

소수성 에어로겔을 혼입한 단열 기포콘크리트 기초연구

A Fundamental Test on Insulation Aerated Concrete Containing Hydrophobic Aerogels

윤 현 섭¹

양 근 혁^{2*}

Yoon, Hyun-Sub¹

Yang, Keun-Hyeok^{2*}

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul, 03746, Korea ¹

Department of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea ²

Abstract

This study is a pioneer investigation to enhance the insulation capacity of the conventional aerated concrete using hydrophobic aerogels. As the main test parameters, aerogel content varied from 0% to 40% of the foam volume. Test results showed that the compressive strength of aerated concrete containing aerogels was lower by 17%~34% than that of the conventional aerated concrete. In addition, the effect of the aerogels on reducing thermal conductivity of aerated concrete is insignificant because of the partial condensation and abnormal distribution of the hydrophobic aerogels. Hence, further hydrophilic treatment for the surface of aerogels is recommended to minimize the decrease in compressive strength and enhance the insulation capacity of aerated concrete.

Keywords : aerogel, aerated concrete, apparent specific gravity, thermal conductivity

1. 서 론

우리나라의 경우 건축물 냉·난방을 위해 소비되는 에너지는 전체 에너지 소비의 약 36%로 평가된다. 이를 줄이기 위하여 정부에서는 저탄소 녹색성장 기본법에 따라 건축물 에너지효율 등급 인증제도 등의 시행으로 고효율 에너지 건축물의 보급 및 확산에 노력을 기울이고 있다. 더불어, 건축물 에너지 절감정책에 따라 2016년부터 공동주택 외벽의 열관류율을 $0.21\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 이하로 제한하고 있는데, 이는 2010년($0.27\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) 대비 약 20% 낮은 수준이다. 즉, 정부는 고효율 에너지 건축물의 설계요구를 지속적으로 높여가고 있다.

건축물의 구조부재에서 단열과 관련되는 부재는 면 요소

인 슬래브와 벽체이다. 이에 따라 슬래브에서는 단열 기포콘크리트, 벽체에서는 외단열 판넬에 대한 관심과 적용이 증가하고 있다. 불연의 요구 성능을 고려하면 슬래브 또는 벽체의 단열 판넬로서 기포콘크리트의 적용은 발포폴리스티렌(expanded polystyrene, EPS)의 좋은 대안이기도 하다 [1].

국내에서 단열의 목적으로서 사용되는 ALC(autoclaved lightweight)블록은 석회, 시멘트, 알루미늄 파우더 또는 알루미늄 페이스트 혼합물을 고온·고압의 환경에서 경화시켜 생산하는 경량 기포 콘크리트의 일종이다. ACL 블록은 단열성능 뿐만 아니라 우수한 경량성으로 인해, 건축물의 경량칸막이 벽체 등으로 널리 사용되고 있다. 그러나 기존 ALC 블록은 기포를 형성하고 있는 공극으로 인해 강도가 낮으며, 취성적인 파괴성향으로 인해 운반 또는 시공과정에서 파손 가능성이 높다. 특히, 제조과정에서 알루미늄 파우더와 시멘트의 화학반응을 이용한 후발포 방식(after-foaming type)을 이용하기 있기 때문에, 발포정도를 제어하기 매우 어려우며 강도의 균질성 또한 떨어질 수 있다[2].

Received : September 6, 2017

Revision received : October 15, 2017

Accepted : October 25, 2017

* Corresponding author : Yang, Keun-Hyeok

[Tel: 82-31-249-9703, E-mail: yangkh@kgu.ac.kr]

© 2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

또한 발포 시 일 방향적인 발포로 인하여 기포구조가 평판형으로 이루어져 있으며, 연속기포의 구조를 가져 습기저항성이 낮은 특성을 갖는다[3]. 이는 수분에 노출될 경우 강도 저하가 심각한 문제를 초래하여, 다습한 환경에 노출 가능성이 높은 외벽체의 재료로서 사용이 제한된다[4]. 이 뿐만 아니라 ALC 블록의 생성 공정은 고온·고압(180℃, 10기압)의 오토클레이브(autoclave)를 필요로 하기 때문에 설비 투자가 과다하며, 수요와 공급의 불균형 문제 등이 야기되고 있다[5].

