

베트남 CFBC 플라이애시를 사용한 지반고화재의 특성

김기석* · 이재원* · 이동원* · 유지형* · 즈엉수언호앙* · 하민** · §민경남*

*주세종이앤씨
**CONINCO

Properties of Ground Solidification Materials using Vietnam CFBC Fly Ash

Keeseok Kim*, Jaewon Lee*, Dongwon Lee*, Jihyung Yu*,
Truong Xuan Hoang*, Ha Minh** and §Kyongnam Min*

*Sejong E&C, Daejeon, Korea
**CONINCO, Hanoi, Vietnam

요 약

베트남 정부는 석탄화력발전소 증설을 중심으로 한 발전용량확보 계획을 추진 중이며, 그에 따라 발전회의 발생량이 지속적으로 증가하고 있어 발전회 대량처리 방안 확보가 시급한 실정이다. 본 연구는 베트남에서 발생하는 발전회 중 순환유동층발전소 플라이애시를 지반고화재의 원료로 활용하기 위해 수행되었다. 플라이애시의 혼용이 지반고화재 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 대상 플라이애시와 고로슬래그, 석고, 시멘트 등을 사용하여 지반고화재를 제조하고, 이를 베트남 연약지반 토사와 혼합하여 시험체를 제작한 후 성능을 평가하였다. 그 결과, 28일 기준 강도 3 MPa 확보가 가능한 배합을 확인하였으며, 기존 보통 포틀랜드 시멘트만을 사용한 고화재 보다 내산성이 뛰어나 산 침지 시험에서 중량손실률을 절반이하로 감소시킬 수 있었다.

주제어 : 순환유동층, 플라이애시, 지반고화재, 베트남, 연약지반

Abstract

According to Vietnam government establishes additional coal-fired power plants to secure generation capacity, emission of ashes is accelerating and processing them is urgent issue. This study targeted utilize fly ashes that occurred in circulating fluidized bed combustion (CFBC) power plant to use ground solidification materials. CFBC fly ashes are used to make solidification with ground granulated blast furnace slag (GGBFS), gypsum and cement. Then produced specimens by mixing with soft ground soil to confirm mixing effect of fly ash in solidification. As a result it was possible to find mixture design that is satisfied 3 MPa compressive strength in age 28 days and reduce weight loss rate over 50% in acid immersion test than plain specimens that using only ordinary portland cement.

Key words : CFBC, Fly ash, Ground solidification material, Vietnam, Soft ground

· Received : March 19, 2018 · Revised : March 28, 2018 · Accepted : April 17, 2018

§ Corresponding Author : Kyoungnam Min (E-mail: sjenc999@naver.com)

President, Sejong E&C, 4th floor, Reagil Building, 23, Oncheonbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34185, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 베트남정부는 석탄내수경제 활성화를 위해 석탄 화력발전용량을 늘리고 있는 추세이며, 안정적이고 저렴하게 전력을 공급하기 위해 미분탄연소(Pulverized coal combustion, 이하 PCC)방식 발전뿐만 아니라 순환유동층연소(Circulating fluidized bed combustion, 이하 CFBC)방식 발전을 함께 적용하고 있다¹⁾.

석탄연료를 사용하는 발전방식에서는 석탄재가 발생하는데, PCC 방식의 연소온도(1,300~1,700°C) 보다 낮은 연소온도(800~900°C) 조건에서 운용되는 CFBC 방식의 발전소는 직접화염 연소방식이 아닌 연소로 내에서 가열된 물질이 유동, 순환하면서 열을 전달해주는 연소방식을 가지고 있다. 이러한 연소방식은 화염이 생성되지 않는 연료도 고온의 유동층 물질과 섞여 서서히 타면서 유동층을 가열해주는 에너지원으로 사용할 수 있기 때문에 우드 펠릿, 우드 칩, 페플라스틱 고품연료(RPF, Refuse plastic fuel) 및 고품 폐기물 원료(RDF, Refuse derived fuel) 등 다양한 난연, 폭발성 에너지원이 사용된다. 그러나 다양한 연료의 연소에 따라 배기가스에는 SO_x, NO_x, 다이옥신 및 염소 등의 유해물질이 발생하며 이를 저감하기 위해 석회질 원료를 추가적으로 사용하기 때문에 플라이애시의 발생량이 증가한다^{2,3)}. PCC 방식과 CFBC 방식의 발전소에서 발생하는 플라이애시의 차이도 여기에서 발생하는데, PCC 방식에서 발생하는 플라이애시는 유리질의 알루미노-실리케이트(Alumino-silicate)로 이루어져 있어 포졸란(Pozzolan)반응성을 띤다. 또한 입상이 구형이기 때문에 콘크리트 혼화제로 활용될 때 응결 전 성질에서는 불베어링 효과로 인한 유동성 증대에 따라 단위수량 및 블리딩의 감소, 응결 후 성질에서는 장기강도 증진효과를 나타낸다고 알려져 있다. 반면, CFBC 플라이애시는 입상이 불균질하며, 탈황공정에 사용된 석회석의 영향으로 PCC 플라이애시 보다 CaO 함량이 높고, 일부 CaO 성분은 free-CaO로 존재한다. free-CaO는 물과 접촉하였을 때 그 반응성이 매우 높기 때문에 콘크리트 혼화제로 사용할 경우 빠른 응결, 그에 따른 슬럼프 손실 및 지연제 사용량 증가 현상이 나타나며 응결 이후 free-CaO가 반응하는 경우 콘크리트에 균열 및 pop-out 현상을 유발하여 내구성에 악영향을 끼칠 가능성이 높다^{3,4)}.

