

## 괴산지역 시추공 지하수의 자연방사성물질 산출특성과 지화학적 기원

김문수<sup>1</sup> · 양재하<sup>1\*</sup> · 정찬호<sup>2</sup> · 김현구<sup>1</sup> · 김동욱<sup>2</sup> · 조병욱<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국립환경과학원 토양지하수연구과, <sup>2</sup>대전대학교 지반방재공학과, <sup>3</sup>한국지질자원연구원

## Geochemical Origins and Occurrences of Natural Radioactive Materials in Borehole Groundwater in the Goesan Area

Moon Su Kim<sup>1</sup>, Jae Ha Yang<sup>1\*</sup>, Chan Ho Jeong<sup>2</sup>, Hyun Koo Kim<sup>1</sup>,  
Dong Wook Kim<sup>2</sup>, and Byung Uk Jo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research

<sup>2</sup>Department of Geotechnical Engineering, Daejeon University

<sup>3</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Received 5 December 2014; received in revised form 12 December 2014; accepted 15 December 2014

지하수내 존재하고 있는 자연방사성물질인 우라늄과 라돈-222의 산출특성과 지화학적 기원을 알아보기 위해 괴산지역 연구부 지내 120 m 깊이의 지하수 관정을 시추하여 심도별 시추코어의 암석화학적 특성과 지하수의 화학적 특성을 분석하였다. 시추코어 샘플 분석과 함께 더블패커시스템과 베일러를 이용하여 8개의 심도별 지하수 시료를 채취하여 지화학적 특성 분석을 수행하였다. 시추코어 분석결과, 주요 암종은 화강반암과 점판암이었으며 일부 구간에서는 탄산염암과 석회규산염암, 페그마타이트가 확인되었다. 심도별 지하수의 pH는 7.8-8.4의 범위이며, 화학적 유형은 Na-HCO<sub>3</sub> 형태를 보였다. 암석 및 광물 내 우라늄과 토륨의 함량은 각각 < 0.2~14.8 ppm과 0.56~45.0 ppm의 범위였으며, 암석현미경과 전자현미경(EPMA) 관찰 결과 자연방사성원소(우라늄) 함유 광물은 흑운모내 포획된 모나자이트 광물인 것으로 확인되었다. 우라늄은 이들 광물의 주요 구성원소를 치환하여 존재하는 것으로 보이며 파쇄대와 같은 주요 대수층 구간에서 용해되어 지하수와 함께 용출되는 것으로 보인다. 라돈-222의 함량은 우라늄의 함량과 어떠한 상관성을 보이지 않았으며 향후, 라돈가스 기원 추적을 위해서는 헬륨과 네온 등 영족기체 동위원소비를 이용한 간접적인 방법을 적용하여 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

**주요어:** 우라늄, 라돈-222, 자연방사성물질, 시추코어, 화강반암, 지하수

The origins and varieties of natural radioactive materials, including uranium and radon-222, were examined in a drilled borehole extending to a depth of 120 m below the surface in the Goesan area. In addition to core samples, eight groundwater samples were collected at different depths, using a double packer system and bailer, and their geochemical characteristics were determined. Most of the rock samples from the drilled core consisted of granite porphyry, with sedimentary rocks (slate, carbonate, or lime-silicates) and pegmatite occurring in certain sections. The pH of samples varied from 7.8 to 8.4, and the groundwater was of a Na-HCO<sub>3</sub> type. Uranium and thorium concentrations in the core were < 0.2-14.8 ppm and 0.56-45.0 ppm, respectively. Observations by microscope and an electron probe microanalyzer (EPMA) showed that the mineral containing the natural radioactive materials was monazite contained in biotite crystals. The uranium, which substituted for major elements in the monazite, appeared to have dissolved and been released into the groundwater in a shear zone. Concentrations of Radon-222 in the borehole showed no close relationship with levels of uranium. The isotopes of noble gases, such as helium and neon, would be useful for analyzing the origins and characteristics of the natural radioactive materials.

**Key words:** uranium, radon-222, natural radioactive materials, drilled core, granite porphyry, groundwater

\*Corresponding author: wjhyang@korea.kr

© 2014, 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 일부 음용지하수내에서 검출되고 있는 미량원소인 우라늄과 라돈 등 자연방사성물질은 이동성과 비교적 긴 반감기로 인하여 고농도 검출과 동시에 넓은 지역에 걸쳐 나타나고 있는 것으로 보고되고 있다. 최근 이러한 자연방사성물질의 산출 특성에 대해서 많은 관심이 집중되고 있으며 환경부 주관의 전국 지하수에서의 자연방사성물질 실태조사 및 정밀조사가 수행되고 있다(Han and Park, 1996; Jeong et al., 2013; Ju et al., 2013).

마을상수도, 간이급수시설, 민방위비상용급수 시설 등 국내에서 지하수를 음용으로 사용하기 위한 일부 급수 시설에서의 우라늄과 라돈 농도는 미국에서 제안하고 있는 먹는물기준치(or 권고치)보다 높게 검출되고 있는 것으로 보고되고 있다(Jeong et al., 2013; Ju et al., 2013). 우라늄과 같은 자연방사성물질의 인체 노출은 지하수의 음용에 의한 것이 대부분이며 우라늄은 전리방사선(ionizing radiation)에 의해 암 및 돌연변이 등의 부작용을 일으킬 수 있다고 보고되고 있다. 이와 함께 화학적 독성으로 인한 비발암성 영향이 신장질환을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다(CEPA, 2001; Shin et al., 2002). 가스상의 라돈은 라듐-226의 붕괴산물로 인간의 호흡에 의해 인체에 흡수될 수 있으며 이를 통해 폐암을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다. 라돈 가스는 토양 및 대기뿐만 아니라 지하수내에서도 다양으로 존재하는 것으로 알려져 있다.

음용 지하수내 용존되어 있는 자연방사성물질에 대한 근원적 해결을 위해 최근 많은 연구자들에 의해 우라늄 및 라돈과 같은 자연방사성물질의 산출 및 원인 규명에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Jeong et al., 1997, 2012, 2013; Ju et al., 2013, 2014). 우라늄이 함유되어 있는 광물은 구조와 화학조성이 복잡하고 다양하지만 지표나 지반환경에 노출되는 경우 다양한 연구 분야의 지구화학적 환경지시자로 널리 활용되어져 왔다(Langmuir et al., 1997; Finch and Murakami, 1999). 그러나 우라늄은 주로 암석내의 부성분으로 함유되어 있기 때문에 광물로서 이용될 만큼 함유도가 높지 않은 것으로 보고되고 있다(Park and Kim, 1998). 일반적인 광물들 중에서 약 5% 정도만이 결정구조적인 필수성분으로 우라늄을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다(Mandarino, 1999). 현재까지 우라늄을 함유하는 광물은 대략 218종이지만 국제광물학협회(International

Mineralogical Association, IMA)가 공인한 광물은 216종이다(Gaines et al., 1997). 우라늄 광물은 지하수 중 방사성 물질을 생성하는 일차적인 근원물질이므로 암석 내 방사성 원소를 함유하는 광물들의 존재형태와 광물학적 정보는 지하수 중 자연방사성물질의 물리적·화학적 거동 특성 파악에 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다(Choo, 2002).

일반적으로 비광화대에서의 우라늄 및 토륨 등 자연방사성원소의 기원은 주로 화강암과 관련되어 있는 것으로 알려져 있으며 특히 화강암중에서도 흑운모와 같은 광물에 주로 함유되어 있는 것으로 알려져 있다(Choo, 2002). 그러나 우라늄 광화대 지역을 제외하면, 암석내 방사성원소를 함유하는 광물들은 대부분 암석내에서 수  $\mu\text{m}$  크기의 미립질로 산출되거나 부성분 광물에 극소량으로 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 또한 조성이 매우 다양하기 때문에 함유 광물 및 형태 규명이 쉽지 않은 것으로 알려져 있다(Burns and Finch, 1999). 따라서 광물내 함유된 자연방사성원소가 일반적인 농도일 경우 지하수내 자연방사성 물질의 기원을 해석하기에 한계성을 가질 수 있다.

본 연구에서는 지하수내 고함량으로 존재하는 자연방사성물질의 산출과 지질 및 지구화학적 상관관계를 해석하는데 있으며, 이를 위하여, 지하수중 자연방사성물질의 농도가 높은 지역을 선정하여 시추지질조사와 시추코어의 암석화학적 특성 분석, 더블팩커와 베일러를 이용한 심도별 지하수의 자연방사성 물질 및 지화학적 성분 변화를 분석하였다. 그리고 이를 종합하여 자연방사성물질의 산출을 지배하는 주요 암석광물과 지하수의 화학적 상관성을 해석하고자 하였다.

