Research Paper

A Study on Infiltration Process and Physicochemical Influence in the Unsaturated and the Saturated Zone of the Bottom Ashes from Thermal Power Plant

Byeong-Hak Park¹, Won-Tak Joun², Seung-Wook Ha³, Yongcheol Kim⁴, Hanna Choi^{4,*}

¹Disposal Performance Demonstration Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057 South Korea

²The research Institute of Basic Sciences, Seoul National University, Seoul, 08826 South Korea

³College of Natural Science, Seoul National University, Seoul, 08826 South Korea

⁴Division of Climate Change Adaptation, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, 34132 South Korea

*Corresponding author : pythagoras84@kigam.re.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 14 February 2022

Received in revised form 26 February 2022

Manuscript accepted 26 February 2022

Available online 28 February 2022

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2022.55.1.97>

Research Highlights

- The iced column and percolation experiments were performed to visualize the filtering and draining processes of the bottom ash and biochar.
- A lot of bottom ashes can percolate into groundwater by precipitation, and therefore it is necessary to manage the materials containing Ca and SO₄.
- The biochar was filtered through the unsaturated zone and neither dissolved nor dynamically mixed with the groundwater.

ABSTRACT

This study focused on the physicochemical effects of bottom ash dissolved precipitation on the soil and groundwater environment. The iced column and percolation experiments showed that most of the bottom ash particles were drained as the ash-dissolved solution, while the charcoal powder was filtered through the soil. Ion species of Al, As, Cu, Cd, Cr, Pb, Fe, Mn, Ca, K, Si, F, NO₃, SO₄ were analyzed from the eluates collected during the 24 h column test. In the charcoal powder eluates, a high concentration of K was detected at the beginning of the reaction, but it decreased with time. The concentrations of Al and Ca were observed to increase with time, although they existed in trace amount. In the bottom ash eluates, the concentrations of Ca and SO₄ decreased by 30 mg·L⁻¹ and 67 mg·L⁻¹, respectively, over 24 h. It is regarded that the infiltration patterns of the bottom ash and biochar in the unsaturated zone were different owing to their particle sizes and solvent properties. It is expected that a significant amount of the bottom ash will mix with the precipitation and percolate below the water table, especially in the case of thin and highly permeable unsaturated zone. The biochar was filtered through the unsaturated zone. The biochar did not dissolve in the groundwater, although it reached the saturation zone. For these reasons, it is considered that the direct contamination by the bottom ash and biochar are unlikely to occur.

Keywords: bottom ash, biochar, precipitation, visualization test, column eluates

Citation: Park, B.-H., Joun, W.-T., Ha, S.-W., Kim, Y., Choi, H. (2022) A Study on Infiltration Process and Physicochemical Influence in the Unsaturated and the Saturated Zone of the Bottom Ashes from Thermal Power Plant. Korea Economic and Environmental Geology, v.55, p.97-109, doi:10.9719/EEG2022.55.1.97.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

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 original work is properly cited.
pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2022 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

화력발전소 배출 바닥재의 불포화대와 포화대 침투과정과 물리화학적 영향에 대한 연구

박병학¹ · 전원택² · 하승욱³ · 김용철⁴ · 최한나^{4,*}

¹한국원자력연구원 처분성능실증연구부

²서울대학교 자연과학대학 기초과학연구원

³서울대학교 지구환경과학부 수리지구환경연구실

⁴한국지질자원연구원 지질환경연구본부 지하수연구센터

*책임저자 : pythagoras84@kigam.re.kr

요 약

화력발전소 연소부산물로 형성된 바닥재와 바이오차는 건설 매립 시 강수와 혼합되어 토양 하부로 침투할 가능성이 있다. 이 연구에서는 강수와 혼합된 바닥재 성분이 토양 및 지하수 환경에 미칠 수 있는 물리화학적 영향을 예측하고자 하였다. 아이스 칼럼 및 침투실험을 통해 미립자인 바닥재는 대부분 증류수에 용해되어 토출구로 배수되나, 바이오차(숯가루)는 매질에 여과되는 것을 시각적으로 관찰하였다. 칼럼 실험 용출액의 이온 분석(Al, As, Cu, Cd, Cr, Pb, Fe, Mn, Ca, K, Si, F, NO₃, SO₄) 결과, 숯가루 충전 칼럼은 K가 상당히 높은 농도(0.5 cm 충전 시 19.8 mg·L⁻¹, 1 cm 충전 시 126 mg·L⁻¹)로 검출되었으나 시간에 따라 점차 농도가 감소하였다. Al과 Ca는 미량으로 검출되었으나 시간에 따라 농도가 상승하는 것이 관찰되었다. 바닥재 충전 칼럼은 실험 초기부터 Ca와 SO₄가 고농도로 검출되었으며 24시간 동안 각각 30 mg·L⁻¹, 67 mg·L⁻¹가 감소하였다. 연구 결과에 근거하여, 투수성이 좋고 포화대가 지표에 가까운 토양의 경우 오랜 시간 강수가 지속된다면, 상당량의 바닥재는 강수와 혼합되어 지하수면 아래로 침투할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 바이오차는 불포화대에서 걸러지며, 포화대에 도달하여도 지하수에 녹지 않아 직접적인 오염을 일으킬 가능성은 낮다고 여겨진다. 바닥재와 바이오차의 침투에 의한 토양 및 지하수 환경의 교란은 자연적 완충작용에 의해 보완되나, 실제 매립지는 대용량 고농도의 매질과 반응이 이뤄지므로 일반화를 위해서는 더욱 큰 규모의 연구가 필요할 것이다.

주요어 : 바닥재, 바이오차, 강수, 시각화실험, 칼럼 용출

1. 도 입

기후변화의 주원인으로 지목되고 있는 이산화탄소(CO₂) 배출량을 저감하기 위해 국제 사회는 꾸준한 노력을 기울이고 있다. 1992년 기후변화에 관한 유엔 기본 협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)에서 온실가스 발생 억제의 필요성이 제기되었고, 1997년 구체적으로 이산화탄소 감축량까지 정한 교토의정서가 회원국의 동의 가운데 체결되었다. 세계적 추세에 발맞추어, 2021년 제26차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26, 26th Conference of Parties)에서 한국 정부도 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다고 선언하였다. 산업화와 경제성장을 위해서는 에너지가 필요하며, 신재생에너지 중심의 에너지 전환을 위한 노력이 이뤄지고 있으나, 아직까지 우리나라의 에너지 공급은 화석연료에 상당히 의존하고 있다(KOSIS, 2022). 이런 이유로 화력발전을 유지하거나 축소하는 동시에 탄소배출량을

줄이기 위한 노력이 사회적으로 요구되고 있다.

