

실리카 에어로젤을 이용한 단열·내화재 개발에 관한 연구

조명호¹, 홍성철^{2*}

¹호서대학교 글로벌창업전공, ²호서대학교 안전환경기술융합학과

A Study on Insulation·Fire Proof Materials Using Silica Aerogels

Myung Ho Cho¹, Sungchul Hong^{2*}

¹Division of Global Entrepreneurship, Hoseo University

²Department of Convergence Technology for Safety and Environment, Hoseo University

요약 본 연구에서는 기존의 글라스울의 흡습에 의한 변형을 해결하고 단열성능향상을 위해 실리카 에어로젤을 이용한 단열재를 개발하였다. 글라스울 단열재에 액상의 혼합 바인더를 이용하여 실리카에어로젤이 함침된 글라스울 복합체를 제조하였다. 액상의 혼합 바인더는 수용성바인더(CMC, carboxymethyl cellulose)와 물에 분산시킨 실리카 에어로젤을 이용하여 준비하였다. 초기 0.048 g/cm³의 밀도를 갖는 글라스울 보드를 준비하고 실리카 에어로젤을 함침시켜 0.065 g/cm³의 밀도를 갖는 단열보드를 제작할 수 있었다. 이렇게 제조된 실리카 에어로젤 함침 글라스울 보드 복합체는 단일 글라스울 보드의 단열 성능보다 7.4% 향상된 0.0315 W/mK의 열전도율(thermal conductivity)을 나타내었다. 제조된 실리카 에어로젤-글라스울 복합체는 불꽃 관통시험에서 362초간 내화 저항성을 나타내어 단일 글라스울 보드에 비하여 2.7배나 높은 내화성능을 보였다. 또한 일반 글라스울 보드는 흡습에 의하여 수직방향으로 처짐현상을 나타내는 단점이 있었으나, 실리카 에어로젤이 함침된 보드에서는 실리카 에어로젤의 발수특성으로 인하여 높은 내수성능을 나타내는 것을 확인하였다.

Abstract In this study, silica aerogel-glass wool composites were developed for improvement of thermal conductivity and overcoming the water adsorption of glass wool boards. Silica aerogel-glass wool composites were prepared by glass wool and silica aerogel with liquid binder. Mixtures with binder were composed of CMC (carboxymethyl cellulose) and silica aerogel for glass wool board. Silica aerogel-glass wool composite boards were had 0.065 g/cm³ density by impregnation silica aerogel where from origin glass wool board at 0.048 g/cm³ density. Thermal conductivity of silica aerogel-glass wool composites were 0.0315 W/mK (up to 7.4% thermal resistance) and fire penetration time came to 362 seconds (up to 2.7 times stronger than origin glass wool board). In addition, hydrophobic aerogel characteristics prevented the adsorption of water onto silica aerogel-glass wool composite boards that was good for lightweight.

Keywords : Board, glass wool, insulation, silica aerogel, thermal conductivity

1. 서론

건축물에 사용되고 있는 단열재에는 크게 유기계 단열재와 무기계 단열재로 구분된다. 유기계 단열재에는 발포폴리스티렌(스치로폼), 폴리우레탄(PU폼), 우레아폼 등이 있다. 유기계 단열재의 경우 단열성능은 뛰어나지

만 화재에 취약하고 화재 시 유독가스가 발생하는 취약점을 지니고 있다. 무기계 단열재에는 미네랄울(암면), 글라스울(유리섬유) 등이 있다. 무기계는 일반적으로 높은 내열성을 나타내지만 유기계 단열재에 비하여 내수성과 단열성능이 낮다[1].

