

Geochemical Characteristics of the Gyeongju LILW Repository **II. Rock and Mineral**

중·저준위 방사성폐기물 처분부지의 지구화학 특성 **II. 암석 및 광물**

Geon Young Kim¹⁾, Yong Kwon Koh, Byoung-Young Choi, Seon Ho Shin and Doo Haeng Kim*

Korea Atomic Energy Research Institute, Daedeokdaero 1045, Yuseong-gu, Daejeon

*Korea Hydro and Nuclear Power Co., LTD, Youngdongdaero 411, Gangnam-gu, Seoul

김건영¹⁾, 고용권, 최병영, 신선호, 김두행

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

*한국수력원자력(주), 서울특별시 강남구 영동대로 411

(Received November 24, 2008 / Revised December 04, 2008 / Approved December 16, 2008)

Abstract

Geochemical study on the rocks and minerals of the Gyeongju low and intermediate level waste repository was carried out in order to provide geochemical data for the safety assessment and geochemical modeling. Polarized microscopy, X-ray diffraction method, chemical analysis for the major and trace elements, scanning electron microscopy (SEM), and stable isotope analysis were applied. Fracture zones are locally developed with various degrees of alteration in the study area. The study area is mainly composed of granodiorite and diorite and their relation is gradational in the field. However, they could be easily distinguished by their chemical property. The granodiorite showed higher SiO₂ content and lower MgO and Fe₂O₃ contents than the diorite. Variation trends of the major elements of the granodiorite and diorite were plotted on the same line according to the increase of SiO₂ content suggesting that they were differentiated from the same magma. Spatial distribution of the various elements showed that the diorite region had lower SiO₂, Al₂O₃, Na₂O and K₂O contents, and higher CaO, Fe₂O₃ contents than the granodiorite region. Especially, because the differences in the CaO and Na₂O distribution were most distinct and their trends were reciprocal, the chemical variation of the plagioclase of the granitic rocks was the main parameter of the chemical variation of the host rocks in the study area. Identified fracture-filling minerals from the drill core were montmorillonite, zeolite minerals, chlorite, illite, calcite and pyrite. Especially pyrite and laumontite, which are known as indicating minerals of hydrothermal alteration, were widely distributed in the study area indicating that

1) Corresponding Author. E-mail : kimgy@kaeri.re.kr

the study area was affected by mineralization and/or hydrothermal alteration. Sulfur isotope analysis for the pyrite and oxygen-hydrogen stable isotope analysis for the clay minerals indicated that they were originated from the magma. Therefore, it is considered that the fracture-filling minerals from the study area were affected by the hydrothermal solution as well as the simply water-rock interaction.

Key words : LILW repository, Gyeongju, Lithology, Fracture-filling mineral, Geochemistry

요 약

경주 중·저준위처분장의 안전성평가에 필요한 기초자료를 제공하고, 지화학 모델링의 자료를 제공하기 위하여 처분부지의 암석, 광물에 대한 지구화학적 특성연구를 수행하였다. 이를 위하여 편광 현미경 관찰, X-선 회절분석, 주원소 및 미량원소 화학분석, 미세조직관찰을 위한 주사전자현미경(SEM) 분석, 안정동위원소분석이 수행되었다. 조사지역내에는 지역적으로 파쇄대가 발달하여 있으며 이 파쇄대를 따라 매우 다양한 변질양상을 관찰할 수 있다. 처분부지의 모암은 화강섬록암 및 섬록암으로서 지표지질조사시 이들의 관계는 점이적으로 변하는 데에 비해 화학적으로는 비교적 명확하게 구별되어 화강섬록암이 섬록암에 비해 높은 SiO₂ 함량, 낮은 MgO, Fe₂O₃ 함량을 보여준다. 그러나 SiO₂의 증가에 따라 각 주원소들의 변화경향이 동일선상에 놓여 있어서 이들이 동일한 마그마 기원일 가능성을 지시한다. 처분부지내의 주원소들의 공간적 분포를 살펴보면, 섬록암 지역이 화강섬록암 지역에 비해 낮은 SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O 및 높은 CaO, Fe₂O₃ 분포를 보여주어 화강섬록암과 섬록암 지역의 차이가 명확하다. 이 중 CaO와 Na₂O의 분포 양상은 섬록암과 화강섬록암 지역 간의 차이가 더욱 분명하고 그 증감 경향이 거의 정확하게 상반되어 있어 지구성광물인 사장석의 조성변화가 처분부지 암석의 조성을 변화시키는 가장 큰 원인임을 알 수 있다. 시추코아에서 확인된 단열광물은 몬모릴로나이트, 제올라이트광물, 녹니석, 일라이트, 방해석, 황철석 등이다. 일반적으로 열수변질광물로 알려져 있는 황철석과 로먼타이트가 매우 광범위하게 분포하는 것으로 보아 조사지역 전반에 걸쳐 광범위한 광화작용 혹은 열수변질작용이 있었음을 지시한다. 단열대 내 황철석의 황 안정동위원소분석과 단열충전광물들의 산소 및 수소 안정동위원소 분석결과 역시 이들이 마그마 기원임을 지시한다. 따라서 처분부지 내 단열충전광물들은 단열대를 따르는 지하수와 단순한 물-암석 반응 이외에 광범위한 마그마 기원의 열수작용에 의한 영향을 받은 것으로 판단된다.

중심단어 : 중·저준위방사성폐기물처분장, 경주, 암석, 단열충전광물, 지구화학

I. 서론

방사성폐기물의 처분개념은 방사성폐기물을 안전한 환경조건을 갖는 지하환경에 처분하여 인간환경으로부터 격리시키는 것으로서, 일반적으로 공학적 방법과 천연 방법을 모두 고려한 다중방벽 개념을 채택

하고 있다. 경주 중저준위처분장 역시 다중방벽 개념을 채택하고 있으며 이중 천연방벽에 해당하는 처분부지의 모암은 결정질암인 화강섬록암으로 주로 구성되어 있다. 이와 같은 결정질 암반의 경우에는 암반에 분포하는 단열 또는 단열대가 주된 지하수 유동로서 작용하며, 지하수는 장기간에 걸쳐 처분장의 공학

적 방벽을 부식 또는 침투하여 핵종을 생물권으로 유출 및 이동시키는 주된 매개체가 될 수 있다. 그러나 또 다른 측면에서는 핵종-지하수-암석 반응현상이 핵종누출을 지연 또는 저지하는 지질학적 방법의 한 요인이 되며, 이 과정에서 유해 핵종은 단열대 내의 광물과의 흡착반응, 이온교환, 표면침전 등과 같은 지화학적 반응을 통하여 인간환경으로 이동되는 시간과 농도가 감소될 수 있다. 즉, 처분장으로부터 방사성 핵종의 유출은 지하수의 유동에 기인하며, 결정질 암반에서의 지하수의 유동체계는 지역적인 단열체계 특성에 지배된다. 또한 유출된 핵종의 거동은 핵종을 운반하는 지하수의 화학성분과 지하수와 접촉하는 암석, 광물 등의 지하매질의 지구화학적 특성에 좌우된다. 따라서 처분장의 안전성 평가를 위해서는 모암에 따른 수리지화학적 특성 규명이 우선되어야 하며, 여기에는 지하수의 화학적 특성, 지하수의 체류시간, 지하수와 접촉하는 모암 및 단열층전광물의 특성규명이 필수적으로 요구된다. 특히 화강암반에서 지하수는 단열을 따라 유동하며, 이런 지하수 유동로에는 화강암을 구성하는 1차 광물과는 다른 물-암석 반응을 통한 2차 광물이 분포하며, 이와 같은 2차 광물의 특성은 핵종의 흡착특성 평가에 중요한 자료로 활용된다.

본 논문은 경주 중·저준위처분장의 부지특성조사의 일부로 수행된 내용으로서, 처분부지의 암석, 광물에 대한 지구화학적 특성 및 지구화학적 특성평가에 필요한 기초자료를 제공하고, 처분부지 내 물의 지구화학 조사내용을 근거로 한 물-암석 반응 및 지화학 모델링의 자료를 제공하기 위하여 수행된 연구 결과이다. 이를 위하여 처분부지내 지하매질에 대한 시료 채취 및 분석을 수행하였으며, 특히 시추코아 시료채취 시에는 암상의 변화 및 변질대, 단열대 구간 뿐 아니라 시추공 지하수의 지구화학 조사내용도 함께 고려하여 채취 위치를 정하였다. 채취된 암석, 광물 시료에 대하여 편광현미경 관찰 및 X선 회절분석(XRD)을 통한 광물감정과 X선 형광분석(XRF) 및 유도결합플라즈마 분석(ICP-AES, ICP-MS)을 통한 화학분석을 수행하였다. 이밖에 전자현미분석(EPMA)을 이용한 광물의 화학분석과 주사전자현미경관찰(SEM) 등을 수행하였다.

II. 처분부지의 지질 및 분석방법

가. 지질

처분부지의 지구화학적 조사를 위한 지하지질매질의 기재는 부지지질(반경 1km)조사 결과를 따랐다 (Fig. 1). 부지지질조사에 의하면 조사지역은 상대적으로 서부에 고지가 형성되어 동쪽으로 완만하게 경사져 있으며 전체적인 지형은 분포암중에 크게 영향을 받고 있다. 지표조사에 의한 암석의 분포는 크게 백악기 퇴적암류와 후기에 관입한 화강암류로 구분할 수 있다. 퇴적암류들은 경상층군의 상부 층준에 대비되는 것으로 알려지고 있으며, 주로 이암과 실트스톤, 사암의 호층으로 구성된다. 화강암류는 백악기 퇴적암류를 관입하며 조사지역의 중심 지역에서부터 북동부 지역에 걸쳐 분포한다. 부지 반경 1 km 지역의 지표지질조사결과에 따른 지질도에 의하면 조사지역의 화강암류는 중립질의 흑운모화강암과 화강섬록암 내지 섬록암으로 산출된다. 화강섬록암과 섬록암은 부지의 북측에서 남측으로 갈수록 점이적으로 변하는 특징을 보여주면서 조사지역의 남쪽 해안가 일대에는 석영섬록암이 분포하며, 관입체의 중심부가 되는 북쪽으로 가면서 화강섬록암으로 변한다. 조사지역의 북단에 분포하는 흑운모화강암은 화강섬록

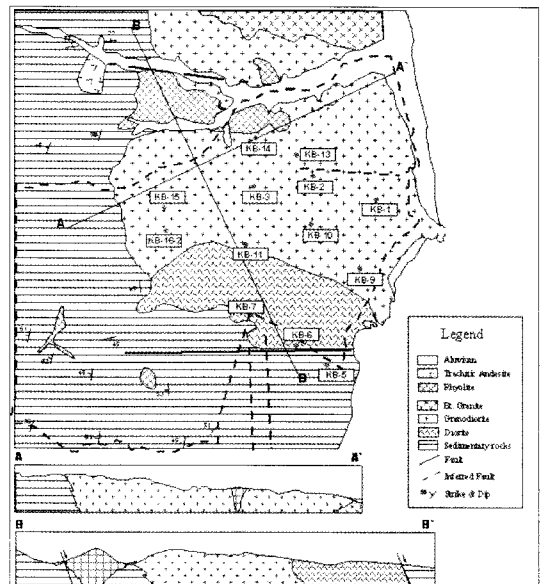


Fig. 1. Geologic map of the study area. Borehole locations are also shown.

암을 관입한 후기 관입체이다. 퇴적암과 화강암류 외
에 조사지역에는 유문암과 반정질 조면안산암과 같
은 관입암류들이 함께 나타나며 제4기층으로는 하천
이나 지형적으로 저지에 형성된 하상퇴적층 혹은 산
록층이 있으며 해안을 따라 고기 해안단구층이 확인
된다.

