



Article

## 천연방벽 암상모델 구축을 위한 시추공 분석절차 및 KURT 부지에의 적용

최지민<sup>1,2</sup>, 정수림<sup>1</sup>, 정두희<sup>1</sup>, 박재용<sup>3</sup>, 박경우<sup>1</sup>, 김영석<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원 저장처분성능검증부

<sup>2</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부

<sup>3</sup>한국지질자원연구원 심층처분환경연구센터

### Borehole analysis procedure for constructing a lithological model of natural barrier and its application to the KAERI underground research tunnel

Ji-Min Choi<sup>1,2</sup>, Soolim Jung<sup>1</sup>, Doohee Jeong<sup>1</sup>, Jai-Yong Park<sup>3</sup>, Kyung-Woo Park<sup>1</sup>, Young-Seog Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Disposal Safety Evaluation Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Republic of Korea

<sup>2</sup>Division of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

<sup>3</sup>Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

Received: September 23, 2023 / Revised: November 29, 2023 / Accepted: February 19, 2024

\*Corresponding author: +82-51-629-6633 / E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

**요약:** 처분부지를 구성하는 천연방벽은 방사성폐기물로부터 유출된 방사성 핵종을 인간생활권에 도달되지 않도록 장기간 격리시키는 역할을 해야 한다. 따라서 천연방벽을 구성하는 기반암의 특성뿐만 아니라 과거부터 현재까지의 진화과정을 복원하여 이해하고, 이를 바탕으로 현재부터 미래까지의 진화과정을 예측할 수 있어야 하며, 현재 국내에서는 이를 위한 방법론이 개발 중이다. 이러한 진화과정을 예측하기 위한 여러 방법 중 시추코어를 활용한 방법은 처분장의 심부 조건을 고려했을 때 지표에서 파악하기 힘든 정보를 제공한다. 따라서 이 논문에서는 시추공의 심도별 암상분포 분석절차를 제시하고, 이것을 천연방벽 장기진화 복원 및 예측 방법론이 검증될 KURT (KAERI Underground Research Tunnel) 주변 시추공에 적용하였다. 제시된 암상분포 분석절차는 사전분류와 이를 단순화하는 단계를 포함하는데, 사전분류에서는 심도 1 m 간격으로 암석의 조직적 특징을 기재하고, 다음 단계에서는 암맥 및 변질에 대한 몇 가지 기준을 적용하여 단순화한다. 그리고 이 결과를 바탕으로 지화학 분석 및 암석기재학적 관찰을 통해 주원소 함량과 구성광물의 조직 및 결정학적 특성을 분석하여 부지 내 대표암상을 종합적으로 도출한다. 모든 분석절차를 연구지역에 적용한 결과 KURT 부지를 구성하는 암상은 두 개의 심성암류와 이를 관입한 일곱 개의 암맥류로 분류되며, 일부 변질대를 포함한다. 추후 연령측정 및 미량원소 지화학 특성을 고려해 시추공을 활용한 암상분포 분석절차를 보완하고 시-공간적 지질 형성 환경을 종합적으로 해석할 예정이다. 이 연구결과는 방사성폐기물 처분부지 암상모델의 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**주요어:** 방사성폐기물처분, 천연방벽, 장기진화, 암상모델, 시추공

**ABSTRACT:** The natural barrier of radioactive waste disposal site should permanently isolate radionuclides from human environments for a geologically long-term period. Therefore, it is necessary not only to reconstruct the past-to-present evolution of the bedrock, but also to predict its future evolution. An analytic methodology to assess the geological evolution using boreholes around the natural barrier is under development in Korea. Boreholes can provide important information at depth unrevealed from the surface. The analytic procedure of rock distribution as a function of borehole's depth was established in the study, and was further applied to boreholes around KAERI Underground Research Tunnel (KURT), to validate the methodology. The procedure involves the pre-classification and simplification stages to select core samples for geochemical and petrographic analyses. In the former stage, the mineral assemblage and textural features of core samples are described for each 1-m column and the latter stage is simplifying dikes or altered zones, which is carried out using several criteria proposed in this study. Geochemical and petrographic analyses were performed to measure the concentrations of major elements and to observe microstructure, consequently defining the representative lithology of a borehole site. Applying all analytical procedures to the study area, the bedrock around the KURT site was categorized into two types of plutonic rocks, seven types of intruding dikes, and altered zones. Further studies such as geochronology and trace element geochemistry are necessary to complement the analytical procedure for understanding the spatiotemporal geological setting. The results of this study are potentially applicable to the development of the petrogenetic model of a radioactive waste disposal site.

**Key words:** radioactive waste disposal, natural barrier, long-term evolution, petrogenetic model, borehole

## 1. 서론

한국전력공사가 공개한 한국전력 통계에 따르면 2022년 우리나라 전력소비량의 약 29.6%를 원자력에너지가 담당하고 있다(KEPCO, 2022). 석탄 및 석유를 이용한 화력발전은 대기오염을 발생시킬 수 있으나, 원자력발전은 이러한 오염을 일으키지 않아 최근 EU 텍소노미에서 녹색 에너지원으로 분류되었다(Ahn and Kwon, 2021). 하지만 원자력발전의 문제는 일본 후쿠시마 원전에서와 같은 방사성물질의 유출이나 원자력발전의 부산물인 사용후핵연료(spent nuclear fuel)의 안전한 관리방법에 있다.

현재까지 우리나라의 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료를 포함한 고준위 방사성폐기물(high-level radioactive waste, HLW)은 각 발전소에 임시저장 중이다. 중저준위 방사성폐기물(low- & intermediate-level radioactive waste, LLW & ILW)은 2015년 경주에 건설된 처분장에서 관리되고 있으나, 고준위 방사성폐기물의 최종 관리를 위한 처분장은 아직 건설되지 못하였으며, 임시로 저장 중인 발전소 내 저장용량의 포화시점은 임박해오고 있다(KHNP, 2023).

현재까지 고준위 방사성폐기물 최종 관리를 위해 다양한 방법들이 제시되었다. 우주처분(space disposal)과 섭입대처분(subduction-zone disposal)도 제시되었지만, 이 경우 비용 문제뿐만 아니라 사고 시 막대한 방사능 오염이 발생할 수 있는 문제가 있다(Burns *et al.*, 1978; Attrill and Gibb, 2003). 특히 섭입대처분의 경우 폐기물이 맨틀 내로 침강하지 않고 용기할 가능성을 배제할 수 없다는 어려움이 있다(Uyeda, 1984). 또한 해양처분(sea dumping 또는 seabed disposal)과 빙하처분(ice sheet disposal)은 각각 런던협약(1990)과 남극조약(1961)에 의해 금지되었다. 따라서 현재 가장 가능성이 높은 방법으로 고려되고 있는 심부암반을 이용한 방법에는 약 500 m 심도에 폐기물을 처분하는 심층처분(deep geological disposal)과 약 5 km 심도의 시추공을 굴착해 3~5 km 구간에 폐기물을 처분하는 심부시추공처분(deep borehole disposal) 방법이 있다(Chapman and Mc Kinley, 1987; NAS, 1957). 이 중에서도 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)는 심층처분을 권고하고 있다(IAEA, 1981, 1989). 고준위 방사성폐기물 관리 선도국인 스웨덴과 핀란드는 심층처분을 최종 관리방안으로 결정하여 인허가를 이미 획득하였으며, 특히 핀란드는 현재 처분시설을 건설 중이다.

심층처분은 개념적으로 고준위 방사성폐기물을 담은 처분용기(canister), 이를 외부로부터 막아주는 완충재(buffer)와 뒷채움재(backfill)로 구성된 공학적방벽(engineered barrier), 그리고 이 모든 것들을 인간생활권으로부터 격리할 심

부암반에 해당하는 천연방벽(natural barrier)을 포함한 다중방벽(multi-barrier) 시스템으로 구성된다. 그중 천연방벽은 인위적인 성능향상이 어렵기 때문에 부지선정 과정이 중요하며, 특히 천연방벽을 구성하는 기반암의 물리화학적 특성은 방사성핵종 이동에 영향을 미치는 수리지화학적 특성의 파악에 매우 중요하다. 따라서 기반암의 성능평가를 위해 충분한 기간에 걸친 부지선정 절차뿐만 아니라 다양한 부지특성의 파악을 위한 조사를 통해 장기적인 안전성을 평가해야 한다.

심층처분을 고려하고 있는 국가들에서는 처분부지에 대해 투수율이 낮고 균질하며 진화과정에 대한 예측이 가능한 암종을 고려하고 있다. 퇴적암의 경우 층서 대비를 위한 기준층(key bed)을 활용하여 암상분포 해석이 용이하지만 층과 층 사이의 투수성 차이와 투수율이 높은 암종 자체의 보장이 힘들다. 반면 화강암과 같은 결정질암류의 경우 단일 암종으로 구성되지만 마그마 유체에 의해 생성된 성인적 특성상 직접적인 관찰 없이 심부의 암상분포 확인이 어렵다. 우리나라에서는 처분부지 대상 암종으로 결정질암을 고려 중이며, 퇴적암과 같은 기준층 없이 심부 암상분포를 확인하기 위해서 연구자, 연구 시기, 분석 절차 등에서의 편차로부터 발생할 불확실성을 최소화하고, 동등한 해상도로 평가할 수 있는 공통된 기준이 필요하다. 또한 심층처분의 지질학적 조건을 고려했을 때 지표 부근에서 확인하기 힘든 심부 지질특성에 대한 정보를 제공할 수 있는 시추공 자료에 위의 기준을 적용한 적절한 분석이 수행되어야 한다.

현재 우리나라에서는 지하연구시설(Underground Research Laboratory)이나 최종 처분을 위한 부지가 선정되지 않아 천연방벽을 구성하는 기반암의 물리화학적 특성과 진화특성을 이해하기 위해 한국원자력연구원을 중심으로 부지 내 연구용으로 굴착된 소형 지하연구터널(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)과 그 주변 지역에 약 100~1,000 m 심도로 굴착된 시추공들을 활용한 다양한 예비연구가 수행 중이다(Choi *et al.*, 2021a, 2021b; Jeong *et al.*, 2021; Jung *et al.*, 2021, 2022). 특히 결정질암 내 단열대와 같은 구조를 따라 관입하는 특성이 있는 암맥류와 단열 주변의 열수작용에 의해 형성된 변질구조의 분포를 파악하는 것은 천연방벽 내에서 유체의 주요 이동통로가 될 수 있는 취성구조의 분포를 파악하는데 중요하다. 이번 연구에서는 KURT 주변 시추공을 선별하여 시추코어 분석, 암석기재학적 관찰, 그리고 지화학 분석 등을 통합하여 우리나라에서 처분부지 구성 암종으로 고려되고 있는 결정질암의 암상분포에 대해 동일한 해석이 가능하도록 기반암이 과거부터 현재까지 장기간 동안 겪어온 진화과정을 복원하는 방법론을 구축하고자 하였으며, 이를 위해 먼저 KURT 부지 내 분포하

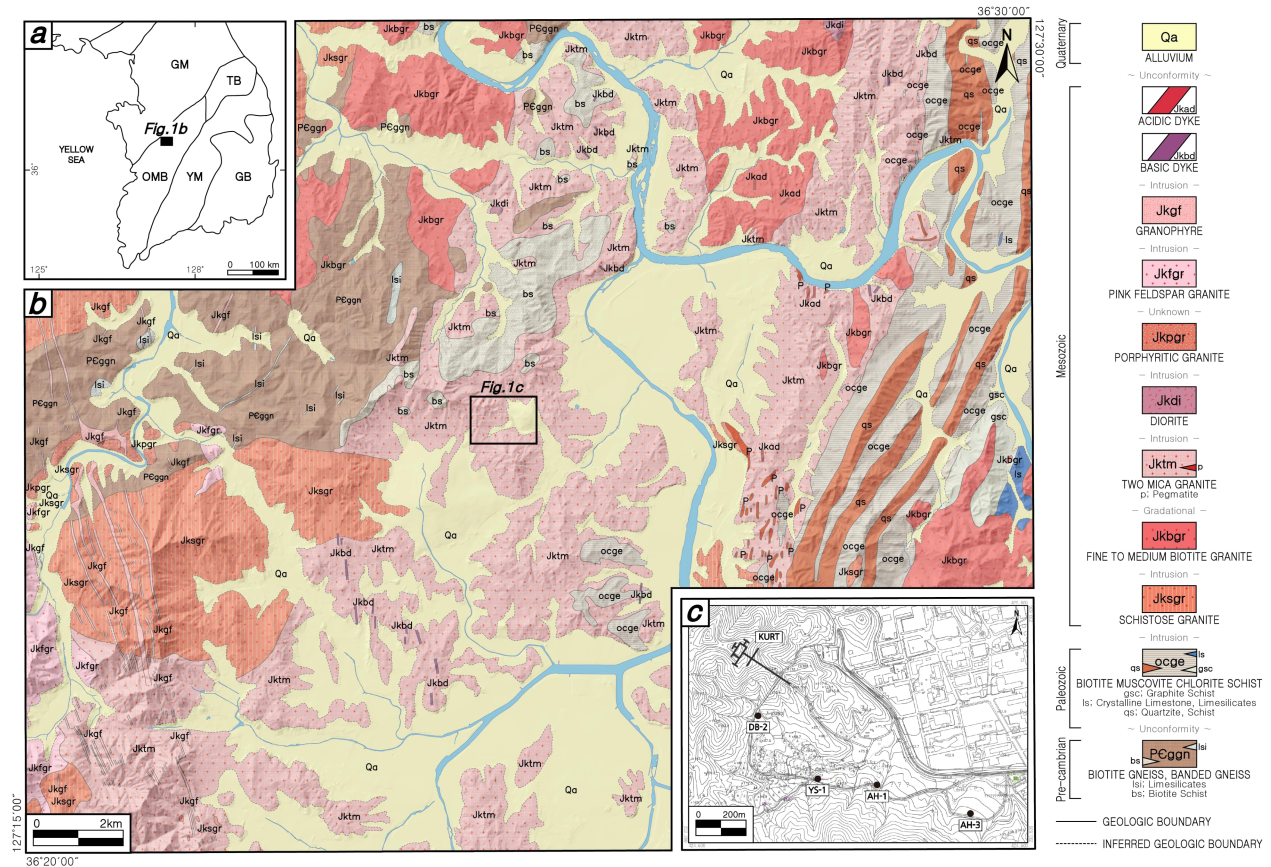
는 암맥 및 변질대와 함께 대표적인 암상(rock type)을 분류하고 심도별 분포를 파악하고자 하였다. 이렇게 획득한 시추공 암상자료와 지화학분석 결과를 데이터베이스화하면 이후 3차원 암상모델 제작에 활용할 수 있을 것이다(Park *et al.*, 2021b).

