

浮遊分離法에 의해分離한高純度精製石炭灰와高炭素石炭灰의特性

李靖彦 · 安泳徹 · 金成贊 · 具宰賢 · 羅晟洙 · 辛鎮赫 · 李在瑾

釜山大學校 機械工學科

*釜山大學校 工科大學院 粉體工學科

Properties of Carbon-Rich Particles and Purified Ash Obtained from Countercurrent Column Flotation

Jung-Eun Lee, Young-Chull Ahn, Seong-Chan Kim, Jae-Hyun Ku, Sung-Soo Na, Jin-Hyok Shin and Jae-Keun Lee

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

**Powder Technology Engineering, Graduate School, Pusan National University*

요 약

석탄 화력 발전소에서 발생하는 수백만 톤의 석탄회를 대부분 회사장(Ash Pond)에 매립함에 따라 해양오염 유발, 회사장 포화에 따른 발전소의 수명 감소, 그리고 재활용 가능한 자원의 낭비와 같은 문제를 유발하고 있다. 국내외적으로 이와 같은 문제를 해결하기 위해 석탄회를 구성하고 있는 미연탄소와 산화광물 성분을 재활용하기 위한 연구가 진행되고 있다 따라서 본 연구는 역류 컬럼 부유 분리장치를 이용하여 미연탄소분 함량이 LOI 0.5%인 고순도 석탄회와 미연탄소 함량이 LOI 70% 정도인 고탄소 석탄회를 분리하여 각 회분의 특성을 물리적, 그리고 화학적 특성별로 분석하였다. 그 결과 정제 석탄회는 대부분 구형의 입자로 질량 평균 입경은 39.8 μm 정도로 분석되었으며 비표면적은 2.2 m^2/g 으로 나타났다 그리고 산화광물질은 대부분 플라이트와 석영을 구성하는 실리카와 알루미늄 성분으로 약 83%으로 분석되었다 고탄소 석탄회의 경우 대부분 비구형의 입자로 질량평균 입경은 76.6 μm 로 정제 석탄회에 비해 크고 비표면적은 15.2 m^2/g 으로 분석되어 정제 석탄회와 상당한 차이를 보이고 있다. 또한 고탄소 석탄회에서 산화광물질을 이루고 있는 주된 성분은 실리카와 알루미늄으로 정제 석탄회와 동일하나 함량 정도는 48%로 정제 석탄회의 함량 보다 매우 적어 정제 석탄회와 고탄소석탄회의 특성은 상당한 차이가 있는 것으로 분석되었다

주제어: 고순도 정제 석탄회, 고탄소 석탄회, 입도, 비표면적, 재활용

ABSTRACT

Fly ash generated from the pulverized coal power plant have caused the serious ocean pollution due to the disposal in the ash pond, the life reduction of a power plant and the waste of re-utilizable resource. The research to reuse the unburned carbon and mineral composing of the ash has been progressed. In this study, the physical and chemical characteristics of high grade ash and unburned carbon particles obtained from countercurrent column flotation are investigated. The cleaned ash of the less 0.5% loss on ignition(LOI) in carbon content is a spherical sphere and 39.8 μm in size of MMD(Mass Median Diameter), 2.22 m^2/g of specific area. The morphology of high LOI carbon particles is a amorphousness, 76.6 μm of particle size and 15.2 m^2/g of specific area. The high grade cleaned ash and the high LOI ash have some difference in the light of physical, chemical and morphological characteristics

Key words: Fly ash, column flotation, chemical composition, particle size, specific surface area

* 1998년 12월 30일 접수, 1999년 5월 14일 수리

* E-mail: jelee4@hyowon.pusan.ac.kr

1. 서 론

석탄회는 석탄이 연소되면서 기연성성분은 연소된 후 잔류한 입자성 물질을 총칭하는데 연소배기가스에 동반되어 연소영역 밖으로 배출되는 비교적 입자가 큰 다공성 입자와 단단한 구형의 입자로 이루어져 있다.¹⁾ 광물 성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 을 비롯한 산화광물질이 약 90%를 차지하고 미연탄소는 5~15% 정도 함유되어 있는데,²⁾ 광물성분은 콘크리트 혼화제, 시멘트 대용제 등의 건축용 재료뿐만 아니라 화장품, 섬유, 반도체의 충전제(Filler) 등으로 활용이 가능하다. 또한 미연탄소 함량이 높은 고탄소 석탄회는 재연료, 야금용 탄소, 흡착제 등으로 재활용 할 수 있다. 하지만 현재 석탄회의 재활용 범위는 시멘트, 레미콘 분야에 주로 이용되고 있으며 기타 분야는 극히 미미한 실정이다. 따라서 공업 원료로서 석탄회를 재활용하기 위해서는 석탄회를 고순도의 광물산화물로 이루어진 정제 석탄회와 미연탄소 함량이 높은 고탄소 석탄회로 분리하는 기술 개발이 무엇보다 중요하며 이때 생성되는 정제 석탄회와 고탄소 석탄회의 특성에 대한 정확한 이해가 필요하다.³⁾ 따라서 본 연구는 석탄화력 발전소에 발생하는 석탄회를 역류컬럼 부유분리를 통해 분리하여 채취한 고순도 정제 석탄회와 고탄소 석탄회 시료의 각 특성을 분석하였다.

