J. of Korean Inst. of Resources Recycling
Vol. 25, No. 4, 2016, 60-67

http://dx.doi.org/10.7844/kirr.2016.25.4.60
pISSN : 1225-8326 eISSN : 2287-4380

≫ 연구논문 ≪

# P507 추출수지를 이용한 중희토류 원소(Gd, Tb, Dy)의 흡탈착 분리특성에 관한 연구

이성은 · 김정운 · 전종혁 · 전홍명 · 이진영* · †한 춘

광운대학교 화학공학과
*한국지질자원연구원 광물자원연구본부

# Separation and Adsorption-Desorption Characteristics of Heavy Rare Earth Elements (Gd, Tb, Dy) using P507 Resin

**Sungeun Lee, Joung Woon Kim, Jong Hyuk Jeon, Hong Myeong Jun, Jin Young Lee* and †Choon Han**

*Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Korea*
**Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea*

## 요 약

본 연구에서는 P507을 포함하고 있는 추출수지를 사용하여 중희토류 원소인 Gd, Tb, Dy의 흡·탈착 반응 메커니즘을 고찰하고 분리를 위한 최적 크로마토그래피법의 반응조건을 도출하였다. 흡·탈착 반응 메커니즘은 흡착등온식인 Langmuir, Freundlich 흡착등온식과, 흡착속도모델인 유사 1차, 2차 반응속도식을 적용하여 고찰하였다. 중희토류 원소의 흡착반응은 단분자층으로 일어난다고 가정하여 흡착등온식을 적용하였고, 잘 일치하여 흡착반응이 단분자층으로 이루어짐을 추측할 수 있었다. 시간별 실험을 진행하여 유사 1차, 2차 반응속도식에 적용한 결과 유사 2차 반응속도식이 추출수지의 중희토류 흡착 메커니즘을 더 잘 표현하였고, 평형흡착량의 실험값은 이론값에 부합하였다. 크로마토그래피법을 이용하여 용리액 HCl 0.25 M 농도조건에서 $\alpha_{Gd}^{Tb}=1.24$, $\alpha_{Tb}^{Dy}=1.03$으로 분리계수 1이상의 높은 분리조건을 확인하였다. HCl 용리액을 사용하였을 때, 용리액의 농도가 높을수록 분리도는 감소하고 용출구간은 줄어드는 경향을 확인하였다.

**주제어** : 분리, 중희토류, 추출크로마토그래피, 흡착등온식

## Abstract

This study was conducted to establish the adsorption-desorption mechanism and the optimum condition of chromatographic operation for separations of heavy rare earth elements (Gd, Tb, Dy) using a p507-containing resin. By employing Langmuir and Freundlich isotherm together with pseudo first and second order kinetics, absorption-desorption reaction mechanism was investigated. Langmuir and Freundlich isotherm was applied under assumption that adsorption reaction occurs in form of monolayer, and because the result was identical to the assumption, now we know adsorption of heavy rare earth elements occurs in form of monolayer. Concerning the pseudo first and second order kinetic, the pseudo second order seemed to be more suitable to represent heavy rare earth element adsorption mechanism. By using the extraction chromatography to separate heavy rare earth ele-

· Received : June 16, 2016 · Revised : July 18, 2016 · Accepted : August 9, 2016
†Corresponding Author : Choon Han (E-mail : chan@kw.ac.kr)
Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, 20 Kwangwoon-ro, Nowon-gu, Seoul 01897, 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.

ments, $\alpha_{Gd}^{Tb}$ = 1.24, and $\alpha_{Tb}^{Dy}$ = 1.03 were confirmed in eluent HCl 0.25 M which indicates almost perfect separations of three elements. Furthermore, as concentrations of eluent became higher, the resolution value decreased and the elution area got shortened.

**Key words :** Separation, heavy rare earth, extraction chromatography, adsorption isotherm

## 1. 서 론

희토류 원소는 란타늄부터 루테튬을 포함한 주기율표 상의 IIIA그룹의 원소들이며, 유사한 화학적 물리적 성질을 가지고 있다.[1] 희토류 원소는 촉매, 배터리에 사용되는 등 현대과학에서 수요가 많지만 한정된 매장량과 일부 국가에 편재되어 있어 가격이 높은 편이다.[2,3] 희토류 원소의 전자구조는 원자번호가 증가함에 따라 4f 궤도 함수에 전자가 차 들어간다. 희토류 원소의 4f 전자껍질은 $5s^2p^6$ 전자들에 의해 감싸져 화학적 성질이 매우 비슷하여 분리하기 어렵게 하는 원인이 된다.[4,5]

