

## 電氣싸이클론을 이용한 石炭灰 중 未燃炭素 低減技術 開發

\*趙熙燦\* · 金正允\*\*

서울대학교 地球環境시스템工學部

### Separation of Unburned Carbon from Coal Fly Ash Using an Electrocyclone

\*Hee-chan Cho\* and Jeong-yun Kim\*\*

School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

#### 요 약

발전소에서 발생하는 석탄회 재활용을 위해 석탄회 내의 미연탄소를 제거하기 위한 장치를 개발하여 실험을 수행하였다. 석탄회 중 조립 석탄회가 미연탄소 함량이 높으며 또한 마찰에 의해 정전기적으로 석탄회 내의 미연탄소는 (+)극성을, 순수 회분은 (-)극성을 띠게 된다는 사실에 근거하여 입도 분급 및 정전기적 분리가 동시에 일어날 수 있는 싸이클론 정전분리장치를 설계하였다. 그리고 분급입도를 조절하기 위하여 싸이클론 내에 vane을 설치하였으며 전극의 형태에 따른 영향을 알아보기 위해 막대형 전극과 grid형 전극을 설계하여 실험을 수행하였다. 그 결과 막대전극의 경우 미립분의 회수율이 5~10% 증가하였으며 grid 전극의 경우 약 15%까지 증가하였다. 그러나 미연탄소 함량은 조립분의 경우 전극 설치 전보다 크게 증가하였으나 미립분의 경우 그다지 변하지 않았다. 따라서 본 시료의 경우 전기장을 형성시킴으로써 같은 미연탄소 함유량을 갖는 정제석탄회의 회수율은 크게 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

**주제어:** 석탄회, 미연탄소, 공기분급, 마찰대전분리, 싸이클론 정전분리

#### ABSTRACT

For the recycle of coal fly ash generated from power stations, we developed an electrocyclone system which can separate unburned carbon from coal fly ash, based on the fact that coarse fly ash particles contain higher amount of unburned carbon and unburned carbon particles are charged positively, and pure ash particles are charged negatively on contacting each other. Additionally, guide vanes were installed in the cyclone to control the cut size. Two types of electrode, stick and grid type, were designed to investigate the effect of electrode type. Results show that by introducing an electric field inside the cyclone, the yield increases by 5 to 15%. But the content of unburned carbon in the clean ash does not change significantly.

**Key words:** Fly ash, Unburned carbon, Air classification, Tribo-electrostatic separation, Electrocyclone

#### 1. 서 론

석탄회는 석탄 발전소에서 석탄을 연소한 뒤에 연소되지 않은 회분이 배연가스와 함께 배출되기 전에 전기 집진기에 의해 포집되어 발생하게 된다. 국내 석탄화력 발전소에서 생산되는 석탄회는 현재 연간 300만톤 정

도이나 지속적인 에너지 공급 요구에 따른 석탄발전소 추가 건설로 2005년에는 약 600만톤에 이를 것으로 추산하고 있다.<sup>1)</sup> 현재 대부분의 석탄회는 매립되고 있는 실정인 바, 장차 추가 회처리장 입지확보의 어려움이 예상됨에 따라 석탄회 처리 문제는 산업 및 환경보호차원에서 심각한 문제로 대두되고 있다. 정부는 '98년부터 석탄회 재활용율을 회생산량의 35%, 2005년에는 50%로 책정하여 석탄회 재활용을 적극 독려하고 있으나, 아

\* 2001년 5월 3일 접수, 2001년 5월 30일 수리

\*\* E-mail: \*hccho@plaza.snu.ac.kr, \*\*kooltz77@snu.ac.kr

직까지 국내 소수의 회사만이 석탄회 재활용에 관계하고 있으며 기존 수요시장 또한 극히 제한되어 있어 장차 급증할 석탄회 발생량을 소화하기 위해서는 획기적인 시장개척이 절실하다.

석탄회는 시멘트콘크리트에 사용할 때 작업성이 좋아지고 최종강도를 높이는 등의 여러 가지 이점이 있으나 석탄회에 혼재한 미연탄소가 많을 경우 콘크리트 혼합시 첨가되는 기연제(Air Entraining Agent)를 흡착하여 강도 및 성능을 저하시키는 요인이 되므로 산업계에서는 탄소함량 5%이하를 요구하고 있다. 국내 석탄발전소에서 발생하는 석탄회의 미연탄소 함유량은 5~15% 정도로 매우 높은 편이며 따라서 석탄회 재활용 촉진을 위해서는 미연탄소분의 저감을 통한 석탄회 품질 개선이 필요하다.

