



Article

# 한국지질자원연구원 지진관측소의 지진파형 자료 기반 연구의 시간적 진화: 서지계량 및 단어 기반 분석

임호빈<sup>1,\*</sup>, 신진수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지진연구센터

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 복합지진탐지연구센터

## Evolution of research using seismic waveform data of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources: bibliometric and word-based analysis

Hobin Lim<sup>1,\*</sup>, Jin Soo Shin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

<sup>2</sup>Integrated Earthquake Monitoring Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: April 2, 2026 / Revised: May 11, 2026 / Accepted: May 24, 2026

\*Corresponding author: +82-42-868-3101 / E-mail: [hbl@kigam.re.kr](mailto:hbl@kigam.re.kr)

**요약:** 지진관측망의 장기 운영은 많은 비용과 시간이 소요되며, 운영의 지속을 위해서는 관측망의 사회적 그리고 학술적 유용성을 입증할 수 있는 근거가 지속적으로 요구된다. 본 연구에서는 한국지질자원연구원에서 운영하고 있는 지진관측망의 활용도를 학술적인 측면에서 검증하기 위하여 이 관측망에서 생산하고 배포한 지진파형 원시자료를 실제로 사용한 학술논문들을 취합하고 해당 논문의 서지 정보를 분석하였다. 1998-2025년 기간에 발표된 논문들을 대상으로, 다단계 검색으로 후보논문을 확보한 후 본문을 직접 확인하는 과정을 수행하여 대상 논문 227편을 선정하였다. 논문들의 서지 정보를 기반으로 연구 주제의 시간적 진화를 살펴 보았다. 분석 과정에서는 69개의 단어를 정하고 제목 및 초록에서 연도별 등장 빈도를 집계하였다. 또한, 이들 단어를 다시 5개 그룹으로 분류하여 전반적인 경향을 파악할 수 있도록 하였다. 논문 수의 증가와 함께 주제 범위 또한 점진적으로 확대되는 양상을 보인다. 주요 지구물리적 사건과 일부 연구 주제 사이에 시간적 상관성이 관찰되었다. 이 연구는 장기간 운영된 관측망의 학술적 활용도를 정량적으로 평가하고 자료 활용 논문 목록을 공개함으로써 관측 인프라의 효용성 평가 근거를 제공한다. 따라서 본 연구는 지속적인 관측 및 데이터 공유를 통한 지진관측망의 학술적 효용을 실증적으로 시사한다.

**주요어:** 지진파형 데이터, 서지 분석, 연구 경향

**ABSTRACT:** Long-term operation of seismic networks requires substantial financial and temporal investment, and their continued operation necessitates evidence demonstrating their scientific and societal utility. This study evaluates the academic utilization of the seismic network operated by the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources by analyzing peer-reviewed publications that used the raw seismic waveform data. A total of 227 articles published between 1998 and 2025 were identified through a multi-stage search procedure. Candidate publications were first collected through systematic queries and subsequently verified by manual inspection. Based on the compiled bibliographic dataset, the temporal evolution of research topics was examined. A set of 69 predefined words was used to quantify annual frequencies in the titles and abstracts. These words were further grouped into five thematic categories to capture overall research trends. The results indicate expansion of research topics, both in quantity and thematic scope, over time. In addition, major geophysical events showed temporal correlations with thematic concentration and subsequent development. This study provides a quantitative assessment of the academic utilization of a long-term seismic network and offers a curated list of publications that used its data. The findings demonstrate the scientific value of sustained observation and highlight the role of seismic networks in supporting the advancement of seismological research.

**Key words:** seismic waveform data, bibliometric analysis, research trends

## 1. 서론

국가적으로 많은 비용이 투자된 지진관측망을 지속적으로 유지하기 위해서는 운영 효율성을 판단할 합리적 그리고 지속적인 근거가 필요하다. 이를 위하여 학술적 측면에서도 관측망에서 제공된 자료가 지진 연구에 어떻게 활용되어 왔는지 정량적 검증 결과를 제시할 필요가 있다. 관측망의 활용도는 여러 방식으로 평가할 수 있다. 예를 들어, 배포된 원시자료를 개인 또는 기관이 수령한 횟수와 자료의 양을 수치화하는 것이다. 그러나 이러한 방식은 기록이 시작되기 이전의 이용 이력을 추적할 수 없으며, 자료 수령자가 원시자료를 실제로 어떻게 활용하였는지 파악하기 어렵다는 한계가 있다.

이에 비해 원시자료의 수령자가 일정 시간이 지난 뒤 공개한 연구 성과를 추적하는 방법이 가능하다. 사후적 접근은 자료 배포와 연구 성과 발표 사이에 시간 지연이 있지만, 과거의 활용 이력을 비교적 폭넓게 추적할 수 있으며 원시자료가 실제 연구에서 어떤 방식으로 활용되었는지 파악할 수 있다는 장점이 있다. 비슷한 방식으로 Staats *et al.* (2023)는 국제지진관측망(Global Seismographic Network; GSN)을 인용하거나 사용하고 있는 논문을 특정 기간에 대해 표본 조사하였다.

최근 국제지진관측망(GSN)의 장기간의 운영 이력에 관한 논문이 발표되어 GSN의 설립목적과 파급효과를 논의하였고, 이는 본 연구의 동기를 상당히 공유한다(Ringler *et al.*, 2022; Staats *et al.*, 2023; Wilson *et al.*, 2023; Davis, 2024; Davis *et al.*, 2024). 국제지진관측망은 전지구적인 규모에서 지진 및 핵실험, 그리고 지구내부구조를 연구하는데 활용되었다. 위 일련의 논문은 GSN의 발전 이력을 기록하고, 다양한 파급 효과를 종합하며, 과거와 현재의 여러 가지 재정적 지원에 대하여 사사하는 것을 목적으로 한다. 한국지질자원연구원 지진관측망(그림 1의 “Seismic”)은 과학기술정보통신부의 재정지원으로 운영되고 있으며, 원주 배열관측소(KSRS)는 원자력안전위원회와 핵실험금지조약기구(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization)에서, 공중음파관측망은 미국 공군기술응용센터(Air Force Technical Applications Center)으로부터 재정지원을 받고 있다.

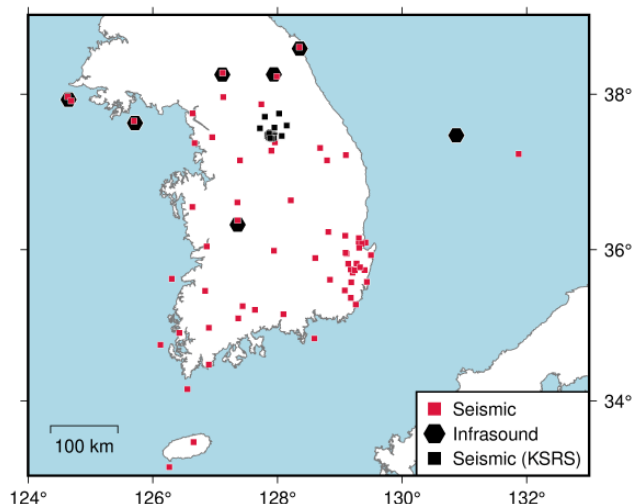
한국지질자원연구원에서는 당시 지진학적으로 관심도가 높은 동남권에서 1994년부터 디지털 지진관측소를 운영하기 시작하였다. 이후, 수도권, 충청 서부지역 등과 같이 지진연구와 지진재해 관심지역을 중심으로 관측망을 확장하여 현재 61개소의 상시지진관측소를 운영하고 있다(그림 1; KIGAM Earthquake Monitoring & Response Team, 2024; Lee *et al.*, 2024). 획득된 자료는 국제지진관측망의

방식으로 웹으로 공개되어 활용된다. 그 외에도 공중음파 관측소 7개소 그리고 25개 관측소로 구성된 원주 배열식 관측소도 운영하고 있다.

본 연구에서는 원시자료 활용의 대표적 결과물인 학술 논문을 대상으로 서지 정보를 취합하는 방법을 채택하였다. 피인용지수(impact factor)나 학술지 발행국을 구분하지 않고 접근 가능한 모든 학술지를 대상으로 하였다. 1998년부터 2025년까지 한국지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM) 지진연구센터에서 생산한 지진파형 원시자료를 이용한 논문 227편의 서지 정보를 수집하고 이를 분석 대상으로 하였다. 아울러, 대한민국에 소재한 지진 관측소에서 생산된 자료를 사용한 경우도 함께 집계하여 참고하였다. 이러한 접근은 논문 수가 지니는 정량적 지표와 함께 개별 논문이 반영하는 연구 주제의 다양성을 동시에 파악할 수 있다는 장점을 지닌다. 이를 통해 지진관측망이 학술 연구에서 수행해 온 역할과 연구 주제의 시간적 변화를 파악하고자 한다.

여기에서는 한국지질자원연구원에서 운영 중인 지진관측망을 대상으로 한다. 한국지질자원연구원에서 실제로 관측망을 운영하고 원시자료를 배포하는 세부 조직의 명칭은 시기별로 “지진연구센터”, “지진탐지연구실”, “복합지진탐지연구센터” 등으로 변화가 있었다. 연구 대상 기간인 1998-2025년 동안에는 “지진연구센터”라는 이름으로 원시자료가 배포되었으므로, 혼동을 피하기 위해 아래에서는 “지진연구센터”를 사용하도록 한다.

연구 주제의 시간적 변화를 파악하기 위하여 69개의 다양한 단어를 정하고, 논문의 제목과 초록에 해당 단어가 포함되었는지를 연도별로 집계하였다. 이러한 방식은 개별 논문의 주제 다양성을 반영하면서도 논문 간 연관성을 파



**Fig. 1.** Map of seismic and infrasound stations. The KSRS stands for the Korea Seismic Research Station.

악할 수 있다는 장점이 있다. 이를 통해 연구자가 시기별로 어떤 연구 주제에 관심을 보였는지를 파악할 수 있다.

