

摩擦荷電型靜電選別法을 이용한 Mill Reject 產物 再活用 技術開發

全好錫 · 韓五炯 · 申宣明 · Roe-Hoan Yoon**

韓國地質資源研究院 資源活用部, *朝鮮大學校 資源工學科

**Virginia Polytechnic Institute and State University

Development of Recycling Technique of Mill Reject Products using Triboelectrostatic Separation

Ho Seok Jeon, Oh Hyung Han, Shun Myung Shin and Roe-Hoan Yoon**

Minerals & Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*Department of Resource Engineering, Chosun University,

**Virginia Polytechnic Institute and State University

요 약

본 연구는 석탄 화력발전소로부터 배출되는 약 20% 정도의 mill reject 산물로부터 석탄을 회수하여 에너지원으로 재활용하기 위한 마찰하전형정전선별기술을 개발하는데 있다. 연구결과 회분함량 47%인 mill reject 산물로부터 회분함량 15%인 정제 석탄회를 66.23%의 석탄회수율로 얻을 수 있었다. 또한 releases analysis 분석결과 발전소에서 요구하는 회분함량 20% 이내에서 석탄회수율을 80% 까지 얻을 수 있는 처리공정을 제시하여, 본 처리법의 우수성을 입증하였다.

주제어: 마찰하전형정전선별, mill reject, 재활용, 하전

ABSTRACT

This study was to develop the triboelectrostatic separation technique to recycle the coal from about 20% of mill reject products remained by grinding process in the coal thermoelectric power plant. In this study, we get a test results that can product the cleaned coal of 15% ash content and 66.23% recovery from mill reject of 47% ash content. And then, from the result of the releases analysis, we proved the excellence of treatment method, after showing the treatment processing which is able to get 80% of recovery of coal from 20% of ash content demanded in the power plant.

Key words: Triboelectrostatic separation, mill reject, recycling, charging

1. 서 론

산업의 발전과 국민소득의 향상으로 세계 에너지 소비가 매년 10% 이상 증가하고 있는 실정이다. 에너지 원별 석탄이 차지하는 비중이 현재 30%에 달하고 있으나 앞으로 석탄의 비중은 더 증가 될 것으로 예측하고 있다.¹⁻³⁾ 이와 같은 이유는 석탄은 화석연료 중 가장 경제성이 높고 매장량이 풍부하며 지역적 편차가 심하

지 않기 때문이다. 또한 수력발전의 경우 지리적인 여건 때문에 한계가 있고 원자력발전은 안정성의 문제와 폐기물의 처리 등 여전히 해결해야할 많은 문제점을 갖고 있기 때문이다. 그러나 석탄이 아무리 경제성이 높고 풍부한 매장량을 갖고있는 에너지라 할지라도 장기적인 에너지 수급을 위해서는 연소시 발생하는 공해와 연소 후 발생하는 석탄회 등 많은 문제점을 해결할 수 있는 기술개발이 뒤따라야 할 것이다.⁴⁾

본 연구는 석탄화력발전소의 분쇄과정에서 발생하는 mill reject 산물로부터 석탄과 회분 구성 광물을 효율

* 2002년 1월 16일 접수, 2002년 3월 5일 수리

* E-mail: hsjeon@kigam.re.kr

적으로 선별할 수 있는 기술을 개발하여, 현재 전량 폐기되고 있는 mill reject 산물을 재활용 할 수 있는 기술을 개발하는데 있다. 즉, 미국의 경우 현재 발전소에 사용되고 있는 석탄의 약 20% 정도가 분쇄공정에서 mill reject 산물로 폐기되고 있는데, 만약 이 mill reject 산물을 재활용하지 않는다면 석탄회와 함께 부산물의 재처리를 위한 2차 부담을 안게 될 것이다. 이들 mill reject 산물은 비교적 경도가 높은 광물로 구성되어 있어 분쇄공정에서 굵은 입자로 남아 일부 석탄과 함께 배출되는 것으로, 이들 중 회분함량이 대략 40% 이상 존재하고 있어 바로 발전소에 이용하기는 불가능하다.

