

The study of geopolymer utilization of reclaimed ash by using magnetic separation method

Kangduk Kim[†]

Department of Advanced Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received August 29, 2017)

(Revised September 22, 2017)

(Accepted September 27, 2017)

Abstract Using a magnetic separation process, pond ash generated in thermoelectric power plants was separated into magnetic materials and nonmagnetic materials in order to make it into a raw material of geopolymers and unburned carbon; screening characteristics according to the particle sizes and magnet strength levels of the pond ash were observed. Based on the results of magnetic separation into fine particle (0.15~0.84 mm) and rough particle (0.84~2.4 mm) pond ash using 3000 G magnets, the weight fraction and ignition loss of nonmagnetic materials were found to be higher than those of magnetic materials, regardless of the particle size. In the case of fine particle pond ash, when the magnet strength was increased from 3000 G to 10000 G, even those materials that were weakly magnetic were separated into magnetic materials, leading to drastic increases in the weight fraction of magnetic materials, such that the ignition loss accounted for 66.9 % (22.8 wt%) of the entire ignition loss of 32.6 wt%, despite of the low ignition loss. Based on the results of measurement of the compressive strength levels of geopolymers made of magnetic-separated rough particle pond ash, the compressive strength of geopolymers made of magnetic materials containing small amounts of unburned carbon was found to be 20 MPa.

Key words Reclaimed ash, Magnetic separation, Unburned carbon, Geopolymer

자력선별법을 이용한 화력 발전소 매립회의 지오폐리머 원료화 연구

김강덕[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2017년 8월 29일 접수)

(2017년 9월 22일 심사완료)

(2017년 9월 27일 게재확정)

요약 화력발전소에서 발생하는 매립회의 지오폐리머 원료화를 위하여 자력선별 공정을 이용하여 자성체와 비자성체로 분리하였으며, 매립회의 입도 및 자석의 세기에 따른 미연탄소의 선별 특성을 관찰하였다. 3000 G 자석을 이용한 세립(0.15~0.84 mm)과 조립(0.84~2.4 mm) 매립회의 자력선별 결과, 매립회는 입도에 상관없이 비자성체의 무게분율과 강열감량이 자성체보다 높게 나타났으며, 세립 매립회의 경우 자석의 세기를 3000 G에서 10000 G로 증가시키면, 약한 자성을 띠는 물질들도 자성체로 분리됨에 따라 자성체의 무게 분율이 급격히 증가되면서 낮은 강열감량에도 불구하고 전체 강열감량의 32.6 wt%의 66.9%(22.8 wt%)를 차지하였다. 자력 선별된 조립 매립회로 제조된 지오폐리머의 재령일별 압축강도 측정결과, 미연탄이 적게 포함된 자성체로 제조된 지오폐리머의 압축강도가 20 MPa를 나타내었다.

1. 서론

화력발전소에서 발생하는 석탄회는 크게 비회(fly ash)와 저회(bottom ash)로 나뉘며, 국내의 경우 연간 약 830만톤의 석탄회가 발생되고 있다[1]. 현재 발생된 석

탄회의 약 70%가 재활용되고 있으며, 재활용되지 못한 석탄회의 대부분은 발전소내에 위치한 회 처리장(pond ash)을 통해 비회와 저회의 구분 없이 매립되고 있는 실정이다[2]. 일부 화력 발전소의 경우 매립장의 처리 용량이 이미 포화상태에 도달하였으며, 이에 따른 매립회의 대량 처리기술 개발이 시급한 실정이다[3].

현재 석탄 매립회(이하 매립회) 재활용 관련 연구들은 저장도 고유동화재, 도로 기층 보조재료 및 콘크리트용

[†]Corresponding author

E-mail: solidwaste@kyonggi.ac.kr

골재와 같은 건설 및 토목재료로 재활용하기 위한 연구들이 활발히 진행 중이다[1, 4-6]. 또한 구조물의 뒤채움재로 활용하는 방법과 포졸란 물질로 재활용하는 연구도 진행 중이다[7, 8]. 그러나 석탄 연소 부산물인 매립회 경우 일반적으로 점토와 유사한 화학조성을 나타내며 SiO₂와 Al₂O₃가 풍부하기 때문에 매립회에 존재하는 미연탄소 성분을 제거한다면 기존 시멘트를 대체할 저탄소 무기계 바인더인 지오폴리머(geopolymer)의 원료로 활용이 충분히 가능할 것으로 판단된다[9-14]. 지오폴리머 바인더의 기본적인 강도 발현기구는 원료에 존재하는 Al과 Si 등의 원자들이 높은 pH 상태에서 용출된 후, 용출된 이온들이 규산칼슘 수화물이나 알루미늄칼슘 수화물을 생성하여 시멘트와 같은 경화성능을 갖게 하는 것이다[15, 16].

