

## 영월지역 토양중 PFA로부터 기인된 잠재적 독성원소의 분포

최선경\* · 문희수\* · 송윤구\*\* · 유장한\*\*

### The Distribution of Potentially Toxic Elements in Soils Derived from PFA near Youngwol Power Plant

Sun Kyung Choi\*, Hi-Soo Moon\*, Yoongoo Song\*\* and Janghan Yoo\*\*

**ABSTRACT :** Fly ashes have been deposited around Youngwol power plant until electrostatic precipitator was installed in 1981. Fresh fly ash samples from electrostatic precipitator and weathered fly ash from ash disposal site were collected from Youngwol power plant, along with 65 soil samples of nearby area to look into the influence of PFA deposit on the soils in surrounding area. In chemistry, EPA does not contain high level of toxic elements and there is no notable concentration of toxic elements in soil near power plant. Total concentrations of Co, Cr, Cu, V, and Zn are 13 ppm, 89 ppm, 73 ppm, 157 ppm and 57 ppm in PFA. Concentrations of these elements in ash-rich soils are 15 ppm, 78 ppm, 60 ppm, 133 ppm and 68 ppm, and those in ash-poor soils are 19 ppm, 70 ppm, 38 ppm, 91 ppm and 97 ppm. But these metal elements are highly concentrated in magnetic fractions of EPA (Co, 129 ppm; Cr, 217 ppm; Cu, 210 ppm; V, 197 ppm; Zn, 90 ppm). Considering the process of long-term weathering of PFA, potentially toxic substances from the ash could be leached into soils and groundwater.

## 서 언

상업용 화력발전소에서 발생하는 고상폐기물인 석탄회(pulverized fuel ash; PFA)는 발전설비 중 과거 기계식 집진설비를 채용하던 시절 그 발생량 중 많은양을 생태계로 방출하여 발전소 인근 지역에 두껍게 퇴적시켜 그 지역에서는 토양의 주 구성 성분을 차지하게 되었다. 집진설비를 개선한 오늘날에도 화력발전소 주변 생태계로 방출되는 양은 급격하게 줄어들었으나 여전히 발생되고 있으며 이의 처분문제가 제기되고 있다.

석탄(유연탄 혹은 무연탄)을 연료로 사용하였던 발전소에서 필수적으로 발생하는 석탄회는 석탄의 소성산물로서 독특한 화학조성과 광물학적 특성을 갖고 있다. 이러한 특성은 대부분 연료로 사용되고 있는 석탄의 종류

즉, 모질물질(母質物質)로부터 영향을 받고 있으므로 국가마다 지역마다 사용되는 석탄의 종류에 따라 서로 독특한 성질을 갖고 있다 (Mattigod *et al.*, 1990; Pougnet *et al.*, 1990; Chinchon *et al.*, 1991; Filippidis and Georgakopoulos, 1992; Vassilev and Vassileva, 1996; 윤정환 등, 1995; 이규호 등, 1997; Vassilev *et al.*, 1997).

필연적으로 발생하는 석탄회에 대한 연구는 서구 국가에서는 다양한 방면으로 상당한 수준으로 진행되고 있다 (Ferraiolo *et al.*, 1990; Eary *et al.*, 1990; Akita, 1995; Singer and Berggaut, 1995; Querol *et al.*, 1995a; Queralt *et al.*, 1997a; Querol *et al.*, 1997b; Stewart *et al.*, 1997; Hower *et al.*, 1998). 이러한 연구들 중 석탄회를 토양개량제로서 활용하는 연구는 매우 활발하다 (Aitken and Bell, 1985; 신제성 등, 1987, 1990). 석탄회는 작물 생육에 필요한 인산, 칼리 및 붕소 성분을 다량 함유하고 있을 뿐만 아니라 입도 크기가 다양하므로 이들이 함유하고 있는 양분 공급 능력 외에도 토양의 성질, 즉 사질토에서 점토질 토양에 이르기까지 다양한 토양에서의 작물 생육에 적정한 물리적 성질인 보수력(保水力)이나 점착성 등을 개선하는

\* 연세대학교 지구시스템과학과 (Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea), E-mail: choisk@yonsim.yonsei.ac.kr

\*\* 한국자원연구소 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejon 303-350, Korea)

데에도 효과적으로 사용될 수 있음이 연구결과로 밝혀지고 있다 (신제성 등, 1987, 1990). 그러나 1965년에 가동하기 시작한 영월화력발전소 주변은 과량의 석탄회가 토양중에 분포되어 있어 토양개량제의 기능을 잃어버리고 오히려 위해한 영향을 주지 않을까 염려되는 지역이다. 왜냐하면 석탄회는 석탄 생성당시 석탄이 갖는 유기물에 의한 강한 흡착의 결과 유용한 원소 외에도 다양한 유해 원소를 동시에 함유하고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 자연계로 석탄회를 다량으로 방출한 영월화력발전소 주변 지역의 토양을 대상으로 이들 토양에서의 잠재적 독성원소들의 토양 내의 분포를 검토하고 그 위해성 여부를 고찰하는데 목적을 두고자 한다.

**시료 및 연구방법**

강원도 영월 남한강변에 위치한 영월화력발전소는 석탄을 사용하는 100MW의 발전용량을 가지고 있다. 1981년 전기식 집진설비를 설비하기 이전에는 다량의 석

탄회를 배출하여 발전소 주변지역에서는 80~90 cm의 두께로 퇴적되었으며, 약 2 km의 반경에 이르는 지역에서는 상당량의 석탄회가 토양에 분산되어 있다.

본 연구를 위하여 발전소를 중심으로 지형적으로 석탄회의 집적이 가능한 지역에서 20 cm이내의 표면 토양시료 63개와 발전소 연료로 사용하는 석탄, 전기집진기에서 채취된 석탄회 (EPA), 자력선별기로 분리된 EPA내 광물질과 과거 처분장에서 단기간의 풍화작용에 대한 영향을 검토하기 위하여 일정기간 지표에 노출된 석탄회 (WFA)를 채취하였다. 또한 가장 두껍게 석탄회가 퇴적되었다고 생각되는 발전소 북쪽 방향위치에서 두 개 (A, G)의 시료를 채취하였다. 시료채취 위치는 Fig. 1에 도시하였다. 이들 시료채취 위치는 발전소로부터의 거리와 함께 기반지질을 고려하였다. 이 지역은 홍원리층, 막골석회암층, 삼태산층 및 영흥층의 탄산염암류가 주된 분포를 보이며, 이를 부정합으로 중생대의 반송층이 조사지역의 중앙에 분포된다 (Fig. 1). 남한강을 따라 저지대를 제외한 나머지 지역은 넓은 분포를 보이는 탄산염암류로부터 기원된

