

逆流형 컬럼 浮選機를 이용한 石炭灰 精製에 관한 研究

李靖彦 · 李在瑾

釜山大學校 環境技術産業開發研究所, 釜山大學校 機械工學科

Removal of Unburned Carbon from Fly Ash Using Countercurrent Column Flotation Cell

Jung-Eun Lee and Jae-Keun Lee

**Institute for Environmental Technology and Industry
Department of Mechanical Engineering, Pusan National University*

요 약

석탄 화력 발전소에서 발생하는 수백만 톤의 석탄회는 콘크리트 호회재 및 건축자재로 재활용이 가능함에도 불구하고 과다한 미연탄소 함량으로 인해 대부분 회시장(Ash Pond)에 매립하게 되는데, 이로 인해 환경오염 유발, 회시장 포화에 따른 발전소의 수명 감소, 그리고 재활용 가능한 자원의 낭비와 같은 문제가 발생한다. 본 연구는 석탄회 내의 미연탄소분을 분리하여 미연탄소분 함량이 낮은 고순도 석탄회를 회수하기 위해 직류관 믹서(In-Line Mixer)로 미세기포를 발생시키는 역류형 컬럼부선기를 이용하였다. 이때 입자 표면에 소수성의 특성을 강화시키는 포수제의 증가에 따른 석탄회와 미연탄소 입자의 분리특성을 분석하였다. 석탄회 톤당 8%의 포수제를 사용한 역류형 컬럼 부선기를 이용하여 미연탄소분 함유량이 7%인 석탄회를 분리 실험한 결과 미연탄소분 함유량 0.5 %인 고순도 석탄회를 88.2% 회수하였다. 그리고 질량평균입경이 21.2 μm 인 석탄회를 분리 실험하여 입도를 분석한 결과 분리 정도에 따라 입도는 뚜렷하게 구별되어 나타났는데, 분리효율이 증가할수록 정제 석탄회의 경우 입도는 미세해지는 반면 고탄소 석탄회의 입도는 조대해져 입도분포의 양극화 현상이 뚜렷하게 나타났다. 포수제의 투입량이 증대함에 따라 미연탄소 입자의 계면에 소수성이 강화되어 분리특성이 향상되었으며, 이때 회수한 고순도 석탄회의 입도는 미세화 되는 경향이 나타났다.

주제어: 역류형 컬럼 부선기, 포수제, 기포제, 분리효율, 석탄회

ABSTRACT

Fly ash generated from the pulverized coal power plant contains unburned carbon ranged from 5~15% based on the weight, in the form of fine particles. Flotation technique was proposed for separating unburned carbon from fly ash and producing high quality ash containing low carbon to reuse the cleaned ash. This study describes to investigate the technical feasibility of a countercurrent column flotation to separate unburned carbon from fly ash into economically variable product as a function of collector addition. Separation tests taking into account yield, recovery and separation coefficient showed that the recovery of fly ash and unburned carbon was strongly dependent on the air bubble size, collector content, and particle size. The separation coefficient increased rapidly, and then gradually decreased with increasing collector content. Optimal separation condition was found to be the collector content of 8 l/ton-FA. Separation performance of cleaned ash at the optimal condition was measured the yield of 88.2%, the recovery of 93%, unburned carbon of 0.5% LOI, and separation coefficient of 0.98.

Key words: Countercurrent column, frother, collector, separation coefficient, fly ash

* 1998년 12월 30일 접수, 1999년 8월 9일 수리

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

1. 서 론

전량 수입하고 있는 유연탄은 제철, 발전 및 시멘트 산업에서 연간 3,200만 톤을 소비하고 있으며 특히 발전연료로서 사용하고 있는 유연탄의 사용량 증가로 석탄회 발생량은 96년도에 300만 톤 정도이며 2005년까지 유연탄 화력발전소의 건설이 20호기 추가 건설 예정으로 되어 있어 석탄회 발생량은 600만 톤으로 예상된다.¹⁾ 석탄회의 발생량 증가 추세와 비례하여 석탄회 매립에 따라 나타나는 문제인데 기존 발전소의 경우 회사장(ash pond)이 포화되는 시점을 발전소의 수명으로 한정할 정도이며 신규 발전소 건설시 회사장 부지의 확보가 입지선정의 부담으로 작용하고 있으므로 석탄회의 재활용을 높인다면 폐기물의 재활용에 의한 부가가치의 창출, 환경오염 및 발전소 부지확보 문제의 해결 등의 많은 장점이 있다. 따라서 석탄회의 재활용은 콘크리트 혼화재 및 건축자재분야에서 많이 이루어지고 있는데 재활용 가능한 양질의 석탄회를 회수하는 것이 무엇보다 중요하다. 석탄회의 주성분은 규소, 알루미늄, 철산화물과 같은 산화광물질로 이루어져 있어 강도를 필요로 하는 재료로 사용하는데 있어 매우 유용한 반면 완전 연소되지 못한 미연탄소분이 약 10%정도 함유되어 있어 강도가 매우 취약하여 석탄회를 재활용 재료로 사용하는데 장애요소로 작용하고 있다. 따라서 화력발전소에서 배출되는 석탄회를 재활용하고자 할 때, 이 미연탄소분을 최소화(탄소분의 함량을 3%이하)하는 것이 무엇보다 중요하다.^{2,3)}

