https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.6.368

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

PRDC 추출탑을 이용한 희토류 용매추출 연구

김병준[a], 김용성[b*]

A Study on Rare Earth Solvent Extraction Using a PRDC Extraction Tower

Byeong Jun Kim[a], Young Sung Kim[b*]

[a] Graduate School of NIDE Fusing Technology, Seoul National University of Science & Technology
[b] Seoul Tech NDT Research Center, Seoul National University of Science & Technology

ARTICLE INFO

Article history:
Received 6 September 2022
Revised 3 November 2022
Accepted 7 November 2022

Keywords:
Solvent extraction
PRDC
Rare earth
Separation

ABSTRACT

In this study, Nd, Pr, and Dy were separated and extracted from the rare earth aqueous solution obtained from NdFeB magnet scrap using a PRDC device. To secure the optimal PRDC process conditions, the experiment was conducted by varying the number of rotations of the perforated plate, flow rate of the solution, and concentration of the extractant. As the rotation speed of the perforated plate increased and the flow rate decreased, the extraction rates of Nd, Pr, and Dy increased. However, as the concentration of the extractant increased from 5% to 10%, the extraction rates of Nd and Pr considerably increased, and the separation efficiency of Nd and Dy decreased. In addition, as a result of examining the changes in batch and continuous extraction conditions, single batch extraction showed the highest separation coefficient.

1. 연구배경

희토류는 화학적으로 매우 안정되고, 열을 잘 전도하는 양도체의 성질을 지니고 있어, 오늘날 첨단산업분야에서 필수소재로 사용되고 있다. 특히, 희토류 중 하나인 네오디뮴(Nd)은 Nd계 영구자석의 핵심 소재로 높은 보자력을 갖고 있어 IT 제품의 소형화를 가능케 하며, 이외에도 풍력발전의 터빈이나 전기자동차의 모터 등에 쓰이고 있어 그 중요성은 나날이 증가하고 있다[1]. 하지만, 희토류의 생산량이 중국이라는 하나의 국가에만 집중되어 있어, 중국의 외교정책에 의해 희토류 자원 수급이 크게 좌우되어 공급이 불안정한 실정이다. 이를 해결하고자 희토류 자원의 재자원화에 관한 연구가 이루어지고 있다[2-8]. 국내 연구에서는 폐 Nd계 영구자석의 스크랩으로부터 고순도의 희토류 화합물을 제조하는데 있어, 고순도 정제를 위해 mixer-settler 방식의 용매추출 기술을 제안하고 있다[2,3].

Mixer-settler는 용매추출 공정에서 널리 사용되는 방식으로 한 번에 처리할 수 있는 용액량이 많고, 단 수를 늘리기 쉬워 양산에 적합하다는 장점이 있다. 하지만, 추출을 위해 기본적으로 필요한 용액의 양이 많고, 공정제어가 어려우며, 초기 장치비와 운전비용이 높고, 장치가 개방되어 있어 유기용액의 악취가 나며, 사용공간이 많다는 단점이 있다. 그 외의 방식으로는 column 형태의 장치가 많이 사용되며 그 중 몇 가지를 Table 1에 나타내었다. Spray column 방식은 가장 오래된 column 형태의 용매추출 방법으로 수상과 유기상을 위, 아래에서 분무해주는 간단한 원리와 구조를 갖는다. 따라서, 장치비와 운전비용이 가장 저렴하고 column이 수직 형태이므로 사용공간을 줄일 수 있는 장점이 있으나, 역혼합에 의한 추출율 저하 문제와 추출단 수를 늘리는 것이 제한적이라는 단점이 있다. Pulse column 방식은 column 내부에 있는 disk에 상하 진동으로 맥동을 주어 수상과 유기상을 혼합시켜 추출반응을 일으키는 방식으

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6804
E-mail address: yongsk@seoultech.ac.kr (Young Sung Kim).

