

## 한국원자력연구원 지하처분연구시설(KURT)의 단열충전광물 특성과 그 의미

### Characters of Fracture-filling Minerals in the KURT and Their Significance

이 승 엽 (Seung Yeop Lee)\* · 백 민 훈 (Min Hoon Baik)

한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구센터  
(Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea)

**요약:** 한국원자력연구원에 위치한 KURT 지하처분연구시설은 2003년 부지조사를 시작으로 최근에 완공하였으며, 그 규모는 길이 약 180 m, 폭 6 m, 그리고 높이 6 m의 말굽형 단면을 가진 터널이고 지하 약 90 m 깊이에 위치하고 있다. 터널 굴착이 100 m 정도 진행되었을 때, 신선한 암석 및 풍화가 진행된 암석, 그리고 균열 및 단층 충전물질로 채워진 부분을 대상으로 시료를 채취하여 광물 및 화학적 분석을 실시하였다. KURT 암반에는 일라이트, 스멕타이트, 녹니석과 같은 층상규산염광물들과 방해석 등이 단층 및 균열을 충전하고 있다. 일라이트나 스멕타이트는 단열대에 주로 혼합광물로 존재하고 있으며, 우세종에 따라 입도에 따른 함량비에 차이가 있다. 산화철로 피복된 암석과 단열충전물 시료에는 우라늄 및 토륨의 함량이 신선한 암석에 비해 높았으며, 이는 암석으로부터 서서히 용탈되거나 지하수 및 열수에 용존되어 있던 핵종 원소들이 단열을 따라 이동하면서 산화철 및 단열충전광물들에 의해 선택적으로 수탁되거나 공침된 결과로 해석된다. 본 연구결과는 향후 지하심부 고준위방사성폐기물 처분관련 장기안정성 예측시 핵종 이동 및 지연에 영향을 끼치는 환경 인자 평가에 귀중한 자료로 활용될 것이다.

**주요어:** 지하처분연구시설, 우라늄, 토륨, 단열충전광물, 고준위폐기물

**ABSTRACT:** The KAERI Underground Research Tunnel (KURT) located in KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) was recently constructed following the site investigation in 2003. Its dimension is 180 m in length, 6 m in width, and 6 m in height, and it has a horseshoe-like cross-section and is located in the ground to the depth of 90 m. When the tunnel was dug into the ground with 100 m in length, fresh rocks, weathered rocks and fracture-filling materials were taken and examined by mineralogical and chemical analyses. There are phyllosilicate minerals such as illite, smectite and chlorite including calcite, which are filling some faults and cracks of the KURT rock. The illite and smectite usually coexist in the fracture, where their content ratio is different according to which mineral is predominant. There are high concentrations of U and Th in the rocks coated with iron-oxides and filled with secondary materials as compared with those in the fresh rocks. It seems that the radionuclides, which are slowly leached from the parent rocks or exist as a dissolved form in

\*교신저자: seungylee@kaeri.re.kr

the groundwater and hydrothermal solution, may have been migrated along the fractures and thereafter selectively sorbed and coprecipitated on the iron-oxides and the fracture-filling materials. These results will be very useful for the evaluation of environmental factors affecting the nuclides migration and retardation when long-term safety is considered to the geological disposal of high-level radioactive wastes in the future.

**Key words** : KURT, Uranium, Thorium, Fracture-filling minerals, High-level radioactive wastes

## 서 론

원자력 발전과 더불어 필연적으로 발생하는 방사성 폐기물은 현재 원자력 발전소 부지 내 임시 저장고에 관리되고 있으나, 각 발전소마다 저장 능력의 한계를 보임에 따라 방사성 폐기물의 중앙 집중식 영구 처분은 시급히 해결되어야 할 국가적 과제가 되었다. 일반적으로 방사성 폐기물의 육지 처분 방식은 천층 처분과 암반 동굴 처분 방식으로 나눌 수 있으며, 우리나라에서는 고준위 폐기물의 경우 암반 동굴 처분을 원칙으로 하고 있다. 방사성 폐기물 처분의 기본 목적은 폐기물을 인간 환경으로부터 격리, 차단시켜 폐기물 내에 함유된 방사성 핵종이 인간에게 위해를 가하지 않도록 하는 것이다.

국내 고준위 방사성 폐기물 처분개념은 방사성 폐기물을 안전한 환경 조건을 갖는 지하 심부환경에 처분하여 인간환경으로부터 격리시키는 것으로서, 여기에는 공학적인 방벽과 지질학적인 천연방벽을 모두 고려한 다중방벽 개념을 채택하고 있다. 공학적 방벽은 방사성폐기물 처분장으로부터 핵종 유출을 최대한 차단하도록 설계되지만, 수십만 년에서 수백만 년의 장기간의 걸친 처분장의 안전성을 고려해야 하는 고준위 방사성 폐기물 처분장에서는 지질학적 천연방벽의 역할이 필수적이다(김건영 외, 2004).

