

모나자이트 샌드의 염산침출용액으로부터 용매추출에 의한 Nd와 Pr의 분리

박주호 · 전호석* · 이만승

목포대학교 신소재공학과, *한국지질자원연구원 광물자원연구본부

Solvent Extraction for the Separation of Nd and Pr from Chloride Leaching Solution of Monazite Sand

Joo-Ho Park, Ho-seok Jeon* and 이만승 Lee

Department of Advanced Materials Science & Engineering, Mokpo National Univ., Chonnam 534-729, Korea

*Division of Minerals Utilization and Materials, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Taejon 305-350, Korea

요 약

Nd와 Pr이 함유된 모나자이트 샌드의 염산 침출용액에서 PC88A와 D2EHPA를 사용하여 두 금속을 분리하기 위한 용매추출실험을 수행하였다. 이러한 목적을 위해 수상의 pH에 따른 PC88A와 D2EHPA의 비누화가 두 금속의 추출 및 분리에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서 수행한 실험조건에서 Nd의 분배계수가 Pr의 분배계수보다 크며, 수상의 pH가 높을수록 분리인자가 증가하였다. PC88A에 비해 비누화시킨 PC88A로 추출하는 경우 분배계수와 분리인자 모두 증가하였다. D2EHPA의 비누화율은 두 금속의 추출에는 영향을 미치지지만, 분리인자에는 큰 변화가 없었다.

주제어 : 용매추출, PC88A, D2EHPA, 비누화, 분리

Abstract

Solvent extraction experiments have been performed to separate Nd and Pr from chloride leaching solution of monazite sand using PC88A and D2EHPA. For this purpose, the effect of the saponification of PC88A and D2EHPA on the extraction and separation of the two metals were studied by varying the pH of aqueous solution. In the experimental ranges conducted in this study, the distribution coefficients of Nd were higher than those of Pr and separation factor value increased with the increase of solution pH. Saponification of PC88A enhanced the distribution coefficients of Nd and Pr as well as the separation factor. Saponification of D2EHPA had some effect on the extraction of the two metals but little effect on the separation factor.

Key words : Solvent extraction, PC88A, D2EHPA, Saponification, Separation

*Received : August 19, 2013 · Revised : September 9, 2013 · Accepted : September 23, 2013

*Corresponding Author : Man-Seung Lee (E-mail : mslee@mokpo.ac.kr)

Department of Advanced Materials Science & Engineering, Mokpo National University, 61 Dorim-ri, Chungkye-myun, Muan-gun, Chonnam, 534-729, Korea

Tel : +82-62-450-2492 / Fax : +82-62-450-2498

©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

Pr과 Nd는 주기율표상 원자번호 59와 60번에 해당하는 희토류 금속으로 촉매 및 영구자석에 주로 쓰인다. 특히 네오디뮴 자석은 현재까지 개발된 영구자석 중에서 가장 강한 것으로 알려져 있다. 따라서 하드디스크 드라이브, 광학 디스크 드라이브, 휴대전화, 디지털 카메라와 캠코더 등의 소비가전, 사무 자동화 및 공장 자동화 그리고 자동차 부품 등 우리 일상 생활에 광범위하게 사용되고 있다. 최근 수년간 자동차용 소형 모터, 센서 및 전동 조향 장치 등을 중심으로 자동차 제조에서 희토류 자석의 사용은 확대되어 가고 있다.¹⁾

이와 같이 수요가 급증함에 따라 희토류 원광으로부터 희토류 금속을 추출하기 위한 많은 연구가 시행되고 있다. 최근에는 고순도 희토류 금속을 분리, 정제하기 위한 방법으로 용매추출법과 이온교환 크로마토그래피법이 각광받고 있다. 특히 용매추출법의 경우 처리용량이 크고, 반응속도가 빠르며 분리효과가 좋다.²⁾ 양이온 추출제의 일종인 D2EHPA(di(2-ethyl hexyl) phosphoric acid, HEEHP)와 PC88A(2-ethyl hexyl phosphonic acid mono-2-ethyl hexyl ester, HEH(EHP))는 금속의 용매 추출에 흔히 사용되는 추출제이며, 희토류 금속의 분리에도 많이 사용되고 있다. PC88A에 의한 희토류 금속의 추출율이 D2EHPA보다 낮지만, PC88A를 추출제로 사용하는 경우 분리인자가 더 크다.^{3,4)} 또한 PC88A는 경희토류 금속과 중희토류 금속을 분리하는데 효과적이다. 따라서 PC88A를 이용한 희토류 금속분리에 대해 많은 연구가 행해지고 있다.⁵⁻⁷⁾

