

Research Paper

태풍 변화로 인한 주거시설 피해 정량화 프레임 워크 제안

A Framework for Quantifying the Damage to Residential Facilities Caused by Typhoon Changes

김지명¹ · 손승현^{2*}

Kim, Ji-Myong¹ · Son, Seunghyun^{2*}

¹Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Mokpo National University, Muan-gun, Jeonnam, 58554, Korea

²Researcher, Department of Architectural Engineering, Mokpo National University, Muan-gun, Jeonnam, 58554, Korea

*Corresponding author

Son, Seunghyun
Tel : 82-62-360-5833
E-mail :
seunghyun@mnu.ac.kr

Received : September 6, 2023

Revised : September 27, 2023

Accepted : October 26, 2023

ABSTRACT

This research aims to investigate the alterations in typhoon patterns attributable to climate change and to quantitatively assess the risk of damage to residential structures. The increasing prevalence of climate anomalies and severe weather events, a consequence of global warming, is causing escalating damage globally. Notably, numerous countries are facing substantial devastation due to shifts in typhoon trajectories. Despite this, there exists a gap in empirical research quantifying the impact of these changes on building integrity and the associated risk alterations driven by climate change. In addressing this gap, our study analyzes the frequency and intensity of typhoons impacting Korea, examining the evolution of these meteorological phenomena. Furthermore, we employ the Korean Typhoon Vulnerability Function for residential facilities to quantify the altered risk posed by these changing patterns. The outcomes of this study provide the private sector with essential data to formulate diverse scenarios and business strategies in response to the escalating risks of typhoon-related damage. Additionally, it equips governmental bodies with the necessary insights to develop comprehensive risk management strategies to mitigate the effects of future typhoons.

Keywords : typhoon, climate change, risk quantification, residential facilities

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

기후변화는 다양한 분야에 심각한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 질병 확산 및 해수면 상승과 같은 장기적인 영향을 생성할 뿐만 아니라 단기적으로는 극단적인 기상 현상에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 극한 기상 현상에는 폭염, 한파, 허리케인과 같은 폭풍, 폭우, 홍수, 강수량 부족 및 가뭄이 포함될 수 있다. 많은 지역이 최근 극한 기상 현상으로 인해 치명적인 영향을 받고 있다. 물론 이러한 극단적인 기상 현상은 항상 인류 역사의 일부였다. 그러나 최근 기상이변은 과거에 비해 빈도와 강도가 높아지고 피해 가능성도 급증하고 있다.

또한, 현재 열대성 저기압의 패턴은 과거의 패턴과 매우 다르기 때문에 슈퍼 태풍 또는 슈퍼 허리케인이라고 부르기도 한다. 예를 들어, 태풍 하이옌은 2013년에 발생했으며 육지에서 기록된 가장 극단적인 열대성 저기압이었기 때문에 슈퍼 태풍 올란타로 알려졌다. 심한 비와 바람으로 인해 남아시아 국가들은 약 3000억 달러의 엄청난 피해로부터 복구하기가 어려웠다



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[1]. 2017년 미국에서는 3개의 강력한 허리케인(Hurricanes Harvey, Maria, Irma)이 막대한 피해를 입혔다. 이 허리케인으로 인한 총 피해는 약 2,930억 달러였으며 Harvey는 1,250억 달러, Maria는 900억 달러, Irma는 776억 달러의 피해를 발생시켰다 [2]. 또한, 2005년에 발생한 허리케인 카트리나는 미국 역사상 가장 큰 피해를 입힌 자연 재해 중 하나로, 이 허리케인으로 인한 폭우와 강풍으로 인해 미국 걸프 연안 도시는 약 1,800억 달러의 직간접적인 피해를 발생시켰다[2]. 유럽에서는 1999년 유럽 폭풍 Anatol, Lothar 및 Martin의 기록적인 비와 바람으로 인해 약 130억 유로의 경제적 손실이 발생하기도 했다[3].

그러나 이러한 역사적 사건과 기록적인 피해에도 불구하고 기후 변화와 열대성 저기압 패턴에 대한 논쟁은 여전히 존재한다. 많은 연구에서 기후 변화가 열대성 저기압에 영향을 미쳤다고 주장했지만 다른 연구에서는 이에 대한 증거가 빈약하다고 주장하기도 한다. 예를 들어 일부에서는 기후가 따뜻해짐에 따라 열대성 저기압의 강도가 점진적으로 증가한다고 주장하지만, 다른 연구에서는 이러한 증가가 자연 변동 범위 내에 있다고 주장하기도 한다[4-6]. 지역이나 국가별로 장기 기후 관측을 통한 열대 저기압의 빈도 또는 강도와 기후 변화의 관계를 설명하기에 충분한 기간이 아니거나 그 영향이 명확하지 않을 수 있다[7]. 그러나 극한 기상 현상, 특히 열대 저기압으로 인한 피해가 매년 증가하고 있다는 연구가 있으며, 아울러 이러한 추세가 더 많은 사람과 자산에 피해를 입히고 있으며 많은 도시의 해안 인구와 재산 밀도가 높고 삼림이 줄어들고 있는 점을 감안할 때 피해는 훨씬 더 커질 것이라고 보고 있다[8-10]. 이러한 연구는 사회적 취약성(예: 소득 및 인구) 증가로 인한 피해를 고려치 않고 있어, 이러한 현상들이 단순히 기상 이변 및 열대 저기압의 증가로 보기는 어렵지만 그 추세는 분명하다고 판단하고 있다[11].