방사성폐기물의 처분 부지의 지질로서 화강암과 화강편마암과 같은 결정질 암류를 많은 국가에서 생각하고 있다. 결정질암에서 지하수 유동은 연속성이 좋은 단열(fracture)을 따라 지배되는 것으로 알려져 있다. 이러한 단열의 면은 일차광물, 이차 변질광물, 충전광물 등이 분포한다. 이들은 단열 틈을 막아서 지하수의 유동을 억제하거나, 지하수의 화학적 특성에 영향을 미치고, 유해 핵종에 대한 흡착, 이온교환, 침전, 산화환원반응 등으로 핵종과 상호작용 한

다. 또한, 단열충전 및 변질광물들은 그들이 생성될 수 있는 물리·화학적 환경이 서로 다르므로 생성 당시의 지화학적 환경에 대한 정보를 제공한다. 화강암 및 화강편마암과 같은 결정질암의 단열을 충전하는 이차 광물로는 캐올리나이트(kaolinite), 스멕타이트(smectite), 일라이트(illite)와 같은 점토광물이 흔히 관찰되며, 제올라이트(zeolite), 탄산염 광물, 황철석, 철 및 망간산화물 등이 분포하기도 한다. 이러한 광물들은 지하수로부터 침전되거나 열수에 의한 변질 또는 풍화작용 등에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다(정기영, 1998; 이석훈과 김수진, 2000; Choo and Chang, 2000).

KURT (KAERI Underground Research Tunnel) 연구실증시설의 지질학적 특징으로는 소규모 단층 및 절리 등이 국부적으로 발달해 있고, 이러한 단층 및 절리를 따라 다양한 종류의 이차광물 혹은 침전물 등이 그 곳을 충전하고 있다. 본 연구는 KURT 내에서 고준위폐기물 처분연구를 수행하는데 있어서 연구지역의 지질학적 절리 및 단층과 같은 단열대의 중요성과 광물학 및 지화학적 특성을 밝혀 핵종과 같은 방사성 원소들의 지하심부 거동을 이해하는데 주목적이 있다. 심부 지질환경에서 대부분의 핵종들이 지하수에 의해 단열을 따라 이동하기 때문에, 방사성 핵종 거동을 이해하는 한 방법으로 본 터널의 암석 표면 및 균열면을 따라 존재하는 핵종들의 존재를 파악하고자 한다.

## 지질 특성

대전광역시 유성구 덕진동 150번지 한국원자력연구원 주말농장 우측 후면에 위치한 KURT 지하처분연구시설은 2003년 부지조사(조원진 외, 2004)를 시작으로 최근에 완공하였으며, 규모는 길이 약 180 m, 폭 6 m, 그리고 높이 6 m의 말굽형 단면을 가진 터널이고 지하 약 90

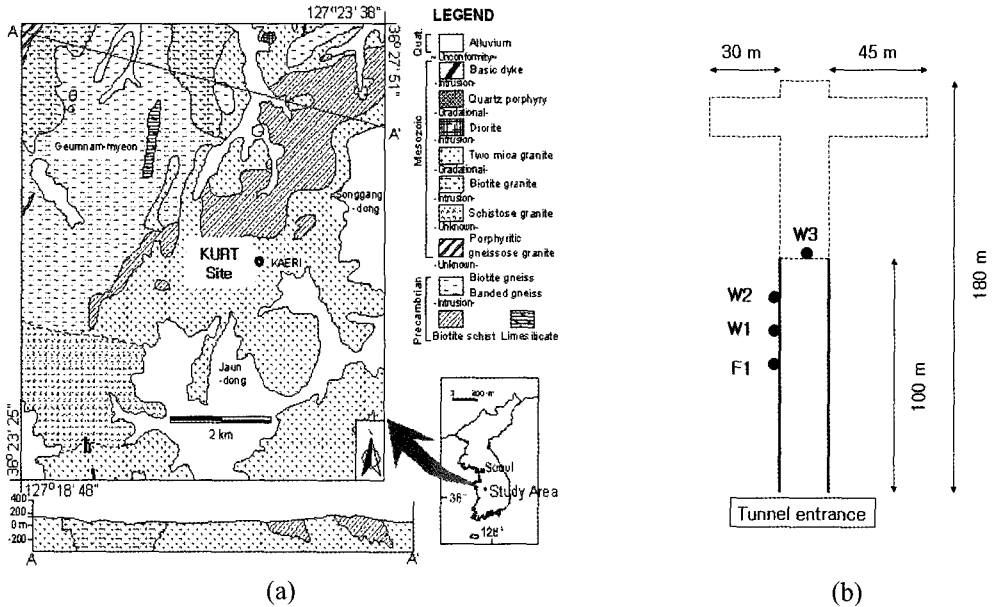


Fig. 1. (a) Geological map of the study area (Kim *et al.*, 2004) and (b) schematic drawing of the KURT facility, in which rock sampling was carried out at 4 sites (F1, W1, W2, and W3). The thin dotted lines of (b) indicate that the tunnel was not completely excavated at that time.