## 연구지역 및 연구방법

### 시추지질조사

연구지역내 시추지점은 충청북도 괴산군 연풍면 유하리 204-1 “나무야 나무야” 캠핑장부지내로 지리적 좌표 N 36°46'48.7", E 127°58'32.9" 지점이다(Fig. 1). 시추지점은 기존 지하수중 방사성물질의 농도가 높게 검출되었던 공공용 부지로서 관리가 용이한 지역을 우선순위로 선정하였다. 시추지점에서 약 36m 떨어진 지점에 지하수 관정이 위치하고 있고, 현재는 음용으로 이용하지 않고 생활용 지하수 관정으로 이용되고 있다. 연구대상지역 지질특성과 심도별 지하수의 화학적 특성을 알아보기 위하여 선정된 시추지점에서 시추공을 굴착하였

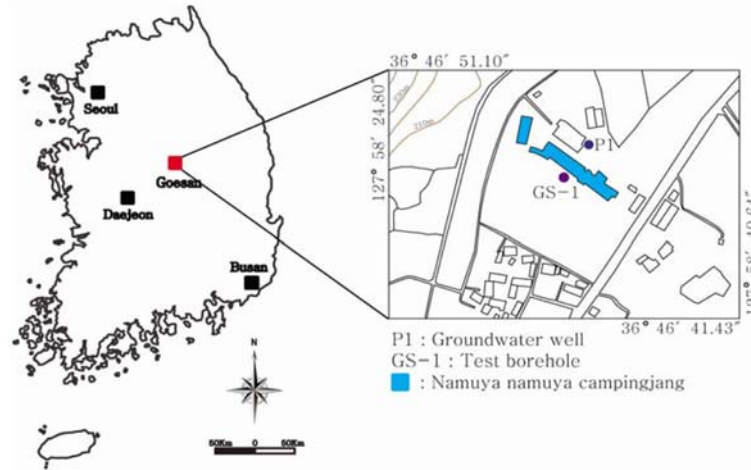


Fig. 1. Map showing the locations of boreholes (GS-1 and P1) at the Goesan site.

다. 괴산지역 시추공의 심도는 지표로부터 120 m이며, 시추공의 케이싱 심도는 지하 6 m로 하였다. NX 공경의 시추공 설치 후 지하수의 자연유출(natural overflow)이 발생하는 피압대수층임을 확인하였다. 시추를 통하여 얻어진 시추코어를 이용하여 지질주상도를 작성하였으며 일정한 심도별로 시추코어 샘플을 채취하여 화학성분 및 현미경관찰에 활용하였다.

**암석광물 화학분석**

괴산지역 시추코어 암석에 대한 지화학적 성분을 분석하기 위하여 암석 종류별로 9개의 샘플(GS-1, GS-2, ... GS-7, GS-9)을 일정 깊이별로 채취하였다. 암석의 구성광물과 자연방사성원소의 함유특성을 알아보기 위하여 암석박편을 제작하여 암석현미경관찰을 실시하였으며 이를 통해 미세조직의 관찰 및 자연방사성 물질의 산출 특성 분석에 활용하였다. 광물내 우라늄과 토륨의 함량과 화학적 성분 조성을 알아보기 위해 후방산란전자영상(Back Scattered electron Image, BSI)과 파동분산분광기(Wave Dispersive Spectrometer, WDS)를 이용하여 분석하였다. 사용한 기기는 서울대학교 기초과학공동기기원의 EPMA(일본 JEOL사 JXA-8900R 모델)이었으며 암석시료의 주요원소 성분에 대한 정량적 및 정성적 분석을 위하여 X-선 형광분석(X-ray Fluorescence spectrometry, XRF)을 실시하였다. 그리고 암석의 우라늄 및 토륨 등 우라늄계열을 포함한 미량원소(Cr, Pb, Zn, Ni, Cu, Co, Ce, Nd, La, Ba, Sr, Be, Rb, Cs, Pr, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb 등)의 분석을 위하

여 한국기초과학지원연구원의 유도결합쌍플라즈마질량기(Fison model PQ III, ICP-MS)를 이용하여 분석하였다.

**지하수 시료채취 및 현장수질측정**

연구지역 지하수는 더블패커(double-packer)를 이용하여 구간별 지하수를 채취하였으며 서로 다른 구간의 지하수 혼합을 방지하기 위하여 하부구간에서부터 10 m 간격으로 상향 이동시키면서 채취하였다. 심도 -70 ~ -80 m 구간은 심한 파쇄대 구간으로 -70 m 이하는 시추공벽의 붕괴를 막기 위해 베일러를 이용하여 지하수를 채취하였다. 지하수 채취를 위한 더블패커 설치시, 두 개의 패커를 10 m 구간의 길이만큼 연결봉으로 연결 후 시험구간까지는 상부 패커 위에 액셀레이프(15 mm)를 연결하여 패커를 장착시켰다. 이 후, 20~25 kPa 압력의 물을 이용하여 패커를 팽창시켜 상하부를 격리시켜 구간별 지하수의 혼합을 최소화하였다.

지하수 시료채취는 2차례에 걸쳐 이루어졌으며 각 구간별로 토출관을 통해 나오는 지하수를 충분히 안정화시킨 후 대기와의 접촉을 최소화할 수 있는 조건에서 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 산화환원전위(Eh), 용존산소량(DO), 중탄산이온(bicarbonate, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)을 측정하였다. 지하수의 현장수질측정은 Orion 5 star 모델의 휴대용 측정기를 이용하였으며, 중탄산이온은 0.05 N 농도의 HCl로 산중화적정법을 이용하여 농도를 구하였다.

지하수의 주요 양·음이온과 미량원소 분석 그리고 산소/수소의 동위원소 분석을 위하여 0.2 μm 공극을 갖는 여과지를 이용하여 부유물질을 제거한 후 각각 60

mL의 폴리에틸렌 용기에 채수하였다. 양이온 시료에는 이온의 용기 흡착과 침전을 방지하기 위하여 적정량의 농질산을 첨가하여 pH 2 이하로 유지될 수 있도록 하였다.

#### 지하수 화학성분 및 라돈 분석

지하수 시료는 0~4°C 냉장 보관 상태로 보존하여 분석하였으며, 주요 양이온과 미량원소는 기초과학지원연구원(오창센터) 유도결합 플라즈마 원자방출분광기(ICP-mass optima 4300DV, ICP-AES)와 유도결합 플라즈마 질량분석기(Fison model PQ III, ICP-MS) 등의 장비로 분석하였다. 음이온 성분( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $F^-$ )은 한국 기초과학지원연구원(부산센터)에서 이온크로마토그래피(IC, Dionex 120i)를 사용하여 분석하였다.

라돈가스 분석을 위한 시료는 대기와의 노출을 최소화하여 22 mL 시료 용기에 지하수 8 mL와 액체섬광물질(Optiphase Hisafe3) 12 mL를 첨가하여 충분히 혼합시킨 후 한국지질자원연구원의 액체섬광계측기로 측정하였다.

#### 지질 및 시추코어 암석화학

연구지역의 지질은 주로 고생대 후기 오르도비스기 옥천층군의 화전리층과 백악기 불국사 화강반암으로 구성되어 있으며, 부분적으로 산성암맥과 염기성암맥이 관입되어 있는 형태를 이루고 있다(Fig. 2). 연구지역에 대한 일반지질에 대한 설명은 괴산도폭(Lee and Kim, 1972)을 인용하여 간략하게 기술하였다.

연구지역에 넓게 분포하고 있는 화전리층의 구성 암석은 암회색점판암, 흑색석회규산염암 등이다. 이들 암석은 대부분이 규화작용을 비롯한 고대작용을 받고 있는 것이 특징이며, 특히 석회규산염암이 가장 우세하다. 백악기 화성암류의 구성암은 화강반암과 그 밖에 우백질 반상화강암 등의 화강암류 및 산성과 염기성암맥 등이다. 화강반암은 일반적으로 세립질이며, 이 중에는 석영반암 및 반화강암의 암상을 갖는 것이 혼재되어 있는 형태가 일반적이다. 우백질화강암 역시 조립질이나 흑운모의 함량이 감소되면서 다소 우백질 조암광물의 반상조직을 나타내는 곳이 적지 않다. 한편 산성 및 염기성 암맥류는 모든 지층과 암체를 관입하고 있으며, 암맥의 구성암은 대부분 석영반암, 반화강암 또는 화강반암이며, 그 밖에 석영맥과 염기성암맥이 있다. 대부분의 산수계가 장년지형상을 이룸으로서 꼭지나 하천연변에 지층과 암체를 부정합으로 덮고 발달되어 있으며 층적층의 규모는 미약한 것으로 나타났다.

