

화강암지역 지하수 수질의 특징과 불소원인에 관한 물-암석반응 연구

추창오¹ · 김종태¹ · 정일문² · 김남원² · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과

²한국건설기술연구원 수문연구실

Geochemical Aspects of Groundwater in Granite Area and the Origin of Fluoride with Emphasis on the Water-Rock Interaction

Chang-Oh Choo¹, Jong-Tae Kim¹, Il-Moon Chung², Nam-Won Kim², and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Department of Earth & Environmental Sciences, Andong National University

²Water Resources & Environmental Research Division, Korea Institute of Construction Technology

이 연구의 목적은 경남 북서부 화강암 분포지역 지하수의 지구화학적 특징 및 불소의 원인을 물-암석반응으로 이해하는데 있다. 이를 위하여 지하수의 수질과 모암인 화강암의 주요 성분간의 부화경향성을 검토하였으며, 변질된 암석내 광물의 미세조직을 전자현미경으로 관찰하고 화학성분을 분석함으로써 물-암석반응에 따른 지하수내 불소의 용존 원인을 해석하였다. 불소함량과 경도를 비교한 결과 이들 간에는 뚜렷한 상관성은 나타나지 않는다. 그러나 불소함량과 pH는 대체로 서로 비례하는 경향을 보이며, 공의 심도가 깊어질수록 불소함량도 증가한다. 흑운모의 변질작용은 벽개를 따라 일어나거나, 결정의 가장자리 부분에서 가장 우세하게 일어난다. 물-암석반응에 의하여 흑운모가 쉽게 변질되므로 본 연구지역의 지하수내 불소의 주공급원이 될 가능성이 가장 높다.

주요어 : 지하수, 물-암석 반응, 화강암, 불소, 흑운모

The purposes of this study are to understand characteristic water-rock interaction mechanisms of groundwater in the granite area of Geochang and Hapcheon areas, Gyeongnam-do and to clarify the origin of fluoride. The possible water-rock interaction process and the source of fluorine were studied using water chemistry, rock chemistry, mineralogy by XRD, and microtexture analysis by backscattered electron image of the electron microprobe. No clear relationships between F and hardness was found. But the fluorine content increases to some extent with pH and well depth. Preferential alteration due to water-rock interaction took place along edges or cleavage, or margins of biotite. Because biotite is highly subject to alteration in granite aquifer, fluorine in groundwater is originated from the leaching of biotite.

Key words : water-rock interaction, groundwater, granite, fluoride, biotite

서 론

불소는 전기음성도가 큰 원소이므로 반응성이 높아 다른 이온과 쉽게 결합하여 이온결합이나 공유결합을 형성한다. 불소이온의 전하는 OH⁻와 같고 이온반경이 거의 같기 때문에 광물구조 내에서 이들은 서로 치환이 가능하다. 따라서 불소는 여러 양이온들과 잘 결합하며 광물의 형태로는 형석, 인회석, 각섬석류, 운모류 등으로

산출된다. 국제광물협회(IMA)에서 공인된 불소함유 광물의 종류는 336개에 이른다. 불소와 OH⁻는 이온반경과 전하가 거의 같기 때문에 각섬석류와 운모류와 같은 함수 광물의 표면에서 서로 치환되기 쉬우며, 결과적으로 물의 pH에 따라서 불소의 함량도 영향을 받게 된다. 지하수에서 불소는 화강암, 편암 및 편마암 등의 심부지하수에서 높은 함량을 보인다. 특히 화강암을 통하여 배출되는 지하수는 변성암이나 퇴적암을 통하여 배출되는 지하수에

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

비하여 불소함량이 훨씬 높다(Lisa, 1994; Saxena and Ahmed, 2003). 지하수에서 불소는 약알칼리 내지 알칼리 영역에서 전기전도도가 높고 Ca와 중탄산이 높을 수록 불소의 함량이 높게 나타나는데, 물-암석반응 동안 암석내 불소의 함양, 이온의 화학종, 반응체류시간 등이 중요한 요소이다(Jacks et al., 2003; Saxena and Ahmed, 2003; Subba Rao and Davadas, 2003; Abu Rukah and Khaled Alsokhny, 2004).

국내 화강암지역 지하수의 불소는 백악기 화강암에서 가장 높게 나타나는데, 지하수공 심도가 증가함에 따라 불소함량이 증가하며 pH, Na, SiO₂, HCO₃⁻, B, Rb, Cl, Li와는 양의 관계, Ca와는 음의 상관관계를 갖는다(황 정, 2001). 화강암지역 지하수에서 상대적으로 높게 나타나는 불소는 기반암의 특성과 밀접한 관련성을 가진다. 예를 들면, 우리나라 동남부 영남지역의 양산단층대 인근의 지하수의 경우 공공급수시설 지하수의 약 10%가 음용수 불소기준치(1.5 mg/l)를 초과한 것으로 나타났는데, 불소 고함유 공공급수 지하수공은 대체로 단층대를 따라 분포하는데 화강암류 지역에서 높다(Kim and Jeong, 2005).

본 연구의 목적은, 수자원의 지속적 확보기술개발사업을 위해 특히 지하담 개발에서 나타나는 지하수 수질에 대한 것으로서, 경남 거창군과 합천군 지역의 화강암 분포지역의 지하수의 수질특성과 불소함유의 원인을 물-암석반응의 관점에서 고찰하는데 있다. 이를 위하여 지하수의 수질과 모암인 화강암의 주요 성분간의 부화경향성을 검토하였으며, 변질된 암석내 광물의 미세조직을 전자현미경으로 관찰하고 화학성분을 분석함으로써 물-암석반응에 따른 지하수내 불소의 용존 원인을 해석하였다.

연구 방법

본 연구를 위하여 거창(24개), 합천(10개)지역의 화강암 분포지의 지하수공을 선정하여 물 시료를 채취하였다. 지하수 내 무기물의 성분 분석을 위한 채수는 현장에서 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC) 및 수온을 측정하였다. 간이수질을 측정 후, 지하수를 현장에서 0.45 μm membrane 필터를 사용하여 부유물을 제거한 다음에 무균용기에 채수하였다. 모든 지하수 시료는 냉장보관을 하여 실험실로 운반한 다음에 양이온과 음이온을 각각 분석하였다. 지하수 시료는 원자흡광분광기(AAS), 유도결합플라즈마(ICP-AES) 및 이온크로마토그래피(IC)를 사용하여 양이온과 음이온을 각각 분석하였다. 연구지역의 경우 식수와 농촌생활용수가 주를 이루는데,

수질문제가 되는 주요 항목들은 pH, 탁도, 경도, 증발잔류물, 불소, 염소, 질산성질소, 과망간산칼슘소비량, 아연, 철, 망간, 황산이온, 알루미늄 등이다.

물-암석 반응에 따른 지하수의 수질특성을 해석하기 위하여 기반암인 화강암 시료를 분석하였다. 심도별 암석시료는 경남 함양군 함양읍 구룡리 원구지구 소재하는 원구 B-2호공으로서 주 대수층인 105~150 m 범위 구간에서 시추코어를 회수하였다. 불소 고함량 지하수공에서 시추코어를 제대로 회수하기가 현실적으로 불가능하였기 때문에 위 시추공을 중심으로 고찰하였다. 이와 더불어 대표적인 화강암 암상을 나타내는 지표암석을 채취하여 화강암내 불소의 함량과 주원소를 분석하였다. 화강암 시료는 경남 합천군 봉산면 상현리, 합천군 가회면 도탄리, 및 본 연구지역 일대에 분포하는 신선한 화강암과 풍화된 화강암을 대상으로 하였다.

암석의 광물조성은 심도별로 회수된 암석과 지표의 신선한 화강암, 풍화된 화강암을 대상으로 X-선 회절분석(X-Ray Diffraction, Rigaku D/max 2000 XRD)을 실시하였고, X-선 형광분석기(X-ray fluorescence spectrometer, Philips PW2404 XRF)로써 전암의 화학성분을 분석하였다. XRD분석의 경우 화강암 시료를 분말상태로 제작하여 CuKα, 5-65도 2θ구간에서 0.05도 간격으로 측정하였다. 전암의 XRF 화학분석은 한국기초과학연구원 서울센터에 수행되었다. XRF분석의 경우 XRD분석에 사용된 동일한 암석시료를 비드로 제작하여 주성분과 불소를 분석하였다. 이때 분석항목은 SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, MgO, MnO, Na₂O, CaO, K₂O, P₂O₅ 및 불소(F)이다. 철은 기기분석의 특성상 3가로 간주하였으며, 작열감량(Loss on ignition)을 함께 측정하였다.

암석시료의 경우 물-암석 반응의 결과 나타나는 미세조직 관찰과 이차변질 광물의 동정 및 광물의 화학성분 분석은 전자현미분석기(Electron Microprobe, Shimadzu EPMA-1600)를 이용하였다. 연마편을 제작한 후, 후방산란 전자영상(Back Scattered Electron Image, BSE)으로써 미세조직을 관찰하고, 주요 조암광물과 변질광물에 대하여 에너지분산스펙트럼(Energy dispersive spectrum, EDS)분석을 실시하여 ZAF 보정을 거쳐 반정량 화학분석을 수행하였다.

지 질

거창지역

거창군에 분포하는 지질은 변성암류와 화성암류 및

이를 부정합적으로 피복하고 있는 신생대 제4기 충적층으로 구분할 수 있다. 거창도폭(1964)에 의하면 변성암류에는 시대미상의 미그마타이트질편마암, 반상변정화강암질편마암, 세립화강암질편마암, 조립화강암질편마암, 호상편마암, 우백화강편마암, 선캠브리아기의 흑운모편마암, 반상변정편마암, 화강암질편마암, 화성암류에는 시대미상의 섬록암질암, 해인사화강암, 주라기의 육십령화강암, 백악기의 흑운모화강암, 각섬석화강암, 복운모화강암이 주로 분포한다.

거창지역 화강암 분포지역에서 24개 지하수시료를 채취하였다. 공의 심도는 73~250 m범위이다. 이들 지역은 대체로 대수층의 발달이 양호하여 지하수개발의 어려움은 없으나 남하면, 마리면 등 황강유역에서 개발된 지하수에서 간혹 불소가 기준치 이상으로 검출되기도 한다. 경도, 증발잔류물, 황산이온 등은 서로 상관성은 있으나 수질기준 이내이다.

합천지역

합천도폭(1964)에 따르면 합천군에 분포하는 지질은 크게 변성암류, 화성암류, 퇴적암류와 이를 부정합적으로 피복하고 있는 제4기 충적층으로 구분할 수 있다. 변성암류에는 흑운모편마암, 반상변정편마암, 편마암상섬록암질암, 선캠브리아기의 미그마타이트질편마암 등이 분포하며, 화성암류는 회장암, 안산암류, 해인사화강암, 우백질화강암, 고령화강암, 각섬석화강암, 흑운모화강암, 둔내리화강암, 섬장암 등이 분포하며 퇴적암류에는 원지층, 마동층, 진주층, 칠곡층, 합안층, 신라역암층이 분포하고 있다. 합천읍을 끼고 흐르는 황강을 중심으로 하부(대양면, 용주면, 삼가면, 쌍백면, 쌍책면, 청덕면, 초계면 등)는 퇴적암이고, 황매산을 중심으로 한 대병면, 가야면, 야로면, 봉산면 등은 편마암 및 화강암이 분포하고 있다. 합천지역 화강암 분포지역에서 10개의 지하수 시료를 채취하였다. 공의 심도는 150~205 m범위이다. 합천일대의 지하수의 경우 기반암에 따른 수질특성도 차이가 있는데 퇴적암류에서는 경도, 증발잔류물, 황산이온 등은 서로 상관성이 있으며 먹는물 수질기준치에 근접하거나 이를 초과한 수치를 보이기도 한다. 그러나 화강암이나 편마암 지역 지하수는 양호한 수질을 나타낸다.

