J. of Korean Inst. of Resources Recycling
Vol. 28, No. 5, 2019, 68-73
https://doi.org/10.7844/kirr.2019.28.5.68
pISSN : 1225-8326 eISSN : 2287-4380

≫ 연구논문 ≪

타이타늄 철석으로부터 염산 침출에 의한 고순도 이산화 타이타늄 회수

안형훈 · §이만승

목포대학교 공과대학 신소재공학과

Recovery of High Purity TiO_2 Powder from Ilmenite by Hydrochloric Acid Leaching

Hyeong Hun Ahn and §Man Seung Lee

Department of Advanced Material Science & Engineering, Institute of Rare Metal, Mokpo National University, Chonnam 534-729, Republic of Korea

요 약

타이타늄 철석은 이산화 타이타늄 제조를 위해 사용되는 주요 광석 중 하나이다. 순도 99.9% 이상의 이산화 타이타늄 제조를 위해, 타이타늄 철석에 존재하는 철(III), 규소(IV) 그리고 망간(II)과 같은 불순물로부터 타이타늄(IV)을 분리해야 한다. 본 논문에서는 타이타늄 철석으로부터 염산 침출 및 고순도 타이타늄(IV) 용액으로부터 가수분해를 통해 고순도 이산화 타이타늄 습식 제련 공정을 조사했다. 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV) 그리고 망간(II)의 침출률에 대한 염산 농도, 광액농도 그리고 침출 시간에 따른 영향에 대해 조사했고 최적 침출 조건을 얻었다. 타이타늄(IV)을 가수분해하기 위한 중화제로 수산화암모늄 및 수산화나트륨 용액을 사용했다. 수산화 암모늄 용액으로 가수 분해된 침전물을 소성하여 아나타제상의 이산화 타이타늄을 얻었다. 타이타늄 철석으로부터 고순도 이산화 타이타늄 분말 제조를 위한 습식 제련 공정이 개발 가능하다.

주제어 : 타이타늄 철석, 이산화 타이타늄, 침출, 염산, 가수분해

Abstract

Ilmenite is one of the principal ores for the production of titanium dioxide. To produce titanium dioxide with purity higher than 99.9% from ilmenite, Ti(IV) should be separated from the dissolved impurities such as Fe(III), Si(IV), and Mn(II) present in ilmenite. In this work, a hydrometallurgical process was investigated to recover pure titanium dioxide from ilmenite by HCl leaching followed by separation and hydrolysis of Ti(IV). An optimum leaching condition was obtained by investigating the effect of HCl concentration, pulp density, and leaching time on the leaching percentage of Ti(IV), Fe(III), Si(IV), and Mn(II). Ammonium hydroxide and sodium hydroxide solutions were employed as neutralizing agents to hydrolyze Ti(IV) from the stripping solution of Ti(IV). Titanium dioxide of the anatase phase was obtained by calcination of the hydrolyzed precipitates with NH_4OH solution. A hydrometallurgical process can be developed to produce pure TiO_2 powders from ilmenite.

Key words : Ilmenite, TiO_2, Leaching, HCl, Hydrolysis

· Received : September 30, 2019 · Revised : October 11, 2019 · Accepted : October 18, 2019

§ Corresponding Author : Man-Seung Lee (E-mail : mslee@mokpo.ac.kr)
Department of Advanced Materials Science & Engineering, Mokpo National University, 1666 Yeongsan-ro, Cheonggye-myeon, Muan-gun, Chonnam 58554, Korea

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

1. 서 론

타이타늄은 지각의 약 0.6%를 차지하고 있으며, 9번째로 풍부한 원소이다. 대표적인 타이타늄 원광석으로는 타이타늄 철석(40 ~ 80% TiO_2, Ilmenite), 금홍석(>95% TiO_2, Rutile), 예추석(>95% TiO_2, Anatase), 백 티탄석(>65% TiO_2, Lucoxene)이 있다[1]. 이러한 타이타늄 원광석 중 타이타늄 철석이 타이타늄 제련에 주 원료로 사용된다. 타이타늄 철석은 검은색을 띠고 육방정계의 결정형을 가지며 불순물로 마그네슘, 망간, 바나듐, 네오디뮴, 철을 포함한다[1-3].

