J. of Korean Inst. of Resources Recycling
Vol. 27, No. 6, 2018, 68-75
https://doi.org/10.7844/kirr.2018.27.6.68
pISSN : 1225-8326 eISSN : 2287-4380

≫ 기술자료 ≪

국내 순환유동층보일러 석탄재의 희토류 분포 특성 및 평가

김영진* · 백철승* · 서준형* · 최문관* · §조계홍* · 안지환**

*한국석회석신소재연구소 연구개발실, **한국지질자원연구원 탄소광물화적정기술사업단

Distribution and Evaluation of Rare Earth Elements contained in Coal Ashes from Korea Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC)

Young-Jin Kim*, Chul-Seoung Baek*, Jun-Hyung Seo*, Moon-Kwan Choi*, §Kye-Hong Cho* and Ji-Whan Ahn**

**Department of Research and Development, Korea Institute of Limestone and Advanced Materials*
***Center for Carbon Mineralization, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*

요 약

국내 순환유동층보일러(CFBC)발전소로부터 발생된 석탄재의 희토류 성분, 함량 및 분포특성을 평가하여 희토류 회수 개발 가능성을 검토하였다. 국내 CFBC발전소에서 확보한 6 종 석탄재의 희토류 함량은 82.2 ~ 311.7 ppm으로, 세계 석탄재 희토류 평균값으로 제시된 403.5 ppm에 비해 낮게 확인되었다. 희토류 농도와 Outlook coefficient값을 이용한 분석 결과, 6 종의 석탄재 모두 unpromising area (I)로 분류되었다. 현재 단계에서 석탄재의 희토류 회수를 위한 개발은 어려운 상태임을 확인하였고, 향후 석탄재 중 희토류 성분의 회수를 위해서는 critical 희토류를 주요 대상으로, 이를 농축하기 위한 전처리 및 선별 공정 개발이 필요한 것으로 확인되었다.

주제어 : 순환유동층보일러, 석탄재, 희토류, 평가

Abstract

The rare earth elements (REE) contents in coal ashes generated from domestic circulating fluidized bed combustion (CFBC) were identified for evaluating the exploitation possibilities for recovering rare earth elements. Total REE contents for all of the samples in this study ranged from 82.2 ~ 311.7 ppm, much lower than the 403.5 ppm given on the average value of world coal ash. As a result of analysis using REE concentration and Outlook coefficient, six types of coal ashes falls in the unpromising area (I). These results suggest that it is difficult to recover rare earth element from coal ashes at this stage. It has been confirmed that to recover rare earth elements in coal ashes, research on the pretreatment and concentration process for critical REE is requirement.

Key words : circulating fluidized bed combustion, coal ash, rare earth elements, evaluation

· Received : July 6, 2018 · 1st Revised : August 14, 2018 · 2nd Revised : October 8, 2018 · Accepted : October 25, 2018
§ Corresponding Author : Kye-Hong Cho (E-mail : khcho99@kilam.re.kr)
Department of Research and Development, Korea Institute of Limestone & Advanced Materials, 18-1, Udeok-gil, Maepo-eup, Danyang-gun, Chungcheongbuk-do 27003, 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

희토류(Rare Earth Elements, REE)는 전기적, 발광적, 자성적 및 화학적 안정성이 우수한 특성이 있으며, 이러한 특성을 이용하여 광학, 영구자석 및 전자재료 등 다양한 산업분야에 활용되고 있다. 일부 희토류 금속은 자성재료에 필수적으로 사용되는 물질로 알려져 있으며, 자성체 및 배터리 등과 같은 산업이 발전함에 따라 그 수요도 계속 증가하고 있다[1,2].

세계 희토류 수요는 점차 증가하고 있으나, 희토류 시장은 대부분 중국이 지배하고 있는 구조로 되어 있어 희토류 가격변동 및 자원무기화 현상이 중국에 의해 발생되고 있다. 이에 희토류 소비가 높은 미국, 일본 및 호주 등의 국가에서는 희토류 확보를 위해 광산의 재개발, 심해저 광물 개발, 폐전자제품 재활용 등의 대책을 마련하고 있으며, 최근에는 석탄재(Coal Ash)로부터 희토류 성분을 회수하는 연구도 진행하고 있다[3-5].

