

염산용액에서 Cyanex 572를 사용하여 [Sm]/[Pr, Nd] 분리를 위한 향류추출 공정변수 계산

이주은 · 소홍일 · 장인환 · ^{1§}안재우 · ^{2§}김홍인* · 이진영*

대진대학교 신소재공학과, *한국지질자원연구원 DMR융합연구단

Calculation of Countercurrent Extraction Process for Separation of [Sm]/[Pr, Nd] in Hydrochloric Acid Solution using Cyanex 572

Joo-eun Lee, Hong-il So, In-hwan Jang, ^{1§}Jae-woo Ahn, ^{2§}Hong-in Kim* and Jin-young Lee*

Department of Advanced Materials Sci. & Eng., Daejin University, Pocheon 11159, Korea

**Covergence Research Center for Development of Mineral Resources (DMR) Korea Institute
of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea*

요 약

추출제로 Cyanex 572를 사용하여 염산용액에서 [Sm]과 [Pr, Nd] 그룹을 분리하기 위해 Xu Guangxian이 제시한 이론에 의하여 최적 향류 추출 공정 변수를 계산하고자 하였다. 기초실험으로부터, [Sm]/[Pr, Nd]의 두 그룹 최적 분리계수는 추출공정의 경우 pH 1.75에서 14.59, 세정공정에서는 0.01M HCl에서 14.61 이었다. [Sm]과 [Pr, Nd] 그룹분리에 필요한 공정 변수에 대해 계산을 하였다. 계산 결과 두 그룹의 희토류 분리에 필요한 총 추출 및 세정 단수는 11단이었으며, 최적추출비를 유지시키기 위해 필요한 원료 용액, 추출용액 및 세정용액의 유량비는 0.1 M HCl을 사용하였을 경우 6.25 : 1.74 : 5.80 이었다.

주제어 : 희토류, Cyanex 572, 향류추출, 분리계수, 최적 추출비 이론

Abstract

For the purpose of optimizing the counter current extraction process for separation of [Sm] and [Pr, Nd] group in hydrochloric acid solution using Cyanex 572 as an extractant, the theory of Xu Guangxian was derived for calculating the optimized extraction factors. From the basic batch test result, the separation factor of [Sm]/[Pr, Nd] was 14.59 at pH 1.75 in extraction process and 14.61 at 0.01 M HCl in scrubbing process. The process parameters can be calculated using a theory of optimum extraction ratio. From the result of calculation, the total extraction and scrubbing stage numbers at counter current process were 11 and for maintain extraction ratio the flow rate ratio of feed solution, solvent solution, scrubbing solution was 6.25 : 1.74 : 5.80 using 0.1 M HCl.

Key words : Rare Earth Elements, Cyanex 572, Counter current extraction, Separation factor, Optimum extraction ratio

· Received : October 2, 2018 · Revised : October 15, 2018 · Accepted : October 17, 2018

^{1§} Corresponding Author : Jae woo Ahn (E-mail : jwahn@daejin.ac.kr)

Advanced Materials Science & Engineering, Daejin University, Hoguk-ro 1007, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 11159, Korea

^{2§} Corresponding Author : Hong In Kim (E-mail : hi@kigam.re.kr)

Department of Development of Mineral Resources, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, 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

21세기 첨단 산업에서 각광받고 있는 자원인 희토류는 물리·화학적 특성이 비슷해 분리가 힘들어 자원이 편재되어 있는 중국에서 희토류 금속을 분리 및 정제하는 연구가 활발히 진행 중 이고, 그 중 Xu Guangxian이 최적 추출비 이론을 통해 batch test만으로 향류추출 공정에 필요한 변수를 계산할 수 있는 식을 제시하여 이를 활용해 실제 공정에 적용하고 있다¹⁻⁷⁾. 또한 본 저자들의 이전 연구에서 용매추출을 이용하여 희토류 원소 별 분리를 위한 기초연구⁸⁻¹⁰⁾와 이를 바탕으로 최적추출비 이론을 통해 Cyanex 572를 사용하여 [Pr, Nd, Sm]/[La]의 분리에 관한 향류추출 공정에 필요한 추출 및 세정 단수 그리고 유량비에 대하여 계산한 바 있으며¹¹⁾, 분리가 힘든 Pr 및 Nd 분리에 대하여 Cyanex 572와 PC88A의 두 추출제의 효율성을 비교하고 금속을 그룹별로 분리하는 공정을 설계한 바 있다¹²⁾.