Table 1 Comparison of solvent extraction methods

	Mixing manner	Separating manner	Cost (simplicity)	Efficiency (mixing ability)	Speed (separating ability)
Mixer-settler	Impeller rotation	Gravity separation	△	○	X
Spray column	Droplets spray	Gravity separation	○	X	△
Pulse column	Pulsation	Gravity separation	△	X	△
RDC	Impeller rotation	Gravity separation	△	△	△
PRDC	Impeller rotation	Gravity separation	△	○	△

로, column 내부의 disk 수를 늘려 추출단 수를 늘릴 수 있고, 추출반응의 효율이 column의 직경에 의존하지 않는 장점이 있다. 그러나, 맥동이 부족하거나 너무 크면 flooding 현상이 유발되어 적절한 맥동 조건이 필요하다[9,10]. Rotating-disk contactor(RDC) 방식은 column 내부의 중앙 샤프트에 회전식 disk가 장착되어있고, column 벽면에는 고정식 링이 배치되어 있는 구조로, 중앙의 disk가 회전하면서 생기는 전단력으로 액적이 부숴지고 미세해져 추출 효율을 높이는 용매추출 방식이다. 공정이 빨라 높은 처리량을 갖고 작동 및 유지관리가 용이하다는 장점이 있으나, 사용되는 용액의 계면장력이 낮은 경우 심각한 축 방향의 역혼합과 액적의 불균일한 분포로 인해 추출효율이 감소하는 단점이 있다. 이를 해결하고자 한 단계 발전한 방식으로 perforated rotating disk contactor(PRDC)가 있다. RDC와 동일하게 중앙의 회전식 disk의 전단력으로 두 상을 혼합하는 방식이나 disk를 다공판 형태로 하여 다공판의 회전속도로 액적의 크기를 조절할 수 있고, 액적 간의 접촉 시간을 늘릴 수 있어 RDC에 비해 더 높은 추출 효율을 나타낸다[10,11].

이러한 장점에도 불구하고, 국내 희토류의 용매추출 연구는 mixer-settler의 방식이 대부분이다. 따라서, 본 연구에서는 기존 mixer-settler 방식의 대안책으로 PRDC 장치를 직접 제작하고, 수용액 내 희토류의 분리 및 정제에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료

사용되는 시료는 2가지로 희토류가 함유되어있는 수용액(feed solution)과 추출제가 함유되어있는 유기용액(solvent)이다. 수용액은 국내 자원회수업체에서 폐 NdFeB 자석 스크랩으로부터 제조한 것을 제공 받은 것으로 Fig. 1과 같은 공정을 거쳤다. 폐 NdFeB 자석을 100℃에서 1시간 동안 H_2를 1.5~2 L/min.으로 투입하며 열처리했다. 이후 6시간 볼밀하고 황산으로 60℃에서 3

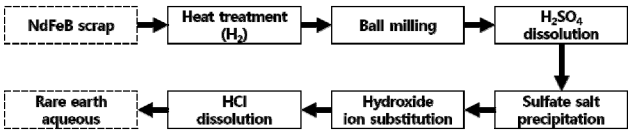


Fig. 1 Feed solution manufacturing process

시간 용해했다. 용해 후 여과지로 고/액 분리를 하고, 분리된 용액은 황산나트륨과 60℃에서 교반하여 반응시켜 희토류 황산복염을 생성했다. 해당 황산복염을 수산화나트륨 용액과 60℃에서 반응시켜 희토류 황산복염을 희토류 수산화물로 전환시키고, 이를 염산에 용해하여 최종적으로 pH 2.2의 희토류 염산 수용액을 제조했다. 이 때, 폐 NdFeB 자석은 UH등급으로 Nd, Pr 이외에 Dy를 포함하는 고품위 자석이다. Table 2은 NdFeB 자석의 등급표이다. 사용온도에 따라 자석의 등급이 나뉘며, 이 등급에 따라 희토류의 조성과 성분에 차이가 있다[12]. 해당 UH등급의 자석 스크랩으로 제조된 희토류 수용액은 ICP-MASS (Thermofisher scientific 社 model: iCAP-Q) 분석을 통해 용액 내 희토류 성분을 분석하였고, 그 결과는 Table 3에 나타내었다. 유기용액은 수용액내 희토류를 추출하기 위한 추출제 PC88A(2-ethylhexyl phosphoric acid mono – 2 – ethyl - hexylester)와 추출제의 농도를 조절하기 위한 희석제로 수소처리된 케로신 즉, 케로신의 방향족 원소를 제거한 ISD-108(Mining Chem Co., Ltd.)를 혼합하여 사용했고, 농도는 5wt%, 10wt%로 조절하였다.