#### 지질주상도

시추코어의 암석특성, 단열층전광물 특성, 파쇄대, 코어 회수율 등을 포함하는 정밀한 지질주상도를 작성하였다(Fig. 3). 시추공의 수직적 지질특성을 보면 지표에서 -2.2 m까지 매립층이며, -2.2 ~ -5.2 m 구간은 흑갈색의 실트질 모래 풍화토와 잔자갈로 구성되어 있는 것으로 확인되었다. -5.2 ~ -8.0 m 구간에서는 탄산염암이 확인되었으며, -8.0 ~ -33.4 m 구간은 비교적 신선하며 강한 석회규산염암이 나타났다. -33.4 ~ -50.0 m 구간은 석회질을 소량 포함하는 흑색점판암이 확인되었다. 흑색

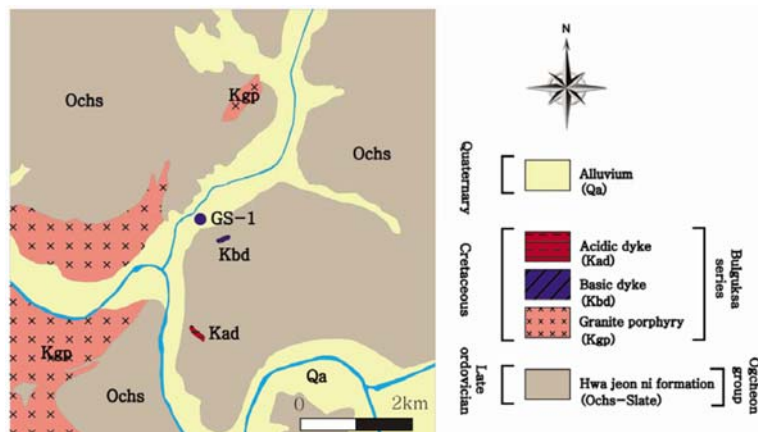


Fig. 2. Geological map of the study area, showing the location of the borehole at the Goesan site (modified from Lee and Kim, 1972).

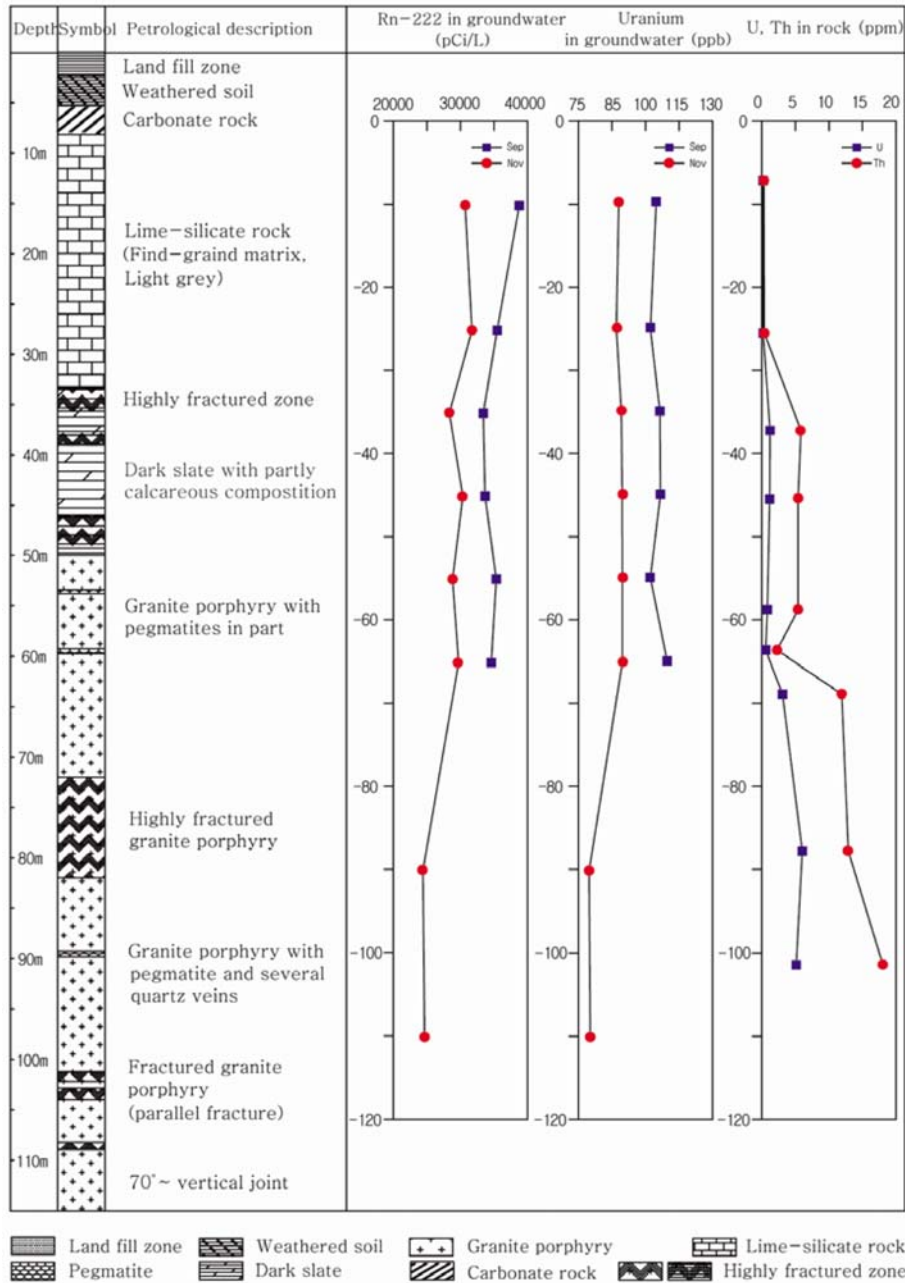


Fig. 3. Geological columnar section of the drilled borehole at the Goesan site, showing the distribution of radioactive materials in groundwater and rock samples.

점판암의 구간 중 -33.4 ~ -35.6 m, -37.7 ~ -39.0 m, -46.0 ~ -49.3 m 구간이 풍화대 및 파쇄대 구간이다. -50.0 ~ -120.0 m 구간은 담회색 또는 담홍색의 화강반암이 주된 암석이었으며, -71.9 ~ -82.0 m에서는 비교적

심하게 풍화된 파쇄대가 확인되었다. -101.2 ~ -102.2 m, -102.9 ~ -104.0 m, -108.5 ~ -108.9 m에서도 파쇄대가 확인되었다. 단열파쇄구간에는 석영맥과 페그마타이트가 확인되었으며, 일부 단열구간에서는 점토질 물질이 확인

되었다.

-71.9~-82.0 m 파쇄대 발달 구간의 코어회수율(RQD)은 9%로 상당히 낮았으며, 다른 구간의 파쇄대에서는 14~31%로 낮은 값을 보인다. 그 외 구간에서는 코어회수율(RQD)이 40~100% 정도의 보통암으로 견고한 암질상태를 보였다.

#### 암석 및 광물 화학조성

괴산지역 시추코어에 대한 우라늄(U)와 토륨(Th)을 포함한 미량원소 분석결과는 Table 1에 제시되었다. 암석 내 우라늄의 함량은 <0.2~14.8 ppm의 범위이며, 토륨은 0.56~45.0 ppm의 범위로 분석되었다. 가장 높은 우라늄 함량을 보이는 암석은 화강반암(GS-8)이며, 탄산염암(GS-1)에서 가장 낮은 우라늄 함량을 보였다.

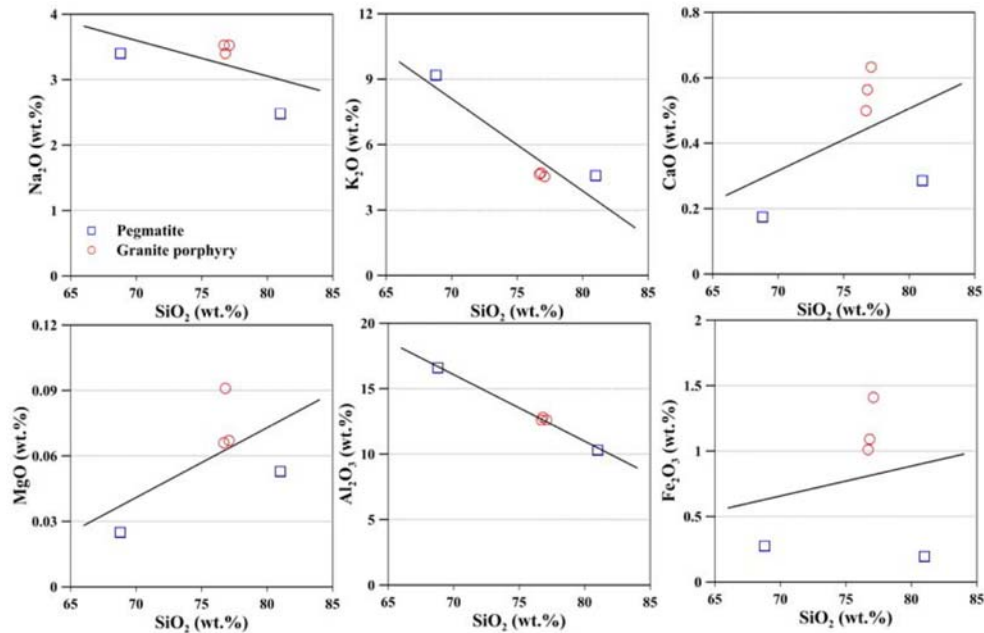
**Table 1.** Concentrations of trace elements in rock and mineral samples from the borehole at the Goesan site. (unit: ppm)

