연구논문

오산화바나듐(V_2O_5)의 건식 정제에 관한 기초 연구김병수^{1,2*} · 류태공¹ · 장한권¹ · 서창열¹ · 유정현¹ · 최지혁¹ · 조성욱¹ · 김대섭¹¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원활용연구센터, ²과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과Fundamental Study on the Pyrometallurgical Purification of Vanadium Pentoxide (V_2O_5)Byung-Su Kim^{1,2*}, Tae-Gong Ryu¹, Hankwon Chang¹, Chang-Youl Suh¹, JeongHyun Yoo¹, Jihyuk Choi¹,
Sung-Wook Cho¹ and Dae-Sup Kil¹¹Utilization Research Center, Mineral Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea²Department of Resources Recycling, University of Science and Technology (UST), Daejeon, Korea***Corresponding Author.** Byung-Su Kim, bskim@kigam.re.kr, Utilization Research center, Mineral Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) and Department of Resources Recycling, University of Science and Technology (UST), Daejeon, Korea

Received

20 January 2021

Final version Received

8 February 2021

Accepted

23 February 2021

Abstract

A fundamental study on the volatilization purification method, a pyrometallurgical purification technology, was carried out to examine the removal of impurities from vanadium pentoxide (V_2O_5). From the thermodynamic analysis, it was expected that impurities contained in V_2O_5 could be removed into the gas phase while holding it at temperatures over 300°C for P_2O_5 and at over 600°C for NaOH and KOH, because of their high vapor pressures. Experiments were carried out in the temperature range of $600\text{--}1,100^\circ\text{C}$ and a holding time range of 15–60 min under atmospheric and reduced pressures. The range of reduced pressure was $7.9 \times 10^{-2}\text{--}1.1 \times 10^{-1}$ atm under an argon atmosphere. By comparing the thermodynamic analysis with the experimental results, it was verified that impurities such as SO_3 , P_2O_5 , NaOH, and KOH were effectively removed from V_2O_5 regardless of the pressure conditions of the furnace. At the optimum conditions, V_2O_5 with a purity of 99.6 wt% was manufactured from V_2O_5 with a purity of 99.2 wt%.

Key words : High purity vanadium pentoxide (V_2O_5), Pyrometallurgical purification, Volatilization purification, Vapour pressure

요약

본 연구에서는 오산화바나듐(V_2O_5)로부터 불순물을 제거하기 위한 건식정제 공정법 중의 하나인 휘발정제 방법에 대한 기초연구를 수행하였다. 열역학적 분석결과 오산화바나듐에 함유된 P_2O_5 불순물은 300°C 이상에서 NaOH와 KOH 같은 불순물은 600°C 이상에서 증기압이 높아 기상으로 휘발 제거가 가능할 것으로 분석되었다. 실험은 대기 분위기와 감압 분위기에서 휘발온도 $600\text{--}1000^\circ\text{C}$, 유지시간 15–60분으로 변화시키면서 수행되었다. 감압은 아르곤 분위기에서 $7.9 \times 10^{-2}\text{--}1.1 \times 10^{-1}$ 기압으로 조절하였다. 열역학적 분석결과와 실험 결과를 비교함으로써 SO_3 , P_2O_5 , NaOH, KOH 같은 불순물이 로내 압력 조건에 상관없이 효과적으로 오산화바나듐으로부터 제거된다는 것이 확인되었다. 최적 조건에서 99.6 wt% 순도를 갖는 오산화바나듐이 99.2 wt% 순도를 갖는 오산화바나듐으로부터 제조되었다.

주요어 : 고순도 오산화바나듐(V_2O_5), 건식정제, 휘발정제, 증기압

서 론

산화바나듐(V_2O_5)은 철강 산업, 화학 산업, 항공기 산업 그리고 배터리 산업 등에서 바나듐 원료로 광범위하게 사용되고 있다(Moskalyk and Alfantatazi, 2003; Dassisti *et al.*, 2016; Goso *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018). 특히, 철강산업에서 오산화바나듐은 특수철강의 고장력, 경도, 피로저항 등의 물리적 특성을 향상시키기 위하여 합금 원료로 사용되는 페로바나듐(Fe-V) 합금철을 제조하기 위한 원료로 사용된다. 전 세계에서 생산되는 오산화바나듐 생산량의 85% 이상이 철강 산업에서 페로바나듐의 원료로 사용되고 있다. 뿐만 아니라 최근에 항공기 산업에서 알루미늄-바나듐(Al-V) 합금 개발과 배터리 산업에서 비발화성 및 대용량 에너지 저장장치인 바나듐 레독스흐름 배터리(Vanadium Redox Flow Battery) 개발이 활발히 진행되고 있다. 이와 같은 관점에서 향후에 고순도 오산화바나듐의 수요가 꾸준히 증가할 것으로 예측된다. 따라서 오산화바나듐의 고순도화 연구에 대한 관심이 점차로 커지고 있는 상황이다.

