

기후변화에 따른 도시 노후건축물의 재해피해 분석

Disaster Damage Assessment of Old and Deteriorated Buildings in urban Area under the Climate Change Scenarios

김소윤* · 윤지윤** · 김홍석***

Kim, Soyoon · Yoon, Jiyeon · Kim, Brian H.S.

Abstract

Climate change and growing number of old and deteriorated buildings in urban area have increased the risk to a possible disaster. This study finds influential factors on disaster damage in urban areas and predicts the possible damage scale under the climate change scenarios. Five years of data from 2009 to 2013 are used within 69 cities in Seoul, Busan, Daegu, Incheon, Gwangju, Daejeon, and Ulsan. Using tobit model with related variables, the results indicate that the ratio of old and deteriorated buildings, scale impervious area, rate of precipitation and wind speed can increase damage scale of the buildings. On the other hand, increase in the length of sewer and annual budget can decrease the damage scale. RCP (Representative Concentration Pathways) 8.5 from IPCC is adopted to predict the possible damage in each major cities in Korea. The results indicate that the damage can increase by 2.0 to 9.6 times and Busan and Gwanju can suffer with highest damage due to significant increase of precipitation. This study suggest that the administration needs to reflect and adopt the possible consequences from climate change in highly population concentrated urban area with increasing number of the deteriorating building for their disaster management policy.

키 워 드 ■ 기후변화, 자연재해, 건물피해액, 노후건축물, 토빗모형

Keywords ■ Climate Change, Disaster, Building Damage, Deteriorated Building, Tobit Model

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 기후변화가 진행됨에 따라 이상기후현상이 나타나는 빈도가 증가하고 있다. 호우, 태풍, 폭염 등 자연재해의 규모가 증가하며, 재해의 발생시기가

일정하지 않다. 이러한 이상기후현상으로 인해 재해의 발생은 현재보다 더욱 크고 잦은 피해로 이어질 수 있다.

한국의 경우 호우 및 태풍에 의한 피해가 자연 재해피해의 약 85% 이상을 차지하고, 7-8월 기간에 그 피해가 집중되어 있어 풍수해에 의한 피해가 크다. 또한 높은 도시화율로 인해 최근 도시지역에

* Dept. of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University

** Dept. of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University

*** Dept. of Agricultural Economics and Rural Development, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University (corresponding author: briankim66@snu.ac.kr)

서 수재해로 인한 피해가 빈번하게 발생하고 있다. 이와 더불어 도시지역의 지속적인 개발에 따라 불투수면적은 계속해서 증가하고 있으며, 건축물이 밀집되어 있기 때문에 재해위험성 또한 점차 높아지고 있는 추세이다.

도시지역에서 재해에 대한 위험성을 평가하는 항목 중 하나가 건축물의 노후도이다(국립방재연구소, 2003). 실제로 폭우와 태풍으로 인한 노후건축물 붕괴사고가 잇따르고 있으며, 노후건축물이 밀집한 지역에 거주하고 있는 주민들은 붕괴의 우려 속에 살아가고 있다¹⁾. 재해발생 시 노후건축물은 침수위험도, 화재위험도, 건물붕괴위험도가 높기 때문에 노후건축물에 대한 관리가 중요하지만, 제대로 된 관리가 이루어지고 있지 않으며 오히려 노후건축물의 수가 증가하고 있는 추세이다. 국토교통부에서 발표한 전국건축물현황(2013)에 따르면 전국적으로 30년 이상 된 노후건축물이 236만개 가량 분포하고 있으며 꾸준히 증가하고 있다.

재해의 위험에 대비하여 2005년부터 ‘풍수해저감 종합계획’을 지자체별로 5년마다 수립하도록 하고 있다. 이후 기후변화에 따른 위험증가에 따라 2012년 1월 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률(이하 국토계획법) 시행령」의 개정을 통해 광역도시계획, 도시·군기본계획 및 도시·군관리계획 수립 시 풍수해저감종합계획의 반영을 의무화하도록 하였다. 또한 2011년 9월에는 「국토계획법」 제 3조 8호에 ‘기후변화에 대한 대응 및 풍수해 저감을 통한 국민의 생명과 재산의 보호’가 추가되었다. 이러한 법적·제도적 노력과 함께 재해와 관련된 다양한 연구들이 진행되고 있으나, 선행연구의 대부분은 토지이용에 초점을 맞추고 있다. 하지만 소방방재청에서 제시하는 풍수해저감종합계획 수립가이드북에서 시설물의 노화와 관련된 피해내용을 포함하고 있는 만큼 건축물 및 노후건축물에 대한 고려가 필요하다.

이에 본 연구는 기후변화와 관련하여 노후건축물의 재해취약성을 분석하는 데에 그 목적이 있다. 이를 위해 건물의 재해피해액을 결정하는 요인을 추정하고, 기후변화에 따라 강수량이 증가할 때 노후건축물의 현재 상황이 지속된다면 피해액이 얼마나 증가하는가를 예측해 본다.

2. 연구범위 및 방법

본 연구는 전국의 특별·광역시에 속해있는 69개 구를 대상으로 한다. 특별·광역시의 경우 타 지역에 비해 시가화비율이 높아 도시지역으로 규정하기에 충분하다 판단하여 공간적 범위로 설정하였고, 군단위의 지역은 건물의 밀도가 낮고 농어촌 지역인 경우가 많아 분석의 범위에서 제외되었다. 연구의 시간적 범위는 자료의 취득가능성을 고려하여 2009년부터 2013년까지의 5개년으로 한다. 관련 선행연구들은 기후현상의 장기적인 특성을 고려하기 위해 20년 혹은 30년이라는 시간적 범위를 설정하였으나, 본 연구에서는 최근 변화하고 있는 기후현상과 재해피해의 특성을 반영하고자 비교적 짧은 범위로 설정하였다.

