

바텀애시 미분말을 이용한 지반개량재의 강도 평가

여동준*, 이병석, 고건우
전북대학교 토목공학과

Strength Evaluation of Soil Stabilization Material using Fine Powder Bottom Ash

Dong Jun Yeo*, Byung Suk Lee, Kun Woo Ko
Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University

요 약 석탄화력발전소의 산업부산물인 바텀애시는 매년 800만톤 이상이 꾸준히 배출되고 있으나, 플라이애시에 비해 입경의 크기가 불규칙하고 물리화학적으로 불리하여 대부분이 매립되고 있다. 이 바텀애시를 분쇄하여 미분말 바텀애시를 얻어내었으며, 이 미분말 바텀애시를 여러 혼화재들과 혼합하고 일축압축강도시험을 측정하여 사면 표층개량에 사용하는 지반개량재로서 사용가능성을 분석하였다. 바텀애시를 30시간동안 분쇄하여 분말도 $6.870\text{cm}^2/\text{g}$ 의 미분말 바텀애시를 얻어낼 수 있었으며, XRF분석을 통해 SiO_2 와 Al_2O_3 의 포졸란 반응을 유발할 수 있는 화학성분이 포함되어 있다는 것을 알아낼 수 있었다. 바텀애시 미분말을 시멘트, 2종류의 폐석고 및 여러 혼화재들과 혼합을 하였으며, 각 재료들의 배합비를 실험군별로 다르게 혼합하여 일축압축강도 시험을 실시하여 최적의 강도를 나타내는 최적배합비를 찾아내었고, 이를 비교하기 위하여 현장에서 사용되고 있는 여러 지반개량재들과 비교하였다. 시험결과, 바텀애시 미분말을 이용한 지반개량재의 강도가 실제 지반개량재를 사용한 시험군과 강도증진양상이 초기에 높거나 비슷하였고, 28일 강도는 비슷한 결과를 나타내는 것으로 미루어 보아, 미분말 바텀애시를 시멘트 및 황산염계 폐석고와 혼합하였을 경우 지반개량재로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract Although more than 8 million tons of bottom ash has continuously been discharged, most of it is reclaimed due to its irregular particle size, and physical and chemical disadvantages as compared to fly ash. In this study, fine powder bottom ash was mixed with various admixtures and a uniaxial compressive test was conducted on the mix to analyze the possibility of using it as a soil stabilization material. The bottom ash was pulverized for 30 hours to obtain a fine powder with a specific surface area of $6.870\text{cm}^2/\text{g}$, and a chemical component that could induce a pozzolan reaction between SiO_2 and Al_2O_3 was added to this powder. The uniaxial compressive test conducted on the mix of bottom ash and admixture gives the optimal blending ratio showing the optimal strength, and it was compared with the corresponding values for various ground improvement materials. As a result of the test, the strength of the soil stabilization material made from the fine powder of bottom ash at the beginning was higher or similar to that of a test group that was using actual soil stabilization materials, and the 28-day strength showed similar results. It is concluded in this work that the fine powder of bottom ash mixed with cement and sulfate-based waste gypsum can be used as a soil stabilization material.

Keywords : Coal Bottom Ash, Fine Powder Bottom Ash, Soil Stabilization Material, Waste Gypsum, Sulfate

*Corresponding Author : Dong Jun Yeo(Jeonbuk National Univ.)

email: ggjoa@jbnu.ac.kr

Received May 13, 2021

Accepted September 3, 2021

Revised July 6, 2021

Published September 30, 2021

1. 서론

우리나라는 1970년도 오일파동 이후, 석유중심의 에너지 수급 구조로부터 에너지 다변화 정책으로 전환됨에 따라, 원료의 매장량이 풍부하고 가격이 저렴하여 안정적인 공급이 가능한 석탄을 이용해 전력을 생산하는 석탄 화력발전소가 급증하였다. 2018년 전력생산량의 에너지원별 발전량 중, 석탄을 이용한 전력생산 비중이 41.8%로 가장 많은 비중을 차지하고 있다.

석탄 화력발전의 증가로 인해 대기오염이 발생하고, 전력생산을 위해 미분탄이 연소된 후 발생하는 산업부산물인 석탄회(coal ash)는 연간 약 800만톤 이상이 꾸준히 배출되고 있다. 이 석탄회는 재활용되는 일부를 제외하고는 해안지역에 설치된 회처리장에 매립을 하고 있어 토양 및 해양 오염을 유발한다. 또한, 석탄 화력발전의 신규설비는 2029년까지 21기가 반영되어 있어, 신규 석탄 화력발전소의 증가로 매년 1,000만 톤 이상의 석탄회가 발생될 것으로 예상된다. 매년 발생하는 석탄회로 인해 기존 회처리장의 용량한계로 신규 회처리장을 건설하고자 하지만, 환경단체 및 주변 주민들의 반대로 인하여 신규 회처리장 건설에 어려움을 겪고 있다[1].

