

摩擦帶電 靜電分離機를 利用하여 石炭灰에 含有된 未燃炭素粉 除去에 관한 研究

李在瑾 · 金成贊 · 孫洛元 · 金科炫 · 吳定根

釜山大學校 機械工學部

Triboelectrostatic Separation of Unburned Carbon from Flyash for Ash Recycling

Jae-Keun Lee, Seong-Chan Kim, Nag-Won Son, Doo-Hyun Kim and Jung-Geun Oh

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

요 약

석탄 화력 발전소에서 발생하는 석탄회는 연간 약 300만톤이며 대부분 매립하여 발전소 주변 환경오염, 민원발생, 회처리장 부족 등의 문제점이 있다. 석탄회를 콘크리트의 혼화제로 사용하면 강도 증가, 부식 방지, 비용 절감 등의 큰 이점을 갖고 있다. 그러나 석탄회에 함유된 미연탄소분은 콘크리트의 강도를 저하시켜 석탄회 재활용에 어려움이 있다. 본 연구는 석탄회 재활용을 위해 석탄회 내의 미연탄소분을 분리하는 마찰대전 정전분리장치에 관한 것이다. 석탄회를 구리 표면에 마찰시키면, 미연탄소분과 석탄회 성분의 작용함수가 구리 표면의 작용함수와 차이를 가지므로 미연탄소분과 석탄회는 각각 양극과 음극으로 대전되며, 대전된 미연탄소분과 석탄회를 외부 전기장에 통과시켜 분리하는 것이다. 마찰대전 정전분리장치는 석탄회를 공급하는 스크류 피더, 마찰 대전기, 수직형 구리판, 전원 공급 장치, 유량계, 그리고 모터 팬으로 구성되어 있다. 분리 효율과 석탄회 회수율에 미치는 중요한 인자는 마찰 대전 구조, 전계 강도, 석탄회 입도 크기이었다. 최적 분리 조건은 입도 크기 125 μm 이하, 전계 강도 200 kV/m이었으며, 미연탄소함량이 7%인 원시료에서 미연탄소함량이 3% 이하인 정제 석탄회를 80% 이상 회수하였다.

ABSTRACT

Flyash from a coal-fired power plant is produced approximately 3 million tons in 1996 and causes the serious environmental problem due to the disposal in the ash pond. Flyash is an accepted additive in concrete where it adds strength, sulfate resistance and reduced cost, provided acceptable levels of unburned carbon are maintained. This paper describes to investigate the technical feasibility of a dry triboelectrostatic process to separate unburned carbon from flyash into economically valuable products. Particles of unburned carbon and flyash can be imparted positive and negative surface charges, respectively, with a copper tribocharger due to differences in the work function values of the particles and the tribocharger, and can be separated by passing them through an external electric field. A laboratory scale separation system consists of a screw feeder for ash supply, a tribocharger, vertical collecting copper plates, power supplies, a flow meter, and a fan. Separation tests taking into account separation efficiency and ash recovery showed that flyash recovery was strongly dependent on the tribocharger geometry, electric field strength, flyash size, and ash feeding rate. Optimal separation conditions were flyash size less than 125 μm and electric field strength of 200 kV/m. Over 80% of the flyash with 7% loss on ignition was recovered at carbon contents less than 3%.

1. 서 론

전량 수입하고 있는 유연탄은 제철, 발전 및 시멘트 산업에 연간 3,200만톤 정도가 소비되고 있으며 특히 발전연료

로서 유연탄의 사용량 증가로 석탄회 발생량은 94년 300만톤 정도이며 2005년까지 유연탄 화력발전소의 건설이 20호기 추가 건설 예정으로 되어 있어 석탄회 발생량은 600만톤으로 예상된다.¹⁾ 현재 석탄회 발생량의 대부분은 발전소

주위 바다를 매립하는 방식으로 빼기하고 있으며 재활용률은 22% 정도에 그치고 있다. 미국, 일본을 비롯한 선진국들의 경우 석탄회 재활용에 대한 관심과 연구가 70년대부터 진행되어 오고 있어 현재 환경문제와 경제적 이익 측면에서 상당한 성과를 이루고 있다. 석탄회의 발생량이 풍부하고 활용분야 또한 다양하지만 활용현황이 미비한 이유는 석탄회가 자원이라는 인식부족, 재활용을 권장하고 활성화할 수 있는 제도적 장치의 미비를 들 수 있으며 무엇보다도 콘크리트와 같은 재활용 품질에 영향을 미칠 수 있는 양질의 석탄회를 생산하는 것이 문제이다. 현재 국내에서 사용 중인 미연탄소분 분리기술의 수준은 매우 취약한 단계에 있어 석탄회를 재활용을 하는데 걸림돌이 되고 있다.

