

向流컬럼浮選機에서 石炭灰의 크기 및 未燃炭素 含量이 分離特性에 미치는 영향

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

Effect of the Particle Size and Unburned Carbon Content on the Separation Efficiency of Fly ash in the Countercurrent Column Flotation

Jung-Eun Lee* and Jae-Keun Lee

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

요 약

석탄회는 기포에 잘 부착되는 미연탄소 성분의 입자와 기포에 부착되지 않는 산화광물 성분의 입자로 구성되어 있으므로, 석탄회 입자를 수중에 부유시킨 상태에서 기포를 발생시키면 미연탄소와 산화광물질 입자를 각각 분리할 수 있다. 분리된 이들 두 종류의 입자들은 건축용 재료, 화장품, 섬유 및 반도체의 충전제(Filler), 흡착제, 야금용 탄소 등과 같이 고부가가치 원료로 활용이 가능하다. 본 연구는 부유선별법에 의해 구성된 향류컬럼부유분리장치를 이용하여 혼합입자인 석탄회 입자를 효율적으로 분리하고자 하는 것인데, 분리특성은 기포와 혼합입자의 특성에 따라 결정된다. 기포의 특성에 대한 연구는 장치의 설계와 밀접한 관련이 있기 때문에 선행연구에서 충분히 이루어졌으나 혼합입자의 특성에 따른 분리효율 평가에 관한 연구는 수행되지 않고 있다. 혼합입자인 석탄회가 분리에 미치는 특성을 파악하기 위해 석탄회 입자의 질량중양직경이 23, 95, 190 μm 일 때, 미연탄소의 함량이 7, 11, 20%일 때에 각각의 분리효율을 분석하였다. 그 결과 공급되는 석탄회 입자의 크기가 작을수록, 미연탄소 함량이 작을수록 분리효율이 증가하였다. 즉 포수제 투입량이 8 l/ton-fa로 같은 조건에서 미연탄소 함량이 7%와 20%인 경우 분리효율은 각각 86%와 74%로 분석되었으며 질량중양직경이 23 μm 와 190 μm 일 때 분리효율은 각각 74%와 39%로 분석되었다. 결국 석탄회에서 소수성인 미연탄소의 함유량이 증가할수록 분리효율은 감소하는 반면 입자의 크기가 작을수록 기포와의 부착성능이 향상되어 분리효율은 향상되는 것으로 분석되었다.

주제어: 석탄회, 미연탄소, 컬럼부선, 분리효율, 입자 크기

ABSTRACT

Fly ash was composed of the unburned carbon and mineral particles. The former was able to attach on the bubbles, while the latter was not. Therefore, it was possible to separate the unburned carbon and the mineral from fly ash using the froth flotation process. This study was carried out to evaluate the separation efficiency as a function of the fly ash particle properties in the column flotation. Separation efficiency was analyzed for various size fraction of -38 μm , 38~125 μm and +125 μm , and for various fly ash samples containing 7, 11, and 20 wt% unburned carbon. For the size fractions of -38 μm containing 7 wt% unburned carbon, separation efficiency was 86%, whereas separation efficiency was found to be 74% for the size fraction of +125 μm containing 20 wt% unburned carbon. The results indicated that separation efficiency increased with the decrease in the particle size and the unburned carbon content of the fly ash.

Key words: separation efficiency, fly ash, column flotation, unburned carbon, particle size

* 2000년 6월 15일 접수, 2000년 11월 17일 수리

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

1. 서 론

석탄회는 대부분 석탄이 연소할 때 석탄에 함유되어 있는 Si, Al, Fe, Mg 등과 같은 비연소성광물입자와 연소되지 못한 미연탄소 성분으로 이루어진 혼합입자이다. 보통 연소 후 생성된 광물 입자는 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO와 같은 산화물로 존재하는데 전체 석탄회 중의 대부분을 차지하고 미연탄소 성분의 입자는 약 3~11 wt% 정도 함유되어 있다. 그런데 석탄회에 함유되어 있는 산화 광물 입자는 형상이 구형이며 크기가 20 μm 정도로 미세할 뿐만 아니라 강도가 크기 때문에 콘크리트 혼화제, 시멘트 대용재 등의 건축용 재료뿐만 아니라 화장품, 섬유, 반도체의 충전제(Filler) 등으로 재 활용할 수 있는 것으로 연구되고 있다. 또한 미연탄소 성분은 비구형의 형상을 가지고 있으면서 입자의 크기가 100 μm 이상으로 클 뿐만 아니라 입자의 표면에 미세 기공이 많이 형성되어 있기 때문에 흡착제, 야금용 탄소, 그리고 재연료 등으로 활용이 가능한 것으로 평가되고 있다.¹⁾ 그러나 석탄회에 산화광물질 성분과 미연탄소 성분이 혼합되어 있으면 재활용하기가 어렵다. 즉 석탄회에 함유되어 있는 이 두 성분을 분리하여야만 고부가가치의 원료로 활용이 가능하다.

