

## 화력발전소 바닥재의 수용성 금속이온 용출가능성 조사

서효식<sup>1,2</sup> · 고동찬<sup>1,2</sup> · 최한나<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 기후변화대응본부 지하수환경연구센터

<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 지질과학

## Investigation on the Leaching Potential of Water-Soluble Metals from Bottom Ashes in Coal-fired Power Plants

Hyosik Seo<sup>1,2</sup> · Dong-Chan Koh<sup>1,2</sup> · Hanna Choi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea

<sup>2</sup>Geological Science, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

### ABSTRACT

Bottom ash generated from thermal power plants is mainly disposed in landfills, from which metals may be leached by infiltrating water. To evaluate the effect of metals in leachate on soil and groundwater, we characterized bottom ash generated from burning cokes, bituminous coal, the mixture of bituminous coal and wood pellets, and charcoal powder. The bottom ash of charcoal powder had a relatively large particle size, and its wood texture was well-preserved from SEM observation. The bottom ash of charcoal powder and wood pellets had relatively high K concentration from total element analysis. The eluates of the bottom ash samples had appreciable concentrations of Ca, Al, Fe, SO<sub>4</sub>, and NO<sub>3</sub>, but they were not a significant throughout the batch test. Therefore, it is considered that there is low possibility of soil and groundwater contamination due to leaching of metal ions and anions from these bottom ash in landfills. To estimate the trend of various trace elements, long-term monitoring and additional analysis need to be performed while considering the site conditions, because they readily adsorb on soil and aquifer substances.

**Key words :** bottom ash, thermal power plants, landfill, infiltrate, leaching components

### 1. 서 론

급속한 산업화로 인한 에너지 사용량 급증과 더불어 기후 위기의 심각성이 전 세계적으로 주목받고 있다. 화석 연료로 인한 탄소배출의 저감 노력이 그린 뉴딜 프로젝트로 이어지고 있으나, 우리나라는 여전히 에너지 공급의 상당 부분을 석탄과 원유에 의존하고 있다(Sonnenschein and Mundaca, 2016). 국내의 전체 발전설비용량 중 화력발전은 40% 정도 차지하며, 이때 사용되는 유연탄과 무연탄 양은 연간 약 7,000만 톤으로 보고되고 있다

(KOSIS, 2020). 화력 발전에 사용되는 연료는 유연탄과 무연탄 이외에도 중유, 경유, LNG 등이 있고, 화석연료 사용으로 인해 대기 중으로 배출되는 물질 또한 분진, 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물 등으로 다양하다. 연소 후 남은 물질은 석탄재(coal ash) 또는 석탄회(石炭灰)라고 부르며, 국내에서는 약 70% 정도 재활용되고 있다(NIER, 2011).

배출되는 석탄재는 포집되는 장소에 따라 비산재(fly ash) 및 바닥재(bottom ash)로 구분할 수 있다(박동원 외, 2013). 비산재는 화석연료 연소 후 발생하는 부산물로서 집진기에서 포집되는 미분말로 평균 입경은 20~30 μm 정도인 것으로 알려져 있다(정장희, 2001). 바닥재는 연료가 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 노벽, 과열기 등에 부착되어 있다가 보일러 하부의 호퍼(hopper)에서 떨어져 수집된다. 바닥재는 비산재에 비해 비교적 굵은 입자 형태가 나타나고 입경은 0.5~10 mm 정도로 크기가 다양하며(정장희, 2001), 전체 석탄재 발생량 중 약 30%를 차

주저자: 서효식, 석박사통합과정

공저자: 고동찬, 한국지질자원연구원 책임연구원

\*교신저자: 최한나, 한국지질자원연구원 선임연구원

Email: pythagoras84@kigam.re.kr

Received : 2022. 01. 21 Reviewed : 2022. 01. 27

Accepted : 2022. 02. 17 Discussion until : 2022. 04. 30

지하는 것으로 알려져 있다(NIER, 2011). 비산재는 국내에서 콘크리트 혼화재, 시멘트 클링커 제조원료 등 다양한 형태로 재활용이 이루어지고 있는 것에 비해, 바닥재는 대부분 발전소 부지 내 특정 장소에 매립 처분되고 있다(Cheriaf et al., 1999; Churchill et al., 1999; Chimenos et al., 2000). 바닥재 역시 경계블록, 호안블록, 흡착제, 구조물 뒷채움재 등 콘크리트 골재 대체재로서 활용하기 위한 연구가 진행되고 있으나, 아직까지는 설비재의 강도 약화 등 여러 단점으로 인해 활용용도가 제한적인 편이다(장용철 외, 2009). 발전소 가동에 따라 지속적으로 배출되는 석탄재와 분진은, 매립지에 장기간 보관되는 동안 지진, 계절 변화, 배수 등의 자연적·인위적 요인으로 인해 차폐층(cover liner)을 통과하여 침투한 강수와 반응을 일으킬 수 있다. 강수와 반응한 바닥재로부터 수용성 금속의 용출 및 중금속 성분의 농축이 발생한 매립지 유출수가 수계로 흘러들어갈 경우 총용존고형물(Total dissolved solid, TDS), 금속먼지 등의 성분이 퇴적되어 토양·지하수 환경에 오염을 일으킬 가능성이 있다(Wang et al., 2008; 박동원 외, 2013).

많은 국가에서는 폐기물관리법을 기준으로 비산재 및 바닥재의 오염물질에 대해 납(Pb), 구리(Cu), 카드뮴(Cd), 아연(Zn) 등의 금속 및 중금속 잔여물에 대한 특성 평가를 선행한다. 석탄재의 콘크리트 및 시멘트 대체제로의 활용은 특성평가가 충분히 수행된 뒤 이루어진다(Fytianos et al, 1998; Chimenos et al., 2000). 비산재에 대한 실험 가운데, Fytianos et al.(1998)은 pH 4 질산 용액에서 칼슘(Ca)의 용출능이 8.85%이며 그 이외에도 크롬(Cr): 11.325%, Pb: 10.5%, Cd: 6%, Zn: 1.7% 정도가 됨을 보고하였다. Singh(2013)은 칼럼시험을 통해 Cr, Cd, Al(알루미늄), V(바나듐), As(비소) 등의 금속이 검출한계(0.001 mg/L) 미만으로 나타남을 보고하였다. 또한, Wang et al.(2008)은 중국 스즈이산시(Shizuishan city) 석탄 화력발전소의 바닥재를 대상으로 증류수를 용매로 용출 시험한 결과 Cd, As, Pb, Cr, Co(코발트), Ni(니켈), Mo(몰리브덴), Hg(수은), Se(셀레늄), Th(토륨) 등 대부분의 성분들이 시험 초기 12시간 내에 87% 이상 용출되었다고 분석하였다. 국내에서 수행한 연구로는 고태훈 외(2010)가 태안 화력 발전소 바닥재의 재활용 가능 여부를 검토하기 위한 용출특성 평가를 진행하였다. 해당 연구에서 대부분의 토양·수질 분석항목들에 대한 바닥재 용출 성분의 오염 가능성은 존재하지 않으며, 황산염(SO<sub>4</sub>)에 대한 용출농도만 상대적으로 높음을 밝혔다. 박동원 외(2013)는 바닥재와 결합하고 있는 Cd, Pb, As, Zn, Hg,

