한국자원공학회지 J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.
Vol. 56, No. 3 (2019) pp. 292-302, https://doi.org/10.32390/ksmer.2019.56.3.292

ISSN 2288-0291(print)
ISSN 2288-2790(online)

총 설

바나듐 자원의 자립 확보를 위한 선별기술 및 동향

김성민[1] · 전호석[1]*

Separation Processes for Self-Sufficient Recovery of Vanadium Resources in Korea

Seong-Min Kim and Ho-Seok Jeon*

(*Received 18 June 2019; Final version Received 18 June 2019; Accepted 21 June 2019*)

Abstract : Vanadium (V) is a transition metal with a silver-gray color. It is commonly used in high-strength alloys because of its ability to improve impact and abrasion resistance, even when only a small amount is added. In recent years, there has been active research into vanadium reduction-oxidation flow batteries (VRFB), which are suitable for use in the development of storage devices for renewable energy applications. Separation and recovery of vanadium from low-grade stone coal ore is currently being investigated in China. Various pre-treatment processes have been studied, such as magnetic separation and gravity separation, that can be used to treat large quantities of ore, as well as flotation processing based on the surface characteristics of the minerals. There is an urgent need for the development of separation technologies to facilitate the self-sufficient extraction of vanadium resources present in Korea.

Key words : vanadium, mineral processing, pre-treatment, vanadium separation, vanadium recovery

요 약: 바나듐(V)은 은회색의 전이금속으로, 철강 제조 시, 소량만 첨가하여도 강도가 높아지고 충격과 마모에 강해지는 특성을 가지고 있어, 고강도 합금의 원료로 많이 사용되고 있다. 또한, 최근에는 신재생 에너지의 저장장치에 적합한 특성을 가지고 있는 것으로 알려진 바나듐 환원-산화 배터리의 주원료로서 해당 연구가 많이 진행되고 있다. 바나듐은 현재 중국에서 저품위 무연탄 광석으로부터 회수하기 위한 선별기술이 많이 연구되고 있다. 대량의 광석 처리가 가능한 자력선별 및 비중선별 등이 전처리 기술로서 많이 연구되고 있으며, 광물의 표면특성을 이용하는 부유선별에 대한 연구도 이루어지고 있다. 우리나라에도 상당량의 바나듐이 부존되어 있는 것으로 보고되고 있으며, 수요확대가 예상되는 바나듐 자원의 안정적인 확보를 위하여 이와 같은 선별기술의 개발이 시급한 실정이다.

주요어 : 바나듐, 자원처리, 전처리, 바나듐 선별, 바나듐 회수

서 론

국내 광산물 수급은 2000년 대 부터 전반적으로 증가 추세를 보였으나, 2011년 이후 자원의 가격 하락과 함께 감소 추세를 보이고, 2017년 다시 자원의 가격 상승으로 증가 추세를 보이고 있다(Kim *et al*., 2018). 이 중 금속광은 2017년 기준, 생산 약 670 억 원, 수입 약 15조 9,000억 원, 수출 약 1,900억 원으로, 수요의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 특히 국내 금속광 자급률은 0.5%로, 금과 은을 제외하고는 거의 0%의 자급률을 보이고 있어, 대부분 수입에 의존하고(2017년 기준 총수입량 8,400톤) 있기 때문에, 국내 주요 제조 및 관련 사업의 대외 경쟁력이 낮은 상황이다(Kim *et al*., 2018).

바나듐은 철강에 소량만 첨가하여도 강도가 높아지고 충격과 마모에 물성을 갖게 해주는 특징으로 인하여, 첨단산업 및 다양한 산업에서 필수적인 원료이다(Lee, 2009, Lmtiaz *et al*., 2015; Wang *et al*., 2018). 최근, 특수 합금강 제조 및 에너지 저장장치에 대한 관심이 세계적으로 증가하면서, 이의 핵심원료인 바나듐 자원에 대한 관심도 급증하고 있다(Choi *et al*., 2017; Cunha *et al*., 2015; Ju *et al*., 2018; Kim and Park, 2017). 특히 중국 등에서는 지진 구조체 보강을 위하여 철근에 바나듐을 넣어 강도를 높인 건축재료 사용을 의무화 하는 등, 전 세계적으로 수요가 높아질 것으로 예상되고 있다.

바나듐은 전 세계적으로 경제성이 있는 매장량이 약 2,000만 톤으로 추정되고 있으며, 중국, 러시아, 남아공에 약 90%가 편중되어 있다(USGS, 2019). 특히 중국은 전세계 매장량의 약 55%가 부존되어 있어, 향후 수요가 증가할

1) 한국지질자원연구원 광물자원연구본부
*Corresponding Author(전호석)
E-mail; hsjeon@kigam.re.kr
Address; 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

것이라 예상되는 바나듐의 회수를 위한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Liu *et al*., 2016; Liu *et al*., 2017; Xu *et al*., 2017; Wang *et al*., 2014; Yan *et al*., 2018; Zhao *et al*., 2013; Zhao *et al*., 2014). 그리고 중국의 랴오닝성과 후베이성 등의 지역에 저품위 원광이 대량으로 매장되어 있어, 파분쇄를 통한 단체분리 뿐 아니라, 분쇄산물의 물리화학적 특성을 이용한 자력, 비중, 부유선별을 적용하는 기술이 개발 중이다(Moskalyk and Alfantazi, 2003; Xu *et al*., 2017; Yan *et al*., 2018). 국내에서도 1990년대부터 함바나듐광이 국내에 부존되어 있다는 연구 조사 결과를 바탕으로 기초 회수 연구가 진행된 바 있다. 국내에는 많은 자원이 부존되어 있지 않지만, 개발가치가 있는 희유금속광의 일부를 보유하고 있다(Kim, 2013; Lee *et al*., 1997). 특히, 바나듐의 경우 부존량이 많은 것으로 예측되며, 원광의 품위가 높고 기존 대비 품위 및 회수율을 크게 높일 수 있는 기술을 확보 가능할 것으로 판단된다.