석탄회 중 미연탄소를 제거하는 방법으로 개발되고 있는 기술들은 순수 석탄회와 미연탄소의 물리 화학적 특성 차이를 이용한 것으로 입도분급법, 정전기분리법, 부유선별법 등이 있으며 이외에 연소방법(Carbon Burnout Process)이 시도되고 있으나 방법마다 각각 장단점이 있다. 특히 이 중에서 부유선별법이 가장 효율이 좋은 것으로 보고되고 있으나 이 방법은 습식으로서 분리 후 탈수 및 건조라는 고비용 공정이 필요하여 그 경제성에서 문제점을 보이고 있다. 또한 국내에서 마찰대전을 이용한 분리시스템의 개발 연구가 진행되고 있으나<sup>2,3)</sup> 역시 장비의 고비용으로 인해 아직까지 상용화가 되지 못하고 있다.

본 연구는 장비 및 추가 비용의 경제성을 고려하여 이러한 여러 가지 방법 중에서 입도분급법 및 정전기분리법을 접목시킨 새로운 방법을 채택, 석탄회 중에 존재하는 미연탄소분의 분리 장치와 분리법 개발을 위해 수행되었다. 이미 수행된 연구들의 결과<sup>4,5)</sup> 미연탄소분은 입도분급에 의해서 어느 정도 분리해낼 수 있다는 사실을 근거로 싸이클론을 제작하여 석탄회 중 미연탄소의 입도분리 실험을 하였다. 또한 정전분리의 효율성을 검토하기 위해 싸이클론 내에 전극을 설치, 전기장을 부여하여 싸이클론 자체의 입도분리와 전기장에 의한 정전분리를 병행할 수 있는 싸이클론 정전분리장치를 개발하여 분리 실험을 수행하고 그 효율을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 실험기기 제작

#### 2.1.1. 싸이클론 제작

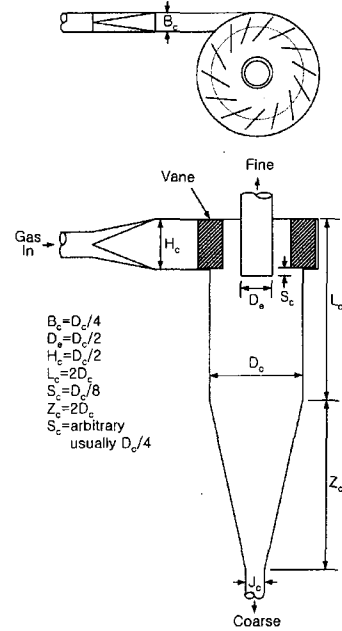


Fig. 1. Plan and front cross sectional view of the cyclone.

싸이클론 분리는 집진기로서 널리 이용되는 장치이며 기체 중에 섞여 있는 고체 입자를 원심력을 이용하여 분리하는 장치이다. 본 실험에 이용된 싸이클론 분리는 이미 수행된 연구<sup>6)</sup>에서와 비슷하게 Fig. 1 과 같은 형태로 설계, stainless steel 재질로 제작하였으며 상부에 vane도 장착하여 공기주입량이 같더라도 열립 각도에 따라 싸이클론 내부의 유속 중 접선속도(tangential velocity)가 변화되어 원심력이 틀려짐에 따

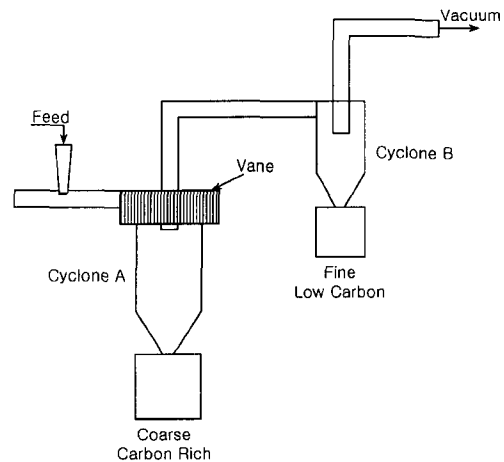


Fig. 2. Schematic diagram of the two-stage cyclone system.

라 분급입도가 2차적으로 조정되도록 하였다. 전체적인 구성은 Fig. 2 와 같이 2단으로 제작하여 첫 번째 싸이클론은 입도분리용으로 두 번째 싸이클론은 분리된 석탄회 포집용으로 하였다. 석탄회는 첫 번째 싸이클론에서 큰 입자와 작은 입자로 분리되며 큰 입자는 큰 원심력에 의해 싸이클론 벽쪽으로 이동하며 중력에 의하여 밑으로 움직여 결국 하부에 포집되고, 작고 가벼운 입자는 싸이클론 중앙에 형성되는 상부방향의 소용돌이에 의해 싸이클론 상부로 유출되어 두 번째 싸이클론에서 포집되게 된다.