B(붕소), Ti(타륨)이 혐기성의 환원 환경에서 주변으로 용출될 가능성이 높다고 보고하였다. 이와 같은 연구들을 통해, 바닥재에 함유된 물질이 복잡한 물리·화학적 특성을 가지고 있으며, 용출 초기단계와 환원환경에서 수용성 금속 성분의 용출로 기인한 인근 수계 및 생태계에 영향을 미칠 가능성이 존재한다고 판단하였다(전미희와 배성근 2006). 바닥재의 구성 성분은 연료물질의 종류, 연소 방법 등에 따라 크게 나뉘며, 주로 석회(CaO), 철산화물(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 실리카(SiO<sub>2</sub>)와 미량의 중금속으로 되어있는 것으로 알려져 있다(Eisenberg et al., 1986). 이 외의 미량 성분들은 여러 환경적인 요인에 의해 변할 수 있으며, 독립적인 원료를 통한 실험 자료는 토양·지하수에 영향을 미칠 수 있는 바닥재를 검토하는 기초적인 연구로서 기여할 수 있을 것으로 본다.

이 연구는 매립지 바닥재의 금속이온 및 음이온 성분의 강우에 대한 용출가능성 평가를 수행하였다. 대조군으로는 강원도 C 숯가마 공장의 바닥재를 사용하여 바닥재와 혼합연소하는 바이오매스의 특성을 이해하고자 하였으며, 종류별 바닥재 표면의 물리·화학적 특성 및 총함량을 비교하였다. 초기 용출성분과 장시간 반응에 따른 미량성분에 대한 정확한 이해가 있다면, 바닥재의 매립 및 재활용 시 토양·지하수 환경에 미칠 수 있는 직접적인 물리·화학적 영향을 최소화 할 수 있을 것이다.

## 2. 실험재료 및 방법

연구에서 사용한 바닥재는 유연탄(flaming coal, namely, bituminous coal), 코크스(cokes), 그리고 대체 에너지로 주목 받고 있으며 공시재료로 안정성 있는 바이오매스인 목재펠릿(Yang et al., 2018)을 유연탄과 혼합 제작한 연료(flaming coal and wood pellets)를 사용하여 실험하였다. 대조군으로는 숯공장에서 연소 후 냉각 침전된 숯가루를 사용하였으며, 해당 물질은 자연기원 연소물로서 목재펠릿과 연소특성을 비교할 수 있을 것으로 판단하였다. 연소물의 종류에 따라 바닥재의 투수성과 침출가능한 수용성 금속성분 및 이온성분을 비교하고자 표면분석, 총함량분석, 용출실험을 수행하였다. 표면분석은 물리·화학적 특성을 확인하고자 입도, SEM, EDS 분석을 수행하였으며, 총함량분석을 통해 화학적 조성분과 수용성 성분의 존재와 함량을 판단하고자 하였다. 용출 성분은 연속 추출실험과 비교하여도 타당한 이론적 연관성이 있는 배치 테스트(John et al., 1977)로 진행하였다.

## 2.1. 시료 준비 및 전처리

이 연구에서 사용한 숯가루의 바닥재(GE-1)는 강원도 C 숯가마 공장의 분진 포집장치에서 채취하였다. 숯가마 공장의 숯가루와 탄화폐기물은 고도처리 후 재활용, 혹은 폐기물 전문업체를 통한 처리가 이뤄지지만, 소형작업장 등에서 발생된 폐기물은 처리 전 매립적치 되는 경우도 존재한다. 따라서 이들 성분은 바닥재와 마찬가지로 매립지 주변의 토양·지하수 환경에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단하여 자연기원 연소물의 용출 가능성분을 보여주는 대조군으로 활용하였다.

화력발전소에서 사용하는 석탄 연료는 200 mesh의 미분기로 분쇄하여(약 70-80% 통과하는 수준으로 거름)  $1,500 \pm 200^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 부유상태로 연소시키며, 연소가 진행되는 동안 노벽, 과열기 및 재열기 등에 부착되었던 석탄회가 보일러 하부의 호퍼에 낙하하여 포집된 것이 바닥재이다(Park and Kim, 2012). 이 연구에서는 전라북도에 위치한 모 화력발전소의 보일러 내부에 냉각 포집된 바닥재를 연소물질의 종류(코크스, 목재펠릿과 유연탄, 유연탄) 별로 각 저장소에서 채취하여 실험에 사용하였다.

숯가루의 바닥재(GE-1), 코크스의 바닥재(GE-2), 목재펠릿과 유연탄의 혼합 연료 바닥재(GE-3), 유연탄의 바닥재(GE-4) 시료들은 폐기물 공정 시험법의 시료 조제 방법에 따라,  $100 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 폴리에틸렌 바트(vat)위에 항량으로 24시간 동안 건조한 후, 눈금간격 1 mm와 0.5 mm체에 차례로 걸러 0.5 mm 이내 입도를 가지는 분말만을 시료로 사용하였다(환경부고시 제2016-196호).

바닥재 시료들의 주요이온 및 미량이온 성분들의 함량 분석은 한국기초과학지원연구원 오창 본원에 전성분 분석을 의뢰하였다. 전처리를 통해 분리 및 회수된 바닥재의 성분에 대하여는 다검출기 유도결합플라즈마 질량분석기

(MC-ICP-MS, AXIOM MC model, Thermo Elemental Ltd)를 활용하여 분석이 이루어졌다.

시료의 입도분포 균질성을 판단하고자 연세대학교의 이과대학 공동기기실 Mastersizer 2000 장비(MS2000, Malvern, software version v5.60)를 사용하여 각 고체 시료의 직경을 측정하였으며 실험은 세 번 수행(triplicate)하여 평균값을 사용하였다. 입도분석은 1 L의 증류수에 1 g의 분말시료를 투입한 뒤 물질을 충분히 혼합시켜 습식분산 레이저회절 방법으로 측정하였다(분산장치: Hydro 2000).

바닥재의 기본적인 물리화학적 조성을 분석하기 위해 서울대학교 기초과학공동기기원의 주사전자현미경(SEM: JSM-7100F, JEOL Ltd., USA)과 에너지분산형 분광분석(EDS: Aztec Software, Oxford Instruments, UK)장비를 이용하여 표면을 관찰하였다. 시료의 표면은 백금으로 코팅(Sputter Coater 108 auto, Cressington, UK)하여 전자현미경 분석을 하는 동안 시료가 이온화 되는 것을 억제하고자 전처리하였다.

## 2.2. 강우 시 바닥재의 중금속 용출가능성

매립된 바닥재로부터 강우사건 시 수용성 금속이 용출될 수 있는지 토양·지하수 오염 가능성을 평가하기 위하여 강수와와의 반응을 모사하기 위한 배치테스트를 진행하였다. 배치테스트는 오염물질의 잠재적 용출 가능성(leaching potential)을 평가하는데 기본 틀로 사용되어진 방법(John et al., 1977)이다. 연구에 많이 응용되는 표준 용출시험법은 국내표준용출실험법(Korean Standard Leaching Test, KSLT)와 미국 인공강우 용출실험법(US STCLP) 등이 있다. 이 실험법은 제시된 용출실험법보다 반응 시간이 길고 용매의 양이 많다는 특징이 있어, 여름철(6~8월) 대부분의 강우가 집중되고 장마가 지속되는 국내의 환경을 더욱 잘 나타낸다고 판단하였다.

