

과산화수소를 혼입한 경량기포 모르타르의 물리적 특성에 관한 연구

Investigation on the Physical Properties of the Lightweight Mortar Made with Hydrogen Peroxide

이 수 용

김 지 현

이 재 용

정 철 우*

Lee, Soo-Yong Kim, Ji-Hyun Lee, Jae-Yong Chung, Chul-Woo*
Department of Architectural Engineering, Pukyong University, Nam-Gu, Busan, 48513, Korea

Abstract

The increase in energy efficiency has become a significantly important issue for building construction and maintenance. The energy efficiency is known to be achieved by using a material with lower thermal conductivity, and the best method is to increase the internal porosity of the material. Typical ways to increase internal porosity within cementitious composite are to use foaming agents or to use reactive powder such as aluminum. However, in this work, hydrogen peroxide was chosen as an alternative material to make lightweight cement mortar. The volume expansion of fresh cement mortar and unit weight, compressive strength and thermal conductivity of 28 day old cement mortar were measured. According to the experimental results, the incorporation of hydrogen peroxide increased internal porosity, and thereby reducing the compressive strength and thermal conductivities of cement mortar. It was found that hydrogen peroxide can be successfully used to produce lightweight mortar for thermal insulation purposes of buildings.

Keywords : lightweight mortar, hydrogen peroxide, volume expansion, compressive strength, thermal conductivity

1. 서 론

단열 효과가 높은 유기질 계열의 단열재는 화재가 발생하는 경우 직접 연소가 발생할 수 있으며, 이로 인한 유독가스의 분출 등과 같은 2차적인 문제로 인해 인명피해에 직접적인 영향을 미친다[1,2,3]. 유기질 단열재료의 경우 난연처리를 통해 이를 일정부분 해결할 수 있다고 보고되어져 있으나, 여전히 화재시의 연소 및 유독가스의 분출 문제에서 완전히 자유롭지 못한 것이 현실이다. 특히 난연 처리된 발포 폴리스티렌 같은 경우 폐기물 처리에 여러 가지 어려움이 따르는 것으로 알려져 있다[4]. 이러한 이유로 여러 종류의 건축물

에 점차적으로 무기질 단열재를 활용하는 방향으로 전환되는 추세이다.

무기질 단열소재의 대표적인 종류로는 경량 기포 콘크리트를 들 수 있다. 경량 기포 콘크리트는 기존의 콘크리트보다 공극이 많으므로, 무게가 가볍고, 열전도율이 높아 내화성이 뛰어난 단열재의 형태로 많이 활용한다. 시멘트 복합체 내부에 경량을 유지하기 위한 기포를 투입하는 방법에는 여러 가지의 형태가 존재하는데, 이 중 가장 일반적인 형태는 콘크리트의 대부분을 차지하는 골재를 경량의 골재로 치환하는 방법이다[5,6,7]. 그러나 이는 고온의 소성공정을 거치는 경량골재의 특성상 생산비용이 높아 큰 경제성은 가지지 못하는 것으로 알려져 있다. 또한, 금속분말이 알칼리 용액과 접촉하여 수소가스를 발생시키는 원리의 발포제를 이용하여 제조하는 ALC(Autoclave Lightweight Concrete)의 경우[8]에도 비용이 비쌀 뿐만 아니라, 제품의 제조 중 수소가스의 발생 및 고압의 양생과 관련된 안전의 문제가 발생할 수 있어 항상 유의해야만 한다. 이를 고려하면 온도 및 압력

Received : January 10, 2018

Revision received : January 23, 2018

Accepted : January 25, 2018

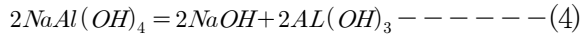
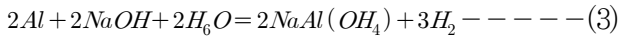
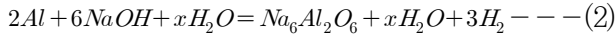
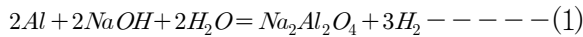
* Corresponding author : Chung, Chul-Woo

[Tel: 82-51-629-6084, E-mail: cwchung@pknu.ac.kr]

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

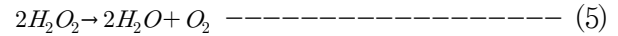
을 상승시키는 공정을 동반하는 제품을 저비용의 유기질 단열재의 대체재로서 고려하기는 어려울 것으로 보인다.

