

보은제일광산일대의 발토양에 대한 독성원소들의 분산과 부화

유봉철¹ · 김기중¹ · 이찬희² · 이현구^{1*}

¹충남대학교 지구환경과학과, ²공주대학교 문화재보존과학과

Dispersion and Enrichment of Potentially Toxic Elements of Farmland Soils from the Boeunjeil Mine Area, Korea

Bong Chul Yoo¹, Ki Jung Kim¹, Chan Hee Lee² and Hyun Koo Lee^{1*}

¹Department of geology and environmental sciences, Chungnam National University

²Department of cultural heritage conservation sciences, Kongju National University

The study is for contaminations of major, rare earth and trace elements of the farmland soils from the Boeunjeil mine area. The results are compared with the soils of Chungjoo, Deokpyeong, Boeun and Chubu areas. Fe and S contents of the contaminated area are high relative to those from the uncontaminated areas, Chungjoo and Boeun areas. Trace elements of the contaminated area are high relative to those from uncontaminated area, Chungjoo, Deokpyeong, Boeun and Chubu areas. The trace elements are divided into Cd, Ni, Sr, U, V, Zn and As, Co, Cu, Mo, Pb, Sb, based on these dispersion and correlation. Two groups show the positive correlation. Enrichment factor of potentially toxic elements from contaminated area is >5 value, but <4 value in the uncontaminated area. In the geoaccumulation index of the minor elements, the contaminated area has >1 value and the uncontaminated area has <1 value except Mn. Enrichment index of potentially toxic elements(As, Cd, Co, Cu, Ni, U, Zn) ranges from 0.3 to 87.0 in the contaminated area and from 0.4 to 3.9 in the uncontaminated area. Overall results show that the high contents of farmland soils for the elements(Fe, S, As, Cd, Co, Cu, Ni, U, Zn) indicate the contamination by coal-related activities.

Key words : Boeunjeil mine area, farmland soils, toxic element, enrichment factor, geoaccumulation index

이 연구에서는 보은제일광산 주변 발토양의 오염정도를 주원소, 희토류원소 및 미량원소를 이용하여 접근해보았다. 이들 연구결과는 충주, 덕평, 보은 및 추부지역의 것들과 비교되었다. 주성분 원소 중 Fe와 S는 비오염예상지역, 충주 및 보은지역 발토양의 원소보다 높았다. 오염예상지역에서의 미량원소는 비오염예상지역, 충주, 덕평, 보은 및 추부지역의 함량보다 높았다. 이들 원소들은 상관성과 분산을 기초로 U, Cd, Ni, Sr, V, Zn 등의 원소들과 As, Co, Cu, Mo, Pb, Sb 등의 원소들로 구분되며 두 그룹의 원소들은 원소간에 양의 상관성을 갖는다. 잠재적 독성원소들의 부화계수는 오염예상지역에서 5 이상의 값을 갖으며 비오염예상지역에서는 4 미만의 값을 갖는다. 오염예상지역에서 As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, U 및 Zn 원소의 지능지수는 1 이상의 값을 갖으며, 비오염예상지역에서는 Mn원소를 제외한 모든 미량원소가 1 미만의 값을 갖는다. 잠재적 독성원소에 대한 부화지수에서 오염예상지역(0.3~87.0)과 비오염예상지역(0.4~3.9)은 차이를 보였다. 전체적인 오염예상지역 발토양내 원소들(Fe, S, As, Cd, Co, Cu, Ni, U, Zn)의 높은 함량은 광산활동에 의한 오염을 지시한다.

주요어 : 보은제일광산, 발토양, 독성원소, 부화계수, 지능지수

1. 서 언

현재 우리나라에는 보은제일광산과 같은 2000여 개

의 휴·폐금속 및 석탄광산이 존재한다(Coal Industry Promotion Board, 1995). 이 광산들의 대부분은 폐광된 상태로 방치되어 있으며 광산개발 당시 발생한 광

*Corresponding author: phklee@cnu.ac.kr

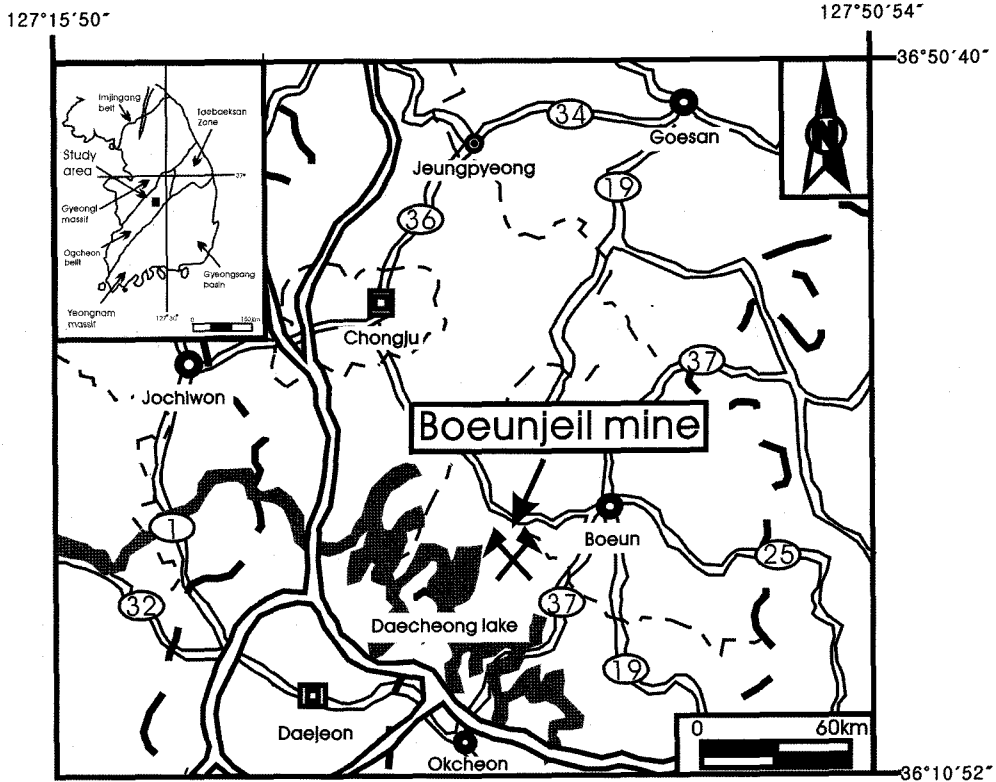


Fig. 1. Location map of the Boeunjeil mine.

산 폐석 및 폐갱구 등이 그대로 방치되어 있어, 광산 주변의 토양 및 수계를 오염시키고 있다. 지구화학적 환경에서 중금속 원소들의 분산과 거동 및 부화는 암석과 광석으로부터 토양, 퇴적물, 순환수를 따라 이동하며, 각각의 환경계의 자정능력을 초과할 때 유해한 물질이 부화되어 생태계에 영향을 미칠 수 있다(Davies and Balinger, 1990). 최근 많은 언론매체에서 전국의 휴·폐금속 및 석탄광산일대의 경작토양에서 재배한 농작물들의 일부가 중금속에 오염되어 전량 폐기되었다는 보고가 있었다.

보은제일광산은 행정구역상 충청북도 보은군 회남면 북위 $36^{\circ}26'32''$, 동경 $127^{\circ}36'23''$ 부근에 위치한다 (Fig. 1). 이 광산은 보은탄전, 13개 광산 중의 하나이며 1954년부터 채광을 시작하였으나 채산성 악화에 인하여 1991년에 폐광된 광산이다.

보은제일광산은 대청호 상류지역에 위치하며 채광후 폐광의 관리 소홀에 의해 강도, 채굴적, 광폐석 및 선광잔해물이 방치되어 있다. 이들은 지표수나 바람에 의하여 인접 토양 또는 대청호로 유입되고 있으며 광산 인근지역의 하천은 황철석의 산화로 인한 엘로우보이

(Yellowboy) 현상과 알루미늄 수산화물의 침전으로 인한 백색침전이 두드러지게 나타나고 있다. 이런 퇴적물 오염은 지표수와 반응하여 가수분해, 수화 또는 산화/환원 등과 같은 반응과정을 통해 농작물 및 생태계에 잠재적인 영향을 미칠 수 있다(McBride, 1994). 이는 점오염원으로서 수계를 따라 이동되며 하천 생태계와 반응을 하여 독성 및 유해중금속을 부화 시킬 것이다.