## 2. 연구지역 지질 및 시추공 제원

KURT 부지를 포함하는 연구지역은 한반도 지체구조상 경기육괴와 옥천변성대의 경계부에 가깝고 북-동방향으로 발달하는 옥천변성대의 중간 정도에 위치한다. 연구지역은 기반암인 선캄브리아시대 흑운모편마암(biotite gneiss) 및 호상편마암(banded gneiss)을 선캄브리아시대부터 고생대에 이르는 옥천층군의 변성퇴적물(metasediment)이 부정합으로 피복하고 있으며, 이를 중생대의 편상화강암(schistose granite), 흑운모화강암(biotite granite), 복운모화강암(two mica granite), 섬록암(diorite), 반상화강암(porphyrict granite), 홍색장석화강암(pink feldspar granite), 그레노파이어(granophyre), 석영반암(quartz porphyry) 및 각종 암

맥류가 관입하고 있으며, 이를 다시 제4기 충적층(alluvium)이 부정합으로 피복하고 있다(그림 1b; Park *et al.*, 1977; Kim and Lee, 1981; Hwang and Moon, 2018; Lee *et al.*, 2021).

그중 KURT를 포함한 부지의 주요 구성암석인 중생대 복운모화강암은 유성지질도폭 내에서 루프펜던트(roof pendant) 형태로 분포하는 흑운모편마암류, 변성퇴적물, 편상화강암과 흑운모화강암을 관입하며, 도폭의 북동부로부터 남부에 이르는 넓은 영역에 분포한다. 따라서 연구지역 내 복운모화강암은 이전에 형성된 암석들을 포획하는 형태로 산출되며, 지질도상에서 렌즈상의 페그마타이트(pegmatite)를 포함하고 있다. 도폭에 의하면 페그마타이트 암맥의 두께는 대부분 5 m 미만이며, 밀집부에서 복운모화강암 내 백운모의 함량이 증가하는 경향이 있다(Park *et al.*, 1977). 도폭상에서 균집의 형태로 나타나는 고철질 암맥과 규장질 암맥은 KURT 지역의 주요 구성암석인 복운모화강암과, 이후에 형성된 중생대 섬록암, 반상화강암, 홍색장석화강암, 그리고 석영반암을 관입하며, 도폭 전역에 남-북 방향



**Fig. 1.** (a) Geotectonic map of the Korean Peninsula with the Yuseong area marked in a black box (modified from Kee *et al.*, 2019). (b) Geological map of the Yuseong area (modified from Park *et al.*, 1977; Kim and Lee, 1981; Hwang and Moon, 2018; Lee *et al.*, 2021). (c) Location map of the boreholes KURT (KAERI Underground Research Tunnel) used in this study.

**Table 1.** General information about four boreholes used in this study (Park *et al.*, 2021a).

Borehole ID	Drill Direction	Horizontal Coordinates		Ground Level (EL. m)	Drill Depth (m)
		Northing	Easting		
AH-1	vertical	424,745	232,989	89.80	450
AH-3	vertical	424,619	233,388	82.60	1,000
DB-2	vertical	425,032	232,498	108.16	1,000
YS-1	vertical	424,767	232,743	83.55	500

으로 나타난다. 또한 약대를 따라 얇게 관입하는 암맥의 특성상 KURT 부지 내에 소규모로 분포하고 있다.

한국원자력연구원에서는 2006년부터 연구지역인 KURT 부지의 지질학적, 수리지질학적, 지구화학적, 열역학적 특성을 연구하기 위한 다수의 시추공을 확보하였다. 시추공은 연구 목적에 따라 최소 100 m부터 최대 1 km까지 다양한 심도를 갖고 있으며, 수직공과 경사공은 물론 수평공도 존재한다. 이번 연구에서는 심부 지질특성의 수직적인 분포를 파악하기 위해 400 m 이상의 심도를 지닌 수직공을 대상으로 수직 및 수평적 암상 변화를 조사하였다. 이를 위해 시추공 간에 충분한 이격을 둔 네 공(AH-1, AH-3, DB-2, YS-1)을 선정하였다(그림 1c). AH-1 시추공은 약 450 m, YS-1 시추공은 약 500 m, AH-3과 DB-2 시추공은 약 1,000 m 심도이며, 기본적인 시추공 정보는 표 1과 같다(Park *et al.*, 2021a).

### 3. 시추코어 암상분포 분석절차

시추코어를 활용한 심부의 암상분포 분석은 광역규모(유성지질도폭; Park *et al.*, 1977)에서의 암석학적 특성을 바탕으로 수행하였다. 시추공의 심도별 암상분포를 파악하기 위해 유성지질도폭에서 보고된 암상별 분포와 광물학적 특징을 바탕으로 암상의 사전분류를 진행하였다. 사전분류 결과를 바탕으로 시추코어 시료를 채취하여 지화학분석 및 현미경 관찰을 수행하여 네 개의 시추공 내 심도별 암상분포를 파악하였고, 이를 종합하여 시추코어를 이용한 심부 암상분포 분석절차를 제시하였다(그림 2).

#### 3.1. 사전분류

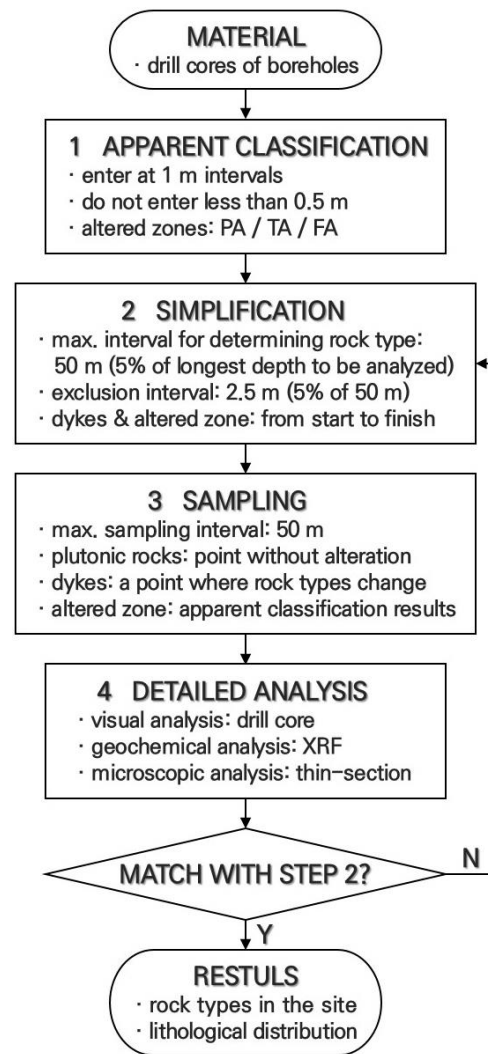
먼저 시추코어의 심도별 구성광물, 입도, 결정도, 그리고 색 등의 겉보기 특징을 사전분류하였으며, 이때 다음과 같은 기준을 설정하였다(Choi *et al.*, 2021b).

- i) 시추작업시 시추코어 회수 단위인 1 m 간격으로 겉보기 암상 판별
- ii) 시추코어 회수 단위 1 m의 과반 이하인 50 cm 이내의 암상 변화 제외
- iii) 변질대의 경우 단열을 따라 부분적으로 변질된 부분

과 완전하게 변질되어 이전 암상의 확인이 어려운 부분으로 분류해 겉보기 암상 판별과 별도 표기

iv) 단층대의 경우 앞의 변질대와 구분하기 위해 파쇄 구간에 인접한 변질 부분을 기재

이러한 기준을 바탕으로 사전분류된 심도별 암상분포 결과는 칼럼 형태의 데이터베이스로 정리하였다(그림 3 AC,



**Fig. 2.** Flowchart of the procedure for analyzing deep lithological distribution using drill cores (modified from Choi *et al.*, 2021a, 2021b, 2022; Jeong *et al.*, 2021; Jung *et al.*, 2021, 2022).

4) 사전분류된 암상들의 특징은 표 2와 같다(Modified from Choi *et al.*, 2021a, 2021b; Jung *et al.*, 2021).

시추코어의 대표암상을 결정하기 위해서는 구간의 단순화 작업이 필요하다(Palmén *et al.*, 2004; Aaltonen *et al.*, 2010). 따라서 앞서 1 m 간격으로 정의한 칼럼을 일차적으로 단순화하여 심도별 암상을 정의하였으며, 이때 다음과 같은 기준을 설정하였다.

- i) 암상 결정시 최대 간격은 50 m (분석 대상 시추공 최장 심도인 1,000 m의 5%)로 설정하고, 폭이 그 이상일 경우 추가 시료채취를 통해 암상 정의
- ii) 앞의 기준을 따르되 2.5 m (최대 암상 결정 간격인 50 m의 5%) 이내의 폭은 제외
- iii) 폭 2.5 m 이내로 연속적으로 나타나는 암맥류의 경우 시작지점부터 종료지점까지 한 구간으로 기재
- iv) 점이적인 변질대의 경우 시작지점부터 종료지점까지 한 구간으로 기재

이렇게 단순화된 결과(그림 3 SC, 4)는 이후 시료위치 선정기준이 된다. 앞의 기준에 따른 네 시추공에서의 겹보기 특징 파악 및 1차 단순화 결과는 각각 표 3~6의 AC 및 SC와 같다.

### 3.2. 시료채취

사전분류 단계에서의 겹보기 특징 분석과 단순화를 통해 정의된 결과를 바탕으로 각 시추공에서 시료를 채취하였으며, 이때 다음과 같은 기준을 설정하였다.

- i) 최대 암상 결정 간격인 50 m마다 시료위치 선정(50 m 이상의 구간은 추가 선정)
  - ii) 심성암의 경우 구간 내 변질 및 관입 영향이 없는 위치 선정
  - iii) 암맥류의 경우 겹보기 특징 변화를 보이는 위치 모두 선정
  - iv) 거정질 암맥의 경우 겹보기 특징이 같은 구간 내 대표위치 선정
  - v) 변질대의 경우 겹보기 특징 변화가 같은 구간 내 대표위치 선정
- 이렇게 채취된 시료는 이후 지화학 및 암석기재학적 분석에 사용된다.

### 3.3. 지화학분석 및 시료기재

선정한 시추코어 시료의 전암 주원소 성분을 한국지질자원연구원 지질자원분석센터에 설치된 X-선 형광분석기(X-ray

Rock Type Classification of "DB-2" Borehole at Depth / Edit: Choi / Date: 220707

Box no.	Depth from (1m interval)	APPARENT ROCK TYPE								+Alteration
		DYKE			GRANITE					
		M mafic	F felsic	P pegmatitic	Gt normal	Gt-l light	Gt-d dark	Mt migmatite		
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
CORE155-1	909	*								
	910									
	911									
CORE155-2	912									
	913									
	914									
	915									
	916				*					
	917									
CORE156	918									
	919									
	920									
	921									
	922									
	923									
CORE157	924					*				
	925									
	926									
	927									
	928									
	929									
	930									
CORE158	931					*				
	932									
	933									
	934									
	935									
	936									
	937									
CORE159	938								PA	
	939								PA	
	940								PA	
	941								PA	
	942								PA	
	943								PA	
	944								PA	
CORE160	945								PA	
	946								PA	
	947								PA	
	948								PA	
	949								PA	
	950								FA	
CORE161	951					*			FA	
	952								FA	
	953								FA	
	954								FA	
	955								FA	
	956								FA	

