

국가 기후위기 적응정보 표준분류체계 기반의 기후리스크 평가를 위한 핵심리스크 및 영향체인 도출 방법론 연구

정시원* · 유영재** · 장유진* · 황진후** · 전성우***† · 오윤영**** · 서도현***** · 진형아*****

*고려대학교 환경생태공학과 학생, **고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, ***고려대학교 환경생태공학부 교수, ****국립환경과학원 지구환경연구과 환경연구사, *****국립환경과학원 지구환경연구과 전문연구원, *****국립환경과학원 지구환경연구과 환경연구관

Methodology for deriving key risks and developing impact chains for climate risk assessment based on the Korea Climate Crisis Adaptation Information Taxonomy (KADT)

Jeong, Si Won* · Yoo, Young Jae** · Jang, Yu Jin* · Hwang, Jin Hoo** · Jeon, Seong Woo***† · Oh, Yunyeong**** · Seo, Do Hyun***** and Jin, Hyungah*****

*Student, Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Research Professor, Ojeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

****Researcher, Global Environment Research Division, National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Korea

*****Research Fellow, Global Environment Research Division, NIER, Incheon, Korea

*****Senior Researcher, Global Environment Research Division, NIER, Incheon, Korea

ABSTRACT

As the impacts of climate change increase, their analysis has become essential. In South Korea, efforts are underway to establish national climate risk assessments and adaptation measures. However, there is a lack of comprehensive analysis of the causal relationships behind these risks and their impacts on other sectors and risks. This study proposes a methodology based on the Korea Climate Crisis Adaptation Information Taxonomy, KADT, to derive impacts, aiming to enhance systematic management of national climate risks and their integration with adaptation policies. Using the methodology from the Climate Risk Sourcebook, the study derives key risks and impact chains for four sectors (water environment; agriculture, livestock and food; forestry; marine and fisheries) based on KADT. Key risks are selected through analysis of extreme climate projections and climate disaster impact scales, while subsystems are established using KADT components to develop the impact chains. Finally, impact chains are created for both intra-sectoral and inter-sectoral key risks. These impact chains (i) provide a systematic basis for deriving the data required for quantitative risk assessment, (ii) facilitate the identification of entry points for adaptation options, making it easier to integrate risk management with adaptation plans, and (iii) enable the development of comprehensive policies that address multiple risks simultaneously. Future research utilizing KADT, involving diverse experts and stakeholders to identify additional factors such as vulnerabilities, is expected to further enhance the utility of KADT.

Key words: KADT, Climate Risk, Key Risk, Impact Chain, Climate Risk Assessment, Climate Risk Sourcebook

†Corresponding author : eepps_korea@korea.ac.kr (02841, Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University. Tel. +82-2-3290-3043)

ORCID 정시원 0009-0009-0966-6494
유영재 0000-0003-0595-3911
장유진 0009-0007-6072-4421
황진후 0000-0002-5372-5377

전성우 0000-0001-5928-8510
오윤영 0000-0002-9115-814X
서도현 0000-0001-9528-2060
진형아 0006-0001-6573-1985

1. 서론

기후변화는 전 세계적으로 일어나는 대규모적인 변화로써, 기온, 강수 등 다양한 환경적 요인을 변화시킨다. 스웨덴의 학자인 Arrhenius는 대기 중 이산화탄소 농도가 2배 상승하면 지구 표면의 평균 온도가 약 5~6℃ 상승할 것으로 예측하며 최초로 온실가스와 기후변화의 상관관계를 제시하였다(Arrhenius, 1896). 이로부터 약 90년이 지난 1990년 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)로부터 제1차 평가보고서(AR1; First Assessment Report)가 발간되었으며, 현재까지 제6차 평가보고서(AR6)가 발간되었다. 온실가스 배출량은 에너지 사용량 증가, 산업의 확장, 교통량 증가 등으로 인해 지속적으로 증가하고 있으며 기후변화를 가속화하고 있다(Lamb et al., 2021; Minx et al., 2021). 기후변화의 가속화는 단순히 지구온난화, 해수면 상승 등의 영향뿐만 아니라 폭우, 가뭄 등 이상기상현상으로 인한 재난 및 재해를 가중시키고 있는 것으로 확인되었다(Kim and Park, 2021). 최근 들어서는 기후변화로 인한 기후재해 등이 증가함에 따라, 기후변화(Climate change) 대신 기후위기(Climate crisis)라는 용어를 사용함으로써 기후변화에 더욱 적극적으로 대응하기 위해 노력하고 있다.

미국과 멕시코 등 미주 지역뿐만 아니라 영국, 독일 등 유럽 국가들을 포함한 많은 국가에서는 이러한 기후위기에 대응하기 위해 기후리스크의 관리와 대응을 위해 노력하고 있다. 특히, 영국은 독자적인 기후변화 리스크 평가(C CRA; Climate Change Risk Assessment)를 5년마다 실시하여 다양한 부문에서 기후변화로 인한 리스크를 식별하여 평가하고, 이를 국가 적응 계획 수립에 활용하고 있다(HM Government, 2022). 이처럼 많은 국가가 기후리스크 평가(CRA; Climate Risk Assessment)를 통해 기후위기에 대응하고 있다. CRA는 리스크의 원인, 연쇄적으로 발생할 수 있는 잠재적 영향 및 부정적 결과를 정량적, 정성적 정보와 데이터, 전문가 지식 등의 근거를 기반으로 분석하는 과정으로, 현재와 미래의 리스크 모두를 평가하는데 사용될 수 있다. CRA는 기후 관련 리스크, 노출, 취약성 등을 이해하고 여러 부문에 피해를 초래할 수 있는 영향을 파악하며, 기후변화적응의 부족한 부분을 식별하고 대응의 시급성을 평가하여 우선순위를 정하기 위해 수행된다(ISO, 2021; Zebisch et al., 2023).