상온에서 배합 중 다량의 공기를 연행시키는 방법은 높은 온도 및 압력이 필요 없어 경제적으로 충분히 고려할 수 있는 하나의 대안이 될 수 있다. 이러한 형태의 콘크리트를 일반적으로 경량기포콘크리트로 부르며, 그 중 특히 공극률이 높은 형태의 특수한 콘크리트를 cellular concrete(기건비 중 $0.8g/cm^3$ 이하)라고 ACI committee 523에서 정의하였는데[9], 콘크리트의 내부에 다량의 공기를 안정적으로 연행시키기 위해서는 크게 두 가지의 방법이 존재하는 것으로 알려져 있다. 첫 번째 방법은 적정량의 혼화재료(거품 생성제; Foaming Agent)를 물에 혼입하여 시멘트계 재료와 직접적으로 배합하며, 배합하는 과정에서 기포가 생성되도록 유도하거나 먼저 만들어진 공기방울을 시멘트, 물과 함께 투입하여 배합하는 방법이다. 이 때, 기포는 매우 안정적인 형태이어야 한다. 두 번째 방법은 알루미늄 분말과 같은 재료를 이용하여 시멘트 재료 내부에서 발생하는 화학적인 팽창을 활용하는 방법이다[10]. 시멘트 복합체 내부에서(특히 높은 pH를 가지는 상황에서) 알루미늄의 화학반응은 아래의 식 (1)~(4)와 같이 이루어지는 것으로 알려져 있다[11].



이 방법은 앞서 언급된 ALC의 제조에도 활용되는 기술이지만 알루미늄 분말의 가격이 상대적으로 높아 다방면으로 활용되지는 못하고 있으며, 특히 수소가스의 발생으로 인해 주변 환경 관리가 소홀해지면 수소가스의 농축으로 인한 폭발사고로 이어질 수 있는 가능성이 존재한다. 따라서 상온에서의 화학적인 팽창을 유도하기 위한 두 번째의 방법을 선택 시에는 보다 안정적인 대체 재료를 확보할 필요성이 존재한다.

기존의 콘크리트를 만드는 과정에 과산화수소를 발포제로 첨가할 경우 과산화수소가 시멘트 복합체 내부에서 산소를 발생시킬 수 있다[12]. 과산화수소가 물에 첨가되는 순간 발생하는 산소를 발생시키는 반응은 아래의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.



과산화수소를 활용하게 되면, 수소가스를 발생시키는 알루미늄 분말에 비해 유해성이 훨씬 낮은 산소를 발생시키는 공정을 이용한다. 이로 인해 시멘트 복합체 내부에 다양한 크기의 공극을 형성시켜 경량기포콘크리트의 제작이 가능해지거나, 그 특성을 경량 기포 콘크리트에 매우 유사한 수준으로 향상시킬 가능성이 존재한다. 기존의 연구결과에서는 일반적으로 시멘트에 대한 과산화수소의 혼입률이 커질수록 압축강도는 낮아지지만 재료의 무게 또한 줄어들어 충분한 경량성을 확보할 수 있다고 보고되었다. 특히 경량 기포 콘크리트의 28일 압축 강도를 발포제인 과산화수소의 비율에 따라 측정, 비교하여 이의 최적비를 제시하였다[13]. 그러나 현재까지 과산화수소를 혼입한 시멘트 복합체에 관련된 연구결과는 매우 부족한 상황으로 이에 대한 추가적인 연구결과의 확보가 필요하다.

