정전분리법을 이용한 석탄회 중 미연탄소 정제

노승수* · 길준호 · 전병용 · 노갑수
〈쌍용양회 기술연구소〉

1. 서 론

지속적인 전력 수요의 증가로 인한 국내 유연탄 화력발전소 신 · 증축에 따라 석탄회 발생량도 점진적으로 증가하여 왔으며 앞으로도 증가할 것으로 예상된다. 그러나 현재 석탄회 발생량의 대부분은 발전소 주위에 매립 폐기되고 있어 장차 가중되는 회처리장의 입지확보 문제, 환경보호 및 경제적 이익 측면에서 석탄회 재활용의 욕구가 높아져 오고 있다.[1)]

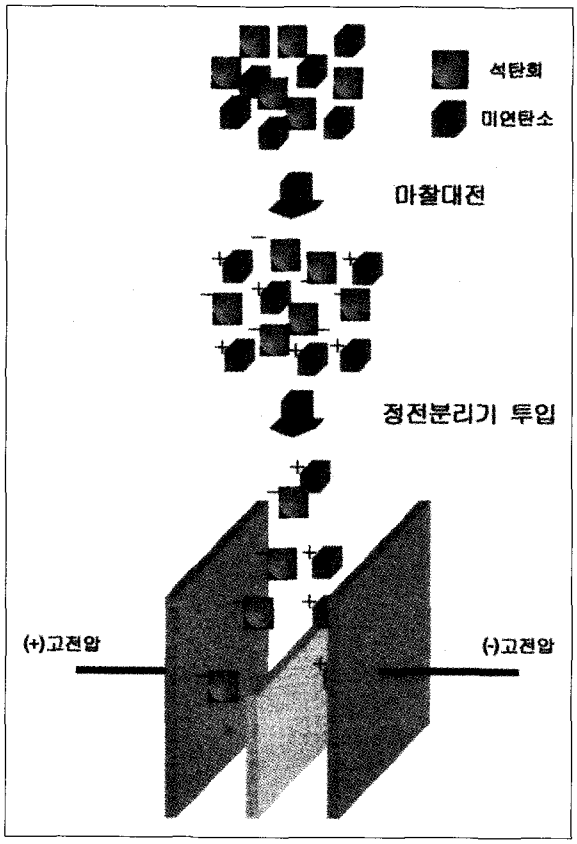
석탄회는 일반적으로 주성분이 SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 등이고 일부 CaO, MgO, 미연탄소(unburned carbon) 성분을 함유하고 있는데 이중 SiO_2는 성분함량이 가장 높으면서 포졸란 활성도를 갖기 때문에 시멘트 혼화재로 사용시 콘크리트의 수화열 감소, 작업성 개선, 알칼리 골재반응 억제, 내구성 향상 및 장기강도를 증진시킬 수 있다. 그러나 석탄회에 존재하는 미연탄소는 화력발전소 연소로의 연소조건이나 석탄 종류에 따라서 2~10%를 차지하고 있는데, 이 미연탄소는 석탄회를 콘크리트 혼화재로 사용시 비표면적이 커서 AE제 등을 잘 흡착하고, 콘크리트의 구성성분과 반응하지 않기 때문에 압축강도 및 유동성의 저하를 초래한다. 현재 우리나라 발생 석탄회의 미연탄소 함량은 다소 높은 편이어서 콘크리트 등에 대량으로 적용하기 위해서는 석탄회의 미연탄소 함량을 낮추는 것이 바람직하며 현재 국내 · 외에서 미연탄소 함량을 저감시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재 국내 · 외의 석탄회 정제기술은 석탄회의 회(ash)성분과 미연탄소 성분의 물리적 특성과 화학적 특성 차이를 이용한 방법으로 크게 비중선별법, 부유선별법, 기름응집법 등의 습식법과 기계분급법, 자력선별법, 정전분리법 등의 건식분리법이 있다. 습식분리법은 분리효율이 우수하고 많은 방법들이 상업화를 실현하였으나 습식이기 때문에 석탄회의 탈수 및 건조 등의 설비투자비가 크고, 폐수발생 등 2차오염을 유발하며 분리된 석탄회의 포졸란 활성이 저하되는 등의 문제점을 가지고 있다. 건식분리법은 정제 석탄회의 고유특성이 변하지 않고, 경제성 면에서도 습식법보다 우수하나 현재까지 각 방법마다 기술적인 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 상용화된 건식분리법인 공기분급법은 장치가 단순하여 대용량화가 용이한 반면 미연탄소 함량 저감의 한계가 있으며, 마찰대전형 정전분리법인 미국 STI 기술은 분리효율이 우수하나 연속운전이 불가능한 단점이 있다.[2)]