최근에는 CRA 과정 내에 기후리스크의 ‘영향체인’을

개발하는 과정이 통합되어 활용되고 있다. ISO 14091: 2021 기후변화에 대한 적응 - 취약성, 영향 및 리스크 평가에 관한 지침에서는 CRA 과정에서 리스크의 인과관계를 이해하기 위해 영향체인을 개발해야 하며, 영향체인은 시스템에서 리스크 유발 요소를 이해하고, 시각화하고, 체계화하여 우선순위를 지정하는 역할을 하여 리스크 평가의 출발점이 된다고 서술하고 있다. 또한 다양한 위험 요소 간 관련성 및 상호의존성을 염두에 두어 영향 체인을 개발하도록 하고 있다. 독일 국제협력기구(GIZ, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit)의 기후리스크 자료집(CR-SB; Climate Risk Sourcebook), 유럽환경청의 유럽 기후리스크 평가(European Climate Risk Assessment) 보고서 등에서도 리스크의 원인 및 영향 관계를 파악하기 위한 부문 내, 부문 간 영향 체인을 작성하고 있다. 현재 우리나라는 단순히 기후리스크에 대해 일대일 대응으로 정책을 수립하고 있어, 국제표준 및 해외 사례와 같이 영향체인을 작성하여 리스크의 부문 내 영향 관계 및 다른 리스크와의 관계성을 파악하고, 리스크를 통합적으로 관리하는 방향으로의 전환이 필요하다.

「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(이하 탄소중립기본법)」은 2021년 제정되어 2022년 발효되었는데, 기후위기 시대에 맞서 국가 수준에서 종합적인 기후변화 적응을 추진하기 위한 내용을 포함하고 있다. 탄소중립기본법 제37조 제2항에 따르면, 정부는 기후위기가 생태계, 대기, 물환경 등 다양한 부문에 미치는 영향과 취약성, 위험 및 사회적·경제적 파급효과를 조사·평가하는 기후위기 적응정보 관리체계를 구축하고 운영하여야 한다. 환경부 국립환경과학원에서는 탄소중립기본법을 준용하여 적응정보를 ‘기후 위기의 영향·취약성·위험 및 파급효과를 조사 평가에 사용되는 모든 정보’로 정의하였다. 이에 따르면 기후리스크 평가의 구성요소들과, 적응해법 및 정책 시행 등 기후위기 적응 조치에 대한 모든 정보가 적응정보의 범위에 해당한다. 또한, 기후위기 적응정보 관리체계 구축을 지원하기 위하여 과학기반(SCI), 적응해법(SOL), 정책평가(PEV)로 이어지는 국가 기후위기 적응정보 표준분류체계(KADT; Korea Climate Crisis Adaptation Information Taxonomy)를 개발하고 있다(Seo et al., 2023). KADT의 과학기반(SCI) 분류체계는 제3차 국가 기후위기 적응 강화대책(‘23)에서 제시된 72개 국가기후리스크를 중심으로 부문별 하위 정보들이 양방향으로 연계되며, 특히 기후영향인자(CIDs; Climate impact drivers), 대상, 영향 등의 요소를 이용하여 국가기후리스크

크의 완결성을 진단하는 체계를 포함하고 있다(Seo et al., 2023). 그러나 국가기후리스크의 형태는 그 특성상 리스크와 관련된 하위 상세 정보를 모두 명시하기는 어렵기 때문에, 리스크의 영향과 파급효과 파악을 통해 적응정책과 연계하기 위해서는 대표성과 시급성이 보장되는 핵심리스크를 대상으로 순차적으로 기후리스크 평가 정보를 구축하고 제공할 필요가 있다. 따라서 KADT의 과학기반(SCI) 분류체계의 구성요소를 활용하여 영향체인을 도출하고 이를 통해 국가기후리스크를 보다 효과적으로 파악하고, 관련 적응정책과의 연계성과 활용성을 높일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기후리스크 평가 관련 사례를 참고하여, 한국의 기후위기 적응정보 표준분류체계(KADT)의 활용성 제고를 위해 KADT 기반의 핵심리스크를 선별하고 이를 기반으로 하는 영향체인 도출 방법론을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 국내·외 영향체인 도출 사례 조사·분석

국내에서는 기후위기 영향을 정량적으로 평가하는 도구로 한국형 기후변화 통합 영향평가 모형 MOTIVE (Model Of inTegrated Impact and Vulnerability Evaluation of climate change)와 기후변화 취약성 평가도구 VESTAP (Vulnerability assESsment Tool to build climae change Adaptation Plan)이 존재한다. MOTIVE는

부문 내, 부문 간 상호관계를 바탕으로 평가항목을 만들고 부문별 영향 및 취약성, 등급과 경제가치 등을 모형을 통해 정량적으로 평가한 결과를 제공하는 모형이다. VESTAP은 기후변화 영향에 대한 사전평가를 위해 전국, 지자체 단위로 취약성 평가 항목과 지표, 평가결과 등을 제공하는 모형이다(<https://kaccc.kei.re.kr>). 이러한 평가도구들은 개발시점의 필요에 맞게 AR4 (VESTAP), AR5 (MOTIVE)를 기반으로 개발된 것으로, 최근 AR6 (2022)에서 제시된 핵심리스크 및 영향체인 등의 내용을 충분히 반영하지는 못하고 있다. 따라서 국가 기후위기 적응대책에서 제시된 국가기후리스크와 평가도구를 연계하여 리스크를 관리하고 적응정책을 수립, 시행할 수 있도록 하는 AR6 기반의 새로운 리스크 평가 체계의 마련이 필요하다.

AR6 기반의 최근 기후리스크 평가에서는 국가의 기후리스크를 중심으로 ‘영향체인(Impact chain)’을 구축하여 리스크의 영향관계를 도출하는 과정을 포함하고 있다. 영향체인이란 특정 맥락에서 특정 기후위험으로 이어지는 모든 주요 요인과 과정을 포함하는 개념적 모델이다(Zebisch et al., 2022)(Fig. 1). 영향체인은 특정 리스크에 기여하는 관련성 있는 다양한 요소들을 포착할 수 있는 프레임워크로 다양한 데이터와 참여자를 통합할 수 있으며 적응계획의 적합성에 초점을 맞춘 접근 방식이다(Menk et al., 2022). 알프스의 기후 위험 평가를 위해 처음 개발된 이후 기후리스크 자료집(CR-SB)에 통합되었으며, 이후 독