일반적으로 오산화바나듐의 품위가 99.2 wt% 이하인 공업용 오산화바나듐에는 바나듐 원료의 종류와 제조공정에 따라서 다르지만 불순물로 나트륨(Na), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 알루미늄(Al), 규소(Si), 타이타늄(Ti), 철(Fe), 아연(Zn), 몰리브덴(Mo), 망간(Mn), 인(P), 황(S) 및 염소(Cl) 등을 함유하고 있다. 따라서 현재까지 알려진 공업용 오산화바나듐으로부터 이와 같은 불순물을 정제하기 위한 정제 방법에는 크게 습식법과 염소화 처리 후 습식 처리하는 방법 즉 염화법이 있다(Mjejri *et al.*, 2017). 습식법에는 석출법, 용매추출법, 이온교환수지법 등이 있으며, 이와 같은 방법에서는 다단계의 공정이 필요하고, 다량의 화학물질을 사용하고, 다량의 폐수 발생과 공정 시간이 길다는 단점이 있다. 또한, 염화법은 오산화바나듐을 염소(Cl_2), 사염화탄소(CCl_4) 또는 염화알루미늄($AlCl_3$) 등을 이용하여 바나듐옥시클로라이드($VOCl_3$)로 전환하여 기화시켜 백필터에서 포집한 후 습식 처리하여 정제하는 방법으로 공정 중 발생하는 염화물에 의한 반응기의 침식과 대기오염에 대한 문제점이 있으며, 뿐만 아니라 다량의 폐수가 발생한다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 오산화바나듐의 정제 방법인 습식법과 염화법의 단점을 보완하기 위하여 공업용 오산화바나듐에 함유된 불순물 중 증기압이 높은 불순물을 가스상으로 휘발 제거하는 건식 정제 공정을 개발하기 위한 기초 연구를 수행하였다. 본 연구에서 개발하고자 하는 공정은 기존 공정과 비교해서 공정이 단순하고, 공정시간이 짧고, 화학물질의 사용이 없고, 또한 폐수 발생이 없는 경제적이면서 환경 친화적인 공정이라고 할 수 있다. 따라

서 본 연구에서 개발된 공정은 향후에 공업용 오산화바나듐으로부터 고순도 오산화바나듐을 제조하는 정제공정 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 론

이론적 배경

일반적으로 공업용 오산화바나듐은 나트륨(Na), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 알루미늄(Al), 규소(Si), 티탄(Ti), 철(Fe), 아연(Zn), 몰리브덴(Mo), 망간(Mn), 인(P), 황(S) 및 염소(Cl) 등의 불순물을 함유하고 있다. 따라서 실험에 앞서 공업용 오산화바나듐으로부터 건식정제 기술의 하나인 휘발정제 기술을 활용하여 이러한 불순물을 제거할 수 있는지를 열역학적으로 조사하였다. 일반적으로 공업용 오산화바나듐은 암모니움페타바나데이트(NH_4VO_3)를 대략 380~550°C 사이에서 열분해를 통하여 제조되고 있다(Ma *et al.*, 2018). 또한, 현재 공업용 오산화바나듐에 함유된 Na와 K의 안정상은

Fig. 1. Formation free energy of Na compounds in the presence of oxygen and hydrogen.

Fig. 2. Formation free energy of K compounds in the presence of oxygen and hydrogen.

불명확하지만 각각 Na_2O 와 K_2O 인 것으로 알려져 있다. 그러나 공업용 오산화바나듐에 함유된 Na와 K의 합계 함유량이 0.5 wt% 이하로 매우 미미하여 실험적으로 안정상을 확인하는 것은 매우 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 수소와 산소가 존재하는 조건에서 Na와 K의 안정상에 대한 온도에 따른 생성자유에너지를 Outokumpu Research Oy에서 개발한 화학프로그램인 HSC 5.1 version을 이용하여 계산하여 Na와 K의 안정상을 조사하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 수소와 산소가 존재하는 조건에서 Na와 K 화합물의 안정상에 대한 생성자유에너지를 나타낸 것이다. Fig. 1

Fig. 3. Vapor pressure of V_2O_5 and oxides for the Na, K, and P impurities contained in industrial vanadium pentoxide.

