

# 순환유동층보일러의 Fly Ash, Bottom Ash를 활용한 채움재 개발에 관한 기초연구

## A Basic Study on the Development of Backfill Material with Fly Ash and Bottom Ash of Circulating Fluid Bed Combustion

조용광<sup>1</sup> 이용무<sup>1</sup> 남성영<sup>1</sup> 김춘식<sup>1</sup> 서신석<sup>1</sup> 조성현<sup>1</sup> 이형우<sup>1</sup> 안지환<sup>2\*</sup>

Cho, Yong-Kwang<sup>1</sup> Lee, Yong-Mu<sup>1</sup> Nam, Seong-Young<sup>1</sup> Kim, Chun-Sik<sup>1</sup> Seo, Shin-Seok<sup>1</sup> Jo, Sung-Hyun<sup>1</sup> Lee, Hyung-Woo<sup>1</sup> Ahn, Ji-Whan<sup>2\*</sup>

*Technical Center, HANIL CEMENT Co.Ltd., Daejeon, 34361, Korea<sup>1</sup>*

*Center for Carbon Mineralization, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, 34132, Korea<sup>2</sup>*

### Abstract

In this study, the Controlled Low Strength Material (CLSM) was investigated to utilize the bottom ash and fly ash generated in the Circulating Fluidized Bed Combustor (CFBC). It was confirmed that the CFBC fly ash (CFBC-F) and CFBC bottom ash (CFBC-B) had an irregular particle shape through SEM measurement. According to the results of the hazard analysis, it was also confirmed that they were environmentally safe. In the case of mixing with CFBC-F, the unit quantity was increased. Regarding the rate of change of length, shrinkage in the range of -0.05~0.50% occurred in the air dry curing condition and expansion in the range of 0.1~0.6% in the sealed curing condition. Compressive strength was increased in the sealed curing condition compared to the air dry curing condition because there was enough moisture for hydration reaction in the long term. Therefore, the results of this study are likely be used as basic research data of mine filler materials.

Keywords : coal ash, fly ash, bottom ash, circulating fluid bed combustion, backfill, waste mine

### 1. 서 론

산업이 발전함에 따라 석탄재 발생량은 계속적으로 증가하여 2005년 이후에는 연간 5천만 톤 이상의 석탄이 소비될 것으로 예상되어 석탄재 배출량도 증가할 것으로 전망된다[1,2]. 따라서, 석탄재를 자원의 절약 및 환경 보전이라는 측면에서 유용하게 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

석탄재는 미분탄 연소방식(Pulverized coal Combustion, 이하 “PC”라 명함)과 순환유동층 방식(Circulating Fluidized Bed

Combustion, 이하 “CFBC”라 명함)에서 발생하는 석탄재로 구분할 수 있다. PC방식의 발전소에서 발생하는 석탄재(Fly ash(PC-F))는 콘크리트 혼화재 또는 시멘트 연료로 재활용되고 있다[3].

그러나 CFBC보일러 발전소에서 발생하는 석탄재는 탈황 과정에서 투입되는 석회석에 의해 CaO, SO<sub>3</sub>성분이 증가하여 이를 콘크리트에 적용할 경우 free-CaO에 의한 급열과 균열발생, SO<sub>3</sub>에 의한 부피팽창 증대의 우려가 있어 이를 활용하는데 있어 제한이 되어 왔다[4].

국내 CFBC 보일러 발전소에서 배출되는 비산재는 연간 50만톤 정도로 추정되며, 바닥재를 포함할 경우 그 수치는 더 커질 것으로 보고되고 있으며, CFBC 보일러 발전소의 신규 건설로 인해 앞으로 배출량은 더욱 증가할 것으로 예상된다[5]. 그러나 CFBC 보일러 석탄재 일부는 중금속이 포함되어 있어 활용하지 못하고 매립 처분되고 있어 처리에 따른

Received : September 1, 2017

Revision received : October 31, 2017

Accepted : December 12, 2017

\* Corresponding author : Ahn, Ji-Whan

[Tel: 82-42-868-3573, E-mail: ahnjw@kigam.re.kr]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

막대한 비용의 발생과 환경오염 문제를 야기 시키고 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 최근 CFBC 석탄재의 활용을 극대화시키기 위한 방안으로 2016년 2월 CFBC 석탄재를 콘크리트 혼화재료로 사용할 수 있도록 KS L 5405 “플라이 애시”규정이 개정되었다. 또한, 한국지질자원연구원에서는 CFBC 석탄재를 탄산화 시키는 연구를 통하여 CFBC 석탄재의 중금속을 고정화 시켜 대량으로 활용할 수 있는 방안을 마련하였다. 이렇게 CFBC 석탄재를 활용하기 위한 정책과 중금속 고정화 기술의 도입으로 최근에는 탄산화된 CFBC 석탄재를 대량으로 활용하고자 휴·폐광산 채움재에 대한 연구가 이루어지고 있다[6].