본 연구에서는 건식 선별법 중 가장 효과적인 것으로 보고된 마찰하전형정전선별(triboelectrostatic separation)법을 이용하여 발전소 mill reject 산물을 재활용 할 수 있는 선별법을 개발하였으며, 특히 기존에 개발된 기술보다 선별효율을 높일 수 있는 고구배 전기장과 공기를 이용하여 석탄과 회분구성 광물을 효율적으로 하전시킬 수 있는 하전장치를 개발하였다. 또한 연속처리를 위한 공정개발과 중광물(middling)로 처리된 산물을 연속으로 재차 하전시켜 처리하므로 선별효율을 높였으며, 연속처리 시 문제가 될 수 있는 하전장치 등을 개발하였다. 연구결과 최적 실험조건에서 원 시료 중 회분함량 47%로부터 회분함량이 15%인 정제 석탄을 생산할 수 있는 선별법을 개발하였다.

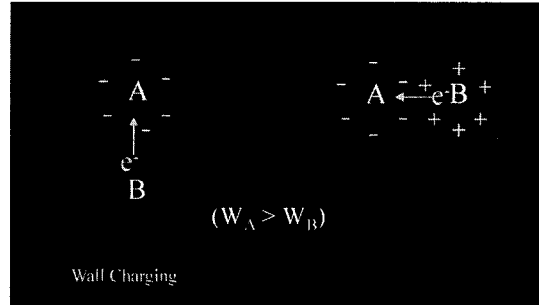


Fig. 1. Charging principle of two particles by collision.

2. 이론적 배경

서로 다른 재질의 입자가 서로 충돌을 하거나 다른 제 3의 재질에 충돌하게 되면, Fig. 1 에서와 같이 work function 값이 작은 입자는 전자를 잃어 positive(+)로 하전을 띄게 되고 work function 값이 큰 입자는 negative(-)로 하전이 이루어지게 된다. 이때 각각 반대의 하전으로 이루어진 혼합된 입자들을 Fig. 2 에서와 같이 전압이 높은 전기장 내로 통과시키면 positive로 하전된 입자는 negative 전극으로 이동하게 되고, 이와 반대로 negative로 하전된 입자는 positive 전극으로 이동되어 각각 분리가 이루어지게 되는 것이다.¹⁻⁷⁾ 이때 선별효율에 가장 크게 영향을 미치는 것은 두 입자간의 표면 하전값을 높일 수 있는 하전장치의 재질과 방법이

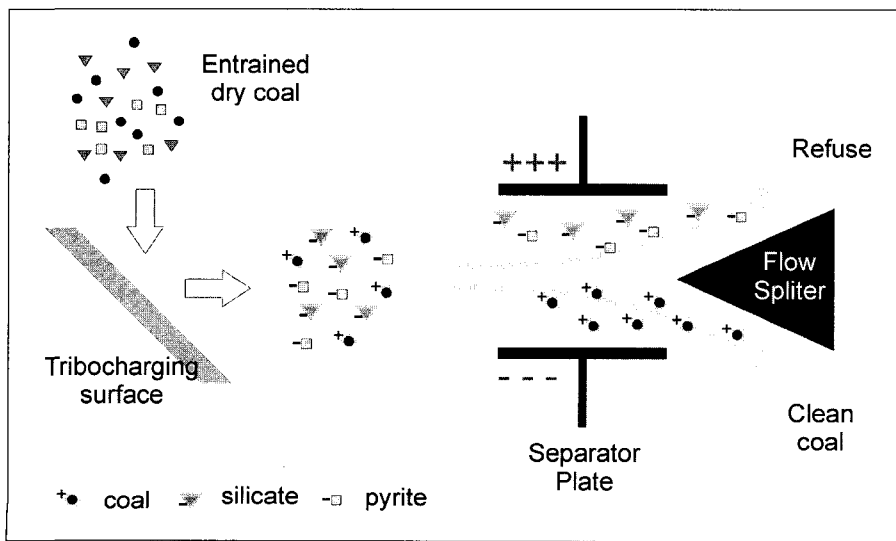


Fig. 2. Schematic representation of triboelectrostatic separation.

Table 1. Work Functions of Metals and Oxides^{7,8)}

Metals	Work Function (eV)	Oxides	Work Function (eV)
Pt	5.3	TiO ₂	6.2
Ni	5.0	SiO ₂	5.0
C	4.8	Al ₂ O ₃	4.7
Fe	4.7	MoO ₃	4.3
Cu	4.5	FeO	3.9
Zn	4.3	ZrO	2.0
Al	4.1	SrO	1.3
Si	3.6	CsO ₃	1.0~1.2
Cs	1.0	BaO	1.1
Carbon : 4.0 CaO : 1.6 Mineral : 5.4			

이 기술개발의 핵심이다.