본 연구는 석탄회의 시멘트 콘크리트 혼화재로의 대량 이용을 위하여 여러가지 장점을 가지고 있는 마찰대전형 정전분리법을 적용, 연속 운전이 가능한 석탄회 중 미연탄소 정제장치에 관한 것으로 장치의 정제 성능에 영향을 미치는 인자에 대한 최적조건을 실험을 통하여 도출하였다.

2. 관련 이론

미분체의 정전분리 방법에는 코로나 방전형(corona discharging type) 및 정전유도형(electrostatic inductive type)과 마찰대전형(triboelectric type) 정전분리 방법이 있다. 코로나 방전형 및 정전유도형 정전분리 방법은 전도성과 비전도성 분체가 혼합된 분체에만 적용할 수 있는 반면에 마찰대전형 정전분리 방법은 일함수



〈그림 1〉 정전분리 원리도

(work function)가 다른 두 미분체를 직접 충돌시키거나 일함수 차이의 중간 정도의 물질의 표면에 충돌시키면 일함수의 크기에 차이에 따라 두 미분체가 (+), (−)로 대전되는데, 이 대전된 미분체를 직류 전기장에 투입하여 전기력에 의해 (+)로 대전된 분체는 (−)전극으로 (−)로 대전된 미분체는 (+)전극으로 이동하여 분리하는 방법이다.[3,4]

고체입자의 일함수란 전기화학적 전위와 비슷한 의미로 고체표면 내부의 페르미 준위(Fermi level)의 전자에너지와 고체외부 진공상태의 전자에너지 차이 또는 고체입자의 최외각 자유전자 하나가 고체의 구속으로부터 벗어나기 위한 최소의 에너지라고도 말할 수 있는데, 일함수가 작다는 것은 그만큼 외부로 전자를 쉽게 잃어버릴 수 있다는 것이며 일함수가 크다는 것은 반대로 외부로부터 전자를 쉽게 얻을 수 있다는 것이다.

일반적으로 순전하(net charge)가 없는 일함수가 다른 두 고체입자의 접촉시 접촉계 면에서는 터널링 효과(tunneling effect)에 의해 일함수가 낮은 물질로부터 일함수가 높은 물질로 전자의 이동이 발생하여 두 고체표면 내부의 페르미 준위가 동일해지려고 한다.

입자의 접촉분리시 두 입자 사이에 전달되었던 전하의 역흐름(back flow)으로 완전히 소진되지 않고 물질에 남아있게 되면, 두 물질의 순전하가 존재하게 되어 일함수가 낮은 물질은 (+)로, 일함수가 높은 물질은 (−)로 대전되게 된다.

석탄회 구성입자들의 대전 극성을 예측하면 미연탄소 입자와 SiO_2, Al_2O_3 입자의 접촉시 미연탄소는 (+)로 다른 입자는 (−)로 대전된다.[5,6]

3. 실험 방법

3.1 실험 방법

석탄회 중 미연탄소 성분을 분리하기 위한 마찰대전 정전분리 장치는 크게 호퍼와 스크류 피더(screw feeder)로 이루어진 석탄회 공급장치, 인젝터(injector), 마찰수송관 및 디퓨저(diffuser) 등으로 이루어진 마찰대전부(tribocharger), 10㎝ 간격의 (+)·(−) 평판전극, 중앙분리판(splitter), 직류 고전압 발생장치로 이루어진 정전분리부 및 사이클론과 백필터로 이루어진 분체포집부로 구성되어 있다.

석탄회는 3.5ton/hr 용량의 스크류 피더에 의해 자유 낙하하여 인젝터에 정량 공급된다. 압축공기 출구를 인젝터 공기 투입부에 연결하여 압축공기가 인젝터내에서 고속으로 압축·팽창하고 이때 발생하는 흡인력으로 인젝터내로 시료가 투입되어 공기와 함께 스테인레스 스틸 재질의 인젝터와 수송관에서 마찰대전이 이루어진 후 디퓨저내에서 분산된 후 균일하게 전장 분리기에 투입된다.