근래에는 계면활성제인 기포제를 물과 함께 혼합·발포하여 사용하는 선발포 방식(pre-foaming type)의 기포콘크리트의 활용 가치가 높아지고 있다. 기포콘크리트는 양생과정에서 고온·고압의 오토클레이브를 필요로 하지 않는 습식형 제조방식으로, 현장 여건에 따라 타설이 용이한 특징을 갖는다. 기포의 양이 많은 경우에는 기포 간 결합을 촉진시킴으로서 연속공극을 형성하는 문제점이 있으나, 이는 시멘트의 양을 많게 하거나 기포의 양을 감소시키는 방법으로서 해결이 가능하대[6]. 그러나 이러한 방법은 결국 시멘트 사용량이 많아 밀도증가에 의한 경량성 및 단열성능 저하로 이어 질수 있다. 이와 함께 압축강도 발현을 고려할 때 습식형 경량기포콘크리트의 열전도율을 약 0.15W/m·K 이하로 낮추는 것은 어려우며, ALC 블록 수준의 성능확보도 어렵다.

이 연구의 목적은 습식형 기포콘크리트의 단열성능 향상을 위하여 나노공극의 에어로겔 기술의 융합에 대한 기초평가이다. 0.017~0.022W/m·K 수준의 낮은 열전도율을 갖는 에어로겔의 혼입에 따른 기포콘크리트의 열전도율 개선효과 및 역학적 특성을 평가하였다. 에어로겔 혼입을 변화에 따라 기포 콘크리트의 플로우, 침하깊이, 압축강도, 절건비중 및 열전도율을 측정하였으며, KS F 4039 및 KS F 2701에 제시된 현장 타설용 기포콘크리트 및 ALC 블록의 규격과 비교하였다.

2. 실험

2.1 사용 재료

기포콘크리트 제작에 사용된 에어로겔의 형상 및 물리적 특성은 Figure 1 및 Table 1과 같다. 1~20 μ m 범위의 입경을 가지며, 밀도는 0.07g/cm³이다. 에어로겔은 재료 자체가 0.017~0.022W/m·K 수준의 낮은 열전도율을 가지며, 비표면적은 800,000 m²/kg이다. 기포제는 가수 분해형

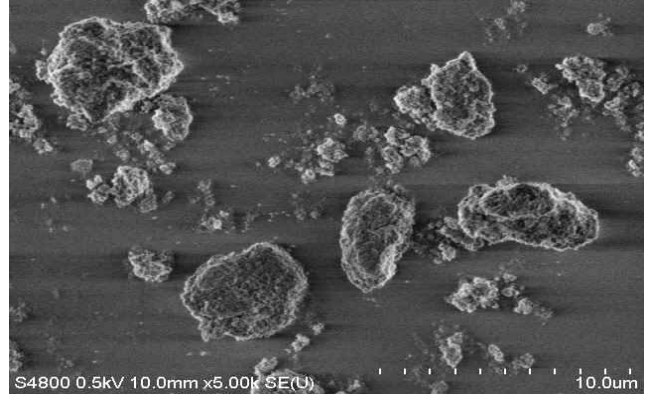


Figure 1. Micro-structure image of aerogels

Table 1. Physical properties of aerogel

Particle size range (μ m)	Density (g/cm ³)	Specific surface area (m ² /kg)	Thermal conductivity (W/m·K)
1 ~ 20	0.07	800,000	0.017~0.022

Table 2. Chemical composition of cement (% by mass)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	LOI
22.13	5.49	3.59	61.98	2.51	1.09	2.14	0.91

Table 3. Mixture proportion of aerated concrete

Aerogel content for replacing foam (%)	W/C (%)	Unit binder (kg/m ³)	Foamed ratio (%)	Slurry Density (kg/m ³)
0				705
10				729
20	30	500	69	753
30				777
40				802

단백질 종류로서, 암갈색의 액상형태를 띠는 동물성 재료를 사용하였으며, 밀도는 1.06g/cm³이다. 사용된 시멘트의 화학적 조성은 Table 2와 같으며, 밀도 및 분말도는 각각 3.14g/cm³ 및 4,497cm²/g이다.