본 연구는 석탄회를 콘크리트 혼화제로 재활용하기 위해 석탄회의 미연탄소분함량을 3% 이하로 감소시키며 구조가 간단하고 분리효율이 뛰어난 마찰대전 정전분리장치 개발에 관한 것으로, 화력발전소의 전기집진기에서 채취한 석탄회 분석, 석탄회의 미연탄소분을 제거하기 위한 수직형 마찰대전 정전분리장치 설계 및 제작, 그리고 분리 성능에 영향을 미치는 변수 실험을 통해 최적 분리 조건을 도출하고자 한다.

2. 석탄회 재활용 및 분리 기술 현황

석탄회는 일반적으로 포졸란 재료로 알려지고 있는데 포졸란이란 규산질 혹은 규산 알루미늄질로서 자체로는 경화성이 없거나 미약하지만 미세한 분말인 경우 상온에서 수분의 존재 하에 알칼리 및 알칼리토류의 수산화물과 화학반응을 하여 그 자체가 경화하거나 혹은 경화성 화합물을 형성하는데 도움을 주는 물질로 알려져 있다. KS규격(KS L 5508)에서는 천연 포졸란, 소성(하소) 포졸란, 인공 포졸란으로 분류하고 있으며 석탄회는 슬래그, 소성 점토 등과 함께 인공 포졸란으로 분류되고 있다. 이러한 포졸란 재료로서의 특징을 살려 오래 전부터 석탄회를 콘크리트나 시멘트 혼화제로 사용하려는 시도가 이루어져 왔다. 따라서 석탄회와 관련된 대부분의 공업규격이나 품질기준도 콘크

Table 1. The Flyash Requirements for Recycling.

	Flyash Generalcd	KS Standard	Acceptable Levels
Flyash Size	~200 μm	< 44 μm	< 44 μm
Carbon Content (LOI)	6~15%	< 5%	< 3%

리트 분야에서의 활용을 대비하기 위하여 제정되고 있다. 석탄회 재활용률이 외국의 경우 30~60%인데 비해 국내의 석탄회 재활용률은 96년 현재 22%로 매우 저조하다. 그 원인으로서는 석탄회 입도의 불균일(~200 μm), 석탄회 내의 미연탄소분 과다 함량(6~15%)으로 인한 콘크리트 압축 강도 저하와 겹은 외관을 들 수 있다. 그리고, 석탄회 활용분야는 콘크리트 혼화제로 콘크리트 전체 중량의 8~10%를 혼합하고 있으며 그 외 건축·토목 재료, 농업용 토질 개선제, 비료, 인공 제올라이트 제조 등에 활용될 수 있다.

Table 1은 석탄회를 콘크리트 혼화제로 재활용하기 위한 석탄회의 조건으로, 발생하는 석탄회를 재활용하기 위해서는 입도가 44 μm이하로 균일하고 미연탄소함량이 3% 미만의 양질의 석탄회를 생산하여야 한다. 큰 입자의 석탄회에는 다량의 미연탄소분이 존재하고 있으며, 큰 입자의 석탄회를 제거하기 위해 국내외에서 널리 사용되고 있는 분리기술은 원심분급장치이다. 그러나, 원심분급식 큰 입자의 석탄회가 미세입자로 파쇄되어 다량의 미연탄소분이 미세입자군으로 분급되므로, 미연탄소함량을 5% 이하로 분리하여 석탄회를 재활용하는데 어려움이 많다. 원심분급장치에서 분급하지 못한 미세한 크기의 미연탄소분 제거에는 마찰대전 정전분리장치가 매우 효과적으로 알려져 있으며 연구 시작 단계이다.^{2,9)}

3. 정전 분리 장치 제작 및 실험 방법

3.1. 정전 분리 원리

Table 2는 여러가지 물질의 작용함수를 나타낸 것으로, 작용함수가 다른 두 물질이 마찰하게 되면 작용함수가 큰 물질은 음극으로 대전되고, 상대적으로 작용함수가 작은 물

