



Article

제주 지질유산의 지표·지하·표본 자료의 GeologicUnit 중심 통합 구조화: 수월봉·성산일출봉·만장굴 사례

김현경^{1,2}, 윤석훈^{1,*}

¹제주대학교 지구해양학과

²제주특별자치도민속자연사박물관

A GeologicUnit-centered framework for integrating surface, subsurface, and specimen data for Jeju geoheritage: case studies of Suwolbong, Seongsan Ilchulbong, and Manjanggul

Hyun-Kyung Kim^{1,2}, Seok-Hoon Yoon¹

¹Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

²Jeju Special Self-Governing Province Folklore and Natural History Museum, Jeju 63270, Republic of Korea

Received: April 23, 2026 / Revised: May 29, 2026 / Accepted: June 22, 2026

*Corresponding author: +82-64-754-3436 / E-mail: shyoon@jejunu.ac.kr

요약: 제주 지질유산 자료는 지표 조사자료, 시추주상도, 박물관 표본, 문헌 및 해설자료로 분산되어 있어, 동일 지질현상에 대한 지표·지하·표본 증거를 함께 조회하고 비교하기 어렵다. 본 연구는 지질단위(GeologicUnit)를 중심으로 이들 자료를 연결·구조화하는 정보구조 J-GHO를 제안하고, 수월봉·성산일출봉·만장굴 사례에 적용하였다. 수월봉에서는 반경 2 km 내 공개 시추공 13개와 총 122개 구간을 구조화하여 상부 응회암, 하부 현무암-클링커 반복, 사암 및 특이 암상의 분포를 비교 가능하게 하였다. 성산일출봉에서는 육상 응회구와 해저 시추·해저 분화구 자료를 복수의 지질단위를 통해 연결하였고, 만장굴은 용암동굴 지형, 보존관리 조사자료, 표본자료를 동일한 해석 틀 안에서 연결하는 구조를 제시하였다. 그 결과 J-GHO는 분산된 자료의 대응 관계와 자료 공백을 보다 명시적으로 드러내고, 연구, 보전, 해설 및 박물관 활용을 위한 통합 질의와 자료 연계의 기반으로 활용될 수 있음을 보여준다.

주요어: 제주 지질유산, 지질단위, 통합해석, 정보구조화, 박물관 표본

ABSTRACT: Jeju geoheritage data are dispersed across field survey records, borehole logs, museum specimens, literature, and interpretive resources, making integrated retrieval of surface, subsurface, and specimen-based evidence difficult. This study proposes J-GHO, an information structure that connects and organizes these resources around GeologicUnit as a common geological framework, and applies it to the cases of Suwolbong, Seongsan Ilchulbong, and Manjanggul. At Suwolbong, 13 public boreholes and a total of 122 borehole intervals within a 2 km radius were structured, enabling comparison of upper tuff deposits, underlying basalt-clinker alternations, sandstone-bearing intervals, and exceptional lithologies. At Seongsan Ilchulbong, the terrestrial tuff cone was linked with offshore borehole and submarine crater data through multiple GeologicUnits. At Manjanggul, lava-tube geomorphology, conservation-management records, and specimen data were connected within a common interpretive framework. The results demonstrate that J-GHO makes correspondences and evidence gaps among dispersed resources more explicit and can serve as a foundation for integrated querying and data linkage to support research, conservation, interpretation, and museum applications.

Key words: Jeju geoheritage, GeologicUnit, integrated interpretation, information structuring, museum specimens

1. 서론

제주도는 UNESCO 세계자연유산이자 UNESCO 세계 지질공원으로서 단성화산체, 용암동굴, 해안 노두 등 다양한 화산지형과 지질유산이 밀집한 지역이다(Jeon *et al.*, 2024). 그러나 이러한 지질유산과 관련된 자료는 각 기관과 시스템에서 지표 조사자료, 공개 시추주상도, 박물관 표본, 학술문헌, 보존관리 보고서, 서사·해설자료 등의 형태로 축적·관리되고 있으나, 동일한 지질현상에 대한 지표·지하·표본자료를 함께 조회하고 비교하기는 쉽지 않다. 이러한 자료 조건은 연구의 효율을 낮출 뿐 아니라, 지질공원 해설, 박물관 전시 및 교육, 보존관리 판단의 일관성도 약화시킨다.

특히 공개 시추주상도 자료는 이미 상당량 축적되어 있으나, 각 시추공의 심도별 암상 정보가 사례 중심으로 재구성되어 있지 않기 때문에 특정 지질명소(geosite)나 지질단위와 연계된 질의에 직접 활용되기 어렵다. 또한 성산일출봉과 만장굴 사례에서는 각각 해저 조사자료와 보존관리 조사자료가 함께 고려되어야 하므로, 단일 자료군만으로는 화산체 구조와 형성과정, 그리고 활용 맥락을 충분히 설명하기 어렵다. 한국의 지질유산 정보화와 관련해서도 이미 공공 부문과 학술 연구에서 일정한 축적이 이루어져 왔다. 국가지질공원사무국과 국가유산청은 지질유산 및 지형·지질 관련 조사와 기록화를 수행해 왔고, 국가유산 공간정보 서비스와 한국지질자원연구원의 공개 플랫폼은 관련 정보의 접근 기반을 제공하고 있다. 국내 학술 연구에서도 지질유산 정보 구축과 관리방안(Lee and Lee, 2015; Ju and Woo, 2019) 및 권역별 DB 구축 사례가 제시된 바 있다. 그러나 이러한 기존 체계는 주로 목록화, 분포 파악, 공간 조회, 기관별 관리에 초점을 두고 있어, 동일 사례 안에서 지표 조사자료, 지하 시추구간, 박물관 표본, 조사보고서, 서사·해설자료를 공통 해석 기준 아래 함께 연결하여 조회하는 데에는 한계가 있다.

제주 지질유산 자료는 단순히 많이 수집하는 것만으로 충분하지 않으며, 컴퓨터가 자료의 의미와 관계를 읽고 질의할 수 있도록 어떤 형식과 기준으로 정리하느냐가 중요하다. GeoSciML, GWML2.2, GeoSPARQL, CIDOC CRM과 같은 국제표준은 지질단위, 시추구간, 공간정보, 표본·서사 맥락을 일정한 형식으로 표현할 수 있는 기준을 제공한다. 이러한 기준을 고려하여 각 기관의 메타데이터가 생산·관리될 때, 분산된 자료는 이후 온톨로지를 통해 의미적으로 연결될 수 있다. 본 연구는 이와 같은 관점에서 지표 조사자료, 지하 시추자료, 박물관 표본, 조사보고서 및 서사·해설자료를 하나의 저장소에 단순히 모으는 방식보다 공통의 지질학적 기준 아래 연결하는 구조가 필요하다고 보았다.

