

《原著》

## 북운모화강암지역 지하수 중 자연방사성 물질의 경시적 붕괴특성 연구

김문수<sup>1\*</sup> · 김태승<sup>1</sup> · 김현구<sup>1</sup> · 김동수<sup>1</sup> · 정도환<sup>1</sup> · 주병규<sup>1</sup> · 홍정기<sup>1</sup> · 김혜진<sup>1</sup> · 박선화<sup>1</sup>  
정찬호<sup>2</sup> · 조병욱<sup>3</sup> · 한진석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국립환경과학원 토양지하수연구과

<sup>2</sup>대전대학교 지반방재공학과

<sup>3</sup>한국지질자원연구원

## Study on Temporal Decay Characteristics of Naturally Occurring Radionuclides in Groudwater in Two Mica Granite Area

Moon Su Kim<sup>1\*</sup> · Tae Seung Kim<sup>1</sup> · Hyun Koo Kim<sup>1</sup> · Dong Su Kim<sup>1</sup> · Do Hwan Jeong<sup>1</sup>  
Byoung Kyu Ju<sup>1</sup> · Jung Ki Hong<sup>1</sup> · Hye Jin Kim<sup>1</sup> · Sun Hwa Park<sup>1</sup> · Chan Ho Jeong<sup>2</sup>  
Byong Wook Cho<sup>3</sup> · Jin Seok Han<sup>1</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>Groundwater Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

### ABSTRACT

To figure out the decay characteristics of naturally occurring radionuclides, eight sampled groundwaters from a monitoring borehole having high levels of uranium and radon concentrations in a two mica granitic area have analyzed by liquid scintillation counters (LSC) for over 1 year. In December 2011, three groundwater samples (DJ1, DJ2, DJ3) were obtained from each aquifer system located at -20 m, -40 m, -60 m of the monitoring borehole below the ground surface, respectively. Five samples (DJ4, DJ5, DJ6, DJ7, DJ8) were additionally gained from each aquifer positioned -20 m, -40 m, -60 m, -100 m, -105 m of the borehole in February 2012, respectively. Temporal variation characteristics of uranium and radon concentrations have showed over maximum 2.1 times and 1.4 times fluctuations of the values in the same sampling intervals over time, respectively. The intervals of -40 m and -105 m in the borehole have the highest values of uranium and radon concentrations, respectively. This may imply that the concentrations of naturally occurring radionuclides such as uranium and radon in groundwater have been changed over time and indicate that the qualities of groundwaters from the aquifers developed at each interval in the borehole are different each other. This discrepancy, moreover, could be caused by behaviour differences between uranium which is in ionic status having a half life of 4.6 billion years and is transported along with the flowing groundwater, and radon which is in gaseous status having a 3.82 day's half life in the aquifer systems. Physicochemical characteristics of groundwaters from the aquifer systems could be identified by the results of the *on-situ* measuring items such as pH and Eh, and the major ionic contents. The CPM values of eight groundwater samples analysed by LSC over one year have shown not to follow the theoretical decay curve of the radon. The CPM values of the samples have ranged from 2 to 7.5 after it had passed two months when the theoretical CPM values of the radon started zero since the initial analysis. Alpha and beta particle spectrums have shown the peaks of radium-226, however they have not revealed any peaks of radon and it's daughter products such as polonium-218 and 214, bismuth-214 for the late stage of the analysis. This implies that the groundwater from the borehole may contain radium-226 having a half life of 1,600 years which decays continuously.

**Key words :** Groundwater, Radiological decay, CPM, LSC, Alpha & beta particle spectrum

\*Corresponding author : hyd009@korea.kr

원고접수일 : 2013. 4. 22 심사일 : 2013. 8. 2 게재승인일 : 2013. 8. 2

질의 및 토의 : 2013. 10. 31 까지

## 1. 서 론

자연방사성 물질이란 지구의 지각에 자연적으로 존재하는 물질로서, 환경 중 자연적으로 분포하는 방사성 물질을 통틀어 지칭한다. 대표적으로 U-238, Rn-222, Ra-226 등을 들 수 있는데 이들의 반감기는 각각 45억년, 3.82일, 그리고 1,600년이다. 국내 지하수 중 자연방사성 물질 관련 초기 연구논문으로 “대전지역 지하수에 함유된 우라늄 및 라돈의 함량에 대한 연구(Han et al., 1996)”가 있다. 또한 대전지역의 암석, 토양 및 토양가스, 음용 및 온천 지하수 가스시료 및 실내공기 중 라돈에 대한 연구(Hong, 1997)도 수행된 바 있다. 이 후 음용 시 인체위해성 등을 고려하여 1999년부터 국립환경과학원에서 지속적으로 지하수 중 자연방사성 물질관련 조사연구가 본격적으로 수행되어 왔다. 이를 크게 3단계로 나누면, 1단계 실태조사(1999~2002)에서는 지질을 고려한 전국적 분포조사 위주의 연구(NIER, 1999; 2000; 2001; 2002)가 수행되었으며, 2단계 조사(2006)에서는 기존 고함량 지점의 특성 조사 및 향후 조사계획 관련 연구(NIER, 2006)가 수행되었다. 3단계 실태조사(2007~2016)는 전국적인 함유량 실태조사(NIER, 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012)와 고함량 우려지역 정밀조사(NIER, 2008; 2009; 2010; 2011; 2012)로 나뉘어져 수행되어왔다.

이러한 다년간의 실태조사 결과를 통해 국내 지하수 중 고함량 자연방사성 물질이 특정 지질에 규제되며(Jeong et al., 2010), 지하수를 수원으로 사용하는 마을상수도에서 라돈은 물공급 과정에서 물탱크를 거치면서 자연적으로 저감됨(Noh et al., 2011)을 알 수 있었다. 또한 국내 지하수 중 전알파의 특성(Jeong et al., 2011c)과 수리지화학적 인자와 자연방사성 물질 간의 연관성을 파악(Jeong et al., 2011b)하였고, 지역별 지하수 중 우라늄과 라돈의 함량 분포 범위(Jeong et al., 2011a)를 제시하였으며, Ra-226 분석방법에 대하여 고찰(Jeong et al., 2012)하여 최적방안을 도출하였다. 정밀조사 결과를 통해 청원지역 시추공에서 자연방사성 물질의 산출특성(Jeong et al., 2011)을 규명하였으며, 이천 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈의 함량특성(Cho et al., 2011)과 동 지역내 시추공 지하수와 시추코어 내 자연방사성 물질의 산출 특성을 규명(Jeong et al., 2012)하였고 논산지역 지하수 중 우라늄과 라돈의 수리지화학적 특성과 조사지역의 정밀함량분포도(Cho et al., 2012)를 제시하였다.

주요 선진국들은 국민건강 및 환경에 영향을 줄 수 있는 고농도의 자연방사성 물질에 대하여 기준 혹은 제한치

를 두고 관리하고 있다. 이 중 미국의 예를 보면, 지하수 중 자연방사성 물질에 대한 연구를 1954년부터 시작하여(USGS, 1962), 약 200,000개 이상의 조사결과를 확보하였으며 지속적인 조사연구 중에 있다. 미국 환경청(EPA)은 연구가 공식적으로 시작된 후 약 23년 후인 1977년에 먹는물 중 방사성핵종관련 법을 제정하였다. 이 후 14년 지난 1991년에 관련법 개정을 위한 제안서를 마련하였으나 이 후 비용편익분석 등 여러 가지 사항을 종합적으로 검토한 후 2000년에 먹는물 중 방사성물질 기준을 최종 확정하였다(USEPA, 2000; 2001). 1977년 최초법 제정 후 2000년 최종적인 법이 확정되는데 23년이 소요되었으며 2003년 먹는물 중 방사성물질의 기준이 발효된 기간까지 포함하면 총 26년이 걸렸다. 최초 연구가 시작되어 관련법이 최종 확정되어 발효되는데 걸린 시간이 무려 49년으로 약 반세기가 걸린 셈이다. 하지만 먹는물 중 라돈의 경우 1999년 관련법이 제안(USEPA, 1999)된 상태로 아직 확정되지 않았다.

