

국내 석탄화력발전소 석탄회 중 희유금속 가치 평가

박석운 · 김재관 · 이형범 · 서연석 · 홍준석 · *이현동

한국전력공사 전력연구원

Evaluation of Some Rare Metals and Rare Earth Metals Contained in Coal Ash of Coal-fired Power Plants in Korea

Seok-Un Park, Jae-Kwan Kim, Yeon-Seok Seo, Jun-Seok Hong,
Hyung-Beom Lee and *Hyun-Dong Lee

KEPCO Research Institute

요 약

국내 석탄화력발전소 11곳의 석탄회(비산재, 바닥재 및 매립회) 및 매립장 상등수를 채취하여 희유금속의 함량분포를 살펴보았다. 주요 전략광물인 이트륨(Yttrium) 및 네오디뮴(Neodymium)의 경우 약 23~75 mg/kg 범위로 나타났다. 별도의 회수기술 개발에 대한 가치가 충분한 것으로 판단되었다. 연간 발생하는 비산재 및 바닥재와 더불어 매립회의 양을 감안하면 국내 석탄화력발전소가 보유하고 있는 희유금속은 약 1.67조 원의 가치가 있는 것으로 조사되어 도시광산으로서 충분한 경제적 가치가 있는 것으로 판단된다.

주제어 : 회토류, 희유금속, 석탄회, 석탄화력발전소, 도시광산

Abstract

The content distributions of some rare metals and rare earth metals in coal ash (fly ash, bottom ash and pond ash) and leachate from coal-fired power plants were investigated. In case of Yttrium (Y) and Neodymium (Nd) which were strategic critical elements, their contents were ranged from about 23~75 mg/kg and it is shown they are worth to be developed for the recovery and separation method. Considering the annual amount of fly ash and bottom ash and pond ash, coal-fired power plants have great value of about 1,670 billion KRW and it is regards they are worthy as urban mines.

Key words : Rare Earth Metals, Rare Metals, Coal Ash, Coal-fired Power Plant, Urban mine

1. 서 론

석탄은 풍부한 매장량, 저렴한 가격, 공급원의 안정성 등으로 인해 세계적으로 화력발전소의 근간이 되는 원

료로 사용되고 있으며, 2014년 12월 기준으로 한전 발전회사의 총 발전량 442,914,458 MWh 중 무연탄 및 유연탄 석탄화력은 203,765,391 MWh로 약 46%를 차지하고 있다.¹⁾ 국내의 경우 제5차 장기 전력수급계획

· Received : June 16, 2015 · Revised : July 13, 2015 · Accepted : July 29, 2015

*Corresponding Author : Hyun-Dong Lee (E-mail : hdlee@kepcoco.kr)

Power Generation Laboratory, KEPCO Research Institute, 105 Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34056 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.

(1999~2015년) 및 제6차 장기 전력수급계획(2013~2027년)에 의하면 석탄화력 발전은 2027년까지 10,500 MW의 신규설비가 소요될 것으로 예상되어 전력원으로 석탄 화력의 비중은 증대되고 있는 실정이다. 이와 같이 석탄화력 발전소의 신축 및 증축계획에 따라 석탄회 발생량이 2013년 연간 821만 톤에서 2020년에는 연간 1,660만 톤으로 증가할 것으로 예상되고 있다.

현재 국내 석탄화력 발전소의 매립장에는 5,708만 톤의 석탄회가 매립되어 있으며 이들 중 상당량이 미연탄소 5% 이상의 고미연분 석탄회이다. 석탄회는 대부분 시멘트 몰탈 및 콘크리트 혼화제로 재활용되고 있으나 계속해서 증가하는 석탄회 발생량에 비해 시멘트 산업의 성장률이 낮아 석탄회의 재활용에는 한계가 있어 2020년경에는 석탄회 재활용률이 50% 이하로 떨어질 것으로 예상되고 있다. 또한, 환경부는 2020년까지 폐기물 발생량 대비 매립률을 3%로 줄이는 것을 목표로 2017년부터 폐기물 매립 부담금제도를 시행할 계획에 있어 폐기물 매립 관련 국가정책 동향 및 석탄화력 발전소의 회처리장 등의 상황을 고려해 볼 때 석탄회의 재활용에 대한 부담과 압박은 더욱 가중될 것으로 보인다. 따라서 석탄회의 새롭고 다양한 고부가 활용기술 개발을 통한 고부가 자원화 방안 마련이 절실한 시점이라 할 수 있다.

