

## 호주의 석탄재 재활용 사례와 석탄재 재활용과 관련된 환경 문제

박진희\* · 지상우\*\* · 신희영\*\* · 조환주\*\* · 안지환\*\*

\*충북대학교 환경생명화학과, \*\*한국지질자원연구원 광물자원연구본부 탄소광물화사업단

### Recycling of Coal Ash and Related Environmental Issues in Australia

Jin Hee Park\*, Sang-Woo Ji\*\*, Hee-Young Shin\*\*, Hwanju Jo\*\* and Ji-Whan Ahn\*\*

\*School of Crop Science and Agricultural Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea

\*\*Mineral Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

#### 요 약

석탄재는 석탄 연소 시 발생하는 것으로 포집 방법에 따라 비산재와 바닥재로 나눌 수 있다. 비산재와 바닥재는 특성에 따라 다양한 용도로 재활용이 가능하다. 호주는 세계에서 네 번째로 석탄을 생산하는 국가이며 석탄재를 시멘트, 콘크리트, 광산 채움재, 농업용 토양 개량제 등으로 활용하고 있다. 비산재는 시멘트, 콘크리트용 보충제로 사용하면 시멘트의 강도와 콘크리트의 내구성을 향상시킬 수 있다. 광산 채움재로 석탄재를 활용하면 지반을 안정화시킬 수 있으며 석탄재의 다량 처리가 가능하다. 석탄재는 주로 알칼리성이므로 광산 채움재로 사용 시 산성광산배수를 중화시킬 수 있다. 또한, 토양 개량제로 사용하면 산도 개선 효과를 얻을 수 있으며 토양의 물리적 특성 개선이나 식물에 필요한 원소를 공급할 수 있다. 호주 비산재는 식물 독성에 영향을 미치는 미량 원소 함량이 낮으며, 방사성 원소 함량도 토양 배경 농도 범위 내에 존재하기 때문에 재활용 가능성은 더 확대될 것이다. 석탄재의 특성은 연소에 사용한 석탄의 특성과 관련이 있으며 한국은 호주에서 석탄을 수입하기 때문에 한국의 석탄재도 다양한 용도로 재활용이 가능할 것이다.

주제어 : 석탄재, 비산재, 바닥재, 재활용, 미량 원소

#### Abstract

Coal combustion products are generated during coal combustion and can be grouped into fly ash and bottom ash depending on collection methods. Fly ash and bottom ash can be recycled for various purposes based on their characteristics. Australia is the fourth largest coal production country in the world and reuses coal ash as cement, concrete, mine filler, and agricultural soil amendment. When fly ash is used as a supplement for cement and concrete, strength of the cement and the durability of the concrete can be improved. Use of coal combustion product for mine backfill stabilizes underground mine voids and stores a large amount of coal ash in the voids. Because of alkalinity of coal combustion products, it can neutralize acid mine drainage when used for mine backfill. In addition, it can be used as an agricultural soil amendment to improve acidity and physical properties of the soil and to supply plant nutrients. Recycling of fly ash in Australia will be further expanded because of its low trace element contents that can be toxic to plants and low radioactive element contents existing within soil background concentrations.

· Received : July 16, 2019 · Revised : August 12, 2019 · Accepted : August 20, 2019

§ Corresponding Author : Hwanju Jo (E-mail : chohwanju@kigam.re.kr)

Mineral Resources Division, 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.

The characteristics of coal combustion products are related to the characteristics of the coal used for combustion, and since Korea imports coal from Australia, Korean coal combustion products also can be recycled for various purposes.

**Key words** : coal combustion product, fly ash, bottom ash, recycling, trace element

## 1. 서 론

석탄재는 석탄 연소 시 발생하는 것으로 비산재와 바닥재로 나눌 수 있다. 비산재는 연소가스와 같이 배출되다가 집진기에서 포집된 미세한 입자를 의미하며 바닥재는 연소 시 낙하 배출된 것을 의미한다. 석탄의 연소 과정에서 85% 이상이 비산재로 배출되며 바닥재는 15% 이하이다<sup>1)</sup>. 전세계적으로 가장 많은 석탄을 생산하는 나라는 중국, 미국, 인도, 호주, 러시아이며 호주는 네 번째로 석탄을 많이 생산하는 국가이다<sup>2)</sup>. 2010년 데이터에 따르면 석탄재 총 생산량은 780 Mt이며 가장 많은 양의 석탄재를 생산하는 국가는 중국으로 385 Mt을 생산하였으며, 그 다음으로 북아메리카가 118 Mt, 인도가 105 Mt, 유럽이 52.6 Mt 순이다.

호주는 전세계 석탄재 생산량의 2%를 차지하고 있으며 재활용률은 45.9%로 전세계 평균 재활용률인 53%보다 약간 낮은 수준이다. 석탄재의 재활용률이 가장 높은 국가는 일본으로 96.4%를 재활용하고 있으며 가장 낮은 나라는 아프리카/중동아시아로 10.5%가 재활용된다<sup>2)</sup>.