나. 지질매질 및 시료의 선택

분석대상의 지질매질 시료는 KB-1, 2, 3, 4, 5, 6,
7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16-2 공의 시추코아에서
채취하였으며, 시료의 선택을 위해서 부지반경 1
km 내 지질도와 시추코아의 주상도를 검토한 후, 이
를 기초로 암상의 변화에 따라 시료를 채취하였다.
지표지질조사에서 점이적인 관계로 기재된 화강암
류인 화강섬록암과 섬록암체는 시추코아의 관찰결
과에서도 매우 점이적인 관계를 보여주어 명확한 구
별이 어렵다. 특히 화강암류와 퇴적암과의 경계부
에서는 심하게 호은펠스화 되어 있으며 이러한 경계부
가 시추코아의 수직분포상에 매우 빈번하게 반복되
어 나타나기 때문에 명확한 암종분포의 경계를 구분
하기가 매우 어렵다. 이에 관해서는 신월성 1,2호기
예비안전성분석보고서[1]에서도 본 부지에 분포하는
화강암류를 단일한 흑운모화강섬록암으로 기재한
바 있으나, 조사지역의 지하매질 중 화강암류는 부
지지질조사결과에 의한 지질도(부지반경 1 km 지
질)에 따라 화강섬록암과 섬록암으로 구별하여 기재
하였으며 퇴적암의 경계부에서 열변성작용에 의하
여 혼펠스화된 퇴적암류는 변질퇴적암으로 기재하
였다. 따라서 부지반경 1 km 지질조사 결과에 따라,
채취한 암석시료 중 KB-9, 10, 11, 13 공 전체 시료
와 KB-15 공 80.5 m 심도의 시료가 화강섬록암에 해
당된다. 또한 KB-6, 7, 8 공 전체 시료와 KB-5 공
120.4 m, 141.0 m 심도의 시료들은 섬록암에 해당된
다. 변질퇴적암은 KB-14 공 전체 시료와 KB-5 공
63 m 심도 상부구간의 시료, KB-15 공 57.5 m,
106.5 m 심도의 시료이다.

처분부지의 암석, 광물에 대한 지구화학 특성조사
를 위한 지질시료들은 물시료 화학분석 결과와의 비
교 및 지구화학 모델링을 위하여 물시료 채취지점을

우선적으로 고려하여 선정하였다. 그밖에 모암과 단
열대의 분포양상 및 변질정도에 따라 화학분석용 시
료를 선정하였다. 모암의 대표적 지화학 특성을 알
아보기 위한 화학분석용 시료들은 모두 풍화나 변질
작용에 의한 오염이 없는 부분을 선택하였다. 이밖
에 모암 및 단열대의 변질작용에 의한 영향을 살펴보
기 위하여 변질정도에 따른 시료채취 및 파쇄대 구간
의 변질 시료도 함께 채취하였다. 이렇게 채취되고
선택된 화학분석 시료 중에서, 시추코아상에서 단열
대 근처나 변질대 근처 혹은 이와 관련되어 채취된
시료는 전체적으로 매우 신선한 시추코아의 암석시
료와 따로 구별하였다. 단열층전광물은 분석된 시추
주상도상에서 규모가 큰 단열대를 중심으로 시료채
취계획이 세워졌고, 이후 실제 시료채취시에 시추주
상도나 시추코아사진에서 확인할 수 없었던 다양한
산출양상에 따른 단열층전광물을 채취하였다. 물-암
석 반응의 가장 일반적인 지화학환경지시자인 방해
석과 황철석의 시료들은 주상도의 기재내용을 근거
로 이들의 안정동위원소분석을 위한 시료채취계획을
세웠으며, 실제 분석에 적합한 시료의 판단은 현장에
서 시추코아를 직접 확인하면서 이루어졌다. 이상과
같이 시추공으로부터 얻어진 시추코아에서의 시료채
취심도 및 위치를 분석된 시추주상도와 단열분포에
따른 주상도에 표시한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

다. 분석 방법

지질매질의 지구화학 특성을 조사하기 위하여 편
광 현미경 관찰, X-선 회절분석, 주원소 및 미량원소
화학분석, 미세조직관찰을 위한 주사전자현미경
(SEM) 분석, 동위원소분석이 수행되었다.

채취된 시추코아시료의 암석 및 단열층전광물에
대해 편광현미경 관찰과 X-선 회절분석(XRD)으로
광물감정을 하였다. X-선 회절분석은 한국기초과학
지원연구원의 D8-ADVANCE 모델(Bruker AXS사)을
이용하였으며, 0.02 2 Theta step 당 0.6~0.8 s의 단
계적 주사방식으로 분석을 수행하였다. 또한 일부
대표적인 단열대의 단열광물조성을 알기 위하여
XRD 회절분석결과를 이용하여 Rietveld법에 의한
정량분석을 수행하였다. 암석시료의 주원소 함량은

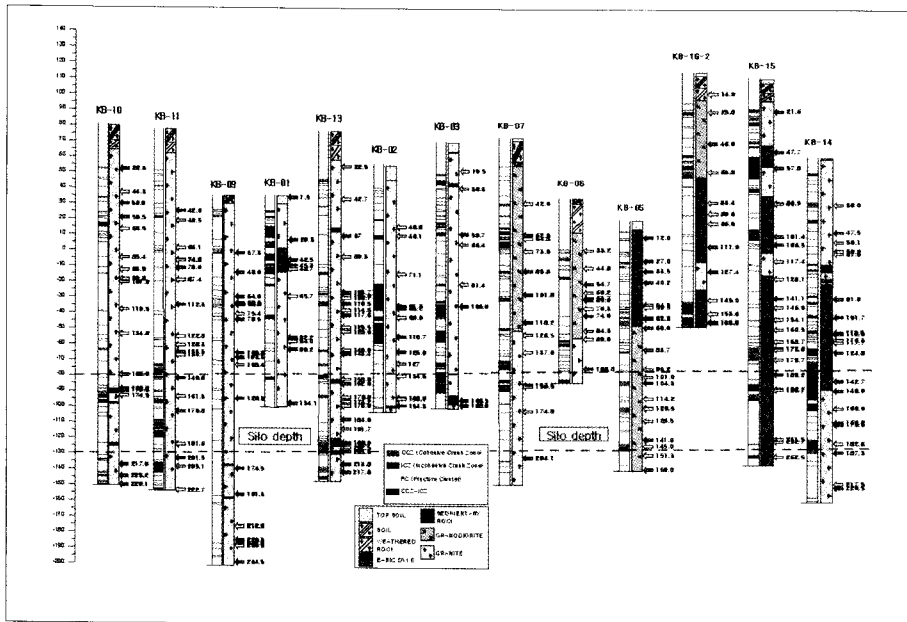


Fig. 2. Sampling location and depth from the drill cores in the study area.

기초과학지원연구소의 X선형광분석기(XRF; Philips PW2404)와 경북대학교 기초과학연구소의 X-선 형광분석기(X-Ray Fluorescence Spectrometer, Philips Model 1404)를 이용하였으며 미량원소 함량은 기초과학지원연구소의 유도결합플라즈마 방출분석기(ICP-AES, Jobin Yvon Ultima 2C) 및 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer Elan 6100)로 분석하였다. 모암의 변질대 및 열극층전광물의 감정과 미세 조직의 표면관찰 그리고 상호생성관계를 알아보기 위하여 주사전자현미경(SEM) 관찰을 실시하였다. SEM 분석은 기초과학지원연구소의 LEO 1455VP(LEO사)를 이용하였다. 암석을 구성하고 있는 각 광물의 화학분석은 기초과학지원연구소의 전자현미분석기(EPMA; CAMECA SX50)를 이용하였다.

부지 내 단열대에 존재하는 2차 생성 광물들의 성인을 알아보기 위하여 이들에 대한 산소, 수소, 탄소 및 황 안정동위원소 분석을 수행하였다. 산소 안정동위원소 분석은 기초과학지원연구소의 안정동위원소 질량분석기(Micromass, Optima)로 분석하였다. 자료의 재현성은 약 $\pm 0.3\%$ 이며, 실험방법은 Taylor and Epstein (1962)[2]과 유사하다. 수소 안정동위원

소 분석은 한국기초과학지원연구소의 안정동위원소 질량분석기(GV Instruments, Isoprime)로 분석하였으며 Venneman and O'Neil (1993)[3]과 유사한 실험법을 적용하였고, Coleman et al. (1982)[4]과 Kendall and Coplen (1985)[5]과 유사한 Zinc 환원법으로 수소를 발생시켰다. 자료의 재현성은 약 $\pm 2\%$ 이다. 탄산염광물의 탄소동위원소 분석과 황화광물에 대한 황동위원소 분석은 한국기초과학지원연구소의 안정동위원소질량분석기(Micromass, Optima)로 분석하였으며 분석정밀도는 $\pm 0.2\%$ 이다.

시추코아 시료로부터 심도별로 분석된 자료들의 공간적 분포특성을 크리깅(kriging) 기법을 이용하여 전체 조사지역에 대해 확장하였으며, GMS (Groundwater Modeling System) 5.0에 탑재되어 있는 geostatistics module을 사용하였다.

III. 처분부지의 암석 및 광물학적 특성

가. 광학현미경 관찰결과

산소-수소 동위원소는 물의 구성 성분이며 혼합과 증발의 영향을 받지 않는다면 지구화학 반응에 의해서 동위원소 조성이 변하지 않기 때문에 물의 기원을

규명하는데 추적자로서 사용되고 있다[6]. 또한 삼중수소는 12.43년의 반감기를 가지며 1950년대 핵실험 이후 그 농도가 크게 증가하였기 때문에 대략적인 물의 연령을 측정하는데 사용되고 있다[6].

Fig. 2에 세계천수선(Global Meteoric Water Line)과 함께 시료들의 산소-수소 동위원소 값을 도시하였다. 일반적으로 해수의 산소-수소 동위원소 값은 각각 0‰에 근접하며, 연구 부지의 해수 역시 유사한 값을 보여주고 있다. 관심 대상인 지표수와 지하수의 동위원소 값은 대부분 세계천수선 상에 군집하여 도시되고 있으며, 지하수 시료를 또한 깊이에 상관없이 지표수와 함께 도시되고 있다. 이는 이들 지표수와 지하수의 기원이 강우에 기인하고 있음을 나타내며, 해수 침투에 의한 직접적인 영향은 없음을 보여주고 있다. 해수 침투 영향을 직접적으로 받았다면 다량의 해수가 유입됨으로 해수의 동위원소 값과 혼합선(mixing line)에 도시되어야 하기 때문이다.

지하수 연령을 나타내는 삼중수소 농도 분포는 Fig. 2에 또한 제시되어 있다. 그림에서 보이는 것과 같이 삼중수소 농도는 심도 100 m 이상에서 매우 높은 농도 분포를 보여주고 있으며 최고 약 400 TU의 값을 보여주고 있다. 최근 국내 강우의 삼중수소 농도는 10 TU이하로 알려져 있으며 자연 배경치와 유사한 값을 갖는 것으로 알려져 있다[6]. 이를 고려하였을 때 연구 지역의 삼중수소 농도는 매우 높은 값으로 이는 주변

에 위치한 월성원전의 영향을 받고 있음을 나타낸다. 반면 100 m 이하에서는 농도가 급격히 감소하여 100 TU 이하의 값을 보여주고 있다. 따라서 100 m 이하의 지하수는 100 m 이상의 지하수보다 상대적으로 오래된 지하수임을 나타내고 있다. 하지만 100 m 이하 지하수 역시 최근 국내 강우의 삼중수소보다 매우 높은 값을 보여주고 있어 이들 지하수는 1960년대 이후로 충전되었으며 빠르게는 월성원전 가동 시기인 1983년 이후에 충전된 것으로 판단된다. 이러한 사실은 지하수 충전이 일반적인 심부 대수층보다 비교적 빠르게 일어나고 있음을 지시한다. 이는 또한 지하수의 산소-수소 동위원소 값이 심도에 무관하게 군집되어 유사한 값을 나타내는 요인임을 보여주고 있다.