희토류를 분리하는 방법에는 고전적으로 분별결정법이 많이 사용되었고, 현대에는 용매 추출법, 이온교환크로마토그래피법, 추출크로마토그래피법 등이 많이 사용되고 있다. 분별결정법은 용해도차이를 이용한 분리법으로 희토류원소의 경우 그 차이가 매우 미미하여 최근에는 거의 시도되지 않고 있다. 용매추출법은 수용액상의 희토류 원소가 추출제와의 친화도 차이로 분리하게 된다. 이 경우 대용량으로 연속작업이 가능하고 높은 효율을 나타내지만, 재활용이 불가능하고 순도가 높지 않다는 단점이 있다.[6] 이온교환크로마토그래피법은 이온교환반응을 이용한 크로마토그래피로, 높은 순도의 원소를 얻을 수 있고 재활용이 가능하다는 것이 장점이나 비싸고 대량공정이 어렵다는 점이 단점이다.[7,8]

추출크로마토그래피법은 용매추출법과 이온교환크로마토그래피법의 장점을 조합하여 만든 방법으로 기본적으로 이온교환크로마토그래피의 장치와 같지만, 이온교환수지 대신에 용매추출법의 메커니즘을 적용한 추출수지를 사용하는 것이 다르다. 이온교환크로마토그래피법에서의 다단분리의 고효율과 재활용이 가능하다는 장점과, 용매추출법의 높은 선택도 및 분리효율 등의 장점을 지닌다.[9-11]

대부분의 희토류가 중국에서 생산되는 만큼 희토류 분리에 대한 연구는 중국에서 활발하게 진행되고 있다. Z. H Wang등은 HEOPPA를 포함한 추출수지를 이용하여 중희토류의 분리를 시도하였고, Q. Jia등은 Cyanex 302를 포함한 추출수지를 이용하여 중희토류를 분리하였다.[12,13] 또한 Kazuo Kondo등은 acidic organophosphorus를 포함한 마이크로캡슐을 이용하여 중희토류를 분리하였고, M. Eskandari Nasab등은 희토류 분리의 최적조건을 탐색하는 등 중국이 아닌 다른 나라에서도 희토류 분리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[14,15]

그러나 국내에는 보유 희토류 자원이 있음에도 분리기술이 미흡하여 희토류의 대부분을 수입에 의존하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내산 모나자이트 원광 내 존재하는 중희토류 중 가장 함유율이 높은 세 원소(Gd, Tb, Dy)를 대상으로 추출수지에 의한 분리를 목표로 하였다. 이 때, P507을 기능기로 가지고 있는 추출수지를 사용하였으며 크로마토그래피법에 의한 분리실험을 실시하였다.[16-18] 추출수지는 희토류 원소와 흡탈착 반응을 반복하며 분리가 일어나기 때문에 분리실험에 앞서 흡탈착 메커니즘을 고찰하였다. pH와 질량, 반응시간을 변화시켜가며 회분식 실험을 진행했으며, 얻은 정보를 Langmuir, Freundlich 흡착등온식을 통해 열역학적으로 분석하여 흡착 모델을 제시하였다. 중희토류 이온의 흡착속도는 유사 1차, 2차식을 통하여 수식화 하고, 최종적으로 추출크로마토그래피법을 이용하여 각 원소를 분리하고자하였다.

## 2. 실 험

### 2.1. 시약 및 기기

실험에 사용된 중희토류 Gd, Tb, Dy는 증류수에 50 mg/L 농도로 제조하여 사용하였다. 각 중희토류는 gadolinium (III) chloride hydrate ($GdCl_3 \cdot H_2O$, STREM CHEMICAL, 99.9%), terbium (III) chloride hexahydrate ($TbCl_3 \cdot 6H_2O$, Sigma-Aldrich, 99.9%), dysprosium (III) chloride hexahydrate ($TbCl_3 \cdot 6H_2O$, Sigma-Aldrich, 99.9%)를 사용하였다. 모의용액의 pH는 HCl (DUKSAN, 36%)과 NaOH (JUNSEI, 97%)를 사용하여 조절하였다. 추출수지로는 Cangzhou chemical Co., Ltd의 P507을 사용하였다.

회분식 교반에는 진탕배양기를 사용하였고, 희토류 원소의 정량분석에는 ICP-OES (inductively coupled plasma

optical emission spectroscopy, Optima 2000 DV, Perkin Elmer Instrument, USA) 장비를 사용하였다.

