

Application for Functional Construction Materials of Artificial Soil Manufactured Using Coal Bottom Ash

Kangduk Kim[†] and Yeongsaeng Lee*

Department of Advanced Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

*Department of Civil Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

(Received January 23, 2014; Revised July 1, 2014; Accepted July 2, 2014)

석탄 저회로 제조한 인공토양의 기능성 건설재 적용 가능성

김강덕[†] · 이영생*

경기대학교 신소재공학과

*경기대학교 토목공학과

(2014년 1월 23일 접수 ; 2014년 7월 1일 수정 ; 2014년 7월 2일 채택)

ABSTRACT

To recycle coal bottom ash(denoted here as CBA) generated from thermal power plants as a functional construction material, artificial soil(denoted as AS) containing CBA with dredged soil(denoted as DS) at a ratio(wt%) of 70 : 30 was manufactured by means of material engineering with sintering in a rotary kiln at 1125°C using a green body formed via extrusion processing. The properties of the soil mechanics of the AS and the as-received CBA were analyzed and compared. Compaction testing results determined an optimum moisture content of the AS and CBA at 18%. During these tests, the maximum dry unit weights of the materials were similar, at 1.57 and 1.58 t/m³, respectively. The compressive strength levels of the AS and CBA concrete specimens were 5.1 and 5.4 t/m², respectively, both of which increased after materials engineering processing. In a consolidation test, the compression index of the AS and CBA was found to be 0.114 ± 0.001 in both cases. The values were similar regardless of the materials engineering processes, but during the consolidation of AS, its coefficient was higher than that of the CBA materials.

Key words : Coal bottom ash, Soil, Compressive strength, Compression index, Consolidation coefficient, Functional construction materials

1. 서 론

화력발전소에서 발생하는 저회(coal bottom ash)는 입자가 크고 거칠며, 입자의 형태의 불균일 이외에 화학적 조성의 다양함으로 인하여 비회(coal fly ash)와 비교하여, 재활용률이 낮은 상황이다.¹⁻³⁾ 국내 10개의 석탄 화력발전소에서 발생하여 회처리장에 매립되고 있는 석탄회는 연간 840만 톤을 상회하는 것으로 알려져 있으며 이중 저회의 재활용률은 매우 낮은 실정이다. 현재 대부분의 저회는 화력발전소 내에 위치한 회 처리장(ash pond)에 매립되고 있으나, 향후 매립지의 부족 및 관리비 증가, 주변지역의 환경오염 등의 문제로 인하여 안정적인 저회의 대량 재활용기술 개발이 필요한 실정이다.¹⁻³⁾

국내의 경우 저회와 페타이어 및 일반풍화토를 혼합하여 제조된 시험용 성토체의 성토재 적용 가능성에 대한 연구와 굴착 후 되메움이 필요한 공사현장의 채움재로 기존의 현장발생토인 점토와 황토를 대신하여 산업 폐기물인 석탄 매립회를 활용한 유동성 채움재 활용을 위한 연구가 수행되었다.^{1,4)} 또한 저회와 점토를 혼합 후 소성하여 비중 1.5 이하의 인공경량골재나 흡착제와 같은 기능성 세라믹 제품과 결정화 유리의 원료로 재활용하는 연구들이 수행되어 왔다.^{5,6)} 그 외에 기존에 콘크리트용 잔골재로 사용되는 강모래, 해사 및 부순모래를 저회 및 비회로 대체함으로써 환경보호 및 잔골재 세척에 의해 발생하는 미립분 손실의 보완을 통한 콘크리트의 물성을 개선시키기 위한 재활용 연구도 수행되었으나, 아직까지 저회의 재활용 실적이 낮은 상황이다.⁷⁾ 토목 및 건축분야에서 저회의 활발한 재활용을 위해서는 저회의 토질 역학적 특성규명 뿐만 아니라, 저회의 단독사용 이외에 다른 폐자원과의 혼합을 통한 기능성 건설재료의 개발이 필요하다.

[†]Corresponding author : Kangduk Kim
E-mail : solidwaste@kyonggi.ac.kr
Tel : +82-31-249-1309 Fax : +82-31-244-8241