보은제일광산의 모암인 옥천누층군의 함탄질 흑색세일은 백악기의 퇴적암에 비해 많은 유해중금속을 함유하고 있다. 기존의 연구로 충주, 덕평, 회남, 보은 및 추부지역일대에 분포하는 흑색세일 및 폐탄광에 대한 잠재적 독성원소들의 분포형태 및 분산특성(Kim, 1993; Lee and Lee, 1996; 1997a; Lee et al., 1996b; 1997; Chon et al., 1997; Kim and Chon, 1997; Lee and Lee, 1997b)과 흑색세일에 관련된 광물·광상학적 접근(Kim and John, 1980; Lee, 1986; Kim, 1989)이 있다. 그러나 보은제일광산일대의 환경지구화학적 연구로는 이 광산일대의 지표수에 의한 오염과 관련하여 Chon et al.(2001)의 연구가 있을 뿐 광산폐석

에 의한 인근지역 발토양의 주원소와 미량원소 특성 및 오염정도 연구는 아직까지 규명되어 있지 않다.

따라서 이 연구는 다른 지질학적 물질에 비해 잠재적 독성원소들이 상대적으로 높은 옥천누층군의 흑색 셰일내 탄층을 채굴한 보은제일광산 주변지역의 발토양을 대상으로 폐광에 따른 환경유해원소의 분산, 거동 및 부화를 고찰하였고 이를 옥천누층군내 타 연구지역의 자료와 비교하였다. 이 결과는 환경유해원소의 함량이 환경에 미치는 영향을 파악할 수 있는 기초자료로 제시하고자 한다.

2. 주변지질

보은제일광산일대의 주변지질은 기존연구(Lee *et al.*, 1996a; Lee and Lee, 1997a)에서 보고되어 있는 바, 여기에서는 간략하게 그 개요만을 설명하고자 한다. 이 광산에는 시대미상의 옥천누층군인 변성퇴적암, 고생대의 국사봉층, 시대미상의 현무암질암, 백악기 산성암맥 및 제4기의 충적층이 분포한다(Fig. 2).

옥천누층군은 하부로부터 문주리층, 창리층 및 황강리층으로 구성된다. 문주리층은 광산의 남동측 및 북서측에서 NE-SW방향으로 분포하며 주로 변성사질암이나 부분적으로 변성이질암이 협재된다. 이 층의 엽리 방향은 주향 N10~45°E, 경사 35~75°NW이다. 창리층은 광산의 북서측에서 NE-SW방향으로 분포하며 주로

변성이질암으로 구성되어 있으나, 곳에 따라 층준에 단속적으로 흑연질 셰일과 돌로마이트질 석회암이 협재된다. 이 층의 엽리의 주향은 N25~35°E, 경사는 60~70°NW이다. 황강리층은 남동측에서 NE-SW방향으로 분포하며 변성합력이질암과 박층으로 연장성이 양호한 석회질암으로 구성된다. 역의 직경은 수 mm~30cm 정도이나 대부분은 10cm 미만이다. 역은 규암, 천매암, 석회암, 편마암 등으로 구성되며 원마도는 불량하다.

국사봉층은 흑색 점판암, 천매암과 박층의 석회질암, 흑연질 셰일 및 탄층으로 구성된다. 탄층은 단속적으로 발달하는데 보통 3~6매 정도이고 폭은 0.1~3m의 범위를 보이나 대부분은 1 m 내외이다. 이 층의 엽리는 일반적으로 N5~45°E의 주향과 35~70°NW의 경사를 가지나 소습곡에 의해 상당히 교란되어 있다. 이 층은 원래 옥천누층군의 창리층으로 인정되었던 지층이나 보은도폭에서는 평안누층군에 대비되는 층으로 설정하고 국사봉층으로 명명하였다(Kim *et al.*, 1977).

현무암질암은 광산 인근에 분포하며 감람석 및 외래암편이 포획되어 있다. 현무암은 회색 내지 암녹색의 괴상으로 산출되며 감람석, 휘석 및 사장석으로 구성되어 있다. 산성암맥은 광산의 북동측에서 NS방향으로 분포한다.

보은제일광산은 폐광된 이후로 광산개발 당시 발생한 광산 폐석 및 폐갱구 등이 그대로 방치되어 있어 광산 주변의 토양 및 수계를 오염시키고 있다(Fig. 3-

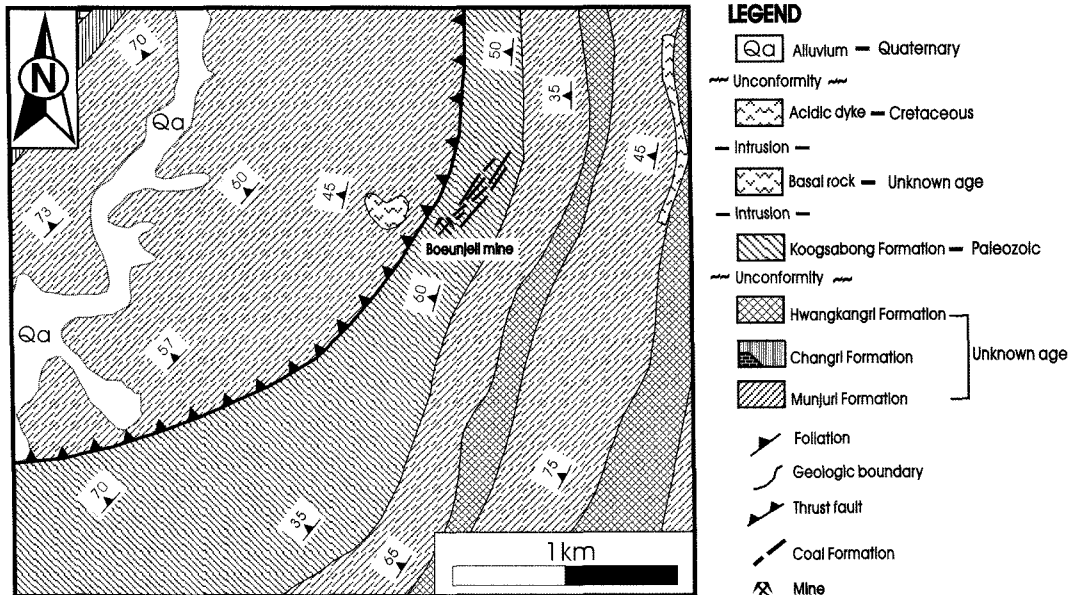


Fig. 2. Geological map of the Boeunjeil mine(Modified from Kim *et al.*, 1977).

A, B, C). 또한 일부 수계에서는 알루미늄 수산화물의 침전으로 인한 백색침전이 두드러지게 나타나고 있다 (Fig. 3-D).

3. 시료채취 및 분석

밭토양 시료채취지역은 지질 및 지형조건 등을 고려

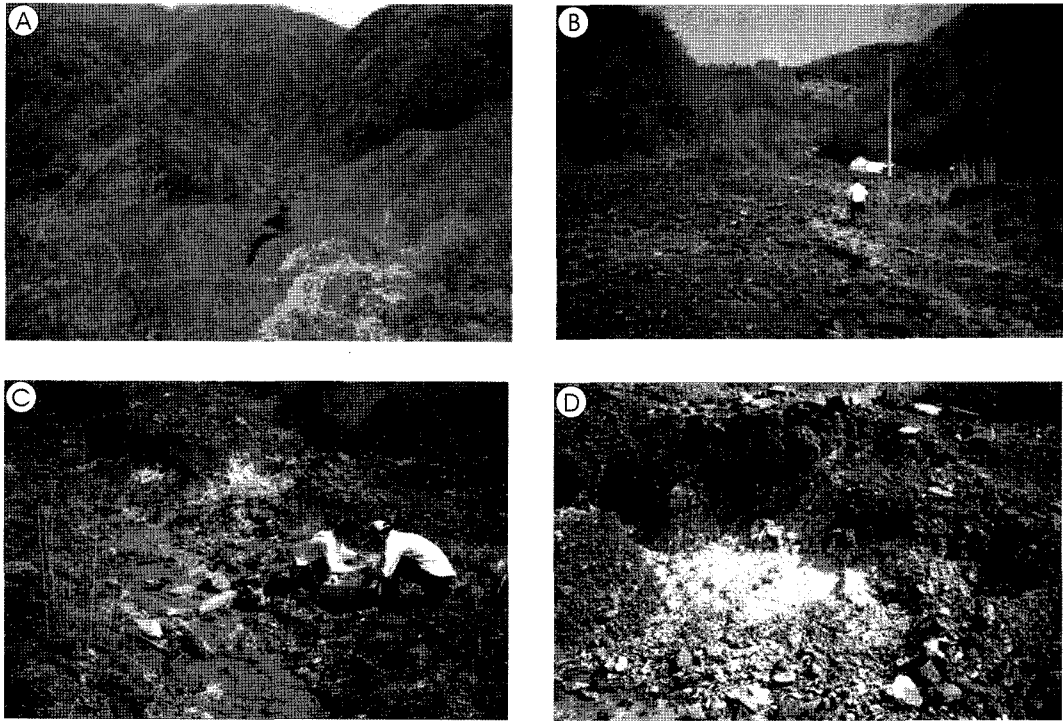


Fig. 3. Photographs showing waste rock and coal dump of the Boeunjeil mine area (A, B, C), white precipitates around the Boeunjeil mine drainage or farmland soil (D).