지질명소(geosite)가 장소성과 관리 단위를 제공한다면

(Brilha, 2016), 지질단위(GeologicUnit)는 지표 노두, 시추구간, 표본 산지, 조사보고서의 해석 내용을 동일한 지질학적 대상 아래 배열할 수 있는 기준으로 기능할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지표 자료뿐 아니라 지하 시추자료와 표본자료까지 함께 연결하기 위한 중심 기준으로 지질단위를 설정하였다. 본 연구에서 지질단위는 새로운 공식 층서단위를 제안하기 위한 개념이 아니라, 기존 자료와 문헌에서 반복적으로 지시되는 화산체 본체 또는 관련 지질학적 대상을 J-GHO 안에서 구조화하기 위한 공통 해석 기준이다(Abel *et al.*, 2015). 서사·해설자료는 1차 지질증거를 대체하는 자료가 아니라, 지질단위 중심 구조 위에 부가되는 해설 및 활용 맥락 자료로 다루었다. 이에 본 연구는 제주 지질유산 자료를 지질단위 중심으로 재구성하는 정보구조 J-GHO (Jeju Geoheritage Ontology)를 제안하고, 수월봉, 성산일출봉, 만장굴 사례에 적용한다. 본 연구의 핵심 질문은 분산된 지표 자료, 지하 시추자료, 표본자료, 조사보고서 및 서사·해설자료를 지질단위 중심으로 재배열할 때, 동일 지질명소 내부와 사례 간에 어떠한 자료 연결 양상과 증거 공백이 드러나는가에 있다.

2. 연구자료와 방법

본 연구는 제주 지질유산 자료를 지질단위(GeologicUnit)를 기준으로 연결하기 위하여 자료 수집, 자료 선별, 지질단위 설정, 자료 유형별 매핑, 온톨로지 구현, 질의 검증의 순서로 수행하였다. 이 절에서는 각 단계에서 사용한 자료, 선별 기준, 구조화 방법을 순서대로 제시한다.

첫째, 수월봉, 성산일출봉, 만장굴을 대상으로 지표 조사자료, 공개 시추주상도, 박물관 표본자료, 학술문헌, 조사보고서, 서사·해설자료를 수집하였다. 세 사례는 지질학적 대표성, 선행 연구의 축적 정도, 그리고 공개 시추자료·해저 조사자료·보존관리 조사자료라는 서로 다른 자료 조건을 대표하도록 선정하였으며, 사례별 선정 근거와 주요 자료의 성격은 4.1절 및 표 4에 제시하였다. 지표 자료는 「제주권 지질유산 발굴 및 가치평가」(Geological Society of Korea, 2020)를 중심으로 정리하였다. 공개 시추자료는 제주지하수정보관리시스템 공개 자료와 「제주특별자치도 지하수조사 개발 보고서」(Korea Rural Community Corporation, 2017)를 활용하였다. 박물관 표본자료는 문화유산표준관리시스템 등록 정보와 e-Museum (2025) 공개 정보를 함께 검토하였다. 성산일출봉의 해저지질 자료는 「세계자연유산 해저지질조사 및 가치 발굴 연구용역보고서」(Jeju Special Self-Governing Province, 2022)와 Ki *et al.* (2024)를 함께 참조하여 보완하였고, 만장굴의 보존관리 자료는 「제주도 천연동굴 보존관리방안 연구 및 조사」(Jeju Special Self-

Table 1. Definition of key terms used in this study.

Term	Definition
Ontology	Formal representation of concepts and relations
J-GHO	Jeju Geoheritage Ontology proposed in this study
GeologicUnit	Geological unit concept used as an operational interpretive anchor for linking heterogeneous geoheritage data
BoreholeInterval	Depth-defined interval within a borehole log
NarrativeResource	Interpretive or contextual resource associated with geoheritage

Table 2. Relationship levels between GeologicUnit and resource types in J-GHO.

Resource type	Relation to GeologicUnit	Evidence level
SurfaceFeature	exposesUnit	Relatively direct
GeoArtifact	derivedFromUnit	Semi-direct
BoreholeInterval	isPartOfBorehole; correlatesWithUnit (when assigned)	Interpretive
NarrativeResource	contextual association	Indirect

Governing Province, 2020)를 활용하였다. 서사·해설자료는 자연유산 해설, 설화, 탐사사 자료 중 각 지질명소의 해석 맥락과 관련되는 자료를 대상으로 하였다.

둘째, 공개 시추공의 검색 범위는 각 지질명소의 중심 지점을 기준으로 반경 2 km로 설정하였다. 이 범위는 지질학적 경계를 의미하는 것이 아니라, 지표자료·시추자료·표본자료를 사례 단위로 함께 비교하기 위한 운영적 검색 범위이다. 수월봉의 경우 반경 1 km에서는 공개 시추공이 3개에 그쳐 권역 규모의 비교가 제한되었고, 반경 3 km에서는 32개 시추공이 포함되어 사례 중심 분석 범위가 과도하게 확대되었다. 반경 2 km에서는 13개 시추공이 확인되어 자료 수의 충분성과 사례 중심 해석 가능성 사이의 균형이 가장 적절하였다. 이에 따라 동일한 기준을 성산일출봉과 만장굴에도 적용하여 사례 간 비교의 일관성을 유지하였다.

셋째, 수집 자료를 사례별 핵심 분석자료와 배경자료로 구분하였다. 수월봉은 반경 2 km 내 공개 시추공 13개와 122개 시추구간이 확보되어 공개 시추자료를 핵심 분석자료로 사용하였다. 성산일출봉은 공개 시추공이 제한적이므로 해저 다중빔, 탄성파, 해상시추 자료를 핵심 분석자료로 삼았다. 만장굴은 용암동굴의 보존관리 맥락이 중요하므로 보존관리 보고서에 수록된 시추, 물리탐사, 검층, 진동 자료를 핵심 분석자료로 사용하였다. 성산일출봉과 만장굴 주변의 공개 시추공은 지역적 지하 정보의 존재를 확인하는 배경자료로 처리하였으며, 그 사유는 표 4에 제시하였다.

넷째, 각 사례에서 기존 학술문헌·조사보고서에서 반복적으로 지시되는 지질학적 실체 가운데, 주요 자료군과 의미적으로 연결될 수 있고 통합 질의를 위한 공통 해석 기준으로 활용 가능한 대상을 지질단위(GeologicUnit)로 설정하였다. 수월봉은 SuwolbongTuffUnit, Gosan Formation,

GwanghaeakBasaltUnit을 중심으로 구조화하였다. 성산일출봉은 SeongsanTuffUnit과 SubmarineCraterUnit을 함께 고려하였다. 만장굴은 ManjanggalBasaltUnit을 중심으로 용암동굴 지형요소, 보존관리 조사자료, 표본자료를 연결하였다.

다섯째, 자료 유형별로 지질단위와의 연결 방식을 구분하였다. 지표 지형요소는 노두와 지형 관찰에 근거하여 지질단위와 연결하였다. 박물관 표본은 산지, 등록 정보, 문헌 정보를 근거로 연결하였다. 시추자료는 심도별 시추구간(BoreholeInterval) 단위로 구조화하여 암상, 심도, 지하수 위 등 비교 가능한 속성을 부여하였다. 서사·해설자료는 지질명소의 해설과 활용 맥락을 보완하는 자료로 연결하였다. 각 자료 유형과 지질단위의 연결 방식 및 증거 수준은 표 2에 제시하였다.