본 연구에서는 가공 전 저회의 토질 역학적 특성을 규명하고, 저회에 오염토양의 준설작업 시 발생하는 무기성 폐자원인 준설토(dredged soil)를 첨가하여 경량 건설재료를 제조하여 그 특성을 저회와 비교, 분석하였다. 이를 위해서 가공 전 저회와 가공된 건설재료의 입도분포, 다짐 시험, 일축 압축 강도 시험, 직접 전단 시험을 통한 토질 공학적 특성을 평가하였으며, 저회를 기능성 건설재료의 원료로 대량 재활용 하는 기술의 개발 가능성을 예측하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 원료로는 인천 ‘Y’ 화력발전소에서 발생하는 저회(coal bottom ash, 이하 CBA)와 화력발전소 준설작업 시 발생된 준설토(dredged soil, 이하 DS)를 사용하였다. 저회의 재료공학적 처리를 위해 저회와 준설토를 150 μm 이하로 미분쇄한 뒤 7:3의 무게비로 건식혼합한 후 압출성형기(extruder)를 이용하여 실린더형태(지름 = 10 ± 0.5 mm, 길이 = 10 ± 2 mm)로 성형하였다. 성형체는 과일 릫 규모의 로타리 킬른(rotary kiln, 길이 5 m × 내경 0.3 m)에서 1125°C/15 min 조건으로 소성하였다. 소성된 원료는 다시 롤러 밀(roller mill)과 핀 밀(pin mill)을 이용하여 미분쇄하였다. 본 연구에서는 재료공학적으로 처리된 건설재료를 인공토양(artificial soil, 이하 AS)으로 명명하였다.

CBA와 AS의 화학조성분석은 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. CBA와 AS의 기초물성분석을 위해 비중(KS F 2308 ‘흙의 비중 시험 방법’), 입도분포(KS F 2302 ‘흙의 입도 시험 방법’), 그리고 액성 한계·소성 한계값(KS F 2303 ‘흙의 액성 한계·소성 한계 시험 방법’)을 측정하였다. 흙의 입도분포 시험은 KS F 2302에 의해 식 (1), (2)의 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_c)를 구할 수 있으며 이를 통해 원료의 입도분포와 입도분포의 균등상태 확인이 가능하다.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{1}$$

- C_u: 균등계수
- D₆₀: 입도분포곡선에서 통과중량 백분율 60%에 해당하는 입자크기
- D₁₀: 유효입자크기(입도분포곡선에서 통과중량 백분율 10%에 해당하는 입자크기)

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \tag{2}$$

- C_c: 곡률계수
- D₃₀: 입도분포곡선에서 통과중량 백분율 30%에 해당하는 입자크기

KS F 2303에 따른 흙의 액성 한계·소성 한계값 측정은 다음 식 (3)에 따르며, 소성지수를 통해 흙이 소성상

태로 있을 수 있는 함수비의 범위를 관찰하는 것이 가능하다.

$$I_p = w_l - w_p \tag{3}$$

- I_p: 소성지수
- w_l: 액상한계(흙의 함수비 감소에 따른 약한 전단응력을 갖는 상태의 함수비)
- w_p: 소성한계(소성성을 잃고 부서지기 시작하는 함수비)

또한 각 원료의 다짐 특성(KS F 2312 ‘흙의 다짐 시험 방법’) 및 투수 시험(KS F 2322 ‘흙의 투수 시험 방법’)을 수행하였다. 다짐 시험의 경우 흙의 함수비를 증가시키면서, 반복적인 다짐을 통해 건조 단위중량(γ_d)을 측정하는 것으로, 원료를 성토재로 활용하기 위해 필요한 측정 방법은 식 (4)와 같다.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \tag{4}$$

- γ_d: 건조단위중량(tf/m³)
- γ: 습윤단위중량, $\gamma = \frac{W}{V}$ (W: 몰드안에 다져진 흙의 무게, V: 몰드의 부피)
- w: 함수비

흙의 물리적 특성에 중요한 요인 중의 하나는 흙의 간극이다. 흙 속에 존재하는 물은 이 간극을 통해서 이동하기도 하며 흙의 강도에 영향을 미친다. KS F 2322에 의한 식 (5)는 흙의 투수계수를 결정하는 식으로 물의 흐름에 따른 지반 공학적 설계 시 일반적으로 고려되어진다.

$$k_T = \frac{L}{h} \cdot \frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \tag{5}$$

- k_T: 온도 T(°C)에 대한 투수계수(cm/sec)
- L: 시료의 높이(cm)
- A: 시료의 단면적(cm²)
- h: 수두(cm)
- t: 시간(sec)
- Q: (t₁ - t₂)시간(s)내에 월류한 수량(cm³)

마지막으로 CBA와 AS로 각각 공시체를 제작하여 일축 압축 강도(KS F 2314 ‘흙의 일축 압축 시험방법’) 및 직접 전단 시험(KS F 2343 ‘압밀 배수 조건에서 흙의 직접 전단 시험방법’)을 수행하였으며, 각 원료의 압축특성 분석을 위해 압밀 시험(KS F 2316 ‘흙의 압밀 시험 방법’)을 수행하였다.

