



## 국가 기후위기 적응정보 표준분류체계 개발(III): 세부 구조와 활용도 개선

서도현\* · 오윤영\*\*† · 유영재\*\*\* · 진형아\*\*\*\* · 정시원\*\*\*\*\* · 전성우\*\*\*\*\* · 김지연\*\*\*\* · 노순아\*\* ·  
백지원\* · 이대균\*\*\*\*\* · 이종천\*\*\*\*\*

\*국립환경과학원 기후변화연구과 전문연구원, \*\*국립환경과학원 기후변화연구과 연구사, \*\*\*고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수,  
\*\*\*\*국립환경과학원 기후변화연구과 연구관, \*\*\*\*\*고려대학교 환경생태공학과 석사과정, \*\*\*\*\*고려대학교 환경생태공학부 교수,  
\*\*\*\*\*국립환경과학원 기후변화연구과 과장, \*\*\*\*\*국립환경과학원 기후탄소연구부 부장

### Development of a standard classification system for climate crisis adaptation information: Part-III. Detailed structure and usability enhancement

Seo, Do Hyun\* · Oh, Yunyeong\*\*† · Yoo, Young Jae\*\*\* · Jin, HyungAh\*\*\*\* · Jeong, Si Won\*\*\*\*\* ·  
Jeon, Seong Woo\*\*\*\*\* · Kim, JiYeon\*\*\*\* · Roh, Soon-A\*\* · Baek, Jiwon\* ·  
Lee, Daegyun\*\*\*\*\* and Lee, Jong-chun\*\*\*\*\*

\*Research Fellow, Climate Change Research Division, National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Korea

\*\*Researcher, Climate Change Research Division, NIER, Incheon, Korea

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

\*\*\*\*Senior Researcher, Climate Change Research Division, NIER, Incheon, Korea

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

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

\*\*\*\*\*Manager, Climate Change Research Division, NIER, Incheon, Korea

\*\*\*\*\*Director General, Climate Change and Carbon Resrarch Department, NIER, Incheon, Korea

### ABSTRACT

The management of climate adaptation information requires a classification framework capable of accommodating the climatic, environmental, and socio-economic characteristics of diverse countries, while ensuring international interoperability. The Korea national climate ADaptation information Taxonomy (KADT), optimized for Korea's climatic-environmental context based on the National Adaptation Plans (NAP) and climate risks, requires flexible extension to capture a broader range of regional characteristics and achieve wider global applicability. This study aims to develop a generalizable classification methodology to enhance the KADT's practical applicability and international utility. We propose a three-phase methodology combining a conceptual framework with Shannon information entropy theory. Five normalized environmental assessment indicators—Climate Exposure Index (CEI), Topographic Complexity Index (TCI), Socioeconomic Exposure Index (SEI), Social Vulnerability Index (SVI), and Adaptive Capacity Index (ACI)—are integrated into a Total Environmental Assessment Index (TEAI) using weights. For operational deployment, a formal expert-elicitation procedure (Delphi/AHP) is proposed to derive specific weights. The TEAI operationalizes the IPCC AR6 adaptation formulation and guides efficient adaptation budget allocation. The three-phase methodology uses normalized entropy (H) to select target-based, impact-based, or hybrid grouping strategies. Pilot applications in South Korea, the United Kingdom, and Mongolia demonstrated cross-context applicability: H results favored target-based grouping for South Korea and impact-based grouping for the UK and Mongolia. The methodology

†Corresponding author : [magojina@korea.kr](mailto:magojina@korea.kr) (22689, Climate Change Research Division, National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Korea. Tel. +82-032-560-7318)

ORCID 서도현 0000-0001-9528-2060 김지연 0000-0001-5999-2188  
오윤영 0000-0002-9115-814X 노순아 0009-0001-3622-938X  
유영재 0000-0003-0595-3911 백지원 0000-0002-5422-2288  
진형아 0006-0001-6573-1985 이대균 0000-0001-6012-7757  
정시원 0009-0009-0966-6494 이종천 0000-0002-6222-9543  
전성우 0000-0001-5928-8510

Received: August 31, 2025 / Revised: September 22, 2025 / Accepted: October 1, 2025

produced 29/8, 33/7, and 35/3 detailed subclasses/subclass items, respectively, derived from entropy-based grouping rules. This research advances the KADT from a static taxonomy to a dynamic, verifiable tool for evidence-based adaptation planning, supporting international compatibility and offering a pathway toward global standardization.

*Key words* : Adaptation Information, KADT, Shannon Entropy, Environmental Assessment Indicator

## 1. 서론

최근 전 지구적 기후시스템의 변화가 가속화되면서 기후변화 대응 패러다임의 전환이 요구되고 있다. 세계기상기구(WMO)에 따르면 2024년 전 지구 평균기온이 산업화 이전 대비  $1.55 \pm 0.13^\circ\text{C}$  상승하여 파리기후협정에서 제시 하였던  $1.5^\circ\text{C}$  임계점(tipping point)을 초과했다(WMO, 2024). 이는 지구의 기후시스템이 비가역적이고 구조적인 변화가 일어났다는 것을 의미하며, 앞으로 전 세계적으로 극한 기상현상의 빈도와 강도가 현저히 증가하게 될 것이다(IPCC, 2022). 우리나라 역시 2024년 연평균 기온은  $14.5^\circ\text{C}$ 로 113년 관측 사상 최고치를 기록했고, 열대야 발생 일수는 24.5일로 평년 대비 3.7배 증가했다(KMA, 2024). 특히 2024년 9월 평균기온이 평년 대비  $4.2^\circ\text{C}$  상승한  $24.7^\circ\text{C}$ 를 기록하여 기후변화의 계절적 패턴 변화가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 기온 상승은 국내 자연재해 패턴에도 직접적 영향을 미치고 있으며, 여름철 연속된 폭염과 집중호우로 인한 농업 피해가 전년 대비 42% 증가하고 도시 침수 및 에너지 공급 불안정 사례가 빈발하고 있다(KMA, 2025a).

이러한 상황은 온실가스 감축 중심의 완화(mitigation) 정책만으로는 악화하고 있는 기후 영향을 억제하기에 한계가 있음을 시사한다. 이에 따라 온난화의 임계점(tipping point)을 넘어서 달라져 버린 기후조건에 대한 사회시스템의 적응(adaptation) 역량 강화를 통하여 완화와 적응이 조화를 이룰 수 있는 적응 정책을 수립하여야 한다.

한편, 기후 적응 관련 정보는 기상·기후 데이터를 넘어 생태계, 농업, 보건, 에너지, 국토·교통 등 사회경제 전 부문에 걸쳐 광범위하게 생성되고 있다(UNEP, 2023). 한국은 2024년 10월 탄소중립녹색성장기본법(이하 탄소법) 개정을 통해 세계 최초로 “기후위기 적응정보”를 법적으로 정의하였다. 그러나 부문별 정보의 특성과 생산 주체가 상이하여 통합적 관리와 활용을 위해서는 체계적인 대비가 필요하다(Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth, 2024).

이에 환경부 국립환경과학원은 기후위기 적응정보의

통합적 관리를 위한 국가 기후위기 적응정보 표준분류체계(Korea National Climate Crisis Adaptation Information Taxonomy, KADT)를 개발하였다(Seo et al., 2023). 이를 통해 과학기반(SCI)-적응해법(SOL)-정책평가(PEV)의 3대 분류 구조를 확립하고, 후속 연구를 통해 세부구조와 효용성을 평가하고(Seo et al., 2024), KADT 기반의 국가 기후리스크 관리를 위한 핵심리스크(Key risks) 선별과 영향체인 도출 방법론을 개발하였다(Jung et al., 2024).

하지만 KADT는 우리나라 적응대책의 국가 기후리스크를 중심으로 고유한 기후·환경적 여건에 최적화되어 있으므로, 다양한 지역적 특성이나 다른 나라의 기후·환경적 상황에 보편적인 적용성을 보장하기에는 부족하다는 한계가 있다. 아울러 탄소법에서 명시한 “기후위기 적응정보 관리체계”로서의 기준을 제시하고, 국제적 기후적응 거버넌스 체계 내에서 선도적 역할을 확보하기 위해서는, 구조적 관점에서의 개선 진단과 국제적 기준에 부합하는 범용성 및 확장성 확보가 필수적으로 수행되어야 한다.