국내에는 가행광산과 휴·폐광산을 합하여 5,000개 이상의 광산이 있으며 그 중 지하 공동(Cavity)이 존재하는 광산은 2,000개 이상으로 추정되고 있다[7]. 공동의 존재는 지반 침하 및 붕락, 산성 침출수에 의한 토양오염, 지하수오염 등의 광범위한 광해를 일으켜 경제·사회적인 피해를 발생시키고 있다[8].

이에 본 연구에서는 CFBC보일러에서 배출되는 석탄재를 활용하기 위해 탄산화시켜 제조한 비산재(이하 “CFBC-F”라 명함)와 바닥재(이하 “CFBC-B”라 명함)를 활용하여 지반안정재 및 휴·폐광산의 채움재로 사용되는 저장도 고유동 채움재의 물성을 확인하는데 목적이 있다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험인자 및 수준

저강도 고유동 채움재를 휴·폐광산에 적용할 경우 적용 분야에 따라 장래에 굴착이 필요할 수 있다. 그러므로 굴착성을 나타내는 수치로 압축강도가 사용되는데, 인력에 의한 굴착은 0.8MPa이하, 백호와 같은 장비에 의한 굴착은 0.7~1.4MPa정도가 요구된다. 그러나 필러로 잔골재나 PC-F를 사용한 저장도 고유동 채움재의 경우 2.0MPa의 강도에서 백호로 굴착이 가능하다[9].

본 연구에서는 인력이나 백호로 굴착이 가능한 강도 2.2MPa이상을 목표 강도로 설정하였으며, 재료분리현상이 나타나지 않는 범위 내에서 목표 flow (300±10mm)을 얻는데 필요한 단위수량을 설정하는 방법으로 진행되었다. 또한 가장 경제적인 배합을 찾자 시멘트와 CFBC-F의 사용량을 조절하였고, CFBC-B, CSA 및 감수제는 고정하였다. 이에 대한 실험인자와 평가항목은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experiment factor and tests

Experiment Factor	OPC (%)	10.0, 9.0, 7.0, 6.0
	CFBC-F (%)	90, 60
	CFBC-B (%)	30
	CSA (%)	1.0
	Super plasticizer (%)	0.25
Tests	Curing Method	Air dry, Sealing
	Flow (mm)	Fresh backfill
	Length change ratio (%)	
	Compressive strength (MPa)	7, 28

### 2.2 시편의 제작 및 양생방법

본 연구에서 배합은 질량배합으로 실시하였고, 채움재의 혼합과 시험체 제작은 KS L ISO 679 “시멘트의 강도시험방법”의 규정에 따라 실시하였다. 시험체 양생은 7일간 양생실에서 양생한 후 탈형과 동시에 20 ± 2 °C에서 기건양생 및 밀봉양생을 실시하였고, 배합표는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Mixture proportion of backfill material

Specimen	W/R (%)	Binder (%)					Super-plasticizer (%)
		OPC	CSA <sup>1)</sup>	PC-F/A	CFBC-F	CFBC-B	
Plain	34	10	0	90	0	0	
CFBC-1	98	9	1	0	90	0	
CFBC-2	85	9	1	0	60	30	0.25
CFBC-3	93	7	1	0	62	30	
CFBC-4	94	6	1	0	63	30	

1) C S A : Calcium SulfoAluminate

## 3. 사용재료의 특성

### 3.1 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트는 H사의 1종 포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였고, 시멘트의 화학적 성분과 물리적 특성에 관한 내용은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Chemical and physical properties of cement

Chemical Composition	Composition Content (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig.loss
			21.95	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11
Physical Properties	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Setting Time (min)		Compressive Strength(MPa)			
			Initial Set	Final Set	3d	7d	28d	
			3,456	3.15	230	370	29.1	42.5

### 3.2 CFBC

본 연구에서 사용된 CFBC-F, CFBC-B는 Y 지역 소재 화력발전소에서 발생하는 것을 탄산화 반응을 통해 CO<sub>2</sub>를 고정화한 것을 활용하였다.

