

## 대청호 상류, 회남일대에 분포하는 탄질 변성니질암과 하상 퇴적물의 환경유해원소에 관한 지화학적 거동, 분산 및 부화

이찬희\* · 이현구\*

### Geochemical Behavior, Dispersion and Enrichment of Environmental Toxic Elements in Coaly Metapelites and Stream Sediments at the Hoenam Area, up the Taecheong Lake, Korea

Chan Hee Lee\* and Hyun Koo Lee\*

**ABSTRACT** : The Hoenam area, up the Taecheong lake, composed mainly of low grade coal-bearing metapelites within the Ogcheon Supergroup. These coal formations are developed discontinuously several hundred meters and swelling from 10 to 300 cm along the host metapelites. Although the formations have been mined for coal, but already mined out, and the formations were higher content (mean value of 42 samples) of environmental toxic elements as As (13 ppm), Ba (1.81 wt. %), Cd (2 ppm), Cr (188 ppm), Cu (87 ppm), Mo (214 ppm), Pb (25 ppm), Sb (3 ppm), Se (12 ppm), U (55 ppm), V (2124 ppm) and Zn (234 ppm) than the host metapelites and the NASC. The Al, Ti, Mg, K and Na contents in stream sediments derived from the Hando and Bugook mine area were highly concentrations than the samples from the Samseongjeil mine area. The mean value (wt. %) of Fe (10.07), Mn (0.15), Ca (0.84), P (0.18) and Ba (0.77) influenced by the Samseongjeil mine were higher than the other mine drainage sediments. The mean content (ppm) of environmental toxic elements in drainage sediments from the Samseongjeil mine were taken As (2083), Cu (447), Mo (202), Ni (720), Pb (42), U (250), V (1070) and Zn (2632), which are extremely high concentrations against NASC and EPA. Characteristics of elemental behavior and dispersion of the all toxic elements are the same as increased with increasing U, V, and Cu. Rare earth elements in the sediments are enriched with LREE (La, Ce and Nd) from the drainage on strong concentration of toxic elements. The pH of stream water is neutral, but pH of the sediments ranged from 4.92 to 6.93 (mean 6.22), those are slightly acid in the Hando mine area. Major elements in the host rocks at the Hoenam area are mostly depleted especially Ca, excepting Ti and Ba, normalized with NASC. The sediments were highly enriched of Ti, Fe, Mg, Mn and Ba, but depleted of Al, K, Ca, Na and P on the basis of host rocks and NASC. Minor and environmental toxic elements in the host rocks were strongly enriched all elements (As, Cd, Mo, Se, U, V and Zn), excepting Co, Ni and Sr. Enrichment index (mean value) about toxic elements (As, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn) of the sediments in this area have taken 41.35 (Hando mine drainage; 2.73, Samseongjeil mine drainage; 113.14 and Bugook mine drainage; 8.19), those are seriously contaminated by environmental toxic elements.

## 서 언

최근 자연환경에 관한 사회적 관심이 높아짐에 따라 산업 및 가정폐기물의 관리와 처리에 까지 많은 문제점들이 지적되고 있다. 또한 지하자원의 개발을 목적으로 가행되었던 각종 광산에서 유출된 폐석, 광석, 광미, 갱내수의 특

성과 이들로 인한 하천, 토양, 순환수 및 농작물의 오염등에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 광폐석들은 자연경관의 황폐화, 유실에 의한 수로 및 도로의 차단, 산사태, 농경지 및 가옥파괴의 원인을 제공하고 있다. 광폐수는 자연경관을 해치는 것은 물론 중금속 오염, 산도 및 탁도의 증가, 구조물의 노화촉진등을 유발하고 있으며, 이들의 대부분은 방치된채 상수원 또는 하천으로 유입되어 수질악화에 따른 생물상의 파괴를 야기하고 있는 것이 현실이다.

\* 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea)

지표환경에 노출된 암석, 토양 및 퇴적물을 구성하는 주성분원소와 희토류원소 등은 그 환경적 유해가 아직까지도 불분명한 것이 많다. 그러나 미량원소중에 특히 중금속원소 (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Zn --)들은 환경적으로 중요한 유해원소 임이 잘 알려져 있다. 일반적으로 지구화학적 환경에서 중금속원소들의 분산과 거동 및 부화는 암석과 광석으로부터 출발하여 풍화퇴적물, 토양 및 순환수를 따라 이동한다. 이들이 각각의 일정한 환경계내에서 자정능력을 초과하면 잠재적으로 유해한 물질의 양이 부화되어 식물, 동물 및 인간에게 영향을 미치는 것이다 (Schuiling, 1990). 광산 및 광업 활동은 일부지역에서 행해지고 있어 환경에 대하여는 국부적이지만, 다양한 형태의 중금속 원소들이 유출 및 분산되어 잠재적으로 동식물 및 인간에게 큰 영향을 미칠 수 있다 (Salomons, 1995).

대청호 상류, 충북 보은군 회남면 용호리 및 분저리 일대 (36.24~36.26°N, 127.33~127.36°E)에 분포하는 옥천누층군의 변성니질암에는 저품위 탄층이 협재되어 있으며 이를 대상으로 개발한 실적이 있는 한도탄광, 삼성제일탄광 및 부국탄광이 분포한다. 이 탄층에는 바나듐, 바륨, 우라늄, 몰리브데넘 및 중금속이 상당량 함유되어 있고, 이들은 모두 탄질물질에 흡착되어 있어 유기탄소와 거동을 같이 하는 것으로 알려져 왔다 (김옥배, 전용원, 1980; 이민성, 전효택, 1980; 박봉순, 소칠섭, 1980; 이상만 등, 1981).

이 지역에는 상당량의 광폐석이 방치되어 있으며, 폐광도에서 유출되는 갱내수는 아무런 여과없이 하천을 따라 그대로 대청호로 유입되고, 광산주변의 하천과 토양은 부분적으로 적갈색 또는 회백색을 띠는 등 심한 오염도를 보여주고 있다. 이 연구에서는 회남일대의 탄광주변에 분포하는 탄질 변성니질암 및 하상퇴적물을 대상으로 기반암과 퇴적물의 지구화학적 특성을 검토하였고, 폐광에 따른 환경오염의 실태와 환경유해원소의 분산, 거동 및 부화를 고찰하였다.

## 지질개요

회남지역의 지질에 관하여는 김옥준 등 (1977), 김윤규 등 (1988), 이찬희 등 (1996, 1997) 및 이현구, 이찬희 (1996)에서 이미 보고된 바 있기 때문에 여기에서는 개요만을 기술하고자 한다. 이 지역의 지질은 옥천누층군의 변성퇴적암에 해당하는 문주리층을 기저로, 창리층이 정합적으로 분포하며 이를 황강리층의 암석이 부정합으로 피복한다. 이 층들은 평안누층군에 속하는 것으로 보이는

국사봉층의 암석에 의하여 부정합 및 단층으로 문주리층과 접하고 있다 (김옥준 등, 1977). 그러나 이 변성퇴적암류의 암상과 층서적 특징으로 보아, 회남지역의 문주리층은 황강리-괴산 일대의 운교리층에 대비될 가능성이 있으며, 실제 문주리층의 암석은 국사봉층으로 명명된 지층일 것으로 추정된다. 한편 평안누층군으로 설정된 국사봉층은 문주리층의 일부로 해석함이 타당할 것으로 보인다 (이찬희 등, 1996).

이 변성퇴적암류들은 유라기의 흑운모 화강암과 시대미상의 알카리 현무암질암에 의하여 관입되어 있다 (김옥준 등, 1977; 김윤규 등, 1988). 이 지역의 변성퇴적암에 대한 온도와 압력조건을 추정한 연구는 없으나, 이와 인접한 보은 및 괴반령 지구조 단위 (Cluzel *et al.*, 1990)는 490~630°C와 4.2~9.4 kb의 조건에서 변성작용이 있었다고 한다 (김현철 등, 1995). 위 지역의 암상 및 구성암석은 회남지역의 옥천누층군을 이루는 것과 동일한 것으로 보아 양자의 변성조건은 비슷하였을 것으로 추정된다.

이 지역에서 산출되는 탄층은 국사봉층으로 명명되어진 흑색 점판암내지 천매암으로 구성된 지층에 협재된다. 이 지층의 편리는 N5-45°E의 주향과 45-78°NW의 경사를 갖고 있으나, 상당히 교란되어 수 많은 소습곡 및 벽개가 발달되어 있다. 이 층내에는 석탄으로 개발되었던 6매의 탄층이 분포하며 이 탄층을 대상으로 개발한 한도탄광, 부국탄광, 삼성제일탄광이 있다. 또한 탄층의 주향 및 경사를 따라 노두의 여러 곳에서 갱도와 지표채굴적이 개설되어 있으나 현재는 모두 봉락되어 있다. 이 탄층은 팽축이 심하여 10~300 cm의 폭을 가지고 있으며, 주향연장은 단속적으로 약 3 km 정도가 추적된다.

## 시료 및 분석

최근까지 옥천누층군에 분포하는 흑색 또는 탄질 세일에 관하여는 주로 우라늄과 바나듐의 탐사와 관련된 광상학 및 지화학적 연구가 대부분이었다 (김옥배, 전용원, 1980; 박봉순, 소칠섭, 1980; 이민성, 전효택, 1980; 이상만 등, 1981; 이대성 등, 1986; Kim, 1989; 이찬희 등, 1996; 이현구, 이찬희, 1996). 그러나 이 세일에 함유된 방사성 및 중금속원소의 잠재적 독성이 알려지면서 이들의 분포상태, 거동과 분산특성, 부화 등의 환경지구화학적 연구가 활발히 진행되고 있다 (전효택, 정명채, 1991; Kim, Thornton, 1993; Chon *et al.*, 1996; 이진수 등, 1996).

