

## 옥천대 우라늄 광화대 부근 퇴적암 지하수의 수리화학적 특성

황 정\*

대전대학교 지반설계정보공학과, 300-716, 대전광역시 동구 용운동 96-3

### Hydrochemistry of Groundwater in the Uraniferous Sedimentary Rocks of the Ogcheon Belt, Republic of Korea

Jeong Hwang\*

Department of Geotechnical Engineering, Daejeon University, Daejeon 300-716, Korea

**Abstract:** A hydrochemical comparative study of groundwater in uraniferous sedimentary rock of the Ogcheon belt was carried out to investigate the genetic relationship between uraniferous groundwater of Daejeon area and uraniferous sedimentary rocks of the Ogcheon zone. The groundwater shows weak alkaline pH values ranging from 6.4 to 8.1 and low Eh values ranging from -50 to 225 mV. The groundwaters to Ca-HCO<sub>3</sub> type that shows high concentration of Ca<sup>2+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> due to the dissolution of carbonate mineral in limestone. The concentration of uranium in the groundwater was measured very low below 3.2 µg/L, while it was detected as much as 1165 µg/L in the mine waste water. The low Eh value of groundwater is one of the main causes of low uranium concentration of groundwater in uraniferous sedimentary rocks in the Ogcheon belt. It is suggested that the uranium of groundwater in granitic region of Daejeon area was not mainly provided from uraniferous sedimentary rocks in the Ogcheon belt.

**Keywords:** Ogcheon belt, uranium, groundwater, granite, uraniferous sedimentary rock, hydrochemistry

**요약:** 옥천대 우라늄 광화대 부근 퇴적암 지하수에 대한 수리지화학적 연구를 수행하여 옥천대 우라늄 광화대와 대전 지역 우라늄 지하수와의 성인적 관련성을 고찰하였다. 지하수의 pH는 6.4-8.1의 범위로 중성에서 약알칼리성 특성을 보이며, Eh는 대체로 -50-225 mV의 범위로서 일부는 환원성 환경의 특성을 보인다. 지하수는 탄산염광물의 용해반응으로 Ca<sup>2+</sup> 및 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 함량이 우세한 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형에 해당된다. 석탄광산 폐수에서는 1165 µg/L의 우라늄이 검출되었으나 지하수내 우라늄 함량은 3.2 µg/L 이하로 매우 낮다. 우라늄 광화대 부근 지하수에서 낮은 우라늄 함량은 낮은 Eh를 보이는 수리지화학적 특성에 기인한다. 대전지역 지하수 내 우라늄은 옥천대 우라늄 광화대로부터 공급되지는 않은 것으로 판단된다.

**주요어:** 옥천대, 우라늄, 지하수, 우라늄 광화대, 수리지구화학

## 서론

대전지역의 경우 온천수와 지하수에서 미국의 먹는 물 기준치(혹은 권고치)를 상회하는 우라늄이 상당수 검출된다(국립환경연구원, 1999, 2001; 김건영 외, 2000; 정찬호, 2003). 김건영 외(2000)는 유성지역 지열수와 지하수에서 고농도 우라늄 지하수의 기원에 대하여 유성지역이 화강암 분포지역임을 근거로 퇴적

암의 영향은 배제하고 화강암과 지하수의 반응결과로 해석하였다. 그러나 류종식 외(2005)는 대전지역 지하수에 존재하는 우라늄과 스트론튬의 기원 연구에서 대전지역 지하수는 화강암과 석회암의 영향을 함께 받았다고 보고하였다. 따라서 대전지역 지하수내 우라늄의 기원에 관한 기존 연구에서는 일반적으로 화강암과의 반응결과로 추정하고 있으나, 최근의 일부 연구 결과는 주변 퇴적암의 영향에 대한 검토의 필요성이 제기되고 있다. 지하수내 우라늄의 함량이 높은 원인을 밝히기 위해서는 우라늄 광물이 쉽게 용해될 수 있는 지구화학적 환경과 대수층 내 파쇄대의 발달 정도를 포함하는 종합적인 검토가 필요할

\*Corresponding author: jeongha@dju.ac.kr

Tel: 82-42-280-2572

Fax: 82-42-280-2576

것이다. 지하수내 우라늄의 기원은 대전지역 인근에는 옥천대 우라늄 광화대가 광범위하게 발달하고 있어 이들 암층과 지하수간의 반응에 따른 성인적 관련성에 대한 검토가 필요하다.

옥천대 북부의 구룡산층과 남부의 창리층에 협재된 흑색 셰일에는 탄질물과 함께 저품위 우라늄 광화대가 배태되어 있다. 1980년대까지는 우라늄 광체의 부존과 평가를 위한 지질학적, 광상학적, 지구화학적 연구가 주로 수행되어 왔다(이상만 외, 1981; Chi et al., 1985; 이대성 외, 1986). 1990년대 이후에는 이들 우라늄 광화대의 암석, 토양, 하상퇴적물에 관한 환경지질학적 연구가 주로 수행되어 왔다(전효택과 정명채, 1991; Kim and Thornton, 1993; 이찬희와 이현구, 1997). 옥천대 우라늄 광화대의 지하수에 대하여는 그 지구화학적 특성에 대한 연구는 일부 수행되었지만 지하수내 우라늄에 대한 고찰이 없거나(김형돈 외, 1988; 김통권 외, 1999), 지하수내 용존된 우라늄의 함량에 관한 자료만 제시되어 있다(국립환경연구원 1999, 2001; Lee et al., 2001). 2000년대 이후에는 옥천대에서 우라늄 함량이 높은 광산폐수에 대한 보고가 있다(Woo et al., 2002; 이병선과 우남철, 2004). 이 연구에서는 옥천대 우라늄 광화대 부근 퇴적암지역 지하수에 대한 수리지화학적 특성을 고찰하여, 옥천대의 우라늄 광화대와 우라늄 지하수와의 성인적 관련성 연구를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 일반지질

