



NdFeB계 희토류 자석 스크랩에서 에멀전 플로우 공법을 이용한 중희토류의 용매추출 공정 연구

김병준^a, 김용성^{b*}

Study on the Solvent Extraction Process of Heavy Rare Earth Using Emulsion Flow Method from NdFeB Based Rare Earth Magnet Scrap

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	17	May	2022
Revised	4	July	2022
Accepted	11	July	2022

Keywords:

Solvent extraction
Emulsion flow
NdFeB magnet
Rare earth
Separating

ABSTRACT

In this study, emulsion flow equipment was newly manufactured by modifying the shape of the oil phase nozzle and the filter pore size. An experiment to find the optimal conditions for separating Nd and Dy in the chlorinated rare earth aqueous solution recovered from the dissolution process of the spent Nd magnet was performed with this equipment. The emulsion filling rate was the highest at 100% when the nozzle for spraying oil phase inside the cylinder was type B with a jaw height of 5 mm above the filter and the filter pore size was 40 to 100 μm (P2). Therefore, it was confirmed that these are the most optimal emulsion process conditions in the nozzle when separating Nd and Dy by the emulsion flow method.

1. 연구배경

NdFeB계 자석은 상용화된 영구자석 중 가장 강력한 자성을 지닌 자석으로 오늘날 첨단산업분야에서 다양하게 쓰이고 있다. 컴퓨터, 차량 모터, 자력분리기, 발전용 모터, 의료장비 등에 사용되고 있으며 특히, 전기 자동차의 주요 부품으로 그 수요가 나날히 증가하고 있다. 그러나, 국내에서는 Nd를 포함한 희토류 자원의 생산이 전무하여 전량 해외 수입품에 의존하고 있어, 높은 수요에 비해 공급이 불안정한 실정이다. 이렇게 수입되어 제품화된 희토류들은 사용이 끝난 후 대부분 스크랩으로 처리되어 해외로 다시 수출되고 있다. 희토류 자원의 공급을 안정화하기 위해서는 국내에서 사용이 끝나 스크랩화된 희토류 자원을 재자원화하는 기

술이 꼭 필요하다.

이러한 문제를 해결하고자, 국내에서 Nd를 포함한 희토류를 재자원화하는 기술이 활발히 연구 중이다^[1,2,11]. 아래 Fig. 1은 희토류의 회수 공정을 간략히 나타낸 것이다. 폐 Nd자석 스크랩은 아직 강한 자성을 가지고 있기 때문에, 자성을 없애는 탈자 공정부터 이루어진다^[11-13]. 이후 스크랩을 파분쇄하는 공정, 강산에 용해하는 공정, 황산나트륨으로 희토류를 침전시켜 Fe와 분리하는 공정, 분리된 희토류 침전물을 수산화물로 전환하는 공정, 희토류 수산화물을 다시 염산에 용해하는 공정, 희토류 염산 수용액을 용매추출하여 경희토류와 중희토류를 분리하는 공정, 희토류 수용액을 다시 침전하여 분말화하는 공정으로 이루어진다.

이 중 용매추출 공정은 Nd 자석 내에 있는 경희토류(Nd, Pr,

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6804

E-mail address: youngsk@seoultech.ac.kr (Young Sung Kim).

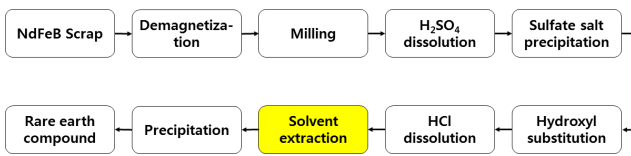


Fig. 1 NdFeB magnet recycling process

Table 1 Comparison of solvent extraction methods

	Mixing manner	Separating manner	Cost (simplicity)	Efficiency (mixing ability)	Speed (separating ability)
Pulse column	Impeller rotation	Gravity separation	△	○	X
Spray column	Pulsation	Gravity separation	△	X	△
Centrifugal extractor	Droplets spray	Centrifugal force	○	X	△
Mixer-settler	Impeller rotation	Gravity separation	X	○	○
Emulsion flow	Droplets spray	Flow change	◎	○	○