### 2.2. 흡착 실험

2.2.1. 초기 산도 효과

pH조건은 수지의 흡착성능에 영향을 주기 때문에 수지의 최대흡착능 조건을 알기위해 산도실험을 수행하였다. 중희토류 원소 모의혼합용액의 pH를 1, 2, 3, 4, 5, 6으로 HCl을 이용하여 조절하여 실행하였다. pH별 중희토류 모의용액 100 ml에 수지 0.3 g을 첨가하여 25 °C, 200 rpm으로 하루 동안 교반하여 산도별로 중희토류 흡착반응에 미치는 영향을 비교하였다.

2.2.2. 흡착 특성 및 흡착 성능 평가

P507 수지의 중희토류의 흡착과정을 이론적으로 해석하기 위하여 농도별 흡착 실험을 실시하였다. 중희토류 모의용액 100 ml에 추출수지의 양을 0.25 ~ 0.7 g로 수지 양을 조절하고 24시간 동안 25°C, 200 rpm 조건으로 교반시켰다. 얻어진 데이터를 Langmuir, Freundlich 흡착등온식에 적용하여 흡착 메커니즘을 고찰하였다.

2.2.3. 반응시간의 영향

중희토류 모의용액 100 ml에 추출수지 0.4 g을 첨가하여 25°C, 200 rpm으로 1분 ~ 2880분 동안 교반시켰다. 유사 1차 반응속도식(pseudo first order)과 유사 2차 반응속도식(pseudo second order)을 이용하여 시간에 따른 흡착반응속도에 대한 분석을 하였다.

2.2.4. 추출크로마토그래피법을 이용한 분리

추출크로마토그래피는 내부직경 0.8 cm의 관에 20 cm 높이로 수지를 충진하여 사용하였다. 4.95 ml/min.의 속도로 2 M HCl을 충분히 흘려주어 컬럼 내부를 세척하였다. 산도를 pH 3으로 조절한 중희토류 모의용액 30 ml를 1 ml/min.의 속도로 흘려주어 반응을 수행했다. 이후 증류수 150 ml를 4.95 ml/min.의 속도를 흘려주어 흡착되지 않은 용액을 배출한 뒤, HCl 용리액을 1 ml/min.의 속도로 농도를 변화시키며 흘려주어 분리 실험을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 초기 산도에 따른 흡착

회분식 반응기에서 초기 산도에 따른 각 희토류 원소의 흡착량을 알아본 결과 Fig. 1처럼 나타났다. Tb와 Dy는 pH 2에서 12.82 mg/g, 15.22 mg/g으로 가장 높은 흡착능을 보였으나, Gd는 pH 3에서 가장 높은 흡착능을 보였다. 본 실험의 최적 pH는 수지 질량당 가장 많은 흡착량을 보인 pH 3을 최적 pH로 생각하고 이 후 실험을 진행하였다.

### 3.2. 흡착등온식을 통한 흡착 메커니즘의 분석

본 연구에서는 중희토류 원소가 추출수지에 흡착되는 흡착 메커니즘을 Langmuir, Freundlich 흡착등온식에 적용하였다. Langmuir 흡착등온식은 고체 표면에 원자를 흡착하는 흡착점이 존재하며 이 흡착점과 흡착질의 상호인력이 흡착되는 양에 관계없이 항상 같고, 흡착 표면이 완전히 덮이면 그 이상은 흡착이 일어나지 않는다는 단분자막 흡착을 가정한다. 따라서 흡착속도는 비어있는 흡착점의 분율과 기체의 압력에 비례하고, 탈착속도는 흡착되어있는 흡착점의 분율에 비례하기 때문에 표면 흡착률에 관해 Langmuir 흡착등온식을 정리하면 식(1)과 같이 된다.

$$\frac{C_e}{q_e}=\frac{C_e}{q}+\frac{1}{bq} \tag{1}$$

여기서 $C_e$는 흡착평형에서의 흡착질 평형농도(mg/L), $q_e$는 평형상태에서 흡착제 단위 g당 흡착된 흡착질의 양(mg/g)을 의미한다. b와 q는 Langmuir 상수로 이론적인 흡착능과 흡착속도와 관련된 Langmuir 상수이다.