결과 및 고찰

수질

본 연구지역 화강암 지하수의 수질특성은 Table 1과

같다. 지하수의 수질은 물-암석반응을 겪으면서 진화하는데, 특히 지질과 여러 성분간에 밀접한 관련성을 보인다(Chebotarev, 1955; Nordstrom et al., 1989; Bank et al., 1995). 물-암석 반응동안 규산염광물은 그 구성성분의 일부가 그대로 남게 되는 비조화 용해(incongruent dissolution)를 겪게 되며, 점차 지하수와 평형을 이루면서 이차적으로 새로운 광물이 형성된다(White and Brantley, 1995; Stumm and Morgan, 1996). 이로써 지하수는 이차적 광물상과 평형상태를 유지하면서 일정한 수질을 유지하거나, 또는 대수층의 환경이 변하게 되면 화학반응을 겪으면서 다시 과포화 되거나, 불포화상태에 놓이게 되고, 결과적으로 수질은 변한다.

본 지역 지하수의 경우 지하수의 수소이온농도는 거창지역의 경우 6.0~8.5 범위, 합천지역의 경우 6.5~7.5 범위이다. 우리나라의 먹는샘물 지하수의 pH는 평균 7.31이다(조병욱 외, 2002). 수소이온농도는 광물을 용해시키면서 소모되므로 지하 심부로 내려갈수록 지하수의 pH는 높아진다. 수소이온은 물속에서 수화작용을 통하여 광물과 결합을 하게 되는데 결국에는 광물내의 원소들의 화학결합을 끊게 되고, 광물의 양이온과 이온교환 반응을 통하여 교환되면서 광물을 점진적으로 용해시킨다. 결과적으로 물-암석반응이 진행될수록 수소이온은 지하수로부터 감소하게 되는 반면에, 광물로부터 방출된 양이온은 상대적으로 지하수에 풍부하게 용존되게 된다.

화강암지역 지하수의 평균 pH를 지하수공의 심도별로 분석한 자료에 의하면 심도 0~100 m의 평균 pH는 7.0, 100~300 m는 7.82, 300 m 이상은 8.48로서 지하수공의 심도가 깊어질수록 pH가 높아지는 것으로 보고된 바 있다(이종운 외, 1997). 그러나 본 지역의 경우 pH와 공의 심도간에는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않는다(Fig. 1). 불소는 거창지역의 경우 14개소에서 검출되며 0.2~4.4 mg/l 범위를 보인다. 한편 합천지역의 경우 조사대상 10개소 중에서 단지 1개소에서만 불소가 검출된다. 불소함량과 경도를 비교한 결과 이들 간에는 뚜렷한 상관성은 나타나지 않는다(Fig. 1). 그러나 불소함량과 pH는 대체로 서로 비례하는 경향을 보인다. 또한 공의 심도가 깊어질수록 불소함량도 대체로 증가한다. 그러나 pH와 공의 심도를 비교한 결과 이들은 예상과는 달리 일관성을 보이지 않는다. 본 지역 대수층의 수리지질학적 요소가 복잡하거나, 심도에 따른 물-암석반응의 경로에 일관성이 결여되었거나, 지하수공의 그라우팅 처리에 문제가 있는 것으로 보인다.

염소는 거창지역의 경우 1~17 mg/l 범위, 합천지역의

Table 1. Physical and geochemical properties of groundwater in the granite area. GC denotes Geochang samples and HC refers to Hapcheon samples. (Ion unit: mg/l)

| Samples | Well Depth(m) | pH | Hardness | Total Solids | F | Cl | NO ₃ -N | SO ₄ ²⁻ | Al | Fe |
|---------|---------------|-----|----------|--------------|-----|----|--------------------|-------------------------------|------|------|
| GC002 | 150 | 7.4 | 48 | 98 | 0.2 | 5 | 3.2 | 3 | 0.13 | 0.10 |
| GC003 | 73 | 6.7 | 51 | 115 | 0.7 | 7 | 0.8 | 7 | 0.04 | 0.09 |
| GC007 | 200 | 7.0 | 86 | 187 | 0.1 | 15 | 5.2 | 9 | nd | nd |
| GC008 | 150 | 6.5 | 51 | 168 | nd | 9 | 9.0 | nd | nd | nd |
| GC010 | 220 | 6.9 | 41 | 86 | 1.7 | 6 | 0.6 | 5 | nd | nd |
| GC011 | 190 | 8.0 | 41 | 81 | 1.0 | 3 | 0.6 | 3 | nd | 0.05 |
| GC012 | 150 | 7.3 | 128 | 200 | 0.8 | 4 | 0.8 | 2 | nd | 0.15 |
| GC013 | 75 | 7.1 | 47 | 125 | 0.3 | 17 | 5.7 | 9 | 0.44 | 0.27 |
| GC014 | 75 | 7.5 | 42 | 104 | nd | 4 | 3.7 | 2 | nd | nd |
| GC017 | 250 | 6.0 | 73 | 223 | 0.3 | 15 | 9.0 | 2 | nd | nd |
| GC018 | 250 | 6.6 | 87 | 177 | 0.5 | 5 | 0.7 | 6 | 0.16 | 0.17 |
| GC019 | 120 | 6.6 | 52 | 110 | 0.5 | 1 | 0.4 | 2 | nd | 0.26 |
| GC021 | 150 | 7.6 | 50 | 91 | 4.4 | 8 | 0.6 | 5 | 0.02 | nd |
| GC022 | 200 | 7.7 | 45 | 135 | 3.9 | 7 | 2.1 | 4 | nd | nd |
| GC023 | 150 | 7.1 | 61 | 164 | nd | 5 | 0.9 | 11 | nd | 0.25 |
| GC024 | 200 | 7.8 | 42 | 102 | nd | 4 | 2.6 | 2 | nd | 0.24 |
| GC025 | 190 | 6.5 | 51 | 168 | 1.4 | 9 | 7.6 | 1 | 0.74 | nd |
| GC026 | 190 | 6.9 | 73 | 179 | nd | 5 | 3.6 | 2 | 0.08 | nd |
| GC027 | 200 | 7.0 | 76 | 110 | 0.2 | 9 | 5.1 | 8 | nd | nd |
| GC028 | 210 | 6.7 | 25 | 68 | nd | 1 | 0.9 | 2 | nd | nd |
| GC029 | 120 | 7.0 | 41 | 93 | nd | 2 | 0.5 | 4 | nd | nd |
| GC043 | 230 | 6.9 | 52 | 215 | nd | 7 | 7.0 | nd | nd | nd |
| GC047 | 150 | 8.5 | 63 | 118 | nd | 6 | 3.3 | 2 | nd | nd |
| GC048 | 160 | 7.2 | 56 | 158 | nd | 5 | nd | 5 | nd | nd |
| HC017 | 150 | 6.5 | 97 | 235 | nd | 18 | 3.4 | 13 | nd | 0.46 |
| HC018 | 205 | 6.4 | 126 | 194 | nd | 9 | 4.1 | 9 | nd | 0.51 |
| HC019 | 200 | 7.5 | 29 | 97 | 0.5 | 2 | 1.0 | 8 | nd | nd |
| HC020 | 170 | 7.1 | 64 | 122 | nd | 16 | 1.7 | 25 | nd | nd |
| HC022 | 150 | 6.9 | 47 | 75 | nd | 5 | 1.0 | 5 | nd | 0.05 |
| HC023 | 192 | 6.9 | 88 | 28 | nd | 18 | 2.2 | 5 | nd | nd |
| HC034 | 100 | 7.0 | 89 | 176 | nd | 15 | 6.8 | 1 | nd | nd |
| HC035 | 120 | 7.2 | 89 | 148 | nd | 5 | 2.2 | 4 | nd | nd |
| HC037 | 150 | 7.2 | 75 | 136 | nd | 7 | 1.6 | 2 | 0.06 | d |
| HC036 | 150 | 7.2 | 81 | 143 | nd | 3 | 1.4 | 4 | nd | nd |

경우 2~18 mg/l 범위를 나타낸다. 심부지하수인 경우는 해수침입을 논외로 한다면 물-암석 반응과 같은 내인적인 요인에 의하여 광물로부터 유래하는 것이 일반적이다. 특히 Cl을 함유하는 흑운모나 각섬석, 유체포유물의 용해에 의하여 심부지하수에 부화될 수 있다. 염소와 불소간의 상관성을 비교하여도 분명한 경향성은 나타나지 않는다(Fig. 2). 불소가 4 mg/l 이상 고농도인 2개 시료는 얼핏 염소가 증가할수록 증가하는 것처럼 보인다. 그러나 그 외의 다른 시료의 경우 서로간의 상관성은 매우 낮아 어떤 관련성은 관찰되지 않는다. 질산성질소는 거

창지역에서 0~9.0 mg/l 범위, 합천지역의 경우 1.0~6.8 mg/l 범위를 보인다. 조사대상 지하수 가운데서 질산성질소가 5 mg/l 이상인 경우는 거창지역의 지하수에서 35%, 합천지역 지하수는 10% 수준이다.

황산이온은 거창지역의 경우 0~11 mg/l, 합천지역의 경우 1~25 mg/l 범위이다. 10 mg/l 이상인 경우는 거창지역 지하수는 1개소, 합천지역 지하수는 2개소로 나타난다. 기타 Al, Fe, Zn, Mn 등과 같은 성분은 불검출 내지 미량으로 함유된다.