	GS-1	GS-2	GS-3	GS-4	GS-5	GS-6	GS-7	GS-8	GS-9
Rock type	CR	LS	SL	SL	PG	PG	GP	GP	GP
Depth (m)	-7.70	-26.95	-37.20	-46.24	-59.00	-63.0	-69.96	-88.20	-102.8
Pb	1.19	1.75	6.83	4.26	20.8	40.3	25.5	26.9	28.9
Zn	70.5	101.0	114.9	87.7	3.46	3.29	23.7	20.3	14.7
Ga	0.37	3.26	28.4	29.8	12.9	18.9	17.9	19.7	17.7
Rb	<0.2	4.02	319.7	225.7	166.3	341.6	235.4	361.5	366.7
Y	12.9	20.2	18.2	8.49	11.0	7.73	44.4	49.6	62.4
Mo	32.8	11.4	1.76	4.92	<0.2	0.26	0.57	<0.2	<0.2
Nd	10.2	11.2	34.4	7.9	6.45	3.17	16.9	27.7	19.9
Tb	0.44	0.76	0.61	0.24	0.26	0.17	1.09	1.14	1.10
Lu	0.08	0.10	0.45	0.23	0.22	0.18	0.84	0.91	1.11
Hf	0.29	0.41	5.61	2.59	1.25	0.60	3.49	4.54	4.88
Ni	8.53	10.5	22.2	23.0	<0.2	<0.2	0.31	0.40	2.83
Cu	15.0	0.69	11.7	17.4	0.27	0.28	0.69	1.26	0.91
Co	1.61	8.00	26.0	20.1	<0.2	<0.2	0.31	0.40	2.83
Ce	15.0	12.2	58.5	13.4	10.4	5.28	24.9	45.3	32.9
Nd	0.58	2.57	17.0	15.4	6.70	4.11	26.9	33.3	38.2
La	6.82	3.46	28.6	8.02	4.69	2.77	10.1	19.5	14.3
Ba	3.19	17.1	200.1	271.4	9.43	18.7	5.02	51.2	12.7
Sr	210.1	194.5	99.4	294.4	10.2	14.8	5.98	17.2	9.62
Be	<0.2	4.21	1.95	4.33	2.76	1.87	6.38	6.00	6.16
Eu	0.86	0.84	0.96	0.47	0.09	0.16	0.65	0.14	0.09
Cs	<0.2	0.85	20.1	23.5	1.80	2.7	7.12	6.83	4.93
Pr	1.94	2.07	6.62	1.45	1.28	0.61	3.31	5.48	3.96
Sm	2.29	3.92	4.60	1.32	1.36	0.70	4.64	5.58	4.36
Gd	3.07	5.13	5.07	1.61	16.0	0.92	5.97	6.73	5.90
Dy	2.61	4.47	3.73	1.73	1.88	1.36	8.02	8.29	8.96
Ho	0.44	0.70	0.81	0.38	0.41	0.30	1.70	1.76	2.03
Er	1.05	1.59	2.74	1.30	1.30	0.99	5.33	5.65	6.69
Tm	0.12	0.16	0.41	0.20	0.20	0.16	0.82	0.88	1.05
Yb	0.65	0.89	2.80	1.46	1.41	1.12	5.55	6.05	7.33
Th	0.56	0.71	14.3	14.2	13.2	5.67	29.3	32.9	45.0
U	<0.2	0.26	2.86	2.53	1.73	1.24	7.43	14.8	12.3

CR: Carbonate rock, SL: Slate, PG: Pegmatite, GP: Granite porphyry

**Table 2.** Major element composition of core samples in the study area. (unit: wt.%)

Sample ID	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	L.O.I	Total
GS-1	1.27	32.9	0.002	19.4	ND	0.105	2.46	0.494	N.D.	0.014	41.4	98.0
GS-2	53.2	37.0	0.070	1.65	0.44	1.81	4.74	0.653	0.007	0.077	N.D.	100
GS-3	56.6	2.66	4.34	6.09	2.38	15.0	9.74	0.068	0.179	1.52	0.827	99.5
GS-4	57.1	5.27	2.87	3.94	1.84	16.4	7.42	0.099	0.186	1.35	2.20	98.7
GS-5	81.0	0.286	4.59	0.053	2.48	10.3	0.194	0.004	N.D.	0.013	N.D.	99.0
GS-6	68.8	0.174	9.19	0.025	3.40	16.6	0.274	0.009	N.D.	0.005	0.312	98.8
GS-7	77.1	0.633	4.53	0.067	3.53	12.6	1.41	0.057	N.D.	0.050	0.208	100
GS-8	76.8	0.564	4.70	0.091	3.40	12.8	1.09	0.044	0.008	0.075	0.582	100
GS-9	76.7	0.500	4.64	0.066	3.53	12.6	1.01	0.039	0.002	0.053	0.432	100



**Fig. 4.** Variations in major chemical compositions as a function of SiO<sub>2</sub> content for rock samples from the core at the Goesan site.

토륨의 경우, 가장 높은 함량을 보이는 암석은 화강 반암(GS-9)이며, 탄산염암(GS-1)에서 가장 낮은 함량을 보였다. 우라늄과 토륨의 함량은 중금속과 희토류원소(REE)의 함량과 전체적으로 비례하는 특징을 보였다.

시추코어에서 채취된 암석의 주요 화학성분에 대한 자료는 Table 2에 제시되었다. 암석의 주요 화학성분 분석은 탄산염암, 석회규산염암, 점판암, 페그마타이트, 화강반암 등으로 암종을 구분하여 분석하였다.

페그마타이트(GS-5, GS-6)는 가장 높은 SiO<sub>2</sub> 함량을 보였으며, 그 범위는 68.8~81.0 wt%로 분석되었다. 화강

반암(GS-7, GS-8, GS-9)의 SiO<sub>2</sub> 함량의 범위는 76.7~77.1 wt%로 분석되었다. 점판암(GS-3, GS-4)의 SiO<sub>2</sub> 함량은 56.6~57.1 wt%의 범위였으며, 높은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량을 보였다. 석회규산염암의 SiO<sub>2</sub> 함량은 53.2 wt%이며, 높은 CaO의 함량을 보였다. 탄산염암의 SiO<sub>2</sub> 함량은 1.27 wt%로 가장 낮은 함량을 보였으며, CaO, MgO 함량은 가장 높은 함량을 보였다. 탄산염암과 석회규산염암의 K<sub>2</sub>O와 Na<sub>2</sub>O의 함량은 다른 암석보다 비교적 낮은 것으로 분석되었다.

채취된 암석 중 페그마타이트와 화강반암에 대한 주

요 화학성분에 대한 원소변화 경향을 Harker diagram에 도시하였다(Fig. 4). SiO<sub>2</sub> 함량에 대한 각 성분의 변화를 보면, SiO<sub>2</sub> 함량 증가에 따라 Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량은 감소하는 경향을 보이는 반면, CaO, MgO,

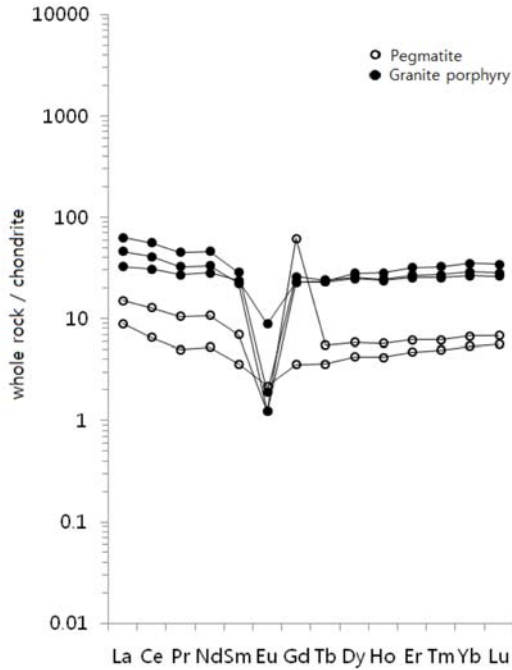


Fig. 5. Normalized rare earth element (REE) patterns of chondrite in rock samples from the core at the Goesan site.

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분은 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

괴산지역의 희토류원소를 Nakamura (1974)의 chondrite에 대한 분석치로 표준화한 REE 패턴을 분석하였다(Fig. 5). 압중별 평균화한 희토류의 총량은 페그마타이트의 경우 1.22~61.78 ppm 범위였으며, 화강반암의 경우 1.22~62.90 ppm 범위로 경희토류(LREE)가 중희토류(HREE)보다 부화된 것으로 분석되었다. 사장석의 분별작용을 지시하는 Eu(-) 이상은 화강반암이 페그마타이트보다 현저하게 낮은 것으로 나타난다.

### 지하수의 수리화학 특성

#### 현장수질측정 결과

시추공에서 심도별로 채취된 8개 지하수 시료에 대해 현장에서 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO)을 측정하였으며, 그 결과는 Table 3에 제시하였다.