향후, 자원 환경과 개발 기술에 따라 자립 확보가 가능한 시점에서 주요 생산 국으로 전환될 것으로 예상되어, 지속적인 관심과 고도 기술개발이 필요할 것으로 판단된다. 특히, 바나듐 뿐만 아니라 국내에 부존되어 있는 희유금속광을 대상으로 하는 기술개발은 향후 해외에 부존되어 있는 희유금속광의 확보 및 그 외 경제적 가치가 있는 것으로 판단되고 있는 텅스텐, 몰리브덴, 티타늄 등의 확보에도 활용할 수 있기 때문에 기술자립을 위한 꾸준한 노력이 필수불가결한 요소이다(Jeon *et al*., 2018).

바나듐의 물리화학적 특성

바나듐은 원소기호 V로 표시되는 은회색의 전이금속으로, 원자번호는 23번이며, 순수한 상태에서는 연성과 전성이 있다(Lmtiaz *et al*., 2015; Moskalyk and Alfantazi, 2003). 산소, 질소, 탄소, 수소 등의 불순물이 첨가되면 단단해지고 쉽게 부서지는 특징을 가지고 있으며, 녹는점(1,910°C)과 끓는점(3,410°C)은 대부분의 금속보다 높은 편이다(Ju *et al*., 2018). 열역학적으로 반응성이 크기 때문에, 자연 상태에서는 화합물로만 존재하며, 산화물은 피막을 형성하고, 이로 인하여 내부식성과 내산성이 우수한 특징을 가지고 있다. 고온으로 가열하면 대부분의 비금속 원소들과 반응하고, 염소와 반응하면 VCl_4가 되며, 공기 중에서는 660°C 이상에서 산화되어, Fig. 1과 같이 산화수가 +2인 VO에서 +5인 V_2O_5 까지 여러 산화물을 만들 수 있다(Lmtiaz *et al*., 2015).

바나듐의 용도별 사용량

바나듐의 용도는 크게 철강제의 첨가제, 기타 금속 및 합금용, 비금속용 등으로 아래와 같이 4가지로 구분할 수 있다(Park and Sohn, 2008). 소량만 첨가하여도 강도가 높아지고 충격과 마모에 강한 성질을 가지게 해주는 특징으로 인하여 대부분 철강 제조에서 사용되고 있다(Ju *et al*., 2018). 그리고 최근에는 바나듐 환원-산화 배터리가 신재생에너지의 전력을 저장하는데 용이한 것으로 알려져 연구가 많이 진행되고 있으며, 새로운 에너지 소재로서 각광받고 있어 점차 그 수요가 확대될 것으로 예상되고 있다(Choi *et al*., 2017; Cunha *et al*., 2015; Lee, 2009, Kim and Park, 2017).

1. 철강제의 첨가제(84%): 고강도강, 공구강, 내열강 등으로 철강의 강도, 경도, 마모의 저항성 및 내열성 증가
2. 기타 금속 및 합금용(9%): 티타늄 합금, 부식저항 및 내구용 합금, 초전도체용 합금
3. 비금속용(5%): 촉매제, 유리, 안료, 전기 및 배터리용
4. 기타(2%)

특히, 철강 첨가제로 사용되는 경우에도, Fig. 2와 같이 바나듐 고탄소강, 고속공구강, 내진 건축용 고강도 철강, 핵반응로, 초전도 자석 등으로 해당 분야가 상당히 많은 것으로 알려져 있다. 그리고 바나듐은 아래와 같이 다음의 4가지 형태로 판매되고 소비되고 있어, 해당하는 산물을 생산하는 연구가 계속적으로 진행되고 있다(Park and Sohn, 2008).

Fig. 1. Pure vanadium metal bar and vanadium solution (+2 ~ +5).

1. 오산화바나듐: 중간 산물로서, 바나듐 함유 슬래그 및 바나듐산 암모늄에 포함
2. 페로 바나듐: 대부분의 바나듐(85-90%)은 최종적으로 사용 전에 페로바나듐으로 전환
3. 알루미늄-바나듐 모합금(master alloy): 바나듐을 비철합금으로 만드는데 사용
4. 바나듐 금속: 매우 전문적인 상업적 용도로 사용되는 일부 생산물

향후, 바나듐 수요량 증가는 철강 생산량 및 수요량에 영향을 크게 받을 것으로 예상되며, 고품질 철근의 수요가 늘어날수록 철근에 소비되는 바나듐의 함유량이 증가되기 때문에 수요가 더욱 증가될 예정이다. 최근에는 Fig. 3과 같이 바나듐 환원-산화 배터리 연구가 많이 진행되고 있어, 수요가 확대될 예상이다(Kim and Park, 2017).

바나듐의 부존특성

바나듐은 전 세계적으로 약 6,300만 톤 정도 매장되어 있는 것으로 알려져 있으나, 현재의 기술 및 가격 등을 고려한 경제성이 있는 매장량은 약 2,000만 톤 정도로 추정되고 있다. 매장량은 Table 1과 같이 중국, 러시아, 남아공에 약 90% 정도가 편중되어 있어 거의 점유를 하고 있으며, 생산량도 거의 비슷한 실정이다(USGS, 2019). 바나듐은 주로 보크사이트나 석탄, 원유, 오일 셰일, 타르 등과 같이 석탄을 생성하는 물질에 많이 포함되어 있으며, 일부 인산염 광물, 타이타늄 함유 있는 자철광, 우라늄 함유 사암 등에도 일부 포함되어 있는 것으로 알려져 있다(Moskalyk and Alfantazi, 2003; Park and Sohn, 2008). 그러나 대부분 부산물로 회수되고 있기 때문에 원료의 공급이 원활하지 않은 특징도 가지고 있다.

