

## 정전선별법을 이용한 석탄회로부터 미연탄소분 제거에 관한 연구

최우진, 염영길

환경청정기술연구센터 수원대학교 환경공학과

### ABSTRACT

The goal of this study is to investigate the potential application of triboelectrostatic separation process for removing unburned carbon from fly ash. The process utilizes the difference in electrical charging characteristics between the organic material (carbon) and the mineral matter (fly ash). In the present work, dry separation tests have been conducted on Samchunpo fly ash samples using a bench - scale analytic separator. The test variables studied include air rate, feed rate, electric field strength, particle size, charger material and length, etc. The best separation results were obtained at the air rate 50 l/min, feed rate 15 g/min and voltage 15 kV. The fly ash with carbon content below 1 % was obtained with over 65 % recovery.

**key word** : fly ash, power plants, electrostatic separation, unburned carbon.

### 1. 서론

석탄의 수요 증가와 함께 석탄회 발생은 매년 증가추세에 있다. 연간 국내에서 발생하는 석탄회는 '96년 기준 약 310 만톤이상 발생하고 있으나 2006년까지 계속해서 유연탄발전소를 집중 건설할 예정임에 따라 향후 석탄회 발생량은 600 만톤을 훨씬 상회할 것으로 예상된다 [1]. 그러나, 현재 석탄회는 총발생량의 22%만이 이용되고 있으며 나머지는 매립 처분되고 있어 매립지 확보가 점차 어려운 문제가 되고 있다. 또한 석탄회의 처리, 매립 등으로 인한 환경문제도 심각해서 dust로 인한 2차 공기오염문제는 물론 지하수 및 지표수의 오염문제가 야기되고 있다. 이와 같은 문제점등을 해결하기 위해서 선진각국들은 이미 여러분야에 걸쳐 석탄회의 재활용기술을 개발하였으며 실용화된 분야도 많이 있다.

일반적으로 석탄회가 가장 많이 이용되는 분야는 시멘트분야로서, 우리나라의 경우 다량의 석탄회를 concrete 제조에 적극적으로 활용하는 것이 가장 바람직한 것으로 알려져 있다. 그러나, 석탄회중에 미연탄소함량이 높아지면 발전비용을 높일 뿐 아니라 석탄회의 콘크리트활용을 어렵게 하고 있다. 그 이유는 미연탄소함량이 크면 콘크리트강도에 영향을 미칠 뿐 아니라, 기포제와 같은 첨가제를 흡수하여 제조비용을 높이며, 동시에 콘크리트의 열팽창 강도에도 영향을 주게 된다. 따라서, 콘크리트분야에서 요구하는 석탄회의 특성으로서는

미연탄소분함량이 적고 Pozzolanic 특성이 좋아야 하며 각종 특성이 균일하게 생산, 공급이 가능해야 한다. 이와 같이 석탄회의 재활용성을 높이기 위해서는 석탄회중에 함유된 미연탄소분을 경제적으로 제거할 수 있는 기술개발이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 석탄회로부터 미연탄소분을 효과적으로 제거할 수 있는 건식정전 선별기술의 적용가능성을 검토하였으며, 특히 입자의 하전효율 메카니즘을 규명하므로써 선별효율을 증진시킬수 있는 방안을 제시코져 한다.

## II. 실험방법

본 실험에 사용된 석탄회는 삼천포 화력발전소 전기집진기에서 채취한 것으로, 두 종류의 시료에 대한 공업분석 결과는 Table 1 과 같다. Table 1 에서 알 수 있듯이 공업 분석결과 A 시료는 수분 0.17 %, 휘발분 1.66 %, 회분 88.5 %이며 고정탄소가 10.19 %로 비교적 높다. 이에 반해 B 시료는 수분 0.13 %, 휘발분 1.52 %, 회분 94.66 %이며 고정탄소 3.82 %로 비교적 낮은 수준이다. 두 A, B 시료의 평균 고정탄소(LOD)함량은 약 6.6 %이었다. A 시료의 평균입도는 약 46  $\mu\text{m}$ 이었으며 B 시료의 경우는 26.3  $\mu\text{m}$ 으로 A 시료에 비해 훨씬 미세한 것으로 나타났다. 불밀을 이용하여 5분간 분쇄후 얻어진 시료의 평균입도는 A, B 시료가 각각 19.9  $\mu\text{m}$  및 11.9  $\mu\text{m}$ 이었다.

