

발전용 석탄의 연소전 탈황탈회 처리시스템 설계를 위한 기초연구

최우진 · 정진도* · 지평삼*

한국자원연구소, *한국전력공사 기술연구원

Preliminary Study on Precombustion Cleaning for Coal-fired Utility Plants

Woo Zin Choi, Jin Do Chung* and Pyung Sam Ji*

Korea Institute of Geology, Mining & Materials

**Korea Electric Power Corporation, Research Center*

요 약

본 연구에서는 자력 및 정전기 선별법에 의한 발전용 석탄의 연소전 탈황탈회 가능성 조사를 미국 PETC와 공동으로 수행하였다. 정전기 선별법에 의한 석탄의 탈황실험은 국내무연탄 및 미국 유연탄 시료를 대상으로 수행하였으며, 본 선별법은 석탄으로부터 유황을 함유하는 광물은 물론 회분을 제거하는데 매우 효율적임을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 고강도 자력선별기를 이용하여 국내무연탄에 대한 전식자력선별 가능성을 검토하였다. 삼척 및 동원탄광 시료에 대한 입도별 2단계 선별실험을 수행하였으며, 본실험 결과 동원탄광 시료가 삼척탄광 시료보다 회분제거가 용이하였으며 유황분의 경우는 두시료 모두 40~50% 제거가 가능하였다. 기초실험을 통하여 향후 발전용 석탄의 연소전 탈황탈회처리시스템 개발에 필요한 기초자료를 제시하였다.

Abstract—This paper will discuss some of the technical aspects of the precombustion coal cleaning techniques, such as triboelectrostatic and magnetic separation. The triboelectrostatic separation, which is based on charging dielectric particles selectively, was studied for upgrading Korean anthracite and U. S. bituminous coal in cooperation with Pittsburgh Energy Technology Center (PETC). The results obtained on Korea coal and Illinois No.6 coal show that both ash and pyritic sulfur rejection were excellent, but the carbon recovery was relatively poor compared to wet processes. High-intensity magnetic separation was also conducted on Korean anthracite by using a Rare Earth(RE) roll magnetic separator. The result show that a substantial portion of the pyritic sulfur was removed from Samchuck and Dongwon coal samples using RE roll magnetic separator (sulfur removal ratio 40~50%). The fundamental information obtained in this study will be useful not only for improving coal cleaning efficiencies but for promoting the utilization of low quality coals to the utility plants.

1. 서 론

석탄은 공급의 안정성에서 뿐만아니라 중장기적으로 경제성이 우수한 에너지원으로 알려져 있으며, 또한 세계 1차 에너지 공급의 거의 30%를 점하고 있어서 국제적으로나 국내적으로 상당히 중요한 위치를 차지하고 있다. 최근 석탄이용을 둘러싼 여건은 커다란

변화를 보이고 있는데, 에너지 수요, 특히 석유수요의 확대, 산성비 및 지구 온난화등 지구환경 문제에 대한 세계적인 관심의 고조, 그리고 석탄전환을 포함한 석탄이용 기술의 진보등으로 세계 각국은 석탄의 이용 확대에 대한 기대가 매우 큰 실정이다.

그러나 석탄의 이용확대에 가장 큰 장애는 석탄 연소시에 수반되는 여러가지 공해문제 들이며, 이 문

제를 해결하기 위해 선진 각국에서는 청정석탄이용 기술(Clean Coal Technology, CCT) 개발에 관한 연구를 활발히 진행중에 있다. 이 CCT 기술은 연소전 처리법, 연소중 처리 및 연소후 처리법등으로 분류할 수 있는데, 연소후 처리법의 대표적인 예로는 화력발전소의 배연탈황설비(Scrubber)를 들 수 있다. 연소전 처리 기술은 물리적 또는 화학적인 처리법을 이용하여 석탄으로부터 유황분 및 회분을 제거한 후 공해없는 석탄을 사용하는 기술로써 처리비용이 연소후 처리법에 비해 3배 이상 저렴한 것으로 알려져 있다. 이와같이 최근에는 석탄에 회분이 2% 이하, 그리고 유황분이 매우 적은 Superclean Coal 또는 Ultraclean Coal 생산을 위해 종래의 석탄전처리(Coal Cleaning) 기술을 대폭 개선한 Advanced Coal Cleaning 기술개발에 선진 각국에서는 많은 노력을 기울이고 있다.

