

민간기업을 위한 물리적 기후리스크 추정 연구

최용상^{1)*} · 유창현¹⁾ · 공민정¹⁾ · 조민정¹⁾ · 정해수¹⁾ · 이윤경²⁾ ·
박선기¹⁾ · 안명환¹⁾ · 황재학³⁾ · 김성주³⁾

¹⁾이화여자대학교 기후·에너지시스템공학과, ²⁾이화여자대학교 기후·환경변화예측연구센터,
³⁾금융감독원 지속가능금융융팀

(접수일: 2023년 10월 4일, 수정일: 2023년 11월 13일, 게재확정일: 2023년 11월 28일)

Estimation of Physical Climate Risk for Private Companies

Yong-Sang Choi^{1)*}, Changhyun Yoo¹⁾, Minjeong Kong¹⁾, Minjeong Cho¹⁾, Haesoo Jung¹⁾,
Yoon-Kyoung Lee²⁾, Seon Ki Park¹⁾, Myoung-Hwan Ahn¹⁾, Jaehak Hwang³⁾, and Sung Ju Kim³⁾

¹⁾Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

²⁾Center for Climate/Environmental Change Prediction Research, Ewha Womans University, Seoul, Korea

³⁾Financial Supervisory Service, Seoul, Korea

(Manuscript received 4 October 2023; revised 13 November 2023; accepted 28 November 2023)

Abstract Private companies are increasingly required to take more substantial actions on climate change. This study introduces the principle and cases of climate (physical) risk estimation for 11 private companies in Korea. Climate risk is defined as the product of three major determinants: hazard, exposure, and vulnerability. Hazard is the intensity or frequency of weather phenomena that can cause disasters. Vulnerability can be reflected in the function that explains the relationship between past weather records and loss records. The final climate risk is calculated by multiplying the function by the exposure, which is defined as the area or value of the target area exposed to the climate. Future climate risk is estimated by applying future exposure to estimated future hazard using climate model scenarios or statistical trends based on weather data. The estimated climate risks are developed into three types according to the demand of private companies: i) climate risk for financial portfolio management, ii) climate risk for port logistics management, iii) climate risk for supply chain management. We hope that this study will contribute to the establishment of the climate risk management system in the Korean industrial sector as a whole.

Key words: Climate risk, Hazard, Exposure, Vulnerability, Private company

1. 서 론

전 세계에서 기상이변으로 인한 경제적 피해 사례가 속출하고 있다. 최근(2021년 2월) 미국 텍사스에서는 한파로 인해 전력 공급망에 문제가 발생하여 전국

적으로 정전이 발생하였다. 이로 인해 생산라인 중단, 항공편 취소, 가정용 가스 공급 감소 등으로 인한 경제적 피해가 발생했다. 글로벌 원유 공급망에도 차질이 발생하였다. 같은 해 여름(2021년 7월) 유럽에서는 기록적인 폭우와 홍수가 발생하여 수많은 인명과 재산 피해가 발생했다. 독일과 벨기에에서는 각각 150명 이상이 사망하였고, 인프라 및 주택 등 부동산에 대한 손실도 막대했다.

우리나라도 기상이변으로 인한 피해가 적지 않다. 우리나라 주로 태풍, 홍수로 인한 물적 피해가 주

*Corresponding Author: Yong-Sang Choi, Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University, 52 Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul 03760, Korea.
Phone: +82-2-3277-4461, Fax: +82-2-3277-3275
E-mail: ysc@ewha.ac.kr

요한데, 지금까지 집계된 연간 공공분야 평균 피해액은 약 3,691억 원이다(MOIS, 2022). 최근 기록적으로(2020년 7월 중순부터 한 달간) 지속된 장마로 인해 경기, 강원, 충청 등 지역에서 대규모 홍수 피해가 발생하였다. 이때 전국적으로 70여 명의 사망자가 발생하였으며, 침수로 인해 대규모 재산 피해도 발생하였다. 2022년 9월 태풍 ‘힌남노’로 포스코 포항제철소에 침수 피해가 발생하여 막대한 손실이 발생하였다. 2023년 7월에는 집중호우로 인해 전국에 인명 피해가 속출하였다. 이처럼 태풍 및 집중호우 수해가 매년 여름철 반복되고 있다(e.g., Franzke et al., 2023; Nam et al., 2023; Oh et al., 2023). 이와는 반대로 봄 가뭄으로 인한 산불 피해도 매년 보고되고 있다. 2018년 여름에는 폭염이 지속되어 농작물에 큰 피해가 발생했다. 특히 고추 등 열매 채소의 경우 수확량이 줄어들면서 가격이 폭등하였다.

이와 같이 태풍, 홍수, 가뭄, 폭염과 같은 극한 기상현상으로 발생한 물적 피해를 ‘기후리스크(climate risk)’라고 하며, 이를 특별히 에너지 ‘전환리스크(transition risk)’와 구분하여 기후의 ‘물리적리스크(physical risk)’라고 한다(TCFD, 2017). 본 논문에서는 기후의 물리적리스크만을 다루므로 물리적리스크를 편의상 기후리스크로 지칭하겠다. 기후리스크라는 용어는 2006년 영국의 경제학자인 Nicholas Stern이 발표한 ‘Stern Review on the Economics of Climate Change’ 보고서에 처음 등장하였다. 이후 기후리스크는 경제계에서 점차 중요한 개념으로 자리 잡았고, 새로운 ESG (Environmental, Social, and Governance) 기업 공시 및 평가를 대비해, 과학적 데이터 기반으로 분석해야 할 핵심 요소로 인식되고 있다. 2019년 세계경제포럼에서 발표된 보고서에 따르면, 기후리스크는 글로벌 경제리스크의 요인 중에서 가장 높은 위험성을 가지고 있다(WEF, 2019). 국제통화기금은 2019년 10월 기후변화로 인한 자연재해 발생이 세계 경제 성장률에 부정적인 영향을 미치는 것으로 분석하며 이러한 영향이 특히 개발도상국에서 더욱 크다고 경고했다. 세계은행은 2020년 11월 지속가능개발목표(SDGs) 중 하나인 ‘기후변화 대응’ 부족으로 인해 기후리스크가 매년 최대 5.2조 달러로 예상된다고 경고했다(IMF, 2019). 2023년 세계은행 보고서(World Bank, 2023)에서는 기후변화가 농작물 생산, 해양 생태계, 인프라, 건강 등 여러 분야에서 경제적 영향을 미치고 있으며, 특히 인프라 파괴와 자연재해로 인한 인명피해 등을 초래하는 등 인류 복지에 직접적인 영향을 미친다는 것을 강조했다. 이러한 보고서나 연구 결과들은 모두 기후리스크가 전반적으로 세계 경제에 적지 않은 부정적인 영향을 미치고 있다고 보고 있는 것이다.

이처럼 실제 피해 사례들이 누적되고, 국제사회에서 지속적으로 경고함에 따라, 기후리스크는 이제 민간기업의 경영에 실질적인 리스크로 인식되고 있다. 이에 기업에서는 잠재적 기후리스크에 대한 체계적 관리의 필요성이 매우 중요해지고 있다. 기업 입장에서 기후리스크의 관리는 두 가지 측면에서 중요하다. 첫째로, 기후리스크의 공시 의무에 대한 대비이다. 기업 공시 중 가장 중요한 것 중 하나인 기후변화 재무 정보공개 전담협의체(Task Force on Climate-Related Financial Disclosures, TCFD)는 기업이 기후변화 관련 위험과 기회를 식별하고 관리하며, 이를 투자자와 공유하기 위한 국제적인 표준 가이드라인으로 2015년도에 설립되어, 2017년 TCFD 권고안이 발표되었다. TCFD 권고안은 기업이 기후변화 관련 위험 요인을 식별하고 해당 위험에 대한 대응 전략을 평가하고 개발하여 공시함으로써, 기업의 재무상태에 영향을 미칠 수 있는 기후변화 위험에 대한 정보의 투명성을 높이고 투자자의 기업평가에 도움을 준다. 우리나라에서 TCFD 지지를 선언한 기업은 2023년 8월 기준 181개이다(TCFD, 2023). 그 외에도, ISO (International Organization for Standardization)에서는 기후 변화에 대한 적용과 관련된 ISO14090 표준을 발표하였으며 이 외 다양한 공시 기준들이 소개되고 있다. 2021년 11월 국제회계기준(International Financial Reporting Standards, IFRS) 재단이 국제지속가능성기준위원회(International Sustainability Standards Board, ISSB)를 설립하고, 2024년부터는 TCFD의 기후공시모니터링 업무를 IISSB로 이관하기로 하였고, 이를 통해 현재의 다양한 공시 기준을 통일하게 된다. 2023년 6월 공개된 IFRS S1, S2 최종안은 ESG 기준 최초로 글로벌 ‘공통 언어’를 제시했다는 점에서 의의가 있다. IFRS S1은 기업이 단기, 중기 및 장기적으로 직면하는 지속 가능성 관련 위험과 기회에 대해 투자자에게 전달할 수 있도록 설계된 일련의 공시 요구사항을 제공하고, IFRS S2는 특정 기후 관련 공시를 명시하며 IFRS S1과 함께 사용하도록 설계되었다. 통일된 권고안은 2024년 1월부터 적용될 예정이다(IFRS, 2023a, 2023b).

둘째로, 민간기업에서 언제 어디서 찾아올지 모르는 기후리스크를 추산해 경영 의사결정에 반영해야 급작스러운 재무적 피해를 줄일 수 있다. 지금까지 전 세계에서 자연재해로 인한 실질적 기업 피해 사례는 앞서 자세히 설명한 바 있다. 이에 국내에서는 금융감독원이 2021년 12월 기후리스크 관리지침서를 발표하여 금융권의 기후리스크 관리 체계 확보를 사전 권고하였다(FSS, 2021). 세계 경제의 추세로 볼 때 수년 내 이는 의무 사항으로 바뀔 것이다. 이러한 준비에 미온적인 기업은 지속가능지수 등 기업 평가의 하

락을 면치 못해 외부 투자 유치에 불리해진다. 이 두 가지 측면 모두 현재와 미래의 기후리스크에 대한 구체적 산정값을 요구하므로 과학 기반의 기후리스크 추산이 절실히 필요한 상황이다.

하지만 지금까지 이에 대한 구체적 연구가 보고되지 않아 아직 이론적 기반은 매우 빈약한 상황이다.

Hwang (2022)에 따르면 은행권에 기후리스크를 적용하는 초기 연구가 진행된 정도이다. 따라서 본 연구는 우리나라 민간기업의 기후리스크 추정 모형 사례를 유형별로 정리하여 소개하고 사용된 자료 및 방법과 고려사항들을 정리하였다. 이 연구를 통해 저자들은 우리나라 산업 전반의 기후리스크 산정이 궁극적으로 과학적 기반 하에 이루어 질 수 있도록 기여하고자 한다. 2장에서는 기후리스크 추정 방법론 개발에 관한 기본 원리를 설명하며, 3장에서는 금융 자산 관리, 항만 수출입 화물관리, 해외 공급망 관리에 관한 기후리스크 추정 사례를 소개한다.

2. 기후리스크 추정의 기본 원리

기후리스크 추정은 지금까지 다양한 방식으로 이루어졌으나, 가장 보편적으로 통용되는 개념은 다음과 같다(Wolfgang Kron, 2005; IPCC, 2012; UNDRR, 2016; Zscheischler et al., 2018; Claassen et al., 2023):

기후리스크 = 해저드(Hazard)

× 취약성(Vulnerability) × 노출도(Exposure) (1)

여기서 오른쪽의 세 항 모두 중요한 기후리스크의 결정 요소로서, 이 중 하나라도 커지면 기후리스크가 커진다.

The 2^o Investing Initiative (2019) 보고서를 발간한 독일의 씽크탱크 연구기관인 2DII (The 2^o Investing Initiative)에서는, 이 식(1)을 이용해 SecReg이란 모델을 구축하였다. 이 SecReg 모델에서는 해저드 강도를 3단계, 업종별 취약성을 3단계, 지역별 노출도를 3단계로 나누어 세 요소의 경우의 수인 총 27 등급으로 리스크를 추정하고, 이에 따라 시나리오별 신용등급 하락을 추정하는 방법을 제시하였다(British Embassy, 2021).

식(1)에서 가장 핵심이 되는 항은 해저드이다. 해저드는 대기과학, 수문학 등 자연과학 분야에서 어떤 특정 물리량을 지칭하는 용어는 아니다. 하지만 본 논문에서 식(1)의 해저드는 잠재적으로 물적피해를 야기할 수 있는 각종 기상현상의 심도(또는 강도)와 빈도를 통칭한다. 예를 들어, 강우강도가 강할수록 강우빈도가 잣을수록 리스크는 커지는 법이다. 현재 대부분 민간기업의 주요 수요는 중장기(수 년-수십 년) 기후리스크에 있다. 따라서 홍수 리스크를 계산하기 위

Table 1. Variable of some extreme climate index (Source: Korea Meteorological Administration, http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/info/how_use.html?m1=1&m2=2).

