

## 생활폐기물 소각 바닥재의 역학적 특성

# Mechanical Characteristics of Municipal Waste Incineration Bottom Ashes

오 명 학<sup>1)</sup> · 이 정 협<sup>2)</sup> · 박 해 용<sup>3)</sup> · 조 완 제<sup>†</sup>

Myounghak Oh · Jeonghyeop Lee · Haeyong Park · Wanjei Cho

Received: September 9<sup>th</sup>, 2015; Revised: September 16<sup>th</sup>, 2015; Accepted: October 16<sup>th</sup>, 2015

**ABSTRACT** : Due to the population growth and development of industry, waste from household and industries has increased. As the advanced countries experienced these problems, they have already started research on recycling methods of waste incineration ashes. Domestic recycling rate of incineration ash became up to 80 percent as high as the level of developed countries, but the recycling was limited to fly ash for admixture in concrete. In case of bottom ash, most of bottom ash was reclaimed in the landfills. Therefore, basic physical property and mechanical experiments for bottom ash were conducted in this study to evaluate the possibility of incineration bottom ash as an alternative construction materials. Bottom ashes from three different landfills with two different incineration methods were tested. Incineration methods are Stoker type Incinerator and Pyrolysis-Melting Treatment. Bottom ash can be used as an alternative granular material for construction based on the basic physical property and mechanical characteristics similar to those of sandy materials. However, the incineration method should be considered since it can affect the material and mechanical characteristics of the incineration bottom ash.

**Keywords** : Waste incineration ash, Bottom ash, Stoker type incinerator, Pyrolysis-melting treatment

**요 지** : 인구 증가와 산업발전에 따라 생활 및 산업분야에서 발생하는 폐기물의 양도 크게 증가하고 있다. 폐기물 소각재 처리로 인한 문제는 국내뿐 아니라 선진국에서도 경험하고 있는 현상으로 이미 선진국에서는 폐기물 소각재를 건설재료로 사용하는 등 소각재의 재활용을 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 국내의 폐기물 소각재 재활용은 현재 약 80%로 선진국 수준에 이르렀지만 이는 콘크리트 혼화재로서 사용되는 비산재(Fly ash)만 해당되며, 재활용을 위한 관련 기술 및 노하우가 부족한 바닥재(Bottom ash)의 경우 대부분 매립처리 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 폐기물 소각 시 발생하는 소각재 중 발생량이 많고 재활용률이 낮은 바닥재의 기본물성 및 역학시험을 수행하여 건설재료로서의 사용 가능성을 평가하기 위하여 화격자 소각방식과 열분해 용융 소각 방식에 따라 발생된 바닥재의 역학적 특성을 비교하였다. 시험 결과, 폐기물 소각재의 바닥재는 모래와 비슷한 특성을 보여 건설재료로서의 사용가능성을 확인할 수 있었다. 폐기물 소각방식에 따라 바닥재의 기본물성 및 역학적 특성에 차이가 있는 것으로 나타났으므로 바닥재 활용 시 소각방식에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

**주요어** : 폐기물 소각재, 바닥재, 화격자 소각방식, 열분해 용융 소각방식

## 1. 서 론

인구 증가와 산업발전에 따라 생활 및 산업분야에서 발생하는 폐기물의 발생량도 크게 증가하고 있는 추세이다. 국내의 경우 생활폐기물, 사정장 배출시설계 폐기물(지정폐기물 제외), 건설폐기물의 2013년 한해 총 발생량은 약 1억 4천만 톤이었다. 이 중 6% 정도인 약 8백만 톤의 폐기물이 소각 처리된 것으로 나타났다. 폐기물 소각 처리 시 발생하는 소각재는 보일러 상부에서 발생하는 비산재(Fly ash)와 보일러 저부에서 채취되는 바닥재(Bottom ash)로 구분된다. 비산재의 경우 콘크리트 혼화재로서 재활용되며 재활용률은 약 80%로 선진국 수준에 이르렀다. 그러나 소각 처리된

