



입자파쇄에 따른 Bottom ash의 전단강도 변화 Changes in Shear Strength of Bottom ash through the Particle Breakage

윤태강* · 손영환**† · 박재성* · 노수각*** · 봉태호*** · 김동근*

Yun, Tae-Kang · Son, Young-Hwan · Park, Jae-Sung · Noh, Soo-Kack · Bong, Tae-ho · Kim, Dong-Geun

Abstract

Bottom ash and fly ash are by-product from thermoelectric power plants. Fly ash is recycled to various field. However, though an output of bottom ash have increased each year, most of them is reclaimed in ash landfill. It is necessary to find a solution that bottom ash is recycled economically and know characteristics of bottom ash to recycle. It is goal to investigate engineering properties of bottom ash, especially the particle breakage, to recycle that. Bottom ash was crushed by impact method according to compaction energy and then compared with or original sample and crushed it in terms of particle size distribution and characteristics of strength. In result, after crushed it, particle finer was increased, especially 2~0.85 mm size, than original. It was displayed a tendency that internal friction of crushed sample was decreased but cohesion of it was not. Therefore, it is important to investigate the engineering properties of bottom ash in terms of the particle breakage to use construction materials for various field.

Keywords: Bottom ash; Friction angle; Cohesion; Particle breakage

1. 서 론

산업화가 진행됨에 따라 건설 분야에서 한정된 천연 골재량으로 인한 수급난 및 무분별한 채취로 인한 자연훼손 등의 문제가 발생되고 있다. 이에 따라 산업 전반에서 발생하는 산업 폐기물을 재활용하여 천연 골재를 대체하고자 하는 시도가 제기되고 있다. 산업 폐기물이 처리 될 경우 매립지 부족 및 처리 비용 부담 등의 경제적인 문제를 해결할 수 있고 폐기물 처리에 따른 환경안전상의 문제를 저감시킬 수 있다 (Sim, 1998).

산업 폐기물 중 화력발전소에 발생하는 석탄회는 크게 fly ash와 bottom ash로 나뉜다. Fly Ash는 지반안정제, 시멘트 대체재 등 건설재료로 대부분 재활용되고 있지만 석탄회 총 발생량의 15~20 %를 차지하는 bottom ash의 경우 발생량의

약 60%가 매립되고 있는 실정이다 (Chun et al., 1990; Huang and Lovell, 1990; Rogbeck and Knutz, 1996; Lee, 2008; Kuk et al., 2010; Muhandi et al., 2010; Park et al., 2012).

Bottom ash는 그 특성이 골재와 유사하여 건설재료로써 재활용하기 위한 많은 연구가 국내외에서 진행되어 왔다. 일반적으로 bottom ash는 투수성이 우수하고 내부마찰각이 높기 때문에 수평 배수재, 도로 성토재, 구조물 뒷채움재 등으로 활용되고 있으며 혼합재료로 활용하여 재료의 강도를 보강하는 연구들이 이루어지고 있다 (Kim, 2009; Jung et al., 2010; Choi et al., 2013). 하지만 건설재료로써 bottom ash를 재활용할 경우 상부 하중에 의한 입자 파쇄가 일어날 수 있다. 입자 파쇄가 일어날 경우 bottom ash의 공학적 특성이 변할 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.

파쇄 특성에 대한 연구는 주로 화강풍화토의 입자파쇄특성에 관한 연구가 진행 되었으며 응력 재하 시 흙 입자의 파쇄 특성에 대하여 고찰하였다 (Miura and Ohara, 1979; Kim et al., 1996; Ham et al., 2007; Hardin, 1985). 또한 조립질 화강토 및 세립토의 입자 파쇄가 주로 일어나는 입경과 전단강도정수의 변화에 대하여 연구하였다 (Jeong et al., 2000). 이와 마찬가지로 Kim et al.(1996)은 화강토의 입자파쇄 정도에 따라 전단강도의 변화와 입경분포 변화에 대하여 고찰하였다.

