

상온제련을 위한 네오디뮴의 비수계 전해 기초연구

박제식 · §이철경*

전자부품연구원 차세대전지연구센터, *금오공과대학교 신소재공학부

A Basic Study on Non-aqueous Electrolysis of Neodymium for Room-temperature Metallurgy

Jesik Park and §Churl Kyoung Lee*

Advanced Batteries Research Center, Korea Electronics Technology Institute

*School of Advanced Materials Sci. & Eng., Kumoh National Institute of Technology

요 약

본 연구에서는 네오디뮴의 상온제련의 가능성을 알아보기 위하여 비수계 전해액에서 네오디뮴의 전기화학적 레독스 거동을 조사하였다. 비수계 전해질로는 이온성액체인 $[C_4mim]PF_6$, $[C_4mim]Cl$, $[P_{66614}]PF_6$ 와 함께 네오디뮴 염에 대한 용해도가 높은 에탄올과 전기화학적 안정성이 높은 탄산염계 유기용액을 기반으로 한 혼합전해질을 대상으로 하였다. 다른 전해액에 비하여 ethylene carbonate (EC)/di-ethylene carbonate (DEC)의 경우가 네오디뮴의 전기화학적 레독스 특성이 우수한 것으로 판단되었으며, 물성향상을 위하여 에탄올을 첨가하는 실험을 수행하였다. 순수한 1 : 1 EC/DEC와 에탄올의 혼합 비율, 그리고 $NdCl_3$ 의 농도에 따른 이온전도도를 측정 한 결과, 에탄올 함량 50 vol%, $NdCl_3$ 농도 0.5 M에서 전해질 특성이 가장 우수한 것으로 판단된다. 순환전위법과 선형전위법을 이용해 -3.8 V (vs. Pt-QRE)에서 네오디뮴의 환원반응으로 추정되는 전류피크가 관찰된다. 상온에서 -6 V (vs. Pt-QRE)에서 18시간 동안 정전압법으로 전해한 결과, 금속 네오디뮴이 전착되었음을 확인하였다.

주제어 : 네오디뮴, 상온제련, 비수계 전해액, 전해

Abstract

In this study, the electrochemical redox behavior of neodymium in non-aqueous electrolytes was investigated to confirm the possibility of neodymium metallurgy at room temperature. The non-aqueous electrolytes include ionic liquids such as $[C_4mim]PF_6$, $[C_4mim]Cl$, and $[P_{66614}]PF_6$, ethanol which are highly soluble in neodymium salts, and mixed electrolytes based on carbonate with highly electrochemical stability. The electrochemical redox properties of neodymium were better than those of other electrolytes in the case of the mixed electrolyte based on ethylene carbonate (EC)/di-ethylene carbonate (DEC). Ethanol was added to improve the physical properties of the mixed electrolyte. Thorough the analysis about ionic conductivity of EC/DEC ratio, ethanol content and $NdCl_3$ concentration, the best electrolyte composition was 50 vol% content of ethanol and 0.5 M of $NdCl_3$. Using cyclic voltametry and linear sweep voltametry, a current peak estimated at -3.8 V (vs. Pt-QRE) was observed as a limiting current of neodymium reduction. Potentiostatic electrolysis for 18 hours at room temperature at -6 V (vs. Pt-QRE) confirmed that metallic neodymium was electrodeposited.

Key words : neodymium, room-temperature metallurgy, non-aqueous electrolyte, electrolysis

· Received : May 25, 2018 · Revised : July 2, 2018 · Accepted : July 9, 2018

§ Corresponding Author : Churl Kyoung Lee (E-mail: cklee@kumoh.ac.kr)

School of Advanced Materials Science & Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi, Kyungbuk 39177, 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

희토류 금속은 주기율표상에서 3A족인 스칸듐-이트륨 및 란타넘계열 15원소를 합한 17 원소를 총칭한다. 희토류 금속은 화학적 성질이 비슷해 일반적인 방법으로는 분리하기가 어렵고 천연 상태에서 서로 합금형태로 산출된다. 희토류 금속은 매장량으로만 보면 희소하지 않으나 다른 광물과 대비해 채굴 가능한 광상이 많지 않아 일부 국가에 자원이 편중되어 있다¹⁾.

