

ORIGINAL ARTICLE

CO₂ 고정화된 CFBC 석탄재를 활용한 저강도 고유동 채움재의 특성평가

조용광 · 남성영 · 이용무 · 김춘식 · 서신석 · 조성현 · 이형우 · 안지환¹⁾*

한일시멘트 테크니컬센터, ¹⁾한국지질자원연구원 탄소광물화사업단

Characterization of Controlled Low-Strength Materials Utilizing CO₂-Solidified CFBC Coal Ash

Yong-Kwang Cho, Seong-Young Nam, Yong-Mu Lee, Chun-Sik Kim,
Shin-Seok Seo, Sung-Hyun Jo, Hyung-Woo Lee, Ji-Whan Ahn¹⁾*

Technical Center, HANIL CEMENT Co.Ltd., Daejeon 34361, Korea

¹⁾Center for Carbon Mineralization, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Korea

Abstract

A Controlled Low-Strength Materials (CLSM) is suitable for mine backfilling because it does not require compaction owing to its high fluidity and can be installed quickly. Therefore, a CLSM utilizing CO₂-solidified Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) coal ash was developed and its properties were investigated, since CO₂-solidification of CFBC coal ash can inhibit exudation of heavy metals. The chemical composition and specific surface area of Pulverized coal Combustion fly ash and CFBC fly ash were analyzed. The water ratio, compressive strength and length change ratio of CLSM were confirmed. The water ratios differed with the specific surface area of the CLSM. It was confirmed that the porosity of CLSM affected its compressive strength and length change ratio.

Key words : Coal ash, Fly ash, Bottom ash, Backfill, Waste mine, Material

1. 서론

산업이 발전함에 따라 다양한 산업분야에서 많은 산업부산물들이 발생되고 있다(Kong et al., 2010). 대표적인 산업부산물로는 화력발전소에서 석탄연소 후 발생하는 석탄재(coal ash), 탈황공정에서 배연탈황 처리 후 발생하는 탈황석고, 제철산업에서 발생하는 고로

슬래그(blast furnace slag), 제강슬래그(steel making slag) 등이 있다. 이중에서 화력발전소에서 발생하는 석탄재는 비산재(Fly ash)와 바닥재(Bottom ash)로 나누어지며 발생량의 70% 이상이 비산재로 알려져 있다(Lim et al., 2016). 석탄재는 시멘트 원료, 레미콘 혼화재, 성·복토용 등으로 일부 재활용되고 있다. 화력발전소의 석탄재 특성은 연소방식에 따라 달라지는데,

Received 26 September 2017; Revised 20 October, 2017;

Accepted 24 October, 2017

*Corresponding author: Ji-Whan Ahn, Center for Carbon Mineralization, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Korea.
Phone : +82-42-868-3573
E-mail : ahnjw@kigam.re.kr

The Korean Environmental Sciences Society. 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.

미분탄 연소방식(Pulverized coal Combustion, PC)과 순환유동층보일러(Circulating Fluidized Bed Combustion, CFBC)에서 발생하는 석탄재로 구분할 수 있다(Lee et al., 2011). CFBC보일러의 경우 고체 입자를 유동화하여 연소하는 방식으로 저품위 석탄 등의 다양한 가연성 물질에 대해 광범위한 연소 사용이 가능하며 1,300 ~ 1,600 °C 연소되는 PC보일러 대비 약 900 °C의 낮은 연소로 질소산화물 생성을 억제할 수 있는 장점이 있어 청정 화력발전으로 인식되고 있으며 그 결과 전 세계에서 차지하는 비율이 점차 증가하는 추세이다(Jang et al., 2017). 하지만 대부분의 재활용 되는 석탄재는 PC보일러에서 발생하는 석탄재이며, CFBC보일러에서 발생하는 석탄재는 탈황과정에서 투입되는 석회석에 의해 CaO, SO₃ 성분이 증가하여 이를 건축재료에 적용할 경우 free-CaO에 의한 급열과 균열발생, 과량의 SO₃에 의한 부패팽창 증대의 우려가 있어 이를 활용하는데 제한되어 왔다(Jang et al., 2016). 따라서 CFBC석탄재를 효과적으로 활용하는 방안에 대한 연구가 진행 중에 있으며 한국지질자원연구원에서는 CFBC석탄재를 가속탄산화(CO₂고정화)시켜 중금속의 용출을 억제함으로써 인체 환경적인 안정성을 확보하는 방안을 마련하고 있다(Nam et al., 2012). CFBC석탄재를 적용할 수 있는 방안으로 광산에 적용되는 저장도 고유동화 채움재(Controlled Low Strength Materials, CLSM)가 검토되고 있으며 CFBC 석탄재를 활용할 수 있는 유망한 기술 분야로 대두되고 있다. CLSM은 높은 유동성으로 인해 다짐작업이 요구되지 않고 신속한 타설이 가능하므로 광산채움재로서 적합한 특성을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다(Ryu et al., 2008; Han et al., 2016). 국내에는 가형 광산과 휴·폐광산을 합하여 약 5,000개 이상의 광산이 존재하며 이 중 지하 공동이 존재하는 광산은 약 2,000개 이상으로 추정되고 있다(Kim et al., 2015). 이러한 지하 공동의 존재는 광산의 지반침하로 인한 안전사고를 일으킬 우려가 있으며, 산성배수와 침출수에 의한 토양오염 등의 환경적인 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 폐광산의 지반침하, 토양오염 등의 문제를 방지하기 위해 CLSM 개발을 연구하였으며 환경적인 안정성을 위해 CFBC보일러에서 배출되는 석탄재를 탄산화 시켜 제조한 비산재