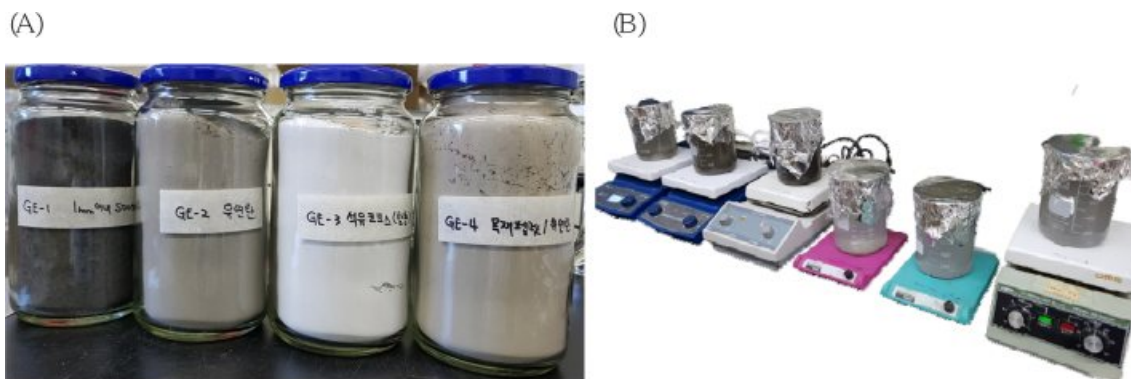


Fig. 1. Powder image of bottom ashes (A), and prepared GE-1, GE-2, and GE-3 samples for dual batch test (B).

실험에 사용한 용액은 자연강수의 약산성 범위를 반영하기 위하여 pH 5.8-6.3으로 조절한 용매(증류수)를 활용하였으며, 1 L의 증류수를 유리비커(Pyrex, Borofloat)에 담아 4 종류의 GE시료를 1 g씩 각각 혼합하였다. 각 배치는 두 세트(duplicate)씩 준비하여 96 시간동안 반응(시료채취 간격은 10, 20, 30, 40, 50, 60 분, 1, 1.5, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 96 시간)시켰다(Fig. 1(b)). 바닥재 입자들이 비커 바닥에 가라앉지 않고 용액에 고르게 분포하도록, 실험을 수행하는 동안 테프론 재질의 교반자석을 비커에 넣고 약 250 rpm으로 교반(MSH-20D, DAIHAN-brand)하였다. 실험이 진행되는 동안 용액의 증발을 억제하기 위해 선상저밀도 폴리에틸렌 비닐(LLD-PE)로 비커의 입구를 덮어두었다. 96시간 동안 진행되는 실험을 동시에 수행하기 위해 여러 종류의 디지털 자력 교반기를 사용하였으나, 실험을 수행하기 전 교반기 위에 교반자석을 올려 MSH-20D 교반기의 속도와 일치시키는 작업을 수행하였다.

실험시작 1시간 이내의 시료 채취 횟수가 많은 이유는, 초기에 고-액 반응이 활발하게 이뤄지다가, 12시간 이후로는 시료와 용액이 점차 평형을 이루며 용출속도가 안정화 될 것이라고 판단하였기 때문이다(전미희와 배성근, 2006). 배치테스트 반응 12시간 이후로는, 평형용액의 산화반응이 진행되며 수산화물과 이온성분의 농도가 어떻게 변화하는지를 이해하고자 하였다. 시료 분취량은 10 mL로, 채취한 즉시 0.45  $\mu\text{m}$  공극사이즈의 유리섬유여과지로 여과한 뒤, 농질산을 2~3 방울 첨가하여 냉암소에 보관하였다. 실험을 통해 얻은 용출액 시료는 폐기물 공정 시험법 기준에 따라 전처리를 진행 한 후 ICP-AES(Ultima 2C, Horiba Jobin Yvon)와 ICP-MS(DRC II, Perkin Elmer)를 사용하여 Al, Ca, K, Fe(철), Mn(망간), Si(珪素), F(불소),  $\text{NO}_3$ (질산염),  $\text{SO}_4$ 과 같은 금속성분 및 이온성분들을 분석하였으며, 음이온 분석 시료는 4°C 이하에서 냉장 보관 후 연세대학교 지하수토양환경연구소에서 IC(DX-80, Dionex)를 사용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 바닥재의 입도와 물리적 특성 분석

이 연구에서 사용된 바닥재의 입도는 Table 1과 같다. GE-1은 나무를 연소하는 과정에서 형성된 분진으로, 체에 걸렸어도 모래의 직경으로 분류되는 입자가 11.3%로 GE-2와 GE-3에 비해 약 2배 가까이 조성이 높게 나타난다. GE-2와 3 시료는 점토의 직경으로 분류되는 입자가 더 많이 관찰되며, GE-3에서 점토 직경의 입자들이 더욱 많이 존재하는 것으로 분석되었다. GE-1 시료는 산불과 같이 자연적인 과정에 의해 발생할 수 있는 분진이며, 화력 발전소 바닥재와 비교하였을 때 6 mm 이내 직경으로 분쇄하여 연소되는 목재펠릿의 연소특성을 보여줄 수 있다. 그에 비해, GE-2와 3 시료는 코크스(cokes)의 바닥재, 유연탄 및 목재펠릿(flaming coal and wood pellet)의 바닥재로, 표면적이 훨씬 넓고 연소효율도 높아 분진의 입도가 상당히 작은 것으로 추정된다.