본 연구에서는 경량 기포 모르타르를 이용하여 재령 28일 압축강도, 단위용적중량, 부피 팽창률 및 기존에 진행되지 않은 열전도율을 측정하여 과산화수소를 혼입한 경량 기포 모르타르의 물성에 대한 연구를 진행하고자 하였다. 콘크리트가 아닌 모르타르를 활용한 이유는 모르타르를 이용하여 시멘트 벽돌로써의 제조 가능성도 존재하지만 모르타르는 실제 미장과 같은 상황에서도 충분히 활용이 가능하다. 그러므로 과산화수소를 활용하는 경우 미장이나, 모서리 부분의 단열 시공시 활용될 수 있는 충분한 가능성을 지닌다고 판단하였기 때문이다. 본 연구의 최종 목적은 발포제로 과산화수소(Hydrogen Peroxide)를 사용하여 과산화수소의 혼입 비율에 따른 모르타르의 물성 변화를 분석하고 이의 활용 가능성을 평가하여 단열이 취약한 부위나 결로 발생 부위 또는 부정형의 부위에 내부 충전재 또는 바름재로서 경량 기포 모르타르를 적용하기 위한 기초자료를 제시하고자 함이다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

이 연구는 기존의 알루미늄 분말을 사용하여 발포한 고온 고압양생법에 비해 경제적으로 저렴한 과산화수소를 이용하여 상온양생법으로 경량기포 모르타르를 연구하기 위함이며, 실험인자는 Table 1과 같다.

단위시멘트량(C), 물시멘트비(W/C), 발포제-시멘트비(H/C)를 실험인자로 선정하였으며, 단위시멘트량(C)를 500kg/m³, 시멘트와 모래(S)는 1:3비율, 물시멘트비(W/C)는 50%로 고정하였으며, 발포제-시멘트비(H/C)를 0~30%의 변화를 주었다. 사용재료는 시멘트는 KS L 5201 「포틀랜드 시멘트」의 규격을 만족하는 국내 S사에서 생산되고 있는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 그 물성은 Table 2와 같다.

Table 1. Experimental factors and variations

Factors	Value	Abbreviation
Cement (kg/m ³)	500	C
Water to cement ratio (%)	50	W/C
Cement to hydrogen peroxide ratio (%)	0, 10, 20, 30	H/C
Sand (kg/m ³)	1,500	S

Table 2. Chemical compositions of OPC

Specimen	Chemical composition(wt.%)							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂
Cement	63.42	19.48	4.69	4.08	3.11	3.04	1.32	0.38

실험에 사용된 모래는 주문진산의 표준사를 사용하였고, 물은 상수도를 사용하였다. 과산화수소는 D사에서 생산되는 KS M 1112 「과산화수소」의 규격을 만족하는 공업용 35% 과산화수소를 사용하였으며, 그 품질은 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of hydrogen peroxide

Class	Amount(%)	Evaporation(%)	Free acid(%)	Stability(%)
35% Hydrogen peroxide	More than 35.0	Below 0.10	Below 0.05	More than 97.0

2.2 실험방법

2.2.1 배합

공시체의 제조는 Kitchen Aid 사의 paddle mixer를 이용하여 진행하였다. 먼저 시멘트와 모래를 혼입한 후 건비뮴

을 1분간 진행하여 시멘트와 모래를 균등하게 분산시켰고, 이후 배합수를 투입하여 느린 속도에서 2분간 모르타르의 배합을 진행하였다. 과산화수소의 투입은 모르타르의 배합이 완료된 후에 이루어졌으며, 믹서를 이용하여 1분간 추가 배합하였다.

배합이 완료된 모래는 5×5×5cm 큐브(Cube) 몰드(압축강도 및 단위용적중량 측정용) 및 9×9×1cm의 판형 몰드(열전도율 측정용)에 다짐을 진행하였다. 과산화수소를 혼입한 모르타르의 경우 과도한 다짐으로 인해 기포가 제거될 수 있으므로 최소한의 자극만을 이용하여 다짐을 진행하였으며, 수분의 증발을 방지하기 위하여 성형이 완료된 모르타르를 포함한 몰드에 비닐을 씌워 밀봉한 후 24시간 동안 보관하였다.