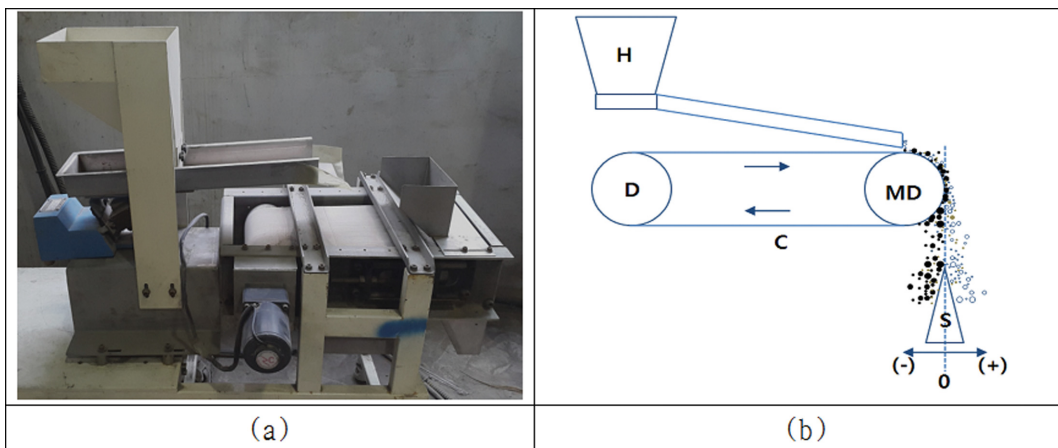
본 연구에서는 건식 자력선별 공정을 이용해 매립회의 입도 및 자력 변화에 따른 자성체와 비자성체로의 분리 실험을 수행하였으며, 분리된 매립회의 물리/화학적 특성을 분석함으로써 매립회의 지오폴리머 원료화 가능성 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 매립회는 국내 ‘S’ 화력발전소에서 발생된 매립회를 사용하였다. 건식자력선별을 위한 전단계로 매립회는 습식 체가름 공정을 통해 각각 0.15~0.84 mm와 0.84~2.4 mm의 두 가지 입도범위 원료를 준비하였으며, 각각을 ‘세립(fine)’와 ‘조립(coarse)’로 명명

하였다. 건식 자력선별에 사용된 희토류 자석은 각각 3000 G(gauss)와 10000 G의 두 종류를 사용하였으며, 자력선별기의 경우 자체 제작하였다. 건식자력선별 공정의 경우 호퍼에 투입된 건조 매립회가 진동공급기를 통해 컨베이어 벨트 위로 정량 공급되며, 매립회는 희토류 자석이 사용된 magnetic drum을 통과하면서 자성체(magnetic material)와 비자성체(non-magnetic material)로 각각 분리시켰다(Fig. 1). 자성체와 비자성체로 각각 자력 선별된 조립 매립회를 L/S 비 = 0.3(무게비)로 고정시키고 지오폴리머 반응을 위한 알칼리 활성화제로 NaOH 18 M 수용액을 혼합하여 지름 = 20 mm의 지오폴리머 시험체를 제조하였다. 제조된 시험체는 70°C/24 h의 조건으로 양생하였으며, 2/4/14일 상온(25°C) 재령 후 압축강도를 측정하였다.

매립회의 화학성분과 결정상 분석은 각각 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan)와 XRD(X'pert pro, PANalytical Co., Netherlands)를 이용하여 분석하였으며, 강열감량 실험은 KS F 3416 “탄소 및 탄화구소 함유 내화물의 화학 분석 방법”을 이용하였다. 또한 자력선별된 매립회의 철산화물 형태를 파악하기 위해 KS E 3016 “철광석의 산화제일철 분석방법”과 KS E ISO 2597-1 “철광석의 총 철 분석방법-제1부: 염화주석 환원 후 적정법”을 이용한 습식정량분석을 수행하였다. 매립회의 이미지는 광학현미경(DCS-105, Sometech vision, Korea)과 SEM(JSM-6500F, JEOL, Japan)을 이용하여 관찰하였다. 매립회로 제조된 지오폴리머의 압축강도는 UTM(BESTUTM-030MD, SSAUL BESTECH, Korea)을 이용하여 측정하였다.



H: Hopper
 D: Motor
 MD: Magnetic drum
 C: Conveyor belt
 S: Separator
 ●: Magnetic materials(M)
 ○: Non-magnetic materials(NM)

Fig. 1. (a) Photograph and (b) Schematic diagram of dry type magnetic separation apparatus.

Table 1
Chemical compositions of as-received reclaimed ash(wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	ZrO ₂	P ₂ O ₅	C	L.O.I	Total
RA*	43.6	22.3	4.6	5.3	1.6	0.4	0.6	1.0	0.1	0.5	17.7	2.3	100.0

*RA: Reclaim ash discharged from thermal power plant.