2.2 실험장치

추출장치인 PRDC는 다공판이 회전하면서 두 상의 용액이 혼합되어 추출반응이 일어나는 추출컬럼과 혼합된 두 상이 분리되어 모이는 장치의 상, 하단의 추출탑으로 구성된다. 추출컬럼은 pyrex로 제작되었으며, 높이 800 mm, 용적량 3.3 L에 컬럼 내부에는 12개의 테플론 다공판이 배치되어있다. 다공판의 중심 샤프트는 모터와 연결되어 있어 최대 500 rpm까지 회전할 수 있다. 상, 하단의 추출탑도 pyrex로 제작되었으며, 높이 200 mm, 용적량은 1 L이다. 이외에도 수용액과 유기용액을 유송하기 위한 각각의 유송펌프와 추출된 수용액을 토출하는 토출펌프, 그리고 펌프와 다공판 회전수를 제어하기 위한 제어박

Table 2 Heat resisting temperatures on each grade of Nd magnets

Grade	N	H	UH	AH
Max operating temperature (℃)	80	120	180	230

Table 3 Composition analysis result in rare earth aqueous solution

Component	Pr	Nd	Dy
Content (mg/L)	1064.82	3299.27	206.67

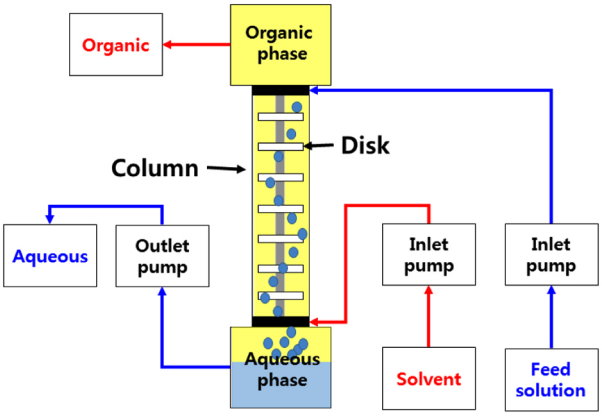


Fig. 2 PRDC device model

스가 있다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 PRDC 장치의 구성도를 나타낸다. 수상은 상단에서 투입되어 하단으로 토출되고, 유기상은 하단에서 투입되어 상단으로 토출된다.

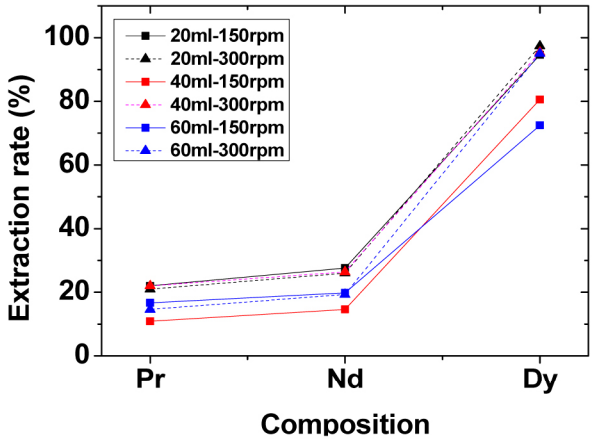
2.3 실험방법

PRDC 장치를 이용한 용매추출 공정에서 추출율을 좌우할 변수는 용액의 유송속도, 다공판의 회전수, 용액의 농도, pH 추출제 등 많은 변수가 존재한다. 이 중 본 연구에서는 유송속도와 다공판의 회전수, 추출제 농도를 변수로 하여 폐 NdFeB 자석 스크랩으로부터 얻어진 희토류 수용액에서 Dy를 추출해내기 위한 최적의 공정 조건을 도출하고자 다음과 같은 조건으로 연구를 수행하였다. 희석제 ISD-108로 추출제 PC88A 농도를 각각 5%와 10% 조절한 유기용액을 장치 내에 있는 상단의 추출탑 하단까지 채워넣었다. 이후 다공판을 150/300 rpm으로 회전시키며 수용액과 유기용액을 20/40/60 ml/min.으로 투입하였다. 상단의 추출탑에 용액이 가득 차올라 유기용액이 토출되기 시작할 때 추출된 수용액의 토출펌프를 가동하여 이 시점을 기준으로 1 L 단위로 용액이 추출되었을 때 수용액의 샘플을 채취하였다. 수용액 샘플은 ICP-MASS로 분석하고, 그 결과값으로 추출율, 분배계수(D), 분리계수(β)를 식 (1), (2), (3)을 이용하여 계산하였다[13,14]. 분리계수는 Nd와 Dy의 분리계수를 계산하였다.