나. 단열충전광물

처분부지의 암석 시추코아에서 관찰되는 단열광물은 몬모릴로나이트, 제올라이트광물, 녹니석, 일라이트 등이다. 이밖에 특징적으로 황철석이 매우 광범위하게 분포하며, 분포양상도 지역적으로 매우 다양하다. 전체적으로 황철석의 양은 많지 않으나 산점상으로 광범위하게 분포하고 있으며 매우 드물게 국지적으로는 수 mm 두께의 맥상에 이르기까지도 한다. 이는 조사지역 전반에 걸쳐 광범위한 광화작용 혹은 열수변질작용이 있었음을 지시한다. 또한 후술하겠지만 시추코아 상에 주로 흰색 혹은 옅은 핑크색의 코

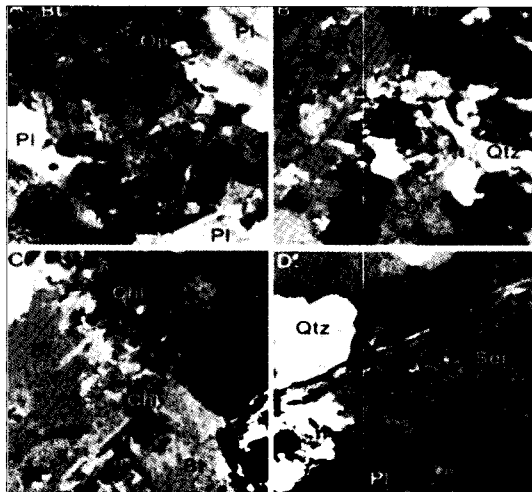


Fig. 3. Photomicrographs of granodiorite. Bt: biotite, Hb: hornblende, Chl: chlorite, Or: K-feldspar, Pl: plagioclase, Qtz: quartz, Op: opaque minerals, Ser: sericite

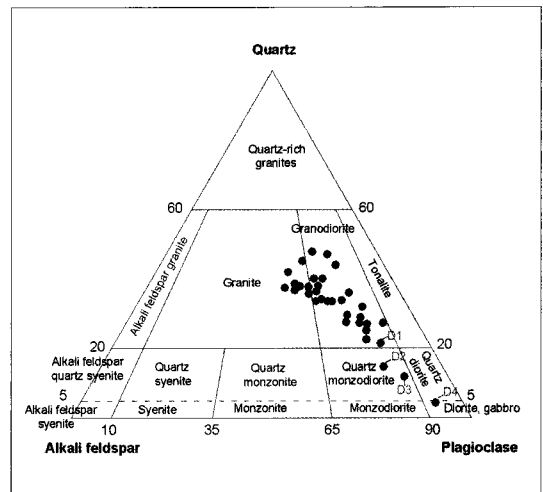


Fig. 4. QAP diagram for the granitic rocks of the study area

팅형태로 산출되는 충전광물은 대부분 제올라이트 광물인 로먼타이트이며 로먼타이트 역시 열수변질작용에 의한 생성광물로 알려져 있다. 제올라이트광물의 경우 단열충전광물로서 흔히 산출되는 광물이나 일반적으로 산출상태가 방해석과 유사하기 때문에 방해석으로 잘못 판단하는 경우가 많다. 일반적으로 방해석은 매우 흔한 단열충전광물임에도 불구하고 조사지역의 시추코아에서는 방해석의 산출이 드물었다. 또한 시추코아상에서 다양한 규모의 단열대가 관찰되며, 이들은 경우에 따라 점토질 물질로 채워진 단층비지형태를 보여주기도 한다.

① X-선 회절분석(XRD) 결과

X-선회절분석(XRD)에 의해 시추코아로부터 확인할 수 있는 단열광물은 몬모릴로나이트, 제올라이트 광물, 녹니석, 일라이트, 드물게 카올리나이트 등이다. 몬모릴로나이트는 XRD 회절 상에서는 특징적으로 (001)피크가 15~16 Å로 나타났다(Fig. 5A). 녹니석은 시추코아 전반에서 관찰되는 다양한 규모의 단열구간에서 단열면에 얇은 코팅형태로 주로 산출되며 현미경에서는 매우 미세한 세맥으로 주로 관찰되었다. 이러한 부분에 대한 XRD 분석결과 또한 각각 녹니석의 (001)과 (002)피크인 14 Å과 7 Å 피크를 잘 보여주었다(Fig. 5B).

단열대 구간에서는 천부와 심부구간의 구별없이 장석들이 부분적으로 견운모화되어 있는 양상을 관찰할 수 있다. 이러한 부분들에 대한 분석결과 역시 일라이트로 감정되었으며(Fig. 5C), 단열면에 코팅되어 있는 일라이트는 흔히 녹니석과 함께 공존하는 것으로 감정되었다. 이밖에 황철석이 매우 광범위하게 분포하고 그 산출규모 또한 산점상에서부터 1 cm 두께의 맥상에 이르기까지 다양하게 산출되어 조사지역 전반에 걸쳐 광범위한 광화작용이 있었음을 알 수 있다.

시추코아 상에 주로 흰색 혹은 옅은 핑크색의 코팅형태로 산출되는 제올라이트 광물은 주로 로먼타이트로 감정되며(Fig. 5D) 이밖에 스텔레라이트도 흔히 산출되는 것이 특징이다(Fig. 5E). 드물게 홀란타이트도 감정되었다(Fig. 5F). 제올라이트 광물의 경우 단열충전광물로 흔히 산출되는 광물이나 일반적

으로 산출상태가 방해석과 유사하기 때문에 방해석으로 잘못 기재되거나 단순히 백색 점토광물 등의 기재에 그치는 경우가 흔하다. 방해석 역시 매우 흔한 단열충전광물임에도 불구하고 조사지역의 경우 KB-4, 5, 15, 16-2 시추공들을 제외하고는 예외적으로 방해석의 산출이 드물다.

시추코아에서는 다양한 규모의 단열대가 관찰되며 이들은 경우에 따라 점토질의 단층비지형태를 보여주며 일부 이런 파쇄대 구간에서는 각력을 포함하기도 한다. 이 경우 구성광물은 대부분 몬모릴로나이트와 일부 일라이트 및 녹니석의 혼합체로 감정되었다.

이상의 X선 회절분석 결과들을 단순화시킨 시추주상도와 함께 Fig. 6에 도시하였다. 도시한 결과, 처분부지에서 산출되는 단열충전광물들은 그들이 산출되는 모암이나 심도의 변화, 혹은 산출되는 단열규모 등에 따른 규칙성을 보여주지는 않는다. 이상의 XRD 감정결과에서의 주된 특징은 처분부지 내에서 산출되는 단열충전광물은 단일 광물로 산출되는 경우가 매우 드물고 여러 점토광물의 집합체로 주로 산출된다는 점이다. 또한 제올라이트 광물인 로먼타이트나 스텔레라이트는 산출량은 적으나 산출빈도가 매우 높고, 세맥 형태나 코팅형태로서 처분부지 내 단열구간에 광범위하게 산재한다.

황철석 역시 산출빈도가 매우 높고, 경우에 따라서는 산점상 분포가 아닌 수 mm 두께의 맥상으로 산출되기도 한다. 앞서 기술하였듯이 일반적으로 물-암석반응에 의해 가장 흔하게 침전되는 광물인 방해석은 일부 변질퇴적암 및 퇴적암 내에서만 산출되며, 화강섬록암이나 섬록암에서는 거의 산출되지 않고 있다. 이들 화강암류의 경우, 단열빈도가 매우 높고 파쇄정도도 심해서 투수성 단열대로 구분된 파쇄대 구간에서도 방해석의 산출빈도가 매우 낮다.

시추코아에서 확인된 단열대 중 대표적인 광물 조성 및 산출양상을 보이는 단열대에 대하여 X-선 회절분석 결과를 이용하여 리트벨트(Rietveld)법을 통한 정량분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 정량분석이 수행된 대부분 시료에서 모암의 영향으로 석영과 장석류가 다량 함유되어 있

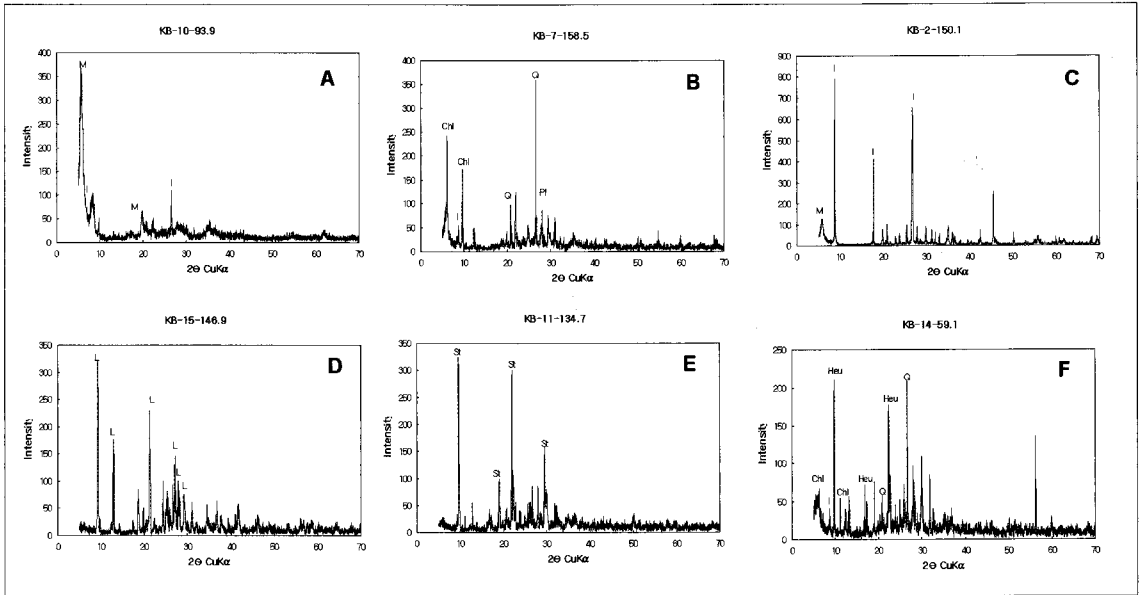


Fig. 5. XRD powder pattern of representative fracture-filling mineral samples of the study area. (M: montmorillonite, Chl: chlorite, I: illite, L: laumontite, St: stellerite, Heul: heulandite, Q: quartz, Pl: plagioclase)

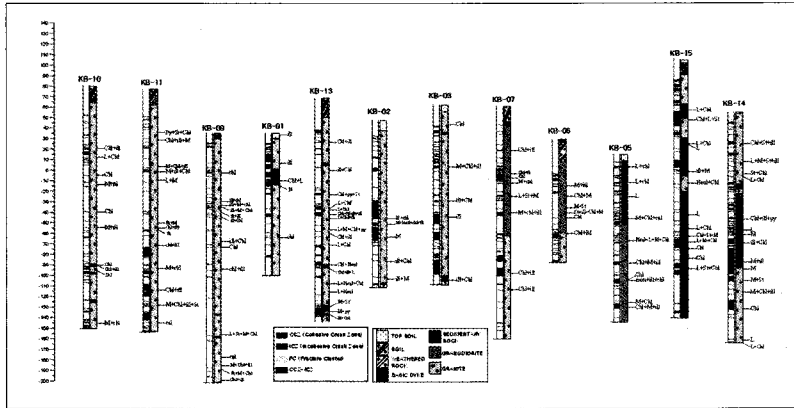


Fig. 6. Distribution of fracture-filling minerals identified by XRD in the study area (ill: illite, chl: chlorite, L: laumontite, St: stellerite, Heul: heulandite, M: montmorillonite, cal: calcite, py: pyrite)

Table 1. Results of XRD quantitative analysis

Sample # (depth)	Quartz	Microcline max	Albite	Kaolinite	illite	Mont.	Chlorite
KB-1 (1.5m)	29,21	13,83	16,44	24,89	6,39	9,18	-
KB-5 (62,5m)	7,39	-	31,90	2,69	-	58,01	-
KB-7 (101,8m)	13,80	-	31,13	1,79	-	48,28	-
KB-10 (225,2m)	30,65	-	8,40	6,29	-	54,65	-
KB-11 (149,8m)	11,04	-	26,90	5,73	11,59	45,11	-
KB-13 (22,5m)	21,10	30,84	37,06	-	-	11,00	-
KB-13 (170,8m)	26,23	21,04	37,55	-	-	-	15,18
KB-14 (112,9m)	10,21	28,40	39,28	-	10,85	-	11,26
KB-15 (179,7m)	10,20	-	21,07	8,53	5,81	40,71	13,67
KB-16 (145,0m)	16,69	22,54	27,96	-	2,47	20,26	10,09

으며, 몬토릴로나이트와 일라이트 및 녹니석의 혼합

체도 함유되어 있다. 점토광물의 혼합체에 대한 정량분석에는 많은 종류의 불확실성이 존재하는데, 그 원인 중에 하나는 대부분의 점토광물들이 유사한 결정구조를 갖고 있어 주 회절 피크가 중첩되기 때문이다[6]. 이번 분석결과에서도 살펴보면 카올리나이트가 예상보다 많은 양으로 계산된 경향이 보이는데, 녹니석의 경우는 XRD 회절선이 (001)피크와 (002)피크가 특징적이거나 (001)피크는 몬토릴로나이트의 (001)피크와 겹쳐지고 (002)피크가 카올리나이트의 주 회절선인 (001)피크와 겹쳐진다. 이에 따라

녹니석과 몬모릴로나이트가 함께 산출되는 시료의 경우, 정량분석 프로그램이 이러한 현상을 명확하기 구별하지 못하므로 몬모릴로나이트의 양이 과대평가되고, 아울러 일부 녹니석의 함량은 카올리나이트로 감정된다. 따라서 Table 1에 나타난 정량분석결과 중에서 카올리나이트의 경우는 녹니석으로 환산하여 추정하는 것이 보다 합리적이며, 계산된 몬모릴로나이트의 경우에도 일부 녹니석의 함량이 더해진 것으로 추정해야 한다.