Table 2. Work functions of various compounds⁹⁾

Material compounds	Work function (eV)
CS ₂	0.99~1.17
SrO	1.27
CaO	1.60
Y ₂ O ₃	2.00
UO ₂	3.15
CeO ₂	3.21
FeO	3.85
Carbon	4.00
MoO ₃	4.25
Cu	4.38
Al ₂ O ₃	4.70
MgO	4.70
SiO ₂	5.00
Mineral	5.40

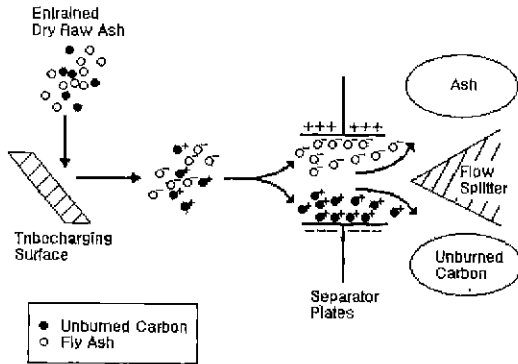


Fig. 1. The principle of triboelectrostatic separation system.

질은 양극으로 대전된다. Fig. 1은 마찰대전 정전분리 개념도를 나타낸 것으로, 미연탄소분과 석탄회 성분의 작용함수가 구리의 작용함수와 차이를 가지므로 석탄회를 구리 표면에 마찰시키면 미연탄소분과 석탄회는 각각 양극과 음극으로 대전되며, 대전된 미연탄소분과 석탄회를 외부 전기장에 통과시켜 분리하는 것이다. 대전된 입자들은 고전압이 걸려있는 집진판에 통과할 때 정전기력에 의해 “양”으로 대전된 미연탄소분은 음극판에, “음”으로 대전된 석탄회는 양극판에 부착되어 분리된다. 분리효율에 미치는 중요한 변수는 마찰 대전기 구조, 전계 강도, 석탄회 입도 크기, 그리고 석탄회 공급량으로서 정제된 석탄회 회수율을 고려한 분리장치 설계가 고려되어야 한다.

3.2. 정전 분리 장치

Fig. 2는 석탄회에 함유된 미연탄소분 제거를 위한 마찰대전 정전분리장치의 설계도로 석탄회 공급장치(Ash Feeder), 공기 건조장치(Dryer), 마찰 대전기(Tribocharger), 정전 집진부로 구성되어 있다. 석탄회 공급장치는 컴프레서에서 발생한 압축 공기를 공기 건조장치(Dryer)에서 건조시키고 불순물을 제거한 후 유량 조절 밸브를 이용하여 압축 공기의 공급 유량을 조절한다. 스크류 피더로 석탄회를 일정하게 벤츄리로 공급하고 압축 공기에 의해 흡입된 석탄회를 마찰대전기로 수송한다. 마찰 대전기는 공급된 석탄회를 마찰 대전시키는 부분으로 마찰 대전율을 높이기 위하여 구리 파이프를 스프링 형태로 만들고, 석탄회를 균일하게 정전집진부에 공급하기 위해 확산노즐을 부착한다. 정전 집진부는 두 개의 구리판을 100 mm의 간격을 두고 강한 전기장을 형성시켜 대전된 입자를 정전기력 원리로 포집하는 부분으로, 고전압 발생 장치를 각각의 극판에 연결하여 전기장을 형성시켰다. 이때 극판의 주위는 아크릴을 이용하여

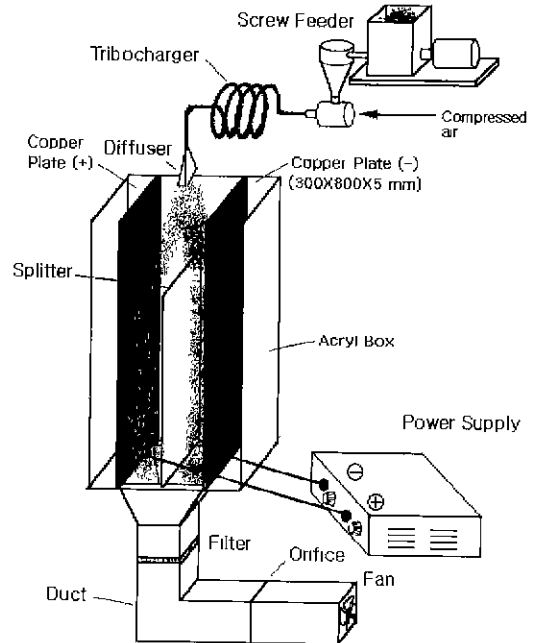


Fig. 2. A laboratory scale triboelectrostatic separation system.