Ce, La)와 중희토류(Tb, Dy)를 분리/정제하는 공정이다. 통상 경희토류와 중희토류 사이에는 성질에 큰 차이가 있고 가격 차이가 10배 가량 나기 때문에 경제적 측면과 환경적인 측면을 고려하여 가장 최적의 용매추출 공정으로 분리하는 기술이 필요하다. 용매추출은 통상적으로 수용액 상(이하 수상)과 유기용액 상(이하 유상), 두 상이 서로 섞이지 않는 성질을 이용해 수상에 존재하는 표적물질을 유상으로 분리해내는 것을 말한다. 용매추출에는 추출 장비의 형태에 따라 다양한 방식이 존재하며 이를 Table 1에 나타내었다^[3]. Pulse column 방식은 상하 진동으로 맥동을 주어 수상과 유상을 혼합하는 방식이다. 액적 분산이 반경 방향으로 균일하고 추출 효율이 탐정에 의존하지 않는 장점이 있지만, 맥동이 부족하거나 너무 크면 flooding 현상이 유발되어 적절한 맥동조건이 요구된다^[9]. Spray column 방식은 가장 처음 시도된 용매추출 방법으로 유상과 수상을 상·하에서 단순히 분무해주는 아주 간단한 원리와 구조를 갖는다. 때문에, 비용면에서는 큰 장점을 가지지만 역혼합에 의한 추출율 저하 문제가 있다. Centrifugal extractor 방식은 원심력을 이용한 방식으로 혼합효율도 좋고 공정시간도 짧아 성능은 매우 뛰어나지만, 설비 비용과 운영비용이 매우 비싸다는 단점이 있다. Mixer-settler 방식은 가장 널리 사용되는 용매추출 방식이다. 한 번에 처리할 수 있는 용량이 많고, 유량제어가 용이하며, 단수를 늘리기 쉬워 양산에서 많이 사용된다. 하지만, 추출을 위해 기본적으로 필요한 수상과 유상을 포함한 용액 양이 많고, 공정제어가 어려우며, 초기 장치비와 운전 비용이 높다. 공정시간이 길며, 추출을 위한 단수를 많이 필요로 하기에 공간사용이 많다^[4,8]. 실제 최근 연구에서는 Nd, Dy의 분리를 위해 추출단에서 1회

추출시 약 84.2%의 Tb-Dy를 추출했다. Pilot scale의 용매추출 공정은 추출단 4개, 세정단 8개, 탈거단 4개, 세척단 3개로 총 19개의 단을 사용했고, 60시간의 공정시간이 필요로 했다^[5]. 전체 공정 중 용매추출에 할당되는 공정시간이 매우 길어 공정효율이 매우 떨어진다. 따라서, 현행의 mixer-settler 방식을 대체할 새로운 용매추출 방식이 필요하다.

최근 해외의 연구에서 ‘에멀전 플로우법(emulsion flow)’이라는 새로운 용매추출법을 제안하였다^[3]. 에멀전 플로우법은 수상 용액의 흐름에 대하여 200 μm 수준의 유상 액적을 분무하여 에멀전을 형성한다^[7]. 한편 좁은 컬럼에서 형성된 에멀전 버블은 장치의 상부와 하부의 상분리부에서 급격히 통과면적이 증가하면서 그 유속이 급격히 감소한다. 이 때, 후속의 유속이 빠른 에멀전 액적과 충돌하면서 액적이 급격히 성장하고 터지면서, 에멀전이 빠르게 해소되게 된다. 이러한 원리를 이용해 소형의 장치로도 빠른 처리 속도를 갖게 된다. 단순한 구조를 가지며 동력장치가 별도로 없어 비용이 저렴하고, 공정시간이 짧은 장점이 있다. 또한, 한 번의 추출로 90% 이상의 추출율을 갖는다. 따라서, 경희토류와 Dy 회수 공정에 적용시 비용 절감과 공정시간의 감소 효과를 줄 것으로 기대된다.

