

팽창성분이 혼입된 석탄재 기반 콘크리트의 팝아웃 발생 억제를 위한 석탄재 수처리 조건 최적화

홍재진* · 강주한** · 김미나** · 최우성*** · 오명준***† · 김성륜***††

Optimization of Coal Ash Water Treatment Conditions to Suppress Concrete Pop-out Based on Coal Ash Containing Expansion Components

Jae-Jin Hong*, Joo-Han Kang**, Mi-Na Kim**, Woo-Seong Choi***,
Myung-Jun Oh***†, Seong-Yun Kim***††

ABSTRACT: Coal ash has been used as a sand replacement in the construction industry. Due to the use of bituminous coal as a result of anthracite depletion, and quicklime as an air purifier in the desulfurization process, pop-out defects have recently occurred in concrete using coal ash, severely limiting the recycling of coal ash into concrete. In this study, the components that cause the pop-out problem of the coal ash filled concrete were identified and a pretreatment method to fully expand the expansive components in advance was proposed as a solution to this problem. By treating water twice for 10 min, allowing the CaO mixed in the coal ash to fully expand, the problems of pop-out and reduced compressive strength of the concrete were overcome. The cost and time efficient water treatment method proposed in this study is expected to promote the recycling of coal ash into concrete.

초 록: 석탄재는 건축 및 건설 산업에서 모래의 대체재로 사용되어 왔다. 그러나, 무연탄의 고갈에 따른 유연탄의 사용이나, 탈황공정에서 공기정화의 목적으로 사용된 생석회의 사용으로 인한 팽창성분의 혼입으로 인해 최근 석탄재를 혼입한 콘크리트에서 팝아웃 문제가 발생하고 있어 석탄재의 콘크리트 재활용을 심각하게 제한하고 있다. 본 연구에서는 석탄재 콘크리트 팝아웃 문제를 유발하는 성분을 특정하고, 이를 해결하기 위한 방안으로 팽창성분을 미리 완전히 팽창시키기 위한 전처리 방법을 제안하였다. 석탄재에 혼입된 산화칼슘을 완전히 팽창시킬 수 있는 10분씩 2회 처리하는 최적조건을 적용하여 콘크리트의 팝아웃 및 압축 강도 저하의 문제를 극복할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 비용 및 시간 효율적인 수처리 방법은 석탄재의 콘크리트로의 재활용을 활성화 시킬 것으로 기대된다.

Key Words: 석탄재(Coal ash), 콘크리트(Concrete), 전처리(Pre-treated), 팝아웃(Pop-out)

Received 16 May 2024, received in revised form 18 June 2024, accepted 20 June 2024

*Department of Convergence Management of Technology, Jeonbuk National University

**Department of Carbon Composites Convergence Materials Engineering, Jeonbuk National University

***Department of Organic Materials and Textile Engineering, Jeonbuk National University

†Corresponding author (E-mail: mjoh@jbnu.ac.kr)

††Co-corresponding author (E-mail: sykim82@jbnu.ac.kr)

1. 서 론

모래는 세계적으로 물 다음으로 많이 소비되는 원료로, 건축 및 건설 산업에서 콘크리트, 도로, 철도, 유리 등의 제작에 사용되는 중요한 재료이다[1]. 모래와 같은 골재의 사용량은 지난 20년간 약 3배 증가하여 연간 최대 500억 톤 정도 소비되는 것으로 추정되고 있다[2]. 국내의 경우, 강모래는 거의 고갈되어 미량만 사용되고 있으며, 주로 사용되고 있는 바다모래의 경우, 어장 파괴 및 해안 침식과 같은 문제를 유발하고 있다[3,4]. 대안으로 고려될 수 있는 산림 혹은 폐 모래의 사용도 여의치 않아, 모래를 대체할 자원의 개발이 시급하다.