대표적으로 사용되는 무기계 단열재로서 글라스울은

*Corresponding Author : Sungchul Hong(Hoseo University)

Tel: +82-41-540-9834 email: chemaster@live.com

Received July 3, 2015

Accepted October 8, 2015

Revised (1st September 18, 2015, 2nd September 30, 2015)

Published October 31, 2015

다른 단열제보다 값이 비교적 저렴하고, 가공 및 성형이 용이하여 단독으로 직접 사용되거나 샌드위치패널에 삽입하여 건축물 내·외벽 및 지붕구조에 널리 사용하고 있다. 특히, 기존의 유기계 발포샌드위치패널의 구조 및 설치 위치에 따른 내부 심재의 연소 특성으로 인하여 화재 시 플래시오버(flashover) 등과 같은 급속한 연소범위의 확대가 발생하는 것과는 달리 글라스울 샌드위치패널은 화염전파 속도가 느리고 유독가스 발생량이 적은 연소특성을 나타내고 있어 사고 초기에 화재를 억제 할 수 있는 이점을 가지고 있다[2].

그러나 이러한 장점에도 불구하고 소재의 특성 및 구조적인 특성으로 시간이 지남에 따라 수분을 흡수하게 되고 이로 인하여 심재가 서서히 하부로 처지면서 구조물의 상단에는 빈공간이 발생하는 문제점이 있다. 특히 우리나라와 같이 사계절이 반복되는 환경에서는 이러한 현상이 심화되며 수분을 흡수한 심재가 동절기에 동결과 해동과정을 반복하면서 급격한 내구성저하가 발생하게 된다. 이는 무기계로 이루어진 글라스울의 다공성 구조에서 기인하는 것으로서 물을 쉽게 흡수하는 조건을 갖추고 있기 때문이다. 이러한 부분에서 본 연구의 주요 목표인 발수특성을 포함하면서 보다 단열 특성을 높이는 기술의 개발이 필요하다[3].

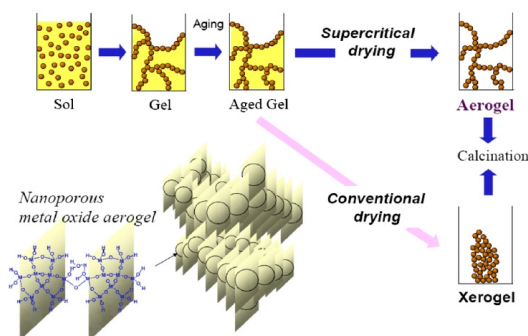


Fig. 1. Scheme of aerogel structure and fabrication process

한편, 실리카 에어로젤(silica aerogel)은 현존하는 물질 중 가장 가벼운 고체로 알려져 있다. 이러한 특성은 실리카 에어로젤 분말이 갖는 90% 이상의 높은 기공율과 600 m³/g 이상의 비표면적을 가지는 나노 다공성 구조에 기인한 것이다. Fig 1은 에어로젤의 구조 및 제조 과정을 나타내고 있다[2]. 실리카 에어로젤은 SiO₂에 의

한 망상 구조로 되어 있으며 siloxane chain은 유기 고분자의 C-C 결합보다 매우 큰 결합력을 형성하고 있으며 특히 소수화된 표면은 방수 및 발수 효과가 뛰어나기 때문에 내구성이 우수하고 비중이 매우 낮기 때문에 효율성이 높은 나노신소재 물질이다[3,4].

최근 값싼 원료를 사용해서 실리카 에어로젤을 간단한 공정으로 제조하는 기술들이 다양하게 시도되었고, 일부 제품들에 한하여 상용화에 성공하여 판매되고 있다. 특히 물유리(water glass)를 전구체로 하여 기존에 사용되던 초임계건조(supercritical dry) 공정이 아닌 상압건조(ambient dry)기법을 이용하여 분말형태로 제조하는 공정이 개발되어 이종의 재료와 함께 사용할 수 있는 복합화 연구가 활발하게 이루어지고 있다[5-9].

