

부유선별법에 의한 국내산 석탄의
품위향상 연구

Study for improving Grade of Domestic Coal by Flotation

2014년 8월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김민규

부유선별법에 의한 국내산 석탄의
품위향상 연구

지도교수 한 오 형

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 4월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 민 규

김민규의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박 천 영 ㉠

위 원 조선대학교 교수 강 성 승 ㉠

위 원 조선대학교 교수 한 오 형 ㉠

2014년 5월

조선대학교 대학원

- 목 차 -

List of tables	iv
List of figures	vi
Abstract	vii
제 1 장 서론	1
제 2 장 이론적 배경	2
제 1 절 부유선별	2
1. 부유선별 이론	2
2. column 부선	4
3. 접촉각	6
4. 제타전위	7
5. 부선시약	8
제 3 장 시료 및 실험방법	9
제 1 절 시료	9
1. 입도분석 및 공업분석	9
가. 제일(서림)광업소 무연탄	9
나. 화순광업소 무연탄	11
다. 경동 탄광 무연탄	13

2. 광물학적 특성	15
가. 제일(서림)광업소 무연탄	15
나. 화순광업소 무연탄	17
다. 경동 탄광 무연탄	19
3. 접촉각 측정	21
4. 제타전위 측정	22
제 2 절 실험방법	23
1. 시료의 분석	24
2. 부유선별 기기	25
제 4 장 실험 결과	28
제 1 절 제일(서림)광업소 무연탄	28
1. 일반부선(Batch flotation)	28
2. Microcel™ column 부선	29
가. 포수제 첨가량에 따른 영향	29
나. 기포제 첨가량에 따른 영향	30
다. 억제제 첨가량에 따른 영향	31
라. 세척수량에 따른 영향	32
마. 공기주입량에 따른 영향	33
3. 결과	34
제 2 절 화순광업소 무연탄	35
1. 일반부선(Batch flotation)	35

2. CPT column 부선	36
가. 포수제 첨가량에 따른 영향	36
나. 기포제 첨가량에 따른 영향	37
다. 세척수량에 따른 영향	38
라. 공기주입량에 따른 영향	39
마. 광액농도에 따른 영향	40
3. Microcel™ column 부선	41
4. 결과	42
제 3 절 경동 탄광 무연탄	43
1. 일반부선(Batch flotation)	43
2. CPT column 부선	44
가. 포수제 첨가량에 따른 영향	44
나. 기포제 첨가량에 따른 영향	45
다. 세척수량에 따른 영향	46
라. 급광량에 따른 영향	47
마. 광액농도에 따른 영향	48
3. Microcel™ column 부선	49
4. 결과	50
제 5 장 결론	51
참고문헌	52

List of tables

Table 3-1. Result of proximate analysis for raw sample of Jeil mining station	9
Table 3-2. Result of Gross Calorific Value analysis for raw sample of Jeil mining station	9
Table 3-3. The result of a wet screen analysis for raw sample of Jeil mining station	10
Table 3-4. Result of proximate analysis for raw sample of Hwa-soon mining station	11
Table 3-5. The result of a wet screen analysis for raw sample of Hwa-soon mining station	11
Table 3-6. Result of Gross Calorific Value analysis for raw sample of Hwa-soon mining station	12
Table 3-7. Result of proximate analysis for raw sample of Gyeongdong mining station	13
Table 3-8. The result of a wet screen analysis for raw sample of Gyeongdong mining station	13
Table 3-9. The result of a wet screen analysis for raw sample of Gyeongdong mining station	14
Table 3-10. Result of Chemical analysis for raw sample of Hwa-soon mining station	18
Table 4-1. Effects of cleaning stage on Microcel TM column flotation.	41

List of figures

Figure 2-1. Schematic view of Denver type flotation machine	3
Figure 2-2. Schematic illustration of froth structure	3
Figure 2-3. Schematic illustration of column flotation machine	5
Figure 2-4. Contact angle between bubble and particle	6
Figure 2-5. Schematic showing the distribution of ions around a charged particle	7
Figure 3-1. X-ray diffraction pattern of raw sample from Jeil mining station ·	15
Figure 3-2. SEM micrograph & Element mapping of Jeil mining station raw sample	16
Figure 3-3. X-ray diffraction pattern of raw sample from Hwa-soon mining station	17
Figure 3-4. X-ray diffraction pattern of ash	17
Figure 3-5. SEM micrograph & Element mapping of Hwa-soon mining station raw ample	18
Figure 3-6. X-ray diffraction pattern of raw sample from Gyeongdong mining station	19
Figure 3-7. SEM micrograph & Element mapping of Gyeongdong mining station raw ample	20
Figure 3-8. Contact angle of raw coal ore sample	21
Figure 3-9. Zeta potential of raw coal ore sample	22

Figure 3-10. Batch laboratory flotation machine & concentrate and tailing pictures	25
Figure 3-11. CPT column flotator & concentrate and tailing pictures	26
Figure 3-12. Microcel TM column flotation system; (a)machine and (b)schematic illustration.	27
Figure 4-1. Effect of collector dosage on Microcel TM column flotation	29
Figure 4-2. Effect of frother dosage on Microcel TM column flotation	30
Figure 4-3. Effect of depressant dosage on Microcel TM column flotation	31
Figure 4-4. Effect of wash-water on Microcel TM column flotation	32
Figure 4-5. Effect of air flow rate on Microcel TM column flotation	33
Figure 4-6. Effect of collector dosage on CPT column flotation	36
Figure 4-7. Effect of frother dosage on CPT column flotation	37
Figure 4-8. Effect of wash-water on CPT column flotation	38
Figure 4-9. Effect of air flow rate on CPT column flotation	39
Figure 4-10. Effect of pulp density on CPT column flotation	40
Figure 4-11. Effect of collector dosage on CPT column flotation	44
Figure 4-12. Effect of frother dosage on CPT column flotation	45
Figure 4-13. Effect of wash-water on CPT column flotation	46
Figure 4-14. Effect of feed rate on CPT column flotation	47
Figure 4-15. Effect of pulp density on CPT column flotation	48
Figure 4-16. Effects of cleaning stage on Microcel TM column flotation.	49

Abstract

Study for improving Grade of Domestic Coal by Flotation

By Kim, Min Gyu

Adv. Prof. : Han, Oh Hyung

Dept. of Energy Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

In order to recover clean coal and reduce the ash content in low-grade coal, flotation experiments were carried out. Three kinds of coal samples were collected from domestic coal mine sites, and were measured according to particle size distribution analysis and an industrial analysis as a preliminary step. These coal samples were also investigated using XRD, SEM, contact angle and Zeta potential. As a result of the XRD analysis, muscovite, pyrophyllite, quartz, graphite, and birnessite were identified in the coal samples, and it is confirmed that the Si and Al can not be liberated from the coal samples according to SEM analysis. To identify the optimum conditions for conditioning reagents(collector, frother, depressant), a general flotation experiment was carried out. The obtained conditions from the general flotation experiment were again applied in the CPT(Canadian process Technologies) column and in a MicrocelTM column flotation test. According to the results from the flotation test, the ash rejection and combustible recovery were enhanced to 81.23% and 84.90%, respectively. The results of the flotation tests showed that the best enhancement rate parameters were when the pulp density was 3.0%, the collector content was 200mL/ton(DMU 101), frother content was 30L/ton(MIBC), the depressant content was 3.0 kg/ton(SMP) and the air flow rate was 1,200mL/min. It is suggest that the results of the flotation experiment conditions

was to enhance the utilization of low-grade domestic coal and to up grade the coal quality, and finally to reduced air pollution.

제1장 서론

최근 석탄이용을 둘러싼 여건은 커다란 변화를 보이고 있는데 에너지 수요, 특히 석유수요의 확대, 산성비 및 지구 온난화 등 지구환경 문제에 대한 세계적인 관심의 고조, 그리고 석탄전환을 포함한 석탄이용 기술의 진보 등으로 세계 각국은 석탄의 이용 확대에 대한 기대가 매우 큰 실정이다. 또한, 석탄은 우리나라가 보유하고 있는 유일한 화석 에너지로써 지금과 같은 고유가 시대에, 수입하는 에너지를 대체할 수 있는 대안이다. 특히, 석탄은 가스나 석유와 같은 화석에너지에 비해 매장량이 풍부하여 지역적인 편차가 심하지 않고 다른 화석에너지에 비해 경제성이 우수하여, 차후 발생할지도 모를 에너지 자원의 전략적 사용을 방지할 수 있는 에너지이다.(한오형 외 3인, 2011).

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 한다.

최근 국내에서도 청정석탄 이용을 위한 기술개발이 이루어지고 있으나, 석탄가스화 및 액화관련 기술이 주를 이루며, 선탄, 선별, 탈황, 탈회 등에 대한 연구는 선진국에 비하여 미흡한 실정이다. 석탄이용을 위해서는 환경적으로 문제가 야기되는 SOx, NOx, 석탄회 등을 저감화하는 기술을 개발하여야 한다. 또한 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, 일반부유선별기의 선별효율은 53 μm 이하로 미립자 처리에 적합하지 못한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 저 품위 무연탄을 경기(서림)광업소, 화순광업소, 경동탄광에서 각각 채취하여 CPT(Canadian process Technologies) column 및 MicrocelTM column 부선기술을 적용하여 초저회분 고품위 청정석탄의 회수 가능성을 확인하고자 하였다.

제2장 이론적 배경

탄소를 함유하는 광물을 선별하는 기술로는 물리적 성질을 이용한 비중선별과 자력선별, 정전선별이 있으며, 물리화학적 성질을 이용한 부유선별법이 있다(Finch and Dobby, 1990). 부유선별법은 분리하고자 하는 고체입자의 표면특성을 이용하며 광물처리 분야에서 가장 널리 활용되고 있다.

제1절 부유선별

1. 부유선별 이론

부유선별(froth flotation)은 분리하고자 하는 고체 입자의 표면특성, 즉 습윤도(wettability)를 이용하는 물리화학적 선별법이다. 물에 잘 적셔지는 광물의 표면을 친수성(hydrophilic)이라 하며, 반면에 잘 적셔지지 않는 광물의 표면을 소수성(hydrophobic)이라고 하는데 고체 혼합물이 현탁되어 있는 광액(pulp)내에 기체를 주입하여 소수성 입자만 선택적으로 기포에 부착시켜 수면에 떠오르게 한다. 반면에 친수성 입자는 광액 내에 남게 되는 특성을 이용하여 분리가 가능하다. 한편, Fig. 2-1은 Denver type 일반부선기의 개략도이다.

이 방법은 주로 광석광물(ore mineral)과 맥석광물(gangue mineral)을 분리하는 선별법으로 이용되었는데 최근에는 폐플라스틱 상호분리, 폐지로부터 잉크제거, 석탄회정제 등 폐기물 처리 분야뿐만 아니라 폐수(waste water)처리에도 많이 이용되고 있다.

Fig. 2-2는 기포에 광화된 여러 가지 형태를 보여주고 있다. 이들의 형태를 보면 광물이 기포에 부착(attachment)된 것과 미립이 존재하는 부선 공정에서 기포에 흡착한 소수성 입자들 사이에 미립이 끼워져 동반흡착(entrapment)된 것, 지나치게 미립으로 존재하는 부선에서 친수성인 맥석이 기포 상승 시에 생기는 흡인력 등에 의해 기포와 기포사이에 혼입하여 상승하게 되는 현상(entrainment)을 보여주고 있다. 이와 같이 entrapment와 entrainment는 모두 부선희율을 저하시키게 하는 원인

이 된다(이강문, 1985).

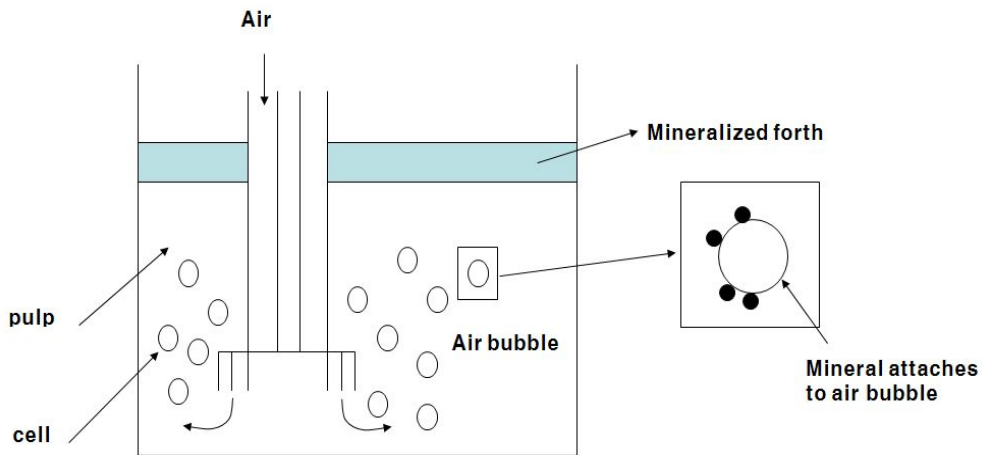


Fig. 2-1. Schematic view of Denver type flotation machine.

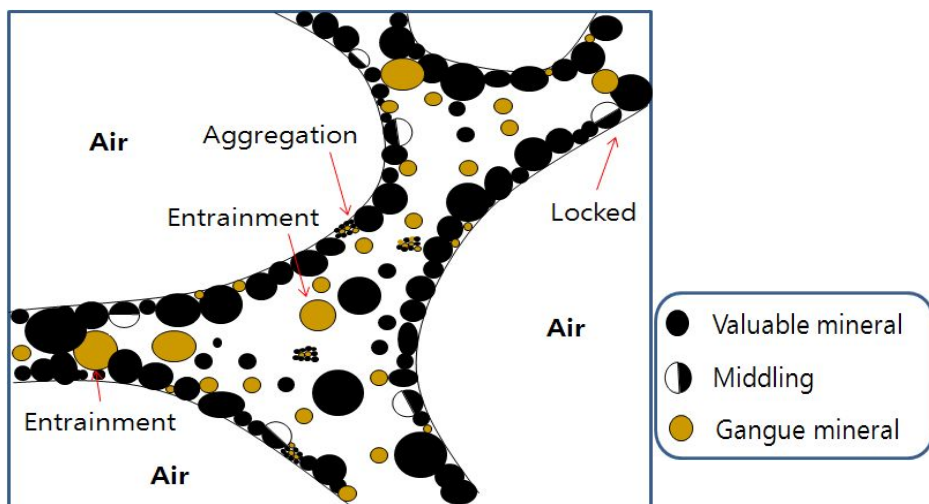


Fig. 2-2. Schematic illustration of froth structure.

