» 연구논문 «

페니켈수소전지에서 회수된 희토류복합 침전분말로부터 세륨 회수에 대한 연구

김보람* · 안낙균** · 이상우*** · §김대원*

*고등기술연구원 신소재공정센터, **고등기술연구원 융합소재연구센터, ***(주)케이엠씨

A Study on the Separation of Cerium from Rare Earth Precipitates Recovered from Waste NiMH Battery

Boram Kim*, Nak-Kyoon Ahn**, Sang-Woo Lee*** and §Dae-Weon Kim*

*Advanced Materials and Processing Center, Institute for Advanced Engineering (IAE), Yongin 17180, Korea

**Materials Science and Chemical Engineering Center, Institute for Advanced Engineering (IAE), Yongin 17180, Korea

***KMC, Gumi 39414, Korea

요 약

페니켈수소전지에 함유되어 있는 세륨을 회수하기 위하여 침출 및 침전을 통해 회수한 희토류복합 침전분말을 수산화나트륨(NaOH) 수용액에 반응온도 70 °C 및 반응시간 4시간의 조건에서 이온교환반응을 통하여 희토류 수산화물로 변환시켰다. 이후 희토류 수산화물은 반응온도 80 °C에서 반응시간 4시간의 조건에서 공기를 주입하며 산화반응을 통해 세륨을 Ce³⁺에서 Ce⁴⁺로 전환시켰다. 세륨의 산화율은 XPS 분석을 통해 약 25 %로 확인하였으며, 산화반응이 완료된 분말은 묽은 황산에 대한 용해도 차이를 이용하여 세륨과 나머지 희토류를 분리하였다. 최종적으로 회수된 분말은 XRD 분석을 통해 수산화세륨(Ce(OH)₄)의 결정상을 확인하였으며, 이때 세륨의 순도는 약 94.6 %, 회수율은 97.3 %를 나타내었다.

주제어 : 페니켈수소전지, 희토류복합 침전분말, 분리 및 회수, 산화율, 수산화세륨

Abstract

In order to recover the cerium contained in the spent nickel metal hydride batteries (NiMH battery), the recovered rare earth complex precipitates from NiMH were converted into rare earth hydroxides through ion exchange reaction to react with NaOH aqueous solution at a reaction temperature of 70 °C, for 4 hours. Rare earth hydroxides were oxidized by injecting air at 80 °C for 4 hours to oxidize Ce³⁺ to Ce⁴⁺. The oxidation rate of cerium was confirmed to be about 25 % through XPS, and the oxidized powder was separated from the rest of the rare earth using the difference in solubility in dilute sulfuric acid. The finally recovered powder has a crystal phase of cerium hydroxide (Ce(OH)₄). The cerium purity of the final product was about 94.6 %, and the recovery rate was 97.3 %.

Key words : NiMH battery, rare earth complex, separation, Cerium hydroxide

· Received : September 25, 2019 · Revised : October 28, 2019 · Accepted : November 13, 2019

§Corresponding Author : Dae-Weon Kim (E-mail : mdsimul@naver.com)

Advanced Material & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28 Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17180, 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

하이브리드 자동차(HEV; Hybrid Electric Vehicle)에 주로 사용되어진 니켈수소전지(NiMH; Nickel Metal Hydride Battery)는 리튬이온전지의 출현으로 그 사용량이 감소하고 있으나, 2000년대 초에 보급되었던 하이브리드 자동차와 함께 폐기되는 니켈수소전지의 양도 증가하고 있다. 국내 전지의 종류에 따른 재활용률 및 니켈수소전지의 연도별 재활용 현황에 대하여 Fig. 1에 나타내었다¹⁾. Fig. 1에 의하면, 망간/알칼리 전지 및 리튬일차전지 등은 재활용 의무량 대비 재활용률이 100%가 넘는 반면, 니켈수소전지는 59.1%로 다른 전지에 비해 매우 낮은 실정이다. 또한 니켈수소전지는 재활용률의 증가세도 정체되어 있기 때문에 이에 대한 적절한 재활용 공정 기술 개발 및 활성화를 통해 재활용률 증대가 필요하다.