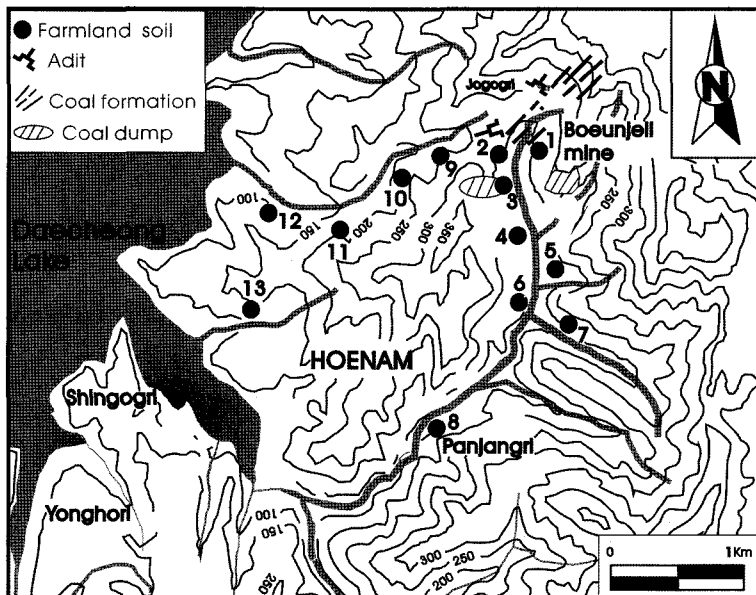


Fig. 4. Location map of farmland soil samples in the Boeunjeil mine area.

하여 광산활동의 영향을 받는 지역(오염예상지역)과 받지 않는 지역(비오염예상지역)으로 구분하였다. 시료는 상류에서 하류방향으로 균일하게, 오염예상지역 8개와 비오염예상지역 5개를 채취하였다(Fig. 4). 발토양 시료들은 오거를 이용하여, 1m 간격의 격자상으로 9지점에서 채취하고 이를 합하여 하나의 완전한 시료로 하였다. 발토양 시료는 500g을 채취하여 폴리에틸렌 봉지에 넣어 보관하였다. 채취된 시료는 자연건조시킨 후 -10 mesh(<2 mm)로 체질하고 축분법을 이용하여 취한 시료를 -80 mesh(<180 μm)의 입도로 준비하였다. 화학분석은 준비된 시료에 대해 캐나다의 ACTLABS와 충남대학교 공동실험실습관의 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)와 중성자 활성분석기(INNA)를 이용하여 정량분석 하였다.

4. 연구결과 및 토의

4.1. 주성분원소

일반적으로 오염예상지역과 비오염예상지역의 발토양에 대한 주성분 원소의 조성변화는 큰 차이가 없으나 일부 오염예상지역에서 Fe와 S 원소가 높게 나타난다(Table 1). 각각을 살펴 보면 시료채취 2지점에서

Fe와 S 원소가 높게 나타나는데 이것은 황철석의 영향으로 생각된다. 오염예상지역과 비오염예상지역의 발토양에서 주성분 원소 중 Fe, Mg 및 K를 Bowen(1979)와 Sparks(1995)가 제시한 자연토양 내 원소함량과 비교해 높았다. 이들 원소 중 특히 높은 함량을 갖는 Fe는 충주지역 토양(Lee *et al.*, 1996b)과 보은지역 토양(Lee *et al.*, 1997)보다 높게 나타난다. 조사지역의 탄층 및 탄층을 수반하는 변성이질암(Lee and Lee, 1997a)의 주성분 원소 중 Fe는 충주, 덕평 및 보은지역의 세일(Chon *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1996b; 1997)보다 높은 함량을 갖는 것으로 보아 모암 및 광석광물에서 유래되었음을 알 수 있다.

오염예상지역의 광산 상류에서 하류로 감에 따라 그 함량을 도시하면, 주성분원소는 두가지 유형의 변화 형태를 보여준다(Fig. 5-A). 첫 번째 변화 유형을 갖는 원소들은 광산 일대에서 그 함량이 급격히 증가한 후, 하류로 감에 따라 그 함량이 감소하는 Fe와 S원소들이 있다. 두 번째 변화 유형을 갖는 원소들은 광산 일대에서 그 함량이 감소하나 하류로 감에 따라 그 함량이 증가하는 Al, Ti, Mg, Ca, K, Na 및 P원소들이 있다. 비오염지역은 상류에서 하류로 감에 따라 함량을 도시하여 보았지만 주성분원소는 일정하거나 감소

Table 1. Concentrations of major and rare earth elements in farmland soils from the Boeunjeil mine area.

No.	Major element (wt.%)									Rare earth element (ppm)							
	Al	Ti	Fe	Mg	Ca	K	Na	P	S	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
1	9.71	0.50	7.25	1.53	1.00	3.65	0.77	0.11	0.60	37	69	18	4	0.9	<0.5	3.6	0.56
2	0.82	0.02	26.30	0.06	0.24	0.39	0.02	0.01	19.20	5	7	5	1	1.1	<0.5	0.9	0.08
3	7.97	0.42	6.42	1.71	0.75	1.94	0.44	0.10	0.09	66	150	64	11	2.5	1.7	4.6	0.84
4	7.36	0.54	7.35	2.03	0.75	1.82	0.23	0.05	0.10	49	90	47	8	1.8	<0.5	4.3	0.70
5	6.91	0.31	6.48	1.27	1.07	2.18	0.22	0.15	0.38	74	113	46	6	1.9	1.2	5.2	0.72
6	7.11	0.35	8.11	1.39	1.01	2.03	0.21	0.13	0.77	75	166	87	12	2.2	1.5	5.3	0.50
7	6.69	0.40	3.87	1.03	0.29	2.19	0.43	0.08	0.03	43	76	29	6	1.0	0.7	2.9	0.36
8	8.19	0.38	5.10	1.03	0.34	2.41	0.40	0.23	0.05	50	118	40	8	1.9	<0.5	4.0	0.69
Mean	6.85	0.37	8.86	1.26	0.68	2.08	0.34	0.11	2.65	49.9	98.6	42	7	1.7	0.9	3.9	0.56
9	10.15	0.77	7.06	2.83	0.80	2.41	0.10	0.04	0.01	48	80	36	7	1.5	1.0	3.3	0.45
10	8.77	0.66	6.70	2.49	0.98	2.33	0.34	0.07	0.04	37	70	34	6	1.6	1.0	3.7	0.61
11	7.48	0.73	6.47	2.34	0.80	2.03	0.30	0.10	0.03	34	62	32	5	1.1	0.9	3.2	0.43
12	9.68	0.65	7.17	2.37	0.92	2.39	0.27	0.06	0.02	44	82	44	7	1.7	1.0	3.8	0.52
13	8.57	0.70	6.88	2.10	1.00	2.09	0.40	0.05	0.02	42	85	36	6	1.5	<0.5	3.7	0.57
Mean	8.93	0.70	6.86	2.43	0.90	2.25	0.28	0.06	0.02	41	75.8	36.4	6.2	1.5	0.9	3.5	0.52
WR ¹⁾	7.48	0.21	2.95	0.76	0.07	3.00	0.21	0.06	0.05	51	89	47	9	2.3	1.5	6	1.0
Shale ²⁾	10.45	0.02	3.33	1.34	2.53	2.28	0.66	0.07		32	73	33	6	1.2	0.9	3	0.5
NS ³⁾	7.10	0.50	4.00	0.50	1.50	1.40	0.50	0.08	0.07	40	-	35	-	-	-	3	-
NS ⁴⁾	7.20	0.29	2.60	0.90	2.40	1.50	1.20	0.04	0.16	37	-	46	-	-	-	3.1	-

WR¹⁾; mean value of 42 metapelite samples by Lee and Lee(1997a), Shale²⁾; average value of world wide shales by Haskin *et al.*(1968), Rose *et al.*(1979) and Gromet *et al.*(1984), NS³⁾; Normal soil from Bowen(1979), NS⁴⁾; Normal soil from Sparks(1995).