Table 1. Proximate analysis of fly ash samples.

Samples	Moisture	Volatile	Ash	FixedCarbon	Mark
A	0.17	1.66	88.15	10.19	Dry
B	0.13	1.52	94.66	3.82	base
A + B	0.16	1.61	91.79	6.60	

Fig. 2 는 석탄회 A 시료의 입도별 중량비, 탄소함량 및 탄소질량비등을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 석탄회를 구성하는 입자중 66 % 이상이 400 mesh 이하의 미세한 입자로 구성되어 있음을 알 수 있으며 전체의 약 15 %만이 74  $\mu\text{m}$ (200 mesh)보다 큰 입자로 구성되어 있다. 반면에 입도별 미연탄소함량을 보면 200 mesh 이상의 석탄회에서 미연탄소함량이 45.8 %, 270 mesh 이상 석탄회에서 13.73 %, 400 mesh 이하 석탄회에 함유된 미연탄소분은 1.66 %로 측정 되었다. 따라서 석탄회에 존재하는 미연탄소분의 약 70 %는 입자크기가 74  $\mu\text{m}$  이상에 존재하고 있으며 입자가 작아질수록 미연탄소함량이 감소함을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 우선적으로 석탄회 시료에서 200 mesh 이상의 입자를 체가름을 통하여 제거한후, 얻어진 -200 mesh 석탄회시료에 대한 정전선별실험을 수행하였다. 따라서 정전선별실험에 이용된 석탄회 시료의 미연탄소분 함량은 2.6 ~ 3.4 % 수준이었으며 분쇄한 원시료에 대한 정전선별실험도 수행하였다.

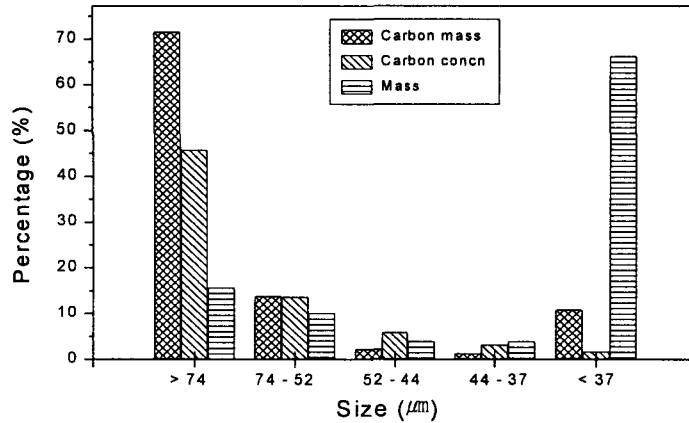


Fig. 2 Percentage of fly ash mass, carbon concentration, and carbon mass distributions in each size fractions.

본 실험에서는 1 회에 30 g의 시료를 이용하였으며 실험조건을 변경하면서 최적선별조건을 확립코져하였다. 시료를 하전장치(Tribocharger)에 공급하기 전에 Vacuum generator를 가동시키고, 정전선별기 본체에 전원을 공급한 후 질소가스를 주입하고 진동식 공급장치를 가동하여 깔때기 모양의 시료투입구로 일정하게 시료를 투입하였다. 분리 실험 후 극판의 위치에 따라 포집된 시료는 중량을 측정후 회수된 시료에 대한 미연탄소함량을 측정하였다. 시료에 대한 공업분석은 Leco사의 TGA-601 열중량 분석기를 이용하여 수행하였다. 시료의 채취위치는 각 극판의 0 ~ 15 cm, 15 ~ 30 cm, 30 ~ 60 cm, 60 ~ 100 cm부분에서 채취하였으며 전체 시료량에서 회수된 양을 계산하므로써 Vacuum cleaner에서 포집된 양과 미연탄소분 함량을 측정하였다.

