

광역 및 기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 내 산불 취약성 평가 지표 다양성 및 세부이행과제 정합성 분석

김선우* · 김의찬* · 노민우** · 이수종** · 이우균***†

*고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생, **고려대학교 오정리질리언스연구원 박사후연구원, ***고려대학교 환경생태공학부 교수

An analysis of the diversity of wildfire vulnerability indicators and the coherence of action tasks in detailed implementation plans for climate change adaptation measures in metropolitan and local governments

Kim, Sunwoo* · Kim, Uichan* · Roh, Minwoo** · Lee, Sujong** and Lee, Woo-Kyun***†

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

**Postdoctoral Researcher, OJeong Resilience Institute (OJERI), Korea University, Seoul, Korea

***Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Climate change is intensifying the frequency and severity of wildfires, underscoring the need for adaptation strategies beyond short-term suppression. In South Korea, large recent wildfires including the 2022 Uljin - Samcheok event and the record-breaking 2025 Gyeongbuk Province fire have emphasized the limitations of current response systems. Local governments are required to establish climate change adaptation plans using VESTAP (Vulnerability AssESsment Tool to build Climate Change Adaptation Plan), yet the actual diversity and coherence of wildfire-related indicators within these plans remain unclear. This study examined detailed implementation plans from 17 metropolitan and 219 municipal governments to assess the use of wildfire vulnerability indicators and the consistency of wildfire-related action tasks. Indicators were categorized into exposure, sensitivity, and adaptive capacity, standardized through preprocessing, and analyzed in terms of frequency, cumulative coverage, and inter-municipal similarity using the Jaccard index. Action tasks were text-mined and compared with VESTAP's adaptive capacity indicators. Results showed that indicator selection was heavily concentrated, with cumulative coverage exceeding 94% in all domains and median Jaccard indices of 1.0, reflecting highly uniform combinations across municipalities. Among 540 wildfire-related action statements, a total of 123 coherence cases were identified with adaptive capacity indicators, mostly limited to human resources, while financial capacity, equipment, and public education were rarely represented. These findings indicate that wildfire adaptation policies remain narrowly framed. Expanding indicators to include anthropogenic ignition sources, land use, and community factors, as well as broadening adaptive capacity measures to reflect financial, institutional, and educational dimensions, is essential. Moreover, the current five-year planning cycle should be complemented by iterative monitoring and interim reviews to better capture seasonal and interannual wildfire variability.

Key words : Climate Change Adaptation, Wildfire, VESTAP, Local Government

†Corresponding author : leewk@korea.ac.kr (145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3016) ORCID 김선우 0009-0002-6282-8623 이수종 0000-0002-6383-805X 김의찬 0009-0003-6918-0273 이우균 0000-0002-2188-359X 노민우 0000-0003-0815-3469

Received: October 15, 2025 / Revised: October 31, 2025 / Accepted: November 28, 2025

1. 서론

최근 기후변화는 불가역적 과정으로 인식되고 있다. 인위적인 탄소 배출을 즉각 중단하더라도 장기간의 지구 온난화와 해수면 상승은 수 세기 이상에 걸쳐 불가피하게 지속될 것이라는 연구 결과가 발표된 만큼(Schleussner et al., 2024; Solomon et al., 2009), 앞으로의 기후변화 대응은 완화를 넘어, 사회적·지역적 차원의 적응의 중요성이 동시에 강조되어야 함을 시사한다. 특히 기후변화로 인해 발생 빈도와 강도가 증가하고 있는 산불은 적응 전략의 필요성을 보여주는 대표적인 재난으로, 단순한 생태계 교란을 넘어 인명 피해, 재산 손실, 지역 경제 약화, 건강 악화, 탄소 배출 증가를 초래한다(Flannigan et al., 2009). 기후변화로 인한 고온, 가뭄, 연료 수분 감소 등은 산불의 발생 빈도와 규모를 증가시키며, 이러한 산불 증가는 인간 활동으로 인한 지구온난화와 밀접한 연관성을 가진다(Mansoor et al., 2022). 한국에서도 2022년 3월 발생한 울진·삼척 산불로 약 16,302 ha의 산림이 소실되었으며(KFS, 2023), 2025년 3월에는 전국에서 144건의 산불이 발생하였다(KFS, 2025). 특히 경북을 중심으로 발생한 대형산불은 잠정적으로 약 99,289 ha의 산림을 소실시켰으며, 이는 국내 역사상 최대 규모로 기록되었다(Sung et al., 2025). 이러한 연이은 대형 산불 피해는 기존의 산불 대응 체계만으로는 충분하지 않음을 보여준다. 기후변화가 구조적으로 산불 위험을 증폭시키고 있는 상황에서, 산불 대응 능력 강화를 위해서는 단기적 방재 대책을 넘어선 체계적인 기후변화 적응 전략이 필수적이다. 특히 지역별 기후 취약성과 산불 위험 요인을 반영한 적응 전략은 산불 발생 가능성을 줄이고 피해를 최소화하며, 장기적으로 지역사회와 생태계의 회복탄력성을 높이는 데 핵심적인 역할을 할 수 있다.

이러한 적응 전략은 국제적으로는 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)가 제시한 기후변화 취약성 평가의 기본 틀, 즉 노출(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응능력(Adaptive Capacity) 개념에 기반하여 수립되고 있다. 그 중 적응능력을 ‘기후변화에 따른 잠재적 피해를 완화하거나 기회를 활용하며 결과에 대응하기 위해 시스템·제도·인간이 조정할 수 있는 능력으로 정의하고 있으며, 이는 적응능력이 노출과 민감도와 다르게 인간의 정책적·제도적 개입을 통해 강화할 수 있는 요소임을 시사한다(IPCC, 2001, 2007, 2014). 이러한 국제적 프레임워크에 근거하여, 한국은 법

률적 기반 아래 지자체 차원의 적응대책을 제도화하였다. 한국은 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제1조·제46조 및 「저탄소 녹색성장 기본법」 제48조 및 동 시행령 제38조 등에 따라, 국가 및 지자체에서 기후변화 적응대책과 그 세부시행계획을 수립하고 있다. 그럼에도 불구하고 국내 산불 발생 추이는 여전히 연중화·대형화하는 양상을 보이며(Ryu et al., 2022), 과학 기반의 산불 예방 및 대응체계가 절실한 상황이다.

