

영월 화력발전소에서 배출된 석탄회의 광물학적, 지화학적 특성

이규호* · 최선경* · 문희수* · 이상훈**

Mineralogical and Geochemical Characteristics of PFA (Pulverised Fuel Ash) from Yongwol Power Plant

Gyoo Ho Lee*, Sun Kyung Choi*, Hi-Soo Moon* and Sang Hoon Lee**

ABSTRACT : The main purpose of this study is to investigate mineralogical and chemical changes during natural weathering, and assess the mobility of major and trace elements. Yongwol power plant utilize anthracite coal which is mainly composed of illite, kaolinite, pyrophyllite and quartz in mineralogy. Coal and coal-derived fly ash samples were sampled by the electrostatic precipitator in Yongwol coal-fired power plant in Korea. Short term weathered fly ash were also collected in ash disposal mound, and two profile soil samples were taken from an ash near the power plant. Amorphous materials are the main component of the fly ash, and mullite, quartz, magnetite and hematite are present in all coal-derived fly ash. In chemistry, Si and Al are the most abundant elements of the total content. The ash samples were fractionated into upper 90 μm and under 45 μm size. Finer particles show higher concentrations in metal contents including Co, Cr, Cu, Ni, V, Zn and Pb. Concentration of Zn and Pb are nearly 4 times higher concentration in the finer particles. For the profile samples, the concentrations of SiO_2 , Na_2O , MgO and K_2O generally show increasing trends with depth, whereas those of Fe_2O_3 and TiO_2 appear to decrease with depth. Content of MnO does not show any specific depth trend. For the trace elements, Co, Cu, Ni and V show increasing concentrations with depth.

서 론

석탄(유연탄 혹은 무연탄)을 연료로 사용하는 화력 발전소에서 필수적으로 발생하는 석탄의 연소산물 중 하나인 석탄회(PFA: Pulverised Fuel Ash)는 독특한 화학조성과 광물학적 특성을 갖고 있다. 석탄회가 갖는 광물학적, 화학적 특성은 대부분 연료로 사용되고 있는 원탄의 종류 및 연소조건에 따라 다양해진다(Gay *et al.*, 1987).

발전소에서 발생하는 고상폐기물인 석탄회의 양은 사용되는 석탄의 종류에 따라 석탄회 발생량의 차이는 있으나 오늘날에도 계속 필연적으로 발생하고 있으며 그 양이 증가되고 있는 추세에 있다.

석탄회는 석탄 생성당시 석탄이 갖는 유기탄소에 의한 강한 흡착의 결과 유용한 원소외에도 다양한 유해 원소들 동시에 함유하고 있다. 이의 적절한 활용을 유도하기 위

해서는 이들 석탄회 생성물에 대한 광물학적 및 지화학적 연구를 통하여 그 특성이 규명되어야 한다. 또한 이들이 자연계로 방출되어 토양의 구성성분으로 존재하는 경우 소성 산물인 석탄회라 할지라도 지표환경에 의하여 풍화작용을 받으며 그 결과로 상전이 따른 구성원소의 분산과 이동이 따른다. 그 결과 지하수의 오염원으로서 작용할 수도 있다.

국내의 석탄을 연료로 사용하고 있는 화력발전소는 여러곳이 현재 가동되고 있다. 최근에 건설된 화력발전소는 근대적인 집진기를 장치하여 석탄회의 배출량이 무시될 정도의 소량이다. 그러나 과거에 건설된 발전소의 경우에는 초기에는 기계식 집진기를 설치하여 석탄회의 회수율이 저조해 상당량이 주변 지역으로 배출되었다. 연구지역인 강원도 영월군 남한강 유역에 위치하는 영월 화력발전소 주변은 1965년에 가동을 시작하여 1981년 전기식 집진기가 설치되기 이전까지 과거 대기로 배출된 석탄회의 양이 막대한 지역으로서 발전소 주변의 토양에 상당한 두께로 퇴적되어 있을 뿐만 아니라 국내에서는 자연에 퇴적된 가장 오래된 석탄회의 하나이다. 1981년까지 이 곳에

* 연세대학교 지구시스템학과 (Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea)

** 한국카톨릭대학교 생명과학부 (Division of Life Sciences, Catholic University of Korea, Puchon 422-743, Korea)

서의 석탄소비량은 약 445만톤에 이르며 따라서 본 연구는 자연계로 다량으로 방출되어 이미 오래전에 토양의 주요 구성성분으로 존재하고 있는 석탄회의 지표환경에서 일어나는 단기간 풍화과정에 따른 광물학적 및 화학적 특성을 규명하고 토양 깊이에 따른 원소의 거동 및 입도 분포에 따른 원소의 분포와 거동을 고찰하였다.

시료 채취 및 분석

석탄의 연소 산물중 하나인 석탄회는 원탄의 종류에 따라 그 성분이 다양하며 또한 연소 조건에 따라 달라진다. 따라서 화력발전소에서 배출되는 석탄회의 특성이 늘 일정하다고 할 수는 없을 것이다. 그러나 영월화력발전소가 설립된 이후 국내 무연탄만을 사용 했으므로 성분상 큰 변화는 없으리라 생각된다. 본 연구를 위해 발전소에서 사용하고 있는 원탄 및 이의 연소 산물중 하나인 석탄회를 집진기에서 채취 (EPA : Electrostatic Precipitator Ash, 이하 EPA로 표기함)하였다. 또한 주변의 교란 받지 않은 토양 2곳에서 단면 시료를 핸드 오거를 사용하여 깊이 20 cm간격으로 복합시료를 만들어 채취하였다 (A-1, A-2, A-3, A-4, G-1, G-2, G-3). 또한 계곡에 매립된 석탄회(WFA : Weathered Fly Ash, 이하 WFA로 표기함) 1개를 채취하였다.

