

청원지역 시추공 지하수의 수리화학 및 자연방사성물질 산출 특성

정찬호^{1*} · 김문수² · 이영준² · 한진석² · 장효근¹ · 조병욱³

¹대전대학교 지반방재공학과, ²국립환경과학원 토양지하수연구팀, ³한국지질자원연구원

Hydrochemistry and Occurrence of Natural Radioactive Materials within Borehole Groundwater in the Cheongwon Area

Chan Ho Jeong^{1*}, Moon Su Kim², Young Joon Lee², Jin Seok Han²,
Hyo Geun Jang¹, and Byung Uk Jo³

¹Dept. of Geotechnical Engineering, Daejeon University

²National Institute of Environmental Research

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

이 연구에서는 지하수내 존재하는 우라늄과 라돈-222와 같은 자연방사성물질 산출과 지화학적 상관관계를 알아보기 위하여 연구용 부지(충북 청원군 부용면 갈산리)에 120 m 심도로 시추하고, 심도별로 채취된 지하수의 화학적 특성과 시추코어의 암석화학적 특성을 분석하였다. 시추코어상 주요 암종은 흑운모편암과 흑운모화강암이며 일부 구간에서 반상화강암과 염기성암맥이 확인되었다. 더블패커 시스템으로 채취한 6개 구간에서 지하수의 pH는 5.66~8.34 범위를 보이고, 화학적 유형은 Ca-HCO₃ 형으로 속한다. 심도별 및 시기별로 수리화학적 특성 차이를 보인다. 지하수내 우라늄과 라돈-222의 함량은 최고 683 ppb와 7,600 pCi/L를 각각 보이며, 심도 50~70 m구간에서 가장 높은 값을 보인다. 암석 및 광물내 우라늄과 토륨의 함량은 각각 0.51~23.4 ppm과 0.89~62.6 ppm의 범위를 보이며, 흑운모편암에서 가장 많은 방사성포유물(radioactive inclusion)이 관찰되었고, 현미경관찰과 EPMA 분석결과 방사성원소를 함유하는 광물로는 흑운모내 함유된 소량광물인 모나자이트, 일메나이트로 확인되었다. 우라늄은 이들 광물의 주요 구성원소를 치환하여 존재하며, 일부 석영과 장석 입자내에도 우라늄의 산출이 확인되었다. 시추공 심도 -50~-70 m 구간 지하수에서 높은 방사성물질 함량을 보이는 것은 이 구간의 지하수의 화학적 특성, 즉, 약알칼리성의 pH와 산화환경이고, 중탄산의 함량이 높아 우라늄의 용존에 좋은 조건이 된 것으로 보인다. 지하수내 라돈가스의 함량은 우라늄 농도와 대체로 비례하므로 우라늄의 붕괴와 관련된 것으로 보이며, 라돈가스의 기원에 대한 하나의 해석방법으로 헬륨과 네온등 영축기체 동위원소비를 이용한 간접적인 추적방법을 적용할 필요가 있을 것이다.

주요어 : 우라늄, 라돈-222, 시추코어, 흑운모편암, 더블패커, 지하수

A test borehole was drilled in the Cheongwon area to investigate the relationship between geochemical environment and the natural occurrence of radioactive materials (uranium and Rn-222) in borehole groundwater. The borehole encountered mainly biotite schist and biotite granite, with minor porphyritic granite and basic dykes. Six groundwater samples were collected at different depths in the borehole using the double-packed system. The groundwater pH ranges from 5.66 to 8.34, and the chemical type of the groundwater is Ca-HCO₃. The contents of uranium and Rn-222 in the groundwater are 0.03-683 ppb and 1,290-7,600 pCi/L, respectively. The contents of uranium and thorium in the rocks within the borehole are 0.51-23.4 ppm and 0.89-62.6 ppm, respectively. Microscope observations of the rock core and analyses by electron probe microanalyzer (EPMA) show that most of the radioactive elements occur in the biotite schist, within accessory minerals such as monazite and limenite in biotite, and in feldspar and quartz. The high uranium content of groundwater at depths of -50 to -70 m is due to groundwater chemistry (weakly alkaline pH, an oxidizing environment, and high concentrations of bicarbonate). The origin of Rn-222 could be determined by analyzing noble gas isotopes (e.g., ³He/⁴He and ⁴He/²⁰Ne).

Key words : Uranium, Rn-222, Drilled core, Biotite gneiss, Double packer, Groundwater

*Corresponding author: chjeong@dju.kr

서 론

우라늄은 높은 이동성과 긴 반감기 때문에 지하수에 비교적 높게 검출되는 미량원소이다. 우라늄과 토륨은 주로 암석내의 부성분으로 함유되기 때문에 광석으로 이용될 만큼 함유도가 높은 것은 많지 않다. 전 세계 지하수내 우라늄의 평균적 농도는 0.1~10 µg/L 정도이다(성익환외, 1999).

국내 음용 지하수내 우라늄(uranium)과 라돈(radon)과 같은 자연방사성물질의 산출에 대해서는 한정희와 박계현(1996)에 의해 처음으로 보고되었다. 그 후 환경부 주관으로 1999~2002년에 걸쳐 전국지역 지하수에 대한 1차 실태조사가 수행되었고, 2006년에 2차 실태조사가 수행되어 지질별로 지하수내 우라늄, 라돈, 전알과 함량 등 자연방사성물질의 함유량과 특성을 분류하였다(성익환외, 1999; 2000; 2001; 2002; 조병욱외 2006). 그리고 2007~2016년에 걸쳐 지하수내 자연방사성 함량이 높은 지역을 중심으로 광역 및 정밀 자연방사성물질 산출과 기원에 대한 조사가 진행되고 있다(조병욱외 2008; 2009).

그 동안 조사결과 전국 다수 지역의 지하수(마을상수도, 간이급수시설, 민방위비상용급수시설)에서 미국의 먹는물 기준치(혹은 권고치)를 상회하는 우라늄과 라돈이 검출되었다. 자연상의 우라늄이 인체에 노출되는 경우는 주로 지하수를 통해 음용하는 경우이며, 우라늄은 전리방사선(ionizing radiation)에 의해 발암성과 돌연변이성 등의 유해성이 있다. 그러나 더 중요한 비발암성 악영향(화학적 독성)으로 신장질환을 유발한다는 것이다(CEPA, 2001; 신동천외, 2002). 라돈은 가스상으로 라듐-226의 붕괴산물로 Rn-222는 호흡을 통하여 인체에 흡수될 경우 폐암을 유발하는 방사성물질이다. 라돈가스는 토양과 대기뿐만 아니라 지하수내에도 존재한다.

이와 같이 지하수내 함유된 자연방사성물질에 대해서 근원적으로 대처하기 위해서는 방사성물질에 대한 정확한 기원에 대한 규명이 먼저 선행되어야 한다. 우라늄 광물은 구조와 화학조성이 다양하고 복잡하므로 지표 부근이나 수성환경에서 산출하는 경우에는 지구화학적 환경의 지시자로서 널리 활용되어져 왔다(Langmuir, 1997; Finch and Murakami, 1999; Murphy and Shock, 1999). 그러나 우라늄은 주로 암석내의 부성분으로 함유되기 때문에 광석으로 이용될 만큼 함유도가 높은 것은 많지 않다(박맹인과 김근수, 1998). 일반적인 광물들 중에서 약 5% 정도만이 결정구조적인 필수성분으로 우라늄을 함유하는 것으로 알려져 있다(Mandarino, 1999). 현재까지 우라늄을 함유하는 광물은 218종이지만, 국제광물학회

회(International Mineralogical Association, IMA)가 공인한 광물은 216종이다(Gaines et al., 1997). 우라늄 광물은 지하수중 방사성 물질의 일차적인 근원물질이므로 암석 내 방사성 원소를 함유하는 광물들의 존재형태와 광물학적 정보가 중요한 요소이다(추창오, 2002).

일반적으로 비광화대에서의 U, Th과 같은 자연방사성원소의 기원은 주로 화강암과 관련되며, 화강암중에서도 흑운모와 같은 운모류 광물에 주로 함유되어 있는 것으로 알려져 있다(추창오외, 2002). 그러나 정작 암석내 방사성원소를 함유하는 광물들이 어떠한 상태로 존재하는 가를 파악하는 것은 여전히 어려운 문제이다. 그 이유는 우라늄광화대 지역을 제외하면, 대부분의 암석에서 우라늄광물은 수 µm 크기의 미립질로 산출되거나, 부성분 광물에 극소량으로 포함되고, 화학조성이 복잡하고 매우 다양하기 때문이다(Burns and Finch, 1999). 따라서 광물내 함유된 방사성원소의 농도가 특이할 정도로 높지 않는 경우 지하수내 자연방사성 물질의 기원을 해석하기에 한계성을 가질 수 있다.

이번 연구의 목적은 지하수내 존재하는 자연방사성물질과 지구화학적 상관관계를 규명하기 위하여, 기존에 알려진 지하수중 자연방사성물질의 농도가 높았던 지역을 선정하여 시추지질조사와 시추코어의 암석화학적 특성 분석, 더블패커를 이용한 심도별 지하수의 자연방사성 물질 및 지화학적 성분 변화를 분석하였다. 그리고 이를 종합적으로 조명하여 자연방사성물질의 산출을 지배하는 주요 암석광물과 지하수의 화학적 상관성을 해석하였다.

이 연구를 위하여 충청북도 청원군 부용면 갈산리 12-2번지 지역을 연구대상 시추지역으로 선정하였다(Fig. 1). 시추지점에서 약 10 m 이격된 지점에 지하수를 개발하여 마을상수도로 사용하였으나, 환경부의 자연방사성물질 조사과정에서 우라늄과 Rn-222의 함량이 미국의 제안치인 30 ppb와 4,000 pCi/L를 각각 초과하여 지금은 지하수공이 되폐음되어 폐쇄된 상태이다.

연구방법

시추조사

연구용 시추공의 심도는 지표하 120 m이며, 시추구경은 Nx 규격이다. 시추공의 케이싱의 심도는 지하 3 m이며, 시추공 내 지하수위는 -2.8 m에서 확인되었다. 시추를 통하여 얻어진 시추코어는 구간별로 정리하여 수직적 지질특성 변화를 해석하기 위한 지질주상도를 작성하는데 이용하였고, 암석광물 분석을 위하여 이용되었다.