각 시료의 특성을 다양한 각도에서 이해하기 위해 시료의 입도 등의 물리적 특성 분석, 입자의 형상과 비표면적 특성 해석을 통한 형태적 특성 분석, 그리고 분리된 시료의 미연탄소 함량 및 결정 구조를 이루고 있는 산화광물 성분의 분포 정도를 파악하기 위한 화학적 분석을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1. 석탄회의 분리 방법

고순도 정제 석탄회와 고탄소 석탄회를 얻기 위하여 역류컬럼 부유분리 장치를 이용하였다. 본 장치는 입자 표면에 작용하는 친수성과 소수성의 차이를 이용하여 분리하는 장치로서 석탄회에 함유되어 있는 미연탄소는 소수성의 특성을 띠므로 기포와 부착하여 컬럼의 상층부로 부유하며, 산화광물질은 친수성 입자로 기포와 부착되지 않고 컬럼의 하부로 이동하여 분리된다.

Fig. 1은 실험장치 구성을 나타낸 것으로서 역류 컬럼 부유분리장치, 기포발생장치, 컬럼 그리고 교반조 등으로 구성되어 있다. 석탄회는 광액농도 20 wt% 슬러

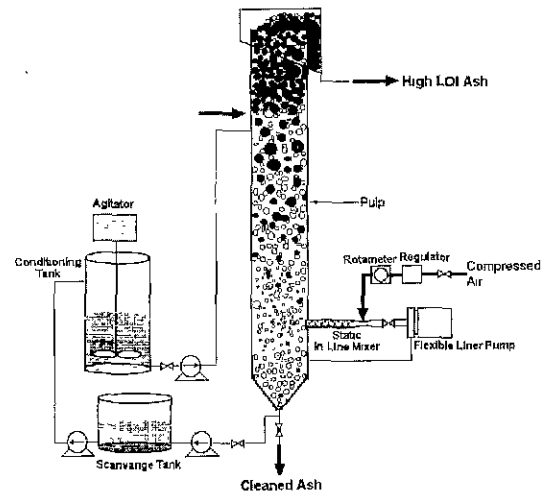


Fig. 1. Schematic diagram of the countercurrent column flotation apparatus.

리 상태로 제조하여 기포제(Frother)와 포수제(Collector)를 각각 40 ml를 혼입한 다음 교반기로 30분 동안 교반후 컬럼내로 분당 2/l를 공급하였다. 동시에 컬럼의 하부에서 압축공기(1 kg/cm²)를 기포발생장치로 통과시켜 0.5~1 mm 크기의 미세기포를 분당 7/l로 컬럼내에 주입하였다. 컬럼의 상부측의 회수조(Froth side tank)에서 채취한 고탄소 석탄회와 컬럼의 하부조(Tail side tank)에서 채취한 고순도 정제 석탄회에 대하여 각각 물리적, 형태적, 그리고 화학적 특성 등을 분석하였다.

2.2. 분석 방법

정제 석탄회와 고탄소 석탄회의 물리적, 형태적, 그리고 화학적 특성을 파악하기 위해 입도분포, 밀도, 입자의 형상, 비표면적 및 기공, 그리고 미연탄소 함량, 각 석탄회에 함유된 화학적 구성성분 분포등을 항목별로 분석하였다. 각 시료의 미연탄소 함량은 강열감량법을 이용하였으며 화학적 구성성분을 정성적, 정량적으로 분석하기 위해 엑스선 회절 분석기(XRD)와 에너지 분산 엑스선 분광분석기(EDXA), 그리고 엑스선 형광 분석기(XRF)를 이용하였다. 입자의 입도분포를 분석하기 위해 입도분포측정기를 이용하였고 입자의 형상은 전자현미경으로 표면형상 변화를 관찰하였다. 또한 표면특성분석기로 입자의 기공 및 비표면적을 구하였다.

2.2.1. 물리적 특성 분석법

입도분포는 입자의 물리적 특성을 파악하는데 있어 중요한 요소로, 석탄회의 분리특성에 대한 물성을 파악

할 수 있을 뿐만 아니라 미연탄소함량과 입자 크기의와의 관계를 알 수가 있다. 입도분포는 입도분포측정장치(Malvern, Mastersizer)를 이용하여 분포도, 누적분포, 질량평균입경(Mass Median Diameter : MMD)을 조사하였다.

입자의 형상은 입도 분포, 미연탄소함량, 그리고 비표면적과 밀접한 관계가 있어 매우 중요하다. 석탄회 입자의 형상 및 표면 특성은 전계방사형 주사전자현미경(Hitachi, FEG-SEM, S-4200)을 이용하였으며 입자의 비표면적, 체적 그리고 기공의 크기는 표면특성분석기(Micromeritics, SCA, ASAP-2010)를 이용하였다.