전압이 인가된 수직한 (+)·(−) 평행전극판 사이에 투입된 대전석탄회는 전계에 의한 정전력(electostatic force)에 의해 각각 반대편 전극을 향해 이동하여 분리되며, 이때 이들을 분할하기 위해 중앙에 분리판(splitter)을 설치하였다.

중앙분리판은 이동하면서 수율(yield)을 조절할 수 있도록 되어 있다. 중앙분리판을 통과하여 분

〈표 1〉 원료 석탄회의 화학조성

구분 / 시료	화학조성 (%)									LOI (%)	평균입경 (μm)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	K_2O		
KS L 5405 기준	45 ↑	-	-	-	-	-	-	-	-	5.0 ↓	-
보 령 A	59.01	26.95	4.88	4.30	0.8	1.60	0.69	0.43	1.14	7.5	23.24
태 안 A	52.24	24.75	6.41	5.81	1.40	1.20	1.16	0.32	1.43	5.0	15.96
보 령 B	58.30	22.11	4.98	4.32	1.05	1.00	0.40	0.46	2.17	5.0	24.08
보 령 C	53.36	20.56	8.21	5.60	1.30	0.92	0.80	0.74	1.04	7.0	24.19
보 령 D	55.82	20.54	9.57	2.97	0.70	0.86	0.43	0.45	1.15	8.0	34.21
태 안 B	53.94	23.13	10.56	4.24	0.95	1.02	0.73	0.26	1.04	4.5	19.93
보 령 E	53.70	21.35	9.15	2.85	0.95	0.95	0.52	0.48	1.05	9.0	27.34

리된 미연탄소 함량이 낮은 정제회(product)와 미연탄소 함량이 높은 폐기회(reject)는 각각 사이클론과 백필터에서 포집된 후 무게를 측정하여 투입 석탄회 질량에 대한 정제회 질량의 백분율인 수율을 계산하고 한국공업규격 KS L 5405의 방법으로 미연탄소 함량(LOI : Loss On Ignition)을 측정하였다.[7]

3.2 실험 시료

실험에 사용된 석탄회는 보령 화력발전소와 태안 화력발전소에서 채취한 시료로 화학조성은 Philips사의 XRF로 측정하였고, 입도분포는 Malvern사의 Mastersizer로 측정하였으며, 미연탄소 함량은 한국공업규격 KS L 5405의 방법으로 측정하였다.

화학조정을 측정한 결과를 〈표 1〉에 나타내었다. SiO_2의 함량이 모든 시료에서 50% 이상이고, $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ 함량의 합이 80%으로 강열감량을 제외하면 KS규격 및 ASTM 규격을 모두 만족함을 알 수 있다. 보령D 및 태안B 시료의 경우 Fe_2O_3 함량이 다소 높은 것을 알 수 있다.

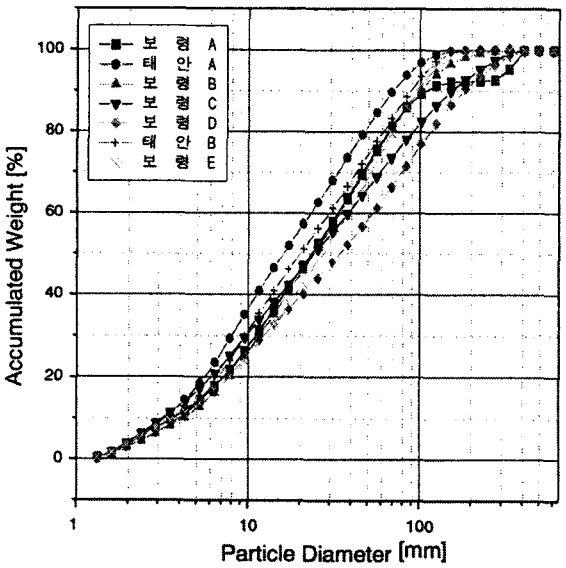
석탄회의 입도분포를 측정한 결과 비슷한 입도분포를 보이고 있으나 태안A 시료의 입도는 다소 미세하고, 보령D 시료는 굵은 입도분포를 하고 있는 것으로 나타났으며, 그 결과를 〈그림 2〉에 나타내었다.