이 지역에 관한 기반암의 분석시료는 이찬희 등(1996, 1997)의 보고와 같이, 한도탄광 (20시료), 부국탄광 (13시료) 및 삼성제일탄광 (9시료)의 탄층 및 탄층을 수반하는

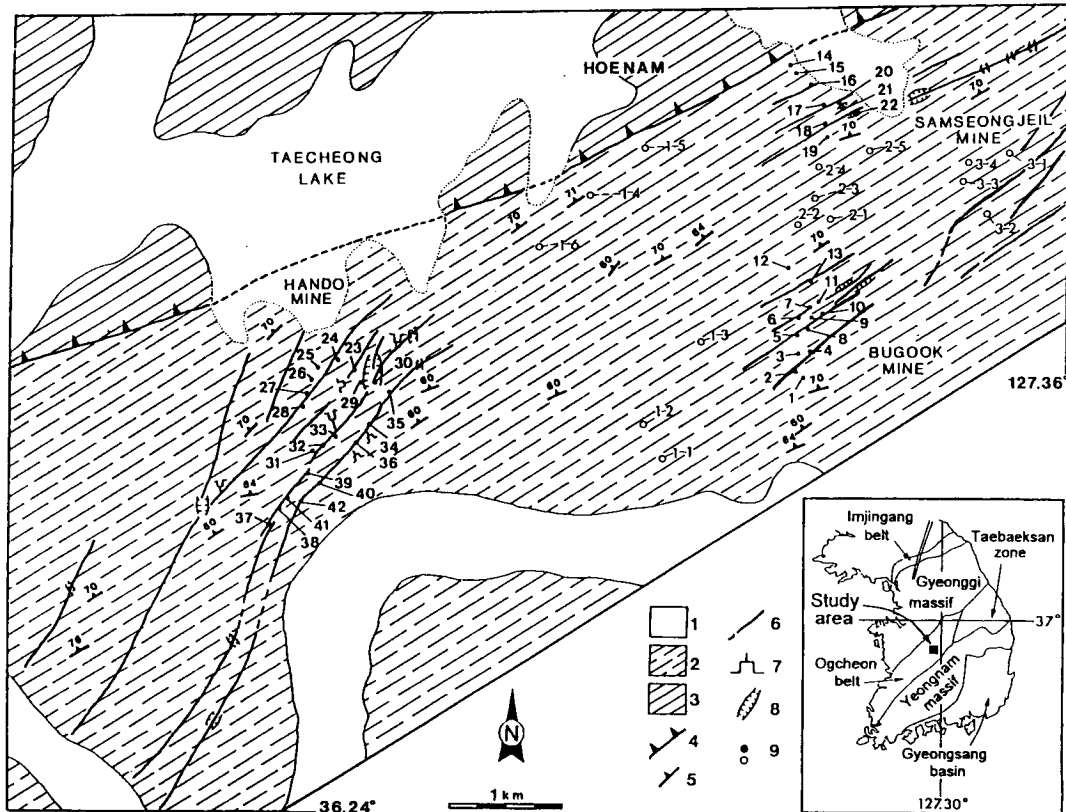


Fig. 1. Geology and sample locations of the study area. 1; alluvium, 2; Koogsabong Formation, 3; Munjuri Formation, 4; thrust fault, 5; foliation, 6; coal formation, 7; adit, 8; trench, 9; sample location (full dots; metapelites, open dots; stream sediments).

변성니질암을 대상으로 주원소, 미량원소와 희토류원소를 분석하였다. 하상퇴적물은 한도탄광 주변의 수계를 따라 대청호로 유입되는 하천에서 6시료, 부국탄광 주변의 수계를 따라 대청호로 유입되는 하천에서 5시료 및 삼성제일탄광의 주변에서 대청호로 유입되는 하천에서 4시료를 채취하여 암석과 동일한 방법으로 주원소, 미량원소 및 희토류원소를 분석하였다 (Fig. 1).

이 하천들은 모두 남쪽에서 북쪽으로 발달하고 있고, 유량이 비교적 적은 작은 하천이다. 한도 및 부국탄광 주변의 수계는 삼성제일탄광 주변에 발달하는 수계에 비하여 비교적 급경사를 이루고 있고 거리도 짧다. 하상퇴적물은 물의 흐름이 없는 곳에서 표면의 부유물을 제거한 후에 1~5 cm 깊이로 채취하였다.

기반암 및 하상퇴적물은 캐나다의 ACTLAB에 의뢰하여 유도분극 아르곤플라즈마 분광분석기 (ICP-AES)와 중성자 활성화분석기 (INAA)를 이용하여 총 48개 원소를 정량분석 하였다. 하상퇴적물은 실내에서 자연건조하여

180 mesh 미만의 입도로 체질한 시료를 대상으로 분말화하여 분석하였다. 하천수의 pH는 현장에서 시료채취와 동시에 측정하였다. 그러나 하상퇴적물의 pH 측정은, 채취된 시료를 실내에서 건조시킨 다음 Rump, Krist (1988)의 방법에 따라 10 mesh 미만의 입도를 갖는 시료 20 g을 증류수 (pH=6.29) 50 ml에 혼탕하여 자력교반기로 한시간 정도 교반시킨 후에, 20여분 안정시킨 것을 Orion SA-720 pH 측정기를 이용하여 측정하였다.

## 결과 및 고찰

### 기반암

### 주성분원소

쇄설성 변성퇴적암의 화학조성은 근원암의 지질환경에 따라 다양한 특징을 갖고 있으며, 세계적으로 널리 분포되어 있는 세일에는 지질시대에 따라 다소 차이는 있으나

미량원소의 평균함량은 지각구성물질의 수백배 이상 농집되어 있다 (Gromet *et al.*, 1984; McLennan *et al.*, 1980; Vine, Tourtelot, 1970). 회남지역에 분포하는 탄층의 암석지구화학적 특징을 검토하기 위하여 분석된 시료의 주원소, 미량원소 및 희토류원소의 함량은 이찬희 등 (1996; 1997), 이현구, 이찬희 (1996)에 의하여 보고된 바 있다.

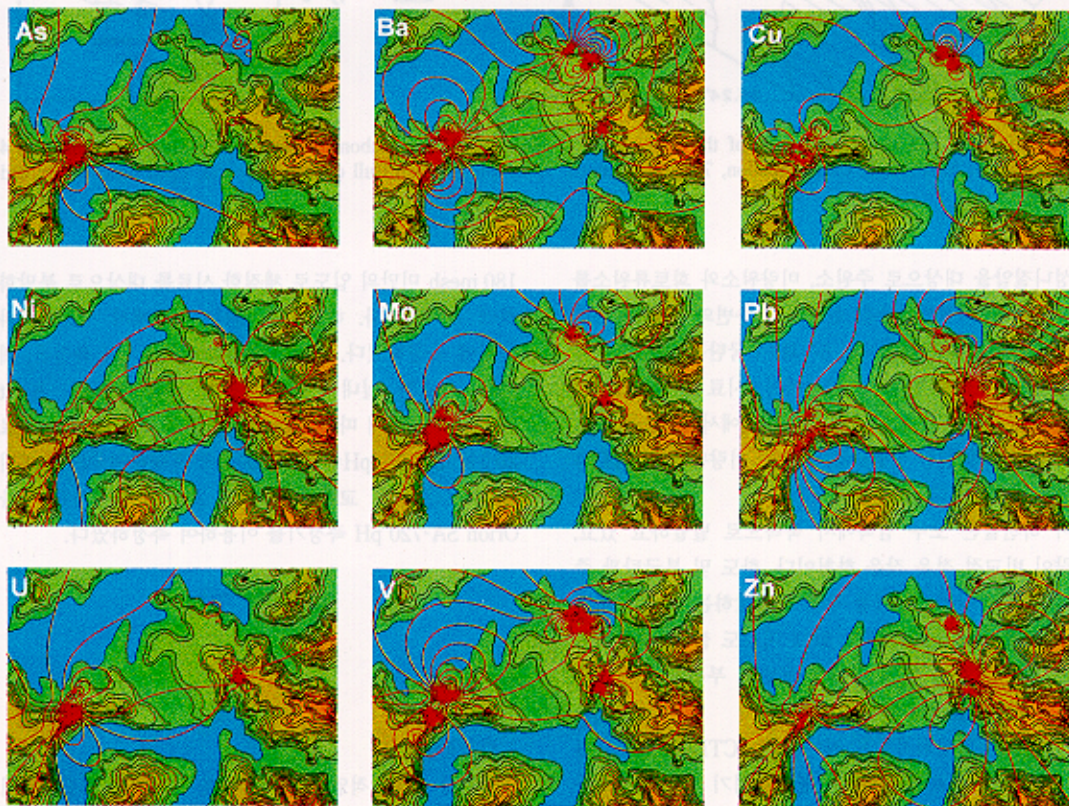
이 탄층을 구성하는 주성분 원소들은 위치 및 광상에 관계없이 상당히 불균질하여 일정한 경향을 보이지 않는다. 이 중 Na (0.04~1.81), P (0.00~0.46) 등의 함량 (wt. %)은 비교적 낮으나, Al (0.81~10.98), Mg (0.05~3.43), K (0.31~5.04)의 함량은 비교적 넓은 범위의 조성변화를 갖는다. 또한 이 주원소의 평균조성 (wt. %)을 NASC (North American Shale Composite)와 비교할 때 Ca (0.01~1.32)의 함량은 아주 낮으나, 환경유해원소인 Ba (0.13~4.60), Ti (0.01~0.45), Fe (0.38~7.24)의 함량이 월등히 높은 특징을 보인다.

