

탄산화 양생이 순환유동층 보일러 애시의 수화특성에 미치는 영향

Effect of Carbonation Curing on the Hydration Properties of Circulating Fluidized Bed Boiler Ash

차수원¹ · 이시은² · 이원준³ · 최영철^{4*}

Soo-Won Cha¹ · Shi-Eun Lee² · Won-Jun Lee³ · Young-Cheol Choi^{4*}

(Received September 25, 2023 / Revised October 25, 2023 / Accepted October 25, 2023)

In this study, the hydration and carbonation properties of circulating fluidized bed boiler (CFBC) ash with different free-CaO contents were investigated. In addition, the possibility of utilizing CFBC ash with a high free-CaO content as a cementitious material was investigated by carbonation curing as a pretreatment. The CFBC ash with high free-CaO content exhibited rapid setting behavior and low early compressive strength when mixed with cement. For CFBC ash with high free-CaO content, carbon dioxide capture increased with the duration of carbonization curing. In addition, the free-CaO value decreased together, indicating that the free-CaO reacted with carbon dioxide. When the CFBC ash with high free-CaO content was pretreated by carbonation, no fresh set appeared, and the initial compressive strength was improved. From the results of this study, it is confirmed that CFBC ash with high free-CaO content has a high potential to be utilized as a cementitious material through proper carbonation curing.

키워드 : 순환유동층 보일러 애시, 탄산화 양생, CO₂ 포집, 수화, 유리석회

Keywords : CFBC ash, Carbonation curing, CO₂ uptake, Hydration, Free-CaO

1. 서론

산업의 발달에 따라 지구온난화로 인한 이상 온도, 홍수 및 가뭄 등 이상 기후의 발생이 빈번해지고 있으며, 이에 대한 원인으로는 온실가스 등 대기오염이 원인으로 대두되고 있다. 이에 전세계적으로 대기오염물질 저감을 위하여 노력하고 있는 실정이다. 이에 대한 일환으로 발전분야에서는 미분탄 보일러 방식에서 순환유동층 보일러 애시(Circulating fluidized bed combustion ash, CFBC ash)의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 순환유동층 보일러 연소 방식은 미분탄 보일러 연소방식에 비해 연소온도가 비교적 낮으며 (Anthony and Granatstein 2001), 연소 효율이 높기 때문에 다양한 연료를 사용할 수 있는 장점이 있다(Song et al. 2008). 또한, 탈황공정의 추가 없이 보일러 내부에서 탈황공정이 이루어진다는

특징이 있다(Kuo et al. 2014). CFBC에서 배출되는 플라이애시는 일반적인 화력발전소에서 생산되는 플라이애시와는 다른 특성을 가지고 있다. 로내 탈황을 위하여 투입되는 석회석 또는 돌로마이트에 의하여 다량의 CaSO₄와 free CaO가 존재하며, 연소온도의 차이에 의하여 둥근 형태가 아닌 각진 형태를 가지고 있다 (Anthony and Granatstein 2001).

최근, 이산화탄소를 포집 및 저장 기술을 이용하여 대기 중의 이산화탄소를 저감하는 방안에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이 중 광물탄산화 기술은 대기 중의 이산화탄소를 영구적으로 저장할 수 있는 장점이 있다(Hasan et al. 2015). 광물탄산화 기술의 원료 물질은 알칼리 토금속 산화물이 필요하지만 일부 천연 광물인 규산염 암석이나 알칼리성 산업부산물에서 얻을 수 있으며, 대표적인 알칼리성 산업부산물로는 CFBC ash가 있다. 광물탄

* Corresponding author E-mail: zerofe@gachon.ac.kr

¹울산대학교 건설환경공학부 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Nam-gu, 44610, Korea)

²가천대학교 토목환경공학과 석사과정 (Dept. of Civil & Environment Engineering, Gachon University, Gyonggi-do, 13120, Korea)

³가천대학교 토목환경공학과 선임연구원 (Dept. of Civil & Environment Engineering, Gachon University, Gyonggi-do, 13120, Korea)

⁴가천대학교 토목환경공학과 교수 (Dept. of Civil & Environment Engineering, Gachon University, Gyonggi-do, 13120, Korea)

산화 기술을 통해 생성되는 탄산칼슘(CaCO₃)은 수화반응 촉진 및 강도 증진에 긍정적으로 영향을 줄 수 있다는 연구보고가 있다. 광물탄산화 반응을 이용한 탄소포집형 건설재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 알칼리성 산업부산물인 플라이애시의 이산화탄소 포집 재료로 사용한 연구가 진행되고 있는 추세이다 (Ukwattage et al. 2015).