3. 결과 및 고찰

Table 1은 매립회의 화학조성 분석 결과를 나타낸 것이다. 매립회는 SiO₂와 Al₂O₃ 성분이 각각 43.6 wt%와 22.3 wt% 존재하였으며, 미연탄소 성분이 17.7 wt% 높게 나타났다. 매립회는 일반 적점토에 비해 SiO₂의 함량이 약 10 wt% 정도 낮지만, 지오폴리머 콘크리트의 강도 저하를 유발하는 미연탄소 성분이 17.7 wt%나 존재하기 때문에 이를 제거하게 되면 SiO₂와 Al₂O₃가 각각 53.0 wt%와 27.1 wt%로 증가하여 지오폴리머 원료로 적용 가능할 것으로 판단된다[15, 16].

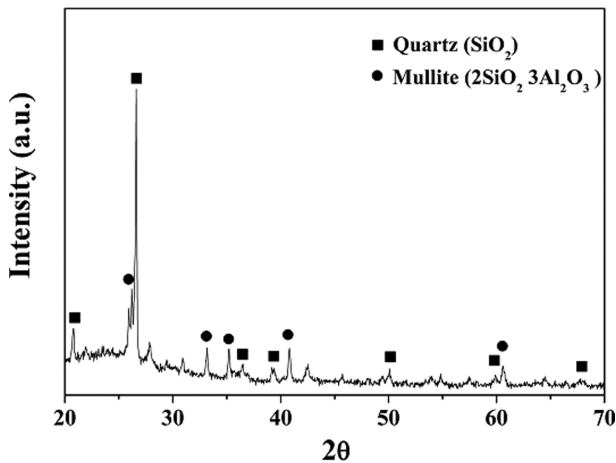


Fig. 2. XRD pattern of as-received reclaimed ash.

XRD를 이용한 매립회의 결정상 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다. 결정상 분석결과 매립회는 quartz(SiO₂)와 mullite(2SiO₂ · 3Al₂O₃)를 주 결정상으로 나타내었다. mullite 결정상은 화력 발전소의 고온 열처리 시에 석탄에 포함되어 있는 SiO₂와 Al₂O₃ 성분의 결합에 의한 것으로 대부분의 매립회에서 관찰된다[17]. 매립회를 포함한 각종 부산물들의 지오폴리머 원료화를 위해서는 중/축합 반응(polymerization/condensation reaction)에 참여하는 SiO₂와 Al₂O₃ 성분이 많이 존재하는 것이 유리하다. 특히 SiO₂와 Al₂O₃이 결정질 보다 비정질상태로 존재 시 높은 pH에서 SiO₂와 Al₂O₃에서 Si⁴⁺, Al³⁺ 양이온 용출이 용이해 지오폴리머화(geopolymerization)에 유리하다고 보고되고 있다[13, 14].

Fig. 3은 매립회의 형상을 SEM으로 관찰한 결과이다. Fig. 3(a)에서 매립회는 수십~수백 μm 크기의 입자들로 구성되어 있으며, 다공성 및 쉘형 형태를 갖는 입자들이 관찰되었다. 특히 Fig. 3(b)와 같은 미연탄 성분이 많이 관찰되었다.

Fig. 4은 습식 체가름을 통한 매립회의 입도분포와 각 입도별 강열감량을 측정된 결과이다. 0.15 mm 이하 및 0.15~0.84 mm 크기의 입자들이 각각 약 34 wt%와 46 wt% 높게 분포하고 있으며, 2.4 mm 이상의 크기를 갖는 매립회도 약 7.6 wt% 존재하였다. 입도별 강열감량 측정 결과 0.15~0.84 mm와 2.4 mm 이상의 크기를 갖는 매립회의 강열감량이 각각 34.6 %와 50.6 %로 높게 나타났다. 입도분포와 각 입도별 강열감량 차이는 매립회