석탄회에 함유되어 있는 미연탄소분을 제거하기 위해 부유선별이론(froth flotation theory)을 바탕으로 역류형 컬럼 부선기 장치를 구성하여 포수제변화에 따른 최적 분리 조건을 도출하고자 한다. 석탄회 입자는 친수성을 갖는 광물산화물과 소수성을 띠고 있는 미연탄소분으로 이루어져 있으므로 광액(pulp) 중에 기포를 발생시키게 되면 미연탄소분은 기포와 충돌하여 부유하고 광물산화물은 광액중에 잔존함에 따라 분리하는 것이다. 따라서 본 연구는 기포를 따라 부유하는 고탄소 석탄회 입자와 광액상에 잔존하여 컬럼 하부로 배출되는 정제 석탄회(cleaned ash)의 분리 특성을 역류형 컬럼 부선기를 이용하여 파악하고, 입자표면에 소수성의 특성을 강화시키는 포수제의 변화에 따른 최적의 분리조건을 구하고자 한다.

2. 역류형 컬럼 부선기

2.1. 부유선별 원리

액중에 부유하는 입자들의 표면에는 그 입자들의 특성에 따라 젖음성(wettability)이 다르게 나타난다. 부유선별법은 젖음성이 서로 다른 혼합 입자가 혼합액 속에 있을 때 기포(air bubble)를 발생시켜 젖음성이 작은 입자는 계면에 형성되어 있는 수화층(hydrated film)이 얇아 기포와 충돌하게 되면 기포-입자 집합체(bubble-particle aggregates)를 형성하여 상승하고 젖음성이 큰 입자는 수화층이 두꺼워 기포와 충돌하여도 부착되지 않아 액중에 잔류하게 되어 혼합 입자를 분리하는 것이다.⁴⁾ 젖음성이 큰 입자는 친수성(hydrophilic)입자이고, 반면 젖음성이 작아 표면 자유에너지가 낮은 입자는 소수성(hydrophobic)입자이다. 입자가 소수성을 띠게 되면 입자와 기포의 응집성을 지속시키므로 입자의 표면에 소수성을 강화시키는 것은 입자와 기포의 부착력을 증대시킬 뿐만 아니라 탈락가능성을 최소화시킬 수 있다. 소수성 특성을 갖는 입자의 표면에 소수성 코팅(hydrophobic coating)을 하게 되면 이것이 가교 역할을 하여 기포가 소수성 입자의 표면에 잘 부착하여 부유성이 증대된다.⁵⁾ 석탄화력발전소에서 채취한 석탄회는 친수성을 갖는 산화광물질 입자와 소수성을 띠는 미연탄소 입자로 이루어져 있어 광액에 기포를 발생시키게 되면 미연탄소 입자는 기포와 충돌하여 부유하고 광물산화물은 광액에 잔존함에 따라 분리되는 것이다. 이때 포수제(collector)를 광액 내에 첨가시키면 기포와 입자 사이에 형성되어 있는 수화층의 안정성이 증대되어 기포와 잘 부착하게 되는데, 본 연구에서는 정제등유(kerosene)를 포수제로 사용하였으며 그 사용량의 변화에 따른 분리실험을 수행하였다.

2.2. 부유선별 장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 역류형 컬럼 부선기로서 기포발생장치, 교반조, 회수탱크 등으로 구성되어 있다. 부유선별 장치에 있어 기포의 크기는 입자와의 충돌효과를 증대시키는데 중요한 변수로 작용하는데 기포의 크기가 300 μm 보다 작을 때 분리효율이 뛰어난 것으로 분석되었다.⁶⁾ 고정형 직류관 믹서(static in-line mixer)와 벤츄리관으로 구성된 미세기포 발생장치는 석

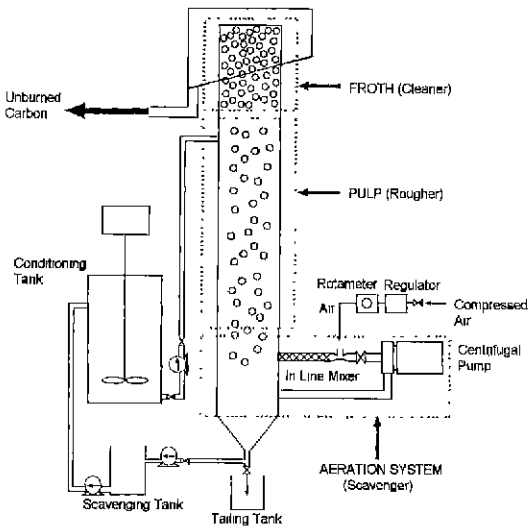


Fig. 1. Schematic diagram of the counter-current froth flotation system.