2.2.2 부피팽창률 측정

배합이 완료된 직후, 굳지 않은 상태의 모르타르를 1,000ml의 메스실린더(원통형)에 투입하여 400ml의 용량을 맞추고, 이 지점을 기준으로 하여 시간의 경과에 따른 부피팽창률을 측정하였다. 부피팽창 측정은 1시간 동안 매 10분 간격으로 진행하였다.

2.2.3 양생 및 시편처리

배합 24시간 경과 후 각각의 몰드에서 탈형을 하였으며, 이후 28일간 포화 수산화칼슘 수용액에서 수증양생을 진행하였다. 양생이 끝난 공시체는 급격한 건조를 방지하기 위해 48시간 자연건조 후 60℃의 온도로 24시간 완전 건조를 진행하였고, 이후 모르타르 시편체의 28일 압축강도, 단위용적중량, 열전도율 실험을 진행하였다.

2.2.4 28일 단위용적중량 및 압축강도

28일 재령이후 건조가 완료된 모르타르 시편체를 전자식 저울 위에 올려 무게(g)를 측정하였다. 또한 버니어캘리퍼스를 이용하여 시편체 각 면의 길이를 측정한 후 단위용적당 무게비를 이용하여 단위용적중량을 산출하였다.

단위용적중량 측정이 완료된 시편체를 이용하여 압축강도 측정을 진행하였다. 압축강도 시험은 KS L 5105 규정에 따라 진행되었고, 압축강도를 측정하기 위한 실험장비는 전동식 압축강도 시험기(S1 industry Co., Korea, S1-1471D)를 사용하였으며, 하중재하속도는 1mm/min으로 하였다.

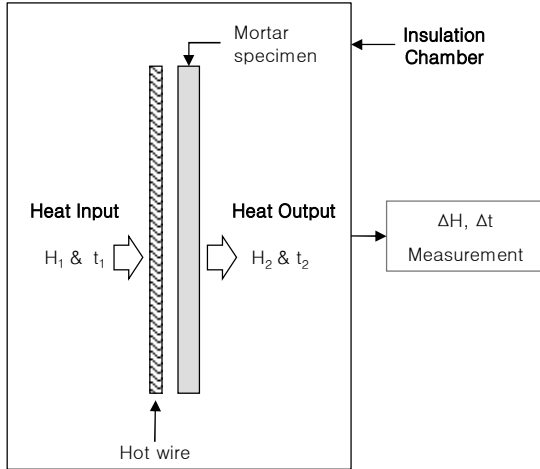


Figure 1. Schematic diagram of thermal conductivity measurement

2.2.5 열전도율 측정

열전도율의 측정은 실험실에서 자체 제작한 단열챔버(실험실 인큐베이터)를 통해 측정하였으며, 판형물드로 제작한 모르타르의 마감면이 열선면과 마주보게 설치한 후, 절연재료로 마감하여 미세열 교환을 차단하였다. 이후 단열챔버의 상부 캡을 덮어 전류를 통해 열을 발생 시키면 열선면에서 발생하는 열이 모르타르 마감면에 Input 되어 비마감면에서 시간차(Δt)를 가지고 Output 되는데 이때 발생하는 온도의 편차(ΔH)와 시간차(Δt)를 이용하여 열전도율을 측정하였다. 식 (6), (7)은 열전도의 법칙을 나타낸 것이며, Figure 1은 열전도율 측정 원리를 간단히 도식화하여 나타낸 것이다[14].