여섯째, 구조화된 자료는 OWL 2 기반 온톨로지로 구현하고 Protégé (Musen, 2015)에서 클래스, 속성, 개체를 작성하였다. 지질단위와 암상 개념은 GeoSciML, 시추공과 시추구간 구조는 GWML2.2, 공간 정보와 위치 기반 질의는 GeoSPARQL, 표본과 서사·해설자료의 맥락 연결은 CIDOC CRM을 선택적으로 참조하였다. 국제표준과의 선택적 정렬 원칙 및 각 도구의 역할은 3.3절 및 표 3에 제시하였다. HermiT reasoner (Glimm *et al.*, 2014)를 이용하여 클래스와 관계 설정의 논리적 일관성을 점검하였고, Apache Jena Fuseki (Carroll *et al.*, 2004)에서 SPARQL 질의를 실행하여 구조화된 자료가 지질단위 중심으로 조회되는지 검토하였다. 질의 검증은 공개 시추자료가 가장 풍부한 수월봉 사례를 중심으로 상세히 제시하였으나, 성산일출봉의 해저 조사자료 및 만장굴의 보존관리 조사자료 역시 J-GHO 안에 구조화하여 지질단위 중심으로 함께 조회될 수 있도록 하였다.

Table 3. International standards and tools selectively aligned with J-GHO and their scope of application.

Standard/Tool	J-GHO element	Purpose in this study	Scope
GeoSciML	GeologicUnit, lithology	Geological semantics	Selective concepts only
GWML2.2	Borehole, BoreholeInterval	Borehole structure	Borehole and interval model only
GeoSPARQL	Geosite and borehole location	Spatial representation	Coordinates and spatial queries
CIDOC CRM	NarrativeResource, provenance context	Contextual linkage	Narrative and provenance context
OWL 2 / Protégé	Classes and properties	Ontology implementation	Full implementation environment
HermiT	Class hierarchy	Consistency validation	Logical verification
SPARQL / Jena Fuseki	Query instances	Query testing	Retrieval validation
OOPS!	Ontology report	Pitfall screening	Supplementary quality check

본 연구에서 사용하는 핵심 용어는 표 1과 표 2에 제시하였다. 클래스명으로 사용되는 GeologicUnit, BoreholeInterval, SurfaceFeature, GeoArtifact, NarrativeResource는 영문 표기를 유지하였다.

3. J-GHO의 핵심 설계 원칙

J-GHO는 제주 지질유산과 관련된 지표자료, 지하자료, 표본자료 및 해설자료를 하나의 해석 체계 안에서 연결하기 위해 설계된 정보구조이며, 핵심은 이들 자료를 지질단위를 중심으로 재구성하는 데 있다(그림 1).

그림 1에서 실선은 지질명소-지표지형요소, 지표지형요소-지질단위, 지질표본-지질단위와 같이 직접 관찰 또는 산지·등록정보에 근거한 관계를 나타낸다. 반면 점선은 시추구간과 지질단위의 층서적 대응 관계, 그리고 서사·해설자료와 지표지형요소 사이의 맥락 관계를 나타낸다. 이를

통해 J-GHO는 원자료에 기재된 기록과 본 연구에서 부여한 구조화 및 해석 관계를 구분하여 표현한다.

3.1. 지질단위 중심 구조와 자료 위계

J-GHO의 첫 번째 설계 원칙은 지질단위를 자료 통합의 중심 축으로 설정하고, 자료 유형별 증거 수준과 역할을 구분하는 것이다. 지질단위는 서로 다른 자료 유형을 동일한 지질학적 맥락 아래 연결하기 위한 기준으로 활용되며, 이를 통해 자료 간 대응 관계와 증거 수준의 차이를 구조적으로 표현할 수 있다(표 2).

지질명소가 장소성과 관리의 축을 제공한다면, 지질단위는 지표 노두, 시추구간, 표본을 공통 해석 축 아래 연결하는 기준으로 기능한다. 각 자료 유형과 지질단위 간의 관계는 동일한 증거 수준으로 취급되지 않으며, 자료 유형별 적용 수준은 표 2에 제시한다. 지표 노두와 표본은 각각 exposesUnit 및 derivedFromUnit 관계를 통해 비교적 직

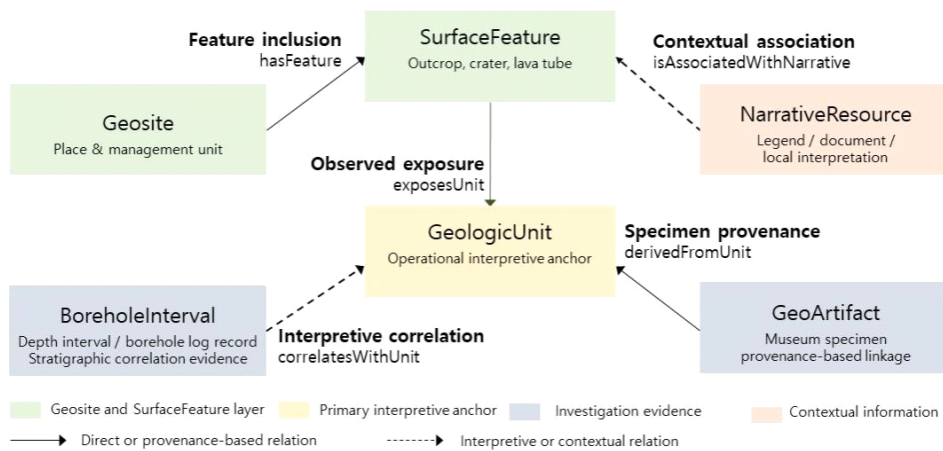


Fig. 1. Conceptual structure of J-GHO showing GeologicUnit as the primary interpretive anchor. Colors indicate resource layers, and line styles indicate the evidential status of relations. Solid arrows indicate direct or provenance-based relations, including geological site–feature inclusion, surface exposure, and specimen provenance. Dashed arrows indicate interpretive or contextual relations, including stratigraphic correlation between borehole intervals and GeologicUnit, and contextual association between NarrativeResources and SurfaceFeatures. Property names shown below the relationship labels indicate the ontology relations used in J-GHO.

접적으로 연결되는 반면, 시추자료는 사례에 따라 층서 비교 자료 또는 보존관리 조사자료로 활용되며, 지표 노두 및 표본과는 구분되는 해석 수준에서 연결된다. 서사·해설자료 역시 지질학적 1차 증거를 대체하지 않으며 지질단위 중심 구조 위에 추가되는 맥락 계층으로 다루어진다.

시추구간은 시추공에 속한 독립 구간 자료로 구조화되며, 특정 지질단위와의 층서적 대응이 명시적으로 부여되는 경우에만 *correlatesWithUnit* 관계로 연결된다.

3.2. 복수 지질단위와 사례별 자료 조건의 수용

J-GHO의 두 번째 설계 원칙은 복수의 지질단위와 사례별 자료 조건의 다양성을 구조 안에서 유지하는 것이다. 성산일출봉과 같이 하나의 지질명소가 둘 이상의 지질단위와 연결되는 경우에는 이를 단일 단위로 환원하지 않고 지질단위 간 관계를 유지한다. 또한 수월봉, 성산일출봉, 만장굴은 활용되는 지하자료의 종류와 증거 수준이 서로 다르므로, J-GHO는 이러한 차이를 제거하지 않고 동일한 구조 안에서 표현할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 사례별 자료 특성과 증거 공백을 비교 가능한 형태로 제시할 수 있다.

3.3. 국제 표준과의 선택적 정렬

J-GHO의 세 번째 설계 원칙은 자료 유형별 국제표준과의 선택적 정렬이다. 본 연구는 GeoSciML, GWML2.2, GeoSPARQL, CIDOC CRM의 전체 구조를 구현하는 대신, 제주 지질유산 자료를 지질단위 중심으로 연결하고 질의하는 데 필요한 개념만을 선별적으로 참조하였다. 이를 통해 상호운용 가능성을 확보하면서도 제주 지질유산 자료의 현실적 조건에 맞게 구현 범위를 조절하였다.

