



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

공학석사 학위논문

하동지역 저품위 티탄철광의 선별 기술
및 선별 공정에 관한 연구

A Study on the Mineral processing Technology and Process on
the low grade Ilmenite ore in Ha-dong Area



2014년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

이 광 훈

본 논문을 이광훈의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 윤 지 호 (인)

위 원 유 경 근 (인)

위 원 정 우 근 (인)

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of table.	IV
List of Figures.	V
Abstract	VIII
1장 서 론	1
2장 티타늄 광물의 일반현황	
1) 광상학적 및 광물학적 특성	4
2) 용도 및 이용방법	6
3장 이론적 배경	
1) 자력선별 이론	8
2) 비중선별 이론	16
4장 티탄철석의 정제기술 개발	
1) 시료의 특성	17
2) 입도 분석	19
3) 실험 방법	23
(1) 1차 건식자력선별	23
(2) 비중선별	27
(3) 비중선별 및 Cross belt 자력선별 병용 실험	30

5장 실험 결과 및 고찰

1) 1차 건식자력선별 실험결과 33
2) 비중선별 실험결과 39
3) 비중선별 및 Cross belt 자력선별 병용 실험 결과 44
4) 최종 공정 48

6장 결 론 52

참고문헌 55

감사의 글 58



List of Tables

Table 1 Composition of main titanium minerals.	5
Table 2 Mineralogical property of Ilmenite and Rutile.	6
Table 3 Magnetic behaviors of minerals.	12
Table 4 Elemental composition of the raw sample analyzed by XRF. ·	20
Table 5 Size distribution and chemical analysis of various size fraction of ilmenite ore.	22
Table 6 Specific gravity of the gangue minerals in this study.	29

List of Figures

Fig. 1. Major titanium minerals.	5
Fig. 2 . Uses of Rutile and Ilmenite concentrates.	7
Fig. 3 Schematic representation of magnetic separation.	10
Fig. 4 Magnetization of materials in various magnetic fields.	11
Fig. 5 XRD patterns of raw Ilmenite ore sample.	20
Fig. 6 ((A) - (D) Photomicrographs of Ha-Dong Ilmenite ores. crossed nicol images, (B) and (D) are opened nicol, respectively.	21
Fig. 7 Photomicrographs of Ha-Dong Ilmenite ores. (A) and (B) are reflecting microscope images.	21
Fig. 8 SEM image and EDS mapping of Ha-Dong Ilmenite ore sample.	22
Fig. 9 Rare earth High-force magnetic separator.	25
Fig. 10 Process of magnetic separation by using Rare earth roll-type magnetic separator.	26

Fig. 11 Wilfley type shaking table.	28
Fig. 12 Arrange of ore particles at table plate with different particle size and density.	28
Fig 13 Process of gravity separation used by Shaking table.	29
Fig. 14 Cross belt type magnetic separator.	31
Fig. 15 Combination process using Gravity and Mag. separator for Recovery of Ilmenite concentrate.	32
Fig. 16 Effect of particle size on TiO_2 grade & recovery in dry magnetic separation using Rare earth High-force magnetic separator. ..	36
Fig. 17 Effect of splitter position on TiO_2 grade & recovery in dry magnetic separation using Rare earth High-force magnetic separator. ..	37
Fig. 18 Effect of roll speed on TiO_2 grade & recovery in dry magnetic separation using Rare earth High-force magnetic separator.	38
Fig. 19 Effect of particle size on TiO_2 grade & recovery in gravity separation using shaking table.	41

Fig. 20 Effect of water rate on TiO₂ grade & recovery in gravity separation using shaking table. 42

Fig. 21 Effect of feed rate on TiO₂ grade & recovery in gravity separation using shaking table. 43

Fig. 22 Effect of magnetic intensity on TiO₂ grade & recovery in dry magnetic separation using cross belt type magnetic separator. 46

Fig. 23 Effect of feed rate on TiO₂ grade & recovery in dry magnetic separation using cross belt type magnetic separator. 47

Fig. 24 Final process using Gravity, Magnetic separation for recovery of Ilmenite concentrate. 49

Fig. 25 Photos of products recovered apply final process. 50

Fig. 26 XRD analysis of products separated by final process. 51

A Study on the Mineral processing Technology and Process on the low grade Ilmenite ore in Ha-dong Area

Lee Kwang Hoon

Department of Ocean Energy & Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Titanium ore of more than 90% is processed goes producing titanium dioxide pigment, which is used as whitening and opacifying agent in the industries of paints, alacquers, plastics, textiles, papers and etc.. and 5% of the world production of titanium minerals goes to make titanium metal which has wide industrial applications in the air craft engines, submarine bodies, marine structures and etc..

In this study, the head ore was taken from Ha-dong mine located in Ha-dong city, Kyunsangnamdo province. The head ilmenite are contains as low as about 6.45% TiO_2 and is mainly associated with gangue minerals such as chlorite, albite, tremolite, quartz and magnesiohornblende. The XRF analysis show that the associate minerals have grade of about 43.14% SiO_2 , 11.24% Al_2O_3 , 24.13% Fe_2O_3 , 0.35% Na_2O , respectively

KEY WORDS: Ilmnite, Magnetic separator, Shaking table

The target grade of titanium concentrate is determined as high as more than 48% TiO_2 , which can be acceptable for titanium smelting. The optimum process and conditions to get the high grade ilmenite concentrate are as follow ;

1) The head ore containing about 6.45% TiO_2 crushed to -5mm in size. can be up graded to 10.4% TiO_2 , with 98.4% recovery by High-force magnetic separator at conditions of 150RPM Roll speed and Splitter postion at 2.

2) The ilmenite pre-concentrate of about 10.4% TiO_2 is again up graded to 44.93% TiO_2 with 59.3% recovery by using Shaking Table concentrator at the conditions as followings ; the pre-concentrate reground to -100mesh, in size, water feed rate 8L/min., sample feed rate 250g/min., slope of table 1.1° , length of table 0.9cm, and strokes of table 150times per min.

3) The intermediate grade ilmenite concentrate of about 44.9% TiO_2 is again upgraded to 50.3% TiO_2 with 49.1% recovery by using Cross belt magnetic separator at contidions of 4000Gauss magnetic intensity and 20g/min. feed rate.

As a result, it's show that the final ilmenite concentrate of about 50.3% TiO_2 which is acceptable goes titanium smelting can be recovered with aboce optimum conditions and process.

제 1 장 서 론

지구상에 존재하는 티타늄 원료 광물 중 TiO_2 를 1%이상 함유하고 있는 광물은 약 140여 종으로 매우 다양하다. (전호석 외, 2001) 이 중 상업적으로 가치가 있는 광물은 티탄철석과 금홍석, 예추석, 브루카이트 등의 7여 종이며, 현재 TiO_2 성분을 농축시켜 사용하고 있는 광물은 금홍석과, 티탄철석 2종류에 불가하다. 금홍석은 TiO_2 함유량이 94% 이상으로 매우 높아 TiO_2 를 농축하기에 유리한 광물이지만, 전 세계적으로 매장량이 적고 호주, 남아공 등의 사광산에 95%이상 매장되어 있는 지역편재가 심한 자원이다. (한국 자원정보서비스) 반면 티탄철석의 경우 TiO_2 함유량은 금홍석 보다 낮으나 세계적으로 매장량이 풍부 할 뿐만 아니라 가격 또한 금홍석 가격의 약 1/5 수준으로 저렴하여 티타늄의 이용은 대부분 티탄철석을 정제하여 사용하고 있다.(W.A.P.J PREMARTNE and N.A ROWSON, 2002)

티타늄의 이용은 크게 금속상태와 이산화티탄 백분의 산화물 형태로 이용된다. (W.A.P.J PREMARTNE and N.A ROWSON, 2002) 금속티타늄은 고강도, 내고온, 내저온, 내부식, 무독성, 초전도체 성질 등으로 인하여 제트엔진 부품과 항공기 동체에 합금 원료로 사용되고 있으며, 화학공장, 발전소등 과 같은 산업에서 많이 사용되고 있다. 특히 금속 티타늄은 해양환경에 뛰어난 내부식성을 보인다. 일반 강철의 경우 교체시기가 18개월 정도이지만 티타늄 파이프의 수명은 20년으로 석유생산 파이프 및 해상 플랫폼 건설에 적극적으로 사용되고 있다. 그 외에 인공치아, 인공관절, 용접봉 등으로도 사용된다. (한국 자원정보서비스) 또한 산화물 상태에서는 높은 백색도와 반사특성, 그리고 밝은 분사특성을 가지고 있어 백색분말의 형태로 페인트, 제지, 고무, 플라스틱 및 기타산업의 백색안료로 사용된다. 중량 면에서는 TiO_2 안료가 전체 안료 시장의 10% 이하를 차지하지만 금액 면에서는 연간 70억 달러로써 다른 형태의 안료보다

약 3배가 되는 금액으로 가치가 높다. (G. Belardi et al, (1998) ; 한국자원정보 서비스) 게다가 과학 및 산업의 급속한 발달로 티타늄의 우수한 재질을 이용한 용도개발이 이루어지면서 국내에서도 티타늄 관련 원료의 사용이 증가하고 있다.

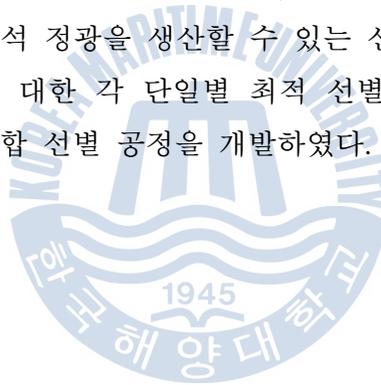
광물을 선별하기 위한 대표적인 방법으로는 부유선별, 비중선별, 자력선별, 정전선별이 있다. 각 선별법은 목적한 광물의 고유한 특성을 이용한다. 부유선별법은 광물 표면이 소수성일 경우 주로 사용되며, 비중선별법은 광물의 서로 다른 비중차이를 이용하여 중력에 대한 입자들의 상대적 움직임 차이를 이용하여 분리하는 방법이다. 자력선별법은 광물입자들의 서로 다른 자성 감응 차이를 이용한다. 한편 정전선별법은 물질의 도전율 차이를 이용하는 선별법이다. 티탄철석은 맥석광물에 비해 비중이 크고 자화가 잘 되기 때문에 비중선별 및 자력선별을 이용하여 선별하고 있다.

티탄철석을 회수하기 위한 연구는 국내의 경우 충남대학교 김원사 교수팀에 의해 1996년도에 경남 하동지역에 1억 톤 이상이 매장되어 있다고 보고 된 뒤, 1999년 한국지질자원연구원에서 양정일 등에 의해 연구되었으나, 그 뒤 뚜렷한 연구는 수행되지 않았다. 반면 국외의 경우, N.Babu(2009)는 인도 Tamil Nadu 지역의 Red sands로부터 티탄철석 및 다른 중광물을 회수하기 위해 비중선별 및 자력선별을 이용하여 티탄철석 및 다른 중광물을 회수하기 위한 연구를 수행하여, 회수율 94%의 결과를 얻었다고 보고하고 있다. 또한 G.Belardi(1998) 등은 티타늄 안료 공장에서 발생된 fine waste로부터 TiO_2 성분을 농축시키기 위해 자력선별, 부유선별, 그리고 비중선별을 수행한 연구를 발표하였다. 그리고 Zhang Xiaolin(2011) 등은 티탄철석을 부유선별 할 때, 자철석(Magnetite)가 미치는 영향을 연구하여, 자철석이 광액 내에 존재 할 경우 품위는 약2%, 회수율은 약 5%가 감소한다는 연구내용을 발표하였다. 이처럼 해외에서는 티탄철석을 회수하기 위하여 다양한 방면으로 연구가 진행되고 있으나, 국내에서는 약 15년 전에 수행한 것이 전부이다.

국내의 경우 연천광산 및 연평광산에서 티탄철석을 장기간 생산하였으나, 2001년 연평광산이 생산을 중단하면서 국내 생산량이 2011년 약 18만 톤으로 2008년에 비해 40% 감소하였다. 또한 생산된 티탄철석 정광은 자철석, 적철석

등을 함유한 함티탄 자철석으로 제철소의 용광로 노벽보호제로만 이용되고 있을 뿐, 제련용 고품위 티탄철석(TiO_2 48% 이상)은 전량 수입에 의존하고 있다 (광산물 수급현황, 2011). 따라서 경남 하동지역의 국내 광산을 대상으로 고품위 티탄철석 정광을 생산할 수 있는 기술을 개발하여 고품위 티탄철석 정광을 국내에서 일부라도 생산한다면, 티타늄 자립 수급율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 목적은 경남 하동지역에 대량으로 부존되어 있는 저품위 티탄철석 (TiO_2 6.45%)을 대상으로 전량 수입에 의존하고 있는 제련용 고품위 티탄철석 정광을 생산 할 수 있는 선별기술을 개발하는데 있다. 하동지역에 매장되어 있는 티탄철석은 회장암과 각섬석이 주요 불순물이지만, 그 외 티탄철석과 비슷한 비중 및 전기적 성질을 갖고 있는 광물들이 많이 수반되어 있어 단일 선별법으로는 고품위 티탄철석 정광을 생산이 어렵다. 따라서 티탄철석 원광으로부터 제련용 고품위 티탄철석 정광을 생산할 수 있는 선별 기술을 개발하기 위하여 비중선별, 자력선별에 대한 각 단일별 최적 선별기술을 확립한 다음 이들 각각의 장점을 혼합한 혼합 선별 공정을 개발하였다.



제 2 장 티타늄 광물의 일반 현황

1) 광상학적 및 광물학적 특성

티타늄 광물의 암석광상은 반려암-회장암(Gabbro-Anorthosite) 계열의 화성암, 알칼리화성암 및 변성암 등에서 산출된다. 반려암-회장암 계열암석은 티탄철석의 광염광상 혹은 괴상의 집합(분리정출)광상이 포함된다. 이런 형태의 주요 광상은 노르웨이, 캐나다, 핀란드, 미국 등에서 나타난다. (한국자원정보서비스)

지구상에 존재하는 광물 중 TiO_2 성분을 1%이상 함유한 천연광물은 약 140여종에 이르고 있으나, 공업적으로 이용할 수 있는 광물은 티탄철석(Ilmenite), 금홍석(Rutile), 예추석(Anatase), 루콕신(Leucoxene), 브루카이트(Brookite), 페로브스카이트(Perovskite), 파이로파나이트(Pyrophanite) 등의 10여종이다. (전호석 외, 2001) 그러나 이들 광물중 실제로 TiO_2 성분을 이용하고 있는 광물은 금홍석과 티탄철석으로 이들의 화학 조성 및 광물학적 특성을 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. Fig. 1은 주요 티타늄 광물을 나타낸 것이다.

금홍석은 TiO_2 함량이 96% 이상을 함유하고 있어 이용하기에 가장 좋은 광물이다. 하지만 세계적으로 매장량이 적을 뿐만 아니라 일부 지역에 국한되어 되어있다. 가격 또한 티탄철석보다 5배 이상 높다. 반면 티탄철석은 이론적 TiO_2 함량이 약 53%로 금홍석 보다 낮지만, 그 외에 대부분이 FeO 또는 Fe_2O_3 로 이루어져 있어, 침출에 의한 TiO_2 회수 후 Fe를 이용할 수 있는 이점도 있다.(양정일 외, 1999) 뿐만 아니라 티탄철석은 세계적 매장량이 비교적 풍부하고 원료가격이 금홍석 보다 저렴하여, 전 세계적으로 TiO_2 성분의 80% 이상을 티탄철석으로부터 이용하고 있다. (W.A.P.J premaratne et al, 2002)

티탄철석은 광물학적으로 삼방정계에 속하며, 코람덤형 능면체로 결정을 이루지만 보통 철 흑색의 괴상, 입상으로 산출되며 금속 또는 아금속 광택을 나타낸다. 경도 5 ~ 6, 비중 4.7 ~ 4.8의 고비중 광물이며 자성을 띤다. 화학식은

FeTiO₃ 이며, 때때로 Fe²⁺와 이온 반지름이 비슷한 Mg²⁺ 이온과 치환되기도 한다. 또한 적철광(α -Fe₂O₃)이나 자철광(Fe₃O₄)과 고용체를 형성하기도 한다. (양정일 외, 2001) 이론적으로 티탄철석은 최고 53%의 TiO₂와 47%의 FeO로 구성되지만, 몇몇 사광상에서는 철분 및 칼슘의 제거와 산화작용 등으로 인하여 실제 TiO₂의 함량은 이론값보다 증가하여 TiO₂ 65 ~ 70%에 이르는 경우도 있다.

