

# 친수성 표면개질의 에어로겔을 혼입한 시멘트 페이스트의 압축강도 발현 및 열전도율 평가

## Evaluation on Compressive Strength Development and Thermal Conductivity of Cement Pastes Containing Aerogels with Hydrophilic Surface Treatment

안 태 호<sup>1</sup>

박 종 범<sup>1</sup>

윤 현 섭<sup>1</sup>

양 근 혁<sup>2\*</sup>

Ahn, Tae-Ho<sup>1</sup>

Park, Jong-Beom<sup>1</sup>

Yoon, Hyun-Sub<sup>1</sup>

Yang, Keun-Hyeok<sup>2\*</sup>

*Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul, 03746, Korea <sup>1</sup>*

*Department of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea <sup>2</sup>*

### Abstract

The objective of the present study is to examine the feasibility on the development of high-insulation concrete using aerogels with hydrophilic surface treatment. To prevent the segregation and enhance the dispersibility of aerogels in the cement pastes, the substrate of aerogels was modified to be hydrophobic property using surfactant. The modified aerogels were added from 0% to 100% of the cement volume at the interval of 25% under the constant cement content. Some cement pastes showed segregation phenomenon and flocculation of aerogels during mixing phase. The addition of aerogels decreased the compressive strength of cement pastes but enhanced the thermal conductivity. The thermal conductivity of pastes with 100% aerogels was lower by 43% when compared with that measured in the conventional paste. To improve the compressive strength and insulation capacity of concrete containing aerogels, a reliable surface treatment method of aerogels needs to be further investigated.

Keywords : aerogel, paste, surface treatment, insulation, thermal conductivity

## 1. 서 론

최근까지 석유화학 공업이 발달함에 따라 석유기반의 유기단열재 시장의 비율은 지속적으로 성장해왔다. 유기단열재는 국내 단열재 시장의 65%이상을 점유하고 있으며, 주로 발포폴리스티렌(expanded polystyrene) 및 폴리우레탄(polyurethane)기반의 단열재가 사용되고 있다[1]. 유기단열재는 운반 및 현장가공이 쉬워 단독으로 사용이 가능하며,

가격이 저렴한 이점이 있다. 그러나 유기단열재는 내열성이 낮고 화재 시 유해가스가 발생하는 문제점이 있다[2,3]. 최근에는 유기단열재의 빠른 연소 특성으로 인한 잦은 화재로 단열재 관련 정책이 강화되고 있으며[4], 이에 따라 유기단열재 시장은 점차 감소하고 무기단열재에 대한 관심이 급격히 커지고 있는 추세이다.

무기단열재는 유기단열재와 달리 내열성이 뛰어나고 유해 가스발생량이 적은 장점이 있다. 더불어 무기단열재는 불연 재료로서 화염의 확산을 막아 화재를 초기에 진압할 수 있는 이점 있다. 무기단열재는 주로 인조광물섬유로 만들어지며 건축용도에 따라 다양하게 생산되고 있다. 대표적인 무기단열재로 글라스울(glass wool)과 미네랄울(mineral wool)은 흡음, 보온 및 내구성이 뛰어나 건축물 내외벽 및 지붕구조 등 다양한 곳에 사용되고 있다. 그러나 글라스울

Received : November 13, 2017

Revision received : January 5, 2018

Accepted : January 25, 2018

\* Corresponding author : Yang, Keun-Hyeok

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

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

및 미네랄올은 구조적 특성상 수분에 취약하여 뭉침 및 처짐 현상 등이 발생하여 단열효과가 불량하게 된다[5]. Shin et al.[6]은 글라스올 및 미네랄올의 함수율에 따른 열전도율을 평가 하였으며, 함수율 5%에서 0%대비 각각 70% 및 123% 증가함을 보였다. 또한, 시험체를 다시 건조한 후 열전도율을 평가한 결과 열전도율은 시험 전 대비 각각 3.1% 및 15.9% 증가해 단열재의 내구성 저하가 일어난 것을 확인 하였다. 이처럼 단열재의 함수율 증가는 내구성에 중대한 영향을 미치게 된다[7,8]. 특히 우리나라와 같이 사계절이 반복되는 환경에서는 단열재가 흡수한 수분이 동결 융해작용을 반복하여 내구성 저하가 급격하게 발생하게 된다[9]. 이에 따라 우수한 내열성 및 내구성을 갖는 단열재에 대한 관심이 높아지고 있다.