이러한 CFBC 플라이애시의 단점을 극복하고 활용하기 위해 전 세계적으로 관련된 연구가 수행중인데, 이

들 연구는 크게 플라이애시의 단점을 보완하여 콘크리트 혼화제로 사용하는 경우와 콘크리트 혼화제로 사용하지 단점이 되는 부분을 장점으로 활용하여 다른 용도로 사용하는 경우로 나눌 수 있다.

전자의 경우, CFBC 플라이애시의 특성이 보통 콘크리트보다 특수 콘크리트와 부합하기 때문에 댐이나 도로 포장 등에 사용되는 전압콘크리트(Roller compacted concrete)에서 골재 일부를 대체 활용하여 콘크리트의 강도와 내화산염 성능을 향상시키는 연구가 Chi and Huang⁵⁾에 의해 진행된 바 있으며, Zhang 등은 오토클레이브 벽돌(autoclave brick)에 바인더로 CFBC 플라이애시와 슬래그를 적용하여 오토클레이브 양생기간 동안 CFBC 플라이애시의 반응을 완료 시켜 체적안정성을 확보하는 연구를 진행하였다⁶⁾. 또한, Li 등은 황성황산염, 알칼리 황성화제, 계면활성제 등으로 CFBC 플라이애시를 개질하여 시멘트 혼화제로서 활용 시 단점을 저감시키는 연구를 진행한 바 있다⁷⁾.

후자의 경우, CFBC 플라이애시를 파분쇄하여 PCC 플라이애시와 혼합 분체를 만들어 CFBC 플라이애시를 최대 40%까지 사용한 분체로 지오폴리머를 제작하여 30 MPa 강도를 발현하는 연구가 Chindaprasirt and Rattanasak에 의해 진행된 바 있으며⁸⁾, Shon 등은 저강도 고유동 채움재(Controlled low strength materials)에 CFBC 플라이애시를 사용하여 응결속도 및 강도 증진효과에 대한 연구를 수행하였다⁹⁾. 또한 미국 환경청(Environmental Protection Agency, 이하 EPA)는 석탄광산의 재 채굴을 위해 수질/지질화학적 요소를 고려한 최선의 현장관리 방법을 요약한 매뉴얼을 발간하였는데, 이 보고서에서는 광산 배수 및 침출수로 인한 오염을 최소화하기 위한 방법론에 대해 기술하고 있으며, CFBC 플라이애시를 포함한 다양한 종류의 석탄재를 활용해 산성수에 의한 지하수 오염과 지화학적 변질을 최소화 할 수 있다고 보고하였다¹⁰⁾.

상기 기술한 바와 같이 다양한 분야에서 CFBC 플라이애시를 재활용하기 위한 연구가 진행되는 산업폐기물 매립에 따른 환경적·경제적 부담을 최소화 하고, 적합한 용도로 활용함에 따라 시멘트 사용량 절감 등에 따른 천연자원 사용량을 저감하기 위한 것으로, 본 연구도 같은 일환으로 화력발전설비가 증가추세에 있는 베트남 지역의 CFBC 발전소에서 발생한 플라이애시를 지반고화제로 활용하고자 하였다. 또한 천연자원으로 제조되는 시멘트사용량을 최소화하기 위해 또 다른 산업부산물인 고로슬래그를 활용하여 지반고화제로 사용하였을

때의 특성을 분석하였다.