m 깊이에 위치하고 있다. 이 지역의 지질을 살펴보면, 경기변성암 복합체에 속하고 주로 선캠브리아기의 편마암류와 중생대의 심성암과 맥암류로 구성되어 있다(그림 1a). 연구 지역을 구성하고 있는 심성암류는 크게 시대미상의 편상화강암과 중생대 복운모화강암으로 나눌 수 있다. 이 중 복운모화강암은 연구 지역 전 범위에 걸쳐 가장 광범위하게 분포하는 암석으로 편상화강암을 관입하고 있다. 복운모화강암은 중립 내지 세립질이며 주구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등이고 저어콘, 금홍석, 인회석 등이 소량 관찰된다(김건영 외, 2004). 시추코아 분석에 의하면 장석류는 시추코아 심도와 관계없이 균운모화 되어 있는 양상을 흔하게 보이며 흑운모의 녹니석화 작용도 빈번하게 관찰된다. 일부 석영맥이 산출되는 구간에서는 황철석 및 몰리브데나이트 등의 광석광물이 산출되는 것으로 보아 국지적인 광화작용이 있었던 것으로 판단된다(김건영 외, 2004).

### 시료채취 및 분석

시료 채취는 KURT 공사가 진행 중인 과정에

서 이뤄졌으며, KURT 터널 벽면의 균열, 절리, 그리고 단층과 같은 단열에 분포하는 이차충진 광물과 일부 암석 등을 대상으로 시료를 채취하였다(그림 1b). 시료 채취는 터널 굴착 여건상 발파와 숏크리트 타설 이후 일시적이고 부분적으로 드러난 암반을 대상으로 하였다. 채취된 시료의 광물학적 분석을 위해 실체현미경, X-선 회절분석(XRD), 그리고 주사전자현미경(SEM) 기기를 사용하였고, 미량 화학성분 분석을 위해서는 ICP-MS를 이용하였다.

분석과정을 구체적으로 살펴보면, 채취 시료를 실내 대기 조건에서 건조시킨 후, 일부 시료를 작게 쪼개어 전처리 없이 시료대 위에 올려 놓고 실체현미경을 통해 약 200배까지 확대하여 암석 및 광물의 형태를 관찰하였다. 또한, 기초과학지원연구원의 XRD (Bruker D8 Advance, Germany)를 이용하여 암석 및 미지시료의 광물을 동정하였다. 시료의 분석조건은 전 광물 분석을 위해서 주사범위  $2\theta$ 를  $60^\circ$ 까지 하여 시료 내에 존재 가능한 모든 광물들을 분석하려고 하였다. 암석 시료를 구성하는 광물의 미세한 구조 및 조직 표면을 수  $\mu\text{m}$  이하로 관찰하기 위해 기초과학지원연구원의 SEM (LEO 1455

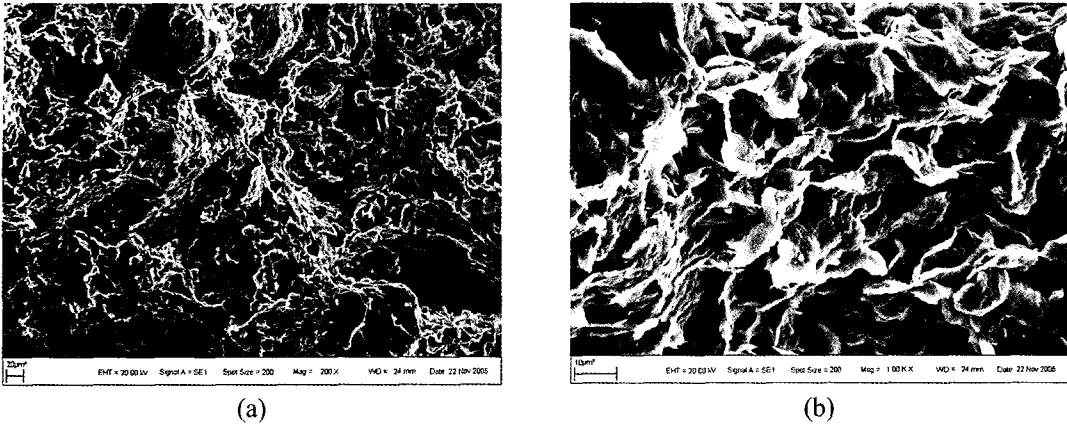


Fig. 2. SEM photomicrographs of (a) a fracture-filling smectite and (b) the magnified view of the sample (a).

VP, Germany)을 이용하였다. 수분이 제거된 건조한 시료에 Au coating을 실시하고 수천에서 수만 배까지 확대( $\sim \mu\text{m}$  크기)하여 관찰하였다. 경우에 따라서 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)를 이용하여 관찰중인 광물의 특정 부분을 원위치 표면화학 분석하였다. 그리고, 시료 내에 포함된 미량 방사성 화학성분(Sm, Th, U)을 알기 위해서 전처리를 통해 시료를 강산에 녹인 후 ICP-MS를 이용하여 분석하였다.