(“CFBC-F” 라 명함)와 바닥재(“CFBC-B”라 명함)를 활용한 것과 PC석탄재(“PC-F” 라 명함)를 주재료로 사용한 것을 활용하여 제조한 CLSM의 물성평가를 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험 재료

CFBC 비산재와 바닥재는 Y지역의 화력발전소에서 발생하는 것을 탄산화 시켜 사용하였으며, PC비산재는 A지역의 화력발전소에서 발생하는 것을 사용하였다. 시멘트의 수화반응을 통한 CLSM에 강도를 부여하기 위해 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, CLSM의 건조수축변화 안정성을 확보하기 위해 팽창제로 사용된 Calcium Sulfo-Aluminate(CSA)는 H사의 것을 사용하였다. CLSM의 단위수량을 감소시키고 유동성을 증가시키기 위해 사용된 polycarbonate(PC계) 유동화제는 C사의 것을 사용하였다.

2.2. 실험 방법

CLSM을 휴·폐광산에 적용할 경우 적용분야에 따라 사후 장래굴착이 필요할 수도 있다. 굴착을 나타내는 수치는 압축강도를 통해 판단할 수 있으며, 인력에 대한 굴착은 0.8 MPa이하, 백호(Back Hoe)와 같은 장비 굴착은 0.7 ~ 1.4 MPa정도의 압축강도가 요구된다. 그러나 필러로 잔골재나 PC-F를 사용한 CLSM의 경우 2.0 MPa의 강도에서 백호 굴착이 가능하다고 보고되고 있다(Lin et al., 2004). 또한 ACI Committee 229 보고서에서는 flow 300±10 mm 이상이 되어야 고유동성을 발현한다고 보고되고 있다(ACI 229R, 2005). 따라서 유동성을 증가시키기 위해 사용된 유동화제는 다량의 미세공기를 발생시켜 CLSM의 입자들의 분산을 용이하게 만들기 때문에 유동성이 증가되지만 일정 함량 이상 함유하게 될 경우 공기량 증가로 인해 물성저하를 가져올 수 있다. 본 연구에서는 이러한 특성과 목표 물성을 기준으로 하여 Table 1과 같이 배합을 설계하였다. CFBC-F와 CFBC-B는 가속탄산화 방법을 통하여 CO₂를 고정화 시켜 사용하였다. 각 시료의 혼합방법은 KS L ISO 670의 규정방법에 따라 모르타르 혼합기를 통해 1분 동안 혼합하여 CLSM을

Table 1. Compositions of controlled low strength materials

NO	PC-F	CFBC-F	CFBC-B	OPC	CSA	Superplasticizer
F-1	90.00	-	-	9.00	1.00	0.25
F-2	-	90.00	-	9.00	1.00	0.25
F-3	-	63.00	27.00	9.00	1.00	0.25
F-4	-	64.40	27.60	7.20	0.80	0.25
F-5	-	65.10	27.90	6.30	0.70	0.25
F-6	-	65.80	28.20	5.40	0.60	0.25

제조하였다.