우리나라의 경우 석탄화력 발전의 설비중설로인해 향후 10년간 발전용 유연탄의 사용량이 대폭적으로 증가될 것으로 예상되고 있다. 그러나, 석탄화력 발전소의 대기오염 배출허용 기준은 SO_2 의 경우 현재의 700 ppm에서 1999년 까지 270 ppm으로 크게 강화될 전망이다. 따라서 기존 화력발전소에서는 대기오염 배출허용기준 강화에 대처하기 위해 배연탈황시설의 설치등 환경설비의 보강을 검토하고 있으나 환경설비의 추가설치에 따른 공간확보가 매우 어려운 문제로 대두되고 있다. 석탄은 직접연소에 의해서 또는 가스화나 액화로 변화시켜서 이용할 수 있으나, 석탄의 효과적인 활용은 석탄의 고유특성과 처리과정에 커다란 영향을 받고있다. 즉, 석탄으로부터 회분 및 유황분을 연소전에 미리 제거하므로써, 발열량의 증가와 안정화를 이룰수 있으며, 또한 회분등의 감소로 보일러에 있어서 열효율의 향상을 기대할 수 있다. 또한 회분을 구성하고 있는 광물등을 미리 제거하므로써 수송 및 파쇄 비용의 절감과 연소시 황산화물(SO_x)의 발생을 감소 시키므로써 배연탈황 시설의 설치 비용의 절감이 가능하다. 그 밖에도 전처리 과정을 통하여 석탄의 가스화 및 액화에 영향을 주는 회분이나 석탄의 암석학적 성분(Petrographic composition)을 개선시킬 수 있다. 즉, 석탄 액화의 경우 반응도가 떨어지는 Fusinite나 Semifusinite등의 Intertinites 성분을 미리 제거 하므로써 액화를 촉진시킬 수 있다. 한편 Clean Coal을 이용하여 석탄-물(Coal Water Fuel, CWF) 혼합 연료를 제조할 경우 보다 안정되고 최대한의 석탄입자를 포함한 점도가 낮은 슬러리를 공급할 수 있는 장점이 있다. 우리나라에서는 그동안 발전용 석탄에 대한 연소전처리 기술개발이 체계적으로 이루어지지 못하였으며, 앞으로 석탄을 산업 및 발전용 연료로서

이용을 확대하려면 석탄의 전처리 기술개발은 필수적이며 또한 연료의 최종 가공기능에 부합하는 처리 기술의 개발이 시급히 요망되고 있다.

본 연구에서는 발전용 석탄의 연소전 탈황탈회처리 가능성 검토를 위하여 국내 무연탄 및 미국 유연탄에 대한 건식 정전기선별 및 자력선별 실험을 수행 하였다. 기초 실험을 통하여 향후 저품위 석탄의 확대 사용 가능성 여부 및 건식 탈황탈회 처리기술의 국내 적용에 필요한 기초자료를 제시하였다.

2. 석탄의 건식 정전기 선별

전통적인 선탄기술은 비중차이에 의해 석탄으로부터 회분을 구성하는 광물을 분리제거하였으며 이러한 비중 선별은 주로 물이나 공기등을 이용하여 수행되어 왔다. 그러나, 석탄으로부터 회분을 효율적으로 제거하기 위해서는 미분쇄가 필연적이며 미립석탄의 고품위화를 위해 부유선별법등 습식법을 적용할 경우 탈수 및 건조 등 후처리 문제가 수반되고 있다. 특히 석탄의 경우 탈수등 후처리에 드는 경비가 막대한 것으로 추산되고 있기때문에 최근 석탄의 건식 처리법에 대한 관심이 고조되고 있는 실정이다.²⁾ 석탄의 건식선별법으로 정전기선별(electrostatic separation)을 들 수 있으며 이 방법은 석탄 입자 및 회분을 구성하는 광물 입자간의 전기전도도의 차이를 이용하여 선별할 수 있다. 정전기 선별은 상당히 오랜 역사를 갖고있으나 현재까지 석탄의 경우는 상용화를 이루지 못하였다. 정전기 선별법을 석탄에 적용할 경우 주로 황철석뿐만 아니라 회분을 구성하는 광물의 분리 제거가 가능한 것으로 알려져 있다. 정전기 선별법은 자력선별법보다 전력 소모가 적은 장점이 있으나 처리능력이 작거나 작업 조건등이 까다로운 단점이 있다. 비록 효율적인 선별을 위해서는 석탄 시료는 분쇄 및 건조단계를 우선적으로 거쳐야 하나 발전소에서 연소직전에 정전기 선별을 수행할 수 있다면 탈수, 건조 공정등으로 인한 부수적인 비용의 절감이 가능하다.

정전기선별의 원리는 크게 다음 3가지로 알려져 있다.³⁾

1. 코로나 방전형 (charging by ion or electron bombardment)
2. 전 유도형 (charging by conductive induction)
3. 마찰하전형 (charging by contact or friction)

코로나 방전형의 경우 가는 금속선 등을 이용하여 코로나 방전을 일으켜서 양도성 입자는 방전된 음극 이온이나 전자에 의해 전기적으로 중성이 되는 반면에

절연성 입자는 양극으로 하전된 물체에 흡착되어 상호분리가 가능케 된다. 정전 유도형의 경우는 양도성 입자가 전기장(electric field)에 투입이 되면 분극이 된후 접지된 양도체 (grounded conductor)에 접촉이 되므로써 하전되어 입자가 양도체(conductor)로부터 정전기적으로 반발력을 갖게 된다. 반면에 절연성 입자는 하전이 안된채로 중력에 의해 분리가 된다. 이 방법은 특히 중사로부터 양도체 광물인 금홍석이나 일메나이트등을 회수하는데 이용되고 있다. 마지막으로 마찰 하전형의 경우 성질이 다른 두 절연성(dielectric) 광물을 서로 접촉 마찰을 시킨후 분리시켰을때 한 광물은 양극으로 다른 하나는 음극으로 하전된다. 따라서 이렇게 하전된 입자를 전기장(electric field)에 유입시키므로써 상호분리가 가능케 된다.^{3,4,5} 이와같은 원리를 이용한 건식 정전기 선별법을 Triboelectrostatic separation이라고 불리고 있으며 미국 Pittsburgh Energy Technology Center (PETC)등을 중심으로 많은 연구가 진행중에 있다.