양이온 추출제를 사용하여 mixer-settler를 이용한 연속공정으로 희토류 금속을 분리하는 경우 양이온추출제의 수소이온이 수상으로 이동하면서 수상의 pH가 감소한다. 연속공정시 이와 같이 수상의 pH가 감소하면 금속이온을 추출할 수 있는 구동력이 감소하므로 금속의 분리에 필요한 추출단수가 증가한다. 연속공정에서 양이온추출제로 인해 수상의 pH가 감소하는 것을 억제하기 위한 방법으로 미리 양이온추출제를 비누화시킨 다음 추출하는 방법에 대해 많은 연구가 행해졌다.⁸⁻¹⁰⁾

여러 희토류정광으로부터 습식법을 적용하여 고순도

희토류 성분을 회수할 수 있는 공정이 발표되었다.^{11,12)} Banda등은 monazite sand를 NaOH로 온침(digestion)시킨 다음 염산으로 침출시켜 희토류와 Th 및 Al, Fe의 용해에 대한 실험결과를 발표하였으며,^{13,14)} 염산 침출액의 조성을 Table 1에 나타내었다. 상기 염산 침출액의 pH를 조절하면 토륨이 분리되었고, 침출액에는 경희토류성분(La, Ce, Pr, Nd)과 비철금속(Fe, Al)이 존재하는 용액을 얻었다. Al과 Fe는 용액의 pH를 조절하여 침전물로 제거가 가능하다. Ce의 경우 산화제를 첨가하면서 용액의 pH를 조절하면 Ce(IV)으로 산화되면서 침전되므로 회수가 가능하다. Ce를 분리한 추출여액에서 경희토류 성분인 La, Nd과 Pr의 농도는 각각 0.056M, 0.023M, 0.0085M이었다. La, Pr, Nd이 함유된 용액에서 La를 분리하기 위해 PC88A와 같은 양이온 추출제를 단독 또는 다른 용매와 혼합하여 사용하는 경우 Pr과 Nd이 선택적으로 추출되면서 수상에 La를 잔존시키는 것이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 La를 분리한 다음 Pr과 Nd를 분리하기 위한 최적의 추출조건을 조사하기 위해 Nd과 Pr의 농도가 각각 0.023, 0.0085M인 혼합용액을 제조하였으며, 이때 침출액에 존재하는 불순물들은 그 함량이 매우 낮기 때문에 미량의 불순물은 무시하고 두 금속의 분리실험을 수행했다. 이러한 목적을 위해 Nd와 Pr이 함유된 염산용액으로부터 PC88A와 D2EHPA를 사용한 용매추출에 대한 연구를 수행하였다. Nd와 Pr의 최적 분리조건을 조사하기 위해 수상의 pH와 추출제의 농도 및 비누화율을 변화시키며 추출조건에 따른 두 금속의 추출과 분리거동을 조사하였다.

2. 이론적 배경

희토류 원자의 구조 특징은 주기율표상의 3족, 6주기로 최외각 전자가 4f 전자궤도에 배열되어 있다는 것이다. 4f 전자궤도에 있는 원소를 내부전이원소(inner transition elements)라고 한다. 원자의 핵전하수가 증가함에 따라 4f 전자궤도에 전자들이 채워지기 때문에 원자번호가 증가할수록 원자의 크기가 작아진다. 이러한 특이한 현상은 란타늄 원소들에만 있는 것으로 란타늄

Table 1. Chemical composition of the leaching solution of monazite sand

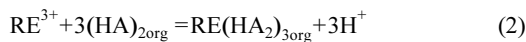
Elements	La	Nd	Pr	Ce	Th	Fe	Al
Con.	0.056M	0.023M	0.0085M	0.5 ppm	1 ppm	1 ppm	3.4 ppm

수축(lanthanides contraction)이라고 한다. 이로 인하여 원자번호가 증가할수록 금속의 활성도와 염기성은 감소하는 반면, 착화합물의 안정도는 증가한다.³⁾ 따라서 주기율표상 원자번호가 60번인 Nd의 분배계수가 원자번호가 59번인 Pr의 분배계수보다 크며, Nd와 Pr간의 분리인자(Separation factor)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

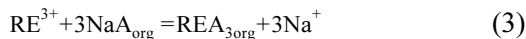
$$\text{Separation factor} = \frac{D_{\text{Nd}}}{D_{\text{Pr}}} \quad (1)$$

상기 식에서 D(Distribution coefficient)는 분배계수를 나타낸다.

양이온추출제에 의한 희토류 금속의 추출실험결과가 많이 발표되었으며, 추출반응을 다음과 같이 나타낼 수 있다.³⁾



상기식에서 하첨자 org는 유기상을 나타낸다. Organophosphorus산은 일반적으로 유기상에서 이합체로 존재하여 추출반응에 참여한다. 하지만 NaOH등을 이용해서 비누화시키면 단위체로 추출반응에 참여하며, 추출반응을 다음과 같이 나타낼 수 있다.



