

순환유동층 보일러애쉬를 활용한 경량기포 콘크리트 개발

Development of Autoclave Aerated Concrete Using Circulating Fluidized Bed Combustion Ash

이창준¹ · 송정현² · 정철우^{3*}

Chang Joon Lee¹ · Jeong-Hyun Song² · Chul-Woo Chung^{3*}

(Received February 5, 2021 / Revised February 22, 2021 / Accepted February 26, 2021)

In this study, as a method to increase the recycling of circulating fluidized bed combustion ash(CFBCA), CFBCA was utilized to produce autoclave aerated concrete product since CFBCA contains quicklime and calcium sulfate components that are required for the manufacture of autoclave aerated concrete. Successful achievement of such objective will bring cost reduction with high value addition, saving of natural resources, and the reduction of environmental load. Various mixing designs were designed to evaluate the properties of autoclave aerated concrete made of CFBCA. Based on series of experimental program, prototypes mix design for factory manufacturing was obtained. According to the experimental results, it was confirmed that gypsum can be replaced with CFBCA through the method of pre-treating the CFBCA as a slurry. It was possible to produce competitive autoclave aerated concrete products using CFBCA.

키워드 : 순환유동층보일러애쉬, 경량기포콘크리트, 압축강도, 절건밀도

Keywords : Circulating fluidized bed combustion ash, Autoclave aerated concrete, Compressive strength, Oven dry density

1. 서론

저에너지 저탄소 도시의 구현을 위한 에너지 공급체계의 핵심 기술로 성장하고 있는 소형 열병합 발전의 비중은 최근 들어 점차 커지고 있다. 그러나 발전연료인 고열량탄의 수급 악화로 저열량탄의 수요가 늘면서 기존의 방식과 다른 형태의 발전 설비인 순환 유동층 보일러(CFBC, Circulating Fluidized Bed Combustion)가 주목받기 시작하였다(Anthony and Granatstein 2001).

순환 유동층 보일러는 저열량탄을 사용할 수 있고, 대용량화 될수록 고효율을 보이는 특성을 가지며, 공기, 연료 및 석회성분을 동시에 주입시켜 연소시킴으로써 질소산화물, 황산화물 등 오염물질의 배출을 크게 줄이는 친환경 발전설비이다. 특히 현재 전 세계에서 생산되는 석탄의 상당수가 저질탄이고, 순환유동층 보일러는

저열량탄을 효율적으로 활용할 수 있는 특성을 가지고 있기 때문에, 순환 유동층 보일러 설비의 점유율은 1990년대 2%대에서 2000년대 중반 이후 10%대로 증가하였고, 현재에도 각종 발전소들이 순환 유동층 보일러를 채택하며 설비가 추가적으로 증가하고 있는 상황이다. 이에 따라, 순환 유동층 보일러를 가동하면서 나오는 산업 부산물인 순환유동층 보일러애쉬(CFBCA, Circulating Fluidized Bed Combustion Ash)의 처리 방법에 대한 대안이 필요하게 되었다(Koornneef et al. 2007; Park et al. 2020; Sheng et al. 2007).

배연탈황 석고와 달리 부가적인 탈황설비가 없는 순환 유동층 보일러에 석회석(CaCO₃)이 연료와 함께 투입되면, 850~900°C 온도에서 생석회(CaO)와 이산화탄소(CO₂)로 분해가 되고, 이후 생석회는 유동층 보일러 내의 황산화물(SO_x)과 산소(O₂)와 반응하

* Corresponding author E-mail: cwchung@pknu.ac.kr

¹충북대학교 건축공학과 부교수 (Associate Professor, Architectural Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Chungbuk, 28644, Korea)

²(주)에센이엔텍 대리 (Assistant Manager, ESEN Design&Tech, Seoul, 05855, Korea)

³부경대학교 건축·소방공학부 부교수 (Associate Professor, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea)

여 탈황석고를 생성하게 된다. 그러나 대부분의 순환 유동층 보일러를 사용하는 에너지 생산 업체의 경우 석회석을 과다 투입하여 탈황 효율을 높이는 방법을 사용하고 있기 때문에, 황산칼슘(무수석고) 뿐만 아니라, 반응하지 못한 생석회(CaO) 또한 함께 포함하게 된다(Chi and Huang 2013; Wang and Song 2013). 따라서 순환유동층 보일러애시를 건설재료로 재활용하게 되는 경우, 생석회(CaO)성분에 의한 발열반응 및 생석회의 수화반응에 의한 팽창 균열의 문제점 등이 발생하게 되어, 시멘트 대체재료 혹은 석고보드의 직접적인 대체재료로서 활용하기 어렵다(Havalica et al, 1998). 이는 순환 유동층 보일러 애시를 기존 산업의 순환자원으로 사용하기 위해서는 부가적인 공정이 필요하다는 것을 의미하며, 추가 비용을 발생시키기 때문에, 현재에는 지반 고화재 등의 저부가가치적인 용도로만 활용이 되고 있다.