2-1. 미립석탄의 건식 선별(Triboelectrostatic beneficiation of fine coal)

Triboelectrostatic separation법의 경우 석탄 미립자를 포함한 gas stream을 노즐을 통해 급속하게 일정한 간격으로 배치된 금속 분리판 내에 투입시키므로써 입자와 금속 표면간의 접촉으로 인해 순수한 석탄 입자(organic matter)는 양극으로 하전되며 그와 반대로 회분을 구성하는 입자, 즉 규산염(silicate) 및 황산화물(sulfide) 입자는 음극으로 하전하게 된다. 이와같이

양, 음극으로 하전된 입자들을 고전위 전기장내에 통과시키면 양극으로 하전된 석탄입자는 음극판에, 음극으로 하전된 회분입자는 양극판에 각기 부착하게 된다.^{6,7} 따라서, Triboelectrostatic 방법에 의해 석탄입자와 회분을 구성하는 광물입자간의 하전을 달리 할 수 있으며 분리판(separator plates)을 이용하여 clean coal과 광물들간의 효율적인 분리가 가능하다. Fig. 1은 Triboelectrostatic separation의 개념을 나타낸 것이다. 석탄 선별의 경우, 광물과 유기물질이 상호 반대로 하전이 될뿐만 아니라 입자 표면의 전도도가 낮기 때문에 Triboelectrostatic법이 앞서 지적한 코로나 방전형이나 정전 유도형보다도 훨씬 우수한 선별 효과를 이룰 수가 있다.

Triboelectrostatic 법에 의한 석탄 건식 선별시 선별 효율성 평가는 분리판에서 채취한 각각의 시료를 분석해서 회분함량을 시료 투입구로부터의 거리의 함수로 표시하므로써 선별 효율을 평가한다. 따라서 음극판쪽에 회수된 석탄 정광의 회분 함량은 시료 투입 위치로부터 멀어질 수록 증가하며, 양극판쪽에 회수된 물질의 회분 함량은 시료 투입 위치로부터 멀어질 수록 감소하게 된다.

2-2. 실험방법

본 건식선별실험에서 사용한 시료는 삼척탄좌에서 채취한 시료이며 회분 함량은 46.5%이다. 그밖에 미국 유연탄의 고품위 가능성 검토를 위해 Illinois No. 6 시료에 대해서도 선별 실험을 수행하였다. Illinois No. 6 석탄 시료의 회분 함량은 23.2% 이었다.

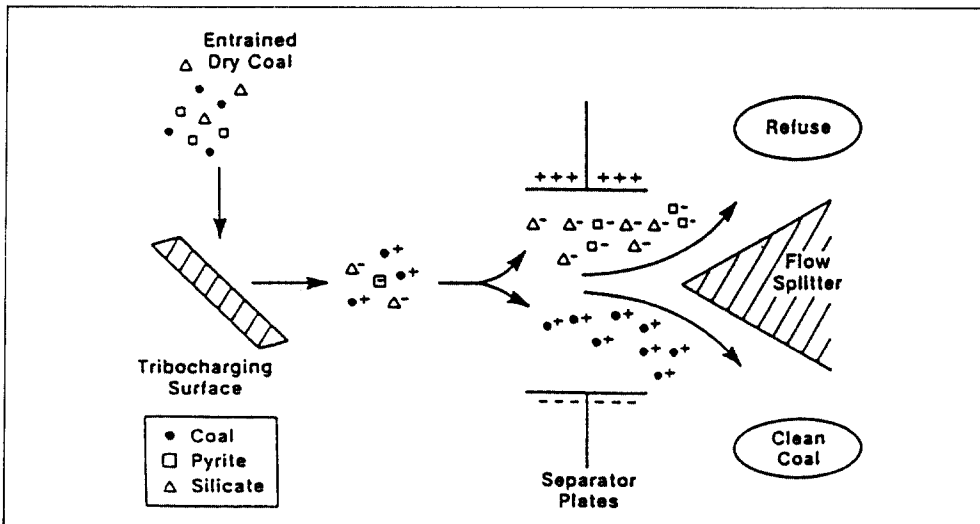


Fig. 1. Schematic of Triboelectrostatic Coal Separation(Finseth et al⁸).

본 실험에서 사용한 전식 선별기는 PETC에서 자체 제작한 것으로서 Fig. 2에서 보듯이 분리판의 크기는 폭과 길이가 각각 48 in.이며 두 분리판의 간격은 약

4인치이다. 또한 분리판의 재질은 동(copper)이며, 석탄 선별의 경우 분리판은 각각 +, -25,000 volts로 하전되어 있다. 시료 투입 노즐은 분리판의 중간에 위치해 있으며 노즐의 단면은 1/8 in. 이며 길이는 4 in.이다. 선별효율은 하전효율(charging efficiency), 하전시간(charge lifetime), 입자의 운반효율(particle transport efficiency) 및 전기장에서의 선별성 등에 크게 좌우된다. 특히, 분리판에 투입되는 공기의 교류상태(degree of turbulence)가 분리판내에 투입되는 입자의 운반효율을 결정 하는데 매우 중요하다.⁹⁾

본 실험에서 사용한 시료의 양은 50 g씩이었으며, 삼척탄좌 시료의 경우 입도 크기는 100 mesh 이하이었으며 Illinois No. 6 시료의 경우 100% 400 mesh 이하였다.