자료 유형에 따라 참조한 국제표준은 서로 다르다. 지질단위와 암상 개념은 GeoSciML 계열의 지질정보 상호운용 구조(Sen and Duffy, 2005)를, 시추공과 시추구간 구조는 GWML2.2 (Boisvert and Brodaric, 2012; OGC, 2017)를 참조하여 설계하였으며, 공간 좌표와 위치 기반 질의의 가능성은 GeoSPARQL (Battle and Kolas, 2012; Car *et al.*, 2024)을 참고하였다. 또한 표본과 서사·해설자료의 맥락 정보는 CIDOC CRM (CIDOC CRM Special Interest Group, 2023)과의 정렬 가능성을 고려하였다.

온톨로지 구현은 OWL 2 (W3C OWL Working Group, 2012) 기반으로 Protégé (Musen, 2015)에서 구현하였으며, HermiT reasoner (Glimm *et al.*, 2014)를 이용하여 논리적 일관성을 검증하였다. 또한 Apache Jena Fuseki (Carroll *et al.*, 2004)로 SPARQL 질의를 실행하여 분산된 자료가 지질단위 중심으로 함께 조회될 수 있는지를 확인하였고 OOPS! (Poveda-Villalón *et al.*, 2014)를 활용하여 일반적인 온톨로지 설계상의 잠재적 오류를 점검하였다(그림 2).

J-GHO에서 참조한 국제표준 및 도구의 대응 요소와 적용 범위는 표 3에 제시하였다.

4. 결 과

4.1. 사례별 자료 구성과 지질단위 중심 재구성

본 연구에서는 수월봉, 성산일출봉, 만장굴을 대상으로 지표 조사자료, 시추자료, 박물관 표본, 학술문헌 및 조사보고서, 서사·해설자료를 수집하고, 이를 지질단위 중심으로 재구성하였다. 세 사례는 제주 지질유산 내 지질학적 대표성, 선행 연구의 축적 정도, 그리고 자료 조건의 차이를 기준으로 선정하였다. ‘표준 통합 사례’, ‘확장 통합 사례’, ‘활용 중심 통합 사례’는 각 사례의 자료 조건을 비교한 결과 귀납적으로 도출한 기술적 구분이다. 구체적으로 이 구분은 핵심 지하자료의 유형, 지표·지하·표본자료의 결합 밀도, 지질단위와의 연결 방식, 주된 활용 방향의 차이를 기준으로 하였다.

본 연구에서는 모든 검토 자료를 동일한 수준의 핵심 분석자료로 사용하지 않았다. 수월봉에서는 반경 2 km 내 공개 시추공과 시추구간을 주요 분석자료로 사용하였으나, 성산일출봉과 만장굴의 공개 시추공은 각각 복합 화산체 구조와 용암동굴 구조를 직접 해석하기에는 제한적이므로 배경자료로 처리하였다. 세 사례의 선정 기준, 주요 원자료,

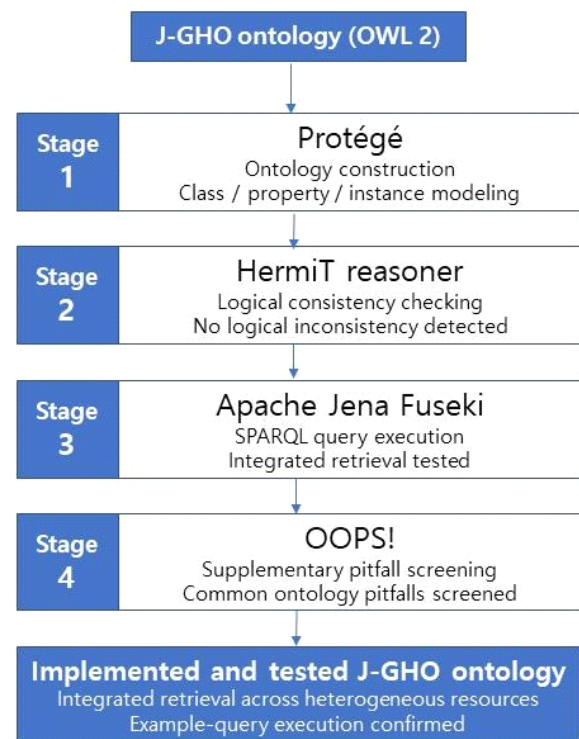


Fig. 2. Ontology implementation, consistency checking, query execution, and supplementary pitfall screening of J-GHO.

Table 4. Criteria for case selection, source-data use, and GeologicUnit linkage for three Jeju geoheritage sites.

Case	Selection rationale	Core data used	GeologicUnit linkage
Suwolbong	Representative phreatomagmatic site with diverse evidence sources	Surface survey, public boreholes, museum specimens, literature and interpretive materials	SurfaceFeature-exposesUnit; GeoArtifact-derivedFromUnit; BoreholeInterval as stratigraphic comparison data
Seongsan Ilchulbong	Representative tuff cone linking onshore and submarine volcanic records	Onshore landforms, offshore borehole, submarine volcanic data, literature and interpretive materials	Multiple GeologicUnits representing terrestrial and submarine volcanic components
Manjanggul	Representative lava tube with conservation-management data	Lava tube geomorphology, conservation records, subsurface survey data, specimens	Lava tube features linked to ManjanggulBasaltUnit; conservation records as contextual resources

Note: One public borehole within 2 km of Seongsan Ilchulbong and 11 public boreholes within 2 km of Manjanggul were reviewed as regional subsurface data, but were treated as background data because they were limited as direct evidence for interpreting the composite volcanic body or lava-tube structure.

지질단위와의 연결 방식, 배경자료 처리 사유는 표 4에 제시하였다.

세 사례는 모두 J-GHO 구조화의 적용 대상이지만, 자료 조건과 분석 초점은 서로 다르다. 수월봉은 공개 시추자료가 비교적 풍부하여 반경 2 km 내 13개 시추공과 122개 시추구간을 기반으로 시추구간 비교와 SPARQL 질의 검증 을 상세히 수행한 핵심 검증 사례이다. 성산일출봉은 공개 시추자료가 제한적인 대신 육상 옹화구와 해저 다중뿔, 탄성파, 해상시추 자료를 함께 연결해야 하는 확장 구조화 사례이다. 만장굴은 공개 시추공의 전면 비교보다 용암동굴

지형요소와 보존관리 목적의 시추·물리탐사·검층·진동 자료를 연결하는 것이 핵심인 활용 중심 구조화 사례이다. 따라서 본 연구에서는 세 사례의 분석 밀도를 동일하게 맞추기보다, 서로 다른 자료 조건에서 지질단위 중심 구조화가 어떻게 적용되는지를 비교하는 데 초점을 두었다. 성산일출봉과 만장굴의 해저 조사자료 및 보존관리 조사자료도 J-GHO 안에 구조화되어 질의 가능한 구조로 편입되었으며, 질의 결과의 상세 제시는 수월봉 사례를 중심으로 수행하였다. 세 사례의 자료 구성과 지질단위 중심의 연결 양상을 그림 3에 요약하여 제시하였다.

