대전지역 시험용 시추공 지하수내 우라늄 및 라돈-222의 지화학적 산출특성

정찬호^{1*} · 유근석¹ · 김문수² · 김태승² · 한진석² · 조병욱³

¹대전대학교 지반방재공학과, ²국립환경과학원 토양지하수연구과, ³한국지질자원연구원

Geochemical Occurrence of Uranium and Radon-222 in Groundwater at Test Borehole Site in the Daejeon area

Chan Ho Jeong^{1*}, Kun Seok Ryu¹, Moon Su Kim², Tae Sung Kim²,
Jin Suk Han², and Byung Uk Jo³

¹Dept. of Geotechnical Engineering, Daejeon University

²National Institute of Environmental Research

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

본 연구는 대전지역 기존 지하수중 우라늄 및 라돈-222와 같은 자연방사성 물질의 농도가 높은 것으로 알려진 한 지점을 선정하여 121 m 심도의 연구용 시추공을 확보하여 심도별 지하수내 우라늄 및 라돈-222의 산출특성 밝히고, 시추코어를 이용하여 우라늄의 기원에 대한 지화학적 상관성을 알아보고자 하였다. 이를 위하여 더블패커를 이용하여 시추공내 심도별로 6개 지하수 시료를 채취하여 화학성분 분석, 우라늄과 라돈-222의 함량을 분석하였다. 분석결과 지하수의 pH는 중성내지는 알칼리성이며, 화학성분상 $\text{Ca-HCO}_3(\text{SO}_4+\text{Cl})$ 유형에 속한다. 그리고 우라늄과 라돈-222의 농도는 각각 $169\sim1,020$ ppb와 $9,190\pm 96\sim32,800\pm 180$ pCi/L를 보여 심도별 뚜렷한 농도차이를 보이며, 모두 미국 EPA 권고치를 초과하였다. 지하수내 우라늄은 지하 45~50m 심도에서 가장 높은 함량을 보인다. 이 구간 지하수는 약알칼리성의 산화환경이며 높은 HCO_3^- 의 함량으로 우라늄 용존에 유리한 환경으로 보인다. 지하수내 우라늄의 형태는 우라닐탄산염화합물 $\{(\text{UO}_2\text{CO}_3)^0 \text{ 혹은 } (\text{UO}_2\text{HCO}_3)^+\}$ 이 우세한 것으로 보인다. 라돈-222 함량은 심도가 깊어질수록 증가하는 경향을 보인다. 시추코어에 의한 지질주상도특성을 보면 모암은 복운모화강암이며 페그마타이트가 수 곳에서 확인되었고, 중성질 암맥이 100 m 내외에서 확인되었다. 암석내 우라늄과 토륨의 함량은 0.372~47.4 ppm과 0.388~11.2 ppm의 범위를 보여 기존 국내에서 보고된 함량보다 높은 값을 보인다. 암석현미경 관찰 및 전자현미분석결과 방사성원소를 함유하는 광물로는 장석과 흑운모내 포획된 모자나이트, 인회석, 녹염석 광물로 확인되었으며, 광물내 주요성분을 치환하여 주로 존재한다.

주요어 : 더블패커, 지하수, 복운모화강암, 자연방사성물질, 시추코어

A drilling project was undertaken to characterize the geochemical relationship and the occurrence of radioactive materials at a test site among public-use groundwaters previously known to have high occurrence of uranium and radon-222 in the Daejeon area. A borehole (121 m deep) was drilled and core rocks mainly consist of two-mica granite, and associated with pegmatite and dykes of intermediate composition. The groundwater samples collected at six different depths in the borehole by a double-packed system showed the pH values ranging from neutral to alkaline (7.10-9.3), and electrical conductivity ranging from 263 to 443 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The chemical composition of the borehole groundwaters was of the $\text{Ca-HCO}_3(\text{SO}_4+\text{Cl})$ type. The uranium and Rn-222 contents in the groundwater were 109-1,020 ppb and 9,190-32,800 pCi/L, respectively. These levels exceed the regulation guidelines of US EPA. The zone of the highest groundwater uranium content occurred at depths of 45 to 55m. The groundwater chemistry in this zone (alkaline, oxidized, and high in bicarbonate) is favorable for the dissolution of uranium into groundwater. The dominant uranium complex in groundwater is likely to be $(\text{UO}_2\text{CO}_3)^0$ or $(\text{UO}_2\text{HCO}_3)^+$. Radon-222 content in groundwater shows an increasing trend with depth. The uranium and thorium contents in the core were 0.372-47.42 ppm and 0.388-11.22 ppm, respectively. These levels are higher values than those previously been reported in Korea. Microscopic observations and electron microprobe analysis (EPMA) revealed that the minerals containing U and Th are monazite, apatite, epidote, and feldspar. U and Th in these minerals are likely to substitute for major elements in crystal lattice.

Key words : Double packer, groundwater, two-mica granite, radioactive materials, drilling core

*Corresponding author: chjeong@dju.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

국내 음용수로 사용되는 지하수에서 우라늄과 라돈-222과 같은 자연방사성물질의 산출은 Han and Park (1996)에 의해 처음 보고된 이후로 환경부 주관으로 전국을 대상으로 음용 지하수내 자연방사성물질의 산출에 대한 광역 및 정밀조사가 현재까지 단계별로 진행되어 왔다. 조사결과 다수의 지하수(마을상수도, 간이급수시설, 민방위비상용급수시설)에서 미국 EPA의 먹는물 권고치인 우라늄의 농도 30 ppb와 Rn-222의 4,000 pCi를 초과하는 것으로 알려져 왔다(Cho et al., 2006; 2008; 2009; Sung et al., 1999; 2000; 2001; 2002).

우라늄과 라돈-222가 인체에 미치는 유해성은 각각 신장질환과 폐암유발로 이에 대해서는 이미 잘 알려져 있다(CEPA, 2001; Shin, 2002). 지하수내 자연방사성물질의 산출과 지질과의 상관성에 대한 규명은 향후 지하수 개발과 이용측면에서 매우 중요한 과제가 되며, 기준치를 초과하는 사용중 지하수에 대한 대책마련에도 매우 중요한 정보를 제공할 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 Jeong et al. (2011; 2012)는 이천 및 청원의 기존 지하수중 우라늄과 라돈의 함량이 높은 지점을 대상으로 시추조사와 시험공에서 더블패커를 이용한 심도별로 지하수를 채취를 통한 우라늄과 라돈의 산출특성을 밝히고, 암석코어에 대한 EPMA 분석 등을 실시하여 우라늄의 산출과 암석지화학적 상관성을 연구한 바 있다.