연구지역은 옥천누층군이 주로 분포하는 괴산, 보은, 대전, 금산 일대이다. 괴산에서 금산지역에 발달하는 옥천누층군은 드리스트 단층과 습곡에 지배되어 북동-남서방향으로 반복 발달한다. 옥천누층군의 동측과 서측 경계는 모두 주라기 화강암류의 관입을 받았으며 대전지역에서는 주라기 화강암의 관입으로 옥천누층군의 연장이 절단된다. 주라기 화강암에는 남북방향으로 발달하는 백악기 화강질 맥암류가 발달한다. 이병주 외(1995)는 연구지역의 암상 및 층서에 의해 옥천누층군을 변성사질암대(Og1), 하부천매암대(Og2), 합력천매암대(Og3), 상부천매암대(Og4)로 구분하였다(Fig. 1).

괴산에서 금산지역에 발달하는 옥천누층군은 드리스트 단층과 습곡에 지배되어 북동-남서방향으로 반

복 발달한다. 이들은 주로 천매암과 점판암의 두꺼운 호층으로 구성되며 석회암이나 규암이 박층으로 협재된다. 점판암과 천매암의 호층대 내 흑색 셰일에는 탄질물과 함께 저품위 우라늄 광화대가 발달한다. 우라늄 광화대는 충주시 매현리에서 논산시 수락리까지 북동에서 남서로 약 100 km 연장 분포한다. 옥천누층군의 동측과 서측 경계는 모두 주라기 화강암류의 관입을 받았으며 대전지역에서는 주라기 화강암의 관입으로 옥천누층군의 연장이 절단된다. 주라기 화강암은 구성광물과 조직에 의해 편상화강암, 흑운모화강암, 복운모화강암으로 세분된다. 이중 복운모화강암이 대전 전 지역에 걸쳐 광범위하게 분포한다. 주라기 화강암에는 남북방향으로 발달하는 백악기 화강질 맥암류가 발달한다. 백악기 화강암류들은 남북방향의 방향성을 가지고 주라기 화강암체를 암주상 혹은 맥암의 형태로 관입하였으며, 미문상조직 및 정동구조 등 천소 관입의 특징을 보인다. 이들 화강암류들은 홍색장석화강암, 세립홍색장석화강암, 그레노파이어, 석영반암 등으로 구분되며 이들 암상간의 직접적인 선후관계는 불명하나 암질이 부분적으로 유사한 점이 많아 동시기 물질인 마그마의 활동산물일 것으로 추정하였다(박희인 외, 1977; 이상만 외, 1980). 진호일 외(1995)는 대전 인근 금산지역 백악기의 화강암류를 5가지 암상으로 세분하고 그 중 등립흑운모화강암의 연대를 59 Ma의 백악기말 내지는 제3기초로 보고한 바 있다.

## 연구방법

이 연구를 위하여 괴산-보은-대전-금산 지역에 발달하는 옥천누층군의 흑색 셰일 분포지역을 중심으로 27개의 지하수 시료와 2개의 광산폐수를 채취하였다(Fig. 1). 시료채취 시기는 2009년 7월-9월이며, 지하수 공의 심도는 20-300 m 범위이다. 지하수 시료에 대한 현장측정은 수온, 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소농도(DO) 등에 대하여 Orion 5-star 휴대용 측정기를 사용하였다. 탄산이온( $\text{HCO}_3^-$ )의 함량은 0.05 N의 HCl을 이용한 산-중화 적정법으로 현장에서 정량하였다. 지하수시료의 채취는 공 심도를 고려하여 수온의 변화가 없을 때까지 약 20분 정도 양수하여 안정화시킨 후에 실시하였으며, 분석용 시료는 현장에서 핸디형 진공펌프와 0.45  $\mu\text{m}$  셀룰로즈 멤브레인 필터를 이용하여 시

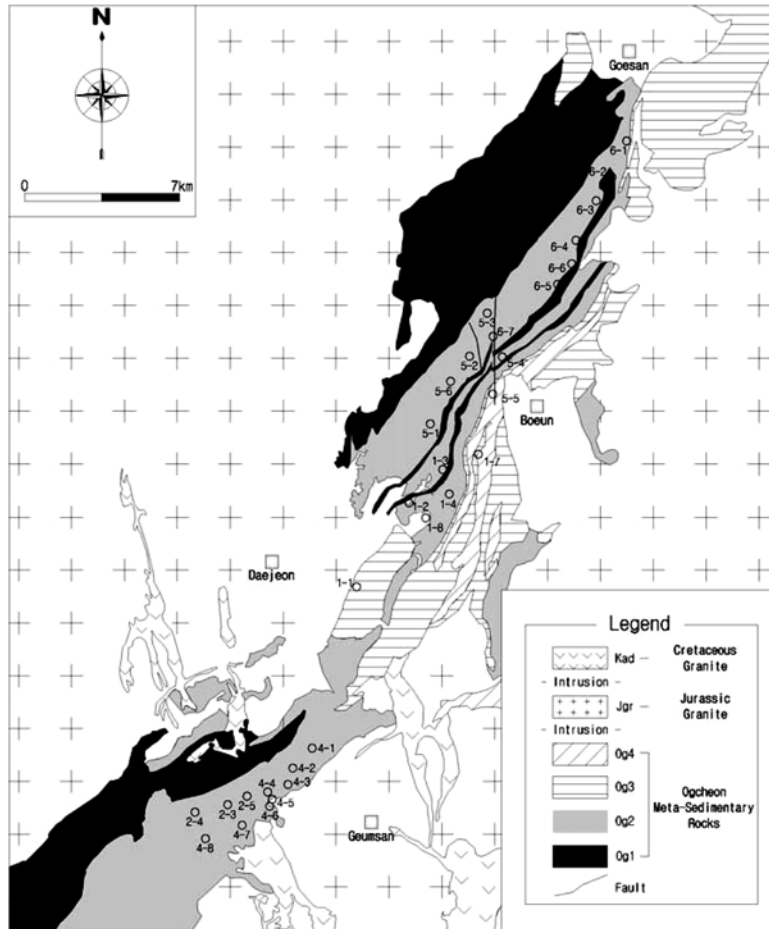


Fig. 1. Geological map of Ogcheon belt ranged from Goesan to Guemsan area (modified from Lee et al., 1995). The sampling sites of groundwater are shown as open circles.

