

## 방사성 폐기물 처분 연구를 위한 심부시추공 단열층 전광물의 광물학적 특성

김건영 · 고용권 · 배대석 · 김천수 · 김경수

한국원자력연구소 (kimgy@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

고준위 방사성 폐기물의 심지층 처분 개념에 있어서 불투성인 암반을 처분장으로 할 경우 암반에 분포하는 단열 또는 단열대는 지하수 유동로로서의 잠재성을 지니고 있으며, 따라서 핵종은 처분장으로부터 지하수를 따라 이동되어 인간생활권으로 도달하게 된다. 이 과정에서 유해 핵종은 단열대 내의 광물과의 흡착반응, 이온교환, 표면침전 등과 같은 지화학적 반응을 통하여 그들이 인간환경으로 이동되는 시간과 농도를 감소시키는 지연효과를 얻을 수 있다. 따라서 이와 관련된 단열광물의 광물학적 및 지화학적 특성 연구가 방사성 폐기물 처분장 안정성 평가에 중요한 과제 중의 하나이다 (한국원자력연구소, 2003). 그러나 심부 지하수의 수리화학적 연구를 포함하여 국내에서 주로 수행되고 있는 심부지질 환경에 대한 연구는 대부분 기존에 개발된 시추공이나 관측공을 이용한 시료 채취에 제한되어 왔다. 따라서 대수층의 모암 및 구성광물에 대한 직접적인 증거를 확보하기가 매우 어렵기 때문에 주로 지하수의 화학 특성으로 지하 심부에서 일어날 수 있는 물-암석 반응에 의한 단열광물들의 침전 조건을 유추한다거나, 혹은 매우 제한적으로 시추코아로부터 직·간접적인 단열광물을 채취하여 심부지질 환경의 특성을 유추하고자 하는 연구들이 수행되고 있는 실정이다. 이에 대하여 한국원자력연구소에서는 우리나라의 대표적 결정질 암반인 주라기 화강암 중 영동형 (강원도 고성)과 영서형 (대전유성지역) 화강암을 선정하여 이에 대한 심부 시추조사 및 장기적 모니터링을 수행하고 있다. 이들 심부 시추공에서 얻어진 지질시료를 이용하여 심부 화강암 반 및 단열광물들의 광물학적 특성과 지화학적 특성을 소개하고자 한다.

### 2. 시료 및 분석

시추공에서 회수된 시추코아에 대해 심도별로 신선한 암석과 단열대를 중심으로 단열층 전광물 및 변질암석을 채취하였다. 암석 및 단열층 전광물에 대해 편광현미경 관찰과 X-선 회절분석(XRD)으로 광물 감정을 하였다. X-선 회절분석은 한국원자력연구소(KAERI)의 X-선 회절분석기(SIEMENS D5000)를 이용하여 분석하였다. 광물의 화학분석은 기초과학지원연구소의 전자현미분석기 CAMECA SX50을 이용하여 분석하였다. 암석 시료의 주원소 및 미량원소 함량은 기초과학지원연구소의 유도결합플라즈마 방출분석기(ICP-AES, Shimadzu ICPS-11000III)와 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, FISON PlasmaTrace)로 분석하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 모암

영동형 화강암은 강원 고성지역에 해당하며 시추지역의 지질은 흑운모 화강암으로 이루어져 있다. 과거 석산으로 개발되었던 곳으로서 단열의 발달이 거의 없는 피상의 암반에 해당되어 시추구간 전반에 걸쳐 단열대의 발달을 관찰하기 어렵다. 흑운모 화강암은 조립질 및 등립질로서 지표 근처 풍화작용에 의한 변질을 제외하고는 매우 균질한 조직을 보인다. 주구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 흑운모 등이며 특징적으로 각섬석이 산출된다. 이

밖에 스펀, 금홍석, 저어콘 등이 미량 존재한다. 고성 화강암내 500m 시추공에서 심도별로 채취된 시료의 전암분석결과를 살펴보면 미세한 석영-장석맥이 지나가는 277m 구간에서  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ 의 함량 증가가 관찰되며, 이 부분을 제외하고는 전 구간에 걸쳐 매우 일정한 화학 특성을 보이고 있다.

영서형(유성) 화강암지역은 경기변성암 복합체 내에 위치하며 주로 선캠브리아기의 편마암류와 중생대의 심성암과 맥암류로 구성되어 있다 (박희인 외, 1977). 시추위치의 지질은 중립질 내지 조립질의 복운모화강암으로 이루어져 있으며 국지적으로는 미약하나마 편상조적을 보이기도 하나 연구지역 남서부에 분포하는 편상화강암과의 관계는 불명확하다. 심부 시추공자료에 의하면 지표에서부터 심부에 이르기까지 크고 작은 단열대가 다수 발달해 있으며 이러한 단열대를 중심으로 다양한 변질양상을 보이고 있다. 변질대 및 단열대에서는 방해석, 불석 및 녹염석 세맥이 발달해 있으며 이러한 변질구간에서는 흑운모가 관찰되지 않고 녹니석화 되어있다. 또한 일부구간의 신선한 화강암 부분을 제외하고는 대부분의 장석이 견운모화되어 있는 양상을 보인다. 일부 석영맥이 산출되는 구간에서는 방연석 및 황철석 등의 광석광물이 산출되는 것으로 보아 국지적인 광화작용이 있었던 것으로 판단된다. 편광현미경 관찰 결과 주구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 백운모 등이며 석류석, 저어콘 등이 소량 관찰된다. 녹니석, 녹염석, 일라이트가 2차광물로 관찰되고, 퍼어다이트가 드물게 관찰되기도 한다. 영서형 화강암내 500m 시추공에서 심도별로 채취된 시료의 전암분석결과를 살펴보면 염기성 암맥이 지나가는 -105m 구간을 포함하여 -90m~-130m 구간과 -230m~-250m 구간에서 급격한  $\text{SiO}_2$  함량 감소와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ 의 증가가 관찰된다. 특히 이 두 구간에서 L.O.I 값이 증가한 것은 이 구간에 점토광물과 같은 2차 광물이 많이 존재함을 지시한다. 이 밖에 분석된 변질 암석들은 모두 신선한 화강암에 비하여 높은 L.O.I 값을 보여주고 있다.