본 연구에서는 연소 연료가 다른 2종의 CFBC ashes를 건설재료로 활용하기 위한 가능성에 대해 조사하였다. 이를 위해 CFBC ash를 혼입한 시멘트의 수화특성 및 역학적 특성에 대해 조사하였다. 또한, 탄산화 양생을 통해 CFBC ash의 탄소포집 성능을 산정하였으며, 탄산화 양생이 수화특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 사용 재료

본 연구에서는 원재료로 free-CaO 함량이 다른 CFBC ash를 사용하였다. 이는 화력 발전소 중 순환유동층 보일러를 이용하여 발전을 하는 발전소에서 배출되는 플라이애시로서, 국내 S 발전본부에서 배출되는 것(S-CFBC)과 국내 H 발전본부에서 배출되는 것(H-CFBC)을 사용하였다.

Table 1에는 본 연구에서 사용한 원재료인 OPC, S-CFBC 및 H-CFBC의 화학분석 결과를 표시하였다. 2종의 CFBC ash는 모두 CaO, SiO₂, Al₂O₃, SO₃ 등의 화학성분으로 구성되어있는 것을 확인하였다.

S-CFBC ash의 경우, CaO가 22.5%, SiO₂가 39.2%, Al₂O₃가 17.5% 정도로 나타났으며, H-CFBC ash의 경우, CaO가 66.3%, SO₃가 25.4%로 나타나, 주요 구성 화학성분은 시멘트의 주요 구

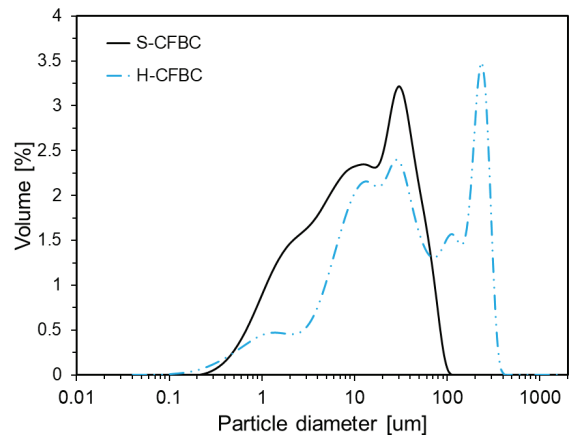
Table 1. Chemical compositions of CFBC ashes

	Chemical composition (wt%)		
	OPC	S-CFBC	H-CFBC
CaO	62.9	22.5	66.3
SiO ₂	18.8	39.2	2.7
Al ₂ O ₃	4.3	17.5	1.1
Fe ₂ O ₃	3.6	8.4	0.5
MgO	3.7	2.4	3.0
TiO ₂	0.3	0.7	-
K ₂ O	1.4	1.0	0.3
Na ₂ O	0.2	1.3	0.2
SO ₃	3.9	6.1	25.4

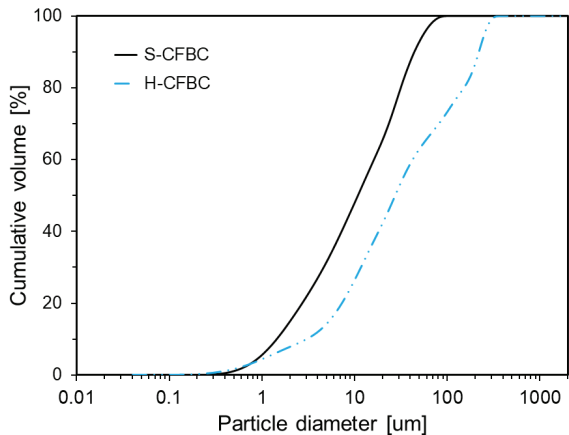
성 화학성분과 유사한 것을 확인하였다. 다만, 순환유동층 보일러 애시의 경우, 사용 연료에 따라 주요 구성 화학성분이 상당한 차이가 나는 특징을 나타내고 있다. S-CFBC의 경우 석탄을 연료로 사용한 순환유동층 보일러에서 배출된 애시이며, H-CFBC는 페트로코크스를 연료로 사용한 순환유동층 보일러에서 배출된 애시이다.

Fig. 1은 사용한 CFBC ash의 입도분포를 나타내고 있다. S-CFBC의 경우 평균입경이 19.4 μm로 나타났으며, H-CFBC는 77.0 μm로 나타났다. 입도분포의 범위 또한 S-CFBC가 약 0.2~100 μm, H-CFBC 약 0.2~400 μm의 범위로 나타났다. S-CFBC가 H-CFBC 보다 입도범위가 좁고, 평균입경 또한 작은 특징을 가지고 있는 것을 확인하였다. 이러한 특징은 Fig. 2에 표시한 SEM 이미지에서도 확인할 수 있다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 S-CFBC와 H-CFBC의 SEM 이미지를 나타내고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 S-CFBC의 입자