2.2 배합

기포콘크리트 특성에 대한 에어로겔 혼입의 영향을 평가하기 위한 배합상세는 Table 3과 같다. 기포 혼입량 대비 에어로겔의 치환비율을 무혼입, 10%, 20% 및 40%로 변화하였다. 단위 시멘트량 및 물-시멘트비(W/B)는 각각 500 kg/m³ 및 30%로 고정하였으며, 기포제는 3%로 희석하여 사용하였다. 시멘트를 70리터의 배합 용기에 투입 한 후 1분 동안 건비빔을 실시하였으며, 계량된 물을 투입 후 3분 이상

충분히 혼합하여 페이스트를 생성하였다. 3%로 희석된 동물성 기포제와 압축공기(0.6MPa 이상)를 기포 생성기에 투과시켜 기포균을 생성한 후 페이스트가 담긴 배합용기에 에어로겔 분말과 함께 혼합하여 기포콘크리트를 제작하였다.

2.3 측정

기포콘크리트의 플로우는 KS F 4039에서 제시하고 있는 350×350mm의 유리판 및 안지름 80mm 높이 80mm인 아크릴원통을 이용하여 측정하였다. 침하깊이의 측정은 KS F 4039에 따라 안지름 145mm, 높이 300mm인 투명 아크릴 용기를 이용하였으며, 시료를 투입한 후 2시간 뒤에 상부의 침하 깊이를 0.5mm 단위로 측정하였다. 기포콘크리트를 투입한 용기는 진동에 의한 침하를 방지하기 위하여 측정 시 까지 정치 시켰다. 경화된 콘크리트의 압축강도는 KS F 2459에 따라 ϕ 100×200mm 몰드를 사용하여 제작한 시험체를 재령 7 및 28일에 측정하였다. 겉보기 비중은 KS F 2459에 따라 28일 동안 수중양생을 실시한 공시체를 105±5℃의 환경에서 건조 시킨 후 실온에서 냉각 후의 질량을 측정하여 평가 하였다. 기포콘크리트의 열전도율은 KS F 4039에 따라 300×300×50mm의 시험체를 제작하였으며, 28일간 항온항습환경(습도 60±5%, 온도 20±1℃)에서 양생을 실시 한 후 105±2℃ 항량이 될 때까지 건조하였다. 이후 열전도율 측정장비를 이용하여 KS L 9016에 따라 열전도율 측정을 실시하였다. 기준온도 20℃에서 양면에 15℃의 온도차를 부여하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 플로우

나노공극 에어로겔 혼입을 변화에 따른 기포콘크리트의 플로우 측정 모습 및 결과를 각각 Figure 2 및 Figure 3에 나타내었다. 기포콘크리트의 플로우는 에어로겔 혼입율이 0%에서 40%로 변화함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 에어로겔 혼입율이 40%인 시험체의 경우가 200mm로 가장 높게 나타났으며, 무혼입 시험체가 120mm로 가장 낮게 나타났다. 에어로겔 혼입율 10% 및 20%인 시험체의 플로우는 130mm 및 140mm 로, 에어로겔 혼입율이 40%인 시험체에 비하여 각각 35% 및 30% 낮게 나타났다. 에어로겔의 혼입율인 30%인 시험체의 플로우는 155mm로, 40%인 시험체 대비 약 20% 수준이었다.



Figure 2. Flow images of aerated concrete specimens

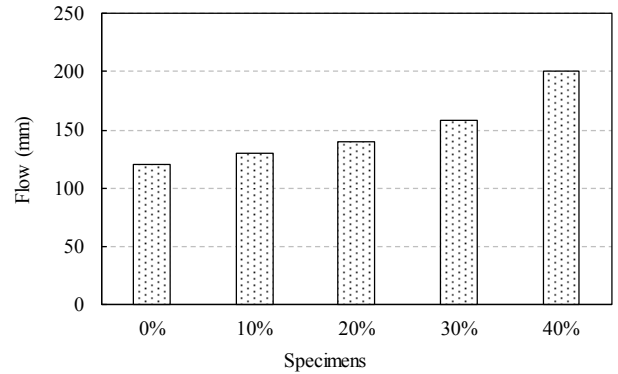


Figure 3. Effect of aerogel content on the flow of aerated concrete

결과적으로 에어로겔의 혼입량이 증가함에 따라 기포콘크리트의 플로우는 증가하였으며, 30%에서 40%로 변화할 때 그 증가율은 20% 이상으로 크게 나타났다. 더불어, 에어로겔을 40% 혼입한 시험체만이 현장 타설용 기포콘크리트의 KS 규격인 180mm 이상의 플로우 값을 만족하였다.