본 연구는 석탄회에 함유되어 있는 산화광물 입자와 미연탄소 입자를 분리하기 위한 목적으로 부유선별법(Flotation)을 적용하여 구성된 향류컬럼부유분리장치(Countercurrent Column Flotation System)를 이용하여 석탄회와 같은 혼합입자를 분리하고자 하는 것이다. 부유선별법(Flotation)은 성질이 다른 두 종류의 입자가 혼합된 혼합입자로부터 각각의 입자를 분리하는데 매우 효과적인 방법으로 연구되어 왔는데, 혼합입자의 분리에 영향을 미치는 인자는 컬럼에서 발생하는 기포의 특성과 분리 대상인 입자의 특성, 그리고 소수성 입자에 기포의 부착 특성 향상을 위한 포수제 투입량 등의 세 가지 변수에 의해 크게 결정된다. 부유선별법을 이용하여 혼합입자를 분리하는데 있어 가장 중요한 영향을 미치는 인자는 기포의 특성이다. Gaudin(1957)과 Klassen(1963)은 부유분리장치에서 발생하는 기포의 거동특성 및 기포의 형태, 그리고 소수성 입자와의 부착 메커니즘에 대해 많은 연구를 수행하였다.^{2,3)} 그 후 Yoon(1993), Yianatos(1987), Dobby(1988) 등에 의해 기포의 특성 분석에 대한 연구를 다각도로 전개해 왔는데, Yoon(1993)은 부유선별에서 미세기포는 혼합입자의 분리효율을 향상시킬 수 있음을 분석하였으며, Yianatos

(1987)와 Dobby(1988)는 기포제의 투입량, 공기의 공급량, 그리고 컬럼의 크기 등에 따라 형성되는 기포의 특성을 분석하였다.^{4,6)} 이때 기포의 특성은 기포의 크기, 속도, 그리고 체적비에 따라 분류하여 분석하였으며 이들 기포의 특성이 혼합입자의 분리에 미치는 영향을 평가하여 왔다. 하지만 입자의 크기, 소수성 입자가 함유되어 있는 비율, 그리고 포수제의 투입량 등에 의한 입자의 분리 특성에 대한 연구는 수행되고 있지 않다. 이정연(1999)과 안양규(1997)는 석탄회 입자의 분리 특성에 대한 연구를 수행한 바 있으나 분리 대상 입자의 크기 및 미연탄소의 함유량과 같은 특성의 변화에 따른 분리 연구는 수행하지 않았다.^{7,8)}

따라서 본 연구는 석탄회에 함유되어 있는 미연탄소 입자의 함량 및 분리대상 입자의 크기에 따른 분리 특성을 분석하여 석탄회의 분리의 최적 조건을 도출함으로써 재활용이 가능한 양질의 석탄회를 효과적으로 얻고자 하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 향류컬럼부유분리장치

부유선별법(Flotation)은 친수성인 입자와 소수성인 입자가 서로 혼합된 상태에서 액중에 부유할 때, 기포를 발생시켜 소수성 입자를 기포에 부착시켜 컬럼의 상부로 이송시키는 반면 친수성 입자는 컬럼의 하부로 이송시켜 두 입자를 분리시키는 방법이다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 부유선별법으로 향류컬럼부유분리장치(Counter-current Column Flotation System)를 나타낸 것이다. 이 장치는 기포 발생장치, 분리된 입자 회수장치, 그리고 기포의 크기 및 형상을 측정할 수 있는 장치로 구성되어 있다. 특히 기포 발생 장치는 혼합입자의 분리 효율 향상에 중요한 영향을 미치는데, Luttrell(1991)과 Yoon(1993)에 의하면 미세기포(Microbubble)를 발생시킬수록 분리효율이 향상된다고 분석하였다.⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 미세기포를 발생시킬 수 있는 In-Line Mixer 형 기포 발생 장치를 장착하여 미세 기포를 발생시켰으며, 발생한 기포의 안정성을 확보하기 위해 기포제(Frother)로 MIBC(Methyl Isobutyl Carbinol)를 사용하였다. 석탄회 공급탱크(Feeding Tank)에서는 포수제(Collector)인 정제등유(Kerosene)를 혼합하여 1200 rpm으로 교반(Agitation)하여 포수제가 소수성인 미연탄소 입자의 표면에 코팅(Hydrophobic Coating)을 하도록 하였다. 컬럼으로 공급된 석탄회 중 기포에 부착한

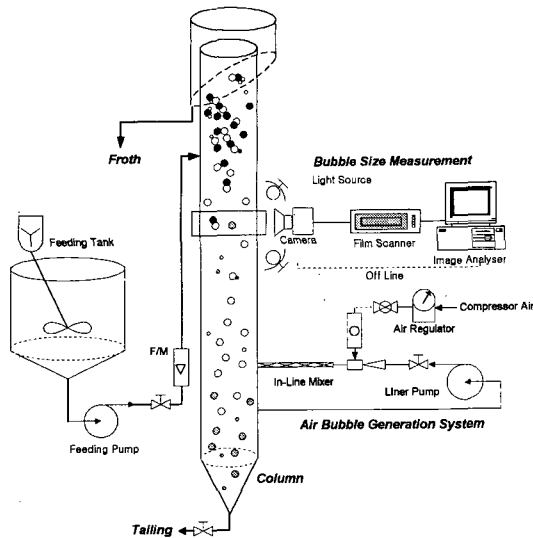


Fig. 1. Schematic diagram of the countercurrent column flotation apparatus.

미연탄소 입자는 컬럼 상부측 회수탱크(Froth Tank)에 저장되며 기포에 부착되지 않은 산화광물 입자는 컬럼 하부측 회수탱크(Tailing Tank)에 저장되도록 설치하였다. 이때 컬럼 상부측 회수탱크(Froth Tank)에 저장된 석탄회를 고탄소석탄회(High LOI Ash)라 하고, 컬럼 하부측 회수탱크(Tailing Tank)에 저장된 석탄회를 정제석탄회(Cleaned Ash)라 한다. 또한 컬럼내에서 형성되는 기포의 형상을 파악하기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 사진촬영기법(Photographic Method)을 이용하였다. 컬럼 하부에서 발생된 기포가 상승할 때 500 W의 수은등을 촬영영역 상하에 설치하여 광원에 노출된 기포를 카메라(FM-2, Nikon)로 촬영하였다. 이때 사용한 필름은 ASA 400이며 셔터속도는 1/1000로 하였으며 촬영한 기포는 필름 스캐너(Sprint Scan-35, Polaroid)를 이용하여 이미지를 얻어 그 특성을 분석하였다.