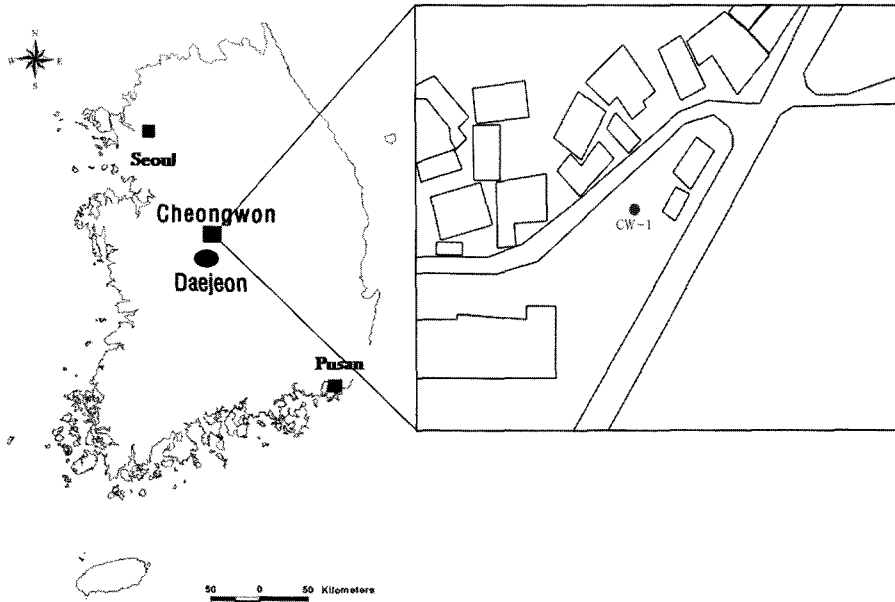


Fig. 1. Map showing the location of the borehole site (CW-1) in the Cheongwon area.

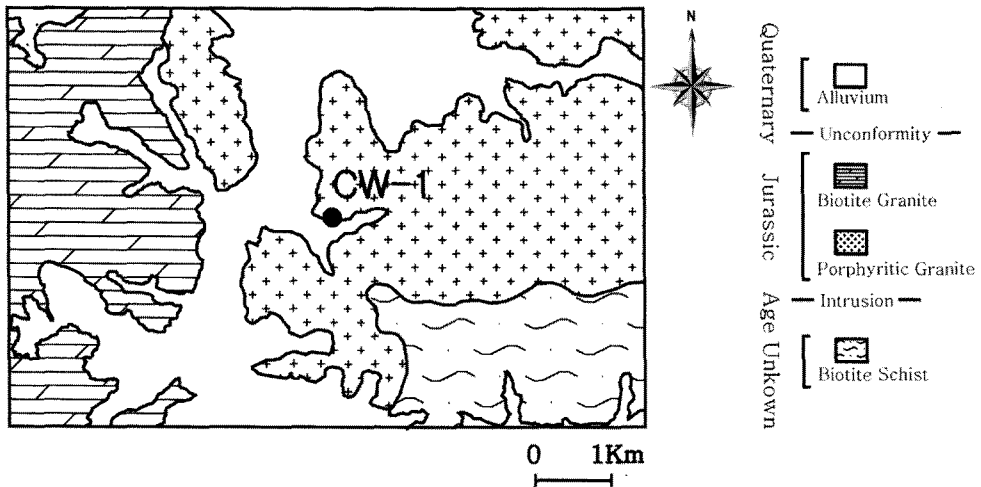


Fig. 2. Geological map of the study area, showing the location of the borehole (CW-1).

암석광물 화학분석

시추코어에 대한 암석 및 광물의 지화학 성분을 분석하기 위하여 암석종류별로 12개(GS-1, GS-2..., GS-11, GS-12)를 구간별로 채취하였다. 암석의 구성광물과 자연방사성원소의 함유특성을 알아보기 위하여 12개의 암석박편을 제작하여 암석현미경 관찰을 실시하였다. 박편관찰시 확인된 특정광물내 방사성원소의 존재를 파악하기 위하여 전자현미분석(EPMA)을 실시하였다. 전자현미분석에서는

주로 후방산란전자영상(back scattered electron image)관찰과 화학성분에 대한 정성 및 반정량분석은 에너지분산분광기(Energy dispersive spectrometer, EDS)을 이용하였다. 사용한 기기는 경북대학교 공동기기센터의 EPMA (Shimazu 1600 electron microprobe 모델)를 이용하였다.

암석시료의 주요원소 성분에 대한 정량 및 정성분석을 위하여 X-선 형광분석(X-ray fluorescence spectrometry, XRF)을 실시하였다. 그리고 우라늄과 토륨 등 우라늄계

열의 원소를 포함한 미량원소 분석을 위하여 기초과학 지원연구원 서울분원의 유도결합쌍플라즈마질량기(Fison model PQ III, ICP-MS)를 이용하였다.

지하수 시료채취 및 현장측정

시추공에서의 지하수 시료채취는 더블패커(double-packer)를 이용하여 심도별로 지하수를 채취하였다. 더블패커 시스템에 대한 모식도는 Fig. 3과 같다. 패커의 장착과 시료채취과정은 다음과 같다: 우선 두 개의 패커를 원하는 구간의 길이만큼 연결봉으로 연결한 후 시험구간까지는 상부 패커 위에 액셀파이프(15 mm)를 연결하여 패커를 장착하고, 물을 이용하여 20~25 kpa의 압력으로 패커를 팽창시켜 상하부 구간을 격리하였다. 격리된 구간의 지하수는 수중모터펌프(Grundfos co.)와 파워펌프(Waterra co.)를 이용하여 양수하였다.

지하수 시료채취는 지하 120 m 심도에서 시작하여 10 m 간격으로 상향하면서 채취되었다. 현장에서 양수를 통하여 지하수를 채취할 수 있는 대수층 구간은 6개 구간으로 확정되었다. 심도는 -110 m~120 m 구간(GS-GW1), -100 m~110 m 구간(GS-GW2), -60 m~70 m 구간(GS-GW6), -50 m~60 m 구간(GS-GW7), -40 m~50 m 구간(DJ-GW8), -10 m 이상 상부 구간(GS-GW9)이다.

지하수 시료 채취는 지하수공 구간별로 충분히 양수를 실시하여 시추 시 주입된 주입수의 영향을 제거한 후

가능한 대수층의 고유의 지하수를 채취하고자 하였다. 지하수 양수시에는 토출관을 통하여 흐르는 지하수를 일정시간 동안 지속하여 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 온도, 용존산소, 전기전도도를 외부의 공기와 접촉을 막기 위하여 제작한 Flow-cell에 지하수를 흘려 측정하였고 이들 값들이 안정된 후에 시료를 채취하고, 각각 항목의 현장수질측정 값을 확정하였다. 지하수의 pH는 Orion 5 star 모델의 휴대용 pH 측정기, Eh는 동종의 기기로 백금전극을 이용하여 측정하였다. 온도와 전기전도도는 Orion 5 star의 전기전도도 측정기와 용존산소 측정기로 각각 측정하였다. 지하수의 HCO₃⁻ 함량은 0.05N 농도의 HCl로 산중화적정법으로 구하였다.

채취된 물 시료는 화학분석을 위하여 간이 진공펌프를 이용하여 셀룰로즈 질산염막 필터 0.45 μm 여과지를 이용하여 부유물과 이물질을 제거한 후 양이온 및 미량원소 분석용 60 mL와 음이온 분석용 60 mL로 각각 구별하여 채취하였다. 양이온 분석용 시료에는 농질산을 첨가하여 pH 2이하로 산성화시켜 이온들의 침전이나 용기 벽에 흡착되는 것을 방지하고자 하였다. 채취된 물 시료는 분석 전까지 냉장 보관하였다. 라돈가스 분석을 위한 시료는 대기노출을 최소화하여 채취 후 즉시 액체섬광물질을 첨가하여 분석전까지 냉장 보관을 유지하였다.

화학성분 및 라돈 분석

물 시료의 양이온(Ca, Mg, K, Na, Si)과 미량원소(Fe, Mn, Sr)성분은 원자흡광분광분석기(Unicam model 989, AAS), 유도결합쌍 플라즈마 원자광출분광분석기(Shimadzu model ICPs-1000 III, ICP-AES), 유도결합쌍 플라즈마 질량분석기(Fison model PQ III, ICP-MS) 등의 장비로 분석하였다. 양이온 성분 및 미량원소는 기초과학 지원연구원에서 분석되었다. 그리고 음이온 성분인 SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, F⁻ 이온은 한국원자력연구소에서 이온 크로마토그래피(IC, Dyonex 500)을 이용하여 분석하였다. 화학분석 자료의 정확성을 검토하기 위해서 분석된 총 양이온과 총 음이온 함량을 당량으로 환산하여 전하균형을 계산하였다.

라돈-222(²²²Rn)의 측정은 라돈의 반감기가 3.82일인 점을 고려하여 현장에서 채취 즉시 밀봉하고 최단시간내 분석이 이루어지도록 하였다. 채수시간과 측정의 시작 및 끝 시간을 정확히 기록하여 보정하여야 한다. 액체섬광계 측기용 20 mL 저농도 칼륨 유리병에 전처리를 거치지 않은 시료 5 mL와 섬광액(Hisafe III) 15 mL를 혼합하여 액체섬광계측기로 측정하였다. 라돈-222 분석은 기초과학지원연구원 대전본원에서 이루어졌다.

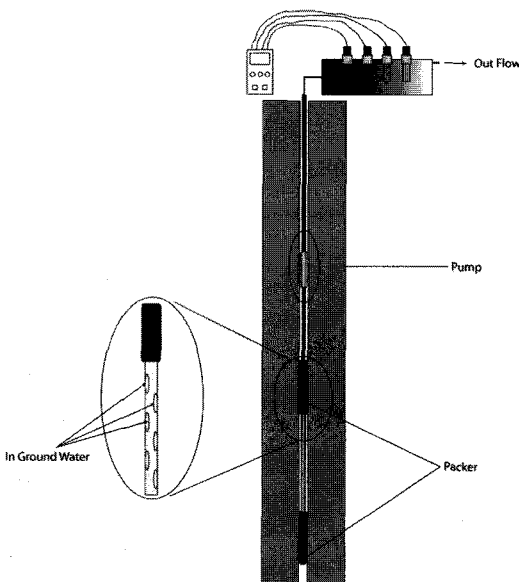


Fig. 3. Schematic diagram of the double-packer system installed in the borehole.