경도는 거창지역의 경우 25~128, 합천지역의 경우

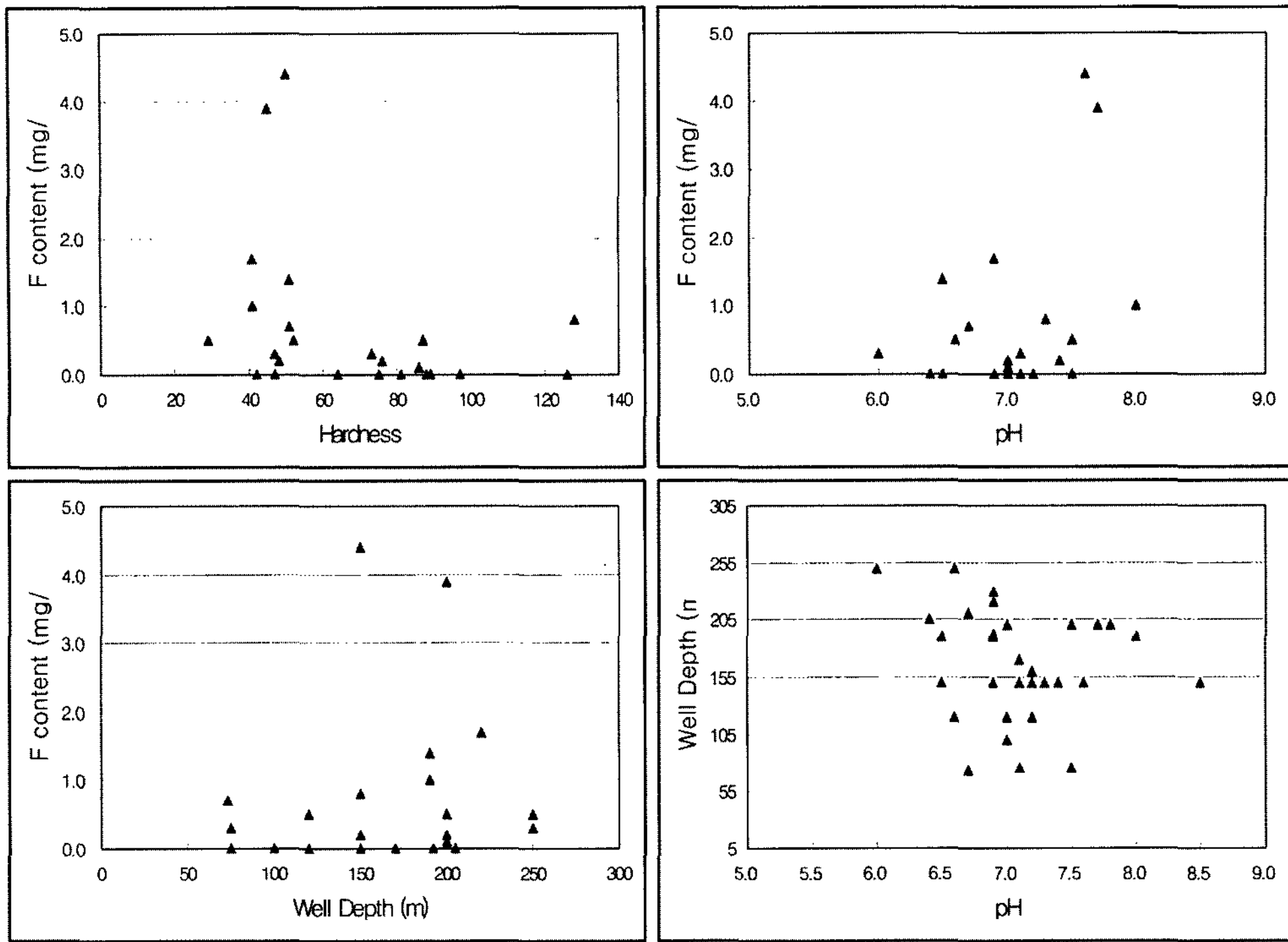


Fig. 1. Relationships between physicochemical factors in groundwater.

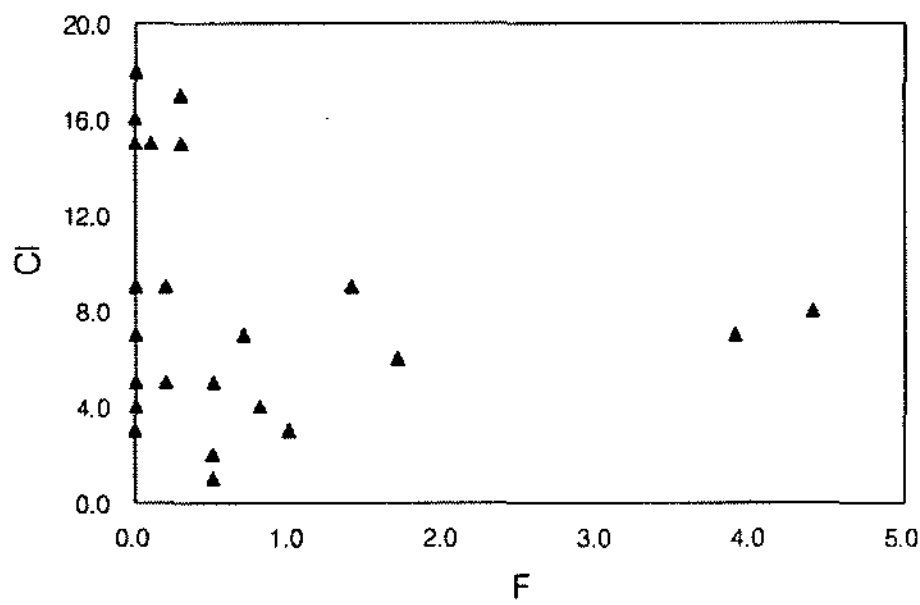


Fig. 2. Relationship between F and Cl in groundwater (unit: mg/l).

29~126 범위이다. 화강암 지역의 경도는 일반적으로 타 암종에 비하여 낮게 나타난다(한국자원연구소, 2000; 조 병욱 외, 2002).

암석내 불소와 주요 화학성분

Table 2는 화강암 전암을 대상으로 XRF 분석치를 나타낸 것이다. SiO₂는 61.17~76.43% 범위로 지표의 신선한 화강암과 풍화암에서 다소 높게 나타났으며 심부로 갈수록 약간 감소하는 경향을 보인다. 그러나 상현과 도탄의 지표암석시료에서 가장 낮게 나타나 지역과 풍화변질 정도에 따라 상이함을 알 수 있다.

Al₂O₃는 12.45~16.91% 범위로 나타나며, 상현과 토

탄에서 가장 높다. 나타나며 지표암인 풍화암과 신선한 화강암에서 가장 낮게 나타난다. Fe₂O₃는 0.50~4.91% 범위로서 상현과 도탄에서 가장 높으며, 시추공과 지표 노두의 신선한 화강암, 풍화암에서는 2% 미만으로 낮다. TiO₂는 모든 암석에서 0.7% 이하의 미량으로 함유되어 있으며, Al₂O₃, Fe₂O₃가 풍부한 상현과 도탄지역에서 역시 가장 높게 나타난다.

MgO는 0.01~2.65% 범위로서 상현과 도탄을 제외한 지역에서는 0.9%이하의 미량으로 함유되어 있다. 이 성분도 알루미늄, 철, 티타늄의 함량이 높은 상현과 도탄에서 가장 높게 나타난다. 규소함량이 높은 지역에서 낮게 함유된다. MnO는 전 지역에 걸쳐 0.1% 이하의 미량으로 함유되나 이것의 경향성은 상현과 도탄에서 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이는 전술한 바와 같이 규소함량이 높은 지역에서 낮게 함유된다. CaO는 0.28~4.52% 범위로 함유되는데 상현과 도탄에서 가장 높게 나타난다. 그러나 규소함량이 높은 지역에서는 낮게 나타난다.

K₂O는 2.99~5.64 % 범위로 함유되는데 상현과 도탄에서 가장 낮게 함유되며, 지표의 신선한 화강암과 풍화된 화강암에서 높게 나타난다. 특히 풍화된 지표암에서 가장 높게 나타난다. Na₂O는 2.98~4.41% 범위로 함유되며 상현과 도탄에서 가장 높게 함유되며 지표암과 105~110 m 구간에서 낮게 나타난다. P₂O₅는 0.01~0.19%

Table 2. Chemical compositions of bulk rock samples.

| Sample | Sanghyun | Dotan | 105~110 (m) | 110~120 (m) | 120~130 (m) | 130~150 (m) | Fresh Granite | Weathered Granite |
|----------------------------------|----------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|
| SiO ₂ | 61.17 | 65.27 | 76.10 | 72.78 | 69.28 | 72.47 | 76.46 | 76.43 |
| Al ₂ O ₃ | 16.91 | 16.60 | 13.53 | 14.95 | 15.48 | 14.74 | 12.48 | 12.45 |
| TiO ₂ | 0.68 | 0.39 | 0.12 | 0.16 | 0.23 | 0.14 | 0.03 | 0.02 |
| Fe ₂ O ₃ * | 4.91 | 3.21 | 0.89 | 1.53 | 1.95 | 1.27 | 0.58 | 0.50 |
| MgO | 2.65 | 1.40 | 0.44 | 0.52 | 0.87 | 0.40 | 0.03 | 0.01 |
| MnO | 0.08 | 0.05 | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.01 |
| CaO | 4.52 | 3.56 | 0.97 | 1.66 | 2.15 | 1.61 | 0.28 | 0.34 |
| K ₂ O | 2.99 | 3.03 | 4.36 | 3.92 | 3.49 | 4.05 | 4.88 | 5.64 |
| Na ₂ O | 3.67 | 4.41 | 2.98 | 3.59 | 3.42 | 3.50 | 3.42 | 2.99 |
| P ₂ O ₅ | 0.19 | 0.12 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.01 | 0.01 |
| F | 0.13 | 0.12 | 0.10 | 0.12 | 0.12 | 0.10 | 0.06 | 0.06 |
| L.O.I** | 1.52 | 1.26 | 0.20 | 0.19 | 2.36 | 1.04 | 1.34 | 1.33 |
| Wt.% | 99.42 | 99.43 | 99.75 | 99.51 | 99.47 | 99.40 | 99.60 | 99.79 |

* Fe assumed as ferric

** Loss on ignition

범위로 함유되며 상현과 도탄에서 가장 높게 함유되며 지표암과 105~110 m 구간에서 낮게 나타난다.

작열감량(L.O.I)은 0.19~2.35% 범위인데 120~130 m 심도구간에서 가장 높고, 105~120 m 심도구간에서 가장 낮게 나타난다. 그리고 상현, 도탄, 신선한 화강암, 풍화된 화강암과 같이 지표암의 경우에는 1.33~1.52% 내외로서 지역에 따른 큰 차이는 없다. L.O.I는 점토광물과 같은 함수광물의 존재와 밀접하게 관련된다. L.O.I가 105~120 m 구간에서 가장 낮게 나타나는 것은 (OH)기나 수분을 층간에 함유하는 광물의 함량이 적음을 의미한다.

F는 0.06~0.13% 범위로서 함유되며 상현과 도탄에서 가장 높게 함유되며 지표암에서 가장 낮게 나타난다. 불소함량은 철이나 L.O.I와 뚜렷한 관계를 보이지 않는다 (Fig. 3). 이는 함수광물중에서 (OH) 수산화기를 갖는 광물들이 존재하더라도 불소를 치환하는 정도가 미미함을 의미한다. 화강암에서 대표적인 함수광물인 흑운모의 경우 철을 함유하는데 철의 불규칙한 함량변화는 흑운모가 물-암석반응을 통하여 변질되었음을 의미한다. 따라서 흑운모에는 불소를 일부 함유하므로 풍화과정 동안 불소가 지하수로 용탈될 가능성이 있다. Fig. 3에서 보듯이 CaO와 F간에는 뚜렷한 관계가 관찰되지 않는다. 이로 볼 때 대수층에서 형석의 존재가능성은 매우 낮다고 판단된다.