한편, 석탄회에는 다양한 희유금속들이 존재한다는 다양한 보고가 있어 왔다. 희토류(Rare Earth Elements, REEs)는 주기율표 상의 원자번호 21, 39, 57-71번의 물질로 물리·화학적 성질과 광물의 특성에 따라 경희토류(Light REEs), 중희토류(Medium REEs) 및 중희토류(Heavy REEs)로 구분되는데, 란타넘 계열 원소[경희토류: 란타넘(Lanthanum), 세륨(Cerium), 프라세오디뮴(Praseodymium), 네오디뮴(Neodymium), 중(Medium)희토류: 프로메튬(Promethium), 사마륨(Samarium), 유로퓸(Europium), 가돌리늄(Gadolinium), 중(Heavy)희토류: 테르븀(Terbium), 디스프로슘(Dysprosium), 홀뮴(Holmium), 에르븀(Erbium), 툴륨(Thulium), 이테르븀(Ytterbium), 루테튬(Ruthenium)] 15개와 스칸듐(Scandium), 이트륨(Yttrium)을 합친 17개 원소를 말한다.²⁾ 이들 희토류는 신산업소재를 중심으로 급격한 수요 증가와 공급량의 한계 때문에 가격이 매우 가파르게 상승하고 있어 국제간의 희토류 자원 확보 전쟁이 급격히 진행되고 있다. 특히 희토류 중 일부 원소는 매장량의 한계로 수요를 감당하기 어려워 전략적 광물로 분류되고 있으며, 미국 에너지성(DOE)은 공급 부족 위험도를 기준으로 이러한

원소 중 5개 성분(이트륨, 유로퓸, 네오디뮴, 테르븀 및 디스프로슘)을 가장 중요한 중대전략물질(Critical Strategic Material)로 분류하고 확보방안에 대한 다양한 연구를 수행하고 있다. 희유금속의 수급문제는 글로벌 이슈로 중국에 의한 공급독점에 대비하여 기술수요가 늘어나고 시장 또한 성장할 전망이다. 특히 발광소자와 영구자석에 주로 쓰이는 이트륨 및 네오디뮴과 리튬(Lithium)의 경우 예상 시장규모가 각각 약 467억\$(‘25), 약 2,940억\$(‘25) 및 약 138억\$(‘20)으로 보고된 바가 있다.³⁾

따라서 본 연구에서는 국내 석탄화력발전소에서 발생하는 석탄회에 함유되어 있는 희유금속의 함량을 분석하고 이들의 경제적 가치평가를 통해 석탄화력발전소의 도시광산(Urban Mining)화 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 석탄회 중 희유금속 분포 현황

2008년 12월 22일 미국 Tennessee Valley Authority's Kingston Plant에서 대량의 석탄회 슬러리가 인근 유역으로 유출되는 사고가 발생한 이후 미국 EPA (Environmental Protection Agency)는 미국 내 석탄회 발생에 대해 모니터링을 강화하고 석탄회 안전 사용에 대한 법규를 제정하려고 하고 있다. 이 과정에서 석탄회 중에는 중금속 뿐 만 아니라 미국 DOE가 전략적 광물로 지정한 여러 종류의 희토류 금속들이 함유되어 있다는 것을 확인하였다. 따라서, 미국 DOE 및 EPA는 2015년까지 대부분 미국 발전소별 발생하는 석탄회 중 Trace Element (중금속 및 희토류금속)를 추적, 모니터링을 통해 Trace Element에 대한 재활용 규격을 제정하고 추출기술 개발을 지원하고 있다. Table 1은 미국 DOE가 2011~2012년 동안 10여개 발전소에서 발생하는 석탄회 중 전략적 광물 함유량을 모니터링한 결과이다. Table 1과 같이 석탄회 중에는 갈륨 212~299, 세륨 405~565, 코발트 20.0~100, 란타넘 206~286, 프라세오디뮴 49.0~68.4, 이트륨 191~259, 유로퓸 3.90~5.90, 네오디뮴 183~256, 테르븀 4.90~7.30, 디스프로슘 32.1~50.3, 게르마늄 1.00~356 mg/kg 정도가 분포되어 있는 것으로 알려져 있다.⁴⁾

Wojciech Franus 외⁵⁾, Blissett 외⁶⁾ 및 Querol 외⁷⁾ 따르면 역청탄 및 유연탄의 석탄회에는 희유금속이 약 28.8~359.1 mg/kg의 범위로 존재한다고 보고한 바가 있다. Goldschmidt⁸⁾는 석탄회에 이트륨, 게르마늄 및 스칸듐이 각각 0.08%, 1.1% 및 0.04%로 함유되어 있

Table 1. Mean and range of contents of strategic REEs and some rare metals in coal and coal ashes of U.S. (unit : mg/kg)

Element	Raw Coal	Coal ash	Coal Fly Ash
Ce	20.9 (0.79 - 790)	468.78 (151 - 1,784)	- (405 - 565)
Dy	2.09 (0.11 - 28)	61.54 (18 - 527)	- (32.1 - 50.3)
Eu	0.28 (0.025 - 5.8)	7.64 (2.00 - 31)	- (3.9 - 5.9)
La	9.09 (0.07 - 230)	259.85 (60 - 839)	- (206 - 286)
Nd	8.48 (0.47 - 230)	236.02 (70 - 967)	- (183 - 256)
Pr	4.81 (0.17 - 65)	59.02 (17 - 239)	- (49.0 - 68.4)
Tb	0.54 (0.01 - 21)	10.29 (3.00 - 8.0)	- (4.9 - 7.3)
Y	8.18 (0.10 - 100)	408.34 (97 - 3,540)	- (191 - 259)
Total REE	54.9 (0.20 - 1,031)	1,723 (721 - 8,426)	- (1,213.6 - 1,667.6)
Ga	5.24 (0.044 - 41)	N.A.	- (212 - 299)
Ge	4.23 (0.007 - 220)	- (<10 - 1,841)	- (1.00 - 356)
Ln	0.71 (0.025 - 23)	N.A.	N.A.
Te	1.82 (8.8 - 510)	N.A.	- (0.14 - 2.7)

*N.A. : not analyzed, '-' means no average value.

