

Rock Weathering and Geochemical Characteristics in the KURT

한국원자력연구소 지하처분연구시설(KURT)의 암석 풍화 및 지화학적 특성

Seung Yeop Lee, Min-Hoon Baik, Won Jin Cho and Pil-Soo Hahn
Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Deokjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

seungylee@kaeri.re.kr

이승엽, 백민훈, 조원진, 한필수
한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received July 12, 2006 / Approved October 11, 2006)

Abstract

A basic research was conducted on the mineral weathering and geochemical characteristics in the KURT (KAERI Underground Research Tunnel), which was recently constructed at a site in KAERI. Some rock samples exposed during the KURT construction were examined using a microscope and chemical analysis for some micro-changes of the rocks caused by the chemical weathering. The weathered granite has some small and fine cracks around the rock-forming minerals. In particular, there are a characteristic weathering of feldspar mineral and a preferential leaching of Ca component from the mineral dissolution. In addition, by the dissolution of biotite containing Fe^{2+} component there were iron-oxides precipitates as secondary products into the micro-cracks of around minerals. The results also show that the micro-cracks initiated from the mineral interior are extended and connected into the larger cracks along the grain boundary with the progress of the weathering. Thus, it is considered that some chemicals dissolved from the fresh rock would be involved in the formation of secondary minerals and migrate interacting with them.

Key words : KURT, weathering, granite, cracks

요약

한국원자력연구소 내 부지에 건설된 지하처분연구시설(KURT, KAERI Underground Research Tunnel)에 대한 기초적인 광물 풍화 및 지화학적 특성을 살펴보았다. 분석 대상 시료는 건설 과정에서 노출된 암석에 대해서 화학적 풍화에 따른 암석의 미세적인 변화를 현미경 및

화학성분 분석 등을 통해 관찰하였다. 풍화가 진행된 화강암의 경우 암석을 구성하고 있는 광물들 주변에 미세하고 작은 균열들이 발달하였다. 특히, 장석 광물의 풍화가 특징적으로 관찰되었고 광물 용해에 따른 Ca 성분의 선택적 용출 현상이 심하였다. 또한, Fe^{2+} 를 함유한 흑운모의 용해에 의한 Fe^{2+} 성분의 용출에 의해 주변 광물의 미세균열에 이차생성물로 철산화물 침전이 두드러졌다. 광물내부로 부터 발생된 미세균열은 풍화가 진행되면서 점차 그 규모가 커지고 grain boundary를 따라 매우 먼 거리까지 확장되는 특성을 보여 주었다. 신선한 암석이 풍화됨에 따라 암석 내에 존재하거나 용출된 화학 성분들은 이러한 미세 균열들을 통해 새로운 이차광물 생성에 관여하거나 그들과 상호 반응하면서 이동하는 것으로 추정된다.

중심단어 : 지하처분연구시설, 풍화, 화강암, 균열

I. 서론

암석이 기계적 및 화학적 작용에 의해 작게 파괴되는 과정을 암석의 풍화(rock weathering)라고 한다. 기계적으로 암석이 파괴되는 주요 원인중의 하나는 위에 놓였던 하중의 제거에 의한 압력의 감소이다. 1 기압은 0.76 m의 수은주의 압력에 해당하며, 이는 물의 기둥 약 10 m의 압력에 해당된다. 그러므로 수면하 10 m에서는 약 2 기압의 압력이 생기며 10 m씩 깊어짐에 따라 1 기압씩 기압이 증가한다. 밀도가 2.7 g/cm^3 인 암석은 지하 약 4 m에서 1 기압이 된다. 따라서, 심부 암석이 노출되면 높은 압력이 제거되므로 암석은 팽창하면서 틈, 즉 절리를 가지게 된다. 압력의 제거로 생긴 절리는 그들 사이의 간격이 크므로 암석을 곧 작은 조각으로 만들지 못하나 절리면을 따라 물, 공기, 그리고 생물의 작용이 일어나기 시작하여 다음 단계의 파괴작용을 일으킬 터전을 장만해 주는 일을 한다[1].

기계적 혹은 물리적 풍화와는 달리, 암석이 물(지하수)과 접촉하게 되면 화학적 풍화가 활성화 된다. 화학적 풍화가 진행되면서 모암을 구성하는 광물들의 종류에 따라 다양한 형태의 다른 물질로 변해간다. 화학적 풍화의 다양한 기작을 통해 각기 다른 종류의 새로운 이차 광물 및 침전물들이 만들어진다. 이와 같은 신선한 광물의 용해 및 파괴의 시작은 물속에 있는 수소이온들의 활동도에 의해 영향을 받으며, 광물 구성성분 용출 및 표면구조 등의 변화가 일

어난다[2]. 물속에 녹아있는 수소이온은 조암광물 성분중 양이온을 선택적으로 수화 및 치환시키는 화학 반응을 통해 원광물의 결정을 non-stoichiometric하게 용해시켜 나간다. 이러한 광물용해 작용에 의해 광물 전체의 내부구조와는 다른 얇은 두께(μm)의 leaching 구조가 광물표면에 형성되며, 점차 광물 내·외부에 미세한 균열들을 발달시킨다[2].