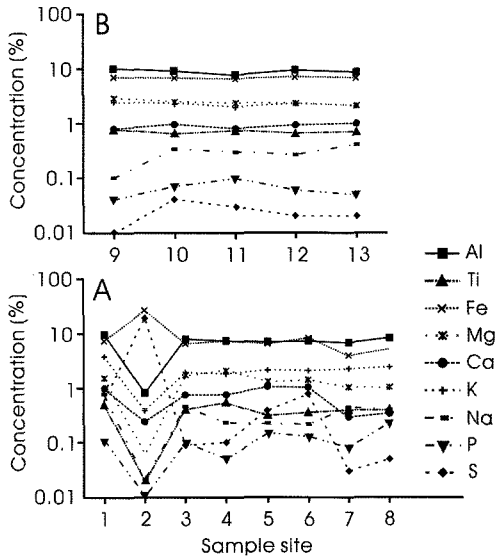


Fig. 5. Variation diagrams of major elements against sample sites in farmland soils from the Boeunjeil mine area. A; Contaminated area, B; Uncontaminated area.

하는 경향을 갖는다(Fig. 5-B).

Al의 함량을 기준으로 다른 주성분 원소의 조성에 대한 변화도를 살펴보았다(Fix, 1958). 이 결과, 오염예상지역 발토양에선 Al 함량이 증가함에 따라 Ti, Mg, Ca, K, Na 및 P함량은 증가하지만 Fe와 S함량은 감소한다(Fig. 5-A). 비오염지역의 발토양에서는 Al 함량이 증가함에 따라 Fe, Mg, Ca 및 K 함량은 증가, Na, P 및 S함량은 감소하는 경향이나, Ti함량은 아무런 상관관계가 관찰되지 않는다(Fig. 5-B).

4.2. 희토류원소

오염예상지역과 비오염예상지역에서 채취한 발토양에 대한 희토류원소의 조성은 큰 차이가 없다(Table 1). 또한 이들 값은 Lee and Lee(1997a)의 탄질 변성이질암의 희토류원소 조성 및 Haskin *et al.*(1968) 및 Rose *et al.*(1979)의 전세계 평균 셰일의 조성과도 유사한 값을 갖는다. 그러나 오염예상지역에서의 일부 경희토류원소(La, Ce, Nd, Sm)는 Fe와 S 원소가 부화되어 있는 곳에서 현저히 낮은 값을 갖는다. 오염예상지역과 비오염예상지역에서의 발토양은 상류에서 하류로 갈수록 함량에서 증감의 폭만 다를 뿐, 증감을 반복한다.

4.3. 미량원소

오염예상지역과 비오염예상지역에서 채취한 발토양에 대한 미량원소의 조성변화(평균함량 (wt.%))는

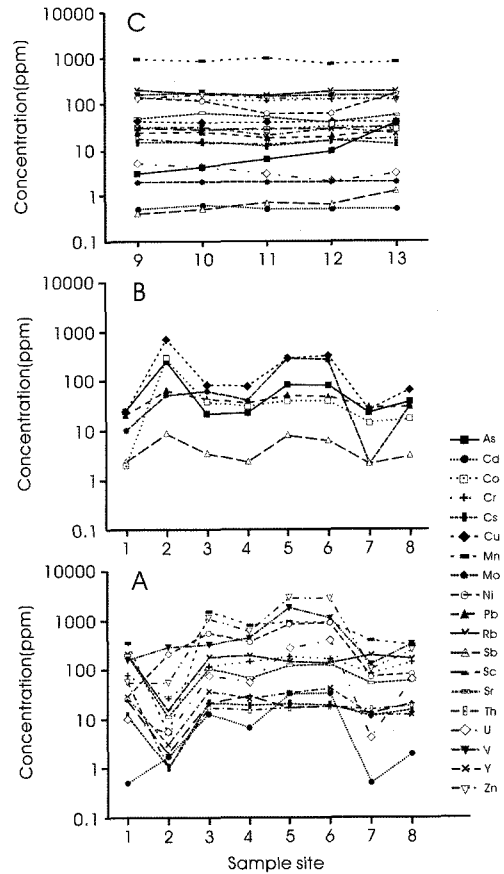


Fig. 6. Variation diagrams of minor elements against sample sites in farmland soils from the Boeunjeil mine area. A and B; Contaminated area, C; Uncontaminated area.

Table 2에 있다. 전체적으로 오염예상지역은 As, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Sr, U, V 및 Zn 원소가 높게 나타난다. 이 미량원소의 함량은 Bowen(1979)과 Sparks(1995)가 제시한 자연토양 내 원소함량에 비해, 오염예상지역에서는 As, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Mo, Ni, Sb, Sc, U, V 및 Zn가, 비오염예상지역에서는 Co, Cr, Cs, Ni, Sc, V 및 Zn 등이 높은 함량을 갖는다(Table 2). 기존 보은, 충주, 덕평 및 추부 일대의 발토양의 미량원소 함량(Table 2)과 비교해, 오염예상지역에서는 As, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, U, V 및 Zn 등의 원소가 비오염예상지역에서는 Ni 원소가 높게 나타난다. 이는 이 지역의 함탄층 흑색셰일이 환경유해 원소를 제공하는 중요한 근원암입을 입증하는 것이다. 또한 Kabata-Pendias(1979)와 Kloke(1979)에 의해 제안된 토양 중 잠재적 독성원소들의 허용한계치와 비교

Table 2. Concentrations (ppm) of minor elements in farmland soils from the Boeunjeil mine area.

No.	As	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zn
1	24	<0.5	2	79	12	23	344	10	25	20	207	2.3	24	194	58	10	155	28	55
2	247	1.7	283	26	1	706	5	51	206	65	15	8.5	2	11	1	5	284	3	54
3	22	12.2	38	115	21	84	1512	61	537	42	179	3.3	21	104	17	75	323	37	1112
4	23	6.6	31	145	19	79	789	39	359	35	189	2.3	29	67	15	56	429	25	573
5	83	31.5	39	182	20	286	914	285	824	52	142	7.9	17	123	17	271	1788	33	2760
6	82	32.8	40	165	19	321	874	266	884	48	132	6.0	18	128	18	381	1109	41	2670
7	23	<0.5	14	80	11	25	388	2	70	28	188	2.1	13	51	15	4	126	12	102
8	38	1.9	17	143	15	64	308	32	80	29	162	3.0	20	59	19	61	317	12	251
Mean	67.8	11.0	58	116.9	14.8	198.5	641.8	93.3	373.1	39.9	151.8	4.4	18	92.1	20	107.9	566.4	23.9	947.1
9	3	0.5	32	133	15	42	932	2	136	23	201	0.4	29	48	17	5	160	30	130
10	4	0.6	28	118	15	38	845	2	114	24	166	0.5	27	63	14	4	171	30	159
11	6	<0.5	27	116	12	39	966	2	60	17	151	0.7	28	51	13	3	146	20	127
12	9	<0.5	31	125	16	40	718	2	60	19	187	0.6	28	39	16	2	149	28	122
13	37	<0.5	27	122	13	39	796	2	167	24	189	1.2	32	56	17	3	150	22	117
Mean	11.8	0.5	29	122.8	14.2	39.6	851.4	2	107.4	21.4	178.8	0.7	28.8	51.4	15.4	3.4	155.2	26	131
WR ⁽¹⁾	13	2.0	6	188	6	87	71.5	214	72	25	154	3.0	17.9	92	11	55	2124	12	234
Shale ⁽²⁾	7	0.3	20	100	5	57	-	2	95	20	140	1.0	-	450	11	3	130	-	80
NS ⁽³⁾	6	0.35	8	70	4	30	1000	1.2	50	35	150	1	7	250	9	2	90	40	90
NS ⁽⁴⁾	7.2	-	9.1	54	-	25	550	0.97	19	19	67	0.66	8.9	240	9.4	2.7	80	25	60
BFS ⁽⁵⁾	18.6	1.9	21	96	-	50	-	5.7	36	36	-	-	-	-	-	6.1	-	-	183
CFS ⁽⁶⁾	6.3	0.9	13	75	-	24	-	2.1	51	31	-	0.7	-	-	16.6	3.5	-	-	121
DFS ⁽⁷⁾	28	0.5	24	139	-	62	589	12.7	61	27	-	-	-	-	17	14.3	251	-	148
CFS ⁽⁸⁾	33	0.3	21	107	-	51	617	3.9	53	30	-	-	-	-	17.2	6.4	172	-	118
PELS ⁽⁹⁾	20	3	50	100	-	100	-	5	100	100	-	5	-	-	-	-	50	-	300
PELS ⁽¹⁰⁾	30	5	50	100	-	100	-	10	100	100	-	10	-	-	-	-	100	-	300

