

매립장 석탄회의 긴급복구용 CLSM으로 활용 가능성*

Feasibility Study on CLSM for Emergency Recovery of Landfill Bottom Ash

김하석** · 김기석***

Ha-Seog Kim** · Ki-Suk Kim***

Abstract

In this study, the characteristics such as flowability, bleeding rate, and strength of the CLSM (Controlled Low Strength Material) according to physical properties such as particle size distribution and particulate content of the pond ash were investigated as part of the practical development of technology for CLSM using pond ash. As a result of analyzing the properties of the collected pond ash, it was found that the density and particle size distribution characteristics were different. And that the bleeding ratio did not satisfy the standard in the case of the specimen with a large amount of fly ash and a lot of addition of mixing water. As a result of the compressive strength test, the strength development of 0.5 MPa or more for four hours was found to be satisfactory for the specimens using hemihydrate gypsum with a unit binder amount of 200 or more, and the remaining gypsum showed poor strength development. Although it was determined that landfill coal ash can be used as a CLSM material, it is necessary to identify and apply the physical and chemical characteristics of coal ash buried in the ash treatment plant of each power generation company.

Keywords: Bottom Ash, Emergency Recovery, CLSM, Mass Utilization, Recycling

1. 서론

국내 석탄재 발생 현황은 2018년 기준 약 940만 톤 수준으로 이중 플라이애시는 795만톤, 바텀애시는 144만톤을 차지하고 있다(김진만 외, 2021). 석탄재 발생량 중 대다수인 약 831만톤은 재활용되고 있으며 그 활용율은 89%이나, 재활용되지 못하는 약 109만톤은 매립되고 있는 실정이다. 발전소 매립 폰즈에 매립되어 있는 석탄재의 주요 활용 용도는 도로 노반재와 항만 및 산업단지 조성 등에 사용되는 저부가가치적 채움재로 활용되고 있다(김진만·

김하석, 2023).

하지만 이러한 단순 매립 방법에 의한 재활용은 대량 재활용이 가능하지만 국한된 재활용 분야이며, 대규모 활용에 따른 환경문제 발생 우려로 인해 사용에 제약사항이 따르고 있어 새로운 분야의 재활용 기술 개발이 필요한 실정이다.

최근 도심지 지반침하 발생에 따른 사회적 문제가 대두되고 있으며, 대부분의 도심지 지반침하는 하수 관거의 누수 또는 인근 토목공사 시 지하수 유출에 따른 지하공동 발생이 원인으로 지목되고 있다(이 과섭 외, 2005).

*본 논문은 2022년도 중소벤처기업부의 기술개발사업[S3226444] 지원하에 수행한 연구로 관계 기관에 감사의 말씀을 올립니다.

**도담이엔씨 대표이사(주저자: bravo3po@kongju.ac.kr)

***도담이엔씨 기업부설연구소 부장(교신저자: tofks@naver.com)

지반침하 복구공사는 침하된 지반을 채우는 것에서부터 시작되며 통상적인 흙 및 토사를 사용할 시 층별로 적층과 다짐이 필수적이며 특히 지하 공동부의 면적이 상부로 노출되어야 공사가 가능한 단점을 가지고 있다. 또한 콘크리트를 사용할 경우 유동성 확보를 위해 W/B 비율을 높여서 사용하기 때문에 재료 분리 저항성 저하, 블리딩 발생 등의 문제를 내재하고 있다. 따라서 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 CLSM 재료 개발이 국내 및 국외에서 이루어지고 있다.

CLSM(Controlled Low Strength Material)은 유동성을 높여 채움재로 활용되는 재료로 별도의 다짐공정이 필요로 하지 않는 강도 제어형 복합재료를 의미하며 균질한 다짐도 및 충전성을 확보할 수 있어 협소한 공간, 하수관 및 구조물용 뒤채움재로 활용되고 관련 연구가 수행되고 있다(김영옥 외, 2020; 김영옥 외, 2019; 이준 외, 2018).

CLSM에 관한 연구는 기술 선진국의 경우 노후된 하수관의 비중이 높아 하수관의 결함으로 인한 토사 유출 및 지반침하 사례가 빈번히 발생함에 따라 유동성 재료를 활용한 지하 매설물의 채움재에 관한 연구 및 현장 적용 실적이 증가하는 추세이고, 각종 표준 및 시방서에서 유동성 채움재에 대한 품질기준 및 가이드라인을 제시하고 있다(Green and Schmitz, 2004; Lea and Nguyenb, 2016; Kiyomasa et al., 2013).

