

신보활석광산 주변에 형성된 우라늄 이상치에 관한
지화학적 연구 (I)
- 수리화학적 특성을 중심으로 -

정재일* · 이무성** · 나춘기**

Geochemical Study on the Uranium Anomaly
around the Shinbo Talc Mine (I)
- In the Light of Hydrochemical Properties -

Jae-II Chung*, Mu-seong Lee** and Choon-Ki Na**

ABSTRACT: The purpose of this study is to elucidate the source of U anomaly formed in stream water of the drainage system around the Shinbo talc mine area based on the hydrochemical properties of water masses including surface water and groundwater. The hydrochemical properties of water masses in the Shinbo talc mine area are divided into three types; Type I: Ca(Mg)SO₄ type with high U content as shown in the stream water flowout from the mine, Type II: Ca(HCO₃)₂ type with high U content as in deep groundwater, Type III: Ca(HCO₃)₂ type with low U content as in the other stream water and shallow groundwater. It is necessary to emphasize that in deducing the uranium source, a distinct discrimination between type I and type II is showed in their hydrothermal properties in spite of commonly having a high uranium content, which in turn means the occurrence of a different water-rock interaction processes between both type. All evidences suggest that type II groundwater have acted as a primary media in the transport of uranium and that, as the groundwater flows through the talc mineralization zone, water composition of type II was transformed into that of type I water as the results of a secondary water rock interaction process, caused by imposition of new mineralogically controlled thermodynamic constraints. Consequently, in the viewpoint of hydrochemical exploration, the investigation of the hydrologic circulation system and the hydrogeologic properties for the aquifer of type II groundwater shall be done first of all and will provide a crucial clue on tracing the uranium mineralization zone occurred in the Shinbo talc mine area.

서 론

국내의 우라늄 광상탐사는 1910년대부터 우라늄과 토륨을 함유하는 광물인 monazite를 위시하여 smarskite, fergusonite, torbernite, autunite 등이 발견되면서 각 지역에 걸쳐 실시된 바 있으나 아직 경제적으로 가행가치가 있는 광상은 발견되지 않고 있다 (김종환 등, 1981; 서효준 등, 1986; 오천혁 등, 1989). 진안분지 북서쪽에 위치

한 신보활석광산 지역에 대한 우라늄 광상 탐사는 지난 1985년 서효준 등 (1986)에 의해 광역탐사가 실시된 바 있다. 그 결과에 의하면 광산의 향내수 및 주변 지하·지표수계에서 매우 높은 함량의 우라늄이 검출되는 등 아주 뚜렷한 우라늄 지화학 이상대가 발달되어 있고 동시에 이 지역의 지질이 초기 우라늄 농축작용에 호조건을 제공할 수 있는 흑연질 편암과 백운암질 석회암이 발달하고 있어 이 지역에 고농도의 우라늄 광체가 존재하고 있을 가능성이 높은 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 그 후의 정밀조사를 거쳐 우라늄 광화대가 기대되는 구조선대를 대상으로 수행한 시추조사 (오천혁 등, 1989)에서 우라늄 광화대가 확인되지 않는 등, 여전히 이 지역에 고농도의 우라늄 이상대를 형성시킨 우라늄의 기원은 불분명한채

* 전북대학교 지구환경과학과 (Department of Earth and Environmental Sci., Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea)

** 목포대학교 환경공학과 (Department of Environmental Eng., Mokpo National University, Chonnam 534-729, Korea)

남아있는 실정이다.

이 연구의 목적은 신보 활석광상 주변에 발달되어 있는 수계를 대상으로 지표수 및 지하수의 원소화학적 및 동위 원소화학적 특성을 파악하고 이를 바탕으로 이 지역에 우라늄 이상대를 형성시킨 함 우라늄층의 지구화학적 특징을 추적, 규명하여 우라늄 광상 탐사의 기초자료로써 활용하고자 하는데 있다. 이 논문은 상기 목적을 달성하기 위한 일차적 시도로써 수행된 신보활석광상 주변의 지표수 및 지하수의 화학분석 결과를 정리한 것으로 각 수체의 수리화학적 특성을 규명하고 우라늄 함유량과의 상호 관계를 추적하여 함 우라늄 지하수를 배태하고있는 대수층의 지구화학적 특성을 고찰하였다.

지질 및 광산개요

조사지역은 전북 전주시에서 진안방면으로 약 30 km 거리에 위치한 전북 완주군 소양면 신촌리, 시원리 일대와 진안군 부귀면 세동리 지역 (동경 127°15'~127°20', 북위 35°47' 30"~35°52' 30")으로 기발간 1:25000 지형도의 신정도폭에 해당하며, 지질도폭으로는 전주·진안도폭 (1924)의 북서단과 용담도폭 (1973)의 남서단에 속하는 지역이다. 조사지역의 지질 (Fig. 1)은 선캠브리아기에 해당하는 흑운모-녹니석편암, 규암, 백운질 석회암, 흑연질 편암 등의 변성퇴적암류를 기반으로하여 이들을 관입한 거정질 화강암과 주라기 대보화강암, 그리고 이들 모두를 부정합으로 덮고 있는 역암, 역질사암, 혈암, 화산암질 암석 등의 백악기 진안층군과 다시 이들을 관입하고 있는 규장암맥과 석영반암 등의 산성 맥암류인 후기 관입체로 구성되어있다 (대한광업진흥공사, 1977, 1979, 1983; 서효준 등, 1986). 신보활석광상은 변성퇴적암류인 변질혼성대를 구성하는 백운암 및 백운질 석회암과 석영-운모편암내에 협재되는 백운암 및 백운암질 석회암이 열수변질작용을 받아 형성된 활석을 주 채광대상으로 하는 광산으로 광석의 품위는 SiO₂ 41.12~66.84%, Al₂O₃ 0.76~11.32%, Fe₂O 0.96~2.12%, MgO 21.10~31.20%로 알려져 있으나 현재는 폐광된 상태이다.