탄회 슬러리를 원심펌프로 흡입하여 벤츨리관을 통과할 때 압축공기와 혼합되어 직류관 믹서를 통과하면서 기포가 발생하는 것이다. 직류관 믹서는 관내에 선회류 모양의 믹서가 장착되어 있는 것으로 믹서에 유입된 공기와 석탄회 슬러리는 믹서의 선회류를 따라 이동하면서 공동현상(cavitation)에 의해 미세기포가 생성되는 것이다. 벤츨리관으로 유입되는 압축공기는 압력조절기(TPC, TAR 4000)와 유량계(Dwyer, RMA)를 통과하면서 정압 및 정량으로 되는데 컬럼에서 흡입한 광액과 압력이 1 kg/cm^2 이고 유량이 7 lpm 인 압축공기가 혼합되도록 하였다. 이때 발생된 미세기포의 크기는 $500 \mu\text{m}$ 로 조사되었는데, 컬럼내로 유입된 미세 기포는 소수성의 석탄회 입자에 부착하여 컬럼의 상부로 부유하였다. 컬럼은 기포발생장치에서 생성된 미세 기포가 광액상의 소수성 입자와 충돌 및 부착할 수 있도록 L/D(컬럼 길이와 직경의 비)를 30으로 하였는데 컬럼 높이는 240 cm 이고 직경은 8 cm 이다. 컬럼내에는 석탄회 입자, 기포 그리고 물이 서로 작용하는 광액층과 컬럼 상부의 기포층으로 이루어지는데 기포층의 높이는 45 cm 를 유지하도록 하여 실험을 수행하였다. 컬럼의 상부측에는 기포에 부착하여 상승한 고탄소 석탄회를 회수할 수 있는 탱크(froth side tank)를 설치하였으며 컬럼의 하부측에는 정제석탄회를 회수할 수 있는 정제회 회수조(tailing tank)를 설치하였다. 교반조(conditioning tank)에서는 슬러리 상태의 석탄회에 기포제와 포수제를 혼

합하여 1200 rpm 으로 교반(agitation)하여 포수제가 소수성인 미연탄소분의 입자 표면에 코팅(hydrophobic coating)을 하도록 한다.

3. 실험방법

역류형 컬럼 부선기를 이용하여 정제석탄회와 고탄소 석탄회의 미연탄소 함유량, 입도분포 그리고 분리 특성을 파악하기 위해 강열감량분석방법, 입도분포측정장치를 이용하였다. 기포크기 및 입자간의 부착현상을 분석하기 위해 광학현미경을 사용하였다. 컬럼내의 광액은 5 wt\% 이고 슬러리 공급량(feed rate)은 2 lpm 이다. 미세 기포 발생을 위해 기포제로 MIBC(Methyl Isobutyl Carbinol)를 사용하였으며 투입량은 석탄회 $1 \text{ 톤당 } 2 \text{ l}$, 즉 2 l/ton-FA (Fly Ash)로 하였다. 미연탄소의 함량이 7% 인 석탄회에 대하여 정제등유(kerosene)인 포수제의 투입량을 0 에서 12 l/ton-FA 까지 변화시키면서 증가량은 2 l/ton-FA 단위로 실험을 수행하였다. 기포제 및 포수제의 투입 방법은 교반조에 정량을 투입하고 슬러리 상태의 석탄회와 더불어 1200 rpm 으로 고속 교반한다. 충분히 교반이 이루어져 미연탄소 입자의 표면에 포수제의 코팅이 이루어졌을 때 컬럼으로 공급하면서 기포를 발생시킨다. 이때 컬럼내에서 광액층과 기포층의 변화가 없는 일정 높이(45 cm)가 된 정상상태가 이루어 질 때까지 교반조와 컬럼사이에 재순환(recirculation)시킨다. 컬럼내에서 정상상태가 이루어지면 석탄회를 분리시켜 정제회 회수조에서는 정제석탄회를, 상부 회수조에서는 고순도 석탄회를 채취한 후 강열감량과 입도분포를 측정하여 분리효율을 파악한다.

강열감량(loss on ignition)은 석탄회에 함유되어 있는 미연탄소분의 함량을 측정하는 것으로, 이 방법은 시료를 전기로에서 750°C 까지 가열하여 미연탄소분을 연소한 후 가열 전후의 무게 차로 측정하는 것이다(KS L 5405).¹¹⁾ 분리 전후의 입도분포 및 질량평균입경(mass median diameter)의 변화를 조사하기 위해 입도분포측정장치(Malvern, Mastersizer)를 사용하였다. 소수성인 미연탄소 입자가 기포에 부착할 때 미세 기포와 큰 기포에 부착하는 미연탄소 입자의 형태적 특성 및 작용 메카니즘을 분석하기 위해 광학현미경(Navitac, MicroMatc)을 사용하여 큰 기포 사이에 부착되어 있는 미연탄소 입자와 작은 기포들이 미연탄소 입자 주위에 부착하고 있는 형상을 분석하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 석탄회 분석