2. column 부선

지금까지의 부유선별은 denver type 처리공정이 일반화되어 있었다. 그러나 이 공정은 부선조의 구조상 품위를 향상시키는 데는 상당한 한계성을 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 그것은 교반조 내에서 임펠러의 강한 회전에 의하여 품위가 저하되거나 교반조 내에서 생성된 기포가 크기 때문에 부력이 증가하여 미 분쇄된 맥석광물이 부상하기 때문이다. 이와 같은 문제점이 있어 1970년대부터 column 공정이 도입되었다.

Fig. 2-3은 column 부선기의 개략도이다. column 부선의 기본적인 원리는 기포와 고체 입자들의 부착에 의한 선별방법으로 일반 부유선별(denver type)과 같으나, 기포와 고체의 부착 메커니즘이 서로 다르다. 즉, 일반 부유선별은 동적에너지(dynamic energy)인 기계적인 교반에너지에 의한 기포와 고체의 부착방법을 이용하지만, column 부선은 정적에너지(static energy)인 역방향 흐름을 이용하는 것이다. 이것은 column의 하부에서 공기를 주입하여 기포방울이 column의 상부에서 하부로 흐르는 슬러리를 지나 상승하게 함으로써 부선이 이루어지는 것으로, 이때 슬러리를 지나면서 친수성인 광물과는 부착하지 않고 소수성인 광물과 부착하여 부선 셀의 윗부분으로 기포에 부착된 목적광물이 상승하여 선별이 이루어지게 된다.

역방향 흐름(counter current)은 대부분의 column 내에서 가장 위쪽 상단에 위치한 세척수의 첨가에 의해 보다 좋은 효과를 나타낸다. 이러한 흐름형태는 일반 부유선별 셀에서 발견된 것과 정반대이다. 즉 일반 부유선별에 있어서는 기포, 물 그리고 고체들은 모두 같은 방향으로 운동한다. column 부선의 역방향 흐름 결과 column은 부선을 위해 기포와 고체입자의 부착기회가 향상된 유체역학적인 조건을 갖게 되고, 또한 높은 회수율과 보다 저렴한 동력소비하에서 일반 부유선별보다 더 정제된 산물을 생산 할 수 있게 된다.

일반 부선기에 의한 부유선별의 경우 피할 수 없는 한계점은 부선 셀 내에 유체의 난류에 따라 미립자들이 기포 궤적내로의 기계적 탑승에 의하여 상당량의 친수성 맥석입자들이 광액 중에서 정광으로 옮겨지는 것이다. 이를 최소화하기 위한 광액표면에 두터운 포말을 만들어 맥석은 광액중으로 돌려보내고, 원하는 소수성 입자들은 포말 중에 지니고 있다가 최종적으로 부선조에 분리되도록 해야 한다. 그러나 일반 부유선별기에서는 이러한 세척작용이 미흡하여 몇 단계의 정선이 필요하

며, 이로 인하여 회수율의 저하 및 동력의 과다 투입 등의 문제점이 발생된다.

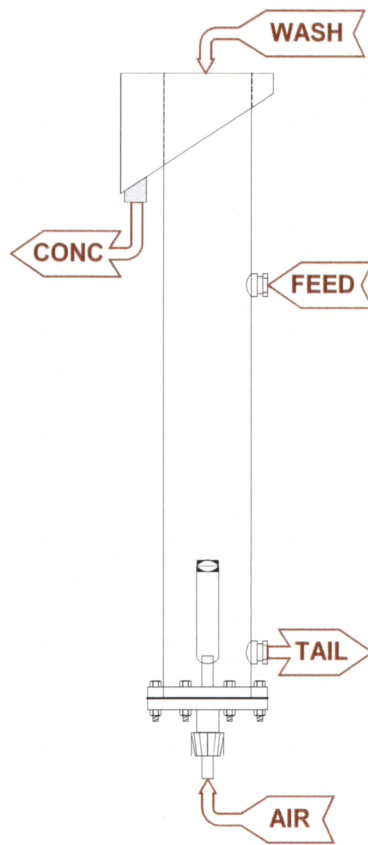


Fig. 2-3. Schematic illustration of column flotation machine.

3. 접촉각

접촉각이란 액체와 기체가 고체 표면 위에서 열역학적으로 평형일 때 이루는 각을 말한다. Fig. 2-4를 보면 알 수 있듯이 접촉각(θ)은 고체표면의 젖음성(wettability)을 나타내는 척도로써, 대부분 고착된(sessile) 물방울에 의해 측정이 가능하다. 평평한 고체 표면에 접촉한 액체의 접촉각은 액체 접합점에서 물방울 곡선의 끝점과 고체 표면의 접촉점에서 측정 가능하다. 이러한 접촉각은 물질의 부유능력을 나타내는 척도로도 쓰인다.

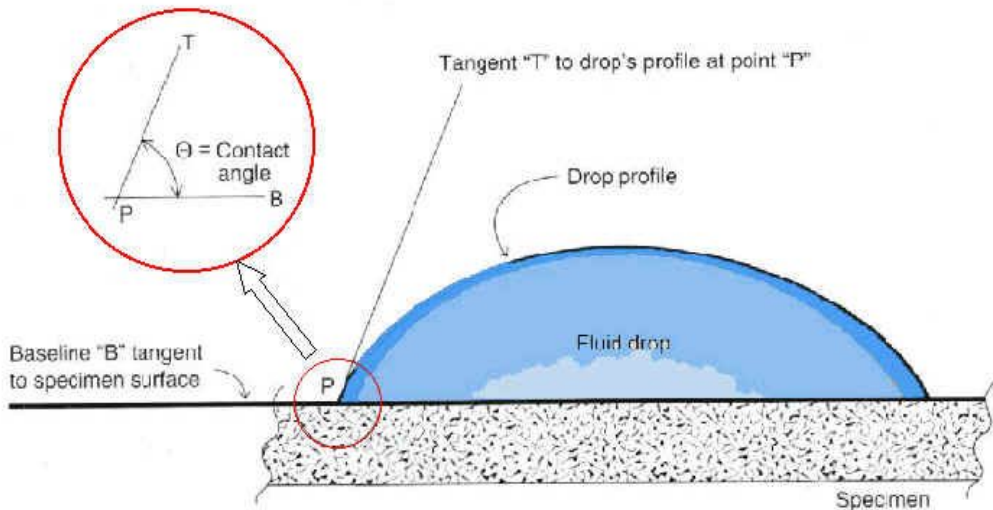


Fig. 2-4. Contact angle between bubble and particle (Lee, 1999)..

4. 제타전위

수용액 속에 들어 있는 미립자(콜로이드상)는 표면 전하에 따라 반대되는 이온이 달라붙어 Fig. 2-5와 같은 전기 이중층을 형성한다. 즉, 콜로이드입자의 표면이 음으로 대전되어 있으면 그 표면에 양이온들이 강하게 붙어서 치밀한 고정층을 형성하고 양이온의 잉여들은 고정층에 있게 되나 총체적으로 점점 밀려나가는 상태를 나타내어 확산층(또는 분산층)을 형성한다. 이 두 층을 전기이중층(electrical double)이라 한다. 이 때 확산층의 안쪽에서 바깥쪽으로 향하여 양이온의 농도가 점차 저하되면 역으로 음이온이 점차 증대되어 확산층이 없어지는 곳에 두 이온의 농도가 같게 된다. 콜로이드 입자가 물속에서 이동할 때 입자에 물의 일부가 부착하여 이동하며 이때 이동면에서 부착수와 정지수 사이에 전단면(slipping plane 또는 plane of shear)이 생기게 되며, 이 전단면에서의 정전기 전위를 제타전위(zeta potential)라 한다.

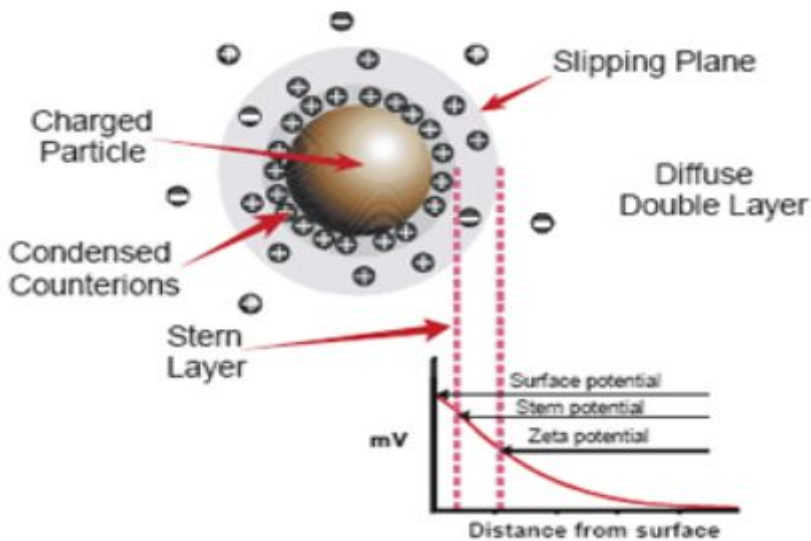


Fig. 2-5. Schematic showing the distribution of ions around a charged particle(Hunter, 1981; Kaszuba et al., 2010).

5. 부선시약

대부분의 선별법들이 거의 순수한 기계적, 물리적 방법에 의하여 선별이 이루어지는 것과는 달리 부유선별은 물리적 및 물리화학적, 또는 화학적인 영향을 받는 선별방법이다. 이는 앞서 부유선별 이론에도 언급한 바와 같이 목적광물의 표면을 소수성(hydrophobic)으로 변화시키거나, 광물과 부착한 기포의 안정성을 부여하는 등의 기능을 하는 시약들을 목적에 맞게 첨가하여야만 선별에 있어 효율성을 향상시킬 수 있다.

부선에 사용되는 시약들은 그 목적에 따라 아래와 같이 분류할 수 있으며, 석회석과 규산나트륨 등의 시약들은 부유선별에서 한 가지 이상의 역할을 하기도 한다.

한편, 본 연구에서는 여러 가지 부선시약 중 포수제(collector), 기포제(frother), 억제제(depressant)등을 사용하여 첨가량 규명을 위한 실험을 실시하였다.

- ① 포수제(collector) : 목적 광물의 표면에 흡착하여 그 표면을 소수성으로 변화시켜 기포에 부착을 용이하게 하는 부선시약
- ② 기포제(frother) : 물의 표면장력을 저하시켜 미세기포의 발생을 용이하게 할 뿐만 아니라 기포의 안정성을 향상시키는 부선시약
- ③ 억제제(depressant 또는 depressing agent) : 소수성표면을 친수성으로 전환시키거나 포수제의 흡착을 방해하여 부유성광물의 부유성을 제거시키는 시약
- ④ 활성화제(activator) : 부유하기 어려운 광물 또는 이미 억제를 받아 비부유성이 된 광물에 다시 부유성을 부여하는 역할
- ⑤ pH 조절제(pH regulation agent) : 광액의 pH를 조절하여 광석과 시약의 흡착 조건을 변화시키는 시약
- ⑥ 분산제(dispersant 또는 dispersing agent) : 광액내의 입자들을 분산시켜 친수성 입자들이 동반부유(entrainment) 하지 못하도록 하는 시약

제3장 시료 및 실험방법

제1절 시료

국내에 부존된 석탄을 대상으로 부유선별 특성을 확인하기 위하여 국내에서 생산된 저 품위 무연탄 3개의 시료를 대상으로 실험을 진행하였다.

1. 입도분석 및 공업분석

가. 제일(서림)광업소 무연탄

본 연구에서 사용된 첫 번째 시료는 국내 경기도 연천의 경기 제일(서림)광업소에서 직접 채취한 무연탄을 사용하였다. Table 3-1은 원 시료의 공업분석 결과를 나타낸 것이다. 분석 결과 고정탄소가 20.68%였으며, 휘발분 5.34%, 회분 73.98%로 나타났다. 한편, Table 3-2는 입도별 구간의 무게비, 고정탄소 및 발열량을 분석한 결과이며, 5 mesh이상의 산물을 단순 체질만으로 발열량을 2,000 Kcal/kg 이상으로 올릴 수 있음을 제시한다.

Table 3-1. Result of proximate analysis for raw sample of Jeil mining station

Name	Proximate Analysis (%)		
	Volatile Dry	Ash Dry	Fixed carbon Dry
Raw sample	5.34	73.98	20.68

Table 3-2. Result of gross calorific value analysis for raw sample of Jeil mining station

Size (mesh)	Weight (%)	Fixed Carbon Dry (%)	Gross Calorific Value (Kcal/Kg)
Raw sample	100.00	20.68	1,560
-30	36.46	34.16	2,730
+30	63.54	13.97	1,110
5 × 10	22.75	14.05	1,860
3.5 × 5	9.09	13.82	990
+3.5	8.21	9.09	560

Table 3-3은 원 시료를 Disk mil과 석탄 미분쇄기를 사용하여 과 분쇄 후 체를 이용하여 습식 입도 분석한 결과로, 메디안경 D_{50} 은 78.257 μm 이었으며 조립질인 +30 mesh 구간의 F.C의 품위가 낮은 것으로 나타났다. 이는 맥석광물의 강도가 높아 잘 깨지지 않아 조립질에 비교적 다량 분포하기 때문이며, 반대로 석탄은 매우 강도가 낮아 쉽게 부서지기 때문에 비교적 미립의 영역의 입자들의 F.C 함량이 높은 것을 알 수 있다

Table 3-3. The result of a wet screen analysis for raw sample of Jeil mining station (D_{50} : 78.257 μm)

Size (mesh)	Weight (%)	F.C Assay	Size (μm)	Cum. Under	F.C Dist.(%)	Cum. F.C Under(%)
-500	9.74	29.27 (2.85)	-25	100.00	13.69	100.00
400 * 500	5.44	40.97 (2.23)	500(25)	90.27	10.71	86.31
325 * 400	5.13	36.44 (1.87)	400(37)	84.83	8.98	75.60
270 * 325	1.54	47.89 (0.74)	325(43)	97.70	3.54	66.62
200 * 270	0.67	40.84 (0.27)	270(53)	78.16	1.31	63.08
140 * 200	0.13	38.90 (0.05)	200(74)	77.49	0.24	61.76
100 * 140	1.63	33.29 (0.54)	140(113)	77.36	2.61	61.52
60 * 100	0.74	33.67 (0.25)	100(147)	75.73	1.20	58.91
30 * 60	11.45	29.23 (3.35)	60(246)	74.99	16.08	57.71
10 * 30	23.49	14.75 (3.46)	30(600)	63.54	16.65	41.63
5 * 10	22.75	14.05 (3.20)	10(1,651)	40.05	15.36	24.98
3.5 * 5	9.09	13.82 (1.26)	5(3,962)	17.30	6.04	9.62
+3.5	8.21	9.09 (0.75)	3.5(5,613)	8.21	3.59	3.59
Total	100.00	(20.81)			100.00	

나. 화순광업소 무연탄

두 번째 시료는 국내 화순광업소에서 직접 채취한 무연탄을 과 분쇄 공정을 통해 입도 조절하여 사용하였다. Table 3-4은 원 시료의 공업분석 결과를 나타낸 것으로 분석 결과 고정탄소가 56.12%였으며 수분 1.09%, 회분 37.56%, 휘발분 6.31%로 나타났다.