석탄재는 주로 콘크리트 및 시멘트의 원료로써 모래를 대체하여 재활용되고 있는 폐자원이다[5]. 화력 발전소나 제철소 등에서 사용한 석탄의 연소과정에서 연간 750만 톤 이상의 석탄재가 배출되고 있으며, 이 중 82.7%의 석탄재가 재활용되고 있다[6]. 특히, 건축 및 건설 산업에서 콘크리트의 재료로 사용 시, 시멘트 질량의 80%까지 혼합하여 사용할 수 있기 때문에 많은 양의 석탄재를 처리할 수 있는 매우 중요한 재활용 방안이다[7]. 또한, 국내를 포함해서 전 세계적으로 석탄의 사용량이 증가하여 석탄재의 발생량 역시 증가할 것으로 예상되어, 재활용의 필요성 또한 더욱 증대되고 있다[8].

석탄재의 특성상 발생과정에 따라 물리적 및 화학적 특성이 달라지기 때문에 이를 고려한 다양한 석탄재의 재활용 연구들이 수행되고 있다[9-15]. 석탄재의 일종인 제강 슬래그를 복합재료의 구조용 충전제로 사용하는 연구가 보고되었다[10]. 석탄 가스화 미세 슬래그의 잔류 탄소를 직접 전극으로 사용하여 산소 환원 촉매로 사용하는 기술이 개발되었다[11]. 석탄재 내부에 함유된 철 및 비철 같은 고부가가치 금속 및 희토류를 입자 크기에 따른 분류 및 자성 분리 기술을 이용해 회수하는 방법이 제안되었다[12]. 이외에도 토양을 대체하거나 비료로 사용[13], 해양에 응용하여 산호초 복원[14], 제강 슬래그 내부의 Fe(II)를 이용하여 Cr(VI)와 같은 중금속 제거[15] 등을 위한 연구들이 보고되었다.

석탄재를 재활용하기 위한 다양한 연구들이 진행되었지만, 석탄재의 재활용 양과 효율 측면에서 콘크리트 재료로 사용하여 모래나 시멘트를 대체하는 연구가 가장 활발히 진행되고 있다[16]. 석탄재를 이용한 콘크리트의 강도발현을 분석하여, 석탄재의 함량과 화학적 활성화 정도에 따라 콘크리트의 강도가 제어될 수 있다는 연구가 보고되었다[17]. 친환경적인 콘크리트 제작을 위해 석탄재를 비롯한 산업 부산물만을 사용한 다공성 콘크리트 제조를 통해 중금속을 고형화, 안정화 된 제품에 효과적으로 고정하는 방안이 개발되었다[18]. 석탄재의 함량 증가에 따라 콘크리트의 가공성과 압축 강도가 감소하여 이를 해결하기 위해

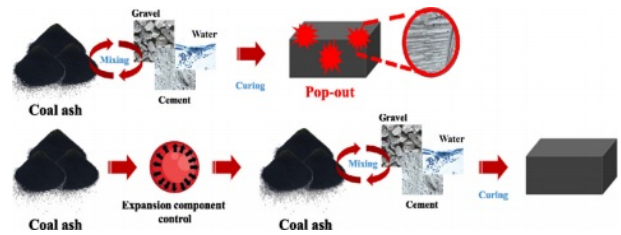


Fig. 1. Schematic diagram of the strategy for solving the pop-out phenomenon

황산나트륨을 사용하여 강도를 증가시키는 방법이 제안되었다[19]. Kumar 등[20]은 학계에 보고된 200개 이상의 연구를 종합적으로 분석하여 다양한 석탄재 기반 콘크리트의 내구성에 대해 분석하여 비교하였다.

최근 석탄재를 콘크리트 원료로 재활용 시, 팽아웃 현상의 발생이 보고되고 있다[21]. 콘크리트 표면에 발생하는 팽아웃은 외관의 불량 및 콘크리트의 기계적 특성 감소 등의 문제를 유발하기 때문에 팽아웃 문제의 해결 방안이 요구되고 있다[21]. 이러한 석탄재 콘크리트 팽아웃의 원인을 분석 하거나, 해결 방안에 대한 연구들도 보고되고 있다[22,23]. Lee 등[22]은 석탄재를 이용한 콘크리트는 팽창성 물질인 CaO나 MgO에 의해 팽아웃 현상이 발생할 수 있다고 보고하였다. 이러한 석탄재의 팽아웃 현상 방지를 위해 고온 건조 처리, 입자 크기 제어, 자연 에이징 등의 해결 방법들이 제안되었다[23].