Nd와 Pr의 추출반응식의 평형상수(K)에 분배계수의 정의를 대입하여 정리하면 분리인자를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Separation factor} = \frac{K_{\text{Nd}}}{K_{\text{Pr}}} \quad (4)$$

3. 실험재료 및 방법

고순도 NdCl₃(99.9%)와 PrCl₃(99.9%)를 증류수에 용해시킨 다음 염산용액과 NaOH용액을 사용하여 용액의 pH를 조절하였다. 추출제는 Escaid110에 희석하여 유기상으로 사용하였다. 이때 PC88A, D2EHPA와 Escaid110은 모두 시약급으로 정제하지 않고 그대로 사용하였다.

Nd와 Pr의 합성용액 15ml와 농도를 조절된 추출제 15 ml를 분액여두에 넣고 상온에서 wrist action shaker를 이용하여 20분간 교반하였다. 수상과 유기상의 혼합

물을 분액깔대기에서 2시간 정치하여 수상과 유기상을 분리하였다. 수상의 pH는 pH meter(Orion Star A211 BENCHTOP)로 측정하였으며, 추출반응 후 수상에 존재하는 Nd와 Pr의 농도는 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)로 분석하였다. 유기상으로 추출된 금속의 농도는 물질수지로 구했으며, 다음 식으로 분배계수를 계산하였다.

$$D = \frac{\text{Metal concentration in organic phase after extraction}}{\text{Metal concentration in aqueous phase after extraction}} \quad (5)$$

4. 결과 및 고찰

4.1. 용액의 pH에 따른 금속의 추출 및 분리

수상의 pH 및 추출제의 종류가 Nd와 Pr의 추출 및 분리에 미치는 영향을 조사하기 위해 Nd와 Pr의 농도를 각각 0.023 M, 0.0085 M로 조절된 합성용액의 pH를 3에서 6까지 변화시켜 추출실험을 수행했다. 양이온추출제인 PC88A와 D2EHPA의 농도를 0.03 M에서 0.09 M까지 변화시켜 상기 pH범위에서 추출실험한 결과를 Fig. 1-4에 나타내었다. 본 연구의 실험범위에서 초기 pH와 달리 평형 pH값은 서로 비슷하였다. 이런 경우 평형 pH 대 분배계수의 대수치를 그림으로 나타내는 경우 큰 의미가 없어 실험자료를 초기 pH에 따른 분배계수의 변화를 나타내었다.

추출제로 PC88A를 사용하는 경우 본 실험범위에서 초기 pH의 증가에도 불구하고 Nd와 Pr의 분배계수가 일정한 값을 나타내는 것을 Fig. 1에서 알 수 있다. 이와 같이 양이온추출제에 의한 금속이온의 추출시 수상의 초기 pH가 증가함에도 불구하고 금속의 추출율에 큰 변화가 없는 것은 본 실험을 행한 수상의 pH와 관계 있다. 즉, 수상의 pH가 3에서 6사이의 조건에서는 pH가 수상에서 수소이온의 농도에 매우 민감하므로 약간의 금속이온이 추출되면서 추출제의 수소이온이 수상으로 이동하는 경우 수상의 pH가 급격하게 감소하므로 금속의 추출율에 큰 변화가 없다. Fig. 1에 의하면 Nd의 분배계수가 Pr의 분배계수보다 높으며 PC88A의 농도가 낮을수록 두 분배계수간의 차이가 커져 분리에 효과적이었다. Nd와 Pr간의 분리인자를 구한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험범위의 PC88A농도에 대해 초기 pH가 3인 경우 분리인자는 1.38에서 1.59의 범위를 나타내었다. 초기 pH가 4인 경우 분리인자는 1.31에서