료 중의 부유물질을 제거하였다. 지하수 시료 중 양이온, 음이온 분석용 시료는 60 mL 폴리에틸렌용기에 각각 구분하여 채취하고 분석 전까지 냉장 보관하였다. 특히 양이온 분석용 시료에 대해서는 유기작용과 금속이온들의 침전 및 용기 내 흡착 등의 변질을 막기 위해 농질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다(Greenberg, 1992).

지하수의 수질특성을 고찰하기 위한 지하수 시료에 대한 화학분석은 한국기초과학지원연구원에서 수행되었다. 주성분 원소는 유도결합쌍 프라즈마 원자방출 분광분석기(Jobin Yvon 138 Ultrace, ICP-AES)로 분석하였으며, 미량성분 원소는 유도결합쌍 프라즈마 질량분석기(Perkin Elmer Elan 6100, ICP-MS)로 분석되었다. 음이온 성분은 이온크로마토그래피(IC, Dionex, DX-500)로 분석하였다.

## 연구결과 및 고찰

### 현장수질특성

연구지역 지하수 시료에 대한 pH, 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO), 온도 등 현장수질특성은 Table 1과 같다. 지하수의 pH는 6.4-8.1의 범위이며 평균치는 7.1로 중성에서 약칼리성 특성을 보인다. 산화-환원전위(Eh)는 대체로 -50-225 mV의 범위를 보여 일부는 환원성 환경의 특성을 보이기도 한다. 용존산소량은 1.4-15.7 mg/L의 범위를 보인다. 전기전도도(EC)는 대체로 76-362  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보인다. 보은지역의 석탄광산과 채석장에서 채취된 광산폐수(시료번호: 1-4)와 웅덩이 폐수(시료번호: 6-6)는 각각 2456, 2436  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 높은 전기전도도를 공통적으로 보이며, pH는 채석장 웅덩이 폐

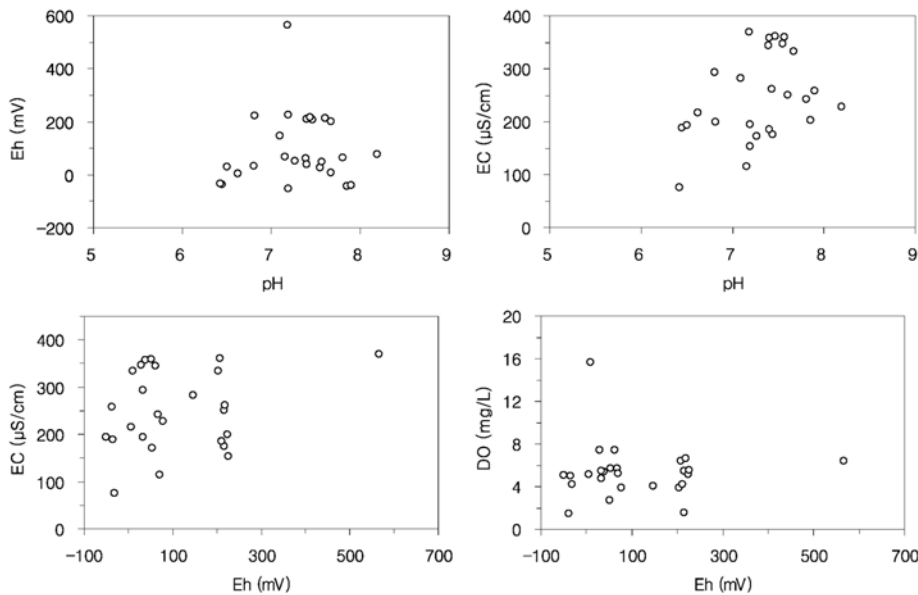


Fig. 2. Plots showing the relationship between pH, Eh, EC and DO of groundwater samples.

수에서는 3.3의 산성 특성을 보이나 석탄광산 폐수에서는 7.5의 중성 특성을 보인다. Fig. 3은 지하수의 각 수질 요소 간의 상관관계를 나타낸 것이다. 연구지역 지하수의 pH, Eh, EC, DO간의 뚜렷한 상관관계 경향은 보이지 않으나 pH의 증가에 대한 EC의 증가 경향이 관찰된다(Fig. 2). 이는 점진적인 물-암석반응이 진행되면서 이동도 큰 성분들이 점진적으로 방출되어 pH가 높아지고 용존이온의 함량이 증가되면서 EC값이 높아지는 경향을 보이는 것으로 해석된다.

**주성분 원소 특성**

지하수 시료들의 주성분 원소에 대한 자료는 Table 1과 같다. 주요 양이온의 대체적인 농도 범위를 살펴보면 Na<sup>+</sup>는 2.7-14.6 mg/L, K<sup>+</sup>는 0.3-4.9 mg/L, Ca<sup>2+</sup>는 7.1-68.1 mg/L, Mg<sup>2+</sup>는 2.0-8.6 mg/L의 범위를 보인다. 지하수의 주 양이온에 해당하는 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>의 함량은 암석의 종류나 계절에 따라 용존량에 다소간의 차이가 있으나 일반적으로 Ca<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>K<sup>+</sup>의 함량 순위를 보이는데, 연구지역 지하수에서도 동일한 특성을 보인다.