시료채취 및 분석

신보활석광상 주변에 발달된 자연수계의 우라늄을 포함한 원소화학적 특성을 파악하기 위하여 광산을 중심으로 그 주변에 위치하는 하천수계에서 11개의 하천수를 채취하였고 광산하부 마을 및 주변 농경지에 설치된 지하수 공에서 6개의 천부지하수와 1개의 심부지하수를 채취하

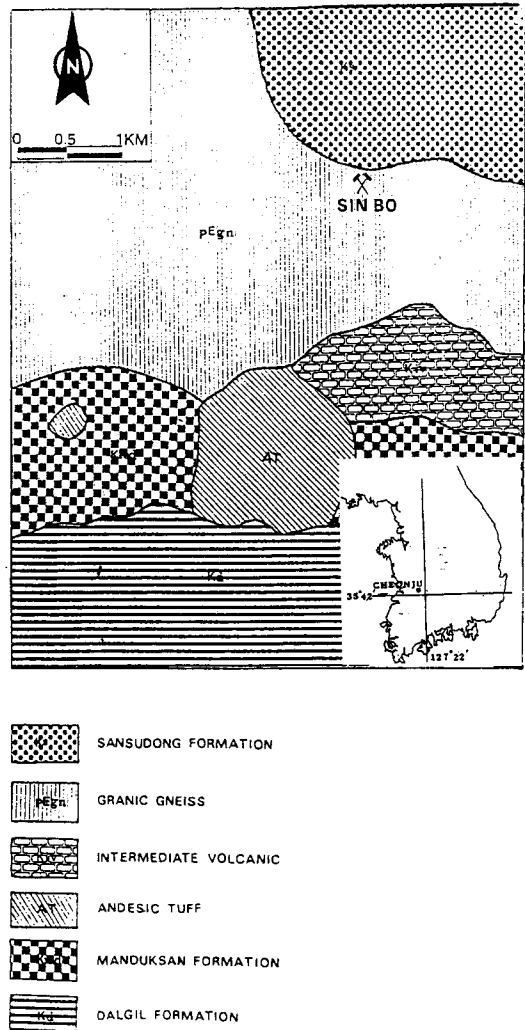


Fig. 1. Geologic map of the Shinbo talc mine area.

였다 (Fig. 2). 각 시료는 현장에서 0.45 μm 여과지로 여과하여 부유물질을 제거한 후 채취하였으며, 양이온 분석용 시료는 시간의 경과에 따른 시료 용기 벽면에서의 흡착 및 화학 원소들간의 변질을 방지하기 위해서 채취된 시료에 농질산을 2~3방울 가하는 방식으로 현장에서 산성화시켰다. 특히 음이온 분석용 시료는 원소 화학의 변화를 가능한 방지하기 위하여 일회용 여과유닛 (Millex-HA 0.45 μm Filter Unit)를 이용하여 수중에서 흡입 여과하여 5 ml의 폴리에틸렌 용기에 주입하고 즉시 밀봉하였다. 지하수는 시료채취전 30분 이상 양수하여 수온이 거의 일정하게 안정화되었을 때 채취하였다. 시료채취 이후 분석까지 모든 운반 및 저장은 아이스박스 및 냉장고를 이용하여 저온상태를 유지하였다. 각 시료의 수소이온농도

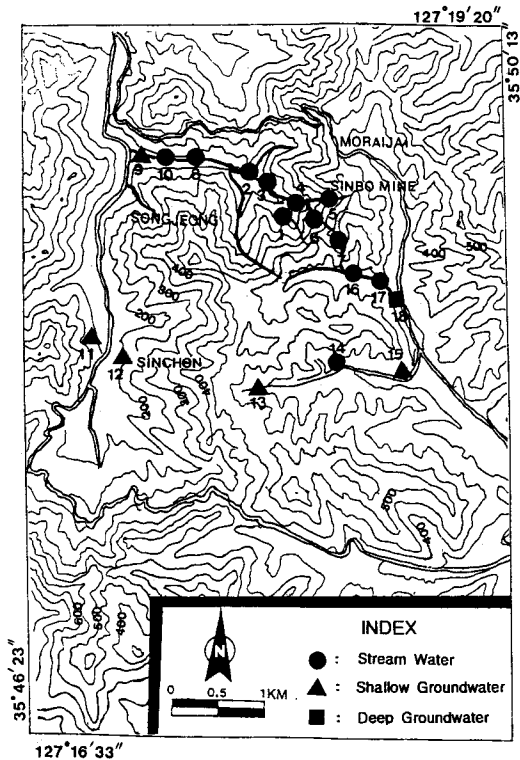


Fig. 2. Map showing the hydrologic system and sampling sites of stream water and groundwater around the Shinbo talc mine area.

(pH), 산화-환원전위 (Eh), 수온, 전기전도도 (EC) 등 자연수의 물리화학적 특성은 휴대용 pH-Eh 측정기 및 전기전도도계를 이용하여, HCO_3^- 의 함량은 페놀프탈레인 용액과 메틸레드-브롬크레졸그린 혼합용액에 의한 적정법을 이용하여 각각 현장에서 바로 측정되었다. Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- 등을 포함하는 음이온의 정량은 전북대학교 공과대학 공동시험실에 설치된 IC (DX-100)를 이용하여 분석하였으며, Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} 의 주성분 양이온 및 U, Ba, Mo, Sr 등을 포함하는 미량성분 원소는 기초과학지원연구소 서울분소에 의뢰하여 각각 ICP-AES와 ICP-MS를 이용하여 정량분석하였다.

결과 및 고찰

수리화학적 특성

신보활석광산 주변 수계 및 지하수공에서 채취한 하천수 및 지하수에 대해 pH, Eh, 전기전도도 등 물리적 특성 및 양이온과 음이온의 화학분석 결과를 정리하여 Table

1에 나타내었다. 각 수체의 물리적 특성을 서로 비교해보면, 하천수와 심부지하수의 pH가 각각 7.8 ± 0.6 과 7.5 로 약알카리성을 보이는 반면 천부지하수는 6.0 ± 0.3 의 pH 범위를 보여 약산성에 속하였다. 한편 산화-환원전위 (Eh)는 각 수체가 모두 거의 유사한 범위의 산화환경을 나타내었으나, 용존 이온량의 정도를 나타내는 전기전도도 (EC)에서는 하천수가 $417 \pm 321 \mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 높았고 심부지하수 $156 \mu\text{S}/\text{cm}$, 천부지하수 $104 \pm 60 \mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타나 각 수체별로 매우 상이한 값을 보였다. 특히 광산의 항내수를 발원수로 하는 수계 하천수의 경우, 광산에 가까울수록 pH는 7.50에서 8.18로 점차 증가, Eh는 69.7 mV에서 61.3 mV로 점차 감소하는 경향을 보여 (Fig. 3a), 반대편 사면 또는 인근의 하천수 (pH = 6.00~7.28, Eh = 50~93.7 mV), 천부지하수 (pH = 5.70~6.40, Eh = 74.0~91.7 mV) 및 심부지하수 (pH = 7.50, Eh = 73 mV)에 비해 보다 알카리성-환원환경의 수질특성을 보였다. 이러한 경향은 하천수의 원소화학적 수질 특성에서도 뚜렷이 반영되어 나타난다. 즉, 하천수 중에 용존되어있는 원소들의 총합량의 척도가 되는 EC는 광산에 가까워질수록 $223 \mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 $853 \mu\text{S}/\text{cm}$ 로 급격히 증가하는 경향을 보였으며 인근의 다른 수체 (하천수 $56.8\sim 66.5 \mu\text{S}/\text{cm}$, 천부지하수 $74.0\sim 99.7 \mu\text{S}/\text{cm}$, 심부지하수 $155.5 \mu\text{S}/\text{cm}$)에 비해 뚜렷히 높은 값을 보였다. 각 원소별로는 살펴보면, 특히 광산 주변에서 뚜렷이 부화되는 원소는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} 및 F^- 로서 하천수중에 함유된 이들 원소의 대부분이 광산 및 주변 폐석으로부터 공급되고 있음을 나타낸다 (Fig. 3b). 이는 광산의 항내수를 발원수로 하고 주변 폐석을 경유하는 하천수가 모두 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ 의 수질특성을 나타내는 반면 주변의 기타 하천수, 천부 지하수 및 심부 지하수의 수질특성이 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 라는 점에 의해 뒷받침되고 있다. 또한 주요 용존 음이온에서도 천층 및 심층 지하수 모두가 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 의 순으로 음이온이 부화되어 있는 경향을 보였으나, 하천수의 경우 광산지대와 비광산지대가 서로 다른 수질특성을 보였다. 즉, 광산 폐석을 경유하는 하천수의 경우 SO_4^{2-} 가 가장 우세한 음이온종인데 반해 비광산 지대의 하천수는 지하수와 마찬가지로 HCO_3^- 가 가장 주된 음이온종이었다. 이처럼 하천수간에 보여지는 수리화학적 수질특성의 차이는 이들 하천수가 모두 지하수를 발원수로 하고 있다는 점에서 각 하천의 발원수를 이루는 지하수 자체의 수질특성 차이를 반영한다고 볼 수도 있겠으나 광산폐석을 경유하는 수계 분류의 하천수만이 상이한 수질특성을 보일뿐만 아니라 대부분의 용존성분이 주변 지류에 비해 현저히 부화되어 있다는 점으로 미루어 광산 폐석