2. CFBC 플라이애시의 특성

본 연구에서 사용한 플라이애시는 베트남 북부 Cao Ngan 지역의 CFBC 발전소에서 발생된 것이며, 재료의 특성상 공기 중 수분과 접촉하여 풍화될 가능성이 크기 때문에 시료는 배출 즉시 채취하여 밀봉하였다.

PCC 발전소에서 발생하는 플라이애시와 비교하기 위하여 국내 중부화력에서 발생하는 PCC 플라이애시와 비교분석하였으며, 주사전자현미경(SEM, Scanning electron microscope)을 사용하여 관찰한 결과, 알려진 바와 같이 PCC 플라이애시는 구형에 가까운 입형을, CFBC 플라이애시는 부정형의 입형을 보였다. X-선 형광분석기(WD-XRF)와 ASTM C 114 (Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement)의 과염소산 적정 유리석회 측정법에 따라 화학조성과 유리석회를 분석¹¹⁾한 결과는 Table 1과 같다. PCC 플라이애시는 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분으로 각 59.87, 21.39 wt%, CFBC 플라이애시는 SiO₂와 Al₂O₃는 32.19, 14.93 wt%로 분석되었으며 CaO와 SO₃가 주성분으로 각각 20.86, 16.67 wt%, 950±25 °C로 가열하여 강열감량이 15.87 wt%로 나타났다.

PCC 플라이애시의 경우 주로 콘크리트 혼화재로서 사용되기 때문에 KC L 5405 ‘플라이 애시’에서 성분, 강열감량, 분말도 등 물리화학적 특성에 따라 플라이애

시를 1~4 등급으로 분류하고 있으며¹²⁾ Table 2에 KS에서 규정하고 있는 플라이애시의 등급별 기준과 연구에서 사용한 CFBC 플라이애시의 특성을 표기하였다. 본 연구에 사용된 플라이애시의 경우 그 발생공정이 달라 대부분의 특성이 콘크리트 혼화재로 사용되는 PCC 플라이애시와는 다른 것으로 나타났다. 플라이애시의 강열감량은 보일러 운용 중 다 타지 않은 미연탄소로부터 발생하는데 탄소는 유분을 흡착하는 성질이 있어 콘크리트에 사용되는 혼화제의 기능을 저하시키기 때문에 그 함량을 제한하고 있지만, 본 연구에서는 플라이애시를 지반고화재로서 활용 하는 것이기 때문에 그 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

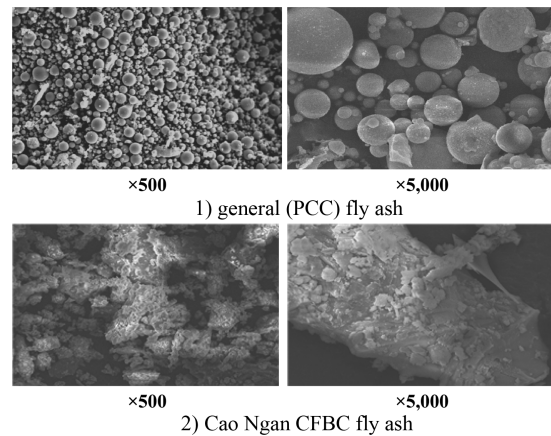


Fig. 1. SEM images of fly ashes.

Table 1. Chemical compositions of fly ashes

(unit: wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI	f-CaO
PCC F/A	59.87	21.39	8.51	3.59	1.33	0.76	3.21	0.30
CFBC F/A	32.19	14.93	9.71	20.86	2.00	16.67	15.87	1.80

Table 2. Chemical & physical properties of fly ashes

Items	Fly ash grade (KS L 5405)				CFBC fly ash
	I	II	III	IV	
SiO ₂ (%)	over 45.0				32.19
LOI (%)	under 3.0	under 5.0	under 8.0	under 5.0	15.87
f-CaO (%)	under 2.5				1.80
SO ₃ (%)	under 3.5				16.67
Blaine (cm ² /g)	over 4,500	over 3,000	over 2,500	over 1,500	1970

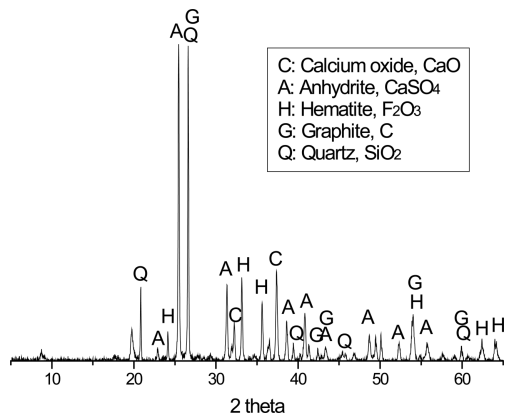


Fig. 2. XRD Pattern of CFBC fly ash.