탄산염 광물의 용해, 대기와 토양 내 CO<sub>2</sub> 가스의 용해와 같은 자연적 반응으로 인해 기원하는 지하수 내 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 33-200 mg/L의 범위로서 퇴적암 지역에서 넓은 함량범위를 보인다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 함량은 9.1-30.7

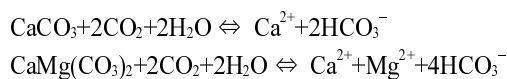
mg/L의 범위를 보인다. 시료번호 4-1의 경우는 매우 높은 황산염과 질산염 농도를 보여주고 있어 지표오염물질의 유입 가능성이 매우 높아 검토대상에서 제외하였다. Cl<sup>-</sup> 함량은 대체로 2 mg/L 이하의 낮은 농도를 보인다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 자연적인 반응에 의한 것 보다는 유기물의 부식, 생활하수나 축산폐기물 등의 인위적 오염에 의해 기원하기 때문에 지하수 오염의 지표가 된다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 함량은 전술한 바와 같이 시료번호 4-1의 경우를 제외하고 모두 음용수 기준인 45 mg/L (NO<sub>3</sub>-N, 10 mg/L 기준으로 환산) 보다 낮은 13.4 mg/L 이하이다. 이상에서 연구지역 지하수의 주요 음이온은 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이다.

용존 원소별 분포특성을 보다 자세히 알아보기 위하여 전기전도도를 기준으로 하여 여러 수리화학적 특성의 변화를 살펴보았다(Fig. 3). Fig. 3에서 지하수의 주요 양이온 함량은 전기전도도에 따라 비례적으로 증가하며 특히 Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>함량은 Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>함량 보다 더 뚜렷한 정의 상관관계를 보인다. 일반적으로 지하수내 용존되어 있는 Ca의 기원은 주로 방해석(CaCO<sub>3</sub>)이나 돌로마이트(CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)같은 탄산염광물의 용해, 퇴적암내에 존재하는 석고(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), 그리고 일부는 사장석(CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)의 용해로부터 기원된다(Hounslow, 1995). 일반적으로 탄산염광물이 용해되면 다음과 같은 반응을 따른다(Appelo and Postma, 1994):

**Table 1.** Physicochemical compositions of groundwater samples collected from Goesan to Guemsan area (unit: mg/L)

Sample No.	T	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	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>
1-2	20.3	7.7	203	334	3.9	13.40	2.82	54.37	5.60	158.65	21.41	8.90	1.21	0.25
1-3	20.8	7.2	565	370	6.4	14.62	2.61	44.58	11.61	54.92	-	-	-	-
1-4*	14.9	7.6	196	2456	8.2	8.57	3.05	400.62	322.32	152.55	1329.92	2.88	0.46	0.20
1-7	15.2	7.6	215	251	5.5	3.95	2.19	33.24	8.62	109.84	-	-	-	-
1-8	20.5	7.4	215	176	1.5	9.32	1.86	20.91	4.00	73.22	9.17	5.03	5.56	0.06
2-3	18.4	7.4	210	186	4.3	2.78	0.34	33.18	3.40	97.63	-	-	-	-
2-4	19.1	6.8	224	200	5.2	6.46	2.64	27.17	3.86	67.12	-	-	-	-
2-5	18.0	7.2	225	153	5.6	3.51	0.89	24.85	2.67	88.48	-	-	-	-
4-1	22.2	7.9	-43	203	7.1	11.47	0.59	21.99	3.79	45.77	622.30	1.87	977.33	1.87
4-2	22.9	7.7	9	334	15.7	5.35	1.80	63.65	5.57	158.65	26.63	0.14	8.90	0.14
4-3	17.1	7.6	28	347	7.5	5.82	1.78	65.52	5.99	175.43	26.14	0.14	9.69	0.14
4-4	16.9	7.5	207	362	6.4	6.03	2.58	68.12	6.54	199.84	-	-	-	-
4-5	18.2	7.4	218	262	6.7	3.15	0.98	49.77	5.21	128.14	-	-	-	-
4-6	20.4	7.8	67	242	5.7	7.86	3.31	35.53	7.67	122.04	14.53	0.35	7.12	0.35
4-7	19.3	7.4	61	345	7.5	4.44	4.35	60.77	7.34	146.45	-	-	-	-
4-8	20.4	7.9	-38	258	1.5	38.20	0.54	20.34	5.31	149.50	14.18	1.53	0.05	1.53
5-1	16.2	7.1	147	283	4.1	5.05	2.93	51.24	4.42	134.24	-	-	-	-
5-2	16.2	7.2	70	116	5.3	2.96	0.64	451.37	2.07	54.92	-	-	-	-
5-3	17.8	7.2	-50	196	5.1	3.61	2.33	30.39	3.42	68.65	-	-	-	-
5-4	16.5	6.4	-36	189	5.0	9.69	4.49	21.33	3.70	48.82	-	-	-	-
5-5	17.4	6.4	-33	76	4.3	4.34	1.32	7.14	3.85	33.56	-	-	-	-
5-6	21.5	6.6	5	217	5.2	5.49	4.08	34.75	4.63	106.17	-	-	-	-
6-1	15.6	8.2	77	229	4.0	20.48	1.68	26.56	4.32	97.63	29.18	0.28	2.41	0.28
6-2	22.0	7.3	53	172	5.7	6.96	1.88	24.38	3.64	77.50	-	-	-	-
6-3	17.9	7.4	39	358	5.4	11.34	3.31	61.21	5.04	138.52	-	-	-	-
6-4	16.4	7.6	51	360	2.7	8.99	7.23	52.86	13.44	161.70	30.75	0.04	8.64	0.04
6-5	17.3	6.8	33	294	4.8	9.80	3.02	40.74	6.09	112.89	-	-	-	-
6-6*	23.8	3.3	150	2436	3.2	10.17	4.93	409.12	59.37	-	2967.11	0.02	0.27	0.02
6-7	20.3	6.5	32	194	5.5	5.46	4.57	29.34	3.14	82.38	-	-	-	-

\*: mine water



상기 식을 근거로 하였을 때 연구지역의 지하수 내 Ca가원이 방해석이나 돌로마이트와 같은 탄산염 광물의 용해일 경우, 지하수내로 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 및 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 방출되게 된다. 따라서 연구지역의 자연수 시료들에서는 Ca<sup>2+</sup>뿐만 아니라 Mg<sup>2+</sup> 함량도 비교적 높게 나타나게 되며 Mg 이온 역시 TDS와 정의 관계를 명확하게 보여주게 된다.