Table 3-4. Result of proximate analysis for raw sample of Hwa-soon mining station

Name	Proximate Analysis (%)		
	Volatile Dry	Ash Dry	Fixed carbon Dry
Raw sample	6.31	37.56	56.12

Table 3-5. The result of a wet screen analysis for raw sample of Hwa-soon mining station (D₅₀ : 81.558 μm)

Size (mesh)	Weight (%)	F.C Assay (Dry basis)	Size (μm)	Cum. Under	F. C Dist.(%)	Cum. F. C Under(%)
+60	34.76	50.60 (17.59)	60(250)	34.76	32.54	32.54
60 * 100	11.68	55.54 (6.49)	100(149)	46.44	12.00	44.54
100 * 140	7.18	58.73 (4.22)	140(113)	53.62	7.80	52.34
140 * 200	5.36	59.24 (3.18)	200(74)	58.98	5.87	58.21
200 * 270	4.59	58.91 (2.70)	270(53)	63.57	5.00	63.21
270 * 325	1.13	60.77 (0.69)	325(44)	64.70	1.27	64.48
325 * 400	2.44	59.30 (1.45)	400(37)	67.14	2.68	67.16
400 * 500	3.61	60.72 (2.19)	500(25)	70.75	4.05	71.21
-500	29.25	53.19 (15.56)	-25	100	28.78	100
Total	100.00	(54.06)			100.00	

Table 3-5는 체를 이용한 원 시료의 습식 입도 분석결과로, 메디안경 D₅₀은 81.558 μm 이었으며 조립질인 +60 mesh 구간의 F.C의 품위가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이는 맥석광물의 강도가 석탄에 비해 강하므로 쉽게 과 분쇄 되지 않아 조립질에 맥석이 비교적 다량 분포하기 때문이며, 반대로 석탄은 매우 강도가 약해 쉽게 분쇄되기 때문에 100 mesh 이하의 입도 구간에 F.C 함량이 높은 것을

알 수 있다. 한편, 가장 미립인 -500 mesh의 경우 과 분쇄과정에서 일부 과 분쇄된 맥석광물이 포함되어 있어 F.C의 품위가 낮은 것으로 사료 된다

Table 3-6는 원 시료와 입도별 구간의 무게비, 고정탄소 및 발열량을 분석한 결과이다. 분석결과 원 시료의 발열량은 3,694 kcal/kg 이었으며, +100 mesh 구간과 -500 mesh 구간을 제외한 나머지 구간의 발열량이 큰 차이가 없이 거의 비슷함을 알 수 있다. 한편 +100 mesh 구간과 -500 mesh 구간 산물을 단순 체질에 의해서 분리하는 것만으로도 발열량을 4,000 kcal/kg 이상으로 올릴 수 있으나 이 구간이 차지하는 무게비가 64%이상을 차지하므로 고품위 석탄을 얻기 위해서는 선탄공정이 필요함을 제시한다.

Table 3-6. Result of Gross Calorific Value analysis for raw sample of Hwa-soon mining station

Size (mesh)	Weight (%)	Fixed Carbon (%) (Dry basis)	Gross Calorific Value (kcal/kg) (Dry basis)
Raw sample	100.00	55.52	3,694
+60	34.77	50.60	2,972
60 * 100	11.68	55.54	3,695
100 * 140	7.18	58.73	4,189
140 * 200	5.36	59.24	4,429
200 * 270	4.59	58.91	4,608
270 * 325	1.13	60.77	4,696
325 * 400	2.44	59.30	4,482
400 * 500	3.61	60.72	4,623
-500	29.25	53.19	3,458

본 연구에서는 입도 특성을 확인하고 일반부유선별기에서 처리하기 힘든 53 μ m (270 mesh) 이하의 입자들의 선별 효율을 높이기 위하여 Vibro Screen을 사용하여 세 구간의 시료로 입도를 조절하여 +100 mesh 구간 산물을 Denver sub-A 부유선별기를 사용하여 일반부선을 통한 예비실험을 실시하였으며, 100 \times 325 mesh 구간의 입도 산물은 100 \times 325 mesh 입도 범위에서 높은 선별효율을 갖는 CPT column에 적용하여 조건제 첨가량 실험을 실시하였다. 또한 -325 mesh 시료를 대상으로 MicrocelTM column을 이용하여 처리횟수에 따른 영향 실험을 실시하였다.

다. 경동 탄광 무연탄

세 번째 시료는 국내 경동 탄광에서 채굴된 무연탄을 1차 Screening 단계에서 발생한 -20 mm 산물과 Jaw crusher에 의해 파쇄 후 산물을 체질하여 얻은 -20 mm 산물을 혼합한 시료(이하 원 시료라 함)를 2차 파 분쇄 공정을 통해 +100, 100×325, -325 mesh 3구간으로 입도 조절하여 사용하였다. Table 3-7은 원 시료의 공업분석 결과를 나타낸 것으로 분석 결과 수분을 제외한 고정탄소가 57.39%였으며, 회분 38.11%, 휘발분 4.49%로 나타났다.

Table 3-7. Result of proximate analysis for raw sample of Gyeongdong mining station

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

Table 3-8. The result of a wet screen analysis for raw sample of Gyeongdong mining station

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 3-8은 체를 이용한 원 시료의 습식 입도 분석결과로, 조립질인 +30 mesh 구간의 F.C의 품위가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이는 맥석광물의 강도가 석탄

에 비해 강하므로 쉽게 과 분쇄 되지 않아 조립질에 비교적 다량 분포하기 때문이며, 반대로 석탄은 매우 강도가 약해 쉽게 분쇄되기 때문에 100 mesh 이하의 입도 구간에 F.C 함량이 높은 것을 알 수 있다. 한편, 가장 미립인 -500 mesh의 경우 일부 점토광물과 과 분쇄과정에서 일부 과 분쇄된 맥석광물이 포함되어 있어 F.C의 품위가 낮은 것으로 사료된다.

Table 3-9은 Disc mill을 사용하여 건식분쇄한 후 Vibro Screen을 통해 입도 조절이 완료된 세 구간 (+100 mesh, 100 × 325 mesh, -325 mesh)의 시료를 다시 표준체를 사용, 습식 입도 분석결과로, 메디안경 D_{50} 은 +100 mesh 구간이 271.971 μm , 100 × 325 mesh구간이 64.451 μm , -325 mesh 구간은 8.478 μm 이었다. 그리고 +100 mesh와 100 × 325 mesh 구간에 조절하고자 하는 입도 외에 약간의 미립자가 포함되어 있는 것은 건식 공정의 한계임을 확인하였다.

+100 mesh 구간 산물을 Denver sub-A 부유선별기를 사용하여 일반부선을 통한 예비실험을 실시하였으며, 100 × 325 mesh 구간의 입도 산물은 100 × 325 mesh 입도 범위에서 높은 선별효율을 갖는 CPT column에 적용하여 조건제 첨가량 실험을 실시하였다. 또한 -325 mesh 시료를 대상으로 MicrocelTM column을 이용하여 처리횟수에 따른 영향 실험을 실시하였다.

Table 3-9. The result of a wet screen analysis for raw sample of Gyeongdong mining station

Size (mesh)	Weight (%)			Size (micron)
	+100 mesh	100 × 325 mesh	-325 mesh	
+60	41.2	-	-	60(250)
60 * 100	48.87	0.06	-	100(149)
100 * 140	7.18	16	-	140(113)
140 * 200	0.22	17.92	-	200(74)
200 * 270	0.06	18.98	-	270(53)
270 * 325	0.07	18.66	0.76	325(44)
325 * 400	0.4	4.97	2.61	400(37)
400 * 500	0.01	6.95	12.19	500(25)
-500	2	16.48	84.93	-25
Total	100			

2. 광물학적 특성

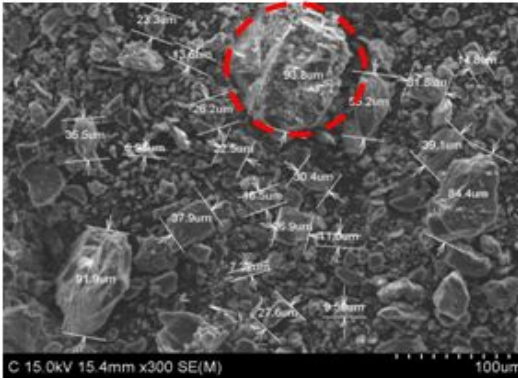
가. 제일(서림)광업소 무연탄

Fig. 3-1은 제일광업소의 무연탄 중에 존재하는 광물의 규명을 위한 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다. 분석 결과, muscovite($K(OHF_2)_2Al_3Si_3O_{10}$), quartz(SiO_2), birnessite($Na_4Mn_{14}O_{27} \cdot 9H_2O$), pyro-phyllite($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$) 등이 관찰되었다.

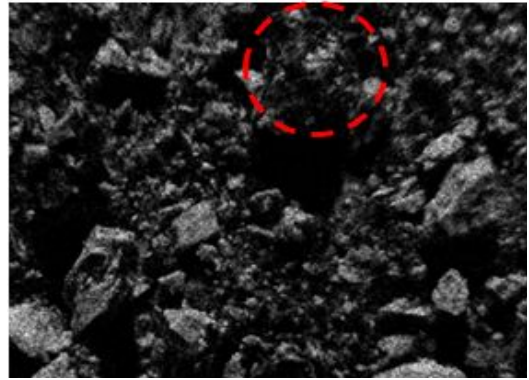


Fig. 3-1. X-ray diffraction pattern of raw sample from Jeil mining station.

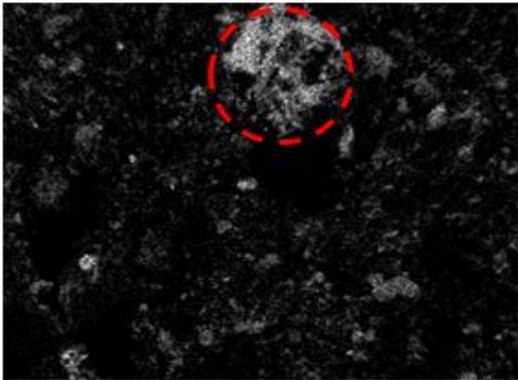
Fig. 3-2는 원 시료의 SEM 및 원소별 mapping 결과이다. 대부분이 탄소성분으로 나타났으며, 큰 입자를 위주로 확인한 결과, Si와 Al 사이에 탄소 C가 존재하고 있어 단체분리가 되지 않은 상태로 존재하고 있음을 알 수 있었다.



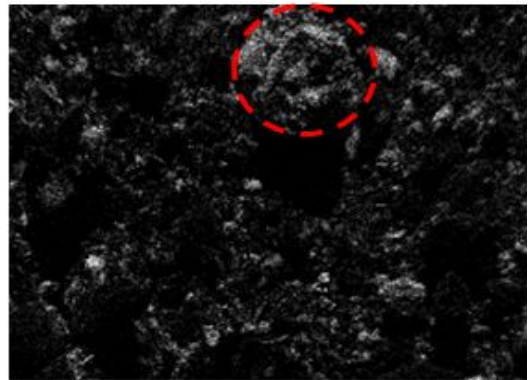
SEM



C



Si



Al

Fig. 3-2. SEM micrograph & Element mapping of Jeil mining station raw sample.

나. 화순광업소 무연탄

Fig. 3-3은 원 시료 중에 존재하는 광물의 규명을 위한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 분석결과, Kaolinite($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), Muscovite($\text{K}(\text{OHF}_2)_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}$) Quartz(SiO_2), 등이 관찰되었다. 한편, 공업분석 후에 생성된 Ash만을 모아서 XRD 분석한 결과 Fig. 3-4처럼 주로 quartz(SiO_2)만이 높은 peak를 관찰 할 수 있었다.

Fig. 3-3. X-ray diffraction pattern of raw sample from Hwa-soon mining station.

Fig. 3-4. X-ray diffraction pattern of ash.

Table 3-10. Result of Chemical analysis for raw sample of Hwa-soon mining station

Name	Chemical Component (%)					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O
Raw sample	50.28	32.15	4.99	1.85	5.59	4.25

Table 3-10은 원 시료에 존재하는 회분구성 광물의 화학분석 결과를 나타낸 것으로 SiO_2 와 Al_2O_3 의 함량이 82% 이상으로 규산염 광물들이 주요 맥석으로 존재함을 알 수 있었다. 또한 SEM 및 원소별 mapping 결과 Fig. 3-5처럼 대부분이 탄소성분으로 이루어진 것을 알 수 있었으며, 큰 입자를 위주로 확인한 결과, Si와 Al 사이에 탄소 C가 존재하고 있어 완전한 단체분리가 되지 않은 상태로 존재하고 있음을 알 수 있었다.