앞서 언급했듯이 에멀전 플로우 공법은 마이크로 사이즈의 유상 액적과 수상 액적이 반응하여 에멀전을 형성한다. 때문에, 유상 노즐의 형상 및 기공의 크기에 따라 에멀전 형성에 영향을 줄 것으로 예상된다. 국내에서는 아직 에멀전 플로우 공법을 이용한 용매추출 연구 결과가 발표된 바 없다. 이에 본 연구에서는 실험장비를 직접 제작하여 에멀전이 형성되는 공정 조건을 확보하기 위한 기초 실험으로 유상 노즐의 형상과 기공 크기를 제어하여 경희토류와 Dy를 분리하는 실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료

본 연구에서는 에멀전 플로우 법으로 Nd자석 스크랩 내의 경희토류와 Dy를 분리하기 위해 국내 자원회수 업체에서 공급받은 희토류가 용해된 염산수용액을 시료로 사용하였다. 해당 시료는 다음과 같은 공정으로 제조되었다. Nd자석 스크랩을 수소열처리를 통해 탈자 및 분쇄하였다. 수소열처리한 Nd 자석 스크랩을 황산으로 침출한 후, 황산나트륨을 첨가하여 희토류는 침전시키고 Fe는 용액에 남아 Fe와 희토류를 분리했다. 용매추출을 위해서는 희토류를 염산에 다시 용해시켜야 하나 희토류 황산복염 상태는 산에 잘 녹지 않는다. 따라서, 가성소다를 첨가하여 희토류 황산복염을 수산화물로 전환시키는 공정을 거쳤다. 전환된 희토류 수산화물은 염산에 매우 잘 용해되었고, pH 2.6의 희토류 염산 수용액을 제조

Table 2 Composition analysis result in rare earth aqueous solution

Component	La	Ce	Nd	Pr	Dy
Content (mg/L)	219.6	413.6	868.3	3628.6	88.1

하였다. 이렇게 제조된 희토류 염산 수용액 시료는 ICP-MASS (ThermoFisher scientific 社 model: iCAP-Q)로 분석하여 그 조성을 Table 2에 나타내었다. 희토류를 추출하기 위한 추출제는 PC88A(2-ethylhexyl phosphoric acid mono-2-ethyl-hexyl ester)를 사용했고, 희석제로는 kerosene을 사용하여 추출제의 농도를 5 wt%로 조절하였다.

2.2 실험장치

본 연구에서는 lab-scale의 에멀전 플로우 장치를 Fig. 2와 같이 직접 제작하였다. 해당 장치는 초기 투입된 용액만으로 용매추출하는 batch식의 에멀전 플로우 실험 장치이다. 장치의 중앙에는 수상과 유상이 에멀전 상태로 혼합되는 혼합부가 위치하며 용적은 약 0.29 L이다. 혼합부의 상부에는 상분리된 유상이 모이는 상단 분리부가 있고, 혼합부의 하부에는 상분리된 수상이 모이는 하단 분리부가 존재하는 매우 단순한 구조를 갖는다. 상분리부는 각각 약 0.94 L이다. 혼합부의 상단에는 수상이 분무되는 노즐이, 하단에는 유상이 분무되는 노즐이 존재한다. 하단의 수상 분리부와 상단의 수상 노즐을 teflon tube로 연결하여 수상이 순환하도록 하였다. 또한, 상단의 유상 분리부와 하단의 유상 노즐을 연결하여 유상이 순환하도록 하여 외부 용액의 추가 투입없이 용액이 끊임없이 순환되는 구조로 구성하였다. 용액의 송액 펌프는 튜빙펌프를 사용하였다.

에멀전 플로우의 핵심은 마이크로 수준의 유상 액적과 수상 액적이 혼합되어 유착되는 것이기 때문에 유상 노즐이 매우 중요하다. 수상 노즐은 teflon tube에 직경 0.75 mm 구멍을 12개 타공한