지진연구센터의 원시자료는 지진 발생 기작과 관련 있는 지진의 성질에 관한 연구뿐만 아니라, 토모그래피와 수신함수 등의 방법을 이용한 지구 내부 구조 영상화 연구에도 활용되어 왔다. 1998-2025년 동안 발생한 다양한 사건은 지진파형 원시자료를 활용하는 방식과 관련이 있는지 살펴보고자 하였다. 북한이 2006년, 2009년, 2013년, 2016년, 2017년에 수행한 여섯 차례의 핵실험에서 발생한 지진 동과 대기진동은 지진계와 공중음파 관측장비에 기록되어 핵실험 위치와 크기, 자연지진과의 구분 등 진동원의 특성을 규명하는 연구에 활용되었다. 2016년 9월 12일에 발생한 경주지진과 2017년 11월 15일 포항지진은 1978년 대한민국의 현대적인 지진 기록을 시작한 이래 가장 큰 규모의 두 지진이었다.

본 연구에서는 한국지질자원연구원 지진연구센터에서 생산·배포한 지진파형 원시자료를 실제로 활용한 학술 논문을 수집하고, 이를 기반으로 연구 주제의 시간적 변화를 분석하고자 한다. 본문과 사사 및 데이터 출처를 확인하는 수동 검토를 통해 실제로 원시자료 사용이 확인된 논문을 최종 분석 대상으로 선정하였다. 이후 69개의 단어를 정의하여 제목과 초록에 나타나는 연도별 등장 빈도를 집계함으로써 연구 주제의 변화 양상을 정량적으로 분석하였다. 위와 같은 간접적 방식에 대비되는 방식은, 논문 목록 중에서 특정 논문을 선정하여 연구 결과의 예시를 서술하는 방식일 것이다. 특정한 논문을 선정하는 데에는 주관적인 선택이 개입될 수밖에 없다. 직접적인 논문 선택을 회피하고, 그 대신 69개의 단어를 선택하는 단계를 두어 대상이 되는 논문을 균등하게 다루고자 하였다. 장기간 운영된 지진관측망이 학술 연구에서 어떤 방식으로 활용되어 왔는지, 그리고 연구 주제의 확장 양상과 특정 사건 사이에 어떠한 시간적 상관성이 존재하는지를 시각화하고자 한다.

## 2. 방법

### 2.1. 검토 대상 목록 작성 및 수동 검토 조건

지진연구센터의 지진관측망을 사용하거나 사사에 밝힌 논문을 체계적으로 수집하기 위하여 두 단계의 검색 스크립트를 작성하였다. 첫 번째 단계에서는 지진연구센터 관측망과 관련된 논문을 다중 학술 API (Application Programming Interface)를 이용하여 검색하고, 중복 제거 및 관련성 필터링을 거쳐 후속 분석용 데이터셋을 생성하였다. 이용한 API는 OpenAlex와 Semantic Scholar이다. 검색 쿼리는 지진연구센터, KIGAM 및 한국 지진 관측과 연관된 단어로 다중으로 설정하였는데, “KIGAM seismic”, “KIGAM

earthquake”, “KIGAM seismograph”, “Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources seismic”, “한국지질자원연구원 지진”, “KIGAM network Korea”, “KIGAM broadband seismic” 등을 사용하였다. 수집 항목으로는 제목, 저자, 발행연도, DOI (Digital Object Identifier), 게재처, 초록을 포함하였다. 후처리에서는 DOI를 우선으로 하고 DOI가 없을 경우 제목 기준으로 동일 논문을 제거하였다.

두 번째 단계에서는 OpenAlex API만을 활용하여 검색 쿼리 수와 결과 규모를 확장하고, 단어 검색에 더해 소속기관 기준 검색을 추가함으로써 KIGAM 지진관측망 관련 논문 수집의 포괄성을 높였다. 검색 쿼리는 KIGAM 직접 언급, 전체 명칭 변형, 한국어 표현, 한국 지진망 관련 표현을 포함한 확장 쿼리 세트를 사용하였으며, “한국지질자원연구원 지진”, “지질자원연구원 관측”, “Korean seismic network”, “Korea seismograph network”, “Korean peninsula earthquake”, “South Korea seismic station” 등이 그 예이다. DOI, 제목 기준으로 동일 논문을 제거하였다.

위와 같은 방법으로 후보 논문 3,886편을 수집하였다. 학술 데이터베이스의 색인 범위에 따라 일부 논문이 누락될 가능성은 존재한다. 후보 논문을 대상으로 수동 검토 과정을 진행하였다. 수동 검토에서는 그림 1에 표시된 관측소 중 하나 이상의 관측소를 직접 사용한 논문만을 포함시켰다. 지진파형 원시자료를 직접 사용한 것이 아니라, 지진목록(earthquake catalog)만을 사용한 논문은 포함시키지 않았다. 수동 검토는 본 논문의 한 명의 저자가 3,886편의 논문 중 대상이 되는 논문을 선별하고, 이것을 다시 다른 저자가 재검하였다. 재검 중 목록에서 추가되거나 빠진 논문은 10편 이내이다. 이 논문은 자료의 사용 여부를 본문에 명시하지 않은 경우를 다수 포함한다. 그 결과, 한국지질자원연구원 지진연구센터에서 생산한 지진파형 원시자료를 실제로 사용하고 있음이 확인된 논문 227편을 최종 분석 대상으로 선정하였다. 또한, 한국지질자원연구원 외에 대한민국에 소재한 지진 관측소에서 생산된 데이터를 사용하고 있는 논문 수를 보조 자료로 함께 집계하였다.

### 2.2. 특정 단어가 나타나는 연도별 추이

연구 주제의 변화를 다양한 관점에서 파악하기 위해 69개의 단어를 정의하고 제목과 초록에 해당 단어가 포함된 논문의 연도별 수를 집계하였다. 단어는 다양한 연구 주제를 반영하도록 설정하였으며, 하나의 논문이 여러 단어에 동시에 포함되는 중복을 허용하였다. 모든 논문이 적어도 하나의 단어를 포함할 때까지 단어의 수를 늘려갔으며, 논문의 주요 결과나 방법론을 포함하도록 선정하였다. 단어 검색의 일관성을 확보하기 위하여 제목과 초록에 포함된 영문 단어는 대소문자, 단수·복수, 하이픈 사용 등에 따라

**Table 1.** List of words and groups. The words in parentheses indicate substitute terms defined to aggregate synonyms or semantically similar concepts under a single term.

| Group                                     | Words                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Number of words |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Seismic phenomena & Source processes (SS) | Anthropogenic, Aseismic, Directivity, Earthquake, Explosion (quarry), Fluid, Focal depth, Focal mechanism (moment tensor, fault plane solution), Induced (triggered), Intraplate, Megathrust, Micro-earthquake (micro-seismicity), Nuclear (North Korea, DPRK, Democratic People's Republic of Korea), Self-similarity, Earthquake sequence, Source parameter (source property, source properties), Stress, Stress drop, Volcano (eruption)                                                                        | 19              |
| Region & Tectonic setting (RT)            | China (sino), East Asia (NE Asia, Northeast Asia, North-east Asia), Gangwon, Gyeonggi Massif, Gyeongju, Gyeongsang (southeastern, south-eastern), Japan, Jeju (Cheju), Korean Peninsula (South Korea), Metropolitan (Seoul), Offshore (Yellow sea, East Sea, Sea of Japan), Okcheon Fold Belt (Okcheon Belt, Okcheon Metamorphic Belt, Ogcheon Fold Belt, Ogcheon Belt, Ogcheon Metamorphic Belt), Baekdu (Packdu, Backdu, Changbai), Pohang, Subduction (slab), Ulleung island (island of Ulleung), Yangsan fault | 17              |
| Wave propagation & Earth structure (WE)   | Ambient noise, Anisotropy (anisotropic), Asthenosphere, Attenuation (quality factor), Coda, Core-Mantle, Crust, Groundwater (ground water), Lg, Lithosphere, Mantle, MTZ (mantle transition zone, 410 km, 660 km, 670 km), Scattering, Surface wave (dispersion), Teleseismic, Velocity (speed, structure)                                                                                                                                                                                                         | 16              |
| Methods & Approaches (MA)                 | 3D (3-D, three dimensions), Coulomb, Deep learning (machine learning, convolutional neural network), Double difference (relocation, relocated, relocating), GMPE (ground motion prediction equation, GMM, ground motion model), Inversion, Receiver functions, Seismic hazard assessment, Site amplification, Tomography, VS30, Waveform inversion                                                                                                                                                                 | 12              |
| Observation, Instrumentation & Data (OID) | Early warning, Infrasound (seismo-acoustic), KSRS (Wonju), Magnitude scale, Metadata (sensor orientation, misorientation, seismometer orientation, orientation of borehole, orientation corrections, sensor response)                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5               |

일치 여부가 달라지지 않도록 전처리 과정을 거쳐 통일하였다. 또한 동의어 또는 유사한 개념을 하나의 단어로 집계하기 위하여 대체어를 설정하였다(표 1의 괄호). 예를 들어 “volcano”의 대체어로 “eruption”을 포함하여 두 표현이 동일한 개념으로 집계되도록 하였다. 정의된 단어는 표 1에 알파벳 순으로 제시하였다.