2.2. 분석 방법

본 연구에서 사용된 석탄회의 분리효율은 원시료와 실험 후 분리된 고탄소석탄회, 그리고 정제석탄회에 함유된 미연탄소 함량(LOI) 값을 측정하여 분석하였다. 각 석탄회에 함유되어 있는 미연탄소 함량은 한국공업규격(KS L 5405)에 의해 제시된 강열감량(Loss on Ignition)법으로 분석하였는데, 시료를 전기로에서 750°C까지 가열하여 미연탄소분을 연소한 후 가열 전후의 무게

차로 측정하는 것이다.¹⁰⁾ 석탄회를 크기 및 미연탄소 함량 변화에 따라 부유선별법으로 분리실험을 수행하기 전에, 석탄회를 습식체가름법으로 38 μm 이하, 38~125 μm, 그리고 125 μm 이상의 입자를 각각 선별하였다. 습식체가름에 의해 선별된 각 석탄회는 입도분포측정장치(Malvern, Mastersizer)로 질량중양직경(Mass Median Diameter; MMD)을 측정하여 분리 실험 수행시 대표 직경으로 이용하였다.

석탄회 분리 실험을 수행한 후, 컬럼의 상·하부에서 회수한 고탄소석탄회와 정제석탄회에 대하여 각각의 미연탄소 성분 함량과 회수한 양 즉 수율(Yield)을 측정하였다. 수율(Yield)은 식 (1)에서 나타난 바와 같이 컬럼의 상·하부에서 회수한 고탄소석탄회와 정제석탄회의 양을 공급량에 대한 무게 백분율(wt%)로 나타낸 것이다.

$$\text{수율(Yield)} = \frac{\text{분리된 각 석탄회의 무게}}{\text{공급된 석탄회의 무게}} \times 100 \quad (1)$$

회수율(Recovery)은 식 (2)에 나타난 것과 같이 공급된 석탄회중 회수한 정제석탄회와 고탄소석탄회를 백분율로 나타낸 것인데, 정제석탄회 회수율은 컬럼 하부에서 회수한 산화광물질 양을 총 공급된 산화광물질로 나누어 구한다.

$$\text{회수율(Recovery)} =$$

$$\frac{\text{컬럼의 상·하부에서 회수한 산화광물질 또는 미연탄소량}}{\text{공급된 산화광물질 또는 미연탄소량}} \times 100 \quad (2)$$

이때 컬럼의 상부에서 회수한 고탄소석탄회에서 미연탄소 성분의 회수율을 RUC라하고 컬럼 하부 측에서 회수한 정제석탄회에서 산화광물질 성분의 회수율을 RM이라고 할 때, 이 두 회수율의 차를 이용하여 뉴턴 분리효율(Newton's Overall Separation Efficiency)을 구할 수 있다.¹¹⁾ 식 (3)에서 보는 바와 같이 정제석탄회의 산화광물질 회수율과 고탄소석탄회의 미연탄소 회수율의 합에서 100을 뺀으로서 구할 수 있는데, 이는 분리효율을 평가할 수 있는 기준으로 활용하였다.

$$\eta = R_M + R_{UC} - 100 \quad (3)$$

2.3. 분리효율에 영향을 미치는 인자

혼합입자의 분리효율에 영향을 미치는 인자는 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 우선, 기포의 형상 및 크기

에 의해 결정되는 기포의 특성에 따라 분리효율이 변화할 수 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 향류컬럼부유 분리장치에 의해 발생하는 기포의 크기 및 형상과 같은 특성이 분리효율에 미치는 영향에 대하여 이정언(1999)은 분석한 바가 있다.⁷⁾ 이 연구에서 기포제의 투입량이 5 l/ton-fa, 즉 석탄회 단위 ton에 대한 포수제 투입량을 5로 하였을 때 기포의 크기가 약 0.5 μm 정도로 최적의 분리효율을 얻을 수 있다고 평가하고 있어 본 연구에서도 이 조건에 의해 실험을 수행하였다. 두 번째는 혼합입자중 소수성 입자 표면에 소수성 코팅(hydrophobic coating)을 함으로써, 기포와의 부착성을 향상시킬 수 있게 하는 포수제의 투입량(Collector Concentration: CC)의 변화이다. 이정언은 포수제의 투입량이 8 l/ton-fa 이상인 경우에는 입자의 분리에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었기 때문에 본 연구에서도 포수제는 투입량의 변화를 각각 0, 4, 8 l/ton-fa로 하여 분리특성을 평가하였다. 마지막으로 분리대상인 혼합입자의 특성, 즉 입자의 크기 분포와 소수성 입자인 미연탄소 성분 함량이 분리효율에 미치는 영향이다. 본 연구에서는 혼합입자인 석탄회에 함유되어 있는 소수성 입자인 미연탄소 성분 변화에 따라, 그리고 석탄회 입자의 크기 분포에 따라 분리효율을 분석하였다. 결국 In-Line Mixer 기포발생장치가 장착된 컬럼에 기포제를 5 l/ton-fa 투입하여 미세기포를 발생시킨 상태에서 포수제 투입량을 변화시키면서 분리 대상인 혼합입자의 특성에 따라 분리효율을 분석하였다.