Bottom ash는 시공 시 다짐에 의해 입자 파쇄가 일어나고 이는 내부마찰각과 점착력의 변화를 일으킬 수 있다. 이러한 문제는 시공 시 원재료의 특성에 영향을 미쳐 강도 변화 및 투

* Graduate student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Associate professor, Department of Rural Systems Engineering and Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

*** Researcher, Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +81-2-880-4585 Fax: +81-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

Received: February 10, 2015

Revised: October 5, 2015

Accepted: November 5, 2015

수성 저하, 침하 등의 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 성토재, 뒷채움재 등으로 활용 시 추가적으로 파쇄에 의해 발생할 수 있는 강도변화에 대한 영향을 확인해야 한다. 하지만 국내 bottom ash의 파쇄에 따른 강도 특성에 대한 연구는 전무한 실정이며 bottom ash를 건설재료로 재활용 시 활용할 수 있는 기초 자료 또한 부족하다. 따라서 본 연구에서는 입자 파쇄에 따른 강도정수 특성 변화를 관찰하기 위해 영흥화력발전소에서 발생한 bottom ash를 채취하여 다짐에너지에 따른 bottom ash의 파쇄 특성을 파악하고, 입도분석시험 및 직접전단시험을 통해 bottom ash 입자 파쇄 특성과의 상관성을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 재료

본 연구를 위하여 영흥화력발전소에서 채취한 bottom ash를 사용하였으며, 재료의 물리적 특성은 Table 1과 같다. Bottom Ash 입자의 구성 물질을 분석하기 위하여 XRF (X-Ray Fluorescence) 시험을 실시하였으며 결과는 Table 2와 같다. 또한 Fig. 1은 bottom ash의 입도 분포 곡선을 나타낸다.

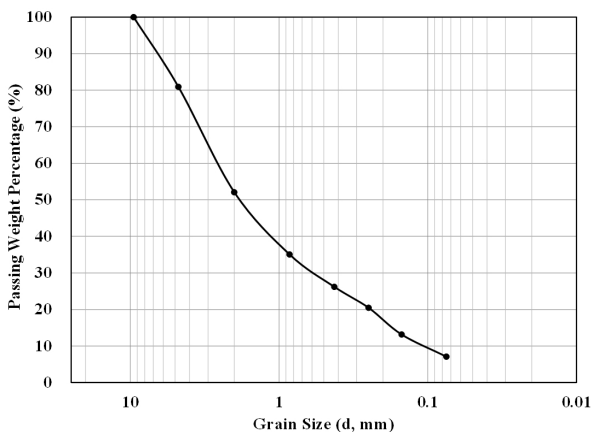


Fig. 1 The particle size distribution curve of bottom ash

Table 1 Physical properties of bottom ash

G _s	Passing size 4.75 mm (%)	Passing size 0.075 mm (%)	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _g	LL	PL	USCS	γ_{dmax} (kN/m^3)	OMC (%)
2.21	80.92	7.08	0.098	2.56	25.60	1.31	NP	NP	SW-SM	11.0	22.3

Table 2 Results of XRF

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	SO ₃
53.27	21.91	8.21	7.82	2.16	1.47	1.45	1.21	0.97

Bottom ash는 양호한 입도분포를 가지고 있으며 통일분류법상 SW-SM으로 분류되었다. 또한 KSF 2312 기준에 따라 표준 A 다짐으로 다짐시험 결과 최적함수비는 22.3 %, 최대건조단위중량은 11.0 kN/m^3 으로 나타났다. 또한 bottom ash의 비중은 2.21로 일반적인 흙의 값에 비해 낮게 나타났다. 이는 XRF 시험 결과 주된 화학성분은 SiO₂, Al₂O₃이고 전체의 70 % 이상을 차지하며 화력발전소에서 연소 후 냉각되어 입자가 형성되기 때문인 것이기 때문에 일반 흙에 비해 비중이 낮은 것으로 판단된다. Fig. 2는 bottom ash를 주사전자현미경 (SEM)을 이용하여 촬영한 것이다. Bottom ash는 화력발전소에서 석탄을 연소한 뒤 발생하는 부산물이기 때문에 Fig. 2와 같이 기체가 빠져나와 생긴 공동을 관찰할 수 있었다.

2. 실험방법

가. 입자 파쇄 및 입도 시험

Bottom ash는 직경 10 cm 몰드를 사용하였으며, 표준 A 다짐에 해당되는 다짐에너지로 시료를 성형하였다. Table 3은 bottom ash 입자 파쇄를 위해 사용된 다짐방법이다. 일련의 과정을 반복하여 다짐을 하지 않은 bottom ash 원 시료를 C0, 다짐 횟수에 따른 다짐에너지의 크기를 변화하여 각각 C1, C2, C3로 명명하였다. 각 시료에 가해진 다짐에너지는 Table 4와 같다.