Fig. 1에는 희토류 혼합용액에서 각 성분들을 단계적으로 분리·회수하는 공정 개략도를 나타냈다. 희토류 원소인 La, Ce, Pr, Nd, Sm 혼합액으로부터 첫 단계는 다른 원소들보다 쉽게 산화되는 Ce를 먼저 산화·환원 방법에 의해 분리, 회수하는 것이다¹³⁻¹⁵⁾. 이어서 분리가 비교적 수월한 La를 회수한 뒤, 상호분리가 어려운 Pr과 Nd를 한 그룹으로 하여 [Sm]과 [Pr, Nd]그룹을 분리해야한다. 따라서 본 연구에서는 Xu Guangxian이 제안한 최적추출비 이론에 의한 최적 공정 설계 기법을 소개하고, 3원계 희토류(Pr, Nd, Sm) 혼합용액에서 Cyanex 572를 사용하여 [Sm]과 [Pr, Nd]그룹을 향류추출 공정에 의해 분리할 경우에 필요한 단수 및 유량 등을 최적추출비 이론에 의해 계산하여 적정 조건을 제시하고자 하였다.

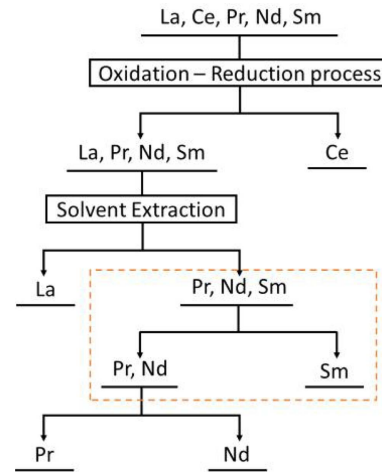


Fig. 1. Schematic diagram of light rare earth metals.

2. 이론적 배경

2.1. 향류추출 공정

용매추출법에서 향류추출(counter current)공정은 여러 단의 추출 및 세정공정이 연속적으로 이루어지기 때문에 분리가 어려운 희토류 원소의 상호분리 기술로 효과적이다. 이 공정은 추출제를 포함하고 있는 유기상과 원료용액인 수상이 혼합되어 반응이 일어나는 혼합조(mixer)와 반응 후 유기상과 수상을 분리시키는 침강조(settler)가 한 단을 이루며, 유기상과 수상이 서로 반대 방향에서 주입된다. 이에 대한 향류추출공정의 모식도를 Fig. 2에 나타냈다.

향류추출공정에서 공정변수를 구하기 위한 기본식을 유도하려면 몇 가지 가정이 필요하다. 첫째는, 여러 원소가 포함되어 있는 용액에서 추출 경향이 큰 물질들을

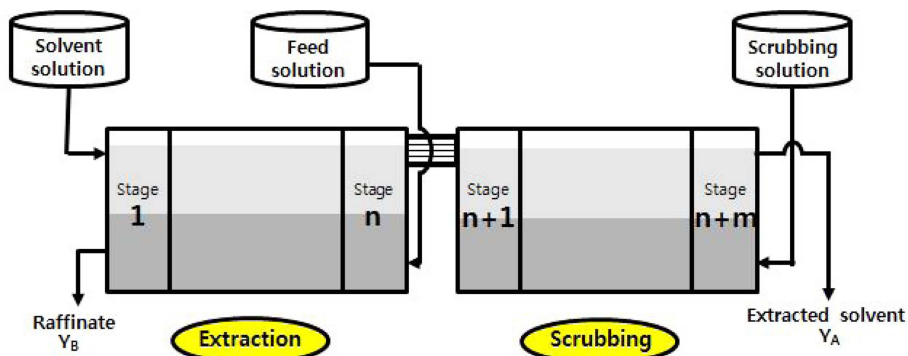


Fig. 2. Schematic diagram of counter current extraction.