$$\text{Extraction (\%)} = \frac{(C_0 - C_{eq})}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{D (distribution coefficient)} = \frac{(C_0 - C_{eq})}{C_{eq}} \quad (2)$$

$$\beta \text{ (separation factor)} = \frac{D_{Dy}}{D_{Nd}} \quad (3)$$



(a) Extraction rate trend

Flow rate [ml/min.]	Disk speed [rpm]	Composition (%)		
		Pr	Nd	Dy
20	150	21.98	27.63	94.60
20	300	20.98	25.98	97.42
40	150	16.64	20.94	82.39
40	300	21.98	26.44	95.41
60	150	16.69	19.77	72.53
60	300	14.65	19.34	94.99

(b) Extraction rate

Fig. 3 Rare earth extraction rate according to flow rate and disk rotation speed at 5% PC88A

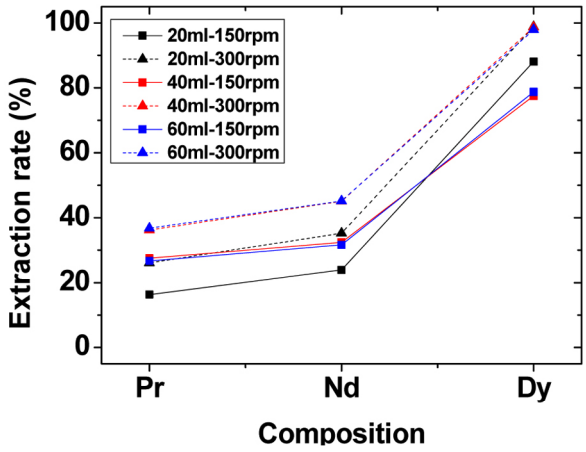
상기 식에서 C_0는 초기 수상의 개별 희토류 원소의 농도 (mg/L), C_{eq}는 용매추출 후 수상의 개별 희토류 원소의 농도 (mg/L)를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PRDC 용매추출 공정 조건 실험

PRDC 장치를 이용하여 희토류를 용매추출 시, 최적의 추출 조건을 도출하기 위해 장치에 투입되는 용액의 유송속도와 다공판의 회전수를 달리하여 추출율 거동을 확인하였다.

Fig. 3은 유기용액의 PC88A 농도가 5%인 경우의 추출 결과를 나타낸 것이다. 다공판 회전수가 300 rpm 일 때, 용액의 유송속도가 20 ml/min.에서 60 ml/min.으로 증가할수록 중희토류인 Dy의 추출율이 97.42%에서 94.99%까지 감소하는 경향을 나타냈다. 유송속도가 증가할수록 수상 액적이 많아지고 이로 인해 수상 액적 간의 충돌과 뭉침 현상 등으로 유기용액과 반응하는 수상 액적의 표면적이 감소하여 추출율이 소량 감소하는 것으로 판단된다. 동일한 유송속도 조건에서 다공판 회전수를 150 rpm에서 300 rpm으로 증가시키면, 희토류의 추출율이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 특히, 유송속도 60 ml/min.에서 Dy 추출율이 72.53%에서 94.99%까지 상승하여 다공판 회전수가 추출효율에 매우 중요한



(a) Extraction rate trend

Flow rate [ml/min.]	Disk speed [rpm]	Composition (%)		
		Pr	Nd	Dy
20	150	16.32	23.88	88.08
20	300	26.11	35.24	98.85
40	150	27.50	32.37	77.49
40	300	36.20	45.08	98.70
60	150	26.65	31.60	78.71
60	300	36.79	45.17	97.92

(b) Extraction rate

Fig. 4 Rare earth extraction rate according to flow rate and disk rotation speed at 10% PC88A