미국 환경청은 먹는물 중 자연방사성 물질의 기준을 확정하기 위하여 끊임없는 조사 및 연구를 수행하였으며, 특히 자연방사성 물질 분석분야의 연구를 수행하여 분석방법을 정립(USEPA, 1976; 1980; 1991; 1994)하였다. 우리나라의 경우 라돈(Kim et al., 2006)과 Ra-226 분석(Jeong et al., 2012)의 정도보증/정도관리 관련 연구가 진행되었으며, 국립환경과학원에서 지속적으로 적용성 검토 및 연구를 진행 중에 있다.

본 연구는 우라늄과 라돈의 함량이 미국의 기준치(30 ug/L) 및 제안치(4,000 pCi/L)보다 높은 복운모화강암 지역에서 자연방사성 물질을 장기 관측할 수 있도록 개발된 시추공 채수 시료를 극저준위 액체섬광계수기(Ultra Low Level Liquid Scintillation Counter)로 장기간 분석하여 채수심도별 자연방사성 물질의 붕괴특성을 규명하기 위함이다.

## 2. 지질 및 연구방법

### 2.1. 조사지역의 지질개요

본 연구의 대상이 된 시추공은 1999년에 대전광역시 서구에 위치한 한 공원 내에 개발되었다. 이곳에는 1996년에 음용 목적으로 개발된 2개의 민방위비상급수용 지하수 관정이 있었는데, 환경부의 조사과정에서 우라늄과 라돈의 함량이 각각 3,607  $\mu\text{g/L}$  및 23,000 pCi/L으로 높게 검출되어 폐쇄된 이력이 있는 곳이어서 지하수 중 고함량 자연방사성 물질 기원연구 부지로 선정되었다.

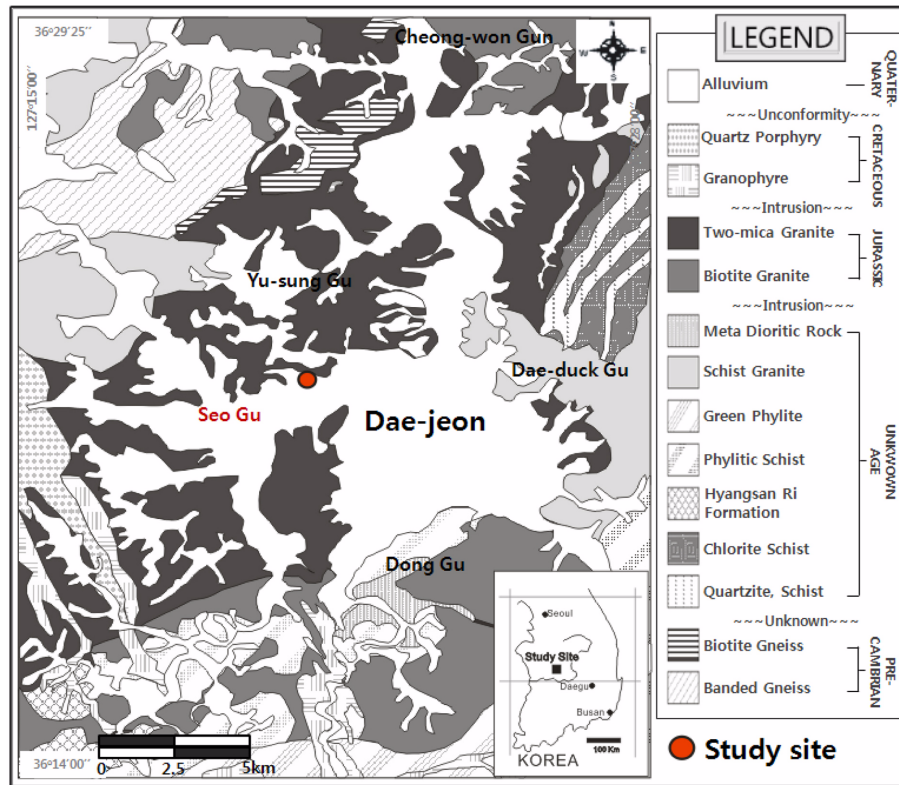


Fig. 1. The location of the study site and the geological settings of the area.

조사지역의 지표지질은 북운모화강암이며 관측시추공의 위치는 Fig. 1의 지질도상에 표기하였다. 시추심도는 121 m, 시추구경은 76 mm 규격이며 케이싱의 심도는 15.1 m이며 개발 시 지표에서 지하수위까지 깊이(DTW; Depth to Water)는 8 m였다. 회수된 시추코어를 통한 수직적 지질을 보면 지표 하 4.0 m(이후 지표 하는 GL-로 표기)까지 매립층, GL-13.5 m까지는 풍화토, GL-121 m까지 북운모 화강암으로 대부분 구성되어있으며 풍화토 이하 구간에 페그마타이트, 석영맥, 염기성 다이크(dyke) 및 파쇄대가 수직적으로 발달해 있다(NIER, 2009). 조사지역 지하수의 수리전도도, 강수량 및 함양특성 등의 수리지질학적 특성파악을 위해서는 슬러그 테스트, 양수시험 등 추가적인 연구가 필요하다.

## 2.2. 시료채취 및 현장 전처리

개발된 시추공에서 지하수 시료채취 지점은 최초 개발 시 더블 패커(double packer) 시스템을 통해 지하 120 m 심도에서 시작하여 10 m 간격으로 상향이동 시키면서 실험하여 6개의 대수층 구간(GL-105 m ~ GL-115 m, GL-95 m ~ GL-105 m, GL-55 m ~ GL-65 m, GL-45 m ~ GL-55 m, GL-45 m ~ GL-55 m, GL-35 m ~ GL-45 m, GL-20

상부구간)을 확인하였고(NIER, 2009), 이 중 5개 지점인 GL-20, GL-40, GL-60, GL-100, GL-105 m 지점에서 베일러(bailer)를 이용하여 시료를 채취하였다. 조사대상 관측공은 2011년 6월 스테인레스 베일러가 GL-105 m 지점에 고정되어 막힌 후 GL-100 m 지점에서 플라스틱 베일러까지 고정되어 막힌 상태였다. 장기분석을 위한 시료는 2011년 12월에 GL-20, GL-40, GL-60 m 지점에서 1차 채취하였으며 ID는 조사지역의 명칭을 따서 각각 DJ1, DJ2, DJ3으로 명명하였다. 이 후 2012년 1월에 2개의 베일러를 회수 후 시추공의 리밍(reaming) 작업을 한 후 2012년 2월에 GL-20, GL-40, GL-60, GL-100, GL-105 m 지점에서 2차 시료를 채취하였으며, ID는 1차와 같은 방식으로 심도별로 각각 DJ4에서 DJ8까지 명명하였다.

기본적인 지하수의 현장시료채취, 분석 및 보관은 국립환경과학원에서 제시한 시험방법(안)을 따랐다(NIER, 2007; 2009). 기기분석항목은 우라늄, 라돈, 전알파, 주요 양·음이온( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ )으로 각각의 현장 시료채취 및 전처리는 다음과 같다. 우라늄 분석용 시료는 0.45  $\mu\text{m}$  막필터 한 후 125 mL 폴리에틸렌 용기(Polyethylene bottle)에 담은 직후 공침과 흡착을 막기 위해 농질산 1 mL를 첨가하여 pH 2 이하로

유지하였다. 라돈 시료는 Optiphase Hisafe3 섬광용액 12 mL가 채워진 폴리에틸렌 바이알(PE vial)에 폭기발생을 최소화한 시료 8 mL를 주입하여 흔들어 섞은 후 실험실로 운반하였다. 전알파 시료는 현장에서 지하수 시료 1 L에 1 N HNO<sub>3</sub> 15 mL 첨가하였고, 주요 양·음이온 분석용 시료는 우라늄 시료와 같이 막필터 한 후 양이온 분석시료만 농질산 처리를 하여 실험실로 운반하였다.

### 2.3. 분석방법

연구대상 지하수의 수온, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 산화환원전위(Eh), 그리고 용존산소(DO)는 현장에서 휴대용 멀티 측정기(Orion multi 5 Star, Thermo Fisher Scientific)를 이용하여 신속히 측정하였다. 양이온(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>)은 유도결합플라즈마 원자방출광도계(ICP-OES, Horiva & Jobin Yvon ULTIMA2; Varian 720-ES) 2대로, 음이온(Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup>)은 이온크로마토그램(IC, Metrohm 850 Professional)으로 분석하였다. 음이온 중 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 이산화탄소의 용탈을 막기 위해 현장에서 산중화적정법을 사용하여 신속하게 측정하였다.

