

# 비회와 저회의 함유량에 따른 모래의 내부마찰각 변화

## Assessing Friction Angle of Sand According to Fly Ash and Bottom Ash Contents

김장건\* · 원종묵\*\*

Kim, Jang-Keon\*, and Won, Jongmuk\*\*

### Abstract

The treatment of coal ash produced at coal-fired power plants requires high costs and has environmental problems. Therefore, a high proportion of coal ash has been reused, and the effective reuse of coal ash has been investigated extensively. In this study, the physical-chemical characteristics of bottom ash and fly ash sampled from a domestic coal-fired power plant were investigated. In addition, the shear behavior of bottom and fly ashes-sand mixtures was evaluated to verify the reuse potential of bottom and fly ashes. Direct shear tests were performed to evaluate the friction angle of the coal ash-sand mixture, which was used as an input parameter in the numerical analysis for slope stability to establish a framework for assessing the reuse potential of coal ash.

**Key words :** Bottom Ash, Fly Ash, Friction Angle, Direct Shear Test, Slope Stability

### 요 지

화력발전 부산물인 석탄회의 처리는 높은 비용과 환경적 문제가 발생하기 때문에 대부분의 석탄회는 재활용되고 효율적인 석탄회의 재활용에 대한 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 국내의 화력발전소에서 채취한 저회와 비회의 물리/화학적 특성에 대하여 분석하고 고찰하였다. 또한 저회와 비회의 함유량에 따른 모래의 전단거동을 평가하고 이를 통하여 석탄회의 재활용 가능성에 대하여 고찰하였다. 직접전단실험을 통하여 내부마찰각을 산정하고 이를 사면안정 모델 수치해석의 입력변수로 이용하여 석탄회의 재활용 가능성 평가방법을 제안하였다.

**핵심용어 :** 저회, 비회, 내부마찰각, 직접전단시험, 사면안정

## 1. 서 론

United Nations Environment Programme (UNEP)는 매년 자연적으로 보충되는 양보다 많은 500억톤의 모래와 자갈이 채굴되고 있다고 보고하였다. 모래는 물 다음으로 많이 이용되는 자원으로, 과도한 모래채취가 생물 다양성을 훼손하고 홍수위험을 높이는 등 환경적으로 치명적인 악영향을 주고 있다. 따라서 UNEP에서는 천연모래의 적극적인 관리가 필요하다고 지적하였다(UNEP, 2022). 시멘트의 양생과 더불어 지반의 성토 작업에도 필수적으로 이용하는 모래의

사용량 감소를 위하여 모래의 대체가능한 재료에 대한 연구가 수행되어야 한다.

우리나라는 아직 화력발전에 의한 전기 생산량이 2021년 기준 34.3%에 달하고(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2022) 부산물로 발생하는 석탄회의 매립이 시간이 갈수록 어렵기 때문에 석탄회를 재활용 할 필요성이 대두되어져 왔다. 그러나 현재 국내의 석탄회 재활용 분야는 시멘트 혼화제, 시멘트 2차 제품, 성토제, 비료 등에 대부분 쓰일 만큼 재활용의 범위가 좁아 석탄회 재활용 관련 연구가 활발하게 진행되어 왔다(ACAA, 2021). 특히 최근 5년간

\*정회원, 울산대학교 건설환경공학부 석사과정(E-mail: longgun0603@gmail.com)

Member, Master Student, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

\*\*교신저자, 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수(Tel: +82-52-259-2279, Fax: +82-52-259-2629, E-mail: jmwon@ulsan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

저희는 재활용률이 100%를 상회함에도 불구하고 이전에 매립되어있는 저회로 인해 각 발전소가 소유하고 있는 매립장이 포화 상태에 있으며, 새로운 매립장 부지 확보가 어려운 상황이다. 또한 비회의 재활용률은 2019년 기준 평균 82.36%에 그쳐 매립을 최소화 하기 위하여 비회의 완전한 재활용이 필요하다(Oh and Kim, 2019).

미국은 1968년에 Americal Coal Ash Association (ACAA)를 설립하여 석탄회를 여러 방면에서 재활용 하고 있으며 재활용 분야와 재활용률 공개하고 있다. 비회는 대부분 콘크리트 생산, 구조물의 뒷채움재 등에 사용되고 저회는 구조물의 뒷채움재, 도로의 도로기층 노상재료 등의 다방면의 분야에서 재활용이 이뤄지고 있다(ACAA, 2021).

미국 Electric Power Reserch Institute (EPRI)은 90년대 중반에 5개 주의 도로 기층 및 노상 재료 등으로 석탄회를 적용한 후 장기적인 모니터링을 실시하였는데, 5개 현장 모두 석탄회의 적용이 주위환경에 유해한 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다(Rehage and Schrab, 1995). 또한 Koh et al. (2003)에 따르면 비회와 저회를 혼합한 혼합석탄회의 재활용 후 강우나 지하수 등의 접촉에 의해 배출되는 침출수에 의한 오염가능성이 미미함을 확인하였다. 오히려 일부 석탄회가 띄는 알칼리성은 산성비로 인해 산성화된 지반의 중성화에 기여함을 확인하였다.