Fig. 2. Various applications of Fe-V alloy.

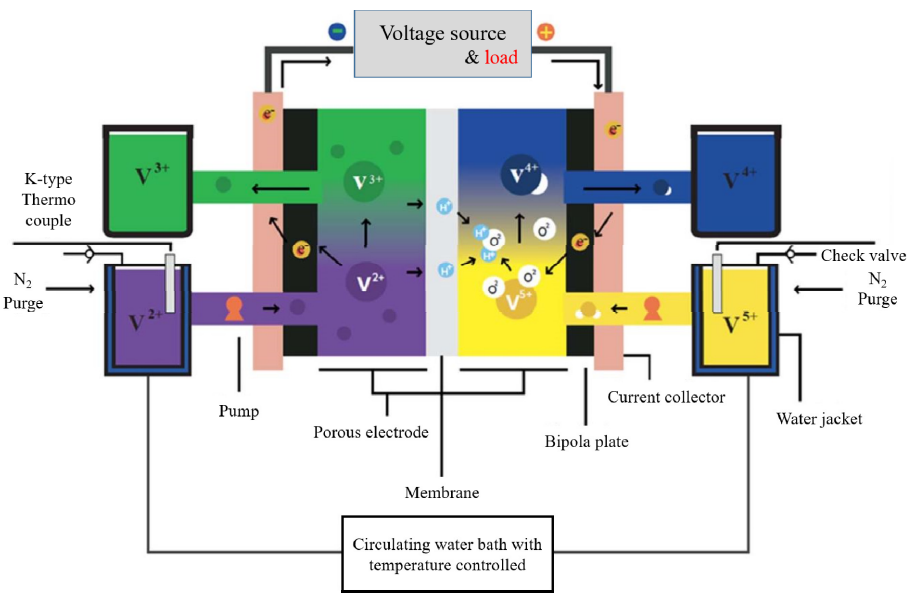

Fig. 3. Schmatic diagram of Vanadium Redox Flow Battery (VRFB).

Table 1. World mine production and reserves

Country	Mine production (t)		Reserves (kt)
	2017	2018	
United States	-	-	45 (0.2%)
Australia	-	-	2,100 (10.4%)
Brazil	5,210 (7.3%)	6,300 (8.6%)	130 (0.6%)
China	40,000 (56.2%)	40,000 (54.5%)	9,500 (46.9%)
Russia	18,000 (25.3%)	18,000 (24.5%)	5,000 (24.7%)
South Africa	7,960 (11.2%)	9,100 (12.4%)	3,500 (17.3%)
Total (rounded)	71,200 (100%)	73,000 (100%)	20,000 (100%)

바나듐의 지각 내 분포 량은 100-150 ppm 으로 22번째로 비교적 풍부한 원소로서 분포범위가 넓고, 동, 니켈, 몰리브덴 보다 흔하게 산출되는 것으로 알려져 있다. 보크사이트나 라테라이트 광상과 같은 풍화잔류 광상과 함께 산출되거나, 염기성 암석의 풍화에서 발생하는 잔류점토광물에서 발견되기도 한다. 이와 같이 함바나듐광은 다양한 지질학적환경으로부터 생성되어 칼노석(carnotite), 로스코라이트(roscoelite), 갈연석(vanadinite), mottrarnite 그리고 파트로나이트(patronite) 등 약 50여 종류의 광물 중에 함유되어 있지만, 경제적인 광상은 매우 드물어 일반적으로 부산물에서 회수하고 있다(Moskalyk and Alfantazi, 2003). 대부분의 바나듐은 불용성의 3가 상태로 화성암 내에 분산되어 있거나, 철 마그네슘, 규산염광물, 자철석, 티탄철석 등의 광물 내에 2가 철을 치환하여 존재하기도 한다.

특히 국내에서도 1990년대부터 바나듐광물의 국내 부존현황을 연구하여, Fig. 4와 같이 옥천과 연천 지역에 바나듐이 함유되어 있는 것을 확인하고, 이에 대한 기초 연구가 진행되어 왔다. 옥천은 탄질 변성이질암에 바나듐이 바륨과 함께 매장되어 있는 것이 확인되었고, 흑색 점판암에 우라늄과 함께 부존되어 있는 것을 확인한 바 있다(Kim, 2013; Lee *et al*., 1997). 연천 지역에서는 티탄철석 광산에 부존되어 있는 자철광에 바나듐이 대량으로 부존되어 있는 것으로 확인 되었다. 이와 같이, 가격이 높고 확보가 어려운 광물 중 하나인 바나듐을 국내에서 자립수급 할 수 있는 기술의 개발이 필요한 실정이다.

바나듐의 시장 현황

바나듐 가격은 KOMIS(한국자원정보서비스)를 참고하면, Fig. 5와 같이 시장 상황이 과잉 공급과 부족 사이를 오

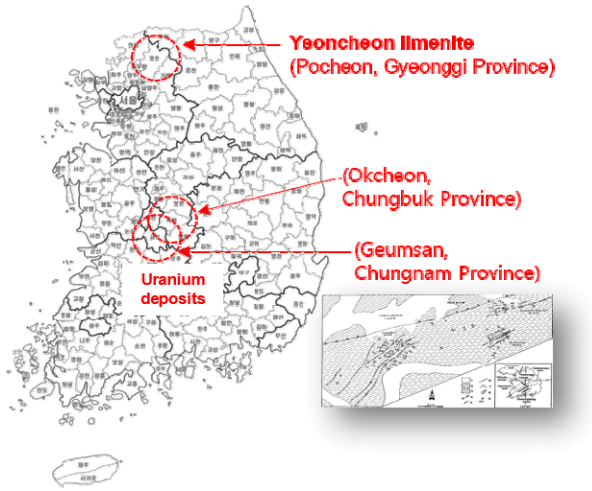

Fig. 4. Ore deposits of vanadium in Korea.