최근의 데이터를 보면 호주의 석탄재 재활용은 2016년 5.35 Mt으로 43%가 재활용되었다. 석탄재 생산량은 4년간 크게 변하지 않았으며 재활용 비율은 2010년 41%, 2011년 48%, 2012년 42%, 2013년 52%, 2014년 48%, 2015년 48%로 약간씩 증가하고 있다<sup>3)</sup>. 석탄재는 주로 시멘트와 콘크리트 용도로 재활용되며 광산 채움재나 도로용 재료, 농업용으로 사용되기도한다<sup>3)</sup>. 재활용되는 용도 중 가장 높은 비율을 차지하는 것은 시멘트나 콘크리트용으로 약 68%의 석탄재가 시멘트용이나 콘크리트용, 광물 채움재 등 고부가가치용으로 사용되고 있으며 18%가 구조 채움재, 도로용 재료, 응집제, 광산 복원용으로 사용되었다. 사용되고 남은 양은 매립지에 저장되는데 2016년 기준 9.4 Mt이 매립지에 저장되어 있으며 향후 재활용이 가능한 상태이다<sup>3)</sup>.

석탄재의 특성은 석탄재의 재활용과 밀접한 관계를 가지고 있다. 특히, 용적밀도, 공극률, 입자 크기 등이 건설용이나 농업용으로 석탄재를 재활용하는데 있어 중요한 인자들이다. 석탄재의 구성 성분은 주로 산화물로

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> 및 CaO 등으로 구성되어 있다. 이 외에도 석탄재는 미량 원소들을 포함하는데 이들 가운데는 As, B, Cd, Cr, Cu, Ni 및 Pb와 같이 독성이 있는 원소들도 있어 농업용으로 사용 시 주의해야 한다. 이러한 미량원소의 용해도는 pH에 따라 달라지는데 몇몇 양이온들은 산성 pH에서 용출이 잘 일어나지만 As, B, Cr, Mo, V, W와 같은 산화 음이온을 형성하는 원소들은 알칼리 조건에서 용탈이 잘 일어난다<sup>4)</sup>. 따라서 사용 환경에 맞게 적절한 형태로 석탄재를 재활용해야 한다. 본 연구에서는 호주의 석탄재 특성에 따른 재활용 사례를 조사하였으며 석탄재의 재활용과 관련해 발생할 수 있는 환경 문제를 분석하였다.

## 2. 시멘트, 콘크리트용 석탄재 재활용

비산재를 재활용하면 폐기물의 처리량을 감소시킬 수 있으므로 환경적으로 도움이 될 뿐만 아니라 콘크리트 용으로 사용 시 콘크리트의 전반적인 성능과 품질을 향상시킬 수 있다. 비산재는 포졸란 특성을 가지고 있어 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응할 수 있으며 시멘트의 수화를 촉진시킨다<sup>5)</sup>. 비산재는 작업성을 개선하고 물의 사용량을 줄여 경제적이며 수화열을 감소시켜 콘크리트의 소성 특성에 영향을 미친다. 비산재는 콘크리트의 강도 발달을 증가시키고 철근부식을 감소시킨다<sup>6)</sup>. 비산재는 후기 시멘트의 강도, 작업성을 향상시키고 콘크리트의 내구성 을 향상시키는 시멘트 보조 재료이다. 일반적으로 비산재는 콘크리트에서 20%~30%의 시멘트 보충제로 흔히 사용된다.

호주에서는 실제로 비산재를 원료로 한 시멘트나 콘크리트용 재료를 판매하고 있다. 호주의 Cement Australia는 시멘트용으로 Kaolite HPA라는 브랜드로 석탄재를 판매하고 있다. Flyash Australia에서는 Microash™라는 제품으로 콘크리트용 비산재를 생산하고 있다. Microash™는 반응성이 높은 aluminosilicate pozzolan으로 표면적이 커 반응성이 크다. Microash™는 포트랜드 시멘트의 수화 작용으로 형성된 Ca(OH)<sub>2</sub>와 결합하여 규산칼슘 수화물 겔을 형성하여 기공 공간을 채우고 밀도가 높은 콘크리트 혼합물을 만든다. 석

회와 반응하는 Microash™의 특성으로 인해 시간이 지나면서 효과적인 시멘트의 수화가 일어나며 강도가 증대된다<sup>7)</sup>.