여러 가지 석탄회의 재활용 방법(e.g., 콘크리트 첨가제, 도로 보조기층 등) 중 하나인 성토재 등의 대규모 토목공사에 사용하기 위하여 석탄회의 강도정수를 평가하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 직접전단시험을 통한 모래와 저회, 비회 혼합토의 내부마찰각을 평가하고 지반 공학적 재료로서 재활용 가능성에 대해 고찰하였다. 또한 선행 연구에서 산정된 우리나라 발전소 석탄회의 내부마찰각과 본 연구에서 사용된 석탄회의 내부마찰각을 비교하였으며 실내실험을 통해 산정된 내부마찰각을 입력변수로 이용하여 석탄회의 함유량 별 사면의 안전율을 산정하고 비회와 저회의 재활용 가능성에 대하여 고찰하였다.

## 2. 이론적 배경 및 실험방법

### 2.1 국내외 석탄회의 재활용 현황

Table 1에는 공공데이터센터에 발표된 자료를 근거로 하여 한국동서발전(당진, 호남, 동해)과 한국남부발전(하동, 삼척)에 소속된 5개 발전소의 발생량의 합과 재활용량의 합을 나타내었다. 저회의 발생량보다 재활용량(Table 1의 재활용량(total recycled))이 높은 이유는 과거에 매립된 저회와 발생된 저회를 동시에 재활용하고 있기 때문이다. 또한 미국 ACAA에서 발표한 보고서에 따라 미국의 석탄회 총 발생량과 재활용량, 그리고 재활용 비율을 Table 2에 나타내었다. 미국의 석탄회 발생량은 한국 발전소의 총생산량보다 10배 이상이기 때문에 석탄회의 재활용량도 한국에 비해

**Table 1.** Current State of Coal Ash Production and Recycling in the Korea, 2020 (Korea East-West Power Co. Ltd., 2021; Korea Southern Power Co. Ltd., 2021)

	Fly Ash (t)	Bottom Ash (t)
Total produced	2,343,000	505,000
Total recycled	2,089,000	1,274,000
Total recycle rate	89.16%	252.28%

**Table 2.** Current State of Coal Ash Production and Recycling in the USA, 2020 (ACAA, 2021)

	Fly Ash (t)	Bottom Ash (t)
Total produced	26,512,322	7,973,554
Total recycled	17,104,493	2,955,653
Total recycle rate	64.52%	37.07%

크지만, 재활용 비율이 한국보다 낮음을 알 수 있다.

### 2.2 직접전단시험을 이용한 전단강도

직접전단시험기는 전단상자, 수직 및 수평력을 가할 수 있는 가압장치, 수직변위 및 수평변위를 측정할 수 있는 변위센서로 구성되어 있고 시료가 담겨있는 전단상자에 수직력을 가하고 전단을 진행하는 시험이다. 흙을 전단파괴시킬 때 각 수직응력에 따라 최대 전단응력을 산정할 수 있는데 이 최대전단응력들을 각각 연결하면 Mohr-Coulomb 파괴포락선이 되고 이 선의 절편과 경사각은 각각 점착력과 내부마찰각이 된다.

직접전단시험은 배수조건의 조절이 불가능하고 응력이 시료의 전 단면이 아닌 경계에 집중되어 있으며, 전단면이 미리 정해진다는 단점이 있다. 또한 전단 시 주응력의 방향이 회전되는 등의 문제점이 있지만, 간단하고 빨리 시험 결과를 얻을 수 있다는 장점 때문에 많이 활용된다(Kim, 2013).

## 3. 시료특성 및 실험조건

### 3.1 실험 재료

본 연구에서는 주문진 표준사와 하동 화력발전소에서 발생한 부산물인 비회와 저회를 사용하였다. 저회(Bottom Ash)는 석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 보일러의 하부로 낙하된 과상 또는 입자의 입경이 큰 재 성분을 지칭하며 전체 석탄회 발생량 중 10%~20%를 차지한다. 대부분의 저회는 매립하였는데 2016년 ‘자원순환기본법’이 제정됨에 따라 저회를 재활용 소재로 사용하기 위한 연구개발이 진행되었다. 본 연구에 이용한 저회는 입자의 일관된 크기를 조성하고 과도하게 큰 입자를 제거하기 위해 #10 체에 걸러낸 후 사용하였다.

비회(Fly Ash)는 유연탄의 연소 후 발생하는 부산물로 포집기를 통해 채취하게 된다. 비회는 전체 석탄회 발생량 중 약 75%-80%를 차지하고 있는데, 비회 첨가로 인해 콘크리트의 가공성이 개선되고 경화열이 완화되며 포졸란 반응으로 인해 장기적으로 강도를 개선할 수 있기 때문에 혼화제로 주로 사용되어져 왔다. 본 연구에서는 하동발전소에서 채취한 비회를 건조시킨 후 직접전단실험에 이용하였다.

### 3.2 시료의 물리·화학적 분석

석탄회는 같은 화력 발전소에서 채취하였더라도, 사용되는 연료나 소각 조건의 변화에 따라 화학적인 조성이 달라질 수 있기 때문에, 본 연구에서 이용된 석탄회의 화학적 물성치를 산정하기 위하여 X-선 회절 분석(XRD), SEM 및 EDS 분석, X-선 형광 분석(XRF)을 수행하였다. 그리고 비중, 체가름, 비중계 실험의 경우 각각의 ASTM 기준을 따라 실험을 수행하였다. 저회의 경우 #10체에 걸러 낸 후 105 °C의 오븐에서 5시간 이상 건조 후 사용하였으며 저회의 XRF, XRF, SEM 분석은 막자사발에서 분쇄한 시료를 이용하였다.