Fig. 2는 CFBC 플라이애시의 광물상을 분석하기 위한 XRD 측정결과이다. 주성분인 Quartz의 피크를 확인할 수 있었으며, 다른 주성분인 칼슘의 경우 칼슘산화물의 형태로 존재하기도 하지만 황성분과 함께 무수석고의 형태로 존재하는 것이 확인되었다.

3. 베트남 연약지반의 특성

일반적인 콘크리트에서 골재의 사용량은 70% 수준으로 골재의 품질이 콘크리트 품질에 미치는 영향이 크듯, 고화재의 경우 목표 설계강도에 따라 m^3 당 200~300 kg 가량이 사용되기 때문에 토사의 특성에 따라 고화재를 사용하여 개량한 지반의 특성 또한 달라지게 마련이다. 본 연구에서는 추후에 이루어질 현장시공시험 계획을 고려하여 CFBC 플라이애시의 수급이 용이한 베트남 하노이 인근 지역의 연약지반을 시험 사이트로 결정한 후 그 지반의 토질을 조사하였으며 31개 지점의 시료를 채취하여 분석한 결과는 Table 4와 같다. 조사된

토사에 자갈은 존재하지 않았으며 평균 모래는 14.27%, 세립토는 85.73%로 분석되었다. 액성한계(Liquid limit)는 34.90~88.40%, 소성한계는 18.00~51.80% 범위에 있었으며, Table 3에 표기된 KS F 2324 ‘흙의 공학적 분류방법’에 사용된 통일분류법(USCS, Unified soil classification system)에 따라 구분한 결과¹³⁾, 고소성 무기질 실트(MH)인 샘플이 15개로 가장 많은 것으로 나타났다.

4. 사용재료 및 실험방법

4.1. 사용재료

고로슬래그(Ground granulated blast furnace slag, 이하 GGBFS)는 시멘트-콘크리트 분야에서 폭넓게 활용되고 있는 산업부산물로서 본 실험에서는 국내 H사에서 발생한 3종 고로슬래그를 사용하였으며, 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 또한, 고로슬래그를 바인더로 사용하는 경우 시멘트와 함께 수화반응을 촉진시켜주는 것으로 알려진 재료인 무수석고를 함께 바인더로 사용¹⁵⁾하였으며, 재료의 특성은 Table 5와 같다.

또한, 플라이애시는 상기 서술된 베트남 Cao Ngan 지역의 CFBC 플라이애시를 사용하였으며, 토사의 경우 수분조건을 일정하게 유지하기 위해 건조기에서 110°C로 24시간 이상 건조한 뒤, 시험 직전 수분을 첨가 및 혼합하여 함수비를 50%로 고정하여 사용하였으며 밀도는 플라이애시가 2.23, 토사는 1.63g/cm³로 측정되었다.

4.2. 실험방법

실험은 KS F 2328 ‘흙 시멘트의 압축강도 시험방법’에 준하여 공시체를 제작하고 압축 강도시험을 진행하였다¹⁴⁾.

Table 3. Unified soil classification system (U.S.C.S) of fine grained soils

Major division		Group Symbols	Typical names
Fine grained soils [50% or more passing #200 sieve]	Silts and clays LL 50% or less	ML	Inorganic silts of low plasticity
		CL	Inorganic clays of low to medium plasticity
		OL	Organic silts of low plasticity
	Silts and clays LL greater than 50%	MH	Inorganic silts of high plasticity
		CH	Inorganic clays of high plasticity
		OH	Organic clays of medium of high plasticity