### Ⅲ. 실험결과 및 고찰

#### 1. 실험결과

Fig. 3은 시료의 하전효율 및 처리량에 영향을 미치는 air rate 변화가 정전선별에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 air rate를 40 l/min에서 80 l/min까지 변화하며 실험한 결과이다. 본 실험의 조건은 시료투입량 15 g/min, 전압세기 15 kV이었으며 건조된 시료를 실험에 이용하였다. Air rate 변화에 따른 실험결과 회분회수율은 air rate가 증가함에 따라 다소 감소하다가 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그러나 미연탄소분 회수율은 air rate가 40 l/min에서 50 l/min로 증가하면 carbon 회수율이 65%에서 79%로 증가하였으나 air rate가 그 이상 증가하면 다소 감소함을 보여주고 있다. 회수된 정제 석탄회의 미연탄소분 함량도 air rate 40 l/min에서 1.3%에서 50 l/min인 경우 0.9%까지 감소 하다가 다시 증가함을 알 수 있다. 주입되는 공기량이 적으면 시료가 하전장치에 강하게 충돌되지 못해 시료의 표면하전이 효율적으로 이루어지지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 air rate 60 l/min 이상에서 공기의 충분한 흐름에 의해 시료의 하전은 효율적으로 이루어지나, 너무 강한 공

기의 흐름에 의해 석탄회중에 혼입된 미연탄소분 입자가 선택적으로 분리되지 못하고 정제 석탄회중에 혼입되어 석탄회중의 미연탄소분 함량이 다소 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 Feed rate 변화가 정전선별효율에 미치는 영향을 검토하기 위하여 feed rate를 5 g/min에서 25 g/min까지 변화시키면서 실험한 결과이다. 본 실험은 air rate 50 l/min, voltage 15 kV에서 수행하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 carbon 회수율은 feed rate를 5 g/min에서 15 g/min로 증가시키면 68%에서 78%까지 증가하였으나, feed rate를 25 g/min까지 증가시키면 carbon 회수율은 73% 수준으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 반면에 정제 석탄회 생산율 (Ash yield)은 feed rate 변화에 큰 영향을 받지 않음을 보여주고 있다. 즉, 시료 급광량을 15 g/min까지 증가시키면 생산율이 3%가량 감소하다가 feed rate 증가에 따라 생산율은 미미하게 증가하는 경향을 보여주고 있다.

이와 같이 feed rate 증가에 따라 Carbon 회수율이 증가하는 것은 양극으로 하전된 Carbon 입자들이 음극판으로 이동할 때 하전이 안된 석탄회 입자들과 단체분리가 되지 않은 입자들이 비선택적으로 함께 이동된 것으로 생각되며, 따라서 전반적으로 Ash yield는 다소 감소하나 Carbon 회수율은 증가하는 경향이 있다.

Fig. 5는 하전된 시료가 정전선별기 본체내에서 선별이 이루어질 때 분리판의 전압세기가 선별효율에 미치는 영향을 관찰한 것으로 이때의 실험조건은 air rate 50 l/min, feed rate 15 g/min이었다. 실험결과 carbon 회수율은 5 kV에서 74%, 15 kV에서 78%까지 다소 증가하였으나, 20 kV에서 60%미만까지 급격히 감소하였다. 반면에 정제석탄회 생산율은 전압의 세기가 증가함에 따라 초기에는 다소 감소하였으나 전반적으로 큰 변화가 없음을 보여주고 있다. 회수된 정제 석탄회의 미연탄소분 함량도 전압의 세기가 15 kV 까지 큰 변화가 없으나 20 kV에서 1.7%로 다소 높게 나타났다. 이와 같이 분리판의 전압세기가 증가하면 할수록 하전장치에 의해 하전된 입자들이 분리판내로 투입될 때 반대로 하전된 입자들이 선택적으로 보다 강하게 분리판으로 흡수될 수 있기 때문이다. 또한 분리판의 전압세기가 증가하면 분리판내에 투입된 입자들의 이동이 빨라지기 때문에 입자들간의 간섭에 의한 방해가 줄어드는 것으로 사료된다. 그러나, 전압의 세기가 20 kV이상이 되면 분리극판 내에서 코로나 방전이 발생되어 정전기력에 의한 분리 효율이 떨어지게 된다.