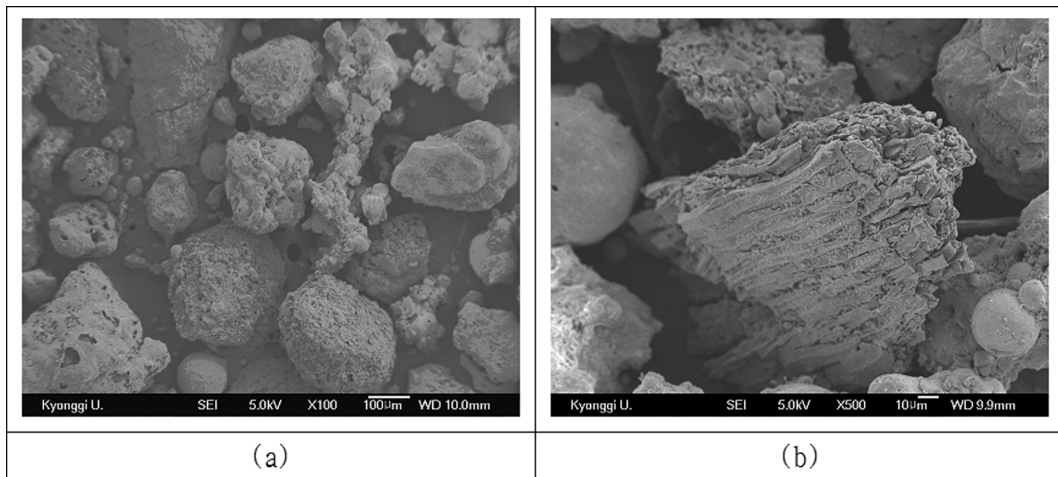
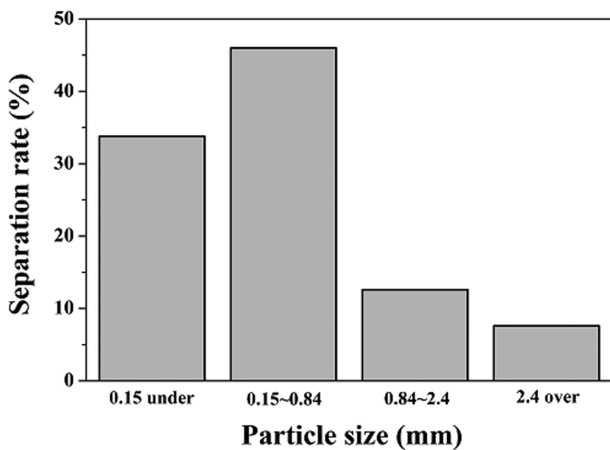
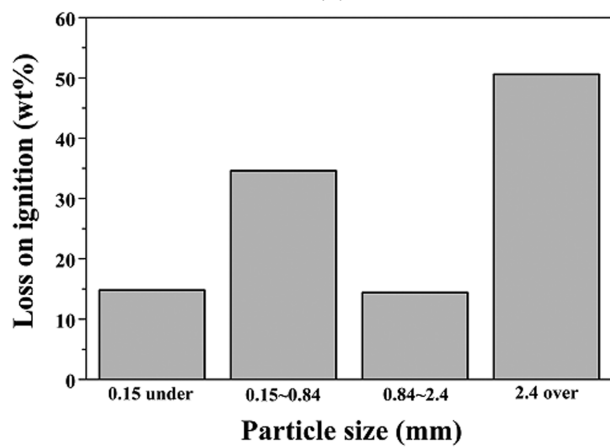


Fig. 3. SEM image of as-received reclaimed ash.



(a)

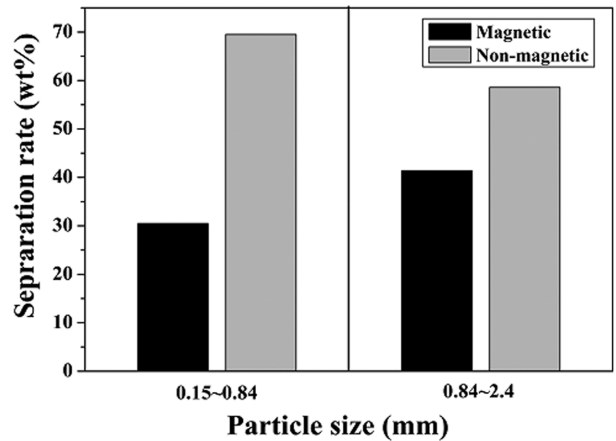


(b)

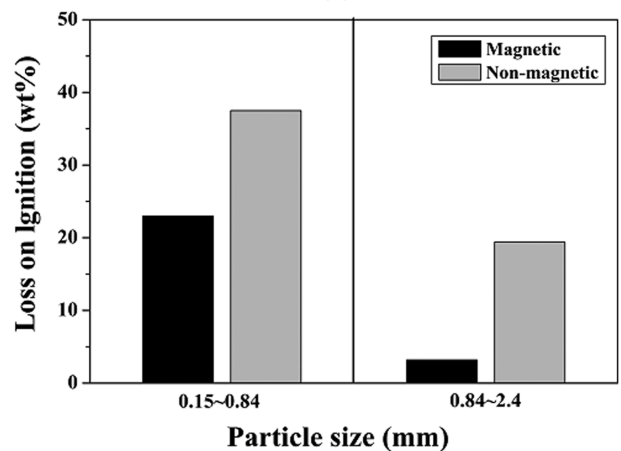
Fig. 4. (a) Particle size distribution for the as-received reclaimed ash, and (b) loss on ignition vs. particle size relation.

내에 미연탄소들의 불균일한 분포를 의미하며, 효과적인 자력선별을 위해서는 체가름과 같이 입도제어를 위한 전처리 공정이 필요할 것으로 판단된다.

매립회의 입도별 광학이미지 관찰 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 매립회의 크기와 상관없이 모든 입도 구간에서 미연탄 덩어리와 다공성 슬래그들이 혼재하고 있음을 관찰할 수 있다. 특히 0.15~0.84 mm 입도구간과 2.4 mm 이상 매립회에서는 검은색의 미연탄 덩어리들이 많이 관



(a)



(b)

Fig. 6. (a) Separation rate, and (b) loss on ignition of RA separated at 3000 G using magnetic separation method as a function of particle size.