따라서 본 연구에서는 기후변화로 인한 태풍 패턴 변화가 주거시설에 미치는 영향을 정량화하고자 하였다. 이를 위해 한국에 영향을 미친 태풍 사례를 조사하여 태풍의 강도와 빈도 변화를 분석하고, 태풍의 변화에 따른 건물 손실피해 위험을 평가하였다. 이를 통해 태풍 변화로 인한 주거시설 피해 정량화 프레임 워크 제안하였다. 향후, 본 연구의 결과는 학술적으로 태풍 피해 예측 시나리오 도출 및 안전관리 시스템 개발의 기초자료로 활용되며, 실무적으로 다양한 태풍 대비 위험 관리 전략 수립에 기여할 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 목적은 기후변화와 태풍변화를 정량적으로 증명하는 것이다. 이를 달성하기 위해 본 연구는 Figure 1과 같이 진행된다. 첫째, 우리나라에 영향을 미친 태풍을 조사하여 태풍의 강도와 빈도의 변화를 분석하였다. 둘째, 태풍 패턴 변화로 인한 주거시설 피해 위험도를 정량화하였다. 태풍 위험도를 정량화하기 위해 재해 위험평가 모델의 주요 사용자인 보험사, 재보험사, vendor의 주거시설 대상의 한국형 태풍 취약성 함수를 사용하였다. 본 연구는 1973년부터 2022년까지 한국에 영향을 미친 태풍에 한정하였다. 따라서 본 연구의 연구 범위는 한국으로 한정한다.

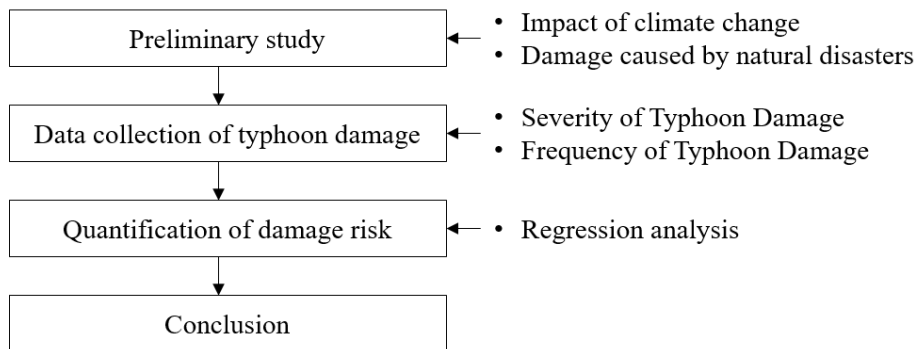


Figure 1. Research Methodology

2. 예비적 고찰

2.1 기후변화의 영향

유엔 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC)은 5차 평가 보고서(AR5)에서 기후 변화에 대해 경고하고 있다. 이 보고서는 산업화 이전 수준과 비교했을 때 2100년까지 지구 평균 기온이 모든 시나리오에서 1.5°C 이상 상승할 것으로 추정하고 있다. 또한 온실가스 배출이 계속되면서 온난화가 계속될 것이며, 더욱이 2.0°C를 넘을 가능성이 높다고 보고했다. 아울러, World Bank[12]도 비슷한 전망을 내놓고 있다. 이 연구에서는 지구 대기의 온실 가스로 인해 지구 온난화는 불가피하며 기온은 산업화 이전보다 1.5°C 높아질 것으로 보고 있다. 온실 가스 배출량을 줄이기 위한 합리적인 조치가 없다면 지구는 세기 중반까지 최대 2°C, 세기 말까지 최대 4°C까지 따뜻해질 것으로 예상하고 있다[12].

또한 Stern[13]은 배출량을 줄이기 위한 조치가 없을 경우 2035년 초에 온실 가스 농도가 산업화 이전 수준의 두 배에 도달하여 지구 온도가 거의 2°C 상승할 것이라고 전망하고 있다. 또한, 지구 온난화는 전 세계의 물 순환을 변화시켜 습한 지역과 건조한 지역의 차이를 증가시킬 것으로 예상하고 있다. 열이 더 깊은 바다로 확장됨에 따라 바다의 순환 패턴이 바뀌고 계속 따뜻해지며 지구의 빙하는 줄어들 것으로 보고 있다. 감소된 빙하로 인해 지구 평균 해수면은 지난 40년 동안의 상승률보다 더 빠르게 상승할 가능성이 클 것으로 예상하고 있다[14]. 위에서 언급한 바와 같이 많은 연구에서 지구 기후 변화가 확실하고 증가할 것임을 보여 주고 있으며 지구 온난화의 부작용에 대해 경고하고 있다[13].

기후변화의 경제적 영향에 관한 문헌은 다음과 같다. IPCC 5차 평가[14]는 3°C 이상으로 온난화가 증가하면 연간 국내 총생산의 0.2%에서 2.0%의 손실이 발생할 것이라고 보고했지만 피해 추정치는 국가마다 크게 다르다. 또한 온난화가 2°C를 초과하면 다양한 포트폴리오에서 마이너스 수익이 예상된다[15]. Dietz and Stern[16]은 지구 온난화가 4°C 수준에 도달하면 온난화가 없는 경우에 비해 연간 경제 생산량이 50% 감소할 것으로 추정하고 있다. 그들은 2100년까지 약 3.5°C의 온난화를 추정하고 있다. Stern[13]은 향후 2세기 동안 2.4~5.8°C의 지구 온난화 시나리오가 2100년까지 전 세계 연간 GDP의 평균 약 5%의 손실을 초래할 것이라고 추정되기도 한다. 지구 온난화에 대한 조치가 취해지지 않으면 광범위한 위험과 영향을 감안할 때 비용이 GDP의 20% 이상 증가할 것으로 예상하기도 한다. 또한 극한 날씨는 세기 중반까지 전 세계 GDP의 0.5~1%에 피해를 줄 수 있다고 추정되기도 한다[13].