Table 4. Basic properties of soils on test site

No.	Passing rate (%)		LL* (%)	PL** (%)	SC***	No.	Passing rate (%)		LL* (%)	PL** (%)	SC***
	#4	#200					#4	#200			
1	100	88.12	50.8	38.4	MH	17	100	100.00	62.19	26.60	CH
2	100	88.21	56.31	31.83	MH	18	100	60.80	34.90	18.60	CL
3	100	91.54	56.46	32.60	MH	19	100	76.59	36.69	20.88	CL
4	100	95.69	56.21	31.70	MH	20	100	97.30	63.10	31.50	CH
5	100	81.80	55.98	31.83	MH	21	100	51.10	51.00	27.00	CH
6	100	92.13	55.72	31.83	MH	22	100	97.50	88.40	51.80	MH
7	100	94.94	56.14	31.70	MH	23	100	97.20	66.21	25.10	CH
8	100	88.69	56.80	32.33	MH	24	100	80.70	35.10	18.00	CL
9	100	88.44	56.70	31.83	MH	25	100	77.60	38.00	18.50	CL
10	100	81.40	36.47	18.60	CL	26	100	100.00	73.73	30.80	CH
11	100	84.90	41.70	20.10	CL	27	100	98.50	62.76	34.01	MH
12	100	62.80	46.19	23.10	CL	28	100	97.70	74.68	39.52	MH
13	100	67.70	41.10	18.80	CL	29	100	97.90	63.30	34.17	MH
14	100	53.00	48.94	22.60	CL	30	100	72.60	74.77	39.69	MH
15	100	99.40	61.40	31.36	MH	31	100	97.80	75.15	40.07	MH
16	100	95.60	37.40	21.31	CL	avr.	100	85.73	55.30	29.23	

*LL: Liquid limit, **PL: Plastic limit, ***SC: Soil classification on U.S.C.S

Table 5. Chemical and physical properties of materials

Materials	Chemical composition(unit: wt%)						Blaine (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
GGBFS	34.65	13.93	0.41	44.01	3.59	1.72	4,675	2.91
Cement	19.68	5.08	5.48	60.66	1.92	1.45	4,320	3.15
Gypsum	0.19	0.07	0.03	40.94	0.25	57.88	3,015	2.60
Fly ash	32.19	14.93	9.71	20.86	2.00	16.67	1,970	2.23

사용재료 중 보통 포틀랜드 시멘트(OPC, Ordinary potland cement)의 경우 재활용 재료를 최대한 활용하기 위한 연구의 목적 상 10 wt%로 고정 사용하였으며, 다른 재료들의 배합비는 고로슬래그 분말 30~60 wt%, 무수석고 30~20 wt% 그리고 플라이애시 10~30 wt%로 조절하였으며 예비시험 결과를 참고하여 자체 고화강도를 가지며 고로슬래그의 잠재수경성에 대한 자극효과를 낼 수 있는 무수석고와 고로슬래그 비율은 1:1, 1:3 두 수준으로 진행하였다. 또한 국내 상용화 되어 있는 지반고화제의 사용량이 200~300 kg/m³인 것, 추후

현장시험시공 시 설계 목표 강도가 2 MPa인 것을 고려하여 고화제 사용비율은 200 kg/m³, 240 kg/m³ 두 조건으로 설정하였으며 전체 배합표는 Table 6과 같다.

개량된 재료는 건조 상태에서 1차 비빔하여 균일하게 혼합한 후 물을 추가하여 슬러리 상태로 제조하였으며 물·바인더 비율(water/binder ratio)은 0.8로 고정하였다.

제조된 고화제 슬러리는 함수율이 50%로 조절된 토사와 다시 혼합하여 직경 5 cm, 높이 10 cm의 원통형 플라스틱 볼드에 채워 공시체를 제작하였으며, 세 번에 걸쳐 나누어 채우면서 나무망치로 볼드를 두드려 기포

Table 6. Mixture design

Soil		Solidification usage	ID	Mixing ratio by weight of binder				
Density	Water content			GGBFS	Gypsum	F/A	Cement	W/B ratio
2.63 t/m ³	50 %	200 kg/m ³	1	30	30	30	10	0.8
			2	35	35	20		
			3	40	40	10		
			4	45	15	30		
			5	52.5	17.5	20		
			6	60	20	10		
		240 kg/m ³	7	30	30	30		
			8	35	35	20		
			9	40	40	10		
			10	45	15	30		
			11	52.5	17.5	20		
			12	60	20	10		

를 제거하였다.