Wagners는 고품질의 시멘트 제품을 생산할 수 있는 소재를 판매하며 대부분의 건설 용도에 적합한 범용 시멘트와 조기강도시멘트, 수축제한 시멘트를 생산한다<sup>8)</sup>. 황산염 내성 시멘트는 포틀랜드 시멘트 클링커와 석고를 비산재와 혼합한 제품으로 황산염에 대한 내성이 필요한 경우 사용된다. 일반 혼합시멘트인 포틀랜드 시멘트에도 비산재가 25% 배합되어 범용 시멘트의 강도를 유지하면서 내구성과 작업성을 향상시킨다. 비산재가 혼합된 시멘트는 도로 안정화 및 일반적인 건설용도로 널리 사용된다. 포틀랜드 시멘트와 분쇄 고로 슬래그를 혼합하여 제조하면 콘크리트 내구성을 향상시켜 도로 안정화에 사용할 수 있어 분쇄고로슬래그는 시멘트 보충 소재로 콘크리트 산업에 사용한다.

Independent Cement는 빅토리아와 뉴사우스웨일즈 지역에 시멘트 및 시멘트 혼합 제품을 공급하는 회사이다<sup>9)</sup>. Independent Cement는 콘크리트 제품의 작업성 및 내구성을 향상시키는 시멘트 보충 재료로 비산재를 사용한다. Ecoblend 제품은 환경 친화적인 시멘트로 다량의 온실 가스를 방출하는 시멘트를 대체하기 위해 슬래그 또는 비산재를 시멘트 보조제로 최소 30% 함유하고 있다. Ecoblend 제품은 기존의 시멘트 제품보다 내구성이 좋으며 수명이 길다.

### 3. 광산 채움재로 석탄재 활용

석탄재는 광산의 채굴적에 backfill 용도로 사용하여 지반을 안정화하는데 사용될 수 있다. 석탄재는 일반적으로 pH가 7 이상이기 때문에 광산의 채굴적에 채움재로 사용할 경우 산성광산배수를 중화시킬 수 있다<sup>10)</sup>. 석탄재는 특성에 따라 산성광산배수의 중화뿐만 아니라 노천광산에서 차폐재, 지하 광산에서는 채움재와 토양 개량제로 사용할 수 있다<sup>11)</sup>. 광산 채움재로 석탄재를 사용하는 것은 석탄재 처리에 대한 부담을 줄일 수 있다. 호주에서 석탄재를 광산 채움재로 사용한 예는 주로 지하 채굴적의 붕괴를 막기 위한 용도와 석탄재를 폐기하기 위한 목적이다. 뉴사우스웨일즈주의 Upper Hunter Valley의 Warkworth에서 지하광산과 노천광산을 운영하고 있는 Wambo Mining Corporation은 석탄재를 기반으로 한 채움재를 적용해 Wambo Colliery 광산의 채굴적을 안정화하였다. 지질학적인 문제를 고려

했을 때 광업 활동을 지속하는데 가장 적합한 것은 backfill로 판단되었으며 모래, 시멘트, 비산재를 조합하여 채움재를 제조하였다. 채움재는 시멘트 대체제로 비산재를 일부 사용하였으며 현장에서 혼합하여 광산 채굴적으로 슬러리 상태로 주입하였다<sup>12)</sup>.

유사한 사례가 남호주주에서도 보고되었다. 남호주주에 위치한 Olympic Dam은 1988년 가동을 시작하여 채광이 완료되면 채굴적을 unconsolidated rock fill이나 aggregate와 binder의 혼합물인 Cemented Aggregate Fill (CAF)을 이용해 backfill하고 다시 채광하는 방법으로 개발하였다. 2014년 보고서에 따르면 CAF에 광물 찌꺼기를 사용하고 바인더로 시멘트, 비산재, 석회를 첨가하여 강도를 조절하였다. 비산재는 Port Augusta에서 생산된 비산재를 사용하였으며 조성은 주로 57%의 폐석, 26.5%의 deslimed 광물찌꺼기와 모래, 2.5% 시멘트, 5% 미분 비산재, 9% tailings liquor로 구성되어 있다<sup>13)</sup>.

석탄재는 가행광산에서 지속적인 채광의 안전성을 위한 backfill 용도로 사용하지만 이미 폐광된 광산 채굴적의 지반 환경 안정화를 위하여도 사용한다. 퀸즐랜드 주의 Ipswich 지역에서 차량 전용 도로를 건설하던 중 지하에 존재하는 오래된 광산을 발견하였다. 그 광산은 19세기 초반부터 1987년까지 운영된 광산으로 광산의 크기나 깊이, 정확한 위치에 대한 정보가 알려지지 않았다. 퀸즐랜드 교통과는 도로의 붕괴를 막기 위해 광산 지하공간의 backfill을 실시하였다<sup>14)</sup>. 광산의 채움재는 근처 CS Energy의 Swanbank Power Station 매립지의 석탄재를 시멘트와 폐석, 물과 혼합하여 페이스트로 제조하였다. 석탄재는 Swanbank 매립지에서 돌을 제거하고 비산재의 수분 함량을 조절하여 밀도를 낮추고 운송에 드는 비용을 최소화하였다. 슬러리 상태로 된 재료는 물이 차 있는 광산내로 주입하였으며 물은 슬러리를 주입하는 동안 펌프로 뽑아 수처리 시설에서 역삼투로 처리하였다. 광산 채굴적 채움 공사는 2009년 7월 중순에서 시작하여 2010년 11월까지 수행하였으며 총 약 50000 m<sup>3</sup>의 비산재를 사용하였다<sup>15)</sup>.