#### 3.2.1 입도분포곡선

Fig. 1은 체가름시험(ASTM D422, 2004)을 통해 산정한 저회, 비회, 표준사의 입도분포곡선이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 저회에 비해 비회는 더 작은 입경을 가지는 것으로 나타났으며 본 연구에서 이용한 저회와 표준사의 입도분포는 거의 유사한 것으로 나타났다. 통일분류법(USCS)에 의거하여 본 연구에 이용한 저회와 비회를 분류한 결과(ASTM D2487, 2006) 각각 SP와 SM으로 나타났으며 비회의 경우 약 30% 정도가 세립분(입경 < 0.075 mm)인 것으로 나타났다. 또한 주문진 표준사와 저회, 비회의  $d_{50}$  (중간 입경)은 각각 0.70 mm, 0.75 mm, 0.01 mm로 나타났으며 이를 통하여 산정한 주문진 표준사/저회, 주문진 표준사/비회 입경비는 각각 0.93, 7,000으로 나타났다. 마지막으로 본 연구에 이용

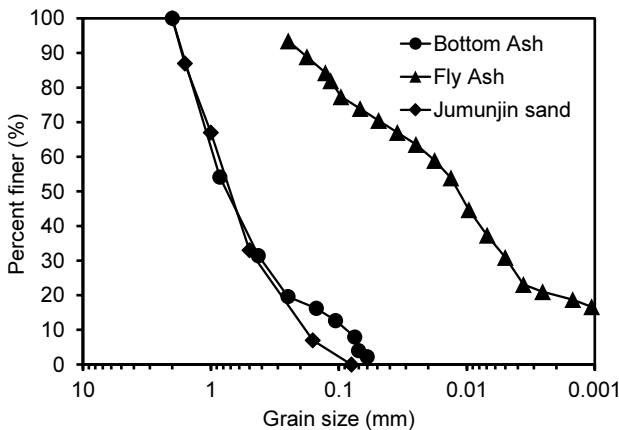


Fig. 1. Particle Size Distribution Curve of Jumunjin Standard Sand, Bottom Ash, Fly Ash

한 주문진 표준사, 저회, 비회의  $C_u$  (균등계수,  $C_u = d_{60}/d_{10}$ )는 각각 4.77, 10.86, 35.9로 나타났다. 이를 통하여 본 연구에 이용한 비회는 매우 입도분포가 양호한 것을 볼 수 있다.

#### 3.2.2 비중( $G_s$ ) (ASTM D854-00, 2000)

석탄회와 표준사의 배합비율에 따른 계산된 비중값을 Fig. 2에 나타내었다. 비회( $G_s = 2.22$ )와 저회( $G_s = 2.43$ ) 모두 표준사( $G_s = 2.65$ )보다 낮은 비중값을 나타내기 때문에 석탄회 함유량이 높아질수록 비중값이 낮아지는 현상을 확인할 수 있다.

#### 3.2.3 간극비

Fig. 3에 나타난 간극비의 변화는 최대, 최소 간극비 (ASTM D4253, 2000; ASTM D4254, 2006)를 구한 후 상대밀도 50% 기준으로 간극비를 산정한 결과이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 석탄회의 함량에 따른 간극비의 변화는 석탄회와 표준사가 혼합됨에 따라 입도분포가 좋아지기 때문에(Fig. 1) 상대적으로 낮은 석탄회의 함량에서는 석탄회 함량이 증가할수록 간극비가 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 입경비

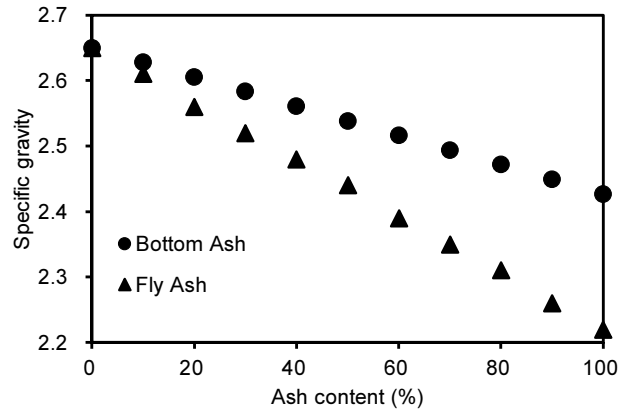


Fig. 2. Changes in the Specific Gravity Value According to the Ratio of Jumunjin Standard Sand and Coal Ash

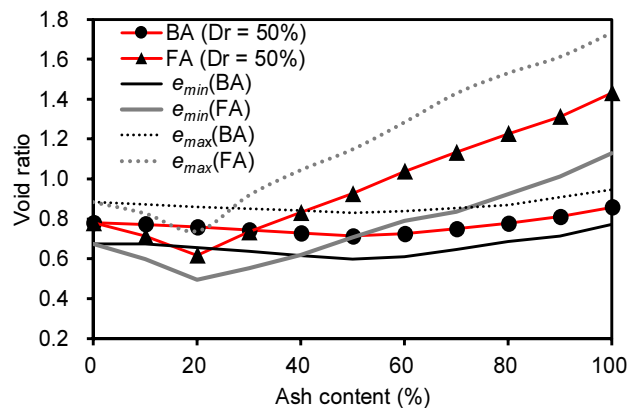
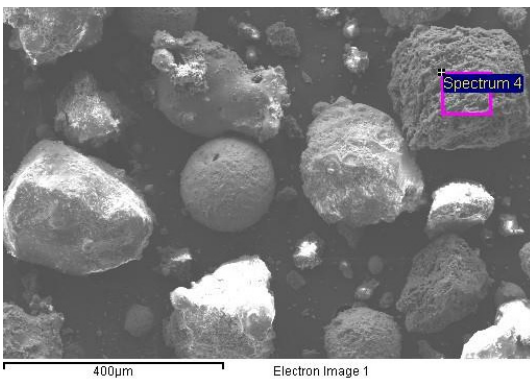