## 결과 및 토의

### 단열충전물의 특징

#### 스멕타이트(smectite)

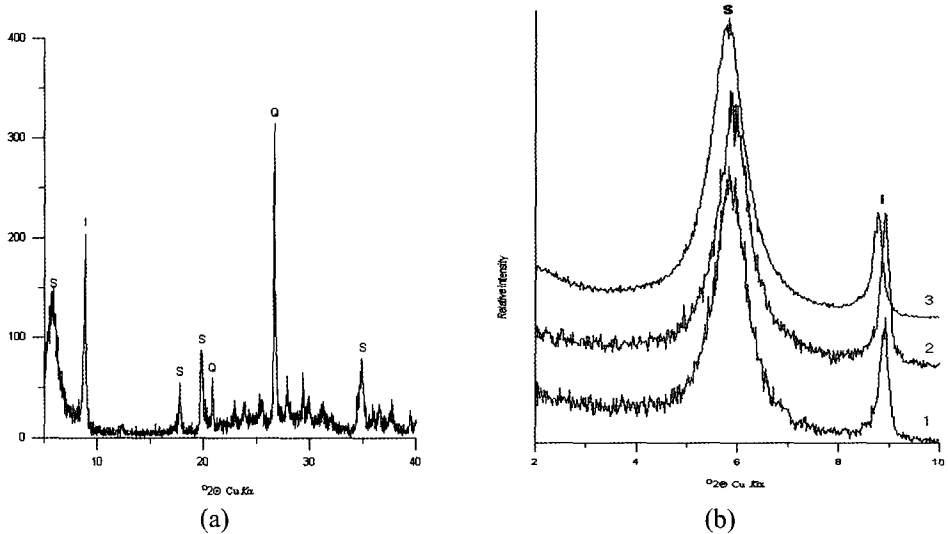
KURT 터널 입구부터 곳곳에 균열 및 단층들이 분포하고 있으며, 몇몇 단열면에서 팽창성 층상광물인 스멕타이트가 관찰된다(그림 2). 단열충전물로 존재하는 스멕타이트는 단열을 따라 선상으로 분포하고 있으며, 특징으로는 충전 광물의 두께에 변화가 있고 부분적으로 순수한 세립질의 스멕타이트가 풍부히 존재한다. X-선 회절분석결과, 부 광물로는 일라이트가 소량 섞여 있으며 일부 석영(quartz)도 불순물로 포함되어 있다(그림 3a). 전자현미경하에서 스멕타이트는 판상구조의 형태를 잘 보여주고 있으나, 입자의 굴곡 및 왜곡이 심하고 대체로 입자 크기의 분포가 균일하지 않고, 입자들끼리 서로 엉겨 붙은 형태로 관찰된다(그림 2).

증류수에 시료를 넣고 흔들어 준 후 정치하

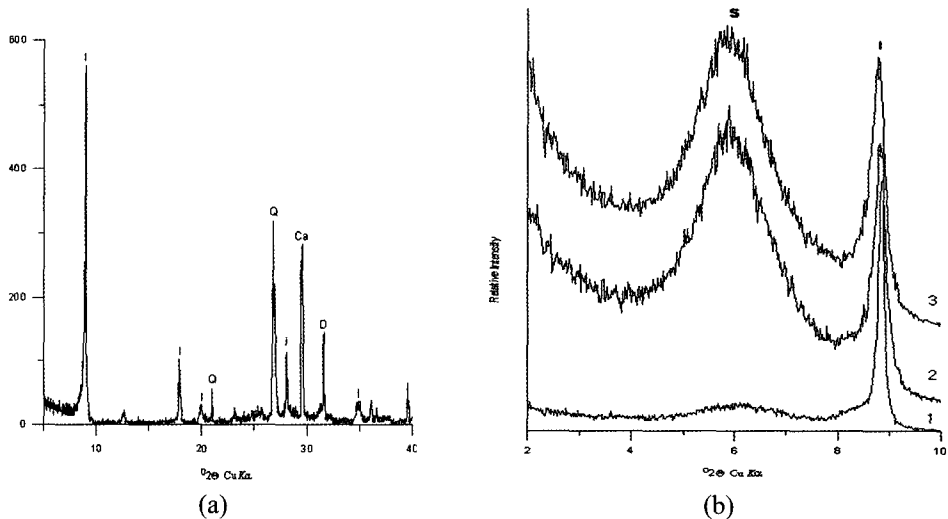
는 시간을 달리하여 입자 크기에 따른 광물 구성 변화를 보고자 하였다. 즉, 침강(sedimentation)에 의해 입자 크기를 정성적으로 분리시킨 후, 입자에 따른 혼합 충전광물 분포 양상을 살펴보면, 스멕타이트와 일라이트 광물은  $\mu\text{m}$  크기 범위 내에서 서로 일정(homogeneous)한 비율로 존재하였다(그림 3b). 다시 말해, 스멕타이트가 우세한 단열충전광물 시료의 경우, 혼재 광물로 존재하는 일라이트는 소량이지만 스멕타이트 입자 크기( $\sim$ 수  $\mu\text{m}$ )와 비슷한 분포를 보이며 단열을 채우고 있고, 이는 이곳을 통과하는 지하수 용존 핵종들이 충전광물과의 반응에서 입자 크기 보다는 광물 종류에 의한 영향을 더 크게 받을 것으로 사료된다.