시추코어의 지질 및 암석화학

연구지역 일대의 지질은 청주도폭 (권영일과 진명식, 1974)을 참조하면 시대미상의 흑운모편암이 분포하며, 이를 주라기 반상화강암, 흑운모화강암이 차례대로 관입한다. 시추지점의 지질은 기존 지질도상 반상화강암에 해당된다.

지질주상도

시추코어의 암석특성, 단일충전광물 특성, 파쇄대 및 절리발달의 특성, 코어회수율 등을 포함하는 정밀한 주상도를 작성하였다(Fig. 4). 시추공의 수직적 지질특성을 보면 지표에서 -0.8m까지 전담토, -0.8~1.7m 구간은 모래질 점토의 퇴적으로 구성되며, -1.7~3.0m 구간은 호박돌을 함유한 실트질 모래의 봉적층으로 구성된다.

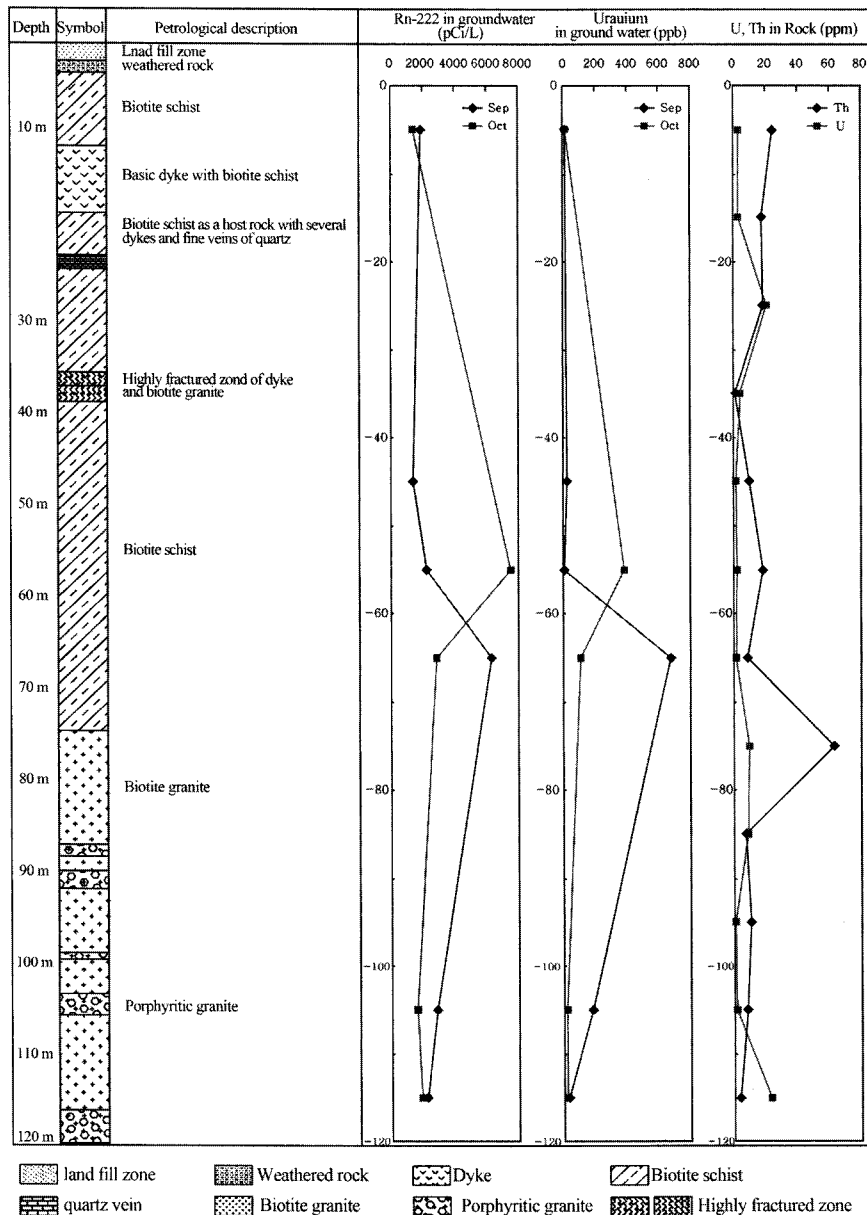


Fig. 4. Geological column of the borehole, showing the depth distribution of radioactive material in groundwater and rock samples.

-3.0~75.31 m 구간의 주요 암석은 흑운모 편암으로 이루어져 있으며, 부분적으로 반상화강암, 암회색의 세립질 염기성 암맥과 석영맥이 관입되어 있다. -75.31~120 m 구간은 흑운모 화강암이 주된 암석이며, 반상 화강암이 5개 구간에서 흑운모 화강암과 반복적으로 나타난다. 그리고 단열충진광물로는 주로 탄산염광물과 석영맥이 충전되어 있으며, 일부에서는 점토질 물질이 확인되었다.

기존 지질도상에서는 시추지점은 반상화강암으로 표기되었지만, 시추코어에 의해 확인된 주요 암종은 흑운모편암과 흑운모화강암이다. 기존 지질도상 흑운모편암은 시추지역에서 남동편으로 약 1 km 이상 떨어진 지역에 반상화강암과 경계를 이루고 있고, 흑운모화강암은 시추지점 동편에 분포하는 것으로 표식되어 있다. 흑운모편암이 화강암내 부분적으로 포획된 것인지, 아니면 지질경계가 시추지점 영역까지 수정되어야 할지에 대한 여부는 이 일대가 모두 총적층이라 확인할 수 있는 노두가 없어 현재로서는 정확하게 단정할 수 없다.

파쇄대 발달 구간의 코어회수율(RQD)은 47-86% 정도로 낮고, -3~4 m, -55.52~56.11 m 구간에서는 파쇄대의 발달로 코어회수율(RQD)이 47%의 낮은 값을 보인다. 그 외 구간에서는 RQD값이 96~100% 정도로 매우 견고한 암질상태를 보인다. 이상의 시추코어에 대한 정밀 주상도 자료는 지하수 시료채취 구간의 설정에 기준자료로 활용되었다.

화학성분

채취된 암석의 주요 화학성분에 대한 자료는 Table 1에 제시되어 있다. 암석의 주요 화학성분 분석은 흑운모 화강암, 흑운모 편암, 반상화강암과 같이 크게 3개 암종으로 구분하여 분석되었다. 반상화강암이 가장 높은 SiO₂ 함량을 보이고 73.9~82.7 wt.%를 보이고, 흑운모 화강암의 SiO₂ 함량은 71.6~72.6 wt.%를 보인다. 흑운모 편암은 60.6~77 wt.%를 보인다. 흑운모편암은 흑운모의 함량이 높아 Fe₂O₃, MgO, TiO₂ 성분에서 화강암보다 높은 함량을 보이고, Na₂O와 K₂O 성분은 화강암이 높은 함량을 보인다.

시추코어 암석에 대한 우라늄(U)과 토륨(Th)을 포함한 미량원소 분석결과는 Table 2에 정리되어 있다. 우라늄의 함량은 0.51~23.4 ppm의 범위를 보이고, 토륨은 0.89~62.6 ppm의 농도를 보인다. 우라늄과 토륨의 함량은 중금속(Cr, Ni, Cu, Zn, Co, Pb)과 희토류원소(REE)의 함량과 대체적으로 비례하는 특징을 보인다. Fig. 4는 심도별 암석 시료의 우라늄과 토륨의 함량 변화를 보여준다.

지하수의 수리화학 특성

현장 수질측정 자료

시추공 심도별로 채취된 6개 지하수 시료에 대해서는 현장에서 pH, 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존

Table 1. Major element compositions of rock samples from the borehole at the Cheongwon site. (unit : wt.%)

	GS-1	GS-2	GS-3	GS-4	GS-5	GS-6	GS-7	GS-8	GS-9	GS-10	GS-11	GS-12
SiO ₂	73.9	71.6	72.6	71.8	72.0	77.0	61.0	75.0	82.7	72.4	60.6	60.9
Al ₂ O ₃	14.2	14.9	14.3	14.7	14.2	9.00	17.6	10.3	10.0	14.2	17.9	17.8
Fe ₂ O ₃	0.67	2.03	1.83	1.88	1.31	4.37	7.09	4.84	0.45	0.62	7.00	7.25
CaO	0.78	1.84	1.38	1.77	1.46	2.90	3.21	2.63	1.50	1.00	3.76	2.11
Na ₂ O	3.51	4.16	3.74	4.03	4.09	0.24	1.99	1.23	4.29	3.84	2.83	1.62
MgO	0.10	0.41	0.33	0.36	0.27	2.64	3.61	2.55	0.13	0.19	3.54	3.78
K ₂ O	6.34	3.97	4.82	4.47	5.87	2.12	2.83	1.72	0.48	7.29	2.28	3.53
P ₂ O ₅	0.06	0.14	0.11	0.11	0.08	0.20	0.14	0.14	0.03	0.07	0.10	0.15
TiO ₂	0.05	0.35	0.33	0.32	0.23	0.55	0.78	0.58	0.05	0.05	0.76	0.81
MnO	0.00	0.20	0.02	0.02	0.02	0.05	0.07	0.05	0.03	0.01	0.08	0.08
L.O.I	0.32	0.60	0.52	0.52	0.55	0.89	1.63	0.97	0.32	0.34	1.18	2.03
Total	99.9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Rock type	porphyritic granite	biotite granite	biotite granite	biotite granite	biotite granite	biotite schist	biotite schist	biotite schist	porphyritic granite	biotite granite	biotite schist	biotite schist
Sampling depth (m)	-118.93	-108.06	-89.80	-81.05	-78.10	-63.44	-58.70	-44.52	-38.44	-37.90	-24.80	-8.67

Table 2. Trace element compositions of rock and mineral samples from the borehole at the Cheongwon site. (unit : ppm)