폐기물의 10~15% 정도(중량 기준)가 발생하는 바닥재의 경우에는 비산재에 비해 월등히 많은 양이 발생되고 있는 실정이지만, 재활용을 위한 관련 기술 및 노하우가 부족하여 재활용되는 일부를 제외한 대부분이 매립처리 되고 있다. 최근 폐기물 매립지 부족과 신규 매립지 확보가 어려운 실정에서 폐기물의 매립량 감소를 위해 바닥재의 활용을 모색해야 할 시점이다.

폐기물 소각재 처리로 인한 문제는 국내뿐 아니라 선진국에서도 경험하고 있는 현상으로 이미 선진국에서는 폐기물 소각재를 건설재료로 사용하는 등 소각재의 재활용을 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다(Muhunthan et al., 2015). 따라서 바닥재의 재활용을 위해 국내에서 수행된 선행연구

1) Coastal Disaster Prevention Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

2) Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

3) Coastal Disaster Prevention Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

† Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University (Corresponding Author : jei0421@dankook.ac.kr)

를 살펴보면 바닥재를 건설 분야에서 건축재료 및 성토재료 등의 건설재료로서 적합성에 관한 연구(Park et al., 2012; Lee & Lee, 2013)를 비롯한 연구들이 진행된 바 있다.

본 연구에서는 폐기물 소각 시 발생하는 소각재 중 재활용률이 낮은 바닥재의 기본물성 및 역학시험을 수행하여 건설재료로서의 사용 가능성을 평가하고, 폐기물 소각방식에 따른 바닥재의 역학적 특성을 비교하고자 한다.

## 2. 폐기물 소각재

### 2.1 폐기물 소각방식 비교

국내에서 가장 널리 적용되고 있는 폐기물 소각방식은 폐기물을 직접 소각하는 화격자 소각방식(Stoker type incinerator)이다. 화격자 소각방식은 폐기물을 화격자 위에 투입하고 교반 및 이송시키면서 소각시키는 방식으로 소각로 내부에서 모든 소각과정이 완료되기 때문에 공정이 매우 간단하며 소각 시 발생된 폐열을 회수하여 에너지원으로 활용이 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 공기의 과다 공급으로 인한 증금속 및 다이옥신 등과 같은 유해물질이 발생될 가능성이 높다는 단점을 가지고 있다.

소각재의 유해성을 원천적으로 최소화하기 위해 최근 가장 부각되는 방식이 열분해 용융소각방식(Pyrolysis-melting treatment)이다. 국내에서 사용되고 있는 열분해 용융방식은 가스화 공정으로서 휘발 및 분해에 의해 가연성 가스 등을 생성하는 열분해 가스화 공정단계와 생성된 열분해 가스 및 2차 공기의 연소과정에서 발생하는 연소열로부터 회분의 용융을 유도하는 용융공정단계로 소각공정의 구분이 가능하다(Park et al., 2009). 열분해 용융방식은 무산소 또는 저산소로 운영되며 불연물은 1,200°C 이상으로 고온 용융시켜 슬래그화 하므로 증금속 및 다이옥신 등의 오염물질이 거의 전무하다는 장점을 가지고 있다. 국내에서의 열분해 용융방식의 기술 수준은 아직 성장 초기 단계에 있지만, 유럽과 일본 등 여러 선진국의 경우 열분해 용융방식을 통한 상업실적이 있으며 차세대 폐기물 소각공정으로 인정받고 있다.

Table 1은 화격자 소각방식과 열분해 용융방식을 비교하여 나타낸 표이다.

### 2.2 바닥재의 특징

폐기물 소각에서 발생하는 소각재는 바닥재(Bottom ash)와 비산재(Fly ash)로 구분된다. 바닥재는 폐기물 소각 중 연소실에서 낙하 배출된 소각재를 말하며, 연소가스에 교반되어 보일러나 집진기로 포집된 소각재를 비산재라고 부른다.