Mendelsohn et al.[17]은 지구 온난화 시나리오(2010년까지 2.5°C 증가)를 사용하여 잠재적 피해를 연구했으며 총 시장 영향 비용이 2100년에 GDP의 0.1%를 초과하지 않을 것이라고 추정하였다. 시장 영향은 위도에 따라 다를 수 있다. 예를 들어, 저위도 국가에서는 온난화가 피해를 증가시킨다. 반면 소득은 고위도 지역에서 증가할 것으로 예상된다. 그러나 지구 온난화가 2.0°C 이상일 경우 편익은 감소하고 피해는 증가할 것으로 예상되고 있다. 또한 지구 온난화 시나리오(2060년까지 2.0°C 증가)의 피해가 2060년에 GDP에 총 0.3%의 피해를 줄 것으로 예상하고 있다. 아울러 2060년까지 2.0°C의 온난화로 대부분의 피해가 농업에서 발생할 것이며 그 피해는 국가마다 크게 다를 것이라고 보고 있다[17].

이러한 연구 결과에서 알 수 있듯이 기후 변화는 미래의 경제 성장과 생활 수준에 상당한 영향을 미칠 것으로 예측된다. 손실은 지역에 따라 다를 수 있지만 피해는 전 세계적으로 증가할 것으로 예상되고, 여기에 더해 기상이변으로 인한 피해가 가중될 것으로 예상하고 있다.

2.2 기후변화와 자연재해로 부터의 피해

자연재해로 인한 피해의 증가는 인구증가 및 부의 증가와 밀접한 관련이 있다. 세계 인구가 매년 증가하고 있고 부도 증가하고 있기 때문이다. 자연 재해로 인한 연간 피해는 이러한 부와 인구의 증가와 관련이 있을 수 있다. 따라서 기후변화와 자연재해로 인한 피해 증가를 객관적으로 정량화하기 위해서는 부와 인구의 증가도 동시에 고려해야 한다[18]. 이를 위해 많

은 연구에서 인구와 부의 변화에 대해 고려 후 기후변화와 피해를 살펴보았다. Nordhaus[19]는 1900년 이후 미국의 허리케인으로 인한 손실이 GDP에 대해서만 수정된 데이터에 따라 크게 증가했다고 주장했다. Changnon[20]은 미국에서 허리케인으로 인한 보험 손실이 1950년대 초반부터 2000년대 중반까지 증가했지만 그 증가는 미국 서부에 집중되었으며 최근 이 지역의 인구와 부의 증가로 인한 것으로 보고 있다. 그는 1992년 이후 미국에서 우박으로 인한 보험 손실에 관한 연구를 통해, 우박으로 인한 보험 손실 금액이 증가했지만 이는 도시 지역의 확장으로 인해 우박에 대한 노출과 취약성이 증가했기 때문으로 보고 있다.

또한 우박의 빈도에는 변화가 없었다[21]. Chang et al.[10]은 한국의 6개 도시에서 홍수 손실 조사를 통해 홍수 손실의 증가를 설명하고 있다. 홍수피해 증가의 원인은 인구증가와 여름철 강수량 및 삼림 벌채와 관련이 있는 것으로 발표했다[10]. Schmidt et al.[22]은 미국 허리케인 손실 변화에 명확한 추세가 있음을 발견하기도 했다.

그러나 이러한 추세는 1970년 이후에 나타났으며 부와 인구를 조정한 후에야 발견할 수 있었다[22]. Fengqing et al.[23]는 중국 신장 자치구의 홍수피해를 조사한 결과 1980년대 후반 이후 홍수피해가 증가했다고 보고 했다. 홍수증가의 원인은 기후 변화에 따른 폭우가 아니라 보호구역과 홍수조절구조물에 있다고 지적했다[23]. Changnon[9]은 미국 서부 지역에서 1974년 이후 강풍, 강우, 번개, 우박, 토네이도로 인해 정규화된 자료에 따라 피해가 증가했다고 보고했다. 그러나 뇌우 활동이 감소한 지역에서도 정규화 데이터에 따라 손실이 증가한 것으로 나타나 사회 경제적 요인이 이러한 추세에 기여했음을 시사하기도 했다[9].

Miller et al.[24]은 부와 인구 증가를 고려하여 전 세계 기후 재해에 대한 손실 데이터를 수정하여 분석했다. 그들의 주요 발견은 1970년 이후 기후 재해로 인한 손실이 증가했지만 이러한 추세는 1950년까지 확장되지 않는다는 것이다. 이전 연구와 마찬가지로 부와 인구는 기후 변화와 자연 재해로 인한 손실 간의 관계 연구에서 중요한 고려 사항이다. 그러나 인구와 부의 증가가 자연재해 피해 증가에 대한 중요 인자이기 때문에 관련 연구에서는 부와 인구를 적절하게 배제하기 어려운 것이 연구의 큰 어려움으로 작용하고 있다. 아울러, 기존 연구들은 자연재해 피해액의 증감만을 판단하고 있어 기후변화로 인한 건물 피해 변화에 대한 정량적 파악이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 기후변화와 자연재해로 인한 손실만을 정량적으로 연구하기 위해 부와 인구의 간섭을 배제하기 위해 취약성 함수를 사용하였고, 주거시설을 대상으로 기후변화로 인한 태풍의 변화에 따른 건물 손실피해 위험을 조사하였다.

3. 태풍의 변화

이 섹션에서는 태풍의 빈도와 강도 변화에 대해 조사하였다. 태풍 위험의 정도는 빈도와 심도의 곱에 의해 결정되기 때문에 빈도와 심도 모두 위험 결정에 중요한 역할을 한다. 따라서 자세한 조사를 위해 빈도와 심도를 별도로 조사하였다. 태풍의 빈도와 심도 변화에 대해 조사하기 위해 1973년부터 2022년까지 우리나라에 영향을 미친 태풍의 수와 태풍의 최대순간풍속 데이터를 기상청으로부터 수집하였다. 연도별로 25m/s 이상의 최대순간풍속을 가지는 태풍의 빈도는 Figure 2와 같다.