에어로겔은 나노크기의 기공을 가지고 있으며, 기공 내에서의 열전달이 거의 일어나지 않는 특징이 있다. 또한 높은 기공률을 가지는 에어로겔은 열전도율이 0.02W/m·K이하로 뛰어난 단열성능을 가지며[10], 제조 공정상 강한 소수성(hydrophobicity)을 가지는 표면특성으로 인해 발수 및 방수효과가 뛰어나다. 이에 따라 에어로겔을 활용하면 높은 단열성능과 내구성을 확보한 시멘트계 단열재 개발을 기대할 수 있을 것으로 예상되나, 이에 대한 실험적 연구는 미흡하다.

이 연구는 기존 유기단열재의 문제점을 보완하면서 높은 단열성능 및 내구성을 가지는 단열재 개발에 대한 기초 연구이다. 에어로겔의 표면 소수특성을 친수성으로 전환하였을 때 시멘트와의 배합 시 강도발현 및 열전도율에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 사용재료

실험에 사용된 시멘트의 밀도 및 비표면적은 각각 3.15g/cm<sup>3</sup> 및 3,260cm<sup>2</sup>/g이다. 에어로겔은 국내 J사 제품을 사용하였으며, Table 1에 물리적 특성을 나타내었다. 에어로겔의 밀도 및 비표면적은 0.1g/cm<sup>3</sup> 및 800m<sup>2</sup>/g이며, 열전도율은 0.022W/m·k로 매우 낮은 밀도와 높은 비표면적 및 단열성능을 가진다. 에어로겔의 표면 형상은 Figure 1과 같이 불규칙한 다방면체의 형상을 이루고 있으며, 입자 크기는 20μm 이하이다. 에어로겔의 기공구조는 Figure 2에 나타난 바와 같이 20nm의 1차 졸(primary sol)이 집합

하여 메소세공(mesopore)을 형성하며 공극률이 90% 이상인 초 다공성 구조로 이루어져 있는 것이 특징이다. 실험에 사용된 에어로겔의 주성분은 실리카이며, Figure 3에 에어로겔의 화학구조를 나타내었다. 에어로겔은 제조과정에서 기공률 및 기공구조를 유지하기 위해 구조표면을 다양한 개질제(methyltriethoxy silane, dimethyl chlorosilane, phenyltriethoxysilane, trimethylchlorosilane)들을 이용하여 표면을 알킬기(methoxy, methyl)와 같은 소수기로 개질시킨다. 이에 따라 최종적으로 생산되어지는 에어로겔의 표면은 강한 소수성의 구조를 띄게 된다.

### 2.2 표면 개질

실험에 사용된 에어로겔은 초 소수성을 가지며, 물라화학적 특성상 시멘트와 혼합될 때 분말이 비산하고 재료 분리 현상이 일어나 균질한 혼합이 어렵다. 따라서 균질한 혼합을 위해서는 에어로겔 표면개질 과정이 필요하다[11,12]. 본 연구에서는 계면활성제를 사용하여 초 소수성 에어로겔을 친수성으로 표면개질 하였으며, Figure 4에 계면활성제를 이용한 에어로겔의 표면개질 메커니즘을 나타내었다. 일반적으로 계면활성제는 친수성과 소수성 두 가지 성질을 가지고 있다. 따라서 계면활성제를 소수성 에어로겔과 교반하면 계면활성제의 소수성 분자들이 에어로겔의 소수성분자들과 반데르발스 인력에 의해 결합하게 된다. 즉, 소수성 에어로겔 표면에 계면활성제의 친수성 그룹이 바깥 방향에 위치하면서 소수성에서 친수성으로 개질된다.