3. 결과 및 분석

3.1. 부유분리장치내 기포의 특성

컬럼내에 기포를 공급하면 기포층(Froth Layer)이 형성되고, 공급된 석탄회 입자가 기포층을 통과함에 따라 미연탄소 성분은 기포에 부착하는 반면 산화광물 입자는 기포층을 그대로 통과하여 컬럼의 하부로 배출되는 것이다.¹²⁾ 기포의 형성 및 특성은 소수성 및 친수성 입자를 분리하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다. Fig. 2는 소수성 및 친수성 입자의 분리 현상을 사진촬영에 의한 기법(Photographic Method)으로 측정된 것이다. 기포발생장치에서 발생한 기포가 컬럼의 상부로 이동하면서 기포 유동층(Bubbly Zone)을 형성하며 컬럼 상부에서 약 1 m 지점에서 기포층을 형성한다. Fig. 2(a)는 기포 유동층과 기포층의 경계를 나타낸 것이며, Fig. 2(b)는 경계면에서 "a" 부분을 확대하여 나타낸 것으로

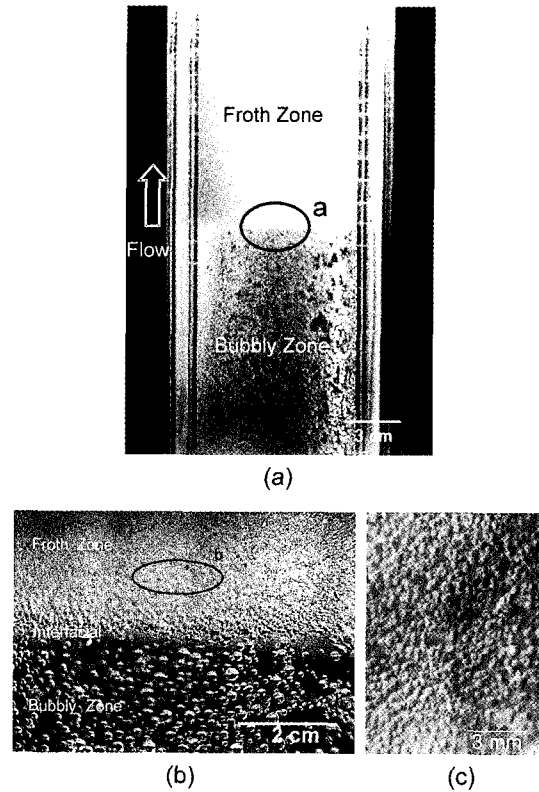


Fig. 2. Photographs of bubble in the flotation system: (a) the shape of froth and bubbly flow in the column, (b) bubbly flow at the part "a", (c) bubble shape at the part "b".

기포유동층보다는 기포층에서 기포 체적비율(Gas Holdup)이 클 뿐만 아니라 기포의 크기가 작아지는 경향이 있다. 실제 본 실험 장치에서 발생하는 기포의 크기는 약 0.5 mm 정도로서 소수성 입자와 친수성 입자의 분리효율을 향상시키는데 매우 효과적인 크기의 기포를 생성하는 것으로 분석되었다(이정언 1999). 그리고 Fig. 2(c)는 Fig. 2(b)의 "b" 부분을 확대하여 나타낸 것으로, 기포층을 형성하는 기포의 형상은 매우 균일할 뿐만 아니라 기포의 크기도 균일하여 소수성 입자와의 부착 효율을 증대시킬 수 있다.

이와 같이 부유분리장치에서 형성된 기포가 소수성 입자와 부착하여 컬럼의 상부로 원활하게 이동하기 위해서는 기포의 크기, 상승속도, 그리고 컬럼내에서 기포의 체적비와 같은 변수에 의해 크게 좌우된다. 부유선별에 있어 영향을 미치는 이와 같은 요소에 대한 연구는 Dobby(1988), Finch(1991) 등에 의해 상당히 진행

된 바 있을 뿐만 아니라 향류컬럼부유분리장치에서의 연구는 이정연(1999)에 의해 최적의 조건을 도출한 바가 있다.^{13),14),7)} 따라서 본 연구는 미세기포를 발생시킨 상태에서 혼합입자인 석탄회의 크기와 미연탄소 함량비에 따른 분리특성을 평가하여 최적의 조건을 도출하고자 하는 것이다.

3.2. 석탄회의 크기분포 특성

Fig. 3은 석탄회 입자의 형상을 전자현미경으로 촬영하여 나타낸 것인데, 형태학적으로 크게 두 종류의 입자가 분포되어 있다. "A"로 표시된 입자는 형상이 구형이면서 입자의 크기가 작으며 기포와 부착하지 않는 산화광물 입자인 반면 "B"로 표시된 입자는 형상이 비구형이면서 입자의 크기가 크고 기포와의 부착 특성이 큰 미연탄소 입자이다. 이정연(1999)에 의한 연구 결과에 따르면 미연탄소 입자의 질량중양직경은 $76.52\mu\text{m}$ 이며 산화광물 입자의 질량중양직경은 $12.19\mu\text{m}$ 로 분석되

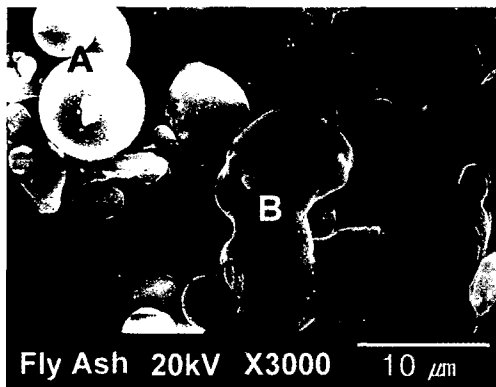


Fig. 3. Scanning electron micrograph(SEM) of the fly ash: (a) part "A" illustrates unburned carbon particle, (b) part "B" illustrates mineral particle.