본 실험에 사용된 석탄회는 96년 8월에 삼천포 화력 발전소 제 1호기의 전기집진기 호퍼에서 채취한 것으로 호주, 남아공 중국, 캐나다산 등의 유연탄을 서로 혼합하여 사용한 발전연료로부터 생성된 석탄회이다. Table 1은 유연탄의 공업분석 및 원소분석에 대한 결과와 석탄회 성분분포 및 입도 그리고 미연탄소 함량을 나타낸 것이다. 석탄회를 구성하고 있는 대부분은 산화광물질로 약 90%를 점유하고 있으며 이중 주종을 이루고 있는 성분은 SiO₂(65%), Al₂O₃(23%), Fe₂O₃(5%)이다. 산화광물질을 제외한 모든 성분은 미연탄소로서, 이 함량은 발전소 보일러의 운전조건에 따라 달라지는데 본 연구에서 사용된 석탄회는 미연탄소 함량이 7%이고 질량평균입경은 21.5 μm로 측정되었다. Fig. 2은 본 연구에서 사용된 석탄회의 형상으로 구형의 형상으로 이루어진 산화광물질 입자와 비구형의 미연탄소 입자로 이루어져 있다.

어린 산화광물질 입자와 비구형의 미연탄소 입자로 이루어져 있다.

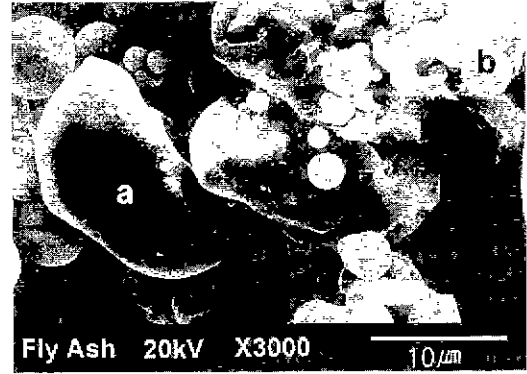
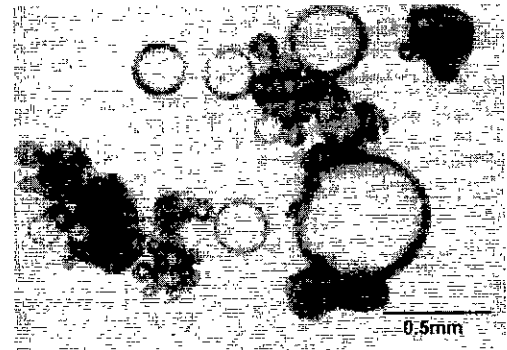


Fig. 2. Scanning electron micrograph of fly ash: (a) unburned carbon particle, (b) mineral particle

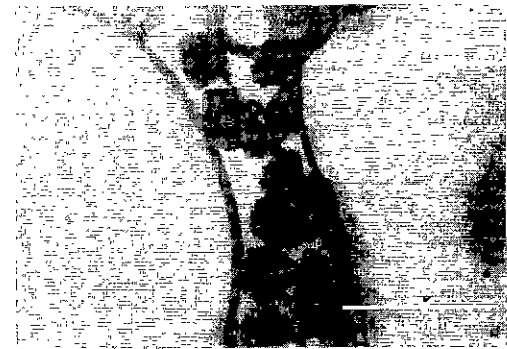
Table 1. Ash analysis collected from the Samcheonpo power plant

Parameters		Unit	Standard	Value		
Proximate Analysis	Moisture	Wt%	dry base	2.50		
	Ash			13.95		
	Volatile Matter			29.49		
	Fixed Carbon			54.09		
Ultimate Analysis	Carbon	Wt%	dry base	68.57		
	Hydrogen			4.36		
	Nitrogen			1.68		
	Oxygen			11.06		
	Sulfur			0.45		
	Mineral			13.88		
Ash Composition	SiO ₂	Wt %	-	65.46		
	Al ₂ O ₃			23.95		
	Fe ₂ O ₃			5.04		
	CaO			0.95		
	MgO			0.73		
	Na ₂ O			0.23		
	K ₂ O			1.30		
	MnO			0.17		
	Ash Size			μm	MMD	21.5
	Unburned Carbon (LOI)			Wt%	-	7

MMD : Mass Median Diameter
LOI : Loss On Ignition



(a)



(b)

Fig. 3. Microphotographs of the contact of unburned carbon particles and bubbles · (a) small bubbles (0.5 mm in size), (b) large bubbles (1 mm in size)

4.2. 기포와 미연탄소입자의 부착특성

광액상에서 미연탄소 입자의 표면은 소수성으로 수화층이 얇아 기포와 충돌함에 따라 기포의 부착이 용이하다. 이러한 특성을 이용하여 광액상에 혼재해 있는 산화광물질과 미연탄소를 분리하는데 기포에 미연탄소 입자가 부착하는 특성 및 형상을 분석하는 것은 중요하다. 미연탄소 입자의 비중은 약 1.9 정도이므로 기포에 부착되지 않으면 부유하지 못하고 침전해 버린다. 따라서 미연탄소의 부유성을 강화시키기 위해서는 한 입자 주위에 많은 기포가 부착되어야 한다. Fig. 3는 광학현미경을 이용하여 기포에 부착되어 있는 소수성 미연탄소 입자를 관찰한 것으로 Fig. 3(a)는 하나의 미연탄소 입자 주위에 평균 500 μm크기의 기포가 부착되어 있어 이것에 의한 부력으로 미연탄소 입자가 상승한다. 그러므로 부유분리 장치에서 분리의 효율을 증대시키기 위해서는 미연탄소 입자의 표