2.2. 싸이클론 정전분리장치

마찰대전에 의한 정전분리의 경우 분리효율이 높은 장점과 싸이클론의 입도분리시 분리된 석탄회의 입도가 균일해지는 장점을 병행하기 위해 싸이클론 정전분리장치를 제작하여 실험하였다. 우선 싸이클론 내에서 빠른 유속으로 인해 석탄회 입자들이 상호 마찰, 하전되는 성질을 이용, 하전된 입자가 정전기력으로 분리될 수 있도록 싸이클론 내에 전기장을 형성할 전극을 설치하였다. 전극은 Fig. 3(a) 에 나타난 바와 같이 단순한 막대모양(Stick)의 전극이며 다른 하나는 Fig. 3(b) 와 같은 원통형의 철망(Grid)으로 만들어진 전극이다. 이들 전극을 (+)극에 연결시키고 싸이클론 외부를 접지하여 싸이클론 내부에 전기장을 형성시킴으로써 (+)극으로 하전되는 미연탄소 입자가 원심력과 동시에 전기적 척력을 받아 싸이클론 벽쪽으로 이동하도록 유도하여 일차적으

로 싸이클론에 의한 입도분리 기능과 이차적인 정전기 분리가 동시에 발생토록 하였다.

2.3. 시료 및 강열감량 측정

시료는 석탄화력발전소에서 획득한 미연탄소 함량 5.7%의 석탄회를 사용하였다. 싸이클론은 이미 기술한 대로 설계된 것을 사용하였으며 미연탄소함량을 측정하기 위한 소각기구로서는 전기로와 내열도가니를 사용하였다. 미연탄소함량은 810°C에서 3시간 소각하여 감량된 무게로 측정하였다. 소각에 사용되는 시료는 미리 건조하여 수분의 영향을 배제하였으며 소각실험에 사용된 시료의 무게를 정확히 측정하기 위해서 내열도가니도 시료와 함께 건조시켰다. Table 1 에 시료의 입도 및 미연탄소함량을 나타내었다. Table 1 을 살펴보면 미연탄소 함량이 입도에 따라 크게 변화하고 있음을 알 수

Table 1. Size distribution and LOI (%) content of feed material

Size, $\mu\text{m}$	Interval %	Cumulative %	LOI, %
+105	12.5	100.0	23.37
105~74	8.5	87.5	6.81
74~53	8.3	79.0	3.78
53~38	9.5	70.7	3.37
38~26	9.6	61.3	2.51
-26	51.7	51.7	2.8

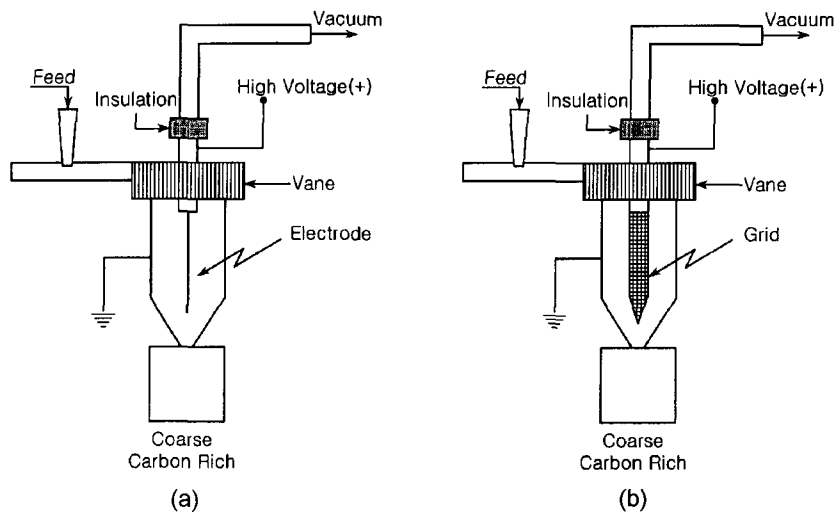


Fig. 3. Schematic diagram of the cyclone with; (a) a stick type electrode, (b) a grid type electrode.

있다. 특히 105  $\mu\text{m}$  이상의 입자들의 미연탄소함량이 약 23%로 매우 높으며 입도가 작아질수록 함량이 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 이론상 38  $\mu\text{m}$  이하의 석탄회만 회수하여도 미연탄소 함량 약 2.75%의 고순도 석탄회를 최소한 60% 정도 회수할 수 있다는 결론이 나온다.

**2.4. 싸이클론 분리 실험**

싸이클론을 이용한 분리 실험은 기 서술한대로 제작된 일반 싸이클론과 전극이 설치된 두 종류의 싸이클론을 이용하여 수행하였으며, 시료를 공급하기 위한 장치로는 Vibrator를 이용하였다. 싸이클론 분리 실험의 전 처리로는 우선 Vibrator에서 시료를 공급할 경우 뭉침을 줄이고 일정량이 공급될 수 있도록 하기 위해 시료를 110°C로 조절된 Oven에서 약 2시간 정도 건조하였다. 싸이클론 내에 설치된 vane의 각도는 30도, 60도, 80도의 세 각도에 대해 실험하였고 전압은 막대형 전극은 20 kV, grid형 전극은 10 kV를 이용하였다.