Freundlich 등온흡착식은 Langmuir 등온흡착식에 흡착질이 흡착됨에 따라 상호작용이 감소하여 지수적으로

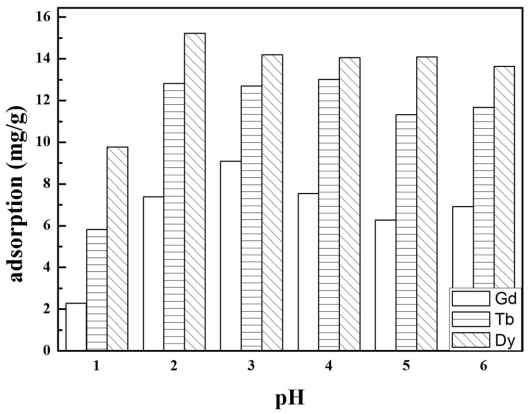


**Fig. 1.** Effects of pH on the adsorption for heavy rare earth elements (Gd, Tb, Dy).

미분흡착률이 감소한다는 가정을 도입하여 이론적으로 유도한 흡착등온식이며, 기본식의 양변에 자연로그를 취하여 1차식으로 변형한 식 (2)를 사용하였다.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2)$$

이 때 $C_e$는 흡착평형에서의 흡착질 평형농도(mg/L), $K_F$와 n은 Freundlich 상수, $q_e$는 평형상태에서 흡착제 단위 g당 흡착된 흡착질의 양(mg/g)을 의미한다. Freundlich 흡착등온식 상수($K_F$)는 흡착제의 흡착능에 대한 척도($mg^{1-(1/n)}L^{1/n}g^{-1}$)로서 클수록 흡착능이 양호함을 의미하며, n은 흡착동력의 크기를 나타내는 것으로 일반적으로 n이 2이상일 때 흡착이 쉽게 일어나며 n이 1이하인 물질은 난흡착성이다.[19,20]

Langmuir와 Freundlich 두 식 모두 흡착이 단분자층으로 일어남을 가정한 식으로 중희토류 원소의 흡착 반응이 단분자층으로 일어난다고 가정하여 두 식을 적용 후 평가하였다. 실험한 내용을 흡착등온식에 적용하여 Fig. 2와 상수 값은 Table 1에 나타내었다. 분석 결과 Langmuir 흡착등온식에서의 결정계수($R^2$)값이 Gd 0.9929, Tb 0.9965, Dy 0.9950으로, Freundlich 흡착등온식을 적용하여 얻은 결정계수값인 Gd 0.8013, Tb 0.9672, Dy 0.9926보다 전체적으로 1에 더 근접하여 P507 수지의 중희토류 흡착 메커니즘은 Langmuir 흡착등온식에 더 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한, Langmuir 흡착등온식은 흡착 점의 에너지 상태는 동일하며, 흡착된 분자 사이에는 상호작용이 없으며 흡착열은 모든 흡착 점에서 주위의 상태와 무관하게 일정하다. 그러나, 단분자층까지만 흡착되는 흡착계에서는 흡착열이 표면 덮임율에 따라 감소한다는 이론인 Freundlich 흡착등온식은 본 연구 결과에 적절하지 않음을 확인하였다. 따라서 중희토류 원소와 P507간의 흡착반응은 Langmuir 흡착등온식이 더 적절한 것으로 사료된다.

### 3.3. 반응시간에 따른 흡착속도

시간별 실험을 실시한 정보를 바탕으로 유사 1차 반응속도식과 유사 2차 반응속도식에 적용하여 추출수지의 중희토류 이온에 대한 흡착 반응속도를 분석하였다. 유사 1차 반응속도식은 수용액상의 용해제로부터 용질의 흡착과정을 알기 위해 가장 널리 사용되는 속도식 중 하나이다. 분석을 위하여 직선화시킨 식 (3)을 사용하였다.

