

## 단층대 지하수의 수리화학 및 노블가스 동위원소 특성

정찬호<sup>1\*</sup> · 최현영<sup>1</sup> · 이용천<sup>1</sup> · 이유진<sup>1</sup> · 양재하<sup>2</sup>

<sup>1</sup>대전대학교 건설안전방재공학과, <sup>2</sup>국립환경과학원 토양지하수연구과

## Hydrochemistry and Noble Gas Isotopes of Groundwaters around the Fault Zones

Chan Ho Jeong<sup>1\*</sup>, Hyeon Young Choi<sup>1</sup>, Yong Cheon Lee<sup>1</sup>, Yu Jin Lee<sup>1</sup>, and Jae Ha Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Construction Safety and Disaster Prevention

<sup>2</sup>Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research

Received 2 December 2016; received in revised form 13 December 2016; accepted 18 December 2016

한반도 동남부에 발달된 양산단층과 감포지역 단층대에서 지하수의 순환에 대한 단층대의 영향을 알아보기 위하여 10개 암반 지하수를 채취하여 화학성분과 영속기체 동위원소 특성을 분석하였다. 분석결과 지하수의 화학적 유형은 Ca-HCO<sub>3</sub> 형에서 Ca-SO<sub>4</sub>(Cl) 형의 영역을 보이며, 지질과의 뚜렷한 상관성을 보이지 않는다. 영속기체인 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He와 <sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne 동위원소비 상관관계도에서 1점을 제외한 지하수는 대기기원의 <sup>3</sup>He가 우세하며, 이는 단층대를 통하여 강수의 지하수로 유입이 활발한 대수층 환경임을 지시한다. 아울러 단층대를 통한 심부의 헬륨공급이 없는 환경임을 시사한다. <sup>4</sup>He의 비율이 비교적 높은 지하수는 물-암석반응이 상대적으로 충분한 대수층조건에서 암석기원의 <sup>4</sup>He가 일부 기원되었음을 지시한다.

**주요어:** 양산단층, 화학적 유형, 대기기원, <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He, 순환

The chemical composition and noble gas isotopes of 10 deep groundwater samples were analyzed to know the circulation of groundwaters in the Yangsan fault and the Gampo fault. The chemical types of groundwaters show the Ca-HCO<sub>3</sub> type and Ca-SO<sub>4</sub>(Cl) type, and show indistinct relationship with geology. Noble gas isotopic data of most groundwaters were plotted along the air-crust mixing line on <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He vs. <sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne diagram, and show dominant <sup>3</sup>He of air origin except one sample that shows helium mixing of crust origin. This indicates that groundwater actively circulates along fault, and fault could not play an role of upward pathway of a deep-seated helium gas. A comparatively high <sup>4</sup>He indicates that groundwater flows in an aquifer assuring relatively enough water-rock interaction.

**Keywords:** Yangsan fault, chemical type, atmospheric origin, <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He, circulation

### 서 론

단층대에서의 지하수 흐름은 발달되어 있는 균열에 따라 지하수의 흐름을 증대시키거나 방향에 따라 흐름의 저해 발생을 시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 단층은 다양한 크기의 틈을 가진 균열을 가지고 있으면서 지하수의 수리수두(hydraulic gradient) 방향과 일치하게 되면 수 km에 걸쳐 전체적인 지하수의 흐름을 주도할 수 있으며 또한 균열의 공간적 분포에 따라 우선적 지하수 흐름(preferential

groundwater flow)을 발생시킬 수 있다(Government of South Australia, 2010).

광역적 규모(regional scale)의 단층에 있어서 지하수 흐름은 단층의 상·하부에 위치한 지하수 시스템 내 수리수두(hydraulic gradient)에 비례하는 달시안(Darcian) 흐름 원리에 근거한다고 할 수 있지만 그보다 작은 영역에서의 지하수 흐름은 암석 형태, 지질 구조, 균열 틈 크기(fracture aperture size), 균열 밀도, 그리고 인간 활동 등에 의해 다양성을 보일 수 있다. 또한 단층선을 따라 지하수는 매우

\*Corresponding author: chjeong@dju.kr

© 2016, 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.

높은 유동 특성을 보일 수 있으나, 단층을 가로지르는 지하수 순환을 예측하고 평가하는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있다(Green et al., 2007).

단층은 지하수 흐름뿐만 아니라 수리지화학적 특성에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 해안 대수층내 발달한 단층은 수리지질학적으로 중대한 불균질성과 이방성을 야기시키며 염분 이동, 해수 침투, 그리고 지하수 유동에 있어서 단층의 존재 여부에 따라 광범위한 영향을 미치는 것으로 분석되었다(박주현 외, 2008). 3차원 수치모델링을 통한 이 연구에서 단층은 단층면과 평행한 방향으로 지하수 유동과 염분 이동에 대해 통로의 역할을 하지만 단층면과 수직인 방향으로서는 지하수 및 염분 이동에 있어서 일종의 방해물로 작용하는 것으로 나타났다.

단층대를 통한 물의 순환 특성이 지하수의 화학적 특성에 미치는 영향과 단층대의 발달에 의한 심부와의 연결성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 한반도 동남부의 양산단층대와 감포지역 단층대 주변 지하수의 수리지화학적 특성을 분석하고, 지하수의 순환에 대한 단층대의 영향을 평가하기 위하여 영죽기체 동위원소비( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ,  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ) 방법을 적용하고자 하였다.