2.2.2. 화학적 특성 분석법

각 시료에 대한 미연탄소의 함량에 대한 분석은 석탄회 분리장치의 성능을 조사할 수 있는 기준일 뿐 아니라 정제 석탄회와 고탄소 석탄회의 순도를 결정할 수 있는 자료로 활용될 수 있다. 미연탄소 함량에 대한 분석은 강열감량법(KS L-5405)으로 분석하였으며 화학적 구성성분은 정성적, 정량적 측면에서 분석을 하여 두 시료의 성분 변화를 파악하였다. 정성적 분석은 엑스선 회절 분석기(Rigaku, Max-2400, XRD : X-ray Distribution)와 에너지 분산 엑스선 분광분석기(Hitachi, Hitachi S-4200, EDXA : Energy Dispersive X-ray Spectrometer Analysis)와 같은 X선 회절 분석법으로 분석하여 입자를 구성하고 있는 화합물을 온도변화에 따라 구조 및 입자의 결정을 관찰함으로써 각 시료를 구성하고 있는 산화광물질의 성분분포를 분석하였다. 정성적으로 분석된 산화광물질의 각 성분의 함유 정도를 파악하기 위한 정량적 분석은 엑스선 형광 분석기(Phillips, PW1480, XRF : X-ray Fluorescence Sequential Spectrometer)를 이용하는데, 이는 시료의 화학적 조성 범위를 파악하기 위해 사용한 방법으로서, 시료를 950°C에서 연소하여 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 과 1:5로 혼합하여 1200°C에서 다시 용융하여 분석하였다.

3. 실험결과

3.1. 석탄회 분리 실험 결과

Table 1은 LOI 9.3% 석탄회를 역류부유선별 장치로 분리한 후 얻은 결과를 나타낸 것으로, 고순도 석탄회와 고탄소 석탄회의 미연탄소 함량 분포이다. 강열감량법으로 분석한 결과, 고순도 석탄회는 LOI가 0.65%이었고 고탄소 석탄회는 미연탄소 함량이 LOI 57.6%였다. 정제 석탄회 회수율은 84.8%이고 고탄소 석탄회

Table 1. Separation results of the fly ash using the counter-current column flotation

Ash Type	Weight distribution (%)	Carbon content by LOI analysis (Wt%)	Carbon distribution (%)
Raw Ash	100	9.3	100
Cleaned Ash	15.2	0.6	5.9
High LOI Ash	84.8	57.6	94.1

의 회수율은 15.2%로 분석되었다. 미연탄소 함량과 분리후 회수한 량을 통해 각 시료의 미연탄소 분포도를 분석한 결과 정제 석탄회는 5.9%이고 고탄소 석탄회는 94.1%로 파악되었다.

3.2. 물리적 분석 결과

3.2.1. 입도분포 분석 결과

Fig. 2는 원시료, 정제석탄회, 그리고 고탄소 석탄회의 입도분포 및 누적분포의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 원시료 석탄회에 대한 입도분포 변화를 나타낸 것으로 Bimodal 형상의 입도 분포를 이루고 있으며 미세입자 모우드는 입경이 0.25 μm , 큰 입자 모우드는 입경이 약 80 μm , 질량평균입경은 39.78 μm 로 분석되었다. 누적분포는 기울기를 통해 입도 분포의 변화량을 파악할 수 있는데, 10 μm 에서 100 μm 까지 범위에서 그래프에서의 기울기 변화량이 크므로 이 범위에서 입자 분포의 집중화가 이루어져 있었다. Fig. 2(b)는 고탄소 석탄회 입자의 입도분포를 분석한 것으로 원시료의 입도분포에서 나타나는 미세 입자 모우드는 거의 소멸해 버렸을 뿐만 아니라 큰 입자 모우드의 분포가 우측으로 이동하여 질량평균입경이 76.52 μm 로 원시료에 비해 크게 증가하였다. 이는 고탄소 석탄회에서 대부분을 차지하고 있는 미연탄소 입자의 영향에 의해 입자의 크기 분포 및 질량평균입경이 증가한 것이다. 이에 반해 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 정제석탄회의 입도 분포는 고탄소 석탄회의 입도분포와 완전히 다른 경향으로 분석되었다. 1 μm 이하의 미세 입자 모우드의 최고값은 원시료에 비해 증가한 반면 큰 입자의 모우드는 감소하였으며 질량평균입경이 12.19 μm 로 석탄회 분리전 원시료에 비해 입경이 상당히 감소하였다. 이는 정제 석탄회를 구성하는 주된 물질은 입자의 크기가 미연탄소에 비해 상대적으로 작은 산화광물 입자라는 사실을 알 수 있다.