면에 소수성을 강화시키고 500 μm이하되는 미세 기포를 발생시키는 것이 중요하다.⁷⁾ Fig. 3(b)의 경우 1 mm 이상되는 큰 기포주위에 미연탄소 입자가 부착되어 있는 것으로, 이러한 경우 큰 기포는 컬럼을 따라 부유하게 되면서 터지거나 기포주위의 입자들의 부착력이 작아 기포에서 떨어질 가능성이 높을 뿐 아니라 기포사이의 미연탄소 입자에 미세한 석탄회가 혼입될 가능성이 증대하여 분리효율을 저하시키므로 미세기포 발생이 석탄회의 산화광물질과 미연탄소 성분 분리에 크게 영향을 준다.⁸⁾

4.3. 포수제 증가에 따른 분리 효과

Table 2는 입자의 표면에 소수성을 강화시키는 포수제의 변화에 따른 미연탄소 입자의 분리특성을 파악하기 위해 포수제 양을 2 l/ton-FA씩 증가하여 12 l/ton-FA까지 변화시켜 포수제 증가에 따른 분리특성에 대한

Table 2. Recovery performance of countercurrent column flotation as a function of collector dosage.

Feed Content (%)		Collector Addition (l/ton-F.A.)	Product	Yield (Wt%)	Assay from Yield (%)		Recovery (%)		S
Mineral	U.C.				Mineral	U.C.	Mineral	U.C.	
93.0	7.0	0	High LOI Ash	21.5	90.8	9.2	21.2	25.6	0.47
			Cleaned Ash	78.5	92.7	7.3	78.8	74.4	
			Total	100.0	92.3	7.7	100.0	100.0	
		2	High LOI Ash	10.9	50.6	49.4	5.9	74.8	0.81
			Cleaned Ash	89.1	98.0	2.0	94.1	25.62	
			Total	100.0	92.8	7.2	100.0	100.0	
		4	High LOI Ash	11.9	46.8	53.2	6.0	88.4	0.94
			Cleaned Ash	88.1	99.1	0.9	94.0	11.6	
			Total	100.0	92.9	7.1	100.0	100.0	
		6	High LOI Ash	11.1	47.7	52.3	5.7	90.7	0.96
			Cleaned Ash	88.9	99.4	0.6	94.3	9.3	
			Total	100.0	93.7	6.3	100.0	100.0	
		8	High LOI Ash	11.8	56.3	43.7	7.0	91.3	0.98
			Cleaned Ash	88.2	99.5	0.5	93.0	8.7	
			Total	100.0	94.4	5.6	100.0	100.0	
		10	High LOI Ash	11.7	56.6	43.4	7.0	89.8	0.97
			Cleaned Ash	88.3	99.4	0.6	93.0	10.2	
			Total	100.0	94.4	5.6	100.0	100.0	
		12	High LOI Ash	10.9	61.1	38.9	7.0	85.2	0.92
			Cleaned Ash	89.1	99.2	0.8	93.0	14.8	
			Total	100.0	95.0	5.0	100.0	100.0	

U.C. : Unburned Carbon
 F.A. : Fly Ash
 LOI : Loss On Ignition
 S : Separation Coefficient
 Frother amount added : 5 l/ton-FA

실험결과를 나타낸 것이다. 여기서 수율(yield)은 부유선별 실험을 통해 컬럼의 상부측(froth side)과 하부측(tail side)에서 각각 채취한 정제 석탄회와 고탄소 석탄회의 양을 무게백분율(wt%)로 구한 것이다. 분석값(assay)은 분리된 석탄회에 함유된 광물성분과 탄소 성분을 강열감량법으로 분석한 것이다. 회수율(recovery)은 공급된 석탄회 중에서 컬럼의 상부로 회수된 미연탄소의 회수량과 컬럼의 하부로 회수된 산화광물의 양을 구한 것으로, 정제 석탄회의 경우 회수율은 컬럼의 상부에서 채집한 산화광물질의 양을 총 공급된 산화광물질의 함량으로 나누어 구한다. 예를 들면 Table 2에서 포수제 공급량이 8 l/ton-FA일 경우 컬럼 하부측에 회수한 광물성분 회수율 93%은 채취한 산화광물질 함량 87.8%을 총 공급된 산화광물질 함량 94.4%로 나누어 얻은 값이다. 그리고 분리 계수(separation coefficient)는 분리효과를 평가하는 기준으로 활용되는데 정제석탄회와 고탄소 석탄회의 회수율 차이를 이용하여 구한다. 즉 컬럼 하부측에서 회수한 정제 석탄회의 회수율과 컬럼 상부측에서 회수한 고탄소 석탄회의 회수율 차를 백분율로 구한 다음 1에서 이 값을 뺀으로서 구한다. 따라서 분리정도가 클수록 정제 석탄회와 고탄소 석탄회의 회수율 차이는 줄어들게 되고 분리계수는 증가하게 된다.