본 연구에서는 순환유동층 보일러애시의 활용성을 높여, 상대적으로 고부가가치를 가지는 경량기포 콘크리트(Autoclaved Lightweight Concrete, ALC)의 제조에 활용하고자 한다. 경량기포콘크리트의 제조시 시멘트와 규사, 생석회, 석고 등 무기질 원료를 활용한다는 점에 착안하여, 생석회 및 황산칼슘 성분을 주 성분으로 하는 순환유동층 플라이애시를 생석회 및 석고의 대체재료 활용하고, 이를 통해 비용절감, 자원재활용, 환경부하 저감, 및 고부가가치화 등의 목표를 달성하고자 한다.

본 연구의 목표는 순환자원인 순환 유동층 보일러 애시를 사용하여 고강도 저비중의 경량 기포 콘크리트를 개발하는 것이다. 이를 위해 순환 유동층 보일러 애시의 화학분석을 실시하였고, 경량기포 콘크리트의 최적 배합 도출을 위해, 기포를 함유하지 않은 모르타르 시험체를 선제작하여 강도특성을 파악한 후, 최적 물성을 가지는 것으로 나타난 배합을 선정하여, 경량기포콘크리트를 제작하였다. 제작된 경량기포콘크리트 시험체의 굳기 전까지의 온도상승률, 오토클레이브 양생 이후의 압축강도 및 비중의 측정을 통해, 시제품 생산을 위한 최적 배합을 도출하였다. 최종적으로 실제 생산 공정을 이용한 시제품의 물성을 기존의 경량기포콘크리트의 물성과 비교 평가하여, 순환유동층 플라이애시의 경량기포콘크리트 활용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 순환 유동층 보일러 애시를 적용한 무발포 실험체와 발포 실험체를 제작하여 반복실험을 실시 후 이를 통해 경량

기포 콘크리트 물성 실험 및 최적 배합을 도출한 후, 이를 실제 공장 생산시설에서 제작하는 순서로 실험을 진행하였다.

무발포 실험체의 경우, ASTM C 109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar(using 50mm Cube Specimen) (ASTM 2020)”에 따라 크기는 50×50×50(mm)의 큐빅 형태로 모르타르 시험체를 제작하여 압축강도 실험을 수행하였다. 이는 재료의 화학성분 중 C/S 몰비에 따른 강도의 경향성을 파악하기 위한 실험계획이다.

발포 실험의 경우 발포에 따른 부피변화를 고려하여, 200×300×400(mm) 크기의 실험체를 제작한 후 모르타르 시험체 크기로 절단하여 강도를 측정하였다. 발포 시 시간에 따른 발포 시험체(cake)의 내부온도 변화를 측정하여, 온도상승률에 의한 경량기포 콘크리트의 제조 가능성을 파악하고자 하였으며, 제조된 cake의 형상 및 이의 안정성, 및 경화 후 재료 내부의 공극 분포의 균질성을 확인하여 경량기포 콘크리트의 제조가능성을 추가적으로 검증하고자 하였다.

2.2 실험재료

본 연구에 사용된 시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트이고, 이의 화학성분표는 아래의 Table 1에 나타나 있다. 순환유동층 보일러애시는 원유 정제과정에서 발생하는 석유 부산물인 petro coke 100%를 연료로 사용하는 국내 H사의 제품을 사용하였다. 순환유동층 보일러애시의 화학성분은 X-선 형광분석법에 의해 확인하였으며, 이를 Table 1에 정리하였다. 순환유동층 보일러애시의 비중은 르사틀리에 비중병을 이용한 KS L 5110(KS 2001) 시멘트의 비중 시험 방법에 의거하여 실시하여 측정하였으며, 이는 2.69로 나타났다.

Table 1에 따르면, 본 연구에 사용된 순환유동층 플라이애쉬는 유연탄을 연료로 사용하는 일반 순환유동층 플라이애쉬에 비해 SiO₂, Al₂O₃와 같은 주요 광물의 함량이 상당히 낮고, CaO와 SO₃의 함량이 높은 것을 확인할 수 있다(Kang and Jung 2017).

Table 1. Chemical compositions of materials(units: %)

Chemical component	Ordinary portland cement type I	Circulating fluidized bed boiler ash
CaO	62.5	56.81
SiO ₂	22.1	3.66
Al ₂ O ₃	5.4	0.50
SO ₃	2.2	28.23
MgO	2.1	0.55
Fe ₂ O ₃	3.2	0.25
LOI	2.44	9.02

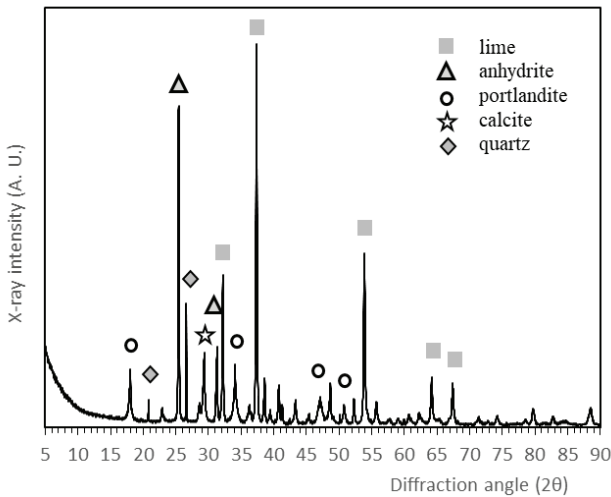


Fig. 1. XRD pattern of circulating fluidized bed boiler ash

Table 2. Mineral compositions of circulating fluidized bed boiler ash(units: %)