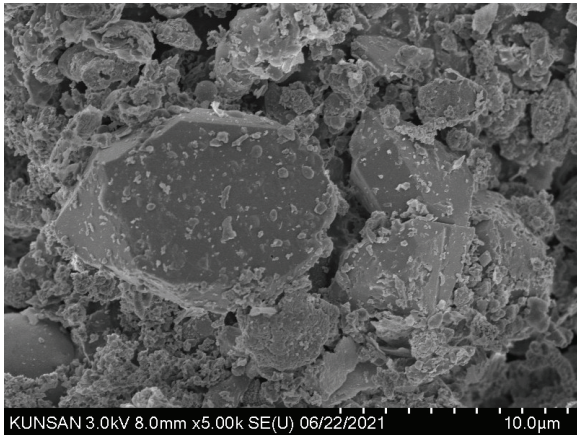


(a) Volume

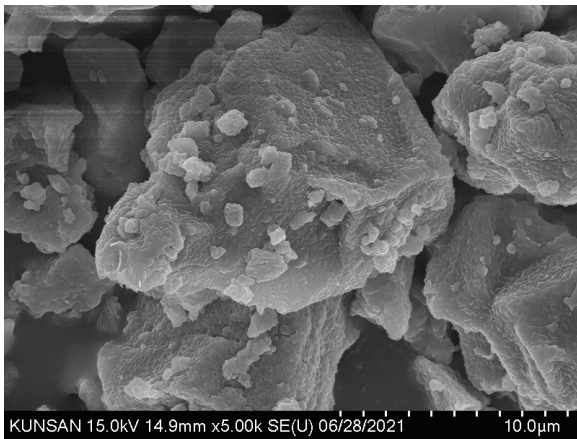


(b) Cumulative volume

Fig. 1. Particle size distributions of CFBC ashes



(a) S-CFBC

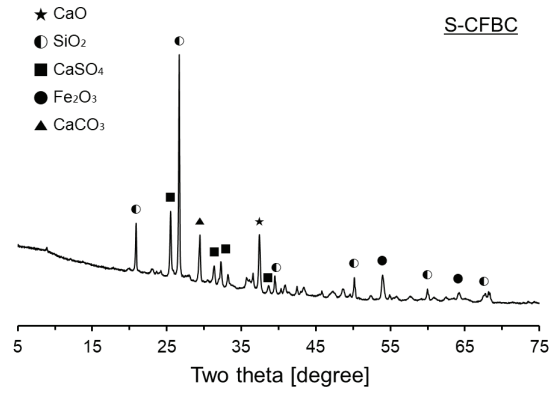


(b) H-CFBC

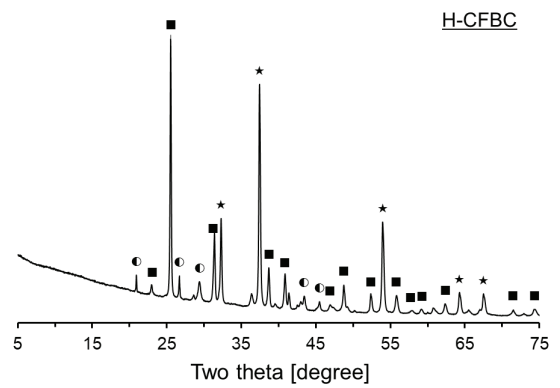
Fig. 2. SEM images of CFBC ashes

크기가 H-CFBC보다 작은 것으로 나타났다. 또한, 두 종류의 CFBC ash 모두 일반 미분탄 플라이애시와 달리 각진 형태를 가지고 있다. 이는 보일러의 연소 온도에 기인되는 것으로 판단된다. 일반 미분탄 보일러의 연소온도는 1300~1500 °C이며 이에 비해서 순환유동층 보일러의 연소온도는 800~950 °C로 비교적 저온에서 연소가 일어나며, 이에 따라 배출되는 플라이애시의 입자형태도 차이가 나는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 CFBC ash의 XRD 패턴을 보여주고 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 S-CFBC의 주요 광물은 Quartz, Anhydrite, Lime, Hematite, Calcite이며, H-CFBC의 주요 광물은 Quartz, Anhydrite, Lime이다. CFBC ash의 주요 구성광물인 Anhydrite는 로내 탈황공정을 위해 투입한 석회석과 연료중에 함유된 SO₃와 반응하여 생성된 것으로 판단된다. Lime은 석회석의 탈탄산 및 탈황반응 후 미반응 잔여량이 존재하는 것이며, Quartz는 순환유동층 보일러의 유동상 물질로 투입되는 SiO₂인 것으로 보인다. 반면,



(a) S-CFBC



(b) H-CFBC

Fig. 3. XRD patterns of CFBC ashes

순환유동층 보일러의 연소 연료에 따라 구성광물의 차이가 나타났다.