가면서 변동 폭이 큰 특징을 가지며, 변화율이 높은 편이다(Lee, 2009). 2009년에 중국 시장의 철강 가격 하락이 지속됨에 따라 생산량이 감소하면서 공급 과잉이 줄어들었으며, 2015년 11월부터 가격이 다시 상승 하고 있다. 최근에는 에너지 저장시장의 큰 성장으로 인하여, 향후 신재생에너지의 배터리로 각광받으면서 수요 및 가격을 증가시킬 것으로 알려져 있다.

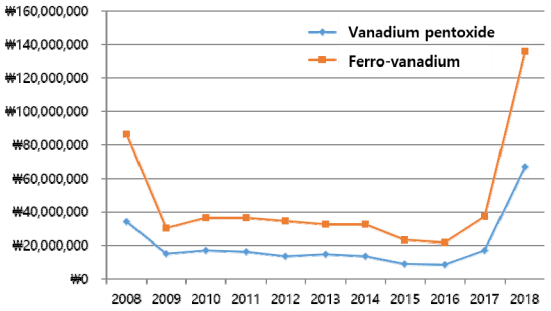

Fig. 5. Prices of vanadium pentoxide and ferro-vanadium in 2008-2018.
*Vanadium pentoxide: Min 98%, Europe
*Ferro-Vanadium: Metal Bulletin, U.S Free Market 70-80% spot price

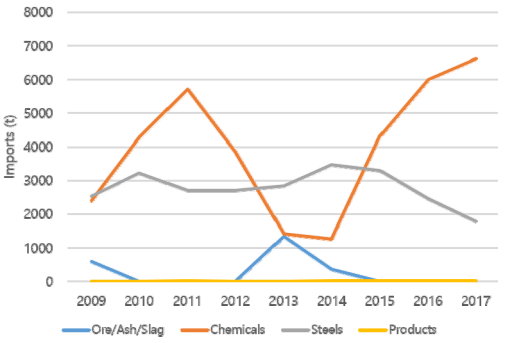

Fig. 6. Total imports of vanadium in 2009-2017.

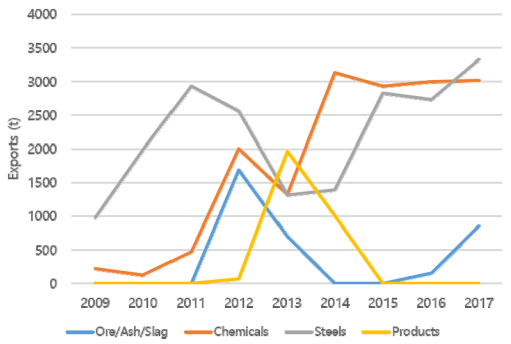

Fig. 7. Total exports of vanadium in 2009-2017.

2009년부터 2017년까지 바나듐의 총 수입량은 Fig. 6과 같이 5,000톤에서 8,400톤 범위에서 증가와 감소가 반복되고 있으며, 총 수출량은 Fig. 7과 같이 1,200톤에서 7,200톤 범위에서 증감이 반복되고 있다. 주로 화합물의 원료인 오산화바나듐과 철강의 원료인 페로바나듐 형태로 수입 및 수출이 되고 있으며, 현재 국내에는 가행 광산이 없어 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 생산 업체들 간의 공동 생산 및 2차 생산량의 증가 영향으로 2014년부터 바나듐 수출입량이 계속적으로 증가하고 있다.

바나듐의 선별기술 개요

바나듐의 원료는 Fig. 8와 같이 크게 광석과 부산물로부터 공급되고 있다(Park and Sohn, 2008). 특히, 전 세계 매장량 및 생산량의 50% 이상을 차지하고 있는 중국은 초무연탄(stone coal ore)에 저품위로 87% 이상 매장되어 있는 것으로 알려져 있어, 물리화학적 선별공정을 이용하여 대량의 광석을 처리하는 기술개발 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Moskalyk and Alfantazi, 2003).

1. 광석: 인광석, 함티탄자철광, 철-바나듐 정광, 우라늄-바나듐 정광, 무연탄 등
2. 부산물: 함티탄자철광으로부터 강철 생산 시 발생하는 함바나듐 슬래그, 석유 잔재물, Ferro-phosphorus 슬래그, 폐촉매, 소각재 등

함바나듐광으로부터 바나듐 정광을 생산하는 바나듐 회수 공정은 파쇄, 분쇄, 선별 공정으로 이루어져 있다. 선별

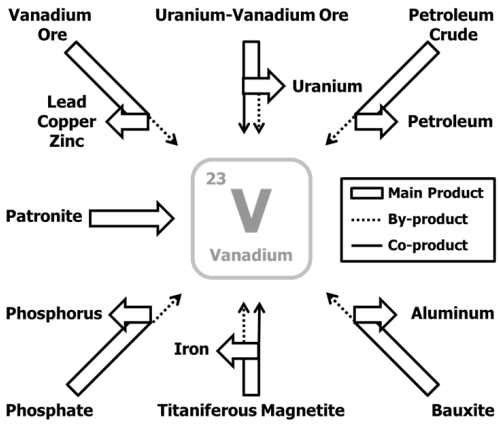

Fig. 8. The main source of vanadium.

효율을 증가시키고, 선별이 가능한 입도로 조절하는 단체 분리를 위한 파쇄 및 분쇄를 진행하고, 해당 광석이 가지고 있는 물리화학적 특성에 따라 자력, 비중, 부유선별을 단일 또는 복합적인 공정으로 설계하고 수행하여, V_2O_5 기준 최소 1% 이상의 품위를 가지는 정광을 회수하고 있다.