2.3. 분석방법

CFBC석탄재와 PC석탄재의 형상을 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM, JSM5410, JEOL, Japan)을 사용하여 확인하였으며, 화학적 성분을 분석하기 위해 X선 형광분석기(XRF, ZSX100e, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. 또한 비표면적을 확인하기 위해 BET분석기(TriStar3000, Micromeritics, Norcross, USA)를 이용하여 확인하였다. 한편 CO₂고정화 여부를 확인하기 위해서 X-Ray Diffraction (XRD, SmartLab, Rigaku, Japan)을 이용하였다. XRD측정 조건은 45 kV, 200 mA의 CuK α radiation($\lambda=1.54 \text{ \AA}$)을 조사하여 5°/min의 scan speed로 10 ~ 60°의 범위를 측정하였다. 유동성을 확인하기 위해 ACI Committee229에서 규정하고 있는 방법으로 지름이 76 mm 높이가 152 mm인 원형 실린더 몰드를 사용하였으며, 몰드를 들어 올린다음 30초 후 퍼진 지름의 4방향으로 측정 후 평균을 구하여 유동성을 확인하였다. 시험체 제작은 KS L 4151에 의거하여 40 * 40 * 160 mm³ 몰드에서 7일 간 양생실에서 양생한 후 탈형과 동시에 20 ± 3 °C의 온도조건에서 기건 양생 및 밀봉 양생을 실시하였다. 길이변화율은 제작된 시험체를 KSF2424 기준에 의거하여 콘택트 스트레인게이지 (293-252, Japan)를 통해 탈형 후 3, 7, 14, 21, 28일 기준으로 측정하여 건조수축변화 및 팽창성을 확인하였다. 압축강도는 압축강도 측정기(X2000, Montauban, France)를 사용하였으며, 제작된 시험체를 KS L ISO 679에 의거하여 재령 7일, 28일의 압축강도를 측정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. CFBC석탄재 및 PC석탄재의 특성

CFBC석탄재와 PC석탄재의 형상을 분석한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 순환유동층보일러의 석탄재인 비산재 및 바닥재의 경우 거친 부정형을 형상을 나타내고 있는 것을 확인하였다. 반면 PC석탄재인 PC-F의 경우 구형의 형상을 가지고 있는 것을 확인하였다. 화학조성분석 결과는 Table 2에 나타내었다. CFBC비산재, CFBC바닥재의 경우 PC-F와 비교하여 SiO₂와 Al₂O₃와 같은 주요광물의 함량이 상대적으로 낮은 편이나 CaO 및 SO₃ 함량이 높게 나타났고, PC-F에는 존재하지 않는 Ig와 TiO₂ 함량이 존재 하는 것을 확인하였다. 이러한 화학적 조성 함량을 가지는 이유는 일반적으로 탈황설비가 갖추어진 PC연소방식과 달리 CFBC연소방식은 보일러 내부에서 탈황을 하기 위해 석회석을 투입하기 때문이며, 보통 투입되는 석회석의 양은 Ca/S 몰비 기준 2.0 ~ 2.5 정도이며, 이로 인해 CaO 성분이 높은 것으로 보고되고 있다(Anthony et al., 2007). PC보일러의 경우에는 원료로 사용되는 유연탄의 특성으로 인해 상대적으로 높은 SiO₂와 Al₂O₃ 함량을 가지는 것으로 알려져 있으며, 이외에 소량의 화학성분으로 구성되어 있는 것을 확인하였다(Shun et al., 2010). CFBC석탄재와 PC석탄재의 비표면적을 확인하기 위해 측정된 BET 분석을 실시하였다. 비표면적 분석결과 CFBC비산재의 비표면적이 29.95 m²/g로 가장 큰 것을 확인하였으며, CFBC바닥재의 경우 3.45 m²/g이며, PC-F는 4.12 m²/g으로 CFBC비산재 대비 상대적으로 비표면적이 작은 것을 확인하였다.