2.2 실험 계획

본 연구에서는 free-CaO 함량이 다른 두 종류의 CFBC ash의 수화 및 역학적 특성을 조사하기 위해 페이스트 및 모르타르 시편체를 제작하였다. Table 2는 모르타르 시편체의 배합표를 나타내고 있다. 이때 사용된 모래는 ISO 표준사를 사용하였으며, 페이스트는 모래를 제외하고 제조하였다.

Table 2. Mixture proportions of mortar specimens

Specimens	W/B	Unit weight (g)				
		Cement	S-CFBC	H-CFBC	Sand	SP (wt%)
SCFBC25	0.5	337.5	112.5	-	1350	0.4
HCFBC25		337.5	-	112.5	1350	0.4

2.3 실험 방법

2.3.1 Free-CaO 분석

순환유동층 보일러를 이용한 발전방식에는 인체 유해물질은 황(S) 성분의 제거를 위하여 로내에 석회석을 주입시키고 있다. 탈황을 위하여 투입되는 일부 석회석이 황(S) 성분과 충분히 반응하고, 반응하지 못하고 free-CaO의 상태로 CFBC ash 중에 존재한다. Free-CaO의 측정 방법으로는 KS L 5405 및 ASTM C 114에서 권장하고 있는 에틸렌 글라이콜(Ethylene glycol) 법을 준용하여 측정하였다. 에틸렌 글라이콜 실험 방법은 먼저 샘플을 기준 용량으로 계량한 후, 100 ml 삼각 플라스크에 넣고 에틸렌 글라이콜 50 ml를 샘플이 들어간 삼각플라스크에 투입한 후 50~60 °C의 중탕기에 넣은 후 5분 간격으로 30분간 혼합하여 샘플이 에틸렌 글라이콜에 잘 용해되도록 한다. 용해된 샘플은 부호너 깔때기에 NO. 20 여과지 2장으로 흡입 여과하여 에틸렌글리콜 10 mL로 3회 세척한다. 여과된 용액은 브롬크레졸 그리인(Brom cresol green) 지시약 3방울을 적가한 후, 0.1 N HCl 표준 용액을 1 mL 단위로 적가하여 청색에서 맑은 노란색이 되는 점을 종점으로 한다. 0.1 N HCL 용액의 적가량을 기준으로 free-CaO의 정량값을 나타내며, 각 샘플 당 3회의 실험을 진행하여 평균값으로 평가하였다.

2.3.2 수화특성 분석

CFBC ash를 혼합한 시멘트 페이스트의 수화특성을 조사하였다. 각 페이스트에 대해 Calmtrix사의 I-Cal 2000 모델을 이용하여 수화열을 측정하였다. 각 변수별로 정해진 배합비에 따라 페이스트를 배합하여 약 70 ± 1 g의 시료를 전용 플라스틱 재질의 용기에 담아 기기에 투입 후 72시간 동안 측정하였다. 측정값은 누적발열량과 시간에 따른 발열량을 그래프로 나타내었다.

2.3.3 압축강도 시험

모르타르 압축강도 시험은 KS L ISO 679의 실험 방법을 준용하여 실시하였다. 실험 조건으로는 W/B를 0.5로 고정하였으며, CFBC ash는 시멘트 중량 대비 25 %를 치환 혼합하였고, 혼화제를 시멘트 중량 대비 0.4 t% 첨가하여 배합하였다. 이때, 각 시편을 3개씩 제작하여 온도 20 ± 1 °C, 습도 60 ± 10 %로 유지한 항온항습 챔버에서 24 h 양생 후 탈형을 실시하였다. 각 변수별 재령(1일, 3일, 7일, 28일)에 따른 압축강도를 측정하였다.

2.3.4 탄산화 양생에 의한 CFBC ash의 전처리

본 연구에서는 free-CaO 함량이 높은 H-CFBC ash를 사용하여 탄산화 양생 기간에 따른 free-CaO의 함량 변화 및 열중량 분



Fig. 4. H-CFBC pretreatment

석을 수행하였다. 실험 조건으로는 W/B의 비는 0.10이 되도록 CFBC ash에 수분을 일정 높이에서 스프레이로 공급하여 탄산화 양생을 진행하였다(Fig. 4). 탄산화 양생은 온도 20 ± 1 °C, 상대습도 60 ± 10 %, CO₂ 농도 5 ± 1 %의 조건에서 수행하였다. 탄산화 양생 기간별(1 h, 5 h, 12 h, 24 h)로 샘플을 채취하여 free-CaO 함량을 측정하였으며, 또한, 열중량 분석을 통해 시료에 포함된 Ca(OH)₂와 Calcite 함량을 분석하였다. SEM 분석을 통해 탄산화에 의해 변화되는 페이스트의 미세조직을 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 CFBC ash의 free-CaO 함량 및 탄산화 양생

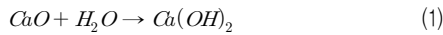
각 CFBC ash의 특성을 비교하기 위해 변수들의 free-CaO를 측정하였다. 측정된 결과, S-CFBC는 11.8 %, H-CFBC는 30.1 %로 확인됐다. H-CFBC가 S-CFBC 대비 free-CaO가 약 3배 가량 높게 나타났다. 이는 S-CFBC는 석탄, H-CFBC는 코크스를 주연료로 사용하였는데, 주연료의 성분 차이로 인해 나타난 것이다. Free-CaO 함량이 높은 H-CFBC의 경우 급결 등이 예상되어 탄산화 양생을 통한 전처리를 수행 후 건설재료로의 가능성을 검토하였다.