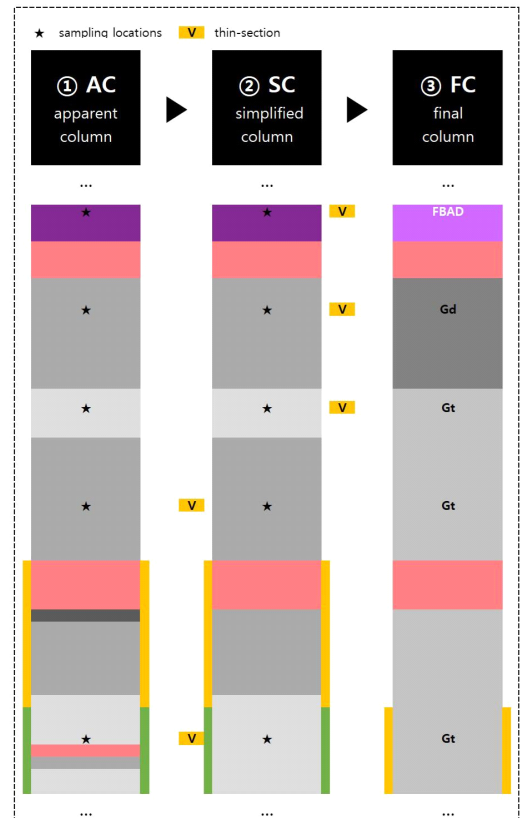
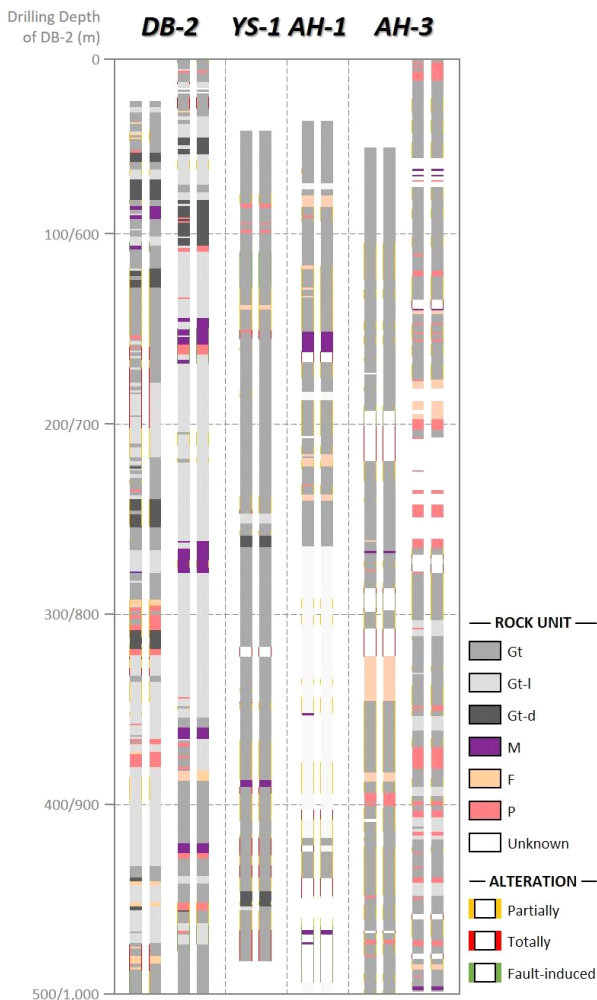


Fig. 3. An example of the data sheet of rock type analysis and its classification into three different stages. (a) Apparent classification. (b) Simplification. (c) Final rock types. Sampling locations are marked as a star mark. See the text and Table 2 for abbreviations.

fluorescence spectrometer, Shimadzu SRF-2400)를 활용하여 분석하였으며(표 7), 이를 기반으로 화성암 시료를 분류하고 지화학적 특성을 구분하였다(그림 5, 6). 또한, 암석의 박편을 제작하여 겉보기 특징으로 확인할 수 없는 광물들의 조직적 특성을 분석하였다. 만약 분석결과가 사전분류 결과와 일치하지 않을 경우, 사전분류에서 정의된 해당 구간을 지화학 및 암석기재학적 분석결과를 활용해 수정하였다. 또한 사전분류 단계에서 50 m 이상 구간이 같은 암상으로 정의되어 채취된 다수의 시료가 서로 다른 암상으로 확인될 경우 추가 시료를 채취하여 동일한 분석을 통해 재검토한다.



**Fig. 4.** Geological log showing the rock types of all boreholes at the pre-classification stage. Apparent columns (AC) are on the left, and simplified columns (SC) are on the right for each. The geological log depths (m) of all boreholes are calibrated to the ground level (108.16 m), which is the zero point of the DB-2 borehole. For the locations and ground level of the borehole, see Figure 1 and Table 1, respectively. See the Table 1 for abbreviations.

## 4. KURT 부지 대표암상 분류

사전분류, 지화학 및 암석기재학적 분석 결과를 종합하여 KURT 부지의 대표암상을 도출하였다. 연구지역의 심성암체 내에는 다양한 성분 및 조직적 특징을 갖는 암맥류들이 10 cm 이내부터 약 25 m 두께까지 다양하게 관입하고 있다. 대부분의 암맥은 고철질 성분을 갖지만, 일부 규장질 성분과 거정질 입도를 보이는 암맥류도 발달한다. 또한, 단열대 또는 열수에 의한 변질구간도 발달한다. 이 외에 복잡한 구조나 중첩된 변질작용에 의해 명확하게 구분할 수 없는 구간은 암종미상으로 분류하였다. 상세히 분류된 각 암상들의 특성은 다음과 같다.

### 4.1. 화강암류

KURT 부지의 화강암류는 유성지질도폭의 복운모화강암에 해당하는 화강암과 함께 화강섬록암으로 구성되며, 복운모화강암에 특징적으로 발달하는 페그마타이트 암맥도 부지 내 화강암류에서 나타난다(Park *et al.*, 1977). 화강암과 화강섬록암은 대표암상 분류에서 지화학 및 암석기재학적 분석 결과에 의해 다른 암상으로 분류되었지만, 각 분석에서 점이적인 화학성분 차이와 구조적 변화를 보인다(그림 5a). 이번 연구에서의 분석절차에 따라 분류된 화강암류는 다음과 같은 특성을 갖는다.

화강암(granite, Gt)은 등립의 중립질 내지 조립질 입도로 육안상으로 입자의 구분이 가능하다(그림 7a, 7b). 박편상에서는 석영, 정장석, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모, 그리고 일부 장석이 견운모화(sericitization)된 것을 관찰할 수 있다. 주요 광학적 특징으로 석영에서의 파동소광, 정장석에서의 퍼사이트조직(perthite texture), 사장석에서의 알바이트쌍정(albite twin), 미사장석에서의 격자쌍정(tartan twin)이 관찰된다.

화강섬록암(granodiorite, Gd)은 알칼리-규산염 분류도(TAS diagram; Middlemost, 1994; Le Maitre *et al.*, 2002)에서 화강섬록암 영역에 도시되지만, 연구지역 내 화강암과 비슷한 영역 내에 함께 군집으로 나타난다(그림 5a). 육안상으로 화강암과 같이 입자의 구분이 가능하나, 흑운모의 함량이 높으며 일부 화강섬록암은 화강암보다 작은 약 1~2 mm 크기의 중립질 입도를 보인다(그림 7c, 7d). 박편상에서는 석영, 사장석, 흑운모, 백운모, 견운모 등을 관찰할 수 있다. 주요 광학적 특징으로 사장석과 석영의 연정에 의해 별레가 굽아 먹은 듯한 모양의 미르메카이트조직(myrmekite texture)과 사장석에서의 알바이트쌍정이 관찰된다(그림 8b).

연구지역의 심성암류인 화강암과 화강섬록암으로 분류된 암석들을 대상으로 주원소 함량에 대한 지화학적 분석 결과, 알칼리-철-마그네슘 분류도(AFM diagram; Irvine and

**Table 2.** Pre-classified rock types for apparent analysis of selected samples (Modified from Choi *et al.*, 2021a, 2021b; Jung *et al.*, 2021).

Rock Type	Description
	[ rock unit ]
Normal granite (Gt)	coarse granite observed throughout the borehole
Lighter granite (Gt-l)	lighter granite than Gt
Darker granite (Gt-d)	darker granite than Gt
Mafic dyke (M)	dark-colored and fine-grained rock that cuts the host rock
Felsic dyke (F)	light-colored rock that cuts the host rock
Pegmatitic dyke (P)	pegmatitic rock that cuts the host rock
Porphyry (Pp)	similar to granite but with porphyry
Migmatite (Mt)	a mixture of leucosome and melanosome, such as a melting structure
	[ alteration ]
Partially altered zone (PA)	a part of the original facies changes locally or shows gradual changes (mainly in the form of a thin band along the hydrothermal fracture)
Totally altered zone (TA)	a wide area is completely altered, and almost no apparent features of the original facies
Fault-induced altered zone (FA)	completely altered zone in a section with high fracture density

Baragar, 1971)에서 칼크-알칼라인(calc-alkaline) 계열에 속하며(그림 6a), 산화칼륨-규산염 분류도(K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> diagram; Peccerillo and Taylor, 1976)에서는 고칼륨(high-K)에서 중칼륨(medium-K) 칼크-알칼라인 계열에 속한다(그림 6b). 알루미늄 포화지수(Alumina Saturation Index, ASI) 도표(Shand, 1943)에서는 대부분 과알루미나(peraluminous) 특성을 보인다(그림 6c).

#### 4.2. 암맥류

유성지질도폭에 의하면 균집된 형태의 고철질, 규장질, 그리고 페그마타이트 암맥이 중생대 복운모화강암 및 이후 형성된 다른 화강암류를 관입하며, 특히 페그마타이트 암맥은 5 m 이하의 두께로 나타난다(Park *et al.*, 1977). 이번 연구에서 대표암상으로 분류된 고철질 및 규장질 암맥은 부지 내에 광범위하게 분포하는 화강암 및 화강섬록암을 관입하고 있으며, 거정질 암맥 또한 이들 암석을 대부분 5 m 이하의 얇은 두께로 관입하는 특징을 보인다. 이번 연구에서의 분석절차에 따라 분류된 암맥류는 다음과 같은 특성을 갖는다.

현무암질 암맥(basaltic dyke, BD)은 알칼리-규산염 분류도에서 현무암(basalt) 영역에 도시된다(그림 5b). 육안으로는 입자가 거의 구분되지 않으며(그림 7e, 7f), 박편상에서는 세립질 입도를 보이고, 사장석, 각섬석, 흑운모가 미립질의 기질부를 형성한다(그림 8c).

현무-안산암질 반암맥(basaltic-andesitic porphyritic dyke, BAPD)은 알칼리-규산염 분류도에서 현무암-안산암(basalt-andesite) 영역에 도시된다(그림 5b). 육안으로는 입자의 구

분이 힘들고, 약간의 반정을 함유하고 있다(그림 7g, 7h). 박편상에서는 현무암질 암맥과 다르게 입자의 구분이 가능한 현정질(phaneritic) 조직을 보이며, 사장석, 각섬석, 흑운모로 구성된 미립질 입도의 기질 내에 약 500 μm 크기 이내의 휘석, 석영, 또는 녹니석류 반정을 함유하는 반상(porphyritic) 조직을 보인다. 특히 침상의 사장석들 사이에 휘석이 분포하는 입간조직(intergranular texture)과 유리질로 채워진 층간상조직(intersertal texture)이 관찰된다(그림 8d).

세립질 현무-안산암질 암맥(fine-grained basaltic-andesitic dyke, FBAD)은 알칼리-규산염 분류도에서 현무암-안산암(basalt-andesite) 영역에 도시된다(그림 5b). 육안으로는 입자의 구분이 가능한 현정질 조직을 보이나 반정은 함유하고 있지 않다(그림 7i, 7j). 박편상에서는 흑운모, 사장석, 그리고 석영이 완정질 및 등립질의 구조를 보이며, 자형의 흑운모를 함유하고 있다. 특히 사장석과 석영이 상접하는 부분에서 미르메카이트조직이 관찰된다(그림 8e).

세립질 안산암질 암맥(fine-grained andesitic dyke, FAD)은 알칼리-규산염 분류도에서 안산암(andesite) 영역에 도시된다(그림 5b). 육안으로는 입자의 구분이 가능한 현정질 조직을 보이나 반정은 함유하고 있지 않다(그림 7k, 7l). 박편상에서는 석영, 사장석, 그리고 흑운모가 완정질 및 등립질의 구조를 보이며, 세립질 현무-안산암질 암맥에 비해 흑운모의 입도가 작고 함량이 적다(그림 8f).

안산암질 반암맥(andesitic porphyritic dyke, APD)은 알칼리-규산염 분류도에서 안산암(andesite) 영역에 도시된다(그림 5b). 육안으로는 입자의 구분이 힘들고 약간의 반정을 함유하고 있다(그림 7m, 7n). 박편상에서는 주로 풍화된

**Table 3.** Rock types of AH-1 at the apparent classification step, simplification step, and final step with sampling locations. Abbreviation: D=depth from; RT=rock type; AT=alteration type. See the text for other abbreviations.

D (m)	AC		SC		FC	
	RT	AT	RT	AT	RT	AT
17	WR		WR		Gd	PA
38						
41	Gt	PA	Gt	PA		
43						
48	Gt-l		Gt-l		Gt	
51						
53	Gt	PA	Gt	PA		
54	F		F		TA	
60	Gt	PA		PA		
64	P					PA
65	Gt	PA		PA		
67						
89	F					
91	Gt		Gt		Gt	
100	F					
101	Gt	PA		PA		PA
104	F					
105	Gt					
122	M		M		APD	
132	Uk	TA	Uk	TA		TA
137	Gt	PA	Gt	PA		PA
145						
152	Gt-l		Gt-l			
156	Gt	PA		PA	Gd	PA
174	Gt-l					
175	Gt		Gt			
179		PA		PA		PA
183	F					
184	Gt					
185			F			TA
186	F					
189		PA		PA		
190	Gt					
198	P		Gt			
199	Gt	PA		PA	Gd	PA
203	F		F			TA
206	Gt		Gt		Gd	
229						
255		PA		PA		PA
260						
263		PA		PA		PA
268	Gt-l					
295		PA		PA		PA
298			Gt-l	PA	Gt	PA
304		PA		PA		PA
312	M					
313						
336	Gt-l	PA		PA		PA
352						
360	Uk	TA	Uk	TA		TA
365	Gt-l	PA	Gt-l	PA		
374	Gt		Gt			
378	Uk	TA	Uk	TA	Gt	
381	Gt	PA	Gt	PA		
394	Uk	TA	Uk	TA		
403		PA		PA		TA
404					Gt	
414	Pp	PA	Pp	PA		
418						TA
420	M		M		BD	FA
422	Pp	FA		FA		
426	M		Pp			TA
427	Pp					
446	Gt-l		Gt-l		Gt	

석영과 견운모로 구성된 미립질 입도의 기질 내에 약 200~500  $\mu\text{m}$  크기의 흑운모 반정을 함유한다(그림 8g).