### 3.2. 단열충전광물

고성지역의 심부시추공에서 얻어진 시추코어는 단열의 발달이 거의 없기 때문에 이에 따른 단열충전광물 역시 채취할 수 없었다. 유성지역의 심부시추공들에서는 다수의 단열대가 발달해 있다. 이러한 단열대를 중심으로 다양한 2차 생성광물들이 충전되어 있다. 단열충전광물들은 대부분 단열대의 표면에 코팅되어 있거나 세맥상으로 충전되어 있다. 경우에 따라서는 매우 미세한 세맥으로 발달해 있기도 하다. 이러한 단열충전광물들은 대부분 단일광물보다는 여러 광물종의 혼합체로 존재한다.

YS-01 시추공(500m 심도)으로부터 회수된 단열충전 광물에 대한 X-선 회절분석(XRD) 결과 불석 광물(로몬타이트, 홀란다이트), 방해석, 일라이트 (2M1과 1Md), 녹니석, 녹염석 등이 확인되었다. 로몬타이트와 홀란다이트 같은 불석 광물들과 방해석이 가장 흔하게 관찰되는 단열충전광물이며 이들은 흔히 서로 intergrowth된 상태로 결정화 되어있다. 산출상태 또한 매우 다양하여 약 1~2mm 두께의 맥상으로 결정형이 잘 발달한 상태로 산출되기도 하고 단열 표면 코팅이나 미세 균열을 충전하는 형태로 산출되기도 한다. 일라이트와 녹니석 또한 흔하게 관찰되는 단열충전광물로서 녹니석으로 주로 코팅되어 있는 단열면은 어두운 녹색이나 검은색을 띠고 있다. 녹염석은 매우 미세한 균열을 충전하는 형태로 산출되며 흔히 녹니석이나 일라이트와 함께 존재한다. 녹염석으로 주로 구성된 단열은 주로 밝은 녹색을 띠고 있으며 대부분 hairline crack형태로 존재하나 녹염석의 결정이 잘 발달되어 밀집되어 있는 부분도 관찰된다. 이밖에 소량의 카올린 광물이나 clinozoisite가 존재하기도 하며 특징적으로 방연석 (galena)이나 황철석(pyrite) 같은 광석광물들이 산출되기도 한다. 이처럼

시추공으로부터 확인된 단열광물은 방해석, 일라이트, 녹니석, 제올라이트, 카올리나이트 및 녹염석이 확인되었으나 유성지역 YS-01 시추공지하수의 화학조성자료로부터 PHREEQC (Parkhurst, 1995)를 이용하여 시추공지하수로부터 단열광물의 대한 포화지수를 계산한 결과는 이들 이외에 2차 광물로 철산화물 및 스멕타이트가 2차광물로 침전될 수 있을 가능성을 보여주고 있다.

이상과 같은 영동형과 영서형 화강암지역의 심부시추공 시추코아에서 얻어진 결과를 비교하여 이들의 암석 및 단열충전광물에 대한 특성을 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Comparison of granites between the boreholes GS-01 and YS-01.

	Youngdong type (Koseong)	Youngseo type (KAERI)
Rock type	Biotite granite	Two-mica granite
Major minerals	quartz, plagioclase, K-feldspar, biotite, amphibole	quartz, plagioclase, K-feldspar, biotite, muscovite
Minor minerals	sphene, zircon, rutile, Fe-oxide minerals	garnet, zircon, pyrite, galena
Fracture filling minerals		zeolite(laumontite, heulandite), calcite, illite(sericite), chlorite, epidote, kaolinite
Weathering minerals (surface area)	illite (sericite), chlorite, kaolinite	illite (sericite), chlorite, calcite, kaolinite
Grain size	coarse-grained	coarse- and medium-grained
Texture	typical granitic texture	typical granitic texture + alteration (sericitization)
Fracture		many fracture throughout the total drill hole depth (500m)
Alteration state	fresh granite throughout the total drill hole depth (500m)	- alteration zones around the fractures (sericitization and/or chloritization) - calcite, zeolite, and epidote veins - overlapped with low-grade hydrothermal alteration

#### 4. 참고문헌

- 박희인, 이준동, 정지곤 (1977) 한국지질도 유성도폭 (1:50,000) 및 도폭설명서, 자원개발연구소, 21p.
- 한국원자력연구소 (2003) 고준위폐기물처분기술개발, KAERI/RR-2333/2002, 과학기술부, 589p.
- Parkhurst, D. L. (1995) User's guide to PHREEQC-A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations, U. S. Geol. Surv., Water-Res. Invest. Report 95-4227 142p.