이 후 수분의 증발을 막기 위해 각 몰드를 고분자 필름으로 밀봉하여 20±3°C 온도조건에서 양생을 실시하였으며 3, 7, 14, 28일 재령에서 탈형 후 압축강도 측정을 진행하였다. 또한 개량된 연약 지반은 산성을 띠는 비나 침출수, 해수 등에 노출될 가능성도 있기 때문에 50×50×50 mm 크기로 별도 제작한 시험체를 28일간 양생하여 내산성 평가를 OPC 시험체와 비교하여

진행하였다.

5. 실험결과

5.1. 압축강도

재령별로 측정된 시험체의 압축강도 결과는 Fig. 3에 나타내었으며, 좌측그래프는 전체 시료 중 고화재의 비율이 200 kg/m³일 때, 우측 그래프는 고화재의 비율이

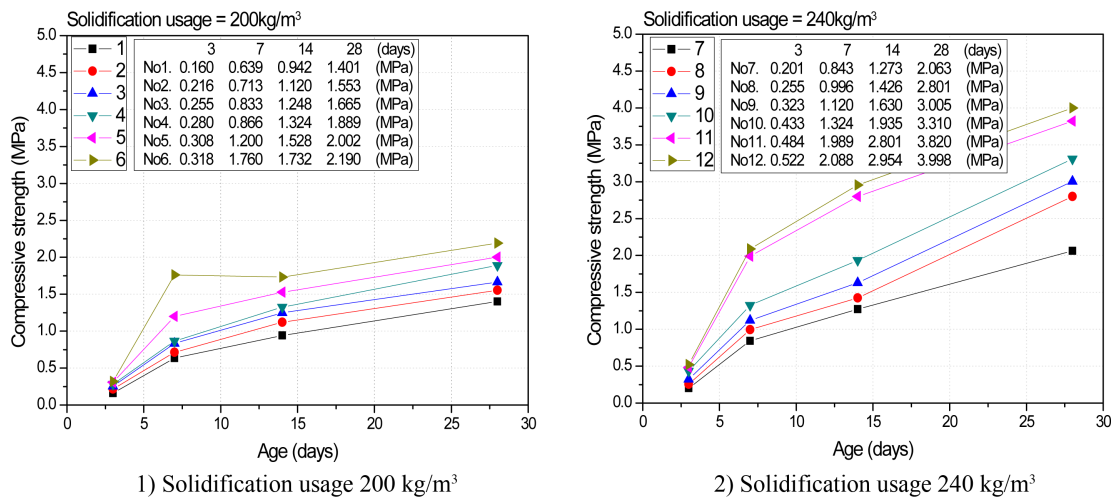


Fig. 3. Compressive strengths of solidifications.

240 kg/m³일 경우를 의미한다.

고로슬래그분말 사용량 증가에 따라 압축강도 발현 또한 증가하였으며, 플라이애시의 사용량은 감소할수록 압축강도 발현이 증가하였다. 강도발현 그래프의 추세에 따라 분석해보면 고화제 사용량이 200 kg/m³일 경우와 240 kg/m³일 경우 모두 강도차이가 균등한 편에 속하여 플라이애시 사용량 보다 고로슬래그 사용량이 강도발현에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 고로슬래그의 잠재수경성발현 및 자체 강도발현을 목적으로 포함된 석고와 고로슬래그의 비율은 1:3 비율이 적합한 것으로 나타났다.

또한, 추후 진행될 현장시험시공에서 28일 기준 목표 설계기준 강도가 2 MPa 정도인 것과 1.5정도의 안전율을 고려하였을 때, 9번 배합부터 28일 재령에서 3 MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 9번 배합의 플라이애시 사용비율이 10%로 낮은 점, 무수석고가 사용량이 많은 점(바인더 내 40%)을 감안하면, 배합표 상 10번에 해당하는 배합비율(고로슬래그 45, 석고 15, 플라이애시 30, 시멘트 10)이 연구의 목적인 CFBC플라이애시를 재활용하기에 보다 적합한 것으로 판단된다.

5.2. 내산성

50×50×50 mm 크기의 정육면체 몰드로 제작한 공시체는 28일 간 양생 후 5% 농도의 H₂SO₄ 용액에 침지시켜 내산성 시험을 진행하였으며, 그 결과는 Fig. 5 및 Table 7에 표현하였다.