고 붕소 및 코발트 또한 각각 0.3% 및 1.15%의 비교적 높은 함량으로 존재하는 것을 확인한 바가 있으나, 이는 상당히 과거의 연구자료로 분석기술의 수준이 현재에 비해 많은 차이가 있을 수 있기 때문에 직접적인 비교는 어렵다고 볼 수 있다. 한편, Zhang 외^{9,11)}는 음식물쓰레기 소각재, 동물폐기물소각재, 원예폐기물소각재, 하수슬러지 소각재 및 소각로바닥재를 대상으로 희토류 함량분석을 실시한 결과 이트륨, 란타넘 및 세륨 등 11개 희토류가 53.7~130 mg/kg의 범위로 존재하고, 리튬, 갈륨, 루비듐, 이트륨 및 지르코늄 등의 함량은 5~300 mg/kg의 범위로 존재하는 것을 확인하기도 하였다.

국내에서는 한국서부발전(주)과 군산대학교가 석탄회로부터 리튬 회수사업을 검토한 결과 회처리장의 리튬 농도가 2~3 mg/L(해수 평균 리튬 농도 : 0.17 mg/L)의 범위로 존재함을 확인한 바가 있다. 이는 대상금속이 리튬에 한정되었기 때문에 국내 석탄화력발전소에서 발생하는 석탄회 중에 함유된 희유금속의 분포에 대한 모니터링을 수행한 사례는 없다고 할 수 있다. 이종근 외²⁾는 한국남동발전(주)의 화력발전소에서 비산재(fly ash)와 바닥재(bottom ash)를 분리 채취한 후 XRF(X-ray fluorescence spectrometry)로 화학조성을 측정하여 희토류의 존재유무를 간접적으로 검토하였으나, 분석기기의 한계로 희토류의 존재를 확인할 수 없었다고 보고한 바가 있다.

3. 글로벌 희유금속 관련 동향

희유금속의 가격은 'Metal Bulletin'이나 'Metal Week' 등의 잡지와 일부 웹사이트의 게재 가격이 지표로 이용되고 있지만 희유금속의 가격을 결정하는 국제기구는 존재하고 있지 않다. 이들의 가격은 실 거래장소에서 수요와 공급의 동향을 보고 쌍방의 매매에 의해 결정되고 있다. 과거 희토류 시장은 미국 등의 한정된 생산자에 의해 안정된 가격으로 희토류가 제공되어져 왔으나 중국이 저렴한 비용으로 채굴한 희토류를 생산함으로써 희토류 시장의 약 90%를 차지하게 되었다. 2000년대에는 전 세계 희토류 생산량의 대부분을 중국이 차지했지만 2010년대 들어서 호주산 철광석과 미국산 광석에 대한 개발도 이루어지고 있다. 다만, 현재까지도 희토류의 가격은 중국의 환경문제 관련 대책이나 자국내 수요를 우선시 하는 정책에 의해 크게 좌우되고 있어 중국의 동향에 항상 예의주시해야 하는 실정이다.¹²⁾

미국의 경우 희토류 수급문제에 단기적으로 대처할 수 있는 정책은 적지만 중장기적 관점에서 희토류 대체 기술에 대한 연구와 재활용 및 재사용 방안 개선을 추진하고 있다. 유럽위원회(EU)는 2008년 'Raw Material Initiative'를 책정하고 2010년에 안티몬, 베릴륨, 코발트, 갈륨, 게르마늄, 인듐, 탄탈륨 및 텅스텐 등 14종의 금속을 주요 관리대상으로 선정하고 있고, 2014년 5월에

신규로 붕소, 점결탄 및 인광석 등을 추가하여 총 20종으로 관리하고 있다. 한편, 일본은 '희토류 쇼크'이 후 자국 내에서 희토류 각 원소의 대체 및 자원절약을 위한 연구개발을 신속히 진행하여 공급중단 위험을 감소하려는 노력이 있었다. 다만 일부 희토류의 경우 여전히 수급균형이 악화되고 있는 실정이다^{3,13)}.

4. 분석방법

본 연구에서는 국내 석탄화력발전소를 500 MW 역청탄 표준화력을 기준으로 800 MW 대용량화력, 아역청탄 전소발전, 무연탄 혼소발전 및 유동층발전으로 구분하여 11개 화력본부 석탄화력 발전소에서 발생하는 비산재, 바닥재, 매립회(pond ash) 및 매립장 상등수(leachate)별로 대표시료를 채취하여 희유금속의 함량분포를 살펴보고자 하였다. 비산재의 경우 발생 직후 채취하였고 바닥재 및 매립회는 회처리장에서 해수의 영향이 적은 지점을 골라 시료를 채취하였다. 또한, 침출수는 회처리장의 상등수를 채취하였다.