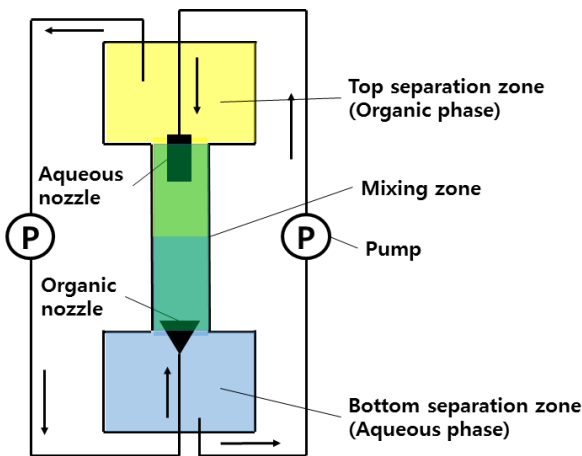


Fig. 2 Batch type emulsion flow model

Table 3 Pore size of glass disc filter

	P2	P3	P4
Pore size(μm)	40-100	16-40	10-16

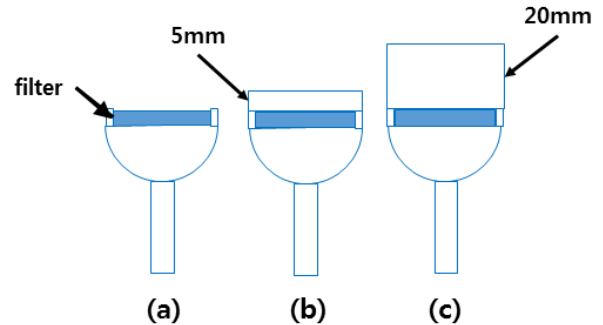


Fig. 3 Three types of (a) type A, (b) type B, (c) type C organic phase nozzle heads.

뒤, teflon mesh를 감싸서 제작하였다. 유상 노즐은 마이크로 수준의 액적을 분무하기 위해 기성품으로 판매되는 glass filter와 pyrex 유리를 사용하여 제작하였다. Table 3은 유상 노즐 제작에 사용된 glass filter의 종류를 나타낸 것이다. 통상 기공 크기에 따라 분류하며, P2에서 P4로 숫자가 커질수록 filter의 기공 크기가 100~10 μm까지 미세해진다. Fig. 3은 제작된 유상 노즐의 형상을 나타낸 것이다. 노즐의 filter 위의 턱 높이에 따라서 type A, B, C로 명명하고 분류하였다. Type A는 filter 위의 턱이 없다. Type B는 filter 위로 5 mm의 턱이 있고, type C는 20 mm의 긴 턱이 형성되었다.

2.3 실험방법

에멀전 플로우 법으로 희토류 수용액 내의 경희토류와 Dy를 분리하기 위해 batch 식으로 유상 노즐을 달리하여 용매추출하였다. 먼저, 장치 내에 희토류가 용해된 수상을 혼합부의 절반 높이까지 채웠다. 이후 추출제가 함유된 용매인 유상을 상단 분리부의 일정 높이까지 채워넣어 혼합부에서의 수상과 유상의 비율이 1:1이 되도록 하였다. 수상과 유상의 송액 펌프를 동시에 가동하여 에멀전 형성 거동을 관찰하였다. 수상의 유송량은 30 ml/min., 유상의 유송량은 240 ml/min.으로 설정하였다. 수상의 송액 펌프가 순환시킨 용액량이 초기에 투입된 수상 용액량과 같아지면 수용액 샘플을 채취하였다. 채취한 수용액 샘플은 ICP-MASS 로 희토류 성분을 분석하였고 분석결과를 바탕으로 각 조건에 따른 추출율, 분배계수(D), 분리계수(β)를 식 (1), (2), (3)을 기반으로 각각 계산하였다^[5,6].

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

Table 4 Emulsion formation rate in mixing part

	P2	P3	P4
Type A	100	85<	75<
Type B	100	100	100
Type C	100	90<	90<

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

$$\beta \text{ (separation factor)} = \frac{D_1}{D_2} \quad (3)$$

상기 식에서 C_0 는 초기 수상의 개별 희토류 원소의 농도, C_{eq} 는 용매추출 후 수상의 개별 희토류 원소의 농도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유상 노즐 형상에 따른 에멀전 형성

에멀전 플로우 법은 장치의 혼합부에서 에멀전이 형성되고 상·하단의 상분리부에서 에멀전 상이 분리되어 용매 추출이 이루어진다. 따라서, 혼합부에서 안정적인 에멀전 상의 형성이 중요하다. 본 연구에서는 안정적인 에멀전 상을 형성하는 조건을 확인하기 위하여 다양한 형태와 기공 크기의 유상 노즐을 이용하여 에멀전 층이 얼마나 혼합부에서 형성되어 충전시키는지를 관찰하였고, 형성된 에멀전 층이 혼합부를 얼마나 채우는지를 기준으로 평가하였다.