시료를 채취한 위치는 Fig. 1과 같다.

채취된 시료는 모두 실온에서 건조시켰으며 시료의 광물학적 조성을 알아보기 위해 MAC MXP-18A Rint-2500 X-선 회절 분석기를 사용하였다. 분석조건으로 Cu-K α 선을 사용, 가속 전압 및 전류는 40 Kv/20 mA, 발산 슬릿 1 mm, 산란 슬릿 1 mm, 수광 슬릿 0.15 mm 주사속

도는 3°/min으로 2 θ 3~60°구간을 분석하였다.

석탄회의 풍화에 따른 구성광물의 변질정도를 알아보기 위해 EPA 및 WFA를 박편 및 연마편을 만들어 전자현미분석을 실시하였다. 기기는 Si (Li) detector를 부착한 JEOL사 JXA-8600SX EDX을 이용하였으며 분석조건은 가속전압 15 kV, 시료전류 3.0 nA, beam직경 2 μ m, 분석시간은 100초이다. 형태적 고찰을 위해 주사 전자현미경 (SEM)을 사용하였다. 화학분석은 ICP/AES를 이용하여 분석하였다.

EPA 및 WFA의 입도 분포를 알아보기 위하여 MALVERN Instruments SB·0B를 사용하였으며, H₂O를 사용하여 자동증기 흡착기인 BELSORP 18을 이용 흡착능의 차이를 비교하였다.

결과 및 토의

광물학적, 형태학적 특성

국내산 무연탄을 사용하는 영월화력발전소의 경우 원탄의 X-선 회절분석결과 주 구성물질은 석탄이며 부성분 광물로서 상당량의 일라이트, 납석 및 카올리나이트와 소량의 석영을 함유하고 있다. 석탄의 연소산물 중 하나인 EPA는 주로 비정질로 이루어져 있으며, 결정질 물질로서는 소성 산물인 몰라이트, 석영, 자철석 (Fe₃O₄) 및 소량의 적철석 (Fe₂O₃)을 함유한다. 이중 Fe 산화광물은 원시료에서의 회절선 구분이 미약하여 자석을 이용하여 분리후 X-선 회절 분석하였으며, 단기 풍화과정에 의한 상변화를 알아보기 위해 WFA의 회절분석결과 EPA와 광물 조성상의 차이는 보이지 않는다. 또한 EPA 및 WFA내 점토입도 크기에서의 광물학적 조성차이를 알아보기 위해 입도 분리를 실시한 후 분석한 결과 유리질이 대부분임을 알수 있었다 (Fig. 2).

석탄회를 편광현미경 및 주사전자 현미경으로 관찰한 결과 입자크기는 매우 다양하여 직경 0.5~200 μ m 사이에 분포한다. 석탄회 입자는 형태에 따라 내부가 매우 작은 구형물질로 가득차 있는 플레로스피어 (plerosphere)와 내부가 비어있는 구형의 세노스피어 (cenosphere)로 구분할 수 있다 (Fig. 3a, 3c). 지표에 오랜기간 노출되어 있었던 WFA의 경우 EPA보다 불규칙적인 외부 형태를 갖는다.

일반적으로 석탄회는 구성성분이 불균질하며 후방산란 전자영상 (Backscattered Electron Image)으로 관찰시 원자량 차이에 의해 이의 구성물질중 상대적으로 밝게 보이는 Fe 주 구성 성분인 입자와 어둡게 보이는 Si 및 Al이

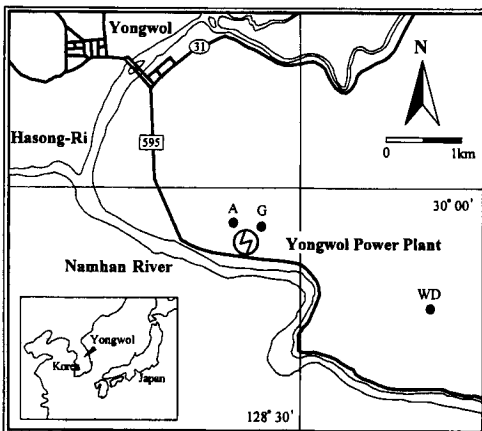


Fig. 1. Map showing location of Yongwol Power Plant and ambient, sampling sites and sources.

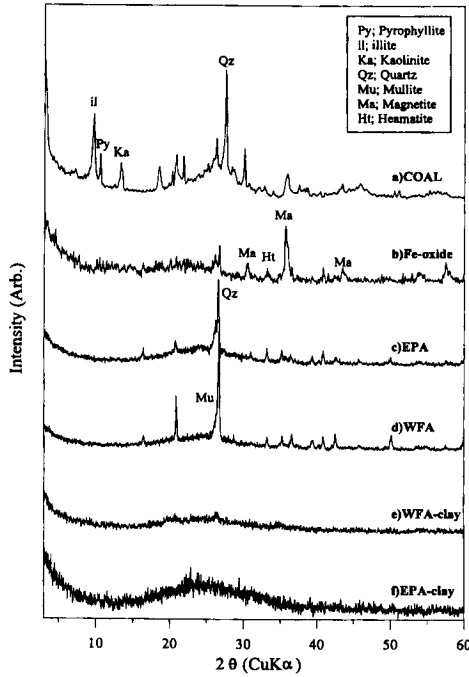


Fig. 2. X-ray diffraction patterns for the a) COAL, b) Fe-oxide, c) EPA, d) WFA, clay size fraction of, e) WFA and f) EPA.