타이타늄 철석의 제련을 위해 다양한 방법이 연구됐다[1,4-8]. 대표적인 이산화 타이타늄 제조 공정은 황산염 공정 또는 염화물 공정이 있다[1,5]. 황산염 공정은 타이타늄 함유량이 낮은 타이타늄 슬래그(72 ~ 87% TiO_2) 또는 타이타늄 철석을 원료로 한다. 하지만 제련 후 황산철과 같은 다량의 불순물이 포함된 폐기물이 발생하고 제조된 이산화 타이타늄의 순도가 낮은 단점이 있다[1,6]. 염화물 공정은 황산염 공정에 비해 상대적으로 적은 폐기물을 발생시키고 고순도의 이산화 타이타늄을 제조할 수 있다. 하지만 염화물 공정은 적어도 95%의 순도를 지닌 금홍석이 필요하다[6]. 따라서 이러한 단점을 극복하고 저품위의 타이타늄 원광으로부터 고순도의 이산화 타이타늄을 생산할 수 있는 새로운 제련 공정이 요구된다.

본 논문에서는 저품위 타이타늄광인 타이타늄 철석으로부터 고순도 이산화 타이티늄을 회수하기 위해 염산에 의한 습식공정을 연구했다. 타이타늄 철석은 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV), 망간(II)을 함유하고 있다. 침출 용액의 조성은 목적 성분의 고순도화를 위한 분리 방법 및 조건에 큰 영향을 미친다. 따라서 염산 침출시 염산 농도, 광액농도, 침출 시간에 따른 타이타늄 및 기타 성분의 침출 거동을 조사했다. 타이타늄 철석의 염산 최적 침출 조건에서 얻은 침출액에 아민계 추출제로 철(III)을 분리한 다음 산성추출제로 타이타늄(IV)를 분리하면 고순도 타이타늄 용액을 얻을 수 있다[9]. 본 논문에서는 용매 추출로 분리한 타이타늄(IV)을 가수분해하여 이산화 타이타늄을 제조하고 그 특성을 조사했다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

본 연구에서는 사용한 타이타늄 철석의 성분과 조성은 XRD (X-Rray Dffractometer, Panalytical B.V. EMPYREAN)와 XRF (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer, Hitachi EA1200VX)로 분석하고 그 결과를 Fig. 1과 Table 1에 나타냈다. 염산 침출액의 농도는 염산(35%, Daejung Chemical & Metals Co., Ltd)을 2차 증류수에 첨가해 준비했다. 이산화 타이타늄 가수분해 실험에서는 타이타늄(IV) 탈거 용액의 pH를 조절하기 위해 수산화암모늄(25%, Daejung Chemical & Metals Co., Ltd)과 수산화나트륨(97%, Daejung Chemical & Metals Co., Ltd)를 사용했다.

2.2. 실험 방법

타이타늄 철석의 염산 침출 실험에서 250 mL flat-bottom glass 반응기를 사용했다. 침출 온도 및 반응시간은 자력 교반기를 사용해 조절했고, 침출 후 잔여물과 침출액을 여과지(Advantec No.2: 110 mm, pore size : 5 um)로 여과 했다[10,11]. 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV), 망간(II)의 침출률은 침출액에 존재하는 금속 농도 측정값으로부터 물질 수지로 계산했다. 침출액에 존재하는 금속 농도는 ICP-OES (Inductive Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Spectro arcos

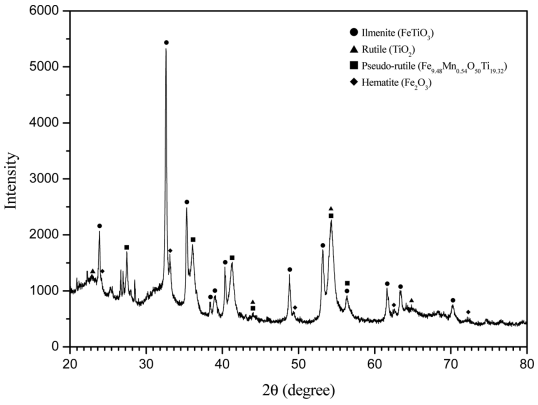

Fig. 1. XRD patterns for ilmenite ore.

