

국내부존 VTM으로부터 바나듐 회수를 위한 황화배소 공정의 열역학적 평가

§김영재*** · 최경섭** · 박현식*** · §정경우***

*한국지질자원연구원 자원활용연구본부 순환자원연구센터, **과학기술연합대학원대학교 자원순환공학

Thermodynamic Evaluation of Sulfate-Roasting Process for the Vanadium Extraction from Korean VTM Ore

§Youngjae Kim***, Kyungsob Choi**, Hyunsik Park*** and §Kyeong Woo Chung***

*Resources Recycling Research Center, Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea

**Resource Recycling, University of Science Technology (UST), 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea

요 약

본 연구에서는 국내 부존 바나듐 광물인 포천 지역의 바나듐 함유 함티탄철석(VTM: Vanadium-bearing titaniferous magnetite)을 대상으로 하여, 바나듐 회수를 위한 황화 배소 반응의 열역학적 평가를 수행하였다. Na_2SO_4 를 이용하여 황화 배소를 진행하는 경우, 배소 조건에 따른 배소 후 바나듐 및 불순물의 수침출 거동을 평가하고, 황화 배소 반응에 대한 메커니즘 규명을 위하여 열역학적 평가를 수행하였다. Na_2SO_4 를 이용한 황화 배소의 경우 Na_2CO_3 를 이용한 염배소 공정과 비교하여 반응 온도는 200 °C 정도 높았지만 바나듐 침출률이 높고 Al, Si 등의 불순물에 대한 낮은 침출률을 보였다. 바나듐만 선택적으로 수침출되는 황화 배소 반응의 특징은 기상의 SO_2 가스와 정광내 바나듐간의 반응에 따른 반응 메커니즘에 기인하는 것으로 예상되었다.

주제어 : 바나듐 함유 함티탄철석, 황화 배소, 바나듐, 열역학

Abstract

In the present study, the thermodynamic evaluation of the sulfate-roasting process was conducted to extract vanadium from the Korean vanadium titano-magnetite ore. The leaching efficiency of vanadium and other impurities was analyzed for varying roasting temperatures and addition of Na_2SO_4 . In the case of sulfate roasting, the roasting temperature was 200 °C higher than that previously observed Na_2CO_3 roasting. However, the higher leaching efficiency of vanadium and lower leaching efficiency of other impurities, such as aluminum and silicon, were observed. The high selectivity for the extraction of vanadium in sulfate roasting would result from the reaction mechanism between SO_2 gas and vanadium concentrate.

Key words : Vanadium titanium-magnetite (VTM) ore, sulfate-roasting, vanadium, thermodynamic calculation

· Received : March 25, 2022 · Revised : April 1, 2022 · Accepted : April 1, 2022

§ Corresponding Author : Youngjae Kim (E-mail : youngjae.kim@kigam.re.kr) / Kyeong Woo Chung (E-mail : case7@kigam.re.kr)

Resources Recycling Research Center, Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, 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