주성분인 유리질 입자로 구분된다 (Fig. 3b). 그러나 이들 유리질 성분이 모두 Si 와 Al은 아니며 Fe를 주로 포함하고 있다. 이 유리질 성분을 $(SiO_2)_x \cdot (R_2O_3)_y$ 로 표기한다고 할 때, R은 Al이나 Fe가 주로 차지하고 있다. Fe가 주 성분인 입자표면을 후방산란전자영상과 주사전자현미경으로 관찰시 매우 다양한 외부결정 성장형을 관찰할 수 있으며 외부 뿐만 아니라 입자의 내부도 같은 결정성장형을 보여주며 주로 60 μm이하의 크기에서 흔히 관찰된다. 이들 입자의 내부와 외부에서 나타나는 결정 성장형이 동일한 것으로 보아 정출시 적어도 동일한 온도 조건에서 형성된 결과임을 시사한다. 결정형중 90°의 각도의 수직상으로 성장하는 마그네타이트의 결정구조는 결정성장속도가 빠를때 나타나는 형태로 (Fig. 4), 비교적 순수한 성분에서 성장된 것 (Booher *et al.*, 1994)이라고 알려져 있다. 석탄회내의 Fe-산화광물은 구조식 $Fe_3 \cdot M_xO_4$ 인 스피넬구조에서 M위치에서의 격자치환에 의해 V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn 그리고 Cu와 같은 일부 중금속 원소들이 다량 농집되 있으며 장기 침출이 일어나는 환경하에서 (Hansen, Fisher, 1981; Hulett *et al.*, 1980) 관심을 두어야 할 것이다. 석탄회 입자는 풍화받은 시료 가 보다 불규칙적인 형태와 표면조직을 보이며, 집진기에서 채취한 시료는 전형적인 구형의 형태를 보인다. 이들의 입도분포

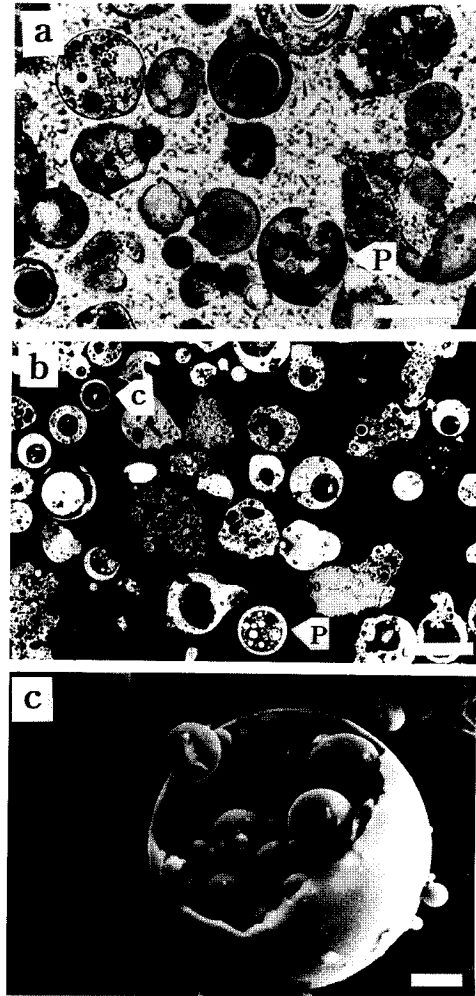


Fig. 3. a) Typical morphology of dominant types of fly ash particles seen in open with polarized light, b) The back-scattered electron images of fly ash sample (C; cenosphere P; plerosphere), The darker area is Si-rich and the brighter area is Fe-rich phase. c) SEM image showing typical fly ash particle contain microspheres. The horizontal bars represent 6 μm (a and b) and 100 μm (c).

및 형태는 원소의 용탈과도 관계가 있으므로 토양개량제로 활용시에도 중요하다.

집진기에서 채취한 시료 (EPA)와 지포에서 단기 풍화 받은 석탄회 (WFA) 사이의 입도 분포실험 결과는 다음과 같다 (Fig. 5). EPA 보다는 WFA에 작은 입자들이 분포되어 있으며 최대 입도 분포는 각각 102 μm 와 105 μm에서 나타난다. 자동흡착기를 사용한 H₂O흡착 실험에서는 WFA가 EPA보다 높은 값을 갖는다 (Fig. 6). 이는 입도 분석결과 WFA가 EPA보다 작은 크기의 것들로 이루어져 있고 따라서 작은입자가 보다 큰 표면적을 가질

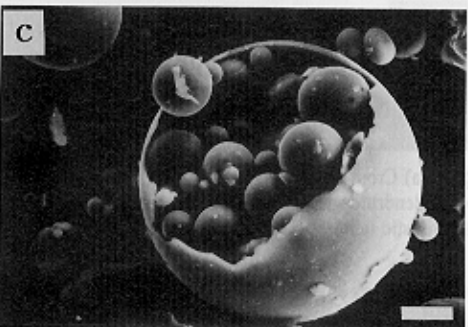
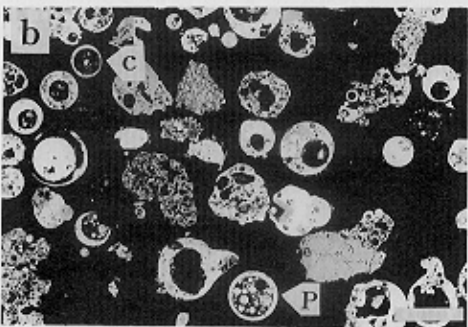
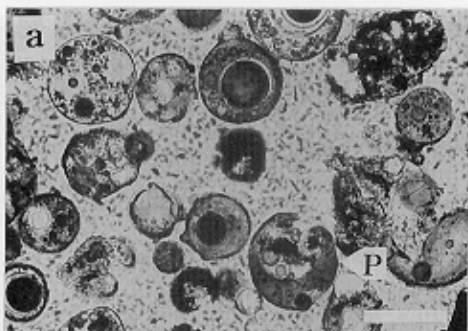