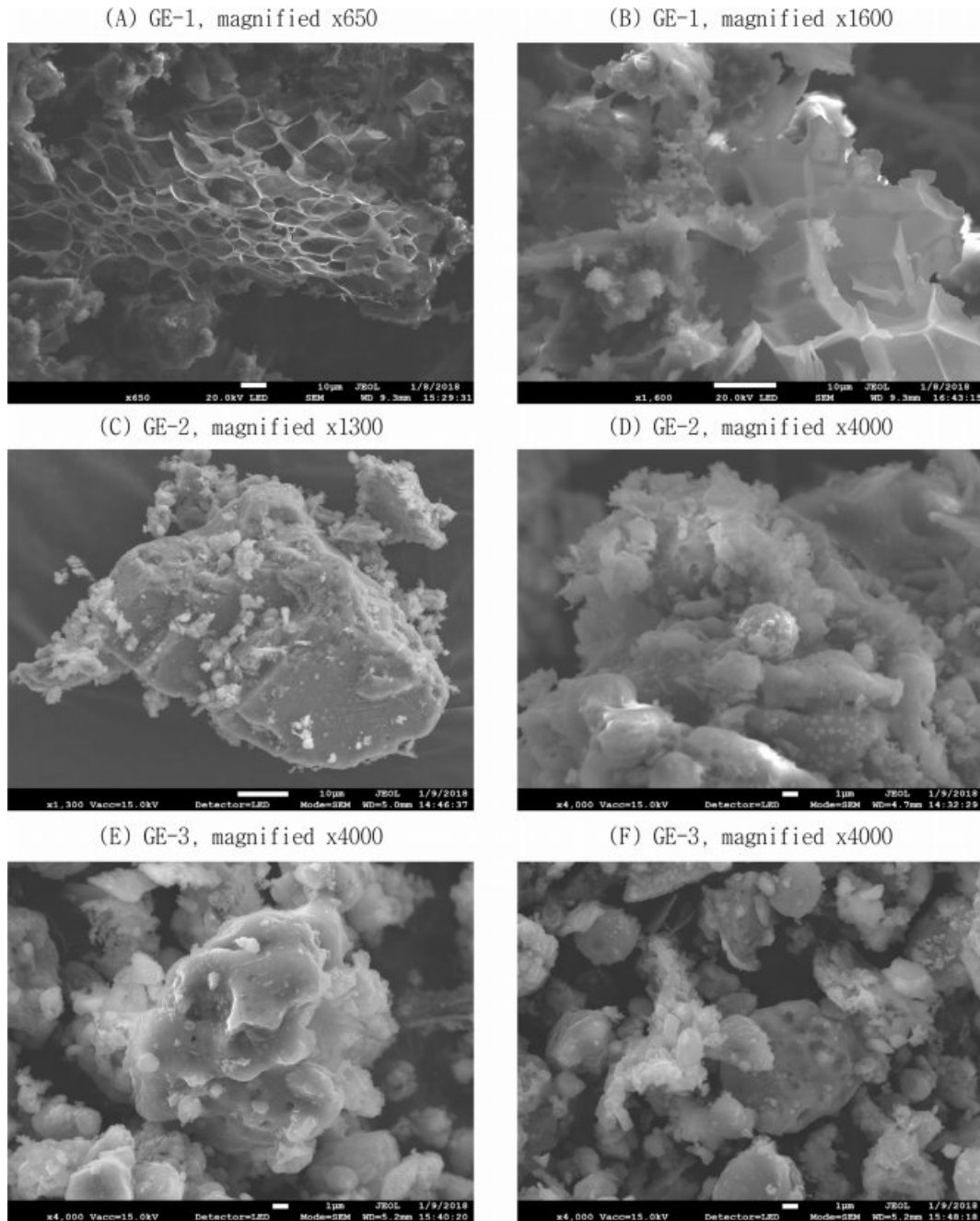
분진 시료들의 표면특성을 이해하면 표면적에 따른 용출가능성과 조성 물질들에 대한 이해가 가능할 것으로 판단하여 주사전자현미경 관찰을 수행하였다(Fig. 2). 앞서 다룬 것처럼 GE-1은 조성이 큰 입자들이 상당량 분포하여, 650배와 1600배 확대하여 관찰하였다. 그에 비해 GE-2는 상대적으로 입자가 조밀하여 1300배와 4000배 확대하여 관찰을 수행하였다.

GE-3는 입자를 관찰하는 것이 4000배에서 가장 잘 보인다고 판단하여 해당 확대배율로만 SEM 관찰을 수행하였다. GE-1은 참나무를 원형 그대로 활용한 공장에서 나온 숯가루의 바닥재이며, 연소과정에서 탄화되어 날아간 목질조직이 분진포집장치에서 획득된 것이다. Fig. 2(a)처럼 나무 섬유질의 그물무늬가 잘 관찰된다. 이는 상대적으로 저온이며 온도가 일정하게 유지되지 않는 환경에서 형성된 브라운 카본으로 칭할 수 있다(Choung et al., 2016; Choi et al., 2021).

GE-2와 3은 화석연료 연소로 대표되는 블랙카본으로, 고온의 연소과정에서 형성되며 이들은 탄소와 광물이 불

**Table 1.** Classification of samples following by German soil systematics

Size distribution (mm unit)	Classification	Texture classification (Unit : %)		
		GE-1	GE-2	GE-3
2-0.062	Sand	11.3	6.24	6.60
0.062-0.002	Silt	85.3	86.3	82.3
below 0.002	Clay	3.40	7.46	11.1
		100	100	100



**Fig. 2.** SEM images of bottom ash from GE-1 (charcoal powder), GE-2 (cokes), and GE-4 (mixed flaming coal and wood pellets).

어서 관찰된다. Fig. 2(c)는 GE-2 시료에 혼합되어 있는 광물과 미세분진이 보이며, Fig. 2(d)는 사진 중앙과 왼쪽 뒤편으로 구형의 탄소산화물이 관찰된다. Fig. 2(e)와 (f)의 GE-3 사진은 다공성 탄소산화물이 상당히 많이 관찰되는데, 이는 혼합된 목재 펠릿이 연소되며 기체가 빠져나간 형성된 다공질인 것으로 여겨진다.

표면의 화학조성은 Fig. 2(A), (C), (E)의 각 5개 지점

을 에너지 분산형 분광분석기(EDS)로 조사하여 평균값을 구하였다(Table 2). GE-1 표면의 주요 구성성분은 탄소와 산소로 측정되었고(99.7%), GE-2의 주요 구성성분은 탄소, 산소, 칼슘, 규소이며(94.3%), 알루미늄과 황이 각각 2%로 미량 측정되어, 특정 조건에서 강우와 반응하는 경우 황산염 및 알루미늄 금속성분의 용출이 나타날 수 있을 것으로 여겨진다. GE-3 표면의 주요 구성성분은 산소,

**Table 2.** Surface chemical composition of GE-1, GE-2, and GE-3 by SEM-EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) with % unit

Sample	C	O	Si	K	Ca	Cl	Na	Mg	Al	P	S	Ti	Fe	Cu	Zn	Ba	W	
GE-1	MAX	95.2	10.2	0.04	0.09	0.37	0.09											
	MIN	89.5	4.29	0.02	0.03	0.08	0.02											
	Avg.	92.0	7.68	0.03	0.06	0.21	0.06											
	SD	2.92	3.08	0.01	0.03	0.14	0.04											
GE-2	MAX	39.2	47.9	6.53	0.49	38.0		0.31	0.33	5.20	0.69	4.15	0.07	0.23	0.09	0.06	0.06	
	MIN	22.7	34.3	0.18	0.44	1.47		0.27	0.26	0.31	0.69	0.38	0.05	0.19	0.02	0.00	0.06	
	Avg.	31.9	44.2	3.19		15.0		0.29	2.55		2.05				0.05			
	SD	7.46	6.63	3.34		17.2		0.03	2.56		1.83				0.03			
GE-3	MAX	30.2	53.9	29.9	2.91	8.57	0.11	0.61	1.05	7.78	0.20	0.25	1.85	4.15	0.16	0.05	0.72	0.23
	MIN	19.7	29.6	10.4	1.01	1.09	0.11	0.23	0.40	3.31	0.10	0.06	0.30	0.49	0.00	0.00	0.10	0.09
	Avg.	25.1	43.4	15.7	2.17	3.94		0.38	0.73	5.45		0.84	1.59	0.05		0.28		
	SD	4.89	9.43	8.18	0.89	3.15		0.17	0.27	1.85		0.62	1.46	0.07		0.25		

MAX = maximum value, MIN = minimum value, Avg. = average value, SD = standard deviation

탄소, 규소, 알루미늄, 칼슘이며(93.6%), 칼륨과 철이 각각 2.17%, 1.59%로 미량 관측되었다.