희토류 기반의 영구자석은 높은 자속밀도와 박막화 등의 기술 개발로 인해 많은 산업 분야에서 이용되고 있다²⁾. 네오디뮴-철-붕소(neodymium-iron-boron, NIB) 자석은 현재까지 개발된 영구자석 중에서 가장 강한 것으로, 전형적인 화학적 조성은 $Nd_2Fe_{14}B$ 이며, 컴퓨터 하드 디스크 드라이브, 각종 무선 공구, 서보 모터, 전기 파워 핸들, 하이브리드 및 전기 자동차, 풍력 터빈의 발전기 등 강한 자기장이 요구되는 다양한 산업에 사용되고 있다³⁻⁷⁾. 최근 강화되는 환경규제와 함께 친환경 자동차의 개발로 고성능 자석의 수요가 급증하면서 네오디뮴(Nd), 디스프로슘(Dy)과 같은 희토류의 자원 및 분리정제 기술의 개발과 함께 폐기되는 영구자석의 재사용 혹은 재활용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다³⁻⁵⁾.

네오디뮴은 다른 희토류 원소들과 마찬가지로, 주로 모나자이트(monazite)와 바스트나사이트(bastnasite)와 같은 희토류 광으로부터 추출되며, 무수 할로겐화네오디뮴을 칼슘으로 환원시켜 얻는다. 할로겐화물로는 흡습성이 적고 안정한 CaF_2 가 부산물로 생성되며, 네오디뮴은 NdF_3 형태로 제조된다. 네오디뮴 염을 녹인 수용액에 알칼리를 가하여 $Nd(OH)_3$ 형태의 침전물로 분리한 다음 이를 가열 하소시키면 산화네오디뮴으로 변하게 된다⁸⁾. 금속으로 제련하기 위해서는 이를 고온 용융염 전해하거나, 고온에서 칼슘(Ca)으로 환원시켜 금속 합금 형태인 미시메탈(misch metal)을 얻는다. 과거에는 네오디뮴이 주로 유리 착색제로 소량 사용되었으며, 대부분은 미시메탈 형태로 다른 희토류 금속과의 합금으로 생산되었다⁹⁾. 그러나 최근에는 순도 높은 금속 네오디뮴의 수요가 많아져, 이온교환 방법이나 용매 추출법을 이용하여 네오디뮴 화합물을 분리정제한 후 금속 네오디뮴 또는 산화 네오디뮴 형태로 제조하는 방식이 많이 적용되고 있다¹⁰⁾. 기존의 네오디뮴 금속 제련은 건식 환원방식이나 용융염 전해에 의하여 이루어지고 있지만 네오디뮴 순도를 높이기 위해서는 복잡하고 비용이 많이 드는 분리정제 공정이 수반되고 고온 공정에

의한 에너지 소비 역시 매우 크다. 특히 용융염 전해법 역시 그 수율이 높지 않으면서 고온 공정이라는 단점은 여전히 개선하여야 할 문제이다^{11,12)}.

본 연구에서는 네오디뮴의 상온 제련 가능성을 알아보기 위해 비수계 전해액에서 네오디뮴의 전기화학적 거동을 조사하였다. 네오디뮴의 공급원으로 기존 제련 과정의 중간산물인 $NdCl_3$ 을 사용하였으며, 단일 전해질로써 이온성액체의 적용가능성을 검토하였다. 전기화학적 안정성이 우수한 1:1 EC/DEC를 기반으로 네오디뮴 염에 대한 용해도가 높은 에탄올을 사용하여 혼합전해질을 대상으로 상온에서 네오디뮴의 전기화학적 레독스를 조사함으로써 상온에서 금속 네오디뮴의 제련 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실 험

본 연구에서 전해질로 사용한 이온성액체는 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ($[C_4mim]PF_6$)와 1-butyl-3-methylimidazolium chloride ($[C_4mim]Cl$), trihexyl(tetradecyl)phosphonium chloride ($[P_{66614}]Cl$)을 선정하였고, $[C_4mim]PF_6$ 와 $[C_4mim]Cl$ 은 직접 제조하여 사용하였다. 비수계 용매는 전기화학적 안정성이 우수한 1:1 vol%의 ethylene carbonate (EC, 99%, Sigma-Aldrich)/diethylene carbonate (DEC, $\geq 99\%$, Alfa Aesar)를 사용하였다. 이온성액체 $[C_4mim]Cl$ 의 합성은 $[C_4mim]PF_6$ 의 합성과정에서 출발 물질의 미 반응물과 용매를 제거함으로써 얻을 수 있다. 합성된 이온성액체는 희석과 세정을 반복하여 불순물을 제거하고 회전증발기(rotary evaporator)를 이용해 $60^\circ C$, 100 mbar 압력 하에서 48시간 동안 용매를 건조하였다. 네오디뮴의 공급원으로 $NdCl_3$ (neodymium(III) chloride, 99.99%, Aldrich)을 사용하였다. 각각의 이온성액체 경우 네오디뮴염을 0.1 M의 염산에 녹인 후 $[C_4mim]Cl$ 과 혼합하여 $120^\circ C$ 진공오븐에서 건조하여 수분을 제거한 후 실험에 사용하였다.