전단시험의 경우 KS F 2343에 의한 식 (6)에 따라 흙의 전단강도, 점착력, 내부마찰각을 측정하였으며, 전단강도를 통해 외부 응력에 대한 흙의 최대저항력을 예측할 수 있었다.

Table 1. Chemical Compositions of Raw Materials

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZrO ₂	C	Ig. loss	Total
CBA*	45.6	18.6	8.1	2.2	0.8	0.2	0.5	1.3	0.2	0.1	0.3	18.1	4.1	100.0
DS**	70.7	14.4	3.8	0.8	0.2	2.5	2.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	100.0

*Coal bottom ash

**Dredged Soil

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \theta \quad (6)$$

τ_f : 전단강도(shear strength)

c : 점착력(cohesion)

σ_n : 파괴면에 작용하는 수직응력(normal stress)

θ : 내부마찰각(angle of internal friction)

원료의 압축지수와 압밀계수는 KS F 2316에 의한 식 (7)을 이용해 측정하였으며, 구조물의 하중이나 성토된 재료의 자중에 의한 특성 관찰이 가능하였다.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma_v)} \quad (7)$$

C_c : 압축지수(Compression index)

e : 간극비(Void ratio) $e = (\text{물 부피} + \text{공기 부피}) / \text{토양 부피}$

σ : 토양의 응력

3. 결과 및 고찰

CBA와 DS의 화학조성분석결과를 Table 1에 나타내었다. CBA는 SiO₂와 Al₂O₃가 각각 45.6과 18.6 wt% 존재하며, 미연탄소 성분이 18.1 wt%로 높게 나타났다. DS는 SiO₂가 70.7 wt%로 많이 존재하며, Na₂O와 K₂O 알카리 산화물이 각각 2.5 wt%와 2.7 wt% 존재하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에 사용된 CBA의 비중(specific gravity, G_s)은 2.1로 국내에 존재하는 일반 모래나 점토의 비중 2.6~2.8 보다 훨씬 가볍게 나타났다(Table 2). Fig. 1(a)와 Table 2의 CBA 입도분포 분석결과 유효경(effective diameter, D_{10})의 크기는 0.02 mm를 나타내었고, 균등계수(uniformity coefficient, C_u)와 곡률계수(curvature coefficient, C_c)는 각각 21.5와 2.6를 나타내었다. 일반적으로 균등계수가 10 이상이면 입도분포가 좋다(well-graded)고 분류하며, 2 이하일 경우 입도분포가 나쁘다(pooly-graded)고 분류하고 있으며 본 실험에 사용된 CBA의 경우 비교적 우수한 입도분포를 나타내었다.⁸⁾ Table 2의 결과에서 재료공학적으로 처리된 AS는 비중이 2.4로 일반 모래나 점토에 비해 가볍지만 CBA보다 비중이 0.3 증가하였으며 이는 CBA에 혼합된 DS로 인한 비중 증가와 1125°C의 열처리 공정에 의한 AS의 치밀화에 의한 것으로 판단된다. Fig. 1(b)와 Table 2의 입도분포 분석결과 AS의 유효경(D_{10})의 크

Table 2. Specific Gravity and Particle Properties of CBA and AS*

	CBA	AS*
G_s	2.1	2.4
D_{10} (mm)	0.02	0.04
C_u	21.5	8.5
C_c	2.6	2.4

*Artificial soil containing coal bottom ash with dredged soil

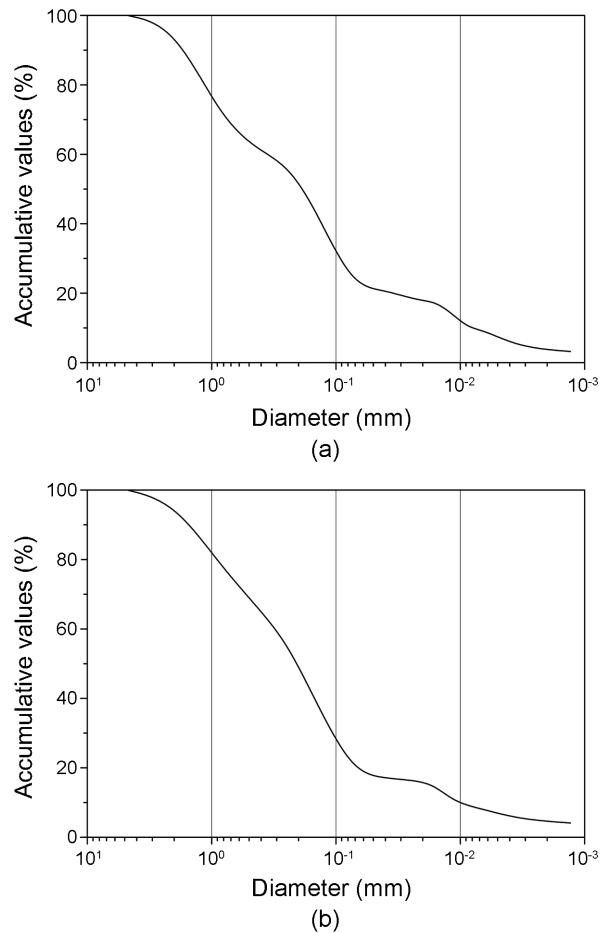


Fig. 1. Particle size distribution of (a) CBA and (b) AS.