C1~C3에 적용한 다짐에너지는 표준 A 다짐 에너지의 1~3 배에 해당되고, 원시료 C0와 다짐에너지를 달리 적용시킨 C1~C3의 입도분포를 확인하기 위해 KSF 2302에 따라 각 시료에 대해 8회씩 입도분석시험을 실시하였다.

나. 직접전단시험

C0~C3 시료에 대해 직접전단시험을 실시하였으며, Bottom ash 원 시료의 최대건조단위중량, 최적함수비 조건에서 각 시료에 대하여 직접전단시험을 실시하였다. 시료 성형 시 추가적인 파쇄의 영향을 최소화하기 위해 1.0 cm/min 다짐속도

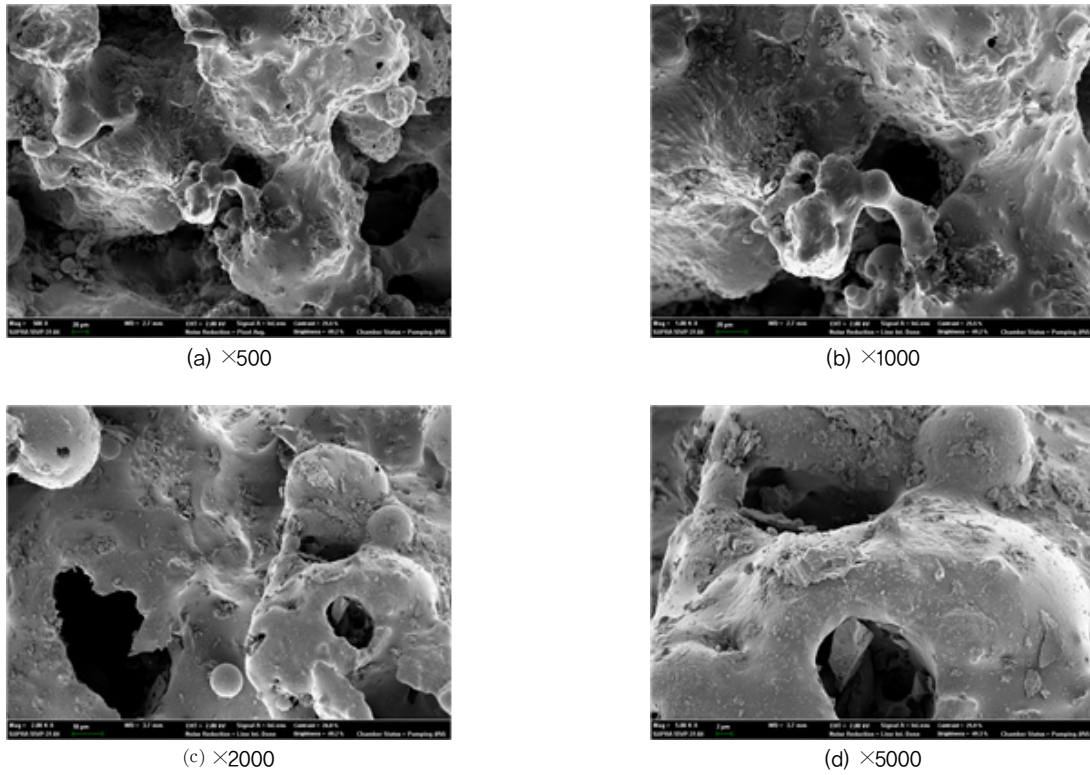


Fig. 2 SEM image of bottom ash

Table 3 Physical properties of particles breakage

	Compaction Method	
	Standard A	Modified
Rammer Weight (kg)	2,50	4,48
Rammer Height (cm)	30	45
Mold Diameter (cm)	10	10
Blows per Layer	25	28
Layers	3	1
Volume (cm^3)	1,000	1,000
Compaction Energy (kN/m^2)	551,8	553,8

Table 4 Compaction Energy of sample type

Sample	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃
Compaction Energy (kN/m^2)	0	553,8	1107,6	1661,4

Table 5 Physical properties of direct shear test

Maximum dry unit weight (kN/m^3)	Optimum moisture content (%)	Mold Diameter (cm)	Mold Height (cm)	Normal Stress (kPa)
11,0	22,3	6,35	2,92	31, 62, 93, 124, 186, 248

로 정적 다짐을 실시하였다. 직접전단시험은 KS F 2343 기준에 따라 전단속도는 시험 몰드 입경의 1%/min으로 실험하였

고 수평변형률 15%까지 측정하였다. 실험 조건은 Table 5와 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 파쇄에 따른 입도 변화