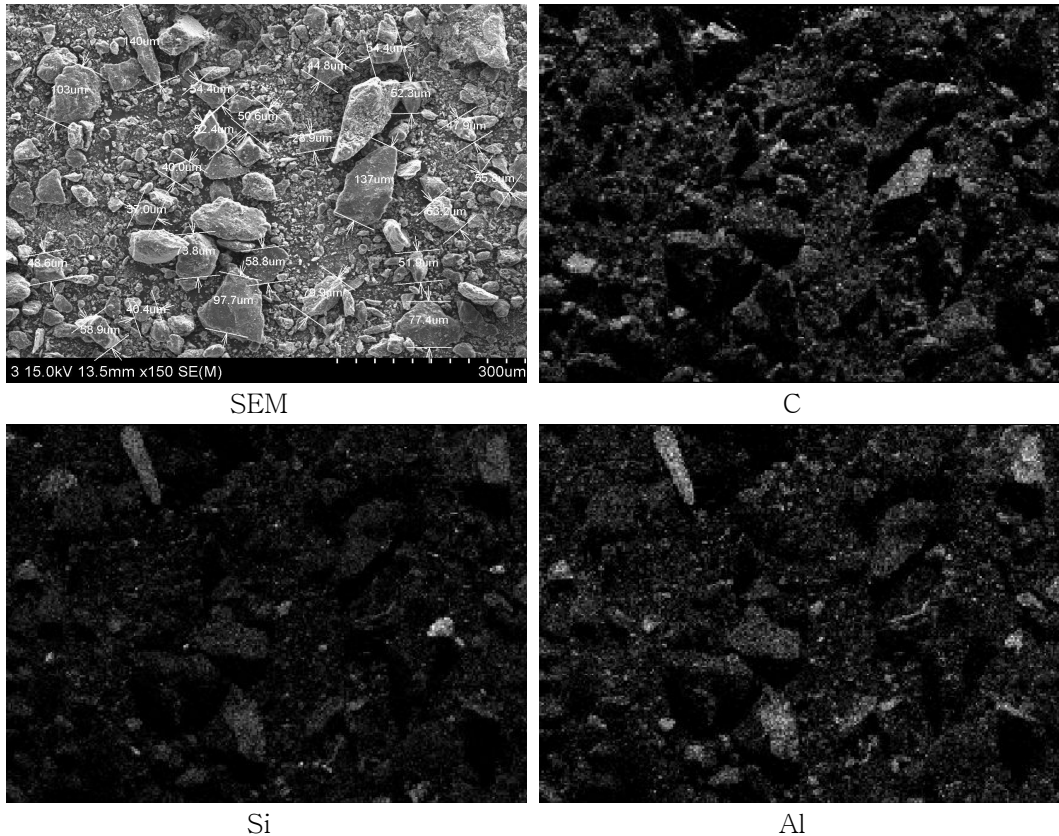


Fig. 3-5. SEM micrograph & Element mapping of Hwa-soon mining station raw ample.

다. 경동 탄광 무연탄

Fig. 3-6은 경동 탄광 시료 중에 존재하는 맥석광물을 확인하기 위한 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다. 분석결과, Pyrophyllite($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), Quartz(SiO_2), Birnessite($\text{Na}_4\text{Mn}_{14}\text{O}_{27} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) 등이 맥석광물로 관찰되었다. 한편 원 시료의 SEM 및 원소별 mapping 결과 Fig. 3-7과 같다. 앞의 2개의 시료(제일광업소와 화순광업소의 무연탄 시료)와 같은 양상으로 대부분이 탄소성분으로 이루어진 것을 알 수 있었으며, Si와 Al 사이에 탄소 C가 존재하고 있어 완전한 단체분리가 되지 않은 상태로 존재하고 있음을 알 수 있었다.

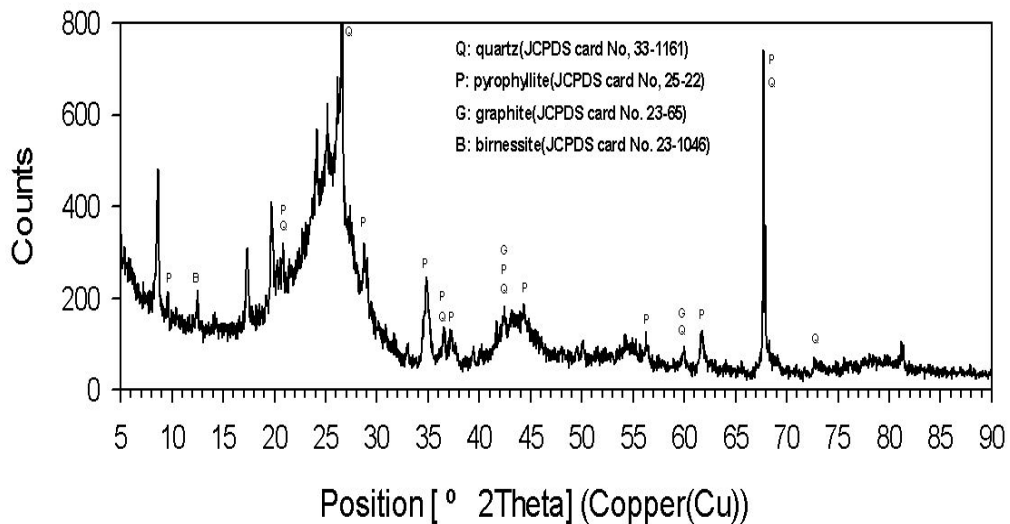


Fig. 3-6. X-ray diffraction pattern of raw sample from Gyeongdong mining station.

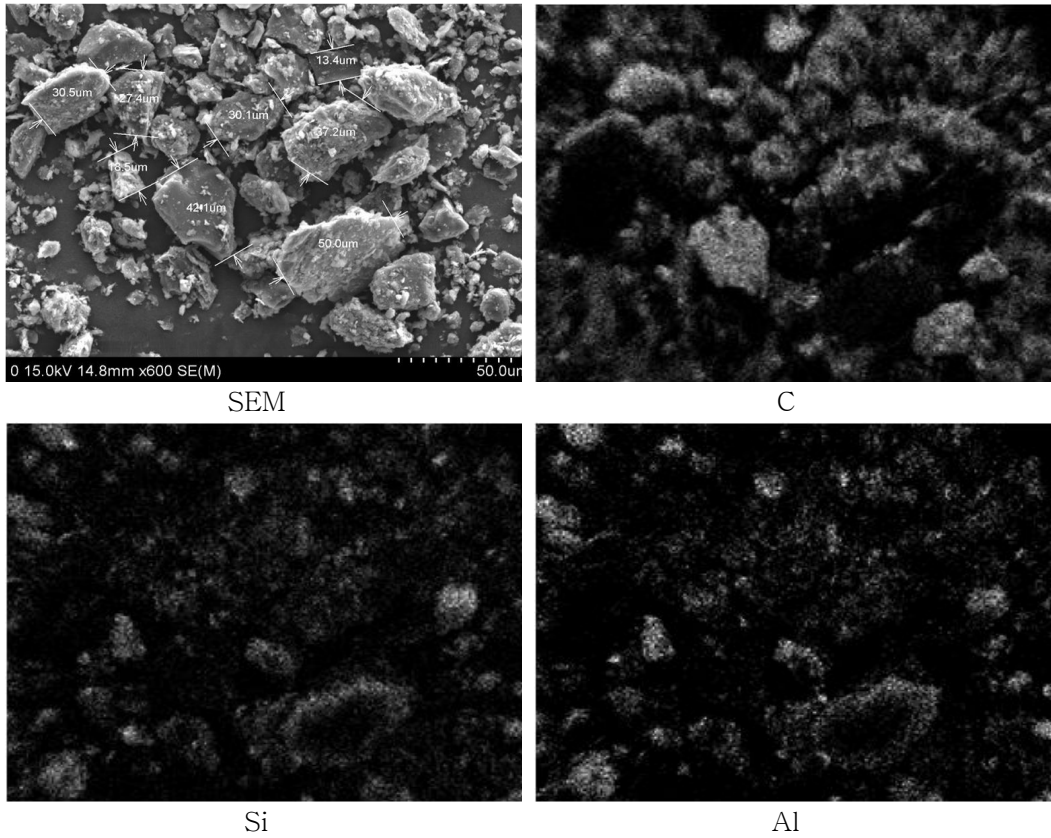


Fig. 3-7. SEM micrograph & Element mapping of Gyeongdong mining station raw sample

3. 접촉각 측정

국내산 석탄의 젖음성(wettability) 즉, 친수성과 소수성을 확인하기 위하여 경동탄광 무연탄을 대상으로 접촉각 측정을 실시한 결과 Fig. 3-8과 같다. 증류수를 사용하여 pH 별(pH 5,7,9) 측정을 실시하였을 때, pH 7일 때, 51.71°로 접촉각이 가장 큰 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구에 사용되는 포수제인 DMU-101을 1 ppm 첨가하고 측정한 결과, 63.33°로 접촉각이 증가함을 확인하였다. 한편, 본 연구에서 사용된 물은 수돗물을 사용하였으며, pH가 약 6.8로써 별도의 조절 없이 사용하였다.

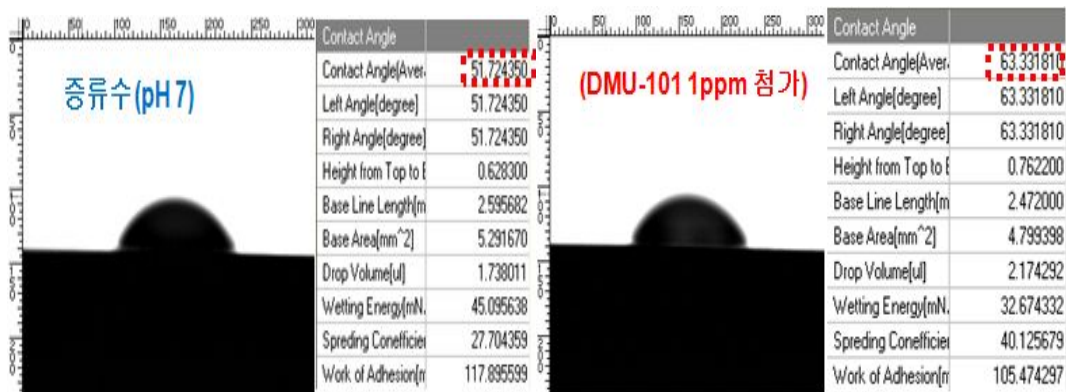
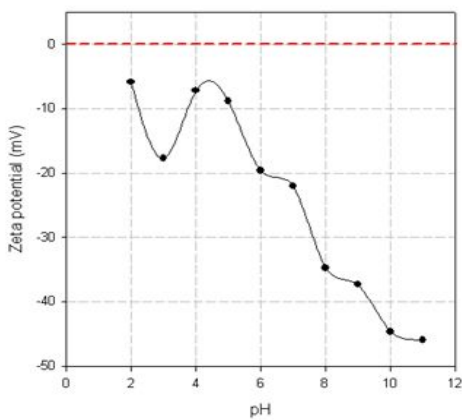


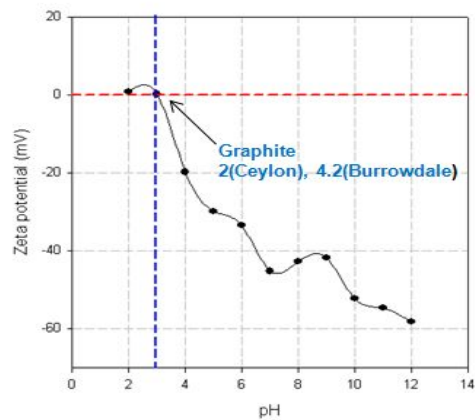
Fig. 3-8. Contact angle of raw coal ore sample

4. 제타전위 측정

광액상태에서 pH 조절 및 응집과 분산 등을 위한 기초자료를 얻기 위하여 제타 전위 측정을 실시하였다. Fig. 3-9를 보면 알 수 있듯이 증류수를 분산매로 사용하였을 경우 등전위점(PZC)을 확인할 수 없었으며, 본 연구에 사용된 포수제인 DMU-101을 100 mL/ton 첨가한 후 제타전위 측정한 결과 pH 3에서 등전위점을 확인할 수 있었다.



distilled water



distilled water
+ DMU-101 (100 mL/ton)

Fig. 3-9. Zeta potential of raw coal ore sample.

제2절 실험방법

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 이하의 입자들의 선별 효율을 높이기 위하여 vibro screen을 사용하여 세 구간의 시료로 입도를 조절하여 100 mesh이상 구간 산물을 일반부선기를 사용하여 예비실험을 실시하였으며 100 × 325 mesh구간의 입도는 이 범위에서 높은 선별효율을 갖는 CPT column에 적용하여 일련의 실험을 실시하였다. 또한 325 mesh이하시료를 대상으로 Microcel™ column 부선기를 이용하여 실험을 실시하였다.

미립의 석탄의 선별을 위해 CPT column 부선과 Microcel™ 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 rpm으로 고정한 후 4ℓ cell에 광액(Dp: 20%) 상태의 시료를 5분간 교반 후, 포수제를 첨가하여 3분, 기포제를 첨가하여 2분간 교반하였으며 공기를 주입하여 15분 내지 20분간 부유 산물을 회수하였다

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

1. 시료의 분석

연구에 사용된 시료의 광물조성을 확인하기 위해 조선대학교 공동실험실습관의 PANalytica 社의 X'poertPRO MPD로 X선 회절분석(X-ray diffraction)을 실시하였다.

시료의 입자 표면 및 계면 특성을 확인하기 위해 Malvern 社의 Zetasizer Nano ZS90 모델을 사용하여 제타전위, SEO 社의 Phoenix 300을 이용하여 접촉각을 각각 측정하였다.

또한, 시료를 구성하는 주요 원소를 분석하기 위하여 한국지질자원연구원에 분석을 의뢰하여 Shimadzu 社의 MXF-2400을 사용하여 XRF 분석을 실시하였으며, 평균입경을 확인하기 위하여 Malvern 社의 MASTERSIZER 2000을 사용하여 입도분석을 실시하였다.

부유선별을 통한 품위향상을 확인하기 위하여 LECO 社의 TGA-701 모델의 공업분석기를 이용하여 고정탄소(fixed carbon)의 함량을 측정하였다. 한편 시료의 대략적인 단체분리 특성을 확인하기 위해 HITACHI 社의 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy) S4800을 이용하여 SEM 및 원소별 mapping을 실시하였다.

2. 부유선별 기기

부유선별을 위해 처음 개발된 M. S. 표준형 부선기는 교반실과 포말실이 각기 분리되어 있고, 공기주입량을 자유로이 조절하기 어렵다는 단점이 있다. 본 연구에 사용된 미국 Metso 社의 Denver sub-A형 일반부선기는 M. S. 표준형 부선기의 단점을 보완하여 포말실이 교반실 위에 위치하도록 하여 면적을 절약하고, 각 구마다 공기 주입량을 임의로 조절할 수 있도록 개선되었다. 부선 cell에 급광된 광액은 시약들이 첨가되어 회수하고자 하는 광물의 표면을 소수성으로 변화시킨 후 다른 광물(맥석광물)들과 임펠러 회전(원심력)에 의해 주위로 분산된다. 또한 임펠러 중심부는 회전에 의해 발생하는 압력차로 공기가 도입 및 분산되며, 소수성 광물들이 부착되어 광화된 기포(mineralized froth)들은 층을 이루면서 정광으로 회수된다. 한편, Fig. 3-10은 Denver sub-A 부선기와 부선사진이며, 각각의 시료에 대한 예비 실험을 실시하였다.