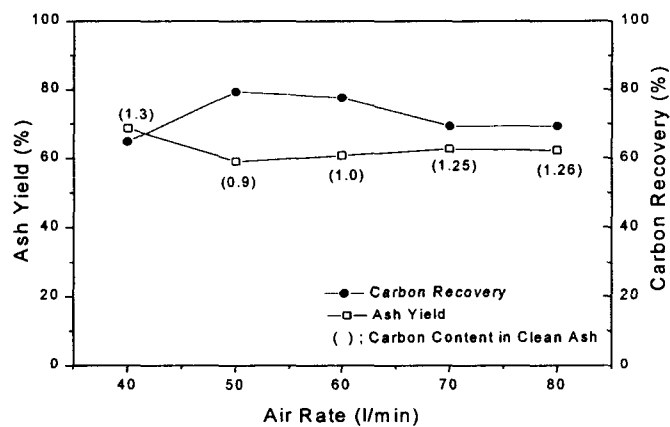


Fig. 3 The effect of air rate on ash yield and carbon recovery from the triboelectrostatic separation for Samchunpo fly ash.

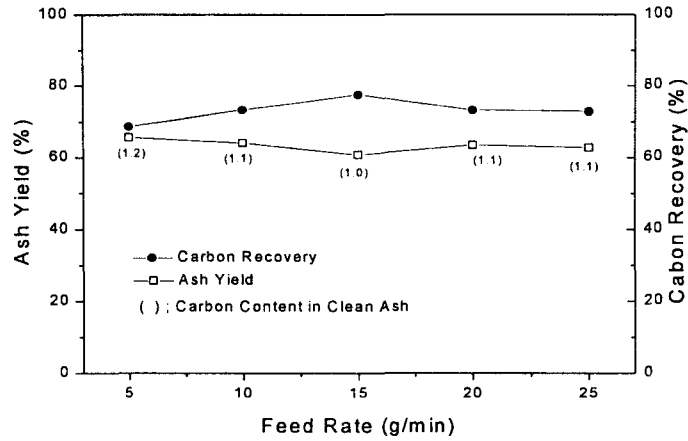


Fig. 4 The effect of feed rate on ash yield and carbon recovery from triboelectrostatic separation for Samchunpo fly ash.

Table 2는 시료의 입도크기가 정전선별에 미치는 영향을 검토 하기 위하여 석탄회 원시료와 5분간 분쇄한 시료를 이용하여 실험한 결과로 실험조건은 air rate 50 l/min, feed rate 15 g/min, 전압세기 15 kV이었다. 앞서 언급하였듯이 석탄회 원시료와 5분간 분쇄한 시료의 평균입도는 각각 46  $\mu\text{m}$ 와 19.9  $\mu\text{m}$ 이었다. 석탄회 원시료에는 200 mesh (75  $\mu\text{m}$ )이상의 굵은 입자가 15%이상 함유되어 있으며 대부분의 미연탄소분 입자가 함유되고 있음은 이미 언급한 바 있다. Table 2에서 알 수 있듯이 원시료의 정전선별 결과 carbon 회수율은 20%미만으로 분쇄한 시료의 61.5%에 비해 매우 낮았으며 그 이유는 입자가 큰 미연탄소분이 효율적으로 분리되지 못하였기 때문이다.

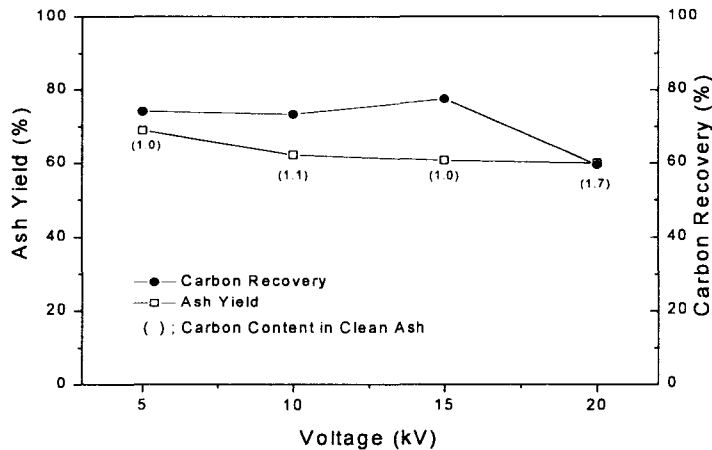


Fig. 5 The effect of voltage (electric field strength) on ash yield and carbon recovery from the triboelectrostatic separation for Samchunpo fly ash.