Table 1 은 혼합된 물질을 마찰하전 시킬 때 기초가 되는 물질의 work function 값을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 이 값을 기초로 하여 석탄과 맥석 구성광물의 중간인 work function 값을 갖는 PVC(4.7)를 하전 물질로 사용하였다. Work function 값이 4.7인 PVC를 하전물질로 사용하게 되면 이보다 work function 값이 큰 맥석 구성광물들은 전자를 얻어 negative(-)로, 그리고 석탄은 work function 값이 PVC 재질보다 작기 때문에 전자를 잃어 positive(+)로 각각 하전을 띄게 되어 분리가 가능하게 되는 것이다.

3. 시료 및 실험방법

3.1. 시료의 특성

본 연구에 사용된 시료는 미국 Virginia State의 Glenyn Power Plant에서 채취한 것으로, Table 2 와 같이 회분 함량이 47.19%로 높은 mill reject 산물이다. 발전소에 공급되는 석탄 원 시료의 회분함량은 10% 내

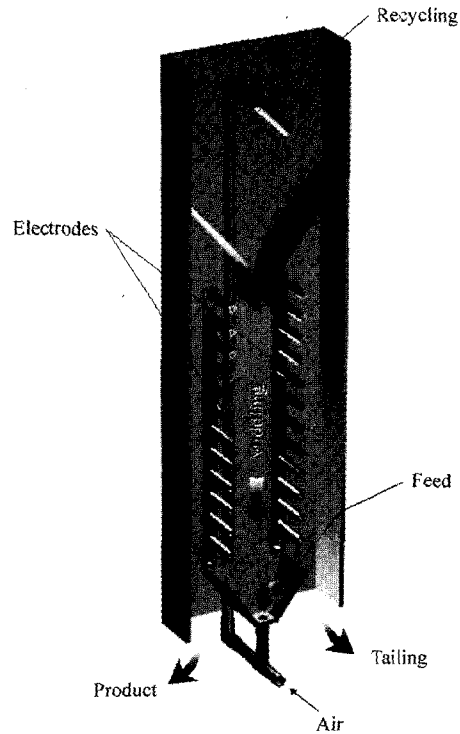


Fig. 3. The generic bench-scale triboelectrostatic separator unit used in the present study.

외이지만 분쇄 공정에서 경도가 높은 회분 구성 광물들이 mill reject 산물로 처리되어 회분함량이 크게 높아진 것이다. 미국의 경우 발전소에 공급되는 석탄의 약 20%가 분쇄공정에서 mill reject로 처리되는데, 이는 1년 간 석탄 사용량이 5억 톤이므로 약 1억 톤 가량의 mill reject가 발생하고 있는 것이다.⁸⁾ 물론 이들 mill reject 산물의 경우 회분함량이 50%나 되기 때문에 실제 석탄이 차지하는 비중은 절반 밖에 되지 않지만, 이

Table 2. Results of size analysis of mill reject products used in this tests

Size Range (mesh)	Weight (%)	Assasy (Ash%)	Distribution (Ash%)	Size (mesh)	Cumulative Oversize (%)	Cumulative Distribution (Ash%)
-28/+35	40.21	46.26	39.42	35	40.21	39.42
-35/+48	15.41	46.15	15.07	48	55.62	54.49
-48/+65	13.04	44.23	12.22	65	68.66	66.71
-65/+100	10.45	48.79	10.80	100	79.11	77.51
-100/+200	10.96	49.11	11.41	200	90.07	88.92
-200/+325	4.62	50.70	4.96	325	94.69	93.88
-325	5.31	54.35	6.12			
Total	100	47.19	100			

들이 폐기물로 처리됨으로 재활용 기술개발이 이루어지지 않으면 많은 비용을 지불하게 될 것이다.