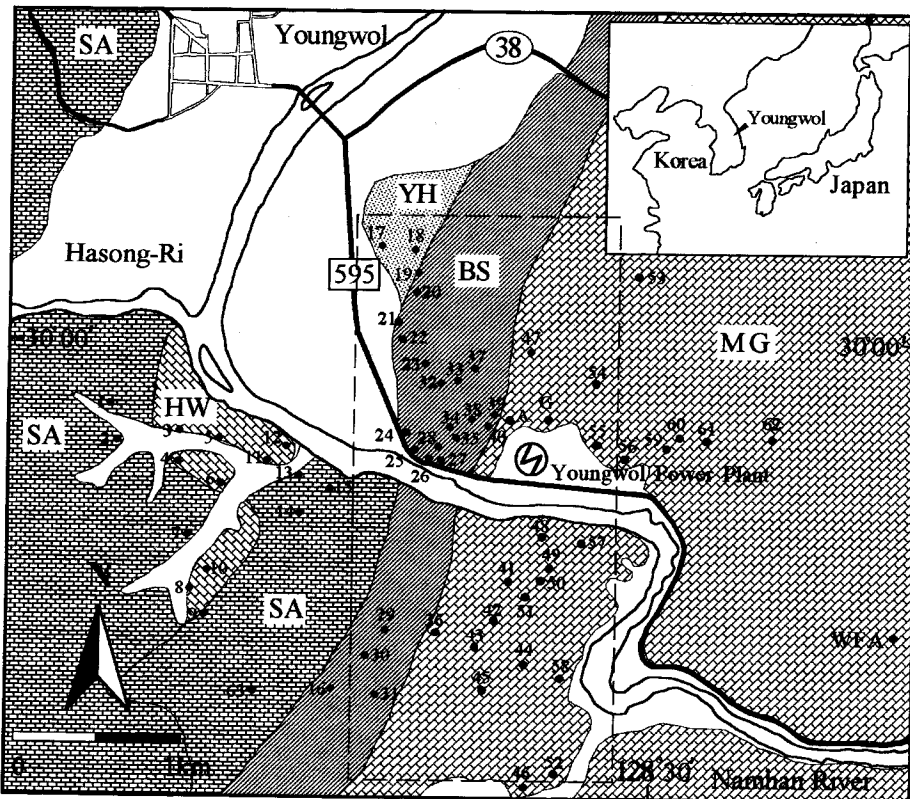


Fig. 1. Geologic map showing location of sampling site and Youngwol power plant. (HW, Heungwolri Formation; MG, Maggol Forantion; SA, Samaesan Formation; YH, Youngheung Formation; BS, Bansong Formation; unshaded area, alluvium).

토양의 조성을 갖는다.

채취된 모든 시료는 실내에서 건조시킨 후 분쇄하였다. 원시료를 이용하여 X-선회절분석을 실시하였으며, 분석 조건은 Cu-K $\alpha$ 선을 이용하여 2 $\theta$  3~60°구간을 가속전압 및 전류 40 kV/30 mA, 발산슬릿 1 mm, 산란슬릿 1 mm, 수광슬릿 0.15 mm, 회절선 채취간격 0.01°, 주사속도는 원시료는 3°/분의 조건으로 분석하였다. 석탄회로부터 기인되는 함철 혹은 철-광물을 식별하기 위하여 자력선별기를 이용하여 자성물질을 따로 분리하였다.

채취된 시료들에 대하여 주원소 및 몇 가지 중금속 원소 (Co, Cr, Cu, V, Zn)들을 선정하여 분석하였다. 채취한 EPA, WFA 및 철광물에 대하여는 Cd 및 Pb분석을 첨가하였으나 Cd는 1 ppm 미만의 함량을 보이므로 석탄회에 기인된 잠재적 오염원으로서의 토양의 Cd분석은 제외시켰다. 토양시료들과 석탄회시료의 총량 분석은 완전용해 시킨 후 ICP/AES로 실시하였다. 또한 오염원으로 선정된 네 가지 중금속 원소들 (Cu, Zn, Pb, Cr)은 토양 중의 분산과 이동관계를 설명하기 위하여 선택적으로 부분 추출하였으며, 추출용액에서의 농도는 원자흡광분석기 (Shi-madzu AA-6701F)를 이용하여 분석하였다. 선택적 부분추출은 2 mm이하로 체질된 토양시료 5 g을 취하여 원소의 준 전체함량 (pseudo-total)을 의미해 줄 수 있는 0.43N의 HNO<sub>3</sub> 용액 25 mL에 넣은 후 상온에서 2시간 진탕기를 이용하여 흔들어준 후, 47 mm의 0.45  $\mu$ m의 멤브레인 필터에 걸러내는 방법으로 이루어졌다.

## 결과 및 고찰

### 석탄회와 주변 토양의 광물조성

이 지역 석탄회의 광물조성은 본 연구진에 의하여 보고된바 있다 (이규호 등, 1997). 이 연구 결과에 의하면 이 지역의 석탄회는 주로 소성의 결과 대부분 비정질 물질로 구성되어 있으며, 결정질 물질은 몰라이트, 석영, 자철석 및 적철석으로 구성되어 있다. 이들의 입도분포는 다양하며, 대부분이 0.5~200  $\mu$ m 사이에 분포된다. 또한 석탄회는 내부가 작은 구형물질로 채워진 플레로스피어 (plerosphere)와 내부가 비어 있는 세노스피어 (cenosphere)의 두 가지로 산출된다. 이러한 석탄회를 형성시킨 원탄은 석탄이 주 구성물질이며, 부성분 광물로 일라이트, 납석, 카올리나이트 및 석영을 함유하고 있다 (Fig. 2a). 석탄회에 소량 함유되어 있는 철광물들은 일반적으로 V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn 그리고 Cu와 같은 전이원소들이 농집되

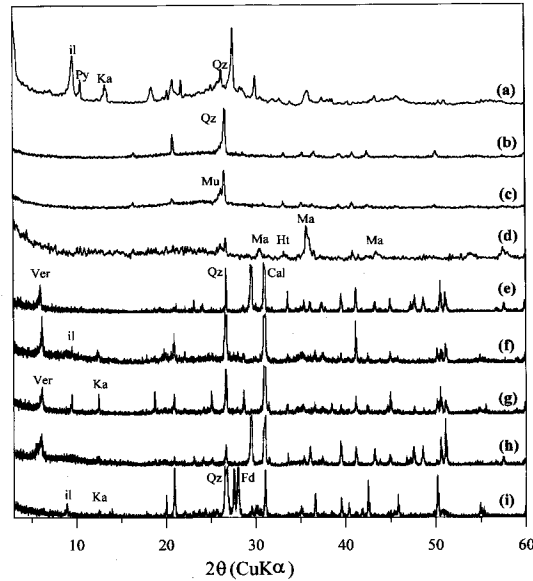


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of (a) coal, (b) fly ash collected from electrostatic precipitator (EPA), (c) fly ash collected from disposal site (WFA), (d) Magnetic fraction of EPA and (e) soil samples from Maggol Formation, (f) Samsa Formation, (g) Heungwolri Formation, (h) Youngheung Formation and (i) Bansong Formation. il, illite; Ka, kaolinite; Ver, vermiculite; Py, pyrophyllite; Qz, quartz; Fd, feldspar; Mu, mullite; Ma, magnetite; Ht, hematite; Cal, calcite.

