

나노 기공성 단열 실리카 모노리스 제조 및 특성 연구

최현묵 · 김성우[†]

경기대학교 화학공학과

(2014년 2월 10일 접수; 2014년 2월 25일 수정; 2014년 2월 27일 채택)

Preparation and characterization of nanoporous monolith with high thermal insulation performance

Hyun-Muk Choi · Seong-Woo Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Kyonggi University,

94-6, Iui-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi 443-760, Korea

(Received February 10, 2014; Revised February 25, 2014; Accepted February 27, 2014)

요약 : 본 연구에서는 졸-겔, 용매치환, 표면개질, 상압건조 공정과 계면활성제에 의한 템플레이팅 (templating) 공법 및 소결 공정을 이용하여 실리카 에어로겔 모노리스와 메조포러스 실리카 모노리스를 각각 합성하였다. 제조된 두 종류의 실리카 모노리스는 균열이 없이 비교적 투명하였으며, 매우 높은 기공율(92-94%) 및 비표면적(800 - 840 m²/g)과 수 십 nm 수준의 기공 크기를 갖는 것으로 확인되었다. 표면개질을 적용한 실리카 에어로겔 샘플이 스프링백 효과로 인하여 메조포러스 실리카 모노리스에 비해 더욱 미세하고 균질한 나노 기공 구조를 보였을 뿐만 아니라, 그 단열 성능도 더욱 우수한 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 합성된 두 종류의 실리카 모노리스를 중간층으로 적용한 복층 창유리의 단열 성능을 측정된 모노리스의 열전도도와 이론식을 근거로 조사한 결과, 기존의 상업적으로 응용되는 공기층 삽입 복층 창유리에 비해 우수한 단열 성능을 보이는 것으로 나타났다.

Abstract : In this study, we synthesized two different silica monoliths by using sol-gel, solvent exchange, surface modification, ambient pressure drying processes, and surfactant-based templating technique followed by calcination process. All of the prepared two silica monoliths showed crack-free appearance with fairly good transparency, and furthermore were confirmed to have extremely high porosity, specific surface area, and mean pore size below 30 nm. The silica aerogel sample exhibited finer and more homogeneous nano-sized pore structure due to spring back effect caused by surface modification, which resulted in better thermal insulation performance. Based on measured thermal conductivities and theoretical relationship, multi-layered glass window system in which silica monolith prepared in this study was inserted as a middle layer was revealed to have superior thermal insulation performance compared to conventional air-inserted glass window system.

Keywords : silica monolith, nano-sized pore, thermal insulation performance, glass window

[†]Corresponding author (E-mail: wookim@kgu.ac.kr)

1. 서 론

최근의 빌딩 혹은 주택 등의 건축물은 충분한 채광 및 조망 확보를 위하여 외벽에서 차지하는 유리창의 면적 비율을 확대하는 방향으로 설계되고 있는 추세이다. 그러나 대부분의 에너지 손실은 이러한 창유리를 통해 일어나기 때문에 결국 건축물에서 소모되는 에너지 양이 증가하는 원인이 되고 있다. 따라서 에너지 비용을 절감하고 환경파괴의 원인이 되는 온실가스 배출량을 최소화하기 위해서는 건축물을 통한 열의 유입/유출을 차단할 수 있는 단열 창유리 소재의 개발이 필요하다[1].

여름철에 외부로부터의 태양 열선의 투과를 차단하고 겨울철에는 단열 효과에 의해 실내 열 손실을 방지하기 위하여 유리 표면에 은(Ag)과 같은 금속막을 코팅하여 제조된 로우이(low-emissivity) 윈도우 시스템이 이미 실용화되어 건축물에 적용되고 있으나, 높은 제조비용이 그 단점으로 지적되고 있다. 또한 유리에 단열 성능을 부여할 수 있는 박막 형태의 코팅 물질을 개발하기 위해 필라이트, 중공체, 실리카 다공체, 나노 클레이와 같은 분말 형태의 무기 단열 물질을 유기 고분자 수지와 복합화한 다양한 연구 결과가 여러 연구자들에 의해 보고되었다[2-5]. 그러나 이러한 복합 물질은 유리의 투명성 확보를 위해 박막 형태로만 유리에 코팅 처리되어야 하기 때문에 결국 유리의 단열 성능을 획기적으로 향상시키는 데는 한계가 있다.