지하 광산이 아닌 노천광산의 경우에는 지반의 안정화 목적보다는 석탄재의 폐기용으로 광산 채굴적을 활용한다. 이러한 경우 운송비 문제로 인해 주로 광산 근처에 발전소가 있으며 발전소에서 생산되는 폐기물을 근처 광산에 파이프를 운송하여 채굴적을 메꾸으로써 폐기물 처리 비용과 운송비를 저감시킨다. 빅토리아주 Latrobe Valley의 발전소로부터 나오는 석탄재 폐기물은

파이프를 통해 근처 갈탄 광산의 채굴적으로 수송하여 처리하였다. 그러나 Latrobe Valley의 석탄 화력 발전소 주변의 매립지가 Gippsland의 대기, 지하수, 강을 오염시킬 수 있다. 2015년 Yallourn 발전소의 석탄재 처리 파이프가 터져 8.6 ML의 석탄재 슬러지가 Morwell 강에 유출되었으며 Yallourn 소유주인 에너지 오스트레일리아는 \$7584의 벌금을 지불했다. Latrobe Valley와 같이 호주에서는 석탄재를 광산 채굴적 매립하는 경우가 있는데 대부분 지하 채굴적이 아닌 노천광산에 적용한다<sup>16)</sup>.

채굴적 석탄재로 채운 후 상부에 표토를 덮어 광산 개발 전의 상태로 복원한 사례가 있다. Macquarie 발전소는 1996년 환경개선 사업을 실시하였는데 Ravensworth 근처의 노천광산의 채굴적 Bayswater 발전소의 비산재로 채우고 표토를 덮어 그 위에 식생을 형성하였다. 표토로 사용한 토양은 석탄재와 다른 재활용 폐기물로 구성되었다. 토양 개량제는 Hunter Water Corporation에서 얻은 biosolid와 석탄재, 석회 및 석고를 섞어 제조하였다. Macquarie 발전소는 석탄재를 1년에 2 Mt까지 생산하며 2002년에서 2003년 사이 비산재, 바닥재, 석회 및 석고를 각각 60561 t, 5154 t, 475 t, 2067 t 판매하였다<sup>17)</sup>. 퀸즐랜드주의 Kogan Creek 발전소는 Kogan Creek 광산으로부터 4 km 떨어진 곳에 위치하며 광산 채굴적 매우는데 석탄재를 사용한다. 광산은 노천광산으로 광산 채굴적을 폐석으로 채우며 발전소에서 나온 석탄재는 소량의 물과 혼합하여 파이프라인을 통해 광산으로 수송하여 채굴적을 다 채우면 폐석과 토양으로 덮고 식생을 형성한다<sup>18)</sup>.

#### 4. 농업용으로 석탄재 활용

농업에 적용 가능한 석탄재는 12~14 Mt으로 최소 8.7 Mt의 비산재와 1.0 Mt의 바닥재가 농업 또는 기타 용도로 사용될 수 있다<sup>19)</sup>. 비산재를 토양개량제로 사용하는 이유는 비산재의 특성과 관련이 있다. Class F 비산재의 경우 비정질 규산염이 점진적으로 용해되어 양이온이 천천히 용출되며 장기간에 걸쳐 산성 토양의 pH를 증가시킨다. 또한, 비산재 첨가에 따른 식물 생육의 긍정적인 효과는 석회 시용 효과, 영양 공급 및 토양의 물리적 특성 개선 등이 있다. 호주 비산재는 다른 비산재와 달리 미량 원소 농도가 상대적으로 낮고 미량 원소에 의한 독성 위험이 낮기 때문에 석고 및 석회와 같은 토양 처리제와 마찬가지로 농업 토양 개량제로 사

용될 수 있다. 토양 개량제로 비산재 사용 시 10 t/ha를 초과하지 않는 비율로 적용하며 대부분 5 t/ha 이하로 적용한다<sup>19)</sup>. 호주 비산재 산분해 시험 결과 갈탄에서 생성된 비산재를 제외하고 뉴사우스웨일즈주와 퀸즐랜드주에서 정한 규제 기준을 충족하였다. 호주에서 농업 토양에 적용 가능한 비산재농도는 Pb 100 mg/kg 이하, Cd 10 mg/kg, Hg 5 mg/kg이며 CaCl<sub>2</sub> 추출시 B는 60 mg/kg 이하 및 전기전도도는 4.0 dS/m를 초과하지 않아야 한다<sup>20)</sup>. 전반적으로 호주 농업용 석탄재 시장의 규제가 심하나 농업 토양 개량제로서의 사용 가능성이 있으므로 시장이 확대될 수 있다.