Table 1. Physical properties of aerogel

| Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Specific surface area (m <sup>2</sup> /g) | Thermal conductivity (W/m·K) | Pore size (nm) | Void percentage (%) |
|------------------------------|---|------------------------------|----------------|---------------------|
| 0.1                          | 800                                       | 0.022                        | φ ≤ 20         | 90                  |

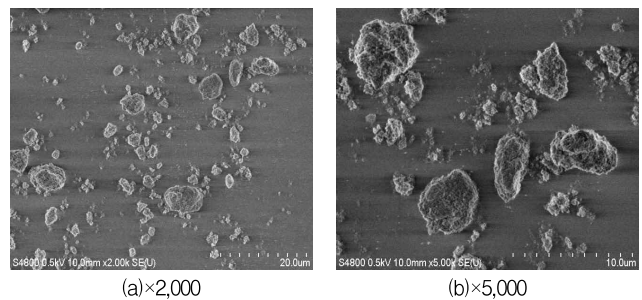


Figure 1. SEM image of aerogel

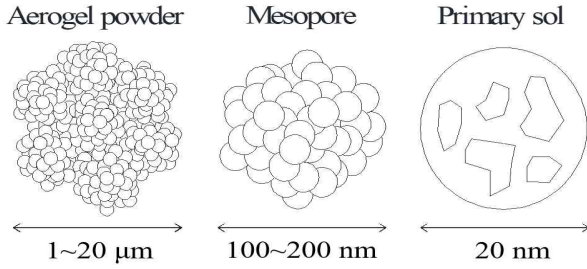


Figure 2. Typical pore structure of aerogel

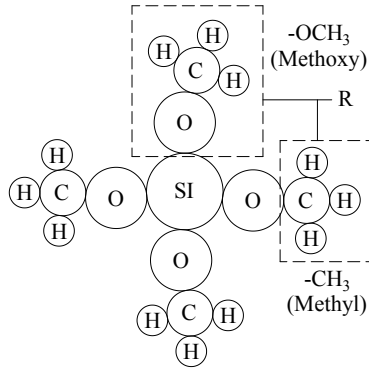


Figure 3. Chemical structure of aerogel

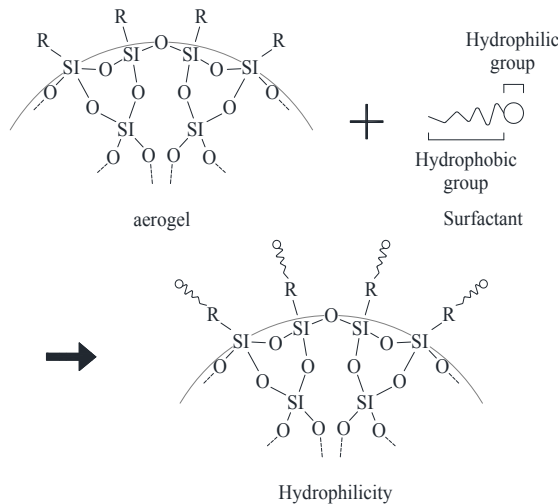


Figure 4. Substrate modification mechanism of aerogel using surfactant

Table 2. Mixture proportions of cement paste specimens

| Specimens | W/C (%) | Addition of aerogels relative to cement volume (%) | Unit weight (kg/m <sup>3</sup> ) |        |         |            |
|-----------|---------|--|----------------------------------|--------|---------|------------|
|           |         |  | Water                            | Cement | Aerogel | Surfactant |
| C         |         | 0  | 557.5                            | 1393.8 | 0       | 0          |
| A0        |         | 0  | 542.4                            | 1356.0 | 0       | 27.1       |
| A25       | 40      | 25   | 549.7                            | 1224.3 | 6.8     | 24.5       |
| A50       |         | 50   | 446.3                            | 1115.8 | 12.4    | 22.3       |
| A75       |         | 75   | 410.0                            | 1025.1 | 17.1    | 20.5       |
| A90       |         | 90   | 390.9                            | 977.4  | 19.5    | 19.5       |
| A100      |         | 100  | 379.2                            | 947.9  | 21.1    | 19.0       |

### 2.3 실험계획

에어로겔을 첨가한 시멘트 페이스트의 역학적 특성을 평가하기 위한 배합상세는 Table 2와 같다. 주요 변수로 에어로겔을 시멘트 부피대비 0, 25, 50, 75, 90% 및 100% 첨가하였으며, 물-시멘트비(W/C)는 40%로 고정하였다. 표면 개질을 위해 사용된 계면활성제의 양은 물중량의 5%로 고정하였으며, 계면활성제는 시멘트 페이스트 배합 전 에어로겔과 함께 넣고 교반하였다. 또한 시멘트 페이스트에 대한 계면활성제의 영향을 알아보기로 에어로겔 및 계면활성제 무첨가 시험체를 제작하였다. 이들 변수에 따라 에어로겔을 첨가한 시멘트 페이스트의 배합 직후 혼합 상태와 전반적인 역학적 특성을 평가하였다.