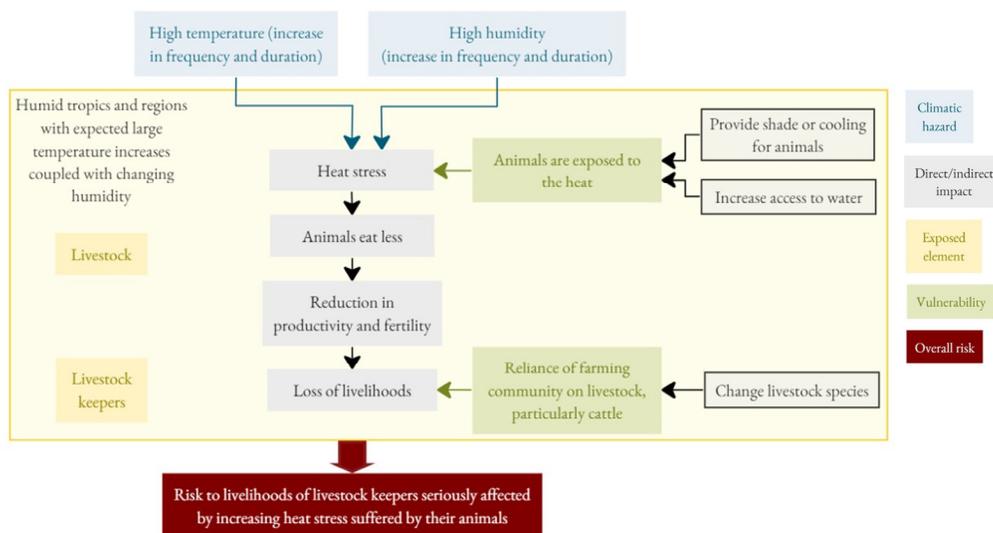


Fig. 1. Example of an impact chain in the agricultural sector (<https://www.adaptationcommunity.net>)

일, 유럽뿐만 아니라 약 20개국의 국가기후리스크 평가에 적용되었고(Fritzsche et al., 2014; Schneiderbauer et al., 2013), ISO 14091에서도 기후리스크 평가를 위한 개념 중 하나로 제안되었다(ISO, 2021).

본 연구에서는 KADT의 활용성 제고를 위해 국가기후리스크를 평가하여 적응정책과의 연계 목적을 한다는 점에서, 리스크를 중심으로 인과관계를 파악하고 적응계획과 연계 가능한 방법론인 영향체인을 적용하고자 하였다. 기후리스크 자료집(CR-SB)은 기후영향체인을 통해 기후리스크를 평가하는 일련의 과정을 담고 있으며, 유럽 등의 국가 및 다양한 연구에서도 참고하고 있는 기후리스크 평가 프레임워크 자료이므로 본 연구에서도 CR-SB의 방법론을 준용하여 KADT 기반의 핵심리스크 도출과 평가에 활용하였다.

기후리스크 자료집(CR-SB)은 ISO 31000:2018 리스크관리 지침의 기후위험평가(CRA)에서 제시되는 네 가지 모듈인 범위 설정(Scoping), 리스크 식별(Risk Identification), 리스크 분석(Risk Analysis), 리스크 평가(Risk evaluation)를 포함하고 있다(Zebisch et al., 2023). 또한, CRA의 네 가지 모듈 외에 추가적으로 데이터 및 정보(Data & Information), 적응(Towards Adaptation), 모니터링 및 평가(Monitoring & Evaluation), 커뮤니케이션(Communication)의 4가지 교차 모듈을 함께 다루고 있다(Fig. 2).

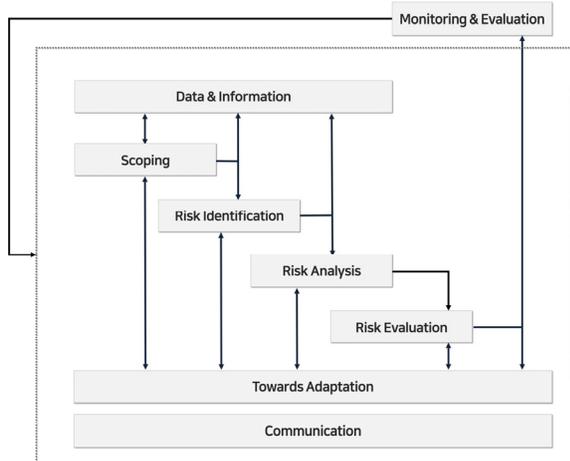


Fig. 2. CR-SB framework (adapted from the original figure)

범위 설정 모듈은 기존 목표, 가치, 정책 및 계획 프레임워크를 고려하고 새로운 프레임워크를 정의하여 의사결정과 적응계획을 지원할 수 있도록 CRA의 범위를 설정

하는 모듈이다. 리스크 평가의 목적 및 범위를 설정하고, 시스템(Systems), 하위시스템(Subsystems) 및 관련 노출요소(Exposed elements)를 정의하는 등의 과정을 다룬다. 리스크 식별 모듈은 기존의 지식과 전문가 의견, 이해관계자의 의견을 바탕으로 리스크를 식별하는 단계이며, 현재와 미래의 기후 영향과 리스크를 파악하여 심층 분석을 위한 리스크를 결정하는 단계이다. 리스크 분석 모듈은 리스크의 구성요소인 위험요소, 노출, 취약성을 분석하고 그들 사이의 상호작용과 이로 인한 직접적, 연쇄적 영향을 이해하는 모듈로, 영향체인(Impact Chain)을 중심으로 이루어진다. 리스크 평가 모듈은 리스크의 심각성을 평가하고, 주요 리스크에 대해 긴급한 조치가 필요한 경우 기후리스크 관리 및 적응정책 결정에 정보를 제공하기 위한 리스크 수용력을 평가하는 모듈이다. 데이터 및 정보 모듈은 리스크 평가를 위해 정보 기반을 준비하는 단계로, 현재의 기후, 기후 시나리오, 기후 영향에 관련된 정보 및 기후위기에 노출된 시스템, 하위시스템 및 요소의 현재와 잠재적 미래의 상황, 영향, 취약성 등을 설명하는 정보들이 포함된다. 적응 모듈은 기후변화와 그 영향에 대한 조정 과정으로, 피해를 줄이거나 유리한 기회를 활용하기 위해 CRA에서 CRM (Climate risks management)로의 전환을 지원하여 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다. 모니터링 및 평가 모듈은 특정 목표를 위해 실행된 기후 적응 옵션의 진행 상황을 추적하며, 적응 조치의 효과를 객관적으로 판단하는 과정을 다룬다. 커뮤니케이션 모듈은 다양한 사용자 및 목표 그룹에게 기후 관련 리스크와 CRA의 결과를 효과적으로 전달하기 위한 단계를 제공하는 모듈이다.

CR-SB의 모듈 중 영향 체인을 중심으로 하는 리스크 분석 모듈을 연구에 활용하였다. 리스크 분석 모듈은 크게 7개의 단계로 구성된다(Fig. 3).

