

## 저품위 티탄철석의 활용을 위한 선별시스템 개발

이광훈<sup>1)</sup> · 백상호<sup>2)</sup> · 최희경<sup>2)</sup> · 전호석<sup>1)\*</sup>

### Development of Separation Process for Utilization of Low Grade Ilmenite Ore

Kwang-Hoon Lee, Sang-Ho Baek, Hee-Kyoung Choi and Ho-Seok Jeon\*

(Received 8 April 2014; Final version Received 18 July 2014; Accepted 20 August 2014)

**Abstract :** This study was carried out for the development of separation process that can produce the ilmenite concentrate of over 48% TiO<sub>2</sub> from low grade ilmenite crude ore. In order to reduce treatment cost and increase separation efficiency the magnetic separation at first was applied for recovering the magnetic minerals. Which reground would make the degree of liberation increase. which was treated by gravity separation to reject the gangue minerals from the magnetic product. Because the heavier product contains not only ilmenite but also magnetite and other gangue minerals, the product was treated by further dry magnetic separation to obtain the higher grade ilmenite concentrate. Finally, the high-grade ilmenite concentrate of 50.3% TiO<sub>2</sub> could be obtained with recovery of 49.1% through the separation process developed in this study.

**Key words :** Ilmenite, Separation process technology, Magnetic separation, Gravity separation

**요약 :** 저품위 티탄철석으로부터 TiO<sub>2</sub> 48% 이상인 고품위 티탄철석 정광을 생산 할 수 있는 선별공정 개발 연구가 수행되었다. 선별비용 저감과 선별효율 향상을 위해 먼저 조립 산물에서 자력선별에 의해 자성산물을 회수한 다음, 단체분리도의 향상을 위해 재분쇄 하였다. 이것을 가지고 비중선별법을 적용하여 비중이 낮은 맥석광물들을 제거하였다. 이때 회수된 중광물에는 티탄철석과 비중은 비슷하나 강자성체인 자철광과 약자성 혹은 비자성인 맥석광물들이 함께 수반되어 있어서, 이들의 제거를 위하여 다시 건식 자력선별법을 적용하여 최종 티탄철석 정광을 회수하는 공정을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 선별공정을 적용한 실험결과, 최적실험 조건에서 TiO<sub>2</sub> 품위와 회수율이 각각 50.3%와 49.1%인 최종 티탄철석 정광을 얻었다.

**주요어 :** 티탄철석, 선별공정, 자력선별, 비중선별

## 서 론

금속 티타늄(Ti metal)은 고강도, 내고온, 내저온, 내부식, 무독성 등의 성질로 인하여 제트 엔진 부품과 항공기 동체에 합금 원료로 사용되고 있으며, 염소(Cl)이온에 대한 내식성이 뛰어나 해상 플랫폼 및 석유생산 파이프 등 다양한 산업에 사용되고 있다(Korea Mineral Resources Information Service, 2013). 또한 산화물 형태의 티타늄(TiO<sub>2</sub>)은 높은 백색도와 반사특성 등의 성질로 인해 페인트, 제지, 고무, 등의 백색 안료로 사용된다. TiO<sub>2</sub> 안료는 고령토, 탄산칼슘, 활석 등의 안료에 비해 시장 점유

율이 10% 미만으로 낮지만, 가격은 다른 안료에 비해 3 배 이상 높아 부가가치가 매우 높다. 또한 불투명제나 중백제로써 TiO<sub>2</sub> 안료를 대체할 물질은 거의 없으며, 기술적인 대체방법도 없다(Belardi *et al.*, 1998).

국내 티타늄 자원은 경기도 연천과 연평광산에서 장기간 동안 생산되어 1990년 연간 생산량 350,000톤 이었으나 2001년 202,000톤 으로 약 40% 감소되었다(KIGAM, 2012). 또한 2001년 연평광산이 생산을 중단하였고, 연천광산 역시 생산량이 감소하고 있어 차후 티탄철광의 수입 의존율이 높아지고 자급율이 급격히 감소 될 것으로 예측된다(Koh, 2010). 한편, 경남 하동-산청 지역은 국내에서 유일하게 선캄브리아기 회상암이 분포하고 있으며, 회상암 분포지 내에 티탄철석 광상의 산출이 보고되었다(Jeong *et al.*, 1989). 이후 한국지질자원연구원에 의해 12 개공 1,630 m의 시추가 수행되어 TiO<sub>2</sub> 약 4% 의 저품위 티탄철석광을 약 800만톤을 확보한 바 있다

1) 한국지질자원연구원

2) 과학기술연합대학원대학교

\*Corresponding Author(전호석)

E-mail: hsjeon@kigam.re.kr

Address: Mineral resources research Division, KIGAM,  
Daejeon, Korea

(Koh, 2010). 티탄철석 광석은 비록 저품위의 광석이지만, 이들을 선별할 수 있는 우수한 선별공정을 개발한다면 전량 수입에 의존하고 있는 고품위 티탄철 정광 약 300,000톤을 어느 정도 대처 할 수 있을 것이라 판단된다.

광물을 선별하기 위한 방법으로는 부유선별(물리·화학적 선별법), 비중선별 및 자력선별(물리적인 선별법) 등이 있다. 부유선별법은 적절한 시약의 사용과 pH의 조절 등으로 목적인 광물을 선택적으로 선별 할 수 있는 장점이 있지만, Fan과 Rowson(2000)은  $Fe^{2+}$ ,  $Ti^{4+}$  이온이 광액 내에 함께 존재하면  $Fe^{2+}$  이온이 포수제에 먼저 흡착한다고 발표 하였으며, Zhang 등(2011)은 자철석(magnetite)과 티탄철석이 함께 광액 내에 존재 할 경우 품위는 약 2% 회수율은 약 5%가 감소한다는 연구 내용을 발표하였다. 이와 같은 결과는 부유선별법은 티탄철석 선광에 대체적으로 효과적이지 못함을 보여준다. 반면 Premaratne와 Rowson(2003)은 자력선별과 비중선별을 혼합한 공정으로 고품위 정광( $TiO_2$  60% 이상)을 생산하였으며, Babu 등(2009)은 인도 사광상에서 티탄철석 회수율 94%의 결과를 얻은 것으로 보아, 물리적인 선별법이 티탄철석 선광에는 더 효율적임을 알 수 있다.