일반적으로 퇴적암의 주원소는 Al 및 Ba의 함량과 동

일한 거동을 하는 것으로 알려져 있다 (Fix, 1958). 그러나 이 지역의 탄질 변성니질암에 분포하는 주원소의 조성을 Al의 함량에 따라 변화경향을 검토한 결과, Al의 함량이 증가함에 따라 Ti와 K의 함량은 증가하는 경향을 보여 주나, Fe와 Mg의 함량은 미약한 부의 상관관계를 갖는다. 한편 Ca, Na 및 P의 함량은 아무런 경향을 갖지 않았으며, Ba를 기준으로 하여 주원소들의 상관도를 작성하여 보아도 규칙적인 경향을 찾을 수 없었다.

### 미량 및 독성원소

이 탄층의 미량원소를 검토하기 위하여 분석된 시료에서는 거의 모든 원소가 NASC의 평균치를 상당히 초과한다. 특히 환경유해원소중에 U, V, Mo, Mn 및 Ni 등의 함량은 아주 높으며, Cd (<0.5-10.3), Co (<1-17), Cr (56-20), Cs (2-17), Pb, Sc (1.8-34), Se (3-65), Sb (0.6-1.8), Th (2-18), W (<1-20), Rb (33-260) 및 Sr (35-233) 들의 함량 (ppm)도 비교적 높고 조성의 변화폭도 크다. 한편 환경적 독성원소들의 함량범위와 평균조성



**Fig. 2.** Maps showing topography and concentration contours of environmental toxic elements in coaly metapelites at the Hoenam area, up the Taechong lake.

(ppm)은 As; <0.5~49 (13), Cu; 3-356 (87), Ni; 2-108 (72), Mn; 5-624 (71), Pb; 5097 (26), Mo; 11-870 (214), V; 123-8112 (2124), U; 0.5-460 (56) 및 Zn; 8-2661 (234) 으로 아주 높다.

기반암에 함유되어 있는 환경유해원소에 관하여 광산의 위치와 지형에 따라 세분하여 보면 특정원소의 오염도가 서로 다르게 나타난다 (Fig. 2). 각 원소의 평균치 (ppm) 를 가지고 나누어 볼 때, As (19)는 한도탄광 부근의 시료에서 특히 높고, Cu (180)는 삼성제일탄광의 시료에서, Ni (174), Pb (37) 및 Zn (446)은 부국탄광의 시료에서 월등히 높은 특징이 있다. U의 평균함량 (ppm)은 부국탄광 (64)과 한도탄광 (69)에서 특히 높으며 삼성제일탄광 (14)에서는 아주 미량만 검출되었다. Mo은 함량변화가 상당히 심하여 일반적인 경향은 보이지 않으나, 삼성제일탄광에서 높게 (평균 227 ppm) 검출된다. 또한 V의 함량은

전반적으로 아주 높으나 광산에 따라 비슷한 경향을 보이고, 삼성제일탄광에서 다소 높은 함량을 갖는다.

일반적으로 퇴적암내의 V은 U, Mo, Ba, Al등의 퇴적기원 암석에서 상대적으로 높은 원소들과 거동특성을 같이 하고 있으며 (Breger, 1958), As, Cu, Ni, Zn 등과는 부의 상관관계를 보여야 한다 (Bell, 1978; Szilagyi, 1971). 그러나 이 탄층의 Al 함량이 증가함에 따라 Ba과 V의 함량도 증가하는 경향을 보여주나 U, Mo, As, Cu의 함량은 특별한 관계를 갖지 않았으며, Ba를 기준으로 하여 각 원소의 상관도를 작성하여 보아도 일정한 경향을 찾을 수 없었다.

#### 하상퇴적물

#### 주성분원소

하상퇴적물의 대부분은 암석의 기계적 풍화작용에 따

**Table 1.** Contents of major (wt. %) and selected rare earth (ppm) elements in stream sediments at the Hoenam area, up the Taecheong lake.

No.	Al	Ti	Fe	Mg	Mn	Ca	K	Na	P	Ba	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
<b>Hando mine area</b>																		
SS1-1	7.14	0.66	5.58	1.52	0.10	0.53	1.85	0.14	0.04	0.17	35	60	28	5	1.2	<0.5	4	0.1
SS1-2	7.79	0.57	6.03	2.03	0.08	0.79	1.83	0.27	0.05	0.11	43	74	31	5	1.3	<0.5	3	0.5
SS1-3	7.63	0.75	5.94	1.71	0.11	0.30	2.00	0.24	0.08	0.09	33	61	26	3	0.9	<0.5	3	0.4
SS1-4	7.74	0.82	5.69	1.44	0.08	0.30	1.99	0.18	0.05	0.07	39	73	26	5	1.1	<0.5	3	0.4
SS1-5	8.03	0.87	6.50	1.59	0.12	0.41	2.07	0.30	0.05	0.15	37	70	29	5	1.3	<0.5	3	0.5
SS1-6	7.84	0.94	6.82	1.82	0.11	0.59	2.08	0.17	0.05	0.10	37	72	26	5	1.3	<0.5	4	0.5
mean	7.70	0.77	6.09	1.69	0.10	0.49	1.97	0.22	0.05	0.12	37	68	28	5	1.2	<0.5	3	0.4
R1(20)	7.93	0.25	3.64	0.30	0.02	0.02	3.27	0.32	0.02	0.90	49	92	49	9	1.9	1.1	5	0.7
<b>Samseongjeil mine area</b>																		
SS2-1	6.85	0.30	7.42	0.86	0.11	0.49	1.94	0.31	0.16	0.84	80	130	54	10	2.5	2.1	7	0.9
SS2-2	7.09	0.21	11.50	1.00	0.14	1.07	2.48	0.21	0.20	1.01	88	140	54	8	2.6	<0.5	7	<0.1
SS2-3	6.95	0.25	10.80	1.03	0.21	1.13	2.10	0.23	0.20	0.74	79	130	45	8	2.9	2.4	7	<0.1
SS2-4	6.80	0.57	7.94	1.02	0.09	0.50	2.04	0.31	0.11	0.41	76	132	66	10	2.5	1.7	5	0.9
SS2-5	6.32	0.22	12.70	0.86	0.22	1.02	1.84	0.19	0.24	0.87	90	150	58	10	2.8	2.4	8	1.3
mean	6.80	0.31	10.07	0.95	0.15	0.84	2.08	0.25	0.18	0.77	83	136	55	9	2.7	1.8	7	0.7
R2(9)	7.99	0.24	1.59	0.69	0.02	0.02	3.45	0.19	0.01	2.25	58	93	52	9	1.8	1.4	7	1.2
<b>Bugook mine area</b>																		
SS3-1	5.97	0.86	6.08	1.02	0.08	0.37	1.89	0.31	0.05	0.10	51	100	34	7	1.5	<0.5	5	0.6
SS3-2	9.82	0.50	5.25	1.33	0.09	0.34	3.62	0.63	0.07	0.10	36	73	27	5	1.0	1.0	4	0.5
SS3-3	6.99	0.41	7.58	1.21	0.14	0.89	1.89	0.34	0.08	0.34	87	126	57	12	2.2	1.2	4	<0.1
SS3-4	8.20	0.55	7.04	1.23	0.11	0.26	2.54	0.41	0.05	0.34	51	110	37	7	2.0	<0.5	4	0.6
mean	7.75	0.58	6.49	1.20	0.11	0.47	2.49	0.42	0.06	0.22	56	102	39	8	1.7	0.8	4	0.4
R3(13)	6.43	0.14	2.83	1.30	0.09	0.16	2.28	0.12	0.15	1.27	45	82	41	8	2.4	2.1	7	1.0
R4(42)	7.48	0.21	2.95	0.76	0.04	0.07	3.00	0.21	0.06	1.81	51	89	47	9	2.3	1.5	6	1.0
Shale	10.45	0.02	3.33	1.34	0.07	2.53	2.28	0.66	0.07	0.08	32	73	33	6	1.2	0.9	3	0.5

R1 (20); mean value of 20 metapelite samples near the Hando mine area, R2 (9); mean value of 9 metapelite samples near the Samseongjeil mine area, R3 (13); mean value of 13 metapelite samples near the Bugook mine area, R4 (42); mean value of 42 metapelite samples near the Hoenam area. Shale; average value of world wide shales by Gromet *et al.* (1984), Rose *et al.* (1979) and Haskin *et al.* (1968).

라 분리 및 이동되고 물리화학적 침전에 의하여 농축되며, 일부 원소들은 산화물 또는 유기물에 흡착되어 퇴적된다. 회남지역의 탄광주변에 분포하는 하상퇴적물에 관한 주원소의 함량은 Table 1과 같이 다양한 특성을 갖는다. 전반적으로 보아 이 퇴적물들의 조성은 NASC의 평균치 (wt. %)에 비하여 Al (5.97~9.82), Mg (0.30~2.03), Mn (0.08~0.22), Ca (0.26~1.13), K (1.83~3.62), Na (0.14~0.41)의 함량은 낮으나, Ti (0.21~0.94), Fe (5.25~12.70), P (0.04~0.24) 및 Ba (0.07~1.01)의 함량은 높고 변화폭도 크다.