## 연구지역 및 지질

### 연구 지역

연구대상 지역은 경북 포항-경주-양산으로 이어지는 양산 단층대 주변지역으로 선정하였다(Fig. 1). 양산단층은 한반도 동남부에서는 북북동-남남서 방향으로 대표되는 단층으로 다량의 선구조들이 안행상 형태(echelon type)나, 인접한 선 구조들과 교차하기도 하면서 나타난다(김종열, 1993). 이

들 선 구조들은 자인단층, 밀양단층, 모량단층, 양산단층, 동래 단층 그리고 일광단층으로 명명되고 있다. 이들 가운데 가장 규모가 크고 대표될 수 있는 선구조는 부산의 낙동강 하구둑에서 경북 영해의 병곡 해수욕장을 통과하는 육상에서만 약 170 km에 달하는 양산단층이다. 단층대가 지나가는 지역은 대체로 낮은 지형과 충적층이 발달되며, 주변부는 대략 300 m 이하의 정도의 낮은 산들이 분포하고 있다(김종열, 1993).

### 지질 특성

연구 지역의 지질은 1:250,000으로 발간된 안동 및 부산 도폭을 참조하였다(황재하 외, 1996; 김동학 외, 1998). 연구지역은 백악기 경상누층군의 회색, 적갈색, 녹회색의 이암, 사암, 셰일, 역암 등의 쇄설성 퇴적암으로 구성된 하양층군과 안산암, 안산반암, 안산암질 응회암 등으로 구성된 화산쇄설암 그리고 용암류로 구성된 유천층군 등으로 구성되어 있다(김종열, 2003). 이들을 백악기 제 3기 불국사 화강암류에 의해 관입된다. 연구 지역 동쪽에는 천북역암과 학림층 등으로 구성된 제 3기층이 백악기층을 부정합으로 광범위하게 피복된 형태로 나타나고 있다. 동해안 양남분지는 에오세-마이오세 장기층군 화산쇄설성 퇴적암으로 구성되어 있으며, 현무암질 용암이나 암맥이 수반되어있다. 본 연구지역에 분포하는 화강암류는 주로 경상분지 내에 널리 분포하고 있는 불국사 화강암류로, 화강암, 화강섬록암, 토날라이트로 세분화되며, 세립 또는 중립질의 특성을 보인다(김종열, 2003).

연구지역을 포함하는 경상분지 동남부에는 주단층대인 양산단층대를 중심으로 서쪽에는 자인단층대, 밀양단층대, 모량단층대 그리고 동쪽에는 동래단층대, 일광단층대, 울산단

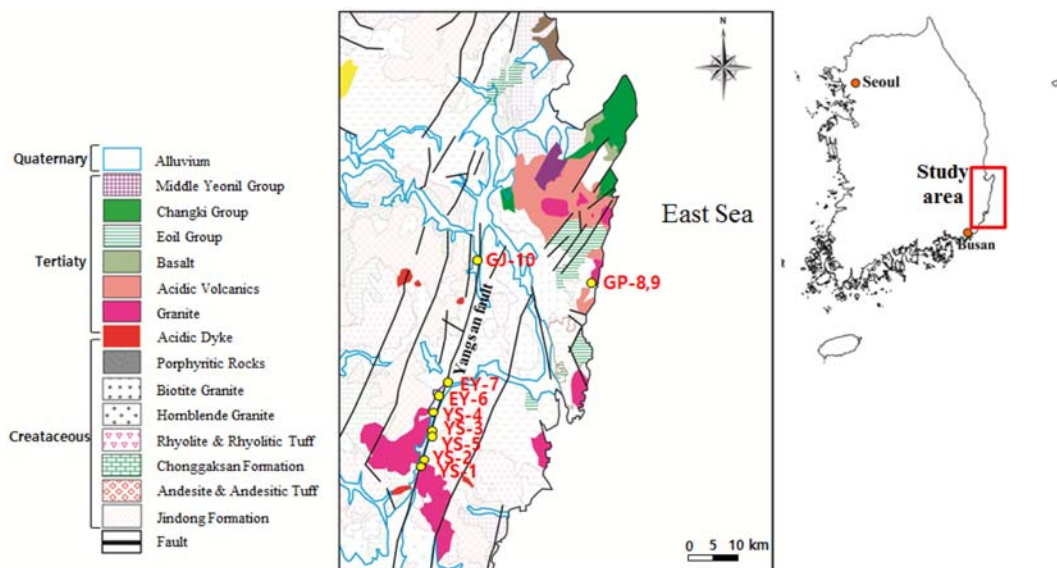


Fig. 1. Location and geologic map of the study area.

층대가 위치하고 있다. 북북서 방향인 울산단층대를 제외하면 대부분 북북동 방향으로 평행하게 발달되어 있다(김동학 외, 1998).

## 연구 방법

### 지하수 시료 채취 및 현장 수질 측정

본 연구를 위하여 양산단층 주변에 분포하는 지하수 시료 8점과 감포지역 단층대주변 지하수 2점을 채취하였으며, 지하수공 심도는 100~400 m의 범위이다. 채취된 시료 중 GP-8과 GP-9의 경우, 원자력시설부지 지하터널 관측 지점에서 채수하였다.

시료채취 현장에서 수소이온농도(pH), 용존산소량(dissolved oxygen), 전기전도도(electrical conductivity), 산화환원전위(oxidation reduction potential), 온도 등을 Thermo사 Orion 5 star모델의 휴대용 측정기를 이용하여 측정하였다. 또한 농도 0.05 N의 HCl을 이용한 산중화적정법을 이용하여  $\text{HCO}_3^-$ 의 농도를 적정하였다.

현장에서 채취된 지하수는 0.45  $\mu\text{m}$  여과지를 이용해 부유물과 이물질을 제거하였으며 양이온과 미량원소, 음이온 분석용으로 구분하여 60 mL의 폴리에틸렌 용기에 각각 담아 냉장 보관하여 이동하였다. 양이온 분석용 시료에는 농질산을 첨가시켜 pH를 2 이하로 산성화하여 이온들의 침전 및 용기 내 흡착을 방지하였다.