본 연구에서는 국내에 부존되어 있는 저품위 티탄철석 광을 대상으로  $TiO_2$  함량이 48% 이상인 고품위 정광을 생산 할 수 있는 선별기술을 개발하는데 있다. 특히, 티탄철석과 맥석 구성광물들의 물리적 특성을 고려하여 비중선별과 자력선별법을 적용한 선별시스템을 개발하여, 국내 티탄철석 자원을 개발 할 수 있는 기술을 확보하는데 있다.

## 시료 및 실험방법

### 시료의 특성

본 연구에 사용된 티탄철석 시료는 경상남도 하동군 옥중면에 위치한 하동티탄광산에서 채취한 것으로, Table 1의 화학분석 결과에서 알 수 있듯이 원광 중  $TiO_2$ 의 함량이 6.45%로 낮은 저품위 티탄철석이다.  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$ 가 각각 41.14%와 11.24%로 높아, 대부분의 맥석광물이 규산염 광물로 이루어져 있음을 알 수 있지만, CaO 함량도 9.77%로 다소 높아 Ca 구성 광물도 주요 불순광물임을 알 수 있다. 그리고 Fe 성분이 24.13%로 높은 것으로 보아 티탄철석 이외에 함철 광물들도 많을 것으로 생각된다.

Fig. 1은 화학분석 결과 확인된 각 구성 원소들의 근원 광물을 규명하기 위한 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 티타늄의 근원 광물은 티탄철석이며 주요 맥석광물로는 석영, 녹니석, 조장석, 투섬석 그리고 각섬석이 관찰되었다. 주요 불순물은  $SiO_2$ 와 Fe를 함유한 광물들로  $TiO_2$ 의 품위 향상을 위해서는 이들을 효율적으로 제거 할 수 있는 선별기술 개발이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 2는 XRD 분석에서 확인된 구성광물들의 분포 특성을 규명하기 위한 현미경 감정결과를 나타낸 것으로, (A)와 (C)는 교차니콜, (B)와 (D)는 개방니콜 하에서 관찰하였다. 개방 니콜에서는 색 또는 다색성을 관찰할 수 있고, 직교니콜에서는 소광 또는 간섭색을 관찰 할 수 있는 특징이 있다. XRD 분석에서 확인된 녹니석, 투섬석, 각섬석 등이 확인되었으나, XRD 분석에는 나타나지

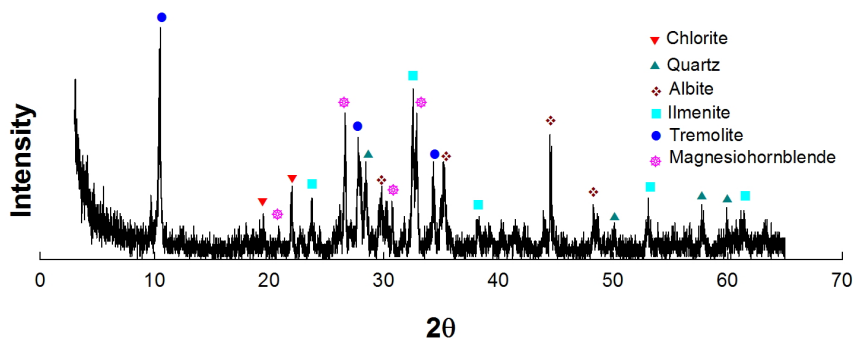


Fig. 1. XRD analysis of raw sample from Ha-Dong mine, Korea.

Table 1. Chemical composition of ilmenite raw sample from Ha-Dong mine

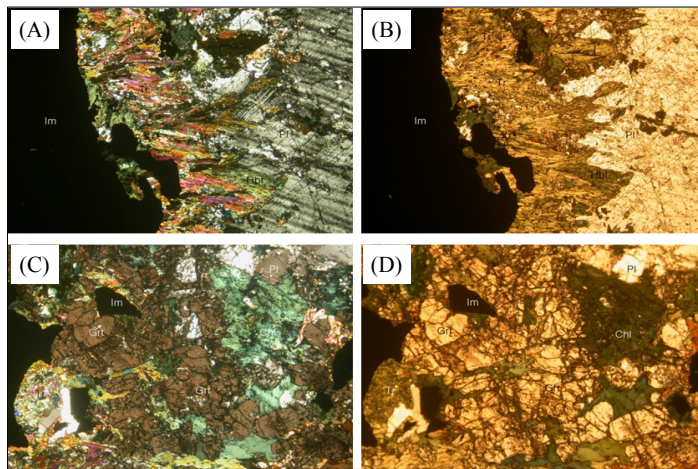
Chemical composition (%)									
$TiO_2$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$K_2O$	$Na_2O$	$P_2O_5$	MnO
6.45	41.14	11.24	24.13	9.77	2.76	0.35	1.04	0.84	0.28

않았던 석류석이 분포함을 확인 하였다. 그리고 원광 분석에서는 나타나지 않았으나, 선광실험 과정에서 나온 산물을 분석한 결과 자철석도 존재하였다. 자철석과 석류석 등의 맥석광물은 티탄철석과 비중이 비슷하기 때문에, 비중선별 만으로는 품위 향상이 어려울 것이라 생각 되어, 자력선별법이 병행되어야 함을 알 수 있다. 한편 티탄철석의 분포특성은 일부 굵은 입자로 존재하기도 하지만 상당량이 미립으로 분포하고 있어, 파분쇄 시 맥석광물들과 단체분리도가 비교적 낮을 것으로 판단되어, 선별이 쉽지 않을 것으로 생각된다.