네오디뮴의 전기화학적 환원거동을 조사하기 위해 3 전극 전해 셀을 구성하였으며, 작동전극으로는 금박(Au foil, 1 cm \times 1 cm), 상대전극(1 mm $\Phi \times$ 1 m)과 기준전극은 백금선(Pt wire)을 사용하였다. 모든 전극과 셀은 실험 전 황산(H_2SO_4)과 과산화수소(H_2O_2 , 1:1, vol.%) 혼합용액과 초음파세척기를 이용하여 세척한 다음, 진공오븐에서 $100^\circ C$, 24시간 건조하여 사용하였다. 모든 전기화학 실험은 고순도 아르곤 기체(5 N-산소함

량 1 ppm 이내, 수증기 함량 3 ppm 이내)를 장입한 글로브박스 내에서 수행하였다. 이온성액체의 전기화학적 특성 및 네오디뮴 이온의 환원거동은 Potentiostat/Galvanostat(SP-240 Bio-Logic)을 이용하여 순환전위법(cyclic voltammetry, CV)와 선형전위법(linear sweep voltammogram, LSV)법으로 측정하였다. 전압범위는 $-5 \sim 0$ V (vs. OCV)이며, 주사속도는 10 mV/s로 측정하였다. LSV에서 확인된 네오디뮴의 환원전위에서 정전위법으로 환원하였으며, 그에 따른 작동전극의 표면 변화를 확인하였다. 환원전극의 분석은 전계방사형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscopy, FE-SEM, JEOL, JSM-6710F)을 이용하여 관찰하였고, FE-SEM에 부착된 에너지분산형분광법(energy dispersive spectrometry, EDS)를 이용하여 조성을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이온성액체에서 네오디뮴의 전기화학적 환원

이온성액체는 상온에서 대부분 액체 상태로 존재하는 그린용매(green solvent)로써 그 자체로 전해질의 역할이 가능하며 친환경 전해질로 적용하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다¹³⁾. 이러한 특성을 가지는 이온성액체 중 문헌 조사를 통해 $[C_4mim]PF_6$ 와 $[C_4mim]Cl$, 그리고 $[P_{66614}]Cl$ 을 선정하고 네오디뮴의 전해에 적용 가능성을 검토하였다.

우선적으로 수용액에 존재하는 네오디뮴 이온에 대한 추출능이 있는 $[C_4mim]PF_6$ 의 전기화학적 특성을 확인하였다. 10 mM의 $NdCl_3$ 를 $[C_4mim]PF_6$ 에 용해한 후 상온에서 작동전극을 금 및 네오디뮴, 기준 및 상대전극을 백금 선으로 사용하여 네오디뮴의 전기화학적 산화/환원 거동을 조사하여 Fig. 1(a)에 나타내었다. $[C_4mim]PF_6$ 만을 이용한 전해질은 약 -2.2 V에서 음극

한계전위가 나타났으며 10 mM의 $NdCl_3$ 를 용해한 전해질에서는 $[C_4mim]PF_6$ 의 음극 한계전위인 -2.2 V 보다 높은 -1.7 V에서 네오디뮴의 환원전류로 예상되는 피크전류가 확인되었다.

네오디뮴 공급원으로 사용한 $NdCl_3$ 와 동일한 음이온을 가지는 $[C_4mim]Cl$ 의 경우 10 mM의 $NdCl_3$ 를 0.1 M HCl에 용해시킨 후 $[C_4mim]Cl$ 과 혼합하여 120°C 진공오븐에서 수분을 제거하여 전해질로 사용하였다. Fig. 1(b)에 나타낸바와 같이 10 mM의 $NdCl_3$ 과 함께 전해질을 구성했을 때와 동일한 전압 범위에서 환원전류가 $[C_4mim]PF_6$ 보다 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 네오디뮴이 환원되더라도 전해질을 구성하고 있는 이온이 환원반응에 참여하여 불순물로 포함될 가능성이 있다.