### 주요이온 및 미량원소 분석

지하수에 대한 화학 성분 분석 중 양이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ )과 일부원소( $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Si}^+$ ) 성분은 원자흡광분광분석기(Unicam model 989, AAS), 유도결합쌍 플라즈마 원자방출분광분석기(Shimadzu model ICPS-1000 III, ICP-AES)로 분석하였다. 미량원소(Li, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, Pb, Bi, Th, U)는 유도결합쌍 플라즈마 질량분석기(Fison model PQ, ICP-MS)로 분석되었으며, 이상의 분석은 한국기초과학지원연구원 오창센터에서 이루어졌으며, 0.1  $\mu\text{g/L}$  이하의 값은 제외하였다. 음이온 성분 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ )은 한국기초과학지원연구원 부산 지부의 Dionex 120 이온크로마토그래피로 분석하였다. 화학분석자료의 정확성을 검토하기 위해서 분석된 총 양이온과 총 음이온 함량을 당량으로 환산하여 전하균형을 계산하였다.

### 영족기체 동위원소 분석

지하수 내 영족기체 동위원소 분석을 위하여 양산지역에서 3개의 시료(YS-1, YS-4, YS-5)를 채취하였으며, 연양지역에서 1개 시료(EY-7), 그리고 경주지역에서 1개의 시료

(GJ-10)와 원자력시설부지에서 2개의 시료(GP-8, GP-9)를 채취하였다. 영족기체 동위원소 분석을 위한 시료는 동경대학교 지각화학연구실에서 특수 개발한 양쪽 고진공 개폐기가 있는 진공유리용기를 이용하여 채취하였다. 용기의 체적은 약 50 cc이고 물속에 용존된 영족기체는 금속재질로 제작된 토폴러펄프시스템으로 추출하였다. 토폴러펄프시스템은 극 저준위의 노블가스 배경치를 가진 환경하에서 노블가스를 측정할 수 있는 장치이다. 토폴러 펄프를 이용하여 지하수에서 노블가스 두 개의 Ti-Zr 포집자를 이용하여 정화시켰다. 그리고 참숯 포집자와 저온 냉각된 스테인레스 강철 포집자를 이용하여 He, Ne과 Ar-Kr, 그리고 Xe 등 3개의 가스군으로 분리하였다.

모든 영족기체의 절대량과 He, Ne 동위원소비는 VG5400 (MS-III) 동경대학교 지각화학연구실의 노블가스 질량분석기로 분석하였다. 질량분석기의 민감도와 동위원소 질량분리능의 수정 요소는 알려진 표준대기의 가스함량을 측정함으로써 결정하였다.

## 수리지화학적 특성

### 현장수질 측정자료

단층대 주변 지하수의 현장수질 측정자료는 Table 1에 제시하였으며, pH, 산화환원전위(ORP), 전기전도도(EC)에 대한 박스-휘스커도는 Fig. 2에서 제시하였다.

지하수의 pH는 5.65~8.16의 범위를 보이고, 산화환원전위는 -28.0~133 mV의 범위로 EY-6, 7 지하수가 환원환경을 보인다. 전기전도도는 135~703  $\mu\text{S/cm}$ 의 범위로 지하수별 상당한 차이를 보인다. 용존산소는 0.95~6.06 mg/L의 범위로 환원성 환경을 보이는 EY-6 지하수가 가장 낮은 값을 보인다.

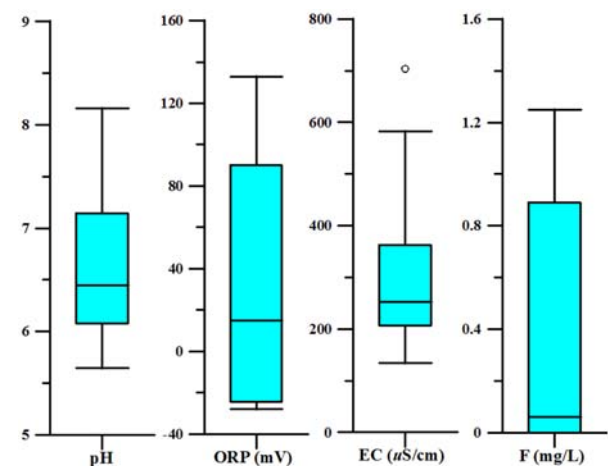


Fig. 2. Box-Whisker plots of pH, ORP, EC of groundwater samples in the study area.