Fe와 Mg는 거의 유사한 거동을 보이는데, 전암내 화학적 특성을 볼 때 상현과 도탄과 같은 지역에서는 mafic 광물이 상대적으로 높게 함유된다. mafic 광물에는 Fe와 Mg외에도 Ti, Mn 등이 포함되어 있다. 이같은 광물이 풍부한 암석에서는 사장석의 Ca 함량도 높고, Al의

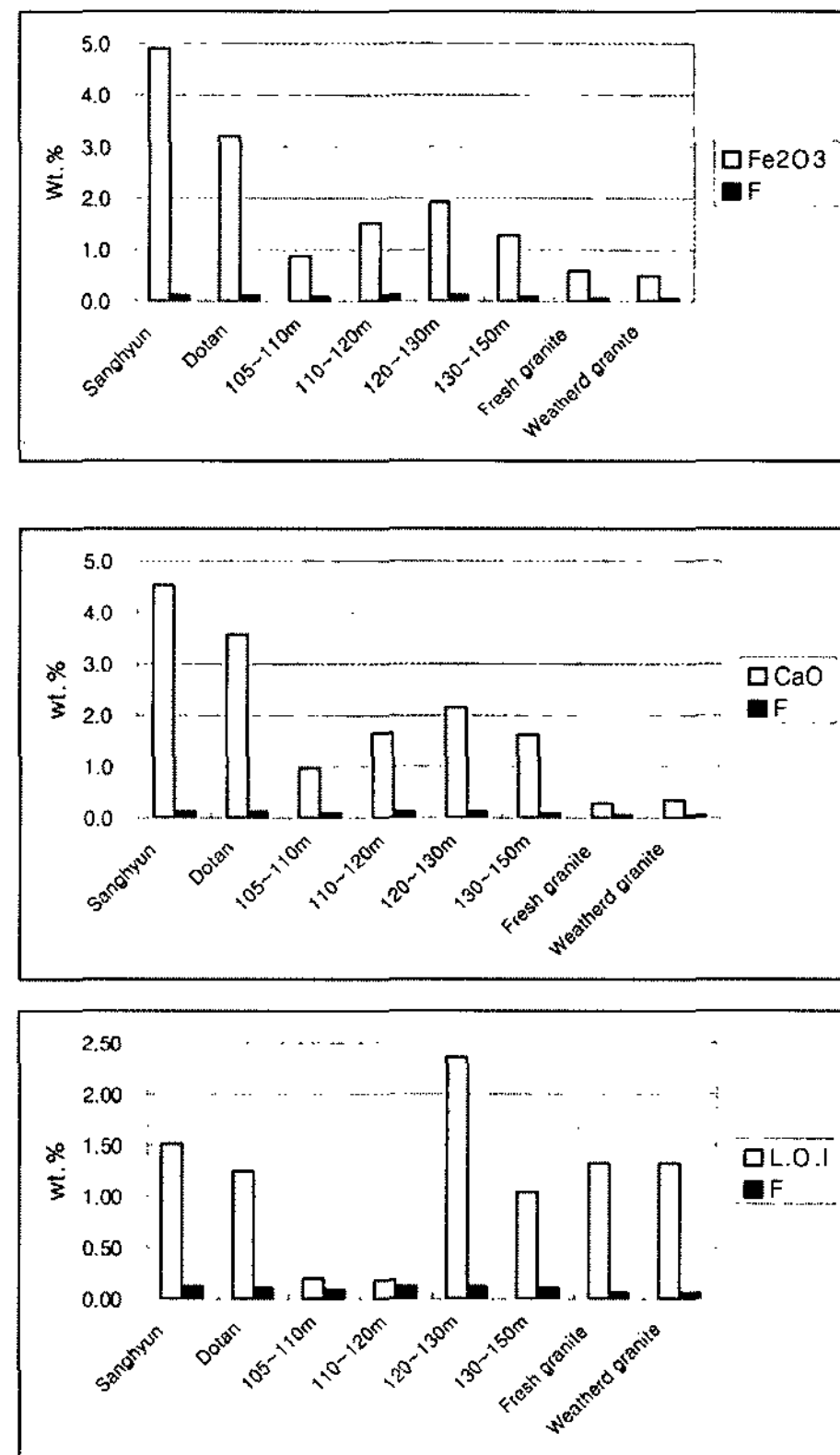


Fig. 3. Contents of fluoride and some components in bulk granite.

함량도 높으나 Na의 함량은 낮다. 그런데 상현과 도탄의 경우 Ca 뿐만 아니라 Na도 높게 나타나므로 이는 단순한 사장석의 알바이트화 작용에 기인하는 것으로 볼 수

없다. 지표의 풍화된 화강암에서 Ca가 쉽게 용탈되어 제거되는 현상일 가능성이 있다.

알칼리원소의 경우 Ca, Na는 비슷한 거동을 보이나 K는 정반대의 거동특성을 나타낸다. K의 경우 지표암에서 가장 높게 나타나는데 이는 풍화변질된 암석에 일라이트와 같이 K를 함유하는 이차광물이 비교적 풍부하게 형성된 것으로 볼 수 있다. 특히 K는 Na나 Ca에 비하여 일라이트와 같은 점토광물의 구성요소로 층간에 들어가므로 상대적으로 유동성이 낮다. 즉 다른 알칼리, 알칼리토금속 이온들이 비교적 유동성이 커서 쉽게 이동하여 제거되나, 이는 풍화변질작용이 일어날수록 K는 결과적으로 그대로 남아 부화되는 결과를 낳는다.

Ca-Mg와 Ca-Fe는 거동특성이 유사한데 특히 Ca-Fe의 경우 상관성이 매우 높다. 이로 볼 때 지표암이나 대수층에서 이들은 거의 동일한 양상으로 이동하거나, 지하수에 용해되는 것으로 생각된다.

암석내 주요 성분간 상관성

암석 내 주요 성분들간의 함량변화가 지하수의 수질특성에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위하여 분석된 주요 항목을 대상으로 상관성 분석을 수행하여 결정계수(coefficients of determination)를 계산하였다(Table 3). 특정한 성분의 거동은 마그마로부터 화강암이 형성되어 마그마 분화작용을 거치면서 정치되는 일련의 과정에서 화학적 친화도나 결정화 작용에 의하여 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 주원소를 중심으로 이들이 심도별 또는 풍화과정동안 얼마나 유사한 거동을 하는지 또는 무관한 지를 해석하였다.

규소와 알루미늄간의 결정계수는 0.888로서 높게 나타

나는데 서로 음의 관계를 가진다. 즉 규소의 함량이 높을수록 알루미늄의 함량은 낮아진다. 이는 석영, 장석을 비롯한 대부분의 규산염광물에서 나타나는 일반적인 현상이다. 중성범위에서 알루미늄의 용해도는 매우 낮기 때문에 어느 정도의 물-암석반응이 일어나더라도 지하수에 알루미늄이 용존되기는 어렵다(Drever, 1988). 따라서 이들의 상관성을 통하여 수질에 영향을 주는 정도를 정확하게 해석하기가 무리가 있다.

알칼리원소의 경우 Ca, Na는 비슷한 거동을 보이나 K는 정반대의 거동특성을 나타낸다. K의 경우 지표암에서 가장 높게 나타나는데 이는 풍화변질된 암석에 일라이트와 같이 K를 함유하는 이차광물이 비교적 풍부하게 형성된 것으로 볼 수 있다. 특히 K는 Na나 Ca에 비하여 일라이트와 같은 점토광물의 구성요소로 층간에 들어가므로 상대적으로 유동성이 낮다. 즉 다른 알칼리, 알칼리토금속 이온들이 비교적 유동성이 커서 쉽게 이동하여 제거되나, 이는 풍화변질작용이 일어날수록 K는 결과적으로 그대로 남아 부화되는 결과를 낳는다.

Ca-Mg와 Ca-Fe는 거동특성이 유사한데 특히 Ca-Fe의 경우 상관성이 매우 높다. 이로 볼 때 지표암이나 대수층에서 이들은 거의 동일한 양상으로 이동하거나, 지하수에 용해되는 것으로 생각된다. 규소와 철(Fe2O3)간의 결정계수는 0.964로서 매우 높은 상관성을 보이는데 이들은 서로 음의 관계를 가진다. 규소와 마그네슘간의 결정계수는 0.919로서 철과 마찬가지로 매우 높게 나타나며 이들은 음의 관계를 보인다. 이는 휘석, 각섬석, 흑운모와 같은 철, 마그네슘 함유광물의 존재와 관련된다. 즉 철, 마그네슘의 함량이 높을수록 이들 광물은 풍부하게 존재하는 것으로 볼 수 있다. 그러나 암석이 물과의 반응을 겪으면서 풍화, 변질되면 이들은 소모되므로 암석 내에는 철, 마그네슘이 결핍되게 된다. 따라서 암석 내 규산염광물과 광물 내에서 규소와 철, 마그네슘 광물간의 상관성은 더욱 떨어지게 될 것이다.

전술한 바와 같이 본 연구에서 분석된 암석의 수가 충분하지 못하고 다양하지 못한 점은 해석상의 한계점이 될 수 있으나, 전암의 분석치에서 이들 성분간 상관성이 높은 경우는 물-암석간 반응의 해석에 근거자료가 된다. 규산염과 철, 마그네슘 광물간의 상관성이 매우 높은 것은 지하수시스템에서 물-암석반응이나 풍화변질작용이 비교적 충분히 진행되지 못하였기 때문인 것으로 볼 수 있다.

규소와 칼슘간의 결정계수는 0.979로서 매우 높게 나타나는데 이들은 사장석이나 휘석, 각섬석류에서 비교적 풍부하게 포함되기 때문이다. 상관성이 높게 나타나는 것

Table. 3. Coefficients of determination(R²) between chemical components in whole rocks.

| | R ² | remarks |
|---|----------------|-----------------------|
| SiO ₂ -Al ₂ O ₃ | 0.888 | negative relationship |
| SiO ₂ -Fe ₂ O ₃ | 0.964 | negative relationship |
| SiO ₂ -MgO | 0.919 | negative relationship |
| SiO ₂ -CaO | 0.979 | negative relationship |
| Fe ₂ O ₃ -CaO | 0.974 | positive relationship |
| Fe ₂ O ₃ -MgO | 0.983 | positive relationship |
| Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅ | 0.991 | positive relationship |
| MgO-CaO | 0.928 | positive relationship |
| MgO-P ₂ O ₅ | 0.989 | positive relationship |
| CaO-K ₂ O | 0.826 | negative relationship |
| CaO-Na ₂ O | 0.498 | positive relationship |
| Na ₂ O-K ₂ O | 0.546 | negative relationship |

은 광물 상태로 결정 내에 그대로 존재하기 때문이며, 이들이 물-암석반응에 의하여 규소나 칼슘이 용탈된 증거로 보기 어렵다. 만약 충분한 물-암석반응이 일어났다면 상관성은 매우 낮거나 거동의 유사성이 발견되기 어려웠을 것이다. 기타 여러 성분간의 상관계수를 고찰해 보더라도 물-암석반응이 비교적 충분히 일어난 것이라고 보기는 어려운 결과를 나타낸다.