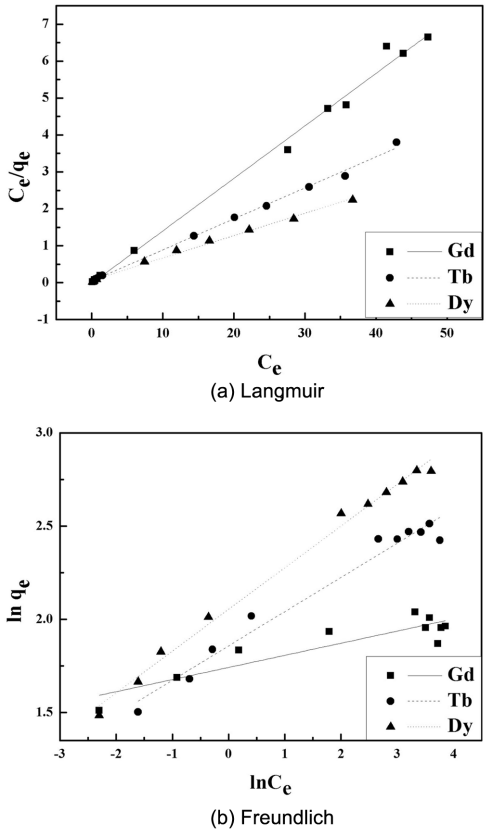


**Fig. 2.** Isotherms for heavy rare earth elements (Gd, Tb, Dy).

**Table 1.** Langmuir and Freundlich isotherms constants

| Element | Langmuir isotherm | | | Freundlich isotherm | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $q_m$ | b | $R^2$ | $K_F$ | n | $R^2$ |
| Gd | 7.032 | -7.255 | 0.9929 | 5.711 | 15.408 | 0.8013 |
| Tb | 11.905 | 1.838 | 0.9965 | 6.410 | 5.449 | 0.9672 |
| Dy | 15.361 | 1 | 0.9950 | 7.795 | 4.472 | 0.9926 |

$$\ln(q_e - q) = \ln q_e - K_1 t \quad (3)$$

여기서 $K_1$은 반응속도 상수(min.$^{-1}$), $q_e$는 평형상태에서 흡착제 단위 g당 흡착량(mg/g), $q_t$는 반응시간 t에서의 흡착량, t는 시간(min.)이다.

유사 2차 반응속도식은 고체상의 흡착평형능력을 바탕으로 하고 있으며, 마찬가지로 직선화시킨 식 (4)를 사용하였다.

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{K_2 q_s^2} + \frac{1}{q_s} t \quad (4)$$

여기서 $K_2$는 2차 반응속도상수(g/mg·min.)이며 1차 반응속도식과 같이 $q_e$는 평형상태에서 흡착제 단위 g당 흡착량(mg/g), $q_t$는 반응시간 t에서의 흡착량, t는 시간(min.)이다.[21)]

유사 1차 반응속도모델에 적용하기 위하여 $\ln(q_e\text{-}q)$와 t로 도시화 하여 Fig. 3(a)에 나타내었고, 유사 2차 반응속도 모델에 적용하기 위하여 $t/q_t$대 t로 도시화하여 Fig. 3(b)에 나타내었다. 흡착속도 데이터를 두 식에 적용한 결과 유사 1차 반응속도식보다 유사 2차 반응속도식을 더 따르는 결과를 나타내었다. 즉, 유사 2차 반응속도식을 통해 계산된 $R^2$값은 0.9970 ~ 0.9995로 유사 1차 반응속도식의 $R^2$값 보다 높은 값을 나타냈다 (Table 2). 또한 반응속도식을 통해 구한 평형상태에서의 흡착량($q_e$)과 실제 실험값의 차이가 유사 2차 반응속도식을 통해 구한 값이 Gd 3%, Tb 0.2%, Dy 0.5%인 것에 비해 유사 1차 반응속도식으로부터 구한 평형흡착량은 Gd 3%, Tb 42%, Dy 54%의 오차를 보여 유사 2차 반응속도식이 중희토류 흡착반응을 보다 잘 표현한다고 할 수 있다.

### 3.4. 추출크로마토그래피법을 이용한 중희토류 원소의 분리

용리액의 농도에 따른 중희토류 원소 분리의 최적 조건을 알아보기 위하여 HCl 0.25, 0.3, 0.35 M의 조건에서 추출크로마토그래피 실험을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 추출크로마토그래피의 분리 효율은 분리능을 사용하여 분석하였다. 분리도는 다음 식 (5)과 같이 표현된다.

$$\alpha_A^B = \frac{2(t_B - t_A)}{W_A + W_B} \quad (5)$$

여기서 $t_A$, $t_B$는 용질 A와 B의 크로마토그래피 peak의 위치이고, $W_A$와 $W_B$는 용질 A와 B의 크로마토그래피 peak밑면의 길이이다.