니켈수소전지는 유가금속인 코발트, 니켈 이외에도 세륨, 란탄 그리고 네오디뮴과 같은 희토류 원소를 함유하고 있으며, 많은 연구자들이 페니켈수소전지로부터 유가금속을 회수하는 연구를 수행하고 있다²⁻⁶⁾. 2012년 Innocenzi 등은 페니켈수소전지 내 니켈, 망간 및 희토류의 완전한 용해를 위해 두 번의 순차적 침출단계의 필요성을 제시하며, 침출 이후 선택적 침전을 통해 란탄과 세륨황산염 형태로 99% 회수할 수 있는 공정도를 제안하였다⁷⁾. 2013년 Gasser 등은 흡착제인 layered double hydroxide (LDH)-A를 사용하여 페니켈수소전지 내 란탄(III)과 네오디뮴(III)의 분리 및 회수 연구를 진행하였다⁸⁾. 1차적으로 산에 용해시킨 후 수산화나트륨과 반응시켜 희토류 침전물을 생성하여 코발트와 니켈

을 분리하였다. 침전물은 다시 2 M의 염산에 용해시킨 후 흡착제를 사용하여 란탄(III)과 네오디뮴(III) 모두 약 98% 회수하였다. 2015년 Yun 등은 N1923 추출제를 사용하여, 철, 니켈, 구리, 망간 및 아연으로부터 희토류 추출에 대한 pH, 온도, 교반속도 및 시간의 영향을 조사하였다. 최적 조건을 설정하여 파일럿 실험 결과 99.98%의 추출율과 순도 99.77%의 희토류 옥살산염 형태로 희토류를 회수하였다⁹⁾. 그러나 기존 연구에서는 희토류복합물 형태로의 회수 연구가 주를 이루었고, 희토류 원소별 분리 및 회수의 경향을 확인할 수 있는 기초 데이터는 부족한 실정이다.

본 저자들은 이전 연구에서 페니켈수소전지를 황산에 침출한 후, 수산화나트륨을 이용한 침전법을 통해 코발트와 니켈을 회수하였고, 희토류에 대하여서는 희토류복합 침전분말($\text{NaREE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, REE; Rare Earth Element)의 결정상으로 회수하였다¹⁰⁻¹²⁾. 그러나 회수된 희토류복합 침전물의 형태는 산업적으로 사용되는 분야가 없으므로 각 희토류 원소별로의 분리가 필요하다.

따라서 본 연구는 페니켈수소전지 내 희토류 중 가장 함유량이 높은 세륨을 선택적으로 분리하는 연구를 다음과 같은 주요 공정 (i) 희토류복합 침전물로부터 수산화나트륨을 이용하여 희토류 수산화물 형태로 치환; (ii) 희토류 수산화물에서 Ce^{3+} 에서 Ce^{4+} 로 전환; (iii) 각 희토류 용해도 차이에 의한 세분 분리; (iv) 분리된 세륨의 평가를 통하여 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 희토류복합 침전분말($\text{NaREE}(\text{SO}_4)_2$

Fig. 1. Status of recycling of waste battery and NiMH in Korea¹⁾.

Table 1. Details of components for NaREE(SO₄)₂·H₂O¹⁰⁾

	Rare earth elements				Etc.				
Weight(%)	Ce	La	Nd	Pr	Na	K	Fe	Zn	Ni
	36.6	15.7	9.2	3.4	33.3	1.1	0.5	0.1	0.1

·H₂O)은 페니켈 수소전지(Model: HHR-33AH72W6, Hitachi) 모듈에서 물리적 처리, 침출 및 침전을 통해 코발트와 니켈을 제거하여 제조하였다¹⁰⁾. 희토류복합 침전분말에는 세륨이 약 33.6 %, 란타넘이 약 15.7 % 그리고 네오디뮴과 프라세오디뮴이 각각 9.2 %, 3.4 % 함유되어 있으며, Table 1에 나타내었다.

회수된 희토류복합 침전분말은 NaOH 수용액을 이용하여 반응 온도 70 °C, 반응 시간 4시간의 조건으로 이온치환반응으로 희토류 수산화물을 제조하였다. 반응식은 식 (1)에 나타내었다.

Ce³⁺을 Ce⁴⁺로 산화시키기 위하여 반응 온도 80 °C 조건으로 4시간 동안 공기를 2,000 cc/min으로 주입하며, 이중반응조를 이용하였으며 Fig. 2에 모식도를 나타냈다. 수산화세륨의 산화반응은 식 (2)에 나타내었다.

Fig. 2. Schematic for experimental apparatus for the oxidation of NaREE(SO₄)₂·H₂O.