Fig. 3. a) Typical morphology of dominant types of fly ash particles seen in open with polarized light, b) The back-scattered electron images of fly ash sample (C; cenosphere P; plerosphere), The darker area is Si-rich and the brighter area is Fe-rich phase. c) SEM image showing typical fly ash particle contain microsphere. The horizontal bars represent 6 μm (a and b) and 100 μm (c).

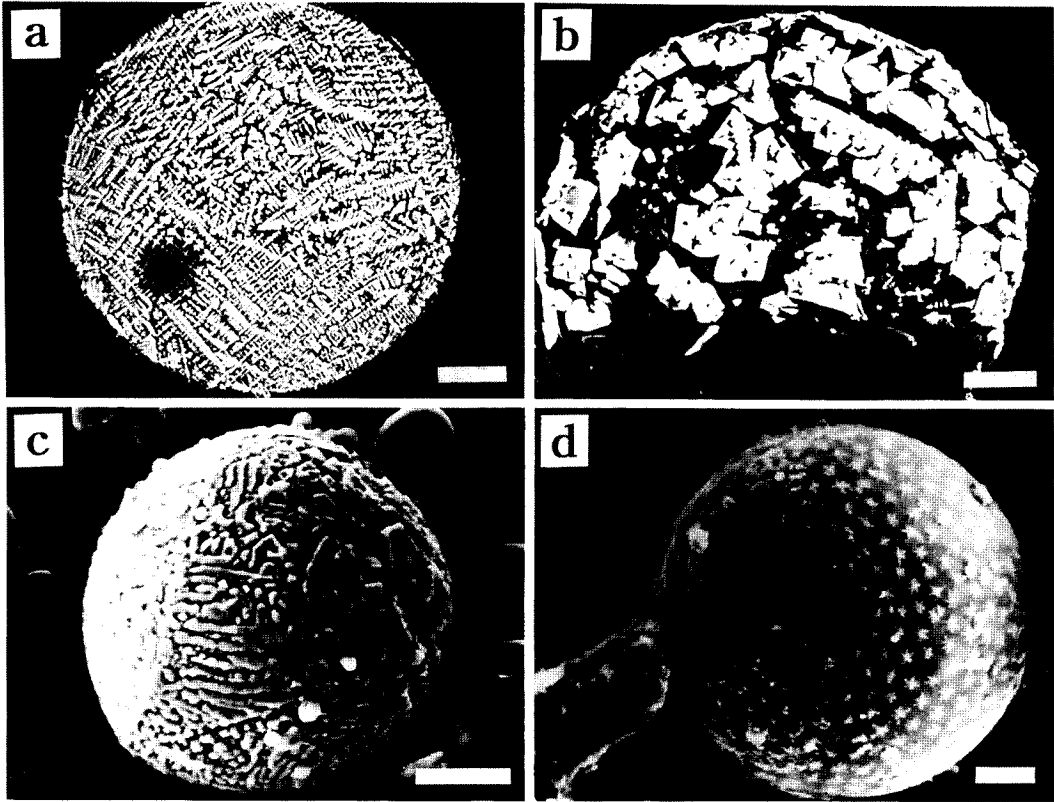


Fig. 4. a) Cross-sectional view showing fine dendritic growth in a particle. Symmetry of crystal structure in Fe-rich fraction, b) Coarse dendritic growth observed in a magnetic fraction from EPA. c) and d) SEM photographs of iron-rich phases showing characteristic textures on their surfaces (EPA). The horizontal bar represents 10 μm .

수 있으므로 흡착능이 크게 나타날 수 있고 또한 주사전 자현미경 관찰 결과시에도 WFA가 보다 불규칙한 입자를 많이 포함하며 따라서 표면적은 더욱 증가 되었으리라고

생각된다. 이러한 석탄회의 외부 결정형 및 입도크기 분포는 토양개량에 있어 조립질이나 세립질 토양에 객토자 원으로 사용할 경우 적정토성이 유지되어 토양구조가 발

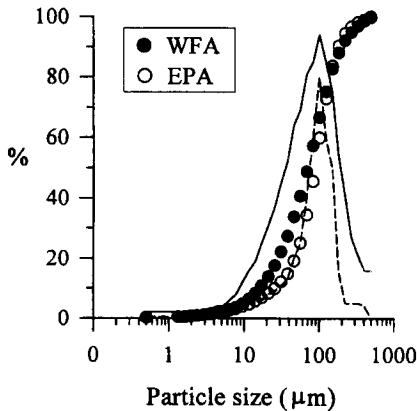


Fig. 5. Comparison of size distribution between WFA (Weathered Fly Ash) and EPA (Electrostatic Precipitator Ash). Solid line; WFA, dotted line; EPA

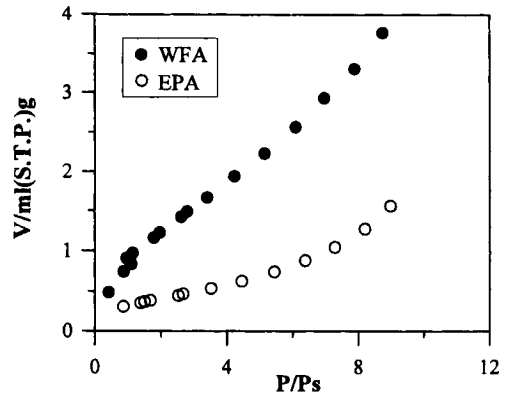


Fig. 6. Isotherm of adsorption capacities of WFA and EPA with H_2O . WFA; Weathered Fly Ash, EPA; Electrostatic Precipitator Ash.