화강암질 암석은 50 % 이상의 장석과 흑운모 광물들을 포함하고 있다. 화강암의 풍화는 장석 및 흑운모 광물의 풍화에 의해 큰 영향을 받으며, 시간이 지날수록 점차 화강암 전체 구성 조직의 파괴에까지 이른다[2-7]. 원자력연구소에 건설된 지하처분연구시설(KURT)의 주 구성 암석은 화강암이며 터널 깊이에 따라 풍화 및 변질 정도가 다르다. 지표면으로부터 지하 심도가 낮은 터널 입구 부근은 풍화가 많이 진행된 상태이며, 터널 막장은 단층 및 절리를 따라 암석 풍화대가 발달해 있다. 최근 세계 각국은 심부지질에서의 핵종이동에 관한 실험을 다양하게 수행하고 있으며, 일부 광물에 대해서는 수착, 탈착 실험 등을 실내 규모에서 수행하고 있다. 그리고, 결정질 화강암을 방사성폐기를 지하처분 매질로 고려함에 따라, 화강암에 대한 다양한 실험 등을 관심있는 나라들에서 수행하고 있다. 하지만, 아직까지 그 연구는 매우 미미한 수준이다. 특히, 심부 화강암반에 장기간 폐기물을 적치하게 될 때, 풍화에 의해 서서히 나타나는 화강암의 변질 및 미세균열과 그것에 의한 용질 이동의 영향 등에 대한 현장 및 실내 실험은 거

의 이뤄지지 못하고 있다.

본 연구의 목적은 KURT의 풍화 화강암을 면밀히 관찰함으로써, 시간이 흐름에 따라 암석이 화학적으로 풍화되면서 미세 절리가 발달하고, 이러한 특성이 향후 핵종 거동에 끼치는 영향 등을 살펴봄으로써, 고준위폐기물처분 안전성평가 자료로 활용하고자 한다.

II. 지질 특성

대전광역시 유성구 덕진동 150번지 한국원자력연구소 주말농장 우측 후면에 위치한 KURT 지하처분 연구시설은 2003년 부지조사[8,9]를 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. 이 지역의 지질을 살펴보면, 경기변성암 복합체에 속하고 주로 선캄브리아기의 편마암류와 중생대의 심성암과 맥암류로 구성되어 있다(Fig. 1). 연구 지역을 구성하고 있는 심성암류는 크게 시대미상의 편상화강암과 중생대 복운모화강암으로 나눌 수 있다. 이 중 복운모화강암은 연구 지역의 전 범위에 걸쳐 가장 광범위하게 분포하

는 암석으로 편상화강암을 관입하고 있다. 복운모화강암은 중립 내지 세립질이며 주구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등이고 저어콘, 금홍석, 인회석 등이 소량 관찰된다[10]. 시추코아 분석에 의하면 장석류는 시추코아 심도와 관계없이 건운모화 되어 있는 양상을 흔하게 보이며 흑운모의 녹니석화 작용도 빈번하게 관찰된다. 일부 석영맥이 산출되는 구간에서는 황철석 및 몰리브데나이트 등의 광석 광물이 산출되는 것으로 보아 국지적인 광화작용이 있었던 것으로 판단된다[10].

III. 시료채취 및 분석

시료 채취는 KURT 공사가 진행 중인 시점(약 100 m 까지 굴착진행)에서 이뤄졌으며(Fig. 1), KURT 터널 벽면의 특정 위치 암석시료를 대상으로 시료간의 풍화 정도를 비교하기 위해 신선한 암석과 풍화된 암석들을 육안으로 확인한 후 햄머를 이용하여 채취하였다. 터널 암석의 시료 채취는 터널 굴착 역건상 발파와 숏크리트 타설 이후 일시적이고 부분적으로 드러난 암반을 대상으로 하였다. 채취된 시료는 광물분석과 화학분석 두 가지로 나누어서 실시하