WR⁽¹⁾; mean value of 42 metapelite samples by Lee and Lee(1996), Lee and Lee(1997a), Shale⁽²⁾; average value of world wide shales by Haskin *et al.*(1968), Rose *et al.*(1979) and Gromet *et al.*(1984), NS⁽³⁾; normal soil from Bowen(1979), NS⁽⁴⁾; normal soil from Sparks(1995), BFS⁽⁵⁾; average farmland soils from Boeun by Lee *et al.*(1997), CFS⁽⁶⁾; average farmland soils from Chungjoo by Lee *et al.*(1996b), DFS⁽⁷⁾ and CFS⁽⁸⁾; average farmland soils from Dukpyung and Chubu by Yi and Chon(2003), PELS⁽⁹⁾; phytotoxicity excessive levels in surface soils from Kloeke(1979), PELS⁽¹⁰⁾; phytotoxicity excessive levels in surface soils from Kabata-Pendias(1979).

Contaminated area

Uncontaminated area

Table 3. Gain and loss of minor elements (ppm) in farmland soils from the Boeunjeil mine area.

No.	Gain (+) or loss (-) (g)																							
	As	Cd	Co	Cu	Cs	Cr	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zn					
1	5.49	-1.61	-4.46	-127.14	3.24	-69.28	-135.00	-206.30	-52.74	-9.59	5.46	-1.23	18.49	57.45	33.68	-47.30	-2004.60	21.57	-191.63					
2	2240.12	13.51	2575.51	49.17	3.12	6353.10	-354.39	251.22	1807.12	567.93	-17.17	74.54	18.24	8.34	-1.88	-9.39	466.63	27.37	258.59					
3	7.65	9.45	29.66	-80.07	13.71	-8.16	1019.04	-156.75	431.98	14.42	13.99	0.10	19.71	5.61	4.95	15.39	-1820.86	34.73	809.63					
4	10.38	4.71	25.51	-40.64	13.31	-6.71	401.86	-174.36	292.85	10.57	38.08	-0.66	29.47	-23.91	4.24	1.91	-1688.01	25.41	348.34					
5	76.85	32.10	36.22	9.01	15.65	222.59	589.40	94.51	819.97	31.29	-0.29	5.55	18.40	41.15	7.40	238.35	-188.51	35.72	2753.67					
6	73.27	32.51	36.08	-14.41	13.99	250.70	519.48	65.84	858.00	25.50	-15.13	3.31	18.94	42.66	7.94	345.35	-957.29	43.13	2574.95					
7	12.72	-1.44	9.65	-98.55	6.30	-59.05	33.82	-211.76	6.27	6.31	56.20	-0.65	14.54	-34.98	5.77	-50.53	-1983.12	13.42	-118.96					
8	21.71	-0.26	9.53	-57.40	7.70	-28.55	-118.70	-184.77	1.06	1.49	-6.04	-0.26	18.27	-38.11	6.35	0.71	-1834.48	10.96	-4.76					
Mean	306.02	11.12	339.71	-45.00	9.63	831.83	244.44	-65.30	520.57	80.99	9.39	10.09	19.51	7.28	8.56	61.87	-1251.28	26.54	803.60					
9	-10.79	-1.63	17.58	-89.99	5.05	-56.05	286.83	-212.53	28.22	-8.05	-5.87	-2.71	21.37	-56.63	1.53	-51.32	-2006.09	22.11	-138.20					
10	-9.59	-1.49	17.88	-87.36	6.79	-54.59	320.71	-212.29	25.23	-4.53	-12.42	-2.57	23.03	-38.27	0.94	-51.59	-1978.15	25.59	-98.39					
11	-7.00	-1.50	21.00	-72.00	6.00	-48.00	566.00	-212.00	-12.00	-8.00	-3.00	-2.30	28.00	-41.00	2.00	-52.00	-1978.00	20.00	-107.00					
12	-6.05	-1.61	17.95	-91.41	6.36	-56.09	154.82	-212.45	-25.64	-10.32	-9.50	-2.54	21.64	-61.86	1.36	-53.45	-2008.86	21.64	-139.73					
13	19.29	-1.56	17.57	-81.52	5.35	-52.96	294.76	-212.25	73.76	-4.05	10.96	-1.95	27.93	-43.12	3.84	-52.38	-1993.08	19.20	-131.88					
Mean	-2.83	-1.56	18.40	-84.45	5.91	-53.54	324.62	-212.31	17.92	-6.99	-3.97	-2.41	24.39	-48.18	1.93	-52.15	-1992.84	21.71	-123.04					

Table 4. Enrichment factor(EF) of major and rare earth elements in farmland soils from the Boeunjeil mine area.

No.	Ti	Fe	Mg	Ca	K	Na	P	S	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
1	1.8	1.9	1.6	11.0	0.9	2.8	1.4	9.2	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4
2	0.9	81.3	0.7	31.3	1.2	0.9	1.5	3502.8	0.9	0.7	1.0	1.0	4.4	3.0	1.4	0.7
3	1.9	1.1	2.1	10.1	0.6	2.0	1.6	1.7	1.2	1.6	1.3	1.2	1.0	1.1	0.7	0.8
4	2.6	2.5	2.7	10.9	0.6	1.1	0.8	2.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8	0.3	0.7	0.7
5	1.6	2.4	1.8	16.5	0.8	1.1	2.7	8.2	1.6	1.4	1.1	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8
6	1.8	2.9	1.9	15.2	0.7	1.1	2.3	16.2	1.5	2.0	1.9	1.4	1.0	1.1	0.9	0.5
7	2.1	1.5	1.5	4.6	0.8	2.3	1.5	0.7	0.9	1.0	0.7	0.8	0.5	0.5	0.5	0.4
8	1.7	1.6	1.2	4.4	0.7	1.7	3.5	0.9	0.9	1.2	0.8	0.8	0.8	0.3	0.6	0.6
Mean	1.8	11.9	1.7	13.0	0.8	1.6	1.9	442.7	1.1	1.2	1.0	0.9	1.2	0.9	0.8	0.6
9	2.7	1.8	2.7	8.4	0.6	0.4	0.5	0.2	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3
10	2.7	1.9	2.8	11.9	0.7	1.4	1.0	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
11	3.5	2.2	3.1	11.4	0.7	1.4	1.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4
12	2.4	1.9	2.4	10.2	0.6	1.0	0.8	0.3	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4
13	2.9	2.0	2.4	12.5	0.6	1.7	0.7	0.4	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6	0.3	0.5	0.5
Mean	2.8	2.0	2.7	10.9	0.6	1.2	0.9	0.4	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4

A five-category system proposed by Sutherland(2000) runs as follows: <2 = no or minimal pollution, 2-5 = moderate pollution, 5-20 = significant pollution, 20-40 = very strong pollution, >40 = extreme pollution.

해도 오염예상지역의 As, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, V 및 Zn 함량이 높게 나타난다.