따라서 본 연구에서는 유동성 채움재(CLSM) 골재로 바텀애시를 대량 활용하고, 특히 긴급복구용 CLSM에 대한 기초연구를 통해 매립재의 안정적인 활용방안을 도출하고자 한다.

2. 매립석탄회 특성 분석

2.1 실험계획

본 실험에 사용된 바텀애시는 D사 당진화력발전

소 회처리장에 매립되어 있는 것으로 발전 후 발생하는 플라이애쉬와 바텀애쉬 그리고 비산을 방지하기 위한 토사가 혼재되어 있는 상태이다. 따라서 매립석탄재를 CLSM에 활용하기 위하여 Table 1과 같이 물리적 특성을 분석하였다.

아래 Fig. 1은 바텀애시가 매립되어 있는 회처리장의 조사지점을 답사한 후 각 지층의 구성 상태와 매립되어 있는 층의 공학적 성질 등을 분석하기 위하여 총 6개소를 선정하여 NX규격의 시추공을 실시한 지점을 나타낸다.

Table 1. Test Plan of Bottom Ash

ID	Test Factors	Test Method
1	Collected PA (3 point)	KS F 2324

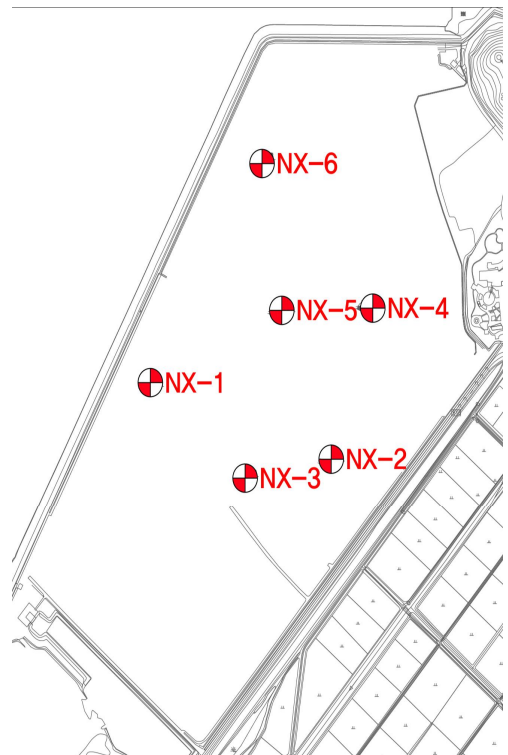


Fig. 1. Drilling Location Map of Ash Pond

2.2 분석 결과

2.2.1 시추조사 결과

시추분석 결과 바텀애시 매립현황은 토사를 0.8~1.2m 정도 복토되어 있어 그 아래로 바텀애시가 약 5.5~9m 두께로 매립되어 있다. 바텀애시 매립층에 대한 표준관입시험(SPT) 결과 매우 느슨에서 느슨한 수준인 N 2~5 정도로 판명되었다. 다짐 정도를 나타내는 현장 들밀도와 실내 다짐 시험 결과 매립장의 바텀애시 다짐 정도는 최적 함수비 다짐도의 53~65% 수준으로 이를 토대로 하여 태양광 발전 부지를 포함한 면적에 시추 조사 시 적용한 양 단면 평균법 및 최초 시추 깊이인 9m를 적용한 매립석탄층 3차원 두께의 추정체적을 합산하면 회처리장 바텀애시 매립량은 약 12,343,000m³로 파악되었다.

2.2.2 물리적 특성 결과

시추조사를 통하여 채취한 바텀애시의 유동성 채움재 배합기술 개발을 위해 입도, 0.075mm(No.200) 체 통과율, 밀도, 액성한계 및 소성한계, 공학적 분류를 실시하였다.

매립 바텀애시의 입도 시험방법은 KS F 2302에 준하여 매립 바텀애시를 4분법을 이용하여 균등하게 0.5kg을 채취한 후 2mm체를 이용하여 체가름을 실시하였다. 2mm 잔류분에 대하여 9.5mm, 4.75mm, 2mm에 대한 체분석을 실시하고 2mm 통과분에 대해서는 비중계 분석을 실시하여 입도를 분석하였다. 0.075mm체 통과율은 KS F 2309에 준하여 건조된 시료 최소 500g을 채취하고 1.2mm, 0.075mm 체를 사용하여 씻기 시험을 수행한 후 질량을 측정하여 산출하였다. 또한 밀도 시험은 KS F 2308에 준하여 시료를 비중병에 투입한 후 증류수 주입 및 가열을 실시하여 바텀애시 입자사이의 기포를 제거하고 실온 냉각 후 질량을 측정하여 산출하였으며, 액성 및 소성한계 시험은 KS F 2303에 준하여 시험을 실시

하였다.