Table 4은 유상 노즐의 형태와 기공 크기에 따라 형성된 에멀전 층이 혼합부를 채우는 비율을 정량적으로 나타낸 결과이다. Fig. 4는 실제 형성된 에멀전 층을 나타내었다. Filter 위에 턱이 5 mm 존재하는 type B의 경우, filter의 기공 크기와 상관없이 혼합부에서 에멀전 층이 충분히 형성되었다. 그 외 type A, C의 경우 노즐 기공 크기가 P2일 때만 혼합부를 완전히 채울만큼 에멀전이 충분히 충전되었다. Type C는 노즐 턱이 높아 상단에서 형성되어 하단으로 내려오는 수상 액적이 유상 노즐 안에 유입되는 경향을 나타내었다. 이 때, 유상 노즐에서 분무된 유상 액적이, 노즐 안으로 유입된 유상 액적 보다 수십 배 이상 큰 수상 액적의 계면을 따라 상승하면서 합쳐져 mm 수준의 큰 유상 액적을 형성하여 에멀전 형성을 방해한 것으로 판단된다. 따라서, type B 형태의 노즐이 에멀전 형성에 가장 유리한 조건이라 판단된다.

3.2 유상 노즐의 기공 크기 변화에 따른 추출

유상의 액적 크기에 따른 추출 거동을 확인하기 위해 유상 노즐의 filter 기공 크기를 달리하여 추출을 진행하였다. Fig. 5는 노즐

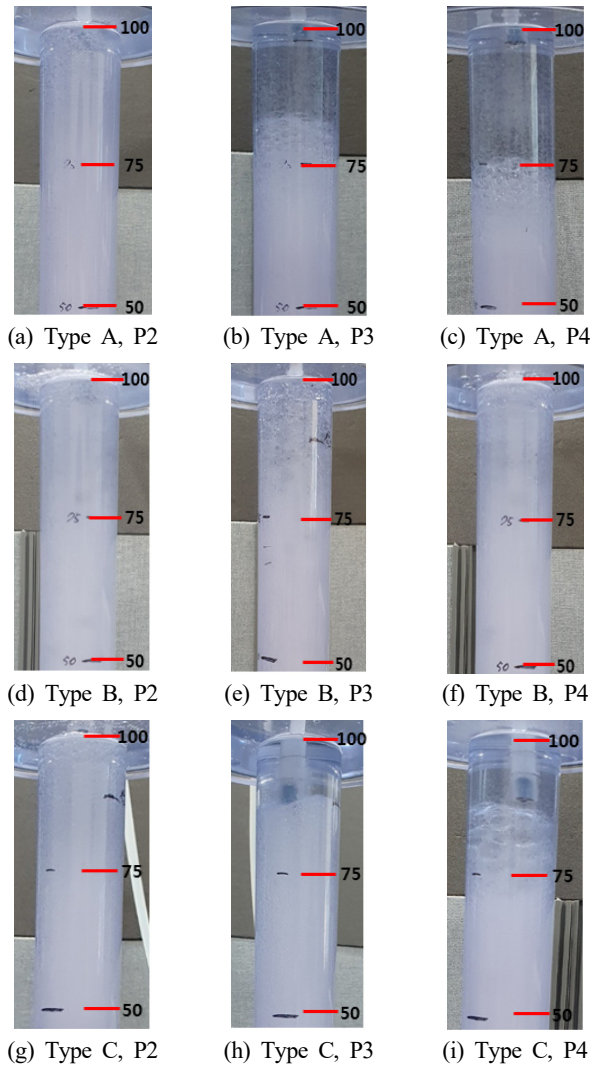
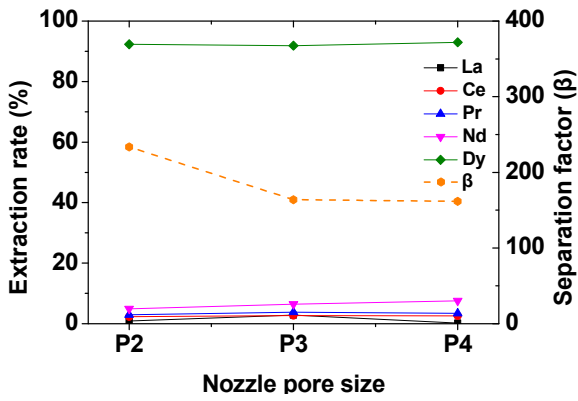