석탄 및 석탄재로부터 희토류 회수와 관련된 연구는 미국, 영국 및 러시아 등의 국가에서 수행하고 있다. 각국은 자국의 다양한 석탄 및 석탄재에 포함된 희토류 성분, 함량 및 분포를 조사하여 개발 가능성 검토에 관한 연구를 주로 하고 있으며, 미국의 경우 석탄재에 포함된 수 백 ppm의 희토류 성분을 회수하기 위한 목적으로 물리적 선별, 침출 및 추출 공정을 이용한 농축 연구도 진행하고 있다[5-13].

국내의 경우 에너지를 생산하는 발전소 중 화력발전의 비중이 높기 때문에 석탄재도 다량 발생되고 있으며, 주로 시멘트, 콘크리트 및 건설 분야와 관련된 재활용 연구가 활발하게 진행되고 있다. 국내에서 석탄재로부터 희토류 회수에 관한 연구는 전무하며 희토류 함량에 관한 연구가 일부 발표되었으나, 희토류 분포 특성 및 산업적으로 요구되는 희토류 금속과 관련하여 석탄재의 개발가능성에 대한 검토는 매우 부족한 실정이다[14-17].

이에 본 연구에서는 화력발전 중 미래에 발전 가능성이 있는 순환유동층보일러(Circulating fluidized bed combustion, CFBC) 발전소로부터 발생된 석탄재를 실험대상으로, 희토류 성분의 함량 및 분포특성을 확인하고 이러한 결과를 통해 개발 가능성에 대해 검토하였다.

2. 석탄재 중 희토류 평가 관련 연구 동향

석탄재는 발전소 운전공정에 의해 발생된 산업부산물로 평균적으로 403.5 ppm의 희토류가 포함되어 있으며, 석탄과 동일한 희토류 분포 특성을 가질 수 있다고 알려져 있다[6-8,18,19]. 석탄재에 포함된 주요 광물로는 석영(quartz), 멀라이트(mullite), 경석고(anhydrite), 자철석(magnetite), 적철석(hematite) 및 일라이트(illite) 등이 있으며, 발전소 운전 방식 차이에 따라 함유 광물 종류 및 함량의 차이가 발생된다[8,9]. 발전소 연소 방식은 고온(1,300 ~ 1,700°C)에서 진행되는 미분탄 연소방식(Pulverized coal combustion, PC)과 상대적으로 저온(800 ~ 950°C)에서 진행되는 CFBC보일러가 있으며, CFBC방식은 석탄 이외의 다양한 부재료가 함께 사용되고 낮은 온도로 발전되는 장점이 있어 청정 화력발전으로 알려져 있다[14,20]. 본 연구에서는 실험결과 비교를 위해 국내·외에서 발표된 관련 자료를 함께 조사하였다.

Fig. 1은 국내·외에서 발표된 석탄재 중 희토류의 함량 및 세계 석탄재 희토류 평균값(Average of world coal ash)을 나타낸 것으로, 각 논문에서 제시한 분석자료 중 희토류의 함량이 중간 값인 자료를 이용하여 작성하였다[7-10,16]. 국내 연구는 2개의 PC발전소와 1개의 CFBC발전소에 포함된 비산재(Coal fly ash)의 희토류 농도를 제시하였으며(Fig. 1(a)), 국외 논문에서는 4개의 PC발전소로부터 발생된 비산재의 희토류 성분에 대한 자료를 이용하였다(Fig. 1(b)). 국내·외 자료에서 바닥재(Coal bottom ash)에 대한 연구는 거의 없었으며, 이는 비산재에 비해 바닥재의 발생량이 적기 때문에 나타난 결과로 예상된다. 국외 자료에서 CFBC발전소 석탄재의 희토류 평가에 대한 자료가 부족한 이유는 현재까지 주로 사용하고 있는 보일러 방식이 PC발전소이기 때문으로 판단된다.