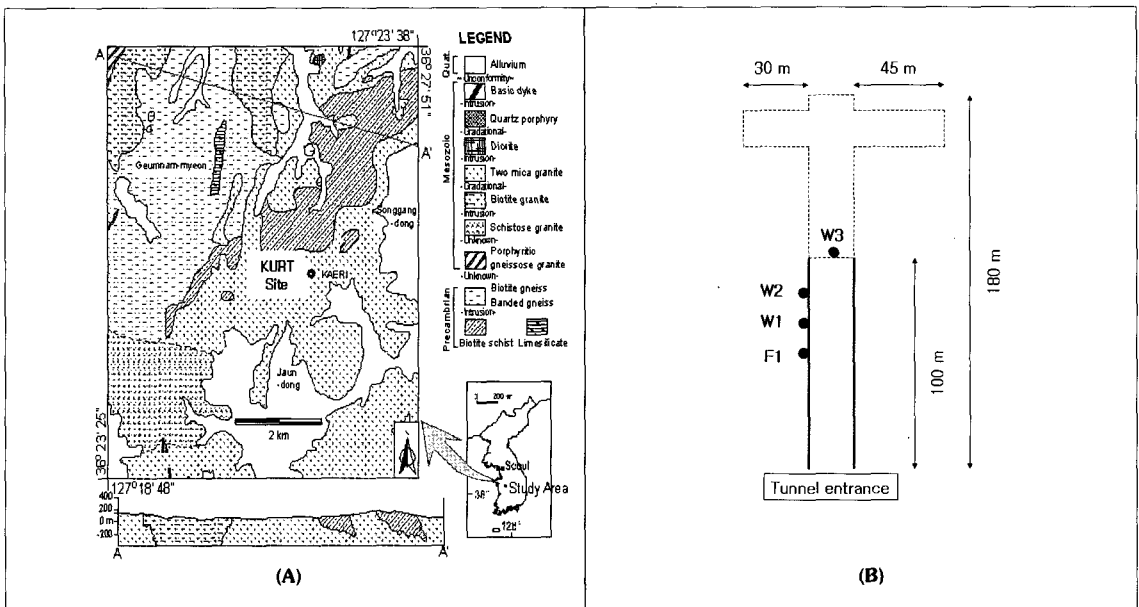


Fig. 1. (A) Geological map of the study area and (B) schematic drawing of the sampling sites in the KURT. The dotted lines indicate that the tunnel was not completely excavated at the time.

였다. 시료의 광물학적 분석을 위해 실체현미경, 편광현미경, X-선 회절분석(XRD), 주사전자현미경(SEM), 그리고 전자현미분석(EPMA) 기기를 이용하였고, 주요 화학성분 분석을 위해서는 XRF를 사용하였다.

분석과정을 구체적으로 살펴보면, 채취 시료를 실내 대기조건에서 건조시킨 후, 일부 시료를 작게 분리하여 전처리 없이 시료대 위에 올려놓고 실체현미경을 통해 약 200배 까지 확대하여 암석 및 광물의 미세한 형태를 관찰하였다. 채취한 시료의 절단면에 대한 광물 구조 및 조직을 mm 수준에서 관찰하기 위해 슬라이드글라스에 압편 시료를 붙여 박편을 만든 후, 편광현미경을 이용하여 수백 배로 확대하여 관찰하였다. 기초과학지원연구원의 XRD(Bruker D8 Advance, Germany)를 이용하여 암석 및 미지시료의 광물을 동정하였다. XRD 분석을 위하여 압편시료는 막자사발을 사용하여 최대한 곱게 갈아 시료 홀더에 채운 후 XRD 분석을 실시하였다. 시료의 분석조건은 전광물 분석을 위해서 scan range 2θ 를 60까지 하여 시료내에 존재 가능한 모든 광물들을 분석하려고 하였다. 암석 시료를 구성하는 광물의 미세한 구조 및 표면을 수 μm 이하로 관찰하기 위해 기초과학지원연구원의 SEM(LEO 1455VP, 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 특정부분을 in-situ 표면화학분석으로 조사하였다. 그리고, 시료의 광물 동정 및 각 point별 화학성분 분석을 위해 박편을 만들고 carbon coating 한 후 EPMA(Cameca SX-50, France)를 사용하여 정성 및 정량 분석하였다. 암석의 major 화학성분(Al, Ca, Na, Fe, K, Mg, Mn, P, Ti, Si)을 분석하기 위해서 XRF(X-ray Fluorescence Spectroscopy)를 이용하였다. 이 방법을 통해서 진암 화학조성을 알 수 있었다. 이러한 분석을 위한 시료 준비는 분석하고자 하는 시료 약 50 g을 건조하고 막자사발로 곱게 빻고 강산용액에 녹이는 전처리 과정을 거친 후 분석하였다.