Fig. 3에서 지하수의 주요 음이온인 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 및 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 전기전도도와 비례적인 상관관계를 보이는 데 특히 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 함량은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 함량 보다 더 뚜렷한 정의 상관관계를 보인다. 이상에서 물-암석반응이 진행될수록 용존량이 체계적으로 뚜렷하게 증감하는 대표적인 이온종은 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 및 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>이다. 따라서

연구지역 지하수내 주요 이온 종들은 탄산염광물의 용해에 기인하는 것으로 판단된다. 연구지역 지하수 시료의 지하학적 유형을 해석하기 위하여 주요 용존 이온을 대상으로 파이퍼도(Piper, 1994)를 작도하였다 (Fig. 4). Fig. 4에서 연구지역 지하수는 모두 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형에 해당되는데, 이는 퇴적암의 대수층에 Ca<sup>2+</sup> 및 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분의 공급이 가능한 탄산염광물들이 포함되어 있음을 시사한다.

**미량성분 및 우라늄 원소 특성**

지하수 시료들의 미량성분 원소에 대한 자료는 Table 2와 같다. 연구지역 지하수에 상대적으로 풍부하게 함유된 미량원소는 Sr, Ba, Al, Fe, Cu, Zn, 등이다. 각 미량원소의 대체적인 농도 범위를 살펴보면 Sr은 25-372 μg/L, Ba는 2-163 μg/L, Al은 6-50 μg/L, Fe는 2-15 μg/L, 범위를 보인다. Cu와 Zn은 시료간의

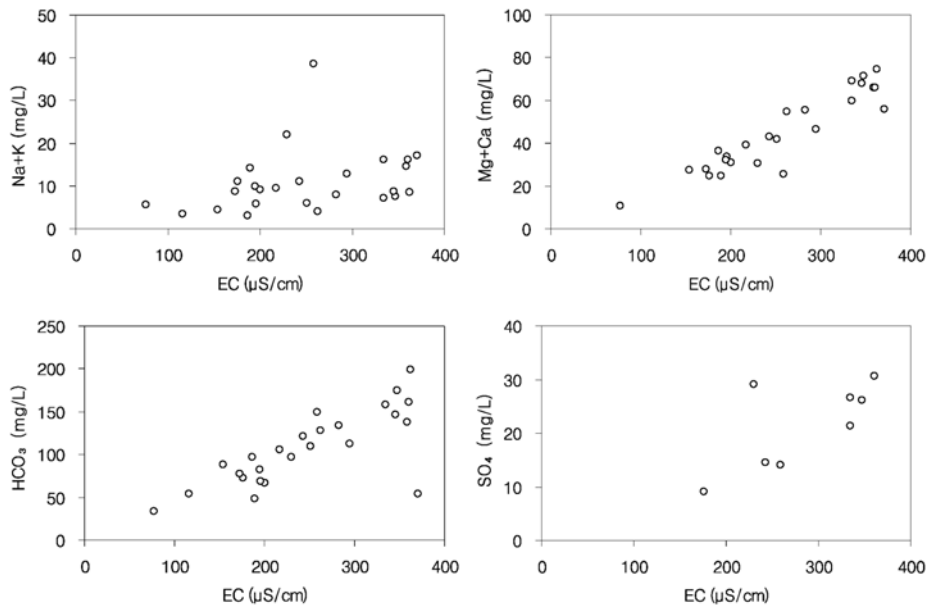


Fig. 3. Plots of EC versus  $\text{Na}^+\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration of groundwater samples.

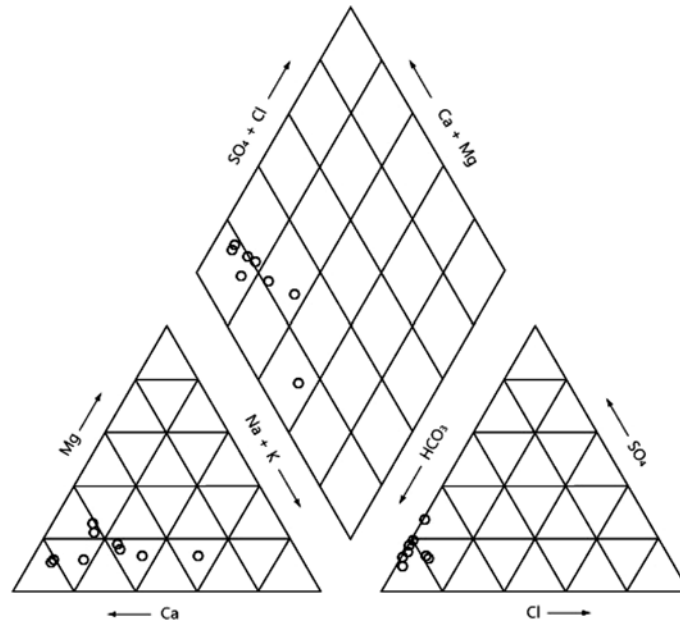


Fig. 4. Piper diagram for groundwaters collected from Goesan to Geumsan area.