이에 따라 본 연구는 KADT의 실용성 및 범용성 강화를 주목적으로 설정하며, 두 가지 핵심 목표를 제시하고자 한다. 첫째, 분류체계 항목의 유연화를 통해 글로벌 기후적응 정보관리 표준과의 상호운용성 강화를 위한 KADT 활용 가이드라인을 제안한다. 이 방법론은 인간 뇌의 신경망 구조를 모방한 개념적 프레임워크와 Shannon 정보 엔트로피 이론을 융합하고(Shannon, 1948), IPCC AR6의 리스크(Risk)와 영향(Impact)에 대한 접근법을 채택하여 각국의 다양한 기후·환경적 조건에도 유연하게 적용할 수 있는 범용적인 최적화 알고리즘을 제공한다. 둘째, KADT 기반 종합적 정보관리 인프라 구축을 위한 실증적 활용 방안을 제시한다. 이를 통해 KADT, 영향체인, 적응정보 공통포맷 등을 핵심 구성요소로 하여 사용자별 차별화된 접근과 국제 데이터 관리 표준에 부합하는 통합정보관리 체계의 구현 방향을 제시한다. 본 연구에서 제안하는 KADT와 이에 기반한 범용적인 정보관리체계의 활용 방안은 탄소법에서 규정한 적응정보 관리체계의 기준점인 동시에 국제화한 적응정보의 표준화 관리체계 구축과 운영의 선도적인 틀을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 기존 플랫폼·분류체계의 구조적 특성 진단

본 연구는 KADT의 세부구조와 활용도 개선을 위한 체계적 근거 마련을 목적으로, 국내외 적응정보 관리체계에 대한 종합적 분석을 수행하였다. 분석 대상은 크게 두 유형으로 구분된다. 첫째, 정보 분류 기준과 체계를 제시하는 정보분류체계(Taxonomy)로서 국내 5개 사례(국가 기후기술 분류체계, 재난안전 R&D 분류체계, 한국형 녹색 분류체계 등)와 국외 7개 사례(EU Taxonomy, EUCRA 위험 군집 분류, UNDRR 재해유형 분류체계 등)를 포함하였다. 둘째, 이러한 분류체계를 기반으로 실제 정보를 제공하는 정보시스템으로서 국내 16개 플랫폼(기상청 기후정보포털, 기상기후 빅데이터 분석 플랫폼, 국가기후기술 정보시스템, VESTAP, MOTIVE 등)과 국외 15개 플랫폼(유럽 기후적응 플랫폼, 독일 기후예방조치 포털, 일본 기후변화 적응정보 플랫폼, 아일랜드 기후 적응 플랫폼 등)을 대상으로 하였다(Table 1). 일부 분석 내용은 선행 연구에서 제시하였으며, Table 1은 KADT 개발에 핵심적 시사점을 제공한 주요 사례들만을 선별하여 제시하였다(Seo et al., 2023, 2024). 특히 이번 연구는 기존 분석을 바탕으로 추가 조사된 해외 플랫폼 및 최근 개정된 분류체계를 포함하여 비교 분석의 완성도를 높였다.

분석 방법론은 정보분류체계의 구조와 국제 표준과의 연계성을 중심으로 한 구조적 분석과 정보시스템의 운영 주제, 정보 분류 방식, 정책 연계성을 중심으로 한 비교 분석을 병행하였다(GTC, 2017; KMA, 2024). 정보분류체계와 정보시스템의 분석은 적응 해법 및 정책 정보 보유 현황, 표준화 및 리스크 평가 체계를 기준으로 수행하였다.

### 2.2. KADT 구조적 완성도 제고를 위한 통합 방법론 개발

적응정보의 체계적 분류는 국가별 적응정책 수립과 이행에 있어 핵심적 기반 요소로 인식되고 있다. KADT는 과학기반(SCI), 적응해법(SOL), 정책평가(PEV)의 3대(大), 물환경·생태계 등 9개 부문의 중(中)분류, 그리고 기후리스크 및 기후영향요인을 연계하는 양방향 연결 구조에 기반한 분류체계이다(Seo et al., 2023, 2024). 하지만 한국의 기후리스크에 맞춰진 최적화 구성은 기후·환경적 특성이 다양한 지역에 대한 범용성 부분에서는 근본적인 제약으로 작용할 수 있다. 이에 본 연구는 KADT의 구조적 우수성을 계승하면서도 각국의 환경적 특성을 반영할

수 있는 범용적 적응정보 분류체계 구축을 위한 통합 방법론을 개발하였다.

이 방법론은 3개의 단계적 절차로 구성된다(Fig. 1). Phase 1 (환경평가지표 선정)은 다양한 기후환경 조건을 특성화하기 위한 환경평가지표를 선정하고, 이에 필요한 정량 데이터의 수집과, 전문가 델파이 및 AHP 기법을 활용한 가중치 결정, 스케일 재조정을 통한 지표 표준화로 구성된다. 이를 통해 5종의 환경평가지표(기후위험노출지수(Climate Exposure Index, CEI), 지형복잡성지수(Topographic Complexity Index, TCI), 사회경제적노출지수(Socioeconomic Exposure Index, SEI), 사회취약성지수(Social Vulnerability Index, SVI), 적응역량지수(Adaptive Capacity Index, ACI))를 선정하고, 그리고 IPCC (2022)의 위험 정의를 수학적으로 구현한 종합환경평가지수(Total Environmental Assessment Index, TEAI) 선정을 순차적으로 수행한다.

Phase 2 (세분류 항목 구축/보완)은 특정 기후리스크 항목의 평가를 위한 적용 대상 국가의 기후리스크 구축 여부를 우선 확인하고, 미 구축 국가의 경우 “CID, 대상, 영향, 영향방향”의 4요소로 기초 세분류 항목을 생성한 후, 5종의 환경평가지표의 구성요소를 조정한다. 기 구축 국가의 경우 국가 기후리스크 완결성 진단 알고리즘(Seo et al., 2024)을 적용하여 과학적 근거에 기반을 둔 적응정보와 연계될 수 있게끔 세분류 항목을 보완한다.

Phase 3 (소분류 항목 구축)은 Shannon 엔트로피 이론(식 (1))을 핵심으로 하는 과학적 의사결정 체계가 적용된다 (Shannon, 1948).

$$H(X) = - \sum_{x_i \in X} p(x_i) \log p(x_i) \quad (1)$$

여기서 H(X)는 목적함수, X는 그룹 할당을 나타내는 이산 확률변수,  $x_i$ 는 각 소분류 그룹,  $p(x_i) = n_i/N$ 는 그룹 i에 속하는 항목 비중( $n_i$ : 그룹 i의 항목 수, N: 총 항목 수)을 의미한다.

Shannon 엔트로피 이론의 활용은 생태학 분야에서 생물다양성 측정에 광범위하게 적용되어 그 유효성이 입증된 바 있으며, 복잡한 시스템의 분류 효율성을 정량화하는 데 탁월한 성능을 보여왔다(Cover and Thomas, 2006; Magurran, 2004). 이러한 활용 사례들을 기반으로 본 연구에서는 세분류 항목을 대상으로 한 실제 그룹화 시나리오별 확률 분포를 계산하고 이 확률 분포를 바탕으로 엔트

Table 1. Analysis of platform and classification system for climate adaptation and related information

Type	Name	Adaptation solution	Policy documents	Standardization	Risk assessment
Domestic platform	Korea meteorological administration climate information portal	-	○	○	-
	Weather and climate big data platform	-	○	○	-
	Integrated environmental and health information system	○	-	○	-
Overseas platform	Climate-ADAPT	○	○	○	○
	Italy climate change adaptation platform	○	○	○	-
	AdapteCCa	○	○	○	○
Domestic classification system	CTis	-	-	○	-
	Environmental technology standard classification	-	-	○	-
	CAPSS emission source classification system	-	-	○	-
Overseas classification system	CTCN adaptation technology classification	-	-	○	-
	EU Taxonomy	-	-	○	-
	UNDRR hazard classification and description system	-	-	○	-

\* Key examples from comprehensive analysis of 21 domestic and 22 overseas systems