IV. 결과 및 토의

KURT 터널의 주구성 암석은 화강암이며, 약한 변성작용을 받아 다양한 암종으로 존재하며 일부 광물들은 부분적으로 chlorite화 되어 있다. 터널 입구로부터 막장쪽으로 100 m 정도까지는 암반이 신선하지 않고 풍화가 상당히 진행된 상태로 존재한다. 터널 중간 70 m 지점 회차로 부근의 암석은 대체로 신선하고 화강암의 전형적인 조직을 잘 보여주고 있다(Fig. 2). 박편을 통해 화강암의 광물조성을 살펴보았을 때, 석영과 장석이 주를 이루고 운모류와 변성작용에 의한 변질산물인 녹니석이 관찰되고 있다(Fig. 3). 박편에서 녹니석은 주로 흑운모의 변질산물로 관찰된다. 터널내의 암석은 풍화가 진행되면서 암석표면에 침전된 철산화물(iron oxides)에 의해 피복되고 이차광물들이 미세 틈새를 따라 부분적으로 발달, 충전되어 있다.

가. 광물의 풍화

신선한 화강암과 풍화가 진행된 화강암의 major

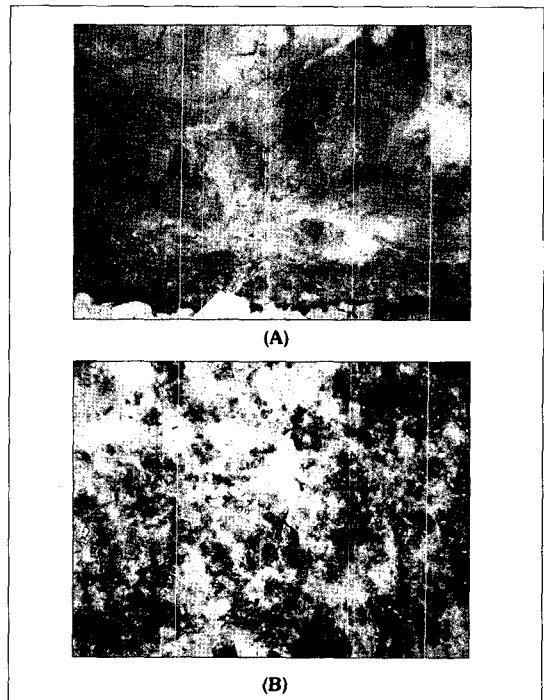


Fig. 2. Outcrop of the fresh granite site (F1), which is located at 70 m from the tunnel entrance of the KURT

화학성분들을 서로 비료해 보면 부분적으로 차이가 나는데, 특히 칼슘(Ca) 성분의 함량 차이가 크다 (Table 1). 신선한 화강암의 경우 CaO 함량이 3.01 % 정도이지만, 풍화가 진행된 암석의 경우 최대 0.95 % 정도에 지나지 않는다. 이러한 큰 차이는 화강암을 구성하는 원소 중 칼슘 성분의 지화학적 거동의 독특성에 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 위의 결과는 풍화초기에 칼슘이 가장 먼저 그리고 쉽게 침출(leaching out)된다는 것을 의미한다[11]. 풍화가 진행 중인 암석시료를 분석한 결과 신선한 암석에 비해 전반적으로 칼슘 함량이 부족하고 이것은 화강암을 구성하는 광물 중 칼슘을 함유하고 있는 장석류의 급격한 붕괴에 의한 칼슘 성분의 용출 때문인 것으로 판단된다 (Fig. 4). 편광현미경 관찰에 의하면, 장석류, 특히 사장석의 풍화가 두드러지게 관찰된다(Fig. 4). 현미경 상에 보이는 장석류의 풍화는 원광물의 칼슘성분이 농집된 부분이 물에 의해 선택적으로 침출(leaching

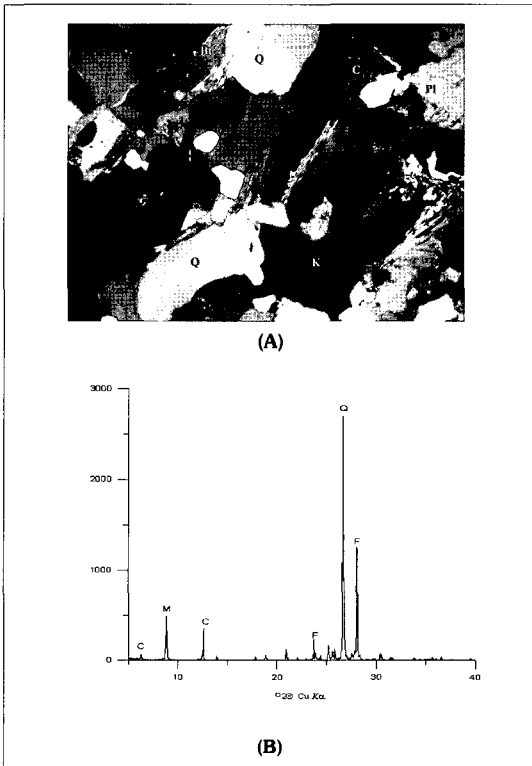


Fig. 3. (A) A thin-section photomicrograph of the fresh granite. (B) XRD pattern of the fresh granite. (K: k-feldspar, PI: plagioclase, Q: quartz, Bt: biotite, C: chlorite, M: mica, F: feldspar).