Fig. 3. Change of Void Ratio According to Ash Content

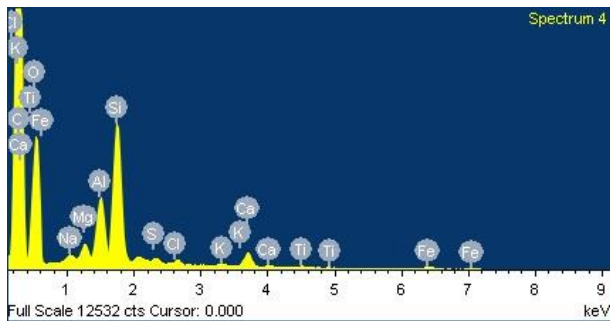
가 매우 큰 비회의 경우 입경이 큰 표준사의 공극 사이에 비회가 위치하기 때문에 ~20%의 비회 함량까지는 공극이 줄어들고 간극비가 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 비회 함량이 20%를 초과하게 되면 표준사 입자 사이의 접촉이 거의 없어지기 때문에 비회의 상대적으로 큰 간극비에 따라 표준사-비회의 간극비가 증가하게 된다. 비회 100%의 경우 상대밀도 50%에 해당하는 간극비는 1.43으로 일반 모래에 비하여 매우 큰 값을 나타내었다. 반면에 저회의 경우 표준사-비회 혼합토와 유사한 거동(낮은 석탄회 비에서 간극비 감소)을 나타내나 비슷한 입경 및 입도분포(Fig. 1)로 인하여 저회 함유량이 증가함에 따라 상대적으로 변화가 적은 간극비를 보인다. Fig. 3의 결과는 모래-실트 혼합토나 굵은 모래-가는 모래 혼합토에서 나타나는 경향과 유사하며 석탄회의 입도분포(또는 입경비)가 간극비의 변화에 끼치는 영향을 보여준다.

### 3.2.4 SEM & EDS

Scanning Electron Microscope (SEM)은 시편을 향해 1차 전자를 쬐 충돌시켜 발생하는 2차 전자(50 eV 이하의 에너지를 갖는 전자)와 후방으로 방출되는 Backscattered Electron (후방산란 전자)의 신호를 검출하여 모니터에 영상을 형성시켜 확대 분석하는 기술이다. 이 때 시편이 갖고 있는 원소 고유의 특성에 따라 X선이 검출되는데 이 특정 X선을 통해



(A) SEM of bottom ash

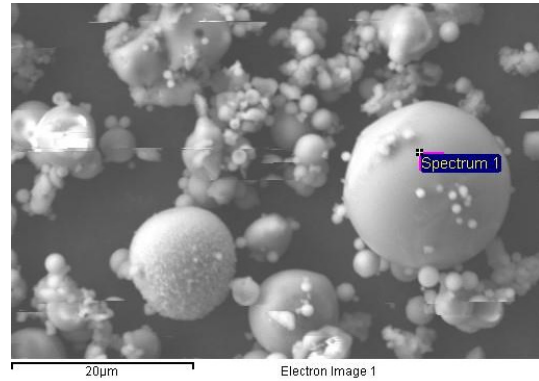


(B) EDS analysis of bottom ash

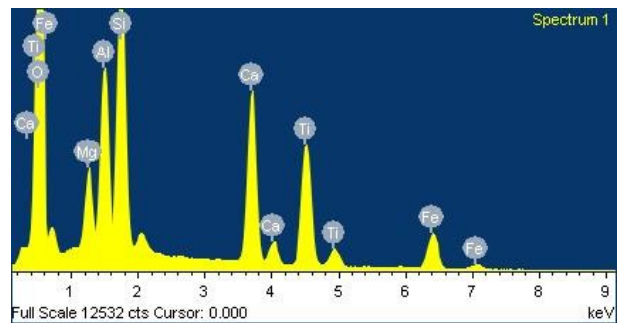
Fig. 4. Results of SEM-EDS Analysis of Bottom Ash

시편의 원소 구성을 파악할 수 있는 원소분석방법 중 하나가 energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)이다.

본 연구에서는 JEOL JSM-7600를 이용하여 저회와 비회의 SEM 및 EDS 분석을 수행하였고 그 결과를 각각 Figs. 4와 5에 나타내었다. Tables 3과 4의 저회와 비회의 입자부분



(A) SEM of fly ash



(B) EDS analysis of fly ash

Fig. 5. Results of SEM-EDS Analysis of Fly Ash

Table 3. Elemental Composition of Bottom Ash

Element	Weight (%)	Atomic (%)
O	34.85	40.88
Al	2.87	2.28
Si	18.72	13.37
C	15.65	17.93
Fe	21.96	21.87

Table 4. Elemental Composition of Fly Ash

Element	Weight (%)	Atomic (%)
O	52	70.18
Al	7.52	5.79
Si	16.73	12.33
Ca	2.62	1.43
Fe	14.52	7.03

**Table 5.** Comparison of Major Components of Bottom Ash and Fly Ash

	Bottom Ash Concentration (%)	Fly Ash Concentration (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52.1	7.86
SiO <sub>2</sub>	24.2	60.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.67	23.4
CaO	5.63	2.68
SO <sub>3</sub>	3.84	0.555
Na <sub>2</sub> O	1.73	0.319
TiO <sub>2</sub>	1.02	2.30
K <sub>2</sub> O	0.798	1.22

EDS 분석의 정량적인 결과이다. Table 3에 나타난 바와 같이 본 연구에서 이용한 저회는 상대적으로 높은 탄소 함유량을 보였고 따라서 공극이 많은 입자형상을 보였다 (Fig. 5). 반면 비회의 경우 완전연소로 인해 입자가 매우 낮은 탄소 함유량을 보였다(Table 5).