어 있는 것으로 알려져 있다 (Hulett and Weinberger, 1980; Hulett *et al.*, 1980; Norton *et al.*, 1986). EPA를 자력선별기로 분리하여 얻은 함철 및 철시료들을 X-선회절분석을 한 결과 자철석과 소량의 적철석으로 구성되어 있다 (Fig. 2d). 전기 집진기에서 채취된 석탄회 (EPA)와 지표에 상대적으로 오랜 시간 노출된 시료 (WFA)의 광물 조성은 큰 차이를 보이지 않았다 (Fig. 2b와 c). 석탄회를 거의 함유하고 있지 않은 토양들은 질석, 카올리나이트, 장석과 소량의 석영등으로 구성되어 있다. 이러한 광물조성은 이 지역의 기반암의 지질조건을 반영하고 있다. 본 역의 지질은 1962년 태백산지질조사시 보고서를 인용한 것으로 하부 오르도비시안의 막골석회암, 시대미상의 홍월리층, 삼태산층, 중기 오르도비시안의 영흥층, 석탄기의 홍점층과 주라기 반송층으로 구성된다. 이 중 사암과 셰일로 구성된 반송층을 제외하고는 석회암내지 돌로마이트로 구성되는 지질 특성을 갖는다. 각각의 기반암의 풍화산물인 토양의 X-선회절분석 결과는 Fig. 2e~j와 같다. 석회암이나 돌로마이트 기원 토양의 주 구성광물로는 질석, 납석, 방해석이며, 반송층 토양에는 질석, 일라이트, 카올린, 석영 및 장석이 주구성 광물로 존재한다. 그러

나 일부 하천에 가까운 범람원 기원의 토양에서는 약간 다른 광물 조성을 보인다. 일반적으로 발전소에 가까워지면서 석탄회의 양은 증가된다. 그러나 이들 석탄회의 주 구성물질이 비정질이기 때문에 이들의 함량을 정량화 하는데는 문제점이 많아 시도하지는 않았지만, 정성적으로 발전소에 가까워지면서 토양내 석탄회의 증가를 인식할 수는 있다.

**석탄회와 주변토양의 화학조성**

석탄회의 화학조성은 Table 1과 같다. 일반적으로 석탄회의 주 구성성분은 Si와 Al로서 이들의 조성비는 60%를 상회하며, SiO<sub>2</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>비는 1.8~2.5의 범위에 놓인다. 이 비는 원탄이 함유하고 있는 석탄을 제외한 부성분 광물질의 함유비에 따라 다르게 나타난다. 집진기에서 채취된 시료들 (EPA)은 석탄회 처분장에서 비교적 오래 지표환경에 노출되어 있던 시료들 (WPA)에 비하여 SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO 및 Na<sub>2</sub>O가 상대적으로 다소 낮게 나타나는 것은 이미 이규호 등 (1997)이 보고한 바와 같다. 이규호 등 (1997)은 석탄회의 입도분리 후 분석한 결과 상대적으로 세립질 (<45 μm)에서 중금속 원소 중 Zn, Pb와 Cu의 부화현상을 관찰하고 이는 입자가 작아질수록 비표면적이 증가되어 연소과정에서 이들 원소들이 흡착되는데 기인 되는 것으로 해석하고 있다. 이러한 현상은 기존의 연구

결과 (Greenberg *et al.*, 1978; Campbell *et al.*, 1980; Gay and Davis, 1987; Clarke, 1993)들과 일치되는 현상이다.

환경부 (1996)의 농경지에서의 토양오염 우려기준치가 설정된 6가지의 중금속 원소와 기준치는 Cd (1.5 ppm), Cu (50 ppm), As (6 ppm), Hg (4 ppm), Pb (100 ppm), Cr<sup>6+</sup> (4 ppm)등이다. 석탄회가 함유하는 잠재적 독성 원소들의 함유량은 Table 1과 같다. Table 1에 제시한 석탄회는 As와 Hg를 제외한 5개의 원소들 중 유해원소로 지정된 4개 원소들은 완전 용해에 의하여 분석된 값 들임에도 불구하고 이들의 함유량을 보면 Cu를 제외한 나머지 원소들은 부분침출에 의한 분석결과를 기준으로 설정된 우려 기준치 이하의 값을 보여준다. Cr은 Cr (III) 및 Cr (VI)의 합으로서 자연계에서 산출되는 대부분의

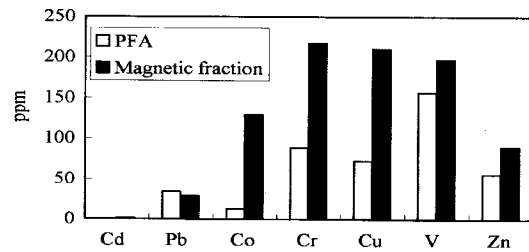


Fig. 3. Comparison of average elemental concentration in PFA (Pulverised Fuel Ash) and magnetic fraction of EPA.

**Table 1.** Major (%) and trace elements (ppm) contents of coal, electrostatic precipitator ash (EPA), weathered fly ash (WFA) and magnetic fraction of EPA.

	Coal	EPA			WFA			MF
		1	2	average	1	2	average	
SiO <sub>2</sub>	21.63	44.61	45.64	45.13	40.22	54.72	47.47	27.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.11	25.11	27.56	26.34	21.68	24.43	23.06	15.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.81	3.79	3.96	3.88	2.91	5.64	4.28	51.34
MgO	0.37	0.75	0.76	0.76	0.63	1.13	0.88	2.33
CaO	0.25	0.50	0.71	0.61	0.37	0.47	0.42	0.83
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.16	0.26	0.21	0.13	0.20	0.17	0.07
K <sub>2</sub> O	1.65	3.32	3.83	3.58	2.86	3.40	3.13	1.24
TiO <sub>2</sub>	0.59	1.54	1.52	1.53	1.30	0.37	1.34	0.78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.15	0.20	0.18	0.12	0.15	0.14	0.25
MnO	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.38
Cd	<1	<1	-	<1	<1	-	<1	<1
Pb	28	36	-	36	33	-	33	29
Co	5	8	11	10	16	15	16	129
Cr	39	80	102	91	88	85	87	217
Cu	39	77	82	80	66	65	66	210
V	62	130	178	154	166	152	159	197
Zn	34	43	67	55	55	61	58	90

EPA; electrostatic precipitator ash, WFA; weathered fly ash collected from disposal site, MF; magnetic fraction of EPA. 1; this study, 2; data from Lee *et al.* (1997).