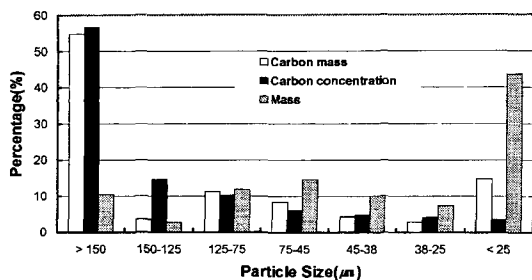


Fig. 4. Carbon concentration and mass fraction as a function of size distribution.

었다.¹⁾ 기포는 소수성 입자에 부착하여 석탄회에서 소수성 입자를 분리하는 것이므로 소수성 입자의 함량 비율은 분리효율에 큰 영향을 미친다.

Fig. 4는 삼천포 화력발전소 전기 집진기 1단 하부에서 포집하여 본 연구의 분리 실험실에 사용된 석탄회를 습식 체가름법에 의해 분석한 것으로, 석탄회에 함유되어 있는 미연탄소의 함량비를 입자의 크기별로 분석하여 나타내었다. Mass는 총 석탄회 질량 중 해당 입도 범위내에서 점유하는 비율을 의미하며 Carbon Mass는 Mass중에서 미연탄소 입자가 차지하는 비율을 의미한다. 따라서 $150\mu\text{m}$ 이상의 입자는 총 석탄회 중 약 10%를 차지하며, 이 중 미연탄소 입자는 약 55%를 차지하고 있다. 반면 입자의 크기가 $25\mu\text{m}$ 이하인 경우, 총 석탄회 중 약 45% 이상을 차지하며 이때 미연탄소가 차지하는 비율은 약 5% 정도이다. 즉 석탄회는 입자의 크기가 클수록 미연탄소의 함량이 증가하는데 이는 이정연(1999)의 연구와 유사한 경향을 보이고 있다.¹⁵⁾ 입자의 크기와 미연탄소의 함량비에 따른 분석 특성을 분석하기 위해 입자의 크기와 미연탄소 함량비와의 관계는 매우 중요하다.

3.3. 미연탄소 함량에 따른 분리특성

Fig. 5는 포수제 투입량의 변화에 따라 미연탄소 함량(LOI)이 7, 11, 20%인 석탄회에 대한 분리 실험 결과를 나타낸 것이다. 이때 포수제의 투입량을 0에서 12 l/ton-fa까지 변화시키면서 회수된 각 석탄회에 대한 미연탄소의 함량 변화를 관찰하였는데, Fig. 5(a)는 컬럼의 상부측에서 회수한 고탄소석탄회에 대하여 미연탄소 함량 변화를 분석한 것이며 Fig. 5(b)는 컬럼의 하부측에서 회수한 정제석탄회를 분석한 결과이다. 컬럼의 상·하부측에서 회수한 정제석탄회와 고탄소 석탄회의 미연탄소에 대한 분리특성을 미연탄소 함량별로 나타낸 결과에 따르면, 포수제의 투입량 증가에 따라 고탄소석탄회는 미연탄소 함량이 증가하는 반면 정제석탄회는 감소하는 경향이 있다. 즉 최초 미연탄소 함량이 20%인 석탄회를 분리할 때, 고탄소석탄회는 포수제의 투입량이 증가함에 따라 미연탄소의 함량이 20%에서 미연탄소 함량이 75%로 증가하는 반면 정제석탄회는 18%에서 약 1.5% 정도로 감소되어 뚜렷한 분리 현상을 관찰할 수 있었다. 그런데 원시료의 석탄회의 미연탄소 함량이 20%일 때보다 7%일 때 정제석탄회의 미연탄소 함량이 낮게 나타난 것으로 분석되었는데, 이는 원시료의 석탄회에 함유되어 있는 미연탄소의 함량 정도가 분

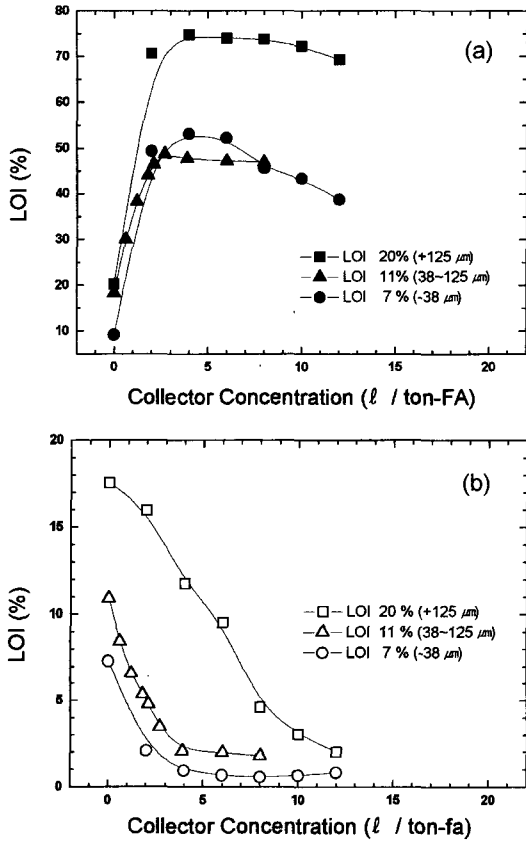


Fig. 5. Test results of carbon contents(LOI) as a function of collector concentration: (a) froth side, (b) tail side.