Mineral component	Amount(wt. %)
Anhydrite(CaSO ₄)	39.56
Calcite(CaCO ₃)	11.25
Quartz(SiO ₂)	2.46
Portlandite(Ca(OH) ₂)	15.38
Lime(CaO)	31.15

순환유동층 보일러에서의 광물상 분석은 X-선 회절분석을 이용하여 진행하였다. 순환유동층 플라이애시 샘플을 아게이트 막자에 얹고, 이를 곱게 갈아 미분말로 만든 후, Rigaku사의 Ultima IV X-ray diffractometer를 활용하여 광물상 분석을 진행하였다. 스캔된 2θ 회절각의 범위는 5°~90°이며, 전압 40kV 및 전류 40mA의 조건에서 연속스캔모드를 활용하여 측정하였다. 이후 얻어진 XRD 패턴은 Fig. 1에 나타내었는데, Fig. 1에 따르면, 순환유동층 보일러 애시는, 생석회(Lime: CaO), 무수석고(Anhydrite: CaSO₄), 수산화칼슘(Portlandite: Ca(OH)₂), 방해석(Calcite: CaCO₃), 및 석영(Quartz: SiO₂) 등의 결정성 광물을 함유하고 있는 것으로 나타났다. Whole pattern fitting 분석법에 의해 얻은 광물상의 정량 데이터는 Table 2에 정리하였다.

3. 무발포 실험

3.1 무발포 실험 배합

무발포 시험은 경량기포콘크리트에서 뼈대가 되는 골조 부분의

Table 3. Mix proportions of un aerated mortar specimens(g)

Mix No.	Quartz	Lime	Cement	Gypsum	CFBCA	Water
1	500.0	114.2	228.3	35.1	-	395.2
2	458.0	79.0	228.3	-	112.8	395.2
3	479.3	96.6	228.3	17.6	56.4	395.2
4	422.9	79.0	263.4	-	112.8	395.2
5	444.2	96.6	263.4	17.6	56.4	395.2
6	422.9	79.0	228.3	35.1	112.8	395.2
7	387.8	114.2	263.4	-	112.8	395.2
8	426.6	114.2	263.4	17.6	56.4	395.2
9	445.0	73.1	228.3	-	131.7	395.2
10	414.8	59.5	228.3	-	175.6	395.2
11	409.9	73.1	263.4	-	131.7	395.2
12	379.6	59.5	263.4	-	175.6	395.2
13	395.2	140.5	307.4	35.1	-	395.2
14	368.8	149.3	324.9	35.1	-	395.2

강도특성을 추정하기 위한 목적으로 진행되었다. 본 실험에 사용된 배합은 Table 3에 정리하여 나타내었다. Mix 1의 배합은 일반적으로 ALC를 생산하는데 사용되는 일반 배합이며(control), 이를 기준으로 각각의 구성재료의 양을 변화시켜 총 14종의 다양한 배합을 구성하여, 실험을 진행하였다.

무발포 실험은 재료의 계량 → 배합 → 타설 → 1차 양생 → 오토클레이브 양생 → 건조의 순으로 진행하였다. 재료의 배합은 계량이 끝난 후 물을 배합용기에 미리 붓고, 석고, 규사, 시멘트, CFBCA 슬러리, 생석회 순으로 재료를 투입하여 배합하였으며, 교반시간은 발열을 발생하는 재료인 시멘트 투하부터 5분으로 고정하였다. CFBCA의 경우 배합시 사용될 물의 일부와 슬러리 형태로 교반시켜 약 3일정도 정지한 후 활용하였는데, 이는 CFBCA에 존재하는 무수석고는 순환 유동층 보일러 내 850~900°C의 온도에서 CaO와 SO₃가 반응하여 생성된 석고로 불용성 무수석고이기 때문에, 일반적인 이수석고에 비해 반응성이 상당히 떨어질 수밖에 없어, 이를 일부라도 이수석고로 전환시켜 반응성을 올리기 위해 선택한 방법이다.

배합 후 몰드에 타설된 시험체는 온도 48°C, 상대습도 100%의 환경에 4시간동안 노출시켜 1차 양생을 진행하였고, 1차 양생이 마감된 시험체를 탈형한 후, 2차로 온도 180°C 10기압의 조건에서 오토클레이브 양생을 실시하였다. 오토클레이브 양생이 종료된 시험체는 수분을 많이 함유하고 있기 때문에, 3일동안 실험실에 방치시켜 기건상태로 건조시킨 후 압축강도 시험을 진행하였다.