Cr이 Cr (III)임을 고려할 때 비록 기준치를 넘는다고 해서 반드시 우려할 수준은 아니다. 한가지 특징적인 것은 이들 중금속 원소가 자력선별기로 분리된 시료들에서 현저하게 농집된다는 것이다 (Fig. 3). 이러한 사실은 이규호 등 (1997)에 의해서도 보고된바 있으나 이번엔 다시 분석된 결과에서도 일치하며 기존의 연구결과 (Hulett and Weinberger, 1980; Norton *et al.*, 1986)와도 잘 일치된다. 이는 중금속원소들이 침정석 구조를 이루는 철광

물 고용체의 원소들을 치환하는데 기인하는 것으로 보고되어 있다. 이러한 결과는 이 지역 토양에서의 중금속 원소들의 분산은 석탄회에 함유되어 있는 철광물의 용해조건과 밀접하게 관계된다는 것을 지시한다.

발전소에서 반경 1 km 내에 해당되는 표면의 토양은 최근에 침식을 받은 곳을 제외하면 거의 예외없이 발전소로부터 날아 온 석탄회를 함유하고 있다. 조사지역에서 상대적으로 먼 거리에 위치한 사면의 토양에서는 비산

**Table 2.** Analytical result of soils derived from Maggol, Youngheung and Bansong Formation (major elements, %; trace elements, ppm). 1, soils contain relatively large amounts of fly ashes; 2, soils contain less or extremely small amounts of fly ashes.

Sample No.	Maggol Formation													
	1								2					
	A	G	48	49	51	55	57	average	42	44	45	52	58	average
SiO <sub>2</sub>	47.74	50.21	48.76	53.53	49.77	49.19	50.11	49.90	54.36	63.98	49.05	45.81	56.42	53.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.66	21.49	21.22	19.90	20.98	20.44	20.89	20.94	18.68	15.50	19.34	19.40	15.22	17.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.92	5.13	4.66	4.86	4.38	5.47	4.56	4.85	7.61	5.92	7.23	9.56	6.34	7.33
MgO	0.92	1.02	1.08	1.27	1.08	1.41	1.04	1.12	2.32	1.62	3.02	1.72	2.98	2.33
CaO	0.35	0.36	0.33	0.56	0.28	0.60	0.27	0.39	0.34	0.56	1.10	1.82	2.47	1.26
Na <sub>2</sub> O	0.19	0.19	0.21	0.31	0.25	0.24	0.21	0.23	0.13	0.42	0.23	0.20	0.38	0.27
K <sub>2</sub> O	3.03	3.14	2.93	4.18	2.94	2.84	2.91	3.14	2.75	4.11	4.58	5.23	3.47	4.03
TiO <sub>2</sub>	1.14	1.10	1.07	0.99	1.00	1.01	1.02	1.05	0.83	0.80	0.84	0.72	0.71	0.78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.14	0.15	0.12	0.12	0.15	0.13	0.15	0.14	0.14	0.15	0.22	0.21	0.17
MnO	0.03	0.03	0.03	0.07	0.07	0.15	0.03	0.04	0.08	0.15	0.09	0.23	0.12	0.13
Co	14	15	16	19	16	16	16	16	18	20	18	26	18	20
Cr	75	8	80	90	83	85	81	82	85	73	99	75	72	81
Cu	64	61	67	56	65	59	65	62	40	31	46	105	42	53
V	138	143	142	133	145	139	143	140	116	92	118	100	99	105
Zn	58	56	60	61	57	71	55	60	77	64	78	94	86	80

**Table 2.** Continued.

Sample No.	Youngheung Formation			Bansong Formation					
	2			1				2	
	17	18	average	20	22	23	33	average	31
SiO <sub>2</sub>	56.19	57.56	56.88	55.23	45.74	49.92	44.33	48.81	69.43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.30	13.76	14.03	15.18	19.58	19.15	20.06	18.49	12.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.89	7.03	6.46	4.24	4.03	4.23	4.26	4.19	4.56
MgO	3.06	2.75	2.91	1.02	1.01	0.92	0.90	0.96	1.12
CaO	3.45	2.32	2.89	0.42	0.32	0.35	0.29	0.35	0.41
Na <sub>2</sub> O	0.64	0.51	0.58	0.39	0.22	0.22	0.18	0.25	0.54
K <sub>2</sub> O	2.20	2.36	2.28	2.18	2.61	2.72	0.71	2.56	1.98
TiO <sub>2</sub>	0.64	0.68	0.66	0.79	0.96	0.94	1.02	0.93	0.71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.37	0.38	0.12	0.10	0.12	0.10	0.11	0.08
MnO	0.14	0.21	0.18	0.11	0.03	0.04	0.03	0.05	0.13
Co	20	25	23	14	15	15	14	15	15
Cr	66	69	68	68	80	75	74	74	63
Cu	31	53	42	42	62	63	62	57	20
V	89	90	90	103	137	128	133	125	80
Zn	88	215	152	72	120	58	54	76	59

1, soils contain relatively large amounts of fly ashes; 2, soils contain less or extremely small amounts of fly ashes.

(飛散)된 석탄회가 그 자리에 퇴적되기보다는 낮은 지역으로 운반되어 (육안 혹은 현미경 식별결과) 아주 소량의 석탄회 만을 함유한다. 기반암이 다른 인근지역으로부터 퇴적물의 유입되지 않은 지역의 토양시료를 지질조건(기반암)이 다른 원지성(源地性) 토양으로 간주하여 석탄회의 영향을 받은 토양의 화학조성과 비교하는데 기준 시료로 사용하였다. 그러나 남한강변 일부 낮은 지역의 토양은 하상 퇴적물들이기 때문에 반드시 그 지역의 토양의 조성과 일치한다고 보기는 어렵다.