석탄회가 발생하는 장소에 따라 플라이애시(fly ash)와 바텀애시(bottom ash)로 구분되는데, 석탄회 발생량 중 약 75~80%를 차지하는 플라이애시는 포졸란 반응을 유도하는 SiO_2 와 Al_2O_3 를 다량 함유하고 있어 시멘트의 Ca(OH)_2 와 포졸란 반응을 유도할 수 있으므로, 콘크리트 혼화재료 및 시멘트 클링커 제조 원료로 재활용 되고 있다. 바텀애시도 플라이애시와 유사한 화학구조로 포졸란 반응을 유도할 수 있는 화학성분을 가지고 있으나, 입径의 크기가 불규칙하고 불순물이 많이 포함되어 있어 플라이애시에 비해 물리 화학적으로 불리하여 대부분이 매립되고 있다[2-4].

이처럼 발생량의 대부분이 매립되는 바텀애시를 플라이애시처럼 다방면에서 재활용 할 수 있는 방법을 개발하여 지속적으로 사용하게 된다면, 신규 석탄 화력발전소 및 기존 발전소에서 매립되는 석탄회의 양을 감소시킬 수 있고 기존에 매립되어 있는 석탄회까지도 사용 가능하게 되어 환경적으로 긍정적인 결과를 도출할 수 있다. 또한, 플라이애시는 2017년 기준 ton당 단가가 약 44,000원으로 2016년에 비해 170%가 상승하였지만, 바텀애시는 무상지급 또는 처리비를 지급해주며 제공해주는 경우도 있어 경제적으로도 매우 타당하다.

최근 바텀애시를 재활용하기 위해 여러 연구가 진행되

고 있으며, 특히 도로건설 및 콘크리트 분야에서 바텀애시를 재활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 바텀애시는 천연 모래와 유사한 특성으로 인해서 도로건설시 배출구부분의 모래 또는 미세 골재를 부분적으로 대체하여 사용할 수 있으며, 보조기층, 도로 기재 재료 및 바인더 층의 역청 혼합물로 사용이 적합한 것으로 연구되었다[5].

또한, 바텀애시가 낮은 밀도를 갖는 특성을 활용해 콘크리트의 골재를 대체하여 경량골재 콘크리트로 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 천연골재에 비해 바텀애시 골재의 낮은 강성은 콘크리트 건조수축 변형 제어에 불리하며, 바텀애시 골재의 낮은 강도는 균열진전 저항에도 불리한 단점들이 있어 보다 많은 연구를 통해 기반을 구축하고 실용화를 하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다[6].

하여, 본 연구에서는 바텀애시를 시멘트 및 폐석고와 혼합하여, 사면 표층개량에 사용하는 지반개량재로 재활용하기 위한 연구를 진행하였다.

2. 본론

2.1 지반개량재 매커니즘

2.1.1 Soil-Cement와 지반개량재

Soil-Cement와 지반개량재는 흙, 시멘트, 물 등의 혼화재료를 사용하여 수화반응과 포졸란 반응을 이용해 지반의 강도를 증진시킨다.

Catton(1959)에 의하면 Soil-Cement는 흙에 시멘트계 고화재를 첨가하여 흙의 성질 및 구조에 변화가 발생하게 되는데, 이는 고화재의 수화작용에 의해 토립자들이 큰 덩어리 형태가 되게 변화시킨다. 장원호(2001)는 Soil-Cement의 초기 수화 단계에서 생성되는 에트링자이트(ettringite)의 생성을 높여 토립자와 시멘트의 공극을 채워줌으로서 우수한 강도를 발현하고, 이 에트링자이트는 중금속이온의 고정화뿐만 아니라 용출에서도 상당히 중요하다고 하였다. 이렇게 Soil-Cement는 지반의 강도를 매우 높게 증진시켜, 노반의 재료, 도로포장과 같은 교통하중 등의 큰 하중에도 견디는 곳에 사용된다[7-9].

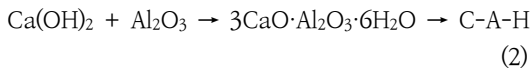
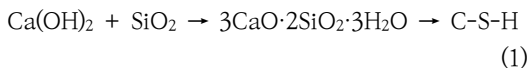
본 연구의 목적으로 하는 지반개량재는 사면을 보호하는 표층개량에 적용하기 위한 지반개량재이며, 비탈면과 같은 사면의 표층부에 적용하여 강우 등의 천재지변으로 인한 사면의 붕괴 위험으로부터 안정성을 높이는 목적으

로 사용되며 Soil-Cement보다 낮은 강도를 가져 식생이 가능하다. 이러한 지반개량재는 시멘트와 물 등의 수화반응을 일으키는 재료를 기반으로 하며, 플라이애시 등의 포졸란 물질을 첨가재로 사용한다. 실제 사용되는 지반개량재는 플라이애시를 사용하고 있어, 플라이애시와 비슷한 성분을 가진 바텀애시를 사용해 지반개량재로 이용하기 위한 재활용 가능성을 연구하였다.

2.1.2 반응 매커니즘

포졸란(pozzolan)반응은 실리카질물질(SiO_2)을 주성분으로 하며 그 자체에는 수경성이 없으나, 시멘트의 수화에 의해 생기는 Ca(OH)_2 와 상온에서 서서히 반응하여 불용성의 화합물을 만드는 작용이다.