이천 및 청원지역 시추공을 대상으로 연구결과를 U, Th과 같은 자연방사성원소는 흑운모화강암과 흑운모편암의 주요 구성광물인 흑운모내 포획된 소량광물(인회석, 저어콘, 모나자이트, 일메나이트 등)에 주로 함유되어 있으며, 일부는 장석과 석영내에도 포획되어 있는 것으로 밝혀졌다(Jeong et al., 2011; 2012). 그러나 우라늄 광물로서의 존재여부는 확인되지 않고 있다. 이는 우라늄광물이 암석내에서 수 μm 크기의 미립질로 산출되거나, 부성분 광물에 극소량으로 포함되고, 화학조성이 복잡하고 매우 다양하기 때문에 존재여부를 확인하기가 매우 어렵기 때문이다(Burns and Finch, 1999). 그리고 라돈-222의 함량과 우라늄 농도와의 상관성은 거의 일치하지 않음을 보여주었다. 심도별로 지하수내 우라늄과 라돈의 산출 함량이 큰 차이를 보여주어 특정구간의 암석화학적 특성 및 대수층의 조건이 지하수내 우라늄과 라돈의 용해에 영향을 미치는 것으로 보인다.

이번 연구에서는 대전지역 북운모화강암 지질지역에 존재하는 지하수중 자연방사성물질의 함량이 높았던 지

역을 선정하여 시추지질조사를 통하여 시추코어의 암종별 방사성원소의 존재 상태와 분포 특성을 알아보고자 하였으며, 아울러 시추공에서 더블패커를 이용한 심도별, 시기별로 지하수를 채취하여 지하수내 자연방사성물질의 함량과 수리지화학적 상관성을 알아보고자 하였다. 이를 종합적으로 조명하여 자연방사성물질의 산출을 지배하는 대수층 심도, 주요 근원광물, 그리고 수리지화학적 상관성을 알아보고자 하였다.

연구지역은 대전광역시 서구 갈마 1동 392-6번지 한마음어린이공원 지역으로 선정하였다(Fig. 1). 이 지역에는 2개의 민방위비상급수용 지하수가 1996년에 개발되어 음용수로 이용되어 왔으나, 환경부의 자연방사성물질 조사과정에서 우라늄의 농도가 3,607ppb, Rn-222의 함량이 23,000 pCi/L로 미국의 제안치인 30ppb와 4,000 pCi/L를 크게 초과하여 지금은 지하수 공급이 중단된 상태이다.

연구방법

시추조사

연구대상지역으로 선정된 대전광역시 서구 갈마 1동 392-6번지 한마음어린이공원내의 부지에서 시추지질조사를 실시하였다. 시추심도는 121m이며, 시추구경은 NX 규격이다. 시추는 2009년 7월 17일~20일 사이에 진행되었다. 시추공의 케이싱의 심도는 지하 15.1m이다. 시추공 내 지하수위는 -8.0m에서 확인되었다. 시추지점은 기존 2개의 비상용 민방위 급수시설 지하수공 사이의 지점으로 선정하였다(Fig. 1).

암석광물 화학분석

시추코어에 대한 암석 및 광물의 지화학 성분을 분석하기 위하여 토양시료 1개(DJ-1), 암석시료 20개(DJ-2~DJ-19, DJ-21, DJ-22), 파쇄대 시료 1개(DJ-20) 등 총 22개 시료를 구간별 암종별로 구분하여 채취하였다. 채취한 암석시료에 대해 암석박편을 제작하고 현미경 관찰을 통해 자연방사성원소의 존재 및 분포특성을 알아 보았다. 암석현미경 관찰시 확인된 특정 광물내 자연방사성원소의 존재를 파악하기 위하여 후방산란전자영상(Backscattered electron image)관찰과 화학성분에 대한 정성 및 반정량분석은 에너지분산분광기(Energy dispersive spectrometer, EDS)를 실시하였다. 사용한 기기는 경북대학교 공동기기센터의 EPMA(Shimadzu 1600 electron microprobe)를 이용하였다.

Fig. 1. Location map showing the borehole test site (DJ-1) in the Daejeon area. P1 : emergency groundwater facilities.

암석시료의 주요원소 성분에 대한 정량 및 정성분석을 위하여 X-선 형광분석을 실시하였다. 그리고 우라늄과 토륨 등 우라늄계열의 원소를 포함한 미량원소 분석을 위하여 유도결합쌍 프라즈마 질량분석(Fison model PQ, ICP-MS)을 실시하였다. 화학성분 분석은 기초과학지원연구원 서울분원의 기기를 이용하였다.

지하수 시료채취 및 현장수질측정

시추공에서의 지하수 시료채취는 더블패커 시스템을 이용하여 심도별로 지하수를 채취하였다. 더블패커 시스템에 대한 내용은 Jeong et al(2011; 2012)에 의해 이미 설명된 바 있으므로 여기서는 세부적 설명은 생략하였다.

지하수 시료채취는 지하 120 m 심도에서 시작하여 10 m 간격으로 상향이동 시키면서 지하수 시료를 채취하였다. 현장에서 양수 등의 과정을 거치면서 최종적으로 지하수를 채취할 수 있는 대수층 구간은 6개 구간으로 확정하였으며, 심도는 지하 105 m~115 m 구간(DJ-GW1), 95 m~105 m 구간(DJ-GW2), 55 m~65 m 구간(DJ-GW6), 45 m~55 m 구간(DJ-GW7), 35 m~45 m 구간(DJ-GW8), 20 m 상부 구간(DJ-GW9)이다.

지하수 시료 채취는 지하수공 구간별로 충분히 양수를 실시하여 시추과정에서 주입된 주입수의 영향을 최소화한 후 대수층의 지하수를 채취하였다. 지하수 양수

시에는 토출관을 통하여 흐르는 지하수를 일정시간 동안 지속하여 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 용존 산소량(DO), 전기전도도(EC), 중탄산(HCO_3)을 외부의 공기와 접촉시키지 않은 조건에서 측정하였다. 지하수의 현장수질측정은 Orion 5 star 모델의 휴대용 측정기를 이용하였으며, 중탄산은 0.05N 농도의 HCl로 산중화적 정법으로 측정하였다. 채취된 물 시료는 화학분석 및 동위원소분석을 위하여 간이 진공펌프를 이용하여 셀룰로즈 질산염막 필터 0.45 μm 여과지를 이용하여 부유물과 이물질을 제거한 후 양이온 및 미량원소 분석용 60 mL, 음이온 분석용 60 mL로 각각 구별하여 채취하였다. 양이온 분석용 시료에는 폴리에틸렌 용기에 담은 후 농질산을 첨가하여 pH 2이하로 산성화시켜 이온들의 침전이나 용기 벽에 흡착되는 것을 방지하고자 하였다.