#### 완전용해 및 단일침출에 의한 토양내의 중금속 분포

Table 2는 각기 다른 지질조건으로부터 형성된 원지성 토양과 석탄회를 인식할 정도로 포함하고 있는 토양 시료들, 즉, 발전소를 중심으로 북북서-남남동 방향에서 채취

된 토양시료들을 완전용해에 의하여 분석한 결과이다. 조사지역 내 63개 지점에서 채취된 시료들을 0.43N의 HNO<sub>3</sub> 침출법에 의하여 분석되어진 중금속 (Cu, Zn, Pb, Cr)의 함량 분석결과 (Table 3)에서 나타난 바와 같이 분석된 네 가지 원소들, Cu, Zn, Pb 및 Cr은 완전용해 후 총량을 분석한 경우 (Table 2)나 부분침출 후 분석된 결과 (Table 3)에서 모두 환경부가 정한 토양의 우려기준 이하의 값을 갖는다 (환경부, 1996). 탄산염암류를 기반암으로 한 토양과 반송층을 기반암으로 한 토양에서 다소의 광물조성 차이는 있으나 화학조성은 큰 차이를 보이지 않는다. 단, 영흥층의 Zn는 다른 석회암 기반암에서 기인된 토양보다 높은 값을 갖는다. 막골층과 반송층에서는 토양 내 석탄회의 함유량이 많고 적음에 따른 원소분포 차이를 알아보았다. 영흥층은 비교적 석탄회를 소량 포함하고 있다. 중금속원소들의 분포는 발전소를 중심으로 석탄회의

**Table 3.** Analytical data (ppm) of soil samples treated with 0.43N HNO<sub>3</sub>.

Sample No.	Cu	Zn	Pb	Cr	Sample No.	Cu	Zn	Pb	Cr
1	2.72	12.40	4.06	0.47	34	4.00	2.59	2.86	0.39
2	0.66	0.30	0.70	0.40	35	4.20	2.07	2.67	0.30
3	0.67	0.08	0.65	0.41	36	4.07	2.03	3.36	0.80
4	0.61	0.26	1.06	0.43	37	3.32	3.18	3.59	0.34
5	3.17	2.46	7.05	0.45	38	3.71	3.10	4.24	0.71
6	0.62	0.53	1.00	0.46	39	4.15	3.81	4.14	0.70
7	0.62	0.84	1.09	0.50	40	0.83	1.24	0.87	0.14
8	6.78	2.34	6.31	0.47	41	4.00	1.54	16.10	0.56
9	0.68	0.50	0.23	0.12	42	2.24	1.38	5.72	0.80
10	4.87	4.27	2.05	0.37	43	5.47	5.19	6.68	1.01
11	4.86	6.74	10.74	1.05	44	4.65	1.59	6.10	0.75
12	2.97	4.82	9.07	0.51	45	4.45	2.20	1.00	0.97
13	4.18	4.99	7.03	1.40	46	1.84	2.01	1.07	1.49
14	4.42	3.84	7.13	0.16	47	4.71	4.00	3.00	0.31
15	4.76	6.29	10.68	0.32	48	4.44	2.43	3.43	0.20
16	4.12	4.69	7.08	0.35	49	4.50	2.33	3.12	0.35
17	4.26	6.03	7.31	0.69	50	4.69	1.17	10.78	0.40
18	6.40	9.23	4.83	0.64	51	4.43	1.60	8.00	0.40
19	4.62	4.12	2.85	0.50	52	6.95	5.93	2.32	2.16
20	3.56	7.34	6.99	0.36	53	1.75	2.39	5.49	0.50
21	1.94	1.72	3.35	0.36	54	3.98	2.26	3.13	0.34
22	4.98	2.36	4.46	0.58	55	0.64	0.31	0.67	2.00
23	4.88	2.83	4.01	0.24	56	4.80	2.74	2.71	0.34
24	5.97	8.62	19.59	2.76	57	4.65	2.16	2.97	0.27
25	1.29	1.99	2.65	0.32	58	5.12	4.52	7.91	0.88
26	5.14	1.00	8.95	1.31	59	4.15	1.87	3.46	0.59
27	3.36	3.21	3.09	0.52	60	0.65	1.10	0.55	0.41
28	4.52	4.10	2.41	0.21	61	4.86	2.97	3.78	1.07
29	3.60	1.33	8.50	0.28	62	4.10	3.26	3.27	0.79
30	4.98	2.87	5.56	0.42	63	5.12	4.52	7.91	0.88
31	3.83	2.89	5.78	0.23	A	4.52	4.10	2.40	0.21
32	4.13	1.77	3.19	0.30	G	4.50	4.00	2.45	0.20
33	4.62	1.84	2.27	0.18					