암석상태의 시료는 각 구성 광물들 간의 정도 및 결정이 다르고, 인접한 광물들과의 결합상태가 다르기 때문에 파쇄 및 분쇄과정에서 특정 입도에 동일 광물들이 많이

농축되는 현상을 보인다. 따라서 광물의 선별실험에 앞서 입도분석을 수행하여 파분쇄 과정에 의한 목적 광물의 농축 가능성 및 개략적인 단체분리 특성을 관찰하고, 효과적인 처리법의 선택과 최적 선별입도를 규명하기 위해 입도분석을 수행하였다.

Table 2는 티탄철석 원 시료를 8 mesh 이하로 파분쇄한 다음, 이들 산물에 대한 입도분석 결과를 나타낸 것이다. 입도분석 결과, 입도별 중량비는 -18/+35 mesh와 -35/+48 mesh 입도에서 각각 37.33%와 19.61%로 -18/+48 mesh 입도가 전체 중량비의 50% 이상을 구성하고 있다. 이보다 입도가 작아질수록 중량비는 크게 감소하여 -48/+325 mesh 구간은 전체 중량비의 25%를 차지하였다. 하지만 325 mesh 이하의 입도에서 중량비가 11.16%로



**Fig. 2.** Photomicrographs of Ilmenite raw ores from Ha-Dong(40×0.5 cm=70 μm). (A) and (B) are crossed nicol, (C) and (D) are opened nicol, respectively. Im = Ilmenite, Pl = Plagioclase, Tr = Tremolite, Hbl = Hornblende, Grt = Garnet, Chl = Chlorite.

**Table 2.** Size distribution and chemical analysis on various size fraction of ilmenite ore

Fracture(mesh)	wt.(%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Cumulate(TiO <sub>2</sub> %)
- 8/+18	6.39	5.25	5.25
- 18/+35	37.33	5.78	38.4
- 35/+48	19.61	6.58	58.7
- 48/+65	5.71	7.25	65.1
- 65/+100	7.63	7.32	73.7
- 100/+150	4.24	7.84	78.9
- 150/+200	3.71	7.94	83.4
- 200/+325	4.22	8.72	89.1
- 325	11.16	6.32	100.0
Total	80.91	6.45	100

증가 하여, 미립자가 미립자의 발생이 높은 것을 알 수 있다. 입자의 크기에 따른  $TiO_2$  함량은 굵은 입자에서 낮고 입자가 작아질수록 증가하는 것을 알 수 있어,  $TiO_2$  광물이 다른 모암 광물에 비해 경도가 낮다는 것을 알 수 있다. 즉, 입도가 가장 큰 -8/+18 mesh에서  $TiO_2$  함량이 5.25%로 가장 낮지만, 입도가 작아질수록  $TiO_2$  함량이 증가하여 -200/+325 mesh 입도에서는 8.72%로 평균보다 2.27%나 높다. 그러나 325 mesh 이하의 입도에서 다시  $TiO_2$  함량이 6.32%로 감소하는데, 이는  $TiO_2$ 를 함유한 티탄철석보다 경도가 낮은 장석, 각섬석 등의 광물들이 쉽게 분쇄되어 미립으로 이동되었기 때문으로 생각된다.

### 실험 방법

Fig. 3은 티탄철석 정광을 회수하기 위해 본 연구에서 개발한 실험공정을 나타낸 것으로, 먼저 원광석을 조크러셔와 콘크러셔를 이용하여 비교적 굵은 입도로 제조하였다. 제조된 시료는 먼저 분쇄비용 절감과 선별효율 향상을 위해 고구배 자력선별 실험을 수행하여 다량의 비자성 맥석광물들을 제거 하였다. 이때 회수된 자성산물은 로드밀을 이용하여 단체분리를 높인 다음, 윌프레이

테이블 비중선별법을 적용하여 비중이 낮은 맥석광물들을 제거하였다. 비중선별에서 회수된 고비중 산물은 원광분석에서 확인된 티탄철석과 비중이 비슷한 맥석광물이 다량 포함되어 있어, 이들을 제거하기 위해 재차 건식 자력선별을 수행하여 최종 티탄철석 정광을 회수하였다.

### 실험 결과 및 고찰

#### 조립자 자력선별

광물의 선별실험에서 입자크기는 품위와 회수율에 매우 중요한 영향을 미친다. 특히 건식 자력선별의 경우 입자가 너무 크거나 작으면 단체분리뿐만 아니라 자화율과 입도에 따른 중량에 의해 선별효율에 나쁜 영향을 미치므로, 최적 선별조건을 규명하기 위해서는 반드시 입자크기에 대한 연구를 수행해야 한다. Fig. 4는 티타늄 1차 정제실험에서 입자크기가  $TiO_2$ 의 품위와 회수율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 자력선별기의 roll speed 150 rpm, 회수대 위치 2인 조건에서 입자크기를 -20 mm, -10 mm, -5 mm, -2 mm로 제조하여 실험한 결과이다. 본 실험은  $TiO_2$  품위보다는 95% 이상의 높은 회수율을 얻을 수 있는 입도를 결정하기 위한 것이다. 이는 조립자에서 티탄철석을 1차 회수하면 재 분쇄과정에서 분쇄

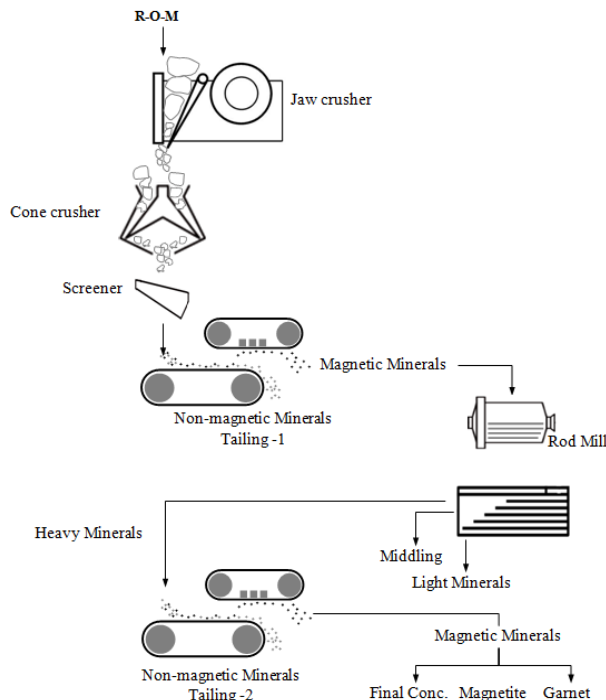


Fig. 3. Combination process using gravity and mag. separator for recovery of ilmenite concentrate.