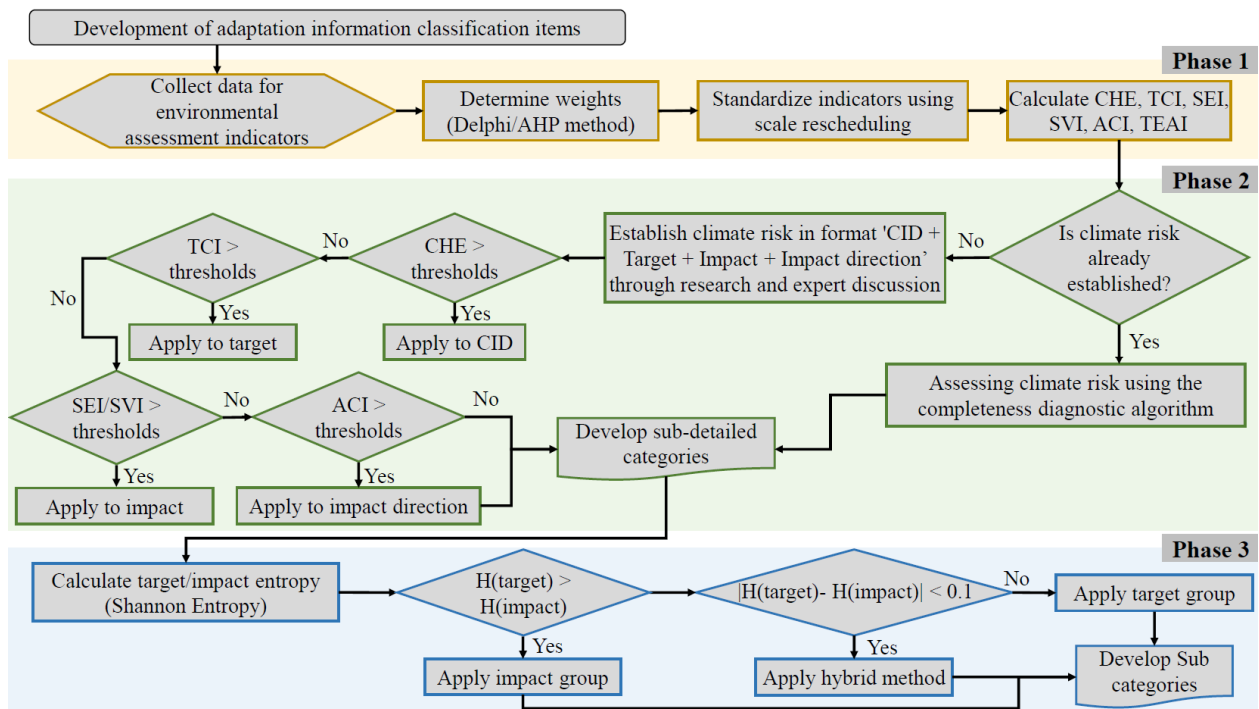


Fig. 1. Flowchart of the guidelines for the standard classification system of adaptation information

로피 H (Target)와 H (Impact)를 직접 산출하는 데에 활용하였다. 구체적으로는 대상, 그리고 영향을 기준으로 세분류 항목들을 그룹화했을 때 각 그룹의 항목 수 비율을 계산하여 확률변수를 구성하였다. 이때, 엔트로피 H (X)는 그룹화 시 발생하는 정보 불확실성의 정도를 정량적으로 나타내며, 분류체계의 효율성을 측정하는 목적함수로 사용된다. 계산된 값은 낮은 엔트로피의 경우 정보 집중도가 높고 예측 가능성이 큰 효율적 분류를, 높은 엔트로피는 정보 분산이 크고 불확실성이 높은 비효율적 분류를 의미한다. 즉, Phase 3에서 정보 엔트로피 이론이 적용되는 핵심 논리는 세분류 항목들을 대상 기준 또는 영향 기준으로 그룹화할 때 발생하는 정보의 분산 정도를 수학적으로 정량화하여, 해당 국가의 환경적 맥락에서 가장 효율적인 분류 구조를 객관적으로 도출하는 것이다.

이후 이에 따른 의사결정 알고리즘은 다음과 같이 구성된다. H (Impact) < H (Target)인 경우 영향 기준 그룹화를 선택하고, 그 외의 경우 대상 기준 그룹화를 선택한다. 단, 두 엔트로피 값의 차이가 임계값 이내일 때에는 하이브리드 그룹화 방식을 적용하여 양쪽 접근법의 장점을 통합한다. 이러한 접근법은 주관적 판단에 의존하지 않고 수학적으로 검증이 가능한 객관적 기준을 통해 각국의 환경적 특성에 최적화된 분류체계 구조를 도출할 수 있게 하며, 정보 이론에 기반한 과학적 엄밀성과 정책적 실용성을 동시에 확보할 수 있다. 이뿐만 아니라 항목들을 선정하는 과정에서 IPCC AR6 Working Group II (IPCC, 2022)와 ISO 14090 (ISO, 2019)에 기반한 적응, 기후 관련 표준 용어를 사용하여 국제적 호환성 또한 확보한다. 궁극적으로는 KADT가 이러한 정량화되고 체계적인 접근법을 통해 국내 기후·정책 환경의 특수성에 기반하면서도 국제적 확장성과 상호운용성을 동시에 확보하는 적응형 분류체계로 발전할 수 있도록 본 연구에서 방법론적 토대를 제공하고자 한다.

### 3. 연구 결과 및 토의

#### 3.1. 기존 분류체계·플랫폼의 구조적 특성 진단

정보분류체계의 분석 결과, 국내 체계는 대·중·소·세분류의 세밀한 위계 구조를 통해 정보의 명확성과 활용 편의성을 추구하는 반면, 국외 체계는 포괄적이고 유연한 구조를 통해 광범위한 적용 가능성을 보장하려는 특성을 보였다. 국가 기후기술 분류체계(CTIs)는 감축-적응-융복

합의 3대 분야 45개 기술 분류로 구성되어 기술 중심의 체계적 접근을 제공하고 있으나, 정책 연계 측면에서는 보완이 필요한 것으로 확인되었다(GTC, 2017). 반면, UNDRR 재해유형 분류 및 설명체계는 국제 표준화를 통한 상호운용성 확보에 중점을 둔 구조로, 한국의 적응 자원 접근성과 정책-시장 연계 강화에 시사점을 제공하는 것으로 분석되었다. EU Taxonomy는 경제활동과 기후 기여도를 연계한 분류 방식을 통해 정책-시장 연계를 강화하고 있는 것으로 분석되었다.

정보시스템(플랫폼)은 국내의 경우 정부 주도의 단일 운영 체계가 지배적이며 플랫폼별로 상이한 정보 분류 방식을 채택하고 있어 종합적인 정보의 접근에 구조적 제약이 존재하는 것으로 확인되었다. 기상청 기후정보포털의 경우 고해상도 기후데이터(500 m 해상도)와 극한기후지표를 제공하여 노출 지표 산정과 부문별 적응정보 생산 기반을 제공하고 있으나, 적응정책과의 연계가 제한적인 것으로 나타났다(KMA, 2025b). 반면 국외 플랫폼들은 정부, 학계, 민간의 협력 구조를 기반으로 국가 적응정책과 연계된 체계적 정보 분류를 구현하고 있으며, 특히 Climate-ADAPT는 EU 회원국 간 정보 공유와 정책 통합을 통해 정책 부합성과 사용자 접근성을 동시에 확보한 것으로 분석되었다(EEA, 2019). 아일랜드 기후 적응 플랫폼은 공공참여 기능과 IPCC 프레임워크 통합을 통해 국제 정합성과 데이터 호환성을 강화한 사례로 확인되었다. 이러한 비교 분석을 통해 본 연구는 KADT의 구조적 개선을 위한 주요 시사점으로 국내 플랫폼의 분산적 정보 관리 체계의 통합 필요성, 국외 플랫폼의 다층적 협력 구조 및 정책 연계 방식의 벤치마킹 가능성, 분류체계 간 상호운용성 확보를 위한 국제 표준과의 조화 방안 등이 도출되었다.

#### 3.2. 적응정보 분류체계의 표준화

국가 기후리스크 중심으로 한국의 기후·환경 및 정책 조건에 최적화된 KADT의 기본 구조는 기후적응 정보의 지역별 특수성과 맥락 의존성에 기인하며, IPCC (2022)에서도 각 지역의 환경적 특성을 반영한 적응전략이 필수적임을 강조하였다. 따라서, 단순히 한국의 지역적 특성에만 한정하지 않고 과학 기반의 적응정보 표준분류체계 기준으로 역할 확장을 위해 본 연구는 KADT의 구조적 완결성을 유지하면서도 국가별 지리적, 기후적, 사회경제적 특성을 정량화하는 5종 환경평가지표(CEI, TCI, SEI, SVI,

Table 2. The definition and key quantitative data of environmental performance indicator

Variable name	Abbreviation	Definition	Key Quantitative Data Elements
Climate Exposure Index	CEI	Measures degree of exposure to climate hazards	Temperature Anomaly Rate, Precipitation Change Rate, Extreme Weather Frequency, Drought Severity Index
Socioeconomic Exposure Index	SEI	Evaluates socioeconomic system exposure	Population Density, Carbon intensity of GDP, Development indicators
Social Vulnerability Index	SVI	Quantifies social vulnerability and resilience	1-HDI, Poverty rate, 1-Social Protection Coverage, 1-Health System Capacity
Topographic Complexity Index	TCI	Measures terrain complexity affecting climate impact	Elevation Standard Deviation, Slope Variability, Coastline Length/Density, Drainage Density
Adaptive Capacity Index	ACI	Assesses national adaptive capacity	R&D Investment Intensity, Governance Effectiveness, Education Attainment Level

ACI)를 개발하고, 이를 산정하는 방식을 제안하였다. 그리고 이를 활용하여 3개의 단계적 절차를 거쳐 표준분류 체계 항목을 구축할 수 있는 가이드라인을 제안하였다. 이를 위해 Shannon 정보 엔트로피 이론에 기반한 최적화 원칙을 적용하여 소분류 그룹화 기준 결정 알고리즘을 설계함으로써, 대상 기준, 영향 기준, 혼합형 그룹화 간 최적 선택을 통해 적응정보의 활용 효율성을 극대화하였다. 또한 IPCC AR6 Risk Assessment 개념과(IPCC, 2022) ISO 14090 (ISO, 2019)의 기후, 적응 관련 표준용어를 준용하여 정책적 연계성과 국제적 호환성을 갖추기 위한 통합 방법론을 제시하였다. 이러한 종합적 접근을 통해 본 연구는 다양한 국가 환경에서 KADT의 유연한 적용과 국제적 확장성을 동시에 보장하는 과학적이고 실용적인 방법을 제공하고자 하였다.