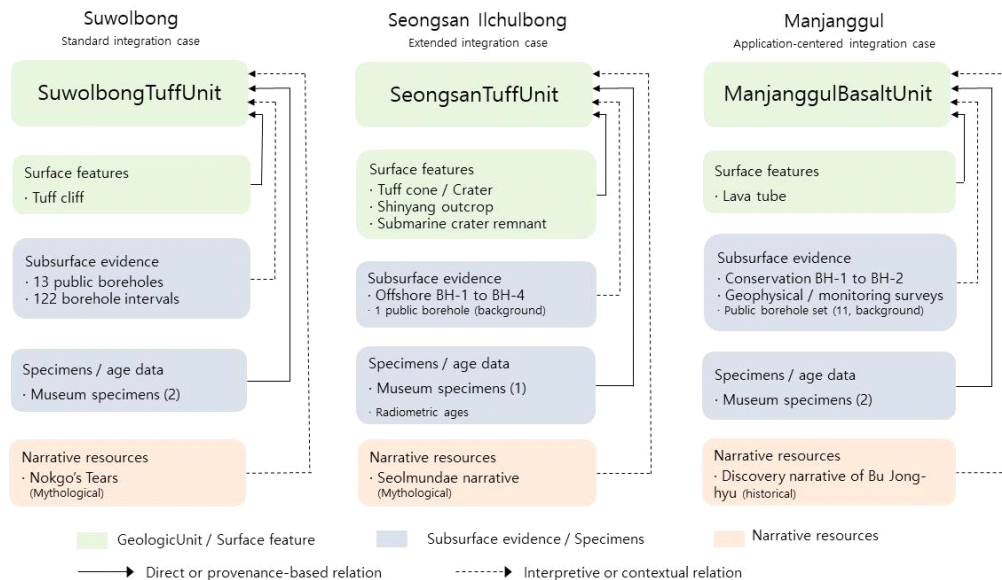


Fig. 3. Comparative integration profiles of Suwolbong, Seongsan Ilchulbong, and Manjanggul under the GeologicUnit-centered framework. Solid arrows indicate direct or provenance-based linkages (SurfaceFeature and GeoArtifact connections); dashed arrows indicate interpretive or contextual linkages (BoreholeInterval stratigraphic correlation and NarrativeResource contextual association). Public borehole sets treated as background data are noted within the Subsurface evidence boxes.

Table 5. Specifications of the 13 public boreholes in the Suwolbong area (2 km radius) used in this study.

No.	Well ID	Elev. (m)	TD (m)	GWL (m)	# Int.	Upper tuff (m)	B-C pairs	Base lith.	Exceptional lithology
1	Y199330074	17	80	16.9	9	4.9	3	SS	—
2	Y199330075	19.452	82	17.6	10	3.0	3	SS	—
3	Y199330076	16.084	80	12.7	7	0.8	2	SS	—
4	Y199330077	20	70	19	11	absent	5	CL	—
5	Y199330078	16.507	87	13.3	8	3.5	1	SS	PFB
6	Y199330080	16.9	85	13	10	10.2	3	SS	—
7	Y199330084	19.745	85	16.6	9	absent	3	SS	—
8	Y199330086	17	70	16.6	6	5.8	1	GS	GS
9	Y199330090	16	80	12	15	5.4	6	SS	—
10	Y199330091	16.8	90	12	15	4.0	4	M	—
11	Y199330174	10	80	13	9	absent	2	M	—
12	W200710004	8	150	n/a	8	absent	2	sSS	ApB, sSS
13	D200040038	18	99	18	5	absent	1	SS	sSS

Note: Elev. = elevation above sea level; TD = total drilling depth; GWL = static groundwater level; # Int. = number of BoreholeInterval instances; Upper tuff = thickness of the uppermost tuff where present; B-C pairs = number of basalt-to-clinker transitions; Base lith. = lithology of the deepest logged interval. Abbreviations: SS = sandstone; M = mud; GS = conglomerate; CL = clinker; sSS = shelly sandstone; PFB = porphyritic feldspar basalt; ApB = aphyric basalt; n/a = not available. Exceptional lithology refers to lithologies considered unusual within the study area regardless of stratigraphic position; a lithology may appear in both Base lith. and Exceptional lithology columns when it meets both criteria.

4.2. 수월봉: 공개 시추자료와 표본이 결합되는 표준 통합 사례

수월봉 사례는 공개 시추자료와 박물관 표본이 가장 안정적으로 결합되는 표준 통합 사례이다. 수월봉 응회환의 퇴적양상과 형성과정에 대한 연구(Sohn and Chough, 1989)와 제주 현무암질 응회환-응회구의 수성화산 작용 모델(Sohn, 1996)은 시추자료 해석의 배경을 제공한다. 본 연구에서는 반경 2 km 내 공개 시추공 13개를 구조화 대상으로 삼고, 상부 응회암, 하부 현무암-클링커 반복, 사암 및 특이 암상 분포를 비교 가능한 형태로 정리하였다.

13공의 정량 제원과 층서 요약을 표 5에 제시하였다. 표고는 8.0–20.0 m (평균 16.3 m), 총심도는 70–150 m (평균 88 m) 범위에 분포하며, 공 1개당 5–15개의 시추구간으로 총 122개 구간이 구조화되었다. 상부 응회암은 13공 중 8공(Y199330074, 075, 076, 078, 080, 086, 090, 091)에서 두께 0.8–10.2 m (평균 4.7 m) 범위로 확인되었고, 5공(Y199330077, 084, 174, W200710004, D200040038)에서는 기재되지 않았다. 하부 현무암-클링커 교호는 모든 공에서 공통적으로 나타났으나 반복 주기는 공마다 1–6회로 변동하였다. 최하부 암상은 11공에서 사암 또는 머드로 기재되었고, 특이 암상으로는 Y199330078의 반상장석현무암(PFB, 64.2–69.5 m), Y199330086의 역암(GS, 63.0–70.0 m), W200710004의 비반상현무암(ApB, 0.4–34.0 m)과 함패

류사암(sSS, 88.0–150.0 m), D200040038의 함패류사암(sSS, 59.8–64.0 m)이 확인되었다. 이러한 시추공 간 암상 조성의 차이는 수월봉 반경 2 km 권역이 단일 균질 층서가 아니라 응회암 분포의 국지성과 기저 사질-함패류 퇴적체의 측방 변이 가능성을 함께 포함하는 구조임을 시사한다. 자연수위는 12공에서 기재되었으며 12–19 m 범위(표 5)로, 수월봉 권역의 포화대가 상대적으로 얇게 형성되어 있음을 보여준다.

이러한 구조화 결과는 수월봉 권역의 지하 층서가 단일한 응회환 퇴적체로 단순화되기보다, 상부 응회암의 불균질한 분포, 하부 현무암-클링커 반복, 기저부 사질 내지 함패류 퇴적체의 측방 변이를 함께 포함함을 보여준다. J-GHO는 개별 시추공 열람만으로 파악하기 어려운 권역 규모의 층서적 불균질성을 시추구간 단위로 비교하게 한다.

4.3. 성산일출봉: 육상 지질명소와 해저 자료의 확장 통합 사례

성산일출봉 사례는 육상 지질명소의 지형요소와 해저 조사자료가 함께 작동하는 확장 통합 구조를 보인다. 성산일출봉 권역에서는 반경 2 km 내 공개 시추공 1개가 확인되었으나, 본 사례의 지하 구조 해석은 육상 단일 시추공보다 해저 다중빔, 탄성파, 해상시추 4공 자료에 더 직접적으로 의존하므로, 공개 시추공은 배경 자료로만 사용하고 해

Table 6. Example SPARQL queries, returned results, and their interpretive significance in J-GHO.