오염예상지역의 함량변화를 도시하면, 광산 상류에서 하류로 감에 따라 미량원소는 시료채취 2지점 및 3지점에서 두가지 유형의 변화 형태를 보여주나 하류로 감에 따라 변화의 유형은 거의 같다. 첫 번째 변화 유형을 갖는 미량원소 그룹인 Cd, Cs, Mn, Ni, Sr, U, V, Y 및 Zn들은 시료채취 지점 2에서 그 함량이 급격히 감소하나 시료채취 지점 3에선 증가한다(Fig 6-A). 두 번째 변화 유형을 갖는 미량원소 그룹인 As, Co, Cu, Mo, Pb 및 Sb원소들은 시료채취 지점 2에서 그 함량이 급격히 증가하나 시료채취 지점 3에선 감소한다(Fig. 6-B). 비오염지역도 상류에서 하류로 감에 따라 함량변화를 도시하면 두가지 유형의 변화 형태를 보여준다(Fig. 6-C). 첫 번째 형태는 하류로 감에 따라 As, Ni 및 Sb원소들이 증가하나, 두 번째 형태는 첫 번째 변화 유형 원소들을 제외한 원소들로 하류로 감에 따라 일정하거나 감소한다. 이러한 변화 형태는 지역(오염예상지역, 비오염예상지역)과 원소종류에 따라 상관성이 다르다는 것을 암시한다. 오염예상지역에선 U와 Cd, Cs, Ni, Sr, V, Zn 등의 원소들과 As와 Co, Cu, Mo, Pb, Sb등의 원소들, 두그룹으로 분류되며 각 그룹 내의 원소들은 서로 양의 상관성을 보이고 있다.

주성분원소 중에 풍화, 축적, 모암변질 또는 변성작용에 안정한 비유동성원소로 Al원소를 이용하여 각 미량원소의 손실/이득을 계산하였다(Hendricks and Whittig, 1968; Grant, 1986; Maclean and Kranidiotis, 1987). 오염예상지역과 비오염예상지역의 발토양에 대한 미량원소의 손실/이득 계산 결과(Table 3), 오염예상지역에서의 As, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb, U 및 Zn 원소가 현저히 증가하였음을 알 수 있다. 특히 As, Co, Cu, Ni, Pb와 Zn 원소는 오염예상지역에서 비오염예상지역에 비해 최소 18배 이상 부화되어 있다.

4.4. 부화특성

오염예상지역과 비오염예상지역의 발토양에 대한 주성분, 희토류, 미량원소의 부화계수(Enrichment factor; EF)를 Sutherland(2000)와 Teixeira *et al.*(2001)등이 제시한 방정식을 이용하여 구하였다(Table 4, 5). 부화계수 계산시 이 지역의 기반암에 관한 평균조성은 Lee and Lee(1997a)의 결과치를 이용하였다. Table 4에서 보는 것과 같이, 주성분 원소의 부화계수는 전반적으로 3미만이나 오염예상지역의 일부 지점에서는 Ca(4.4~31.3), Fe(81.3), S(8.2~3502.8)원소가, 비오염예상지

역에서는 Ca(8.4~12.5)원소가 높으며, 심한오염 이상 값을 갖는다. 여기서 Ca원소는 광산활동에 의한 오염보다는 인위적(비료) 및 모암에서 기원되었다고 생각된다. 희토류원소의 부화계수는 전반적으로 2미만이나 일부 지점에서 Eu(3.0)와 Tb(4.4)가 보통오염의 값을 갖는다. Table 5에서 보는 것과 같이, 미량원소의 부화계수는 오염예상지역과 비오염예상지역의 값이 현저히 다르다. 오염예상지역의 Cr, Cs, Mo, Rb, Th, Sc, Sr, V 및 Y원소들에 대한 부화계수는 5 미만이다. 그러나 As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, U 및 Zn원소들에 대한 부화계수는 5 이상의 값으로 심한 오염을 지시한다. 비오염예상지역의 미량원소 부화계수는 Co(4.5), Mn(7.6~13.5)을 제외한 모든 원소들이 2 미만의 값을 갖는다. 여기에서 Mn원소는 모암에서 기원되었으며 Co원소는 모암 및 광산활동에 의해 기원되었다고 생각된다.

지누적지수(geoaccumulation index)는 오염된 토양, 퇴적물의 금속 누적을 정량화하는 또 다른 방법이다. 이 지수는 Sutherland(2000)와 Manjunatha *et al.*(2001) 등이 제시한 방정식을 이용하여 구하였다(Table 6, 7). 이 도표에서와 같이, 지누적지수는 7등급으로 분류되며 Igeo의 값이 6은 배경치의 100배가 부화되었다는 것을 나타낸다(Muller 1979). Table 6에서 보는 것과 같이, 오염예상지역에서 Ca(2.2~3.5), Fe(2.0), S(2.7~87.6)와 비오염예상지역에서 Ca(2.6~3.3)가 2이상의 값을 갖으나 다른 주성분 원소의 지누적지수는 1 미만이다. 따라서 이들 원소(Ca, Fe, S)는 보통 또는 심한 오염이상임을 지시한다. 희토류원소의 지누적지수는 모든 지역에서 1 미만의 값을 가지므로 이들 원소들에 의해 거의 오염되지 않았음을 알 수 있다. Table 7에서 보는 것과 같이, 비오염예상지역의 미량원소에 대한 지누적지수는 Mn원소를 제외한 모든 미량원소가 1 미만의 값을 갖는다. 오염예상지역에서 As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, U 및 Zn 원소의 지누적지수는 1 이상의 값을 가지므로 보통오염이상임을 지시한다. Pb와 Sb원소는 부화계수가 5이상인 값을 갖지만 지누적지수는 1미만으로 비오염을 나타낸다. 따라서 광산활동으로 인한 인접지역의 발토양 내 영향을 준 원소는 Fe, S, As, Cd, Co, Cu, Ni, U 및 Zn 등이다.

이들 원소들 중 토양 내 잠재적 독성원소인 As, Cd, Co, Cu, Ni, U, Zn 등 7개 원소를 대상으로 부화지수를 산출하였다. 부화지수 계산 시 적용되는 독성원소의 평균함량(Bowen, 1979; Rose *et al.*, 1979; Sparks, 1995)에 따라 부화지수 값이 달라진다. 이 부화지수(산

Table 5. Enrichment factor(EF) of minor elements in farmland soils from the Boeunjeil mine area.

No.	As	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zn
1	1.4	0.2	0.3	0.3	1.5	0.2	3.7	0.0	0.3	0.6	1.0	0.6	1.0	1.6	4.1	0.1	0.1	1.8	0.2
2	173.3	7.8	430.3	1.3	1.5	74.0	0.6	2.2	26.1	23.7	0.9	25.9	1.0	1.1	0.8	0.8	1.2	2.3	2.1
3	1.6	5.7	5.9	0.6	3.3	0.9	19.9	0.3	7.0	1.6	1.1	1.0	1.1	1.1	1.5	1.3	0.1	2.9	4.5
4	1.8	3.4	5.3	0.8	3.2	0.9	11.2	0.2	5.1	1.4	1.2	0.8	1.7	0.7	1.4	1.0	0.2	2.1	2.5
5	6.9	17.1	7.0	1.1	3.6	3.6	13.8	1.4	12.4	2.3	1.0	2.9	1.0	1.5	1.7	5.3	0.9	3.0	12.8
6	6.6	17.3	7.0	0.9	3.3	3.9	12.9	1.3	12.9	2.0	0.9	2.1	1.1	1.5	1.7	7.3	0.6	3.6	12.0
7	2.0	0.3	2.6	0.5	2.1	0.3	6.1	0.0	1.1	1.3	1.4	0.8	0.8	0.6	1.5	0.1	0.1	1.1	0.5
8	2.7	0.9	2.6	0.7	2.3	0.7	3.9	0.1	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	0.6	1.6	1.0	0.1	0.9	1.0
Mean	24.5	6.6	57.6	0.8	2.6	10.6	9.0	0.7	8.2	4.2	1.1	4.4	1.1	1.1	1.8	2.1	0.4	2.2	4.4
9	0.2	0.2	3.9	0.5	1.8	0.4	9.6	0.0	1.4	0.7	1.0	0.1	1.2	0.4	1.1	0.1	0.1	1.8	0.4
10	0.3	0.3	4.0	0.5	2.1	0.4	10.1	0.0	1.4	0.8	0.9	0.1	1.3	0.6	1.1	0.1	0.1	2.1	0.6
11	0.5	0.3	4.5	0.6	2.0	0.5	13.5	0.0	0.8	0.7	1.0	0.2	1.6	0.6	1.2	0.1	0.1	1.7	0.5
12	0.5	0.2	4.0	0.5	2.1	0.4	7.6	0.0	0.6	0.6	0.9	0.2	1.2	0.3	1.1	0.0	0.1	1.8	0.4
13	2.5	0.2	3.9	0.6	1.9	0.4	9.7	0.0	2.0	0.8	1.1	0.4	1.6	0.5	1.3	0.1	0.1	1.6	0.4
Mean	0.8	0.2	4.1	0.6	2.0	0.4	10.1	0.0	1.2	0.7	1.0	0.2	1.4	0.5	1.2	0.1	0.1	1.8	0.5

A five-category system proposed by Sutherland(2000) runs as follows: <2 = no or minimal pollution, 2-5 = moderate pollution, 5-20 = significant pollution, 20-40 = very strong pollution, >40 = extreme pollution.