Fig. 4. Vapor pressure of V_2O_5 and chlorides for Fe, K, Na, Ca and Ti impurities contained in industrial vanadium pentoxide.

과 2는 공업용 오산화바나듐을 제조하기 위한 암모니움페타바나테이트(NH_4VO_3)의 열분해 온도인 $380^\circ C$ 이상에서 $NaOH$ 의 생성자유에너지는 Na_2O 의 생성자유에너지보다 작고, 전체적인 온도범위에서 KOH 의 생성자유에너지는 K_2O 의 생성자유에너지보다 작다는 것을 보여준다. 따라서 공업용 오산화바나듐에 함유된 Na와 K의 안정상은 각각 Na_2O 와 K_2O 인 것 보다는 $NaOH$ 와 KOH 인 것이 더 타당한 것으로 판단하였다. 이와 같은 열역학적 분석을 토대로 공업용 오산화바나듐에 함유된 $NaOH$, KOH , P_4O_{10} 등의 증기압을 V_2O_5 의 증기압과 함께 Fig. 3에 나타냈다 (Kubaschewski and Alcock, 1979). Fig. 3은 고려된 온도범위에서 공업용 오산화바나듐에 함유된 $NaOH$, KOH , P_4O_{10} 등의 증기압이 V_2O_5 증기압 보다 높기 때문에 감압 또는 상압상태에서 위와 같은 불순물을 기상으로 휘발제거가 가능하다는 것을 보여준다. 한편 염소와 여러 불순물을 함유한 공업용 오산화바나듐에 대하여 바나듐을 포함한 여러 불순물의 염화물에 대한 증기압을 계산하였다. Fig. 4는 공업용 오산화바나듐에 함유된 불순물의 염화물과 오산화바나듐의 증기압 곡선을 보여준다 (Kubaschewski and Alcock, 1979). Fig. 4는 $FeCl_3$, KCl , $NaCl$, $TiCl_4$ 등 불순물의 증기압이 V_2O_5 증기압 보다 높기 때문에 감압 또는 상압 상태에서 위와 같은 불순물을 기상으로 휘발제거가 가능할 것으로 분석되었다. 그러나 $CaCl_2$ 의 증기압은 비교적 매우 낮기 때문에 제거가 어려울 것으로 판단된다. 한편, 염화바나듐(VCl_3)의 증기압은 비교적 높기 때문에 바나듐 일부가 기상으로 손실될 것으로 분석되었다.

실험 방법

본 연구에서는 중국산 공업용 오산화바나듐 분말을 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 시료의 화학 분석데이터이다. Table 1에 제시된 바와 같이 공업용 오산화바나듐은 S, P, K, Na, Ca, Fe, Si 등의 불순물을 포함하고 있으며, 99.2 wt%의 V_2O_5 순도인 것으로 분석되었다.

가열로는 실리콘 카바이드(SiC) 발열체의 전기저항로와 분위기 조절이 가능한 진공유도로를 사용하였다. 도가니는 알루미늄도가니와 흑연도가니 두 종류를 사용하였다. 실험은 시료가 장입된 도가니를 로에 장입하고, 대기 분위기

Table 1. Chemical analysis data of vanadium pentoxide powder used in this study (wt%)

V_2O_5	SO_3	SiO_2	$NaOH$	Al_2O_3	P_2O_5	KOH
	0.025	0.019	0.134	0.163	0.206	0.129
99.2	CaO	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	ZnO	MoO_3
	0.088	0.039	0.005	0.004	0.004	0.014

(A) SiC electrical resistance furnace.

(B) Vacuum induction furnace capable of controlling the atmosphere.

Fig. 5. Experimental equipment used in the study.

기와 감압 분위기에서 목적 온도로 가열하여 일정시간 유지한 후, 로 안에서 냉각하였다. 실험온도는 600°C에서 1,100°C로, 진공도는 아르곤 분위기에서 7.9×10^{-2} 기압에서 1.1×10^{-1} 기압으로 조절되었으며, 유지시간은 15분에서 60분까지 변화시켰다. Fig. 5는 대기 분위기와 감압 상태에서 수행된 실험장치 사진이다.