그룹 A, 추출 경향이 더 작은 물질들을 그룹 B라고 하며 A, B에 대한 2성분 추출이라 간주하여 계산한다. 이 때 분리계수는 그룹 A와 B에서 인접한 원소들의 분리계수로 정하는데 예를 들어 A그룹 원소(C₁, C₂, ... C_n)와 B그룹 원소(C_{n+1}, C_{n+2}, ... C_m)가 있을 때 A, B그룹의 분리계수는 C_{n+1}의 추출비/C_n의 추출비로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 A그룹은 [Sm], B그룹의 경우는 [Pr, Nd]이기 때문에 분리계수는 A그룹의 Sm과 B그룹 중 추출율이 가장 낮은 Nd의 추출비로 나타낸다. 둘째는 각 단마다 추출 및 세정 분리계수가 다소 다를 수 있지만 일정한 분리계수를 적용한다는 것이다. 셋째는 각 단에서의 추출비 및 유량비가 일정하다는 것인데, 이것은 정상상태에 도달하면 만족시킬 수 있다.

2.2. 최적 추출비 이론에 의한 향류추출공정 설계

2.2.1. 최적 추출비 이론^{5-7,11,12)}

분리할 대상에 대해 batch test를 진행하여 실험한 결과를 토대로 추출단 및 세정단의 추출비(E), 분리계수(β)를 계산하는데, 이때 추출단의 분리계수를 β, 세정단의 분리계수를 β'라 한다. (M)은 A그룹 및 B그룹의 총량(mmol/min), (\bar{A})는 유기상 내 A그룹의 농도, (A)는 수상 내 A그룹의 농도를 나타낸다.

$$E_A = (\bar{A})/(A) \quad E_B = (\bar{B})/(B) \quad E_{M_i} = (\bar{M}_i)/(M_i) \quad (2)$$

$$\beta = E_{Sm}/E_{Nd} \quad \beta' = E'_{Sm}/E'_{Nd} \quad (3)$$

최종 회수금속인 B그룹의 순도(P_B)와 회수율(Y_B)를 결정하고, 이후 분리대상인 A, B그룹에 대해 다음과 같이 순화배수(purification factor) a, b를 정의하는데 이는 분리 효과를 판단하는 기준이 된다. a는 유기상 끝단(n+m단)에서의 A그룹 순도와 수상 끝단(1단)에서 B그룹의 회수율을, b는 수상 끝단(1단)에서의 B그룹 순도와 유기상 끝단(n+m단)에서 A그룹 회수율을 결정하는 인자이다. f_A 및 f_B는 A그룹과 B그룹의 물분율이다.

$$a = \frac{b - Y_B}{b(1 - Y_B)} \quad (4)$$

$$b = \frac{P_{B_1}(1 - P_{B_1})}{f_B/f_A} \quad (5)$$

최적화된 추출공정은 순도와 회수율이 높고 경제성이 제일 좋은 공정을 말한다. 이는 최적 추출비 공식으로 공정설계를 위한 변수를 계산할 수 있으며 순도 및 회수율이 같은 상황 하에 금속의 하루 생산량이 최대일

때 반드시 만족하여야 하는 공식이다. 먼저 추출단 제어 조건하의 추출 단 수상 끝단(1단)에서 B그룹의 생산량 Q_B은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_B = 1.44 \cdot \frac{V \cdot (B)_1}{t \cdot (1+R)} \quad (6)$$

Q_B는 B그룹의 생산량(kg/d), V는 각 단 혼합실의 유효체적(ℓ), t는 접촉시간(min), (B)₁은 수상출구(1단)중 B그룹의 금속농도(g/l), R은 수상과 유기상의 부피비이며, 1.44는 g/min을 kg/d로 환산하기 위한 인자이다.

이 때 각 단 혼합실의 유효체적 V는 다음과 같다.

$$V = \frac{V_{Total}}{n(1+r)} \quad (7)$$

V_{Total}은 추출단의 혼합 침강실의 총 체적(ℓ)이고 r은 침강실와 혼합실의 체적비다.