	GS-1	GS-2	GS-3	GS-4	GS-5	GS-6	GS-7	GS-8	GS-9	GS-10	GS-11	GS-12
Ba	322.1	831.6	1018	747.4	612.8	168.9	432.0	286.0	31.53	361.3	346.0	622.3
Cr	<1	<1	<1	<1	<1	30.3	68.4	31.8	<1	<1	63.2	68.1
Sr	174	199	274	285	245	78.4	202	168	77.2	104	301	157
Zn	33.7	51.3	40.0	41.7	29.0	56.9	106	58.6	6.01	8.78	97.1	104
Sc	<1	<1	<1	<1	1.31	6.56	14.9	8.94	<1	<1	16.7	16.8
V	2.23	14.6	11.9	12.5	12.8	45.7	102	56.2	1.77	1.38	99.4	103
Zr	11.4	142	59.4	11.0	48.1	28.3	44.3	16.5	5.03	47.6	91.3	39.8
Be	4.73	2.73	1.54	2.99	2.86	1.24	2.55	1.57	10.3	6.04	3.29	2.28
Co	0.40	2.00	2.16	1.95	1.27	12.9	18.3	10.0	0.40	1.93	17.4	18.9
Ni	<0.2	0.38	0.72	0.54	0.56	18.9	33.1	17.6	0.52	<0.2	30.8	34.5
Cu	19.4	1.77	2.16	2.04	1.19	153	2.90	1.25	0.31	8.23	2.85	23.1
Ga	39.8	65.7	76.6	63.6	56.9	19.9	46.8	29.0	20.1	40.7	43.0	60.8
Rb	240	134	178	165	225	113	159	82.5	15.1	214	117	203
Y	5.92	4.26	2.11	5.67	16.3	13.5	12.1	10.0	4.31	18.3	51.3	14.2
Nb	6.49	8.05	2.41	10.7	12.0	7.18	15.0	9.52	22.3	19.9	16.2	18.3
Cs	4.97	3.03	3.70	3.97	3.23	6.92	8.34	3.39	0.28	3.46	7.96	8.43
La	3.37	17.7	22.1	10.9	64.8	20.8	36.8	21.9	1.63	14.2	35.8	50.1
Ce	6.75	38.3	50.0	21.8	148	43.5	75.1	44.9	3.14	30.2	72.6	112
Pr	0.82	3.93	4.99	2.39	16.3	5.26	9.09	5.41	0.35	3.61	8.79	12.3
Nd	4.21	21.8	26.4	13.9	84.8	27.8	47.5	28.8	1.81	18.4	46.1	64.6
Sm	1.00	2.62	2.92	1.90	11.8	3.92	6.34	3.95	0.40	3.37	6.39	8.60
Eu	0.44	0.53	0.46	0.67	1.09	0.69	1.67	0.91	0.17	0.41	1.74	1.70
Gd	1.00	2.32	2.38	1.71	10.9	4.32	6.60	4.15	0.48	3.54	7.37	8.85
Tb	0.17	0.22	0.20	0.21	1.12	0.54	0.75	0.49	0.10	0.57	1.09	0.97
Dy	0.99	0.87	0.61	1.02	4.14	2.64	3.10	2.17	0.65	3.07	7.36	3.70
Ho	0.16	0.12	0.07	0.17	0.55	0.47	0.45	0.35	0.11	0.53	1.76	0.52
Er	0.48	0.38	0.22	0.50	1.45	1.31	1.14	0.96	0.33	1.49	6.19	1.33
Tm	0.07	0.04	0.01	0.06	0.13	0.15	0.11	0.11	0.06	0.20	0.99	0.14
Yb	0.55	0.35	0.14	0.49	0.89	1.11	0.85	0.82	0.54	1.51	8.50	1.05
Yb	0.55	0.35	0.14	0.49	0.89	1.11	0.85	0.82	0.54	1.51	8.50	1.05
Lu	0.07	0.05	0.02	0.06	0.11	0.16	0.13	0.12	0.07	0.20	1.31	0.16
Hf	0.86	4.63	2.26	3.84	2.58	0.90	1.51	0.52	0.40	2.48	3.13	1.65
Pb	3.90	29.0	34.9	34.4	38.8	6.22	35.8	24.1	22.4	69.2	36.8	23.6
Bi	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.55	0.26	0.48	<0.2	<0.2	<0.2	0.22
Th	3.63	7.95	10.3	6.88	62.6	8.40	18.4	9.73	0.89	18.2	18.0	24.5
U	23.4	1.23	0.51	8.92	9.93	1.41	2.51	1.52	4.09	21.3	3.32	3.01

산소량(DO) 등을 측정하였으며 그 결과는 Table 3에 정리되었다. Fig. 5에서는 시추공 심도에 따른 지하수의

pH, Eh, EC, DO의 시기별 변화특성을 보여준다. 구간별 지하수 산출량은 2.2~10.3 m³/day 으로 구간에

Table 3. Chemical composition of groundwater samples according to depth in the borehole at the Cheongwon site. (unit: mg/L)

Sample ID	Depth (m)	Sampling Date	pH	Eh (mv)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻	E (%)	*Q (sec)
SG-GW1	110~120	08/09/10	7.07	148	571	3.9	3.68	26.4	72.0	15.9	0.1	262	27.4	28.0	0.02	17.8	4.15	22
		16/10/10	6.44	32.3	556	3.01	3.51	26.2	71.6	15.9	0.03	265	20.9	22.5	0.13	19.5	6.15	24
SG-GW2	100~110	08/09/10	7.18	49.7	59.4	0.88	2.31	27.9	84.6	12.8	0.14	305	25.0	25.4	0.56	14.1	2.38	73
		16/10/10	6.35	55.9	519	5.2	3.32	25.8	59.5	15.5	0.05	233	23.1	22.5	0.19	20.9	4.91	103
SG-GW6	60~70	08/09/10	8.34	-30.8	609	1.16	3.93	29.8	80.4	12.3	0.2	326	24.4	25.3	0.46	11.0	-1.2	43
		16/10/10	6.62	18.4	548	4.0	3.36	26.9	64.7	14.6	0.03	253	22.9	24.3	0.23	19.2	3.49	32
SG-GW7	50~60	08/09/10	8.28	45.6	561	4.78	4.79	27.0	70.1	16.6	0.7	256	27.3	28.2	0.34	17.0	4.84	43
		16/10/10	6.9	105	600	4.81	3.84	26.7	81.1	15.2	0.03	299	22.7	21.2	0.25	18.3	4.58	23
SG-GW8	40~50	08/09/10	7.31	71.4	500	7.35	4.01	26.4	54.7	16.5	0.27	207	27.5	28.0	0.17	18.4	5.67	108
SG-GW12	0~10	09/09/10	5.66	-20.8	481	1.13	3.58	27.2	45.5	16.9	0.06	192	27.5	28.3	0.16	19.5	4.41	57
		16/10/10	6.65	132	469	8.44	3.58	26.1	45.2	16.0	0.04	188	23.9	23.1	0.07	21.2	6.15	24

*pumping time(second) required to fill a bottle of 1 liter

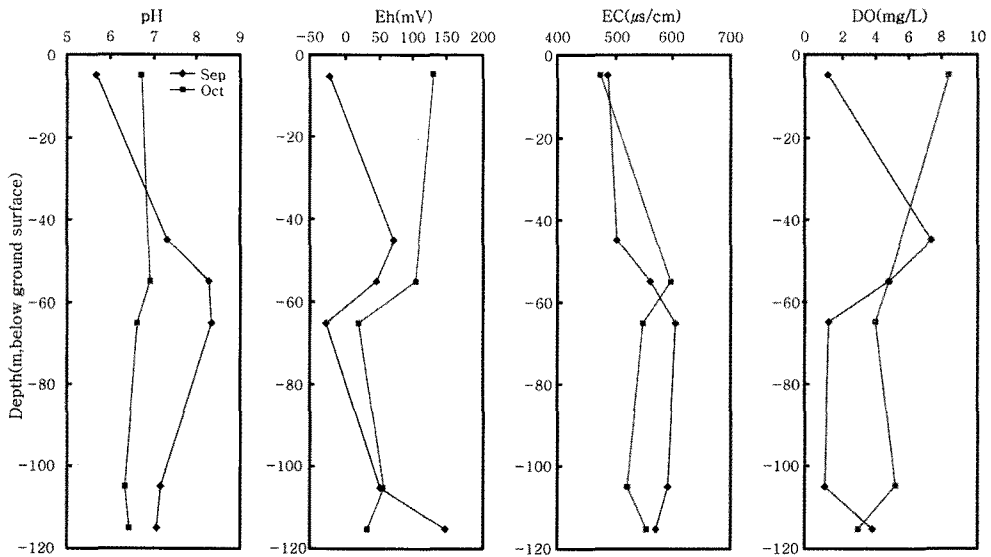


Fig. 5. Depth variations of pH, EC, Eh, and DO of groundwater samples from the borehole at the Cheongwon site.

따라 산출량에 차이를 보인다(Table 3). GS-GW1, GS-GW6, GS-GW7 구간에서 비교적 많은 지하수 산출량을 보이며, GS-GW-2, GS-GW-8 구간에서는 소량의 지하수 산출량을 보인다(Table 3). 따라서 상부구간을 제외한 주요 대수층 구간은 심도 -110~120m, 심도 -60~70m, 심도 -50~60m 구간이다.

2차례 현장수질 측정결과 지하수의 pH는 5.66~8.34의 범위를 보이며, 1차 시기에 심도별 지하수의 pH는 상부에서 하부로 향할수록 증가하다 다시 약간 감소하는 경

향을 보이며, pH 값에서 비교적 큰 폭의 변화를 보인다. 2차 시기에서는 심도별 pH의 변화가 크지 않다.

지하수의 산화-환원전위(Eh)는 -30.8~148mV의 범위를 보이며, 심도별, 시기별 차이를 보인다. Eh와 용존산소량은 지하 50-70m 구간에서 낮은 값을 보이며, pH값은 이 구간에서 가장 높은 값을 보인다.

지하수의 전기전도도는 481~609 μs/cm의 범위를 보인다. 전기전도도는 천부에서 중간 심도까지 증가하는 경향을 보이다가 하부로 향할수록 감소하는 경향을 보

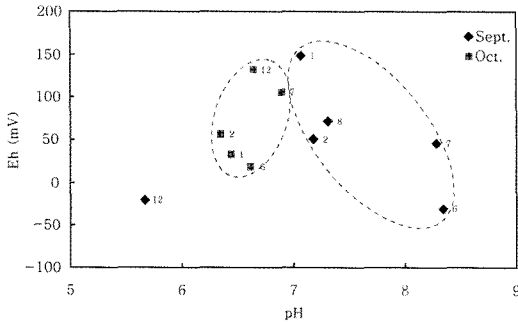


Fig. 6. Relationship between pH and Eh of groundwater samples from the borehole at the Cheongwon site.