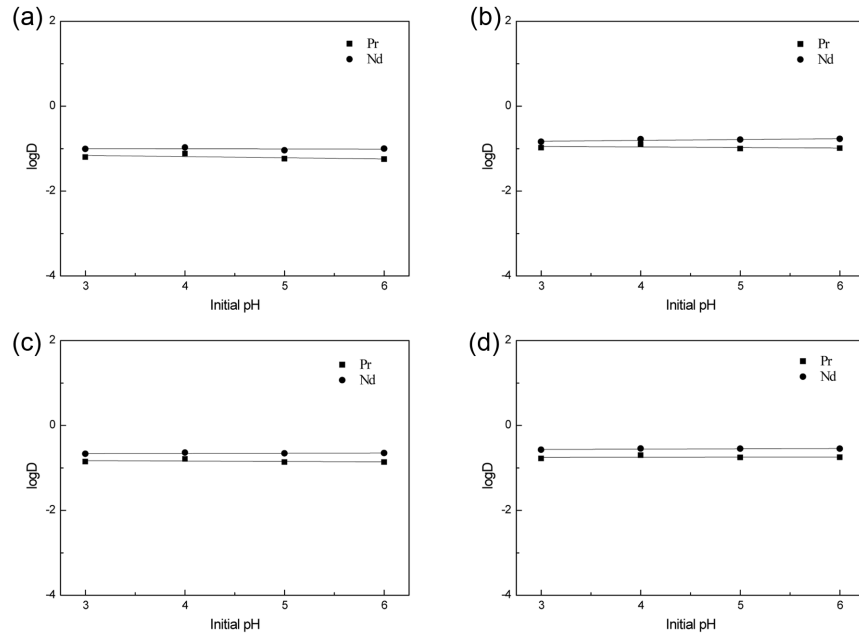


Fig. 1. Plot of log D vs Initial pH for distribution coefficient of Nd and Pr from the mixed solution of NdCl₃ and PrCl₃ with PC88A. Aqueous phase: [Nd] = 0.023M, [Pr] = 0.0085M. Organic phase: [PC88A] = (a) 0.03M, (b) 0.05M, (c) 0.07M, (d) 0.09M.

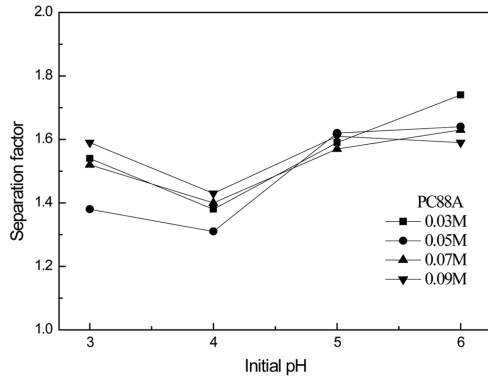


Fig. 2. Effect of Initial pH on the separation factor between Nd and Pr with PC88A. Aqueous phase: [Nd] = 0.023M, [Pr]=0.0085M. Organic phase: [PC88A] = 0.03-0.09M.

1.43의 범위를 나타내어 초기 pH가 3일 때보다 분리인자는 감소하였다. 이 후 초기 pH가 증가하면서 분리인자는 증가하였으며 초기 pH가 5인 경우 분리인자는 1.57에서 1.62, 초기 pH가 6인 경우 분리인자는 1.59에서 1.74의 범위를 각각 나타내어 초기 pH가 증가할수록 분리인자가 증가하는 것을 알 수 있다.

추출제로 D2EHPA를 사용하는 경우 PC88A와 마찬가지로

가지로 초기 pH의 증가에도 불구하고 Nd와 Pr의 분배계수는 일정한 값을 나타내는 것을 Fig. 3에서 알 수 있다. 또한 Nd의 분배계수가 Pr의 분배계수보다 높으며 초기 pH가 증가하면서 Nd와 Pr의 분배계수가 증가하였다. Fig. 4에서 초기 pH가 3인 경우 분리인자는 1.34에서 1.43의 범위를 나타내었다. 초기 pH가 4인 경우 분리인자의 범위는 1.32에서 1.36을 나타내어 초기 pH가 3일 때보다 분리인자의 범위가 감소하였다. 이 후 초기 pH가 5일 때 분리인자는 1.36에서 1.40으로 증가하였으며 초기 pH가 6인 경우 1.40에서 1.43의 범위를 나타내어 PC88A와 마찬가지로 초기 pH의 증가에 따라 분리인자의 범위도 증가하는 것을 확인하였다.

PC88A의 경우 D2EHPA에 비해 분배계수는 낮으나 분리인자가 높아 Nd와 Pr의 분리에 효과적이며, 이러한 결과는 일반적으로 PC88A와 D2EHPA를 사용한 희토류 금속의 추출특성과 잘 일치한다. Fig. 1-4로부터 PC88A와 D2EHPA를 사용하였을 경우 수상의 초기 pH보다는 추출제의 농도가 두 금속의 추출에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 한편 본 연구의 실험범위에서 초기 pH가 4일 때 분리인자가 감소하였다가 그 이후 다시 증가하였으며 초기 pH가 6일 때 가장 높은 분리인자를 얻었다.