No.	변수명	정의	단위
1	폭염일수 (HW33)	일최고기온이 33°C 이상인 날의 연중일수	일
2	열대야일수 (TR25)	밤최저기온이 25°C 이상인 날의 수	일
3	서리일수 (FD0)	서리는 대기 중의 수증기가 승화 작용에 의해 지면이나 지상의 물체에 얼음 결정체로 붙어 있는 현상을 말하며, 서리일수는 관측자가 직접 관측한 현상일 일최저기온이 0도 미만인 날의 연중일수	일
4	결빙일수 (ID0)	결빙은 옥외에 있는 물이 동결하는 현상을 말하며, 결빙일수는 관측자가 직접 관측한 현상일 일최고기온이 0도 미만인 날의 연중일수	일
5	한파일수 (CWm12)	아침 최저기온(03:01~09:00)이 영하 12도 이하인 날의 수 일최저기온이 -12°C 이하인 날의 연중일수	일
6	호우일수 (RAIN80)	일강수량이 80 mm 이상인 날의 연중일수	일
7	5일 최다강수량 (RX5DAY)	연중 5일 누적 강수량(0.1 mm 이상 강수량) 중 최대값	mm
8	95퍼센타일 강수일수 (RD95P)	1 mm 이상인 일강수량이 기준기간의 상위 95퍼센트보다 많은 날의 연중 일수	일

해 해저드에 연도별 기상지수 값(호우일수, 총 강수량 등)을 사용할 수 있다. 하지만 앞으로는 해저드의 계절예측 및 수 시간 내 급작스럽게 발생할 해저드의 예측과 관리도 점차 중요해질 것이다. 해저드에 사용되는 각종 기상지수는 이미 대기과학 분야에서 다양하게 정의되고 기록되어 왔다(e.g., Karl et al., 1999). 하지만 어떤 기상지수를 민간기업의 기후리스크 추정에 사용할지, 민간기업에서 실제적 리스크로 인식하는 현상을 설명하기 위한 추가 기상지수 개발이 필요한지에 대해 앞으로 심도 있는 논의가 필요하다.

과거 해저드 값은 기상관측 자료를 사용하여 계산될 수 있다. 기상청은 현재 종관기상관측(ASOS)와 방재기상관측(AWS)을 통해 얻은 과거에서 현재까지의 각종 기상지수 자료를 일반에 공개하고 있다. Table 1은 기상청 기상자료개발포털(<https://data.kma.go.kr/>)에서 제공하는 기상현상 일수 목록과 극한기후지수의 일부이다. 이 외에도, 기상청에서는 계급별 일수 및 기온, 강수량, 바람 자료도 제공하고 있다.

미래의 해저드 값은 전세계 기후 모델에서 모의한 온실가스 배출 시나리오에 따른 미래 기후 전망치를 사용할 수 있다. 온실가스 배출 시나리오는 크게 두 종류가 있다. 우선 RCP (Representative Concentration Pathways, 대표농도경로) 시나리오는 기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 제5차 평가 보고서(IPCC, 2014)에서 사용한 표준 온실가스 시나리오로 대표농도경로 4개 시나리오(RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.0)로 구성되어 있다(Table 2). 시나리오의 각 숫자들은 2100년 기준의 복사강제력, 즉 대기 중 온실기체, 에어로졸 등으로 지금부터 2100년까지의 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의

정도를 의미한다. 둘째로 SSP (Shared Socioeconomic Pathways, 공동사회경제경로) 시나리오는 IPCC 제6차 평가보고서(IPCC, 2021)에서 채택한 신규 온실가스 경로 시나리오로 기존 RCP 개념과 함께 미래 사회경제변화를 기준으로 미래의 완화와 적응 노력을 고려한 5개의 시나리오(SSP1-2.6, 2-4.5, 3-7.0, 4/5-8.5)로 구성되어 있다. SSP 시나리오는 인구통계, 경제발전, 복지, 생태계 요소, 자원, 제도 및 거버넌스, 기술발전, 광범위한 사회요소, 정책에 따라 개발되었다(O'Neill et al., 2014; Chae et al., 2016). SSP 시나리오의 첫 번째 숫자는 기후변화 적응을 위한 사회·경제적 노력으로 사회발전과 온실가스 감축정도에 따라 구별되며, 두 번째 숫자는 2100년 기준의 복사강제력을 나타낸다. 각 시나리오에 대한 의미는 Table 2에 제시하였다.

식(1)의 노출도는 기후에 노출된 지역의 규모나 가치로 보는 것이 가장 현실적이다. 미래 기후리스크 예측에서는 이 가치의 상승을 반드시 적용해야 한다. 이 가치는 부동산 가치, 또는 지역별 국내총생산(GDP)으로 평가될 수 있다. 인구 증가, 경제 발전 등으로 자본이 집중된 지역에 더 많은 자본이 유입될 가능성 이 높다. 주요 도시일수록 노출도가 급격하게 증가하기에 지역의 가치를 적절하게 고려해야 한다.

식(1)의 취약성은 손실 또는 피해액이며, 해저드와 지수 비례 관계이다. 따라서 해저드가 증가하면 취약성도 증가하므로, 해저드와 독립적으로 다룰 수 있는 향이 아니다. 이에 취약성을 해저드에 대한 비용함수(cost function)로 취급하게 되고, 더 나아가서는 노출도가 취약성 함수에 곱해져 최종 비용함수가 구축된다. 즉, 식(1)의 기후리스크의 계산은 다음과 같이 더욱 간결해진다.

Table 2. Definition of RCP (Representative Concentration Pathways) and SSP (Shared Socioeconomic Pathways) scenarios (Source: Korea Meteorological Administration).

Scenario	Meaning	Radiative forcing (W m ⁻²) (2100)
RCP2.6	인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우	2.6
RCP4.5	온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우	4.5
RCP6.0	온실가스 저감 정책이 어느정도 실현되는 경우	6.0
RCP8.5	현재 추세(저감없음)로 온실가스가 배출되는 경우(BAU 시나리오)	8.5
SSP1-2.6	재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이를 것으로 가정하는 경우	2.6
SSP2-4.5	기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도를 중간 단계를 가정하는 경우	4.5
SSP3-7.0	기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우	6.0
SSP5-8.5	산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우	8.5

$$\begin{aligned} \text{기후리스크} &= \text{취약성(해저드)} \times \text{노출도} \\ &= \text{비용함수(해저드)} \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)는 해외 평가기관에서 약간씩 다른 형태로 변형되었다. 특히 비용함수의 구축이 핵심인데, 각 평가사에서 다양한 형태로 발전되어 왔다. 가장 보편적으로 사용되는 방법은 모건스탠리캐피털인터네셔널(MSCI)에서 공개되었다(MSCI, 2020). MSCI는 기후리스크를 자산손실률(ClimateVar)로 간주하고 비용함수를 구축하는 것으로 알려져 있다. MSCI에 따르면 기후리스크에 따른 우리나라 민간기업의 자산손실률은 5~10% 정도이다.

MSCI에서는 태풍의 경우 비용함수를 미래 변화가 없는 정해진 평균 연간 피해액 또는 자산만 고려한다. 태풍은 미래 기후 추세가 지역별로 매우 상이하고 불확실성이 커서 이 가정은 단순하지만 합리적으로 보인다. 해안 홍수 또는 하천/강 홍수의 경우 영업 중단 기간 동안의 피해를 고려한다. 해안 홍수의 경우, 미래 범람지역이 늘 것으로 보이므로 해안 지역 자산의 해발 고도와 해수면간 비교를 통해 비용 함수를 구축할 수 있다. 이때, 침수로 인한 직접적 피해와 함께, 사업 중단 기간의 수입 감소와 같은 간접피해도 고려한다.

마지막으로, 다양한 극한기상현상(폭염, 혹한, 폭우, 폭설, 강풍)의 경우 자체적인 기준 초과 일수를 계산하고, 지역별로 다른 취약성(예를 들면 열대지역은 30도 이상 더위에 적응됨) 등을 고려하는 것으로 보인다. 여기서 모든 극한기상 현상은 강도가 아닌 빈도(발생일수)를 중요하게 고려한다. 실제 해저드 강도라고 하는 것은 이 발생일수를 의미하는 것이다.

이처럼 취약성 \times 노출도, 즉 비용함수는 해저드 빈도와 강도에 대한 비용손실 함수로서, 우리나라에 대해 적용하기 위해서는 실제 특별피해 기록 등 데이터를 활용해 현실적으로 찾는 것이 중요하다. 우선 지역별로는 행정안전부에서 제공한 2021 재해연보 자료를 이용할 수 있다. 이 자료는 2012~2021 기간 연간 자연재해별 피해자료가 지역별로 정리되어 있다(MOIS, 2022). 다만 공공 피해액만 집계했기 때문에 민간 자산손실까지 추정하기엔 실제적인 한계가 있으므로 좀 더 정확한 비용함수 구축을 위해서 민간기업의 기록자료(특별 손실 등)가 필요하다. 특히 해외 지역과 같이 이런 기록이 아직 존재하지 않는다면, 기후 취약성을 평가한 연구 자료나 미디어 분석을 통해 파악된 다양한 정보를 바탕으로 구축되어야 한다. 예를 들어 유럽 지역에 대해서는 폭염, 폭우에 대한 피해 비용이 큰데 취약성은 지역 전문가를 대상으로 한 인터뷰나 설문조사가 이루어져 보고되고 있는 것으로 보인다. 또한 시간이 지나면서 제방이나 하수처리 시

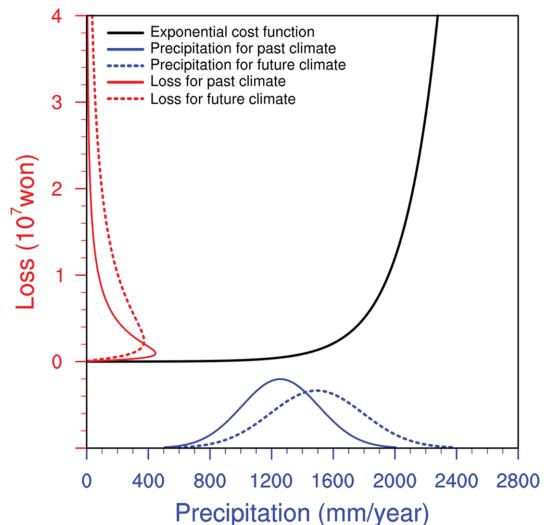


Fig. 1. A conceptual diagram of the relationship between hazard (e.g., precipitation in mm/year, blue) and climate risk (e.g., loss in 10^7 won, red) according to Eq. (2). The solid and dashed lines indicate the probability distributions for the present and future climates, respectively. The black line indicates that the loss is the exponential cost function of precipitation.

설을 새로 구축하며 도시의 기후 취약성 개선도 고려해야 하므로 다양한 전문가 및 정책 결정자와 협업해야 한다.

그렇다면, 미래기후 기후 시나리오를 기반으로 어떻게 미래 기후리스크를 추정할 수 있을까? 이를 간단한 모식도를 통해 설명하면 다음과 같다. Figure 1에서 x축은 해저드[강수량(Precipitation), 단위: mm year^{-1}], y축은 기후리스크[피해액(Loss), 단위: 천만 원]이며, 각각 파란색과 빨간색으로 표기하였다. 그리고 과거의 값은 실선으로, 미래의 값은 점선으로 표기하였다. 식(2)에서 해저드를 정규분포를 갖는 물리량으로 가정하면, 미래 기후 시나리오에서 해저드 분포의 변화(평균, 표준편차, 비대칭도 등)가 예상된다. 이를 정규분포의 형태를 갖는 과거 해저드(파란 실선)와 구별되는 미래의 해저드(파란 점선)로 표현하였다. 그럼에서 지수함수(검은 실선)는 해저드(x축)-기후리스크(y축)간의 관계식인 비용함수이다. 이 함수는 과거 기록 자료가 있다면 회귀분석을 통해 파악할 수 있는데, 취약성과 노출도가 동시에 이 함수에 반영되게 된다. 미래에 하수처리 개선 등으로 바뀔 기후 취약성과 노출도까지 고려한다면, 비용함수는 앞으로 더욱 고도화된 모형으로 발전시킬 수 있다. 그러나 미래에도 기후 취약성과 노출도가 일정하다고 가정하면(즉 이 비용함수가 미래에도 변함없다고 가정하면), 달라진 미

래 해저드 정규분포(파란 점선)는 과거 해저드 정규분포(파란 실선)와 대비된다. 이 해저드 정규분포 변화에 따라, 비용함수로 투영되는 미래 기후리스크의 추정값 분포도 달라지게 된다(빨간 점선).

3. 유형별 기후리스크 추정 사례

3.1 국내 금융 자산 관리를 위한 기후리스크 추정

주요 금융사에서는 부동산 자산 또는 투자 포트폴리오 관리를 위해 우리나라 시군구별 홍수와 태풍의 기후리스크 파악이 요구된다. 홍수와 태풍의 기후리스크는 우리나라 자연재해 피해액의 94% 이상을 차지하는 주요 리스크로, 홍수 피해는 전체 자연재해 중 약 62%를, 태풍은 약 32%를 차지한다(MOIS, 2022). 따라서 과거 자료를 기반으로 비용함수를 찾고, 미래 기후변화 시나리오를 적용하여 전국적 피해 규모를 예측하는 것이 필요하다.

3.1.1 홍수 리스크

홍수 리스크는 과거 관측 데이터와 과거 피해액을 회귀 분석하여 도출된 식에 SSP 시나리오를 사용하여 추정하였다. 식(2)를 기반으로 극한기후지수를 해저드, 피해액을 기후리스크 값으로 정의하여 홍수 리스크를 예측하였다.

홍수 리스크 예측에 사용한 극한기후지수는 호우일수, 5일 최다 강수량, 95퍼센타일 강수일수 총 3가지이다(Table 1). 여기서 강수분포가 여름철에 집중된 대한민국의 기후 특성을 고려하여 강수강도(연 강수량을 연 강수일수로 나눈 값) 대신 호우일수(일 강수량이 80 mm 이상인 날의 연중 일수)를 분석 요소로 선택하였다. 또한 ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices), IPCC, STARDEX (Statistical and Regional Dynamical Downscaling of Extremes for European Regions)에서 공통적으로 제공하는 극한기후지수인 5일 최다 강수량, 95퍼센타일 강수일수를 사용하였다. 현재는 기상청에서 과거 관측 값에 대한 극한기후지수를 제공하고 있지 않아, 과거 관측 자료로부터 기상청 극한기후지수의 정의(Table 1)에 따라 계산하였다. 이때 사용한 자료는 기상청 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS)와 자동기상관측 장비(Automatic Weather Station, AWS)에서 관측된 일별 강수량 자료이다. 각 시군구에 해당하는 관측소가 여러 개인 경우는 전체 관측소의 평균값을 사용하였다. 또한 시군구에 대응되는 관측소가 없는 10개의 지역은 인접한 관측소의 강수량 자료를 이용했다. 피해액 자료는 행정안전부 국민재난안전포털(<https://www.safekorea.go.kr/idsiSFK/neo/main/main.html>)에서 제공하는 시군구별 자연재난상황

통계 자료를 사용하였다. 자료 검색 시 조회 연도는 1998~2021년이며, 원인은 호우로 설정하였다.