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{-----(6)}$$

$$P = kA \left| \frac{dT}{dx} \right| \text{-----(7)}$$

P: 에너지 이동 비율 (W or kcal/hr)

k: 열전도도(kcal/m · hr · °C)

Q: 에너지(J) Δt: 시간(s or hr) A: 단면적(m²)

ΔT: 온도차(°C) Δx, dx: 두께(m)

3. 실험결과 및 분석

3.1 부피팽창

부피팽창은 1,000ml의 메스실린더에 400ml의 모르타르

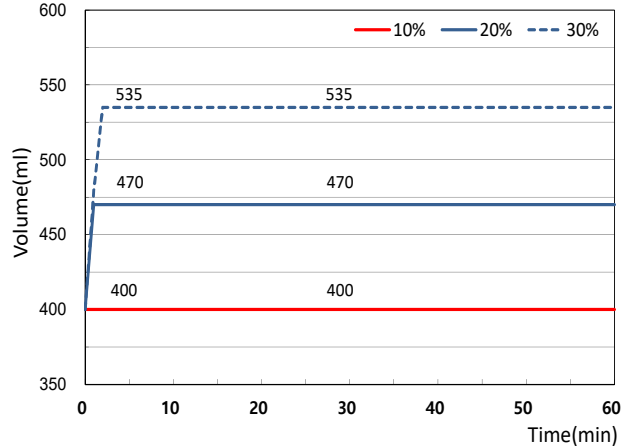


Figure 2. Volume expansion of fresh cement mortar made with hydrogen peroxide

를 동일하게 채운 후 발포제-시멘트비의 비율에 따라 시간이 경과함에 따른 부피변화를 관찰한 것이며, 이의 결과 값을 Figure 2에 나타내었다.

Figure 2에 따르면, 과산화수소를 혼입한 모르타르는 초기 1분 동안 급격한 변화가 일어나는 것으로 확인되었다. 또한 대부분의 팽창반응은 10분 내에 마무리되는 것으로 관찰되었다. 과산화수소의 혼입률이 증가할수록 부피팽창은 증가하는 것으로 나타났다. 과산화수소의 혼입률이 20%인 경우 최종부피는 470ml로 초기부피 400ml 대비 17.50% 증가하였으며, 과산화수소 혼입률이 30%로 증가하는 경우 최종 부피는 535ml로 33.75% 증가하였다. 그러나 과산화수소의 혼입률이 10%인 경우 초기부피 400ml 대비 아무런 차이를 보이지 않았다. 이는 과산화수소를 혼입하지 않은 플레인 모르타르의 값과 동일한 것이다. 이러한 결과가 관찰된 이유는 과산화수소 혼입률 10%인 경우에도 부피의 팽창은 발생하나, 대부분의 팽창이 시험체를 메스실린더로 옮기는 과정에서 완료됨에 따라 추가적인 부피팽창이 발생하지 않은 것으로 사료된다. 이는 과산화수소 혼입률 10% 정도로는 시멘트 모르타르에 충분한 팽창을 유도하기 어렵다는 것을 의미한다.

3.2 단위용적중량 및 압축강도

단위용적중량은 압축강도를 측정하기 전 각각의 모르타르의 무게를 측정한 후, 각 면의 길이 측정값을 이용하여 부피를 계산하고 이를 이용하여(무게/부피) 도출된 값의 평균값을 나타낸 것이다. 측정결과 값은 Figure 3에 나타나 있다.