Table 1. Chemical analyses of stream waters and groundwaters in Sinbo mine area.

	Stream water of main stream started at mine							The other Stream water							Shallow groundwater					DG18*
	SW7	SW6	SW4	SW3	SW2	SW8	SW10	SW1	SW5	SW14	SW16	SW17	SG9	SG11	SG12	SG13	SG15			
T(°C)	14.6	13.5	16.9	19.0	19.6	22.4	23.0	19.4	18.5	18.1	20.0	19.4	21.4	21.5	18.7	17.4	16.5	15.9		
pH	8.18	8.00	8.20	8.14	8.00	7.90	7.50	8.05	7.88	6.00	7.28	6.00	6.27	5.80	5.90	5.70	6.40	7.50		
Eh	61.3	64.7	63.3	69.5	69.0	61.7	69.7	55.0	69.5	89.3	50.0	93.7	74.0	90.5	83.0	80.0	79.0	73.0		
Ec	853	850	762	678	537	257	223	165	143	63.0	66.5	56.8	223	99.7	83.9	74.0	155.5	155.5		
Na	5.94	5.23	5.51	7.22	6.07	6.31	5.31	4.23	4.35	5.03	3.69	3.57	8.05	4.83	5.69	4.18	4.25	9.07		
K	1.74	1.56	1.55	1.75	1.42	1.06	0.87	0.78	0.71	1.18	0.90	0.92	4.08	1.57	1.76	1.90	1.12	0.76		
Ca	81.65	70.32	67.89	74.68	55.38	24.55	17.57	15.64	12.43	5.41	4.88	4.91	19.47	7.43	4.73	3.91	6.52	15.33		
Mg	41.06	41.44	39.54	39.76	29.93	8.89	5.78	4.71	4.68	1.45	1.12	1.30	4.21	1.80	1.26	1.44	2.10	2.15		
HCO ₃	107.0	112.0	97.0	85.0	69.0	0.90	45.0	50.0	42.0	20.0	0.36	18.0	48.0	20.0	15.0	20.0	26.0	45.0		
SO ₄	634.79	357.05	554.28	267.64	316.01	64.01	53.77	10.12	29.45	3.82	6.06	13.67	43.03	8.16	13.15	4.44	4.61	12.07		
Cl	10.58	3.61	10.51	4.08	9.0	4.71	5.04	4.72	12.26	3.47	5.03	11.78	6.54	5.85	5.83	5.09	3.09	9.12		
F	0.76	0.35	0.678	0.23	0.3	0.25	0.24	0.07	0.11	0.09	0.07	0.09	0.18	0.21	0.09	-	0.10	0.66		
NO ₃	23.47	7.88	26.60	10.75	28.73	9.72	8.41	29.32	55.84	6.06	11.39	25.55	18.48	20.97	11.43	6.48	4.63	5.06		
U	306.24	317.34	257.89	209.04	142.89	13.62	3.13	0.31	3.07	0.06	0.42	32.87	4.87	0.09	0.06	0.16	0.27	387.33		
Th	-	-	-	0.12	0.22	-	-	0.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Ba	34.97	34.78	32.68	34.92	27.35	15.25	13.27	8.03	9.41	13.59	11.69	13.75	24.34	17.09	17.79	19.56	4.23	9.52		
Sr	1587.3	1589.5	1335.44	1060.38	743.42	270.61	185.34	61.20	70.24	53.66	26.66	25.29	148.44	74.24	48.67	35.33	54.87	197.84		
Mo	209.46	194.26	168.53	120.68	82.69	20.15	10.43	1.56	2.97	0.36	0.37	0.81	2.98	1.28	0.97	0.59	0.61	32.39		
Al	7.00	39.0	36.0	50.0	28.0	13.0	12.0	32.0	200.0	10.0	18.0	32.0	15.0	9.0	5.0	25.0	50.0	8.0		
Mn	1.09	3.47	2.59	2.79	1.72	3.17	2.22	3.31	17.94	1.55	2.81	4.56	3.50	1.81	1.59	68.79	1.98	2.03		

* Deep groundwater produced from aquifer with depth 157 m. Units are mV for Eh, $\mu\text{S/cm}$ for Ec, mg/l for major elements and $\mu\text{g/l}$ for trace elements.

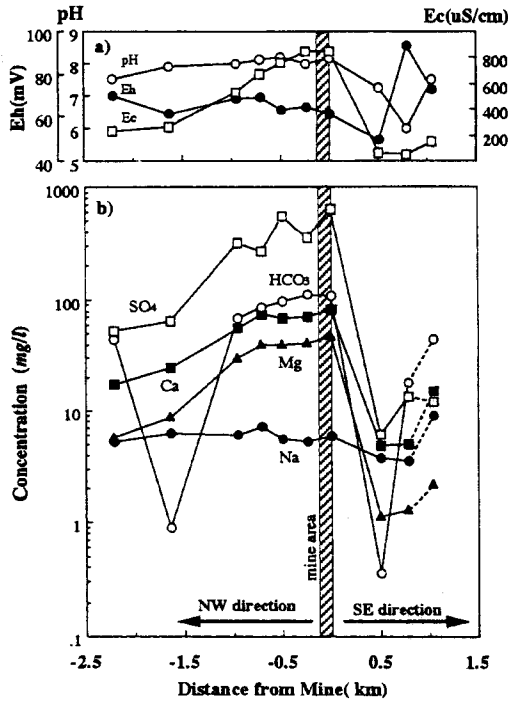


Fig. 3. Variation of pH, Eh and EC (a) and major elements (b) in stream water, and also plotted is deep groundwater as a comparing data (the point of right end side).