완전 절연을 하였고, 극판에서 포집하지 못한 입자는 필터를 이용하여 포집하였다. 극판의 중간에 분리대를 설치하여 극판 중간에서 석탄회가 서로 충돌하여 중성화되는 것을 막고, 분리가 용이하도록 하였다.

3.3. 실험 방법 및 조건

최적 석탄회 분리 조건을 찾기 위하여 석탄회 입도 크기, 선계강도 변화에 대하여 분리 실험을 하였다. 실험은 먼저 컴프레서에서 나온 압축 공기를 밸브로 조절하며 벤츄리노즐을 통해 석탄회 공급기에서 이송된 석탄회를 마찰 대전부로 공급한다. 마찰 대전부에서 대전된 석탄회는 정전 집진부에서 순수 석탄회는 (+)극판에, 그리고 미연탄소분은 (-)극판에 포집된다. 분리 실험후 극판의 위치에 따라 포집된 석탄회의 미연탄소분 함량을 강열감량법(KS L 5405)으로 측정한다. 즉, 각 극판의 0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm 부분, 필터부 그리고 장치바닥 부분에서 채취, 전체 12개소에서 각각의 미연탄소분 함량과 회수율을 측정하였다. 분리실험의 실험 조건으로는, 석탄회 공급량은 1.6 g/min, 분사 속도는 13.1 m/s, 그리고 온도와 상대 습도는 20~30°C, 30~60%이었다. 본 연구에서 사용한 석탄회는 96년 삼천포 화력 발전소의 전기집진기에서 채취한 석탄회로 평균 미연탄소함량(LOI : Loss On Ignition)은 7%이다.

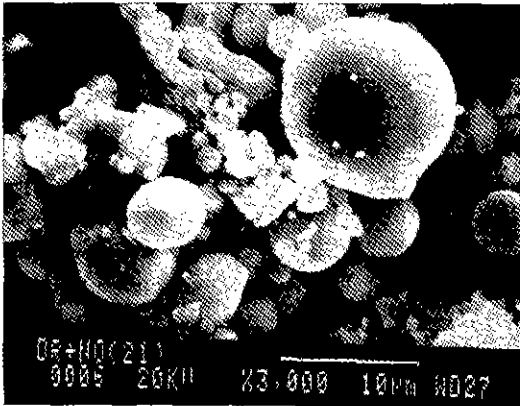


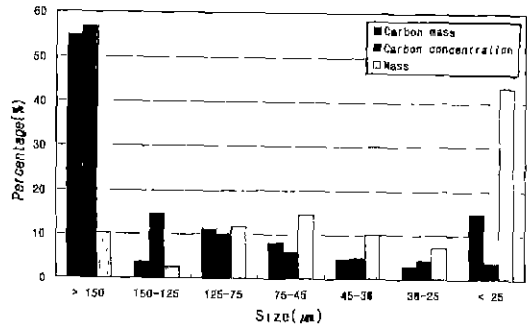
Fig. 3. Scanning electron micrograph of flyash.

4. 결과 및 분석

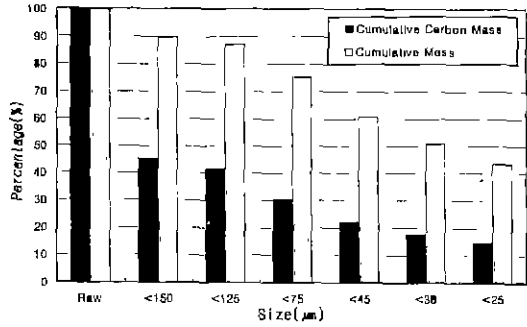
4.1. 석탄회 분석 결과

Fig. 3은 석탄회의 전자현미경 사진으로, 대부분 투명하며 구형인 입자이나 비구형 입자도 다소 포함되어 있다. 일반적으로 석탄회는 보일러의 가동연료로 사용되는 석탄의 종류, 보일러의 운전조건 등과 같은 변수에 따라 물리적, 전기적, 화학적 특성이 다양하게 나타난다. 석탄회를 화력 발전소의 전기집진기에서 채집하여 성분 분석, 전자 현미경, 광학 현미경, 입자 카운터, 비저항성 측정장치를 이용하여 석탄회의 물리적, 화학적, 전기적 특성 분석이 가능하다.⁶⁾