지하수 화학성분 및 라돈 분석

채취한 물 시료의 주요 양이온 성분과 미량원소 성분은 기초과학지원연구원의 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. 그리고 음이온 성분인 SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^- 이온은 한국기초과학지원연구원 부산분소의 이온크로마토그래피(IC, Dionex 500)을 이

Fig. 2. Geological map of the study area including the location of the borehole (DJ-1).

용하여 분석하였다. 화학분석자료의 정확성을 검토하기 위해서 분석된 총 양이온과 총 음이온 함량을 당량으로 환산하여 전하균형을 계산하였다. 라돈-222의 측정은 라돈의 반감기가 3.82일인 점을 고려하여 현장에서 채취 즉시 밀봉하고 최단시간내 분석이 이루어지도록 하였다. 액체섬광계측기용 20 mL 저농도 칼륨 유리병에 전처리된 거치지 않은 시료 5 mL와 섬광액 15 mL를 혼합하여 액체섬광계측기로 측정하였다. 라돈-222분석은 한국 기초과학지원연구원 오창센터에서 분석하였다.

지질주상도 및 암석화학

본 연구에서 시추지역으로 선정된 대전시 서구 갈마동의 한마음어린이공원지역일대는 도시화로 인해 지질을 확인할 수 있는 노두가 없는 상태이므로 이 지역 일대의 지질도인 1:50,000 유성 지질도폭(Park et al., 1977)과 대전 지질도폭(Lee, et al., 1980), 그리고 1:250,000 축척의 대전 지질도폭(Lee et al., 1996)의 내용을 인용하면 시추공 주변의 지질은 중립질 내지 세립질 복운모화강암으로 이루어져 있으며, 국지적으로 편상조적을 보인다. 이 밖에 맥암류와 석영반암이 이들을 관입하고 있으며 복운모화강암의 주 구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모, 백운모 등이고 부 구성광물로는 저어콘, 금홍석, 인회석 등이 소량으로 함유된다. 연구지역의 지질도는 Fig. 2와 같다.

지질주상도

시추코어의 암석특성, 단열충전광물 특성, 파쇄대 및 절리발달의 특성, 코어 회수율 등을 포함하는 정밀한 주상도를 작성하였다(Fig. 3). 시추공의 수직적 지질특성을

보면 지표에서 지하 4.0m까지 매립층이며, 4.0~13.5 m 구간은 황갈색의 실트질 모래의 풍화토로 구성된다. 13.4~15.3 m 구간은 모암인 복운모화강암이 풍화된 풍화암 구간이다. 15.3~20.3 m 구간에서는 약간의 풍화를 받은 복운모화강암이 확인된다. 18.0~19.0 m 구간에서 심한 파쇄대가 발달된다. 20.3 m 이하에서는 비교적 신선한 복운모화강암으로 구성되며, -121 m까지 곳곳에서 페그마타이트가 확인되었다.

10 cm 이상 폭의 페그마타이트가 발달된 구간은 31.7~32.9 m, 40.3~41.0 m, 46.5~48.8 m, 59.3~59.7 m, 63.5~63.8 m, 68.2~68.4 m, 88.3~89.1 m, 93.3~93.5 m, 112.7~112.9 m, 119.1~119.3 m으로 다수가 확인되었다. 페그마타이트에는 거정질 백운모 입자가 확인된다. 그리고 복운모화강암내 암회색의 세립질 중성질 암맥 다수가 관입되어 있다. 암맥은 22.8~22.9 m, 69.1~69.5 m, 73.9~74.8 m, 97.2~97.5 m, 101.8~102.2 m, 103.5~105.3 m, 108.9~109.1 m, 109.7~110.4 m, 112.8~114.2 m에서 발달되어 있다. 그 외 석영과 방해석 세맥이 다수 확인되었다. 단열충전광물로는 주로 탄산염광물과 석영맥이 충전되어있으며, 일부에서는 점토질물질이 확인되었다.

단열과 파쇄대 발달은 구간은 연암구간과 경암의 상부구간에서 코어회수율(RQD) 76~86% 정도로 낮고, 36.2~42.2 m 구간에서 다수의 단열이 발달되어 있으며 코어회수율이 70~58%로 낮은 값을 보인다. 91.3~92.8 m 구간에서는 수직절리가 발달되어 있으며, 90.2~90.3 m 구간에서 코어회수율은 69%로 낮은 값을 보인다. 101.5~109.6 m 구간에서는 심한 파쇄대 3곳이 발달되어 있어 코어회수율이 0~72% 정도로 이 구간이 시추공의 주요 대수층의 역할을 할 수 있다. 이는 후술될 양수량 과도 일치한다. 그 외 구간에서 코어회수율은 95~100%

Fig. 3. Geological column based on the borehole core and the distribution of radioactive materials in groundwater and rock cores.

정도로 매우 견고한 암질상태를 보인다. 시추코어에 대한 정밀 주상도 자료는 지하수 시료채취 구간의 설정에 기준자료로 활용되었다.

암석의 화학조성

채취된 암석의 주요 화학성분 및 우라늄과 토륨의 함량에 대한 자료는 Table 1에 제시되어있다. 암석의 주요

화학성분 분석은 복운모화강암, 페그마타이트, 풍화된 화강암, 중성질 암맥과 같이 4개 암종으로 구분하여 분석이 수행되어졌다. SiO_2 와 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 함량 상관관계에서 화강암은 아알칼리(sub-alkaline) 영역에 속하고, 페그마타이트와 복운모화강암은 SiO_2 함량이 71.1~77.2 wt.%를 보여 국내 일반화강암 조성에 비해 보다 규장질이다. Fig. 4는 Rb-Ba-Sr 함량비에 의한 삼각다이아그램으로

Table 1. Major chemical compositions including uranium and thorium of core rock samples from the study area.