Kremser식으로부터¹⁶⁾

$$\frac{(B)_1}{(B)_n} = \frac{E_B - 1}{E_B^n - 1} \cong 1 - E_B \quad (8)$$

(7), (8)식을 (6)에 대입하고 E_B로 미분하면

$$\ln \beta \cdot E_B = \frac{1 - E_B}{E_B} \quad (9)$$

이를 Taylor 급수공식으로 전개한 뒤 제 1항을 (9)식에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$E_B = 1/\sqrt{\beta} \quad (10)$$

(10)식은 추출단 총 체적과 분리효과가 같은 조건하에서 일생산량 Q_B가 가장 많을 때 E_B이 반드시 만족해야할 식이며 이 식을 최적 추출비 공식이라고 한다.

한편, 세정단 제어일 경우에 최적 추출비 공식은 다음과 같다.

$$E'_A = \sqrt{\beta'} \quad (11)$$

향류추출공정에서 금속을 고순도로 분리할 수 있는 기준으로 회추출비(J_S)와 회세정비(J_W)를 정의할 수 있고, 이 값이 클수록 고순도 분리가 가능하며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$J_S = \bar{S}/M_1 \quad (12)$$

$$J_W = W/\bar{M}_{n+m} \quad (13)$$

Table 1. Formula of optimum extraction ratio, maximum extraction and scrubbing quantity

Extraction stage control	Scrubbing stage control
if, $f_B' > \sqrt{\beta} / (1 + \sqrt{\beta})$ $E_M = 1 / \sqrt{\beta}$ $E_M' = \frac{E_M \cdot f_B'}{E_M - f_A'}$	if, $f_B' > \sqrt{\beta'} / (1 + \sqrt{\beta'})$ $E_M' = \sqrt{\beta'}$ $E_M = \frac{E_M' \cdot f_A'}{E_M' - f_B'}$
$\bar{S} = \frac{E_M \cdot f_B'}{1 - E_M}$	$W = \bar{S} - f_A'$ (14)

여기서 \bar{S} 는 최대 추출량으로 보통 n단 부근에서 가장 높은 값을 보인다. W 는 최대 세정량으로 보통 n+1단 부근에서 가장 높다. M_x 는 x단에서의 총 금속 질량유량이다. J_S 가 비교적 작을 때 추출단 제어라 하며 (10)식을 만족시켜야 하고, J_W 가 작을 때는 세정단 제어라 하며 (11)식을 만족시켜야 한다. $J_S = J_W$ 일 때는 $f_B' = \sqrt{\beta} / (1 + \sqrt{\beta})$ 의 관계식을 갖고, 이를 통해 다음 Table 1과 같이 두 가지 경우에 대하여 \bar{S} 와 W 를 계산할 수 있다.

f_A' 와 f_B' 는 각각 유기상끝단(n+m단)에서의 A그룹 물질분율과 수상끝단(1단)에서의 B그룹 물질분율을 나타낸다.

2.2.2. 단수 계산

추출 단수(n)와 세정 단수(m)는 Alders의 단수공식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다¹⁷⁾.

$$n = \left(\frac{\log b}{\log(\beta \cdot E_M)} + 2.303 \log \frac{P_A^* - P_{A_1}}{P_A^* - P_{A_n}} \right) \div E_{\text{efficient}} \quad (15)$$

$$m+1 = \left(\frac{\log a}{\log(\beta' / E_M')} + 2.303 \log \frac{\bar{P}_B^* - \bar{P}_{B_{n+m}}}{\bar{P}_B^* - \bar{P}_{B_n}} \right) \div E_{\text{efficient}} \quad (16)$$

반응조의 형태가 사각형이고 완벽하게 닫힌계가 아닌 점을 고려하여 공정 효율 $E_{\text{efficient}}$ 을 고려하였다. 수상 내 A그룹의 순도와 유기상 내 B그룹의 순도가 낮을 경우, P_A^* 와 \bar{P}_B^* 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_A^* = \frac{(\beta \cdot E_M) - 1}{\beta - 1} \quad (17)$$

$$\bar{P}_B^* = \frac{(\beta' / E_M') - 1}{\beta' - 1} \quad (18)$$

2.2.3. 유량비 결정

유량비는 원료용액인 수상과 유기상의 상비를 통해 최적 추출비를 만족시킬 수 있는 중요한 인자이다. 원료용액 유량(V_F , ml/min), 유기상 유량(\bar{V}_S , ml/min) 그리고 세정액 유량(V_W , ml/min)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_F = M_F / C_F \quad (19)$$