석탄회는 고온에서 연소 후 발생하는 시료이기 때문에 석탄회에 함유된 희유금속을 분석하기 위해서는 적절한 전처리가 필요하다. 먼저 석탄회 시료 약 0.2 g을 취하여 Teflon 용기에 담고 농염산 3 mL와 농질산 2 mL를 천천히 첨가한다. 이후 농 과염소산 1 mL와 농불산 2 mL를 첨가한다. 시료와 산이 담긴 용기를 미리 110°C에 맞춰진 알루미늄 heating block에 놓고 초기건조를 시행하고 이후 온도를 160°C까지 올린 다음 시료를 모두 증발시킨다. 이후 시료용기를 꺼내서 방형시킨 다음 농질산 1 mL를 첨가하고 1% 질산용액 19 mL를 추가한다. 용기의 뚜껑을 닫고 건조오븐에 넣어 100°C에서 30분 동안 가열한다. 이러한 과정을 통해 용융된 시료를 ICP-OES를 통해 희유금속의 농도를 분석하였다. 단, 석탄회 시료의 성상 및 전처리 과정 중 특이사항에 따라 시료량 및 첨가하는 산의 종류와 양은 달라질 수 있다. 분석대상 금속은 희토류 11종(리튬, 네오디뮴, 유로퓸, 테르븀, 디스프로슘, 세륨, 란타넘, 니오븀, 텔루륨, 토륨 및 탈륨) 및 희유금속 10종(은, 금, 바륨, 비스무트, 코발트, 갈륨, 리튬, 니켈, 바나듐 및 지르코늄)으로 총 21종으로 하였다.

5. 결과 및 고찰

국내 석탄화력발전소 석탄회 및 침출수 중 희토류와 희

유금속의 함량분포를 분석한 결과 전략광물 중 임계물질(critical element)인 이트륨의 경우 비산재가 30~71 mg/kg, 바닥재가 21~68 mg/kg, 매립회가 26~75 mg/kg의 범위로 존재하는 것으로 나타났으며, 평균적으로 40 mg/kg 이상을 함유한 것으로 보였다. 특히, 이트륨 함량은 태안화력의 비산재와 바닥재가 가장 높고 당진화력의 매립회에서 가장 높은 값을 나타내었다. 네오디뮴의 경우 비산재가 23~56 mg/kg, 바닥재 19~86 mg/kg, 매립회 19~67 mg/kg 범위로 나타났으며, 비산재의 경우 태안화력 석탄회, 바닥재의 경우 동해화력 석탄회, 매립회의 경우 당진화력 석탄회에서 네오디뮴의 함량이 가장 높게 나타났다. 세륨은 33~178 mg/kg(비산재 38.5~166.0, 바닥재 33.0~138.0, 매립회 61.2~178.0), 란타넘은 17.3~98.8 mg/kg(비산재 21.0~84.0, 바닥재 17.3~98.8, 매립회 24.9~90.9), 니오븀은 12.0~89.4 mg/kg(비산재 19.0~46.5, 바닥재 14.4~89.4, 매립회 12.0~53.3), 토륨은 20~60.8 mg/kg(비산재 20.0~63.5, 바닥재 20.0~60.8, 매립회 20.0이하), 텔루륨 및 탈륨은 20 mg/kg이하인 반면, 매립장 침출수의 경우 모든 희토류금속의 함량이 0.05 mg/kg으로 나타나 해수에 의해 침출되지 않는 것으로 확인되었다.

또한, 금과 은의 경우 0.1 mg/kg 이하로 나타났으며, 바륨은 354~2,120 mg/kg (비산재 462~2,120, 바닥재 354~2,090, 매립회 447~1,590), 비스무트는 10 mg/kg 이하, 코발트는 13.1~77.0 mg/kg (비산재 13.1~57.7, 바닥재 33.2~77.0, 매립회 27.6~62.7) 갈륨은 38.9~110 mg/kg (비산재 53.4~88.9, 바닥재 38.9~110.0, 매립회 45.6~93.9), 니켈은 25.0~97.5 mg/kg (비산재 31.0~77.9, 바닥재 34.1~97.5, 매립회 25.0~86.3), 바나듐은 72~191 mg/kg (비산재 109.0~191.0, 바닥재 72.6~169.0, 매립회 82.2~171.0), 지르코늄은 129~584 mg/kg (비산재 140.0~584.0, 바닥재 129.0~551.0, 매립회 166.0~489.0)으로 확인되었으며, 매립장 침출수의 경우 리튬(함량 0.1~0.9 mg/kg으로 용출되어 있는 반면, 다른 희유금속들은 용해되지 않고 매립회에 그대로 고착되어 있는 것으로 확인되었다).