Fig. 1(A)는 대한민국의 2001~2020의 화력발전설비를 연료별로 구분하여 제시한 것으로, 화력발전의 주원료는 석탄, 유류, LNG로 구분할 수 있다(KOSIS, 2022). 화력발전설비 가운데 석탄이 차지하는 비율은 지난 20년간 꾸준히 약 50% 내외로 보고되어 화력발전이 우리나라 에너지 공급에 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 특히 석탄화력발전 설비용량은 2001년 1500만kW, 2010년 2500만kW, 2020년 3700만kW로 매우 가파르게 성장세가 이어지고 있다. 이는 산업화가 이루어지며 경제발전 전에 필수동력을 제공하기 위해 에너지의 요구량이 점차 높아지기 때문으로 해석할 수 있다(Yuanyuan and Cho, 2019). 산업용 열병합 보일러 형태로 활용되고 있는 순환 유동층 보일러는 연소효율이 무연탄보다 강한 유연탄을 주로 사용하고 있으며(Shun *et al.*, 2010), 화력발전소에서 사용하는 연료는 주로(약 75~85%) 유연탄이 활용되고 있다(KOSIS, 2022). 발전소에서는 저탄소 신재생에너

Fig. 1. Composition by fuel of all power generation facilities and thermal power generation facilities in Korea between 2001 and 2020 (A), annual precipitation and annual average temperature data in Seoul (B).

지의 한 종류로서 목재펠릿과 같은 목질계 바이오매스를 유연탄과 함께 혼합하여 연소하는 방법으로 탄소 저감을 실현하고자 노력하고 있다. 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령에 의하면 바이오에너지는 바이오매스(biomass)를 원료로 하여 얻어지는 에너지를 통칭하며(KLIC, 2022), 유연탄 화력발전소의 목재펠릿 혼소의 타당성에 관하여는 이미 상당한 연구가 진행되어 왔다(Lee, 2011; Song *et al.*, 2018; Arriola *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2021). 특히 연소 후 목재펠릿의 부산물로 생성된 바이오차(Biochar, BC)는 안정성이 뛰어나 토양에 투입해도 분해가 거의 일어나지 않으며, 토양흡착능 및 양이온교환능 증가, 토양산성도 저감, 미생물 생체량 증가, 토양통기성 증가, 토양용적밀도 감소 등의 장점을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다(Sohi *et al.*, 2010; Blackwell *et al.*, 2012; Lehmann and Jseph, 2015).

석탄연소 과정이 진행되며 부산물로 석탄회(coal ash)가 생성되는데, 연소된 재는 보일러 아래로 침강되는 바닥재(bottom ash)와 굴뚝의 집진장치를 통해 포집되는 비산재(fly ash)로 나눌 수 있다. 석탄회 발생량은 연소한 사용탄의 종류에 따라 차이가 있으나, 비산재가 약 75~80%이고 바닥재가 20~25%를 차지하는 것으로 알려져 있다(Reijnders, 2005). 바닥재는 보수력(water holding capacity) 및 통기성이 높아, 펄라이트 및 질석을 대체하는 상토성분으로 활용할 수 있다(Park and Kim, 2012). 비산재는 콘크리트 혼화재, 시멘트 원료 등 자원화 하기 위한 개발이 국내외적으로 적극적으로 추진되고 있으며(Oh, 2006; Zacco *et al.*, 2014; Behnood *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2017), 바닥재 역시 시멘트 부원료 및 성토용 골재로 재활용되고 있으나, 상당량(약 60% 내외)의 바닥재는 폐기물로 분

류되어 회처리장에 매립된다(NIER, 2011; Park and Kim, 2012; Maeng *et al.*, 2014). 토양에 건식매립된 바닥재와 잔여 바이오매스 연소물은 강수사건에 의해 불포화대에 유입될 가능성이 존재한다.

지난 20년간(2001~2020) 서울에서 관측한 연평균 강수량은 1412 mm, 연평균 기온은 12.9°C도로, 각 연도별 강수량과 평균기온을 Fig. 1(B)에 막대그래프로 표현하였다(KMA, 2022). 가장 인구밀도가 높은 서울지역 연평균기온의 증감과 관계없이(KOSTAT, 2022), 남한 전역의 에너지사용량은 꾸준히 상승하는 것이 관찰되었다. 특히 6월과 9월 사이 태풍과 장마의 영향으로 강수가 집중되는 것으로 관측되고 있으며, 매립된 바닥재는 강수와 혼합되어 불포화대로 침투할 가능성이 있다. 따라서 이 연구에서는 강수에 의해 바이오차가 혼합된 바닥재 성분이 불포화대로 유입될 경우 지하수 및 토양환경에 미칠 수 있는 영향을 예측하고자 하였다. 이를 위해 첫째, 아이스 칼럼과 수조실험을 통해 바이오매스 연소물질이 강수사건에 의해 토양에 침투가 이루어져 혼합되는 형태를 이해하고자 하였다. 둘째, 칼럼테스트를 통해 수용성 주요 이온 및 미량이온 성분들이 토양 및 지하수에 미칠 수 있는 영향을 고찰하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1. 연구재료

연구에 사용한 바닥재는 전라북도 북서부에 위치한 A 화력발전소의 유연탄 연소 및 냉각시설에서 채취하였다. 숯가루는 강원도 평창군에 위치한 B 숯 제조공장의 분진포집장치에서 채취하여 서늘하고 건조한 장소에서 24

시간 이상 건조시켰다. 건조된 시료는 눈금간격 18 메쉬(mesh, 체눈의 크기 1 mm)와 25 메쉬(체눈의 크기 0.5 mm)의 체(testing sieve, s/steel, 청계상공사, 대한민국)에 차례로 걸러, 0.5 mm 이내의 입도를 가지는 분말을 연구에 사용하였다(환경부고시 제2016-196호). 유연탄 연소 바닥재와 숯가루의 입도분포를 측정하기 위해 연세대학교 지구시스템학과와 공동기기장비(Mastersizer 2000, Malvern)를 사용하였다. 1 L의 증류수에 1 g의 분말시료를 투입한 뒤 혼합기로 충분히 분산(Hydro 2000)시켜 습식분산 레이저회절 방법으로 3회 측정한 평균값을 사용하였다.