의 영향에 의한 것으로 판단된다.

우리늄과 기타 미량원소

본 연구의 주관심사인 우리늄 (U)은 항내수를 발원수로 하고 폐석더미를 경유하여 흐르는 하천수계에서 306 µg/l를 최고치로 광산으로부터 멀어짐에 따라 약 1 km 하부에서 142 µg/l, 약 2.3 km에서 3.13 µg/l로 감소하는 경향이 뚜렷하였다. 이러한 U의 용존농도는 인근 하천수가 대부분 1 µg/l이하의 U를 함유하고 있고 광산을 경유하는 수계 본류로 유입되는 지류들이 광산에 인접해있음에도 불구하고 0.31~3.07 µg/l정도의 U만을 함유하고 있다는 점을 감안할 때 항내수 또는 폐석의 영향에 의해 부화되었을 것으로 추정된다. 하천수와 마찬가지로 광산 주변의 관정에서 채취한 지하수 역시 그 위치 및 대수층의 심도에 따라 서로 다른 U 농도를 보였다. 즉 천부지하수 (≤ 10 m)의 경우, 광산경유 수계 하부에 위치하는 관정 (9)에서는 4.87 µg/l로 비교적 높았으나 광산으로부터 서남측 (11, 12) 관정은 <0.1 µg/l, 남측 (13, 15) 관정은 0.16~0.27 µg/l로 자연수층의 평균함유량과 유사한 농도 범위를 보였다. 반면 광산의 반대편인 동남측 사면 하부

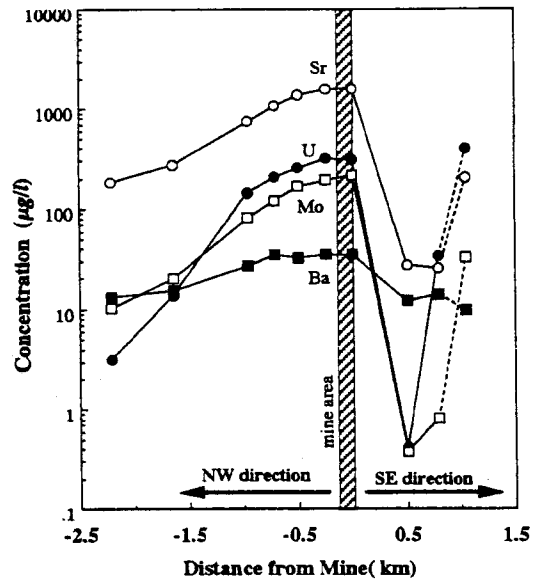


Fig. 4. Distribution map of U (a), Ba (b), Mo (c) and Sr (d) contents in stream water and groundwater collected from the Shinbo talc mine area.

에 위치한 심층지하수 (157 m)에서는 387 µg/l의 U를 함유하고 있어 이 지역에서 채취된 모든 시료 가운데 가장 높은 함량치를 보였다 (Fig. 4a).

연구지역의 수계에서 U과 양호한 수반관계를 보이는 미량원소는 Ba, Mo, Sr으로 나타났으며 (Fig. 4b-d), 특히 광산으로부터 시작되는 하천수계에서 그 상관성은 더욱 높게 나타났다 (Fig. 5). 그러나 U를 가장 많이 함유하고 있는 심층지하수의 경우, 이들 원소들의 함유량 (Ba 9.52 µg/l, Mo 32.4 µg/l, Sr 198 µg/l)은 지류 및 인근 하천수 (Ba 8.03~13.8 µg/l, Mo 0.36~2.97 µg/l, Sr 25.3~70.2 µg/l)나 천부지하수 (Ba 4.23~24.3 µg/l, Mo 0.59~2.98 µg/l, Sr 24.9~148 µg/l)에 비해 Mo는 높지만 Ba과 Sr은 서로 중복되는 농도범위를 보이고 있고, 광산 경유 하천수 (Ba 27.4~35.0 µg/l, Mo 82.7~209 µg/l, Sr 743~1590 µg/l)보다는 모두 상당히 낮은 농도를 보이고 있어, 이들 원소들의 함유량이 U의 함유량과 절대적으로 비례하지는 않았다. 이는 첫째 광산 경유 하천수와 심층 지하수간의 pH-Eh 환경차이에 의한 각 원소의 용해도 및 이동성 변화, 둘째 폐석에 의한 이차적 영향 (오염?)을 그 원인으로 생각할 수 있으나, 양수체간의 pH-Eh 환경이 현저히 다르지 않다는 점과 폐석을 경유한 하천수가 수질특성이 바뀔 정도로 폐석의 영향이 강했다는 점 등을 고려할 때 전자보다는 오히려 후자에 의한 영향일 가능성이 더 높을 것으로 판단된다.