시료 입도구간별 미연탄소 함량을 보면 입도가 38μm 이상인 부분은 무게 함량은 적지만 미연탄소 함량이 높고, 입도가 38μm 미만인 부분은 거의 60% 이상의 무게 함량을 차지하지만 미연탄소의 함량은 낮은 것으로 나타났다.

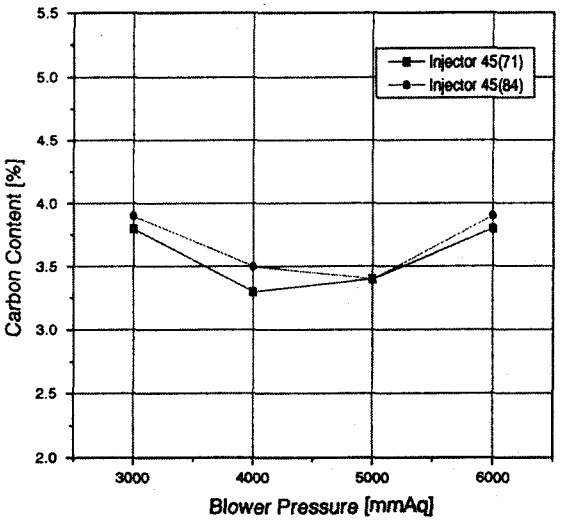
따라서 미연탄소는 주로 굵은 입도의 범위에 위치하는 것을 알 수 있다.

〈표 2〉 원료 석탄회의 입도구간별 미연탄소 함량

size (μm)	보 령 A		태 안 A		보 령 B		보 령 C		보 령 D		태 안 B		보 령 E	
	wt%	LOI	wt%	LOI	wt%	LOI	wt%	LOI	wt%	LOI	wt%	LOI	wt%	LOI
150 이상	3.21	37.8	0.59	52.58	0.94	45.7	3.88	37.56	1.86	49.7	0.37	42.58	1.15	46.1
105~150	3.24	39.6	1.4	31.59	2.41	21.2	4.86	18.48	5.33	29.9	4.62	23.59	4.51	31.3
74~105	3.95	29.4	2.07	17.08	3.77	16.2	3.2	21.1	3.52	32.31	6.54	12.08	5.3	21.86
53~74	5.5	18.3	5.04	10.66	7.21	9.67	7.26	10.85	4.72	11.3	10.02	7.66	9.6	17.22
38~53	6.4	13.2	5.35	6.74	8.4	8.6	9.4	4.41	12.55	11.78	9.88	4.74	11.0	10.2
26~38	9.6	6.25	6.45	5.17	8.39	7.37	6.28	5.75	9.62	5.3	11.18	2.6	12.64	9
26 미만	68.1	2.1	79.1	2.3	68.88	2.03	65.12	2.93	62.4	2.4	57.39	1.59	55.8	5.6
합 계	100	7.5	100	5.0	100	5.0	100	7.0	100	8.0	100	4.5	100	9.0



〈그림 2〉 원료 석탄회의 입도 분포



〈그림 3〉 블로워 압력 변화의 영향

4. 결과 및 고찰

석탄회 정전분리 조건의 선정을 위하여 전극판 인가전압, 정전분리기 석탄회 투입속도, 석탄회 투입량 변화 및 습도의 변화 실험을 행하여 최적 조건을 도출한 후 미연탄소 함량별 정전분리 성능을 평가하였다.