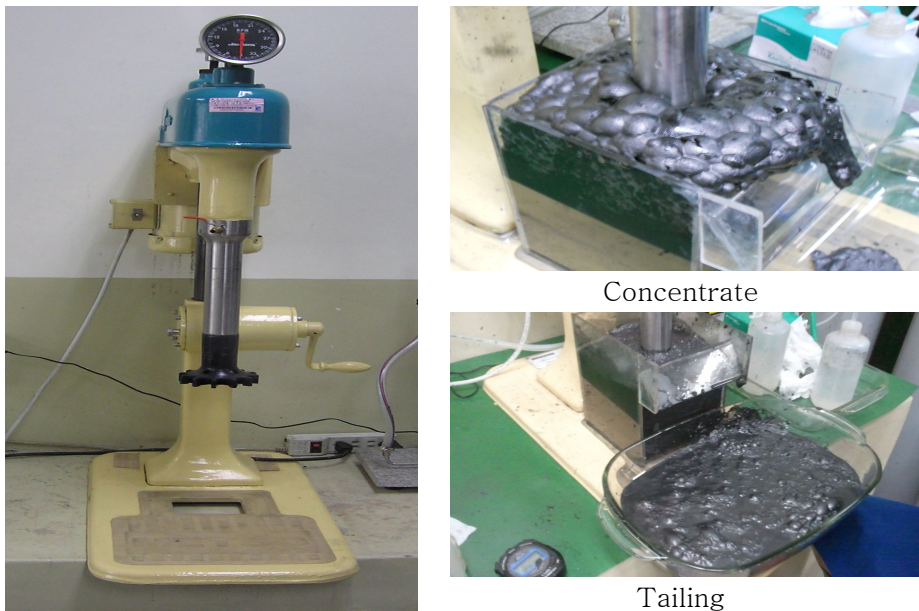


Fig. 3-10. Batch laboratory flotation machine & concentrate and tailing pictures.

또한, Fig. 3-11은 column 부상기의 최신형이라고 할 수 있는 Eriez사의 CPT column 부상기이다. 대부분의 조작이 Auto control로 이루어지기 때문에 편리하며 기포의 직경이 작기 때문에 column 내부에서 체류시간이 길어지고 기포와 광석의 부착기회가 높아져 회수율이 높고, 필요에 따라 기포의 크기를 조절할 수 있으며, 세척수(wash water)의 양을 조절하면서 맥석의 세척효과를 높여 품위와 회수율을 조절할 수 있다. 한편, 실험조건으로써 CPT column 부상기에서 선별효율이 가장 높다고 알려진 100 × 325 mesh로 입도를 조절하여 예비실험에서 얻은 자료를 토대로 실험을 진행하였다.



Fig. 3-11. CPT column flotator & concentrate and tailing pictures.

Microcel™ column 부선은 재래식 부유선별에서 선별하기 어려운 53 μm 이하의 미립자를 처리하는데 있어 부상효율을 향상시키고자 개발된 부유선별의 한 종류로, 미세기포 발생기(microbubble generator 또는 Sparger) 등을 통해 기포의 표면적을

증가시켜 미립자 처리에 적합한 부유선별방법이다. Fig. 3-12는 Microcel™ column 부선기의 사진과 개략도이며, -325 mesh로 입도를 조절하여 실험을 진행하였다.

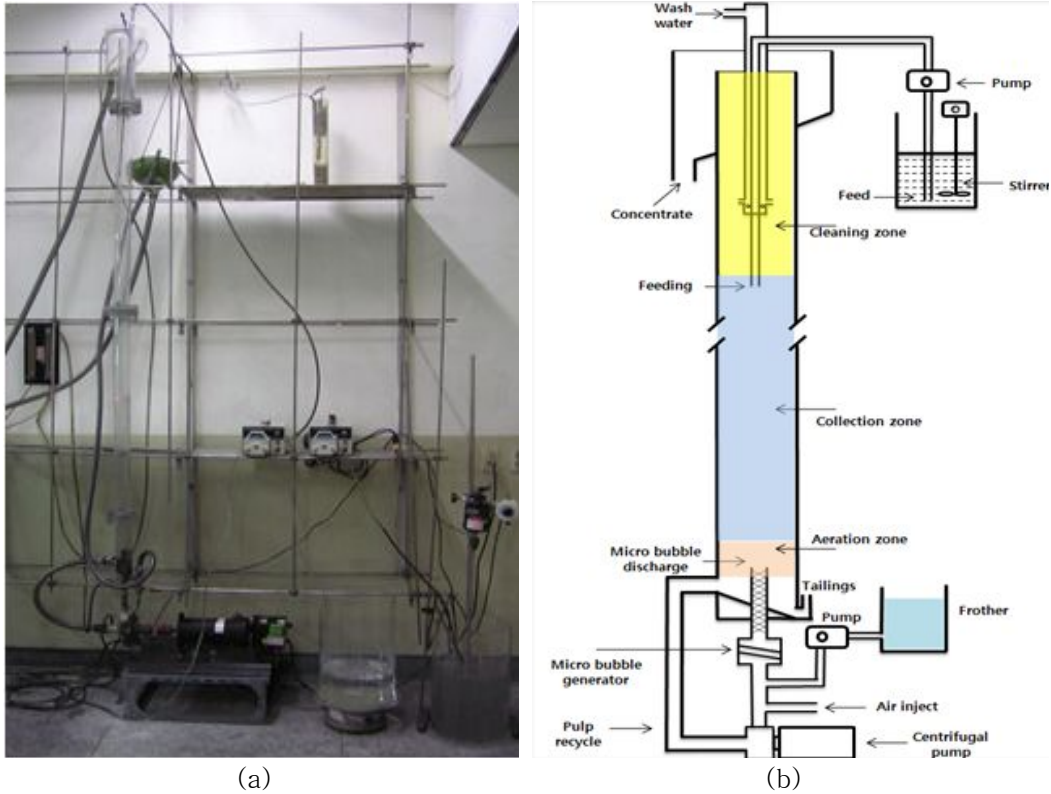


Fig. 3-12. Microcel™ column flotation system; (a)machine and (b)schematic illustration.

제4장 실험결과

제1절 제일(서립)광업소 무연탄

1. 일반부선(Batch flotation)

경기도 연천의 제일 광업소 무연탄의 Ash rejection 향상을 위한 적정 포수제를 선정하기 위하여 포수제를 첨가하지 않은 시료와 비이온성 포수제 Kerosene, 석유류 시약과 기름류 시약의 혼합특성을 갖는 시약인 DMU-101과 DDA(Dodecyl amine), Kerosene과 DDA를 혼합하여 사용한 것과 DMU-101과 DDA를 혼합하여 사용했을 때를 대상으로 포수제 종류에 따른 영향을 확인한 결과, Ash rejection 58.33%, Com. recovery 51.63%를 얻을 수 있는 DMU-101과 DDA를 혼합하여 사용하였을 경우가 적정 시약으로 확인되어 이 후 실험의 포수제로 사용하였다.

또한, 석탄 부선에 주로 쓰이는 기포제 중 MIBC, DF250, AF65, pine oil,을 사용하여 적정 기포제 종류를 선정하기 위해 실험을 실시한 결과 Fig. 4-2와 같았다. 그림에서와 같이 기포제 종류에 따른 영향은 AF65의 경우 Ash reject 58.56%, Com. recovery 60.71%로 Ash rejection과 Com. recovery를 고려하였을 때 가장 좋은 조건으로 확인되었다.

원 시료의 Si, Al 등의 불순물 억제효과를 확인하기 위해 억제제를 사용하지 않고 실험한 것과, Sodium silicate(SS), Sodium meta phosphate(SMP), SiO₂ remover, Lime을 한 종류씩 각각 사용한 것과 SS와 SMP 두 종류를 혼합하여 사용하여 억제제 종류에 따른 영향에 대해 실험한 결과로 SMP를 사용하였을 때, Ash rejection 55.61%, Com. recovery 85.28%로 얻을 수 있어 억제효과가 가장 높음을 알 수 있다.

2. Microcel™ column 부선

가. 포수제 첨가량에 따른 영향

일반부선의 포수제 종류 변화 실험에서 부선효율이 가장 좋은 시약으로 확인된 DMU-101과 DDA를 혼합한 시약(이하 DMU-101 + DDA)의 적정 사용량을 확인하기 위해 첨가량을 100 ~ 500 mL/ton까지 변화시키면서 실험을 실시한 결과 Fig. 4-1과 같다. 첨가량이 증가함에 따라 Ash rejection 은 소폭 증가되었다가 저하되었고 Com. recovery는 소폭 저하되었다가 향상되었다, 이는 일부 맥석광물의 표면에도 포수제의 영향을 받아서 부선효율에 영향을 주기 때문으로 사료된다. 따라서 공정의 경제성을 고려하여 포수제를 100 mL/ton 첨가하였을 때 Ash rejection 81.71%, Com. recovery 67.19%를 얻을 수 있어 적정 첨가량으로 확인되었다.

Fig. 4-1. Effect of collector dosage on Microcel™ column flotation.

(Dp : 10%, Collector : DMU-101+D.D.A, Frother : AF65 5.4 L/ton,
Depressant : S.M.P 4 kg/ton, Wash water 450 mL/min.,
Air flow rate 1,197 mL/min.)

나. 기포제 첨가량에 따른 영향

기포제인 AF65를 Microcel™ column 실험에 적용하였을 때, 기포제의 첨가량 변화에 따른 부선 효율을 확인하기 위해 적정 포수제로 확인된 DMU-101 + D.D.A의 첨가량을 100 mL/ton로 고정한 후, AF65의 첨가량을 1.8 ~ 9 L/ton까지 변화시키면서 실험을 실시한 결과는 Fig. 4-2와 같다. 그림을 보면 알 수 있듯이 첨가량이 많아질수록 Ash rejection은 저하되며 Com. recovery는 증가하였으나 5.4 L/ton 이상 첨가를 하게 되면 다시 Ash rejection은 증가하고 회수율은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 첨가량이 증가하면서 기포의 크기가 미립의 석탄에 알맞게 조절되었기 때문이라고 사료된다. AF65 첨가량이 5.4 L/ton 일 때, Ash rejection 83.52%, Com. recovery 65.98% 가장 좋은 조건임을 알 수 있었다.

Fig. 4-2. Effect of frother dosage on Microcel™ column flotation.

(Dp : 10%, Collector : DMU-101+D.D.A 100 mL/ton, Frother : AF65,
Depressant : S.M.P 4 kg/ton, Wash water 450 mL/min.,
Air flow rate 1,197 mL/min.)

다. 억제제 첨가량에 따른 영향

Fig. 4-3은 억제제의 첨가량에 따른 영향을 확인하기 위해 억제효과가 가장 좋았던 SMP를 사용하여 첨가량을 1 ~ 5 kg/ton 까지 변화시켜 실험한 결과이다. 억제제의 첨가량이 증가할수록 맥석광물들을 억제하기 때문에 Ash rejection은 증가하고 Com. recovery는 감소하였다. 따라서 본 실험에서는 4 kg/ton를 첨가하였을 때 Ash rejection 86.19%와 Com. recovery 62.50%를 얻을 수 있어서 가장 좋은 조건임을 확인 하였다.

Fig. 4-3. Effect of depressant dosage on MicrocelTM column flotation.

(Dp : 10%, Collector : DMU-101+D.D.A 100 mL/ton, Frother : AF65
5.4 L/ton, Depressant : S.M.P, Wash water 450 mL/min.,
Air flow rate 1,197 mL/min.)

라. 세척수량에 따른 영향

세척수의 첨가량에 따른 영향을 확인하기 위하여 세척수량을 40~720 mL/min. 까지 변화시키면서 실험한 결과 Fig. 4-4와 같았다. 세척수량이 증가할수록 맥석광물에 대한 세척력이 좋아져, Ash rejection은 83.07%에서 93.37%까지 향상되나, Com. recovery는 60.83%에서 47.01%로 저하되었다. 이는 세척수량이 증가하면서 column 내부의 하향류(underflow) 압력이 커져 미립의 석탄뿐만 아니라 맥석과 단체분리가 되지 않은 상태의 일부 조립질 중광(middling)이 광미로 배출되기 때문으로 사료된다.

Fig. 4-4. Effect of wash-water on MicrocelTM column flotation.

(Dp : 10%, Collector : DMU-101+D.D.A 100 mL/ton, Frother : AF65
5.4 L/ton, Depressant : S.M.P 4 kg/ton, Air flow rate 1,197 mL/min.)

마. 공기주입량에 따른 영향

공기주입량에 따른 영향을 확인한 결과, Fig. 4-5와 같았다. 공기 주입량이 늘어남에 따라 Com. recovery은 향상되고 Ash rejection은 저하되는데, 이는 기포제량이 일정할 때 공기량이 증가하게 되면, column내부의 bubble size가 커져서 기포의 부력과 부유속도가 상승하여 정광으로 일부 맥석이 동반부유 되어 Com. recovery는 증가하지만, 품위는 저하되기 때문이다. 공기 주입량이 1,197 mL/.min. 일 때, Ash rejection 74.72%, Com. recovery가 66.06%로 적정 조건임을 확인하였다.

Fig. 4-5. Effect of air flow rate on MicrocelTM column flotation.

(Dp : 10%, Collector : DMU-101+D.D.A 100 mL/ton, Frother : AF65
5.4 L/ton, Depressant : S.M.P 4 kg/ton, Wash water 450 mL/min)

3. 결과

예비실험에서 제일(서림)광업소 무연탄의 조건별 시약은 포수제(DMU-101+ Dodecyl amine), 기포제(Aero froth #65), 억제제(Sodium metaphosphate)가 효과적임을 확인하였다. Microcel™ column 부선에서 포수제(DMU-101+DDA)를 사용하여 100 mL/ton 첨가하였을 때, Ash rejection 81.71%, Com. recovery 67.19%으로 적정 조건이었다.

기포제는 AF65를 사용하여 5.4 L/ton 일 때, Ash rejection 83.52%, Com. recovery 65.98%으로 가장 좋은 조건임을 알 수 있었으며, 억제제인 SMP를 4 kg/ton를 첨가하였을 때 Ash rejection 86.19%와 Com. recovery 62.50%를 얻을 수 있어서 가장 좋은 조건임을 확인 하였다.

또한 세척수량을 40 ~ 720 mL/min.까지 변화시키면서 실험한 결과 세척수량이 증가할수록 맥석광물에 대한 세척력이 좋아져 Ash rejection은 83.07%에서 93.37 %까지 향상되나, Com. recovery는 60.83%에서 47.01%로 저하되었으며, 공기 주입량이 1,197 mL/.min. 일 때, Ash rejection 74.72%, Com. recovery가 66.06%로 적정 조건임을 확인하였다.