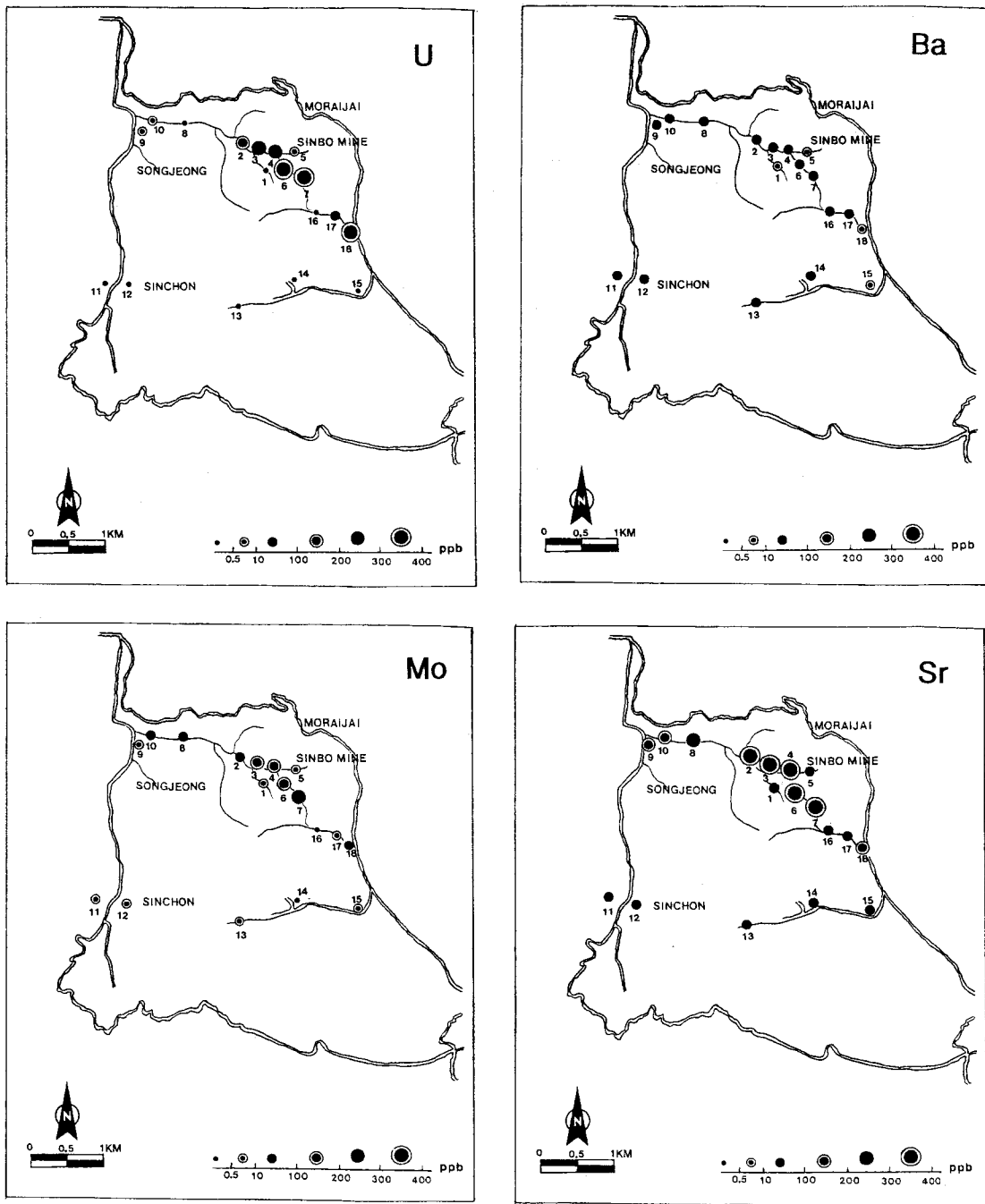


Fig. 5. Variation of trace elements in stream water and deep groundwater as in Fig. 3. U(a), Ba(b), Mo(c), Sr(d).

특히 이 지역에서 고농도의 U를 함유하고있는 하천수 및 지하수에서 보여지는 Mo의 부화현상은, 사암을 모암으로하는 이차적인 U 광상의 자연수 지화학 탐사에 있어 Mo이 U에 비해 보다 효율적인 지시원소로 이용될 수

있다는 기존 연구결과 (Langmuir, Chatham, 1980; Miller *et al.*, 1984)에 비추어 볼 때, 이 지역에 이와 유사한 U 광화대가 존재하고 있을 가능성을 뒷받침하고 있다.

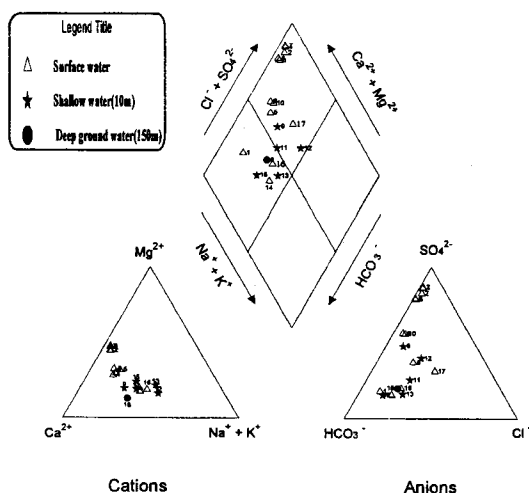


Fig. 6. Piper diagram of waters collected from the Shimbo talc mine area.

주성분 원소와 우라늄에 의한 수질특성의 분류

연구 대상 지표수 및 지하수의 수질유형을 고찰하기 위하여 각 수체의 주성분 원소 분석결과를 바탕으로 작성한 Piper diagram을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 연구지역에 존재하는 수체들이 크게 두가지 유형으로 분류될 수 있음을 보이고 있다. 즉, 광산의 항내수를 발원수로 폐석을 통과하여 형성되는 수계 분류의 모든 하천수는 $CaSO_4$ 형으로 분류되는 반면 그 외의 수체, 즉 지류, 인근 하천수, 천부 및 심부지하수는 모두 $Ca(HCO_3)_2$ 형으로 분류되는 수질특성을 보였다. 특히 양이온의 경우, 광산쪽 하천에서는 신보활석광산의 특정원소인 Mg^{2+} 의 부화가, 농경지쪽에서

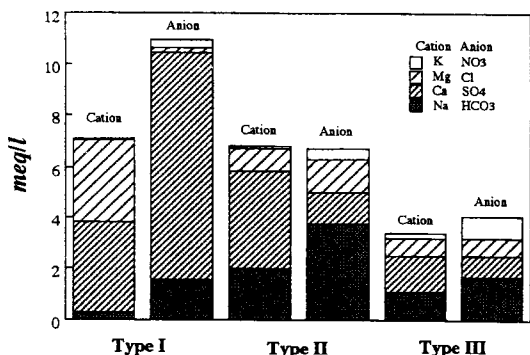


Fig. 7. Chemical composition for each group of water quality represented in milliequivalents per liter (Type I: stream water flowed from the mine drainage system, Type II: deep groundwater, Type III: the other stream water and shallow groundwater)

는 농경활동의 영향을 나타내는 ($Na^+ + K^+$), 특히 K^+ 의 부화가 뚜렷하여 각 수체의 수리화학적 특성이 주변환경을 반영하는 특정원소에 의해 영향을 받고 있음을 나타내고 있다. 이상의 수질특성에 각 수체중의 U 함유량 차이를 추가로 고려하여 이 지역 수체들의 원소화학적 특성을 분류하면 다음 세가지 형으로 나눌 수 있다. 즉, 고농도의 U를 함유하고 $CaSO_4$ 형의 수질 특성을 갖는 광산 경유 하천수를 제1형으로, 제1형과 같이 고농도의 U를 함유하지만 $Ca(HCO_3)_2$ 형의 수질특성을 갖는 심층 지하수를 제2형으로, 제2형과 같이 $Ca(HCO_3)_2$ 형의 수질특성을 갖지만 저농도의 U를 함유하는 인근 하천수 및 천부 지하수를 제3형으로 각각 분류할 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 상기 분류에 근거 시료들을 위의 세형태로 분류하고 각 형에 속하는 시료들에 함유된 주요 양이온과 음이온의 평균 용존량을 *epm* (equivalents per million)과 *epm* %로 환산하여 각각 도시한 것이다. Fig. 7에서 특징적인 것은 제2형과 제3형의

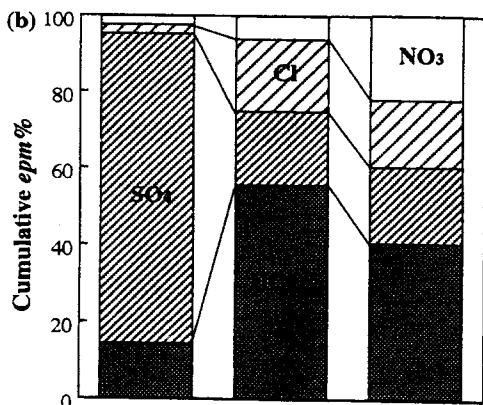
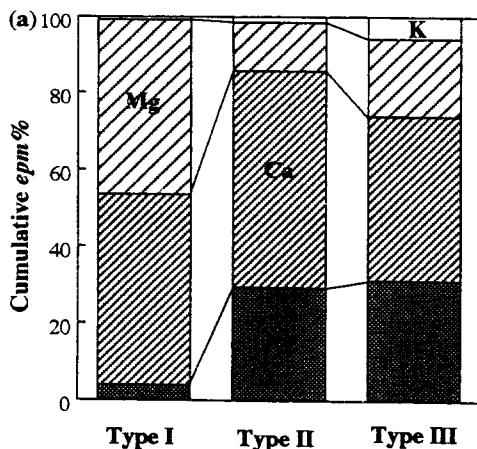


Fig. 8. Chemical composition for each group of water quality represented in percentage of total equivalents per liter (Type are the same as in Fig. 7.)