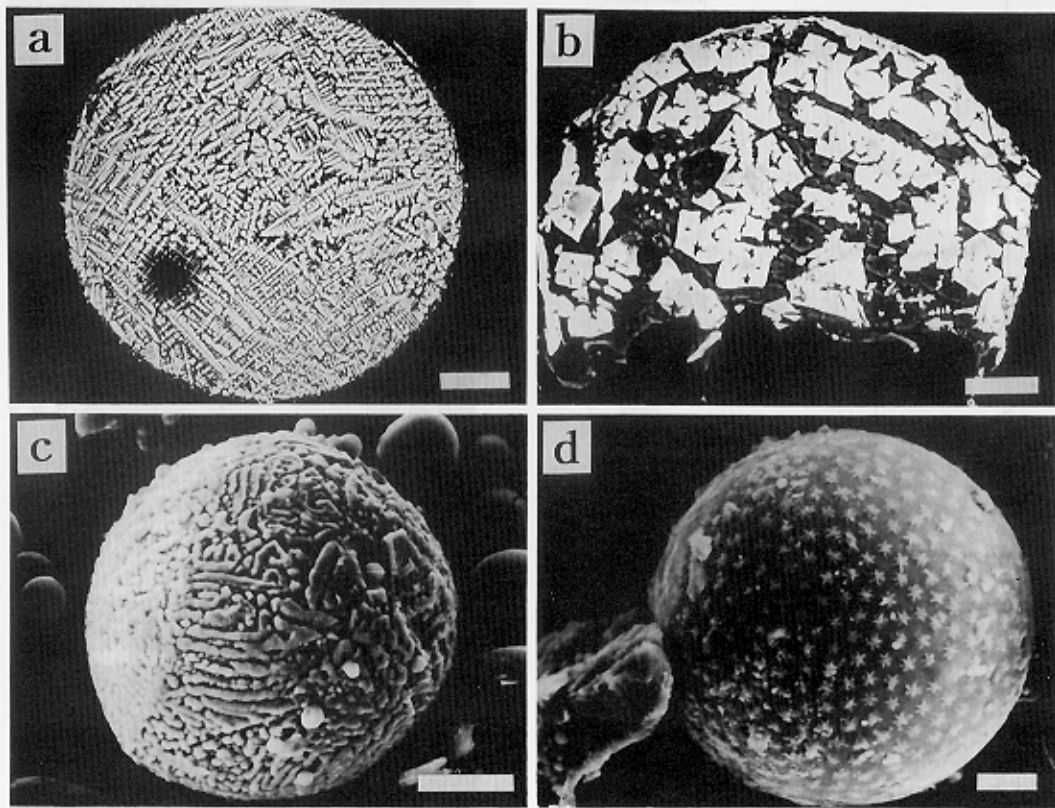


Fig. 4. a) Cross-sectional view showing fine dendritic growth in a particle. Symmetry of crystal structure in Fe-rich fraction, b) Coarse dendritic growth observed in a magnetic fraction from EPA. c) and d) SEM photographs of iron-rich phases showing characteristic textures on their surfaces (EPA). The horizontal bar represents 10 μm .

달되고 수분보존 능력이 증가하는 등 물리성이 개선된다 (한국전력공사 기술연구원, 1994). 또한 석탄회내의 원소 용탈 정도에 영향을 주게된다 (E1-Mogazi *et al.*, 1988).

석탄회의 지화학적 특성

원탄, EPA, WFA 그리고 입도분리된 시료의 주원소 및 중금속원소의 화학분석 결과는 다음과 같다 (Table 1). 원탄인 무연탄은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 그리고 K₂O 함량이 각각 21.63%, 13.11%, 1.81%, 1.65%로 유연탄보다 높은 함량을 보이는데 이는 국내산 무연탄이 일라이트, 카올리나이트, 남석등의 점토광물을 유연탄보다 많이 포함하고 있는 광물학적 조성을 반영하는 결과이다. 일반적으로 석탄회는 Si와 Al이 주구성원소 (Hulett, Weinberger, 1980; Matigod *et al.*, 1990; Dudas, Warren, 1988)로서 영월화력발전소 석탄회의 경우 SiO₂와 Al₂O₃함량이 70%에 이르며 Si/Al 원소비는 1.7이다. 원탄에 함유되어 있는 모든 주원소들은 석탄회에 부화되는 현상을 보여주는 바 원탄보다 연소산물인 석탄회에 1.6~2.6배 정도 농집되어 있다.

SiO₂, Fe₂O₃, MgO, 그리고 Na₂O는 EPA보다는 WFA에 다소 높게 나타나는데 이는 Fe-광물의 산화 및 Mg, Na가 Ca보다 용탈이 어렵기 때문이라 사료된다.

미량원소 역시 원탄보다는 석탄회에 농집되는 양상을 보이는데 Cr, Cu 그리고 V은 약 2배 농집되어 있다.