탄산화 양생 기간별 H-CFBC의 free-CaO 함량에 대한 결과는 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보는 바와 같이 탄산화 양생을 하면 free-CaO 함량은 감소하는 경향을 보였으며, 12시간 이상 탄산화 양생을 수행했을 때 수렴하는 경향을 보였다. H-CFBC를 12시간 동안 탄산화 양생 후 free-CaO 함량은 S-CFBC와 유사하게 나타났다.

Table 3. Free-CaO content of H-CFBC by carbonation curing

Time (h)	Free-CaO (%)
0	30.1
1	19.5
5	12.4
12	11.3
24	11.5

다음 Fig. 5는 H-CFBC의 탄산화 양생 기간에 따른 열중량 분석 결과를 나타내고 있다. CFBC ash는 식 (1)과 같이 물과 반응하여 알칼리성인 수산화칼슘을 생성하고, 생성된 수산화칼슘이 식(2)와 같이 CO₂와 반응하여 탄산칼슘을 생성한다(Xu et al, 2018).



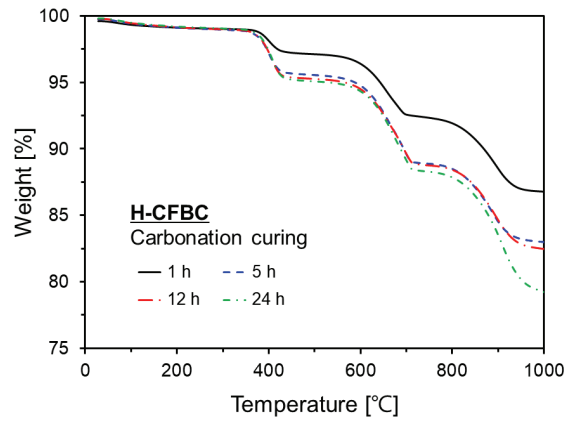
Ca(OH)₂와 Calcite의 분해 온도는 각각 Fig. 4(b)의 첫 번째와 두 번째 피크에 해당한다. H-CFBC의 탄산화 양생 기간에 따른 Ca(OH)₂와 CO₂ uptake를 정량한 결과를 Table 4에 나타내었다. CO₂ uptake의 산정은 Calcite의 분해 온도에서 시료의 중량변화를 이용하였다.

Table 4. CO₂ uptake and Ca(OH)₂ of H-CFBC by carbonation curing period

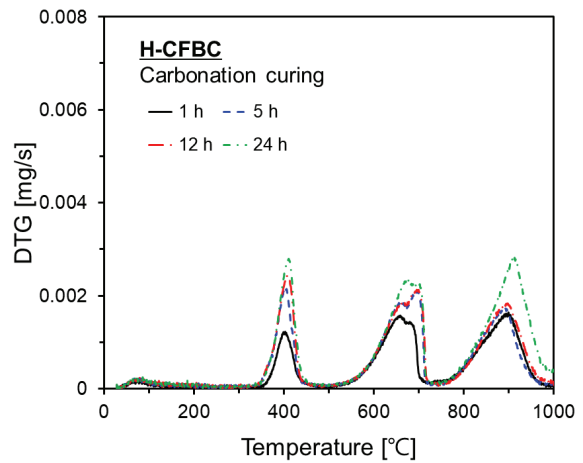
Type	Time [h]			
	1	5	12	24
Ca(OH) ₂ (%)	1.74	2.05	2.09	2.11
CO ₂ uptake (%)	14.2	18.8	20.8	21.1

H-CFBC의 탄산화 양생 기간별 Ca(OH)₂를 정량화한 결과 1.7 %에서 2.1 %로 증가한 것을 확인했다. 이는 초기에 도포한 물로 인해 생성된 수산화칼슘 이외에 CO₂ 양생 챔버에 존재하는 습도에 의한 것으로 판단된다. 탄산화 양생 시간 증가에 따라 CO₂ uptake 양이 1시간에는 14.2 %였으나, 12시간 양생 후에는 20.8 %로 증가하는 것을 확인하였다. 이는 H-CFBC에 포함된 free-CaO에 의해 이산화탄소를 포집하여 탄산칼슘의 생성에 의한 것으로 보인다. 반면, 양생 기간이 24시간의 CO₂ uptake의 양은 12시간에 비해 증가하였으나 그 증가 폭은 크지 않았다.