Table 4. Depth variations of uranium and radon-222 contents in groundwater samples from the borehole at the Cheongwon site.

Sample ID	Depth (m)	Sampling Date (D/M/Y)	Rn-222 (pCi/L)	Uarium (ppb)
GS-GW1	110~120	08/09/10	2,100	23.0
		16/10/10	1,790	14.6
GS-GW2	100~110	08/09/10	2,840	178
		16/10/10	1,530	15.8
GS-GW6	60~70	08/09/10	6,310	683
		16/10/10	2,770	104
GS-GW7	50~60	08/09/10	2,100	0.03
		16/10/10	7,600	388
GS-GW8	40~50	08/09/10	1,300	18.4
		16/10/10	-	-
GS-GW12	5~10	09/09/10	1,710	6.54
		16/10/10	1,290	9.10

이다. 지하수의 용존산소량은 0.88~8.44 mg/L의 범위를 보인다. GS-GW12 시료를 제외한 지하수의 용존산소량은 하루로 향할수록 대체적으로 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 6은 지하수의 pH-Eh 상관관계를 보여준다. pH-Eh 상관관계는 1차 시기의 GS-GW12 시료를 제외하고는 1차 시료는 pH가 증가할수록 Eh는 감소하는 경향을 보인다. 그러나 2차 지하수 시료에서는 1차 지하수에 비해 pH가 대부분 약산성화 되어 있고, pH와 Eh값은 대략적으로 정의 상관관계를 보인다. 현장수질 측정 자료를 종합적으로 볼 때 1차 시기의 지하수는 심도별 수질차이를 어느 정도 반영을 하지만 2차 시기에는 상당히 균질화된 특성을 보인다. 이러한 수질변화의 원인은 시추에 의한 대수층의 교란의 영향으로 보인다. 그러나 수질특성에 대한 강수의

영향과 대수층 고유의 수질특성 반영여부 등 다른 요인도 배제할 수 없으므로 향후 지속적인 심도별 지하수의 수질 모니터링이 필요할 것으로 보인다.

화학성분

지하수의 주요화학성분에 대한 자료는 Table 4에 정리되어 있다. 지하수 심도별 및 시료채취 시기별 지하수내 주요이온 함량변화는 Fig. 7과 같다. 지하수내 주요 양이온성분에 대한 함량특성을 보면 가장 풍부한 양이온인 Ca²⁺ 성분은 45.2~84.6 mg/L의 범위를 보이고, Mg²⁺ 성분은 12.3~16.9 mg/L의 농도 범위를 보인다. Na⁺ 성분은 25.8~29.8 mg/L의 범위를 보이고, K⁺ 성분은 2.31~4.79 mg/L의 농도 범위를 보인다. Ca²⁺ 성분은 지하수의 심도가 깊어질수록 약간 증가하는 경향을 보이고, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ 성분은 별다른 변화를 보이지 않는다. 시료채취 시기에 따른 농도변화를 보면 K⁺와 Mg²⁺의 경우에는 차이를 보이지 않지만, Na⁺와 Ca²⁺의 경우 9월 시료보다 10월 지하수에서 다소 낮은 함량을 보인다.

지하수내 주요 음이온 성분인 HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, F⁻ 함량 특성은 다음과 같다. 가장 높은 농도를 보이는 HCO₃⁻는 188~326 mg/L의 농도 범위를 보인다. 심도별로 보면 상부에서 중간심도까지 증가하는 경향을 보이다가 -55 m 구간을 기준으로 하여 감소하는 경향을 보인다. 특별한 유기오염원이 없는 경우에 지하수내 HCO₃⁻는 탄산염 광물의 용해, 대기와 토양내 CO₂ 가스의 용해와 같은 자연적 반응으로부터 주로 기원한다(Appelo and Postma, 1996).

지하수내 Cl⁻ 농도는 20.9~27.5 mg/L 범위를 보이고, SO₄²⁻ 성분은 21.2~28.3 mg/L 범위의 함량을 보인다. 이들 성분은 심도별 시기별 약간의 차이를 보인다.

지하수내 F⁻ 성분은 0.02~0.56 mg/L의 범위를 보인다. 심도별로 보면 심도가 깊어질수록 F⁻ 함량은 약간 증가하다가 -105 m 구간을 지나면서 다시 감소하는 경향을 보인다. 일반적으로 화강암지역 지하수에서 F⁻기원은 주로 운모류의 OH⁻를 치환한 F⁻의 용탈 기인하는 것으로 알려져 있다(Apambire *et al.*, 1997). 연구지역의 모암은 흑운모화강암이고 대수층이 될 수 있는 염기성 암맥의 파쇄대에 흑운모가 풍부하므로 운모류의 OH⁻기를 치환한 F⁻ 성분의 용해가 주요 기원으로 해석된다.

대부분의 경우 NO₃⁻ 성분은 자연적 기원보다는 유기물의 부식, 생활하수나 분뇨 등 인위적 오염에 의해 기원한다(Appelo and Postma, 1996). 시추공 지하수내 NO₃⁻ 농도가 11.0~21.2 mg/L의 범위를 보인다. 현재

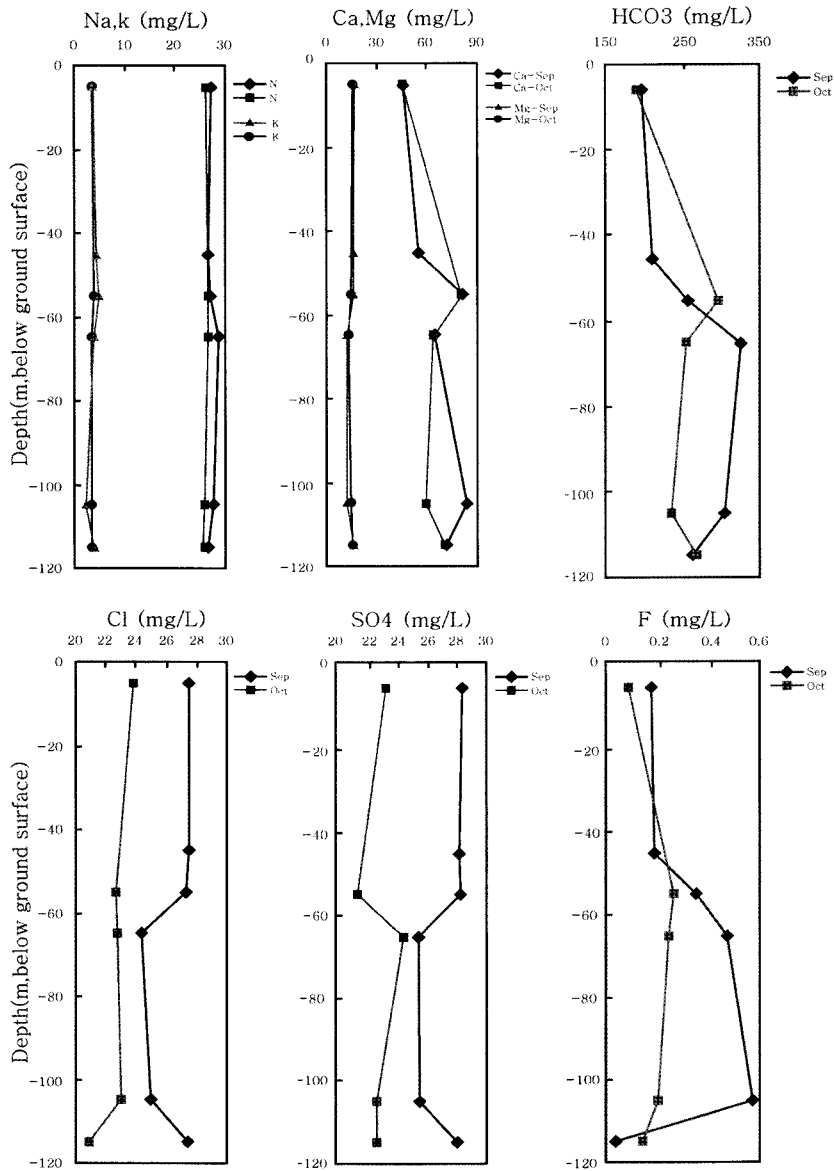


Fig. 7. Depth variations in the major element composition of groundwater in the borehole at the Cheongwon site.

농도는 음용수 기준치 이하이지만 주변지역의 농업 및 축산 활동으로 인한 수질오염 초기단계인 것으로 판단 된다.

수리화학적 유형

심도별 지하수의 수질을 파이퍼도(Piper, 1944)에 도시하면 모두 Ca-HCO₃의 유형에 도시된다(Fig. 8). 6개 심도별 지하수 시료 모두 유사한 지점에 도시되어 수리

화학적 유형상 뚜렷한 차이를 보여주지는 않는다. 아울러 시기별로도 큰 차이를 보여주지는 않는다. 일반적으로 화강암 및 화강편마암지역 지하수의 지화학적 진화과정은 진화초기에 중성내지는 약산성의 Ca-HCO₃ 유형에서 진화가 진행되면 Ca(Na)-HCO₃의 유형을 거쳐 진화의 마지막 단계에는 고알카리성의 Na-HCO₃ 유형으로 전이된다(정찬호외, 1997). 연구지역 시추공지하수는 대수층의 지질이 화강암류와 흑운모편암으로 구성되어 있지만, pH와 화

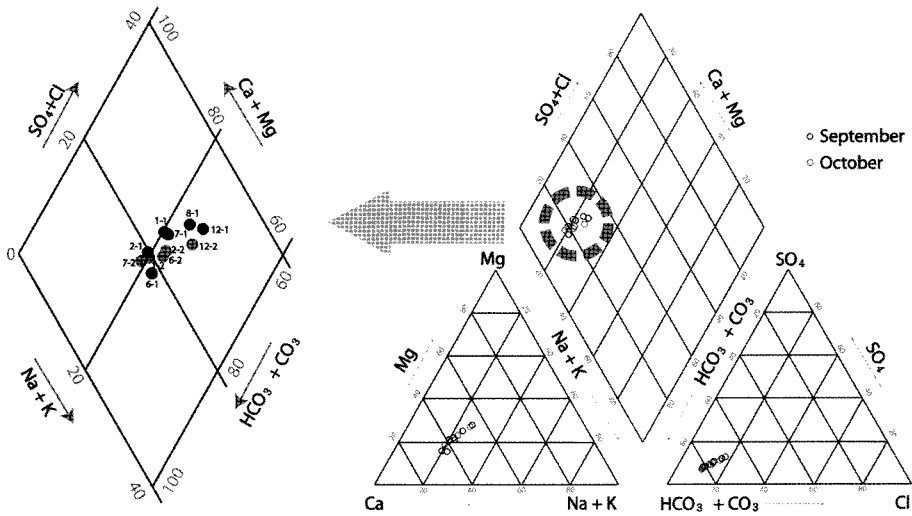


Fig. 8. Trilinear plot showing the chemical composition of groundwater samples from the borehole at the Cheongwon site.