태풍의 풍속을 25m/s로 구분한 이유는 25m/s 이상의 풍속 발생 시 주거시설의 지붕이나 기왓장 파손이 발생하여 태풍으로 인한 직간접 피해가 발생하기 때문이다. 우리나라는 연간 평균 0.74회의 태풍의 영향을 받았고 표준편차는 0.72이었다. 조사 기간 동안 발생한 태풍의 최소 발생 수는 0건이었으며, 우리나라에 영향을 미치는 태풍의 발생 건수는 2건이 가장 많았다.

태풍빈도의 선형회귀는 $y=0.0161x-31.393$ 이고, 결정계수는 $(R^2)0.049$ 이었다. 이 회귀식의 기울기는 태풍 발생 연도와 횟수의 관계가 양(+)의 관계를 나타내어 태풍의 횟수가 매년 소폭 증가했음을 나타내고 있으나, 결정계수는 낮아 약한 상관관계를 보여주고 있다. 따라서 기후변화로 인해 주거시설에 피해를 유발할 수 있는 25m/s 이상의 최대순간풍속을 가지는 태풍 수가 매년 증가하고 있음을 보여주고 있다.

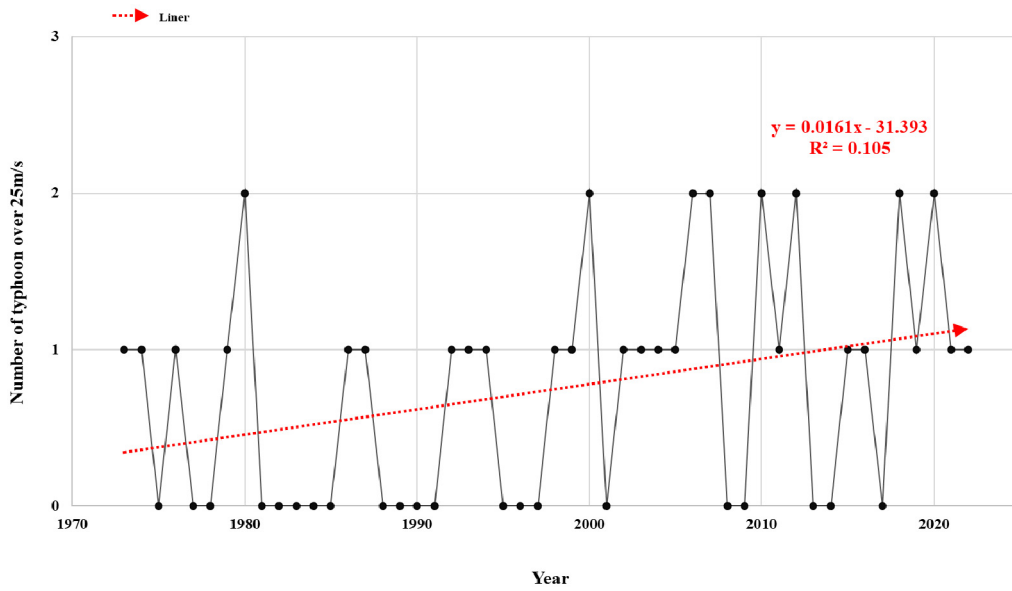


Figure 2. Frequency of typhoons exceeding 25m/s wind speed

태풍의 연도별 최대순간풍속은 Figure 3과 같다. 태풍이 우리나라에 영향을 미쳤을 때 96개 기상관측소에서 기록한 최고 풍속으로, 태풍별 최대순간풍속을 수집한 후 연도별로 최대풍속을 결정하였다. 평균 최대순간풍속은 40.59m/s, 표준편차는 9.62m/s였다. 최고 최대순간풍속은 63.7m/s, 최저 최대순간풍속은 23.6m/s였습니다.

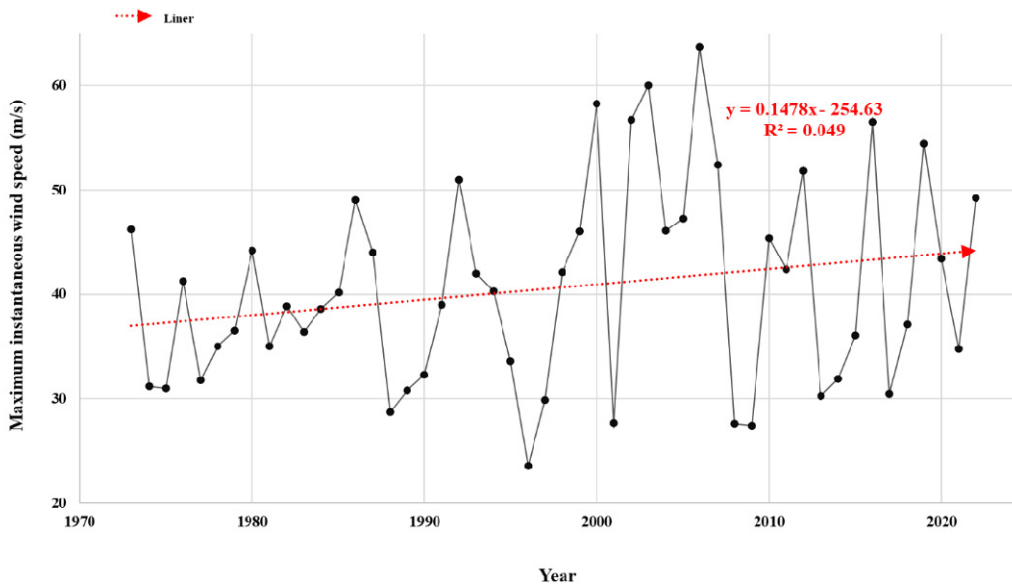


Figure 3. Annual trends in maximum instantaneous wind speed of typhoons

태풍 심도의 선형 회귀식은 $y=0.1478x-24.63$ 이고, 결정계수는 (R^2)0.105이었다. 이 회귀식의 기울기는 연도와 최대순간 풍속 사이의 관계가 양의 관계임을 나타내며, 결정계수는 매우 낮아 매우 약한 상관관계를 보여주고 있다. 따라서 기후변화로 인해 주거시설에 피해를 유발할 수 있는 최대순간풍속이 매년 증가했음을 나타낸다.

