

석탄재에 포함된 희토류의 경제성 평가

김영진* · 김승현** · §이재령**

*한국석회석신소재연구소 연구개발실, **강원대학교 에너지·자원공학과

Economic Evaluation of Rare Earth Elements Contained in Coal Ash

Youngjin Kim*, Seunghyun Kim** and §Jaeryeong Lee**

*Department of Research and Development, Korea Institute of Limestone and Advanced Materials

**Department of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University

요 약

석탄재로부터 희토류 회수 가능성을 확인하기 위해 경제성 평가 요소를 분석하여 국내 희토류 확보를 위한 검토 자료로 활용하고자 하였다. 석탄재로부터 희토류 회수를 위한 가행 최저품위는 TREO기준 1,000 ppm으로 확인되었으며, 각 희토류 성분의 함량에 따라 경제적 가치가 변화되는 특성을 보였다. 이는 현재 산업에서 요구하는 희토류 원소별 가격차이 발생에 따른 결과이며, 미래 산업에서 요구되는 희토류 성분에 따라 변동은 가능하다. 석탄재함유 희토류성분에 대해 상용화 회수공정 개발을 목적으로, 희토류 함량 및 석탄재 발생량을 이용한 평가, 산업 수요 특성을 고려한 평가, 실제 산업에서 투자비용과 수익비용의 비교평가 등 다양한 경제성 평가 방법에 대해 연구가 진행되었다. 이러한 연구로부터 확인된 석탄재에 포함된 희토류 회수 관련 기술 수준은 높지 않았으며, 이로 인해 경제성이 확보된 희토류 회수 시스템의 개발이 아직은 미흡한 것으로 확인되었다. 세계 희토류 시장의 문제점 극복을 위한 대책으로 석탄재에 포함된 희토류 회수 연구는 계속 진행될 것으로 보고되었으며, 국내에서도 자원 및 회수기술 확보를 목적으로 이와 관련된 연구가 절실히 요구된다.

주제어 : 석탄재, 희토류, 경제성, 평가

Abstract

This study aims to introduce and economical review on the possibilities of rare earth elements(REEs) recovery from coal ashes and the analysis of economical evaluation factors based on the data for securing domestic rare earth elements. The cut-off grade of REEs on recovering from coal ash was confirmed to be 1,000 ppm on total rare earth oxides(TREO) basis, and while the economic value of coal ash changed with contents and specific elements of rare earth elements. This shall be resulted in the price differences of rare earth elements required by the current industry, and it probably varies depending on the future demand of rare earth components. For developing of commercial recovery technology on REEs in coal ashes, many researches have been carried out by various analyzing methods, such as evaluation of holding value of REEs in ashes, assessment between supply and demand of industry, comparison of investment and its profitability for the REEs's production from coal ashes, and so on. Although these methods have been suggested, its recovery system with economical feasibility could not be confirmed up to present. In this reason, the process design of recovering REEs from coal ash shall be researched continuously to solve the problems of the global rare earth market. And also these researches shall be conducted actively in Korea for the purpose of securing the REEs resources and their recovering technologies.

· Received : October 1, 2019 · Revised : October 30, 2019 · Accepted : November 15, 2019

§ Corresponding Author : Jaeryeong Lee (E-mail: jr-lee@kangwon.ac.kr)

Department of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University, 1 Gangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 24341, 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.

Key words : Coal ash, Rare earth elements, Economic, Evaluation

1. 서 론

석탄화력발전은 우리나라의 총 전력생산 중 약 40% 정도를 차지하고 있는 전력 공급원으로써, 한국전력공사 산하 5개의 자회사(남동발전, 남부발전, 동서발전, 서부발전, 중부발전) 및 민간기업인 GS 동해 전력 총 6개의 회사가 61기의 화력발전소를 운영하고 있다¹⁾. 석탄화력발전소에서 전기 생산을 위한 가동과 함께 석탄재(Coal ash)가 발생되며, 석탄재는 발전설비 방식, 투입원료, 발전용량 및 기간 등에 따라 물성이 변화되는 특성이 있다. 석탄재는 연간 약 800만 톤 이상이 배출되며 발생량도 꾸준히 증가하고 있으나, 시멘트, 콘크리트 및 건설 분야 등으로만 재활용되고 있다. 재활용되는 않는 석탄재는 발전소마다 회 처리장(Ash pond)에 매립하고 있으나, 처리장이 점차 부족해지고 있는 실정으로 발전사에서는 석탄재 재활용 확대방안에 대해서 지속적인 관심 및 문제해결을 위한 대책마련에 힘쓰고 있다²⁾.

미국, 유럽 및 일본 등의 국가에서는 기존 석탄재 재활용 방법 문제 해결을 위한 경제적, 기술적 대안 확보를 목적으로 석탄재 중 미량의 유용금속 성분 회수에 관한 연구가 다양한 방식으로 진행되고 있다. 최근에는 희토류(Rare Earth Element, REE)를 회수하기 위해서 석탄재 중 희토류의 함량, 성상 및 개발 가능성 평가에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

석탄재로부터 희토류 성분 회수는 재활용뿐만 아니라 국가 산업의 필요한 원료 수급에 대한 관점에서도 매우 중요한 부분으로, 이는 세계 희토류 생산이 대부분 중국에서 진행되어 발생된 문제와 관련이 있다. 희토류의 생산은 과거에서부터 현재까지 90% 이상 중국에서 생산되고 있으며, 이를 자원무기화로 사용한 실제 사례도 발생하였다³⁾. 석탄재에 포함된 희토류의 관한 연구는 주로 희토류 함량, 성상 및 이를 통한 기초 경제성 평가 등으로 수행되고 있으며, 미국에서 가장 활발하게 연구되고 있다. 미국에서는 석탄재를 희토류 확보를 위한 가능한 원료로써 인정하고 국가 전략적인 계획을 통해 희토류 성분의 분석, 농축 및 회수 등 각 분야를 분류하여 적극적인 투자를 통한 희토류 회수 연구를 진행하고 있다^{4,10)}.