리스크 분석의 핵심 도구인 영향체인은 리스크 식별 단계에서 수집된 정보를 바탕으로, 전문가 및 이해관계자를 포함한 협의체를 구성하여 협력을 통해 개발하는 것이 바람직하다. 영향체인은 각 부문의 핵심리스크(Key risks)를 중심으로 구성되며, 범위 설정 단계에서 정립된 하위체계를 기반으로 작성된다. 하위체계는 시스템, 하위시스템, 노출요소로 구성된다. 시스템은 주로 관련 부처 및 기관에서 관리되는 큰 기능적 부문을 의미하며, 하위시스템은 그 내부의 구성 요소나 세부 집합을 뜻한다. 노출요소는 리스크 평가 프레임워크에서 가장 작은 단위로, 기후 위험에 직접적으로 노출된 요소를 말한다. 이러한 하위 체

Step 1	Develop impact chains for relevant risks within each subsystem
Step 2	Consider interlinkages between subsystems
Step 3	Reflect on gaps and potential entry points for CCA options in the impact chains
Step 4	Collect data and indicators for components and factors of impact chains
Step 5	Describe and analyse impacts and risks along the impact chains – risk report
Step 6	Aggregate assessment of risk drivers and potential for severe consequences
Step 7	Compile a risk analysis report

Fig. 3. 7 Steps of the risk analysis module (adapted from the original figure)

계를 기반으로 직접적 영향, 노출 요소, 기후 영향 인자, 간접적 및 연쇄적 영향, 취약성 요소, 기후리스크 관리 (CRM) 및 적응(CCA; Climate Change Adaptation) 정책의 진입점 등을 종합적으로 고려하여 부문 내 영향체인을 작성해야 하며, 부문 간 영향 체인은 부문 내 영향체인을 토대로 하위 시스템 간 상호 연결과 연쇄작용을 개념화하여 작성해야 한다(Zebisch et al., 2023).

따라서 KADT 기반 핵심리스크 선정 및 영향체인 도출을 위해서는 리스크 분석 모듈을 중심으로 범위 설정, 리스크 식별, 데이터 및 정보 모듈을 함께 적용할 수 있으며, 최종적으로 부문별 핵심리스크를 중심으로 부문 내, 부문 간 영향체인을 구축하는 방법론을 제안하고자 한다.

2.2. KADT 국가기후리스크 검토

KADT는 적응정보의 효과적인 수집, 제공 및 관리를 목적으로 각 부처에 산재된 리스크, 적응해법, 정책평가 등 적응정보를 연계하여 활용하기 위해 개발된 표준분류 체계이다. KADT는 크게 세 가지 측면에서 기후적응에 기여할 수 있다. 첫 번째로, 각 부문별 리스크를 파악할 수 있다. 두 번째로, 정책결정자 및 지자체 차원에서 KADT를 통해 제시되는 적응해법을 기반으로 적응정책을 수립할 수 있다. 마지막으로, 각 부처 또는 지자체에서 시행된 정책 정보를 기반으로 정책평가를 수행할 수 있다. 이를 상세히 살펴보면, KADT는 과학기반, 적응해법, 정책평가의 3개 대분류 체계와 국토·교통, 농업·축산·식품, 물환경, 보건·복지, 산림, 산업·통상·에너지, 생태계, 해양·수산, 공통활용의 9개 중분류 체계가 있으며, 각 대분류별로 하위 분류체계인 소분류부터는 부문별 중점 관리대상 등에 따

라 구성요소를 다원화할 수 있는 구조이다(Seo et al., 2023). 과학기반(SCI)은 72개 국가기후리스크를 기반으로 작성되며, 적응해법(SOL)은 제3차 국가기후위기적응 강화대책상 제시되는 226개 사업을 기반으로, 정책평가(PEV)는 지방적응대책목록을 기반으로 작성된다. KADT 과학기반(SCI)의 세분류항목은 72개의 국가기후리스크를 기후영향인자(CIDs), 대상, 부정적 영향의 3가지 항목을 포함하도록 보완한 것이다. 즉, 과학기반의 세분류 항목 하나하나가 리스크에 해당된다.

CR-SB 사례에 따르면 어떠한 리스크에 대한 분석 및 평가를 위한 영향체인 작성을 위해서는 단순히 기후리스크뿐만 아니라 해당 리스크의 하위 구성요소인 시스템, 하위시스템, 노출요소 등이 요구된다. 제3차 국가 기후위기 적응 강화대책 상 제시된 72개의 국가기후리스크는 이를 고려하고 작성된 것이 아니므로, 각각의 리스크로부터 구성요소 도출이 필요하다. 기존에 제시된 KADT는 리스크의 3가지 구성요소로 기후영향인자, 대상, 영향을 제시하고, 국가기후리스크 보완을 수행하였다. 하지만, 기후위기의 영향·파급효과와 파악 등 적응정책에 필요한 모든 정보를 포함하는 적응정보의 관점에서 보았을 때 기후로 인한 리스크뿐만 아니라 기회 또한 포괄하여야 하므로 분류체계상 부정적 영향만을 고려하는 것은 적절하지 않다. 이에 국립환경과학원에서는 3개 구성요소를 기반으로 작성된 KADT를 일부 수정하여 기후영향인자, 대상, 영향, 영향의 관계성의 4개 구성요소의 진단체계로 보완을 추진하고 있다. 본 연구는 이를 준용하여 영향체인의 작성에 활용하고자 하였다.

2.3. 핵심리스크 선정 기준

영향체인 도출 방법론을 제시하기 위하여, 시의성이 높은 4개 부문을 선정하였으며, 영향체인 도출을 위한 각 부문별 핵심리스크를 제시하고자 하였다. 핵심리스크(Key risks)는 ‘잠재적으로 심각한 위협’으로 정의되며, 다양한 규모의 다양한 시스템에 대해 정의될 수 있다. 핵심리스크는 부정적 결과의 규모, 부정적 결과의 가능성, 위협의 시간적 특성, 대응능력을 고려하여 식별되어야 하며, 가능한 경우 리스크의 위협(Hazard), 노출(Exposure), 취약성(Vulnerability)에 대한 미래 상황을 예측하는 문헌을 활용하도록 하고 있다(IPCC, 2022). CR-SB에서는 기존의 지식, 현지 전문가 의견, 이해관계자 등의 의견을 반영하여 심층 분석을 진행하기 위한 핵심리스크를 식별하도록 하고 있으며, 리스크 발생의 잠재적 규모, 심각한 결과의 가능성, 위협 감소의 가능성 및 한계, 시스템(부문)의 중요성, 위협의 시기 등을 식별 기준으로 제시하고 있다(Zebisch et al., 2023).