액성한계는 425 μ m체를 통과한 시료 약 200g을 채취하여 시험 장치에 거치한 후 낙하를 반복시키고 흠 바닥부 시료의 길이가 약 13mm 맞닿을 때까지 시험을 실시한 후 시료의 함수비를 측정하였다. 동일 과정을 총 4회 반복하여 직선 보간법에 의해 매립 바텀애시의 액성한계를 산출하였다. 소성한계 시험은 시료 약 30g을 채취하여 불투명한 유리판에 손바닥으로 굴리면서 지름 약 3mm에서 끊어질 때 그 조각난 부분의 매립바텀애시를 모아 함수비를 측정하여 산출하였다. 또한 산출된 액성한계와 소성한계를 이용하여 아래의 식에 의해 소성지수를 산출하였다. 본 연구에서 평가대상 매립 바텀애시의 공학적 성질을 판단하기 위한 척도의 일환으로서 KS F 2324에 준하여 공학적 분류를 실시하였다.

채취시료에 대한 물성 분석 결과 Table 2와 같이 밀도 1.99~2.03g/cm³ 및 0.075mm체 통과율 52.3~7.8%의 수준으로 나타났으며, 액·소성한계 시험에서는 시험불가(Non-Plastic)로 판정되었으며 Fig. 2는 입도분포를 나타낸다.

평가결과를 토대로 공학적 분류를 실시한 결과 입도분포 불량한 모래(SP)군으로 분류되었다. 당진화력발전소 매립지의 채취별 시료에 대한 특성 분석 및 공학적 분류 결과 채취별에 따른 밀도는 동등한 수준으로 나타났으나, 0.075mm체 통과율 및 입도분포, 공학적 분류의 결과는 서로 상이한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 석탄재의 발생 시기, 매립

Table 2. Result of Bottom Ash Properties

ID	PI	Density (g/cm ³)	Passing Ratio (No. 200)
PA-1	NP	1.99	36.5
PA-2	NP	2.04	52.3
PA-3	NP	2.03	7.8

PI=Plasticity index, NP=Non-Plastic

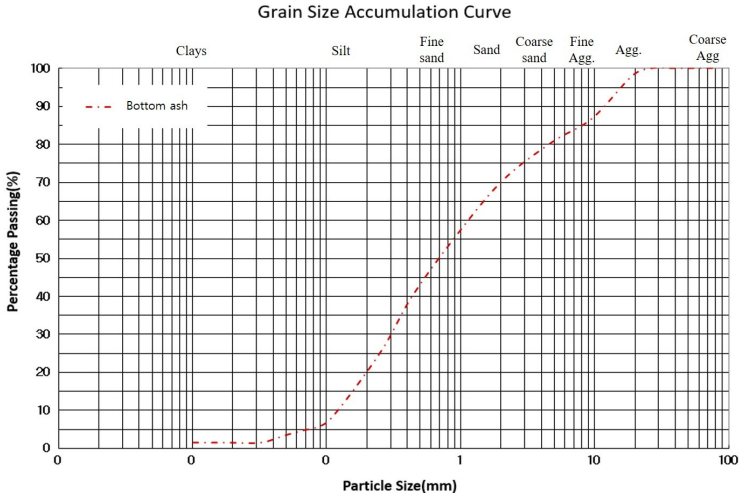


Fig. 2. Bottom Ash Particle Size Distribution Curve

시 사용되는 복토, 채취 심도 등의 영향이 작용한 것으로 판단된다.

3. 긴급복구용 CLSM 실험계획 및 재료특성

3.1 실험계획

본 과제의 목표를 달성하기 위하여 Table 3과 같이 실험계획을 수립하였다.

본 실험계획에서 220mm 이상의 유동성과 4시간 이내 0.5MPa 이상 압축강도 발현을 위하여 다음과 같은 재료를 바인더로 사용하였다. 시멘트 대신 칼슘알루미네이트(C₁₂A₇) 계열인 환원슬래그를 속경성 바인더로 이용하였다. 철강공정에서 발생하는 환원슬래그는 급결 특성을 갖는 재료로 단독으로 결합

재로 사용한 경우 강도 발현이 저조한 결과를 나타냈다.