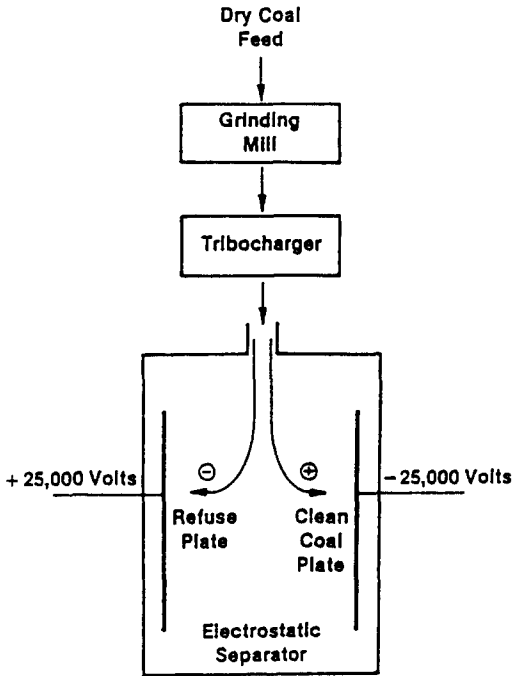


Fig. 2. Flowsheet of Triboelectrostatic Separator(PETC).

2-3. 실험결과

Fig. 3은 삼척탄좌 시료의 Triboelectrostatic separation 후 분리판의 위치별 정탄 및 폐기물의 양 및 회분분석 결과를 나타낸 도표이다. 석탄 입자는 앞서 지적 하였듯이 Triboelectrostatic charging 후 양극으로 하전된 석탄입자는 음극판에, 폐기물(refuse)은 그와반대로 음극으로 하전된 다음 양극 plate에 부착되어 회수된다. 그림에서 보듯이 삼척탄좌 시료는 투입 시료의 약 20%가 분리판의 6 in. 이내에서 회수되었으며 회분함량도 12.3% 이하였다. 그러나 분리판 위치가 6 in. 이 후에서 채취된 시료의 회분함량은 34.8%로 다소 높게

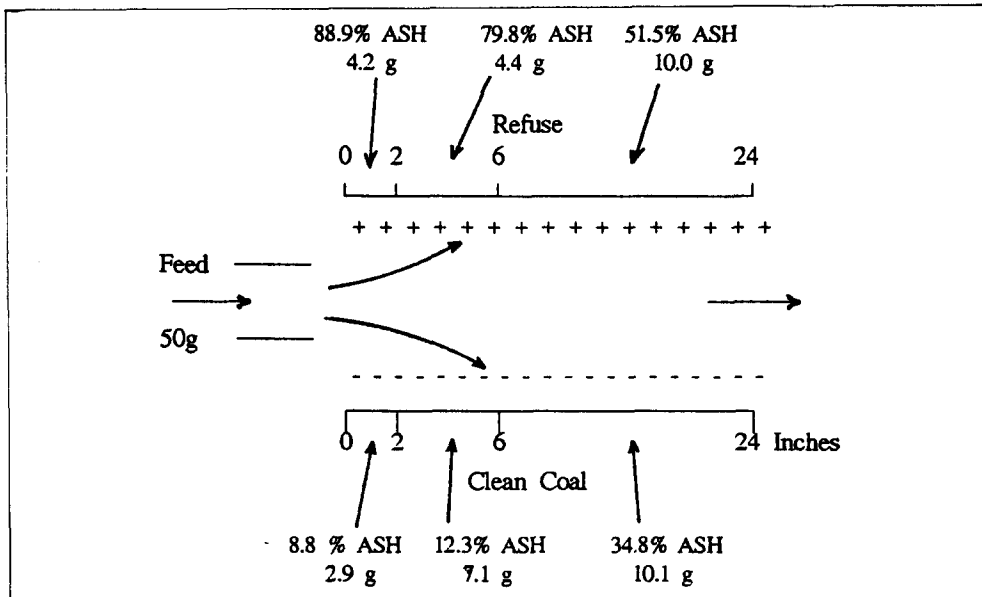


Fig. 3. Triboelectrostatic separation of Samchuck coal samples.

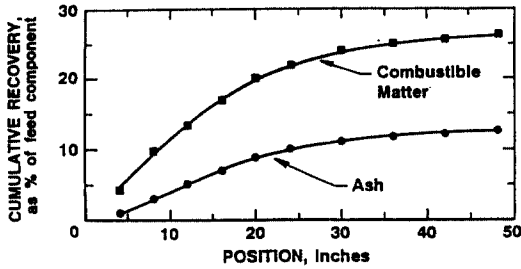


Fig. 4. Cumulative recovery of combustible matter and ash for Samchuck coal sample.

나타났다. 그와 반면에 양극 plate 에서 회수된 refuse의 양도 17%에 이르고 있으며 회분 함량도 80% 이상으로 선별이 매우 효율적으로 이루어 졌음을 알 수 있다.