R. Helmuth(1987)에 의하면, 석탄회의 성분 중 SiO_2 와 Al_2O_3 는 포졸란 반응을 일으키는 물질로 시멘트와 혼합 시에 시멘트의 수화에 의해 발생하는 수산화칼슘 Ca(OH)_2 의 Ca^{2+} 와 반응해 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)이나 칼슘알루미네이트(C-A-H)를 생성하고 장기간 고화를 통해 강도를 발현하며 아래와 같은 반응식을 제시하였다[10].



석탄회의 주성분은 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화제2철(Fe_2O_3), 산화칼슘(CaO)등으로 구성되어 있으며, 대부분 실리카와 알루미나가 전체 화학성분의 약 70%를 차지한다. 포졸란 반응은 산화칼슘(CaO)에 의해 좌우되는데, 산화칼슘은 석탄회의 특성 중에 포졸란 반응을 일으키는 주원소로 포졸란 반응에 의해 수화물이 형성되어 석탄회의 입자공극을 메우는 결합체를 형성시켜 응결고화를 촉진시킨다. 플라이애시는 인공 포졸란으로, 대부분의 입자가 구형이고 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 의 형태로 존재해 물의 Ca(OH)_2 와 화합하는 성질을 가지고 있어서 불용성 실리카질 화합물($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-nH}_2\text{O}$)로 경화하는 gel상을 다량 생성한다[11].

지반개량재 재료로 사용되는 석고는, 시멘트에 있어 알루미산3칼슘(C_3A , 3CaO , Al_2O_3)과의 반응에 의해 생성되는 에트링자이트에 의해 응결을 조절하는 작용을 한다.

고로슬래그 및 플라이애시 등의 비결정질 물질은 시멘트와 달리 수화되지 않지만, 수산화물이나 황산염같은

자극제의 첨가에 의해 비결정질 입자의 불규칙적인 3차원 쇄상결합이 절단되면서, 구조체 내부에 함유된 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} 등의 이온들이 용출되어 시멘트와 같은 경화특성을 가지게 된다. 석고는 황산염 자극제로 사용이 가능하며, 플라이애시에 황산염계 자극제를 사용하여 수화반응을 일으킬 수 있다[12,13].

하여, 본 연구에서는 포졸란 반응성을 가지는 분쇄한 미분말 바텀애시에, 폐석고를 황산염계 자극제로 활용해 수화반응을 활성화시켜 시멘트와 유사한 경화체를 형성해 지반개량재로 사용하고자 한다.

2.2 실험방법

2.2.1 실험개요

본 연구에서는 지반개량재의 재료로 분쇄한 바텀애시 미분말을 시멘트 및 여러 혼화재들과 혼합하여 배합비 및 양생기간별로 일축압축시험을 진행하였으며, 각 재료에 대한 XRF분석을 통해 화학성분을 알아내었고, SEM 촬영을 통하여 분쇄 전, 후의 바텀애시 미세구조와 개량 전, 후 지반의 미세구조를 분석하였다.

사면의 표층개량에 적용하는 지반개량재는 실제 현장 시공시, 자연상태 그대로인 지반에 전직배합한 지반개량재를 도포한 후 포크레인 등의 장비를 이용해 현장에서 혼합하는 방식으로 시공을 진행한다. 하여, 본 연구에서는 원지반토를 다짐시험을 통해 최적함수비 상태로 맞춘 후 일정량의 지반개량재 배합비를 손배합을 통해 일축압축시험을 실시하였다.

일축압축시험을 위한 공시체 제작은 직경 5cm, 높이 10cm의 원통형 모양 콘크리트 실린더 물드를 사용하였다. 공시체 제작은 KS F 2312에 의거한 흑의 다짐시험 방법 중, A다짐 방법의 다짐에너지지를 기준으로 3층 다짐을 실시하였으며, 최대 재하하중은 3톤 용량이고 1mm/min의 일정한 속도로 재하하는 CBR시험기를 사용하여 일축압축강도를 측정하였다.

2.2.2 실험재료

연구에 사용한 원지반토는 전북 진안에 위치한 도로 사면 보수공사 현장의 원지반토를 사용하였으며, 원지반의 특성을 파악하기 위해 KS F 기준에 의해 비중시험(KS F2308), 체가름시험(KS F 2309), 다짐시험(KS F 2312), 입도시험(KS F 2302), 액·소성 시험(KS F 2303 & 2304)을 실시하였고 그 결과를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1. Physical properties of the ground

		Natural ground
Mechanical analysis	D ₁₀ (mm)	0.0018
	D ₃₀ (mm)	0.06
	D ₆₀ (mm)	0.0194
	Passed #200 sieve(%)	78.1
	Passed #4 sieve(%)	99.9
Classification of soil (U.S.C.S)		ML
Specific gravity		2.62
Plastic limit(%)		15.1
Liquid limit(%)		34.7
Plasticity index(%)		19.6
Optimum moisture content(%)		16.1