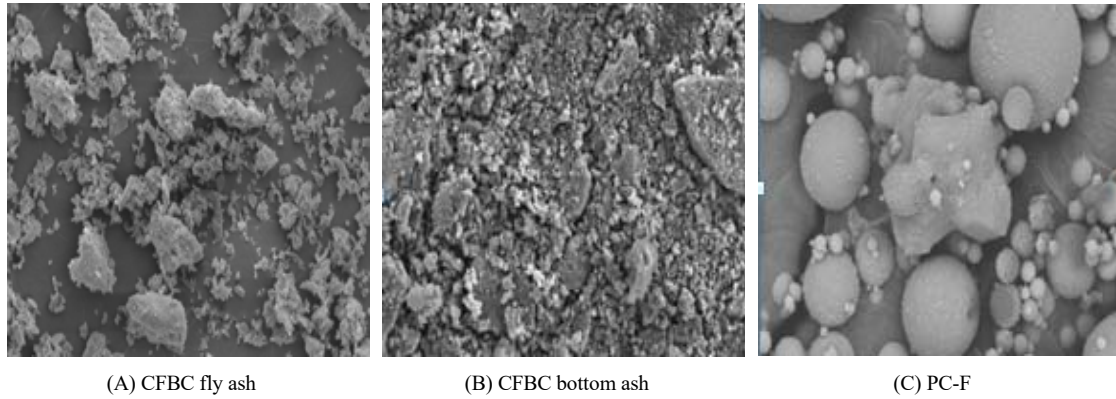


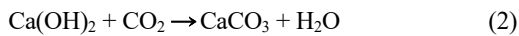
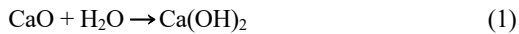
Fig. 1. SEM images of CFBC fly ash (A), CFBC bottom ash (B) and PC-F(C).

Table 2. Chemical composition of CFBC fly ash, CFBC bottom ash and PC-F

Type	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Ig (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	SO ₃ (%)
CFBC fly ash	10.6	32.4	17.3	21.3	8.94	2.44	0.5	4.56
CFBC bottom ash	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. CFBC석탄재의 CO₂ 고정화 특성

가속탄산화는 탄산염의 침전 반응을 통해 CO₂를 고정화 하는 기술이며, calcium, magnesium 및 metal oxide와 같은 물질이 CO₂와의 반응을 통해 안정화되어 용해되지 않는 탄산염이 생성되는 메커니즘을 가지고 있다. 탄산화 반응은 이온을 기초로 하여 반응하며 아래와 같은 반응식에 의해서 Calcite(CaCO₃)를 생성하는 것을 의미한다.



CFBC석탄재의 CO₂고정화 여부를 확인하기 위해 XRD분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

CFBC석탄재의 주요성분을 살펴보면 Lime(CaO), Periclase(MgO), Quartz(SiO₂), Anhydrite(CaSO₄)등이 구성되어 있는 것을 확인하였다. CFBC 석탄재의 탄산화 전과 후의 시료를 비교하여 보면 탄산화 전에

있던 CaO성분이 가속탄산화 과정을 거치면서 탄산화 후에는 석탄재의 표면에 CaCO₃가 생성되는 XRD분석결과를 통해 확인할 수 있다. 따라서 이러한 결과는 내부에 불안정한 상태로 존재하는 중금속 용출을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. CLSM의 물 비율

물-채움재 비율(Water-backfill ratio)의 경우 채움재가 경화된 후에 내구성에 많은 영향을 주는 인자로서 물의 비율이 너무 높으면 내구성 저하의 원인이 되며, 너무 낮으면 시공성(workability) 및 충전성이 저하되어 시공이 어렵게 된다. 이러한 물의 비율은 혼합된 CLSM의 비표면적에 영향을 받으며, 비표면적이 클수록 물 흡수율이 높은 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2014). Fig. 3은 채움재의 고유동성을 발현하기 위해 300±10 mm의 flow를 얻는데 필요한 물비율(W/R)의 도출결과를 나타내었다. F-1의 경우 300±10 mm의 flow를 얻기 위해 물비율(W/R)이 가장 낮은 35%가 소요되었다. 이러한 결과는 F-1의 주재료인 PC-F의