국내 바나듐 선별 연구 동향

국내에도 바나듐이 부존되어 있다는 조사 결과를 바탕으로, Figs. 9와 10과 같이 티탄철석과 백운모로부터 바나듐 정광을 회수하여 자원을 확보하는 자립수급을 위한 선별

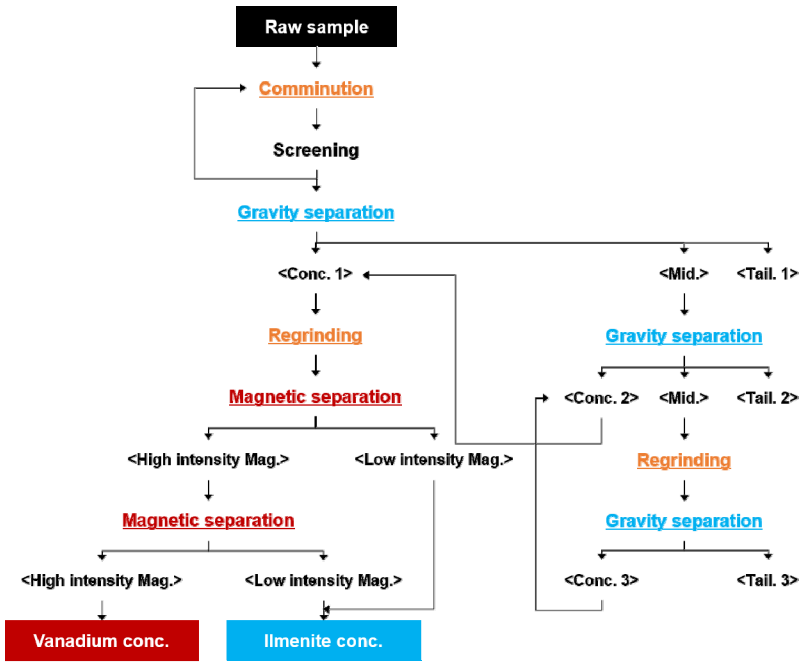

Fig. 9. Flow sheet for the recovery of vanadium from ilmenite using magnetic and gravity separation.

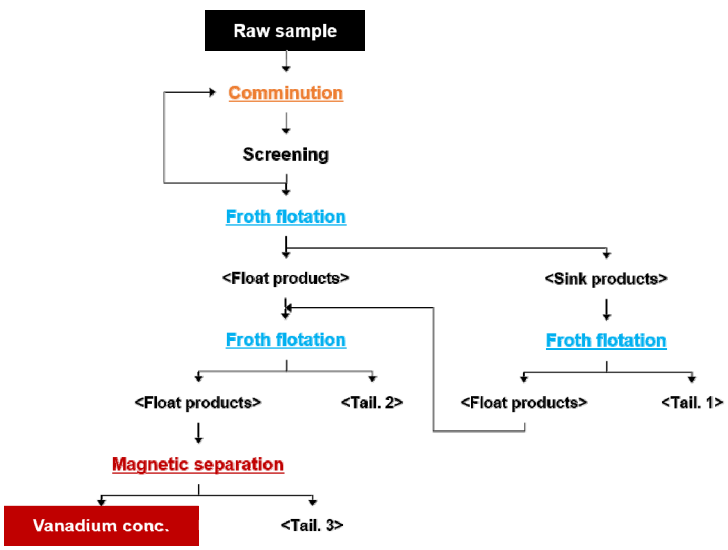

Fig. 10. Flow sheet for the recovery of vanadium from muscovite using flotation.

기술 개발 연구가 진행된 바 있다.

기존의 국내에 위치한 티탄철석 정광을 생산하는 공정에서 발생하는 부산물에 바나듐이 포함되어 있어, 이로부터 바나듐 정광의 회수가 가능하다. 해당 지역의 자철석에 바나듐이 포함되어 있기 때문에 전처리 공정으로 비중선별을 이용하여 비중이 낮은 산물을 먼저 제거한다. 그리고 비중이 높은 산물에서 자력선별을 이용하여 최종적으로 품위 1% V_2O_5 이상의 바나듐 정광과 동시에 품위 44% TiO_2 이상의 티탄철석 정광을 회수하는 기술이다. 이와 같이, 첨단산업에 많이 사용되고 있는 타이타늄과 바나듐을 처리하는 공정 개발을 통하여, 국내에 부존되어 있는 광산에서의 자립수급 및 회수기술의 국산화를 기대할 수 있다.

그리고 백운모에도 바나듐이 함유되어 있어, 주요 맥석광물로 석영, 방해석, 중정석으로부터 분리하는 연구를 수행하였다. 이때, 입자의 표면특성 차이를 이용하는 부유선별을 사용하여 정광의 품위 및 회수율을 향상시키는 공정을 개발하여 1% V_2O_5 이상의 바나듐 정광을 회수하는 기초연구를 수행하였다.

해외 바나듐 선별 연구 동향

중국에는 대량의 바나듐이 매장되어 있다고 알려져 있으나, 대부분 품위가 매우 낮은 광이 부존되어 있는 것으로 알려져 있다(Tang *et al*., 2016; Xu *et al*., 2017; Yan *et al*., 2018). 바나듐 회수 공정 연구는 경제성 및 효율성을 고려하여, 물리화학적 선별 공정을 통한 바나듐 정광의 품위를 증가시키는 목적으로 수행되고 있다(Wang *et al*., 2015). 특히, 매우 낮은 품위로 대량으로 부존되어 있는 초무연탄(stone coal ore)으로 부터 바나듐이 포함되어 있는 백운모를 회수하여 정광을 생산하는 연구를 주로 수행하고 있으며, 함바나듐 티탄철석으로부터 회수하는 연구도 진행되고 있다(Liu *et al*., 2016; Zhao *et al*., 2013). 이때, 각 지역별 원광의 물리화학적 특성에 맞게 자력선별, 비중선별, 부유선별 등을 적용하여 정광을 회수하는 기술을 개발하고 있다.