Table 1. XRF analytical data of the major elements of the rocks in the KURT

Samples ^a % Oxide	F1	W1	W2	W3
SiO ₂ (%)	69.86	75.53	74.34	72.34
Al ₂ O ₃ (%)	16.10	13.10	14.11	14.89
Fe ₂ O ₃ (%)	2.61	2.00	0.96	1.58
CaO (%)	3.01	0.49	0.57	0.95
MgO (%)	0.67	0.42	0.18	0.34
K ₂ O (%)	3.33	3.69	5.43	4.72
Na ₂ O (%)	2.96	2.69	2.99	2.65
TiO ₂ (%)	0.30	0.30	0.15	0.23
MnO (%)	0.06	0.03	0.03	0.02
P ₂ O ₅ (%)	0.12	0.08	0.04	0.09
L.O.I. ^b (%)	0.78	1.47	0.86	1.98
Total (%)	99.80	99.80	99.66	99.79

^a (F1: Fresh rock, W1~W3: Weathered rocks)

^b Loss on ignition

out)되면서 그 곳에 이차광물이 형성되거나 충전되는 과정이 진행된다[5]. 칼슘 함량이 높은 사장석 광물 표면의 균열을 따라 침투한 지하수 및 수분에 의해 칼슘이 용해되어 빠져나가면서 풍화가 진행된 화강암은 전반적으로 칼슘 농도 값이 낮게 나온다.

풍화가 지속적으로 진행된 암석의 경우, 이차광물로 일라이트(illite)와 스멕타이트(smectite)와 같은

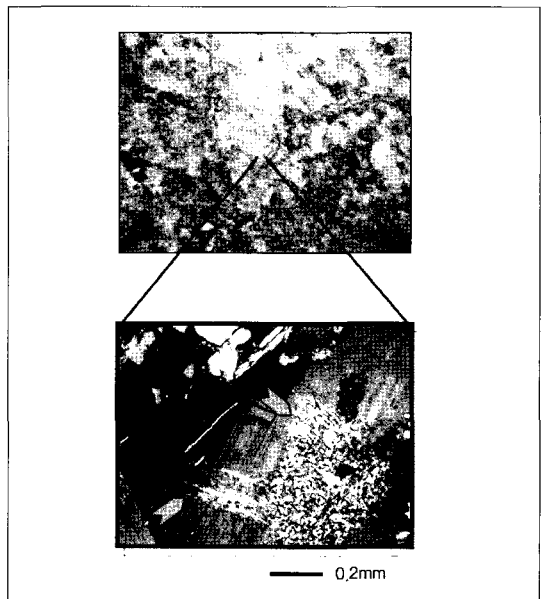


Fig. 4. Photographs showing the break down of plagioclase in the weathered granite. The arrows indicate the secondary altered materials which made from the dissolution of plagioclase.

작은 입자(수 μm)의 층상광물들이 발달하였다. Fig. 5에서 관찰할 수 있는 것처럼 KURT 현장에서는 주로 일라이트 광물이 풍화산물로 발달해 있고 그 표면과 주변을 스멕타이트 광물이 피복하고 있는 특징을 보여준다. 일라이트와 스멕타이트와 같은 층상광물은 다른 광물들에 비해 핵종 원소 흡착이 탁월하고 핵종 거동에 큰 영향을 주는 광물으로써[12-14], 이러한 층상광물들의 발달 여부는 향후 핵종들의 migration과 관련하여 중요하게 다뤄져야 할 사항이다. 즉, 본 연구 지역에서 풍화암과 암석 균열대를 따라 발달하는 일라이트와 같은 층상 이차광물들의 분포 및 양에 의한 핵종 이동 저지효과에 대한 자세한 연구가 추후 필요할 것으로 사료된다. 또한, 풍화암 주변 일라이트 광물질 표면에는 ferrihydrite와 같은 미세 철산화물들이 매우 얇게 피복되어 있다(Fig. 5B). 물속에 녹아 있던 철 이온들이 산화되면서 이차광물 표면에 침전되고 풍화암 및 이차광물들의 색깔에 큰 영향을 미치고 있었다. 이러한 철 성분은 흑운모와 같은 철 함유 광물들의 지속적인 풍화에 의해 공급되는 것으로 판단되며, 암석내에 철 함유 광물들의 분포가 중요하게 작용하는 것으로 보인다.