기존에 선행된 연구들을 보면 비산재의 경우 세립분과 비슷하며, 풍화도 및 세립도의 경향을 보이는 반면 바닥재의 경우 입자가 크며, 풍화도보다는 모래에 가까운 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 특히 바닥재의 경우 입경이 대체로 0.425~4.75mm의 범위를 가지며 이는 모래-잔자갈 범주에 포함된다. 바닥재의 비중은 일반적인 모래의 비중(2.6~2.8)보다 약 20% 이상 작게 나타나는 것으로 알려져 있다(Chae et al., 2007).

바닥재는 모래에 가까운 특성을 가지는 경량재료로서 인공모래로 사용할 수 있을 것으로 판단되지만, 보일러 내에서 바닥재가 채취되는 위치에 따라 비산재의 혼합률이 달라지면서 입도분포가 상이한 것으로 알려져 있다. 그러므로 사용 목적에 따른 사전검토가 반드시 필요하다(Lee et al., 2011).

## 3. 시험재료 및 방법

본 연구에서는 소각방식에 따른 폐기물 소각재의 물리적 특성과 강도 특성을 파악하기 위해 생활폐기물 소각장에서 발생된 바닥재를 사용하여 기본물성시험과 역학시험을 실시하였다.

### 3.1 시험재료 특성

본 연구에 사용된 소각재는 국내 수도권 지역 3곳에서 생활폐기물 소각 시 발생된 바닥재(Bottom ash)를 채취하여 사용하였으며, 각각의 시료를 A, B, C로 구분하였다. Table 2는 시험에 사용된 폐기물 소각 바닥재를 소각방식에 따라

Table 1. Comparison of stoker type incinerator and pyrolysis-melting treatment (Bae, 2010)

	Stoker type incinerator	Pyrolysis-melting treatment
Heat transfer	Exothermic reaction	Endothermic reaction
Physio-chemical reaction mode	Combustion	Decomposition
Air intake and exhaust gas	Relatively more exhaust gas occurs due to more air intake for complete combustion.	Little exhaust gas occur due to little need to air intake.
Device type	Open - type	Enclosed - type
Secondary pollution	Possible secondary pollutant such as heavy metal and dioxin	Low contamination density

Table 2. Classification of waste incineration bottom ash

Sample No.	Incineration method	Feature
A	Stoker type incinerator	- Install stationary or moving grates in incinerator and incinerate waste on the grates.
B		
C	Pyrolysis-melting treatment	- Burn pyrolysis or synthetic gas without direct burning of waste. - Composition of heavy metal and dioxin can be decreased via melting process - higher recycling rate.



(a) Sample A



(b) Sample B



(c) Sample C

Fig. 1. Waste incineration bottom ash used in the test

분류한 표이며, Fig. 1은 소각재 시료 A, B, C를 나타낸 사진이다.

각각의 바닥재 시료의 화학적 조성을 분석하기 위해 XRF 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Chemical components of waste incineration bottom ash

Components	Content (%)		
	A	B	C
SiO <sub>2</sub>	13.51	19.30	27.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.42	13.27	11.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.20	4.97	11.06
MgO	1.34	1.61	1.68
CaO	48.87	38.27	35.09
Na <sub>2</sub> O	3.51	4.62	3.50
K <sub>2</sub> O	1.34	2.73	0.50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7.84	6.61	5.58
Cl	3.02	3.60	0.08
etc.	3.95	5.05	3.35

일반적인 조립질 지반 재료의 경우 모암의 종류에 따라 어느 정도 차이는 있으나 SiO<sub>2</sub> 함량이 상당히 높으며, 대표적인 조립질 지반재료인 주문진 표준사의 경우 98% 이상이 SiO<sub>2</sub>로 이루어져 있다. 소각재의 경우 그 성분에서 일반적인 자연 지반재료와 비교하여 SiO<sub>2</sub> 함량은 낮은 대신 CaO의 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 따라서 바닥재를 점토 등 다른 재료와의 혼합하여 활용하는 경우 CaO 성분에 의한 화학 반응 여부 및 그 영향에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 기본물성시험

본 연구에서 사용된 폐기물 소각재 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해 물성시험을 실시하였다. 시험은 체가름 시험(KS F 2302, 2002), 비중시험(KS F 2308, 2006), 상대 밀도시험을 실시하였다.