국내의 경우, 석탄화력발전소에서 발생하는 석탄재를

재활용 목적으로 시멘트, 레미콘 및 복토용 등으로 사용하고 있으며, 석탄재 중 희토류를 회수하는 연구는 거의 없는 실정이다¹¹⁻¹⁴⁾. 일부 연구자들에 의해서 석탄재에 포함된 희토류 평가에 대한 연구가 발표되었으나, 주로 분석을 통해 희토류 성분의 함량 및 주요 광물에 대한 부분을 언급하였다. 최근에는 국내 석탄재를 대상으로 희토류 침출에 관한 연구가 발표되었으나 일부 희토류 성분의 침출 특성에 관한 연구로, 실제 산업에서 희토류 성분의 회수를 목적으로 수행된 경제성 검토에 대한 국내 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내에서 발생하는 석탄재에 포함된 희토류 성분의 경제성 검토를 위한 기초 연구로써, 경제성 평가를 위한 주요 요소를 확인하고 실제 산업적 개발을 위한 필요 부분에 대해 검토하였다.

2. 국내/외 석탄재 처리 및 재활용 현황

2.1. 국내 현황

국내의 석탄재 재활용은 법규, 제도적 문제로 인해 주로 시멘트, 콘크리트, 건축 및 토목 등에 재활용하고 있다. 석탄화력발전소로부터 발생하는 석탄재의 재활용 수준은 75% 미만으로, 나머지는 회 처리장에 매립 처리하고 있으나, 대부분 처리 시설이 만지 상태에 이르고 있다¹⁵⁾. 환경부는 2020년까지 폐기물 발생량 대비 매립률을 3%로 줄이는 것을 목표로 폐기물 매립 부담금제도를 시행하고 있기 때문에 재 처리장 포화상태 등의 상황을 해결하기 위한 석탄재 재활용 방안이 매우 필요한 실정이다¹⁶⁾.

석탄화력발전소 연소 방식 차이에 따라서도 석탄재 재활용률의 차이가 높게 나타난다. 이러한 이유는 발전소 연소온도 및 투입 원료 성분 등의 조건 변화에 따른 영향으로 인한 석탄재의 성분 및 성상 차이로 발생된 문제로 알려져 있다. 미분탄 연소 방식(Pulverized coal combustion, PCC)의 발전소에서 발생된 석탄재는 높은 연소온도(1,300 ~ 1,700 °C)로 인해 유리질의 알루미노실리케이트(Aluminosilicate)로 이루어져 있으며, 이는 포졸란 반응성을 띄고 있어 주로 시멘트와 콘크리트용 혼화제로 많이 사용되고 있다. 순환유동층보일러(Circulating fluidized bed combustion, CFBC)로부터 발생된 석탄재는 SOx의 배출량을 줄이기 위해 투입된

석회석에 의해 생성된 무수석고 및 유리석회의 함량이 높은 특성이 있어, PCC로부터 발생된 석탄재와 성분 및 성상에 큰 차이가 있다. PCC 방식과 CFBC 방식의 발전소로부터 발생되는 석탄재는 주로 시멘트, 콘크리트와 같은 건설 분야에 재활용되고 있으며, 최근에는 CFBC 석탄재에 포함된 회토류 검토 및 회수와 관련된 연구도 일부 발표되었다¹⁷⁾.

2.2. 국외 현황

세계 석탄재 발생량은 화력발전소의 증가와 함께 계속적으로 증가하고 있다. 이러한 이유로 기존의 석탄재를 매립하는 방식의 문제점인 환경 및 추가 에너지 소비 부분을 보완하기 위해 다양한 방식으로 석탄재 재활용 연구를 실시하고 있다. Table 1은 2013년 세계 석탄재 재활용 현황을 나타낸 것으로, 석탄재 발생량은 중국이 가장 높게 확인되었으나 석탄재의 재활용률(%)은 일본(96.4%)이 가장 높게 확인되었다. 일본과 유럽에서만 90%가 넘게 재활용 되는 것으로 확인되었으며, 이외의 국가에서는 70% 이하의 재활용률을 나타내었다²⁾.

석탄재는 주로 시멘트, 콘크리트, 그라우트, 여러 첨가제, 폐기물 안정제 및 광해방지용 광산 채움재로 재활용되고 있는 것으로 확인되었다²⁾. 석탄재 재활용률이 높은 일본의 경우 석탄 비산재(coal fly ash)를 재활용

하여 콘크리트, 슬러리 재료, 터널 공사 슛크리트 및 석탄재 혼합 벽돌 등으로 활용하고 있으며, 미국에서도 미국석탄협회 ACAA(American Coal Ash Association)를 통해 통합적인 관리가 이루어지고 있다. 최근에는 석탄재로부터 회토류와 같은 유용금속 성분 회수를 목적으로 회토류 성분의 경제성 평가와 관련된 연구를 미국 및 유럽 등에서 활발하게 진행하고 있다^{4,10)}. 이는 회토류 자원 전쟁에 대한 대책으로 석탄재로부터 회토류 성분의 회수 및 개발에 대한 부분을 국가전략의 일환으로 수행하고 있으며, 공급 부족 위험도를 기준으로 이트륨, 유토포, 네오디뮴, 터븀, 디스프로슘을 중대전략물질로 분류하고 원재료 확보를 위한 노력을 기울이고 있다¹⁸⁾.