특히 불소와 여러 성분간의 상관성은 매우 낮게 나타난다. 전암의 불소의 함량은 시료와 무관하게 거의 0.1% 내외 수준으로 낮게 나타난다. 이는 불소가 용탈되어 암석 내에서 그 함량이 낮게 나타난 것으로 보기 어렵다. 즉 현미경상에서 관찰한 바에 따르면 신선한 화강암에서도 운모나 (OH)기를 갖는 함철, 함마그네슘 광물의 함량은 매우 낮게 나타난다. 연구지역의 화강암 질암은 대부분 우백질 화강암류에 속한다. 불소를 치환하기 쉬운 수산화기(OH)를 갖는 광물로는 각섬석, 흑운모, 백운모류가 있으나 본 암석에서는 흑운모나 백운모가 매우 적게 함유되어 있어서 이들이 물-암석반응에 따라 용해되어 용탈되어 지하수로 이동했다고 보기는 어렵다.

XRD 분석에 의한 전암의 광물조성

XRF 분석에 사용된 동일한 암석에 대하여 구성광물을 XRD로 분석한 결과, 상현과 도탄에서는 타 지역에서는 산출되지 않는 각섬석과 녹니석이 어느 정도 함유된 것으로 감정되었다(Fig. 4). 전암에 대한 XRF 화학분석자료에서도 나타난 바와 같이 이들 암석에서는 철, 마그네슘의 함량이 높다. 즉 이같은 현상은 각섬석과 녹니석 또는 운모류(주로 흑운모)에 기인하는 것으로 보아야 한다. 심도별 및 지역별 암석의 구성광물을 보면 다음과 같다.

105~110 m 구간의 암석에서는 석영, 알바이트 장석의 함량이 가장 높고, 미량의 운모와 카올리나이트가 감정되었다(Fig. 5). 카올리나이트의 경우 그 함량은 거의 무시할 만한 수준이다.

110~120 m 구간의 암석에서는 석영, 알바이트 장석의 함량이 가장 높다. 그런데 알바이트 장석의 경우 105~110 m 구간의 암석에 비하여 그 함량이 조금 높다. 그러나 운모와 카올리나이트와 같은 미량광물의 함량과 조성비는 거의 동일한 것으로 볼 수 있다. 카올리나이트의 경우 그 함량은 거의 무시할 만한 수준이다.

120~130 m 구간의 암석에서는 석영, 알바이트 장석의 함량이 가장 높다. 알바이트 장석의 경우 105~110 m 구간의 암석에 비하여 그 함량이 조금 높다. 그러나 운모와 카올리나이트와 같은 미량광물의 함량과 조성비는 거

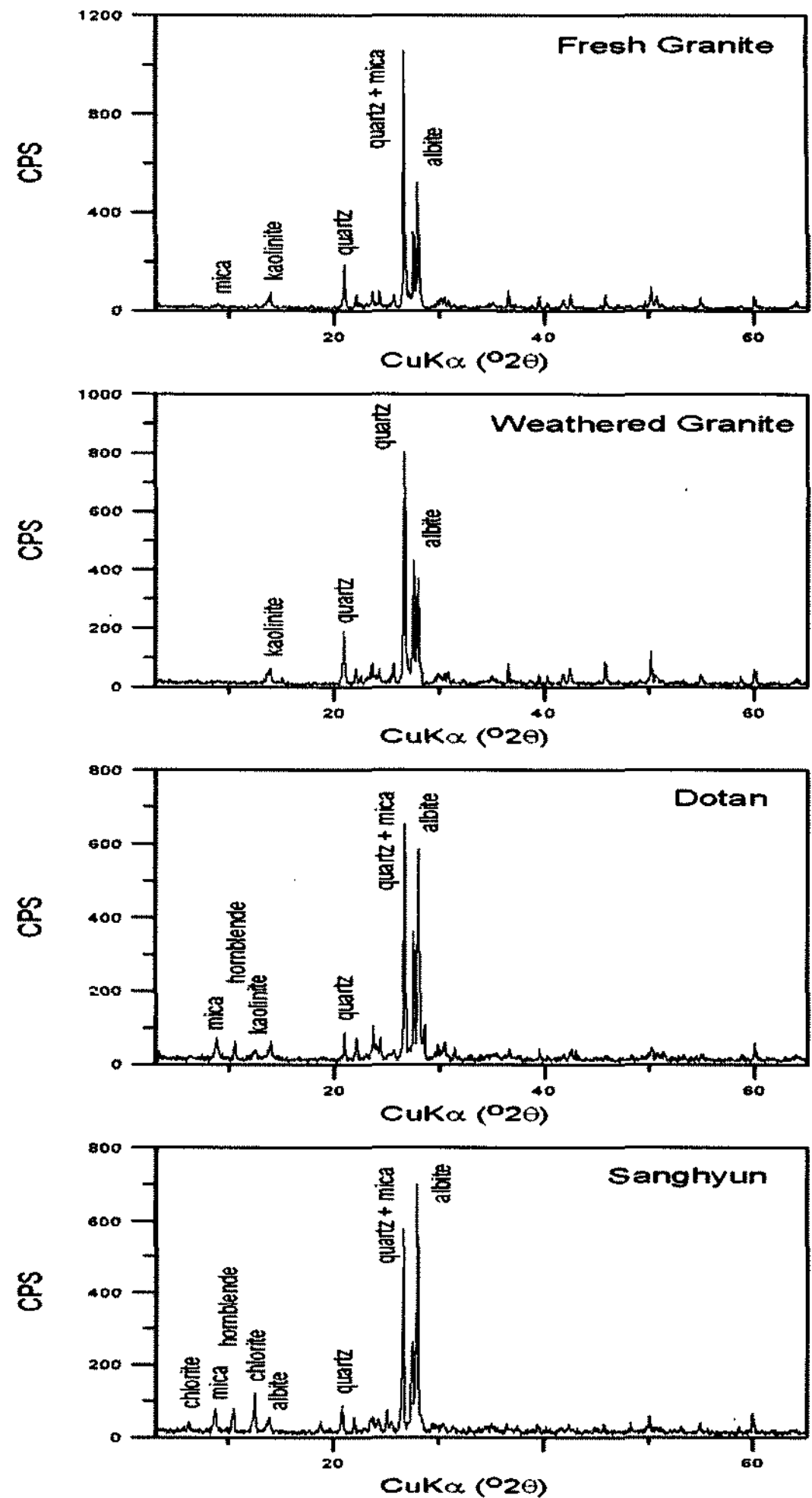


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of bulk rock samples indicating abundant quartz and albite, with trace hydrous minerals.

의 동일한 것으로 볼 수 있다. 카올리나이트의 경우 그 함량은 거의 무시할 만한 수준이다. 운모의 결정도는 105~110 m 구간의 암석에 비하여 높은 편이다.

130~150 m 구간의 암석에서는 석영, 알바이트 장석의 함량이 가장 높다. 알바이트 장석의 경우 105~110 m 구간의 암석에 비하여 그 함량이 조금 높다. 운모와 카올리나이트와 같은 미량광물의 함량과 조성비는 거의 동일한 것으로 볼 수 있다. 카올리나이트의 경우 그 함량은 거의 무시할 만한 수준이다. 운모의 결정도는 105~110 m 구간의 암석에 비하여 높은 편이다. 시추코아 암석에서는 심도에 따른 광물조성은 거의 동일한 것으로 볼 수 있다.

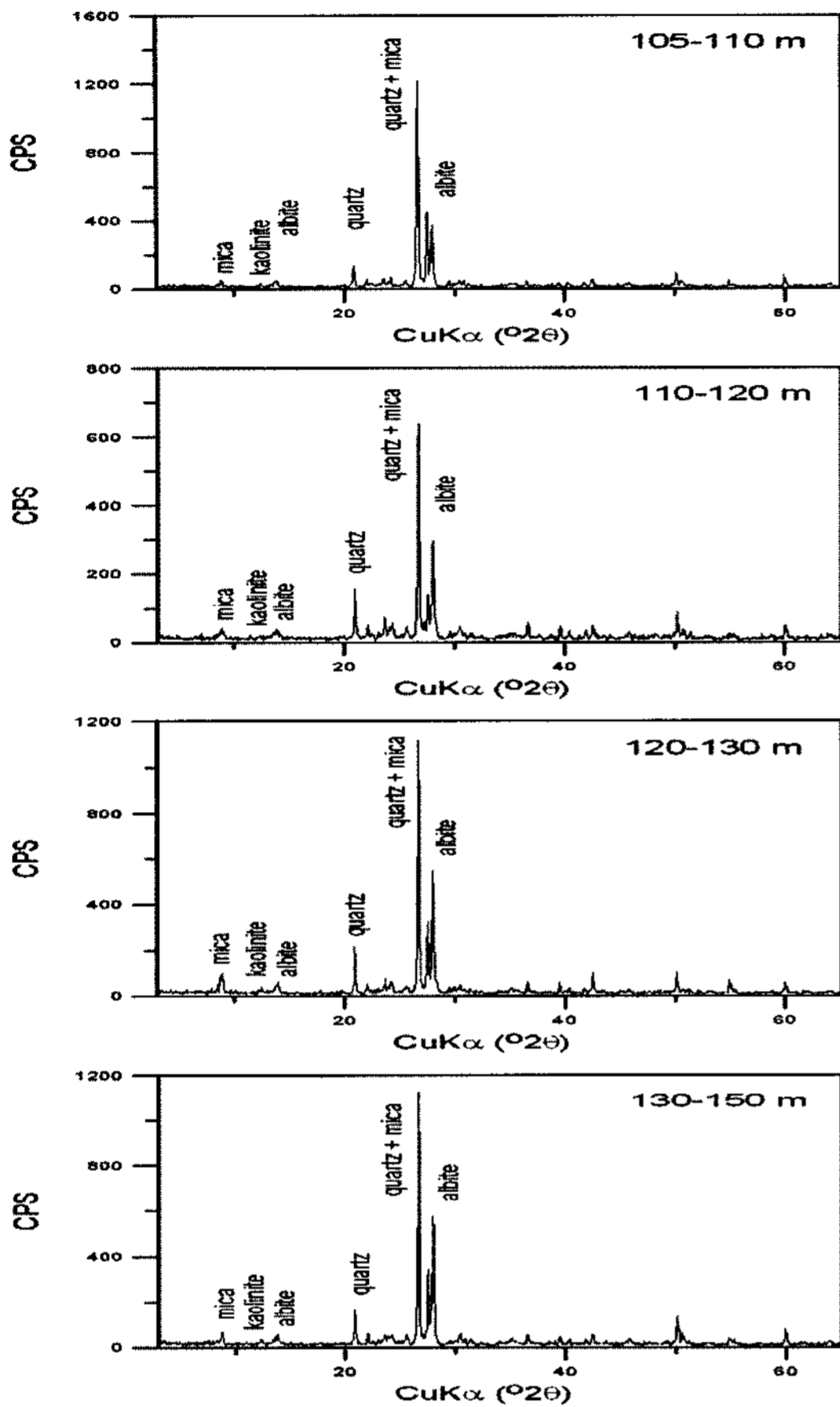


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of core samples indicating abundant quartz and albite, with trace hydrous minerals.

상현과 도탄의 경우 석영과 알바이트 장석의 함량이 가장 높고, 그 외에 각섬석, 녹니석, 운모류 순으로 나타난다. 그러나 양자간에는 광물조성과 함량은 조금 차이가 있는 것으로 볼 수 있다. 도탄의 경우 석영과 장석의 함량비는 거의 비슷하며, 그 외 수반광물은 운모, hornblende, 카올리나이트이다.