이들의 함량을 각각의 광산분포에 따라 나누어 보면 Al, Ti, Mg, K 및 Na의 함량은 한도광산과 부국광산의 수계에서 채취된 시료에서 다소 높은 특징이 있고, 환경유해원소 (평균 wt. %)인 Fe (10.07), Mn (0.15), Ca (0.84), P (0.18) 및 Ba (0.77)는 삼성제일탄광의 수계에서 채취된 시료가 높은 함량을 갖는다 (Fig. 3).

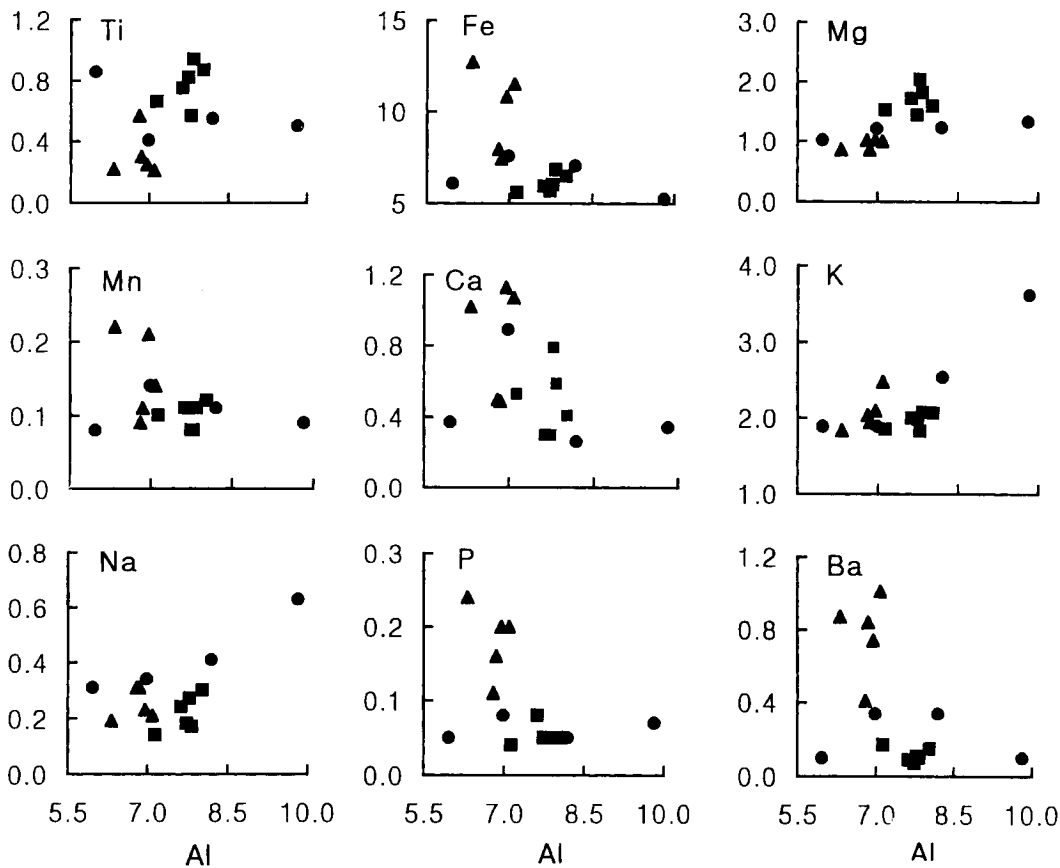
이 원소들의 함량을 Al의 조성변화에 따라 각각의 분산

관계도를 작성하면 (Fig. 3), Al의 함량이 증가함에 따라 Mg, K, Na는 증가하는 경향이 있다. 그러나 Ca, P와 Ba는 감소하는 경향이 뚜렷하며 Ti, Fe 및 Mn은 불분명한 관계를 갖는다. 따라서 Al의 함량이 낮을수록 환경유해원소의 함량도 낮은 것으로 추정된다.

**미량 및 독성원소**

니질퇴적암은 입도가 작을 뿐 아니라 점토광물을 포함하고 있어 환경지화학적으로 의미를 갖는 미량원소들이 농집될 수 있고, 특히 흑색 셰일에는 지각의 평균함량에 비하여 수십에서 수백배에 이르는 환경유해원소가 부화되어 있다 (Turekian, Wedepohl, 1961). 따라서 이로부터 유래된 환경유해원소는 하천의 잔류퇴적물에 존재하는 점토, 유기물 및 산화물에 흡착되거나 침전됨으로서 동식물 및 인간에게 잠재적인 독성원으로 작용하는 것이다 (Thornton, 1983).

이 연구지역에 분포하는 하상퇴적물의 미량원소를 검



**Fig. 3.** Variation diagrams for major element concentrations against Al contents in stream sediments at the Hoenam area, up the Taecheong lake. ■; Hando mine area, ●; Samsongieil mine area, ▲; Bugook mine area.

**Table 2.** Contents (ppm) of selected minor elements in stream sediments at the Hoenam area, up the Taechyeong lake.

No.	As	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Se	Sr	Th	U	V	Zn
<b>Hando mine area</b>																	
SS1-1	13	0.6	25	130	12	34	2	44	20	170	1.1	<3	44	14	5	144	129
SS1-2	9	<0.5	29	130	13	39	<2	50	20	170	0.9	<3	49	18	3	118	128
SS1-3	26	<0.5	25	110	11	34	<2	43	18	160	1.1	6	34	17	4	116	122
SS1-4	5	<0.5	23	120	11	34	<2	42	25	170	0.9	<3	38	18	4	118	114
SS1-5	14	<0.5	30	140	12	38	<2	47	25	190	1.2	<3	49	20	4	141	142
SS1-6	11	1.7	30	130	13	41	2	54	24	190	1.0	<3	42	19	6	135	200
mean	13	0.7	27	127	12	37	2	47	22	175	1.0	4	43	18	4	129	139
R1(20)	19	1.0	5	182	6	77	235	33	19	152	2.0	12	100	12	68	1668	139
<b>Samseongjeil mine area</b>																	
SS2-1	35	9.1	57	140	8	146	77	213	40	140	5.4	<3	87	22	64	655	885
SS2-2	4500	50.0	79	200	17	657	371	912	43	120	7.7	80	111	19	410	1578	3169
SS2-3	2700	88.5	110	230	16	627	234	1133	45	120	6.4	58	103	21	340	1261	4019
SS2-4	81	6.4	36	150	9	120	64	170	37	130	4.2	5	71	18	75	473	688
SS2-5	3100	112.1	120	220	13	684	263	1177	44	<15	7.6	60	109	22	360	1381	4401
mean	2083	53.2	80	188	13	447	202	720	42	105	6.2	41	96	20	250	1070	2632
R2(9)	8	7.0	4	264	13	180	227	24	23	182	3.0	17	92	8	14	3437	138
<b>Bugook mine area</b>																	
SS3-1	94	<0.5	30	140	11	33	<2	50	24	150	4.4	<3	44	21	5	110	140
SS3-2	47	<0.5	17	130	20	43	2	33	51	230	3.0	<3	63	17	5	155	134
SS3-3	87	14.7	53	110	10	261	264	375	45	130	4.4	18	85	19	500	327	1591
SS3-4	130	3.5	46	140	14	47	23	113	33	220	4.8	<3	51	22	88	155	504
mean	65	4.8	37	130	14	96	73	143	31	183	4.2	7	61	20	150	187	592
R3(13)	7	1.0	7	144	4	97	172	174	37	128	3.0	7	75	12	64	1918	446
R4(42)	13	2.0	6	188	6	87	214	72	25	154	3.0	12	92	11	55	2124	234
Shale	7	0.3	20	100	5	57	2	95	20	140	1.0	1	450	11	3	130	80

R1 (20); mean value of 20 metapelite samples near the Hando mine area, R2 (9) mean value of 9 metapelite samples near the Samseongjeil mine area, R3 (13); mean value of 13 metapelite samples near the Bugook mine area, R4 (42); mean value of 42 metapelite samples near the Hoenam area. Shale; average value of world wide shales by Gromet *et al.* (1984) and Rose *et al.* (1979).

토하기 위하여 분석된 시료에서 환경유해원소의 함량 (ppm)은 Table 2와 같다. 이중 Cr (110-230) 및 Sr (34-111)을 제외한 모든 원소는 부이상치를 갖고 있다. 특히 V (110-1578) 및 Ni (33-1177) 등의 함량은 아주 높으며, Co (<17-120), Cs (11-17), Se (<3-80), Th (14-22) 및 Rb (120-230) 등의 함량도 비교적 높고 조성의 변화폭도 크다. 또한 치명적인 독성원소의 함량도 (ppm) As; 5-4500, Cd; <0.5-88.5, Cu; 33-687, Mo; <2-371, Pb; 18-51, Sb; 09-7.7, U; 3-500 및 Zn; 114-4401 로서 높은 함량을 갖는다.