용리액이 HCl 0.25 M일 때 용출구간이 1740 ml로

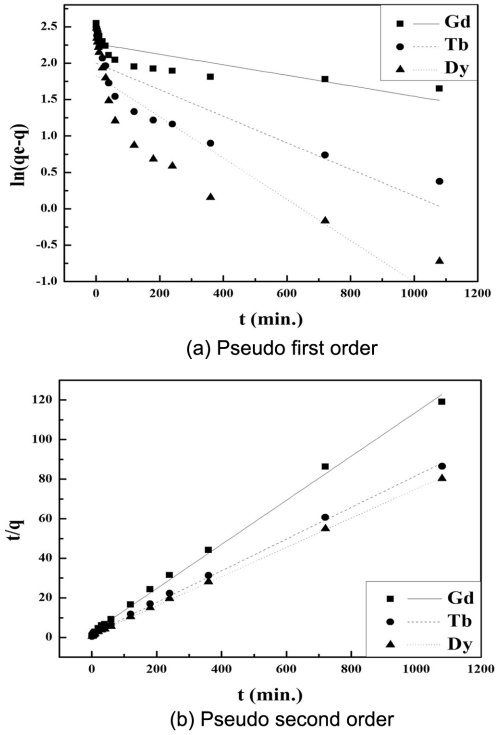


**Fig. 3.** Kinetic models for heavy rare earth elements (Gd, Tb, Dy).

**Table 2.** Pseudo-first-order and pseudo-second-order constants

| Element | Experiment | Pseudo first order | | | Pseudo second order | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $K_1$ | $q_e$ | $R^2$ | $K_2$ | $q_e$ | h | $R^2$ |
| Gd | 14.263 | 0.001 | 9.645 | 0.5904 | 0.005 | 8.967 | 0.411 | 0.9970 |
| Tb | 13.95 | 0.002 | 7.381 | 0.7053 | 0.004 | 12.482 | 0.601 | 0.9985 |
| Dy | 13.948 | 0.003 | 6.236 | 0.7524 | 0.004 | 13.54 | 0.812 | 0.9995 |

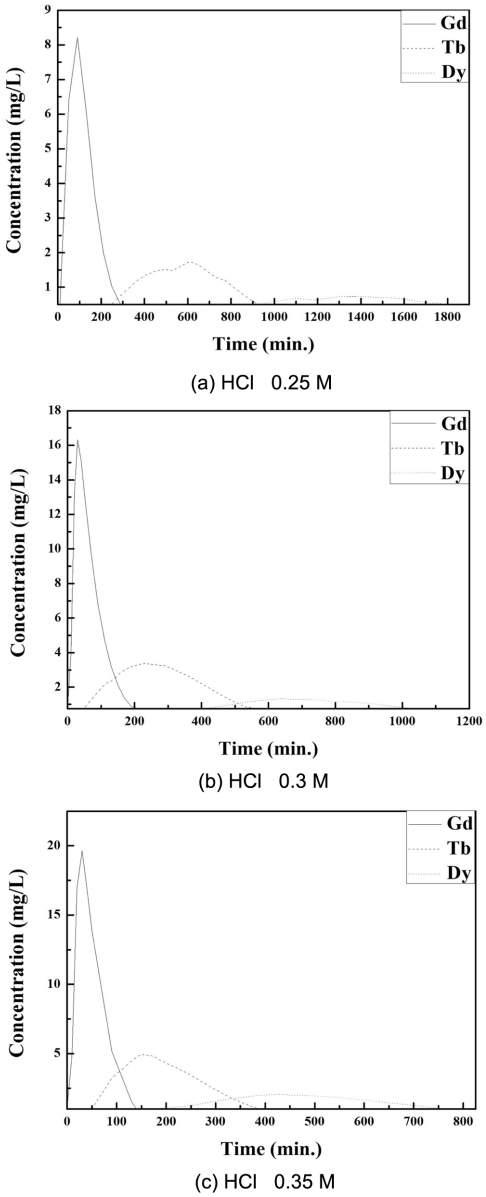


**Fig. 4.** Separation results of chromatography (Gd, Tb, Dy).

가장 길었으나 분리도가 $\alpha_{Gd}^{Tb} = 1.24$, $\alpha_{Tb}^{Dy} = 1.03$으로 가장 높았고, 세 원소가 높은 분리도를 보였다. 하지만, 용리액의 농도를 HCl 0.35 M로 높였을 때 분리도는 $\alpha_{Gd}^{Tb} = 0.7$, $\alpha_{Tb}^{Dy} = 0.68$로 낮아졌고, 용출구간은 730 ml로 짧아졌다. 용리액의 농도가 증가할수록 용출구간은 짧아졌으나 분리도도 감소하였고, 용리액의 농도가 감소할수록 용출구간이 길어지는 대신에 분리도도 증가하는 경향을 보였다. 따라서 중희토류 세 물질의 최적분리조건은 0.35 M에서 분리도 1이상으로 높은 분리도로 분리 되었다.