### 3.2. 총합량 분석

바닥재의 총합량 분석(total elemental analysis)에서는 숯가루의 바닥재(GE-1), 코크스의 바닥재(GE-2), GE-3(유연탄 및 목재펠릿의 혼합연료의 바닥재) 외에도 추가적으로 유연탄의 바닥재(GE-4)를 측정하였다. GE-3에 대조하여, 혼합연료 중 유연탄에서 기원할 수 있는 성분을 확인하고자 GE-4(유연탄 연소 바닥재)에 대하여 총합량 분석을 수행하였다(Table 3).

총합량 분석 결과 바닥재의 주요 성분은 Ca, Al, Fe, S, K 등으로 나타났다. 표면의 화학적 조성과의 비교하면, 표면 중 Ca의 함량이 1.47~37.9%를 보이며 가장 높게 측정되었던 GE-2는 총합량 분석 결과에서도 Ca가 3,804 mg/L로 높게 나타났으며, 표면 중 Al의 함량이 3.31~7.78%로 가장 높게 측정되었던 GE-3의 Al의 총합량은 794 mg/L로 높게 나타났다(Table 2와 3). 대체적으로 Table 2에서 표면성분의 측정 결과 높은 함량을 보였던 시료는, Table 3의 총합량 분석에서도 해당 성분이 높게 측정되었다. 코크스의 바닥재(GE-2)에서는 시료표면의 S가 0.38~4.25%로 다른 시료들에 비해 상대적으로 높게 검출되어, 용출시험에서 SO<sub>4</sub>를 분석항목으로 고려하였다.

Mg은 유연탄 및 목재펠릿 혼합연료 바닥재(GE-3)에서 총합량이 199.7 mg/L로 가장 많이 측정되었으며, 숯가루 바닥재(GE-1) 및 유연탄 바닥재(GE-4)보다 현저하게 큰 것으로 나타나 발전소에서 연소 시 두 성분(GE-1과 4) 이외의 첨가제가 존재할 가능성이 있다고 여겨진다.

K은 표면적 화학 성분 분석에서 GE-2의 함량이 GE-1

보다 높게 측정되었지만, 총합량 분석 결과 GE-3 > GE-1 > GE-4 > GE-2 순으로 나타났다. 반응용액의 pH 조건 및 반응 시간 등의 환경에 따라 바닥재와 결합한 성분의 용탈정도에 차이가 있을 수 있다. 또한, Song et al. (2001)이 발표한 바와 같이, 생물연료 연소(Biomass burning)의 특징적 지시자로서 K가 검출되었을 가능성이 있을 것으로 여겨진다. GE-1은 참나무의 연소산물이며, GE-3는 목재펠릿 혼합연료의 연소산물로, 연소된 목재류로부터 기원한 K이 결합 형태에 따라 다소간 함량 차이를 보이며 나타난 것으로 보인다.

Zn는 4 종류의 바닥재 시료에서 모두 측정되었으며, 가장 많은 양을 함유한 시료 GE-3은 2.1 mg/L로, 대조군인 GE-1(1.9 mg/L)과도 비슷한 수치를 보이는 것으로 나타났다. Zn는 수용액에서 이동성이 높은 원소이므로, 매립 시 토양 복도에 대한 주의가 필요하며, 바닥재의 적재 시 매립량과 기간에 따라 정기적인 지하수 모니터링이 필요할 것으로 여겨진다.

Ti(티타늄)은 대조군 함량(9.6 mg/L)과 비교하였을 때, GE-2에서 1.6 mg/L로 매우 작게 측정되었지만, 유연탄을 연소시킨 바닥재 GE-3과 GE-4의 경우 39.4 mg/L, 54.3 mg/L로 상대적으로 높게 측정되었다. Ti는 지각 내 매장량이 매우 풍부한 전이 금속 원소이며, 용해성과 유해성은 매우 낮으므로 바닥재로부터 용출되어 오염을 일으킬 가능성은 매우 낮을 것으로 여겨진다.

Na와 P(인)은 대조군(P: 38.0 mg/L, Na: 39.2 mg/L, GE-1)과 비교하였을 때, GE-2에서 상대적으로 함량이 적게 관측되었으며 GE-3, 4 시료의 측정값이 크게 측정되었다. GE-3에서 측정된 값(P: 56.9 mg/L, Na: 72.6 mg/L)이 GE-4(P: 35.7 mg/L, Na: 27.3 mg/L)보다 큰 것으로

**Table 3.** Concentrations of total elemental analysis with mg/L unit

Elements	GE-1	GE-2	GE-3	GE-4
Ca	1823	3804	1690	1510
Al	186	24.9	794	893
Fe	161	17.9	286	371
S	79.6	702	277	272
Mg	76.8	193	200	110
K	270	22.2	383	90.5
Ti	9.6	1.6	39.4	54.3
P	38.0	0.8	56.9	35.7
Na	39.2	11.3	72.6	27.3
Sr	9.9	4.7	16.4	24.0
Ba	12.0	1.8	15.9	13.8
Mn	45.6	1.4	11.8	2.8
Cr	0.5	0.2	0.8	0.8
Zn	1.9	1.5	2.1	0.7
Cu	0.9	0.1	0.8	0.6
Co	0.1	0.0	0.2	0.4
Pb	0.1	0.0	0.6	0.3
As	0.0	0.1	0.3	0.1
Cd	0.0	0.0	0.0	0.0
Sn	0.0	0.0	0.0	0.0
Sb	0.0	0.0	0.0	0.0

보아 혼합 시료 중 목재펠릿의 P와 Na의 함량이 큰 것으로 여겨진다. 특히 Na는 지각의 주요구성 성분 중 하나이며 P의 함량도 다른 원소에 비해 낮게 측정되었으므로 용출로 인한 오염의 염려는 낮은 것으로 보인다.

Sr(스트론튬)은 GE-2의 경우, 대조군(9.9 mg/L)보다 낮은 수치(4.7 mg/L)로 측정되었으나 GE-3, 4 시료에서는 더 많은 함량을 가지는 것으로 측정되었다. GE-3(16.4 mg/L)과 GE-4(24.0 mg/L)를 비교하였을 때, GE-4의 함량이 GE-3보다 많은 것으로 보아 혼합시료 중 Sr은 대부분 유연탄에서 온 것으로 보인다.

Ba(바륨)은 GE-3, 4 시료와 대조군인 GE-1 시료에서 함량이 유사하게 검출되었으나, GE-2는 상대적으로 미량 검출되었다. 마지막으로, Mn은 대조군인 GE-1 시료를 제외하고는 상대적으로 매우 미량 검출되어, 추가적인 Mn의 용출 평가는 GE-1에 대해서만 진행하였다.

As, Cd, Sb, Sr는 미량 원소로 분류되나 바닥재에서 철 수산화물 혹은 망간 수산화물과 결합된 형태로 산출되는 원소이기 때문에 흡착 형태의 비율이 높아 바닥재의 장기간 매립 시 토양 내 잔류할 가능성이 있다. 따라서 대용량의 바닥재 폐기물 관리를 위해 이들 원소를 직접적으로 평가할 때는 산화·환원환경, 고·액비, 용출상태 등 폐기물 용출시험규정에 따라 추가적인 연구를 해야 할 필요

성이 있다고 판단한다.