팽아웃 현상의 해결 방안으로 제안된 고온 건조처리나 입자 크기 제어의 경우 처리를 위한 비용이 크다는 한계점이 있으며, 자연 에이징 처리의 경우 에이징 처리 시간이 매우 오래 걸린다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 석탄재의 비용, 시간 및 처리량 효율적인 재활용 방안을 제안하는 것을 목표로 하였다. Fig. 1과 같이, 석탄재를 분석하여 CaO가 주요한 팽창성분임을 확인하였고, CaO의 반응에 대해 분석하였으며, CaO의 수화반응을 조절하여 콘크리트 제작 시 팽아웃 현상을 억제하는 방안에 대해 연구했다. 또한, 본 연구에서 제안한 수처리 방법을 통해 콘크리트 팽아웃 문제를 효율적으로 해결하고 기계적 강도를 향상시켰다.

2. 실 험

2.1 재료 및 시편제조

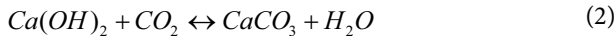
사용된 석탄재는 광양 제철소와 전주 폐기물 발전소에서 수거한 석탄재를 3대7 비율로 혼합하여 사용했다. 모래와 자갈, 포틀랜드 시멘트(KS L 5201, 쌍용 C&E, 서울, 대한민국)를 사용하여 콘크리트를 구성하였다. 덕산과학(서울, 대한민국)에서 구매한 산화칼슘을 사용하여 수화반응을 최적화 하였다.

물과, 시멘트, 자갈, 석탄재가 각각 10.5, 15.8, 36.8, 36.9 wt%의 비율로 혼합 되었으며, 28일 간의 양생 과정을

거쳐 제조되었다. 팝아웃 문제를 관찰하기 위한 시편은 상단 지름 60 mm, 하단 지름 40 mm, 높이 45 mm의 크기로 제작해 분석했다. 압축강도를 측정하기 위한 시편은 지름 100 mm, 높이 200 mm의 크기로 제작했다.

2.2 CaO 팽창거동

CaO와 물과의 반응식은 아래와 같다[24].



위와 같은 반응을 확인하기 위해 50 ml 매스실린더에서 CaO와 물의 반응 실험을 진행했고, CaO의 부피 및 온도변화를 측정했다. CaO와 물의 반응을 통한 부피 변화를 실린더 눈금으로 측정했으며, 그 과정에서 일어나는 발열반응을 확인하기 위해서 적외선 온도계(DT8380, Washranp, 중국)를 통해 최고 온도를 확인했다. 해당 실험은 반응 후 건조시킨 시료에 반복적으로 실험하여 부피 팽창이 확인되지 않을 때까지 진행했다. CaO와 물의 반응으로 팽창한 물질의 Thermogravimetric Analysis (TGA) 분석을 통해 생성된 물질의 피크를 관찰했다. 또한, 석탄재의 수처리 시간에 따른 반응의 변화를 확인하기 위해 TGA 분석을 진행했다.

2.3 특성화

팝아웃 시료와 석탄재의 Wavelength Dispersion X-ray Fluorescence Spectrometer (WD-XRF, ZSX Primus IV, Rigaku, 일본) 분석을 통해 B~Cm 범위의 원소를 분석했으며, 팝아웃 시료의 X-ray Diffraction (XRD, D8 ADVANCE, Bruker Corporation, 미국) 분석을 통해 원소들의 피크를 확인했다. 석탄재를 2.00 kV, 50배율 조건에서 전계방출주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope (FE-SEM), GeminiSEM 500, Zeiss, 독일)을 사용하여 촬영했으며, 부착된 Energy dispersive spectroscopy (EDS) 검출기를 통해 석탄재의 구성 원소들을 분석했다. 질소 가스 조건에서 분당 10°C의 속도로 가열 조건에서 TGA (Q50, TA Instruments, 미국) 피크를 분석하여 수화반응을 통한 CaO의 변화를 확인했다. 콘크리트의 압축강도는 ISO 1920-4에 근거하여 0.6 MPa/s의 일정한 속도로 하중을 가하며 측정했으며, 3개의 공시체의 시험결과를 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 팝아웃 분석