Query	Retrieval target	Returned results	Interpretation
①	Resources associated with SuwolbongTuffUnit	SurfaceFeature: 1; GeoArtifact: 2; NarrativeResource: 1; BoreholeInterval: 122	Links surface, specimen, borehole, and narrative data in one query
②	Sandstone-series intervals	15 intervals	Shows sandstone-bearing intervals by depth and borehole
③	Exceptional lithologies	5 intervals	Identifies lithological variation in the Suwolbong area
④	Resources linked to SeongsanTuffUnit and SubmarineCraterUnit	SurfaceFeature: 4; GeoArtifact: 1; MarineBorehole: 4 (BH-1 to BH-4); NarrativeResource: 2	Links onshore and offshore volcanic evidence
⑤	Resources linked to ManjanggulBasaltUnit	SurfaceFeature: 1; GeoArtifact: 2; BoreholeInterval: 6; NarrativeResource: 2	Links lava-tube, specimen, and conservation data

저 시추자료를 중심으로 정리하였다. 성산일출봉의 기존 해저지질 조사와 화산학 연구(Sohn and Chough, 1992; Jeju Special Self-Governing Province, 2022; Ki *et al.*, 2024)는 성산일출봉이 현재의 육상 옹회구 노두만으로 설명되는 단일 지질명소가 아니라, 해저 연장부와 해저 분화구 자료를 함께 고려해야 하는 복합 화산체임을 보여준다. 따라서 성산일출봉 사례는 하나의 지질단위로 환원되는 구조가 아니라, SeongsanTuffUnit과 해저 분화구 관련 단위를 함께 고려해야 하는 복합화산체 구조(multi-unit interpretive structure)로 표현되는 것이 적절하다. 본 연구에서는 해저 분화구 관련 해상시추 및 해저지형 자료를 구조화하기 위해 SubmarineCraterUnit을 보조 지질단위로 설정하였으며, 이는 「세계자연유산 해저지질조사 및 가치 발굴 연구용역

보고서」(Jeju Special Self-Governing Province, 2022)와 Ki *et al.* (2024)의 해저 화산체 해석에 근거한다. J-GHO에서 복수의 지질단위 간 관계를 유지하도록 설계한 것은 이러한 자료 조건을 반영하기 위한 것으로, 성산일출봉의 경우 육상 지질명소 중심 해석을 해저 자료까지 확장하는 통합 틀로 기능한다. 이를 통해 육상 옹회구 자료와 해저 조사자료가 복수의 지질단위를 매개로 함께 연결될 수 있음을 확인하였다.

4.4. 만장굴: 보존관리 자료를 포함하는 활용 중심 통합 사례

만장굴 사례는 용암동굴 지형요소, 보존관리 조사자료, 박물관 표본이 함께 작동하는 활용 중심 통합 사례이다. 반경 2 km 내 공개 시추공 11개가 확인되었으나, 본 사례에서는 용암동굴과 보존관리 목적 조사자료의 연계를 중심으로

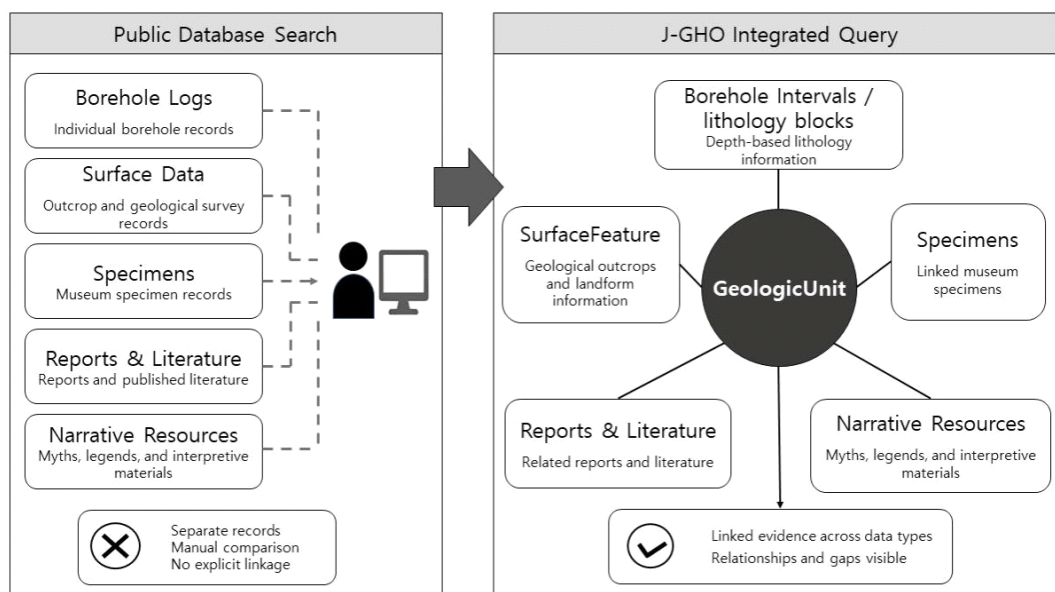
**Fig. 4.** Comparison between public database retrieval and J-GHO-based integrated querying for Jeju geoheritage data.

Table 7. Comparison of data integration patterns in the three case studies.

Comparison item	Suwolbong	Seongsan Ilchulbong	Manjanggul
GeologicUnit(s)	SuwolbongTuffUnit (1)	SeongsanTuffUnit, SubmarineCraterUnit (2)	ManjanggulBasaltUnit (1)
Main data types	Surface, borehole, specimens, narrative/interpretive resources	Onshore, offshore, specimens, narrative/interpretive resources	Lava-tube, conservation, specimens, narrative/interpretive resources
Data count	SurfaceFeature: 1; GeoArtifact: 2; BoreholeInterval: 122 (13 boreholes); NarrativeResource: 1	SurfaceFeature: 4; GeoArtifact: 1; MarineBorehole: 4 (BH-1 to BH-4); NarrativeResource: 2	SurfaceFeature: 1; GeoArtifact: 2; BoreholeInterval: 6 (BH-1 and BH-2); NarrativeResource: 2
Interpretively linked resources	BoreholeInterval (spatially selected; correlatesWithUnit not assigned); NarrativeResource	MarineBorehole (structured at borehole level); NarrativeResource	BoreholeInterval; correlatesWithUnit = ManjanggulBasaltUnit; NarrativeResource
Main evidence gap	No direct stratigraphic correspondence between surface tuff exposure and individual borehole intervals	Limited public borehole data around the terrestrial geosite; high interpretive dependency for onshore-offshore linkage	Limited subsurface evidence directly corresponding to lava-tube geometry

Note: Data counts represent ontology instances structured in the J-GHO prototype. For Seongsan Ilchulbong, BH-1 to BH-4 were structured as MarineBorehole instances. For Manjanggul, BH-1 and BH-2 correspond to conservation boreholes associated with the lava-tube system.