산화반응 후 수산화희토류를 여과 및 수세를 하였으며, 세륨을 선택적으로 침전시키기 위해 1 M 황산수용액에 용해시켜 10 M의 수산화나트륨으로 pH를 조절하였다. 또한 pH에 따른 희토류 원소(세륨, 란타넘, 네오디뮴, 프라세오디뮴)의 침전율을 비교하였다. 이후 침전된 4가의 수산화세륨은 여과지(F1001, CHMLAB)를 사용하여 여과 후 수세하여 회수하였다. Fig. 3에 본 연구에서 수행된 희토류복합 침전분말로부터 수산화세륨의 분리 회수 공정에 대한 흐름도를 나타내었다.

회수된 수산화세륨은 XRD(X-ray diffractometer, Shimadzu, XRD-6100)를 이용하여 결정상 분석을 실시하였고, XPS(X-ray photoelectron spectroscopy, Thermo Fisher Scient, K-Alpha+)를 통해 수산화세륨의 Ce³⁺에서 Ce⁴⁺로의 전환율을 확인하였다. 최종적으로 회수된 수산화세륨의 회수율과 순도는 ICP-OES(Inductively coupled plasma optical emission spectrometer, SHIMADZU)를 이용하여 분석하였다.

Fig. 3. Experimental procedure for separation Ce from rare earth precipitate (NaREE(SO₄)₂·H₂O).

3. 결과 및 고찰

3.1. 이온치환반응

본 저자들은 기존 연구에서 페니켈수소전지 분말을 1M 황산용액에 침출하여, 침출액의 pH 조절을 통해 희토류복합 침전분말($\text{NaREE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 제조 연구를 수행하였으며, 이를 본 실험의 원료로 사용하였다¹⁰⁾.

희토류복합 침전분말의 조성은 Table 1에 나타낸 것과 같다. 희토류복합 침전분말은 흰색의 분말이며, 결정상과 결정형태를 확인하기 위해 XRD와 FE-SEM(Field emission scanning electron microscope, TESCAN, MIRA-3) 분석을 시행하였다. 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다. XRD 분석 결과, 희토류복합 침전분말은 $\text{NaCe}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NaLa}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{NaNd}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

형태로 존재하였으며, SEM 분석 결과 수십 μm 크기의 육각기둥이 응집되어 있는 형태로 관찰되었다.

희토류복합 침전분말을 산화반응에 적합하도록 수산화나트륨을 이용하여 이온치환반응을 통해 수산화물로 제조하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 결정상과 입자형태가 변하였다. 회수된 분말은 옅은 황색의 분말로 FE-SEM을 통해 육각기둥의 입자와 꽃모양의 입자가 혼재되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 XRD 결과는 $\text{NaREE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 분말이 $\text{REE}(\text{OH})_3$ 형태로 변하여 $\text{Ce}(\text{OH})_3$, $\text{La}(\text{OH})_3$, $\text{Nd}(\text{OH})_3$ 가 주요 피크로 확인되었다.

3.2. 산화반응

희토류수산화물 내 Ce^{3+} 이 산화되어 Ce^{4+} 의 상태에서는 다른 희토류 원소들에 비해 염기도가 약해지므로

Fig. 4. XRD pattern and SEM image of rare earth precipitates.

Fig. 5. XRD pattern and Fe-SEM image of rare earth hydroxide.

Table 2. The pH of the rare earth element dissolved in the aqueous sulfuric acid solution¹³⁾

Rare earth elements	pH
La ³⁺	7.41
Ce ³⁺	7.35
Pr ³⁺	7.17
Nd ³⁺	6.95
Ce ⁴⁺	2.65

pH 조절을 통해 희토류 원소들과 분리가 가능하다¹³⁾. Table 2에 황산수용액에서 희토류 원소별 침전물이 생성되는 pH를 나타내었다. 4가의 세륨이온은 pH 약 2.65에서 Ce(OH)₄의 형태로 침전되며, 이와 달리 란탄을 포함한 다른 희토류 원소들은 pH 6 이상에서 침전물을 형성한다. 따라서 이 특성을 이용하고자 Ce³⁺을 Ce⁴⁺로 산화시킨 후 희토류 수산화물을 황산과 반응시킨 후 수산화나트륨을 사용하여 pH를 조절함으로써 희토류 수산화물로부터 Ce⁴⁺을 분리할 수 있었다.