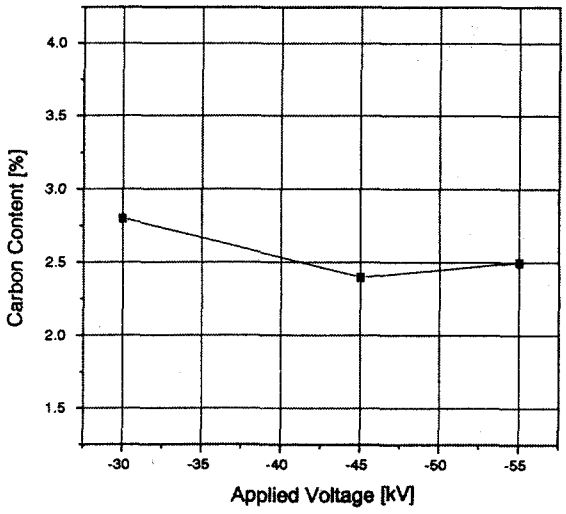
1) 정전분리기 석탄회 투입속도의 영향

석탄회 투입속도 변화의 영향을 알아보기 위하여 실험조건을 미연탄소 함량 8.0%인 보령 화력발전소 D 시료를 투입량 3.0ton/hr, 전극판 인가전압 -50kV, 수율 55%로 고정한 후 블로워 압력을 3,000, 4,000, 5,000, 6,000㎜Aq (투입속도 10.7, 11.6, 12.5, 13.4㎧/s) 으로 변화시키면서 실험을 행하여 그 결과를 〈그림 3〉에 나타내었다.

실험결과 블로워 압력이 4,000~5,000㎜Aq, 석탄회 투입속도 11~12㎧/s 사이에서 분리성능이 가장 우수하게 나타났다. 석탄회 투입속도가 낮은 경우에는 단위 공기량에 대한 분체 투입량의 비로 정의되는 분체농도가 높기 때문에 입자 분산성이 저조하여 분리성능이 저조하게 나타나고, 투입속도가 높은 경우에는 분체농도는 낮아지나 입자속도가 높기 때문에 입자가 인젝터 내부나 운송관 벽에 충돌하여 깨어지는 현상과 속도증대에 따른 석탄회 입자의 정전분리부내 입자 체류속도의 저하로 분리성능이 저조하게 나타나는 것으로 생각된다.

2) 인가전압 영향

전극판 인가전압 변화의 영향을 알아보기 위하여 실험조건을 미연탄소 함량 4.5%인 태안 화력발전소 B 시료를 투입량 3.7ton/hr, 블로워 압력 5,000㎜Aq, 수율 70%로 고정한 후 (+)전극판의 전압을 0kV로 유지한 상태에서 (-)전극판 인가전압을 -30, -45, -55kV로 변화시키면서 실험하여 그 결과를 〈그림 4〉에 나타내었다. 석탄회



〈그림 4〉 전극판 인가전압 변화의 영향

중 미연탄소 분리효율이 인가전압 절대값의 상승에 따라 좋아지나, -45kV와 -55kV의 경우에는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

전압 증가에 따라 분리효율이 향상되는 것은 전극판 인가전압 증가함에 따라 전극사이의 전계가 증가하고 이로 인해 전극사이를 통과하는 (+), (-)대전입자에 전기적 인력을 증가시키기 때문에 (+)대전입자는 (-)전극 방향으로 (-)대전입자는 (+)전극 방향으로 이동하여 서로 분리되기 때문에 나타나는 현상이다.

그러나 -45kV와 -55kV의 경우는 분리효율의 변화가 거의 없는데, 이것은 전계에 의한 입자의 분리에 한계가 있음을 나타내는 것으로 전극판 인가전압을 더 증가시키더라도 분리효율은 더 증가하지 않을 것으로 생각된다.