반응 전, 후 시료의 S는 XRF(MXF-2400, Shimadzu, Japan)을 사용하여 분석하였고, 나머지 금속성분은 혼산(HF:HClO₄:HCl=1:3:5) 분해로 완전히 분해하여 ICP(Jobin-Yvon Equipment Co., JY-38 plus)로 분석하였다.

실험 결과 및 고찰

Table 2는 알루미늄이나 도가니를 사용하여 대기 분위기에서 1시간 동안 휘발정제 실험 후 얻어진 시료와 흑연 도가니를 사용하여 감압 분위기($7.9 \times 10^{-2} - 1.1 \times 10^{-1}$ 기압)에서 1시간 동안 휘발정제 실험 후 얻어진 시료의 ICP 분석결과를 나타낸 것이다. Table 2에서 보여 지는 바와 같이 대기 분위기에서는 700°C 이하에서 1시간 휘발정제를 할 경우 오산화바나듐의 품위가 99.5 wt% 이상인 것으로 확인되었다. 또한 감압 분위기에서는 전 온도구간에서 1시간 휘발정제를 할 경우 오산화바나듐의 품위가 99.6 wt% 이상인 것으로 확인되었다. 그러나 감압 분위기에서 실험 전, 후 시료의 무게감량이 온도에 따라서 대략 20% - 30%로 휘발온도가 증가할수록 오산화바나듐의 휘발량이 증가하는 것으로 확인되었다.

Table 2. Volatile refining analysis result according to volatilization temperature (wt%)

Atmospheric pressure					Reduced pressure			
volatilization temperature (°C)	600	700	800	1,000	600	700	800	1,000
Crucible	Alumina crucible				Graphite crucible			
	wt%							
SO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0
SiO ₂	0.026	0.036	0.036	0.030	0.051	0.089	0.058	0.068
NaOH	0.137	0.089	0.089	0.090	0.106	0.110	0.108	0.140
Al ₂ O ₃	0.124	0.283	0.718	2.249	0.085	0.093	0.094	0.102
P ₂ O ₅	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
KOH	0.009	0.009	0.009	0.009	0.014	0.014	0.014	0.014
CaO	0.032	0.025	0.027	0.039	0.023	0.024	0.022	0.034
Fe ₂ O ₃	0.042	0.034	0.034	0.033	0.036	0.039	0.042	0.043
TiO ₂	0.005	0.005	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01
MnO	0.004	0.004	0.004	0.004	0.008	0.008	0.008	0.008
ZnO	0.004	0.004	0.004	0.004	0.008	0.008	0.008	0.008
MoO ₃	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
V ₂ O ₅	99.60	99.49	99.05	97.52	99.63	99.58	99.61	99.55

Fig. 6. Variation of SO_3 , P_2O_5 , NaOH, KOH and Al_2O_3 content in industrial vanadium pentoxide with volatilization temperature under atmospheric pressure.

Fig. 6과 Fig. 7은 공업용 오산화바나듐의 휘발정제 온도에 따른 SO_3 , P_2O_5 , NaOH, KOH와 Al_2O_3 의 품위변화를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 휘발정제 온도에 상관없이 SO_3 , P_2O_5 , NaOH, KOH 등의 품위는 초기 공업용 오산화바나듐 분말의 품위보다 비교적 낮아진 것으로 나타났다. 이것은 앞장에서 설명한 바와 같이 P_2O_5 , NaOH, KOH 등의 증기압이 높고, SO_3 는 기체이므로 휘발정제 과정에서 형성된 후 바로 기상으로 제거되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 감압 분위기에서 온도가 증가할수록 NaOH와 Al_2O_3 의 품위가 다소 증가한 것으로 나타나고 있으나 초기 공업용 오산화바나듐 분말에 함유된 NaOH와 Al_2O_3 의 품위 보다는 작다. 또한 휘발온도 $1,000^\circ\text{C}$ 에서 Al_2O_3 의 품위가 초기 공업용 오산화바나듐 분말에 함유된

Fig. 7. Variation of SO_3 , P_2O_5 , NaOH, KOH and Al_2O_3 content in industrial vanadium pentoxide with volatilization temperature under reduced pressure.