우라늄은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Agilent 7500 Series)로, 전알파는 기체비례계수기(GPC, Canberra Tennelec™ Series)로 분석하였다. 라돈은 액체섬광계수기(LSC, PerkinElmer Quantulus™ 1220)로 현장에서 시료 채취한 시간을 기준으로 2일 이내에 분석하였는데, 이는 라돈의 반감기(3.82일) 때문이다. 라돈의 세기는 아래의 계산식으로 구할 수 있다.

$$Rn(dpm/L) = \frac{(Rn)_{total}}{V_s} = \frac{CR}{V_s \cdot \varepsilon} \cdot \lambda_{Rn} T_D \quad (1)$$

여기서,  $V_s$ : volume of sample (L),  $\varepsilon$ : counting efficiency,  $CR$ : count rate (cpm)

$\lambda_{Rn}$ : decay constant of radon,  $T_D$ : elapsed time (day)

### 2.4. 장기모니터링

1차 시료 3개는 2011년 12월 8일 시료 채취 일에 LSC로 분석을 시작하여 2013년 1월 7일까지 약 1년 1개월간 총 211회 분석을 진행하였다. 분석초기 약 2개월 동안은 공휴일을 제외하고 매일 2회씩 분석을 진행하였다. 2012년 2월 9일부터 9월 6일까지 약 7개월 동안 매일 1회 분석을 기본으로 진행하였다. 이 후 2012년 10월 22일까지 약 한달 보름간 실험실 사정으로 분석을 일시 중단하였으나, 2012년 10월 23일부터 2013년 1월 7일까지

1~2주에 1회씩 분석을 수행하였다. 2차 시료 또한 2012년 2월 22일 시료채취일 다음날부터 2013년 1월 7일까지 총 127회 분석을 진행하였으며, 1차 시료의 분석일정에 맞추어 실험을 진행하였다. 이러한 장기 분석 시 분석 시간간격의 비균질성은 실험 결과에 크게 영향을 주지 않은 것으로 사료된다(Fig. 5).

## 3. 연구결과

### 3.1. 자연방사성 물질, 주요 양·음이온 및 현장측정결과

연구대상 시추공에서 심도별로 채수한 1차 및 2차 지하수 시료의 자연방사성 물질(라돈, 우라늄, 전알파) 농도, 주요 양·음이온 분석 값과 전하균형(Charge balance) 값, 그리고 현장 측정값(수온, pH, Eh, EC, DO)을 Table 1에 나타내었다.

라돈의 최고값은 2차 시료 GL-105 m 지점에서 13,770 pCi/L, 최소값은 1차 시료 GL-20 m 지점에서 7,036 pCi/L, 1, 2차 시료의 평균값은 10,914 pCi/L로 모두 미국의 먹는물 중 라돈의 제안치인 4,000 pCi/L를 초과하였다. 우라늄의 최고값은 2차 시료 GL-40 m 지점에서 557.40 ug/L, 최소값은 1차 시료 GL-20 m 지점에서 212.40 ug/L, 평균값은 423.15 ug/L로 미국의 먹는물 기준 30 ug/L를 모두 초과하였다. 전알파는 모두 MDA(Minimum Detectable Activity) 이하였다.

주요 양이온(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>)과 음이온(F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 분석결과 양·음이온 균형 값의 범위는 -3.9%에서 9.7% 사이이다. S는 2차 시료 GL-105 m 지점에서 9.0 mg/L로 최고값을, 2차 시료 GL-20 m 지점에서 3.9 mg/L의 최소값을, 7.1 mg/L의 평균값을 보였다. 현장측정결과 수온은 13.8~14.8°C, 수소이온농도(pH)는 7.0~8.5, 산화환원전위(Eh)는 -62~182 mV, 전기전도도(EC)는 314~337 uS/cm, 용존산소(DO)는 1.1~2.3 mg/L의 범위를 보였다.

### 3.2. 액체섬광계수기(LSC)에 의한 장기분석결과

Table 2와 3은 1차 및 2차 라돈분석용 시료 8개를 경과시간별로 LSC(Liquid Scintillation Counter)로 분석한 결과이며, 단위분당 섬광계수 값(CPM; Counts Per Minute)으로 나타내었다. 그리고 이론 CPM 값은 라돈의 반감기를 이용한 이론 붕괴식에서 도출하였다.

1차 시료 GL-20 m 지점 시료인 DJ1의 초기 라돈 값은 7,036 pCi/L이며 이 후 정시적 실제 측정 CPM 값의 범위는 291.861~2.334이나 이론 CPM값이 0(소수 셋째자

**Table 1.** Radon, uranium, gross- $\alpha$ , major cation & anion concentrations, and *on-situ* measured values of the sampled groundwaters

Date	ID	Depth (m)	<sup>222</sup> Rn (pCi/L)	<sup>238</sup> U (μg/L)	Gross α (pCi/L)	Si	(mg/L)										C.B	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)
							Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>							
'11 Dec.	DJ1	GL-20	7,036	212.40	MDA	3.9	8.9	2.4	1.1	44.7	1.5	28.3	17.5	0.3	107	-3.9	14.3	7.0	-62	323	1.4	
	DJ2	GL-40	8,576	263.80	MDA	4.9	8.9	2.5	1.1	47.4	1.5	28.3	19.9	0.4	107	-2.3	14.5	7.3	-45	316	1.1	
	DJ3	GL-60	12,050	386.00	MDA	5.3	9.2	2.5	1.3	48.8	1.1	28.4	17.3	0.4	104	1.3	14.8	7.1	25	337	1.2	
'12 Feb.	DJ4	GL-20	8,966	441.80	MDA	7.9	13.3	1.1	1.5	58.6	1.1	27.6	30.1	0.6	105	6.8	13.9	8.5	145	325	2.3	
	DJ5	GL-40	12,014	557.40	MDA	8.7	13.1	1.1	1.2	61.2	1.1	27.6	27.9	0.5	104	9.2	14.1	8.2	127	323	2.2	
	DJ6	GL-60	11,891	500.00	MDA	8.6	13.0	1.0	1.2	60.4	1.1	27.7	27.2	0.4	108	7.6	14.0	8.2	147	316	2.0	
	DJ7	GL-100	13,010	497.40	MDA	8.7	13.1	1.0	1.3	59.9	1.1	27.7	27.2	0.4	99	9.7	14.2	8.3	158	314	1.9	
	DJ8	GL-105	13,770	526.40	MDA	9.0	13.1	1.0	1.3	61.6	1.1	27.7	27.7	0.4	108	8.3	13.8	8.5	182	318	1.8	
MDA: < 0.9 pCi/L																						