### 3.2.5 XRD and XRF

X-ray diffraction (XRD)는 시편의 화학적 조성, 결정 구조, 결정질 크기, 변형, 우선 방위 및 층 두께 등 구조 정보를 확인하는 기법이다. 본 연구에서 수행한 저회와 비회의 XRD 결과는 각각 Figs. 6과 7에 나타내었다. XRD (PHILIPS PW3040)는  $10^\circ < 2\theta < 80^\circ$ 의 범위에서 0.017°의 스텝 크기, 스텝 당 59.7초 발산슬릿 = 0.5°의 조건으로 수행하였다).

또한 저회와 비회의 화학적 성분 분석을 위하여 X-ray Fluorescence (XRF) 분석(PHILIPS PW2404)을 수행하고 그 결과를 Table 5에 나타내었다). Table 5에 나타난 바와 같이 저회의 경우 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 가장 높은 함유량을 보였고 비회의 경우 SiO<sub>2</sub>가 가장 높은 함유량을 보였다.

## 3.3 직접전단시험 장비 및 실험 방법

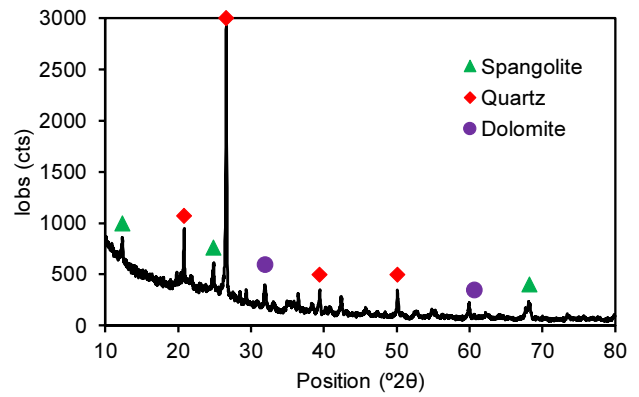
### 3.3.1 직접전단시험 장비

본 연구에서는 석탄회와 표준사를 혼합하여 저회와 비회의 함유량에 따른 내부마찰각을 산정하였다. 본 연구에 사용된 직접전단시험장치는 Fig. 8과 같이 전단상자, 전단 모터, 전단강도 측정 센서, LVDT로 구성되었다. 지름 = 60 mm, 높이 = 42 mm인 원형전단상자를 이용하였고 시험장치를 컴퓨터에 연결하여 전단변위에 따른 전단응력과 수직하중을 측정하였다.

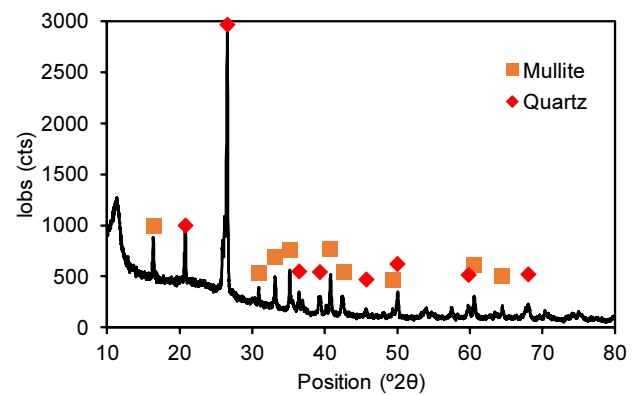
### 3.3.2 실험조건 및 방법

저회와 비회의 함유량은 각각 0, 20, 40, 60, 80, 100%로

1) Korea Basic Science Institute에서 분석하였음.  
2) Korea Basic Science Institute에서 분석하였음.



**Fig. 6.** XRD Analysis Results of Bottom Ash



**Fig. 7.** XRD Analysis Results of Fly Ash



**Fig. 8.** The Direct Shear Test Equipment Used in This Study

설정하였고 1.25 mm/min의 전단속도로 실험을 수행하였다. 수직응력은 100, 150, 200, 250 kPa로 설정하였고 주어진 수직응력에서 전단변위에 따른 전단응력을 측정하였다. 시

료는 32 mm의 높이로 조성하였고 모든 실험은 최대/최소 간극비(Fig. 3)를 이용하여 50%의 상대밀도로 수행하였다. 수직변위는 LVDT를 이용하여 측정하였고 주어진 수직하중 하에서 수직변위가 수렴된 시점에서 전단변위(수평방향)를 가하여 실험을 수행하였다. 균질한 석탄회-표준사 혼합토를 조성하기 위하여 상대밀도 50%에 해당하는 석탄회와 표준사를 용기에 넣고 30분간 물리적으로 혼합하였다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 석탄회-표준사 혼합토의 전단응력-전단변위 거동