## 4. 결 론

중희토류 모의용액으로부터 각 원소를 분리하기 위하여, P507를 추출제로 사용한 추출수지를 이용하여 흡탈착 메커니즘 확인 및 추출크로마토그래피를 이용한 분리실험을 통하여 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

먼저 산도에 따른 중희토류 흡착실험결과, pH 3에서 세 원소가 고루 흡착되었으며, 가장 많은 흡착량을 보였다. 이어 농도별 흡착실험을 진행하여 Langmuir, Freundlich 흡착등온식을 적용하여 흡착 메커니즘을 분석한 결과, Langmuir 흡착등온식이 Freundlich 흡착등온식보다 $R^2$ 값이 높아 중희토류 원소와 P507간의 흡착반응에 더 적절하였다. 흡착반응이 단분자층으로 일어남을 가정하여 Langmuir식과 Freundlich식에 적용하여 평가하였고, 그 결과 잘 일치하여 중희토류 흡착반응은 단분자층으로 일어남을 추측할 수 있었다. 흡착반응을 유사 1차, 유사 2차 반응속도식에 적용한 결과 유사 2차 반응속도식이 $R^2$값도 1에 더 가깝고, 식을 통해 구한 $q_e$값과 실험치의 오차도 더 적어 중희토류 흡착반응을 더 잘 표현하였다.

중희토류 각 원소를 분리하기 위하여 추출크로마토그래피법을 이용하여 분리실험을 진행하여 용리액이 HCl 0.25 M일 때, 분리도 $\alpha_{Gd}^{Tb} = 1.24$, $\alpha_{Tb}^{Dy} = 1.03$으로 분리를 확인하였으며, 용리액의 농도가 낮아질수록 용출구간은 늘어났지만 분리도는 증가하였다. 따라서 분리시간 및 용리액의 농도, 분리도 등을 감안한 최적분리의 HCl 농도는 0.25 M이었다.

## 감사의 글

이 논문은 한국지질자원연구원이 주관하는 창의형 융합 연구사업(CAP-11-1-KIGAM)에 의해 연구되었으며 지원에 감사드립니다.

## References

1. P. Henderson, 2013 : Rare Earth Element Geochemistry, pp. 1-32, 115-152.
2. Koh, S.-M., 2009 : Situation of the Supply-demand and

Potentiality of REE Resources in South Korea. J. Miner. Soc. Korea, **22,** pp. 417-422.
3. Marc Humphries, 2010 : Rare Earth Elements: The Global Supply Chain, pp. 1-15.
4. J Jensen, AR Mackintosh, 1991 : Rare earth magnetism, pp. 1-7.
5. R Elliott, 2013 : Magnetic properties of rare earth metals, pp. 1-14.
6. Jiri Starry, 2013 : The solvent extraction of metal chelates, pp 21-49.
7. Nishihama, S., Sakaguchi, N., Hirai, T., Komasawa, I., 2002 : Extraction and separation of rare earth metals using microcapsules containing bis(2-ethylhexyl)phosphinic acid. Hydrometallurgy, **64**, pp. 35-42.
8. Friedrich G. Helfferich, 1962 : Ion exchange, pp. 1-21, 421-499.
9. Horwitz, E. P., Dietz, M. L., Chiarizia, R., Diamond, H., Essling, A. M., Graczyk, D., 1992 : Separation and preconcentration of uranium from acidic media by extraction chromatography. Anal. Chim. Acta., **266**, pp. 25-37.
10. Horwitz, E. P., McAlister, D. R., Dietz, M. L., 2006 : Extraction Chromatography Versus Solvent Extraction: How Similar are They?, Sep. SCI. Technol., **41**, pp. 2163-2182.
11. Pin, C., Briot, D., Bassin, C., Poitrasson, F., 1994 : Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography. Anal. Chim. Acta., **298**, pp. 209-217.
12. Wang, Z., Ma, G.., Lu, J., Liao, W., Li, D., 2002 : Separation of heavy rare earth elements with extraction resin containing 1-hexyl-4-ethyloctyl isopropylphosphonic acid. Hydrometallurgy, **66(1),** pp. 95-99.
13. Jia, Q., Wang, Z. H., Li, D. Q., Niu, C. J., 2004 : Adsorption of heavy rare earth(III) with extraction resin containing bis(2,4,4-trimethylpentyl) monothiophosphinic acid. Journal of Alloys and Compounds, **374(1)**, pp. 434-437.
14. Kondo, K., Kamio, E., 2002 : Separation of rare earth metals with a polymeric microcapsule membrane. Desalination, **144(1-3)**, 249-254.
15. Nasab, M. E., Sam, A., Milani, S. A., 2011 : Determination of optimum process conditions for the separation of thorium and rare earth elements by solvent extraction. Hydrometallurgy, **106(3)**, 141-147.
16. Liu, J. S., Chen, H., Chen, X. Y., Guo, Z. L., Hu, Y. C., Liu, C. P., Sun, Y. Z., 2006 : Extraction and separation of In(III), Ga(III) and Zn(II) from sulfate solution using extraction resin. Hydrometallurgy, **82**, pp. 137-143.
17. LIAO, C., JIAO, Y., LIANG, Y., JIANG, P., NIE, H., 2010 : Adsorption-extraction mechanism of heavy rare earth by Cyanex272-P507 impregnated resin. T. Nonferr. Metal. Soc., **20**, pp. 1511-1516.
18. Abreu, R. D., Morais, C. A., 2014 : Study on Separation of Heavy Rare Earth Elements by Solvent Extraction with Organophosphorus Acids and Amine Reagents. Minerals Eng., **61**, pp. 82-87.
19. Na, Choon-Ki, Jeong Jin-Hwa, Park Hyun-Ju, 2011 : Applicability of Theoretical Adsorption Models for Studies on Adsorption Properties of Adsorbents (1). Korean Soc. Environ. Eng., **33**, 606-616
20. Desta, M. B., 2013 : Batch Sorption Experiments: Langmuir and Freundlich Isotherm Studies for the Adsorption of Textile Metal Ions onto Teff Straw (Eragrostis tef) Agricultural Waste. J. Therm, **2013**, 1-6.
21. Miyake, Y., Ishida, H., Tanaka, S., Kolev, S. D., 2013 : Theoretical analysis of the pseudo-second order kinetic model of adsorption. Application to the adsorption of Ag(I) to mesoporous silica microspheres functionalized with thiol groups. Chem. Eng. J, **218**, 350-357.