기후변화 적응대책 세부시행계획에서는 산불 취약성 평가를 위해 VESTAP(Vulnerability assessment tool To build climate change Adaptation Plan)을 활용하고 있다. VESTAP의 취약성 산정식은 다음과 같이 정의된다.

$$Vulnerability = \alpha \cdot Exposure + \beta \cdot Sensitivity - \gamma \cdot Adaptive Capacity \quad (1)$$

재난, 건강, 농업, 산림, 수자원, 생태계, 산업·에너지 등 7개 부문에 걸쳐 구축된 약 400개의 지표 DB를 활용하여 각 지표를 최대-최소 표준화를 통해 정규화한 후, 노출과 민감도는 취약성에 정(+)의 방향으로, 적응능력은 부(-)의 방향으로 반영하여 종합 취약성 점수를 산출한다. VESTAP은 지역별 위험 요인과 여건을 반영하여 지자체가 자율적으로 지표를 구성하고 조정할 수 있도록 설계된 평가 틀이다(Oh et al., 2016; Park et al., 2017). 그러나 실제 지자체의 계획에서 취약성 평가 지표가 어느 정도의 다양성을 확보하고 있는지에 대해서는 검증이 이루어지지 않았다. 또한, 지표 구성과 세부이행과제가 어느 정도의 정합성을 보이는지에 대한 분석은 부족한 실정이다.

이러한 한계 인식 속에서 기후변화 적응대책의 수립 및 이행 수준을 진단하고, 지자체 계획의 정합성과 실행체계를 평가하려는 다양한 연구가 이루어져 왔다. Kim and Yun (2014)은 논리적 모형분석(Logical Framework Approach)을 적용하여 전국 16개 광역지자체의 기후변화 적응대책 세부시행계획을 목표수립, 현황조사, 의사결정, 실행 및 평가의 4단계와 총 17개의 적응계획 요소(예: 목적의 표현, 인적자본 평가, 사회자본 평가 등)에 따라 평가하였다. 그 결과, 모든 계획요소에서 평가기준을 완벽하게 충족한 지자체는 없는 것으로 나타났으며, 이행 및 평가 단계의 체계가 전반적으로 미흡한 것으로 분석되었다. Ahn et al. (2016)은 제1차 국가기후변화적응대책(2011~2015)에 근거하여 수립된 시범 기초지자체 33곳의 기후변화 적응대책 세부시행계획과 1990~2013년의 기후피해

신문기사 2,565건을 분석하였다. K-평균 군집분석 및 상관분석 결과, 피해유형과 적응대책 간에 양(+)의 상관관계가 확인되었으나, 산림 및 생태계 분야에서는 예산과 대책이 상대적으로 미흡하여, 지자체가 과거 피해사례를 부분적으로 반영하고 있음에도 불구하고 기후예측 기반의 장기 적응전략은 부족한 것으로 나타났다. Park (2023)은 2021년에 이행된 우리나라 지자체 기후위기 적응대책의 특성을 분석한 결과, 지역별로 이행 현황이 상이하게 나타나 각 지역의 특성이 일정 부분 반영된 것으로 보이나, 해수면 상승 등 해양 관련 부문, 강풍 등의 기후위험, 감시·예측 관련 부문에 대한 대응은 지자체 수준에서 여전히 미흡한 것으로 보고하였다. 앞선 연구들이 주로 지자체 수준의 기후변화 적응대책의 구조와 실행 특성을 다룬 반면, Han and Kim (2023)은 파리협정 제7조의 적응 관련 국제 규범과 한국의 제3차 국가기후변화적응대책 간 정합성을 비교·분석함으로써 상위 정책체계의 일관성을 평가하였다. 제3차 국가기후변화적응대책은 파리협정의 핵심 목표인 적응역량 강화, 회복력 증진, 취약성 감소를 전반적으로 반영하고 있으나, 국제협력 및 거버넌스 부문에서의 실질적 이행은 상대적으로 미흡한 것으로 나타났다. 이 연구는 국제적 규범과 국내 적응정책 간 정합성 확보를 위해 제도적 조정 및 범부문 거버넌스 강화의 필요성을 제시하였다.

기존의 선행연구들은 주로 기후변화 적응대책의 구조적 완성도, 실행 수준, 정책 체계의 정합성을 분석하는 데 초점을 두었으나, 대부분 분야 전체를 포괄적으로 다루어 산불 부문을 개별 위험영역으로 분석한 사례는 부족하였다. 이에 본 연구는 전국 지자체의 최신 기후변화 적응대책 세부시행계획을 대상으로 산불 취약성 평가 지표의 활용 현황과 지자체 간 다양성을 정량적으로 분석하고, 아울러 산불 관련 세부이행과제가 VESTAP의 적응능력 지표와 정합하는지를 검토하고자 하였다. 이러한 분석을 통해 국내 지자체 산불 적응 정책이 지닌 구조적 한계를 진단하고, 지역 특성과 기후위험을 반영한 보다 효과적인 적응정책 수립 방향을 제시하는 것을 목표로 하였다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1. 연구 재료

본 연구에서는 산불과 관련된 국내 기후변화 적응계획 및 정책과 세부이행과제의 현황을 파악하기 위해 전국 17

개 광역지자체와 226개 기초지자체를 대상으로 최신 기후변화 적응대책 세부시행계획(Detailed Implementation Plan for Climate Change Adaptation Measures) 문서를 수집하였다. 일부 기초지자체는 해당 문서가 미비하거나 공개되어 있지 않아, 최종적으로 17개 광역지자체와 219개 기초지자체의 문서를 분석에 활용하였다. 자료의 수집은 각 지자체 공식 웹사이트 및 관련 기관을 통해 이루어졌으며, 수집된 문서는 전문 분석 및 전처리 과정을 거쳐 취약성 평가 지표, 세부이행과제 텍스트 등으로 분류하였다 (Table 1).