국내외 바이오매스 연료로 사용되는 목재펠릿은 가격이 저렴하고 지속적 공급이 가능한 소나무와 낙엽송이 주된 원료로 이용되고 있다(Lee, 2011). 신갈나무와 같은 참나무 수종은 국내에 많이 분포하나 펠릿 성형이 어려운 것으로 알려져 있으며, 다양한 원료의 공급과 수급안정성을 위해 신갈나무 등의 목재펠릿 제조 연구가 진행 중에 있다(Kim *et al.*, 2015). 국내에서 사용하고 있는 목재펠릿은 대부분 해외수입에 의존하고 있으며 운송 과정에서 발생하는 탄소배출이 탄소중립과 배치된다는 점에

서, 바이오매스연료를 제지·커피슬러지로 대체하는 움직임이 이어지고 있다. 따라서 참나무 숯가루를 활용하여 모사하는 실내실험도, 매립지에 적재된 바이오매스 연소물이 지표 아래로 침투하여 토양 및 지하수계에 미칠 수 있는 영향을 예측하는데 유의미가 결과를 보일 것으로 판단하였다.

2.2. 아이스칼럼 실험

부피 1 L의 원통형 폴리프로필렌 병을 준비하여, 깨끗하게 세척한 직경 0.75~1.0 mm의 글라스비드(Sigmund Lindner, SiLibeads, Cat. number: 5002, Germany)를 강수 유동시험법-표준칼럼 시험(ASTM, 2013) 방법에 따라 조밀하게 채웠다(Fig. 2(A)). 칼럼의 약 절반에 해당하는 13 cm 높이까지 글라스비드를 채운 뒤 해당 칼럼을 증류수에 완전 포화시켰다가, 12시간 동안 칼럼 하부의 배출구로 완전 배수시켜 불포화대 환경을 조성하였다. 글라스비드를 실험에 사용한 이유는, 바닥재 성분과 직접적인 화학반응을 일으키거나 실험용액으로부터 용출된 성분이 글라스비드의 조성에 영향을 미칠 가능성이 거의 없어 안

Fig. 2. Column filled with glass beads and Jumunjin sand after the experiment (A), and schematic diagram of iced column experiment (B).

정한 매질이라 판단하였기 때문이다.

두 번째로, 위와 동일한 방법(ASTM, 2013)을 사용하여 약 13 cm 높이까지 주문진사를 채운 칼럼을 준비하였으며, 해당 칼럼 역시 포화 및 12시간 배수시켜 글라스비드와 동일한 컨디션이 되도록 하였다. 실험에 사용한 주문진사는 15개의 샘플에 대해 입도 분석을 수행하여 평균 입도(d_{50} , average diameter), 유효 입도(d_{10} , effective diameter), 균등 계수(C_u , coefficient of uniformity)를 도출한 바 있다(Park *et al.*, 2018). 주문진사의 균등 계수는 1.36으로 매우 분급이 잘되어 균질하며, 평균 입도는 2 mm로 거친 모래(coarse sand)로 분류된다(Friedman and Sanders, 1978). 주문진사를 사용한 이유는 바닥재의 침투가 일어난 형태를 좀 더 토양환경에 가까운 조건에서 시각적으로 확인하고자 함이다.

Fig. 2(B)는 글라스비드와 주문진사를 매질로 사용한 아이스칼럼 시험의 개략적 모식도이다. 강수사건시 바닥재가 불포화대에 침투하는 것을 모사하기 위한 실험용액은 두 종류의 바닥재를 사용하여 제조하였다. 첫 번째 용액은 3 g의 유연탄 연소 바닥재를, 두 번째 용액은 1 g의 숯가루를 각각 1 L의 증류수에 포화시켜 준비하였다. 숯가루를 사용한 이유는 첫째, 목질계 바이오매스로서 직접 연소에 사용되는 연료의 하나로 숯이 활용되고 있기 때문이다. 둘째, 화력발전소에서 석탄과 혼소하여 사용하는 목질계 바이오매스가 6 mm 이내의 톱밥 크기를 가지는 점에 착안하여(Lee, 2011), 0.5 mm 이내의 입도를 가지는 숯가루가 바이오매스 대체제로 실험에 사용하기 적합하다고 판단하였기 때문이다. 한편, 유연탄 연소 바닥재는 대부분(약 92%) 2 μm 이내의 입도를 가지는 회색의 고운 입자로, 가시성이 상당히 낮아 아이스칼럼의 시각화 실험을 위해 숯가루에 비해 3배 많은 양을 사용하였다.

실험용액은 펄리스탈틱 펌프(Minipuls 3, Gilson, USA)를 사용하여 1 mL·min⁻¹의 유속으로 글라스비드 상부에서 주입하였다. 지하수의 평균 유속은 매질의 특성에 따라 0.2~15.2 m·day⁻¹로 알려져 있으며(Harter, 2003), 강우 집중 시기의 함양을 가정하여 가장 빠른 지하수의 유속으로 펄리스탈틱 펌프 속도를 설정하였다. 매립 환경에서는 바닥재 가운데 강수와 혼합된 성분들이 지표에서 불포화대로 일부 침투가 이루어지나, 실험에서는 바닥재를 증류수에 포화시켜 상부에서 분사하였기 때문에 실제 상황과 차이가 있다는 점을 감안해야 한다.

실험용액을 모두 통과시킨 칼럼을 6시간 동안 충분히 배수시킨 후, 글라스비드의 표면에 남아있는 수막으로 입자들을 결합시키고자 냉동실에 24시간 보관하였다. 제작된 아이스칼럼은 2.5 cm의 균일한 간격으로 상부부터 하부방향으로 절단하였으며, 가장 상부는 3 cm 두께로 절

단하여 단면을 관찰하였다(Appendix A1). 미국 국립보건원(NIH)에서 연구용으로 개발한 Java 기반 이미지 처리 프로그램인 ImageJ를 이용하여 단면 사진으로부터 플룸의 경계면을 결정하고자 하였으나, 색상 대비가 뚜렷하지 않아 경계면을 도출하기 어려웠다. 따라서 사진을 최대한 확대하여 채도, 색조, 선명도, 밝기, 대비 등을 조절하면서 그림판과 파워포인트를 활용하여 경계면을 도출하고 아이스칼럼의 단면과 비교하며 도출한 경계면을 수정/보완하였다.