기상청의 태풍자료를 바탕으로 연도별 태풍의 빈도와 심도(최대순간풍속)를 조사하였다. 태풍의 빈도는 해마다 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 또한 태풍의 심도도 해가 갈수록 높아지는 것으로 나타났다. 따라서 태풍의 빈도와 강도 모두 매년 증가하고 있어, 태풍으로 인한 피해 위험이 높아졌다. 다만, 본 연구에 사용된 기상청의 자료는 1973년부터 2022년까지 약 50년 동안 기록된 것이므로, 추가적인 데이터 수집을 통해 추세를 주시할 필요가 있다.

4. 태풍 변화로 인한 피해의 변화

이 섹션에서는 변화된 태풍 패턴으로 인한 주거시설의 피해 위험을 정량화하고자 한다. 본 연구에서는 보험사, 재보험사, 벤더사에서 태풍 위험도를 정량화하기 위해 사용하는 한국형 태풍 취약성 함수를 채택하였다. 태풍에 대한 취약성 평가는 태풍위험 평가모델의 중요한 부분으로, 태풍의 피해 위험을 평가하기 위해 취약성 곡선 또는 취약성 함수를 사용하고 있다. 취약성 함수는 건물의 취약성을 정량화하여 표현한다. 태풍에 대한 취약성 함수는 각종 건물의 평균피해율, 풍속, 건물분류의 상관관계를 설명하고 피해규모를 결정한다. 평균피해율은 태풍으로 인해 건축물에 발생한 피해 총액을 건축물 총비용으로 나눈 값이다. 따라서 평균피해율은 태풍에 대한 건물의 취약성을 측정하는 척도로 사용된다. 예를 들어 평균 피해율이 높다는 것은 태풍에 대한 취약성이 높아 피해가 크다는 것을 의미한다. 취약성 함수는 건물의 재고정보, 풍속 등 다양한 피해지표를 통해 태풍에 대한 피해율을 정량화하여 기존 연구에서 발견된 재산 및 인구 등에 따른 피해 왜곡을 방지하기 위해 사용하였다[25].

태풍위험 평가모델(CAT, Catastrophic model)은 자연 재해 위험을 과학적으로 평가, 대응 또는 완화하기 위한 위험 평가 도구로서 여러 이니셔티브, 글로벌 관리 및 민간 이익에 의해 개발 및 사용되고 있다. 예를 들어, 공개 모델에는 미국의 HAZUS Multi-Hazard, 뉴질랜드의 RiskScape, 유럽의 MATRIX(New Multi-Hazard and Multi-Risk Assessment Method), 남미의 Central America Probabilistic Risk Assessment 등이 있다. 벤더 모델에는 자연 재해 및 기타 위험에 대한 모델을 비즈니스 모델로 개발하고 사용하는 위험 관리 솔루션, 응용 보험 연구 및 위험 정량화 및 엔지니어링이 포함된다. 보험회사에서는 자체 또는 벤더 모델을 적극적으로 사용하여 자연 재해로 인한 위험을 정량화하고 있다.

보험회사에서는 CAT 모델을 사용하여 포트폴리오, 자본, 비즈니스 선호도, 보유 전략을 관리하고 자연 재해의 정량화된 위험을 기반으로 인수 물건의 모니터링을 수행한다[25,26]. CAT 모델은 일반적으로 위험 모듈, 노출 모듈, 취약성 모듈 및 재무 모듈로 구성된다.

각 모듈은 독립적인 기능을 가지고 있으며 모듈의 동작은 순차적으로 진행된다. 첫째, 위험 모듈은 이벤트를 생성하고 로컬 강도를 계산하여 이벤트를 물리적으로 정의하고 자연 재해의 심도와 빈도를 규정한다. 둘째, 노출 모듈은 건물에 대한 인벤토리 및 지리 정보를 구현한다. 셋째, 취약성 모듈은 풍속과 건물재고정보를 바탕으로 평균피해율을 결정하는 취약성 함수를 기반으로 피해율을 제공한다. 마지막으로 재무 모듈은 공제액 및 책임 한도와 같은 특정 보험 요소를 적용하여 재무 손실을 계산한다[25]. 예를 들어 해저드 모듈에서는 특정 지역의 과거 태풍의 특성에 따라 시뮬레이션을 통해 태풍의 강도와 빈도를 정의한다. 노출 모듈에서 특정 지역에 있는 건물의 인벤토리 특성 및 지리적 특성에 따라 풍속이 결정된다. 결정된 풍속에 따라 취약성 모듈은 취약성 함수를 통해 피해량을 계산한다. 계산된 피해액은 금융 모듈의 보험 조건을 고려하여 계산된다.

본 연구에서는 태풍 피해의 정량화를 위해 다음과 같은 순서로 진행되었다. 첫째, 기상청에서 매년 태풍 내습시의 최대순간풍속 자료를 취합하였다. 둘째, 각 최대순간풍속을 태풍 취약성 함수에 입력하고 피해율을 시뮬레이션 하였다. 셋째, 연도별 피해율 분석을 통해 피해율 변화를 분석하였다. 태풍 취약성 함수를 사용함으로써 객관적이고 과학적인 피해율 변화 분석이 가능하고, 인구와 부와 같이 피해에 영향을 줄 수 있는 인자들을 완전히 배제함으로써 결과의 편향성을 배제하였기 때문에 산출 결과에 대한 타당성을 확보하였다.