호주의 석탄재는 일반적으로 알칼리성이며 빅토리아의 갈탄 연소 비산재의 pH는 9.9이다. 빅토리아, 남호주, 뉴사우스웨일즈의 발전소에서 생산된 비산재는 더 높은 알칼리성을 띤다. 이러한 알칼리성 비산재는 석회질 재료로써 산성 농업 토양에 적용할 수 있다. 호주 농업 토양의 경우 절반이 pH는 5.5 미만의 산성이며, 1,100만 ha의 땅이 심각한 산성으로 확인되었다<sup>20)</sup>. 따라서 알칼리성의 비산재를 토양에 처리하면 토양 산도의 개선 효과를 얻을 수 있을 것이다. 호주에서 비산재를 토양에 적용 시 토양내 영양 공급과 농작물 생산에 관한 연구는 거의 보고된 것이 없다. 그러나 일부 연구에서 빅토리아 갈탄의 석탄재를 이용한 포트실험에서 비산재는 목초지에 잠재적인 영양소 공급원이며 비료와 유사한 연구결과를 보였다<sup>21)</sup>.

#### 5. 호주 석탄재 활용과 관련된 환경문제

비산재의 미량 원소 분포는 주로 원료 석탄의 미량원소 함량과 관련이 있으며 호주 석탄의 미량원소 함량이 낮아 비산재의 미량원소 함량은 낮은 편이다. 호주 비산재는 유럽 비산재에 비해 Cu, Mo, Ni, Zn의 농도는 유사하나, 원소들의 함량 편차가 더 크게 나타났다. Be와 Ge의 함량은 호주 비산재가 약간 높으며, Be는 시료간의 편차가 매우 컸다. 중국 비산재와 비교하여 호주 비산재의 Cu, V, Pb 값은 더 낮았으며 Zn과 As는 서호주 비산재에서 높은 값을 보였다<sup>22)</sup>. 흑탄의 연소로 생성된 석탄재 대부분은 다양한 농도의 철 및 티타늄 산화물과 함께 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>를 포함한다. 남호주 석탄재는 Na, Mg 및 Ca의 농도가 약간 높았다. 퀸즐랜드와 서호주의 시료는 비슷했으며, 높은 농도의 산화철을 함유하고 있었다. 일반적으로 퀸즐랜드 시료는 철과 산화칼슘의 농도가 높았다<sup>23)</sup>.

비산재의 사용과 관련하여 비산재에 존재하는 미량 원소의 총 함량보다 용출될 수 있는 원소의 함량이 더 중요하다. 비산재에서 원소들의 용출 가능성은 용출 방법과 화학적 조건에 따라 달라진다. 이는 사용된 용출액의 pH뿐만 아니라 석탄재의 성분에 따라 달라진다. 용출 과정 중 용액의 pH는 비산재의 산도에 따라 달라지는데 산성 비산재는 용출 후 용출액이 산성에서 중성을 나타내며 알칼리 비산재는 사용한 초기 용액의 pH와 상관없이 모두 9.5 이상의 pH값을 나타냈다. 산성 비산재에서는 B, Mo, Se이 쉽게 용출되며 B의 농도가

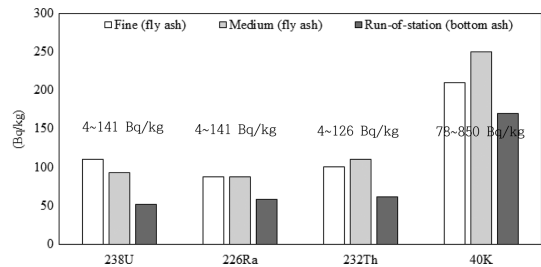


Fig. 1. Average radionuclide concentrations in coal combustion products. Values above the bar indicates range of radionuclide concentrations in soils.