유문암질 반암맥(rhyolitic porphyritic dyke, RPD)은 알칼리-규산염 분류도에서 유문암(rhyolite) 영역에 도시된다(그림 5b). 육안으로는 기질을 구성하는 입자의 구분이 힘들며 약 1 mm 크기의 백색 반정을 확인할 수 있다. 박편상에서도 약 300~500  $\mu\text{m}$  크기의 정장석과 견운모 반정이 확인되며 석영, 사장석, 그리고 백운모로 구성된 기질은 견운모화되거나 일부 풍화된 것으로 보인다(그림 8h).

거정질 암맥(pegmatitic dyke, P)은 육안으로 최대 약 3 cm의 매우 큰 입자크기의 장석을 확인할 수 있다(그림 7o, 7p). 연구지역에 분포하는 거정질 암맥은 일부 5 m 이상의 두께도 보이지만, 대부분 약 1 m 이하로 다른 암맥류에 비해 얇은 두께로 발달한다.

#### 4.3. 변질대

변질대의 경우, 사전분류에서의 단층대로 추정되는 구간에 발달한 변질대(FA)는 단열이 매우 밀집되어 있기 때문에 이후 발생한 열수작용 등의 영향에 의해 완전한 변질대(TA)와 유사한 양상을 보인다. 실제로 이번 연구에서 활용된 네 개 시추공에서 확인된 변질작용을 받은 것으로 보이는 암상들이 존재하는 구간에 많은 단열들이 발달하고 있다. 대표암상 분류에서는 사전분류에서 단층대로 추정된 구간 중에서도 단열의 밀도가 매우 높고 모암의 특징이 거의 남아있지 않은 구간을 완전한 변질대(TA)로, 단열의 밀도가 높지만 일부 단열을 따라 얇은 띠 형태의 국부적인 변화를 보이는 구간은 부분적인 변질대(PA)로 구분하였다.

### 5. KURT 부지 암상분포 특징

#### 5.1. 시추공별 암상분포 특징

KURT 연구지역에 굴착된 시추공 중 이번 연구에 활용된 네 개 시추공에 대한 사전분류, 단순화, 지화학 분석 및 암석기재학적 관찰 결과를 종합하여 심도별 암상분포를 산출했다(그림 3 FC, 4). 자세한 심도별 암상분포 분석결과는 표 3~6, 그림 9와 같다. 그림 9에서 심도별 암상분포는 지반고(표 1)와 상부의 풍화대 두께를 고려하여 실제 암반이 나타나는 지점부터 표기하였다. 지반고의 보정은 가장 높은 DB-2 (108.16 m) 시추공에 맞추어 나머지 세 시추공 YS-1 (83.55 m), AH-1 (89.80 m), AH-3 (82.60 m)에서 각각 24.61 m, 18.36 m, 25.56 m 깊게 보정하였다. 그리고 암반이 아닌 상부의 풍화대 두께는 DB-2, YS-1, AH-1, AH-3 시추공에서 각각 25 m, 16 m, 17 m, 26 m이다. 따라서 DB-2 시추공의 굴착시점으로부터(그림 9의 0 m 지점) 암반이 처음 나타나는 깊이는 DB-2, YS-1, AH-1, AH-3 시



**Table 4.** Rock types of AH-3 at the apparent classification step, simplification step, and final step with sampling locations. Abbreviation: D=depth from; RT=rock type; AT=alteration type. See the text for other abbreviations.

D (m)	AC		SC		FC		D (m)	AC		SC		FC	
	RT	AT	RT	AT	RT	AT		RT	AT	RT	AT	RT	AT
18	WR		WR		WR	PA	458	Gt	PA				PA
26							464	P					
78		PA				PA	465						
98							474		PA	Gt	PA	Gt	PA
103		PA				PA	478	Gt					
108							483		PA		PA		PA
120	Gt	PA				PA	486						
125							487	P					
128		PA	Gt	PA	Gt	PA	488	Gt					
133							489	P		P		P	
140		PA					490	Gt					
142							492	P					
148	Uk						497						
149							507		PA		PA		PA
156	Gt	PA					515						
158							519	Gt	PA	Gt	PA	Gt	PA
166		PA				PA	526						
169	Uk	FA	Uk	FA		TA	531		PA		PA		PA
177		TA					540	Uk		Uk			
196		PA					546	M		M			
207							547	Uk		Uk		Uk	
216	Gt	PA					549	M		M			
218			Gt			Gt	550	Uk		Uk			
239	F						552	P		P		P	
240	Gt						553	Uk		Uk		Uk	
245	M		M			FAD	556		PA		PA		PA
246							563						
250	Gt	PA				PA	568		PA		PA		PA
254			Gt			Gt	573	Gt					
255	P						583		PA	Gt	PA	Gd	PA
256	Gt						589						
262		PA				PA	593	P					
265		TA				TA	594	Gt					
268	Uk	FA	Uk	FA		RPD	602	P		P		P	
276							605		PA		PA	Gt	PA
277		TA				PA	618	Gt	TA	Gt	TA		TA
278	Gt	PA	Gt	PA		Gt	623	M		M		FAD	
287	Uk	TA	Uk	TA		TA	624	F		F		Uk	
302						PA	626	Gt		Gt			
306	F		F			RPD	631	P		P			
317							632	Gt		Gt			
326	Gt	PA	Gt	PA		PA	636	P	PA	P	PA		PA
365	F		F			TA	637	Gt		Gt		Gt	
370	Gt	PA	Gt	PA		PA	640	P		P			
376	P						641						
381	Gt		P			P	643	Gt	PA	Gt	PA		PA
382	P						649						
383							654		PA		PA		PA
384	Gt	PA					662	P					
390	Uk					PA	663	F		F			
392		PA					667	Uk		Uk		Uk	
397							674	F					
400	Gt	PA				PA	679	Uk		F			
402							681	F					
405		PA	Gt	PA	Gt	PA	684	P		P		P	
432	P						690	Gt		Gt			
433							694	P					
437		PA				PA	695	Uk				Uk	
445	Gt						712	P		Uk			
451		TA				TA	713	Uk					
452		PA				PA	723	P		P		P	
456							725	Uk		Uk		TA	
457	P	FA	P			P	731	P		P		P	
							738	Uk		Uk		UK	

Table 4. (continued.)

D (m)	AC		SC		FC	
	RT	AT	RT	AT	RT	AT
750	P		P		P	
755	Gt	PA	Gt	PA	Gt	PA
759		TA		TA		
761	Uk	FA		FA		
764		TA	Uk			TA
768	P					
769	Gt	PA	Gt	PA		PA
795	Gt-l					
799	P		Gt-l		Gt	
800	Gt-l					
804		PA				
806						
820	Gt	PA		PA		PA
823			Gt		Gd	
824	Gt-l					
825						
831	Gt	PA		PA		PA
842	P					
843	Gt	PA	P		P	
844	P					
845	Gt	PA	Gt	PA	Gd	PA
848	Gt-l		Gt-l		Gt	
856						
860	Gt	PA	Gt	PA	Gd	PA
865	P		P		P	
877						
882	Gt	PA	Gt	PA		PA
887	Gt-l		Gt-l		Gt	
892	Gt		Gt			
895	P	PA	P	PA	P	PA
897						
898	Gt		Gt		Gt	
900	P		P		P	
904	Gt-l					
909	Gt		Gt-l		Gt	
910	Gt-l					
912	P		P		P	
914	Gt-l		Gt-l			
916						
920	Gt	PA		PA		PA
923	P					
924	Gt		Gt		Gt	
931	P					
932	Gt					
937	P		P		P	
940	Gt-l		Gt-l			
947	Gt					
948	P		Gt		Gt	
949	Gt					
957	Uk	TA	Uk	TA		TA
960	Gt	PA	Gt	PA	Gt	PA
970						
972	P		P		P	
975	Gt		Gt		Gt	
979	Uk	TA	Uk	TA		TA
982						
983	Gt	PA	Gt	PA	Gt	PA
985	F	PA	F		Uk	
988	Gt					
991	P					
992			Gt		Gt	
995	Gt	PA				
997	M		M		BD	
999	Gt		Gt		Gt	

추공에서 각각 25 m, 40.61 m, 35.36 m, 51.56 m이다. 아래에서는 네 시추공에서 모두 관찰되는 화강암과 화강섬록암 외에 시추공별로 분포하는 암맥류에 대해 기술하였다.

5.1.1. AH-1

AH-1 시추공에서 관찰되는 고철질 암맥은 약 122~132 m, 420~422 m 심도에 분포한다. 고철질 암맥을 확인할 수 있었던 시료 중 125 m 심도에 분포하는 암석은 사전분류에서 암흑색의 암상과 비현정질 입도에 반정을 포함하고 있다. 현미경 관찰에서도 기질 내 반정을 함유하고 있어 이 암석을 안산암질 반암맥(APD)으로 분류하였다. 421 m 심도에 분포하는 암석은 사전분류에서 암흑색의 암상을 가지며 세립질 입도에 반정은 포함하고 있지 않다. 현미경 관찰에서도 뚜렷한 반정은 없이 등립질의 기질부를 형성하고 있어 이 암석을 현무암질 암맥(BD)으로 분류하였다.

AH-1 시추공에는 규장질 암맥은 발달하지 않으나 변질대를 따라 화강암류를 구성하는 광물의 색이 변한 부분이 다수 분포한다.

5.1.2. AH-3

AH-3 시추공에서 관찰되는 고철질 암맥은 약 245~246 m, 623~624 m, 997~999 m 심도에 분포한다. 고철질 암맥 시료 중 245 m와 624 m 심도에 발달하는 암맥은 사전분류에서 암흑색의 암상을 가지나 부지 내 다른 고철질 암맥들에 비해 입도가 큰 특징이 있다. 현미경 관찰에서는 세립질 입도를 보이며 등립질 조식을 보여 이 암석을 세립질 안산암질 암맥(FAD)으로 분류하였다. 998 m 심도에 분포하는 암맥은 사전분류에서 뚜렷한 반정이 없는 암흑색의 암상을 가져 이 암석을 현무암질 암맥(BD)으로 분류하였다.

AH-3 시추공에서 관찰되는 규장질 암맥은 약 268~277 m, 302~326 m 심도로 대략 60 m 구간에서 걸쳐 집중되어 분포한다. 규장질 암맥을 확인할 수 있었던 272 m, 309 m, 320 m 심도의 시료는 모두 사전분류에서 담회색에서 담녹색을 띠며 약 2 mm 크기의 반정을 함유하고 있다. 현미경 관찰에서는 모두 심한 변질을 받아 기질부는 건운모화되었으며 반정으로 산출되는 장석들도 변질을 받았다. 이 암석은 유문암질 반암맥(RPD)으로 분류하였으며 변질과 상관성이 있는 것으로 보인다.

또한, AH-3 시추공의 376 m 심도부터 약 1~10 m의 폭을 갖는 다양한 두께의 거정질 암맥이 다수 분포한다. 이 시추공에 분포하는 대부분의 거정질 암맥은 정장석의 함량이 높아 홍색을 띠지만 일부 백색의 거정질 암맥도 분포한다. 앞서 기술한 AH-3 시추공에서만 흔히 관찰되는 규장질 암맥과 거정질 암맥은 다른 시추공에 비해 주변 화성활동의 영향을 많이 받았음을 지시하며, 연구지역 내 후기 화성활동

**Table 5.** Rock types of DB-2 at the apparent classification step, simplification step, and final step with sampling locations. Abbreviation: D=depth from; RT=rock type; AT=alteration type. See the text for other abbreviations.