연구방법은 재해피해액 자료의 특성을 고려하여 토빗모형을 이용하였다. 모든 지역이 직접적인 재해피해를 입는 것이 아니기 때문에 일부자료는 중절된 형태를 보인다. 따라서 이러한 경우 토빗모형이 적합하며(R. Carter Hill *et al.*, 2010), 토빗모형을 이용하여 재해의 경제적 피해에 영향을 미치는 요인을 찾고, 모형의 한계효과를 통해 기후변화 시나리오 중 하나인 RCP 8.5 시나리오²⁾에서 강수량 증가에 따른 재해 피해액 증가를 예측해본다. 기상청에서 강수량 전망에 적용한 기후변화 시나리오는 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오가 있다. RCP 4.5 시나리오는 온실가스 저감정책이 시행되어 어느정도

효과가 나타난 시나리오이고, RCP 8.5 시나리오는 지금의 온실가스 증가추세가 지속되는 시나리오이다. 이에 따라 점차 진행되는 기후변화에서 노후건축물의 위험성을 분석하기 위해 본 연구에서는 기후변화가 더욱 두드러지는 RCP 8.5 시나리오를 적용한다.

II. 선행 연구 검토

1. 노후건축물과 안전

노후건축물은 년수가 경과함에 따라 건축물이 갖는 기본성능이 저하되고 구성부위에 균열이나 침하 등의 결함이 생겨 건축물전체가 기대하는 성능을 발휘하지 못하는 상태의 건축물이다(민병호 외, 1991; 류혜선·홍원화, 2005). 노후의 원인은 기술 및 사회경제적 요인에 기인하는데, 노후 상태를 나타내는 가장 기본적인 기준은 건물의 경과년수로 볼 수 있다(민병호 외, 1991).

노후건축물과 안전에 대한 연구는 유환희 외(2005), 국립방재연구소(2003)를 포함하여 서울시정개발연구원(2008), 김걸 외(2014), 김윤종·원종석(2008) 등 방재분야에서 많이 다루어져 오고 있다. 유환희 외(2005)는 오늘날 도시공간에서 재해나 재난이 발생할 경우 대형 피해로 확산될 가능성이 높음을 이야기하며 관련 재해 및 재난의 평가 항목에 건축물의 노후도를 포함하였다. 또한 국립방재연구소(2003)에서도 서울과 대도시는 재해위험요소가 많이 존재하고 있음을 설명하며 방재적 관점에서 도시조사 항목 중 하나로 건축물의 노후도를 포함하고 있다. 그리고 김걸 외(2014)에서는 기후변화에 따라 자연재난의 강도가 강해지고 있으며, 급격한 경제발전과 함께 건설된 많은 도시시설의 노후화는 더 큰 재난으로 이어질 수 있음을 주장하였다.

2. 재해에 대한 피해연구

재해에 대한 국내의 선행연구는 재해의 총 피해에 대한 연구가 주를 이룬다. 최종익(2003)은 수정된 반로그모형(semilog model)을 사용하여 도시시설의 밀집이 현저히 증가하고 있는 경기도의 9개 시·군을 대상으로 과거 22년 동안 도시적 토지이용의 증가와 자연재해로 인한 총 피해간의 관계를 살펴보았다. 또한 최종익(2004)에서는 경기도 전체 31개 시·군을 대상으로 패널모형을 사용하여 과거 32년 동안 도시화로 인한 수도권 도시의 수해 취약성을 분석하였다. 두 연구를 통해 경기도 지역에서 도시화는 재해피해를 증가시키는 역할을 한 것을 확인하였다. 한편 정준호·허인혜(2014)는 강원도의 11개 시·군을 대상으로 1992년부터 2010년까지 자연재해로 인한 직접피해액의 시간적인 추세를 살펴보고, 기후 및 사회경제적 변수가 경제적 손실에 미치는 효과를 추정하였다. 신상영·박창열(2014)는 서울시의 2010년 9월과 2011년 7월의 침수피해 사례를 바탕으로 토지이용의 특성과 침수피해면적 간의 관계를 분석하였다.

재해로 인한 총 피해에서 좀 더 세부적인 관점으로 시설물 및 건물의 피해에 대한 선행연구도 수행되었다. 최열·서만훈(2013)에서는 과거 13년간의 데이터를 바탕으로 경남 20개 시·군에서 도시특성 요소가 자연재해에 의한 총 피해액과 공공시설피해액에 미치는 영향으로 나누어 분석하였다. 김지명 외(2015)는 자연재해 중 태풍이 지역별 건물피해액에 영향을 미치는 요인을 태풍정보, 지리정보, 건설환경, 사회경제의 4개 항목으로 나누어 도출하였다.

자연재해에 의한 피해에 대한 국외 연구는 2000년대 이전부터 수행되어 왔다. Smith (1994)는 건물 용도에 따른 홍수 피해를 추정하였는데, 남아프리카 공화국의 주거용 건물과 상업용 건물의 홍수

피해를 추정함으로써, 같은 재해에 의한 피해라도 건물 용도에 따라 지역사회에 미치는 영향이 다르게 나타날 수 있음을 주장하였다. 또한 Powell *et al.*(1995)는 플로리다 동쪽 해안의 허리케인 앤드류에 의한 피해를 리얼타임(real-time) 분석방법에 의해 추정하였다. 이를 통해 재해에 의한 총 비용은 지역사회가 피해를 회복하는 총 시간을 고려하여 추정되어야 함을 주장하였다.