Fig. 6은 탄산화 양생 기간별 H-CFBC의 SEM 이미지이다. 공통적으로 탄산화 양생을 통해 탄산칼슘을 생성하는 것을 볼 수



(a) TG



(b) DTG

Fig. 5. TG and DTG curves of H-CFBC by carbonation curing

있는데 양생 시간에 따라 탄산칼슘 결정이 크고 뚜렷하게 많아지는 것을 확인할 수 있다(Hu et al, 2022).

본 연구에서는 free-CaO 함량이 높은 H-CFBC를 24시간 상기 조건의 탄산화 양생을 수행한 후 탄산화 양생을 수행하지 않은 S-CFBC와 H-CFBC와 수화 및 역학적 특성을 검토하였다.

3.2 CFBC ash를 혼입한 시멘트 페이스트의 수화 특성

Fig. 7은 Table 2에 의해 CFBC ash를 혼입한 시멘트 페이스트의 미소수화열 결과를 72시간 동안 측정된 결과이다. Plain은 CFBC ash가 혼입되지 않고 바인더로 OPC만을 사용하여 제조한 시험체이며, HCFBC25C는 H-CFBC를 탄산화 양생으로 전처리한 시료를 시멘트 중량비 대비 25 %를 혼입한 시험체이다. Fig. 6(a)

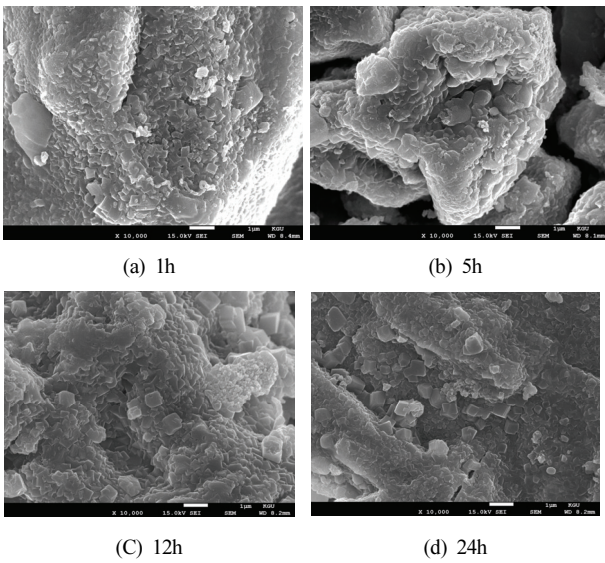


Fig. 6. SEM images of Pre-Carbonation H-CFBC

는 단위 시간당 발열량을 보여주고 있으며, SCFBC25는 약 28시간 정도 지난 뒤 2차 피크가 발생하였다. Plain과 비교했을 때 2차 피크가 약간 빠르게 발생하였다. HCFBC25는 2차 피크가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 1차 피크가 크게 발생한 것을 확인할 수 있는데, 이는 초기에 free-CaO 함량이 높은 H-CFBC가 free-CaO에 의해 초반에 급격한 발열을 보인 것으로 판단된다.

H-CFBC를 전처리한 후 제조된 HCFBC25C의 경우 HCFBC25와는 다른 양상을 보였으며, 오히려 SCFBC25와 유사한 결과를 나타냈다. 수화 초기 반응에 가장 큰 영향을 주는 인자 중 하나인 free-CaO의 함량이 탄산화 양생에 의해 감소되어 초반 발열이 HCFBC25보다 낮게 나타났다. 또한, HCFBC25에서 보이지 않던 2차 피크가 약 32시간에 나타났다. 시간에 따른 누적발열량(Fig. 6(b))을 보면 Plain의 누적발열량이 가장 높게 나타났으며, SCFBC25, HCFBC25C, HCFBC25의 순으로 나타났다. Free-CaO 함량이 가장 높은 HCFBC25의 경우 약 28시간까지는 가장 높은 누적발열량을 나타냈으나, 그 이후 누적발열량의 증가가 감소하여 72시간에는 가장 낮은 누적발열량을 나타냈다. 이러한 결과는 CFBC ash에 포함된 화학성분의 차이에서 나타난 결과이다(Irbe et al., 2018).

3.3 압축강도

Fig. 8은 각 변수별 재령(1일, 3일, 7일, 28일)에 따른 압축강도 결과를 나타내고 있다. Plain은 CFBC ash를 사용하지 않고 바인더로 OPC만을 사용하여 제조한 모르타르 시험체를 나타낸다.