이들의 평균함량 (ppm)을 광산에 따라 세분하면, 삼성제일탄광의 수계에서 채취된 시료에서 As (2083), Cu (447), Mo (202), Ni (720), Pb (42), U (250), V (1070) 및 Zn (2632) 등이, 다른 광산의 수계에서 채취된 시료에 비하여 월등히 높다 (Fig. 4). 이들 대부분의 함량은 미국 환경청의 기준치 (Anon, 1977; Baudo, Muntau, 1990)를 수천배까지 초과하는 것이다.

이 환경유해원소의 함량을 U, V 및 Cu의 조성변화에 따라 각각의 분산관계를 보면, U의 증가에 따라 As, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, V 및 Zn의 함량이 증가하는 경향을 잘 보여준다 (Fig. 4). 또한 Cu가 증가함에 따라 As, Cd, Mo, Pb, U 및 Zn의 함량도 증가하며, V의 함량이 증가함에 따라 Mo, Cu 및 Zn의 함량도 증가하는 경향을 갖는다 (Fig. 5). 따라서 이 지역의 환경유해원소는 모두다 동일한 거동특성을 갖고 있음이 확인되었다.

#### 회토류원소

이 하상퇴적물의 회토류원소에 관한 조성은 Table 1과 같이 NASC의 평균함량에 비하여 전반적으로 높으며, 특히 삼성제일탄광의 주변에 분포하는 하상퇴적물에서 높은 경향이 있다. 각 광산의 수계에서 채취된 암석 및 하상퇴적물의 평균함량과 NASC의 회토류원소를 가지고 Haskin *et al.* (1968)의 운석 (chondrite) 값으로 표준화한 것을 살펴보면 Fig. 6과 같이 거의 동일한 변화상을



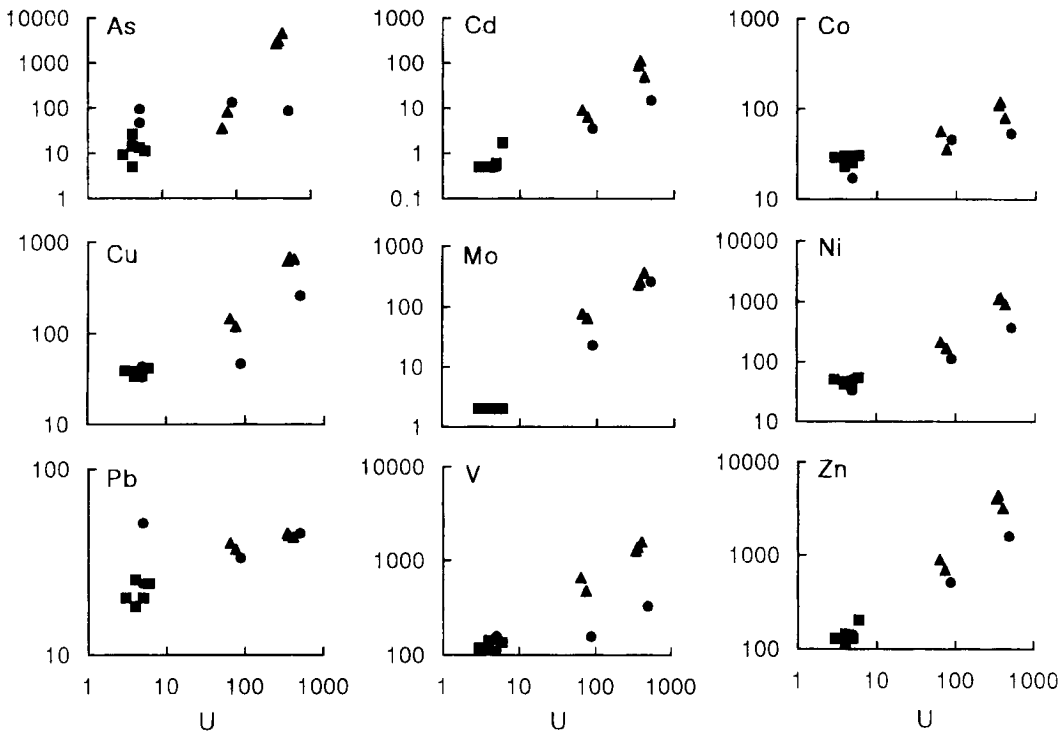


Fig. 4. Representative variation diagrams for minor element concentrations against U contents in stream sediments at the Hoenam area, up the Taechong lake. ■; Hando mine area, ●; Samsongjeil mine area, ▲; Bugook mine area.

갖는다. 그러나 환경유해원소와 희토류원소의 농집이 많은 삼성제일광산 및 부국광산의 수계에서 채취된 하상퇴적물에서는 한도탄광 주변의 시료에 비하여 전반적으로 부화된 경향을 보이며, 특히 LREE (La, Ce 및 Nd)가 높은 부화경향을 보인다.

#### 수소이온농도 (pH)

연구지역의 하상퇴적물과 하천수의 pH를 측정된 결과는 Table 3과 같다. 하천수의 pH는 6.06~7.59 (평균 6.84)로서 거의 중성에 가까운 범위를 보이고, 한도광산의 수계에서 약간 높은 특징이 있으나 각각의 수계 및 시료의 차이에 따른 변화는 없었다. 하상퇴적물의 pH는 4.92~6.93 (평균 6.22)이나, 중금속의 오염도가 심한 삼성제일탄광 (평균 6.70) 및 부국탄광 (평균 6.50) 수계의 시료들 보다 오히려 한도탄광의 시료에서 (평균 5.47) 낮은 약산성을 보인다. 한편 각각의 시료가 갖는 pH와 중금속 오염원소의 상관관계는 아무런 경향성이 없어 보이나, 이들은 앞으로는 상당한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

#### 부화계수 및 지수

기반암의 구성원소에 대한 하상퇴적물의 부화는 단일 원소에 의한 오염현상이라기 보다, 여러원소들이 복합적으로 일어나는 것이기 때문에 종합적인 부화정도의 평가가 이루어져야 한다. 따라서 연구지역의 기반암에 포함된 각각의 주성분, 미량 및 희토류원소의 함량을 NASC 및 전세계 흑색 셰일의 평균조성으로 (Gromet *et al.*, 1984; Rose *et al.*, 1979; Haskin *et al.*, 1968) 나누어, 이 원소들의 부화계수 (enrichment factor; EF)를 구하였다. 하상퇴적물에 관하여는 각각의 광산이 분포하는 지역의 기반암에 관한 평균조성 (이찬희 등, 1996; 1997; 이현구, 이찬희, 1996)과 NASC 평균값 (Gromet *et al.*, 1984; Rose *et al.*, 1979; Haskin *et al.*, 1968)으로 나누어 부화계수를 구하였다.

부화지수 (enrichment index; EI)는 다변수자료를 단순화시키기 위한 방법으로 각 시료의 분석치를 주원소, 미량원소, 환경유해원소, 희토류원소로 나누어 회남지역 기반암의 평균치, NASC (Gromet *et al.*, 1984) 및 미국 환경청 (Anon, 1977; Baudo, Muntau, 1990)의 자료로 표준화한 것을 산술평균치로 하였다 (Table 3). 따라서 1 이상인 경우는 부화지역으로, 1 이하는 비부화지역으로 나눌 수 있다.

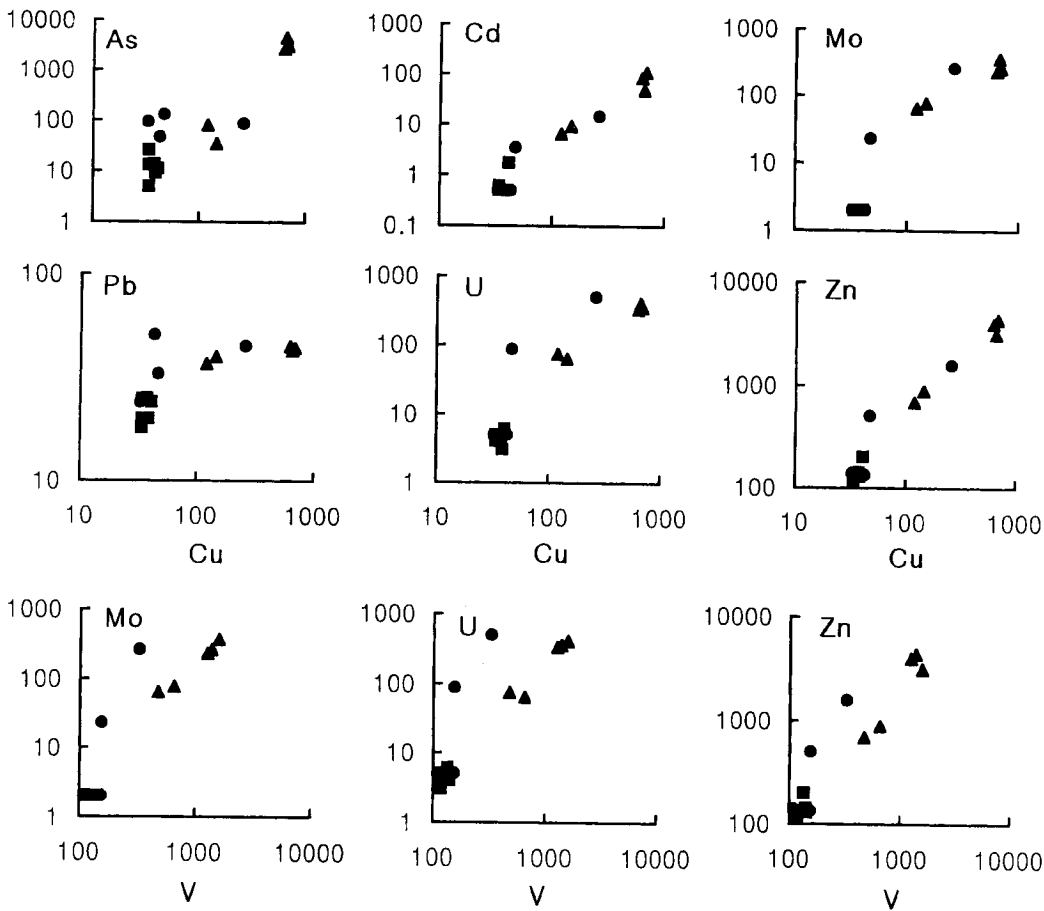


Fig. 5. Selected variation diagrams for minor element concentrations against Cu and V contents in stream sediments at the Hoenam area, up the Taecheong lake. ■; Hando mine area, ●; Samsongjeil mine area, ▲; Bugook mine area.