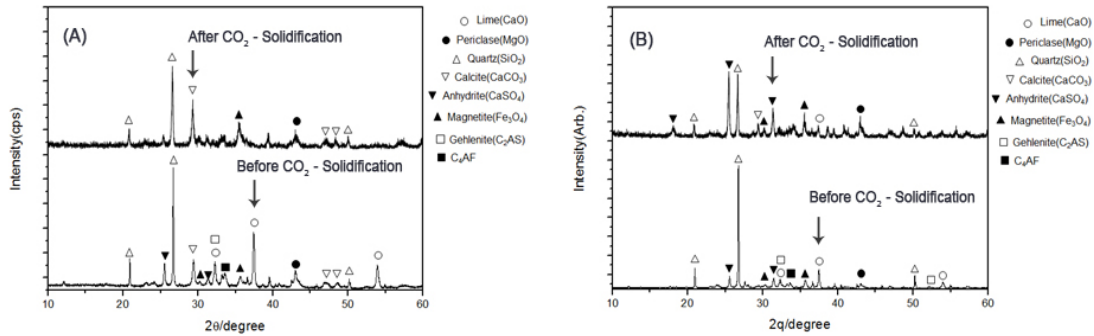


Fig. 2. XRD spectra of CFBC fly ash by CO₂ Solidification (A) and CFBC bottom ash by CO₂ Solidification (B).

경우 SEM측정을 통해 확인하였듯이 구형의 형상을 가지고 있으므로 채움재 내에서 볼-베어링 역할로 인해 유동성 향상에 기여한 것으로 볼 수 있다. 또한 비표면적 분석 결과에서도 확인 할 수 있듯이 PC-F의 비표면적은 상대적으로 작은 4.12 m²/g이며, 이로 인해 물비율(W/R)이 감소한 것으로 판단된다. F-2의 경우 300±10 mm의 flow 얻기 위해 물비율(W/R)이 가장 많은 149%가 소요되었다. 이러한 결과는 CFBC-F의 경우 비표면적이 상대적으로 가장 큰 29.95 m²/g의 비표면적을 가지고 있으며 열역학적인 안정성에 의해 물비율이 증가한 것으로 판단된다(Lee et al., 2014). F-3~6의 배합의 경우 300±10 mm의 flow 얻기 위해 소요되는 물비율(W/R)이 F-2에 대비 낮은 것을 확인하였다. 이러한 결과는 F-3~6에 함유되어 있는 CFBC-B의 비표면적에 의해 기인된 결과로 해석할 수 있으며 CFBC-B의 비표면적은 상대적으로 가장

작은 3.45 m²/g로 인해 CLSM의 물비율(W/R)이 감소한 것으로 판단된다.

3.4. 압축강도 특성

CLSM의 압축강도의 경우 2.0 MPa의 강도에서 백호 굴착이 가능하다고 보고되고 있으며, 고강도를 발현할 경우 재 굴착의 어려움을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Lin et al., 2004). 압축강도는 구성하고 있는 성분과 물 비율에 영향을 받으며, 물 비율이 높을 경우 워커빌리티(workability)는 증가되지만 압축강도는 저하된다고 보고되고 있다(Lee et al., 2014). 일반적인 표준양생 조건이라고 할 수 있는 기건양생 후 측정된 압축강도 결과는 Fig. 4(A)에 나타내었으며, 실제 타설 현장(지하공동)과 유사한 환경조건에서 양생하기 위해 실시한 밀봉양생 후 측정된 결과는 Fig. 4(B)에 나타내었다. 기건양생 조건과 밀봉양생 조건의 장기 28일 강도를 비교해보면 기건양생한 경우가 밀봉양생한 경우보다 압축강도가 저하된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 밀봉양생한 경우 수분이 증발하지 못하고 장기적으로 수화반응을 진행할 수 있는 수분이 충분히 남아 있기 때문에 기건양생 대비 압축강도가 증가한 것으로 판단된다. 각 배합별 압축강도를 비교한 결과 다른 배합 대비 F-1의 압축강도가 증가한 것을 확인 할 수 있다. 이러한 결과는 F-1의 경우 물 비율이 상대적으로 적은 35%로 인해 경화 후 CLSM의 공극률이 적고 이로 인해 수밀성이 향상되어 압축강도가 증가한 것으로 판단되어진다(Ishida et al., 2007). 반대로 F-2의 경우 물 비율이 가장 많은

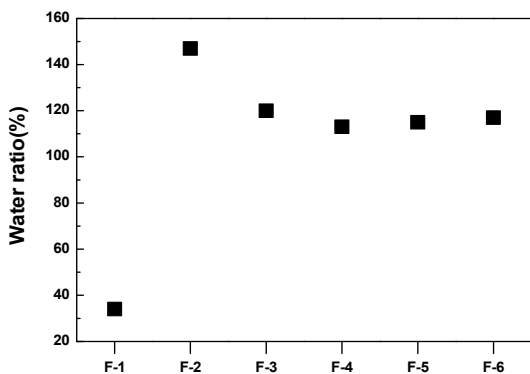


Fig. 3. Water ratio of controlled low strength materials.

