongju Mauna Ocean* (February 18, 2014). Retrieved from Resort

- <http://www.ksilbo.co.kr/news/articleView.html?idxno=443645>
- Kwon, S.H., Park, H.S., and Chung, G.H. (2016). Analysis of snow vulnerability and adaptation policy for heavy snow. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 2, pp. 363-368.
- Lee, B.J. (2014). *Supporting platform for the analysis of climate change driven disaster vulnerability in urban area*. Korea Research Institute for Human Settlements.
- Lee, M.J., and Kang, J.E. (2012). Predictive flooded area susceptibility and verification using GIS and frequency ratio. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 2, pp. 86-102.
- Lee, S.H., Kang, J.E., Bae, H.J., and Yoon, D.K. (2015). Vulnerability assessment of the air pollution using entropy weights: Focused on ozone. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 21, No. 4, pp. 751-763.
- Lee, S.H., Kang, J.E., and Park, C.S. (2016). Urban flood risk assessment considering climate change using bayesian probability statistics and GIS: A case study from Seocho-Gu, Seoul. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 19, No. 4, pp. 36-51.
- Ministry of Public Safety and Security (MPSS). (2014). *Disasters report*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2016). *Statistical yearbook of natural disaster*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2017). *Statistical yearbook of natural disaster*.
- Nam, K.H. (2014). *A study on the compound- disaster risk assessment by utilizing the bayesian network*. Ph.D. dissertation, Inje University.
- Office for Government Policy Coordination (OPC) and Korea Meteorological Administration (KMA). (2010). *Abnormal climate special report*.
- Office for Government Policy Coordination (OPC) and Korea Meteorological Administration (KMA). (2018). *Abnormal climate report*.
- Oh, M.S. 2012. *Bayesian statistical inference with R-Monte Carlo*. Paju: FreeAcademy. pp. 201-202.
- 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.
- Oh, Y.R., Jeong, S.M., and Chung, G.H. (2017) Snow depth criteria for snow damage warning using statistical analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 327-337.
- Park, C.S., Song, Y.I., Lee, S.H., Kim, Y.J., Byun, B.S., Chae, J.E., et al. (2014). *Climate-environmental risks outlook and the national strategy (I)*. Report No. 2014-03-01, Korea Environment Institute.
- Park, H.S., Jeong, S.M., and Chung, G.H. (2014). Frequency analysis of future fresh snow days and maximum fresh snow depth using artificial neural network under climate change scenarios. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 6, pp. 365-377.
- Park, S.J., Lee, D.K., Sung, S.Y., and Jung, T.Y. (2014). Risk assessment of potential inundation due to sea level rise using Bayesian network. *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 49, No 2, pp. 347-358.
- Shin, Y.N., Kim, M.A., Lee, S.W., Yoo, M.K., Mun, H.S., Kang, T.G., et al. (2012). *Water quality prediction and assessment using Bayesian linear regression*. NIER-RP2012-27, National Institute of Environmental Research. pp. 3-5.
- Sudokwon News. (2014). *Voices of dealing with the collapse of the resort* (February 17, 2014). Retrieved from <http://sudokwon.com/read.php3?aid=1392702842249729001&search=%C6%F8%BC%B3>
- Yoo, G.Y., and Kim, I.H. (2008). *Development and application of a climate change vulnerability index*. Report No. RE2008-05, Korea Environment Institute.
- Won, J.S., Bae, Y.S., and Kim, S.K. (2013). *A study on urban snow removal and disposal in Seoul: Focused on local roads*. Report No. 2013-OR-53, The Seoul Institute.
- Won, J.S., Bae, Y.S., and Kim, S.K. (2014). A study on countermeasures against heavy snow on road in Seoul: Focusing on Seocho 1-dong. *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 67-74.
- World Economic Forum (WEF). (2017). *The Global Risks Report 2017* (12th ed.).

Received	January 21, 2019
Revised	January 24, 2019
Accepted	February 7, 2019