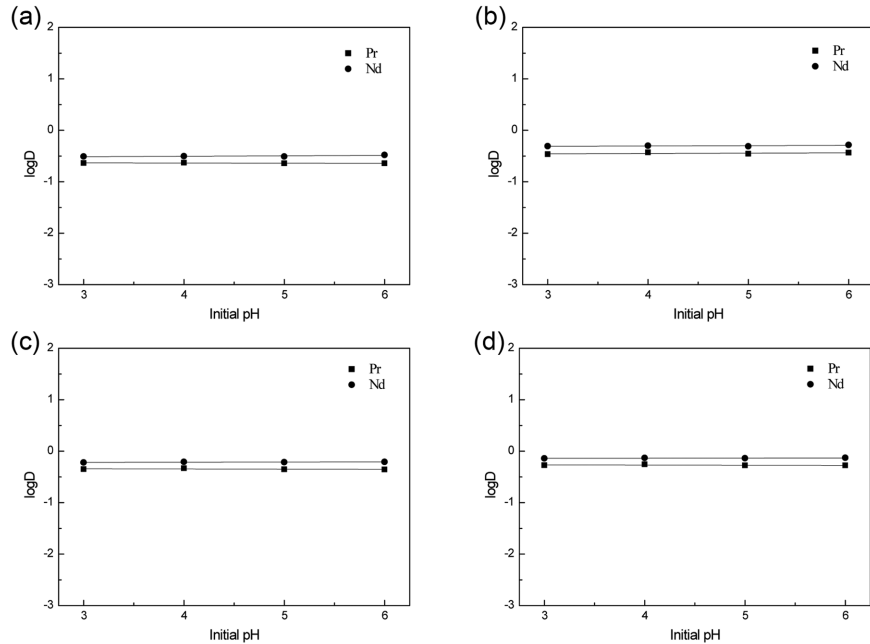


Fig. 3. Plot of log D vs Initial pH for distribution coefficient of Nd and Pr from the mixed solution of NdCl₃ and PrCl₃ with D2EHPA. Aqueous phase: [Nd] = 0.023M, [Pr] = 0.0085M. Organic phase: [D2EHPA] = (a) 0.03M, (b) 0.05M, (c) 0.07M, (d) 0.09M.

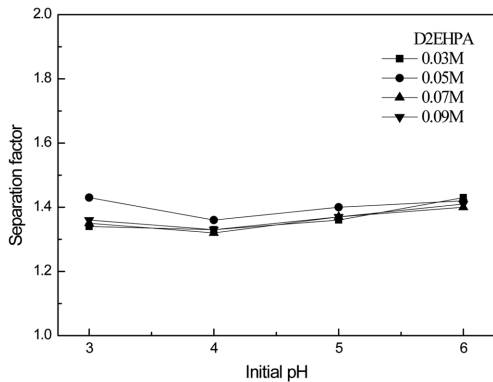


Fig. 4. Effect of Initial pH on the separation factor between Nd and Pr with D2EHPA. Aqueous phase: [Nd] = 0.023M, [Pr] = 0.0085M. Organic phase: [D2EHPA] = 0.03-0.09M

4.2. PC88A의 비누화율이 두 금속의 분리에 미치는 영향

비누화시키지 않은 PC88A를 사용할 경우 초기 pH가 6일 때 최대 분리인자 값을 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 추출제로 PC88A를 사용하여 Nd와 Pr의 혼합용액으로부터 추출제의 비누화율이 두 금속의 분리

에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. Nd와 Pr의 농도를 각각 0.023M과 0.0085M로 조절된 혼합용액의 pH를 6으로 고정시켰다. PC88A의 농도는 0.03에서 0.09M까지, 비누화율을 0에서 40%까지 변화시켜서 얻은 실험결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다.

Fig. 5를 보면 비누화시킨 PC88A를 사용할 경우 추출제의 농도가 증가하면서 분배계수가 조금씩 증가하였다. 한편 PC88A의 비누화율이 10%일 때 분배계수는 비누화시키지 않은 PC88A에 비해 분배계수가 오히려 감소하였으나, 비누화율이 증가하면서 분배계수는 다시 증가하였다. 분리인자의 경우 PC88A의 농도가 0.03에서 0.07M일 때 비누화율이 증가하면서 분리인자는 각각 2.76에서 1.63, 2.40에서 1.65, 2.05에서 1.66의 범위로 감소하였다. PC88A의 농도가 0.09M일 때 비누화율이 증가함에도 분리인자는 1.53에서 1.67범위로 거의 일정한 값을 나타내는 것을 Fig. 6에서 알 수 있다.

본 실험범위에서 Nd의 분배계수가 Pr의 분배계수보다 높으며, 이는 일반적인 희토류성분의 추출특성과 잘 일치한다. 또한 추출제의 농도와 비누화율이 증가할수록 Nd와 Pr의 분배계수는 증가하여 일반적인 양이온 추출제에 의한 희토류성분의 추출거동과도 잘 일치한다.