Fig. 3은 원 시료와 다짐에너지에 의해 파쇄된 시료의 입도 분포를 나타내고 있다. C0~C3의 평균 입도분포는 전반적으로 파쇄가 증가할수록 입경 별 통과율이 증가하는 것으로 나타났다. C0에서 C1, C1에서 C2로 파쇄될 때 유사한 증가폭으로 각 입경 별 통과율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 C2에서 C3로 파쇄될 때의 입경 별 통과율의 증가폭은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 최초 입경이 큰 입자들이 다짐에너지에 직접적인 영향을 받아 입자 파쇄가 일어나고 이후 파쇄된 입자의 입경이 점차 감소하여 파쇄에 대한 영향이 미미해지므로 다짐에너지에 의한 입자 파쇄가 선형적으로 증가하지 않는 것으로 판단된다.

파쇄에 따른 입경 별 변화는 파쇄하기 전의 원 시료 C0와 비교했을 때 다짐에너지의 증가에 따라 입경 별로 차이를 보였으며, 2~0.85 mm 입경의 통과량이 가장 두드러진 증가를 보였다. 다짐에너지가 큰 입자의 파쇄에 영향을 끼쳐 2~0.85

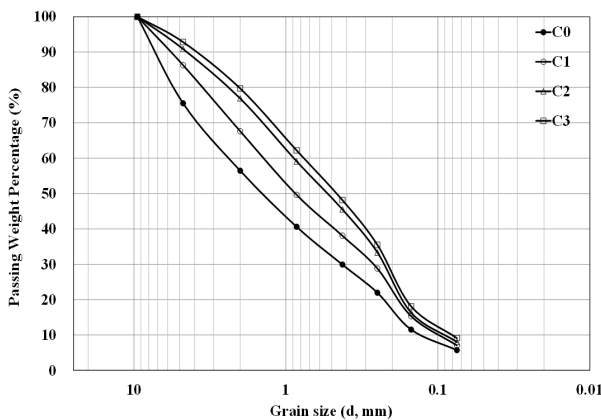


Fig. 3 Grain size distribution according to compaction energy

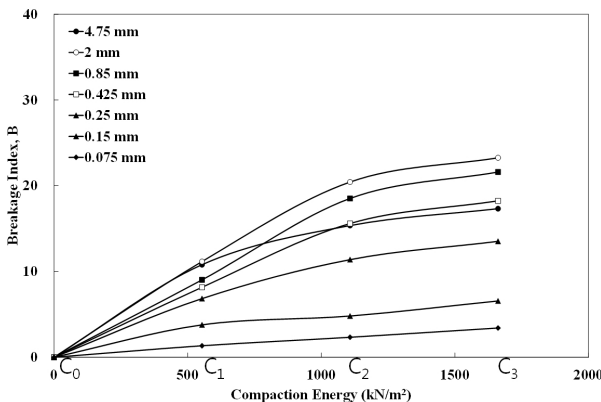


Fig. 4 Breakage index according to compaction energy

mm 입경의 입자가 증가한 것으로 판단된다. 반면 0.15~0.075 mm 입경의 범위에서는 다짐에너지 증가에 따라 미미한 변화를 보였다.

Fig. 4는 Marsal (1967)이 제안한 파쇄 전, 후의 입경 통과 백분율 차이를 파쇄지수 (Breakage Index, B)로 나타낸 것이다. 그림과 같이 2~0.85 mm 입경에서 파쇄에 대한 영향이 가장 크게 나타났으며 따라서 다짐에너지로 인한 bottom ash의 입자파쇄는 2~0.85 mm의 범위에서 주로 발생하는 것으로 판단된다. 원 시료 C0 대비 C1~C3의 파쇄지수는 다짐에너지가 증가할수록 파쇄의 증가폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