Sample ID	DJ-1 (ws)	DJ-2 (tg)	DJ-4 (pt)	DJ-5 (wtg)	DJ-7 (wtg)	DJ-9 (tg)	DJ-10 (pt)	DJ-12 (id)	DJ-14 (pt)	DJ-15 (pt)	DJ-16 (tg)	DJ-17 (tg)	DJ-18 (id)	DJ-19 (tg)	DJ-20 (fbd)	DJ-22 (tg)
Al ₂ O ₃	16.1	16.2	13.6	17.7	5.1	15.9	14.8	18.0	13.9	13.4	14.0	15.5	16.4	16.2	16.6	15.0
CaO	1.7	2.5	0.9	7.7	0.2	2.1	1.3	5.2	0.5	1.0	1.6	1.2	7.2	1.9	3.0	1.8
Fe ₂ O ₃ *	1.9	1.3	0.4	1.9	0.4	1.0	0.6	6.8	0.7	0.9	1.1	1.2	5.0	1.1	3.5	1.8
K ₂ O	4.3	3.8	4.0	3.6	1.6	4.2	1.8	2.3	5.4	2.2	3.8	3.9	3.2	3.6	5.0	3.2
MgO	0.3	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	1.2	0.1	0.2	0.2	0.3	1.1	0.3	0.8	0.2
MnO	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
Na ₂ O	2.9	3.9	4.0	4.6	0.4	3.9	5.2	3.1	2.5	4.3	4.0	4.5	2.2	3.1	1.3	3.9
P ₂ O ₅	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.0	0.2	0.1
SiO ₂	71.4	71.4	75.8	58.8	92.0	72.7	75.5	61.0	76.7	77.2	74.6	72.3	55.3	71.1	63.5	73.5
TiO ₂	0.2	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	1.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	0.1	0.8	0.1
L.O.I	1.84	0.72	1.18	5.15	0.79	0.69	0.97	0.71	0.84	1.55	1.32	1.77	8.03	3.15	4.81	1.50
Total	100.6	100.4	100.2	100.2	100.7	100.8	100.3	99.9	100.8	100.8	100.7	100.7	99.8	100.7	99.5	100.5
U (ppm)	5.98	1.31	2.79	1.67	0.37	1.28	18.5	2.25	0.68	0.78	1.44	1.46	1.82	11.8	47.4	2.64
Th (ppm)	8.12	9.23	2.21	11.2	0.39	6.60	7.97	9.56	0.79	0.90	7.21	8.27	5.55	6.07	8.28	10.0

*Total Fe, ws: weathered soil, tg: two-mica granite, pt: pegmatite, id: intermediate dyke, wtg: weathered two-mica granite, fbd: fractured basic dyke

화강암의 분화특성을 보여준다. 복운모화강암은 화강섬록암(granodiorite) 영역에 주로 도시되고, 페그마타이트 일부 시료는 Sr 함량이 낮은, 상당히 분화된 화강암의

Fig. 4. Chemical classification of granite and plots of chemical composition of two-mica granite and pegmatite on the Rb-Ba-Sr component diagram. A: diorite, B: granodiorite and quartz diorite, C: anomalous granite, D: normal granite, E: strongly differentiated granite

특성을 보인다.

시추공의 암종별 우라늄(U)과 토륨(Th) 함량을 보면 우라늄의 함량은 0.172~47.42 ppm의 범위를 토륨은 0.12~11.22 ppm의 농도 범위이다. 가장 높은 우라늄 함량(47.4 ppm)을 보이는 암석은 DJ-16 시료로 108.5 m 심도에서 채취한 파쇄대 구간인 중성질 암맥이다. 그 다음 높은 함량을 보이는 시료는 DJ-8(59.6 m 심도)의 페그마타이트로 18.48 ppm의 우라늄 함량을 보인다. 페그마타이트내 백운모 단일광물(DJ-19)의 우라늄과 토륨의 함량은 0.172 ppm, 0.12 ppm으로 매우 낮다.

국내 대표적인 화강암내 우라늄의 함량은 4~5 ppm 이하의 수준이다(Sung et al., 2002). Choo et al (2002)는 지하수내 우라늄의 함량이 22.8~43.4 ppb로 비교적 높은 지역인 포천, 괴산, 여주지역 화강암내 우라늄의 함량이 6.5~10.8 ppm 범위로 보고하였다. 지금까지 보고된 화강암내 우라늄 함량과 비교하면 비록 화강암을 관입한 중성질 암맥이지만 47.42 ppm의 우라늄 함량은 상당히 높은 값에 해당된다. 그리고 페그마타이트(DJ-8)와 복운모화강암(DJ-15) 시료도 비교적 높은 우라늄 함량이 나타난다.

Fig. 5. Variations in the pH, Eh, electrical conductance (EC), and dissolved oxygen (DO) of groundwater samples collected from six different depths at the test borehole site.

수리화학적 특성

현장 수질측정 결과

6개 구간에서 채취된 지하수에 대한 pH, Eh, 전기전도도, 용존산소량 등의 결과는 Table 2에 제시하였다. Fig. 5는 시추공 심도에 따른 pH, Eh, 전기전도도, 용존산소량의 변화특성을 보여준다.

구간별 지하수 산출량은 1.33~12.34 m³/day 으로 구간에 따라 산출량에 차이를 보인다(Table 2). DJ-GW2, DJ-GW-9 구간에서 지하수 산출량이 많으며, DJ-GW-6, DJ-GW-7 구간에서는 상대적으로 지하수 산출량이 적다. 따라서 상부구간을 제외한 주 대수층 구간은 지하 95~115 m 구간이다.

현장수질 측정결과 지하수의 pH는 7.10~8.30의 범위를 보이며, 심도별 지하수의 pH는 상부에서 하부 구간으로 향할수록 증가하는 경향을 보인다. 시기별 pH 변화는 큰 차이를 보이지는 않는다. 연구지역 시추공 지하수는 약산성의 강수가 지하로 침투한 후 심부로 이동하면서 체류시간과 함께 물-암석 반응 통하여 알칼리성으로 진화하는 화강암지역의 지하수 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 보인다(Jeong et al., 1997).

지하수의 산화-환원전위(Eh)는 -120~+219 mV의 범위를 보이며, 심도별, 시기별 차이를 보이나, 일정한 경향성을 보이지는 않는다. 시추공 심도 50 m 구간에서 최고 +219 mV의 산화환경을 보이며, 100 m 구간에서는 -120 mV의 환원성 환경을 보인다. pH-Eh 상관관계에서 일부시료를 제외하고는 pH가 높아질수록 Eh값이 낮아지는 경향을 보인다. 지하수의 pH-Eh 조건은 우라늄 용해도와 관련이 있으므로 지하수 화학조건과 우라늄 용해에 대한 논의는 후술될 것이다.