3.2 침하깊이

에어로겔을 혼입한 기포콘크리트의 침하깊이 측정 모습 및 결과는 각각 Figure 4 및 Figure 5와 같다. 모든 시험체의 침하깊이는 4mm 이하 수준으로 0.6품의 현장 타설용 기포콘크리트 품질 수준(6mm 이하)을 만족하였다. 무혼입 시험체의 침하 깊이가 4mm로 가장 크게 나타났으며, 에어로겔의 혼입량이 증가함에 따라 시험체의 침하깊이는 감소하는 경향을 나타내었다. 나노공극 에어로겔을 10%, 20% 및 30% 혼입한 시험체의 침하깊이는 3.5mm, 2.5mm 및 1.5mm로, 무혼입 시험체 대비 각각 약 12%, 37% 및 62% 감소하였다. 에어로겔을 40% 혼입한 시험체의 침하깊이는 1mm로 무혼입 시험체 대비 약 75% 감소하였다. 일반적으로 기포콘크리트의 침하는 기포 표면상에 존재하는 수분이 시멘트의 수화반응으로부터 생성된 겔 공극 및 미세 모세관공극으로 흡수되며 발생한다

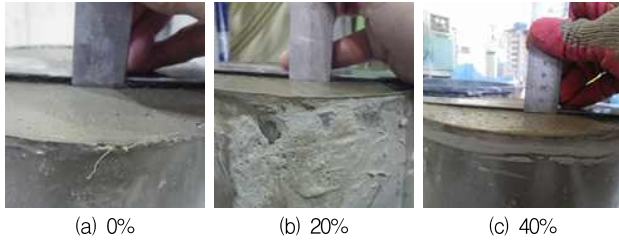


Figure 4. Deformed depth images aerated concrete specimens

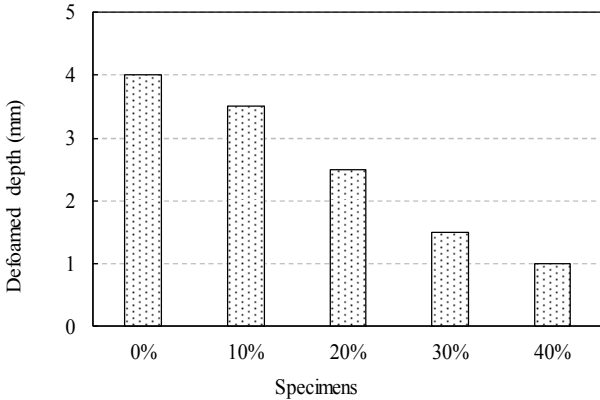


Figure 5. Effect of aerogel content on the deformed depth of aerated concrete

[7]. 그러나 다량의 수분을 포함하는 기포를 대신하여 투입한 에어로겔은 수분을 포함하지 않으며, 기포와 혼합되므로서 표면상에서 겔 공극 및 미세 모세관 공극으로 흡수되는 수분이 감소하게 되므로 침하의 발생이 적은 것으로 판단된다.

3.3 겉보기 비중

나노공극 에어로겔 혼입 기포콘크리트의 겉보기 비중 측정 결과는 Figure 6에 나타내었다. 측정결과 무혼입 시편체를 제외한 모든 시편체는 ALC 블록 0.6품의 품질 규격(0.55 이상 0.65 미만)을 만족하였다. 에어로겔을 30% 혼입한 시편체의 겉보기 비중이 0.59로 가장 높았으며, 에어로겔을 10% 및 30% 혼입한 시편체의 겉보기 비중은 0.58로 유사하게 나타났다. 무혼입 시편체의 경우의 겉보기 비중은 0.52로 가장 낮았으며, ALC 블록 0.5품의 품질 규격(0.45 이상 0.55 미만)을 만족하였다.