침지 2주 후 OPC 고화제를 사용한 고화체는 육안으로도 시험체의 파괴 및 붕괴를 확인할 수 있었으며, 붕괴가 일어난 시험체의 가장 큰 덩어리를 제외한 부분을

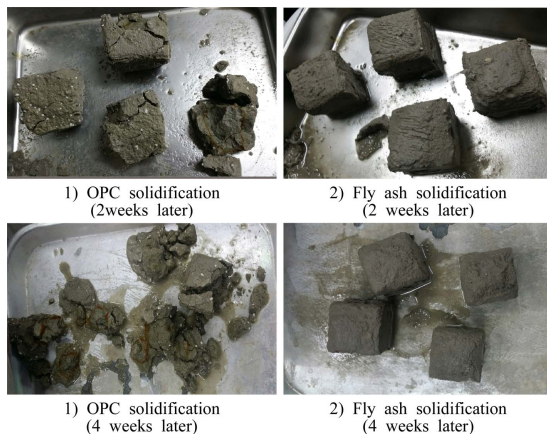


Fig. 4. Acid immersion test.

Table 7. Weight loss according to acid immersion test

ID	initial(g)	2 weeks later		4 weeks later	
		after(g)	loss(%)	after(g)	loss(%)
OPC solidification	218.0	145.6	33.2	collapsed	
Fly ash solidification	215.6	181.2	16.0	179.1	16.9

탈락물로 구분하였을 때 중량 손실률은 평균 33.2%로 나타났다. 플라이애시를 사용한 개발 고화제로 고화시킨 경우 표면의 탈락은 있었지만 붕괴는 일어나지 않아 중량손실률이 평균 16.0%로 OPC 고화제를 사용한 경우의 중량손실률에 비해 절반 이하 수준으로 나타났다.

침지 4주 후 OPC 고화제를 사용한 고화체는 붕괴가 더욱 진행되어 붕괴에 의한 탈락물과 고화체 물체를 구분하기 어려워 중량 측정이 불가능하였다. 플라이애시를 사용한 경우 육안으로 관찰하였을 때 2주 경과 후의 형태와 유사하게 일부 탈락물은 존재하지만 형태는 유지하고 있었으며, 중량 손실률은 16.9%로 나타났다.

6. 결 론

베트남 CFBC 발전소에서 발생하는 플라이애시를 지반고화제로서 재활용하기 위한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 베트남 CFBC 플라이애시는 부정형의 입형을 띠고 있으며, 주성분은 SiO₂, CaO, SO₃, Al₂O₃, 강열감량은 15.9%, 주 구성광물은 Quartz, Gypsum, Hematite, Graphite 등으로 분석되었다.

2) 실험에 사용된 현지 연약지반 분석결과, 모래와 세립토는 평균 14.27%, 85.73%, 액성한계는 34.90~88.40%, 소성한계는 18.00~51.80% 범위로, 고소성의 무기질 실트인 샘플이 가장 많은 것으로 나타났다.

3) 압축강도 시험결과 바인더로 사용된 무수석고와 고로슬래그 사용비율 1:1, 1:3 조건 중 1:3 비율이 강도 발현에 보다 효과적이었으며 고로슬래그의 사용량이 증가함에 따라 압축강도가 비례하여 증가하는 추세를 보였다.

4) 배합에 10~30% 사용된 플라이애시의 경우 사용량 증가에 따른 강도변화 추이가 크지 않았다. 이는 플라이애시의 성분분석 및 광물상 분석결과로 유추해 볼 때, 20.86%의 SiO₂ 및 16.67%의 SO₃성분이 석고상으로 존재하여 이 성분이 직접적으로는 자체 수화, 간접적으

로는 고로슬래그 및 시멘트와 함께 수화하여 강도형성에 기여하기 때문에 유추할 수 있다.

5) 고화재 사용량 200 kg/m³과 240 kg/m³ 조건을 비교하여 볼 때, 200 kg/m³ 조건 일부 배합에서 28일기준 강도 2 MPa를 달성하는 것이 가능하였지만, 안전을 및 플라이애시 사용량을 고려할 경우 고화재 사용량은 240 kg/m³, 바인더 배합비율은 고로슬래그 45, 석고 15, 플라이애시 30, 시멘트 10이 적합한 것으로 나타났다.