국내·외 PC발전소로부터 발생된 비산재를 실험대상으로 희토류의 함량을 분석한 결과에서는 세계 석탄재에 포함된 평균 희토류 농도보다는 약간 낮았으나, 유사한 분포특성을 나타내었다(Fig. 1). PC발전소로부터 발생된 석탄재에 포함된 희토류는 293.7 ppm에서 382.6 ppm의 범위로 확인되었으나, 국내 CFBC발전소로부터 발생된 비산재의 희토류 농도는 196 ppm으로 세계 석탄재 희토류 평균 농도(403.5 ppm)에 비해 49% 수준으로 확인되었다. 이는 CFBC발전소에서 사용하는 석탄 및 운전특성이 반영된 것으로 예상된다. PC보일러는 미분의 석탄만 투입하여 작동하는 방식이며, CFBC보일러는 석탄 이외의 모래 및 탄산칼슘 등과 같은 다양한 재료가 함께 사용된다. 따라서 석탄에 포함된 희토류 원소의 함량이 동일하다고 가정한다면 주재료 변화 및 부재료 투입에 의해 희토류의 농도는 상대

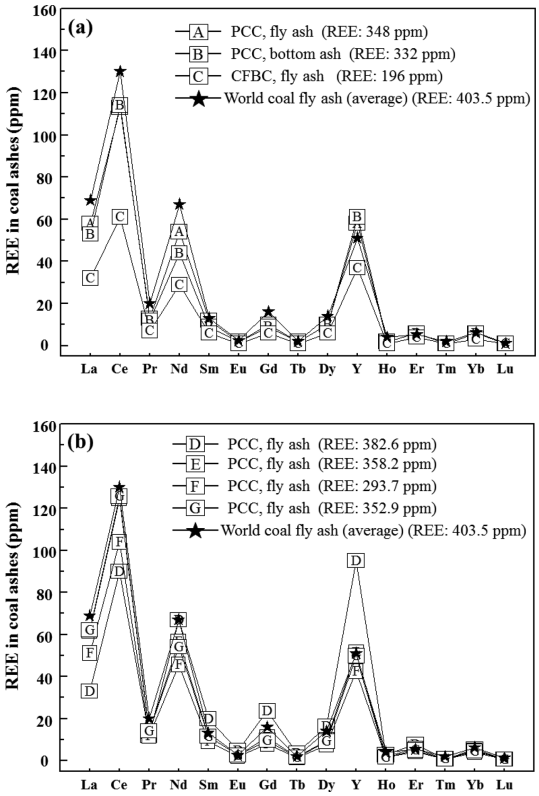

Fig. 1. REE distribution in coal ashes. ((a) domestic, (b) overseas)[7-10,16].

적으로 낮아질 수 있다고 판단된다.

3. 실험대상 및 실험방법

국내의 CFBC발전소에서 확보한 비산재 및 바닥재 6종을 실험대상으로 사용하였다(Table 1). 석탄재의 광물조성 확인을 위해 X-선 회절 분석기(X-ray Diffraction, D/max 2500 V/P, Rigaku Co. Ltd., Japan)를 이용해 분석하였고, 주요 성분의 함량은 X-선 형광 분석기(XRF, X-ray fluorescence spectrometry, ZSX Primus 2, Rigaku, Japan)를 이용하여 조사하였다. 석탄재에 포함된 희토류 정량 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ELAN DRC-II, Perkinelmer, U.S.A)를 이용하여 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 화학조성 및 주요성분

Fig. 2는 국내 CFBC발전소로부터 확보한 석탄재 6종의 XRD 결과를 나타낸 것으로 주요 광물은 quartz로 확인되었고, A와 B발전소에서는 anhydrite도 주요 광물로 나타났다. 주요 광물 이외의 magnetite, hematite 및 illite 등이 나타났으며 이러한 결과는 관련 연구에서 확인된 광물상과 큰 차이를 보이지 않았다[9,12,16]. A-fa, A-ba, B-fa 및 B-ba에서 공통적으로 anhydrite가 주요 광물로 나타난 이유는 CFBC보일러 운전특성에 따른 결과로 판단된다. CFBC보일러는 PC보일러에 비해 낮은 온도에서 다양한 연료를 사용할 수 있으며, SO_X 배출량 저감을 위해 탄산칼슘이 주성분인 석회석을 탈황제로 사용하여 anhydrite가 석탄재의 주요 물질로 나타난다[14,20]. C-fa와 C-ba에서는 상대적으로 anhydrite의 peak가 낮게 나타났으며 XRF 결과에서도 C 발전소의 CaO 함량이 A, B사에 비해 적고, SiO_2의 함량은 A, B 발전소에 비해 높은 특성을 나타내었다(Table 2). 이