Table 1. Chemical compositions of the ilmenite employed in this work

Element	Ti	Fe	Si	Mn	Etc. (Cr, V, Ca, Sn, Nb, Zn)
wt%	46.7	44.8	3.5	1.9	3.1

FHE 17 model)로 측정했다. 타이타늄(IV) 가수분해 실험를 위해 250 mL 비커에 타이타늄(IV) 탈거 용액 100 ml를 넣고 수산화암모늄이나 수산화나트륨을 사용해 용액의 pH를 조절했다. 가수분해 반응에 의해 형성된 침전물을 여과한 다음 2시간동안 건조시키고 800℃에서 5시간 동안 하소했다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 염산 용액에서 타이타늄 철석의 침출 반응

타이타늄 철석은 산화 제 1철 과 이산화 타이타늄이 주성분으로 철(II)은 마그네슘이나 망간으로 치환될 수 있다[12-14]. 타이타늄 철석은 자연적인 변형으로 인해 단계적으로 유사 금홍석을 걸쳐 금홍석 및 헤마타이트로 변형된다[14]. 타이타늄 철석의 변형은 함유하고 있는 제 1철 과 2철 비율에 따라 영향을 받는다[14]. Fig. 1에 의하면 본 실험에서 시료로 사용한 원광은 타이타늄 철석($FeTiO_3$, Ilmenite), 금홍석(TiO_2, Rutile), 유사 금홍석($Fe_{9.48}Mn_{0.54}O_{50}Ti_{19.32}$, Pseudo-rutile), 헤마타이트($Fe_2O_3$, Hematite)로 구성되어 있다. 타이타늄 철석과 헤마타이트의 염산용액에 의한 침출 반응을 식 (1)과 (2)에 나타냈다[5,15,16].

$$FeTiO_3 + 4HCl = TiOCl_2 + FeCl_2 + 2H_2O \quad (1)$$

$$Fe_2O_3 + 6HCl = 2FeCl_3 + 3H_2O \quad (2)$$

타이타늄 철석의 침출 반응 속도는 침출 용액에 존재하는 수소 이온의 확산과 미반응 타이타늄 철석으로부터 생성되는 타이타늄(IV)과 철(II)의 확산 속도 영향을 받는다[15]. 수소이온의 크기는 타이타늄(IV) 과 철(II) 이온보다 작기 때문에 수소이온의 확산 속도는 타이타늄(IV) 그리고 철(II)의 확산 속도보다 빠르다[15]. 따라서 미반응 타이타늄 철석으로부터 생성되는 타이타늄(IV)과 철(II) 이온의 확산 속도가 전체 침출 반응 속도에 큰 영향을 미친다[15]. 염산 용액에서 타이타늄 철석의 침출 반응은 수축핵 모델과 잘 일치하며 이때 활성화 에너지는 17 kJ/mol^{-1}이다[17].

타이타늄 철석에서 철은 제 1철과 2철로 존재한다. 따라서 염산용액에 침출시 식 (1)과 (2)반응에 의해 각각 철 2가 이온과 3가 이온으로 침출될 수 있다. 본 논문에서 광액농도 1%, 침출 온도 70 ℃, 9 M 염산 용액에서 침출후 염산 침출 용액에 존재하는 철 2가 이온의 농도를 페난트로린법을 통해 측정했다[18]. 측정 결과 본 논문의 실험조건에서 철은 모두 3가 이온으로 존재함을 확인하였다. XRD결과에 의하면 타이타늄 철석에서 2가 철이 존재하지만 침출 과정에서 (3)반응에 의해 침출된 2가 이온이 3가 이온으로 산화되어 침출 후 용액에는 3가 이온만 존재한다고 생각된다. 산소가 용해된 수용액에서 2가 철 이온의 산화반응을 다음 식(3)에 나타냈다.

$$4\ Fe^{2+} + O_2 + 4\ H^+ = 4\ Fe^{3+} + 2\ H_2O\ \ E^o = 0.46\ V \quad (3)$$

3.2. 염산 농도에 따른 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV), 망간(II)의 침출률 변화

