



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 2월  
석사학위논문

석탄 품위향상을 위한 CPT column  
부선 연구

조선대학교 대학원  
에너지자원공학과  
김 우 람

# 석탄 품위향상을 위한 CPT column 부선 연구

CPT column flotation for improving coal grade

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원  
에너지자원공학과  
김우람

# 석탄 품위향상을 위한 CPT column 부선 연구

지도교수 한 오 형

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 우 람

# 김우람의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박 천 영 ㉠

위 원 조선대학교 교수 강 성 승 ㉠

위 원 조선대학교 교수 한 오 형 ㉠

2015년 11월

조선대학교 대학원

## - 목 차 -

List of tables .....	iii
List of figures .....	iv
Abstract .....	vi
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 이론적 배경 .....	2
제 1 절 비중선별 .....	2
제 2 절 자력선별 .....	4
제 3 절 정전선별 .....	6
1. 부유선별 이론 .....	8
2. Column 부선 .....	10
3. 접촉각 .....	12
4. 부선시약 .....	13
제 3 장 시료 및 실험방법 .....	14
제 1 절 시료 .....	14
1. 입도분석 및 공업분석 .....	14
2. 광물학적 특성 .....	17
3. 접촉각 측정 .....	18

제 2 절 실험방법 .....	19
1. 시료의 분석 .....	20
2. 부유선별 기기 .....	21
제 4 장 실험 결과 .....	23
제 1 절 일반부선(Batch flotation) .....	23
제 2 절 CPT column 부선 .....	24
1 포수제 첨가량에 따른 영향 .....	24
2 기포제 첨가량에 따른 영향 .....	26
3 억제제 첨가량에 따른 영향 .....	27
4 세척수량에 따른 영향 .....	28
5 공기주입량에 따른 영향 .....	29
6. 광액농도에 따른 영향 .....	30
7. 광액온도에 따른 영향 .....	31
8, 입도구간별 비교 실험 .....	34
제 5 장 S.E.M & 원소별 mapping .....	35
제 6 장 결론 .....	37
참고문헌 .....	39

## List of tables

Table 2-1 Results of Bartles-Mozley gravity separation for the mine wastes	2
Table 2-2 The work function of various unit elements materials	7
Table 3-1 Result of proximate analysis for raw sample	14
Table 3-2 Result of gross calorific value analysis for raw sample	15
Table 3-3 Result of wet screen analysis for raw sample	16
Table 3-4 Result of a wet screen analysis for raw sample	16

## List of figures

Figure 2-1 Basic jig construction. ....	3
Figure 2-2 Schematic view of Hand jig. ....	3
Figure 2-3 Principles of permroll magnetic separation .....	5
Figure 2-4 Principle of corona, induction and triboelectrostatic separation .....	7
Figure 2-5 Schematic view of Denver type flotation machine .....	9
Figure 2-6 Schematic illustration of froth structure .....	9
Figure 2-7 Schematic illustration of column flotation machine .....	11
Figure 2-8 Contact angle between bubble and particle .....	12
Figure 3-1 X-ray diffraction pattern of raw sample .....	17
Figure 3-2 Contact angle of raw coal ore sample .....	18
Figure 3-3 Batch laboratory flotation machine & concentrate and tailing pictures .....	21
Figure 3-4 CPT column flotator & concentrate and tailing pictures .....	22
Figure 4-1 Effects of collector dosage on CPT column flotation .....	25
Figure 4-2 Effects of frother dosage on CPT column flotation .....	26
Figure 4-3 Effects of depressant dosage on CPT column flotation .....	27
Figure 4-4 Effects of wash water on CPT column flotation .....	28
Figure 4-5 Effects of Air flow rate on CPT column flotation .....	29
Figure 4-6 Effects of Pulp Density on CPT column flotation .....	30
Figure 4-7 Effects of Collector temperature on CPT column flotation .....	32

Figure 4-8 Effects of frother temperature on CPT column flotation ..... 33

Figure 4-9 Optimum factor on CPT column flotation ..... 34

Figure 5-1 SEM & EDS mapping of raw sample ..... 35

Figure 5-2 SEM & EDS mapping of Concentrate ..... 36

## Abstract

### - CPT column technology research for improving coal grade -

By Kim, Woo Ram

Adv. Prof. : Han, Oh Hyung

Dept. of Energy Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

Development of commercial technology for expansion in domestic anthracite coal utilization is urgent due to the mass reserves of low grade anthracite in Korea. Therefore, a series of experiments were conducted in this study to resolve this problem using CPT column in order to check the possibility of high-quality production for the fine coal that is impossible to treat by dry separation method. Particle size analysis was conducted for the sample using disk mill and vibro screen, and preliminary experiment was conducted for +100 mesh of the product obtained through this process by batch flotation(Sub-A type). Comparison experiment was conducted for -100 mesh and 100 × 325 mesh by each factor-specific condition applying to CPT Column. The result of CPT column flotation by using the proper reagent confirmed through batch flotation was ash rejection 82.49% and recovery 90.01% under the conditions of pulp density 5%, frother temperature 26°C, Kerosene collector (200mL/ton), Pine oil frother (1L./ton), Lime depressant (3kg/ton), air flow rate (1,400mL/ton) and wash water (300mL/ton).

## 제1장. 서 론

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. 우리나라의 에너지 소비는 지속적으로 확대되고 있으나, 에너지자원의 97 %를 수입에 의존하고 있으며, 특히 석탄의 경우 2002년 기준 24억 TOE에서 2030년에는 36억 TOE로 증가할 것으로 예상되어 이러한 에너지 수요를 대비하기 위해 천연가스, 재생에너지 등 새로운 에너지원에 대한 연구가 활발히 진행 중이지만 지역적 편재 없이 가장 풍부하며 가격 경쟁력이 우수한 석탄에 대한 수요증가 추세는 부인할 수 없는 현실이다. 석탄은 우리나라가 보유하고 있는 유일한 화석 에너지로써 고유가 시대에 수입하는 에너지를 대체할 수 있는 대안으로 가스나 석유와 같은 화석에너지에 비해 경제성이 우수하여, 차후 발생할지도 모를 에너지 자원의 전략적 사용을 방지할 수 있는 에너지이다. 국내의 경우 석탄이 환경 친화적이지 않다는 부정적 인식의 확대로 인해 석탄 이용도가 갈수록 저하되고 있는 실정이다. 따라서 국내의 석탄 이용에 관한 연구개발의 참여율이 감소하였으며, 선진국에 대하여 기술개발 수준이 상당히 뒤쳐져 있다. 현재 청정 석탄 이용을 위한 기술개발이 이루어지고 있으나, 석탄을 이용하기 위해 환경적으로 문제가 야기되는 SOx, NOx, 석탄회 등의 저감화 기술개발이 시급하다. 저 품위 석탄의 품위 향상을 위해서는 단체 분리를 위한 분쇄가 필수적이지만 강도가 약한 석탄은 과분쇄로 인한 미립자의 발생을 피하기 힘들다. 과분쇄된 미립자는 일반적인 선별(자력, 비중, 일반부선 등)방법은 적합하지 않아 미립자를 처리를 위한 선별 기술을 적용하는 것이 필요하다. 초저회분 고품위 청정석탄 생산을 위해서는 53  $\mu\text{m}$ (275 mesh) 이하의 미립으로 분쇄하여 단체 분리도를 향상시켜야 하나, Conventional 부유선별기의 선별효율은 53  $\mu\text{m}$  이상의 입도에 국한되는 것으로 알려져 있어 Microcel<sup>TM</sup> column 부선기와 CPT column 부선기를 이용하여 일반부유선별기에서 처리하기 힘든 53  $\mu\text{m}$  이하의 미립자를 처리하기 위한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 100 mesh이하의 국내산 저 품위 미립 석탄으로 미립자 석탄 처리에 적합한 CPT column 부선기술을 적용하여 미립 석탄의 품위향상 가능성을 확인하고자 한다.

## 제2장. 이론적 배경

탄소를 함유하는 광물을 선별하는 기술로는 물리적 성질을 이용한 비중선별과 자력선별, 정전선별이 있으며, 물리화학적 성질을 이용한 부유선별법이 있다(Finch and Dobby, 1990). 이들의 분리특성을 살펴보면 다음과 같다.

### 제1절 비중선별

비중선별(gravity separation)은 목적광물과 맥석광물의 비중차이를 이용하여 유가금속을 함유한 입자와 맥석을 분리하는 기술로 이 방법은 부유선별법이 출현하기 전까지는 가장 중요한 선별법이었으나 현재는 부유선별 전, 후에 조합시켜 보조적인 선별방법으로 많이 활용되고 있다(Wills, 2006). 비중선별기는 크게 상하방향의 수직 왕복 수류 속에서 무거운 광물을 가벼운 광물보다 하층으로 침강 퇴적시키는 Jig(Fig. 2-1, 2-2)와 침강한 알들을 평탄한 유막 속에서 무거운 입자와 가벼운 입자로 분리시키는 table등이 있으나 전자는 조립, 후자는 세립의 선별에 주로 이용되고 있다. 한편, 미립자의 효율적인 회수를 위해 새로운 형태의 선별기 개발이 이루어져 왔으며 한 예로 Bartles-Mozley 비중선별기는 기존 비중선별기에 비해 미립자 회수에 매우 효과적인 것으로 보고되고 있으며, 비중선별 결과는 Table 2-1에 요약 되어있다. 아래 표에서 알 수 있듯이 기존 비중선별기에서 회수가 어려웠던 45  $\mu\text{m}$ 이하 크기의 입자도 회수가 가능함을 알 수 있으며, 회수율도 70% 수준을 나타내고 있다(최우진, 2004).