결과적으로 에어로겔의 혼입은 기포콘크리트의 겉보기 비중의 증가에 영향을 미쳤지만, 그 영향은 에어로겔 혼입량 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

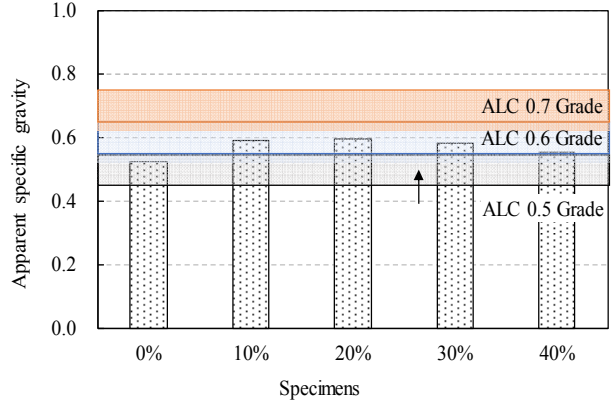


Figure 6. Effect of aerogel content on the apparent specific gravity of aerated concrete

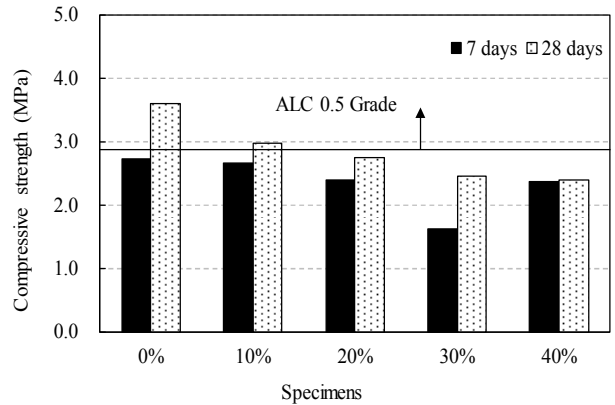


Figure 7. Compressive strength of aerated concrete specimens

3.4 압축강도

에어로겔 혼입을 변화에 따른 기포 콘크리트의 압축강도 측정 결과를 Figure 7에 나타내었다. 기포콘크리트의 재령 7일 압축강도는 에어로겔의 혼입율이 40%인 경우를 제외하고 에어로겔의 혼입율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 무혼입 시편체의 경우 재령 7일 압축강도는 2.7MPa로 가장 높았으며, 에어로겔을 30% 혼입한 시편체의 경우에는 1.6MPa로 무혼입 시편체 대비 약 40% 낮았다. 에어로겔을 10% 및 20% 혼입한 시편체의 재령 7일 압축강도는 2.6MPa 및 2.4MPa로 무혼입 시편체 대비 강도감소는 미미하였다. 에어로겔을 40% 혼입한 시편체의 재령 7일 압축강도는 2.4MPa로 20% 혼입 시편체와 동일한 수준이었다. 기포콘크리트의 28일 압축강도는 에어로겔 혼입율이 0%에서 40%로 변화함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 무혼입 및 에어로겔을 10% 혼입 시편체의 경우만 ALC 블록 0.5품의 품질 수준(2.9MPa 이상)을 만족하였는데, 재령 28일 압축강도는 각각 3.6MPa 및 3.0MPa이었다. 에어로겔을

30% 및 40% 혼입한 시험체의 재령 28일 압축강도는 각각 2.5MPa 및 2.4MPa로, 무혼입 시험체 대비 약 32% 및 34% 낮았다.