MDA: < 0.9 pCi/L

**Table 2.** Measured and theoretical CPM values of DJ1, DJ2, and DJ3

No	Date	DJ1		DJ2		DJ3	
		Measured CPM	Theoretical CPM	Measured CPM	Theoretical CPM	Measured CPM	Theoretical CPM
1	11-12-8	291.861	291.861	353.960	353.960	495.751	495.751
2	11-12-12	137.264	146.496	166.809	177.659	238.157	248.821
3	11-12-13	122.943	129.722	143.064	157.317	207.957	220.331
4	11-12-13	112.589	122.070	135.712	148.037	200.074	207.333
5	11-12-14	100.312	108.093	119.211	131.086	177.355	183.593
6	11-12-14	90.987	101.716	111.688	123.354	169.452	172.763
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	11-12-16	65.187	69.559	74.900	84.355	107.343	118.144
11	11-12-19	38.369	42.766	47.520	51.864	68.326	72.638
12	11-12-19	36.580	40.244	42.697	48.804	63.208	68.353
13	11-12-20	31.924	35.636	39.557	43.216	56.743	60.526
14	11-12-20	31.757	33.533	35.863	40.667	53.121	56.956
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
18	11-12-22	22.012	23.283	25.470	28.236	37.634	39.546
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	11-12-26	11.142	11.225	13.766	13.612	20.598	19.065
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	11-12-28	9.200	7.793	11.074	9.451	15.742	13.237
27	11-12-29	6.882	6.901	9.574	8.369	14.599	11.721
28	11-12-29	7.206	6.494	8.995	7.875	15.401	11.030
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
38	12-1-6	4.327	1.604	4.770	1.945	7.802	2.724
39	12-1-6	3.322	1.509	4.464	1.830	7.104	2.563
40	12-1-9	3.015	0.928	4.276	1.125	6.320	1.576
41	12-1-9	3.493	0.873	4.022	1.059	6.118	1.483
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
58	12-1-20	2.760	0.125	3.526	0.151	4.992	0.212
59	12-1-20	2.777	0.119	3.782	0.144	4.702	0.201
60	12-1-26	2.419	0.042	3.526	0.051	5.502	0.071
61	12-1-26	3.050	0.039	3.543	0.048	4.872	0.067
62	12-1-27	2.624	0.035	4.054	0.042	5.741	0.059
63	12-1-27	2.879	0.033	3.748	0.040	5.451	0.056
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
66	12-1-31	2.334	0.017	3.458	0.020	5.621	0.028
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
76	12-2-8	2.453	0.004	2.913	0.005	5.230	0.007
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
84	12-2-20	2.726	0.000	3.117	0.001	5.605	0.001
85	12-2-24	2.777	0.000	3.441	0.000	5.111	0.000
86	12-2-27	2.931	0.000	3.799	0.000	5.315	0.000
87	12-2-28	2.726	0.000	3.697	0.000	4.480	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
158	12-6-25	2.999	0.000	3.867	0.000	6.132	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
187	12-8-7	3.612	0.000	4.242	0.000	6.167	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
193	12-8-21	3.186	0.000	4.668	0.000	6.184	0.000
194	12-8-22	3.391	0.000	4.174	0.000	5.417	0.000
195	12-8-23	3.203	0.000	3.799	0.000	6.525	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
211	13-1-7	3.118	0.000	3.816	0.000	5.895	0.000

**Table 3.** Measured and theoretical CPM values of DJ4, DJ5, DJ6, DJ7, and DJ8

No	Date	DJ4		DJ5		DJ6		DJ7		DJ8	
		Measured CPM	Theoretical CPM	Measured CPM	Theoretical CPM	Measured CPM	Theoretical CPM	Measured CPM	Theoretical CPM	Measured CPM	Theoretical CPM
1	12-2-23	386.174	386.174	514.869	514.869	507.030	507.030	551.990	551.990	581.287	581.287
2	12-2-27	167.091	170.093	220.952	226.769	213.293	223.307	237.182	243.099	252.366	255.992
3	12-2-28	138.929	141.141	179.209	188.169	173.336	185.297	188.383	201.720	210.997	212.418
4	12-2-29	116.164	117.995	151.626	157.312	148.599	154.911	159.429	168.640	170.147	177.584
5	12-3-2	72.001	79.413	100.165	105.874	98.821	104.258	107.818	113.499	115.622	119.518
6	12-3-6	37.583	39.177	53.667	52.231	50.136	51.434	53.343	55.993	57.978	58.962
7	12-3-7	33.084	32.969	44.277	43.954	40.136	43.283	46.648	47.120	46.665	49.619
8	12-3-8	27.770	27.215	39.116	36.284	35.726	35.730	39.287	38.897	43.751	40.960
9	12-3-9	22.709	22.880	31.757	30.503	30.834	30.038	34.040	32.700	36.117	34.434
10	12-3-12	14.702	13.205	19.864	17.605	19.250	17.337	21.790	18.873	23.596	19.874
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	12-3-26	6.065	1.020	6.797	1.360	6.422	1.339	6.576	1.457	6.968	1.535
21	12-3-27	5.298	0.859	6.678	1.145	6.797	1.128	7.138	1.228	7.155	1.293
22	12-3-28	5.366	0.672	6.746	0.895	6.729	0.882	6.031	0.960	7.138	1.011
23	12-3-29	4.872	0.596	7.002	0.794	6.218	0.782	5.980	0.851	7.308	0.896
24	12-4-2	5.196	0.287	6.167	0.383	5.604	0.377	5.946	0.411	6.593	0.432
25	12-4-4	5.042	0.199	6.405	0.265	6.064	0.261	6.082	0.284	6.354	0.300
26	12-4-5	5.111	0.166	5.758	0.222	5.639	0.218	5.622	0.238	6.456	0.250
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29	12-4-16	4.974	0.022	5.417	0.030	6.132	0.029	6.243	0.032	—	—
30	12-4-17	4.583	0.019	5.605	0.025	5.894	0.025	5.707	0.027	6.831	0.028
31	12-4-18	4.037	0.015	6.576	0.019	6.116	0.019	5.468	0.021	6.116	0.022
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
41	12-5-3	4.957	0.001	7.154	0.001	6.319	0.001	5.690	0.001	6.797	0.002
42	12-5-4	4.889	0.001	6.149	0.001	6.064	0.001	5.383	0.001	6.831	0.001
43	12-5-7	4.872	0.000	6.286	0.001	5.792	0.001	5.553	0.001	6.405	0.001
44	12-5-8	4.855	0.000	6.405	0.001	5.724	0.001	5.076	0.001	6.218	0.001
45	12-5-9	4.668	0.000	6.746	0.000	5.468	0.000	4.974	0.000	5.809	0.001
46	12-5-10	4.753	0.000	6.405	0.000	5.349	0.000	5.162	0.000	6.269	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
71	12-6-20	4.616	0.000	6.030	0.000	3.910	0.000	5.570	0.000	6.507	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
75	12-6-26	4.940	0.000	6.524	0.000	5.638	0.000	5.195	0.000	7.035	0.000
76	12-6-27	5.843	0.000	6.251	0.000	6.132	0.000	5.485	0.000	5.996	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
81	12-7-4	5.077	0.000	5.894	0.000	5.962	0.000	6.422	0.000	6.201	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
85	12-7-10	5.145	0.000	6.831	0.000	6.831	0.000	5.400	0.000	6.695	0.000
86	12-7-11	5.230	0.000	6.303	0.000	5.913	0.000	5.281	0.000	5.861	0.000
87	12-7-12	5.332	0.000	7.070	0.000	5.673	0.000	5.485	0.000	5.588	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
98	12-7-31	4.787	0.000	6.746	0.000	5.502	0.000	5.366	0.000	6.559	0.000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
127	13-1-7	5.298	0.000	6.746	0.000	6.013	0.000	5.741	0.000	5.792	0.000

리)이 되는 시점은 시료채취 후 약 2개월 12일(2012년 2월 20일)이 되는 시점이다. 측정 초기에는 이론 CPM값이

실제 측정 CPM값보다 대부분 큰 값을 보이다 21일 후 (2011년 12월 29일)부터 실측값이 이론값보다 큰 값을 보

인다. 2012년 1월 6일부터 2013년 1월 7일까지 실측 CPM값은 최대 3.612(2012년 8월 7일)~최소 2.334(2012년 1월 31일)의 변동 폭을 보인다.

DJ2(GL-40 m)의 초기 라돈 값은 8,576 pCi/L이며 경시적 실측 CPM 값은 353.960~2.913 범위를 가지나 이론 CPM값은 2012년 2월 24일에 0(소수 셋째자리)이 된다. 이론 CPM값이 실제 측정 CPM값보다 대부분 큰 값을 분석초기에는 보이다 18일 후(2011년 12월 26일)부터 실측값이 이론값보다 큰 값을 보인다. 2012년 1월 6일부터 2013년 1월 7일까지 실측 CPM값은 최대 4.668(2012년 8월 21일)~최소 2.913(2012년 2월 8일) 변동 폭을 보인다.

DJ3(GL-60 m)의 초기 라돈값은 12,050 pCi/L이며 경시적 실측 CPM 값은 459.751~4.480 범위를 가지나 이론 CPM값은 DJ2와 같은 날인 2012년 2월 24일에 0(소수 셋째자리)이 된다. 이론 CPM값이 실측값보다 큰 값을 분석초기에는 보이다 18일 후(2011년 12월 26일)부터 실측값이 이론값보다 큰 값을 보인다. 2012년 1월 9일부터 2013년 1월 7일까지 실측 CPM값은 최대 6.525(2012년 8월 23일)~최소 4.480(2012년 2월 28일) 변동폭을 보인다.