Table 1. Separation results as a function of unburned carbon concentration

Feeding Ash		Collector Concentration (l/ton-fa)	Recovery of UC (%)	Recovery of Mineral (%)	Separation Efficiency (%)
UC ^a (%)	Mineral (%)				
7	93	0	25.6	78.8	4.5
		4	88.4	94.0	82.3
		8	91.3	92.8	86.1
11	89	0	13.8	91.9	5.7
		4	84.2	89.0	73.2
		8	86.3	92.7	78.96
20	80	0	27.3	93.2	20.4
		4	57.0	94.4	51.4
		8	81.9	92.8	74.7

^a Unburned Carbon

리특성에 중요한 인자로 작용하고 있음을 나타낸다.

Table 1 과 Fig. 6 은 미연탄소 함량이 각각 7, 11,

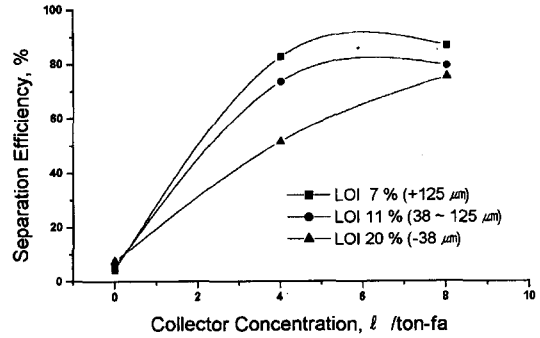


Fig. 6. Variation of separation efficiency as a function of collector concentration for different carbon contents(LOI) at the fly ash.

20% 인 원시료 석탄회에 대하여 포수제 투입량을 0, 4, 8 l/ton-fa로 변화시키면서 분리 실험을 수행하여 회수한 정제석탄회와 고탄소석탄회에 대하여 회수율과 뉴턴 분리효율로 나타낸 것이다. Table 1 은 원시료 석탄회의 분리 실험 후 분석한 회수율과 분리효율을 나타낸 것으로 원시료 석탄회의 미연탄소 함량이 7%이고 포수제 투입량이 8 l/ton-fa인 경우 정제석탄회의 회수율은 92.8%이고 고탄소석탄회의 회수율은 91.3%로 분석되었으며, 이때의 분리효율은 86.1%로 분석되었다. 반면 원시료의 미연탄소 함량이 20%이고 포수제 투입량이 8 l/ton-fa일 때 정제석탄회의 회수율은 81.9%이고 고탄소석탄회의 회수율은 74.7%로 나타났으며, 이때의 분리효율은 74.7%로 분석되었다. 위의 두 경우에서 포수제의 투입량 조건을 동일하게 한 상태에서 분리효율을 분석한 결과 미연탄소 함량이 적은 경우 분리효율이 높은 것으로 파악되었다. Fig. 6 은 미연탄소 함량이 7, 11, 20%인 석탄회에 대해 포수제의 투입량 변화에 따른 분리효율을 나타낸 것이다. 우선 포수제의 투입량이 증가할수록 분리효율은 증가하며 원시료의 미연탄소 함량이 증가할수록 분리효율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉 포수제 투입량을 4 l/ton-fa로 일정하게 한 조건에서 미연탄소 함량이 7, 11, 20%인 원시료 석탄회의 분리효율은 82.3, 73.2, 51.4%로 감소하는데, 분리하고자 하는 석탄회의 미연탄소 함량이 많을수록 분리효율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 원시료 석탄회에서 소수성 입자인 미연탄소 함량이 증가할수록 분리효율이 저하되는데, 그 이유는 기포와 부착하여 컬럼의 상부로 이동하는 소수성입자의 분포 함량이 증가하였기 때문이며, 미연탄소 입자에 부착되어 있는 미세한 산화광물 입자의

영향 때문이다. 따라서 미연탄소 입자를 부선 시키더라도 그 입자에 함유되어 있는 산화광물질의 함유량 때문에 효율은 상대적으로 감소하는 경향이 나타나는 것이다.

소수성 입자가 액중에서 기포와 부착효율을 증대시키기 위해서는 우선 소수성 입자의 표면에 소수성 특성을 강화하기 위해 포수제를 이용하여 소수성 코팅(Hydrophobic coating)을 강화하여야 할 필요성이 있을 뿐만 아니라 기포 투입량을 증대시켜야 한다. 따라서 미연탄소 함량 20%인 석탄회에 대한 분리효율을 향상시키기 위해서는 포수제의 투입량을 증가시키고 기포의 발생량을 증가시켜야 함을 예측할 수 있다. 또한 Fig. 5에서 살펴본 바와 같이 석탄회의 미연탄소 함량과 입자의 크기와는 밀접한 관계가 있다. 즉 석탄회의 입자가 클수록 미연탄소 함량은 큰 반면 입자의 크기가 작을수록 미연탄소 함량은 적다. 따라서 입자의 크기 또한 석탄회 분리에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 예측할 수 있다.