따라서 본 실험에서는 220mm 이상의 유동성과 4시간 이내 0.5MPa 이상 압축강도 발현을 위하여 바인더로서 환원슬래그와 석고를 결합재로 이용하였으며 단위 결합재량 변화에 따른 그 특성을 검토하였다. 실험에 사용한 변수로 단위 결합재량, 석고 종류, 바텀애시 활용율로 선정하였으며 단위결합재량은 100, 120~300kg까지 11수준, 석고 종류로는 탈황무수석고와 이수석고, 반수석고 3종류를 사용하였다. 석고는 전체 결합재 대비 중량비로 25%를 대체하여 사용하였으며 양생은 기건상태로 상온에서 양생하였다. Table 4는 바텀애시를 긴급복구용 CLSM 재료로서 활용 가능성 검토 실험의 실험배합을 나타낸다.

Table 3. Experiment Plan

Factors	Levels	Test Items
Unit binder content	11 (100, 120, 140, ... 280, 300)	<ul style="list-style-type: none"> • Flow • Compressive strength • Bleeding ratio
Types of gypsum	3	

3.2 재료 특성

본 실험에 사용한 사용재료의 물리·화학적 특성은 Table 5에 나타내었다.

제강환원슬래그는 다른 슬래그들과 다르게 수분과 접촉하였을 때 반응하여 자체 분화되는 특성을

Table 4. Experiment Mix

ID	Weight (kg)					Bottom Ash
	W/B*	W/S**	W***	CAC	CaSO ₄	
A-1		12%	1.00	0.38	0.13	7.52
A-2		16%	1.20	0.45	0.15	7.05
A-3		19%	1.40	0.53	0.18	6.58
A-4		23%	1.60	0.60	0.20	6.12
A-5		27%	1.80	0.68	0.23	5.65
A-6		32%	2.00	0.75	0.25	5.18
A-7		38%	2.20	0.83	0.28	4.72
A-8		44%	2.40	0.90	0.30	4.25
A-9		51%	2.60	0.98	0.33	3.78
A-10		59%	2.80	1.05	0.35	3.31
A-11		69%	3.00	1.13	0.38	2.85
D-1		12%	1.00	0.38	0.13	7.52
D-2		16%	1.20	0.45	0.15	7.05
D-3		19%	1.40	0.53	0.18	6.58
D-4		23%	1.60	0.60	0.20	6.12
D-5		27%	1.80	0.68	0.23	5.65
D-6	200%	32%	2.00	0.75	0.25	5.18
D-7		38%	2.20	0.83	0.28	4.72
D-8		44%	2.40	0.90	0.30	4.25
D-9		51%	2.60	0.98	0.33	3.78
D-10		59%	2.80	1.05	0.35	3.31
D-11		69%	3.00	1.13	0.38	2.85
H-1		12%	1.00	0.38	0.13	7.52
H-2		16%	1.21	0.45	0.15	7.04
H-3		19%	1.40	0.53	0.18	6.58
H-4		23%	1.60	0.60	0.20	6.12
H-5		28%	1.81	0.68	0.23	5.64
H-6		32%	2.01	0.75	0.25	5.17
H-7		38%	2.20	0.83	0.28	4.72
H-8		44%	2.40	0.90	0.30	4.25
H-9		51%	2.60	0.98	0.33	3.78
H-10		59%	2.80	1.05	0.35	3.32
H-11		69%	3.00	1.13	0.38	2.85

A: Anhydrate gypsum, D: Dihydrate gypsum

H: Hemihydrate Hemihydrate

* Water and binder ratio

** Water and solids ratio

*** Water

Table 5. Properties of Binder Materials

Binder	Density (g/mm ³)	Blain (cm ² /g)	Chemical Properties (Oxide Content) (%)			
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃
CAC*	2.97	6,300	12.0	31.31	45.98	1.73
Anhydrate	2.83	3,372	0.35	-	40.36	59.29
Dihydrate	2.70	2,611	0.17	0.46	40.43	58.85
Hemihydrate	2.32	3,485	0.11	-	40.03	59.76

* CAC: Calcium Aluminate Composite.

가지고 다른 제강슬래그와 같이 골재로 활용하기 어려운 반응성 재료이다(김진만 외, 2012). 바인더로 사용한 제강환원슬래그의 주성분은 CaO, Al₂O₃ 등으로 급격한 수화반응과 팽창성을 가지고 있는 Mayenite(C₁₂A₇), Larnite(β-C₂S)와 Calcio-olivine (γ-C₂S) 등으로 구성되어 있다. 이러한 특성을 갖는 제강환원슬래그는 CA계 특수시멘트 원료로 활용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서 환원슬래그의 급결성을 이용하여 빠른 겔형성을 목적으로 사용하였다.