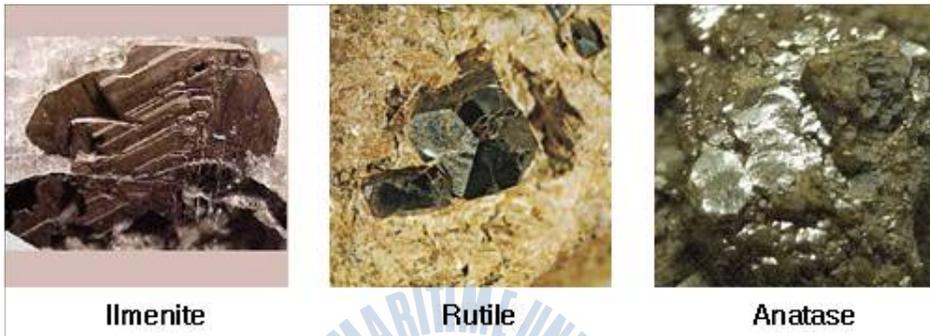


Fig. 1. Major titanium minerals.

Table 1 Composition of main titanium minerals.

Minerals	Chemical composition	TiO ₂ (%)
Ilmenite	FeTiO ₃	45-65
Rutile	TiO ₂	94-98
Anatase	TiO ₂	90-95
Leucoxene	FeTiO ₃	68

Table 2 Mineralogical property of Ilmenite and Rutile.

Mineral	S.G	Hardness	Crystal System	Form
Ilmenite	4.7-4.8	5-6	Hexagonal	Sheet, Granular
Rutile	4.18-4.25	6-6.5	Tetragonal	Prism

2) 용도 및 이용방법

티타늄의 이용은 크게 금속(Ti metal)상태와 이산화티탄 백분(TiO_2)의 산화물 상태로 이용 된다. 금속티타늄은 철 비중의 60%에 불과하고, 비강도(강도/비중)이 알루미늄의 2배, 철의 3배에 달한다. 또한 고강도, 내고온, 내저온, 내부식, 무독성 기체흡수성 그리고 초전도체 성질 등으로 인하여 초음속 항공기, 우주 왕복선, 잠수함 몸체 등에 중요한 합금 원료로 사용되고 있다. 그밖에 용접봉, 전자요업용, 석유화학공업용 등으로도 널리 사용된다. 그리고 염소(Cl)이온에 대한 내식성이 뛰어나 화학공장 또는 해양구조물에 적합하다. 특히 석유생산과이프의 경우 일반 강철의 교체시기가 약 18개월 이지만 티타늄 파이프의 수명은 20년이다. 점점 원양, 심부굴착으로 나아가는 석유생산 사업의 특성상 티타늄 금속은 석유산업용으로 가장 유망한 성장분야이다. 또한 산화물 상태에서는 높은 백색도와 반사특성 그리고 밝은 분사특성을 갖고 있어 오랫동안 TiO_2 백색분말의 형태로 페인트, 제지, 고무, 플라스틱 및 기타 산업의 백색 안료로 사용되고 있다. TiO_2 안료는 고령토, 탄산칼슘, 활석 등의 안료에 비해 중량 면에서는 안료 시장의 10% 이하를 차지 하지만 가격은 다른 형태의 안료 보다 약 3배가 되는 금액으로 가치가 높은 상품이다. 또한 불투명제나 중백제로써 TiO_2 안료를 대체할 물질은 거의 없으며, 기술적인 대체방법도 없다. (한국자원정보 서비스)

티타늄 광물을 이용하기 위해서는 먼저 선광 처리하여 산 침출 및 제련과 정

런 처리에 적합한 품위의 TiO_2 성분을 농축하여야 하며, 농축된 티타늄 정광을 이용하여 금속티타늄을 제조하거나 이산화티탄 백분을 제조하여 티타늄 광물을 이용한다. Fig. 2.는 티탄철석과 금홍석 정광의 이용방법 및 제조공정별 용도를 나타낸 것이다. 티탄철석이나 금홍석을 금속 티타늄으로 이용하기 위해서는 티타늄 광석을 사염화 티타늄(TiCl_4)으로 제조한 다음 액상의 마그네슘으로 약 $773\sim 873^\circ\text{C}$ 에서 환원하여 티타늄 스펀지를 제조한다. 그리고 이를 진공증류하여 염화마그네슘(MgCl_2)를 제거한 후, 티타늄 금속을 회수하여 이용한다. 반면 이산화티탄 백분 제조 공정의 경우 사염화 티타늄 제조 공정을 거치지 않고, 바로 황산침출로 TiO_2 를 회수하여 이용한다.

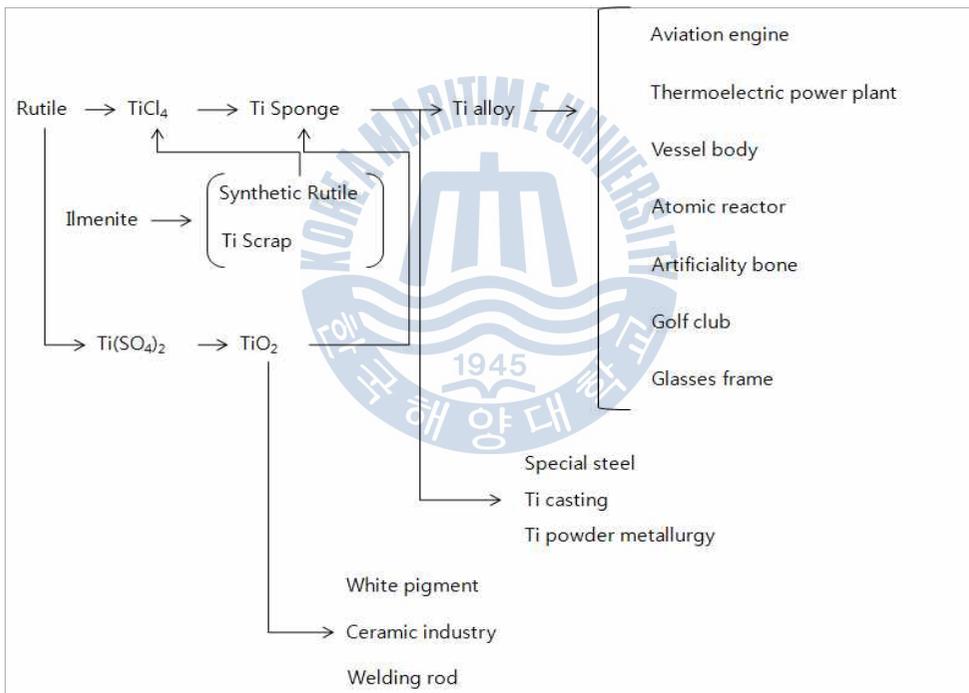


Fig. 2 . Uses of Rutile and Ilmenite concentrates.

제 3 장 이론적 배경

1) 자력선별 이론

광물 중에는 자성을 띄는 광물과 자성을 띄지 않는 광물이 있다. 또한 자성을 가진 광물들 중에서도 자성이 매우 센 것부터 대단히 약한 것 등 여러 가지가 있다. 따라서 자석을 가지고 자성이 보다 약한 광물들로부터 보다 자성이 센 광물을 선별 할 수 있다. 이러한 원리를 이용해서 광물을 선별하는 방법을 자력선별이라 한다. 자력선별이 가능하기 위해서는 투입되는 시료 전체에 작용하는 힘과 특정 자성물질에 자기력이 경쟁적으로 작용해야 하며 이러한 원리의 개념적인 표현을 Fig. 3에 나타내었다. 투입되는 혼합 시료에 전체적으로 작용하는 중력, 마찰력, 견인력 등과 자성 물질에 작용하여 그 물질의 자기적 특성에 변화를 줄 수 있는 자기력과 경쟁적인 힘의 균형에 의해 투입되는 시료는 자기력에 반응하지 않는 물질(Non-mag.), 자기력에 크게 반응하는 물질(Mag.)로 분류되며, 경우에 따라서 중간 물질도 분리해 낼 수 있다.

자기력에 대한 반응은 물질 고유 특성으로 각 물질의 원자 구조에 의해 결정된다. 자기력에 대한 반응을 자화도(Magnetization or Intensity of magnetization)로 표현 할 수 있다. 자화도는 물질의 자기 부피당 자기쌍극 모멘트로 결정되어 지며 자기력이 작용하는 자기장의 강도를 표현하는 단위로는 단위 길이당 전류량(A/m) 또는 Teslas(T)가 쓰인다. 일반적으로 물질의 자기장 세기는 Teslas(T)로, 물질의 자화도는 아래의 식으로 나타내며 그 단위는 A/m이다.

$$M = M_0 + M(H) \quad (1)$$

M_0 : 물질 자체가 갖고 있는 고유 자화도

$M(H)$: 일정 자기력(H)이 가해진 유도된 자기력에 의한 자화도

Fig. 4은 외부에서 가해진 자기장과 물질의 자화도와의 관계를 나타낸 것으로 자기력의 세기가 증가함에 따라 자화도의 변화는 각 물질마다 다르게 나타나며 반응 패턴에 따라 물질을 Ferromagnetic, Ferrimagnetic, Paramagnetic, Diamagnetic 으로 구분 할 수 있다. Ferromagnetic material은 물질 내부의 원자 자기 모멘트가 자성체의 내부에서 모두 같은 방향으로 평행하게 배열되어 있어서 고유 자화도가 높고 자기력이 가해짐에 따라 쉽게 자화되는 물질이다. Ferrimagnetic은 결정내부의 자기 모멘트가 서로 반대방향으로 배열하고 있으나 크기가 서로 달라서 Ferromagnetic에 비해 고유 자화도가 크지 않으며 가해지는 자기력과 직선적인 관계로 자화가 되는 물질이다. 또한 Paramagnetic은 원자 자기 모멘트가 여러방향으로 무질서하게 배열되어 있어서 고유자화도 $M_0 = 0$ 이며 가해지는 자기력과 자화도는 직선적인 관계를 나타낸다. Diamagnetic은 $M_0 = 0$ 이고 가해지는 자기력과 자화도는 1차 관계식이지만 그 기울기가 Negative하다. Table 3 은 일반적인 광물에 대한 자기적 특성을 나타낸 것이다.

자화도를 결정짓는 중요한 특성은 투자율(Magnetic susceptibility)이다. 투자율은 Fig.4 에 나타난 자화도 곡선의 기울기로 나타내며 다음 식으로 표현된다.

$$X = \frac{M}{H} \quad (2)$$

따라서 Paramagnetic material의 투자율 X 는 양(+의 값)을 나타내며, Diamagnetic material은 매우 작은 음(-)의 투자율 X 를 갖는다. 반면에 Ferromagnetic material은 자기장의 세기와 자기 이력(Previous history)에 따라 다른값의 투자율을 나타낸다.

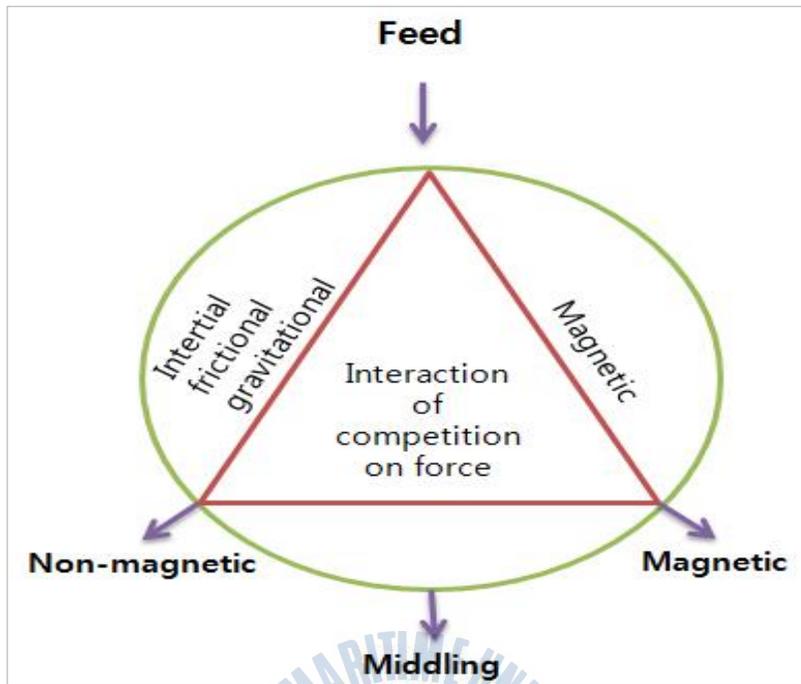
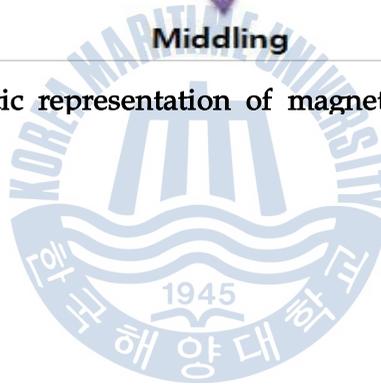


Fig. 3 Schematic representation of magnetic separation.



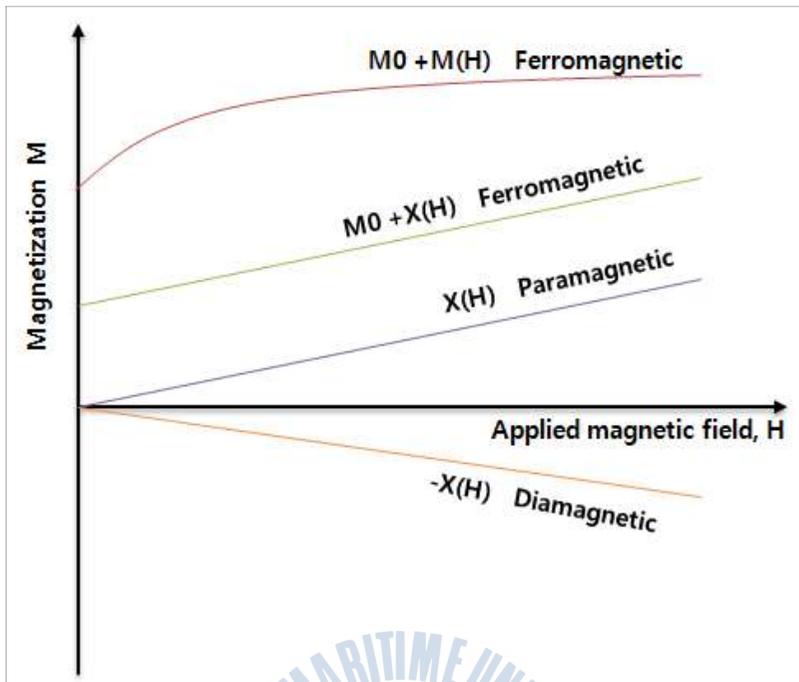


Fig. 4 Magnetization of materials in various magnetic fields.

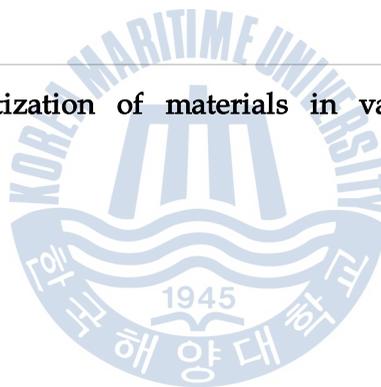
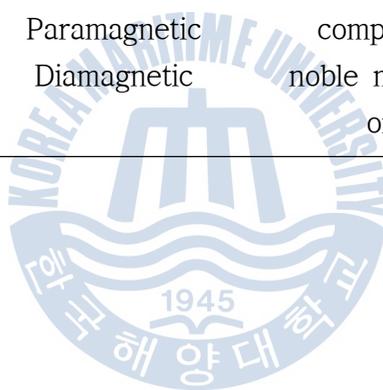


Table 3 Magnetic behaviors of minerals.

Magnetic behavior	General designation	Example
Strongly magnetic	Ferromagnetic Ferrimagnetic	Iron, Cobalt, Nickel, and their compounds ; rare-earth metal and compounds
Modestly magnetic	Ferrimagnetic Paramagnetic	Transition metals and their compounds ; actinides and their compound
Weakly magnetic	Paramagnetic Diamagnetic	Transition metals and their compounds light elements, noble metals and compounds ; organic compounds



(1) 자기력(Magnetic force)

입자에 가해지는 자기력을 결정하는 것은 매우 힘들다. 하지만 계산의 단순화를 위해 몇 가지의 가정을 한다면 비교적 정확한 자기력을 계산 할 수 있으며 (최연호 외, 1997) 그 가정들은 아래에 나타내었다.

1. 입자의 크기가 충분히 작아서 외부에서 가해주는 자기력이 입자에 균일하게 전달된다.
2. 입자의 자기 쌍극점이 입자의 무게 중심에 위치한다.