### 2.4 측정

에어로겔을 첨가한 배합실험은 KS L 5109에 준하여 실시하였으며, 압축강도는 KS L 5105에 따라 200 kN 용량의 만능재료시험기(universal test machine, UTM)를 사용하여 재령 1, 3, 7 및 28일에서 측정하였다. 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도는 KS F 2459에 따라 측정하였으며, 미세구조 분석 및 공극분포 분석은 재령 28일에 시료를 채취하여 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 및 수은압입법(mercury intrusion porosimetry, MIP)을 이용하여 분석하였다. 열전도율은 ASTM C518에 따라 300×300×50mm인 정방형 시험체를 제작하여 재령 28일에 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 배합특성

에어로겔 첨가율에 따른 시멘트 페이스트의 배합직후 혼합 상태는 Figure 5와 같다. 에어로겔 첨가율 변화에 따른 시멘트 페이스트의 혼합 상태는 A90시험체를 제외한 모든 시험체에서 에어로겔 첨가율에 관계없이 균일하게 섞이는 것으로 나타났다(Figure 5 a, b). A90시험체의 경우 배합직후 시멘트 페이스트 표면에 에어로겔 분말이 떠있는 재료 분리 현상을 보였으며, 시멘트 페이스트 표면에 에어로겔과 시멘트 페이스트가 균일하게 섞이지 못하고 줄눈을 형성하고 있는 것으로 나타났다(Figure 5 c). 이러한 현상은 소수성을 갖는 에어로겔의 친수성부여를 위해 사용된 계면활성제의 교반이 충분히 이루어지지 못해 발생된 것으로 판단된

다. 결과적으로, 에어로겔의 표면 친수성 부여를 위해서는 계면활성제와의 교반 시간이 일정 수준 확보되어야 하며, Sessile Drop Method[13] 및 Wilhelmy Plate Method[14] 등의 에어로겔 표면 특성 변화 측정을 통해 교반 시간에 따른 표면 개질 효율성 등의 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 3.2 압축강도

에어로겔을 첨가한 시멘트 페이스트의 압축강도 측정 결과를 Figure 6에 나타내었다. 측정결과 시멘트 페이스트의 압축강도는 재령에 관계없이 에어로겔 첨가량이 0%에서 100%로 변화함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 에어로겔 및 계면활성제가 첨가되지 않은 C 시험체의 경우 재령 28일 압축강도는 36.8MPa로 가장 높게 나타났다. 또한 A25 시험체의 재령 28일 압축강도는 25.6MPa로 에어로겔을 첨가한 시험체중 가장 높게 나타났다. 반면 A100시험체의 재령 28일 압축강도는 10.2MPa로 C 시험체의 약 28% 수준으로 가장 낮았다. 더불어 재령 7일 이후 모든 시험체의 강도 증가 기울기 에어로겔 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, A100 시험체의 재령 7일 이후 재령 28일까지의 압축강도 증가율은 약 2% 수준으로 가장 낮았다. 시멘트 페이스트의 압축강도는 에어로겔뿐만 아니라 계면활성제에 의한 영향도 받는 것으로 나타났는데, A0 시험체의 재령 28일 압축강도는 28.9MPa로 C 시험체 대비 약 22% 감소함을 보였다. 즉, 이는 배합도중 계면활성제로 인해 생성된 기포의 영향으로 시험체 내부에 다수의 공극이 형성되어 압축강도가 감소됨을 의미한다.