본 연구에서 제강환원슬래그의 안정적인 강도발현을 위하여 3종류를 석고를 이용하였다. 탈황무수 석고는 국내 S정유사 탈황공정에서 발생하는 것을 이용하였으며, 이수석고와 반수석고는 천연 석고를 이용하였다.

배합실험에 사용한 바텀애시는 밀도 2.03g/cm³ 및 0.075mm체 통과율 7.8%의 PA-3 시료를 이용하였다.

제강환원슬래그는 물과 배합되었을 시 수십 초 내에 급격한 수화가 진행된다. 따라서 충분한 유동성을 확보하기 위하여 충분한 지연제의 사용이 필수적이며 무수구연산 지연제를 사용하였다.

4. 긴급복구용 CLSM 실험 결과

4.1 Flow 시험 결과

매립 바텀애시를 긴급복구용 CLSM 재료 활용 가능성을 검토하고자 수립한 배합실험의 Flow 실험

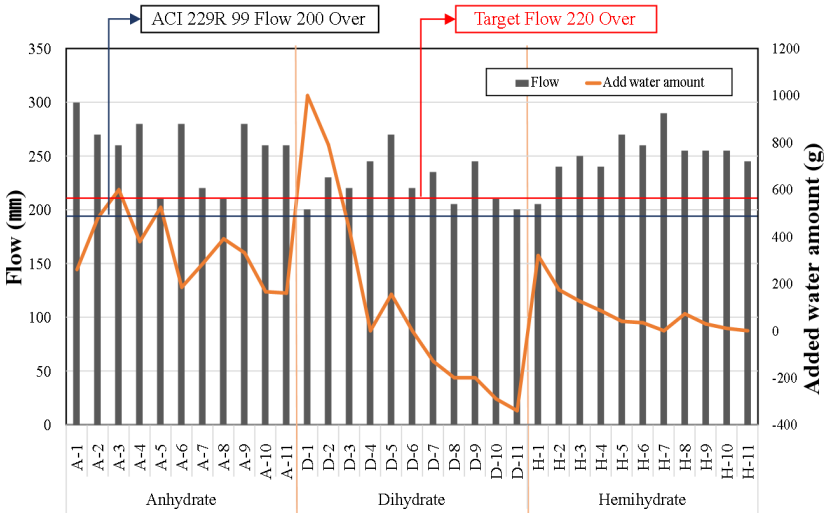


Fig. 3. The Flow Result of CLSM

결과는 Fig. 3과 같다. 일반적인 CLSM Flow 기준은 미국 ACI 229 R-99에 200mm 이상으로 규정하고 있으나 본 연구에서는 안정적인 자기 충전을 위해 220mm 목표 Flow로 선정하였다(ACI 2012). 단위수량을 고정하여 W/B를 200% 고정하여 시험한 결과 매립바탕에서 사용량이 많아질수록 Flow는 급격히 저하하는 결과가 나타났으며 본 실험에서 계획한 Flow 220mm를 충족하지 않는 결과를 나타냈다. 따라서 상당히 높은 단위수량을 나타내지만 배합수를 추가할 경우 목표 플로우를 만족하는 것으로 나타났다. 또한 결합재로 석고계 물질이 투입됨에 따라 석고 사용량이 증가할수록 Flow 저하 현상이 두드러지게 나타났다. 이는 석고 사용량이 증가할수록 배합 초기 요구되는 단위수량이 커지는 결과에 기인된 것으로 판단된다. 그림에서 보는 바와 같이 탈황무수석고를 사용한 시험체군의 경우 추가수량이 160~600g 정도 증가하여야 목표 Flow를 만족하였으며 각각 시험체의 유동성이 목표 Flow는 만족하지만 플로우 값의 차이가 확연히 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 이수석고를 사용한 시험체의 경우 매립 바탕에서 사용량이 높을 경우 목표 Flow를 만

족하기 위하여 추가되는 단위수량이 높아지지만 매립 바탕에서 사용량이 낮아질수록 고정 배합수보다 낮은 수량으로 목표 Flow를 만족하는 결과를 나타냈다. 이는 이수석고 사용량과 고려해보면 매립 바탕에서 사용량이 낮아지고 단위결합재 중 이수석고 사용량이 높아질 경우 요구되는 단위수량이 상당히 낮아지는 결과로 판단된다.