찰되는데, 이는 Fig. 4의 0.15~0.84 mm와 2.4 mm 이상 매립회에서 나타나는 높은 강열감량이 미연탄소에 의한 것임을 보여준다.

Fig. 6는 3000 G 희토류 자석을 이용하여 세립 및 조립 매립회를 건식 자력선별하고, 분리된 자성체와 비자성체에 대한 각각의 분리율과 강열감량을 측정된 결과이다. Fig. 6(a)의 분리율 결과에서 세립과 조립의 자성체

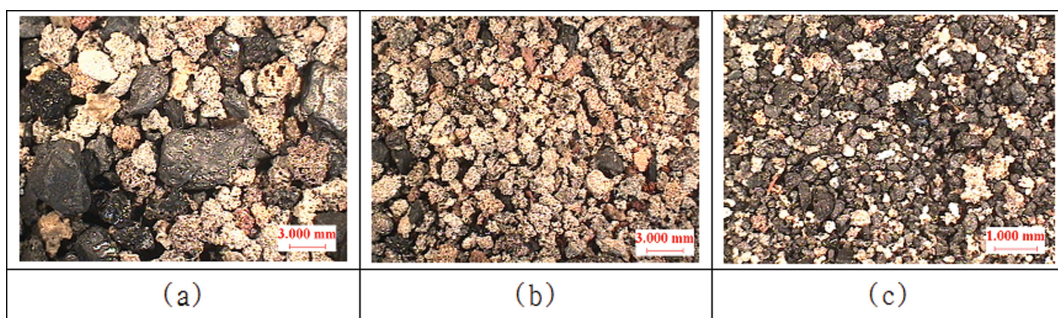


Fig. 5. Optical image of reclaimed ash classified by screening as (a) 2.4 mm over, (b) 0.84~2.4 mm and (c) 0.15~0.84 mm.

무게분율은 각각 30.5 wt%와 41.4 wt%를 나타내면서 비자성체에 비해 낮은 무게분율을 나타내었다. Fig. 6(b)는 자력 선별된 자성체와 비자성체의 강열감량 결과로서, 세립 매립회 경우 자성체와 비자성체의 강열감량이 각각 23.0 wt%와 37.5 wt%를 나타냈으며, 조립 매립회 경우 자성체와 비자성체의 강열감량이 각각 3.2 wt%와 19.4 wt%를 나타내 세립과 조립 매립회 모두 비자성체의 강열감량이 높게 나타났다. 매립회의 자성체와 비자성체의 분리율과 강열감량을 동시에 고려하면 세립 매립회의 전체 강열감량 33.3 wt%(100%)에서 자성체부분의 강열감량이 7 wt%(21.1%), 비자성체부분의 강열감량이 26.3 wt%(78.9%)를 차지하였으며, 조립 매립회의 경우 전체 강열감량 12.6 wt%(100%)에서 자성체와 비자성체부분의 강열감량은 각각 1.4 wt%(11.3%)와 11.2 wt%(88.7%)를 차지하고 있다. 이는 자력선별 공정을 통한 자성체와 비자성체의 선별이 매립회에 존재하는 비자성 미연탄소 성분들을 비자성체에 상대적으로 많이 분포하도록 하는 것으로 판단된다. 특히 조립 매립회 경우 자체 강열감량이 3.2 wt%로 전체 강열감량 12.6 wt%에 비해 상당히 낮으며, 이는 자력선별을 통한 미연탄소의 선별이 가능함을 확인시켜 주었다[18, 19].

Fig. 7은 세립 매립회에 대하여 자력 세기를 3000G에서 10000 G로 증가시킬 때 그에 따른 분리율과 강열감량 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 7(a)에서 자력 세기가 3000 G에서 10000 G로 증가함에 따라 자성체의 무게분율이 30.5 wt%에서 80.9 wt%로 급격히 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)의 자력 선별된 매립회의 강열감량 측정 결과, 10000 G 자석을 이용하여 분리된 자성체와 비자성체의 강열감량은 각각 28.2 wt%와 51.5 wt%로 나타났다. 매립회의 자성체와 비자성체의 분리율과 강열감량을 동시에 고려하면 10000 G 자석으로 분리된 경우 전체 강열감량 32.6 wt%(100%)에서 자성체와 비자성체부분의 강열감량이 각각 22.8 wt%(69.9%)와 9.8 wt%(30.1%)를 나타냈다. 10000 G로 분리된 매립회의