위의 가정에 따라 자기장 안에 존재하는 입자에 가해지는 자기력은 식 (3)의 벡터식으로 표현된다.

$$F_m = (VM \cdot \nabla)B \tag{3}$$

VM : 입자의 부피 V 의 자기모멘트

B : 외부에서 가해주는 자기장 또는 입자의 무게 중심에 유도된 자기력

식 (2)에 의해 자화도는 식(4)로 나타 낼 수 있다.

$$M = (X_s - X_m) \cdot H \tag{4}$$

X_s : 입자의 투자율

X_m : 입자를 운반하는 이동매개체의 투자율

따라서 식(3)의 벡터식은 직교 좌표에서 X방향의 자기력 세기에 대해 아래의 식으로 쓸 수 있으며, Y방향, Z방향에 대해서도 유사한 식을 유도할 수 있다.

$$F_{(m,x)} = V(X_s - X_m) \left(H_x \frac{\sigma B_x}{\sigma x} + H_y \frac{\sigma B_y}{\sigma y} + H_z \frac{\sigma B_z}{\sigma z} \right) \tag{5}$$

식(5)를 일반적으로 쓰이는 구형 좌표로 정리하면 식(6), (7)과 같다.

$$F_{(m,r)} = V(X_s - X_m) \left(H_r \frac{\sigma B_r}{\sigma r} + H_\theta \frac{\sigma B_\theta}{\sigma r} \right) \quad (6)$$

$$F_{(m,\theta)} = V(X_s - X_m) \left(H_r \frac{\sigma B_r}{\sigma \theta} + H_\theta \frac{\sigma B_\theta}{\sigma \theta} \right) \quad (7)$$

θ : 입자에 유도된 자기력선을 기준으로 하는 각도

r : 입자 중심에서의 거리

한편 Fig. 4에서 알 수 있듯이 Ferromagnetic material을 제외한 Paramagnetic과 Diamagnetic material의 경우 B와 H가 같다. 따라서 자기력의 세기에 관한 식은 식(8)로 간단히 정리된다.

$$F_m = V(X_s - X_m) \left(H_r \frac{dH_r}{dr} \right) \quad (8)$$

식(8)에서 알 수 있듯이 자기력의 세기는 자기장의 세기와 유도된 자기장의 구배에 의해 좌우된다. 이러한 자기장 및 유도된 자기장의 구배를 형성하는 방법은 장치 구조 및 이용 용도에 따라 다양하며 유도된 자기장도 기하학적 구조와 강도의 측면에서 다양하게 나타난다.

High intensity magnetic separator의 경우, 분리 효율을 높이기 위해 matrix를 도입하며 대표적인 형태는 steel ball(구형)과 가는 철선(cylinder형)으로 만들어진 steel wool이다. 구형 matrix를 통해 가해지는 자기력의 세기를 계산하기 위해서 일정한 자기장 안에 지름d의 Ferromagnetic material이 독립되어 있으며, 자기장에 존재하는 구형 matrix는 균일한 자화가 이루어진다는 가정이 필요하다. 또한 구형 matrix에 Paramagnetic material이 부착 되었을 경우 약한 자화가 이루어지고 유도된 자기력은 가해진 자기장의 세기와 거의 같으므로 이러한 가정들을 통하여 앞서 유도한 식을 다시 정리하면

$$F_{m,r} = 16\pi V(X_s - X_m) \frac{M}{d_0} \left(H + \frac{8\pi}{3} M \right) \quad (9)$$

이 되고, 부피 V 항을 입자의 지름 d_v 항으로 치환하면 아래의 식으로 정리된다.

$$F_{m,r} = \frac{8\pi^2}{3} d_v^3 (X_s - X_m) \frac{M}{d_0} \left(H + \frac{8\pi}{3} M \right) \quad (10)$$

(2) 항력

자력선별에 있어서 작용하는 힘은 각 물질의 특징에 따라 각기 달리 작용하는 자기력과 모든 입자에 동일하게 작용하는 중력, 마찰력, 입자간의 상호 간섭 등이 있다. 이러한 항력들 중 가장 중요한 힘은 중력과 Hydro-dynamic drag force로써 자력선별 실험 설계 시 매우 중요한 변수이다.

자력선별기에 투입되는 입자의 밀도가 ρ_s , 지름이 d_0 이고 밀도가 ρ_f 인 이동매개체와 함께 존재 할 때의 총 중력은

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_0^3 (\rho_s - \rho_f) g \quad (11)$$

로 나타낼 수 있으며, 층류흐름에서의 Hydrodynamic drag force 는 Stoke's 법칙에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$F_d = 3\pi d_0 v \mu \quad (12)$$

여기서 g 는 중력가속도를 나타내며 v 는 이동매개체(액체, 주로 물)와의 상대 속도이며, μ 는 이동매개체의 점도이다. 따라서 중력은 입자 지름과 3승의 관계이므로 입자가 클수록 중력의 영향이 매우 커지게 되며 drag force는 적게 작용한다. 따라서 광범위한 입자처리를 하는 건식 자력선별에서는 중력보다 자기력이 더 커야하며, 비교적 미립자를 처리하는 습식 자력선별에서는 hydro-dynamic drag force 보다 자기력이 더 커야 분리가 가능하다.

2) 비중선별 이론

비중선별은 비중이 서로 다른 광물 입자를 유체 내에서 중력, 수류 등의 외력을 작용 시키면 비중 차이에 의해 서로 다른 운동을 하게 된다. 이와 같이 광물 입자의 비중과 입도 차이를 이용하여 맥석광물과 유용광물을 분리하는 선별법이다. 비중선별법은 광물의 대량 선별이 가능하고, 운용비용이 타 선별법보다 저렴 할 뿐만 아니라, 시약의 소비가 없어 환경적으로도 안전하여 선광분야에서 널리 이용되고 있다. 비중선별로 처리가 가능한 비중의 차이는 식(13)과 같이 선별도 표준비가 2.5 이상 되어야 하지만, 최근에는 장비의 발달로 인해 선별도 표준비가 1.25 정도만 되어도 분리가 가능하기 때문에 비중선별의 적용범위는 그만큼 확대되고 있다.(채영배 외, 2001)

$$\text{선별도 표준비} = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} \quad (13)$$

D_h : 중광물의 비중

D_l : 경광물의 비중

D_f : 매질(유체)의 비중



제 4 장 티탄철석의 정제기술 개발

1) 시료의 특성

본 연구에 사용된 시료는 경상남도 하동군 옥종면에 위치한 하동 티탄광산에서 채취한 것이다. Table 4 는 본 실험에 사용된 티탄철석 원광에 대한 화학분석 결과를 나타낸 것으로 TiO_2 와 Fe_2O_3 의 함량이 각각 6.45%와 24.13%로 TiO_2 함량은 낮지만 Fe 성분은 비교적 높아 상당량의 Fe 성분이 티탄철석 이외의 광물로부터 온 것이라 생각된다. 그리고 SiO_2 와 Al_2O_3 성분이 각각 43.14%, 11.24%를 이루고 있는 것으로 보아 규산염 광물이 맥석으로 다량 존재함을 알 수 있다. 그리고 CaO 성분도 9.77%가 관찰되어, 이들 성분을 이루고 있는 맥석 광물을 효과적으로 제거 하는 것이 본 연구에 매우 중요한 선별요소로 작용 할 것이라 판단된다. 그리고 MgO와 Na_2O 성분은 각각 2.76%, 1.04% 존재하고 있으며, 기타 성분은 1% 미만으로 관찰되었다.

Fig. 5.은 티탄철석 원광에 대한 화학분석결과 확인된 각 구성 원소들의 근원 광물을 규명하기 위해 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 티타늄의 근원광물은 티탄철석(Ilmenite, FeTiO_3) 이었으며, 주요 맥석광물은 석영 (Quartz, SiO_2), 녹니석(Chlorite, $(\text{Mg,Fe})_5(\text{Al,Fe})_5\text{SiSO}_{10}(\text{OH})_8$), 조장석(Albite, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), 투섬석(Tremolite, $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)와 마그네슘 그룹의 각섬석(Magnesiohornblende, $\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg,Fe})_4(\text{Al,Fe,Ti})_5\text{Si}_6\text{O}_2(\text{OH,F})_2$)이었다. 원광에 함유된 맥석광물의 대부분은 Fe 이온을 함유한 함철 규산염 광물이다. 따라서 효과적인 함철 규산염 광물의 제거가 선별 효율에 큰 영향을 미칠 것이라 생각된다.

XRD 분석에서 확인된 각 구성광물들의 분포 특성 및 입자형태에 따른 단체 분리 가능성을 관찰하기 위한 편광현미경 감정결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 때, 단체분리도란 한 광석 속에 들어있는 특정 광물이 단체로 분리되어 있는 백분율을 일컫는 용어이다. 회수하고자 하는 목적광물의 단체분리도가 높을수

록 이들 광물의 물리화학적 성질을 이용하여 목적광물의 품위 및 실수율을 높일 수 있기 때문에 선별공정에서는 단체분리도를 높이는 것이 매우 중요한 전처리 과정이라고 볼 수 있다(김형석 외, 2008). 사진의 A와 C는 직교니콜, B와 D는 교차니콜 하에서 관찰된 티탄철석광의 감정결과이다. XRD 분석에서 확인된 바와 같이 사장석, 투섬석, 각섬석, 녹니석이 수반되어 있었고, 그리고 원광 XRD 분석에서 확인되지 않은 석류석이 특정 부분에 농집 되어 있는 것을 확인하였다. Fig 7는 반사현미경 관찰결과를 나타낸 것이다. 티탄철석의 일정량이 농축된 형태를 나타내지만, 농축된 티탄철석 내에 불순물의 함유량이 많을 뿐만 아니라, 점조직으로도 분포하고 있기 때문에 광물간의 단체분리가 어려워 순수한 티탄철석 정광산물의 회수는 어려울 것이라 판단된다. 일반적으로 목적광물과 맥석광물이 같은 크기의 입방체로 교호(inter-locking)하여 1:1의 체적비로 존재할 경우, 광물 결정의 1/2의 크기로 분쇄하면 단체분리도는 이론적으로 12.5% 밖에 안된다. 그러나 미분쇄함에 따라 단체분리도가 높아져 광물 결정의 크기보다 1/64 이하의 크기로 분쇄하면 95.5%이상으로 단체 분리 할 수 있다. 그러므로 적게 함유되어 있는 광물은 그 자체의 크기보다 잘게 분쇄하지 않으면 단체분리가 되지 않기 때문에 단체분리도를 높이기 위해서는 광물 결정 크기보다 상당히 미세하게 분쇄하지 않으면 안된다. 그러나 반대로 많이 들어 있는 광물의 경우는 적게 들어있는 광물의 크기보다 굵게 분쇄해도 단체분리가 상당히 용이하다(이강문, 1979).

Fig. 8.는 티탄철석 원광을 분쇄한 후 SEM-EDS 분석 한 결과를 나타낸 것으로 티타늄의 경우 Ti와 Fe 그리고 O 원소로 규명된 입자에 대한 mapping 영역이 중첩되어 본 실험 시료가 티탄철석(Ilmenite, FeTiO_3)임을 확인하였다. 또한 Ti입자와 중첩되지 않는 Fe 입자들도 많이 확인되어, 티탄철석을 제외하고 Fe를 함유하고 있는 함철 맥석광물이 다량 존재함을 확인하였다. 이는 XRD 분석 결과와 일치하였다.

2) 입도분석

암석(Rock) 상태 시료는 각 구성 광물들 간의 경도 및 결정이 다르고, 인접한 광물들과의 결합상태가 다르기 때문에 파쇄 및 분쇄과정에서 특정 입도에 같은 광물들이 많이 농축되는 현상을 보인다. 따라서 광물의 선별 실험에 앞서 입도 분석을 수행하여 파·분쇄 공정에 의한 목적광물의 농축 가능성 및 개략적인 단체분리 특성을 관찰하고 효과적인 처리법의 선택과 최적 선별 입도를 알기 위해 입도분석을 하였다.

Table 5은 티탄철석 시료를 조크러셔와 펄버라이저 및 로드밀을 이용하여 -8mesh 분쇄 한 다음, 이들 분쇄산물에 대한 입도분석 결과를 나타낸 것이다. 입도분석 결과, 입도별 중량비는 -18/+35mesh, -35/+48mesh 입도에서 각각 37.33%, 19.61%로 -18/+48mesh 구간이 전체 중량비의 50%이상을 나타내었다. 이보다 입도가 작아질수록 중량비는 크게 감소하여 -48/+325mesh 구간은 전체 중량비의 25%를 차지하였다. 하지만 325mesh 이하의 입도에서 중량비가 11.16%로 증가 하여, 미립자가 상당 부분을 차지하는 것을 알 수 있다.

TiO₂ 함량은 큰 입도인 -8/+18mesh, -18/+35mesh 입도구간에서 각각 5.25, 5.78 TiO₂%를 나타내어 평균 함량 6.45 TiO₂% 보다 약 1% 낮았다. 35mesh 이하의 구간에서는 TiO₂ 품위가 점차 증가하여 -200/+325mesh의 구간에서는 8.72 TiO₂%로 원광 보다 약 2.27% 높음을 알 수 있다. 한편 325mesh 이하의 구간에서는 6.32 TiO₂%로 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같이 35mesh 이하의 입도에서 TiO₂ 함량이 증가하는 이유는 티탄철석 광물이 각섬석과 장석 등의 모암으로부터 단체분리 되는 것이라 생각된다. 한편 325mesh 이하의 미립자 구간에서 TiO₂ 함량이 낮아지는 이유는 TiO₂를 함유한 티탄철석 보다 경도가 낮은 장석, 각섬석 등의 비금속 광물들이 보다 쉽게 분쇄되어 미립으로 이동되었기 때문이다.

원광의 광물감정을 위한 XRD, XRF 및 SEM-EDS 분석 결과 TiO₂의 근원 광물이 티탄철석임을 확인하였으며, 티탄철석의 품위 향상을 위한 선별 기술 개발 시 맥석광물로 다량 존재하는 각섬석과 녹니석을 효과적으로 제거 할 수 있

는 처리공정 개발이 중요하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 광물감정 결과를 토대로 하여 다량으로 존재하고 있는 각섬석과 녹니석의 제거를 위해 비중선별 공정을 선정하였으며, 또한 티탄철석과 비슷한 비중특성을 가지고 있는 맥석광물들의 제거를 위해 자력선별 공정을 혼합하여 선별 실험을 수행하였다.

Table 4 Elemental composition of the raw sample analyzed by XRF.

Chemical Composition(%)									
TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
6.45	43.14	11.24	24.13	9.77	2.76	0.35	1.04	0.84	0.28

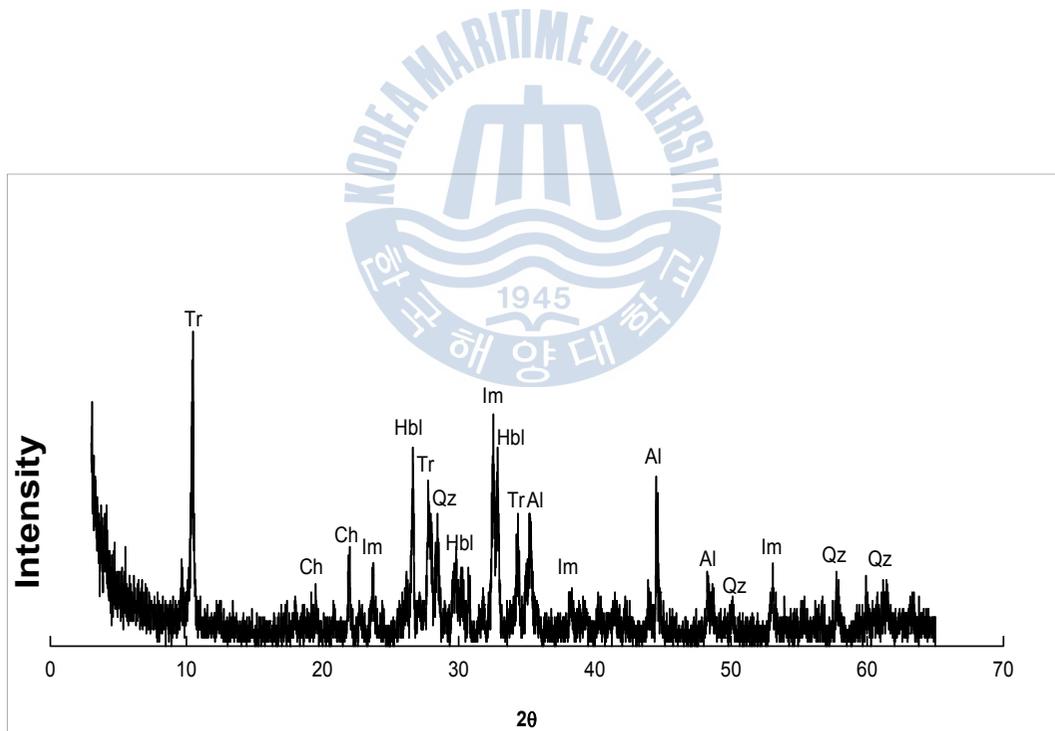


Fig. 5 XRD patterns of raw Ilmenite ore sample. (Im : Ilmenite, Qz : Quartz,, Tr : Tremolite, Ch : Chlorite, Al : Albite, Hbl : Magnesiohornblende).