3.2.1. SCI 대분류

본 연구에서 개발한 SCI 부문의 세분류 항목 구축·보완 알고리즘은 Fig. 1에 제시된 3단계 방법론을 통해 체계적으로 구축되었다. Phase 1 (환경평가지표 산정)은 환경평가지표 산정에 필요한 정량적인 데이터( $X_i$ ) 수집을 시작으로, 전문가 델파이 분석 및 AHP 기법을 활용한 가중치 ( $\omega_i$ ) 산정, 스케일 재조정을 통한 지표 표준화, 5개 환경평가지표 산정, 그리고 TEAI 계산이 순차적으로 수행되었다. CEI는 연평균 기온 변화율, 연강수량 변화율, 극한기상 발생빈도, 가뭄 심각도 등의 요소로, TCI는 고도 표준편차, 경사 변동성, 해안선 길이 및 밀도, 하천 밀도 등의 요소로, SEI는 인구밀도, GDP의 탄소집약도, 개발 지표 등의 요소로, SVI는 인간개발지수, 빈곤율, 사회보장 커버리지, 보건시스템 역량 등의 요소로, 마지막으로 ACI는 연구개발 투자강도, 거버넌스 효과성, 교육성취도의 요소

등으로 구성할 수 있으며, 필요 및 각 나라의 환경에 따라 추가, 수정할 수 있다(Table 2). 모든 하위 요소는 국제 공인기관(NOAA NCEI, World Bank WDI, UNDP HDR, WHO GHO, UNESCO UIS)의 공개 데이터를 활용하여 객관성을 확보하였으며, 스케일 조정을 통해 0-1 범위로 정규화하였다(Nardo et al., 2005; NOAA NCEI, 2024; OECD, 2008; UNDP, 2024; UNESCO UIS, 2024; WHO, 2024; World Bank, 2024).

또한, 각 환경평가지표(Index)를 산정하는 각 정량데이터에( $X_i$ )는 가중치( $\omega_i$ )를 도입하여 산정되도록 하였으며 (식 (2)), 이 가중치는 전문가 델파이 및 AHP 기법을 통해 산정할 수 있다.

$$\text{Index} = \sum_{i=1}^n \omega_i \times X_i \tag{2}$$

Phase 1의 최종 단계에서 도출된 TEAI는 IPCC (2022)의 위험 정의를 직접 반영한 다음 식 (3)을 통해 산정되었다.

$$\text{TEAI} = \text{CRI} \times \text{TAF} \times \text{ACMF} = (\text{CEI} \times \text{SEI} \times \text{SVI}) \times (1 + \text{TCI}) \times (1 - \text{ACI}) \tag{3}$$

여기서 핵심위험지수(Core Risk Index, CRI = CEI × SEI × SVI)는 IPCC AR6의 “Risk = Hazard × Exposure × Vulnerability” 구조를 수학적으로 구현하였으며, 지형증폭계수(Topographic Amplification Factor, TAF = 1 + TCI)와 적응역량완화계수(Adaptive Capacity Mitigation Factor, ACMF = 1 - ACI)는 각각 지형 복잡성과 적응 역량의 맥락적 조정 효과를 표현하였다. 이러한 조합 구조는 직접적 위험 요소와 맥락 조정 요소의 역할을 명확히

Table 3. The thresholds and guidelines for environmental performance indicator

Variable	Thresholds	Guideline
CEI	CHE > 0.6	Segment the CID
TCI	TCI > 0.6	Segment the target
SEI/SVI	SEI/SVI > 0.6	Amplify the impact
ACI	ACI < 0.3	Amplify the impact direction
TEAI	TEAI > 1.0	Urgent need for adaptation support
	0.5 < TEAI < 1.0	Need to strengthen adaptation in a phased manner
	TEAI < 0.5	Need for preventive adaptation management

구분하여 정책적 해석 가능성을 극대화한다.

또한, 이렇게 도출된 TEAI 값은 국가별 적응 우선순위 결정과 국제 기후재원 배분에서 참고할 수 있는 지표로도 활용이 가능하다. 예를 들어, TEAI 값에 따른 체계적 국가군 분류에서 고위험군(TEAI > 1.0)은 긴급 적응 지원이 필요한 국가로, 중위험군(0.5 < TEAI ≤ 1.0)은 단계적 적응 강화가 필요한 국가로, 저위험군(TEAI ≤ 0.5)은 예방적 적응 관리가 중점인 국가로 분류되어 각각 포괄적 즉각 대응, 선택적 점진 대응, 장기적 혁신 대응 전략의 차별화된 적용이 가능하다(Table 3). 이 때, TEAI 산정식에서 각 구성요소(CEI, SEI, SVI, TCI, ACI)가 0-1로 정규화됨에 따라, TEAI의 이론적 범위는 최솟값 0(모든 위험요소 = 0)부터 최댓값 2(CEI = SEI = SVI = TCI = 1, ACI = 0)까지이다. 이러한 이론적 범위 내에서 임계값 0.5와 1.0의 설정은 TEAI 산정식의 구조적 의미에 기반한다. 첫째, TEAI = 0.5는 핵심위험지수 CRI (CEI × SEI × SVI)가 지형증폭과 적응역량 조정을 고려하여 중간 수준의 위험 상태에 도달했음을 의미한다. 둘째, TEAI = 1.0은 CRI = 1.0 수준(위험-노출-취약성이 모두 높은 상태)에서 TAF와 ACMF가 추가 작용하는 임계점으로, 이를 초과하면 긴급 대응이 필요한 고위험 상태로 해석할 수 있다. 이러한 구조적 해석은 IPCC AR6의 위험 정의와 일치하며, 정책 의사결정에서 직관적 해석이 가능한 기준점을 제공한다(IPCC, 2022). 다만 이는 산정식의 구조적 특성에 기반한 방법론적 제안으로, 향후 실증 연구를 통한 검증과 조정이 필요하다. 이렇게 산정된 TEAI는 GCF (Green Climate Fund)와 AF (Adaptation Fund) 등 국제 기후재원의 배분에 과학적인 근거를 제시할 수 있어, 높은 환경적 위험에 노출되면서도 적응 역량이 제한적인 국가에 대한 합리적 지원 체계를 구축하는 데에 활용될 수 있다.

Phase 2 (세분류 항목 구축/보완)는 적용 대상 국가의 기후리스크 구축 여부에 따른 분기 처리가 핵심 요소이

다. 기후리스크가 미구축된 국가의 경우, 연구 및 전문가 토론을 통해 CID, 대상, 영향, 영향방향의 4요소 구조로 기후리스크 항목을 생성한 후, 환경평가지표 기반 구성요소 조정을 단계적으로 적용하였다. 구체적으로는 CEI, TCI, SEI/SVI, ACI의 임계값에 따른 CID 조정(단순화 및 정교화), 대상 조정(지형별 세분화), 영향 조정(사회적 파급효과), 영향방향 조정(심각성 수준)이 순차 적용된다(Fig. 1, Table 3). 반면 영국(Climate Change Risk Assessment, CCRA3)이나 호주 등 기준에 체계적 기후리스크가 구축된 국가의 경우, 국가 기후리스크 완결성 진단 알고리즘을 활용하여 기존 리스크를 세분류에 직접 적용하여 과학적 근거 기반 적응정보와의 연계성을 강화하는 차별화된 접근법을 사용하였다.

환경평가지표(CEI, SEI, SVI, TCI, ACI) 별 임계값 0.3과 0.6의 적용은 기후변화 위험평가 분야에서 널리 활용되는 3분위 분류 기준(Füssel, 2007)과 FAO Climate Risk Toolbox에서 제시하는 저위험(0.0 ~ 0.30), 중위험(0.30 ~ 0.60), 고위험(0.60 ~ 0.80) 구분 체계(FAO, 2022)를 준용하여 설정하였다. 이러한 임계값 설정은 정보 이론의 최적 분할 원칙(Cover and Thomas, 2006)과 부합하며, 향후 각국의 전문가 델파이 조사나 AHP 기법을 통하여 임계값을 변경할 수 있다.