분석 결과는 Figure 4와 같다. 태풍의 피해율의 선형 회귀식은 $y=0.0038x$ 이다. 이 회귀식의 기울기는 연도와 피해율 사이의 관계가 양의 관계임을 나타내며 피해율이 매년 증가했음을 잘 보여 준다.

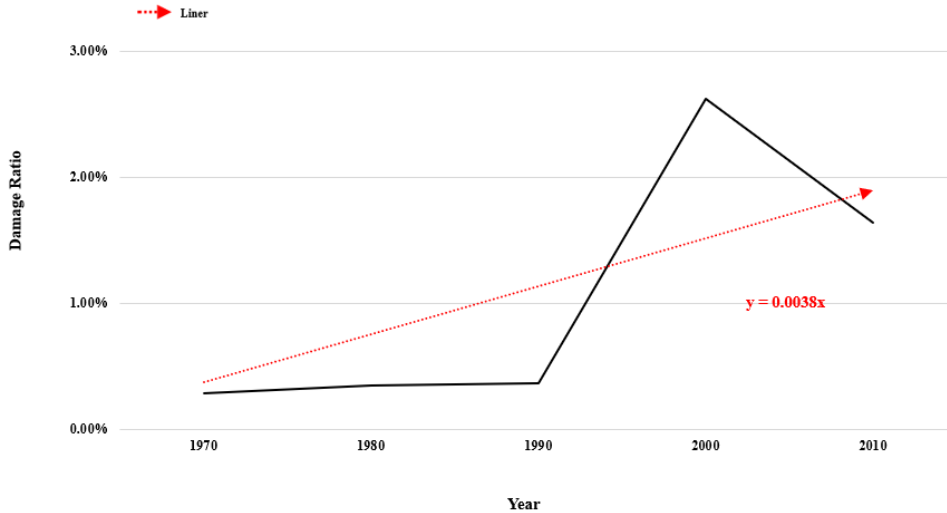


Figure 4. Decadal variations in damage ratios

자세한 분석 결과는 Table 1과 같다. 피해 증가율을 명확히 보여주기 위해 태풍 자료가 기록되기 시작한 1970년대부터 최근 2010년대까지의 10년 단위로 비교하였다. Table 1과 같이 매년 평균 피해율이 증가하고 있으며, 1970년과 대비하여 모든 단위에서 피해율이 증가하고 있으며 그 증가폭도 상승하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Comprehensive descriptive statistics

Decades	Standard Deviation	Mean	Coefficient of Variation	Variation Percentage*
1970	0.29%	0.23%	0.80	-
1980	0.35%	0.29%	0.84	14.33%
1990	0.37%	0.31%	0.84	19.47%
2000	2.63%	2.55%	0.97	528.72%
2010	1.65%	1.57%	0.96	307.21%

*Damage rate increase rate per decade(%)=(Decade - 1970s)/1970s

아울러, 피해 증가율은 1970년대에 비해 수십 년 동안 점진적으로 증가하여 최근 2010년대에는 307.21% 증가하였다. 2000년대에는 528.72%까지 치솟았다. 이는 역사상 가장 많은 피해와 풍속을 기록한 태풍 매미(2001년)와 루사(2002년)로 기인 것으로 판단된다. 변동 계수(Coefficient of Variation)는 측정 단위가 상이한 경우 상호 비교를 위해 사용된다. 변동계수는 표준 편차를 산술 평균으로 나눈 값으로, 변동계수가 클수록 상대적인 차이가 커진다. 변동계수도 10년마다 꾸준히 증가해 태풍의 강도(최대순간풍속) 차이가 커진 것으로 나타났다. 과거에 비해 현재 다양한 강도의 태풍이 발생하고 있어 현재의 태풍은 과거 태풍보다 더 다양한 피해구간을 나타낼 수 있음을 시사한다. 이들 값(평균, 증가율, 변동계수)은 태풍으로 인한 주거시설의 피해 위험이 과거 1970년대보다 커졌음을 증명한다.

5. 토론

본 연구는 기후변화로 인한 태풍의 변화를 정량적으로 연구하였다. 과거 우리나라에 영향을 미친 태풍을 조사하여 태풍의 강도와 빈도 변화를 분석하였다. 분석 결과 태풍의 빈도와 강도 모두 증가한 것으로 나타났다. 이는 태풍의 위험이 점진적으로 커지고 있음을 나타낸다. 증가된 태풍 위험도를 정량화하기 위해 본 연구에서는 부와 인구에 영향을 받지 않는 CAT 모델의 취약성 함수를 사용하였다. 그 결과 1970년대, 1980년대, 1990년대, 2000년대, 2010년대에 걸쳐 태풍의 위험이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 주거시설은 평균적으로 217.43% 피해 위험이 증가한 것으로 나타났다. 또한 2000년대는 태풍 매미와 루사의 영향으로 가장 큰 증가율을 보였다. 이 2개의 태풍은 국내 최대 규모의 태풍이었으나 일반적으로 15~30주기의 태풍으로 간주되기 때문에 분석에 포함시켰다.