Fig. 6에서는 시추공 심도에 따른 지하수의 pH, EC, Eh, DO의 시기별 변화특성을 나타내었다. 구간별 지하수 산출량은 1.9~5.9 m<sup>3</sup>/day으로 구간에 따라 차이를 보였다. GS-YH3 구간에서는 상대적으로 소량의 지하수 산출량을 보였으며, 나머지 구간(GS-YH1~2, GS-YH4~6)에서는 비교적 높은 산출량을 보였다.

2회에 걸친 현장수질 측정결과, 지하수의 수소이온농도(pH)는 7.8~8.4의 범위였으며, 1차 샘플에서는 상부에

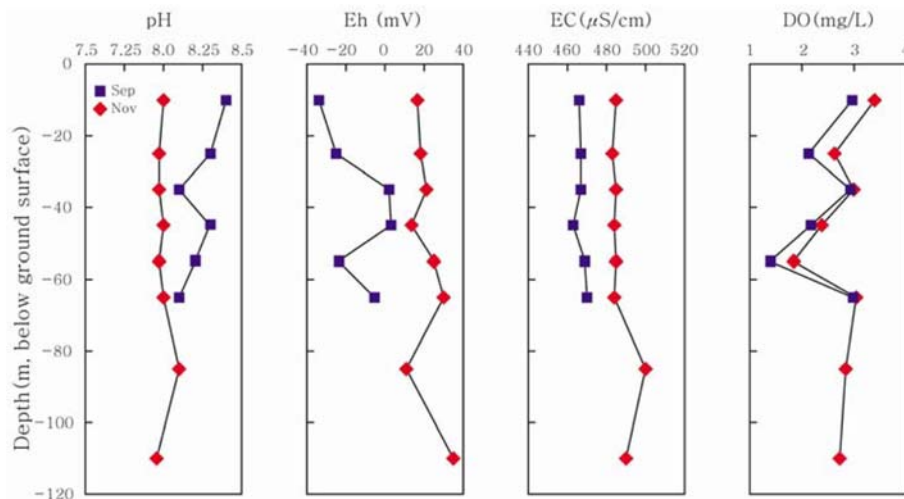


Fig. 6. Vertical variations in pH, electrical conductivity (EC), oxygen reduction potential (ORP), and dissolved oxygen (DO) in groundwater samples from the core at the Goesan site.



**Table 3.** Chemical composition of groundwater samples collected at different depths in the borehole at the Goesan site.

Sample ID	Depth (m)	Sampling date	pH	EC (uS/cm)	Eh (mV)	DO (mg/L)	T (°C)	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Si <sup>2+</sup>	Si <sup>4+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	F <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	E (%)	Q* (sec)
GS-YH1	0~20	25/09/12	8.4	466	-33.4	2.96	14.6	1.76	90.9	18.8	1.29	0.12	9.14	0.09	214	28.1	7.83	7.40	0.42	0.06	1.89	19
		06/11/12	8.0	485	16.7	3.32	13.8	1.13	85.4	15.4	1.03	0.12	8.08	0.02	229	28.0	9.0	6.51	0.45	-	-4.9	38
GS-YH2	20~30	25/09/12	8.3	467	-25.1	2.12	14.8	1.83	89.8	18.8	1.29	0.12	9.26	0.10	214	28.2	10.4	7.30	0.04	0.06	0.98	21
		06/11/12	7.9	483	17.3	2.62	13.9	1.12	84.6	15.3	1.01	0.12	7.91	0.02	221	27.0	9.0	6.45	0.45	-	-3.8	27
GS-YH	30~40	25/09/12	8.1	467	2.2	2.93	15.0	1.79	91.1	18.7	1.27	0.12	9.24	0.10	209	28.1	10.3	7.30	0.07	0.06	3.70	19
		06/11/12	7.9	485	21.2	2.99	13.9	1.13	83.5	15.1	1.01	0.12	7.97	0.01	227	27.0	9.0	6.47	0.45	-	-5.4	59
GS-YH4	40~50	25/09/12	8.3	463	2.4	2.18	15.0	1.90	91.2	18.5	1.27	0.12	9.11	0.10	198	27.7	7.89	7.30	0.39	0.11	4.84	38
		06/11/12	8.0	484	14.1	2.38	14.1	1.14	84.8	15.3	1.02	0.12	8.01	0.02	229	28.0	10.0	6.40	0.45	-	-5.5	30
GS-YH5	50~60	25/09/12	8.2	469	-23.9	1.39	15.6	1.71	93.2	18.3	1.25	0.13	9.21	0.07	211	28.6	7.72	7.40	0.40	0.15	2.97	36
		06/11/12	7.9	485	25.1	1.84	14.1	1.17	85.3	15.0	1.02	0.12	8.01	0.02	217	28.0	9.0	6.46	0.45	-	-3.2	31
GS-YH6	60~70	25/09/12	8.1	470	-5.4	2.98	15.1	1.84	95.6	17.8	1.23	0.13	9.21	0.07	209	29.6	10.4	7.40	0.02	0.06	3.28	18
		06/11/12	8.0	484	30.1	3.04	14.1	1.14	86.1	15.0	1.00	0.12	7.95	0.02	229	28.0	9.0	6.50	0.45	-	-4.9	45
GS-YH7	80~100	06/11/12	8.1	500	11.4	2.84	13.5	1.20	85.3	14.2	1.13	0.11	7.34	0.06	217	27.0	9.0	6.54	0.45	-	-3.3	-
GS-YH8	100~120	06/11/12	7.8	490	25.3	2.72	13.4	1.24	83.7	14.4	1.16	0.11	7.26	0.05	220	27.0	9.0	6.41	0.45	-	-4.4	-

\*Elapsed time (sec) for 1 L of bottle with groundwater during the pumping tests

서 하부로 갈수록 pH는 8.4에서 8.1로 감소하는 경향을 보였다. 2차 샘플에서는 pH 8.0에서 7.8로 약간 감소한 pH 특성을 보였다.

지하수의 산화환원전위(Eh)는 -33.4~30.1 mV의 범위를 보이며, 1차 시기보다 2차 시기에 더 높은 값을 보였다. 2차 시기는 상부와 하부구간의 큰 차이를 보이지 않은 반면 1차 시기는 -40 m 지점에서 크게 증가하는 경향으로 분석되었다.

지하수의 전기전도도(EC)는 463~500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위였으며, 1, 2차 시기 모두 상부에서 하부로 갈수록 전기전도도의 큰 변화는 나타나지 않았지만 2차 시기의 -110 m 지점에서 약간의 증가 후 다시 감소하는 경향을 보였다.

지하수의 용존산소량(DO)은 1.39~3.32 mg/L의 범위를 보이며, 시기별로 비슷한 용존산소량을 보였다. 심도별로 상부에서 하부로 갈수록 감소와 증가를 반복하는 경향을 보였다.

Fig. 7은 지하수의 pH-Eh의 상관관계를 나타내었다. 1차 샘플과 2차 샘플 모두 pH가 증가할수록 Eh 값은 감소하는 경향을 보였으며, 이는 심부로 향할수록 보여

주는 일반적인 지하수의 진화환경을 보여주는 것이라 할 수 있다. 2차 지하수 시료는 1차 지하수에 비해 약산성의 pH 값을 보여주었으며, Eh값 증가와 함께 산화환경 형성을 보여주었다. pH와 Eh값은 부(Negative)의 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다.

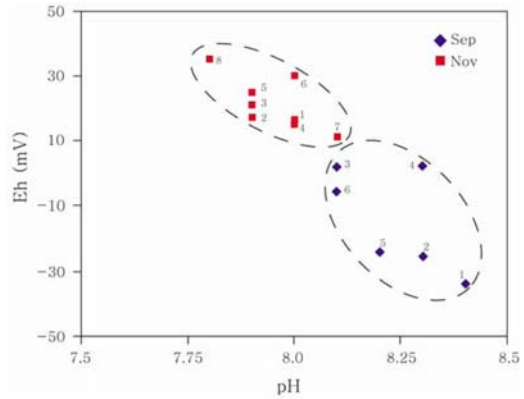


Fig. 7. Relationship between pH and redox potential (Eh) in groundwater samples from the borehole at the Goesan site.