일반적으로 기포 콘크리트의 압축강도는 겉보기 비중에 비례하여 감소한다. Figure 8에는 에어로겔이 혼합되지 않은 기포콘크리트의 실험결과를 나타내었다[8]. 동일 그림에 측정된 에어로겔 혼입 기포 콘크리트의 압축강도와 겉보기 비중의 관계를 나타내었다. 동일한 겉보기 비중에서 에어로겔을 혼합한 기포콘크리트의 압축강도는 에어로겔이 혼합되지 않은 일반기포콘크리트에 비해 낮게 나타났다. 이는 초소수성의 특성을 갖는 에어로겔이 함수 재료인 시멘트 페이스트 및 기포와 균질하게 혼합되지 않아 부분적인 응집 및 응집부분의 경화 저하에 의한 것으로 판단된다. 재료 자체가 0.017~0.022W/m·K 수준의 낮은 열전도율을 갖는 에어로겔은 초소수성의 특징을 갖는다. 초소수성의 성질을 갖는 에어로겔은 주변 환경의 수분이 침투하기 어려운 분자구조를 이루고 있어 물에 쉽게 용해되지 않는다. 즉, 에어로겔은 함수 재료인 기포 콘크리트와의 혼합이 어려우며, 기포콘크리트의 소요강도 확보 및 에어로겔의 균질한 분포를 위해서는 친수성 부여 등의 고도화 처리 기술이 보완되어야 할 것으로 판단된다.

3.5 열전도율

에어로겔 혼입을 변화에 따른 기포콘크리트의 열전도율 측정 결과는 Figure 9와 같다. 측정결과 에어로겔을 혼입한 시험체의 열전도율은 40%인 경우를 제외하고 무혼입 시험체에 비해 높게 나타났다. 에어로겔을 40% 혼입한 시험체의 열전도율은 0.14W/m·K로, 0.15W/m·K의 열전도율을 나타낸 무혼입 시험체에 비해 약 5% 낮았다. 에어로겔을 30% 혼입한 시험체의 열전도율은 0.19W/m·K로 나타났으며, ALC 블록 0.6품의 품질 규격(0.24W/m·K 이하)을 만족하였다. 에어로겔을 10% 혼입한 시험체는 0.17W/m·K의 열전도율을 나타내어 무혼입 및 40% 혼입 시험체의 경우와 같이 ALC 블록 0.5품의 품질 규격(0.19W/m·K 이하)을 만족하였다. 에어로겔을 20% 혼입한 시험체의 열전도율은 0.26W/m·K로 가장 높게 나타났는데, 초소수성의 특성을 갖는 에어로겔이 제작된 시험체 내에서 비교적 균질하게 분포되지 못하여 기포콘크리트의 열전도율 감소에 있어 긍정적인 효과를 보이지 못한 것으로 판단된다. 더불어 에어로겔을 20% 혼입한 기포콘크리트는 ALC 블록 0.7품(0.19W/m·K 이하)의 품질 규격을 만족하였다.

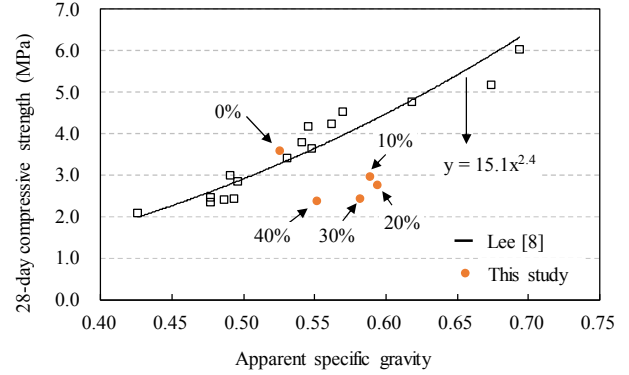


Figure 8. Relationship of apparent specific gravity and 28-day compressive strength