3. 석탄재로부터 회토류 회수 연구 현황

국내에서는 석탄재로부터 회토류 성분을 회수하기 위한 연구가 전무한 상태이며, 최근에 회토류 성분의 분포 특성 및 침출 실험을 이용한 연구 등이 수행되었다¹⁷⁾. 이러한 이유로 회토류 회수 부분에 대한 연구조사는 대부분 국외 연구 자료를 중심으로 조사하였다. 석탄재에 포함된 회토류 성분의 평가 및 회수를 위한 연구는 광물로부터 유용성분을 회수하는 연구와 같이 선별 및 제련으로 분류할 수 있다. 선별에서는 주로 입도 분리, 비중선별 및 자력선별 등의 공정을 통해 회토류 농축 연구를 수행하며, 제련공정에서는 건식, 습식으로 분류하여 연구되고 있다(Fig. 1)⁴⁾. 석탄재에 포함된 회토류 성분의 가행 최저품위(Cut-off grade)는 TREO(Total rare earth oxides) 기준 1,000 ppm으로 알려져 있으나, 광물은 수 % 수준으로 큰 차이를 보인다. 이는 광물은 광산의 개발 및 파분쇄와 같은 초기 투자 및 에너지 비용이 높은 문제가 있으나, 석탄재는 이와 관련된 비용이 투입되지 않기 때문으로 예상된다^{6,19)}. 미국에서는 석탄재에 포함된 수 백 ppm 수준의 TREO를 2% 이상 향상시키기 위한 선별 및 제련 연구를 실시하고 있다¹⁸⁾. 이러한 특성을 가진 석탄재 연구의 목적은 최적 회수 공정 및 조건으로 확인된 회토류 회수 시스템을 산업에 적용하기 전에 경제성을 검토하고 산업화 가능성을 평가하기 위한 것으로 판단된다.

3.1. 선별

선별 연구에서는 주로 입도 분류, 자력 선별 및 비중 선별과 같은 물리적 선별을 이용한 회토류의 농축 연구가 확인되었으며, 주로 PCC보일러에서 발생된 석탄재

Table 1. Production and recycling status of coal ash in the world (2013)

Nation	Production (Mt)	Recycling (Mt)	Recycling ratio (%)
Australia	13.1	6.0	45.8
Canada	6.8	2.3	33.8
China	395.0	265	67.1
Europe(Eu15)	52.6	47.8	90.9
India	105.0	14.5	13.8
Japan	11.1	10.7	96.41
Middle East and Africa	32.2	3.4	10.6
United States of America	118.01	49.7	42.1
Asia (etc.)	16.7	11.1	66.5
Russia	26.6	5.0	18.8
Total	777.1	415.5	53.5

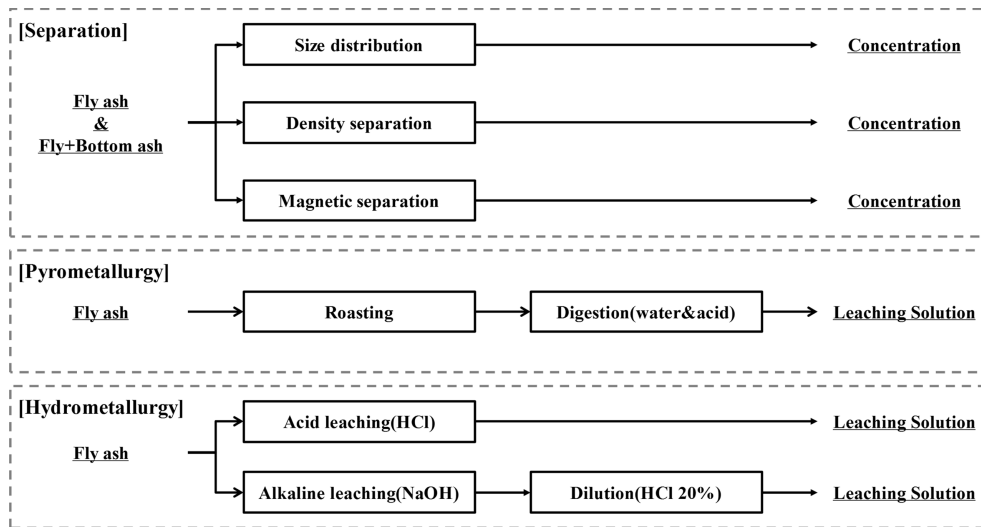


Fig. 1. Flow sheet for recovery of rare earth elements from coal ash.

를 이용한 연구가 많은 것으로 확인되었다⁴⁻¹⁰⁾. 실험대 상으로 사용된 석탄재 종류 및 특성에 따라 포함된 희 토류의 농도 차이가 확인되었고, 선별 실험에 따른 희 토류 농축은 어려운 것으로 나타났다. 입도 분급의 경 우 시료의 입자 크기가 작아질수록 희토류의 농도는 높 아지는 경향을 보였으나, 농축비가 1.5 이하로 낮게 확 인되었다. 자력 선별을 이용한 연구에서는 석탄재 시료 와 자석의 간격 차이 변화를 이용한 연구가 발표되었으 며 석탄재 종류에 따라 약간의 차이는 있으나, 주로 비 자성 산물에서 희토류의 농도가 약간 증가되는 특성을 보였다. 이러한 결과를 통해 석탄재에 포함된 희토류 성 분은 비자성 광물과 관련이 있다고 논문에서 제시되었 고, 희토류의 농축율은 입도분급과 비슷한 특성을 보여 선별 효과가 낮은 것으로 확인되었다. 중액을 이용한 분 리 방법에서는 4 종류의 시료를 대상으로 매질의 밀도 (2.01 ~ 2.95 g/ml)를 변화시켜 분리된 산물에 대한 희 토류 분포 특성을 확인하였다. 각 실험별 매질의 밀도 조건이 약간 차이가 있으나, 석탄재 시료 종류에 따라 희토류 성분이 농축되는 밀도 조건의 경향성이 없는 것 으로 확인되었다. 중액선별을 통한 실험 중 희토류 성 분의 농도가 가장 높게 농축되는 조건은 시료 밀도가 2.71 ~ 2.45 g/ml 조건으로, 희토류의 농도가 2배 정 도 증가 하는 것으로 확인되었으나, 회수율이 5 % 이 하로 매우 낮았다. 현재까지 발표된 연구에서는 선별을 통한 희토류 농축이 선별공정과 관계없이 농축 효과가 매우 낮은 특성을 보였다⁴⁾.