나. 미세균열의 발달

KURT 암석시료 조사 및 분석 결과, 풍화가 진행되면서 화강암을 구성하고 있는 광물들 주변에 미세 균열들이 발달한다는 사실을 확인하였다. 특히, mineral grain boundary, 광물구조의 약한 곳, 그리고 선택적으로 용해된 부분을 따라 미세균열들이 발달하였고 풍화 속도가 빠른 장석, 흑운모류 광물에서는 초기부터 광물조직 내부 깊숙이 미세 균열들이 발달하였다. 미세균열들의 발달은 주로 광물의 화학적 용해작용의 기작에 기반을 둔 것으로 보인다. 광물을 구성하는 화학 성분 중 선택적인 용탈에 의해 일부 주요 원소들이 점차 광물 격자로부터 빠져나가고 광물이 구조적으로 취약해 지면서 서서히 미세균열들이 발달하는 것으로 보인다. Fig. 6은 흑운모의 풍화와 주변 광물들의 용해 관계를 보여주고 있다. 층상광물이면서 Fe^{2+} 를 함유한 흑운모가 풍화되면서 흑운모 층간 간격이 점차 확대되고 물의 침투가 내부

깊숙이 진행되면서, 층간이온 및 광물구성 성분들이 용탈되고 이러한 성분들이 주변 장석광물로 침투하였다. 용해된 Fe^{2+} 성분이 물을 따라 이동하다가 산화되면서 주변 광물 미세균열 공간 내부에 비정질 이차광물로 침전된다(Fig. 6). 장석류의 미세균열은 다른 광물에 비해 발생빈도가 높았으며, 이러한 균열을 따라 새로운 이차광물 형성 및 철산화물 등의 침전이 쉽게 일어났다(Figs. 6, 7). 이러한 이차광물 및 철산화물 등은 in-situ 생성물이기도 하고 주변 철 함유 광물의 Fe 성분 용해(dissolution)와 이동(migration)에 의해서 만들어진 산물이기도 하다. 우리가 현미경을 통해 풍화된 화강암의 조직을 관찰해 보면, 장석 혹은 흑운모 광물이 초기에 가장 먼저 풍화되면서 암석 전체의 미세균열을 주도하고 주변 광물들로 확대되며, 이렇게 만들어진 균열을 따라 용존 지하수로부터 이차광물들이 새롭게 형성된다는 사실을 알 수 있다.

풍화되는 광물들의 미세균열과 더불어 광물 boundary를 따라 연속적으로 발달하고 지속되는 큰

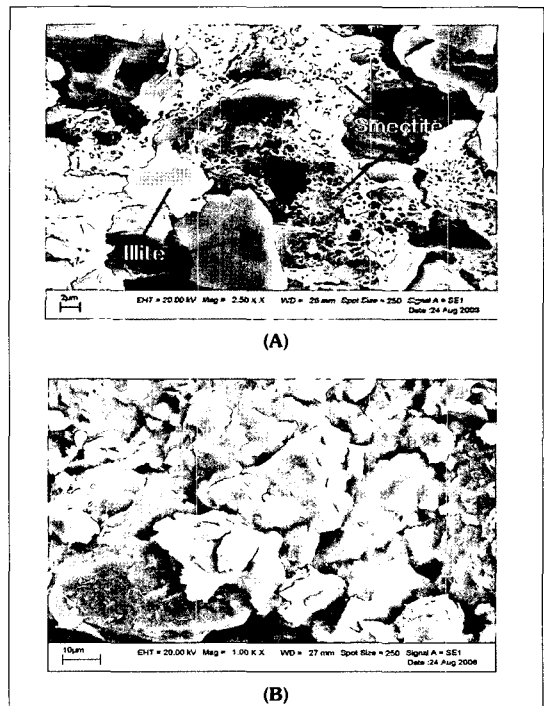


Fig. 5. SEM photomicrographs showing some secondary minerals originated from the weathering of granitic rock in the KURT. (A) Secondary electron image of honeycomb smectite coating the illite surface. (B) Illite coated with very fine amorphous Fe-oxides such as ferrihydrite.