#### 3.2.1 화학적 특성

본 연구에 사용된 CFBC-석탄재와 PC-F의 화학분석 결과는 Table 4에 나타내었다. CFBC-석탄재인 CFBC-F, CFBC-B의 경우 PC-F와 비교하여 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 같은 주요광물 함량이 상대적으로 낮은편이나 CaO 및 SO<sub>3</sub> 함량이 높게 나타났고 PC-F에는 존재하지 않는 Ig와 TiO<sub>2</sub> 함량이 존재하는 것을 확인하였다.

Table 4. Chemical composition of CFBC-F, CFBC-B and PC-F

Type	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Ig (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)
CFBC-F	10.6	32.4	17.3	21.3	8.94	2.44	0.5	4.56
CFBC-B	5.74	46.7	14.0	9.9	2.7	1.41	0.2	18.3
PC-F	7.5	6.3	57.8	-	21.8	1.5	-	1.8

#### 3.2.2 XRD 분석

Figure 1, 2는 CFBC-F, CFBC-B의 광물조성을 분석하기 위해 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD)을 행하였다.

CO<sub>2</sub>를 고정화 시키는 방법은 가속탄산화 방식으로 탄산염의 침전 반응을 통해 CO<sub>2</sub>고정화를 통하여 calcium, magnesium 및 metal oxide와 같은 물질이 CO<sub>2</sub>와의 반응을 통해 안정화되어 용해되지 않는 탄산염이 생성되는 메커니즘을 가지고 있다. 탄산화 반응은 이온을 기초로 하여 Calcite(CaCO<sub>3</sub>)를 생성하는 것을 의미한다. XRD 분석결과 전반적으로 결정질의 SiO<sub>2</sub>의 함량이 높은 것을 확인할 수 있었으며 또한 CaCO<sub>3</sub> 함량이 높은 것을 확인하였다. 이러한 결과는 CFBC-F, CFBC-B에 존재하는 CaO가 CO<sub>2</sub>와 반응함으로 인해 반응 생성물인 CaCO<sub>3</sub>의 함량이 높은 것으로 판단된다.

#### 3.2.3 비표면적 및 입자형상 분석

Figure 3는 CFBC-F, CFBC-B 및 PC-F의 비표면적을 확인하기 위해 BET분석기(TriStar3000, Micromeritics, Norcross, USA)를 이용하여 확인하였다. 비표면적 분석결과 CFBC-F의 비표면적이 29.95 m<sup>2</sup>/g로 가장 큰 것을 확인하였으며, CFBC-B 경우 3.45 m<sup>2</sup>/g 이며, PC-F의 경우 4.12 m<sup>2</sup>/g으로 비산재 대비 상대적으로 비표면적이 작은