침출 용액 염산 농도에 따른 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV), 망간(II)의 침출거동을 조사하기 위해 염산농도를 1 M에서 9 M까지 변화시켜 실험을 수행했다. 본 실험에서 타이타늄 철석의 입도는 100 mm 이하로 고정했다. 침출 온도 80℃ 이상 고온에서 침출시 타이타늄은 가수분해 반응으로 인해 침출률이 저하될 수 있다[6]. 따라서 본 실험에서는 침출 온도를 70℃로 고정했다. Fig. 2에 따르면 타이타늄(IV), 철(III), 망간(II)의 침출률은 염산 농도 증가에 따라 비례적으로 증가하고, 규소(IV)의 경우 염산 농도에 무관하게 상대적으로 낮은 침출률을 보인다. Fig. 2를 보면 7 M 이상의 염산 농도에서 타이타늄(IV)의 침출률이 급격하게 증가한다. 염산농도가 7 M 이하인 용액에서는 타이타늄(IV)의 가수분해 반응등이 일어나 침출률이 저하될 수 있다[8]. 그러나 7 M 이상의 고농도 염산 용액에서는 타이타늄(IV)의 가수분해 및 침전이 억제되어 타이타늄(IV)의 침출

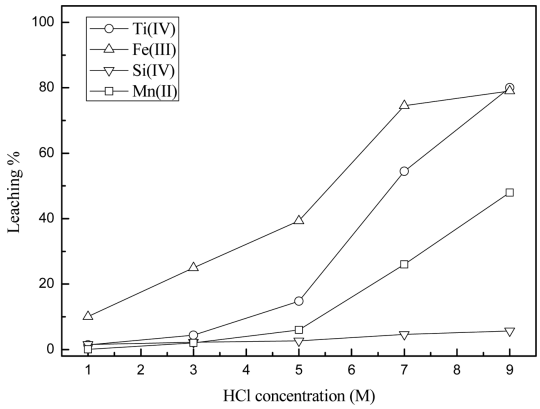

Fig. 2. Effect of HCl concentration on the leaching percentage from ilmenite. [Condition : [Pulp density] = 1%, [Temperature] = 70℃, [Time] = 5 h]

률이 증가한다[8]. 실험 결과에 따르면 염산 농도는 타이타늄(IV)의 침출률에 큰 영향을 미친다. 따라서 타이타늄(IV) 침출시 가수분해 반응을 억제하면서 타이타늄(IV)을 침출할 수 있는 최적 염산 농도를 9 M로 삼았다.

3.3. 광액농도 및 침출 시간에 따른 영향.

3.2절 결과에 따르면 9 M 염산 용액에서 타이타늄(IV) 침출률이 가장 높다. 따라서 9 M 염산 용액에서 광액농도에 따른 침출률의 변화를 조사하기 위해 광액농도를 1%에서 5%까지 변화 시켰다. Fig. 3에 따르면 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV), 망간(II)의 침출률은 광액농도가 증가함에 따라서 침출률이 감소하며 광액농도 5%에서 타이타늄(IV)의 침출률이 급격하게 감소했다. 광액농도가 증가함에 따라 반응에 참여할 수 있는 염산의 유효 농도가 감소한다. 침출용액에 존재하는 염산의 유효 농도의 감소는 타이타늄(IV)의 침출률을 감소시킴과 동시에 가수분해 반응을 촉진시킨다[8]. 실험 결과에 따르면 염산 침출 시 광액농도 1%에서 타이타늄(IV)과 철(III)이 80% 정도 침출되며, 망간은 50% 정도 침출되었다.

9 M 염산 용액에서 광액농도 1%에서 침출 시간 변화에 따른 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV), 망간(II)의 침출률 변화에 대해 조사했다. 침출 시간을 1 시간부터 5시간까지 변화시켜 얻은 실험결과를 Fig. 4에 나타냈다. 침출시간이 증가함에 따라 타이타늄(IV)을 비롯한 대부분의 성분의 침출률이 증가했다. 침출시간 1시간에서 4시간까지 타이타늄(IV), 철(III), 망간(II)의 침춤률이 급격하게 상승하고 4시간 이후 침출 반응은 거의 평

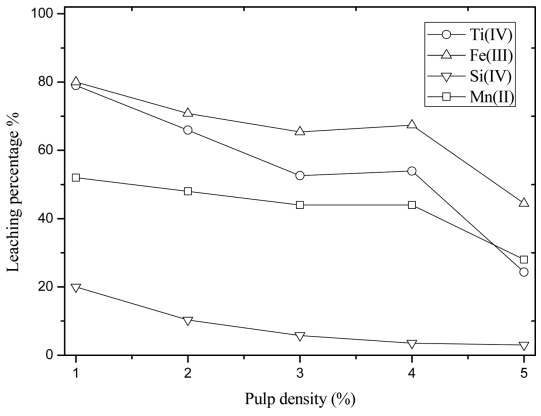

Fig. 3. The effect of pulp density on leaching percentage from ilmenite. [Condition : [HCl] = 9 M, [Temperature] = 70℃, [Time] = 5 h]