### 3.3 시료의 역학시험

본 연구에서는 폐기물 소각재 시료의 역학적 특성을 파악하기 위해 역학시험을 실시하였다. 시험은 투수시험(KS F 2322, 2000), 다짐시험(KS F 2312, 2001), 직접전단시험(KS F 2343, 2007)을 실시하였다.

투수시험과 직접전단시험의 경우 각각의 시료를 비교하기 위하여 상대밀도시험을 통해 얻어진 상대밀도 60%에 해당하는 단위중량으로 시험을 진행하였다.

## 4. 시험 결과

### 4.1 기본물성시험 결과

Table 4는 시험에 사용된 폐기물 소각재의 기본물성시험을 수행한 결과를 나타낸 표이며, Fig. 2는 폐기물 소각재의 입도분포를 나타낸 그림이다.

폐기물 소각재시료 A, B, C를 체가름시험을 통해 통일분류법으로 분류한 결과 양입도의 모래 또는 빈입도의 모래로 분류되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 바닥재의 경우 모래에 가까운 특성을 보인다는 기존의 연구들과 일치한다.

같은 화격자 소각방식으로 소각시킨 시료 A와 시료 B가 각각 양입도와 빈입도의 결과를 나타내는 것을 확인하였으며, 이를 통해 소각방식이 소각재의 입도분포에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보여진다.

바닥재의 비중은 일반적인 모래의 비중(2.6~2.8) 보다 낮으며, 바닥재를 이루는 조성성분 중 산화철( $Fe_2O_3$ )의 성분이 많을수록 큰 비중을 갖는 것으로 알려져 있다. Table 4를 보면 화격자 소각방식으로 소각시킨 시료 A와 시료 B는 비슷한 비중을 가지며 일반적인 모래의 비중보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 반면 열분해 용융방식으로 소각시킨 시료 C는 앞의 두 시료에 비해 상당히 큰 비중을 가지는 것을 확인할 수 있었으며 일반적인 모래와 비교하였을 때에도 더 큰 비중을 가지는 것을 확인하였다. 이는 열분해 용융방식이 1,200°C 이상의 고온으로 용융시켜 슬래그화된 바닥재

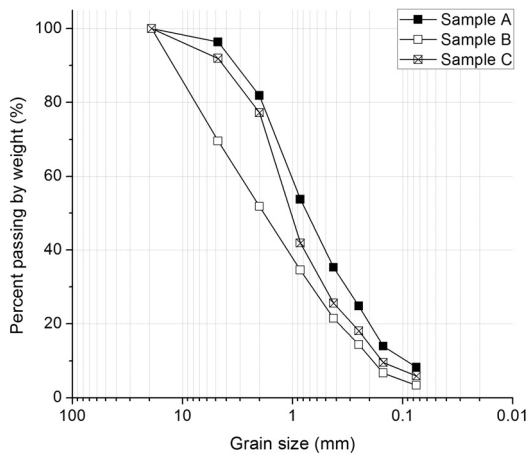


Fig. 2. Grain size distribution of waste incineration bottom ash

Table 4. Summary of properties of Municipal waste incineration bottom ashes

Sample No.	Specific gravity Gs	USCS	Maximum dry unit weight $\gamma_{d \max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Minimum dry unit weight $\gamma_{d \min}$ (kN/m <sup>3</sup> )
A	2.52	SW	14.62	9.52
B	2.56	SP	15.01	8.83
C	2.91	SW	20.70	16.48

가 만들어지기 때문에 열분해 용융방식으로 소각시킨 폐기물 소각재의 비중의 경우 모래보다 큰 것으로 판단된다.