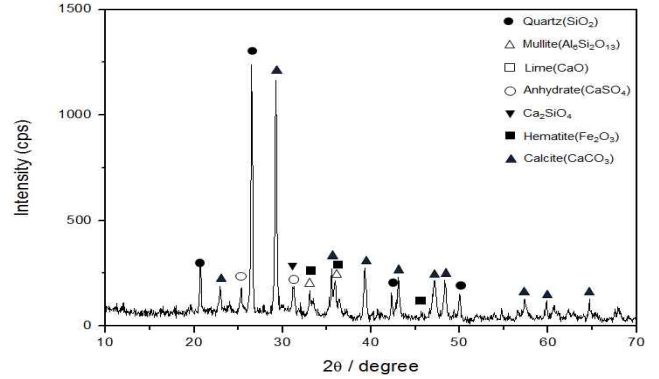


Figure 1. Result XRD of CFBC-F

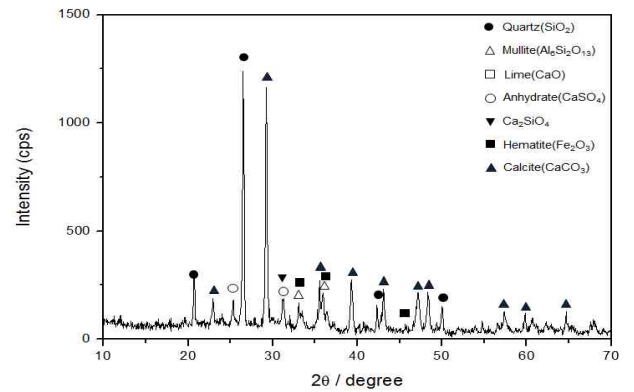


Figure 2. Result XRD of CFBC-B

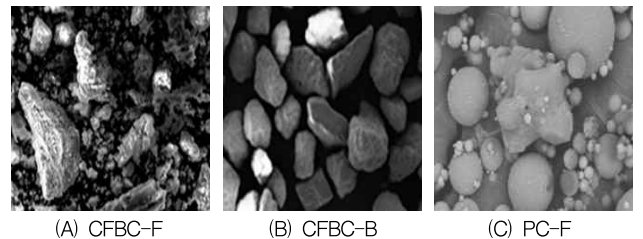


Figure 3. Specific surface area of CFBC-F, CFBC-B and PC-F

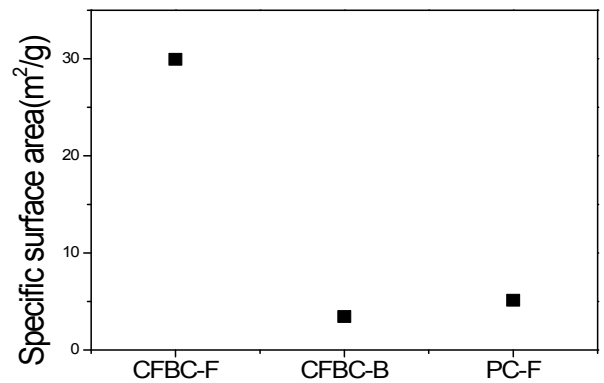


Figure 4. SEM image of CFBC-F(A), CFBC-B(B) and PC-F(C)

것을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 CFBC-F의 경우 비표면적이 크므로 인해 채움재로 적용시 PC-F보다 단위수량이 증가할 것으로 예상된다.

Figure 4는 CFBC-F와 CFBC-B의 표면형상을 분석하기 위하여 SEM을 촬영한 것으로 CFBC-F, CFBC-B 모두 불균일하고 거친 입자형상을 나타내고 있다. 하지만 PC-F의 경우 구형의 동일한 입자형상을 가지고 있는 것을 확인하였다.

### 3.2.4 유해성 분석

유동층보일러에서 발생한 부산물인 fly ash와 bottom ash를 CO<sub>2</sub>로 고정화시킨 CFBC-F, CFBC-B를 휴·폐광산 채움재로 활용하기 위해서는 우선적으로 CFBC-F, CFBC-B 자체로부터 용출되는 물질에 의해 채움재 주변 환경을 오염시킬 가능성이 없어야 한다. 따라서 본 연구에서는 폐기물공정시험법에 의해 유해물질 용출량에 대한 시험을 실시하였고, 그 결과는 Table 5에 나타내었다.

CFBC-F, CFBC-B의 유해물질 분석결과 CFBC-B에서 Cr만 0.02mg/L으로 미량이 용출되었으나 이는 용출량 허용기준 이하였고, 기타항목에서는 일체의 유해물질이 나타나지 않아 휴·폐광산 채움재 재료로 활용하고자 할 경우 환경적인 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

Table 5. Elution of harmful substance of CFBC-F, CFBC-B

Type	CFBC-F			CFBC-B		
	Unit	Result of test	Acceptance criteria	Unit	Result of test	Acceptance criteria
As		0.00	0.01		0.00	0.01
Cd		0.00	0.01		0.00	0.01
Cr(VI)	(mg/L)	0.00	0.05	(mg/L)	0.02	0.05
Hg		0.00	0.0005		0.00	0.0005
Pb		0.00	0.01		0.00	0.01

## 3.3 시험방법

### 3.3.1 유동성

채움재의 유동성을 확인하기 위해 본 연구에서는 ACI Committee229에서 규정하고 있는 방법으로 Figure 5과 같이 원형실린더 몰드를 사용하였으며, 몰드를 들어 올린 다음 30초 후 퍼진 지름의 4방향으로 측정한 후 평균을 구하여 유동성을 확인하였다.

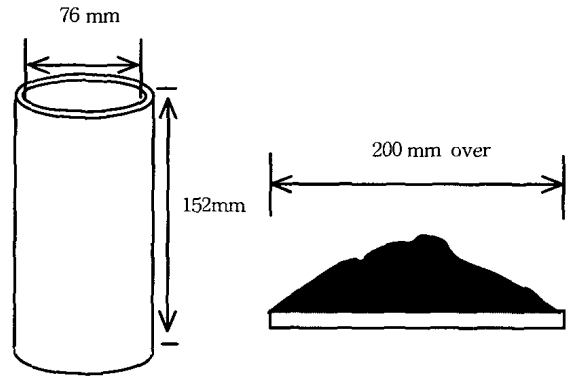


Figure 5. Flow test set-up

### 3.3.2 길이변화율

길이변화율 측정용 공시체는 KS L 4151 “수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험법에 준한 40×40×160mm의 몰드를 제작하였으며, KS F 2424 기준에 의거하여, 콘택트 게이지를 통해 탈형 후 3, 7, 14, 21, 28일을 기준으로 측정하여 건조수축변화 및 팽창성을 확인하였다.