**Table 1.** Geochemical composition of groundwater samples in the study area. (unit: mg/L)

Sample I.D.	Well depth (m)	Rock type	pH	ORP (mV)	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	DO (mg/L)	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>2+</sup>	Fe	Si	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	E.N (%)
YS-1	150	Andesite/Biotite granite	6.30	8.90	207	1.79	23.0	3.60	15.9	2.36	0.14	N.D	7.25	59.0	20.0	19.6	3.70	N.D	4.77
YS-2	150	Andesite/Biotite granite	6.59	90.2	363	2.91	42.8	3.12	43.8	1.53	0.40	N.D	7.70	154	35.0	16.1	1.20	1.05	7.58
YS-3	400	Andesite/Granite	5.65	133	194	5.59	19.7	4.40	17.7	0.99	0.15	N.D	12.8	67.0	15.0	15.3	6.50	N.D	4.74
YS-4	150	Andesite/Biotite granite	5.88	117	216	5.84	17.1	6.33	17.4	1.01	0.14	N.D	21.0	99.2	9.00	16.8	2.10	N.D	-3.66
YS-5	200	Andesite/Biotite granite	8.16	-9.30	252	1.74	18.7	0.94	28.6	0.28	1.08	0.27	6.12	70.2	47.9	12.6	N.D	0.89	-5.07
EY-6	100	Eonyang granite/ Daegu formation/ Andesite	7.34	-24.5	253	0.95	22.2	8.62	31.6	0.35	0.32	N.D	18.8	140	19.0	11.0	N.D	1.25	3.23
EY-7	200	Eonyang granite/ Daegu formation	6.80	-28.0	582	3.16	58.4	15.2	41.1	23.3	1.41	N.D	7.56	296	24.0	37.3	N.D	0.21	1.12
GP-8	110	Tertiary diorite/ Granite	6.08	21.2	703	1.71	66.6	23.2	28.4	4.84	0.35	2.42	14.3	41.2	163	67.6	N.D	0.01	4.9
GP-9	130	Tertiary diorite/ Granite	7.14	-24.6	268	6.06	16.6	4.29	21.8	3.44	0.08	1.98	8.49	76.3	38.3	18.6	N.D	0.08	-7.41
GJ-10	100	Daegu formation/ hornfels	6.15	66.5	135	2.30	11.6	3.00	6.65	1.15	0.08	0.01	4.10	33.7	13.3	9.20	7.12	0.04	-2.52

**수리화학적 유형**

지하수의 주요 화학성분을 파이퍼도에 도시하여 화학적 유형을 분류하였다(Fig. 3). 지하수의 화학적 유형은 Ca(Na)-HCO<sub>3</sub> 유형에서 Ca-SO<sub>4</sub>(Cl) 유형까지 넓게 분포하며 3개의 그룹으로 분류하였다. 그룹 A는 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형으로서 화강암지역 지하수의 진화초기의 특성을 보이며, 그룹 B에 속하는 지하수는 Ca(Na)-HCO<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>, Cl)의 유형으로 국지적 지질의 영향으로 SO<sub>4</sub> 등의 함량이 높은 지하수로 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도가 높지 않아 오염의 영향은 거의 없을 것으로 보인다. 그룹 C의 지하수인 GP-8은 Ca, Mg, SO<sub>4</sub>, Cl의 농도가 높아 Ca-SO<sub>4</sub>(Cl) 유형으로 분류된다. GP-8 지하수는 바다와 인접한 단층대 지하수로 해수와의 혼합과 국부적인 지질의 영향 특히 황철석과 같은 황화광물과의 반응이 화학성분에 영향을 미친 것으로 보인다.

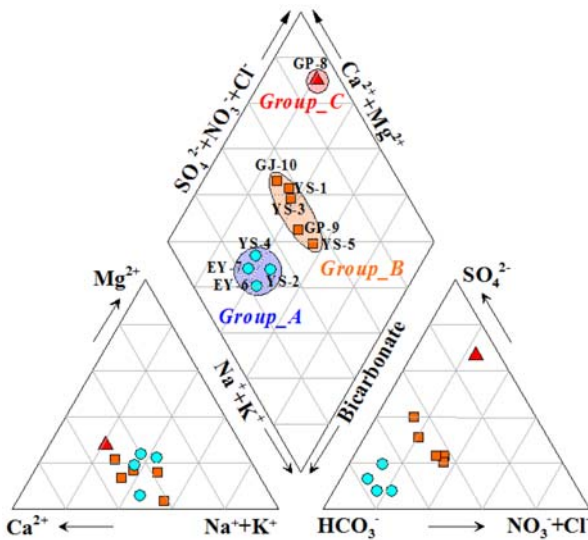


Fig. 3. Trilinear plots showing the chemical types of groundwater in the study area.

**주요 화학 성분**

연구지역 지하수의 주요 성분에 대한 분석 결과는 Table 1에 제시하였다. 지하수의 주요이온함량에 대한 박스-휘스커 통계도는 Fig. 4에서 보여준다. 양이온함량은 Ca > Na > Mg > K의 순서를 음이온 함량은 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 순서를 보인다.

지하수내 이온성분들의 기원은 물-암석 반응에 의한 자연적 과정에 의한 공급과 인간 활동과 관련한 오염물질의 공급으로 구분할 수 있다. 이 연구에서는 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도에 따른 F, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na+K, Ca+Mg 함량변화를 도시하였다(Fig. 5). 유기물 등 특정오염 성분이 없는 경우 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분은 자연반응에 의해 지하수에 공급되는 성분이며, 화강암지역 지하수내 F 성분은 운모류의 (OH)를 치환하여 소량 존재하는 F<sup>-</sup> 성분이 용출이 주요 공급원으로 물-암석 반응을 지시하는 대표적 성분으로 분류할 수 있다. 반면 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분은 생활환경 오염물질에서 기원하는 대표적인 성분으로 분류된다.

Fig. 5(a)의 경우 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 F의 상관관계로 YS-2, YS-5, EY-6 시료는 불소의 함량이 높은 지하수로 중탄산의 농도와도 대체로 비례하는 경향을 보여 물-암석 반응에 의한 영향을 반영하는 것으로 해석된다. Fig. 5(b)는 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 상관관계로 비록 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도가 높지는 않으며, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도와 반비례하는 경향을 보여, 자연기원과 오염기원의 서로 다른 공급원의 성분에 대한 상반성을 잘 보여준다. Fig. 5(c)와 (d)는 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도에 따른 Na+K 함량과 Ca+Mg 함량변화를 도시하였으며, 서로 선형적 비례관계를 보이며, 특히 Ca+Mg와의 상관성은 R<sup>2</sup>=0.94로 매우 밀접한 관련성을 보여 방해석등 탄산염광물의 용해반응에 의한 공급으로 해석된다. Na+K와의 상관성에서도 R<sup>2</sup>=0.77로 장석류의 풍화반응에 CO<sub>2</sub>가 상당히 관여되었음을 시사한다.