상대밀도시험을 통해 획득한 최대건조단위중량과 최소건조단위중량의 경우에도 비중과 마찬가지로 시료 A와 시료 B는 비슷한 건조단위중량을 가지는 반면 시료 C는 최대건조단위중량과 최소건조단위중량 모두 앞의 두 시료에 비해 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 소각방식에 따른 건조단위중량의 차이는 소각방식에 따른 비중의 차이에서 발생한 것으로 판단된다.

### 4.2 투수시험 결과

본 연구에서는 폐기물 소각재의 소각방식에 따른 투수성을 비교하기 위해 투수시험을 실시하였다. 폐기물 소각재시료 A, B, C가 모래와 가까운 특성을 보인다는 결과를 고려하여 정수위 투수시험을 실시하였으며, 시료는 상대밀도 60%에 해당하는 단위중량으로 동일하게 조성하여 실험을 진행하였다. Table 5는 정수위 투수시험의 결과와 유효입경을 나타낸 표이다.

일반적인 사질토의 투수계수는  $1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^6$ 으로 알려져 있다(Bear, 1972). Table 5를 보면 모든 시료가 일반적인 사질토의 투수계수 범위에 속하는 결과를 보였으며, 이는 폐기물 소각재 중 바닥재의 투수성이 모래와 비슷한 경향을 보인다는 것을 나타낸다.

또한 화격자 소각방식으로 소각시킨 시료 A와 시료 B에 비해 열분해 용융방식으로 소각시킨 시료 C의 투수계수가 약 15배 이상 큰 것을 확인할 수 있었다. 흙의 투수성을 지배하는 입경으로 알려진 유효입경을 비교한 결과, 시료 B, 시료 C, 시료 A 순으로 크게 나타나 유효입경의 경향이 투수계수의 경향과는 맞지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 폐기물 소각 바닥재의 투수성은 입도분포 보다는 소각방식에 따른 영향을 크게 받을 것으로 판단되며, 더 정확한 원인을

Table 5. Summary of constant head permeability test

Sample No.	Coefficient of permeability k (cm/sec)	Effective diameter De (mm)
A	$4.05 \times 10^{-4}$	0.099
B	$5.85 \times 10^{-4}$	0.193
C	$9.50 \times 10^{-3}$	0.156

파악하기 위해 소각방식에 따른 입자의 형상이나 간극의 분포에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

### 4.3 다짐시험 결과

본 연구에서는 폐기물 소각 바닥재의 소각방식에 따른 다짐특성을 비교하기 위해 다짐시험을 실시하였다. 다짐방법은 일반 토사재료에서 수행하는 표준 A 다짐방법으로 시험을 진행하였다. Table 6은 폐기물 소각재의 최대건조단위중량과 최적함수비를 나타낸 표이며, Fig. 3은 폐기물 소각재의 다짐곡선을 나타낸 그림이다.

일반적으로 조립토의 경우 입도분포가 좋을수록 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비는 감소하는 것으로 알려져 있다. Table 6과 Fig. 3을 통해 입도시험 시 빈입도의 모래로 분류된 시료 B에 비해 양입도의 모래로 분류된 시료 A와 시료 C의 다짐곡선이 좌상향하는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 사용한 폐기물 소각 바닥재의 다짐특성이 일반적인 조립토의 경향과 일치하고 있다는 것을 나타낸다.