### 3.3. 배치테스트

바닥재 시료를 사용하여 배치테스트(batch test)를 진행하였을 때 pH, Al, Ca, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>의 용출농도 결과를 시료채취 시간(0.17, 0.33, 0.5, 0.67, 0.83, 1, 1.5, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 96 hr)에 따라 Fig. 3에 나타내었다. 이 연구에서는 토양오염공정시험법에서 제시한 것과 같이 0.1N HCl 용매에 1 g : 5 ml의 비율로 용출시키거나, 폐기물 용출시험법에서 제시한 것과 같이 1 g : 10 ml(Lee, 1995; Park et al., 2006)의 고·액비로 용출시키는 방법을 적용하지 않았다. 그 이유는 매립처분된 폐기물로부터 용출된 유해물질의 종류와 농도를 평가하고 침출수의 수질을 사전에 예측하고자 짧게는 10분~길게는 24시간에 걸쳐 수행하는 폐기물 용출시험과 달리(Park et al., 2006), 이 연구는 장기간 매립된 바닥재의 지속적인 환경영향성과 용출성분의 변동추세를 파악하기 위해 수행되었기 때문이다. 초기에 고농도의 바닥재와 반응하면, 고농도 성분의 용출로 인해 실험용액의 희석이 요구될 것이며, 희석을 한다면 저농도로 용출되는 성분은 충분히 감지되지 않을 수 있다고 판단하여 1 g : 1000 ml의 고·액비를 적용하여 오랜 시간(96시간)에 걸쳐 배치테스트를 수행하였다.



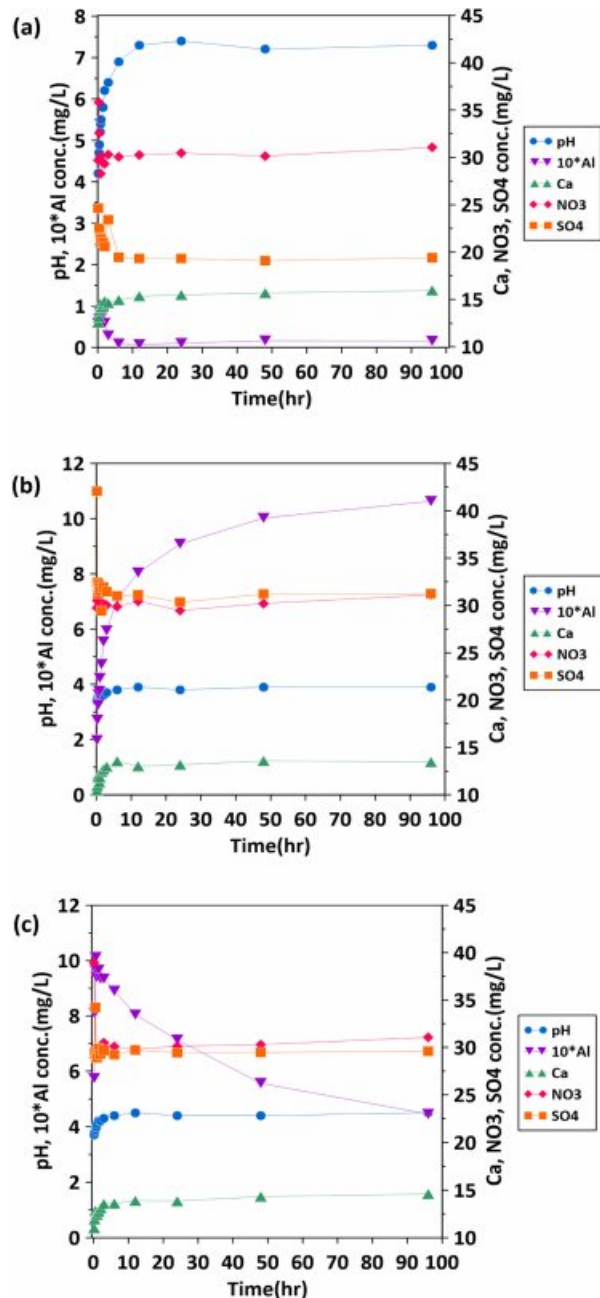
실험용액의 분석 결과에서 Al은 다른 이온에 비해 용출되는 농도가 매우 낮아  $10^*Al$ 로 나타내었다. 위 그래프는 (a): 숯가루의 바닥재(GE-1) 1.00 g; (b): 코크스의 바닥재(GE-2) 1.00 g; (c): 유연탄 및 목재펠릿의 바닥재(GE-3) 1.00 g을 증류수 1000 mL에 용출시켜 분석한 결과이며 대부분 총합량이 많을수록 용출 농도가 높게 측정되었다.

Table 3에서 바닥재 시료 총합량의 상당부분을 차지하던 Ca(GE-1: 1,823 mg/L; GE-2: 3,804 mg/L; GE-3: 1,690 mg/L)과 Al(GE-1: 186 mg/L; GE-2: 24.9 mg/L; GE-3: 794 mg/L)은 바닥재 용출시험에서 96시간이 경과하여도 세 종류의 실험용액 모두에서 약 15 mg/L 이내로 분석되었다.

Al은 주로 유기물 결합형 또는 산화물 형태로 존재하므로, 용출 시 극히 미량만이 용출되어 총합량에 비해 용출되는 이온의 농도는 상당히 낮은 특성을 가진다. GE-2(코크스 연소 바닥재)는 시료 총합량 분석결과에서 Al 함유량이 24.9 mg/L로 가장 낮게 나타났으나(Table 3), 배치에서 반응하는 동안 GE-2의 Al은 활발하게 용출이 이뤄지며 96시간 이후에도 일부 용출이 더 이뤄질 수 있는 것으로 보인다(Fig. 3(b)). 이는 GE-3(유연탄 및 목재펠릿의 혼합연소 바닥재)시료 역시 배치테스트가 이뤄지는 동안 pH가 약 4 내외로 유지되나, Al의 농도는 감소하는 것과 비교되는 결과이다. 그러나 GE-2 그래프 성분원소별 직선의 기울기를 보면, Al을 제외한 성분들은 96시간 이내에 반응이 완료된 것으로 보인다.

배치테스트에서 관찰된 이온 성분들은 분석 초기에 용출 농도의 변화를 보이지만 일정 시간이 지난 후에는 평형을 이루는 것으로 나타났다. 금속 성분 이외에도 음이온 성분의 용출로 인한 오염 가능성을 확인하기 위하여  $SO_4$ ,  $NO_3$ , F의 이온 농도를 분석하였고, 그 결과  $SO_4$ ,  $NO_3$ , F는 먹는 물 수질기준( $SO_4$ : 200 ppm,  $NO_3$ -N: 10 ppm, F: 1.5 mg/L) 및 지하수 수질기준( $NO_3$ -N기준 생활용수: 20 ppm, 농업용수: 20 ppm, 공업용수: 40 ppm) 이하로 측정되었다. 각 항목별 수질기준을 Table 4에 정리하였다.