결국 고탄소 석탄회의 입도크기는 원시료에 비해 증가하고 입도분포는 미세입자 모우드의 최고값은 감소하

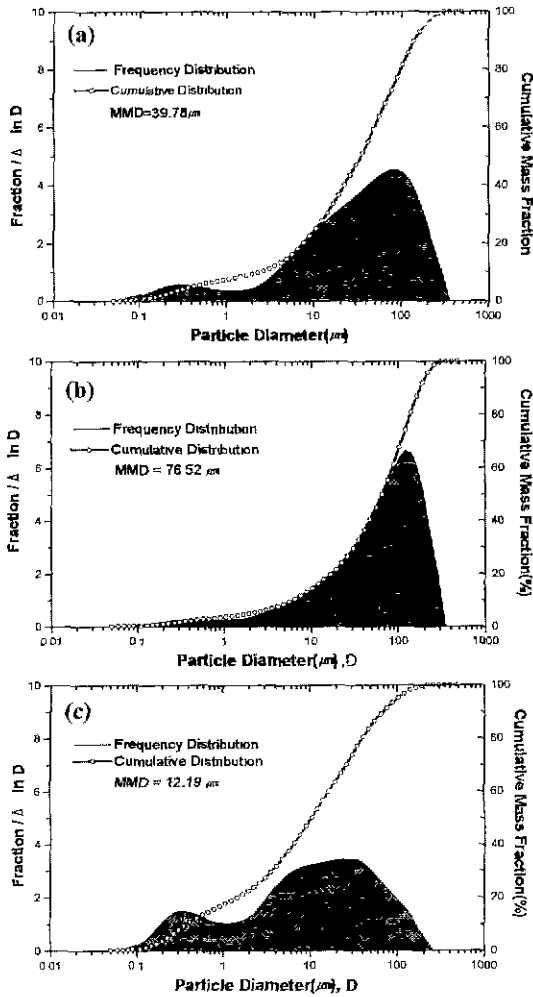


Fig. 2. Size distributions of the fly ash: (a) raw ash, (b) cleaned ash, (c) high LOI ash.

고 큰 입자의 모우드 최고값은 증가하였다. 반면 정제 석탄회의 경우 입도크기는 원시료에 비해 감소하였고 입도분포는 미세 입자 모우드는 원시료에 비해 증가한 반면 큰 입자 모우드는 감소한 결과를 얻었다. 따라서 두 시료의 특성은 입자의 입도 분포상에 나타나는 경향성을 통해 분리정도 및 입자의 물리적 특성의 차이점을 분석할 수 있다.

3.2.2. 입자의 형상 분석

석탄회가 연소과정에 있을 때 보일러의 화염 온도가 1400°C를 초과하므로 무기물질은 대부분 용융됨에 따라 물리, 화학적 변화를 겪는데, 이때 나타나는 가장 뚜렷한 현상은 석탄 입자가 완전히 연소하게 되면 용융입자의 표면에 표면장력을 최소화하기 위한 작용에 의해 구형 입자가 생성되는 반면 완전히 연소되지 못한 석탄회 입자는 비구형의 입자로 남게 된다. Fig. 3은 석탄회를 구성하고 있는 구형성 입자와 비구형성 입자에 대한 분석 사진으로서 부유분리법을 이용하여 분리한 정제 석탄회와 고탄소 석탄회를 전자현미경으로 촬영한 것이다. Fig. 3(a)은 미연탄소와 산화광물 입자의 서로 혼재해 있는 석탄회 원시료를 구성하고 있는 입자 형상을 나타낸 것으로 비구형의 미연탄소 입자와 구형의 산화광물 입자를 파악할 수 있다. 그런데 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 고순도 석탄회는 구형의 입자들로만 구성되어 있는데 석탄입자가 완전히 연소되면서 석탄내에 함유되어 있는 무기질 성분이 용융되어 형성된 것이다. 따라서 강도가 강하고 입자의 형성이 균일하며 입도분포에서 파악한 바와 같이 미세 입도 분포로 이루어져 있으므로 콘크리트 혼화제 및 섬유 또는 도자기등의 충전제(Filler)로 활용이 가능하다. Fig. 3(c)은 고탄소 석탄회의 형상에 대한 분석 사진으로서 입자의 형상은 대부분 괴상이며 표면에는 미세기공이 많은 입자(Porous

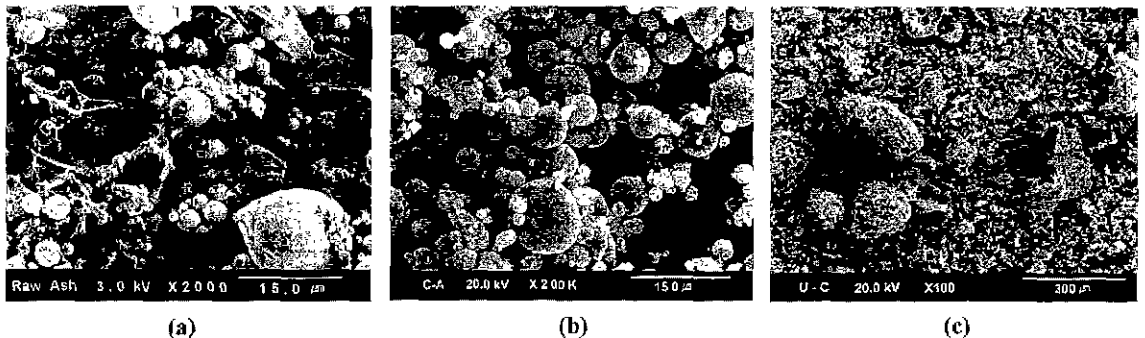


Fig. 3. Scanning electron micrographs of fly ash'. (a) raw ash, (b) cleaned ash, (c) high LOI ash.