2.2. 연구 방법

본 연구의 방법은 크게 두 가지 분석 축으로 구성된다. 첫째, 전국 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획에서 산불 취약성 평가 지표를 추출하여 지표의 활용 현황과 지자체 간 구성의 다양성을 정량적으로 평가하였다. 둘째, 동일 문서에 포함된 산불 관련 세부이행과제를 대상으로 추진전략 문구를 정제·군집화한 후, VESTAP에서 제시하는 적응능력 지표와의 정합성을 검토하였다. 이러한 이중적 접근을 통해 지표가 실제로 얼마나 활용되고 있는지, 그리고 해당 지표가 구체적인 세부이행과제와 어떠한 연계성을 가지는지를 종합적으로 분석하고자 하였다. 모든 분석 절차는 Python 환경에서 텍스트 마이닝과 통계 기법을 적용하여 수행하였다(Fig. 1).

2.2.1. 지자체 산불 취약성 평가 지표의 현황 및 다양성 분석

전국 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획에서 산불 취약성 평가에 사용된 지표를 수집하여, 지표 구성 현황과 지자체 간 다양성을 정량적으로 평가하였다. 수집된 지표는 Exposure, Sensitivity, Adaptive Capacity 영역으로 구분한 뒤, 전각·공백·괄호 표기를 통일하고 동의어를 표준 표기로 일원화하는 전처리 과정을 거쳤다.

분석은 두 가지 방식으로 이루어졌다. 먼저, 영역별 지표의 출현 빈도와 누적 커버리지를 산출하여 지표 선택의 분포와 상위 지표의 기여도를 파악하였다. 누적 커버리지는 지표별 상대빈도를 내림차순으로 정렬한 뒤 누적합을 계산하는 방식으로 산정하였다. 다음으로, 동일 영역 내에서 가능한 모든 지자체 쌍을 구성하여 각 지자체의 지표 모음을 집합 단위로 비교하였다. 이때 집합 간 유사성은 Jaccard 지수를 활용하여 산출하였다. 본 연구에서

Table 1. Example data extraction form for wildfire-related indicators and action tasks

| ID | Local Government | Administrative Level | Exposure | Sensitivity | Adaptive Capacity | Wildfire-related Action Tasks |
|-----|------------------|----------------------|---|---|---|--|
| 1 | Seoul | Metropolitan | <ul style="list-style-type: none"> • Maximum consecutive dry days • Number of days with daily maximum temperature $\geq 33^{\circ}\text{C}$ • Number of days with daily effective humidity $\leq 35\%$ • Number of days with maximum wind speed $\geq 14\text{ m/s}$ | <ul style="list-style-type: none"> • Total population • Area of coniferous forests • Area of broad-leaved forests • Mean slope within forest areas • Soil moisture at 10 cm depth • Area of mixed forests | <ul style="list-style-type: none"> • Fiscal independence ratio • Gross regional domestic product • Number of forest officials • Area of forest designated for disaster prevention | <ul style="list-style-type: none"> • Formulation and implementation of annual comprehensive wildfire prevention plans • Establishment of wildfire prevention and suppression systems |
| 2 | Gangwon | Provincial | <ul style="list-style-type: none"> • Maximum consecutive dry days • Number of days with daily maximum temperature $\geq 33^{\circ}\text{C}$ • Number of days with daily effective humidity $\leq 35\%$ • Number of days with maximum wind speed $\geq 14\text{ m/s}$ | <ul style="list-style-type: none"> • Total population • Area of coniferous forests • Area of broad-leaved forests • Mean slope within forest areas • Soil moisture at 10 cm depth • Area of mixed forests | <ul style="list-style-type: none"> • Fiscal independence ratio • Gross regional domestic product • Number of forest officials • Area of forest designated for disaster prevention | <ul style="list-style-type: none"> • Unification of wildfire response organizations (Phase 1) • Establishment and operation of a Wildfire Prevention Headquarters (Phase 2) • Wildfire prevention and suppression response (prevention-preparedness-response-recovery) |
| 3 | Uiseong | Municipal | <ul style="list-style-type: none"> • Maximum consecutive dry days • Number of days with daily maximum temperature $\geq 33^{\circ}\text{C}$ • Number of days with daily effective humidity $\leq 35\%$ • Number of days with maximum wind speed $\geq 14\text{ m/s}$ | <ul style="list-style-type: none"> • Total population • Area of coniferous forests • Area of broad-leaved forests • Mean slope within forest areas • Soil moisture at 10 cm depth • Area of mixed forests | <ul style="list-style-type: none"> • Fiscal independence ratio • Gross regional domestic product • Number of forest officials • Area of forest designated for disaster prevention | <ul style="list-style-type: none"> • Comprehensive management of wildfire prevention and suppression through the operation of the Wildfire Prevention Headquarters • Targeted wildfire awareness campaigns utilizing wildfire monitoring records • Surveillance activities in wildfire-prone and blind-spot areas • Initial response and rapid suppression of wildfire outbreaks |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