② 주사전자현미경(SEM) 분석 결과

현미경 관찰 및 XRD 감정을 통하여 확인된 대표적인 단열충전광물에 대한 주사전자현미경(SEM) 관찰 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 몬모릴로나이트는 대부분 전형적인 벌집모양의 외형을 보여주며, 경우에 따라서는 일라이트나 장석입자의 외곽부에 불규칙한 결정형으로 산출되어 이들이 운모류나 장석의 변질 산물임을 지시한다. 제올라이트 중 로먼타이트는 특징적인 주상의 집합체 결정형을 보여준다. 로먼타이트에 비해 매우 드물게 산출되기는 하지만 스텔레라이트 역시 불규칙한 주상으로 산출된다. 녹니석은 불

규칙한 육각관상의 집합체로 주로 산출되나 주사전자현미경 상에서는 운모류와 구별이 어렵기 때문에 K 함유 정도의 측정을 위한 EDS분석이 병행되어야만 정확한 감정이 가능하였다[7]. 조사지역의 일라이트 역시 관상의 집합체로 산출되나 결정도는 매우 낮고 결정형도 전형적인 육각관상형을 보여주지 않는다. 앞서 X선 회절분석결과에서도 언급하였듯이 주사전자현미경 관찰 결과, 처분부지 내에서 산출되는 단열충전광물은 단일 광물로 산출되는 경우가 매우 드물고 여러 광물의 집합체로 주로 산출된다.

단열충전광물 중 몬모릴로나이트와 제올라이트 광물은 높은 양이온교환능을 갖고 있고 조사지역 전반에 걸쳐 광범위하게 산출되기 때문에 처분부지의 장기 안전성 측면에서 매우 중요하게 다루어져야할 광물이다. 특히 제올라이트 광물 중 로먼타이트는 칼슘계열의 제올라이트 광물로서 일반적으로 단순한 물-암석반응에 의한 단열충전광물보다는 열수변질에 의한 산물로 알려져 있다. 따라서 로먼타이트가 비록 산출량은 적으나 그 분포범위가 전 시추공의 전체 심도를 통하여 광범위하기 때문에, 처분부지 지역전반에 걸친 광범위한 열수변질작용을 지시하고 있다. 그러나 국지적인 황철석 농집대를 제외하면 열수기원 방해석이나 석영맥과 공존하는 다른 금속광물 집합체의 생성 혹은 고온이나 정도가 높은 열수기원을 지시하는 지시광물들의 산출이 매우 드물기 때문에 열수변질작용의 강도는 높지 않은 것으로 판단된다.

황철석은 지하수의 산화-환원 반응에 직접적으로 관여될 뿐 아니라 pH 조건도 변화시키기 때문에 지하수와 반응하여 산화되면 지하수의 pH는 낮아지고 지하수에 용존된 Fe는 주변 환경의 변화에 따라 다시 산화철의 형태로 침전될 수 있다[8]. 실제로 처분부지내의 시추공에서는 상당히 깊은 심도까지 산화대가 형성된 것을 관찰할 수 있다.

다. 암석의 주원소, 미량원소 및 희토류원소(REE)의 함량 특성

처분부지 내에 분포되어 있는 암석들의 지화학적 특성을 알아보기 위해 시추코아로부터 시료를 선택하여 주성분 및 미량성분에 대한 화학분석을 수행하

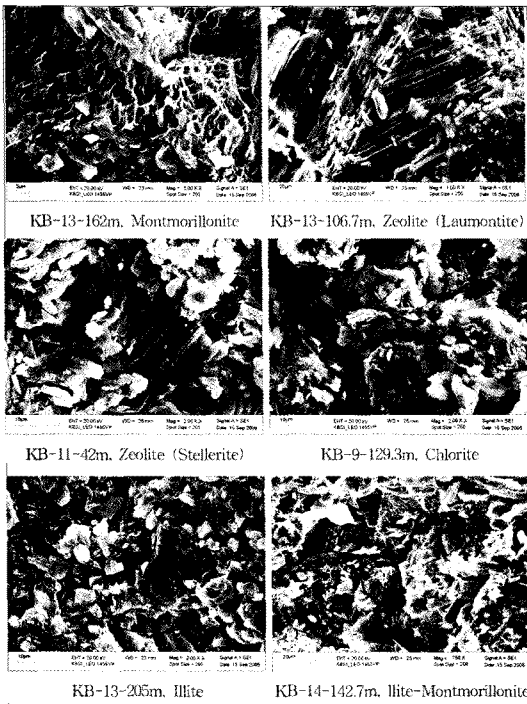


Fig. 7. SEM images of the representative fracture-filling mineral samples in the study area

였으며 이중 분석결과의 일부를 각각 Table 2와 3에 나타내었다. 시추공이 주로 화강암류 지역 내에 위치하기 때문에 시추코아에서는 관찰되지 않는 유문암 시료와 야외노두에서 채취한 전형적인 섬록암 시료에 대한 분석결과도 함께 정리하였다.

조사지역 내에서 산출되는 화강섬록암과 섬록암을 포함한 화강암류와 기타 맥암류와 변질퇴적암류들의 주원소 분석결과를 SiO₂ 변화에 대해 도시하여 보면 SiO₂가 증가함에 따라 Al₂O₃, CaO, total iron, MgO, P₂O₅ 및 TiO₂는 감소하는 경향을 보이며, K₂O는 증가하는 경향을 보인다. Na₂O는 SiO₂가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이지만 명확하지는 않다(Fig. 8). 화강섬록암과 섬록암만을 고려하였을 경우에는 이들의 야외 산상이 점이적으로 변하는 데에 비해 화학적으로는 비교적 명확하게 구별되어 화강섬록암이 섬록암에 비해 높은 SiO₂ 함량, 낮은 MgO, Fe₂O₃ 함량을 보여준다. 그러나 SiO₂의 증가에 따라 각 주원소들의 변화경향이 동일선상에 놓여

있어서 이들이 동일한 마그마 기원일 가능성을 지시한다. 주요 미량원소에 대하여도 SiO₂의 함량변화에 대해 도시하여 보았다(Fig. 9). 전체적으로는 미량원소와 SiO₂ 함량간의 상관관계가 뚜렷하지 않고 분산되는 경향을 보인다. 그러나 주원소 분석결과와 마찬가지로 화강섬록암과 섬록암은 미량원소에서도 뚜렷한 함량차이를 보이고 있다.

조사지역에 분포하는 화강암류를 형성했던 마그마의 특성을 추정하기 위하여 SiO₂와 Na₂O+K₂O와의 관계도에 도시해 본 결과, 화강섬록암과 섬록암 모두 비알칼리계열(subalkaline series)에 속하였다(Fig. 10). 또한 AFM 삼각도에서 살펴보면 조사지역의 화강암류의 분화는 총철분함량이 비교적 결핍된 칼크-알칼리암 계열의 분화경로를 따르고 있다(Fig. 11).

이상의 화학분석 및 해석 결과는 처분부지 조사지역 지표에서 산출되는 화강섬록암과 섬록암의 경계는 점이적으로 변하고 있으며, 화학분석 결과 역시

Table 2. Representative results of major element analysis of rock samples in the study area.

Sample	G, diorite	G, diorite	M, Dike	Diorite	Sed, Rock	Diorite	Diorite	Diorite	Diorite	G, diorite
Borehole	KB-01	KB-02	KB-04	KB-04	KB-05	KB-05	KB-06	KB-07	KB-08	KB-09
Depth(m)	134.1	154.3	45.6	68.6	33.5	120.4	65.0	118.2	127.4	220.3
SiO ₂	70.79	68.42	46.77	61.09	69.53	60.82	66.03	62.64	61.59	69.82
Al ₂ O ₃	14.21	15.01	17.11	16.45	11.49	14.43	12.50	15.80	16.04	12.71
CaO	1.84	2.14	6.94	4.71	4.60	4.55	2.12	4.75	4.49	2.68
Fe ₂ O ₃ *	3.80	4.74	12.24	7.30	4.73	5.88	4.45	7.73	7.55	3.81
K ₂ O	3.87	3.10	0.71	2.14	1.69	2.18	6.17	1.84	2.42	3.01
MgO	1.01	1.30	7.70	2.58	1.83	3.32	1.51	2.35	2.28	1.27
MnO	0.07	0.08	0.17	0.15	0.10	0.21	0.19	0.15	0.19	0.10
Na ₂ O	2.83	3.17	2.59	3.53	1.10	2.36	2.46	3.43	2.85	3.44
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.62	0.22	0.15	0.23	0.25	0.25	0.20	0.12
TiO ₂	0.37	0.54	1.85	0.86	0.56	0.75	0.90	0.78	0.76	0.52
L.O.I	1.20	1.43	3.56	0.64	4.17	5.08	3.48	0.39	1.30	1.57
total	100.10	100.03	100.26	99.65	99.94	99.77	100.05	100.11	99.67	99.06

Sample	G, diorite	G, diorite	G, diorite	G, diorite	G, diorite	G, diorite	Diorite	Diorite	Rhyolite	Rhyolite
Borehole	KB-10	KB-11	KB-13	KB-14	KB-15	KB-16-2	Outcrop	Outcrop	Outcrop	Outcrop
Depth(m)	217.9	201.5	217.8	220.5	101.4	127.4				
SiO ₂	69.10	66.94	70.08	67.96	71.24	58.90	61.37	60.95	78.71	79.57
Al ₂ O ₃	12.63	12.76	11.66	11.98	10.79	14.01	16.59	16.37	12.65	12.09
CaO	3.00	2.17	1.26	0.91	2.81	4.67	5.01	4.89	0.23	0.21
Fe ₂ O ₃ *	4.21	5.25	5.14	6.94	4.67	8.58	6.51	6.63	0.85	0.70
K ₂ O	3.06	2.98	5.54	1.66	2.29	1.90	2.05	2.18	4.30	4.02
MgO	1.27	1.92	1.89	1.35	1.92	2.97	2.43	2.69	0.06	0.10
MnO	0.07	0.14	0.24	0.07	0.10	0.18	0.15	0.17	0.02	0.01
Na ₂ O	3.61	2.84	2.30	4.38	2.23	3.50	3.77	4.60	3.92	3.81
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.20	0.15	0.14	0.24	0.22	0.23	0.01	0.02
TiO ₂	0.51	0.56	0.80	0.38	0.54	0.92	0.79	0.84	0.18	0.17
L.O.I	1.77	3.65	1.44	4.69	3.52	3.28	0.79	1.31	0.56	0.67
total	99.38	99.37	100.55	100.47	100.25	99.15	99.68	100.85	101.50	101.35

