國內產 微粒 石炭의 品位向上을 위한 浮遊選別 研究

韓五炯 · 金珉奎 · 金炳坤

朝鮮大學校 工科大学 에너지 · 資源工學科, *韓國地質資源研究院

Flotation for Improving Grade of Domestic Fine Coal

Oh-Hyung Han, Min-Gyu Kim and Byoung-Gon Kim

*Department of Energy & Resources Engineering, Chosun University,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약

본 연구는 고정탄소 57.39%의 미립 석탄으로부터 고품위 석탄 생산의 가능성을 확인하고자 하여 광물학적, 물리화학적 방법과 단체분리도의 특성을 파악하여 청정 석탄 기술의 처리과정에서 회분을 감소시키는데 목적이 있다. 본 연구에서 일반부선과 미립자 처리에 적합한 column 부선기의 최신형인 CPT column 부선을 적용하여 기포제, 포수제, 억제제의 종류와 첨가량의 변화, 공기주입량, 급광량 그리고 광액농도에 따른 영향을 확인하였다. 먼저 광액농도 20%, 포수제 DMU-101 (100 mL/ton), 기포제 AF65 (300 mL/ton), 억제제 sodium metaphosphate(1 kg/ton)의 실험조건으로 일반부선을 실시한 결과, 회분제거율과 가연분회수율(combustible recovery)을 각각 67.57%와 70.90%를 얻었으며, 광액농도 3%, 포수제 DMU-101(100 mL/ton), 기포제 AF65(10 L/ton), 억제제 sodium metaphosphate(1 kg/ton), 세척수(100 mL/min.)와 공기주입량(1,200 mL/min.)인 조건에서 CPT column 부선을 실시한 결과 회분제거율과 가연분회수율이 각각 85.59%와 88.97%인 결과를 얻었다.

주제어 : 석탄, 단체분리도, CPT column, 고정탄소

Abstract

The purpose of this study is to confirm the possibility of obtaining high grade coal from 57.39% of fixed carbon fine coal. Also, the mineralogical, physical/chemical and liberation characteristics are to be identified to decrease in ash amount, during the pre-processing of clean coal technology. In this study, batch flotation and CPT column flotation proper for the processing of fine particles were used with the variation in kinds and quantity of frother, collector and depressant. Also air flow rate and feeding rates were examined. As a result of batch flotation using 20% of pulp density DMU 101 collector(100 mL/ton), AF65 frother(300 mL/ton), sodium metaphosphate depressant (1 kg/ton), 67.57% of ash rejection and 70.90% of combustible recovery were obtained. The result of CPT column flotation was 85.59% of ash rejection and 88.97% of combustible recovery under the conditions of 5% of pulp density, DMU-101 collector (100 mL/ton), AF65 frother(10 L/ton), SMP depressant(1 kg/ton), wash water(100 mL/min.) and air flow rate(1,200 mL/min.).

Key words : Coal, Liberation, CPT column flotation, Fixed carbon

* Received : November 14, 2013 · Revised : December 2, 2013 · Accepted : December 10, 2013

*Corresponding Author : Oh-Hyung Han (E-mail : ohhan@chosun.ac.kr)

Department of Energy and Resources Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea
Tel : +82-62-230-7116 / Fax : +82-62-233-2110

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

석탄은 공급의 안정성에서 뿐만 아니라 중장기적으로 경제성이 우수한 에너지원으로, 현재의 수요증가를 고려하더라도 확인된 매장량만으로 약 300년 이상 사용 가능한 자원이며, 세계 1차 에너지 공급의 30%를 점하고 있어 국내외적으로 상당히 중요한 위치를 차지하고 있다. 국제 유가와 천연가스의 가격이 급등하면서 앞으로 석탄의 비중은 더 증가될 것으로 예측되고 있다. 또한 석탄은 최근 대륙붕에서 발견된 소량의 천연가스를 제외하고는 한국이 보유하고 있는 유일한 에너지 자원으로써 에너지 자원의 해외 의존도가 97%이상인 한국에서 차후 발생할지도 모를 에너지 자원의 전략적 사용에 대비 할 수 있는 자원이다. 그러나 석탄이 아무리 경제성이 높고 풍부한 매장량을 갖고 있는 에너지라 할지라도 장기적인 에너지 수급을 위해서는 연소 시 혹은 연소 후 발생하는 대기오염 및 석탄회의 근원 물질을 사전에 제거해야 하는 기술개발이 이루어져야 한다¹⁾.