Fig. 4는 정전기 선별후 삼척 탄좌시료의 누적 회수율과 회분함량에 대한 음극판의 위치 함수로 표시한 것이다. 그림에서 보듯이 연소성 물질(combustible matter)의 총 회수율이 회분의 회수량 보다 2배 이상에 이르고 있으며 어느 분리판의 위치에서 든지 투입 시료의 입자 크기를 더 작게 할 경우 보다 높은 회수율이 가능할 것으로 사료된다. 특히 입자의 크기는 회분을 구성하는 입자의 단체분리에 크게 영향을 줄 뿐만 아니라 입자의 하전효율 및 분리판에 투입시 정전력(electrostatic force)에 대한 입자의 반응에도 커다란 영향을 주기 때문이다.

Illinois No. 6 시료의 경우는 시료 투입 위치로부터 8 내지 10in. 이내의 거리에서 선별이 완벽하게 이루어져 우리나라 무연탄의 경우보다 훨씬 선별성이 우수한것으로 보고 되었다(Finseth et. al). Illinois No. 6 시료에 대한 실험결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 약 70%의 연소성물질 즉, 석탄이 회수되었으며, 회수된 석탄의 회분함량은 약 12%에 불과하였다. 유황분의 경우는 회분에 비해 제거율이 낮았으며, 그 주된 원인은 Illinois No. 6 시료의 경우 유기유황분(organic sulfur)의 함량이 거의 45%에 달하기 때문에 물리적인 방법으로 제거가 용이하지 못하였다.

현재 PETC 에서는 분리판에 부착된 시료의 회수, 공기 주입량 조절 및 분리판의 배치구조에 관한 문제 해결을 위해 연구가 계속되고 있으며, 특히 회수율 향상을 위한 기기 보완문제 해결에 초점을 두고 연구가 계속되고 있다.

2-4. 실험 결과에 대한 고찰

본 실험에서는 국내 무연탄 및 미국 유연탄에 대한 건식 정전기 선별 가능성 조사를 PETC와 공동으로

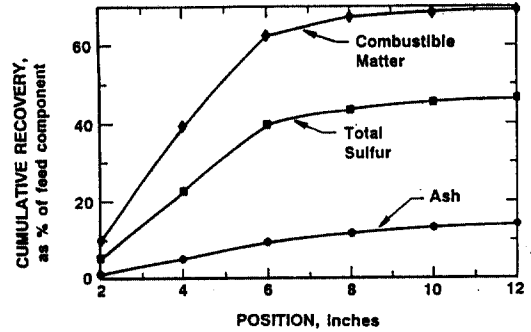


Fig. 5. Recovery of combustible matter, sulfur and ash on the clean coal plate for -400 mesh Illinois No. 6 coal.

수행하였다. 앞서 언급 하였듯이 Triboelectrostatic separation법이 석탄으로 부터 황철석(pyrite)은 물론 규산염광물(silicate minerals) 등을 제거하는데 매우 효율적임을 확인 하였으며, 현재 개발중인 습식 advanced coal cleaning processes에 비해 선별 효율이 떨어지지 않음을 보여주고 있다.

삼척탄좌 시료의 경우 건식 정전기 선별 후 회분이 12% 이내의 정탄회수가 가능 하였으며 유연탄의 경우도 회분이 12% 미만인 정탄회수가 가능 하였다. 앞으로 건식 미분쇄 및 회수율 향상을 위한 기기 보완이 문제점으로 지적이 되었다.

3. 석탄의 건식 고자력 선별(High intensity magnetic separation of coal)

석탄이 반자성체(diamagnetic)인 것은 이미 잘 알려진 사실이며 반면에 석탄에 수반되는 광물, 즉 석영, 점토류, 방해석, 황철석등은 대개 반자성체 이거나 약 상자성체(paramagnetic) 이다.

미국의 경우 지난 30여년 동안 석탄으로 부터 회분을 비롯한 불순물 제거를 위해 고구배 자력 선별법 및 기타 자력 선별법을 적용해 왔으나, 일부의 경우를 제외하고는 좋은 성과를 거두지 못하였다. 따라서 황철석(pyrite)을 비롯한 석탄내에 수반되는 광물의 제거를 위해서는 보다 강력한 자력이 필요하다. Kester(1967) 등은 자력선별법을 이용하여 미국 석탄으로 부터 상당량의 황철석 및 황산염(sulfate) 계통의 유황분을 제거시킬 수 있음을 보여주었다. 고구배 자력선별법은 1970년 초에 개발되었으며 자성이 매우 약한 미립자를 분리하는데 보다 효율적인 것으로 확인 되었다.