Figs. 9와 10은 각각 저회와 비회 함량 60%에서 측정된 전단응력-전단변위 그래프를 나타낸다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 본 연구에서 사용된 표준사와 모든 혼합 비율에 대한 모래-저회 혼합토의 경우, 2-3 mm 범위 사이에서 최대 전단응력(전단강도)이 나타났다. 반면 본 연구에서 사용된 모든 혼합 비율에 대한 모래-비회 혼합토의 경우 모래-저회

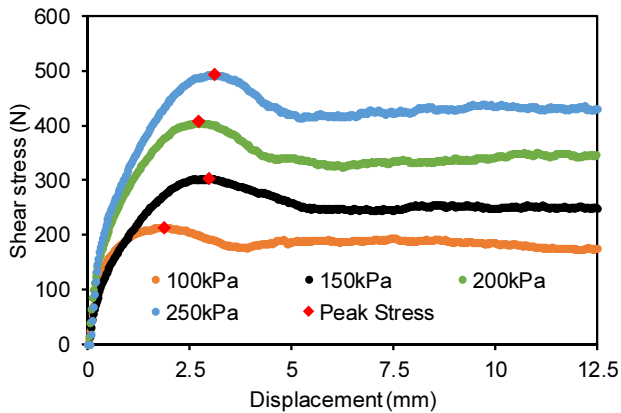


Fig. 9. Shear Stress - Displacement Graph in Bottom Ash Content 60%, Vertical Stress = 100, 150, 200, 250 kPa

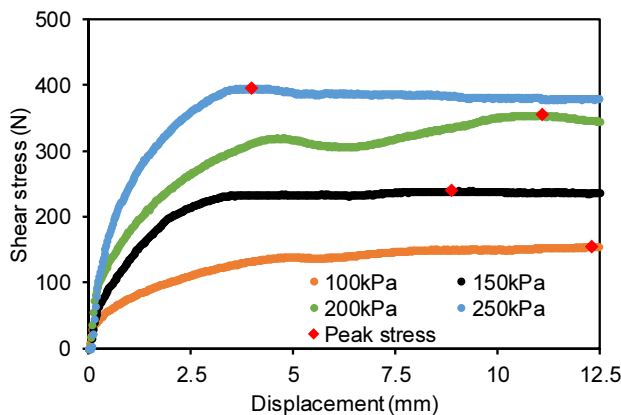


Fig. 10. Shear Stress - Displacement Graph in Fly Ash Content 60%, Vertical Stress = 100, 150, 200, 250 kPa

혼합토와 다르게 뚜렷한 최대전단응력을 보이지 않고 전단 변위가 증가함에 따라 전단강도가 수렴하거나 천천히 증가하는 전단거동을 보였다. 반면 모래-저회 혼합토의 경우 모든 저회 함유량에서 Fig. 9와 같은 뚜렷한 최대전단응력이 나타났다. 이를 통하여 모래 입경에 비해 상대적으로 큰 입경을 가진 저회의 경우 모래와 혼합 시에 조밀한 모래와 같은 전단거동을 보이고 상대적으로 작은 입경을 가진 비회의 경우 느슨한 모래나 세립토와 같은 전단거동을 보임을 알 수 있다. 본 연구에서는 비회-모래 혼합토의 경우, 전단변위 20 mm 내에서 최대전단응력을 전단강도로 산정하고 이를 통하여 내부마찰각을 산정하였다.

##### 4.2 저회와 비회 함유량에 따른 내부마찰각

Fig. 11은 저회와 비회 함유량에 따라 산정된 내부마찰각을 나타낸다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 저회-모래 혼합토의 경우 저회 함유량이 증가할수록 전단강도가 다소 감소하는 경향을 보인다. 다만 저회 100% (모래 0%)인 경우에는 저회 80%에 비해 큰 내부마찰각을 보였다. 비회의 경우 뚜렷한 경향성이 나타나지 않으나 저회와 마찬가지로 비회 함유량이 증가할수록 내부마찰각이 감소하다가 비회 함유량 > 60%에서 내부마찰각이 다시 증가하는 경향을 보인다. 이를

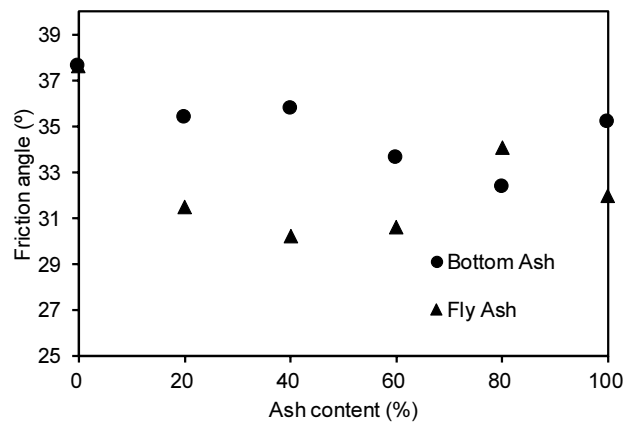


Fig. 11. Changes in Friction Angle According Ash Content

Table 6. Changes in Coefficient of Determination According Jumoonjin Stand Sand - Coal Ash Mixture

Ash content (%)	Coefficient of determination	
	Bottom ash	Fly ash
0	0.9993	0.9993
20	0.9977	0.9851
40	0.9991	0.9979
60	0.9989	0.9721
80	0.9940	0.9307
100	0.9989	0.8848

통하여 비회-모래 혼합토의 전단강도는 높은 비회 함유량에서 유리할 수 있음을 유추할 수 있다. Fig. 11에 나타난 내부마찰각 거동은 Fig. 3에 나타난 석탄회-모래 혼합토의 간극비 경향과 밀접한 관계를 보인다. 하지만 순수한 모래와 다르게 큰 간극비의 석탄회-모래 혼합토가 반드시 높은 내부마찰각으로 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 11의 내부마찰각은 수직응력-전단강도 데이터에서 비회 100%를 제외하고  $R^2 > 0.9$ 의 높은 상관관계를 통해 산정되었다(Table 6).