기는 0.04 mm이고, 균등계수와 곡률계수는 각각 8.5와 2.4로 비교적 우수한 입도 특성을 나타내었다. 액상한계 및 소성한계 시험 결과 CBA와 AS의 소성지수(plasticity index, I_p)가 모두 4 이하로 비소성(non-plastic)의 특성을

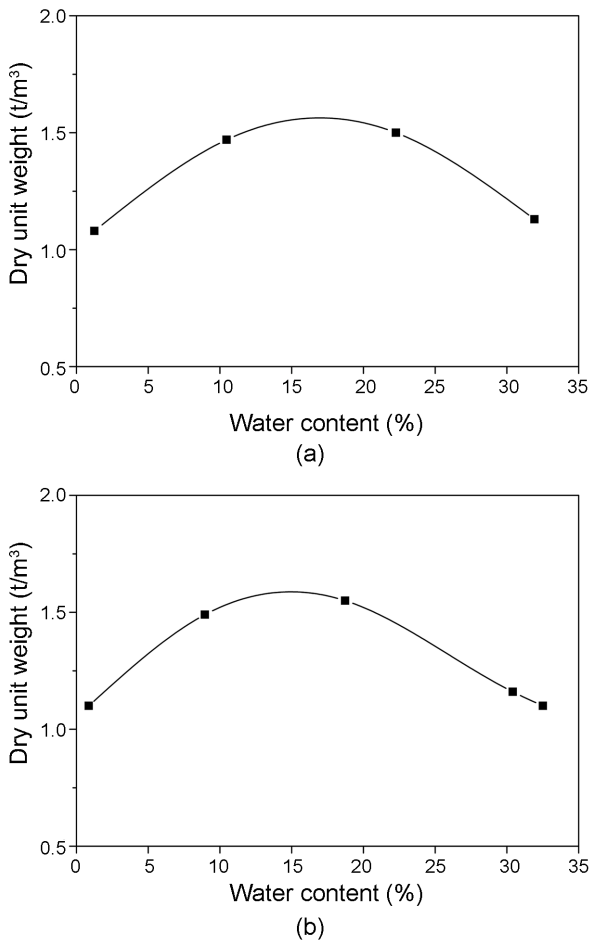


Fig. 2. Dry unit weight of (a) CBA and (b) AS with various water contents.

Table 3. Physical Properties of CBA and AS

	CBA	AS
γ_{dmax} (t/m ³)	1.57	1.58
W_{opt} (%)	18	18
k (cm/sec)	5.77×10^{-5}	8.33×10^{-5}
c (t/m ²)	2.41	2.08
ϕ (degree)	44.5	42.7
C_c	0.113	0.115

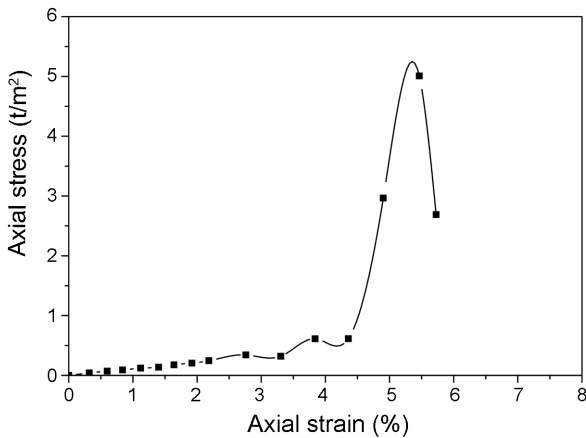
갖는 재료로 분류되었다.⁸⁾ 위의 분석 결과를 종합하여 볼 때 CBA와 AS 재료 모두 통일분류법(unified soil classification system, USCS)에 따른 분류기준에서 실트질 모래(silty sand, SM) 계열로 속하는 것으로 판단되었다.⁹⁾

CBA와 AS를 이용한 다짐시험 결과를 Fig. 2와 Table 3에 나타내었다. CBA의 건조 단위중량(dry unit weight)은 함수비(water content)가 증가하면서 서서히 증가하다가 함수비 18%에서 최대값에 이른 후 다시 감소하는 경향(Fig. 2)을 나타내었다. 다짐 곡선 분석결과 최적 함수비