최근 국내에서도 청정석탄 이용을 위한 기술개발이 이루어지고 있으나, 석탄가스화 및 액화관련 기술이 주를 이루며, 선탄, 선별, 탈황, 탈회 등에 대한 연구는 선진국에 비해 미흡한 실정이다. 석탄이용을 위해서는 환경적으로 문제가 야기되는 SOx, NOx, 석탄회 등을 저감화하는 기술을 개발하여야 하며²⁾, 저 품위 석탄의 품위향상을 위해서는 단체분리를 위한 분쇄가 필수적이지만, 일반적인 선별(자력, 비중, 일반부선 등)방법은 미립자 처리에 적합하지 않아 미립자 처리를 위한 선별 기술의 개발이 시급하다. 한편, 초저회분 고품위 청정석탄 생산을 위해서는 53 μm (275 mesh) 이하의 미립으로 분쇄하여 단체분리도를 향상시켜야 하나, 일반부유

Table 1. Result of proximate analysis for raw sample

Name	Proximate Analysis (%)		
	Ash	Volatile	Fixed carbon
Raw sample	38.11	4.49	57.39

선별기의 선별효율은 53 μm 이하의 미립자에는 좋지 못한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 일반 부유선별기로는 부선횼율이 좋지 못한 53 μm 이하의 미립을 포함한 시료를 국내 경동 광업소에서 직접 채취하여 CPT(Canadian Process Technologies) column 및 Microbubble column 부선횼기술을 적용하여 초저회분 고품위 청정석탄의 회수가능성을 확인하고자 하였다.

2. 시료 및 실험방법

2.1. 시료

본 연구는 국내 경동 탄광에서 채굴된 무연탄을 1차 체질단계에서 발생한 20 mm이하 산물과 조크러서에 의한 파쇄 산물을 체질하여 얻은 20 mm이하 산물을 혼합한 시료(이하 원 시료라 함)를 사용하였다. Table 1은 원 시료의 공업분석 결과를 나타낸 것으로 분석 결과 수분을 제외한 고정탄소(이하 F.C.로 표기함)가 57.39%였으며, 회분 38.11%, 휘발분 4.49%로 존재함을 확인하였다.

Fig. 1은 원 시료 중에 존재하는 맥석광물을 확인하기 위한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다.

분석결과, Pyrophyllite($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), 석영(SiO_2), Birnessite($\text{Na}_4\text{Mn}_4\text{O}_{27}9\text{H}_2\text{O}$) 등이 맥석광물로 관찰되었다.

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of raw sample.

Table 2. Result of wet screen analysis for raw sample

Size (mesh)	Weight (%)	F.C. Assay (Dry basis)	Size (μm)	Cum. Under	F.C. Dist.(%)	Cum. F.C. Under(%)
+3.5	18.47	38.83 (7.17)	3.5(5660)	18.47	12.96	12.96
3.5*5	4.99	40.55 (2.02)	5(4000)	23.46	3.66	16.62
5*10	14.09	52.03 (7.33)	10(1780)	37.55	13.25	29.87
10*30	20.66	59.68 (12.33)	30(600)	58.21	22.28	52.15
30*60	12.25	65.55 (8.03)	60(250)	70.46	14.51	66.66
60*100	4.95	69.55 (3.44)	100(149)	75.41	6.22	72.89
100*140	3.37	60.60 (2.24)	140(113)	78.78	4.06	76.94
140*200	2.31	66.89 (1.55)	200(74)	81.09	2.79	79.74
200*270	2.69	65.10 (1.75)	270(53)	83.78	3.17	82.90
270*325	0.82	66.91 (0.55)	325(44)	84.60	0.99	83.89
325*400	1.48	67.17 (0.99)	400(37)	86.07	1.78	85.68
400*500	1.46	64.78 (0.95)	500(25)	87.54	1.72	87.40
-500	12.46	55.95 (6.97)	-25	100	12.60	100
Total	100.00	(55.33)			100.00	

Table 2는 체를 이용한 원 시료의 습식 입도 분석결과로, 조립질인 30 mesh이상 구간의 F.C.의 품위가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이는 맥석광물의 강도가 석탄에 비해 강하므로 쉽게 파 분쇄되지 않아 조립질에 비교적 다량 분포하기 때문이며, 반대로 석탄은 강도가 매우 약해 쉽게 분쇄되기 때문에 100 mesh이하의 입도 구간에 F.C.함량이 높은 것을 알 수 있다. 한편, 가장 미립인 500 mesh이하의 경우 점토광물과 파 분쇄과정에서 일부 파 분쇄된 맥석광물이 포함되어 있어 F.C.의 품위가 낮은 것으로 사료된다.