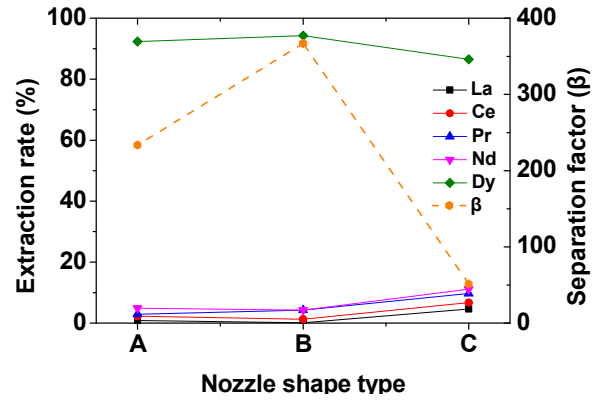
Fig. 4 Emulsion formation. Type A (a) P2, (b) P3, (c) P4. Type B (d) P2, (e) P3, (f) P4 and type C (g) P2, (h) P3, (i) P4.

의 filter 기공 크기에 따른 희토류의 추출율 변화와 분리계수를 나타낸 것이다. P2에서 P4로 기공의 크기에 따른 D_y 의 추출율 94.27, 94.11, 94.08%로 비슷한 수준이었다. 하지만, 경희토류인 La, Ce, Pr, Nd는 2~3% 가량 추출율이 소폭 상승하였다. 유상 노즐 filter의 기공 크기가 작아질수록 분무되는 유상 액적의 크기가 작아져 유상과 수상이 반응하는 표면적이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서, 유상과 수상의 혼합반응이 더 활발해져 추출율이 상승하는 것으로 판단된다. Fig. 5의 분리계수는 Nd의 분배계수와 D_y 의 분배계수를 이용해 계산하였다.

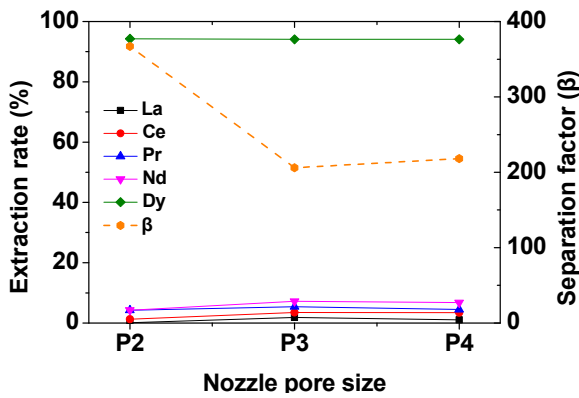
Filter 기공이 미세할수록 추출율은 소폭 증가하지만, 분리효율이 감소하기 때문에 적절한 기공 크기를 선정할 필요가 있다. 또한, 추출 공정 후 filter 표면에 불순물이 누적되는 현상이 있어 기공이 미세할수록 막히기 쉬울 것으로 예상된다. 따라서, 추출율이 높고 기공 크기가 큰 P2 filter가 가장 적합한 크기인 것으로