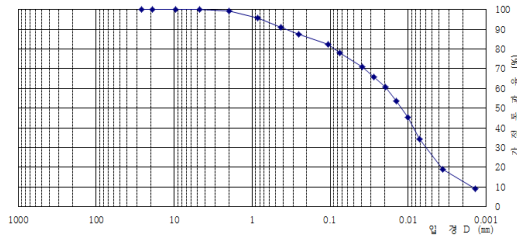


Fig. 1. Grading curve of the ground

바텀애시는 여수에 있는 A사에서 30시간동안 특수 분쇄하여 미분말화 시킨 분말도 $6,870\text{cm}^2/\text{g}$ 의 바텀애시를 사용하였으며, 미분말의 강도증진효과를 비교분석하기 위해 0.5mm 체를 통과한 분말도 $330\text{cm}^2/\text{g}$ 의 바텀애시도 사용하였다. 분쇄시간에 따른 분말도는 Table 2에 나타내었으며, 분쇄 전과 후의 화학구성 분석을 위해 XRF를 통해 분석시험을 진행하였고, 결과는 Table 3에 나타내었다.

바텀애시 미분말의 분말도는 각 분쇄시간인 0, 5, 10, 15, 20, 30 시간에 대해 $330, 820, 3,410, 3,250, 5,110, 6,870\text{cm}^2/\text{g}$ 의 분말도를 가졌으며, 일반적인 시멘트 분말도인 $2,800\sim 3,300\text{cm}^2/\text{g}$ 를 가지려면, 약 8.5 시간 정도의 분쇄만으로도 충분하다는 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 30시간 분쇄한 바텀애시를 사용하였으며, 분쇄 전과 후의 바텀애시에 대해 전자현미경 분석(SEM)을 진행하였고 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2. Fineness by the grinding time

Grinding Time (hr)	0	5	10	15	20	30
Fineness (cm^2/g)	330	820	3,410	3,250	5,110	6,870

Table 3. Chemical composition of Bottom Ash

	Before grinding Bottom Ash(%)	After grinding Bottom Ash(%)
Al_2O_3	31.8	32.1
CaO	12.287	13.126
Fe_2O_3	6.72	7.31
K_2O	1.14	1.11
MgO	2.255	2.332
MnO	0.120	0.11
Na_2O	3.608	3.724
P_2O_5	17.757	17.209
SiO_2	13.9	17
TiO_2	0.41	0.41
L.O.I	2.8	2.11
Total	92.8	96.6

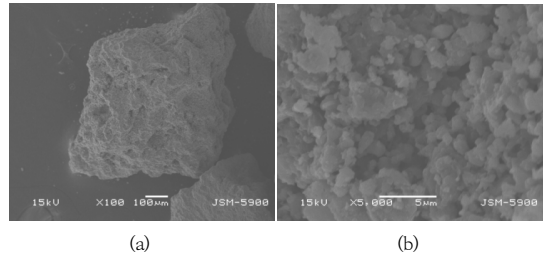


Fig. 2. Sem analysis of Bottom Ash before grinding (a) $\times 100$ (b) $\times 5,000$

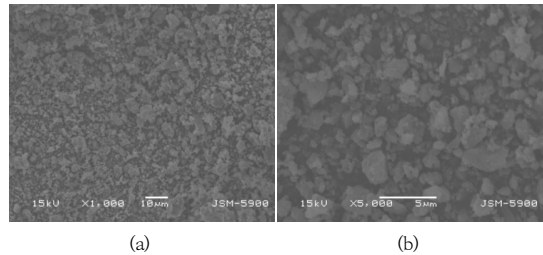


Fig. 3. Sem analysis of Bottom Ash after grinding (a) $\times 100$ (b) $\times 5,000$

본 연구에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 B사 제품인 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼화재들은 D사에서 사용하고 있는 폐석고D, E사에서 사용하는 폐석고E와 플라이애시를 사용하였다. 폐석고 및 플라이애시 화학성분은 Table 4에 나타내었다.

폐석고는 높은 CaO 함량을 가지고 있고 강알칼리성을 가져 혼합시 자극제 역할을 함으로써 포졸란 반응을 촉진할 것으로 예상하여 사용하였다.

Table 4. Chemical composition of Waste Gypsum and Fly Ash

Chemical composition	Waste gypsum D	Waste gypsum E	Fly Ash
Al ₂ O ₃	0.586	0.882	18.47
CaO	80.522	93.428	49.3
Cr ₂ O ₃	0.04	0.01	0.03
Fe ₂ O ₃	0.23	0.32	3.25
K ₂ O	0.07	0.148	0.17
MgO	1.112	0.396	2.29
MnO	0.058	0.01	0.01
Na ₂ O	0.062	0.1	0.38
P ₂ O ₅	0.042	0.07	0.4
SiO ₂	4.232	3.53	22.43
TiO ₂	0.03	0.078	0.84
L.O.I	13.0194	1.0312	1.352

플라이애시를 사용하는 G사 지반개량재는 원지반의 6%만큼 첨가하여 지반의 강도를 개선시키므로, 같은 첨가량을 유지하기 위해 모든 개량재 배합비는 원지반 대비 6%만 첨가하였으며, 함수비는 다짐시험을 통해 최적 함수비로 제작하였다.