다음은 69개 단어를 선정한 의도이다. 본 연구에서 사용한 단어는 연구 주제의 성격에 따라 몇 가지 범주로 구분할 수 있다. 먼저 지진원 특성에 관한 연구를 나타내는 단어로는 source parameter, stress, stress drop, focal mechanism이 포함되며, 이는 지진 발생 과정과 단층 파열 특성을 해석하는 연구를 반영한다. 지구 내부 구조를 다루는 연구는 crust, mantle, mantle transition zone (MTZ)와 같은 단어로 나타나며, 지진파 자료를 이용한 지구 내부 속도 구조와 불연속면 연구를 포함한다. 분석 방법과 관련된 단어로는 tomography, inversion, receiver functions, ambient noise가 있으며, 이는 토모그래피, 역산 기법, 수신함수 분석, 상시 잡음 기반 구조 영상화와 같은 대표적인 지진학적 분석 방법을 반영한다. 또한 특정 사건을 중심으로 한 연구는 Gyeongju, Pohang, nuclear와 같은 단어로 나타나며, 각각 2016년 경주지진, 2017년 포항지진, 그리고 북한 핵실험과

관련된 연구를 포함한다. 마지막으로 연구 대상 지역을 나타내는 단어로 Japan, China, East Asia, Gangwon이 있으며, 이는 한반도뿐 아니라 동아시아 지역 규모에서 수행된 지진학 연구의 공간적 범위를 반영한다. 그 외, 표 1의 모든 단어의 의미와 도입한 의도는 부록 A를 참고할 수 있다. 선정된 단어는 본 연구의 목적에 따라 대표적인 지진학적 주제와 방법을 포괄하도록 구성되었으며, 동일 기준을 적용할 경우 재현 가능한 방식으로 정의되었다.

### 2.3. 공출현 분석

두 단어 사이의 관련성을 파악하기 위해 공출현 행렬을 만들고 계층적 군집분석을 수행하였다. 각 논문의 제목과 초록에서 표 1의 69개의 단어 중 임의의 두 단어 짝이 동시에 나타나는지를 확인하였다. 이후 두 단어 짝이 같은 논문에서 함께 나타난 횟수를 세어 공출현 행렬을 구성하였다. 단순 공출현 횟수는 자주 등장하는 단어의 영향이 클 수 있으므로, 각 단어 짝의 전체 출현 빈도를 고려해 공출현 값을 정규화하였다. 이를 통해 두 단어가 단순히 많이 등장했기 때문이 아니라, 서로 상대적으로 얼마나 자주 함께 나타나는지를 평가하였다. 정규화된 관련도를 거리 값으로 변환한 뒤, 계층적 군집분석을 수행하였다. 그 결과를 바탕으로

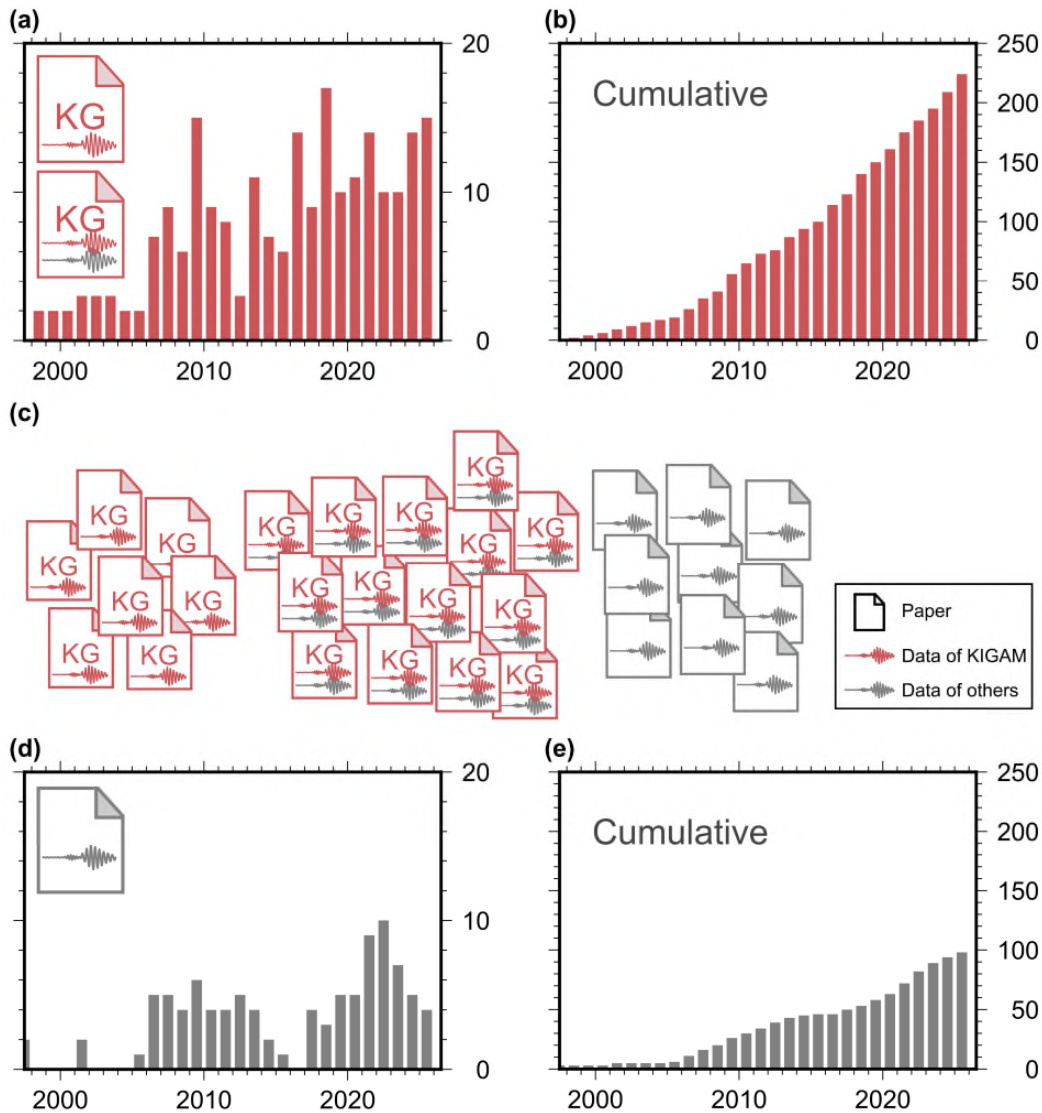


단어 짝의 순서를 재배열하였으며, 관련성이 높은 단어들이 서로 가까이 배치되도록 하였다. 이를 통해 단어 짝의 주제적 연관 구조를 시각적으로 해석하였다.

## 2.4. 단어의 다섯가지 분류

선정한 단어의 수가 69개로 많기 때문에, 이를 다시 5개 그룹으로 분류하여 추상화하였다(표 1). 이 단계에서는 단어는 단 하나의 분류에만 속하도록 하였다. 첫 분류는 “Seismic phenomena & Source processes (SS)”이며, 지진 발생과 관련된 물리적 현상과 지진원의 특성을 포함한다. 지진 유형, 단층 파열 과정, 응력 상태, 지진 규모 및 메커니

즘 등이 해당하며, 지진파의 발생 원인을 설명하는 핵심 요소이다. 19개 단어가 SS분류에 속한다. 두 번째 분류는 “Wave propagation & Earth structure (WE)”이며, 지진파의 전파 과정과 이를 지배하는 지구 내부 구조 및 물성을 다룬다. 감쇠, 산란, 분산과 같은 파동 현상과 지각, 맨틀, 암석권 등의 구조가 포함되며, 지진파 관측 결과를 통해 지구 내부를 해석하는 물리적 기반을 제공한다. 16개 단어가 WE 분류에 속한다. 세 번째 분류는 “Methods & Approaches (MA)”이며, 지진 자료로부터 물리적 정보를 추정하기 위한 해석 및 계산 기법을 포함한다. 역산, 토모그래피, 파형 분석, 경험식 모델, 그리고 머신러닝 기반 접근 등이 이에



**Fig. 2.** Number of papers using the seismic data of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM). (a) The number of papers by year. (b) Cumulative numbers of papers in (a). (c) Simplified chart representing the numbers of the papers using the KIGAM data only (reddish trace), the other networks located in South Korea (grey trace), and both networks. The KG stands for the KIGAM. (d) The number of papers which does not use the seismic data of KIGAM. (e) Cumulative numbers of papers in (d).

해당하며, 관측 데이터를 구조, 물성, 지진원 특성으로 변환하는 역할을 한다. 12개 단어가 MA 분류에 속한다. 네 번째 분류는 “Region & Tectonic setting (RT)”이며, 연구 대상 지역과 그 지역의 지질학적 및 판구조적 환경을 의미한다. 특정 지역, 단층대, 지괴 및 해역 등이 포함되며, 지진 활동과 구조 해석을 공간적 맥락에서 이해하도록 한다. 17개 단어가 RT 분류에 속한다. 마지막 분류는 “Observation, Instrumentation & Data (OID)”이며, 지진파의 관측, 기록, 그리고 데이터 관리 전반을 포함한다. 관측망, 지진계, 메타데이터, 보정 과정 등이 이에 해당하며, 신뢰성 있는 분석을 위한 기초 자료를 제공한다. 5개 단어가 OID 분류에 속한다.