EPA 및 WFA의 입도별 원소분포를 알아보기 위하여 90 μm이상 및 45 μm 이하의 입도로 분리한 후 화학분석한 결과 EPA의 경우 모든 주원소가 45 μm 이하의 입자에서 1.3~2.0배 부화된 값을 보인다. 그러나 WFA의 경우에는 SiO₂ 및 Fe₂O₃의 부화현상이 나타나지 않는다. 중금속 원소의 경우 EPA와 WFA 각각 1.5~4.3배 그리고 1.1~4.0배의 높은 농집현상을 보이는데 이 중 Zn, Pb 및 Cu의 부화현상이 현저하게 나타난다 (Fig. 7,

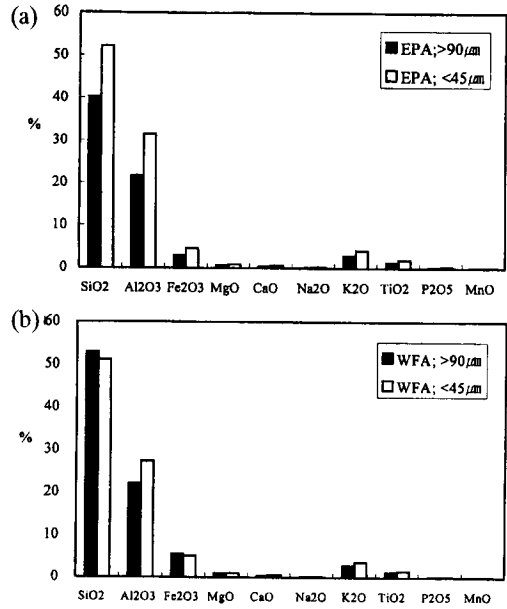


Fig. 7. Major element contents in the size fractionated a) EPA and b) WFA.

Fig. 8). 이는 석탄회의 경우 입자크기가 작을수록 표면적이 증가하고 따라서 고온의 연소과정에서 원소들이 입자표면에 흡착됨으로 인해 함량이 높아지는 경향이 보고된 바 있는데 (Campbell *et al.*, 1980; Chadwick *et al.*, 1987; Clarke, 1992), 이는 이러한 사실을 잘 반영한 결과로 보여진다.

깊이별 원소의 거동

단기 풍화과정에서는 하나 지표환경에서 풍화 받은 석탄회의 깊이에 따른 원소별 거동을 살펴보기 위하여 영월 화력발전소 주변토양 두 곳 (A, G)에서 단면시료를 핸드

Table 1. Major elements contents (wt%) in COAL, EPA, WFA and size-fractionated ash samples.

	COAL	EPA	EFA>μm	EPA<45 μm	WFA	WFA>90 μm	WFA<45 μm
SiO ₂	21.63	44.61	40.22	52.15	52.28	52.88	51.14
Al ₂ O ₃	13.11	25.11	21.68	31.60	20.80	22.00	27.27
Fe ₂ O ₃ (T)	1.81	3.79	2.91	4.59	4.32	5.41	5.02
MgO	0.37	0.75	0.63	0.86	1.21	0.91	0.93
CaO	0.25	0.50	0.37	0.62	0.36	0.40	0.52
Na ₂ O	0.09	0.16	0.13	0.22	0.23	0.14	0.19
K ₂ O	1.65	3.32	2.86	4.11	2.89	2.82	3.55
TiO ₂	0.59	1.54	1.30	1.89	1.03	1.24	1.43
P ₂ O ₅	0.08	0.15	0.12	0.24	0.11	0.13	0.25
MnO	0.02	0.04	0.03	0.05	0.02	0.05	0.05

T; total Fe content

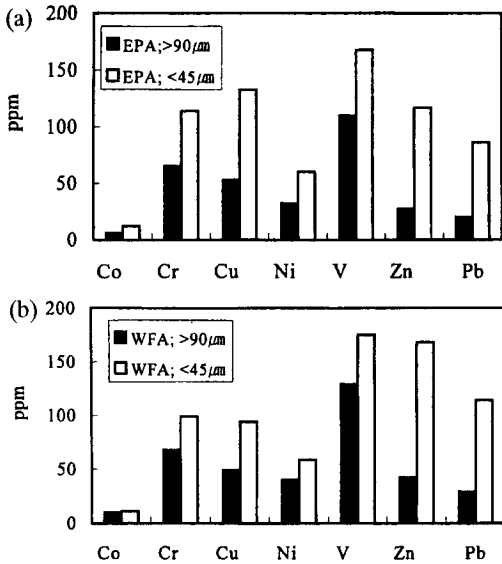


Fig. 8. Trace element contents in the size fractionated a) EPA and b) WFA.

오거를 이용하여 깊이 0~18 cm, 28~38 cm, 48~78 cm, 68~78 cm의 구간에서 복합시료로 채취하였다.