학적 특성상 시추공 지하수는 지화학적 진화의 초기내지는 중기단계에 진입하는 것으로 보인다.

자연방사성물질

우라늄은 천연에 존재하는 원소중에서 가장 무거운 방사성 원소이다. 본 연구에서는 지하수내 우라늄의 화학적 독성의 측면에서 우라늄 성분을 분석하였다. 시추공 심도별 지하수내 우라늄의 농도는 0.03~683 ppb의 범위로 심도별 큰 차이를 보여준다. 특히 심도 -50m~60m, 심도 -60m~70m, 심도 -100m~110m 구간에서는 미국 EPA의 기준치 30 ppb를 크게 초과하고 있다(Table 4). 시기별로는 9월에 채취된 지하수 시료가 10월 채취한 시료보다 GS-GW7, GS-GW12를 제외하고 더 높은 값을 보이며, 채취시기별로 매우 큰 농도변화를 보인다. 특히 GS-GW7구간 지하수의 경우 9월 1차 시기 시료에서는 0.03 ppb에서 2차인 10월 시료에서는 388 ppb로 크게 증가하였으며, GS-GW6 지하수의 경우 683 ppb에서 104 ppb로 크게 감소하였고, GS-GW2 지하수 역시 178 ppb에서 15.8 ppb로 크게 감소하였다. 이와 같은 시기별 우라늄 농도의 큰 차이는 대수층의 교란과 같은 물리적 요인에 의한 것인지, 다른 화학적 요인에 대해서는 현재로서는 확실하지 않으며 향후 몇 차례 시료채취와 분석이 이루어져야 전반적인 경향을 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 우라늄의 함량이 높은 지하수는 라돈의 함량도 대체로 높는데 이는 라돈이 우라늄의 핵분열 생성물의 일종이기 때문이다. 연구지역 시추공 지하수내 라

돈 함량은 1,290~7,600 pCi/L가 검출되어, 미국 EPA의 AMCL인 4,000 pCi/L를 2개 구간(-50~60m, -60~70m)에서 초과하였다. Rn-222의 농도는 우라늄의 농도와 대체로 비례하는 특성을 보여 심도 및 시기별 뚜렷한 함량 변화를 보인다. 우라늄과 Rn-222의 함량 변화를 지질주상도와 암석내 우라늄 함량과 함께 Fig. 4에서 보여준다.

자연방사성물질의 산출특성

암석내 자연방사성물질들의 존재 상태를 알아보기 위하여 암석박편에 대한 편광현미경과 전자현미경 관찰을 실시하였다. 박편상 흑운모편암은 흑운모, 백운모, 석영, 장석이 주요 구성광물이며, 소량광물로 녹염석, 저어콘, 모나자이트, 금홍석 등이 존재한다. 암석내 우라늄 등 자연방사성물질의 존재는 방사성붕괴의 산물에 근거하여 확인할 수 있다. Fig. 9(a), (b), (c)와 (d)는 흑운모편암내 벽개가 잘 발달한 갈색 내지 흑갈색의 관상의 흑운모내 방사성포유물(radioactive inclusion)을 보여준다. 대부분의 방사성붕괴에 의한 방사성환(radioactive halo)은 흑운모내에서 주로 확인되며, 일부 석영입자에서도 확인된다(Fig. 9(e)와 (f)). 암석현미경으로 확인된 방사성포유물의 잔유물인 방사성 환의 개수는 박편당 흑운모화강암에서는 1개 이하로 확인되었지만, 흑운모편암의 경우는 1~27개가 확인되어 흑운모화강암보다는 흑운모편암이 더 많은 양의 방사성포유물을 함유하는 것을 확인할 수 있다. 방사성 환의 크기는 직경 0.025 mm 이하가 가장 많이 분포하며, 그 외

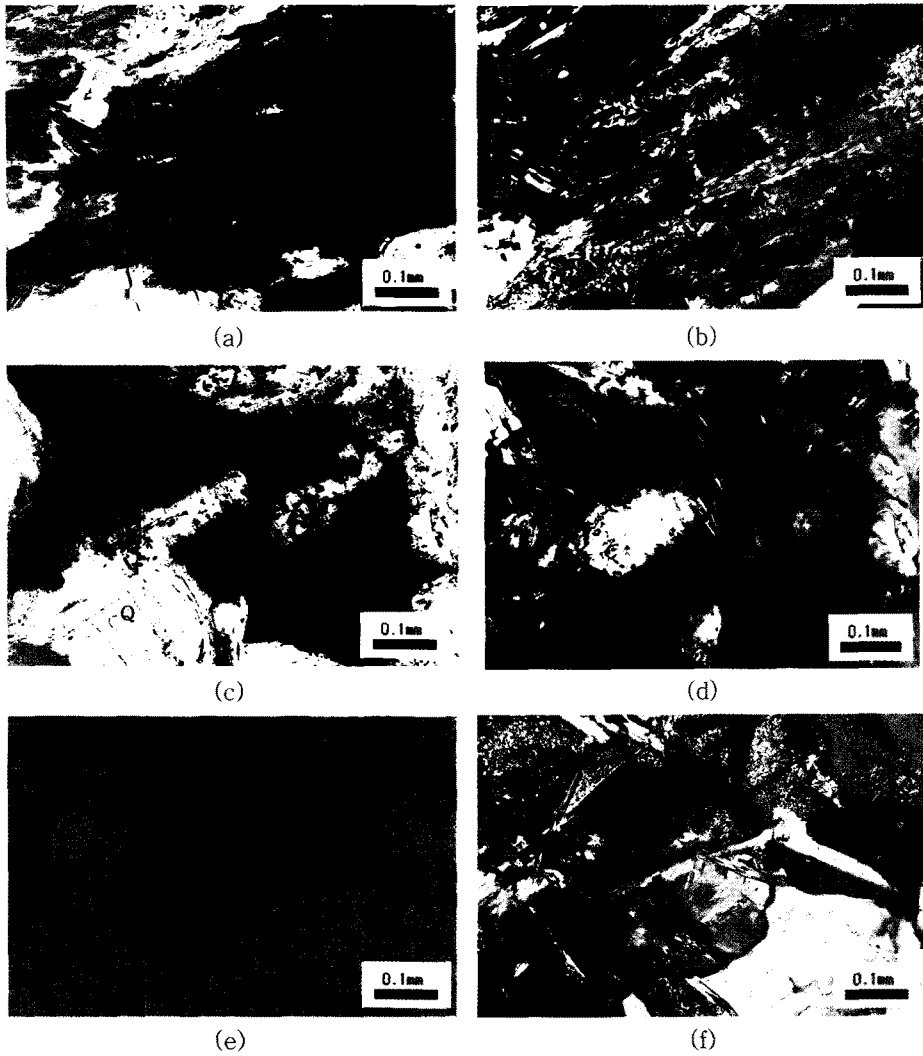


Fig. 9. Photomicrographs showing radioactive inclusions in biotite (a-d) and quartz (e-f) from biotite schist.

나머지 대부분이 0.025~0.05 mm 범위에 속한다.

광물내 방사성원소의 존재 상태를 보다 정확하게 알아보기 위하여 전자현미분석(EPMA)을 실시하였다. 편광현미경하에서 확인된 방사성광물을 중심으로 후방산란 전자영상(back scattered electron image, BSE)으로 방사성원소의 존재 상태를 명암으로 확인하고, 확인된 입자에 에너지분산분광기(energy dispersive spectrometer, EDS)의 전자빔을 주사하여 정성 및 반정량 분석을 실시하여 방사성원소 존재를 확인하였다. 암석내 방사성원소를 함유할 수 있는 광물로는 부수광물인 모나자이트(monazite), 녹염석(epidote), 인회석(apatite), 금홍석(rutile) 등이다.

Fig. 10(a)와 (b)는 흑운모 편암에 대한 BSE 이미지 사진으로 흑운모 입자내 모나자이트로 P, O, Ce, La 성분과 함께 소량의 U 성분이 EDS 피크로 확인되었다. Fig. 10(c)는 일메나이트(ilmenite)로 소량의 U를 함유하고 있으며, 일메나이트의 주요성분인 Ti, Fe, O 성분이 확인되었다. 현미경 관찰결과를 종합하면 확인된 우라늄 함유 광물로는 흑운모내 부수광물로 수반되는 모나자이트, 일메나이트 등이며, 우라늄은 이들 광물의 주요 구성원소인 Ce, La 원소 및 Fe, Ti 원소를 각각 치환하여 존재하는 것으로 보인다. 그리고 일부 석영과 장석 입자내에서도 우라늄 원소의 산출이 확인되었다.