농도 변화범위가 비교적 넓게 나타난다. 연구지역 석탄광산과 채석장 폐수(시료번호: 1-4, 6-6)의 U 함량은 각각 1165, 35  $\mu\text{g/L}$  으로 매우 높게 나타났지만, 지하수의 우라늄 함량은 최대 3.2  $\mu\text{g/L}$  이하로서 매우 낮게 나타났다. 석탄광산의 폐수는 함우라늄 석탄층과의 반응으로 그리고 건축용 슬레이트를 채취를

위한 채석장의 폐수는 슬레이트와의 반응으로 생성되었다. 따라서 석탄광산과 채석장 폐수에서의 우라늄 함량 차이는 각 암층의 우라늄 함유량의 차이에 기인하는 것으로 추정된다. Fig. 5는 연구지역 지하수에서 가장 풍부한 미량원소인 Sr에 대한 Ba, Al, Fe 및 U의 상관관계도이다. Fig. 5에서 Sr에 대한 미량

**Table 2.** Trace elemental compositions of groundwater samples collected from Goesan to Guemsan area (unit:  $\mu\text{g/L}$ )

Sample No.	V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Ba	Pb	Li	Se	Fe	Al	U
1-2	0.23	6.16	2.14	0.68	12.50	0.22	2.82	272.33	2.24	0.13	11.31	0.44	25.70	40.30	1.99
1-3	1.32	2.70	1.74	3.70	27.60	0.31	0.74	442.01	65.44	0.38	6.32	3.64	7.56	13.70	0.16
1-4*	0.10	7.42	483	5.76	1717	<0.1	6.45	1591.39	15.34	<0.1	38.82	12.01	93.70	43.10	1165.08
1-7	1.30	5.72	1.04	0.98	24.30	6.42	5.38	139.01	43.34	0.20	5.37	0.22	5.89	24.20	0.28
1-8	1.19	3.50	1.23	1.52	17.30	5.07	1.40	189.51	53.74	0.25	8.50	0.44	7.28	7.64	0.73
2-3	0.26	4.85	1.25	3.95	173.00	0.11	0.57	255.16	10.84	0.31	3.53	0.28	15.10	8.80	0.28
2-4	0.28	3.17	1.02	1.34	11.80	0.69	1.61	176.38	32.34	0.19	2.66	0.17	6.39	9.97	<0.1
2-5	0.64	3.19	0.73	0.39	2.99	0.29	0.75	173.35	15.94	0.13	2.90	0.17	5.26	14.80	0.13
4-1	0.37	2.62	0.76	3.11	4.42	0.42	1.20	97.94	163.09	<0.1	6.47	0.11	2.51	6.77	1.10
4-2	0.92	4.29	1.94	6.31	40.14	0.51	3.31	198.94	160.09	0.15	1.66	0.31	11.00	50.10	1.45
4-3	0.98	4.69	2.06	2.93	17.04	0.78	3.10	217.94	71.59	0.83	1.90	0.31	14.30	26.60	1.65
4-4	0.30	4.97	1.85	3.44	330.44	0.21	6.81	192.94	88.69	0.34	1.81	0.29	7.82	6.97	0.68
4-5	0.14	3.80	1.35	1.91	17.14	0.35	2.41	129.94	61.09	<0.1	1.15	0.18	5.58	8.83	0.46
4-6	0.68	3.59	1.13	2.04	14.94	77.83	3.98	272.94	47.69	0.33	2.53	0.64	6.52	57.50	1.27
4-7	0.45	4.20	1.71	1.83	16.54	0.34	8.33	141.94	85.19	0.22	0.25	0.27	7.15	13.70	0.58
4-8	0.10	3.44	0.65	0.84	74.34	0.48	2.78	205.94	45.69	0.22	25.84	<0.1	11.80	26.30	1.71
5-1	0.42	4.56	1.57	1.02	10.24	0.43	1.40	121.94	72.29	<0.1	1.24	0.23	6.01	7.32	0.31
5-2	0.10	2.19	0.79	0.54	14.74	0.17	1.49	71.24	55.49	<0.1	0.98	0.10	6.35	11.00	<0.1
5-3	0.22	2.12	1.10	0.87	6.47	0.47	5.01	59.04	65.79	<0.1	0.99	0.17	12.30	10.80	0.11
5-4	0.30	1.90	6.85	4.18	60.14	0.20	0.87	73.64	135.09	0.25	3.17	0.34	6.87	9.21	<0.1
5-5	<0.1	1.28	0.50	3.34	499.44	0.36	1.40	25.54	86.89	0.65	2.11	0.12	7.93	18.10	<0.1
5-6	0.16	4.14	1.19	37.45	38.24	0.34	0.67	68.94	156.09	1.23	1.53	0.19	7.52	12.50	0.21
6-1	0.11	2.58	1.33	1.10	7.14	20.53	2.16	372.94	97.29	0.15	2.33	0.82	7.58	13.60	3.29
6-2	0.81	2.36	1.56	1.48	380.44	0.59	0.61	65.24	75.39	0.10	1.64	0.49	26.20	13.20	0.37
6-3	3.29	5.07	1.66	1.54	28.14	0.62	0.19	108.94	137.09	0.19	3.32	0.24	7.92	29.50	0.36
6-4	0.09	4.96	2.59	2.31	145.44	0.27	13.07	175.94	120.09	<0.1	3.16	1.01	9.89	19.30	2.37
6-5	1.09	9.00	1.24	1.11	7.21	0.46	0.78	134.94	83.39	<0.1	1.63	0.34	2.56	14.50	0.28
6-6*	0.21	3.73	1800	70.55	2753	3.02	44.07	849.94	40.19	4.78	65.94	12.38	103000	30500	35.09
6-7	0.12	3.48	1.06	8.28	56.74	0.32	4.79	86.24	81.19	0.36	<0.1	0.17	15.70	31.10	<0.1

\*: mine water

원소들의 뚜렷한 상관관계 경향을 관찰되지 않으나, Ba는 부의 상관관계 그리고 U은 정 의 상관관계 경향이 관찰된다. 그러나 우라늄 광체에서 U와 정 의 상관관계를 보인다고 보고된(이병선과 우남철, 2004) V 과 Mo은 연구지역 지하수에서는 대체로 함량이 매우 낮아 U과의 상관관계를 확인할 수 없다.