3.2. 실험방법

Fig. 3 은 본 연구에 사용된 마찰하전형정전선별기 (triboelectrostatic separator)의 개략도를 나타낸 것이다. 실험은 Fig. 3 의 아래 부분에 feed로 시료를 공급하면 공기의 흐름에 의해 정전선별기 본체 뒤쪽으로 연결된 PVC 원형 관을 통해 본체 상단으로 이동하여 시료가 두 전극 사이의 전기장내로 자유낙하 하면서 선별이 이루어지게 된다. 이때 석탄시료와 회분 구성광물간의 하전은 PVC 원형 관을 통과하면서 이루어지게 되는데, 본 연구에서는 하전효율을 높이기 위하여 PVC 원형 관에 직각 부분을 3곳이나 설치하여 실험하였다. 급광된 시료가 PVC 원형 관을 통과하여 선별이 이루어지는 시간은 1~2초 내외로 매우 짧은데, 이때 충분한 하전이 이루어지지 않아 중광물(middling)로 처리된 입자들은 재순환 되어 하전이 이루어지므로 선별효율이 높은 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 본 연구에서 하전물질로 PVC 재질을 사용한 이유는, PVC 재질의 work function 값이 석탄(4.1)과 회분구성 광물(5.4)의 중간인 4.7이기 때문이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. Relative Humidity 영향

Fig. 4 는 공기중의 상대습도가 석탄회수율과 회분함량에 미치는 결과를 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 습도가 회분제거율 보다는 석탄회수율에 매우 민감하게 작용함을 알 수 있다. 즉, 실험결과에서 알 수 있듯이 공기중의 습도함량에 따른 석탄회수율은 상대습도가 가장 낮은 30%와 가장 높은 70%에서 각각 68.34%와 54.41%로 약 14%의 차이를 보이지만, 회분함량은 각각 15.72%와 14.01%로 1.7% 밖에 차이가 나지 않아 공기중의 수분함량이 회분함량보다는 석탄회수율에 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

이와 같이 공기중의 상대습도가 선별효율에 영향을 미치는 이유는 입자의 하전량 측정에서 규명되었듯이 공기중의 수분함량이 미립자의 하전에 큰 영향을 미치기 때문이다. 즉, 마찰하전형정전선별법은 입자의 충돌시 발생하는 정전에너지를 이용하여 분리하는 원리인데, 공기중의 습도가 높을 경우 OH⁻기가 입자의 표면에 흡착되어 하전량에 나쁜 영향을 미치기 때문이다.^{1,3)} 따라

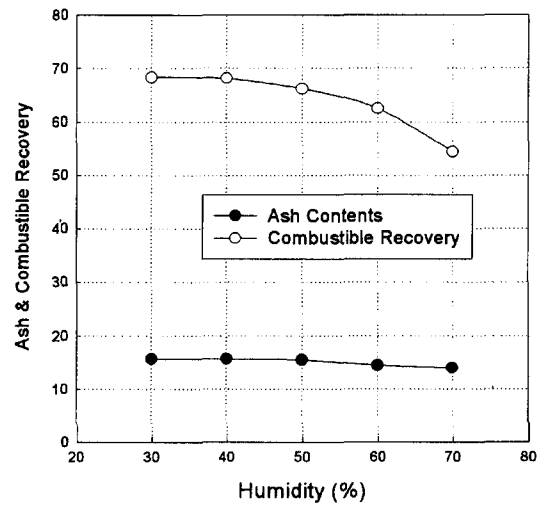


Fig. 4. The effect of relative humidity on ash & combustible recovery in triboelectrostatic separation.

서 본 연구결과 좋은 선별효율을 얻기 위해서는 공기중의 수분함량을 40% 이하로 유지하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

4.2. Air Velocity 영향

Fig. 5 는 하전량에 영향을 미치는 공기의 속도 변화가 석탄회수율과 회분함량에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 공기의 속도를 0.5 m/sec에서 2.0 m/sec 까지

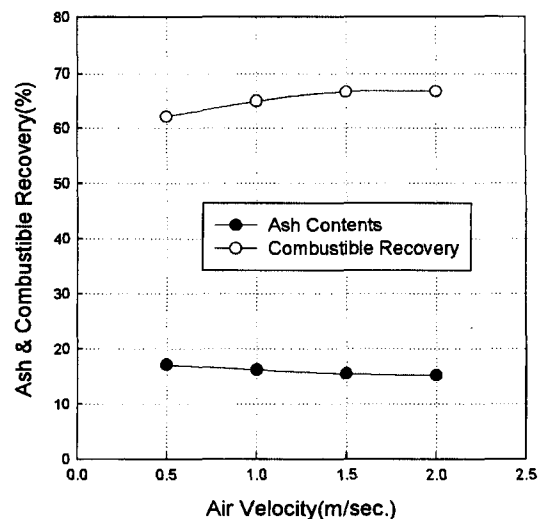


Fig. 5. The effect of air velocity on ash & combustible recovery in triboelectrostatic separation.