Fig. 1(c)에는 $NdCl_3$ 과 동일한 음이온을 가지면서 음극 한계전위가 -3 V로 $[C_4mim]$ 보다 안정한 범위를 가지는 $[P_{66614}]Cl$ 에서의 LSV 측정결과를 나타내었다. $[P_{66614}]Cl$ 을 사용한 전해질은 앞서 검토한 $[C_4mim]PF_6$ 와 $[C_4mim]Cl$ 과는 달리 $NdCl_3$ 을 용해한 전해질에서도 뚜렷한 환원전류가 관찰되지 않으며, 오히려 전류밀도가 감소한 것으로 보아 네오디뮴 공급원으로 사용한 $NdCl_3$ 이 완전히 용해되지 않은 것으로 판단된다.

$[C_4mim]PF_6$ 와 10 mM의 $NdCl_3$ 로 구성된 전해질의 경우 -1.75 V(vs. Pt-QRE)에서 환원전위가 관찰되어 2 시간 동안 정전위법으로 전해환원 하여 표면을 확인하였다. 환원된 전극의 표면형상은 FE-SEM으로 분석하여 Fig. 2(a)에 나타내었다. 전극 표면에 균일하지 않은 분포로 소량의 Nd와 함께 미량의 $[C_4mim]PF_6$ 의 구성원소(F, N 등)가 검출되었다.

10 mM의 $NdCl_3$ 를 0.1 M HCl에 용해시킨 $[C_4mim]Cl$ 전해질의 경우 환원 영역에서 나타난 반응은 -2.3 V(vs. Pt-QRE) 이하에서 전류가 증가하며, 확인된 전위에서 2시간 동안 정전위법으로 전해환원 하였으나 극미

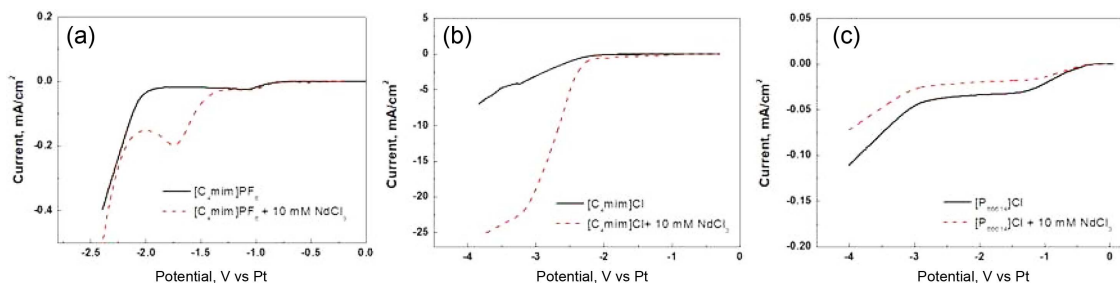


Fig. 1. LSV curves on Au electrode in ionic liquids; (a) $[C_4mim]PF_6$, (b) $[C_4mim]Cl$, (c) $[P_{66614}]Cl$.

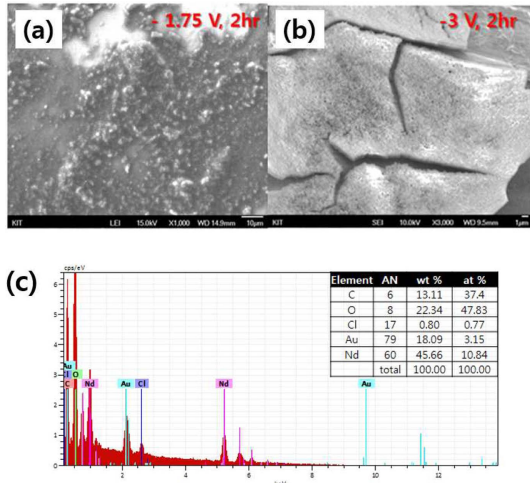


Fig. 2. FE-SEM and EDS images of the deposits on Au electrode in ionic liquids; (a) $[\text{C}_4\text{mim}]\text{PF}_6$ (b) $[\text{C}_4\text{mim}]\text{Cl}$ (c) EDS of the deposits in $[\text{C}_4\text{mim}]\text{Cl}$.