본 연구에서는 입도 특성을 확인하고 부선실험에 적용하기 위해 실험실에서 2차 파분쇄 공정을 통해 +100, 100×325, -325 mesh 3구간으로 입도 조절하여 사용하였다. 일반부유선별기에서 처리하기 힘든 53 μm (270 mesh) 이하의 입자들의 선별 효율을 높이기 위하여 vibro screen을 사용하여 세 구간의 시료로 입도를 조절하여 100 mesh이상(D_{50} : 271.971 μm) 구간 산물을 Denver sub-A 부유선별기를 사용하여 일반부선에 의해 적정시약을 확인하기 위한 예비실험을 실시하였으며, 100 × 325 mesh(D_{50} : 64.451 μm) 구간의 입도는 이 범위에서 높은 선별효율을 갖는 CPT column에 적용하여 일련의 실험을 실시하였다. 또한 325 mesh이하(D_{50} : 8.478 μm) 시료를 대상으로 MicrocelTM column 부선

기를 이용하여 조선(roughing)과 조선정광의 처리횟수(Cleaning)에 따른 영향 실험을 실시하였다.

2.2. 실험방법

미립의 석탄의 선별을 위해 CPT column 부선과 Microbubble column 부선을 적용하기에 앞서 미국 Metso 社의 Denver Sub-A형 부선기를 이용한 일반부선 실험을 통해 포수제, 기포제, 억제제에 따른 적정조건을 확인하였다. 실험조건은 교반속도를 1,200 r.p.m으로 고정한 후 4 l cell에 광액(Dp: 20%) 상태의 시료를 5분간 교반 후, 포수제를 첨가하여 3분, 기포제를 첨가하여 2분간 교반하였으며 공기를 주입하여 15분 내지 20분간 부유 산물을 회수하였다³⁾.

예비실험에서 얻은 자료를 토대로 CPT column 부선기를 이용하여 약 3%의 광액농도 조건⁴⁾에서 기포제, 포수제, 억제제의 첨가량 및 세척수량, 공기주입량, 급광량 변화에 따른 실험을 실시하였으며 MicrocelTM column 부선기를 이용한 1차(조선)실험과 정선(cleaning) 횟수에 따른 변화 실험을 통하여 결론을 도출하였다. 또한, 회수된 정광과 광미는 105°C의 건조기에서 약 24 시간 건조시켰으며, 건조된 시료를 대상으로 LECO 社의 TGA701 공업분석기로 ASTM 5142 규격에 의해 고정탄소와 휘발분, 수분, 회분의 함량을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 일반부선을 통한 예비실험

CPT column 부선에 필요한 적정시약의 조건을 확인하기 위해 본 실험에 앞서 Denver sub-A형 일반부선기를 사용하여 광액농도 20%의 조건에서 포수제, 기포제, 억제제의 종류를 변화시켜 실험을 실시하였다. 일반부선을 통한 예비실험은 먼저 +100 mesh 시료를 대상으로 포수제를 사용하지 않은 경우와 포수제인 DMU-101⁵⁾, DDA, kerosene을 단독으로 그리고 DMU-101+DDA, kerosene+DDA를 각각 1:1비로 혼합한 시약을 사용하여 실험을 실시한 결과, DMU-101을 사용한 경우, 회분제거율 57.29% 가연분회수율 70.17%를 얻을 수 있어 부선효율이 가장 높음을 확인하였다.

또한, MIBC, DF250, AF65, Pine oil등의 기포제를 사용하여 실험을 실시한 결과, MIBC를 사용하였을 경우 선별효율은 높았으나 기포의 안정적인 유지가 어려웠다. 한편, MIBC보다 기포의 안정성이 보다 용이한 AF65를 사용하여 실험을 실시한 결과, 회분제거율 64.12%, 가연분회수율 76.32%로 적정 기포제임을 확인하였다. 또한, 맥석에 대한 억제효과를 확인하기 위해서 억제제를 첨가하지 않는 경우와 sodium silicate(S.S), sodium meta phosphate(SMP), SiO₂ remover, Lime을 사용하여 실험을 실시한 결과, SMP를 사용하였을 때 회분제거율 67.57%, 가연분회수율 70.90% 얻을 수 있어 맥석의 억제효과가 가장 높음을 확인하였다.