운모의 결정도는 비교적 좁은 것으로 보아 풍화작용을 거의 받지 않은 것으로 볼 수 있다. 상현의 경우 알바이트가 가장 풍부한 광물로서 그 함량비는 석영보다 더 높다. 그 외 수반광물로는 녹니석, hornblende 및 운모이다. 운모는 결정도가 비교적 높게 나타나며, 녹니석은 $d(001)$ 에 비하여 $d(002)$ 회절선의 강도가 강한 것으로 볼 때, 철의 함량이 높지 않은 녹니석 계열로 볼 수 있다. 지표암석의 경우 신선한 화강암과 풍화된 화강암은 거의 동일한 광물조성비를 보인다. 그러나 양자에서 카올리나이트에 비하여 운모의 회절선이 거의 소멸한 것

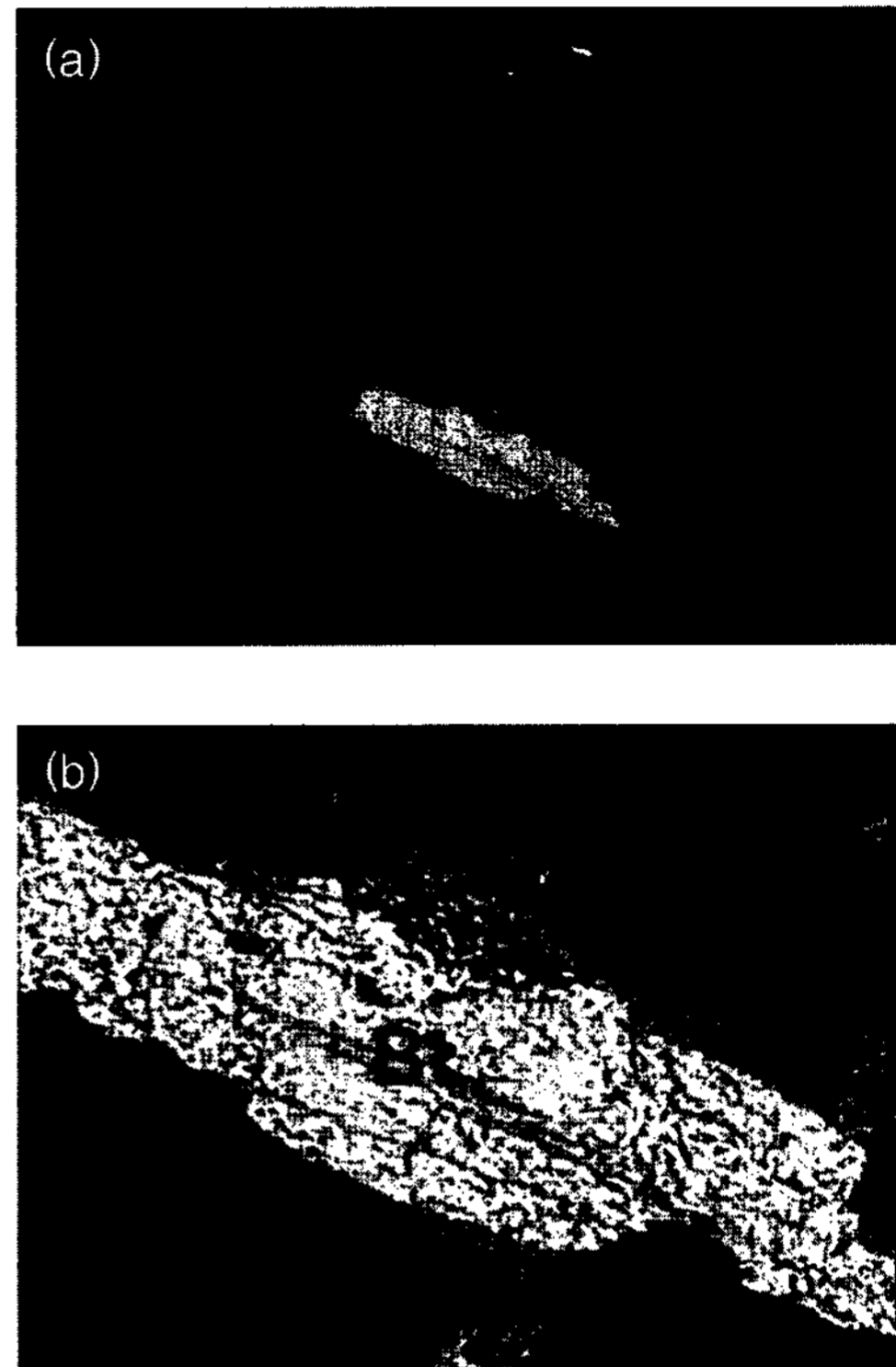


Fig. 6. Backscattered electron images of weathered granite(GW1-1). (a) Biotite (center), quartz and plagioclase(Pl) showing some Na-rich (dark grey) and K-rich (bright grey) lamella. (b) Enlarged image of (a). Biotite (Bt) intensively altered along flakes and margin. Magnification: (a) $\times 500$, (b) $\times 2000$, respectively.

으로 보아 지표암석은 어느 정도 풍화변질 작용을 받은 것으로 보인다.

물-암석반응에 의한 변질광물의 미세조직

Fig. 6은 풍화된 화강암(GW1-1)시료에 대한 전자현미경 후방산란 전자영상(BSE)자료이다. 흑운모는 석영과 장석사이에서 치밀하게 접촉하고 있으며, 결정의 가장자리는 경계가 다소 모호한 상태이다. 미사장석의 경우 Na로 구성된 부분과 K가 풍부한 부분은 lamella처럼 나타난다. 그러나 변질작용에 의하여 직선적인 띠는 아니고, 폭과 형태가 불규칙하게 일정한 방향으로 늘어선 배열을 보이고 있다. 흑운모의 경우 중앙부에는 벽개가 일정한 직선으로 보존되어 있으나, 그 외 부분에서는 벽개가 소멸되었고, 결정의 형태도 불규칙한 경계부를 보이고 있다. 이로 볼 때 장석과 흑운모는 심한 변질작용을 겪고 있음을 알 수 있다. 흑운모의 화학조성은 O 19.00, Mg 4.86, Al 14.14, Si 15.64, Mn 2.46, Fe 43.90 wt.%이다. 흑운모에

서 Fe는 Mg에 비하여 상당히 높은 수치를 보이고 있다.

Fig. 7은 풍화된 화강암(GW1-3)시료에 대한 BSE 영상분석을 수행한 자료이다. 흑운모는 결정내부의 벽개가 완전히 소멸한 상태이며, 결정의 가장자리의 경계부도 거칠게 나타나 있다. 이는 GW1-1 시료보다 풍화변질작용을 더 심하게 받았던 것으로 볼 수 있다. 흑운모와 접하고 있는 사장석에도 결정의 내부가 균질한 화학조성으로 구성된 영역을 볼 수 없다. 즉 결정내부는 Na, Ca, K가 풍부한 부분이 불규칙적으로 분포하거나 점토 광물과 같은 이차적 기원에 의한 광물이 들어 있다. 또한 장석류 내부의 일부 지점에서는 철산화물이 불규칙한 결정의 형태로 포획되어 있다. 이는 이차적 기원으로 형성된 것임을 지시한다.

흑운모의 화학조성은 O 22.77, Mg 3.73, Al 11.64, Si 29.02, Fe 32.84 wt.%이다. 이 흑운모에서 Fe는 Mg에 비하여 약 10배 정도의 상당히 높은 수치를 보이고

있으며, 그 외 Si, Al 이 함유된다. 이 흑운모는 시료 GW1-1에 비하여 Si의 함량이 높고, Al의 함량은 낮으며, Mn은 함유되지 않는 것이 특징이다. Fig. 8은 풍화된 화강암(GW3-1)시료에 대한 BSE 영상분석을 수행한 자료이다. GW1-3에서처럼 흑운모는 결정내부의 벽개가 완전히 소멸한 상태이며, 결정의 가장자리의 경계부는 상당히 거칠게 나타나 있으며, 장석류와 경계부가 불분명한 부분도 있다. 이는 GW1-1나 GW1-3의 경우보다 풍화변질작용을 더 심하게 받았던 것으로 볼 수 있다. 흑운모의 화학조성은 O 20.82, Mg 6.31, Al 15.39, Si 17.52, Fe 39.96 wt.%인데, 흑운모는 Fe와 Mg의 비가 약 7 배 정도로서 철이 상당량 함유된 것임을 보여준다. 그 외 Si, Al이 함유되는데, GW1-3에 비하여 Si의 함량은 낮고 Al의 함량은 더 높다. 한편 흑운모와 인접하는 장석의 경우 전술한 바와 같은 뚜렷한 twin이나 lamella는 보이지 않는다. 장석의 EDS 분석결과에 따르