Table 2. Results of triboelectrostatic separation using raw and ground fly ash samples.

Sample	Size( $\mu\text{m}$ )	Carbon Recovery (%)	+ plate Ash yield (%)	Carbon content in ash (%)
Raw Fly ash	46.6	19.7	38	2.73
Ground Fly ash	19.9	61.5	49	5.59

한편 + plate 에 회수된 석탄회중의 미연탄소분은 원시료의 경우 2.7%로 분쇄한 시료 5.59%보다 낮게 나타났으며 그 이유는 원시료중 미세한 미연탄소분 입자만이 선별적으로 분리되었기 때문이다. 석탄회 선별시 시료를 분쇄한 후 처리하면 처리공정의 비용이 증가하므로 앞서 언급하였듯이 + 200 mesh 입자를 제거한 후 회수된 미립 석탄회를 정전선별처리하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

본 실험에서는 하전장치(Tribocharger)의 재질 및 길이변화가 정전선별에 미치는 영향을 검토하기 위하여 기초실험을 수행하였다. Table 3은 동과 스테인레스스틸로 만든 하전장치와 길이변화에 따른 선별효율을 나타낸 것이다. 동으로 만든 하전장치의 경우 하전장치 내의 in-line mixer의 길이가 증가할수록 입자의 하전효율이 증가함을 알 수 있다. 하전장치의 길이가 5cm에서 15cm로 증가하면 carbon 회수율뿐만 아니라 석탄회 생산율도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 석탄회 생산율의 경우 하전장치의 길이가 15cm일 때 72%로 하전장치의 길이가 5cm를 사용한 경우의 60.7%보다 12% 높게 나타났다. 정제 석탄회중의 미연탄소분 함량도 크게 감소하며 1.0%에서 0.64%까지 낮아진것을 알 수 있다. 하전장치의 길이가 길어지면 금속표면과 접촉면적이 증가하므로써 입자의 하전효율이 증가되는 것으로 생각된다. 그러나 하전장치의 길이를 증가시키면 석탄회 처리량과 연관이 있기 때문에 추가적인 기초실험이 수행되어야 할 것으로 사료 된다. 또한 본 실험에서는 하전장치의 재질에 따라 선별효율이 크게 차이가 나는 것을 확인하였다. 동으로 만든 하전장치가 스테인레스스틸로 만든 하전장치에 비해 전반적으로 선별효율이 우수한 것을 알 수 있었다. 동으로 만든 하전장치의 경우 SS로 제작한 하전장치에 비해 석탄회 생산율이 5~7% 높았으며 정제 석탄회 중의 미연탄소함량도 0.3~0.4% 낮게 나타났다.

Table 3. The effects of charger material and length on separation efficiency

Charger Length (cm)	Carbon Recovery (%)	Ash Yield (%)	Carbon Content in Ash (%)	Total Mass (%)
Copper 15cm	82.9	72.1	0.64	80.0
Copper 10cm	82.3	67.7	0.67	88.0
Copper 5cm	77.5	60.7	1.0	88.4
SS 15cm	89.8	64.9	0.80	86.1
SS 10cm	77.1	65.1	0.9	77.6

(SS : Stainless Steel)

Fig. 6은 최적 실험조건에서 석탄회의 정전선별 결과를 미연탄소함량에 따른 석탄회 생산율로 나타낸 것이다. Fig. 6에서 미연탄소함량이 1.0%미만인 석탄회 생산율은 약 46%이며, 3%이하인 석탄회를 처리할 경우, 전반적으로 미연탄소분함량이 1%수준인 정제된 석탄회 60%이상 회수가 가능하였다. 실험결과 시료투입구로부터 30cm가 넘는 지점에서는 분리가 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있으며, 따라서 30cm 이후의 (-) 및 (+) plate에

서 회수된 시료의 carbon 함량이 반전되고 있음을 보여주었다. 정전선별 시스템을 실제적으로 현장에 적용할 시 이점을 고려하여 설계하여야 할 것으로 사료된다.