이와 같은 기준을 참고하여, KADT 과학기반 세분류 항목에 해당하는 국가기후리스크들 중 리스크의 미래 발생 가능성, 영향 규모 등을 제시하는 문헌을 검토하고 각 부문별 전문가의 의견을 반영하여 핵심리스크를 선정하였다.

3. 연구결과

3.1. KADT 국가기후리스크 구성요소 검토

KADT 개선안의 과학기반(SCI) 세분류항목인 국가기후리스크의 4개 구성요소와 검토 과정은 다음과 같다(Fig. 4). 먼저 하나의 문장 형태로 제시된 국가기후리스크를 기후영향인자, 대상, 영향, 영향의 관계성 4가지의 구성요소로 분할한다. 여기서 기후영향인자(CIDs)란 리스크를 유발하는 기후요인에 해당하며(IPCC, 2022), 대상은 기후영향을 받는 지역이나 대상, 영향은 그로 인해 발생하는 현상, 영향의 관계성은 증가, 감소 등 영향의 방향성과 특성을 의미한다. 이들 각각의 구성요소는 또한 영향체인에 포함되는 구성요소 혹은 영향 흐름을 나타내는 요소가 되며, 이후 정량적으로 리스크를 평가할 때 데이터를 연계할 수 있는 요소의 역할도 할 수 있다.

3.2. KADT 기반의 핵심리스크 및 영향체인 도출 방법론

CR-SB Framework (Zebisch et al., 2023)의 범위설정, 리스크 식별, 리스크 분석 모듈을 참고하여 KADT 부문별 핵심리스크 대상 영향체인 도출 방법론을 다음과 같이 제시하였다(Fig. 5). 첫째, 리스크로서 제시되는 KADT 과학기반(SCI)의 세분류 항목 중 영향체인 도출을 위한 핵심리스크를 선정한다. 둘째, 중분류, 소분류 항목 및 세분류

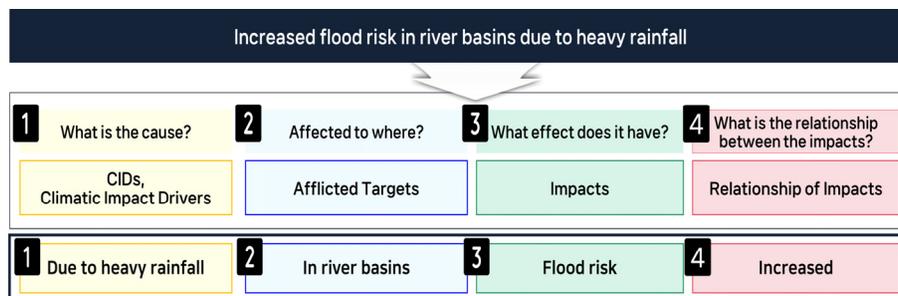


Fig. 4. Example of a review of national climate risk components



Fig. 5. Flowchart of the methodology for developing impact chain based on KADT

항목의 구성요소를 기반으로 영향체인 작성을 위한 시스템, 하위시스템, 노출요소를 설정한다. 셋째, 영향체인 구성요소를 활용하여 핵심리스크 중심의 영향체인을 작성한다.

3.2.1. 핵심리스크 선정

영향체인 도출을 위한 KADT 기반의 부문별 핵심리스크를 다음 3가지 절차에 따라 선정하였다(Fig. 6). 첫째, 발생가능성이 높은 기후영향인자를 가진 국가기후리스크를 선별한다. 이는 2022 남한상세 기후변화 전망보고서를 통해 한국의 극한기후현상 미래 발생 전망 중 가장 발생가능성이 높은 사례를 근거로 하여 선정하였다. 2022 남한상세 기후변화 전망보고서에 따르면 한국은 SSP 시나리오에 따르면 21세기 후반에 기온 상승, 강수량 상승, 강우일수 감소가 예측되며, 풍속, 상대습도, 일사량에는 큰 변화가 없을 것으로 예상된다. 또한, 극한 고온 현상은 증가하는 반면, 극한 저온 현상은 점차 감소하여 거의 발생하지 않을 것으로 전망된다(Kim et al., 2022). 둘째는 리스크의 영향의 규모를 검토하였다. 이는 재해연보(2022)를 통해 한국의 기후재해 발생으로 인한 피해규모가 큰 사례 중에서 선별하였다. 재해연보에 따르면 자연재해로 인한 피해 중 최근 10년간 폭염, 호우, 태풍 순서로 인명피해가 크게 나타났으며, 하천 사방, 도로 등 공공시설과 비닐하우스, 축사 등 사유시설의 피해액이 가장 큰 것으로 나타났다(MOIS, 2024). 시설 피해를 세부적으로 살펴본 결과 물환경, 농업·축산·식품, 산림, 해양·수산 부문의 시설 피해가 지속적으로 발생하는 것으로 나타났다(Table



Fig. 6. Flowchart of the methodology for deriving key risks

1). 이와 같은 데이터를 토대로 물환경, 농업·축산·식품, 산림, 해양·수산 4개 부문의 세분류 항목들의 4가지 개별 구성요소를 검토하였다. 발생가능성이 높은 기후재해 및 피해규모가 높은 기후재해 및 시설과 관련 있는 구성요소를 포함하는 세분류 항목들을 핵심리스크 후보로 선정하였다. 마지막으로 핵심리스크의 적절성, 중요성 등을 추가적으로 논의하여 부문별 최종 핵심리스크를 다음과 같이 선정하였다(Table 2). 선정은 3차례의 자문회의를 통해 이루어졌으며, 본 연구에서 대상으로 하는 4개 부문의 전문가 12명이 참여하였다.