한편 국외의 자연재해 피해에 관한 연구는 피해가 미치는 영향뿐만 아니라 사전예방적 관점인 취약성(vulnerability)과 사후관점인 회복성(resilience) 및 관리 등에 대한 논의도 이루어지고 있다. Cutter *et al.*(2008)에서는 지역 및 공간적 관점에서 자연재해에 의한 피해를 다루고 있으며, 이에 대한 접근 방법을 취약성과 회복성의 관점에 기반하여 분석 틀을 제시하였다. Cutter *et al.*(2008)에 따르면, 자연재해의 피해복구에는 지역의 재해취약성 뿐 아니라 사회경제적 능력이 중요하게 작용하며, DROP (Disaster Resilience Of Place) 모형을 이용하여 회복력을 측정할 수 있는 여러 변수로서, 인구학적 요인, 지역경제적 요인, 행정적 요인, 인프라 요인 등을 제시하였다. 또한 Chang *et al.*(2014)에서는 지진에 의한 건물 피해의 지역회복성에 관한 계량적 연구를 수행하였다. 지역적 관점에서의 회복성을 측정하기 위해서는 재해에 의한 총 피해(액)뿐만 아니라 사회경제적, 기술적, 기관별로 심층적이고 다양한 접근방법을 사용할 필요가 있음을 주장하였다. 또한, 앞으로 나타날 피해를 계량적으로 측정하여 재해 회복성의 역량에 포함할 필요가 있음을 제시하였다.

이와 같이, 국내·외에서 자연재해로 인한 지역사회의 경제적 사회적 피해에 대한 연구는 다수 수행된 바 있다. 하지만 국외에서는 사전예방적 관점인 취약성과 더불어, 사후관점인 회복성에 대한 논의도 충분히 이루어진 반면, 국내 연구는 이미 발생한

재해 피해와 재해취약성과 취약지역에 대한 연구는 다수 이루어졌으나, 앞으로 발생할 재해와 그에 따른 사회 경제적 피해에 대한 연구는 제한적이다. 본 연구는 이와 같은 선행연구에 한계를 반영하여, 재해 취약성과 더불어 기후변화 시나리오를 적용하여 미래의 피해를 추정한 데에 의미가 있다.

III. 분석방법 및 자료

1. 분석방법

토빗모형은 경제학자인 Tobin(1958)이 제안한 모형으로 종속변수의 관찰값이 상당부분 제한된 값(censored data)을 취할 경우 일반적으로 이용된다. 노동시간, 기부행위, 허리케인에 의한 손실 등이 제한된 값의 대표적인 예이며, 본 연구의 종속변수인 재해 건물피해액 또한 일부지역에서 '0'이라는 제한된 값을 나타낸다. 이와 같이 제한된 값이 종속변수에 포함되어있을 경우 일반최소자승법(OLS)에 의한 추정량은 편의가 있으며 불일치하게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 토빗모형을 적용한다(R. Carter Hill *et al.*, 2010).

토빗모형의 일반적인 회귀모형은 다음 식(1)과 같다.

$$y_i^* = x_i' \beta + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

식(1)에서 종속변수 y_i^* 는 잠재적 종속변수로 직접적으로 관찰되지 않으며 식(2)와 같이 관찰된다.

$$y_i = \begin{cases} y_i^*, & \text{if } y_i^* > 0 \\ 0, & \text{if } y_i^* \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

식(2)에 의하면 종속변수 y_i^* 가 0보다 클 경우만 실제로 관찰되며 0보다 작거나 같은 경우 모두 0으로 관찰된다.

이러한 토빗모형은 최우추정법(maximum likelihood)에 의해 추정된다. 최우추정법은 로그-우도함수(log-likelihood function)를 극대화하는 모수값을 구하는 방법으로 토빗모형에서의 로그-우도함수는 다음 식(3)과 같이 주어진다.

$$\log L(\beta, \sigma^2) = \sum_{y_i=0} \log \left(1 - \Phi \left(\frac{x_i' \beta}{\sigma} \right) \right) + \sum_{y_i>0} \log \left[\frac{1}{\sigma} \phi \left(\frac{y_i - y_i' \beta}{\sigma} \right) \right] \quad (3)$$

토빗모형은 비선형모형이기 때문에 분석결과와의 계수가 한계효과가 아니며, 한계효과 계산 시 별도의 식을 필요로 한다. 한계효과를 계산하는 식은 다음 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial E(y|x_i)}{\partial x_i} = \beta \Phi \left(\frac{x_i \beta}{\sigma} \right) \quad (4)$$

식(4)에서 $\phi \left(\frac{x_i \beta}{\sigma} \right)$ 는 종속변수 y_i^* 가 0으로 관찰되지 않을 확률을 뜻한다. 한계효과와 계산을 통해 다른 변수들이 일정할 때 특정 변수의 변화가 종속변수의 변화에 미치는 정도를 파악할 수 있다.

본 연구는 위 식에 따른 토빗모형을 사용하며 5개년의 재해피해액 자료를 통합하여 적용한다. 이와 같이 여러 해의 자료를 통합하여 재해피해를 분석하는 방법은 최충익(2003), 정준호 외(2014), 김지명 외(2015) 등에서 적용된 바 있다.

2. 자료 및 변수

분석에 사용한 변수들은 <표 1>과 같다. 종속변수로 사용한 건물 재해 피해액은 재해연보에 제시된 피해총액 중 건물, 공공시설, 건축물과 관련된 기타항목에 해당하는 금액이다. 재해의 발생은 재산피해로 직결되는 만큼(강정은 외, 2011), 재해피해를 연구한 다수의 선행연구에서 재해피해액을 종속변수로 활용하고 있다. 이에 따라 본 연구에서도 재해로 인한 건축물 피해를 설명하기 위해 재해피해액을 종속변수로 활용하여 분석하고자 한다. 5개년의 자료를 사용하였기 때문에 재해연보 상의 금액환산지수를 활용하여 2013년을 기준으로 각 년도의 피해액을 보정하여 사용하였다.

독립변수는 재해피해액의 결정요인을 분석한 선행연구들(최충익, 2003; 최열, 2013; 정준호 외, 2014; 김지명 외, 2015)을 바탕으로 하여 재해피해에 영향을 주는 변수들로 구성하였다. 그리고 재해피해에 영향을 주는 요소이지만 선행연구에서는 다루지 않았던 노후건축물변수를 추가하였다. 이렇게 구축된 변수들을 각 특성에 따라 취약요소, 기후요소, 방재요소 등 세 가지로 분류하였다.