3.4. 입도분포에 따른 분리효율

입도변화에 따른 분리효율을 파악하기 위해 석탄회를 체가름법으로 38 μm 이하, 38~125 μm 그리고 125 μm 이상의 3부분으로 분급한 다음 각 석탄회에 대하여 입도분포측정장치(Malvern, Mastersizer)를 이용하여 질량중양직경(Mass Median Diameter; MMD)을 측정하였는데, 38 μm 이하의 분급 석탄회 경우 질량중양직경은 23 μm 이었으며, 38~125 μm 의 분급 석탄회는 95 μm , 그리고 125 μm 이상 분급 석탄회는 190 μm 로 분석되었다. 이에 각 분급 석탄회의 미연탄소 함량은 각각 3.6, 9, 31.3%로 측정되었다. Fig. 7은 이들 각 분급된 석탄회에 대하여 포수제의 투입량을 0, 4, 8 l/ton-fa 투입한 후 분리실험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 포수제의 투입량이 0 l/ton-fa일 때 소수성 입자인 미연탄소 성분의 회수율(RUC)은 분급 석탄회의 입자 크기가 23 μm 인 경우 53.5%인 반면 190 μm 인 경우에는 13%로 상당히 감소하였다. Fig. 7(b)와 (c)에서 포수제 투입량을 4와 8 l/ton-fa으로 증가하였을 때도 마찬가지로의 결과를 얻었는데, 포수제 투입량이 4 l/ton-fa일 때 미연탄소 성분의 회수율(RUC)은 분급 석탄회의 입자의 크기가 23 μm 인 경우 79.1%인 반면 190 μm 인 경우에는 48%로 감소하였다. 또한 포수제 투입량이 8 l/ton-fa일 때 미연탄소 회수율(RUC)은 입자의 크기가 23 μm 인 경우 81.8%인 반면 190 μm 인 경우에는 53%로 감소한 결과를 도출할 수 있었다. 즉 석탄회 분리 특성

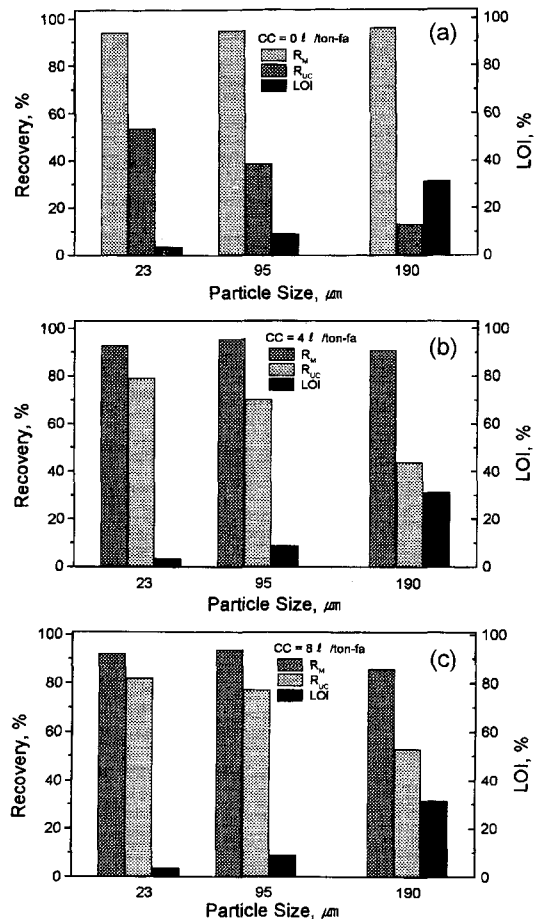


Fig. 7. Recovery of unburned carbon and mineral from the fly ash using the column flotation: (a) CC=0 l/ton-fa, (b) CC=4 l/ton-fa, (c) CC=8 l/ton-fa.

은 포수제 투입량의 변화에 따라 석탄회 입자의 크기가 작을수록 분리 효과가 향상되었다.

Fig. 8은 석탄회 분리에 영향을 미치는 것으로 분석된 포수제의 투입량에 따른 석탄회 입자의 크기에 따른 분리효율(Separation Efficiency)을 나타낸 것이다. 포수제를 투입하지 않은 경우와 투입량을 4, 8 l/ton-fa으로 한 경우, 입자의 크기가 증가함에 따라 효율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 예를 들어 포수제 투입량이 8 l/ton-fa로 하였을 때 질량중양직경이 23 μm 와 190 μm 인 각 석탄회의 분리효율은 각각 74%와 39%로 분석되었다. Fig. 4에서 분석한 바와 같이 석탄회 입자 중 크기가 작을수록 전체 석탄회 중 많은 양을 차지하지만 미연탄소 함량이 상대적으로 줄어들음을 알 수 있다. 결국

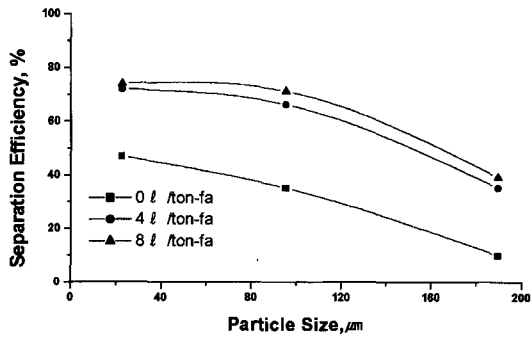


Fig. 8. Variation of separation efficiency as the different particle size.

입자 크기는 부유선별법에 의한 분리효율에 영향을 미치는데, 입자의 크기가 작을수록 분리효율이 향상되는 경향이 있다. 그 이유는 석탄회 입자의 크기 분포가 작을수록 소수성 입자가 차지하는 비중이 작아지므로 기포에 부착시켜야 할 미연탄소 입자의 양이 줄어들기 때문에 상대적으로 효율은 향상하는 것으로 분석할 수 있다. 그런데 입자의 크기가 10 μm이하로 매우 작아지게 되면 입자에 작용하는 관성력이 감소하고 기포와의 충돌력은 떨어진다. 이에 따라 입자의 표면에 있는 수화층(Hydrate Film)의 파괴 현상이 줄어들어 기포와의 부착현상을 저하시키기 때문에 오히려 분리효율이 감소하는 경향이 발생하는 것이다.