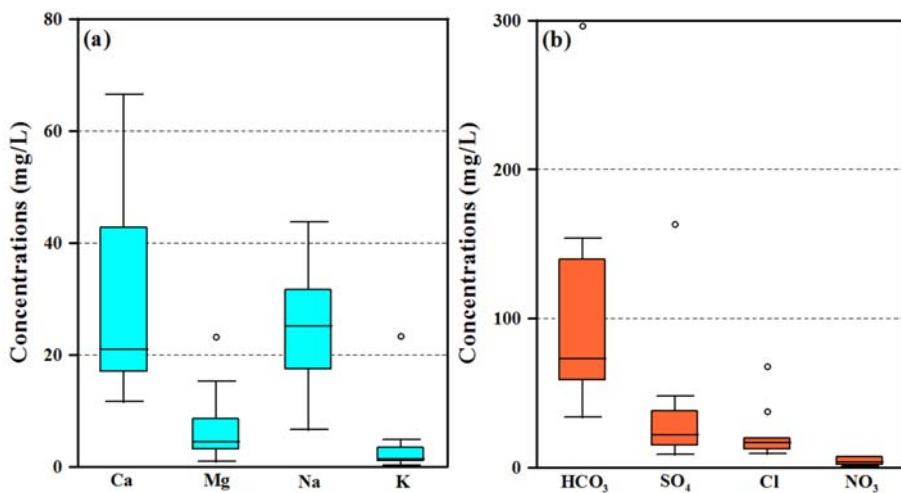


Fig. 4. Box-Whisker statistical plots of major ions of groundwater samples in the study area.

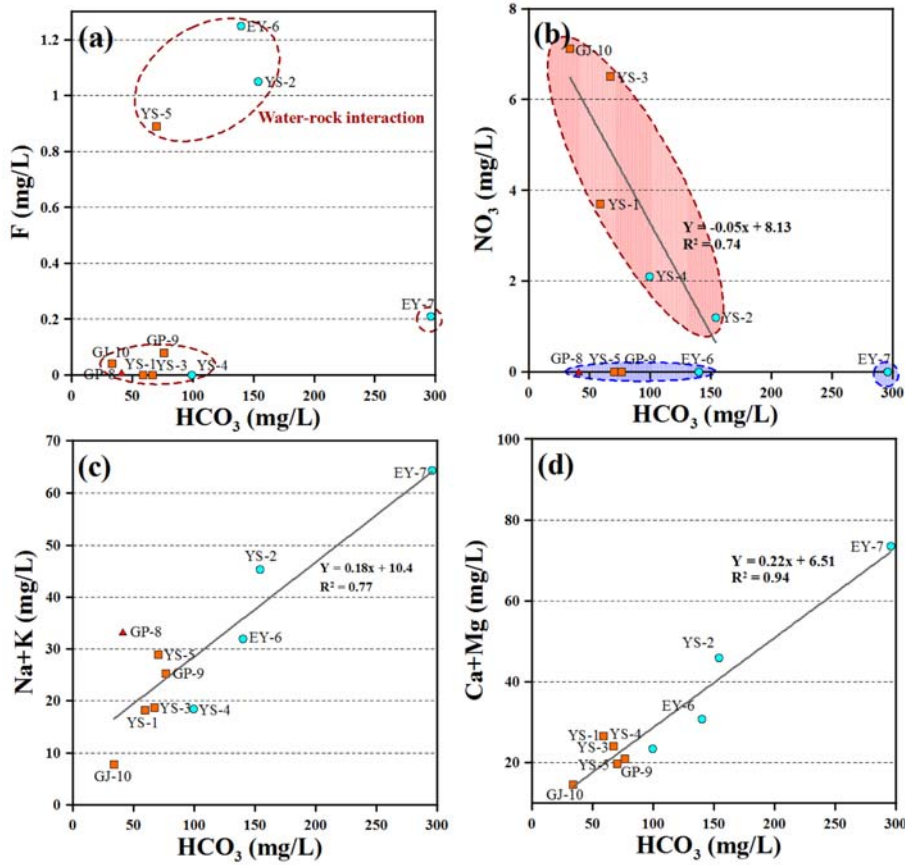


Fig. 5. Variations of major ions according to the HCO<sub>3</sub> in groundwater samples in the study area.

Table 2. Minor and trace elements of groundwater samples in the study area.

(unit : µg/L)

Sample ID.	Li	B	Al	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Rb	Mo	Cd	Cs	Ba	Pb	U
YS-1	3.05	16.6	1.67	<0.5	0.40	1.38	<0.1	0.56	13.9	94.9	<0.1	<0.5	1.92	0.56	<0.1	<0.1	18.5	<0.1	1.86
YS-2	67.4	92.0	1.14	<0.5	0.53	26.5	<0.1	0.24	2.48	9.36	<0.1	1.62	2.10	1.47	<0.1	0.81	6.00	<0.1	1.17
YS-3	3.37	23.4	0.76	<0.5	0.41	0.80	<0.1	0.35	22.3	223	<0.1	<0.5	0.57	0.21	1.96	<0.1	3.98	1.77	0.44
YS-4	9.72	5.79	0.52	<0.5	0.55	0.25	<0.1	0.54	5.02	21.5	0.56	<0.5	0.11	0.09	<0.1	<0.1	17.2	0.24	0.85
YS-5	48.4	135	6.94	<0.5	<0.2	28.3	<0.1	0.66	0.18	4.47	<0.1	10.7	0.47	1.64	<0.1	0.14	1.08	0.07	0.09
EY-6	25.1	47.9	1.37	<0.5	0.35	32.6	<0.1	0.14	1.05	20.5	0.91	3.57	0.74	17.4	<0.1	0.21	3.89	<0.1	0.11
EY-7	33.1	92.8	0.69	<0.5	2.01	1834	5.12	68.7	5.68	1162	<0.1	1.60	23.0	5.13	<0.1	1.25	244	<0.1	0.18
GP-8	23.6	13.6	7.03	2.11	<0.2	940	5.62	3.47	0.47	129	<0.1	<0.5	7.61	6.88	<0.1	0.38	51.9	0.19	0.10
GP-9	91.3	16.3	5.87	<0.5	<0.2	271	<0.1	0.32	0.24	2301	<0.1	<0.5	6.96	1.27	<0.1	0.20	3.47	0.09	0.06
GJ-10	0.62	9.82	39.0	<0.5	<0.2	7.32	<0.1	0.45	0.89	1010	8.57	<0.5	0.62	0.44	<0.1	0.06	14.8	0.19	0.07