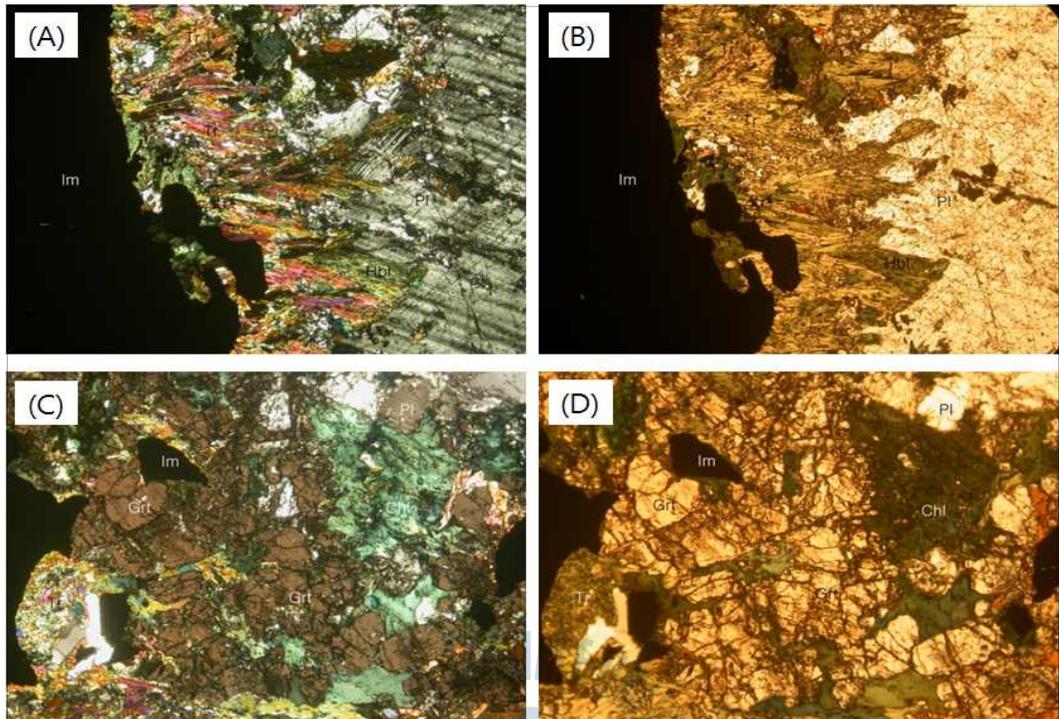


Fig. 6 (A) - (D) Photomicrographs of Ha-Dong Ilmenite ores.(40x, 0.5cm = 70 μ m) (A) and (B) are crossed nicol images, (B) and (D) are opened nicol, respectively. Im = Ilmenite, Pl = Plagioclase, Tr = Tremolite, Hbl = Hornblende, Grt = Garnet, Chl = Chlorite.

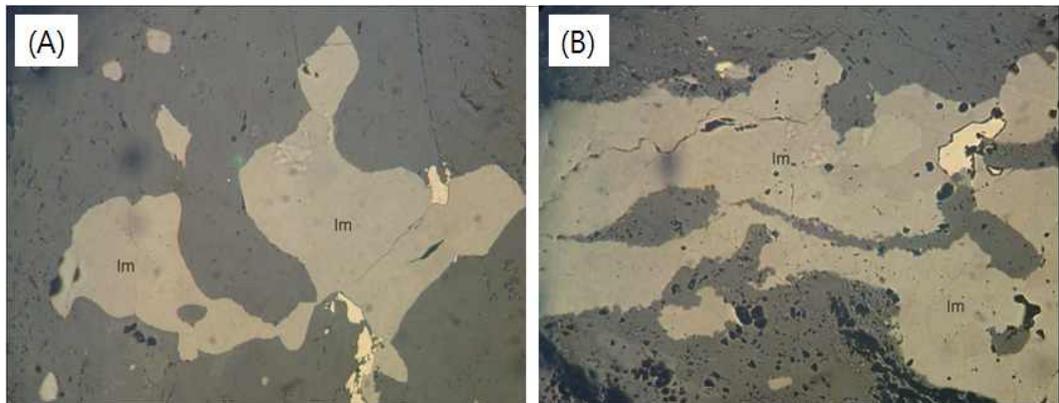


Fig. 7 Photomicrographs of Ha-Dong Ilmenite ores.(40x, 0.5cm = 70 μ m) (A) and (B) are reflecting microscope images. Im = Ilmenite.

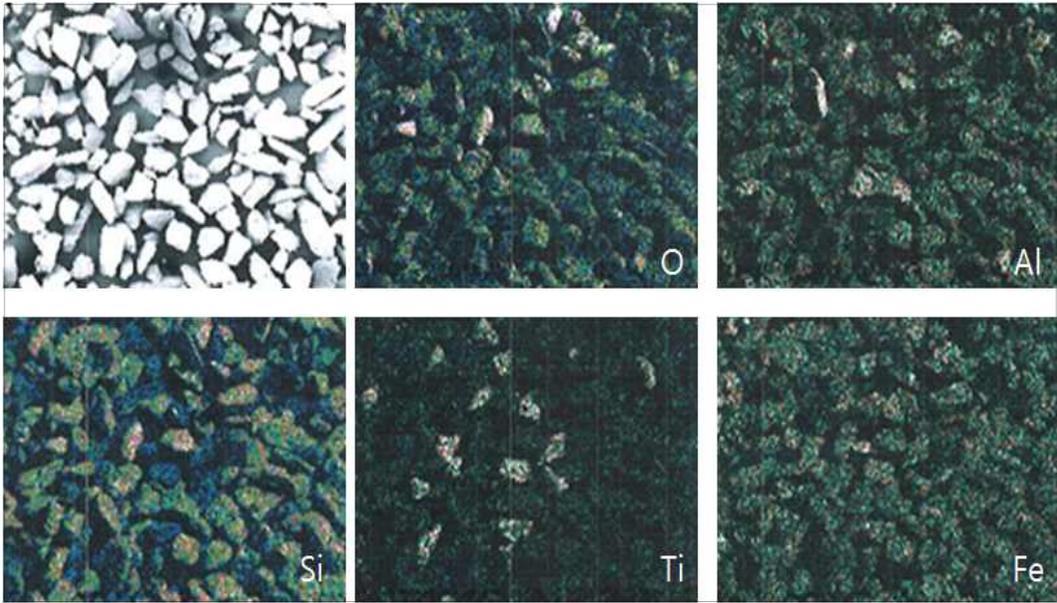


Fig. 8 SEM image and EDS mapping of Ha-Dong Ilmenite ore sample.

Table 5 Size distribution and chemical analysis of various size fraction of ilmenite ore.

Fracture(mesh)	wt. (%)	TiO ₂ (%)	Cumulate (TiO ₂ %)
-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	100	6.45	100

3) 실험방법

본 연구의 목적은 경상남도 하동지역에 매장되어 있는 저품위 티탄철석을 활용 할 수 있는 종합적인 기술을 개발하는데 있다. 이 지역에 매장되어 있는 티탄철석은 TiO_2 품위는 낮으나, 매장량이 풍부하기 때문에 적절한 선별 기술만 개발 된다면 전량 수입에 의존하고 있는 고품위 티타늄 광물을 어느 정도 대체 할 수 있을 것이라 기대된다. 따라서 본 연구에서는 이 지역에 대량 부존 되어 있는 저 품위 티탄철석의 경제성 있는 기술개발을 목적으로, 먼저 채굴된 굵은 입자에서 1차 처리하여, 분쇄비용의 절감과 선광공정의 효율을 높이기 위하여 건식 영구자석을 이용한 자력선별 실험을 수행하였다. 원광석 채굴시 1차선별 공정에서 20~30%의 맥석광물을 굵은 입도에서 제거 할 수 있다면, 이 후 공정에서 많은 분쇄비용을 절감 할 수 있을 뿐만 아니라 선별 효율도 높일 수 있을 것이라 판단된다.

자력선별에 의해 1차 생산된 정광 산물은 TiO_2 품위가 매우 낮기 때문에 정광으로서의 가치가 없다. 따라서 티탄철석의 비중이 약 4.7의 고비중 광물이므로 비중선별 공정을 선택하여 맥석광물로 다량 존재하는 각섬석과 회장석등의 규산염 광물을 제거하기 위한 2차선별 실험을 수행하였다. 2차 비중선별에서 회수된 중광물 중 티탄철석과 비중은 비슷하지만 자화율이 다른 맥석광물을 제거하기 위하여, 자성강도 변화가 가능한 자력선별을 적용하여 제련용 고품위 티탄철석 정광을 생산할 수 있는 처리공정 개발을 위한 실험을 수행하였다.

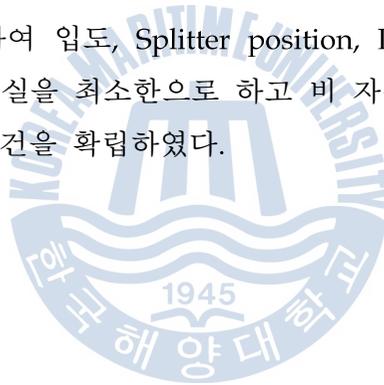
(1) 1차 건식자력선별

본 실험의 목적은 티탄철석의 품위 향상 보다는 비교적 굵은 입도에서 자성을 띄지 않는 맥석광물을 제거하여, TiO_2 품위향상을 위한 2차 비중선별실험 수행 시 불필요한 맥석광물의 분쇄를 방지하여 분쇄비용의 절감 및 비중선별의 선별 효율을 높이기 위한 것이다.

Fig. 9는 본 실험에서 사용된 High-Force Magnetic Separator를 나타낸 것으

로, 미국 International Process Systems(INPROSYS)사에서 제작된 것이다. 실험 기기의 특징은 자성을 띄는 Roll이 Nd-Fe-B의 희토류 합금으로 제조된 영구자석으로 이루어져 있으며, 8,000Gauss의 자장세기를 갖고 있다. 자성을 띄는 Roll과 자성을 띄지 않는 Roll의 직경과 폭은 각각 100mm와 200mm로 이루어져 있고, Roll과 Roll 사이는 내구성을 향상시킨 Polyurethane로 제조된 벨트로 연결되어 있다. 자성 Roll은 magnetic : steel의 배치가 6 : 2 및 4 : 1인 2중 배치구조로 구성되어 있어 입도에 따라 각각 선별 지점을 달리 할 수 있다. 또 다른 장점은 시료가 급광되는 지점에 Ionizer system이 설치되어 미립자들끼리의 응집을 방지함으로써 미립자의 선별 효율을 높일 수 있다.

Fig. 10은 본 자력선별기를 이용하여 비자성 맥석광물을 제거하기 위한 1차 건식 자력선별법의 공정도를 나타낸 것이다. 실험은 원광을 조크러셔와 콘크러셔를 이용하여 목적인 입도로 제조한 다음 맥석광물들의 제거를 위한 최적 선별 공정을 개발하기 위하여 입도, Splitter position, Roll speed의 조건변화 실험을 수행하여 TiO_2 의 손실을 최소한으로 하고 비 자성 맥석광물을 최대한으로 제거 할 수 있는 최적 조건을 확립하였다.



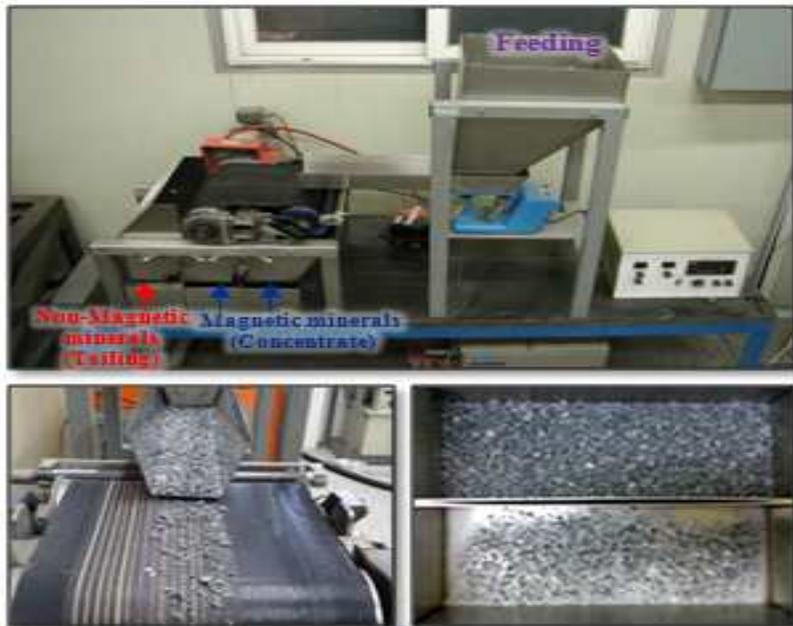
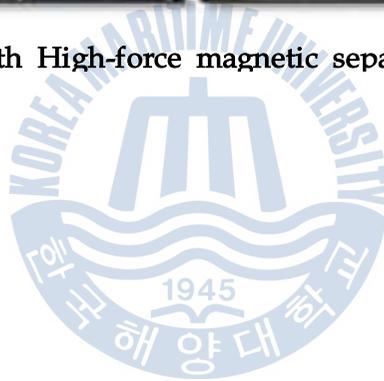


Fig. 9 Rare earth High-force magnetic separator.



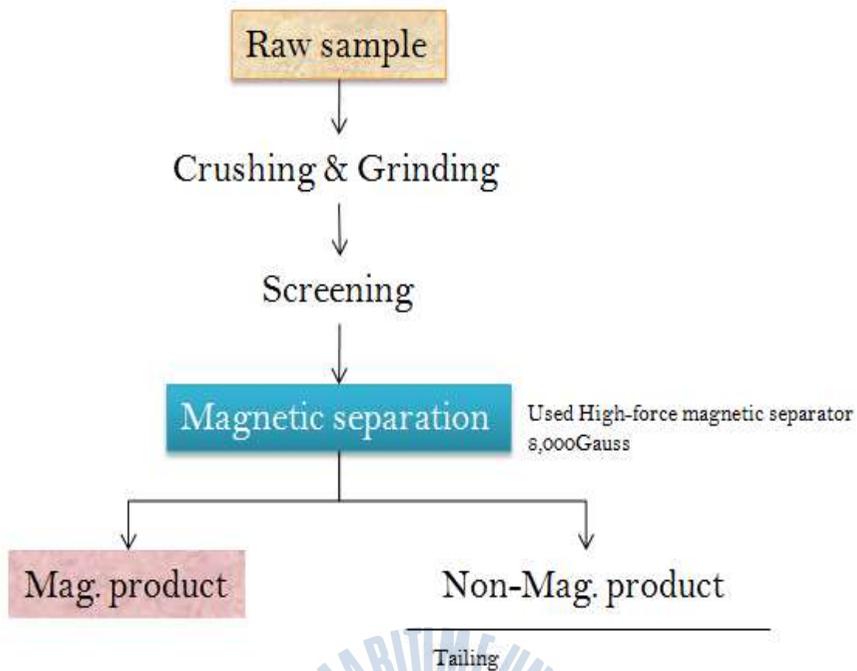
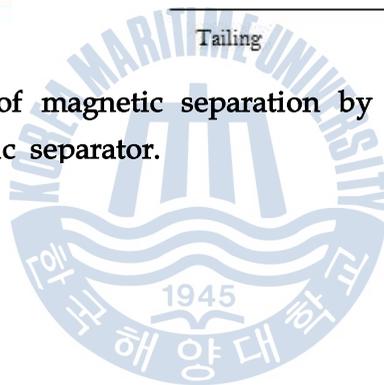


Fig. 10 Process of magnetic separation by using Rare earth roll-type magnetic separator.



(2) 비중선별

Fig. 11 및 Fig. 12는 본 연구에 사용된 Wilfley type의 실험실용 Shaking table 및 모식도를 나타낸 것이다. Shaking table은 비중선별에 가장 많이 사용 되는 장비로, 입자의 크기가 작고 무거운 광물 일수록 입자가 받는 수류의 영향이 작기 때문에, 테이블의 운동방향으로 입자가 거동하여, 테이블의 상류 방향으로 모이게 되고, 반대로 입자의 크기가 크고 가벼운 광물 일수록 수류의 영향으로 인해 수류 방향으로 입자가 거동하여, 테이블의 하류로 모이게 된다.

XRD 분석결과에서 관찰된 대표적인 맥석광물과 티탄철석의 선별도 표준비를 계산한 결과를 Table 6에 나타내었다. 녹니석(Chlorite)의 비중은 2.7, 조장석(Albite)은 2.6, 석영(Quartz)는 2.65이고, 투각섬석(Tremolite)와 각섬석(Hornblende)의 비중은 3과 3.2이다. 조장석, 석영 그리고 녹니석의 선별도 표준비 계산결과 각각 2.34, 2.27, 2.21이었다. 그리고 투각섬석과 각섬석과의 선별도 표준비는 각각 1.88과 1.70이었다. 이들은 모두 비중선별이 가능한 범위에 있기 때문에 비중선별법을 적용하면 맥석광물로 존재하는 대부분의 경광물들이 제거되어 TiO_2 의 품위를 크게 향상 시키는 것이 가능할 것이라 생각된다. 따라서 본 연구에서는 일정 품위의 높은 티탄철석 정광을 생산하기 위하여 유량(Water rate), 급광속도(Feed rate), 입도 등의 조건 변화 실험을 수행하여 맥석광물들을 효과적으로 제거하기 위한 최적 선별 조건을 확립하였다. Fig. 13는 비중선별에 대한 실험공정도 나타낸 것이다.