변수로 작용했다. 이는 다공판의 회전수가 높아지면, 수상 액적이 다공판과 판 사이의 추출단에서 체류하는 시간이 길어지고, 다공판을 통과할 때 다공판의 기공과 부딪히면서 액적이 더 잘게 부숴진다. 즉, 추출 반응 시간과 반응 면적이 증가하여 추출율이 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 4의 PC88A 농도가 10%인 경우에도 다공판의 회전수가 증가하면 추출율이 증가하는 동일한 경향을 보인다. 유송속도 40~60 ml/min. 범위에서 Dy 추출율이 78% 수준에서 98%까지 증가하여, 유송속도가 높은 경우 특히 다공판 회전수 증가로 인한 추출효율이 급격히 상승하는 결과를 보였다. 반면, Nd, Pr의 경희토류 추출율도 10% 가량 증가하는 효과를 보였는데, PC88A 5% 조건에 비해 전반적으로 경희토류의 추출율이 10~20% 증가한 것으로 나타났다. PC88A 10% 조건에서 Dy의 추출율은 최대 98.85%까지 증가한 것으로 나타났으나, 경희토류의 추출율 증가율이 상대적으로 높아 분리효율은 떨어지는 것으로 판단된다. 양산 공정을 가정했을 때, 경희토류의 추출율이 높으면 추후 유기용액에서 경희토류를 추출하는 공정을 수차례 진행해야 하므로 공정효율이 떨어질 것으로 예상된다. 또한, 유송속도가 공정시간을 크게 좌우하는 것을 감안했을 때, PC88A 5%에 유송속도 40 ml/min., 다공판 회전속도 300 rpm이 가장 최적의 조건이라고 판단된다.

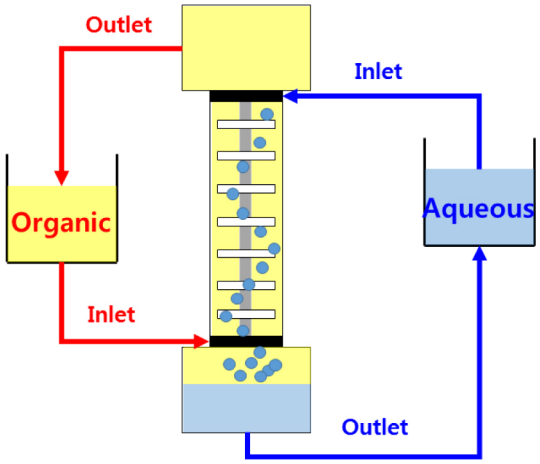


Fig. 5 Conceptual diagram of batch-type extraction of organic phase

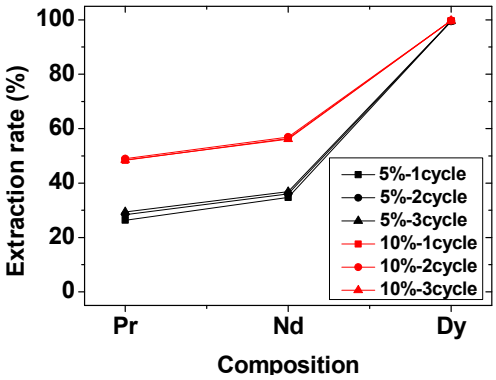
3.2 회분식 추출 횟수에 따른 추출율 거동

통상 용매추출 공정에서는 추출율을 높이기 위해, 추출단을 여러 단으로 하여 수용액 내에서 목표 물질을 여러 차례 추출 해낸다. 본 연구에서 사용된 PRDC 장치는 추출컬럼 내부에 존재하는 다공판의 단 수로 추출단 수가 결정되는데 이는 고정값이므로, 추출단을 늘리는 효과를 위해 추출반응이 끝난 수용액을 장치에 다시 투입하여 재추출하고, 이 때의 희토류 추출 거동을 확인하였다. 1 L의 수용액을 순환시켜 3회 추출하였고, 매 회 추출할 때마다 샘플을 채취했다. 앞의 실험 결과를 바탕으로 실험 조건은 유송 속도를 40 ml/min., 다공판 회전속도를 300 rpm으로 고정하고, PC88A 농도를 5%, 10%로 달리하여 비교하였다. 또한, 추출반응을 진행하는 동안 유기용액을 순환시켜 재사용하는 회분식과 순환시키지 않고 새 유기용액을 계속 공급하는 연속식의 2가지 방식으로 나누어 실험을 진행하였다. 이는 추후 양산에서 재추출 공정을 적용할 경우를 대비하여, 유기용액의 재사용 가능성을 확인하기 위함이다.