이어서 Phase 3 (소분류 항목 구축)은 Shannon 엔트로피 이론에 기반하여 세분류 항목들의 최적 그룹화 방식을 정량적으로 결정하였다. 구체적으로는 세분류 항목들의 실제 그룹화 시나리오별 확률 분포를 계산하여 각 시나리오에 대한 Shannon 엔트로피 H (Target)와 H (Impact)를 직접 산출하는 접근법을 구현하였다. 이를 통해 정보의 집중도와 불확실성을 수학적으로 정량화하여, 최적의 그룹화 방식을 객관적이고 과학적으로 도출할 수 있었다.

구체적인 알고리즘은 다음과 같이 작동한다. 먼저 대상 기준 그룹화와 영향 기준 그룹화 각각에 대해 세분류 항

목들을 실제로 그룹화한 후, 각 그룹의 항목 수 비율  $p(x_i) = n_i/N$ 을 산정한다. 이어서 식 (1)을 적용하여 각 그룹화 방식의 엔트로피를 계산한다. 낮은 엔트로피 값은 정보 집중도가 높고 예측 가능성이 큰 효율적 분류를, 높은 엔트로피 값은 정보 분산이 크고 불확실성이 높은 비효율적 분류를 의미한다.

이후 의사결정 알고리즘은 다음과 같이 구성된다. H (Impact)보다 H (Target)가 큰 경우 영향 기준 그룹화를 선택하고, 그 외의 경우 대상 기준 그룹화를 선택한다. 단, 두 엔트로피 값의 차이의 절대값이 0.05 이내 인 경우에는 하이브리드 그룹화 방식을 적용하여 영향, 대상의 성격을 모두 가지도록 소분류 항목을 구축한다. 이러한 접근법은 주관적 판단에 의존하지 않고, 수학적으로 검증이 가능한 객관적 기준을 통해 각국의 환경적 특성에 최적화된 분류 체계 구조를 도출할 수 있게 한다.

이때, 임계값 0.05는 엔트로피 차이 판정을 위한 경험적 기준으로서, 절대적 수치보다는 차별화된 분류 전략 적용이라 점을 본 연구는 명시한다. 이 임계값은 기존 정보 이론 연구에서 제시하는 불확실성 최소화 원칙과 기후 변화 위험평가 분야의 분류 관행을 종합 고려하여 설정되었으나, 향후 국가별 맞춤 조정이 필요하다는 한계를 가진다(Cover and Thomas, 2006).

궁극적으로, 본 방법론에서 제안하는 Shannon 엔트로피 최소화 개념을 통해 분류체계의 구조적 일관성을 확보하고, 각국의 기후·환경적 특성을 반영하여 수학적으로 검증이 가능한 객관적인 적응정보 분류체계 구축 방법론을 제공할 수 있다.

### 3.2.2. SOL·PEV 대분류

SCI 대분류와 본질적으로 상이한 특성을 가진 SOL 및 PEV 대분류는 각각 적응 해법과 정책평가 정보 고유 영역에서 범용성과 유연한 관리 체계 구축이 핵심이다. SOL 대분류의 경우, 선행 연구에서 한국의 제3차 국가 기후위기 적응 강화대책에 포함된 226개 적응 과제를 기반으로 세분류 항목이 구축되었으나, 이는 국내 정책적·제도적 맥락에 특화되어 국제적 활용에는 제약이 따른다(Seo et al., 2023, 2024). 이러한 한계를 극복하기 위해 SOL의 세분류 항목 역시 SCI 세분류 항목처럼 구조화가 필요하다. 예를 들어, IPCC (2022)에서 제시하는 적응 해법의 4가지 유형화 체계—기술적 접근법(technological approaches), 생태계 기반 접근법(ecosystem-based approaches), 사회적 접근법(social approaches), 제도적 접근법(institutional

approaches)—를 기본 틀로 활용하여 “적응접근법, 실행 규모, 대상시스템, 구현 방법”의 4가지 요소를 활용하여 SOL 세분류 항목을 좀 더 정형화할 필요가 있다. 이를 통해, 기술적 접근법 범주에서 “농업용수 관리-지역 규모-관계시설-스마트 센서 도입”과 같은 구체적 적응 해법이 체계적으로 분류될 수 있다.

또한, 이 과정에서 본 연구에서 개발한 5종 환경평가지표는 각국의 기후·환경적 맥락을 반영한 적응해법의 우선 순위 조정을 위한 판단 인자의 역할도 할 수 있다. 예를 들어, CEI가 높은 고위험 노출 국가에서는 긴급 대응형 기술적 해법이, TCI가 높은 복잡 지형 국가에서는 지형별 차별화된 생태계 기반 해법이 우선 적용되도록 가중치 조정 메커니즘을 적용할 수 있다.

PEV 대분류는 지방자치단체 기후위기 적응대책 목록을 직접 세분류 항목에 할당하는 현행 구조가 타국에서도 해당 국가의 기존 적응대책 이력을 그대로 활용할 수 있어 본질적으로 높은 범용성을 가지고 있다. 그러나 향후 정책 항목의 재구성과 무제한적 증가로 인한 분류체계 관리 효율성 저하 문제에 봉착할 수 있다. 따라서, 소분류 항목을 책정할 때, 정책의 시간적 성격(예방적·대응적·복구적), 공간적 범위(국가·광역·기초·지역), 정책 분야(부문별·통합적), 정책 수단(규제·유인·정보제공)을 기준으로 한 다차원적 그룹화 체계를 활용할 수 있다. 예를 들어, “해안 방재시설 구축”은 대응적-국가-국토교통-유인 정책으로, “기후변화 교육 프로그램”은 예방적-지역-공통활용-정보제공 정책으로 각각 분류될 수 있다.

더 나아가 PEV 대분류에서는 TEAI의 변화량을 활용한 적응 효과 평가 시스템을 도입하여 정책 성과의 정량적 추적을 실현할 수 있다. 연도별 TEAI 변화량을 식 (4)로 산정하여,  $\Delta TEAI$ 가 0.1보다 클 때에는 적응 노력 대폭 강화 필요,  $\Delta TEAI$ 가 -0.1과 0.1 사이일 때 현재 정책 수준 유지, 마지막으로  $\Delta TEAI$ 가 -0.1보다 작을 때에는 적응 정책의 현저한 성과 확인으로 판정하는 객관적 기준으로 활용될 수 있다.

$$\Delta TEAI = TEAI(t+1) - TEAI(t) \quad (4)$$

$\Delta TEAI$  임계값  $\pm 0.1$ 은 TEAI의 이론적 범위(0-2)와 정책 평가의 실용적 목적을 고려하여 본 연구에서 제안하는 기준이다. 0.1의 변화는 전체 범위의 5%에 해당하며, 이는 TEAI를 구성하는 5개 지표의 개별적 변화가 복합적으로 작용할 때 정책적으로 의미 있는 변화를 나타낼 수 있

Table 4. Components and data sources for environmental assessment indicators used in the pilot test

Index	Component (X <sub>i</sub> )	Data source	References	Weights (w <sub>i</sub> )
CEI	Temperature anomaly rate	NOAA global surface temperature dataset	Huang et al. (2024)	0.25
	Precipitation change rate	Global precipitation climatology project	Adler et al. (2018)	0.25
	Extreme weather frequency	EM-DAT international disaster database	Guha-Sapir et al. (2024)	0.25
	Drought severity Index	Global SPEI database	Beguiria et al. (2014) Vicente-Serrano et al. (2010)	0.25
TCI	Elevation standard deviation	NASA shuttle radar topography mission	NASA JPL (2013)	0.5
	Coastline length/density	Global coastline dataset	Zuo et al. (2025)	0.5
SEI	GDP	World development indicators	World Bank (2024)	0.33
	Urban population	World development indicators	World Bank (2024)	0.33
	Agriculture, forestry, and fishing, value added (% of GDP)	World development indicators	World Bank (2024)	0.33
SVI	Human development index	Human development reports data center	UNDP (2024)	0.5
	Poverty rate	Poverty and inequality platform	World Bank (2024)	0.5
ACI	Digital Infrastructure Indicators	International telecommunication union (ITU)	ITU (2022)	0.5
	Worldwide Governance Indicators	World development indicators	World Bank (2024)	0.5

는 수준으로 설정하였다. 다만, 이 임계값은 실증적 검증으로 보완되어야 하며, 향후 다양한 국가의 정책 사례와 TEAI 변화 패턴에 대한 체계적 분석을 통해 조정되어야 한다.

최종적으로 본 방법론을 통해 우리나라 뿐 아니라, 다른 나라에서도 SCI, SOL, PEV 3개 대분류 간 유기적 연계 체계를 확립할 가능성을 볼 수 있었다. 이때, 5종 환경평가지표는 3개 대분류를 관통하는 공통 판단인자로 작용하여, 동일한 TEAI 값을 갖는 국가들 간 SCI, SOL, PEV 결과의 상호 비교와 벤치마킹이 가능하다.