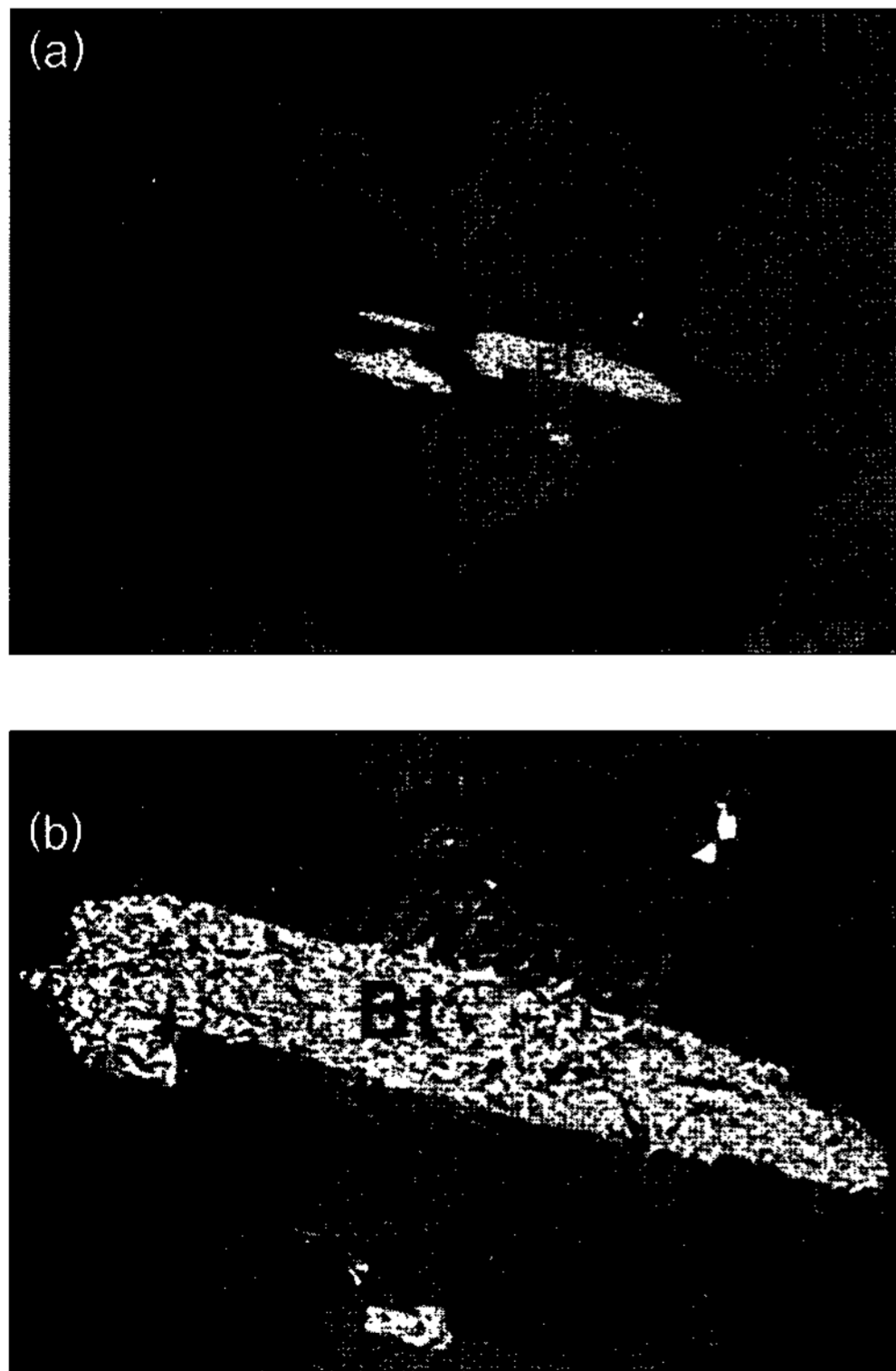


Fig. 7. Backscattered electron images of weathered granite (GW1-3). (a) Biotite (Bt), quartz (Q), and plagioclase (Pl) showing some Na-rich(dark grey) and K-rich (bright grey) lamella. (b) Enlarged image of (a). Biotite(Bt) intensively altered along flakes and margin. Brightest mineral(upper right) is Fe-oxide. Magnification: (a) $\times 500$, (b) $\times 2000$, respectively.

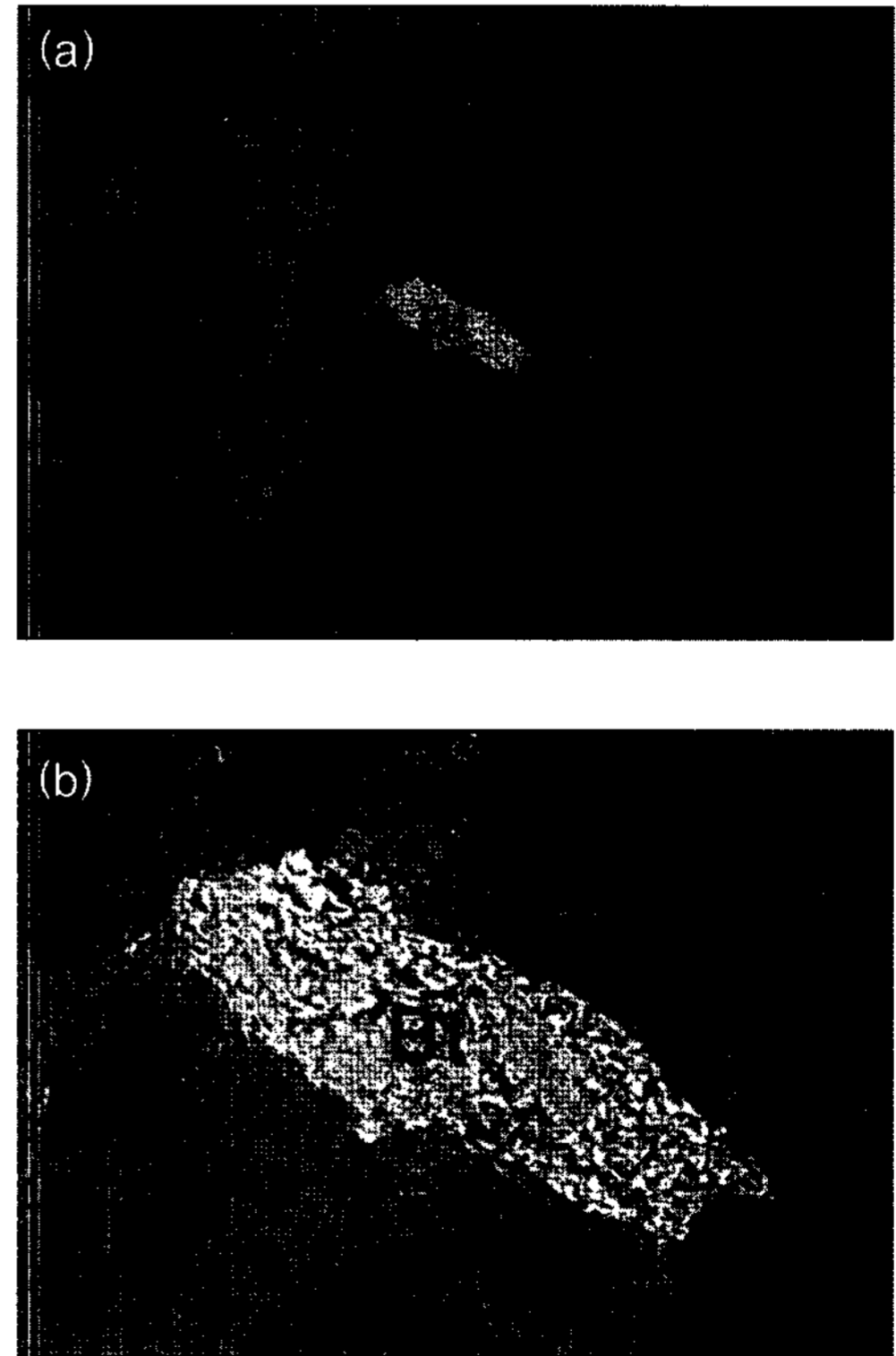


Fig. 8. Backscattered electron images of weathered granite (GW3-1). (a) Biotite(Bt), quartz(Q), and plagioclase (Pl) showing some Na-rich(dark grey) and K-rich (bright grey) lamella. (b) Enlarged image of (a). Biotite(Bt) intensively altered along flakes and margin. Magnification: (a) $\times 500$, (b) $\times 2000$, respectively.

면 이는 알바이트 장석에 해당한다. 이 장석에는 K가 미량으로 함유되거나 화학조성비로 볼 때 거의 무시할 만한 수준이다. Fig. 9는 비교적 신선한 화강암시료 GF3-1에서 관찰된 주요 광물들의 변질양상을 보여 준다. 흑운모는 벽개와 엇지 가장자리를 따라 변질되고 있음을 보여 준다. O 18.52, Al 25.37, Si 34.02, K 14.06, Fe 8.03 wt%이다. 이 경우 버미쿨라이트가 쉽게 형성될 수 있다.

흑운모는 풍화작용동안 버미쿨라이트, 흑운모-버미쿨라이트의 혼합층상구조 광물인 수화흑운모(hydrobiotite) 또는 카올리나이트로 변질된다. 흑운모의 용해반응은 Si의 방출에 의하여 제약을 받는데 결정의 가장자리 엇지는 비정질의 Si의 변질대를 발달시킨다(Nagy, 1995). 산성-약산성 조건에서는 이것의 용해경향은 백운모나 몬모리로나이트와 유사한 것으로 나타난다(Knauss and Wolery, 1989; Furrer et al., 1993). 그러나 백운모에 비하여 용해속도는 5배이상 빠르며 용해는 엇지로부터 안

쪽으로 진행되고, 이 엇지가 버미쿨라이트로 변질되는데 변질이 일어나면 흑운모의 용해반응은 점차 느려진다(Nagy, 1995). 흑운모 주변에는 K장석과 미사장석이 둘러싸고 있는데 정장석은 K로 구성되며 Na는 함유되지 않는다. 미사장석의 경우 Na와 K가 풍부한 부분으로 구분되나 lamella의 경계부는 직선적이지 못하고 일부는 모호한 곳도 있다. K가 풍부한 바탕에 Na로 된 조직을 보이며 풍화변질 작용에 의하여 영향을 받은 것으로 관찰된다. 흑운모와 인접하고 있는 K장석의 경우 내부에 철산화광물이 불규칙하게 분포하는데 이는 흑운모와 같은 함철광물의 변질작용에 의하여 분리되어 이차적으로 형성된 것이다. 이 K장석을 EDS로 분석한 결과 철이 상당량 함유되어 있다. 이는 철산화물이 K장석에 포획되거나 내부균열 부분에 침전된 것으로 보인다.

물-암석반응과 지하수내 불소 원인

본 연구지역 지하수에서 간헐적으로 불소의 함량이 높게 나타나는 현상은 물-암석반응에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 흑운모와 같이 수산기(OH)를 함유하는 광물내에 부분적으로 이를 치환하여 들어있는 불소이온이 물-암석 반응에 의하여 지하수로 용탈되어 나온 것으로 해석된다. 특히 흑운모의 경우 미량으로 암석내에 함유되지만 물-암석반응에 의하여 쉽게 변질, 용해되므로 본 연구지역의 지하수내 불소의 주공급원이 될 가능성이 가장 높다. 흑운모의 변질작용은 벽개를 따라 일어나거나, 결정의 가장자리 부분에서 가장 우세하게 일어난다. 그리고 심한 경우는 결정의 내부에서도 전반적으로 변질작용이 일어난다. 흑운모로부터 녹니석화가 일어나거나 버미쿨라이트로 변질되며, 철산화물도 부분적으로 형성된다. 이는 물-암석반응의 결과로 불소를 함유할 수 있는 주요 광물, 즉 흑운모가 변질되면서 불소를 지하수로 방출하는 것으로 보아야 한다.

일반적인 화강암질암에서의 형석의 함유량을 고려하면 대수층의 심부에서 높게 나타나는 F의 기원을 단순히 형석의 용해만으로 간주하기에는 무리가 있다고 판단된다. 그 보다는 수산기를 함유하는 주요 조암광물의 용해시에 불소가 용탈되는 것이 더 중요하다. 대부분의 경우, 물에서의 불소의 용해도는 형석의 용해도에 좌우되기 때문에 Ca와는 반비례하는 경향을 보이게 된다. 그러므로 Ca함량이 낮은 대수층이나 F를 함유하는 광물(예, 흑운모)이 혼한 곳의 지하수에서는 불소가 흔히 검출된다.