D (m)	AC		SC		FC		D (m)	AC		SC		FC	
	RT	AT	RT	AT	RT	AT		RT	AT	RT	AT	RT	AT
19	WR		WR		WR	PA	193		TA		TA		TA
24	Gt		Gt				198	Gt-l					
27	Gt-l		Gt-l				208	Gt	PA	Gt-l	PA		PA
32	Gt						209	Gt-l					
36	F						214	Gt					
37	Gt						215						
40	Gt-l						216	Gt-l	PA				
41	Gt						217	Gt					
42	Gt-l	PA	Gt	PA		PA	218	Gt-d	PA				
43	F						219	Gt-l					
45	Gt						220	Gt		Gt			
46							222	Gt-l					
51	P				Gt		224						
52	Gt-d		Gt-d				225	Gt	PA				
57	Gt	PA					227						
59			Gt				229	P				Gt	
61							231	Gt					
62	Gt-l	PA	Gt-l	PA		PA	233	Gt-l					
64							235	Gt-d					
67	Gt-d		Gt-d				241	Gt					
76							243	Gt-l					
77	Gt	PA	Gt				245	Gt-d	PA	Gt-d	PA		PA
79							246	Gt-l					
81	M						247						
83	Gt						249	Gt-d					
84	Gt-l		M		FAD		250	Gt					
85	M						257	Gt-l	PA	Gt			
87	Gt						258	Gt					
92	Gt-l		Gt				263	Gt-l		Gt-l			
93	Gt						273	M					
96							274	Gt					Gd
99	Gt-l		Gt-l				277	Gt-l		Gt			
102	M	FA		FA		PA	278	Gt					Gt
103	Gt		Gt				288	F		F			P
104							292	Gt-l		P			
114	Gt-l						293	P					Gd
115	Gt-d		Gt-d		Gt		294	Gt	PA	Gt	PA		PA
118	Gt	PA					297	P				P	
120	Gt-d						298	Gt		P			
124	Gt			PA		PA	301	P					Gt
149							305						
150	P						308						
151	Gt						311	Gt-d	PA	Gt-d	PA		Gd
152	Gt-l	PA					313						PA
153	Gt						314	P	PA	P	PA		P
154							316						
155	P						317		TA		TA		
156	Gt		Gt				319	Gt-l	PA	Gt-l	PA		TA
157	Gt-l	TA		TA		TA	323		TA		TA		
158	Gt						328	Gt		Gt			
160	Gt-l						331		PA		PA		
161							342						
162	Gt	PA		PA	Gt	PA	347	Gt-l	PA		PA		
167	Gt-l						349						
168	Gt						353	P		Gt-l			Gt
174	Gt-l						354	Gt-l					
176	Gt						359	Gt					
178	Gt-l	TA		TA		TA	360	Gt-l					
179	Gt		Gt-l				361	P					
180	Gt-l						362	Gt		P			P
191	Gt						363	P					

Table 5. (continued.)

D (m)	AC		SC		FC		D (m)	AC		SC		FC	
	RT	AT	RT	AT	RT	AT		RT	AT	RT	AT	RT	AT
365	Gt-l		Gt-l		Gt		589	Gt-d		Gt-d		Gt	
369	F						592	Gt-l					
370	P		P		P		593	P		P		P	
375	Gt-l						595	Gt-l					
376	Gt-d						620	P		Gt-l		Gt	
377							621	Gt-l					
381		PA	Gt-l	PA	Gt		632	M					
393	Gt-l						633	Gt-l					
394		PA		PA			635						
395							636	M		M		BD	
428	Gt						640	Gt-l					
435	Gt-d		Gt		Gd		641	M	FA		FA		
437	F		F		Gt	PA	644	P		P		Uk	
439	Gt-l		Gt-l				648	Gt-l					
448	F		F		P		652	M					
450	Gt-d						654	Gt-l					
452	Gt-l		Gt-l		Gt		690	Gt					
463	Gt						691		PA	Gt-l	PA	Gt	PA
464	Gt-l						698	Gt-l					
368							704		PA		PA		PA
469	Gt						705	Gt					
470	F		Gt		TA		708	Gt-l					
471	Gt						749	M					
476	F	TA	F	TA			750	Gt-l					
479	Gt				Gt		753			M		FAD	
481	F					PA	759	M	PA		PA		PA
482							763						BAPD
483	Gt	FA	Gt	PA			766	P					
497					Gd		767	Gt-l					
499	Gt-l						830	P					
500	P		P				831	Gt-l		Gt-l		Gt	
501	Gt		Gt				835	Gt					
507	Gt-l	TA	Gt-l	TA			836	Gt-l	PA				
508					Gt		837						
510	Uk		Uk				842	Gt		Gt			
511	Gt		Gt				845	M		M		FAD	
512	Uk		Uk				852	Gt-l					
513							854	Gt					
515	Gt	TA		TA		TA	855	P					
520			Gt				857	Gt					
522	F						862	P		Gt-l			
523	Gt						863	Gt				Gt	
525	Gt-l						867	P					
527	Gt				Gt		868	Gt					
529	Gt-l		Gt-l				870	F		F			
531	Gt						875	Gt		Gt			
532	Gt-l						907	M		M		FBAD	
535	Gt-d						913	P		P		P	
539	Gt-l		Gt-d		Gd		916	Gt		Gt		Gd	
541	Gt-d						925	Gt-l		Gt-l		Gt	
544							929	Gt		Gt			
547	Gt-l	PA	Gt-l	PA		PA	939	P		P		P	
552							942	Gt-d					
561	Gt		Gt				943	Gt	PA	Gt	PA		
564	Gt-l		Gt-l				949						
568	Gt-d				Gt		950	Gt-l		Gt-l			
577	P						953	P		P		Gt	PA
578	Gt-d						955	Gt	FA		FA		
579	P		Gt-d				956	Gt-l		Gt-l			
580	Gt-d						961						
588	Gt-l						964	Gt		Gt			

**Table 6.** Rock types of YS-1 at the apparent classification step, simplification step, and final step with sampling locations. Abbreviation: D=depth from; RT=rock type; AT=alteration type. See the text for other abbreviations.

D (m)	AC		SC		FC	
	RT	AT	RT	AT	RT	AT
14	WR		WR		WR	
16						
53	Gt	PA	Gt	PA	Gt	PA
59	P		P		P	
61	Gt		Gt		Gt	
70	P		P		P	
71	Gt		Gt		Gt	
74	P		P		P	
76						
87	Gt	FA	Gt	FA		
108					Gt	PA
118	F	PA	F	PA		
121	Gt					
133	P					
134		TA		TA		TA
138						
143		PA				
145					Gd	
167		PA	Gt			
168	Gt					
170		PA				
172						
230		PA		PA		PA
238		TA			Gt	
240	Gt-l		Gt-l			
246	Gt		Gt			
250		PA		PA		PA
253	Gt-d		Gt-d			
260	Gt		Gt			
318	Uk	TA	Uk	TA		TA
324						
342		PA				
344						
350	Gt	TA	Gt	PA	Gt	PA
351		PA				
355						
373		PA		PA		PA
396	M		M		APD	
400		TA		TA		TA
404		PA		PA		PA
420					Gt	
428		PA		PA		PA
430	Gt	TA	Gt	TA		TA
440		PA		PA	Gt	PA
446		TA		TA		TA
453		PA		PA	Gt	PA
461						
467	Gt-d	PA	Gt-d	PA	Gd	
469						
470	Gt-l					PA
472		PA		PA	Gt	
484	Gt		Gt			
489		TA		TA		TA

동과 거정질 암맥의 암상 구분에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

**5.1.3. DB-2**

DB-2 시추공에서 관찰되는 고철질 암맥은 약 80~87 m, 630~644 m, 748~765 m, 846~852 m, 907~912 m 심도에 분포한다. 고철질 암맥을 확인할 수 있었던 81 m 심도에 분포하는 시료는 사전분류에서 암흑색의 암상을 가지며 육안으로 입자가 구분되고 반정은 함유하고 있지 않다. 현미경 관찰에서는 다른 고철질 암맥에 비해 기질부 입자 크기가 크며 반정을 함유하고 있어 이 암석을 세립질 안산암질 암맥(FAD)으로 분류하였다. 642 m 심도에 분포하는 시료는 반정이 없는 암흑색의 암상을 가져 현무암질 암맥(BD)으로 분류하였다. 748~765 m 심도에 분포하는 암맥은 762 m 심도에서 다른 화학조성과 조직을 보이는데, 위쪽은 알칼리-규산염 분류도에서 안산암 영역에 도시되며, 육안으로 입자의 구분이 가능하나 반정을 함유하지 않는다. 반면 아래쪽은 알칼리-규산염 분류도에서 현무암-안산암 영역에 도시되며, 입자가 구별되지 않으나 반정을 함유하고 있다. 따라서 각각 세립질 안산암질 암맥(FAD)과 현무-안산암질 반암맥(BAPD)으로 분류하였다. 848 m와 909 m 심도에 분포하는 시료들은 모두 육안으로 입자 구분이 가능하고 반정을 함유하고 있으나, 알칼리-규산염 분류도에서 각각 안산암과 현무암-안산암 영역에 도시되어 세립질 안산암질 암맥(FAD)과 세립질 현무-안산암질 암맥(FBAD)으로 분류하였다.

AH-3 시추공에서 규장질 암맥은 나타나지 않았으나 거정질 암맥은 다수 분포한다. 특히 291~376 m 심도에서 2~8 m 두께로 다양하게 나타난다. 또한 이 구간은 최종 암상분포에서 변질대로 분류되었으며, 주변 화강암과 화강섬록암의 현미경 관찰에서도 변질구조를 보인다.

**5.1.4. YS-1**

YS-1 시추공에서 관찰되는 고철질 암맥은 약 396~400 m 심도에 분포한다. 고철질 암맥을 확인할 수 있었던 399 m 심도에 분포하는 시료는 사전분류에서 암흑색의 암상을 가지며 비현정질 입도에 반정을 포함하고 있다. 현미경 관찰에서도 기질 내 약하게 변질된 반정을 함유하고 있어 이 암석을 안산암질 반암맥(APD)으로 분류하였다.

YS-1 시추공에서 규장질 암맥은 약 118 m 심도에서 나타나지만, 최종 칼럼에는 표시되지 않았다. 반면 거정질 암맥은 약 59~76 m 구간 내에서 얇게는 10 cm 이내부터 두꺼운 것은 2 m 두께로 다양하게 분포하며, 최종 칼럼에는 1~2 m 두께로 표시되었다. YS-1 시추공 내 거정질 암맥은

**Table 7.** Whole-rock major element concentrations (wt.%) of the samples.

Borehole	Depth (m)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
AH-1	32.9	69.98	15.49	2.26	3.19	0.57	2.42	3.60	0.29	0.05	0.10	1.40	99.35
	39.5	70.71	15.07	2.24	3.31	0.65	2.73	3.63	0.28	0.05	0.10	0.72	99.49
	58.7	67.31	17.34	1.26	1.55	0.28	4.00	4.41	0.16	0.03	0.03	3.06	99.43
	77.7	70.35	15.14	2.39	3.17	0.62	3.12	3.46	0.25	0.05	0.09	0.83	99.47
	125.2	62.91	14.32	5.00	3.53	3.59	2.29	4.26	0.74	0.10	0.21	2.43	99.38
	133.5	72.88	14.25	1.53	1.14	0.69	3.01	3.42	0.27	0.03	0.10	2.18	99.50
	141.5	69.86	14.98	1.80	1.95	0.72	3.89	2.40	0.27	0.04	0.11	3.55	99.57
	149.9	70.85	14.96	2.32	3.32	0.56	2.69	3.40	0.24	0.05	0.09	1.01	99.49
	185.8	74.58	13.08	0.77	1.49	0.18	4.07	2.82	0.08	0.02	0.06	2.42	99.57
	189.8	67.80	14.66	2.62	3.21	0.45	3.05	3.23	0.28	0.05	0.12	4.22	99.69
	215.8	70.94	14.82	2.61	3.14	0.67	2.59	3.52	0.27	0.07	0.10	0.74	99.47
	232.5	72.93	14.40	1.38	2.04	0.12	3.63	4.00	0.12	0.07	0.04	0.80	99.53
	281.0	71.66	14.46	2.15	2.17	0.20	3.65	3.87	0.15	0.04	0.05	0.97	99.37
	332.9	71.85	14.64	1.64	2.09	0.22	3.87	3.87	0.15	0.06	0.04	1.05	99.48
	361.2	72.84	13.98	1.61	1.39	0.25	3.25	4.82	0.15	0.06	0.05	0.97	99.37
	403.3	72.51	12.99	1.34	2.16	0.22	3.33	3.55	0.19	0.07	0.05	3.18	99.59
	409.9	71.97	14.08	1.16	1.59	0.21	4.07	3.62	0.12	0.04	0.04	2.65	99.55
	421.3	41.16	13.90	21.01	2.43	10.91	0.67	0.13	1.07	0.52	0.24	8.37	100.41
437.2	72.69	13.57	0.91	1.78	0.15	3.74	3.95	0.12	0.04	0.04	2.43	99.42	
447.8	72.05	13.80	1.09	2.18	0.26	3.97	2.78	0.11	0.04	0.04	3.22	99.54	
AH-3	38.0	71.06	15.52	2.19	3.19	0.57	2.14	4.07	0.27	0.05	0.10	0.57	99.73
	38.0	74.55	14.48	0.44	1.05	0.10	5.86	2.33	0.04	0.03	0.04	0.78	99.70
	104.6	69.53	15.89	2.12	1.75	0.51	3.63	4.12	0.26	0.05	0.10	1.85	99.81
	169.2	70.37	15.64	1.83	1.66	0.40	2.80	3.58	0.26	0.04	0.09	3.82	100.49
	245.0	58.16	17.23	7.51	5.43	3.49	1.09	2.39	0.97	0.15	0.24	3.74	100.40
	272.0	76.09	13.20	1.07	0.54	0.08	4.58	3.40	0.06	0.06	0.02	1.12	100.22
	309.0	81.56	11.18	0.82	0.09	0.07	3.13	1.72	0.05	0.02	0.02	1.22	99.88
	320.5	76.39	12.97	1.03	0.71	0.06	4.60	2.63	0.05	0.06	0.02	1.55	100.07
	368.0	73.94	13.68	0.53	1.74	0.16	4.82	2.72	0.11	0.04	0.10	2.27	100.11
	410.5	90.91	3.81	1.01	1.43	0.12	1.27	0.03	0.01	0.03	<0.01	1.04	99.66
	451.7	76.13	12.38	0.83	2.42	0.25	4.04	0.59	0.11	0.04	0.04	3.37	100.20
	552.8	75.25	14.08	0.43	0.74	0.10	4.85	3.65	0.04	0.02	0.03	0.72	99.91
	565.0	69.06	15.96	2.23	2.45	0.63	3.92	3.55	0.29	0.06	0.19	1.53	99.87
	619.5	81.56	11.18	0.82	0.09	0.07	3.13	1.72	0.05	0.02	0.02	1.22	99.88
	623.8	57.87	17.34	6.44	4.24	2.39	3.26	1.40	1.14	0.09	0.28	5.81	100.26
	685.0	81.06	12.03	0.71	0.11	0.20	3.60	0.14	0.03	0.08	0.02	1.79	99.77
	727.0	67.33	15.49	2.58	4.16	0.51	2.52	4.42	0.29	0.11	0.12	2.74	100.27
	753.0	74.14	14.57	0.49	0.87	0.08	3.93	4.70	0.04	0.02	0.03	0.99	99.86
	784.0	70.74	15.51	1.84	3.11	0.53	3.23	3.56	0.19	0.07	0.10	0.91	99.79
	800.9	74.05	14.04	0.50	0.93	0.09	5.44	3.68	0.07	0.02	0.05	0.72	99.59
827.8	69.95	15.69	2.28	3.20	0.71	3.24	3.38	0.23	0.07	0.12	0.80	99.67	
855.1	73.17	14.71	0.58	0.80	0.11	5.95	3.12	0.07	0.02	0.03	1.20	99.76	
868.5	74.87	14.23	0.31	0.68	0.06	3.49	5.27	0.04	0.02	0.02	0.80	99.79	
911.0	74.94	13.98	0.41	1.13	0.06	5.24	3.54	0.05	0.03	0.02	0.40	99.80	
934.6	73.43	14.16	1.35	1.29	0.24	4.87	3.40	0.17	0.05	0.08	0.75	99.79	
938.8	79.90	11.72	0.91	1.10	0.13	1.21	3.73	0.08	0.03	0.02	0.91	99.74	
986.3	72.42	14.20	1.57	1.17	0.34	5.02	3.09	0.18	0.05	0.06	1.98	100.08	
994.9	72.03	15.32	1.47	2.34	0.41	3.54	3.54	0.16	0.05	0.10	0.88	99.84	
997.8	51.60	13.06	9.39	8.57	10.38	1.18	2.05	0.83	0.18	0.31	2.82	100.37	
DB-2	34.4	70.87	14.80	2.45	3.10	0.64	2.86	3.42	0.27	0.05	0.11	1.03	99.60
	63.4	71.76	14.05	2.11	1.78	0.59	4.44	3.01	0.28	0.06	0.12	1.52	99.72
	72.6	70.66	14.94	2.31	2.79	0.62	4.13	3.21	0.27	0.06	0.10	0.78	99.87
	81.8	61.85	15.53	6.09	5.18	3.00	2.68	2.93	0.85	0.10	0.24	1.16	99.61
	98.9	73.81	13.46	1.05	0.75	0.46	5.83	3.10	0.14	0.02	0.05	0.99	99.66
	120.5	70.49	15.47	2.11	3.25	0.58	2.78	3.92	0.23	0.06	0.09	0.61	99.59
	146.8	71.22	14.92	2.16	3.23	0.55	2.73	3.44	0.22	0.05	0.09	0.93	99.54
	158.0	71.65	15.47	1.77	1.75	0.61	3.37	2.96	0.24	0.05	0.11	1.73	99.71
	169.0	71.03	15.48	2.69	1.20	0.83	4.23	1.16	0.27	0.05	0.11	2.68	99.73
	190.0	81.97	9.45	0.71	2.08	0.40	1.77	1.39	0.09	0.02	0.03	1.81	99.72
220.0	71.90	17.70	2.00	2.89	0.50	2.75	3.72	0.22	0.05	0.09	0.76	102.58	