미래 기후 시나리오는 기상청에서 제공하는 남한 상세 SSP 기후변화 시나리오를 사용하였다(기상청 기후정보포털, <http://www.climate.go.kr/home/>). 이 시나리오는 우리나라의 복잡한 지형효과를 반영함과 동시에 행정구역별로 자료를 제공하고 있어 지역별 물리적 리스크 추정에 적합하다. 2023년 8월 현재 기상청에서는 SSP 기반 고해상도 남한 상세 기후변화 시나리오의 극한기후지수를 SSP1-2.6 (이하 SSP1)과 SSP5-8.5 (이하 SSP5)에 한정하여 제공하고 있어 두 가지 시나리오를 기반으로 해 기후리스크를 추정하였다.

비용함수를 찾기 위한 회귀분석의 독립변수(해저드)는 극한기후지수이며, 종속변수(기후리스크)는 피해액이다[식(2)]. 전국 229개 시군구를 대상으로 지역별 회귀분석을 진행하였으며, 회귀분석에 사용한 함수는 선형, 지수, 로그 함수이고(Table 3), 각 회귀함수의 결정계수는 Table 4와 같다. Table 4의 결정계수는 변수별 시군구 평균 결정계수 값이다. 결정계수는 회귀식의 설명력을 의미하는 변수로 1에 가까울수록 독립변수가 종속변수를 잘 설명하고 있다고 볼 수 있다. 시군구별로 존재하는 자료의 개수가 달라 시군구 개별 단위로 회귀결과를 분석하는데 어려움이 존재하였다. 따라서 전국 평균 결정계수를 기준으로 기후리스크 분석에 가장 적합한 변수와 회귀함수식을 선별하였다. 지수, 선형, 로그 순으로 전국 평균 결정계수가 높았

Table 3. Curve estimation of each regression model (NDMI, 2013).

Function	Equation for regression function
Linear	$y = a x + b$
Exponential	$y = e^{(ax)} + b$
Log	$y = a \ln(x) + b$

Table 4. Average coefficient of determination for each variable. The coefficient of determination is the average over 229 values for each region.

Variable name	Regression function	R ²
Number of heavy rain (RAIN80)	Linear	0.12
	Exponential	0.14
	Log	0.11
Number of rain days for 95 percentiles (RD95P)	Linear	0.12
	Exponential	0.14
	Log	0.11
Maximum consecutive five-day precipitation (RX5DAY)	Linear	0.22
	Exponential	0.25
	Log	0.19

으며, 3가지 변수 중 5일 최다 강수량(RX5DAY)이 종속변수와 가장 연관성이 밀접하다는 결과가 도출되었다. 따라서 5일 최다 강수량 기반 지수 회귀식을 이용하여 미래 기후리스크를 최종적으로 분석하였다. 이 때, 5일 최다 강수량은 연속된 5일 동안 누적된 강수량이 연중 최대일 때의 5일 누적 강수량을 의미한다.

분석 대상인 전국 229개 시군구 중 74개 지역에서 유의확률(p-value)이 0.05 미만으로 도출되었다. 유의확률은 회귀식의 통계적 유의성 판단지표로 0.05 미만일 경우 회귀식이 통계적으로 유의미하다고 본다.

전국 시군구의 약 33%에 해당하는 지역에서 5일 최다 강수량 기반 지수 회귀식이 홍수 리스크 추정 시 유의미하다고 판단되며 해당 지역들의 평균 결정계수(R-squared)는 0.48, 조정된 결정계수(Adjusted R-squared)는 0.43으로 전국 평균 결정계수를 크게 상회한다.

홍수 리스크 추정결과를 활용하여 시군구별 리스크 분포를 지도에 표시하였다(Fig. 2). SSP1 시나리오를 바탕으로 추정한 홍수 리스크와 5일 최다 강수량의 10년치 평균값을 사용한 결과이며, 각 지도에서 나타

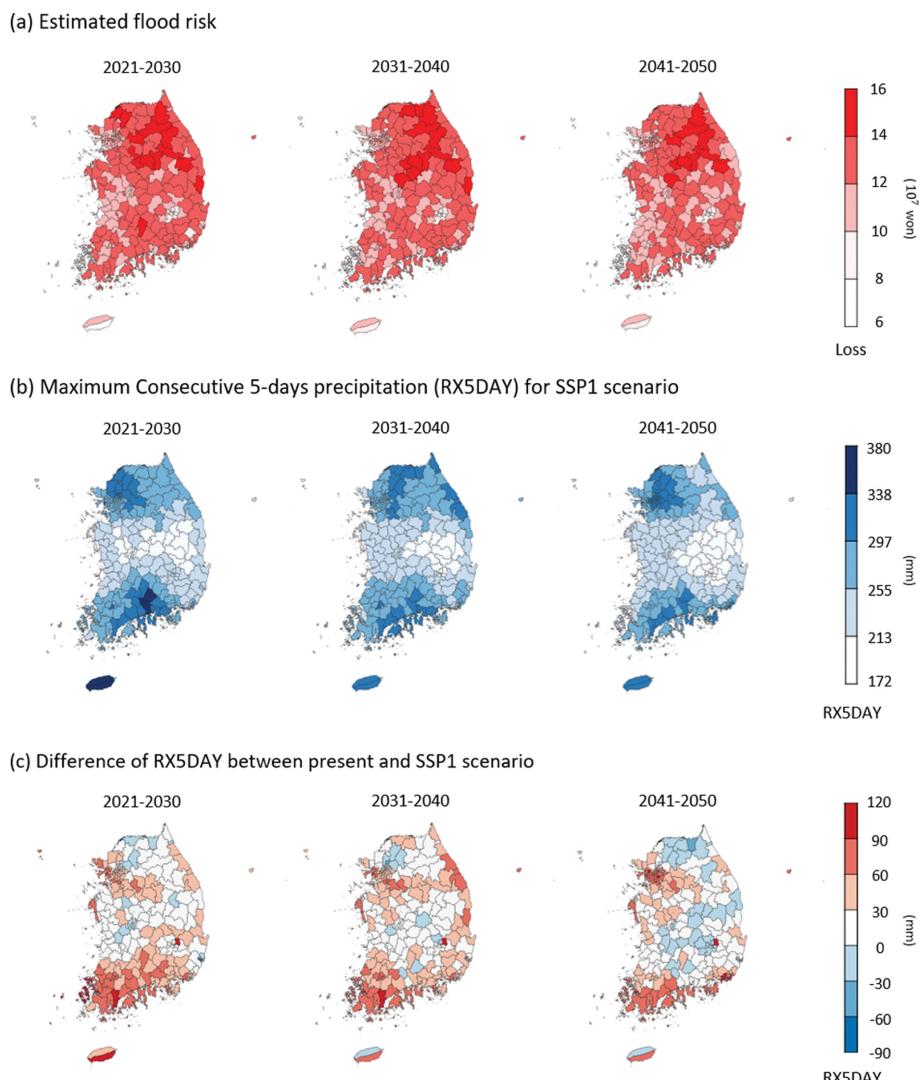


Fig. 2. (a) Estimated flood risk (unit: 10^7 won), (b) maximum consecutive 5-days precipitation (RX5DAY) for SSP1 scenario (2021~2030, 2031~2040, 2041~2050 average) and (c) difference of RX5DAY between present (2000~2020 average), and future for SSP1 scenario. Regions with positive values will increase RX5DAY in the future compared to the present level, and regions with negative values decrease RX5DAY.

내는 값은 2021~2030년, 2031~2040년, 2041~2050년의 평균값에 해당한다. 전반적으로 홍수로 인한 피해는 강원도, 경기도, 충청북도가 인접해 있는 내륙지방과 경상남도 일부 지역을 중심으로 발생할 것으로 보인다(Fig. 2a). 특히, 강원도의 경우 SSP1 시나리오의 5일 최대 강수량이 상대적으로 높지 않은 것에 비해 홍수에 대한 위험도가 높게 도출되었다. 또한, 경상북도 봉화군, 영양군, 영덕군 역시 5일 최대 강수량의 크기에 비해 홍수 피해가 클 것으로 추정된다(Figs. 2a-b). 추정된 결과에서 나온 것과 같이, 미래기후에 따라 발생하는 피해는 지역적인 차이를 보이므로 근본적인 홍수 방지 대책을 수립하기 위해서는 도시의

특성을 고려한 방재시설 설치가 필수적이다.

또한 홍수 리스크에 대한 취약성과 노출도는 지역별 방재시설의 성능에 따라 달라질 수 있다. 특히 방재시설 중 배수시설은 과거의 기상데이터를 바탕으로 배수성능이 결정된다. 그러나 기후변화로 인해 극한 강수가 자주 발생한다면, 기존의 배수성능이 한계에 도달하여 취약성이 낮았던 지역의 홍수 리스크가 증가할 수 있다. 배수시설 특성상, 배수 시설의 건설에는 막대한 자본과 긴 시간이 필요하므로 홍수 리스크를 대비하기 위해서는 현재에 비해 미래에 이상기후로 인한 영향을 많이 받을 것으로 예상되는 지역을 우선적으로 선별하여 배수시설을 정비 및 확충하는

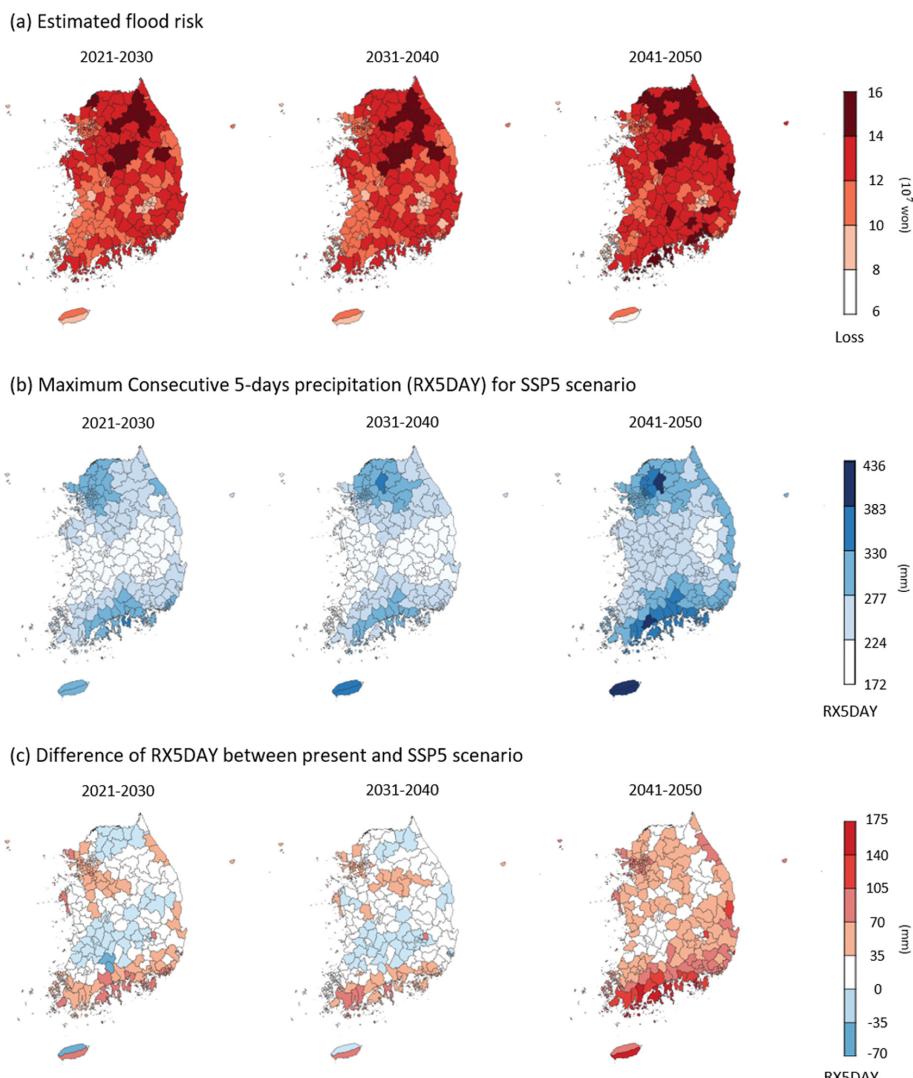


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for SSP5.

것이 중요하다. 앞에서 취약성이 높은 지역을 확인하였고, 해저드에 해당하는 5일 최다 강수량이 지역별로 어떤 차이를 보일 것인지 살펴보고자 한다. 기후 변화로 인한 해저드의 변동이 지역별로 어떻게 나타나는지 확인하기 위해 현재(2000~2020년)와 미래(2021~2030년, 2031~2040년, 2041~2050년)의 5일 최다 강수량 평균값의 차이를 확인했다(Fig. 2c). 양의 값을 나타내는 지역은 현재 대비 미래의 5일 최다 강수량이 증가, 음의 값을 나타내는 지역은 현재 대비 미래의 5일 최다 강수량이 감소할 것으로 예상되는 지역이다. 연도별로 차이가 존재하나 일부 지역을 제외하고 대부분의 지역에서 5일 최다 강수량의 증가가 예상된다. 특히 서울, 남해안과 인접한 전라남도, 제주도 남부에서 많은 증가가 예상되므로 추후 해당 지역들을 중심으로 배수시설의 개선을 고려해야 한다.