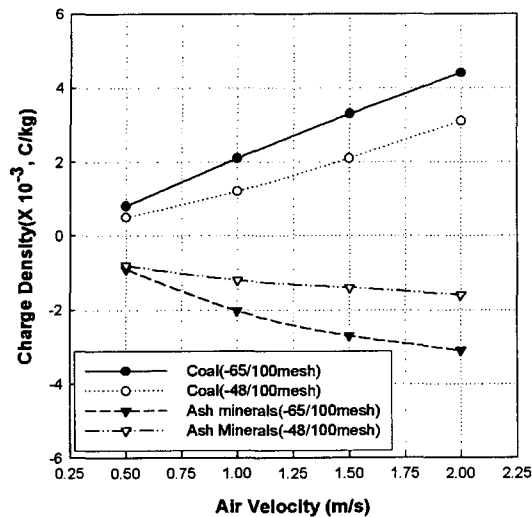


Fig. 6. Effect of air velocity on charge density using clean coal and ash minerals.

변화하며 실험한 결과이다. 실험결과 공기의 속도가 증가할수록 석탄회수율이 증가하고 회분함량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 6의 공기속도에 따른 입자들의 하전량 측정결과에서 알 수 있듯이 공기의 속도가 증가할수록 석탄과 회분구성 입자들이 하전장치에 강하게 충돌하여 하전량이 증가되므로 전기장 내에서 효과적으로 분리되기 때문이다. 그러나 공기의 속도가 증가할수록 입자의 하전량이 증가하여 선별효율이 계속 증가할 것으로 생각하였으나 공기의 속도 1.5 m/sec 이상에서는 뚜렷한 변화를 보이지 않는데, 이는 공기의 속도가 빨라지면 하전된 입자가 전기장 내를 통과하는 속도도 빨라져 입자들이 전기적 인력과 함께 중력 가속도도 증가하였기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 석탄회수율과 회분함량 등을 고려하여 공기의 속도 1.5 m/sec를 최적 실험조건으로 하였으며, 이보다 공기의 속도가 증가하면 뚜렷한 선별효율의 증가 없이 선별비용만 증가하고 그리고 이보다 공기의 속도가 낮아지면 선별효율이 감소하여 효과적이지 못함을 알 수 있다.

4.3. Potential Difference 영향

마찰하전형정전선별에서 하전장치에 의해 하전된 입자들의 표면하전량은 일반적으로 10^{-3} C/kg으로 매우 미미하여, 높은 전기장을 이용하여 혼합된 물질을 분리하게 된다. Fig. 7은 하전된 입자들의 선별이 이루어지

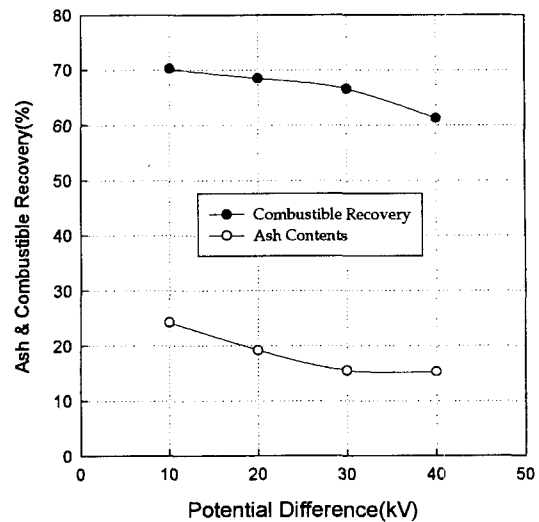


Fig. 7. The effect of potential difference on ash & combustible recovery in bench-scale TES separation.

는 전극의 세기 변화에 따른 석탄회수율과 회분함량의 관계를 규명하기 위하여 전류의 세기를 10 kV에서 40 kV까지 변화하며 실험한 결과이다.