지하수의 전기전도도는 268~443 μ S/cm의 범위를 보인다. 전기전도도는 심도가 깊어질수록 감소하는 경향을 보인다. 지하수의 용존산소량은 0.49~10.1 mg/L의 범위를 보이며, 상부 구간에 낮은 함량을 보이다가 45~55 m 구간에서 증가한 후 하부구간에서는 다시 감소하는 경향을 보인다.

화학성분

지하수의 주요화학성분에 대한 자료는 Table 2에 정리되어 있다. 지하수 심도별 및 시료채취 시기별 지하수 내 주요이온 함량변화는 Fig. 6과 같다. 지하수 내 주요 양이온성분에 대한 함량특성을 보면 가장 풍부한 양이온인 Ca²⁺ 성분은 37.4~66.4 mg/L의 범위를 보이고,

Mg²⁺ 성분은 0.91~3.5 mg/L의 농도 범위로 낮은 함량을 보인다. Na⁺ 성분은 13.7~20.4 mg/L의 범위로 주요 성분이며, K⁺ 성분은 0.98~2.69 mg/L의 농도 범위를 보인다. 이들 양이온의 함량은 지하수의 심도가 깊어질수록 약간 감소하는 경향을 보이고, 시료채취 시기에 따른 농도변화를 보면 Ca²⁺과 Mg²⁺의 경우에는 차이를 보이지 않지만, Na⁺과 K⁺의 경우 7월 시료보다 9월 지하수에서 다소 낮은 함량을 보인다.

지하수 내 주요 음이온 성분인 HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, F⁻ 함량 특성을 보면, 가장 풍부한 음이온은 HCO₃⁻ 성분으로 88.5~167.8 mg/L의 농도 범위를 보인다. 심도별로 보면 50 m 구간에서 가장 높은 함량을 보이다가 다시 감소한다. 시기별로는 7월 시료가 9월 시료에 비해 대체적으로 약간 높은 함량을 보인다. 특별한 유기오염원이 없는 경우에 지하수 내 HCO₃⁻는 탄산염 광물의 용해, 대기와 토양 내 CO₂ 가스의 용해와 같은 자연적 반응으로부터 주로 기원한다.

지하수 내 Cl⁻ 농도는 21.8~31.0 mg/L 범위를 SO₄²⁻ 성분은 23.6~42.0 mg/L 범위를 각각 보인다. 이들 성분은 대체적으로 심도가 깊어질수록 감소하는 경향을 보인다. Cl⁻의 경우에는 1차시기 보다 2차시기에 농도가 감소하는 경향을 보이고, SO₄²⁻성분의 경우에는 상부구간은 9월에 채취된 지하수 시료가 7월 시료보다 약간 더 높은 농도를 보이고, 하부구간에서는 그와 반대적 경향을 보인다.

지하수 내 F⁻ 성분은 0.8~2.29 mg/L의 농도범위로 심도가 깊어질수록 증가하는 경향을 보인다. 하부구간인 95~115 m 구간에서는 음용수의 수질기준치인 1.5 mg/L를 모두 초과한다. F⁻ 기원은 형석(CaF₂)의 용해와 운모류, 각섬석류, 인회석(Ca₅(Cl, F, OH)(PO₄)₃)등의 O₂⁻ 또는 OH⁻ 치환하여 있는 형태로 존재하며, 지하수에 의해 용탈될 수 있다(Apambire et al., 1997). 연구지역의 모암은 복운모화강암이고 대수층이 될 수 있는 염기성 암맥의 파쇄대에 흑운모가 풍부하므로 운모류의 OH⁻기를 치환한 F⁻성분의 용해가 주요 기원으로 해석된다.

생활하수나 분뇨 등 인위적 오염원으로부터 기원하는 NO₃⁻ 성분은 시추공 지하수내에서 0.13~4.51 mg/L의 농도 범위로 비교적 낮은 값을 보인다. 상부구간에서는 약간 높은 농도를 보이는데 이는 특정오염보다는 토양 내 질소성분의 영향으로 보인다.

지하수의 진화특성을 반영하는 pH를 기준으로 주요 양이온의 변화특성을 알아보았다(Fig. 7). pH의 증가에 따라서 Ca + Mg, HCO₃의 함량은 약간 증가한 후 감소

Table 2. Chemical composition of groundwater samples collected at a test borehole site in the Daejeon area.

Sample ID	Depth (m)	Sampling Date (Y/M/D)	pH	Eh (mV)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	DO (mg/L)	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Fe	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	E(%)	*Q (sec)
DJ-GW1	105~115	09/07/31	8.30	-33.2	307	7.50	1.30	16.0	40.0	1.10	0.02	20.1	94.9	28.3	28.0	0.63	1.91	-2.02	25
		09/09/25	8.09	16.7	307	1.96	1.13	13.7	41.6	1.26	0.06	20.6	100.7	27.9	27.7	0.68	1.58	-3.54	46
DJ-GW2	95~105	09/07/31	8.26	-120	268	2.35	0.98	14.6	35.6	0.91	0.02	20.0	88.5	20.6	23.6	0.39	2.29	-0.15	15
		09/09/25	8.23	-84.8	283	0.24	0.74	14.1	37.4	0.93	0.03	21.8	96.1	21.8	23.8	0.13	2.09	-2.03	20
DJ-GW6	55~65	09/07/31	7.85	80.2	365	6.66	1.04	16.6	53.6	1.50	0.03	22.6	154	29.2	32.0	2.61	1.32	-6.12	130
		09/09/25	7.85	119	342	10.1	1.90	16.0	45.0	2.30	0.03	22.6	122	26.6	32.3	1.66	1.81	-3.62	70
DJ-GW7	45~55	09/07/31	7.84	219	379	5.75	2.62	16.6	56.0	2.10	0.71	26.5	168	28.7	33.9	1.86	1.25	-6.31	120
		09/09/25	7.72	61.7	361	4.64	1.05	14.5	49.2	1.48	0.06	10.2	167.8	27.4	30.5	2.06	1.29	-6.9	88
DJ-GW8	35~45	09/07/31	7.27	-41.1	404	1.22	2.69	19.0	56.2	3.59	0.33	24.8	168	30.6	41.9	4.34	0.95	-5.74	24
		09/09/25	7.63	78.1	443	3.03	1.14	16.1	66.0	2.18	0.05	12.0	164.8	26.9	39.2	2.31	0.87	-0.08	40
DJ-GW9	5~20	09/07/31	7.10	-72.3	396	1.52	2.69	20.4	55.6	3.50	0.47	26.9	154	31.0	42.0	4.51	0.8	-3.00	14
		09/09/25	7.20	-21.0	401	0.49	1.41	17.1	53.4	2.77	0.30	26.9	126.6	28.7	41.1	3.18	0.89	-0.85	15

*Q : time required for the collection of 2 liter groundwater from the borehole.