$$\bar{V}_S = \bar{S} / \bar{C}_S \quad (20)$$

$$V_W = 3W / C_W \quad (21)$$

여기서 M_F 는 질량유량으로 1 mmol/min 또는 1 g/min이고 C_F 는 원료용액의 몰농도, \bar{C}_S 는 유기상에 추출된 희토류의 몰농도이며 C_W 는 세정 산 농도이다. 1.0 M 희토류 금속이온을 세정하는 데는 추출반응식에 의해 3.0 M HCl이 필요하다는 가정 하에 세정액 유량을 계산하였다.

3. 실험방법

본 연구에서는 Ce이 제거된 3원계 real solution을 사용하여 Pr, Nd, Sm을 그룹별로 분리하기 위해 추출제로 Cyanex 572(2,4,4-Trimethyl-1-Pentene, Cytec Inc.)를 선정하였고 이에 따른 향류추출공정을 설계하였다. Cyanex 572는 농도를 1.5 M로 조절하기 위해 희석제인 Exxol D-80(Exxon mobil chem.)와 혼합하여 사용하였다. 수용액은 0.1 M HCl에 염화 희토류 시약을 용해한 모의용액을 제조하여 사용하였고 그 조성을 Table 2에 나타냈다.

추출실험은 금속이온이 포함되어 있는 수상과 추출제가 포함된 유기상을 상향식 교반기로 유기상과 수상의 상비(O/A)가 1인 조건에서 혼합하여 10 M NaOH용액으로 혼합용액의 pH를 조절하였다. 세정실험은 혼합용액의 pH 3.0이 되게끔 10 M NaOH로 조절하여 추출제에 금속원소를 모두 추출한 뒤 0.01 ~ 0.5 M HCl을 각각 혼합하여 추출된 금속이온에 대해 세정하였다. 물질 평형에 도달 한 뒤 20분간 교반하고 20분간 정치시킨 후 수상에서 샘플을 채취하여 수용액상에 남아있는 경희토류 금속 농도를 ICP-OES(iCAP 6500DUV)로

Table 2. Composition of synthetic solution used in study

	Pr	Nd	Sm
Unit : mg/L	5,000	15,000	2,500

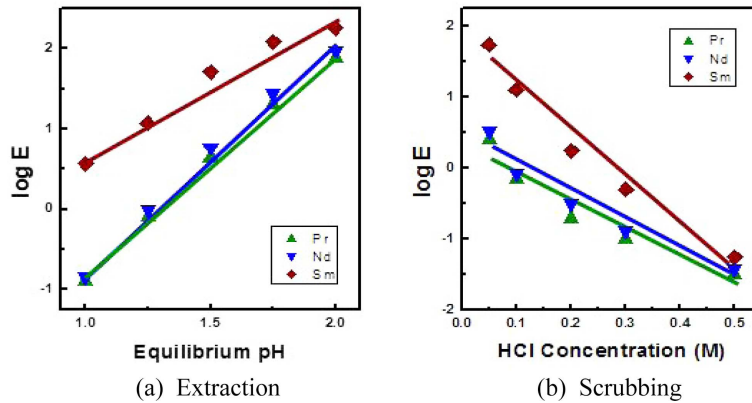


Fig. 3. Plot of log E vs. equilibrium pH for distribution coefficient of Pr, Nd, Sm (O/A : 1.0, 25 °C)

분석하였다.

4. 실험 결과

4.1. [Sm]/[Pr, Nd]그룹 간 분리

같은 pH에서, 추출이 더 잘되는 Sm을 A그룹, 비교적 추출이 덜 되는 Pr과 Nd를 B그룹으로, 두 그룹으로 나누어 2성분 추출이라 간주하여 추출 및 세정 시 추출비를 식 (2)에 의해 계산하였고 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 추출 시 pH에 따른 추출비는 증가하며 낮은 pH에서 분리성이 가장 높았는데 pH가 높아질수록 목표 금속을 포함한 모든 금속이 추출되기 때문이라 사료된다. 세정 시 HCl 농도에 따른 추출비는 감소하며 낮은 농도에서 분리성이 가장 컸음을 보였다.