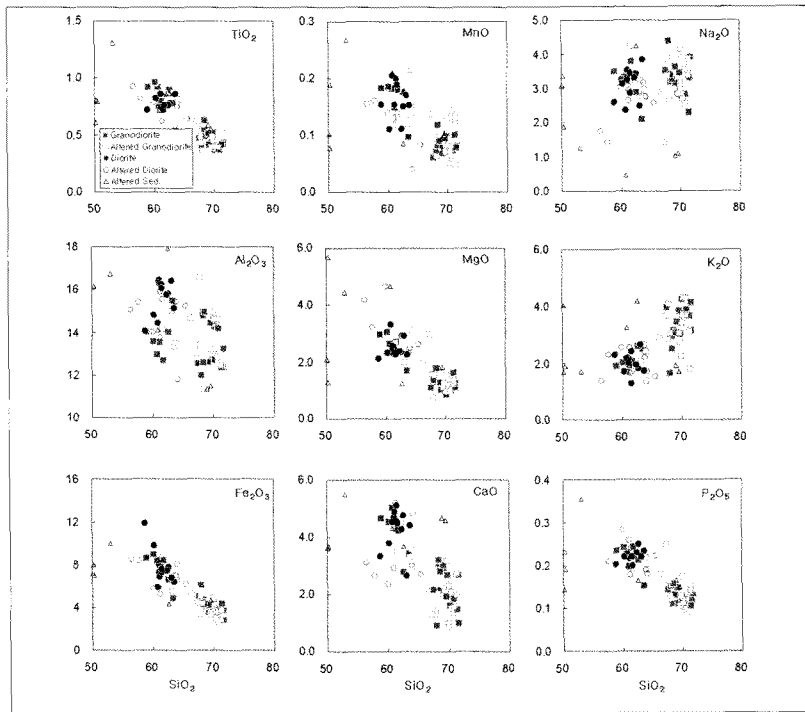


Fig. 8. Plots of major element contents versus SiO_2 content of the granitic rocks.

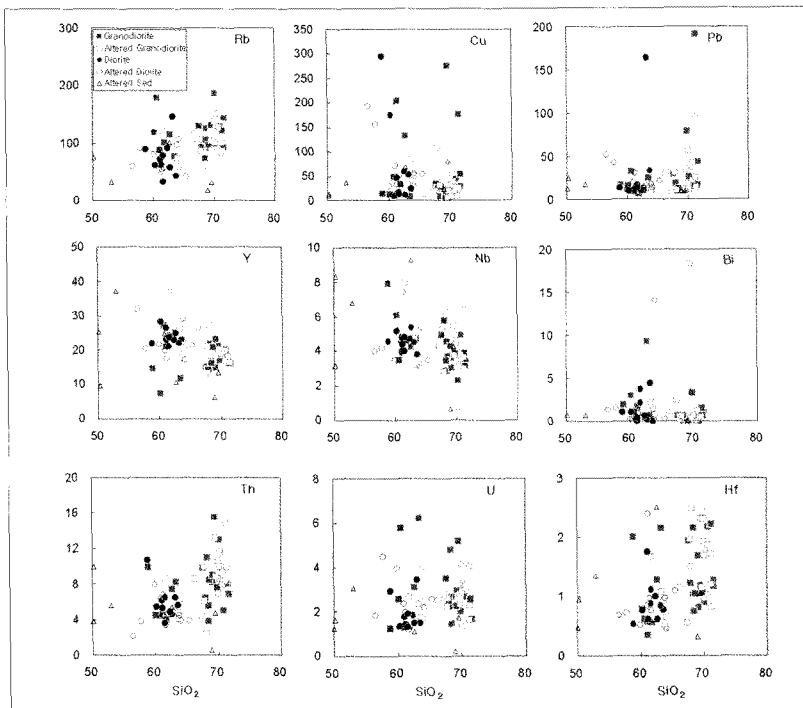


Fig. 9. Plots of trace element contents versus SiO_2 content of the granitic rocks.

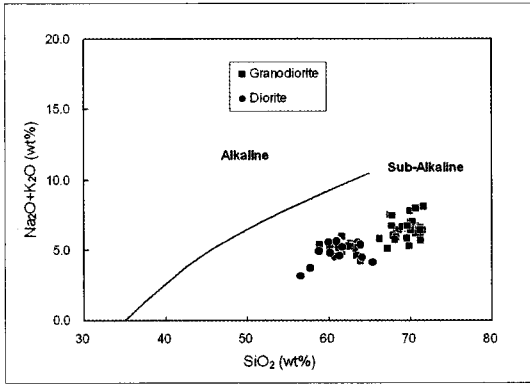


Fig. 10. Plots of SiO_2 (wt%) versus Na_2O+K_2O (wt%)

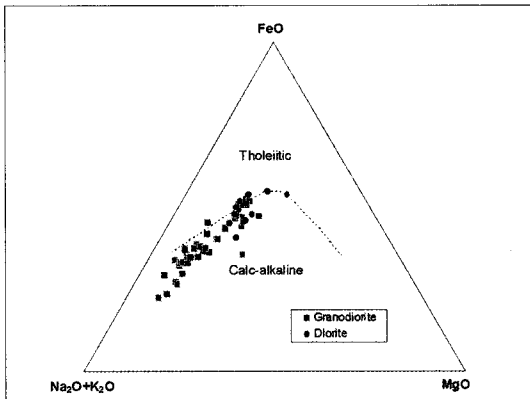


Fig. 11. AFM diagram for the granitic rock from the study area.

조사지역 내에서 관찰되는 화강암류들이 모두 동일 기원 마그마에 의해 분화되었을 가능성을 지시한다. 그러나 화강섬록암과 섬록암은 화학적으로 차이를 보인다. 특히 SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 함량에서 구분이 되며 그 차이는 후술된 크리깅 분석결과에서 명확하게 나타난다.

희토류 원소(Rare Earth Element; REE)는 주기율 표 상에서 원자번호 57~71까지의 원소들로 마그마 분화시 정출되는 고체상 보다는 액체상에 속하려고 하는 특성 때문에 분화과정 동안 초기보다는 후기로 갈수록 함량이 증가하며, 태양계 생성 초기 물질인 콘드라이트(Chondrite)의 함량으로 정규화하여 사용한다. 부지내 지질매질의 희토류원소에 대한 분석결과를 콘드라이트에 대해 정규화시킨 결과를 Fig. 12에 제시하였다. 화강섬록암은 전체적으로 폭 넓은 REE 함량비를 보이며, 신선한 화강섬록암과 변

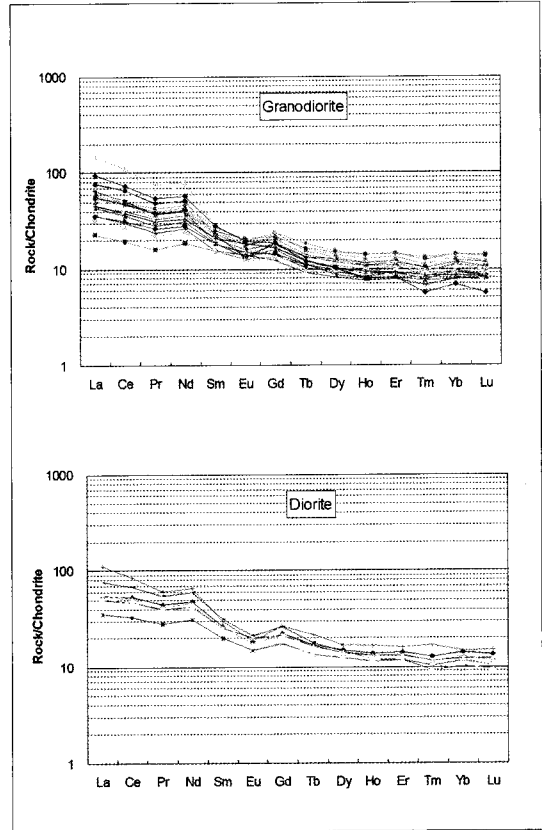


Fig. 12. REE pattern of the granitic rocks normalized by chondrite.

질받은 화강섬록암 사이에 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 이들의 총 REE 함량은 34.3~255.6 ppm의 범위를 나타내며, $(La/Yb)_N$ 의 비율이 1.9~15.2로서, LREE가 부화되고 HREE가 결핍된 양상을 보이며 전체적으로 낮은 Eu 이상($Eu/Eu^*=0.44\sim 1.01$)을 나타낸다. 조사지역 내 분포되어 있는 섬록암의 REE 분포양상은 화강섬록암의 경우와 매우 유사하나 변화폭이 매우 좁다. 화강섬록암과 마찬가지로 섬록암시료들은 상대적으로 분명한 음의 Eu 이상치를 보이는데, 이와 같은 Eu 이상치는 Eu 원소가 광물 내 Ca를 치환하는 경향이 있어 이전의 마그마 분화단계에서 다량의 사장석 정출에 의해 흔히 나타나는 결과이다. 이들의 총 REE 함량은 80.4~179.7 ppm의 범위를 나타내며, $(La/Yb)_N$ 의 비율이 3.0~8.8로서 화강섬록암과 마찬가지로 LREE가 부화되고 HREE가 결핍된 양상을 보이지만 그 정도는 더 낮

Table 3. Representative results of trace and REE element analysis of rock samples in the study area.