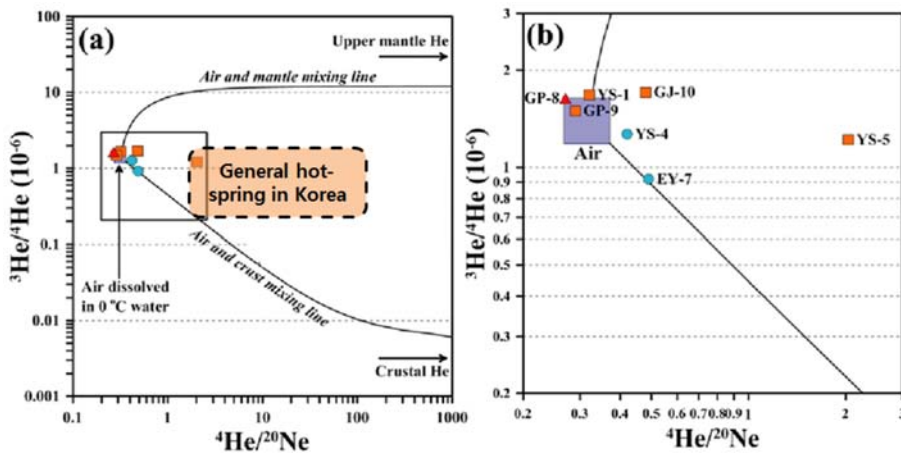
미량원소 성분

미량원소로 Li, B, Al, Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Rb, Mo, Cd, Cs, Ba, Pb, U에 대한 분석 결과는 Table 2에 제시하였다. 분석결과 모든 시료에서 미량원소의 농도가 음용수 수질기준치 이하의 값을 보였다. 하지만 EY-7 지하수 시료의 경우, Mn, Zn, Ba의 농도가 다른 시료의 비해 상당히 높은 1,834 µg/L, 1,162 µg/L, 244 µg/L

의 농도를 보였으며 GP-9 시료의 경우, Zn의 농도가 2,301 µg/L의 높은 농도를 보였다. 규산염 광물의 용해작용으로 용출될 수 있는 Al은 0.52~39.0 µg/L의 함량 범위를 보이고, Ba의 경우 1.08~244 µg/L의 범위를 보여준다. Zn은 4.47~2,301 µg/L의 범위로 넓은 범위의 함량을 보여주었다.

**Table 3.** Noble gas composition and their isotopic ratios of groundwater samples in the study area

Sample ID.	<sup>4</sup> He (cc/g)	<sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He	<sup>20</sup> Ne (cc/g)	<sup>20</sup> Ne/ <sup>22</sup> Ne	<sup>36</sup> Ar (cc/g)	<sup>40</sup> Ar (cc/g)	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	<sup>84</sup> Kr (cc/g)	<sup>132</sup> Xr (cc/g)	<sup>4</sup> He/ <sup>20</sup> Ne
YS-1	5.90E-08	1.68±0.06	1.82E-07	9.83±0.009	1.12E-06	3.32E-04	297±0.36	4.06E-08	2.72E-09	0.32
YS-4	6.66E-08	1.27±0.05	1.60E-07	9.77±0.011	1.42E-06	2.99E-04	298±0.48	3.50E-08	1.63E-09	0.42
YS-5	4.83E-07	1.22±0.07	2.37E-07	9.80±0.015	1.00E-06	4.21E-04	297±0.44	4.93E-08	2.93E-09	2.04
EY-7	9.59E-08	0.92±0.04	1.94E-07	9.80±0.008	9.90E-07	2.93E-04	296±0.35	3.27E-08	1.63E-09	0.49
GP-8	7.17E-08	1.64±0.06	2.63E-07	9.78±0.021	1.33E-06	3.95E-04	298±0.49	4.57E-08	2.32E-09	0.27
GP-9	8.22E-08	1.50±0.07	2.81E-07	9.80±0.011	1.48E-06	4.38E-04	295±0.69	4.86E-08	2.85E-09	0.29
GJ-10	1.10E-07	1.71±0.03	2.28E-07	9.81±0.007	1.31E-06	3.86E-04	296±0.52	4.57E-08	2.28E-09	0.48



**Fig. 6.** Plot of <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He versus <sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne ratios for the groundwaters samples in the study area.

**영족기체 동위원소 특성**

비활성기체인 영족기체(noble gas)는 대기, 맨틀, 지표에 존재하는 휘발성 원소의 순환과정 연구에서 매우 유용한 추적자로 이용되고 있다(Aka et al., 2000). 특히, 헬륨 동위원소비(<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He)는 대기, 지각, 맨틀로부터 측정된 값이 매우 큰 차이를 보여 다양한 물질의 기원 연구에 유용하게 이용된다. <sup>3</sup>He은 대부분 지구 형성 초기나 운석 내 포획되어 있는 원시 헬륨이고 <sup>4</sup>He 동위원소는 U(Th)의 α붕괴 시에 생성된다. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He은 대상 물질이 존재하는 지질 환경이나 시간에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 각종 수리지화학학적 현상 해석에 중요한 정보를 제공해 줄 수 있다.