제2절 화순광업소 무연탄

1. 일반부선(Batch flotation)

과 분쇄공정을 거쳐 +100 mesh 구간으로 입도 조절한 화순광업소 무연탄 시료를 대상으로 석탄의 품위향상을 위한 적정 포수제를 선정하기 위한 실험을 실시하였다. 먼저 포수제를 첨가하지 않은 시료와 석탄 부선에 가장 대표적으로 이용되는 비이온성 포수제인 Kerosene, DMU-101, Kerosene과 DDA를 혼합하여 사용한 것과 DMU-101과 DDA를 혼합하여 포수제 종류에 따른 영향을 확인한 결과 Kerosene 한 종류를 시약으로 사용하였을 때 Ash rejection 82.85%, Com. recovery 43.83%로 다른 결과들과 비교하여 Ash rejection이 가장 높았으나 Com. recovery가 상대적으로 낮아 Ash rejection과 Com. recovery를 함께 고려하여 Ash rejection 81.02%, Com. recovery 51.94%를 얻을 수 있는 DMU-101을 사용하였을 경우, 분리효과가 가장 높은 것으로 확인되어 이 후 실험의 포수제로 사용하였다.

기포제 종류에 따른 분리효과를 확인하기 위해 석탄 부선에 주로 쓰이는 기포제 중 MIBC, DF250, AF65, pine oil을 사용하여 적정 기포제 종류를 선정하기 위해 실험을 실시하였을 때, pine oil의 경우 Ash rejection 62.66%, Com. recovery 72.36%, MIBC를 사용했을 경우 Ash rejection 66.21%, Com. recovery 65.80%로 Ash rejection과 Com. recovery를 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 석탄의 Ash rejection을 좀 더 높이 올리하고자 Ash rejection이 높게 확인된 MIBC를 기포제로 선정하여 실험을 실시하였으며 DF250은 실험 중에 안정적인 유지가 어려움이 확인되어 실험 대상에서 제외하였다. 한편 억제효과를 확인하기 위해 억제제를 사용하지 않고 실험했을 경우와 Sodium silicate(SS), Sodium meta phosphate(SMP), SiO₂ remover, Lime을 사용하여 억제제 종류에 따른 영향에 대해 실험한 결과 SMP를 사용하였을 때 Ash rejection 60.21%, Com. recovery 65.23%로 얻을 수 있어 억제효과가 가장 높음을 알 수 있다.

2. CPT column 부선

가. 포수제 첨가량에 따른 영향

일반부선의 포수제 종류 변화 실험에서 가장 좋은 시약으로 확인된 DMU-101을 대상으로 CPT column 부선에서의 적정 사용량을 확인하기 위해 첨가량을 100 ~ 500 mL/ton까지 변화시키면서 실험을 실시하였으며 사용된 시료는 CPT column에 적합한 입도로 (100 × 325 mesh) 조절된 시료를 사용하였다. Fig. 4-6을 보면 알 수 있듯이 첨가량이 100 mL/ton 일 때 Com. recovery를 80% 이상 유지하면서 Ash rejection 61.55%로 나타냈으며 첨가량이 그 이상 증가할 경우 오히려 Ash rejection이 소폭 감소하는 현상을 보였다. 따라서 포수제를 100 mL/ton 첨가하였을 때 분리효율이 가장 좋은 Ash rejection 61.55%, Com. recovery 80.18%를 얻을 수 있었다.

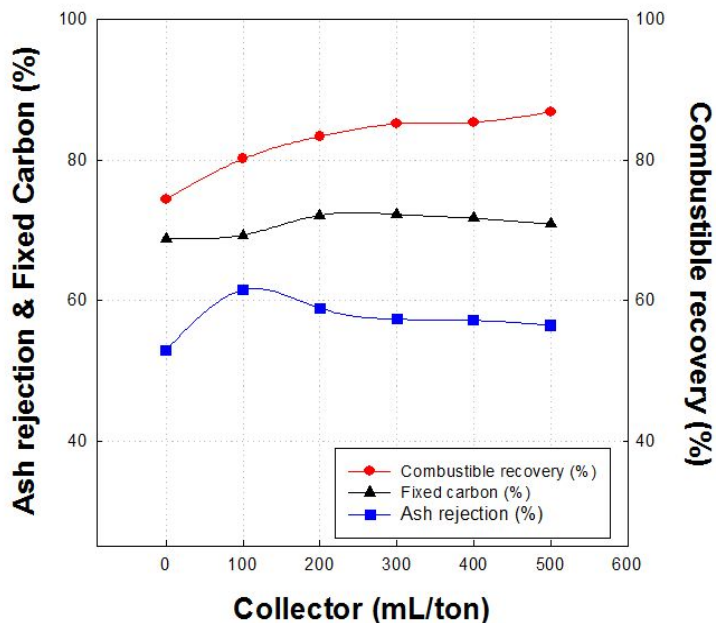


Fig. 4-6. Effect of collector dosage on CPT column flotation.

(Dp : 3%, Collector : DMU-101, Frother : MIBC 40 L/ton,
Depressant : None, Wash water 100 mL/min., Air flow rate : 1,800
mL/min., Feed F. C : 56.12%)

나. 기포제 첨가량에 따른 영향

기포제 첨가량 변화에 따른 부선 효율을 확인하기 위해 기포제인 MIBC의 첨가량을 변화시키면서 수행한 결과, Fig. 4-7과 같이 기포제 첨가량이 20 L/ton이하일 때는 기포의 유지력이 약해 광화된 후 기포가 깨지는 현상이 일어났으나 기포제 사용량을 60 L/ton까지 늘렸을 경우, Com. recovery를 78% 이상 유지하면서 Ash rejection 67.55%로 나타냈으며 첨가량이 그 이상 증가할 경우 오히려 Ash rejection이 급격히 감소하는 현상을 보였다. 한편 기포제 첨가량을 30 L/ton이상으로 늘렸을 경우 Com. recovery는 다시 증가하는 현상을 보이거나 Ash rejection은 급격히 감소하는 현상을 보였다. 이는 기포제의 첨가량이 증가함에 따라 비교적 기포 유지력이 강하며 치밀한 기포층을 형성하여 일부 맥석광물이 동반부유 되기 때문이다. 따라서 기포제를 30 L/ton 첨가하였을 때 분리효율이 가장 좋은 부선효율을 얻을 수 있었다.

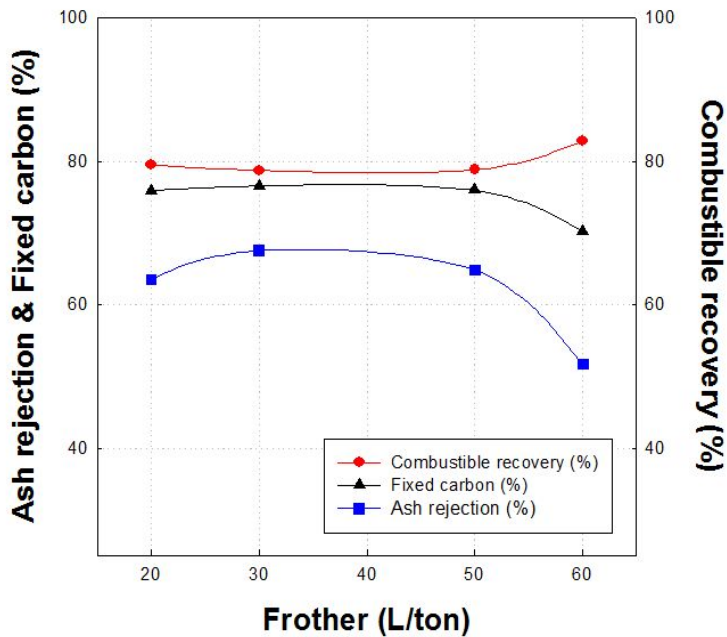


Fig. 4-7. Effect of frother dosage on CPT column flotation.

(Dp : 3%, Collector : DMU-101 200 mL/ton, Frother : MIBC,
 Depressant : SMP 3 kg/ton, Wash water 100 mL/min., Air flow rate:
 1,800 mL/min., Feed F. C : 56.12%)

다. 세척수량에 따른 영향

CPT column 부선에서 세척수 첨가량은 정광의 품위를 조절할 수 있으므로, 이에 따른 선별효과를 확인하기 위해 세척수량을 100 ~ 400 mL/min.까지 변화시키면서 실험한 결과 Fig. 4-8과 같았다. 세척수량이 증가할수록 맥석에 대한 세척력이 좋아져, Ash rejection은 77.49%에서 81.23%까지 향상되나, Com. recovery는 88.34%에서 84.90%로 저하되었다. 이는 세척수량이 증가하면서 column 내부의 하향류(underflow) 압력이 커져 미립의 석탄뿐만 아니라 맥석과 단체분리가 되지 않은 상태의 일부 조립질 중광(middling)이 광미로 배출되기 때문으로 판단된다.

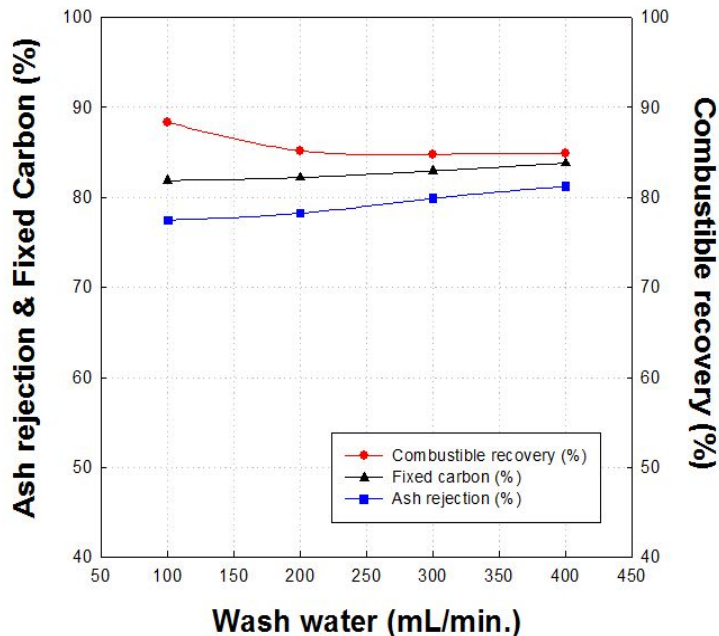


Fig. 4-8. Effect of wash-water on CPT column flotation.

(D_p : 3%, Collector : DMU-101 (200 mL/ton), Frother : MIBC
30 L/ton, Depressant : SMP 3 kg/ton, Air flow rate :1,200 mL/min.,
Feed F. C : 56.12%)

라. 공기주입량에 따른 영향

공기 주입량을 1,200 ~ 1,800 mL/min.까지 변화시켜 실험을 진행한 결과 Fig. 4-9과 같았다. 공기 주입량이 늘어남에 따라 회수율은 향상되고 Ash rejection은 저하되는데, 이는 기포제량이 일정할 때 공기량이 증가되면, column 내부의 bubble size가 커져 기포의 부력과 부유속도가 상승하여 정광으로 일부 맥석이 동반부유되어 Com. recovery는 증가하지만, 품위는 저하되기 때문이다. 한편 공기 주입량이 1,200 mL/min. 일 때, Ash rejection 80.79%, Com. recovery가 79.51%로 좋은 조건임을 확인하였다.

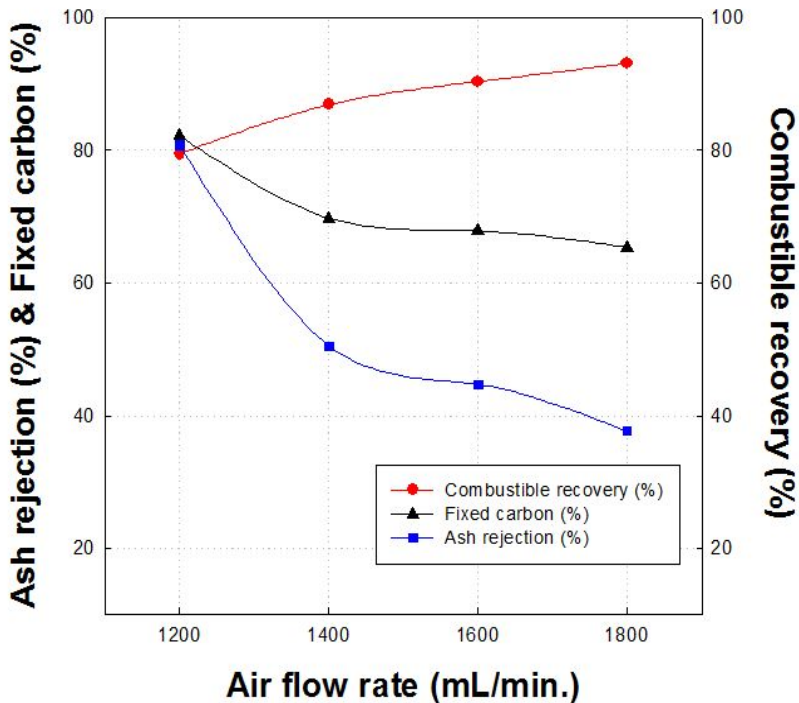


Fig. 4-9. Effect of air flow rate on CPT column flotation.

(Dp : 3%, Collector : DMU-101 200 mL/ton, Frother : MIBC 30 L/ton, Depressant : SMP 3 kg/ton, Wash water 400 mL/min., Air flow rate : mL/min., Feed F. C : 56.12%)

마. 광액농도에 따른 영향

광액농도에 따른 부선흡율을 확인하기 위해 광액농도를 1 ~10%까지 변화시키면서 실험한 결과는 Fig. 4-10과 같았다. 광액농도가 증가할수록 Ash rejection은 향상되지만, Com. recovery는 저하되어 광액농도 1%에서 Ash rejection 61.93%, Com. recovery 86.89%로 확인되었고, 10%에서는 Ash rejection 66.31%, Com. recovery 63.76%로 부선흡율이 저하되었다. 이는 석탄의 표면에 많은 미립의 맥석 광물이 먼저 부착 또는 엉킴(aggregation)현상이 발생되어 포수제의 흡착 및 기포와의 부착기회를 방해하기 때문으로 사료된다. 한편 본 연구에서는 Ash rejection 73%, Com. recovery 79.59%를 얻을 수 있었던 광액농도 7%가 적정 광액농도로 확인되었다.