Sample	Granodiorite	Granodiorite	Mafic Dike	Diorite	Sed. Rock	Diorite	Diorite	Diorite	Diorite	Granodiorite
Borehole	KB-01	KB-02	KB-04	KB-04	KB-05	KB-05	KB-06	KB-07	KB-08	KB-09
Depth(m)	134.1	154.3	45.6	68.6	33.5	141.0	65.0	118.2	127.4	220.3
B	51.20	43.81	118.48	86.37	58.26	97.6	76.4	92.75	78.46	66.5
Ba	433.65	413.24	201.71	329.98	327.15	367.0	1183.6	320.18	356.73	540.1
Cr	<5.0	7.33	120.27	<5.0	102.36	6.7	<5.0	8.35	6.96	5.5
Li	21.11	20.46	31.46	19.95	<5.0	18.7	17.2	20.87	19.32	39.7
Sc	5.47	5.21	22.10	16.46	10.83	15.1	14.4	14.23	14.49	10.9
Sr	178.03	193.01	401.24	306.94	389.94	378.6	326.3	389.23	406.40	261.7
V	42.41	40.53	174.63	129.17	67.12	102.9	78.9	117.03	132.18	79.8
Zn	46.51	30.88	109.12	68.17	65.35	95.6	509.4	71.89	114.02	93.0
Zr	60.39	60.03	147.95	42.99	46.65	19.4	59.4	17.45	34.40	34.4
Ni	4.87	2.80	119.56	5.26	44.02	3.8	3.7	3.63	4.06	2.8
Co	4.74	6.79	37.37	15.31	12.85	10.3	6.8	10.67	11.49	6.1
Cu	43.71	18.50	43.82	11.48	80.28	23.7	56.3	10.70	11.68	19.2
Ga	23.65	23.36	24.46	23.44	21.35	20.5	24.9	22.85	23.39	19.3
As	4.49	2.27	5.48	2.84	14.15	18.3	9.1	2.20	5.69	5.2
Se	0.28	0.22	0.78	0.39	0.22	<0.1	<0.1	<1.00	0.51	<0.1
Rb	129.37	125.45	10.19	71.14	31.81	43.7	152.8	57.96	78.18	99.8
Y	20.19	16.69	28.33	26.51	13.48	23.1	20.7	25.06	23.79	16.8
Nb	4.95	4.56	7.51	4.78	4.24	3.8	4.3	5.36	4.82	3.9
Mo	1.42	2.27	1.08	0.91	1.46	0.6	1.2	1.10	1.55	0.3
Ag	1.10	0.94	0.45	0.65	0.66	0.4	0.6	0.32	0.45	0.5
Cd	0.17	0.17	0.14	0.21	0.32	1.7	0.2	0.31	0.30	4.6
Sn	4.44	3.09	1.55	0.87	0.80	1.9	3.2	1.35	1.80	3.3
Sb	0.20	0.33	0.26	0.28	2.78	<0.1	1.4	0.22	0.61	<0.1
Cs	7.12	8.90	1.10	7.49	1.53	2.8	10.0	5.38	6.71	7.1
La	7.08	13.62	23.02	17.15	16.73	15.4	13.1	17.37	18.05	16.7
Ce	15.72	29.43	55.57	42.65	33.91	37.9	32.7	41.32	42.10	36.4
Pr	1.94	3.43	7.15	5.38	3.76	4.8	4.1	5.12	5.09	4.1
Nd	11.06	18.63	38.45	28.68	20.06	25.6	22.0	27.53	27.46	21.9
Sm	3.03	3.54	6.86	5.23	3.13	5.0	4.8	5.08	4.90	3.7
Eu	0.93	1.08	2.20	1.36	0.89	1.5	1.6	1.29	1.23	1.1
Gd	3.44	3.70	7.77	5.83	3.40	5.5	4.7	5.68	5.50	4.2
Tb	0.52	0.49	1.00	0.80	0.41	0.8	0.7	0.78	0.75	0.5
Dy	3.48	3.03	5.70	4.84	2.47	4.5	3.9	4.69	4.47	3.2
Ho	0.71	0.60	1.10	0.98	0.47	0.9	0.8	0.94	0.88	0.7
Er	2.21	1.88	3.17	3.00	1.48	2.7	2.4	2.83	2.69	2.0
Tm	0.30	0.25	0.40	0.41	0.17	0.4	0.3	0.37	0.35	0.3
Yb	2.30	1.93	2.75	3.00	1.37	2.6	2.5	2.65	2.50	2.0
Lu	0.33	0.27	0.39	0.43	0.19	0.4	0.4	0.38	0.36	0.3
Hf	2.17	2.16	0.72	1.76	1.06	0.8	1.7	0.62	0.88	1.1
W	5.87	4.48	6.08	1.47	0.52	2.8	5.8	1.53	1.57	5.2
Pt	0.59	0.31	0.26	0.36	0.32	4.1	<0.1	0.67	0.39	<0.1
Au	0.20	0.23	0.19	0.10	0.15	<0.1	<0.1	<1.00	<1.00	<0.1
Pb	16.83	9.72	3.64	8.83	9.98	33.2	19.8	10.72	12.94	79.0
Bi	<1.00	0.70	<1.00	<1.00	3.42	<0.1	0.8	0.19	3.70	3.2
Th	5.04	5.56	1.62	6.11	4.77	5.6	5.6	4.56	6.48	7.6
U	2.66	2.65	0.73	1.77	1.71	1.5	1.6	1.50	1.90	2.0

Table 3. Continued

Sample	Granodiorite	Granodiorite	Granodiorite	Granodiorite	Granodiorite	Granodiorite	Diorite 1	Diorite 2	Rhyolite 1	Rhyolite 2
Borehole	KB-10	KB-11	KB-13	KB-14	KB-15	KB-16-2	Outcrop	Outcrop	Outcrop	Outcrop
Depth(m)	217.9	201.5	217.8	220.5	101.4	127.4	-	-	-	-
B	60.72	83.79	61.3	86.7	75.22	128.45	-	-	-	-
Ba	513.60	107.81	517.0	39.0	373.73	289.47	475	359	772	723
Cr	6.92	5.36	5.0	8.6	46.59	12.51	5.28	1.41	0.40	0.56
Li	19.21	27.00	39.8	25.1	20.34	30.38	17.18	17.17	2.24	2.78
Sc	7.49	8.93	12.5	7.8	12.83	19.46	14.4	17.6	4.26	5.70
Sr	289.76	343.89	163.4	113.0	248.76	384.96	395	414	44.0	46.1
V	62.83	72.47	77.4	47.0	49.95	180.07	113	139	<0.01	<0.01
Zn	53.03	62.15	177.0	66.7	134.45	226.93	74.2	87.1	19.1	14.7
Zr	49.57	16.08	26.1	32.5	68.31	9.13	29.0	31.5	134	143
Ni	3.62	7.49	4.0	7.7	30.13	37.46	3.88	1.37	0.99	1.11
Co	4.92	11.76	8.9	16.4	37.67	18.49	11.5	11.6	0.06	0.03
Cu	4.89	132.77	21.7	25.0	122.45	14.64	15.9	2.59	2.41	1.99
Ga	24.24	21.83	16.6	14.3	26.19	34.61	15.4	14.0	13.9	14.7
As	2.84	4.07	8.8	10.2	15.95	5.70	1.28	3.53	<1.00	<1.00
Se	0.32	1.19	3.8	3.7	2.14	0.80	-	-	-	-
Rb	97.56	71.86	255.2	92.5	24.88	219.95	70.1	88.3	109	110
Y	23.15	22.02	18.7	14.2	21.28	14.80	23.1	23.6	18.9	22.0
Nb	4.27	3.59	3.9	5.8	4.22	7.89	2.21	1.83	18.9	17.5
Mo	1.39	5.70	6.0	17.4	1.65	2.23	<0.40	<0.40	2.38	2.49
Ag	0.45	0.21	0.9	0.4	1.24	0.82	-	-	-	-
Cd	0.18	0.39	0.4	0.9	5.94	0.62	0.08	0.04	<0.04	<0.04
Sn	1.74	7.35	6.2	17.2	11.19	4.76	2.70	11.3	3.99	20.1
Sb	0.18	0.24	1.1	0.2	3.12	1.39	0.29	0.99	0.32	0.27
Cs	7.29	7.03	6.6	4.6	5.93	7.35	5.41	3.43	1.97	2.47
La	44.72	13.80	14.2	20.3	17.74	29.39	17.5	20.7	21.7	22.8
Ce	90.74	32.77	33.4	42.1	38.13	59.87	39.2	45.8	43.9	44.9
Pr	9.26	4.04	4.1	4.5	4.57	6.72	5.24	5.97	5.99	6.25
Nd	48.47	21.62	21.9	23.7	24.91	34.98	22.0	25.1	24.0	24.9
Sm	5.45	4.09	4.5	3.6	4.53	5.45	5.01	5.66	5.16	5.46
Eu	1.10	1.17	1.3	1.0	1.31	1.41	1.47	1.36	1.13	1.12
Gd	6.31	4.68	4.9	4.1	5.28	4.94	4.73	5.17	4.44	4.77
Tb	0.74	0.63	0.7	0.5	0.66	0.57	0.76	0.82	0.74	0.77
Dy	4.24	4.09	3.9	2.8	4.04	3.24	4.75	4.98	4.59	4.99
Ho	0.83	0.82	0.8	0.6	0.77	0.57	0.97	1.01	0.94	1.03
Er	2.64	2.53	2.3	1.7	2.27	1.71	2.85	2.95	2.87	3.21
Tm	0.34	0.33	0.3	0.2	0.27	0.18	0.41	0.41	0.44	0.49
Yb	2.58	2.46	2.3	1.7	2.00	1.45	2.69	2.76	2.91	3.38
Lu	0.37	0.34	0.3	0.3	0.28	0.18	0.41	0.40	0.47	0.53
Hf	1.69	0.76	1.1	1.2	0.69	2.00	1.49	1.61	6.29	6.65
W	1.38	71.45	3.1	19.5	9.42	2.20	-	-	-	-
Pt	<1.00	<1.00	0.8	5.1	3.50	2.02	-	-	-	-
Au	<1.00	<1.00	0.1	0.2	<1.00	<1.00	-	-	-	-
Pb	9.46	8.58	14.7	18.6	71.78	16.87	9.07	9.94	28.5	22.7
Bi	<1.00	0.71	0.4	0.5	70.65	1.97	0.38	0.26	0.54	0.96
Th	9.00	4.28	3.9	6.4	5.69	9.89	4.94	7.17	8.90	8.38
U	2.26	1.78	1.1	2.5	3.93	1.24	1.58	2.47	2.14	2.47

다. 전체적으로 화강섬록암보다 상대적으로 더 낮은 Eu 이상 ($Eu/Eu^*=0.51\sim0.87$)을 나타낸다.

조사지역의 화강암류들의 성인을 조구조적으로 알아보기 위하여 조구조적 정치(tectonic setting)에 따라 화성암의 성인을 분류한 판(plate)의 동시충돌형(syncollision), 화산호형(volcanic arc), 판의 내부형(within plate) 그리고 해령형(ocean ridge)의 구분법에 적용하여 보았다. 조사지역의 화강암류의 화학분석결과를 Rb-(Y+Nb) 및 Nb-Y 상호변화도에 도시하여 보면 VAG+synCOLG 및 VAG의 영역에 도시되어 이들이 화산호형(VAG) 및 동시충돌형(synCOLG)에 속함을 알 수 있다(Fig. 13). 따라서 조사지역의 화강암류들은 현재 태평양 연안 조산대와 유사한 조구조적 환경에서 생성되었을 것으로 판단된다.

라. 광물의 화학특성

조사지역 암석의 연마편으로부터 구성광물들에

대한 전자현미경분석을 실시하여 광물별로 중량비와 구조식 계산결과의 일부를 Table 4-7에 정리하였다. 사장석의 경우는 화강섬록암은 Ab61~Ab87로서 올리고클레이스(Oligoclase)~안데신(Andesine)에 해당하며, 섬록암은 Ab63~Ab72로서 주로 올리고클레이스에 해당하고(Table 4), 정장석은 조성차이가 거의 없음을 알 수 있다(Table 5). 흑운모는 팔면체 내의 Fe/(Fe+Mg) 비가 0.45~0.47로 매우 일정한 값을 보이며, 전형적인 흑운모의 화학조성을 보여준다(Table 6). 녹니석 역시 팔면체 내의 Fe/(Fe+Mg) 비가 0.36~0.50으로 상대적으로 Mg가 부화된 양상을 보이며, 비교적 일정한 화학조성을 보여준다(Table 7). 일반적으로 녹니석은 다양한 지질환경에서 생성될 수 있으며, 또한 매우 광범위한 고용체를 이루기 때문에 특정지역의 변질작용에 대해서 변질정도의 중요한 지시자로 작용할 수 있다 [9]. 또한 생성온도와 관련하여 Cathelineau

Table 4. Representative results of microprobe analyses of the plagioclase of the study area.