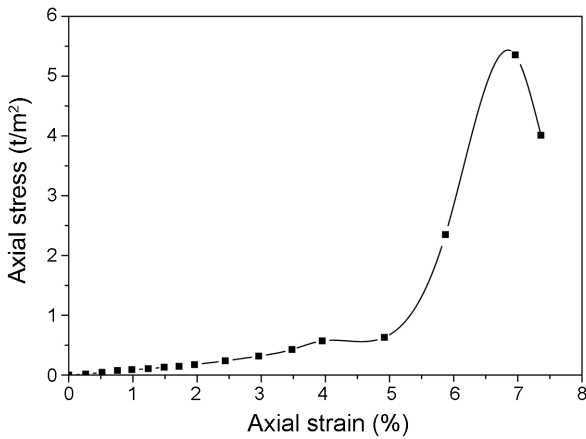
(optimum water content, W_{opt}) 18%에서 최대 건조 단위중량(maximum dry unit weight, γ_{dmax}) 1.57 t/m³을 나타내었다(Table 3). AS 역시 최적 함수비 18%에서 최대 건조 단위중량 1.58 t/m³을 나타내었으며, CBA와 비슷한 경향을 나타내었다(Table 2). Chun등은 석탄회에 대한 다짐시험 결과 최대 건조 단위중량은 1.04 ~ 1.58 t/m³, 최적 함수비는 10.5 ~ 35%로 주장하였으며, 본 연구의 경우 CBA와 AS의 다짐시험에서 최대 건조 단위중량이 1.57 ~ 1.58 t/m³, 최적 함수비는 약 18%로 비슷한 결과를 나타내었다.¹⁰⁾ 일반적인 도로성토재로 사용되는 화강토(granite soil)의 경우 최대 건조 단위중량이 1.81 ~ 1.88 t/m³, 최적 함수비가 12.1 ~ 14.7로 알려져 있으며, CBA와 AS 모두 화강토와 비교하여 최대 건조 단위중량은 낮고 최적 함수비는 높게 나타났다.²⁾ 위의 결과는 CBA와 AS가 화강토와 비교하여 상대적으로 입도분포가 균일하여 다짐에 의한 재료의 치밀화가 어렵고, 물에 의해 재료 표면에 발생하는 표면장력의 저항에 의한 것으로 판단된다.¹¹⁾

다짐 시험이 끝난 CBA와 AS 시편에 대한 투수시험을 수행하였으며 최적 함수비 18%일 때, CBA와 AS의 평균 투수계수(permeability coefficient, k)를 Table 3에 나타내었다. CBA와 AS의 투수계수는 각각 5.77×10^{-5} cm/sec와 8.33×10^{-5} cm/sec로 AS의 투수계수가 약간 감소함을 확인할 수 있었다. 일반적으로 재료는 가장 잘 다져진 상태의 최적 함수비 상태에서 최대 건조 단위중량을 나타내며, 동시에 투수계수는 그와 반비례하여 최소값을 나타낸다. 최대 건조 단위중량일 때 투수계수가 가장 낮아지는 이유는 최적 함수비에 의해 재료 내 입자의 재배열이 용이하고, 다짐으로 인한 입자간의 간극이 좁아지기 때문이다.⁹⁾ CBA와 AS의 투수계수는 실트질 점토(silty clay)의 투수계수 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ cm/sec 범위에 포함되어 토목용 뒤채움재로 활용은 가능하지만 물을 막는 차수층으로 사용되기 위한 기준 투수계수(1.0×10^{-7} cm/sec)를 만족시키지 못하기 때문에 불투수층 재료로의 적용은 어려울 것으로 판단된다.²⁾

다짐 시험에서 최대 건조 단위 중량을 나타내는 최적 함수비 18%에서 CBA와 AS로 각각 공시체($\Phi = 15$ cm, $L = 30$ cm)를 만들어 일축압축시험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험결과 CBA와 AS의 일축압축강도는 각각 5.1과 5.4 t/m²을 나타냈으며, AS의 일축압축강도가 0.3 t/m³ 증가한 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에 사용된 CBA나 AS가 도로의 보조기층재로 활용되기 위해서는 일축강도값이 20 t/m², 기층재로 활용하기 위해서는 일축강도값이 30 t/m²을 만족하여야 한다.¹²⁾ Chun등의 결과에 보고된 것처럼, 본 연구에 사용된 CBA와 AS의 경우 내부에 존재하는 공극으로 인하여 일축강도값이 기준값을 만족시키지 못하기 때문에 도로 기층재로 단독 사용 시 지반 침하현상 발생이 예상되므로, 화강토 등의 재료를 혼



(a)