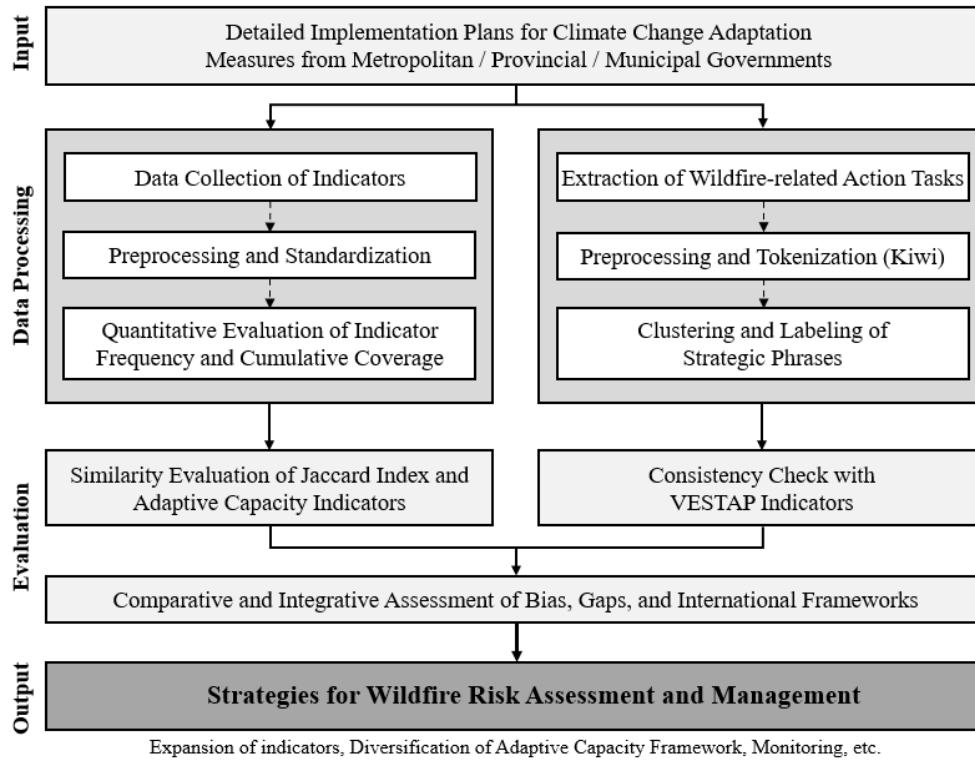


Fig. 1. Workflow of the study

Jaccard 지수는 두 지자체의 취약성 평가 지표 집합 A, B에 대해 다음의 수식을 통해 계산한다.

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (2)$$

즉, 두 지자체가 선택한 지표의 교집합 크기를 합집합 크기로 나눈 값으로, 집합 유사성을 평가하는 대표적 지표이다(Levandowsky and Winter, 1971). Jaccard 지수는 1이면 완전 일치, 0이면 완전 불일치를 뜻하며, 본 연구에서는 평균과 중앙값을 제시하였다. 특히 중앙값이 1인 경우를 판정하여, 완전일치 집합이 과반을 차지하는지 여부를 확인하였다. 누적 커버리지와 Jaccard 지수는 각각 개별 지표의 사용 강도와 지표 세트 수준의 유사성을 보완적으로 보여준다.

2.2.2. 지자체 산불 관련 세부이행과제와 취약성 평가 적응력 지표의 정합성 분석

전국 지자체의 기후변화 적응대책 세부시행계획 내 산불 관련 세부이행과제의 추진전략 문구를 추출하고, 이를

대상으로 적응능력 지표와의 정합성을 평가하였다. 정책과 제도에서의 정합성이란 제도를 구성하는 여러 요소들이 정책 목적 달성을 위하여 서로 잘 부합하고 있는 정도를 말하며, 정책과 제도를 구성하는 요소들이 상호보완적일 때, 또는 최소한 중립적인 관계를 유지하는 상태일 때 제도의 요소들 간 정합성이 확보되고 있다고 한다(Moon and Kim, 2022). 본 연구에서는 정합성을 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획에서 산불 취약성 평가의 적응능력 지표가 세부이행과제의 추진전략에 얼마나 일관되게 반영되어 있는지를 나타내는 개념으로 정의하였다.

추진전략 문구를 형태소 단위로 분절하여 핵심 키워드를 추출하고, 해당 키워드가 VESTAP 적응능력 지표의 명칭 또는 의미상 동일 범주에 해당하는 경우를 ‘정합’으로 판정하였다. 이 과정에서 각 지자체 문서의 항목명, 표제어, 괄호 내 보조 설명 등 분석에 불필요한 요소는 제거하고, 순수한 추진전략 문구만을 확보하였다.

형태소 분석에는 Kiwi (Korean Intelligent Word Identifier)를 활용하였다. Kiwi는 통계적 언어 모델과 Skip-Bigram 접근법을 결합한 오픈소스 한국어 분석기이며, 높은 정확도와 효율성을 바탕으로 다양한 학술 연구

에서 활용된 바 있다(Kim, 2025; Lee, 2024; Yang and Oh, 2023). 정책의 실질적 의미를 반영하기 위해 ‘운영’, ‘추진’, ‘실시’, ‘강화’ 등 행정적·절차적 표현은 불용어로 간주하여 제외하였다.

정제된 추진전략 문구들의 전체 집합을 대상으로 빈도 분석을 실시하여 핵심어 후보를 도출한 후, 서로 다른 지자체 문서에서 나타나는 표현상의 다양성을 통일된 분석 단위로 수렴시키기 위해 의미가 유사한 표현은 하나의 표준 라벨로 통합하였다. 라벨링이 완료된 문구는 지자체별 산불 취약성 평가에 활용되는 적응능력 지표명과 비교하였다. 이 과정에서 하나의 문장이 복수의 지표와 동시에 정합할 수 있음을 인정하여, 분석은 ‘문장-지표’ 단위의 다중 매칭을 허용하였다. 다만 동일 문장이 동일 지표와 중복 연결된 경우에는 하나의 사례로만 간주하여 중복을 제거하였다.

3. 연구 결과

3.1. 지자체 산불 취약성 평가 지표의 현황 및 다양성

영역별 지표 출현 빈도에 따르면, 지표 채택은 소수 항목에 상대적으로 집중되는 경향을 보였다. 먼저 Exposure

에서는 상위 지표로 ‘일 최대풍속이 14 m/s 이상인 날의 횟수(176회)’, ‘연속적인 무강수 일수의 최대값(175회)’, ‘일간 실효습도가 35% 이하인 날의 횟수(164회)’, ‘일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 횟수(163회)’ 등이 반복 채택되었고, 이들 상위 4개 지표의 누적 커버리지는 전체 선택의 96.03%에 달하였다. Sensitivity에서도 ‘토양 수분 10 cm(175회)’, ‘산림 내 평균 경사(174회)’, ‘침엽수림 면적(163회)’, ‘혼효림 면적(163회)’, ‘활엽수림 면적(163회)’, ‘총인구(162회)’가 상위를 구성하였으며, 이들 상위 6개의 누적 커버리지는 94.95%로 나타났다. Adaptive Capacity의 상위 지표는 ‘재정 자립도(176회)’, ‘지역 내 총생산(173회)’, ‘산림 공무원 수(163회)’, ‘산림 방재 면적(163회)’이었고, 이들 상위 4개 지표의 누적 커버리지는 전체 선택의 94.6%였다(Fig. 2). 이러한 분포는 세 영역 모두 소수 지표에 대한 선택 편중이 존재함을 시사한다.