품위 보다 다소 높게 나온 것은 아마도 시료 분리과정에서의 오염에 기인한 것으로 판단된다. 한편, Al_2O_3 의 품위는 감압 분위기에서 흑연 도가니를 사용한 경우에는 초기 공업용 오산화바나듐 분말의 품위보다 비교적 낮아지는 것으로 나타났으나, 대기 분위기에서 알루미늄(Al_2O_3) 도가니를 사용한 경우에는 휘발온도가 증가할수록 Al_2O_3 의 품위가 초기 공업용 오산화바나듐 분말의 품위보다 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 휘발온도가 증가할수록 오산화바나듐에 의한 알루미늄 도가니의 침식에 의한 것으로 판단된다. 한편 흑연도가니를 사용한 경우 Al_2O_3 의 품위가 낮아지는 이유는 아마도 알루미늄이 양쪽성 금속으로서 바나듐과의 결합력이 작기 때문으로 추측된다. 따라서 향후 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3. Volatile refining analysis result at the volatilization temperature of 600°C (wt%)

Holding time (min)	Atmospheric pressure				Reduced pressure			
	15	30	60	90	15	30	60	90
	wt%							
SO_3	0	0	0	0	0	0	0	0
SiO_2	0.105	0.073	0.026	0.127	0.045	0.049	0.036	0.061
NaOH	0.111	0.109	0.137	0.107	0.110	0.113	0.110	0.106
Al_2O_3	0.091	0.086	0.124	0.086	0.094	0.096	0.093	0.085
P_2O_5	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
KOH	0.014	0.014	0.009	0.013	0.014	0.014	0.001	0.014
CaO	0.022	0.024	0.032	0.024	0.031	0.034	0.034	0.023
Fe_2O_3	0.038	0.037	0.042	0.038	0.044	0.043	0.044	0.036
TiO_2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MnO	0.008	0.008	0.004	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ZnO	0.007	0.007	0.004	0.007	0.007	0.007	0.004	0.007
MoO_3	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
V_2O_5	99.57	99.61	99.60	99.56	99.61	99.60	99.64	99.63

Table 3은 알루미늄 도가니를 사용하여 대기 분위기와 감압 분위기($7.9 \times 10^{-2} - 1.1 \times 10^{-1}$ 기압), 600°C 에서 유지 시간에 따른 휘발정제 실험한 결과이다. Table 3에 나타난 바와 같이 로 안의 압력 조건에 상관없이 유지 시간 15분 이상에서 모두 오산화바나듐의 품위가 99.6 wt% 이상인 것으로 확인되었다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 공업용 오산화바나듐 분말에 함유된 SO_3 , P_2O_5 , NaOH 와 KOH 등의 불순물이 휘발하여 기상으로 효과적으로 제거되었기 때문이다. 한편 또한, 대기 분위기에서 보다 감압 분위기에서 불순물의 정제효과는 다소 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 이상의 실험 결과 대기 분위기 또는 감압 분위기에서 오산화바나듐의 용융 온도 이하(670°C)인 600°C 에서 15분 이상 휘발 정제함으로써 99.6 wt% 이상의 오산화바나듐 분말을 제조할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 본 연구에서 개발한 오산화바나듐의 건식 정제공정은 비교적 간단한 공정일 뿐만 아니라 추가적인 화학약품과 폐수발생이 없기 때문에 기존 습식 정제공정과 융합하여 새로운 정제 공정을 개발하는데 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