4. 결 론

부유선별법(Flotation)에서 혼합입자인 석탄회의 분리에 미치는 영향은 액중에 발생하는 기포의 특성과 공급되는 입자의 특성으로 분석되었다. 향류컬럼부유분리장치를 이용하여 기포의 특성을 평가한 후 혼합입자의 크기 및 미연탄소함량이 분리효율에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 향류컬럼부유분리장치(Counter-current Column Flotation System)에서 발생된 기포의 크기는 약 0.5 mm 정도로 기포의 형상이 완전한 구형이며, 컬럼 내에서 기포유동층(Bubbly Zone)과 기포층(Froth Zone)을 형성하였다. 공급된 혼합입자중 소수성인 미연탄소 입자는 기포층에서 기포와 부착하여 기포와 더불어 상부로 이동하였다.
2. 석탄회에서 입자의 크기와 미연탄소 함량과의 관계를 분석한 결과 입자의 크기가 클수록 미연탄소

함량비가 증가함을 알 수 있었다. 즉 크기가 150 μm 이상인 입자의 경우 미연탄소 함량은 약 55% 인 반면 크기가 25 μm이하인 입자의 경우 미연탄소가 차지하는 비율은 약 5% 정도로 분석되었다.

3. 미연탄소의 함량 변화에 따라 분리효율을 분석한 결과 미연탄소 함량이 감소할수록 분리효율이 증가하였다. 즉 포수제 투입량을 8 l/ton-fa로 일정한 상태에서 미연탄소 함량이 7%인 경우, 분리효율이 86%인 반면 미연탄소함량이 20%인 경우 분리효율은 74%로 분석되었다. 즉 소수성인 미연탄소 입자의 함량이 증가할수록 필요 기포량의 증가를 수반하지 않을 경우 효율은 감소한다.
4. 석탄회 입자의 크기 변화에 따른 분리특성을 분석한 결과 입자의 크기가 작을수록 분리효율이 향상되었다. 즉 포수제 투입량이 8 l/ton-fa인 상태에서 질량중양직경이 23 μm인 석탄회의 분리실험 수행 결과 분리효율이 74%인 반면, 질량중양직경이 190 μm인 경우 39 %로 분석되었다. 이는 입자의 크기가 작을수록 기포와의 부착능이 향상될 수 있을 뿐만 아니라 소수성인 미연탄소 입자가 감소하기 때문에 효율이 향상되는 것이다.

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. 이정연, 안영철, 김성찬, 구재현, 나성수, 신진혁, 이재근: "부유분리법에 의해 분리한 정제석탄회와 고탄소석탄회의 특성", 한국자원리싸이클링학회지, 8(4), pp.11-19 (1999).
2. A. M. Gaudin : "Flotation", McGraw-Hill, New York, pp. 338-355 (1957).
3. V. I. Klassen : "An Introduction to the Theory of Flotation", Butterworths, London, pp.69-88 (1963).
4. R. H. Yoon : "Microbubble Flotation", Minerals Engineering, 6, pp.619-630 (1993).
5. J. B. Yianatos, J. A. Finch, G. S. Dobby and M. Xu : "Bubble Size Estimation in a Bubble Swarm", Journal of Colloid and Interface Science, 126, pp.37-44 (1987).
6. G. S. Dobby, J. B. Yianatos, J. A. Finch : "Estimation of Bubble Diameter in Flotation Column from Drift Flux

- Analysis", Canadian Metallurgical Quarterly, 27, pp.85-90 (1988).
7. 이정언, 이재근 : "역류형 컬럼 부선기를 이용한 석탄회 정제에 관한 연구", 한국자원리싸이클링학회지, 8(5), pp.51-58 (1999).
 8. 안양규, 양정일 : "비산화로부터 회수한 미연탄소분의 물리·화학적 특성", 한국자원리싸이클링학회지, 7(1), pp.14-19 (1998).
 9. G. H. Luttrell, M. J. Mankosa, R. H. Yoon : "Commerical Development of the Microcell Column Flotation", in Proceeding of the 8th Korea/U.S. Joint Workshop on Coal Utilization Technology, 6, pp. 45-53, (1991).
 10. 한국공업규격, KS L 5405 : "플라이 에시" (1992).
 11. 이영진 : "분체분급기술메뉴얼", 일본분체공업기술협회, p.55-60 (1996).
 12. L. R. Flint : "Factors Influencing the Flotation Cell Design", Mineral Science Engineering, 5, pp.232-243 (1973).
 13. J. A. Finch, G. S. Dobby : "Column Flotation", Pergamon Press, pp.1-36 (1990).
 14. G. S. Dobby, J. A. Finch : "Particle Collection in Columns-Gas Rate and Bubble Size Effects", CIM Bulletin, 9, pp.430-438 (1986).
 15. 이정언, 이재근 : "석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회 특성과 형성 분석에 관한 연구", 한국에너지공학회지, 7 (1), pp.146-156 (1998).
 16. 이재근, 김성찬, 손낙원, 김두현, 오정근 : "마찰대전 정전 분리를 이용하여 석탄회에 함유된 미연탄소분 제거에 관한 연구", 한국자원리싸이클링학회지, 6(3), pp.15-21 (1999).



李 靖 彦

- 공학박사
- 환경기계전공
- 부산대학교 환경기술·산업개발연구소 근무



李 在 瑾

- 공학박사
- 환경유체전공
- 부산대학교 기계공학과 부교수

《영문학회지 발간》

당 학회에서는 2000년도부터 영문학회지를 4개학회(한국자원리싸이클링학회, 한국자원공학회, 한국암반공학회, 한국지구물리탐사학회)공동으로 발간합니다. 회원여러분의 많은 관심과 참여를 바라며 영문원고를 학회 사무국으로 제출하여 주시기 바랍니다.