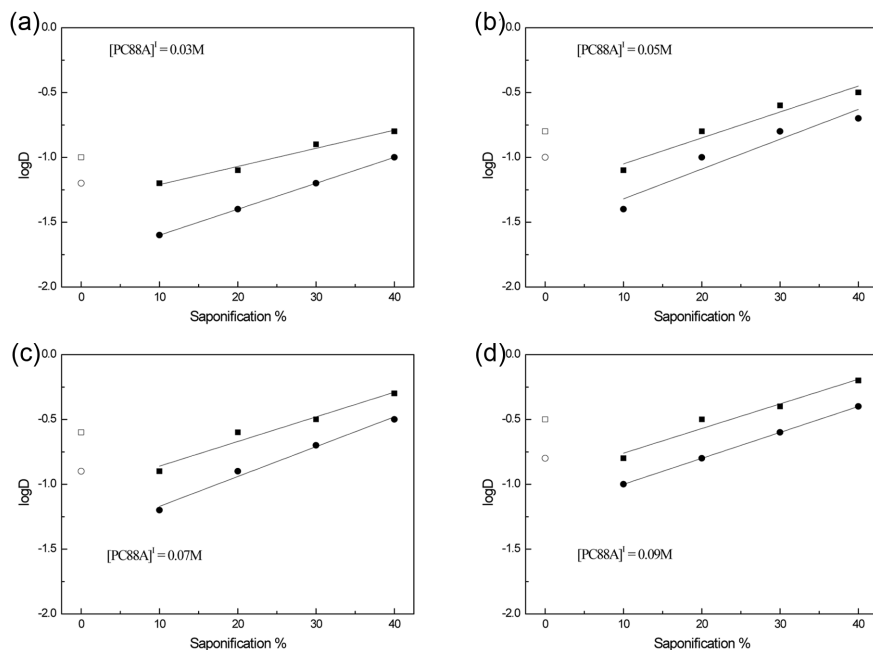


Fig. 5. Effect of saponification of PC88A on the distribution coefficient of Nd and Pr. Aqueous phase: $[Nd] = 0.023M$, $[Pr] = 0.0085M$, Initial pH = 6, Organic phase: $[PC88A] = 0.03-0.09M$, open : without saponification, closed : saponification, \square, \blacksquare : Nd, \circ, \bullet : Pr.

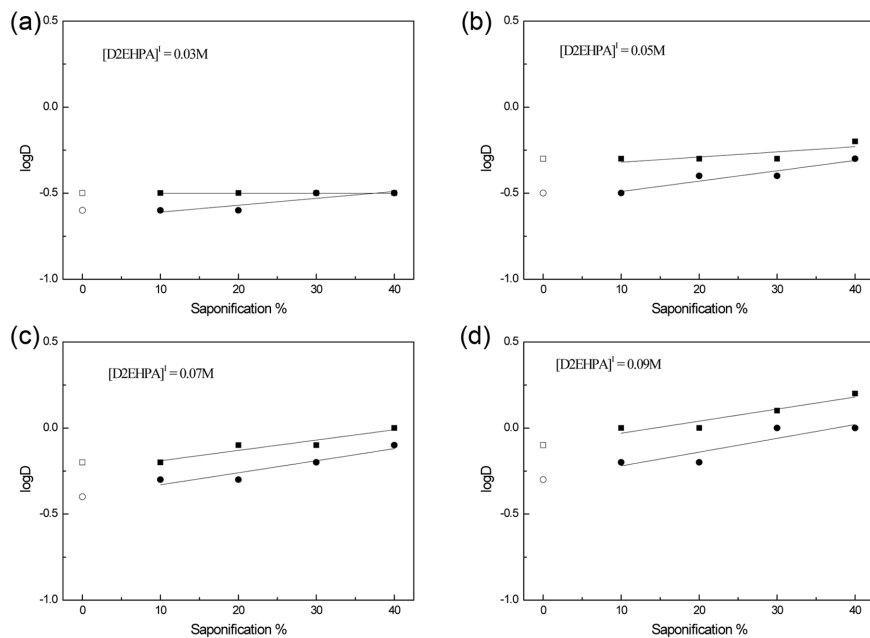


Fig. 6. Effect of saponification of D2EHPA on the distribution coefficient of Nd and Pr. Aqueous phase: $[Nd] = 0.023M$, $[Pr] = 0.0085M$, Initial pH = 6, Organic phase : $[D2EHPA] = 0.03-0.09M$, open : without saponification, closed : saponification, \square, \blacksquare : Nd, \circ, \bullet : Pr.