3.2 미세구조 분석

오토클레이브 반응 이후 생성된 결정성 수화생성물(tobermorite 등)의 형상 분석은, 전계방사형 주사전자현미경 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope; Zeiss, Ultra Plus)을 사용하여 진행하였다. 이때 사용된 시료는 Table 3의 Mix 12~14번 (C/S 몰비를 0.5, 0.8, 및 1.0으로 조절된 배합)에 해당된다. 각 시료는 탄소양면테이프를 이용하여 받침판에 고정시켜 백금(Pt)으로 코팅하여 측정하였다.

3.3 무발포 실험 결과

3.3.1 압축강도 특성

양생 및 건조과정이 종료된 시험체를 대상으로 각 모르타르 시험체의 압축강도를 측정 후, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 따르면, Mix 1 배합인 Control은 37MPa의 압축강도 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. Mix 2, 3의 경우 Mix 1과 매우 유사한 압축강도를 보이는 것으로 나타났다.

Mix 4-6의 경우, 석고를 투입한 시험체(Mix 5-6)의 강도가 석고를 투입하지 않는 경우(Mix 4)에 비해 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Mix 7-8의 경우, Control 시험체(Mix 1)에 비해 상당히 낮은 강도성상을 보였는데, 이는 C/S 몰비를 높게 유지하는 것이 오토클레이브 양생 후 강도발현 성상에 유리하지 않음을 의미한다. Mix 9-12은 석고를 사용하지 않는 경우, CFBCA 비율 증대의 한계점을 확인하기 위해 설계된 배합인데, 이 또한 Control 시험체(Mix 1)에 비해 상당히 낮은 압축강도 값을 보이며, 시멘트량의 증가와 상관없이 CFBCA의 함유량이 높을 경우 강도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

구산 칼슘 수화물계에서 수열합성 반응을 하여 Tobermorite를 생성해 내는 C/S 몰비는 0.83으로 알려져 있는데(Galvankova et al, 2016), 인위적으로 C/S 몰비를 각각 0.8 및 1.0에 맞춘 Mix 13-14 배합의 경우, 강도성상이 C/S 몰비 0.5인 Control 시험체(Mix 1)에 비해 낮게 나타났으며, 시멘트량의 증가 및 규사량의 감소로 인한 C/S 몰비가 0.8을 상회하는 순간 오토클레이브 양생된 모르타르의 강도가 크게 떨어짐을 확인할 수 있었다.

전체적으로 Control 시험체(Mix 1)을 제외하고, 오토클레이브 양생에 적합한 배합은 Mix 2-6인 것으로 사료되며, 이의 배합을 이용하여 발포 시험체를 제작하고 이의 물성을 확인하고자 하였다. 유의할 점은 무발포 실험체는 발포에 대해 고려하지 않고 제작하였기 때문에, 발포 실험체를 제조하는 경우 발생할 수 있는 문제점들을 유의하여 이에 적합하도록 배합설계를 최종 도출해야 한

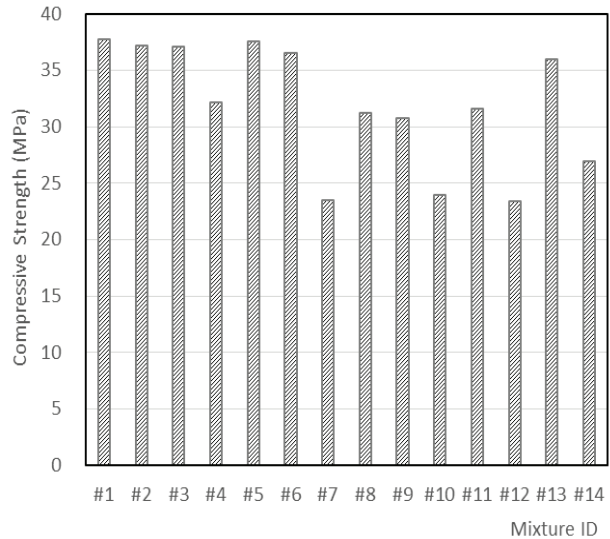


Fig. 2. Compressive strength of unaerated mortar specimens

다. 따라서 시멘트 변화량에 대한 압축강도의 차이는 큰 차이가 없다고 판단하며, 안전성 측면에서 발포 실험체 형태의 실험 또한 진행하고자 하였다.

3.3.2 미세구조적 특성

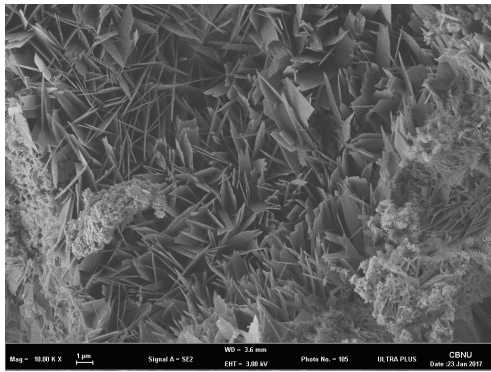
C/S 몰비 0.5(Control), 0.8, 및 1.0의 세 가지 시료(Mix 12, 13, 및 14)에 대해 SEM 촬영을 실시하여 압축강도의 감소에 대한 이유에 대해 분석하고자 하였다. Fig. 3에 따르면, C/S 몰비가 증가할 수록 많은 양의 Tobermorite(판상형의 결정)가 생성되지 않고 Xonotlite(침상형의 결정)의 생성이 진행된 것이 확인되었다.