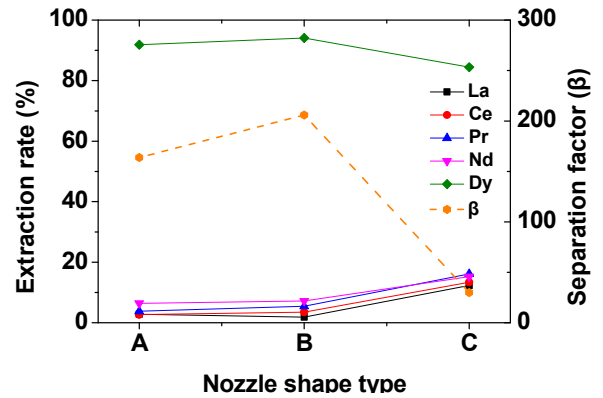
(a) Type A



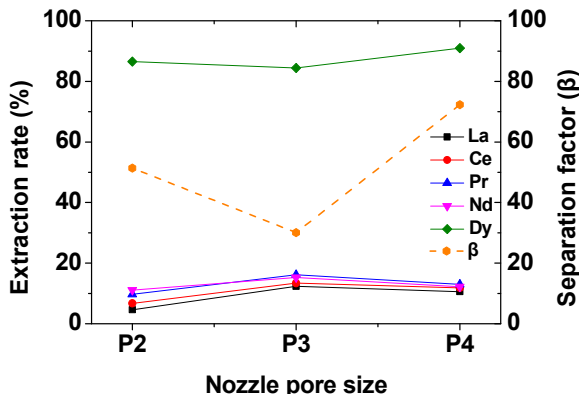
(a) P2



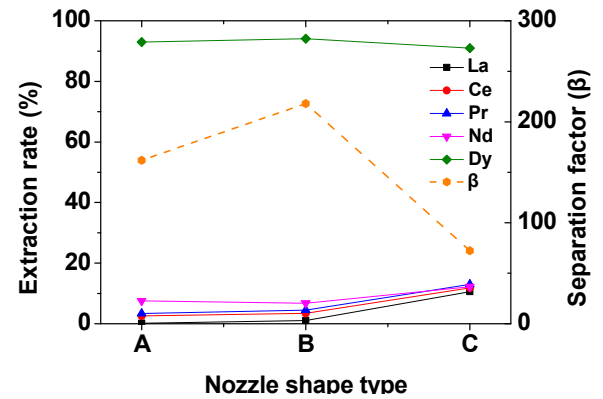
(b) Type B



(b) P3



(c) Type C



(c) P4

Fig. 5 Extraction rate according to the pore size of the nozzle filter

Fig. 6 Extraction rate according to the shape of the nozzle filter

판단된다.

3.3 유상 노즐의 형태 변화에 따른 추출 거동

앞서 유상 노즐에 따라 에멀전의 형성 거동을 확인하였다. Filter 위에 벽이 5 mm 존재하는 type B 형태를 제외하면 에멀전 층이 충분히 형성되지 않았다. 본 연구의 에멀전 플로우 법은 마이크로 수준의 액적의 혼합으로 인한 에멀전이 형성으로 용매추출이 일어난다. 따라서, 노즐의 형태에 따른 추출 거동을 연구하였다. Fig. 6은 노즐의 형상에 따른 P2, P3, P4 filter의 추출율을 나타낸 것이다.

Dy의 추출율은 노즐 filter의 기공 크기와 무관하게 높게 나타났다. Type A, B는 Dy의 추출율이 90% 이상이었고, type C는 80~90%의 추출율을 나타내었다. 분리계수 값 또한 type B > type A > type C 순서로 높았다. Type C의 경우, 상단의 수상 노즐로부터 내려온 수상 액적이 하단의 상분리부로 가지 못하고, 유상 노즐 filter 위에 일부 유입되어 고립되는 현상을 보였다. 이 때문에, 수상 액적은 하단의 상분리부에서 수상으로 흡수되고, 유상 액적은 상단의 상분리부에서 유상으로 흡수되는 안정적인 에멀전 플로우 형성에 비해, 노즐의 턱이 높은 관계로 수상 액적의 유입

에 의한 에멀전화의 불안정성이 발생하여 정상적인 유동이 일어나지 못해 추출율이 떨어진 것으로 판단된다. Type A는 앞서 에멀전 형성 연구에서 에멀전 층이 혼합부에서 충분히 충전되지는 못했지만, 안정적인 에멀전 유동현상으로 추출율이 90% 이상 나타난 것으로 판단된다. Type B는 정상적인 유동과 충분한 에멀전 형성으로 인해 가장 높은 추출율을 나타냈다.