### 3.3.3 압축강도

압축강도 평가용 공시체는 KS L 4151에 준한 40×40×160mm의 몰드를 제작하였으며 측정은 KS L ISO 679“시멘트의 강도 시험 방법”의 기준에 의거하여 재령 7일, 28일의 압축강도를 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 유동성

저강도 고유동 채움재의 유동성은 휴·폐광산의 지하 공동구에 적용할 경우 시공성에 영향을 주므로 채움재의 가장 중요한 성질중의 하나이다. Figure 6은 PC-F를 혼입입한 Plain과 CFBC-F, CFBC-B를 혼입한 저강도 고유동 채움재의 flow를 확인하였다. 또한 300±20mm의 flow 얻는데 필요한 단위수량의 도출결과를 나타내었다. flow의 경우 Plain 310mm와 비교하여 CFBC-F와 CFBC-B가 혼입된 배합에서 298, 312, 301, 310mm로 측정되어 유사한 경향이 나타났고 목표 flow에 만족하였다.

반면에 단위수량의 경우 Plain과 비교하여 CFBC-1은 64%, CFBC-2는 51%, CFBC-3은 59%, CFBC-4는 60%로 각각 증가하는 경향이 나타나 CFBC-F와 CFBC-B를 혼입하여 사용할 경우 작업성에 맞는 유동성을 확보하기 위

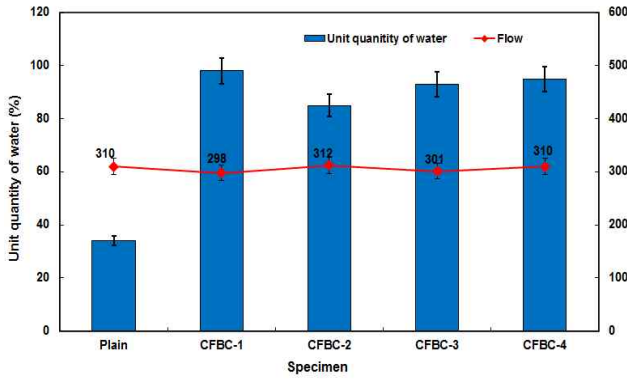


Figure 6. Water ratio and flow of backfill

해서 많은 양의 단위수량이 필요한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Figure 4를 통해 확인하였듯이 Plain의 주재료인 PC-F의 경우 구형의 입자형상을 가지고 있는 것과 달리 CFBF석탄재는 부정형의 형상을 가지고 있고, 미연탄소분에 의하여 흡수하는 물의 양이 많은 것으로 판단된다 [10,11].

#### 4.2 압축강도

압축강도 측정결과는 Figure 7, 8에 각각 나타내었다. 일반적인 모르타르의 압축강도는 시멘트 페이스트 강도, 페이스트-골재간의 부착강도, 물시멘트비 이외에도 골재의 강도, 종류, 공극률, 사용량 등에 따라 영향을 받는다[12]. 채움재의 압축강도 측정결과는 밀봉양생한 경우가 기건양생한 경우보다 압축강도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 밀봉한 경우 장기적으로 수화반응을 진행할 수분이 충분히 남아 있기 때문에 기건양생 대비 압축강도가 증가한 것으로 판단된다. 기건양생한 경우에는 Plain의 초기압축강도가 다른 배합대비 18~49% 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 Plain의 단위수량이 34%로 다른 배합보다 적어 공극률이 적으며, 주재료인 PC-F의 경우 초기에 포졸란 반응이 활성화로 압축강도가 증가한 것으로 판단된다[13]. CFBC-1의 배합 경우에는 압축강도가 다른 배합에 비해 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 CFBC-2,3,4배합과 달리 골재 역할을 하는 CFBC-B와 같은 재료가 없으며 이로 인해 단위수량 증가에 따른 공극률 증가로 압축강도가 다른 배합대비 감소한 것으로 판단된다. CFBC-2,3,4 배합의 경우 시멘트 함량이 가장 높은 CFBC-2의 압축강도가 가장 큰 것을 확인하였으며, 밀봉양생 조건에서는 Plain보다도 28일 압축강도가 더 증가