**3. 실험결과 및 고찰**

**3.1. 입도분급에 의한 미연탄소의 제거**

입도분급과 정전기적 효과를 병행하여 미연탄소를 분리해내는 것이 본 실험의 목적이나 일차적으로 싸이클론에 의한 입도분급의 효과를 알아보고자 실험을 수행하였다. 싸이클론에 의한 입도분급에 영향을 미치는 요소는 싸이클론 자체의 크기나 구조 이외에 공기흐름의 세기, 시료의 공급량, 그리고 싸이클론에 설치하였던 vane의 각도 등에 의해 영향을 받는다.

Table 2는 공기의 유속과 vane의 각도에 따른 분리 결과를 나타낸 것이다. 조립분을 분리하기 위한 싸이클론(A)은 직경이 12 cm이며, 분리 싸이클론(A)에서 빠져 나온 미세한 입자들을 포집하기 위해 설치된 포집용 싸이클론(B)의 직경은 6 cm이다.

먼저 공기유속에 대한 영향을 살펴보면 vane 각도가 30도와 60도인 경우에는 뚜렷한 차이를 보이지 않으나 80도인 경우에는 공기 유속이 증가할수록 회수된 정제 석탄회의 회수율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 공기 속도가 증가할수록 원심력이 증가하여 조립분의 비율이 상대적으로 증가하기 때문으로 판단된다. 이러한 원심력의 영향은 vane 각도 차이에 의한 회수율 변화에서 더욱 뚜렷이 나타난다. 같은 공기유속에서 vane의 각도가 30도일 때는 평균적으로 약 15% 정도의 회

**Table 2.** Effect of air flow rate and vane angle.

Vane angle	Air rate (l/min)	Cyclone*	Yield (%)	LOI (%)
30°	110	A	81.49	5.59
		B	16.05	4.16
	200	A	84.43	5.42
		B	14.97	4.29
	230	A	84.55	5.68
		B	14.56	4.42
60°	110	A	58.01	7.12
		B	38.44	3.97
	200	A	62.03	6.34
		B	39.44	3.65
	230	A	61.57	6.42
		B	36.89	3.72
80°	110	A	29.71	8.94
		B	65.01	4.11
	200	A	33.17	8.04
		B	65.14	4.14
	230	A	40.33	7.26
		B	58.66	3.81

\* Cyclone : A-cyclone for coarse materials, B-cyclone for fine materials.

수율을 보였으나 각도가 60도일 때는 약 38%로 두 배 이상 증가하였으며 80도인 경우 회수율이 60% 이상으로 증가하였다. 즉 각도가 증가할수록 정제된 석탄회의 회수량이 많아짐을 알 수 있다. 그러나 미연탄소 함량의 경우에는 거의 일률적으로 3.5~4% 정도로 큰 차이를 보이지 않아 입도분리에 의한 미연탄소 저감은 한계가 있음을 알 수 있었다.

Table 3은 분리된 석탄회를 입도별로 분리하여 미연탄소함량을 측정된 결과이다. 입도분급에는 140/200/270/400/500 mesh의 5종의 체를 사용하였다. 시료들은 먼저 500 mesh체로 wet-sieving된 다음 건조후 +500 mesh 시료들은 다시 5개의 체를 모두 사용하여 dry-sieving하였으며 효율적인 sieving을 위해서 sieving machine을 사용하였다. Table 3에서 보면 자료가 없는 입도구간이 있는데 이는 그 구간에서 채취된 시료가 극소량이어서 미연탄소 측정 실험을 수행할 수 없었기 때문이다.