실험결과 석탄회수율과 회분함량의 경우 전류의 세기가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 전류의 세기 30 kV를 기준으로 이보다 증가하면 석탄회수율은 감소하지만 회분함량은 뚜렷한 변화를 보이지 않아, 본 연구에 사용된 장치의 경우 전극의 전류세기 30 kV가 최적 실험 조건임을 알 수 있다. 이와 같이 전류의 세기가 낮을 경우 석탄회수율과 회분함량이 높은 이유는, 단체분리가 안된 입자들과 일부 회분구성 광물들이 약한 전류의 세기 때문에 positive(+) 전극으로 이동하지 못하고 negative(-) 전극쪽에 잔류하기 때문이다.

4.4. Stage of Running & Scavenging

Fig. 8과 Fig. 9는 석탄의 품위와 회수율을 높일 수 있는 running과 scavenging 실험결과를 나타낸 것이다. 실험방법은 앞에서 규명된 최적실험조건에서 running은 품위향상을 위해 1차 처리된 정제 석탄을 대상으로 반복실험한 것이고, scavenging은 positive(+) 전극으로 이동된 회분구성 광물로부터 석탄을 회수하기 위해 반복 실험한 것이다.

Running stage 변화실험 결과 35 mesh 이하로 제조된 시료의 경우 running stage 3과 4회에서 회분함량이 각각 3.95%와 2.98%인 초저회분 정제석탄을 얻을 수

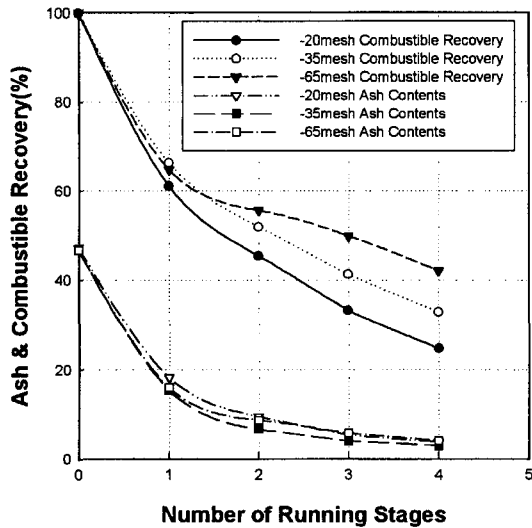


Fig. 8. The effect of running stage on combustible recovery and ash content in bench-scale TES separation test.

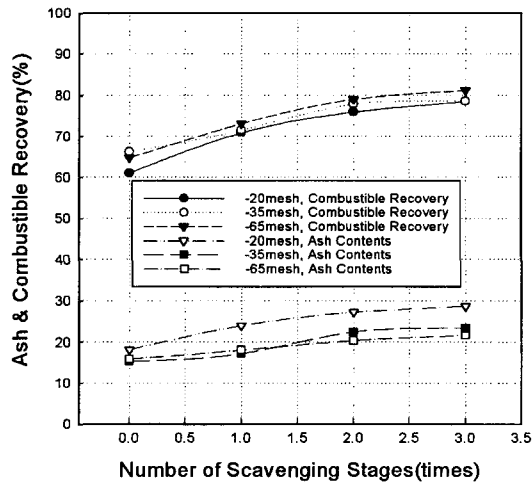


Fig. 9. The effect of scavenging stage on combustible recovery and ash content in bench-scale TES separation test.

있음을 알 수 있다. 그러나 이때 석탄회수율이 각각 41.23%와 32.83%로 매우 낮아, 본 연구에서는 처리비용 등을 고려하여 running stage 1회를 최적 실험조건으로 하였다. 또한 최적 running stage 1회에서 석탄회수율과 회분함량 등을 고려할 경우 입도크기는 35mesh 이하로 제조된 시료가 가장 효과적임을 알 수 있다.

선별실험에서 맥석으로 처리된 산물로부터 석탄을 회수하기 위한 scavenging stage 변화실험 결과 scavenging

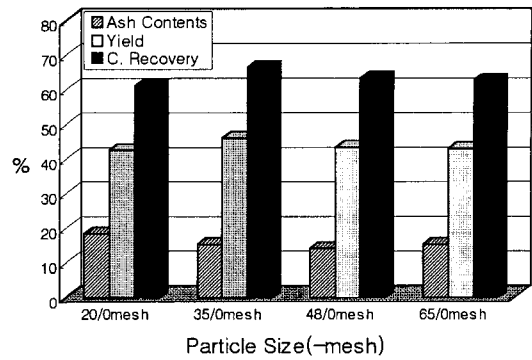


Fig. 10. The effect of particle size on combustible recovery and ash content in bench-scale TES separation test.