Table 2. Calculation of saturation index (SI) for stream and groundwaters in Sinbo mine area.

	pH	Activity				Saturation index		
		[Ca]	[Mg]	[CO ₃]	[SO ₄]	SI _{calcite}	SI _{dolomite}	SI _{gypsum}
Type I with high U content								
SW-7	8.2	1.20×10 ⁻³	1.18×10 ⁻³	6.87×10 ⁻⁶	3.73×10 ⁻³	1.93	4.10	1.78×10 ⁻¹
SW-6	8.0	1.11×10 ⁻³	1.11×10 ⁻³	5.04×10 ⁻⁶	2.28×10 ⁻³	1.31	1.92	1.01×10 ⁻¹
SW-4	8.2	1.02×10 ⁻³	1.02×10 ⁻³	6.68×10 ⁻⁶	3.37×10 ⁻³	1.60	2.86	1.37×10 ⁻¹
SW-3	8.1	1.21×10 ⁻³	1.08×10 ⁻³	5.38×10 ⁻⁶	1.76×10 ⁻³	1.52	2.33	8.43×10 ⁻²
SW-2	8.0	9.03×10 ⁻⁴	8.23×10 ⁻⁴	3.19×10 ⁻⁶	2.10×10 ⁻³	0.67	0.47	7.53×10 ⁻²
					<i>Average</i>	1.41	2.34	1.15×10 ⁻¹
Type II with high U content								
DG-18	7.5	3.18×10 ⁻⁴	7.38×10 ⁻⁵	7.76×10 ⁻⁷	1.04×10 ⁻⁴	5.79×10 ⁻²	8.72×10 ⁻⁴	1.31×10 ⁻³
Type III-1 with low U content(shallow groundwater)								
SG-9	6.3	3.87×10 ⁻⁴	1.39×10 ⁻⁴	4.74×10 ⁻⁸	3.54×10 ⁻⁴	4.30×10 ⁻³	7.43×10 ⁻⁶	5.44×10 ⁻³
SG-11	5.8	1.60×10 ⁻⁴	6.39×10 ⁻⁵	7.04×10 ⁻⁹	7.29×10 ⁻⁵	2.64×10 ⁻⁴	3.12×10 ⁻⁸	4.63×10 ⁻⁴
SG-12	5.9	1.03×10 ⁻⁴	4.52×10 ⁻⁵	6.69×10 ⁻⁹	1.19×10 ⁻⁴	1.61×10 ⁻⁴	1.28×10 ⁻⁸	4.85×10 ⁻⁴
SG-13	5.7	8.63×10 ⁻⁵	5.25×10 ⁻⁵	5.68×10 ⁻⁹	4.08×10 ⁻⁵	1.15×10 ⁻⁴	9.02×10 ⁻⁹	1.40×10 ⁻⁴
SG-15	6.4	1.42×10 ⁻⁴	7.56×10 ⁻⁵	3.68×10 ⁻⁸	4.18×10 ⁻⁵	1.22×10 ⁻³	8.95×10 ⁻⁷	2.36×10 ⁻⁴
					<i>Average</i>	1.21×10 ⁻³	1.68×10 ⁻⁶	1.35×10 ⁻³
Type III-2 with low U content(stream water)								
SW-1	8.1	3.21×10 ⁻⁴	1.60×10 ⁻⁴	3.04×10 ⁻⁶	8.61×10 ⁻⁵	2.29×10 ⁻¹	2.92×10 ⁻²	1.10×10 ⁻³
SW-5	7.9	2.50×10 ⁻⁴	1.56×10 ⁻⁴	1.71×10 ⁻⁶	2.45×10 ⁻⁴	1.00×10 ⁻¹	7.00×10 ⁻³	2.44×10 ⁻³
SW-14	6.0	1.19×10 ⁻⁴	5.27×10 ⁻⁵	1.13×10 ⁻⁸	3.50×10 ⁻⁵	3.16×10 ⁻⁴	4.95×10 ⁻⁸	1.66×10 ⁻⁴
SW-16	7.3	1.08×10 ⁻⁴	4.11×10 ⁻⁵	3.91×10 ⁻⁹	5.63×10 ⁻⁵	9.93×10 ⁻⁵	4.19×10 ⁻⁹	2.43×10 ⁻⁴
SW-17	6.0	1.05×10 ⁻⁴	4.61×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁸	1.22×10 ⁻⁴	2.48×10 ⁻⁴	3.02×10 ⁻⁸	5.12×10 ⁻⁴
					<i>Average</i>	6.59×10 ⁻²	7.25×10 ⁻³	8.93×10 ⁻⁴

* $[CO_3] = 10^{-10.43} \times [HCO_3] / 10^{-pH}$

* activity of each ion was calculated by Debye-Huckel equation(Garrels, Christ, 1965).

* $SI_{calcite} = K_{calcite} / [Ca][CO_3]$, $SI_{dolomite} = K_{dolomite} / [Ca][Mg][CO_3]$, $SI_{gypsum} = K_{gypsum} / [Ca][SO_4]$

* All equilibrium constants are from Garrels, Christ (1965), Langmuir (1971).