지자체 간 지표 집합의 유사성은 산불 취약성 평가 지표가 문서 내 명시되어 있고, 동일 영역에서 복수의 지표가 제시된 지자체만을 대상으로 산정하였다. 산불 취약성 평가 지표가 포함되지 않은 지자체는 유사도 산정이 불가능하여 분석에서 제외되었다. 제외 결과 각 영역의 관측치 수는 176개였으며, 이에 따라 지자체 조합쌍 총 수는 $N(N-1)/2$ 에 의해 15,400쌍으로 나타났다. 이러한 표본을

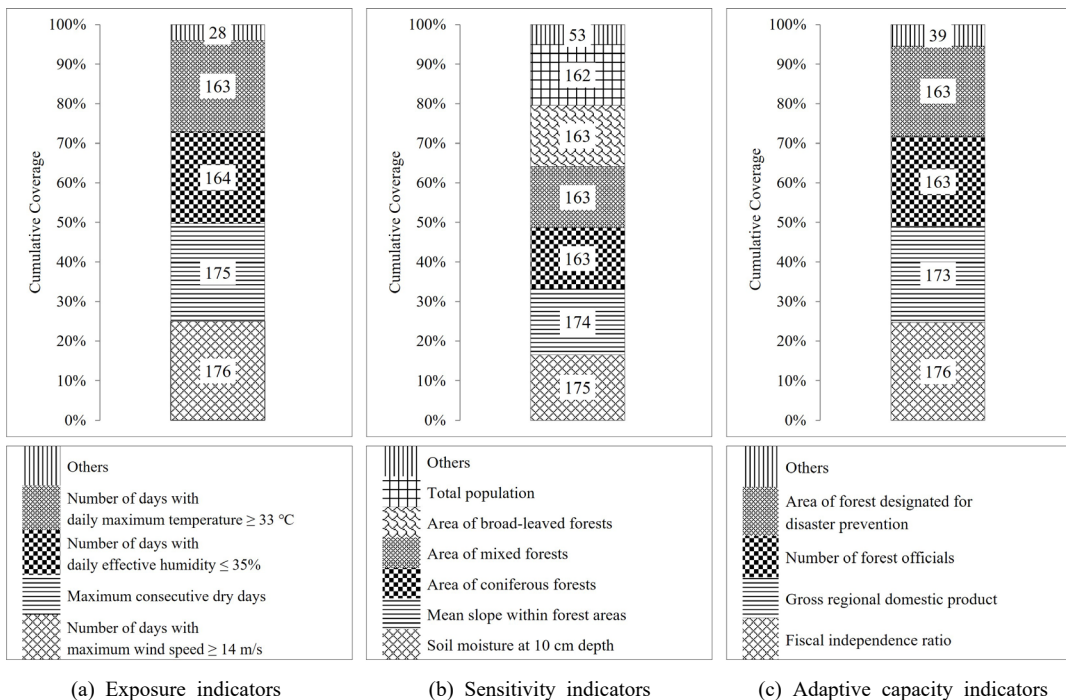


Fig. 2. Cumulative coverage of wildfire vulnerability indicators across three domains

바탕으로 계산한 결과, Exposure 영역의 지자체쌍 Jaccard 지수는 평균 약 0.907, 중앙값 1.000으로 나타났다. Sensitivity 영역은 평균 약 0.881, 중앙값 1.000, Adaptive Capacity 영역은 평균 약 0.894, 중앙값 1.000으로 집계되었다. 중앙값이 세 영역 모두 1.000이라는 것은 각 영역에서 전체 지자체쌍의 과반 이상이 완전히 동일한 지표 조합(J=1)을 사용했음을 의미하며, 선택 패턴이 지표 세트 수준에서 매우 강하게 수렴했음을 시사한다. 평균값 역시 0.881-0.907 범위로 높게 나타나, 완전일치 외의 쌍에서도 전반적으로 근접성이 유지됨을 확인할 수 있다(Fig. 3).

3.2. 지자체 산불 관련 세부이행과제와 취약성 평가 적응능력 지표의 정합성

540개의 산불 관련 추진전략 문구 가운데 VESTAP 적응능력 지표와 정합한 문장은 총 103건으로 확인되었다. 다만, 하나의 문장이 복수의 지표와 동시에 정합될 수 있도록 허용하였기 때문에 전체 정합 사례의 수는 123건으로 집계되었다. Fig. 4는 전체 정합 사례를 기준으로 각 지표의 상대적 빈도를 산출한 결과로, 각 백분율은 전체 정합 사례 내에서 해당 지표가 차지하는 비중을 의미한다. 정합 사례는 일부 지표에 편중되는 양상을 보였으며, 그 중 ‘산림 공무원 수’가 61건(49.6%)으로 가장 높은 비중을 차지하였다. 이어 ‘산불 감시원의 수’가 37건(30.1%), ‘산불 무인감시시스템 또는 산불 감시탑의 수’가 21건(17.1%), ‘산림 방재 면적’이 4건(3.3%)으로 나타났다. 반면 ‘재정 자립도’, ‘지역 내 총생산’, ‘산림 예산’, ‘1

인당 지역 내 총생산’ 등 재정·경제 기반 지표는 정합 문구가 발견되지 않았다. 또한 지자체 추진전략에서 빈번히 등장한 진화장비, 헬기, 교육, 홍보 등의 키워드 역시 적응능력 지표 체계 내 대응 항목이 없어 정합하지 않는 것으로 분석되었다.