먼저 취약요소로는 노후건축물과 강면적, 불투수면적이 포함된다. 먼저 노후건축물은 본 연구에서 주로 살펴보고자 하는 변수로서, 각 구에 존재하는 건물 중 노후건축물의 비율을 계산하여 모형에 적용하였다. 노후건축물로 판단하는 기준은 '서울특별시 도시 및 주거환경 정비조례'에 따라 철근 및 철골 콘크리트를 재료로 하는 건물은 40년 이상, 이외에 벽돌이나 목구조 등은 20년 이상으로 설정하였다. 강면적은 각 구·군의 지목별 국토이용현황 중 하천에 해당하는 면적이며, 불투수면적의 경우 대지, 공장용지, 학교용지, 도로면적의 합이다.

기후요소는 연강수량, 시간당 최대강수량, 최대순간풍속으로 이루어진다. 해당 자료들은 방재기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)를 이용하여 보다 국지적인 범위의 자료들로 전국 약 460

표 1. 변수설명 Table 1. Variable Description

구분 classification	변수명 variable	변수설명 explanation	자료출처 source	
종속변수 dependent variable	ln(damage in building)	건물 및 공공시설의 재해피해액(만원) damage in building and public facility (ten thousand won)	국가재난정보센터 National Disaster Information Center (http://www.safekorea.go.kr)	
독립 변수 independ- ent variable	취약 요소 vulnera- ble factor	RDB	노후건축물의 비율(%) ratio of deteriorated building (%)	건축데이터 민간개방 시스템 (http://open.eais.go.kr/)
		ln(RIVER)	강면적(km ²) river area (km ²)	국가통계포털 Korean Statistical Information Service
		IMPA	불투수면적(km ²) impervious area(km ²)	(http://kosis.kr)
	기후 요소 climatic factor	ATP	연간 총 강수량(mm) annual total precipitation (mm)	국가기후데이터센터 National Climate Data Service System (http://sts.kma.go.kr/)
		HHP	시간당 최대 강수량(mm) hourly highest precipitation (mm)	
		WIND	최대 순간 풍속(m/s) highest gust wind speed (m/s)	
	방재 요소 preventi- ve factor	SEWER	우수관로 길이(km) length of storm sewer (km)	환경통계포털 Environmental Statistical Information Service (http://stat.me.go.kr)
		ln(BASIN)	유수지 용량(m ³) capacity of retarding basin (m ³)	
		FINANCE	재정자립도(%) financial independence rate(%)	지방재정통합공개시스템 Local Finance Integrated Open System (http://lofin.moi.go.kr)
		BUDGET	연 총 예산(억원) budget (one hundred million won)	

여 지점에서 관측된다. 본 연구에서는 각 구·군에 위치한 AWS지점의 자료를 이용했으며 AWS지점이 없는 경우 주변지역의 값을 평균하여 적용하였다.

취약요소나 기후요소가 재해피해를 증가시키는 요소인 반면, 방재요소는 방재를 위한 물리적, 경제적 노력으로 피해를 저감시킬 수 있는 요소이다. 본 연구에서는 물리적 노력으로 우수관로의 길이, 유수지 용량이 해당되며 경제적 노력으로 재정자립도, 예산이 해당된다. 우수관로의 경우 분류식 하수관로 중 우수관로와 합류식 하수관로를 합한 길이를 사용하였고, 유수지는 각 구·군에 위치하는 유수지의 용량을 사용하였다. 재정자립도는 각 구·군의 전체재원 중 자주재원의 비율을 의미하며, 예산은 해당연도의 총예산³⁾에 해당한다.

IV. 분석결과

1. 건물의 재해피해액 결정요인

도시지역에서 재해로 인한 건물피해액에 영향을 미치는 요인을 살펴보기 위해 토빗모형을 사용하여 분석하였다. 추정된 모형의 유의성은 LR (Likelihood Ratio) Chi-Square 검정을 통해 확인할 수 있다. 본 연구에서 LR Chi-Square 통계값은 <표 2>와 같이 196.25이며, '모든 추정계수는 0이다'라는 귀무가설은 1% 유의수준에서 기각됨으로써 본 모형이 통계적으로 유의함을 확인하였다. 총 345개의 관측치 중 167개가 중절되었고, 변수들의 VIF(Variance Inflation Factor) 값은 모두 3미만으

표 2. 토빗모형의 검정통계량
Table 2. Test statistics of Tobit model

구분 classification	통계값 statistics
LR Chi2(10)	196.25
Prob > chi2	0.0000
Pseudo R ²	0.1282
Log likelihood	-667.2879
Number of Obs.*	345(167)

* 괄호 안의 숫자는 종결된 관측치의 개수임
* Figure in brackets is the number of censored observation

로 다중공선성의 문제는 없는 것으로 확인되었다.

모형에 대한 분석결과는 <표 3>과 같다. 먼저, 취약요소 중 노후건축물의 비율과 불투수면적이 통계적으로 유의한 결과를 보이며 두 변수 모두 재해 피해에 정(+)의 관계를 가진다. 노후건축물의 비율이 높을수록 재해에 의한 피해가 증가한다는 결과는 노후건축물이 재해에 취약하다는 것을 보여주는 것이다. 한편 불투수면적의 증가가 재해 피해를 증가시키는 것은 기존에 투수능력이 높아 유수의 역

할을 했던 토지들이 아스팔트와 시멘트로 포장됨으로써 강수의 유출량을 증가시키기 때문이다. 강수 유출량의 증가는 건물의 침수 및 손상을 야기하게 된다. 이러한 결과는 도시적 토지이용의 변화가 재해피해액의 증가를 가져온다는 최충익(2003)과 최열 외(2013)의 연구와 일관성을 가진다.