본 연구에서는 기존의 글라스울이 갖고 있는 단점을 보완하기 위해 높은 단열성과 소수성 및 내화성능을 갖는 실리카에어로젤 분말을 글라스울 내부에 혼입하여 열전도율을 낮추고, 내화성능 및 방수성능을 높이고자 실험을 수행하였다. 즉, 기존 글라스울 또는 미세알루미늄이 심재로 사용되는 샌드위치패널에 본 실험의 결과로부터 얻어진 에어로젤 분말을 적용함으로써 에너지 효율을 높이고, 내구성 증가 및 화재 발생시 화염전파 속도를 늦춰 안전 담보 및 피난시간을 확보하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 글라스울은 국내 (주)벽산글라스울의 글라스울매트를 사용하였으며 기본 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Basic physical properties of glass wool

Item	General glass wool (Bouonpan 2-ho)
Density	0.048 g/cm ³
Thermal conductivity	< 0.043 W/mK (at 70℃)
Shrinking temp. (℃)	> 300
Thickness	50 mm

단열 및 내화, 방수성능의 개선을 위한 기능성 첨가제로써 분말형태의 실리카 에어로젤을 사용하였으며, 글라스울의 조밀한 조직에 쉽게 혼입될 수 있도록 20 μm 이

하의 입도를 가진 국내 지오스에어로겔사의 AEROVA 제품을 적용하였으며 기본 물성은 Table 2와 같다.

그 외 수용성 바인더로써 CMC, 비산억제용 아크릴 에멀전(acrylic emulsion)을 사용하여 혼합액을 조성 후 사용하였다.

Table 2. Basic properties of silica aerogel powder

Features	AeroVa Aerogel
Particle Size	< 20 μm
Pore Diameter	10nm (mean size)
Bulk Density	0.04 ~ 0.10 g/cm^3
Wetting Properties	Super Hydrophobic
Thermal Conductivity	0.017 ~ 0.022 W/mK
Surface Area	600 ~ 800 m^2/g
Porosity	> 90%
Temperature Range	-200 ~ 1,600 $^{\circ}\text{C}$
Flame Resistance	Flame Retardant

2.2 실험방법

본 실험에서는 물 1L에 수용성 바인더(CMC, carboxymethyl cellulose) 1 wt% 첨가 후 500 rpm에서 1시간 교반/분산된 점성액을 준비하고, 이에 비산억제용 레진(Acrylic Emulsion) 1 wt%를 첨가하여 추가 교반한다. 여기에 실리카 에어로겔 분말을 3 wt% 2 ~ 3 차례 나누어서 첨가한 후 교반하여 슬러리 형태로 배합하여 준비한다. 이 후 글라스울 모재의 표면 및 내부에 골고루 함침한 후 오븐 건조기에서 6 시간 이상 완전 건조 시킨다. 위의 순서는 Fig. 1과 같이 나타내었다.

한편, 동일한 글라스울에 에어로겔 함량에 대한 경향성을 확인하기 위해 혼합물의 양을 각각 달리 함침 시킨 후 건조 후의 에어로겔 함량을 비교 측정하여 Table 3과 같이 나타내었다.

Table 3. Aerogel contents with the sample numbers

Sample No.	G0	G1	G2	G3	G4	G5
Aerogel content (g/m^2)	0	80	160	240	320	400

2.2 평가방법

시험체의 열전도율을 측정하기 위하여 일반 세라믹을 비롯한 건축용 단열재의 열전도율 측정에 주로 사용되고 있는 평판열류계법(Heat Flow Method, KS L 1640)을

통해 진행하였으며, 해당 분석이 가능한 장비로써 HFM 436(NETZSCH, 독일)를 이용하였다.

내화 특성에 대해서는 실물화재 시험법으로서 KS F ISO 9750에 준하여 실험을 진행하나 본 연구에서는 시험체의 크기를 고려하여 간이 지그를 이용한 불꽃 노출 및 화재 거동을 평가하였다[10]. 내화시험의 조건은 Table 4와 같으며, Fig. 2에는 내화시험이 진행되는 모습을 나타내었다.