#### 일라이트(illite)

조암광물의 풍화 혹은 변질로부터 이차적으로 형성되는 광물인 일라이트는 핵종 원소 흡착에 중요한 기여를 하는 광물이다(Sawhney, 1970; 김영규와 이은정, 2004; Wendling *et al.*, 2004). 일라이트는 판상 광물 구조의 벌어진 층간 사이로 세슘(Cs) 및 스트론튬(Sr)과 같은 양이온성 방사성 원소들을 이온교환 방식으로 흡착하여 가두는 특성이 있다(김영규와 이은정, 2004). 이러한 일라이트는 본 연구지역의 소규모 단층을 따라 여러 이차광물들과 함께 소량 존재하거나 KURT 막장 우측 연구모듈 지역의 단열을 따라 비교적 순수한 광물 형태로 분포하고 있다. 암반 단열에 존재하는 일라이트 광물에 대한 XRD 분석결과, 결정성이 좋은 일라



**Fig. 3.** (a) X-ray diffraction (XRD) pattern of smectite obtained from a KURT fracture, in which minor minerals such as illite and quartz coexist. (S: smectite, I: illite, Q: quartz). (b) XRD patterns of treated sample (a) with sedimentation method. The sample (a) was suspended in a distilled water for some time and then centrifuged. The numbers 1, 2, and 3 on figure (b) indicate that the clay particles in water were suspended for 0, 2, and 5 minutes, respectively.



**Fig. 4.** (a) XRD pattern of illite obtained from a KURT fracture, in which minor minerals such as smectite, quartz, calcite, and dolomite coexist. (I: illite, Q: quartz, Ca: calcite, D: dolomite). (b) XRD patterns of treated sample (a) with sedimentation method. The sample (a) was suspended in a distilled water for some time and then centrifuged. The numbers 1, 2, and 3 on figure (b) indicate that the clay particles in water were suspended for 0, 2, and 5 minutes, respectively. The original sample (the number 1) has a little amount of smectite, but the others (the numbers 2 and 3) have relatively much more of it.

이트 외에 방해석 및 돌로마이트(dolomite)와 같은 탄산염 광물들도 함께 존재하는 것으로 나타났다(그림 4a). 일라이트는 전자현미경상에서 형태학적으로는 스�멕타이트와 구분하기가

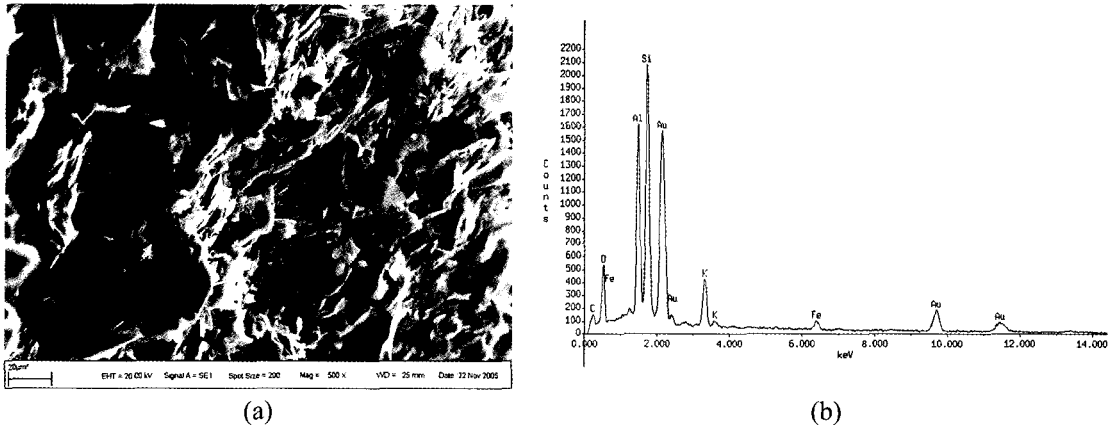


Fig. 5. (a) a SEM photomicrograph of a fracture-filling illite mineral aggregated as a platy form and (b) the EDS chemical analysis for the sample (a) showing a considerable K content.

쉽지 않지만, 일라이트는 보다 뚜렷한 판상구조 형태가 잘 관찰되고 스�멕타이트처럼 굴곡이 있거나 뒤틀림이 흔하지 않다(그림 5a). 또한, EDS 화학분석 값에서 K 함량 피크 값이 높게 나온다(그림 5b).