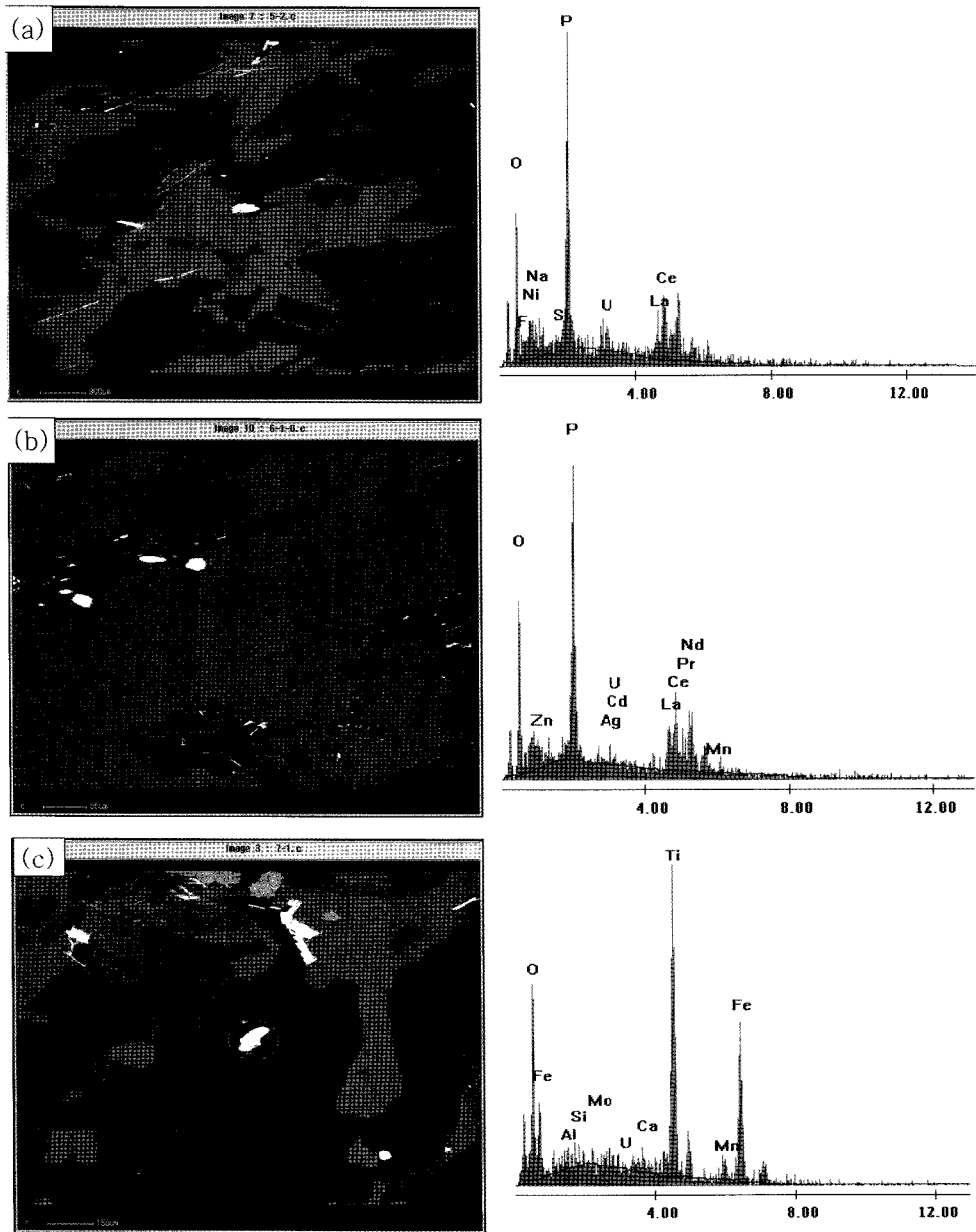


Fig. 10. Back scattered electron image (BSI) and energy dispersion spectrum (EDS) analysis of uranium in the accessory minerals monazite (a and b) and ilmenite (c) in biotite schist.

토 의

지하수내 우라늄의 산출에 대한 논의를 위해서 두 가지 관점에서 접근되어야 할 것으로 보인다. 먼저 대수층을 중심으로 한 암석내 우라늄의 존재 상태와 산출빈도 등에

대한 설명과 두 번째 우라늄원소의 용해와 이동을 지배하는 지하수의 지화학적 환경의 측면이다.

앞에서 설명된바와 같이 연구지역 시추코어 암석내 우라늄의 산출은 흑운모내 포획된 부수광물인 모나자이트와 일메나이트와 같은 광물내 주요 원소를 치환하여 소량

으로 존재하며, 일부 석영과 장석입자에서도 확인된다. 방사성포유물은 주로 흑운모편암을 구성하는 흑운모내에서 확인된다. 흑운모편암은 시추공지질도상 상부에서 지하심도 약 -75 m 지점까지 분포하는 암종으로 시추공지하수내 용존된 우라늄의 주요근원 암종으로 판단된다.

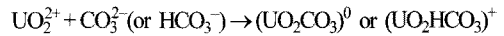
암석내 우라늄이 지하수로의 용출은 합우라늄 광물의 용해도와 지하수의 화학적 조건이 중요한 변수가 될 것이다. 화강암과 같은 결정질 암반에서 지하수가 부존되는 대수층은 주로 파쇄대 구간이며 파쇄대구간은 물리적 응력에 의해 광물들의 물리적 풍화가 상당히 진행된 상태로 신선한 광물에 비하여 화학적 풍화의 속도가 상대적으로 빠르게 진행될 수 있을 것이다. 지하수에서 우라늄의 주요 산화상태는 4⁺, 6⁺ 형태이며 용존된 우라늄은 흔히 착이온(complex ion)을 형성한다(Murakami *et al.*, 1997). 가장 안정된 형태는 산소를 포함한 우라닐이온(UO₂²⁺)의 형태이다(Coother and Lappenbusch, 1983). 우라늄은 지하수의 pH조건에 따라서 이온 종(Species)이 다양하다. 즉, 중성 및 알칼리 범위에서 우세한 우라늄의 이온 종(Species)은 우라닐이온과 우라닐탄산염화합물이며, 반면 낮은 pH에서는 우라닐(Uranyl) 이온이 우세하다(Langmuir and Herman, 1980).

우라늄의 용해는 중탄산(HCO₃)⁻ 함량이 높은 산화환경에서 지하수에 쉽게 용해된다(Zapeczka and Szabo, 1986). 반대로 환원성 조건에서는 이동성이 떨어지고 유기물(예: 휴믹산)에 강하게 흡착된다(Langmuir, 1978). Langmuir와 Herman (1980)는 중성내지 알칼리 pH 범위에서 상당한 양의 우라늄이 탄산염화합물 상태로 수용액상에 잔류할 수 있으며, 약산성 환경에서는 수착반응이 우세하여 물속의 우라늄 농도가 낮고, pH가 낮은 환경에서는 양으로 전하된 우라닐이온과 광물 흡착자리의 양전하(≡SOH₂⁺)의 분포로 인한 반발력 때문에 용존 우라늄 농도가 높다고 제시하였다.

연구지역 시추공 6개 구간 지하수중 지하심도 -50~-70 m 구간 지하수에서 우라늄과 라돈의 함량이 가장 높은 값을 보여주었다. 이 구간 지하수의 화학적 조건은 1차 시료에서는 pH가 8이상의 약알칼리 조건으로 다른 구간보다 높은 pH 조건이며, 용존산소와 Eh값은 낮고, 중탄산의 농도가 상대적으로 높은 특성을 보인다. 2차 시료에서는 pH가 7이하로 1차에 비해 크게 낮아졌고, 용존산소와 Eh값도 낮아진 경향을 보인다.

하지만 중성내지는 약알칼리성 조건이며, 용존산소량이 비교적 낮지만 산화환경이다. 그리고 지하수내 중탄산이 풍부하므로 우라늄의 용해에 좋은 조건이 된다(Zapeczka

and Szabo, 1986). 따라서 지하심도 약 75 m까지 흑운모편암이 주요 암석으로 확인되었고, 만약 흑운모편암이 지하시추공 주변 상당한 영역까지 분포한다면 흑운모편암내 존재하는 우라늄이 순환하는 지하수에 의해 용출된 후 시추공 심도 -50~-70 m 구간의 지하수 화학조건에서 우라늄은 우라닐탄산염화합물의 형태로 용존하는 것으로 보인다.



상기와 같은 탄산염착물의 형태기 우라늄이 인체에 유입되는 가장 흔한 형태이다(Almeida *et al.*, 2004).

일반적으로 라돈은 우라늄의 붕괴 산물이므로 지하수내 우라늄의 농도가 높을수록 라돈의 농도가 높은 경향을 보인다(Voronov, 2004). 라돈가스는 불활성기체이며 반감기가 3.8일로 지하수내에서 멀리 이동하지 않으며, 지하수관정 주변의 지질조건에 직접적인 영향을 받는다(Michel, 1990). 흔히 단층대와 지진대에서 라돈의 농도가 높으며, 국지적으로 수리지질학적 특성(수리전도도, 단열틈의 크기, 지하수 유속 등), 그리고 우라늄과 지하수의 화학적 반응이 영향을 줄 수 있다(Lanctot *et al.*, 1985). 연구지역 시추공 지하수내 라돈의 함량은 대체적으로 우라늄의 농도와 비례한다. 라돈의 기원을 해석하기 위하여 라돈과 같은 불활성 기체인 헬륨과 네온의 동위원소비를 이용하여 간접적으로 라돈가스의 기원을 제시한바 있다(조병욱외, 2008). 즉, 헬륨 동위원소비(³He/⁴He)가 대기, 지각, 맨틀 사이에 큰 차이가 있고, 이 동위원소비를 측정하여 맨틀 혹은 지각에서 지구표층부로 나오는 불활성기체의 기원에 대한 중요한 정보를 얻을 수 있다. 즉, 지하수내 ³He/⁴He 동위원소비와 ⁴He/²⁰Ne 동위원소비 상관관계도에서 지하수내 헬륨 등 영족기체는 지각기원 영역에 도시되어 암석기원으로 해석하였으며, 같은 불활성가스인 라돈가스 암석기원으로 해석한 바 있다. 국내에서 영족기체 분석을 통한 헬륨 등의 기원에 대한 기존연구는 정찬호외(2007, 2008, 2009, 2011) 등에 의하여 국내 온천수와 탄산광천수내 그들의 지질학적 기원을 제시한바 있으며, 향후 시추공 지하수의 심도별로 시료를 채취하여 영족기체 동위원소비 분석을 통한 라돈가스의 기원을 해석하는 것도 하나의 접근방법으로 판단된다.

결 론

지하수내 자연방사성 물질의 산출특성을 규명하기 위

한 본 연구의 결과를 결론적으로 종합하면 다음과 같다:

참고문헌

(1) 충북 청원군 부용면 갈산리 연구용 부지에 시추한 120 m 심도의 시추코어는 기존 지질도상의 지표지질과는 상이한 수직적 지질변화를 보여주었다. 즉, 기존지질도상 반상화강암과는 상이한 흑운모편암, 흑운모화강암이 주요 암석이며, 반상화강암이 부분적으로 반복하여 관입되었다.