따라서, 분석 결과 태풍으로 인한 피해위험이 매년 크게 증가한 것으로 나타났다. 이러한 이유로 변화하는 상황과 증가하는 위험에 대응하기 위한 새로운 전략이 요구된다. 보험 업계는 태풍, 허리케인과 같은 열대성 저기압에 매우 민감하다. 예를 들어 미국의 11개 보험사는 허리케인 Andrew(1992)로 인해 파산하기도 했다. 따라서 피해 위험 증가에 대한 요율 책정, 정책 조건 및 재보험에 대한 검토가 필수적이다. 요율 책정 측면에서 현재 보험료를 인상하고 현재 예상되는 최대 손실 및 책임 한도를 수정할 필요가 있다. 또한 변경된 요율로 인해 인수, 유지 및 누적 관리 전략의 변경이 불가피할 것으로 예상된다. 정책 조건은 기존 보험 정책의 범위를 검토해야 한다. 임의 및 재보험 계약에서는 초과 피해에 대한 새로운 전략과 확대된 위험에 대한 계층화가 필요하다. 또한 적절한 CAT 모델 활용으로 가중 위험의 정확한 정량화를 통해 보험료를 산정하는 것이 중요하다. 반면 위험 증가는 정부나 민간 부문의 적극적인 위험 전가가 요구되므로 보험산업에는 새로운 기회가 될 수도 있다. 향후 CAT 펀드의 도입을 통한 피해를 헤지하는 것도 바람직하다. CAT 펀드는 미국, 독일 등 선진국에서 보험회사의 리스크가 인수능력을 넘어설 때 채권 발행을 통해 재보험 기능을 분산시키는 용도로 쓰인다.

또한, 건설업과 같이 외기에 많이 노출되는 산업의 경우, 태풍으로 인한 피해가 증가 될 것으로 예상되므로 보다 면밀한 풍수해 대책이 요구된다. 특히 태풍 내습이 잦은 남부 지역이나 해안가 지역의 건설현장에서는 우수 유입으로 인한 침수, 토사 유실 및 붕괴 등의 대비를 위한 가배수로 계획 및 추가적인 침사지, 집수정의 계획이 필요하다. 또한, 강풍에 따른 건설기계 및 건설자재, 공구의 넘어짐이나 비산 방지를 위해 안전조치의 강화가 필요하다.

아울러, 정부는 극한 기상 재해를 견딜 수 있는 지속 가능한 건축 환경을 조성하기 위해 건축 설계 기준 및 규정을 강화해야 한다. 또한 과거 건축법규로 지어진 노후 건축물에 대해서는 별도의 관리지침이 필요하다. 태풍이 발생하는 동안 인프라, 라이프라인 및 운송 시스템을 유지 관리하는 것은 인명 및 재산 피해를 줄이는 데 매우 중요하므로 보다 발전된 관리 시스템이 필요하다. 아울러, 풍수해 위험지역도 풍수해보험 의무가입을 통해 피해 위험을 적극적으로 전가하도록 의무화해야 한다. 이를 통해 지역 사회와 주민들이 변화하는 상황에 적절하게 대응할 수 있을 것이다.

6. 결론

많은 역사적 사건 및 피해 분석 연구는 기후 변화와 열대 저기압에 미치는 영향에 대해 계속해서 연구되고 있다. 따라서 본 연구는 기후변화와 태풍변화에 대한 과학적이고 정량적인 연구를 위해 우리나라에 영향을 미친 과거 태풍을 조사하여 태풍의 강도와 빈도를 분석하고 이러한 변화로 인한 피해를 정량화하는 프레임워크를 제안하는데 목적이 있다. 그 결과 태풍의 빈도와 심도가 해마다 증가하고 이에 따라 태풍으로 인한 위험도 해마다 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 기후 변화가 태풍에 영향을 미치고 있음을 시사한다. 따라서 기후변화에 대한 정부와 산업계의 적극적인 대응과 리스크 저감이 노력이 필요하다.

한편, 본 연구는 풍속만을 고려하였기 때문에 추가적인 주거시설의 인벤토리 정보를 사용하면 결과가 달라질 수 있으며

로 주거시설의 인벤토리 정보를 사용한 추가 연구가 필요하다. 아울러, 지리적 위치에 따라 다른 결과를 얻을 수 있기 때문에 지리적 위치에 따른 결과 분석을 위한 추가 연구가 필요하다. 또한, 본 연구는 연구 범위를 한국으로 제한되어 있기 때문에 다른 국가와는 결과가 상이 할 수 있다. 우리나라보다 해안 개발이 많은 나라는 태풍 위험 변화에 더 취약할 수 있고, 시공 능력이나 유지 관리 시스템이 좋은 나라는 태풍 위험 변화에 더 잘 적응할 수 있다. 아울러, 기후 변화 및 위험 감소에 대한 적응 정책은 본 연구에 포함되지 않았다. 개인이나 기관의 적극적인 기후변화 적응 정책과 프로그램을 통해 피해를 줄일 수 있으며 이를 포함하는 종합적인 연구가 필요하다.

요약

본 연구의 목적은 기후변화로 인한 태풍 변화에 대해 알아보고, 이로 인한 주거시설의 피해위험을 정량화하는 것이다. 전 세계적으로 지구온난화로 인한 기후이상과 악기상이 급증하고 있으며, 이로 인한 피해가 급증하고 있다. 특히, 많은 국가에서는 태풍의 패턴 변화로 인해 극심한 피해를 경험하고 있다. 그러나 기후변화에 따른 태풍의 변화와 변화한 위험으로 인한 건물 피해에 대한 실증적 정량화 연구는 부족하다. 따라서, 본 연구에서는 태풍의 변화를 알아보기 위해 우리나라에 영향을 미친 태풍의 빈도와 강도를 분석해 보고, 주거시설의 한국형 태풍 취약도 함수를 활용하여 태풍의 위험변화를 정량화하였다. 본 연구를 통해 민간에서는 기후변화로 인한 태풍 위험의 증가에 따른 다양한 태풍 피해 시나리오 도출 및 비즈니스 모델 도출이 가능하며, 정부에서는 다양한 태풍 대비 위험 관리 전략을 수립할 수 있을 것이다.


키워드 : 기후변화, 주거시설, 태풍, 건물피해


Funding

This research was funded by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2022R1F1A106314112).

This research was supported by a grant from the National Research Foundation of Korea by Ministry of Science, ICT and Future Planning(NRF-2021R1C1C2091677).