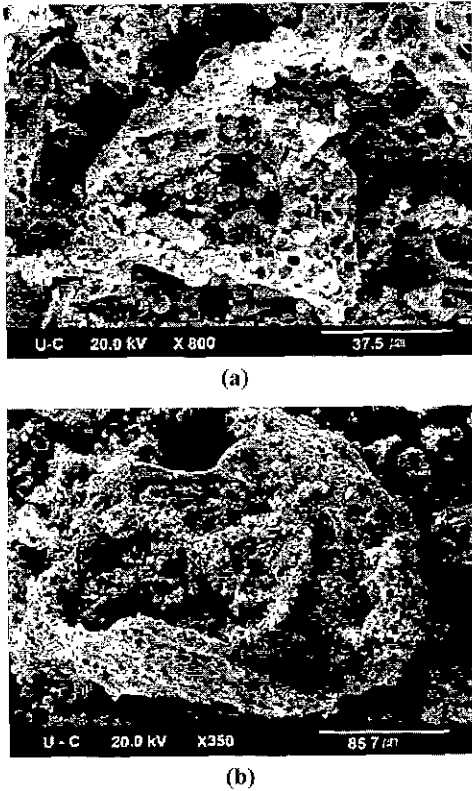


Fig. 4. Scanning electron micrographs of unburned carbon ash; (a) $\times 350$, (b) $\times 850$.

Particle)로 구성되어 있으며 구형 입자들은 전혀 관찰할 수가 없다. 따라서 입자의 강도는 정제 석탄회 비해 매우 약한 반면 비표면적이 넓어 흡착제와 같은 원료로 활용이 가능하며 이 입자를 구성하는 성분이 탄소이므로 재연료로의 사용이 가능하리라 예상된다.

Fig. 4는 비구형이며 표면에 미세 기공으로 이루어진 고탄소 석탄회를 세부적으로 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 입자의 전체적인 형상이며 Fig. 4(b)는 이 입자의 표면에 대하여 세부적으로 관찰한 것이다 즉 미연탄소 입자의 표면은 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 미세한 기공으로 이루어져 있는데 이는 연소중에 석탄입자를 연소하기 위해 우선 파쇄 과정을 겪기위해 입자의 내부 가스가 밖으로 방출되어 미세입자로 된 후 용융된 산화 광물질의 입자가 잔존하여 이루어 졌기 때문이다.^{4,5)} 따라서 이와 같이 미연탄소 입자 표면의 미세기공 때문에 산화광물입자에 비해 밀도가 낮고 비표면적이 크기 때문에 미세기공을 이용한 활성탄 등의 흡착제 활용 가능

성을 분석할 수 있다.

3.2.3. 입자의 비표면적 특성

Table 2는 정제 석탄회의 산화광물 입자와 고탄소 석탄회의 미연탄소 입자의 비표면적, 기공의 체적 그리고 기공의 크기를 나타낸 것으로 각 시료를 아세톤으로 세척한 후 100°C에서 건조한 후 BET(Brunauer, Emmett and Teller)등온법 및 BJH(Barret, Joyner and Halenda)법으로 분석한 것이다. 그 결과 산화광물 입자의 비표면적 크기는 2.1587 m²/g이고 고탄소 석탄회의 비표면적 크기는 15.1989 m²/g으로 7배 이상 큰 것으로 분석되었다. 또한 기공 체적의 경우 산화광물 입자는 0.003715 m³/g이고 미연탄소 입자는 0.01675 m³/g로 5배 이상 크게 분석되었으며 미세 기공의 평균 크기는 산화광물 입자의 경우 109.327 Å이고 고탄소 석탄회는 58.696 Å으로 분석되었다. 산화광물 입자의 표면의 미세기공에 비해 미연탄소 입자의 미세기공의 평균 크기가 작은 이유는 입자간의 공극(Interparticle Porosity)이 측정되었기 때문이다. 반면 미연탄소 입자의 기공은 실제 미세 기공(Interparticle Porosity)의 크기이며 이 크기는 안양규(1998)의 분석 결과와 유사하다.³⁾

Fig. 5는 입자의 기공 크기 변화에 따른 기공의 체적과 면적을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 100 Å 이하의 미세기공에서 고탄소 석탄회의 기공 체적과 산화광물 입자의 기공체적에는 뚜렷한 차이를 관찰할 수 있다. 즉 고탄소 석탄회의 미연탄소 입자의 기공 체적이 산화광물 입자에 비해 상당히 크게 분석되었다. Fig. 5(b)는 미세 기공의 크기에 따른 기공 면적을 나타낸 것으로 50 Å 이하에서 두 입자간의 기공면적이 뚜렷한 차이가 있다. 하지만 기공의 크기가 커짐에 따라 기공의 체적 및 면적의 차이가 줄어드는 이유는 기공이 100 Å 이상일 때는 입자 표면의 기공이 아니라 입자 사이의 공극의 크기로 해석되므로 두 시료간에 차이가 없는 것으로 분석되었다.