### 3.3. 해외 적응정보 분류체계 시범구축을 통한 가이드라인 검증

본 연구에서 개발한 환경평가지표 기반 KADT 구축 가이드라인의 방법론적 적용 가능성 검증을 위해, 서로 다른 기후적, 지형적, 사회경제적 환경을 가진 우리나라, 영국, 몽골 3개국을 대상으로 물환경, 해양·수산 부문의 분류체계 시범 구축을 수행하였다. 이들 국가는 기후리스크 구축 현황과 환경적 다양성 측면에서 차별화되어 선정되었으며, 개발된 알고리즘의 범용적 적용 가능성을 검증하

는 데 적합한 사례를 제공할 것으로 판단하였다. 우리나라는 제3차 국가 기후위기 적응 강화대책을 통해 체계적인 기후리스크 체계를 구축하였으며, 복잡한 지형과 높은 연안 노출도를 특징으로 한다. 영국은 2008년 기후변화법에 따라 CCRA3를 통해 2012년부터 5년 주기로 국가 기후리스크를 체계적으로 평가하는 선진국형 리스크 관리 체계의 대표 사례 국가이다(HM Government, 2022). 몽골은 체계적 기후리스크 구축 이전 단계로, 극한 대륙성 기후와 유목 경제라는 개발도상국의 특성을 나타낸다.

중요한 것은 본 분석이 실증적 구축이 아닌 방법론적 적용 예시라는 점이다. 5종 환경평가지표 산정을 위해 Table 4에 제시된 바와 같이 국제 공인기관의 공개 데이터를 활용하였다. 다만 Table 2에서 제시하였던 환경평가지표 산정에 필요한 모든 데이터를 수집하는 데에 한계가 있어, 국제기구를 통해 구할 수 있는 데이터들만을 활용하여 시범 구축을 수행하였다. 또한 각국이 직접 제공하는 최신 및 고해상도 자료가 아니기에 데이터 정확성, 최신성, 해상도, 통일성 부분은 추후 보완이 필요하다. 아울러 식 (2)를 통한 5개 판단지표(CEI, TCI, SEI, SVI, ACI) 산정 시, 가중치가 모두 동일하게 적용되었으므로, 실제

산정 시에는 전문가 델파이 조사와 AHP 기법을 통한 국가별 맞춤 가중치 산정이 필수적이다(Nardo et al., 2005).

Phase 1에서 산정된 각국의 환경평가지표는 뚜렷한 국가적 특성을 반영하였다(Table 5). 한국의 경우 특히 TCI가 0.75로 가장 높게 나타나 복잡한 산악 지형과 긴 해안선의 특성이 정량적으로 확인되었다. 영국은 ACI가 0.48로 세 국가 중 가장 높아 선진국의 체계적인 적응 인프라를 확인할 수 있었다. 몽골은 CEI가 0.35로 상대적으로 높았지만, ACI가 0.25로 가장 낮아 극한 대륙성 기후의 위험과 제한된 적응 능력이 수치적으로 표현되었다. 이러한 지표 차이는 각국의 지리적, 사회경제적 현실을 객관적으로 반영하며, 후속 분석 결과의 기초 자료로 활용되었다.

Phase 2에서는 각국의 기후리스크 구축 현황에 따른 차별적 접근법이 적용되었다. 우리나라와 영국은 기존 기후리스크가 구축된 국가로서 국가 기후리스크 완결성 진단 알고리즘을 통해 CID, 대상, 영향, 영향방향의 4요소 구조로 세분화가 이루어졌다(Seo et al., 2024). 우리나라의 경우 물환경 부문 9개, 해양/수산 부문 20개로 총 29개의 세분류 항목이 도출되었다. 영국은 CCRA3의 기존 리스크를 완결성 진단 알고리즘에 따라 복수의 CID와 대상을 단일화하는 과정을 거쳐 물환경 부문 19개, 해양/수산 부문 14개로 총 33개의 세분류 항목으로 확장되었다. 반면 몽골은 기후리스크 미구축 국가로서 새로운 4요소 구조의 리스크 항목을 생성한 후, ACI값이 임계값보다 낮은 점을 반영하여 모든 영향방향에 심각성을 강조하는 조정이 적용되었다. 이를 기반으로 물환경 부문 35개의 세분류 항목이 구축되었으며, 내륙국가 특성상 해양/수산 부문은 구축하지 않았다.

Phase 3의 Shannon 엔트로피 기반 그룹화 분석에서는 나라별로 상이한 최적 그룹화 방식이 도출되었다(Table 5). 한국은 대상 기준 그룹화 시 H (Target) = 1.54, 영향 기준 그룹화 시 H (Impact) = 1.61으로 산정되어, 정보 집중도가 높은 대상 기준 그룹화가 선택되어 물환경 부문은 3개,

해양·수산 분야는 5개의 소분류 항목이 구축되었다. 이는 높은 지형복잡성지수(TCI > 0.6)와 부합하는 결과로, 복잡한 지형 조건에서 공간적 대상별 관리가 효율적임을 시사한다. 영국은 H (Target) = 1.55, H (Impact) = 1.49로 영향 기준 그룹화가 선택되었으며, 세 나라 중 가장 적은 엔트로피의 차이를 보였으며, 물환경 부문은 3개, 해양·수산 분야는 4개의 소분류 항목이 구축되었다. 몽골의 경우 H (Target) = 2.32, H (Impact) = 1.46으로 가장 큰 엔트로피 차이를 보이며 영향 기준 그룹화가 선택되었는데, 이는 낮은 적응역량(ACI < 0.3) 조건에서 제한된 자원을 영향별로 집중 배분하는 전략이 합리적임을 뒷받침하며, 3개의 소분류 항목이 구축되었다.

다만, 본 연구에서 시범 구축한 결과는 국제기구 데이터 활용에 따른 지역적 정밀도 제약, 동일 가중치 적용의 단순화, 그리고 임계값 설정의 경험적 특성에 따른 한계점을 지닌다. 또한 완결성 진단 알고리즘의 세분화 기준이나 Shannon 엔트로피 계산을 위한 그룹 분포 가정에도 추가적인 실증 연구가 필요하다. 하지만 본 연구에서 제안하는 5종 환경평가지표 기반 적응정보 분류체계 구축 방법론이 기후리스크 구축 여부, 지형적 복잡성, 사회경제적 발전 수준이 상이한 국가들에도 체계적으로 적용될 수 있으며, 정보 이론에 기반한 객관적 의사결정 체계를 통해 각국의 기후·환경적 맥락에 최적화된 적응정보 분류체계의 구조 도출 방안을 제시할 수 있다는 잠재력을 확인할 수 있었다. 특히 Shannon 엔트로피 최소화 원칙을 통한 그룹화 방식 선택은 주관적 판단을 배제하고 수학적으로 검증이 가능한 기준을 제공함으로써, 국제적 호환성과 과학적 근거 기반의 접근성을 동시에 확보할 수 있는 새로운 접근법으로서 의의가 있다.

### 3.4. 기후위기 적응정보 통합플랫폼을 통한 적응정보 활용도 제고 방안

적응정보의 체계적 활용도 증진을 위해서는 분류체계

Table 5. Pilot development of environmental assessment indicators and information entropy for each country

Country	CEI	TCI	SEI	SVI	ACI	TEAI	H (Target)	H (Impact)	Method
Republic of Korea	0.40	0.75	0.35	0.24	0.43	0.034	1.54	1.61	Target-based Grouping
U.K.	0.32	0.47	0.24	0.16	0.48	0.009	1.55	1.49	Impact-based Grouping
Mongolia	0.35	0.31	0.19	0.34	0.25	0.022	2.32	1.46	Impact-based Grouping