3.2. CPT column 부선 실험

본 실험에 사용한 CPT column 부선기는 Eriez사에서 개발한 선별기로 Fig. 2와 같이 sparger를 통해 미세기포를 발생하여 기포의 비표면적을 증가시켜 미립자를 처리하는 방식으로 MicrocelTM column 부선기와 같이 미세기포가 발생하는 공기도입부(aeration zone), column 내부에서 상승하는 기포에 의해 광물이 포집되는 포집부(collection zone), 기포 또는 목적광물 사이에 동반부유(entrainment 또는 entrapment)되는 맥석을 세척하는 정선부(cleaning zone)의 세 가지 부분으로 구분된다. 특이한 것은 선별효과에 직접영향을 미치는 급광량, 세척수량, 공기주입량, 기포층의 높이 등을 자동조절 할 수 있어 100 mesh 이하의 미립에 높은 선별효과가 높은 것으로 알려져 있다.

Fig. 2. Photo and schematic of CPT CoalProTM column flotation cell.

Fig. 3. Effects of collector dosage on CPT column flotation (Feed rate: 1.48 g/min, Dp : 5%, Collector : DMU-101, Frother : AF65 6 L/ton, Depressant : SMP 1 kg/ton, Wash water 300 mL/min, Air flow rate 1,200 mL/min.).

3.2.1. 포수제 첨가량에 따른 영향

예비실험에서 부선효율이 가장 높은 시약으로 확인된 DMU-101을 대상으로 CPT column에서의 적정 사용량을 확인하기 위해 포수제 첨가량을 0에서 400 mL/ton 까지 변화시키면서 실험을 실시하였다. 본 실험에 사용된 시료는 진동체를 사용하여 CPT column에 적합한 입도로 조절된 시료(100×325 mesh, F. C. 53.75%)를 사용하였다. Fig. 3에서와 같이 포수제를 첨가하지 않는 경우, 포수제를 사용한 경우에 비해 회분제거율과 가연

Fig. 4. Effects of frother dosage on CPT column flotation (Feed rate: 1.48 g/min, Dp : 5%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65, Depressant : SMP 1kg/ton, Wash water 300 mL/min, Air flow rate 1,200 mL/min).

분회수율이 모두 낮아 포수제의 사용이 필요함을 확인하였으며, 첨가량을 100 mL 이상 첨가하였을 때 회분제거율이 소폭 감소하는 현상을 보였다. 이러한 현상은 포수제의 첨가량이 증가하면서 일부 맥석광물의 표면에 까지 영향을 주어 정광으로 회수된 것으로 사료된다. 따라서 포수제를 100 mL/ton 첨가하였을 때, 회분제거율 71.79%, 가연분회수율 90.68%를 얻을 수 있어 가장 부선횼과가 높음을 확인하였다.

3.2.2. 기포제 첨가량에 따른 영향

Fig. 4는 기포제 첨가량에 따른 부선횼과를 확인하기 위해 포수제 DMU-101(100 mL/ton), 억제제 sodium metaphosphate(1 kg/ton)를 고정한 뒤, AF65의 첨가량을 증가시키면서 실험한 결과이다. 기포력이 비교적 우수한 AF65의 경우도 6 L/ton 이하에서는 기포가 안정된 상태로 유지되지 못하였으며 6 L/ton 이상 첨가했을 때 안정된 기포가 발생하였다. 그림과 같이 기포제를 10 L/ton을 초과하여 첨가하였을 때 가연분회수율은 비슷하게 유지되면서 회분제거율이 감소하는 현상이 확인되었다. 이는 기포제의 첨가량이 증가하면서 기포의 크기가 미립의 석탄에 적절하게 조절되었다가 일정량 이상에서는 강하고 치밀한 기포층이 형성되므로 일부 맥석광물이 동반 부유⁶⁾되었기 때문으로 사료된다. 따라

Fig. 5. Effects of depressant dosage on CPT column flotation (Feed rate: 1.48 g/min, Dp : 5%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65 10 L/ton, Depressant : SMP, Wash water 300 mL/min, Air flow rate 1,200 mL/min).