Table 1에는 팝아웃 시료와 석탄재 혼입물을 XRF로 분석한 데이터가 정리되어 있다. SiO₂와 같은 골재 성분들을 제외하면 CaO가 주성분으로 검출되었으며 염화물(Cl⁻)의 함

Table 1. XRF of pop-out sample and coal ash

Compound (%)	Pop-out sample	Coal ash
SiO ₂	54.0	13.0
Al ₂ O ₃	15.9	22.8
Fe ₂ O ₃	1.0	1.5
CaO	8.7	16.7
MgO	1.8	1.5
Na ₂ O	4.9	2.4
K ₂ O	1.9	1.4
TiO ₂	0.3	0.3
SO ₃	0.4	1.2
P ₂ O ₅	0.1	0.2
LOI	6.8	32.8
Cl ⁻ (ppm)	31 060	50 400

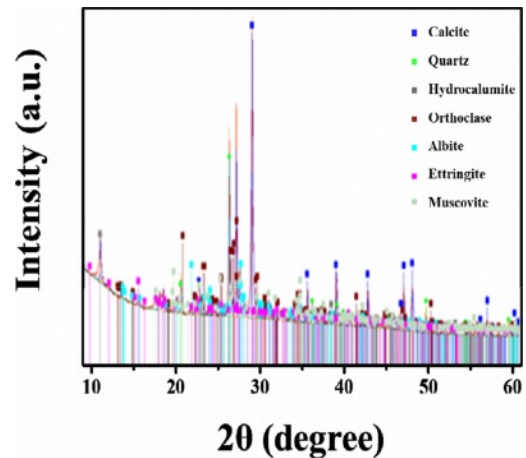


Fig. 2. XRD peaks of pop-out sample

량이 매우 높은 것으로 나타났다. 또한, Fig. 2에서 확인할 수 있는 것과 같이 XRD의 분석을 통해 시료 내부에 탄산칼슘(CaCO₃)에 해당하는 피크가 명확하게 관찰되었고, 골재 성분인 석영, 백운모, 장석 등의 피크가 관찰되었다. 석탄재 내부의 높은 CaO 함량은 주로 발전소의 탈황 과정에서 생석회(CaO)의 투입에 따른 것으로 판단되며, 높은 함량의 염화물은 석탄재 처리과정에서 바닥물을 이용하기 때문에 나타난 것으로 분석된다. Fig. 3은 석탄재의 SEM과 EDS 이미지를 나타낸다. Fig. 3a에서 SEM 이미지를 통해 석탄재의 입자 크기가 직경 100 μm 이하의 작은 입자부터 800 μm 이상의 큰 입자까지 매우 다양함을 확인할 수 있다. Fig. 3b는 석탄재의 EDS 분석을 나타내며 석탄재의 주요 원소가 Ca, O, Si, C 같은 원소들로 이루어져 있고, 이는 XRF 및 XRD 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 CaO의 팽창 실험 결과와 온도변화 추이를 나타낸다. 매스실린더의 바닥까지 물을 최대한 침투시키기 위