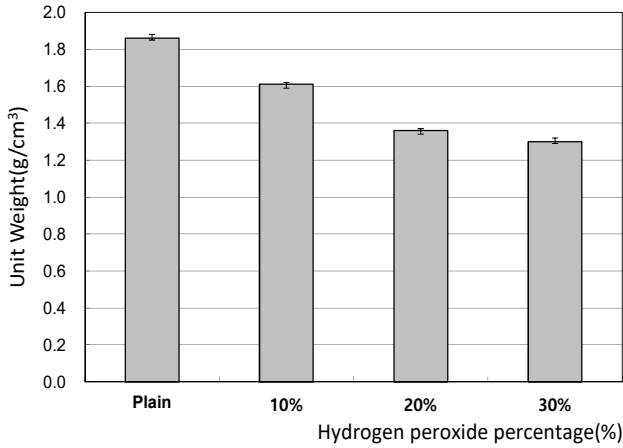


Figure 3. Unit weight of 28 day old cement mortar made with hydrogen peroxide

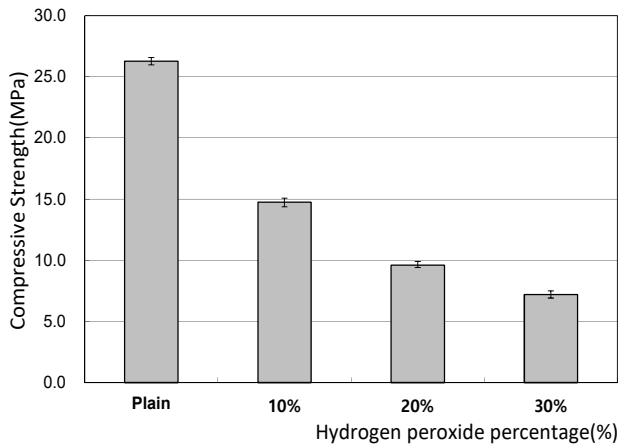


Figure 4. Compressive strength of 28 day old cement mortar made with hydrogen peroxide

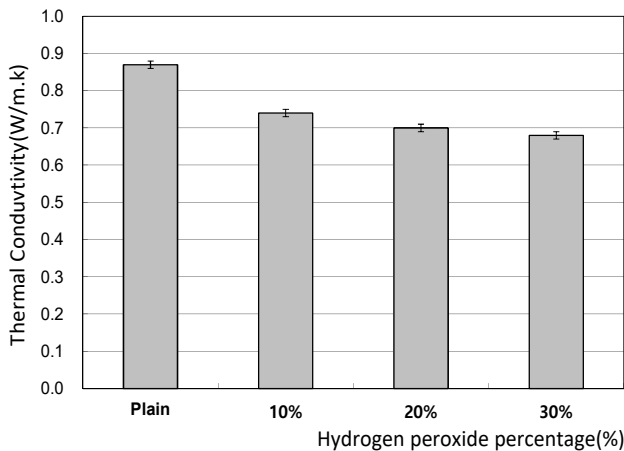


Figure 5. Thermal conductivity of 28 day old cement mortar made with hydrogen peroxide

Figure 3에 따르면, 과산화수소를 혼입하지 않은 시멘트 모르타르의 단위용적중량이 1.86g/cm^3 으로 나타났는데, 단위용적중량은 발포제-시멘트비가 증가할수록 부피는 일정하지만 공극의 다수 발생으로 인해 낮아지는 것으로 확인되었다. 과산화수소의 혼입률이 각각 10, 20, 30%로 증가함에 따라 $1.61, 1.36, 1.30\text{g/cm}^3$ 으로 감소하였으며, 단위용적중량의 최종 감소율은 30.11%에 해당되는 것으로 나타났다. 따라서 과산화수소의 혼입을 통해 경량기포 모르타르의 제작이 가능함을 확인 할 수 있었다.

28일 재령 압축강도 결과는 Figure 4에 나타난 바와 같다. Figure 4에 따르면, 압축강도는 발포제-시멘트비가 증가할수록 공시체에 공극이 증가로 인해 감소하는 것으로 확인되었다. 발포제-시멘트비가 10%일 때는 Plain 시멘트 모르타르의 압축강도인 26.28MPa과 비교해 43.84%정도 급격하게 떨어진 14.76MPa로 측정되었으며, 발포제-시멘트비가 20, 30%로 증가할 때에도 압축강도는 각각 9.60 및 7.20MPa로 감소하였다. 그러나 과산화수소의 혼입률이 증가할수록 압축강도 감소량은 줄어드는 것으로 나타났으며, 이는 단위용적중량의 측정결과 값의 감소 경향과 거의 유사한 형태의 경향을 보이는 것을 알 수 있었다.