2차 시료 GL-20 m 지점 시료인 DJ4의 라돈 값은 8,966 pCi/L이며 이 후 경시적 실제 측정 CPM 값의 범위는 386.174~4.037이나 이론 CPM값이 0(소수 셋째자리)이 되는 시점은 시료채취 후 약 2개월 14일(2012년 5월 7일)이 되는 시점이다. 측정 초기에는 이론 CPM값이 실제 측정 CPM값보다 대부분 큰 값을 보이다 19일 후(2012년 3월 12일)부터 실측값이 이론값보다 큰 값을 보인다. 2012년 3월 27일부터 2013년 1월 7일 동안의 실측 CPM값은 최대 5.843(2012년 6월 27일)~최소 4.037(2012년 4월 18일) 변동 폭을 보인다.

DJ5(GL-40 m)의 라돈 값은 12,014 pCi/L이며 경시적 실측 CPM 값은 514.869~5.417 범위를 가지나 이론 CPM값은 2012년 5월 9일에 0(소수 셋째자리)이 된다. 이론 CPM값이 실제 측정 CPM값보다 대부분 큰 값을 분석초기에는 보이다 약 13일 후(2012년 3월 6일)부터 실측값이 이론값보다 큰 값을 보인다. 2012년 3월 26일부터 2013년 1월 7일 동안 실측 CPM값은 최대 7.154(2012년 5월 3일)~최소 5.417(2012년 4월 16일) 변동 폭을 보인다.

DJ6(GL-60 m)의 라돈 값은 11,891 pCi/L이며 경시적 실측 CPM 값은 507.030~3.910 범위를 가지나 이론 CPM값은 DJ5와 같이 2012년 5월 9일에 0(소수 셋째자리)이 된다. 이론 CPM값이 실제 측정 CPM값보다 큰 값을 분석초기에는 보이다 약 16일 후(2012년 3월 9일)

부터 실측값이 이론값보다 큰 값을 보인다. 2012년 3월 26일부터 2013년 1월 7일 동안 실측 CPM값은 최대 6.831(2012년 7월 10일)~최소 3.910(2012년 6월 20일) 변동 폭을 보인다.

DJ7(GL-100 m)의 라돈 값은 13,010 pCi/L이며 경시적 실측 CPM 값은 551.990~4.974 범위를 가지나 이론 CPM값은 DJ5, DJ6과 같이 2012년 5월 9일에 0(소수 셋째자리)이 된다. 이론 CPM값이 실제 측정 CPM값보다 큰 값을 분석초기에는 보이다 약 15일 후(2012년 3월 8일)부터 실측값이 이론값보다 큰 값을 보인다. 2012년 3월 28일부터 2013년 1월 7일 동안 실측 CPM값은 최대 6.422(2012년 7월 4일)~최소 4.974(2012년 5월 9일) 변동 폭을 보인다.

DJ8(GL-105 m)의 라돈 값은 13,770 pCi/L이며 경시적 실측 CPM 값은 581.287~5.588 범위를 가지나 이론 CPM값은 2012년 5월 10일에 0(소수 셋째자리)이 된다. 이론 CPM값이 실제 측정 CPM값보다 큰 값을 분석초기에는 보이다 약 15일 후(2012년 3월 8일)부터 실측값이 이론값보다 큰 값을 보인다. 2012년 4월 2일부터 2013년 1월 7일 동안 실측 CPM값은 최대 7.035(2012년 6월 26일)~최소 5.588(2012년 7월 12일) 변동 폭을 보인다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 우라늄, 라돈, 전알파의 수리지화학적 특성

연구지역 지하수 중 라돈 농도는 심도가 깊어질수록 높아지는 경향을 보이거나 우라늄의 농도는 GL-40 m 지점에서 최고 농도를 보임을 알 수 있다. 또한 1차 조사 때 우라늄과 라돈의 평균 농도는 287.40 ug/L와 9,220 pCi/L이나 2차 조사 때 우라늄과 라돈의 평균 농도는 504.60 ug/L와 11,930 ug/L의 값을 보여 1차 조사 때 보다 2차 조사 때 우라늄과 라돈의 농도가 많이 높아 졌음을 알 수 있다. 같은 심도별로 우라늄과 라돈값을 비교해 보면, 1차 조사 시 GL-20 m 지점인 DJ1의 우라늄과 라돈이 각각 212.40 ug/L와 7,036 pCi/L이었으나 2차 조사 시 DJ4의 우라늄과 라돈은 441.80 ug/L와 8,966 pCi/L로 각각 약 208% 및 127% 증가하였다. GL-40 m 지점인 DJ2는 263.80 ug/L와 8,576 pCi/L이었으나 DJ5는 557.40 ug/L와 12,014 pCi/L로 각각 약 211.3% 및 140% 증가하였다. GL-60 m 지점인 DJ3은 386.00 ug/L와 12,050 pCi/L이었으나 500.00 ug/L와 11,891 pCi/L로 우라늄은 약 130% 증가하였으나 라돈은 약 1%정도 감소하였다. 전알파는 모두 최소측정세기(MDA) 이하로 검출되었다. 이러한 결과



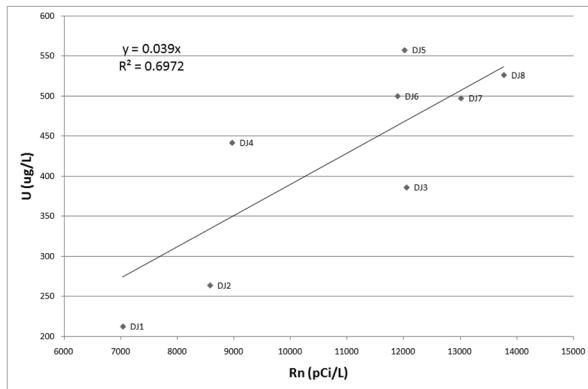


Fig. 2. Corelation between uranium and radon concentrations in the groundwater.

는 조사지역 대수층 지하수 중 우라늄은 시간이 경과함에 따라 210% 및 라돈은 140% 이상 변동할 수 있음을 지시하는데, 그 원인으로 계절적 변동성 및 리밍(reaming)에 의한 시추공 내 변화 등에 기인할 수 있을 것으로 사료 된다.

Fig. 2는 우라늄과 라돈의 상관성을 보여주는데 상관계수  $r = 0.835$ 로 매우 높은 상관성을 보여 준다. 또한 우라늄과 라돈의 최고 농도검출 심도지점이 GL-40 m 지점과 GL-105 m 지점으로 다른데 이는 지하수 중 자연방사성 물질인 우라늄과 라돈의 농도가 심도별로 시간이 경과함에 따라 변화함을 의미하며, 관측공 내 심도별 구간에서 발달된 각 대수층 지하수의 수질특성이 서로 다를 수 있다. 또한 반감기가 46억년인 우라늄은 이온상태로 이동하는 지하수와 함께 이동되며 반감기가 3.82일인 라돈은 가스(gas) 상으로 지하수 내에 존재하여 서로 다른 거동 특성을 보이기에 때문에 이러한 차이가 발생할 수 있을 것으로 사료된다. 보다 정확한 우라늄과 라돈 농도의 경시적인 변동 폭과 거동특성을 파악하기 위해서는 장기적인 관측결과가 요구된다.