Table 2에서 포수제를 투입하지 않은 경우 분리실험을 통해 얻은 정제석탄회는 수율이 78.5 wt%이고 미연탄소 함량이 7.3%로 나타났으며 산화광물질 회수율은 78.8%로 분석되었다. 고탄소 석탄회는 수율이 21.5 wt%이고 이때의 미연탄소 함량은 9.2%로 나타났으며 미연탄소 회수율은 25.6%로 매우 낮게 나타났다. 정제 석탄회의 산화광물질 회수율과 고탄소 석탄회의 미연탄소 회수율을 통해 얻은 분리계수는 0.47로 분석되어 분리효과는 미비하므로 이는 포수제를 투입하지 않은 상태에서 소수성인 미연탄소와 친수성인 산화광물질의 분리효과는 없다고 분석된다. 그런데 포수제의 양을 2 l/ton-FA 증가시키자 분리계수가 0.81로 분석되어 분리효율이 상당히 향상되었음을 알 수 있다. 포수제의 투입량을 계속 증가시키에 따라 분리효율이 향상되어 8 l/ton-FA를 투입하였을 때 정제석탄회의 미연탄소 함량은 0.5%, 산화광물질 회수율은 93%로 상승하였으며 고탄소 석탄회는 미연탄소 함량이 43.7%이고 미연탄소 회수율은 91.3%로 분석되어 분리계수가 0.98로 분리성능이 뛰어났다 포수제의 투입량이 증가함에 따라 분리효과가 향상되었다는 것은 미연탄소 입자의 계면에 소수

성 특성이 강화되어 분리효율 향상에 영향을 미쳤기 때문이다. 하지만 포수제의 투입량을 10 또는 12 l/ton-FA로 증가하였을 경우 정제 석탄회에 미연탄소의 함량이 0.8%로 다시 증가하는 추세를 보였고 분리계수 또한 0.92로 감소하였다 결국 투입량이 계속 증가할 경우 오히려 효율은 다소 감소하므로 미연탄소 입자의 계면에 소수성을 강화시키기 위해 적절한 포수제의 양이 존재함을 알 수 있다 포수제의 투입량은 원시료의 미연탄소 함량과 입자 및 기포의 크기 등과 같은 여러 가지 조건에 의해 결정되지만 본 연구에서는 포수제의 투입량을 8 l/ton-FA로 하였을 때 최상의 분리 효율을 얻을 수 있었다.

Fig. 4(a)는 포수제 증가에 따라 정제 석탄회와 고탄소 석탄회에 함유되어 있는 미연탄소 함유량의 변화를 나타낸 것이고 Fig. 4(b)는 미연탄소의 회수율의 변화를 표현한 것이다. Fig. 4(a)에서 정제 석탄회와 고탄소 석

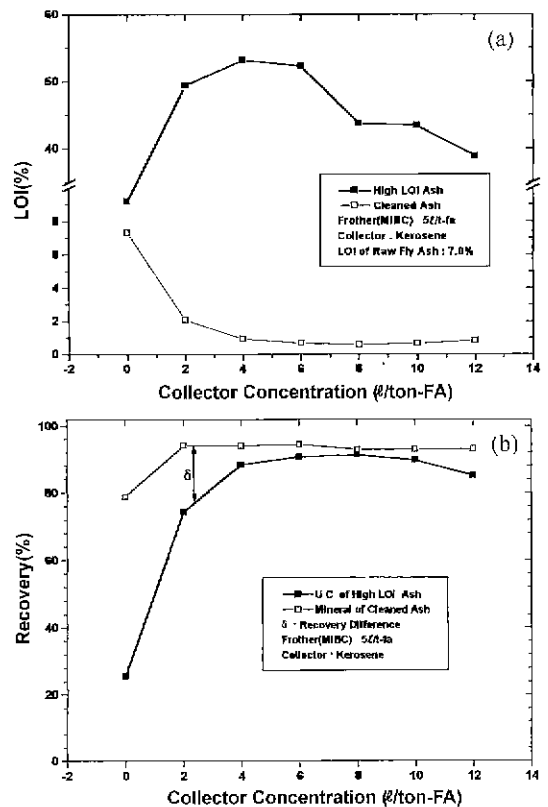


Fig. 4. Separation effect of separation of unburned carbon from fly ash as a function of collector concentration: (a) LOI, (b) recovery.