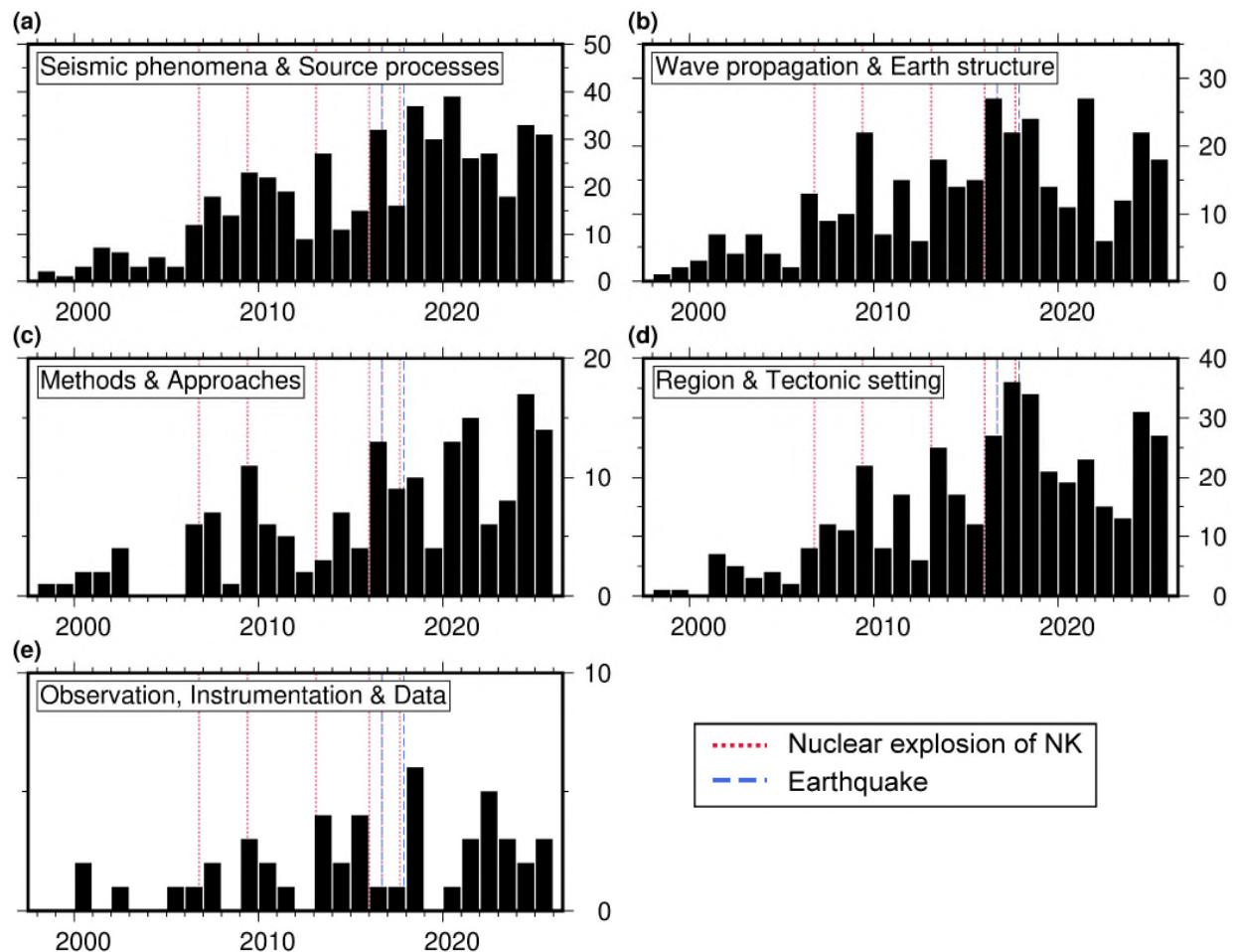
### 3. 결과

#### 3.1. 축적된 발표 논문 수

1998년부터 2025년까지 한국지질자원연구원의 원시자

료를 사용하고 있음을 밝힌 논문은 총 227편으로 집계하였다(그림 2). 해당 논문의 목록은 지오빅데이터 오픈플랫폼([https://doi.org/10.22747/paper\\_data.20260330.47](https://doi.org/10.22747/paper_data.20260330.47)) 그리고 제노도(Zenodo)에 업로드 하였다(<https://doi.org/10.5281/zenodo.20060982>). 연간 평균 논문 수는 8.0편이다. 한 편의 논문이 표 1의 단어와 평균 6.4개 연결된다. 2006년 이후 연간 발간 논문 수가 증가하는 경향을 보인다(그림 2). 2016년 이후에도 연간 발간 논문 수가 소폭 증가 추세를 나타낸다.

한국지질자원연구원 외, 대한민국에 소재하는 지진 관측소에서 생산된 데이터를 활용한 논문 수를 함께 집계하였다(그림 2c). 대상 관측소는 기상청, 국제지진관측망(Global Seismic Network)의 인천(INCN) 관측소(기상청 인천기상대), 한국수력원자력, 경주 고밀도 광대역 지진관측망(The Gyeongju Hi-density Broadband Seismic Network; Lim *et al.*, 2021; Heo *et al.*, 2024) 등의 자료이다. 조사기간 동안 한국지질자원연구원의 자료만을 활용한 논문 수는 77편이



**Fig. 3.** Annual trend of word group. (a) The word group “Seismic phenomena & Source processes (SS)”. (b) “Wave propagation & Earth structure (WE)”. (c) “Methods & Approaches (MA)”. (d) “Region & Tectonic setting (RT)”. (e) “Observation, Instrumentation & Data (OID)”. The NK stands for North Korea. Two earthquakes indicate the 2016 Mw 5.5 Gyeongju earthquake and the 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake.

다. 한국지질자원연구원의 데이터를 사용하면서 동시에 그 외 데이터를 함께 사용하는 논문 수는 150편이다. 그 외 데이터를 사용하지만 한국지질자원연구원의 데이터를 사용하지 않는 논문 수는 98편이다.

### 3.2. 단어 분류 그룹별 양상

1998년 이후 발표된 논문에서 지진연구 관심분야와 시간에 따른 변화를 알아보기 위하여 단어를 그룹화하고 간단한 통계 분석을 하였다. 조사에 사용한 전체 단어는 69개이고 이를 지진연구 방법(Methods & Approaches; MA), 관측·기기·데이터(Observation, Instrumentation & Data; OID), 지진 현상·지진원(Seismic phenomena & Source processes; SS), 파동 전파 및 지구 내부 구조(Wave propagation & Earth structure; WE) 그리고 지역·구조환경(Region & Tectonic setting; RT), 5개 그룹으로 분류하였다(표 1; 그림 3).

다섯 분류 모두 1998년 이후 연도별 집계·누적이 지속적으로 증가하는 패턴을 보이며, 증가 속도와 규모는 분류마다 비슷한 양상을 띤다(그림 3). 지진 현상·지진원(SS)과 지역·구조 환경(RT)은 전 기간에 걸쳐 누적치가 가장 크게 늘어 각각 2020년에 39회, 2017년에 36회로 정점을 이룬다. 다만, 다섯 분류 간 비교는 각 그룹이 포함하는 단어의 수가 다르기 때문에 제한적인 의미를 지닌다. 진원 정밀 위치 결정 및 진원 메커니즘 해석과 같은 지진원 분석 관련 연구와 광역 또는 특정지역을 대상으로 지진활동을 지구조 특성과 연계하여 해석하는 지역지진활동 분야가 관측망 자료의 주된 연구 활용 분야로 판단할 수 있다.

파동 전파·지구 내부 구조(WE) 역시 완만한 상승 곡선을 그리며, 2016년과 2021년에 27회로 정점을 이룬다(그림 3). 지진연구 방법(MA)은 2024년에 17회로 정점을 이룬다. 관측·기기·데이터(OID)는 모든 분류 가운데 연간 건수와 누적 규모가 일관되게 가장 적으나, 포함하는 단어의 수가 적은 것을 동시에 고려하여야 한다. 2018년에 6회로 정점을 이룬다.

### 3.3. 단어 별 양상

제목과 초록에 나타나는 단어의 연도별 분포를 살펴보면 연구 주제의 등장 시기와 변화 양상을 확인할 수 있다(그림 4, 5). 단어 “Nuclear”의 등장은 외부 사건과 시간적 상관성을 보이는 사례이다. 북한이 2006년에 시작하여 간헐적으로 수행한 6차례의 핵실험은 그에 관한 다양한 연구와 관련 있다(그림 5). “Early warning”은 2013년에 처음 등장하며, 조기 경보 시스템에 관한 연구가 최소 그 이전에 시작하였음을 시사한다(그림 4). “Gyeongju” 단어는 “경주지진”을 가리키는 용례로 사용되고 있으며, 시기마다 그

것이 지칭하는 지진이 달라진다(그림 4). Chang and Baag (2006)은 1999년 6월 2일에 발생한  $M_L$  3.4 경주지진을 가리키고 있다. Choi and Shim (2009)은 1999년 4월 24일(규모 3.3), 1999년 6월 2일(규모 4.0), 1999년 9월 12일(규모 3.2)의 지진을 가리키고 있다. 그 이후의 논문은 대부분 2016년 9월 12일 모멘트 규모( $M_w$ ) 5.5의 중규모 지진에 관한 연구가 주를 이룬다. 이와 비슷한 맥락에서, “Yangsan fault”는 수집기간 초부터 등장하며, 이후 2016년 경주지진과 관련된 연구에서 다시 나타난다(그림 5). 2016년 또는 2017년을 기점으로 처음 등장하는 단어는 “Coulomb”과 “Intraplate”를 포함하는데, 이는 지진의 발생 조건이나 환경에 관한 의미를 내포하는 단어들이다(그림 4). “Attenuation”은 2000년 초부터 계속 등장하고, 2010년부터는 그 수가 점차 줄어들면서, 동시에 “GMPE (GMM과 동의어)”는 2010년 중반부터 나타나기 시작한다(그림 4). 이는 같은 개념을 지칭하는 용어가 attenuation model, ground motion prediction equation (GMPE), ground motion model (GMM) 등으로 변천하는 과정과 관련이 있다.

### 3.4. 공출현 기반 연구 관계 해석

단어 세트의 공출현 관계를 분석한 결과, 전체 문헌에서 가장 뚜렷한 중심축은 한반도(Korean Peninsula), 지진(Earthquake), 속도(Velocity)와 관련된 단어군으로 나타났다(그림 6). 다만, 이 단어는 절대적인 출현 횟수가 높기 때문에(그림 4, 5), 다른 단어와의 사이에서도 높은 관련도를 보인다. 그림 6에 나타나는 또 다른 뚜렷한 단어군은 핵실험(Nuclear), 폭발(Explosion), 인프라스운드(Infrasound), Lg, KSRS (원주배열관측소)으로 구성되며, 이는 한반도 및 주변 지역에서 핵실험 또는 인공 지진원 탐지와 관련된 연구 흐름을 반영한다. 이와 별도로 경주(Gyeongju), 포항(Pohang), 유발(Induced), 응력(Stress), 응력강하(Stress drop), 진원 메커니즘(Focal mechanism), 지진원 특성(Source parameter) 등이 서로 가까이 배치되어, 주요 지진 사례와 지진원 분석 과정이 하나의 연관된 단어 군을 형성하고 있다.