2013년 석탄회 발생량을 기준으로 희유금속 함량 평균치를 반영한 석탄화력발전소 비산재의 연간 희유금속 발생량은 Table 3과 같다. 비산재는 연간 695만 톤이 발생하며, 그 중 15,823톤의 희유금속이 발생하는 것으로 확인되었다. 특히, 전략 희토류의 경우 매년 이트륨 338 톤, 네오디뮴 282톤, 란타넘 379톤으로 발생하며, 희유금속의 경우 리튬 688톤, 니켈 388톤, 바나듐

Table 2. Content of rare earth metals in coal ashes and leachate from coal-fired power plants (unit : mg/kg)

Ashes	Rare earth metals											Other rare metals									
	Y	Nd	Eu	Tb	Dy	Ce	La	Nb	Te	Th	Tl	Ag	Au	Ba	Bi	Co	Ga	Li	Ni	V	Zr
F-avg	48.6	40.6	1.9	1.5	8.2	101.5	54.6	31.4	<20.0	<20.0	<10.0	<0.1	<0.1	1,164	<10.0	33.3	67.9	99.0	55.8	146.7	365.4
B-avg	47.0	44.9	1.9	1.5	8.1	97.9	54.2	50.2	<20.0	<20.0	<10.0	<0.1	<0.1	1,019	<10.0	53.4	71.8	117.6	167.1	117.7	383.5
P-avg	46.7	42.9	1.8	1.5	8.1	104.5	53.2	31.6	<20.0	<20.0	<10.0	<0.1	<0.1	872	<10.0	46.0	72.5	117.2	58.9	126.4	367.4
L-avg	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.05	<0.02	<0.04	<0.03	<0.03	<0.03	0.2	<0.03	<0.01	<0.05	0.4	<0.02	<0.04	<0.01
F-min	30.0	23.0	1.2	0.8	4.6	38.5	21.0	19.0	<20.0	<20.0	<10.0	<0.1	<0.1	462	<10.0	13.1	53.4	68.6	31.0	109.0	140.0
F-max	71.0	56.0	2.5	2.1	11.6	166.0	84.0	46.5	<20.0	63.5	<10.0	<0.1	<0.1	2,120	<10.0	57.7	88.9	146.0	77.9	191.0	584.0
B-min	21.0	19.0	1.3	0.7	3.5	33.0	17.3	14.4	<20.0	<20.0	<10.0	<0.1	<0.1	354	<10.0	33.2	38.9	49.6	34.1	72.6	129.0
B-max	68.0	86.0	2.5	2.1	11.6	138.0	98.8	89.4	<20.0	60.8	<10.0	<0.1	<0.1	2,090	<10.0	77.0	110.0	280.0	97.50	169.0	551.0
P-min	26.0	19.0	1.1	0.7	6.3	61.2	24.9	12.0	<20.0	<20.0	<10.0	<0.1	<0.1	447	<10.0	27.6	45.6	34.7	25.0	82.2	166.0
P-max	75.0	67.0	2.8	2.4	13.1	178.0	90.9	53.3	<20.0	<20.0	<10.0	<0.1	<0.1	1,590	<10.0	62.7	93.9	189.0	86.3	171.0	489.0
L-min	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.05	<0.02	<0.04	<0.03	<0.03	<0.03	0.1	<0.03	<0.01	<0.05	0.1	<0.02	<0.04	<0.01
L-max	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.05	<0.02	<0.04	<0.03	<0.03	<0.03	0.3	<0.03	<0.01	<0.05	0.9	<0.02	<0.04	<0.01

*F : fly ash, B : bottom ash, P : pond ash, L : leachate

1,019톤 및 지르코늄 2,538톤으로 나타났다.

바닥재의 경우 연간 126만 톤이 발생하며, 그 중 2,899 톤의 희유금속이 발생하는 것으로 확인되었다. 특히, 전략 희토류의 경우 매년 이트륨 59 톤, 네오디뮴 57 톤, 란타넘 69 톤이 발생하며, 희유금속의 경우 리튬 149 톤, 니켈 211 톤, 바나듐 149 톤, 지르코늄 485 톤이 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 석탄화력발전소의 경우 1983년부터 2015년 현재까지 석탄회 매립장에 약 64,000만 톤의 매립회를 가지고 있다. 그 중 희유금속의 보유량은 128,354 톤으로 매장량이 매우 높은 편이다. 매립장의 경우 희유금속을 추출하고 남은 석탄회 잔여물은 그대로 재매립하거나 재활용할 수 있는 입지적 여건이 매우 양호한 편이다. 전략 희토류의 경우 이트륨 2,985 톤, 네오디뮴 2,742 톤, 초고가의 텔루륨류는 3,836 톤이며, 희유금속의 경우 리튬 7,492 톤, 니켈 3,765 톤, 바나듐 8,080 톤, 지르코늄 23,487 톤으로 매우 높은 보유량을 가지고 있다. 특히, 디스프로슘, 텔루륨 및 갈륨 등은 초고가 가격이며 석탄회 중에도 함량이 높은 편이다.

전략 희유금속의 경우 국제적으로 기준물질로 전환되어 거래되고 있다. 본 연구에서 분석한 국내 석탄화력발전소의 연간 비산재 및 바닥재 발생량(2013년 기준)과 매립장의 매립회에 함유되어 있는 희유금속 보유량을

Metal-pages (www.metal-pages.com), MineralPrices.com (www.mineralprices.com) 및 한국자원정보서비스(www.kores.net)의 국제 거래가격(2015년 1월 기준)을 이용하여 환산한 경제적 가치는 Table 4와 같다.