Fig. 4의 (a)는 96년 삼천포 화력 발전소의 전기집진기에서 채취한 석탄회를 체가름하여 입자 크기 범위별로 질량 함량과 탄소함량을 측정 한 것으로, 탄소 질량비(Carbon Mass)는 원시료 전체 탄소 질량에 대한 크기 범위내 시료의 탄소 질량비를 나타낸 것이며, 질량비(Mass)는 원시료 질량에 대한 크기 범위내 시료의 질량비, 그리고 탄소함량(Carbon Concentration)은 크기 범위내 시료에 대한 탄소함량을 나타낸 것이다. 그리고, (b)는 탄소 질량비와 질량비에 대한 입경별 누적 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 150 μm 이상의 석탄회에서 미연탄소함량이 56%, 125~150 μm 사이의 석탄회에서 미연탄소함량이 15%이며, 125 μm 이하의 석탄회에 함유된 미연탄소함량은 평균 4%로 측정되었다. 대부분의 미연탄소분은 125 μm 이상에 존재하고 작은 입자일수록 미연탄소분의 함량이 작은 것을 알 수 있다. 국내 사용중인 각종 유연탄 석탄회를 분석한 결과, 석탄회의 주성분은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃이고, 그 외에 CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO 등이 함유되어 있으며, 석탄회의 평균 질량 직경은 15~30 μm 정도이고 감열감량 실험을 통한 석탄



(a)



(b)

Fig. 4. Percentage flyash mass, carbon concentration, and carbon mass distributions in each size fractions for Samcheonpo flyash. (a) frequency distribution, (b) cumulative distribution.

회의 미연탄소분 함유량은 5~15%이다.

4.2. 정전 분리 결과

Fig. 5는 석탄회 원시료를 일정 크기 이하의 시료로 체가름한 후, 체가름된 시료를 이용하여 정전분리 실험을 하여 그 결과를 나타내었다. 각각의 극판에 포집된 석탄회를 0~20 cm, 20~40 cm, 40~80 cm 부분과 최종 필터에 포집된 시료 및 장치 바닥부분에 떨어진 시료등 8개의 체취 부분으로 나누어, 각 시료의 누적 탄소함량을 측정하고 전체 공급량에 대한 질량비로서 석탄회의 누적 회수율을 나타낸 것이다. 각 점의 위치는 누적 미연탄소량에 대한 총 공급량 대비 누적 회수율을 나타낸 것으로, 대체적으로 양극판의 0~20 cm, 20~40 cm, 40~80 cm, 장치바닥, 필터, 그리고 음극판의 40~80 cm, 20~40 cm, 0~20 cm의 순서로 나타났다. 실험 결과, 체가름하지 않은 원시료의 경우 미연탄소함량이 3% 이하인 정제 석탄회 회수율이 20% 이하이고, 125 μm 이하의 석탄회는 탄소량이 3% 이하의 석탄회 회수율은 89%이었으며 전체적으로 석탄회의 입도 분포가 작을수록 정전분리 특성이 우수하였다. 마찰대전은 입자간의 표면에

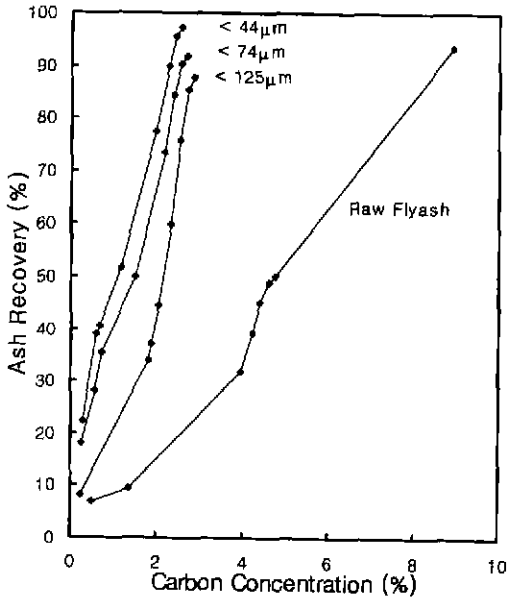


Fig. 5. Separation efficiency of Samcheonpo flyash as a function of particle size (Electric field strength=200 kV/m, Ash feeding rate=1.6 g/min)