(2) 더블패커를 이용하여 시추공 6개 구간에서 지하수를 채취하여 수질화학 성분을 분석한 결과 시추공 지하 심도 50-70미터 사이에서 pH가 가장 높고, Eh와 용존산소량이 낮은 조건을 보인다. 1차 시기의 지하수는 심도별 비교적 큰 수질 차이를 보이지만, 2차 시기의 지하수는 심도별로 큰 차이를 보이지 않으며 상당히 균질화된 특성을 보인다. 지하수의 화학적 유형은 Ca-HCO₃ 형으로 구분된다.

(3) 암석내 우라늄과 토륨의 함량은 각각 0.51~23.4 ppm과 0.89~62.6 ppm의 범위를 보이며, 지하수의 우라늄과 라돈의 함량은 각각 0.03~683 ppb와 1,290~7,600 pCi/L를 보인다. 미국 EPA 30 ppb와 EPA의 AMCL 4,000 pCi/L의 기준을 초과하는 구간은 우라늄은 3구간과 라돈은 2구간이며, 이 구간의 대수층 지질은 흑운모편암이다.

(4) 현미경관찰과 EPMA 분석을 통한 방사성원소(우라늄)를 함유하는 우라늄 광물로 흑운모편암내 흑운모내 포획된 광물인 모나자이트, 일메나이트로 확인되었으며, 이들 광물의 주요 구성원소를 치환하여 존재하는 것으로 보이며, 일부 석영과 장석의 입자내에도 우라늄 원소가 확인되었다.

(5) 시추공 심도 -50—70 m 구간의 지하수에서 우라늄과 라돈-222의 높은 함량을 보이는 것은 지하수의 화학적 특성과 관련되는 것으로 보인다. 즉, 이 구간의 지하수의 화학적 특성은 중성내지는 약알칼리성이며, 산화 환경이고, 중탄산의 함량이 높아 우라늄 성분의 용존에 용이한 환경으로 지하수내 우라늄은 우라닐탄산염 형태로 주로 존재하는 것으로 보인다. 라돈가스는 우라늄의 농도와 대체로 비례하는 것으로 보아, 우라늄의 붕괴 과정에서 생성되는 것으로 보인다. 라돈가스 기원에 추적을 위해서는 헬륨과 네온등 영속기체 동위원소비를 이용한 간접적인 방법을 적용할 필요가 있을 것이다.

사 사

이 연구는 환경부의 지하수중 자연방사성물질 정밀조사연구(10)과제의 연구비로 수행되었다.

권영일, 진명식, 1974, 한국지질도 (청주도폭, 1:50,000) 국립지질광물연구소, 8p.
 박맹인, 김근수, 1998, 계명산층 페그마타이트에 수반되는 우라늄토륨 광상의 지구화학적 특성, 대한자원환경지질학회, 31(5), 365
 성익환, 김대업, 우형주, 정강섭, 조병욱, 이병대, 홍영국, 박중권, 윤욱, 이봉주, 김용제, 윤 윤열, 조수영, 신동천, 장태우, 2000, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구 (II), 국립환경과학원, 323p.
 성익환, 김대업, 우형주, 조병욱, 박중권, 이한영, 정강섭, 윤윤열, 조수영, 이봉주, 이병대, 김통권, 김경수, 추창오, 신동천, 1999, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(I), 국립환경과학원, 338p.
 성익환, 조병욱, 김대업, 김건한, 박덕원, 박중권, 윤윤열, 이봉주, 이병대, 이종철, 임현철, 정강섭, 조수영, 홍영국, 장우석, 양재하, 신동천, 한인섭, 2002, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(IV), 국립환경과학원, 357p.
 성익환, 조병욱, 우형주, 김대업, 김건한, 박중권, 홍영국, 이병대, 윤욱, 이봉주, 이종철, 윤윤열, 김용제, 정강섭, 조수영, 신동천, 장태우, 유명진, 2001, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(III), 국립환경과학원, 388p.
 신동천, 김예신, 문지영, 박화성, 김진용, 박선구, 2002, 지하수 중 자연방사성물질의 위해성 관리에 대한 고찰, 한국환경독성학회지, 17, 273-384.
 정찬호, 고용권, 신선호, Nagao, K., 김규한, 김건영, 2009, 이천 및 포천지역 온천수의 수리화학적 특성 및 영속기체 기원, 지질공학, 19(4), 529-541.
 정찬호, 김규한, Nagao, K., 최훈공, Sumino, H., 박지선, 박충화, 이종익, 허순도, 2008, 동해안지역 온천유형별 수리화학적 특성 및 영속기체 기원, 한국지하수도양 환경학회지, 13(1), 1-12.
 정찬호, 김천수, 김통권, 김수진, 1997, 편마암-물 반응계에서 지하수의 지화학적 진화 및 이차광물 생성에 관한 반응경로 모델링, 한국광물학회지, 10(1), 33-44.
 정찬호, 유상우, 김규한, Nagao, K., 2011, 경북-강원일대 탄산약수의 수질화학과 탄 산 및 영속기체 기원, 지질공학회지, 21(1), 65-77.
 정찬호, 허현성, 김규한, Nagao, K., 2007, 호남지역 저온형 온천수의 수리지구화학적 및 안정동위원소 특성과 영속기체의 기원에 관한 연구, 자원환경지질학회지, 40(5), 635-649.
 조병욱, 김건한, 김연기, 성익환, 안주성, 윤욱, 윤윤열, 이길용, 이병대, 이홍진, 임현철, 조 수영, 홍영국, 2006, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사, 국립환경과학원, 200p.
 조병욱, 김건한, 김연기, 성익환, 안주성, 윤욱, 윤윤열, 이길용, 이병대, 전철민, 조수영, 채 기탁, 채기탁, 최병인, 홍영국, 백승균, 류시원, 정찬호, 2008, 지하수 중 방사성물질 정 밀조사 (I), 국립환경과학원, 293p.
 조병욱, 정찬호, 한인섭, 2009, 지하수 중 방사성물질 정밀조사(II), 국립환경과학원, 273p.
 추창오, 2002, 대보화강암내 함유우라늄 광물의 산출특징과 존재형태의 중요성, 한국광물학회지, 15(1), 11-21.
 한정희, 박계현, 1996, 대전지역 지하수에 함유된 우라늄 및 라돈의 함량, 자원환경지질학 회지, 29(5), 589-595.
 Almeida, R. M. R., Lauria, D. C., Ferreira, A. C. and

- Stracek, O., 2004, Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Regiao dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil, *Journal of Environmental Radioactivity*, 73, 323-334.
- Apambire, W. B., Boyle, D. R. and Michel, F. A., 1997, Geochemistry, genesis, and health implications of fluoriferous groundwaters in the upper regions of Ghana. *Environmental Geology*, 33, 13-24.
- Appelo, C. P. J. and Postma, D., 1996, *Geochemistry, groundwater and pollution*, A. A. Balkema Publisher, Rotterdam, 536p.
- Burns, P. C. and Finch, R.(eds.), 1999, *Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment, Reviews in Mineralogy, Vol. 38*, Miner. Soc. America, Washington, 679p.
- CEPA (California Environmental Protection Agency), 2001, *Public health goals for uranium in drinking water*. CEPA, California, 30p.
- Cothern, C. R., and Lappenbusch, W. L., 1983, Occurrence of uranium in drinking water in the U.S. *Health Physics*, 48, 89-100.
- Finch, R. and Murakami, T., 1999, Systematic and Paragenesis of Uranium Minerals. In: Burns, P. C. and Finch, R. (eds.), *Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment. Reviews in Mineralogy, 38*, Miner. Soc. America, 91-179.
- Gaines, R. V., Skinner, H. C. W., Ford, E. E., Mason, B., Rosenzweig, A., King V. T. and Dowty, E., 1997, *Dana's new Mineralogy*, 8th Ed. Wiley and Sons, New York, 1819p.
- Lanctot, E. M., Tolman, A. L. and Loiselle, M., 1985, Hydrogeochemistry of radon in groundwater, The second Annual Eastern Regional Groundwater Conference, Portland, Maine, July, 16-85.
- Langmuir, D., 1978, Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 547-569.
- Langmuir, D., 1997, *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice-hall, New Jersey, 600p.
- Langmuir, D. and Herman, J. S., 1980, Mobility of thorium in natural water at low temperatures, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 1753-1766.
- Mandarino, J., 1999, *Fleischer's Glossary of Mineral Species*. Mineralogical Record, Tucson, Arizona, 326p.
- Michel, J., 1990, Relationship of radium and radon with geological formations. In: Cothern, C. R. and Rebers, P. A. (Eds.) *Radon, Radium and Uranium in Drinking Water*, Lewis Publishers, Inc., Michigan, 83-96.
- Murakami, T., Ohnuki, T., Osobe, H. and Sato, T., 1997, Mobility of uranium during weathering, *American Mineralogist*, 82, 888-899.
- Murphy, W. M. and Shock, E. L., 1999, Environmental aqueous geochemistry of actinides. In: Burns, P. C. Finch, R. (eds.), *Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment, Reviews in Mineralogy, Vol. 38*, Miner. Soc. America, 221-253.
- Piper, A. M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, *Transactions of American Geophysical Union*, 25, 914-923.
- Voronov, A. N., 2004, Radon-rich waters in Russia. *Environmental Geology*, 46, 639-645.
- Zapeczka, O. S., and Szabo, Z., 1986, Natural radioactivity in ground water-a review. USGS Water-supply Paper 2325, *Ground Water Quality: Hydrologic Conditions and Event*, USGS, 50-57.

2011년 6월 8일 원고접수, 2011년 6월 22일 게재승인

정찬호

대전대학교 지반방재공학과
300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2573
E-mail: chjeong@dju.kr

김문수

국립환경과학원 토양지하수연구팀
인천시 서구 난지로 184 (경서동 종합환경연구단지)
Tel: 032-560-7907
E-mail: hyd009@korea.kr

이영준

국립환경과학원 토양지하수연구팀
인천시 서구 난지로 184 (경서동 종합환경연구단지)
Tel: 032-560-8360
E-mail: 8djoony@korea.kr

한진석

국립환경과학원 환경기반연구부
인천시 서구 난지로 184 (경서동 종합환경연구단지)
Tel: 032-560-8300
E-mail: nierhan@me.go.kr

장효근

대전대학교 지반방재공학과
300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2570
E-mail: sarang8888@naver.com

조병욱

한국지질자원연구원 환경지질연구본부
대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3083
E-mail: cbw@kigam.re.kr