A발전사의 경우 희유금속 가치가 5,329억 원이며, 대부분 A1화력의 매립회가 3,397억 원으로 가장 높은 보유량을 가지고 있다. 한편, B발전사의 희유금속 가치가 5,415억 원으로 발전사 중 가장 높은 경제적 가치를 보유하고 있다. 전체적으로 국내 석탄화력발전소에서 발생 및 보유하고 있는 희유금속은 약 1.67조 원으로 추정되어 회수기술 개발에 대한 가치가 충분한 것으로 판단된다.

6. 결 론

국내 석탄화력발전소 11곳(표준석탄화력발전소 및 유동충발전소 등)을 대상으로 석탄회를 채취하여 희유금속의 함량분포를 살펴본 결과 다음과 결론을 도출하였다.

국내 석탄화력발전소에서 발생하는 석탄회 종류별 전략적 광물 함량분포 중 미국 DOE에서 10년 내 해결 불가능한 5대 전략적 희토류 금속으로 관리 중인 이트륨의 경우 비산재 30~71 mg/kg, 바닥재 21~68 mg/kg, 매립회 26~75 mg/kg의 범위로 존재하는 것으로 나타

Table 3. Amount of rare earth metals and rare valuable metals in coal ashes from coal-fired power plants in 2013 (unit : ton)

Item	coal-fired power plant	amount (10,000 ton)	amount of rare earth metals								amount of rare valuable metals						Total	
			Y	Nd	Dy	La	Ba	Ce	Nb	Te/Th /Tl	Co	Ga	Li	Ni	V	Zr		
Fly ash	A	A1	78	38	32	6	43	911	79	25	47	26	53	77	44	115	286	1,781
		A2	82	40	33	7	45	956	83	26	49	27	56	81	46	120	300	1,870
		A3	15	7	6	1	8	170	15	5	9	5	10	14	8	21	53	333
		A4	6	3	2	0	3	70	6	2	4	2	4	6	3	9	22	137
	B	B1	118	57	48	10	64	1,371	119	37	71	39	80	117	66	173	430	2,681
		B2	29	14	12	2	16	335	29	9	17	10	20	29	16	42	105	656
	C	C1	108	53	44	9	59	1,261	110	34	65	36	74	107	60	159	396	2,467
	D	D1	110	54	45	9	60	1,283	112	35	66	37	75	109	61	162	403	2,510
	E	E1	105	51	43	9	57	1,226	107	33	63	35	71	104	59	154	385	2,398
		E2	13	6	5	1	7	153	13	4	8	4	9	13	7	19	48	298
		E3	25	12	10	2	13	285	25	8	15	8	17	24	14	36	90	558
	Total		695	338	282	57	379	8,091	705	218	417	231	472	688	388	1,019	2,538	15,823
	Bottom ash	A	A1	14	7	6	1	8	143	14	7	8	7	10	16	23	16	54
A2			15	7	7	1	8	148	14	7	9	8	10	17	24	17	56	333
A3			3	1	1	0	1	27	3	1	2	1	2	3	4	3	10	60
B		B1	19	9	8	1	10	189	18	9	11	10	13	22	31	22	71	424
		B2	6	3	3	0	3	60	6	3	4	3	4	7	10	7	23	135
C		C1	14	6	6	1	7	140	13	7	8	7	10	16	23	16	53	314
D		D1	19	9	9	2	11	198	19	10	12	10	14	23	32	23	74	445
E		E1	23	11	10	2	13	236	23	12	14	12	17	27	39	27	89	530
		E2	3	2	1	0	2	34	3	2	2	2	2	4	6	4	13	76
		E3	11	5	5	1	6	116	11	6	7	6	8	13	19	13	44	261
Total		126	59	57	10	69	1,289	124	63	76	67	91	149	211	149	485	2,899	
Pond ash	A	A1	14,951	698	641	121	795	13,044	1,562	472	897	688	1,084	1,752	881	1,890	5,493	30,019
		A2	5,100	238	219	41	271	4,449	533	161	306	235	370	598	300	645	1,874	10,240
		A3	909	42	39	7	48	793	95	29	55	42	66	106	54	115	334	1,824
	B	B1	14,495	677	622	117	771	12,645	1,515	458	870	667	1,051	1,699	854	1,832	5,325	29,103
		B2	7,331	342	314	59	390	6,395	766	232	440	337	531	859	432	927	2,693	14,719
	C	C1	722	34	31	6	38	629	75	23	43	33	52	85	42	91	265	1,449
	D	D1	7,660	358	329	62	407	6,682	800	242	460	352	555	898	451	968	2,814	15,379
	E	E1	6,753	315	290	55	359	5,891	706	213	405	311	490	791	398	853	2,481	13,557
		E2	5,526	258	237	45	294	4,821	577	175	332	254	401	648	325	699	2,030	11,096
		E3	482	23	21	4	26	421	50	15	29	22	35	57	28	61	177	968
Total		63,928	2,985	2,742	518	3,401	55,770	6,680	2,020	3,836	2,941	4,635	7,492	3,765	8,080	23,487	128,354	