Table 4. Conditions of fire resistance

Item	Specifications
Sample Size	300 mm × 300 mm × 50 mm
Burner (Butane)	80 g/hr, 960 kcal, ~1,300 $^{\circ}\text{C}$
Test Time	10 min
Test Result	Perforation

방수 특성에 대해서는 일반적으로 단열, 방화 등을 목적으로 하는 건축물의 내외장재 마무리 재료로 사용하는 미네랄을 판상 단열재의 흡수율 측정에 대한 기준을 따랐으며, 그 방법은 다음과 같다. 200 mm × 150 mm 크기의 시험편을 25 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ $^{\circ}\text{C}$ 의 물속에서 수면 아래 약 30 mm의 위치에 놓고 2 시간 정치한다.

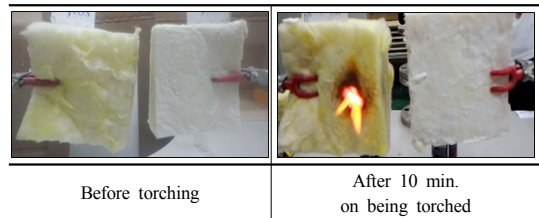


Fig. 2. Flame penetration resistance test

정해진 시간이 경과한 후 시험편을 꺼내 표면에 부착되어 있는 물을 스포프로 닦고, 흡수시의 무게를 측정하여 아래와 같은 식에 따라 산출한다[11].

$$A = \frac{m_1 - m_0}{v \times \delta} \times 100$$

여기서 A 는 흡수율(%), m_0 는 건조무게(g), m_1 은 흡수무게(g), v 는 시험편의 부피(cm^3), δ 는 물의 비중(g/cm^3)이다.

3. 결과 및 고찰

위의 시편제조방법을 통해 제조한 실리카 에어로젤이 함유된 글라스울은 종전의 글라스울에 비하여 밝은 백색을 나타내게 되며[Fig. 3], 외부 표면과 내부 필라멘트 사이에 에어로젤과 바인더의 혼합물이 자리잡고 있는 모습을 주사현미경(SEM)을 통해 확인할 수 있었다[Fig. 4].

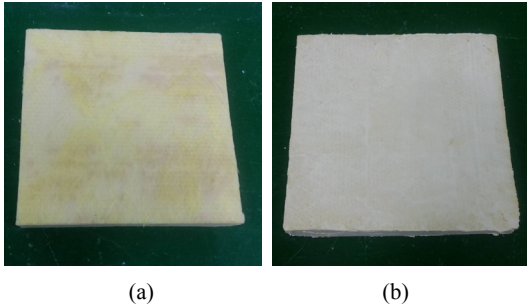


Fig. 3. Morphology of glass wool
(a) general glass wool
(b) aerogel-glass wool

실리카 에어로젤이 함유된 글라스울 시편에 대해서 밀도, 열전도도, 내화특성, 방수 그리고 흡수 특성에 대한 각각의 비교 시험결과는 Fig. 5, 6, 7, 9(G5에서와 같이 에어로젤의 혼입량은 단위 면적당 400 g이 최고였으며, 그 이상의 함량을 사용할 경우 외관이나 보드 자체의 형상에 문제가 발생하였음)와 같았다.

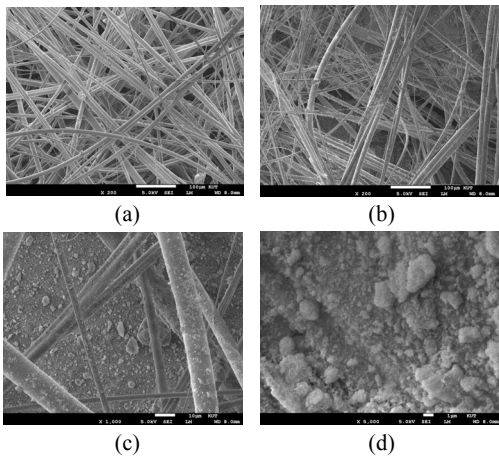


Fig. 4. SEM images of glass wool
(a) general glass wool without aerogel (magn. 200 x)
(b) glass wool with aerogel (magn. 200x)
(c) glass wool with aerogel (magn. 1,000x)
(d) glass wool with aerogel (magn. 5,000x)

두께 50 mm, 1 m²의 중량이 2.4 kg 밖에 되지 않는 저밀도의 글라스울 기본시편은 그 조직 안에 빈 공간이 많기 때문에 실리카 에어로젤이 약 80 g 단위로 400 g까지 증량되는 조건으로 혼합물과 함께 함침 시키는 것이 가능하였다. 이에 따라 각 시편의 외형적인 부피변화는 5% 내외로 적으나, 에어로젤 함량 증대에 따른 무게 변화 때문에 하기 Fig. 5와 같이 밀도가 증가하게 되었다.