3.2. 제련

희토류 회수를 위한 제련 공정은 크게 건식제련과 습 식제련으로 분류하여 연구가 진행되고 있는 것으로 확 인되었다. 희토류 성분의 침출율을 향상시키기 위해 배 소 온도(150 ~ 450 °C), 알칼리 첨가제 종류(Na₂O₂, NaOH, CaO, 및 Na₂CO₃ 등) 및 첨가제 투입 비율을 조절하여 연구가 조사되었으며, 배소온도 및 첨가제 투 입량 증가에 따른 희토류 성분의 침출율이 향상되는 것 으로 확인되었다²²⁾. 습식 공정을 이용한 연구에서는 반 응용액의 몰농도, 고액비 및 온도 등을 변화시켜 실험 하였으며, 반응 용액의 몰농도 및 고액비가 높을수록 희 토류 원소의 추출률이 증가하여, 51.5 %의 침출이 가 능함을 발표되었다. 국내에서도 CFBC 석탄재를 대상으 로 침출 실험한 연구가 최근에 발표되었으며, 침출율은 70 % 이하로 확인되었다^{17,21)}.

4. 석탄재 경제성 평가 방법

석탄재에 포함된 희토류 성분 회수를 위한 산업 적용 사례는 확인되지 않았으며, 주로 석탄재 중 희토류를 회 수하기 위한 목적으로 기초 평가 및 경제성 분석에 관 한 연구가 많은 것으로 확인되었다. 경제성 분석은 연 구개발 투자 여부를 결정하기 위해 실시하는 것으로써 국가 및 기업에서는 경제성 분석을 통해 투자 및 생산 공정 개선 등에 대한 타당성을 확인할 수 있다. 석탄재 중 희토류 회수를 위한 경제성 평가 방법을 조사한 결

Table 2. Methods for economic evaluation of coal ash

No.	Analysis method
I	Evaluation of holding value of rare earth elements in coal ash
II	Relationship between supply and demand of individual REE forecast over the next few years
III	Estimation of the industrial scale cost and revenues of production of REEs from coal ash by combining prior laboratory results, scaling models, combinatorial scenarios and sensitivity analysis
IV	Economic evaluation with change of process conditions

과, 크게 4개의 평가 방법(Table 2)으로 분류 가능 하였으며 현재까지는 경제성 확보를 위한 최적 회수 공정에 대한 연구가 부족한 것으로 조사되었다^{6,8,10,14,22-25}).

4.1. 경제성 평가 방법 Case-I (희토류 함량을 이용한 방법)

보유 가치 평가방법은 석탄재 중 유용금속 성분의 함량, 가격 및 석탄재 발생량을 확인하여 단순히 석탄재에 포함된 유용금속성분의 함량에 대한 계산을 통해 가치를 평가한 방법이다(Fig. 2). 석탄재의 가치를 평가하기 위해 유용금속 성분별 함량을 확인, 석탄재 발생량을 조사한 후, 각 유용금속 원소의 가격을 곱하여 석탄재에 포함된 유용성분의 가치를 평가하는 방법이다. 이 방법은 석탄재 내 유용성분과 희토류 보유 가치를 단순히 구할 수 있는 방법으로 제시되었으나 유용 금속 성분별 가치, 회수공정 및 수익 등에 대한 세부사항이

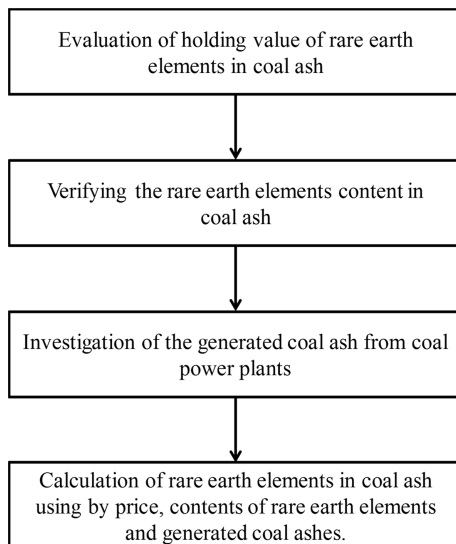


Fig. 2. Flow sheet for Economic evaluation of coal ash (Case-I).

포함되지 않기 때문에 실질적인 경제적 가치 평가는 어렵다고 생각된다¹⁴).

4.2. 경제성 평가 방법 Case-II(희토류 수요, 공급 변화를 이용한 방법)

산업에서 필요한 희토류 수요와 공급 특성을 이용한 경제성 평가 방법은 산업에서 사용하고 있는 희토류 원소의 수요 및 공급량 변화에 따라 희토류 원소를 분류 후, 그룹별 희토류 함량을 확인하여 개발 가능성을 평가하는 방법이다(Fig. 3). 평가를 위해 현재 산업에서 사용되고 있는 희토류 원소의 수요 및 공급 변화에 따라 세 그룹으로 분류하고 각 그룹의 희토류 농도를 확인한다(Critical, Uncritical 및 Excessive). Critical(Nd, Tb, Dy, Y, Eu, Er)은 수요에 비해 공급량이 부족하거나 미래에 부족할 수 있는 그룹, Uncritical(La, Pr, Sm, Gd)은 현재 산업에서 요구되는 수요를 충분히 공급 가능한 그룹 또는 수요가 공급을 충족시키는 그룹, Excessive(Ce, Ho, Tm, Yb, Lu)는 수요에 비해 공급량이 훨씬 높거나 높은 비율로 생산되는 것을 의미한다. 이 방법은 미래 산업에서 요구되는 희토류 원소의 수요 및 공급에 따라 분류 기준인 Critical, Uncritical 및 Excessive에 포함된 희토류 원소가 변화될 수 있는 특징이 있다. 석탄재에 함유된 Critical성분의 총 함량과 Excessive성분의 총 함량을 이용하여 다음의 식 (1)과 같이 outlook coefficient를 계산할 수 있으며, 계산된 값과 석탄재 중 함유된 총 희토류 농도 값을 이용해 향후 개발 가능성에 대해 검토할 수 있다고 알려져 있다^{6,8,10,22}).