서 기포제를 10 L/ton 첨가 시 회분제거율 79.13%, 가연분회수율 89.94%를 얻을 수 있어 적정 첨가량으로 확인되었다.

3.2.3. 억제제 첨가량에 따른 영향

Fig. 5는 예비실험에서 억제효과가 가장 높았던 억제제 SMP(sodium metaphosphate)의 첨가량에 따른 분리효과를 확인하기 위하여 첨가량을 0에서 7 kg/ton까지 변화 시키면서 실시한 CPT column 부선횼과이다. 먼저 억제제를 첨가하지 않은 경우 회분제거율과 F.C.%가 억제제를 첨가했을 때보다 낮음을 확인하였다. 한편, 억제제 첨가량이 3 kg/ton 첨가 하였을 때 회분제거율이 가장 높게 나타났으며, 그 이상 첨가되면 가연분회수율은 비슷하게 유지되면서 회분제거율은 급격히 감소하였다. 이러한 현상은 억제제 첨가량이 증가하면 맥석광물이 억제되어 정광의 품위는 증가하지만 일정량 이상을 첨가할 경우 맥석광물과 미분리(locked)된 석탄입자들이 함께 억제되기 때문이다⁷⁾. 따라서 회분제거율 75.64%, 가연분회수율 89.28%를 얻을 수 있는 3 kg/ton이 억제제 SMP의 적정 첨가량으로 확인되었다.

3.2.4. 공기주입량에 따른 영향

석탄회수율에 영향을 미치는 공기주입량에 따른 실험

Fig. 6. Effects of air flow rate on CPT column flotation (Feed rate: 1.48 g/min, Dp : 5%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65 10 L/ton, Depressant : SMP 3 kg/ton, Wash water 300 mL/min).

결과, Fig. 6에 나타내었다. 전반적으로 공기 주입량이 늘어남에 따라 가연분회수율은 증가하고 회분제거율은 저하되는데 이는 기포제량이 일정할 때 공기량이 증가하게 되면, column 내부의 기포크기가 커져서 기포의 부력과 부유속도가 상승하여 일부 맥석광물이 석탄입자와 함께 동반부유 됨에 따라 부유율 및 회분함유량은 증가하지만, 정광의 품위는 저하되기 때문이다⁸⁾. 한편, 공기 주입량이 1,200 mL/min.일 때, 가연분회수율이 92% 이상을 유지하면서 회분제거율이 82.26%로 가장 높아 최적 실험조건임을 확인하였다.

3.2.5. 세척수량에 따른 영향

Column 부선에서 세척수 사용량은 정광의 품위를 조절할 수 있으므로, 이에 따른 선별효과를 확인하기 위해 세척수량을 0에서 500 mL/min.까지 변화시키면서 실험한 결과, Fig. 7과 같았다. 그림에서 알 수 있듯이 세척수량이 증가할수록 맥석광물에 대한 세척력이 좋아져, 회분제거율은 향상되지만 세척수를 100 mL/min.이상으로 했을 때, 정광의 품위와 회분제거율이 급격하게 저하되었다 이는 세척수량이 증가하면서 column 내부의 하향류(underflow) 압력이 커져 맥석뿐만 아니라 일부 미립의 석탄까지 영향을 받아 광미로 배출되기 때문으로 사료된다⁹⁾.

Fig. 7. Effects of wash-water on CPT column flotation (Feed rate: 1.48 g/min, Dp : 5%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65 10 L/ton, Depressant : SMP 3 kg/ton, Air flow rate 1,200 mL/min).

3.2.6. 급광량에 따른 영향

급광량에 따른 영향을 확인하기 위해 급광량을 0.21 g/min.부터 6.67 g/min.까지 변화시키면서 실험을 진행한 결과 Fig. 8과 같았다. 실험결과 급광량이 증가할수록 가연분회수율이 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 column cell 내부의 광액농도가 증가해 체류시간이 길어짐에 따라 충분한 분리가 이루어지지 않아 일부 미립의 맥석광물들이 동반부유 되거나, 일부 미립의 석탄입자가 맥석광물들과 응결체를 형성하여 광미로 배출되기 때문으로 사료된다. 한편, 급광량이 4.43 g/min.일 경우 회분제거율 80.31%와 가연분회수율 84.05%로 비교적 높은 선별효율을 얻을 수 있었다.