Figure 3은 SSP5 시나리오에 따른 피해 예측액, 5일 최다 강수량(10년 평균), 기후변화에 따른 5일 최다 강수량 변동값(미래와 현재의 차이)이다. 2030년까지 홍수 리스크는 강원도, 경기도, 충청북도가 맞닿아 있는 내륙지방에 주로 나타났으나 시간의 흐름에 따라 점차 피해 지역이 확장됨을 알 수 있다. 2041~2050

년의 홍수 리스크 지도에서 내륙지방에 집중되었던 홍수 리스크가 남해안과 동해안의 일부 지역까지 확대되었다(Fig. 3a). 모든 지역에서 비용함수는 단조적으로 증가하는 경향을 보였으므로 이러한 피해지역의 확장은 SSP5 시나리오의 5일 최다 강수량이 앞서 언급한 지역을 중심으로 크게 증가하였기 때문으로 판단된다(Fig. 3b). 해당 지역의 해저드가 다른 지역에 비해 크게 증가한 만큼 방재시설의 정비를 우선적으로 살펴볼 필요가 있다(Fig. 3c).

홍수 리스크는 희귀분석에서 높은 결정계수를 보인 광주광역시 북구와 경기도 과천시의 사례를 통해 분석하고자 한다. SSP1 시나리오에 따르면 광주광역시 북구는 2026, 2030, 2033, 2038년에 피해가 급격하게 증가할 것으로 전망되며, SSP5 시나리오는 작은 변동성을 유지하며 피해액이 증감을 반복할 것으로 보인다(Fig. 4a). 경기도 과천시의 경우 SSP1 시나리오에서는 2036년까지 피해가 감소하는 추세를 보이나 2038년에는 최대 피해액에 도달할 것으로 예측된다. 2040년대에는 전반적으로 피해가 증가하였다가 2040년대 후반에 다시 감소하는 경향을 보인다(Fig. 4b). SSP5 시나리오에서는 피해액 전망에 대한 뚜렷한 추세는

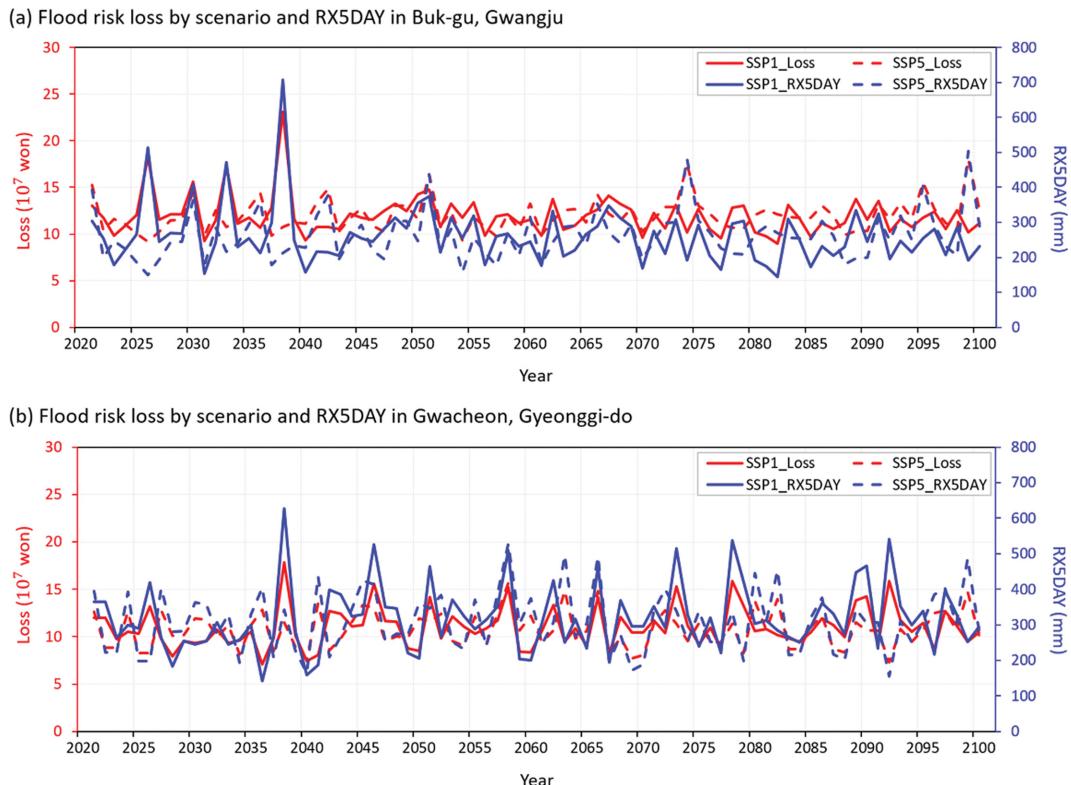


Fig. 4. Flood risk loss by scenario and RX5DAY in (a) Buk-gu, Gwangju, and (b) Gwacheon, Gyeonggi-do.

Distribution of normalized RX5DAY and LOSS in SSP5 scenario per region

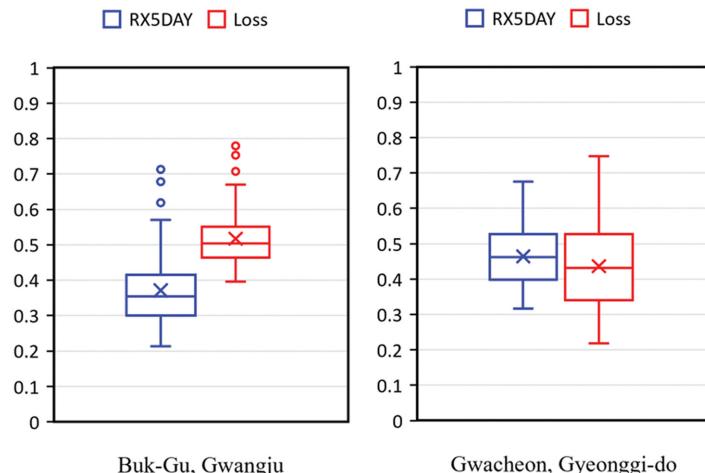


Fig. 5. Distribution of normalized RX5DAY (blue) and flood risk loss (red) in SSP5 scenarios at Buk-Gu, Gwangju (left) and Gwacheon, Gyeonggi-do (right). The definition of RX5DAY is explained in Table 1. The middle of the box in the box-whisker plot represents the median, and the top and bottom lines of the box represent the 25th and 75th percentiles, respectively. The horizontal line and the x-symbol inside the box represent the 5th and 95th percentiles, respectively. The o-symbol represents the limit value, or outlier.

보이지 않으나 일정한 범위 내에서 해마다 증가와 감소를 되풀이할 것으로 추정된다.

광주광역시 북구는 5일 최다 강수량이 미래 전반기에서 후반기로 갈수록 SSP1보다 SSP5에서 더욱 크게 나타나며 피해액도 함께 증가하였다. 하지만 경기도 과천시의 경우 미래 후반기에서도 전반기와 비슷한 추세를 보여 SSP 시나리오에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다. 이는 시나리오에 따른 극한강수의 변화는 지역별로 차이가 존재하며, 홍수 리스크도 지역별로 다르게 나타난다는 것을 보여준다. 주목할 점은 두 지역에서 나타나는 홍수 리스크 피해액과 5일 최다 강수량 사이의 관계의 차이이다. Figure 5는 2021~2100년 동안의 SSP5 시나리오에 따른 광주광역시 북구와 경기도 과천시 지역의 홍수 리스크 피해액(Loss)과 5일 최다 강수량(RX5DAY)을 정규화하여 나타낸 상자그림이다. 상자 그림에서 상자의 아랫변과 윗변은 각각 제 1사분위수, 제 3사분위수를 의미하고 상자 내부의 가로선과 가위표(×)는 각각 중앙값과 평균값을 의미하며 동그라미표(○)를 통해 이상치를 나타낸다. 두 지역 자료의 최대값을 각 지역의 기준값으로 나누어 0~1 사이의 규모로 정규화함으로써 상대적인 특성을 비교하였으며 지역마다 산출된 비용함수는 시나리오에 따라 일정하므로 SSP5 시나리오에 대해서만 분석하였다. 상자그림에서 광주광역시 북구의 5일 최다 강수량은 경기도 과천시보다 낮은 반면, 홍수리스크

피해액 분포는 비슷하거나 조금 더 높다. 다시 말하면 광주광역시 북구에 적합된 비용함수가 경기도 과천시의 비용함수에 비하여 같은 강수량을 더 큰 피해액으로 투영하고 있다고 할 수 있다. 즉, 이는 광주광역시 북구가 강수량에 비해 피해가 상대적으로 크게 발생하고 있다는 것을 의미하며 최종적으로 경기도 과천시보다 광주광역시 북구가 홍수 피해에 대한 취약성이 높다는 결론을 내릴 수 있다.

본 연구에서는 성능이 가장 우수하다고 판단되는 지수함수 기반의 회귀식을 전국에 적용하였으므로 지역별 홍수 리스크 추정결과의 정확도가 상이할 수 있다. 추후 연구에서는 지역별로 적합한 함수 기반의 회귀식을 개별적으로 탐구하고 그것을 적용하여 홍수 리스크를 추정한다면 보다 향상된 홍수 리스크 예측이 가능할 것이다.

3.1.2 태풍 리스크

태풍은 강풍과 폭우를 동반하는 매우 위험한 자연재해 중 하나이다. 태풍은 재산 피해뿐만 아니라 수많은 이재민을 발생시켜 피해 지역의 재해 복구 기간을 장기화시키기도 한다. 태풍 예측은 불확실성이 큰 분야로, 지난 수십 년간 역학 모형, 통계 모형 등을 활용한 연구를 통해 태풍 예측 성능이 지속적으로 향상되고 있으나 신뢰도 측면에서 예측 결과에 대한 한계가 존재한다(Cangialosi, 2020; Knutson et al., 2020;

Ho et al., 2023).

따라서 본 연구에서는 간단한 시나리오 분석 기법을 사용하여 태풍 리스크를 추정하고자 한다. 시나리오 분석 기법은 불확실성이 편재한 현재 상황이 미래에 미칠 잠재적인 영향을 식별하고 평가하는데 사용되는 분석 방법이다(TCFD, 2017). 태풍 시나리오는 IPCC 6차 보고서 결과에 따라 산업화 이전 대비 지구 온도 1.5도 혹은 2도 상승을 중기(2041~2060년)에 달성한다는 전제를 가정하고 두 가지 시나리오를 수립하였다. 1.5도 시나리오는 2050년까지 태풍의 피해가 현재 대비 10% 증가하는 시나리오, 2도 시나리오는 13% 증가하는 시나리오이다(IPCC, 2021). 본 연구에서는 1.5도와 2도 시나리오를 바탕으로 지역별 태풍 리스크를 평가했다.

태풍 리스크는 식(1)을 기반으로 하여 산정되었으며, 리스크 산정식은 지역별 10년 평균 태풍 피해액(Vulnerability), 시나리오별 태풍 전망 계수(Hazard) 그리고 경제성장률(Exposure)의 곱으로 이루어져 있다. 피해액은 홍수 리스크와 동일하게 국민재난안전포털에서 제공하는 피해액 자료를 사용하였다. 국민재난안전포털의 자연재난상황통계에서 태풍이 원인인 피해액을 대상으로 시군구별 10년 평균 태풍 피해액을

Table 5. Trends in economic growth rates from 2018 to 2022.

Year	2018	2019	2021	2022	Average
Economic growth rates (%)	2.2	2.9	4.3	2.6	3

계산하여 분석에 사용하였다. 재해연보에 피해액 산정 기준이 명확하게 제시되어 있지 않으나 행정안전부에서 제공하는 자연재난 발생 횟수 산정 기준은 기상청의 자연재난 특보 발표이다. 이를 바탕으로 태풍 피해액은 기상청에서 태풍 특보 발효와 해제 시점 사이에 발생하는 여러 피해들을 태풍 피해액으로 산정한 것으로 보인다. 피해액 자료가 존재하지 않는 서울특별시와 대구광역시의 일부 행정구역들은 자료가 존재하는 동일 시내의 타 행정구역의 평균 피해액을 사용하였다. GDP는 경제 성장률에 따른 자산가치 변동을 고려하기 위한 변수로, 2018~2022년의 경제성장률의 평균값을 사용하였다. 다만 코로나19로 인해 다소 낮은 경제성장률을 기록했던 2020년은 제외하였다 (Table 5).

앞서 제시한 태풍 리스크 산정식을 사용하여 Fig.

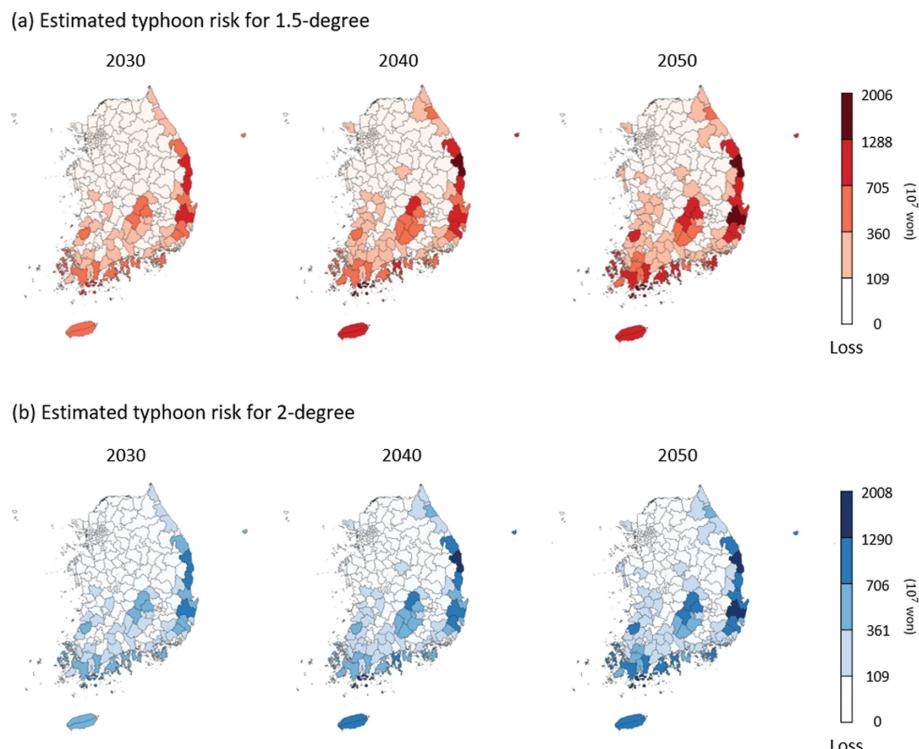


Fig. 6. Estimated typhoon risk for (a) 1.5-degree, and (b) 2-degree scenario (in order of 2030, 2040, and 2050).