Table 2-1. Results of Bartles-Mozley gravity separation for the mine wastes

Material	Feed		Concentrate	
	Size range	Grade (%)	Recovery (%)	Enrichment
Cassiterite Slimes	45%-10 $\mu\text{m}$	0.36% Sn	47	6.4
Scheelite Tails	60%-45 $\mu\text{m}$	0.25% WO <sub>3</sub>	70	2.8
Wolframite	90%-100 $\mu\text{m}$	3.4% WO <sub>3</sub>	92	3.1
Tantalite Tails	90%-40 $\mu\text{m}$	0.08% Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	68	2.5
Cassiterite Tails	80%-50 $\mu\text{m}$	0.49% Sn	70	3.1

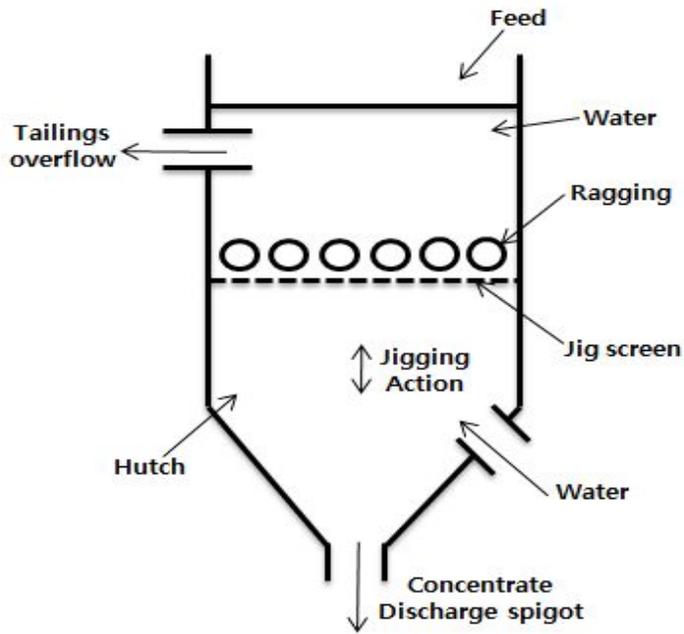


Fig. 2-1. Basic jig construction.

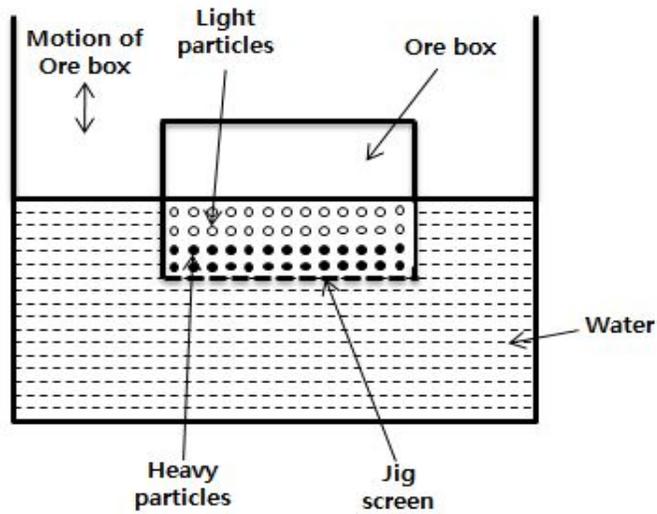


Fig. 2-2. Schematic view of Hand jig.

## 제2절 자력선별

광물 중에는 자석에 의해 끌리는 자성광물과 비자성광물이 있으며, 자성광물 중에서도 약한 자성에 쉽게 끌리는 강자성광물, 강한 자석에만 끌릴 수 있는 약자성 광물, 자계 안에 들어가면 반대방향의 자성을 얻어 자석으로부터 멀어지는 반자성 광물이 있다.

자력선별(magnetic separation)은 기본적으로 외부에서 주어지는 자력에 대한 광물들 간의 고유한 자화율(magnetic susceptibility)의 차를 이용하는 선별법으로 Fig. 2-3에서 알 수 있듯이 자화율의 차이에 따라 광물의 특성이 크게 세 가지로 나누어진다(최우진, 2004).

① 반자성(diamagnetism) : 자력이 감소되는 방향으로 반발력이 작용한다.

반자성의 성질은 외부자장에 의하여 반대 방향으로 자기모멘트가 물질 내에 유도되는 것에 기인한다. 고강도 자석에 의하지 않고서는 자력에 의한 분리가 불가능하며 비자성(non magnetism)이라고도 한다. 반자성광물로는 황철광( $\text{FeS}_2$ ), 첨아연광( $\text{ZnS}$ )그리고 조암광물인 석영, 장석, 운모 등이 있다.

② 상자성(para magnetism) : 자력이 증가하는 방향으로 끌리게 되어 자장의 흐름방향으로 입자들이 배열된다. 강한자석으로 분리가 가능하며 일명 약 자성이라고도 한다. 상자성 광물로는 적철광( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 능철광( $\text{FeCO}_3$ ), 철망간중석( $(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$ ), 금홍석( $\text{TiO}_2$ )등이 있다.

③ 강자성 (ferro magnetism) : 상자성 물질과 유사한 특성을 지니지만 약한 외부자장에 의해서도 강하게 자화되어 영구자석의 성질을 가지는 경우이다. 강자성 광물로는 자철광( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), 티탄철광( $\text{FeTiO}_3$ ), 자류철광( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ )등이 있다.

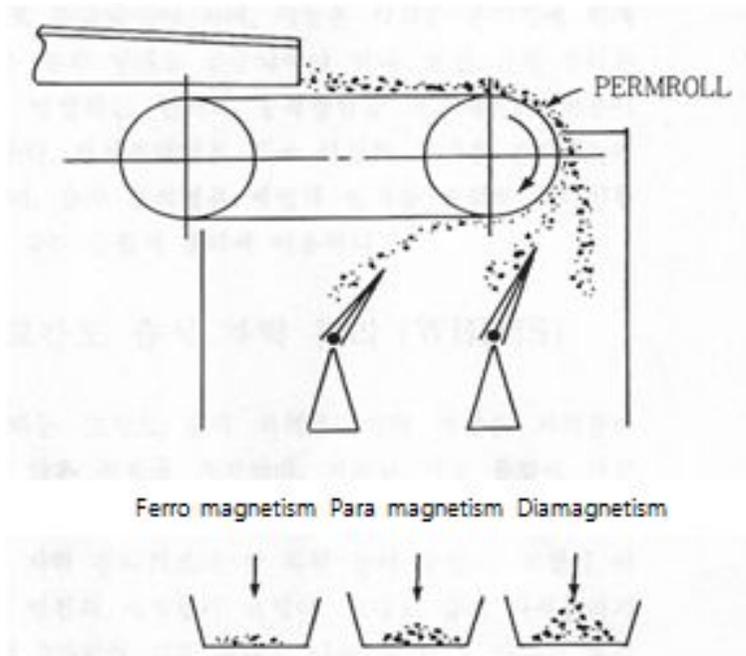


Fig. 2-3. Principles of permroll magnetic separation.

대표적인 자력선별기의 종류로는 드럼형 자력선별기, 유도롤형 자력선별기, 고구배 자력선별기, 초전도 자력선별기가 있으며 오늘날 자력선별기로 사용되고 있는 자석은 특수한 경우를 제외하고는 직류전자석이다. 전자석은 영구자석(permanent magnet)보다 강력하고 자력의 조절이 쉽다는 장점을 가지고 있다.

### 제3절 정전선별

정전선별법(electronic separation)은 광물처리에 있어 철광, 티타늄, 칼륨, 금 그리고 다이아몬드와 같은 유용광물의 처리와 석탄 및 석탄회의 선별처리에 이용되어 왔다. 현재는 기존의 선별법으로 분리가 어려운 혼합물질의 분리와 폐자원의 재활용 분야에 확대 적용되고 있다. 정전선별은 주로 입자들의 하전 방식에 의존하므로 선별장치의 고안은 하전 메커니즘 방식에 의존한다. 또한 이 선별법은 높은 전기장의 영향 하에서 하전된 입자들을 인력이나 반발력에 기초하여 분리하는 고전압 선별법(high tension separation)이라고도 한다. 정전선별법은 선별 단계 이전에 입자들이 정전기적으로 하전 되어야 하며 이들의 하전은 입자의 전기저항과 전기적 표면구조의 차이로 발생되며, 입자에 대한 작용 힘은 하전입자와 전기장 사이의 상호작용에 기인한다(Wang, 2000).

정전선별법은 Fig. 2-4와 같이 전도성 물질과 비전도성 물질이 혼합된 산물을 분리할 수 있는 정전유도형과 코로나 방전형, 그리고 전도성 물질과 비전도성 물질에 관계없이 혼합된 모든 물질의 분리가 가능한 마찰하전형이 있다. Table 2-2는 마찰하전형 정전선별기의 하전 장치와 분리에 적용된 물질들을 나타낸 것이다. 정전선별기 주요 핵심장치인 하전장치는 정전유도형과 코로나 방전형에서 회전드럼(rotational drum)과 진동형 및 벨트형 유도판이 주로 이용되었으며, 특히 재질분리에 있어 하전장치의 영향이 지배적인 마찰하전형의 경우 다양한 종류의 하전장치가 개발되었다. 지금까지 정전선별의 연구는 주로 광물을 대상으로 이루어졌으며, 플라스틱의 연구는 최근에 이루어지고 있다. 플라스틱의 재질분리에 이용할 수 있는 정전선별법은 비전도성 물질들의 분리가 가능한 마찰하전형 정전선별법으로, 이 방법의 장점은 모든 재질의 분리가 가능하고 처리비용이 저렴하며 처리용량이 크다는 것이다. 따라서 개발 즉시 상용화 가능성이 크다는 것이다.

정전선별기에는 정전 선별법은 대전방법에 따라 전기영동에 의한 방법으로

- ①코로나 방전형(charging by ion or electron bombardment)
- ②정전유도형(charging by conductive induction)
- ③마찰대전형(charging by contact or friction, triboelectrostatic)이 있다.

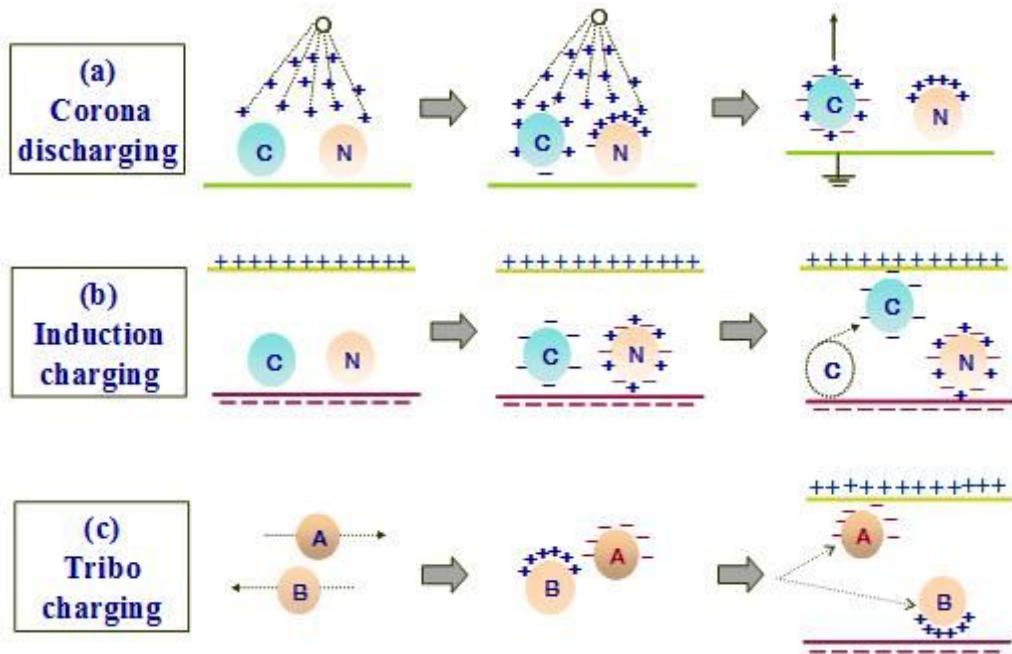


Fig. 2-4. Principle of corona, induction and triboelectrostatic separation.