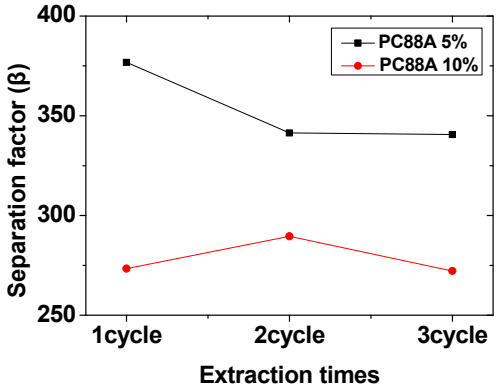
3.2.1 유기용액의 회분식 추출

Fig. 5는 유기용액을 순환시키는 회분식 방식으로 추출하는 실험의 개념도이다. 추출된 수용액을 순환시켜 재추출하는 것과 마찬가지로 유기용액 또한 순환시켜 재사용하는 방식이다. Fig. 6은 회분식 방식의 추출 시, 희토류의 추출율과 Nd와 Dy의 분리계수를 나타내고 있다. PC88A 5% 조건에서 Dy 추출율은 99.48~99.50%, Nd 34.69~36.82%, Pr 26.37~29.37%로 추출 반응이 횟수를 거듭해도 희토류 전체의 추출율에 큰 변화 없이 일정하게 나타났다. 통상 PC88A와 같은 양이온계 추출제의 희토류 추출반응은 식(4)와 같다[13].

$$RE^{3+}_{(aq)} + 3(HA)_{2(org)} = RE(HA_2)_{3(org)} + 3H^{+}_{(aq)} \quad (4)$$



(a) Extraction rate



(b) Separation factor

Fig. 6 Extraction rate and separation factor according to the number of batch-type extractions

추출반응 시, 추출제의 수소이온이 수용액의 희토류 금속 양이온과 치환하여 추출반응이 일어나는데, 이미 한 차례 사용된 유기용액은 치환 가능한 수소이온이 고갈되어 추가적인 추출반응이 일어나지 않아 이런 현상이 일어난 것으로 판단된다. PC88A 10% 조건에서 Dy 추출율은 99.71~99.74%, Nd 56.17~56.89%, Pr 48.38~48.97%로 마찬가지로 추출 횟수를 거듭해도 추출율이 일정했다. 다만, PC88A 5% 조건에 비해, Dy 0.2%, Nd 20%, Pr 20% 수준의 추출율이 증가하였다. Fig. 6(b)의 분리계수를 보면, PC88A 농도 5%가 더 높은 값을 보이며, 추출 횟수가 증가할수록 분리계수가 감소하여 분리효율이 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서, PC88A 농도 5%에 추출은 1회만 하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

3.2.2 유기용액의 연속식 추출

Fig. 7은 회분식과 같이 유기용액을 순환시키는 방법 대신, 유기용액을 외부에서 계속 공급하는 연속식 방식으로 추출하는 실험의 개념도이다. 추출반응한 유기용액은 상단의 추출탑을 통해 토출되고, 하단의 추출탑에서 새로운 유기용액이 투입되는 유기용액이 지속적으로 투입된다. Fig. 8은 유기용액의 연속식 추출반응으로 얻어진 추출 결과이다. PC88A 5% 조건에서는 추출 횟수를 거듭

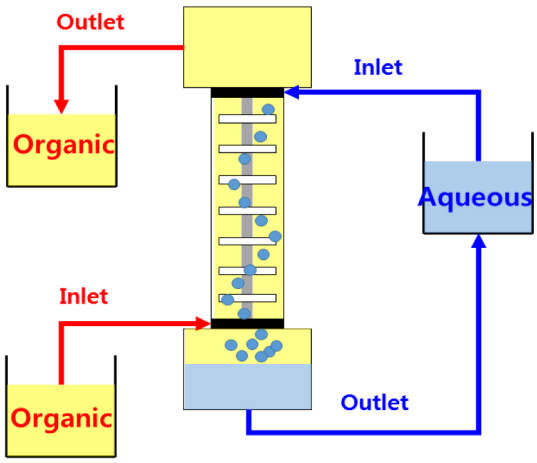
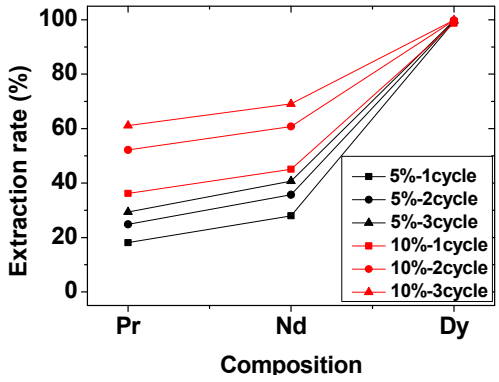
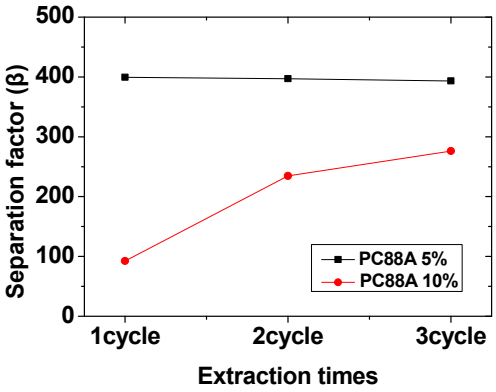