고구배 자력선별법(High-gradient magnetic separator,

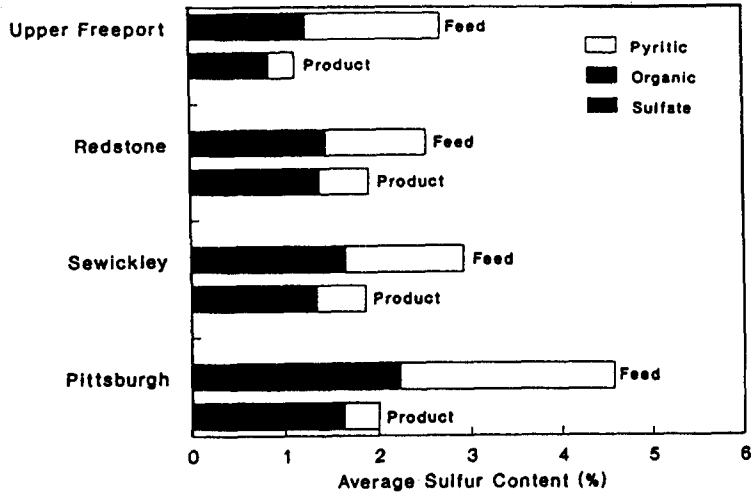


Fig. 6. Sulfur rejection obtained by high-intensity magnetic separation of dry, pulverized coal(Kester et al¹⁰).

HGMS)의 기본 원리는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_s = V \cdot X \cdot H \cdot (dH/dx)$$

위의 식은 x 방향에서 입자에 작용하는 자력(magnetic force)의 크기는 입자의 부피(volume, V), 대자율(volume susceptibility, X), 자장의 세기(field intensity, H) 및 자장의 구배(field gradient, dH/dx)에 비례한다. 따라서 반자성체의 미립자는 H 및 dH/dx를 증가 시킴으로써 보다 효율적으로 분리 시킬 수 있다.

전식 HGMS법은 그동안 여러 종류의 석탄(회분함량 10~28%, 유황분 6.5% 미만) 선별에 폭넓게 적용해 왔으며 황철석(pyrite)의 경우 14%에서 94%, 회분의 경우 15%에서 85% 정도 제거가 가능 하였다. 그러나 제거율이 높은 경우는 열량 회수율이 매우 낮았으며, 그 이유로는 적은양의 상자성 물질을 함유하는 복합 입자가 제거 되었기 때문인 것으로 알려져 있다. 특히 HGMS법의 경우 큰 입자에 미세한 입자가 부착되므로 선별효율을 저하 시키는 것이 문제점으로 지적 되고 있으며, 따라서 미세한 크기의 입자는 처리전에 미리 제거 해야하는 단점이 있다. Fig. 6은 미국 동부 탄에 대한 전식 HGMS법을 적용하여 유황분 제거에 대한 실험 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 석탄중에 함유된 무기질유황(pyritic sulfur)의 제거율이 비교적 높음을 알 수 있다.

본 연구에서는 미국 Eriez Magnetics 사가 개발한 High-intensity Rare Earth Roll 자력 선별기를 이용하여 국내 무연탄에 대한 전식 자력선별 가능성 조사를 수행 하였다.

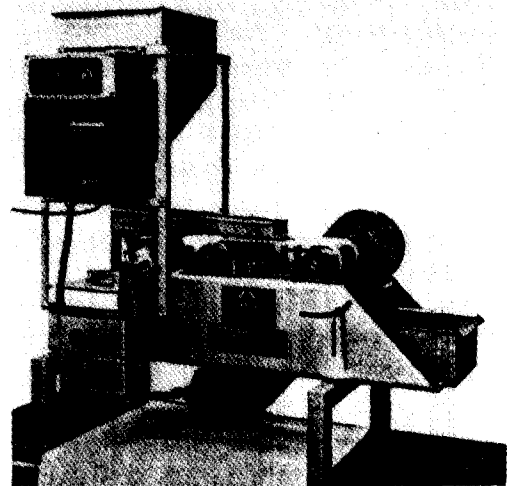


Fig. 7. Rare Earth Roll Magnetic Separator.

3-1. 실험방법

본 실험에서 사용한 시료는 삼척탄좌 및 동원탄광 시료이며 삼척탄좌 시료의 경우 회분 및 유황분이 52.5% 와 1.85% 이었으며, 동원 시료의 경우 각각 45.64% 및 0.41% 이었다. 본 실험에서 사용한 자력 선별기는 실험실용 Rare Earth(RE) Roll Dry High Intensity magnetic separator 이며 앞서 언급 하였듯이 미국 Eriez Magnetics 사가 최근 개발한 것으로서, 전통적인 자력 선별기, 즉 Low intensity dry drum separator 또는 High intensity induced magnetic separators로 분리가 쉽지 않던 약자성 물체 및 미립자에 대해서도 분리효율이 우수한 것으로 보고되고 있다.

Table 1. Results of Rare Earth Roll Tests on Samchuck Coal samples.

Size Fraction	Products	Wt(%)	Assay(%)		Distribution(%)	
			F.C	S	F.C	S
-6 mm	Pr. Mags.	9.5	26.14	3.65	9.9	14.7
	Sec. Mags.	4.1	25.04	4.94	4.1	8.6
	Non. Mags	86.4	27.76	2.10	86.0	76.7
Total		100.0	27.50	2.36	100.0	100.0
-1 mm	Pr. Mags.	13.5	29.35	3.30	9.8	28.1
	Sec. Mags.	10.2	28.79	2.86	7.3	18.4
	+0.3mm Non. Mags.	76.3	43.79	1.11	82.9	53.5
Total		100.0	40.31	1.58	100.0	100.0

Fig. 7은 본 실험에서 사용한 Single-roll RE Roll separator 이다. 본 자력 선별기에 부착된 롤의 크기는 직경과 폭이 각각 2.9 및 5 in. 이며 nonmagnetic tail pulley, 벨트 및 Adjustable splitter등이 장착 되어있다. 시료는 Eriez electromagnetic vibratory를 이용하여 벨트에 투입되며 시료의 유입량을 정확하게 조절할 수 있다. 자력선별기에 부착된 롤의 속도는 조절 가능하며 처리 하고져 하는 물질에 따라 롤의 수가 1개인 것부터 3개가 장착 된것등이 있으며, 이들의 처리능력은 시간당 10톤 까지 가능하다.