Fig. 11 Wilfley type shaking table.

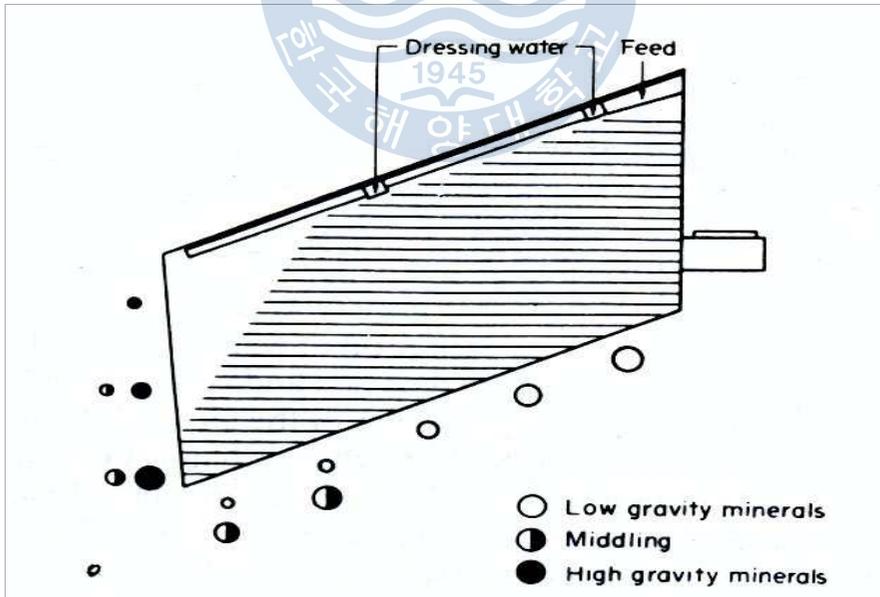


Fig. 12 Arrange of ore particles at table plate with different particle size and density.

Table 6 Specific gravity of the gangue minerals in this study.

Gangue Minerals	Gravity	Specific Gravity
Albite	2.6	2.34
Quartz	2.65	2.27
Chlorite	2.7	2.21
Tremolite	3	1.88

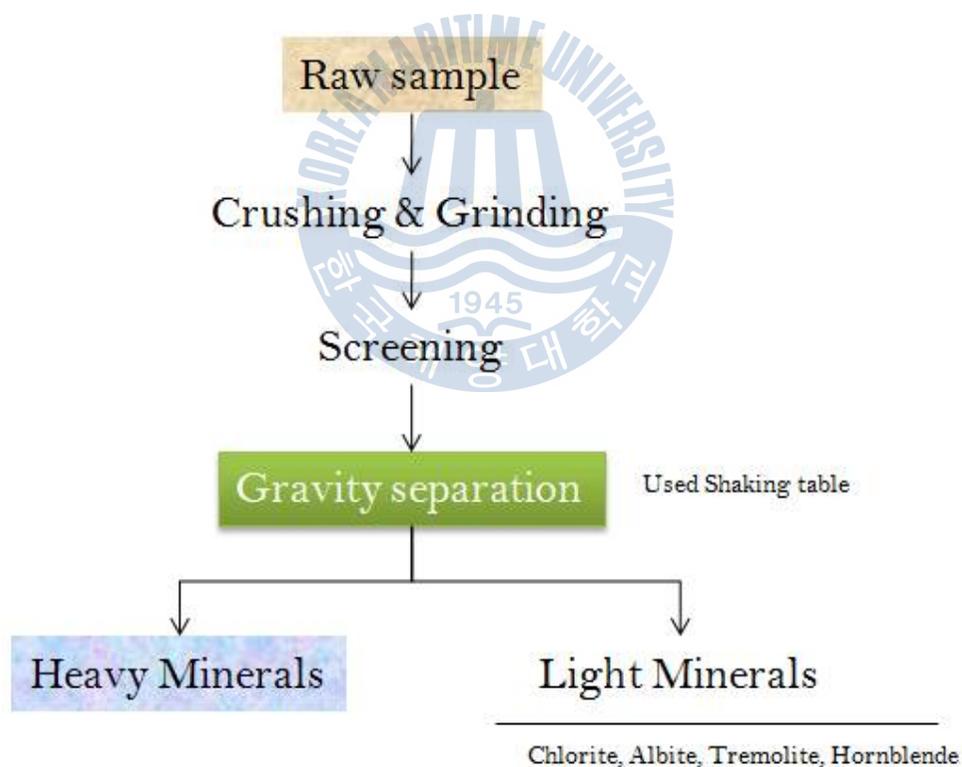


Fig 13 Process of gravity separation used by Shaking table.

(3) 비중선별 및 Cross belt 자력선별 병용 실험

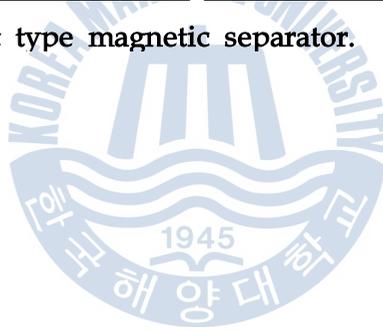
비중선별에 의한 최적조건에서 회수된 정광산물의 TiO_2 의 품위는 약 44%로 체련용으로 사용하기에는 품위가 낮다. 그 이유는 비중선별의 경우 비중이 낮은 광물들과의 분리는 가능하지만 티탄철석과 비중이 비슷한 Garnet, Hornblende, Magnetite 등과 같은 광물들은 비중선별에서 선별하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 비중선별 정광 산물을 대상으로 품위를 보다 높이기 위해 Fig 14 에 나타낸 자력의 세기 변화가 가능한 미국 Eriez Co.의 Cross belt type의 자력선별기를 이용하여 Magnetic intensity, Feed rate 변화 실험을 수행하였다.

본 자력선별기는 급광부로부터 공급된 시료가 벨트를 타고 자선기의 밑으로 지나가는 동안 자성산물들이 자석에 부착되게 되는데, 이 때 자력선별기의 밑 부분에 부착된 자성산물은 시료를 급광하는 벨트와 직각으로 이동하는 Cross belt에 회수되어 자성산물과 비자성 산물들이 분리되게 된다.

Fig. 15는 비중 및 자력선별 병용 실험에 대한 공정도를 나타낸 것이다. 원광을 파·분쇄 하여 목적인 입도로 제조한 다음, Shaking table을 이용하여 Heavy minerals과 Light minerals을 분리하였다. 이 때 회수된 Heavy minerals을 건조시켜 Cross belt type 자력선별을 실시하여 최종 정광 및 Magnetite, Garnet을 회수 하였다.



Fig. 14 Cross belt type magnetic separator.



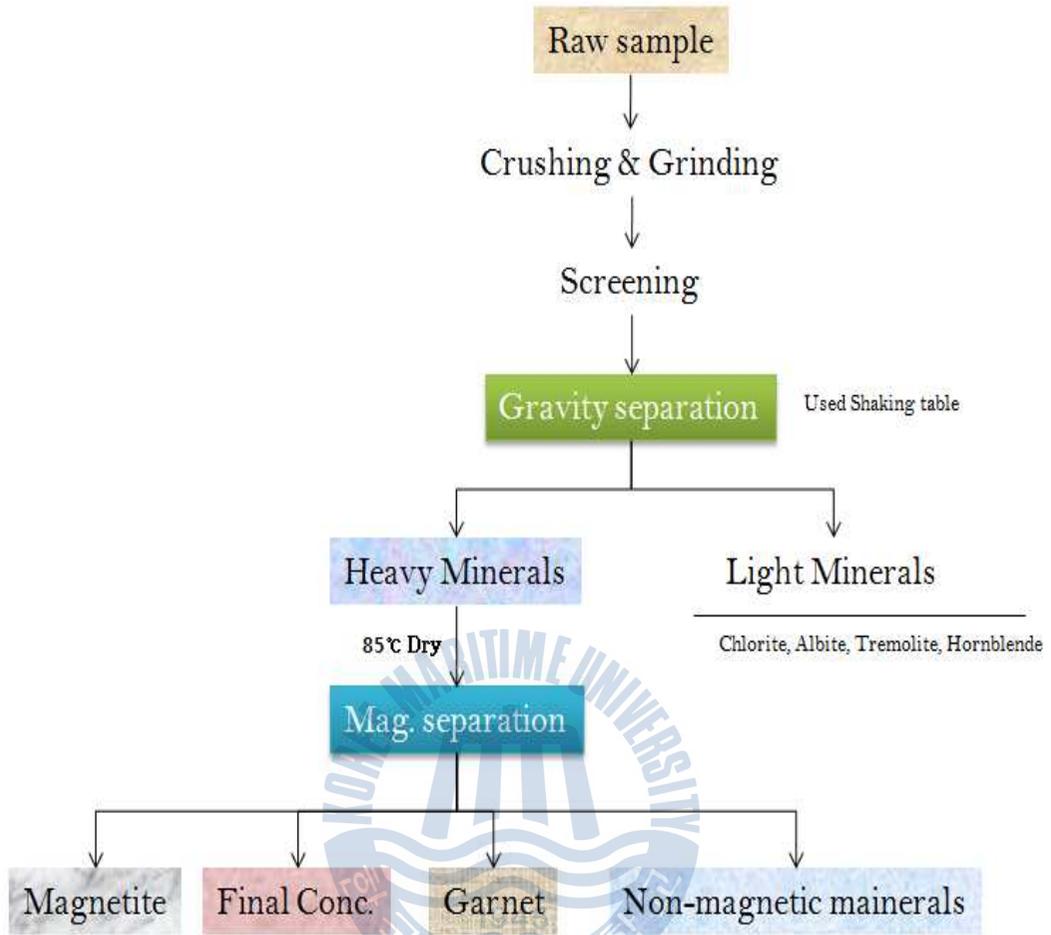


Fig. 15 Combination process using Gravity and Mag. separator for Recovery of Ilmenite concentrate.

제 5 장 실험 결과 및 고찰

1) 1차 건식자력선별 실험결과

광물의 파·분쇄 비용은 전체 선광 공정의 50%이상을 차지한다. 따라서 고품위 티탄철석 정광 생산에 앞서 비교적 큰 입자 영역에서 일부의 맥석광물을 제거한다면 그만큼의 분쇄 비용을 절감하여 전체적인 선광비용을 크게 줄일 수 있다. 본 연구에서는 입도, Splitter position, Roll speed, 변화 실험을 통해 최적의 조건을 검토하였다.

광물의 선별 실험에서 입자크기는 품위와 회수율에 매우 중요한 영향을 미친다. 특히 건식 자력선별의 경우 입자가 너무 크거나 작으면 단체분리 뿐만 아니라 자화율과 입도에 따른 중량에 의해 선별효율에 나쁜 영향을 미치므로, 최적 선별조건을 규명하기 위해서는 반드시 입자크기에 대한 연구를 수행해야 한다. Fig. 16는 티타늄 정제실험에서 입자크기가 TiO_2 의 품위와 회수율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 입자크기를 -20mm, -10mm, -5mm, -2mm로 달리 하여 실험한 결과이다. 실험 조건은 Roll speed 150RPM, Splitter position 2으로 하였다. 실험결과 -20mm에서 품위 및 회수율은 7.05%, 87.6%이었다. 입도를 이보다 작게 하여 실험 했을 때, 품위 및 회수율은 함께 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 입도를 -5mm로 했을 경우 품위 및 회수율은 10.4%, 98.4%이었다. 이와 같은 결과를 나타내는 이유는 5mm를 기준으로 이보다 입자가 큰 경우 비자성 광물과 단체분리 되지 못한 자성광물들이 자화되지 못하여 Roll의 회전력에 의해 비자성 산물로 회수되고, 또한 비자성 광물들이 자성산물과 함께 자화되어 자성산물로 회수되기도 하기 때문에 선별효율이 상대적으로 낮은 것이다. 한편 이보다 입도가 더 작은 -2mm로 실험했을 경우, 품위 및 회수율은 10.5%, 98.1%로 -5mm와 비교하여 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 따라서 최대 입자를 크게 했을 때 파쇄 비용을 더 절감 할 수 있으므로, 본 연구에서는

최대입자 크기를 5mm로 하여 실험을 진행하였다.

회수대의 위치(Splitter position)는 영구자석에 의해 자화된 시료가 Roll의 회전에 의한 원심력에 의해 자성산물과 비자성 산물로 분리 될 때, 기준점 역할을 하므로 물리적인 선별 실험에서 중요한 변수로 작용한다. 본 연구에 사용된 자력선별기는 회수대의 위치를 자성산물의 회수존이 넓어지는 음의 방향과 비자성 산물의 회수존이 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 17는 5mm 이하로 제조된 시료를 대상으로 회수대의 위치를 0,1,2,3으로 변화시켜 TiO₂의 품위와 회수율의 변화를 나타낸 것이다. 회수대의 위치가 0에 위치 할 경우, TiO₂의 품위와 회수율은 7.8%와 99.4%를, 그리고 보다 강한 자성 산물을 회수하기 위해 회수대의 위치를 1에 위치 시켰을 때 TiO₂의 품위와 회수율은 각각 8.96%와 99.2%로 TiO₂의 정제가 거의 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 그리고 회수대의 위치를 2 및 3에 위치 시켰을 때 역시 TiO₂의 품위 및 회수율은 10.4%, 98.4 및 10.6%, 98.1%로 회수대의 위치 0에 비해 약 3%의 품위 향상이 있을 뿐, 뚜렷하게 실험에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이는 본 시료를 구성하고 있는 맥석광물들의 상당량도 비교적 강한 자성산물로 이루어져 있기 때문에, 자력선별기의 회수대를 아무리 변화하여도 티탄철석과 효과적으로 분리되지 않기 때문이다. 또한 회수율은 95% 이상으로 높지만 품위는 약 10%로 낮다. 이는 본 연구에 사용된 자력선별기가 강한 자성을 띠는 영구 자석이기 때문에, 대부분의 맥석광물도 티탄철석과 함께 자화되어 자성 산물로 회수되는 것이라 판단된다.

자력 선별기의 Roll speed가 티타늄 정제에 미치는 실험 결과를 Fig. 18에 나타내었다. 이 때 실험 조건은 입도 5mm 이하, Splitter position 2 이었다. Roll speed가 가장 느린 100RPM에서 TiO₂의 품위와 회수율은 각각 8.51%, 99.4%로 품위는 낮으나 회수율은 높은 경향을 나타내었다. 반대로 Roll speed가 가장 빠른 200RPM에서는 품위 12.5%, 회수율 86.2%로 품위의 증가는 미비하지만 회수율이 급격히 감소하였다. 이는 Roll의 회전속도가 티탄철석의 선별에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Roll speed가 증가하면 광물의 입자가 자화되

어 자석에 부착되는 힘 보다 Roll의 회전에 의한 원심력에 의해 전진 운동하려는 힘이 더욱 크게 작용하여 단체분리 되지 못한 티탄철석 광물이 자석의 힘에 이끌리지 못하고 비 자성 광물 회수대로 회수되기 때문이다. 본 연구에서는 TiO_2 의 품위와 회수율을 고려하여 Roll speed를 150RPM으로 선정하였다.



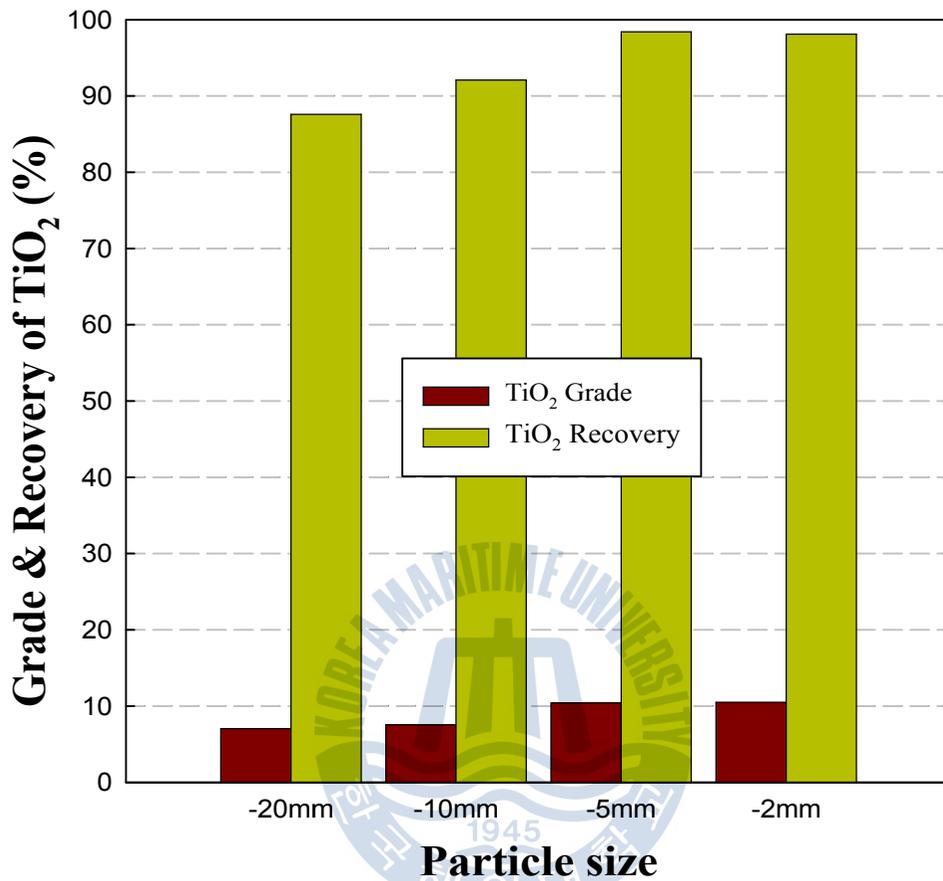


Fig. 16 Effect of particle size on TiO₂ grade & recovery in dry magnetic separation using Rare earth High-force magnetic separator.