4. 발포 실험

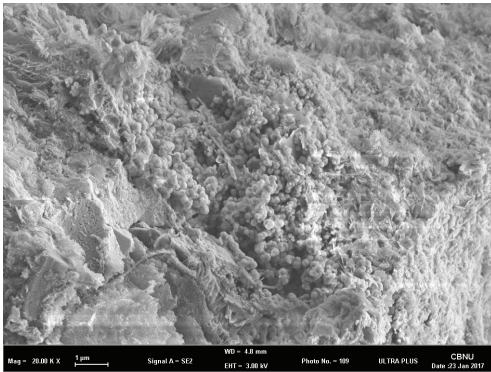
4.1 발포 실험 배합

4.1.1 발포제량 산정

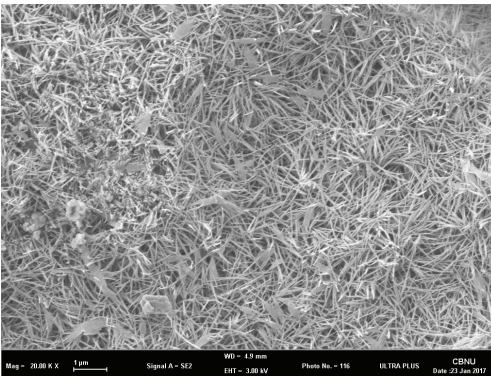
경량기포 콘크리트의 제조과정에서 안정성을 저하시키는 가장 큰 요인으로는 급격한 발열 및 초과 발포라고 할 수 있다. 본 연구에서는 무발포 실험을 통해 경량 기포 콘크리트의 골조 역할을 하는 Tobermorite를 다량 생성이 가능한 배합(강도발현성상이 뛰어난 배합)을 도출한 후, 발열문제는 배합에 따라 발생하는 열량을 산정하고, 이에 맞추어 초기 배합수 온도를 조정하여 문제점을 해결하고자 하였다. 이후 발포 실험을 진행하면서 압축강도와 비중을 확인하고 실제 경량기포 콘크리트의 제조과정에서 안정성을 확인하였다.



a) C/S ratio = 0.5



b) C/S ratio = 0.8



c) C/S ratio = 1.0

Fig. 3. SEM images of autoclave aerated specimens

초기 배합수 온도와 최종 슬러리 내부 온도가 중요한 이유는 경량 기포 콘크리트 제조 시 발포를 시키기 위하여 알루미늄 분말을 교반의 마지막 과정에 섞어 타설하는 과정 때문이다. 이때 온도를 설계와 같이 조절을 할 수 없다면 발포량 또한 정확하게 조절할 수 없다. 알루미늄 첨가량의 계산 방법은 생석회 수화반응으로 인한 발열량과 초기 타설 온도를 고려하여 최종 온도를 예측하여 산정하였다.

알루미늄은 CaO성분이 물과 반응하여 Ca(OH)₂가 풍부한 용액에서는 수소 가스를 발생하며 식 (1)과 같은 화학 반응식에 의해 반응한다. 경량 기포 콘크리트 내부 목표 온도를 대략 80°C로 산정하고, 이를 식 (2)를 활용하면, 발포에 필요한 알루미늄의 양을 개략적으로 산정 할 수 있다. 예를 들어 27g의 순수 알루미늄은 1.5몰의 수소가스를 발생시키는데, 기체 1몰은 상온 20°C로에서 22.4L의 부피를 가지며 온도에 따라 부피가 변하게 된다. 이를 통해, 최종적으로 알루미늄 1g이 발생하는 수소 기체의 양은 1.51L/g임을 확인할 수 있다. 혹은 알루미늄 순도에 변화가 발생하는 경우, 수소 기체 발생량을 순도로 나누어주면 된다.



$$V_t = 22.4(1 + \frac{\Delta t}{273}) \quad (2)$$

위의 기준을 바탕으로 산정된 알루미늄 첨가량 및 무발포 시험에서 선정된 Mix 1-6의 배합을 기준으로 발포시험체용 배합을 아래의 Table 4와 같이 결정하였다.

Table 4. Mix proportions of aerated mortar specimens(g)

Mix No.	Quartz	Lime	Cement	Gypsum	CFBCA	Water	Al
A1	6407	1461	2922	450	-	7531	8.1
A2	5863	1012	2922	-	1443	7531	8.2
A3	6135	1236	2922	225	722	7531	8.2
A4	5413	1012	3372	-	1443	7531	8.2

Note: 'A' indicates aerated specimen

Mix A1은 대조군이고(무발포 Mix 1과 동일), Mix A2-A4는 무발포 시험체용 배합 각각 Mix 4-6에 해당되는 배합이다. 시멘트 비율을 Mix A2, Mix A3은 26%로 사용하였으며 Mix A4는 30%로 사용하였다. CFBCA의 무수석고 성분을 이수석고로 사용하기 위해 물과 3일간 교반한 후 슬러리 형태로 만들어 투입하였다. 발포 시험체의 제작은 계량 → 교반 → 타설 → 내부온도 측정 → 1차 양생 → 탈형 → 오토클레이브 양생 → 커팅 → 건조 순으로 진행하였다. 발포 시험체 제작 시 교반은 Table 4에 나타난 정량을 계량하고 석고, 규사, 시멘트, CFBCA 슬러리, 생석회, 알루미늄 분말(발포용) 순으로 투하하며 교반하였다.