입자의 파쇄 정도는 입자의 입경이 클수록, 각이 많아지고 뾰족할수록, 입자강도가 작을수록 입자파쇄가 발생하기 쉽다 (Miura and Yamanouchi, 1971). 일반적인 bottom ash의 입경은 대부분 1~10 mm 정도의 입경 범위를 갖고 있으므로 (Kim et al., 2009) 일반 풍화토에 비해 입경이 큰 편이다. 따라서 상대적으로 큰 입자가 많이 포함된 bottom ash가 입자 파쇄에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Noh et al. (2006)는 풍화토의 다짐에너지에 대한 영향을 분석하였다. Fig. 5는 풍화토의 다짐에너지 크기에 따른 입자 파쇄정도를 나타낸다. 본 연구 결과와 비교했을 때 Bottom ash보다 풍화토가 동일한 다짐에너지를 가했을 때 입경별 통과율 차이가 더 적은 것을 알 수 있었으며 1회 파쇄 후 풍화토의 입자파쇄가 bottom ash에 비해 미미한 것을 확인할 수 있었다. 앞선 결과에서와 같이 bottom ash는 풍화토에 비해 입경이 크고 모난 입자의 형태이다. 상대적으로 입경이 크고 모나면 입경이 작고 둥근 입자에 비해 파쇄가 증가한다 (Lade et al., 1996). 또한 Bottom ash는 기체가 빠져나와 생긴 기공이 있는 다공질 물질이기 때문에 (Kim et al., 2009) 풍화토보다 파쇄에 대한 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다. 따라서 bottom ash를 건설재료로 사용 시 과다짐 또는 외력에 의해

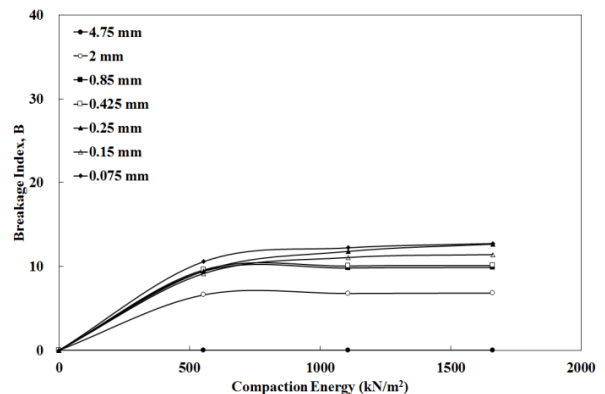


Fig. 5 Breakage index according to compaction energy (granite soil)