비용을 크게 줄일 수 있고, 맥석광물의 과분쇄를 방지하여 후속 공정에서의 선광 효율을 높일 수 있기 때문이다.

실험결과 20 mm와 10 mm 이하로 제조된 시료의 경우 5 mm와 2 mm 이하로 제조된 입자보다 품위와 회수율이 낮은 것을 알 수 있다. 이는 시료의 입자가 5 mm보다 굵으면 단체분리가 안 된 조립자의 상당량이 자화되지 못하고 맥석으로 처리되었기 때문이다. 그리고 5 mm와 2 mm 이하로 제조하여 실험한 결과를 보면, 두 입도 모두 비슷한 결과를 나타내지만, 2mm 이하로 제조된 시료의 경우 과분쇄 비용이 높고 처리량이 적기 때문에, 본 연구에서는 5mm 이하로 제조된 시료를 최적실험 조건으로 하였다.

Roll type 자력선별에서 회수대의 위치는 자화된 입자가 magnetic roll의 원심력에 의해 자성산물과 비자성 산물로 분리 될 때, 기준점 역할을 하므로 물리적인 선별 실험에서 중요한 변수로 작용한다. 본 연구에 사용된 자력선별기는 회수대의 위치를 자성산물의 회수준이 넓어지는 음의 방향(-)과 비자성 산물의 회수준이 넓어지는 양의 방향(+) 두 방향으로 움직일 수 있으나, 음의 방향으로 회수대를 움직일 경우 비자성 산물로 회수되는 양이 극히 적어 회수대의 위치를 양의 방향으로만 변화시켜 실험하였다.

Fig. 5은 5 mm 이하로 제조된 시료를 대상으로 회수대의 위치를 0에서 3까지 변화시키면서, TiO<sub>2</sub>의 품위와 회수율의 변화를 관찰한 것이다. 회수대의 위치가 0에 위치 할 경우, TiO<sub>2</sub>의 품위와 회수율은 7.8%와 99.4%를 그리고 보다 많은 자성 산물을 회수하기 위해 회수대의

위치를 1에 위치 시켰을 때는 TiO<sub>2</sub>의 품위와 회수율은 각각 8.96%와 99.2%로 TiO<sub>2</sub>의 1차 정제가 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 회수대의 위치를 2와 3에 위치 시켰을 때도 TiO<sub>2</sub>의 품위 및 회수율은 10.4%와 98.4% 그리고 10.6%와 98.1%로 원시료 대비 TiO<sub>2</sub> 품위가 4%밖에 증가되지 않았지만, 이때 40% 이상의 맥석광물을 조립자에서 제거할 수 있어 선광비용을 크게 줄이고 처리량을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 비슷한 품위에서 회수율이 다소 높은 분리대의 위치 2를 최적실험 조건으로 하였다.

Fig. 6은 입도크기 -5 mm, 회수대 위치 2인 조건에서

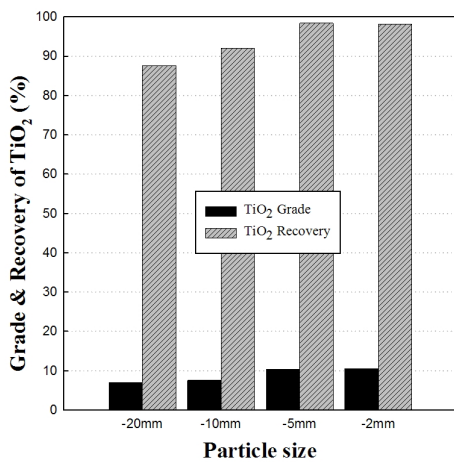


Fig. 4. Effect of particle size on TiO<sub>2</sub> grade & recovery in dry magnetic separation using High-force magnetic separator.

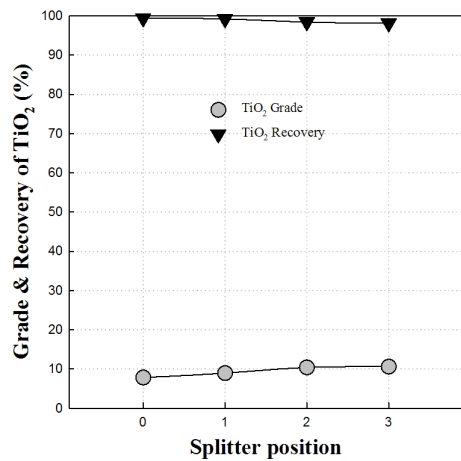


Fig. 5. Effect of splitter position on TiO<sub>2</sub> grade & recovery in dry magnetic separation using High-force magnetic separator.