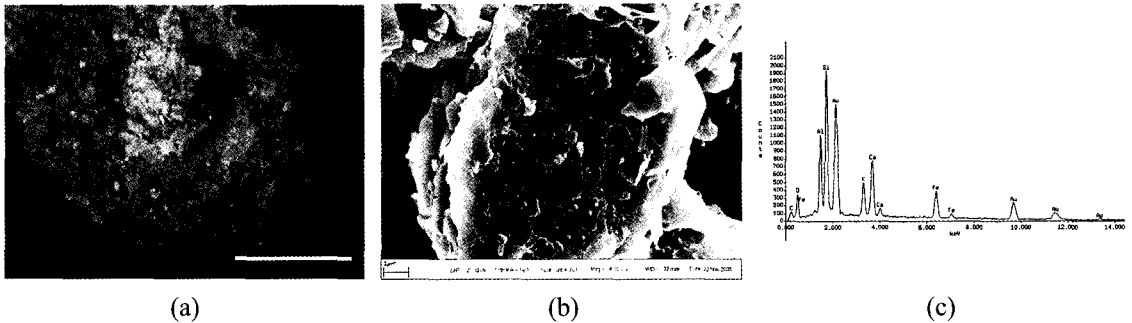
본 연구지역에서 일라이트와 혼합광물로 존재하는 스�멕타이트의 입자 크기를 확인하기 위해 침강에 의해 입도별로 분리, 채취하였다. 입도 분리한 시료를 XRD로 확인했을 때(그림 4b), 스�멕타이트는 일라이트에 비해 세립질 입자(수  $\mu\text{m}$  이하)가 우세하며, 이러한 경향은 미세한 입자에서 일라이트 함량보다 정성적으로 높은 함량을 보여주고 있다. 이같은 사실은 앞서 관찰한 스�멕타이트가 단일의 주된 충전 광물로 존재하는 경우와는 다소 다르다. 즉, 일라이트가 주 단일충전광물로 존재할 경우, 암석 단열면에 분포하는 일라이트는 팽창성 스�멕타이트를 소량 혼합광물로 가지고 있으며 그 크기는 매우 작고 따라서, 거시적으로는 일라이트의 특성을 나타내나 미시적인 부분에서는 콜로이드성 크기를 갖는 스�멕타이트의 특성이 두드러진다는 사실이다. 심부 지하 환경에서 일부 지하수 용존 화학종들은 단열대에 존재하는 미세한 콜로이드성 물질과 오히려 상호 반응성이 뛰어나고, 따라서 일라이트 광물과 혼재하는 스�멕타이트는 비록 소량으로 존재하지만, 수  $\mu\text{m}$  입도 이하에서 진행되는 광물-용액간 반응에서는 스�멕타이트 광물의 영향이 상당히 크게 작용할 것으로 판단된다.

#### 녹니석(chlorite)

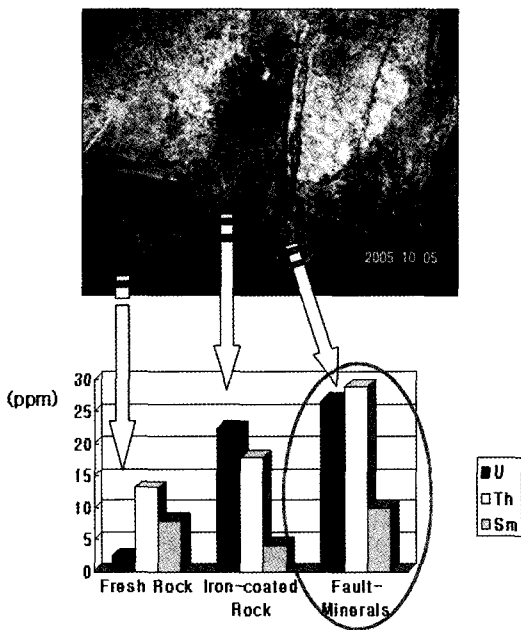
본 연구지역의 암석은 약한 변성작용을 받아 순수한 화강암질 구성광물 외에 변질 광물로 녹니석을 많이 포함하고 있다. 또한, 단열충전 물질에 부분적으로 녹니석이 소량 포함되어 있기도 하며 화강암 본체 주변에 괴상(폭 1 m 이상)의 큰 규모로 존재하기도 한다. 이 곳에서 관찰되는 녹니석은 철과 마그네슘이 적당량 섞여 있는 차모사이트(chamosite)와 클리노클로어(clinochlore)의 중간 화학조성을 갖고 있다. 그리고, 이러한 녹니석을 포함하고 있는 암석이 풍화되면서 이곳에 혼한 철 산화물들의 주요한 Fe 성분의 공급원이 되기도 한다. 외관상으로는 녹색에서 짙은 검녹색의 빛깔을 띠고 있으며, 육안으로는 관찰하기 힘들으나 현미경상에서는 견고한 판상광물의 특징과 압력에 의한 연속적인 파형 구조를 가지고 있다.

#### 탄산염 광물

판상구조를 갖고 있는 일라이트, 스�멕타이트, 그리고 녹니석과 같은 알루미늄규산염 광물 외에 방해석(calcite)과 소량의 돌로마이트(dolomite)와 같은 탄산염 광물들도 단열충전물질로 존재한다. 특히, 방해석은 양적으로는 많지 않으나, 터널 균열 혹은 단층에 항상 발견되며 본 터널 지역에서 흔하게 관찰할 수 있는 이차광물이다(그림 6a). 또한, 이 지역에서 채수되는 지하수는 대부분 높은 pH (약 7~9.5) 범위를 보여주고 있으며, 이는 이곳의 절리를 따라 분



**Fig. 6.** (a) a stereoscopic photograph of fault-filling materials composed of calcite, goethite, and illite minerals and (b) the enlarged view of the inlet square in figure (a), showing some calcite and goethite particles on the illite surface. (c) The EDS chemical analysis for the sample (b), showing considerable peaks of K, Ca, and Fe components. The scale bar in figure (a) is 0.5 cm.