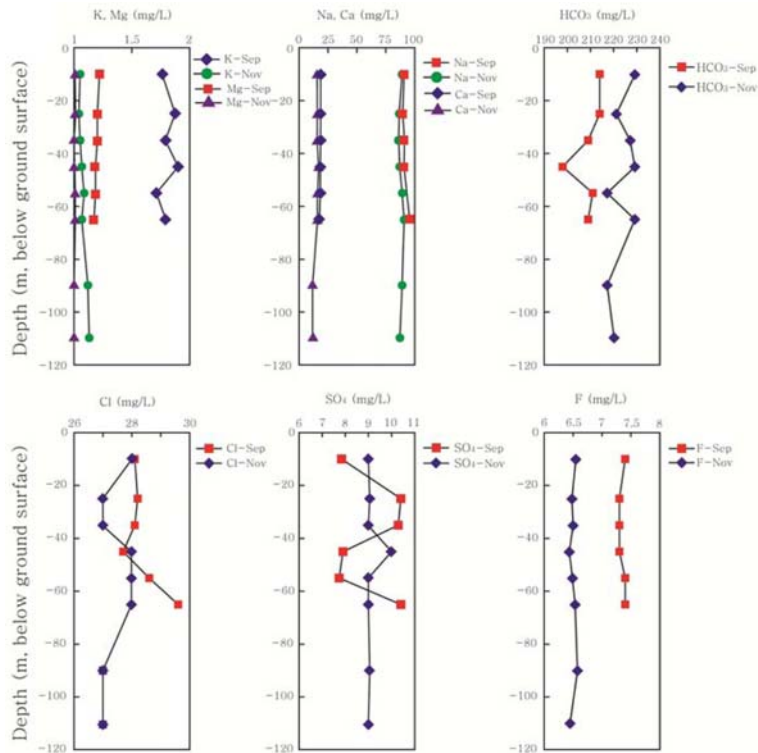


Fig. 8. Vertical variations in the major element composition of groundwater in the borehole at the Goesan site.

현장수질 측정 자료를 통해 볼 때, 1차 시기의 지하수는 심도별 수질차이는 어느 정도 반응을 하지만, 2차 시기 지하수의 pH, Eh, 그리고 EC 값이 심도별로 차이를 보이지 않는 점과 피압대수층에 의한 역류현상으로 보아 상부와 하부구간 사이에 혼합이 이루어진 것으로 추정된다.

**지하수의 주요 화학 성분**

지하수의 주요화합성분에 대한 자료는 Table 3에 제시되어있다. 지하수의 심도별 및 시료 채취 시기별 지하수내 주요이온의 함량 변화는 Fig. 8에 나타내었다.

지하수내 가장 풍부한 양이온인 Na<sup>+</sup>은 83.5~95.6 mg/L의 범위였으며, Ca<sup>2+</sup>은 14.2~18.8 mg/L의 범위였다. Mg<sup>2+</sup>은 1.0~1.29 mg/L의 범위였으며, K<sup>+</sup>은 1.12~1.90 mg/L의 범위를 보였다. Mg<sup>2+</sup>은 시기별로 2차 시기가 더 낮은 함량을 보였으며, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>은 심도별, 시기별로 비슷한 경향을 보였다.

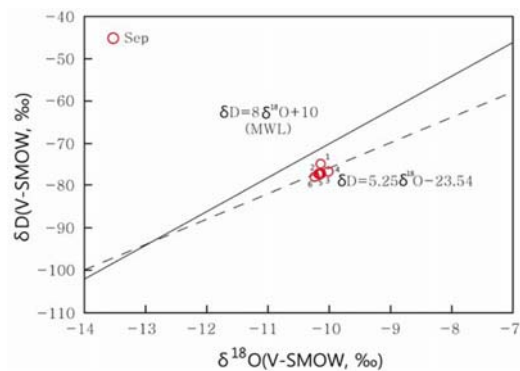
지하수내 가장 풍부한 음이온인 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 탄산염 광물의 용해, 대기와 토양 내 CO<sub>2</sub> 가스의 용해 등과 같은 자연적 반응으로 인해 기원하는 이온으로서 연구지역 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 198~229 mg/L의 범위를 보였다. 시기별로 2차 시료가 1차 시료보다 적은 농도를 보였으며, 심도별로는 두 시기 모두 상부에서 하부로 갈수록 약간 감소하는 경향을 보여주었다.

Cl<sup>-</sup>은 27.0~29.6 mg/L의 범위로 시기별로 비슷한 함량을 보여주었으며, 상부에서 하부로 갈수록 감소와 증가를 반복하는 경향을 보여주었다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 7.72~10.4 mg/L의 범위로 1차 시기는 큰 폭으로 증가와 감소를 반복하는 경향을 보인 반면, 2차 시기는 상부와 하부간의 큰 차이를 보이지 않았다.

생활하수나 축산폐기물 등의 인위적 오염에 의한 기원(Appelo and Postma, 1996)이 대부분이면서 지하수 오염 지표가 되는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 0.02~0.45 mg/L의 범위로 비교적 낮은 농도분포를 보였다. 불소(F<sup>-</sup>)의 함량은 6.40~7.4 mg/L의 범위로 2차 시기가 1차 시기 보다 감소된 농도를 보였으며, 구간별로 거의 차이가 없이 높은 함량을 보였다. 지하수내 불소의 기원은 주로 형석(CaF<sub>2</sub>)의 용해, 운모류의 OH기를 치환한 F의 용해 등에서 기원하는 것으로 알려져 있다. 연구지역 지하수의 고농도 불소의 기원은 화강반암의 흑운모와 관련된 수 있으나 점판암과의 관련성 등에 대한 연구가 보완되어야 할 것으로 판단된다.

**Table 4.** Stable isotope composition of groundwater samples collected from the borehole at the Goesan site.

Sample ID	Sampling date	δ <sup>18</sup> O (‰)	δD (‰)
GS-YH1	25/09/12	-10.15	-74.8
GS-YH2	25/09/12	-10.16	-77.2
GS-YH3	25/09/12	-10.14	-77.1
GS-YH4	25/09/12	-10.02	-76.6
GS-YH5	25/09/12	-10.18	-77.1
GS-YH6	25/09/12	-10.24	-77.9



**Fig. 9.** δ<sup>18</sup>O versus δD values of groundwater samples collected from the borehole at the Goesan site.

**산소·수소동위원소 특성**

시추공 지하수에 대한 산소, 수소 동위원소를 분석하여 Table 4에 제시하였다. 시추공내 6개의 지하수 샘플(GS-YH1, 2, 3, 4, 5, 6)에 대한 δ<sup>18</sup>O와 δD값은 각각 -10.24‰~-10.02‰과 -77.9‰~-74.8‰의 범위를 보였다.

연구지역 지하수의 δD와 δ<sup>18</sup>O의 상관관계를 보여주는 다이어그램은 Fig. 9에 제시하였다. 지하수의 산소·수소 동위원소 상관관계식은 δD = 5.25δ<sup>18</sup>O - 23.54로 분석되었으며 이는 Craig (1961)에 의해 제시된 순환수선(global meteoric water line: δD = 8δ<sup>18</sup>O + 10)보다 다소 하향 이동되어 위치하는 것으로 나타났다. 시추공 지하수의 δD와 δ<sup>18</sup>O 성분은 거의 유사한 범위를 보였다.

**지하수의 수리화학적 유형**

심도별 지하수의 수리화학적 유형을 파이프도(Piper, 1994)에 도시하였다(Fig. 10). 지하수의 화학적 유형은 Na-HCO<sub>3</sub>유형으로 분류되었으며 양이온은 Na<sup>+</sup>의 함량이 우세하고, K<sup>+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>의 함량이 낮은 것으로 분석되

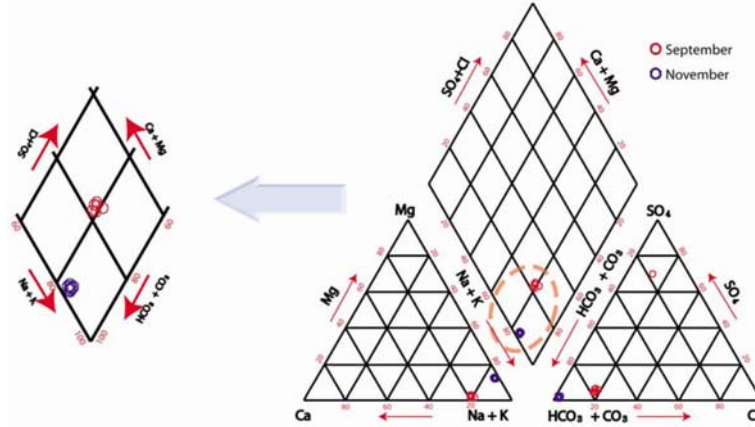


Fig. 10. Piper diagram showing the chemical composition of samples at the Goesan site.

었다. 음이온의 경우, HCO<sub>3</sub>의 함량이 우세한 것으로 분석되었다. 지하수의 지화학적 진화과정에 대한 모델링에 의하면 화강암과 편마암지역 지하수는 지화학적 진화단계 초기에 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형에서 시작하여 진화과정을 거치면서 물-암석 반응에 의해 Ca(Na)-HCO<sub>3</sub> 유형을 거쳐 최종적으로 알카리성의 Na-HCO<sub>3</sub> 유형으로 진화되는 경향을 보이는 것으로 제시하였다(Jeong et al., 1997). 시추공에서 확인된 바와 같이 연구지역의 지질은 상부에 탄산염암, 석회규산염암과 점판암으로 이루어져 있으며, 하부구간은 주로 화강반암으로 이루어져 있어 지질에 따른 상하 구간의 지하수 화학성분의 차이가 나타날 것으로 예상되었지만 연구지역 수리지질학적 특성에 따른 지하수의 순환과 혼합에 의해 지화학적 특성은 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 전반적으로 비교적 Na 함량이 높은 Na-HCO<sub>3</sub> 유형을 보였으며 이는 지하수의 지화학적 진화에 의한 요인보다는 지질특성에 의한 물-암석 상호반응에 의한 것으로 추정된다.