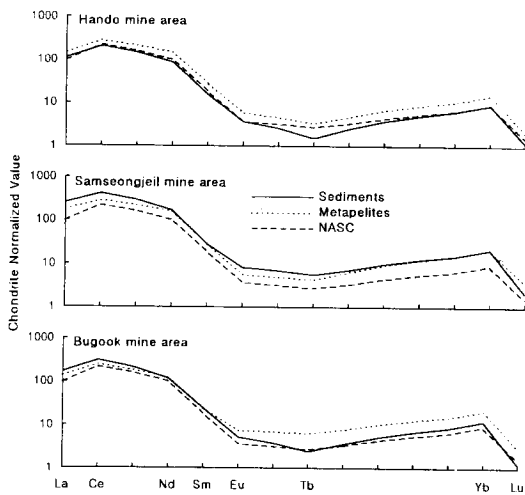


Fig. 6. Diagrams showing pattern of rare earth elements normalized chondrite in stream sediments at the Hoenam area, up the Taecheong lake.

**주성분 및 희토류원소**

회남지역에 분포하는 기반암의 주원소를 NASC의 평균 값으로 표준화한 결과, 광산의 위치와 관계없이 Ti와 Ba를 제외한 모든 주원소가 결핍되어 있고 특히 Ca는 상당히 부족함을 보여준다 (Fig. 7). 그러나 주원소의 부화지수는 평균 3.83 (한도탄광 주변암; 4.08, 삼성제일탄광 주변암; 4.39, 부국탄광 주변암; 3.01)로서 높은 이상치를 갖는다 (Table 4). 이는 결핍원소의 함량에는 큰 차이가 없으나 부화원소의 함량은 상대적으로 퇴적물내에서 아주 높는데 원인이 있다.

이 퇴적물의 주원소를 각각의 수계에 영향을 준 기반암으로 표준화한 것을 보면 (Fig. 7), Na, K 및 Ba를 제외한 모든 원소가 퇴적물내에 부화되어 있다. 특히 Ca가 상당히 부화되어 있고, 전체적인 부화지수는 평균 4.71 (한도탄광 수계; 4.47, 삼성제일탄광 수계; 7.39, 부국탄광 수계; 1.78)로서, 기반암에 비하여 높은 부이상치를 갖는다.

**Table 3.** pH and enrichment index of sediments at the Hoenam area, up the Taechong lake.

	Stream		Enrichment Index by Host Rocks			Enrichment Index by NASC and EPA			
	Sediment pH	Water pH	Major	Minor	REE	Major	Minor	REE	Toxic
<i>Hando mine area</i>									
SS1-1	5.37	7.05	4.47	0.98	0.55	4.18	1.34	0.81	2.62
SS1-2	5.22	6.98	5.91	1.03	0.68	3.66	1.29	1.00	2.53
SS1-3	4.92	6.65	3.72	1.09	0.56	4.65	1.52	0.82	3.31
SS1-4	5.24	6.74	3.33	0.91	0.62	4.85	1.22	0.91	2.17
SS1-5	5.89	6.74	4.22	1.11	0.66	5.32	1.42	0.95	2.88
SS1-6	6.18	6.38	5.14	1.27	0.65	5.53	1.70	0.95	2.86
mean	5.47	6.92	4.47	1.07	0.62	4.70	1.42	0.91	2.73
<i>Samseonjeil mine area</i>									
SS2-1	6.85	7.56	5.13	1.76	1.19	3.44	7.97	2.03	6.99
SS2-2	6.52	6.98	9.32	41.23	0.98	3.47	77.23	1.27	231.84
SS2-3	6.63	7.09	9.93	29.25	1.11	3.40	63.21	1.84	148.99
SS2-4	6.93	6.38	5.26	2.72	1.15	4.18	7.35	1.95	8.51
SS2-5	6.58	6.06	9.81	32.90	1.35	3.50	46.95	2.33	169.39
mean	6.70	6.81	7.89	21.57	1.16	3.60	40.54	1.88	113.14
<i>Bugook mine area</i>									
SS3-1	6.43	6.91	1.70	2.22	0.77	4.96	2.25	1.21	6.64
SS3-2	6.15	6.75	1.85	1.07	0.51	3.47	1.55	0.99	4.30
SS3-3	6.67	6.78	1.92	3.82	1.06	3.34	24.96	1.28	12.25
SS3-4	6.75	6.72	1.66	2.53	0.81	3.97	4.80	1.28	9.58
Average	6.22	6.84	4.71	8.35	0.85	4.08	16.78	1.33	41.35

또한 하상퇴적물의 주원소를 NASC로 표준화 하면 (Fig. 7), 퇴적물중에 Ti, Fe, Mg, Mn 및 Ba가 부화된 경향을 보인다. 이들의 부화지수는 평균 4.08 (한도탄광 수계; 4.70, 삼성제일탄광 수계; 3.60, 부국탄광 수계; 3.94)로서 높은 이상치를 갖는다 (Table 3, 4).

기반암의 희토류원소를 NASC의 평균값으로 표준화한 결과, 광산의 위치와 관계없이 모든 원소가 다소 부화되어 있다 (Fig. 8). 그러나 이 부화지수는 평균 1.58 (한도탄광 주변암; 1.46, 삼성제일탄광 주변암; 1.76, 부국탄광 주변암; 1.53)로서 광산에 따른 큰 차이는 없다 (Table 4). 하상퇴적물의 희토류원소 함량을 각각의 기반암으로 나누어 보면, 이 원소들의 대부분은 삼성제일탄광의 수계에 있는 퇴적물만이 부화 (평균 1.16)되어 있다. 이 퇴적물의 원소를 NASC로 표준화하면 (Fig. 8), 한도탄광 수계의 퇴적물만이 결핍 (평균 0.91)된 양상을 갖는다 (Table 3, 4). 따라서 퇴적물내에 포함된 희토류원소의 함량변화와 표준화된 부화계수 및 지수는 환경오염의 지표로 이용될 수 있음을 보여준다.

#### 미량 및 독성원소

이 지역에 분포하는 기반암의 미량 및 독성원소를

NASC의 평균값으로 표준화한 결과, 광산의 위치와 관계없이 Co, Ni, Sr을 제외한 모든 원소가 부화되어 있고 특히 Cd, Mo, Se, U, V 및 Zn은 상당히 부화되어 있다 (Fig. 9). NASC의 평균조성으로 계산된 기반암의 부화지수는 평균 10.55 (한도탄광 주변암; 10.77, 삼성제일탄광 주변암; 11.94, 부국탄광 주변암; 8.95)로서 아주 높은 이상치를 갖는다 (Table 3, 4). 따라서 이 탄질 변성니질암이 회남지역에 환경유해원소를 제공하는 중요한 근원암임을 입증하는 것이다.

이 원소들을 각각의 수계에 영향을 미친 기반암으로 표준화하면 (Fig. 9), 퇴적물의 일부는 기반암과 거의 비슷한 함량을 가지나 As, Cd, Co, Cs, Cu, Ni, Sb, Se, U 및 Zn 등의 독성원소는 부화된 값을 갖는다. 퇴적물의 기반암에 대한 전체적인 부화지수는 평균 8.35 (한도탄광 수계; 1.07, 삼성제일탄광 수계; 21.57, 부국탄광 수계; 2.41)로서 아주 높은 이상치를 갖는다. 이 퇴적물의 미량 원소를 NASC로 표준화한 것에서는 Sr과 Rb를 제외하고 모든 원소가 부화되어 있다 (Fig. 9). 이들의 부화지수는 평균 16.78 (한도탄광 수계; 1.42, 삼성제일탄광 수계; 40.54, 부국탄광 수계; 8.39)로서 상당히 높은 이상치를 가지며 (Table 3, 4), 삼성제일탄광의 수계에서 특히 높다.