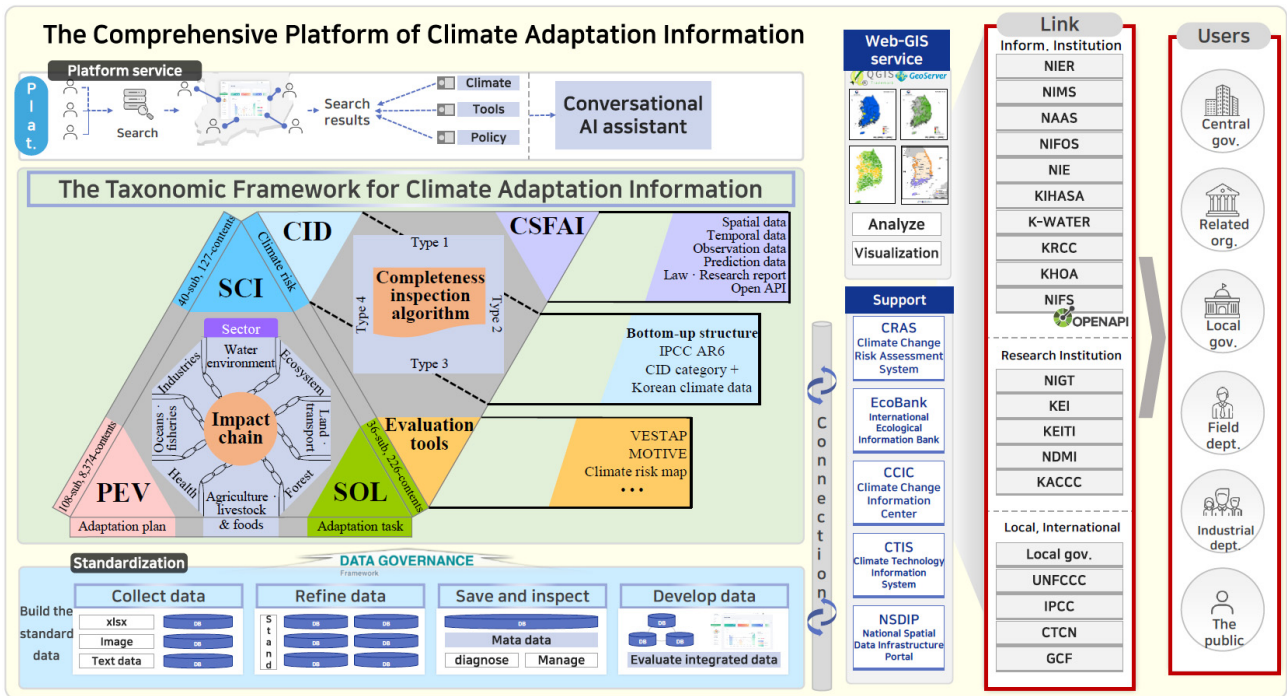


Fig. 2. The concept of the comprehensive platform for climate adaptation information

뿐만 아니라, 이를 핵심 골격으로 하는 플랫폼의 구축이 필수적이다. 추후 본 연구의 KADT와 적응 평가 지원 도구, 적응정보 공통포맷 등을 토대로 국립환경과학원이 구축할 기후위기 적응정보 통합플랫폼은 다양한 사용자 인터페이스, 표준화된 정보 구조, 그리고 지능형 정보 연계 체계를 통해 적응정보의 접근성과 활용성을 극대화하는 것을 목표로 한다(Fig. 2).

특히 새로운 리스크를 탐지 및 관리하는 기능은 통합플랫폼의 핵심적 가치다. 전통적인 기후위험 평가가 과거 데이터와 기존 시나리오에 의존하는 한계를 극복하기 위해서는 새롭게 부상하는 복합적이고 예측 불가능한 위협 요소들을 실시간으로 식별하고 평가하는 시스템이 필요하다. 이는 기후변화의 비선형적 특성과 임계점(tipping points) 현상으로 인해 발생하는 급작스러운 환경 변화에 대응하기 위한 필수 요소로, 유럽의 Climate-ADAPT 플랫폼에서도 주요 개발 방향으로 설정되어 있다(EEA, 2024).

또한, 플랫폼의 사용자 경험 향상을 위해 자연어 처리 기반의 지능형 인터페이스 시스템이 도입될 예정이다. 이 시스템은 대화형 AI 어시스턴트(conversational AI assistant) 형태로 구현되어 사용자의 자연어 질의를 해석하고 KADT 구조 내에서 관련 적응정보를 탐색하여 맞춤형 응답을 제공

한다. 핵심 기능으로는 의미론적 검색(semantic search), 맥락 인식 대화 관리(contextual dialogue management), 그리고 다중 모달 정보 통합(multimodal information integration)이 포함된다. 이러한 AI 시스템은 플랫폼에 지속적으로 축적되는 기후적응 정보, 정책 문서, 사용자 상호작용 데이터를 기반으로 점진적 학습을 수행하여 응답 품질과 정확성을 지속적으로 개선하는 역할을 할 것이다. 이러한 플랫폼의 구조 내에서 본 연구에서 제안하는 5종 환경평가지표 기반의 KADT 구축 가이드라인은 사용자 피드백 루프와 전문가 검증 체계를 통해 AI 시스템의 신뢰성과 설명 가능성을 확보하여 학술적 활용과 정책적 의사결정 지원에 적합한 수준의 정보 서비스를 제공하는 데 핵심적인 역할을 할 것이다.

아울러 KADT 기반의 통합플랫폼은 국제적 호환성 측면에서 IPCC AR6 평가보고서의 위험 평가 프레임워크와 ISO 14090 시리즈의 기후적응 표준을 준용하며, FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) 데이터 원칙에 따른 데이터 관리 체계를 기반으로 구축된다. 이를 통해 국제 기후적응 연구 네트워크와의 연계성을 확보하고, 글로벌 적응 지식의 공유와 축적에 기여할 수 있다. 특히 개발도상국 지원을 위한 기술 이전과 역량 강화 프

로그그램에서 본 플랫폼의 경험과 기술이 활용될 수 있는 잠재력이 크다. 향후 지능형 사용자 인터페이스 기술의 발전과 함께 기후위기 적응정보 통합플랫폼은 단순한 정보 저장소를 넘어서 적응 지식의 능동적 큐레이션과 개인화된 정보 서비스를 제공하는 지능형 적응 거버넌스의 핵심 인프라로 진화할 것으로 전망되며, 이는 기후위기 대응의 과학적 기반을 한층 강화하는 계기가 될 것이다.

#### 4. 결론

기후 위기가 가속화되면서 각국의 적응 노력이 강화되고 있는 가운데, 체계적이고 표준화된 기후적응 정보 분류체계의 중요성은 계속해서 증대되고 있다. 선행 연구에서 개발된 KADT는 국내 기후적응 정보의 체계적 관리를 위한 기반을 마련하였으나(Seo et al., 2023, 2024), 국제적 활용을 위한 범용성과 실용성의 확보가 필요하였다. 따라서, 본 연구는 KADT의 실용성 및 범용성 강화를 주 연구 목적으로 하여, 국제 호환성 확보를 위한 가이드라인 제안과 통합플랫폼을 통한 실증적 활용 방안 제시를 세부 목적으로 설정하였다.

이러한 연구 목적 달성을 위해 국내외 유관 플랫폼과 분류체계의 구조적 특성을 분석하고, 인간 뇌의 신경망 구조를 모방한 개념적 프레임워크와 Shannon (1948)의 정보 엔트로피 이론을 결합하여 동적 적응형 분류체계 구축 방법론을 개발하였다. 특히 IPCC AR6에서 제시하는 기후적응의 정의와 ISO 14090 표준용어를 활용하여 국제적 정합성을 확보하면서도, 각국의 환경적 특성을 반영할 수 있는 5중 환경평가지표 기반의 알고리즘을 구축하였다.

구체적으로, 과학기반 정보(SCI) 대분류에 속하는 소분류 및 세분류 항목 구축을 위해 기후위험노출지수(CEI), 지형복잡성지수(TCI), 사회경제적노출지수(SEI), 사회적 취약성지수(SVI), 적응역량지수(ACI)로 구성된 환경평가지표를 개발하고, 이들의 성격을 IPCC (2022)의 위험 정의에 기반하여 수학적으로 구현한 종합환경평가지수(TEAI) 산정식을 구축하였다. 또한 Shannon 엔트로피 최소화 원칙에 기반한 소분류 그룹화 기준 결정 알고리즘을 통해 각국의 환경적 맥락에 따라 대상 기준, 영향 기준, 또는 혼합 접근법 중 최적 방식을 선택하는 체계를 구축하였다. 이뿐 아니라, 본 방법론은 적응해법(SOL) 및 정책평가 정보(PEV)의 소, 세분류 항목의 정보들이 단순히 구축되는 것이 아니라, 서로 다른 부문의 정보들과 상호연계되고, 더 나아가 통합플랫폼 내에서 정책 성과의 정

량적 추적과 효율적인 예산 배분의 기준으로도 활용될 수 있는 잠재력을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