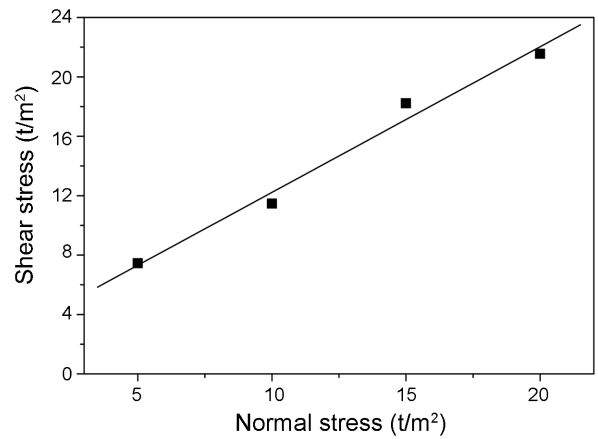


(b)

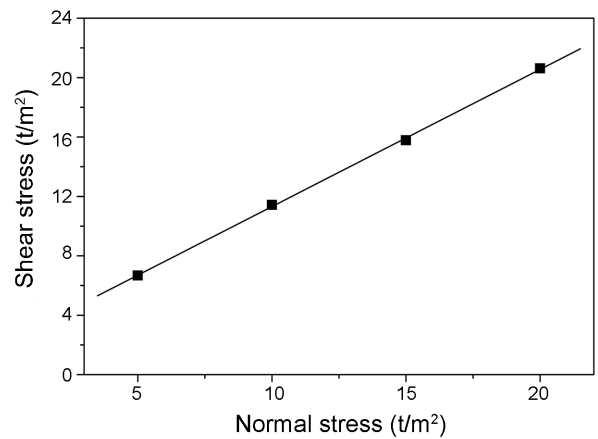
Fig. 3. Compressive strength of (a) CBA and (b) AS.

합하여 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.²⁾

최적 함수비 18%에서 CBA와 AS로 각각 공시체를 만들어 직접전단시험을 수행한 결과를 Fig. 4와 Table 3에 나타내었다. 직접전단시험결과 CBA의 점착력(cohesion, c)과 내부마찰각(internal friction angle, ϕ)은 각각 2.41과 44.5°를 나타내었으며, AS의 점착력과 내부마찰각은 각각 2.08과 42.7°를 나타내었다. 점착력은 미세한 입자를 포함하는 토양에 작용하는 전단응력 중 수직 압력에 관계없이 나타나는 저항력으로 일반적으로 토양 내부의 입자들이 끈끈하게 서로 달라붙는 힘을 나타낸다. 내부마찰각은 흙의 전단강도 성분 중 토양 입자의 내부마찰에 기인하는 마찰저항과 관련된 각도를 나타낸다. 토양의 전단성질은 모래특성을 갖는 사질토의 경우 내부 마찰각에 의해 영향을 받으며 점토특성을 갖는 점성토의 경우 점착력에 의한 영향이 지배적인데, AS의 점착력과 내부마찰각이 CBA에 비해 감소한 것을 확인할 수 있다. 그러나 CBA와 AS의 내부마찰각은 모두 일반적인 자진 모래의 입자에서 나타나는 30~45°의 범위에 속하였으며 도로성토재로 사용되는 화강암의 32°보다 높은 내부마찰각을 나타



(a)



(b)

Fig. 4. Shear stress of (a) CBA and (b) AS.

내었다.¹⁾ 또한 구조물 기초 설계기준 해설에 따르면 내부마찰각이 30° 이상인 사질토의 경우 토목용 뒤채움 재료로 적합하다고 규정하고 있다.¹³⁾

CBA와 AS의 압밀시험에 따른 압축지수(compression index, C_c) 값을 Table 3에 나타내었다. CBA와 AS의 압축지수는 각각 0.113과 0.115로 거의 유사한 값을 나타내었다. 일반적으로 점토의 압축지수는 0.2~0.9 범위에 있으며 압축지수 값이 증가할수록 토양의 연약함을 나타낸다.¹⁴⁾ 따라서 CBA와 AS는 점토에 비해 상대적으로 낮은 압축지수값을 나타내기 때문에 토목용 지반재로 사용하는 것이 유리하다.