본 실험에서는 원탄 시료를 우선 6 mm 이하로 분쇄한 후 -6 + 1 mm 및 -1 + 0.3 mm 시료를 각각 준비한 후, 각 입도별 시료에 대해 2단계 자력선별 실험을 수행 하였다. 본 실험에서 얻어진 1차 및 2차 자성(magnetic)산물, 비자성(nonmagnetic) 산물에 대해 회분 및 유황 분석을 수행 하였다.

3-2. 실험결과

삼척탄좌 시료에 대한 입도별 자력선별 결과는 Table 1에 나타나 있다. 표에서 보듯이 -6 + 1 mm 산물에 대한 자력선별 후, 즉 1차 및 2차 자성산물의 유황 함량이 3.65% 및 4.94%를 보여주고 있으며 이는 원탄 시료의 유황함량 1.85%와 비교할때 무기질유황(pyritic sulfur)의 상당 부분이 제거된 것으로 사료된다. 그러나 자력선별 후 회수된 1차 및 2차 자성 산물과 비자성 산물의 F.C 함량에는 큰 차이가 없음을 보여주고 있으며 비자성 산물의 고정탄소(fixed carbon, F.C.) 회수율은 86%에 이르고 있음을 알 수 있다.

삼척탄좌 -1 + 0.3 mm 시료의 경우 2단계 자력선별 실험 수행후 비자성 산물의 유황 함량이 1.1%까지 낮아졌으며, F.C 함량도 1차 및 2차 자성산물에 비해 43.8% 까지 향상 되었다.

Table 2. Results of Rare Earth Roll Tests on Dongwon Coal samples.

Size Fraction	Products	Wt(%)	Assay(%)		Distribution(%)	
			F.C	S	F.C	S
-6 mm	Pr. Mags.	20.2	19.47	0.91	8.9	29.8
	Sec. Mags.	4.3	24.92	0.57	2.4	4.0
	Non. Mags	75.5	51.69	0.54	88.7	66.2
Total		100.0	44.03	0.62	100.0	100.0
-1 mm	Pr. Mags.	19.6	26.28	0.54	9.7	33.7
	Sec. Mags.	14.4	37.92	0.43	10.4	19.7
	+0.3mm Non. Mags.	66.6	63.32	0.22	79.9	46.6
Total		100.0	52.76	0.31	100.0	100.0

실험 결과에서 알 수 있듯이 삼척탄좌 시료의 경우 황철석 입자의 제거에는 본 자력선별법이 상당한 효과가 있는 것으로 사료되나 반면에 회분을 구성하는 광물입자의 제거에는 다소 효율이 떨어짐을 보여주고 있다. 따라서 본 실험에서 회수된 자성 및 비자성 산물에 대한 현미경 분석을 통한 보다 구체적인 원인 규명이 필요할 것으로 사료된다.

동원탄광 시료에 대한 입도별 자력선별 실험 결과는 Table 2에 나타나 있다. 동원탄광 시료는 삼척탄좌 시료에 비해 유황분(0.41%)이 훨씬 낮은 반면에 F.C 함량(원탄 F.C 50.6%)은 다소 높은 편이다.

Table 2에서 보듯이 -6 + 1 mm 입도의 자력 선별후 1차 및 2차 자성산물의 유황함량이 각각 0.91% 및 0.57% 이었으며, 특히 1차 자성산물의 유황 함량이 높은것은 황철석의 단체분리도가 상기 입도에서 삼척탄좌 시료보다 높은 것으로 사료되며, 2차 자성 산물의 경우는 비자성 산물의 유황 함량에 비해 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. 그러나 동원 탄광의 시료의 경우 -6 + 1 mm 입도의 자력선별 결과에 의하면 비자성 산물의 고정탄소 함량이 51.7%에 이르고 있어서 삼척탄좌 시료의 경우보다 훨씬 높은 수치를 보여주고 있다. 따라서 동원탄광 시료의 경우 삼척탄좌 시료보다 회분을 구성하는 점토광물중에 철분의 함량이 높은 것으로 사료되며, 황철석 이외의 회분을 구성하는 광물도 석탄으로 부터 효율적으로 제거가 가능함을 보여주고 있다. 동원탄광 -1 + 0.3 mm 시료의 경우 2차 자성 산물은 비자성 산물에 비해 유황함량이 0.11% 더 높음을 보여주고 있다. 또한 비자성 산물의 고정탄소 함량은 원탄 시료에 비해 약 25% 향상된 63.3%를 보여 주었으며 고정탄소 회수율도 80%에 이르고 있다.