화격자 소각방식으로 소각시킨 시료 A, B에 비해 열분해 용융방식으로 소각시킨 시료 B의 최대건조단위중량이 약 1.4배 크며, 최적함수비는 약 2.4배 작은 것을 확인할 수 있었다. 이는 소각방법의 차이에서 기인한 시료 C의 높은 비중과

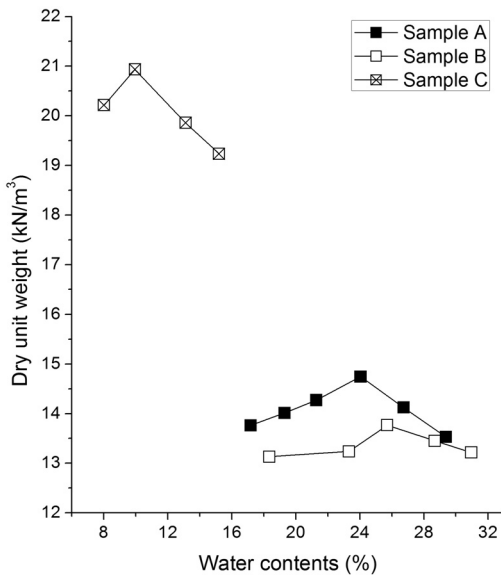


Fig. 3. Compaction curves of waste incineration bottom ashes

Table 6. Summary of compaction test

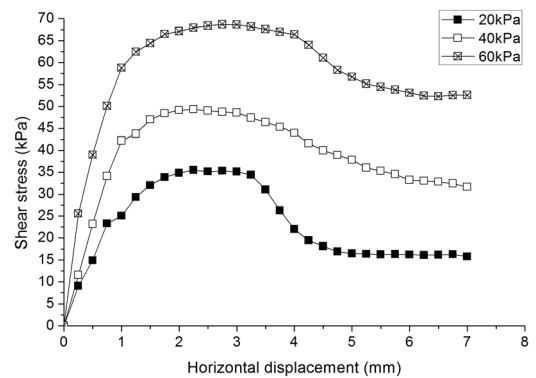
Sample No.	Maximum dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Optimum moisture contents (%)
A	14.74	24.04
B	13.77	25.71
C	20.93	9.94

입자의 형상 및 입도분포의 차이에 의한 것으로 판단된다.

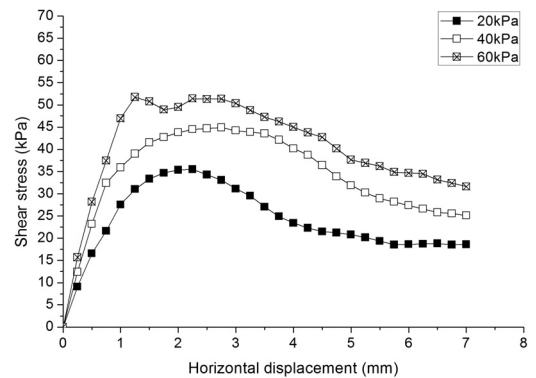
### 4.4 직접전단시험 결과

본 연구에서는 폐기물 소각 바닥재의 소각방식에 따른 강도특성을 비교하기 위해 직접전단시험을 실시하였다. 시료는 노건조시료를 사용하였으며, 앞서 실시한 투수시험과 동일하게 상대밀도 60%에 해당하는 단위중량으로 조성하여 시험을 진행하였다. 전단속도는 1mm/min의 속도로 수직하중만 달리하여 측정된 전단저항력으로 수직응력과 전단응력의 관계를 선형으로 해석하였다.

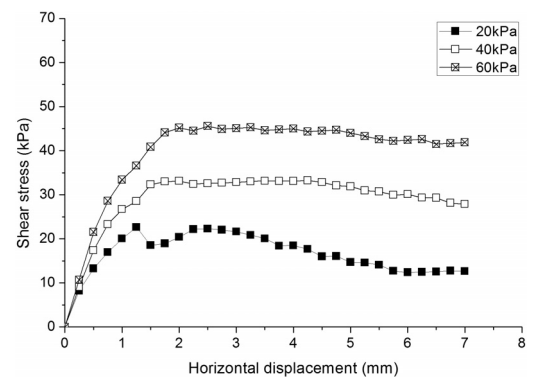
Fig. 4와 Fig. 5는 수평변위와 전단강도의 관계와 연직응



(a) Sample A



(b) Sample B



(c) Sample C

Fig. 4. Relationship of shear stress and horizontal displacement

Table 7. Summary of strength parameters

Sample No.	Cohesion c (kPa)	Internal friction angle $\Phi$ (°)
A	17.96	39.59
B	27.68	22.20
C	10.74	29.94