일반적으로 대전지역 지하수에서 고농도 우라늄 지하수의 기원에 대하여 유성지역이 화강암 분포지역임을 근거로 화강암 내 포함된 우라늄 광물기원으로 추정하고 있다. 지하수내 우라늄의 기원 추적을 위해 대보화강암에서 우라늄 광물의 존재형태와 광물학적 특성을 밝히는 연구가 일부 수행되었지만 우라늄 광물을 전자현미경으로도 발견하기가 매우 어려울 정도로 우라늄광물의 산출이 매우 적다(국립환경연구원, 2001; 추창오, 2002). 또한 대전지역 유라기 화강암류의 평균 우라늄 함량은 일반적인 산성화성암류의 배

경치에 불과할 정도로 낮다(국립환경연구원, 1999). 옥천대 함우라늄 지층에는 다양한 우라늄 광물과 황화광물이 보고되어 있다(이동진, 1986; 정기영과 이석훈, 2001). 또한 이들 지역에는 이차적으로 형성된 우라늄 광물들이 지표 부근 표토층에서 주로 인산염이나 바나듐 광물로 산출된다(이동진, 1986). 광화대 내 우라늄 광물들은 변성작용이나 속성작용동안 재결정화되어 대보화강암 내 우라늄 광물 결정보다 훨씬 큰 결정으로 산출된다(추창오, 2002). 따라서 옥천대 우라늄 광화대와 대전지역 우라늄 지하수 대수층과의 연결에 따른 성인적 관련성에 대한 검토가 필요한 실정이다.

옥천대 우라늄 광화대와 우라늄 지하수와의 성인적 관련성을 검토하기 위하여 우라늄 광화대 부근 지하수의 수리지화학적 특성을 검토하였다. 연구지역 석탄광산 폐수에서는 1165  $\mu\text{g/L}$ 의 우라늄이 검출되었으

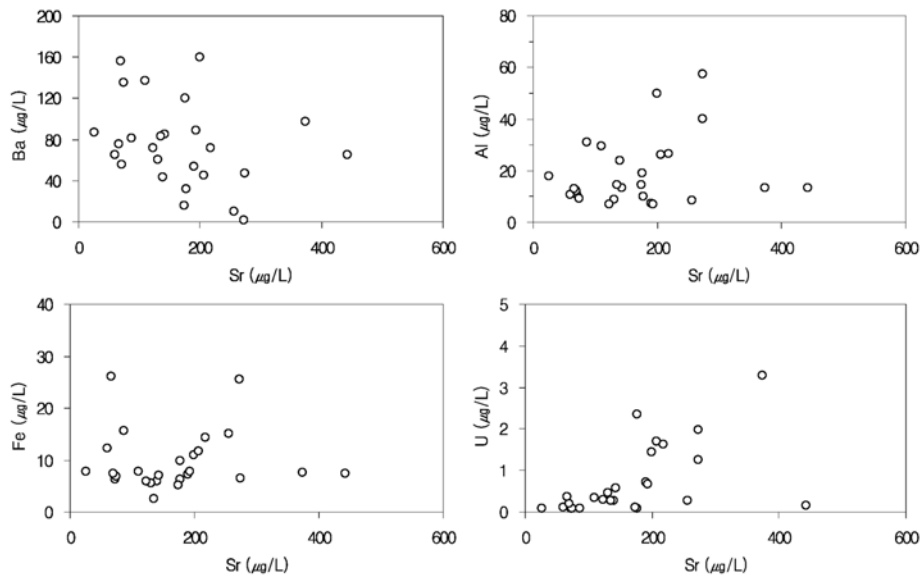


Fig. 5. Plots of Sr versus Ba, Al, Fe and U concentration of groundwater samples.

나 지하수내 우라늄 함량은 매우 낮게 검출되었다. 이번 연구에서는 옥천대 우라늄 광화대에서 다양한 우라늄 광물이 산출됨에도 불구하고 우라늄 광화대 부근의 지하수에서 우라늄의 함량은 인근 대보화강암 분포지역에 비해 매우 낮다는 기존의 보고(국립환경연구원, 1999)와 동일한 결과를 얻었다. 이러한 원인으로서는 옥천대 퇴적암지역에서는 환원환경에 유리한 수리지화학적 요소와 탄소 유기화합물의 우라늄 흡착 등에 의하여 지하수 내 우라늄 함량이 낮게 검출되기 때문인 것으로 추정된다(국립환경연구원, 2001). Chen and Yiacoumi(2002)는  $U^{6+}$ 상태의 우라늄은 용액에서 용해되고  $U^{4+}$ 상태의 우라늄은 용해도가 낮아 주로 침전된다고 보고한 바 있다. 저품위 우라늄 광화대 부근 퇴적암 지하수에서 우라늄 함량이 낮은 것은 환원성 지하수환경 특성 때문인 것으로 추정된다. 따라서 대전의 우라늄 지하수와 옥천대 우라늄 광화대와의 성인적 관련성은 낮은 것으로 판단되나 정확한 규명을 위해서는 두 지역 지하수간 환경동위원소 연구가 필요하다.