Table 7. (continued.)

Borehole	Depth (m)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
DB-2	260.8	72.36	14.48	2.11	2.62	0.46	2.68	3.92	0.21	0.05	0.03	0.76	99.68
	287.3	70.13	15.44	2.15	3.20	0.71	2.57	3.81	0.22	0.07	0.10	1.14	99.54
	289.5	71.73	13.31	0.62	1.68	0.17	7.33	2.27	0.09	0.03	0.05	2.28	99.56
	293.4	74.06	13.82	0.39	1.30	0.12	5.33	2.72	0.04	0.05	0.02	1.88	99.73
	293.8	70.38	13.12	2.31	3.24	0.54	1.44	4.79	0.23	0.07	0.11	3.57	99.80
	305.0	72.69	14.12	1.63	0.91	0.54	4.43	2.86	0.22	0.03	0.10	2.18	99.71
	309.2	70.01	15.35	2.27	3.33	0.80	3.03	3.42	0.24	0.07	0.12	0.99	99.63
	312.0	70.11	14.82	2.49	2.44	0.56	3.57	2.98	0.24	0.05	0.12	2.28	99.66
	317.2	71.52	13.96	1.33	2.14	0.23	3.58	4.03	0.13	0.04	0.03	2.79	99.78
	334.5	71.04	13.96	1.55	2.36	0.26	3.36	4.51	0.14	0.06	0.04	2.38	99.66
	345.7	72.37	14.56	1.59	2.12	0.29	3.58	3.97	0.16	0.08	0.03	0.97	99.72
	387.2	72.78	14.33	1.26	1.75	0.25	4.21	3.54	0.13	0.04	0.06	1.27	99.62
	415.0	72.87	14.74	1.17	2.21	0.26	3.78	3.98	0.13	0.03	0.05	0.45	99.67
	435.0	69.19	14.89	3.00	2.84	0.74	3.61	3.52	0.48	0.04	0.20	1.02	99.53
	437.3	74.07	14.17	0.59	1.08	0.08	3.88	4.61	0.04	0.02	0.01	1.20	99.75
	442.5	72.99	14.69	1.12	2.23	0.22	3.46	4.12	0.12	0.03	0.02	0.53	99.53
	458.0	73.71	14.26	1.23	2.20	0.28	3.29	4.00	0.14	0.02	0.04	0.52	99.69
	477.0	69.35	13.99	2.58	1.94	0.65	4.81	3.00	0.53	0.08	0.15	2.63	99.71
	487.9	69.16	15.68	2.87	3.80	0.77	1.02	4.60	0.39	0.06	0.13	0.97	99.45
	505.1	71.21	14.89	2.31	3.29	0.63	2.55	3.65	0.28	0.04	0.09	0.71	99.65
	528.5	72.85	14.36	1.25	1.54	0.25	4.00	4.06	0.13	0.03	0.03	1.14	99.64
	538.2	67.66	15.50	3.58	2.72	1.09	3.35	3.54	0.74	0.06	0.22	1.14	99.60
	560.8	69.82	14.60	2.87	1.88	0.65	5.07	3.31	0.48	0.06	0.15	0.66	99.55
	564.2	73.04	14.34	1.30	2.06	0.32	4.05	3.62	0.19	0.03	0.04	0.61	99.60
	583.2	70.57	14.39	2.39	1.82	0.61	5.29	2.97	0.44	0.05	0.14	0.93	99.60
	602.4	73.50	13.95	0.74	1.70	0.17	5.06	3.25	0.09	0.03	0.04	1.22	99.75
	642.1	49.84	13.21	10.13	8.75	10.95	3.14	0.78	0.90	0.19	0.33	1.58	99.80
	668.7	72.52	14.52	1.34	1.67	0.27	4.25	3.95	0.13	0.04	0.05	1.02	99.76
	733.0	73.05	14.32	1.18	1.99	0.28	4.36	3.46	0.14	0.03	0.03	0.80	99.64
	757.4	61.09	16.04	5.84	5.12	2.36	2.93	3.53	1.20	0.07	0.34	1.03	99.55
	764.5	56.22	14.49	8.08	9.97	4.43	1.58	1.96	0.82	0.17	0.27	1.61	99.60
	783.2	72.60	14.90	0.90	1.47	0.20	5.21	3.16	0.09	0.11	0.05	1.01	99.70
	814.8	73.49	14.31	1.10	2.05	0.27	3.86	3.57	0.13	0.04	0.04	0.73	99.59
848.8	59.27	16.02	6.96	5.78	3.13	2.76	2.55	1.27	0.09	0.38	1.40	99.61	
859.5	71.50	14.99	2.04	2.77	0.53	2.86	3.65	0.21	0.07	0.08	0.85	99.55	
909.5	55.41	17.10	8.23	7.40	4.07	3.45	0.86	1.39	0.10	0.44	1.16	99.61	
917.6	69.18	15.85	2.34	3.50	0.62	2.37	4.31	0.26	0.04	0.21	0.77	99.45	
933.2	70.74	15.42	2.02	3.22	0.52	2.44	4.27	0.25	0.03	0.10	0.59	99.60	
YS-1	28.2	72.15	14.18	2.46	3.11	0.56	2.73	3.23	0.29	0.06	0.10	0.55	99.42
	71.3	77.44	12.17	0.69	0.71	0.09	5.28	2.04	0.04	0.04	0.04	1.08	99.62
	81.7	71.27	14.49	2.48	3.01	0.59	3.40	3.06	0.30	0.06	0.11	0.65	99.42
	163.8	68.71	15.60	2.60	2.98	0.63	4.27	3.28	0.30	0.06	0.12	0.88	99.43
	175.8	72.12	14.67	1.53	2.21	0.20	3.74	3.84	0.14	0.06	0.05	0.76	99.32
	209.1	72.15	14.76	1.57	2.34	0.23	3.35	3.95	0.14	0.07	0.05	0.84	99.45
	242.9	73.46	13.52	1.32	1.07	0.20	5.44	3.03	0.16	0.05	0.05	1.18	99.48
	249.7	71.94	14.81	1.73	2.36	0.26	3.40	3.97	0.16	0.04	0.05	0.69	99.41
	258.4	71.33	14.10	2.44	2.16	0.53	4.26	3.17	0.33	0.04	0.10	0.90	99.36
	288.7	72.35	14.46	1.63	2.20	0.22	3.85	3.78	0.14	0.05	0.05	0.73	99.46
	319.4	72.14	14.16	1.05	2.05	0.23	2.83	3.74	0.16	0.03	0.05	3.03	99.47
	339.9	72.79	14.48	1.39	2.21	0.27	3.79	3.47	0.16	0.04	0.05	0.75	99.40
	384.6	72.13	14.22	1.79	1.30	0.23	4.19	3.80	0.12	0.20	0.05	1.37	99.40
	399.5	58.95	14.59	6.66	6.43	3.85	1.93	3.05	0.84	0.12	0.25	2.83	99.50
	423.5	73.00	14.44	1.47	2.27	0.19	3.57	3.73	0.12	0.08	0.03	0.41	99.31
	431.4	71.69	14.65	1.55	1.50	0.21	3.56	3.47	0.14	0.04	0.03	2.67	99.51
	451.8	70.64	14.10	1.28	2.43	0.13	4.31	3.74	0.10	0.04	0.03	2.91	99.71
	466.2	69.66	14.51	3.32	2.49	0.84	3.54	3.51	0.48	0.04	0.15	0.83	99.37
471.2	72.89	13.44	1.46	2.03	0.32	4.18	3.03	0.22	0.05	0.04	1.76	99.42	
488.0	72.92	14.28	1.13	1.18	0.25	4.43	3.43	0.12	0.05	0.05	1.69	99.53	
489.5	73.00	14.55	1.05	1.17	0.24	4.02	3.48	0.14	0.03	0.05	1.67	99.40	

대부분 사장석과 석영으로 구성되어 백색을 띤다.

5.2. 대표암상별 분포 특징

KURT 연구지역에 굴착된 시추공들에서 확인한 암상분포 분석 결과, 상부의 풍화대, 화강암과 화강섬록암을 포함한 화강암류, 그리고 이를 관입한 여러 암맥류로 구성된다. 이번 연구에서의 암상분포 분석결과를 시추공에 적용하여 확인한 대표암상 중, 각 시추공의 상부에서 확인된 풍화대의 부피 백분율은 분석된 전체 시추코어 길이 2,902 m 중 84 m로 약 2.89%이며, 지표로부터 평균 21 m 구간에 위치하고 있다. 아래에서는 풍화대를 제외한 대표암상별 분포 특징을 기술하였다.

5.2.1. 화강암류

화강암과 화강섬록암을 포함한 화강암류는 분석된 전체 시추코어 중 2,306 m 구간에 나타나 시추코어의 약 80%를 차지하며, 대표암상에 따라 화강암은 2,002 m (68.99%),

화강섬록암은 304 m (10.48%) 구간에 나타난다. 연구지역 내 분포 암석의 대부분을 차지하는 화강암과 화강섬록암은 이번 연구에서의 암상분포 분석결과에 의해 각각 다른 암상으로 분류되었지만, 지화학분석에서 비슷한 영역 내에 함께 군집으로 나타난다(그림 5a). 마그마는 분화 또는 혼합에 의해 마그마 분화 초기에 형성된 암석과 다른 조성의 암석이 생성될 수 있다(Langmuir, 1989). 따라서 화강암과 화강섬록암에 대해서는 이후 추가적인 분석을 통한 성인 확인이 필요할 것으로 생각된다.