6) 고화재로서 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 시험체와 고로슬래그 및 플라이애시를 시멘트와 함께 사용한 시험체의 내화산염 비교시험결과 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 시험체는 침치 2주차부터 시험체의 붕괴가 시작되었으며, 4주차에서는 시험체의 본체와 탈락물을 구분하기 어려운 정도가 되었으나, 플라이애시를 사용한 배합의 시험체는 중량손실이 2주차 16.0%, 4주차 16.9%로 나타났지만 그 형태를 유지하고 있어 보통포틀랜드 시험체를 사용한 시험체보다 내산성이 뛰어난 것으로 확인되었다. 이는 석고가 주성분인 CFBC 플라이애시와 고로슬래그가 주성분인 시험체가 시멘트만을 사용한 시험체에 비해 수화물중 산과 쉽게 반응하는 수산화칼슘의 양이 적기 때문¹⁶⁾으로 판단된다.

이상의 결과 산업부산물인 CFBC 발전소 플라이애시와 고로슬래그를 지반고화재로 사용하여 적정수준의 강도를 확보하고 보통포틀랜드 시멘트를 활용한 시험체에 비해 높은 내산성을 확보하는 것이 가능하였다. 그러나 CFBC 발전소 플라이애시의 강열감량이 15%로 미연탄소 함량이 높고, 분말도가 상용재료인 시멘트나 고로슬래그 미분말의 절반 이하인 것을 감안할 때 분리선별 공정을 거쳐 플라이애시 내 미연탄소함량을 줄이고 분쇄공정을 통해 재료의 분말도를 향상시키면 지반고화재로서 활용에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진 연구사업 베트남 고칼슘 플라이애시 재활용을 위한 친환경 연약지반 처리공법 개발, 18CTAP-C110254-03의 지원에 의한 것임을 밝히고 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Kyongnam Min et al., 2017 : *Analysis of Physical and Chemical Properties of CFBC Fly Ash in Vietnam for Solidification*, J. of Engineering Geology, 27, pp.245-253.
2. Hyungu Cho, 2015 : *A Study on the RPS Implementatuin with Wood Pellet Mixed Combutuin for 340MW Circulating Fluidized Bed Boiler*, Gyeongsang National Univ, Korea.
3. Chul-Seoung Baek et al., 2015 : *A Review of Desulfurization Technology using Lime stone in Circulating Fluidized Bed Boiler Type Power Plant*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 24(5), pp.3-14.
4. Jeonggook Jang, Sangwoo Ji, and Jiwhan Ahn 2017 : *Utilization of Circulating Fluidized Bed Combustion Ash and Related Specifications for Mine Backfills*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 26(2), pp.71-79.
5. Maochieh Chi, Ran Huang, 2014 : *Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete*, Cement and Concrete Composites, 45, pp.148-156.
6. Zhiwei Zhang et al., 2012 : *Use of circulating fluidized bed combustion fly ash and slag in autoclaved brick*, Construction and Building Materials, 25, pp.109-116.
7. Xiang-guo Li et al., 2012 : *Utilization of modified CFBC desulfurization ash as admixture in blended cements: Physico-mechanical and hydration characteristics*, 102, pp.674-680.
8. Prinya Chindapasirt, Ubolluk Rattanasak, 2010 : *Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer*, Waste management 30, pp.667-672.
9. Chang-seon Shon et al., 2010 : *Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes in controlled low strength material (CLSM) mixture*, Construction and Building Materials, 24, pp.839-847.
10. William A. Telliard, 2001 : *Coal Remining-Best Management Practieces Guidance Manual*, U.S. Environmental Protection Agency, office of Water(4303), EPA-821-B-01-010.
11. ASTM C 114, *Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*.
12. KS L 5405:2016, *Fly ash*.
13. KS F 2324, *Standard method of classification of soils for engineering purposes*.
14. KS F 2328, *Testing method for compressive strength of molded soil-cement cylinders*.
15. S. A. Abo-El-enein et al., 1982 : *Kinetics and mechanism of slag cement hydration*, J. of Chemical Technology and Biotechnology, 32, pp.939-945.
16. Bo-Hyun Yoon, et al., 1997 : *An Experimental Study on the Acid-Resistance of Concrete*, J. of the Korea Concrete Institute, 9(5), pp.127-135.



김 기 석

• 현재 (주)세종이엔씨 설계팀 과장



이 재 원

• 현재 (주)세종이엔씨 상무이사



이 동 원

• 현재 (주)세종이엔씨 설계팀 이사



유 지 형

• 현재 (주)세종이엔씨 설계팀 주임



조영 수연 호양

• 현재 (주)세종이엔씨 설계팀 사원



Ha Minh

• 현재 CONINCO President



민 경 남

• 현재 (주)세종이엔씨 대표이사