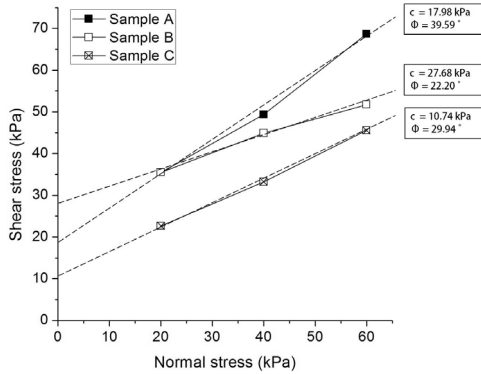


Fig. 5. Mohr-coulomb criterion

력과 전단강도의 관계를 나타낸 그래프이며, Table 7은 직접전단시험을 통해 획득한 강도정수를 나타낸 표이다.

일반적으로 모래의 경우 조밀하거나 느슨하거나에 관계없이 점착력이 없는 것으로 알려져 있다. Fig. 5와 Table 7을 보면 시료 A, B, C 모두 일반적인 모래의 경향과는 달리 점착력을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 화격자 소각방식에서 생성된 바닥재 시료 A와 시료 B가 열분해 용융방식에서 생성된 바닥재 시료 C에 비해 큰 값을 보이는 것을 확인할 수 있었지만 같은 화격자 소각방식인 시료 A와 시료 B 사이의 격차도 상당히 큰 것을 확인할 수 있었다. 내부마찰각의 경우 시료 A, 시료 C, 시료 B 순서로 큰 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

소각재의 강도특성의 경우 일반적인 모래의 특성과는 다른 경향을 보였으며, 소각방식에 따른 경향도 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 입자의 형상 및 표면의 거칠기, 간극의 분포 등의 소각방식에 따라 발생할 수 있는 영향과 소각재의 원재료가 가지고 있던 물리적 특성의 복합적인 요인에 의한 차이로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 폐기물 소각 시 발생하는 바닥재의 소각방식에 따른 역학적 특성을 비교하기 위해 기본물성시험과 투수시험, 다짐시험, 직접전단시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 폐기물 소각 바닥재는 기본물성이 모래와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 입도분포의 경우 소각방식에 따른 특징을 나타내지는 않았지만, 비중은 소각방식에 따라 다르게 나타났다. 화격자 소각방식으로 소각한 바닥재의 경우 일반적인 모래의 비중보다 작은 비중을 가지는 것으로 나타났으며, 열분해 용융 소각방식으로 소각한 바닥재의 경우 일반적인 모래보다 큰 비중을 가지는 것을 확인하였다. 이는 열분해 용융방식이 1,200℃ 이상의 고온으로 용융시키므로 슬래그화된 바닥재가 만들어지기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 소각재의 성분분석결과에 의하면 일반적인 자연 지반재료와 비교하여 SiO<sub>2</sub> 함량이 낮은 대신 CaO의 함량이 높은 것으로 나타났다. 따라서 바닥재를 점토 등 다른 재료와 혼합하는 경우에 대해서는 화학 반응 여부 및 그 영향에 대한 고려가 필요하며 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.
- (3) 투수시험 결과 바닥재의 투수성은 모래의 투수성과 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 또한 화격자 소각방식에서 발생된 바닥재에 비해 열분해 용융방식에서 발생된 바닥재의 투수계수가 큰 것을 확인하였으며, 이는 실험에 사용된 시료들의 유효입경의 경향이 투수계수의 경향과 일치하지 않는 것을 보아 입도분포의 영향보다는 소각방식에 따른 입자의 형상 또는 간극의 분포에 의한 결과로 볼 수 있다.
- (4) 다짐시험 결과 빈입도로 분류된 시료에 비해 양입도로 분류된 시료의 다짐곡선이 좌상향하는 것을 보아 바닥재의 다짐특성이 일반적인 조립토의 경향과 일치한 것으로 판단된다. 소각방식에 따라 화격자 소각방식에서 생성된 바닥재에 비해 열분해 용융방식에서 생성된 바닥재의 최대진조단위중량은 크고, 최적함수비는 작게 나타났다.
- (5) 직접전단시험 결과 소각재 시료의 강도특성은 일반적인 모래의 특성과는 다른 경향을 보였으며, 소각방식에 따른 경향도 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 입자의 형상 및 표면의 거칠기, 간극의 분포 등의 소각방식에 따라 발생할 수 있는 영향과 소각재의 원재료가 가지고 있던 물리적 특성의 복합적인 요인에 의한 차이로 판단된다.