2.3. 바닥재 침투 수조 실험

숯가루는 용매(carry water, 강수)에 해당하는 증류수 흐름을 따라 표토 및 불포화대로 침투하며, 칼럼에 채워진 글라스비드의 입경과 유효 공극보다 작은 입도(0.002~0.062 μm)를 가지는 숯가루는 지하 환경에 상당량 침투할 수 있을 것이다. 특히 강우 사건의 발생과 강우 강도에 따라 표면에 적재된 작은 입자(숯가루 외)들은 불포화대보다 깊게 침투하여 지하수와 접촉할 수 있으며, 침투된 입자들에서 용출된 이온 및 유해 원소들은 토양 및 지하수 환경을 오염시킬 우려가 있다. 이런 이유로 토양 하부로의 침투 가능성에 대한 원리를 이해하고 대응할 필요가 있으며, 미세 입자들의 침투 메커니즘을 이해할 수 있도록, 기초자료들을 충분히 획득하는 것이 중요할 것이다. 이러한 침투 기작을 직관적으로 확인하고 침투 과정을 살펴보기 위해 투명한 글라스비드를 다공성 매질로서 사용하여 바닥재 침투 수조 실험을 설계하였다.

침투 시험을 위한 불포화대 및 포화대는 다음과 같이 형성하였다. 우선 두께 0.4 cm의 투명아크릴로 제작된 수조(가로 60 cm, 세로 5 cm, 높이 50 cm)에 깨끗이 세척한 글라스비드(직경 0.75~1.0 mm, 아이스칼럼의 글라스비드와 동일)를 30 cm 높이까지 습식 패킹(wet packing)하였다. 그 후 하부에서 약 10 cm 높이까지 수위를 조절하여 불포화대와 포화대가 형성되도록 하였다. 수조 양 옆의 배수관의 개폐를 조절하여 바닥으로부터 10 cm 높이에 정수위면이 형성되도록 24시간 동안 수위를 유지시켰으며, 이를 지하수 수면이 안정(steady state)한 상태로 유지되고 있다고 가정하였다(Fig. 3).

바닥재의 침투를 나타내기 위해 실험 용액은 4 L의 증류수에 4 g의 숯가루를 포화시킨 후, 펄리스탈틱 펌프로 1 mL·min⁻¹의 유속으로 펌핑하였으며, 주입관은 수조에서 두 개로 나누어지므로(2 points injection, duplicate) 각각 0.5 mL·min⁻¹의 유속으로 용액이 주입되었다. 글라스비드 매질 내에서 숯가루 포화용액이 들어가는 속도는 약 $2.2 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 로, Park *et al.* (2011)이 제시한 단위 중량에 따른 풍화토의 평균 강우 침투 속도(20 mm/min의

Fig. 3. Experimental setup for visualizing the percolation process consisting of a tank filled with glass beads, a peristaltic pump, and an experimental solution. Stirring using the magnetic bar and stirring machine keeps the uniform mixing state of the experimental solution.

강우강도, 편마암풍화도 $1.297 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 부터 $2.854 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 화강암풍화도 $1.707 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 부터 $2.734 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)와 유사한 범위를 가진다.

2.4. 바닥재를 채운 칼럼 용출 실험

내경 3 cm, 외경 4 cm, 높이 10 cm의 아크릴 칼럼 상부와 하부에 1 mm의 공극크기를 가지는 폴리프로필렌 거름망을 설치하여 칼럼의 매질이 빠져나가지 않도록 하였다. 주입구 위의 거름망 상부에 숯가루와 유연탄 연소 바닥재를 0.5 cm 높이로 채우고, 그 위에 깨끗이 세척한 주문진사를 칼럼에 조밀하게 채워 넣었다. 칼럼 용출 시험의 매질로 주문진사를 사용한 이유는 실제 퇴적환경과 유사한 조건에서 강수와 반응한 침출액의 성분을 판단하여 보고자 함이다.

숯가루는 유연탄 연소바닥재에 비해 상대적으로 입도가 크고, 0.5 cm 높이로 채웠을 때의 중량은 1.75 g, 그리고 1 cm 높이로 채웠을 때의 중량은 약 3.49 g으로 측정되었다. 이에 비해 유연탄은 상당히 조밀하게 채워져 0.5 cm 높이로 채웠을 때 3.43 g의 시료가 들어갔으며, 1 cm 높이로 채운 칼럼은 바닥재 공극이 너무 조밀하여 증류수 투과 시 유연탄 칼럼들이 터져 침출액이 외부로 흘러나왔다. 따라서 실험에는 0.5 cm, 1 cm 높이의 숯가루를 채운 칼럼, 0.5 cm의 유연탄 바닥재를 채운 칼럼 세 종류를 구비하여, 각각 두 세트씩 제작하였다(duplicate). 밤새 실험 유속의 2배로($2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$) 펄스탈틱 펌프를 작동시켜 칼럼 내 공극이 증류수로 충분히 포화될 수 있도록 하였다. 칼럼 실험은 24시간 동안 수행되었으며, 칼럼 바닥에서 상부 방향으로 증류수를 흘려 유출된 이온 성분들의 조성을 분석하여 바닥재가 토양 및 지하수계에 영향을 미칠 가능성을 판단하고자 하였다.

칼럼 용출 실험의 유출수는 24시간에 걸쳐 총 12회(0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 24 시간) 수집되었으며, 유출수를 충분히 혼합하여 10 mL 씩 분취한 시료를 사용하였다. 분취 시료는 $0.45 \mu\text{m}$ 공극사이의 유리섬유 여과지에 거른 뒤, 농질산을 2~3방울 추가하여 pH를 낮춘 뒤 냉암소에 보관하였으며, 시료분취 후 칼럼유출수의 pH와 전기전도도(EC, Electrical Conductivity)를 측정하였다(Orion 5-Star Multiparameter Meter, Thermo Scientific). 시료분취와 pH 및 EC 측정을 완료한 뒤 비커를 깨끗이 씻고 분취 시점 이후의 용액을 다시 포집하였다. 이온 분석은 ICP-AES(Ultima 2C, Horiba Jobin Yvon)과 ICP-MS(DRC II, Perkin Elmer)를 사용하여 Al, As, Cu, Cd, Cr, Pb, Fe, Mn, Ca, K, Si, F, NO_3 , SO_4 와 같은 금속성분 및 이온 성분들을 분석하였으며, 음이온 분석 시료는 4°C 이하에서 냉장 보관 후 연세대학교 지하수토양환경 연구소에서 IC(DX-80, Dionex)를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 불포화대의 물리적 침투(infiltration) 아이스칼럼 테스트와 숯가루의 수조 침투 실험

아이스칼럼 테스트

Fig. 4는 아이스칼럼의 단면 사진으로 (A)와 (B)는 주문진사에 침투시킨 숯가루, (C)와 (D)는 글라스비드에 침투시킨 숯가루, (E)와 (F)는 글라스비드에 침투시킨 유연탄 연소 바닥재이다. 글라스비드는 일정한 범위의 균일한 입자들로 균일성(homogeneity)을 가지는 매질로 활용하였으며, 주문진사는 글라스비드에 비해 형태와 성분조성의 불균질성(heterogeneity)이 크기 때문에 좀 더 자연 토양에 가까운 특성을 가진다고 판단하여 두 종류의 매

Fig. 4. Cross section of the iced column ((A) to (F)) and the image of spatial distributions of the charcoal mixed or bottom ash solutions (images of (A) to (F)). The red dotted circles indicate a highly concentrated charcoal mixed solution in the sand and the yellow lines divide the iced column into left, right, upper, and lower sections.