기후요소의 경우를 살펴보면, 총 강수량, 시간당 최대 강수량, 최대 순간풍속 모두 피해를 증가시키는 것으로 도출되었다. 김지윤 외(2015)의 연구에서 태풍, 호우, 강풍을 건축물 설계 시 중요하게 고려해야 할 재해로 제시하고 있으며, 도시지역에서 태풍 및 호우로 인해 발생하는 건물피해액이 전체 피해 금액의 70% 이상을 차지한다는 점은 본 연구의 결과를 뒷받침 해준다. 특히 우리나라의 경우 태풍은 폭풍과 호우를 동반하여 발생하고, 이로 인해 산사태, 도로 및 제방유실, 건물 붕괴 등의 피해가 발생하므로 이에 대한 대비가 필요할 것으로 여겨진다.

방재요소 중에서는 우수관로 길이와 예산이 통계적으로 유의한 결과를 보인다. 그 중 물리적 노력

표 3. 토빗모형 분석결과 Table 3. Estimated results of Tobit model

구분 classification	변수 variable	Coef.	S.E.
취약 요소 vulnerable factors	RDB	0.0970 **	0.0344
	ln(RIVER)	-0.2236	0.1575
	IMPA	0.4564 ***	0.0907
기후 요소 climatic factors	ATP	0.0135 ***	0.0018
	HHP	0.1805 ***	0.0316
	WIND	0.2287 ***	0.0664
방재 요소 preventive factors	SEWER	-0.0083 *	0.0047
	ln(BASIN)	0.0594	0.0683
	FINANCE	0.0304	0.0273
	BUDGET	-0.0013 **	0.0006
	_cons	-33.9174	4.2231
	sigma	5.9393	0.3511

*** P<0.01, ** P<0.05, * P<0.1

에 해당하는 우수관로는 강우 시 내수배제의 역할을 하여 도시의 침수를 막는 역할을 한다. 본 연구 결과에 따르면 우수관로의 길이 증가는 도시지역의 건물피해액을 감소시키는 것으로 도출되었다. 이러한 결과는 불투수면적의 비율이 높은 도시지역에서 우수관로의 역할이 중요함을 보여준다. 한편 우수지 용량의 경우 유의한 변수는 아니지만 추정계수의 부호는 건물피해액을 증가시키는 것으로 도출되었다. 이러한 결과는 우수지가 방재시설로서의 역할을 하지 못하는 것으로 해석된다. 김종훈(2002)과 정건희 외(2014)에서는 방재시설로서 우수지의 기능이 저하된 원인을 충분하지 못한 용량설계로 설명한다. 집중호우의 빈도증가와 도시화에 따라 우수지 및 배수펌프장의 용량을 초과하는 유출량이 발생하고, 이에 따라 오히려 우수지나 배수펌프장을 중심으로 홍수피해가 발생하는 것이다. 기후변화로 인한 극한 강우현상에 대비하여 효과적인 방재시설의 용량설계가 필요함을 알 수 있다. 한편 경제적 노력 중

재정자립도는 통계적으로 유의하지 않으나 예산은 통계적으로 유의한 부(-)의 관계를 보여준다. 이러한 결과는 Kahn(2003)의 연구와 같이 방재활동이나 시설구축 등에 투입될 수 있는 재원의 크기가 클수록 재해발생에 효과적인 대응을 통해 피해를 감소시킬 수 있는 것이며, 예산이 재원으로서 작용한 것으로 해석된다.

2. 기후변화 시나리오에서의 피해증가 예측

한반도 기후변화 전망보고서(기상청, 2012)에 따르면 지난 30년간(1981-2010년) 남한지역의 여름철 강수량이 증가하는 경향이 있었다. 또한 미래에는 자연적인 변동을 넘어서 더욱 증가하는 경향을 보일 것으로 전망된다. 한편 재해피해에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나인 풍속의 경우 유의한 수준의 변화는 없을 것으로 전망된다. 따라서 본 연구는 도시지역의 노후건물이 현재와 같은 비율로

표 4. 주요 재해피해 증가요인의 지역별 현황(2009-2013년 5개년 평균값)

Table 4. Main factors for increasing damage by region (average data in 5 years; 2009-2013)

지역 region	노후건축물비율(%) old building ratio	연 강수량(mm) annual precipitation	최대 순간 풍속(m/s) highest gust wind speed	불투수면적(km ²) impervious area
서울특별시 Seoul	47.42	1612.57	19.61	12.80
부산광역시 Busan	59.90	1382.15	24.39	11.07
대구광역시 Daegu	54.31	1125.68	18.38	18.80
인천광역시 Incheon	35.39	1505.96	18.08	19.34
광주광역시 Gwangju	49.96	1394.34	22.24	23.05
대전광역시 Daejeon	49.39	1321.08	15.51	22.94
울산광역시 Ulsan	27.82	1164.91	20.11	20.28

주) 노후건축물 비율은 '서울특별시 도시 및 주거환경 정비조례'에 의해 노후건축물로 분류된 건축물의 비율임.

Old building ratio is calculated based on "Seoul Municipal Ordinance on the Maintenance and Improvement of Urban Areas and Dwelling Conditions for Residents".