2.3 실험결과

2.3.1 원지반의 일축압축시험

지반개량재 혼합시의 강도증진효과를 분석하기 위해, 원지반에 대한 일축압축시험을 실시하였다. 각 시험군별로 3개의 공시체를 제작하였고, 일축압축강도는 Table 5에 나타내었으며, 추후 강도증진 효과를 분석하기 위해서 원지반토의 강도는 가장 높은 값인 test1의 값을 사용하였다.

Table 5. Compression Strength of the ground

Test number	Uniaxial Compression Strength (kPa)		
	test1	test2	test3
Natural ground	169.9	169.3	159.6

2.3.2 바텀애시 최적사용량 도출

바텀애시의 최적사용량 도출을 위해 원지반에 시멘트와 바텀애시를 혼합하여 일축압축시험을 진행하였다. 한 시험군당 3개의 공시체를 제작하여 측정하였으며, 7일간 실내온도 24℃에서 양생하였다. 바텀애시 함유율에 대한

강도변화는 Fig. 4에, 최대 압축강도는 Table 6에 나타내었다.

시험결과, 바텀애시와 시멘트의 비가 60:40일 때의 최대 압축강도가 381.2kPa로 시험군중 가장 크게 나타났다. 이 시험결과에 따라 바텀애시 함유량은 추후 시험군에서 60%로 균일하게 사용하였다.

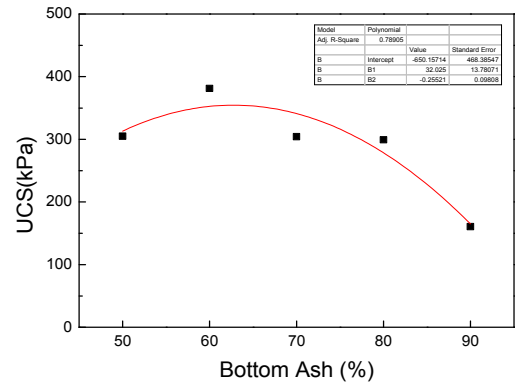


Fig. 4. Uniaxial Compression Strength Change according to Bottom Ash Content

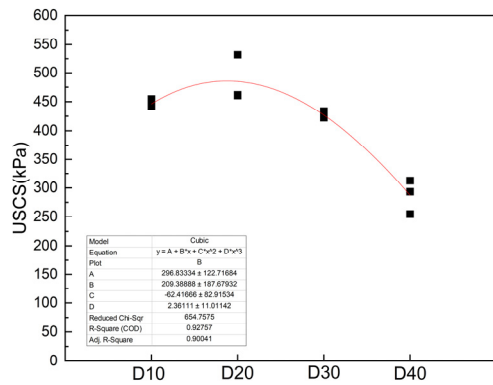
Table 6. Maximum Compression Strength by mixing ratio

Bottom Ash : Cement (%)	Maximum Compression Strength (kPa)
50 : 50	304.9
60 : 40	381.2
70 : 30	304.1
80 : 20	299.1
90 : 10	160.7

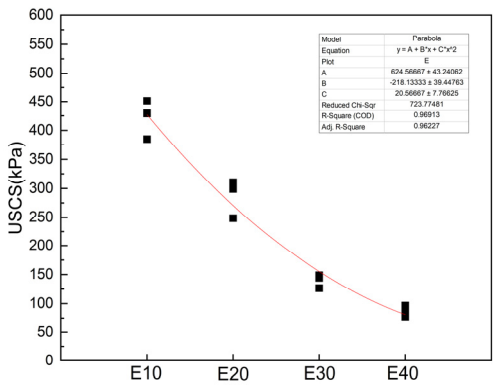
2.3.3 지반개량재의 최적배합비 도출

앞선 시험결과에 따라, 모든 개량재 배합비에 바텀애시 60%를 균일하게 사용하였고, 40%에는 시멘트:폐석고D, 시멘트:폐석고E, 시멘트:플라이애시 3종류의 시험군을 선정하였으며, 앞선 실험과 같은 조건에서 7일간 양생을 진행하였다. 각 시험군별 강도변화 그래프는 Fig. 5에 나타내었으며, 배합비와 최대압축강도는 Table 7에 나타내었다.

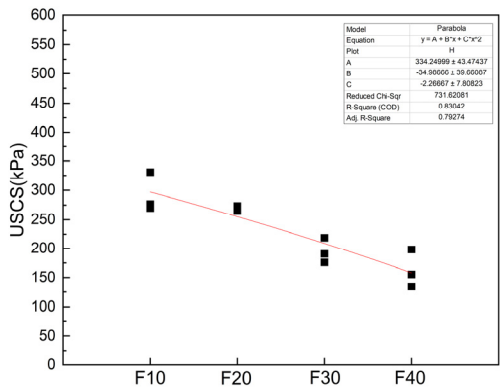
시험결과, 바텀애시 60% : 시멘트 20% : 폐석고D 20%의 최대압축강도가 다른 배합비의 재료들과 사용한 시험군들에 비해 높은 강도를 나타내어 최적배합비로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Compression strength change by materia
(a) Bottom Ash : Cement : Waste gypsum D
(b) Bottom Ash : Cement : Waste gypsum E
(c) Bottom Ash : Cement : Fly Ash