### 3.3 겉보기 밀도

에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 재령 28일 겉보기 밀도는 Figure 7과 같다. 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도는 에어로겔의 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. C 시험체의 재령 28일 겉보기 밀도는 1.44g/cm<sup>3</sup>으로 가장 높게 나타났다. A100 시험체의 경우 재령 28일 겉보기 밀도는 1.17g/cm<sup>3</sup>으로 C 시험체의 약 80% 수준으로 가장 낮았다. 또한 에어로겔 첨가율이 0%에서 100%로 변화할 때 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도의 감소율은 18%로 비교적 작게 나타났다. 더불어 계면활성제의 사용은 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도 변화에 큰 영향을 미치지 않았는데, C 시험체 대비 A0 시험체의 겉보기 밀도 감소율은 1% 수준이었다.

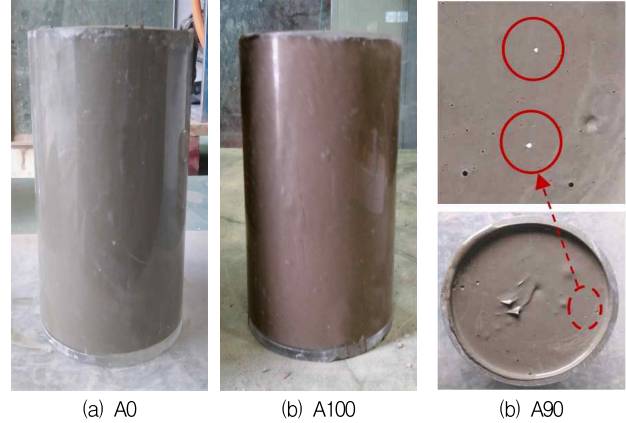


Figure 5. Typical images of fresh cement pastes according to aerogel addition

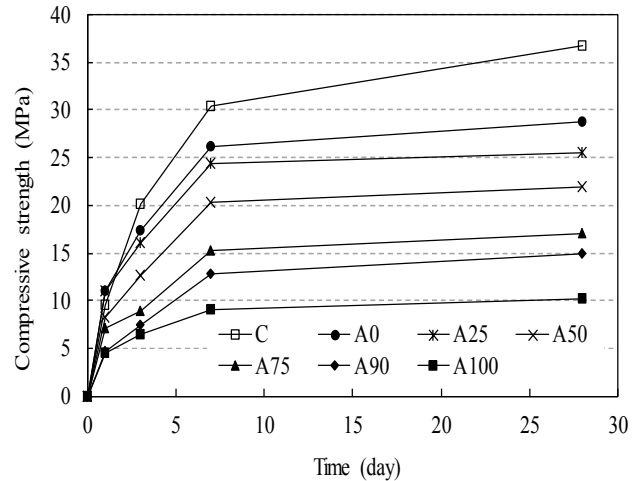


Figure 6. Compressive strength development of cement paste specimens

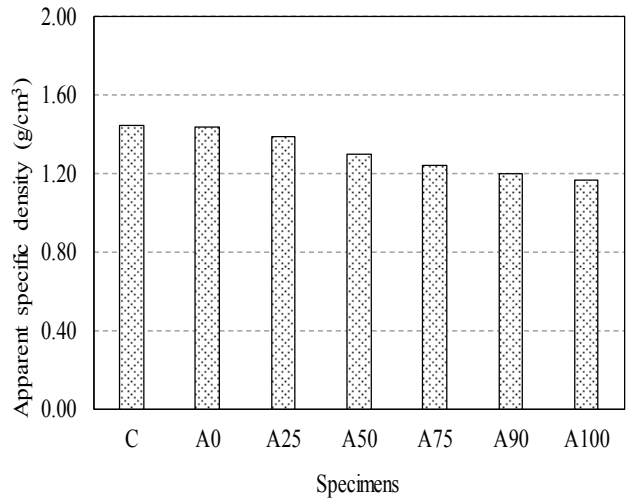


Figure 7. Effect of aerogel addition on the apparent specific density of cement pastes