Fig. 6에서는 일반 글라스울과 실리카 에어로젤이 달리 함유되어 있는 각각의 시편에 대해서 열전도도를 측정된 결과를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 실리카 에어로젤 함량이 증가할수록 시편의 열전도도는 감소하게 된다.

단열재로서의 낮은 열전도도를 갖는 글라스울은 20 °C 조건에서 0.0340 W/mK로 측정되었다. 에어로젤 함량이 증가할수록 열전도도 값이 감소하여 400 g의 에어로젤이 함유된 시편의 경우 0.0315 W/mK로서 기본 글라스울 모재 조건 대비 약 7.4%의 열전도도 감소율을 보였다.

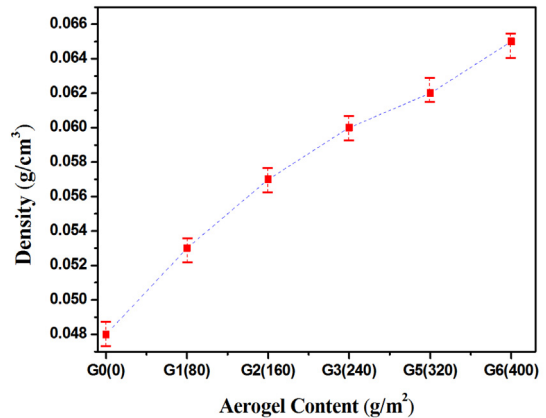


Fig. 5. Density change on changes in aerogel contents

일반적으로 단열재의 열전달은 소재의 고체부분을 통한 전도(conduction), 구조가 만들어 내는 공간(기공)을 통한 대류(convection)를 통해 이루어지는데, 글라스울의 경우 구조적인 특성 상 열전도를 줄이기 위해 필라멘트의 직경이 가느다란(약 6~12 μm) 반면, 필라멘트 가닥 사이사이에 무수히 많은 공간이 존재하며 이를 통해 열전달 즉, 대류가 일어나게 된다[4,12,14-17].

실리카 에어로젤의 경우, 기본적인 열전도도가 글라스울보다 낮고, 입자크기가 글라스울의 빈 공간을 채울

정도로 작기 때문에 결과적으로 글라스울이 갖고 있는 대류를 통한 열전달을 보완하게 된다.

다만, 실리카 에어로젤 자체가 접촉성이 없기 때문에 바인더를 사용하게 되고, 바인더를 통한 열전달 즉, 전도는 약간 상승하게 된다. 추 후 열전도도가 낮은 바인더를 찾거나 개발하게 되면 좀 더 단열성능이 우수한 에어로젤 복합 단열재의 제조가 가능할 것으로 예상된다. 또한, 앞서 확인된 글라스울 내부의 빈 공간을 충분히 활용할 경우, 더 많은 양의 에어로젤 함침이 가능하며 그에 따른 단열성능 개선도 기대할 수 있다.

건축자재에서의 내화성이란 화재로부터 보호되고 고 열환경에 견디는 재료적 특성으로서 화재온도 1,000 °C 이상의 고온에서 변형이나 붕괴가 일어나지 않도록 하는 중요한 물성이다. 실리카 에어로젤은 무기소재를 기반으로 하고 있기 때문에 기본적으로 화기에 대한 높은 내성을 갖게 된다.