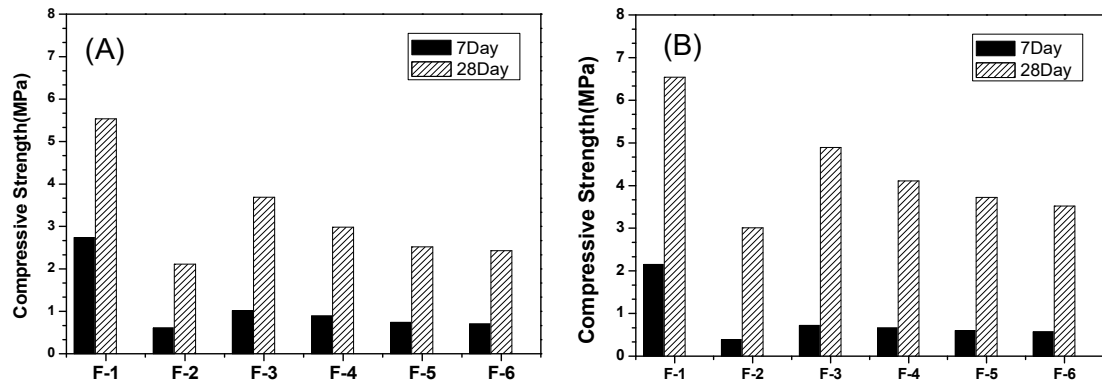


Fig. 4. Compressive strength of controlled low strength materials of air-dry curing (A) and seal curing (B).

149%로 인해 경화 후 CLSM의 공극률이 가장 많고 이로 인해 수밀성이 저하되어 다른 배합 대비 압축강도가 감소한 것으로 판단된다. F-3~6의 압축강도의 경우 혼입된 CFBC-B의 비표면적이 작은 것으로 기 인하여 F-2대비 물 비율을 저감시켜주며, 콘크리트 모 르타르 개념으로 접근할 경우 CFBC-B는 골재의 역 할이라고 볼 수 있는 강도보강제의 역할을 대신해줌 으로서 F-2 대비 상대적으로 압축강도가 증가한 것으 로 판단된다. CFBC 석탄재와 PC 석탄재가 강도발현에 기여하는 이유는 Table 2의 화학조성분석결과를 통해 알 수 있듯이, 화학조성 중에 SiO_2 , Al_2O_3 와 CaO 의 경 우 수화생성물 중 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와의 포졸란 반응을 활성화 시켜 강도증진에 기여하는 C-S-H생성을 촉진시켜 강 도가 발현되는 것으로 판단된다. 즉 수화반응이 진행 되면 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 는 Ca^{2+} , 2OH^- 로 해리되며 2OH^- 는 Ca^{2+} , Si^{2+} , Al^{3+} 이온의 용출을 가속화하여 C-S-H 및 C-A-H 수화물의 생성을 촉진한다. 또한 CaSO_4 는 Ca^{2+} , SO_4^{2-} 로 서서히 해리되며 Ca^{2+} 는 다시 Si^{2+} , Al^{3+} 이온의 용출을 가속화하고 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 강도발 현에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Ryu et al., 2012). 따라서 이러한 특성으로 인해 F-1~6의 배합 모 두 CLSM의 목표 강도인 2.0 MPa 이상의 압축강도 가 발현되는 것을 확인하였다.