Fig. 6. Depth variations in major chemical composition of groundwater samples collected at six different levels in the borehole at the study site.

Fig. 7. Relationship between major ion contents and the pH of borehole groundwater samples. The 'DJ' before all sample numbers in the figure is abbreviated for simple convenience.

하는 경향을 보여주는 반면 Na + K, Cl + SO₄의 농도는 지속적으로 감소하는 경향을 보여준다. 이와 같이 pH와

심도별 이온성분들의 변화는 물-암석 반응 과정 또는 지하수의 혼합과정으로 설명될 수 있을 것이다. 전자는 자

Fig. 8. Piper diagram showing the chemical type of the borehole groundwater samples from the study site.

연적 물-암석 반응을 거치면서 용해과정을 거친 후 과포화된 이온성분들의 이차광물로의 침전 등에 의해 Ca+Mg, HCO_3^- 의 함량의 변화를 해석할 수 있다. 후자는 상부 및 하부 대수층의 함량원이 각각 상이하어 상부는 수직침투에 의한 토양층과 지하수공 주변 도심권 오염원의 영향으로 이온성분의 함량이 높은 것으로 보이고, 하부대수층은 주요 함량원이 인접한 산지로 물-암석 반응에 의한 화학성분뿐만 아니라, 천부 지하수와 혼합된 것으로 보인다. 이러한 가설은 기본적으로 지하수의 화학적 유형이 유사하며, 천부 지하수가 심부지하수보다 Cl, SO_4 , NO_3^- 의 함량이 다소 높은 것에 근거를 찾을 수 있을 것이다.

심도별 지하수의 화학성분을 파이퍼도(Piper, 1944)에 도시하면 모두 Ca-HCO_3 ($\text{Cl} + \text{SO}_4$)의 유형에 도시된다(Fig. 8). 6개 지하수 시료 모두 유사한 지점에 도시되어 수리화학적 유형상 뚜렷한 차이를 보여주지는 않는다. 아울러 시기별로도 큰 차이를 보여주지는 않는다. 일반적으로 화강암지역 지하수의 지화학적 진화과정은 진화 초기에 중성내지는 약산성의 Ca-HCO_3 유형에서 Ca(Na)-HCO_3 의 유형을 거쳐 진화의 마지막 단계에는 고알칼리성의 Na-HCO_3 유형으로 전이된다(Jeong et al., 1997). 연구지역 지하수공의 주 대수층은 110~120 m 심도로 화학적 유형과 pH 등을 종합적으로 고려하면 지화학적 진화과정의 초·중기 단계로 판단된다.

자연방사성물질 산출특성

지하수내 U, Rn-222 산출

우라늄은 천연에 존재하는 원소중에서 가장 무거운 방사성 원소이다. 천연우라늄은 U-234(0.0058%), U-235(0.715%), U-238(99.28%)의 세 개의 동위원소가 존재한다. 연구지역 시추공 심도별 지하수내 우라늄의 농도는 169~1,020 ppb의 범위를 보여주어 전 구간에서 걸쳐 미국 EPA의 권고치 30 ppb를 초과하고 있다. 심도별 지하수내 우라늄의 함량은 큰 차이를 보여준다. 특히 45 m~55 m 구간에서 가장 높은 농도함량을 보인다. 시기별로는 7월에 채취된 지하수 시료가 9월 시료보다 더 높은 값을 보인다.

연구지역 시추공 지하수내 라돈-222 함량은 $9,170 \pm 96 \sim 32,800 \pm 180$ pCi/L 범위를 보여주어 미국 EPA의 권고치인 4,000 pCi/L를 초과하였다. 전반적으로 심도가 깊어질수록 라돈의 함량이 증가하며, 특히 105~115 m 구간에서 증가세가 뚜렷하다. 시기별로는 7월보다는 9월에 약간 더 높은 값을 보인다(Fig. 3). 심도에 따른 지하수내 U와 Rn-222의 농도 그리고 암석내 U, Th의 함량과는 뚜렷한 비례관계를 보이지 않는다. 지하수내 우라늄과 라돈의 산출농도는 암석내 방사성물질의 절대적 함량비뿐만 아니라 광물내 존재상태에 따른 용해도와 화학조건, 파쇄대 발달과 같은 물리적 조건이 중요한 요소로 작용될 것이다. 우라늄은 HCO_3^- 의 함량이 높은 산화

Table 3. Depth variation of Uranium and Radon-222 contents in borehole groundwater.

Sample ID	Depth (m)	Sampling Date (Y/M/D)	Rn-222 (pCi/L)	Uranium (ppb)
DJ-GW1	105~115	09/07/31	25,900 ± 160	669
		09/09/25	32,800 ± 180	285
DJ-GW2	95~105	09/07/31	13,300 ± 120	448
		09/09/25	15,500 ± 130	207
DJ-GW6	55~65	09/07/31	14,600 ± 120	287
		09/09/25	15,390 ± 52	291
DJ-GW7	45~55	09/08/01	10,800 ± 100	1,020
		09/09/25	14,500 ± 120	852
DJ-GW8	35~45	09/08/01	9,170 ± 96	290
		09/09/25	12,400 ± 110	169
DJ-GW9	5~20	09/08/01	9,700 ± 98	214
		09/09/25	9,190 ± 96	208

환경에서 지하수에 쉽게 용해되는 것으로 알려져 있다 (Zapeczka and Szabo, 1986). 지하수에서 우라늄은 주요 산화상태는 4+, 6+ 형태이며, 용해된 우라늄은 대부분 착이온(complex ion)을 형성하며(Murakami et al., 1977), 가장 안정한 형태는 우라닐이온(UO_2^{2+})이다 (Cothorn and Lappenbusch, 1983). 우라늄은 지하수의 pH 조건에 따라서 매우 다양한 화학종(species)을 형성한다. 즉, 중성 및 알칼리 범위에서 우세한 우라늄의 이온 종(Species)은 우라닐이온과 우라닐탄산염화합물이며, 반면 낮은 pH에서는 우라닐(Uranyl) 이온이 우세하다 (Langmuir and Herman, 1980).