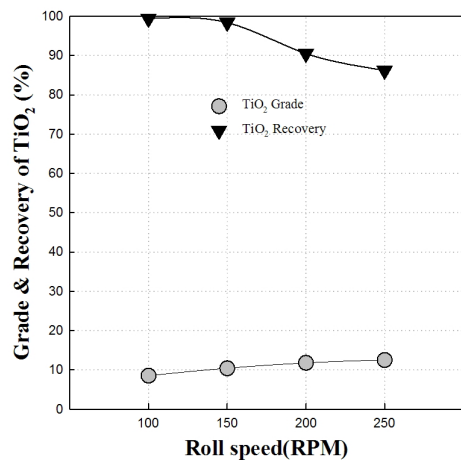


Fig. 6. Effect of roll speed on TiO<sub>2</sub> grade & recovery in dry magnetic separation using High-force magnetic separator.

magnetic roll의 속도가 티탄철석 선별에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, magnetic roll의 속도를 100 rpm에서 250 rpm까지 변화하며 실험한 결과이다. 실험결과 magnetic roll의 속도가 빨라질수록 TiO<sub>2</sub>의 품위 증가하지만 회수율은 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, magnetic roll의 속도가 가장 느린 100 rpm에서 TiO<sub>2</sub> 품위와 회수율은 각각 8.51%, 99.4%로 품위는 낮으나 회수율은 가장 높다. 그러나 magnetic roll의 속도가 가장 빠른 200 rpm에서는 TiO<sub>2</sub> 품위는 12.5%로 가장 높지만 회수율이 86.2%로 가장 낮아 magnetic roll의 회전속도가 티탄철석의 품위와 회수율에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 magnetic roll의 속도가 적정 이상으로 증가하면 자화된 입자가 자석에 부착하려는 힘 보다 원심력에 의해 전진하려는 관성력이 더 크게 작용하여, 일부 티탄철석의 입자들이 자석에 이끌리지 못하고 비 자성산물로 처리되기 때문이다. 본 연구에서는 회수율 95% 이상으로 높으면서도 처리속도가 빠른 150 rpm을 최적시험 조건으로 하였다.

### 비중선별 실험결과

비중선별에 있어 선별의 용이함을 표시하는 지수로서 선별도 표준(concentration criterion)을 사용한다. Table 3은 1차 조선풀광에 대한 XRD 분석결과에서 확인된 주요 맥석 광물과 티탄철석과의 선별도 표준을 계산한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 주요 맥석광물이 비중이 2.5 정도, 선별도 표준이 2.2 정도로 비중선별이 가능한 범위에 있기 때문에, 비중선별법을 적용하면 대량의 맥석광물이 제거되어 TiO<sub>2</sub>의 농축이 가능 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 유막선별의 원리를 이용한 대표적인 비중선별기인 wilfley table을 사용하였다. 이 때 테이블의 충격거리(stroke length) 및 횟수(frequency)는 각각 0.9 cm 및 150/min으로 하였으며, 테이블의 경사는 1.1°로 고정하였다. 그리고 중광물을 대상으로 1회의 정선과정

을 거쳐 비선택적으로 회수된 맥석광물들을 제거하여 TiO<sub>2</sub>의 품위를 향상시켰다.

Fig. 7은 비중선별에 적용할 입도를 결정하기 위해 자력선별에서 회수된 1차 정광산물을 35 mesh에서 150 mesh 이하로 각각 제조하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 비중선별 실험결과, 100 mesh 까지는 회수율의 감소가 크지 않으나 이보다 입도가 작아지면 뚜렷한 품위의 증가 없이 회수율이 큰 폭으로 감소하여 효과적이지 못함을 알 수 있다. 즉, 자성산물을 35 mesh 이하로 재분쇄하여 비중선별 한 결과 TiO<sub>2</sub>의 회수율은 66.0%로 높으나 품위가 35.9%로 낮아 효과적이지 못하다. 그러나 입도가 작아질수록 품위가 증가하여 100 mesh 이하에서 TiO<sub>2</sub>의 품위는 45.0%로 증가하지만, 이보다 입도가 작아지면 뚜렷한 품위의 증가 없이 회수율이 크게 감소되어 효과적이지 못함을 알 수 있다. 따라서 자력선별 1차 정광을 대상으로 재분쇄하여 비중선별을 수행할 때 최적 시료의 입도크기는 100 mesh 이하임을 알 수 있으며, 이때

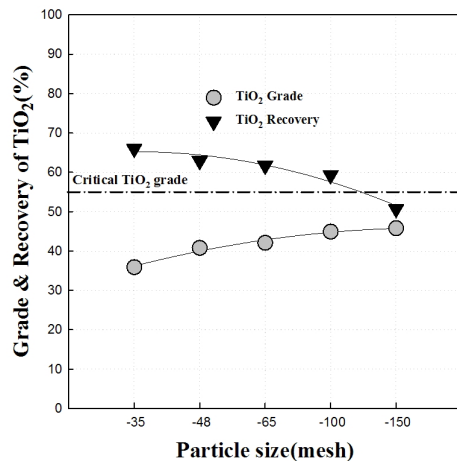


Fig. 7. Effect of particle size on TiO<sub>2</sub> grade & recovery in gravity separation using wilfley table.

Table 3. Gravity & concentration criterion of the gangue minerals

Minerals	Chemical formular	Gravity	Concentration criterion
Ilmenite	FeTiO <sub>3</sub>	5	-
Quartz	SiO <sub>2</sub>	2.65	2.42
Chlorite	(Mg,Fe) <sub>5</sub> (Al,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	2.6 - 3.3	2.5
Albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.6 - 2.7	2.2
Tremolite	Ca <sub>2</sub> MgSiO <sub>22</sub>	3	2
Hornblende	(Ca,Na) <sub>2</sub> (Mg,Fe,Al) <sub>5</sub> (Al,Si) <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	3.1 - 3.3	1.73

TiO<sub>2</sub> 품위와 회수율이 각각 45.0%와 59.3%인 결과를 얻었다.