하지만 PC88A의 농도와 비누화율이 증가할수록 Nd와 Pr간의 분배계수에 차이가 감소하는 것을 Fig. 5와 6를 통해 알 수 있다. 즉, 초기 pH가 6일 때 PC88A의 농도와 비누화율이 낮을수록 Nd와 Pr의 분리가 효과적이었다.

본 저자는 이전 연구를 통해 PC88A와 D2EHPA에 의한 Nd와 Pr의 분리시 수상의 pH보다는 수상에서 금속의 초기 농도와 추출제의 초기 농도비가 두 금속의 분리인자에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.¹⁵⁾ 본 연구의 실험결과에 의하면 Nd와 Pr이 혼합된 염산용액에서 초기 Nd와 Pr의 농도에 대해 PC88A의 초기 농도비가 1인 경우 Nd와 Pr간의 분리인자가 가장 커서 두 금속의 분리에 효과적이었다.

4.3. D2EHPA의 비누화율이 두 금속의 분리에 미치는 영향

PC88A와 마찬가지로 비누화시키지 않은 D2EHPA를 사용할 경우 초기 pH가 6일 때 가장 큰 범위의 분리인자 값을 얻을 수 있었다. 따라서 추출제로 D2EHPA를 사용하여 Nd와 Pr의 혼합용액으로부터 추출제의 비누화율이 Nd와 Pr의 분리에 미치는 영향을 알아보기 위해 Nd와 Pr의 농도를 각각 0.023M과 0.0085M로 조절된 혼합용액을 준비하였다. 이 때 용액의 pH는 6으로 고정시켰다. D2EHPA의 농도는 0.03에서 0.09M까지, 비누화율을 0에서 40%까지 변화시켜 얻은 실험결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다.

Fig. 7에 의하면 D2EHPA의 농도가 증가하면서 Nd와 Pr의 분배계수가 증가하였다. 하지만 비누화율이 증가하더라도 Nd의 Pr의 분배계수는 거의 일정한 값을 나타내었다. Fig. 8에서 분리인자의 경우 D2EHPA의 농도가 0.03M에서 0.09M일 때 비누화율이 증가하면서 분리인자는 각각 1.24에서 1.77, 1.23에서 1.49, 1.20에서 1.32, 1.20에서 1.31로 증가하였다.

본 실험범위에서 D2EHPA를 비누화시켜 사용할 경우 PC88A와 마찬가지로 Nd의 분배계수가 Pr의 분배계수보다 높으며, D2EHPA의 농도와 비누화율이 증가함에 따라 두 금속의 분배계수가 증가하였다. 분리인자의 경우 비누화율이 낮을수록, 추출제의 농도가 높을수록 분리인자가 증가하였으며, 본 실험범위에서 0.09M D2EHPA의 비누화율이 10%일 때 가장 높은 분리인자 값을 얻을 수 있었다. 이로부터 염산용액에서 Nd와 Pr의 농도에 대해 두 금속의 분리에 적합한 D2EHPA와 의 농도비는 약 3인 것을 알 수 있다.

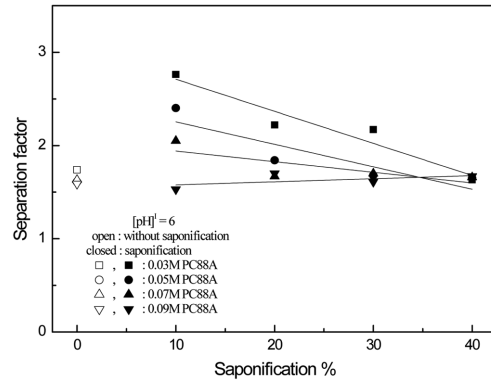


Fig. 7. Effect of saponification of PC88A on the separation factor between Nd and Pr. Aqueous phase : [Nd] = 0.023M, [Pr] = 0.0085M, Initial pH = 6, Organic phase : [PC88A] = 0.03-0.09M.

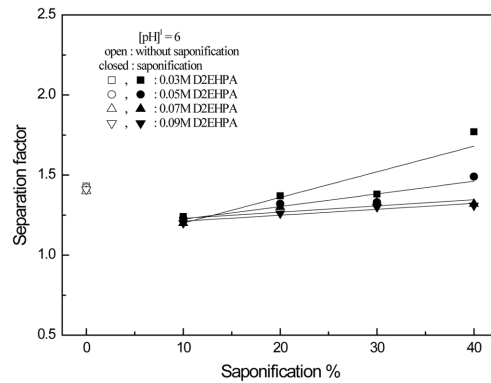


Fig. 8. Effect of saponification of D2EHPA on the separation factor between Nd and Pr. Aqueous phase : [Nd] = 0.023M, [Pr] = 0.0085M, Initial pH = 6, Organic phase : [D2EHPA] = 0.03-0.09M.