표 5. RCP8.5 시나리오에 따른 2050년의 강수량 증가전망 및 피해증가 예측

Table 5. Prediction of possible economic damage in 2050 by precipitation change under the RCP 8.5 scenarios

지역 region	연 강수량 증가전망 precipitation change (mm)	피해금액 증가율 damage increase rate (%)	현재(2009-2013년 평균) 피해금액 current damage (억원)	2050년 예측 피해금액 predicted damage (억원)
서울특별시 Seoul	259.2	288	111.93	434.54
부산광역시 Busan	764.5	865	89.92	867.73
대구광역시 Daegu	287.4	96	0.10	0.19
인천광역시 Incheon	110.5	119	23.23	50.89
광주광역시 Gwangju	468.7	545	14.70	94.83
대전광역시 Daejeon	371.6	364	9.94	46.07
울산광역시 Ulsan	617.8	478	4.60	26.56

주) 연 강수량 증가전망은 한반도 기후변화 전망보고서(기상청, 2012)에서 제시된 자료임.
Precipitation change data is from Korea Climate Change Report (Korea Meteorological Administration, 2012)

지속될 때 기후변화에 의한 연강수량 증가가 피해액을 얼마나 증가시키는지 살피기 위해 한계효과를 계산하여 피해증가를 예측해보고자 한다. 이를 위해 RCP 8.5 시나리오에서 2050년까지의 강수량 증가 전망치를 적용한다. RCP 8.5 시나리오는 IPCC가 제시한 기후변화 시나리오 중 가장 극단적인 시나리오로, 온실가스의 저감 없이 현재의 온실가스 배출 추세가 미래에 이어질 것을 가정한다.

각 지역의 주요 재해피해 증가요인 현황은 <표 4>와 같고, 강수량 증가 전망치와 이에 따른 피해금액 증가 예측결과는 <표 5>와 같다. 2050년이 되었을 때 부산시가 현재보다 연 강수량이 764.5mm 증가하여 가장 많은 증가가 있을 것으로 전망되며, 울산시, 광주시, 대전시, 대구시, 서울시, 인천시 순으로 그 뒤를 잇는다. 연강수량 증가에 따른 피해증가 예측을 살펴보면 강수량 증가가 많은 부산시의 경우 현재 피해금액 대비 약 865% 증가로 가장

크게 증가하며, 광주시, 울산시, 대전시, 서울시, 인천시, 대구시의 순으로 증가할 것으로 예측된다. 앞 절의 결과에서 도출된 바와 같이 강수량의 증가는 피해액을 가중시키는 만큼 기후변화 시나리오에 따라 강수량이 많이 증가하는 지역일수록 예측되는 피해증가율도 큰 것으로 해석된다. 특히 강수량 증가가 가장 큰 부산시의 경우 강수량과 더불어 노후 건축물의 비율이 높고, 풍속이 빨라 피해증가가 더욱 증가될 것으로 여겨진다. 또한 부산시에 이어 두 번째로 피해증가가 큰 광주시는 강수량 증가가 클 뿐만 아니라 노후건축물비율이 세 번째로 높으며, 빠른 풍속과 넓은 불투수면적이 피해증가를 가중시킨 것으로 여겨진다.

피해증가분을 현재의 건물 재해피해금액에 곱하여 미래의 피해금액을 예측해보면 현재 서울시가 111.93억 원으로 가장 많은 피해금액이 발생하는 반면, 기후변화 시나리오에 따라 2050년에는 부산

시가 867.73억 원으로 가장 많은 피해금액이 발생하는 것으로 예측된다. 부산시에 이어 서울시, 광주 시, 인천시, 대전시, 울산시, 대구시의 순으로 예측 피해금액이 크다. 부산시의 경우 피해금액의 증가폭이 큰 만큼 예측되는 피해금액이 크기 때문에 이러한 피해를 저감시키기 위한 대비가 중요할 것으로 여겨진다. 또한 서울시와 인천시의 경우 피해금액의 증가폭이 다른 지역에 비해 크지는 않지만 현재의 피해규모가 크기 때문에 기후변화로 인해 재해피해가 크게 발생할 것으로 예측된다. 따라서 재해에 대한 대비가 매우 중요한 지역이라 할 수 있다.

V. 결 론

기후변화에 따라 자연재해로 인한 피해가 증가하고 있고, 특히 고밀도의 건물과 불투수면적의 높은 비율로 인해 도시지역에서 그 피해가 더욱 커지고 있는 추세이다. 이러한 문제와 더불어 도시지역에서 노후건축물의 비율이 꾸준히 증가하고 있는데, 노후 건축물은 재해에 취약한 요소로서 안전에 대한 관리가 중요하다. 이에 본 연구는 토빗모형을 사용하여 도시지역에서 건물의 재해피해에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 기후변화 시나리오에 따라 강수량이 증가할 때 피해가 얼마나 증가하는가를 알아보 고자 하였다. 도시지역은 시가화비율이 높은 특별·광역시 69개 구로 규정하였고, 최근 변화하고 있는 기후현상과 피해양상을 반영하기 위해 2009년부터 2013년을 연구의 범위로 설정하였다. 이에 따른 결과와 그 결과가 가지는 의미를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 노후건축물, 불투수면적, 연간 총 강수량, 시간당 최대 강수량, 최대 순간 풍속이 건물의 재해피해를 가중시키는 요소로 도출되었고, 우수관로와 지자체의 예산이 재해피해를 감소시키는 요소로

도출되었다. 노후건축물이 재해피해에 영향을 미치는 요소로서 도출된 결과는 노후건축물의 재해 위험성을 보여주는 실증분석결과라 할 수 있다. 더욱이 노후건축물의 비율이 증가 추세에 있는 상황에서 노후건축물에 대한 적절한 관리가 중요함을 알 수 있다.

둘째, 노후건축물이 현재와 같은 비율을 유지할 경우 기후변화 시나리오에 따라 강수량이 증가할 때 재해피해금액은 최소 2배에서 최대 9.6배까지 증가한다. 특히 강수량 증가가 가장 많이 예상되고, 노후건축물의 비율이나 풍속 등 재해피해를 가중시키는 요소의 값이 높은 부산시와 광주시가 가장 큰 비율로 피해금액이 증가할 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 기후변화에 대응하여 각 지자체별로 재해피해를 증가시키는 요인에 초점을 맞추어 대응책을 마련해야함을 시사한다.