Table 2-2. The work function of various unit elements materials.

Materials	Work Function(eV)	Material & Compounds	Work function(eV)
Chromium	4.50	Carbon	4.00
Copper	4.65	MoO <sub>3</sub>	4.25
Stainless Steel	4.69	Cu	4.38
Copper-Nikel Alloy	4.70	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.70
PVC	5.13	MgO	4.70
Nickel	5.22	SiO <sub>2</sub>	5.00
Aluminium	5.42	Mineral	5.40

## 제1절. 부유선별

### 1. 부유선별 이론

부유선별은 분리하고자 하는 고체 입자의 표면특성, 즉 습윤도(wettability)차를 이용하는 물리화학적 선별법이다(유승우 외 2인 2009). 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(한오형 외 3인, 2011).

부유선별을 위해 처음 개발된 M. S. 표준형 부선기는 교반실과 포말실이 각기 분리되어 있고, 공기도입량을 자유로이 조절하기 어렵다는 단점이 있었다. Denver 공기 도입 부선기(Denver sub-A)는 M. S. 표준형 부선기의 단점을 보완하여 포말실이 교반실 위에 위치하도록 하여 면적을 절약하고, 각 구마다 공기 도입량을 임의로 조절할 수 있도록 개선되었다. 한편, Fig. 2-1은 Denver type 일반부선기의 개략도이다.

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 동반 흡착(entrapment) 된 것, 지나치게 미립으로 존재하는 부선에서 친수성인 맥석이 기포 상승 시에 생기는 흡인력 등에 의해 기포와 기포사이에 혼입하여 상승하는 되는 현상(entrainment)을 보여주고 있다. 이와 같이 entrapment와 entrainment 는 모두 부선 효율을 저하시키게 하는 원인이 된다(Yoon. 1998).

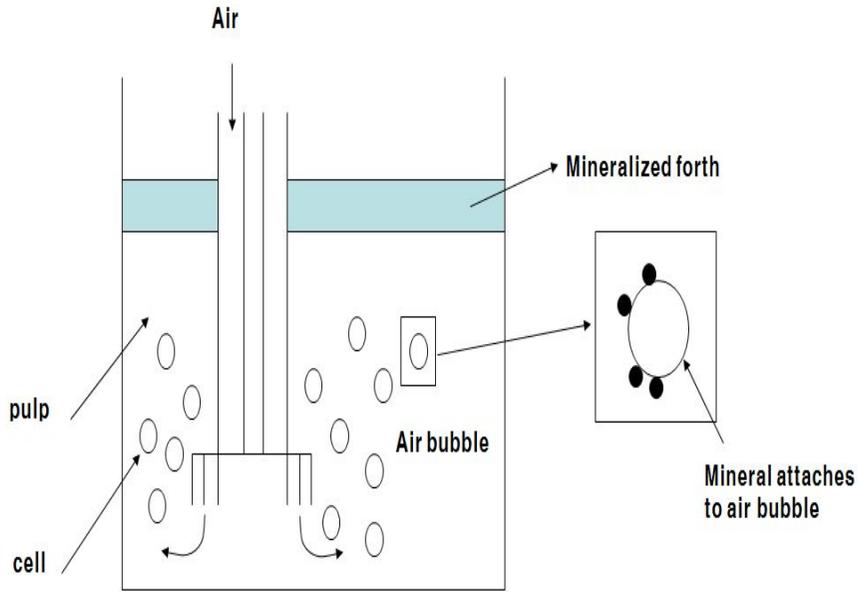


Fig. 2-5. Schematic view of Denver type flotation machine.

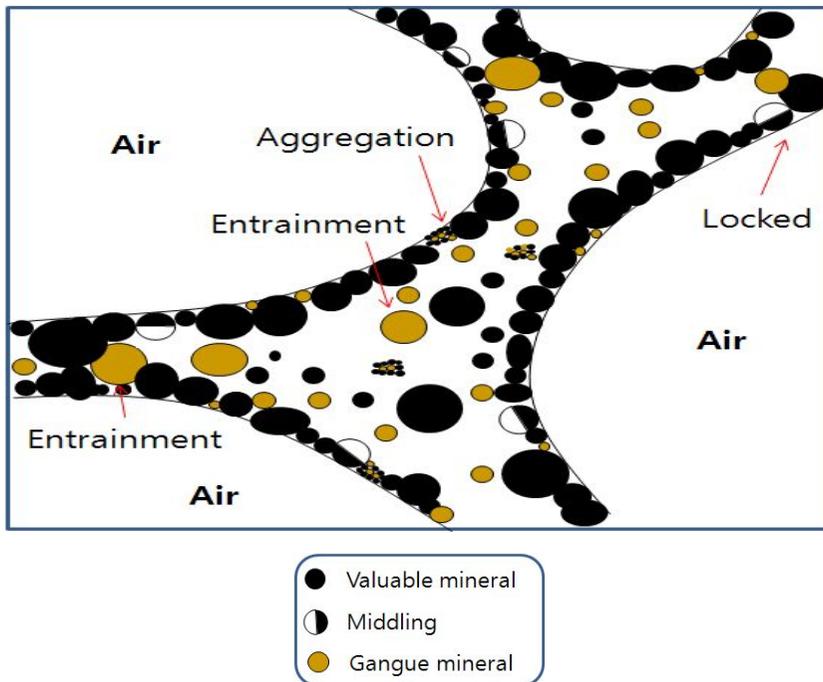


Fig. 2-6. Schematic illustration of froth structure

## 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 미립으로 분쇄된 맥석광물이 부상하기 때문이다. 이와 같은 문제점이 있어 1970년대부터 column 공정이 도입되었다(Rubinstein 외 1인, 1995).

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(한오형 외 1인, 2006).

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.

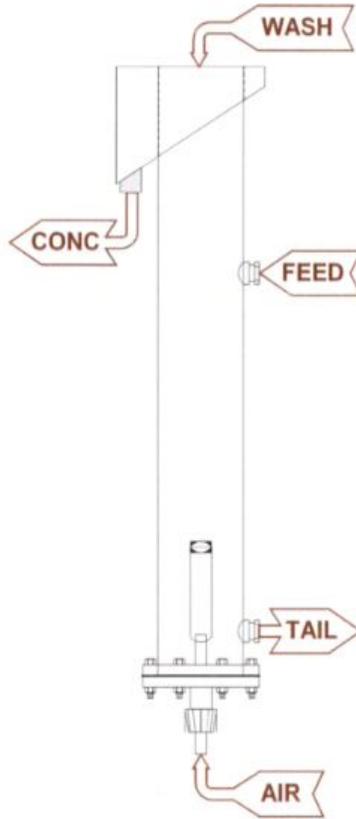


Fig. 2-7. Schematic illustration of column flotation machine

### 3. 접촉각

접촉각이란 액체와 기체가 고체 표면 위에서 열역학적으로 평행일 때 이루는 각을 말한다. Fig. 2-4를 보면 알 수 있듯이 접촉각( $\theta$ )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.

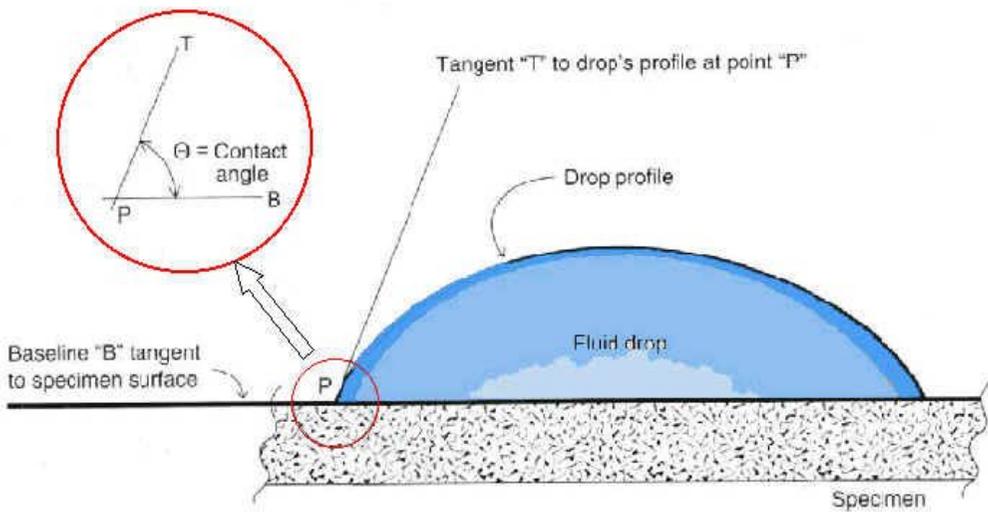


Fig. 2-8. Contact angle between bubble and particle(김민규 외 1인 2013).

## 4. 부선 시약

대부분의 선별법들이 거의 순수한 기계적, 물리적 방법에 의하여 선별이 이루어지는 것과는 달리 부유선별은 물리적 및 물리화학적, 또는 화학적인 영향을 받는 선별방법이다. 이는 목적 광물의 표면을 소수성(hydrophobic)으로 변화 시키거나, 광물과 부착한 기포의 안정성을 부여하는 등의 기능을 하는 시약들을 목적에 맞게 첨가하여야만 선별에 있어 효율성을 향상 시킬 수 있다.

한편, 본 연구에서는 여러 가지 부선 시약 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

본 연구는 국내 경동 탄광에서 채굴된 무연탄중 건식선별 공정에 의해 처리가 불가능한 1 mm 이하의 산물(이하 원시료로 함)을 사용하였다.