대기의 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He은 1.4 × 10<sup>-6</sup>, 지각에서는 0.005 × 10<sup>-6</sup>, 그리고 맨틀에서는 12 × 10<sup>-6</sup>의 값으로 나타난다. 또한 <sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne에 대한 대기, 지각, 맨틀은 각각 0.317, 10,000, 10,000의 값으로 나타난다(Ozima and Podosek, 2002; Graham, 2002; Ballentine and Burnard, 2002).

연구지역 지하수의 영족기체 동위원소 분석 결과, YS-5 시료를 제외한 거의 모든 지하수는 대기로부터 유래된 <sup>3</sup>He에 큰 영향을 받는 것을 보여준다(Fig. 6). 일반적인 우리나라 온천수는 지각 기원의 방사성 붕괴에 의해 발생된 <sup>4</sup>He

와 이에 따른 열원 기원인 것으로 알려져 있다. 연구지역 지하수는 대기 기원의 <sup>3</sup>He의 공급이 큰 특성을 보여 이는 양산단층의 발달로 인한 수리지질학적 측면에서 지하수의 순환이 매우 빠른 환경임을 시사한다.

YS-5 지하수는 암석기원의 <sup>4</sup>He의 공급이 다소 높은 값을 보여준다(Fig. 6(b)). 이는 물-암석 반응이 상대적으로 긴 대수층 환경의 지하수로 단층대에서도 비교적 지하수의 순환이 느린 환경에서 해석된다. 이는 물-암석 상호반응의 측면에서 불소와 영족기체 동위원소 상관관계에서도 이를 뒷받침한다.

영족기체 동위원소 조성비를 Water 0°C와 Water 50°C 선에 도시하여 각각의 기원을 나타낸 결과(Fig. 7), 대부분의 영족기체 동위원소는 0°C와 50°C 선 부근에 도시되어 대기기원임을 나타내지만, <sup>4</sup>He의 경우 선의 약간 윗부분에 도시되어 암석기원의 <sup>4</sup>He의 존재를 지시한다(Kipfer et al., 2002).

불소(F)는 형석광물 등 불소구성 광물 외에는 화강암 등의 운모 내 (OH)를 치환하여 존재하므로 물-암석반응이 진행에 따라서 지하수내 불소의 함량이 높은 값을 보일 수 있다. Fig. 8과 같이 <sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne와 F의 상관관계는 지하수의 물-암석 반응에 대한 정보를 제공할 수 있다. YS-5를 제외한

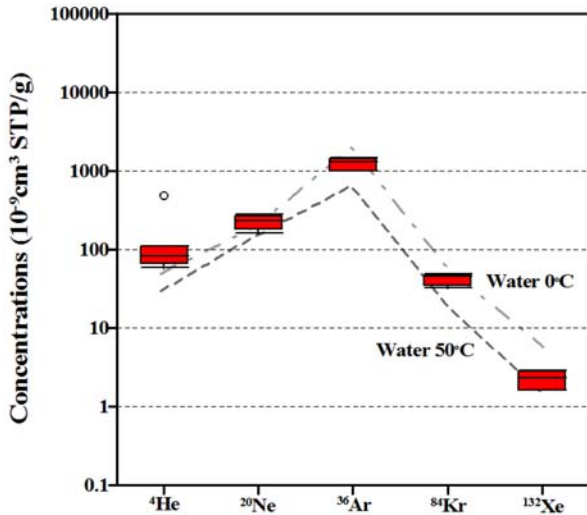


Fig. 7. Box-Whisker plots of Isotopic ratios of noble gas composition of groundwater samples in the study area.

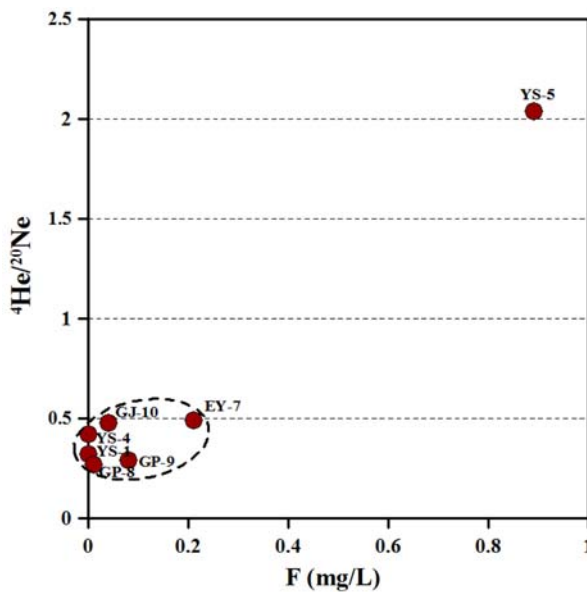


Fig. 8. Plot of  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  versus F values for the groundwaters samples in the study area.

나머지 지하수 시료는 대부분  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  와 F 이온이 동시에 낮은 특성을 보였으며, YS-5 지하수 시료의 경우  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  값이 2.04, F 농도 값이 0.89 mg/L로 다른 지하수에 비해 높은 값을 보인다. 따라서 YS-5 지하수는 다른 지하수 보다 비교적 오랜 기간 물-암석 반응이 이루어진 것으로 해석되며, 그에 따라서 암석기원의  $^4\text{He}$ 의 상대적 비율이 더 높은 것으로 해석된다.