반수석고를 사용한 시험체의 경우 위 무수 및 이수 석고를 사용한 경우와 유사한 결과를 보였지만 실제 타 석고 대비 첨가되는 수량의 양은 상당히 낮은 결과를 나타냈다.

33개 전 시험체 모두 220mm 이상의 흐름값을 보였으며 평균 240±5mm 정도의 플로우 값을 나타내었으며 일정량의 단위수량 첨가시 유동성 변화가 큰 것으로 나타났다.

4.2 블리딩 시험 결과

매립 바탕에서를 긴급복구용 CLSM 재료 활용 가능성을 검토하고자 수립한 배합실험의 Bleeding 실험결과는 Fig. 4와 같다. 일반적인 CLSM Bleeding 기준은 미국 ACI 229 R-99에 3% 이하로 규정하고 있

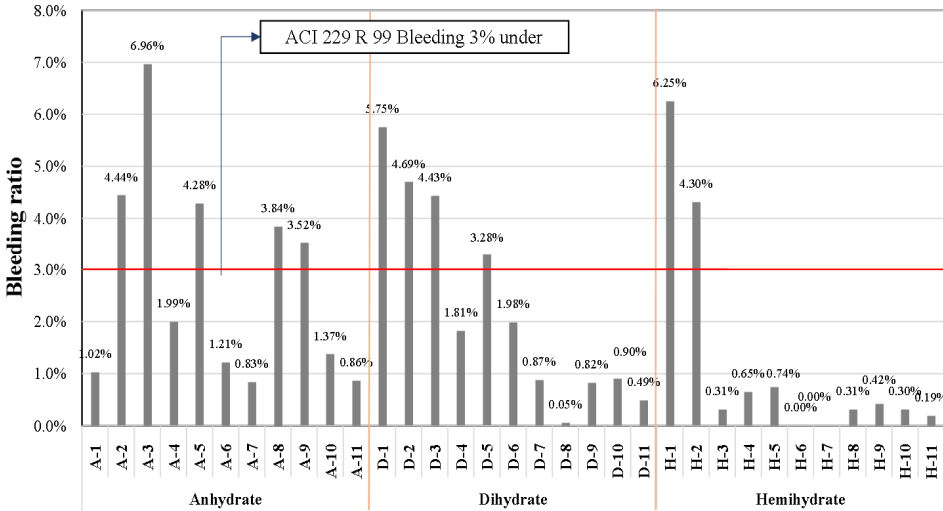


Fig. 4. The Bleeding Ratio Result of CLSM

으며 본 연구에서 또한 이 기준을 차용하여 사용하였다(ACI 229 R-99 2012).

본 실험은 4시간 0.5MPa 강도발현을 구현하기 위하여 환원슬래그 속경성 결합재와 탈황무수석고, 이수석고, 반수석고를 사용하였으며 유동화제 및 감수제와 같은 화학 혼화제를 사용하지 않고 유동성을 확보하기 위하여 W/B는 200% 수준으로 단위수량이 상당히 높게 설정되어 있어 재료분리 위험성이 내포되어 있다. 따라서 전 실험체에 대한 Bleeding 실험결과 바텀에시 사용량이 많고 배합수 추가가 많은 실험체의 경우 Bleeding ratio가 ACI 229 R-99에서 요구하는 3% 이상을 넘어서는 결과를 나타냈으며 바텀에시 사용량이 작고 배합수 추가가 낮은 실험체의 경우 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 환원슬래그 속경성 결합재와 함께 사용된 석고 종류에 따른 Bleeding Ratio 변화는 반수석고를 사용한 시험체가 더 낮은 Bleeding Ratio 결과를 나타내긴 하였지만 석고종류에 따른 Bleeding Ratio 변화는 크게 나타나지 않았다. 즉 바텀에시를 CLSM 채움용 골재로서 사용하기 위해서는 적정입도 및 함수율을 갖는 것을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