바나듐은 대표적인 전략 금속(국가 비상사태 시 가용성이 부족하면 해당 국가의 경제 및 방어능력에 영향을 미치는 금속)으로 국방, 화학, 철강 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다¹⁾. 바나듐은 특히 강철, 알루미늄에 소량 첨가되어 강도와 탄성을 향상시키는 특징을 갖는다. 강철 1톤에 바나듐을 약 1 kg만 첨가해도 강도를 두 배 이상 향상시킬 수 있으며, 이러한 특징으로 세계 바나듐 생산량의 80%는 철강 산업에서 페로 바나듐을 제조하는 첨가 물질로 활용되고 있다. 20년 전까지는 바나듐 합금이 자동차에 사용되지 않았지만, 현재 생산하고 있는 자동차의 45% 이상에는 바나듐 합금이 사용되고 있다. 미국 환경 보호청(U.S. Environmental Protection Agency: EPA)이 정한 연비 기준을 만족시키기 위해서는 강도를 유지한 상태에서 차체 중량을 감소시켜 연비를 높여야 하며, 이에 따라 2025년까지 전체 자동차의 85%가 바나듐 합금을 사용할 것으로 예상된다. 이러한 강도 특성 외에도 바나듐 합금은 뛰어난 내식성을 갖는 것으로 알려져 있다. 뛰어난 내식성으로 바나듐 합금은 화학 물질을 운반하는 파이프 소재에 널리 사용된다²⁾. 또한 바나듐-타이타늄 합금은 뛰어난 비강도 특성으로 항공 엔진의 터빈 블레이드 등 항공우주 분야에서 활용되고 있으며, 중성자를 쉽게 흡수하지 않는 특징으로 바나듐은 원자력 발전에서 중요한 응용 분야를 가지고 있다^{2,3)}. 그 밖에 산화바나듐은 세라믹스 및 유리의 안료, 화학촉매, 초전도 자석 제조에 이용되고 있다. 바나듐의 최신 적용 분야로는 그리드 에너지 저장에 활용될 것으로 기대되는 바나듐 레독스 흐름전지(Vanadium Redox Flow Battery: VRFB)로, 오산화바나듐을 주원료로 한다²⁾.

현재 전세계 바나듐의 약 88%는 바나듐 함유 함티탄 철석(Vanadium bearing Titanomagnetite; VTM)으로부터 생산되고 있다. 중국 및 남아프리카 공화국에서는 이러한 VTM 광을 제강 공정 중 철광석 원료와 혼합/투입하여 용융 환원 및 산소 취련 공정을 통하여 바나듐을 함유한 슬래그를 생산하고, 바나듐이 1차적으로 농축된 함바나듐 슬래그에 대하여 소다 배소 공정을 통하여 바나듐을 회수하고 있다. 이러한 용융 환원과 산소 취련을 통한 바나듐의 농축 및 염배소를 통한 수침출 공정 외에, 바나듐 함유 함티탄철석 광물을 직접 염배소하여 수침출하는 방식의 공

정이 있으며 남아프리카 공화국, 호주, 브라질 등에서 운영되고 있다. 전자의 경우 남아프리카 공화국의 Highveld 공정이, 후자의 경우 남아프리카공화국과 호주의 Xstrata 공정이 대표적이다⁴⁾. 수침출 후, 수용액 중 Si, Mg, Al 등의 불순물을 제거하고 바나듐을 암모늄 폴리바나데이트나 암모늄 메타바나데이트 형태로 석출하여, 최종적으로 순도 99.5% 이상의 오산화바나듐을 얻는다. 즉, 두 공정은 모두 염배소 후 수침출을 통한 바나듐의 회수라는 공통점을 갖고 있으며, 따라서 배소 공정에 대한 열역학적 기초 연구는 향후 바나듐 회수 공정을 설계함에 있어서 필수적인 기초 연구가 될 것으로 기대된다.

건설 및 자동차 분야에서 고강도 철강 소재에의 수요 증가와 바나듐 레독스 흐름 전지 등 새로운 수요처의 등장으로 바나듐 수요는 향후 급증할 것으로 예상되나, 공급 부분에 있어서 이러한 수요 증가를 대응할 수 있는 부분이 불확실한 상황이다. 현재 우리나라의 바나듐 공급은 정유 사업에서 사용이 끝난 폐촉매로부터 회수하는 재활용 분야와 국외 수입에 전적으로 의존하고 있다. 하지만 바나듐 공급을 통제하는 남아프리카, 중국, 러시아의 3개국이 정치적 또는 무역 갈등으로 이러한 공급을 중단시킬 경우 바나듐 가격이 급등할 위험이 크며, 이럴 경우 국내의 관련 산업 생태계에도 큰 파장이 예상된다. 따라서 자원 안보 및 관련 산업의 경쟁력 제고 측면에서 국내 부존 바나듐으로부터 바나듐을 회수할 수 있는 기술 개발의 필요성이 증대되고 있다.