CBA와 AS의 압밀곡선(압밀응력-간극비) 변화를 Fig. 5에 나타내었다. CBA와 AS의 압밀곡선은 뚜렷한 변곡점 없이 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 토양입자가 과거에 받았던 최대 응력을 선행압밀응력(Preconsolidation, σ_m)이라 하는데, 과거 선행압밀응력을 받았던 토양의 경우 응력이 다시 가해지면, 선행압밀응력 값까지 완만한 기울기를 나타내며, 그 이상의 응력에서 다시 급격한 기울기 변화를 나타내는 변곡점을 나타내게 된다.¹³⁾ 본 실

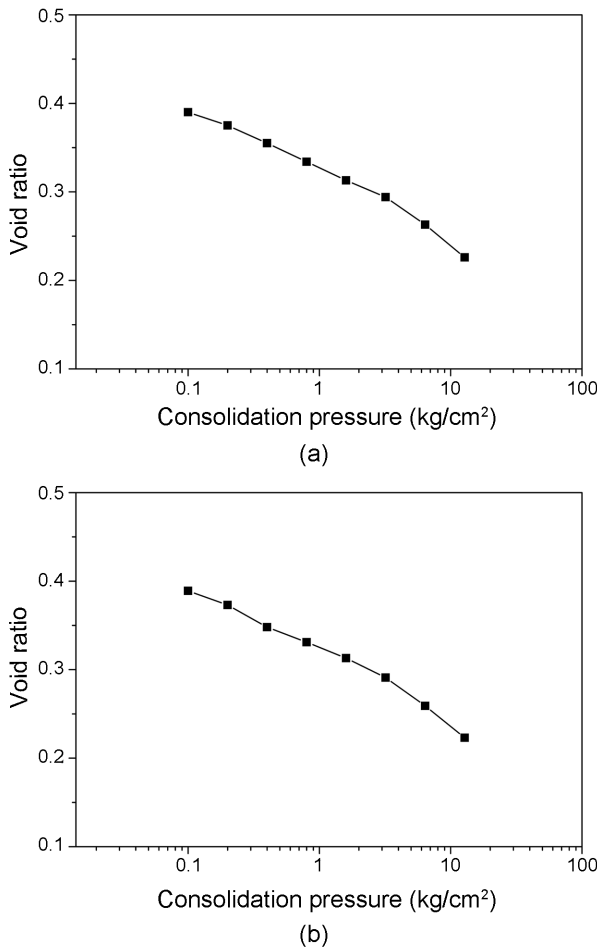


Fig. 5. Void ratio of (a) CBA and (b) AS with various consolidation pressure.

Table 4. Consolidation Coefficient of CBA and AS

Consolidation stress (kg/cm ²)	CBA	AS
0.1	0.00276482	0.00313352
0.2	0.00273555	0.00313007
0.4	0.00269537	0.00312459
0.8	0.00265550	0.00312067
1.6	0.00261456	0.00311363
3.2	0.00257934	0.00311207
6.4	0.00252028	0.00310504
12.8	0.00245136	0.00309692

험에 사용된 재료의 경우 응력에 따른 변곡점이 관찰되지 않았기 때문에 선행압밀응력이 작용하지 않은 것으로 판단된다.

CBA와 AS의 압밀계수(Consolidation coefficient, C_v) 분석결과를 Table 4에 나타내었다. 재료를 기반재로 사용하고자 할 경우, 압밀에 의한 지반침하가 진행되는데 소요

되는 시간을 예측하기 위한 압밀계수의 계산이 필수적이다. 포화된 점토에 외부 하중이 가해지면, 즉시침하가 일어남과 별도로 과잉 간극 수압도 증가하게 된다. 외부하중으로 인하여 토양 입자는 수축하려고 하지만, 물로 인하여 수축하지 못하고 대신 수압을 상승시키며 외부 하중에 견디게 된다. 이로 인해 생성된 과잉 간극 수압은 시간이 지남에 따라 물이 점점 외부로 빠져나감과 동시에 사라지고, 최종적으로 모든 응력의 증가량을 토양이 받게 된다. 이때 토양 입자가 응력을 받으면서 가해진 응력으로 인하여 침하가 발생하게 되는데 이를 압밀침하라고 한다.¹¹⁾ 일반적으로 투수계수가 높은 모래에 비해 투수계수가 낮은 점토의 경우가 즉시침하보다 압밀침하 크기가 훨씬 크며, 또 침하에 소요되는 시간도 긴 문제점을 갖고 있어 구조물 축조 시 심각하게 고려되어야 한다고 보고되고 있다.¹¹⁾ 본 실험의 경우 AS의 압밀계수 값이 CBA 비해 증가한 것을 볼 수 있다. 압밀계수 값이 증가한다는 것은 압밀 소요 시간이 감소한다는 것을 의미하며 AS의 압밀이 빨리 진행된다고 판단할 수 있다. 이는 AS에 존재하는 물이 응력에 의해 쉽게 외부로 배출될 수 있음을 의미하며 이는 Table 3의 투수계수 결과와도 일치한다.