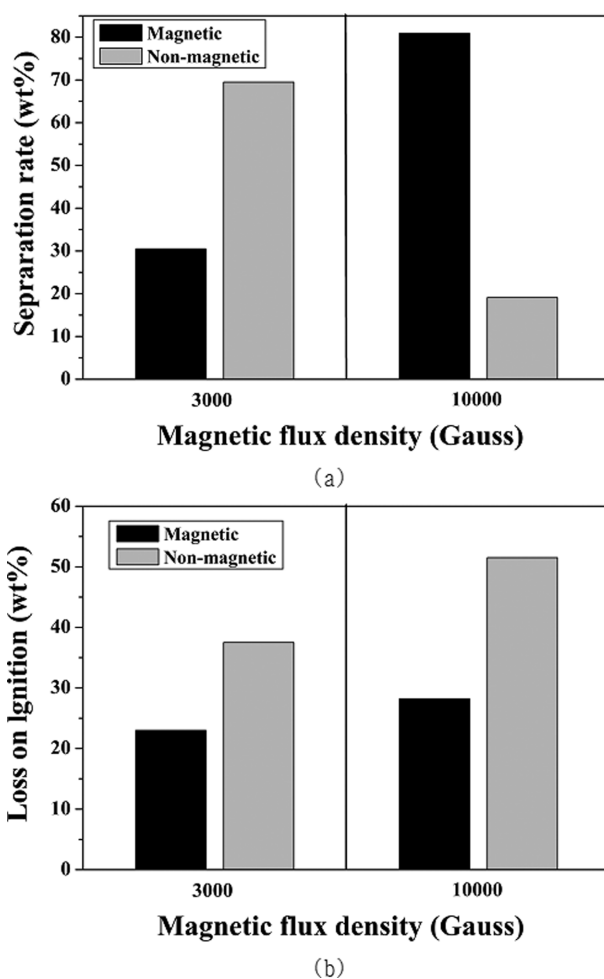


Fig. 7. (a) Separation rate, and (b) loss on ignition of fine RA separated using magnetic separation method as a function of magnetic flux density.

경우 자성체의 강열감량은 비자성체보다 낮지만, 강한 자력에 의한 높은 무게분율로 인해 전체적으로 많은 양의 미연탄소를 포함하고 있다. 이는 자력의 세기가 증가할수록 약한 자성을 띠는 물질들도 자성체로 분리됨에 따라 자성체의 무게분율이 증가되고, 따라서 비자성체는

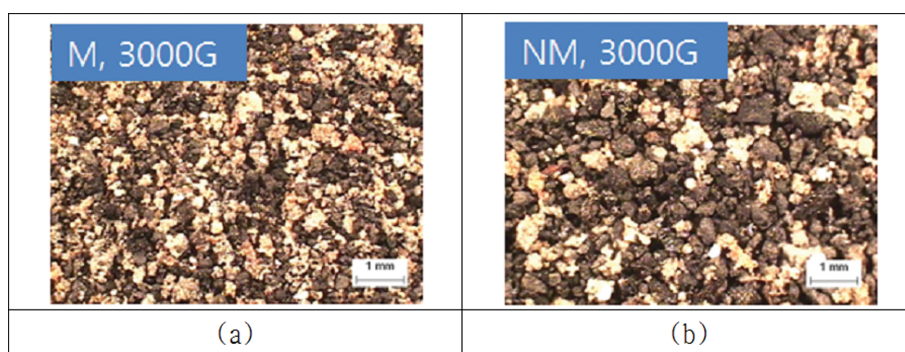


Fig. 8. Optical image of (a) magnetic material and (b) non-magnetic material of fine (0.15~0.84 mm) reclaimed ash classified by magnetic separation at 3000 G.

Table 2

Fe₂O₃ and carbon contents of reclaimed ash was divided by magnetic separation (particle size: 0.15~0.84 mm) (wt%)

		Fe ₂ O ₃	C
Raw material		4.38	18.72
3000 G	M*	6.49	15.78
	NM**	2.99	24.37
10000 G	M	5.20	24.40
	NM	1.44	40.78

*M means magnetic materials.

**NM means non-magnetic materials.

거의 자성을 나타내지 않는 미연탄소 성분들이 존재하면서 강열감량이 증가하게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 8에 3000 G로 자력 선별된 세립 매립회의 광학 이미지를 나타내었다. 자성체 부분보다 비자성체 성분에서 검은 색을 띠는 미연탄 입자들이 상대적으로 많이 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 비자성체 입자들의 크기가 상대적으로 크게 관찰되었다.

3000 G와 10000 G 자석으로 자력선별된 세립 매립회의 철산화물 및 미연탄소의 분포를 확인하기 위해 XRF를 이용한 화학조성분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타냈다. 비자성체는 자력의 세기에 상관없이 높은 탄소함량과 낮은 철성분 함량을 가지고 있음을 확인할 수 있었으며, 특히 10000 G의 자석을 사용한 경우에는 비자성체에 존재하는 탄소성분이 40.8 wt%에 이르는 것으로 확인되었다. 일반적으로 Fe 성분이 많이 포함된 소각재의 경우 연소과정에서 Fe의 산화반응에 의해 산화물층을 형성하고, 냉각 시 생성된 Fe₂O₃와 Fe₃O₄의 Fe 산화물이 환원되는 것으로 알려져 있다[20]. 화력발전 역시 석탄회에 포함된 산화철이 Fe²⁺와 Fe 금속상태로 환원되면서 자성체를 형성하고 연소 후 슬래그와 비자성체인 미연탄소에 고르게 분포될 것으로 판단된다. 따라서 자력선별 공정을 통해 철성분이 농축되어 있는 석탄회는 자성체 쪽으로 붙게 되고, 상대적으로 철성분이 적은 미연탄소 입자들은 비자성체 쪽으로 붙게 되어 매립회의 자력선별이 가능한 것으로 판단된다.