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

Fig. 4은 희토류 성분에 대한 개발 가능성 및 개발을

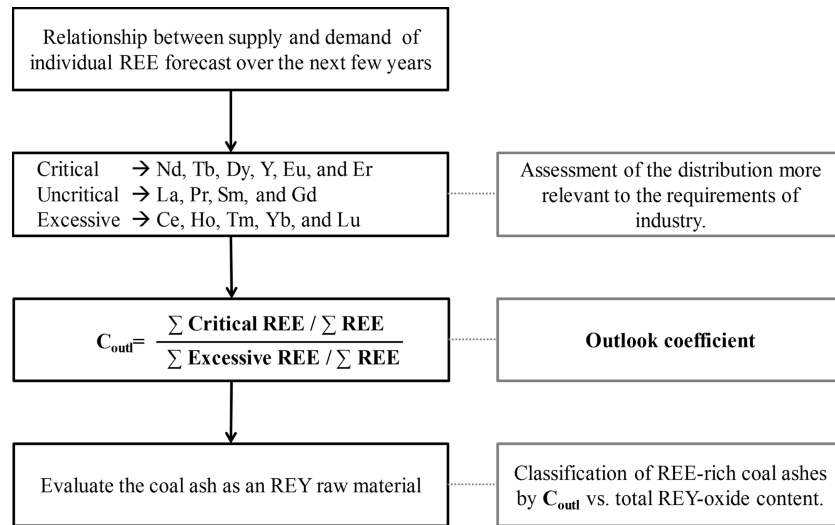


Fig. 3. Flow sheet for Economic evaluation of coal ash (Case-II).

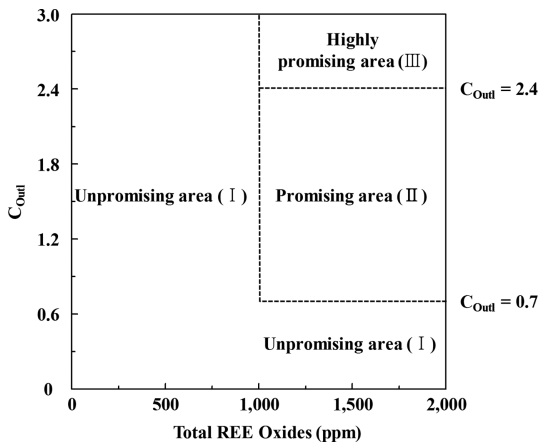


Fig. 4. Economic evaluation of coal ash using by case-II method⁶⁾.

위한 조건을 나타낸 그래프로, 석탄재의 outlook coefficient 값과 석탄재의 총 희토류 농도 값을 TREO 값으로 계산하여 그래프에 표시한 후 개발 가능성을 검토한다. 희토류 함량이 최저 가행품위인 1,000 ppm 보다 낮은 농도일 경우, outlook coefficient의 값과 관계없이 unpromising area로 분류되며, outlook coefficient의 값이 0.7 이하일 경우 unpromising area로 분류되어 개발 가능성이 낮은 것을 나타낸다(Fig. 4). 이 방법은 관련 연구자들이 실험을 목적으로 확보한 석탄 및 석탄재의 경제성 평가를 위해 많이 적용한 방법으로, 산업에서 주로 사용되는 희토류 성분을 분류하고 이에 따

른 평가가 용이한 장점이 있으나 각 원소별 가격, 회수 공정 및 효율 등의 면밀한 평가 조건이 없는 단점이 있기 때문에, 기초 평가 방법에서 확인을 위해 분석된다^{6,8,10)}.

4.3. 경제성 평가 방법 Case-III (TEA 분석 방법)

TEA(Techno-economic analysis)분석 방법은 아직 산업화 되지 않은 기술의 경제성을 평가하기 위해 사용되는 모델링 방법이다^{23,24)}. 미국에서는 Fig. 5와 같은 방법으로 초임계 이산화탄소 추출법을 이용하여 석탄재로부터 희토류 추출에 대한 경제성 평가를 실시하였다. 이 방법은 경제성을 평가하기 전 초임계 추출공정의 모델과 관련된 논문을 조사하여 추출 방법을 적용 하였으며, 공정 변수(희토류의 수율, 석탄재 내 희토류 함량, 반응기 크기, 시약 요구량과 시약 가격)들에 대한 각각의 시나리오를 검토하였다. Fig. 5에서 ②는 초임계 이산화탄소 추출공정의 논문을 조사하여 적용 모델을 설정하는 부분을 나타낸다. ③은 공정 모델 설정 후, Lab. scale에서의 재료 및 에너지 사용 등 발생하는 비용(cost)과 수익(revenue)을 산업 규모로 확장하는 부분으로, 실제 산업에서 필요한 재료와 에너지를 분석하고 산업 규모의 재료 및 에너지 사용량이 정해지면 공정 적용을 통한 수익성에 대한 경제성 분석을 실시한다. 비용은 크게 자본비용, 시약비용, 에너지비용, 노동비용 및 운송비용으로 나눌 수 있다(Table 3). 수익 창출은 추출 공정 후 얻은 희토류 산화물에서 발생되며, 희토류 판