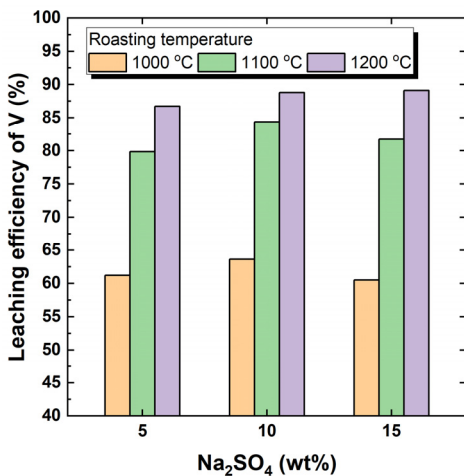
본 연구에서는 현재 경기도 포천에서 생산되고 있는 바나듐 함유 함티탄철석광을 이용하여 바나듐을 회수하기 위한 기초 연구로 황화 배소 공정의 최적 공정 조건에 대한 연구를 수행하였다. 조업 조건에 미치는 변수 도출 및 주요 반응의 규명을 위하여 열역학적 평가를 수행하였으며, 실험적으로 도출된 최적의 황화 배소 조건과 열역학 계산 결과를 비교하여 황화 배소 공정 설계에 있어서 주요한 변수를 도출하고 황화 배소의 반응 메커니즘을 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 포천 관인광산에서 생산된 바나듐 함유 함티탄철석(VTM) 광석에 대하여, 파분쇄 및 자력 선별의 선광 공정을 거쳐 얻어진 바나듐 함량 0.44 wt%(오산화바

나뭇 환산 시 0.78 wt%)의 정광을 얻고, 이러한 정광에 대하여 황화 배소 실험을 수행하였다. 1000, 1100, 1200 °C 온도의 박스형 전기로에서 정광 대비 Na₂SO₄의 무게비를 5, 10, 15 wt%로 변화시키면서 황화 배소 온도와 Na₂SO₄ 첨가량 변화에 따른 바나듐 수침출의 영향성을 확인하였다. 황화 배소 중 시료의 오염과 환원에 따른 반응 변화를 방지하기 위하여, 백금 도가니를 사용하였다. 2시간의 황화 배소 후, 회수된 시료는 휘쇄한 후, 90 °C 온도의 증류수에서 교반을 하면서 4시간 동안 수침출을 수행하였다. 이후 수침출 용액에서 바나듐의 함량은 유도 결합 플라즈마 분광 분석법을 통하여 분석하였다. 잔사 중 남아있는 바나듐의 함량을 확인하기 위하여, 수침출 후 필터에 여과하고 남은 잔사 중 0.1 g을 1 g의 리튬 테트라보레이트(Lithium tetraborate)와 혼합하여, 카본 도가니에 투입하였다. 이후 아르곤 가스로 분위기가 제어된 1000 °C의 수직 관상로에서 1시간 동안 열처리하여, 유리질의 시료를 얻어내었다⁹⁾. 시료는 분쇄하여 산처리를 진행하여 완전히 용해시킨 후, 플라즈마 분광 분석법을 통하여 바나듐 함량을 분석하였다. 최종적으로 바나듐의 침출률은 식 (1)을 통하여 계산되었다.

$$\frac{\text{수침출 용액 중 V함량 (g)}}{(\text{수침출 용액 중 V함량 (g)} + \text{잔사 중 V함량 (g)})} \times 100 \quad (1)$$



황화 배소 반응의 열역학적 고찰을 위해서는 상용 열역학 계산 소프트웨어인 FactSage 8.1을 이용하였다. 다양한 온도 조건에서 국내부존 VTM의 조성을 이용하여 열역학적 평형 상태에 대한 계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 황화 배소 조건에 따른 바나듐의 수침출 거동 변화