Ce³⁺이 Ce⁴⁺로 산화되는 반응에 소요되는 시간을 확인하기 위해 시간 변화에 따른 pH 및 산화환원전위(ORP: Oxidation-reduction potential)를 측정(Electrochemistry Meter, Thermo Scientific, VSTAR52)하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 산화공정을 거쳐 [Ce³⁺]에서 [Ce⁴⁺]의 농도 변화에 따른 Nernst식은 식 (3)과 같다. 식 (3)에서 E는 전극전위, E⁰는 표준전극전위, R은 기체상수, T는 절대온도(K), m은 산화-환원 반응식에 참여하는 전자의 수, F는 패러데이 상수를 나타낸다. 반응 시간이 지날수록 공기에 의한 세륨수산화

Fig. 6. pH and ORP according to the time in oxidation of cerium hydroxide. **Fig. 7.** Effect of pH on sedimentation rate by rare earth elements.

물의 산화가 진행됨에 따라 산화환원전위는 증가하였다. 반응 시간이 210분이 되었을 때, 산화환원전위는 최대값이 되었으며, 그 이후 평형을 유지하므로 산화반응이 종료되었음을 판단하였다.

$$E = E^0 + \frac{RT}{mF} \ln \frac{[Ce^{4+}]}{[Ce^{3+}]} \quad (3)$$

산화 반응 후 세륨 분리에 적절한 조건을 확인하기 위해 pH에 따른 희토류 원소별 침전율을 확인하였으며, 이는 Fig. 7에 나타내었다. pH 2.5에서 세륨의 침전율은 급증하여 약 99 %였으며, 란탄은 약 11 %, 프라세오디뮴은 7 % 및 네오디뮴 16 %의 침전율을 확인할 수 있다. pH 4.0에서 세륨을 제외한 다른 희토류 원소의 침전율이 약 14 ~ 24 %로 확인되지만, 희토류의 상대적인 함량 비율을 고려하면 매우 적은 양이 침전된 것으로 사료된다.

산화 반응 후 Ce³⁺에서의 Ce⁴⁺로의 전환율을 확인하기 위해 XPS 분석을 하였다. 일반적으로 Ce3d XPS 스펙트럼은 10개의 피크로 구성되어 있다. Ce³⁺의 농도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다^{14,15)}. 여기서 Ce(III)와 Ce(IV)는 각각 Ce³⁺와 Ce⁴⁺의 XPS 스펙트럼 피크의 적분된 영역의 합을 나타낸다. Fig. 8과 Fig 9에 각각 REE(OH)₃와 산화반응 후 pH조절을 통해 회수한 Ce(OH)₄ 산물의 XPS 스펙트럼을 나타냈다. 피크의 위치는 다른 피크들과 분리되어 구별이 쉬운 u''' 값을 기준으로 Zhang 등의 연구를 기반으로 계산하였으며, Table 3에 나타냈다¹⁵⁾.

Table 3. Assignment of Ce 3d peaks in XPS

		v_0	v	v'	v''	v'''
Ce 3d _{5/2}	origin	Ce ³⁺	Ce ⁴⁺	Ce ³⁺	Ce ⁴⁺	Ce ⁴⁺
	shift(eV)	-36.10	-34.20	-31.43	-27.44	-18.30
		u_0	u	u'	u''	u'''
Ce 3d _{3/2}	origin	Ce ³⁺	Ce ⁴⁺	Ce ³⁺	Ce ⁴⁺	Ce ⁴⁺
	shift(eV)	-17.80	-15.65	-12.85	-9.25	0

Fig. 8. An XPS spectrum of REE(OH)₃. **Fig. 9.** An XPS spectrum of precipitate (Ce(OH)₄) after air oxidation.

Ce(III)와 Ce(IV)는 상이한 스펙트럼을 갖는다. Ce(IV)는 Ce(III)에 존재하지 않는 약 917 eV에서 피크를 나타낸다¹⁶⁾. Fig. 8과 Fig 9의 데이터를 식 (6)에 적용하여 산출하였으며 산화 전후 분말 모두 Ce(III)과 Ce(IV)의 피크가 혼재되어 있으며, 비율에서는 차이를 나타냈다. 산화 전 REE(OH)₃ 분말의 Ce³⁺와 Ce⁴⁺의 비율은 각각 56.74 %, 43.26 %로 확인하였다. 산화 후 최종 회수한 분말의 Ce³⁺와 Ce⁴⁺의 비율은 각각 31.78 %, 68.22 %로 산화 전후에 따른 Ce³⁺에서 Ce⁴⁺로의 전환율은 약 25 %로 나타났다. Fig. 9에서 보이는 Ce(III)의 피크는 산화가 덜 진행된 이온이 표면에 존재하여 측정된 것으로 사료된다. 또한 Ce(3d) peak가 굉장히