4.3 압축강도 시험 결과

매립 바텀에시를 긴급복구용 CLSM 재료 활용 가능성을 검토하고자 수립한 배합실험의 압축강도 실험결과는 Fig 5와 같다. 압축강도 실험결과 목표로 하는 4시간 0.5MPa 이상 강도발현은 탈황무수석고, 이수석고, 반수석고를 결합재로 사용할 경우 반수석고를 사용한 시험체의 경우 4시간 강도발현이 가장 높은 것으로 나타났다. 특히 탈황무수석고를 사용한 경우 4시간 강도발현이 가장 낮았으며 단위결합재 양이 260 이상일 경우 목표 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 이수석고를 사용한 경우 단위결합재 양이 240부터 4시간 0.5MPa 이상 목표 강도 값을 만족하였으며 반수석고의 경우 단위결합재 양이 200부터 만족하는 결과를 나타냈다. 본 실험에 사용한 결합재는 환원슬래그에 탈황무수석고, 이수석고, 반수석고를 결합재로 사용한 것으로 환원슬래그 단독 사용 보다는 강도발현 및 조기응결을 가져오지만 반수석고를 사용하는 것이 강도발현에 가장 효과적인 결과를 나타냈다. 일반적으로 환원슬래그를 단독 사용 시 칼슘알루미늄에이트의 급격한 형성으로 내부 팽창 붕괴를 유발하여 강도가 저하되는 선행연구 결과와

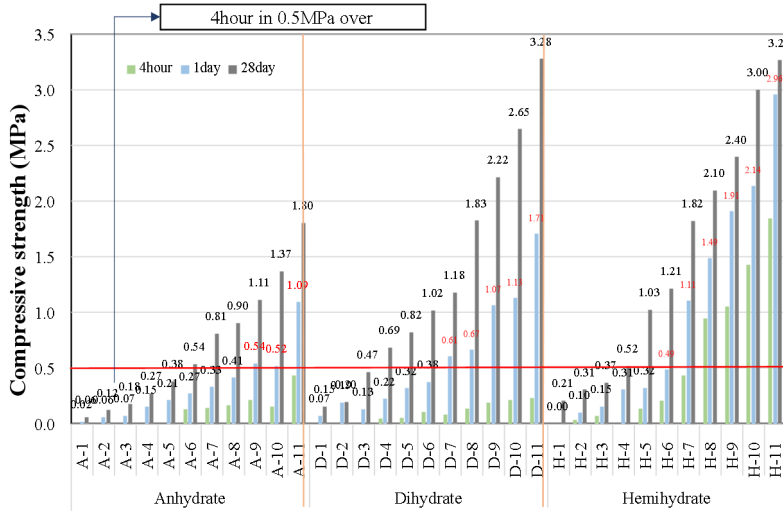


Fig. 5. The Compressive Strength Result of CLSM

유사한 결과를 보였다(Kim and Kim, 2016; Kim and Kim, 2018).

전 시험체에서 양생일수가 증가함에 따라 강도가 증진하였으며 단위 시멘트량이 증가함에 따라 강도는 증가하는 경향이 나타났으며 바텀애시 사용량이 증가할수록 강도는 감소하는 결과를 나타냈다.

강도 시험결과 경제성을 고려할 경우 가격이 가장 싼 탈황무수석고 또는 합성하여 제조한 석고를 이용하는 것이 타당하지만 CLSM 재료로 바텀애시 대량 활용 측면에서 안정된 배합 및 기술개발을 위하여 반수석고를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 화력발전소에서 대량 발생하여 매립되어 있는 매립 바텀애시의 대량 활용방안으로 긴급 복구용 CLSM 재료로 활용 가능성을 확인하기 위한 것으로 바텀애시 사용량 및 결합재 종류에 따라 시험한 결과 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

첫째, 국내 D사 당진화력발전소 매립 pond에 적

치된 바텀애시의 물리적 특성을 KS F 2324에 따라 분석한 결과, 저회와 비회, 일반 흙이 섞여 있는 상태로 채취 시료별 입도 및 밀도는 상이한 특성을 나타내는 것으로 확인되었다.

둘째, 매립 바텀애시를 긴급복구용 CLSM 재료로 활용하기 위하여 단위결합재량과 석고종류에 따른 Flow 시험결과, 단위결합재량이 낮은 경우 바텀애시 사용량이 많아짐에 따라 단위수량 저감효과에 따른 Flow 저감율이 큰 것으로 나타났으며 반수석고를 사용한 시험체가 목표 Flow를 충족하기 위한 첨가수량이 가장 낮은 결과를 도출하였다.

셋째, 유동화제 및 감수제와 같은 화학 혼화제를 사용하지 않고 단위수량으로 유동성을 확보하는 CLSM 재료는 Bleeding에 의한 재료분리 위험성이 크며 본 실험결과 바텀애시 사용량이 많고 배합수 추가가 많은 실험체의 경우 Bleeding Ratio이 기준을 만족하지 않는 것으로 나타났으며 반수석고를 사용한 시험체가 타 석고를 사용한 시험체와 비교시 더 낮은 Bleeding Ratio 결과를 나타냈다.