4. 결 론

화력발전소에서 발생하는 저회를 건축 및 토목용 건설 재료로 대량 재활용하기 위하여 재료 공학적으로 가공한 후 가공 전과 후 재료의 토질 역학적 특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. CBA와 AS의 비중은 각각 2.1과 2.4로 일반 모래나 점토의 비중 2.6~2.8 보다 경량으로 나타났다. 또한 가공 여부에 상관 없이 액상한계 및 소성한계 분석에서 비소성(non-plastic)으로 판명되었으며, 통일 분류법 기준으로 실트질 모래로 분류되었다.

다짐 시험 결과 CBA와 AS의 최적 함수비는 18%로 나타났다. 그때 최대 건조 단위중량은 각각 1.57과 1.58 t/m³로 매우 유사하였다. 투수시험 결과 CBA와 AS의 투수계수는 각각 5.77×10^{-5} 과 8.33×10^{-5} cm/sec로 뒤채움재료는 적합하지만 차수층에 사용하기는 부적합한 것으로 나타났다. 또한 일축압축시험 결과 CBA와 AS는 5~6 t/m³의 압축 강도값을 나타내 보조기층재 사용을 위한 기준강도의 1/4에 불과하였으며, 직접전단시험 결과 도로성토재로 사용되는 화강암보다 낮은 점착력과 높은 내부마찰각을 나타내었다. 압밀실험결과 CBA와 AS 압축지수는 각각 0.113과 0.115로 비슷하였으며, 압밀계수의 경우 AS가 약간 높은 값을 나타내었다.

CBA와 AS 모두 기준점토나 모래에 비해 무게가 감소하는 경량 특성을 나타내며 토목용 뒤채움재료는 적합하

지만, 보조기층재나 성토재의 원료로 단독 재활용하기에 적합하지 않은 것으로 판단된다. CBA와 AS의 대량 재활용을 위해서는 기존의 다른 원료와 혼합하여 투수계수 및 일축압축강도 그리고 전단특성의 제어가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. D. H. Chae, K. O. Kim, H. Y. Shin, and W. J. Cho, "Dynamic Characteristics of Liquidity Filling Materials Mixed with Reclaimed Ash," *J. Geo-Environ. Soc.*, **15** [4] 5-11 (2014).
2. K. K. Kuk, H. Y. Kim, and B. S. Chun, "A Study on the Engineering Characteristics of Power Plant Coal Ash," *J. Geo-Environ. Soc.*, **11** [5] 25-34 (2010).
3. Y. W. Yoon, K. S. Chae, and K. H. Song, "Evaluation of Static and Dynamic Characteristics of Coal Ashes," *J. Geo-Environ. Soc.*, **10** [3] 5-12 (2009).
4. S. J. Lee and T. Y. Lee, "Field Tests for the Application of Bottom Ash and Shred Tire as Fill Materials," *J. Geo-Environ. Soc.*, **14** [10] 29-37 (2013).
5. K. D. Kim and S. G. Kang, "Manufacturing Artificial Lightweight Aggregates Using Coal Bottom Ash and its Application to the Lightweight-concrete," *J. Kor. Cryst. Growth Cryst. Technol.*, **18** [5] 211-16 (2008).
6. S. N. Jo and S. G. Kang, "Effect of HF Treatment on the Crystallization Behavior of the Glass Containing Coal Bottom Ashes(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **48** [1] 80-85 (2011).
7. S. J. Choi and M. H. Kim, "A Study on the Durabilities of High Volume Coal Ash Concrete by the Kinds of Coal Ash(*in Korean*)," *J. Kor. Inst. Build. Constr.*, **9** [3] 73-78 (2009).
8. M. M. Kim, *Soil Mechanics*; pp. 7, Munundang, Seoul 1999.
9. I. J. Park, J. H. Yoo, S. H. Kim, and S. H. Lee, *Soil Mechanics*; pp. 40-48 and 233-236, Goomibook, Seoul, 2010.
10. B. S. Chun and Y. I. Koh, "The Proper Mixing Ratio of Fly Ash to Bottom Ash for Use of Highway Embankment and Subgrade Materials," *J. Kor. Soc. Civ. Eng.*, **12** [1] 177-86 (1992).
11. I. M. Lee, *Principle of Soil Mechanics*; pp. 65, 266-274, Sae Ron, Seoul, 2011.
12. B. S. Chun, H. S. Kwon, B. W. Mun, and J. Y. Ryu "The Application of Coal Ash as Subbase Course Materials(*in Korean*)," *Proc. 1997 KSCE Annu. Conf.*, pp. 61-64, 1997.
13. Korean Geotechnical Society, *Commentary of Structures Foundation Design Standard*; pp.504-05, Goomibook, Seoul, 2009.
14. Y. S. Jang, *Soil Mechanics*; pp. 217-20, C.I.R., Seoul, 2010.