#### 1. 입도분석 및 공업분석

Table 3-1은 원 시료의 공업분석 결과를 나타낸 것으로 분석 결과 수분을 제외한 고정탄소(이하 F.C로 표기함)가 60.44%였으며, 회분 34.45%, 휘발분 5.11%로 존재함을 확인하였다. Table 3-2는 입도 구간별 무게비, 고정탄소 및 발열량을 분석한 결과로 원 시료의 발열량은 4,814 kcal/kg으로 30 mesh 이상의 구간을 단순 제거할 경우 평균 발열량이 4,919 kcal/kg 까지 상승하며, 비교적 고정탄소 함량이 낮으면서 많은 양을 차지하고 있는 500mesh 이하 구간까지 제거할 경우 5,207 kcal/kg까지 상승하는 것을 확인하였다. 이는 단체분리를 하지 않고 단순 체질만으로도 발열량을 높일 수 있음을 알 수 있었다.

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

Name	Proximate Analysis (%)		
	Volatile Dry	Ash Dry	Fixed carbon Dry
Raw sample	5.11	34.45	60.44

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

Size (mesh)	Weight (%)	Fixed Carbon Dry(%)	Gross Calorific Value (Kcal/Kg)
Raw sample	100.00	60.44	4,814
+20	3.03	49.00	3,341
20 × 30	13.31	55.93	4,144
30 × 40	10.20	64.03	5,476
40 × 60	14.82	56.43	4,028
60 × 100	13.42	61.31	5,040
100 × 140	4.90	68.43	5,511
140 × 200	3.44	71.24	5,840
200 × 270	5.03	66.81	5,302
270 × 325	2.47	70.38	5,689
325 × 400	2.35	65.71	5,164
400 × 500	2.47	74.38	6,073
-500	24.56	52.45	3,905

Table 3-3은 체를 이용한 원 시료의 습식 입도 분석 결과로, 가장 조립질인 +20 mesh와 20×30 mesh 구간의 F.C.의 품위가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이는 맥석광물의 강도가 석탄에 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 점토광물과 과 분쇄과정에서 일부 과 분쇄된 맥석광물이 포함되어 있어 F.C의 품위가 낮은 것으로 사료된다(김민규 외 1인, 2013).

Table 3-4는 Disc mill을 사용하여 건식분쇄한 후 Vibro Screen을 통해 입도 조절이 완료된 두 구간 (+100 mesh, -100 mesh)의 시료를 다시 표준체를 사용, 습식 입도 분석결과로, +100 mesh 구간에 조절하고자 하는 입도 외에 약간의 미립자가 포함되어 있는 것은 건식 공정의 한계임을 확인하였다.

본 연구에서는 일반부선기에서 처리하기 힘든 53  $\mu\text{m}$ (270 mesh) 이하의 입자들의 선별 효율을 높이기 위해 vibro screen을 사용하여 3구간의 시료로 입도를 조절하여 100 mesh( $D_{50}$ : 271.971  $\mu\text{m}$ )이상 입도구간의 산물은 Denver sub-A 부유선별기를 사용하여 일반부선에 의해 적정시약을 확인하기 위한 예비실험을 실시하였으며, CPT column에 적합한 입도로 알려진 100 × 325 mesh( $D_{50}$ : 64.451  $\mu\text{m}$ ) 구간과 공정의 단순화를 위해 입도구간을 넓혀 미립구간까지 포함된 100 mesh 이하 산물

을 대상으로 CPT column 적용 가능성 확인을 위한 일련의 비교 실험을 실시하였다. 또한 포수제와 기포제가 온도의 영향을 받을 것으로 판단되어 추가 실험을 실시하였다.

Table 3-3. Result of wet screen analysis for raw sample

Size (mesh)	Weight (%)	F.C Assay (Dry basis)	Size ( $\mu\text{m}$ )	Cum. Under	F.C Dist.(%)	Cum. F.C Under(%)
+20	3.03	49.00 (1.48)	20(850)	3.03	2.58	2.58
20 × 30	13.31	55.93 (5.75)	30(600)	16.34	9.98	12.56
30 × 40	10.20	64.03 (6.53)	40(425)	26.54	11.34	23.9
40 × 60	14.82	56.43 (8.36)	60(250)	41.36	14.51	38.41
60 × 100	13.42	61.31 (8.23)	100(149)	54.78	14.28	52.69
100 × 140	4.90	68.43 (3.35)	140(113)	59.68	5.82	58.51
140 × 200	3.44	71.24 (2.45)	200(74)	63.12	4.25	62.76
200 × 270	5.03	66.81 (3.36)	270(53)	68.15	5.83	68.60
270 × 325	2.47	70.38 (1.74)	325(44)	70.62	3.02	71.61
325 × 400	2.35	65.71 (1.54)	400(37)	72.97	2.68	74.29
400 × 500	2.47	74.38 (1.84)	500(25)	75.44	3.19	77.48
-500	24.56	52.45 (14.46)	-25	100	22.52	100.00
Total	100.00	(57.62)			100.00	

Table 3-4. Result of a wet screen analysis for raw sample

Size (mesh)	Weight (%)		Size (micron)
	+100 mesh	100 × 325 mesh	
+100	82.48	-	100(149)
100 × 140	7.24	10.59	140(113)
140 × 200	1.09	12.51	200(74)
200 × 270	1.20	19.30	270(53)
270 × 325	-	18.05	325(44)
325 × 400	-	3.25	400(37)
400 × 500	-	6.24	500(25)
-500	7.99	30.06	-25
Total	100		

## 2. 광물학적 특성

Fig. 3-1은 원 시료 중에 존재하는 광물의 규명을 위한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다.

분석결과, Pyro-phyllite( $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), Quartz( $\text{SiO}_2$ ), Birnessite( $\text{Na}_4\text{Mn}_{14}\text{O}_{27} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), muscovite( $\text{K}(\text{OHF}_2)_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}$ ) 등이 맥석광물로 관찰 되었다.

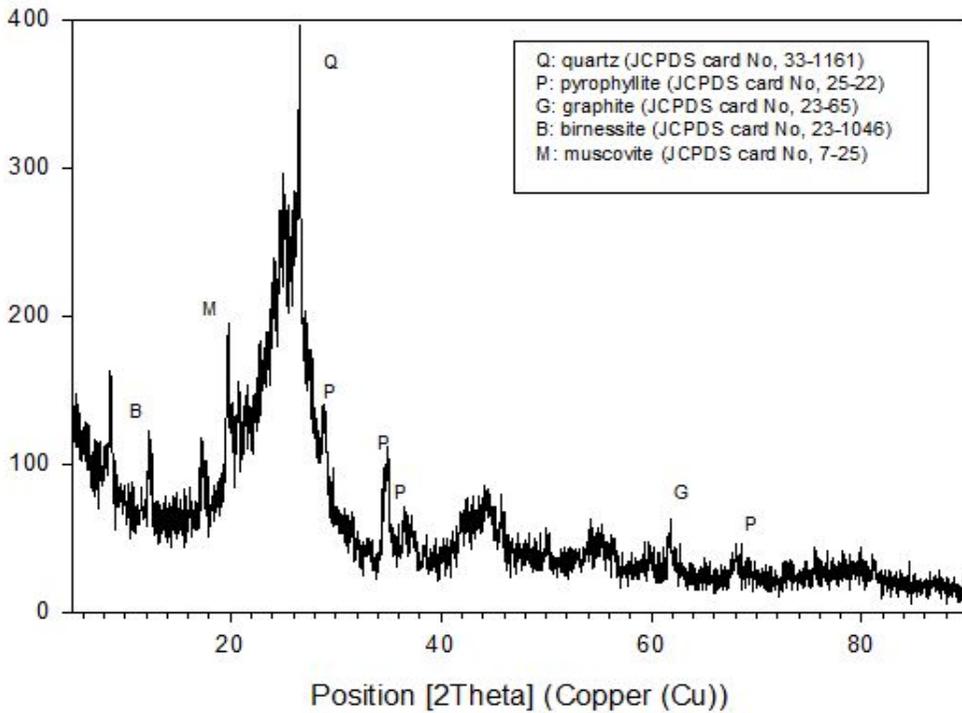


Fig. 3-1. X-ray diffraction pattern of raw sample.

### 3. 접촉각 측정

원 시료의 젖음성(wettability) 즉, 친수성과 소수성을 확인하기 위하여 접촉각 측정을 실시한 결과 Fig. 3-2와 같다. 증류수를 사용하여 pH 별 측정을 실시한 결과, pH 7일 때, 60.98°로 접촉각이 가장 큰 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구에 사용되는 포수제인 Kerosene을 10ppm 첨가 하고 측정한 결과, 66.98°로 접촉각이 증가함을 확인하였다. 한편, 본 연구에서 사용된 물은 수돗물을 사용하였으며, pH가 약 7로써 별도의 조절 없이 사용하였다.

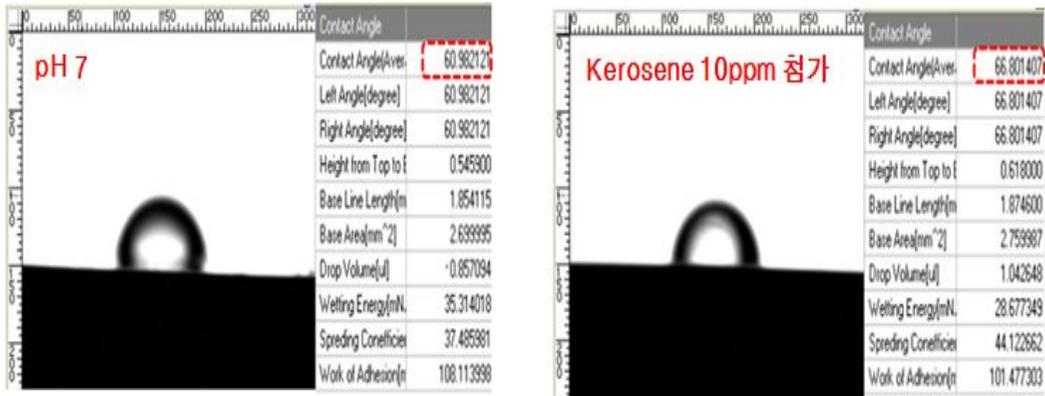


Fig. 3-2. Contact angle of raw coal ore sample

## 제2절. 실험방법

CPT column 부선을 적용하기에 앞서 미국 Metso 社의 Denver sub-A형 부선기를 사용하여 일반부선 실험을 통해 적정 포수제, 기포제, 억제제에 따른 적정조건을 확인하였다. 실험조건은 교반속도를 1,200 rpm.으로 고정 하고 5분간 교반 후, 포수제를 첨가하여 3분, 기포제를 첨가하여 2분간 교반하였으며 공기를 주입하여 15~20분간 부유 산물을 회수하였다. 또한, 추가적으로 Hot plate stirrer(가열식 교반기)를 사용하여 광액의 온도에 변화를 주어 온도에 따른 영향을 확인하는 실험을 실시하였다.