Fig. 4-10. Effect of pulp density on CPT column flotation.

(Dp : 1 ~ 10%, Collector : DMU-101 200 mL/ton, Frother : MIBC
30 L/ton, Depressant : SMP 9 kg/ton, Wash water 200 mL/min.,
Air flow rate : 1,400 mL/min., Feed F. C : 56.12%)

3. Microcel™ column 부선

Ash rejection을 높이기 위한 방법으로 Microcel™ column 부선을 실시하여 회수된 정광(-325 mesh 조절 시료, Fixed carbon: 54.87%)을 대상으로 cleaning 실험을 실시한 결과 Table 4-1와 같았다. Ash rejection이 59.01%의 rougher 정광을 1차 cleaning 실시한 결과 79.83%로 Cum. rejection이 향상되고 Com. Recovery는 80.13%에서 Cum. Recovery 68.04%로 저하되었다. 또한, 고정탄소의 품위도 69.76%에서 79.77%로 향상되었음을 알 수 있다.

화순광업소의 저급 무연탄을 대상으로 calorie를 측정된 결과, 원 시료 4,185 kcal/kg에서 Microcel™ column 부선을 실시하여 회수된 rougher 정광은 5,428 kcal/kg 까지 향상되었고, 1차 cleaning 실시 후에는 6,317 kcal/kg로 원 시료와 비교하여 높은 calorie를 얻을 수 있었다.

Table 4-1. Effects of cleaning stage on Microcel™ column flotation

	Ash rejection (%)	Com. Recovery (%)	Fixed carbon (%)	Calorie (kcal/kg)
Rougher	59.01	80.13	69.76	5,428
Cleaning stage 1	Cum. Rejection (%)	Cum Recovery (%)	79.77	6,317
	79.83	68.04		

4. 결과

화순광업소 무연탄 시료를 대상으로 조건별 시약을 확인한 결과 포수제(DMU-101), 기포제(Methyl isobuthyl carbinol), 억제제(Sodium metaphosphate)가 효과적임을 확인하였으며, CPT column 부선에서 억제제의 첨가량에 따른 부선효율은 크지 않았으며, 포수제(DMU-101)를 100 mL/ton 첨가하여 Ash rejection 61.55%, Com. recovery 80.18%를 얻을 수 있었다.

기포제를 30 L/ton 첨가하였을 때 Ash rejection 67.55%, Com. recovery 78.72%로 가장 좋은 부선효율을 얻을 수 있었다. 세척수량이 증가할수록 맥석에 대한 세척력이 증가함을 확인하였으며, 400 mL/min.로 하였을 때, Ash rejection 81.23%, Com. recovery 84.90%로 가장 좋은 조건으로 확인되었다. 또한 광액농도 7%일 때 분리효과가 가장 좋았으며, 공기 주입량이 1,200 mL/min.일 때, Ash rejection 80.79%, Com. recovery가 79.51%로 좋은 조건임을 확인하였다.

MicrocelTM column 부선을 실시하여 cleaning 실험을 실시한 결과, Ash rejection이 59.01%의 rougher 정광을 1차 cleaning 실시한 결과 79.83%로 Cum. Ash rejection이 향상되었고, 고정탄소 품위도 69.76%에서 79.77%로 향상됨을 알 수 있었다.

제3절 경동 탄광 무연탄

1. 일반부선(Batch flotation)

경동 탄광 무연탄의 Ash rejection 향상을 위한 적정 포수제를 선정하기 위하여 포수제를 넣지 않고 실험한 것과 Kerosene, DMU-101를 단독으로 사용한 경우와 Kerosene과 DDA(Dodecyl amine)를 혼합, DMU-101과 DDA를 혼합하여 사용했을 때를 대상으로 포수제 종류에 따른 영향을 확인한 결과 포수제를 넣지 않고 실험을 진행하였을 때 Ash rejection 45.91%, Com. recovery 60.51%로 확인되었으며 포수제를 첨가하지 않고 자연부유도만을 이용한 경우 정광으로 넘치는 양이 많지 않아서 포수제의 첨가가 필요함을 확인하였다. DMU-101을 첨가하였을 때 Ash rejection 57.29%, Com. recovery 70.17%로 분리 효과가 가장 높은 것으로 확인되어 이후 실험의 포수제로 사용하였다. 한편 양이온 포수제인 amine류의 포수제를 사용한 이유는 단체분리가 되지 않은 상태로 중광(middling)인 석영 등의 규산염광물에 포함되어 있는 탄소 C를 띄워 회수율의 향상을 확인하기 위해 실험을 진행하였으며 amine류의 포수제를 첨가하였을 때 Com. recovery가 높게 확인되었다.

기포제의 종류에 따른 분리효과를 확인하기 위해서 pine oil, MIBC(Methyl isobutyl carbinol), AF65(Aero froth #65), DF250(Dow froth No.250)을 각각 사용하였으며, 임펠러 회전속도 1,200 rpm에 의해 주입되는 자연공기로 기포를 생성시켜 실험을 진행하였다. MIBC를 사용했을 경우 Ash rejection 64.12%, Com. recovery 76.32%로 분리효과가 가장 좋음을 확인 할 수 있었으나 기포가 깨지는 현상이 발생하여 AF65에 비해 기포의 결합력이 약한 것을 확인 할 수 있었으며 이 후 실험은 AF65를 사용하여 진행하였다. CPT column 부선 실험에 적용 시 AF65와 MIBC의 비교실험을 실시하여 적정 기포제를 선정해야 할 것으로 사료된다. 한편 억제제는 SS(Sodium silicate), SMP(Sodium metaphosphate), 스케일 제거제로 사용되는 SiO₂ remover, 생석회(Lime) 중 SMP 사용하였을 때 Ash rejection 67.57%, Com. recovery 70.90%를 얻을 수 있어 억제효과가 가장 높음을 알 수 있었다.

2. CPT column 부선

가. 포수제 첨가량에 따른 영향

분리효과가 가장 높은 시약으로 확인된 DMU-101을 대상으로 CPT column에서의 사용량을 확인하기 위해 첨가량을 0 ~ 400 mL/ton까지 변화시키면서 실험을 실시하였으며 실험에 사용된 시료는 Vibro screen을 사용하여 CPT column에 적합한 입도로 조절된 시료(100 × 325 mesh, Fixed carbon 53.75%)를 사용하였다. Fig. 4-11에서와 같이 포수제를 첨가하지 않고 실험했을 때, 포수제를 사용한 경우에 비해 Ash rejection과 Com. recovery가 모두 낮아 포수제의 사용이 필요함을 확인하였으며, 첨가량을 100 mL를 초과하여 첨가하였을 때 Ash rejection이 감소하는 현상을 보였다. 따라서 포수제를 100 mL/ton 첨가하였을 때, Ash rejection 71.79%, Com. recovery 90.68%를 얻을 수 있어 가장 분리효과가 높음을 확인하였다.

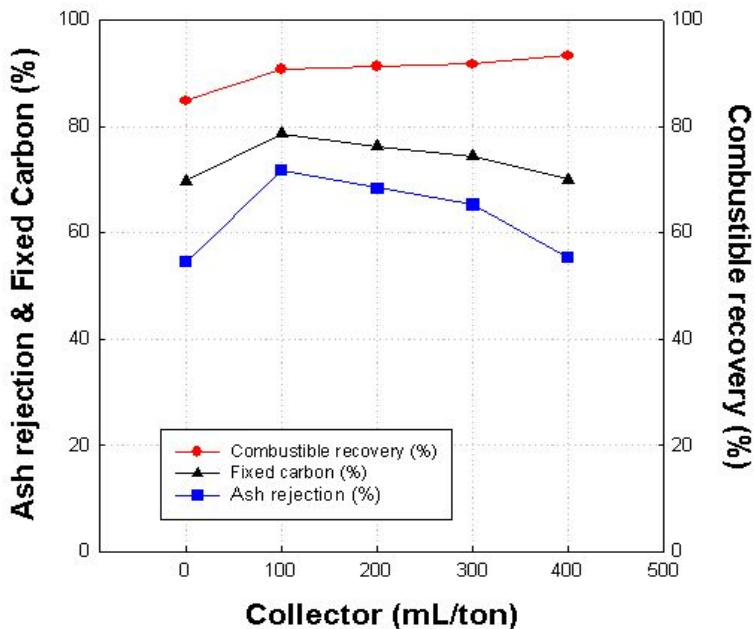


Fig. 4-11. Effect of collector dosage on CPT column flotation.

(D_p : 5%, Collector : DMU-101, Frother : AF65 6 L/ton,
Depressant : Sodium metaphosphate 1 kg/ton, Wash water
300 mL/min., Air flow rate : 1,200 mL/min.), Feed F. C : 53.75%

나. 기포제 첨가량에 따른 영향

Fig. 4-12는 CPT column에서 기포제 첨가량에 따른 부선흡과를 확인하기 위해 포수제로 DMU-101(100 mL/ton), 억제제 SMP(1 kg/ton)를 고정한 뒤, AF65의 첨가량을 증가시키면서 실험한 결과이다. 기포의 결합력이 우수한 AF65를 첨가하여도 6 L/ton 미만에서는 기포가 안정된 상태로 유지되지 않았으며, 그림과 같이 기포제를 10 L/ton을 초과하여 첨가하였을 때 Com. recovery는 비슷하게 유지하면서 Ash rejection은 감소하는 현상이 확인되었다. 이는 첨가량이 증가하면서 기포의 크기가 미립의 석탄에 알맞게 조절되었다가 일정량의 기포제가 추가 되어 강하고 치밀한 기포층이 형성되어 일부 맥석광물이 동반 부유되었기 때문으로 사료된다. 따라서 기포제를 10 L/ton 첨가 시 Ash rejection 79.13%, Com. recovery 89.94%를 얻을 수 있어 적정 첨가량으로 확인되었다.

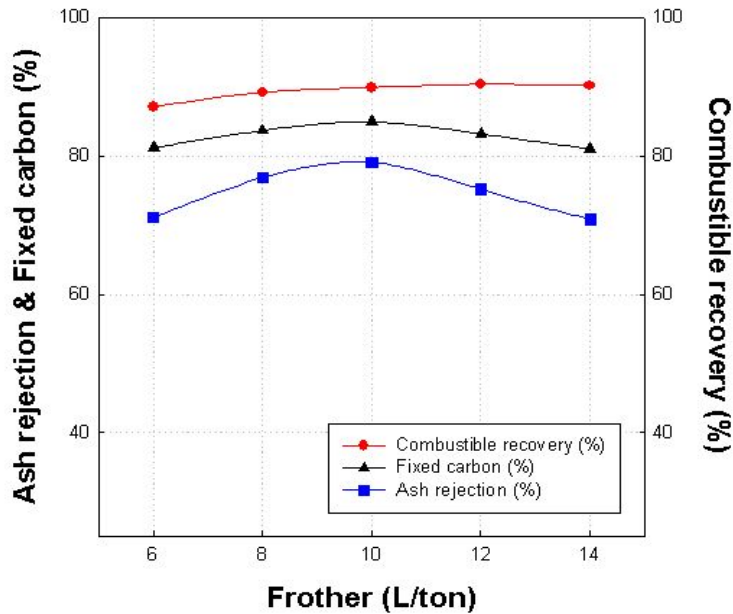


Fig. 4-12. Effect of frother dosage on CPT column flotation.

(Dp : 5%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65,
 Depressant : SMP 1 kg/ton, Wash water 300 mL/min.,
 Air flow rate: 1,200 mL/min.), Feed F. C : 53.75%

다. 세척수량에 따른 영향

column 부선에서 세척수 첨가량은 정광의 품위를 조절할 수 있으므로, 이에 따른 선별효과를 확인하기 위해 세척수량을 0 ~ 500 mL/min.까지 변화시키면서 실험한 결과, Fig. 4-13와 같았다. 그림에서 알 수 있듯이 세척수량이 증가할수록 맥석광물에 대한 세척력이 좋아져, 회분제거율은 향상되지만 세척수를 100 mL/min.을 초과하여 실험을 했을 때, Com. recovery는 증가하지만 F.C.과 Ash rejection이 급격하게 저하되었다. 이는 세척수량이 증가하면서 column 내부의 하향류(underflow) 압력이 커져 맥석뿐만 아니라 미립의 석탄까지 영향을 받아 광미로 배출되기 때문이다.

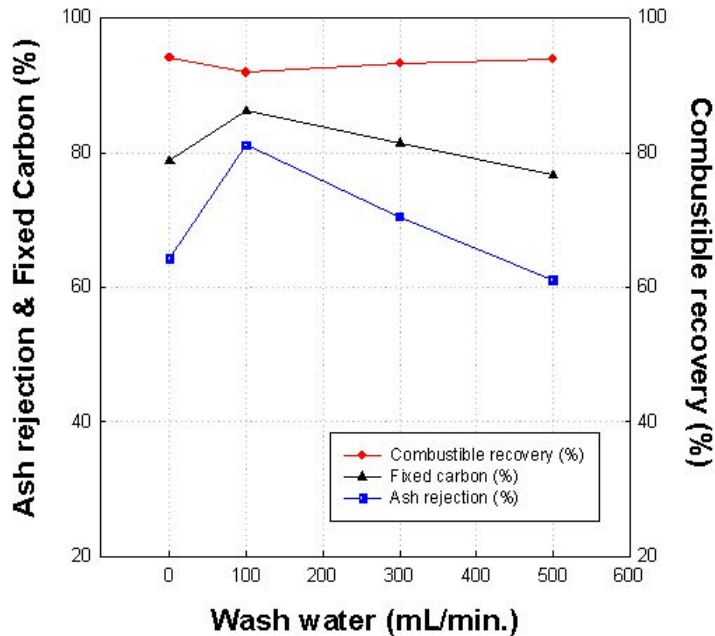


Fig. 4-13. Effect of wash-water on CPT column flotation.