5.2.2. 암맥류

암맥류는 분석된 전체 시추코어 중 223 m 구간에 나타나 약 7.68 %를 차지하고 있으며, 얇게는 1 m 이하부터 최대 14 m 두께까지 발달하고 있다. 그중 고철질, 규장질, 거정질 암맥은 각각 77 m, 33 m, 113 m 구간에 나타나 전체 시추코어의 2.65%, 1.14%, 3.89%로 거정질 암맥이 암맥류의 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 이 중 거정질 암맥은

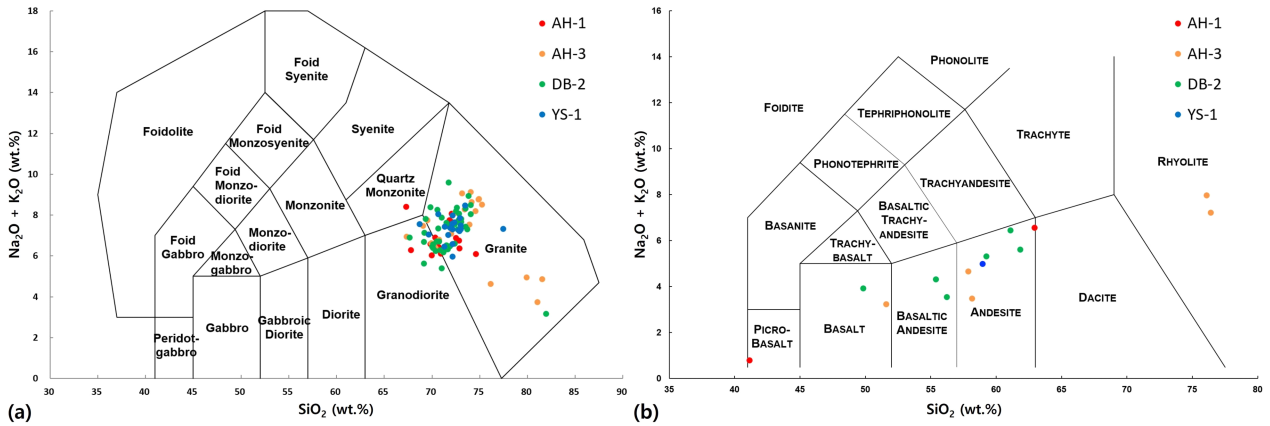


Fig. 5. Rock classification using TAS (total alkali vs. silica) diagram. (a) Plutonic rocks (Middlemost, 1994). (b) Volcanic rocks (Le Maitre *et al.*, 2002).

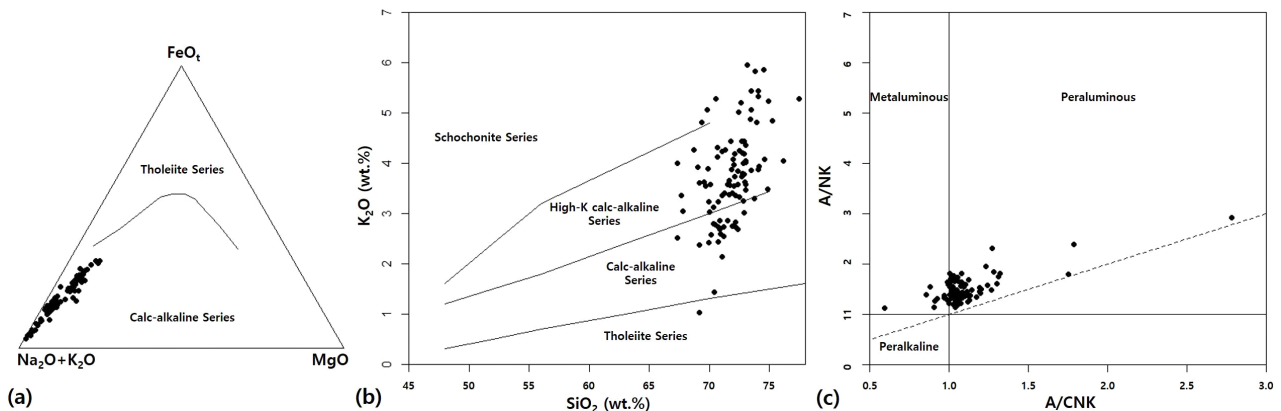


Fig. 6. Chemical classification of plutonic rocks using major elements. (a) FeO<sub>t</sub> - Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O - MgO diagram (Irvine and Baragar, 1971). (b) K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> diagram (Peccerillo and Taylor, 1976). (c) A/NK vs. A/CNK diagram (Shand, 1943).



마그마 관입 말기에 잔류된 성분으로 생성되는 성인 특성상, 부지 대부분을 차지하는 화강암 및 화강섬록암의 관입 시기 말기에 발달하였을 것으로 생각된다. 따라서 거정질 암맥의 관입 특성은 화강암 및 화강섬록암 이후에 관입한 고철질 및 규장질 암맥과는 다르다는 것을 유추해 볼 수 있다. 고철질 암맥류 중에서는 대표암상에 따라 세립질 안산암질 암맥(FAD)이 34 m (1.17%) 구간으로 가장 많이 관입했으며, 현무암질 암맥(BD)이 18 m (0.62%), 안산암질 반암맥(APD)이 14 m (0.48%), 세립질 현무-안산암질 암맥(FBAD)이 8 m (0.28%), 현무-안산암질 반암맥(BAPD)이 3 m (0.10%) 구간에 나타난다. 연구지역에 관입한 암맥류는 입도, 반정의 유무, 및 화학성분에 의해 여러개의 암상으로 분류되었으며, 네 개 시추공에서의 암상별 관입 방향에 대한 추가 연구를 통해 암맥류 관입의 선후관계를 포함한 심부의 3차원 분포를 확인할 수 있을 것이다.

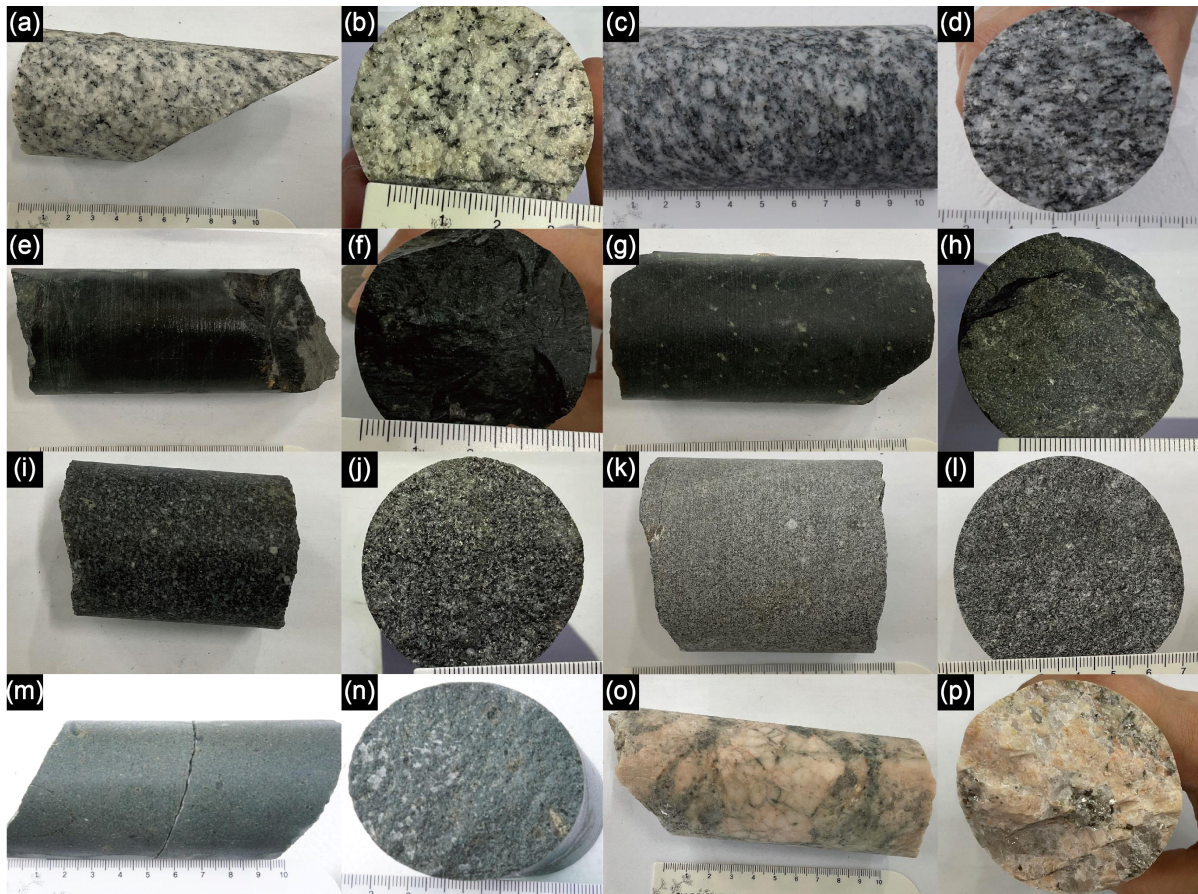
### 5.2.3. 변질대

대표암상 분류에서 완전한 변질대(TA)로 분류된 부분은

분석된 전체 시추코어 중 256 m 구간에 나타나 약 8.82%를 차지한다. 이 변질대는 단열대에서의 파쇄에 의해 발달하거나 열수작용에 의해 형성될 수 있으며, 이 일련의 과정은 암맥의 관입에 의해 모두 수반될 수 있다. 실제로 시추코어 분석 시 암맥의 경계부를 따라 변질이 발달하기도 한다. 변질이 발생하는 영역은 이후 단열을 따라 계속되는 열수작용이나 암맥의 관입에 의해 확장될 수 있으며, 이는 핵종 이동에 영향을 미치는 수리지화학적 특성파악을 위해 중점적으로 연구되어야 한다.

## 6. 결론

이번 연구에서는 지표지질조사만으로 알 수 없던 심부의 암석학적 특성에 따른 대표암상 분류와 심도별 분포를 확인하는 작업을 수행하였다. 이를 위해 KURT 연구지역에 굴착된 시추공 중 서로 다른 암상의 수직·수평적 변화를 함께 파악할 수 있는 네 개의 시추공을 선정하였으며, 사전 분류 절차 수립과 지화학 및 암석기재학적 분석을 수행하

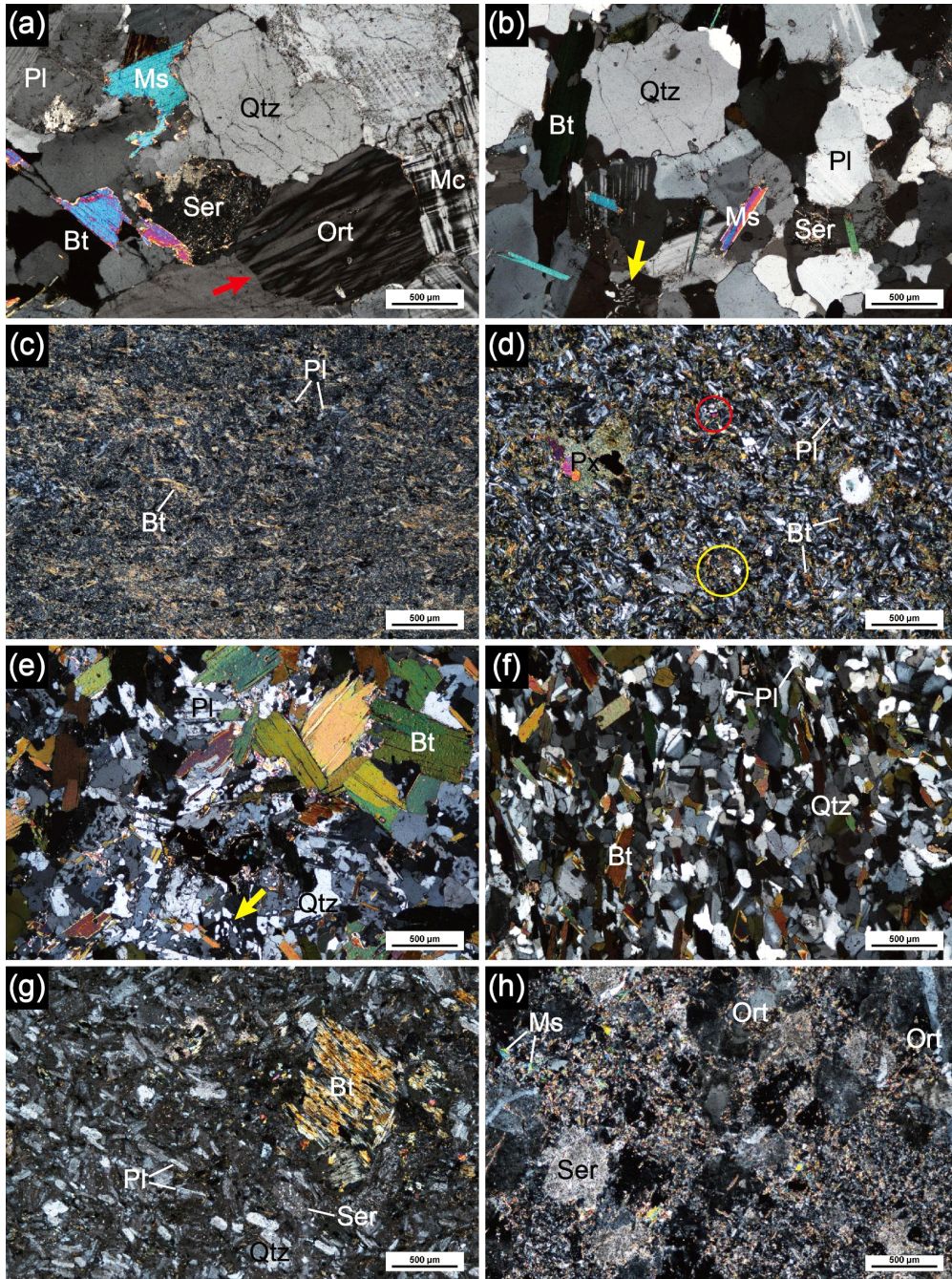


**Fig. 7.** Photographs of representative borehole samples. Side view and cross-section of granite (a, b), granodiorite (c, d), basaltic dyke (e, f), basaltic-andesitic porphyritic dyke (g, h), fine-grained basaltic-andesitic dyke (i, j), fine-grained andesitic dyke (k, l), andesitic porphyritic dyke (m, n) and pegmatitic dyke (o, p).