Fig. 1-(a)는 Na₂SO₄ 함량 및 온도 변화에 따른 V₂O₅의 침출률을 도시한 그림이다. 동일한 Na₂SO₄ 함량에서 배소 온도가 1000 °C에서 1200 °C으로 증가함에 따라 바나듐 침출률은 모두 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 1000 °C, 1100 °C의 고정된 배소 온도에서는 Na₂SO₄의 함량이 5 wt%, 10 wt%로 증가함에 따라 바나듐의 침출률은 증가하나 15 wt% 함량으로 증가함에 따라 바나듐의 침출률은 소폭 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 1200 °C에서는 Na₂SO₄의 함량이 증가함에 따라 바나듐의 침출률도 증가하며, 1200 °C 배소 온도의 15 wt% Na₂SO₄를 첨가한 샘플에서 90 % 수준의 바나듐 수침출률을 달성할 수 있었으며 이때 침출액 중 V의 농도는 4800 mg/L였다. 이는 앞서 Nkosi 등이 보고한 최적의 황화 배소 공정 온도인 1150 °C 이상과도 잘 일치하는 온도이며, 남아프리카 공화국의 Bushveld Complex의 자철석 광에서 얻어진 바나듐 함유 함탄철석을 이용한 2시간의 황화 배

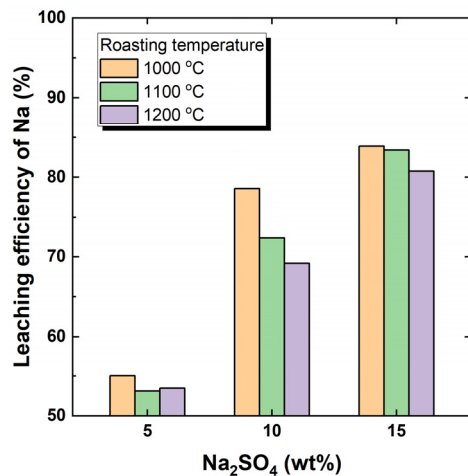


Fig. 1. (a) Effect of Na₂SO₄ addition and temperature on vanadium leaching efficiency (b) Effect of Na₂SO₄ addition and temperature on sodium leaching efficiency.