4. 고찰

본 연구는 국내 지자체의 기후변화 적응대책 세부시행계획을 분석하여 산불 취약성 평가 지표의 채택 현황과 한계를 파악하였다. VESTAP은 중앙 차원에서 구축된 지표 DB와 사용자 정의 기능을 통해 각 지자체가 지역 특성과 연구 목적에 맞게 지표를 선택·수정·추가할 수 있도록 설계되어 자율성을 보장한다는 제도적 취지에도 불구하고, 실제로는 대부분의 지자체에서 Exposure, Sensitivity, Adaptive Capacity 세 영역 모두 소수의 지표에 편중되어 채택되는 경향이 뚜렷하였다. 이는 산불 적응 정책이 취약성 평가에서부터 실행 단계까지 지역적 특성과 산불의 복합적인 요인을 충분히 반영하지 못하고 있는 것으로 해석된다. 한국의 산불은 대부분 인위적 요인에 기인하며, 입산자 실화, 쓰레기 소각, 담뱃불 실화, 주택 화재 비화 등이 주요 원인으로 보고된다(Jeong and Kim, 2022). 그럼에도 불구하고 현재 지자체에서 채택되는 평가 지표는 기상 조건과 산림 내부 특성에 치중하고 있어, 인위적 발화 요인과 주변 토지이용의 영향을 충분히 반영하지 못한다. 다수의 연구에서 도로 밀도, 건축물 분포, 농지 인접성

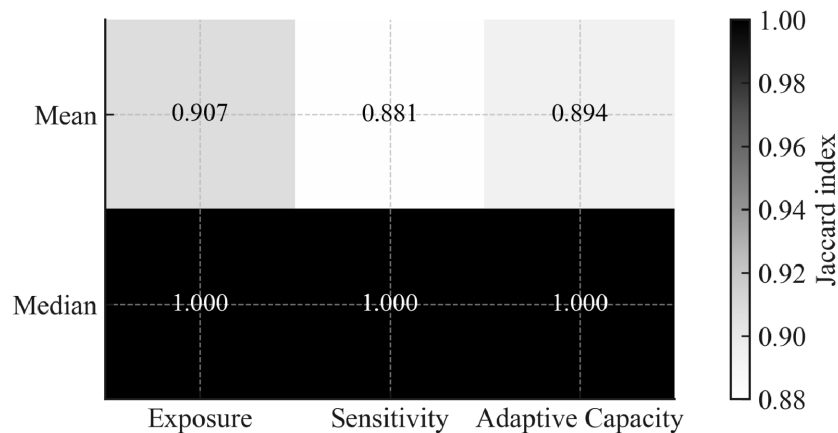


Fig. 3. Summary heatmap showing the mean and median Jaccard similarity of wildfire vulnerability indicators across domains

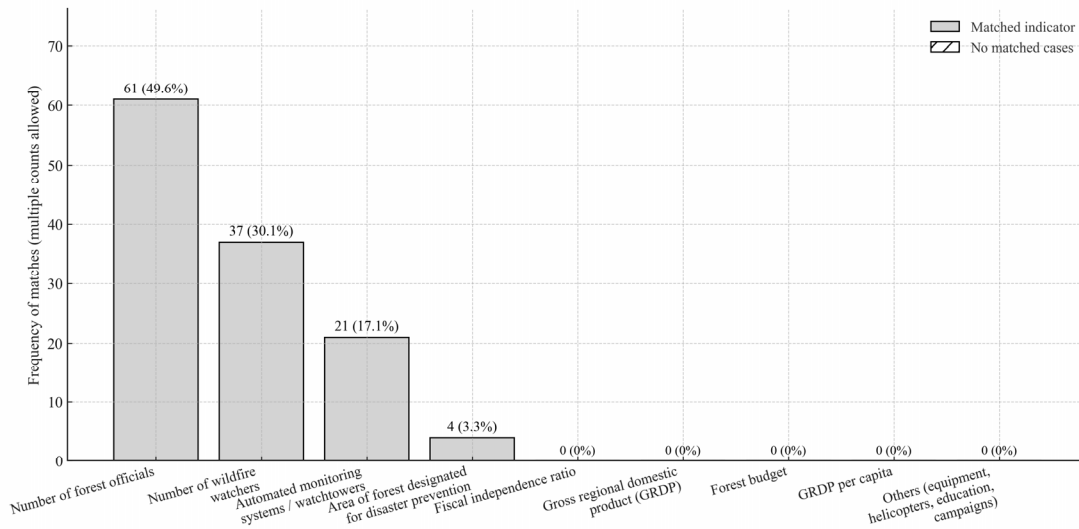


Fig. 4. Frequency of action-task matches with VESTAP adaptive capacity indicators

등이 산불 발생 확률을 높이는 요인으로 제시된 바 있으며(Jo et al., 2025; Kang et al., 2020; Roh et al., 2024), 이는 향후 산불 취약성 평가에서는 기상·산림 특성과 더불어 지역 특성을 반영한 인위적 발화 가능성과 주변 토지이용 조건을 반영한 지표가 포함될 필요가 있음을 시사한다.

또한, 본 연구는 세부이행과제와 적응능력 평가지표 간의 정합성을 분석하였다. 산불 관련 세부이행과제 중 적응능력 평가지표와 정합한 것은 소수에 불과하였고, ‘산림 공무원 수’ 등 인적 자원 중심 항목에 집중되었다. 반면, 실제 산불 대응에 있어 중요한 요소인 진화장비, 헬기 운용, 지역사회 교육과 홍보 등은 현행 지표체계에서 대응 항목이 없어 정합성이 결여되었다(Bai et al., 2023; Maras et al., 2023; Yıldız et al., 2025). ‘재정 자립도’와 같은 재정·경제 기반 지표 또한 반영되지 않아, 재정적 역량과 정책 집행 기반을 평가와 연결하지 못하는 구조적 한계를 드러냈다. 이는 지자체가 적응능력을 주로 인력 확충 차원에서 협소하게 인식하고 있으며, 재정·제도적 기반을 정책에 반영하지 못하고 있다고 판단된다.

기존 연구들은 주로 기후변화 적응계획 전반에서 이러한 한계를 지적해 왔다. 구체적으로는 취약성 평가를 위한 자료와 정보의 부족, 제도적 강제성과 형식의 미비 등이 주요 원인으로 지적되었으며, 동시에 지역 특성과 사회적 인식을 반영한 맞춤형 대책 수립의 필요성이 역설적으로 강조되었다(Ahn et al., 2016; KEI, 2013; Son et al.,

2023; Yoon et al., 2017).