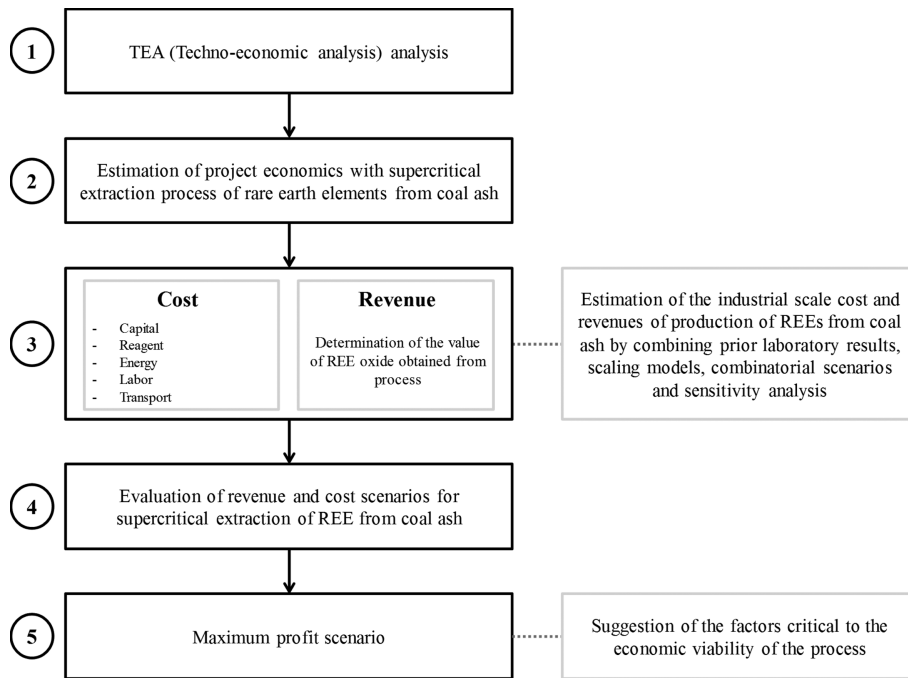


Fig. 5. Flow sheet for Economic evaluation of coal ash (Case-III).

Table 3. Cost for economic evaluation method

No.	Cost	Contents
1	Capital	Determination from a scaling model based on empirical data from smaller industrial scale vessels
2	Reagent	Calculation by multiplying material requirement by price
3	Energy	Determination using empirical data from other supercritical extraction processes
4	Labor	
5	Transport	Estimation using by assuming distance from coal plant to extractor and assuming truck transport between the sites

매로 인한 수익은 REE 금속 함량(kg/ton coal ash), 수율(yield, %), REE 산화물의 가격(\$/kg) 등에 의해 결정된다. ④는 공정의 수익성에 대한 경제 분석이 끝난 후 공정에 대한 민감도 분석과 시나리오의 조합을 실시하는 부분이다. 민감도 분석은 입력한 변수에 대한 결과의 의존성을 확인하는데 사용되며, 반응기 크기, 제품 수율 및 시약소비량 등 공정 변수를 선택하여 시나리오의 조합을 통해 경제성이 검토되었다. 석탄재의 희토류 함량은 폴란드 석탄재(TREE: 934 ppm)와 중국의 석탄재(TREE: 608 ppm)를 시나리오로 선정하여 실험되었다. 경제성은 주로 시약의 사용 및 석탄재에서 추출되는 희토류의 농도와 수율에 의해 결정된다고 제시

하였으며, 희토류 성분 중 스칸듐(Scandium)과 같은 가격이 높은 특정 원소의 함량이 경제적 타당성에 많은 영향을 준다고 발표하였다. 이 방법은 기존의 희토류 경제성 평가에 대한 논문에 비해 상세한 부분까지 검토 및 제시하여 실제 산업에 적용하기에 적절하다고 생각되지만, 희토류 회수를 위한 농축, 회수 공정과 산업에서 수요가 높은 원소에 대한 보완도 필요하다고 판단된다.

4.4. 경제성 평가 방법 Case-IV(공정변수에 의한 경제성 평가 방법)

이 방법은 기존 회수 공정의 단점을 보완하여 경제성 부분을 향상시키기 위해 실험 변수를 조정하여 최적 조

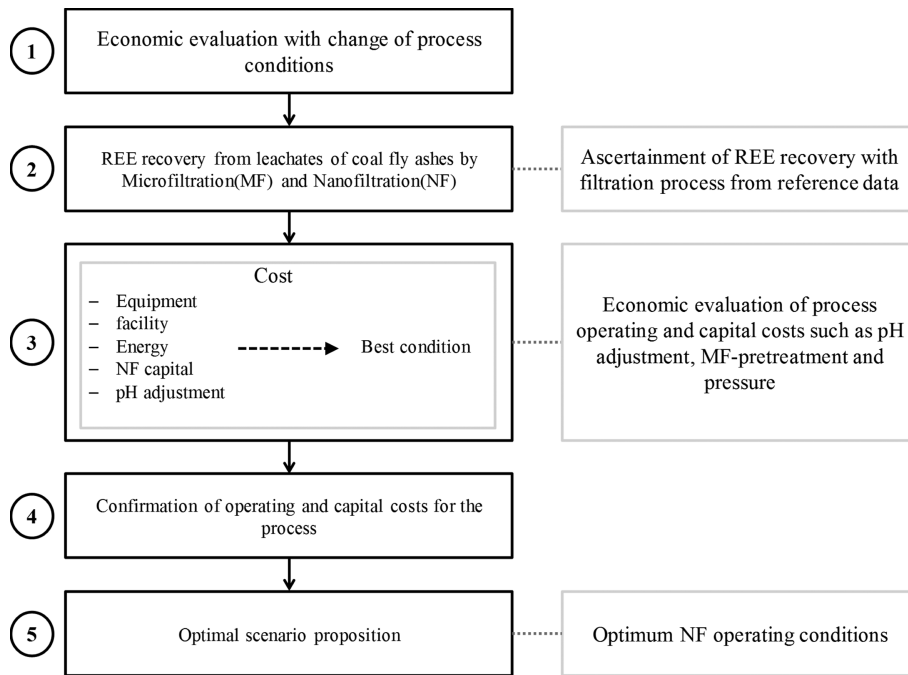


Fig. 6. Flow sheet for Economic evaluation of coal ash (Case-IV).