실험용액의 pH는 GE-1의 경우 1시간 이내에는 pH 5.5로 자연 강수의 pH와 유사한 범위를 보였으나, 시간이 지나면서 숯가루 바닥재로부터 알칼리성분이 해리되어 중성에 가까워지는 것이 보였다. GE-2와 GE-3는 초기 강우(0.17 시간)부터 장기 강우(96 시간)까지 먹는 물 및 지하수 수질 기준(대략 pH 5.0~9.0) 범위를 벗어나는 것으로 측정되었다. 이는 GE-2와 GE-3의 총합량분석에서 다량으로 관측된 황 성분이 화석연료의 연소를 통해 산소



**Fig. 3.** Effluent concentration of (a) GE-1 (bottom ash of charcoal powder) 1.00 g, (b) GE-2 (bottom ash of cokes) 1.00 g, and (c) GE-3 (bottom ash of mixed flaming coal and wood pellets) 1.00 g.

와 결합하여 형성된 이산화황( $SO_2$ ) 혹은 삼산화황( $SO_3$ )일 가능성(통칭하여  $SO_x$ )이 있으며 물과 반응하여 강한 산성 환경을 만들었을 가능성이 높다. 이와 관련된 반응식은 다음과 같다(Zheng et al., 2019).





**Table 4.** Regulations of contaminants and their maximum contaminant levels in water by usage with mg/L unit (Korea)

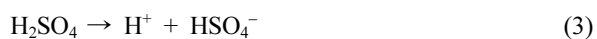
Contents	Drinking water*	Groundwater (by usage)**		
		Residential	Irrigational	Industrial
pH	5.8~8.5	5.8~8.5	6.0~8.5	5.0~9.0
Cl	250	250	250	500
NO <sub>3</sub> -N	10	20	20	40
Pb	0.01	0.1	0.1	0.1
Cr	0.05	0.05	0.05	0.1
As	0.01	0.05	0.05	0.1
Cd	0.005	0.01	0.01	0.02
SO <sub>4</sub>	200	-	-	-
Sr	4	-	-	-
Zn	3	-	-	-
F	1.5	-	-	-
B	1	-	-	-
Cu	1	-	-	-
Fe	0.3	-	-	-
Mn	0.3	-	-	-
Al	0.2	-	-	-
Al	0.2	-	-	-
U	0.03	-	-	-
Se	0.01	-	-	-

\*Regulations on the standards of water quality and testing of drinking water (Ministry of Environment, 2018)

\*\*Regulations on the conservation of water quality of underground water (Ministry of Environment, 2021)

**Table 5.** Concentration of ionic components during the batch test (GE-1, GE-2, and GE-3) at each sampling point

Time	GE-1				GE-2			GE-3			
	Fe	Mn	K	Si	Fe	Si	F	Fe	Mg	K	F
(hr)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
0.17	0.0526	0.2925			0.0465		0.081	0.0581	0.32	0.80	0.063
0.33	0.0472	0.3107	0.70		0.0590	0.05	0.066	0.0576	0.52	1.00	0.081
0.5	0.0434	0.3256	0.15		0.0638	0.17	0.078	0.0513	0.65	0.20	0.093
0.67		0.3406	0.71		0.0666	0.15	0.090	0.0476	0.68	0.90	0.081
0.83		0.3209	0.67		0.0622	0.19	0.084	0.0361	0.46	1.44	0.075
1		0.3179	1.06		0.0651	0.22	0.081		0.51	1.29	0.075
1.5		0.3256	1.09		0.0829	0.32	0.087		0.57	1.31	0.090
2		0.3253	1.18		0.0739	0.39	0.081		0.67	1.13	0.102
3		0.3150	0.91		0.0723	0.47	0.078		0.67	1.12	0.105
6		0.3249	1.23		0.0873	0.61	0.075		0.69	1.10	0.123
12		0.3267	1.36		0.0886	0.70	0.096		0.78	1.37	0.093
24		0.3335	0.50		0.0909	0.79	0.102		0.80	1.69	0.096
48		0.3322	0.97		0.0908	0.95	0.108		0.86	1.29	0.096
96		0.3357	1.03	0.05	0.0819	0.98	0.114		0.88	0.69	0.099



황산염이온은 GE-2와 GE-3의 배치테스트 반응 초기에

급격히 줄어들며 이로부터 다량의 H<sup>+</sup>이온이 해리되어 다 른 완충성분의 존재가 없는 닫힌계(대기 중 이산화탄소의 유입은 한정적이라 가정)의 배치환경에서 낮은 pH가 유 지되는 것으로 여겨진다. 이와 마찬가지로 질산염 이온성

분 모두 배치 실험용액에서 관찰되나, 총합량 분석결과에서는 질소성분의 함량이 미미하였으므로, 바닥재의 산화 질소( $\text{NO}_x$ )로부터 형성된  $\text{H}^+$ 는  $\text{SO}_x$ 에 비해 중류수의  $\text{OH}^-$ 에 상당량 완충된 것으로 여겨진다.

각 바닥재의 주요 총합량 성분들이 강수와의 반응에 의해 용출되는 정도를 판단하고자 Table 5에 성분별 용출 농도를 제시하였다. Fe와 0.0526 mg/L, K은 1.36 mg/L, Mn은 0.3406 mg/L 이하의 농도로 측정되었으며, GE-2은 Fe의 용출 농도가 0.909 mg/L 이하, GE-3는 Fe 0.0581 mg/L, Mg 0.88 mg/L, K 1.69 mg/L 이하로 측정되었으며, 해당 성분들은 시간에 따라 용출 농도가 안정화되는 경향이 나타났다. 따라서 실험에 사용한 시료들이 바닥재로서 부지 내 매립되었으며 상당한 강우가 오래 지속되었을 경우, 양이온 및 음이온의 용출로 인한 오염 가능성은 미미할 것으로 판단한다.

#### 4. 결 론

이 연구는 국내 화력발전소에서 연소물의 종류에 따라 침적된 바닥재를 불포화대에 매립하고 상부에 일부 토양을 복토하는 경우, 강수와 반응한 금속이 용출되어 토양 및 지하수 환경에 미칠 수 있는 영향을 조사하고자 하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. 입도 및 SEM 분석 결과, 숯가루 바닥재의 대부분 입자들이 모래 및 실트 크기로 측정되었다. 저온에서 형성된 브라운 카본으로 입자 크기가 상대적으로 큰 나무 섬유질 그물 무늬가 잘 관찰되었다. 코크스와 혼합연료(유연탄 및 목재펠릿) 바닥재의 대부분 입자들은 실트 및 점토 크기였으며 표면적이 넓고 입도가 상당히 작아 고온의 연소과정에서 형성된 블랙카본 형태가 관찰되었다.

2. EDS 분석 결과, 숯가루, 코크스, 혼합연료(유연탄 및 목재펠릿) 바닥재의 표면 화학 성분은 탄소 및 산소가 대부분인 것으로 나타났다. 표면분석과 총합량 분석에서 황(S)이 상당량 존재하는 것으로 나타났으며 이는 실험용액의 pH를 약 4까지 떨어뜨리는 것을 통해  $\text{SO}_x$ (산화 황)일 가능성이 높다고 판단된다.

3. 총합량 분석 결과, 바닥재의 주요 성분은 Ca, Al, Fe, S, K 등으로 나타났고, 목재펠릿이 포함된 혼합연료의 바닥재는 K가 상대적으로 높게 측정되었다. Sr과 As과 같은 미량금속성분은 일부 시료에서 기준치보다 낮게 측정되었으나, 이들은 일반적으로 토양과 대수층 물질에 흡착이 잘되기 때문에 토양 내 잔류 가능성에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 여겨진다.