기후변화 취약성 평가와 산불 분야의 국제적 기준 역시 본 연구 결과와 대비되는 시사점을 제공한다. IPCC는 기후변화 취약성이 지역 간·내에서 현저히 다르며 사회적 불평등, 토지이용, 거버넌스 등 복합 요인에 의해 좌우된다고 지적하면서, 기후위험 수준에 따라 차별화된 대응을 포함하는 통합적·다부문적 접근이 적응의 효과성을 높인다고 강조했다(IPCC, 2022). 또한 기후변화에 관한 유엔 기본 협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)의 국가적응계획(National Adaptation Plans, NAP) 기술 가이드라인은 취약성 평가와 적응 대안의 도출이 상호 연계된 절차임을 강조하고 있다(UNFCCC, 2012). 유엔 재난 위험 경감 사무국(United Nations Office for Disaster Risk Reduction, UNDRR)은 산불 행동을 결정하는 핵심 요인으로 연료의 가용성 및 상태, 지형, 기상 조건, 진화 활동의 유무를 제시하며, 산불 위험이 단순히 기상 노출 요인에 의해 좌우되지 않음을 강조한다. 더 나아가 산불 관리에서는 노출(Exposure), 취약성(Vulnerability), 위험(Risk) 평가를 결합하는 통합적 프레임워크가 널리 활용되고 있음을 명시하고 있어, 산불 위험의 복합적 요인을 반영한 총체적 관리 접근의 필요성을 보여준다(UNDRR, 2017). 또한 현행 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획은 5년 단위로 수립·갱신되는데, 이러한 주기성은 산불과 같이 계절적 변동성이 큰 기후재난을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다

(Kim et al., 2025). 국제적 가이드라인이 반복적 적응 관리와 결과로부터의 학습, 모니터링, 재평가 등 주기적 보완을 강조하는 것과 비교할 때, 국내 제도는 평가와 실행 간의 시차가 길어 위험 관리의 적시성이 떨어질 우려가 있다(IPCC, 2022; UNFCCC, 2012). 따라서 연례적 모니터링과 중간 점검을 제도화하여 산불 발생 특성과 피해 양상을 적시에 반영할 수 있는 보완적 체계가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 분석 자료가 기후변화 적응대책 세부시행계획 문헌에 국한되어 있어 텍스트 기반 매칭에 의존하였으므로 표현상의 다양성을 충분히 포착하지 못했을 가능성이 있다. 또한, 지표와 과제 간의 정합성 평가는 연구자의 해석적 판단을 일부 수반할 수밖에 없으며, 지자체별 제도적 배경이나 정책 집행 맥락을 완전히 설명하기에는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고, 본 연구는 기존 연구에서 충분히 다루어지지 않았던 지자체 기후변화 적응계획 내 산불 취약성 평가 지표의 채택 양상과 정합성을 체계적으로 검토하였다는 점에서 의의를 가진다. 특히 표준화된 정량적 분석틀을 적용하여 편중 현상을 계량적으로 제시하고, 이를 국제적 논의와 비교·고찰함으로써 향후 산불 적응 정책의 개선 방향을 제시하는 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 전국 지자체의 기후변화 적응대책 세부시행계획을 분석하여 산불 취약성 평가 지표의 활용 현황과 산불 관련 세부이행과제의 정합성을 검토하였다. 연구 결과, 산불 취약성 평가는 소수의 지표에 편중되어 있었으며, 지자체 간 지표 조합의 유사성이 매우 높아 지역적 특성이 충분히 반영되지 못하는 것으로 나타났다. 또한 세부이행과제와 적응능력 지표 간의 연계성은 제한적이었고, 일부 인적자원 중심 지표를 제외하면 재정·경제적 역량, 장비, 교육·홍보 등 실제 대응에 중요한 요소들이 지표 체계와 연계되지 못하고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 국내 지자체의 산불 취약성 평가 및 적응 정책이 평가 단계부터 실행 단계까지 협소하게 구성되어 있음을 시사한다. 향후 산불 취약성 평가는 기상·산림 조건뿐만 아니라 인위적 발화 요인, 주변 토지이용, 지역사회 특성을 포괄할 수 있는 지표로 확장될 필요가 있다. 아울러 적응능력 지표 체계 역시 인력 중심에서 벗어나 재정·제도적 기반, 대응 장비, 교육·홍보 등 다양한 요소를 반영하

여 정책과 실제 대응 과제가 긴밀히 연결되도록 보완되어야 한다. 또한, 현행 적응대책이 5년 주기로 수립·갱신되는 구조는 계절적·연례적 변동성이 큰 산불의 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 따라서 국제적 기준에서 강조하는 바와 같이 반복적 모니터링, 중간 점검, 주기적 보완 체계를 제도화하여 산불 발생 양상과 피해 특성을 적시에 반영할 수 있는 유연한 관리 방식이 필요하다.

본 연구는 지자체 산불 적응 정책의 현행 구조적 한계를 진단하고, 향후 취약성 평가와 적응 정책이 지역 맞춤형·통합적·반복적 관리 체계로 발전할 필요성을 제시하였다. 이는 기후변화로 인한 산불 위험이 심화되는 상황에서 실효성 있는 적응정책을 수립하기 위한 시사점을 제공한다.

사사

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(RS-2024-00402509)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

Reference

- Ahn Y, Kang Y, Park CS, Kim HG. 2016. The characteristics and improvement directions of regional climate change adaptation policies in accordance with damage cases (in Korean with English abstract). *J Environ Impact Assess* 25(4): 296-306. doi: 10.14249/EIA.2016.25.4.296
- Bai Y, Wang L, Yuan X. 2023. Remote monitoring, personnel extinguishment or helicopter extinguishment? How to control forest fires more effectively. *PLoS One* 18(8): e0289727. doi: 10.1371/journal.pone.0289727
- Flannigan MD, Krawchuk MA, de Groot WJ, Wotton BM, Gowman LM. 2009. Implications of changing climate for global wildland fire. *Int J Wildland Fire* 18(5): 483-507. doi: 10.1071/WF08187
- Han J, Kim Y. 2023. A study on policy coherence between the Paris Agreement and climate change adaptation policy in South Korea (in Korean with