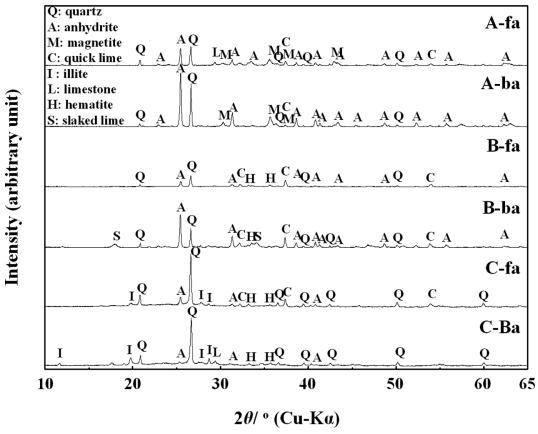

Fig. 2. XRD patterns of coal ashes from Korea CFBC plants.

Table 1. Samples name of coal ashes used in this study

A plant		B plant		C plant	
fly ash	bottom ash	fly ash	bottom ash	fly ash	bottom ash
A-fa	A-ba	B-fa	B-ba	C-fa	C-ba

Table 2. The result of the XRF analysis for coal ashes from Korea CFBC plants

(unit : %)

chemical composition	A-fa	A-ba	B-fa	B-ba	C-fa	C-ba
CaO	26.7000	28.6000	27.3000	54.2000	12.7000	8.7400
SO_3	8.4100	26.1000	8.6500	19.6000	3.38000	-
SiO_2	19.6000	11.6000	26.2000	12.7000	49.2000	46.7000
Fe_2O_3	20.3000	17.9000	13.3000	7.1500	5.9000	6.2400
Al_2O_3	10.1000	5.2200	15.3000	3.1600	22.7000	27.2000
MgO	10.5000	7.9700	4.4100	1.7400	1.0800	0.9040
Na_2O	1.8100	0.8170	2.0900	0.4160	0.3920	0.1650
K_2O	1.0100	0.6550	1.1000	0.2560	1.7700	4.8200
TiO_2	0.5980	0.3570	0.8430	0.2240	1.9400	1.6100
MnO	0.3360	0.3380	0.1630	0.0866	0.0891	0.0165
BaO	0.1550	0.0946	0.1450	0.1410	0.0860	0.1320
SrO	0.1960	0.2000	0.1340	0.1350	-	0.0348
Cl	0.1500	-	0.0133	0.0043	0.0278	0.0144
P_2O_5	0.1070	0.0696	0.2670	-	0.4580	0.1940
Rb_2O	0.0358	0.0037	0.0055	0.0028	-	0.0437
Cr_2O_3	0.0197	0.0327	0.0263	-	0.0368	0.0395
ZnO	0.0184	0.0161	0.0146	0.0156	0.0229	0.0242
NiO	0.0157	0.0183	0.0145	0.0119	-	0.0137
CuO	0.0134	0.0111	0.0150	-	0.0167	0.0148
Br	0.0085	-	-	-	0.0023	-
As_2O_3	-	0.0078	0.0051	-	-	-
ZrO_2	0.0153	-	0.0191	-	0.0628	0.0477
F	-	-	-	-	-	0.2090
PbO	-	-	-	-	0.0146	0.0178
Ga_2O_3	-	-	-	-	0.0064	0.0105
Nb_2O_5	-	-	-	-	-	0.0064
Y_2O_3	-	-	-	-	0.0132	-

는 각 발전소에서 사용되는 있는 석탄의 종류, 모래 등의 부재료 및 공정방법의 차이에 의해 나타난 결과로 판단된다[14,20].

Table 2는 석탄재 6 종의 XRF 결과를 나타낸 것으로 발전소 및 석탄재의 종류에 따라 주요 성분의 함량 차이가 확인되었다. A와 B발전소의 주요 성분으로는 CaO, SO_3, Fe_2O_3 및 SiO_2로 전체시료의 75 ~ 94%로 높은 함량을 보였다. C 발전소의 경우 비산재와 바닥재 모두 SiO_2와 Al_2O_3의 성분이 전체 함량 중 71% 이상을 차지하였으며, CaO 및 SO_3의 함량은 A, B 석탄재에 비해 낮게 확인되었다.