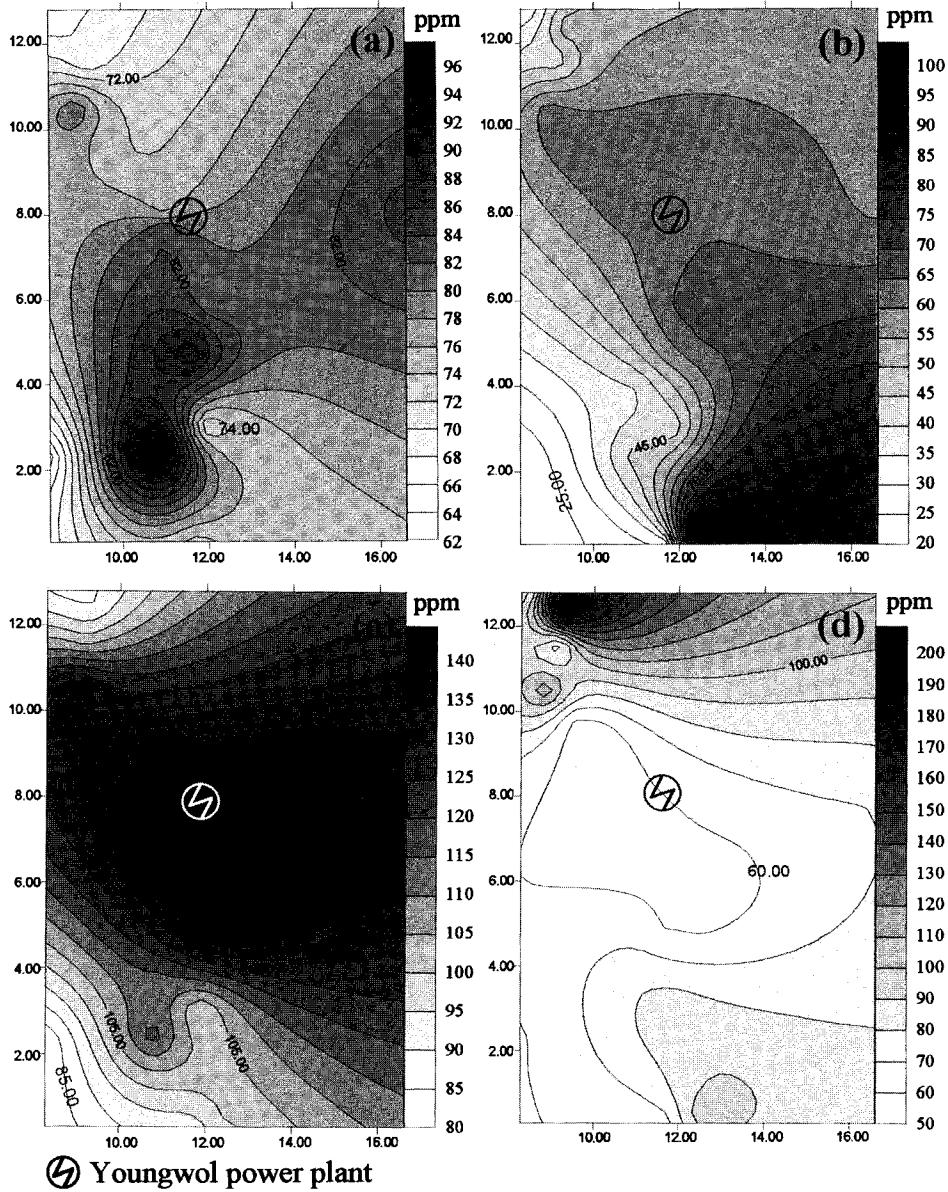


Fig. 4. Contouring maps of (a) Cr, (b) Cu, (c) V and (d) Zn in soils near Youngwol power plant (unit in ppm). Area covered in this map is marked as heavy line in Fig. 1.

함유량이 증가 할 수록 이의 영향을 받아 차이를 보이는데 일반 토양에서보다 현저하게 높은 V이 이를 잘 반영하고 있다 (Fig 4).

완전용해 후의 분석결과를 이용하여 발전소를 중심으로 제한된 지역에서 이들의 분포를 나타낸 것이 Fig. 4이다 (Fig. 1의 점선으로 나타낸 지역). 이 자료를 해석하기 위하여 토양 (석탄회를 소량 함유하거나 거의 함유하지

않은 시료)과 석탄회에서의 중금속의 평균함량을 비교하면 (Table 4), 석탄회에서 토양에 비하여 V, Cu 및 Cr이 부화되는 경향을 보인다. V은 부화되는 경향이 현저하나 다른 두 원소들 Cu와 Cr은 연구지역 토양에서보다 조금 높은 값을 보인다. 이에 반하여 Zn과 Co는 토양보다 석탄회에서 오히려 결핍되는 경향을 보인다. 토양내 V의 양은 모암 및 토양발달정도에 따라 다르다 (Alloway, 1995).

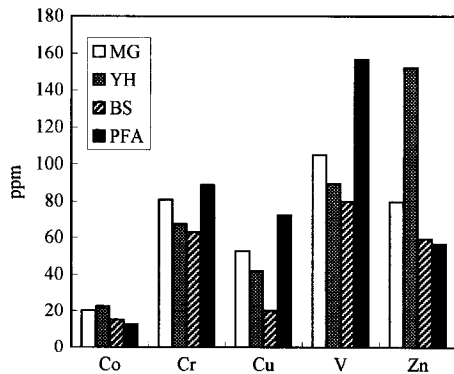
**Table 4.** Relative trace elements contents between fly ash and soils derived from Maggol, Yongheung and Bansong Formation containing extremely small amounts of fly ashes.

	Maggol Formation	Youngheung Formation	Bansong Formation	Fly ash*
Co	20	23	15	13
Cr	81	68	63	89
Cu	53	42	20	73
V	105	90	80	157
Zn	80	152	59	57

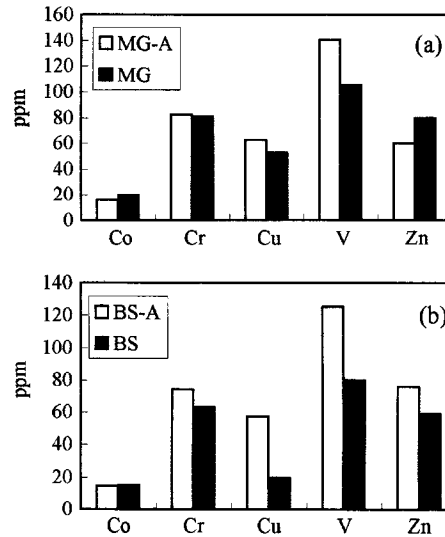
\* Average contents of EPA (electrostatic precipitator ash) and WFA (weathered fly ash).

본 역의 높은 V함량은 석탄회의 존재를 유추하는 주요 원소이나 V이 토양 개량제로서의 유효성을 설명하는 실험적 증거는 아직 찾지 못하였다 (Alloway, 1995; Adiriano *et al.*, 1980). 하지만 석탄회내의 V이 미래의 오염원으로 작용하게 될 것이며 1ha당 167톤의 석탄회는 전체 토양내 V의 함량을 10%정도 증가시킨다는 보고가 있다 (Alloway, 1995). 또한 V은 풍화과정 중 산성이나 알칼리성 환경하에서 전체 V함량의 50%가 풍화된 알칼리성인 석탄회로부터 용출될 것이라고 하였다 (Alloway, 1995).

동일한 지층에서 기원된 토양에서 발전소 근처의 토양 즉 석탄회를 상대적으로 많이 함유하고 있는 토양과 석탄회를 소량 혹은 거의 함유하지 않는 토양 두 가지를 막골층과 반송층 기원의 토양에서 비교하였다 (Fig. 6). Fig. 6a는 막골층 기원의 토양으로서 MG-A는 석탄회를 다량 함유하는 토양시료들의 평균 조성이며, MG는 석탄회를 소량 혹은 거의 함유하지 않은 토양 시료들의 평균 화학



**Fig. 5.** Comparison of average elemental concentration of Co, Cr, Cu, V and Zn in soils derived from various formations and PFA (Pulverized Fuel Ash). MG; Maggol Formation, YH; Yongheung Formation and BS; Bansong Formation.