예비실험에서 얻은 자료를 토대로 CPT column 부선기를 이용하여 포수제, 기포제, 억제제의 첨가량 및 세척수량, 공기주입량, 광액농도, 온도(광액의 온도) 변화에 따른 실험을 실시하였으며, 100 mesh 이하의 입도산물과 100 × 325 mesh 구간의 입도산물을 사용하여 비교 실험을 실시하였다. 실험 후 회수된 정광과 광미는 105℃의 건조기에서 약 24시간 건조시켰으며, 건조된 시료를 대상으로 LECO 社의 TGA701 공업분석기로 ASTM 5142 규격에 의해 고정탄소와 휘발분, 수분, 회분의 함량을 측정하였다.

## 1. 시료의 분석

연구에 사용된 시료의 광물조성을 확인하기 위해 조선대학교 공동실험실습관의 PANalytica 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.

부유선별을 통한 품위향상을 확인하기 위하여 LECO 社의 TGA-701 모델의 공업분석기를 이용하여 고정탄소(fixed carbon)의 함량을 측정하였다(E.E. Berry 외 1인, 1986). 한편 시료의 대략적인 단체분리 특성을 확인하기 위해 HITACHI 社의 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy) S4800을 이용하여 SEM 및 원소별 mapping을 실시 하였다.

## 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. 3-3는 Denver sub-A 부선기와 부선사진이며, 각각의 시료에 대한 예비실험을 실시하였다.

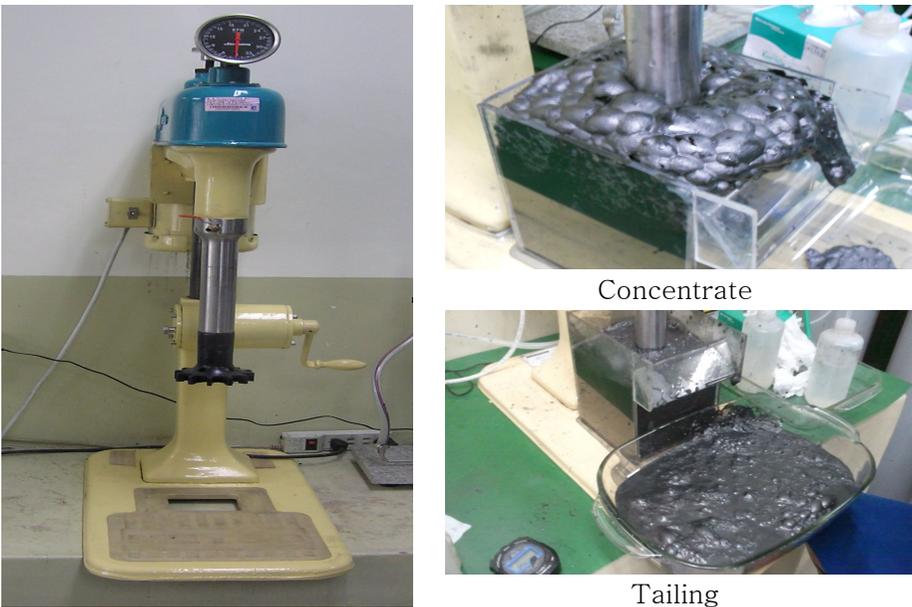


Fig. 3-3. Batch laboratory flotation machine & concentrate and tailing pictures.

또한, Fig. 3-4은 column 부선기의 최신형이라고 할 수 있는 Eriez사의 CPT column(coalpro column) 부선기이다. 적정조건을 확인 한 후 대부분의 조작이 Auto control로 이루어지기 때문에 편리하며 기포의 직경이 작기 때문에 column 내부에서 체류시간이 길어지고 기포와 광석의 부착기회가 높아져 Com. recovery이 높고, 필요에 따라 기포의 크기를 조절할 수 있으며, 세척수(wash water)의 양을 조절하면서 맥석의 세척효과를 높여 품위와 Com. recovery을 조절할 수 있다. 한편, 실험조건으로써 -100 mesh와 CPT column 부선기에서 선별효율이 가장 높다고 알려진 100 × 325 mesh로 입도조절 된 시료의 비교 실험을 진행하였다.



Fig. 3-4. CPT column flotator & concentrate and tailing pictures.

## 제4장. 실험 결과

### 제1절. 예비실험

#### 1. 일반 부선

미국 Metso 社의 Denver Sub-A형 부선기를 이용한 일반부선(예비실험)을 실시하여 포수제, 기포제, 억제제의 사용 시약을 결정하였으며 광액 상태의 시료를 5분간 교반하여 준 후 포수제를 첨가하여 3분 교반, 기포제를 첨가하여 2분간 교반하였으며 공기를 주입하여 15분 내지 20분간 부유 산물을 회수하였다. Denver sub-A형 일반부선기를 사용하여 광액농도 20%의 조건에서 포수제, 기포제, 억제제의 종류를 변화시켜 실험을 실시하였으며, 적정시약을 확인 후 광액의 온도에 변화를 주어 온도에 따른 영향 실험을 실시하였다. 일반부선을 통한 예비실험은 +100 mesh 시료를 대상으로 포수제를 사용하지 않은 경우와 포수제인 Kerosene, DMU-101을 단독으로 Kerosene+D.D.A, DMU-101+D.D.A를 각각 1:1 비로 혼합한 시약을 사용하여 실험을 실시한 결과, Kerosene을 사용한 경우, Ash rejection 52.45%, Com. recovery 78.76%로 부선효율이 가장 좋음을 확인하였다. 또한, 기포제로 Pine oil, MIBC, DF250, AF65를 사용하여 실험을 실시한 결과, AF65를 사용한 경우 Pine oil과 거의 비슷한 부선효율을 보였으나, 경제성을 고려하여 pine oil을 적정 기포제로 선정하였으며, 이때 Ash rejection 52.48%, Com. recovery 74.22%로 가장 적합함을 확인하였다. 한편, 원 시료의 불순물로 확인된 Si, Al 등의 억제효과를 확인하기 위해 억제제를 사용하지 않은 경우와 Sodium silicate(S.S), SMP(Sodium metaphosphate), SiO<sub>2</sub> 제거제, Lime을 사용하여 실험을 실시한 결과, SMP를 사용하였을 경우 Lime에 비해 Com. recovery은 높았으나, Lime을 사용하였을 때 Ash rejection은 60.11%로 가장 높음을 확인하여 Ash rejection과 Com. recovery을 동시에 고려하였을 경우 Lime이 맥석의 억제효과가 가장 좋음을 확인하였다. 적정 포수제와 기포제로 확인된 Kerosene과 Pine oil의 경우, 유상 포수제와 기포제의 온도(물의 온도)에 영향을 받을 것으로 판단되어 추가적으로 온도(물의 온도)에 따른 영향 실험을 실시한 결과, 포수제의 경우 광액의 온도 23℃, 기포제의 경우 광액의 온도 26℃ 일 때 선별효율이 가장 높음을 확인하였다.

## 제2절. CPT column 부선

### 1. 포수제 첨가량에 따른 영향

본 실험에 사용된 CPT column 부선기는 미국 Eriez 社에서 개발된 선별기로 기존의 column부선기인 Microcel™ 과 유사하다. 단지 Bubble generator 대신 Sparger를 통해 미세기포를 발생, 기포의 비표면적을 증가시켜 미립자를 처리하는 방식으로 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 구분되며, 선별효과에 직접영향을 미치는 급광량, 세척수량, 공기주입량, 기포층의 높이 등을 자동 조절 할 수 있어 처리가 힘든 미립의 산물에 선별효과가 높은 것으로 알려져 있다.

예비실험에서 부선 효율이 가장 좋은 시약으로 확인된 Kerosene을 대상으로 CPT column에서의 적정 사용량을 확인하기 위해 포수제 첨가량을 0~500 mL/ton 까지 변화를 주어 실험을 실시하였다. 그 결과, Fig. 4-1과 같이 포수제를 첨가하지 않은 경우에 Ash rejection과 Com. recovery이 모두 낮아 포수제의 사용이 필요함을 확인하였으며 첨가량이 200 mL이상 첨가하였을 때 Ash rejection이 감소하는 현상을 보였다. 이는 포수제의 첨가량이 증가하면서 목적광물 이외의 일부 맥석 광물의 표면에도 강한 포수력을 주어 정광으로 동반 부유된 것으로 사료된다(김민규, 2013). 따라서 포수제를 200 mL/ton 첨가하였을 때 Ash rejection 70.23%, Com. recovery 83.90%를 얻을 수 있어 가장 부선효과가 높음을 확인하였다.

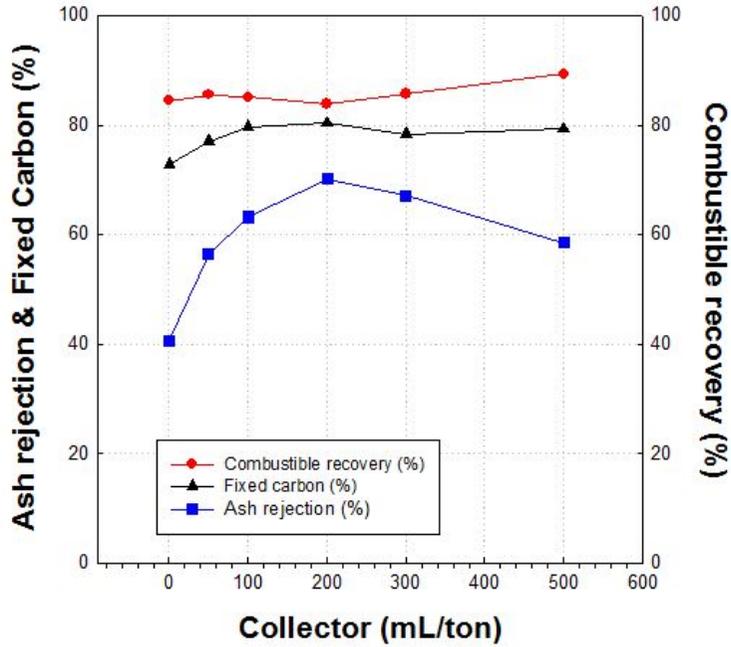


Fig. 4-1. Effects of collector dosage on CPT column flotation.

(Dp : 5%, Collector : Kerosene, Frother : Pine oil (1 L/ton),

Depressant : None, Wash water : 400 ml/min, Air flow rate : 1,200 mL/min.)