질을 실험에 활용하였다. 각각의 사진은 매질과 바닥재가 구분되어 보이도록 밝기와 채도를 조절하였으며, Appendix A1에서 상부에 해당하는 부분(①)을 Fig. 4의 (A), (C), (E)에 배치하고, 하부에 해당하는 부분(②)을 Fig. 4의 (B), (D), (F)에 배치하였다. 실험액이 칼럼 상부에서 균일하게 살포되어, 칼럼의 최상부 표면은 매질과 바닥재의 혼합범위 구분이 어려워 토의에서 제외하였다.

글라스비드는 균일한 크기를 가지고 있으며 공극의 모양이 상대적으로 일정하여 글라스비드를 매질로 사용한 경우에는 숯가루와 바닥재 성분이 전체적으로 고르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4, images of (C) to (F)). 이에 비해 모래를 다공성 매질로 사용한 경우에는 매우 균질한 모래($C_u = 1.36$)를 실험 매질로 사용하였음에도 숯가루 성분의 분포가 고르지 않으며(image of (A)), Fig. 4(A)에서는 왼쪽 상부에 Fig. 4(B)에서는 오른쪽 하부에 숯가루가 집중되어 있는 것이 관찰되었다(붉은색 원으로 표시된 부분). 이러한 결과는 바닥재나 바이오매스가 강수와 함께 토양으로 유입된 후 불포화대 내에서 이동할 때 매질의 불균질성이 큰 영향을 미친다는 것을 나타낸다. 한편 바닥재에 비해 평균 입도가 큰 숯가루는 글

라스비드 매질에 상당량 걸려져서 하부로 내려갈수록 숯가루의 양이 눈에 띄게 줄어드는 것이 아이스칼럼의 단면에서 관찰되었다(Fig. 4(C)와 (D)).

아이스칼럼의 단면을 보면, 글라스비드의 상부에서 상당량의 숯가루가 걸려진 것으로 보이나, 주문진사에서는 오히려 하부에서 걸러지는 숯가루가 더 많은 것으로 관찰되었다. 이는 글라스비드의 매질 특성에 따라 극성이 강한 표면에 정전기적 인력이 형성되어 탄소입자인 숯가루와 잘 결합하기 때문으로 여겨진다. 따라서 지표에 적재된 숯가루는 토양 하부로 유입될 가능성이 있으나, 유연탄 바닥재는 대부분 칼럼 토출구에서 용매인 증류수와 함께 배출되므로 공극 사이를 흐르는 바닥재 용액은 포화대까지 침투할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

숯가루의 수조 침투 실험

아이스칼럼 테스트에서 확인한 것처럼, 숯가루는 불포화대 매질 내부로 침투할 가능성이 있다고 판단되므로, 침투 깊이와 형태를 시각적으로 살펴보기 위한 수조 침투 실험을 수행하였다. 숯가루의 입도분포는 약 11%가 $0.062 \mu\text{m}$ 이상, 약 85%가 $0.002 \sim 0.062 \mu\text{m}$, 약 4%가 $0.002 \mu\text{m}$

Fig. 5. Laboratory visualization experiment for the percolation in a porous medium using 2 point inlets as contaminant sources. The experimental solution at each point passes through the unsaturated zone and percolates into the saturated zone. The blue dotted line indicates the extent of contaminant plumes generated by the experimental solution and the black dotted line is the water table.

이하로 분포하며, 그에 비해 유연탄 연소 바닥재는 약 7%가 $0.062\ \mu\text{m}$ 이상, 약 86%가 $0.002\sim 0.062\ \mu\text{m}$, 약 7%가 $0.002\ \mu\text{m}$ 이하로 분포하였다. 이와 같이 숯가루와 바닥재는 입도분포가 상당히 일치하며, 자연계에서 발생할 수 있는 불포화 특성 매질이 토양 하층으로 침투하는 모습을 시각적으로 명확하게 보여줄 수 있을 것으로 판단하여 숯가루를 실험에 활용하였다. 숯가루가 불포화대와 포화대로 침투하는 과정들을 촬영하여 시작 단계부터 실험 시작 후 5분까지 시간 순서에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 아크릴 수조는 지하수 유속이 매우 느린 정상 상태의 수리지질환경을 보여주고자 하였으며, 바닥으로부터 10 cm 높이에 형성시킨 정수위면이 모세관 상승(capillary rise)에 의해 수조의 왼쪽 수위가 조금 낮고 오른쪽 수위가 조금 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 글라스비드가 채워진 최상단 지점(표토로 가정)에 숯가루 포화용액 주입호스를 2개 설치하여, 각 호스로부터 실험액이 독립적 침투상태를 유지하며 불포화대 영역을 지나 지하수면으로 들어가도록 설계하였다(Fig. 3). 실험용액이 글라스비드의 표면에 떨어지는 속도는 $0.5\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 으로 매우 느리며, 우선 흐름 경로의 형성을 방지하고자 용액주

입관을 최대한 불포화대 영역 근처에 접근시켜 용액을 떨어트렸다. 용액이 주입되는 동안, 떨어지는 힘에 의한 침투는 없었다고 가정할 수 있으며, 자연스럽게 스며드는 방울 형태로 다른 실험조건(글라스비드 표면 교란, 공극 변형, 흐름경로 변동 등)들을 교란하지 않은 상태로 실험을 진행하였다. 숯가루 포화용액은 작은 내경 ($0.1\ \text{mm}$ 이하)의 아크릴 튜브를 통해 나와 불포화대로 침투 가능한 영역이 매우 협소함(point source)에도 불구하고, 일정 시간이 경과하자 용액이 다양한 경로로 이동하며 플룸(plume)의 너비가 최소 5 cm에서 최대 10 cm 까지 확장되는 것을 확인할 수 있었다(Figs. 5와 6). Fig. 5(B)부터 5(H)까지의 그림과 같이 바닥재는 폭넓게 불포화대에 흡착되며, 미세입자들의 흐름 경로(channel)가 형성됨에 따라 수평 및 수직방향으로 더욱 다양하게 뻗어나가는 것이 관찰된다. 본 실험에서 다공성 매질로 사용한 글라스비드는 매우 균질하지만(직경 $0.75\sim 1.00\ \text{mm}$), 실제 다공성 매질은 매우 불균질하며 실험실 규모에 비해 규모가 매우 크기 때문에 오염원이 다양한 경로로 이동하며 훨씬 넓게 분포할 수 있다.