3.3 열전도율

과산화수소를 혼입한 시멘트 모르타르의 열전도율 데이터를 Figure 5에 나타내었다. Figure 5에 따르면, 과산화수소의 혼입률이 증가하면서 열전도율은 감소하는 것으로 나타났다. 과산화수소를 혼입하지 않은 일반 모르타르의 열전도율은 $0.87\text{W/m} \cdot \text{K}$ 로 관찰되었으며 과산화수소의 혼입률이 10, 20, 30% 증가할 때, 각각 0.74, 0.70, $0.68\text{W/m} \cdot \text{K}$ 로 점차적으로 감소하였다. 이는 plain 시멘트 모르타르 대비 각각 85.06, 80.45, 78.16%에 해당되는 값이다.

4. 고찰

본 연구는 과산화수소를 혼입한 모르타르의 단열용 모르타르로서의 활용 가능성을 평가하기 기초연구로, 과산화수소 혼입량 변화에 따른 시멘트 모르타르의 물리적 특성을 비교 측정하였다. Figures 2~5의 결과를 종합적으로 고려해 볼 때, 시멘트 페이스트에 과산화수소를 혼입하게 되면 시멘트 모르타르의 공극률을 증가시키게 되고 이를 통해 열전도율의 감소를 충분히 이끌어낼 수 있음을 확인하였다.

그러나 Figure 2에서 나타난 과산화수소 혼입 시멘트 모르타르의 단위용적중량 값은 모두 cellular concrete의 최소 기준인 0.80g/cm^3 보다는 높은 값을 보여, cellular concrete로 분류될 정도의 공극률을 얻어지는 못한 것으로 관찰되었다. 이로 인해, 과산화수소를 혼입한 시멘트 모르타르로부터 확인할 정도의 열전도율의 감소는 이끌어낼 수 없었다.

과산화수소를 이용하여 cellular concrete 정도의 공극률을 달성하기 위해서는, 배합비율, 골재량 조절, 물시멘트비 조절과 같은 부분에 대한 추가적인 연구의 진행을 통해 과산화수소의 활용성을 검증할 필요성이 존재한다는 것을 의미한다. 특히, 골재량 조절의 경우 과산화수소가 페이스트의 팽창을 유발하기 때문에 가장 유의미한 변수가 될 것으로 사료된다. 또한 물의 존재가 과산화수소의 분해를 촉진하기 때문에 배합수량 및 물시멘트비 또한 공극률에 매우 중요하게 작용할 수 있다.

이러한 문제들이 명확하게 해결된다면 최종적으로 과산화수소를 혼입한 시멘트 모르타르를 결로 부위나 단열이 취약한 부위에 경량 단열 모르타르로 시공이 가능할 것으로 사료된다. 이를 위해서는 과산화수소를 혼입한 시멘트 모르타르를 가상 건축물에 적용시켜 건물에너지 시뮬레이션을 통해 검증하고 실제 결로와 같은 문제점이 발생할 수 있는 부재에 적용시켜 단열성 개선에 대한 평가를 진행하여야 한다면 과산화수소 혼입 모르타르의 실제 적용성에 대한 완전한 검증이 이루어질 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 과산화수소를 혼입한 시멘트 모르타르의 물리적 특성을 비교 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단위용적중량은 발포제 시멘트비(H/C)가 증가할수록 plain과 비교해 최대 약 30% 낮아지며, 부피팽창 또한 최대 약 33% 증가하는 것을 확인함으로써 과산화수소의 혼입을 통한 경량기포 모르타르의 제작이 가능함을 확인하였다.
- 2) 28일 재령에서의 압축강도는 발포제 시멘트비(H/C)가 증가할수록 내부에 공극이 많이 생김에 따라 강도가 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 열전도율은 발포제 시멘트비(H/C)가 증가할수록

plain 모르타르의 열전도율에 비해 떨어지는 것으로 관찰되었다.