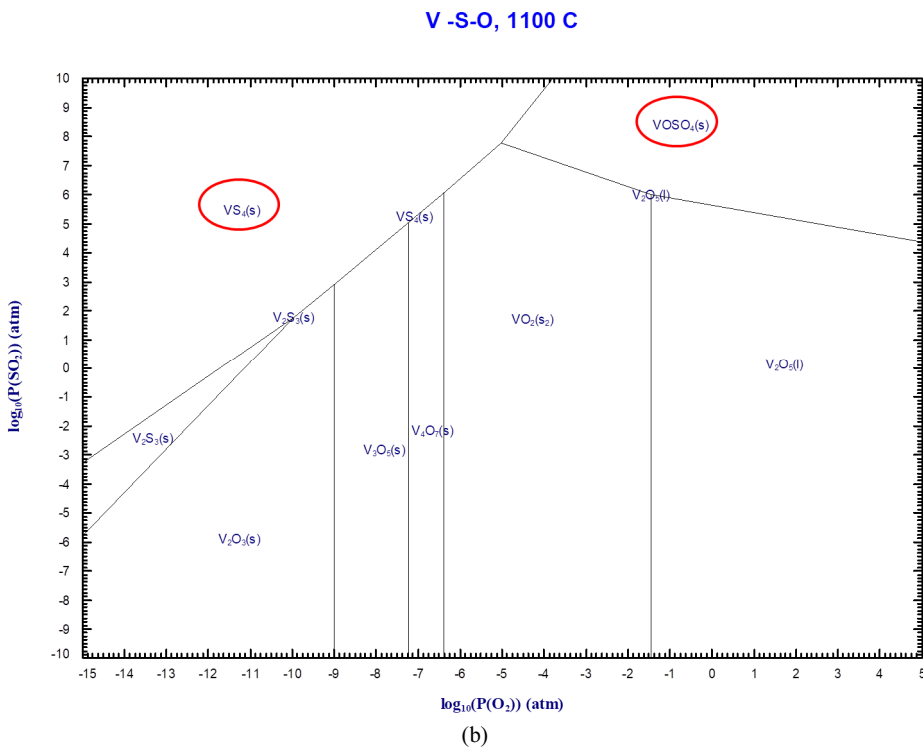
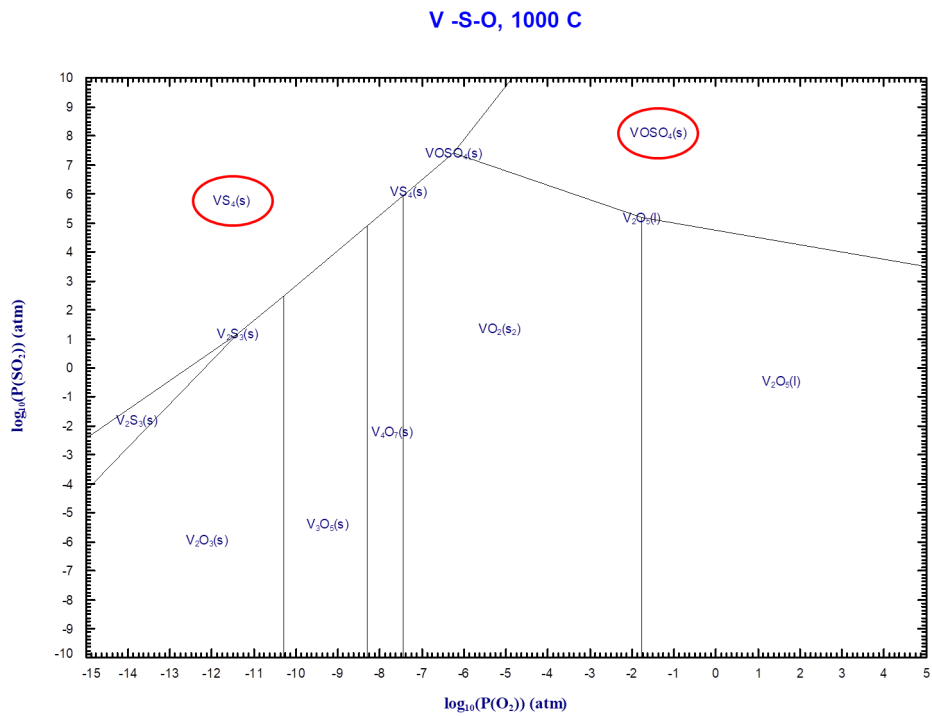


Fig. 2. Phase stability diagram for the V-S-O system at (a) 1000 °C and (b) 1100 °C.

소 후 얻어진 바나듐 회수율 84 %를 뛰어넘는 높은 침출률 결과임을 확인할 수 있었다⁶⁾. 앞서 보고된 황화 배소 시간에 따른 바나듐 침출률의 증가 경향을 고려할 때, 배소 시간을 2시간에서 3시간 이상으로 증가시킬 경우 보다 높은 바나듐 침출률이 달성 가능할 것으로 기대된다.

Fig. 1-(b)는 Na_2SO_4 함량 및 온도 변화에 따른 Na_2O 의 침출률을 도시한 그림이다. 동일한 온도에서 Na_2SO_4 의 함량이 증가함에 따라 수침출된 Na_2O 의 함량은 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 한편 일정한 10, 15 wt%의 Na_2SO_4 함량에서 배소 온도가 증가하는 경우, 수침출 후 수용액 중 Na의 함량은 감소함을 확인할 수 있었다. 한편 5 wt%의 Na_2SO_4 함량에서는 배소 온도 변화에 따른 Na의 수침출률 변화는 크지 않음을 확인할 수 있었다. 침출액 중 Na 농도는 최대 28000 mg/L 수준이었다. Na_2CO_3 를 이용한 염화 배소 연구에서 확인된 10 - 40 % 수준의 Na 수침출률⁷⁾과 비교 비교하였을 때, 황화 배소 시 좀더 높은 Na의 침출률을 확인할 수 있었다.