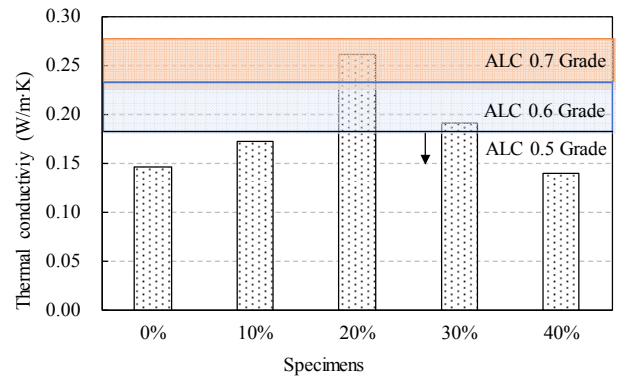


Figure 9. Thermal conductivity of aerated concrete specimens

4. 결 론

습식형 기포콘크리트의 단열성능 향상을 위한 초소수성 나노공극 에어로겔 혼입의 기초 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 에어로겔의 혼입율이 증가함에 따라 기포콘크리트의 플로우는 증가하였으며, 30%에서 40%로 변화할 때 그 증가율은 20% 이상으로 졌다.
- 2) 기포콘크리트의 침하깊이는 에어로겔의 혼입율이 증가함에 따라 시멘트 경화체의 나노공극 및 미세 모세관공극으로 흡수되는 기포표면 수분의 감소로 인해 감소하였다.
- 3) 에어로겔 혼입 기포콘크리트의 겉보기 비중은 혼입율 변화에 관계없이 0.65 미만으로, ALC 블록 0.6품의 품질 규격을 만족하였다.

- 4) 초소수성의 특징을 갖는 에어로겔의 혼합 및 경화의 어려움으로, 혼입량이 증가함에 따라 기포콘크리트의 압축강도는 17%~34% 감소하였다.
- 5) 에어로겔을 40% 혼합한 기포콘크리트의 열전도율은 0.14W/m·K로 가장 낮았으나, 이외의 시험체에서는 소수성 에어로겔의 혼합 불량으로 열전도율 감소에 있어 긍정적인 효과를 보이지 않았다.
- 6) 향후, 나노기술을 적용한 기포콘크리트의 품질 확보를 위해서는 소수성 에어로겔의 친수성 부여를 위한 고도화 처리기술이 보완될 필요가 있다.

요 약

본 연구는 습식형 기포콘크리트의 단열성능 향상을 위한 소수성 에어로겔 기술 융합의 기초연구이다. 주요 실험변수는 에어로겔 혼입양으로서 기포 부피 대비 0%에서 40%로 변화하였다. 실험결과 에어로겔 혼입 기포 콘크리트의 압축강도는 일반 기포콘크리트에 비해 약 17%~34% 낮았다. 에어로겔이 기포 콘크리트 열전도율 저감에 미치는 영향도 미미하였는데, 이는 소수성 에어로겔의 비균질 분포 및 부분적 응집 때문이다. 따라서 에어로겔 혼입 기포콘크리트의 강도 및 열전도율 향상을 위해서는 에어로겔에 친수성을 부여하는 기술이 요구된다.

키워드 : 에어로겔, 기포콘크리트, 겔보기 비중, 열전도율

Acknowledgement

This research was supported by a grant (17CTAP-C132555-01) from Technology Advancement Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean Government and the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA).

References

1. Kim JM, Choi HG, Park SG. An experimental study on the pore structure and thermal properties of lightweight foamed concrete by forming agent type. Journal of the Korea Institute of Building

- Construction, 2009 Aug;9(4):63-73.
2. Chu YS, Seo SK, Im DH, Song H, Lee JK, Lee SH. A study for physical properties of ALC using different quartzite. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2011 Dec;6(4):89-94.
3. Kim JM, Jung JY, Hwang EH, Shin SC. Properties of foamed concrete according to types and concentrations of foam agent. Journal of the Korea Concrete Institute, 2012 Feb;24(1):61-70.
4. Lee KH, Yang KH. Effect of fiber addition for improving the properties of lightweight foamed concrete. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2015 Aug;15(4):383-89.
5. Yang KH. Foamed concrete with a new mixture proportioning method comparable to the quality of convectional ALC block. Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2015 Feb;15(4):1-7.
6. Lee SH, Jung YW, Park JJ. A study on the sound absorption properties of cellular concrete with continuous voids. Journal of the Korea Concrete Institute, 2003 Jan;15(4):566-73.
7. Ramamurthy K, Nambiar EKK, Indu Siva Ranjani GA. A classification of studies on properties of foam concrete. Cement and Concrete Research, 2009 Jul;31(6):388-96.
8. Lee KH. Development of mixture proportioning model for low-density high-strength foamed concrete [master's thesis]. [Suwon]: Kyonggi University; 2013. 103 p.