#### 4.2. 주요 양 · 음이온과 현장측정값의 물리화학적 특성

Fig. 3의 Piper 다이어그램은 연구지역 지하수 유형이 국내 기존연구결과(Hamm et al., 1999; Lee et al., 1997; NIER 2009; 2010; 2011; 2012)와 유사한  $\text{Ca-HCO}_3$  유형임을 보여준다. Fig. 4의 Stiff 다이어그램은 주요 양 · 음이온의 절대량을 보여준다. 2차 조사 시 지하수 중 양이온의 양이 1차 조사 시 양이온의 양보다 많음을 알 수 있다. 전체적으로 같은 시기의 지하수 중 양 · 음이온들은 유사한 농도범위를 보여주고 있다. 양이온의 경우  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 의 2차 조사 시 농도가 1차 조사 시 농도보다

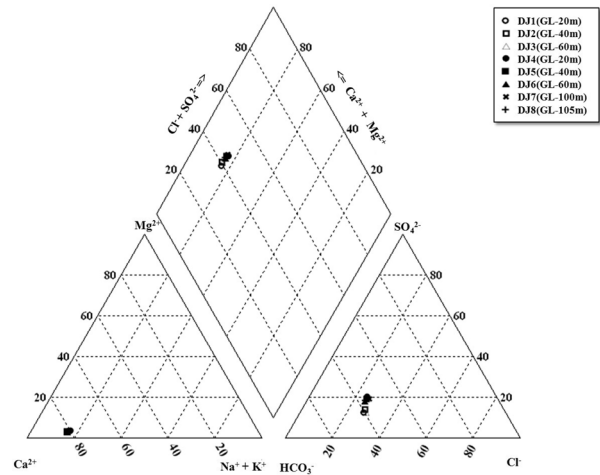


Fig. 3. Piper diagram of the sampled groundwaters.

크지만  $\text{K}^+$ 의 경우는 1차시 농도가 2차시 농도보다 더 크다.  $\text{Mg}^{2+}$ 는 1, 2차 모두 유사한 농도범위를 보인다. 음이온의 경우  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 2차 조사 시 농도가 1차 조사 시 농도보다 높았으며  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ 의 값들은 유사하였다(Table 1).

Si의 경우 일반적으로 용해도가 낮아 그 함량이 30 mg/L 이상의 분석결과를 해석할 때는 주의를 요한다. Si 함량이 높은 지하수는 주로 화산암 지역인 경우가 많아 심성암 대수층과 화산암 대수층을 구분하는데 사용되기도 한다(Hounsflow, 1995). 연구지역의 1, 2차 조사결과 모두 심도가 깊어질수록 Si 농도가 증가하는 경향을 보이는데 이는 심부로 갈수록 물-암석 반응시간이 길어져 Si의 농도가 증가하는 것으로 해석할 수 있다(Table 1). Si 농도와 더불어 현장측정항목에서 pH와 Eh 값을 통해 1, 2차 조사 시 지하수가 서로 다른 특성을 보임을 확인할 수 있으나, 나머지 현장측정항목들의 결과는 서로 유사함을 보여준다. 따라서 지하수의 물리화학적 특성을 알기 위해 Piper Diagram과 Stiff Diagram에 주요 양 · 음이온 분석값을 도시함으로써 명확히 알 수 있다. 그리고 Si 분석값 및 pH와 Eh와 같은 현장측정항목도 이러한 대수층별 지하수의 물리화학적 특성을 확인할 수 있는 주요 지표가 될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.3. 지하수 중 자연방사성 물질의 붕괴특성

1차 시료의 경우 시간이 경과함에 따라 이론 CPM값은 분석시작 후 약 2개월 후에 0(소수 셋째자리)이 되나 실측 CPM 값은 분석시작 후 약 1개월 후부터 2~7사이 값을 지속적으로 보이며 심도가 깊어질수록 CPM값이 커짐을 알 수 있다(Fig. 5). 2차 시료의 경우도 이론 CPM값

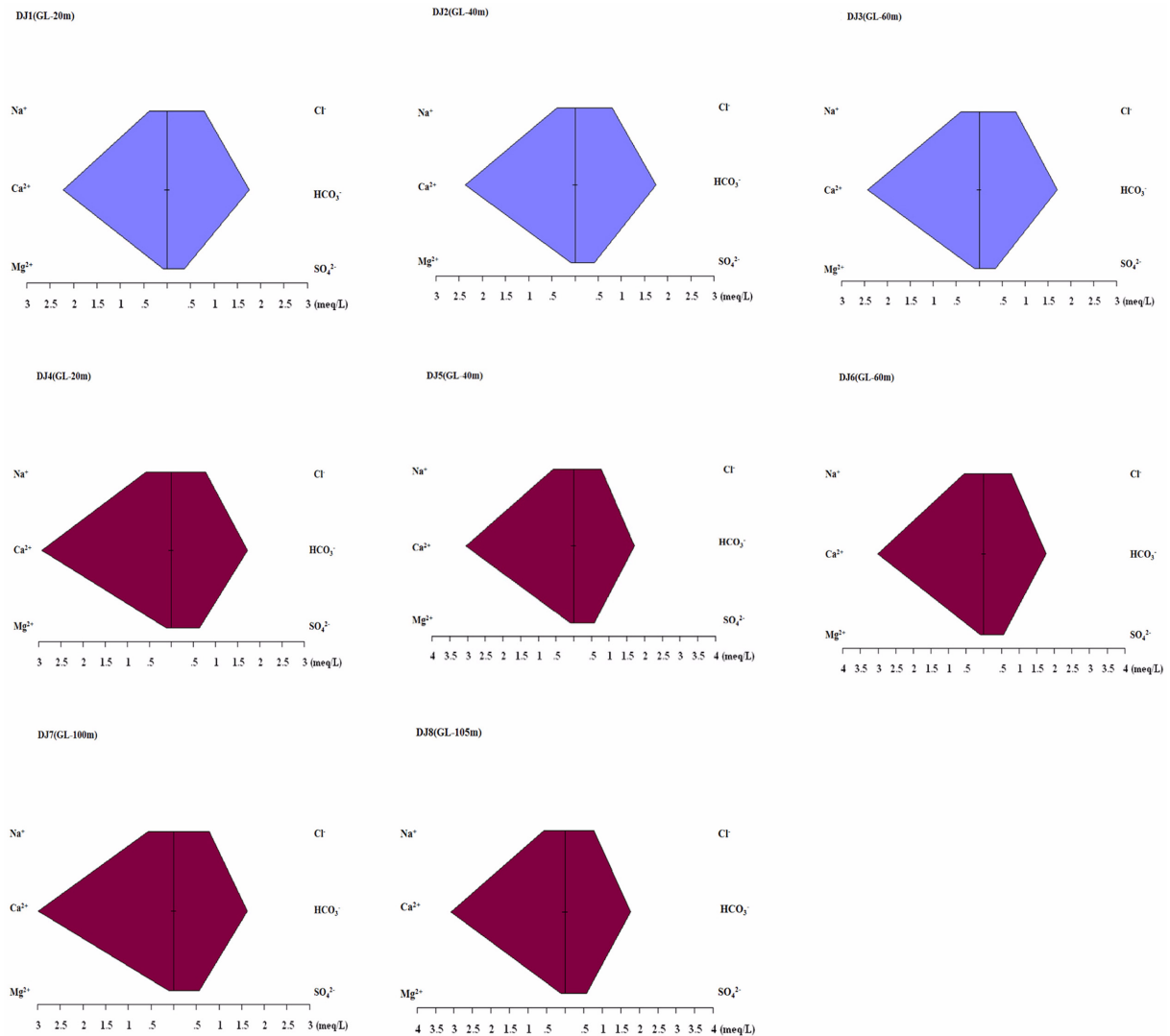


Fig. 4. Stiff diagrams of the sampled groundwaters.

은 분석시작 후 약 2개월 후에 0이 되나 분석시작 후 약 1개월 후부터 실측 CPM 값은 3.5~7.5사이의 값을 지속적으로 보인다. DJ4(GL-20 m)를 제외하고는 1차 시료와 달리 심도별 차이를 뚜렷이 보이지는 않는다(Fig. 5).

조사지역 지하수 중 자연방사성 물질은 시간이 경과함에 따라 이론적인 방사능붕괴를 따르지 않고 일정한 CPM 값의 범위를 유지하고 있음을 알 수 있다. 예를 들면, 8개 시료 중 DJ3 시료의 알파 및 베타입자 스펙트럼을 보면 최초 분석(2011년 11월 8일) 시 Rn-222과 딸핵종인 Po-218과 Po-214의 피크(Peak)가 자라 있음을 확인할 수 있다(Fig. 6 a). 하지만 실측 CPM값이 이론 CPM값보다 커지기 시작하는 2011년 12월 26일 분석결과(Fig. 6. b)를 보면 라돈과 그 딸핵종의 피크가 대부분 줄

어들어 있는 것을 알 수 있다. 그리고 이론값이 0이되는 2012년 2월 24일 분석결과를 보면 라돈의 피크는 거의 보이지 않으며(Fig. 6. c), 마지막으로 최초 분석일로부터 약 13개월 후(2013년 1월 7일)의 분석 스펙트럼(Fig. 6. d)을 보면 라돈과 그 딸핵종의 피크는 보이지 않고 Ra-226 영역에서 피크가 자라있는 것을 볼 수 있다.