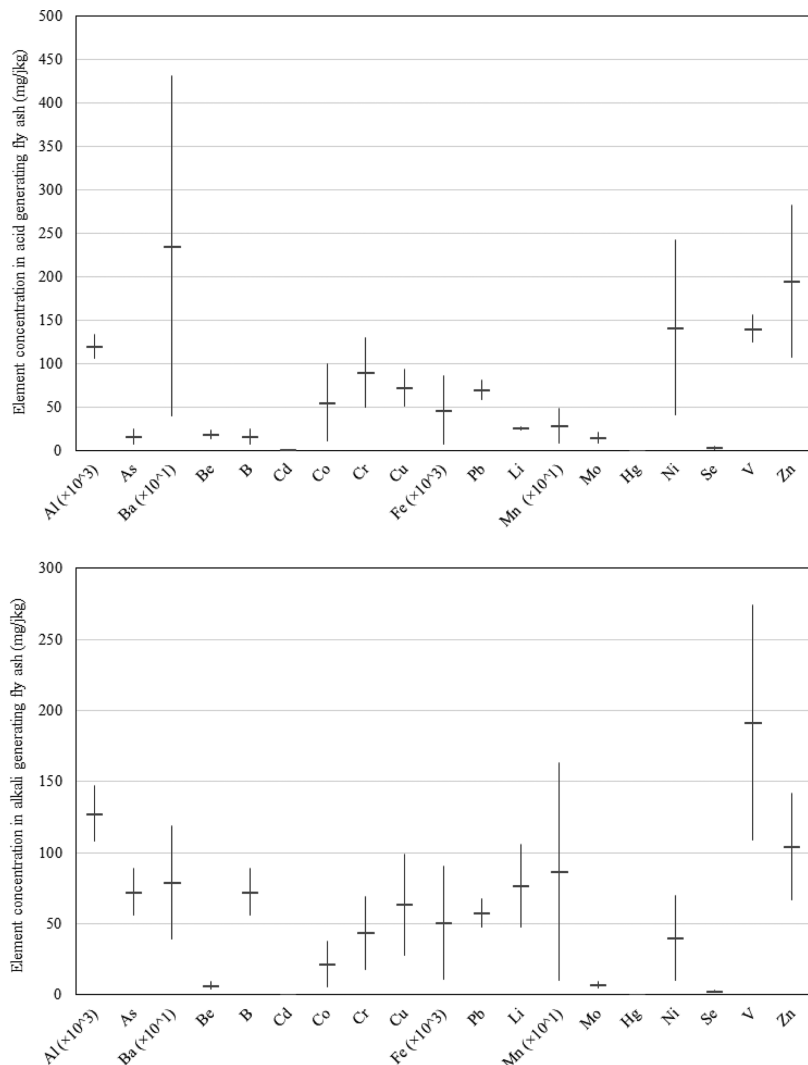


Fig. 2. Element concentrations in acid and alkali fly ash generated in Australia. The horizontal line indicates median value and the vertical line indicates range of the elemental concentrations.

가장 높았다. 이는 비산재에 함유된 B의 농도와 밀접한 관련이 있으며 알칼리 용액에서는 Se 함량이 높으며 As와 같은 경향을 나타냈다<sup>24)</sup>.

자연발생적인 방사성물질(Naturally Occurring Radioactive Material, NORM)은 환경 어디에나 존재한다. NORM은 모래, 점토, 토양, 암석, 광석, 원자재, 제품, 부산물, 재활용 잔류물 등 인간이 사용하거나 가공하는 것들에 광범위하게 퍼져 있다. 석탄재의 NORM 농도는 평균 0.4 Bq/g로 전반적으로 낮은 것으로 보고된다. 따라서 비산재와 바닥재는 시멘트, 콘크리트, 벽돌, 도로 등 호주 내 토목 및 건설 용도로 많이 사용된다. 석탄재의 방사성핵종 농도는 일반적으로 기존 콘크리트 및 벽돌과 같이 건축에 사용되는 재료와 유사하다. 건축 재료로 비산재를 사용하면 주로 <sup>226</sup>Ra의 방사성 딸핵인 기체 라돈의 흡입에 의한 방사선 피폭의 잠재적 위험이 증가할 수 있다. 미세입자인 비산재는 바닥재와 비교하여 휘발성 방사성핵종인 <sup>210</sup>Po과 <sup>210</sup>Pb의 농도가 약간 높았으나 주로 토양 배경농도 범위 내에 존재한다. 우리나라는 토양에서 흔히 발견되는 원소이며 토양에서의 농도는 암석 형태에 따라 다양한 범위로 존재한다<sup>23)</sup>. 토양에 배경 함량으로 존재하는 방사성 원소와 석탄재의 방사성 원소 함량을 비교했을 때 미세 입자와 중간 입자 비산재의 방사성 원소는 토양의 배경농도 범위 내에 존재하거나 약간 높은 농도로 존재하였으며 바닥재의 경우는 모두 토양의 배경농도 범위 내에 존재했다(Fig. 1)<sup>23)</sup>.

석탄재의 backfill과 관련해 발생할 수 있는 환경 문제는 수계의 오염이 있다. Mt Piper 발전소에서 석탄재 매립과 관련한 환경 문제 보고서에 따르면 지하수 모니터링 결과 염도는 <300 mg/L TDS로 낮으며 pH는 5 ~ 6으로 약산성을 나타냈다. 2001년 지하수 모니터링 보고서에 따르면 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, B, Ni, Mn, Fe이 다소 높은 함량으로 나타났으며 석탄광과 인접한 몇몇 관정에서 미량원소의 함량이 높은 것으로 나타났다. 염의 용탈과 관련된 지표인 Cl<sup>-</sup> 함량은 염류로 처리된 석탄재가 지하수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다<sup>25)</sup>.