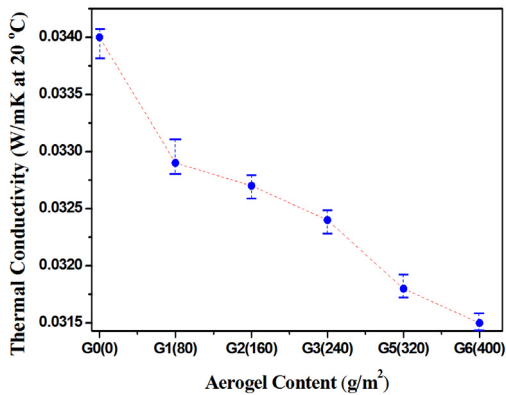


Fig. 6. Thermal conductivity change on changes in aerogel content

본 연구를 통하여 제조된 실리카 에어로젤이 혼입된 글라스울은 기존 글라스울 대비 에어로젤 함량이 증가할 수록 화기에 대한 내구성이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7에서는 같은 두께를 갖는 시편 6개를 동일한 조건의 불꽃에 노출시키고 시간의 경과에 따라 화기에 의한 모재의 손상 즉, 불꽃에 의한 관통현상이 관찰된 시간을 비교한 결과를 보여주고 있다.

일반 상용화 글라스울은 실리카로 이루어진 직경 6~12 μm의 섬유 집합체로서 실리카의 소결온도인 1,700 °C 보다 현저하게 낮은 약 600 °C 부근에서 손상을 입을 것을 관찰할 수 있다.

실리카 에어로젤 분말이 함유된 글라스울은 높은 내열특성을 갖는 실리카 에어로젤이 섬유 격자의 틈새 사이에 내부 공간을 채워 밀도를 높게 된다.

가느다란 필라멘트 즉, 섬유로만 구성된 일반 글라스울과 같이 독립적으로 구조를 이루는 경우보다 격자 사이에 실리카 줄이 혼입되어 화기에 저항하기 유리한 구조로 제조되어 높은 내열 특성을 갖게 되는 것으로 판단되었다.

결과적으로 글라스울에 혼입한 에어로젤의 함량이 증가함에 따라 불꽃에 대한 내구성이 증대되는 것을 확인할 수 있었다[Fig. 7].

실리카 에어로젤은 일반 실리카겔 또는 흙실리카와 달리 표면이 소수(hydrophobic) 특성을 나타낸다. 실리카의 표면이 메틸기(-CH₃)로 치환된 형태로서 이는 에어로젤의 고유한 특성이자 제조 및 물성유지에 필수적인 요소이다[9-11].

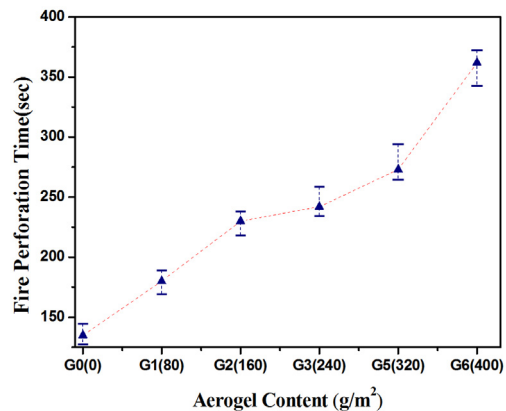


Fig. 7. Thermal resistance change on increase in aerogel content

실리카 에어로젤의 특성을 기존 단열재에 적용하게 되면 소수성 특성을 이용하여 방수 성능의 향상을 기대할 수 있고, 이로 인하여 단열재를 시공한 후 수분의 흡수로 인한 중량의 증가로 단열재 처짐 현상을 방지할 수 있다.

실리카 에어로젤을 적용한 단열재의 표면이 소수화되어 수분의 접촉각이 높아지는 것을 Fig. 8에서 관찰할 수 있다.

일반적으로 사용하고 있는 글라스울 단열재(G0)는 Fig. 9에서와 같이 방수/말수 특성이 없어 수분을 흡수하는 것을 알 수 있다.