Fig. 8은 100 mesh 이하로 제조된 시료를 대상으로 물의 공급량(Water rate)이 TiO<sub>2</sub> 품위 및 회수율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 물의 양이 가장 적은 6 L/min에서 TiO<sub>2</sub>의 품위는 40.9% 이지만 물의 양을 12 L/min까지 증가시키면 45.5% 까지 증가한다. 반대로 회수율은 물의 양 6 L/min에서 61% 이지만 물의 양을 점차 증가시키면 회수율은 서서히 감소하여 12 L/min에서 46.9%로 약 14%가 감소하는 결과를 나타내었다. 이와 같이 물의 양에 따라 품위 및 회수율이 변화하는 이유는 물의 공급량이 적을 경우 비중이 높은 산물과 비중이 낮은 산물이

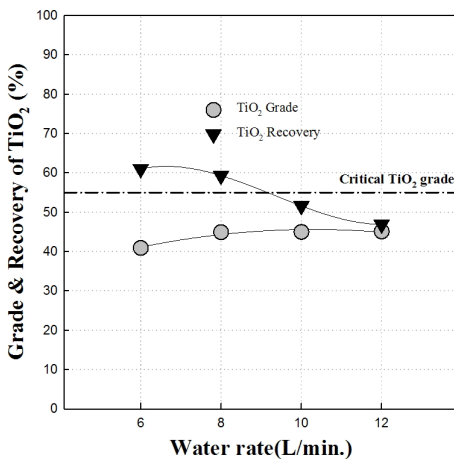


Fig. 8. Effect of water rate on TiO<sub>2</sub> grade & recovery in gravity separation using wifley table.

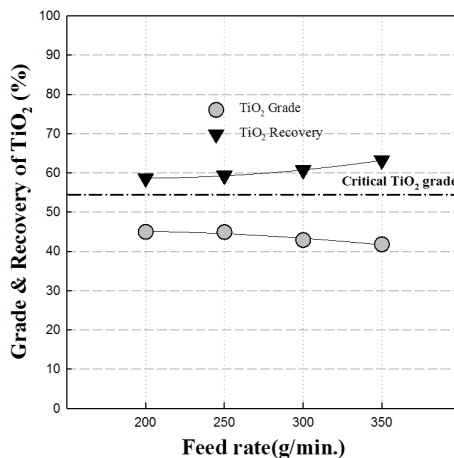


Fig. 9. Effect of feed rate on TiO<sub>2</sub> grade & recovery in gravity separation using wifley table.

충분히 분리되지 못하고 비중이 낮은 산물의 일부가 비중이 높은 산물로 회수되기 때문에, 품위는 가장 낮고 회수율이 높은 것이다. 그러나 실험결과 물의 양 8 L/min까지는 뚜렷한 회수율의 감소 없이 TiO<sub>2</sub>의 품위가 증가하기 때문에, TiO<sub>2</sub>의 품위와 회수율을 고려할 경우 최적 물의 공급량은 8 L/min 임을 알 수 있다.

Fig. 9는 시료의 급광량이 비중선별 실험에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 급광량을 200 g/min에서 350 g/min 까지 변화하며 실험한 결과이다. 실험결과 정광의 TiO<sub>2</sub>의 품위는 시료의 급광량 200 g/min과 250 g/min에서는 44.9%, 44.9%로 거의 변화가 없지만, 급광량 300 g/min과 350 g/min에서는 각각 42.9%, 41.8%로 감소되어 시료의 급광량이 250 g/min 보다 많아지면 TiO<sub>2</sub>의 품위가 감소함을 알 수 있다. 반면 회수율은 시료의 급광량 증가와 함께 미미하게 증가하게 경향을 나타낸다. 이는 본 실험에 사용한 wifley table의 처리 용량이 시료의 급광량 250 g/min 일을 알 수 있으며, 이보다 시료의 급광량이 증가하면 처리용량 한계로 일부 시료가 선별되지 못하고 중광물로 이동하기 때문이다. 따라서 시료의 급광량 변화실험 결과 TiO<sub>2</sub>의 품위와 회수율이 비교적 높은 250 g/min이 가장 효과적임을 알 수 있다.

**미립자 자력선별**

Fig. 10은 비중선별에서 중광물로 회수된 산물의 현미경 사진으로, 사진에서 보는바와 같이 비중이 비슷한 석류석, 자철석 등과 일부 단체분리 안 된 티탄철석이 존재함을 알 수 있다. 일반적으로 자철석의 분리에는 약 자계형 자력선별기로 500G(gauss) 정도에서 쉽게 분리 할 수 있으나 석류석과 같은 합철광물의 경우에는 5,000G 이상의 강자계형 자력선별기를 사용하여야 한다(Kang *et al.*, 1991). 따라서 본 연구에서는 자장의 세기변화가 가능한

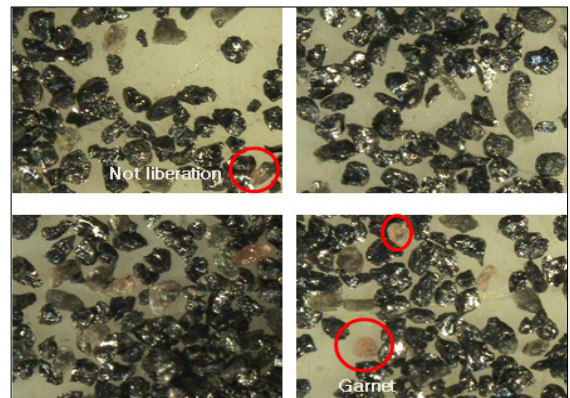


Fig. 10. Photos of heavy product used by wifley table.

crossbelt-type의 건식 자력선별기를 이용하여, 자장의 세기를 1,000G부터 5,000G까지 변화시켜 티탄철석과 자화율이 다른 맥석광물을 선별하였다.

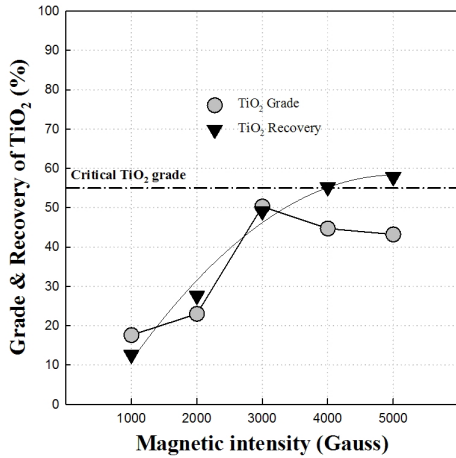


Fig. 11. Effect of magnetic intensity on TiO<sub>2</sub> grade & recovery in magnetic separation using cross belt type magnetic separator.