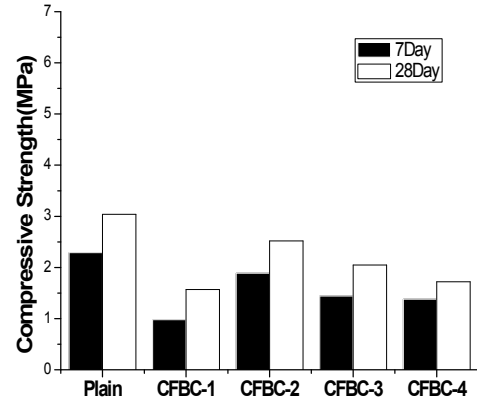


Figure 7. Compressive strength of backfill (air dry curing)

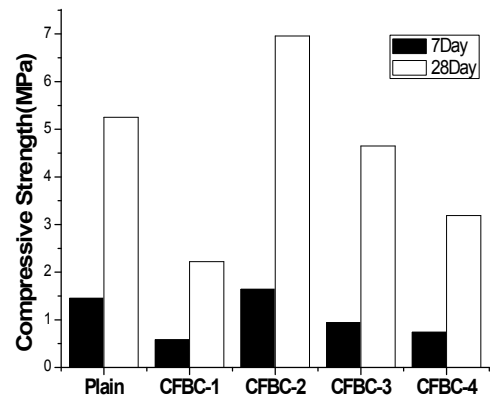


Figure 8. Compressive strength of backfill (seal curing)

한 것을 확인하였다. 이는 CFBC-1,3,4 대비 단위수량이 적으며 OPC의 충분한 함량으로 압축강도가 높은 것으로 판단되어 진다. CFBC-F,B를 통한 강도 증진은 함유되어 있는  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  성분으로 인해 칼슘실리케이트 수화반응시 생성되는  $\text{Ca(OH)}_2$ 와의 포졸란 반응을 활성화 시켜 강도증진에 기여하는 C-S-H 생성에 의해 장기 강도가 증가한 것으로 판단된다. 수화반응이 진행되면  $\text{Ca(OH)}_2$ 는  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $2\text{OH}^-$ 로 해리되며  $2\text{OH}^-$ 는  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Si}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  이온의 용출을 가속화하여 C-S-H 및 C-A-H 수화물의 생성을 촉진한다. 또한  $\text{CaSO}_4$ 는  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 로 서서히 해리되며  $\text{Ca}^{2+}$ 는 다시  $\text{Si}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  이온의 용출을 가속화하고  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 ettringite( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )수화체 생성을 통해 강도발현에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[14]. Plain과 달리 CFBC-2~4의 경우에는 높은 단위수량에도 불구하고 CFBC-B가 채움재의 골재로서 강도보강제 역할을 해줌으로 인해 압축강도가 보상된 것으로 판단된다.

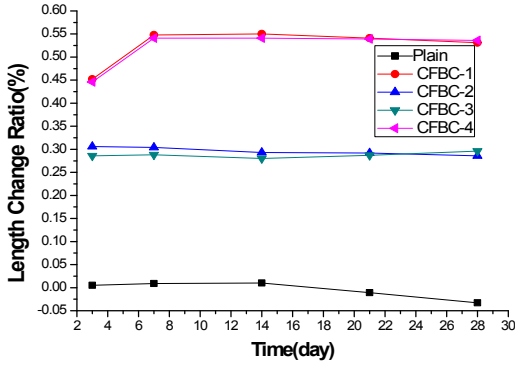


Figure 9. Length change ratio of backfill (air dry curing)

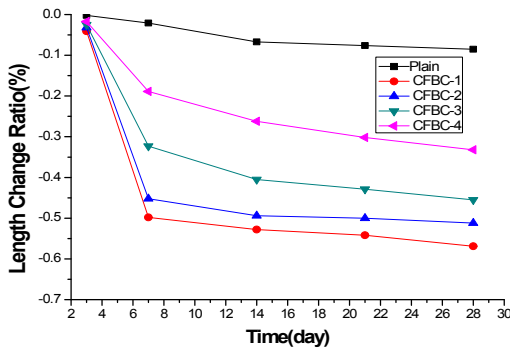


Figure 10. Length change ratio of backfill (seal curing)

### 4.3 길이변화율

길이변화율의 건조수축은 상대습도가 높아짐에 따라 감소한다고 보고되고 있다[15].