그 밖에 Ti, Fe의 침출률은 본 황화 배소 실험에서 0.05 % 미만으로 확인되었다. 침출액 중 농도로는 Ti와 Fe가 각각 최대 57 mg/L, 82 mg/L 였다. 또한 Si의 경우 0.1 - 2.5 %, Al의 경우 0.01 - 0.15 % 수준의 침출률로 확인되었다. 침출액 중 농도로는 Si와 Al이 각각 최대 117 mg/L, 33 mg/L 였다. 이는 앞서 국내 부존 바나듐 함유 함티탄철석을 이용한 염화 배소 연구에서 확인된 Si, Al의 침출률이 각각 10 - 25 %, 10 - 20 %임을 고려할 때, 황화 배소의 경우 바나듐 회수에 대한 높은 선택성을 보임을 확인할 수 있었다.

이러한 바나듐 회수에 대한 높은 선택성과 향후 탄소 중립에 대한 규제 강화를 고려할 때, Na_2CO_3 를 이용한 염배소보다는 Na_2SO_4 를 이용한 황화 배소를 활용한 바나듐 회수 공정의 설계와 개발이 중요할 것으로 전망된다. 본 연구 결과를 통해 얻어진 국내 부존 바나듐 함유 함티탄철석의 최적 황화 배소 조건은 Na_2SO_4 10 wt% 첨가 조성에 1200 °C 배소 온도로 확인된다. 하지만 황화 배소 중 발생하는 부식성의 SO_2 가스에 의한 반응관의 수명과 배가스 처리 시스템 설계 등을 고려하여 이러한 배소 조건은 공정 측면에서 보다 구체적으로 결정되어야 할 것으로 판단된다.

3.2. 황화 배소 반응 메커니즘 확인을 위한 열역학적 고찰

앞서 3.1에서 확인한 황화 배소가 갖는 바나듐에 대한 높

은 선택성은 Na_2CO_3 를 이용한 염배소와는 다른 반응 메커니즘에 기인하는 것으로 예상된다. 앞서 연구에서 Na_2CO_3 를 이용한 염배소 반응은 액상의 Na_2CO_3 상을 형성하고, 이러한 액상의 Na_2CO_3 가 바나듐과 반응하여 Sodium Vanadate를 형성 후 수침출 중 바나듐이 수용액 중에 침출되는 것으로 확인되었었다. 하지만 황화 배소의 경우, 반응물의 최종 형태와 수침출 결과를 볼 때 이와는 다른 반응 메커니즘으로 예상되었으며, 이러한 황화 배소의 반응 메커니즘 확인을 위하여 상용 열역학 소프트웨어인 FactSage 8.1을 이용하여 열역학 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 1000 °C와 1100 °C에서 SO_2 가스 분압과 산소 분압에 따른 바나듐의 열역학적 안정상을 도시한 그림이다. Kellogg 다이어그램이라고도 불리우는 Phase stability diagram은 배소 공정에 있어서 가스상과 반응 온도가 결정된 상태에서 열역학적으로 안정한 상과 이들의 관련성을 확인하기 용이하여 배소 반응의 M-S-O 삼원계에서 널리 이용된다⁸⁾. 그림에서와 같이 높은 SO_2 분압 영역에서 산소 분압이 높은 경우 VOSO_4 상이, 산소 분압이 낮은 경우 VS_4 상을 형성함을 확인할 수 있다. 즉, 배소 공정에서 산소 분압에 따라 바나듐은 이러한 황화물을 형성하는 것을 열역학적으로 예측이 가능하다.