농경지에 석탄재 활용 시 문제점은 미량 원소에 의한 식물 독성이다. 비산재에 의해 발생할 수 있는 문제는 붕소에 의한 식물 독성인데 식물 독성은 비산재가 다량으로 적용될 경우에만 발생한다. 비산재를 39 t/ha를 초과하지 않는 비율로 처리할 경우 카놀라에 대한 독성이 관찰되지 않았다. 호주 비산재는 주요 독성 원소(As, Cd, Hg, Mo, Pb, Se 등)와 환경오염 측면에서 독성

원소(Cr, Cu, Ni, V, Zn, F 등)들이 비교적 낮은 농도로 존재하였다. 따라서 비산재 처리에 의한 토양 및 지하수 오염의 위험은 제한적이라고 할 수 있다<sup>26)</sup>. 그러나 비산재는 일반적으로 시간이 지나면서 토양에 축적되어 먹이사슬이나 지하수로 들어갈 수 있다. 이러한 일이 발생할 가능성은 주로 비산재의 금속 농도, 토양에 원래 존재하는 원소들의 농도, 비산재로부터 원소의 이동성 및 토양으로부터 원소의 이동성, 원소의 식물 흡수에 따라 달라진다. 따라서 농업용으로 적용되는 비산재는 주요 위험 원소들(As, B, Cd, Hg, Mo, Pb, Se)과 추가적인 독성 원소들(Cr, Cu, Ni, Ni)의 함량이 낮아야 한다. Fig. 2는 호주 산성 비산재와 알칼리성 비산재에 존재하는 원소의 함량 범위를 보여주고 있다. 비산재의 미량원소 농도 범위는 대부분 일반 비료에서 검출되는 농도보다 낮고, 어떤 경우에는 오염되지 않은 토양에서 검출되는 것보다 더 함량이 낮게 나타났다. 특히 알칼리 비산재는 일반적으로 산 비산재보다 Cd, Ni, Pb의 미량 원소 수준이 낮다<sup>27)</sup>. 따라서 농업용으로 비산재를 사용할 때 미량원소로 인해 독성을 나타내는 경우는 많지 않을 것이다.

## 6. 결 론

호주 석탄재는 시멘트, 콘크리트, 도로용 재료, 농업용 등으로 활용되고 있으나 재활용율은 높지 않다. 호주 석탄재는 독성 미량원소의 함량이 비교적 낮고 방사성 원소의 함량도 토양 배경농도 수준이므로 재활용 범위가 확대될 수 있다. 한국은 석탄을 주로 호주, 러시아, 인도네시아 등에서 수입하고 있으며 호주에서 2018년 41.5 Mt의 유연탄과 2.1 Mt의 무연탄을 수입하여 전체 석탄 수입량의 31.5%를 호주에서 수입하였다. 한국은 호주에서 가장 많은 양의 석탄을 수입하기 때문에 석탄재의 특성도 알칼리성이며 미량 원소의 함량이 낮은 호주 석탄재와 비슷할 수 있다. 따라서 한국 석탄재도 독성 원소의 함량이 높지 않을 것으로 예상되며 다양한 방법으로 활용이 가능할 것이다. 석탄재는 폐기물이라는 인식이 높아 재활용에 대한 거부감이 있으나 폐기물 처리 비용을 줄이고 환경에 부담을 감소시키기 위해서는 다양한 방법으로 재활용할 수 있는 방안을 마련해야 한다.

한국은 2016년 석탄재 배출사업자의 재활용 지침을 마련하였으며 석탄재의 재활용 용도를 레미콘 등 콘크리트 혼화재, 시멘트 원료, 경량골재, 시멘트 2차제품

원료, 성토용골재, 복토용골재, 도로용골재, 목재 접착제 원료, 시멘트클링커 제조원료 대체용, 배수층 골재, 요업용 재료, 고무·플라스틱 충전재, 도로·연마제·단열제 원료, 제철제강 원료, 상토비료원료로 명시하고 있다. 또한 재활용 목표율을 75%로 제시하여 석탄재의 안전성이 확보된다면 석탄재의 재활용이 확대될 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단-탄소자원화 국가전략프로젝트사업의 지원을 받아 수행함. (NRF-2017M3D8A2084752)