Table 3은 10000 G 자석으로 자력선별된 세립 매립회에 존재하는 철산화물의 습식정량분석 결과를 나타낸 표이다. Fe₂O₃, FeO 철산화물이 자성체 매립회에 상대적으로 많이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 비자성체

Table 3

The quantitative analysis of reclaimed ash was divided by magnetic separation (particle size: 0.15~0.84 mm) (wt%)

	Raw material	M	NM
Fe ₂ O ₃	3.94	4.45	1.14
FeO	0.20	0.30	0.06

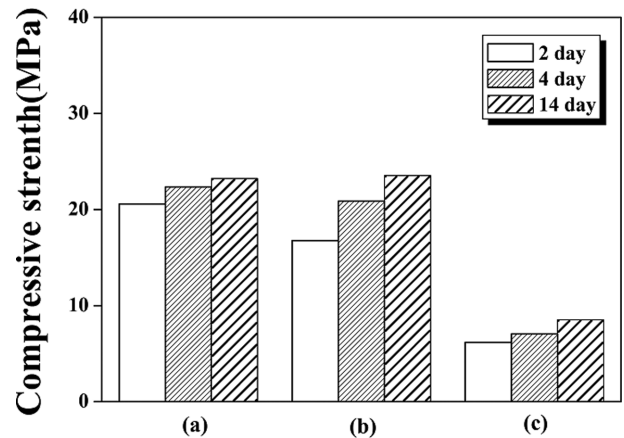


Fig. 9. Compressive strength of Geopolymer of (a) as-received materials (b) magnetic material and (c) non magnetic material of fine (0.15~0.84 mm) reclaimed ash classified by magnetic separation at 3000 G.

매립회와 약 4배의 차이를 나타내었다. 이는 Table 2의 화학성분 분석결과와 유사한 경향을 나타냄을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 자력선별결과에서 자성체와 비자성체의 강열감량 차이가 큰 조립 매립회를 NaOH 18 M 알칼리 활성화제와 L/S 비 = 0.3(무게비)의 조건으로 지오폐리머 시편을 제조하였으며, 제조 후 재령일에 따른 압축강도 특성을 측정된 결과이다. 자력선별하지 않는 매립회의 경우 약 20~22 MPa의 압축강도를 나타내었으며, 자력선별된 자성체 매립회의 경우 초기 압축강도는 20 MPa 이하이지만, 재령일이 증가할수록 압축강도가 상대적으로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 호안블럭과 같은 콘크리트 제품 적용이 가능하다[21]. 자력선별된 비자성체 매립회의 경우 재령일에 상관없이 10 MPa의 낮은 압축강도를 나타내었다. 비자성체로 제조된 지오폐리머의 상대적으로 낮은 압축강도는 비자성체에 포함되어 있는 미연탄 덩어리들이 지오폐리머 반응에 참여하지 않음과 동시에 다공성 표면으로 매립회와 알칼리의 반응을 방해하여 강도가 낮은 것으로 판단된다[22].

4. 결 론

화력발전소에서 발생하는 매립회의 지오폐리머 원료화를 위하여 자력선별 공정을 이용해 매립회의 입도 및 자석의 세기에 따른 미연탄소 성분을 분리하고 특성을 관찰하였다. 화학조성 분석결과, 매립회는 지오폐리머 반응에 적합한 SiO₂와 Al₂O₃가 43.6 wt%와 22.3 wt%로 많이 존재하였으며, 동시에 미연탄소도 17.7 wt%로 많이 포함되어 있었다. 3000 G 자석을 이용한 세립(0.15~0.84 mm)과 조립(0.84~2.4 mm) 매립회의 자력선별 결과, 두

입도의 매립회 모두 비자성체의 무게분율과 강열감량이 자성체보다 높아 자력선별을 통한 자성체와 비자성체의 분리가 미연탄소 입자의 선별에 효과적임을 확인하였다. 자석의 세기를 3000 G에서 10000 G로 증가시킨 세립 매립회의 경우, 약한 자성을 띠는 물질들도 자성체로 분리됨에 따라 자성체의 무게분율이 급격히 증가되면서 낮은 강열감량에도 불구하고 전체 강열감량 32.6 wt%의 70%(22.8 wt%)를 차지하였다. 조립 매립회의 자성체와 비자성체를 이용하여 제조된 지오폐리머 시편의 압축강도 분석결과, 자성체로 제조된 지오폐리머 시편의 압축강도 20 MPa에 비해 미연탄이 많이 포함된 비자성체로 제조된 지오폐리머 시편의 압축강도가 50% 낮은 10 MPa로 관찰되었다. 자력선별을 통한 매립회의 미연탄소 분리 및 특성에 관한 연구 결과, 매립회의 입도 및 자력세기 제어를 통한 미연탄소의 선별이 가능하며, 선별 후 미연탄소가 낮게 포함된 자성체 매립회의 경우 비구조용 지오폐리머 제조를 위한 원료로의 활용가능성이 높을 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A6A3A01017891).