이미 서술한 대로 원시료의 경우 38  $\mu\text{m}$  이하에 총

**Table 3.** Content of unburned carbon for the various size fractions

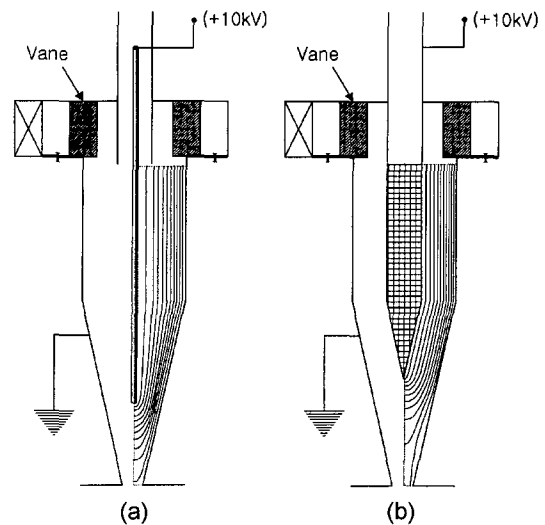
Vane angle	Cyclone	Size (μm)	Mass (%)	LOI (%)
30°	A	+105	11.3	25.24
		105~74	8.8	8.66
		74~53	10.0	4.29
		53~38	12.4	2.97
		38~26	14.2	2.21
	B	-26	43.2	2.45
		+105	5.9	4.38
		105~74	16.9	4.74
		74~53	5.2	5.65
		53~38	5.7	4.92
60°	A	38~26		
		-26	66.4	4.66
		+105	15.5	25.55
		105~74	11.9	6.60
		74~53	13.4	3.15
	B	53~38	13.8	1.93
		38~26	13.5	1.21
		-26	31.9	1.81
		+105		
		105~74	3.5	5.41
80°	A	74~53	4.5	6.31
		53~38	26.6	4.95
		38~26	18.9	4.05
		-26	46.5	4.05
		+105	21.6	27.09
	B	105~74	15.2	5.16
		74~53	16.1	2.23
		53~38	14.9	1.26
		38~26	10.6	0.80
		-26	21.6	1.36
B	+105			
	105~74			
	74~53	1.9	6.49	
	53~38	8.6	4.95	
	38~26	21.7	4.44	
		-26	67.8	3.97

질량의 약 60%가 분포하며 이 구간의 미연탄소 함량은 3% 미만으로 품질이 우수하다. 그러나 B 사이클론에 회수된 석탄회의 입도분포를 살펴보면 완전한 분리가 이루어지지 않아 vane 각도가 80도 이상인 경우에도 10% 이상이 +38 μm 구간에 분포하고 있으며 또한 -38 μm 이하 석탄회의 미연탄소 함량도 원시료에 비해 커져 4%를 상회하고 있다. 이는 큰 입자가 사이클론에 유입되면서 사이클론 내벽 및 vane에 충돌하면서 파쇄되어 생기는 현상으로 분석된다. 따라서 입도분리에 의한 미연탄소의 저감은 첫째 입도분급이 완전히 이루어지지 않아 한계를 받고 둘째 회수된 석탄회의 미연탄소 함량이 원시료에 비해 오히려 증가하는 현상 때문에 기대만큼의 효율을 얻기는 어려울 것으로 판단된다.

**3.2. 입도분급과 정전기적 효과를 병행한 실험**

**3.2.1. 원리**

석탄회의 경우 서로 마찰하였을 때 미연탄소는 (+)극으로, 순수 회성분은 (-)극으로 하전되는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 설계한 사이클론 정전분리 장치의 전극의 형태는 Fig. 4에 나타내었으며 이 때 각 사이클론 내에 생성되는 전기장의 형상을 +10 kV의 전압을 걸었을 경우에 대해 모사해 등전위선을 도식하였다. 막대형 전극에 비해서 원통형 전극이 좀더 균질한 전기장을 형성함을 알 수 있다. 미연탄소가 함유된 석탄회는 전기장 내에서 사이클론 벽쪽으로 힘을 받게 되어 분리되어



**Fig. 4.** Equi-potential curve for the electrocyclone; (a) with a stick type electrode, (b) with a grid type electrode.

**Table 4.** Comparison of the result using stick type electrode to the result of size classification only

Electrode type	Vane angle	Cyclone	Yield (%)	LOI (%)
Stick	60°	A	54.05	7.13
		B	43.00	4.01
	80°	A	36.09	8.90
		B	64.03	3.62
No electrode	60°	A	61.57	6.42
		B	36.89	3.72
	80°	A	40.33	7.26
		B	58.66	3.81

원심력을 더 받게 되어 분리되고 순수한 석탄회는 전극 쪽으로, 즉 싸이클론 안쪽에 형성되는 상승 흐름 쪽으로 힘을 받게 되어 회수용 싸이클론 쪽으로 이동하게 된다. 따라서 단순히 입도 및 밀도에 의해 분급할 경우보다 훨씬 나은 분리 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

3.2.2. 막대형 전극을 이용한 실험

정전기에 의한 분리효과를 알아보기 위해 두 가지 종류의 전극 중 우선 막대형 전극을 이용하여 실험을 수행하였다. 이 전극에는 20 kV의 전압을 Power Supply를 통해 공급하였다. 전극과 싸이클론 본체는 절연체로 분리되었으며 전극의 끝이 집진통 근처까지 내려오도록 길이를 설정하였다. 실험 수행에 있어서 공기의 유속과 시료공급량은 이전 실험과 같은 정도로 조절하였다. Table 4는 정전기적 효과 없이 단순히 분급만 수행한 실험 자료와 전극에 의해 정전기적 효과가 주어진 실험의 자료를 비교한 것이다.