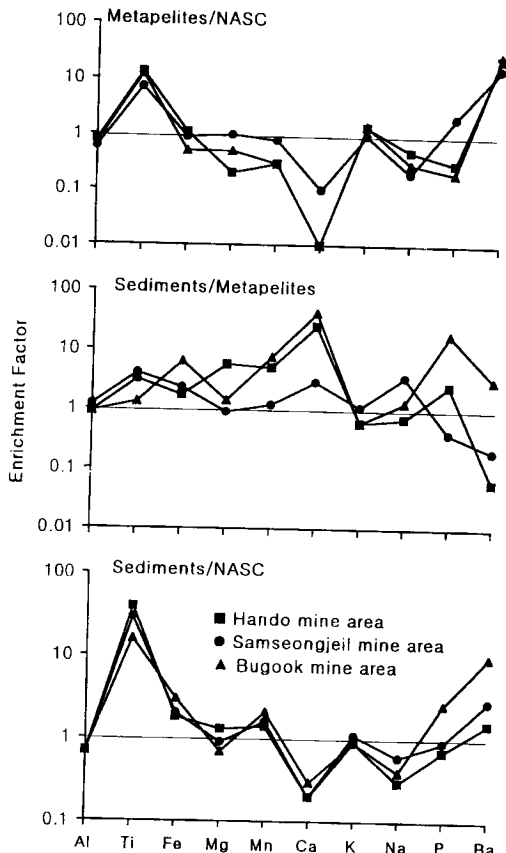


Fig. 7. Diagrams showing enrichment factor of major element concentrations in stream sediments at the Hoenam area, up the Taechong lake.

이 연구지역의 퇴적물에 대한 미국환경청 (EPA)의 7대 독성원소 (As, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb 및 Zn)를 기준으로 중금속 오염에 관한 부화지수를 구하였다. 이 결과 부화

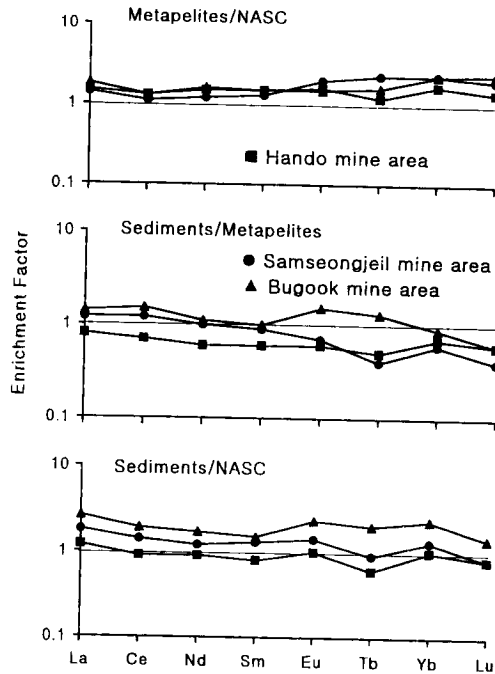


Fig. 8. Diagrams showing enrichment factor of rare earth element concentrations in stream sediments at the Hoenam area, up the Taechong lake. ■; Hando mine area, ●; Samseongjeil mine area, ▲; Bugook mine area.

지수의 평균값은 41.35 (한도탄광 수계; 2.73, 삼성제일탄광 수계; 113.14, 부국탄광 수계; 8.19)로서, 삼성제일탄광의 수계에서 특히 높다 (Table, 3, 4).

환경유해원소의 분포

이와 같이 대청호 상류의 회남지역에 분포하는 탄질 변성니질암에는 주원소, 미량 및 독성원소가 NASC와

Table 4. Summary of enrichment index of metapelite and sediments at the Hoenam area, up the Taechong lake.

Enrichment Index by Host Rocks			Enrichment Index by NASC and EPA				Enrichment Index Host Rock by NASC		
Major	Minor	REE	Major	Minor	REE	Toxic	Major	Minor	REE
<b>Hando mine area</b>									
4.47	1.07	0.62	4.70	1.42	0.91	2.73	4.08	10.77	1.46
<b>Samseongjeil mine area</b>									
7.89	21.57	1.16	3.60	40.54	1.88	113.14	4.39	11.94	1.76
<b>Bugook mine area</b>									
1.78	2.41	0.78	3.94	8.39	1.19	8.19	3.01	8.95	1.53
<b>Average</b>									
4.71	8.35	0.85	4.08	16.78	1.33	41.35	3.83	10.55	1.58

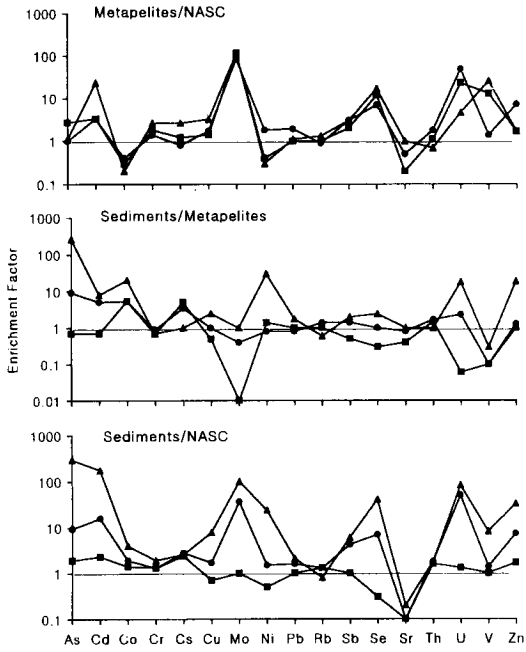


Fig. 9. Diagrams showing enrichment factor of minor and toxic element concentrations in stream sediments at the Hoenam area, up the Taecheong lake. ■; Hando mine area, ●; Samseongjeil mine area, ▲; Bugook mine area.

EPA의 평균함량에 비하여 상당히 부화되어 있어 환경유해요소로 작용하고 있다. 이들을 광산과 수계에 따라 나누고 주성분, 미량, 독성 및 회투류원소로 세분하여 각각의 부화지수를 구하면 삼성제일광산의 수계에서는 심각한 오염현황을 보여주고 있고, 부국광산의 수계도 상당한 오염지수를 갖는다 (Fig. 10). 이 원소들의 평균함량은 환경기준치를 크게 초과하는 것으로서 세계적으로 볼 때, 대규모 광산 및 광업활동 (선광 및 제련) 지역의 오염도와 거의 비슷한 수준이다 (Aston, Thornton, 1977; Boulton, et al., 1994; Fuge et al., 1989). 특히 삼성제일탄광의 상류에는 또다른 오염원 (보은제일탄광)이 있어 상당히 심각한 오염도를 보이고 있는 것으로 판단된다.

대청호는 수력발전, 농업 및 공업용수로 이용되기도 하나, 대전과 청주 및 남부 충청권의 상수원으로도 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나 대청호 주변과 상류의 지질은 회남지역과 같이 탄질 변성니질암을 협재한 옥천누층군의 암석이 대부분을 점유하고 있기 때문에, 잠재적인 오염원을 완전히 제거하기는 불가능한 것이 현실이다. 따라서 이 연구는 환경오염원으로서의 기반암과 기반암의 풍화산물인 퇴적물에 관하여 환경유해원소의 거동, 분산 및 부화를 고찰한 것이다.

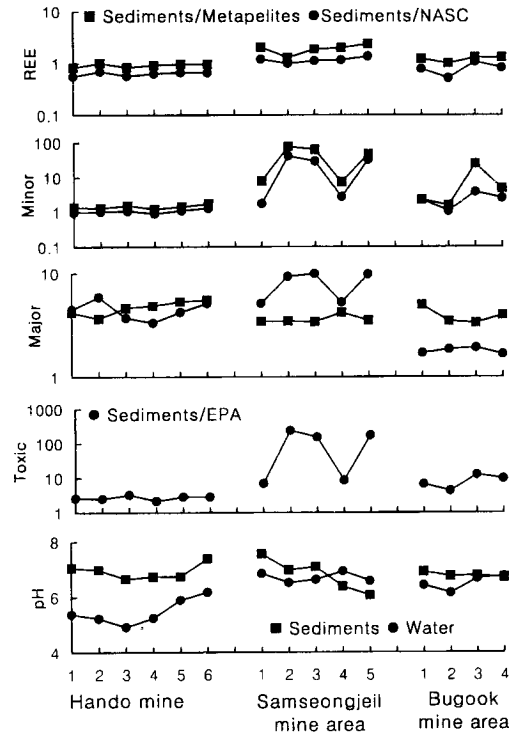


Fig. 10. Diagrams showing pH and enrichment index of major, minor, rare earth and toxic elements normalized by host metapelites, NASC and EPA in stream sediments at the Hoenam area, up the Taecheong lake.

이 결과 회남지역중에 폐탄광이 분포하는 수계를 따라 대청호로 유입되는 하천은 심각한 수준의 오염이 있는 것으로 규명되었다. 그러나 수계내의 토양, 하천수, 호수퇴적물 및 호수에 관한 유해원소의 특성과 거동은 연구되지 않았기 때문에, 어느정도의 오염원소들이 기반암에서 출발하여 자정작용을 거친후에 호수로 유입되었는지는 불분명하다. 이 문제와 오염확산 및 개선방안에 관하여는 앞으로도 연구가 있을 것이다.

결 언

1. 대청호 상류, 회남지역에는 저품위 탄층을 함유한 옥천누층군의 변성니질암이 분포한다. 이 탄층은 10~300 cm로 팽창하며 모암과 평행하게 수백여 m 단속적으로 발달한다. 이 지역에는 위의 탄층을 대상으로 개발한 한도탄광, 삼성제일탄광 및 부국탄광이 있었으나, 현재는 모두 폐광되어 방치된채 환경오염원으로 작용하고 있다.

2. 이 탄질 변성니질암에 함유되어 있는 환경유해원소의 함량 (42시료의 평균함량)은 As (13 ppm), Ba (1.81

wt. %), Cd (2 ppm), Cr (188 ppm), Cu (87 ppm), Mo (214 ppm), Pb (25 ppm), Sb (3 ppm), Se (12 ppm), U (55 ppm), V (2124 ppm), Zn (234 ppm) 로서 NASC에 비하여 월등히 높다.