Table 3. Pore-size distributions of hardened pastes

| Specimens   | C     | A0    | A25   | A50   | A75   | A90   | A100  |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Artificial air pores<br>( $50 \mu\text{m} \leq \phi$ )              | 2.90  | 2.33  | 4.24  | 3.70  | 3.04  | 5.21  | 10.17 |
| Macro capillaries<br>( $50 \text{ nm} \leq \phi < 50 \mu\text{m}$ ) | 17.02 | 20.48 | 14.87 | 27.61 | 29.93 | 28.13 | 25.69 |
| Micro capillaries<br>( $10 \text{ nm} \leq \phi < 50 \text{ nm}$ )  | 6.03  | 8.28  | 9.57  | 6.19  | 6.55  | 6.55  | 5.64  |
| Gel pores<br>( $\phi < 10 \text{ nm}$ )                             | 5.62  | 4.21  | 6.51  | 3.69  | 3.81  | 3.51  | 2.86  |
| Porosity in<br>volume(%)  | 31.57 | 35.30 | 35.20 | 41.19 | 43.33 | 43.39 | 44.35 |

### 3.4 열전도율

에어로겔의 첨가량 변화에 따른 시멘트 페이스트의 열전도율 측정 결과를 Figure 8에 나타내었다. 측정결과 시멘트 페이스트의 열전도율은 에어로겔 및 계면활성제가 첨가되지 않은 C 시험체가 0.595W/m·k로 가장 높았으며, 계면활성제 사용에 따른 열전도율 감소영향이 에어로겔 첨가율이 25~90%인 경우에 비해 크게 나타났다. 계면활성제만을 첨가한 A0 시험체의 열전도율은 0.462W/m·k로 C 시험체 대비 약 23% 감소한 반면, 에어로겔 첨가량이 25~90% 일 때 열전도율 감소는 A0 시험체 대비 6~18% 수준으로 그 영향이 미미하였다. 하지만 에어로겔을 100% 첨가한 A100 시험체의 열전도율의 측정결과는 C 시험체 및 A0 시험체의 열전도율에 비해 43% 및 27% 낮게 나타나 에어로겔 혼합에 따른 열전도율 감소효과가 비교적 크게 나타났다. A90 시험체의 열전도율은 0.42W/m·k로 A75 시험체에 비해 증가하는 결과를 나타내었는데, 이는 배합특성의 결과와 같이 에어로겔의 표면개질이 부분적으로 이루어지고 친수성이 부여되지 못한 소수성 에어로겔이 배합과정에서 시멘트 페이스트와 균일하게 혼합되지 못해 발생된 것으로 판단된다.

일반적으로 콘크리트의 열전도율은 겉보기 밀도와 밀접한 관계를 나타낸다[15]. 본 실험결과 측정된 시멘트 페이스트의 열전도율과 겉보기 밀도와 관계는 비선형 회귀 분석을 통해 식 (1)과 같이 제시 할 수 있다(Figure 8).

$$T_c = 0.2(\rho_c)^{1.4} \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서  $T_c$ 는 시멘트 페이스트의 열전도율이며,  $\rho_c$ 는 겉보기 밀도이다. 시멘트 페이스트의 열전도율은 겉보기 밀도에 비례하여 비선형적으로 감소하였다.

### 3.5 공극률

에어로겔 첨가량 변화에 따른 시멘트 페이스트의 공극률 분포 특성 분석 결과는 Figure 9 및 Figure 10과 같다.

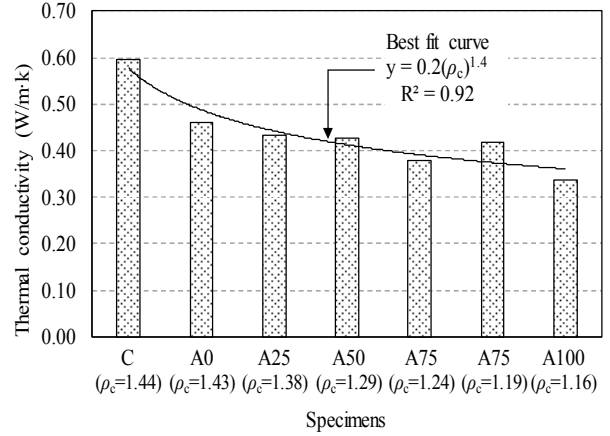


Figure 8. Relationship of apparent specific density and thermal conductivity of cement pastes