Fig. 8. Hydrophobic characteristic on glass wool

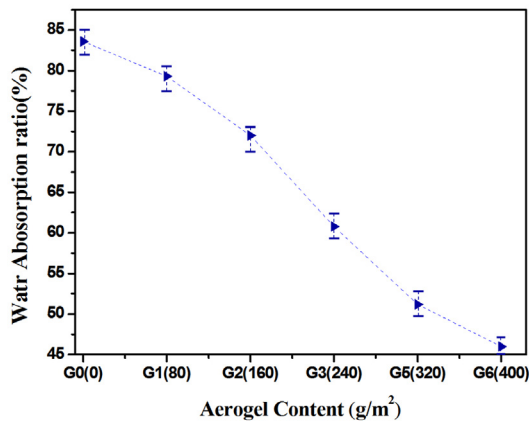


Fig. 9. Water adsorption decrease on increase in aerogel content

Fig. 9의 실험에서 2 시간 동안 수행된 결과 83.6% 흡수율을 나타내었고, 이는 건축단열재로서 치명적인 약점으로 작용하게 된다. 실리카 에어로젤의 함량이 증가할수록 흡수율은 급격하게 낮아졌으며, G6의 경우 46%까지 저하되는 것을 관찰할 수 있었고, 이는 에어로젤의 함량이 증가할수록 소수특성에 의하여 단열재에 수분 흡수를 방해하기 때문인 것으로 판단되었다.

본 연구에서 사용한 일반 글라스울이나 대부분의 건축물 단열재로 많이 사용하고 있는 미네랄울 및 글라스섬유의 경우 저렴한 가격과 경량성, 우수한 단열효과를 갖고 있음에도 불구하고 수분흡수율이 높고, 이로 인하여 중량변화에 따른 장기적 안정성 하락이 문제가 되어 실리카 에어로젤을 이용한 단열재의 개발이 요구되고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 글라스울의 단열성능과 내화성능 및 방수특성을 개선하기 위하여 실리카 에어로젤을 혼입하여 함량별로 시편을 제조하였고, 결과를 분석하였다.

실리카젤 함침을 위한 유동화제로서는 CMC가 가장 좋았으며, 단위 면적당 400 g이 가장 좋은 물성을 나타내는 함량이었다. 400 g 이상이 사용되었을 경우 단열시편의 외관이 좋지 않았으며 또한 섬유격자의 구조체가 수용할 수 있는 범위를 넘어섰다.

실험에서 얻을 수 있었던 결론은 실리카젤의 혼입으로 인하여 섬유격자의 공극을 메워 단열성능과 내열특성을 각각 0.0315 W/mK, 5분 이상 얻을 수 있었고, 실리카젤의 발수특성 향상으로 섬유격자의 수분 흡수를 억제하여 수분흡수율을 46%까지 낮출 수 있었다.

본 연구를 통해서 기존에 건축단열재로 널리 사용되고 있는 글라스울의 단점을 보완하여 발수 특성, 단열 및 내화 특성을 향상시킨 제품을 개발할 수 있는 기틀을 마련하게 되었다고 판단된다.

References

- [1] J. Y. Song, J. P. Kim, Y. J. Cho and N. K. Park, "A Study on Combustion Characteristic of Building Materials" Proceedings of the Korean Institute of Fire Science and Engineering Conference, pp. 16-19, 2001.
- [2] I. H. Yeo, "Fire resistant performance of high-strength concrete column covered with aerogel composite inorganic blanket and gypsum board, 12, pp. 39-45, 2012.
- [3] H. Yokogawa, M. Yokoyama, "Hydrophobic silica aerogel", Journal of Non-Crystalline Solids, 186, pp. 23-29, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00086-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3093(95)00086-0)
- [4] S. D. Williams, and D. M. Curry, "Predictions of Rigid Silica Based Insulation Conductivity," pp. 3276, NASA, 1993
- [5] Douglas M. Smith, Alok Maskra, Ulrich Boes, "Aerogel-based thermal insulation", Journal of Non-Crystalline Solids, 225, pp. 254-259, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00125-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00125-2)
- [6] G. Carlson, D. Lewis, K. McKinley, J. Richardson, T. Tillotson, "Aerogel commercialization: technology, markets and costs", Journal of Non-Crystalline Solids, 186, pp. 372-379, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00069-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3093(95)00069-0)
- [7] Lawrence W. Hrubesh, "Aerogel applications", Journal of Non-Crystalline Solids, 225, pp. 335-342, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00135-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00135-5)