Fig. 6은 실험을 진행하고 숯가루가 글라스비드와 상단

Fig. 6. (A) Before the percolation of charcoal mixed solution (charcoal powder + distilled water) (start point), (B) 20 minutes, (C) 40 minutes, and (D) 60 minutes after the percolation test using charcoal mixed solution.

히 대비되는 것이 관찰되는 시점(20, 40, 60분)의 그림이다. 침투된 입자들은 서로 교란되지 않고 수직 흐름 방향으로 글라스비드의 공극 사이에 걸려졌다. 불포화대를 제외하고 숯가루는 대부분 지하수면에 축적되어, 지하수면의 주변으로 짙은 검은색의 숯가루가 분포하는 것을 확인하였다. Figs. 5와 6에서 볼 수 있듯이, 본 실험에서는 이상적인 매질을 사용하였음에도 좌우 숯가루 포화용액의 침투 양상에 상당한 차이가 있었다. 이러한 차이는 매질의 불균질성이 증가할수록 더욱 크게 나타날 수 있다(Fig. 4). 따라서 실제 불포화대에서 일어나는 침투는 글라스비드와는 달리 물성의 이방성 및 불균질성 등으로 보다 복잡한 양상을 보일 수 있으며, 이에 대한 후속 연구들이 수행될 필요가 있다.

3.2. 용출액의 포화대 침투(percolation)

강수사건이 오랜 시간 지속되는 경우, 매립된 바닥재와 바이오매스 연소재는 강수와 반응하여 수용성 성분이 용출될 가능성이 있다. 용출 성분의 종류와 농도특성을 이해하기 위해 숯가루와 바닥재를 채운 주문진사 칼럼 실험을 수행하였다.

환경부에서 발표한 2010년 상반기 한국 주요화력발전

소의 석탄재 함량 및 용출 분석 결과와 비교하였을 때 (Table 1), 이 실험에서 사용한 유연탄 연소 바닥재와 숯가루 칼럼 유출수에서는 Cd, Cu, Cr, Pb, As 성분과 추가로 분석한 Fe, Mn 성분 역시 검출되지 않았다. 숯가루를 주입한 칼럼의 유출수는 시간이 지남에 따라 Al과 Ca가 상승하고, Mg는 상승하였다가 감소하여 안정화되는 것이 관찰되었다(Fig. 7(A)와 (B)). K와 SiO₂는 꾸준히 감소하여 약 15시간 이후부터는 안정되는 것이 나타났다. 일반적인 지표수 및 지하수에서 미량으로 검출되는 K는 숯가루 칼럼의 유출수에서 상당히 높은 농도(숯가루 0.5 cm 충전 시 19.8 mg·L⁻¹, 1 cm 충전 시 126 mg·L⁻¹)로 검출되었다. 또한 이온 성분들의 농도가 소량이지만 24시간 까지도 꾸준히 변화한다는 점에서 숯가루 바닥재를 야외에 매립한 경우 24시간 이상 수용성 성분들의 용출이 지속되어 수리화학적 조성에 영향을 받은 강수가 토양 하부로 침투할 수 있다고 판단된다.

한편 유연탄 연소 바닥재는 모든 성분이 시간의 흐름에 따라 감소하였으나, Ca가 34.2 mg·L⁻¹에서 3.38 mg·L⁻¹로, SO₄가 70.5 mg·L⁻¹에서 3.39 mg·L⁻¹로 큰 농도변화를 보였다. 특히 숯가루에서는 검출되지 않던 황산염이온(SO₄)이 유연탄 바닥재에서 검출되어, 화석연료의 연소 생성

Table 1. Composition and concentration of heavy metals of bottom ashes and their leachates generated from various thermal power plants in Korea (modified from ME, 2010)

Type	Power plant	Cd	Cu	Cr	Pb	As
Bottom ashes (mg·kg ⁻¹ unit)	Hadong	ND*	0.014	0.028	0.002	0.002
	Honam	ND	0.004	0.005	0.001	0.001
	Donghae	ND	ND	ND	ND	ND
	Seocheon	0.065	113	5.35	1.96	2.19
	Boryeong	ND	14.4	17.1	ND	1.26
	Taeon	ND	14.8	20.9	0.26	2.08
	Dangjin	ND	6.20	2.91	0.37	0.186
	Samcheonpo	ND	ND	ND	ND	ND
	Samcheonpo, bituminous coal	ND	ND	ND	ND	3.3~8.2**
Leachates (mg·L ⁻¹ unit)	Hadong	ND	ND	ND	ND	0.008
	Honam	ND	ND	ND	ND	0.006
	Donghae	ND	0.037	ND	0.070	0.050
	Seocheon	ND	ND	ND	ND	ND
	Boryeong	ND	ND	ND	ND	ND
	Taeon	ND	ND	ND	ND	ND
	Dangjin	ND	ND	ND	ND	0.011
	Samcheonpo	ND	ND	ND	ND	ND
	Samcheonpo, bituminous coal	ND	ND	ND	ND	ND

* ND means not detected

** The As concentrations of ashes from a power plant (in Samcheonpo, bituminous coal) are varying with sub production facilities.

Fig. 7. Ionic composition of the leachates from 0.5 cm thick charcoal powder (A), 1 cm thick charcoal powder (B), and 0.5 cm thick bituminous coal (C).