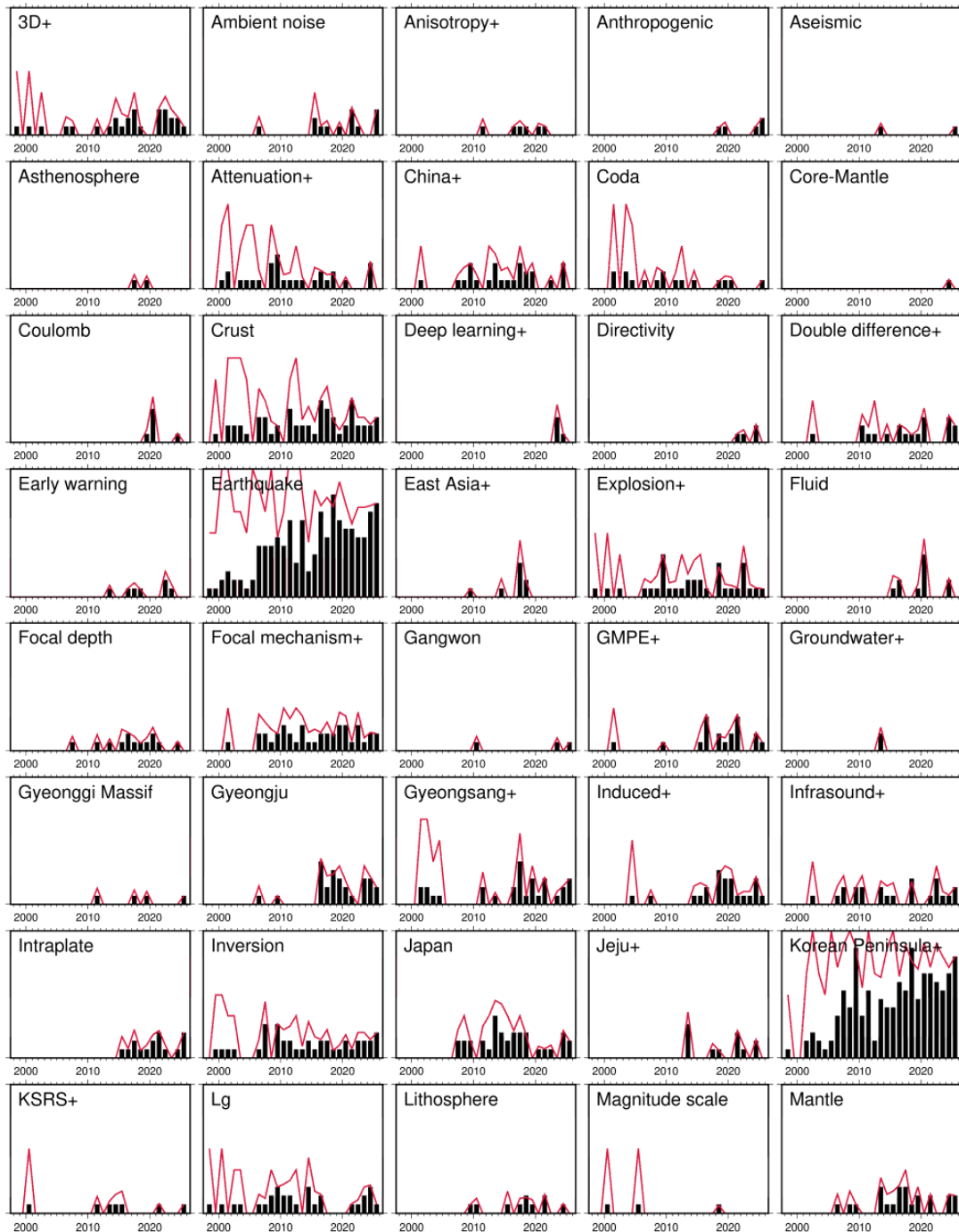
## 4. 토 의

### 4.1. 시간에 따른 양상

본 연구에서 집계한 것은 한국지질자원연구원이 제공·관리하는 지진 관련 데이터를 활용한 학술 논문의 연도별 등장 빈도이며, 69개의 단어를 선정하였고, 이를 다섯 가지 그룹으로 분류하여 시간에 따른 진화를 살펴보았다. 장기 추세에서 논문 수는 증가하여, 연구 공동체 내에서 한국지질자원연구원의 원시자료가 지진 현상 해석(SS), 내부 구조 추론(WE), 지역적 지진·구조 맥락(RT) 논의 등에 반복

적으로 인용 및 활용되어 왔음을 수치로 확인할 수 있다(그림 3, 4, 5). 단, 이것은 장기간 함께 운용되어온 다른 관측 네트워크(예로, 기상청, 한국수력원자력)와의 경쟁관계를 의미하지 않는다. 지진파형 원시자료는 연구자가 복수의 네트워크를 함께 사용하는 경우가 많다. 한국지질자원연구

원의 지진파형 원시자료를 사용하는 논문 227편 중에서 66%가 다른 네트워크의 자료를 함께 사용하고 있다(그림 2c). 종합하면, 본 통계는 한국지질자원연구원 지진파형 원시자료가 국내 및 관련 연구에서 실제 분석의 기반으로 기능해 왔다는 점을 출판 기반의 이용 실적으로 보여주며, 데



**Fig. 4.** Annual trends of the words from “3D” to “Mantle”. Histogram indicates the absolute number of the papers in a range of 0–15. The red solid line indicates its ratio to the annual total number of papers (Figure 2a) in a range of 0–1. The “+” beside the word indicates that alternative words are included. Time range is 1998–2025.



이터의 학술적 그리고 정책적 활용 가능성을 평가하는 데 참고 실증 자료로 쓰일 수 있다.

한국지질자원연구원의 61개 지진관측소의 평균 지진계 사이 거리는 40 km이며, 동남부에 집중하여 분포한다(그림 1). 이와 같은 관측소 분포는 해당 지역의 상대적으로 높은 지진 발생 빈도가 관측망의 초기 설계와 확장기간 동안 반영된 결과이다. 관측망이 해당 지역에서 발생하는 지진의 특성이나 전파 특성 연구에 활용되었다는 것은 단어 “Gyeongju (경주)”에서 확인할 수 있다(그림 4). 2016년 9월 12일 Mw 5.5의 경주지진을 기점으로 논문 수가 증가하였다(그림 4). 이것은 전체 논문수로 정규화한 곡선에서도 확인할 수 있다(그림 4).

위와는 달리, 한국지질자원연구원의 원시자료가 사용되지 않는 경우도 다수 존재함을 확인하였다(그림 2d, 2e). 예

를 들면, 경주 고밀도 광대역 지진관측망을 주로 사용한 경우(Lee *et al.*, 2023), 기상청 관측망을 사용한 경우(Houng, 2017; Hong *et al.*, 2023), 항구 또는 원자력 발전소 부지에 설치된 지진계 자료를 사용하는 경우(Choi, 2022; Seo and Won, 2022), 특정 지역에 임시 관측망을 설치하여 사용한 경우(Cho *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2020)를 들 수 있다. 대한민국 전반에 고르게 분포한 지진관측망을 필요로 하는 경우 기상청 관측망이 주로 사용되고 있다.

북한 지역에서 2006년, 2009년, 2013년, 2016년(동년에 복수 회), 2017년으로 보고된 핵실험과, 2016년 경주지진과 2017년 포항지진은 일부 단어의 출현과 시간적 상관성을 보인다(“Gyeongju”, “Pohang”, “Nuclear”; 그림 4, 5). 다만 이는 단일 기관의 원시자료와 특정 지구물리 사건을