건의 회수 공정 확보 및 이에 대한 평가를 제시하는 방법이다(Fig. 6). Borte 등은 석탄재 침출액으로부터 희토류 성분을 분리하기 위해 나노 필터 공정을 적용하여 회수율이 높은 공정을 확인하였다²⁵⁾. 나노 필터 공정은 기존의 화학적 추출 방법이 가진 단점을 보완할 수 있다고 제시하였으며, 경제성 평가를 위해 나노 필터 공정을 이용하여 희토류를 선택적으로 추출하는 자료를 확인, 효과적인 추출을 위한 공정변수(전처리 여부, 필터종류, pH, 압력 및 시약)들에 대한 시나리오를 평가하였다.

최종적으로 희토류 광물의 가격과 최적의 석탄재 처리비용을 비교하여 경제성을 판단하였다. 회수 공정을 제시한 이후, 공정에 영향을 미치는 다양한 요인들을 분석하여 실제 산업 규모에 적용할 수 있는 최적조건을 도출하였다. 초기자본은 필터, 파이프, 밸브, 조절장치 및 시료 저장장치 등과 같은 장비로 구성되었다. 초기 자본의 경우 주로 산업규모 및 처리량과 관계가 크기 때문에 이를 비교하여 규모에 따른 경제성을 분석하였다. 운영비용은 필터교체, 에너지 소비, 시약 투입량 및 폐액처리와 같은 요소들로 구성되어 있으며, 침출액으로부터 희토류를 회수할 수 있는 최적 공정을 도출하였다. 최종 경제성 평가는 희토류 가격(\$/kg), 석탄재 처

리량(kg/day, kg/year), 침출액 처리비용(운영비용 + 초기자본)을 계산하여 확인하였다. 다양한 조건별 비용 모델을 구축하여 경제성 분석을 실시한 후, 각각의 변수들(필터 종류, pH, 압력 및 온도)이 산업에 적용되었을 때 일어날 수 있는 결과를 예측하고, 얻은 결과를 비교하여 경제성이 가장 높은 조건을 확인하였다. 결과적으로 공정변수 중 pH 및 압력에 따라 석탄재 침출액으로부터 희토류를 회수하는 비용에 차이가 있으며, 나노필터공정을 실제 산업에 적용하기 위해 처리비용을 낮출 수 있는 필요 연구 부분에 대해서도 제시하였다.

5. 국내 석탄재 경제성 평가 연구 방향

국내/외에서 연구되고 있는 석탄재 내 희토류 경제성 평가 방법에 대한 조사를 실시하였으며, 각 연구 그룹별 경제성 평가에 미치는 주요 요소의 차이 및 변화에 대한 부분을 확인하였다. 실제 산업에서는 석탄재에 포함된 희토류 성분을 회수 및 제품으로 판매하는 경제성 부분을 확보해야하기 때문에 이에 대한 면밀한 분석 및 검토가 필요하다. 이러한 이유로 국외에서도 초기 비용 및 수익 부분을 분류하여 검토하였으며, 희토류 성분 회수를 위한 변수로 공정비용, 시약비용, 에너지 및 수송

비용 등 자국의 상황을 고려한 다양한 조건을 평가하여 경제성 확보를 위한 최적 조건을 제시하였으나, 아직 회토류 회수를 위한 최적 공정에 관한 연구가 부족한 상태이다. 우리나라의 경우, 석탄재 중 회토류를 회수하기 위한 경제성 검토가 일부 연구자들에 의해 실시되었으나 실제 산업에 적용하기에는 면밀한 분석이 매우 부족한 실정이며, 국외 경제성 평가 방법을 그대로 적용하기에는 석탄재 특성, 회수 기술 및 자본 등의 차이가 있어 어려움이 있다. 따라서 향후 국내 석탄재로부터 회토류 성분의 회수를 위한 경제성 검토에는 다양한 조건 및 분야의 연구가 필요하다고 판단된다. 경제성 평가를 위한 기초 연구로는 국내에서 발생되고 있는 총 석탄재의 량, 석탄재의 종류, 회토류 함량, 회토류 함유 광물의 성상 및 회토류 시장에 대한 조사이다. 시간 변화에 따른 각 항목의 변동이 적을수록 회토류 성분의 지속적인 개발에 효과적이라고 판단되며, 회토류 시장 조사에서는 회토류 원소 중 수요가 높거나 미래에 수요가 증가될 것으로 예상되는 부분을 확인할 필요가 있다. 이후에는 지속적으로 수급이 가능한 석탄재를 대상으로 회토류 회수를 위한 연구로써 농축, 정제 및 제폭화 등 다양한 방법으로 실시하며, 석탄재의 성분, 성상 및 회토류 회수 특성이 유사한 석탄재를 분류하여 처리하는 방법이 필요하다고 판단된다. 이러한 이유는 발전소 연소방식 차이에 의한 석탄재 및 회토류 함량 특성 등이 크게 변화되기 때문이다. 회토류 회수를 위한 최적 조건이 확인되면, 이러한 실험 조건을 실제 산업에 적용 시에 요구되는 비용(에너지, 노동 및 교통 등)을 검토하여 경제성 확보 가능에 대한 구체적 논의를 하는 것이 필요하다고 판단된다.