stage 1회에서 입도크기 35 mesh와 65 mesh 이하로 제조된 입도의 경우 각각 회분함량이 17.27%와 18.10%인 정제석탄을 석탄회수율 71.45%와 73.03%로 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 선별기술을 현장에 적용할 경우 회분함량 20% 이하인 정제석탄을 mill reject 산물로부터 70% 이상 회수할 수 있을 것으로 생각된다. 한편, 용도에 따라 높은 석탄회수율을 필요로 할 경우 회분함량 22%내에서 석탄회수율을 80% 까지 얻을 수 있는 공정개발도 가능함을 알 수 있다.

4.5. Particle Size

Fig. 10 은 시료의 입자크기가 석탄회수율과 회분함량에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 시료를 20 mesh에서 65 mesh 이하로 각각 제조하여 실험한 결과이다. 각 입도크기별 정전선별 실험결과 48 mesh 이하로 제조된 시료의 회분함량은 14.21%로 가장 낮지만, 석탄회수율이 63.11%로 35 mesh 이하로 제조된 시료의 66.23%보다 낮아 선별효율이 낮은 것을 알 수 있다. 즉, 35 mesh 이하로 제조된 시료의 경우 석탄회수율이 가장 높고 회분함량도 15.38%로 48 mesh 이하로 제조된 시료보다 1% 밖에 차이가 나지 않아 최적 입도크기임을 알 수 있다. 그리고 35 mesh보다 입도가 커지면 단체분리도가 낮고 입자의 중량이 증가하여 전기장의 영향력이 감소되어 선별효율이 떨어지는 것을 알 수 있으며, 또한 입도가 너무 작아지면 미립자의 생성이 많아 이들에 의한 방해 때문에 선별효율이 감소되는 것을 알 수 있다.

Fig. 11 은 입자크기에 따라 얻어진 실험결과를 회분함량과 석탄회수율의 관계로 나타낸 것이다. 실험결과

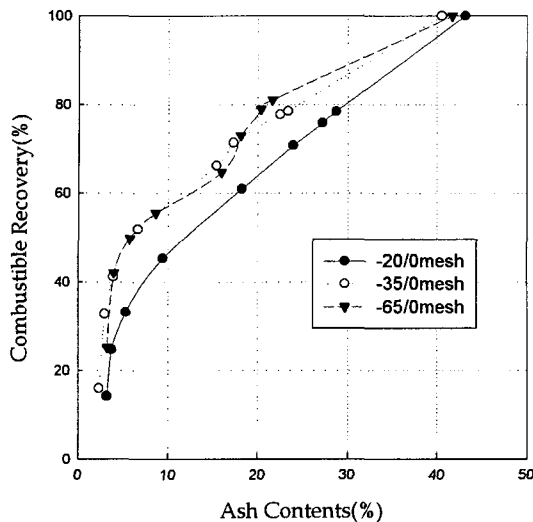


Fig. 11. Combustible recovery vs. ash contents for the test result obtained from the particle size variation.

를 분석해 보면 20 msh 이하로 제조된 시료보다 35 mesh와 65 mesh 이하로 제조된 시료가 선별효율이 크게 높은 것을 알 수 있다. 특히, 본 연구에서 최적 처리입도로 규명된 35 mesh 이하로 제조된 입도의 결과를 분석해 보면 회분함량 10%인 정제석탄을 석탄회수율 58%로 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 또한 석탄회수율을 76%로 높일 경우 회분함량 20%인 석탄을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그리고 65 mesh 이하로 제조된 입도는 회분함량 20%에서 석탄회수율이 80%인 정제석탄을 얻을 수 있어, 입도크기 등 일부 조건변화에 따라 요구하는 정제 석탄을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구결과를 기초로하여 사용자가 요구하는 석탄의 품위와 회수율을 생산할 수 있는 실험조건을 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

mill reject 산물의 재활용을 위한 마찰하전형정전선별 실험결과 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

1. 마찰하전형정전선별 실험에서 입자의 하전효율에 영향을 미치는 relative humidity는 50% 이하가 되어야 좋은 선별효율을 얻을 수 있으며, 또한 시료를 전기장 내로 이동시키고 하전을 유도하는 air velocity는 1.5 m/sec가 최적 실험조건임을 규명하

였다.