Rock	Granodio	Granodio	Granodio	Granodio	Granodio	Diorite	Diorite	Diorite	Diorite
Borehole#-depth(m)	KB1-45,3	KB1-45,3	KB1-45,3	KB14-182,6	KB14-182,6	KB4-68,6	KB4-68,6	KB4-68,6	KB4-68,6
SiO ₂	64.35	65.52	64.77	63.99	65.60	57.98	58.00	58.04	60.03
Al ₂ O ₃	21.16	20.81	21.41	22.92	21.93	26.49	26.42	26.61	23.17
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.05	0.01	0.07
FeO	0.65	0.55	0.45	0.06	0.00	0.26	0.13	0.23	0.23
MgO	0.07	0.01	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05
MnO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	1.65	1.69	2.42	4.10	2.58	8.09	7.93	8.15	5.18
Na ₂ O	7.99	9.98	9.40	9.30	9.90	6.84	6.93	6.87	8.10
K ₂ O	3.65	0.88	0.83	0.20	0.27	0.21	0.19	0.25	0.68
Total	99.54	99.43	99.34	100.57	100.31	99.90	99.64	100.15	97.50
Numbers of cations on the basis of 32 oxygen									
Si	11.53	11.63	11.51	11.25	11.50	10.39	10.41	10.38	10.96
Al(IV)	0.47	0.37	0.49	0.75	0.50	1.61	1.59	1.62	1.04
Sum	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Al(VI)	4.00	3.98	3.99	3.99	4.03	3.99	4.00	3.99	3.95
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Fe	0.10	0.08	0.07	0.01	0.00	0.04	0.02	0.04	0.04
Mg	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	4.11	4.06	4.07	4.00	4.04	4.04	4.03	4.03	4.01
Ca	0.32	0.32	0.46	0.77	0.49	1.55	1.53	1.56	1.01
Na	2.78	3.43	3.24	3.17	3.36	2.38	2.41	2.38	2.87
K	0.83	0.20	0.19	0.04	0.06	0.05	0.04	0.06	0.16
Sum	3.93	3.95	3.89	3.98	3.91	3.98	3.98	4.00	4.04
An	8.07	8.12	11.87	19.36	12.41	39.03	38.32	39.04	25.07
Ab	70.68	86.85	83.32	79.54	86.03	59.75	60.62	59.55	71.00
Or	21.25	5.03	4.81	1.10	1.56	1.22	1.06	1.41	3.92

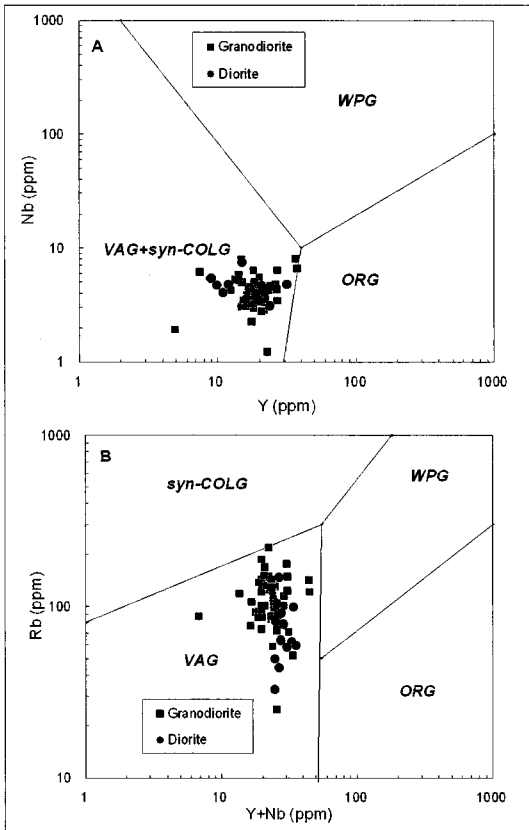


Fig. 13. Plots of Nb versus Y and Rb versus (Y+Nb)

(1988)[10]는 생성온도와 녹니석의 사면체를 차지하는 Al의 함량과의 관계에서 $T(^{\circ}C) = -61.92 + 321.98(Al\ IV)$ 의 관계식을 도출한 바 있다. 그러나 조사지역의 경우, 녹니석의 산출빈도는 높지만 산출량이 적고 산출양상이 주로 단열면을 코팅하는 얇은 세맥상으로 존재하기 때문에 이들의 경험식을 직접 적용하기에는 무리가 있다.

마. 처분부지내에서의 원소들의 분포양상

화학분석결과 중 국지적으로 분포하는 맥암류 및 변질퇴적암 시료들을 제외하고 화강암류인 화강섬록암과 섬록암의 분석결과만을 이용하여 주원소(SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, CaO, Fe₂O₃, K₂O) 및 일부 중금속들(Cu, Cd, Co, Ni, Pb, As)의 분포양상을 KB 시추공들을 중심으로 한 화강암류 지역에 대해 크리깅 기법을 이용하여 해석하여 보았다. 크리깅을 수행한 원소들의 결과를 Fig. 14와 15에

나타내었다.

주원소들의 분포를 살펴보면, 정도의 차이는 있으나 화강섬록암과 섬록암 지역의 차이가 명확하다. 섬록암 지역이 화강섬록암 지역에 비해 낮은 SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O 및 높은 CaO, Fe₂O₃ 분포를 보여주고 있다. 이 중 CaO와 Na₂O의 분포 양상은 섬록암과 화강섬록암 지역 간의 차이가 상대적으로 명확할 뿐 아니라 그 증감 경향이 거의 정확하게 상반되어 있어 사장석의 전자현미경 분석결과에서 나타난 바와 같이 주구성광물인 사장석의 조성변화가 처분부지 암석의 조성을 변화시키는 가장 큰 원인임을 알 수 있다. 또한 Ca 분포는 방해석이 주로 퇴적암 지역 혹은 퇴적암과의 경계지역에 있는 시추공인 KB-4, KB-5, KB-15, KB-16-2 시추공에서 산출되며, 이 중 섬록암 지역에 위치한 KB-4와 KB-5 시추공에서 가장 많이 산출된다.

Cu, Cd, Co, Ni, Pb, As 등의 중금속 원소들은 주원소의 분포경향과는 달리 국지적으로 좁은 구역에 한정되어 높은 함량을 보여준다. 상대적으로 섬록암 지역에서 Cu가 매우 높은 함량분포를 보이는데, KB-6 시추공 시료들에서 높은 Cu 함량이 분석된다. 또한 KB-6 공에서 Fe₂O₃의 함량도 함께 높아지는 경향을 보여 이 지역의 국지적인 광화작용에 의한 결과로 해석할 수 있으나 다른 금속원소들의 함량은 높지 않기 때문에 명확하지는 않다.

바. 단열광물의 탄소, 황, 산소-수소 안정동위원소 분석결과

처분부지 단열대에 분포하는 탄산염광물과 황철석에 대한 탄소 및 황 동위원소 분석을 실시하였으며, 그 결과를 각각 Table 8과 9에 정리하였다. 탄산염광물의 탄소동위원소 조성은 -18.6~-8.4‰로 매우 낮은 값을 보여주어 유기물 또는 열수변질에 의한 기원을 나타낸다. 그러나 처분부지 내에서 산출되는 방해석은 주로 KB-4, 5, 15, 16-2번 시추공에서만 산출되며, 이들은 모두 변질퇴적암이나 그 경계부에 위치하고 있기 때문에 퇴적기원의 탄산염광물과 관계가 있다. 따라서 처분부지내 단열에 분포하는 탄산염광물은 지하수 혹은 낮은 정도의 열수와

Table 5. Representative results of microprobe analyses of the K-feldspar of the study area.

Rock	Granodio	Granodio	Granodio	Granodio	Granodio	Diorite	Diorite	Diorite	Diorite
Borehole#-depth(m)	KB1-45,3	KB4-68,6	KB4-68,6	KB4-68,6	KB4-68,6	KB4-68,6	KB4-68,6	KB4-68,6	KB10-166
SiO ₂	64.42	64.03	64.45	63.82	64.36	64.48	63.89	64.91	62.45
Al ₂ O ₃	18.87	18.68	18.68	18.62	18.74	18.56	18.96	18.50	17.68
TiO ₂	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
FeO	0.16	0.15	0.19	0.22	0.00	0.08	0.04	0.05	0.05
MgO	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
MnO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	2.04	0.83	0.81	0.90	0.79	0.77	1.12	0.79	0.66
K ₂ O	13.95	15.38	15.44	15.37	15.43	15.76	14.61	16.05	15.68
Total	99.50	99.06	99.62	98.96	99.32	99.66	98.65	100.29	96.57
Numbers of cations on the basis of 32 oxygen									
Si	11.89	11.93	11.94	11.91	11.94	11.95	11.90	11.97	11.97
Al(IV)	0.11	0.07	0.06	0.09	0.06	0.05	0.10	0.03	0.03
Sum	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Al(VI)	4.00	4.03	4.01	4.01	4.04	4.01	4.07	3.99	3.97
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.02	0.02	0.03	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	4.04	4.05	4.05	4.05	4.04	4.02	4.08	3.99	3.99
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.73	0.30	0.29	0.33	0.28	0.28	0.40	0.28	0.25
K	3.29	3.65	3.65	3.66	3.65	3.73	3.47	3.77	3.84
Sum	4.02	3.95	3.94	3.99	3.94	4.00	3.88	4.06	4.08
An	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ab	18.16	7.56	7.38	8.21	7.23	6.95	10.44	6.94	6.04
Or	81.84	92.44	92.62	91.79	92.77	93.05	89.56	93.06	93.96

퇴적암과의 반응에 기인한 것으로 판단된다. 황동 위원소의 경우, 일반적으로 기원에 따라 황동위원소 값의 범위가 서로 중첩되기 때문에 해석에 어려움이 있다. 하지만 단열대 내의 황철석에 대한 황동위원소 분석결과, 조성 변화가 크지 않고, 화성기원 범위에 속하기 때문에 황철석은 열수변질작용에 의해 형성된 것으로 판단된다. 이는 코아시료에서 일반적으로 열수변질산물로 알려진 제올라이트 광물(로몬타이트)이 매우 광범위하게 산출되는 사실과 잘 일치한다.

처분부지에서 산출되는 단열충전광물 중 대표적인 점토광물에 대한 산소 및 수소 안정동위원소 분석결과는 Table 10에 나타내어져 있다. Fig. 16에 도시된 바와 같이 동위원소 값들의 변화가 크진 하지만, 모든 분석결과가 마그마 기원에 속한다. 따라서 처분부지 내 단열충전광물들은 단열대를 따르는 지하수와의 단순한 물-암석 반응 이외에 광범위한 마

그마 기원의 열수작용에 의한 영향을 받았음을 알 수 있다.

IV. 결론

경주 중·저준위처분장의 부지특성조사의 일부로 처분부지의 암석, 광물에 대한 지구화학적 특성연구를 수행하였다. 처분부지의 모암은 화강암류로서 화강섬록암 및 섬록암으로 산출된다. 화강섬록암과 섬록암은 부지의 북측에서 남측으로 갈수록 점이적으로 변하는 특징을 보여주며 부지내에는 지역적으로 파쇄대가 발달하여 있고 이 파쇄대를 따라 변질정도가 매우 다양하게 나타난다. 시추코아에서 확인된 단열광물은 몬모릴로나이트, 제올라이트광물, 녹니석, 일라이트, 방해석 등이며 단일 광물로 산출되는 경우가 매우 드물고 여러 점토광물의 집합체로 주로 산출된다.

Table 6. Representative results of microprobe analyses of the biotite of the study area.

Rock	Diorite	Diorite	Diorite	Granodiorite	Granodiorite	Granodiorite
Borehole*-depth(m)	KB4-68,6	KB4-68,6	KB4-68,6	KB14-182,6	KB14-182,6	KB14-182,6
SiO ₂	37.38	36.07	36.64	37.54	37.59	37.65
Al ₂ O ₃	14.18	14.36	14.30	16.02	15.93	16.32
TiO ₂	2.67	2.53	2.67	2.85	2.79	2.85
FeO	20.07	20.19	20.71	18.10	18.04	17.65
MgO	13.10	13.58	13.04	12.20	12.18	12.17
MnO	0.43	0.38	0.46	0.55	0.50	0.56
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.16	0.08	0.00	0.23	0.21	0.18
K ₂ O	9.48	8.37	9.62	9.42	9.55	9.64
Total	97.47	95.56	97.45	96.90	96.78	97.00
Numbers of cations on the basis of 22 oxygen						
Si	5.61	5.50	5.53	5.59	5.61	5.59
Al(IV)	2.39	2.50	2.47	2.41	2.39	2.41
Sum	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al(VI)	0.11	0.09	0.07	0.40	0.41	0.45
Ti	0.30	0.29	0.30	0.32	0.31	0.32
Fe	2.52	2.58	2.61	2.26	2.25	2.19
Mg	2.93	3.09	2.93	2.71	2.71	2.70
Mn	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06	0.07
Sum	5.91	6.09	5.97	5.76	5.74	5.72
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.05	0.02	0.00	0.06	0.06	0.05
K	1.81	1.63	1.85	1.79	1.82	1.83
Sum	1.86	1.65	1.85	1.85	1.88	1.88

Table 7. Representative results of microprobe analyses of the chlorite of the study area.