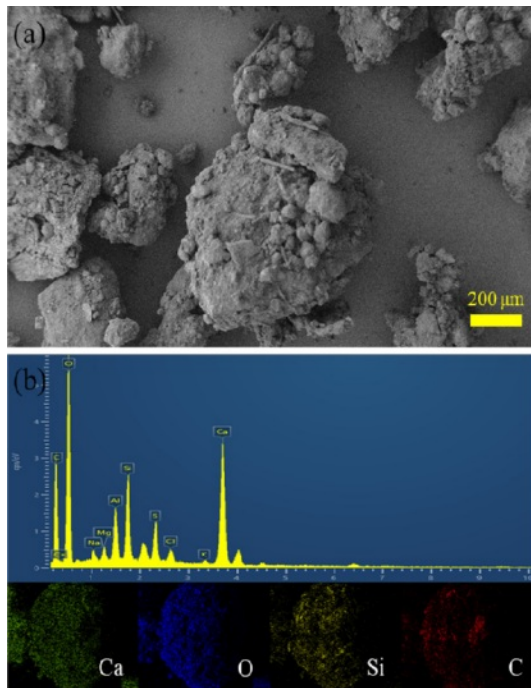


Fig. 3. (a)SEM image and (b)EDS data of coal ash

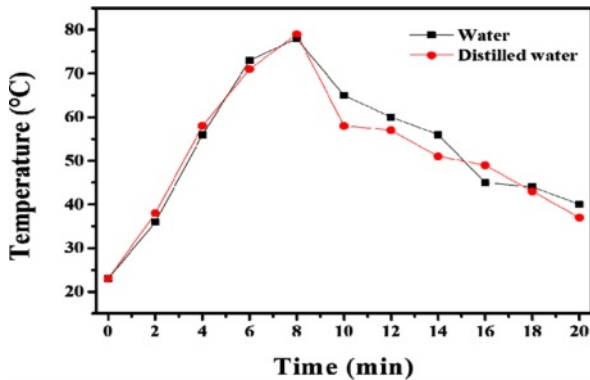


Fig. 4. Temperature change due to reaction between CaO and water

해 CaO는 최소 눈금 단위인 5 ml를 사용했으며, 물을 투입 후 건조를 반복했다. 1회 반응 이후 부피는 약 8 ml로 60% 정도의 팽창을 보였으며, 2회 반응 이후 약 12 ml로 최대 140%의 부피 팽창을 확인했다. 이후 추가 반복실험에도 부피 팽창은 일어나지 않았다. 물과 증류수를 사용하여 온도변화를 확인한 결과 물과 증류수로 인한 차이는 미미하며, 온도가 올라가는 구간인 10분 이내에 대부분의 CaO가 물과 반응한다고 판단되었다. 30분 이상 경과 시 거의 상온까지 온도가 내려오며 1시간 이상 경과 시에는 상온 상태로 유지되었다. 이러한 분석 결과들을 바탕으로 석탄재 내부에 존재하는 다량의 CaO가 팽아웃의 원인이라고 추정되었으며, 충분한 반응을 위해서 10분씩 2회의 수처리가 가장 효율적

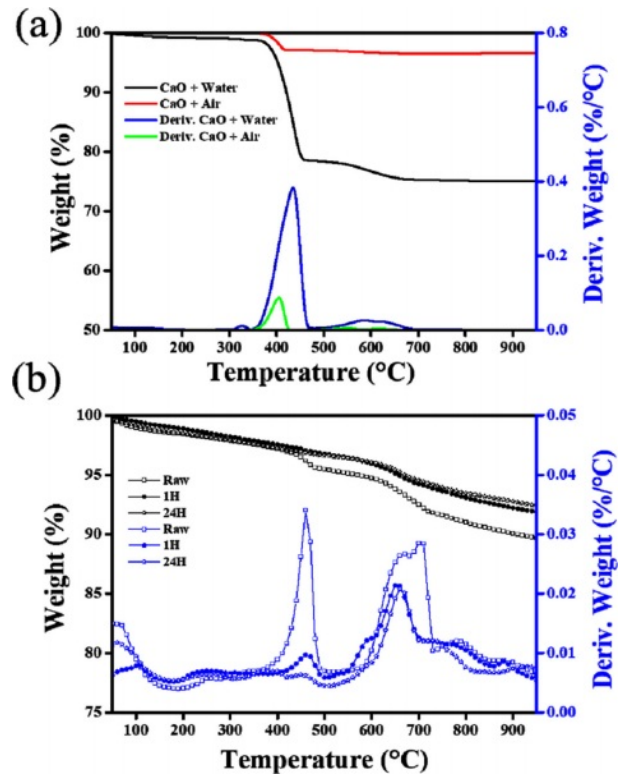


Fig. 5. TGA and DTG peaks of (a) CaO and (b) water-treated coal ash

인 전처리 조건으로 도출되었다.