요 약

건물의 건설 및 운영에 있어서 에너지 효율성을 증가시키는 것은 현재 매우 중요한 이슈이다. 에너지 효율은 기본적으로 열전도율이 낮은 재료를 이용할 때 이루어질 수 있으며, 이를 위한 가장 좋은 방법은 재료 내부의 공극률을 상승시키는 것이다. 일반적으로 시멘트 복합체에 공극률을 상승시키기 위한 방법에는 발포제, 기포제 및 알루미늄 가루와 같은 반응성 분말을 활용하는 것인데 본 연구에서는 이들에 대한 대안으로 과산화수소를 이용하고자 하였다. 과산화수소 혼입 시멘트 모르타르를 제작하고 이의 부피 팽창, 단위용적중량, 압축강도 및 열전도율을 측정하였다. 실험 결과에 따르면 과산화수소의 혼입률이 증가할수록 공극률은 증가하고 이로 인해 압축강도 및 열전도율이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 과산화수소를 이용하여 경량기포 모르타르의 제작이 충분히 가능한 것으로 파악되었다.

키워드 : 경량 모르타르, 과산화수소, 부피팽창, 압축강도, 열전도율

Acknowledgement

This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2016Year). (C-D-2016-0557). Authors appreciate the assistance provided by Mr. Gil-Yong Lee and Young Chae Jo for performing experimental works.

References

1. Park SY, Lee WS, Yeo HS, IM HS. The experimental study for the smoke optical density and toxic gases of sandwich panel insulations(single chamber method). Journal of Korea Institute of Fire Science and Engineering. 2006 Apr;20(4):26-32.
2. Lee JC, Park JC. Fire property of exterior wall applied exterior insulation system with mineral multi pore type lightweight insulation. Journal of the Architectural Institute of Korea. 2015 Jul;31(7):75-82.

-
3. Min SH, A study on fire risk of multi-family apartment houses constructed with the exterior of the EIFS. *Journal of Korea Institute of Fire Science and Engineering*. 2013 Mar;27(3):60–5.
 4. Kang SP, Hwang BI, Characteristic of light weight mortar using waste expanded polystyrene and expanded polystyrene beads. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2017 Oct;17(5):393–41.
 5. Kim HS, Lee SH, Sun JS, Kim JM, A physical properties of lightweight foamed concrete according to lightweight aggregate types and foaming agent types. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2016 Aug;28(4):435–45.
 6. Kim SC, Park KC, Choi HW, An experimental study for the strength variations of high-strength lightweight concrete according to grain-size of artificial lightweight aggregate. *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2011 Sep;15(5):209–17.
 7. Park DO, Sa SH, Kim SH, Ji SW, Choi SK, Seo CH, A study on the properties of lightweight aggregate concrete according to the pore structure and water. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2009 Mar;25(3):85–92.
 8. Kim JM, Choi HG, Park SG, An experimental study on the pore structure and thermal properties of lightweight foamed concrete by foaming agent type. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2009 Aug;9(4):63–73.
 9. ACI Committee 523. 523.1R-06 Guide for cast-in-place low density cellular concrete. 2006. p. 1–13.
 10. Just A, Middendorf B, Microstructure of high-strength foam concrete. *Materials Characterization*. 2009 Jul;60(7):741–48.
 11. Petrovic J, Thomas G, Reaction of aluminum with water to produce hydrogen :a study of issues related to the use of aluminum for on-board vehicular hydrogen storage. Ver. 1.0. U.S. Department of Energy. 2008. 26p.
 12. Adolph G, Munch, Pohl T, inventors; Leichtbaustoff Ges M B H, assignee, Process for the manufacture of masses and articles having a porous cellular structure, United States Patent US 2,024,791. 1935 Dec 17.
 13. Lee SA, A study on the optimum mixing ratio of lightweight foamed concrete by hydrogen peroxide with plaster of paris mold for pottery[doctor's thesis]. [Daegu (Korea)]: Kyungpook National University; 2014. 148 p.
 14. Jewett JW, Serway RA, *Physics for scientists and engineers with modern physics*, 10th ed, Boston: Cengage Learning. 2018. 501p.