4.2. 희토류 함량 및 분포 특성

원자번호 57-71번의 란탄족 원소(Lanthanide)와 스칸듐(Sc), 이트륨(Y)을 포함하여 총 17 개의 원소를 희토류라고 지칭하며, 이 중 스칸듐은 란탄족과 함께 산출

되지 않고 프로메튬(Pm)은 방사능 원소로 자연계에서 거의 발견되지 않아 상업적인 의미의 희토류는 15개 원소만을 지칭한다[11]. 본 연구에서는 스칸듐과 프로메튬을 제외한 희토류 원소 15종에 대한 성분 분석 및 희토류 분류를 통한 특성을 확인하였다.

희토류 원소의 분류는 지구화학적(geochemical) 특성에 따라 경(輕)희토류(LREE, light rare earth element), 중(中)희토류(MREE, medium rare earth element) 및 중(重)희토류(HREE, heavy rare earth element)로 분류할 수 있다. 최근에는 희토류 사용량이 증가됨에 따라 수요 및 공급과 관련된 분류 방법이 제시되었으며, 이를 이용한 석탄재의 희토류 성분 분포 및 평가에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[11]. 이 분류 방법은 산업에서 사용하고 있는 희토류 원소의 수요 및 공급량 변화에 따른 분류 방법으로 critical(Nd, Eu, Tb, Dy, Y, Er), uncritical(La, Pr, Sm, Gd), excessive(Ce, Ho, Tm, Yb, Lu) 크게 세 그룹으로 분류된다. 이는 산업에서 소비되는 희토류 원소에 따라 분류 기준이 변화될 수 있으며, 최근에도 관련 연구논문에 이용되고 있는 방법이다[6,7,10,11]. 이 분류 방법을 통해 확인된 critical성분의 총 함량과 excessive성분의 총 함량을 이용하여 식 (1)과 같이 Outlook coefficient를 계산할 수 있으며, 이 값과 석탄재 중 함유된 희토류 농도 값을 이용해 향후 개발가능성에 대해 검토 할 수 있다[11,21].

$$\text{Outlook coefficient} = \frac{\left(\dfrac{\text{Nd+Eu+Tb+Dy+Er+Y}}{\Sigma\text{REE}}\right)}{\left(\dfrac{\text{Ce+Ho+Tm+Yb+Lu}}{\Sigma\text{REE}}\right)} \quad (1)$$

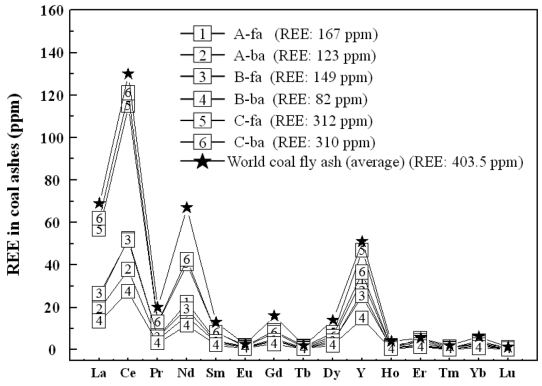

Fig. 3. REE distribution in coal ashes from Korea CFBC plants.

Fig. 3은 석탄재 6 종에 포함된 희토류 성분 분석 결과 및 세계 석탄재 희토류 평균값을 비교하여 나타내었다. 석탄재 종류에 관계없이 경희토류에 포함되는 세륨(Ce), 란타늄(La) 및 네오디뮴(Nd)과 이트륨(Y)의 농도가 상대적으로 높게 분포하는 것으로 확인되었고, 이는 세계 석탄재 희토류의 분포특성과 유사하였다.