## 2. 기포제 첨가량에 따른 영향

기포제 첨가량에 따른 부선흐과를 확인하기 위해 포수제인 Kerosene(200 mL/ton)을 고정한 후 예비실험을 통해 확인한 적정 기포제인 Pine oil의 첨가량을 증가시키면서 실험을 실시한 결과 Fig. 4-2와 같았다. 기포제 첨가량이 증가할수록 Ash rejection은 감소하고 Com. recovery은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기포제가 추가 되어 강하고 치밀한 기포층이 형성되어 목적광물과 일부 맥석광물이 동반 부유되었기 때문으로 사료된다. Pine oil을 1 L/ton 첨가한 경우 Ash rejection 68.37%, Com. recovery 88.23%로 적정 첨가량으로 확인되었다. 기포의 결합력이 비교적 우수한 Pine oil의 경우 1 L/ton의 첨가만으로도 기포발생이 용이하여 경제성을 고려하였을 경우 매우 우수한 것으로 확인되었다.

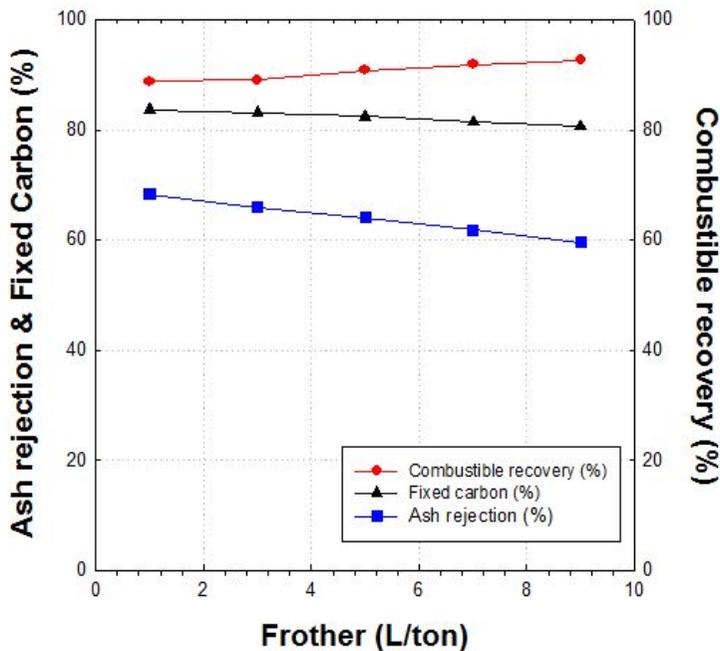


Fig. 4-2. Effects of frother dosage on CPT column flotation.

(Dp : 5%, Collector : Kerosene 200 mL/ton, Frother : Pine oil,  
Depressant : None, Wash water : 400 ml/min, Air flow rate : 1,200 mL/min.)

### 3. 억제제 첨가량에 따른 영향

Fig. 4-3은 예비실험에서 억제효과가 가장 높았던 억제제 Lime의 첨가량에 따른 억제효과를 확인하기 위해 첨가량을 0~7 kg/ton 까지 변화를 주어 실험을 실시하였다. 억제제를 첨가하지 않고 실시한 포수제, 기포제 첨가량 실험에 비해 억제제를 첨가하여 실험을 실시한 경우 Ash rejection과 Com. recovery이 증가한 것을 확인하였으며, 이는 억제제가 첨가됨으로써 맥석광물이 억제되어 석탄의 품위가 증가한 것으로 사료된다. 억제제 첨가량이 3 kg/ton 일 때 Ash rejection 73.37%, Com. recovery 89.78%로 억제효과가 가장 좋음을 확인하였으며, 억제제 첨가량이 3 kg/ton을 초과하였을 경우 Ash rejection, Com. recovery, F.C이 감소하였다. 이러한 현상은 억제제 첨가량이 증가함에 따라 지나친 억제력으로 인해 일부 맥석이 포함된 middling 까지 억제효과를 받은 것으로 사료된다.

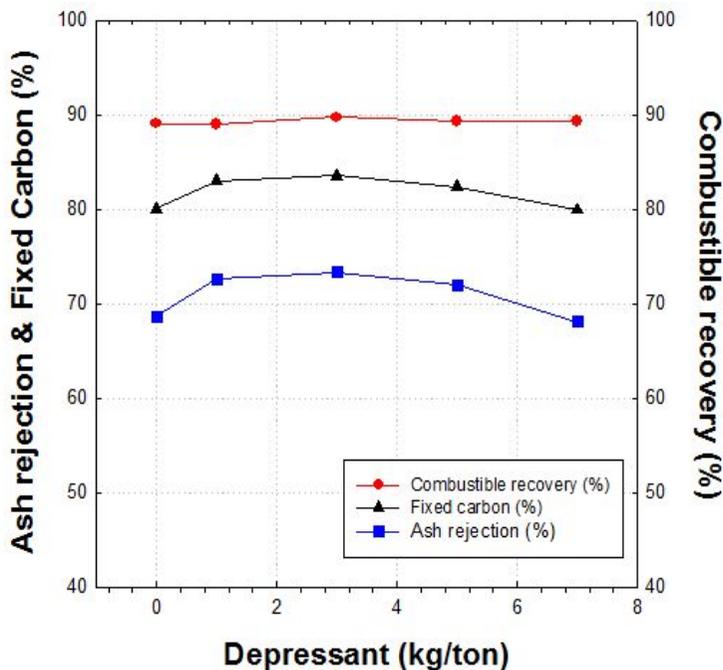


Fig. 4-3. Effects of depressant dosage on CPT column flotation.

(Dp : 5%, Collector : Kerosene 200 mL/ton, Frother : Pine oil 1 L/ton,  
Depressant : Lime, Wash water : 400 ml/min, Air flow rate : 1,200 mL/min.)

#### 4. 세척수량에 따른 영향

column 부선에서 세척수의 첨가는 정광의 품위를 조절할 수 있으므로, 이에 따른 선별효과를 확인하기 위해 세척수량을 0~500 mL/min. 까지 변화를 주어 실험한 결과, Fig. 4-4와 같았다. 그림에서 알 수 있듯이 세척수량이 증가할수록 맥석광물에 대한 세척력이 좋아져 Ash rejection은 향상되지만 세척수량이 300 mL/min. 를 초과하였을 경우, F.C과 회분제거율이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 세척수량이 증가하면서 column 내부의 하향류 압력이 커져 맥석뿐만 아니라 기포에 부착되어 있는 일부 미립의 석탄까지 영향을 받아 Tailing으로 배출되기 때문으로 사료된다. 한편, 세척수량이 300 mL/min. 일 때 Ash rejection 82.49%, Com. recovery 90.01%로 선별효율이 가장 좋음을 확인하였다.

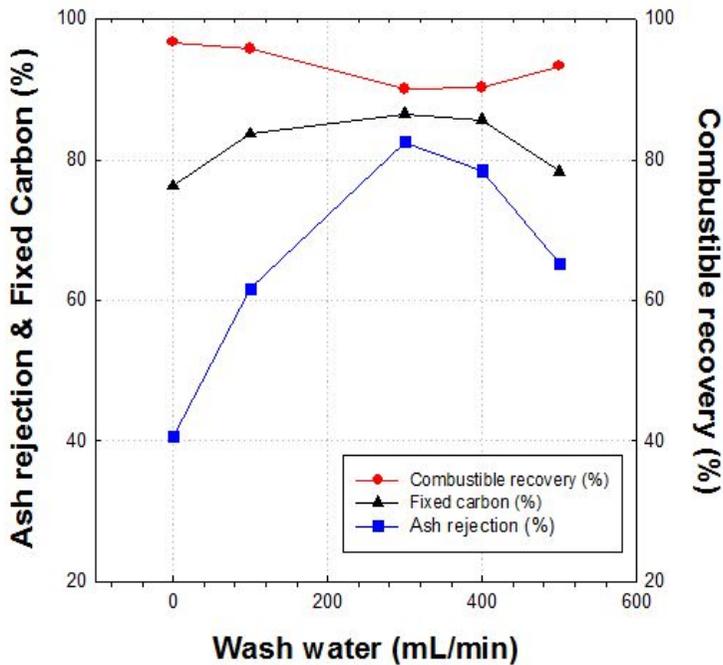


Fig. 4-4. Effects of wash water on CPT column flotation.

(Dp : 5%, Collector : Kerosene 200 mL/ton, Frother : Pine oil 1 L/ton, Depressant : Lime 3 kg/ton, Wash water, Air flow rate : 1,200 mL/min.)

## 5. 공기주입량에 따른 영향

앞에서 확인한 적정 조건을 적용하여 column 부선 실험에서 석탄 Com. recovery 에 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나인 공기주입량의 변화에 따른 영향을 확인 하기 위해 공기주입량을 1,200 ~ 1,800 mL/min. 까지 변화를 주어 실험을 실시하였다. 그 결과, Fig. 4-5과 같이 1,400 mL/min. 일 때 Ash rejection 77.60 %, Com. recovery 89.84 %로 가장 높아 비교적 적정 조건임을 확인하였다. 한편, 공기주입량이 1,400 mL/min. 을 초과하였을 경우 Ash rejection이 감소하는 현상을 확인할 수 있는데, 이는 공기량이 증가하게 되면 column 내부의 상승류 압력이 커져서 기포의 부력과 부유속도가 상승하여 와류가 생김과 동시에 일부 맥석광물이 석탄입자와 함께 동반 부유시킨 것으로 사료된다.

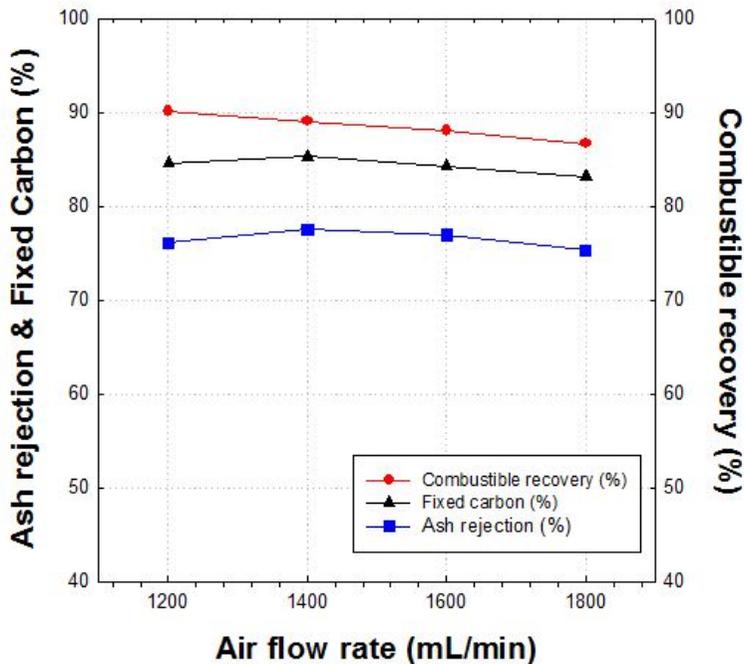


Fig. 4-5. Effects of Air flow rate on CPT column flotation.