4.1.2 발포 시험체 온도 측정

발포시험체의 온도 측정 과정은 Fig. 4에 나타내었다. 발포 시험체 제작시, 내부에 발생한 온도의 측정을 위해, 200×300×400(mm)의 단열 목재 몰드를 제작하고, Type K 열전대를 시편의 바닥부에 위치시킨 후 배합이 완료된 시험체를 타설하였다. 타설이 완료된 발포 시험체는 온도 48°C 습도 100%의 양생실로 이동하여 1차 양생을 실시하였다.

1차 양생 완료 후, 하중계를 통하여 표면을 눌러 하중을 측정하였는데, 이는 경량 기포 콘크리트의 공정상 블록 혹은 패널의 형태로 제작된 시편을 강연선이 자르게 되는데 하중 측정값이 7.0kgf ~13.0kgf의 값이 나와야 강연선이 끊어지지 않고 공정에 적용이 가능하므로 이를 확인해야 하기 때문이다.

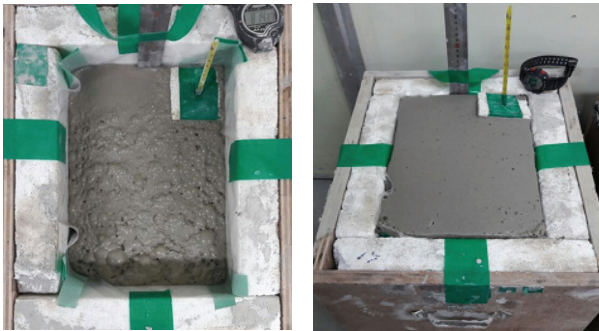


Fig. 4. Photographic images of aerated specimens(left: aerating process, right: after solidification)

4.1.3 발포 시험체 양생

1차 양생이 끝나면 탈형을 한 뒤 180°C 10기압의 오토클레이브에서 약 8시간 양생을 진행하였다. 오토클레이브 양생이 끝난 후, 밴드쏘우를 이용하여 시험체를 100×100×100(mm)의 큐빅 형태로 절단하였다. 경량 기포 콘크리트는 후 발포 방식으로 상부와 하부의 공극차이로 품질이 상이하기 때문에, 절단된 시험체에 상, 중, 하를 표시해 이의 강도와 비중을 따로 기록하였다. 절단이 끝난 시험체들은 실험실에 건조시켜 기건상태로 만든 후, 압축강도 실험은 KS F 2701(2012)에 의거하여 실시하였고, 비중은 105°C에서 72시간 건조 후 절건밀도를 측정하였다.

4.2 발포 실험 결과

4.2.1 내부온도 이력

Fig. 5는 각 배합의 온도이력을 나타낸 그래프로 타설 후 2시간여 동안 발포 시험체의 온도를 측정된 결과이다. 일반적으로 경량 기포콘크리트가 안정적으로 cake를 형성하고 유지할 수 있는 조

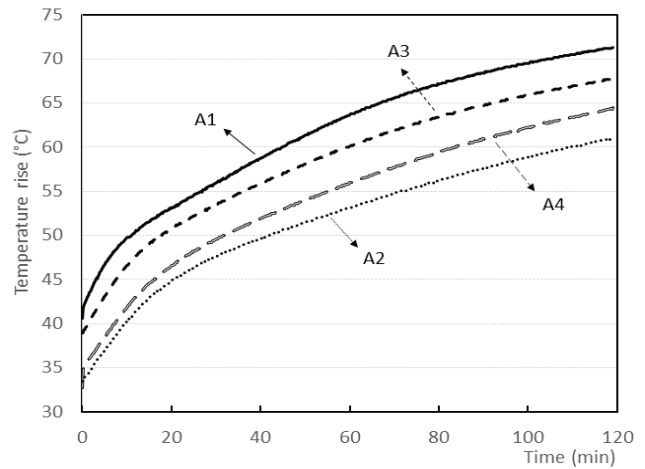


Fig. 5. Temperature of aerated specimens before autoclaving

건은 65~80°C 온도 영역으로 알려져 는데, 온도이력의 측정 시대부분의 시험체에서 2시간 이내에 해당 온도 영역에 도달하는 것으로 나타났으며, 측정기간 동안 시험체의 갑작스런 온도 상승 여부는 관찰되지 않았다. 시험체의 표면 형상을 통한 안정성 평가에서도, 모든 시험체의 표면에 특이할만한 균열이 확인되지 않아, CFBCA를 활용한 발포시험 배합이 비교적 안정적임을 확인할 수 있었다.