- English abstract). *J Clim Change Res* 14(3): 277-297. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.3.277
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. *Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity.* In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, editors. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. *Annex II: Glossary.* In: Mach KJ, Planton S, von Stechow C, editors. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jeong KO, Kim DJ. 2022. A study on the improvement of safety management by analyzing the current status and response system of forest fire accidents (in Korean with English abstract). *J Soc Disaster Inf* 18(3): 457-469. doi: 10.15683/kosdi.2022.9.30.457
- Jo HW, Won MS, Kraxner F, Jeon S, Son Y, Krasovskiy A, Lee WK. 2025. Projecting forest fire probability in South Korea under climate change, population, and forest management scenarios using AI and process-based hybrid model (FLAM-Net). *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens* 18: 13003-13022. doi: 10.1109/JSTARS.2025.3564852
- Kang Y, Jang E, Im J, Kwon C, Kim S. 2020. Developing a new hourly forest fire risk index based on catboost in South Korea. *Appl Sci* 10(22): 8213. doi: 10.3390/app10228213
- Kim J, Kim T, Lee YE, Im S. 2025. Spatial and temporal variability of forest fires in the Republic of Korea over 1991–2020. *Nat Hazards* 121: 9801-9821. doi: 10.1007/s11069-025-07169-4
- Kim JA, Yun SJ. 2014. An Evaluation on Climate Change Adaptation Plans of Regional Local Governments: Focusing on Planning Elements and Establishment Processes (in Korean with English abstract). *Korean Soc Public Administration* 25(2): 29-51.
- Kim JS. 2025. Effects of Korean morpheme analyzer on evaluating difficulty level of BIM requirements (in Korean with English abstract). *J Korea Acad-Ind Coop Soc* 26(4): 89-97. doi: 10.5762/KAIS.2025.26.4.89
- Korea Environment Institute (KEI). 2013. *Study on strengthening linkage between national and local climate change adaptation plan for effective implementation (in Korean).* Seoul, Korea: Korea Environment Institute. KEI Working Paper 2013-07.
- Korea Forest Service. 2023. *Annual report on forest fire statistics 2022.* Daejeon, Korea: Korea Forest Service.
- Korea Forest Service. 2025. *Forest fire information system;* [accessed 2025 Sep 24]. <https://fd.forest.go.kr/ffas/pubConn/movePage/sub3.do>.
- Lee MC. 2024. Kiwi: Developing a Korean morphological analyzer based on statistical language models and skip-bigram (in Korean with English abstract). *Korean J Digit Humanit* 1(1): 109-136. doi: 10.23287/KJDH.2024.1.1.6
- Levandowsky M, Winter D. 1971. Distance between sets. *Nature* 234(5323): 34-35. doi: 10.1038/234034a0.
- Mansoor S, Farooq I, Kachroo MM, Mahmoud AED, Fawzy M, Popescu SM, Alyemeni MN, Sonne C, Rinklebe J, Ahmad P. 2022. Elevation in wildfire

- frequencies with respect to the climate change. *J Environ Manage* 301: 113769. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113769
- Maraş EE, Dönmez K, Emecen Y. 2023. GIS-based determination of the optimal heliport and water source locations for forest fire suppression using multi-objective programming. *Aerospace* 10(3): 305. doi: 10.3390/aerospace10030305
- Moon TH, Kim HS. 2022. Development direction for institutional and policy consistency of environmental policy for climate crisis (in Korean with English abstract). *Korean J Public Administration* 31(1): 27-57.
- Oh KY, Lee MJ, Han DE. 2016. Development of web-based supporting tool (VESTAP) for climate change vulnerability assessment in lower and municipal-level local governments (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 19(1): 1-11. doi: 10.11108/kagis.2016.19.1.001
- Park DS, Park B, Jung E. 2017. Guidelines for the VESTAP-based climate change vulnerability assessment (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 8(4): 339-346. doi: 10.15531/kscrcr.2017.8.4.339
- Park JH. 2023. The status and characteristics of local climate change adaptation plans in Korea (in Korean with English abstract). *Journal of Climate Change Research* 14(5): 561-568. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.5.561
- Roh M, Lee S, Jo HW, Lee WK. 2024. Development of a forest fire diagnostic model based on machine learning techniques. *Forests* 15(7): 1103. doi: 10.3390/f15071103
- Ryu J, Kim SY, Seo KW, Kwon CG. 2022. A study on the efficient operation of special firefighting team for forest fires (in Korean with English abstract). *Crisisonomy* 18(9): 39-50. doi: 10.14251/crisisonomy.2022.18.9.39
- Schleussner CF, Ganti G, Lejeune Q, Zhu B, Pfeleiderer P, Prütz R, Rogelj J. 2024. Overconfidence in climate overshoot. *Nature* 634(8033): 366-373. doi: 10.1038/s41586-024-08020-9
- Solomon S, Plattner GK, Knutti R, Friedlingstein P. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc Natl Acad Sci USA* 106(6): 1704-1709. doi: 10.1073/pnas.0812721106
- Son J, Song C, Hong M, Lee WK, Heo M, Ko Y. 2023. Analysis of detailed action plans for climate change adaptation measures and the 6th regional forest plans with suggestion for improvements (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(5): 543-559. doi: 10.15531/kscrcr.2023.14.5.543
- Sung T, Lee G, Kim D, Kim W, Yang S, Im J. 2025. Real-time wildfire monitoring via geostationary satellite and artificial intelligence: Insights from the March 2025 South Korea wildfires. *Korean J Remote Sens* 41(3): 565-580. doi: 10.7780/kjrs.2025.41.3.6
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2012. National adaptation plans: Technical guidelines for the national adaptation plan process. Bonn, Germany: UNFCCC Secretariat.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). 2017. Words into action: Wildfire hazard and risk assessment. Geneva, Switzerland: UNDRR.
- Yang HD, Oh HY. 2023. DSM-5 depression diagnosis multi-label model based on paragraph vector (in Korean with English abstract). *J Korea Inst Inf Commun Eng* 27(10): 1201-1207. doi: 10.6109/jkiice.2023.27.10.1201
- Yıldız M, Öztürk O, Akbıyık T. 2025. Effectiveness of helicopters in fighting forest fires in Türkiye: A data envelopment analysis approach. *Fire* 8(4): 156. doi: 10.3390/fire8040156
- Yoon JW, Yoon YS, Kim BM. 2017. An exploratory test of evaluation model for climate change adaptation policy: Evaluation of regional climate change adaptation plans focused on delivering adaptation actions (in Korean with English abstract). *J Soc Sci* 43(2): 23-50. doi: 10.15820/khjss.2017.43.2.002