## 2. 선별효율 향상에 관한 고찰

정전선별시 입자의 하전메카니즘에 영향을 주는 중요변수로서는 투입시료의 성분(즉 미연탄소분함량)과 공정시 투입되는 시료량이다. 실험결과를 종합해 볼 때 석탄회 시료중의 미연탄소분함량이 증가하면 일반적으로 선별효율이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한 Feed rate가 낮은 경우에는 미연탄소분입자 자체가 금속표면에 충돌할 확률이 증가되어 (+)로 하전될 확률이 증가되나, 반면에 석탄회입자와 충돌할 확률이 낮아져서 미연탄소분입자가 (+)로 석탄회입자가 (-)로 하전될 확률도 감소하게 된다. 그러나, Feed rate를 증가시키면 미연탄소분입자가 금속표면에 접촉할 확률보다 미연탄소분입자끼리 충돌하여 (+)나 (-)로 하전될 확률이 증가한다. 석탄회 입자의 경우는 이와는 반대로 Feed rate가 증가함에 따라 미연탄소분과 석탄회 입자가 충돌하므로써 각각 (+), (-)로 하전될 확률이 증가한다. 석탄회 입자의 경우는 이와는 반대로 Feed rate가 증가함에 따라 미연탄소분과 석탄회 입자가 충돌하므로써 각각 (+), (-)로 하전될 확률이 증가되는 것으로 판단된다. Fig. 7은 시료 투입량이 각각 높고 낮을 경우에 따라 미연탄소 및 석탄회입자의

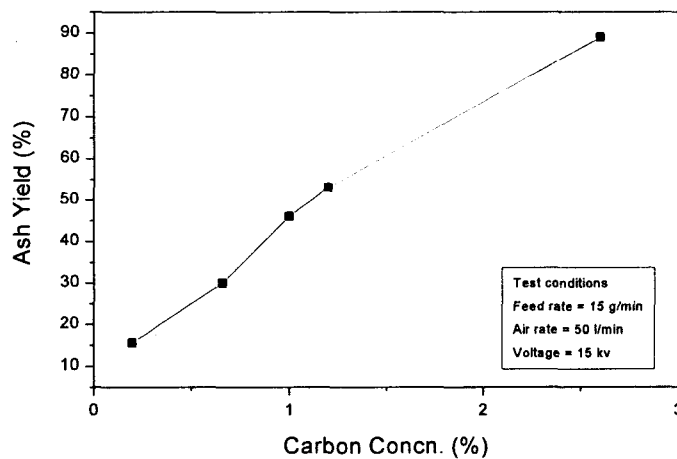


Fig. 6 Ash yield of Samchunpo fly ash (A) tested at the optimum test conditions.

3가지 하전형태와 그에 따른 발생가능성을 보여주고 있다. 결론적으로 시료 투입량이 적으면 미연탄소분 입자들간의 충돌할 가능성이 낮으나 이들 입자들은 금속표면에 충돌하므로써 (+)로 하전될 확률이 증가한다. 그러나 시료투입량이 증가하면 미연탄소분 입자들간의 충돌할 가능성이 증가하므로써 미연탄소분 입자의 하전효율이 크게 증가하므로써 선별효율이 향상되는 것으로 사료된다.

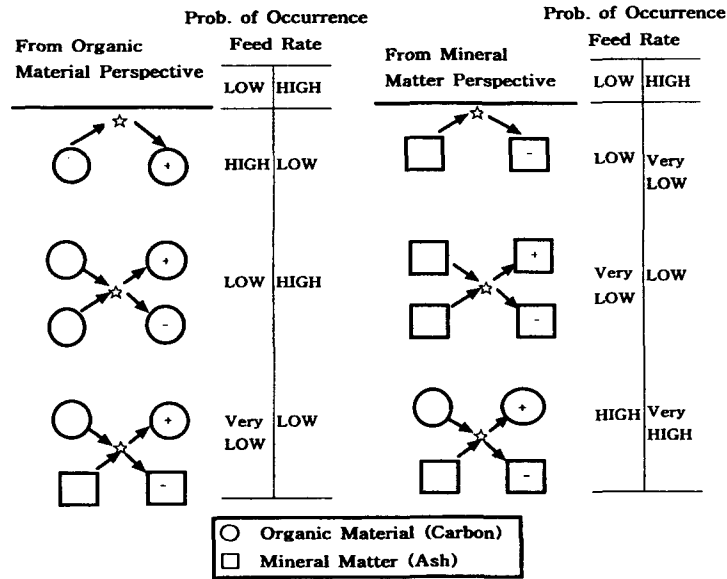


Fig. 7 Schematic representation of particle tribocharging and their relative probabilities of occurrence.