3.2 수처리 석탄재 분석

본 연구에서는 선제적으로 CaO의 수화반응을 일으켜 콘크리트 제조 시 내부에서 팽창을 억제하는 방안을 제안하였다. Fig. 5는 수처리를 진행한 CaO와 석탄재의 TGA 및 Derivative thermo gravimetry (DTG) 그래프를 나타낸다. Fig. 5a는 완전히 수처리 한 CaO와 대기에 노출시킨 CaO의 피크를 보여준다. 물과 반응한 CaO의 경우 450도와 650도 부근에서 피크가 나타났으며 각각 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 CaCO_3 의 피크를 의미한다[25,26]. 같은 시간 동안 공기에 노출시킨 CaO는 대부분 450도에서 피크가 확인되었으며, 수처리에 비해 적은 양이 반응한 것을 확인했다. Fig. 5b는 수처리 시간을 다르게 한 석탄재의 TGA와 DTG 그래프를 보여준다. 수처리 한 석탄재의 피크는 오차가 일부 존재하지만 공통적으로 100도 이하의 피크와 450도, 그리고 650도 부근에서 피크가 관찰되었다. 100도 이하의 피크는 석탄재 내부에 존재하는 수분에 의한 피크이며, CaO와 동일하게 450도와 650도에서 나타난 피크는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 CaCO_3 를 의미한다. 수처리 한 석탄재의 경우 650의 피크가 더 큰 것으로 보아 수화반응으로 생성된 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 공기중의 이산화탄소와 결합하여 CaCO_3 의 형태로 되어 있을 것으로 분석된다.

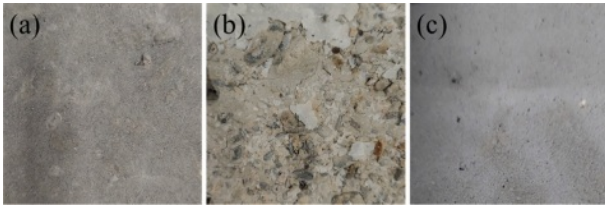


Fig. 6. Morphology of (a) sand, (b) untreated coal ash and (c) water-treated coal ash concretes

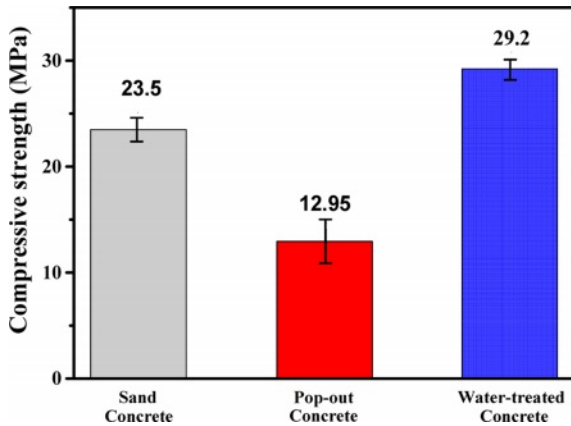


Fig. 7. Compressive strength of concretes

3.3 콘크리트 모폴로지 및 강도 분석

Fig. 6은 수처리를 하지 않은 석탄재를 이용한 콘크리트와 수처리를 진행한 석탄재를 이용한 콘크리트의 모폴로지를 나타낸다. 수처리를 진행하지 않은 석탄재 콘크리트의 경우 균열이 나타난 것을 확인할 수 있으며, 수처리를 진행한 석탄재 콘크리트에서는 문제가 나타나지 않았다.

Fig. 7은 제작한 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. 모래를 사용하여 제작한 콘크리트는 23.5 MPa의 값을 나타냈다. 반면에 팍아웃이 일어난 콘크리트의 압축강도는 12.95 MPa로 매우 낮은 값을 나타냈다. 수처리를 진행한 콘크리트의 압축강도는 29.2 MPa의 값을 나타내며, 압축강도가 상승한 것을 확인했다. 수처리 하지 않은 콘크리트 대비 수처리한 콘크리트의 압축강도는 125 % 향상되었고, 이는 수처리에 의해 CaO의 팽창 및 팍아웃 현상이 억제되었기 때문이다. 또한, 수처리한 콘크리트의 압축강도는 모래를 사용한 콘크리트를 24% 상회하였으며, 이는 28일 간의 장기간양생 과정에서 석탄재 포졸란 반응이 활성화되어 압축강도가 증가한 것으로 보인다[27].