3.2.7. 광액농도에 따른 영향

광액농도에 따른 부선효율을 확인하기 위해 광액농도를 3에서 10%까지 변화시키면서 실험한 결과 Fig. 9와 같았다. 광액농도가 증가할수록 가연분회수율은 저하되었으며, 회분제거율은 광액농도가 5%를 초과할 경우는 저하되었다. 광액농도 3%에서 회분제거율 80.60%, 가연분회수율 90.59%로 확인되었고, 10%에서는 회분제거율 63.76%, 가연분회수율 86.57%로 부선효율이 저하되었다. 이는 석탄의 표면에 많은 미립의 맥석광물이 먼저 부착 또는 엉킴(aggregation)현상이 발생되어 포수제

Fig. 8. Effects of feed rate on CPT column flotation (Dp : 5%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65 10 L/ton, Depressant : SMP 3 kg/ton, Wash water 300 mL/min, Air flow rate 1,200 mL/min).

Fig. 9. Effects of pulp density on CPT column flotation (Feed rate: 4.43 g/min, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65 10 L/ton, Depressant : SMP 3 kg/ton, Wash water 300 mL/min, Air flow rate 1,200 mL/min).

의 흡착 및 기포와의 부착기회를 방해하기 때문으로 사료된다. 한편 본 연구에서 가장 높은 회분제거율 85.59%, 가연분회수율 88.97%를 얻을 수 있었던 광액 농도 5%가 적정 광액농도로 확인되었다.

Fig. 10. Result of multi stage (Raw sample fixed carbon: 44.16%) (Feed rate: 6.81 g/min. Dp: 10%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65 10 L/ton, Depressant : SMP 3 kg/ton, Wash water 360 mL/min. Air flow rate 1,200 mL/min).

3.3. Microbubble column 부선을 통한 정선희수 영향

325 mesh이하 입도의 미립 석탄의 회분제거율을 높이기 위한 방법으로 Microbubble column 부선에서 1차 회수된 조선정광(-325 mesh, F.C. 44.16%)을 대상으로 광액농도를 10%로 정선 실험⁹⁾을 실시한 결과, Fig. 10과 같았다. 그림에서 알 수 있듯이 회분제거율이 64.05%인 조선정광(rougher concentrate)을 대상으로 정선한 후, 누적회분제거율은 1차 정선(stage1)한 후 76.64%, 2차 정선(stage2) 후에는 83.98%로 증가하였다. 이와 같이 정선공정을 통해 회수율은 조선정광 84.78%에서 2차 정선정광의 누적회수율 68.07%까지 저하되었지만 회분제거율이 20%정도 향상됨을 알 수 있었다.

한편, 이들 산물을 대상 대상으로 발열량을 측정한 결과, 원 시료 3,076 kcal/kg에서 2차 정선정광은 6,284 kcal/kg까지 증가하여 원 시료와 비교하여 높은 열량의 산물을 얻을 수 있었다.

3.4 SEM 및 원소별 mapping

Fig. 11은 원 시료의 SEM 및 원소별 mapping 결과로서 대부분이 탄소성분으로 이루어져 있지만 Si와 Al 사이에 탄소 C가 존재하고 있어 단체분리가 되지 않은 상태로 존재하고 있음을 알 수 있었다. 한 편, Fig. 12(a)

Fig. 11. SEM micrograph & Element mapping of raw sample ($\times 300$).