6과 같은 시군구별 리스크를 지도에 표시하였다. 2050년까지의 태풍 리스크 추정 결과, 제주도, 전라남도 남부, 경상북도 내륙, 동해안 지역을 중심으로 태풍으로 인한 피해가 다수 발생할 것으로 예상된다. 이러한 피해분포는 우리나라의 지리적 특징으로 인해 나타나는 고유한 특성으로 판단된다. 우리나라에 내습하는 태풍은 경로에 따라 서해, 남해, 동해로 상륙하는 태풍으로 나눌 수 있는데 동해안 인근 지역들은 위치상 남해와 동해로 진입하는 태풍에 모두 영향을 받기 때문이다. 또한 우리나라에 기록적인 피해를 끼친 태풍 루사(2002), 매미(2003), 힌남노(2022)와 같은 강한 태풍들이 주로 남해안으로 상륙하여 남부 지방을 중심으로 다량의 피해가 발생했다(Park et al., 2006). 2000년대에 들어 이전에 비해 전반적인 피해 지역이 서쪽으로 이동하는 경향을 보이며 제주도와 전라남도의 피해가 점차 증가하고 있다. 또한 태풍당 피해 규모가 큰 9월에 태풍 발생빈도도 증가하고 있어 피해가 자주 발생하는 지역을 중심으로 태풍에 대한 체계적인 대비가 필요하다(Kim et al., 2015).

우리나라에서 태풍에 가장 취약한 상위 5개 지역은 전라남도 완도군, 경상북도 울진군, 경주시, 영덕군, 제주시이다(Fig. 7). 1.5도 시나리오 분석에 따르면 가장 높은 피해액을 기록한 전라남도 완도군은 연간 약 876~2,006천만 원의 피해액이 태풍으로 인해 발생할 것으로 보인다. 경상북도 울진군은 연간 약 771~1,765천만 원, 경상북도 경주시는 약 689~1,577천만 원에 해당하는 피해가 예상된다. 2도 시나리오는 1.5도 시나리오와 유사한 결과가 도출되어 두 시나리오 간의 차이가 거의 나타나지 않는다. 2도 시나리오에서 전라남도 완도군은 약 877~2,008천만 원, 경상북도 울진군은 약 772~1,767천만 원, 경상북도 경주시는 약 690~1,579천만 원, 영덕군은 약 563~1,290천만 원, 제

주시는 약 498~1,140천만 원 가량의 태풍 피해가 예측된다. 더불어 지구온난화가 심화될수록 한반도가 태풍에 의한 영향을 더 자주, 더 강하게 받을 거라는 전망이 다수 존재한다(Lee et al., 2015; Kossin et al., 2016; Chen, Yu, et al., 2021). 따라서 향후 슈퍼태풍 발생 가능성도 고려하여 태풍 취약 지역을 중심으로 자산 피해를 경감시킬 대책 마련이 필요하다.

3.2 항만 수출입 화물 관리를 위한 기후리스크 추정

최근 태풍과 국지적인 집중호우의 빈번한 발생은 3.1의 금융 자산 관리를 위한 기후리스크 외에도 체선으로 인한 피해를 발생시킨다. 우리나라는 많은 민간기업들이 수출입 화물의 대부분을 해상으로 운송하므로 해상 운송 시 체선이 발생하게 된다(Lee, 2012). 체선은 항만 상황 또는 기상악화로 인해 선박이 항만에 접안하지 못하고 용선계약서에 허용된 정박기간 이상 항만에 머무르게 되는 것으로, 항만 혼잡을 일으켜 항만 운영 효율성을 저하할 뿐 아니라 늘어난 정박기간에 따른 체선료를 발생시킨다. 따라서, 효율적인 항만 수출입 화물 관리를 위해서는 체선에 따른 기후리스크 추정이 필수적이다. 또한 태풍에 의한 경제적 피해는 체선 이외에도 운항 중의 피해 등도 고려해 볼 수 있으나, 본 연구에서는 체선 사례만을 다루었으며, 이동과 관련된 공급망과 관련하여서도 추가로 분석할 필요가 있다.

본 절에서는 ○○항에서 발생하는 체선 사례에 대해 기상요소와 체선 사이의 관계를 파악하고 체선 기후리스크를 예측하기 위한 방법론을 소개하며, 이를 적용하여 미래에 발생할 수 있는 체선 기후리스크를 추정하였다. 특히 풍랑에 의해 발생한 체선 사례를 적용하였으며, 기후변화 시나리오 외에도 과거 관측 자료를 바탕으로 생산한 미래 기후 자료를 반영함으로

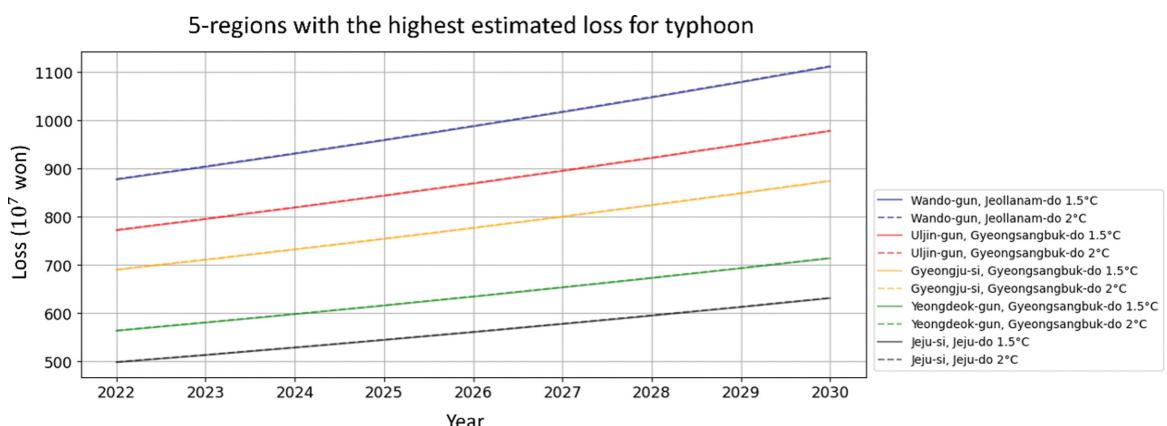


Fig. 7. 5-Regions with the highest estimated loss for typhoon.

써 현실적인 미래 기후 시나리오를 반영하고자 하였다. 본 절에서 보인 분석 결과는 우리나라 특정 지역에 대한 사례를 분석한 것으로, 해당 분석 방법을 통해 추후 전 지구 규모로도 확대하여 이를 적용할 수 있다.

체선으로 인해 발생하는 기후리스크는 직접 피해액과 간접 피해액으로 구분할 수 있다. 체선 발생 시 지급하는 체선료가 체선으로 인한 기후리스크의 주된 리스크지만 본 연구에서는 체선으로부터 발생하는 간접적인 피해도 함께 고려하였다. 이를 위해 체선 발생 시 유가, 수급, 재고 등의 운영 정책 변화로 인한 간접적인 피해를 분류하였고 각각의 피해를 모두 고려할 수 있는 복합적인 기후리스크를 추정할 수 있는 예측 함수를 개발하였다. 이때, 체선으로 인한 기후리스크의 추정을 위한 비용함수는 식(2)에 기반하였으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{risk} &= f(x_t) + \sum_{k=1}^n g_k(x_t) \\ &= f(x_t) + g_1(x_t) + g_2(x_t) + \cdots + g_n(x_t) \end{aligned} \quad (4)$$

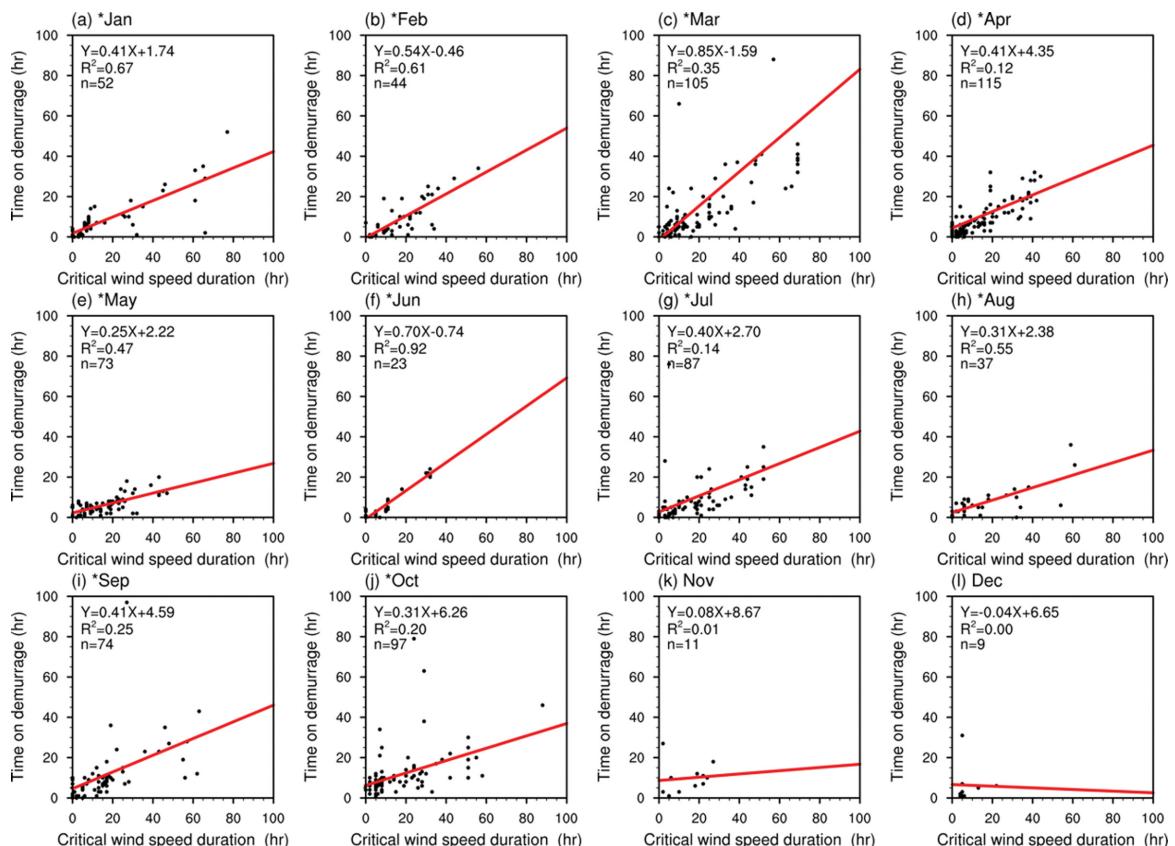


Fig. 8. Scatter plot and corresponding linear regression line between critical wind speed duration and time on demurrage in each month. The * symbol means a significant value for the 95% confidence interval.

여기서, x_t 는 t 년($t = 2023, 2024, \dots, 2100$)의 해저드를 의미한다. $f(x_t)$ 는 체선 발생으로 인한 연간 직접 피해액의 비용함수, 즉 연간 체선료의 비용함수를 의미한다. $g_k(x_t)$ 는 체선 발생으로 인한 연간 간접 피해액($k = 1, 2, \dots, n$)의 비용함수를 의미하며, 생산비, 수송비, 재고 유지 비용, 재고 고갈 비용 등을 포함한다. 이때, 생산비는 제품의 구매 비용 또는 생산 비용으로 고정 값이 사용되며, 수송비, 재고 유지 비용과 재고 고갈 비용은 변동 값이 사용된다. 하지만, 간접 피해에 대한 자료 부족으로 인해 연간 간접 피해액의 비용함수를 직접 도출할 수 없으므로 본 모형에서는 다음과 같은 가정을 통해 간접 피해가 무작위적으로 발생할 때 예상되는 피해액을 추정하였다. 간접 피해는 연간 발생하는 체선 사례의 10% 이내의 확률로 발생하며, 간접 피해가 발생할 경우 연간 간접 피해액은 연간 직접 피해액의 10%의 경제적 손실 비용을 발생시킨다(MOF, 2008).