이러한 SO_2 가스의 형성을 열역학적으로 평가하기 위하여 순수한 Na_2SO_4 에 대하여 온도에 따른 SO_2 가스의 기상량 변화를 확인하여 Fig. 3-(a)에 도시하였다. 그림에서와 같이 1000 °C에서 온도가 상승함에 따라 기상의 SO_2 발생은 꾸준히 증가함을 확인할 수 있다. 즉, 이러한 계산 결과를 통하여 황화 배소 공정 중 SO_2 가스의 발생을 간접적으로 예측이 가능하다.

한편 이러한 기상의 SO_2 가스 발생을 위해서는 액상의 Na_2SO_4 상의 형성이 우선되어야 하며, 온도 변화에 따른 액상의 Na_2SO_4 상의 형성을 확인하기 위하여 본 연구에서 사용한 VTM 조성에 대하여 VTM에 5wt%의 Na_2SO_4 가 혼합된 계에 대하여 열역학 계산을 수행하였다. Fig. 3-(b)는 [VTM+5wt% Na_2SO_4] 계에서 온도 변화에 따른 액상의 Na_2SO_4 의 형성을 무게비로 하여 표현한 그림이다. 그림에서와 같이 약 1080 °C에서부터 액상의 Na_2SO_4 가 형성될 약 1180 °C 온도까지 액상 분율은 꾸준히 증가함을 확인할 수 있다. 즉 배소 온도 1100°C 이상에서 액상의 Na_2SO_4 가 형성되고 이에 따른 기상의 SO_2 가스가 형성될 것으로 예측된다. 본 열역학 계산에서 액상의 Na_2SO_4

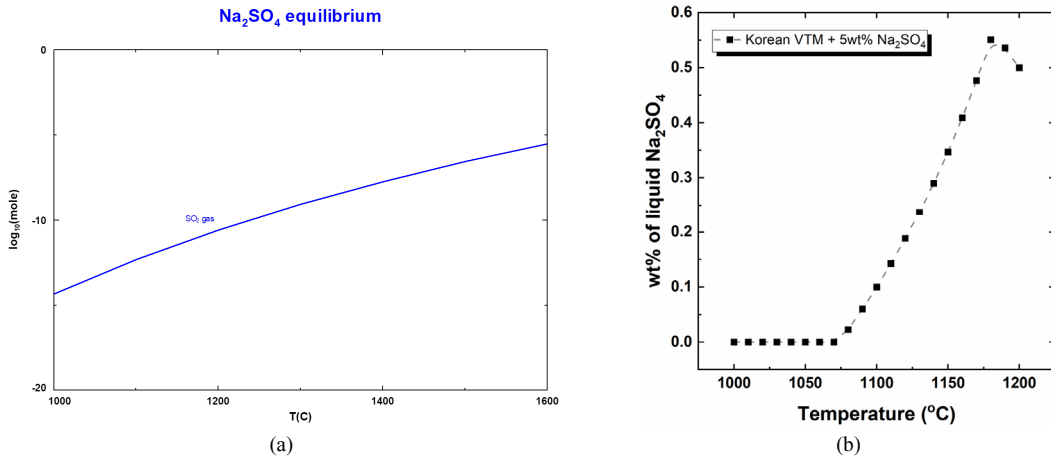


Fig. 3. (a) Formation of SO₂ gas with varying temperature (b) Formation of liquidus Na₂SO₄ phase with varying temperature when Korean VTM was mixed with 5 wt% of Na₂SO₄.

형성 온도는 앞서 바나듐 침출률 실험에서 바나듐의 침출률이 급격히 증가한 온도인 1100 °C과도 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다.

이렇게 형성된 SO₂ 가스는 정광내의 바나듐과 반응하여 VS₄ 또는 VOSO₄ 상을 형성하고 수침출 시 바나듐이 회수되는 메커니즘으로 추정된다. 특히 이러한 기상-고상간의 반응은 앞서 액상-고상간의 반응으로 확인된 염배소 반응과 비교하여 정광 내부 바나듐과의 반응이 용이할 것으로 예상되며, 이에 따라 황화배소에서 보다 높은 바나듐 침출률이 가능한 것으로 예측된다.