수체가 대체로 양이온과 음이온간의 이온균형 (ion balance)을 이루고 있는 반면 항내수를 발원수로 하는 제1형의 경우 양이온에 비해 음이온이 약 1.5배정도 부화되어 있어 이온불균형상태를 이루고 있다는 점이다. 이와같은 이온불균형을 조래하는 주된 원소는 SO_4^{2-} 로 음이온의 총누적 함유량의 80% 이상을 차지할 정도로 현저히 부화되어 있다. 자연수-암석간의 반응에서 자연수중에 SO_4^{2-} 을 공급하는 광물로서는 일반적으로 황철석 (Fe_2S)과 같은 황화광물과 석고 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), 경석고 ($CaSO_4$) 또는 Epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)와 같은 황산염광물 등을 생각할 수 있다. 그러나 이 지역에 존재하는 대부분의 하천수, 특히 SO_4^{2-} 을 다량 함유하는 광산 경우 하천수의 pH가 대부분 8.0 이상으로 알칼리성이라는 점을 감안할 때, 산화시 다량의 수소이온을 방출하여 강한 산성환경을 유발시킬 수 있는 황철석이 SO_4^{2-} 의 주된 공급원이라고 보기는 어려울 것으로 판단된다. 이는 다시 자연수중에 상당량의 Ca^{2+} (또는 Mg^{2+}), SO_4^{2-} 를 방출할 수 있는 대표적인 광물인 방해석, 돌로마이트, 석고에 대한 포화지수를 산출할 경우 (Table

2) 제1형의 모두가 방해석 ($SI_{Mean}=1.41$)과 돌로마이트 ($SI_{Mean}=2.34$)에 대해 과포화 상태에 있다는 사실에 의해서도 Ca^{2+} (또는 Mg^{2+})를 다량 방출할 수 있는 광물 즉, 석고(또는 활석, 혹은 Epsomite 등과 같은 Mg광물이나 그의 풍화산물)와 같이 용해도가 높은 광물이 존재해야 함을 알 수 있다. 그러나 석고에 대해서는 모두 극도로 불포화 상태를 보이고 있어 ($SI_{Mean}=0.15$) 제1형의 수체와 접촉하는 지각물질 (또는 대수층)중에서 그 용유량은 극히 한정적이었을 것으로 예측된다. 각 형을 대표하는 시료의 각 원소성분에 대한 epm %는 제1형이 Mg의 부화로 인해 $Ca(>Mg>Na)SO_4$ 형의 수질특성을, 제2형과 제3형은 그 조성상 우리나라 화성암지대의 지하수형 (이수재, 김수진, 1994; 이인호 등, 1997; 김종근, 이재영, 1997)과 유사한 $Ca(Na>Mg)(HCO_3)_2$ 형의 수질특성을 뚜렷이 보여주고 있다 (Fig. 8). 이상의 결과는 신보광산 주변에 우라늄 이상대를 가져온 지하수의 수질특성이 $Ca-Mg-SO_4$ 형에 국한되어있지 않을 뿐만 아니라 오히려 화성암 대수층에서 흔히 나타나는 $Ca-Na-HCO_3$ 형에 수반되어 이동하고 있으며 이들 수체가

활석 광화대 또는 광산지대의 풍화대를 통과하는 과정에서 수질특성이 Ca-Mg-SO₄형으로 변화되었을 가능성이 매우 높음을 시사한다. 따라서, 단지 광산 폐석하부 또는 항내수의 수질특성만을 고려하여 함 우라늄 지하수의 대수층이 백운질 석회암층군이라는 기존 주장 (오천혁 등, 1989)은 재고되어야 할 것으로 판단된다.

우라늄의 기원 및 향후 탐사방향

지하수의 물리 화학적 특성은 지하수가 충전지역에서 배수지역으로 이동하는 과정에서 겪게되는 다양한 지질환경의 변화와 물-지질매체 사이에 일어나는 다양한 수리지 화학적 반응에 의해 지배된다. 따라서 지하수의 물리 화학적 특성은 지하수 자체의 수리순환 이력에 대한 정보는 물론 그들의 이동통로인 대수층의 지화학적 특성에 대한 정보를 얻는데 있어 매우 중요한 척도로써 이용되고 있다 (Chebotarev, 1955; Clarke, Kugler, 1973; Graham *et al.*, 1975; Freeze, Cherry, 1979). 이러한 관점에서 볼 때, 신보광산 주변에서 보여지는 서로 다른 화학상의 수체는 이들이 서로 상이한 물-암석간의 반응을 거쳤음을 의미한다. 즉, 항내에서 유출되는 지하수를 발원수로 하는 하천수계에서의 Mg과 U의 부화현상은 이들 수체에 다량의 Mg과 U를 공급할 수 있는 지질매체 또는 광화대가 이들 수체의 이동경로에 존재하고 있음을 의미하고 있다. 특히 Mg의 부화는 이 지역이 녹니석화가 고도로 진행된 활석광산이라는 점에서 매우 당연한 결과라 할 수 있다. 또한 Mg이 부화된 수계에서만 고농도의 U 이상치가 존재한다는 사실은 U 역시 Mg이 부화되는 물-암석반응계에서 동반 유래되었을 것이라는 유추에 당위성을 부여하고 있다. 본 연구결과 역시 Fig. 9에 나타낸바와 같이 심부 지하수를 제

외한다면 신보광산 주변에 존재하는 수체중의 Mg/Ca비가 증가함에 따라 U과 U광상 탐사의 지시원소가 되는 Mo의 함량이 조화적으로 증가하고 있어 상기와 같은 기존연구 (서효준 등, 1986; 오천혁 등, 1989)에서의 가설을 재확인 하고 있다. 그러나 신보광산 주변에 발달된 수계중 Mg이 부화된 수체는 오직 광산의 항내수를 발원수로하는 수계 본류의 하천수뿐이며 그의 모든 수체 (지하수 및 하천수)는 모두 Mg가 결핍된 Ca형의 수질특성을 보이고 있다는 점은 이 지역을 대표하는 수질특성이 Ca형이며 Mg형의 수질특성은 단지 광산의 국부적인 영향에 의해 이차적으로 형성된 것임을 강하게 시사하고 있다. 또한 전형적으로 Ca(HCO₃)₂형의 수질특성을 갖는 심부지하수가 광산 반대 쪽 사면에 위치해 있고 광산으로부터 1 km 이상 떨어져 있는 관정에서 채취되었음에도 불구하고 가장 높은 함량의 U를 함유하고 있다는 점은 지하수중에 U를 유리시킨 물-암석간의 반응이 Mg의 부화를 초래한 광산내 물-암석간의 반응과 별개로 일어났음을 의미하며 더 나아가 함우라늄 대수층이 녹니석이나 백운질암으로 이루어지지 않았다는 사실을 나타내고 있다. 결과적으로 고농도의 U를 함유한 항내수는 Ca(HCO₃)₂형의 수질특성을 갖는 심부 지하수에 그 기원을 두고 있으며 이 지하수가 광산의 개발로 인해 활석 광화대내에 형성된 인위적 배수로로 통해 유출되면서 그 수질특성이 Ca(Mg)SO₄형으로 변화했을 것으로 추정된다. 이러한 추론은 서효준 등 (1986)과 오천혁 등 (1989)에 의해 행해진 신보광산 주변 지표 또는 항내 우라늄 조사 및 시추조사에서 지하수에 우라늄 이상값을 보이는 지질매체가 거의 대부분 점토질 물질이라는 사실과 함께 이 지역에 형성된 U 이상대가 심부 지하수에 의해 운반되어온 U에 그 기원을 두고 있으며 지하수중의 U이 광산지대를 통과하면서 그 경로에 존재하는 점토광물의 표면에 흡착되어 형성된 이차적인 부화대임을 유추할 수 있게 한다.