규모의 미세균열들도 관찰할 수 있다(Fig. 8). 계속해서 발달, 성장하는 미세 균열들의 폭은 큰 규모는 아니지만(수십 μm 정도), 균열의 길이 및 연속성은 입자 경계부를 따라 수 mm ~ 수 cm 이상에 달할 정도로 상당한 규모로 발전하며, 주변 광물들의 특성과 형태에 따라 그 모양과 크기가 달라진다. 비록, 미세균열들의 크기 및 규모가 소위 말하는 균열대 혹은 단층대에 비해 매우 소규모인 것은 사실이지만, 초기 누출된 핵종들의 직접적인 접촉 대상이며 주된 이동통로로써 작용하여 지질시간에 걸쳐 이러한 경로를 따라 큰 규모의 균열/단층대에 도달한다는 것을 생각할 때에, 신선한 암석 광물주변에서 만들어지고 확장되는 미세균열들의 규모 및 특징 등은 핵종 이동 연구에 대단한 중요성을 가진다. 또한, 풍화에 의해 신선한 화강암 광물들 주변에 발달하기 시작하는 미세균

열들은 지질특성에 따라 그 크기 및 분포, 그리고 이차광물들의 종류 및 형성 여부에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 미세균열로 침투하는 핵종들의 이동 가속화 혹은 둔화 현상 등 다양한 방식의 핵종 거동은 풍화암의 조직을 미시적인 관점에서 조사함으로써, 심부지질에서의 용질들의 이동 특성을 보다 명확히 이해할 수 있다.

V. 결론

고준위 폐기물을 수 만년 이상 장기적으로 안전하게 관리하면서 생태계에 미치는 영향을 최소화하기 위한 방안의 하나로 많은 사람들은 지하암반에 폐기물을 처분하고자 한다. 지하암반에 폐기물을 처분하게 될 때 장기적인 관점에서 나타나는 문제중의 하나

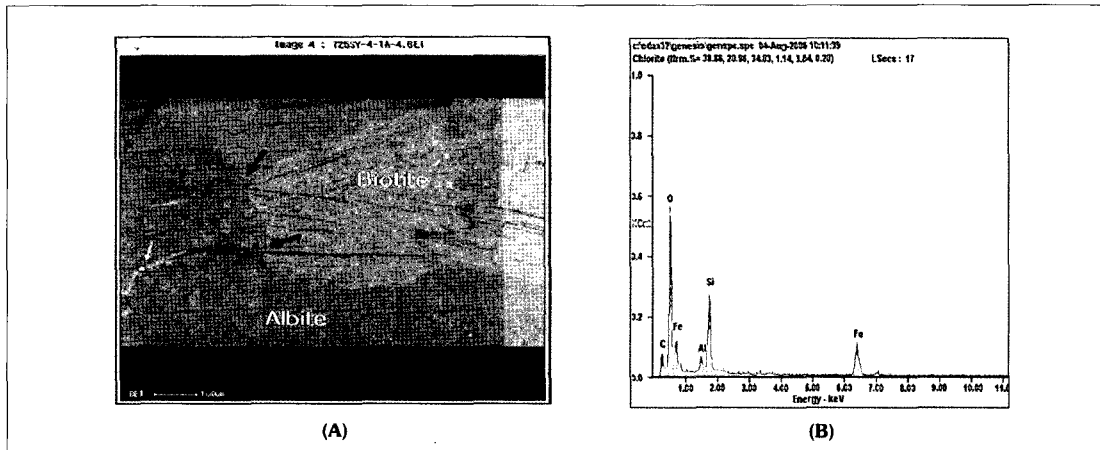


Fig. 6. (A) Back-scattered electron image of a weathered granitic rock. Thick dark arrows indicate channels between minerals, in which cations from enlarged interlayers of a weathered biotite migrate into the etch holes of albite. (B) EDS analysis peaks of the area indicated by a thin white arrow. Fe-oxides are co-precipitated with some secondary aluminosilicate minerals inside the dissolved holes of albite.

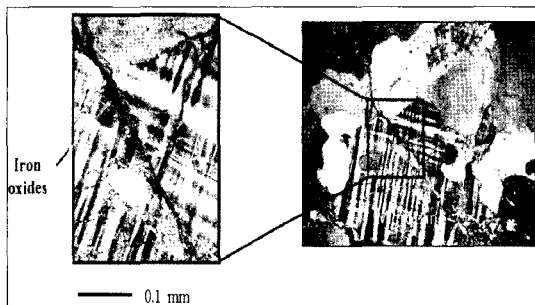


Fig. 7. Photomicrographs showing some micro-cracks developed in the granite.