**이 성 은**

• 광운대학교 화학공학과 학사
• 현재 광운대학교 화학공학과 석사 과정

**김 정 운**

• 광운대학교 화학공학과 학사
• 고려대학교 화학공학과 석사
• 광운대학교 화학공학과 박사
• 현재 한국건설기술연구원 박사후 과정

**전 종 혁**

• 현재 광운대학교 화학공학과 박사과정
• 당 학회지 제24권 4호 참조

**전 홍 명**

• 현재 광운대학교 화학공학과 박사과정
• 당 학회지 제24권 4호 참조

**이 진 영**

• 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부
금속회수연구실 책임연구원
• 당 학회지 제22권 1호 참조

**한 춘**

• 현재 광운대학교 화학공학과 교수
• 당 학회지 제24권 4호 참조

**《광 고》** 本 學會에서 發刊한 자료를 판매하오니 學會사무실로 문의 바랍니다.

* EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價格 : 20,000원
(The 2th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
* 자원리싸이클링의 실제(1994) 400쪽, 價格 : 15,000원
* 학회지 합본집 I~X 價格 : 40,000원, 50,000원(비회원)
(I : 통권 제1호~제10호, II : 통권 제11호~제20호, III : 통권 제21호~제30호, IV : 통권 제31~제40호, V: 통권 제41호~제50호, Ⅵ: 통권 제51호~제62호, Ⅶ: 통권 제63호~제74호, Ⅷ: 통권 제75호~제86호 IX: 통권 제87호~제98호, X: 통권 제99호~제110호)
* 한·일자원리싸이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價格 : 30,000원
* 한·미자원리싸이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價格 : 15,000원
* 자원리싸이클링 총서I(1997년 1월) 311쪽, 價格 : 18,000원
* '97 미주 자원재활용기술실태조사(1997년) 107쪽, 價格 : 15,000원
* 日本의 리싸이클링 産業(1998년 1월) 395쪽, 價格 : 22,000원, 발행처-文知社
* EARTH 2001 Proceeding (2001) 788쪽, 價格 : 100,000원
(The 6th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
* 오재현의 자동차 리싸이클링기행(2003년 2월) 312쪽, 價格 : 20,000원, 발행처-MJ미디어
* 리싸이클링백서(자원재활용백서, 1999년) 440쪽, 價格 : 15,000원, 발행처-文知社
* 리싸이클링백서(자원재활용백서, 2004년) 578쪽, 價格 : 27,000원, 발행처-淸文閣
* 리싸이클링백서(자원재활용백서, 2009년) 592쪽, 價格 : 30,000원, 발행처-淸文閣
* EARTH 2009 Proceeding (2009) 911쪽, 價格 : 100,000원
(The 10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
* 리싸이클링백서(자원재활용백서, 2014년) 435쪽, 價格 : 35,000원, 발행처-S&M미디어(주)