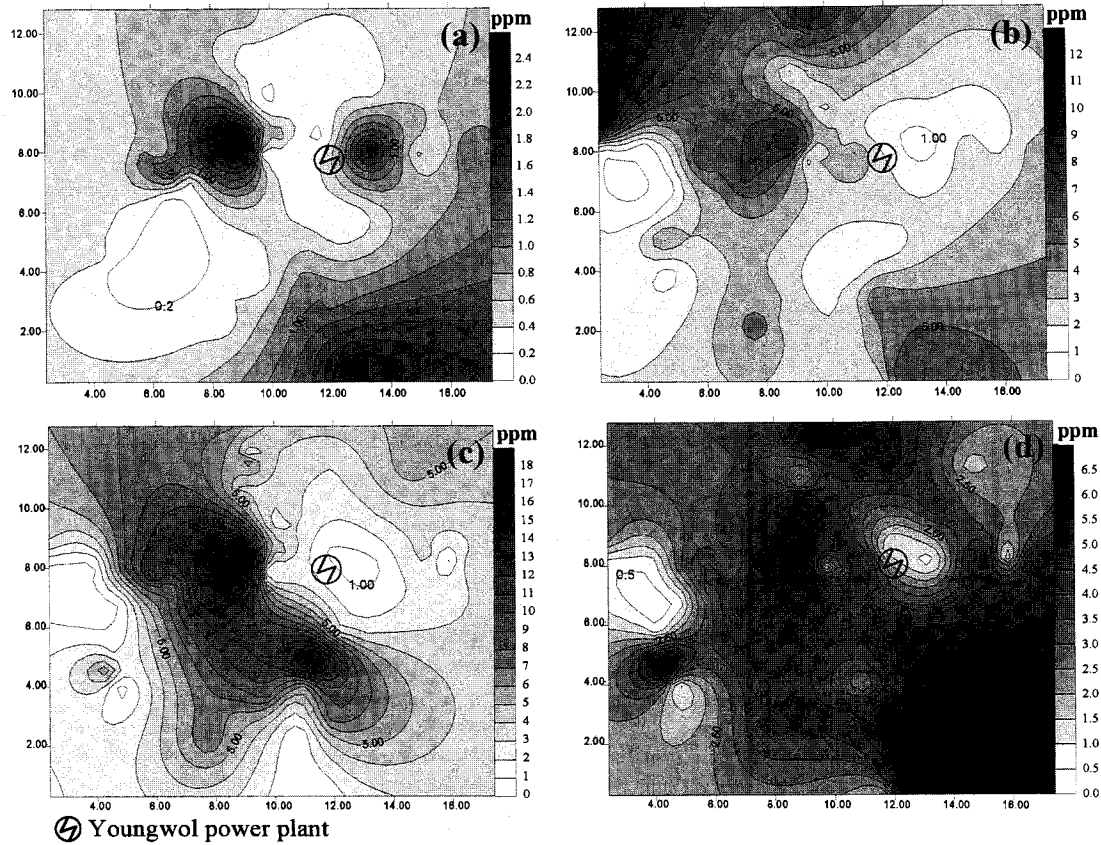


**Fig. 6.** Comparison of average elemental concentration of Co, Cr, Cu, V and Zn in soils. (a) soils derived from the Maggol Formation and (b) from Bansong Formation. MG-A and BS-A contain relatively large amounts of fly ashes. MG and BS contain less or extremely small amounts of fly ashes.

조성을 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 V을 제외하고는 이들의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 다만 토양에 비하여 그 함량차이가 큰 V만이 비교적 뚜렷한 차이를 나타낸다. 이러한 경향은 반송층을 기원으로 한 토양에서도 비슷한 경향성을 보인다 (Fig. 6b). 다만 반송층 기원의 원지성 토양에서 Cu가 상대적으로 결핍되는데 이러한 결과로 석탄회를 함유한 지층에서 Cu가 상대적으로 부화되는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 분포양상은 토양내에 함유되어 있는 석탄회의 양을 그대로 반영한 결과로 해석되어진다.

조사지역 내 65개 지점에서 채취된 시료들을 0.43N의 HNO<sub>3</sub> 침출법에 의하여 분석되어진 중금속 (Cu, Zn, Pb, Cr)의 분포는 Fig. 7과 같다. 이들 중금속 원소들은 토양과 석탄회에서의 함량이 뚜렷한 차이를 보이지 않기 때문에 토양내의 석탄회의 함량을 잘 반영한다고 보기는 어렵다. 이러한 분포양상은 완전용해 후 분석된 결과에서 관찰된 것처럼 반송층을 모암으로 형성된 토양에서의 약간의 Cu의 상대적인 부화가 관찰될 뿐 다른 뚜렷한 상관관계는 발견되지 않는다. 다만 다른 원소들에 비하여 Cr만이 석탄회가 상대적으로 농집된 토양에서 약간 부화되는 경향을 보일 뿐 다른 원소들은 석탄회의 함량과 중금속원소들의 분포가 일치되는 경향을 보이지 않고 있다.





⚡ Youngwol power plant  
**Fig. 7.** Contouring maps of (a) Cr, (b) Cu, (c) Zn and (d) Pb in soils treated with 0.43N HNO<sub>3</sub>, near Youngwol power plant (unit in ppm).

### 결론

석탄화재의 Co, Cr, Cu, V 및 Pb는 50% 이상이 석탄회 입자의 외부층에 주로 농집되어 있다. 영월화력발전소에서 배출된 석탄회는 이러한 중금속원소들의 함유량은 모두 토양의 우려 기준에 못 미치는 값으로서 이 지역의 중금속의 함유량만으로 위해성 여부를 평가한다면 문제가 되지 않는다. 또한, 중금속을 함유하고 있는 석탄회의 구성물질이 철광물(자철석 및 적철석)이기 때문에 이들 광물의 용해에 유리한 환경으로 변화되지 않는 한 석탄회를 함유한 토양이라 할지라도 크게 문제가 되지는 않을 것이다. 완전 용해된 석탄회의 Co, Cr, Cu, V 및 Zn함량은 13 ppm, 89 ppm, 73 ppm, 157 ppm 및 57 ppm이며 연구지역 토양내 석탄회를 다량 포함한 토양 및 소량이거나 거의 포함하지 않는 토양의 경우도 각각 Co, 15 ppm, 19 ppm, Cr, 78 ppm, 70 ppm, Cu, 60 ppm, 38 ppm, V, 133 ppm, 91 ppm, 그리고 Zn, 68 ppm, 97 ppm의 함량치를

보인다. 또한 그 함량이 우려할 수준은 아니라고 하지만 장기 침출시 미치는 영향은 충분히 고려되어야 할 것이다. 그리고, 장기간에 걸친 풍화작용에 의하여 유해원소가 다량 농집되어 있는 석탄회 내의 철광물들이 좀 더 자유롭게 반응에 참여하게 되어, 침출되는 양이 증가하게 되면 토양 자체에서의 오염을 우려할 수준은 아니지만 이때 일어나는 상전이에 따라 중금속원소들의 분산과 이동이 따르게 된다. 그런 경우 특정한 지화학적인 환경에서는 침출되는 원소들이 지하수의 오염원으로서 작용할 수도 있다. 이러한 반응은 경우에 따라 자연환경에 미치는 영향이 매우 심각하게 진행될 수도 있기 때문에 이러한 분야의 연구는 생태계의 오염을 방지하고 그 피해를 최소화하는데 지속적으로 추진되어야 할 것이다.