이상의 결과들은 신보활석광산 주변 수체 (항내수 및 심부 지하수)에 우라늄 이상대를 형성시킨 우라늄 광화대 혹은 부화대가 이 지역에서 일어난 활석광화작용과 성인적으로 무관하다고 단언할만한 어떠한 자료도 확보하지 못했지만 적어도 우라늄 광화대가 녹니석화 지대 또는 활석광화대내 보다는 오히려 화성암질과 같이 물-암석간의 반응에 의해 지하수가 Ca(HCO₃)₂형의 수질특성을 가질 수 있는 암층내에 부존되어있음을 강하게 시사하고 있다. 또한 이 지역에 우라늄 이상대를 형성시킨 함 우라늄층에 대한 향후 탐사방향은 심부의 함 우라늄 지하수에 대한 수리순환계와 대수층에 대한 조사가 우선적이며 중심적이 되어야 하며, 그 결과를 바탕으로 세부탐사방향이 재

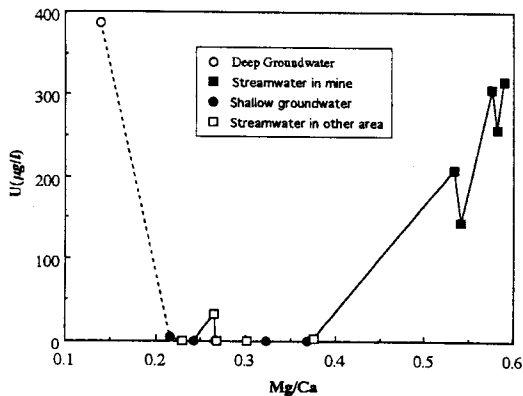


Fig. 9. Relation in U contents vs Mg/Ca ratios of stream water and groundwater occurred in the Shinbo talc mine area.

설정되어져야함을 제시하고 있다.

결 론

신보활석광산 주변 수체중에 우라늄 이상치를 형성시킨 우라늄 부화대의 지화학적 특성을 추적하기 위하여 광산 주변에 존재하는 하천수, 천부 지하수 및 심부 지하수를 채취하여 각각의 수리화학적 특성을 우라늄 용존 함량과 대비시켜 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 광산 주변에 분포하는 수체 (지표수와 지하수)는 대부분 그 수질특성이 $\text{Ca}(>\text{Na})\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 형으로 분류되었으며, 단지 항나수를 발원수로 하는 수계 분류의 하천수만이 $\text{Ca}(\text{Mg}>\text{Na})\text{SO}_4$ 형으로 분류되는 수질특성을 보여 그 수질이 활석광화대의 지구화학적 특성을 반영하고 있다.

2. 그럼에도 불구하고 우라늄 이상치는 $\text{Ca}(\text{Mg})\text{SO}_4$ 형의 수질에서만 국한되어 형성되어있지 않았으며 오히려 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형의 수질특성을 갖는 심부 지하수에서 더 높게 형성되어 있었다.

3. 이러한 사실은 이들 수체중에 우라늄을 유리시킨 물-암석간의 반응이 Mg이나 SO_4 를 부화시킨 물-암석간의 반응과 동원적이지 않다는 사실을 뒷받침함과 동시에 고농도의 우라늄을 함유하고있는 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형의 지하수가 광산개발로 인해 형성된 인위적 파쇄대를 통해 유출되면서 광화대의 암석과 반응하여 그 수질특성이 $\text{Ca}(\text{Mg})\text{SO}_4$ 형으로 변화했음을 강하게 시사하고 있다.

4. 이는 또한 이 지역에 우라늄 이상치를 가져온 우라늄 광화대 또는 부화대가 녹니석화대나 활석광화대내가 아닌 물-암석반응에 의해 지하수중에 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형의 수질특성을 형성시킬 수 있는 지층 (암층)내에 형성되어있음을 의미한다.

5. 따라서 심층 지하수의 수리순환체계 및 대수층의 수리지질학적 특성에 대한 조사가 향후 우라늄 광화대의 탐사를 위해 매우 중요한 정보를 제공해줄 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 1997년 전략광물 센터 연구비와 1995년도

한국과학재단 핵심전문 (951-0404-004-2)연구비와 기초과학연구소 학술연구조성지원 연구과제 (BSRI-97-5425) 연구비의 지원으로 연구된 것임을 밝히며, 이에 감사한다.

참고문헌

- 김정환, 이인기 (1973) 한국지질도 용담도폭설명서 (1:50,000). 국립지질광물연구소.
- 김종환, 김종대, 정태진, 오천혁 (1981) 가평지역 우라늄 광역 광화대 조사연구. 한국동력자원연구소 우라늄-8, p. 7-94.
- 대한광업진흥공사 (1977) 광상시추조사보고. 제3호, p. 859-860.
- 대한광업진흥공사 (1979) 광상시추조사보고. 제4호, p. 886-888.
- 대한광업진흥공사 (1983) 탐광굴진 제6호, p. 264-265.
- 서효준, 신성진, 윤현수, 김통권 (1986) 전주-진안 일대의 우라늄 지화학 탐사 연구. 한국동력자원 연구소 연구보고 86-3, p. 21-55.
- 오천혁, 박중권, 서효준, 김통권, 채수천, 고상모 (1989) 전북 진안 신보 광산지역 우라늄 광상조사 연구. KIGAM89-, p. 81-106.
- 이인호, 이재영, 김통권 (1997) 대구시 지하수의 수질에 관한 지화학적 연구. 자원환경지질학회지, v. 30, p. 327-340.
- 이수재, 김수진 (1994) 납산화강암의 풍화 및 광물-물 반응에 관한 연구. 한국광물학회지, v. 7, p. 40-48.
- 島村新兵衛 (1924) 전주-진안도폭 (1:50,000). 국립지질조사소.
- Chebotaiev, I.I. (1955) Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 8, p. 22-48, 137-170, 198-212.
- Clarke, W.B. and Kugler, G. (1973) Dissolved helium in groundwater: A possible method for uranium and thorium prospecting. Economic Geology v. 68, p. 243-251.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Garrels, R.M. and Christ, C.L. (1965) Solutions, Minerals and Equilibria. Happer & Row, New York, p. 450.
- Graham, G.S., Kesler, S.E. and van Loon, J.C. (1975) Fluorine groundwater as a guide to Pb-Zn-Ba-F mineralization. Economic Geology v.70, p. 396-398.
- Langmuir, D. (1971) The geochemistry of some carbonate ground waters in central Pennsylvania. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 35, p. 1023-1045.
- Langmuir, D. and Chatham, J.R. (1980) Groundwater prospecting for sandstone type Uranium deposits: A preliminary comparison of the merits of mineral-solution equilibria and single-element tracer methods. Jour. Geochem. Explor. v. 13, p. 204-219.
- Miller, W.R., Wanty, R.B. and McHugh, J.B. (1984) Application of mineral-solution equilibria to geochemical exploration for sandstone-hosted Uranium deposits in two basins in west central Utah. Economic Geology, v. 79, p. 266-283.

1998년 1월 8일 원고접수