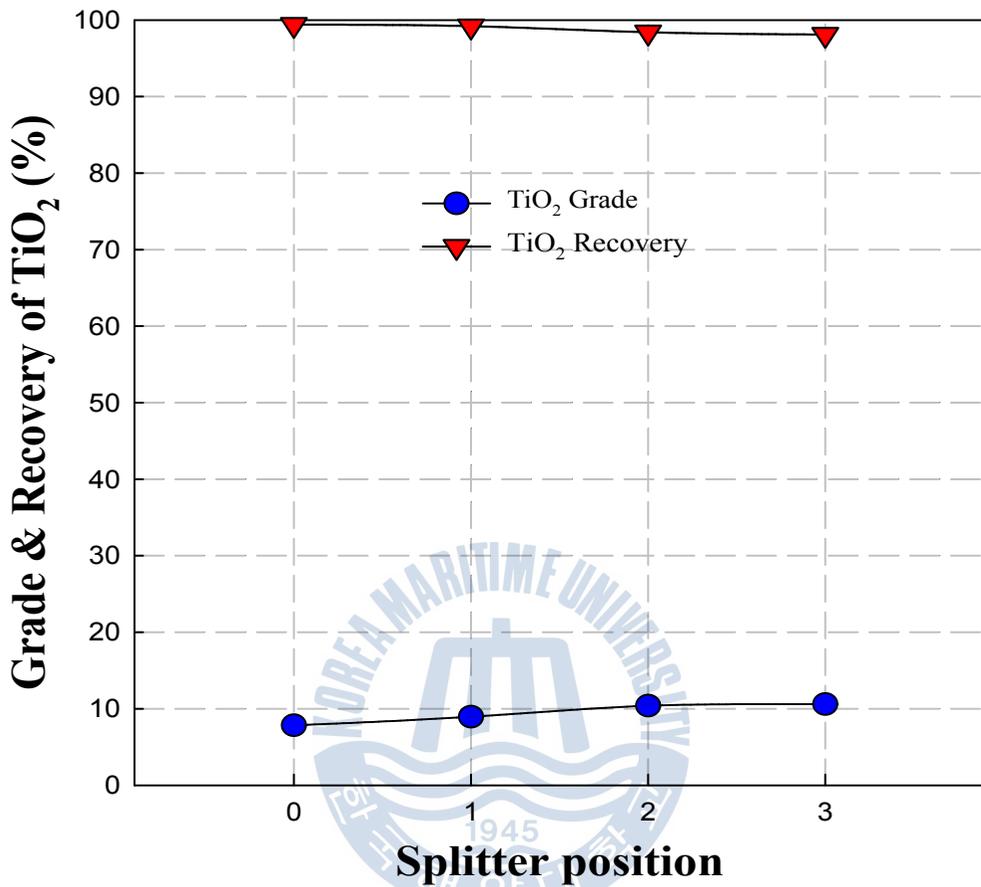


Fig. 17 Effect of splitter position on TiO₂ grade & recovery in dry magnetic separation using Rare earth High-force magnetic separator.

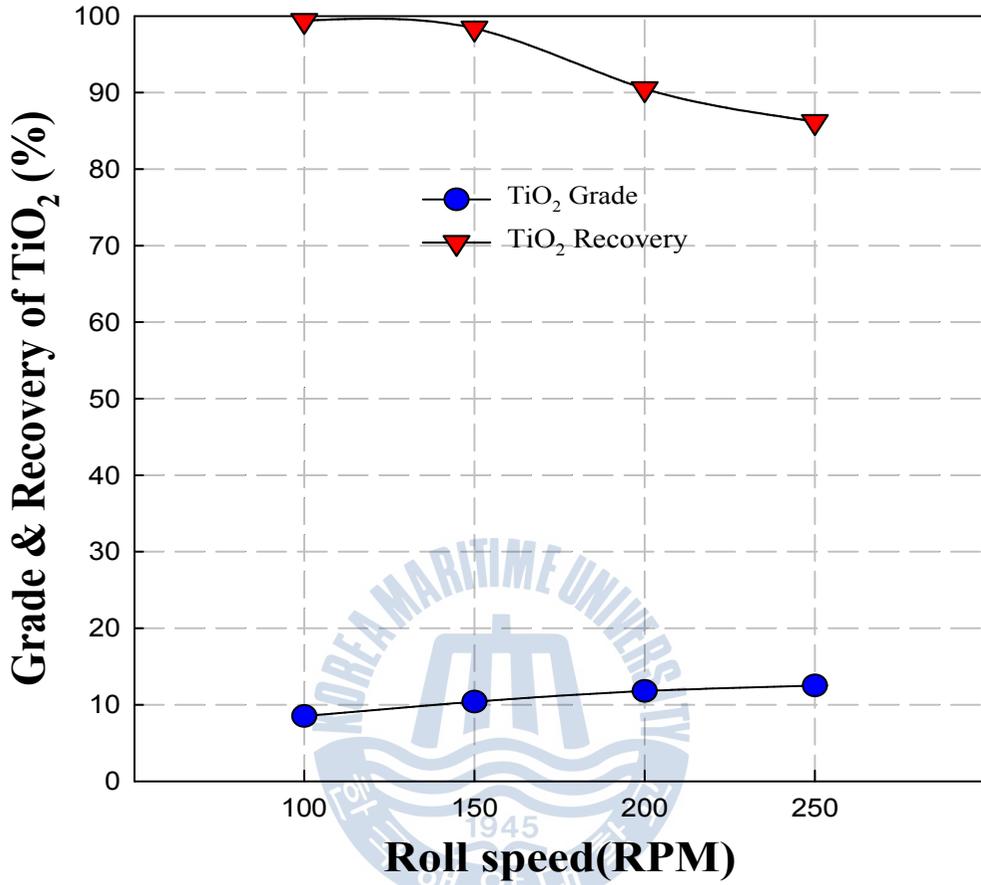


Fig. 18 Effect of roll speed on TiO₂ grade & recovery in dry magnetic separation using Rare earth High-force magnetic separator.

2) 비중선별 실험결과

하동지역 티탄철석 원광에 대한 화학분석 및 광물 감정 결과 대부분의 맥석 광물이 규산염 광물로 이루어져 있어, 고품위 티탄철석을 얻기 위해서는 비중선별법이 가장 효과적임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 비중선별에 가장 많이 이용되는 장비 중 하나인 Shaking table을 이용하여 입도, Water rate, Feed rate를 변화시켜 최적 조건을 검토하였다. 이 때 테이블의 충정 거리 및 횡수(Stroke length & Frequency)는 0.9cm, 150/min.로 하였으며, 테이블의 경사는 1.1°로 고정하였다. 그리고 Heavy 산물을 대상으로 1회의 cleaning을 실시하여 정광의 품위를 향상시켰다.

Fig 19는 시료의 입도크기가 TiO_2 의 품위와 회수율에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 입도를 35, 48, 65, 100, 150mesh 이하의 크기로 제조하여 실험한 결과이다. 입도 35mesh의 경우 TiO_2 의 품위는 35.9%로 매우 낮다. 하지만 입도를 점점 작게 했을 때 품위는 점차 증가하여 150mesh 까지 분쇄 하였을 경우 품위는 45.8%를 나타내었다. 반면 회수율은 입도 35mesh에서 66.0%로 높은 값을 보이지만, 입도가 작아질수록 점차 감소하여 150mesh 시료의 경우 50.7%까지 감소하였다. 특히 100mesh에서 품위와 회수율은 44.93 $TiO_2\%$, 59.3%를 나타낸다. 하지만 150mesh 이하의 시료는 품위와 회수율이 각각 45.8 $TiO_2\%$, 50.7%로 품위의 증가는 미비하지만 회수율은 약 9% 감소하였다. 이는 150mesh까지 분쇄할 경우 시료가 과분쇄 되어 비중선별에서 선별하기가 어려운 Slime이 다량으로 발생하기 때문이다. 따라서 품위와 회수율을 고려하여 100mesh를 최적의 입도로 선정하였다.

Fig. 20는 입도 100mesh 이하의 시료를 대상으로 물의 공급량(Water rate)에 따른 TiO_2 품위 및 회수율의 관계를 나타낸 것이다. 물의 양이 가장 적은 6L/min.에서 TiO_2 의 품위는 40.9% 이지만 물의 양을 12L/min.까지 증가시키면 45.1% 까지 증가한다. 반대로 회수율은 물의 양 6L/min.에서 61% 이지만 물의 양을 점차 증가시키면 회수율은 서서히 감소하여 12L/min.에서 46.9%로 약 14%가 감소하는 결과를 나타내었다. 이와 같이 물의 양에 따라 품위 및 회수율이 변화하는 이유는 물의 공급량이 적을 경우 경광물이 수류의 영향을 충분히 받지 못해 테이블 하부로 유송 되지 못하여 중광물과 함께 회수되기 때문

에 품위는 가장 낮고 회수율은 높다. 반면 물의 양을 8L/min. 이상으로 공급하게 일부의 중광물이 물의 영향을 받아 테이블 하부로 유송되어 회수율이 감소하였다. TiO_2 의 품위와 회수율을 고려할 때 최적의 유량은 8L/min.임을 알 수 있다.

Fig. 21는 입도 100mesh 이하, 물의 공급량 8L/min.에서 시료의 급광량(Feed rate)이 비중선별 실험에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 급광량을 200g/min.에서 350g/min.까지 변화하며 실험한 결과이다. 실험 결과 정광의 TiO_2 의 품위는 시료의 급광량 200g/min.과 250g/min.에서는 44.97%, 44.93%로 거의 변화가 없지만, 급광량 300g/min.과 350g/min.에서는 각각 42.9%, 41.8%로 감소되어 시료의 급광량이 250g/min.보다 많아지면 TiO_2 의 품위는 감소함을 알 수 있다. 반면 회수율은 시료의 급광량을 증가 시킬수록 58.6%에서 63.2%로 꾸준히 증가하게 경향을 나타내었다. 이는 실험에 사용한 Shaking table의 처리용량 한계로 시료의 급광량을 250g/min. 이상으로 증가시키면 상당량의 시료가 선별되지 못하고 중광물의 회수대로 이동하기 때문이다. 따라서 시료의 급광량 변화실험 결과 TiO_2 의 품위와 회수율이 비교적 높은 250g/min.이 가장 효과적임을 알 수 있다. 이보다 시료의 급광량이 많아지면 회수율은 높으나 품위가 낮고, 시료의 급광량이 적으면 품위 및 회수율의 변화는 뚜렷하지 않고, 시료의 처리 속도만 감소되어 효과적이지 못하기 때문이다.

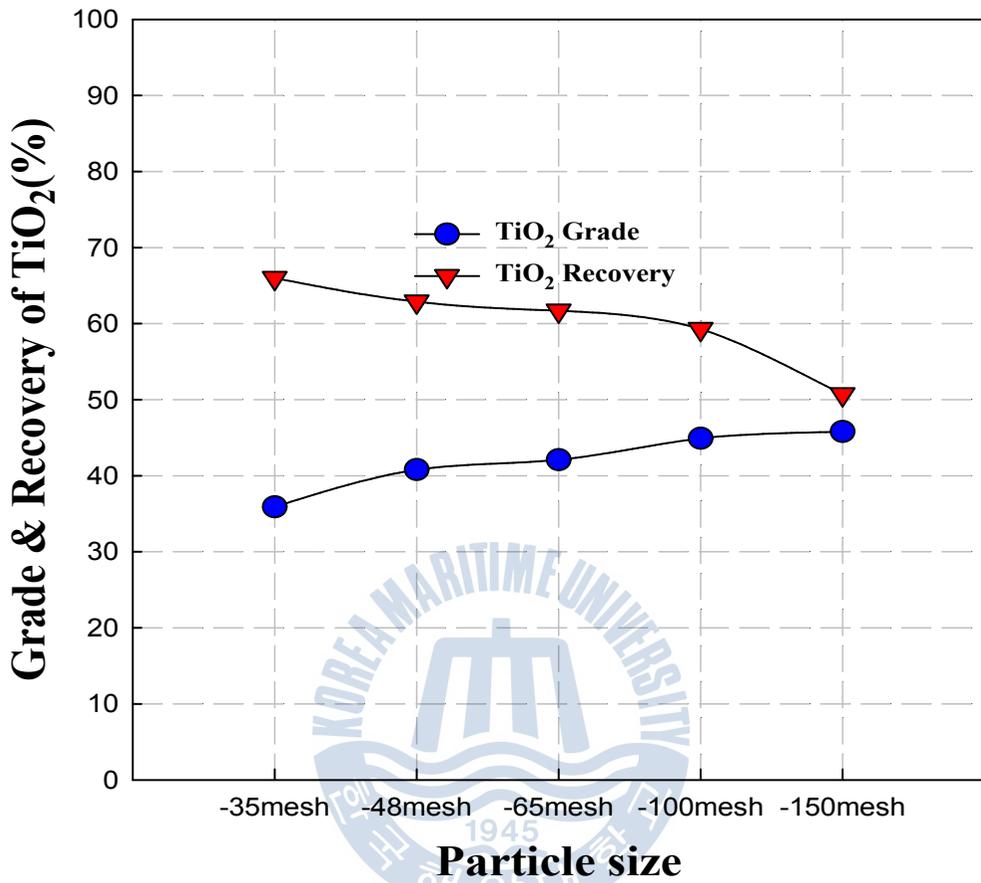


Fig. 19 Effect of particle size on TiO₂ grade & recovery in gravity separation using shaking table.

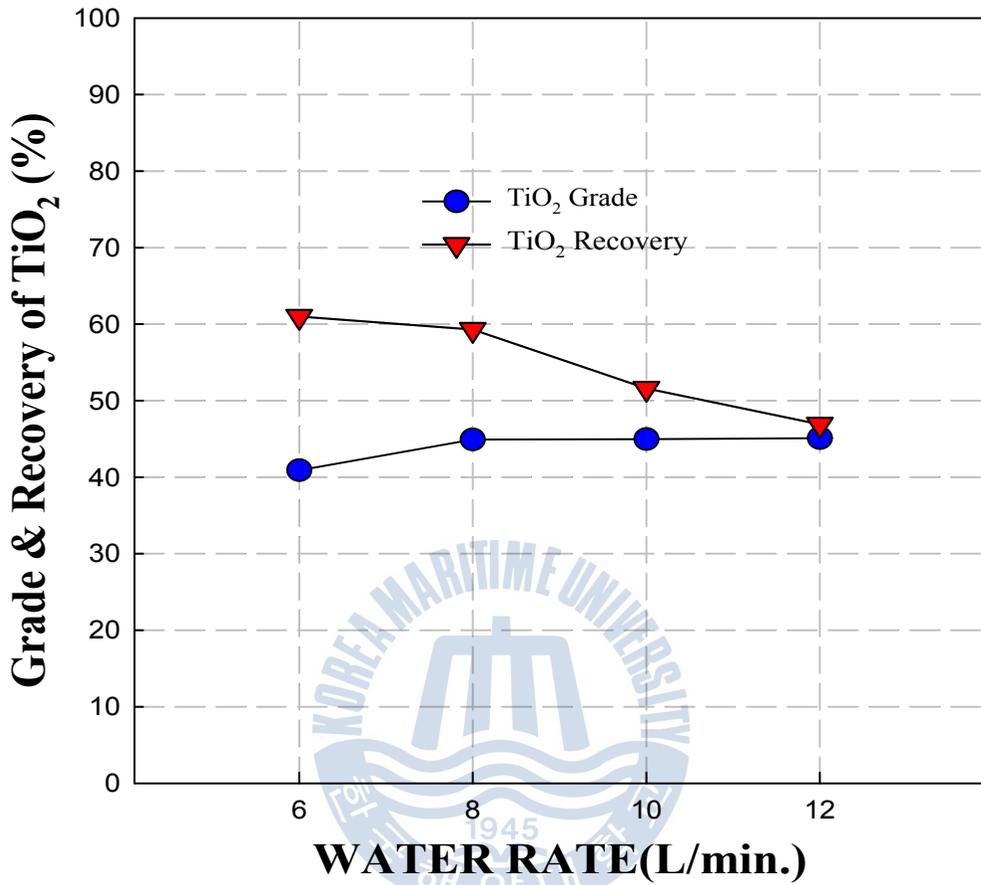


Fig. 20 Effect of water rate on TiO₂ grade & recovery in gravity separation using shaking table.