Langmuir와 Herman (1980)는 중성내지 알칼리 pH 범위에서 상당한 양의 우라늄이 탄산염화합물 상태로 수용액상에 잔류할 수 있으며, 약산성 환경에서는 수확반응이 우세하여 물속의 우라늄 농도가 낮고, pH가 낮은 환경에서는 양으로 전하된 우라닐이온과 광물 흡착자리의 양전하($\equiv\text{SOH}_2^+$)의 분포로 인한 반발력 때문에 용존 우라늄 농도가 높다고 제시하였다.

시추공 심도 50 m 구간에서 높은 우라늄의 농도는 중탄산 함량이 가장 높고, 산화환경이며, 약알카리성의 pH 조건이므로 우라늄은 우라닐탄산염화합물의 형태로 용존하는 것으로 보인다:

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

암석내 방사성물질 존재특성

Fig. 9 복운모화강암의 편광 현미경사진이다. 복운모 화강암은 석영, 장석과 흑운모, 백운모가 주요 구성광물이며, 소량광물로 녹염석, 저어콘, 모나자이트, 금홍석 등이 존재한다. Fig. 9(a)와 (b)는 판상 또는 벽개가 잘 발달한 갈색 내지 흑갈색의 흑운모내 방사성포유물(Radioactive inclusion)을 보여준다. 주변에는 침상의 광물(Rutile)이 분포한다. Fig. 9(c)는 녹염석내에서 방사성 물질의 붕괴로 인한 검은 환(Halo)을 보여주며, Fig. 9(d)는 변질을 거의 받지 않고 포유물 등을 함유하지 않은 깨끗한 결정의 백운모를 보여준다.

광물내 방사성원소의 존재 상태를 보다 명확하게 알아보기 위하여 전자현미분석(EPMA)을 실시하였다. EPMA 분석은 후방산란 전자영상(Backscattered electron image, BSE)으로 방사성원소의 존재 상태를 명암으로 확인하고, 확인된 입자에 에너지분산분광기(Energy dispersive spectrometer, EDS)의 전자빔을 주사하여 정성분석을 실시하여 방사성원소 존재를 확인하였다.

Fig. 10a는 BSE 사진으로 석영입자내 밝은색 부분이 비교적 큰 입자의 인회석으로 EDS 피크상에서 P, O, Ca이 주성분으로 확인되며, U, Th의 존재가 확인된다. Fig. 10b는 흑운모내 함유된 모나자이트로 P, O, Ce, La 성분과 함께 소량의 U, Th 등이 검출된다. 입자의 크기는 수십 μm 의 크기이다. Fig. 10c는 장석 결정내 수 μm 의 미립의 밝은 색 부분에 소량의 U, Th이 함유되어 있다. EDS 분석 자료를 보면 장석의 화학조성인

Fig. 9. Photomicrographs showing biotite including radioactive inclusions and inclusion free muscovite in two-mica granite.

Si, Al, O의 성분이 확인된다.

이상에서 확인된 U, Th 성분은 장석광물내 포획되어 존재하거나 소량광물인 모나자이트, 인회석과 같은 광물내 구성원소를 치환하여 존재하는 것으로 판단된다.

결 론

우라늄 및 라돈-222와 같은 자연방사성물질의 함량이 높은 것으로 알려진 대전시 서구 갈마동 민방위비상용 급수시설(지하수공)에 인접하여 개발한 121 m 심도의 연구용 시추공 지하수와 시추코어에 대한 지화학적 분석을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다:

(1) 시추코어를 통하여 확인한 지하지질의 모암은 주로 복운모화강암이며 심도별로 거정질의 백운모와 우백질 광물을 포함하는 수십 cm 폭의 페그마타이트가 다수 확인되었고, 다수의 세립질 중성질 암맥이 복운모화강암을 관입하고 있다.

(2) 복운모화강암의 화학성분은 고알루미늄과 아알칼리성의 특성을 보이고, 일부 페그마타이트는 분화가 상당히 진행된 화강암의 특성을 보인다. 화강암 및 중성질

암맥내 함유된 우라늄과 토륨은 0.372~47.42 ppm과 0.388~11.22 ppm의 범위를 보여, 지금까지 알려진 광화대지역이 아닌 국내 화강암지역의 우라늄 함량으로는 상당히 높은 값으로 확인되었다.

(3) 더블패커를 이용한 양수시험 결과 시추공내 주요 대수층은 102~115 m 사이의 파쇄대로 확인되었으며, 6개 구간에서 채취된 지하수내 우라늄과 라돈-222의 함량은 각각 109~1,020 ppb와 9,190~32,800 pCi/L의 범위를 보이며, 심도별 농도의 차이가 뚜렷하고, 모두 미국 EPA 기준치를 초과한다. 지하수내 우라늄은 지하 50 m 부근에서 가장 높은 함량을 보인다. 이는 지하수의 약알칼리성 pH, 산화환경, 높은 HCO_3^- 의 함량등 기존에 알려진 우라늄의 용해에 유리한 화학적 환경 때문으로 해석된다. 우라늄의 용존형태는 우라닐탄산염화합물 $\{(\text{UO}_2\text{CO}_3)^0 \text{ 혹은 } (\text{UO}_2\text{HCO}_3)^+\}$ 이 존재가 우세한 것으로 보인다. 라돈-222는 심도가 깊어질수록 높은 함량을 보인다.

(4) 암석현미경관찰과 EPMA 분석을 통하여 확인된 우라늄, 토륨을 함유하는 광물로는 흑운모내 함유된 부수광물인 모나자이트, 인회석, 장석 등으로 확인되었으

Fig. 10. Back-scattered electron image (BSI) and energy dispersion spectrum (EDS) showing a uranium peak in minerals.

며, 모나지이트와 인회석 광물내 우라늄과 토륨은 주요 구성원소를 치환하여 존재하며, 장석에서는 포획된 미립 질에서 방사성원소가 검출된다. 백운모에서는 방사성원

소를 함유하지 않는 것으로 밝혀졌다.

(5) 연구지역 시추공 지하수에서 높은 우라늄의 산출은 복운모화강암과 중성질 암맥내 높은 우라늄 함량과

파쇄대 발달과 같은 물리적 요소, 그리고 우라늄 용해에 유리한 지하수 화학조건 등의 변수가 관여된 것으로 보인다. 라돈-222와 우라늄과 상관성은 명확하지 않다.

사 사

이 연구는 국립환경과학원의 '지하수중 자연방사성물질 정밀조사연구('09)의 연구비로 수행되었다.