셋째, 서울시의 경우 비교적 작은 강수량 증가에도 불구하고 현재의 피해규모가 가장 큰 만큼 부산에 이어 예상 피해금액이 두 번째로 큰 것으로 예측되었다. 이와 같이 현재 재해의 피해규모가 큰 지역은 기후변화의 작은 영향에도 큰 피해를 발생시킬 수 있기 때문에 기후변화 대응책이 더욱 중요할 것으로 판단된다.

본 연구는 다음과 같은 한계를 갖는다. 먼저, 노후건축물로 분류하는 기준에 대한 부분이다. 오래된 건축물이라고 해서 무조건 위험하고 낡은 건축물은 아니며, 올바른 유지 및 보수를 통해 높은 가치를 가지고 있는 건축물도 많이 존재한다. 하지만 자료의 한계로 인하여 노후상태의 가장 기본적인 기준인 경과년수를 기준으로 노후건축물을 분류하였다. 이러한 한계를 최대한 보완하기 위해 본 연구에서는 '서울특별시 도시 및 주거환경 정비조례'를 근거로 건축물의 구조적 특성을 반영한 경과년수를 적용하였다. 이렇게 적용한 것은 목조나 벽돌 건축물에 비해 콘크리트 건축물의 경우 외부자극에 견딜

수 있는 강도가 더욱 커서 건축물의 유지 기간이 길기 때문이다. 후속 연구에서 건축연한, 건축물의 구조뿐만 아니라 도시미관, 난방방식, 부실시공 등 질적인 측면의 자료를 구축하여 노후건축물 분류에 적용한다면 보다 현실을 정확하게 반영하는 연구가 될 것으로 기대된다. 두 번째 한계로는 침수로 인한 피해를 모형에 포함시키지 못한 점을 들 수 있다. 호우에 따른 피해 중 침수는 주요 건물피해 중 하나이지만 저지대에 위치하거나 지하 혹은 반지하가 있는 건물 데이터를 구축하는 데에 어려움이 있어 이를 세분화하여 적용하지 못하였다. 하지만 노후된 건축물일수록 침수에 대한 취약성이 높기 때문에 노후건축물 변수가 이러한 점을 일부 포함하고 있는 것으로 간주할 수 있다.

광역도시계획, 도시·군기본계획 및 도시·군관리계획 수립 시 '풍수해저감종합계획'의 반영이 의무화됨에 따라 각 지자체는 '풍수해저감종합계획'을 수립하는 과정에 있다. 또한 본 연구의 결과와 같이 전국적으로 증가하고 있는 노후건축물은 재해의 취약성을 증가시키는 요소이지만, 이에 대한 구체적인 대책이 부족한 상황이다. 본 연구는 방재적 관점에서 도시계획 수립 시 노후건축물에 대한 대책이 포함되어야 함을 시사하며, 도시계획 과정에서 방재계획이 중요해진 현 시점에서 본 연구의 결과는 의의를 가진다고 여겨진다.

주1. 한채호, 2013.07.01. "노후건물 거주민, 장마가 걱정", 뉴스1.; 박상범, 2015.07.07. "무너질까 무서워요... 장마철, 안전 대책은?", KBS.; 노동규, 2015.07.09. "깨지고 무너진 아파트... 장마-태풍 무서워요", SBS.

주2. RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오는 온실가스 농도전망기법으로 RCP 8.5 시나리오의 경우 미래 온실가스 증가가 2100년경 지구기후 시스템에 $8.5 W/m^2$ 의 직접적 온실효과를 유발한다고 가정되며, IPCC 5차 평가보고서에서 사용된 기후예측 모델임(한반도 기후변화 전망보고서, 기상청).

주3. 행정자치부는 총예산을 일반회계, 공기업특별회계,

기타특별회계로 구분하여 발표하고 있으며, 연구에 사용된 예산은 전 분야에 대한 1년의 일반회계와 기타특별회계를 합한 값임. 연구의 범위인 69개 구단위의 지역의 경우 일반회계가 총예산의 약 94.66%를 차지함.

인용문헌

Reference

1. 국립방재연구소, 2003. 「재난관리를 위한 지역위험도 평가 및 적용에 관한 연구」, 서울. National Disaster Management Institute, 2003. *Study on the regional vulnerability assessment and its application for the disaster management*, Seoul.
2. 국토교통부, 2013. 「전국 건축물 총 6,851,802동 / 33억7천6백만㎡」 세종. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013. *6,851,802 buildings / 3,376million m² in the whole country*, Sejong.
3. 기상청, 2012. 「한반도 기후변화 전망보고서」, 서울. Korea Meteorological Administration, 2012. *Korea Climate Change Report*, Seoul.
4. 김길·김근영·문채·이병재, 2014.. "도시재난 대비를 위한 도시방재계획", 「도시정보」, 2014(7): 6-21. Kim, K., Kim, G. Y., Moon, C., Lee, B. J., 2014. "Urban disaster prevention Plan", *Urban Information Service*, 2014(7): 6-21.
5. 김윤중·원종석, 2008. "재난 제로, 서울을 위한 방재전략", 「SDI 정책리포트」, 2008(11): 1-22. Kim, Y. J., Won, J. S., 2008. "Disaster Zero, the Strategy on disaster prevention in Seoul", *SDI Policy Report*, 2008(11): 1-22.
6. 김종훈, 2002. "국지적 집중호우와 우수지 배수펌프장 인근의 홍수피해", 「한국도시방재학회지」, 2(2): 27-34. Kim, J. H., 2002. "Local Severe Rain Storm and Flood Damage Around Retarding Basin", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 2(2): 27-34.