Figure 9 및 Figure 10은 채움재의 길이변화율 시험결과를 나타낸 것으로 기건양생 조건에서 -0.05~-0.50%범위의 수축이 발생하였으나 밀봉양생 조건에서는 0.1~0.6%의 범위 내에서 팽창이 발생하였다. 기건양생한 조건하에서는 CFBC-1~4의 경우 팽창제 역할을 하는 CSA(Calcium Sulfo Aluminate,  $3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$ )가 혼입 되었음에도 불구하고 수축이 Plain 대비 크게 나타난 것을 확인하였다. 이러한 결과는 CFBC-1~4의 경우 Plain 대비 단위수량이 40% 이상 증가함에 따라 수분이 증발이 많아지고 이로 인해 생성된 공극률 증가로 수축이 크게 일어난 것으로 판단된다. CFBC-4의 경우 수축이 CFBC-1~3대비 작은 것을 확인 할 수 있는데 이러한 결과는 OPC함량이 상대적으로 적은 CFBC-4의 수화반응 활성이 상대적으로 떨어져 생긴 결과로 판단된다. 그러나 휴 · 폐광산 지하공동구 조건과 유사한 밀봉양생 조건에서는 경화 후 수분의 증발속도가 느리고 CFBC-1~4의 경우 85% 이상의 높은 단위수량과 팽창제

로 혼입된 CSA의 역할로 인해 팽창한 것으로 판단된다. CSA의 팽창메커니즘은 CaO의 수화반응에 의해 수산화칼슘 결정이 생성되고 이 결정성장이 팽창에 기여하지만 아우인(Hauyne)과 반응하여 알루미늄산석회수화물과의 고용체 형성에 의해 감소되며 이어서 생성된 침상결정(에트링가이트)에 의해 팽창이 발생된다고 보고되고 있다[16]. CFBC-1,4의 경우 0.6%로 팽창이 크게 일어났으며, 이러한 이유는 상대적으로 높은 CFBC-F의 함량에 의한 것으로 CFBC-F의 화학 조성 분석결과에서도 확인 할 수 있듯이  $SO_3$ 역할로 인해 팽창이 상대적으로 크게 일어난 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 유동층보일러(CFBC)에서 발생하는 CFBC 비산재 및 바닥재를 활용하여 채굴적 공간에 맞는 저장도 고유동 채움재의 물성을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비표면적 분석결과 CFBC-F의 비표면적이  $29.95m^2/g$ 로 가장 큰 것을 확인하였으며, 바닥재의 경우  $3.45m^2/g$ 이며, PC-F의 경우  $4.12m^2/g$ 으로 CFBC-F 대비 상대적으로 비표면적이 작은 것을 확인하였다
- 2) CFBC-F, CFBC-B의 유해물질 용출 분석결과 CFBC-B에서 Cr만  $0.02mg/L$ 로 미량 용출 되었으나 용출허용량 기준 이하였으며, 기타항목에서는 일체의 유해물질이 나타나지 않아 채움재의 재료로 활용할 경우 환경적인 안정성을 확보한 것을 확인하였다.
- 3) 단위수량의 경우 Plain과 비교하여 CFBC-1은 64%, CFBC-2는 51%, CFBC-3은 59%, CFBC-4는 60%로 각각 증가하는 경향이 나타나 CFBC-F와 CFBC-B를 혼입하여 사용할 경우 작업성에 맞는 유동성을 확보하기 위해서 많은 양의 단위수량이 필요한 것을 확인하였다.
- 4) 압축강도의 경우 밀봉양생한 경우가 장기적으로 수화반응을 진행할 수 있는 충분한 수분이 남아 있어 기건양생 대비 압축강도가 증가 하는 것을 확인하였으며, 채움재의 공극률 및 각각의 재료의 특성에 따라서 압축강도 차이가 발생한 것을 확인하였다.
- 5) 길이변화율의 경우 기건양생에서 -0.05~-0.50%범위의 수축이 발생하였으나 밀봉양생에서는 0.1~0.6%의 범위 내에서 팽창이 발생하는 것을 확인하였다. 기건양생에서는 CFBC-1~4의 경우 공극률 증가로 인해 건조수축이 Plain 대비 크게 나타난 것을 확인하였

다. 하지만 밀봉양생에서는 수분증발이 느리고 CSA에 의해 생성된 ettringite로 인해 CFBC-1~4의 경우에는 팽창성이 나타난 것을 확인하였다.