4. 배치테스트 결과를 통해 시간에 따른 바닥재의 pH 변화, 금속 및 음이온의 용출 농도를 확인하였다. 초기 반응은 활발하게 일어났지만, 약 12시간 내외가 지난 후에는 대부분 평형을 이루는 것이 관찰되었다. 용출 초기부터 반응 평형까지 일부 음이온( $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , F)을 포함한 금속 양이온의 용출은 거의 발생하지 않았다.

5. 종합적으로, 석탄 화력발전소에서 배출된 코크스 및 혼합연료(유연탄 및 목재펠릿)의 바닥재를 지표 매립하는 경우, 지하수환경 내에서 금속 및 음이온의 강수에 의한 용출 오염 가능성은 거의 없는 것으로 평가되었다. 이 연구는 다양한 바닥재 종류와 자연부산물을 활용하여 초기 침출성분과 농도를 파악하고 매립용출성분의 오염 가능성을 평가하였다는 점에 의미가 있다고 판단한다.

#### 사 사

이 연구는 2019년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 개인기초연구지원사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제(도심지역 미세먼지의 수용성 금속 성분들에 의한 토양 및 지하수 오염경로 분석 및 특성평가, 과제번호 2018R1D1A1B07044596)입니다. 논문의 검토와 투고를 위해 한국지질자원연구원의 2022년 '기후변화대응 대응량 지하수 확보 및 최적활용 기술개발(22-3411)'의 지원을 받았습니다. 연구를 수행할 수 있도록 도움을 주신 이강근 교수님께 깊은 감사인사를 드립니다. 이 논문을 심사하고 세심한 조언을 나누어 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

#### References

- Bratby, J., Miller, M.W., and Marais, G.V.R., 1977, Design of flocculation systems from batch test data, *Water S.A.*, **3**(4), 173-182.
- Cheriaf, M., Rocha, J., and Pera, J., 1999, Pozzolan properties of pulverized coal combustion bottom ash, *Cement and Concrete Research*, **29**(9), 1387-1391.
- Chimenos, J.M., Fernández, A.I., Nadal, R., and Espiell, F., 2000, Short-term natural weathering of MSWI bottom ash, *Journal of Hazardous Materials*, **79**(3), 287-299.
- Choi, H., Lee, H., Kim, D.H., Lee, K.K., and Kim, Y., 2021, Physicochemical and isotopic properties of ambient aerosols and precipitation particles during winter in Seoul, South Korea, *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 11990-12008.
- Choung S., Oh J., Han W.S., Chon C.M., Kwon Y., Kim, D.Y.,

- and Shin W., 2016, Comparison of physicochemical properties between fine (PM<sub>2.5</sub>) and coarse airborne particles at cold season in Korea, *Sci Total Environ.*, **541**, 1132-1138.
- Churchill, E.V. and Amirkhanian, S.N., 1999, Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11**(4), 295-301.
- Eisenberg, S., Tittlebaum, M., Eaton, H., and Soroczak, M., 1986, Chemical characteristics of selected fly ash leachates, *J. Environ. Sci. Health*, **21**(4), 383-402.
- Fytianos, K., Tsaniklidi, B., and Voudrias, E., 1998, Leachability of heavy metals in Greek fly ash from coal combustion, *Environ. Int.*, **24**(4), 477-486.
- Jang, Y.C., Lee, S., and Lim, J.M., 2009, Physico-chemical characteristics and environmental assessment of coal bottom ash from coal-fired power plant for beneficial use, *Journal of Korea Society of Waste Management*, **26**(8) 680-688.
- Jun, M.H. and Bae, S.K., 2006, Total contents and leaching characteristics of heavy metals and ionic compounds for MSW Stoker incinerator's bottom ash as a function of particle size distribution, *Journal of Korea Society of Waste Management*, **23**(8) 647-655.
- Jung, J., 2001, A Study on Physical Characteristics of Interlocking Block with the Bottom Ash, Master's dissertation of Chung-Ang University, Seoul.
- KOSIS, 2020, Statistics of Fuel consumption in Korea from 2004 to 2020. KEPCO, [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=388&tblId=TX\\_38803\\_A017&conn\\_path=I3](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=388&tblId=TX_38803_A017&conn_path=I3).
- Koh, T., Lee, S., Shin, M., Kim, B., Lee, J., and Lee, T., 2010, Evaluation for contents of contaminants and leaching characteristics of bottom ash, *J. Korea Geo-Environ. Soc.*, **11**(6), 77-83.
- Lee, S., 1995, Potential element retention by weathered pulverised fuel ash: I. Batch leaching experiments, *Economic and Environmental Geology*, **28**(3), 251-257.
- Ministry of Environment, 2018, Guidelines of water quality and testing of drinking water, Ordinance of the Ministry of Environment, ES 05003.e
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2011, Study on Environmental Impact of the mixed with coal ash and soil, National Institute of Environmental Research, No. 11-1480523-000821-01.
- Park, D., Choi, H., Woo, N.C., Kim, H., and Chung, D., 2013, Evaluation of leaching potential of heavy metals from bottom ashes generated in coal-fired power plants in Korea, *Journal of Soil and Groundwater Env.*, **18**(7), 32-40.
- Park, S.G. and Kim, J.M., 2012, Present status and recycling technology for bottom ash in Korea, *Magazine of RCR*, **7**(1), 9-12.
- Park, N.K., Song, H., Chu, Y.S., and Lee, J.K., 2006, Standardization for Cr<sup>6+</sup> analysis in cement and concrete, *In Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, Korea Concrete Institute, 729-732.
- Regulations on the standards of water quality and testing of drinking water-Ministry of Environment, 2018.
- Singh, G., 2013, Environmental Aspects of Coal Combustion Residues from Thermal Power Plants, In: Mohammad Rasul (ed.), *Thermal Power Plants - Advanced Applications*, InTech, Rijeka, Croatia.
- Song, X.H., Polissar, A.V., and Hopke, P.K., 2001, Sources of fine particle composition in the northeastern US. *Atmospheric Environment*, **35**(31), 5277-5286.
- Sonnenschein, J. and Mundaca, L., 2016, Decarbonization under green growth strategies? The case of South Korea, *Journal of Cleaner Production*, **123**, 180-193.
- Wang, W., Qin, Y., Song, D., and Wang, K., 2008, Column leaching of coal and its combustion residues, Shizuishan, China, *Int. J. Coal Geology*, **75**(2), 81-87.
- Wessolek, G., Bohne, K., Duijnisveld, W., and Trinks, S., 2011, Development of hydro-pedotransfer functions to predict capillary rise and actual evapotranspiration for grassland sites, *Journal of Hydrology*, **400**(3-4), 429-437.
- Yang, I., Kang, S., Kim, Y.H., and Han, G., 2018, Preliminary survey for setting evaluation standards of wood pellet safety, *Journal of the Korean Wood, Science and Technology*, **46**(5), 541-552.
- Zheng, C., Wang, Y., Liu, Y., Yang, Z., Qu, R., Ye, D., Liang, C., Liu, S., and Gao, X., 2019, Formation, transformation, measurement, and control of SO<sub>3</sub> in coal-fired power plants, *Fuel*, **241**, 327-346.