3.2.2. 부문별 하위체계 설정

부문별 하위체계 설정은 영향체인 작성을 위한 시스템, 하위시스템, 노출요소를 설정하는 단계이다. KADT 과학기반(SCI)의 중분류, 소분류 및 세분류의 4개 구성요소를 기반으로 CR-SB에서 제시된 하위체계와 매칭하였다(Fig. 7). 시스템은 큰 기능적 단위이자 각 부처의 관리단위를 말하므로, 과학기반(SCI) 중분류 항목을 시스템으로 설정하였다. 하위시스템은 시스템 내에서 영향을 받는 하위 집단으로 지역 및 대상의 성격을 가지므로 세분류 항목의 4개 구성요소 중 ‘대상’에 해당하는 구성요소들을 활용하여 하위시스템으로 설정하였다. 노출요소는 기후위험에

Table 1. Disaster-damaged facilities by sector

Sector	Disaster-damaged facilities
Water environment	Rivers, small streams, irrigation, water supply
Agriculture, Livestock, and Food	Greenhouses, livestock barns, sericulture, livestock
Forestry	Erosion control
Marine and Fisheries	Fishing ports, harbors, fish farming, fishing nets, fishing gear

Table 2. Key risks by four sectors

Sector	Key risks
Water environment	Increased flood risk in river basins due to heavy rainfall
Agriculture, Livestock, and Food	Increased damage to farmland due to flooding from heavy rainfall
Forestry	Increased occurrence and damage from forest disasters caused by heavy rainfall
Marine and Fisheries	Increased risk of coastal flooding due to sea waves

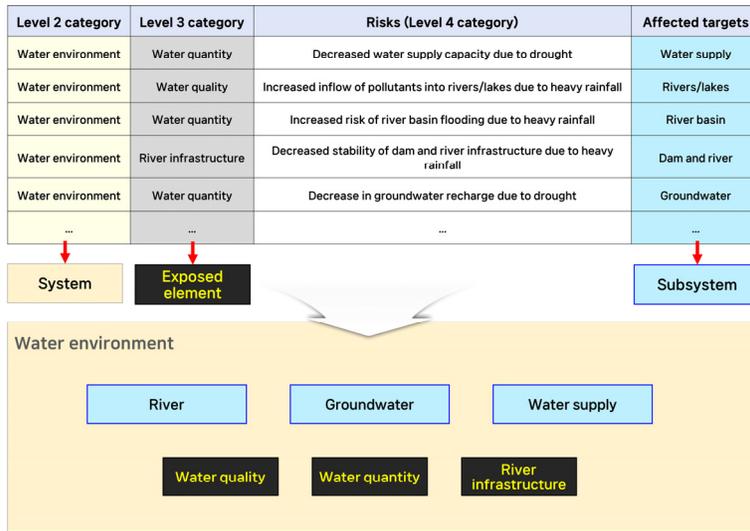


Fig. 7. Example of defining systems, subsystems and exposed elements by sector (Water environment sector)

노출되어 있는 대상이자, 리스크의 바로 상위 단계의 요소이므로 KADT 세분류 리스크의 바로 상위 단계인 소분류 항목을 노출요소로 설정하였다.

3.2.3. 영향체인 작성

영향체인은 앞에서 선정한 시스템, 하위시스템, 노출요소의 큰 틀 내에서 부분별로 선정한 핵심리스크를 중심으로 작성하였다. 부문 내 영향체인 작성 절차는 다음과 같다. 첫째, 선정한 핵심리스크를 시스템-하위시스템-노출요

소의 위계에 맞게 배치한다. 둘째, 핵심리스크를 유발하는 기후영향인자를 시스템 외부에 배치한다. 셋째, 핵심리스크의 영향 및 영향의 관계성에 따라 화살표로 영향 흐름을 표시한다. 그 과정에서 리스크의 문장 내에서는 명시되지 않은 추가적인 직·간접 영향요소가 식별되면 이를 체인 내에 추가한다. 넷째, 핵심리스크와 영향관계에 있는 부문 내 타 리스크를 식별하여 영향체인 내에 포함시킨다 (Fig. 8). 영향 흐름은 관련 사례, 과학기반 보고서, 논문 등을 참고하여 초안을 작성하였으며, 각 분야별 전문가

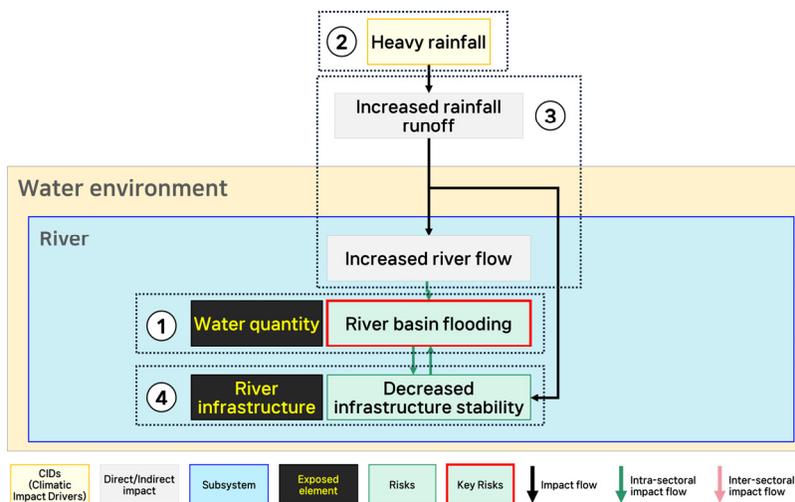


Fig. 8. Example of intra-sectoral impact chain based on key risk (water environment sector)