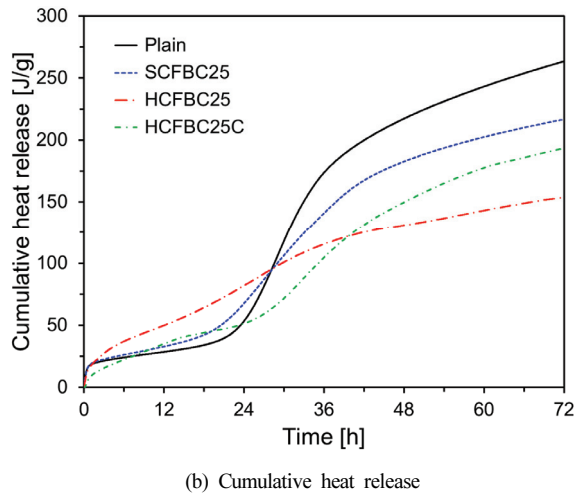
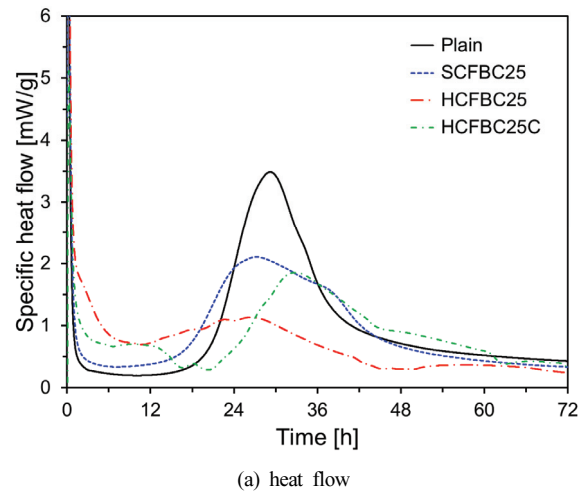


Fig. 7. Heat of hydration of paste specimens

Plain의 압축강도는 다른 변수에 비해 모든 재령에서 가장 높게 나타났다. SCFBC25의 경우 1일, 3일에서는 Plain 대비 약 78%의 압축강도를 나타냈으나, 28일에서는 약 91%로 재령이 증가하면서 Plain과의 압축강도 차이가 감소하였다. 이는 S-CFBC의 포졸란 반응에 의한 결과로 판단된다. HCFBC25의 압축강도는 모든 재령에서 가장 낮은 압축강도는 보였다. 1일 압축강도는 SCFBC25와 유사한 값을 보였지만, 재령에 따라 압축강도 증가 폭이 다른 변수에 비해 낮았으며, 7일 이후의 압축강도는 Plain 대비 약 38~40%로 낮게 나타났다. HCFBC25C의 경우 전체적으로 HCFBC25의 압축강도 경향을 따르지 않고, SCFBC25와 비교하였을 때 조금 낮은 값을 보였지만 유사한 압축강도 경향을 보였다. 이는 Fig. 4(b)의 누적발열량 경향과 유사한 결과이다. 이는 전처리 과정을 통해 초반 급진적으로 발열하는 H-CFBC의 특성이 사라지면서 S-CFBC와 유사한 경향을 보이는 것으로 판단된다.

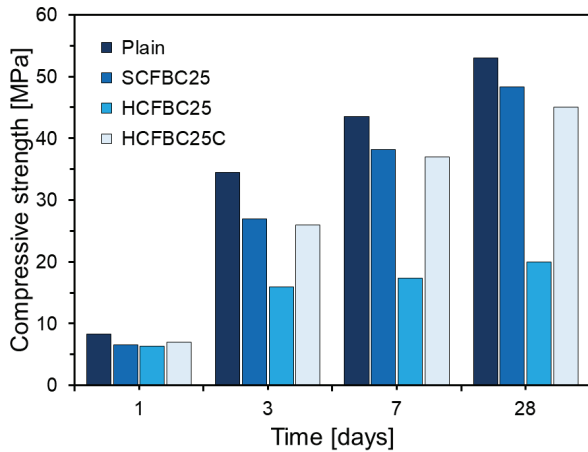


Fig. 8. Compressive strengths of mortar specimens

4. 결론

본 연구에서는 두 종류의 CFBC ash를 혼합한 시멘트의 수화 및 역학적 특성을 조사하였다. 또한, free-CaO 함량이 높은 H-CFBC를 탄산화 양생을 통한 전처리를 통해 건설재료로 활용하기 위한 가능성을 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 일반적으로 CFBC ash는 수화 초기에 급격하게 발열이 나타나는데 이는 CFBC ash에 포함된 free-CaO의 수화반응에 의한 것이다. 이는 Free-CaO 함량에 따라 다르게 나타나며, 수화 및 역학적 특성에 영향을 미친다.
2. CFBC ash의 free-CaO 측정 결과 S-CFBC가 11.8, H-CFBC 30.1로 H-CFBC의 free-CaO가 S-CFBC보다 약 3배 높게 나타났다. 이는 H-CFBC의 주 연료가 코크스로 free-CaO 뿐만 아니라 CaSO₄ 또한 다량 함유하고 있기 때문이다. 따라서 H-CFBC의 경우 건설재료로 활용하기 위해서는 주의가 필요하다.
3. H-CFBC의 free-CaO 함량 조절을 위해 탄산화 양생을 통해 전처리를 진행했을 때, 1~5시간까지 급격히 free-CaO가 감소하였으며, 12시간 이후로는 그 차이가 미미하였다.
4. S-CFBC를 혼합한 SCFBC25의 경우 HCFBC25와 HCFBC25C에 비해 가장 높은 누적발열량이 나타났으며, HCFBC25의 경우 H-CFBC에 포함된 높은 free-CaO에 의한 급결로 수화초기에 가장 높은 누적발열량을 보였으나 시간이 지나면서 가장 낮은 값을 보였다. HCFBC25C의 경우