3.5. 길이변화 특성

길이변화율은 CLSM이 휴·폐광산 지하공동구 안 에 주입되었을 때 CLSM의 수분이 증발함에 따라 공

극수가 증가하게 되고 이로 인해 건조수축변화가 일 어남에 따라 균열이 발생될 우려가 있으며, 건조수축 은 상대습도가 높아짐에 따라 감소한다고 보고되고 있다(Yang et al., 2013). Fig. 5(A)에는 기건양생 후 길이변화 측정된 결과를 나타내었고, Fig. 5(B)는 밀 봉양생 후 길이변화 측정된 결과를 나타내었다. 28일 기준으로 기건양생한 조건에서는 $-0.05 \sim -0.50\%$ 범 위의 수축이 발생하였으나, 밀봉 양생한 조건에서는 $0.05 \sim 0.60\%$ 의 범위내에서 팽창이 발생하였다. 기건 양생한 조건에서는 팽창제인 CSA가 혼입되었음에도 불구하고 F-2~6 경우 F-1 대비 물 비율이 큰 폭으로 증가함에 따라 수분 증발이 많아지고 이로 인해 생성 된 공극량 증가로 소성수축 균열 저항성이 낮을 것으 로 판단되어진다. 지하공동구의 조건과 유사한 밀봉 양생한 조건에서는 환경적인 요인으로 인해 수분증발 이 느려지고 팽창제의 CSA역할로 인해 팽창한 것을 확인할 수 있다. 따라서 14일 이전까지 팽창이 진행되 었다가 수분증발이 어느 정도 진행되면서 14일 이후 부터는 서서히 건조수축이 일어나는 것을 확인할 수 있다. CSA 팽창 메커니즘은 CSA에 포함된 CaO 수화 반응에 의해 수산화칼슘 결정이 생성되고 결정 성장 이 팽창에 기여하며, 아우인(Hauyne)과 반응하여 알 루미산석회수화물과의 고용체 형성에 의해 감소되며 이어서 생성된 참상결정(ettringite)에 의해 팽창이 발 생한다고 보고되고 있다(Won et al., 2001). 밀봉양생 조건에서 F-1 대비 F-2~6의 팽창이 크게 일어나는 것 을 확인할 수 있는데 이러한 결과는 CFBC석탄재의

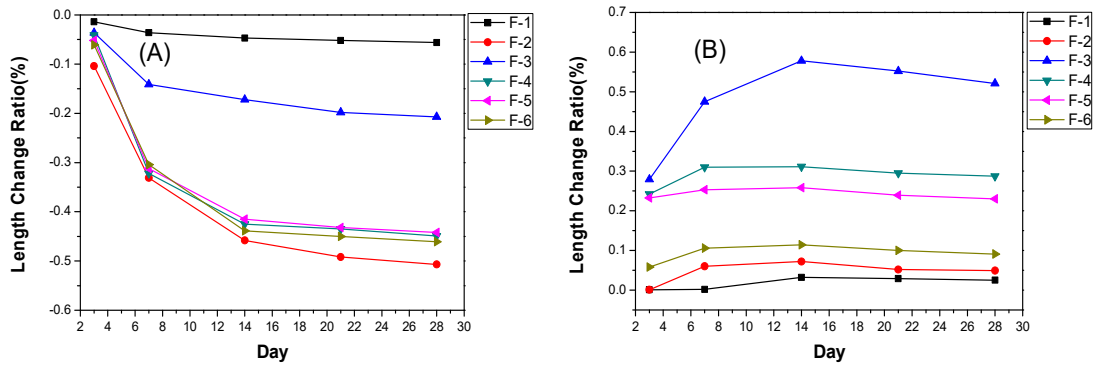


Fig. 5. Length change ratio of controlled low strength materials of air-dry curing (A) and seal curing (B).

경우 화학성분 중에 SO₃ 함량이 PC-F 대비 높아 F-2~6 팽창이 크게 일어나는 것으로 판단된다(Jang et al., 2016).

4. 결론

본 연구에서는 PC석탄재 및 CO₂고정화된 CFBC 석탄재를 활용하여 채굴적 공간에 맞는 CLSM의 기초 물성을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CFBC비산재, CFBC바닥재의 경우 PC-F와 비교하여 SiO₂와 Al₂O₃와 같은 주요광물의 함량이 상대적으로 낮은 편이나 CaO 및 SO₃ 함량이 높게 나타난 것을 확인하였다. 비표면적 분석결과 CFBC-F의 비표면적이 29.95 m²/g으로 가장 큰 것을 확인할 수 있었으며, CFBC바닥재의 경우 3.45 m²/g 이며, PC-F의 경우 4.12 m²/g으로 CFBC비산재 대비 상대적으로 비표면적이 작은 것을 확인하였다.