복잡한 형태로 각 스펙트럼의 간섭으로 인해 3가의 세륨이 강하게 측정되는 경향이 있어 예상했던 전환율보다는 낮게 분석된 것으로도 해석할 수 있다¹⁷⁾.

$$\text{Ce(III)} = v_0 + v' + u_0 + u' \quad (4)$$

$$\text{Ce(IV)} = v + v'' + v''' + u + u'' + u''' \quad (5)$$

$$[\text{Ce(III)}] = \frac{\text{Ce(III)}}{\text{Ce(III)} + \text{Ce(IV)}} \quad (6)$$

NaREE(SO₄)₂·H₂O 분말로부터 희토류 수산화물을 제조하여 Ce(OH)₄ 형태로 회수된 분말의 XRD 분석을 통해 결정상의 특성을 확인하였으며, 그 결과는 Fig.

Fig. 10. XRD patterns of Ce(OH)₄ powder ((a) experimental data, (b) reference data¹²⁾).

Fig. 11. Purity and recovery rate of rare earth elements in product.

10에 나타났다. Ansari 등이 보고한 바에 따르면 $\text{Ce}(\text{OH})_4$ 의 XRD 패턴을 확인할 수 있었으며 본 연구 결과에서도 이와 같은 입방형석구조의 결정상이 생성되었음을 확인하였다¹⁸⁾.

Fig. 11은 최적 조건인 NaOH 수용액과 70 °C의 반응온도에서 4시간 동안 이온치환반응 후, 슬러리에 2,000 cc/min의 유량으로 공기를 주입하며 4시간 동안 산화반응을 거친 후 pH 2.5로 조절하여 회수한 최종 산물의 희토류 원소별 순도와 회수율을 ICP-AES 분석을 통해 분석한 결과이다. 그 결과 희토류 복합물 내 세륨을 제외한 희토류 원소의 함량이 낮을수록 회수율이 높으며 세륨의 순도는 94.6 %이며, 회수율은 97.3 %로 분리 회수하였음을 확인하였다.

$\text{NaREE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 분말로부터 세륨을 분리하기 위해 수산화물로 치환한 후 산화공정을 이용하여 산물을 최종적으로 회수하였다. 회수한 분말은 특성분석을 통해 $\text{Ce}(\text{OH})_4$ 의 형태로 확인되었으며, 세륨 이외의 희토류 원소들에 대해서도 추가적인 연구를 통하여 향후에 연구를 수행하여 보고하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐니켈수소전지 내 함유되어 있는 주요 희토류 성분 중의 세륨에 대하여 세륨수산화물로 회수하기 위한 공정을 진행하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) $\text{NaREE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 분말을 NaOH 수용액에 70 °C에서 4시간 반응을 진행하여 희토류 수산화물을 제조하였으며, 산화공정을 통해 Ce^{3+} 을 Ce^{4+} 로 전환시켰다.
- (2) 산화된 분말은 황산수용액에서 희토류 원소별 침

전물이 생성되는 pH가 상이한 특성을 이용하여 3가의 희토류 원소들로부터 4가의 세륨수산화물을 침전시켜 분리하였으며, XRD 분석을 통해 결정상을 확인할 수 있었다.

(3) 최종적으로 회수된 분말은 XPS를 통해 Ce^{3+} 에서 Ce^{4+} 로의 전환율을 확인하였으며, ICP 분석을 하여 세륨의 회수율 및 순도를 확인한 결과 97.3 %의 회수율과 94.6 %의 순도로 회수하였다.

현재 희토류 원소를 회수하기 위해 주로 연구된 방법인 화학약품을 사용하는 용매추출 기법으로 회수하는 공정에 비해, 공기 산화법을 사용함으로써 경제적인 이점을 얻을 수 있다. 또한 연속 공정을 통해 희토류 원소의 회수율 및 순도의 향상이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(소재부품기술개발사업 No. 10077752).