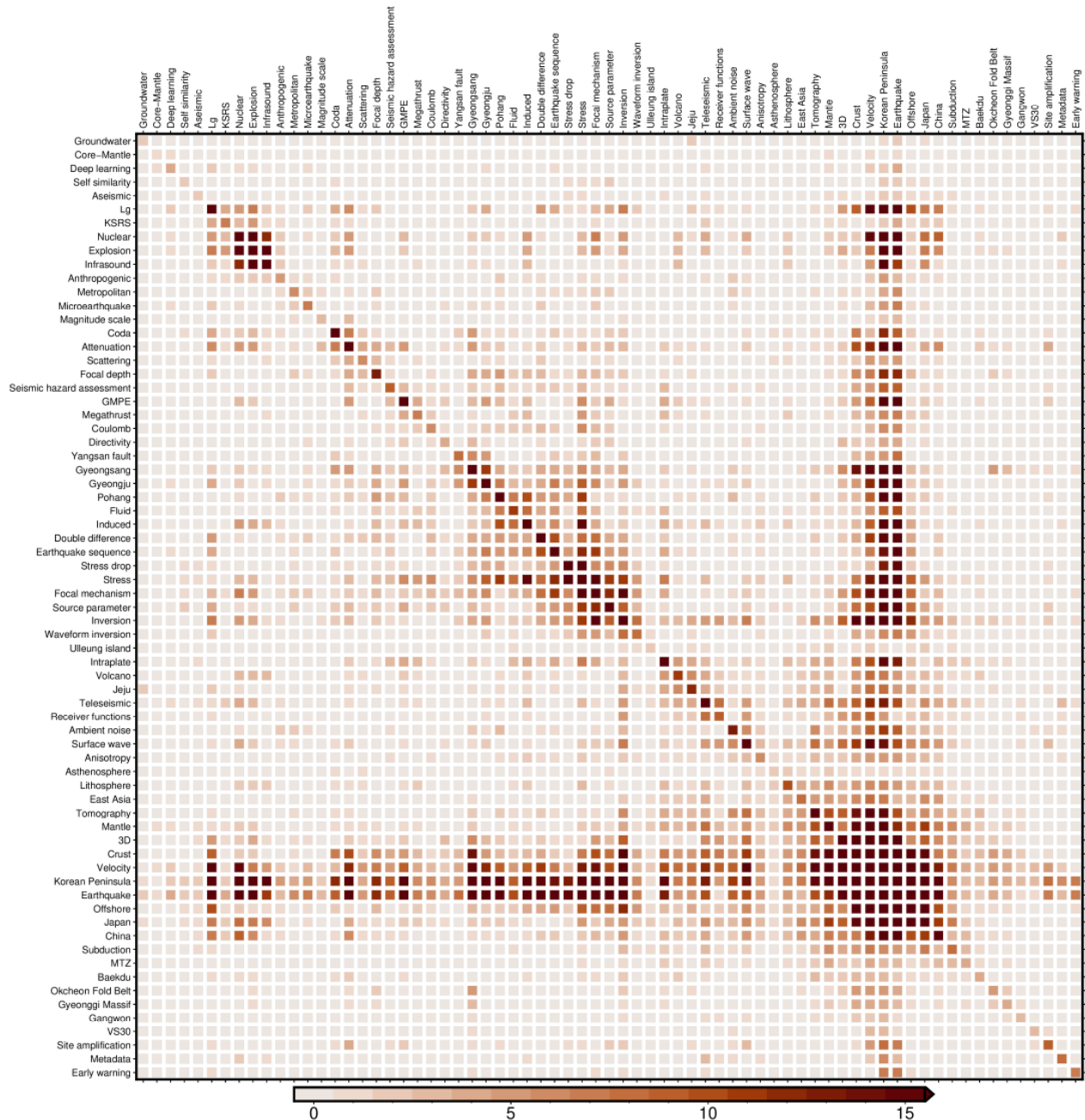


**Fig. 5.** Annual trends of the words from “Megathrust” to “Yangsan fault”. Histogram indicates the absolute number of the papers in a range of 0–15. The red solid line indicates its ratio to the annual total number of papers (Figure 2a) in a range of 0–1. The ‘+’ beside the word indicates that alternative words are included. Time range is 1998–2025. SHA: Seismic Hazard Assessment. ES: Earthquake sequence.

직접 연결하는 인과성에 관한 증거보다는, 연구 관심이 집중되는 시기와 주제적 대응 관계를 기술하는 기술적(descriptive) 분석으로 해석하는 것이 적절하다. 따라서 본 통계는 한국 지질자원연구원 지진파형 원시자료의 활용이 장기적으로 확대되어 온 점을 보여줄 뿐 아니라, 인공폭발과 국내 주요 지진과 같이 해석 수요가 높아진 시기와의 대응 관계를 후속 연구에서 세부 주제-서지 범위를 좁혀 검증할 여지를 남긴다.

#### 4.2. 국외에서의 활용

한국지질자원연구원의 지진파형 원시자료는 국외 연구자들에 의해 다양한 연구 분야에서 활용되었다. 이를 정량적으로 파악하기 위하여 주저자(첫 번째 저자)의 소속이 국외 기관에 해당하는 논문 29편을 선별하였다. 해당 논문에서는 한국지질자원연구원의 관측망 자료를 활용하여 핵심 현의 발생 시점과 위치를 정밀하게 추정하고, 자연지진과의 구분, 진원 메커니즘 해석, 배열자료 기반 탐지 성능 평



**Fig. 6.** Clustered heatmap of word-set co-occurrence. Cell colors indicate the number of papers in which the corresponding two words appear together in the title or abstract. The words are reordered using hierarchical clustering, so that closely related topics are placed near each other.

가 등 국제 핵실험 감시 체계와 연계된 분석에 관한 연구를 다수 포함한다(예로, Kværna *et al.*, 2007, 2021; Murphy *et al.*, 2013; Ford and Walter, 2015; Chiang *et al.*, 2018; Mustač *et al.*, 2020; Barama *et al.*, 2023).

이와 함께, 한국지질자원연구원 원시자료는 한반도 및 동아시아 지역의 지각 및 맨틀 구조 해석과 지진파 전파 특성 연구에도 활용되며, 감쇠구조 추정, 표면파 속도 분포, Pn파 분석 등 다양한 지구물리학적 연구에 기여하고 있다(예로, Ford *et al.*, 2009; Ichinose *et al.*, 2013; Witek *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2019). 또한 경주 및 포항 지진과 같은 국내 주요 지진 사례를 대상으로 하는 연구에도 활용되었다(Grigoli *et al.*, 2018; Uchide and Song, 2018; Ellsworth *et al.*, 2019). 나아가 일부 연구에서는 통가 화산 분출과 같은 대규모 지구물리 사건의 장거리 전파 특성을 분석하는데 한국지질자원연구원 원시자료가 포함되며(Matoza *et al.*, 2022), 이를 통해 해당 자료가 지역적 범위를 넘어 전 지구 지진 및 지구 시스템 연구에서도 활용되고 있음을 확인할 수 있다.

### 4.3. 본 고의 범위

본 연구에서 집계한 주제별 및 연도별 논문 수는 한국지질자원연구원에서 생산 및 배포한 원시자료를 활용한 연구자의 관심과 연구 방향을 반영한다. 해당 원시자료를 사용하지 않은 연구는 본 연구의 범위에 포함하지 않았다. 논문의 선정 여부는 개별 논문의 학술적 신뢰도나 중요성을 평가하는 기준과는 무관하다. 한국지질자원연구원 지진관측소는 약 30년 동안 장기간 운영되어 왔으며, 해당 자료는 국내외 연구자들에게 지속적으로 공유되어 왔다. 이는 연구자들이 시대에 따라 어떤 연구 목적과 동기로 해당 자료를 활용하였는지 연속적으로 파악할 수 있게 한다. 지진관측망의 구축과 운영은 사회 기반 시설에 해당하며 장기간에 걸친 상당한 비용과 노력이 필요하다. 이러한 인프라의 유지 여부는 궁극적으로 정책 결정 과정에서 판단되며, 그 판단을 위해서는 관측망이 학술 연구에서 어떠한 방식으로 활용되어 왔는지에 대한 객관적인 근거가 요구된다. 본 연구는 관측망에서 생산된 원시자료를 활용한 논문을 체계적으로 정리함으로써 이러한 평가에 활용될 수 있는 하나의 근거를 제공하고자 한다.

## 5. 결론

본 연구는 한국지질자원연구원 지진연구센터에서 생산·배포한 지진파형 원시자료를 이용한 학술논문을 1998년부터 2025년까지 체계적으로 수집하고, 그 서지 정보를 기반으로 연구 주제의 시간적 진화를 분석하였다. OpenAlex와

Semantic Scholar API를 이용한 다단계 검색과 수동 검토를 통해 3,886편의 후보 논문을 확보하였으며, 본문·사사·데이터 출처를 수동으로 확인하여 실제로 원시자료를 사용한 논문 227편을 선정하였다. 이 논문들의 제목과 초록을 기반으로 연구 경향을 분석하고, 69개의 단어와 5개 분류의 연도별 등장 빈도를 집계하여 연구 주제의 변화 양상을 파악하였다. 일체의 분석과정을 바탕으로, 많은 연구에서 한국지질자원연구원 지진 관측소의 원시자료가 단독 또는 타기관 자료와 공동으로 사용되었음을 확인하였다.

한국지질자원연구원 지진연구센터의 원시자료를 이용한 연구는 초기에는 지진·폭발 구분, 지진원 파라미터 추정, 감쇠 구조 및 기본적인 속도 구조 규명의 연구에 활용되었다. 또한, 상시잡음 기반 구조 영상화, 부지효과와 지진재해 평가, 핵실험 감시, 화산 및 해역 구조 연구 등으로 점차 확대되었다. 특히 북한 핵실험(2006-2017), 2016년 경주 지진, 2017년 포항지진과 같은 지구물리적 사건은 일부 선정한 단어와 시간적 상관성을 보이기도 한다. 최근에는 딥러닝 기반 자동 분석, 3차원 속도 구조 모델, VS30 및 지진 위험도 평가 등 자동화와 응용 지향 연구가 증가 추세를 보인다. 자료는 지진 발생 기작, 지구 내부 구조, 화산 활동, 핵실험 탐지와 같은 서로 다른 연구 분야에서 활용되고 있음을 보여준다. 또한 시간의 경과에 따라 연구 주제의 범위는 출판 논문의 절대적인 수와 함께 점차 확대되었다.

본 연구는 특정 지진관측망에서 생산된 원시자료를 실제로 사용한 논문을 체계적으로 정리하였다. 이러한 접근은 관측망과 같은 과학 기반 시설의 학술적 기여도를 평가하는 하나의 방법을 제공하며, 향후 지진관측망의 유지·확장과 관련된 정책적 판단에 참고가 될 수 있다.

## 감사의 글

사려 깊은 의견을 주신 편집위원과 익명의 두 심사위원에게 감사드린다. 한국지질자원연구원 지진연구센터의 관측망 운영에 공헌하신 모든 분들에게 감사드린다. 이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “한반도 지진활동 진단과 지진재해 예측 요소 기술 개발”의 지원을 받아 수행되었다.

## REFERENCES

- Abercrombie, R.E., 2021, Resolution and uncertainties in estimates of earthquake stress drop and energy release. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379, 20200131.
- Allen, R.M. and Melgar, D., 2019, Earthquake Early Warning: Advances, Scientific Challenges, and Societal Needs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47, 361-388.
- Aster, R.C., Borchers, B. and Thurber, C.H., 2013, *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Elsevier.