8개 지하수 시료를 일 년 이상 경과시간별로 LSC 분석을 수행한 결과 분석 시작 후 약 1개월 후부터 라돈의 이론적 붕괴곡선을 따르지 않음을 모든 시료의 CPM 값을 통해 확인하였다. 또한 알파 및 베타입자 스펙트럼 분석결과 모든 지하수 시료들에서 라돈과 그 딸핵종들의 피크가 소멸된 후에도 Ra-226의 피크가 존재함을 확인하였다. 이는 반감기 1,600년인 Ra-226이 조사지역 지하수

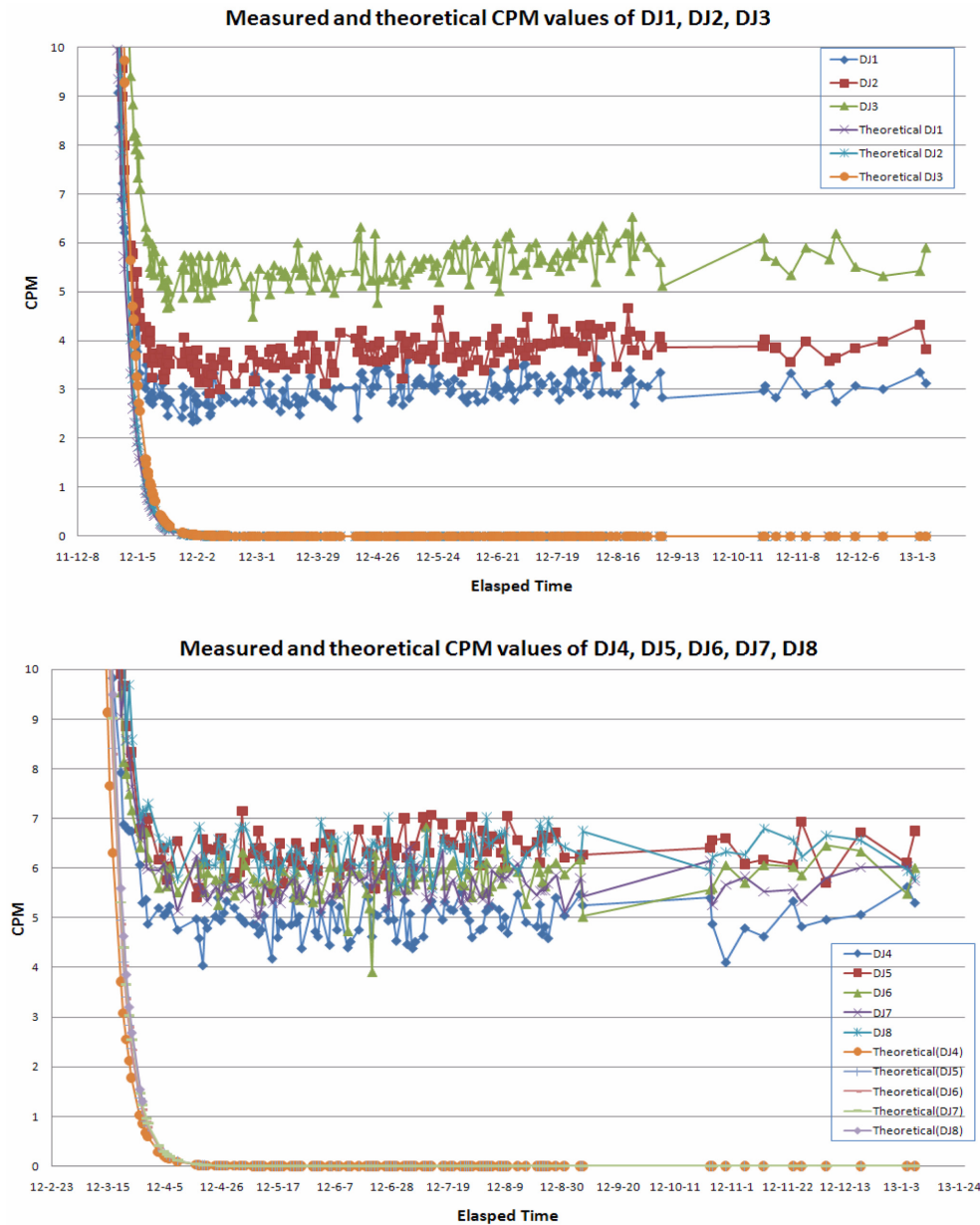


Fig. 5. Measured and theoretical CPM values of the groundwaters over time.

내에 존재하며 지속적으로 붕괴되고 있음을 의미한다.

## 5. 결 론

조사지역 지하수의 채수지점별(공간성) 및 채수시간별(경시성) 물리화학적 특성을 Piper 및 Stiff 다이어그램으로 고찰한 결과 모든 채수된 지하수의 유형은  $\text{Ca-HCO}_3$  유형이며 음이온의 경우  $\text{SO}_4^{2-}$ , 양이온의 경우  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ 의 절대량이 경시적으로 차이를 보였다. Si의 경우 경시적 및 심도별 변화가 뚜렷하였으며 pH와 Eh와

같은 현장측정항목으로도 경시적 변화를 확인할 수 있었다. 따라서 지하수의 물리화학적 변동특성을 파악하는데 있어 주요 이온 함량과 현장측정항목의 측정결과가 중요한 판단근거임을 알 수 있다.

조사지역 지하수 중 우라늄과 라돈의 상관성은 높은 편이나, 우라늄의 최고값은 GL-40 m 지점에서 557.40 ug/L, 라돈의 최고값은 GL-105 m 지점에서 13,770 pCi/L으로 서로 다른 심도에서 각각 확인되었다. 이러한 차이는 심도별 대수층의 수질특성이 서로 상이하며 암반대수층 내에서 두 물질의 거동특성 또한 서로 다름을 지시한다. 또

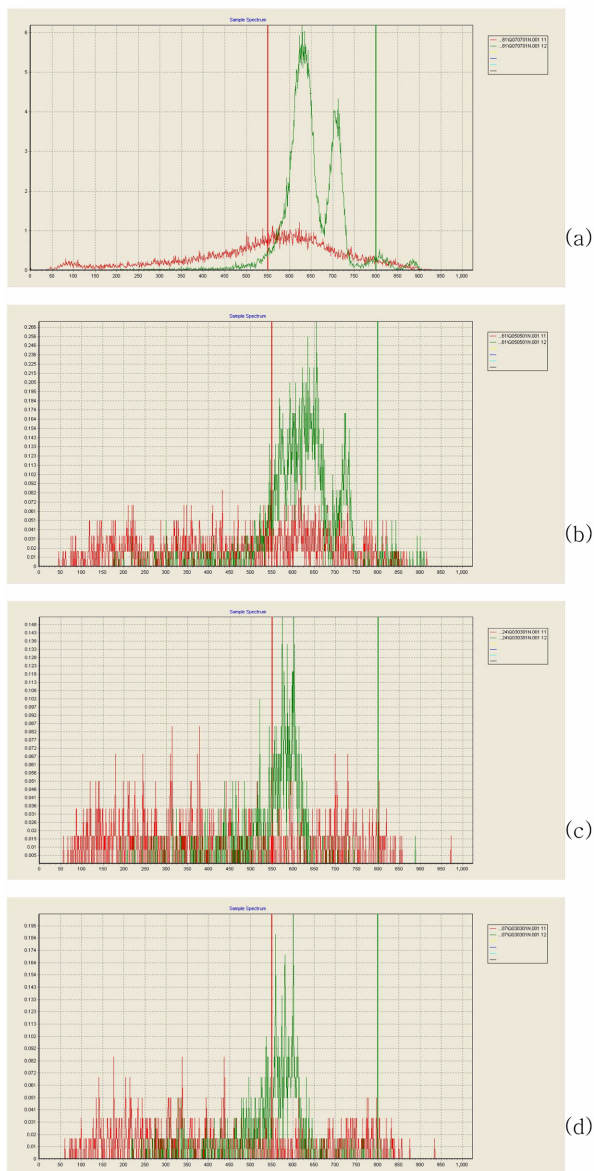


Fig. 6. Alpha and beta particle spectrums of DJ3 by LSC over time (a) 2011-12-8, (b) 2011-12-26, (c) 2012-2-24, (d) 2013-1-7.