Fig. 4는 수요 및 공급에 따른 분류방법을 이용하여 6 종의 석탄재에 포함된 희토류 성분을 분류한 결과로 세계 석탄재 희토류 평균값과 비교하였다. 희토류의 총 함량은 B-ba가 82 ppm으로 가장 낮게 확인되었고, C-fa가 312 ppm으로 가장 높은 함량으로 확인되었다. 국내 CFBC발전소에서 회수된 각 석탄재의 희토류 농도는 세계 석탄재 희토류 평균값에서 제시된 403.5 ppm에 비해 훨씬 낮았고, 동일한 CFBC발전소에서도 희토류 함량의 차이가 크게 나타났다(Fig. 4). 이러한 이유는 실험에 사용된 실험대상이 CFBC발전소로부터 발생한 석탄재로, 운전공정에서 석탄 이외의 부재료가 함께 투입되기 때문에 석탄재에 포함된 희토류의 비율이 감소될 수 있다고 예상되며, 각 발전소의 부재료 종류 및 투입조건 등에 의해서도 차이가 크게 발생된 것으로 판단된다. 각 발전소로부터 회수된 석탄재 중 critical의 값은 31 ~ 103 ppm으로 세계 평균값(142.1 ppm)에 비해 낮았으나, critical 비율은 모두 유사한 특성을 보였다. 이러한 결과는 희토류 회수를 위한 경제성이 세계 석탄재에 비해 상대적으로 낮은 것으로 해석할 수 있으며, 이는 앞서 언급한 것과 같이 보일러 방식 차이에 따른 결과로 판단된다. Fig. 4에서 확인된 critical

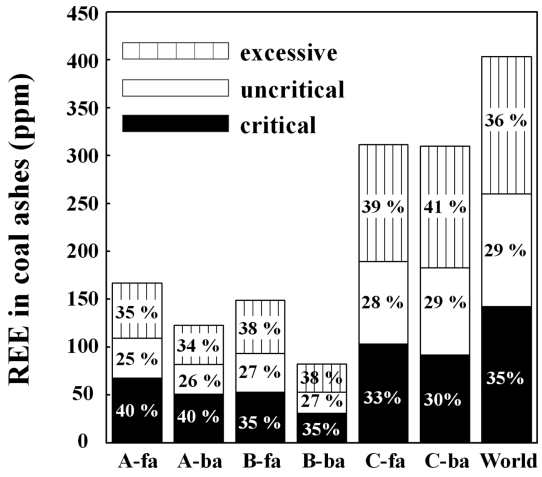

Fig. 4. Classification of REE in coal ashes from Korea CFBC plants.

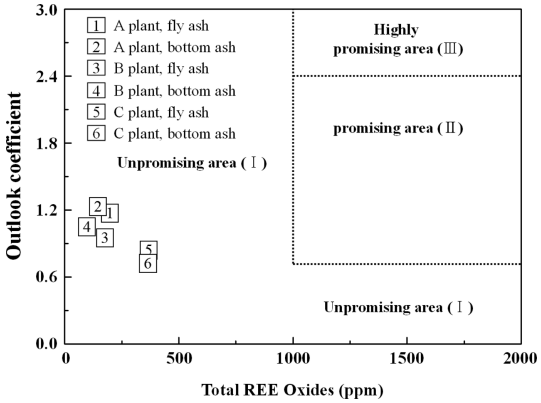

Fig. 5. Evaluation of REE in coal ashes from Korea CFBC plants.

농도 값과 excessive 농도 값을 이용하여 outlook coefficient 값을 계산하였고, 총 희토류의 농도 값은 TREO(Total rare earth oxides) 값으로 계산하여 표기하였다[21].

Fig. 5는 6 종의 석탄재를 대상으로 희토류 농도와 Outlook coefficient를 이용해 나타낸 그래프로, 석탄재에 포함된 희토류 성분에 대한 개발 가능성 및 개발을 위한 조건을 검토하였다. 6 종의 석탄재에 포함된 희토류 함량이 최저가행품위인 1,000 ppm보다 훨씬 낮은 농도이기 때문에 outlook coefficient의 값과 관계없이 모두 unpromising area (I)로 분류되었다[11,21]. 현재 단계에서 국내 CFBC발전소로부터 회수된 석탄재의 희토류 회수를 위한 개발은 어렵지만, 희토류 성분의 농축을 위한 선별공정이 개발된다면 6 종류 모두 promising area (II)로 이동되어 개발 가능성이 향상될 수 있다고 생각된다. 국외 연구에서는 석탄재에 포함된 희토류 성분 농축을 위해 입도분급, 자력선별 및 비중선별 등의 선별 공정을 적용하고 있으며 입도가 작고, 비자성 산물에서 희토류 농도가 높게 나타나는 것으로 확인되었다[10, 12]. 이러한 연구는 대부분 PC발전소로부터 회수된 석탄재에 대한 연구로, 본 실험에 사용된 CFBC발전소로부터 회수된 석탄재와 희토류 성분의 분리 특성이 상이할 수 있기 때문에 국내 CFBC발전소 석탄재에 대한 선별연구가 요구된다고 판단된다.