Table 7. The mixing ratio and maximum compression strength of each sample

Sample	B.A.(%)	C.(%)	W.G.D (%)	W.G.E (%)	F.A.(%)	M.C.S.(kPa)
D10	60	30	10	-	-	454.7
D20		20	20	-	-	531.9
D30		10	30	-	-	433.8
D40		-	40	-	-	312.5
E10		30	-	10	-	451.4
E20		20	-	20	-	310.5
E30		10	-	30	-	148.7
E40		-	-	40	-	96.6
F10		30	-	-	10	330.6
F20		20	-	-	20	273.3
F30		10	-	-	30	218.7
F40		-	-	-	40	198.3

*B.A. : Bottom Ash

C. : Cement

W.G.D : Waste Gypsum D

W.G.E : Waste Gypsum E

F.A. : Fly Ash

M.C.S : Maximus Compression Strength

2.3.4 최적배합비의 일축압축강도 비교

2.3.3에서 바텀애시를 사용한 최적배합비로 판단되는 지반개량재(바텀애시 60% : 시멘트 20% : 폐석고D 20%)를 G사 지반개량재 및 다른 시험군들과 초기강도 및 장기강도까지 비교하기 위하여 8개의 시험군을 선정 하였고, 3, 7, 28일별로 양생을 진행하여 일축압축강도를 측정하였다. 시험군은 최적배합비와 G사 지반개량재를 포함하여, 폐석고와 같은 기타 혼화재들을 다양하게 사용하여 비교하였다.

공시체는 한 시험군당 9개씩 제작하여 측정하였고, 각 양생일별로 3개씩 압축시험을 실시하여 양생기간동안 강도 증진효과를 비교·분석 하였다. 각 시험군의 배합비는 Table 8에 나타내었다. 시험결과, 각 배합비별 양생기간에 따른 강도변화는 Table 9와 Fig. 6에 나타내었다. 앞선 시험결과에서 최적배합비로 판단된 Sample 1이 다른 혼화재료들을 사용한 배합비 중 가장 강도가 높게 나와 최종 최적배합비로 선정하였다. 최적배합비를 플라이애시 지반개량재인 Sample4와 무 시멘트계 지반개량재인 Sample5과 비교했을 때, 3일 및 7일 강도에서 높은 압축강도를 나타내었고, 28일 강도는 비슷한 강도를 나타내어 바텀애시 미분말을 이용한 지반개량재가 플라이애시를 사용하는 지반개량재를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8. Composition of Mixing ratio for long

Test group	Mixing ratio
Sample 1	Optimal mixing ratio (Bottom Ash : Cement : Waste gypsum D) (60% : 20% : 20%)
Sample 2	Bottom Ash : Cement : Waste gypsum E (60% : 20% : 20%)
Sample 3	Bottom Ash : Cement : Fly Ash (60% : 20% : 20%)
Sample 4	Soil Stabilization Material G
Sample 5	Soil Stabilization Material H
Sample 6	Bottom Ash : Cement : Admixture F (60% : 20% : 20%)
Sample 7	Bottom Ash : Cement : Admixture G (60% : 20% : 20%)
Sample 8	Bottom Ash : Cement : Admixture H (60% : 20% : 20%)

Table 9. Compression strength according to the curing period for each sample

Test group	Uniaxial Compression Strength(kPa)			
	Natural Ground	3days	7days	28days
Sample 1	169.9	448.7	783.2	1,063.5
Sample 2	169.9	319.2	429.3	1,021.2
Sample 3	169.9	379.9	474.3	714.2
Sample 4	169.9	442.5	654.4	1,090.5
Sample 5	169.9	376.9	602.3	1,087.1
Sample 6	169.9	428.7	476.6	657.2
Sample 7	169.9	534.1	679.2	795.4
Sample 8	169.9	359.5	446.6	478.7

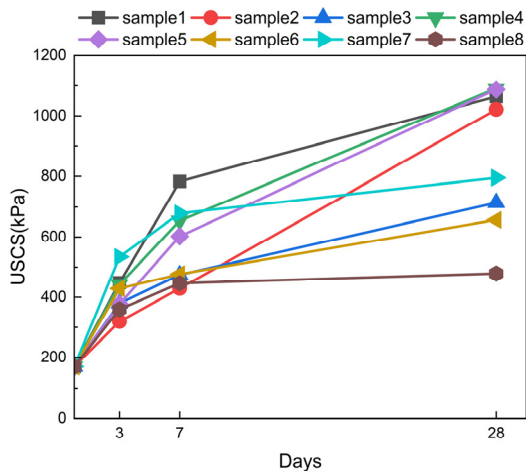
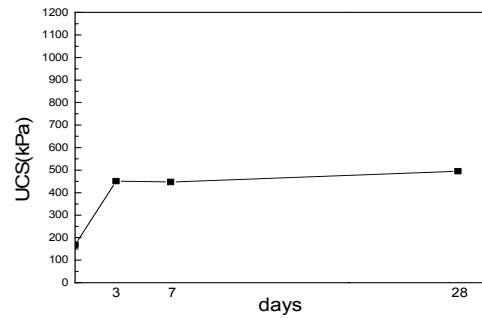