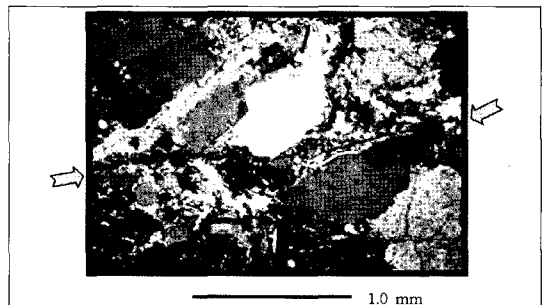


Fig. 8. A photomicrograph showing a largely developed crack along the grain boundaries. The arrows indicate the channel of groundwater transferring dissolved solutes.

는 암석의 풍화에 의한 영향이다. 폐기물 처분장을 건설하게 되면 발생하는 문제점은 기계적인 암반 균열 외에 시간이 흐르면서 화학적 풍화가 점차 확대된다는 점이다. 이러한 풍화에 의해 발생하는 암석의 균열은 작은 규모로 광물내부 깊숙이 진행되며, 이렇게 발생된 미세한 균열들은 풍화 환경에 따라 점차 크게 확대되어 결국 핵종이동 통로로써 큰 기여를 하게 된다. 이번 연구의 결과로부터 알 수 있는 사실은, 장석 및 흑운모 광물들의 풍화가 화강암 풍화에 미치는 영향이 적지 않고 발생하는 초기 미세균열들의 대부분을 담당하며 크기 및 규모는 수 μm 에 지나지 않지만, 점차 그 형태가 확장되어 추후 용존 화학원소들의 미시적인 이동 통로로써 사용될 가능성이 있음을 확인할 수 있다. 즉, 현미경으로 관찰될 정도의 작은 미세 균열들이 서로 상호 연결되어 발달하게 되면 용존 화학성분들의 이동이 훨씬 원거리까지 빠르게 진행될 수 있음을 의미한다. 조암광물 균열 내부에 이차적으로 생성되는 침전물과 이차광물들의 역할이 좀 더 구체적으로 밝혀진다면, 핵종 원소들의 풍화암반 미세 균열을 따라 이동하는 현상을 좀 더 명확히 밝힐 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 정창희, 지질학개론, pp. 102-111, 박영사, 한국 (1987).
- [2] 이승엽, 김수진, 조원진, "운모와 장석의 실내 풍화 실험 및 광물학적 특성," 한국광물학회지, 19, pp. 63-69(2006).
- [3] H.W. Nesbitt, "Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite," Nature, 279, pp. 206-210(1979).
- [4] H.W. Nesbitt and G. Markovics, "Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments," Geochim. Cosmochim. Acta, 61(8), pp. 1653-1670(1997).
- [5] G.Y. Jeong, "The dependence of localized crystallization of halloysite and kaolinite on primary minerals in the weathering profile of granite," Clays Clay Miner., 48(2), pp. 196-203(2000).
- [6] M.J. Wilson, "Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates," Clay Miner., 39, pp. 233-266(2004).
- [7] A. Kirschbaum, E. Martinez, G. Pettinari and S. Herrero, "Weathering profiles in granites, Sierra Norte (Cordoba, Argentina)," J. South Amer. Earth Sci., 19, pp. 479-493(2005).
- [8] 조원진, 박정화, 권상기, 소규모 지하처분연구시설 부지조사 및 평가, KAERI/TR-2751/2004, 한국원자력연구소, 대전(2004).
- [9] 조원진, 박정화, 권상기, 소규모 지하처분연구시설 기본설계, KAERI/TR-2769/2004, 한국원자력연구소, 대전(2004).
- [10] 김건영, 고용권, 배대석, 김천수, "방사성폐기물처분연구를 위한 유성지역 화강암내 심부 시추공 단열 충전광물의 광물학적 특성," 한국광물학회지, 17, pp. 99-114(2004).
- [11] 이승엽, "북한산 지역의 화강암 풍화에 관한 환경 광물학적 연구," pp. 9-26, 이학석사학위논문, 서울대학교(1994).
- [12] D.M. Giaquinta, L. Soderholm, S.E. Yuchs and S.R. Wasserman, "The speciation of uranium in a smectite clay: evidence for catalysed uranyl reduction," Radiochim. Acta, 76, pp. 113-121(1997).
- [13] C.J. Chisholm-Brause, J.M. Berg, R.A. Matzner and D.E. Morris, "Uranium(VI) sorption complexes on montmorillonite as a function of solution chemistry," J. Colloid Interface Sci., 233, pp. 38-49(2001).
- [14] L.A. Wendling, J.B. Harsh, C.D. Palmer, M.A. Hamilton and M. Flury, "Cesium sorption to illite as affected by oxalate," Clays Clay Miner., 52, pp. 375-381(2004).