한편, 기존의 용매추출 방식은 추출율과 분리계수를 높이기 위해 NH_4OH 또는 NaOH 를 추출제에 첨가하는 비누화 반응을 이용한다^[10]. 또한, 추출율을 높이기 위해 추출제의 농도를 약 15wt%(= 0.5 몰농도)까지 증가시켜 용매추출을 하기 때문에 많은 약품이 사용되어 약품폐수로 인한 환경오염 문제가 발생할 수 있다^[5]. 하지만, 본 연구에서는 비누화 반응을 사용하지 않고, 5wt%(= 0.16 몰농도)의 낮은 농도의 추출제만을 사용하여, 90% 이상의 높은 추출율과 300 이상의 높은 Nd와 Dy 간의 분리계수 값을 나타내어, 에멀전 플로우 공법의 성공적인 적용으로 인해 기존 용매추출 공정시 과도하게 소모되는 추출제를 급격히 감소시켜 보다 친환경적이고 경제적인 방법이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐 Nd 자석의 회수 공정 중 용매추출 공정에 에멀전 플로우 공법을 적용하여 경희토류와 Dy를 분리하여 추출하였다. 이 때, 유상 노즐의 기공 크기와 형태를 달리하여 에멀전 형성 비율과 추출율을 비교하였다.

유상 노즐의 기공 크기가 P2인 경우 형상에 상관없이 모두 혼합부에서 에멀전 형성율이 100%로 나타났다. 특히, filter 위에 5 mm 높이의 턱을 갖는 type B형태의 노즐은 filter의 기공 크기에 상관없이 에멀전 형성율이 100%로 나타났다.

Filter 기공 크기가 P2 ~ P4로 미세해질수록 Dy와 Nd의 분리계수가 감소하여 P2 filter를 사용할 때 분리계수가 가장 높았다. 또한, 노즐의 형태가 type B일 때, Dy 추출율이 94% 수준으로 가장 높았다. Type B 형태에 P2 filter를 사용하는 유상 노즐이 에멀전 형성과 경희토류와 Dy의 분리 추출에 가장 효율적인 것으로 판단된다.

에멀전 플로우 공법은 5wt% 수준의 낮은 추출제 농도에서도 높은 추출율을 나타내어, 약품 사용량을 크게 줄일 수 있어 향후 용매추출 공정에 적용시 친환경 및 경제적 효과를 볼 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2022년도 에너지기술개발사업 과제번호 202052101

00070의 연구비지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Korea institute 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>>.
- [2] Sungrim rare earth metal Co. Ltd. , 2019, viewed 10 June 2022, Development of Commercial Equipment for Recovery of Rare Earth Metals from Waste Permanent Magnets and Demonstration of Technology, <<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202000006135>>.
- [3] Naganawa, H., 2017, New Liquid-liquid Extraction Apparatus, "Emulsion-flow" Extractor, Journal of Japanese Society for Analytical Chemistry, 66:11 797-808, <https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.66.797>.
- [4] Lo, T. C., Baird, M. H. I., Hanson, C., 1983, Handbook of Solvent Extraction, Wiley, New york, USA.
- [5] 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>.
- [6] 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>.
- [7] Shimogouchi, T., Naganawa, H., Nagano, T., Grambow, B., Nagame, Y., 2019, Size Distribution of Droplets in Two Liquid-phase Mixture Compared between Liquid Spraying and Mechanical Stirring, Anal. Sci., 35:9 955-690, <https://doi.org/10.2116/analsci.18P508>.
- [8] Lee, J. Y., Eom, H. C., Park, G. S., Kim, J. S., 2006, Removal of Impurity in Rare Earth Solution with Karr Column, Proc. Korean Institute of Resources Recycling Conference, 105-109.
- [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] Xiao, Y., Long, Z., Huang, X., Feng, Z., Cui, D., Wang, L., 2013, Study on Non-saponification Extraction Process for Rare Earth

Separation, *J. Rare Earths*, 31:5 512-516, [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60311-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60311-1).

- [11] Kim, B. J., Kim, Y. S., Joo, G. T., Kim, J. H., Park, I. G., Lee, J. Y., Yang, S. W., 2021, Study on Demagnetization and Magnetization to Reuse NdFeB-based Magnets, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 30:4 269-277, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.4.269>.
- [12] Kim, B. J., Kim, Y. S., Park, I. G., 2021, Study on 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] Kim, B. J., Kim, Y. S., 2021, Effect of Nitrogen Flow Rate during Demagnetization Heat Treatment of NdFeB-based Rare Earth Magnets, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 30:6 432-440, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.6.432>.



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: kj1020@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