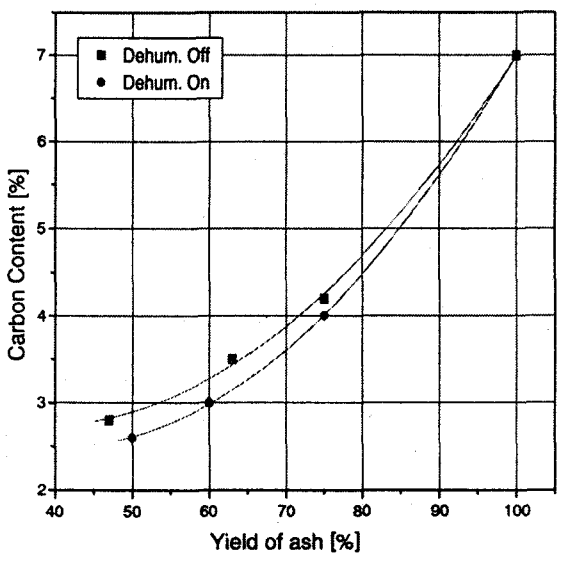
3) 습도 영향

습도 변화의 영향을 알아보기 위하여 실험조건을 미연탄소 함량 7.0%인 보령 화력발전소 C 시료를 투입량 3.0ton/hr, 블로워 압력 4,000㎜Aq, 인가전압 -45kV로 고정한 후 상대습도 56%인 대기조건에서 제습기를 on/off시키면서 수율(yield)변화 실험을 행하여 결과를 〈그림 5〉에 나타내었다. 제습기를 켜지 않았을 경우는 상대습도 56%인 대기공기가 인젝터로 공급되고, 제습기를 켰을 경우 상대습도 25%로 제습된 공기가 인젝터로 공급되게 되어, 제습기를 켜고 실험하여 얻은 결과가 끄고 얻은 결과보다 우수하게 나타났다. 공기중의 상대습도가 높을수록 미연탄소 분리효율은 나빠지는데 이것은 석탄회의 흡습성 때문이라고 생각된다. 석탄회는 습도가 높을수록 공기중의 수분을 더 흡수하게 되고 이로 인하여 입자와 입자간의 응집이 일어나 분산성이 떨어지게 되며, 석탄회 입자 표면에 흡수된 습기가 입자의 표면 저항값을 떨어뜨려 대전입자의 전하를 쉽게 잃어버리게 하기 때문에 분리 성능이 저조해지는 것이라고 판단된다.

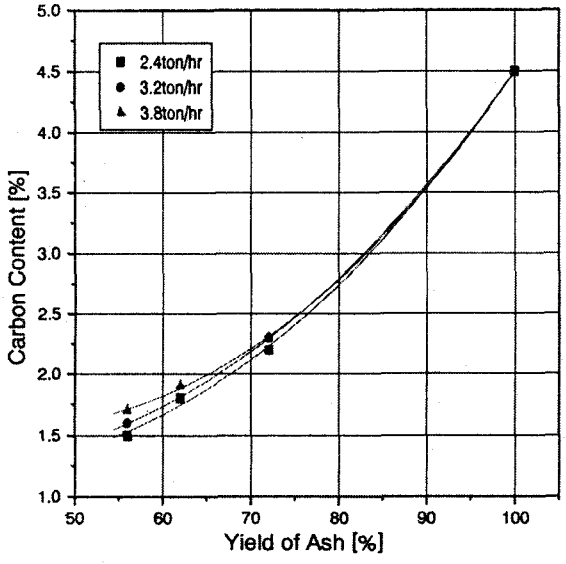
4) 투입량 변화의 영향

석탄회 정전분리장치는 전극판 단위 길이당 석탄회를 최대로 투입시키는 것이 용량증대 측면에서 유리하므로 석탄회 투입량 변화에 따른 분리효율 파악하는 것이 중요하다. 석탄회 투입량 변화의 영향을 알아보기 위하여 미연탄소 함량 4.5%인 태안 화력발전소 B 시료, 블로워 압력 5,000㎜Aq, 전극판 인가전압을 -45kV로 고정한 후 석탄회 투입량을 2.4, 3.2, 3.8ton/hr로 변화시키면서 각각에 대하여 수율변화 실험을 행하여 그 결과를 〈그림 6〉에 나타내었다.

실험결과 석탄회 투입량 증가에 따라 정제회의 미연탄소 함량이 증가하는데 이것은 투입량이 2.4, 3.2, 3.8ton/hr로 증가함에 따라 분체농도



〈그림 5〉 제습공기 사용에 따른 영향



〈그림 6〉 석탄회 투입량 변화의 영향

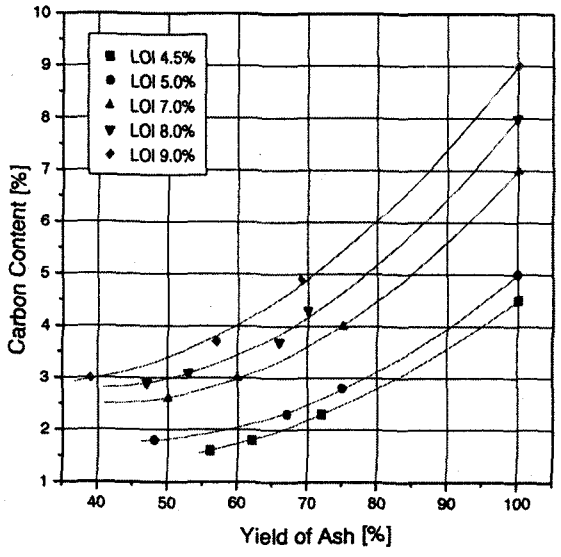
도 0.87, 1.16, 1.38㎏/㎥로 증가하기 때문에 입자간의 평균거리가 가까워지고 이로 인하여 단위 무게당 입자의 대전량 감소, 입자와 입자끼리의 응집체 형성 및 대전된 입자가 입구 분사기를 통해 정전 분리부로 유입되어 각각의 전극으로 움직일 때 입자의 움직임이 방해를 받기 때문인 것으로 판단된다.