량의 네오디뮴이 환원되는 것을 확인하였다.

수용액 기반의 전해질에서 Nd^{3+} 이온의 표준 환원전위가 -2.3 V 인 것을 감안했을 때, 전해질의 음극 한계전위인 -2.3 V (vs. Pt-QRE)를 벗어난 곳에서의 환원을 확인할 필요가 있다고 판단하여, 상기 조건에서 -3 V (vs. Pt-QRE)의 전압을 인가하여 2시간 동안 전해한 전극의 표면 형상을 Fig. 2(b)에 나타내었다. 작동전극으로 사용한 금 전극 표면에서 상당량의 네오디뮴이 환원된 것을 확인할 수 있었으며 다량의 산소가 확인되었다. 이는 네오디뮴의 빠른 산화 특성으로 인해 분석을 위한 이동 중에 산화된 것으로 판단된다. EDS상에서 $[\text{C}_4\text{mim}]\text{Cl}$ 의 구성 원소인 질소가 확인되지 않아 미량

의 염소는 완벽하게 환원이 되지 않은 NdCl_3 일 것으로 생각된다.

이온성액을 적용한 금속네오디뮴의 전해환원은 가능한 것으로 생각되나, $[\text{C}_4\text{mim}]\text{Cl}$ 과 같이 네오디뮴의 환원전위가 전해질의 음극 한계전위를 벗어나기 때문에 효율적인 전해를 위해서 전기화학적으로 안정한 범위가 더 넓은 이온성액체 시스템의 연구 또는 비수계 용매를 사용해야 할 것으로 판단된다.

3.2. 1:1 EC/DEC 및 에탄올에서 네오디뮴의 전기화학적 환원

네오디뮴보다 표준전위가 낮은 리튬의 산화/환원이 가능한 이차전지 전해질에 사용되는 EC/DEC ($\geq 4 \text{ V}$ vs. Li^+/Li)를 용매로 고려하였다. 유전율이 높은 EC가 염의 용해에 유리하나 상온에서 고체 상태이므로 액체 상태를 유지하고 점도를 낮추기 위해 기본적으로 EC와 DEC는 부피비 1:1로 희석하여 사용하였다.

상온에서 작동전극을 금, 상대 및 기준전극을 백금선으로 전기화학 셀을 구성하였고 NdCl_3 를 네오디뮴의 공급원으로 사용하여 LSV를 측정하고 Fig. 3(a)에 나타내었다. 1:1비율의 EC/DEC에서는 NdCl_3 가 거의 용해되지 않았으며, -4 V (vs. Pt-QRE)에서 2시간 동안 정전위법으로 환원하였으나 네오디뮴은 환원되지 않았다. 따라서 네오디뮴 염을 용해할 수 있는 용매를 추가로 검토하였다.

에탄올의 NdCl_3 에 대한 용해도는 0.455 kg/L 로 높아 전해질로서 적용을 검토하였으며 네오디뮴이 용해된 에탄올 전해액에서 LSV를 측정하였고 그 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. EC/DEC 전해질과 달리 환원전위 영역에서 높은 전류가 확인되며, -4 V (vs. Pt-QRE)에

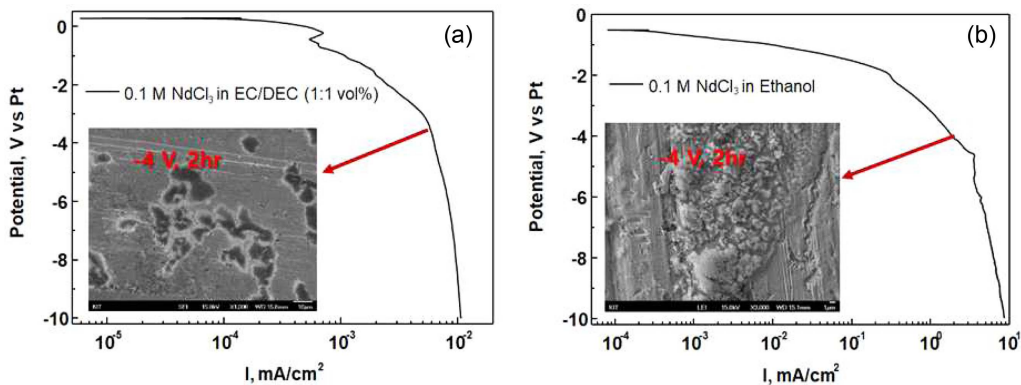


Fig. 3. LSV curves on Au electrode; (a) EC/DEC (b) ethanol.