그룹 간 인접원소인 Nd와 Sm의 추출비를 이용하여 식 (3)을 통해 분리계수를 계산하였고 Table 3, 4에 나타내었다. 추출과 세정 모두 대부분의 영역에서 10.00 이상의 분리계수를 가진다. 추출 및 세정 분리계수 중 높은 값을 갖는 조건을 최적 분리조건으로 선택하였고

Cyanex 572의 추출 분리계수는 pH 1.75일 때 14.59, 세정 분리계수는 HCl농도가 0.01 M일 때 14.61이다

4.2. 최적 분리공정의 변수 계산

경희토류 혼합용액에서 B그룹을 순도 99.9%, 회수를 99.0%로 회수하기 위해 최적 분리계수와 식 (2)~(21)을 이용해서 향류추출공정에 필요한 변수를 계산하였다. 여기서 B그룹의 몰분율은 0.89, 추출 용량은 0.18 M, 총 금속이온 농도는 0.16 M이며 공정 효율을 70%로 선정하여 단수계산에 적용하였다.

4.2.1. 분리목표 결정

(4), (5)식을 이용해 순화배수 a , b 를 구할 수 있으며 계산결과 a 는 333, b 는 99.7의 값을 얻었고 이는 단수를 계산할 때 활용된다.

$$b = \frac{0.999/(1-0.999)}{0.89/0.11} = 124.88$$

$$a = \frac{124.88-0.99}{124.88(1-0.99)} = 99.21$$

Table 3. Separation factor between A[Sm] and B[Pr, Nd] group on the extraction using Cyanex 572 (O/A : 1.0, 25 °C)

pH	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
$\beta_{Sm/Nd}$	12.70	11.51	11.94	12.62	14.59	4.30	0.65

Table 4. Separation factor between A[Sm] and B[Pr, Nd] group on the scrubbing using Cyanex 572 (O/A : 1.0, 25 °C)

HCl conc. (M)	0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.50
$\beta'_{Sm/Nd}$	14.61	14.24	13.35	13.28	13.04	12.02

4.2.2. 최적 추출비의 선택

최적 추출비를 구하기 위해 f'_B 와 $\sqrt{\beta}/(1+\sqrt{\beta})$ 를 비교해 본 결과, f'_B 값이 더 크기 때문에 분리공정은 추출단 제어라는 것을 알 수 있었고, (14)식을 이용해 최대 추출량 \bar{S} 와 최대 세정량 W 를 다음과 같이 구하였다.

$$\bar{S} = \frac{0.26 \times 0.88}{1 - 0.26} = 0.31 \text{ mmol/min}$$

$$W = 0.31 - 0.12 = 0.19 \text{ mmol/min}$$

4.2.3. 단수계산

(15)~(18)식을 이용해 실험으로 구한 분리계수와 순화배수 등을 대입하여 추출 단수 n 과 세정 단수 m 을 다음과 같이 구하였다.

$$n = \frac{\log(124.88)}{\log(14.59 \times 0.26)} + 2.303 \log \frac{0.21 - 0.001}{0.21 - 0.11} \div 0.7 \approx 7$$

$$m + 1 = \frac{\log(99.21)}{\log(14.61 \times 1.62)} + 2.303 \log \frac{0.59 - 0.07}{0.59 - 0.35} \div 0.7 \approx 5$$

따라서 추출은 7단, 세정은 4단이 필요하여, 총 11단이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4.2.4. 유량비 결정