2. XRD 분석결과 CaO가 탄산화 과정을 거치면서 CaCO₃가 생성됨에 따라 CFBC석탄재에 CO₂고정화가 성공적으로 이루어진 것을 확인하였다.

3. F-1의 경우 주재료인 PC-F의 비표면적이 상대적으로 작음에 따라 물 비율이 감소하였으며, F-2~6의 경우 주재료인 CFBC-F의 비표면적이 상대적으로 크므로 물 비율이 증가되는 것을 확인하였다.

4. 압축강도 측정결과 밀봉양생한 경우 수분이 증발하지 못하고 장기적으로 수화반응을 진행할 수 있는 충분한 수분이 남아 있기 때문에 기건양생 대비 압축강도가 증가하였다. F-1의 경우 F-2~6 대비 물 비율

이 적어 압축강도가 상대적으로 높은 것을 확인하였으며, F-1~6 배합 모두 백호굴착이 가능한 압축강도 2.0 MPa 이상의 압축강도를 발현하는 것을 확인하였다.

5. 길이변화 측정결과 환경적인 조건 등의 영향으로 인해 기건양생한 경우 -0.05 ~ -0.50% 범위의 수축이 발생하였으나, 밀봉양생한 경우에는 0.05 ~ 0.60%의 범위 내에서 팽창이 발생한 것을 확인하였다.

이러한 결과는 CFBC석탄재의 활용방안을 넓히고 각기 다른 지하공동·폐광산에 따라 CLSM을 설계 하는데 있어 기초 연구 자료로서 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 201410101880).

REFERENCES

- ACI, 229R, 2005, Controlled low strength materials, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Anthony, E. J., Granatstein, D. L., 2001, Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems, Prog. Energy Combust. Sci., 27, 215-236.
- Han, W. J., Lee, J. S., Byun, Y. H., Cho, S. D., Kim, J. Y., 2016, Study on characteristics of controlled low

- strength material using time domain reflectometry, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 17, 33-37.
- Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T., 2007, Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, 37, 565-578.
- Jang, J. G., Ji, S. W., Ahn, J. W., 2017, Utilization of circulating fluidized bed combustion ash and related specifications for mine backfills, *J. of Korea Inst. of Resources Recycling*, 26, 71-79.
- Jang, J. G., Lee, H. K., 2016, Effect of fly ash characteristics on delayed high-strength development of geopolymers, *Construction and Building Materials*, 102, 260-269.
- Kim, S. L., Park, J. H., 2015, Research and development trends for mine subsidence prevention technology in Korea, *Tunnel & Underground Space*, 25, 408-416.
- Kong, J. Y., Kang, H. N., Chun, B. S., 2010, Characteristics of unconfined compressive strength and flow in controlled low strength materials made with coal ash, *J. of The Korean Geotech. Soc.*, 26, 75-83.
- Lee, B. K., Kim, G. Y., Koo, K. M., Shin, K. S., 2014, Properties of compressive strength of mortar based on high-activated blast furnace slag using the Slag by-product as an activator, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 14, 37-44.
- Lee, N. K., Kim, H. K., Kim, J. S., 2011, Characteristics of co-combustion of anthracite with bituminous coal in a 200-MWe circulating fluidized bed boiler, *Energy*, 36, 5703-5709.
- Lim, S. Y., Choo, H. W., Lee, W. J., Lee, C. H., 2016, The characterization of Controlled Low Strength Material (CLSM) using high CaO fly ash without chemical alkaline activator, *J. of the Korean Geo-Environmental Soc.*, 17, 17-26.
- Lin, K. L., Wang, K. S., Lin, C. H., 2004, The hydration of pastes containing municipal solid waste incinerator fly ash slag, *Journal of Hazardous Materials*, 109, 173-181.
- Nam, S. Y., Seo, J. B., Thriveni, T., Ahn, J. W., 2012, Accelerated carbonation of municipal solid waste Incineration bottom ash for CO₂ sequestration, *Geosyst. Eng.*, 15, 305-311.
- Ryu, G. S., Koh, K. T., Chung, Y. S., 2012, Analysis of mechanical properties and micro structure of fly ash based alkali-activated mortar, *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, 21, 27-38.
- Ryu, J. H., Jeon, H. K., 2008, A Study on development method for early-strength concrete, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 20, 681-684.
- Shun, D. W., Bae, D. H., Oh, C. S., Kim, H. C., 2010, Circulating fluidized bed combustion of Korean anthracite and fabricated anthracite fines, *Applied Chemistry for Engineering*, 21, 553-558.
- Won, J. P., Lee, Y. S., 2001, Properties of controlled low-strength material containing bottom ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 13, 294-300.
- Yang, K. H., Seo, E. A., 2013, Evaluation of shrinkage strain of alkali-activated slag concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25, 593-599.