5. 결 론

Nd와 Pr이 함유된 염산용액으로부터 추출제로 PC88A와 D2EHPA를 사용하여 추출조건에 따른 두 금속의 추출과 분리거동을 조사하였다. 본 연구의 실험범위에서 PC88A와 D2EHPA에 의한 Nd의 분배계수가 Pr의 분배계수보다 컸으며, 초기 pH는 금속의 분배계수에는 영향을 미치지 않았으나, 초기 pH가 증가함에 따라 분리인자는 증가하였다. 비누화시킨 PC88A, D2EHPA를 사용할 경우 추출제의 농도가 증가하면서 분배계수가 증가하였다. 비누화시킨 PC88A에 의한 Nd와 Pr의 분리시 수상에서 금속의 농도와 추출제의 초기

농도비가 1일 때 최대 분리인자 값을 얻을 수 있었다. 비누화시킨 D2EHPA는 두 금속의 분리에 큰 영향을 미치지 않았다. 본 연구결과 비누화시킨 PC88A가 염산 용액에서 Nd와 Pr의 분리에 효과가 있으며, 분리인자는 PC88A의 비누화율에 의존하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국지질자원연구원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

1. Jung-Pil Yang, 2011: The Current Status and Future Outlook of the Bonded Rare-earth Magnet, vol.21, No.4, pp.147-150
2. Sung Gyu Kim et al, 2002: Separation Characteristics of Lanthanum and Cerium with Saponified PC-88A, J. of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers, 39(3), pp. 182-186.
3. Yoo H.S., 2003: Separation Technology Trend of Rare Earth Elements, KISTI.
4. N.V.Thakur et al, 1993: Separation of neodymium from lighter rare earths using alkyl phosphonic acid, PC88A, Hydrometallurgy, 34, pp. 99-108.
5. Gwang-Seop Lee et al, 2004: Solvent Extraction of Nd from Chloride Solution with PC88A, J. of Korean Inst. Of Resources Recycling, 13(4), pp. 39-45.
6. Lee M.S, Lee J.Y, Kim J.S, 2008: Solvent Extraction for the Separation of Gd and Nd from Chloride Solution with PC88A and Saponified PC88A, J. of Korean Inst. Of Resources Recycling, 17(1), pp. 12-19.
7. Man-Seung Lee et al, 2005: Solvent Extraction Separation of Nd and Sm from Chloride Solution with PC88A and Saponified PC88A, J. of Korean Inst. Of Resources Recycling, 12(2), pp. 33-42.
8. K.Sarangi, B.R. Reddy, R.P. Das, 1999: Extraction studies of cobalt (II) and nickel(II) from chloride solutions using Na-Cyanex272. Separation of Co(II)/Ni(II) by the sodium salts of D2EHPA, PC88A and Cyanex272 and their mixture, Hydrometallurgy, 52, pp. 253-265.
9. Jong-Gwan Ahn et al, 2001: Separation of Co, Mn and Zn in Ni-rich Leaching Solution by Na-PC88A, J. Korea Inst. Metals & Materials, vol.39, No.12.
10. Kyung-Ho Park et al, 2004: Solvent Extraction of Cobalt by Cyanex272 from Sulfuric Acid Solution Containing Nickel and Cobalt, J. Korea Inst. Metals & Materials, vol.42, No.11.
11. Manseung Lee, Hoseok Jeon, 2010: Extractive Metallurgy and Separation Technology of Rare Earth Ores, J. of Korean Inst. Of Resources Recycling, Vol. 19, No. 6, pp. 27-35.
12. Gupta, C.K. and Krishnamurthy, N., 2005: Extractive metallurgy of rare earths, CRC press, NY.
13. Raju Banda, Hoseok Jeon, Manseung Lee, 2012: Solvent extraction separation of La from chloride solution containing Pr and Nd with Cyanex272, Hydrometallurgy, 121-124, pp. 74-80.
14. Raju Banda, Hoseok Jeon, Manseung Lee, 2012: Solvent extraction separation of Pr and Nd from chloride solution containing La using Cyanex272 and its mixture with other extractants, Separation and Purification Technology, 98, pp. 481-487.
15. Joo-ho Park, Ho-Seok Jeon, Man-Seung Lee, 2013: Solvent Extraction Separation of Nd and Pr from chloride solution using PC88A and D2EHPA, J. of Korean Inst. Of Resources Recycling (Accept).

전 호 석

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제10권 3호 참조

박 주 호

- 목포대학교 신소재공학과 학사
- 현재 목포대학교 신소재공학과 석사

이 만 승

- 현재 목포대학교 신소재공학과 교수
 - 당 학회지 제11권 1호 참조
-