이를 종합하여 볼 때, 양산단층 주변 암반지하수의 화학 성분은 지하수 관정의 깊이, 지질, 암석-물 상호 반응의 영향보다는 단층대에 발달된 균열 등으로 인한 대수층의 물 순환속도와 단층대를 통한 해수의 유입 등의 영향이 더 큰

것으로 보인다.

### 결론

양산단층대와 감포 일대 원자력시설 단층대 주변 지하수를 대상으로 수리화학적 특성과 영족기체 동위원소를 이용한 지하수의 순환에 대한 단층대의 영향에 대한 연구결과 지하수의 지화학적 유형은 3가지 유형 즉, Ca-HCO<sub>3</sub>(A그룹) Ca(Na)-HCO<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>,Cl)(B그룹), Ca-SO<sub>4</sub>(Cl)(C그룹)으로 분류되었다. A그룹의 지하수의 화학성분은 백악기 퇴적암등 지질의 영향이 큰 것으로 보이며 이온들의 함량도 가장 높다. 반면 B와 C그룹의 지하수는 이온함량이 A그룹의 지하수에 비해 상대적으로 낮으며 천부 오염물질, 해수의 유입, 그리고 지질의 영향이 각각 또는 중첩적으로 영향을 받은 것으로 보인다.

영족 기체동위원소 분석 결과, 양산 단층 주변 지하수 대부분은 대기 기원의  $^3\text{He}$ 에 매우 큰 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며,  $^4\text{He}$ 의 경우 일부 지하수에서 암석기원이 포함되어 있는 것으로 보인다. 대부분의 지하수는 대기기원으로 단층대에서 지하수는 빠른 순환이 이루어지며, YS-5 지하수만 비교적 오랜 기간 물-암석 반응이 이루어지며, 순환이 비교적 느린 대수층 환경으로 보인다.

이상을 종합하면 단층대주변 지하수는 단층대의 영향으로 지하수의 순환이 비교적 빠르고, 일부 지질의 영향과 해안 부근 지하수의 경우 단층대를 통한 해수의 유입의 영향에도 노출된것으로 판단된다.

### 사사

본 연구는 한국연구재단(과제번호 2014064187)의 연구비 지원으로 수행되었다.

### References

Aka, F. T., Kusakabe, M., Nagiouang, K., and Tanyileke, G., 2000, Noble gas isotopic compositions and water/gas chemistry of soda springs from the islands of bioko, Sotom and Annobon, along with Cameroon Volcanic Line, West Africa. *Appl. Geochem.*, 16, 323-338.

Ballentine, C. J. and Burnard, P. G., 2002, Production, release and transport of noble gases in the continental crust. *Rev. Mineral. Geochem*, 47, 481-538.

Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric water, *American for the Advancement of Science*, 133(3465), 1702-1703.

Drever, J.I., 1988, *The Geochemistry of Natural Waters*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J., 437.



- Government of South Australia, 2010, Technical Report, Groundwater flow across regional scale faults, Technical Report DFW 2010/15, 63.
- Graham, D. W., 2002, Noble gas isotope geochemistry of mid-oceanic ridge and ocean island basalts: characterization of mantle source reservoirs. *Rev. Mineral. Geochem*, 47, 247-317.
- Green, G., Banks, E., Wilson, T., and Love, A., 2007, Groundwater recharge and flow investigation in the Western Mount Lofty Ranges, South Australia, DWLBC Report 2007/29, Government of South Australia, through Department of Water, Land and Biodiversity Conservation, Adelaide.
- Kim, D. H., Hwang, J. H., Park, K. H., and Song, K. Y., 1998, Geological report of the Busan sheet (scale: 1:250,000), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kipfer, R., Aeschbah-Herting, W., Peeters, F., and Stute, M., 2002, Noble gases in the continental crust, *Rev. Mineral. Geochem*, 47, 615-700.
- Ozima, M. and Podosek, F. A., 2002, Noble Gas Geochemistry 2nd edition. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 286.
- Paces, T., 1972, Steady-state kinetics and equilibrium between ground water and granitic rock, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 37, 2641-2663.
- Piper, A. M., 1994, A Graphic procedure in the geochemical interpretation of Water-analyses, *Transactions, American Geophysical Union*, 25, 914-928.
- Tardy, Y., 1971, Characterization of the principle weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs, *Chemical Geology*, 7, 253-271.
- Velbel, M. A., 1985, Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge, *Am. J. Sci.*, 285, 904-930.
- Velbel, M. A., 1989, Weathering of hornblende to ferruginous products by a dissolution-precipitation mechanism: Petrography and Stoichiometry, *Clays Clay Mineral.*, 37, 515-524.
- Velbel, M. A., 1992, Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge, III, Cation budgets and the weathering rate of amphibole, *Am. J. Sci.*, 292, 58-78.
- 정찬호**  
대전대학교 지반방재공학과  
대전광역시 동구 대학로 62  
Tel: 042-280-2573  
E-mail: chjeong@dju.kr
- 최현영**  
대전대학교 지반방재공학과  
대전광역시 동구 대학로 62  
Tel: 042-280-2577  
E-mail: dhhd3158@naver.com
- 이유진**  
대전대학교 지반방재공학과  
대전광역시 동구 대학로 62  
Tel: 042-280-2577  
E-mail: geoabby20@gmail.com
- 이용천**  
대전대학교 지반방재공학과  
대전광역시 동구 대학로 62  
Tel: 042-280-2577  
E-mail: dydcjs159@naver.com
- 양재하**  
국립환경과학원 토양지하수연구과  
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)  
Tel: 032-560-7909  
E-mail: wjhyang@korea.kr