5. 결 론

국내 CFBC발전소로부터 발생한 6종 석탄재의 희토류 성분, 함량 및 분포특성을 확인하여 희토류 금속에 대한 개발 가능성에 대한 검토를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

CFBC석탄재는 종류에 따라 함량의 차이는 있으나, quartz와 anhydrite가 주요 광물로 나타났고, magnetite, hematite, illite 등도 함께 확인되었다. 이는 주원료인 석탄의 종류 및 부재료 차이에 의해 발생된 것으로, 발전소에서 탈황제로 석회석을 사용함에 따라 anhydrite가 주요 광물로 나타났다. 6 종 석탄재에 포함된 희토류 성분 분석 결과 희토류의 총 함량은 82.2 ~ 312 ppm으로 각 석탄재의 희토류 농도는 세계 석탄재 희토류 평균값에서 제시된 403.5 ppm에 비해 20 ~ 77% 수준으로 확인되었다.

수요 및 공급에 따른 분류방법을 이용한 희토류 성분 분포 특성은 세계 석탄재 희토류 평균값의 분포와 유사하였고, critical 비율도 모두 유사한 특성을 보였다. Outlook coefficient값과 희토류의 농도 값을 이용한 분석 결과, 6 종류의 석탄재 모두 unpromising area (I)에 위치하여, 현재 단계에서 국내 CFBC보일러로부터 발생된 석탄재 중 희토류 회수를 위한 개발이 쉽지 않다고 판단된다. 향후 석탄재 중 희토류 성분의 회수를 위해서는 상대적으로 농도가 높은 희토류 원소 중 critical 희토류를 주요 대상으로 선정하고, 이를 농축하기 위한 전처리 및 선별 공정 개발이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단-탄소자원화 국가전략프로젝트사업의 지원을 받아 수행함 (2017M3D8A2085338).

References

1. H. K. Park et al., 2012 : *Overview on the technologies for extraction of rare earth metals*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 21(3), pp.74-83.
2. M. S. Lee and H. S. Jeon, 2010 : *Extractive metallurgy and separation technology of rare earth ores*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 19(6), pp.27-35.
3. Y. D. Kim and C. S. Ko, 2010 : *REE resources and it's utilization*, Econ. Envron. Geol., 43(5), pp.505-516.
4. Y. J. Kim, 2013 : *Strategy of critical materials management in the world*, J. of Korean Inst. of Resources

Recycling, 22(5), pp.3-12.
5. R. K. Taggart et al., 2016 : *Trends in the rare earth element content of U.S.-based coal combustion fly ashes*, Environ. Sci, Technol, 50, pp.5919-5926.
6. V. V. Seredin and S. Dai, 2012 : *Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium*, Int. J. Coal. Geol., 94, pp.67-93.
7. W. Franus, M. M. Wiatros-Motyka and M, Wdowin, 2015 : *Coal fly as a resource for rare earth elements*, Environ Sci Pollut Res, 22, pp.9464-9474.
8. S. Dai, I. T. Graham and C. R. Ward, 2016 : *A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal*, Int. J. Coal. Geol., 159, pp.82-95.
9. M. B. Folgueras, M, Alonso and F. J. Fernández, 2017 : *Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements*, Fuel, 192, pp.128-139.
10. R. S. Blissett, N. Smalley and N. A. Rowson, 2014 : *An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and poland to evaluate rare element content*, Fuel, 119, pp.236-239.
11. V. V. Seredin, 2010 : *A new method for primary evaluation of the outlook for rare earth element ores*, Geol. Ore Deposits, 52(5), pp.428-433.
12. R. Lin et al., 2017 : *Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations*, Fuel, 200, pp.506-520.
13. S. U. Park et al., 2015 : *Evaluation of some rare metals and rare earth metals contained in coal ash of coal-fired power plants in Korea*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 24(4), pp.67-75.
14. J. K. Jang, S. W, Ji and J. W. Ahn, 2017 : *Utilization of circulating fluidized bed combustion ash and related specifications for mine backfills*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 26(2), pp.71-79.
15. J. K. Lee and J. Y. Kim, 2013 : *Recovery potential of rare earth elements in coal ashes*, J. of Korea Society of Waste Management, 30(1), pp.94-99.
16. G. Y. Jeong, S. H. Kim and K. J. Kim, 2015 : *Rare metal chemistry, microstructures, and mineralogy of coal ash from thermal power plants of Korea*, J. Miner. Soc. Korea, 28(2), pp.147-163.
17. C. H. Yoon et al., 1996 : *Trace elements and rare earth elements in coal fly ash from the samchenpo, seocheon and Youngdong power plants*, J. of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 33(2), pp.82-89.
18. B. Rubio et al., 2008 : *Preparation and characterization of carbon-enriched coal fly ash*, J. of Environ. Management, 88, pp.1562-1570.
19. M. P. Ketris and Ya. E. Yudovich, 2009 : *Estimations clarkes for carbonaceous biothes: world averages for trace element contents in black shale and coals*, Int. J. Coal. Geol., 78, pp.135-148.
20. C. S. Baek et al., 2015 : *A review of desulfurization technology using limestone in circulating fluidized bed bed type power plant*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 24(5), pp.3-14.
21. J. C. Hower et al., 2018 : *Rare earth element associations in the Kentucky state university stoker ash*, Int. J. Coal. Geol., 189, pp.75-82.