### 4.3 선행연구와의 비교

본 연구에서 이용된 석탄회와 Kuk et al. (2010)에 나타난 영흥화력본부와 삼천포화력본부의 석탄회의 비중, 단위중량, 강도정수를 비교하여 Table 7에 나타내었다(석탄회 함량 100%). Table 7에 나타난 바와 같이 본 연구에서 이용한 하동발전소의 저회는 다른 발전소의 저회에 비해 큰 비중값을 보이고 비슷한 단위중량을 나타내었다. 이는 본 연구에서 이용한 하동발전소의 저회가 바른 발전소의 저회에 비해 상대적으로 큰 간극비를 보임을 의미한다.

저회의 내부마찰각의 경우 본 연구에서 산정된 내부마찰각이 영흥과 삼천포의 저회의 내부마찰각에 비하여 낮게 나타났다. 이는 위에서 언급한 본 연구의 저회가 상대적으로 큰 간극비를 가지기 때문인 것으로 생각된다.

비회의 경우 본 연구에서 이용된 비회가 나머지 두 화력발전소와 비슷한 비중값을 보였으나 훨씬 작은 단위중량을 보였다. 이를 통하여 본 연구에서 이용된 비회의 간극비가 상대적으로 크지만 비슷한 내부마찰각을 보임을 알 수 있다.

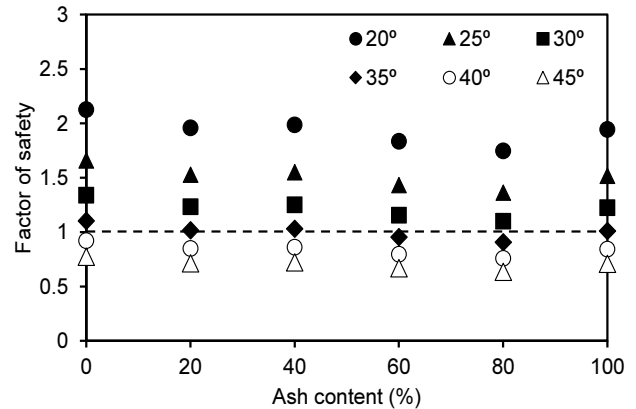
### 4.4 사면안정 해석

본 연구에서는 석탄회의 대체이용 가능성을 평가하기 위해 실내실험에서 산정된 석탄회 함유량별 내부마찰각을 입력변수로 이용하여 수치해석을 수행하였다. Geostudio의 Slope/w를 이용하여 건조한 사면의 사면파괴에 대한 안전율을 산정하고 그 결과를 Figs. 12와 13에 나타내었다. 사면의 크기는 가로 85 m, 우측높이 30 m, 좌측높이 20 m로 설정하였으면 우측최상단과 사면시점 간의 거리 변화를 통하여 경사각을 조절하였다. 사면해석에는 Bishop의 절편법(절편개수 = 100개)을 이용하였으며 Fig. 3의  $Dr = 50\%$ 에 해당하는 단위중량을 입력변수로 이용하였다. 각 조건별 총 361개의 파괴 가능한 사면의 안전율을 산정하고 최소안전률에 해당하는 값을 해당 사면의 안전율로 산정하였다.

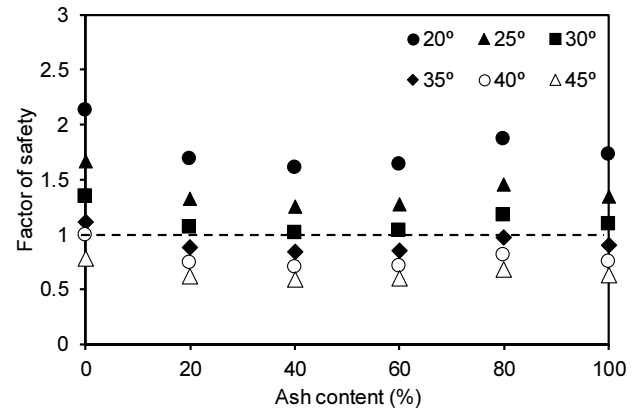
Figs. 12와 13에 나타난 바와 같이 저회와 비회의 함유량이 증가함에 따라 안전율이 다소 감소하는 경향을 보였다. 또한 사면의 경사각이 30° 이하일 때 모든 저회/비회 함유량에서 안전율이 1보다 큰 것을 볼 수 있다. 특히 사면의 설계 안전율 = 1.5일 때, 저회의 경우 경사각 20°와 25°에서 사면파괴에 안전한 것으로 나타났고 비회의 경우 경사각 20°에서 사면파괴에 안전한 것으로 나타났다. 이를 통하여 사면에 석탄회를

**Table 7.** Properties of Coal Ash in Yeongheung, Samcheonpo, Hadong Thermal Power Plant

		Yeong heung	Samcheonpo	Hadong
BA	Gs	1.84	1.99	2.43
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.03	12.85	12.81
	$\emptyset$ (°)	43.5	40.9	35.23
FA	Gs	2.23	2.39	2.22
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.3	15.7	8.96
	$\emptyset$ (°)	28.5	34.1	32.01