유량비는 각각 (19)~(21)식을 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$V_F = 1/0.16 = 6.25 \text{ ml/min}$$

$$\bar{V}_S = 0.31/0.18 = 1.74 \text{ ml/min}$$

$$V_W = (3 \times 0.19)/0.01 = 57.99 \text{ ml/min}$$

계산 결과 추출단수와 세정단수는 총 11단을 필요로 하고 최적 추출비를 만족시키는 원료용액, 추출용액 및 세정용액의 유량비는 6.25 : 1.74 : 57.99이다. 그러나 세정용액의 농도가 낮기 때문에 공정 중 pH가 증가할 우려가 있어 같은 방법으로 세정용액의 농도가 각각 0.05 M, 0.1 M HCl인 경우에 대해 향류추출 공정 변수를 계산하였다. 그 결과 세정용액의 농도에 따른 분리계수에 큰 차이가 없기 때문에 추출 및 세정 단수에는 변화가 없었다. 그러나 유량비에는 변화가 있어 0.05 M HCl을 세정용액으로 사용하는 경우에는 유량비가 6.25 : 1.74 : 11.60 이었으나 0.1 M HCl을 세정용액으로 사용하는 경우에는 유량비 6.25 : 1.74 : 5.80 이었다. 따라서 실제 공정 적용시에는 반응중 pH가 증가 하는 것을 고려한다면 0.1 M HCl을 세정용액으로 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 이에 대한 공정 모식도를 Fig. 4에 나타냈다.

5. 결 론

3원계 혼합용액에서 추출제로 Cyanex 572를 사용하여 [Sm]과 [Pr, Nd]그룹을 분리하기 위해 각 성분의 분배 및 분리계수 등을 기초 실험을 통해 구하였고, 최적 추출비 공식에 의해 향류추출 공정 설계에 필요한 공정변수를 계산한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기초 batch 실험을 통해 그룹 간 인접원소인 Sm과 Nd의 추출 및 세정시 분리계수값을 측정 한 결과, 추출 분리계수값의 경우는 pH 1.75일 때 최대 14.59 이었고, 세정 분리계수는 HCl 농도가 감소할수록 증가하였고 0.01 M HCl일 때 최대 14.61을 나타내었다.

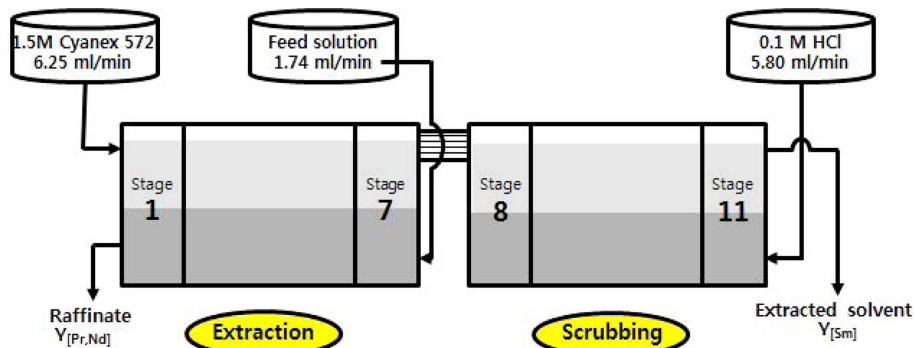


Fig. 4. Counter current process of A[Sm] and B[Pr, Nd] group separation using Cyanex 572 (0.1 M HCl, 25 °C).

2) 1.5 M Cyanex 572를 추출제로 사용하여 [Sm]과 [Pr, Nd]그룹을 목표 순도 99.9%, 목표 회수율 99.0%로 분리·회수하기 위해서 필요한 추출 단수는 7단, 세정 단수는 4단이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한 세정용액으로 0.1 M HCl을 사용할 경우, 유기상 : 원료용액 : 세정액의 최적 유량비는 6.25 : 1.74 : 5.80 이었다.