Table 4. Estimate value of rare earth metals and rare valuable metals from coal-fired power plants (unit : 0.1 billion-KRW)

coal-fired power plants	Estimated value of rare earth metals									Estimated value of rare valuable metals						Sum
	Y	Nd	Dy	La	Ba	Ce	Nb	Te/Th/Tl	Co	Ga	Li	Ni	V	Zr		
A	F	7.45	6.99	7.76	1.09	305.94	2.02	2.62	97.12	2.22	34.16	1.19	1.71	15.73	1.06	487.05
	B	1.27	1.34	1.55	0.19	46.03	0.33	0.74	16.93	0.63	6.11	0.25	0.88	2.20	0.19	78.62
	A1-P	59.12	61.34	62.56	8.75	1,893.99	17.18	21.73	799.23	25.50	301.08	11.60	14.90	112.16	8.79	3,397.94
	A2-P	20.16	20.96	21.20	2.98	645.99	5.86	7.41	272.65	8.71	102.77	3.96	5.08	38.28	3.00	1,159.00
	A3-P	3.56	3.73	3.62	0.53	115.14	1.05	1.34	49.01	1.56	18.33	0.70	0.91	6.82	0.53	206.83
	SUM	91.56	94.36	96.68	13.53	3,007.09	26.44	33.84	1,234.93	38.63	462.45	17.69	23.48	175.19	13.57	5,329.44
B	F	6.01	5.65	6.20	0.88	247.71	1.64	2.12	78.41	1.82	27.50	0.96	1.39	12.76	0.86	393.90
	B	0.93	1.05	1.03	0.14	36.15	0.26	0.55	13.37	0.48	5.00	0.19	0.69	1.72	0.15	61.74
	B1-P	57.34	59.53	60.49	8.48	1,836.05	16.67	21.08	775.17	24.73	291.92	11.25	14.45	108.72	8.52	3,294.39
	B2-P	28.97	30.05	30.50	4.29	928.55	8.43	10.68	392.04	12.49	147.49	5.69	7.31	55.01	4.31	1,665.81
	SUM	93.25	96.27	98.23	13.79	3,048.47	26.99	34.43	1,258.98	39.52	471.90	18.09	23.84	178.21	13.84	5,415.83
C	F	4.49	4.21	4.65	0.65	183.10	1.21	1.57	57.92	1.33	20.55	0.71	1.02	9.44	0.63	291.47
	B	0.51	0.57	0.52	0.08	20.33	0.14	0.32	7.13	0.26	2.78	0.11	0.39	0.95	0.08	34.16
	C1-P	2.88	2.97	3.10	0.42	91.33	0.83	1.06	38.31	1.22	14.44	0.56	0.71	5.40	0.42	163.66
	SUM	7.88	7.75	8.27	1.14	294.76	2.18	2.95	103.36	2.82	37.77	1.38	2.11	15.79	1.14	489.29
D	F	4.57	4.31	4.65	0.66	186.29	1.23	1.61	58.81	1.37	20.83	0.72	1.03	9.61	0.65	296.35
	B	0.76	0.86	1.03	0.12	28.75	0.21	0.46	10.69	0.37	3.89	0.15	0.54	1.36	0.12	49.33
	D1-P	30.32	31.49	32.05	4.48	970.23	8.80	11.14	409.86	13.05	154.15	5.95	7.63	57.45	4.50	1,741.09
	SUM	35.66	36.65	37.74	5.26	1,185.27	10.24	13.21	479.36	14.79	178.87	6.82	9.20	68.42	5.27	2,086.77
E	F	5.84	5.55	6.20	0.86	241.61	1.60	2.07	76.63	1.78	26.94	0.93	1.35	12.46	0.84	384.67
	B	1.52	1.63	1.55	0.22	56.05	0.41	0.87	20.49	0.74	7.50	0.29	1.07	2.61	0.23	95.19
	E1-P	26.68	27.75	28.44	3.95	855.37	7.77	9.81	360.86	11.53	136.10	5.24	6.73	50.62	3.97	1,534.81
	E2-P	21.85	22.68	23.27	3.23	700.01	6.35	8.06	295.81	9.42	111.38	4.29	5.50	41.48	3.25	1,256.57
	E3-P	1.95	2.01	2.07	0.29	61.13	0.55	0.69	25.84	0.82	9.72	0.38	0.47	3.62	0.28	109.81
	SUM	57.85	59.62	61.52	8.55	1,914.17	16.67	21.50	779.63	24.28	291.64	11.13	15.12	110.80	8.57	3,381.04
Total	286.20	294.66	302.45	42.27	9,449.76	82.52	105.93	3,856.25	120.03	1,442.6 ₃	55.11	73.76	548.41	42.39	16,702.38	

*F : fly ash, B : bottom ash, P : pond ash

났으며, 평균적으로 40 mg/kg 이상을 함유하고 있는 것으로 조사되었다. 네오디뮴의 경우 비산재 23~56 mg/kg, 바닥재 19~86 mg/kg, 매립회 19~67 mg/kg으로 이트륨과 유사한 함량을 나타냈으며, 희유금속인 리튬의 함량은 34.7~280 mg/kg 범위로 높게 나타났다.