### 사사

본 연구는 1996년도 연세대학교 교내 학술연구비 지원

과 일부 1996년도 학술진흥재단 해외과건연구지원에 의한 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 신제성, 임동규, 성기석, 김만수 (1987) 홀라이 애쉬의 비료화 연구 I; Fly ash 의 광물학적 특성. 한국토양비료학회지, 20권, 309-314.
- 신제성, 임동규, 성기석 (1990) 홀라이 애쉬의 비료화 연구 II; 대두에 의한 홀라이 애쉬의 가리효과. 한국토양비료학회지, 23권, 204-207.
- 윤정한, 오근창, 김용웅, 신방섭 (1995) 삼천포와 서천화력발전소에서 발생하는 석탄회중의 중금속 함량에 관한 연구, 자원환경지질, 28권, p. 147-154.
- 이규호, 최선경, 문희수, 이상훈 (1997) 영월화력발전소에서 배출된 석탄회의 광물학적, 지화학적 특성. 자원환경지질, 30권, p. 443-450.
- 환경부 (1996) 토양환경보전 업무 편람.
- Adriano, D.C., Page, A.L., Elseewi, A.A., Chang, A.C. and Straughan, I. (1980) Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems: A review. *J. Environ. Qual.*, v. 9, p. 333-344.
- Akita, S. (1995) Recovery of Vanadium and Nickel in Fly Ash from Heavy Oil. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, v. 62, p. 345-350.
- Aitken, R.L. and Bell, L.C. (1985) Plant uptake and phytotoxicity of boron in Australian fly ashes. *Plant and Soil*, v. 84, p. 245-257.
- Alloway, B.J. (1995) Heavy metals in soils. 2nd edition. Blackie Academic & Professional.
- Campbell, J.A., Laul, J.C., Nielson, K.K. and Smith, R.D. (1980) Separation and Chemical Characterization of Finely-Sized Fly-Ash Particles. *Analytical Chemistry*, v. 50, No. 8, 1032-1040.
- Chinchon, J.S., Querol, X., Fernandez-Turiel, J.L. and Lopez-Soler, A. (1991) Environmental Impact of Mineral Transformations Undergone During Coal Combustion. *Environ. Geol. Water Sci.*, v. 18, No. 1, 11-15.
- Clarke, L.B. (1993) The fate of trace elements during coal combustion and gasification: an overview. *Fuel*, v. 72, No. 6, p. 731-736.
- Eary, L.E., Rai, D., Mattigod, S.V. and Ainsworth, C.C. (1990) Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: II. Review of the minor elements. *J. Environ. Qual.*, v. 19, p. 202-214.
- Ferraiolo, G., Zilli, M. and Converti, A. (1990) Fly ash disposal and utilization. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, p. 281-305.
- Filippidis, A. and Georgakopoulos, A. (1992) Mineralogical and chemical investigation of fly ash from the Main and Northern lignite field in Ptolemais, Greece. *Fuel*, v. 71, p. 373-376.
- Gay, A.J. and Davis, P.B. (1987) Some environmental aspects of coal fly ash. 1987. *Coal Science and Chemistry*, edited by A. Volborth. Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam.
- Greenberg, R.R., Zoliter, W.H. and Gordon, G.E. (1978) Composition and Size Distribution of Particles Released in Refuse incineration. *Environ. Sci. Technol.*, v. 12, No. 5, p. 566-573.
- Hower, J.C., Roberson, J.D., Thomas, G.A., Wong, A.S., Schram, W.H., Graham, U.M., Rathbone, R.F. and Role, T.L. (1998) Characterization of fly ash from Kentucky power plants. *Fuel*, v. 75, No. 4, p. 403-411.
- Hulett, L.D. and Weinberger, A.J. (1980) Some etching studies of the microstructure and composition of larger aluminosilicate particles in fly ash from coal-burning power plants. *Environ. Sci. Technol.*, v. 14, p. 965-970.
- Hulett, L.D., Weinberger, A.J., Northcutt, K.J. and Ferguson, M. (1980) Chemical Species in Fly Ash Coal-Burning Power Plants. *Science*, v. 210, No. 19, p. 1356-1358.
- Mattigod, S.V., Dhanpat Rai, Eary, L.E. and Ainsworth, C.C. (1990) Geochemical Factors Controlling the Mobilization of Inorganic Constituents from Fossil Fuel Combustion Residues: I. Review of the Major Elements. *J. Environ. Qual.*, v. 19, p. 188-201.
- Norton, G.A., Markuszewski, R. and Shanks, H.R. (1986) Morphological and Chemical Characterization of Iron-Rich Fly Ash Fractions. *Environ. Sci. Technol.*, v. 20, No. 4, p. 409-413.
- Pougnnet, M.A.B., Wyrley-Birch, J.M. and Orren, M.J. (1990) The boron and lithium content of South African coals and coal ashes. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, v. 38, p. 539-549.
- Queralt, I., Querol, X., Lopez-Soler, A. and Plana, F. (1997a) Use of coal fly ash for ceramics: a case study for a large Spanish power plant. *Fuel*, v. 76, No. 8, p. 787-791.
- Querol, X., Plana, F., Alastuey, A. and Lopez-Soler, A. (1997b) Synthesis of Na-zeolites from fly ash. *Fuel*, v. 75, No. 8, p. 793-399.
- Querol, X., Plana, F., Alastuey, A. and Lopez-Soler, A. (1995a) *Coal Science*, Elsevier Science. 1979-1982.
- Singer, A. and Bergaut, V. (1995) Cation Exchange Properties of Hydrothermally Treated Coal Fly Ash. *Environ. Sci. Technol.*, v. 29, p. 1748-1753.
- Stewart, B.R., Daniels, W.L. and Jackson, M.L. (1997) Evaluation of Leachate Quality from Codisposal Coal Fly Ash and Coal Refuse. *J. Environ. Qual.*, v. 26, p. 1417-1424.
- Vassilev, S.V. and Vassileva, C.G. (1996) Occurrence, abundance and origin of minerals in coals and coal ashes. *Fuel Processing Technology*, v. 48, p. 85-106.
- Vassilev, S.V., Kunihiro, K. and Vassileva, C.G. (1997) Relations between ash yield and chemical and mineral composition of coals. *Fuel*, v. 76, No. 1, p. 3-8.

1998년 8월 28일 원고접수, 1998년 11월 5일 게재승인.