로 구조화하였다. 이에 따라 공개 시추공은 지역적 지하 정보의 배경자료로 활용하고, 「제주도 천연동굴 보존관리방안 연구 및 조사」 1차년도 보고서의 시추조사, 물리탐사, 물리검층, 진동시험 및 수치해석 자료를 핵심 자료로 정리하였다(Jeju Special Self-Governing Province, 2020).

이 자료군은 만장굴과 용천동굴 주변의 지반 조건과 관리 판단을 함께 반영한다. 본 연구에서는 이를 용암동굴 지질명소와 관련된 보존관리 조사 증거로 편입하였으며, 지질단위는 동굴 지형과 주변 지반을 해석적으로 연결하는 앵커로 사용하였다. 따라서 만장굴 사례는 지질유산 연구와 보존관리 자료가 상호 참조될 수 있는 구조화 사례로 해석된다. 구체적인 자료 유형별 연결 결과와 질의 반환 결과는 표 6과 표 7에 제시하였다.

4.5. J-GHO 기반 통합 질의의 활용

공개 DB와 개별 자료 시스템은 시추공, 표본, 논문, 보고서에 대한 접근을 제공하지만, 서로 다른 자료 유형이 동일 사례 안에서 어떻게 대응되는지를 직접 보여주지는 않는다. J-GHO 기반 질의는 지표지형요소, 시추구간, 지질표본, 서사·해설자료를 지질단위 중심으로 함께 배열하여 자료 연결과 증거 공백을 동시에 확인하게 한다(그림 4).

Apache Jena Fuseki에서 다섯 가지 예시 SPARQL 질의를 실행하여 구조화된 자료의 조회 가능성을 확인하였다. 질의①은 수월봉 자료 유형별 연결 수와 공간 기준으로 선별된 권역 시추구간을 조회하며, 질의②와 질의③은 각각

수월봉의 사암 계열 시추구간과 특이 암상 시추구간을 검색한다. 질의④와 질의⑤는 성산일출봉과 만장굴 사례에서 지질단위와 연결된 자료 유형을 조회하기 위한 질의이다. 각 질의의 반환 결과와 해석적 의미는 표 6에 제시하였다.

질의 결과는 J-GHO가 서로 다른 자료 유형을 동일한 지질단위 중심 구조 안에서 통합 조회할 수 있음을 보여준다. 즉, 기존 개별 DB에서는 확인하기 어려운 자료 간 대응 관계와 증거 공백을 사례 단위로 함께 확인할 수 있음을 보여준다. 수월봉 사례에서는 지표자료, 표본자료, 시추자료 및 서사·해설자료가 함께 검색되었으며, 사암 계열 시추구간과 특이 암상 시추구간의 분포도 별도로 확인할 수 있었다. 또한 성산일출봉과 만장굴 사례에서도 육상 및 해저 자료, 보존관리 조사자료, 표본자료, 서사·해설자료가 동일한 구조 안에서 조회되어, 사례별 자료 조건의 차이에도 불구하고 지질단위 중심 통합 질의가 가능함을 확인하였다.

4.6. 사례 간 비교: 연결 강도와 증거 공백의 차이

세 사례는 모두 지질단위 중심 구조화의 적용 대상이지만, 자료 구성과 연결 방식에서는 차이를 보인다(표 7). 수월봉은 SuwolbongTuffUnit을 중심으로 공개 시추자료, 표본자료, 서사·해설자료가 가장 높은 밀도로 연결된 사례이며, 성산일출봉은 복수의 지질단위를 통해 육상 지질명소와 해저 화산체 자료를 함께 구조화한 사례이다. 만장굴은 단일 지질단위를 중심으로 용암동굴 지형요소와 보존관리 조사자료를 연결한 활용 중심 사례로 나타났다.

사례 간 차이는 해석적 연결 자료의 성격에서도 확인된다. 수월봉은 공간 기준으로 선별된 시추구간을 층서 비교 자료로 활용하였고, 성산일출봉은 해상시추 자료를 복합 화산체 해석을 위한 자료층으로 구조화하였다. 만장굴은 보존관리 목적의 시추자료와 조사자료를 지질단위와 연결하여 지질유산 해석과 관리 정보를 함께 다룰 수 있도록 하였다.

또한 세 사례 모두에서 자료 공백이 확인되었다. 수월봉은 지표 노두와 개별 시추구간 사이의 직접 층서 대응이 제한적이며, 성산일출봉은 육상과 해저 자료의 연결에 상대적으로 높은 해석 의존성이 존재한다. 만장굴은 용암동굴 형상과 직접 대응되는 지하 자료가 제한적이다. 이러한 결과는 J-GHO가 사례별 자료 조건과 증거 수준의 차이를 동일한 구조 안에서 수용하면서도, 자료 연결 관계와 증거 공백을 함께 드러낼 수 있음을 보여준다.

5. 연구 활용 및 한계

5.1. 연구 및 활용 측면의 의의

본 연구의 의의는 제주 지질유산과 관련하여 분산되어 존재하는 지표 조사자료, 시추자료, 박물관 표본, 조사보고서, 서사·해설자료를 지질단위 중심으로 재구성하고, 자료 간 해석 근거와 증거 공백을 명시적으로 드러내는 구조를 제시하였다는 데 있다. 수월봉 사례는 권역 규모의 시추구간 비교 가능성을, 성산일출봉 사례는 육상 지질명소와 해저 화산체 자료의 연결 가능성을, 만장굴 사례는 보존관리 조사자료의 지질유산 해석 구조 편입 가능성을 보여준다.

본 연구는 각 기관과 시스템에 분산되어 관리되는 자료를 물리적으로 통합하기보다, 국제표준의 관련 개념을 참조한 공통 해석 구조를 통해 의미적으로 연결하는 방식을 지향한다. 수월봉의 사암 계열 및 특이 암상 시추구간 탐색 질의는 분산된 자료를 유지하면서도 동일 지질단위를 중심으로 지표·지하·표본·맥락 자료를 함께 비교할 수 있음을 보여준다. 또한 각 기관이 지질단위, 시추구간, 표본 산지, 공간정보 등 핵심 메타데이터를 표준화된 형식으로 축적할수록, 이후 J-GHO와 같은 온톨로지 기반 구조에서 자료 간 연결성과 활용 가능성이 높아질 수 있다.

실무적으로 J-GHO는 자료 추적성 확보, 자료 직접성의 구분, 질의 기반 활용을 지원한다. 이를 통해 지표 노두, 시추구간, 박물관 표본의 출처와 관계를 함께 확인할 수 있으며, 관찰 자료와 해석 자료를 구분하여 활용할 수 있다. 또한 공개 DB의 개별 기록 열람을 넘어 사례 단위의 비교·관리 도구로 활용될 수 있다.

5.2. 한계와 향후 과제

본 연구에서 제시한 자료 간 연결은 원자료의 존재 여부

와 본 연구에서 부여한 구조화 및 해석 관계에 동시에 의존한다. 따라서 모든 대응 관계를 동일한 수준의 직접 관찰 자료로 간주할 수는 없다. 수월봉의 시추자료는 권역 층서 비교 자료이고, 성산일출봉은 해저 조사자료에 대한 의존성이 크며, 만장굴은 보존관리 보고서의 시추·탐사 자료가 핵심 지하자료로 사용되었다.

또한 본 연구는 제주 지질유산 중 수월봉, 성산일출봉, 만장굴을 대상으로 수행한 프로토타입 수준의 적용 사례이다. 따라서 자료의 범위와 밀도는 사례별로 차이가 있으며, 일부 자료 유형은 제한적으로만 구조화되었다.