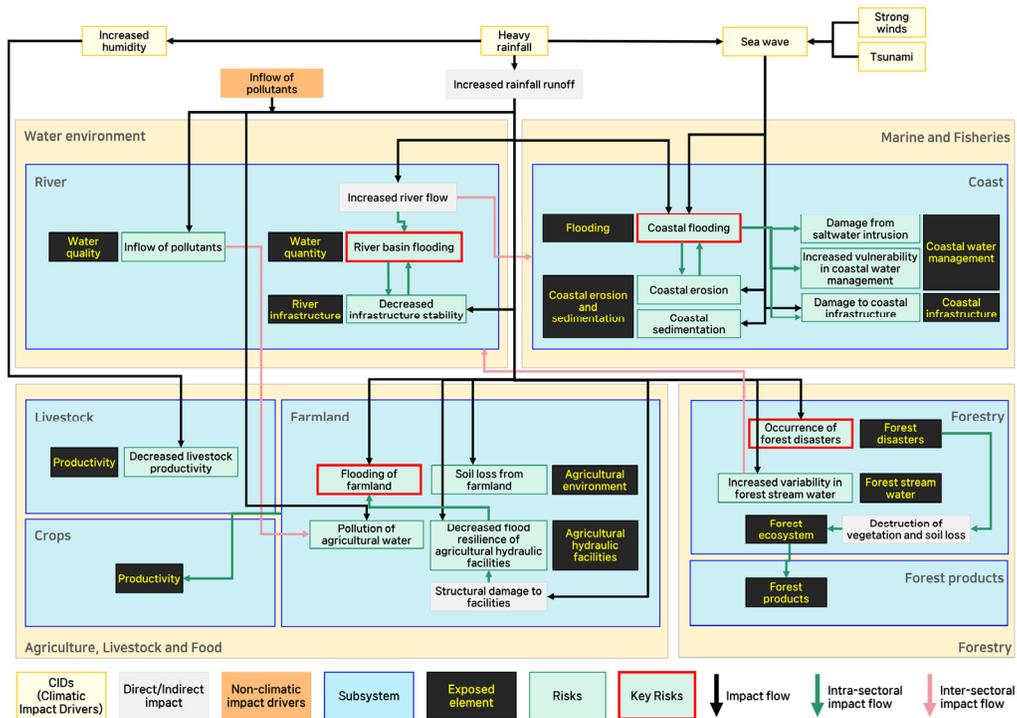


Fig. 9. Inter-sectoral impact chain based on key risks of four sectors

검토를 통해 최종적으로 작성하였다. 방법론을 통해 물환경, 농업·축산·식품, 산림, 해양·수산 4개 부문의 핵심리스크를 중심으로 부문 내 영향체인을 구축하였다.

리스크의 영향관계를 파악하고 통합적으로 관리하기 위해서는 리스크가 타 부문과 나타내는 상호작용 및 연쇄작용을 고려하여야 부문 간 영향체인을 작성하여야 한다. 부문 간 영향체인은 복잡한 영향 흐름 관계를 포함하고 있다. 부문 간 영향흐름은 4개 부문 영향체인의 각각 구성요소들이 타 부문 영향체인의 요소에 미치는 영향 및 관계성을 고려하여 연결하였다. 위에서 작성한 부문 내 영향체인을 기반으로 부문 간 영향관계를 추가하기 위해서 핵심리스크뿐만 아니라 관련된 타 리스크들도 함께 영향체인 내에 포함시켰으며, 영향 흐름 작성 과정에서 추가적으로 식별되는 비기후 위험인자, 직·간접 영향 등을 반영하였다. 방법론을 통해 물환경, 농업·축산·식품, 산림, 해양·수산 4개 부문의 핵심리스크를 중심으로 부문 간 영향체인을 작성하였다(Fig. 9).

4. 결론 및 고찰

기후변화로 인한 피해가 증가하면서 ‘기후리스크’로부

터 발생할 수 있는 영향 및 파급효과를 분석하는 것은 필수적인 작업이다. 국내에는 리스크를 작성하고 기후위기 적응대책을 수립하여 노력하고 있다. 하지만 리스크가 발생하는 인과관계 분석 및 하나의 리스크가 다른 부문 및 리스크에 미치는 영향 등을 파악하기 위한 작업은 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 국내 적응정보 분류체계인 KADT를 기반으로 영향체인을 도출하는 방법론을 제시하여, 국가기후리스크의 체계적 관리 및 적응정책과의 연계성을 높일 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

국내·외 사례 중, 기후리스크 자료집(CR-SB)의 기후리스크 평가 프레임워크의 영향체인 도출 방법론을 응용하였다. 영향체인 작성은 기후영향인자, 대상, 영향, 영향의 관계성의 4개 구성요소 진단체계로 보완된 KADT의 과학기반(SCI) 세분류 항목에 해당하는 국가기후리스크를 활용하였다. KADT 기반의 영향체인 도출 방법론은 다음 세 단계로 구축하였다. 첫째, 부문별 핵심리스크 도출, 둘째, 부문별 하위체계 설정, 셋째, 영향체인 작성이다. 방법론을 적용하기 위한 예시로 KADT 과학기반(SCI) 9개 중분류 중 물환경, 농업·축산·식품, 산림, 해양·수산의 4개 부문을 선정하여 핵심리스크 및 영향체인을 도출하였다. 핵심리스크의 도출을 위해 기후전망보고서 및 재해연보 등

문헌자료를 통해 리스크의 발생가능성과 영향정도를 검토하였고, 이후 전문가 검토를 거쳐 부문별 핵심리스크를 선정하였다. 부문별 하위체계는 KADT 중분류, 소분류, 세분류 및 앞서 도출한 세분류의 4개 구성요소 중 적절한 것을 활용하여 시스템, 하위시스템, 노출요소로 설정하였다. 핵심리스크와 하위체계를 활용하여 마지막으로 부문 내, 부문 간 영향체인을 작성하였다.

KADT를 활용하여 리스크의 영향체인을 도출한 것은 다음과 같은 의의가 있다. 첫 번째로, 영향체인을 리스크 평가 도구와 연계함으로써, 정량적인 리스크 평가를 위한 기반을 마련하였다. 영향체인은 해당 리스크와 관련된 기후영향인자, 비기후위험요인, 직/간접 영향 등 다양한 요소를 포함하고 있으며 영향 흐름을 통해 인과관계를 확인할 수 있다. 영향체인의 각각의 요소는 데이터 연계를 위해 활용 가능한 지표를 식별하는 기준이 될 수 있으며, 기 구축된 MOTIVE, VESTAP 등과 연계한다면 리스크의 영향을 정량적으로 평가할 수 있을 것이다. 두 번째로는 적응정책과 효율적으로 연계 가능하다. 영향체인은 특정 시스템에서 리스크를 유발하는 요소를 이해하고, 체계화하여 우선순위를 지정하는 데 도움이 되며(Estoque et al., 2022; Menk et al., 2022), 적응 옵션의 진입점을 식별하는 데에 유용하게 사용될 수 있다(Zebisch et al., 2023). 기후 적응을 위해 해결해야 하는 근본적인 요소 및 원인을 파악할 수 있고, 어떤 요소에 대한 전략이나 조치가 필요한지 영향체인을 통해 파악하여 리스크를 관리하기 위한 효과적인 정책 수립에 기여할 수 있다. 마지막으로, 부문 간 영향관계를 파악하여 하나의 리스크가 아닌 복합적인 리스크를 고려할 수 있다. 기존에는 기후리스크에 1:1 대응하여 적응정책이 수립되었다면, 부문 간 영향체인을 통해 여러 리스크가 발생하는 상황을 파악하게 되므로 다양한 리스크에 복합 대응 가능한 적응정책 수립에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 제3차 국가 기후위기 적응 강화대책과 연계되는 KADT를 기반으로 영향체인을 도출하는 방법론을 제안하는 것이 목적이다. 영향체인 작성 시에 기 구축된 KADT를 기반으로 수행했다는 점에서, 다른 국가 및 국제기구 등에서 사용하는 기후리스크 평가 과정에 비해 제한적인 요소만을 고려했다는 한계점이 있다. 따라서 본 연구를 통한 방법론을 개선하기 위해, 기존의 KADT를 영향체인 작성을 통한 리스크 평가에 적합한 형태로 변환하는 연구가 추가적으로 진행될 필요가 있다. 또한, 연구진 및 전문가 외에 다양한 이해관계자의 의견을 반영하지 못했