연간 발생하는 비산재 및 바닥재에 함유되어 있는 희유금속은 각각 15,823톤/년 및 2,899톤/년으로 나타났고, 현재까지 매립되어 있는 매립회에는 128,354톤의 희유금속이 함유되어 있는 것으로 조사되었다. 특히 중요 전략광물인 이트륨, 네오디뮴, 란타넘, 리튬, 니켈, 마나뮴

및 지르코늄 등은 매우 높은 보유량을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

국내 석탄화력발전소에서 매년 발생하는 비산재 및 바닥재와 매립장의 매립회에 함유되어 있는 희유금속은 약 1.67조 원의 가치가 있는 것으로 추정된다. 특히, B 발전사의 희유금속 가치가 5,415억 원으로 발전사 중 가장 높은 경제적 가치를 보유하고 있었고, A발전사는 5,329억 원으로 그 중 A1화력의 매립회가 3,397억 원으로 가장 높았다. 따라서 회수기술 개발에 대한 가치가 충분한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 2013 에너지기술개발사업 「국내 석회석광 적용 자동차 경량화 광물 원료 등 미래 자원화 기술 실증화 연구」에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

1. Statistics of Electric Power in Korea (2014), 2015: Korea Electric Power Corporation
2. Jong Keun Lee and Jae Young Kim, 2013: Recovery Potential of Rare Earth Elements in Coal Ashes, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 30(1), pp. 94-99
3. Critical Materials Strategy, 2011: U.S. Department of Energy (DOE)
4. World of coal ash, 2013: American coal ash Association, Ash at work, Issue 1
5. Wojciech Franus, Małgorzata M. Wiatros-Motyka and Magdalena Wdowin, 2015: Coal fly ash as a resource for rare earth elements, *Environmental Science and pollution research international*, DOI 10.1007/s11356-015-4111-9
6. Blissett R.S., Smalley N. and Rowson N. A., 2014: An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content, *Fuel*, 119, 236-239
7. Querol X., Fernandez-Turiel J. and Lopez-Soler A., 1995: Trace elements in coal and their behavior during combustion in a large power station, *Fuel*, 74(3), 331-343
8. Goldschmidt, V. M., 1935 : Rare Elements in Coal Ashes, *Industrial and Engineering Chemistry*, 27(9), pp. 1100-1102
9. Zhang, F. S., Yamasaki, S. and Kimura, K., 2001: Rare earth element in various waste ashes and the potential risk to Japanese soils, *Environment International*, 27, pp. 393-398
10. Zhang, F. S., Yamasaki, S. and Nanzyo, M., 2002: Waste ashes for use in agricultural production : I. Liming effect, contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals, *The Science of the Total Environment*, 284, pp. 215-225
11. Zhang, F. S., Yamasaki, S. and Kimura, K., 2002: Waste ashes for use in agricultural production: II. Contents of minor and trace metals, *The Science of the Total Environment*, 286, pp. 111-118
12. The Global Role of Rare Earth Materials (Renewed Impetus For Renewed Energy Drives Rare Earths Industry), 2011: FROST&SULLIVAN, pp. 9833-9839
13. Problem and Corresponding in Rare Earth Industry, 2014: Japan Society of Newer Metals



박 석 운

- 공학석사
- 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원



김 재 관

- 공학박사
- 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원



이 형 범

- 공학석사
- 현재 한국전력공사 전력연구원 연구원



서 연 석

- 공학석사
- 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원



홍 준 석

- 공학석사
- 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원



이 현 등

- 공학석사
- 한국자원리사이클링학회 이사
- 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

성공한 리사이클링 들어다보기

일본·대만 리사이클링 산업 답사 기행문!

저자는 이 책을 집필한 목적을 국내 업체들에게 기술을 벤치마킹할 수 있는 단서를 제공하기 위해서라고 하고 있다. 어느 공장이든 한두 가지 배울 점이 있다는 것이다. 하물며 수준 높은 선진 업체의 소개는 힌트를 얻고 기술을 접목할 수 있는 물꼬가 될 수 있음을 강조한다.

- 일본과 대만의 리사이클링 산업 답사 기행문으로 「도시광산자원과 리사이클링, 저자 오재현 교수님께서 집필한 리사이클링 관련 두 번째 서적이다.

- 리사이클링 산업 변화를 저지는 각 지역 업체 방문을 통해 마치 현미경으로 들여다보듯 잘 설명해 주고 있다.

> 구매방법		오재현 지음 (신국판) 348쪽 정가 26,000원	
직접구매	발행사 직접 방문하여 구매		
우편구매	송금후 송부요청서 및 무통장입금증 사본을 FAX송부 계좌번호 : 1005-900-925509 우리은행		
서점구매	서울 교보문고, 서울문고, 영풍문고 부산 영광도서	포항 학원사 인천 대한서림	

발행 : **S&M미디어(주)** 문의 : 02) 583~4161(내선 104) [총무팀]