결론적으로 산화광물 입자는 구형으로서 비표면적 및

Table 2. Specific surface area and average pore size of the cleaned ash and the high LOI ash

Item	Cleaned ash	High LOI ash
BET specific surface area (m ² /g)	2.1587	15.1989
BJH pore volume (m ³ /g)	0.003715	0.01675
BJH pore diameter (Å)	109.327	58.6963

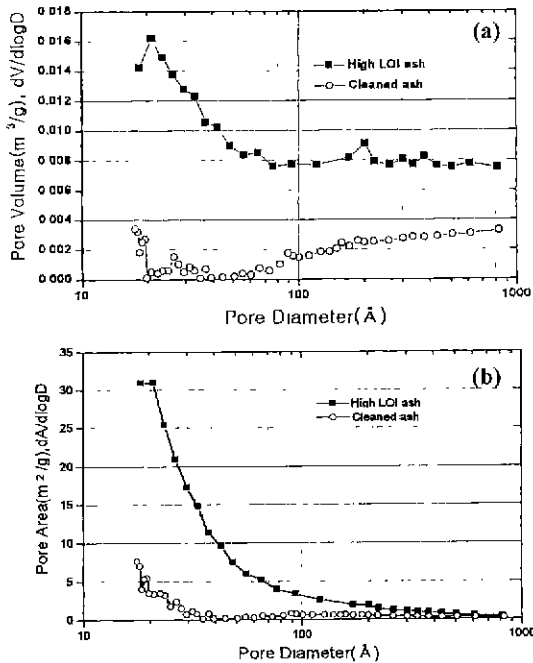


Fig. 5. Pore volume and area distribution of the ash as a function of pore diameter; (a) pore volume, (b) pore area.

기공의 체적과 면적이 작은 반면 미연탄소 입자는 입자의 내부와 외부가 미세기공으로 되어 있기 때문에 비표면적 및 기공의 체적과 면적이 크다. 따라서 이와 같은 분석을 통해서도 고탄소 석탄회는 기공을 이용하여 입자의 표면에서 오염입자를 확산으로 포집할 수 있는 흡착체로 활용이 가능하다.

3.3. 화학적 특성 분석 결과

LOI 7% 함유된 석탄회를 부유분리법을 이용하여 분리하여 산화광물질이 99.6% 함유된 정제 석탄회와 탄소성분이 57.6% 함유된 고탄소 석탄회의 성분변화를 분석하였다. 분석은 엑스선 회절 분석기(XRD)와 에너지 분산 엑스선 분광분석기(EDXA)를 이용하여 정성적인 분석을 하였으며 엑스선 형광 분석기(XRF)로는 정량적인 분석을 하여 두 종류의 시료에서 성분 변화를 조사하였다.

Fig. 6은 엑스선 회절 분석기(XRD)로 정제 석탄회와 고탄소 석탄회의 정성적 분석 결과를 나타낸 것으로 두 시료 모두 2θ의 값이 26° 근처에서 강도(Intensity)가 가장 강하게 분포하고 있었다. 이 분석 데이터

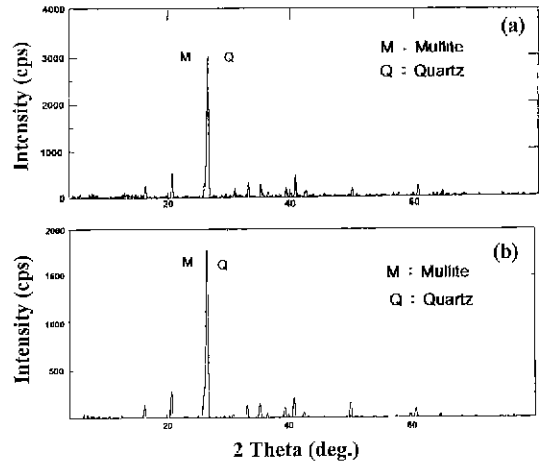


Fig. 6. X-ray diffraction analysis of the fly ash; (a) cleaned ash, (b) high LOI ash

를 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standard) Data로 조사한 결과 회분을 이루고 있는 주된 물질은 SiO₂와 Al₂O₃의 합성물인 물라이트(Mullite)와 SiO₂성분으로 구성된 석영(Quartz)이었다. Fig. 6(a)는 정제석탄회를 분석한 것인데 2θ의 값이 26° 근처에서 최대 강도가 3020 cps로 조사되었으며 주된 결정 성분은 물라이트와 석영임을 파악하였다. Fig. 6(b)는 고탄소 석탄회의 분석 결과로서, 강도가 가장 강한 피크는 정제석탄회와 마찬가지로 26°에서 관찰되어, 주된 결정 성분이 물라이트와 석영으로 분석된 점에서 정제 석탄회 입자와 동일한 결정구조를 가지고 있었다. 하지만 고탄소 석탄회의 경우 최대 강도가 1773 cps로 정제 석탄회의 강도에 비해 절반에 지나지 않았다. 이는 정제 석탄회와 고탄소 석탄회에 함유된 결정질이 물라이트와 석영으로 이루어져 있으며, 정제석탄회에 함유되어 있는 물라이트와 석영의 함유량이 고탄소 석탄회의 함유량보다 크다는 사실을 분석할 수 있다.