**Fig. 12.** Factor of Safety According to Change of Slope Angle and Bottom Ash Content



**Fig. 13.** Factor of Safety According to Change of Slope Angle and Fly Ash Content

재활용 할 시 저회가 비회보다 더 이점을 가짐을 알 수 있다. Figs. 12와 13에 나타난 수치해석 결과는 건조하고 균질한 이상적인 상태에서 수행되었기 때문에 다양한 조건(수리지질학적 조건, 비균질 조건, 다양한 토층 조건 등)에서의 수치해석을 통해 설계 안전율을 만족하는 최적의 석탄회 함유량을 산정할 수 있을 것이라 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 하동발전소의 저회와 비회의 물리/화학적 특성을 체분석, XRD, XRF, SEM-EDS를 통하여 분석하였다. 또한 저회와 비회의 함유량에 따른 표준사의 내부마찰각을 산정하고 이를 통하여 석탄회의 함유량이 모래의 전단거동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 마지막으로 산정된 내부마찰각을 사면안정모델의 입력인자로 이용하여 석탄회의 재활용 가능성에 대하여 고찰하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) 입경비가 매우 큰 비회의 경우 ~20%의 비회 함량까지 간극비가 감소하고 비회 함량 > 20%에서는 간극비가 증가하였다. 표준사-저회 혼합토의 경우 표준사-비회 혼합토와 비슷한 경향을 보이거나 저회 함유량에 따라 상대적으로 변화가 적은 간극비를 보였다. 이는 석탄회의 입도분포(또는 입경비)가 간극비의 변화에 끼치는 영향을 보여준다.
- (2) 표준사-저회의 전단변위-전단응력 거동은 조밀한 모래지반과 유사한 거동을 보이며 상대적으로 적은 전단변위에서 뚜렷한 최대전단응력을 나타내었다. 반면에 표준사-비회의 전단변위-전단응력은 뚜렷한 최대전단응력이 나타나지 않고 느슨한 모래나 세립토에서 나타나는 전단거동이 나타났다.
- (3) 저회-표준사 혼합토의 내부마찰각은 저회의 함유량이 증가함에 따라 감소하다가 60%부터 증가하였다. 또한 비회-표준사 혼합토의 내부마찰각은 비회 함유량 40%에서 최소값을 나타내었다.
- (4) 수치해석 수행 결과 설계 안전율 = 1.5 적용시에 저회는 25° 이하, 비회는 20° 이하의 사면에서 안전한 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 framework를 통하여 사면에 석탄회의 모래 대체 가능성을 평가할 수 있을 것으로 생각된다.
- (5) 본 연구에서 수행된 연구결과는 성토재료나 모래 대체 재료로써 석탄재의 이용가능성을 보여준다. 다만 더 넓은 적용성을 가지기 위하여 추후에 불포화나 포화 상태에서의 전단거동 평가가 요구될 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022R1C1C1007296)이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

American Coal Ash Association (ACAA). (2021). *Coal ash recycling rate increases in 2020, reversing declines*

- in previous two years*. Retrieved June 12, 2022, from <https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/2021/12/News-Release-Coal-Ash-Production-and-Use-2020.pdf>
- ASTM D2487. (2006). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes: Unified soil classification system*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- ASTM D422. (2004). *Standard test method for measurement of particle size analysis of soils*. Philadelphia, Pennsylvania, USA: ASTM.
- ASTM D4253. (2000). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. ASTM International.
- ASTM D4254. (2006). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*. West Conshohocken, PA: American Society of Testing and Materials.
- ASTM D854-00. (2000). *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. American Society for Testing and Materials.
- Rehage, J.A., and Schrab, G.E. (1995). *Environmental performance assessment of coal combustion byproduct use sites: Road construction applications*. Final report, United States. Retrieved June 29, 2022, from <https://www.osti.gov/biblio/86291>
- Kim, S.K. (2013). *Soil mechanics-theory and applications* (3rd ed.). Paju-si: Chungmungak.
- Koh, Y.I., Kim, H.T., Park, Y.H., and Kim, D.Y. (2003). A study on the practical utility of mixed coal ash for materials of soft ground improvement. *Annual Conference of Korean Geo-environmental Society*, pp. 11-17.
- Korea East-West Power Co. Ltd. (2021). *Coal recycling status by power plant*. Retrieved July 10, 2022, from <https://www.data.go.kr/data/15106334/openapi.do>
- Korea Southern Power Co. Ltd. (2021). *Coal recycling status by power plant*. Retrieved July 10, 2022, from <https://www.data.go.kr/data/15082990/fileData.do>
- Kuk, K.K., Kim, H.Y., and Chun, B.S. (2010). A study on the engineering characteristics of power plant coal ash. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 11, No. 5, pp. 25-34.
- Ministry of Trade, Industry and Energy. (2022). *Current status of power generation by energy source*. Retrieved July 10, 2022, from [https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1339](https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339)
- Oh, G.D., and Kim, K.Y. (2019). Compression strength



behavior of mixed soil recycling bottom ash for surface layer hardening. *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, Vol. 5, No. 4, pp. 287-293.

UNEP. (2022). *Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert crisis*. Retrieved June 12, 2022, from <https://unepgrid.ch/en/resource/2022SAND>

---

<i>Received</i>	October 4, 2022
<i>Revised</i>	October 4, 2022
<i>Accepted</i>	October 11, 2022