Table 6. Geoaccumulation index(Igeo) of major and rare earth elements in farmland soils from the Boeunjeil mine area.

No.	Ti	Fe	Mg	Ca	K	Na	P	S	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
1	0.5	0.6	0.5	3.3	0.3	0.8	0.4	2.7	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2	0.0	2.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	87.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
3	0.5	0.5	0.5	2.4	0.1	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2
4	0.6	0.6	0.6	2.4	0.1	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
5	0.3	0.5	0.4	3.5	0.2	0.2	0.6	1.7	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
6	0.4	0.6	0.4	3.3	0.2	0.2	0.5	3.5	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1
7	0.4	0.3	0.3	0.9	0.2	0.5	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
8	0.4	0.4	0.3	1.1	0.2	0.4	0.9	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
Mean	0.4	0.7	0.4	2.2	0.2	0.4	0.4	12.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
9	0.8	0.5	0.8	2.6	0.2	0.1	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
10	0.7	0.5	0.7	3.2	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
11	0.8	0.5	0.7	2.6	0.2	0.3	0.4	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
12	0.7	0.6	0.7	3.0	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
13	0.8	0.5	0.6	3.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Mean	0.8	0.5	0.7	2.9	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1

A seven-category system proposed by Forstner *et al.*(1990) runs as follows: <0 = practically unpolluted, 0-1 = unpolluted to moderately polluted, 1-2 = moderately polluted, 2-3 = moderately to strongly polluted, 3-4 = strongly polluted, 4-5 = strong to very strongly polluted, >5 = very strongly polluted.

Table 7. Geoaccumulation index(I_{geo}) of minor elements in farmland soils from the Bocuinjell mine area.

No.	As	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zn
1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	1.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.5	1.2	0.0	0.0	0.5	0.1
2	4.3	0.2	10.8	0.0	0.0	1.9	0.0	0.1	0.7	0.6	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
3	0.4	1.4	1.4	0.1	0.8	0.2	4.8	0.1	1.7	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.0	0.7	1.1
4	0.4	0.8	1.2	0.2	0.7	0.2	2.5	0.0	1.1	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2	0.0	0.5	0.6
5	1.5	3.6	1.5	0.2	0.8	0.7	2.9	0.3	2.6	0.5	0.2	0.6	0.2	0.3	0.4	1.1	0.2	0.6	2.7
6	1.4	3.7	1.5	0.2	0.7	0.8	2.8	0.3	2.8	0.4	0.2	0.5	0.2	0.3	0.4	1.6	0.1	0.8	2.6
7	0.4	0.1	0.5	0.1	0.4	0.1	1.2	0.0	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.2	0.1
8	0.7	0.2	0.6	0.2	0.6	0.2	1.0	0.0	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.4	0.3	0.0	0.2	0.2
Mean	1.2	1.2	2.2	0.1	0.6	0.5	2.0	0.1	1.2	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.1	0.5	0.9
9	0.1	0.1	1.2	0.2	0.6	0.1	3.0	0.0	0.4	0.2	0.3	0.0	0.4	0.1	0.4	0.0	0.0	0.6	0.1
10	0.1	0.1	1.1	0.1	0.6	0.1	2.7	0.0	0.4	0.2	0.2	0.0	0.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.6	0.2
11	0.1	0.1	1.0	0.1	0.5	0.1	3.1	0.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.4	0.1	0.3	0.0	0.0	0.4	0.1
12	0.2	0.1	1.2	0.2	0.6	0.1	2.3	0.0	0.2	0.2	0.3	0.0	0.4	0.1	0.3	0.0	0.0	0.5	0.1
13	0.7	0.1	1.0	0.1	0.5	0.1	2.5	0.0	0.5	0.2	0.3	0.1	0.4	0.1	0.4	0.0	0.0	0.4	0.1
Mean	0.2	0.1	1.1	0.1	0.5	0.1	2.7	0.0	0.3	0.2	0.3	0.1	0.4	0.1	0.3	0.0	0.0	0.5	0.1

A seven-category system proposed by Forstner *et al.*(1990) runs as follows: <0 = practically unpolluted, 0-1 = unpolluted to moderately polluted, 1-2 = moderately polluted, 2-3 = moderately to strongly polluted, 3-4 = strongly polluted, 4-5 = strong to very strongly polluted, >5 = very strongly polluted.

Contaminated area

Uncontaminated area

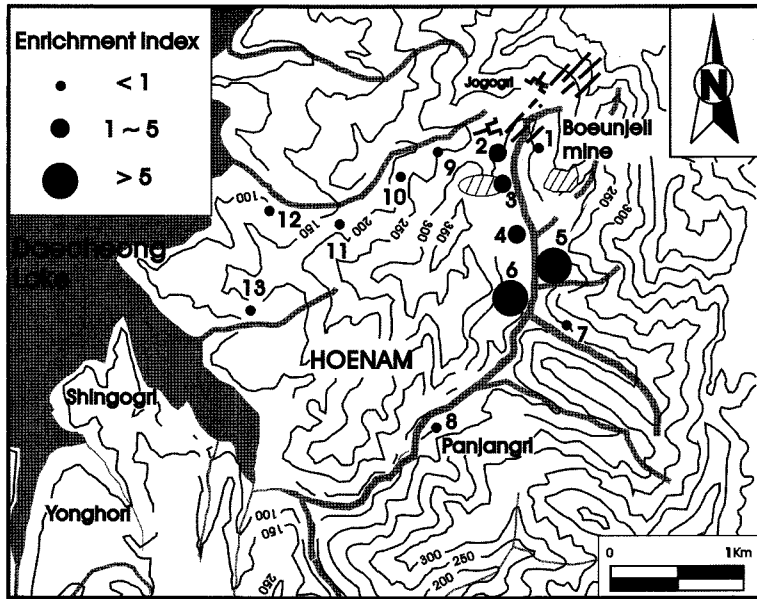


Fig. 7. Enrichment index(EI) diagram of toxic elements((As, Cd, Co, Cu, Ni, U, Zn) in farmland soils from the Boeunjeil mine area.

술적으로 평균한 값)는 1이상은 부화지역으로 1이하는 비부화지역으로 설정할 수 있다. Bowen(1979), Rose *et al.*(1979) 및 Sparks(1995)의 평균함량에 비해 오염 예상지역(1.7~87.0)과 비오염예상지역(1.6~3.9)이 부화되어 있다. 특히 오염예상지역에서 부화가 높음을 알 수 있다. 이는 함탄층 흑색셰일이 잠재적 독성원소를 제공하는 중요한 근원암이며 광산활동으로 인한 폐석 및 탄층내 잠재적 독성원소의 함량이 높음을 나타내는 것이다. 또한 비오염예상지역의 밭토양 평균함량을 이용하여 부화지수를 계산하면 오염예상지역은 1.0~31.5, 비오염예상지역은 0.8~1.3의 값을 갖는다. 연구지역의 밭토양 내 부화된 원소들의 최대값은 Kabata-Pendias (1979)와 Kloke(1979)가 제시한 농작물에 독성을 줄 수 있는 토양중의 잠재적 독성원소들의 최대 허용한계치를 이용하여 부화지수를 구했을때, 오염예상지역은 0.3~5.2이며 비오염예상지역은 0.4~0.7의 값을 갖는다. 이는 경작식물에 잠재적으로 독성을 떨 수 있으며 농작물에 흡입될 가능성도 높음을 지시한다.

이들 독성원소들(As, Cd, Co, Cu, Ni, U, Zn)은 광산활동으로 인한 광산 인접지역의 폐석갱도, 채굴적, 광폐석 및 선광잔해물 등에서 지표수나 바람에 의하여 분산 이동되어 인접 밭토양 내에 원소가 부화되어 있으며 밭작물의 경작에 의해 이들 독성원소들에 오염이 노출되어 있다(Fig. 7).