**자연방사성물질 분포**

**지하수내 자연방사성물질**

자연계내 가장 무거운 방사성 물질인 우라늄은 자연 방사성 물질의 일차적인 근원 물질로서 본 연구에서는 지하수내 심도별 우라늄의 분포 특성에 대하여 분석하였다(Table 5). 시추공 심도별 지하수내 우라늄의 함량은 72.5~113.7 ppb의 범위로 심도별 큰 차이를 보이지 않았으며 모든 구간에서 미국 EPA의 기준치인 30 ppb를 초과하는 것으로 분석되었다.

Table 5. Stable isotope composition of groundwater samples collected from the borehole at the Goesan site.

Sample ID	Depth (m)	Sampling date	Rn-222 (pCi/L)	Uranium (ppb)
GS-YH1	0~20	25/09/12	38,600	109.3
		06/11/12	30,820	86.2
GS-YH2	20~30	25/09/12	35,440	106.0
		06/11/12	31,620	85.9
GS-YH3	30~40	25/09/12	33,280	110.1
		06/11/12	28,190	86.5
GS-YH4	40~50	25/09/12	33,710	110.1
		06/11/12	30,340	86.5
GS-YH5	50~60	25/09/12	35,370	108.0
		06/11/12	28,760	86.9
GS-YH6	60~70	25/09/12	34,560	113.7
		06/11/12	29,590	86.8
GS-YH7	80~100	06/11/12	24,300	73.9
GS-YH8	100~120	06/11/12	24,410	72.5

연구지역 시추공내 지하수의 라돈-222의 함량은 24,410~38,600 pCi/L가 검출되어, 미국 EPA의 AMCL인 4,000 pCi/L를 8구간 모두에서 초과하였다. 시기별로는 2차에 채취한 시료가 1차에 채취한 시료보다 라돈-222함량이 감소하였으며, 지하수의 심도가 깊어질수록 라돈-222의 함량이 감소하는 경향을 보인다(Fig. 11).

심도에 따른 지하수내 자연방사성물질 함량은 심도별 암석내 우라늄 및 토륨 농도와 비교하였을 때, 큰 상관관계를 보이지 않는다. 이는 암석내 자연방사성물질의 농도가 심도에 따라 큰 차이를 보이지 않고 또한 지하

수내 농도는 영향범위 내 대수층의 특성을 반영하므로 시추코어 농도와의 단순 비교는 어렵다.

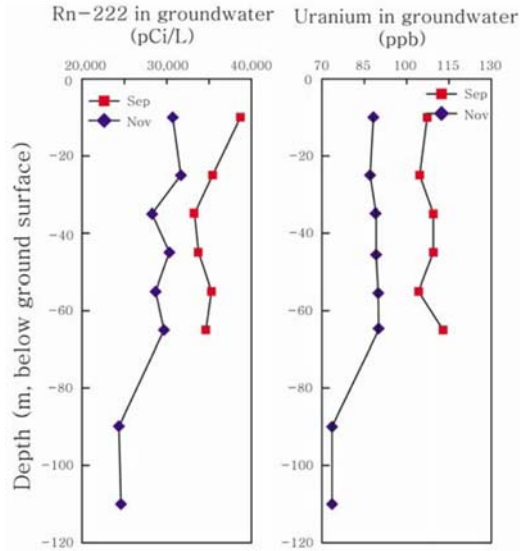


Fig. 11. Vertical variations in the uranium and Rn-222 contents of groundwater samples at the Goesan site.

시추코어 자연방사성물질 분포

암석내 방사성물질의 존재와 분포특성을 밝히기 위하여 암석현미경관찰 및 EPMA관찰을 실시하였다. 관찰 결과, 화강반암(Fig. 12a, b)과 페그마타이트(Fig. 12c, d)내 구성광물의 조직과 특징을 잘 보여주고 있으며 쌍정을 보이는 사장석과 함께 균열이 발달한 석영이 관찰되었다. 흑갈색의 흑운모는 결정내부의 벽개가 거의 소멸한 상태이며, 결정의 가장자리 경계부는 상당히 거칠게 나타나고 있는 것으로 보아 풍화변질작용을 심하게 받은 것으로 보인다. 방사성붕괴에 의한 방사성환(radioactive halo)은 흑운모 내에서 확인되었으며, 암석현미경으로 확인된 방사성 포유물의 잔유물인 방사성 환의 개수는 박편당 페그마타이트에서는 2개 이하로 확인되었다. 화강반암에서는 6~12개가 확인되어 페그마타이트보다 화강반암이 더 많은 양의 방사성포유물을 함유하는 것을 확인할 수 있었다. 방사성 환의 크기는 직경 0.029 mm 이하가 가장 많이 분포하였으며, 그 외 나머지 대부분은 0.029~0.068 mm 범위를 보인다.

광물내 방사성원소의 존재 상태를 보다 정확하게 알아보기 위하여 전자현미경분석(EPMA)을 실시하였다. 후방산란 전자영상(Back Scattered electron Image, BSI)으로 방사성원소의 존재 상태를 명암으로 확인하고, 확

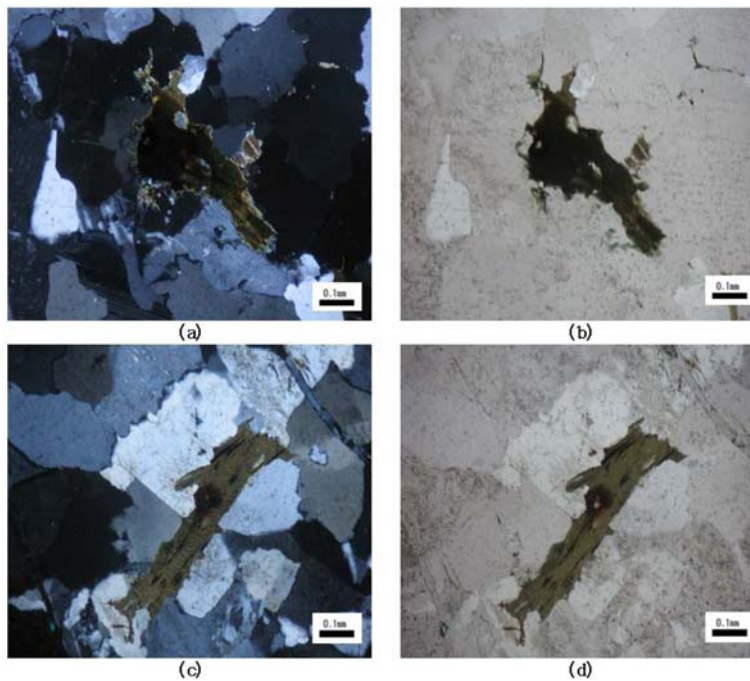


Fig. 12. Photomicrographs showing radioactive inclusions in biotite, including in granite porphyry (a, b) and pegmatite (c, d). (a), (c) under crossed nicols, and (b), (d) under open nicols.

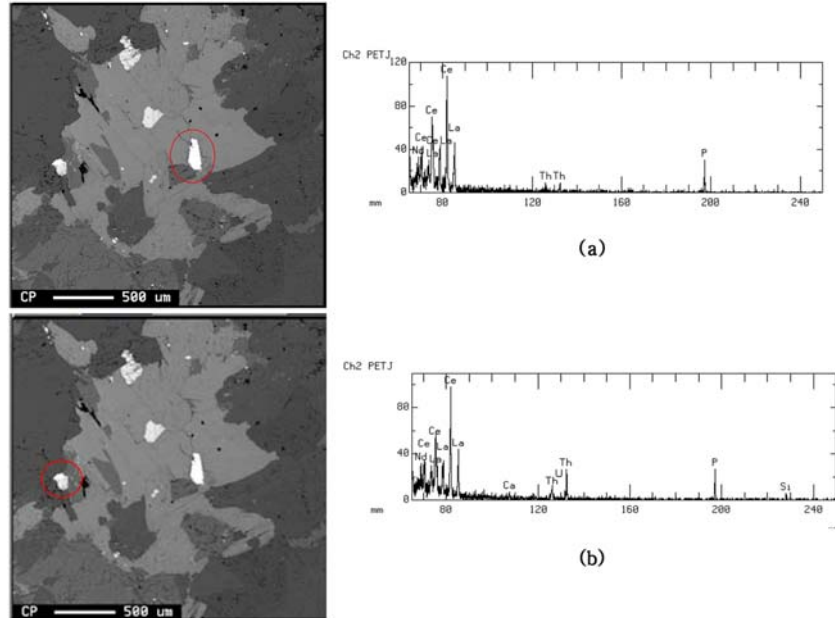


Fig. 13. Back-scattered electron image (BSI) and wave dispersion spectrum (WDS) showing contents of Th inclusions in monazite (GS-7-1(a) and GS-7-2(b)).