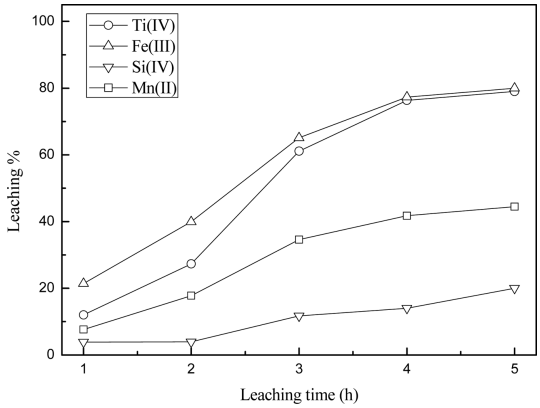

Fig. 4. Effect of leaching time on leaching percentage from ilmenite. [Condition : [HCl] = 9 M, [Pulp density] = 1%, [Temperature] = 70℃]

형에 도달했다. 따라서 본 실험에는 최적 침출 시간을 5시간으로 했다.

3.4. 타이타늄(IV) 탈거 용액으로부터 pH 조절에 의한 타이타늄(IV) 가수분해.

선행 연구에 따르면 PC88A로부터 타이타늄(IV)은 3 v/v% 과산화수소가 첨가된 2 M 황산 용액을 사용해 탈거 가능하고 탈거 용액에서 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV), 망간(II)의 농도를 Table 2에 나타냈다[9]. 본 실험에서는 타이타늄(IV)이 탈거된 용액으로부터 수산화암모늄 및 수산화나트륨을 사용해 타이타늄(IV) 가수분해 실험을 진행했다. 보통 타이타늄(IV)과 같은 산화수가 높은 금속은 수용액에서 자유 금속이온으로 존재하지 않고 가수분해를 통해 하나 또는 두 개의 산소 이온과 결합된 TiO^{2+}와 같은 옥소 금속 이온으로 존재한다[19]. TiO^{2+}는 상온에서 pH가 증가함에 따라 가수분해 반응에 의해 수소 이온을 방출하면서 $TiO(OH)_2$형태로 침전된다. 문헌에 따르면 $TiO(OH)_2$는 pH 0.5에서 4사이에서 pH가 증가함에 따라 용해도가 급격하게 감소하고 pH 4 이상 용액에서 거의 용해되지 않는다. 또한 식 (4)에 따르면 가수분해 반응후 수소 이온이 발생한다. 따라서 타이타늄(IV)의 가수분해 반응은 pH에 의존하

Table 2. The chemical composition of the stripping solution from the loaded PC 88A

Elements	Ti(IV)	Fe(III)	Si(IV)	Mn(II)
Concentration (mg/L)	3396	N.D.	0.1	N.D.

*N.D : Non-Detected

며, pH 조절은 타이타늄(IV) 가수분해 반응에서 매우 중요하다[19].

$$TiO^{2+} + 2H_2O = TiO(OH)_2 + 2H^+ \quad (4)$$

본 실험에서는 탈거 용액에 수산화암모늄 및 수산화나트륨을 첨가해 pH를 증가시켜 타이타늄(IV)을 가수분해했다. 실온에서 가수분해실험을 진행했고 이때 교반 속도는 300 rpm으로 했다. 탈거 용액에 수산화암모늄과 수산화나트륨을 첨가함에 따라 타이타늄(IV) 탈거 용액의 색이 붉은색에서 무색으로 변했다. 수산화암모늄의 경우 첨가량에 증가함에 따라 침전물이 바로 관찰됐고, 수산화나트륨의 경우 첨가 후 70℃에서 30분 정도 가열했을 때 침전물이 관찰됐다. 형성된 침전물을 여과하고 수산화암모늄과 수산화나트륨을 첨가한 용액의 pH를 측정한 결과 각각 8과 10 이었다.