탄회의 미연탄소 함량 변화는 포수제의 투입량이 증가함에 따라 두 그래프 사이의 간격이 넓어지는 것을 알 수 있는데, 이 간격이 넓을수록 분리효율이 증가하는 것이다. Fig 4(b)는 정제 석탄회와 고탄소 석탄회의 미연탄소 회수율의 변화를 나타낸 것으로 두 그래프 사이의 간격(δ)에 따라 분리계수가 결정되는데 포수제의 투입량이 증가할수록 δ 가 감소하여 분리계수가 증가하고 포수제 투입량이 8 l/ton-FA일 때 간격이 최소가 되었다가 포수제의 양을 계속 증가시키자 오히려 간격이 커지므로 포수제의 투입량이 8 l/ton-FA일 때 최적의 분리조건임을 알 수 있다.

4.4. 정제 석탄회의 입도분포 특성

Fig. 5는 포수제의 투입량 변화에 따라 분리된 석탄회의 입도분포 특성을 나타낸 것으로 Fig. 5(a)는 정제 석탄회의 입도분포 변화이고 Fig. 5(b)는 고탄소 석탄회의 입도분포 변화를 나타낸 것이다. 원시료 석탄회의 입도분포는 0.5~0.8 μm 크기 범위에서의 미세입자 모우드와 40~80 μm 의 큰 입자 모우드인 바이모달(bimodal) 형태로 이루어져 있는데, 미세입자와 큰 입자 모우드 질량분율에 대한 변화를 통해 시료의 입도분포

변화를 분석할 수 있다. Fig. 5(a)는 포수제의 투입 변화에 따라 분리실험을 수행한 결과 미연탄소의 함량이 감소하여 석탄회의 정제 정도가 증가한 정제석탄회의 입도분포이다. 원시료에 비해 포수제를 투입하지 않은 경우 미세입자 모우드 질량분율(mass fraction)은 감소하고 큰 입자 모우드 질량분율은 입자 크기(DP)가 큰 방향으로 이동했다. 포수제 투입으로 분리한 정제석탄회의 경우 미세입자 모우드 질량분율은 증가하고 큰 입자 모우드 질량분율은 입자 크기가 감소하는 방향으로 이동하였다. Fig. 5(b)는 원시료 석탄회에서 산화광물질을 제거한 고탄소 석탄회 입자의 분포를 나타낸 것으로 정제 석탄회와 다른 형태의 입도분포를 나타내고 있다. 즉 포수제를 투입하지 않아 분리가 이루어지지 않은 석탄회는 원시료에 비해 미세입자 모우드의 질량분율이 상승하고 큰 입자 모우드의 질량분율은 입자의 크기가 감소하는 영역으로 이동한다. 포수제 투입으로 얻은 고탄소 석탄회는 미세 입자 모우드의 질량분율 최고값이 줄어들어 거의 없어진 반면 큰 입자 모우드의 질량분율은 입도가 증가하는 방향으로 이동하면서 질량분율의 최고값이 상승해 주로 80 μm 이상의 큰 입자로 이루어져 있다. 결국 분리후 각 석탄회의 입도는 뚜렷하게 구별되어 나타났는데 정제 석탄회의 경우 미세 입자 크기 분포가 증가하고 큰 입자의 크기 분포는 감소한 반면 고탄소 석탄회는 미세입자의 입도분포는 감소하고 큰 입자의 분포는 증가하여 두 석탄회 사이에 입도분포의 양극화 현상이 뚜렷하게 나타났다. 그 이유는 석탄회에 함유되어 있는 산화광물 입자의 크기는 미세(fine particle)하고 미연탄소 입자는 조대(coarse particle)하기

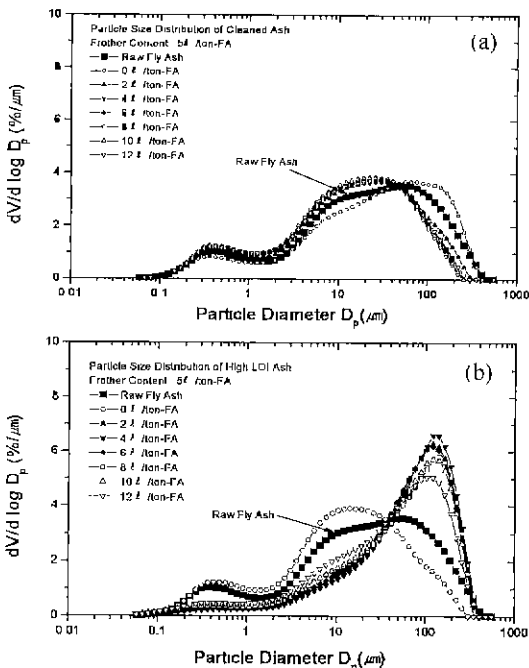


Fig. 5. Particle size distribution as a function of collector concentration: (a) cleaned ash, (b) high LOI ash

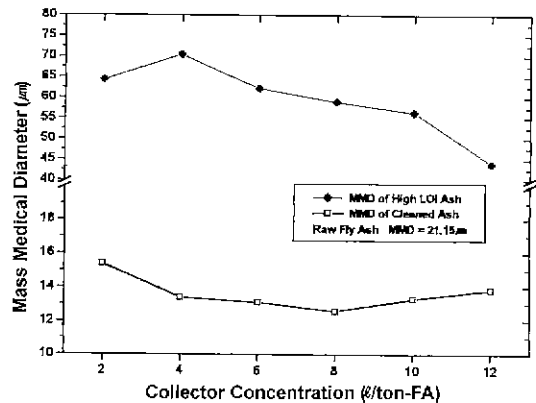


Fig. 6. Mass median diameter of cleaned and high LOI ash as a function of collector concentration.