References

- Almeida, R. M. R., Lauria, D. C., Ferreira, A. C., and Sracek, 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.
- 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.
- Cho, B. W., Jeong, C. H., and Han, I. S., 2009, A detail study on the occurrence of radioactive materials in groundwater(II), NIER, 273p (in Korean).
- Cho, B. W., Kim, K. H., Kim, Y. K., Sung, I. H., Ahn, J. S., Yun, U., Yoon, Y. Y., Lee, K. Y., Lee, B. D., Chon, C. M., Cho, S. Y., Chae, G. T., Chae, G. T., Choi, B. I., Hong, Y. K., Baek, S. G., Ryu, S. W., and Jeong, C. H., 2008, A detail study on the occurrence of radioactive materials in groundwater(I), NIER, 293p.
- Cho, B. W., Kim, K. H., Kim, Y. K., Sung, I. H., Ahn, J. S., Yun, U., Yoon, Y. Y., Lee, K. Y., Lee, B. D., Lee, H. J., Im, H. C., Cho, S. Y., and Hong, K. Y., 2006, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater, NIER, 200p (in Korean).
- Choo, C. O., 2002, Characteristics of Uraniferous Minerals in Daebong Granite and Significance of Mineral Species, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 15, 11-21 (in Korean).
- Cothern, C. R. and Lappenbusch, W. L., 1983, Occurrence of uranium in drinking water in the U.S. *Health Physics*, 48, 89-100.
- Han, J. H. and Park, K. H., 1996, Abundances of Uranium and Radon in Groundwater of Taejeon Area, *Journal of Geosciences*, 29, 589-595.
- Jeong, C. H., Kim, C. S., Kim, T. K., and Kim, S. J., 1997, Reaction Path Modelling on Geochemical Evolution of Groundwater and Formation of Secondary Minerals in Water-Gneiss Reaction System, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 10, 33-44 (in Korean).
- Jeong, C. H., Kim, D. W., Kim, M. S., Lee, Y. J., Kim, T. S., Han, J. S., and Cho, B. W., 2012, Occurrence of Natural Radioactive materials in Borehole Groundwater and Rock Core in the Icheon Area, *Journal of Engineering Geology*, 22, 95-111 (in Korean).
- Jeong, C. H., Kim, M. S., Lee, Y. J., Han, J. S., Jang, H. G., and Jo, B. U., 2011, Hydrochemistry and Occurrence of Natural Radioactive Materials within Borehole Groundwater in the Cheongwon Area, *Journal of Engineering Geology*, 21, 163-178 (in Korean).
- Langmuir, D. and Herman, J. S., 1980, Mobility of thorium in natural water at low temperatures, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 1753-1766.
- Lee, B. J., Kim, D. H., Choi, H. I., Ki, W. S., and Park, K. H., 1996, Geological Map of Korea(Daejeon sheet 1:250,000), Ministry of science and Technology. 56p (in Korean).
- Lee, S. M., Kim, Y. S., and Na, K. C., 1980, Geological Map of Korea(Daejeon, 1:50,000), 26p (in Korean).
- Murakami, T., Ohnuki, T., Osobe, H., and Sato, T., 1997, Mobility of uranium during weathering. *American Mineralogist*, 82, 888-899.
- Park, H. I., Lee, J. D., and Jeong, J. G. 1977, Geological Map of Korea(Yuseong sheet 1:50,000), Korea Institute of Geology and Minerals. 21p (in Korean).
- Piper, A. M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions of American Geophysical Union*, 25, 914-923.
- Shin, D. C., Kim, Y. S., Moon, J. Y., Park, H. S., Kim, J. Y., and Park, S. K., 2002, A review on the hazard of radioactive materials in groundwater, *Journal of Environmental Toxicology Society of Korea*, 17, 273-384 (in Korean).
- Sung, I. H., Cho, B. W., Kim, D. O., Kim, K. H., Park, D. W., Park, J. K., Yoon, Y. Y., Lee, B. J., Lee, B. D., Lee, J. C., Im, H. C., Chung, K. S., Cho, S. Y., Hong, Y. K., Jang, W. S., Yang, J. H., Shin, D. C., and Han, I. S., 2002, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater(IV), NIER, 357p (in Korean).
- Sung, I. H., Cho, B. W., Woo, H. J., Kim, D. O., Kim, K. H., Park, J. K., Hong, Y. K., Lee, B. D., Yun, U., Lee, B. J., Lee, J. C., Yoon, Y. Y., Kim, Y. J., Chung, K. S., Cho, S. Y., Shin, D. C., Chang, T. W., and Yu, M. J., 2001, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater(III), NIER, 388p (in Korean).
- Sung, I. H., Kim, D. O., Woo, H. J., Cho, B. W., Park, J. K., Lee, H. Y., Chung, K. S., Yoon, Y. Y., Cho, S. Y., Lee, Y. J., Lee, B. D., Kim, T. K., Kim, K. S., Choo, C. O., and Shin, D. C., 1999, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater(I), NIER, 338p (in Korean).
- Sung, I. H., Kim, D. O., Woo, H. J., Chung, K. S., Cho, B. W., Lee, B. D., Hong, Y. K., Park, J. K., Yun, U., Lee, B. J., Kim, Y. J., Yoon, Y. Y., Cho, S. Y., Shin, D. C., and Jang, T. W., 2000, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater(II), NIER, 323p (in Korean).
- 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.

원고접수일 : 2013년 6월 7일

수정본채택 : 2013년 6월 24일

게재확정일 : 2013년 6월 25일

정찬호

대전대학교 지반방재공학과

300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3

Tel: 042-280-2573

E-mail: chjeong@dju.ac.kr

유근석

대전대학교 지반방재공학과

300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3

Tel: 042-280-2570

E-mail:

김문수

국립환경과학원 토양지하수과

인천시 서구 난지로 184 (경서동 종합환경연구단지)

Tel: 032-560-7907

E-mail: hyd009@korea.kr

김태승

국립환경과학원 토양지하수과

인천시 서구 난지로 184 (경서동 종합환경연구단지)

Tel: 032-560-7907

E-mail: hyd009@korea.kr

한진석

국립환경과학원 환경기반연구부

인천시 서구 난지로 184 (경서동 종합환경연구단지)

Tel: 032-560-8300

E-mail: nierhan@me.go.kr

조병욱

한국지질자원연구원 환경지질연구본부

대전광역시 유성구 과학로 92

Tel: 042-868-3083

E-mail: cbw@kigam.re.kr