Fig. 7은 정제 석탄회와 고탄소 석탄회를 에너지 분산 엑스선 분광분석기(EDXA)로 분석한 결과로서 각 시료에 함유되어 있는 구성성분의 정도를 분석한 것이다. 주된 화학적 구성성분은 Si, Al이며 Fe, K, Ca, Ti, 그리고 Pt 성분이 미량 함유되어 있었다. 이때 정제 석탄회와 고탄소 석탄회의 구성성분은 거의 동일한 반면 함유정도가 각각 다르게 나타났다. 즉 정제 석탄회의 경우 주된 성분이 Si의 분석 강도는 2200정도인 반면 고탄소 석탄회의 경우 Si의 강도는 약 830정도로 분석 되었다. 따라서 정제 석탄회에 함유되어 있는 광

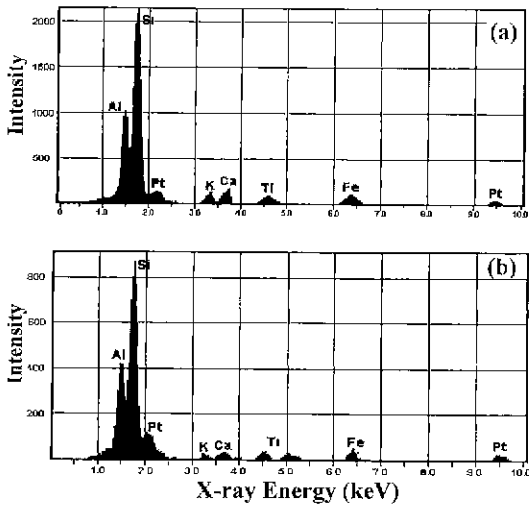


Fig. 7. Energy dispersion X-ray analysis of the fly ash: (a) cleaned ash, (b) high LOI ash.

물 성분은 고탄소 석탄회에 비해 많이 함유되어 있으며 이는 Fig. 6에서 분석하여 고려한 결과와 동일하다

Table 3은 원시료, 정제석탄회, 그리고 고탄소 석탄회의 구성성분을 엑스선 형광 분석기(XRF)를 통해 분석한 결과를 나타낸 것이다. 각 구성성분은 산화 무기물로 구성되어 있는데, 정성적인 분석에서 얻은 결과와 같이 SiO₂와 Al₂O₃의 성분이 주종을 이루고 있으며 그의 Fe₂O₃, CaO, K₂O, MgO, MnO, Na₂O, TiO₂, P₂O₅로 구성되어 있다. 원시료는 SiO₂가 56%, Al₂O₃가 22% 그리고 Fe₂O₃가 7%정도를 함유하고 있는데, 이를 분리하여 얻은 정제석탄회 경우 SiO₂는 59%, Al₂O₃는 24% 그리고 Fe₂O₃는 7%정도로 원시료에 비해 주된 산화광물질 성분의 분포 함량이 증가하였다. 그러나 고탄소 석탄회의 경우 SiO₂는 34%, Al₂O₃는 14% 그리고 Fe₂O₃는 4%정도로 원시료에 비해 주된 산화광물질 성분의 분포 함량이 현저하게 감소하였다. 이와 같은 결과는 엑스선 회절 분석기와 에너지 분산 엑스선 분광분석기를 통해 분석한 정성적 분석 결과와 동일한 경향성을 나타내고 있다. 따라서 분리된 각 석탄회에 대한 정성적, 정량적 분석을 수행한 결과 원시료에 비해 정제석탄회는 산화광물 성분의 함량이 증가한 반면 고탄소 석탄회의 산화광물 성분은 산화광물 함량이 줄어들었다. 그런데 상부층에서 회수된 고탄소 석탄회에 친수성인 산화 광물질이 일정량 회수되는 현상을 관찰할 수 있는데, 이는 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 원시료의 석탄회에서 산화광물 입자와 미연탄소 입자의 일부가

Table 3. Chemical composition of the raw, the cleaned and the high LOI ash

Component (Wt%)	Ash Type		
	Raw Ash	Cleaned Ash	High LOI Ash
SiO ₂	54.75	59.19	34.36
Al ₂ O ₃	21.96	23.62	13.81
Fe ₂ O ₃	7.59	6.68	4.03
CaO	2.69	2.30	2.02
K ₂ O	0.89	0.98	0.55
MgO	1.05	0.91	0.61
MnO	0.06	0.05	0.04
Na ₂ O	0.15	0.22	0.58
TiO ₂	1.26	1.28	0.81
P ₂ O ₅	0.49	0.47	0.43
LOI	8.13	0.37	42.76

응집된 입자의 영향으로 분석된다.⁶⁾ 따라서 미연탄소 부분이 기포와 부착되어 상승할 때 이 입자와 부착된 산화광물입자가 더불어 상승함으로써 나타나는 현상이다.

4. 결 론

석탄회력 발전소에서 채집한 원시료의 석탄회를 역류 컬럼 부유분리 장치를 이용하여 정제 석탄회와 고탄소 석탄회를 분리하여 물리적, 화학적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부유분리법을 이용한 역류컬럼 부유분리 장치로 LOI 9.3%인 원시료의 석탄회를 분리한 결과 LOI 0.65%인 정제 석탄회를 84.8 wt%를 회수하였고 LOI 57.6% 고탄소 석탄회를 15.2 wt% 회수하였다.
2. 석탄회의 입도분포는 미세 입자 모우드와 큰 입자 모우드로 구성된 바이모달(Bi-modal)형 입도분포를 이루고 있었는데 원시료의 경우 미세입자 모우드는 입경이 0.25 μm 근처에서 질량분율의 최고값이 형성되었고 큰 입자 모우드는 약 80 μm 부근에서 질량분율(Mass Fraction) 최고값이 형성되었으며 질량평균입경은 39.78 μm로 분석되었다 고탄소 석탄회의 경우 미세 입자 모우드는 거의 소멸했으며 큰 입자 모우드 최고값은 상승하여 질량평균입경은 76.52 μm로 원시료에 비해 증가하였다. 반면 정제 석탄회는 1 μm 이하의 미세 입자 모우드의 최고값은 원시료에 비해 증가하였고 큰 입자의 모우드는 감소하여 질량평균입경이 12.19 μm로 되어 원시료에 비해 입경이 상당히 감소한 것으로 분석되었다.