본 연구결과를 바탕으로 저강도 고유동성 채움재를 개발하는데 있어 기초 자료로 활용 및 응용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 요 약

본 연구는 순환유동층보일러(CFBC)에서 발생하는 바닥재와 비산재를 활용한 저강도 고유동 채움재를 개발하였다. CFBC비산재(CFBC-F)와 CFBC바닥재(CFBC-B)는 불규칙한 입자 형상을 가지고 있는 것과 유해성 분석결과 환경적으로 안정한 것을 확인하였다. CFBC-F가 첨가될 경우 단위수량이 증가하였다. 길이변화율은 기건양생 조건에서는 -0.05~-0.50% 범위의 수축이 발생하였으며, 밀봉양생 조건에서는 0.1~0.6%의 범위의 팽창이 발생하였다. 압축강도는 밀봉양생 조건에서는 장기적으로 수화반응을 진행할 수 있는 충분한 수분이 남아 있어 기건양생 조건 대비 압축강도가 증가 하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 저강도 고유동 채움재 개발 및 CFBC 석탄재 활용에 있어 도움이 될 것이라 생각된다.

**키워드** : 석탄재, 비산재, 바닥재, 순환유동층보일러, 채움재, 폐광산

## Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea(No. 20141010101880).

## References

1. Lee SJ, Kang NH, Chon CM, Jou HT, Grinding effects of coal-fired pond ash on compressive strength of geopolymers, Journal of Korean Institute of Resources Recycling, 2014 Nov;23(6):3-11.
2. Cho HY, Hong WP, Rho JS, Chung SY, Kim MH, The mortar properties of portland cements blended with modified coal ashes,

- Journal of the Korean Ceramic Society, 1990 Apr;27(7):833-40.
3. Manz OE, Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products, Fuel, 1997 Jun;76(8): 691-6.
4. Sheng G, Zhai J, Li Q, Li F, Utilization of fly ash coming from a CFBC boiler cofiring coal and petroleum coke on portland cement, Fuel, 2007 Nov;86(26):25-31.
5. Jang JK, Ji SW, Ahn JW, Utilization of circulating fluidized bed combustion ash and related specifications for mine backfills, Journal of Korean Institute of Resources Recycling, 2017 Feb;26(2):71-9.
6. Lin KL, Chang CT, Leaching characteristics of slag from the melting treatment of municipal solid waste incinerator ash, Journal of Hazardous Materials, 2006 Jul;135(1):296-302.
7. Kim SL, Park JH, Research and development trends for mine subsidence prevention technology in Korea, Tunnel & Underground Space, 2015;25(5):408-16.
8. Sreenivasarao K, Warren GW, McKinley MD, Hydrometallurgical G, Treatment of municipal solid waste fly-ash for simultaneous detoxification and metal recovery, Journal of Environmental Science and Health, 1997 Apr;32(4):1225-45.
9. Lin KL, Wang KS, Lin CH, The hydration of pastes containing municipal solid waste incinerator fly ash slag, Journal of Hazardous Materials, 2004 Jun;109(1):173-81.
10. Kim SC, Park DK, Yoog KC, Characteristic of cementitious mortar using high volume of recycled fine aggregate, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2016 Sep;4(3):235-42.
11. Kim YS, Kim KK, Park SJ, Kim JS, Drying shrinkage characteristics of the concrete incorporated shrinkage reducing agent according to mixed proportion of concrete, Journal Korea Institute Building Construction, 2017 Jun;17(3):245-52.
12. Moon HY, Yu JH, A study on the fundamental properties of mortar with pig-iron steel slag fine aggregate, KSCE Journal of Civil Engineering, 2000 Oct;(1):403-6.
13. Choi YW, Park MS, Choi BK, Oh SR, The properties of strength development of high volume fly ash concrete with reduction of unit water content, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2014 Mar;2(1):46-51.
14. Ruy JH, Jeon, HK, Analysis of mechanical properties and micro structure of fly ash based alkali-activated mortar, Journal of the Korea Institute of the Resources Recycling, 2012 May;21(3):27-38.
15. Yang KH, Seo EA, Evaluation of shrinkage strain of alkali-activated slag concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, 2013 Dec;25(6):593-9.
16. Won JP, Lee YS, Properties of controlled low-strength material containing bottom ash, Journal of the Korea Concrete Institute, 2001 Jun;13(3):294-300.