Fig. 7 Conceptual diagram of continuous-type extraction of organic phase



(a) Extraction rate



(b) Separation factor

Fig. 8 Extraction rate and separation factor according to the number of continuous-type extractions

할 때마다 Dy의 추출율은 99.3~99.6%로 0.1%씩 증가하고, Nd, Pr은 약 5%씩 증가하는 결과를 보인다. PC88A 10% 조건에서는 Dy 추출율은 약 0.03%, Nd, Pr은 10% 이상 증가하였다. 최종적으로 3회 추출시, Nd, Pr의 추출율은 최대 25% 상승하였고, Dy는 0.2% 상승하는 것에 그쳐, Dy의 추출 향상효과는 매우 미미한 것으로 나타났다. 경희토류인 Nd, Pr의 추출율 증가는 금속이온과

치환할 수 있는 수소이온이 지속적으로 공급되어 추출반응이 매회 추출마다 일어난 것으로 판단된다. 반면, Dy 추출율 증가효율이 낮은 것으로 보아, 유기용액 내의 추출제 농도와 수용액 내의 희토류 금속 이온 농도가 각 희토류 금속 이온의 추출률에 영향을 미치는 것으로 판단된다[13]. Fig. 7(b)의 분리계수 결과를 보면, PC88A 농도 5%가 더 높은 분리계수를 나타내며, 특히 1회 추출 시의 분리계수가 높아 추출을 할수록 분리효율이 오히려 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서, 수용액의 재추출 없이 PC88A 5% 조건으로 1회 추출하는 것이 가장 바람직하다 판단된다. 이 때, 99% 이상의 높은 순도를 갖는 Nd/Pr 희토류 수용액을 얻을 수 있으므로, 추후 실험을 통해 이 용액을 추출 전의 수용액과 혼합하여 추출함으로써, Nd/Pr의 순도를 더 높일 수 있을 것으로 예상한다. 또한, Dy가 추출된 유기용액은 세정(scrubbing), 탈거(stripping) 등의 후속 용매추출 공정으로 Nd/Pr을 추가로 제거하여 Dy의 순도를 높일 수 있을 것으로 예상한다.

4. 결 론

본 연구에서는 직접 제작한 PRDC 장치를 이용해 폐 NdFeB 자석의 스크랩으로부터 얻어진 희토류 수용액의 Nd, Pr과 Dy를 분리하여 추출하였다.

PC88A의 농도가 5%에서 10%로 증가할수록 중희토류 Dy의 추출율 증가는 3%인 반면, 경희토류 Nd, Pr의 동시 추출율이 20% 수준으로 크게 증가함으로 인해 중희토류와 경희토류의 분리 및 추출 효율이 감소함을 보였다. 다공판의 회전수가 증가할수록 모든 공정 조건에서 희토류 추출율이 증가했으며, 특히 Dy 추출율이 최대 20% 증가했다. PC88A 5% 조건에서 유송속도가 증가할수록 희토류 추출율이 감소하여 유송속도가 낮을수록 추출효율이 높았다. 추출된 수용액의 회분식 횟수에 따른 추출율 거동은 PC88A 농도 5%에서 분리계수 값이 가장 높았고, 회분 횟수가 증가할수록 분리계수가 감소하여, 1회만 추출하는 것이 가장 효율적이었다.

후 기

이 연구는 2022년도 에너지기술개발사업 과제번호 20205210100070의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Lee, J. Y., 2015, viewed 12 August 2022, Introduction of Process for High Purity Rare Earths and Core Materials in ICT Industry, <https://www.ceramist.or.kr/upload/pdf/ceramist-2015-18-3-41.pdf>.