HCFBC25와 다르게 수화초기에 급결 현상이 나타나지 않았으며, SCFBC25와 유사한 결과를 보였다.

5. HCFBC25C의 경우 미소수화열 결과와 유사하게, 전체적으로 HCFBC25의 압축강도 경향을 따르지 않고, SCFBC25와 비교하였을 때 조금 낮은 값을 보였지만 유사한 압축강도 경향을 보였다. 이는 전처리 과정을 통해 초반 급진적으로 발열하는 H-CFBC의 특성이 사라지면서 S-CFBC와 유사한 경향을 보이는 것으로 보인다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의해 수행되었음. (과제번호 20018156)

References

Anthony, E.J., Granatstein, D.L. (2001). Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, **27**(2), 215-236.

Hasan, M.M.F., First, E.L., Boukouvala, F., Floudas, C.A., (2015). A multi-scale framework for CO₂ capture, utilization, and sequestration: CCUS and CCU, *Computers & Chemical Engineering*, **81**, 2-21.

Hemalatha, T., Ramaswamy, A., (2017). A review on fly ash characteristics - towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete, *Journal of Cleaner Production*, **147**, 546-559.

Hu, L., Jia, Y., Chen, Z., Yao, Y., Sun, J., Xie, Q., Yang, H. (2022). An insight of carbonation-hydration kinetics and microstructure characterization of cement paste under accelerated carbonation at early age, *Cement and Concrete Composites*, **134**, 104763.

Irbe, L., Urbonas, L., Heinz, D. (2018). Coal fly ash activation Comparison of isothermal calorimetric data and mortar strength, *Thermochimica Acta*, **659**, 151-156.

Kuo, H.P., Tseng, H.Y., Huang, A.N., Hsu, R.C. (2014). A study of the ash production behavior of spent limestone powders in CFBC, *Advanced Powder Technology*, **25**(1), 472-475.

Song, Y., Qian, J., Wang, Z., Wang, Z. (2008). Self-cementing mechanism of CFBC coal ashes at early ages, Journal of Wuhan University of Technology—Materials Science Edition, **23(3)**, 338–341.

Ukwattage, N.L., Ranjith, P.G., Yellishetty, M., Bui H.H., Xu, T. (2015). A laboratory-scale study of the aqueous mineral carbonation of coal fly ash for CO₂ sequestration, Journal of

Cleaner Production, **103**, 665–674.

Wu, Y., Anthony, E.J., Jia, L. (2004). Steam hydration of CFBC ash and the effect of hydration conditions on reactivation, Fuel, **83(10)**, 1357–1370.

Xu, X., Xu, Y., Duan, L. (2018). Effect of fineness and components of CFBC ash on performance of basic magnesium sulfate cement, Construction and Building Materials, **170**, 801–811.

탄산화 양생이 순환유동층 보일러 애시의 수화특성에 미치는 영향

본 연구에서는 유리석회 함량이 다른 순환유동층 보일러 애시의 수화특성 및 탄산화 특성에 대해 조사하였다. 또한, free-CaO 함량이 높은 CFBC ash를 탄산화 양생 전처리를 하여 시멘트계 재료로의 활용 가능성을 살펴보았다. Free-CaO 함량이 높은 CFBC ash를 혼합한 경우 급결의 양상을 보였으며 낮은 초기 압축강도를 나타냈다. Free-CaO 함량이 높은 CFBC ash를 탄산화 양생하였을 때, 양생 기간에 따라 이산화탄소 포집량이 증가하였다. 또한, free-CaO 값이 함께 감소하였으며 free-CaO가 이산화탄소와 반응한 것으로 보인다. Free-CaO 함량이 높은 CFBC ash를 탄산화 양생 전처리를 한 경우 급결이 나타나지 않았으며, 초기 압축강도도 향상된 것을 확인할 수 있었다. 연구 결과 free-CaO 함량이 높은 CFBC ash의 경우 적절한 탄산화 양생을 통해 시멘트계 재료로 활용 가능성이 높은 것으로 나타났다.