Fig. 11는 비중선별에서 회수된 중광물을 대상으로 자력선별 실험을 수행한 결과를 나타낸 것으로, 1,000G와 2,000G 에서는 모두 자철석광 같은 강자성체들이 많이 회수되어 TiO<sub>2</sub> 품위와 회수율이 낮은 것을 알 수 있다. 그러나 이들 강자성 산물이 제거된 시료를 대상으로 자성의 세기를 3,000G에서 자력선별을 수행하면, 자성산물인 티탄철석이 비자성 산물과 효과적으로 분리되어, TiO<sub>2</sub> 품위와 회수율이 각각 50.3%와 49.1%인 고품위 티탄철석 정광을 얻을 수 있다. 한편 이보다 자장의 세기가 증가하면 단체분리가 되지 않은 티탄철석과 일부 약자성 맥석물들이 자성산물로 회수되어, 회수율은 미미하게 증가하나 품위가 감소되어 효과적이지 못함을 알 수 있다. Fig. 12는 1,000G와 3,000G 그리고 4,000G에서 자성으로 회수된 산물에 대한 XRD 분석결과를 나타내었다. XRD 분석결과에서 알 수 있듯이 1,000G에서 자철석과 자유철석 등 강자성체 입자들이 회수된 것을 알 수 있으며, 3,000G에서는 티탄철석과 일부 단체분리가 안된 각섬석이 일부 존재함을 알 수 있다. 그러나 4,000G에서는 섬아연석, 각섬석, 휘석, 석영, 조장석 등의 비자성 산물들이 자성산물로 회수되어, 약자성체와 단체분리가

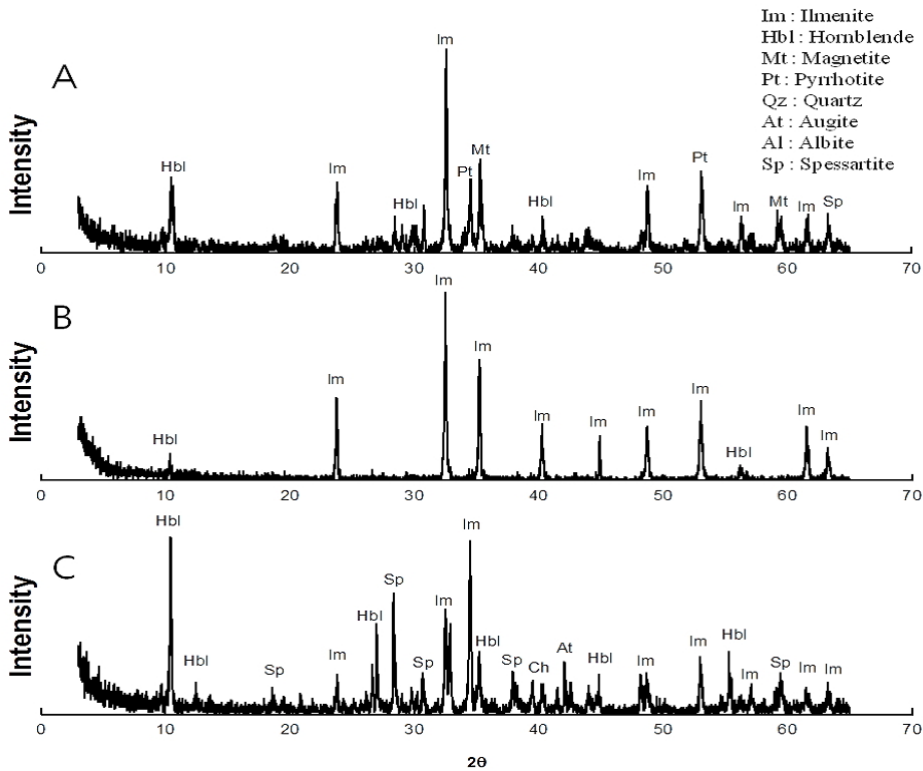


Fig. 12. XRD patterns of 1,000G magnetic product(A), 3000G magnetic product(B) and 4,000G magnetic product(C).



안 된 비자성 입자들이 회수된 것을 알 수 있다.

Fig. 13는 본 연구에 사용된 crossbelt type의 미립자 건식자력선별기의 처리용량을 규명하기 위한 급광량 변화실험 결과를 나타낸 것이다. 실험결과 시료의 급광량 20 g/min까지는 TiO<sub>2</sub> 품위와 회수율에 거의 영향을 미치지 않지만, 시료의 급광량이 25 g/min로 증가 하면 TiO<sub>2</sub> 회수율은 증가하지만 품위가 감소되어 효과적이지 못한 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구에 사용된 자력선별기의 최적 급광량이 20 g/min임을 알 수 있으며, 이보다 시료의 급광량이 적으면 처리량이 낮고, 이보다 급광량이 많아지면 처리용량을 초과하여 선별효율이 감소하게 된다.