References

- [1] S.J. Lee, S.Y. Im, J.W. Jeong, J.Y. Kong and B.S. Chun, "An analysis on thermal characteristic of controlled low strength materials with coal ash for pipe-backfill", 2012 Korean Geo-Environmental Society Conference (2012) 149.
- [2] J.Y. Kong, H.S. Jung, B.J. Huh and B.S. Chun, "Fresh properties and environmental assessment of controlled low strength materials made with coal ash", Geo-environmental and Slope Conference (2010) 83.
- [3] K.D. Kim, J.H. Kim, Y.T. Kim, S.G. Kang and K.G. Lee, "Production of lightweight aggregates using power plant reclaimed ash", J. of the Kor. Ceramic Soc. 47 (2010) 583.
- [4] H.G. Hyun, H.G. Kim and B.S. Chun, "Characteristics of the freezing and thawing for controlled low-strength material using pond ash", J. of the Geo-environmental Society 11 (2010) 51.
- [5] K.K. Kuk, H.Y. Kim and B.S. Chun, "A study on the engineering characteristics of power plant coal ash", J. of the Geo-environmental Society 11 (2010) 25.
- [6] B.C. Han, H.D. Yun and S.Y. Chung, "Flexural behavior of reinforced high-strength lightweight concrete beams with bottom ash aggregates", Journal of the architectural institute of Korea (Structure & Construction) 17 (2001) 37.
- [7] B.S. Chun and Y.H. Yeoh, "A study on the recycling of coal ash as structural backfill materials", J. Kor. Soc. Ocean Eng. 14 (2000) 74.
- [8] W.G. Shin, D.S. Lim and B.S. Chun, "A study on self-hardening characteristic of coal ash by mixing ratio of fly ash and bottom ash", J. of the Geo-environmental Society 11 (2010) 85.
- [9] K.P. Lee, Y.S. Do, S.S. Lee and H.Y. Song, "A study on optimum mixing derivation of the environment-friendly high performance geopolymer paste", Journal of Proceeding the Korea Institute of Building Construction 9 (2009) 107.
- [10] J.T. Kim, D.S. Seo, G.J. Kim and J.K. Lee, "Influence of alkaline-activator content on the compressive strength of aluminosilicate-based geopolymer", J. of the Kor. Ceramic Soc. 47 (2010) 216.
- [11] R. Thakur and S. Ghosh, "High temperature resistant fly ash based geopolymer composite", LAP LAMBERT Academic Publishing (2011).
- [12] R. Thakur and S. Ghosh, "Fly ash based geopolymer composites", LAP LAMBERT Academic Publishing (2011).
- [13] J. Davidovits, "Geopolymer chemistry and applications", Institut Géopolymère (2008).
- [14] J.L. Provis and J.S.J. van Deventer (Ed.), "Geopolymers", Woodhead Publishing Limited (2009).
- [15] S.J. Lee, M.D. Seo, Y.J. Kim, H.H. Park, T.N. Kim, Y. Hwang and S.B. Cho, "Unburned carbon removal effect on compressive strength development in a honeycomb briquette ash-based geopolymer", International J. of Mineral Processing 97 (2010) 20.
- [16] T.H. Ha, S. Muralidharan, J.H. Bae, Y.C. Ha, H.G. Lee, K.W. Park and D.K. Kim, "Effect of unburned carbon on the corrosion performance of fly ash cement mortar", Construction and Building Materials 19 (2005) 509.
- [17] P. Sultana, S. Das, A. Bhattacharya, R. Basu and P. Nandy, "Mullite formation in coal fly ash is facilitated by the incorporation of magnesium oxide", Rev. Adv. Mater. Sci. 27 (2011) 69.
- [18] A.S. Shoumkova, "Magnetic separation of coal fly ash from Bulgarian power plant", Wast Management Res. 29 (2011) 1078.
- [19] J.C. Hower, R.F. Rathbone, J.D. Robertson, G. Peterson and A.S. Trimble, "Petrology, mineralogy, and chemistry of magnetically-separated sized fly ash", Fuel 78 (1999) 197.
- [20] N.L. Um, G.C. Han, K.S. You, H.C. Cho and J.W. Ahn, "Separation of ferrous materials from municipal solid waste incineration bottom ash", J. of Korean Ins. of Resources Recycling 16 (2007) 19.
- [21] Korea Concrete Institute, "Advanced concrete engineering for special uses", Kimundang, Korea (2004) 252.
- [22] N.H. Kang, C.M. Chon, H.T. Jou and S.J. Lee, "Effect of particle size and unburned carbon content of fly ash from hadong power plant on compressive strength of geopolymers", Kor. J. Mater. Res. 23 (2013) 510.