서 생기므로 큰 입자에 비해 비표면적이 큰 작은 입자가 마찰대전이 잘되고, 또한 작은 입자는 관성력에 의한 유동보다 정전기력에 대한 유동이 지배적이므로 정전 분리 성능이 좋게 나타났다. 그러나, Fig. 4에서 보듯이 작은 입도 분포의 석탄회는 미연탄소분 분리효율은 높으나, 주어진 석탄회에서 미립자의 양이 적어 전체적인 석탄회의 회수율이 적으므로, 공급된 전체 원시료에 대한 석탄회의 회수율을 고려할 때 체가름후 125 μm이하(4% LOI)의 석탄회를 분리하는 것이 가장 효율적임을 알 수 있었다. 즉, 미연탄소 함량 3%이하 순수 석탄회의 회수율이 89%인 125 μm 이하의 시료는 Fig 4에서 보듯이 전체 원시료의 92%를 차지하므로, 전체 원시료에서 석탄회를 82%를 회수한 결과이다. 그러나, 75 μm 이하의 시료는 석탄회의 회수율이 95%이지만, 원시료에 대한 질량비가 78%이므로 원시료에서 회수한 석탄회는 74%에 불과하다.

Fig. 6은 집진판 사이의 전계 강도에 따른 석탄회 분리 특성을 실험한 결과로서, 전계를 가지지 않은 상태에서는 석탄회가 전극판에 포집되지 않고 대부분이 최종 필터에서 수거되었으며, 전계 강도가 200 kV/m인 경우 미연탄소함량이 3% 이하인 석탄회가 전체 공급된 석탄회의 89% 이상 회수되어, 가장 좋은 분리효율을 나타내었다. 집진 극판 사이의 전계에 대한 분리실험에서는 전기장이 강할수록 입자와 집진 극판간의 정전기력이 강해져서 분리가 잘 되었다.

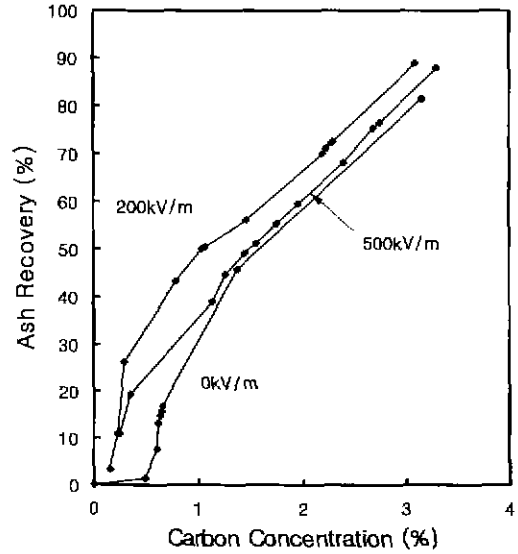


Fig. 6. Flyash separation efficiency of Samcheonpo flyash as a function of electric field strength (Ash feeding rate=1.6 g/min)

그러나, 전기장의 크기가 500 kV/m 이상이 되면 집진 극판에서 코로나 방전이 발생하여 정전기력에 의한 분리 효율은 떨어지게 된다. 본 연구에서 제작한 정전분리장치에서 양질의 석탄회 분리를 위한 최적 분리 조건은 125 μm이하의 석탄회와 200 kV/m의 전계강도이었다

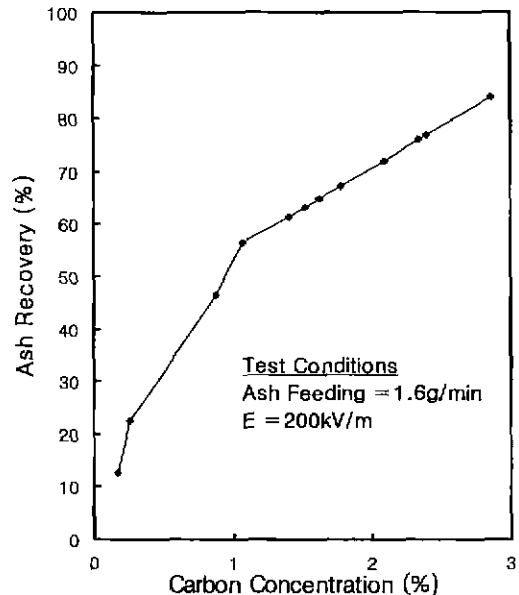


Fig. 7. Ash recovery of samcheonpo flyash for the optimal test conditions.