때문이다.^{9,10)} Fig 6은 분리된 각 석탄회 입자의 질량 평균입경을 나타낸 것으로 질량평균입경이 21.5 μm 인 원시료를 분리한 결과 정제석탄회의 질량평균입경은 12~15 μm의 범위에서 분포하는 반면 고탄소 석탄회의 입도분포는 50~70 μm의 범위에 분포하고 있다. 결론적으로 분리효율이 증가할수록 정제석탄회의 입도는 미세해지고 고탄소 석탄회의 입도는 조대해 진다.

본 연구는 역류형 컬럼 부선기로 석탄회에 함유된 미연탄소 입자를 분리할 때 포수제의 함량에 따른 분리효율과 분리된 석탄회의 특성을 분석한 것으로 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 기포의 크기에 따른 미연탄소분의 부유 특성을 파악하기 위해 큰 기포에 부착된 미연탄소분과 미세 기포에 부착된 미연탄소분의 행상을 분석한 결과, 평균 직경이 500 μm 정도되는 미세기포에 미연탄소분이 부착되었을 때 부유성이 양호하였다
2. 포수제의 투입량이 증가함에 따라 미연탄소분 입자의 계면에 소수성이 강화되어 분리효과가 뚜렷이 나타났는데 최적의 조건을 위한 포수제 투입량은 8 l/ton-FA인 경우로 미연탄소의 함량이 0.5%이고 회수율이 8.7%인 정제석탄회를 88.2% 회수하였으며 분리계수가 0.98의 결과를 얻을 수 있었다.
3. 석탄회와 미연탄소 입자의 분리정도에 따라 입도는 뚜렷하게 구별되어 나타났는데, 질량평균입경이 21.5 μm 인 원시료를 분리한 결과 정제석탄회의 질량평균입경은 12~15 μm의 범위에서 분포하는 반면 고탄소 석탄회의 입도분포는 50~70 μm의 범위에 분포하였다. 결국 분리효율이 증가할수록 정제석탄회의 입도는 미세해지고 고탄소 석탄회의 입도는 조대해 지는 양극화 현상이 뚜렷하게 나타났다.

감사의 글

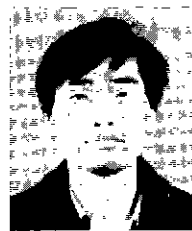
본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호: 96-10-05-02-A-3)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 남호기, 마삼선, 정경택 “석탄회 이용가치와 재활용 기술”. 한국전력공사 (1994).
2. 노갑수, 문광순, 최광호 : “Fly Ash에서 미연소 탄소분의

제거방법”, 석탄회 활용 국제 워크숍, 한국전력공사. pp. 63-84 (1996).

3. 조희찬, 김재관, 이종복, 박운영: “석탄회중 미연탄소 저감기술”, pp. 125-153 (1997)
4. N. Ahmed and G.J. Jameson . Flotation Kinetics. Mine- ral Processing and Extractive Review, v 5, pp. 77-99 (1989).
5. A.M, Gaudin : “Flotation”. McGraw-Hill (1957).
6. G.H, Luttrell. M.J Mankosa, and R.H. Yoon: “Com- mercial Development of the Microcell Column Flota- tion”, in Proceeding of the 8th Korea/U.S Joint Workshop on Coal Utilization Technology, v(6), pp.45-53 (1991).
7. G.H. Luttrell. M.J Mankosa and R.H. Yoon. “Com- mercial Development of the MICROCEL Flotation Column”, in Proceedings of the 8th Korea-U.S.A Joint Workshop on Coal Utilization Technology, Seoul, Korea, Oct. 29-31, v. IV, pp 43-53 (1991).
8. V.I Klassen, and V.A. Mokrousov : “An Introduction to the Theory of Flotation”. Butterworth & Co., pp 25-45 (1963).
9. 이정인, 이재근. “석탄 회력발전소에서 발생하는 석탄회 특성과 형성 분석에 관한 연구”. 한국에너지공학회, Vol. 7, No. 1, pp. 146-156 (1998).
10. 이정인, 이재근: “석탄연소 보일러에서 생성된 석탄회의 분석과 형성 내커니즘 해석에 대한 연구”, 대한기계학회 논문집B권, 제22권 제12호, pp.1691-1701 (1998)
11. 한국공업규격, KS L 5405, “플라이 애시” (1992).
12. 손성근, 김정덕 “부유포말선광법에 의한 유연탄 미산회의 미연탄소분 제거연구”. 자원리사이클링, pp. 44-49 (1996).



李 靖 彦

- 부산대학교 환경기술산업개발연구소, 공학박사
- 환경유체공학



李 在 瑾

- 부산대학교 기계공학부 부교수, 공학 박사
- 환경유체공학