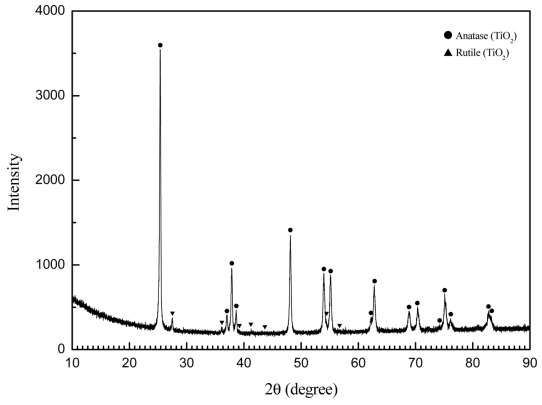

Fig. 5. XRD pattern of the obtained powders hydrolyzed by NH_4OH solution from Ti(IV) stripping solution.

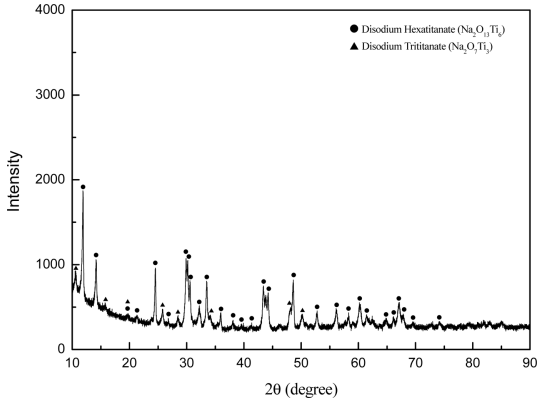

Fig. 6. XRD pattern of the obtained powders hydrolyzed by NaOH solution from Ti(IV) stripping solution.

수산화암모늄과 수산화나트륨을 사용해 제조한 침전물의 XRD 분석 결과를 Fig. 5과 6에 나타냈다. Fig. 5에 따르면 수산화암모늄을 pH 조절제로 사용해서 타이타늄(IV)을 가수분해하면 아나타제상의 이산화 타이타늄이 제조된다. 하지만 수산화나트륨을 pH 조절제로 사용할 경우 최종 생성물로 나트륨이 고용된 타이타늄 산화물이 형성된 것을 Fig. 6에서 알 수 있다. 따라서 수산화나트륨을 pH 조절제로 사용할 경우 이산화 타이타늄을 제조하기 위해서는 가수분해과정에서 고용된 나트륨 이온을 제거하기 위해 산 처리 또는 비등수 처리와 같은 추가적인 공정이 요구된다[20]. 따라서 탈거 용액으로부터 pH 조절에 의한 가수분해로 이산화 타이타늄(IV)을 제조하기 위해서는 수산화암모늄이 더 우수하다.

4. 결 론

타이타늄 철석으로부터 고순도 이산화타이타늄 회수를 위해 염산 침출에 의한 습식공정을 조사했다. 염산 침출시 염산농도, 광액농도, 반응시간에 따른 타이타늄(IV), 철(III), 규소(IV), 망간(II)의 침출 거동을 조사하여 타이타늄(IV) 최적 침출조건을 얻었다. 염산 농도가 증가함에 따라서 타이타늄(IV), 철(III), 망간(II)의 침출률이 증가하며 염산 농도 7 M 이상에서 침출률이 급격하게 증가했다. 침출실험 결과에 따르면 최적 조건인 9 M의 염산 농도에서 광액농도 1%, 침출 온도 70℃에서 5시간 반응시켰을 때 타이타늄(IV)이 80% 정도 침출되었다.

또한 PC88A로부터 탈거된 순수한 타이타늄(IV)용액에 상온에서 수산화암모늄과 수산화나트륨를 pH 조절제로 첨가하여 타아타늄(IV)를 가수분해시켰다. 수산화나트륨을 첨가하면 나트륨이 타이타늄 산화물에 고용되므로 고순도 이산화 타이타늄을 제조하기위해서는 추가적인 공정이 요구된다. 하지만 수산화암모늄을 pH 조절제로 첨가시켜 가수분해된 침전물을 하소시키면 고순도 이산화 타이타늄을 얻을 수 있다. 본 연구결과를 이용하면 비교적 저품위의 타이타늄 철석을 염산 침출시켜 용매추출로 타이타늄을 분리한 다음 고순도 이산화타이타늄을 회수할 수 있는 습식공정의 개발이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연

구 과제입니다(No. 20165010100880).