서 2시간 동안 전해한 전착층의 표면은 불균일한 형태로 상당량의 네오디뮴이 관찰되었다. 또한 EDS 분석결과, 금속 네오디뮴이 확인되어 NdCl_3 가 용해됨을 확인하였다. 그러나 에탄올은 증발 속도가 매우 빠르므로 전해질로 사용하기에는 안정성이 현저히 낮다. 따라서 음극 한계전위가 넓은 EC/DEC 전해질과 네오디뮴 염이 용해가능한 에탄올을 혼합하여 혼합 전해질을 구성하였다.

3.3. 혼합 전해액에서 네오디뮴의 전기화학적 한원

네오디뮴의 용해도와 전해액의 점성(viscosity) 향상을 위하여 EC/DEC에 에탄올을 첨가하였다. 두 용액의 혼합비율이 전해액의 이온전도도에 미치는 영향을 조사하여 Fig. 4에 도시하였다. 1:1 EC/DEC에서 에탄올의 함량이 75%까지 전해질의 이온전도도는 증가하는 것으로 보아 에탄올 함량증가가 전해질의 이온전도성 향상에 기여함을 알 수 있다. 다만 에탄올 함량이 50%

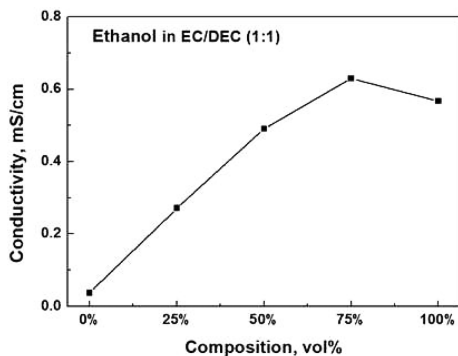


Fig. 4. Effect of ethanol content on electrical conductivity of 1:1 EC/DEC.

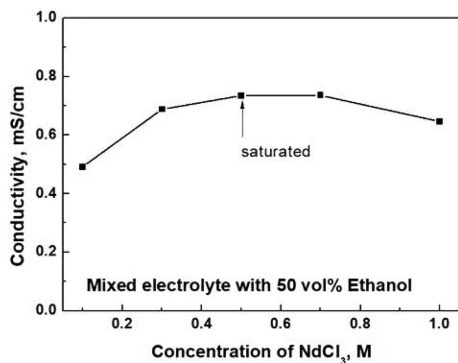


Fig. 5. Effect of NdCl_3 concentration on electrical conductivity of 1:1 EC/DEC.

이상일 경우 에탄올의 증발속도가 빠르기 때문에 전해질의 안정성이 저하될 것으로 예상된다.

Fig. 5는 50%의 에탄올과 혼합된 1:1 EC/DEC (혼합 전해질)에서 네오디뮴 염의 용해도를 알아보기 위해 NdCl_3 의 농도에 따른 혼합 전해질의 이온전도도를 나타내고 있다. NdCl_3 의 함량이 증가함에 따라 전도도가 증가하지만 0.5 M 이상의 농도에서는 용해되지 않은 잔여물이 존재한다. 따라서 에탄올 함량 50%, 0.5 M NdCl_3 를 용해한 전해질이 네오디뮴의 전해에 적합하다고 판단된다.

3.4. 네오디뮴의 상온 전해

상기 혼합전해질에서 네오디뮴의 전기화학적 거동을 확인하기 위하여 LSV법으로 조사하였으며, 그 결과를

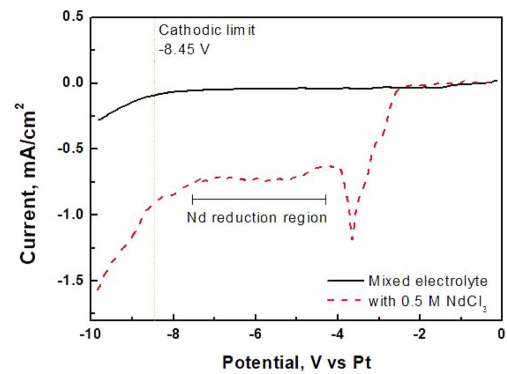


Fig. 6. LSV curves in the mixed electrolyte.