감사의 글

본 연구는 2017년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단사업(No. CRC-15-06-KIGAM)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Kim, J. H., 2015 : *A Case Study on the Dispute of Export Restrictions for China-Rare Earth*, J. of Korea Trade, 40(1), pp.89-108.
2. Koh, S. M., 2009 : *Situation of the Supply-demand and Potentiality of REE Resources in South Korea*, J. Miner. Soc. Korea, 22(4), pp.417-422.
3. Kim, T. S. et al., 2014 : *Status of Rare earth industry*, Trends in Metals & Materials Engineering, 27(1), pp.8-16.
4. De Boer, M. A. and Lammertsma, K. 2013 : *Scarcity of Rare Earth Elements*, 6(11), pp.2045-2055.
5. Yang, H. et al., 2015 : *Component content distribution profile control in rare earth countercurrent extraction process*, Chinese J of Chemical Engineering, 23, pp.192-198.
6. Guangxian, X. and Jimel, X., 1985 : *New frontiers in Rare Earth Science and Application*, Elsevier, Beijing.
7. Guangxian, X., 1995 : *The Rare Earth*, Metallurgical Industry Press of China, Beijing.
8. Cho, Y. C., Kang, M. S., Ahn, J. W., and Lee, J. Y., 2016 : *Solvent Extraction of Rare Earth Elements (La, Ce, Pr, Nd, Sm) from Hydrochloric Acid Solutions using Cyanex 572*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 25(6), pp.50-57.
9. Cho, Y. C. et al., 2017 : *Extraction & Separation behavior of Light rare earth elements from the mixed solutions by Cyanex 572*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 26(4), pp.79-87.
10. Cho, Y. C. et al., 2018 : *Comparison of the Extraction and Separation Behavior of La, Ce, Pr, Nd, Sm from Light Rare Earth Mixed Solutions by PC88A and Cyanex 572*, Korean J. Met. Mater., 56(2), pp.146-154.
11. Lee, J. E. et al., 2018 : *Countercurrent extraction process design for separation of [Pr, Nd, Sm]/[La] using Cyanex 572*, Korean Inst. of Resources Recycling, 27(4) pp.50-56.
12. Lee, J. E. et al., 2018 : *Comparison of Counter Current Extraction Process of Pr & Nd Separation using Cyanex 572 and PC88A*, Korean J. Met. Mater., 56(8), pp.597-604.
13. Gupta, C. K. and Krishnamurthy, N., 2005 : *Extractive Metallurgy of Rare Earths*, pp.172-173 CRC Press, Florida.
14. Yoon, H. S. et al., 1998 : *Decomposition and Leaching of Bastnasite by Sulfation and Recovery of Cerium Hydroxide from Leached Solution*, J. of Korean Ind. & Eng. Chemistry, 9(3), pp.407-412.
15. Kim, S. D. et al., 2002 : *Recovery of Cerium and Removal Impurity from Leached-Solution of Monazite*, Theories and Applications of Chem. Eng., 8(2), pp.3801-3804.
16. Kremser, A., 1930 : *Theoretical analysis of absorption process*, National Petroleum News, 22(21), pp.43.
17. Alders, L., 1959 : *Liquid-Liquid Extraction*, Elsevier, Amsterdam.

이 주 은

- 대전대학교 신소재공학과 학사
 - 현재 대전대학교 신소재공학과 석사 과정
-

소 흥 일

- 대전대학교 신소재공학과 학사
 - 현재 대전대학교 신소재공학과 석사 과정
-

장 인 환

- 대진대학교 신소재공학과 학사
- 현재 대진대학교 신소재공학과 석사 과정

안 재 우

- 현재 대진대학교 신소재공학과 교수
- 당 학회지 제11권 6호 참조

김 홍 인

- 현재 한국지질자원연구원 DMR융합연구단 선임연구원
- 당 학회지 제24권 2호 참조

이 진 영

- 현재 한국지질자원연구원 DMR융합연구단 책임연구원
 - 당 학회지 제22권 1호 참조
-

회비 납부 안내

- 항상 본 학회에 관심을 가져 주신데 대해 진심으로 감사드립니다.
- 정회원, 준회원(학생회원) 중에 회비가 여러 해 미납된 회원께서는 2018년 12월 20일까지 회비를 꼭 납부해 주시기 바라며, 향후 년회비를 2년 이상 미납한 회원에게는 학회운영상 부득이 회지우송 및 기타 소식 관련 서비스도 중단할 것이오니 조속히 회비를 납부하여 주시기 바랍니다.
- **납부일** : 2018년 12월 20일(학회지 27권 6호(2018년 12월호) 부터 발송중지 예정)
- **납부방법** : 계좌이체 또는 지로입금(지로번호 7609637)
우리은행 : 1005 - 301 - 118587 예금주 : (사)한국자원리사이클링학회
- **연락처** : 한국자원리사이클링학회 사무국
전화 02-3453-3541~2, 팩스 3453-3540, E-mail : kirr@kirr.or.kr, <http://www.kirr.or.kr>