물(CCBs, Coal Combustion By-products) 특성이 잘 반영되어 있는 것을 확인하였다(Mattigod *et al.*, 1990; Siddique,

2010). 석탄재 성분에는 주원소 및 미량원소가 원탄에 비해 높은 것으로 알려져 있는데, 그 이유는 고온 연소 및

Table 2. Temporal variations of pH and EC values measured at the sampling point under different source conditions

Time (h)	Blank (Jumunjin Sand)		0.5 cm charcoal powder		1 cm charcoal powder		0.5 cm bituminous coal	
	pH	EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH	EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH	EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH	EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
0.5	6.5	6	7.2	79	8.0	408	6.2	154
1	5.8	4	6.9	48	7.8	157	6.7	61
1.5	5.9	3	7.0	42	7.5	73	6.7	26
2	6.1	3	7.1	40	7.5	58	6.7	26
3	5.9	2	7.1	39	7.4	53	6.7	27
4	5.8	2	7.1	39	7.4	51	6.6	22
5	6.0	2	7.2	37	7.4	48	6.9	20
7	6.1	2	7.2	33	7.4	45	6.9	20
9	6.3	3	7.0	35	7.2	46	6.5	23
12	6.0	2	7.0	37	7.3	43	6.6	22
15	6.2	2	7.0	36	7.2	42	6.5	17
24	5.8	3	6.8	36	7.1	41	6.5	16

냉각 과정을 거치며, 원탄에서 분리된 금속성분들이 상대적으로 휘발성에 따라 비회 및 바닥재의 표면에 농축되기 때문이다(Jones and Goodarzi, 1995).

칼럼 시험 채움재의 대조군으로, 주문진사만을 칼럼에 채워 증류수를 흘려보낸 칼럼은 Ca 이온만이 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 내외로 검출되었다. 따라서 주문진사가 매질로서 용출액에 미치는 영향은 매우 미미할 것으로 판단한다. 또한 숯가루와 바닥재 칼럼 용출액의 pH와 EC가 증류수와 비교하여 큰 변동없이 유지되는 것을 볼 때(Table 2), 용출액이 불포화대 및 포화대에 유입되더라도, 자연계에 풍부하게 존재하는 이온성분들이 주로 용출되므로 토양 및 지하수 환경의 완충작용으로 문제되지 않을 것으로 판단한다(Mattigod *et al.*, 1990). Table 2에서 주문진사 칼럼을 포함하여 모든 칼럼의 용출액은 세척 효과에 의해 pH와 EC가 24시간이 지난 후 약간 감소하는 경향이 보인다. 숯가루 칼럼의 용출액은 함량에 따라 다소간 pH의 상승이 보이나, 유연탄은 거의 일정하게 유지되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 화력발전소의 가동으로 인해 필연적으로 발생하는 매립 바닥재와 바이오매스연소물, 강수와 함께 토양 및 지하수로 침투할 때 나타날 수 있는 물리화학적 영향과 흐름 경로를 이해하기 위해 수행되었다. 아이스칼럼에서 바닥재의 불포화대 침투실험을 수행한 결과, 대부분의 바닥재는 실험용액에 녹아 칼럼을 통과한 것으로 관찰되었다. 이는 지하수면이 지표에 가까이 존재하는 경우, 바닥재 매립지에서 오랜 시간 강수가 지

속된다면 바닥재 성분이 지하수면 아래로 침투할 수 있음을 의미한다. 이에 비해 화력발전소에서 유연탄 연소의 비율을 낮추고자 혼합하여 사용하는 바이오매스는 연소 이후 바이오차 형태로 배출이 되며 이들 역시 바닥재와 함께 일부 매립되어 처분된다. 불포화대에서 바이오차의 이동과 영향을 이해하고자 성상이 비슷한 숯가루를 실험에 사용하였으며, 아이스칼럼 테스트에서 숯가루는 불포화대에서 대부분 걸러진다는 것을 확인할 수 있었다. 숯가루가 불포화대에 침투하는 경로를 직관적으로 관찰하고자 수조실험을 수행하였으며, 이 실험에서 바이오차는 토양에서 대부분 걸러지며 물에 녹지않는 것으로 나타났다. 불포화대의 두께가 얇아 지하수면까지 바이오차가 침투하더라도 지하수에 용해되지 않는 특성때문에 직접적으로 지하수 오염을 일으킬 가능성은 매우 낮을 것으로 판단하였다. 이에 비해 지하수면이 지표에 가깝고 매질의 투수성이 좋다면 바닥재는 강수와 함께 지하수면 아래로 침투할 수 있을 것으로 여겨진다. 이 연구에서 제시한 바닥재 및 바이오차의 불포화대 이동에 대한 물리적인 실험 결과들은 짧은 기간 동안 이상적인 조건에서 도출된 것이므로, 실제 매립지에서 강수로 인한 바닥재 및 바이오차의 이동 특성이나 분포 특성에 대해 일반화된 결론을 내리기는 어렵다고 판단된다. 실제 매립 환경에서는 수리지질특성이 공간적으로 매우 불균질하며 이방성을 가지기 때문에 복잡한 이동 경로로 인해 불포화대 내의 이동 시간이 보다 길어질 수 있으며 수평적인 분산 기작으로 인해 바닥재 및 바이오차가 보다 넓은 지역에 분포할 수도 있다. 따라서 이러한 매질의 불균질성이나 이방성을 고려한 보다 복잡한 조건에서의 연구들을 수행할 필요가 있다. 한편 칼럼 실험을 통한 화학적인 분

석결과, pH와 EC를 포함하여 바닥재로부터 용출된 수용성 이온 성분들이 지하수 환경을 교란시킬 가능성은 거의 없을 것으로 판단한다. 그러나 화력발전소에 따라 사용되는 유연탄이나 바이오매스의 종류가 달라질 수 있으며, 그로 인해 바닥재와 바이오차의 화학조성 역시 차이를 보일 수 있다. 또한 실제 현장의 매립 바닥재는 그 양이 상당히 많으며 지속적으로 생산된다. 따라서 매립에 의한 영향을 일반화하기 위해서는 좀 더 다양한 바닥재나 바이오차를 활용하여 다양한 농도 조건에서 연구를 수행할 필요가 있다. 이 연구는 바닥재 및 바이오차의 매립이 매립지 주변의 토양 및 지하수 환경에 미치는 영향과 다공성 매질 내 침투경로를 판단하기 위한 기초자료로써, 장기적 매립에 대해 안전성과 지속가능성을 판단하는 연구로 관련 연구 종사자들에게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 ‘기후변화대응 대응량 지하수 확보 및 최적활용 기술개발(22-3411)’, 사용후핵연료관리핵심기술개발사업단 및 한국연구재단의 과제(2021M2E1A1085200), 한국연구재단의 NRF-2018R1D1A1B07044596 과 2021R1C1C293498 과제의 지원을 받아 수행되었습니다. 연구에 도움을 주신 서울대학교 지구환경과학부의 이강근 교수님과 실험실 분들께 깊은 감사를 표합니다. 이 논문을 심사하고 세심한 조언을 나누어 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