6. 결 론

석탄화력발전소에서 발생하는 석탄재로부터 회토류 성분 회수를 목적으로 한 경제성 평가에 관한 자료를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

국제 회토류 생산의 대부분이 중국에서 진행됨에 따라 석탄재에 포함된 저농도의 회토류를 회수하기 위한 다양한 회수 및 경제성 평가가 진행되고 있으며, 주로 미국에서 수행되고 있다. 실제 산업에 적용하기 위해 투입 비용 및 수익에 대한 세부사항을 분류하고 이에 따른 수익 실현 가능한 시나리오를 검토하는 것으로 확인되었다. 경제성 평가를 위해 석탄재 중 회토류 성분을 회수하기 위한 공정은 아직 실제 산업에 적용하기에 부

족한 기술수준으로 확인되었으나, 회토류 개발의 경제성 확보를 위한 지속적인 투자는 진행될 것으로 판단된다. 국내의 경우, 석탄재가 매년 발생하고 있으나, 석탄재로부터 회토류 회수를 위한 경제성 평가 및 회수 기술에 관한 연구는 전무한 상태로 확인되었다. 이에 폐자원의 재활용 및 자원 확보 방안을 목적으로 석탄재 중 회토류 회수에 관한 다양한 분야의 연구 및 검토가 필요하다고 판단된다. 이를 위한 기초 연구로써 국내에서 발생하는 석탄재의 량, 종류, 회토류의 함량 및 관련 분야 시장에 대한 조사가 필요하며, 미래에 수요 증가가 예상되는 부분에 대해서도 검토가 요구된다. 기초 평가 후에는 경제적 수익 실현을 위해 회토류 회수 공정이 적용 가능한 석탄재를 대상으로 회토류 성분의 회수 및 생산 공정에 관한 연구가 필요하다. 이러한 연구를 통해 국내 산업 환경에 적용 가능한 최적 회토류 회수 공정을 포함한 투자비용, 수익비용에 관한 면밀한 검토 및 지속가능한 발전 계획이 절실히 요구된다.

감사의 글

이 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업(과제번호: 2019002220002)의 지원을 받아 작성한 논문입니다. 또한 2019년도 강원대학교 전임교원 기본연구비 지원 사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사드립니다.

References

1. Electronic Power Statistics Information System : <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkgeGepGbpGrid.do?menuId=040204>
2. Korea Environment Institute, 2014 : Minimizing Environmental Impact in Accordance with the Thermal Power Plant Ash Management(I)
3. <https://www.posri.re.kr/ko/board/content/15958>
4. Ronghong Lin et al., 2017 : Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations, Fuel, 200, pp.506-520.
5. 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 earth element content, Fuel, 119, pp.236-239.
6. Shifeng Dai and robert B. Finkelman, 2018 : Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects, International Journal of coal Geology, 186,

pp.155-164.

7. M. B. Folgueras, M. Alonso, and F. J. Fernández, 2017 : Coal and sewage sludge ashes as sources of rare earth elements, *Fuel*, 192, pp.129-139.
8. Wojciech Franus et al., 2015 : Coal fly ash as a resource for rare earth elements, *Environ Sci Pollut Res*, 22, pp.9464-9474.
9. Ross 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.
10. Allan Kolker, et al., 2017 : Distribution of rare earth elements in coal combustion fly ash, determined by SHRIMP-RG ion microprobe, *International Journal of Coal Geology*, 184, pp.1-10.
11. Gi Young Jeong, Seok-Hwi Kim, and Kangjoo 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.
12. Chung Han Yoon, et al., 1996 : Trace Elements and Rare Earth Elements in Coal Fly Ash From the Samcheonpo, Seocheon and Youngdong Power Plant, *The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 33, pp.82-89.
13. 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.
14. Seok-Un 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 Kore Inst. of Resources Recycling*, 24(4), pp.67-75.
15. Junho Maeng, Dong-Hwan Suh, and Taeyoon Kim, 2014 : Minimizing Environmental Impact in Accordance with the Thermal Power Plant Ahs Management(II), *Korea Environment Institute*
16. Korea Environment Institute, 2014 : Minimizing Environmental Impact in Accordance with the Thermal Power Plant Ahs Management(II)
17. Lai Quang Tuan, et al., 2019 : Leaching Characteristics of Low Concentration Rare Earth Elements in Korean (Samcheok) CFBC Bottom Ash Samples, *Sustainability*, 11(9), pp.25-62.
18. U.S. Deoartment of Energy : <https://www.energy.gov/>
19. A. Jordens et al., 2013 : A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals, *Miner. Eng.*, 40, pp.97-114.
20. Ross K. Taggart, James C. Hower, and Heileen Hsu-Kim, 2018 : Effects of Roasting Additives and Leaching Parameters on the Extraction of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash, *International Journal of Coal Geology*, 196(1), pp.106-114.
21. Jack F. King, et al., 2018 : Aqueous acid and alkaline extraction of rare earth elements from coal combustion ash, *International Journal of Coal Geology*, 195, pp.75-83.
22. V. V. Seredin, et al., 2010 : A new method for primary evaluation of the outlook for rare earth element ores, *Geol, Ore Deposits*, 52(5), pp.428-433.
23. Saptarshi Das, et al., 2018 : Techno-economic analysis of supercritical extraction of rare earth elements from coal ash, *Journal of Cleaner Production*, 189, pp.539-551.
24. Maryam Ghodrat, et al., 2016 : Techo economic analysis of electronic waste processing through black copper smelting route, *Journal of Cleaner Production*, 126, pp.178-190.
25. Borte Kose Mutlu, et al., 2018 : Application of nano-filtration for Rare Earth Elements recovery from coal fly ash leachate: Performance and cost evaluation, *Chemical Engineering Journal*, 349, pp.309-317.

김 영 진

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

김 승 현

- 강원대학교 에너지·자원공학과 공학사
 - 현재 강원대학교 에너지·자원공학과 석사과정
 - 당 학회지 제28권 2호 참조
-

이 재 령

- 한양대학교 자원공학과 공학석사
 - 일본 동북대학 재료공학과 공학박사
 - 현재 강원대학교 에너지·자원공학과 교수
 - 당 학회지 제28권 2호 참조
-