였다. 사전분류에서는 심도별 암석의 구성광물, 입도, 결정도, 색 등의 겉보기 특징을 파악하여 칼럼 형태로 데이터베이스화하고 몇 가지 기준에 따라 단순화하였다. 그리고 대표시료를 채취하여 X-선 형광분석을 통해 화학조성에 따른 암상을 분류하였으며, 현미경 관찰을 통해 암석 내 광물

들의 조직적 특징을 분석하여 최종적으로 대표암상을 도출하였다.

KURT 부지를 대표하는 화강암류는 화강암과 화강섬록암으로 구분되며, 시추공에서 확인되는 암상의 대부분을 차지한다. 이를 관입하며 나타나는 암상들로 현무암질 암맥,

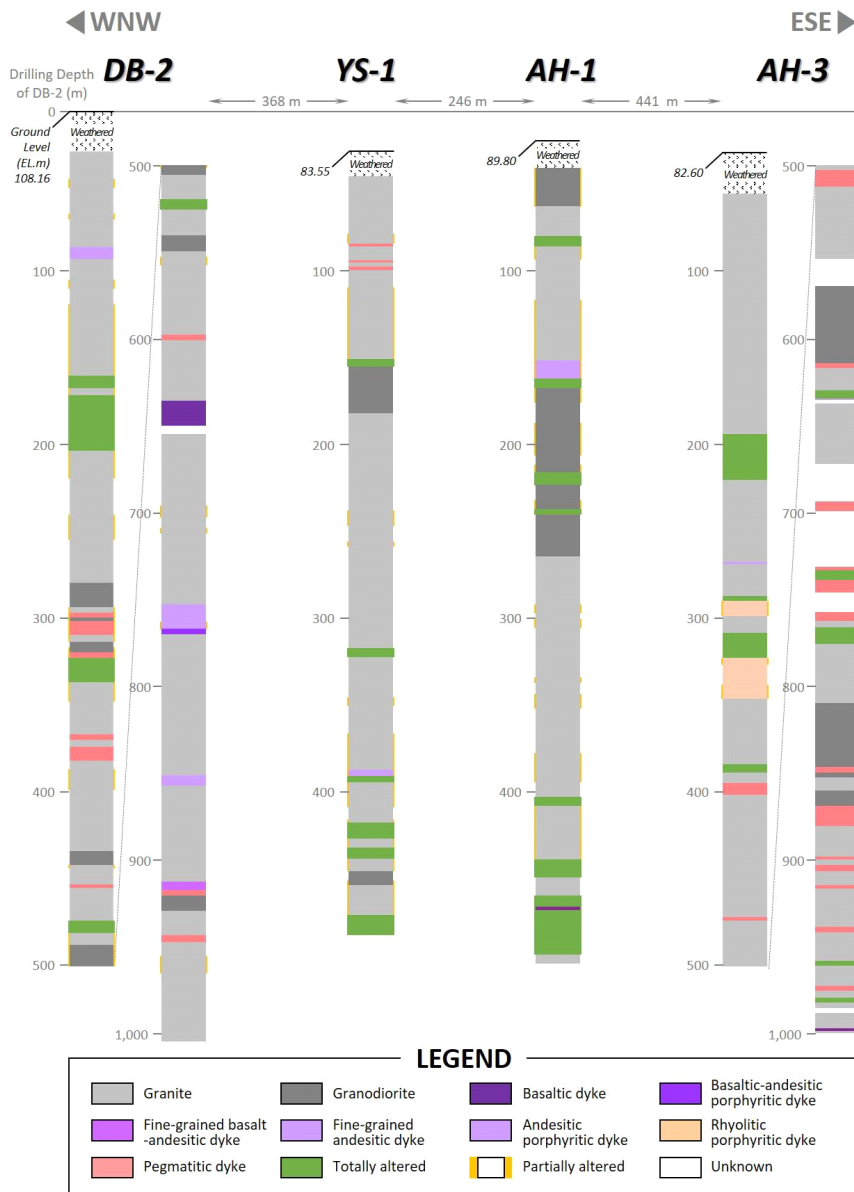


**Fig. 8.** Microscope images of representative borehole samples in crossed-polarized light. (a) Granite. (b) Granodiorite. (c) Basaltic dyke. (d) Basaltic-andesitic porphyritic dyke. (e) Fine-grained basaltic-andesitic dyke. (f) Fine-grained andesitic dyke. (g) Andesitic porphyritic dyke. (h) Rhyolitic porphyritic dyke. Symbols: Bt=biotite, Mc=microcline, Ms=muscovite, Qtz=quartz, Ort=Orthoclase, Pl=plagioclase, Px=Pyroxene, red arrow=perthite texture, yellow arrow=myrmekite texture, red circle=intergranular texture, yellow circle=intersertal texture.

현무-안산암질 반암맥, 세립질 현무-안산암질 암맥, 세립질 안산암질 암맥, 안산암질 반암맥, 유문암질 반암맥, 그리고 거정질 암맥을 하나의 암상으로 분류할 수 있었다. 대표암상에 따른 연구지역 내 암상분포에서는 다양한 종류의 고철질 암맥의 산출빈도가 시추공별로 차이를 보이며, 거정질 암맥은 상대적으로 깊은 심도에서 두껍게 분포하였다. 또한 대부분의 암맥상 관입암들은 모암의 단열분포와 관련이 있거나 주변에 변질대가 함께 분포하는 경향을 나타냈다. 단열대를 포함한 취성구조를 따라 관입하는 특성을 갖는 암맥류에 대한 상세분석 결과는 천연방벽 내 취성구조

가 과거부터 현재까지 겪어온 진화과정을 복원하기 위한 지질학적 증거로 제시될 수 있을 것이다. 이를 통해 서로 다른 시기에 생성된 암석이 같은 암상을 보이는 경우와 같은 시기에 생성된 암석이 다른 암상을 보이는 경우의 선후관계를 파악할 수 있을 것이다.

이번 연구에 활용된 시추코어 자료는 2차원적 자료이므로 부지를 대표하는 3차원 모델로 모사하는 데 어려움이 있다. 하지만 수립된 절차는 부지를 구성하는 기반암의 특징을 정량적으로 해석할 수 있어 다른 시추공에 적용하였을 때 심부 암석학적 특성을 동등한 해상도로 평가할 수 있을



**Fig. 9.** Distribution of finally classified rock types according to depth in a nearly flat two-dimensional cross-section. The geological log depths (m) of all boreholes are calibrated to the ground level (108.16 m), which is the zero point of the DB-2 borehole. For the locations and ground level of the borehole, see Fig. 1 and Table 1, respectively. See the text for abbreviations.

것이다. 아울러, 도출된 대표암상들의 미량원소 및 동위원소 분석과 절대연령측정을 통해 암석의 생성시기를 제한함으로써 최종적으로 천연방벽의 장기진화를 설명하고 3차원 암상모델을 구축하는데 신뢰도 높은 자료로 제공할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 사후후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(2021M2E1A1085200). 세심한 검토로 논문의 질을 향상시켜 주신 편집위원, 심사위원분들께 감사의 말씀을 드립니다.

## REFERENCES

- Aaltonen, I., Lahti, M., Engstöm, J., Mattila, J., Paananen, M., Paulamäki, S., Gehör, S., Kärki, A., Ahoks, T., Torvela, T. and Front, K., 2010, Geological model of the Olkiluoto site, Version 2.0. Working Report 2010-70, Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- Ahn, K. and Kwon, S., 2021, KORAD's social value creation driven by eco-friendly radioactive waste technology: An exploratory case study. *Science & Technology Policy*, 4, 195-221 (in Korean with English abstract).
- Attrill, P.G. and Gibb, F.G.F., 2003, Partial melting and recrystallization of granite and their application to deep disposal of radioactive waste: Part 1-Rationale and partial melting. *Lithos*, 67, 103-117.
- Burns, R., Causey, W.E., Galloway, W.E. and Nelson, R.W., 1978, Nuclear waste disposal in space. Technical Publication 1225, NASA.
- Chapman, N.A. and Mc Kinely, I.G., 1987, The geological disposal of nuclear waste. United States.
- Choi, J.M., Jung, S., Jeong, D. and Kim, Y.S., 2022, Age-dating methods to reconstruct the long-term evolutionary processes of the natural barrier. Annual Conference of the Korean Radioactive Waste Society (Abstracts), Busan, May 25-27, 125 p.
- Choi, J.M., Jung, S., Jeong, D., Park, J.Y. and Kim, Y.S., 2021a, A preliminary study of lithology using boreholes and KURT. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeju, October 26-28, 329 p (in Korean).
- Choi, J.M., Jung, S., Jeong, D., Park, J.Y. and Kim, Y.S., 2021b, Analytic procedure of rock distribution by drill core for the lithological model of the natural barrier. Annual Conference of the Korean Radioactive Waste Society (Abstracts), Jeongseon, November 17-19, 177 p.
- Hwang, J. and Moon, S.-H., 2018, Geochemical evidence for K-metasomatism related to uranium enrichment in Daejeon granitic rocks near the central Ogcheon Metamorphic Belt, Korea. *Geosciences Journal*, 22, 1001-1013.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 1981, Underground disposal of radioactive waste: Basic Guidance. IAEA Safety Series No. 54, STI/PUB/579, IAEA, Vienna.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 1989, Safety principles and technical criteria for the underground disposal of high level radioactive wastes, IAEA Safety Series No. 99, STI/PUB/854, IAEA, Vienna.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523-548.
- Jeong, D., Choi, J.M., Jung, S. and Park, J.Y., 2021, Geochemical analysis for classification granitoid as basic geological data from deep borehole. Annual Conference of the Korean Radioactive Waste Society (Abstracts), Jeongseon, November 17-19, 150 p.
- Jung, S., Choi, J.M., Jeong, D. and Park, J.Y., 2021, Microstructural analysis of host-rocks and altered-rocks for identifying the rock distribution around KURT area. Annual Conference of the Korean Radioactive Waste Society (Abstracts), Jeongseon, November 17-19, 184 p.
- Jung, S., Jeong, D. and Choi, J.M., 2022, A preliminary study on the development of geological evolution reconstruction methodology for long-term safety of the disposal site. Annual Conference of the Korean Radioactive Waste Society (Abstracts), Busan, May 25-27, 123 p.
- Kee, W.-S., Kim, S.W., Kim, H., Hong, P., Kwon, C.W., Lee, H.-J., Cho, D.-L., Koh, H.J., Song, K.-Y., Byun, U.H., Jang, Y. and Lee, B.C., 2019, Geological map of Korea (1:1,000,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, S. and Lee, D.S., 1981, Petrology of granitic complex distributed in the Woosanbong area, northwestern part of Yuseong. *Economic and Environmental Geology*, 14, 123-142 (in Korean with English abstract).
- Korea Electric Power Corporation (KEPCO), 2022, Statistics of electric power in Korea. 92, 194 p (in Korean).
- Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD (KHNP), 2023, Spent fuel storage status in the second quarter of 2023 (in Korean).
- Langmuir, C.H., 1989, Geochemical consequences of *in situ* crystallization. *Nature*, 340, 199-205.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H. and Wooley A.R., 2002, Igneous rocks. A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lee, S.H., Oh, C.W. and Jung, S., 2021, Jurassic igneous activity in the Yuseong area on the southern margin of the Gyeonggi Massif, Korean Peninsula, and its implications for the tectonic evolution of Northeast Asia during the Jurassic. *Minerals*, 11, 466.
- Middlemost, E.A., 1994, Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science reviews*, 37, 215-224.
- National Academy of Sciences (NAS), 1957, The disposal of radioactive waste on land: Report of the committee on waste disposal of the division of earth sciences. National Academy of Sciences-National Research Council Publication, 519.
- Palmén, J.A., Heikkinen, E., Varsta, M. and Heikkinen, J., 2004, Pattern recognition approach for measurement of foliation orientation and determination of rock type from borehole images.

- Working Report 2004-52, Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- Park, H.I., Lee, J.D. and Cheong, J.G., 1977, Geological report of the Yuseong sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 45 p (in Korean with English abstract).
- Park, J.Y., Jung, S. and Choi, J.M., 2021a, Improvement of three-dimensional geologic modeling of the KURT site for analyzing long-term evolution of the natural barrier. Annual Conference of the Korean Radioactive Waste Society (Abstracts), Daejeon, June 2-4, 141 p.
- Park, J.Y., Jung, S., Jeong, D. and Choi, J.M., 2021b, Construction of the three-dimensional geological model around KURT area using borehole data. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeju, October 26-28, 206 p (in Korean).
- Peccerillo, A. and Taylor, S.R., 1976, Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81.
- Shand, S.J., 1943, *The eruptive rocks: Their genesis, composition, and classification, with a chapter on meteorites*. J. Wiley & Sons, Inc., New York.
- Uyeda, S., 1984, Subduction zones: Their diversity, mechanism and human impacts. *GeoJournal*, 8, 381-406.