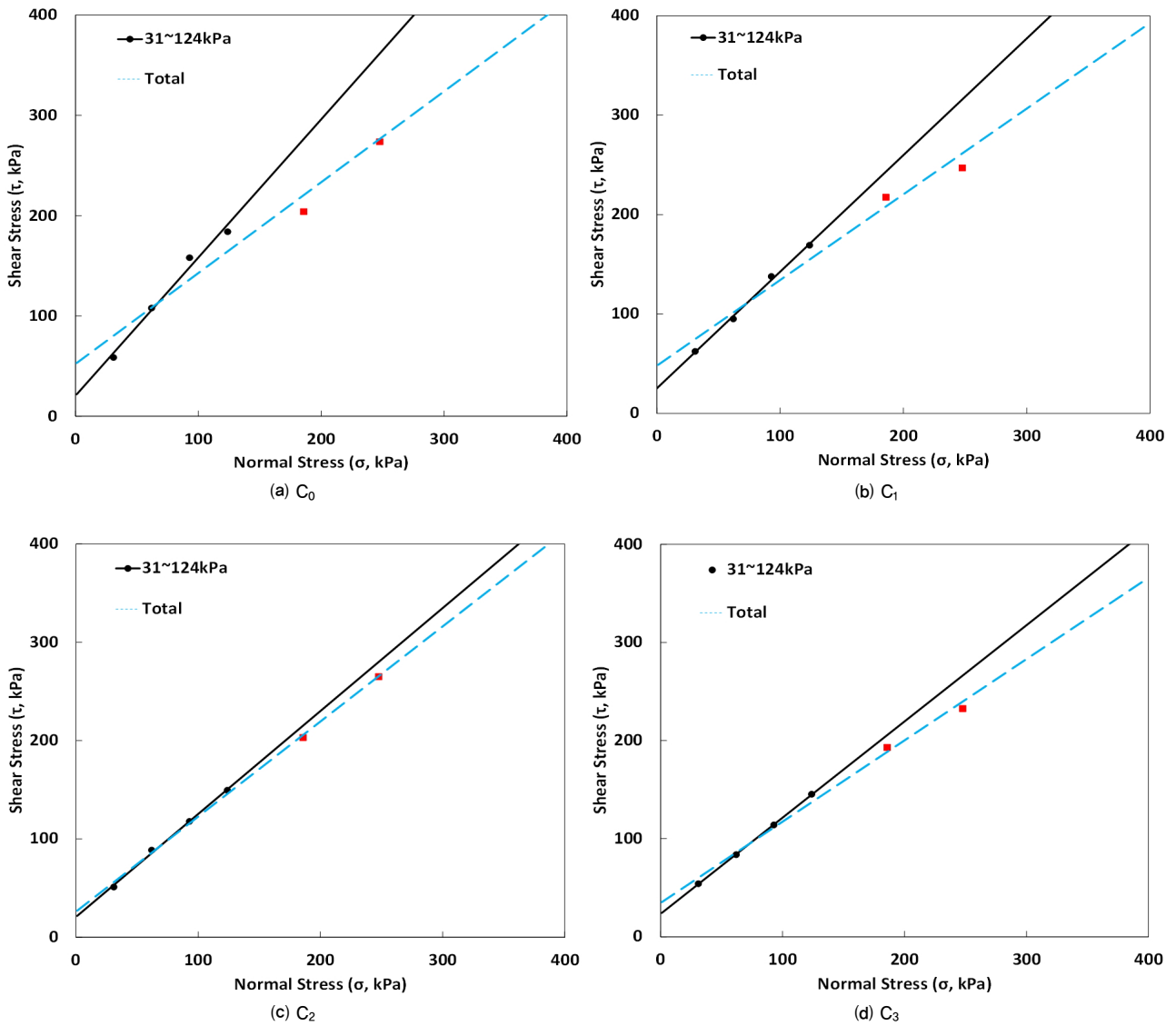


Fig. 6 Relationship with shear stress and normal stress

발생할 수 있는 입자 파쇄 및 공학적 성질 변화는 일반 풍화토보다 더욱 신중하게 고려해야 할 것이다.

또한 Son and Chang (2006)의 XRF 시험을 통한 풍화토의 구성 물질과 bottom ash의 구성 물질을 비교한 결과 경도가 큰 구성 광물인 장석, 석영의 주요 성분을 이루는 SiO₂ 함량이 풍화토보다 평균 8.13 % 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 구성 물질에 따른 입자 강도 측면에서도 bottom ash가 풍화토보다 파쇄에 대한 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

2. 파쇄에 따른 강도 특성 변화

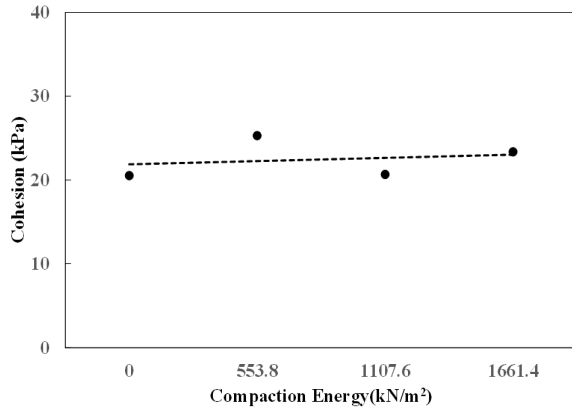
Bottom ash 원 시료의 최대전단위중량, 최적함수비 조건에서 각 시료에 대하여 직접전단시험을 실시하였다. 모든

경우에서 수평 변형율이 약 2 %일 때 전단파괴를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 다짐에너지에 의해 입자 파쇄가 증가할수록 수평 변형에 따른 최대전단강도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 입자 파쇄가 증가할수록 bottom ash 입자의 크기와 형상이 변하게 되고 이로 인해 입자끼리 생기는 엇물림이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

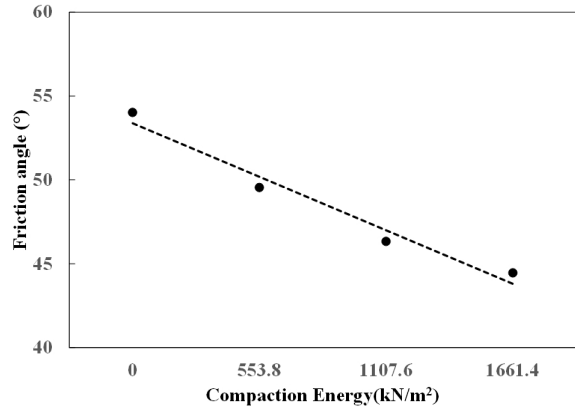
Fig. 6은 각 시료의 수직응력에 따른 최대전단응력을 도시한 결과이다. 원 시료인 C0의 경우 수직응력 31~124 kPa일 때와 186~248 kPa일 때 최대 전단응력의 경향이 상이한 것을 확인할 수 있다. 이는 전단 시 전단면에서 일부 입자의 파쇄가 일어나 입자들이 재배열되어 입자간의 마찰과 구조적 저항이 감소된 것으로 판단된다. 반면 다짐에너지가 증가할수록