2. 하전장치에 의해 5×10^{-3} C/kg 이하로 하전된 입자들을 분리하기 위한 전류의 세기변화 실험결과 30 kV보다 전류의 세기가 약하면 회분함량이 높고 이보다 전류의 세기가 증가하면 석탄회수율이 낮아, 본 장치의 경우 30 kV가 최적 실험조건임을 알 수 있다.
3. 입자크기가 마찰하전형정전선별 실험에 미치는 영향을 관찰하기 위한 실험결과 35 mesh 이하로 제조된 시료가 석탄회수율과 회분함량이 각각 66.23%와 15.38%로 가장 좋은 실험조건임을 규명하였다.
4. 품위향상을 위한 running stage 변화실험 결과 회분함량이 3%인 정제 석탄을 얻을 수 있는 가능성을 입증하였으며, 또한 석탄회수율을 높이기 위한 scavenging stage 변화실험 결과 회분함량 20%로 석탄회수율을 80% 까지 생산할 수 있는 실험조건을 확립하였다.
5. 실험결과를 회분함량과 석탄회수율의 관계로 나타낸 Releases Analysis 분석결과 발전소에서 요구하는 회분함량 20% 이내에서 석탄회수율을 80% 까지 얻을 수 있는 공정을 제시하여, 본 처리법을 발전소에 적용 할 경우 폐기되는 많은 양의 석탄을 재활용할 수 있음을 입증하였다.

참고문헌

1. 전호석, 한오형, Roe-Hoan Yoon, "석탄회로부터 미연탄소분 제거를 위한 정전신기술 개발 연구", 자원공학회 춘계총회 및 학술발표회, p. 27-29 (2000).
2. 전호석, 한오형, Roe-Hoan Yoon, "mill reject 산물 재활용을 위한 마찰하전형 정전기술 개발", 한국자원리싸이클링학회, 춘계학술발표회, p. 124-127 (2000).
3. 전호석, 신선명, 박철현, 문영배, 조성백, 최우진, "Clean Coal 생산을 위한 마찰하전형정전선별 기술개발", 한국자원공학회 추계학술발표회, p. 15-19 (2001).
4. 전호석, 최우진 외 8명, "발전용 석탄의 연소전 탈황탈회 처리기술 개발", KRC-93G-T12, 전력연구원, pp. 1-24, (1996).
5. K. B. Tennal : "Triboelectric Separation of Granular Materials", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Louisiana, October 5-8 pp.1724-1729 (1997).
6. Ban H., "Fundamentals of triboelectrostatic separation : A Discussion on Particle Charge, Particle Size and Separation". Preprint, Annual Meeting of the Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.(SME), Denver,

CO. (1997).

7. Alfano, G., Carbini, P., Ciccu, R., Ghani, M., Peretti, R., and Zucca, A., Progress in Triboelectric Separation of Minerals : Proc. 16th Int. Mineral Processing Congr. Stockholm, Sweden, pp.833-844 (1988).

8. R.-H. Yoon, G. H. Luttrell and G. T. Adel, "Poc-Scale Testing of a Dry Triboelectrostatic Separation for Fine Coal Cleaning", Technical Progress Report, pp.1-15 (1996).



金 好 錫

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용 연구부 선임연구원
- 本 學會志 第10卷 第6號 參照



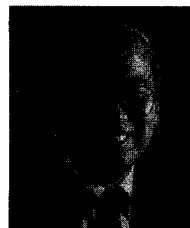
韓 五 炯

- 1973년 조선대학교 자원공학과 공학사
- 1978년 조선대학교 자원공학과 공학 석사
- 1988년 전남대학교 자원공학과 공학 박사
- 현재 조선대학교 자원공학과 교수
- E-mail: ohhan@mail.chosun.ac.kr



申 宣 明

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용 연구부 Post Doc.
- 本 學會志 第10卷 第6號 參照



Roe-Hoan Yoon

- 1977 Ph.D., Metallurgical Engineering (Deans Honors List), McGill University
- 1984 Professor, Department of Mining and Minerals Engineering, Virginia Tech
- 1985 Nicholas T. Camicia Professor of Mineral Engineering, Department of Mining and Minerals Engineering, Virginia Tech
- 1988 Director, Center for Coal and Minerals Processing, Virginia Tech(E-mail; ryoony@vt.edu)