- Barama, L., Williams, J., Newman, A.V. and Peng, Z., 2023, Global Nuclear Explosion Discrimination Using a Convolutional Neural Network. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104443.
- Campillo, M. and Paul, A., 2003, Long-Range Correlations in the Diffuse Seismic Coda. *Science*, 299, 547-549.
- Cesca, S., Heimann, S. and Dahm, T., 2011, Rapid directivity detection by azimuthal amplitude spectra inversion. *Journal of Seismology*, 15, 147-164.
- Chang, S. and Baag, C.-E., 2006, Crustal Structure in Southern Korea from Joint Analysis of Regional Broadband Waveforms and Travel Times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 856-870.
- Chiang, A., Ichinose, G.A., Dreger, D., Ford, S.R., Matzel, E., Myers, S.C. and Walter, W.R., 2018, Moment Tensor Source-Type Analysis for the Democratic People's Republic of Korea-Declared Nuclear Explosions (2006-2017) and 3 September 2017 Collapse Event. *Seismological Research Letters*, 89, 2152-2165.
- Cho, H., Baag, C., Lee, J.M., Moon, W.M., Jung, H. and Kim, K. Y., 2012, P- and S-wave velocity model along crustal scale refraction and wide-angle reflection profile in the southern Korean peninsula. *Tectonophysics*, 582, 84-100.
- Choi, H., 2022, Preliminary strong ground motion simulation at seismic stations within nuclear power plant sites in South Korea by a scenario earthquake on the causative fault of 2016 Gyeongju earthquake. *Nuclear Engineering and Technology*, 54, 2529-2539.
- Choi, H. and Shim, T.M., 2009, Analysis on the source characteristics of three earthquakes nearby the Gyeongju area of the South Korea in 1999. *The Journal of Engineering Geology*, 19, 509-515.
- Davis, P., 2024, Development and Operation of a Global-Scale Seismographic Network: The IRIS/USGS GSN. *Perspectives of Earth and Space Scientists*, 5, e2023CN000225.
- Davis, P., Berger, J., Mellors, R., Ebeling, C. and Auerbach, D., 2024, The IDA Very Long Period and Very Broadband Networks. *Seismological Research Letters*, 95, 1533-1542.
- Ding, S., Ni, S., Kim, Y. and He, X., 2019, Constraints on crust-mantle transition zone with Pn waveforms: A case study of eastern China and southern Korean Peninsula. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 289, 11-19.
- Douglas, J. and Edwards, B., 2016, Recent and future developments in earthquake ground motion estimation. *Earth-Science Reviews*, 160, 203-219.
- Dwyer, J.J., Herrmann, R.B. and Nuttli, O.W., 1983, Spatial attenuation of the Lg wave in the Central United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 781-796.
- Ekström, G. and Busby, R.W., 2008, Measurements of Seismometer Orientation at USArray Transportable Array and Backbone Stations. *Seismological Research Letters*, 79, 554-561.
- Ellsworth, W. L., 2013, Injection-Induced Earthquakes. *Science*, 341, 1225942.
- Ellsworth, W.L., Giardini, D., Townend, J., Ge, S. and Shimamoto, T., 2019, Triggering of the Pohang, Korea, Earthquake (Mw 5.5) by Enhanced Geothermal System Stimulation. *Seismological Research Letters*, 90, 1844-1858.
- Ford, S.R., Phillips, W.S., Walter, W.R., Pasyanos, M.E., Mayeda, K. and Dreger, D.S., 2009, Attenuation Tomography of the Yellow Sea/Korean Peninsula from Coda-source normalized and direct Lg amplitudes. *Pure and Applied Geophysics*, 167, 1163-1170.
- Ford, S.R. and Walter, W.R., 2015, International Monitoring System Correlation Detection at the North Korean Nuclear Test Site at Punggye-ri with Insights from the Source Physics Experiment. *Seismological Research Letters*, 86, 1160-1170.
- Furumura, T. and Kennett, B.L.N., 2005, Subduction zone guided waves and the heterogeneity structure of the subducted plate: Intensity anomalies in northern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110, B10302.
- Grigoli, F., Cesca, S., Rinaldi, A.P., Manconi, A., López-Comino, J.Á., Clinton, J., Westaway, R., Cauzzi, C., Dahm, T. and Wiemer, S., 2018, The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science*, 360, 1003-1006.
- Gu, Y.J. and Dziewonski, A.M., 2002, Global variability of transition zone thickness. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107, 2135.
- Heo, D., Kang, T.-S., Kim, M., Ahn, B.S., Lim, H., Han, J., Kim, K.-H., Rhie, J., Kim, Y. and Ree, J.-H., 2024, New insights on seismic activity in the southeastern Korean Peninsula from the Gyeongju Hi-density Broadband Seismic Network (GHBSN). *Geosciences Journal*, 28, 319-333.
- Hong, T., Lee, J., Lee, J., Park, S., Kim, B. and Choi, S., 2023, Unravelling a midcrustal seismogenic fault structure from a seismic sequence and geophysical data: Application to the 28 October 2022  $M_L$  4.1 Goesan earthquake in the central Korean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 235, 1117-1129.
- Houng, S.E., 2017, Discrimination between Natural Earthquakes and Explosions Based on the Azimuthal Distribution of S/P Amplitude Ratios. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 218-229.
- Ichinose, G.A., Woods, M.T. and Dwyer, J., 2013, Mantle attenuation estimated from regional and teleseismic P-waves of deep earthquakes and surface explosions. *Pure and Applied Geophysics*, 171, 485-506.
- Jang, H., Kim, Y., Lim, H. and Clayton, R.W., 2019, Seismic attenuation structure of southern Peruvian subduction system. *Tectonophysics*, 771, 228203.
- Kang, S.Y., Kim, K., Chiu, J. and Liu, L., 2020, Microtremor HVSR analysis of heterogeneous shallow sedimentary structures at Pohang, South Korea. *Journal of Geophysics and Engineering*, 17, 861-869.
- KIGAM Earthquake Monitoring & Response Team, 2024, 2024 Series of seismic activity, in the Korean Peninsula. KIGAM reports (in Korean).
- Kværna, T., Gibbons, S.J. and Näsholm, S.P., 2021, CTBT seismic monitoring using coherent and incoherent array processing. *Journal of Seismology*, 25, 1189-1207.
- Kværna, T., Ringdal, F. and Baadshaug, U., 2007, North Korea's Nuclear Test: The Capability for Seismic Monitoring of the North Korean Test Site. *Seismological Research Letters*, 78, 487-497.



- Langston, C.A., 1979, Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84, 4749-4762.
- Lee, M.-G., Kim, Y., Cho, H.-I., Kim, H.-S., Sun, C.-G., Seong, Y.-J. and Che, I.-Y., 2024, KIGAM Quake: An open platform for seismological data and earthquake research information. *Geomechanics and Engineering*, 37, 279-291.
- Lee, S., Song, J.-H., Heo, D., Rhie, J., Kang, T.-S., Choi, E., Kim, Y., Kim, K.-H., and Ree, J.-H., 2023, Crustal and uppermost mantle structures imaged by teleseismic P-wave traveltime tomography beneath the Southeastern Korean Peninsula: implications for a hydrothermal system controlled by the thermally modified lithosphere. *Geophysical Journal International*, 235, 1639-1657.
- Lim, H., Kim, Y., Kwon, K.B., Han, J., Ahn, B.S., Chai, G., Choi, Y., Heo, D., Jung, Y., Kang, H., Koh, M.H., Kwon, J., Park, J. Y., Seo, M.-S., Son, Y.O., Han, S., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, K.-H. and Ree, J.-H., 2021, Deployment of the linear array with geophones on the fault zone of the 2016 Mw 5.5 Gyeongju earthquake. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 741-746.
- Lin, J. and Stein, R.S., 2004, Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109, B02303.
- Long, M.D. and Silver, P.G., 2009, Shear Wave Splitting and Mantle Anisotropy: Measurements, Interpretations, and New Directions. *Surveys in Geophysics*, 30, 407-461.
- Marshall, P.D. and Basham, P.W., 1972, Discrimination Between Earthquakes and Underground Explosions Employing an Improved Ms Scale. *Geophysical Journal International*, 28, 431-458.
- Matoza, R.S., Fee, D., Assink, J.D., Iezzi, A.M., Green, D.N., Kim, K., Toney, L., Lecocq, T., Krishnamoorthy, S., Lalande, J.-M., Nishida, K., Gee, K.L., Haney, M.M., Ortiz, H.D., Brissaud, Q., Martire, L., Rolland, L., Vergados, P., Nippess, A. and Wilson, D.C., 2022, Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, 377, 95-100.
- Murphy, J., Stevens, J.L., Kohl, B.C. and Bennett, T.J., 2013, Advanced seismic analyses of the source characteristics of the 2006 and 2009 North Korean nuclear tests. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 2353-2365.
- Mustać, M., Hejrani, B., Tkalčić, H., Kim, S., Lee, S.-J. and Cho, C.-S., 2020, Large isotropic component in the source mechanism of the 2013 Democratic People's Republic of Korea nuclear test revealed via a hierarchical Bayesian inversion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110, 2966-2981.
- Ringler, A.T., Anthony, R.E., Aster, R.C., Ammon, C.J., Arrowsmith, S., Benz, H., Ebeling, C., Frassetto, A., Kim, W.-Y., Koelemeijer, P., Lau, H.C.P., Lekić, V., Montagner, J.P., Richards, P.G., Schaff, D.P., Vallée, M. and Yeck, W., 2022, Achievements and Prospects of Global Broadband Seismographic Networks After 30 Years of Continuous Geophysical Observations. *Reviews of Geophysics*, 60, e2021RG000749.
- Scherbaum, F., 2001, *Of Poles and Zeros*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Seo, J. and Won, D., 2022, Characteristics of site-specific response using the measured data from seismic accelerometers in Pohang Yeongil New Port under 9.12 and Pohang earthquakes. *Scientific Reports*, 12, 19249.
- Shapiro, N.M. and Campillo, M., 2004, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31, L07614.
- Staats, M., Aderhold, K., Hafner, K., Dalton, C., Flanagan, M., Lau, H., Simons, F.J., Vallée, M., Wei, S.S., Yeck, W., Frassetto, A., and Busby, R., 2023, Inconsistent Citation of the Global Seismographic Network in Scientific Publications. *Seismological Research Letters*, 95, 1478-1485.
- Uchida, N. and Bürgmann, R., 2021, A decade of lessons learned from the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000725.
- Uchide, T. and Song, S.G., 2018, Fault rupture model of the 2016 Gyeongju, South Korea, earthquake and its implication for the underground fault system. *Geophysical Research Letters*, 45, 12058-12067.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L., 2000, A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1353-1368.
- Watson, L.M., Iezzi, A.M., Toney, L., Maher, S.P., Fee, D., McKee, K., Ortiz, H.D., Matoza, R.S., Gestrich, J.E., Bishop, J.W., Witsil, A.J.C., Anderson, J.F. and Johnson, J.B., 2022, Volcano infrasound: Progress and future directions. *Bulletin of Volcanology*, 84, 44.
- Wilson, D.C., Hutt, C.R., Gee, L.S., Ringler, A.T. and Anthony, R.E., 2023, Global Seismic Networks Operated by the U.S. Geological Survey. *Seismological Research Letters*, 95, 1578-1590.
- Witek, M., van der Lee, S. and Kang, T., 2014, Rayleigh wave group velocity distributions for East Asia using ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 41, 6627-6635.
- Zhu, W. and Beroza, G.C., 2019, PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophysical Journal International*, 216, 261-273.