5. 결 론

1. 보은제일광산은 대청댐 상류, 회남지역으로 국사봉층 내 탄층을 개발하였으나 1991년도 폐광되었고, 폐광의 관리 소홀에 의해 갱도, 채굴적, 광폐석 및 선광잔해물이 방치되어 환경오염원으로 작용하고 있다.

2. 오염예상지역에서의 미량원소는 As(22~247 ppm), Cd(<0.5~32.8 ppm), Co(2~283 ppm), Cu(23~706 ppm), Mo(2~285 ppm), Ni(25~884 ppm), Pb(20~65 ppm), Sb(2.1~8.5 ppm), Sr(11~194 ppm), U(4~381 ppm), V(126~1,788 ppm) 및 Zn(54~2,760 ppm)로써 비오염예상지역보다 최소 18 배 이상 부화되어 있다. 이들 원소는 자연토양 내 원소함량과 보은, 충주, 덕평 및 추부지역 밭토양의 미량원소 함량과 비교하여 보더라도 오염예상지역에서는 As, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, U, V 및 Zn 등의 원소가, 비오염예상지역에서는 Ni 원소가 높게 나타난다.

3. 오염예상지역에서의 미량원소들은 U, Cd, Ni, Sr, V, Zn 등의 원소들과 As, Co, Cu, Mo, Pb, Sb 등의 원소들로 구별되며 이들 그룹의 원소들은 원소간의 양의 상관성을 보이고 있다.

4. 부화계수는 오염예상지역에서는 As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, U 및 Zn 원소들이 5 이상의 값을 가지며, 비오염예상지역의 Co(4.5), Mn(7.6~13.5)을 제외한 원소들은 4 미만의 값을 갖는다. 또한 지능적

지수는 오염예상지역에서 As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, U 및 Zn 원소들은 1 이상의 값을 가지며, 비오염예상 지역에서는 Mn원소를 제외한 다른 모든 미량원소가 1 미만의 값을 갖는다.

5. 부화계수와 지능지수를 근거로 보았을 때, 광산 활동에 의한 발토양 내 영향을 준 원소는 Fe, S, As, Cd, Co, Cu, Ni, U 및 Zn 등이다. 이들 잠재적 독성 원소에 대한 부화지수는 0.3~87.0(오염예상지역)과 0.4~3.9(비오염예상지역)로써 오염예상지역에서 심각한 오염상태를 보인다.

사 사

심사과정에서 이 논문의 미비점을 지적, 수정하여 주신 세명대학교 정명채교수님과 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Bowen, H.J.M. (1979) Environmental chemistry of the elements. Academic Press, London. 333p.
- Chon, C.M. Moon, H.S. Choi, S.K. and Woo, N.C. (1997) A study on soil clay minerals and the distribution of heavy metals in soils derived from black shale and black slate in Dukpyoung area. *Economic and Environmental Geology*, v. 30, p. 567-586.
- 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 Geochemistry*, v. 11, p. 69-76.
- Coal Industry Promotion Board (1995) Research for the restoration of natural environment at closed coal mine areas. 268p.
- Davies, B.D. and Balingier, R.C. (1990) Heavy metals in soils in North Somerset, England, with special reference to contamination from base metal mining in the Mendips. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 12, p. 291-300.
- 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.
- Forstner, U. Ahlf, W. Calmano, W. and Kersten, M. (1990) Sediment criteria development - Contributions from environmental geochemistry to water quality management. In: Heling D, Rothe, P. Forstner, U. Stoffers, P. (eds) *Sediments and environmental geochemistry: selected aspects and case histories*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, p. 311-338.
- Grant, J.A. (1986) The isocon diagram-a simple solution of Gresen's equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, v. 81, p. 1976-1982.
- 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. *Geochimica et Cosmochimica 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.
- Hendricks, D.M. and Whittig, L.D. (1968) Andesite weathering II. Geochemical changes from andesite to saprolite. *Journal of Soil Science*, v. 19, p. 147-153.
- Jeon, S.R. Shin, I.J. and Lee, K.S. (2001) Geochemistry of stream water around the abandoned Boeun coal mine, Hoenam area. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, v. 20, p. 20-27.
- Kabata-Pendias, A. (1979) Current problems in chemical degradation of soils, paper presented at Conf. on Soil and Plant Analyses in Environmental Protection, Falenty/Warsaw, October 29, 7.
- Kim, J.H. (1989) Geochemistry and genesis of the Guryongsan(Ogcheon) uraniferous black slate. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v. 22, p. 35-63.
- Kim, J.S. and Chon, H.T. (1997) Dispersion and enrichment of potentially toxic elements in Chubu area covered with black shales and slates in Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 30, p. 89-103.
- Kim, K.W. (1993) Influence of uraniferous black shales on trace elements in soils and crops in Korea. Ph.D thesis, University of London, 410p.
- Kim, O.B. and John, Y. W. (1980) Experimental investigation for genetic origin of uranium-bearing coal beds of Ogcheon Group. *Journal of the Korean Institute of Mineral and Mining Engineers*, v. 17, p. 57-66.
- Kim, O.J. Lee, D.S. and Lee, H.Y. (1977) Geological map of Boeun sheet. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 35p.
- Kloke, A. (1979) Contents of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury and nickel in plants grown on contaminated soil. UN-ECE Symposium.
- Lee, C.H. and Lee, H.K. (1997a) Geochemical behavior, dispersion and enrichment of environmental toxic elements in coaly metapelites and stream sediments at the Hoenam area, up the Taechong lake, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 30, p. 209-222.
- Lee, C.H. Lee, H.K. and Shin, M.A. (1996a) Geochemistry of vanadium-bearing coal formation in metapelite of the Ogcheon Supergroup from the Hoenam area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 29, p. 471-481.
- Lee, D.J. (1986) Mineralogy of low-grade uranium ores in the black slate of the Ogcheon Group, Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v. 19, p. 133-146.
- Lee, J.S. Chon, H.T. and Kim, K.W. (1996b) Dispersion and enrichment of potentially toxic elements in the Chungjoo area covered with black shales in Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 29, p. 495-508.
- Lee, J.S. Chon, H.T. and Kim, K.W. (1997) Dispersion and migration of potentially toxic elements in the rock-soil-plant system from the Boeun area underlain by

- black shales, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 30, p. 587-601.
- Lee, H.K. and Lee, C.H. (1996) Geochemistry of trace and rare earth elements from coal-bearing metapelites of the Ogcheon Supergroup at the Hoenam area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 29, p. 689-698.
- Lee, H.K. and Lee, C.H. (1997b) Geochemical origin, behavior and enrichment of environmental toxic elements in coaly metapelite from the Deokpyeong area, Korea. *Economic and Environmental Geology*, v. 30, p. 553-566.
- Maclean, W.H. and Kranidiotis, P. (1987) Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, v. 82, p. 951-962.
- Manjunatha, B.R. Balakrishna, K. Shankar, R. and Mahalingam, T.R. (2001) Geochemistry and assessment of metal pollution in soils and river components of a monsoon-dominated environment near Karwar, southwest coast of India. *Environmental Geology*, v. 40, p. 1462-1470.
- McBride, M.B. (1994) *Environmental chemistry of soils*. Oxford University Press, Oxford, 406p.
- Muller, G. (1979) Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau*, v. 79, p. 778-783.
- Rose, A.W. Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979) *Geochemistry in mineral exploration*. 2nd ed., Academic Press, London, 657p.
- Sparks, D.L. (1995) *Environmental soil chemistry*. Academic Press, INC., 267p.
- Sutherland, R.A. (2000) A comparison of geochemical information obtained from two fluvial bed sediment fractions. *Environmental Geology*, v. 39, p. 330-341.
- Teixeira, E.C. Ortiz, L.S. Alves, M.F.C.C. and Sanchez, J.C.D. (2001) Distribution of selected heavy metals in fluvial sediments of the coal mining region of Baixo Jacui, RS, Brazil. *Environmental Geology*, v. 41, p. 145-154.
- Yi, J.M. and Chon, H.T. (2003) Migration and enrichment of arsenic in rock-soil-crop plant system in areas covered with black shale and slates of Okchon Zone. *Economic and Environmental Geology*, v. 36, p. 295-304.

2006년 6월 7일 원고접수, 2007년 2월 12일 게재승인.