깊이에 따른 광물학적 조성은 X-선 회절분석 결과 차이를 볼 수 없었다. 그러나 주원소 및 미량원소는 깊이에 따른 변화를 보이는 바 그 결과는 다음과 같다 (Table 2). 주원소의 경우 SiO₂, MgO 및 Na₂O는 깊이에 따라 그 함량이 증가하며 TiO₂, Fe₂O₃ 그리고 P₂O₅는 감소하는 경향을 보여준다 (Fig. 9). 이는 풍화작용이 일어나는 동안 석탄회로부터 특정 원소의 용탈 정도를 지시하는 것이라 사료된다. 석탄회를 구성하고 있는 주 성분인 유리질은 Al과 Si로 주로 이루어져 있는데 이 유리질은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 하나는 Si가 풍부한 외부와 다른 하나는 석영-몰라이트로 구성되는 내부이다 (Hulett *et al.*, 1980; Dudas, Werren, 1988). 따라서 SiO₂의 경우 지표

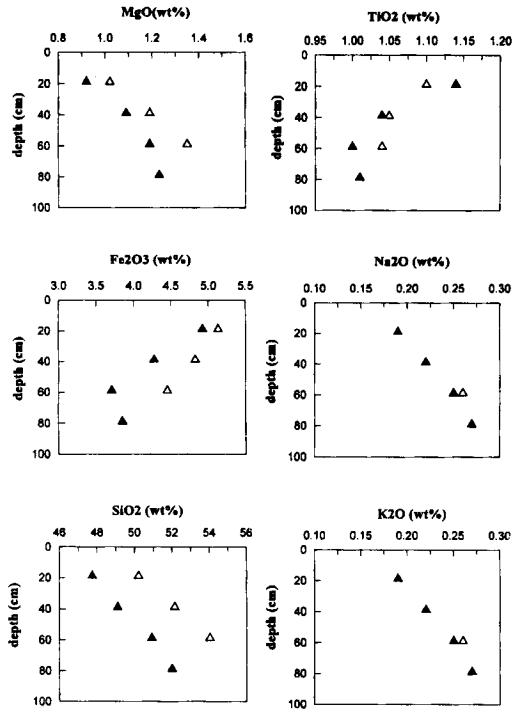


Fig. 9. Major elemental distributions related in depth trend (▲; A-series, △; G-series).

에 가까운 시료일수록 유리질내의 Si 용탈이 비교적 쉽게 일어나 지표에서 심부로 들어갈수록 그 상대적 함량이 증가되는 것이라 사료된다. Fe₂O₃ 함량은 지표로 갈수록 높은 함량을 보이는데, 이는 오랜시간 동안 지표환경하에 노출된 것일수록 보다 많은 산화과정을 겪었기 때문이라 사료된다. Ti 또한 이동성이 낮은 원소이고 따라서 지표에 많이 존재하게 된다. 미량원소의 깊이에 따른 원소 거동은 다음과 같다 (Fig. 10). Ni, V, Co, 그리고 Cu는 깊이에 따라 그 함량이 많아지는 경향을 보이는데 이는 이들 원소의 초기 용탈이 비교적 쉽게 일어난다는 사실과 잘 일치하는 경향을 보여준다. 그러나 Zn의 경우 G 계열의 시료는 뚜렷한 경향성을 보이고 있지 않으나 A계열은 깊이에 따라서 감소하는 경향을 보인다.

단면시료의 깊이에 따른 원소 거동 결과에 있어, 하부로 갈수록 증가되는 양상을 보이는 원소들은 지표환경하에 가까이 있을수록 원소의 용탈이 용이하였다는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 결과는 이들 원소가 석탄회를 구성하고 있는 물질의 어느 성분에 주로 농집되어 있는지 그리고 이들 원소의 환경조건에 따른 이동성에 따라 달라지게 된다. 따라서 이와 같은 결과는 자연퇴적된 석탄회에서 기인된 일부 중금속원소중 하부토양을 오염시킬 수 있

Table 2. Trace elements contents in COAL, EPA, WFA and size-fractionated ash sample.

	COAL	EPA	EFA >90	EPA <45 μm	WFA	WFA >90 μm	WFA <45 μm
Co	5	8	6	12	16	10	11
Cr	39	80	65	114	88	68	99
Cu	39	77	53	133	66	49	94
Ni	22	41	32	60	52	40	59
V	62	130	110	168	166	129	175
Zn	34	43	27	117	55	42	168
Pb	28	36	20	86	33	29	114

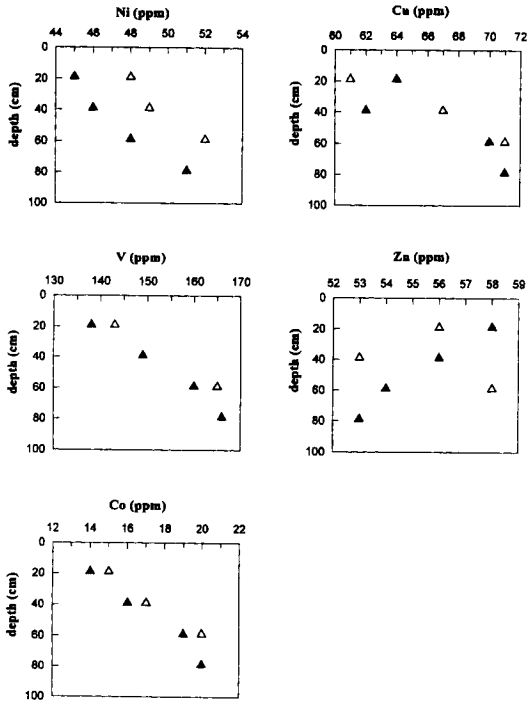


Fig. 10. Trace elemental distributions related in depth trend (▲; A-series, △; G-series).

는 잠재적 오염원소의 종류를 유추할 수 있으며 나아가 수질오염의 가능성도 예측할 수 있다.

결론

1) 원탄은 일라이트, 카올리나이트 및 납석과 같은 점토광물과 석영이 주 구성광물인 국내산 무연탄으로 유원

Table 4. Analytical results of trace elements (ppm) with depth trend in weathered fly ash mound.