4. 결 론

본 연구에서는 모래를 대체하여 석탄재를 사용한 콘크리트 제조 시 발생하는 팍아웃 문제를 해결하기 위한 방안을 모색했다. 팍아웃 원인으로 추정되는 현상들을 조사하여 팍아웃의 원인이 석탄재 내부에 존재하는 CaO로 인한

결과임을 확인하였다. 이를 해결하기 위해 석탄재의 선제적 수처리 방법을 제안했다. 수처리 전과 후의 콘크리트의 모폴로지 확인 및 기계적 강도 측정을 통해 석탄재를 최적화된 조건인 10분씩 2회 수처리함으로써 석탄재 내부의 CaO 선팽창을 유도하여 팍아웃 문제를 해결하고, 콘크리트의 압축강도를 향상시킬 수 있는 것을 확인했다. 이러한 결과들로부터, 최소 1개월 이상의 석탄재 자연 에이징 시간을 20분 정도의 처리 시간으로 단축할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 본 연구의 석탄재 수처리 방법은 고갈되어 가는 모래의 사용을 줄이고 석탄재의 재활용률을 향상시켜, 매립으로 인한 환경오염을 방지하는데 중요한 역할을 할 수 있는 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 융합기술사업화 확산형 전문인력 양성사업과 교육부의 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC3.0)의 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다.

REFERENCES

- John, R., "Sand Geographies: Disentangling the Material Foundations of the Built Environment," *Geography Compass*, Vol. 15, No. 5, 2021, e12560.
- Bendixen M., Iversen, L.L., Best, J., Franks, D.M., Hackney, C.R., Latrubesse, E.M., and Tusting, L.S., "Sand, Gravel, and UN Sustainable Development Goals: Conflicts, Synergies, and Pathways Forward," *One Earth*, Vol. 4, No. 8, 2021, pp. 1095-1111.
- Jo, Y.K., Kim, Y.J., and Soh, Y.S., "Evaluations of Corrosion Resistance of Coated Steel Using Polymer Cement Slurry," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 1, 2003, pp. 117-124.
- Kim, J.H., and Yoo, S.H., "Public Perspective on the Environmental Impacts of Sea Sand Mining: Evidence from a Choice Experiment in South Korea," *Resources Policy*, Vol. 69, 2020, 101811.
- Muthusamy, K., Rasid, M.H., Jokhio, G.A., Budiea, A.M.A., Hussin, M.W., and Mirza, J., "Coal Bottom Ash as Sand Replacement in Concrete: A Review," *Construction and Building Materials*, Vol. 236, 2020, 117507.
- Putilova, I.V., "Current State of the Coal Ash Handling Problem in Russia and Abroad, Aspects of the Coal Ash Applications in Hydrogen Economy," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 80, 2023, pp. 31040-31048.
- Nayak, D.K., Abhilash, P.P., Singh, R., Kumar, R., and Kumar, V., "Fly Ash for Sustainable Construction: A Review of Fly Ash Concrete and Its Beneficial Use Case Studies," *Cleaner Materials*, Vol. 6, 2022, 100143.
- Tamanna, K., Raman, S.N., Jamil, M., and Hamid, R., "Coal Bottom Ash as Supplementary Material for Sustainable Construction: A Comprehensive Review," *Construction and Build-*