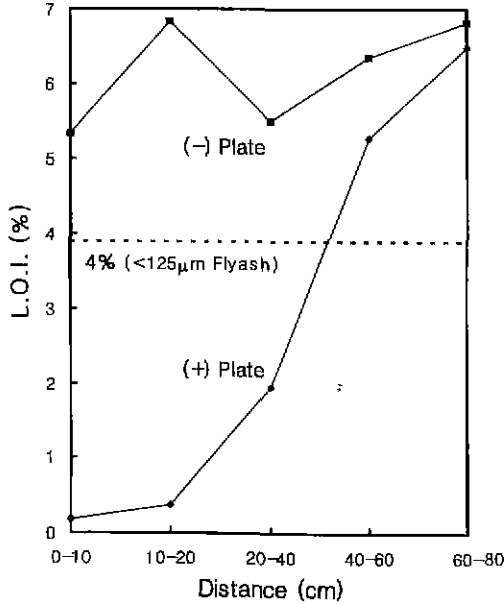


Fig. 8. Separation plate deposition profiles for samcheonpo flyash (Ash feeding rate=1.6 g/min, Electric field=200 kV/m).

Fig. 7은 최적 분리 조건에서의 석탄회의 정전 분리결과를 미연탄소함량에 따른 석탄회 회수율을 나타낸 것이다. 그림에서 미연탄소함량이 1% 이하인 석탄회 회수율은 55%이며, 3% 이하인 석탄회를 투입된 전체 석탄회의 80% 이상 회수가 가능함을 알 수 있다 이때 두 극판과 필터에 의해 포집된 석탄회를 분석해 보면 (+)극판 전체에 포집된 석탄회의 평균미연탄소함량은 2%, 회수율은 42.3%이었으며, (-)극판 전체에서는 평균미연탄소함량이 6.2%인 석탄회가 투입된 전체 석탄회의 10.7%가 회수되었다. 그리고, (-)극판에 포집된 석탄회를 제외한 나머지 전체 부분, 즉 (+)극판, 필터, 장치바닥부분과 전체공급량에서 회수되지 않은 부분을 계산한 결과에서 미연탄소함량은 3%이며 회수율이 전체 석탄회의 89%로 분리성이 아주 양호함을 알 수 있다.

Fig. 8은 정전 분리 실험후 극판 거리에 따른 미연탄소함량을 나타낸 것으로, 분리가 대부분 극판의 앞에서 일어남을 알 수 있다. 이 중에서 (+)극 집진판 입구부터 40 cm까지 포집된 석탄회의 미연탄소함량은 2% 이하이고, 40 cm 이후는 미연탄소분의 분리 효율이 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 9는 최적 조건 실험후 전극판에 포집된 석탄회와 미연탄소입자의 사진으로, 마찰대전기를 통해 분사된 석탄회가 일정한 분사각을 가지며 전극판에 포집되었다. 그림에서 보듯이 (+)전극판에 포집된 석탄회의 색깔은 밝은 회색으로

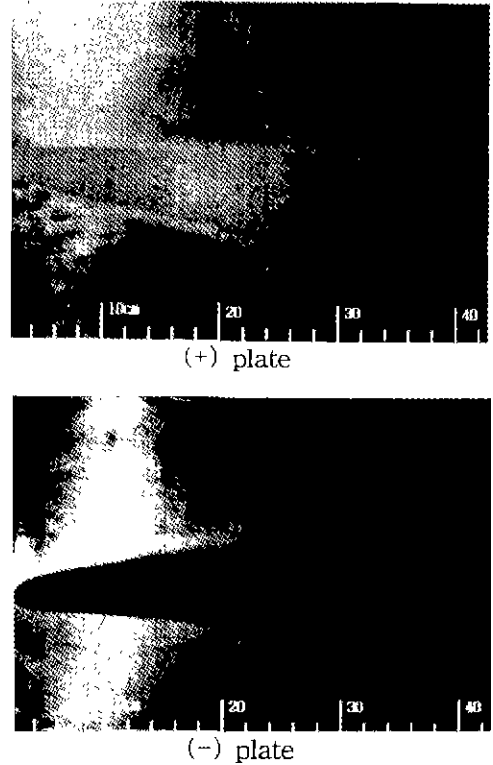


Fig. 9. Photograph of flyash separated at (+) & (-) copper plate (grey : ash, black : carbon)