직접 피해액의 비용함수를 도출하기 위해 과거 체선 기후리스크(종속변수)와 기상요소(독립변수) 사이

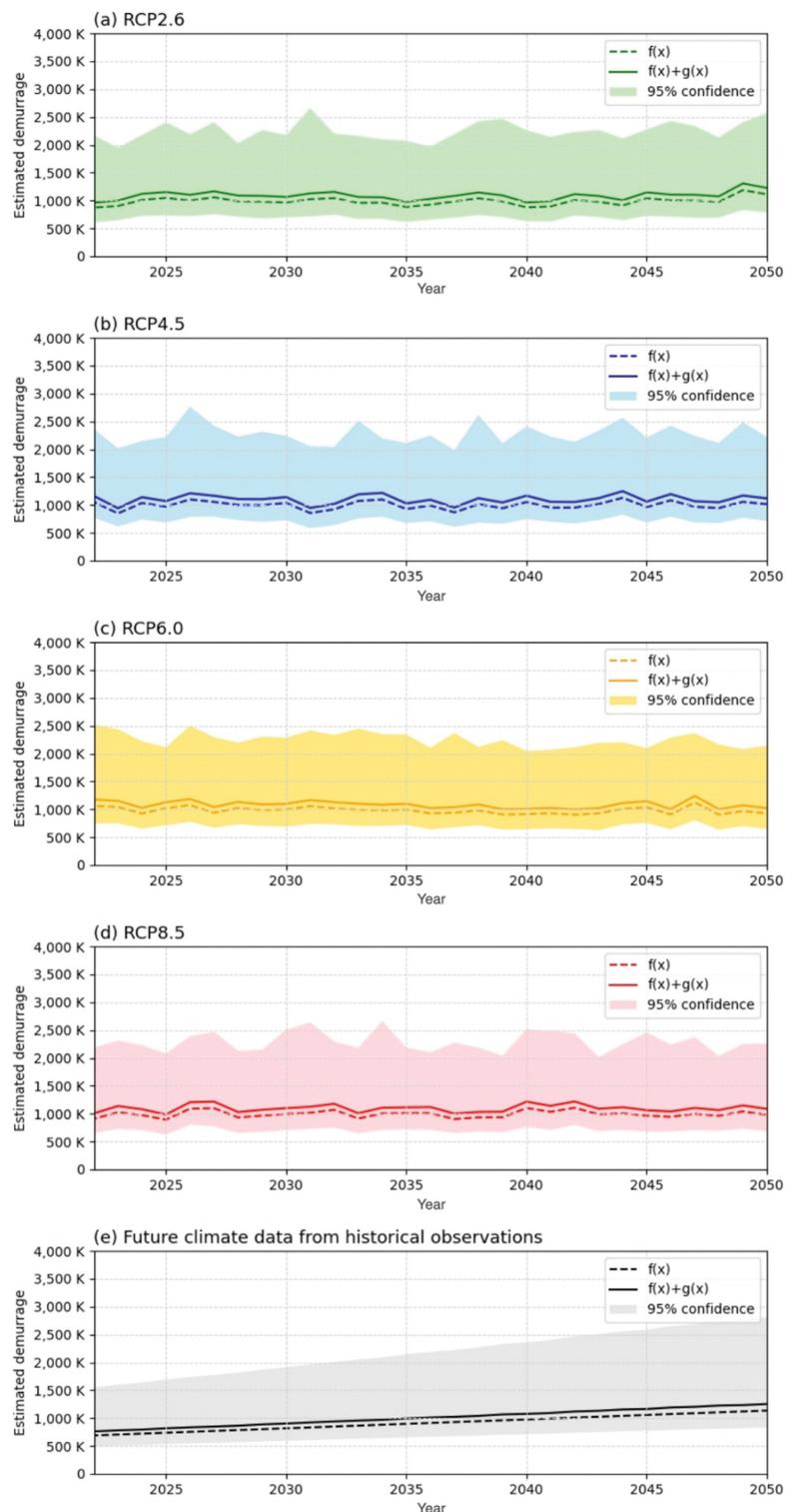


Fig. 9. Estimated demurrage charge (unitless) for future scenarios (a) RCP2.6, (b) RCP4.5, (c) RCP6.0, (d) RCP8.5, and (e) future climate data from historical observations.

의 회귀분석을 수행하였다. 과거 체선 기후리스크 자료로는 ○○항에서 발생한 A사의 2016년부터 2021년 까지의 체선 피해 사례를 사용하였다. A사의 체선 피해 원인은 안개, 태풍, 풍랑으로 구분되고 있으나, 본 연구에서는 사례 수가 가장 많은 풍랑에 대한 피해 사례를 분석 대상으로 선정하였다. 이때, 종속변수는 체선시간으로 설정하였다. 체선료는 일반적으로 체선 시간과 체선료율을 곱하여 계산되는데, 체선료율은 운영전략의 변화에 따라 큰 변동성을 갖기 때문에 체선료율을 고정한 채 체선시간을 추정하고 상황에 맞는 체선료율을 고려하여 피해액을 도출하기 위함이다.

독립변수 설정을 위해 국립해양조사원 바다누리 해양정보 서비스(<https://www.khoa.go.kr/>)에서 제공하는 풍속 자료를 사용하였다. 풍속은 풍랑과 밀접한 관련이 있는 요소로 다양한 연구에서 풍랑 예측의 주요 인자로 사용되고 있으나, 체선 특성상 풍속의 강도보다는 풍속이 지속되는 시간과 더 밀접한 연관이 있는 것을 확인하였다. 따라서, 본 모형에서는 체선기간 동안 풍속이 임계값 이상 지속된 총합계 시간을 임계 풍속 시간으로 정의하고 이를 독립변수로 사용하였다. 이때, 계절성을 반영하기 위해 체선기간 동안 발생한 풍속의 월 평균값을 월별 임계값으로 사용하였다.

Figure 8은 체선시간을 종속변수로, 임계 풍속 지속 시간을 독립변수로 선정하여 계수 간의 선형회귀분석을 통해 월별 임계 풍속 지속시간-체선시간 비용 함수를 나타낸 결과를 나타낸다. 회귀분석 결과, 사례 수가 적은 11월과 12월을 제외한 모든 월에서 95% 신뢰수준에서 유의한 결과를 보였다. 이를 바탕으로 추정식에 미래의 임계 풍속 지속시간을 대입하면 월별 미래 체선시간 추정이 가능하며, 이를 합하여 연간 미래 체선시간을 추정하였다. 이에, 고정된 체선료율(2016~2020년 평균, 19,066)을 곱하여 연간 체선 피해액으로 환산하였다. 체선료율은 민간기업의 보안상 무단위로 표기하였다.

앞서 산출한 추정식을 바탕으로 기후변화에 따른 미래 체선 피해액을 추정하기 위해 기상청 기후정보 포털(<http://www.climate.go.kr/home/>)에서 제공하는 기후변화 시나리오 자료를 활용하였다. 사용된 기후변화 시나리오 자료는 HadGEM3-RA 지역기후모형을 통해 생산된 2015~2050년의 RCP 시나리오(2.6/4.5/6.0/8.5)이며, 공간해상도는 $12.5\text{ km} \times 12.5\text{ km}$ 이다. 또한, 기후변화 시나리오 자료의 불확실성을 고려하고자 풍속의 과거 관측 자료(2008~2021년)를 바탕으로 2050년까지의 미래 풍속 자료를 생산하고 이를 미래 기후 시나리오로 사용하였다.

Figure 9는 미래 체선으로 인한 피해액 추정한 결과를 나타내었으며, Figs. 9a-d는 RCP 시나리오별 미래 체선 피해액 추정 결과를 나타낸다(무단위로 표시).

2050년의 체선의 직접 피해액 추정 금액은, RCP2.6 시나리오에서 약 1,113,109, RCP4.5 시나리오에서 약 1,012,640, RCP6.0 시나리오에서 약 929,157, RCP8.5 시나리오에서 약 979,163으로 추정되었다. 또한, 무작위적으로 발생하는 간접적인 피해를 적용하여 체선의 간접 피해액을 추가로 고려한 결과, RCP2.6 시나리오에서의 미래 체선 피해액은 1,232,182, RCP4.5 시나리오에서 약 1,123,231, RCP6.0 시나리오에서 약 1,030,294, RCP8.5 시나리오에서 약 1,078,223으로 각각 추정되었다. RCP 시나리오별 미래 체선 피해액은 경년 변동성을 보이나, 2050년까지 유의미한 추세는 나타나지 않았다. 또한, RCP 시나리오별 미래 체선 피해액의 차이가 거의 나타나지 않았다. Figure 9e는 과거 관측 자료를 기반으로 추정된 미래 기후 자료를 사용하여, 2050년까지의 미래 체선 피해액을 추정한 결과를 나타낸다. 2050년 체선의 직접 피해액은 약 1,135,644, 간접 피해액을 고려한 전체 피해액은 약 1,251,776으로 추정되었다. 유의미한 추세가 나타나지 않았던 RCP 시나리오별 미래 체선 피해액과 달리 소폭이지만 유의미한 증가 추세가 나타났다. 이는, 과거 자료를 기반으로 산출된 미래 기후 자료 특성상 과거 관측 자료의 동향이 반영된 결과이다. ○○항의 임계 풍속 지속시간은 2008년부터 2021년까지 증가 추세를 보이므로 이러한 추세를 고려했을 때 미래의 임계 풍속 지속시간 또한 증가할 것으로 예측되며, 이는 미래 체선 피해액의 증가로 이어질 것으로 예측할 수 있다.

결과적으로 기후변화를 고려한 체선 피해액은 929,157 부터 1,251,776까지의 분포를 보이고 있다. RCP 시나리오별 미래 체선 피해액의 차이는 약 194,074로 차이가 크지 않았으며 소폭의 경년 변동성을 보일 뿐 현재에 비해 증가하거나 감소한다고 결론을 내리기는 어렵다. 하지만, 과거 관측 자료의 추세를 고려하여 미래 체선 피해액을 추정한 결과 약하지만 꾸준히 증가하는 경향이 나타나므로 이를 대비할 필요가 있다.

3.3 해외 공급망 관리를 위한 기후리스크

본 절에서는 제품 생산을 위한 공급망과 이에 대한 기후리스크를 고려한다. 다단계적인 공급망의 성격은 종합적으로 고려하기 이전 단계로 각 단계 공급망에 대하여 데이터에 기반한 기후리스크 초기모형 예시를 제시하는 것을 목표로 한다. 또한 특정 지역이 아닌 전 지구에 대한 리스크 평가를 고려하여, 사업장의 개별 특성을 반영하기 보다는 전반적인 평가를 우선으로 한다.

앞서 모형들과 같이 기후리스크 모형은 식(1)을 따라 추정된다. 리스크 추정을 위한 비용함수는 재해빈도/강도의 함수이며, 재해빈도/강도는 관측 및 미래기후 시나리오 실험 데이터를 바탕으로 계산된 이상기

후 지수를 사용하였다. 본 장에서는 폭염 발생일수를 사용한 모형을 예시로 제시하였으나, 한파와 같은 다른 형태의 이상기후에 대하여서도 동일한 접근이 가능하다. 노출도는 평가하고자 하는 공급망의 매출액 등으로 추후 독립적으로 산정할 수 있어서 제외하였다.

폭염발생은 각 사업장의 생산성, 유통과정 등에 영향을 줄 수 있다. 예를 들어, 사업장 C 는 다음과 같은 공급망을 통하여 상품을 생산한다고 하자($A \rightarrow B \rightarrow C$). 즉, 사업장 C 의 상품 생산은 사업장 B 로부터의 조달에, 또 사업장 B 의 상품 생산은 사업장 A 로부터의 조달에 의존한다. 그러나 각 사업장은 물품을 납품하는 주기와 이에 따른 재고를 보유하고 있기 때문에 모든 이상기후 발생이 사업활동에 유의미한 영향으로 이어지지 않는다. 따라서 사업장 C 의 사업활동은 사업장 B 의 사업활동이 이상기후로 인하여 충분히 지연되거나 또는 사업장 A 의 사업활동 지연이 사업장 B 에게 상당한 영향을 미치는 경우이다. 본 연구에서는 사업장 C 에 미치는 최종적인 영향을 산출하기 이전 단계로 각 공급망 단계의 리스크를 평가하였다.

비용함수는 다음과 같은 가정을 사용하여 설계하였다. 첫째, 각 사업장은 일반적으로 발생하는 이상기후(본 절에서는 폭염 발생일수를 예로 다룸)에 대하여 충분히 적응되어 있는 것으로 가정한다. 즉, 각 사업장은 평년 수준으로 발생하는 폭염에 대하여 설비 및 대응 시스템을 구축하고 있어 사업활동에 유의미한 영향을 받지 않는다. 좀 더 구체적으로, 평년 수준의

폭염 발생일수는 과거 42년(1979~2020년) 관측 자료에서 계산된 지역별 평균 폭염 발생일수를 사용하였다. 계산된 평년 수준의 폭염은 지역별로 상이할 수 있으며, 특히 절댓값을 기준으로 하는 폭염, 또는 이상기후 지수의 경우에는 더욱 그러하다. 본 연구에서는 지점별 일평균 온도 분포의 95퍼센타일을 기준으로 폭염발생일수를 산정하였다.

둘째, 폭염발생이 평년 수준을 충분히 벗어난 경우 각 사업장은 사업활동에 영향을 받는다. 평년 수준을 충분히 벗어나는 여부는 과거 42년(1979~2020년) 지역별 폭염 발생일수의 표준편차를 사용하여 평가하였다. 표준편차 역시 각 지점별 값을 사용하기 때문에 폭염발생의 변동이 큰 지역과 그렇지 않은 지역에 대한 고려가 가능하다. 다시 말하면, 과거 폭염발생의 변동 폭이 큰 지역에서는 사업장이 이에 대한 대응을 어느 정도 수준 구축하고 있는 것으로 가정한다. 반대로 폭염발생이 변동 없이 일정하게 발생한 경우는 평년 수준을 조금만 벗어나도 사업활동에 지장을 받을 수 있다. 예를 들어, 95퍼센타일 기준 폭염 발생일수는 남아시아, 동남아시아 지역에서 약 15~25일의 표준편차를 보이며, 이는 북동아시아 지역 표준편차 약 5~10일 보다 더 큰 값을 보인다(Fig. 10). 본 연구에서는 표준편차의 3배를 벗어나는 경우를 “충분히”라고 고려하였으며, 이는 이상기후 지수가 정규분포를 따른다고 가정하였을 때 약 95%에 해당하는 값이다. 그럼에도 해당 값은 주관적 판단에 따라 조정이

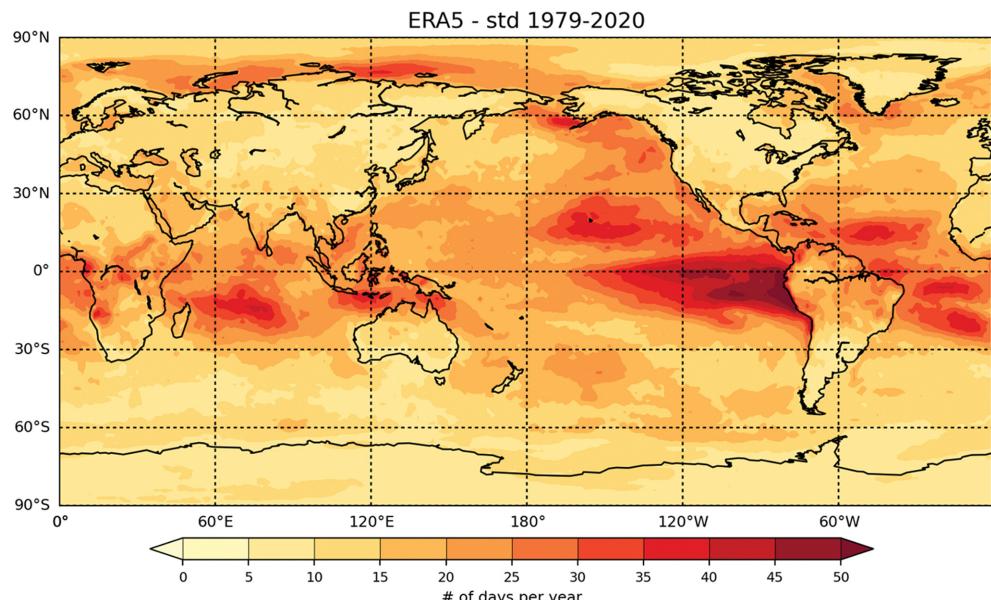


Fig. 10. Standard deviation of 95 percentile heat wave days (1979~2020) from ERA5 reanalysis data (ECMWF: European Centre for Medium Range Forecast). The number of heat wave days is calculated year by year using daily 2-m temperature.