Rock	Diorite	Diorite	Diorite	Granodiorite	Granodiorite	Granodiorite
Borehole*-depth(m)	KB14-182,6	KB14-182,6	KB14-182,6	KB15-101,4	KB15-101,4	KB15-101,4
SiO ₂	26.27	27.85	26.34	27.83	27.73	28.08
Al ₂ O ₃	18.21	17.85	18.97	18.72	18.37	18.73
TiO ₂	0.12	0.08	0.02	0.09	0.09	0.09
FeO	27.81	27.21	27.69	20.85	20.76	20.69
MgO	15.30	15.80	15.82	20.63	20.20	20.37
MnO	1.25	0.95	1.23	0.87	0.92	0.86
CaO	0.09	0.08	0.04	0.03	0.02	0.05
Na ₂ O	0.06	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01
K ₂ O	0.03	0.10	0.00	0.02	0.03	0.01
Total	89.13	89.95	90.14	89.07	88.12	88.90
Numbers of cations on the basis of 14 oxygen						
Si	2.78	2.90	2.75	2.83	2.85	2.85
Al(IV)	1.22	1.10	1.25	1.17	1.15	1.15
Sum	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Al(VI)	1.05	1.08	1.08	1.07	1.07	1.09
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Fe	2.46	2.37	2.42	1.77	1.78	1.76
Mg	2.42	2.45	2.46	3.12	3.09	3.08
Mn	0.11	0.08	0.11	0.08	0.08	0.07
Ca	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
K	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	6.08	6.01	6.09	6.05	6.04	6.02

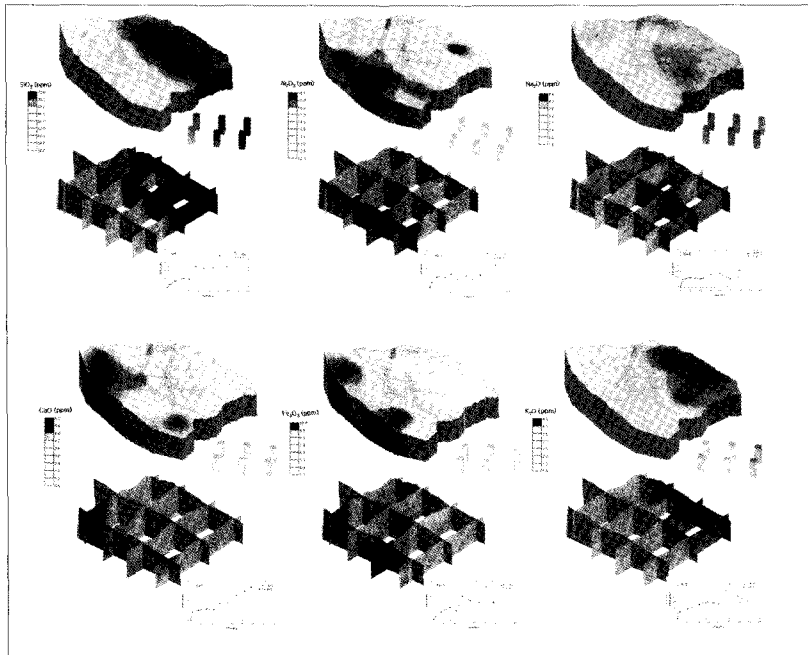


Fig. 14. 3-D spatial distribution of major elements in the study area (SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , CaO , Fe_2O_3 , K_2O).

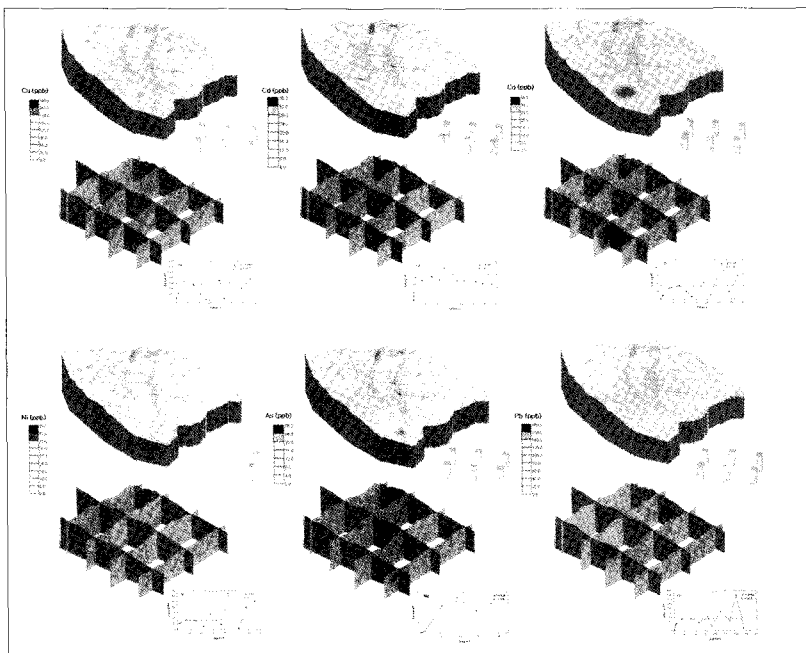


Fig. 15. 3-D spatial distribution of heavy metal elements in the study area (Cu, Cd, Co, Ni, As, Pb)

모암의 화학분석결과로부터 화강섬록암과 섬록암을 비교하였을 때, 화강섬록암과 섬록암 모두 비알칼리계열(subalkaline series)에 속하며 이들의 분화

는 총철분함량이 비교적 결핍된 칼크-알칼리암 계열의 분화경로를 따르고 있다. 또한 화강섬록암과 섬록암의 야외 산상은 점이적으로 변하는 데에 비해

Table 8. Results of C-13 stable isotope analysis of calcite from the study area.

Borehole no.	Sample Depth(m)	$\delta^{13}\text{CPDB}$ (‰)	$\delta^{18}\text{OPDB}$ (‰)
KB-4	54.2	-11.9	-10.0
KB-4	69.5	-12.3	-10.3
KB-5	54.9	-8.6	-21.2
KB-5	56.5	-8.4	-21.5
KB-5	96.2	-11.0	-10.2
KB-5	101.0	-12.7	-10.4
KB-5	121.5	-13.0	-10.6
KB-8	130.2	-13.6	-8.9
KB-9	212.5	-13.6	-9.1
KB-11	222.7	-12.3	-9.1
KB-15	199.7	-9.1	-9.1
KB-15	252.7	-13.3	-5.2
KB-16-2	96.7	-18.6	-7.6
KB-16-2	153.6	-11.8	-10.7

Table 9. Results of sulfur isotope analysis of pyrite from the study area.

Borehole no.	Sample Depth(m)	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)
KB-2	46.1	1.9
KB-5	128.5	3.9
KB-7	126.5	9.8
KB-10	44.3	4.8
KB-11	66.1	5.0
KB-13	173.2	4.5
KB-15	128.1	1.7
KB-14	59.9	4.7
KB-14	117.7	1.8
KB-15	251.5	4.7

Table 10. Results of oxygen and hydrogen stable isotope analysis of fracture-filling minerals from the study area.

Sample no.	$\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$	$\text{H}_2\text{O}(\text{wt}\%)$	Description
KB-5-40.2m	-46.7	6.8	10.4	Laumontite
KB-7-101.8m	-61.7	10.2	3.1	Montmorillonite
KB-11-149.8m	-43.0	5.9	1.5	Illite + Chlorite
KB-13-106.7m	-65.6	5.3	8.7	Laumontite + Chlorite
KB-15-179.7m	-36.2	5.8	4.0	Chlorite

화학적으로는 비교적 명확하게 구별되어 화강섬록암이 섬록암에 비해 높은 SiO_2 함량, 낮은 MgO , Fe_2O_3 함량을 보여준다. 그러나 SiO_2 의 증가에 따라 각 주원소들의 변화경향이 동일선상에 놓여있어서 이들이 동일한 마그마 기원일 가능성을 지시한다. 이들 화강암류를 구성하는 사장석의 경우는 화강섬록암은 Ab61~Ab87로서 올리고클레이스(Oligoclase)~안데신(Andesine)에 해당하며, 섬록암은 Ab63~Ab72로서 주로 올리고클레이스에 해당하고, 정장석은 조성차이가 거의 없다. 흑운모는 팔면체 내의 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 비가 0.45~0.47로 매우 일정한 값을 보이며, 전형적인 흑운모의 화학조성을 보

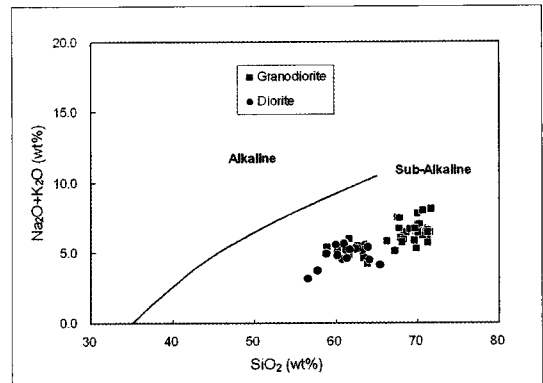


Fig. 16. $\delta^{18}\text{O}$ versus δD diagram for the fracture filling minerals of the study area.

여준다. 녹니석 역시 팔면체 내의 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 비가 0.36~0.50으로 상대적으로 Mg가 부화된 양상을 보이며, 비교적 일정한 화학조성을 보여준다. 처분부지내의 주원소들의 공간적 분포를 살펴보면, 섬록암 지역이 화강섬록암 지역에 비해 낮은 SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O 및 높은 CaO , Fe_2O_3 분포를 보여주어 화강섬록암과 섬록암 지역의 차이가 명확하다. 이 중 CaO 와 Na_2O 의 분포 양상은 섬록암과 화강섬록암 지역 간의 차이가 더욱 분명하고 그 증감 경향이 거의 정확하게 상반되어 있어 주구성광물인 사장석의 조성변화가 처분부지 암석의 조성을 변화시키는 가장 큰 원인임을 알 수 있다.

일반적으로 열수변질광물로 알려져 있는 황철석과 로몬타이트가 매우 광범위하게 분포하는 것으로 보아 조사지역 전반에 걸쳐 광범위한 광화작용 혹은 열수변질작용이 있었음을 지시한다. 이와 관련하여 단열대 내의 황철석에 대한 황동위원소 분석결과는 이들이 열수변질작용에 의해 형성되었음을 지시하며 단열충전광물들의 산소 및 수소 안정동위원소 분석결과 역시 이들이 마그마 기원임을 지시한다. 따라서 처분부지 내 단열충전광물들은 단열대를 따르는 지하수와 단순한 물-암석 반응 이외에 광범위한 마그마 기원의 열수작용에 의한 영향을 받은 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 중·저준위처분장 부지특성조사-지화학

조사의 일환으로 수행되었으며 일부 과학기술부 원
자력연구개발 중장기계획사업과제의 지원을 받았음
을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 신월성 1,2호기 예비안정성분석보고서, PSAR(2002)
- [2] H.P. Jr. Taylor and S. Epstein, "Relationship between O18/O16 ratios in coexisting minerals of igneous and metamorphic rocks, Part1: Principles and experimental results", Geol. Soc. Bull., 73, pp461-480(1962).
- [3] T.W. Vennemann and J.R. O'Neil "A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent", Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sec.), 103, pp227-234(1993).
- [4] M.L. Coleman, T.J. Shepherd, J.J. Durham, J.E. Rouse and G.R. Moore, "Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis", Anal. Chem., 54, pp993-995(1982).
- [5] C. Kendall, and T.B. Coplen, "Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination", Anal. Chem., 57, pp1438-1440(1985).
- [6] S.W. Bailey, "Structures of layer silicates", in: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification, G.W. Brindley and B. Brown, eds, Mineralogical Society, London, pp 1-123(1980).
- [7] 김건영, 김수진, "우리나라 충남지역 활석광상에서 산출되는 녹니석의 화학적 및 투과전자현미경 연구", 한국광물학회지, 13(2), pp. 53-64(2000)
- [8] J.I. Drever, The Geochemistry of Natural Waters, 3th ed., pp. 1-436, Prentice Hall(1997)
- [9] W.J.S. Zhong, J.M. Hughes, and D.M. Scotford, "The response of chlorite to metasomatic alteration in Appalachian ultramafic rocks", Can. Mineral., 23, pp443-446(1985).
- [10] M. Cathelineau, "Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of a temperature", Clay Miner., 23, pp471-485(1988).