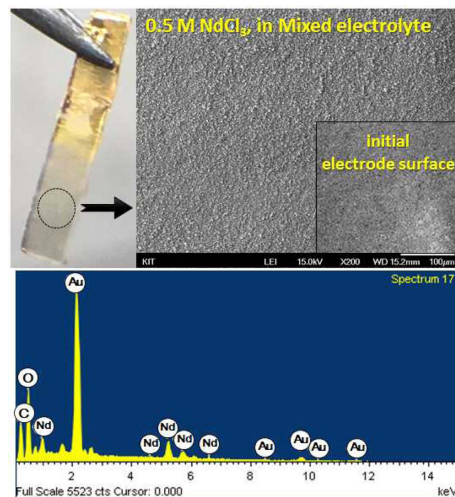


Fig. 7. FE-SEM and EDS images of the deposits in the mixed electrolyte.

Fig. 6에 나타내었다. 0.5 M NdCl_3 를 용해한 혼합 전해질의 거동은 네오디뮴 염을 포함하지 않는 혼합 전해질에서는 나타나지 않던 네오디뮴의 환원 반응에 해당하는 환원전류의 증가가 -3.8 V (vs. Pt-QRE)에서 확인되었다. 그러나 피크전류가 확인되는 전위에서는 네오디뮴이 환원되었으나 지속적인 환원반응이 이루어지지 않았으며, 연속적인 환원전류가 관찰되는 전위구간에서 금속 네오디뮴의 환원이 가능하였다.

0.5 M NdCl_3 가 용해된 1:1 EC/DEC와 50% 에탄올을 혼합 전해질에서 -6 V (vs. Pt-QRE)에서 정전위법으로 상온 전해한 결과, 전극 전체적으로 균일하게 환원된 네오디뮴을 확인할 수 있었다. Fig. 7에 환원된 네오디뮴의 표면 형상과 조성을 나타내었다. EDS 분석 결과, 전해질의 성분은 관찰되지 않았으며, 전극으로 사용한 금과 함께 금속 네오디뮴이 확인되며, 산소의 경우 분석과정에서 공기 중으로 노출되면서 네오디뮴이 일부 산화된 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 네오디뮴의 상온제련의 가능성을 알아보기 위하여 비수계 전해액에서 네오디뮴의 전기화학적 환원 거동을 조사하였다. 이를 위해 네오디뮴의 용해도가 높은 이온성액체와 에탄올, 그리고 전기화학적 안정성이 높은 EC/DEC를 기반으로 한 비수계 전해질을 선정하고 각 전해액에서 네오디뮴의 전기화학적 거동을 조사하였다. 단일 전해질로 이온성액체는 네오디뮴의 환원반응이 가능하였으나 음극한계전위가 높아 추가적인 개선이 필요하였다. 에탄올과 EC/DEC로 혼합전해질을 구성한 경우 AC 임피던스법을 이용하여 측정된 전해질의 전기전도도 자료로부터 에탄올 함량 50 vol%, NdCl_3 농도 0.5 M이 전해에 적합하다고 판단하였다. LSV를 이용해 상기 혼합 전해액에서 네오디뮴의 환원 거동을 확인하였으며, 상온전해를 위한 기초자료를 수집하였다. -6 V 에서 정전위법으로 환원한 전극 표면을 EDS로 분석한 결과, 금속 네오디뮴이 전착되었음을 확인하였고 전극물질인 금과 분석중 혼입된 산소를 제외하고 다른 불순물은 검출되지 않았다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 교내 학술연구에 의한 것

으로 이에 감사드린다.