Fig. 5에 따르면, Mix A2 및 A4의 경우 온도이력이 Mix A1(control) 시험체에 비해 상당히 낮은 온도이력을 보임을 알 수 있었다. 그러나 Mix A3의 경우 Mix A1 시험체에 비해 온도는 다소 낮지만 Mix A2 및 A4 보다는 안정적인 온도상승곡선을 그리는 것을 확인할 수 있었다.

4.2.2 압축강도 및 절건밀도

Fig. 6은 발포 실험체의 압축강도 및 절건밀도를 나타낸 것으로, 압축강도에서는 Mix A2를 제외하고 모두 Mix 1(control) 시험체의 압축강도를 상회하는 것으로 나타났다. Mix A4의 경우 약 10% 이상 상승된 값을 보여 가장 우수한 압축강도 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 절건밀도에서는 모든 시험체의 밀도가 Mix 1(control)에 비해 높은 것으로 나타났다.

전반적으로 볼 때, CFBCA를 활용한 배합이 압축강도가 높고 비중이 조금 크게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열손실이 다소 발생하는 실험실 환경에서 측정된 값으로, 실제 열손실이 없는 조건의 현장 공정에서 활용하면 기포가 좀 더 발생하여 밀도를 낮출 수 있는 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 공장 생산에 활용될 배합을 강도 성상이 가장 좋게 나타난 A4 로 선정하여, 이를 공장 생산에 적용하였다.

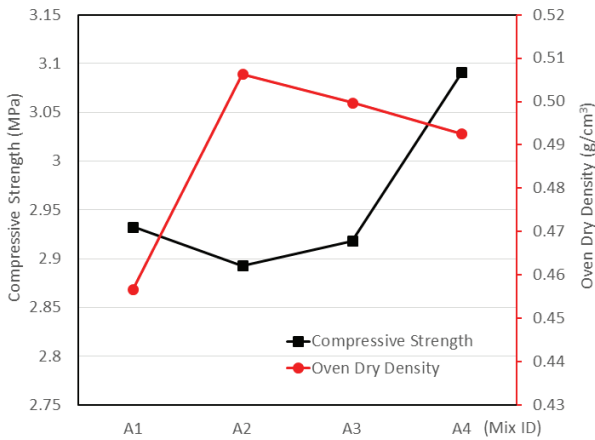


Fig. 6. Compressive strengths and oven dry densities of autoclave aerated specimens produced in the laboratory

5. 시제품 생산 및 평가

5.1 시제품 생산 배합

시제품 생산을 위해 최종적으로 선정된 배합은 Mix 4의 배합이다. 시제품 생산 시 몰드 내 열선이 부착되어 열 공급이 이루어지므로, 현장 적용을 위해 배합수 온도 산정 시 보정 값을 통해 미세조정 하였다. 배합설계를 Table 5에 나타내었으며 기존 석고를 사용한 경량 기포 콘크리트와 비교하기 위하여 동시 제작하여 성능을 평가하였다. 시험체의 발수 효과 증진을 위해 폴리실리콘 계열의 액상형 발수제를 고품분 대비 0.2% 추가하여 최종 시제품을 생산하였다.

경량 기포 콘크리트를 생산하는 과정은 발포 실험체의 과정과 유사한 과정으로 진행되었다. 실험 순서로는 교반 → 타설 → 1차 양생 → 커팅 → 오토클레이브 양생 → 출하의 과정으로 진행되며, 계량은 사일로에서 이루어졌다. 교반을 마치고 타설을 한 후 온도 48°C 습도 100%의 양생실로 이동하여 1차 양생을 실시하였다. 강 연선으로 절단을 하고 난 뒤 180°C 10기압의 오토클레이브에서 약 8시간 양생을 시켰으며, 양생이 끝난 실험체들은 실험실에 건조시켜 기건 상태로 만든 후, 압축강도 실험은 KS F 2701(2012)에 의거하여 실시하였고, 105°C에서 72시간 건조 후 절건밀도를 측정하였다.

Table 5. Mix proportions of aerated mortar specimens(kg)

Mix No.	Quartz	Lime	Cement	Gypsum	CFBCA	Water	AI
Control	1741	397	794	513	-	1596	2.35
CFBCA	1471	275	916	-	1177	1202	2.35

5.2 시제품 최종 성능 평가

시제품으로 생산된 경량 기포 콘크리트의 압축강도와 절건밀도를 Fig. 7에 나타내었다. 발포 시험체의 결과와는 달리, 압축강도 및 절건밀도 모두 일반 경량 기포 콘크리트(A1; control)가 CFBCA를 활용한 경량 기포 콘크리트에 비해 높게 나타났다. 그러나 압축강도/절건밀도의 비율로 이를 비교하면 A1 시험체와 CFBCA를 활용한 시험체가 매우 근사한 값을 가지는 것으로 나타났으며, 이를 고려하면 CFBCA를 활용하여 경량 기포 콘크리트를 공장 제작하는 것은 충분한 가치를 가진다고 볼 수 있다.