- ing Materials, Vol. 389, 2023, 131679.
9. Al Biajawi, M.I., Embong, R., Muthusamy, K., Norasyikin, I., and Obianyo, I.I., "Recycled Coal Bottom Ash as Sustainable Materials for Cement Replacement in Cementitious Composites: A Review," *Construction and Building Materials*, Vol. 338, 2022, 127624.
 10. Nam, J.H., Chun, H.J., and Hong, I.P., "Effect of Slag Particle Size and Volume Fraction on Mechanical Properties of Slag Reinforced Composite," *Composites Research*, Vol. 24, No. 4, 2013, pp. 218-222.
 11. Guo, Q., Li, H., Wang, S., Gong, Y., Ren, L., and Yu, G., "Experimental Study on Preparation of Oxygen Reduction Catalyst from Coal Gasification Residual Carbon," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 446, 2022, 137256.
 12. Allegrini, E., Maresca, A., Olsson, M.E., Holtze, M.S., Boldrin, A., and Astrup, T.F., "Quantification of the Resource Recovery Potential of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ashes," *Waste Management*, Vol. 34, No. 9, 2014, pp. 1627-1636.
 13. Jafer, H.M., Atherton, W., Sadique, M., Ruddock, F., and Loffill, E., "Development of a New Ternary Blended Cementitious Binder Produced from Waste Materials for Use in Soft Soil Stabilization," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 172, 2018, pp. 516-528.
 14. Takahashi, T., and Yabuta, K., "New Applications for Iron and Steelmaking Slag," *NKK Technical Review*, No. 87, 2022, pp. 38-44.
 15. Park, D., Lim, S.R., Lee, H.W., and Park, J.M., "Mechanism and Kinetics of Cr(VI) Reduction by Waste Slag Generated from Iron Making Industry," *Hydrometallurgy*, Vol. 93, 2008, pp. 72-75.
 16. Ghazali, N., Muthusamy, K., and Ahmad, S.W., "Utilization of Fly Ash in Construction," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 601, 2019, 012023.
 17. Bae, S.Y., "An Experimental Study on Strength Development of Concrete Including Fly Ash," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 14, No. 3, 2000, pp. 66-71.
 18. Jang, J.G., Ahn, Y.B., Souri, H., and Lee, H.K., "A Novel Eco-friendly Porous Concrete Fabricated with Coal Ash and Geopolymeric Binder: Heavy Metal Leaching Characteristics and Compressive Strength," *Construction and Building Materials*, Vol. 79, 2015, pp. 173-181.
 19. Rafieizonooz, M., Salim, M.R., Hussin, M.W., Mirza, J., Yunus, S.M., and Khankhaje, E., "Workability, Compressive Strength and Leachability of Coal Ash Concrete," *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 56, 2017, pp. 439-444.
 20. Kumar, S., Kapoor, K., Singh, S.P., Singh, P., and Sharma, V., "A Review on the Properties of Natural and Recycled Coarse Aggregates Concrete Made with Different Coal Ashes," *Cleaner Materials*, Vol. 5, 2022, 100109.
 21. Xue, J.C., Wang, W.C., Wu, C.H., Hong, T.J., Chen, T.H., and Huang, C.Y., "Deterioration Analysis and Expansion Behavior Prediction of Electric Arc Furnace Slag as Fine Aggregate in Mortar," *Journal of Building Engineering*, Vol. 85, 2024, 108717.
 22. Lee, M.H., and Lee, J.C., "Study on the Cause of Pop-out Defects on the Concrete Wall and Repair Method," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, 2009, pp. 482-490.
 23. Cho, B.S., "Study on Stable Use of Stainless EAF Oxidizing Slag as Fine Aggregate of Concrete," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 18, No. 3, 2014, pp. 133-142.
 24. Jung, H.Y., Sohn, J.Y., Roh, S.G., Lim, M.W., and Sohn, J.S., "Preparation and Characterization of Solid Reducing Agent Using a PVA Binder," *Polymer(Korea)*, Vol. 43, No. 3, 2019, pp. 379-386.
 25. Sulimai, N.M., Salifairus, M.J., Khusaimi, Z., Malek, M.F., Abdullah, S., Khan, H., Al Rokayan, S., and Rusop, M., "Synthesis of Nanostructured Calcite Thin Film by Additive-free Carbonation Reaction via Thermal Chemical Vapor Deposition Method," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 32, 2021, pp. 3072-3082.
 26. Yu, J., Zeng, X., Zhang, G., Zhang, J., Wang, Y., and Xu, G., "Kinetics and Mechanism of Direct Reaction between CO₂ and Ca(OH)₂ in Micro Fluidized Bed," *Environmental Science & Technology*, Vol. 47, No. 13, 2013, pp. 7514-7520.
 27. Lee, D.U., and Kim, Y.S., "A Study on the Strength Properties of Concrete Containing Bottom Ash as a Part of Fine Aggregate," *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 22, No. 6, 2006, pp. 79-86.