는 CPT column 부유선별에서 가장 품위가 높았던 최적 조건으로 실험을 한 후 회수된 정광의 사진이고, (b)는 광미의 사진이다. (b)에서 확인할 수 있듯이 회수된 광미에서는 탄소 C가 거의 확인되지 않았으며 불순물인 Si와 Al이 함께 분포하고 있음을 알 수 있었다. 한편, 정광인 (a)에서는 불순물은 Si와 Al이 부분적으로 존재하지만 거의 보이지 않고 탄소 C가 주로 분포함이 확인되어 100 mesh 이하로 분쇄할 경우 단체분리가 잘 이루어질 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 실험은 국내 경동탄광에서 직접 채취한 미립의 저품위 무연탄(고정탄소 57.39%)을 대상으로 고품위 석탄 생산의 가능성을 확인하고자 XRD 분석과 입도분석을 한 후 일반부선에서 파악한 적정 부선조건을 토대로 CPT column과 Microbubble column 부선을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원 시료의 공업분석 결과, 고정탄소가 57.39%, 휘발분 4.49%, 회분 38.11%이었다. XRD 분석결과, Pyrophyllite($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), Bimessite($\text{Na}_4\text{Mn}_{14}\text{O}_{27}9\text{H}_2\text{O}$), 석영(SiO_2)등이 맥석광물로 확인되었다.
2. 부선 시약 규명을 위한 일반부유선별 실험결과, 포수제는 DMU-101 기포제로는 AF65, 맥석의 억제제로 SMP를 사용하였을 때 가장 좋은 부선효과를 얻을 수 있었다.
3. CPT column 부선을 통해 실험한 결과, 포수제로 DMU-101를 100 mL/ton 첨가하였을 때, 기포제로 AF65의 사용량이 6 L/ton 일 때, 맥석의 억제제로 SMP를

(a) Concentrate. ($\times 100$)

(b) Tailing. ($\times 400$)

Fig. 12. SEM micrograph & Element mapping of CPT column flotation.

3 kg/ton을 첨가하였을 때, 공기 주입량이 1,200 mL/min.일 때, 세척수량이 100 mL/min. 일 때, 금광량은 4.43 g/min.로 했을 때, 광액농도는 5%로 하였을 때, 가장 좋은 부선효과를 얻을 수 있었다.

4. Microbubble column 부선을 하여 얻은 조선정광을 대상으로 정선 실험을 실시한 결과, 1차 정선 실시 후에 누적 회분제거율이 76.64%이었으며 2차 정선 실시 후에는 83.98%로 증가되었고, 발열량도 3,076 kcal/kg에서 6,284 kcal/kg까지 향상되었다.

5. 원 시료의 SEM 및 원소별 mapping 결과, Si와 Al과 탄소 C가 단체분리가 되지 않은 상태로 존재하였으며 CPT column 부선을 통해 얻은 정광산물의 경우 단체분리가 충분히 이루어 졌음을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 2013년도 주요사업 위탁연구사업으로 연구가 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. H. S. Joen, O. H. Han, S. M. Shin and R. H. Yoon, 2002 : "Development of Recycling Technique of Mill Reject Produce using Triboelectrostatic Separation", The Korean Institute of Resources Recycling, Vol. 11, No. 2, pp.20-27.
2. G. M. Lee, 1985 : "Mineral processing", pp.219-305, Bando publisher, Seoul, Korea.
3. S. W. Yoo, H. K. Park and M. Y. Jung, 2009 : Effect of the Oxidation of Fixed Carbon on the Oily Collector Addition for the Coal Briquette Ash Flotation, Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 46, No. 5, p.58.
4. M. D. Brown, G. T. Adel, and R. H. Yoon, 1984 : *A Laboratory Stirred Ball Mill for Fine Grinding of Coal*, Proceedings of 4th Annual Collegiate Association of Mining Education, Lexington, Kentucky, U.S.A, October, 1984.
5. Finch and Dobby, 1990; Groopo and Parekh, 1990; Goodall and O'Connor, 1992; Tao et al, 2000.
6. R. H. Yoon, G. T. Adel and G. H. Luttrell., 1987 : *Development of The Microbubble Column Flotation Process*, Proceedings of 2nd International Conference on Processing and Utilization of High-Sulfur Coals, Carbondale, Illinois, U.S.A, September 27-October 1, 1987.
7. J. A. Finch and G. S. Dobby, 1989 : Column Flotation, p.157. Pergamon Press.
8. Julius B. R. Rubinstein, 1995 : *Column Flotation Processes, Designs and Practices*. Vol. 2, p.143, Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland.
9. Wills, B. A and T. J. Napier-Munn, 2006 : *Mineral processing technology(7th)*, p.290, p.306. Elsevier, Burlington, USA.

韓 五 炯

- 현재 조선대학교 에너지 · 자원공학과 교수
 - 당 학회지 제22권 5호 참조
-

金 珉 奎

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
 - 당 학회지 제22권 5호 참조
-

金 珉 奎

- 조선대학교 에너지 · 자원공학과 학사
 - 현재 조선대학교 에너지 · 자원공학과 석사과정
-