가능하다.

셋째, 비용함수 V 는 0~100% 사이의 값을 갖는다. 폭염발생이 평년수준 이하인 경우 비용함수는 0% 값을 가지며, 평년 수준을 충분히 벗어나는 경우 사업장의 비용함수는 급격히 증가하여 hyper tangent 함수를 따라 100% 값에 도달한다. hyper tangent을 사용하는 이유는 그 모양이 0~100% 비용함수의 일반적인 모양으로 적은 개수의 파라미터를 사용하여 설계가 가능하기 때문이다. 3.1장에 사용된 비용함수와 비교하였을 때, 파라미터에 따른 비용함수의 변화를 확인할 수 있는 장점이 있으며, 추후 이상기후에 대한 설비 및 대응시스템 보강 등을 고려한 비용함수 변경이 용이하다.

위와 같은 가정을 바탕으로 다음과 같은 비용함수 V 를 설계할 수 있다.

$$V = \left(1 + \tanh \left[\frac{H - (\bar{H} + 2s\tilde{H})}{s\tilde{H}} \right] \right) / 2 \quad (5)$$

여기서 H 는 각 연도별, 지점별 폭염발생일수이며, 관심에 따라 다른 이상기후 지수로 설정이 가능하다. \bar{H} 는 지점별 과거 발생한 폭염발생일수의 평균값이며, \tilde{H} 는 지점별 표준편차이다. 마지막으로 s 는 비용함수의 형태를 결정하는 파라미터이다. 본 연구에서는 몇 개의 값을 사용하여 비용함수 형태를 살펴보려고 한다. 재해유형에 따른 비용함수 산정이 가능한 데이터가 존재한다면 사업장별로 구체적인 값 설정이 가능하다.

Figure 11은 \bar{H} 가 20일, \tilde{H} 가 10일인 경우, s 값을 1, 2, 4로 각각 설정하였을 때 비용함수의 모습이다. 여기서 사용된 \bar{H} 와 \tilde{H} 값은 관측기간 동안 전 지구 평균된 \bar{H} 와 \tilde{H} 값과 유사하다. 설계한 바와 같이 비용함수는 0~100%의 값을 갖으며, 평균 폭염일수인 20일 이하에서 0%로 수렴하는 모습을 보인다. 비용함수는 파라미터 s 가 1인 경우(Fig. 11의 파란선) 폭염일수가 30일 이상일 때 급격히 증가하며 50일 이상일

때 100%로 수렴한다. 파라미터 s 의 값이 2와 4로 증가할수록 폭염일수 증가에 따른 비용함수의 증가는 느리게 발생한다. 파라미터 s 를 2로 설정하는 경우 평균 폭염 발생일수에 비하여 폭염이 40일로 2배 이상 발생한 경우 비용함수는 약 12%의 값을 보인다(Fig. 11의 검은선). 파라미터 s 를 4로 설정하는 경우 동일한 조건 상에서 약 5%의 값을 보인다(Fig. 11의 빨간선). 과거 폭염발생에 따른 피해 사례에 대한 데이터가 있다면 적절한 값 설정이 가능하며, 지역별로 차등하여 값을 설정할 수 있다. 아래 분석결과에서는 전지구적으로 s 를 4로 설정하였다. 이와 같이 구성된 모형을 사용하여 미래 기후에 대한 공급망 리스크 평가가 가능하다. 과거 자료를 기반으로 \bar{H} , \tilde{H} , s 를 설정하고, 이에 따른 비용함수 모형에 기후모형이 생산한 미래 기후 시나리오 실험 자료를 대입하면 미래 폭염일수 변화에 따른 리스크 변화 추정이 가능하다.

Figure 12는 관측 및 미래기후 시나리오 SSP3-7.0(이하 SSP3)에서 나타난 폭염일수 추세와 이에 따른 폭염 리스크 추세를 보여준다. 지난 40년간 폭염일수는 전지구적으로 증가하는 추세를 보였으나 지역별로는 약 2일/연 감소에서 2.5일/연 증가하는 추세가 확인된다. 동아시아 지역에서는 약 0.5일/연 정도 수준의 유의미한 증가 추세가 확인되었으며(Fig. 12a), 한반도 지역(37.5N, 126E)에서도 동아시아지역과 비슷한 0.59일/연 정도의 증가 추세가 관측되었다(Fig. 13a의 검은 실선). 과거 폭염일수의 증가에 대한 폭염 리스크 추세를 살펴보면 매우 유사한 증감 패턴이 확인된다(Fig. 12b). 리스크 추세값은 지역에 따라 약 0.01%/연 감소에서 0.06%/연 증가를 보이며(Fig. 13b), 한반도 지역(37.5N, 126E)에서는 0.07%/연 리스크 증가 추세가 확인된다(Fig. 13b의 검은선). 리스크의 변동은 폭염일수의 변동과 높은 상관관계를 보이나, 그 변동 폭은 폭염일수에 비하여 매우 작다. 이는 과거 관측된 폭염일수가 각 지역별 평년 폭염일수에 대하여 표

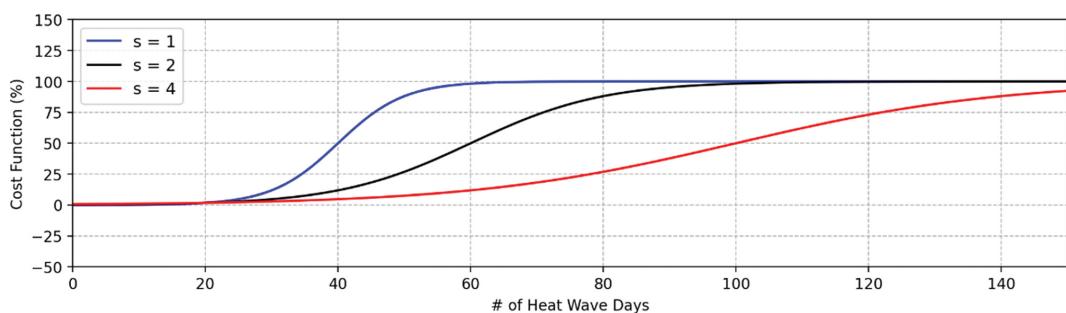


Fig. 11. Example of cost function (V): \bar{H} : 20 days, \tilde{H} : 10 days, s : 1, 2, 4. X-axis denotes the H in eq. (5), and y-axis denotes the V . Where, s indicates the parameter that determines the form of the cost function, \bar{H} is the average number of heat wave days that occurred in the past for each point, and \tilde{H} is the standard deviation for each point.

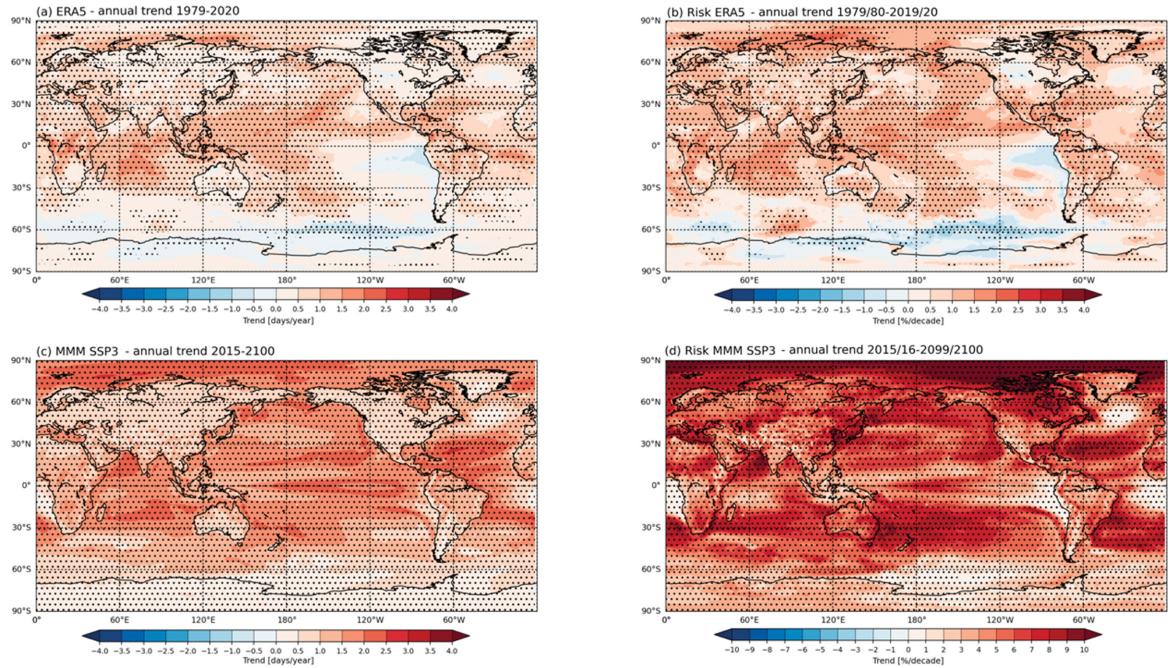


Fig. 12. (Top panel) past climate, (bottom panel) future climate, (left panel) the change of number of heat wave days, and (right panel) the change of heat wave risk. The future climate is calculated based on ensemble average of integrated 10 models using SSP3 scenarios.

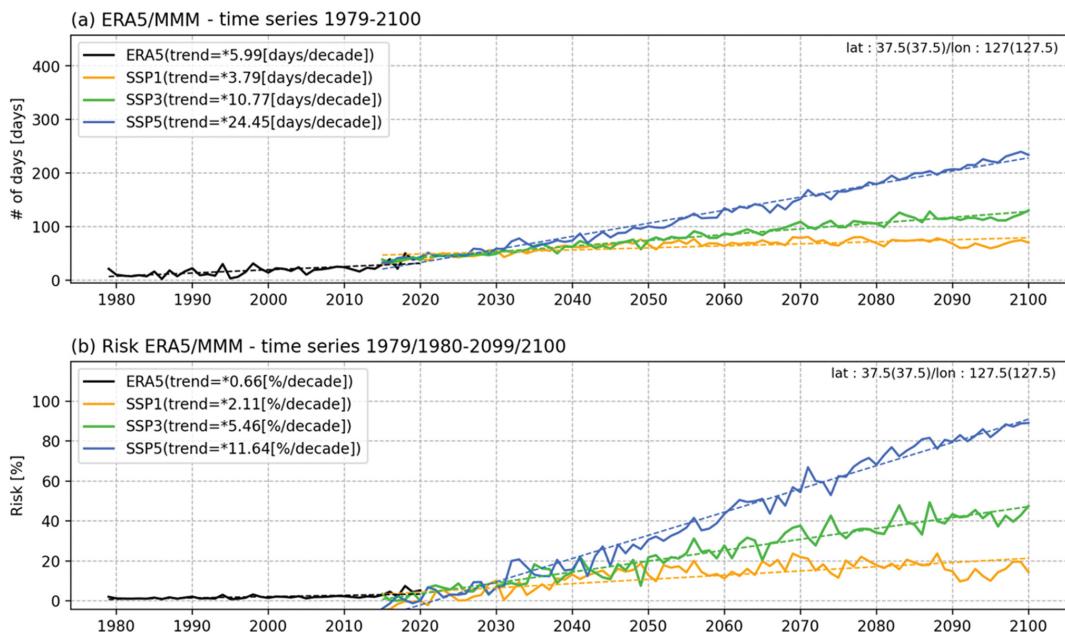


Fig. 13. (a) The number of heat waves days and (b) the risk of heat waves in the past climate (black line) and the SSP 3 future climate (green line) shown in Fig. 12 [Korean Peninsula (37.5N, 127E)]. Number of heat wave days and heat wave risk for SSP1 (yellow line) and SSP5 (blue line). The trend calculated from each data is marked in the upper left, and the * table means a significant value for the 95% confidence interval.

준편차 대비 크게 다른 값을 보이지 않았기 때문이다. 다시 말하면, 비용함수(Fig. 11)에서 H 가 \bar{H} 로부터 크게 벗어나지 않았기 때문에 비용함수 V 의 변동이 0 으로부터 크게 벗어나지 않는다.

미래 폭염일수의 변화는 미래기후 시나리오 SSP3에 대해 적분한 10개의 모형 결과를 사용하여 분석되었다. 각 모형 실험의 폭염일수 변화를 계산하고 양상을 평균을 리스크 모형의 입력자료로 사용하였다. 이에 따르면 SSP3의 경우 폭염일수는 연평균 약 0~3.5 일까지 증가할 수 있으며, 동아시아에서 그 정도는 약 0.5~1일로 현재 추세를 상회한다(Fig. 12c). 한반도 지역(37.5N, 126E) 폭염일수 증가 추세는 약 1.1일/연으로 과거 40년 추세에 2배에 가까운 값을 보인다(Fig. 13a의 녹색선). 미래기후 리스크 변화율 역시 전반적으로 과거 추세에 비하여 매우 가파른 증가를 보인다 (Fig. 12d). SSP3 시나리오에 따른 한반도 지역(37.5N, 127E) 폭염 리스크 증가 추세는 약 0.55%/연으로 과거 추세의 10배에 달한다. 폭염일수 증가에 비하여 리스크 추세가 크게 증가한 이유는 비용함수가 이상기후 대한 비선형 함수이기 때문이다. 특히 이상기후 평균값에서 벗어나기 시작하는 구간에서 선형함수보다 더 빠른 증가를 보이기 때문에(Fig. 11) 폭염일수 증가에 따른 리스크 추세는 21세기 후반에 비하여 전반에 더 큰 값을 보인다(Fig. 13).