# Appendix A. Meanings and selection rationale of the 69 words.

“3D”는 3차원을 의미한다. 역산이나 포워드 계산의 모델 도메인이 3차원인 연구가 포함되기를 의도하였다. “Coulomb”은 쿨롱응력(Coulomb Failure Stress)의 개념을 사용한 연구(Lin and Stein, 2004)를 포함하기를 의도하였다. “Deep learning”은 딥러닝을 이용하거나 그에 관한 연구(Zhu and Beroza, 2019)를 포함하기를 의도하였다. “Double difference”는 Waldhauser and Ellsworth (2000)의 지진 위치 재결정 방법을 사용한 논문을 포함하기를 의도하였다. “GMPE”는 거리와 규모에 따라 지진동의 크기를 계산하는 식에 관한 연구(Douglas and Edwards, 2016)를 포함하기를 의도하였다. “Inversion”은 역산(Aster *et al.*, 2013)을 이용한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Receiver functions”은 수신함수(Langston, 1979)를 이용한 지진파 불연속면에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Seismic Hazard Assessment”는 지진 재해도에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Site amplification”은 부지 진폭 효과에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Tomography”는 지진파 토모그래피 또는 지진파 단층촬영 기법을 활용한 연구를 포함하기를 의도하였다. “VS30”는 지하 30 m 깊이에서의 S파 속도를 가리키는 VS30에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Waveform inversion”은 파형역산을 이용한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Early warning”은 지진 조기 경보 시스템 또는 그것에 관한 알고리즘에 대한 연구(Allen and Melgar, 2019)를 포함하기를 의도하였다. “Infrasound”는 20 Hz 미만의 저주파 음향을 이용한 연구(Watson *et al.*, 2022)를 포함하기를 의도하였고, “seismoacoustic”과 별도로 구분하지 않고 대체어로 두었다. “KSRS”는 원주배열관 측소를 사용하거나 그에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Magnitude scale”은 규모식에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Metadata”는 지진 관측소의 기기응답(Scherbaum, 2001)이나 센서 방위각(Ekström and Busby, 2008) 등의 메타데이터에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “China” 또는 “Sino”는 중국을 의미한다. “East Asia”는 동아시아 또는 동북아시아에 대한 광역적인 연구를 포함하기를 의도하였다. “Gangwon”은 강원도 지역에 관한 속도구조나 지진에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Gyeonggi Massif”은 경기육괴와 관련있는 연구를 포함하기를 의도하였다. “Gyeongju”는 1997년 6월 26일 지역 규모( $M_L$ ) 4.2 또는 2016년 9월 12일에 발생한 Mw 5.5 지진에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Gyeongsang”은 경상도 또는 경상분지(Gyeongsang Basin)의 속도구조나 지진에 관한 연구가 포함되기를 의도하였다. “Japan”은 일본을 의미한다. “Jeju”는 화산섬 제주도에 관한 연구를

포함하기를 의도하였다. “Korean Peninsula”은 한반도 전반에서 발생하는 지진이나 속도 구조에 관한 연구를 포함하기를 의도하였고, “South Korea”를 대체어로 두었다. “Metropolitan”은 서울과 같은 대도시와 관련있는 지진이나 속도구조에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Offshore”는 해역 환경이나 그것에서 발생한 지진에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Yellow Sea”, “East Sea”, “Sea of Japan”을 대체어로 두었다. “Okcheon Fold Belt”는 옥천대와 관련있는 연구를 포함하기를 의도하였다. “Baekdu”는 백두산에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Pohang”은 2017년 11월 15일 포항에서 발생한 Mw 5.5의 지진에 관한 연구나 그것의 여진에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Subduction”은 섭입대 또는 섭입시스템과 관련있는 연구를 포함하기를 의도하였다. “Slab”을 대체어로 두었다. “Ulleung island”는 화산섬 울릉도에 관한 연구를 포함하기를 의도하였고, 울릉분지(Ulleung basin)와 구분하기 위하여 단어에 “island”를 추가하였다. “Yangsan fault”은 양산단층과 관련있는 연구를 포함하기를 의도하였다. “Anthropogenic”은 사람의 활동을 대상으로 하는 연구를 포함하는 것을 의도하였다. “Aseismic”은 유의미한 지진파 방사를 동반하지 않는다는 의미이다. “Directivity”는 지진의 파쇄 방향성(Cesca *et al.*, 2011)에 대해 논의한 논문을 포함하기를 의도하였다. “Earthquake”는 지진 전반에 관한 논문을 포함하기를 의도하였다. “Explosion”은 인공폭발을 대상으로 하는 연구(Marshall and Basham, 1972)를 포함하기를 의도하였다. “Fluid”는 유체를 의미한다. “Focal depth”는 지진의 발생 깊이를 의미한다. “Focal mechanism”은 주향이동, 역단층 등의, 지진의 진원 메커니즘을 의미하고, 이를 “Moment tensor”와 별도로 구분하지 않고 대체어로 두었다. “Induced”는 유발 지진에 관한 연구(Ellsworth, 2013)를 포함하기를 의도하였고, “triggered”를 따로 구분하지 않는 대체어로 두었다. “Intraplate”는 판내부 환경에서 발생한 지진에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Megathrust”는 2011년 3월 11일 모멘트 규모 9.0-9.1의 도호쿠-오기 지진(Uchida and Bürgmann, 2021)이나 그 밖의 대지진에 관련된 연구를 포함하기를 의도하였다. “Micro-earthquake”는 작은 규모의 지진에 관한 연구를 포함하기를 의도하였고, “micro-seismicity”를 별도로 구분하지 않는 대체어로 두었다. “Nuclear”은 북한의 2006년, 2009년, 2013년, 2016년, 2017년 핵실험에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “North Korea”등을 대체어로 두었다. “Self-similarity”은 지진의 규모에 따른 자기 유사성에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “earthquake sequence”는 특정 지역에 지진이 지속적으로 발생하는 현상을 일컫기를 의도하였다. “Source parameter”는

코너주파수, 지진 파쇄 면적, 응력 강하 따위의 지진원 특성에 관한 연구를 포함하기를 의도하였고, “source property”, “corner frequency”를 대체어로 두었다. “Stress”은 응력에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Stress drop”은 응력강하와 관련있는 연구(Abercrombie, 2021)를 포함하기를 의도하였다. “Volcano”는 화산에 관한 연구를 포함하기를 의도하였고, “Eruption”을 대체어로 두었다. “Ambient noise”은 지진파 배경잡음을 의미한다. 지진파 배경 잡음 토모그래피에 관한 연구(Campillo and Paul, 2003; Shapiro and Campillo, 2004)를 포함하기를 의도하였다. “Anisotropy”는 지진파 비등방성을 의미하며, 그에 관한 연구(Long and Silver, 2009)를 포함하도록 의도하였다. “Asthenosphere”는 연약권을 의미한다. “Attenuation”은 지진파 감쇠 또는 감쇠 구조에 관한 연구(Jang *et al.*, 2019)를 포함하기를 의도하였다. “Coda”는 P파 또는 S파의 뒤를 따르는 파동을 이용하는 연구를 포함하기를 의도하였다. “Core-Mantle”은 외핵과 맨틀의 경계를 언급하는 논문을 포함하는 것을 의도하였다. “Crust”는 지구의 가장 바깥 층인 지각의 구조나 지각 지진에 관한 연구를 포함

하기를 의도하였다. “Groundwater”는 지하수를 의미하고, 지하수와 지진파의 상호작용에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “Lg”는 Lg파를 이용하거나 그것을 대상으로 하는 연구(Dwyer *et al.*, 1983)를 포함하기를 의도하였다. “Lithosphere”는 암석권을 의미한다. “Mantle”은 최상부 맨틀, 상부맨틀의 속도 구조에 관한 연구를 포함하기를 의도하였다. “MTZ”는 맨틀 전이대(Mantle Transition Zone)에 관한 연구(Gu and Dziewonski, 2002)를 포함하기를 의도하였다. “Scattering”은 지진파 산란을 대상으로 하거나 그것을 이용한 연구(Furumura and Kennett, 2005)를 포함하기를 의도하였다. “Surface wave”는 표면파를 이용한 연구나 그것을 대상으로 하는 연구를 포함하기를 의도하였고, “Dispersion”을 대체어로 두었다. “Teleseismic”은 원거리 지진(teleseismic earthquake) 또는 원거리 지진파(teleseismic wave)등의 단어를 사용하는 논문을 포함하기를 의도하였다. “Velocity”는 지진파 전파 속도에 관한 연구 또는 그것을 이용하는 연구를 포함하기를 의도하였고, “Speed”, “Structure”를 대체어로 두었다.