(Dp : 5%, Collector : Kerosene 200 mL/ton, Frother : Pine oil 1 L/ton, Depressant : Lime 3 kg/ton, Wash water : 300 mL/min, Air flow rate).

## 6. 광액농도에 따른 영향

광액농도에 따른 부선흡율을 확인하기 위해 광액농도를 3 ~ 10 % 까지 변화를 주어 실험을 실시하였다. 그 결과, Fig. 4-6과 같이 광액농도가 증가할수록 Com. recovery는 증가하다가 감소하였으며, 광액농도가 5 %를 초과할 경우 Ash rejection과 F.C, Com. recovery가 모두 저하됨을 확인하였다. 이는 미립의 맥석광물이 먼저 부착 또는 엉킴(aggregation)현상이 발생되어 포수제의 흡착 및 기포와의 부착기회를 방해하기 때문으로 사료된다. 한편 본 연구에서 Ash rejection 80.59 %, Com. recovery 83.36 %의 결과를 얻을 수 있었던 광액농도 5 %가 적정조건으로 확인되었다.

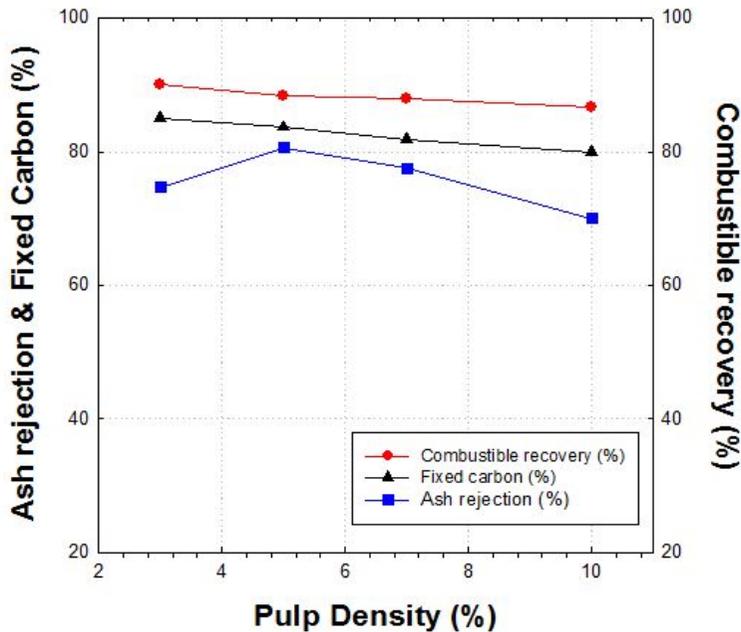


Fig. 4-6. Effects of Pulp Density on CPT column flotation.

(Dp, Collector : Kerosene 200 mL/ton, Frother : Pine oil 1 L/ton, Depressant : Lime 3 kg/ton, Wash water : 300 mL/min, Air flow rate : 1,400 mL/min).

## 7. 광액온도에 따른 영향

앞서 예비실험에서 온도(물의 온도)에 따른 영향을 실시한 결과, 포수제와 기포제가 온도에 영향을 받는 것을 확인하여 CPT column 부선실험에 이를 적용하여 실험을 실시하였다. CPT column 부선기의 경우 예비실험에 실시하였던 batch 부선기와 달리 column 부선기의 구조상 세척수가 연속적으로 공급되기 때문에 일정 온도를 유지해 주는데 어려움이 있다. 그러므로 첨가된 시약이 물의 온도에 따라 일정한 분산효과를 유지하기 위해 Hot plate stirrer(가열식 교반기)를 사용, column에 공급되기 직전의 광액 온도를 일정하게 유지한 상태에서 각 시약을 첨가하여 5분간 충분히 활성화 시킨 다음 급광시켜 실험을 실시하였다. 기존에 실험은 시약을 첨가하여 column에 공급된 광액의 온도는 약 20 °C 이었으며, 본 실험에서는 급광 당시 광액의 온도를 17 ~ 32 °C 까지 변화를 주어 실험을 실시하였다. 그 결과, Fig. 4-7과 같이 포수제의 경우 column에 급광된 광액의 온도를 23 °C로 유지하였을 때 Ash rejection 80.05 %, Com. recovery 87.21 % 로 가장 좋은 선별효과를 확인하였다. 또한 기포제의 경우 역시 Fig. 4-8과 같이 예비실험에서 확인된 적정 온도인 26 °C에서 Ash rejection 82.56 %로 가장 좋은 온도임을 확인하였다. 향후 column 내부의 광액의 온도를 일정하게 유지하기 위한 방법과 개발이 필요할 것으로 사료된다.

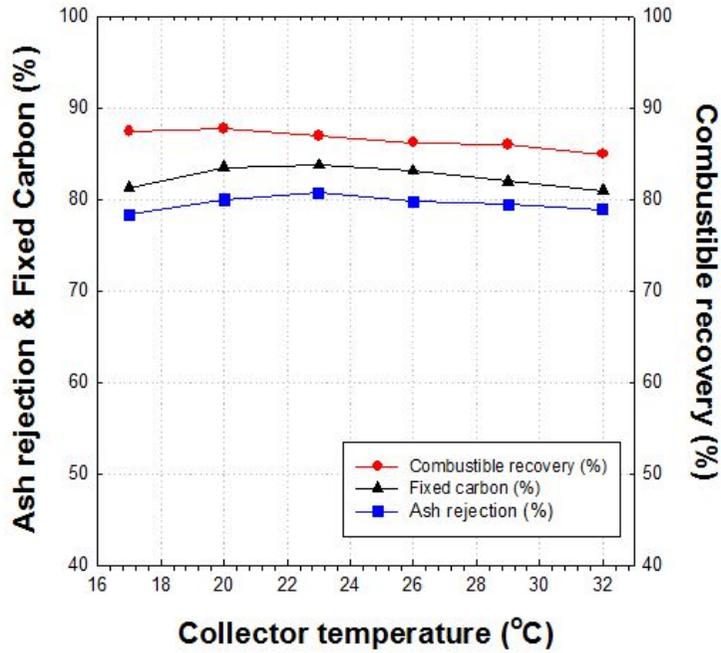


Fig. 4-7. Effects of Collector temperature on CPT column flotation.  
 (Dp : 5%, Collector : Kerosene 200 mL/ton, Frother : Pine oil 1 L/ton,  
 Depressant : Lime 3 kg/ton, Wash water : 300 mL/min, Air flow rate : 1,400  
 mL/min, Collector temperature).

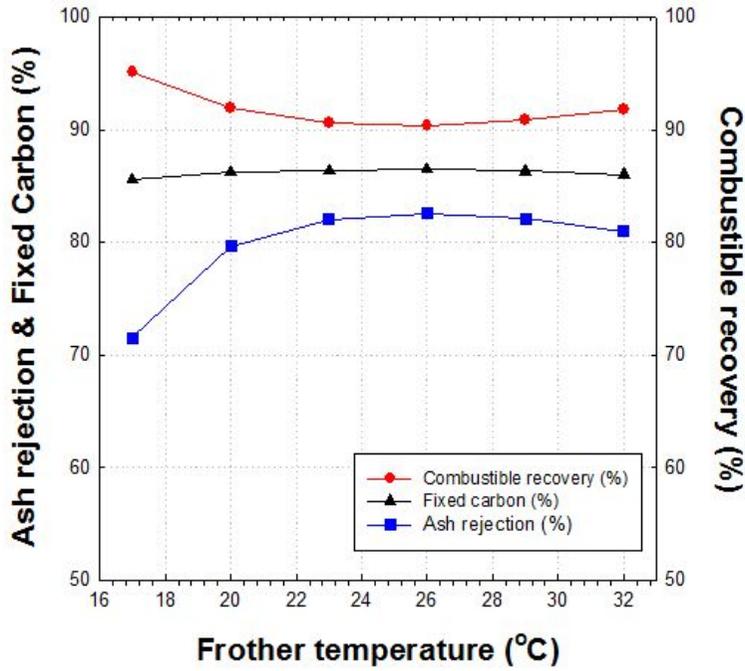


Fig. 4-8. Effects of frother temperature on CPT column flotation.  
 (Dp : 5%, Collector : Kerosene 200 mL/ton, Frother : Pine oil 1 L/ton,  
 Depressant : Lime 3 kg/ton, Wash water : 300 mL/min, Air flow rate : 1,400  
 mL/min, Collector temperature).

## 8. 입도구간별 비교실험

앞 실험을 토대로 확인된 최적조건을 적용하여 CPT column에 적합한 입도로 알려진 100 × 325 mesh 시료로 입도조절 후 -100 mesh 시료와 선별효과를 비교하기 위해 실험을 실시하였다. 그 결과 Fig. 4-9과 같이 입도구간이 좁은 100 × 325 mesh 시료가 Ash rejection은 84.62%, Com. recovery 90.452%로 -100 mesh 구간에 비해 Ash rejection은 약 5% 정도 선별효율이 좋았지만, -100 mesh 시료의 경우 공정의 단순화를 위해 입도구간을 넓혀 미립구간까지 포함한 것을 고려하면 비슷한 결과를 얻을 수 있어 향후 추가 실험이 필요할 것으로 사료된다.