References

1. Korea Battery Recycling Association, Recycling Performance, <http://www.kbra.net/>, August 01, 2019.
2. Bertuol, D. A., Bernardes, A. M., and Tenório, J. A. S., 2006 : Spent NiMH batteries: characterization and metal recovery through mechanical processing, *Journal of Power Sources*, 160(2), pp.1465-1470.
3. Bertuol, D. A., Bernardes, A. M., and Tenório, J. A. S., 2009 : Spent NiMH batteries—The role of selective precipitation in the recovery of valuable metals, *Journal of Power Sources*, 193(2), pp.914-923.
4. Innocenzi, Valentina and Francesco Veglio., 2012 : Recovery of rare earths and base metals from spent nickel-metal hydride batteries by sequential sulphuric acid leaching and selective precipitations, *Journal of Power Sources*, 211, pp.184-191.
5. Pietrelli, L., Bellomo, B., Fontana, D., et al., 2005 : Characterization and leaching of NiCd and NiMH spent batteries for the recovery of metals, *Waste Management*, 25(2), pp.221-226.
6. Pietrelli, L., Bellomo, B., Fontana, D., et al., 2002 : Rare earths recovery from NiMH spent batteries, *Hydrometallurgy*, 66(1-3), pp.135-139.
7. Innocenzi, V. and Veglio, F., 2012 : Recovery of rare earths and base metals from spent nickel-metal hydride batteries

- by sequential sulphuric acid leaching and selective precipitations, Journal of Power Sources, 211, pp.184-191.
8. Gasser, M. S. and Aly, M. I., 2013 : Separation and recovery of rare earth elements from spent nickel-metal-hydride batteries using synthetic adsorbent, International Journal of Mineral Processing, 121, pp.31-38.
 9. Yun, X. I. A., Liansheng, X., Jiying, T. I. A. N. et al., 2015 : Recovery of rare earths from acid leach solutions of spent nickel-metal hydride batteries using solvent extraction, Journal of Rare Earths, 33(12), pp.1348-1354.
 10. Ahn, N. K., Kim, D. W., and Yang, D. H., 2018 : A Study on Recovery of Rare Earth and Acid Leaching for Wet Recycling of Waste NiMH Batteries, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 27(1), pp.22-30.
 11. Ahn, N. K., Kim, D. W., Shim, H. W. et al., 2018 : A study on recovery of rare earth oxide powders from waste NiMH batteries, Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, 28(2), pp.85-90.
 12. Kim, D. W., Ahn, N. K., Shim, H. W. et al., 2018 : A Study on the Preparation of Rare Earth Oxide Powder for Rare Earth Precipitates Recovered from Spent Ni-MH Batteries, Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, 25(3), pp.213-219.
 13. Yoon, H. S., Kim, C. J., Eom, H. C. et al., 2005 : Separation of cerium hydroxide from wasted cerium polishing powders by the aeration and acidity-controlling method, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 14(6), pp.3-9.
 14. Preisler, E. J., Marsh, O. J., Beach, R. A. et al., 2001 : Stability of cerium oxide on silicon studied by x-ray photoelectron spectroscopy, Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 19(4), pp.1611-1618.
 15. Zhang, J., Ju, X., Wu, Z. Y. et al., 2001 : Structural characteristics of cerium oxide nanocrystals prepared by the microemulsion method, Chemistry of materials, 13(11), pp.4192-4197.
 16. Aramaki, K., 2002 : Self-healing mechanism of an organosiloxane polymer film containing sodium silicate and cerium (III) nitrate for corrosion of scratched zinc surface in 0.5 M NaCl, Corrosion Science, 44(7), pp.1621-1632.
 17. Paparazzo, E., 2011 : On the curve-fitting of XPS Ce(3d) spectra of cerium oxides, Materials Research Bulletin, 46(2), pp.323-326.
 18. Ansari, A. A. and Kaushik, A., 2010 : Synthesis and optical properties of nanostructured Ce(OH)₄, Journal of Semiconductors, 31(3), pp.1-4.

김 보 략

- 한양대학교 자원환경공학과 석사
 - 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 연구원
 - 당 학회지 제27권 1호 참조
-

안 낙 균

- 대전대학교 신소재공학과 석사
 - 현재 고등기술연구원 융합소재연구센터 연구원
 - 당 학회지 제26권 4호 참조
-

이 상 우

- 현재 (주)케이엠씨 연구소장
-

김 대 원

- 동경공업대학 재료과학과 박사
 - 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 수석연구원
 - 당 학회지 제26권 2호 참조
-