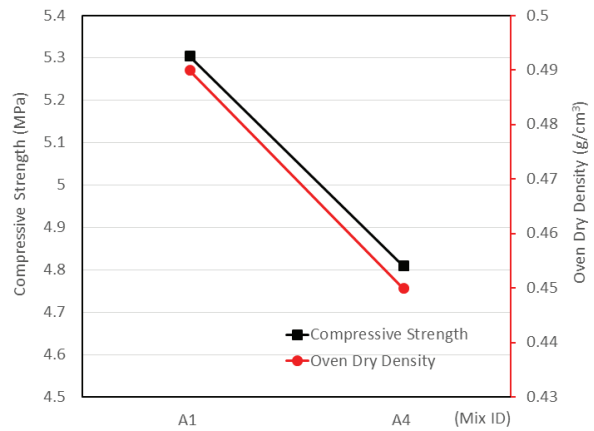


Fig. 7. Compressive strengths and oven dry densities of autoclave aerated specimens produced using factory facility

6. 결론

본 연구에서는 경량 기포 콘크리트의 제조에 CFBCA의 활용가능성을 평가하고자, 다양한 배합설계를 도출하여 실험을 진행하였고, 이를 바탕으로 최종적으로 실제 공장에서 시제품을 생산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 슬러리 형태로 CFBCA를 선처리하여 활용하는 경우, 일반 콘크리트 배합과 물성에서 큰 차이가 없는 경량 기포 콘크리트의 제조가 가능하며, 이를 통해 충분한 경제성을 확보할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 시험체 내부의 C/S 물비가 높아질수록 판상형의 tobermorite 결정보다는 침상형의 Xonotlite 결정상의 생성이 더욱 촉진되는 것을 확인하였다. 따라서 경량 기포 콘크리트의 제작에서 tobermorite 결정의 생성을 촉진시켜 강도를 상승시키려면, C/S 물비를 0.8 이하로 낮추는 것이 유리한 것으로 밝혀졌다.

Conflicts of interest

None.

Acknowledgment

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21NANO-B156177-02).

References

- American Society for Testing and Materials C 109. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens), West Conshohocken: ASTM International.
- Anthonu, E.J., Granatstein, D.L. (2001). Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems, *Progress Energy Combustion Science*, **27(2)**, 215–236.
- Chi, M., Huang, R. (2013). Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete, *Cement and Concrete Composites*, **45**, 148–156.
- Galvankova, L., Masilko, J., Solny, T., Stepankova, E. (2016). Tobermorite synthesis under hydrothermal conditions, *Procedia Engineering*, **151**, 100–107.
- Havalica, J., Brandstetr, J., Odler, I. (1998). Possibilities of utilizing solid residues from pressured fluidized bed coal combustion(PSBC) for the production of blended cements, *Cement and Concrete Research*, **28(2)**, 299–307.
- Kang, Y.H., Jung, S.W. (2017). Material properties of circulating fluidized bed combustion fly ash and utilization of non-sintered cement field, *Magazine of RCR*, **12(2)**, 26–32 [in Korean].
- Koornneef, J., Junginger, M., Faaij, A. (2007). Development of fluidized bed combustion—an overview of trends, performance and cost, *Progress Energy Combustion Science*, **33(1)**, 19–55.
- KS F 2701 (2012). Autoclaved Lightweight Aerated Concrete Block, Korean Agency for Technology and Standards [in Korean].
- KS L 5110 (2001). Testing Method for Specific Gravity of Hydraulic Cement, Korean Agency for Technology and Standards [in Korean].
- Park, J., Oh, H., Jung, G.S., Kang, C.H. (2020). Application on the CFBC fly ash as a stimulant to improve the early strength of hydration portland cement, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(1)**, 8–16 [in Korean].
- Sheng, G., Li, J., Li, F. (2007). Self-cementitious properties of fly ashes from CFBC boilers co-firing coal and high-sulphur petroleum coke, *Cement and Concrete Research*, **37(6)**, 871–876.
- Wang, B., Song, Y. (2013). Methods for the control of volume stability of sulfur-rich CFBC ash cementitious systems, *Magazine of Concrete Research*, **65(19)**, 1168–1172.

순환유동층 보일러애쉬를 활용한 경량기포 콘크리트 개발

본 연구에서는 순환유동층 보일러 애쉬의 재활용 가능성을 높이기 위한 방법으로, 경량기포콘크리트의 제조시 생석회 및 황산칼슘 성분이 필요하다는 점에 착안하여, 이를 생석회 및 석고의 대체재로 활용하여, 생산원가 절감, 자원재활용, 환경부하 저감 및 고부가가치화 등의 목표를 달성하고자 하였다. 다양한 배합설계를 도출하여 경량기포 콘크리트 물성을 평가하였고, 이를 바탕으로 실제 공장에서 시제품을 생산하여, 경량 기포 콘크리트의 제조에 순환유동층 보일러애쉬의 활용성을 검증하고자 하였다. 실험 결과에 따르면, 순환유동층 보일러애쉬를 슬러리로 선처리하여 활용하는 방법을 통해 석고를 CFBCA로 대체 가능한 것이 확인되었으며, 이를 통해 경쟁력 있는 경량기포 콘크리트 제품의 생산이 가능함을 보였다.