자력선별은 함바나듐광이 가지고 있는 자성을 이용한 것으로, 바나듐 정광과 동시에 티탄철석 정광을 회수할 수 있기 때문에 경제성이 높은 기술이다. 파분쇄를 통하여 단체분리를 진행하고 자력선별을 수행하는 경우, 강자성 산물

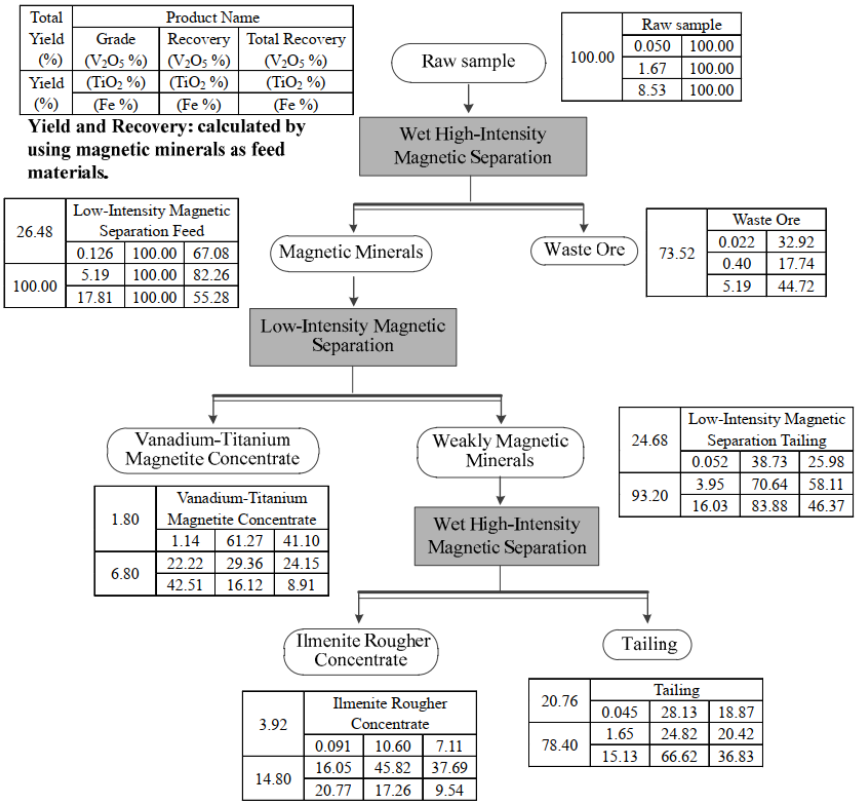

Fig. 11. Flow sheet for the pre-concentration of low-grade vanadium-titanium magnetite ore.

에 주로 바나듐이 포함되어 있고, 상대적으로 약자성 산물이 티탄철석의 정광으로 회수된다.

Chengba Xu는 Fig. 11와 같이 최근 중국의 Chao-yang 지역의 저품위 함바나듐 자철광(0.05% V_2O_5)을 자력선별을 이용하여 1차적으로 원광 중 73.52%를 제거하고, 품위 1.14% V_2O_5%, 22.22% TiO_2, 42.51% 의 정광을 회수하는 기술을 개발하였다(Xu *et al*., 2017).

Baijun Yan은 저품위 초무연탄에 적철광을 혼합 및 열처리 하여 자성을 가지면서 바나듐이 농축된 스피넬상의 Fe_2VO_4 으로 변환시켜 자력선별을 수행하였다(Yan *et al*., 2018). 그 결과 저품위 초무연탄으로부터 V 함유량 14% 이상의 고품위 정광을 90% 이상 회수하는 기술을 개발하였다.

비중선별은 파분쇄를 통하여 단체 분리된 광물입자의 크기와 비중이 서로 다른 특성을 이용하여 요동테이블(shaking table), 스파이럴(spiral) 등으로 분리하는 것이다. 주로 습식으로 진행되며 처리용량이 크고 속도가 빠른 장점을 가지고 있다.

Xin Liu는 Fig. 12와 같이 중국 Xianning 지역의 품위 0.81% V_2O_5 초무연탄을 이용하여 선택적 파분쇄를 진행하고, 파분쇄 산물의 입자크기와 비중을 이용하여 스파이럴로 품위 1.02% V_2O_5, 회수율 89.6%의 정광을 회수하는 기술을 개발하였다(Liu *et al*., 2016). 특히, 정광은 광미와 비교하여 제련 공정에서 산의 소비량이 많은 광물인 인회석과 철을 반 이상 적게 포함되어 있어, 향후 회수공정 진행 시 생산단가의 절감이 가능한 특징을 가지고 있는 것을 확인하였다.

Yunliang Zhao는 중국 Hubei 지역의 품위 0.71-0.82% V_2O_5 초무연탄을 이용하여 요동테이블로 비중선별을 수행하였다(Zhao *et al*., 2013; Zhao *et al*., 2014). 바나듐이 백운모와 일라이트에 포함되어 있는 것을 확인하고, 탄소 제거를 위하여 700°C에서 열처리 후 파/분쇄를 진행하고 요동테이블에서 선별한 결과, 품위 0.92-1.04% V_2O_5, 회수율 90.3-95.29%인 정광을 회수하는 기술을 개발하였다.