Table 6 Cohesion and internal friction angle by normal stress

Normal stress (kPa)	C (kPa)				ϕ (°)			
	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃
31~124	20.52	25.28	20.65	23.35	54.02	49.54	46.33	44.45



(a) Cohesion according to compaction energy



(b) Friction angle according to compaction energy

Fig. 7 Cohesion and Internal friction angle according to compaction energy

31~124 kPa에서의 경향과 전체 수직응력에 대한 경향이 유사해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 bottom ash의 입자 파쇄 정도에 따른 전단강도의 변화를 분석하기 위해서는 추가적인 입자 파쇄가 일어나지 않는 31~124 kPa의 범위에서 직접전단시험을 실시하는 것이 적합하다고 판단된다. Table 6은 31~124 kPa 범위에서의 다짐에너지 별 입자 파쇄에 따른 각 시료의 점착력과 내부마찰각을 나타낸 것이다.

Bottom ash는 점성이 없는 흙의 전단특성을 가진다. 일반적으로 점성이 없는 흙의 전단강도는 활동마찰 및 회전마찰로 생기는 마찰저항과 엷물립으로 인한 구조적 저항의 두 성분으로 이루어진다. Fig. 5, 6에서 다짐에너지에 의해 입자 파쇄가 증가할수록 전단강도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 파쇄로 인한 마찰저항과 엷물립의 감소가 전단강도의 감소에 기인한 것으로 판단된다.

다짐에너지에 따른 입자파쇄에 의한 내부마찰각과 점착력의 변화를 분석한 결과는 Fig. 7과 같다. Kim et al. (2001)은 세립분의 함유량이 감소할수록 점착력은 감소하며 입자의 파쇄정도를 200번체 통과량의 증가로서 평가하였다. Bottom ash의 입자 파쇄가 증가할수록 점착력의 경우 일정한 경향성을 보이지 않았다. 이는 입자 파쇄 전후 세립분 함량의 증가폭이 미미하였기 때문에 점착력의 증가가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 내부마찰각의 경우 다짐에너지가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 다짐에너지에 의해 입자 파쇄가 일어나면서 입자 간의 구조적 저항의 감소로 인한 결과라고 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 국내 bottom ash의 입자파쇄와 강도특성과의 상관성을 파악하기 위해 다짐에너지에 따른 bottom ash의 공학적 특성변화에 대하여 알아보았다. 실내시험을 통해 입도 분포 및 강도 특성 등의 변화를 분석하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Bottom ash의 파쇄 특성은 다짐에너지가 증가할수록 입경별 통과율이 증가하는 것으로 나타났다. 2~0.85 mm에 해당하는 입경의 통과율이 가장 두드러지는 증가를 보였고 0.15~0.075 mm 입경의 경우 통과율의 증가폭이 미미하였다.
2. Bottom ash의 입자 파쇄는 입경 크기, 입자의 형상, 구성광물 등의 이유로 풍화도와 비교했을 때 파쇄에 대한 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.
3. 수직응력이 31~124 kPa일 때보다 186~248 kPa일 때 전단강도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 전단 시 파쇄가 일어나 입자들이 재배열되어 입자간의 마찰과 구조적 저항이 감소한 것으로 판단된다. 따라서 bottom ash의 입자 파쇄 정도에 따른 전단강도의 변화를 분석하기 위해서 추가적인 입자 파쇄가 일어나지 않는 30~120 kPa의 범위에서 확인해야 될 것이다.
4. 다짐에너지가 증가함에 따라 내부마찰각이 감소하는 경향을 보였다. 반면 점착력의 경우 입자 파쇄 전후 세립분의 변화가 미미하였기 때문에 입자 파쇄에 따른 경향성을 보이

지 않았다. 이로 인해 다짐에너지가 증가할수록 수평 변형에 따른 최대전단강도가 감소하는 경향을 보였다.

5. 실제 지반에서 입자 파쇄가 발생할 경우 재료 성질의 변화, 침하 등의 공학적 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 건설재료로서 bottom ash를 재활용하기 위해서는 입자 파쇄에 따른 공학적 특성 변화를 고려해야 한다.