넷째, 압축강도 시험결과 4시간 0.5MPa 이상 강도발현은 탈황무수석고, 이수석고, 반수석고를 결합

재로 사용할 경우 반수석고를 사용한 시험체의 경우 4시간 강도발현이 가장 높은 것으로 나타났으며, 단위결합재량 200 이상이 사용되어야 목표 시간내 강도발현이 가능하였으며 환원슬래그와 반응하여 에트링가이트 생성에 반수석고가 가장 유리한 결과로 판단된다.

다섯째, 상기 시험결과 긴급복구용 CLSM 재료로 활용하기 위하여 원재료인 매립 바텀애시 사용이 가능한 것으로 판단되나 발전사별 회처리장에 매립되어 있는 바텀애시의 물리, 화학적 특성을 파악하여 적용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김영욱·이봉춘·정상화(2019), “굴착토를 활용한 유동화 채움재의 현장 적용성 평가”, 「한국건설순화자원학회 논문집」, 7(4): 349~357.
2. 김영욱·이봉춘·정상화(2020), “굴착토를 활용한 속경성 유동성 채움재의 공학적 특성 평가”, 「한국건설순화자원학회 논문집」, 8(4): 450~457.
3. 김진만·김하석(2023), 「매립석탄제기반 긴급복구용 반응성 self-levelling 채움재 사업화 기술개발」, 울산: 동서발전.
4. 김진만·김하석·추연욱(2021), 「우드펠릿 플라이애시를 이용한 무시멘트 기반 지반 고화재 개발」, 인천: 남동발전.
5. 김진만·최선미·김지호(2012), “다양한 철강제조공정에서 부산되는 전기로 환원슬래그의 급경성 무기결합 재료의 적용성 검토”, 「한국건설순화자원학회 논문집」, 7(2): 70~77.
6. 이과섭·이원석·김태형(2005), 「BTL 하수관거 정비사업 성과요구수준서 표준안 연구」, 서울: 한국환경관리공단.
7. 이준·김영욱·이봉춘·정상(2018), “표준토 조건별 하수관용 유동화 채움재의 공학적 특성”, 「한국건설순화자원학회 논문집」, 6(3): 182~189.
8. American Concrete Institute (2012), ACI 229R 99: Controlled Low Strength Materials, ACI Committee 229, MI Farmington Hills.
9. Green B. H. and D. W. Schmitz (2004), “Soil-Based Controlled Low Strength Materials”, *Journal of Environmental & Engineering Geoscience*, 10(2): 169~174.
10. Kim, H. S. and J. M. Kim (2016), “Quality Improvement of Recycled Aggregates Using the Acid Treatment Method and the Strength Characteristics of the Resulting Mortar”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19: 968~976.
11. Kim, H. S. and J. M. Kim (2018), “The Optimum Production Method for Quality Improvement of Recycled Aggregates Using Sulfuric Acid and the Abrasion Method”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20: 754~765.
12. Kiyomasa, D., S. Hiroyuki, K. Youichi and H. Tsuneo (2013), *Technical Guide for Using the Construction Site Soil*, 4th Ed., Tokyo.
13. Lea, D. H. and K. H. Nguyenb (2016), “An Assessment of Eco-Friendly Controlled Low-Strength Material, Sustainable Development of Civil”, *Urban and Transportation Engineering Conference*, 142: 260~267.

요약

본 연구에서는 매립석탄재를 이용한 CLSM의 실질적인 기술개발의 일환으로 매립석탄재의 입도분포 및 미립자 함량 등 물성에 따른 CLSM의 유동성, 블리딩 속도, 강도 등의 특성을 검토하였다. 그 결과 채취한 매립석탄재는 밀도 특성과 입도 분포가 다른 것으로 나타났으며 비산재의 양이 많고 혼합수를 많이 첨가한 시편의 경우 블리딩 비율이 기준을 만족하지 못하였고 압축강도 시험 결과, 4시간 동안 0.5MPa 이상의 강도발현은 단위결합재량이 200 이상인 반수석고를 사용한 시편의 경우 만족스러운 것으로 나타났다. 나머지 석고는 강도발현이 불량한 것으로 나타나 매립석탄재는 CLSM 소재로 활용이 가능할 것으로 판단되나 각 발전사의 회처리장에 매립된 석탄재의 물리화학적 특성을 규명하고 적용할 필요가 있다.

주제어: 바텀애시, 긴급복구, CLSM, 대량활용, 재활용