[2] Korea Institue of Geoscience and Mineral Resources, 2016, viewed 8 June 2022, Recovery of Rare Earth Metal from Spent Magnet, <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201800023136>.

[3] Sunglim rare earth metal Co. Ltd., 2019, viewed 8 June 2022, Development of Commercial Equipment for Recovery of Rare Earth Metals from Waste Permanet Magnets and Demonstration of Technology, <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202000006135>.

[4] Kim, B. J., Kim, Y. S., 2022, Study on the Solvent Extraction Process of Heavy Rare Earth Using Emulsion Flow Method from NdFeB Based Rare Earth Magnet Scrap, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 31:4 233-239, https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.4.233.

[5] Lee, S. Y., Park, S. H., Son, I. J., Sohn, H. S., 2018, Recovery of Rare Earth Elements from Nd Magnet Scrap Using PVC, J. Korean Inst. of Resources Recycling., 27:1 38-44, https://doi.org/10.7844/ kirr.2018.27.1.38.

[6] Lee, G. H., Kim, C. K., Lee, D. H., Song, Y. J., 2021, A Study on the Leaching of Rare Earth Elements from Waste Phosphor Powder, Korea J. Met. Mater., 59:7 459-468, https://doi.org/10.3365/ KJMM.2021.59.7.459.

[7] Kumari, A., Sahu, K. K., Sahu, S. K., 2019, Solvent Extraction and Separation of Nd, Pr and Dy from Leach Liquor of Waste NdFeB Magnet Using the Nitrate Form of Mextral® 336At in the Presence of Aquo-Complexing Agent EDTA, Metals., 9:2 269, https://doi.org/10.3390/met9020269.

[8] Yoon, H. S., Kim, C. J., Chung, K. W., Kim, S. D., Lee, J. Y., Kamur, J. R., 2016, Solvent Extraction, Separation and Recovery of Dysprosium (Dy) and Neodymium (Nd) from Aqueous Solutions: Waste Recycling Strategies for Permanent Magnet Processing, Hydrometallurgy, 165:1 27-43, http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.028.

[9] Kim, W. S., 1985, Extraction Separation Operation, Chemical Industry and Technology, 3:3 292-304, <https://www.cheric.org/PDF/CIT/CI03/CI03-3-0292.pdf>.

[10] Teh, C. L., Malcolm, H. I., Carl, H., 1983, Handbook of Solvent Extraction. Wiley, New york, USA.

[11] Asadollahzadeh, M., Hemmati, A., Mostaedi, M. T., Shirvani, M., Ghaemi, A., Mohsenzadeh, Z., 2017, Use of Axial Dispersion Model for Determination of Sherwood Number and Mass Transfer Coefficients in a Perforated Rotating Disc

Contactor, Chin. J. Chem. Eng., 25:1 53-61, https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.06.007.

[12] Kim, B. J., Park, I. K., Kim, Y. S., 2021, Study on the Demagnetization and Classification of NdFeB Magnets According to Different Heat Treatment Temperatures, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 30:2 119-126, https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.2.119.

[13] Jeon, S. B., Son, I. J., Lim, B. C., Kim, J. M., Kim, Y. J., Ha, T. G., Yoon, H. S., Kim, C. J., Chung, K. W., 2018, Solvent Extraction of Light (Pr, Nd) and Medium (Tb, Dy) Rare Earth Elements with PC88A of Rare Earth Chloride Solution from Waste Permanent Magnet, J.Korean Inst. Resources Recycling, 27:3 8-15, https://doi.org/10.7844/kirr.2018.27.3.8.

[14] Ahn, N. K., Im, B., Lee, J., Park, J. R., Lee, C. G., Park, K. S., 2017, Solvent Extraction of Heavy Rare Earth Elements Using PC88A from Synthesis Solution of Low Concentration Rare Earth Solution, J. Korean Inst. Resources Recycling, 26:4 26-33, https://doi.org/10.7844/kirr.2017.26.4.26.

Byeong Jun Kim
Master Candidate in the Graduate School of NIDE Fusing Technology, Seoul National University of Science and Technology.
His research interest is Material and Nano-Micro Technology.
E-mail: kbj1020@seoultech.ac.kr

Young Sung Kim
Professor in the NDT Research Center, Seoul National University of Science and Technology. His research interest in Material and Nano-Micro Technology.
E-mail: youngsk@seoultech.ac.kr