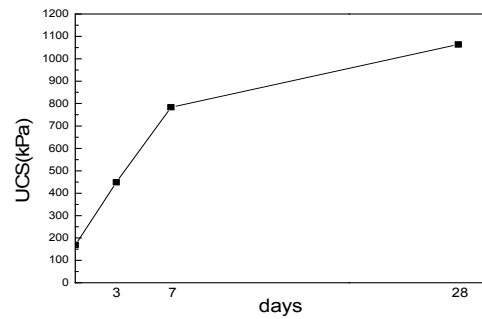
Fig. 6. Compression Strength change by mixing ratio

2.3.5 미분말 바텀애시의 강도증진 효과 분석

분쇄 전의 바텀애시를 사용하였을 때와, 분쇄 후의 미분말 바텀애시를 사용하였을 때의 강도증진효과 분석을 위하여, 최적배합비에 분말도 $330\text{cm}^2/\text{g}$ 의 바텀애시와 분말도 $6,870\text{cm}^2/\text{g}$ 의 바텀애시 미분말을 각각 사용하여 일축압축시험을 진행하였다. 양생기간에 따른 압축강도는 Table 10에 나타내었으며, 각각의 강도증진양상은 Fig. 7에 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 7. Strength enhancement pattern by Fineness
(a) Fineness $330\text{cm}^2/\text{g}$ (b) Fineness $6,870\text{cm}^2/\text{g}$

Table 10. Maximum Compression Strength by Mixing ratio

Part		Compression Strength (kPa)			
Test group	Fineness (cm^2/g)	Ground	3days	7days	28days
Bottom Ash	330	169.9	451.4	447.2	494.8
Bottom Ash fine powder	6,870	169.9	448.7	783.2	1,063.5

시험결과, 분말도 $330\text{cm}^2/\text{g}$ 의 바텀애시를 사용한 경우, 3일 강도는 451.4kPa 로 나타났고 28일 강도는 494.8kPa 로 강도증진이 거의 나타나지 않았다. 하지만, 분말도 $6,870\text{cm}^2/\text{g}$ 의 바텀애시를 사용한 경우에는 28일 강도가 $1,063\text{kPa}$ 로 비교했을 때 2.15배 높은 압축강도를 나타냈다.

이는 Park(2017)이 언급한 바와 같이, 바텀애시 생성 과정에서 생기는 바텀애시 입자 표면의 산화피막이 바텀애시를 분쇄하면서 파괴되고 내부 반응성 물질인 SiO_2 , Al_2O_3 및 Ca^{2+} 등의 이온들이 용출되고 수산화칼슘 결정이 발생하여, 실리카나 알루미늄 등의 가용성분이 반응해 C-S-H gel 및 C-A-H gel을 형성하여 미세공극을 충전시키고 조직이 견고해지는 포졸란 반응이 활발해졌기 때문에 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다[14].

2.3.6 미세구조 분석

포졸란 반응으로 발생한 미세구조의 변화를 관찰하기 위해, Fig. 8의 원지반토의 형상과 Fig. 9의 바텀애시 미분말을 이용한 최적배합비의 지반개량재를 혼입 후 28일 경과후의 시료에 대해 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미세구조를 관찰하여 비교하였다.

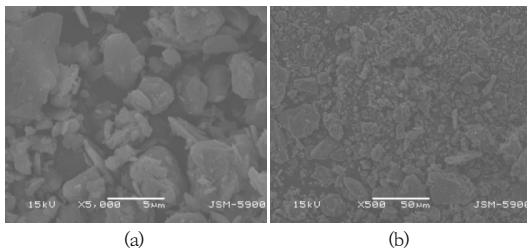


Fig. 8. SEM analysis of the Ground (a) $\times 100$ (b) $\times 5,000$

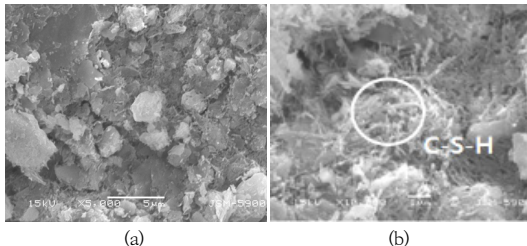


Fig. 9. SEM analysis after mixing Soil Stabilization material (a) $\times 100$ (b) $\times 5,000$

관찰 결과, M. Cheriaf(1999)와 같이 바텀애시 미분말을 이용한 최적배합비의 지반개량재를 혼입 후 원지반토와 비교하여 C-S-H상으로 보이는 수화생성물이 흙 입

자들과 엉켜있는 것을 Fig. 9에서 관찰할 수 있었으며, 이로 인하여 강도가 증가한 것으로 판단할 수 있었다[2].