사 사

이 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012 R1A1A1010633)

REFERENCES

1. Choi, W. S., Y. H. Son, J. S. Park, S. K. Noh, and T. H. Bong, 2013. Analysis of Strength Characteristic for Bottom Ash Mixtures as Mixing Ratio and Curing Methods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 129-140. (in Korean)
2. Chun, B. S., Y. I. Koh, M. Y. Oh, and H. S. Kwon, 1990. Studies on engineering properties of coal ash obtained as industrial wastes. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 10(1): 115-124. (in Korean)
3. Ham, T. G., M. Hyodo, and Y. Nakata, 2007. Single Particle Crushing Properties of Decompose Granite Soil. *KSCE Conference & Civil Expo 2007* 949-952. (in Korean)
4. Hardin, B.O., 1985. Crushing of soil particles. *Journal of Geotechnical Engineering* 111(10): 1177-1192.
5. Huang, W. H., and C. W. Lovell, 1990. Bottom Ash as Embankment Material. *ASTM Special Technical Publication* 1070: 71-85.
6. Jeung, C. S., and J. H. Yang, 2000. The Effects of Compaction Water Contents and Particle Crushing for Compacted Decomposed Granite Soil. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 20(3-C): 269-279. (in Korean)
7. Jung, S. H., M. J. Choe, B. C. Lee, and Y. J. Choi, 2010. An Experimental Study on Bottom Ash for Utilization of Subbase Materials. *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute* 5(4): 89-98. (in Korean)
8. Kim, C. G., W. J. Choi., Y. K. Choi, and J. S. Jeong, 1996. Study on ShearStrength Characteristics of Weathering Granite Soil for Particle - Crushing *KSCE Conference & Civil Expo 1996* 445-448. (in Korean)
9. Kim, J. Y., Y. H. Lee, and J. S. Lee, 2001. The Effects of Fines on the Mechanical Characteristics in Compacted Decomposed Grinite Soils. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 21(4-C): 465-470. (in Korean)
10. Kim, S. C., 2009. Applicability Study of Bottom Ash for Use of Sand Mat Material, M. S. diss., Suncheon, Korea; Suncheon National University. (in Korean)
11. Kuk, K. K., H. Y. Kim, and B. S. Chun, 2010. A study on the engineering characteristics of power plant coal ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 11(5): 25-34. (in Korean)
12. Lade, P. V., J. A. Yamamuro, and P. A. Bopp, 1996. Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 122(4): 309-316.
13. Lee, Y. H., 2008. A study on the utilization of bottom ash as a substitute material for sand in vertical drain. Master's degree, Hanyang University. (in Korean)
14. Marsal, R. J., 1967. Large Scale Testing of Rockfill Materials. *Journal of Soil Mech. and Foundation Division, ASCE*, 93(2): 27-43.
15. Miura, N., and S. O-hara, 1979. Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses. *Soils and Found.*, Tokyo, Japan, 19(3): 61-76.
16. Miura, N., and T. Yamanouchi, 1971. Drained shear characteristics of standard sand under high confining pressures, *Proc. of the Japan Society of Civil Engineers*. 1971(193): 69-79. (in Japanese)
17. Muhardi, A. Marto, K. A. Kassim, A. M. Makhtar, L. F. Wei, and Y. S. Lim, 2010. Engineering characteristics of Tanjung bin coal ash. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 15: 1117-1129.
18. Noh, S. K., Y. H. Son, P. W. Chang, and S. P. Kim, 2006. Analysis of Effect of Compaction Energy on Characters of Grain Size Distribution, Comapation and Permeability Using Fragmentation Fractal. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(6): 59-67. (in Korean)
19. Park, J. S., W. S. Choi, T. W. Kim, and Y. H. Son, 2012. Evaluation of environmental stability and geochemical properties of coal combustion products. *The 2012 KSAE Annual Conference*. (in Korean)
20. Rogbeck, J., and A. Knutz, 1996. Coal bottom ash as light fill material in construction. *Waste Management* 16(1): 125-128.
21. Sim, J. G., 1998. A line of policy for recycling wastes. *Journal of The Korean Society for Environmental Education* 11(1): 7-20. (in Korean)
22. Son, Y. H., and P. W. Chang, 2009. Breakage Index of Weathered Soil Reflecting Breakage Level and Weathering Degree. *KSCE Journal of Civil Engineering* 13(5): 325-332.