## 결 론

옥천대 퇴적암 지역의 지하수에 대한 수리지화학적 연구를 수행하여 옥천대 우라늄 광화대와 대전지역 우라늄 지하수의 지구화학적 특성과 성인적 관련성을

고찰하였다. 화강암지역 지하수는 퇴적암지역 지하수에 비해 pH는 낮고 Eh는 높은 현장수질특성을 보인다. 두 지역 지하수는 모두  $Ca-HCO_3$  유형에 해당되지만 화강암지역에 비해 퇴적암지역 지하수는 탄산염 광물의 용해반응으로  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  함량이 다소 높다. 석탄광산 폐수에서는 1165  $\mu g/L$ 의 우라늄이 검출되었으나 지하수내 우라늄 함량은 3.2  $\mu g/L$  이하로 매우 낮다. 우라늄 광화대 부근 지하수에서 낮은 우라늄 함량은 낮은 Eh를 보이는 수리지화학적 특성에 기인한다. 대전지역 지하수 내 우라늄은 옥천대 우라늄 광화대로부터 공급되었을 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 2009년도 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호: 2009-0073901)의 지원에 의해 수행되었다. 본 논문의 심사과정에서 여러 가지 의견제시와 조언과 제언을 해주신 이진용, 이영재 심사위원님께 감사드립니다.

## 참고문헌

국립환경연구원, 1999, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구. 한국자원연구소, 338 p.



- 국립환경연구원, 2001, 지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구. 국립환경연구원, 388 p.
- 김진영, 고용권, 김친수, 배대석, 박맹언, 2000, 유성지역 지열수의 지구화학적 특성연구. 지하수환경학회지, 7, 32-46.
- 김형돈, 우남철, 최미정, 1998, 충북 괴산군 덕평리 일대의 지하수 수질과 오염. 지하수환경, 5, 141-148.
- 김통권, 성익환, 박중권, 김대엽, 1999, 국내 우라늄 산출지 부근의 지하수에 대한 지화학적 연구. 대한지하수환경학회 · 한국토양환경학회 공동학술발표회 요약집, p. 41.
- 류종식, 신형희, 이광식, 장호완, 2005, 다검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기를 이용한 대전지역 지하수의 우라늄과 스트론튬 동위원소 특성 연구. 대한지질학회 2005년 춘계학술발표회 논문집, p. 177.
- 박희인, 이준동, 정지곤, 1977, 유성도폭. 한국지질자원연구원, 대전, 21 p.
- 이동진, 1986, 옥천계 흑색슬레이트내 부존하는 저품위 우라늄 광석에 대한 광물학적 연구. 광산지질, 19, 133-146.
- 이대성, 윤석규, 이종혁, 김정택, 1986, 옥천대 우라늄광층의 구조규제 및 지구화학적 특성연구. 광산지질, 19, 19-41.
- 이병선, 우남철, 2004, 채석장 산성배수에 의한 수질오염과 수계 내 Al, Fe의 지화학적 거동. 지질학회지, 40, 257-277.
- 이병주, 김동학, 최현일, 기원서, 박기화, 1996, 대전 지질도폭 설명서. 한국자원연구소, KR-95(S)-1, 59 p.
- 이상만, 김형식, 나기창, 1980, 대전도폭. 자원개발연구소, 26 p.
- 이상만, 박희인, 김수진, 박봉순, 이상현, 1981, 괴산군 덕평지역 변성퇴적암내에 배태된 우라늄 광상의 성인. 지질학회지, 17, 53-68.
- 이찬희, 이현구, 1997, 대청호 상류 회남일대에 분포하는 탄질 변성니질암과 하상퇴적물의 환경유해원소에 관한 지화학적 거동. 자원환경지질, 30, 209-222.
- 전효택, 정명채, 1991, 함우라늄 흑색셰일 분포지역에서의 유독성 원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구. 광산지질, 24, 245-260.
- 정기영, 이석훈, 2001, 옥천대 탄질 흑색점판암내 몰리브덴의 존재형태. 한국광물학회지, 14, 52-57.
- 정찬호, 2003, 대전지역 민방위 비상급수용 지하수에 대한 수리화학과 질소 및 황동위원소 연구. 지질공학회지, 13, 239-256.
- 진호일, 민경원, 전효택, 박영석, 1995, 금산지역에 분포하는 화강암류의 암석지구화학. 자원환경지질, 28, 123-137.
- 추창오, 2002, 대보화강암내 함우라늄 광물의 산출상태와 존재형태의 중요성. 한국광물학회지, 15, 11-21.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D., 1994, Geochemistry, Groundwater and Pollution. Balkema, Rotterdam, USA, 536 p.
- Chen, J.P. and Yiaccumi, S., 2002, Modeling of depleted uranium transport in subsurface system. Water, Air, and Soil Pollution, 140, 173-201.
- Chi, S.J., Kim, S.H., and Lee, P.K., 1985, Uranium Occurrence in Coaly Meta-Pelrites in the Jinsan Area. Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 18, 1-9.
- Greenberg, A.E., Clesceri, L.S., and Eaton, A.D. (eds), 1992, Standard methods for the examination of water and waste water. 18th Ed., American Public Health Association, USA, 1010 p.
- Hounslow, A.W., 1995, Water quality data: Analysis and interpretation. Lewis Publishers, NY, USA, 397 p.
- Kim, K.W. and Thornton, I., 1993, Influence of Ordovician uraniferous black shales on the trace element composition of soils and food crops in Korea. Applied Geochemistry, Supplementary Issue 2, 249-255.
- Lee M.H., Choi G.S., Cho Y.H., Lee C.W., and Shin H.S., 2001, Concentrations and activity ratios of uranium isotopes in the groundwater of the Okchun Belt in Korea. Journal of Environmental Radioactivity, 57, 105-116.
- Piper, A.M., 1994, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions of American Geophysical Union, 25, 914-923.
- Woo, N.C., Choi, M.J., and Lee, S.K., 2002, Assessment of groundwater quality and contamination from uranium bearing black shales in Goesan-Boeun area, Korea. Environmental Geochemistry and Health, 24, 261-273.

2010년 4월 12일 접수  
 2010년 5월 26일 수정원고 접수  
 2010년 6월 8일 채택