7. 김지명·김부영·양성필·오정일·손기영, 2015. “태풍에 따른 지역별 건물피해액에 영향을 미치는 요인 도출 및 피해 예측모델 개발”, 『한국건축시공학회지』, 15(5): 515-525.
Kim, J. M., Kim, B. Y., Yang, S. P., Oh, J. G., Son, K. Y., 2015. “Influence Factors Suggestion and Prediction Model Development of Regional Building Damage Costs according to Typhoon”, *Journal of The Korean Institute of Building Construction*, 15(5): 515-525.
8. 김지윤·정숙진·이성화·윤성환, 2015. “자연재해에 대비한 건축물 방재계획 실태에 관한 조사 연구”, 『대한건축학회연합논문집』, 17(1):2 59-266.
Kim, J. Y., Jung, S. J., Lee, S., H., Yoon, S. H., 2015. “A Survey about the Actual Condition of Architecture Disaster prevention Plan”, *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, 17(1):2 59-266.
9. 류혜선·홍원화, 2005. “대도시 중심지역의 재난 피해 저감을 위한 재난위험도 평가에 관한 연구”, 『대한건축학회논문집』, 21(11): 277-285.
Ryu, H. S., Hong, W. H., 2005. “Research of a Disaster Risk Assessment for Reducing Disaster on Urban Areas”, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 21(11): 277-285.
10. 민병호·임상돈·도건호, 1991. “건물 노령화의 이해와 대책”, 『대학건축학회지』, 35(1): 65-71.
Min, B. H., Lym, S. D., Doh, G. H., 1991. “A Socio-Technological View to Building Superannuation”, *Review of Architecture and Building Science*, 35(1): 65-71.
11. 서울시정개발연구원, 2008. 『서울시 주거환경의 질 지표와 평가에 관한 연구』, 서울.
Seoul Development Institute, 2008. *Indicators and Evaluations of the Quality of Residential Environments in Seoul*, Seoul.
12. 신상영, 박창열, 2014. “토지이용 특성과 침수피해 면적 간의 관계 분석: 서울시를 사례로”, 『국토연구』, 81: 3-20.
Shin, S. Y., Park, C. Y., 2014. “Analyzing Relationships between Land Use Characteristics and Flood Damage Areas : The Case of Seoul”, *The Korea Spatial Planning Review*, 81: 3-20.
13. 유환희, 김성삼, 박기연, 최우석, 2005. “지형공간 정보체계에 의한 도시지역 재해위험도 평가”, 『한국지형공간 정보학회지』, 13(3): 41-52.
Yoo, H. H., Kim, S. S., Park, K. Y., Choi, W. S., “Disasters Risk Assessment of urban Areas by Geospatial Information Systems”, *Journal of the Korean society for geospatial information system*, 13(3): 41-52.
14. 정건희, 심규범, 김응석, 2014. “침투강우강도를 고려한 우수관로 및 빗물펌프장의 설계용량 검토”, 『한국수자원학회논문집』, 47(9): 777-787.
Chung, G. H., Sim, K. B., Kim, E. S., 2014. “Study on Design Capacity of Stormwater Pipe and Pumping Station considering Peak Rainfall Intensity”, *Journal of Korea Water Resources Association*, 47(9): 777-787.
15. 정준호, 허인혜, 2014. “자연재해 직접 피해액의 추세 및 그 결정요인에 대한 분석: 강원도의 사례”, 『사회과학연구』, 53(1): 77-99.
Jeong, J. H., Heo, I. H., 2014. “An Analysis of the Time Trend of Direct Economic Damages from Natural Disasters and Their Determinants: The case of Gangwon-do”, *Journal of Social Science*, 53(1): 77-99.
16. 최열, 서만훈, 2013. “도시특성 요소가 자연재해에 의한 피해액에 미치는 영향에 관한 연구”, 『국토계획』, 48(5): 309-318.
Choi, Y., Seo, M. H., 2013. “Assessing the Impact of the Factors of Urban Characteristics on the Damages Caused by Natural Disaster Using Panel Model”, *Journal of Korea Planning Association*, 48(5): 309-318.
17. 최충익, 2003. “도시적 토지이용의 변화가 도시의 자연재해 취약성에 미치는 영향에 관한 연구”, 『국토계획』, 38(2): 35-48.
Choi, C. I., 2003. “A Study on Natural Hazards Vulnerability in Urban Area by Urban Land Use Change”, *Journal of Korea Planning*

- Association*, 38(2): 35-48.
18. 최충익, 2004. “도시화에 따른 수해 취약성에 관한 실증분석”, 「국토연구」, 42: 17-37.
 - Choi, C. I., 2004. “A Empirical Study on the Urban Flood Vulnerability by Urbanization Using Panel Data : In Case of Kyonggi Province”, *The Korea Spatial Planning Review*, 42: 17-37.
 19. Chang, S. E. and Shinozuka M., 2004. “Measuring Improvements in the Disaster Resilience of Communities”, *Earthquake Spectra*, 20(3): 739-755.
 20. Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., & Webb, J., 2008. “A place-based model for understanding community resilience to natural disasters”, *Global environmental change*, 18(4), 598-606.
 21. Kahn, M. E., 2005. “The death toll from natural disasters: The role of income, geography, and institutions”. *Review of Economics and Statistics*, 87(2): 271-84.
 22. Powell, M. D., Houston, S. H., and Ares, I., 1995. “Real-time damage assessment in hurricanes. In Preprints”, 21st Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami: Unknown.
 23. R. Carter Hill, William E. Griffiths, Guay C. Lim, 2010. 「계량경제학 제3판」, 이병락 역, 서울: 시그마프레스..
R. Carter Hill, William E. Griffiths, Guay C. Lim, 2010. *Principles of Econometrics, Third Edition*, Translated by Lee, B. R., Seoul: Sigma Press.
 24. Smith, D. I., 1994. “Flood damage estimation- A review of urban stage-damage curves and loss functions”, *Water S.A.*, 20(3): 231-238.

Date Received 2016-04-22
 Reviewed(1st) 2016-06-20
 Date Revised 2016-06-29
 Reviewed(2nd) 2016-07-25
 Date Accepted 2016-07-25
 Final Received 2016-09-05