**Fig. 7.** A graph showing some radionuclides concentration analyzed from various rock materials in the KURT. The highly concentrated U and Th are found in fracture-minerals and iron-coated rocks.

포하는 방해석과 같은 탄산염 광물들의 용해에 의한 영향이 작용한 것으로 보인다. 탄산염 광물들의 생성 연대는 분명치 않으나, 과거 열수 변질 작용에 의해 이차적으로 형성되었거나 지하수로부터 과포화 되어 침전, 성장에 의해 암석 단열을 따라 형성된 것으로 보인다. 관찰되는 특징으로는 단열을 따라 일정한 방향성을

가지고 있으며 방해석 표면들이 철 혹은 망간 산화물로 얇게 피복되어 있는 경우가 흔하다. 과거 이 지역의 용존 철 성분들이 이동 중 판상 형태로 성장한 방해석과 같은 탄산염 광물들에 흡착되거나 그들과 같이 지하수로부터 공침되면서 형성된 것으로 보인다. 또한, 그림 6b에서 보는 바와 같이 KURT 단열에서 일라이트 광물은 적은 양으로도 항상 나타나며, 그 표면 위에 작은 방해석들이 미세한 입자 혹은 비정질 형태로 분포하고 있고 철 산화물이 얇게 피복되어 있는 경우도 있다.

#### 일부 방사성 핵종들의 분포 특성

암석에는 미량의 방사성 원소들이 잔류하고 있으며, 암석의 지질학적 조건 및 풍화작용 등에 의해 분포 및 농도 특성이 달라진다(Nesbitt, 1979; Koppi *et al.*, 1996; Rayne and Airey, 2006). 본 연구 지역에서 방사성 원소 중 대표적인 핵종인 U, Th, 그리고 Sm을 대상으로 암석 내 분포 특성을 조사하였다. 신선한 암석 및 풍화가 진행된 암석, 그리고 균열 혹은 단층 충전물질로 채워진 부분을 대상으로 시료를 채취하여 분석하였는데, 비교 대상 화학성분들의 선택적인 농집 현상이 관찰되었다(그림 7). 특히, 단열충전물 시료는 신선한 암석에 비해 우라늄과 토륨의 함량값이 높게 나왔다. 하지만, REE(희토류원소) 원소인 Sm은 시료 간에 큰 차이가 없었고, 우라늄, 토륨과는 달리 특정 부분에 집중되는 현상은 관찰되지 않았다(표 1). 조사

**Table 1.** The radionuclides concentration ( $\mu\text{g/g}$ ) analyzed from the samples of each site in the KURT.

	F1	W1	W2	W3	W1-1	W3-1
Sm	8.02	5.76	6.64	4.03	10.00	6.21
Th	13.20	17.40	36.90	17.80	28.80	3.25
U	2.47	2.81	14.70	22.30	22.30	26.60

Note : F1, W1, and W2 - granitic rocks; W3 - granite coated with Fe-oxides; W1-1 and W3-1 - fracture-filling materials.

된 단열충전물은 주로 점토성 물질이어서 조암 광물을 구성하는 결정성 광물들과는 다소 다르다. 특히, 일라이트 및 스멕타이트와 같은 점토성 광물들은 핵종 원소들을 이온교환에 의해 층간구조 내부에 붙잡아두거나 광물 가장자리에 화학결합 혹은 공유결합을 형성하여 수착시킨다(Grambow *et al.*, 2006; Bradbury and Baeyens, 2006).

점토성 단열충전광물 외에 산화철 광물은 일반 암석에 비해 높은 우라늄 농도 값(20 ppm 이상)을 보여 주었다. 관찰되는 특징 중의 하나는 철 산화물로 피복되어 있는 암석의 핵종원소 농도가 상대적으로 높다는 사실이다. 이것은 페리하이드라이트(ferrihydrite)와 침철석(goethite)과 같은 철산화 광물들이 핵종 원소들을 강하게 수착함으로써 높은 농도의 핵종 분포를 보여주는 것으로 판단된다(Sato *et al.*, 1997; Murakami *et al.*, 2005). 본 지역의 산화철 광물들의 형성은 흑운모 광물을 비롯하여 철을 함유한 녹니석 광물 등의 풍화로부터 비롯된 것이다. 지하수에 의한 광물 구조 파괴 및 Fe 성분들의 용출과 이동 중 산화 및 침전되면서 균열, 단층 및 암석 표면에 국부적으로 수 mm 이상의 철 산화물 층을 형성시킨 것으로 보인다. 단열충전광물 및 산화철 광물 형성 시기에 대한 연구가 보다 구체적으로 진행되면, 지하심부 핵종들의 거동에 대한 주변 이차광물들의 영향을 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 보인다. 결국, 본 지역은 핵종 원소들이 심부 지하수 혹은 열수를 따라 이동하면서 이미 형성되었거나 형성 과정중에 있는 철 산화물 혹은 단열충전물들을 구성하는 점토질 광물과 화학적으로 상호작용하여, 접촉하는 물질 표면에 수착, 이온교환 혹은 공침되면서, 신선한 암석시료에 비해

상대적으로 높은 우라늄, 토륨 농도 값을 보여 주는 것으로 판단된다.