- [8] M. Schmidt, F. Schwertfeger, "Applications for silica aerogel products", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, pp. 364-368, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00054-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00054-4)
- [9] G. Herrmann, R. Iden, M. Mielke, F. Teich, B. Ziegler, "On the way to commercial production of silica aerogel", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, pp. 380-387, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)90076-4](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3093(95)90076-4)
- [10] KS F ISO 9705, "Fire Tests-full-scale Room Test for Surface Products", Korean Agency for Technology and Standards, 2009.
- [11] A. Venkateswara Rao, D. Haranath, "Effect of methyltrimethoxysilane as a synthesis component on the hydrophobicity and some physical properties of silica aerogels", *Microporous and Mesoporous Materials*, 30, pp. 267-273, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1387-1811\(99\)00037-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1387-1811(99)00037-2)
- [12] E. M. Sparrow, and R. D. Cess, "Radiation Heat Transfer", Augmented Ed., pp. 255-271, McGraw-Hill, New York, 1978
- [13] M. Dowson et al., "Streamlined life cycle assessment of transparent silica aerogel made by supercritical drying." pp. 396-404, *Applied Energy*, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.047>
- [14] G. A. Domoto, and W. C. Wang, "Radiative Transfer in Homogeneous Nongray Gases with Nonisotropic Particle Scattering," *Journal of Heat Transfer*, 96, pp. 385-390, 1974
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3450210>
- [15] L. K. Matthews, R. Viskanta, and F. P. Incropera, "Combined Conduction and Radiation Heat Transfer in Porous Materials Heated by Intense Solar Radiation," *Journal of Solar Energy Engineering*, 107, pp. 29-34, 1985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3267649>
- [16] J. Marschall, J. Maddren, and J. Parks, "Internal Radiation Transport and Effective Thermal Conductivity of Fibrous Ceramic Insulation," *AIAA*, pp. 2001-2822, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2001-2822>
- [17] R. Siegel, and J. R. Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer", 2nd Ed., pp. 426-427, McGraw-Hill, New York, 1981.
- [18] R. Baetens et al., "Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond." *Energy and Buildings*, 42(2), pp. 147-172, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.005>
- [19] J. M. Schultz, K. I. Jensen, and F. H. Kristiansen, "Super insulating aerogel glazing." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89, pp. 275-285, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.016>
- [20] K. Daryabeigi, "Effective Thermal Conductivity of High Temperature Insulations for Reusable Launch Vehicles," NASA TM-1999-208972, 1999.
- [21] F. Schwertfeger, D. Frank, M. Schmidt, "Hydrophobic waterglass based aerogels without solvent exchange or supercritical drying", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225, pp. 24-29, 1998.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00102-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00102-1)
- [22] Dotts, R. L., Curry, D. M., and Tillian, D. J., "Orbiter Thermal Protection System," *pace Shuttle Technology Conference Proceedings, Part 2*, pp. 1062-10811, 1985.

홍 성 철(Sungchul Hong)

[정회원]



- 2013년 2월 : 성균관대학교 화학공학과 (공학박사)
- 2014년 9월 : 바이오나노융합재료 연구센터 (선임연구원)
- 2014년 10월 ~ 현재 : 호서대학교 안전환경기술융합학과 교수

<관심분야>

안전·환경기술, 유/무기 화합물

조 명 호(Myung-Ho Cho)

[정회원]



- 1999년 2월 : 호서대학교 안전공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 호서대학교 안전공학과 (공학박사)
- 2004년 9월 ~ 2009년 2월 : ㈜드림텍 연구소장
- 2010년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 글로벌창업전문공 교수

<관심분야>

안전, 화학, 신소재