ORCID

Ji-Myong Kim,  <https://orcid.org/0000-0002-1907-4291>

Seunghyun Son,  <https://orcid.org/0000-0003-1349-5586>

References

1. Rosario D, Eduardo, D. Final report eects of typhoon YOLANDA (HAIYAN) (Report). Quezon City (Philippines): National Disaster Risk Reduction and Management Council; 2014 [accessed on 20 April 2019]. Available From: http://www.ndrrmc.gov.ph/attachments/article/1329/FINAL_REPORT_re_E_ects_of_Typhoon_YOLANDA_HAIYAN_06-09NOV2013.pdf
2. United States National Hurricane Center. Costliest U.S. tropical cyclones tables update. FL: United States National Hurricane Center; 2018. Available From: <https://www.nhc.noaa.gov/news/UpdatedCostliest.pdf> (accessed on 31 May 2020).
3. Ulbrich U, Fink AH, Klawa M, Pinto JG. Three extreme storms over Europe in December 1999. *Weather*. 2001 Mar;56:70-80.

<https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.2001.tb06540.x>

4. Emanuel K, Sundararajan R, William J. Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2008 Mar;89(3):347-68. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-347>
5. Webster PJ, Holland GJ, Curry JA, Chang HR. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*. 2005 Sep;309(5742):1844-6. <https://doi.org/10.1126/science.1116448>
6. Solomon S, Qin D, Mannin M, Marquis M, Averyt K, Tignor MMB, Miller HL, Chen Z. *Climate change 2007: The physical science basis*. Cambridge (United Kingdom): Intergovernmental Panel on Climate Change; 2007. 1007 p.
7. Landsea CW, Harper BA, Hoarau K, Knaff JA. Can we detect trends in extreme tropical cyclones?. *Science*. 2006 Jul;313(5786):452-4. <https://doi.org/10.1126/science.1128448>
8. Watson RT, Core Writing Team. *Climate Change 2001 Synthesis Report*. Cambridge (United Kingdom): Intergovernmental Panel on Climate Change; 2001. 409 p.
9. Changnon SA. Damaging thunderstorm activity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001 Apr;82(4):597-608. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0597:DTAITU>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0597:DTAITU>2.3.CO;2)
10. Chang H, Franczyk J, Kim CH. What is responsible for increasing flood risks? The case of Gangwon Province, Korea. *Natural Hazards*. 2008 Jul;48:339-54.
11. Pielke RA, Gratz J, Landsea CW, Collins D, Saunders MA, Musulin R. Normalized tropical cyclone damage in the united states: 1900-2005. *Natural Hazards Review*. 2008 Feb;9(1):1-29. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2008\)9:1\(29\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2008)9:1(29))
12. The World Bank. *Turn down the heat: Confronting the new climate normal*. World Bank. WA: The World Bank; 2013. 275 p.
13. Stern N. *The economics of climate change: The stern review*. Cambridge (United Kingdom): Cambridge University Press; c2006. PART II, *The Impacts of Climate Change on Growth and Development*; p. 67-73.
14. Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL. *Summary for policymakers: Climate change 2014 impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge (United Kingdom): ntergovernmental Panel on Climate Change; c2014. Part A, *Global and sectoral aspects*; 32 p.
15. Mercer LLC. *Investing in a time of climate change* [Internet]. London (United Kingdom): Mercer International Finance Corporation and the UK Department for International Development. 2019 Apr 20. Available From: <http://www.mercer.com/services/investments/investment/opportunities/responsible-investment/investing-in-a-time-of-climate-changereport-2015.html>
16. Dietz S, Stern N. Endogenous growth, convexity of damages and climate risk: How nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions. *The Economic Journal*. 2015 Mar;125(583):574-620. <https://doi.org/10.1111/ecoj.12188>
17. Mendelsohn R, Schlesinger M, Williams L. Comparing impacts across climate models. *Integrated Assessment*. 2000 Mar;1(1):37-48. <https://doi.org/10.1023/A:1019111327619>
18. Bouwer LM. Have disaster losses increased due to anthropogenic climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011 Jan;92(1):39-46. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3092.1>
19. Nordhaus WD. The economics of hurricanes and implications of global warming. *Climate Change Economics*. 2010 Jul;01(01):1-20. <https://doi.org/10.1142/S2010007810000054>
20. Changnon SA. Increasing major hail losses in the U.S. *Climatic Change*. 2009 May;96(1-2):161-6. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9597-z>
21. Changnon SA. Temporal and spatial distributions of wind storm damages in the United States. *Climatic Change*. 2008 Nov;94(3-4):473-82. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9518-6>
22. Schmidt S, Kemfert C, Hoppe P. Tropical cyclone losses in the USA and the impact of climate change: A trend analysis based on data from a new approach to adjusting storm losses. *Environmental Impact Assessment Review*. 2009 Nov;29(6):359-69. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.03.003>

23. Fengqing J, Cheng Z, Guijin M, Ruji H, Qingxia M. Magnification of flood disasters and its relation to regional precipitation and local human activities since the 1980s in Xinxiang, Northwestern China. *Natural Hazards*. 2005 Nov;36:307-30. <https://doi.org/10.1007/s11069-005-0977-z>
24. Miller S, Muir-Wood R, Boissonnade A. An exploration of trends in normalized weather-related catastrophe losses. *Climate extremes and society*. 2008 Nov;12:225-47. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535840.014>
25. Kim JM, Kim T, Son K. Revealing building vulnerability to windstorms through an insurance claim payout prediction model: A case study in South Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2017 Jun;8(2):1333-41. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1337651>
26. Sanders DEA, Brix A, Duffy P, Forster W, Hartington T, Jones G, Levi C, Paddam P, Papachristou D, Perry G, Rix S. The management of losses arising from extreme events. London (United Kingdom): Proceedings of the Convention General Insurance Study Group GIRO; 2019. 261 p.