한 1, 2차 조사결과 우라늄의 농도는 210%, 라돈의 농도는 140% 이상 변동하였는데 이는 지하수 중 우라늄과 라돈의 함량이 경시적으로 일정하지 않고 상당히 큰 변동폭을 가지면 변화함을 지시한다.

지하수 중 자연방사성 물질의 경시적 붕괴특성을 알기 위해 우라늄과 라돈 값이 높은 북운모화강암 지역에 설치된 관측정에서 2회에 걸쳐 심도별로 시료를 채수한 후 1년 이상 액체섬광계수기로 분석을 진행하였다. 8개의 시료를 LSC로 경과시간별로 분석한 결과 이론적인 방사능 붕괴 곡선을 따라 CPM값이 0으로 수렴하지 않고 모든

시료에서 분석 약 1개월 후부터 일정 수준의 CPM값이 유지됨을 확인하였다. 이에 경시적으로 분석된 알파 및 베타입자 스펙트럼을 확인한 결과 라돈과 그 딸핵종들의 피크는 시간이 경과함에 따라 소멸되었으나, Ra-226영역에서 피크가 성장해 있음이 확인되었다. 이는 반감기가 1,600년인 Ra-226이 지하수 내에 존재하며 지속적으로 붕괴되고 있음을 의미한다. 이러한 고함량 우라늄과 라돈 함유 지하수의 장기간의 경시적인 스펙트럼 해석을 통한 Ra 존재 규명은 기존의 연구에서 볼 수 없었던 내용이라 할 수 있다. 추후 조사지역 지하수의 Ra 함량을 조사하는 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- Cho, B.W., Choo, C.O., Kim, M.S., Lee, Y.J., Yun, U., and Lee, B.D., 2011, Uranium and radon concentrations in groundwater near the Icheon granite, *J. Eng. Geol.*, **21**(3), 259-269.
- Cho, B.W., Kim, M.S., Kim, T.S., Han, J.S., Yun, U., Lee, B.D., Hwang, J.H., and Choo, C.O., 2012, Hydrochemistry and distribution of uranium and radon in groundwater of the Nonsan area, *J. Eng. Geol.*, **22**(4), 427-437.
- Hamm, S.Y., Cho, M.H., Sung, I.H., Lee, B.D., Cho, B.W., and Shim, H.S., 1999, Comparison of hydrochemical characteristics of groundwater in the southern area and the northwestern area, Pusan, *Journal of the KSGE*, **6**(3), 140-151.
- Han, J.H. and Park, K.H., 1996, Abundances of uranium and radon in groundwater of Taejeon area, *Econ. Environ. Geol.*, **29**(5), 589-595.
- Hong, Y.K., 1997, Environmental geochemistry of radon at the Taejeon city area in Korea, *Econ. Environ. Geol.*, **30**(1), 51-60.
- Hounsflow, A. W., 1995, Water quality data; Analysis and interpretation, Lewis publishers, 83 p.
- Jeong, C.H., Kim, D.W., Kim, M.S., Lee, Y.J., Kim, T.S., Han, J.S., and Jo, B.U., 2012, Occurrence of natural radioactive materials in borehole groundwater and rock core in the Icheon area, *J. Eng. Geol.*, **22**(1), 95-111.
- 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, *J. Eng. Geol.*, **21**(2), 163-178.
- Jeong, D.H., Eom, I.C., Yoon, J.K., Kim, M.S., Kim, Y.K., and Kim, T.S., 2010, Characteristics of groundwater environment in highly enriched areas of natural radionuclides, *J. Soil & Groundwater Env.*, **15**(6), 9-16.
- Jeong, D.H., Kim, M.S., Ju, B.K., and Kim, T.S., 2011a, Distribution characteristics of uranium and radon concentration in

- groundwater of provinces in Korea, *J. Soil & Groundwater Env.*, **16**(6), 143-149.
- Jeong, D.H., Kim, M.S., and Lee, Y.J., 2011b, Hydrogeochemical characteristics and natural radionuclides in groundwater for drinking water supply in Korea, *J. Soil & Groundwater Env.*, **16**(6), 133-142.
- Jeong, D.H., Kim, M.S., Noh, H.J., Yoon, Y.Y., Kim, D.S., Lee, Y.J., Ju, B.K., Hong, J.K., and Kim, T.S., 2012, A preliminary study for analytical method and environmental characteristics of radium-226 in groundwater, *J. Soil & Groundwater Env.*, **17**(2), 22-27.
- Jeong, D.H., Lee, Y.J., Ju, B.K., Noh, H.J., Yu, S.J., and Kim, M.S., 2011c, Study on gross-alpha characteristics of groundwater for drinking in Korea, *J. Soil & Groundwater Env.*, **16**(5), 67-73.
- Kim, Y., Cho, S.Y., Yoon, Y.Y., and Lee, K.Y., 2006, Optimal method of radon analysis in groundwater using ultra low-level liquid scintillation counter, *J. Soil & Groundwater Env.*, **11**(5), 59-66.
- Lee, J.U., Chon, H.T., and John, Y.W., 1997, Geochemical characteristics of deep granitic groundwater in Korea, *J. of the KSGE*, **4**(4), 199-211.
- NIER, 1999, Study on the radionuclides concentrations in groundwater (I).
- NIER, 2000, Study on the radionuclides concentrations in groundwater (II).
- NIER, 2001, Study on the radionuclides concentrations in groundwater (III).
- NIER, 2002, Study on the radionuclides concentrations in groundwater (VI).
- NIER, 2006, An investigation on radionuclide levels in groundwater
- NIER, 2007, An investigation of natural radionuclide levels in groundwater (I), 2007-87-943.
- NIER, 2008a An investigation of natural radionuclide levels in groundwater (II), 2008-67-1017.
- NIER, 2008b, Occurrences of radionuclides in groundwater of the 4 high potential areas (I).
- NIER, 2009a, An investigation on natural radionuclide levels in groundwater (III), 2009-61-1117.
- NIER, 2009b, Occurrences of radionuclides in groundwater of the 4 high potential areas (II).
- NIER, 2010a, An investigation on natural radioactivity levels in groundwater ('10), 2010-47-1222.
- NIER, 2010b, Occurrences of radionuclides in groundwater of the 4 high potential areas ('10).
- NIER, 2011a, Study on naturally occurring radioactive materials (NORM) in groundwater in South Korea ('11), RP2011-1401.
- NIER, 2011b, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the Goesan area ('12)
- NIER, 2011c, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the two high potential areas ('11)
- NIER, 2012, Study on naturally occurring radioactive materials (NORM) in groundwater in South Korea ('12), RP2012-196.
- Noh, H.J., Jeong, D.H., Yoon, J.K., Kim, M.S., Ju, B.K., Jeon, S.H., and Kim, T.S., 2011, Natural reduction characteristics of radon in drinking groundwater, *J. Soil & Groundwater Env.*, **16**(1), 12-18.
- USEPA, 1976, Interim radiochemical methodology for drinking water, 600/4-75-008 (revised).
- USEPA, 1980, Prescribed procedures for measurement of radioactivity in drinking water, 600/4-80-032.
- USEPA, 1991, Determination of radon in drinking water by liquid scintillation counting, Method 913.0.
- USEPA, 1994, Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, Method 200.7.
- USEPA, 1999, National primary drinking water regulations; Radon-222 Proposed rule, Federal Register, vol 64, No. 211.
- USEPA, 2000, National primary drinking water regulations; radionuclides; Final rule, 40 CFR parts 9, 141, and 142 <http://www.epa.gov/safewater/radionuclides/regulation.html>.
- USEPA, 2001, Radionuclide rule: a quick reference guide, Office of Water, 816-F-01-003.
- USGS, 1962, Data on uranium and radium in ground water in the United States, Professional Paper 426.