References

1. H. Azuma, H. Imoto, S. I. Yamada, and K. Sekai, 2010 : REE Resources and It's Utilization, *Econ. Environ. Geol.*, 43, pp.505-516.
2. O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar, and J. P. Liu, 2011 : Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient, *Adv. Mater.* 23, pp.821-823.
3. H. S. Choi and Y. H. Kim, 2010 : Recycling technology of Nd-Fe-B based rare earth element magnets, *J. Kor. Powd. Met. Inst.*, 17, pp.435-442.
4. V. Prakash, Z. Sun, J. Sietsma, and Y. Yang, 2014 : Electrochemical recovery of rare earth elements from magnet scraps-a theoretical analysis, *ERES2014*, pp.163-170.
5. H. Ota, M. Matsumiya, T. Yamada, T. Fujita, and S. Kawakami, 2016 : Purification of rare earth bis(trifluoromethyl-sulfonyl)amide salts by hydrometallurgy and electrodeposition of neodymium metal using potassium bis(trifluoromethyl-sulfonyl)amide melts, *Sep. Purif. Technol.*, 170, pp.417-426.
6. D. Kramer, 2010 : US seeks science ties to salve relations with Muslim world, *Phys. Today*, 63, pp.22-24.
7. S. V. Eliseeva and J. C. G. Buenzil, 2011 : Rare earths: jewels for functional materials of the future, *New J. Chem.*, 35, pp.1165-1176.
8. K. A. Gschneidner Jr., 1980 : Rare earth speciality inorganic chemicals, Symposium on Speciality Inorganic Chemicals, 1980, Salford. Proceedings, The Royal Society of Chemistry, London, pp.403-443.
9. C. V. Sundaram, 1987 : Chemistry and metallurgy of rare earth metal extraction and applications, *Trans. Indian Inst. Met.* 40(6), pp.457-477.
10. K. Nakashima, F. Kubota, T. Maruyama, and M. Goto, 2005 : *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, pp.4368-4372.
11. J. C. Lee, W. B. Kim, J. K. Jeong, and I. J. Yoon, 1998 : Extraction of neodymium from Nd-Fe-B magnet scraps by sulfuric acid, *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.*, 36, pp.967-971.
12. J. W. Lyman and G. R. Palmer, 1993 : Recycling of rare earths and iron from NdFeB magnet scrap, *High Temp. Mat. Pr-Irs.*, 11, pp.175-185.
13. J. Park, Y. J. Jung, P. Kusumah, J. Lee, K. Kwon, and C. K. Lee, 2014 : Application of ionic liquids in hydrometallurgy, *Int. J. Mol. Sci.*, 15, pp.15320-15343.



박 제 식

- 2009년 국립금오공과대학교 정보나노소재공학과 공학사
- 2017년 국립금오공과대학교 대학원 신소재공학과 공학박사
- 현재 전자부품연구원 차세대전지연구센터 Post-doc.



이 철 경

- 1984년 서울대학교 자원공학과 공학사
- 1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
- 2002년 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부 책임연구원
- 현재 국립금오공과대학교 신소재공학부 교수

공 지 사 항

- 항상 본 학회에 관심을 가지고 참여해주셔서 감사합니다. 그간 한국자원리사이클링학회는 회원 여러분의 참여와 활동으로 많은 발전을 하였습니다.
- 당 학회에서는 국문학회지 “資源리사이클링”에 게재되는 원고에 대해 20부의 별쇄를 제작하여 우편으로 보내드렸습니다. 그러나 ‘온라인투고시스템’ 및 출판환경의 변화로 별쇄가 필요하지 않은 상황이 되었으며, 모든 원고는 pdf 파일로 관리가 가능한 시스템이 갖춰졌습니다.
- 이에 당 학회에서는 편집위원회와 이사회의 논의를 거쳐 ‘별쇄 20부’의 인쇄물을 저자분들께 제공하지 않는 것으로 결정하였습니다. 학회지 제27권 1호(2018년 2월 발간)에 게재되는 원고부터는 별쇄를 제공하지 않고, pdf 파일로 보내드릴 예정입니다. 다만, 저자의 요청이 있을 경우 제작이 가능합니다.
- 별쇄 인쇄는 학회지가 발행되는 짝수월(2,4,6,8,10,12월) 20일 전까지 요청하시면 인쇄가 가능합니다.
- 별쇄 인쇄비는 기본 20부/20,000원, 추가 10부당/10,000원씩 추가되며 원고게재료와 함께 청구합니다.
- 당 학회에서 발간하는 국문학회지 “資源리사이클링”은 한국연구재단의 등재학술지로 1992년 창간호를 시작으로 25년이 넘는 학회의 역사와 함께한 학회지입니다. 회원여러분의 많은 관심과 투고를 부탁드립니다.
- 원고의 투고는 당 학회의 홈페이지 <http://www.kirr.or.kr> 또는 <https://kirr.jams.or.kr> 에 회원가입을 하시고 투고하여 주시면 됩니다.
- 연락처 : 한국자원리사이클링학회 사무국
전화 02-3453-3541~2, 팩스 3453-3540, E-mail : kirr@kirr.or.kr, <http://www.kirr.or.kr>