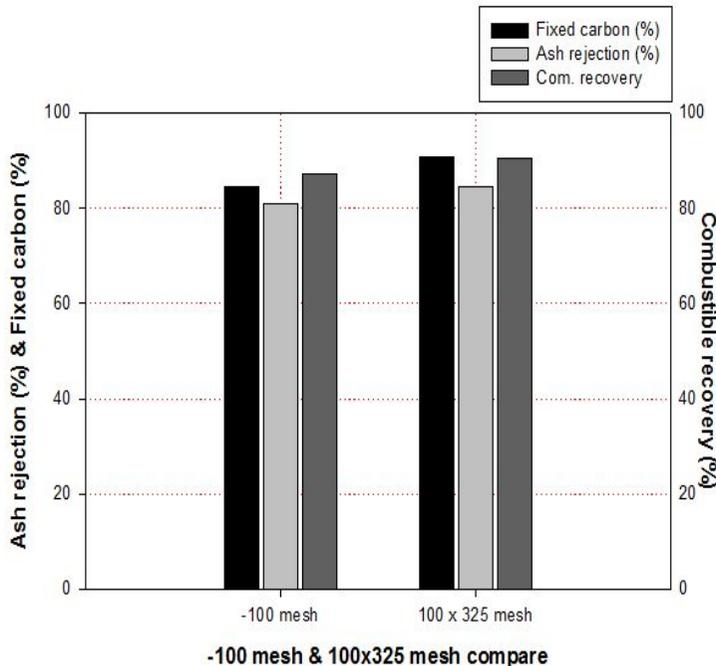


Fig. 4-9. Optimum factor on CPT column flotation

(Dp : 5%, Collector : Kerosene 200 mL/ton, Frother : Pine oil 1 L/ton, Depressant : Lime 3 kg/ton, Wash water : 300 mL/min, Air flow rate : 1,400 mL/min.).

## 제5장. SEM 및 원소별 mapping 결과

원 시료의 SEM 및 원소별 mapping 결과 Fig. 5-1과 같이 대부분이 탄소성분으로 이루어진 것을 알 수 있었으며, Si와 Al 사이에 탄소 C가 존재하고 있어 완전한 단체분리가 되지 않은 상태로 존재하고 있음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 5-2는 CPT Column부선기로 최적조건을 적용하여 가장 품위가 높았던 정광을 대상으로 SEM 및 원소별 mapping을 실시한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 불순물은 Si와 Al이 부분적으로 존재하고 있음을 확인할 수 있었지만 거의 보이지 않고 탄소 C가 주로 분포하고 있음을 확인하여 단체분리가 잘 이루어진 것을 알 수 있었다.

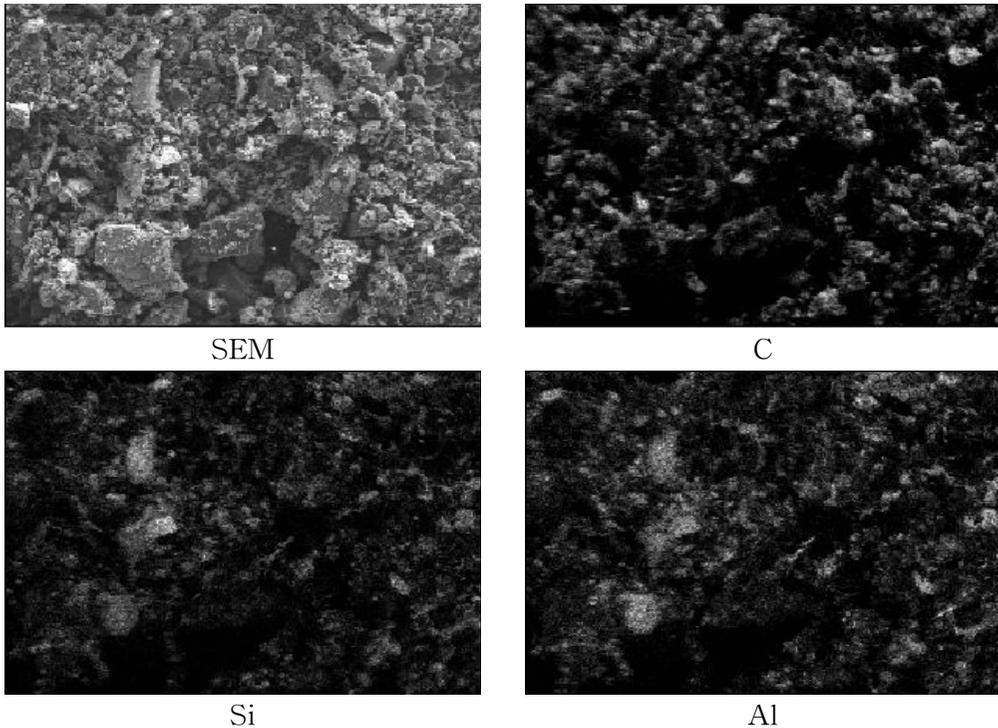
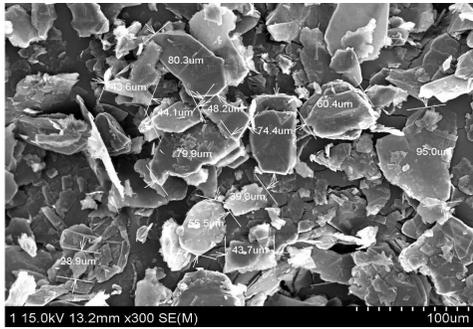
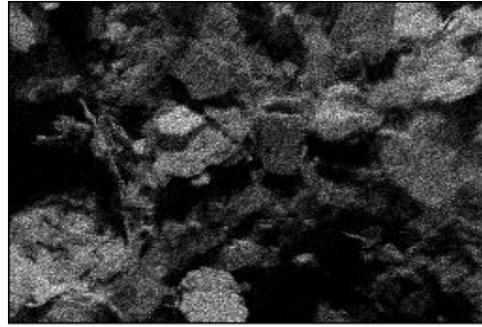


Fig. 5-1. SEM & EDS mapping of raw sample



SEM



C



Si



Al

Fig. 5-2. SEM & EDS mapping of Concentrate

## 제5장. 결론

CPT(Canadian process Technologies) column 부선회분 고 품위 청정석탄의 회수 가능성을 확인하기 위하여 국내산 저 품위 무연탄을 대상으로 부선회분을 확인하고 맥석광물의 선택적 억제 가능성을 확인하기 위해 일련의 실험을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

원 시료의 공업분석 결과, 고정탄소가 60.44 % 이었으며, 휘발분 5.11 %, 회분 34.45 %로 존재함을 확인하였으며, 체를 이용한 원 시료의 습식 입도 분석결과, 조립질인 +20 mesh와 20 × 30 mesh 구간의 고정탄소가 품위가 낮은 것으로 나타났다. 한편, 가장 미립인 -500 mesh의 경우 과 분쇄 과정에서 일부 과 분쇄된 맥석광물이 포함되어 있어 고정탄소의 품위가 낮은 것으로 사료된다.

CPT column 부선회분 Factor를 확인하기 위해 실시한 예비실험인 일반부선회분에서 포수제 Kerosene (200 mL/ton)를 사용하였을 경우에 Ash rejection 52.45 %, Com. recovery 78.76 %를 얻을 수 있어 적정 포수제로 확인하였으며, 기포제 종류에 따른 영향은 pine oil (300 mL/ton)의 경우 Ash rejection 52.48 %, Com. recovery 74.22 %로 분리효과가 가장 좋았으며, 경제성과 분리효율을 고려하여 적정 기포제로 확인되었다. 적정억제제로 확인된 SMP(Sodium metaphosphate)와 비교하여 억제제 종류에 따른 영향을 확인한 결과, Lime이 Ash rejection은 60.11 %로 약간 낮으나 Com. recovery는 높음을 확인하여 적정 억제제로 확인되었다.

일반부선회분을 통해 확인된 조건을 토대로 CPT column을 실시한 결과, 포수제의 첨가량에 따른 영향을 확인한 결과, Kerosene 200 mL/ton 첨가하였을 때 분리효율이 가장 좋은 Ash rejection 70.23 %, Com. recovery 83.90 % 를 얻을 수 있었으며, 기포제로 Pine oil을 1 L/ton 첨가한 경우 Ash rejection 68.37 %, Com. recovery 88.23 %로 가장 좋은 조건임을 확인할 수 있었다, 또 억제제로 Lime의 첨가량에 따른 영향을 확인한 결과, 3 kg/ton 을 첨가하였을 때 Ash rejection 73.37 %, Com. recovery 89.78 %로 억제효과가 가장 좋음을 확인하였다.

세척수량에 따른 선별효과를 확인하기 위해 세척수량을 0 ~ 500 mL/min. 까지 변화를 주어 실험을 실시한 결과, 세척수량이 300 mL/min. 을 초과했을 때 고정탄소와 Ash rejection이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 세척수량이 300

mL/min. 일 때 Ash rejection 82.49 %, Com. recovery 90.01 % 로 선별효과가 가장 좋음을 확인하였다. 공기주입량에 따른 영향을 확인한 결과, 1,400 mL/min.를 초과하였을 경우 Ash rejection이 감소하는 현상을 확인하였으며, 공기주입량 1,400 mL/min. 일 때 Ash rejection 77.60 %, Com. recovery 89.84 % 로 적정 조건임을 확인하였으며, 광액농도 5 %일 때 Ash rejection 80.59 %, Com. recovery 83.36 % 로 부선흡율이 가장 좋음을 확인하였다.

예비실험을 통해 확인된 것과 마찬가지로 광액의 온도는 포수제 23 ℃, 기포제 26 ℃가 가장 좋은 조건이었으며, 향후 column 내부의 광액의 온도를 일정하게 유지하기 위한 방법과 개발이 필요할 것으로 사료된다.

최적조건을 토대로 -100 mesh 와 100 × 325 mesh 입도구간의 시료를 대상으로 CPT column에 적용하여 비교실험을 실시하였다. 그 결과, -100 mesh의 입도범위가 100 × 325 mesh 입도구간에 비해 낮은 선별효과를 나타냈으나 공정단순화를 위해 입도범위를 넓힌 것을 고려하면 비슷한 결과임을 알 수 있다.

시료의 SEM 및 원소별 mapping 결과 대부분이 탄소성분으로 이루어진 것을 알 수 있었으며, 미량의 Si와 Al이 부분적으로 존재하지만 대부분이 탄소 C로 구성되어 있어 단체분리가 잘 이루어진 것을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

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

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

이강문, 1985: “광물처리공학”, 반도출판사, 서울, 한국.

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

최우진, 1994, “석탄의 고품위화를 위한 선별성 향상에 관한 연구”, 한국광물자원공사논문집, 제48권, pp.147-156

한오형, 강현호, 2006, “Microbubble column에 의한 인상흑연의 부선에 관한 연구”, 한국자원리싸이클링학회, Vol. 15, No. 2, pp. 37-44

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

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

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

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.

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

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

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.

Wills, B.A., 2006, "*Mineral processing technology(7th)*", Tim Napier-munn, Elsevier, Burlington, USA2.

Yoon. R. H., POC-Scale Testing of a Dry Triboelectrostatic Separation for Fine Coal Cleaning, U. S. Department of Energy Federal Energy Technology Center, 1998, pp.4-9.