#### IV. 결론

1. 삼천포 화력발전소 전기집진기에서 발생된 석탄회를 분석한 결과 대부분 미연탄소분은 입경이 74  $\mu\text{m}$  이상인 석탄회에 존재(45% LOI)하였으며 74  $\mu\text{m}$  이하 석탄회의 미연탄소분함량은 2.6 ~ 3.8% 수준이다.
2. 정전선별의 분리효율에 영향을 미치는 주된 변수는 석탄회의 입도크기, 전기장의 세기 등이었으며 시료투입량(Feed rate)과 하전장치의 재질 및 길이도 미연탄소분 회수율과 석탄회 생산율에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 일반적으로 석탄회 입자가 작을수록 분리효율이 우수하였으며 분리판내의 전기장 세기가 클수록 석탄회의 집진력이 증가하여 분리효율이 향상되었다.
3. 수평형 정전선별 실험결과를 종합해보면 최적 실험조건은 air rate 50 l/min, feed rate 15 g/min, voltage 15 kV 등이었으며 동으로 제조한 하전장치가 스테인레스스틸로 제작한 것보다 선별효율이 우수한 것으로 나타났다.
4. 본 연구에서는 입자의 하전메카니즘을 투입되는 시료량에 따라 검토하였으며 시료 투입량이 적으면 미연탄소분입자 자체가 금속표면에 접촉하므로써 하전이 될 확률이 증가하는 것으로 판단되며 반면에 시료투입량이 증가하면 미연탄소 입자들 또는 미연탄소-석탄회 입자들간의 접촉으로 인한 입자의 하전이 증가되는 것으로 사료된다.
5. 화력발전소에서 채취한 석탄회 시료의 미연탄소함량은 10%수준이었으나 입도가 74  $\mu\text{m}$  이상을 제거하면 2.6 ~ 3.8% 수준(Yield 85%)이었으며 정전선별후 1.0%미만의 정제된 석탄회를 전체양의 60 ~ 65% 이상 회수가 가능하였다.



## 후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 손응권 외, “선회식 연소시스템을 이용한 석탄재의 미연탄소분 저감기술 개발” 최종 보고서, 통상산업부, 1998.
- 2) 오성원, “석탄회 처리현황과 대책”, 한국전력공사 자원재활용부, p.8, 1996.
- 3) Whitlock D. R., “Separation of mixed fine powders using new electrostatic technology”, 11 th Industrial Minerals International Congress, Proceedings, pp. 140 - 144, 1995.
- 4) Heng Ban, et al., “Dry Electrostatic separation of Carbon From Coal combustion Fly Ash”, 12 th International Symposium on Coal Byproduct Management & Use., Vol II, Orlando, FL., Jan. 1997.
- 5) Heng Ban, et al., “Dry Electric separation of Carbon from Coal Combustion Fly Ash”, 12 th International Symposium on Coal Byproduct Management & Use, Vol II, Orlando, FL., Jan. 1997.
- 6) Finseth D. H., Newby T., and Elstrodt R., “Triboelectrostatic Beneficiation of Fine Coal”, Proceeding of the 9th Korea - U.S.A Joint Workshop on Coal Utilization Technology, 221 - 230, 1992.
- 7) 최우진, 정진도, 지평삼: “발전용 석탄의 연소전 탈황탈회 처리시스템 설계를 위한 기초연구”, 한국에너지공학회지, 제 4 권 1 호, 5 - 12, 1995.
- 8) 최우진 외, “발전용 석탄의 연소전 탈황탈회 처리기술”, 최종보고서, 전력연구원, 1996.
- 9) Ralston, O. C., “Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids”, Elsevier, 1961.