우리나라의 불소 고함량지하수의 경우 불소가 풍부한 화강암류 분포지역에서 잘 나타나며, 수질, 지하수의 연

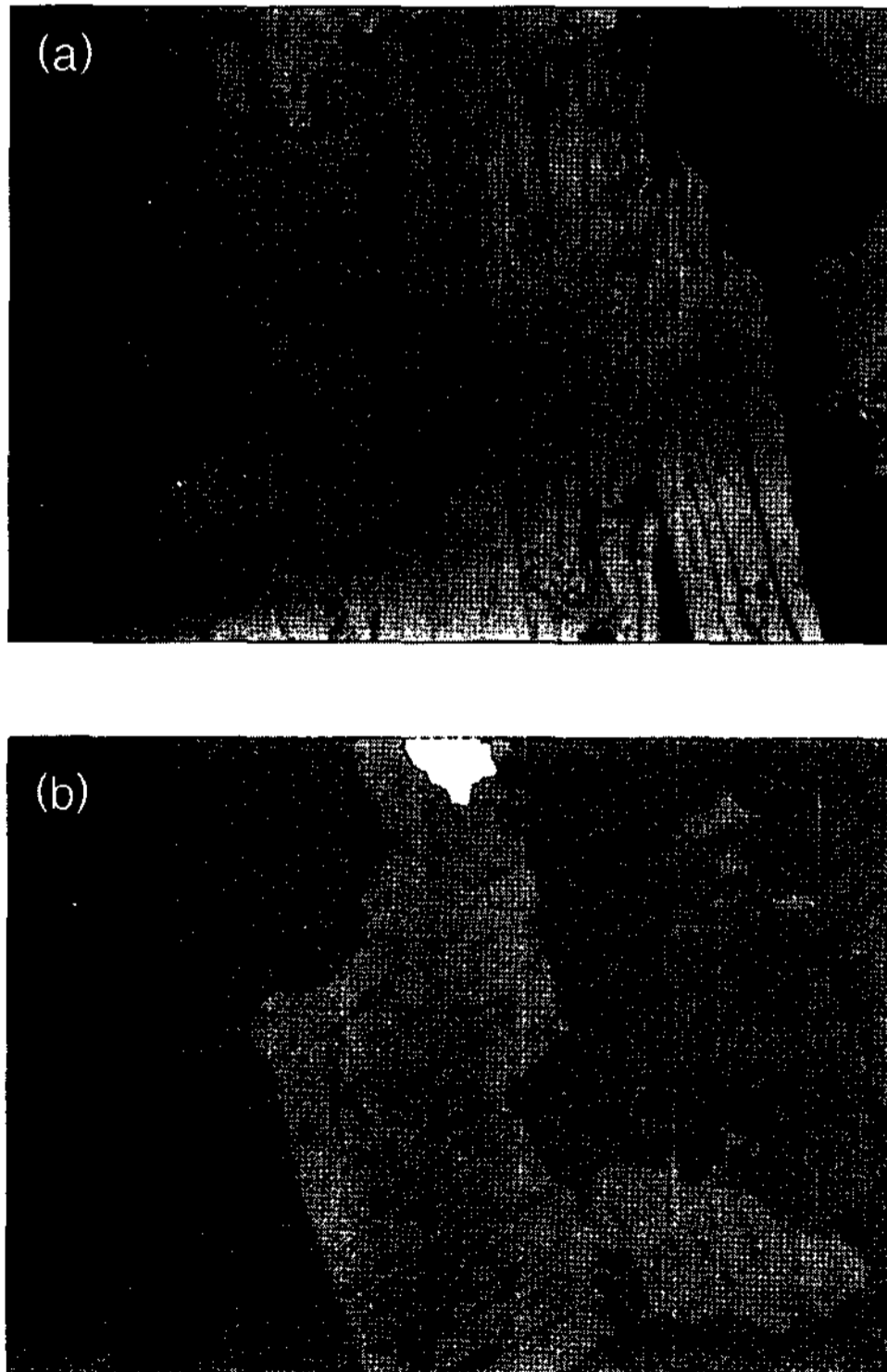


Fig. 9. Backscattered electron images of weathered granite (GF3-1). (a) Biotite(Bt) intensively altered along flakes. (b) Enlarged image of (a). K-feldspa(Ksp) showing Na-rich(dark grey) lamella in the K-rich(bright grey) host. Brightest mineral(central upper) is Fe-oxide. Magnification: (a) × 500, (b) × 2000, respectively.

령, 심도, 지질구조와도 연관된다(Kim and Jeong, 2005). 전국의 먹는샘물 지하수에서 불소는 평균 0.50 mg/l를 나타낸다(한국자원연구소, 2000; 조병욱 외, 2002). 이중 윤 외(1997)에 의하면 심부로 갈수록 함량이 높게 나타난다. 고기에 형성된 불소 고함유 지하수의 경우는 심부에서 순환하다가 단층면을 따라 상부로 유동하여 단층대를 따라 분포하게 된 것으로서 암석의 지화학적 특징, 지하수 연령, 공심도 및 지질구조가 중요한 요소로 나타난다(Kim and Jeong, 2005). 금산-완주지역의 지하수내 불소는 백악기 화강암 지역에서 특히 높게 나타나는데 화강암내 함불소 규산염광물의 용해에 의한 것과 관련된다(황 정, 2001).

화강암질암의 물-암석반응을 통한 용해실험에 따르면 pH7.6~8.6, EC750~1750 uS/cm, 높은 중탄산 농도 (350~450 mg/l) 조건에서 불소농도가 높게 나타나며(Saxena and Ahmed, 2001), 실제로 불소가 고함량인 지하수의 경우 대부분의 pH는 7.5~8.5 범위를 나타낸다(Saxena and Ahmed, 2003). 본 지하수의 pH범위도 대부분 중성 내지 약 알칼리성에 해당하므로 이와 유사한 범위가 된다.

불소 고함량 지하수의 경우 심부 대수층으로부터 유래하는데, 높은 중탄산, pH, 온도, 심부에서의 긴 체류 시간, 화산암 지대나 단층과 근접함도 관련된다(Carrillo-Rivera et al., 2002; Valenzuela-Vasquez et al., 2006). 특히 지하수중의 불소는 외부로부터 오염이 없는 경우라면 거의 지질학적인 요인에 기인하는데 화강암, 페그마타이트, 화강암질편마암, 규암 등과 같이 형석을 부수 광물로 수반하는 경우 이같은 암석이 물-암석반응을 통하여 풍화되면 불소가 지하수로 용출된다(Saxena and Ahmed, 2003). 따라서 지열류량이 높거나, 함수광물을 많이 함유하는 화강암지대의 중성 내지 약 알칼리성 지하수는 심도가 깊어짐에 따라 불소 함량이 증가하므로 지하수를 개발할 때는 이 점을 유의해야 할 필요가 있다.

결 론

경남 북서부 거창군, 합천군의 화강암 분포지역 지하수의 지구화학적 특징 및 불소의 원인을 물-암석반응의 관점에서 요약하면 다음과 같다. 불소함량과 pH는 대체로 서로 비례하는 경향을 보인다. 또한 공의 심도가 깊어질수록 불소함량도 대체로 증가한다. 그러나 pH와 공의 심도를 비교한 결과 이들은 예상과는 달리 일관성을 보이지 않는다. 본 지역 대수층의 수리지질학적 요소가 복잡하거나, 심도에 따른 물-암석반응의 경로에 일관성이 결

여되었기 때문인 것으로 보인다. 미세조직 관찰에 따르면 물-암석반응에 의하여 흑운모가 쉽게 변질되어 있으므로 본 연구지역의 지하수내 불소의 주공급원이 될 가능성이 가장 높다. 흑운모의 변질작용은 벽개를 따라 일어나거나, 결정의 가장자리 부분에서 가장 우세하게 일어난다.

사 사

이 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-2-3)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국립지질조사소, 1964, 한국지질도 거창도폭 1:250,000.
 국립지질조사소, 1964, 한국지질도 합천도폭 1:250,000.
 이중운, 전효택, 전용원, 1997, 국내 화강암질암 내 심부지하수의 지구화학적 특성, 지하수환경학회지 4, 199-211.
 조병욱, 이병대, 이인호, 추창오, 2002, 국내 먹는 샘물의 특정 수질 항목에 대한 고찰, 대한지질공학회지, 12, 395-404.
 한국자원연구소, 2000, 먹는샘물 관리시스템 구축연구(III), 환경부/한국자원연구소, 271p.
 황 정, 2001, 금산-완주지역 형석광화대내 석회암 및 화강암지역 지하수의 불소분포특성 및 저감방안, 자원환경지질, 34, 105-117.
 Abu Rukhahm Y. and Khaled, A., 2004, Geochemical assessment of groundwater contamination with special emphasis on fluoride concentration, North Jordan, *Chemie der Erde* 64, 171-181.
 Bank, D., Reimann, C., Royset, O., Skarphagen, H. and Saether, O. M., 1995, Natural concentrations of major and trace elements in some Norwegian bedrock groundwaters, *Appl. Geochem.*, 10, 1-16.
 Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., Edmundo, W. M., 2002, Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosi basin, Mexico, *Jour. Hydrology*, 261, 24-47.
 Chebotarev, I. I., 1955, Metamorphism of natural waters in the crust of weathering, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 8, 22-48.
 Furrer, G., Zysset, M. and Schindler, P. W., 1993, Weathering kinetics of montmorillonite: Investigations in batch and mixed-flow reactions. In: Manning, D. A. C., Hall, P. L., Hughes, C. R.(eds) *Geochemistry of Clay-Pore Fluid Interactions*. Chapman and Hall, London, 1439-1441.
 Kim, K. and Jeong, G. Y., 2005, Factors influencing natural occurrence of fluoride-rich groundwaters: a case study in the southeastern part of the Korean Peninsula, *Chemosphere*, 58, 1399-1408.
 Knauss, K. G. and Wolery, T. J., 1989, Muscovite dissolution kinetics as a function of pH and time at 70°C, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 1494-1502.

- Lisa, S. B., 1994, Factors influencing fluoride concentration in Norwegian lakes, *Water, Air, Soil Pollut.*, 77, 151-167.
- Nagy, K. L., 1995, Dissolution and precipitation kinetics of sheet silicates. In : A. F. White and S. L. Brantley (editors), *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. Reviews in Mineralogy*, 31, 173-233.
- Nordstrom, D. K., Ball, J. W., Donahoe., R. J. and Whittemore, D., 1989, Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 1727-1740.
- Saxena, V. X. and Ahmed, S., 2001, Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study, *Environ. Geology*, 40, 1084-1087.
- Saxena, V. X. and Ahmed, S., 2003, Inferring the chemical parameters for the dissolution of fluoride in groundwater, *Environ. Geology*, 43, 731-736.
- Subba Rao, N. and John Devadas, D. (2003) Fluoride incidence in groundwater in an area of Peninsular India, *Environ. Geology*, 45, 243-251.
- Stumm, W. and Morgan, J. J. 1996. *Aquatic Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1022p.
- Valenzuela-Vasquez, L., Ramirez-Hernandez, J., Reyes-Lopez, J. J., Sol-Urbe, A., Lazaro-Mancilla, O., 2006, The origin of fluoride in groundwater supply to Hermosillo city, Sonora, Mexico, *Environ. Geol.*, 51, 17-27.
- White, A. F. and Brantley, S. L., 1995, Chemical weathering rates of silicate minerals: An overview, In: A. F. White and S. L. Brantley (editors), *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals, Reviews in Mineralogy*, 31, 1-22.

2008년 2월 28일 원고접수, 2008년 3월 12일 게재승인

추창오

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388번지
Tel: 054-820-5182
Fax: 054-822-5467
E-mail: choocco@empal.com

김종태

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388번지
Tel: 054-820-5182
Fax: 054-822-5467
E-mail: jongtae98@empal.com

정일문

한국건설기술연구원 수문연구실
411-712 경기도 고양시 일산구 시민대로 1190
Tel: 031-910-0334
Fax: 031-910-0251
E-mail: imchung@kict.re.kr

김남원

한국건설기술연구원 수문연구실
411-712 경기도 고양시 일산구 시민대로 1190
Tel: 031-910-0256
Fax: 031-910-0251
E-mail: nwkim@kict.re.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388번지
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@andong.ac.kr