표에서 볼 수 있듯이 석탄회 중 미세 입자 쪽의 회수율이 전극을 사용한 경우에는 vane각도 60도와 80도에서 각각 43.00%, 64.03%로 전극을 사용하지 않고 단순히 분급만 한 경우의 36.89%, 58.66%에 비해 증가한 것을 알 수 있었다. 또한 이와 더불어 정제된 석탄회의 미연탄소함량 역시 전극을 사용한 경우에 뚜렷하지는 않지만 감소하는 경향이다. 이는 석탄회 내의 미연탄소 분리에 있어 정전기적 효과를 부가적으로 사용함으로써 단순 분급에 비해 회수율과 질을 향상시킬 수 있는 가능성을 보여준다 할 수 있다.

3.2.3. 원통형 Grid전극을 이용한 실험

본 실험의 조건은 막대형 전극을 이용한 경우와 같

**Table 5.** Comparison of the result using grid type electrode to the result using stick type electrode

Electrode type	Vane angle	Cyclone	Yield (%)	LOI (%)
Grid	60°	A	51.94	7.11
		B	45.21	4.40
	80°	A	27.90	8.69
		B	71.53	4.07
Stick	60°	A	58.57	5.40
		B	42.14	4.51
	80°	A	39.94	5.80
		B	57.46	4.10

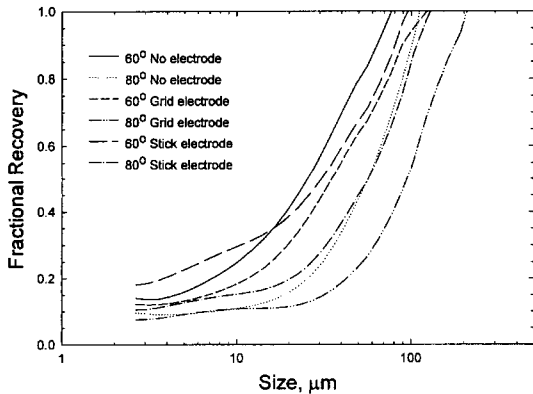
다. 다만 전극만이 철망 재질의 grid전극으로 바뀌었다. 역시 전극의 끝이 집진통 근처까지 내려오도록 조절하였으며 전압은 20 kV로 조절한 경우 전극에서 스파크가 발생하여 10 kV로 조절하였다. grid전극을 설치하는 과정에서 전압이 10 kV로 변하였기 때문에 grid전극을 이용한 실험을 하는 동시에 막대형 전극 싸이클론에 대해서도 10 kV 전압에 대해 실험을 재수행하였다. 실험 결과는 다음의 Table 5에 나타나 있다.

원통형 grid전극을 사용한 경우 정제된 석탄회의 회수율은 vane각도 60도와 80도에서 각각 45.21%, 71.53%로 막대형 전극을 사용한 경우의 42.14%, 57.46%에 비해 증가한 것을 알 수 있다. 특히 vane각도 80도의 경우는 그 증가가 현저하다. grid전극을 사용한 경우와 이전의 단순 분급시료의 결과나 막대형 전극을 사용한 경우를 비교해 보면 우선 미립분 석탄회의 회수율이 증가하였고 조립분 석탄회의 미연탄소함량이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 반면 미립분 석탄회의 미연탄소함량은 그다지 변하지 않은 것을 알 수 있다. 결과적으로 회수하려는 석탄회 성분 중 미연탄소의 함량은 그다지 줄일 수 없지만 그 회수율은 상당량 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

Table 6은 실험 중 grid전극의 존재가 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위한 실험의 결과이다. 표를 살펴보면 grid전극이 있고 전압을 걸어주지 않았을 경우에는 아무것도 없이 그냥 수행한 실험의 결과와 비슷한 결과를 보인다. 다만 vane각도 80도의 경우는 아무것도 없을 때에 비해서 미립분 석탄회의 회수율이 약간 감소하였는데 이는 안쪽의 소용돌이로 입자들이 유입되는 과정에서 grid에 부딪혀서 생긴 결과라고 생각할 수 있다.