References

1. T. H. Nguyen and M. S. Lee, 2018 : A review on the recovery of titanium dioxide from Ilmenite ores by direct leaching technologies, Min. Proc. Ext. Met. Rev., 40, pp.1-17.
2. A. Nurul., in Mineral Resources Engineering, Murdoch University, Perth Wstern Australia, 2017.
3. M. J. Gázquez, J. P. Bolívar, R. Garcia-Tenorio, et al., 2014 : A review of the production cycle of titanium dioxide pigment, Mater. Sci. Appl., 05, pp.441-458.
4. W. Zhang, Z. Zhu, and C. Y. Cheng, 2011 : A literature review of titanium metallurgical processes, Hydrometallurgy, 108, pp.177-188.
5. M. H. H. Mahmoud, A. A. I. Afifi, and I. A. Ibrahim, 2004 : Reductive leaching of ilmenite ore in hydrochloric acid for preparation of synthetic rutile, Hydrometallurgy, 73, pp.99-109.
6. G. K. Das, Y. Pranolo, Z. Zhu, et al., 2013 : Leaching of ilmenite ores by acidic chloride solutions, Hydrometallurgy, 133, pp.94-99.
7. A. A. Nayl and H. F. Aly, 2009 : Acid leaching of ilmenite decomposed by KOH, Hydrometallurgy, 97, pp.86-93.
8. N. El-Hazek, T. A. Lasheen, R. El-Sheikh, et al., 2007 : Hydrometallurgical criteria for TiO2 leaching from Rosetta ilmenite by hydrochloric acid, Hydrometallurgy, 87, pp.45-50.
9. H. H. Ahn and M. S. Lee, 2019 : Separation of Ti(IV) and Fe(III) by solvent extraction from ilmenite leaching solution, korean J. Met. Mater., submitted.
10. R. Banda, T. H. Nguyen, S. H. Sohn, et al., 2013 : Recovery of valuable metals and regeneration of acid from the leaching solution of spent HDS catalysts by solvent extraction, Hydrometallurgy, 133, pp.161-167.
11. W. D. Xing and M. S. Lee, 2017 : Leaching of the Mixture of Metallic Gold and Silver, J. of Korean Inst. Resour. Recycl., 26, pp.39-45.
12. A. B. Alafara, A. A. Folahan, A. A. Olayide, et al., 2012 : Simultaneous recovery of total iron and titanium from ilmenite ore by hydrometallurgical processing., Metall. Mater. Eng, 18, pp.67-68.
13. S. S. Sergio, L. Abhishek, and J. Animesh, 2014 : Alkali roasting of bomar ilmenite: rare earths recovery and physico-chemical changes, Open Chem., 13, pp.270-278.
14. D. S. Suresh, K. A. Thomas, P. N. Mohan, et al., 1994 : Alteration of ilmenite in the manavalakurichi deposit, india, Clay. Clay. Miner., pp.567-571.
15. E. Olanipekun, 1999 : A kinetic study of the leaching of a Nigerian ilmenite ore by hydrochloric acid, Hydrometallurgy, 53, pp.1-10.
16. H. H. Ahn and M. S. Lee, 2019 : Adsorption of Pd(II) onto Zr(IV) Based Metal-Organic Framework UIO-66-NH2 from Hydrochloric Acid Solution, Korean J. Met. Mater., pp.57, 1-7.
17. A. M. Ramadan, M. Farghaly, W. M. Fathy, et al., 2016 : Leaching and kinetics studies on processing of Abu-Ghalaga ilmenite ore, J. Res. Eng. Technol., 3, pp.46-53.
18. E. Viollier, P. W. Inglett, K. Hunter, et al., 2000 : The ferrozine method revisited: Fe(II)/Fe(III) determination in natural waters, J. Appl. Geochem., 15, pp.785-790.
19. P. L. Brown and C. Ekberg, 2016 : Hydrolysis of Metal ions, pp. 433-442, Wiley-VCH, Nevertheless.
20. D. S. Seo, J. K. Lee, H. G. You, et al., 2001 : Preparation of TiO_2 nanocrystalline powder at low temperature, J. Korean Ceram. Soc., 38, pp.331-336.

안 형 훈

• 목포대학교 신소재공학과 학사
• 현재 목포대학교 신소재공학과 석사과정

이 만 승

• 현재 목포대학교 신소재공학과 교수
• 당 학회지 제11권 1호 참조