3. 정제 석탄회의 형상은 무기질 성분이 용융되어 형성된 구형의 입자로 이루어져 있어 강도가 강하고 입자의 형성이 균일하여 콘크리트 혼화제 및 섬유 또는 도자기등의 충전제(Filler)로 활용이 가능한 반면 고탄소 석탄회는 대부분 비구형이며 표면이 미세기공으로 이루어져 있어 흡착제와 같은 원료로 활용이 가능하다.
4. 정제 석탄회는 비표면적 및 기공의 크기가 작은 반면 고탄소 석탄회는 입자의 내부와 외부가 미세기공으로 되어 있어 비표면적 및 기공의 크기가 크게 나타났다. 따라서 정제 석탄회 입자는 충전제 등의 공업원료로 활용할 수 있으며 고탄소 석탄회는 표면적 및 기공을 이용한 흡착제로 활용할 수 있음을 분석하였다.
5. 원시료를 분리하여 채취한 정제 석탄회와 고탄소 석탄회에 주된 무기질 결정 성분은 물라이트와 석영으로 SiO_2 와 Al_2O_3 의 성분이 주종을 이루고 있으며 그의 Fe_2O_3 , CaO , K_2O , MgO , MnO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 로 이루어져 있었는데 이들 성분 중 정제 석탄회의 경우 SiO_2 는 59%, Al_2O_3 는 24% 그리고 Fe_2O_3 는 7%정도 분석되었으며 고탄소 석탄회는 SiO_2 는 34%, Al_2O_3 는 14% 그리고 Fe_2O_3 는 4%정도로 정제 석탄회에 비해 구성성분 분포 함량이 현저하게 감소하였다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술 · 산업개발 연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호: 96-10-05-02-A-3)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다

참고문헌

1. G. L. Fisher, B. A. Prentice, D. Silverman, and J. M. Ondov, A. H. Biermann, R. C. Ragau. and A. R. McFarland. "Physical and Morphological Studies of Size-Classified Coal Fly Ash". *Journal of the American Chemical Society*, 12(4) (1978).
2. R. C. Flagan and J. H. Seinfeld: "Fundamentals of Air Pollution Engineering". Prentice-Hall, pp. 358-390 (1988).

3. 안양규, 양정일 · "비산회로부터 회수한 미연탄소분의 물리 · 화학적 특성", 한국자원리사이클링학회지, 7(1), pp.14-19 (1998)
4. Kaufhen, I and L. David · "Comparision of Micron and Submicron Fly Ash Particles Using Scanning Electron Microscopy and X-ray Elemental Analysis", *Journal of the Environ. Sci. Technol.*, 18(7), 544-547 (1984).
5. 이정언, 이재근 : "석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회 특성과 형성 분석에 관한 연구", 한국에너지공학회, Vol. 7, No 1, pp. 146-156 (1988)
6. G. L. Fisher : "Size-Related Chemical and Physical Properties of Power Plant Fly Ash", *Generation of Aerosol and Facilities for Exposure Experimentes.* Klaus, W(Ed.), 203-214 (1980).



李 靖 彦

- 부산대학교 환경기술 · 산업개발연구센터, 공학박사
- 환경유체공학



安 泳 徹

- 부산대학교 기계공학과 박사과정
- 환경유체공학



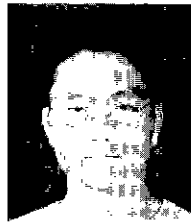
金 成 贊

- 부산대학교 기계공학과 박사과정
- 환경유체공학



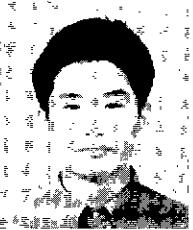
具宰賢

- 부산대학교 정밀기계공학과 박사과정
- 환경유체공학



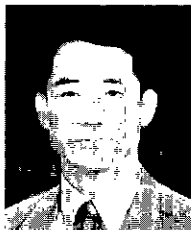
辛鎮赫

- 부산대학교 기계공학과 박사과정
- 환경유체공학



羅景洙

- 부산대학교 기계공학과 석사과정
- 환경유체공학



李在瑾

- 부산대학교 기계공학부 부교수 공학박사
- 환경유체공학

바로잡습니다.

8권3호의 25page 저자 약력을 바로잡습니다.

정종현 : 1997년 연세대학교 화공과 학사 → 1979년 연세대학교 화공과 학사
한국원자력연구소 핵화공연구팀 선임연구원→책임연구원

문제권 : 1989년 충남대학교 대학원 박사 → 1989년 연세대학교 대학원 박사

8권3호의 6page 저자사진을 바로잡습니다.

저자 김영일교수 최성욱씨의 사진 위치가 바뀌었습니다.

7권4호의 6page Fig. 2와 Fig. 3의 그림 위치가 바뀌었습니다.