(Dp : 5%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65 10 L/ton,
 Depressant : SMP 1 kg/ton, Air flow rate : 1,200 mL/min.),
 Feed F. C : 53.75%

라. 급광량에 따른 영향

급광량에 따른 영향을 확인하기 위해 급광량을 0.21 g/min.부터 6.67 g/min.까지 변화시키면서 실험을 진행한 결과 Fig. 4-14와 같았다. 실험결과 급광량이 증가할수록 Com. recovery가 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 column cell 내부의 광액농도가 증가해 체류시간이 길어짐에 따라 일부 미립 맥석광물들이 동반부유되거나, 일부 미립의 맥석광물들이 석탄과 응집체를 형성하여 광미로 배출되기 때문으로 사료된다. 한편, 급광량이 4.43 g/min. 일 경우 Ash rejection 80.31%, Com. recovery 84.05%로 비교적 높은 선별효율을 얻을 수 있었다

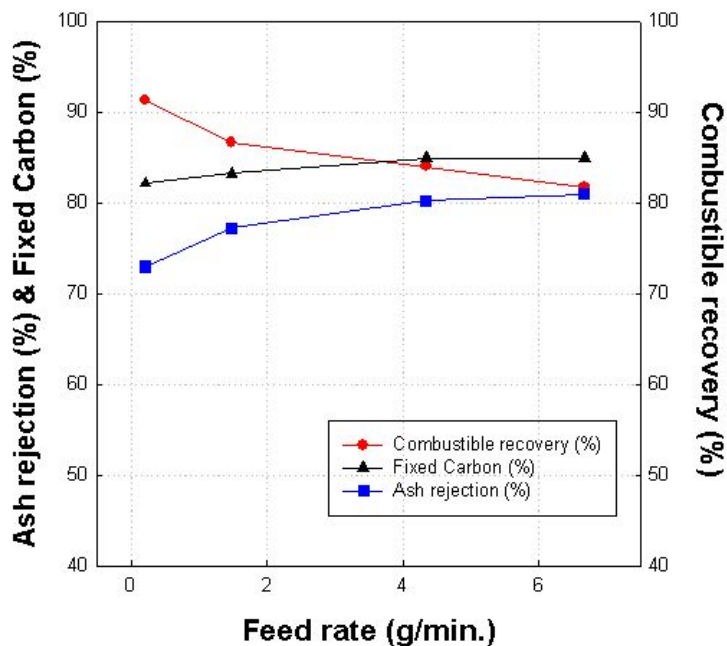


Fig. 4-14. Effect of feed rate on CPT column flotation.

(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.), Feed F. C : 53.75%

마. 광액농도에 따른 영향

광액농도에 따른 부선흡율을 확인하기 위해 광액농도를 3 ~ 10%까지 변화시키면서 실험한 결과 Fig. 4-15과 같았다. 광액농도가 증가할수록 Com. recovery는 저하되었으며, Ash rejection은 광액농도가 5%를 초과할 경우는 저하되었다. 이는 석탄의 표면에 많은 미립의 맥석광물이 먼저 부착 또는 엉킴(aggregation)현상이 발생되어 포수제의 흡착 및 기포와의 부착기회를 방해하기 때문으로 사료된다. 한편 본 연구에서 가장 높은 Ash rejection 85.59%, Com. recovery 88.97%를 얻을 수 있었던 광액농도 5%가 적정 광액농도로 확인되었다.

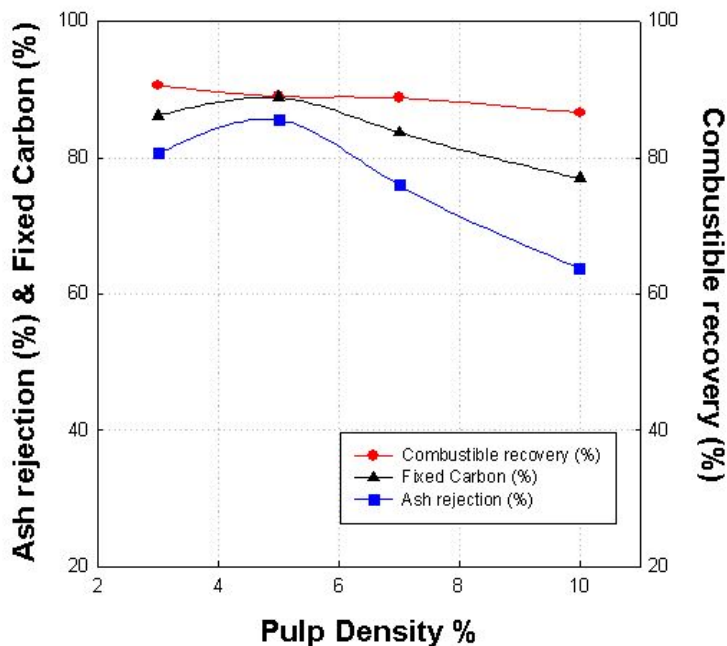


Fig. 4-15. Effect of pulp density on CPT column flotation.

(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.), Feed F. C : 53.75%

3. Microcel™ column 부선

-325 mesh 입도의 미립 석탄의 회분제거율을 높이기 위한 방법으로 Microcel™ column 부선에서 1차 회수된 조선정광(-325 mesh, F.C. 44.16%)을 대상으로 광역 농도를 10%인 조건에서 cleaning 실험을 실시한 결과, Fig. 4-16과 같았다. 그림에 서와 같이 Ash rejection이 64.05%인 조선정광(rougher)을 대상으로 1차 cleaning(stage 1)한 후 Cumulative ash rejection 76.64%, 2차 cleaning(stage 2) 후에는 83.98%로 증가하였다. 이와 같이 정선공정을 통해 Com. recovery는 조선정광 84.78%에서 2차 cleaning 후에 누적회수율(Cumulative recovery)은 68.07%까지 저하되어 회수율은 떨어지지만 회분제거율이 20%정도 향상됨을 알 수 있었다. 한편, calorie를 측정된 결과, 원 시료 3,076 kcal/kg에서 2차 cleaning 실시하여 6,284 kcal/kg까지 증가하여 원 시료와 비교하여 높은 열량의 산물을 얻을 수 있었다.

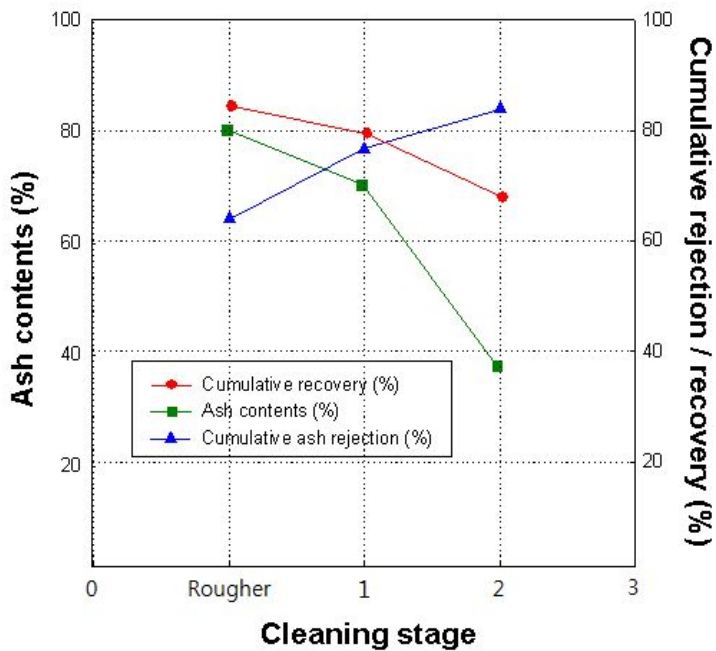


Fig. 4-16. Effects of cleaning stage on Microcel™ column flotation.

(Dp : 10%, Collector : DMU-101 100 mL/ton, Frother : AF65
10 L/ton, Depressant : SMP 1 kg/ton, Wash water 360 mL/min.,
Air flow rate: 1,200 mL/min.), Feed F. C : 44.16%

4. 결과

경동 탄광 무연탄 시료를 대상으로 조건별 시약을 확인한 결과 포수제(DMU-101), 기포제(Aero froth #65), 억제제(Sodium metaphosphate)가 효과적임을 확인하였으며, 포수제의 영향을 확인한 결과, DMU-101를 100 mL/ton 첨가하였을 때 분리효율이 가장 좋은 Ash rejection 71.79%, Com. recovery 90.68%를 얻을 수 있었다.

기포제로 AF65의 첨가량에 따른 영향을 확인한 결과, 기포제 첨가량을 10 L/ton 초과하여 첨가할 경우 Ash rejection은 소폭 감소하고, Com. recovery는 소폭 증가하는 현상을 확인 할 수 있었다. 한편 기포제 첨가량을 10 L/ton 첨가하였을 때 Ash rejection 63.27%, Com. recovery 70.06%를 얻을 수 있어 분리효과가 가장 좋음을 알 수 있었다.

세척수량이 100 mL/min. 일 때 Ash rejection 81.09%, Com. recovery 91.91%로 가장 좋은 조건임을 확인하였다. 급광량에 따른 영향은 0.21 g/min.부터 6.67 g/min.까지 조절하여 실험을 진행한 결과, 급광량을 4.43 g/min.로 했을 때 Ash rejection 80.31%, Com. recovery 84.05%로 가장 좋은 조건임을 확인할 수 있었다.

또한 광액농도가 증가할수록 선별효율이 떨어짐을 확인하였으며 5%일 때 Ash rejection 85.59%, Com. recovery 88.97%로 가장 좋은 결과를 나타냈다.

-325 mesh 입도구간 시료를 Microcel™ column 부선기를 이용하여 조선정광을 대상으로 cleaning 실험을 실시한 결과, 1차 cleaning 실시 후에 누적 회분제거율이 76.64%이었으며 2차 cleaning 실시 후에는 83.98%로 증가되었다. 고정탄소 발열량은 3,076 kcal/kg에서 6,284 kcal/kg까지 향상되었다.

제5장 결론

CPT(Canadian process Technologies) column 및 Microcel™ column 부선기술을 적용하여 초저회분 고품위 청정석탄의 회수 가능성을 확인하기 위하여 국내산 저 품위 무연탄을 대상으로 부선특성을 확인하고 맥석광물의 선택적 억제 가능성을 확인하기 위해 일련의 실험을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

고정탄소 20.68%의 제일(서림)광업소 무연탄을 대상으로 일반부선을 실시하여 조건제 시약 포수제(DMU-101+ Dodecyl amine), 기포제(Aero froth #65), 억제제(Sodium metaphosphate)가 효과적임을 확인하였으며, Microcel™ column 부선을 실시하여 Ash rejection 83.65%와 Com. recovery 70.42%을 얻을 수 있었다. 향후 Microcel™ column 부선 정광을 대상으로 정선과정을 추가할 경우 고품위 석탄 생산이 가능할 것으로 사료된다.

화순광업소 무연탄 원 시료(고정탄소 54.38%)를 대상으로 입도별 발열량 분석 결과 원 시료의 발열량은 3,694 kcal/kg 이었으며, +100 mesh 구간과 -500 mesh 구간 산물을 단순 체질에 의해서 분리하는 것만으로도 발열량을 4,000 kcal/kg 이상으로 올릴 수 있으나 이 구간이 차지하는 무게비가 64%이상을 차지하므로 선탄 공정이 필요함을 알 수 있었다. CPT column 부선을 실시하여 Ash rejection 81.23%와 Com. recovery 84.90%을 얻을 수 있었으며, -325 mesh의 시료(F.C. 54.87%)를 대상으로 Microcel™ column 부선 실험을 진행한 결과 Ash rejection 71.16%와 Com. recovery 71.05%를 얻을 수 있었다.

회분이 38.11%로 존재하는 경동 탄광 무연탄은 과 분쇄된 맥석광물에 의해 -500 mesh의 고정탄소의 품위가 낮게 확인되었으며, CPT column 부선을 실시하여 100×325 mesh 구간 시료(F.C. 53.75%)를 대상으로 Ash rejection 85.59%와 Com. recovery 88.97%로 얻을 수 있었다. -325 mesh로 조절된 시료(Fixed Carbon 44.16%)를 대상으로 Microcel™ column cleaning 실험을 실시한 결과 2차 cleaning 실시 후에는 누적 회분제거율이 83.98%로 증가 하였으며 고정탄소 발열량도 6,284 kcal/kg로 향상되었다.

참 고 문 헌

김민규, 한오형, 2013, “국내산 미립 석탄의 고품위화를 위한 부유선별 연구”, 한국리사이클링학회지, Vol. 22, No.6, pp, 64-72

이강문, 1985: “광물처리공학”, 반도출판사, 서울, 한국.

유승우, 박홍규, 정문영, 2009, “연탄재 부유선별에서 고정탄소의 산화가 유상포수제 첨가량에 미치는 영향”, 한국지구시스템공학회지 Vol. 46, No.5 pp. 582-588.

전호석, 한오형, 신선명, 윤여환, 2002, “마찰하전형정전선별법을 이용한 *Mill Reject* 산물 재활용 기술개발”, 한국리사이클링학회지, Vol. 11, No. 2, pp, 20-27

정문영, 신희영, 박재구, 2000, “역부선법에 의한 국내산 무연탄회의 정제”, 한국자원공학회지, 제 37권, 제 1호, pp. 72-79

최우진, 2004, “광산폐기물의 재활용 기술 동향과 전망”, 자원환경지질, 제37권, 제1호, pp. 113-119

한오형, 홍종원, Jambal Davaasuren, 박신웅, 2011, “인상흑연의 품위향상을 위한 *Microbubble column* 부선 특성 연구”, 한국지구시스템공학회, Vol. 48, No. 5, pp. 631-638

한오형, 강현호, 2006, “*Microbubble column*에 의한 인상흑연의 부선에 관한 연구”, 한국자원리사이클링학회, Vol. 15, No. 2, pp. 37-44

Subrahmanyam and Forssberg, 1988; Falutsu and Dobby, 1989; Finch and Dobby, 1990; Falutsu, 1994; Dennis, 1998; Kennedy, 2008

Xianjun Lu, E. Forssberg, 2001, "*Flotation selectivity and upgrading of Woxna fine graphite concentrate.*" Minerals Engineering, Vol 14, Issue 11, November, 2001, pp. 1541-1543

Wang, J., Hu, Qiu and Zhong, 2000, "*Use of Silver-bearing Concentrates in Bacterial Leaching of Chalcopyrite containing Ore Material*", Proceedings of 21st International Mineral Processing Congress, Rome, Italy.

Finch and Dobby, 1990; Groopoo and Parekh, 1990; Goodall and O'Connor, 1992; Tao et al., 2000

Rubinstein, Julius B., 1995, column Flotation, Vol. 2, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 41-45.

E.E. Berry and R.T. Hemmings, 1986. "Beneficiation of Fly Ash : An Over view of a Resource." 2nd Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Spain. April 1986

Fogg, C. T and Boyle, Jr., E. H. 1987: Flake and High Crystalline Graphite Availability - Market Economy Countries: A Minerals Availability Appraisal, USBM Inf. Circ. 9122, 40.

Mathieu, G. I., 1972, Comparison of Flotation, Vol. 2, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 103-140.

Wills, B.A., 2006, "*Mineral processing technology(7th)*", Tim Napier-munn, Elsevier, Burlington, USA