하지만 앞서 이야기한 황화 배소의 반응 메커니즘 확인과 관련한 일련의 가설은 열역학적 계산에 근거하여 도출된 것으로, 향후 이러한 가설의 검증을 위해서 가스 분석을 통한 SO₂ 가스의 발생 확인 및 주사 현미경 등을 통한 배소 후 정광의 미세 구조 변화 등에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

황화 배소 반응을 통한 바나듐 회수 공정 개발을 위하여 본 연구에서는 국내 부존 바나듐 광물인 포천 지역의 바나듐 함유 함티탄철석(VTM: Vanadium-bearing titaniferous magnetite)을 대상으로 하여, 바나듐 회수에 미치는 배소 조건을 평가하고, 반응 메커니즘 확인을 위한 열역학적 평가를 수행하였다. Na₂SO₄를 이용하여 황화 배소를 진

행하는데 있어서, 배소 조건에 따른 배소 후 바나듐 및 불순물의 수침출 거동을 평가하고, 상용 열역학 소프트웨어인 FactSage 8.1을 이용하여 황화 배소 반응에 대한 메커니즘을 고찰하였다. Na₂SO₄를 이용한 황화 배소의 경우 Na₂CO₃를 이용한 염배소 공정과 비교하여 반응 온도는 200 °C 정도 높았지만 바나듐 침출률이 높고 Al, Si 등의 불순물에 대한 낮은 침출률을 보였다. 바나듐만 선택적으로 수침출되는 황화 배소 반응의 특징은 기상의 SO₂ 가스 와 정광내 바나듐간의 반응에 따른 반응 메커니즘에 기인하는 것으로 예상되었다.

Acknowledgements

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘국내 부존 바나듐(V) 광물자원 선광/제련/활용기술 개발(GP2022-010, 22-3212-1)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. G. Lu, T. Zhang, G. Zhang, et al., 2019 : Process and Kinetic Assessment of Vanadium Extraction from Vanadium Slag Using Calcification Roasting and Sodium Carbonate Leaching, JOM, 71, pp.4600-4607.
2. G. Bauer, V. Guther, H. Hess, et al., 2017 : Vanadium and Vanadium Compounds, in: Ullmann's Encycl. Ind. Chem., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.

3. R. Gilligan, A.N. Nikoloski, 2020 : The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources, Miner. Eng. 146, p.106106.
4. F. Cardarelli, 2018 : Materials Handbook - A Concise Desktop Reference, 3rd ed., Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
5. M. Pansu, J. Gautheyrou, 2006 : Analysis of Extractable and Total Elements, in: Handb. Soil Anal., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
6. S. Nkosi, P. Dire, N. Nyambeni, et al., 2017 : A comparative study of vanadium recovery from titaniferous magnetite using salt, sulphate, and soda ash roast-leach processes, in: T.S.A.I. of M. and Metallurgy (Ed.), 3rd Young Prof. Conf., Pretoria, South Africa.
7. Y. Kim, H. Lee, H. Park, et al., 2021 : Thermodynamic Analysis of Alkali-Roasting Process for Vanadium Extraction Process, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng. 58, pp.25-29.
8. M.S. Safarzadeh, S.M. Howard, 2018 : Revisiting the Kellogg diagrams: roaster diagrams and their usefulness in pyrometallurgy, Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 39, pp.191-197.



김영재

- 연세대학교 금속시스템공학과 학사
- 연세대학교 신소재공학과 석사
- The University of Tokyo 재료공학 박사
- LG화학 정보전자소재연구본부 과장
- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부 선임연구원



최경섭

- 부산대 화공생명공학과 학사
- 현재 UST 학생연구원 석·박사과정



박현식

- 연세대학교 금속시스템공학과 학사
- 연세대학교 신소재공학과 석사
- University of New South Wales 재료공학 박사
- LS-Nikko 동제련 기술연구소 연구원
- 한국에너지기술평가원 책임연구원 (파견)
- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부 책임연구원

정경우

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제26권 5호 참조