김 영 진

- 강원대학교 지구시스템공학과 공학석사
- 강원대학교 에너지·자원공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원

백 철 승

- 광운대학교 화학공학과 공학석사
- 광운대학교 화학공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원
- 당 학회지 제27권 3호 참조

서 준 형

- 한양대학교 자원환경공학과 공학석사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원
- 당 학회지 제27권 3호 참조

최 문 관

- 교통대학교 재료공학과 공학석사
- 교통대학교 신소재공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원

조 계 홍

- 인하대학교 요업공학과 공학석사
- 광운대학교 화학공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 책임연구원
- 당 학회지 제27권 3호 참조

안 지 환

- 인하대학교 자원공학과 공학석사
- 연세대학교 경제학 경제학석사
- 인하대학교 자원공학과 공학박사
- 현재 한국지질자원연구원 탄소광물화사업단 단장
- 당 학회지 제27권 3호 참조

공 지 사 항

▣ 항상 본 학회에 관심을 가지고 참여해주셔서 감사합니다. 그간 한국자원리싸이클링학회는 회원 여러분의 참여와 활동으로 많은 발전을 하였습니다.

▣ 당 학회에서는 국문학회지 "資源리싸이클링"에 게재되는 원고에 대해 20부의 별쇄를 제작하여 우편으로 보내드렸습니다. 그러나 '온라인투고시스템' 및 출판환경의 변화로 별쇄가 필요하지 않은 상황이 되었으며, 모든 원고는 pdf 파일로 관리가 가능한 시스템이 갖춰졌습니다.

▣ 이에 당 학회에서는 편집위원회와 이사회의 논의를 거쳐 '별쇄 20부'의 인쇄물을 저자분들께 제공하지 않는 것으로 결정하였습니다. 학회지 제27권 1호(2018년 2월 발간)에 게재되는 원고부터는 별쇄를 제공하지 않고, pdf 파일로 보내드릴 예정입니다. 다만, 저자의 요청이 있을 경우 제작이 가능합니다.

▣ 별쇄 인쇄는 학회지가 발행되는 **짝수월(2,4,6,8,10,12월) 20일 전까지 요청**하시면 인쇄가 가능합니다. 비용은 **기본 20부/20,000원, 추가 10부당/10,000원씩** 추가되며 원고게재료와 함께 청구합니다.

▣ 당 학회에서 발간하는 국문학회지 **"資源리싸이클링"**은 한국연구재단의 등재학술지로 1992년 창간호를 시작으로 25년이 넘는 학회의 역사와 함께한 학회지입니다. 회원여러분의 많은 관심과 투고를 부탁드립니다.

▣ **원고의 투고는 당 학회의 홈페이지** http://www.kirr.or.kr **또는** https://kirr.jams.or.kr **에 회원가입을 하시고 투고하여 주시면 됩니다.**

▣ 연락처 : 한국자원리싸이클링학회 사무국
전화 02-3453-3541~2, 팩스 3453-3540, E-mail : kirr@kirr.or.kr, http://www.kirr.or.kr