3-3. 실험 전반에 대한 고찰

본 실험에서는 미국 Eriez Magnetics 사가 개발한 RE Roll 고강도 자력선별기를 이용하여 국내 무연탄에 대한 건식 자력선별 가능성을 검토 하였다. 앞서 언급 하였듯이 삼척탄좌 및 동원탄광 시료에 대한 입도별 2단계 선별 실험을 수행 하였으며, 본 실험을 통하여 국내 무연탄으로부터 효율적인 유황분 및 회분 제거가 가능함을 확인 하였다. 특히 RE Roll 자력선별기는 High intensity induced magnetic roll separator 등 재래식 자력 선별기 보다 훨씬 우수한 회분 제거율을 보여 주었다.

실험결과에 의하면 동원탄광 시료의 경우가 삼척탄좌 시료보다 회분제거가 훨씬 용이했으나 유황분의 경우 두시료 모두 40%~50% 제거가 가능 하였다. 앞으로 선별회수의 증가와 0.3 mm 이하 크기의 입도에 대한 선별공정 개발에 대한 연구가 계속되어야 할 것이며 본 자력선별기를 이용하여 발전용 석탄의 연소전 탈황 가능성 조사도 가능할 것으로 사료된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내무연탄 및 미국 유연탄에 대한 건식 정전기 선별 및 자력선별 가능성 조사를 미국 PETC와 공동으로 수행 하였으며 본 실험 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1) 현재 미국 PETC 에서 개발중인 Triboelectrostatic 선별법은 석탄으로부터 황철석은 물론 회분을 구성 하는 광물들을 제거하는데 매우 효율적임을 확인 하였다. 삼척탄좌 시료의 경우 정전기 선별 후 원탄 회분함량이 46.5%에서 12% 내외의 정탄회수가 가능 하였으며 Illinois No. 6 시료의 경우 회분 및 무기유황분 제거율이 각각 50% 및 55%에 달하였다.

2) 본 Triboelectrostatic separation법은 입자의 크기가 10 μm 이하에도 적용이 가능 하였으며 특히 최적 입자의 크기는 입자의 하전효율 및 선별기 내에서 정전기력에 대한 입자의 반응에 커다란 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서 앞으로 산업화를 위한 처리능력의 증대와 회수율 향상을 위한 기기 보완이 문제점으로 지적되고 있다.

3) 본 연구에서는 또한 미국 Eriez Magnetics 사가 개발한 RE Roll 고강도 자력 선별기를 이용하여 국내 무연탄에 대한 건식자력선별 가능성을 검토 하였다. 삼척탄좌 및 동원탄광 시료에 대한 입도별 2단계 선별시험을 수행 하였으며 본 실험을 통하여 국내 무연탄으로부터 유황분 및 회분 제거가 가능함을 확인

하였다. 실험 결과에 의하면 동원탄광 시료가 삼척탄좌 시료보다 회분제거가 용이 하였으며 유황분의 경우 두 시료 모두 40~50% 제거가 가능 하였다.

4) RE Roll 자력 선별법은 종래 자력 선별법보다 전력소모가 적은 장점이 있으며 앞으로 선별회수의 증가 및 0.3 mm 이하의 미립입자에 대한 선별효율 향상에 대한 연구가 계속되어야 할것으로 사료되며 향후 발전용 석탄에 대한 체계적인 연구가 요망된다.

참고문헌

1. Lochhart N.C.: Dry Beneficiation of Coal, *Powder Technology*, **40**, 17 (1984).
2. Yoon R.H.: "Advanced Coal Cleaning", Coal Preparation, 5th ed., SME, Littleton, Co. 966-1005 (1991).
3. Kelly E.G. and Spottiswood D.J.: The Theory of Electrostatic Separations, A Review: Parts 1,2, and 3, *Minerals Engineering*, **2**, no 1, pp 33-46, no 2, 193-205, and no 3, 337 (1989).
4. Ralston O.C.: Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids, Elsevier, Amsterdam (1961).
5. Ciccu R., Peretti R., Serci A., Tamanini M and Zucca A.: Experimental Study On Triboelectric Charging of Mineral Particles, *J. Electrostatics*, **23**, 157 (1989).
6. Afano G., Carhini P., Carta M., Ciccu R., Del Fa' C., Peretti R and Zucca A.: "Application of Static Electricity in Coal and Ore Beneficiation", *J. Electrostatics*, **16**, 315 (1985).
7. Lochhart N. C. and Hart G. H.: "Dry Beneficiation of Coal", *The Coal Journal*, No. 28 (1990)
8. D. Finseth, T Newby and R. Elstrodt: "Triboelectrostatic Beneficiation of Fine Coal" Proceeding, Ninth Korea-U.S.A. Joint Workshop on Coal Utilization Technology, SanFrancisco, October 19-24 (1992).
9. Link T., Killmeyer R., Elstrodt R. and Haden N.: "Initial Study of Dry Ultrafine Coal Beneficiation Utilizing Triboelectric Charging with Subsequent Electrostatic Separation", DOE/PETC/TR-90/11, 19 (1990)
10. Kester W.M., Leonard J.W., and Wilson,E.B.: "Reduction of sulfur from Steam Coal by Magnetic Methods", *Mining Congress Journal*, Vol. **53**, July, 70 (1967).