Sample	A-1	A-2	A-3	A-4	G-1	G-2	G-3
Depth (cm)	0-18	28-38	48-58	68-78	0-18	28-38	48-58
Co	14	16	19	20	15	17	20
Cr	75	82	87	89	82	83	93
Cu	64	62	70	71	61	67	71
Ni	45	46	48	51	48	49	52
V	138	149	160	166	143	149	165
Zn	58	56	54	53	56	53	58

탄과 비교시 상대적으로 높은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 그리고 K₂O의 함량을 갖는다.

2) X-선 회절분석 결과 석탄회는 대부분 유리질로 구성되어 있고, 주 구성광물은 몰라이트와 석영이 대부분이며 소량의 Fe-광물(주로 자철석)로 이루어져 있다.

3) 석탄회는 Si와 Al이 70%정도 차지 하며 Mg, Na, Ca, K, 그리고 소량의 Ti로 이루어져 있다.

4) WFA에 Al, Ca, Ti, K, P, 그리고 Mn이 EPA보다 높은 값을 보인다. 미량원소 또한 WFA에 부화되어 있는 경향을 보인다.

5) 입도크기 분포에 따른 원소함량을 비교해 본 결과 EPA에는 실트입도 이하에서 주원소 및 미량원소가 모두 부화되어 있다. 또한, WFA 경우에는 주원소인 Si와 Fe를 제외하고 모두 45 μm 이하의 입자들에 더 많이 농집되어 있는 경향을 보인다.

6) 단면시료의 깊이에 따른 원소 거동을 알아본 결과, 주 원소의 경우 Si, Na, Mg, K는 깊이에 따라 증가하는 경향을 Fe, P, Ti는 감소하는 경향을 보이며, 미량원소는 Ni, V, Co 및 Cu는 깊이에 따른 증가경향을 그리고 Zn은 감소하는 경향을 보인다.

Table 3. Analytical results of major elements (wt %) with depth trend in weathered fly ash mound.

Sample	A-1	A-2	A-3	A-4	G-1	G-2	G-3
Depth (cm)	0-18	28-38	48-58	68-78	0-18	28-38	48-58
SiO ₂	47.74	49.10	50.92	51.99	50.21	25.15	54.03
Al ₂ O ₃	21.66	21.25	21.05	21.72	21.49	21.21	21.22
Fe ₂ O ₃ (T)	4.92	4.27	3.71	3.85	5.13	4.82	4.45
MgO	0.92	1.09	1.19	1.23	1.02	1.19	1.35
CaO	0.35	0.33	0.29	0.30	0.36	0.40	0.45
Na ₂ O	0.19	0.22	0.25	0.27	0.19	0.22	0.26
K ₂ O	3.03	2.91	2.99	3.14	3.14	3.01	3.17
TiO ₂	1.14	1.04	0.00	1.01	1.10	1.05	1.04
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.10	0.10	0.14	0.12	0.11
MnO	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03

T; total Fe content

사 사

이 연구는 학술진흥재단의 1996년도 해외파견 연구지원과 대우재단의 1996년도 장학연구지원에 의하여 수행되었음을 밝히고 이에 감사한다.

참고문헌

- 한국전력공사 기술연구원 (1994) 토양개량제로서의 석탄회 이용 연구. p. 1-402.
- Booher, H.B., Martello, D.V., Tamilia, J.P. and Irdi, G. (1994) Microscopic study of spheres and microspheres in fly ash. *Fuel*, v. 73, p. 205-214.
- Campbell, J.A., Laul, J.C., Nielson, K.K. and Smith, R.D. (1978) Separation and chemical characterization of finely-sizes fly-ash particles. *Analytical Chemistry*, v. 50, p. 1032-1040.
- Chadwick, M.J., Highton, N.H. and Lindman, N. (1987) In 'Environmental Impact of Coal Mining and Utilization', Pergamond Press, Oxford.
- Clarke, L.B. (1993) The fate of trace elements during coal combustion and gasfication: an overview. *Fuel*, v. 72, p. 731-736.
- Dudas, M.J. and Werren, C.J. (1988) Submicroscopic structure and characteristics of intermediate calcium fly ashes. (In: Fly ash and coal conversion by-products: Characterization, utilization and disposal VI. edited by McCarthy, G.J. Glasser, F.P. Roy, D.M. and R.T. Hemmings. p. 309-316). *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* v. 113, Materials Research society, Pittsburg, P.A.
- El-Mogazi, D., Lisk, D.J. and Weinstein, L.H. (1988) A review of physical, chemical, and biological properties of fly ash and effects on agricultural ecosystems. *The Science of the Total Environment*, v. 74, p. 1-37.
- Gay, A.J. and Davis, P.B. (1987) Some environmental aspects of coal fly ash (In *Coal Science and Chemistry*. edited by A. Volborth. p. 221-243). Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Hansen, L.D. and Fisher, G.L. (1980) Elemental distribution in coal fly ash particles. *Environ. Sci. Technol.* v. 14, p. 1111-1117.
- Hulett, L.D. and Weinberger, A.J. (1980) Some etching studies of the microstructure and composition of large aluminosilicate particles in fly ash from coal-burning power plants. *Environ. Sci. Technol.* v. 14, p. 965-970.
- Hulett, L.D., Jr., Weinberger, A.J., Northcutt, K.J. and Ferguson, M. (1980) Chemical species in fly ash from coal-burning power plants. *Science*, v. 210. 19. p. 1356-1358.
- Mattigod, S.V., Rai, D., 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.

1997년 9월 20일 원고접수