결 론

건식정제 기술의 하나인 휘발정제 기술로 공업용 오산화바나듐(V_2O_5) 분말로부터 V_2O_5 함유량이 99.6 wt% 이상인 고품위 오산화바나듐(V_2O_5) 분말의 제조가 가능함을 확인하였다. 특히 공업용 오산화바나듐에 함유된 SO_3 , P_2O_5 , NaOH , KOH 같은 불순물이 휘발정제에서 효과적으로 제거됨을 확인하였다. 공업용 오산화바나듐의 휘발정제를 위한 최적 조건은 로안의 압력조건에 상관없이 휘발온도 600°C , 유지시간 15분 이었다. 본 연구에서 개발된 정제기술은 기존의 습식법과 염화법과 비교해서 공정이 매우 단순하고, 공정시간이 짧고, 화학물질의 사용이 전혀 없으며, 또한 폐수 발생이 전혀 없는 환경 친화적인 공정이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 공정은 향후 공업용 오산화바나듐의 정제공정 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘국내 부존 바나듐(V) 광물자원 선광/제련/활용기술 개발(GP2020-013, 21-3212-1)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Dassisti, M., Cozzolino, G., Chimienti, M., Rizzuti, A., Mastorilli, P., and L'Abbate, P., 2016. Sustainability of vanadium redox-flow batteries: Benchmarking electrolyte synthesis procedures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, p.16477-16488.
- Goso, X.C., Lagendijk, H., Erwee, M., and Khosa, G., 2016. Indicative vanadium deportment in the processing of titaniferous magnetite by the roast-leach and electric furnace smelting processes. *Sustainable Hydrometallurgical Extraction of Metals, Southern Africa Institute of Mining and Metallurgy*, Cape Town, South Africa, p.69-79.
- Jiang, D.D., Zhang, H.L., Xu, H.B., and Zhang, Y., 2017. Chlorination and purification of vanadium pentoxide with anhydrous aluminum chloride. *Journal of Alloys and Compounds*, 709, p.505-510.
- Kubaschewski, O. and Alcock, C.B., 1979. *METALLURGICAL THERMO-CHEMISTRY (5th Ed)*, Vol. 24, Pergamon Press, Oxford, England, p.360-376.
- Ma, Y., Wang, X., Stopic, S., Wang, M., and Kremer, D., 2018. Preparation of vanadium oxides from vanadium(IV) strip liquor extracted from vanadium-bearing shale using an eco-friendly method. *Metals*, 8, p.1-12.
- Mjeiri, I., Rougier, A., and Gaudon, M., 2017. Low-cost and facile synthesis of the vanadium oxides V_2O_3 , VO_2 , and V_2O_5 and their magnetic, thermochromic and electrochromic properties. *Inorganic Chemistry*, 56, p.1734-1741.
- Moskalyk, R.R. and Alfantatazi, A.M., 2003. Processing of vanadium: a review. *Minerals Engineering*, 16(9), p.793-805.
- Zhang, J., Zhang, W., and Xue, Z., 2018. An environment-friendly process reaturing calcified roasting and precipitation purification to prepare vanadium pentoxide from the converter vanadium slag. *Metals*, 9, p.1-12.

김 병 수

1985년 전북대학교 공과대학 금속공학과
공학사
1993년 전북대학교 대학원 금속공학과
공학석사
1999년 유타대학교 대학원 금속공학과
공학박사

현재 한국지질자원연구원 자원활용연구센터 책임연구원
(E-mail; bskim@kigam.re.kr)

류 태 공

2002년 충남대학교 공과대학 정밀공업화학
공학사
2004년 충남대학교 대학원 공업화학
공학석사
2008년 유타대학교 대학원 금속공학과
공학박사

현재 한국지질자원연구원 자원활용연구센터 책임연구원
(E-mail; tgryu@ksmer.or.kr)

장 한 권

1998년 영남대학교 공과대학 환경공학과
공학사
2000년 영남대학교 대학원 환경공학과
공학석사
2003년 히로시마대학교 대학원 화학공학과
공학박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(E-mail; hkchang@kigam.re.kr)

서 창 열

1993년 한밭대학교 공과대학 기계설계과
공학사
1997년 한밭대학교 대학원 금속공학과
공학석사

현재 한국지질자원연구원 자원활용연구센터 책임기술원
(E-mail; cysuh@kigam.re.kr)

유 정 현

2002년 전남대학교 공과대학 금속공학과
공학사
2005년 전남대학교 대학원 금속공학과
공학석사
2009년 전남대학교 대학원 금속공학과
공학박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(E-mail; yoo@kigam.re.kr)

최 지 혁

2005년 연세대학교 공과대학 금속시스템
공학 공학사
2010년 연세대학교 대학원 금속공학 공학
박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(E-mail; jhchoi@kigam.re.kr)

조 성 옥

1984년 서울대학교 공과대학 금속공학과
공학사
1991년 서울대학교 대학원 금속공학과
공학석사
1994년 일본 동북대학교 대학원 금속공학과
공학박사

현재 한국지질자원연구원 자원활용연구센터 책임연구원
(E-mail; cho@kigam.re.kr)

길 대 섭

1994년 한밭대학교 재료공학과 공학사
1996년 충남대학교 대학원 재료공학과 공학
석사
2006년 공주대학교 대학원 재료공학과 공학
박사

현재 한국지질자원연구원 자원활용연구센터 퇴직계약직
(E-mail; kil@kigam.re.kr)