위 결론을 통해 폐기물 소각 바닥재가 모래와 비슷한 특성을 보여 건설재료로서의 사용 가능성을 확인할 수 있었으나, 폐기물 소각방식에 따라 바닥재의 기본물성 및 역학적 특성에 차이가 있는 것으로 나타났다. 향후 소각방식에 따른 입자의 형상 또는 간극의 분포, 화학적 반응성 등에 대한

추가 연구를 통해 폐기물 소각 바닥재의 물리 화학적 특성에 대한 영향인자를 명확히 규명할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 주요사업(PE99324)으로 수행되었습니다.

## References

1. Bae, S. I. (2010), A study comparative analysis of operation data in the stoker treatment and the pyrolysis melting treatment, Master's thesis, Kwangwoon University, pp. 31~42.
2. Bear, J. (1972), Dynamics of fluids in porous media, American elsevier publishing company, New York, pp. 136.
3. Chae, K. S., Cho, S. H., Yoon, Y. W. and Kim, K. S. (2007), Basic study for the utilization of mixed coal ash as lightweight embankment, Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Annual Conference 2007, KSCE, pp. 814~817 (in Korean).
4. KS F 2302 (2002), Test method for particle size distribution of soils, pp. 1~10 (in Korean).
5. KS F 2308 (2006), Test method for density of soil particles, pp. 1~4 (in Korean).
6. KS F 2312 (2001), Test method for soil compaction using a rammer, pp. 1~6 (in Korean).
7. KS F 2322 (2000), Standard test methods for permeability of saturated soils, pp. 1~7 (in Korean).
8. KS F 2343 (2007), Testing method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, pp. 1~5 (in Korean).
9. Lee, S. J., Kim, Y. K., Koh, T. H., Lee, S. H. and Shin, M. H. (2011), A study on the basic and compression characteristics of lightweight waste for use as fill materials, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 5, pp. 61~74 (in Korean).
10. Lee, S. J. and Lee T. Y. (2013), Field tests for the application of bottom ash and shred tire as fill materials, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 14, No. 10, pp. 29~37 (in Korean).
11. Muhunthan, B., Taha, R. and Said, J. (2015), Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes, Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 54, No. 8, pp. 985~991.
12. Park, S. Y., Cho, T. H., Kim, B. N., Chung, S. S. and Kim, S. J. (2009), Commercial scale development of a MSW pyrolysis & melting furnace using hot flue gas from melting furnace, Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference 2009, The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 127~134 (in Korean).
13. Park, S. Y., Park, H. S., Moon, J. W. and Oh, J. H. (2012), A study on property evaluation for the development of functional flooring material using bottom ash, Journal of Residential Environment Institute of Korea, Vol. 10, No. 2, pp. 107~115 (in Korean).