다는 한계점의 보완이 필요하다. CR-SB에서는 전문가, 이해관계자의 워크숍 등을 통해 영향체인을 개발하도록 하고 있으며 영향체인 내에는 기후영향인자 및 리스크 외에도 취약성 요소, 기타 잠재적 리스크 유발 요소 등을 포함하도록 하고 있다. 우리나라는 국립환경과학원 국가기후위기적응센터를 중심으로 적응정보 생산 관련 10개 기관이 참여하고 있는 국가 기후위기 적응연구 협의체를 구성하고 있다. 추후 KADT를 기반으로 협의체뿐만 아니라 연구자, 전문가, 이해관계자와 함께 리스크와 연관된 요소를 추가적으로 식별하여 영향체인을 구축하는 연구가 수행된다면 KADT의 활용성을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 영향체인에 MOTIVE, VESTAP 등 평가도구를 적용하여 리스크를 정량적으로 평가하는 향후 연구를 통해 각 리스크의 대응 시급성과 우선순위를 평가하여 효과적으로 적응정책과 연계할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2024-01-01-007).

References

- Arrhenius S. 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philos Mag* 41(251): 237-276. doi: 10.1080/14786449608620846
- Climate Change Survey and Impact Information Provision System. [date unknown]. Climate change impact assessment. [accessed 2024 Sep 9]. <https://www.arccas.or.kr/main/main.do>
- EEA (European Environment Agency). 2024. European climate risk assessment. Copenhagen, Denmark: Author. EEA Report 01/2024.
- Estoque RC, Ooba M, Togawa T, Yoshioka A, Gomi K, Nakamura S, Tsuji T, Hijioka Y, Watanabe M, Kitahashi M. 2022. Climate impact chains for envisaging climate risks, vulnerabilities, and adaptation issues. *Reg Environ Change* 22(4): 133. doi: 10.1007/s10113-022-01982-4
- Fritzsche K, Schneiderbauer S, Bubeck P, Kienberger S, Buth M, Zebisch M, Kahlenborn W. 2014. The

- vulnerability sourcebook. Bonn and Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- HM Government. 2022. UK climate change risk assessment 2022.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Climate change 2022 - Impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844
- ISO (International Organization for Standardization). 2021. Adaptation to climate change — Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment. Geneva, Switzerland: Author. ISO 14091:2021.
- Kim DH, Kim JW, Kim TJ, Byun YH, Jeong JY. 2022. Detailed climate change projection report for South Korea. Jeju, Korea: National Institute of Meteorological Sciences.
- Kim N, Park C. 2021. A priority analysis on the climate change adaptation measures in the disaster: using AHP and ANP (in Korean with English abstract). *J Environ Policy Adm* 29(1): 21-45. doi: 10.15301/jepa.2021.29.1.21
- KMA (Korea Meteorological Administration). [date unknown]. Climate change impact information. [accessed 2024 Sep 9]. http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/influence/inf_1-1.php
- Korea Climate Change Adaptation Information Portal. [date unknown]. Web assessment tool. [accessed 2024 Sep 9]. <https://kaccc.kei.re.kr/portal/tool/vestap.do>
- Lamb WF, Wiedmann T, Pongratz J, Andrew R, Crippa M, Olivier JG, Wiedenhofer D, Mattioli G, Khourdajie AA, House J, et al. 2021. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environ Res Lett* 16(7): 073005. doi: 10.1088/1748-9326/abee4e
- Menk L, Terzi S, Zebisch M, Rome E, Lückerrath D, Milde K, Kienberger S. 2022. Climate change impact chains: A review of applications, challenges, and opportunities for climate risk and vulnerability assessments. *Weather Clim Soc* 14(2): 619-636. doi: 10.1175/WCAS-D-21-0014.1
- Minx JC, Lamb WF, Andrew RM, Canadell JG, Crippa M, Döbbling N, Forster PM, Guizzardi D, Olivier J, Peters GP, et al. 2021. A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970-2018 with an extension to 2019. *Earth Syst Sci Data* 13(11): 5213-5252. doi: 10.5194/essd-13-5213-2021
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety). 2024. 2022 disaster yearbook. Sejong, Korea: Author.
- Schneiderbauer S, Pedoth L, Zhang D, Zebisch M. 2013. Assessing adaptive capacity within regional climate change vulnerability studies—An Alpine example. *Nat Hazards* 67(3): 1059-1073. doi: 10.1007/s11069-011-9919-0
- Seo DH, Oh YY, Lee EJ, Jin HA, Jeon SW, Kim JY, Roh SA, Back JW, Lim CS, Yoo MS. 2023. Development of a standard classification system for climate crisis adaptation information: Part-I. Overview and framework (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(6-2): 903-918. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.903
- Zebisch M, Renner K, Pittore M, Fritsch U, Fruchter SR, Kienberger S, Schinko T, Sparkes E, Hagenlocher M, Schneiderbauer S, et al. 2023. Climate risk sourcebook. Bonn and Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Zebisch M, Terzi S, Pittore M, Renner K, Schneiderbauer S. 2022. Climate impact chains—A conceptual modelling approach for climate risk assessment in the context of adaptation planning. In: Kondrup C, Mercogliano P, Bosello F, Mysiak J, Scoccimarro E, Rizzo A, Ebrey R, de Ruiter M, Jeuken A, Watkiss P (eds). *Climate adaptation modelling*. Cham, Switzerland: Springer. p. 217-224. doi: 10.1007/978-3-030-86211-4_25