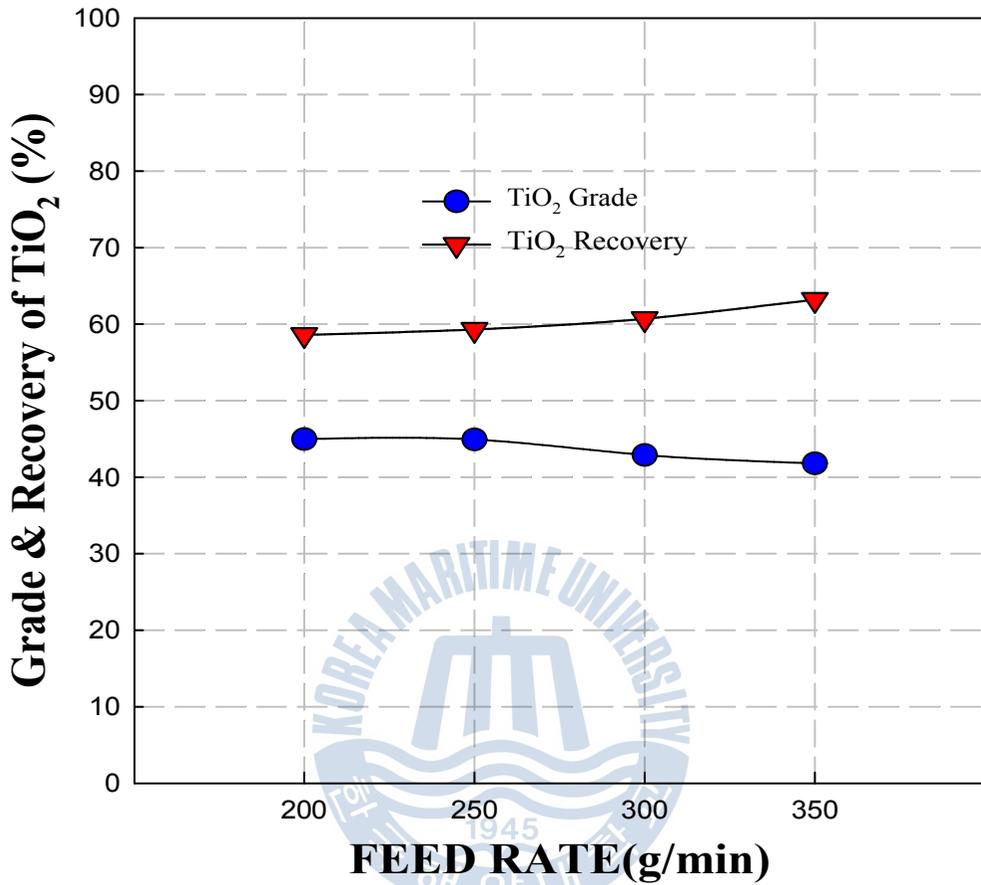


Fig. 21 Effect of feed rate on TiO₂ grade & recovery in gravity separation using shaking table.

(3) 비중선별 및 Cross belt 자력선별 병용 실험

앞선 비중선별 공정에서 경광물을 다량으로 제거하여 TiO_2 의 품위를 44.93%까지 향상시켰으나 아직까지 제련용으로 사용하기에는 품위가 낮다. 이는 티타늄의 근원광물인 티탄철석과 비슷한 비중을 가진 광물들이 원광 내에 존재하여 비중선별로 이들을 제거하기에는 한계가 있기 때문이다. 이들 맥석광물은 티탄철석과 자화율은 다르지만 자성을 띄고 있다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 자력의 강도 조절이 가능한 Cross belt type의 건식 자력 선별기를 이용하여 티탄철석과 기타 맥석광물에 대한 선별 실험을 수행하였다. 이 때 사용된 시료는 비중선별에서 회수된 Heavy minerals(44.93 TiO_2 %)산물을 85℃에서 건조시킨 시료를 사용하였으며, 최적 조건을 도출하기 위해 Feed rate, Magnetic intensity를 변화시켜 실험하였다.

Fig. 23는 비중선별에서 회수된 Heavy 산물을 1000Gauss에서 5000Gauss까지 변화시키면서, 자장의 세기가 TiO_2 의 품위와 회수율의 향상에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 자장의 세기가 가장 작은 1000Gauss에서 TiO_2 의 품위와 회수율은 각각 17.6%, 12.6%로 낮다. 이는 자장의 세기가 매우 약해 TiO_2 의 근원광물인 티탄철석 외에 강자성체가 회수되었기 때문이다. 자장의 세기를 점차 증가시켜 3000Gauss에서는 TiO_2 의 품위와 회수율이 각각 50.3%, 49.1%를 나타내었다. 이는 3000Gauss에서 티탄철석이 자화되어 자성산물로 회수되기 때문이다. 자장의 세기를 4000Gauss이상으로 증가시키면 티탄철석 이외에 Garnet을 비롯한 기타 함철 광물들이 티탄철석과 함께 자화되어 회수되기 때문에 TiO_2 의 품위는 감소하고 회수율은 증가하는 경향을 나타낸다. 각 전압에서 생산된 산물은 XRD 분석을 통해 규명하였다. 따라서 티탄철석만을 회수하기 위해서는 자장의 세기를 2000Gauss로 하여 Magnetite등의 강자성체를 제거한 후, Non-magnetic 시료를 다시 3000Gauss로 재선별 하여야한다.

Fig. 24는 급광속도가 TiO_2 의 품위와 회수율에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 급광량이 25g/min. 이상으로 증가 할 경우 TiO_2 의 회수율은 증가하지만 품위는 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 Cross belt 자력선별기의 처리용량 한계로 자성산물이 자화 되어 이동할 때, 비자성 산물이 함께 응집되어 자성산물 회수대로 이동했기 때문이라 판단된다. 20g/min. 이하로 자력선별기를 운용할

경우 TiO_2 의 품위와 회수율의 뚜렷한 변화 없이 시료의 처리속도만 늦어지므로 최적의 급광속도는 20g/min.으로 선정하였다.



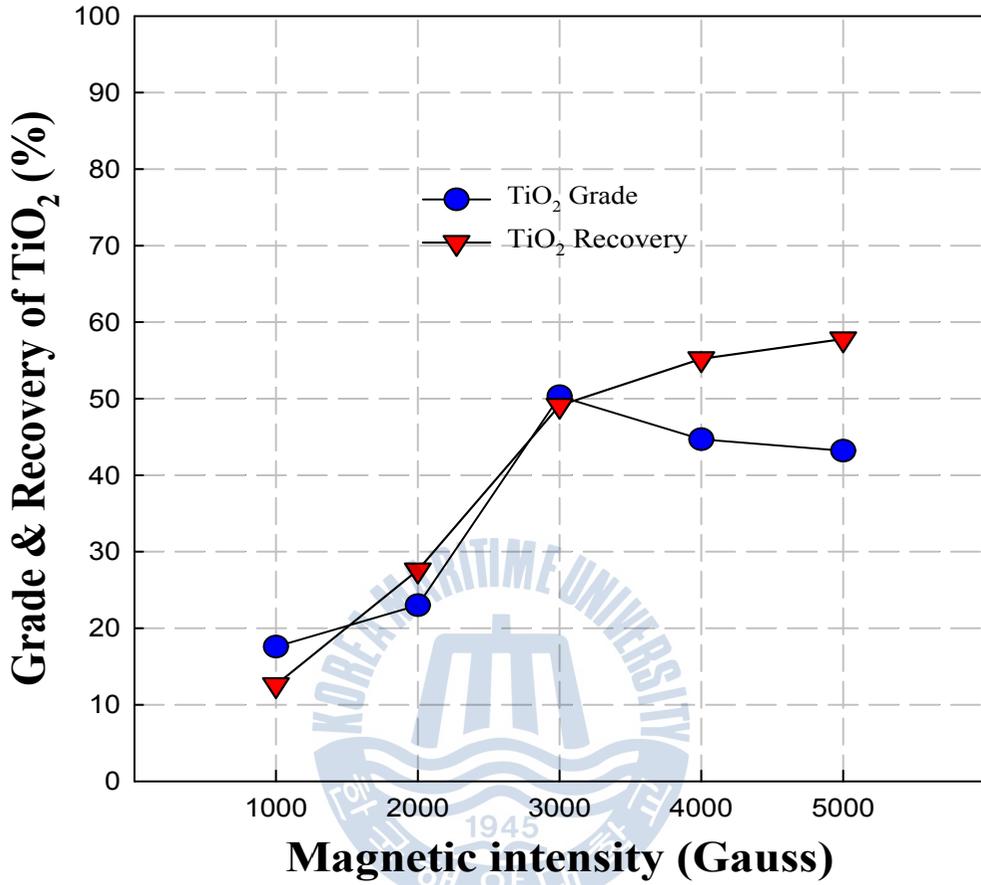


Fig. 22 Effect of magnetic intensity on TiO₂ grade & recovery in dry magnetic separation using cross belt type manetic separator.

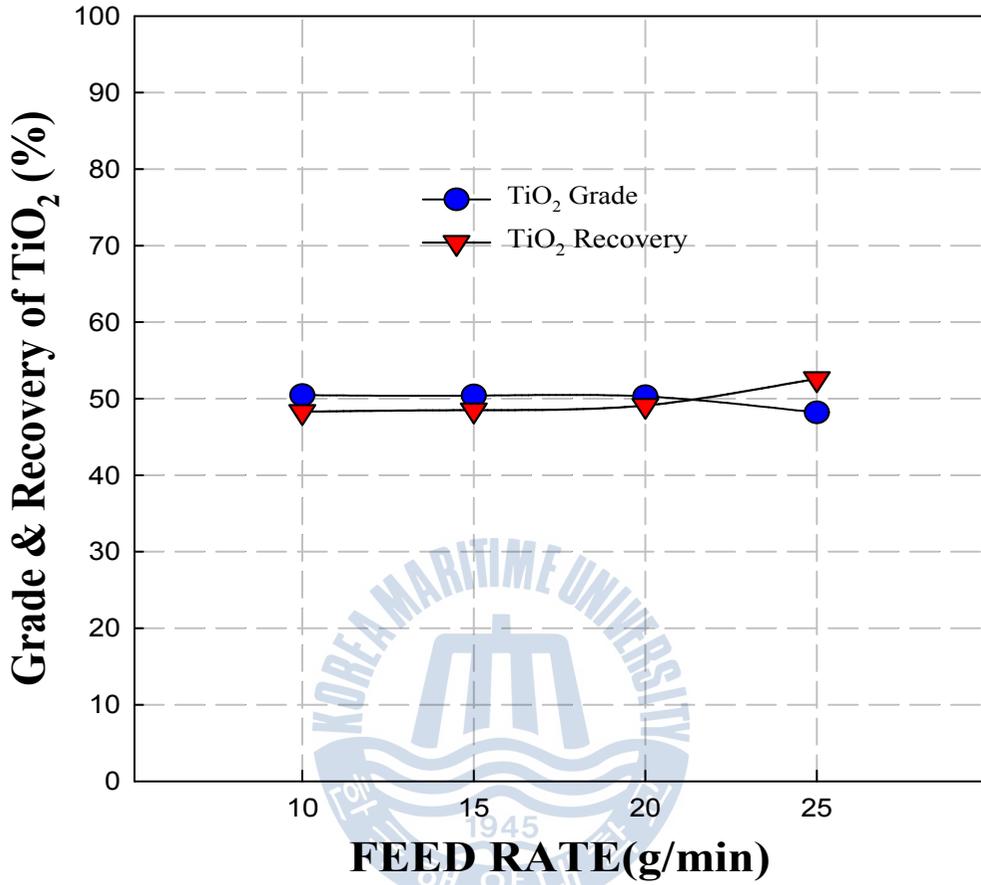


Fig. 23 Effect of feed rate on TiO₂ grade & recovery in dry magnetic separation using cross belt type manetic separator.

(4) 최종 공정

Fig. 25는 앞서 연구한 각 공정별 최적 조건들을 종합하여 하동 티탄철석 활용을 위한 최적 처리공정을 나타낸 것이다. 먼저 조크러셔와 콘크러셔를 파쇄한 후 체를 이용하여 5mm 이하의 입도로 제조하였다. 제조된 시료를 영구자석 자력선별기(High magnetic separator, 8000Gauss)를 이용하여 비자성 맥석광물(Tailling 1)을 제거 하였다. 실험 조건은 입도 -5mm, Roll speed 150RPM, Splitter position 2이었다. 그 다음 회수된 자성 산물을 로드밀을 이용하여 100mesh 이하의 입도로 제조한 후, Shaking table을 이용하여 Water rate 8L/min. Feed rate 250g/min.의 조건에서 비중선별을 실시하여 Heavy minerals 와 Light minerals을 회수하였다. 또한 TiO_2 의 품위 향상을 위해 cleaning을 1회 실시하였다. 이 때 회수한 Rouhger conc.를 대상으로 아직도 제거 되지 않은 티탄철석과 비중은 비슷하지만 자화율이 다른 맥석광물들을 제거하기 위해 전압변화가 가능한 Cross belt type 자력선별기를 이용하여 전압세기 2000Gauss Feed rate 20g/min.의 조건에서 Magnetite를 비롯한 강자성체를 제거하였다. 그 뒤, Non-magneitc 시료를 대상으로 전압세기 3000Gauss, Feed rate 20g/min.의 조건에서 티탄철석을 회수하였다. 이 때 회수한 정광의 TiO_2 품위 및 회수율은 50.3%, 49.1% 이었다. Fig. 26는 자력선별에서 회수된 각 산물들에 사진이다. Fig. 27은 XRD 감정결과를 나타내었다.

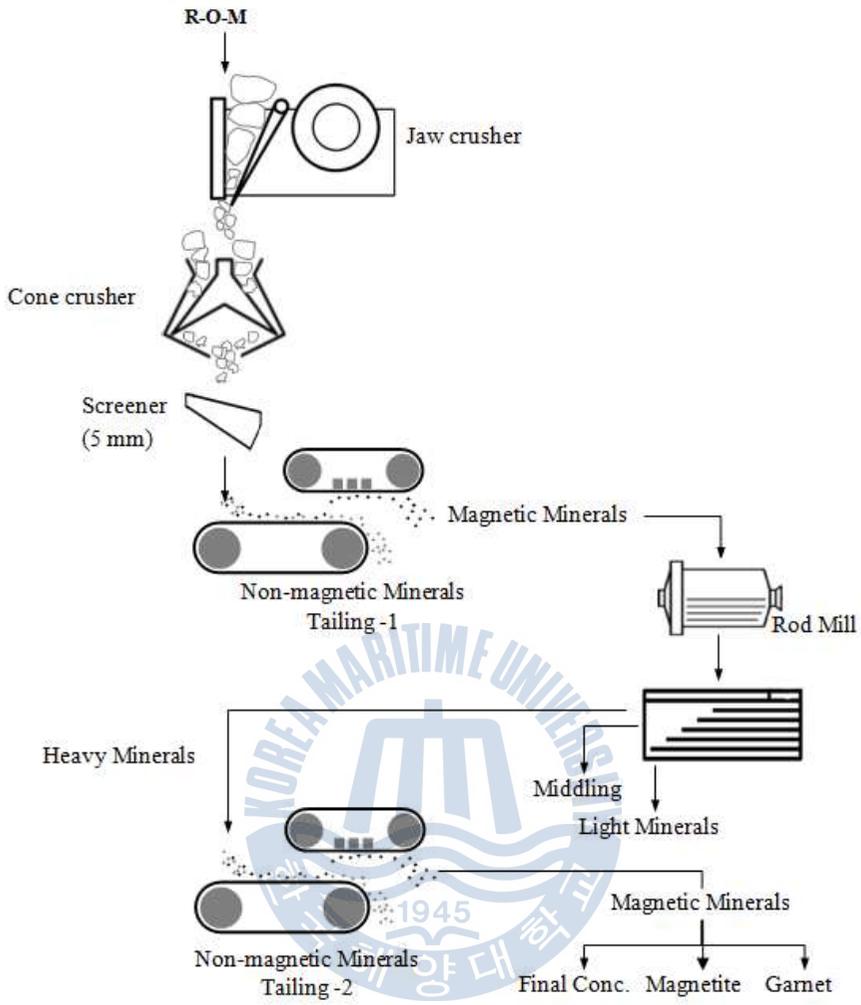


Fig. 24 Final process using Gravity, Magnetic separation for recovery of Ilmenite concentrate.