### 결 론

본 연구에서는 경상남도 하동군 옥종면 지역의 경제적 가치가 낮은 저품위 티탄철석광을 대상으로 부가가치가 높은 제련용 고품위 티탄철석 정광을 생산 할 수 있는 선광공정을 개발하기 위한 연구를 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원광에 대한 광물감정 및 화학분석 결과, 티타늄의 근원광물은 티탄철석이었으며, 주요 맥석광물로 녹니석, 조장석, 투섬석 그리고 마그네슘 그룹의 각섬석이 확인되었다. 원시료 분석에서는 나타나지 않았으나, 실험산물을 통해 석류석 및 자철석과 자류철석 등도 맥석광물도 존재함을 확인하였다. 따라서 Fe<sup>x+</sup> 및 SiO<sub>x</sub>를 수반한 함철 규산염광물들을 제거할 수 있는

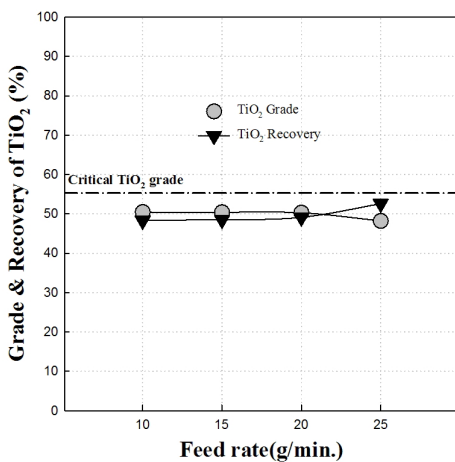


Fig. 13. Effect of feed rate on TiO<sub>2</sub> grade & recovery in dry magnetic separation using cross belt type magnetic separator.

기술개발이 필요함을 알 수 있다.

2. 굵은 입도에서 일부의 맥석광물을 제거하기 위한 고구배 자력선별 실험결과, 입도크기 5 mm 이하, magnetic roll 속도 150 rpm, 회수대 위치 2인 최적실험 조건에서 TiO<sub>2</sub> 품위와 회수율이 각각 10.4%와 98.4%인 결과를 얻었으며, 이때 40% 이상의 맥석광물을 조립자에서 사전 제거함으로 분쇄비용 절감과 선별효율을 높일 수 있는 기회를 얻었다.
3. 맥석광물과 티탄철석의 선별도 표준을 계산 했을 때, 비중선별법으로 TiO<sub>2</sub>의 품위를 크게 향상시킬 수 있을 것이라 판단되며, 입도크기 100 mesh 이하, 물의 공급량 8 L/min., 급광량 250 g/min. 그리고 정선 1회의 조건에서 TiO<sub>2</sub>의 품위와 회수율이 각각 44.9%와 59.3%인 결과를 얻었다.
4. 비중선별에서 회수된 중광물에서 티탄철석과 비중은 비슷하지만 자화율이 다른 맥석광물을 제거하기 위한 crossbelt type의 미립자 자력선별 실험을 수행하여, 자성의 세기 3,000G에서 TiO<sub>2</sub>의 품위와 회수율이 각각 50.3%와 49.1%인 최종 티탄철석 정광을 회수하였다.
5. 자력선별과 비중선별을 혼합한 공정을 개발하여 저품위 티탄철석으로부터 TiO<sub>2</sub> 품위가 50.3%인 고품위 티탄철석 정광을 생산할 수 있는 선별기술을 개발하였으나, 상용화를 위해서는 TiO<sub>2</sub> 회수율을 70% 까지 높일 수 있는 공정개발이 필요할 것으로 생각된다.

### 사 사

본 연구는 지식경제부 에너지·자원기술개발 사업의 일환으로 국내 희유금속자원 탐사 및 활용기술 개발을 목적으로 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

### References

Babu, N., Vasumathi, N. and Bhima, R., 2009, "Recovery of ilmenite and other heavy minerals from Teri sands(Red sands) of Tamil Nadu, India," *J. of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 149-159.

Belardi, G., Piga, L., Quaresima, S. and Shehu, N., 1998, "Application of physical separation methods for the upgrading of titanium dioxide contained in a fine waste," *International Journal of Mineral Processing*, 53, pp. 145-156.

Fan, X. and Rowson, N., 2000, "The effect of Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> on limenite flotation," *Minerals Engineering*, Vol. 13,

No. 2, pp. 205-215.

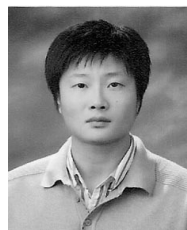
- Jeong, J.G., Kim, W.S. and Dabid, H., 1989, "Geological structure of Hadong anorthositic rocks and associated titanium orebody," *J. of The Geological Society of Korea*, Vol. 25, No. 1, pp. 98-111.
- Kang, H.C., Uhm, G.H. and Shin, S.M., 1991, "Separation of Garnet from Granite," *J. of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 28, pp. 366-374.
- Koh, S.M., 2010, "Occurrence of ilmenite deposits in Hadong-Sancheong area," *J. of The Mineralogical Society of Korea*, Vol. 23, No. 1, pp. 25-37.
- Korea Institute of Geoscience And Mineral Resources (KIGAM), 2012, *Mineral commodity supply and demend*. Korea Mineral Resources Information Service, 2013.10.24, www.kores.net.
- Premaratne, W. and Rowson, N., 2003, "The processing of beach sand from sri lanka for the recovery of titanium using magnetic separation," *Physical Separation and Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 13-22.
- Zhang, X., Liu, D., Fang, J. and Xu, J., 2011, "Study on influence of residual magnetite in Panzhihua ilmenite flotation," *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol. 2, pp. 83-88.



### 이 광 훈

2012년 한국해양대학교 에너지자원공학과 공학사  
2014년 한국해양대학교 해양에너지자원공학과 공학석사

현재 한국지질자원연구원  
(E-mail; walls93@gmail.com)



### 백 상 호

2003년 조선대학교 자원공학과 공학사  
2005년 조선대학교 자원공학과 공학석사

현재 과학기술연합대학교대학원 자원순환공학 박사과정  
(E-mail; anchors@kigam.re.kr)



### 최 희 경

2012년 부산대학교 지질환경과학과 이학사

현재 과학기술연합대학원 대학교 자원순환공학 석사과정  
(E-mail; glauconite@ust.ac.kr)

### 전 호 석

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원  
과학기술연합대학교 자원순환공학과 교수  
(本學會誌 第51卷 第3号 参照)