References

- Arriola, E., Chen, W.H., Chih, Y.K., De Luna, M.D. and Show, P.L. (2020) Impact of post-torrefaction process on biochar formation from wood pellets and self-heating phenomena for production safety. *Energy*, v.207, p.118324. doi: 10.1016/j.energy.2020.118324
- ASTM (2013) Standard Test Method for Column Percolation Extraction of Mine Rock by the Meteoric Water Mobility Procedure. ASTM Int.
- Behnood, A., Gharehveran, M.M., Asl, F.G. and Ameri, M. (2015) Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, v.96, p.172-180. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.021
- Blackwell, P., Riethmuller, G. and Collins, M. (2012) Biochar application to soil. In *Biochar for environmental management* (pp. 239-258). Routledge.
- Friedman, G.M. and Sanders, J.E. (1978) *Principles of Sedimentology*. Wiley, New York.
- Harter, T. (2003) Basic concepts of groundwater hydrology. UCANR Publications.
- Jones, D.R. and Goodarzi, F. (Ed.). (1995) *The leaching of major and trace elements from coal ash*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. doi: 10.1007/978-94-015-8496-8_12
- Kim, S.H., Yang, I. and Han, G.S. (2015). Effect of sawdust moisture content and particle size on the fuel characteristics of wood pellet fabricated with *Quercus mongolica*, *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* sawdust. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, v.43(6), p.757-767. doi: 10.5658/WOOD.2015.43.6.757
- KLIC (Korean Law Information Center) (2022) New Energy and Renewable Energy Development, Use, and Spread Promotion Law, Available at <https://www.law.go.kr/> [Accessed February 13 2022].
- KOSIS (Korean statistical information service) (2022) Composition of power generation facilities by fuel source, Available at <https://kosis.kr/index/index.do> [Accessed February 13 2022].
- KMA (Korea Meteorological Administration) (2022) Climate information, Seoul, Available at <https://www.weather.go.kr/w/index.do> [Accessed February 13 2022].
- KOSTAT (Statistics Korea) (2022) Population and Population Density by Region, Available at http://www.index.go.kr/potal/stts/idxMain/selectPoSttsIdxMainPrint.do?idx_cd=1007&board_cd=INDX_001 [Accessed February 13 2022].
- Lee, G.S. (2011) A Study on the Feasibility of Co-Firing with Wood pellet in Bituminous Coal Thermal Power Plant. Keimyung University Publisher, Seoul.
- Lee, Y.R., Soe, J.T., Zhang, S., Ahn, J.W., Park, M.B. and Ahn, W.S. (2017) Synthesis of nanoporous materials via recycling coal fly ash and other solid wastes: A mini review. *Chemical Engineering Journal*, v.317, p.821-843. doi: 10.1016/j.cej.2017.02.124
- Lehmann, J. and Joseph, S. (2015) *Biochar for environmental management: an introduction* (pp. 33-46). Routledge.
- Lin, Y.L., Zheng, N.Y. and Hsu, C.H. (2021) Torrefaction of fruit peel waste to produce environmentally friendly biofuel. *Journal of Cleaner Production*, v.284, p.124676. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124676
- Maeng, J.H., Kim, T.Y. and Seo, D.H. (2014) Minimizing environmental impact in accordance with the thermal power plant ash management (I). *Korea Environment Institute*, v.24(5), p.472-486.
- Mattigod, S.V., Rai, D., Eary, L.E. and Ainsworth, C.C. (1990) Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I. Review of the major elements. *Journal of environmental quality*, v.19(2), p.188-201. doi: 10.2134/jeq1990.00472425001900020004x
- ME (Ministry of Environment) (2010) Report on the regular inspection of domestic and imported coal ash heavy metals (First half of 2010), Seoul.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2011) Study on Environmental Impact of the mixed with coal ash and soil, No. 11-1480523-000821-01.
- Oh, J. (2006) Current Status for Resources Recycling in Korea. In *Proceedings of the International Seminar on Mineral Processing Technology and Indo-Korean Workshop on Resource Recycling (MPT-2006)* (Vol. 1, pp. 42-48). Allied Publishers.

- Park, B.H., Lee, B.H. and Lee, K.K. (2018) Experimental investigation of the thermal dispersion coefficient under forced groundwater flow for designing an optimal groundwater heat pump (GWHP) system. *Journal of Hydrology*, v.562, p.385-396. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.023>
- Park, K.B., Chae, B.G., Kim, K.S. and Park, H.J. (2011) Analysis of rainfall infiltration velocity for unsaturated soils by an unsaturated soil column test: comparison of weathered gneiss soil and weathered granite soil. *Economic and Environmental Geology*, v.44(1), p.71-82. doi: 10.9719/EEG.2011.44.1.071
- Park, S.G. and Kim, J.M. (2012) Present Status and Recycling Technology for Bottom Ash in Korea. *Magazine of RCR*, v.7(1), p.9-12. doi: 10.14190/MRCR.2012.7.1.009
- Reijnders, L. (2005) Disposal, uses and treatments of combustion ashes: a review. *Resources Conservation and Recycling*, v.43, p.313-336. doi: 10.1016/j.resconrec.2004.06.007
- Shun, D.W., Bae, D.H., Oh, C.S. and Kim, H.C. (2010) Circulating fluidized bed combustion of Korean anthracite and fabricated anthracite fines. *Applied Chemistry for Engineering*, v.21(5), p.553-558.
- Siddique, R. (2010) Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials. *Resources, Conservation and Recycling*, v.54(12), p.1060-1066. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.06.011
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E. and Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in agronomy*, v.105, p.47-82. doi: 10.1016/S0065-2113(10)05002-9
- Song, Y., Kim, O., Park, S. and Lee, J. (2018) A Study on the Changes in Heavy Metal Emissions when Using Mixed Fuel in a Thermal Power Plant. *Journal of Environmental Health Sciences*, v.44(1), p.63-75. doi: 10.5668/JEHS.2018.44.1.63
- Yuanyuan, H. and Cho, H.C. (2019) The Research on the Relationship between Energy Consumption and Economic Development in China Based. *The Review of Eurasian Studies*, v.16(4), p.93-117.
- Zacco, A., Borgese, L., Gianoncelli, A., Struis, R.P.W.J., Depero, L.E. and Bontempi, E. (2014) Review of fly ash inertisation treatments and recycling. *Environ Chem Lett* v.12, p.153-175. <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0454-6>

Appendix A1. Schematic diagram of cutted iced column including observed parts (upper part of ① and lower part of ②) to investigate the bottom ash infiltration process.