향후에는 다양한 제주 지질유산 사례를 추가하여 자료 연결 밀도와 증거 수준을 비교하고, 시추자료의 공간 범위와 품질, 표본 산지 메타데이터, 해설 및 교육자료의 표준화 수준을 함께 검토할 필요가 있다. 또한 국제표준 어휘와의 매핑을 정교화하고, 각 기관의 분산 관리 체계를 유지한 상태에서 공통 메타데이터와 질의 구조를 연계하는 방향으로 모델을 확장할 수 있다.

6. 결론

본 연구는 제주 지질유산 자료를 지질단위 중심으로 통합하기 위한 온톨로지 기반 정보구조 J-GHO를 제안하고, 이를 수월봉, 성산일출봉, 만장굴 사례에 적용하였다. J-GHO는 지질단위를 1차 해석 앵커로 설정하고, 지표 자료, 시추자료, 표본자료, 조사보고서, 서사·해설자료를 자료 유형별 증거 수준과 역할을 유지한 상태에서 구조화하도록 설계하였다.

세 사례에 대한 적용 결과, 자료 구성과 증거 수준이 서로 다른 경우에도 동일한 구조 안에서 자료를 조직하고 조회할 수 있음을 확인하였다. 수월봉 사례는 권역 규모의 시추자료를 활용한 층서 비교 가능성을 보여주었고, 성산일출봉 사례는 육상 지질명소와 해저 화산체 자료의 통합 가능성을, 만장굴 사례는 보존관리 조사자료의 지질유산 해석 구조 편입 가능성을 보여주었다.

본 연구는 분산된 자료를 물리적으로 통합하기보다 공통 해석 구조를 통해 의미적으로 연결하는 접근을 제안하였으며, 자료 간 연결 관계와 증거 공백을 함께 확인할 수 있는 기반을 마련하였다. 이는 향후 제주 지질유산 자료의 관리, 활용뿐 아니라 연구, 교육, 해설, 박물관 정보서비스를 위한 통합 지식구조로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

박물관 표본 자료의 일부는 e-뮤지엄 공개 자료를 통해 확인하였으며, 비공개 등록정보의 조회와 검토 과정에서는 국립중앙박물관이 관리하는 문화유산표준관리시스템 자

료를 활용하였다. 제주 지질유산 관련 정보는 「제주권 지질유산 발굴 및 가치평가」(2020) 보고서를 참조하였으며, 지하수 시추주상도 자료는 제주특별자치도 지하수정보관리시스템의 공개 자료와 한국농어촌공사 제주지역본부가 발간한 「제주특별자치도 지하수조사·개발 보고서」(2017)를 활용하였다. 아울러 본 논문의 논리적 전개와 설명의 명확성을 높이는 데 유익한 의견을 제시해 주신 익명의 심사위원들께 감사드린다.

REFERENCES

- Abel, M., Perrin, M. and Carbonera, J.L., 2015, Ontological analysis for information integration in geomodeling. *Earth Science Informatics*, 8, 21-36.
- Battle, R. and Kolas, D., 2012, Enabling the geospatial semantic web with Parliament and GeoSPARQL Semantic Web, 3, 355-370.
- Boisvert, E. and Brodaric, B., 2012, GroundWater Markup Language (GWML): enabling groundwater data interoperability in spatial data infrastructures. *Journal of Hydroinformatics*, 14, 93-107.
- Brilha, J., 2016, Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, 8, 119-134.
- Car, N.J., Homburg, T., Perry, M., Herring, J., Knibbe, F., Cox, S.J.D., Abhayaratna, J. and Bonduel, M., 2024, OGC GeoSPARQL: A Geographic Query Language for RDF Data, Version 1.1. OGC Implementation Standard 22-047r1, Open Geospatial Consortium.
- Carroll, J.J., Dickinson, I., Dollin, C., Reynolds, D., Seaborne, A. and Wilkinson, K., 2004, Jena: implementing the semantic web recommendations. In *Proceedings of the 13th International World Wide Web conference on Alternate Track Papers and Posters*, New York, USA, 74-83.
- CIDOC CRM Special Interest Group, 2023, Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model, Version 7.1.3 (ISO 21127:2023). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- e-Museum, 2025, National Museum of Korea e-Museum, <https://www.emuseum.go.kr/> (Oct. 20, 2025).
- Geological Society of Korea, 2020, Assessment of the Value and Distribution of Geological Heritages in the Jeju Province. Korea National Park Service, Wonju, 915 p (in Korean).
- Glimm, B., Horrocks, I., Motik, B., Stoilos, G. and Wang, Z., 2014, HermiT: an OWL 2 reasoner. *Journal of Automated Reasoning*, 53, 245-269.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2020, Conservation and Management Strategy for Natural Caves in Jeju Island. Jeju, 106 p (in Korean).
- Jeju Special Self-Governing Province, 2022, Research Service Report on Submarine Geological Survey and Value Discovery for the World Natural Heritage. Jeju, 276 p (in Korean).
- Jeon, Y., Southcott, D. and Ki, J., 2024, Korean geoheritage: the volcanic landforms of the Jeju Island UNESCO Global Geopark. *Episodes Journal of International Geoscience*, 47, 295-310.
- Ju, S.O. and Woo, K.S., 2019, A new approach for the geological assessment for geoheritage conservation in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 149-163 (in Korean with English abstract).
- Ki, J.S., Yoon, W.S., Go, S.Y., Sohn, Y.K. and Yoon, S.H., 2024, Multi-stage volcanic eruption of Seongsan Ilchulbong tuff cone, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 60, 245-259 (in Korean with English abstract).
- Korea Rural Community Corporation, 2017, Report of Groundwater Investigation and Development in Jeju Special Self-Governing Province. Jeju, 262 p (in Korean).
- Lee, S.J. and Lee, M.J., 2015, The Research on the Management Plan of Geological Heritage in Korea using GIS. *Journal of Environmental Policy*, 14, 103-123 (in Korean with English abstract).
- Musen, M.A., 2015, The Protégé project: a look back and a look forward. *AI Matters*, 1, 4-12.
- OGC (Open Geospatial Consortium), 2017, OGC WaterML 2.0: Part 4 — GroundWaterML 2.2 (GWML2.2), OGC 16-032r2. Open Geospatial Consortium, Wayland, MA, 160 p.
- Poveda-Villalón, M., Gómez-Pérez, A. and Suárez-Figueroa, M.C., 2014, OOPS! (Ontology Pitfall Scanner!): an on-line tool for ontology evaluation. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 10, 7-34.
- Sen, M. and Duffy, T., 2005, GeoSciML: development of a generic Geoscience Markup Language. *Computers & Geosciences*, 31, 1095-1103.
- Sohn, Y.K., 1996, Hydrovolcanic processes forming basaltic tuff rings and cones on Cheju Island, Korea. *Geological Society of America Bulletin*, 108, 1199-1211.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1989, Depositional processes of the Suwolbong tuff ring, Cheju Island (Korea). *Sedimentology*, 36, 837-855.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1992, The Ilchulbong tuff cone, Cheju Island, South Korea: depositional processes and evolution of an emergent, Surtseyan-type tuff cone. *Sedimentology*, 39, 523-544.
- W3C OWL Working Group, 2012, OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition). W3C Recommendation, Available at: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (December 11, 2012).