## 결론

원자력연구원 부지 내에 건설된 고준위폐기물 지하처분연구시설은 암석 단열대에 다양한 충전광물들을 가지고 있으며, 특히 판상구조의 점토질 광물들을 다량 함유하고 있다. 팽창성 층상광물인 스멕타이트는 주로 소량의 일라이트와 함께 산출되며 입자 크기에 따른 함량비에는 서로 큰 차이가 없으나, 일라이트가 우세한 시료의 경우에는 입자 크기에 따른 함량비에 차이가 있었다. 따라서, 단열을 통한 핵종 거동을 연구할 때, 일라이트가 우세한 단열충전광물의 경우 입자 크기에 따른 광물학적 영향을 고려해야 할 것이다. 녹니석 및 방해석 등은 단열대에 부분적으로 소량 존재하지만, 대규모 변질 산물로 암석의 일정 부분을 구성하고 있다. 또한, 풍화과정에서 녹니석 등의 철함유 광물로부터 용출되어 흘러나온 Fe 성분들은 지하수로부터 산화 및 침전되면서 산화철을 형성하여 핵종 수착에 큰 영향을 끼치고 있다. 신선한 암석과 비교했을 때, 단열충전광물 및 산화철에 의한 우라늄 및 토륨과 같은 핵종 원소들의 농집 경향은 본 연구지역에서 핵종 수착의 주된 특성중의 하나이며, 향후 KURT 핵종이동연구에 귀중한 자료로 활용될 것이다.

## 감사의 글

본 논문에 필요한 자료인용의 허락과 친절한 조언을 아낌없이 해주신 김건영 박사님과 익명의 심사자에게 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고 문헌

- 김건영, 고용권, 배대석, 김천수 (2004) 방사성폐기물 처분연구를 위한 유성지역 화강암내 심부 시추공 단열충전광물의 광물학적 특성. 한국광물학회지, 17, 99-114.
- 김영규, 이은정 (2004) 인위적으로 풍화시킨 일라이트 표면의 Cs 흡착 특성. 한국광물학회지, 17, 235-243.
- 이석훈, 김수진 (2000) 유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 의한 광물조성의 변화. 한국광물학회



- 지, 13, 121-137.
- 정기영 (1998) 팔공산 화강암내 흑운모의 풍화과정에서 생성되는 고령토 광물들의 광물학적 특성 및 생성환경. 한국광물학회지, 11, 97-105.
- 조원진, 박정화, 권상기 (2004) 소규모 지하처분연구시설 부지조사 및 평가. KAERI/TR-2751/2004, 한국원자력연구소, 대전, 106p.
- Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2006) Modelling sorption data for the actinides Am(III), Np(V) and Pa(V) on montmorillonite. *Radiochim. Acta*, 94, 619-625.
- Choo, C.O. and Chang, T.W. (2000) Characteristics of clay minerals in gouges of the Dongrae fault, Southeastern Korea, and implications for fault activity. *Clays Clay Miner.*, 48, 204-212.
- Grambow, B., Fattahi, M., Montavon, G., Moisan, C. and Giffaut, E. (2006) Sorption of Cs, Ni, Pb, Eu(III), Am(III), Cm, Ac(III), Tc(IV), Th, Zr, and U(IV) on MX 80 bentonite: An experimental approach to assess model uncertainty. *Radiochim. Acta*, 94, 627-636.
- Koppi, A.J., Edis, R., Field, D.J., Geering, H.R., Klessa, D.A. and Cockayne, D.J.H. (1996) Rare earth element trends and cerium-uranium-manganese associations in weathered rock from Koongarra, Northern Territory, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 1695-1707.
- Murakami, T., Sato, T., Ohnuki, T. and Isobe, H. (2005) Field evidence for uranium nanocrystallization and its implications for uranium transport. *Chem. Geol.*, 221, 117-126.
- Nesbitt, H.W. (1979) Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, 279, 206-210.
- Payne, T.E. and Airey, P.L. (2006) Radionuclide migration at the Koongarra uranium deposit, Northern Australia - Lessons from the Alligator Rivers analogue project. *Physics Chem. Earth*, 31, 572-586.
- Sato, T., Murakami, T., Yanase, N., Isobe, H., Payne, T.E. and Airey, P.L. (1997) Iron nodules scavenging uranium from groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, 31, 2854-2858.
- Sawhney, B.L. (1970) Potassium and cesium ion selectivity in relation to clay mineral structure. *Clays Clay Miner.*, 18, 47-52.
- Wendling, L.A., Harsh, J.B., Palmer, C.D., Hamilton, M.A. and Flury, M. (2004) Cesium sorption to illite as affected by oxalate. *Clays Clay Miner.*, 52, 375-381.

---

2007년 8월 10일 원고접수, 2007년 9월 3일 게재승인.