부유선별은 원광이 품위가 낮거나 복잡한 조성을 가지고 있을 때 원하고자 하는 광물의 회수를 위하여 입자의 표면 특성을 이용한 것이다. 대부분 초무연탄을 대상으로 연구

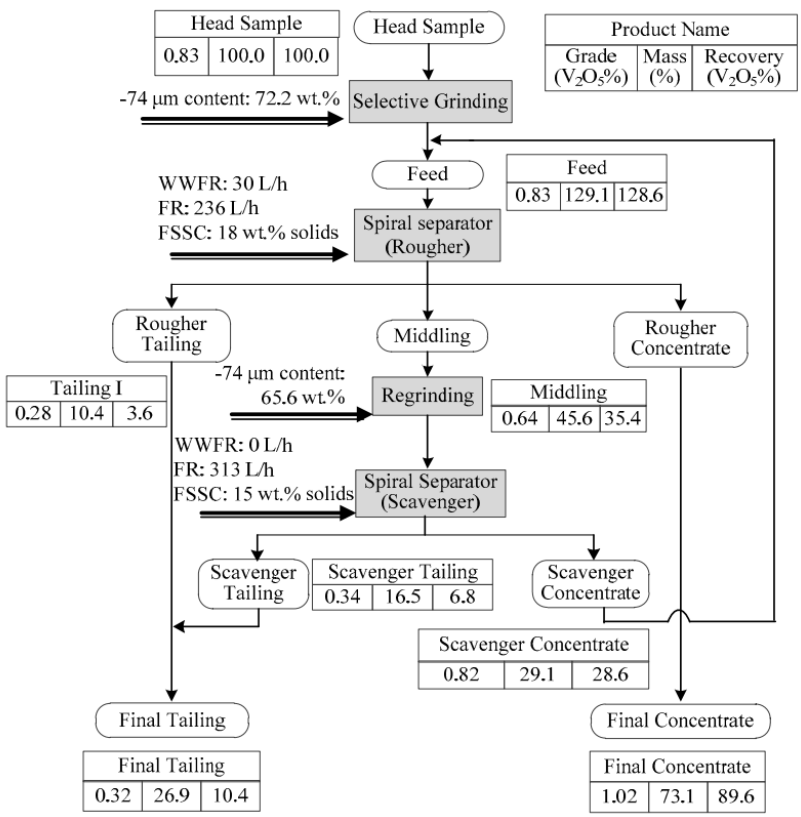

Fig. 12. Flow sheet for the pre-concentration of vanadium from stone coal ore (GPD: ground pulp density, WWFR: wash water flow rate, FSSC: feed solid concentration).

가 진행 중이며, 바나듐이 포함 된 주요 광물은 백운모로 파악되어, 이를 정광으로 회수하기 위하여 불순물인 석탄과 석영 등을 우선 제거하고, 선택적으로 백운모를 부유시켜 회수하고 있다.

Li Wang은 Fig. 13과 같이 중국 Shanxi 지역의 품위 0.68-0.92% V_2O_5 초무연탄을 이용하여 부유선별 연구를 수행하였다(Wang *et al*., 2014). 부선 효율을 향상시키기 위하여 방해석과 석탄을 올레인산과 기름을 포수제로 사용하여 역부선을 통하여 제거하였다. 그리고 부유되지 않은 산물로부터 아민계열의 포수제를 사용하여 정부선을 수행한 결과, 품위 1.32-1.88% V_2O_5, 회수율 76.58-88.38%의 정광을 회수하는 기술을 개발하였다.

Chun Liu는 중국 Hubei 지역의 품위 0.71% V_2O_5 초무연탄을 이용하여, 먼저 열처리 및 슬라임 제거와 같은 전처리를 진행하고, 지방산을 포수제로 사용하여 방해석을 제거하는 역부선을 수행하였다(Liu *et al*., 2017). 그리고 부유되지 않은 산물로부터 아민계열의 포수제를 사용하여 정부선을 수행한 결과, 품위 1.07% V_2O_5, 회수율 83.3%의 바나듐 정광을 회수하는 기술을 개발하였다.

향후 바나듐 선별 연구

2000년대 이후, 바나듐 선별기술의 연구목표는 크게 1) 품위 향상, 2) 공정의 단순화 그리고 3) 처리 용량 증가로 확인되고 있다. 이를 달성하기 위한 적절한 선별 공정의 선정 및 도입을 위하여, 원광에 포함되어 있는 함바나듐광 및 주요 맥석광물의 광물학적, 물리적, 화학적 특성의 면밀한 분석이 필요한 것으로 판단된다. 또한, 향후 효과적인 함바나듐광의 선별기술 및 공정을 개발하기 위하여, 광물의 분리/선별 특성을 고려하고, 바나듐 이외의 유용광물을 동시에 효과적으로 회수하는 공정을 개발한다면 경제성 또한 확보 가능할 것이라 판단된다.

결 론

희유금속광 중 바나듐은 매장량 및 생산량이 중국, 러시아, 남아공 3개국에 약 90%가 편중되어 있어, 가격 등락폭이 클 뿐 아니라, 안정적 확보가 매우 어려운 금속이다. 특히, 전 세계적으로 특수 합금강 제조 및 에너지 저장장치에 대한 관심이 고조되어 가고, 이의 핵심원료인 바나듐에 대한 관심도 증가하고 있어 더욱 수요가 높아질 것으로 예상되고 있다. 현재 국내에는 가행중인 광산이 없어 전량 수입에 의존하고 있으며, 계속적으로 생산량이 증가하여 바나듐 수입량이 증가하고 있는 실정이다. 그렇기 때문에 바나듐 매장량이 50%가 넘는 중국에서 저품위 함바나듐광으로부터 자력, 비중, 부유선별 등을 이용하여 바나듐 정광을 회수하는 연구가 가장 활발하게 진행되고 있다. 그러나 국내에서도 함바나듐광이 부존하고 있는 과거의 조사 결과를 바탕으로 1990년대부터 티탄철석과 백운모로부터 바나듐을 회수하는 기초 선별 연구가 진행된 바 있다. 앞으로, 부존가능성이 높은 국내 지역의 면밀한 분석과 각 광물의 특성을 고려한 선별 기술을 개발하여 효과적으로 회수하는 공정을 개발하여 경제성을 확보한다면, 자립 수급이 가능할 것으로 기대된다.