인된 입자에 에너지분산분광기(Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 및 파동분산분광기(Wave Dispersive Spectrometer, WDS)의 전자빔을 주사하여 정성 및 반정량 분석을 실시하여 방사성원소의 존재를 확인하였다.

암석내 방사성원소를 함유할 수 있는 부수광물로는 모나자이트(monazite), 금홍석(rutile), 인회석(apatite) 등으로 알려져 있으며 또한 일부 석영 및 장석의 입자에서도 확인되는 것으로 보고되고 있다(Choo, 2002; Jeong et al., 2012).

괴산지역 암석에서 확인된 우라늄 및 토륨을 함유하는 광물로는 모나자이트(monazite)로 이들 광물은 흑운모내 포획되어 존재하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 13a는 GS-7-1 시료에 대한 BSI 사진 및 WDS 피크로서 모나자이트의 P, O, Ce, La 성분과 함께 소량의 Nd 성분 그리고 Th 성분이 나타나는 것으로 확인되었다. Fig. 13b는 GS-7-2 시료에 대한 BSI 사진 및 WDS 피크로서 모나자이트 내 P, O, Ce, La 성분, 소량의 Nd 성분 그리고 Th와 U 성분이 확인되었다.

## 결론

지하수내 자연방사성 물질의 산출특성을 규명하기 위

한 본 연구의 결과를 비교하여 결론적으로 종합하면 다음과 같다.

(1) 충청북도 괴산군 연구용 부지에 120 m 심도의 연구용 관정을 시추하여 모암을 확인한 결과, 상부에서 지하 50 m 구간은 주로 점판암, 탄산염암과 석회규산염암으로 구성되어 있으며, 50 m 이하에서는 화강반암으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 심도에 따라 페그마타이트와 석영맥이 다수 확인 되었다.

(2) 지하수의 지화학적 성분을 분석한 결과, 심도별 8개 구간 지하수의 pH는 7.9~8.4의 범위로 상부와 하부 구간의 큰 차이가 없었으며, 1차 시료보다 2차 시료에서 약간 더 약산성화되어 있는 것으로 나타났다. Eh의 경우, 1차 시기의 지하수는 심도별 뚜렷한 차이를 보이지만, 2차 시기의 지하수는 심도별로 수리화학 특성이 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. EC와 DO는 심도 및 시기별로 큰 차이를 보이지 않았으며, 지하수의 화학적 유형은 Na-HCO형으로 Na 성분이 다소 높은 특성을 보이고 특히 불소의 함량이 7.3 mg/L로 상당히 높은 특성을 보여 주었다.

(3) 암석내 우라늄과 토륨의 함량은 각각 <math>0.2\sim 14.8\text{ ppm}</math>과 <math>0.56\sim 45.0\text{ ppm}</math>의 범위를 보여 고함량은 아니지만, 지하수의 경우 우라늄과 라돈의 함량은 각각 72.5~

113.7 ppb와 24,300~38,600 pCi/L 범위를 보여 전체 구간에서 미국 EPA 기준을 크게 초과하였다.

(4) 방사성 포유물의 잔유물인 방사성 환의 개수는 화강반암 내 흑운모에서 6~12개가 관찰되었으며, 페그마타이트 역시 흑운모내에서 2개 이하로 관찰되어 화강반암이 페그마타이트보다 더 많은 방사성환이 확인되었다. 그 외 압석인 석회규산염암, 탄산염암과 점판암에서는 방사성환은 관찰되지 않았다.

(5) 현미경관찰과 EPMA 분석을 통한 방사성원소(우라늄)를 함유하는 광물로는 흑운모내 포획된 광물인 모나자이트로 확인되었고, 이들 광물의 주요 구성원소를 치환하여 존재하는 것으로 추정된다. 존재하는 우라늄광물의 용해는 파쇄대와 같은 주요 대수층 구간에서 지하수에 의해 용출되는 것으로 보인다.

(6) 지하수 관정은 피압상태를 보이며, 심도별 지화학적 특성이 뚜렷하게 나타나지 않으므로 지하수의 순환과 혼합이 빠른 대수층의 특성을 보인다. 높은 우라늄과 라돈-222 함량은 연구지역 상부에 해당되는 점판암 보다는 하부의 화강반암의 영향이 보다 더 지배적인 것으로 추정된다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원에서 수행한 “지하수 중 자연방사성물질 함유실태조사” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

Appelo, C. A. J. and Postma, D. J., 1996, *Geochemistry, groundwater and pollution*, Balkema publishers, A. A., Rotterdam, 536p.

Burns, P. C. and Finch, R., 1999, Uranium: mineralogy, geochemistry and the environment, *Reviews in Mineralogy*, Mineralogical Society of America, 38, 679p.

California Environmental Protection Agency (CEPA), 2001, *Public health goals for uranium in drinking water*, California, 30p.

Choo, C. O., 2002, Characteristics of uraniferous minerals in Daebo granite and significance of mineral species, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 15(1), 11-21 (in Korean with English abstract).

Finch, R. and Murakami, T., 1999, Systematics and paragenesis of uranium minerals, *Reviews in Mineralogy*, 38(1), 91-180.

Gains, R. V., Skinner, H. C. W., Foord, E. E., Mason, B., Rosenzweig, A., King V. T., and Dowty, E., 1997, *Dana's new mineralogy*, Eighth Edition, New York, John Wiley & Sons, 1872p.

Han, J. H. and Park, K. H., 1996, Abundances of uranium and radon in groundwater of Taejeon area, *The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 29(5), 589-595 (in Korean with English abstract).

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(1), 33-44 (in Korean with English abstract).

Jeong, C. H., Kim, D. W., Kim, M. S., Lee, Y. J., Kim, T. S., Han, J. S., and Jo, B. W., 2012, Occurrence of natural radioactive materials in borehole groundwater and rock core in the Icheon area, *Journal of Engineering Geology*, 22(1), 95-111 (in Korean with English abstract).

Jeong, D. H., Kim, M. S., Ju, B. K., Hong, J. K., Kim, D. S., Kim, H. K., Kim, H. J., Park, S. H., Han, J. S., and Kim, T. S., 2013, Environmental characteristics of natural radionuclides in groundwaters in volcanic rock areas: Korea, *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 18(1), 36-45 (in Korean with English abstract).

Ju, B. K., Kim, M. S., Jeong, D. H., Hong, J. K., Kim, D. S., Noh, H. J., Yoon, J. K., and Kim, T. S., 2013, Environmental characteristics of naturally occurring radioactive materials (<sup>238</sup>U, <sup>222</sup>Rn) concentration in drinking groundwaters of metamorphic rock areas: Korea, *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 18(3), 82-92 (in Korean with English abstract).

Ju, B. K., Kim, M. S., Kim, H. K., Kim, D. S., Kim, Y. R., Jeong, D. H., Yang, J. H., Park, S. H., and Kim T. S., 2014, Study on the gross alpha analysis method with LSC, *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 19(3), 104-110 (in Korean with English abstract).

Langmuir, D., Hall, P. and Drever, J. I., 1997, *Aqueous environmental geochemistry*, New Jersey, 600p.

Lee, C. H. and Kim, J. H., 1972, Geological map of Korea (Goesan sheet, 1:50000), *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 24p.

Mandarino, M. J., 1999, *Fleischer's glossary of mineral species*, *Mineralogical Record Incorporated Tucson, Arizona*.

Nakamura, N., 1974, Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5), 757-775.

Park, M. E. and Kim, G. S., 1998, Geochemical of uranium and thorium deposits from the Kyemyeongsan pegmatite, *The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 31, 365-374 (in Korean with English abstract).

Piper, A. M., 1994, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses, *Transactions, American Geophysical Union*, 25, 914-928.

Shin, D. C., Kim, Y. S., Moon, J. Y., Park, H. S., Kim, J. Y., and Park, S. K., 2002, International trends in risk management of groundwater radionuclides, *The Korean Society of Environmental Health and Toxicology*, 17(4), 273-284 (in Korean with English abstract).

**김문수**

국립환경과학원 토양지하수연구과  
 인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)  
 Tel: 032-560-7907  
 E-mail: hyd009@korea.kr

**양재하**

국립환경과학원 토양지하수연구과  
 인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)  
 Tel: 032-560-7909  
 E-mail: wjhyang@korea.kr

**정찬호**

대전대학교 지반방재공학과  
 대전광역시 동구 대학로 62  
 Tel: 042-280-2573  
 E-mail: chjeong@djju.ac.kr

**김현구**

국립환경과학원 토양지하수연구과  
 인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)  
 Tel: 032-560-7924  
 E-mail: khk228@korea.kr

**김동욱**

대전대학교 지반방재공학과  
 대전광역시 동구 대학로 62  
 Tel: 042-280-2570  
 E-mail: hoppy3@nate.com

**조병욱**

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