**Table 6.** Comparison of the result using electrodes

Electrode type	Vane angle	Cyclone	Yield (%)	LOI (%)
Grid (powered)	60°	A	49.97	6.87
		B	49.84	3.91
	80°	A	25.25	10.12
		B	72.52	4.16
Grid (not powered)	60°	A	58.17	6.82
		B	40.86	3.89
	80°	A	31.82	8.20
		B	66.69	4.23
Stick (powered)	60°	A	61.57	6.42
		B	36.89	3.72
	80°	A	40.33	7.26
		B	58.66	3.81

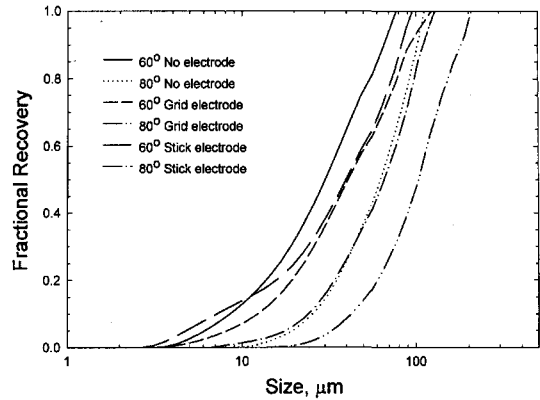


**Fig. 5.** Tromp Curve.

grid전극이 있을 때 전압을 걸어준 경우와 안 걸어준 경우를 비교해보면 앞의 경우들과 마찬가지로 미립분 석탄회의 회수율이 증가한 것을 볼 수 있으며 그 증가량 또한 상당히 현저하다. 그리고 분리된 석탄회 내에 포함된 미연탄소의 함량도 조립한 경우엔 더 증가하였고 미립인 경우에는 별 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 전극에 전압을 걸어주면 미립분의 미연탄소 함량은 별로 변화하지 않으나 회수율이 크게 증가하는 효과를 얻을 수 있다.

3.2.4. 분리효율의 분석

보다 정확한 입도분리효율 분석을 위하여 Tromp Distribution 값<sup>7)</sup>을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 이



**Fig. 6.** Corrected Tromp Curve.

**Table 7.** Cut size and Sharpness Index under various experimental conditions

Electrode type	Vane angle (°)	Cut size (μm)	Bypass	Sharpness Index
No electrode	60°	30.20	0.14	0.364
	80°	62.49	0.11	0.491
Stick	60°	40.89	0.12	0.339
	80°	103.57	0.11	0.500
Grid	60°	39.74	0.18	0.321
	80°	65.72	0.14	0.438

곡선은 어떤 입도의 입자가 조분으로 회수된 비율을 입도에 따라 계산하여 도시한 것이다. 이상적인 분리라면 어떤 분리입도보다 작은 것은 조립분에 회수되지 않고 (0%), 분리입도보다 큰 것은 모두 조립분에 회수되어 (100%), 곡선의 형태는 계단형으로 나타나야 한다. 그러나 Fig. 5에서 알 수 있듯이 입자들간에 혼입되는 오차가 발생하여 곡선의 형태는 S형을 띠게 된다. 특히 미립 영역에서 분리되지 않고 남아있는 입자들이 일정량 발생하게 되는데 이를 Bypass라고 한다. 이 Bypass의 영향을 없애기 위해 각각에 대해서 보정하여 새로운 곡선을 그릴 수 있으며 이를 Fig. 6에 도시하였다. 또한 Fig. 6으로부터 각 분리장치의 Sharpness Index 및 분리 입도를 구할 수 있으며 이를 Table 7에 나타내었다. 실험결과 Sharpness Index는 전기장의 유무 및 전극의 형태에 대해 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 분리효율은 같은 분리 입도에 대해 Sharpness Index가 크고 Bypass가 작을 경우에 더 좋아지는데 본 실험에서는 전기장의 형성으로 인한 Sharpness Index 및 Bypass

의 변화에 있어 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 또한 전기장을 걸어주었을 경우 분리 입도는 vane 각도가 60도일 경우에는 약 25%정도 증가하였으며 80도인 경우에는 막대형 전극의 경우 약간 증가한 정도이나 grid형 전극의 경우 40%이상 증가함을 확인하였다. 이러한 경향은 전기장이 발생된 경우 미립분으로 회수되는 양이 현저히 증가하는 것에서도 확인할 수 있다. 이는 전기장 내에서 미연탄소분이 받는 척력의 영향보다 순수회가 받는 인력의 영향이 더 크기 때문인 것으로 분석된다.

#### 4. 결 론

본 실험은 화력 발전소에서 발생하는 폐기물인 석탄회의 재활용을 위해 재활용에 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 석탄회 내의 미연탄소를 제거하고자 수행되었다. 미연탄소의 분리를 위해서 기존에 연구된 입도 분급법과 병행하여 정전기 효과를 입도분급법과 접목시켜 실험하였다. 정전기 효과를 주기 위해서 입도분급 싸이클론 내에 전극을 설치하였으며 전극의 형태에 따른 효과를 알아보기 위해 막대형 전극과 grid형 전극의 두 종류의 전극을 제작, 실험에 사용하였다.

실험을 수행한 결과 grid형의 전극을 사용한 경우 가장 높은 정제 석탄회 회수율을 얻었으며 이 경우 정제된 석탄회 내의 미연탄소 함량은 약 4%정도였다.