3. 퇴적물내 Al, Ti, Mg, K 및 Na의 평균함량 (wt. %) 은 한도 및 부국광산의 수계에서 채취된 시료에서 높고, Fe (10.07), Mn (0.15), Ca (0.84), P (0.18) 및 Ba (0.77)는 삼성제일탄광의 수계에서 채취된 것에서 높다. 이들은 Al의 증가에 따라 Mg, K, Na는 증가하고 Ca, P와 Ba는 감소하며 Ti, Fe와 Mn은 불분명한 관계를 갖는다.

4. 환경유해원소의 평균함량 (ppm)은 삼성제일탄광의 수계에서 채취된 시료에서 As (2083), Cu (447), Mo (202), Ni (720), Pb (42), U (250), V (1070) 및 Zn (2632)의 함량이 특히 높다. 이 원소들의 대부분은 EPA 기준치를 수천배까지 초과하며 U, V 및 Cu의 함량과 동일한 분산 및 거동특성을 갖는다.

5. 하상퇴적물의 희토류원소는 오염도가 심한 수계에서 LREE (La, Ce 및 Nd)가 부화된 경향을 갖는다. 하천수의 pH는 중성에 가까운 범위를 보이나, 퇴적물의 pH는 4.92~6.93 (평균 6.22)로서 한도탄광의 시료에서 약산성을 보인다.

6. 이 지역의 기반암은 NASC에 비하여 Ti와 Ba를 제외한 모든 주원소가 결핍되어 있고 특히 Ca는 상당히 결핍되어 있다. 각 광산의 수계에 분포하는 퇴적물의 주원소중에 Ti, Fe, Mg, Mn 및 Ba는 상당히 부화되었으며 Al, K, Ca, Na, P는 결핍되어 있다.

7. 이 기반암의 독성원소중에 Co, Ni, Sr을 제외한 모든 원소가 부화되어 있고 Cd, Mo, Se, U, V 및 Zn은 상당히 높은 부이상치를 갖는다. 이 퇴적물의 독성원소 (As, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn)에 대한 부화지수는 평균 41.35 (한도탄광 수계; 평균 2.73, 삼성제일탄광 수계; 113.14, 부국탄광 수계; 8.19)로서 심각한 오염상태를 보인다.

## 사 사

이 연구는 한국과학재단 후원 전략광물자원연구센터의 1997년도 연수지원 연구비에 의하여 이루어 졌음을 명기하며 이에 깊이 감사한다. 일부는 한국학술진흥재단 공모 과제 연구비 (과제번호: 01-D-0315)의 지원을 받았다. 이 논문의 원고에 관하여 심도있는 심사와 고견을 피력하여 주신 서울대학교 자원공학과와 전효택교수님께 감사드리며, 또한 야외조사, 시료채취 및 실내실험을 도와준 충남대학교 지질학과와 신미애 석사, 고재현 및 박정희 학사에게도 사의를 표한다.

## 참고문헌

- 김옥배, 전용원 (1980) 옥천계 함우라늄 탄층중에 존재하는 우라늄의 성인에 관한 연구. 대한광산학회지, 17권, p. 57-66.
- 김옥준, 이대성, 이하영 (1977) 한국지질도, 보은도폭 및 설명서. 한국자원개발연구소, 35p.
- 김윤규, 이대성, 송윤구, 김선익 (1988) 보은지역 조곡리 현 무암에 함유된 초염기성 포획암의 암석학. 지질학회지, 24권, 특별호, p. 57-66.
- 김현철, 조문섭, 고희재 (1995) 증평-덕평 지역에 분포하는 중부 옥천변성대의 변성 지구조적 진화. 지질학회지, 31권, p. 299-314.
- 박봉순, 소철섭 (1980) 한반도 옥천대에 분포하는 함우라늄 층의 지질구조규제 및 조성광물과 우라늄 분포와의 상관관계 연구. 광산지질, 13권, p. 215-227.
- 이대성, 윤석규, 이종혁, 김정택 (1986) 옥천대 우라늄광층의 구조규제 및 지구화학적 특성연구. 광산지질, 19권, 특별호, p.19-41.
- 이민성, 전효택 (1980) 옥천대 함우라늄 지층중의 우라늄과 타성분과의 상관관계. 광산지질, 13권, p. 241-246.
- 이상만, 박희인, 김수진, 박봉순, 이상현 (1981) 괴산군 덕평 지역 변성퇴적암내에 배태된 우라늄광상의 성인. 지질학회지, 17권, p. 53-68.
- 이진수, 전효택, 김경용 (1996) 충주지역 흑색세일 분포지역에서의 잠재적 독성원소들의 분산과 부화. 자원환경지질, 29권, p. 495-508.
- 이찬희, 이현구, 신미애 (1996) 회남지역 옥천누층군의 변성 니질암내에 분포하는 바나듐을 함유한 탄층의 지구화학적 특징. 자원환경지질, 29권, p. 471-481.
- 이찬희, 이현구, 신미애 (1997) 회남지역 옥천누층군의 탄질 변성니질암에서 산출되는 바륨-바나듐 백운모 (바나듐-오엘라체라이트). 지질학회지, 33권 (인쇄중).
- 이현구, 이찬희 (1996) 회남지역의 옥천누층군에 분포하는 탄질 변성니질암의 미량 및 희토류원소 지화학. 자원환경지질, 29권, p. 689-698.
- 전효택, 정명채 (1991) 함우라늄 흑색세일 분포지역에서의 유독성 원소들의 분산에 관한 지구화학적 원소. 광산지질, 25권, p. 245-260.
- Anon, J. (1977) Ecological evaluation of proposed discharge of dredged or fill material into navigable water. Interim Guidance for Implementation of Section 404 (b), Public Law, p. 92-500.
- Aston, S.R. and Thornton, I. (1977) Regional geochemical data in relation to seasonal variations in water quality. Sci. Tot. Environ., v. 7, p. 247-260.
- Baudo, R. and Muntau, H. (1990) Lesser known in-place pollutants and diffuse source problems. In Baudo, R. (ed.), Sediments: Chemistry and Toxicity of In-place Pollutants. Lewis Pub. Inc., p. 1-14.
- Bell, R.T. (1978) Uranium in black shale (a review) in uranium deposits, their mineralogy and origin. University of Toronto Press, Toronto, p. 307-329.
- Boult, S., Collins, D.N., White, K.N. and Curtis, C.D. (1994) Metal transport in a stream polluted by acid mine drainage the Afon Goch, Anglesey, UK. Environ. Pollut., v. 84, p. 279-284.
- Breger, I.A. (1958) Geochemistry of coal. Econ. Geol., v. 53, p. 923-941.
- Chon, H.T., Cho, C.H., Kim, K.W. and Moon, H.S. (1996) The occurrence and dispersion of potentially toxic elements in areas covered with black shales and slates

- in Korea. *Applied Geochem.*, v. 11, p. 69-76.
- Cluzel, D., Cadet, J.P. and Lapierre, H. (1990) Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, v. 183, p. 41-56.
- Fix, C.E. (1958) Selected annotated bibliography of the geology and occurrences of uranium-bearing marine black shales in the United State. U.S.G.S. Bull., 1059-F. p. 263-325.
- Fuge, R., Paveley, C.F. and Holdham, M.T. (1989) Heavy metal contamination in the Tanat valley, North Wales. *Environ. Geochem. Health*, v. 11, p. 127-135.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A. and Korotev, R. L. (1984) The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 48, p. 2462-2482.
- Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frey, F.A. and Wildeman, T. T. (1968) Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: Ahrens, L.H. (ed.), *Origin and Distribution of the Elements*, 1. Pergamon, Oxford, p. 889-911.
- Kim, J.H. (1989) Geochemistry and genesis of the Guryongsan (Ogcheon) uraniferous black slate. *Jour. Kor. Inst. Mining Geol.*, v.22, p.35-63.
- Kim, K.W. and Thornton, I. (1993) Influence of Ordovician uraniferous black shales on trace element composition of soils and food crops in Korea. *Applied Geochem.*, Suppl. Issue, 2, p. 249-255.
- McLennan, S.M., Nance, W.B. and Taylor, S.R. (1980) Rare earth elements-thorium correlations in sedimentary rocks, and the composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 44, p. 1833-1839.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979) *Geochemistry in Mineral Exploration*. 2nd ed., Academic Press, London, 657p.
- Rump, H.H. and Krist, H. (1988) *Laboratory manual for the examination of water, waste water and soil*. VCH Verlagsgesellschaft, 190p.
- Salomons, W. (1995) Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention. *Jour. Geochem. Explor.*, v. 52, p. 5-23.
- Schuling, R.D. (1990) Geochemical engineering: some thoughts on a new research field. *Applied Geochem.*, v. 5, p. 251-262.
- Szilagyi, M. (1971) The role of organic material in the distribution of Mo, V and Cr in coal fields. *Econ. Geol.*, v. 66, p. 1075-1078.
- Thornton, I. (1983) *Applied Environmental Geochemistry*. Academic Press, London, 501p.
- Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H. (1961) Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 72, p. 175-192.
- Vine, J.D. and Tourtelot, E.B. (1970) *Geochemistry of black shale deposits - a summary report*. *Econ. Geol.*, v. 65, p. 253-272.

---

1997년 3월 29일 원고접수