### References

- Bhattacharya, S. S. and Kim, K. H., 2016 : Utilization of coal ash: Is vermitechology a sustainable avenue?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, pp.1376-1386.
- Heidrich, C., Feuerborn, H. J., and Weir, A., 2013 : Coal combustion products: a global perspective. In *World of Coal Ash Conference*, pp.22-25.
- ADAA, 2016 : Ash Development Association of Australia, Annual Membership Survey Results.
- Jayaranjan, M. L. D., Van Hullebusch, E. D., and Annachhatre, A. P. 2014 : Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13, pp.467-486.
- Wang, A., Zhang, C., and Sun, W., 2004 : Fly ash effects: II. The active effect of fly ash. *Cement and concrete research*, 34, pp.2057-2060.
- Cement Australia, <https://www.cementaustralia.com.au/>, July 02, 2019.
- Flyash Australia, Product data sheet microash, [http://www.flyashaustralia.com.au/\\_respub/\\_site/\\_img/content/Microash%20Product%20Data%20Sheet%20-%20Final.pdf](http://www.flyashaustralia.com.au/_respub/_site/_img/content/Microash%20Product%20Data%20Sheet%20-%20Final.pdf), July 02, 2019.
- <https://www.wagner.com.au/main/what-we-do/cement,-flyash-lime/products/bulk>, July 02, 2019.
- <http://www.independentcement.com.au/>, July 02, 2019.
- Jang, J. G., Ji, S., and Ahn, J. W., 2017 : Utilization of circulating fluidized bed combustion ash and related specifications for mine backfills, *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, 26, pp.71-79.
- Yoo, J. C., Ji, S. W., Ahn, J. W. et al., 2017 : A case study of mine environmental restoration using coal ash, *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, 26, pp.80-88.
- Grice, A. G., Finn, T., and Smith, P. A., 1999 : Backfilling in Australian mines: a new application in underground coal operations, *Australian Coal Review*, pp.10-14.
- BHP Billiton, 2014 : Olympic Dam Annual Report.
- Millar, D. and Holz, B., 2010 : Ipswich Motorway upgrade-Filling of abandoned coal mines, *Queensland Roads Edition No. 9*. pp.46-61.
- Holz, B., 2011 : The use of pond ash in the filling of abandoned coal mines under the Ipswich Motorway, *Coal Ash Matters*, Ash Development Association of Australia.
- Environmental Justice Australia, <https://www.envirojustice.org.au/our-work/community/air-pollution/resources/coal-ash-dumps-and-community-health/>, July 02, 2019.
- Ward, C. R., French, D., Jankowski, J. et al., 2006 : Use of coal ash in mine backfill and related applications, *Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development*.
- Kogan Creek Power Station. <https://www.csenergy.com.au/what-we-do/generating-energy/kogan-creek-power-station>, July 02, 2019.
- Aiken, J. T. and Heidrich, C., 2015 : Australian Marketing Perspective Coal Ash for Agriculture. In *World of Coal Ash (WOCA) conference in Nashville, TN-May* pp.5-7.
- Yunusa, I. A., Loganathan, P., Nissanka, S. P. et al., 2012 : Application of coal fly ash in agriculture: a strategic perspective. *Critical reviews in environmental science and technology*, 42, pp.559-600.
- Ukwattage, N. L., Ranjith, P. G., and Bouazza, M., 2013 : The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon). *Fuel*, 109, pp.400-408.
- Azzi, M., Day, S., French, D., Halliburton, B. et al., 2013 : Impact of Flue Gas Impurities on amine-based PCC Plants-Final Report.
- Heidrich, C., Brown, S., and Collier, D., 2011 : Naturally occurring radionuclides in Australian coal combustion products (CCPs). *Proceeding 2011 World of Coal Ash Conference*, pp.9-12.
- Jankowski, J., Ward, C. R., French, D. et al., 2006 : Mobility of trace elements from selected Australian fly ashes and its potential impact on aquatic ecosystems. *Fuel*, 85, pp.243-256.
- SKM, 2010: Mt Piper Poert Dysyion Ash Placement Project, Appendix D Hydrology and water quality.
- Ukwattage, N. L., Ranjith, P. G., and Bouazza, M., 2013 : The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in

agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon). Fuel, 109, pp.400-408.

27. Yunusa, I. A. M., Eamus, D., DeSilva, D. L. et al., 2006 : Fly-ash: an exploitable resource for management of Australian agricultural soils. Fuel, 85, pp.2337-2344.

---

### 박진희

- 서울대학교 농화학 학사
  - 서울대학교 환경지구화학 석사
  - Univ. of South Australia Environmental Science 박사
  - 현재 충북대학교 환경생명화학학과 조교수
- 

---

### 지상우

- 한양대학교 지구환경시스템공학과 박사
  - 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
  - 당 학회지 제25권 3호 참조
- 

---

### 신희영

- 한양대학교 자원공학과 박사
  - 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
  - 당 학회지 제25권 3호 참조
- 

---

### 조환주

- 고려대학교 지질학 학사
  - 고려대학교 지질공학 석사
  - 고려대학교 지질공학 박사
  - 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 선임연구원
- 

---

### 안지환

- 현재 한국지질자원연구원 탄소광물화사업단 단장
  - 당 학회지 제27권 3호 참조
-