본 실험의 결과를 종합해 보면

1. 대부분의 순수 석탄회가 미립분에 분포하고 있으며 미연탄소는 석탄회 내의 조립 입자들 내에 다량 존재하고 있음을 확인하였다.
2. 싸이클론을 이용한 입도분리 실험결과 미연탄소분이 싸이클론 내벽 및 vane에 충돌하면서 파쇄되어 회수 석탄회에 혼입함으로써 이론에 못 미치는 분리효율을 보였으나 분리된 석탄회의 입도가 균일해지는 장점이 있었다. 또한 단순 분급시 vane을 설치하여 그 각도를 변화시킴으로써 더 적절한 회수 환경을 만들어 줄 수 있음을 알았다.
3. 단순 분급과 동시에 정전기 효과를 추가로 적용하면 정제 석탄회의 회수율을 높일 수 있었다. 단순 입도분리와 비교하여 싸이클론 정전분리 장치에서 회수된 석탄회의 미연탄소 함량이 비슷할 경우 석탄회 회수율이 2배 정도 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 회수된 석탄회 내의 미연탄소 함량을 줄이는 데는 기대만큼 큰 영향을 미치지 않았다.
4. 싸이클론 정전분리 장치 이용시 정전기 효과를 적

용시키기 위해서 막대형 전극을 사용한 것보다는 grid형 전극을 사용한 경우 더 높은 효율을 얻을 수 있었다. 이러한 현상의 한 이유로 grid형 전극이 막대형 전극에 비해 더 균질한 전기장을 발생시켜 준다는 점을 생각할 수 있었다.

과거의 실험들을 살펴보면 부유선광을 수행한 경우 회수율 약 90%, 미연탄소 함량 약 0.8~1.6%로 가장 양호한 회수율과 미연탄소 함량을 보여준다.<sup>8)</sup> 본 실험에서는 가장 양호한 결과가 회수율 약 70%, 미연탄소 함량 약 4% 정도인 것을 고려해 보면 아직은 그 효율 면에서 조금 떨어지지만 대용량화가 용이하고 post-processing이 필요 없다는 점에 이점이 있다. 따라서 앞으로 전기장을 형성시키는 방식이나 다른 모양, 다른 재질을 가진 전극 또는 싸이클론의 운전조건 등을 고려하여 마찰대전 효과를 보다 극대화한다면 대량처리가 용이하고 경제성을 가진 분리장치를 개발할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 1998년도 서울대학교 발전기금 일반학술연구비 지원 연구과제의 일환으로 수행된 것으로 연구비의 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 오성원 : "석탄회 처리현황과 대책" 한국전력공사 자원재활용부 (1996).
2. 이재근, 김성찬, 손낙원, 김두현, 오정근 : "마찰대전 정전분리를 이용하여 석탄회에 함유된 미연탄소분 제거에 관한 연구" 한국자원리싸이클링학회지, 6(3), pp.15-21 (1999).
3. Jae-kwan Kim, Sung-chul Kim, Jong-jin Kim and Hai-soo Chun : "Tribo-electrostatic Beneficiation of Fly Ash for Ash Recycling" 2001 International Symposium on Chemical Engineering, Cheju Island, Korea (2001).
4. M. Anderson and G. Jackson : Trans. Brit. Ceram. Soc., Vol 52 (1983).
5. R. A. Lister : "Fly Ash Characterization and Monier Separation Technology" in AshTech 84, CEGB, London (1984).
6. 조희찬, 김재관, 이종복, 박운영, 최정완 : "석탄회 중 미연탄소 저감기술" 석탄회 및 탈황석고 국제 워크샵, 서울 (1997).
7. Hee-chan Cho and Jae-kwan Kim : "Analysis on the Efficiency of the Air Classification of Fly Ash, Geosystem



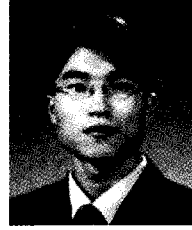
Engineering, 2(2), pp.37-42 (1999).  
 8. 황선국, 양정일 : “석탄회의 습식처리 및 고부가가치향상

연구” 석탄회 및 탈황석고 국제 워크샵, 서울 (1997).



趙 熙 燦

- 1978년 서울대학교 자원공학과 공학사
- 1986년 Pennsylvania State Univ. 석사
- 1989년 Pennsylvania State Univ. Mineral Processing 박사
- 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수



金 正 允

- 1999년 서울대학교 자원공학과 공학사
- 2001년 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사
- 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

### 學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解說	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解說, Review
技 術 報 告	實際的인 試驗, 調查의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解說하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外的 研究 機關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 隨霜 등
Group 紹介	企業, 研究機關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 掲載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.