미연탄소함량이 2% 미만인 양질의 석탄회이며, (-)전극판에는 검은 색의 미연탄소분이 포집되어 전계에 의한 정전 분리 현상을 확인할 수 있다. 또한, 전극판의 전단에서는 포집된 석탄회의 색깔이 뚜렷한 차이를 보이지만 입구로부터 멀어질수록, 즉 40 cm를 벗어나면 (+)와 (-)전극판에 포집된 석탄회의 색깔이 유사하여, 대부분의 석탄회가 전극판의 전단에서 분리가 되고, 후단에서는 입자가 전기적으로 중화되어 분리효율이 떨어졌음을 알 수 있다.

5. 결 론

화력발전소의 석탄회를 재활용하기 위해 석탄회 분석과 석탄회에 함유되어 있는 미연탄소분을 3% 이하로 분리하기 위한 실험실 규모의 마찰대전 정전분리장치를 설계, 제작, 성능 평가하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 석탄회를 크기별 미연탄소분의 함량을 분석한 결과, 대부분의 미연탄소분은 입경이 125 µm이상인 석탄회 (33% LOI)에 존재하고 125 µm이하 석탄회의 미연탄

소분 함유량은 4~5%이다.

2. 정전 분리성에 영향을 미치는 주된 변수는 석탄회의 입도 크기와 전계 강도이었다. 석탄회 입자의 크기가 작을수록 분리성이 양호하고, 전계 강도는 극판간에 코로나 방전이 일어나지 않는 범위에서 전계 강도가 클수록 석탄회의 집진 부착력이 강해져서 분리성이 좋아진다.
3. 분리효율과 석탄회 회수율을 고려할 때 본 연구에서 제작한 정전 분리 장치에서의 최적 분리 조건은 입도 크기는 125 μm 이하, 전계 강도는 200 kV/m이었다.
4. 화력발전소의 전기집진기에서 채집한 석탄회 원시료의 미연탄소함량은 7%이었으나, 입도가 125 μm 이상의 석탄회를 제거한 후, 본 연구에서 설계/제작된 마찰 정전분리장치에 의하여 미연탄소함량 3% 이하의 양질의 석탄회를 전체 석탄회의 80% 이상 회수되었다.

감사의 글

본 연구는 통상산업부 에너지관리공단 부설 에너지자원 기술개발지원센터와 환경기술 산업개발 지원센터(RRC 과제번호: 96-10-05-02-A-3)의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 남호기, 마삼선, 정경택 : "석탄회 : 이용가치와 재활용 기술", 한국전력공사, (1994).
2. H. Ban, J.L. Schaefer, and J.M. Stencel : "Size and Velocity Effects on Coal Particle Triboelectrification and Separation Efficiency", *Proceedings of 10th Annual International Pittsburgh Conference*, 138-143, University of Pittsburgh, Pittsburgh (1993).
3. D.H. Finseth, T. Newby, and R. Elstrodt : "Triboelectrostatic Beneficiation of Fine Coal", *Proceeding of the 9th Korea-U.S.A Joint Workshop on Coal Utilization Technology*, 221-230 (1992).
4. R. Gupta, D. Gidaspow and D.T. Wasan : "Electrostatic Separation of Powder Mixtures Based on the Work Functions of Its Constituents", *Powder Technology* 75, 79-87 (1993).
5. 최우진, 정진도, 지평삼 : "발전용 석탄의 연소전 탈황탈회 처리시스템 설계를 위한 기초연구", 한국에너지공학 회지, 제 4권 1호, 5-12 (1995).
6. 이재근, 하만영, 김경천, 김귀순, 구재현 : "온도와 수분함유량 변화에 의한 Fly Ash의 비저항성 특성연구". *대한기계학회 1995년 춘계학술대회논문집(II)*, 517-522 (1995).