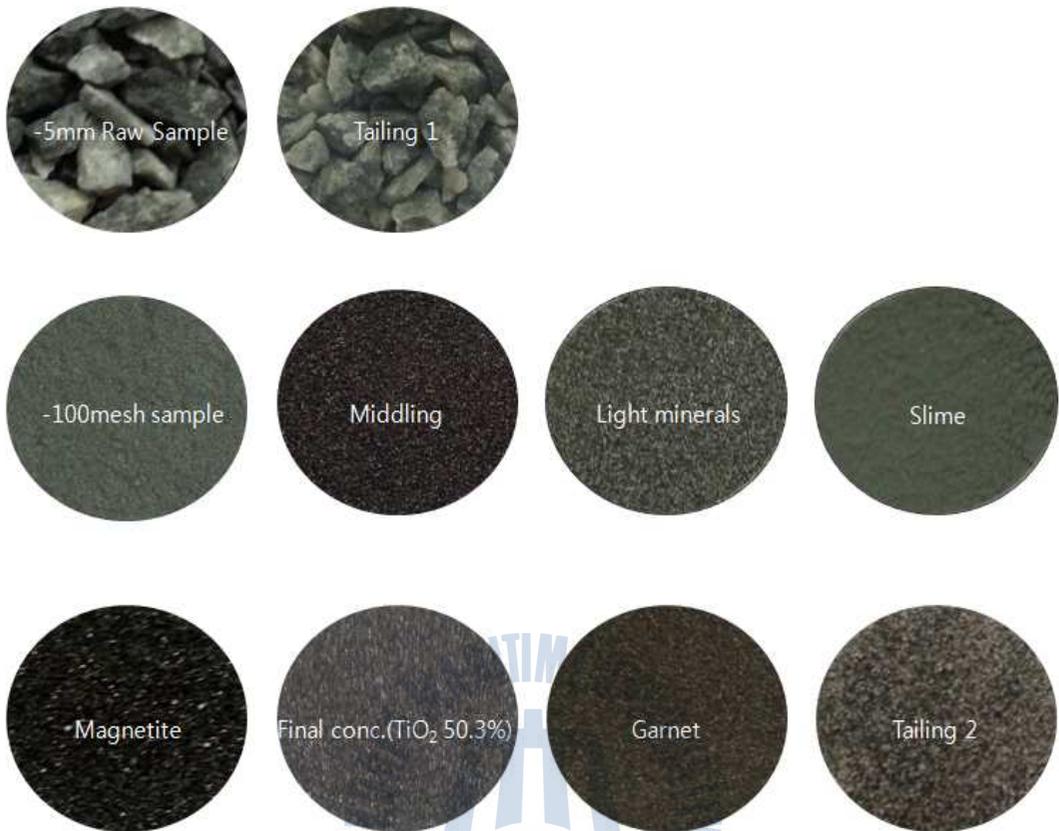


Fig. 25 Photos of products recovered apply final process.

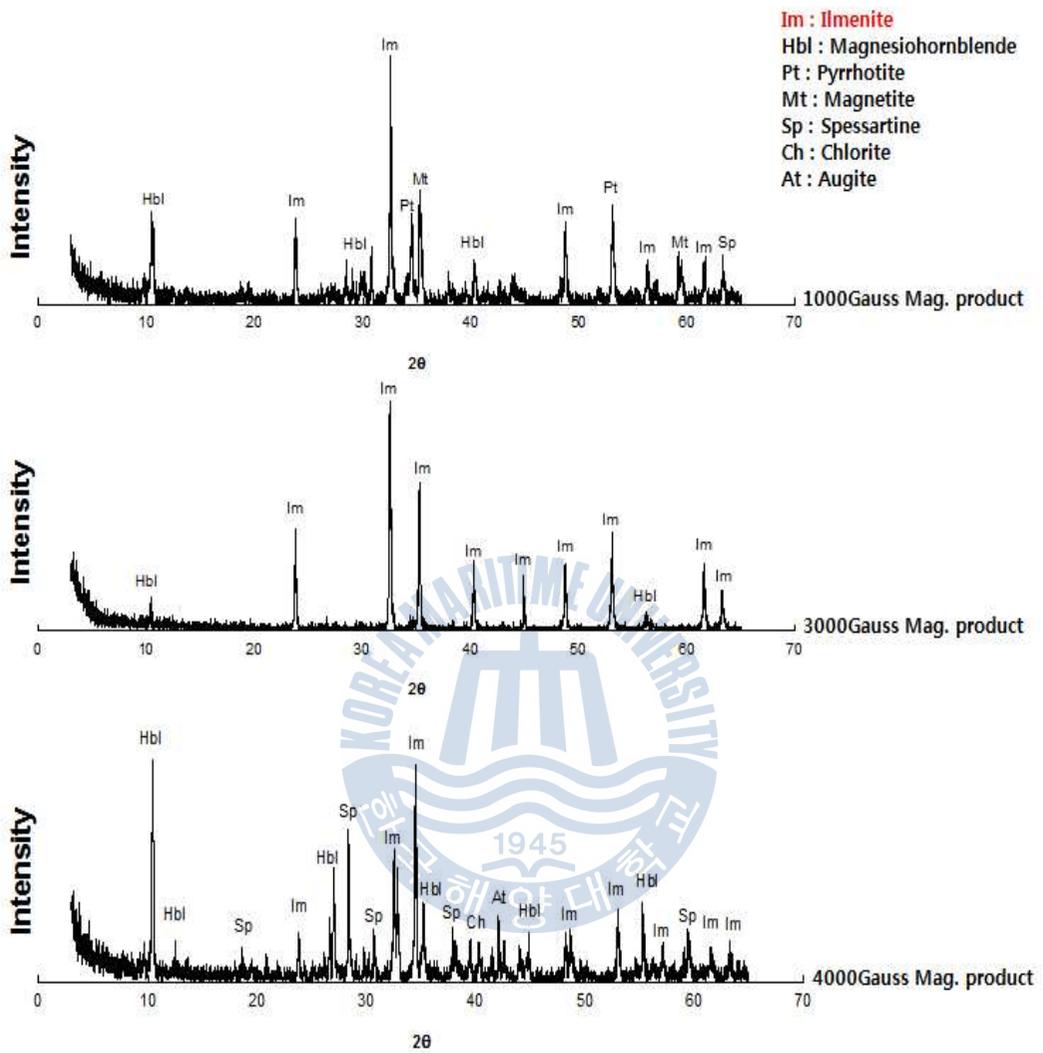


Fig. 26 XRD analysis of products separated by final process.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 경상남도 하동군 옥종면 지역에 대량으로 매장되어 있는 저품위 티탄철석을 대상으로 제련용 고품위 티탄철석 정광을 생산할 수 있는 선별 기술을 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 티탄철석과 맥석광물들의 광물학적 특성을 연구하여 자력선별, 비중선별의 각 단일별 최적 선별기술을 확립한 다음, 이들 중 선별 효율이 우수한 처리법만을 조합한 혼합선별 공정을 개발하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 티탄철석 원광에 대한 광물감정 및 화학 분석 결과, 티타늄의 근원광물은 티탄철석(Ilmenite, FeTiO_3) 이었으며, 주요 맥석광물은 석영 (Quartz, SiO_2), 녹니석(Chlorite, $(\text{Mg,Fe})_5(\text{Al,Fe})_5\text{Si}_{10}(\text{OH})_8$), 조장석(Albite, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), 투섬석(Tremolite, $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)와 마그네슘 그룹의 각섬석(Magnesiohornblende, $\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg,Fe})_4(\text{Al,Fe,Ti})_5\text{Si}_6\text{O}_2(\text{OH,F})_2$)이다. 또한 원광 XRD 분석에서 확인 되지 않았으나 실험 산물을 통해 Garnet, Magnetite의 불순물도 확인되었다.

2) 굵은 입도에서 일부의 비자성 광물을 제거하기 위한 건식 영구자석 선별 실험 결과, 입도-5mm, Roll speed 150RPM, Splitter position 2의 조건에서 회수된 산물의 TiO_2 의 품위 및 회수율은 각각 10.4%, 98.4% 였다. 회수된 산물의 품위는 낮지만, 회수율이 98% 이상으로 높고, 30%이상의 맥석 광물을 굵은 입도에서 제거 할 수 있었다. 본 기술을 선별공정도에 적용 할 경우 분쇄비용의 절감과 2차 선별의 처리용량 증대로 처리 단가를 줄일 수 있을 것이라 생각된다.

3) 하등 티탄철석에 대한 광물감정 결과 맥석 구성광물의 대부분이 함철 규산염 광물임이다. 비중선별법이 가장 선별효율이 크다고 판단된다. Shaking table을 이용하여 비중선별 실험결과 100mesh 이하로 제조된 입도를 기점으로 이보다 입도가 작아져도 TiO_2 의 품위는 뚜렷하게 증가되지 않는다. 게다가 비중선별로 회수하기 어려운 Slime이 다량으로 발생하여 회수율은 큰 폭으로 감소한다. 따라서 품위 및 회수율을 고려하여 100mesh 이하 입도를 최적 실험 조건으로 정하였다.

4) 100mesh 이하의 시료를 대상으로 Shaking table의 최적 조건을 규명하기 위해 Water rate, Feed rate 변화 실험을 하였으며, Water rate 8L/min., Feed rate 250g/min., Cleaning time 1회의 조건에서 TiO_2 의 품위 및 회수율은 44.93%, 59.3%의 결과를 얻었다.

5) 티탄철석과 비중은 비슷하지만 자화율이 다른 맥석광물을 제거하기 위해 비중선별 정광 산물을 대상으로 자장의 세기 변화가 가능한 Cross belt 자력선별기를 이용하여 자화율이 다른 맥석을 제거하기 위한 실험을 하였다. 실험결과 최적 자장세기는 2000~4000Gauss 이었으며, Feed rate는 선별기의 처리용량의 한계로 20g/min. 이 가장 적절하였다. 이때 TiO_2 의 품위 및 회수율은 50.3%, 49.1% 이었다.

6) 자장의 세기에 따라 각각 회수된 산물의 XRD 광물 감정 결과 1000~2000Gauss에서 Magneite를 비롯한 강자성체가 자화 되었으며, 2000~3000Gauss에서 본 연구의 목적광물인 티탄철석이 비교적 깨끗하게 자화 되어 회수되었다. 그리고 4000~ 5000Gauss에서는 미처 자화되지 못한 티탄철석 및 Garnet, Hornblende 등이 자화됨을 확인하였다.

7) 본 연구에서 생산한 티탄철석의 정광은 50.3% TiO_2 로 목표 품위를 만족

하였다. 하지만 비중선별 공정에서 TiO_2 의 손실이 많아 회수율이 49.1%로 낮아
향후 회수율 향상을 위한 연구가 필요할 것이라 생각된다.



제 7 장 참고문헌

한국자원정보서비스 홈페이지. (<http://www.kores.net/>)

양정일 등, 2001. *하동지역 티탄철석의 선광 및 활용 경제성 연구 최종보고서*, 산업자원부

환경부, 2002. *귀금속 광산폐기물로부터 유가자원 회수기술 개발 연구*, 환경부

김형석 등, 2008. 필리핀 만카얀 지역 금·은 광석의 비중선별 특성, *한국광물학회지*, 21(4), pp.383-395

강헌찬 등, 1991. 화강암에서 석류석의 선별, *한국자원공학회지*, 28, pp.366~374

정지곤, 송무영, 1990. 하동군 옥종면 회장암질에 배태된 티타늄광체에 대한 지구 물리탐사, *Journal. Korea Earth Science Society*, 11(2), pp.111-119

정재성 등, 2010. 원생대 하동회장암체 내 철-티탄 광체의 산상과 변형. *암석학회지*, 19(1), pp.31-49

이종만 등, 1999. 하동지역 회장암질암의 진화 및 함티타늄광체와 성인적 관련성에 대한 예비연구. *지질학회지*, 35(4), pp.321-336

Andrew falconer, 2003. Gravity separation : old technique/new methods. *Physical Separation and Engineering*, 12(1), pp.31-48

- W.A.P.J. Premaratne and N.A. Rowson, 2003. The processing of beach sand from SRI LANKA for the recovery of titanium using magnetic separation. *Physical Separation and Engineering*, 12(1), pp.13-22
- N.C. Kothari, 1974. Recent developments in processing ilmenite for titanium. *International Journal of Mineral Processing*, 1, pp.287-305
- Tegist Chernet, 1999. Mineralogical and textural constraints on mineral processing of the Koivusaarenneva ilmenite ore. *International Journal of Mineral Processing*, 57, pp.153-165
- Jan Drzymala and Andrzej Luszczkiewicz, 1985. Microlaboratory study on magnetic, gravity and high-tension separation of hercynite and pleonaste from low-grade ilmenite concentrates. *International Journal of Mineral Processing*, 14, pp.233-238
- R.C Behera and A.K. Mohanty, 1986. Beneficiation of massive ilmenite by forth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 17, pp.131-142
- G. Belardi, et al., 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
- John King, et.al., 1982. A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials : some results from lake sediments. *Earth and Planetary Science Letter*, 59 pp.404-419
- Adam Jordens, et al., 2013. Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation. *Minerals Engineering*, xxx pp.xxx-xxx
- M. Dobbins, et al., 2007. A discussion of magnetic separation techniques

for concentrating ilmenite and chromite ores. *Minerals Processing, Physical Separation*

Z. Cui, et al., 2002. Magnetic properties of ilmenite, hematite and oilsand minerals after roasting. *Minerals engineering*, 15, pp.1121-1129

Zhang Xiaolin, et al., 2011. Study on influence of residual magnetite in Panzihua ilmenite flotation, *Procedia Earth and Planetary Science*, 2, pp.83-88

N. Babu, et al., 2009. Recovery of ilmenite and other heavy minerals from Teri sands(Red sands) of Tamil Nadu, India. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 8(2), pp.149-159



감사의 글

대학원에 입학하여 해양에너지자원공학과 의 학생으로써 희망과 열정으로 시작했던 대학원 석사과정도 이 논문과 함께 마무리가 되었습니다. 2년이란 시간동안 정말 많은 관심과 도움을 받아왔습니다. 부족한 제가 이렇게 결실을 이루게 도와주신 많은 분들에게 감사의 마음을 전하려 합니다.

가장 먼저 부족한 저를 석사 논문이라는 결실과 항상 배움의 길로 인도하시어 늘 탐구하는 자세로 일깨워 주신 지도교수 유경근 교수님께 머리 숙여 진심으로 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 교수님께 배워온 몰입, 탐구의 마음을 잊지 않고 어느 곳의 어느 위치에 있든, 늘 부끄럽지 않은 제자가 되도록 항상 노력하겠습니다.

2년간의 연구소 생활을 통해 제게 귀감이 되어 주신 전호석 박사님의 지도와 가르침을 통해 석사학위 과정을 무사히 마치게 되었습니다. 어쩌면 학부생으로 학업을 멈출 수도 있었던 시기에 저에게 용기를 북돋아 주시고 격려를 해주시며 석사까지 할 수 있도록 지도해주신 은혜 잊지 않겠습니다. 그리고 석사생활을 하는 동안 많은 관심으로 지도해 주신 양정일 실장님, 조성백 박사님, 정수복 박사님, 김형석 박사님, 김상배 박사님, 김완태 박사님, 유광석 박사님, 이 훈 박사님, 김관호 박사님, 서주범 박사님께 감사 인사 드립니다.

힘들면 같이 소주잔을 기울이며 동생의 고민을 들어준 상호형, 응모형, 기석이형, 민철이형, 선희누나, 슬기누나, 남희누나, 현승이형, 동현이형, 다와수레형 의 따뜻한 관심과 배려도 잊을 수 없습니다. 그리고 2년간 같은 공간에서 때론 힘든 일도 마다하지 않고 도와준 수강이, 은선이, 희경이, 다와더르츠, 준형이, 용진이, 민규, 종근이, 상진이, 원종이와 함께 했던 지난 시간들을 소중히 간직하겠습니다. 또한 학교에서 생긴 일을 바로바로 가르쳐

주던 경배, 오혁이, 용훈이, 영목이에게도 고맙다는 말을 전합니다.

무엇보다 못한 자식 한 글자라도 더 배우도록 늘 관심을 갖고 지켜봐 주시며, 사랑을 아낌없이 주신 아버지, 어머니 정말 감사합니다. 늘 사랑을 받기만 했던 아들이지만, 이제는 제가 받은 사랑을 조금이나마 돌려 드리고 싶습니다. 아버지, 어머니 정말 사랑합니다. 그리고 항상 나에게 따뜻한 관심과 배려를 해주었던 누나들 정말 감사하고 사랑합니다.

이밖에 너무나도 감사의 말을 전하고 싶은 사람이 많지만 이름 하나하나 되새기지 못한 점 죄송하게 생각하며 관심으로 지켜 봐주셨던 모든 분들께 훗날 부끄럽지 않은 모습으로 찾아 뵐 수 있도록 최선을 다하겠습니다. 감사합니다.



2014년 1월

이 광 훈