3. 결론

본 연구에서는 석탄 화력발전소의 산업폐기물인 바텀애시를 분쇄하여 얻어낸 바텀애시 미분말을 지반개량재의 재료로 이용하기 위하여 시멘트 및 폐석고 등의 자극제와 혼합 후 지반개량을 실시하여 최적의 강도를 나타내는 최적배합비를 찾을 수 있었고 활용가능성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 특수 장비를 이용하여 바텀애시를 미분말화 하여 8.5시간 분쇄로 시멘트와 같은 분말도를 얻어낼 수 있는 것을 확인하였으며, 분쇄 전에 비해 포졸란 반응성이 활발해졌다.
 2. 폐석고D를 이용한 최적배합비의 지반개량재를 여러 혼화재료들을 사용한 배합비의 지반개량재들과 비교한 결과, 폐석고D를 사용하였을 때 강도가 가장 높게 나타났다. 이는 폐석고D가 황산염계 자극제의 역할을 하여 미분쇄로 파괴되지 않은 바텀애시의쇄상결합을 절단하고 구조체 내부에 함유된 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} 등의 이온들이 용출되어 경화해 강도가 증가한 것으로 판단되며, 다른 폐석고나 혼화재들은 이와 같은 역할을 하지 못한 것으로 판단된다.
 3. 미분말 바텀애시를 이용한 최적배합비의 지반개량재를 현장에서 사용되고 있는 지반개량재들과 일축압축강도를 비교한 결과, 강도증진양상은 초기에 높거나 비슷하였고, 28일 강도는 비슷한 결과를 나타내었다.
 4. 분쇄한 미분말 바텀애시를 사용한 공시체가, 분쇄 전 바텀애시를 사용하였을 때보다 초기강도 및 장기강도 모두 높았으며, 양생 기간 동안 강도가 지속적으로 향상되었다.
- 즉, 미분말 바텀애시를 시멘트 및 적절한 황산염계 폐석고와 혼합했을 경우 사면 표층개량 지반개량재로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Maeng Junho, Kim Taeyoon, Suh Donghwan,

- Minimizing Environmental Impact in Accordance with the Thermal Power Plant Ash Management, Research Report, Korea Environment Institute, Korea, pp.1-5
- [2] M Cheriaf, J. Cavalcante Rocha, J.Pera, "Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash", *Cement and Concrete Research*, Vol29, No.9, pp.1387-1391, Set. 1999
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00098-8)
- [3] Bruce W. Ramme, Mathew P. Tharaniyil, Coal Combustion Products Utilization Handbook Third Edition, p.448, We Energies, 2013, pp.21
- [4] P. Klieger, S. Gebler, "Fly ash and concrete durability, in Concrete Durability", *Katherine and Bryand Mather International Conference*, American Concrete Institute, Atlanta, Georgia, USA, pp. 1043-1069, 27 APRIL-MAY 1987
- [5] M H Abdullah, A S A Rashid, U H M Anuar, A Marto and R Abuelgasim, "Bottom ash utilization: A review on engineering applications and environmental aspects", *International Conference on Geotechnical Engineering in Tropical Regions*, IOP Science, Kuala Lumpur, Malaysia, pp.1-3, 2019
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012006>
- [6] Ji Gu Bae, *Evaluation on the Engineering Characteristics and Shrinkage Behavior of Lightweight Concrete using Bottom Ash Aggregates and Preformed Foams*, Ph.D dissertation, Kyonggi University, Suwon, Korea, p.1-11, 2020.
- [7] Catton, M.D, "Early Soil-Cement Research and Development", *American Society of Civil Engineers*, Vol.85, HW 1, pp.1-16, 1959.
DOI: <https://doi.org/10.1061/JHCEA2.0000078>
- [8] Zang, Won Ho, *A Study on Mechanical Properties of Cement Mortar Contained the Remicon Sludge*, Master's thesis, Chungang University, Seoul, Korea, p.6-12, 2001.
- [9] Kim, Seung Gon, *A Study on Engineering Characteristics of Soil-Cement*, Master's thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea, pp.11-12, 2007
- [10] R. Helmuth, "Fly Ash in cement and concrete", *Portland Cement Association. Journal of Cement and Concrete Research*, 30, pp. 201-204, 1987.
- [11] Chun, byung Sik, Kho, Youg Il, Oh, Min Yeoul, Kwon, Hyung Seok, "Studies on Engineering Properties of Coal Ash Obtained as Industrial Wastes", *K SCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol10, No.1, pp.115-123, 1990.
- [12] Mun, Kyoungju, *Properties of Non-Sintered Cement and Concrete Recycled with Industrial Waste*, Ph.D dissertation, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea, pp.7, 2004.
- [13] Mun Kyoungju, Soh YangSeob, "Hydration Reaction of Non-Sintering Cement using Waste Gypsum and Waste Lime with Activators", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, pp.232~235, 2004
- [14] Park Seungho, *The Improvement of Bottom ash Performance for Use as Fine Aggregate and Binder for Concrete*, Ph.D dissertation, Daejin University, Pocheon, Korea, pp.90-109, 2017

여 동 준(Dong-Jun Yeo)

[정회원]



- 2017년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학사)
- 2019년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목공학과 (박사과정)

〈관심분야〉

지반공학, 지구물리탐사

이 병 석(Byung-Suk Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목공학과 교수

〈관심분야〉

지반공학, 지구물리탐사

고 건 우(Kun-Woo Ko)

[정회원]



- 2015년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목공학과 (박사과정)

〈관심분야〉

지반공학, 지구물리탐사