5) 미연탄소 함량별 분리성능

미연탄소 함량에 따른 정제성능을 평가하기 위하여 실험조건을 블로워 압력 5,000㎜Aq, 전극판 인가전압 -50kV, 석탄회 투입량을 3.0ton/hr로 고정한 후 미연탄소 함량이 4.5%, 5.0%, 7.0%, 8.0%, 9.0%인 석탄회의 수율변화에 따른 정제성능 결과를 〈그림 7〉에 나타내었다. 실험결과 미연탄소 함량이 비교적 낮은 LOI 4.5%, 5.0% 시료는 정제회 수율 75% 정도에서 미연탄소 함량 3.0% 이하로 정제가 가능하였다. 또한 미연탄소 함량이 비교적 높은 LOI 7.0%, 8.0%, 9.0%인 경우는 정제회 수율 85%, 75%, 70% 정도에서 미연탄소 함량 5.0% 이하로 정제할 수 있었으며, 정제회 수율 60%, 50%, 40%에서는 미연탄소 함량을 3.0% 이하로 정제할 수 있었다.

5. 결 론

석탄회의 콘크리트 혼화재로의 대량 이용을 위하여 여러가지 장점을 가지고 있는 마찰대전형 정전분리법을 적용하여, 연속 운전이 가능한 석탄회 중 미연탄소 정제장치를 설계·제작하여 장치의 정제성능에 영향을 미치는 인자에 대한 최적조건 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.



〈그림 7〉 석탄회 미연탄소 함량별 분리성능

1) 석탄회 정전분리 장치의 적정 운전 조건은 석탄회 투입속도 11~12m/s, 전극판 인가전압 -45kV 이상, 적정 석탄회 투입량 3.0ton/hr로 나타났으며 공기 중 습기가 정제성능에 영향을 미침을 확인하였다.
2) 적정 운전조건에서 미연탄소 함량 4.5, 5.0, 7.0, 8.0, 9.0%인 시료를 투입하여 정전분리 성능을 평가한 결과, 미연탄소 함량이 비교적 낮은 LOI 4.5, 5.0% 시료는 정제회 수율 75% 정도에서 미연탄소 함량 3.0% 이하로 정제가 가능하였다. 또한 미연탄소 함량이 비교적 높은 LOI 7.0, 8.0, 9.0%인 경우는 정제회 수율 85, 75, 70% 정도에서 미연탄소 함량 5.0% 이하로 정제할 수 있었으며, 정제회 수율 60, 50, 40%에서는 미연탄소 함량 3.0% 이하로 정제할 수 있었다.

〈참 고 문 헌〉

1. 오성원, "석탄회 및 탈황석고 배출현황 및 대책", 석탄회 및 탈황석고 국제워크샵, 한국전력공사-한국계면공학연구소, p. 27 (1997).
2. B. James, G. Stephen and T. Edmond, "STI Fly Ash Separation System", PETC Technical report, Feb. (1996).
3. Koich Linoya et al, "Powder Technology Handbook", Marcel Dekker, Inc. 51 (1991).
4. L. Cheng and S. L. Soo, "Charging of Dust Particles by Impact", J. of Che. Physics, 41, 2, Feb. (1970).
5. R. Gupta, et al., "Electrostatic Separation of Powder Mixture", Powder Technology pp. 75~79 (1993).
6. D. M. Taylor, P. E. Secker, "Industrial Electrostatics : Fundamentals and Measurements", John Wiley & Sons Inc. pp. 85~95 (1994).
7. 한국표준공업규격 KS L 5211, KS L 5405, "석탄회 품질규격".