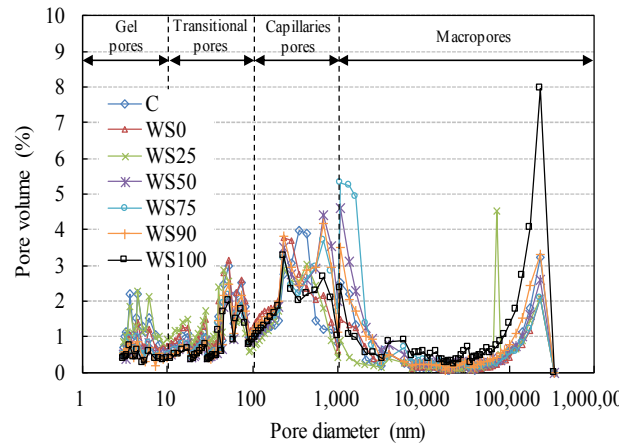


Figure 9. Pore-size distributions of hardened pastes

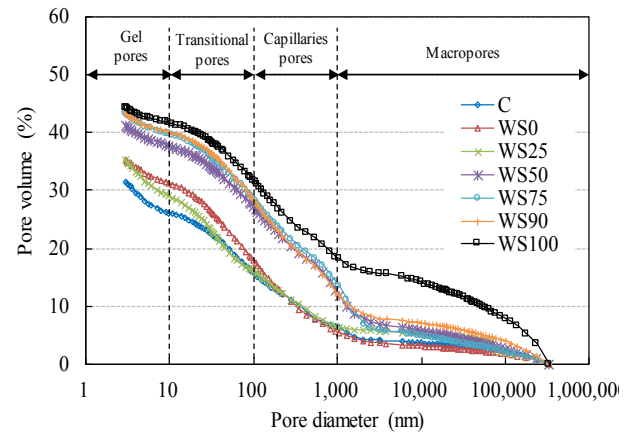


Figure 10. Cumulative porosity of hardened pastes

에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 전체 공극률은 50nm ~50 $\mu$ m 범위의 거대 모세관 공극(Macro capillary pores)에 의해 지배되었다. 특히, A25 시험체를 제외한 대부분의 시험체는 C 시험체의 거대 모세관 공극 비율에 비해 크게 나타났는데, 이는 20 $\mu$ m 수준의 입자 크기를 갖는 에어로겔이 시멘트 매트릭스 계면에 분포함에 따라 발생된 결과로 판단된다. 기공(Artificial air pore) 또한 에어로겔의 첨가량이 0%에서 100%로 변화함에 따라 증가하였는데, 이는 에어로겔 첨가량의 증가와 함께 계면활성제로 인형 형성된 기포 자체 수분량 감소로 기포막이 불안정한 상태가 되어 주변의 기포와 병합되거나 소포되어 공극이 커진 것으로 판단된다. 더불어, 시멘트 페이스트의 전체 공극률의 증가는 열전도율과 매우 유사한 관계를 나타내었다. 결과적으로, 에어로겔 첨가율의 증가는 시멘트 페이스트의 공극률 증가와 함께 열전도율 감소의 효과를 나타내었다.

#### 4. 결 론

이 연구는 에어로겔을 활용한 고단열 콘크리트 재료 개발을 위한 기초연구이다. 시멘트계 재료에서 에어로겔의 재료 분리 방지 및 분산성 향상을 위하여 소수성 에어로겔의 표면 개질제로서 계면활성제를 이용하였다. 에어로겔의 첨가량 변화에 따른 시멘트 페이스트의 특성 평가결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재령 7일 이후 시멘트 페이스트의 강도 증가 기울기는 에어로겔 첨가량이 증가함에 따라 감소하였다.
- 2) 에어로겔 첨가율이 0%에서 100%로 변화할 때 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도의 감소율은 18%로 비교적 작았다.
- 3) 에어로겔을 첨가한 시멘트 페이스트의 열전도율은 겉보기 밀도에 비례하여 비선형적으로 감소하였다. 에어로겔을 100% 첨가한 시험체의 열전도율은 일반 시멘트 페이스트 대비 약 43% 감소하였다.
- 4) 에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 거대 모세관 공극율은 일반 페이스트에 비해 높았다.
- 5) 계면활성제를 이용한 에어로겔의 표면 개질은 일정 수준의 교반시간 확보 미흡 시 시멘트 페이스트와의 불균질 혼합 및 열전도율 감소에 영향을 미칠 수 있다. 에어로겔을 활용한 콘크리트의 압축강도와 단열성을 향상

시키기 위해서는 에어로겔의 최적 표면개질 및 에어로겔의 크기와 혼입율에 대한 다양한 연구들이 진행될 필요가 있다.