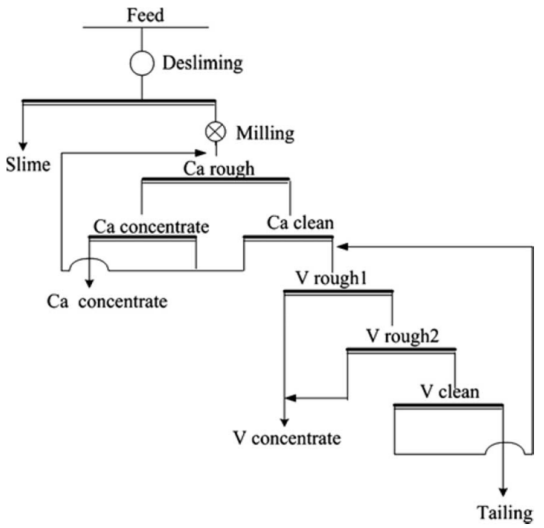

Fig. 13. Flow sheet for the flotation process of stone coal ore.

사 사

본 연구는 2019년도 한국지질자원연구원(KIGAM) 주요 사업 재원으로 지원을 받아 수행한 연구과제 입니다 (GP2017-025: 19-3212).

References

Choi, C.Y., Kim, S.H., Kim, R.Y., Choi, Y.S., Kim, S.Wh., Jung, H.Y., Yang, J.H., and Kim H.T., 2017. A review of vanadium electrolytes for vanadium redox flow batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 263-274.

Cunha, A., Martins, J., Rodrigues, N., and Brito, F.P., 2015. Vanadium redox flow batteries: a technology review. *Int. J. Energy Res.*, 39, 889-918.

Jeon, H.S., Baek, S.H., Kim, S.M., and Go, B.H., 2018. Status of reserves and development technology of rare earth metals in Korea. *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng*., 55(1), 67-82.

Ju. J., Fu, H.G., Wei, S.Z., Sang, P., Wu, Z.W., Tang, K.Z., and Lei, Y.P., 2018. Effects of Cr and V additions on the microstructure and properties of hign-vanadium wear- resistant alloy steel. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(2), 176-186.

Kim, J.M. and Park, H.S., 2017. Experimental analysis of discharge characteristics in vanadium redox flow battery. *Applied Energy*, 206, 451-457.

Kim, J.S., 2013. Research and development for the recovery of uranium and vanadium from Korean black shale ore. *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, 22(1), 3-10.

Kim, Y.J., Lee, H.B., Lee, Wh,S., Kim, D.H., and Yoo, O.J., 2018. *Mineral commodity supply and demand 2017/2018*, KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Minereal Resources).

Lee, C.H., Lee, H.K., and Shin, M.A., 1997. Barium-vanadium muscovite of coaly metapelite in the Hoenam area of the Ogcheon Supergroup, Korea. *J. the Geological Society of Korea*, 33(2), 55-64.

Lee, H.B., 2009. Domestic vanadium stock adequacy. *Mineral and Industry*, 22(1), 60-70.

Liu, C., Zhang, Y., and Bal, S., 2017. Vanadium recovery from stone coal through roasting and flotation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27, 197-203.

Liu, X., Zhang, Y., Liu, T., Cai, Z., and Sun, K., 2016. Pre-concentration of vanadium from stone coal by gravity using fine mineral spiral. *Minerals*, 6(3), 82-93.

Lmtiaz, M., Rizwan, M.S., Xiong, S., Li, H., Ashraf, M., Shahzad, S.M., Shahzad, M., Rizwan, M., and Tu, S., 2015. Vanadium, recent advancements and research prospects: A review. *Environment International*, 80, 79-88.

Moskalyk, R.R. and Alfantazi, A.M., 2003. Processing of vanadium: a review. *Minerals Engineering*, 16, 793-805.

Park, K.H. and Sohn, J.S., 2008. Status and prospect of vanadium resources and processing. *Trends in Metals & Materials Engineering*, 21(4), 4014.

Tang, J., Zhang, Y., Bao, S., and Liu, C., 2016. Pre-concentration of vanadium- bearing mica from stone coal by roasting-flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53(1), 402-412.

USGS (U.S. Geological Survey), 2019. *Mineral Commodity Summaries 2019*, Reston, Virginia, U.S.A.

Wang, L., Sun, W., and Zhang, Q., 2015. Recovery of vanadium and carbon from low-grade stone coal by flotation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25, 3767-3773.

Wang, L., Sun, W., Liu, R., and Gu, X., 2014. Flotation recovery of vanadium from low-grade stone coal. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 1145-1151.

Wang, M., Huang, S., Chen, B., and Wang, X., 2018. A review of processing technologies for vanadium extraction from stone coal. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 1-9.

Xu, C., Zhang, Y., Liu, T., and Huang, J., 2017. Characterization and pre-concentration of low-grade vanadium titanium magnetite ore. *Minerals*, 7(8), 137-148.

Yan, B., Wang, D., Wu, L., and Dong, Y., 2018. A novel approach for pre-concentr ating vanadium from stone coal ore. *Minerals Engineering*, 125, 231-238.

Zhao, Y., Zhang, Y., Bao, S., Liu, T., Bian, Y., Jiang, M., and Liu, X., 2014. Loose- stratification model in separation process for vanadium pre-concentration from stone coal. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 528-535.

Zhao, Y., Zhang, Y., Liu, T., Chen, T., Bian, Y., and Bao, S., 2013. Pre-concent ration of vanadium from stone coal by gravity separation. *International J. Mineral Processing*, 121, 1-5.

김 성 민

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 연구원
(本 學會誌 第55券 第1号 參照)

전 호 석

1988년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1990년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원 센터장
과학기술연합대학교 자원순환공학과 교수
(E-mail; hsjeon@kigam.re.kr)