이에 더하여, 개발된 방법론의 실증적 적용 가능성을 검증하기 위해, 기후리스크 구축 현황과 환경적 특성이 상이한 대한민국, 영국, 몽골 3개국을 대상으로 시범 적용을 수행하였다. 우선 각 나라의 환경평가지표 및 국가 기후리스크 완결성 진단 알고리즘을 통해 세분류 항목을 시범 구축, 보완하였으며, 이에 우리나라는 물환경 부문 9개, 해양/수산 부문 20개로 총 29개의 세분류 항목을, 영국은 물환경 19개, 해양/수산 14개로 총 33개의 세분류 항목을, 몽골은 물환경 35개의 세분류 체계를 구축되었다. 그리고, 세분류 항목을 효율적으로 분류하기 위해 Shannon 엔트로피 기반 정보 집중도 분석 결과, 우리나라는 대상 기준 그룹화가 최적인 것으로 도출되었으며( $H(\text{Target}) = 1.54 < H(\text{Impact}) = 1.61$ ), 영국과 몽골은 각각 영향 기준 그룹화가 효율적임을 보여주었다(영국:  $H(\text{Impact}) = 1.46 < H(\text{Target}) = 1.55$ ; 몽골:  $H(\text{Impact}) = 1.46 < H(\text{Target}) = 2.32$ ). 이로써 우리나라는 물환경 부문 3, 해양·수산 부문 5개의 소분류 항목이, 영국은 물환경 부문 3, 해양·수산 부문 4개의 항목이, 마지막으로 몽골은 물환경 부문 3개의 소분류 항목이 도출되었다. 이를 바탕으로 특히 한국의 복잡한 지형( $TCI > 0.6$ )에 따른 대상별 관리 전략과 몽골의 낮은 적응 역량( $ACI < 0.3$ )에 따른 영향별 집중 대응 전략이 정보 이론적 근거를 통해 객관적으로 선택됨으로써, 각국의 기후·환경적 맥락이 과학적 기준에 따라 분류체계에 적절히 반영되었음을 확인할 수 있었다. 다만 환경평가지표를 산정하였을 때 동일한 가중치를 일률적으로 적용한 점과, 국제기구 데이터 활용에 따른 지역적 정밀도 및 최신성 제약은 방법론적 한계로 남아 있어, 향후 국가별 맞춤형 전문가 델파이 조사와 고해상도 실증 데이터 기반 모델 정밀화가 요구된다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 정보 엔트로피 최소화 원칙을 통한 객관적 분류체계 구축이 다양한 국가 환경에 체계적으로 적용할 수 있음을 입증하였으며, 기후적응 분야의 국제적 표준화와 과학적 엄밀성 확보에 이바지할 수 있는 방법론적 토대를 마련하였다.

또한 적응정보의 체계적 활용도 제고를 위해 KADT 기반의 국가 기후위기 적응정보 통합플랫폼의 구축 방향을 제시하였으며, 특히 새롭게 나타날 수 있는 리스크의 탐지 기능과 자연어 처리 기반 지능형 AI 어시스턴트 도입을 통한 사용자 친화적 인터페이스 구현 방안도 논의하였다. 이러한 통합플랫폼은 분산된 적응정보를 체계적으로

연계하고 국제적 호환성을 확보하여 글로벌 기후적응 지식 공유에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

최종적으로, 본 연구 결과는 기존의 정적 분류체계를 넘어서 환경 변화에 유연하게 대응할 수 있는 적응형 정보 관리 체계(adaptive management system)의 가능성을 실증적으로 제시하고자 하였으며, 특히 수학적으로 검증이 가능한 객관적 기준을 통해 각국의 환경적 특성을 반영한 맞춤형 분류체계 구축이 가능함을 확인하였다. 향후 연구에서는 더 많은 국가를 대상으로 한 확장 적용과 실제 정책 환경에서의 활용성 검증, 그리고 기후변화 시나리오에 따른 동적 업데이트 메커니즘 개발이 필요하며, 이를 통해 KADT가 단순히 우리나라뿐 아니라 기후 적응 정보의 국제 표준화를 선도하는 체계로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2025-01-01-015).

## Reference

- Adler RF, Huffman GJ, Chang A, Ferraro R, Xie PP, Janowiak J, Rudolf B, Schneider U, Curtis S, Bolvin D, Gruber A, Susskind J, Arkin P, Nelkin E. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *J Hydrometeorol* 4: 1147-1167. doi: 10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2
- Beguiría S, Vicente-Serrano SM, Reig F, Latorre B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int J Climatol* 34: 3001-3023. doi: 10.1002/joc.3887
- Cover TM, Thomas JA. 2006. *Elements of information theory*, 2nd edn. Hoboken, NJ: Wiley.
- EEA (European Environment Agency). 2019. *Sharing adaptation information across Europe*; [accessed 2025 Aug 27]. <https://climate-adapt.eea.europa.eu>
- EEA (European Environment Agency). 2024. *Climate-ADAPT: European Climate Adaptation Platform - Adaptation options and governance guidance*. Copenhagen, Denmark: EEA; [accessed 2025 Aug 27]. <https://climate-adapt.eea.europa.eu>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2022. *Climate risk toolbox - Guiding material for climate risk screening*. Rome, Italy: FAO. doi: 10.4060/cc2909en
- Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth for Coping with Climate Crisis. 2024. Act No. 19754, amended 2024 Oct 22 (in Korean).
- Füssel HM. 2007. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Glob Environ Change* 17(2): 155-167. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002
- GTC (Green Technology Center). 2017. *Study on establishing a climate technology classification system (updated edition based on the 2016 final report) (in Korean with English abstract)*. Seoul, Korea: Green Technology Center.
- Guha-Sapir D, Below R, Hoyois P. 2024. *EM-DAT: The emergency events database*. Brussels, Belgium: Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D.Guha-Sapir; [accessed 2025 Sep 1]. [www.emdat.be](http://www.emdat.be)
- HM Government. 2022. *UK climate change risk assessment 2022*. London, UK: Her Majesty's Stationery Office.
- Huang B, Yin X, Menne MJ, Vose RS, Zhang HM. 2024. *NOAA global surface temperature dataset (NOAAGlobalTemp), version 6.0*. NOAA National Centers for Environmental Information. doi: 10.25921/rzxcg-p717
- 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 IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ISO (International Organization for Standardization). 2019. *Adaptation to climate change - Principles, requirements and guidelines*. Geneva, Switzerland: Author. ISO 14090.

- ITU. 2022. Core list of ICT indicators. Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union; [accessed 2025 Sep 1]. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/coreindicators/default.aspx>
- Jung SW, Yu YJ, Jang YJ, Hwang JH, Jeon SW, Oh YY, Jin HA. 2024. Methodology for deriving key risks and impact chains for climate risk assessment based on the national climate crisis adaptation information standard classification system (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 15(5-2): 845-855. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.5.845
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2024. Annual climate report 2024 (in Korean with English abstract). Seoul: Korea Meteorological Administration. Technical Report 2024-01.
- KMA (Korea Meteorological Administration) 2025a. 2024 Abnormal climate report (press release and summary). Seoul, Korea: Government of the Republic of Korea; [accessed 2025 Sep 22]. <https://www.climate.go.kr/home/bbs/view.php?code=93&bnam=abnormal&vcode=7024&cpag=1&vNum=19&skind=&sword=&category1=&category2=>
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2025b. Climate information portal: High-resolution climate data and extreme climate indices (in Korean with English abstract where applicable); [accessed 2025 Aug 27]. <https://www.climate.go.kr>
- Magurran AE. 2004. *Measuring biological diversity*. Oxford, UK: Blackwell Publishing.
- Nardo M, Saisana M, Saltelli A, Tarantola S, Hoffman A, Giovannini E. 2005. *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Paris, France: OECD Publishing. doi: 10.1787/533411815016
- NASA JPL. 2013. NASA shuttle radar topography mission global 1 arc second. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003
- NOAA NCEI (National Centers for Environmental Information). 2024. Climate at a glance: Global time series; [accessed 2025 Aug 27]. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>
- OECD. 2008. *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Paris, France: OECD Publishing. doi: 10.1787/9789264043466-en
- Seo DH, Oh YY, Lee EJ, Jin H, Jeon SW, Kim JY, Roh SA, Baek J, 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
- Seo DH, Oh YY, Yoo YJ, Jin H, Jeon SW, Jeong SW, Jang YJ, Kim JY, Roh SA, Baek J, Lim CS, Yoo MS. 2024. Development of a standard classification system for climate crisis adaptation information Part-II: Configurations and efficiency (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 15(5-2): 815-830. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.5.815
- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell Syst Tech J* 27: 379-423, 623-656.
- UNDP (United Nations Development Programme). 2024. Human Development Report statistical data; [accessed 2025 Aug 27]. <https://hdr.undp.org/data>
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2023. *Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate investment and planning on climate adaptation*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.
- UNESCO UIS (Institute for Statistics). 2024. UIS Data Centre; [accessed 2025 Aug 27]. <http://uis.unesco.org/> or <https://uisdata-unesco.org>
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 23: 1696-1718. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1
- WHO (World Health Organization). 2024. Global Health Observatory (GHO) data; [accessed 2025 Aug 27].

<https://www.who.int/data/gho>

WMO (World Meteorological Organization). 2024. State of the global climate 2024. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. WMO Report No. 1347.

World Bank. 2024. World Development Indicators (WDI); [accessed 2025 Aug 27]. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>

Zuo J, Xu J, Chen C, Wang X, Sun M, Zhang G, Lyu H, Gao Y, Zhong Y. 2025. GCL\_FCS30: A global coastline dataset with 30-m spatial resolution and detailed classification system. *Sci Data* 12: 45. doi: 10.1038/s41597-025-04430-0