#### 요 약

이 연구의 목적은 친수성 표면개질의 에어로겔을 활용한 높은 단열 콘크리트 재료 개발의 기초 평가이다. 시멘트계 재료에서 에어로겔의 재료분리 방지 및 분산성 향상을 위하여 소수성 에어로겔의 표면은 계면활성제를 이용하여 친수성을 부여하였다. 시멘트 페이스트에서 에어로겔의 첨가량은 시멘트 부피 대비 0%에서 100%로 변화하였다. 일부 시멘트 페이스트는 배합단계에서 재료분리 및 에어로겔의 뭉침현상이 나타났다. 에어로겔의 혼입은 시멘트 페이스트의 압축강도를 저하시키는 반면 열전도율은 향상시켰다. 에어로겔을 100% 첨가한 페이스트의 열전도율은 일반 페이스트 대비 약 43% 낮았다. 에어로겔 혼입 콘크리트의 압축강도와 단열성 향상을 위해서는 에어로겔의 최적 표면개질에 대한 연구가 요구되었다.

**키워드** : 에어로겔, 페이스트, 표면개질, 단열, 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. Park JM, Kim DH, Su DJ. Recent research trends for green building thermal insulation materials. *Journal of the Korea Society of Clean Technology*. 2012 Mar;18(1):14-21.
2. Park MH. Manufacturing research of inorganic insulation using waste gypsum [master's thesis]. [Chuncheon]: Kangwon National University; 2010. 57 p.
3. Lee HY, Choi HJ, Kang JS. A comparative study on the total heat release of insulation by combustibility test. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2016 Oct;36(2):686-7.

- 
4. Lee JC, Park JC, Song H, Effect of external thermal insulation composite system with a non-combustible calcium silicate based mineral on the mitigation for reducing fast spread of flame. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2016 Oct;16(5):397-403.
  5. Shin HU, Song H, Chu YS, Lee JK, A study on light-weight fire retardant inorganic insulation. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2012 May;2012(5):337-8.
  6. Shin HU, Song H, Chu YS, Lee JK, Characteristic of insulation with moisture content lightweight inorganic foam ceramic board. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2013 Nov;13(2):198-9.
  7. Choi HJ, Jeong YS, Kim GW, Kang JS, Lee SE, An experimental study on thermal conductivity change of building insulation materials with long-time elapse II. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 2003 Apr;23(1):605-8.
  8. Lee SE, Kang JS, Jeong YS, Choi HJ, An experimental study on the thermal conductivity change of building insulation materials with environmental condition and long-time elapse. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 2003 Dec;19(12):235-41.
  9. Lim SH, Lee GC, Changes in insulation performance of organic insulating materials for building construction by accelerated durability test conditions. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2016 Dec;16(6):595-601.
  10. Cha JH, Kim SM, Study of aerogel insulation performance for building application. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 2011 Oct;31(2):303-4.
  11. Hyun SH, Lee CH, Kim DJ, Surface modification of silica aerogels. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 1996 Dec;33(12):1319-24.
  12. Kim NY, Kim SW, Preparation and thermal insulation property of UV curable hybrid coating materials based on silica aerogel. *Journal of the Korean Oil Chemists' Society*, 2012 Mar;29(1):141-8.
  13. Shang J, Flury M, Harsh JB, Zollars RL, Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008 Dec;328:299-307.
  14. Eral HB, Mannetje DJCM<sup>t</sup>, Oh JM, Contact angle hysteresis: A review of fundamentals and applications. *Colloid and Polymer Science*, 2013 Feb;291:247-60.
  15. Neville AM, *Properties of concrete*, 5th ed, New Jersey: Prentice Hall; 2011. 846 p.