동일한 분석을 SSP1, SSP5 시나리오에 대하여 적용하였을 때 한반도 지역(37.5N, 127E) 폭염일수는 0.38~2.4일/연으로 과거대비 약 0.63~4배의 추세를 보이며, 이에 따른 폭염 리스크는 0.21~1.16%/연으로 과거대비 약 3~16배의 추세를 보인다. 흥미로운 점은 과감한 온실가스 배출저감정책이 성공한 SSP1 시나리오의 경우에 폭염일수 증가 자체는 과거보다 낮은 추세를 보이지만, 폭염일수의 지속적인 증가로 인하여 폭염 리스크는 과거 추세 대비 3배의 값을 보인다. 또한 온실가스 배출저감이 이루어지지 않은 SSP5 시나리오에서 폭염 리스크는 2100년 약 95%에 이르는 비용함수를 보인다. 이는 사업장이 현재 수준의 폭염일수로부터 매우 높은 일수의 폭염이 발생하는 경우 사업활동이 현저히 지장을 받을 것이라는 가정에 의거한 것이며, 증가하는 폭염일수에 대한 점진적 대응을 고려하지 않은 값이다.

4. 결론 및 토의

지금까지 유형별 민간기업을 위한 기후리스크 추정 모형을 제안하였다. 제안된 세 가지 유형은 국내 금융 자산 관리, 항만 수출입 화물 관리, 해외 공급망 관리를 위한 기후리스크 추정이다. 각 유형에 따라 홍수, 태풍, 풍랑, 폭염 등이 야기하는 기후리스크를 추

정하였다. 공통적으로 본 연구에서는 과거 관측된 기상 극한지수와 공공시설의 피해액을 지역별로 회귀분석해 비용함수를 도출하고, 미래 기후 시나리오(RCP, SSP 시나리오)에 투영시켜 시나리오별 피해액을 예측하였다.

하지만 이 비용함수에 사회적 요소의 역할이 어느 정도 기여하였는지 정량적으로 파악하지 못하였다. 예를 들어, 동일한 양의 강수량에 대해, 사회기반시설이 취약한 지역에서는 그렇지 않은 지역보다 피해가 클 수밖에 없다. 이를 반영하기 위해서는 추후 기후 변수뿐만 아니라, 사회기반시설 요소(총건축물 수, 하천 개수율, 중계펌프장 현황 등)도 추정식에 반영해 기후 리스크 개선 효과에 대한 추가 연구가 필요할 것이다.

본 연구에서는 금융 자산 관리를 위해 홍수와 태풍 리스크 추정 모형을 제안하였다. 홍수와 태풍 리스크 모형을 통해 각 기상 현상 별 피해 정도와 취약 지역을 파악할 수 있었다. 홍수로 인한 피해는 강원도, 경기도, 충청북도가 인접해 있는 내륙지방과 경상남도 일부 지역을 중심으로 발생할 것으로 결과가 나타났으며, 강원도의 경우에는 5일 최다 강수량에 비해 홍수에 대한 위험도가 높게 도출되었다. 강수량에 비해 피해가 클 것으로 추정되는 지역들은, 도시 특성을 고려한 방재시설 설치를 통한 홍수 방지 대책이 필요할 것으로 보인다. 태풍의 경우, 불확실성이 매우 커 정확한 예측은 어렵다. 지구온난화가 심화될수록 한반도가 태풍에 의한 영향을 더 자주, 더 강하게 받을 것이라는 전망을 가정해 본 연구에서는 간단히 1.5도와 2도 시나리오에 따라 태풍 리스크를 추정하였다. 해당 결과를 바탕으로 투자 전략을 수립하거나 기후변화로 인한 재무적 영향 평가 시 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 사료된다. 기상현상으로 인한 금전적인 피해를 기후리스크로 표현하는 연구는 현재로서는 초기 단계이기에 불확실성이 존재한다. 따라서 더욱 발전된 연구방법론을 개발하고 다양한 위험기상을 대상으로 한 후속 연구를 통해 기후리스크 모형의 정확성을 향상시킬 필요가 있다.

항만 수출입 화물 관리를 위해서는 풍랑으로 인한 체선 리스크를 추정하는 것이 중요하다. 풍랑은 풍속이 임곗값 이상 지속된 총 합계 시간, 즉 임계 풍속 시간과 큰 연관성이 있다. 그러나, 시간당 자료가 확보되지 않아, 계절성을 반영하기 위해 월별 임곗값 기준으로 체선기간 동안 발생한 풍속의 월 평균값을 사용하여 풍랑 위험을 예측하였다. 체선 발생 시 지급하는 체선료가 체선으로 인한 기후리스크의 주된 리스크이나 본 연구에서는 체선으로부터 발생하는 유가, 수급, 재고 등의 운영 정책 변화로 인한 간접적인 피해를 모두 고려할 수 있는 복합적인 기후리스크를 추정할 수 있는 예측 함수를 개발하였다.

한 기업의 제품 생산은 여러 단계에 걸쳐 협력사의 가치사슬로 뿐만 아니라, 공급망 관리를 위한 기후리스크를 고려하는 경우 여러 단계를 거쳐 최종적으로 사업장에 도달하는 공급망 특성을 반영해야 한다. 그러나 위에서 제시한 것처럼, 공급망상 위험 자료의 기록이 거의 없는 경우가 많아, 해당 사업장의 특성이 아닌 전반적인 평가를 수행하였다. 사업장에 미치는 최종적인 영향을 산출하기 위해 각 공급망 단계별 리스크를 평가하였다.

무엇보다 민간기업에서 기후리스크 관리가 지속 가능하도록, 피해 발생으로 인한 영향 등의 분석을 위해 피해 기록의 보관이 반드시 필요하고, 이를 활용하여 미래에 발생할 기후리스크에 대비하여야 한다. 실제 민간기업의 피해 분석을 하는 경우 국내 연구가 많지 않고, 관련 자료의 부족 등의 문제로 인해 간접적으로 피해를 추산할 수밖에 없는 것이 이 모델의 근본적 한계이므로, 이를 개선하기 위해서는 특별 피해 자료의 기록과 지속적 자료 관리가 반드시 병행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2018R1A6A1A08025520)이며, 민간주도 기후 리스크 관리모형 개발 프로젝트(Frontier-1.5°) 및 기상청 기상 기후 데이터 융합분석 특성화 대학원의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- British Embassy, 2021: *South Korea Climate Related Risk Assessment*, 99 pp.
- Cangialosi, J. P., E. Blake, M. DeMaria, A. Penny, A. Latto, E. Rappaport, and V. Tallapragada, 2020: Recent progress in tropical cyclone intensity forecasting at the national hurricane center. *Wea. Forecasting*, **35**, 1913–1922, doi:10.1175/WAF-D-20-0059.1.
- Chae, Y., 2016: *Development of socio-economic scenarios for low carbon climate change adaptation ready society in Korea*. Korea Environment Institute, 684 pp (in Korean).
- Chen, Y., Z. Duan, J. Yang, Y. Deng, T. Wu, and J. Ou, 2021: Typhoons of western North Pacific basin under warming climate and implications for future wind hazard of East Asia. *J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics*, **208**, 104415, doi:10.1016/j.jweia.2020.104415.
- Claassen, J. N., P. J. Ward, J. Daniell, E. E. Koks, T. Tigge-loven, and M. C. de Ruiter, 2023: A new method to compile global multi-hazard event sets. *Sci. Rep.*, **13**, 13808, doi:10.1038/s41598-023-40400-5.
- Franzke, C. L. E., J.-Y. Lee, T. O’Kane, W. Merryfield, and X. Zhang, 2023: Extreme weather and climate events: dynamics, predictability and ensemble simulations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **59**, 1–2, doi:10.1007/s13143-023-00317-5.
- FSS, 2021: *Climate Risk Management Guidelines*, Financial Supervisory Service, 14 pp (in Korean).
- Ho, C.-H., B.-G. Kim, B.-M. Kim, D.-S. R. Park, C.-K. Park, S.-W. Son, J.-H. Jeong, and D.-H. Cha, 2023: Review of the weather hazard research: Focused on typhoon, heavy rain, drought, heat wave, cold surge, heavy snow, and strong gust. *Atmosphere*, **33**, 223–246, doi:10.14191/Atmos.2023.33.2.223 (in Korean with English abstract).
- Hwang, J., 2022: Physical risk stress test for domestic bank corporate loans. *Journal of Korean Economic Studies*, **40**, 89–125 (in Korean).
- IFRS Foundation, 2023a: *IFRS S1 General Requirements for Disclosure of Sustainability-related Financial Information*, 46 pp [Available online at <https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/publications/pdf-standards-issb/english/2023/issued/part-a/issb-2023-a-ifrs-s1-general-requirements-for-disclosure-of-sustainability-related-financial-information.pdf>].
- _____, 2023b: *IFRS S2 Climate-related Disclosures*, 44 pp [Available online at <https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/publications/pdf-standards-issb/english/2023/issued/part-a/issb-2023-a-ifrs-s2-climate-related-disclosures.pdf>].
- IMF, 2019: *Fiscal Monitor: How to Mitigate Climate Change*. International Monetary Fund, 81 pp [Available online at <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/fiscal-monitor/2019/October/English/text.ashx>].
- IPCC, 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 582 pp.
- _____, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. In Contribution of Working Group I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 151 pp.
- _____, 2021: *Summary for policy makers. Climate change 2021: The physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 28 pp.

- Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 32 pp.
- Karl, T. R., N. Nicholls, and A. Ghazi, 1999: CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Wea. Climate Extremes*, **42**, 3-7.
- Kim, S., C.-H. Joh, and S. Lee, 2015: Change of damages and damage areas caused by typhoon in South Korea. *J. Climate Research*, **10**, 121-135, doi:10.14383/cri.2015.10.2.121.
- Knutson, T., S. J. Camargo, J. C. L. Chan, K. Emanuel, C. Ho, J. Kossin, M. Mohapatra, M. Satoh, M. Sugi, K. Walsh, and L. Wu, 2020: Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, E303-E322, doi:10.1175/BAMS-D-18-0194.1.
- Kossin, J. P., K. A. Emanuel, and S. J. Camargo, 2016: Past and projected changes in western North Pacific tropical cyclone exposure. *J. Climate*, **29**, 5725-5739, doi:10.1175/JCLI-D-16-0076.1.
- Kron, W., 2005: Flood Risk = Hazard • Values • Vulnerability. *Water Int.*, **30**, 58-68, doi:10.1080/02508060508691837.
- Lee, M., 2012: A study on determinants of the ship's time in a port in the perspective of port service innovation. *Innovation Studies*, **7**, 51-69 (in Korean).
- Lee, S., G. Kim, and H. Ham, 2015: Future Typhoon Genesis Distribution based on HadGEM2-AO. *J. Wind Eng.*, **19**, 101-109.
- MOF, 2008: *Port Affairs Handbook*. Ministry of Oceans and Fisheries, 416 pp (in Korean).
- MOIS, 2022: *2021 Annual Disaster Report*, Ministry of the Interior and Safety, 492 pp (in Korean).
- MSCI, 2020: *MSCI Climate VaR methodology part 4 – Physical climate risk*. MSCI ESG Research, 28 pp.
- Nam, C. C., D. S. R. Park, and C.-H. Ho, 2023: Major decisive factors of tropical cyclone risk in the Republic of Korea: Intensity, track, and extratropical transition. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **59**, 359-366, doi:10.1007/s13143-023-00318-4.
- NDMI, 2013: *Development of Regional Loss Function Based on Scenario*, National Disaster Management Research Institute, 75 pp (in Korean).
- Oh, H., K.-J. Ha, and J.-Y. Jeong, 2023: Identifying dynamic and thermodynamic contributions to the record-breaking 2022 summer extreme rainfall events in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, doi:10.1007/s13143-023-00334-4 (published online).
- O'Neill, B. C., E. Kriegler, K. Riahi, K. L. Ebi, S. Hallegratte, T. R. Carter, R. Mathur, and D. P. van Vuuren, 2014: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways, *Climatic Change*, **122**, 387-400, doi:10.1007/s10584-013-0905-2.
- Park, J.-K., B.-S. Kim, W.-S. Jung, E.-B. Kim, and D.-G. Lee, 2006: Change in statistical characteristics of typhoon affecting the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **16**, 1-17 (in Korean).
- TCFD, 2017: *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*, Task Force on Climate-related Financial Disclosures, [Available online at <https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf>].
- _____, 2023: *Support the TCFD*, Task Force on Climate-Related Financial Disclosures, [Available online at <https://www.fsb-tcfd.org/supporters/>].
- The 2° Investing Initiative, 2019: *Storm ahead: A PROPOSAL FOR A CLIMATE STRESS-TEST SCENARIO*, 42 pp [Available online at https://2degrees-investing.org/wp-content/uploads/2019/02/Stress-test-report_V2.pdf].
- UNDRR, 2016: *Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction*, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 41 pp.
- World Bank, 2023: *World Development Report 2023: Migrants, Refugees, and Societies*. The World Bank, doi:10.1596/978-1-4648-1941-4.
- WEF, 2019: *Global Risks Report 2019*. World Economic Forum, 107 pp [Available online at https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2019.pdf].
- Zscheischler, J., and Coauthors, 2018: Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, **8**, 469-477, doi:10.1038/s41558-018-0156-3.