한편 최근에 나노 기공성의 실리카 에어로겔이 초단열 소재로서 주목받고 있는데, 이는 매우 높은 기공율(92 - 98 %) 및 나노 크기 (20 - 50 nm)의 기공으로 인하여 공기보다 낮은 열전도도를 갖기 때문이다[6-9]. 일반적으로 다공체에서의 열전달은 고체상에서의 열전도(k_s) 및 복사(λ_{rad}), 기공내의 기체상에서의 열전도(k_g) 및 대류(h_g)에 의해 일어난다. 따라서 다공체의 유효 열전도도(K_{eff})는 다음 식과 같이 이러한 열전달 요소의 합으로 정의될 수 있다.

$$K_{eff} = k_s + k_g + h_g + \lambda_{rad} \quad (1)$$

실리카 에어로겔의 경우 기공 크기가 공기 분자의 평균자유행로(mean free path) 크기(약 70 nm) 보다 작아 기공내에서의 대류 열전달이 거의 일어나지 않기 때문에, 즉 상기의 식에서 $h_g \approx$

0 으로 가정할 수 있어 마이크로 기공 크기의 다공체 또는 발포체에 비해 매우 낮은 열전도도(K_{eff})를 갖는 우수한 단열 특성을 나타낸다[10].

본 연구에서는 단열 윈도우 시스템 적용을 위하여 초단열 성능을 갖는 나노 기공성의 투명한 실리카 모노리스를 합성하고자 하였다. 실리카 전구체인 tetraethoxysilane (TEOS)를 출발물질로 하여 졸-겔 공정을 통하여 실리카 겔을 제조하고, 겔에 함유된 용매 제거를 위해 용매치환 및 표면개질, 상압 건조 공정을 순차적으로 적용한 실리카 에어로겔 모노리스(SA-M)와 계면활성제 자기조립체에 의한 템플레이팅(templating) 공법을 이용한 메조포러스 실리카 모노리스(MPS-M)를 각각 합성하였다. 서로 다른 공법에 의해 제조된 두 종류의 나노 기공성 실리카 모노리스의 기공율 및 기공크기, 비표면적 등의 특성을 BET를 이용하여 비교 분석하였으며, 모폴로지, 표면 특성, 투명성 등을 관찰하였다. 또한 제조된 두 종류의 실리카 모노리스 및 공기(air)가 중간층으로 각각 삽입된 이중층 윈도우 시스템에 대하여 단열 특성의 변화를 중간층의 두께 변화에 따라 조사하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료

본 실험에서는 졸-겔 공정에 의한 실리카 졸 제조를 위해 tetraethoxysilane (TEOS, Acros organics, 98 %)을 무기 전구체로 사용하였으며, TEOS의 가수분해 반응을 위해 2차 증류수와 공통 용매로서 에탄올 (Samchun chemical, 95 %)을 사용하였다. 가수분해 및 축합 반응의 촉진을 위해 산성 및 염기성 촉매로서 희석된 염산 (Duksan chemical, 35.0 %)과 수산화암모늄 (NH₄OH, Sigma aldrich)을 각각 사용하였다. 겔화 이후 습윤겔 내부에 존재하는 미반응물 제거를 위한 세척 및 숙성용 용매로는 이소프로필알코올 (IPA, Duksan chemical)을 사용하였으며, 숙성이 완료된 습윤겔의 용매 치환 및 표면 개질을 위해 표면장력이 매우 낮은 n-hexane (Ducsan chemical)과 trimethyl chloro silane (TMCS, Acros organics)을 사용하였다. 템플레이팅 구조를 형성하기 위한 계면활성제로는 polyethleneglycol hexadecyl ether (Brij C10, Sigma aldrich Co.)을 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 실리카 에어로겔 모노리스 제조

실리카 에어로겔 모노리스 (SA-M)는 졸-겔 공정, 용매치환, 표면개질, 상압건조 등의 공정 단계를 거쳐 제조되었다. 먼저 실리카 전구체인 TEOS와 물, 에탄올을 TEOS : EtOH : H₂O : = 1 : 8 : 6의 몰 비로 혼합하고 HCl 산성 촉매를 첨가하여 상온에서 12 시간동안 단순교반에 의한 졸-겔 반응을 진행하였다. 이러한 졸-겔 공정의 가수분해와 축합반응을 통해서 올리고머 형태의 실리카 졸 상이 형성되고, 이들 졸 상으로부터 화학적 변화를 거치면서 삼차원적 망상구조의 실리카 습윤겔 상으로 전이된다. 이렇게 얻어진 습윤겔 내에 남아있는 미반응물 및 물을 제거하기 위하여 IPA를 이용하여 세척하였으며, 또한 더욱 강하고 치밀한 망목구조의 실리카 습윤겔을 생성하기 위하여 IPA 존재하에 50 °C에서 48 시간동안 숙성 (aging) 공정을 실시하였다. 실리카 에어로겔은 숙성과정을 거치더라도 그 골격이 약하기 때문에 상압 건조과정에서 발생한 모세관력에 의해 기공들이 쉽게 붕괴된다[11,12]. 따라서 본 연구에서는 표면장력 및 증기압이 매우 낮은 헥산 용매로 졸-겔 반응시 사용된 물을 치환하여 실리카의 붕괴 및 크랙 현상을 방지하였다[13]. 또한 에어로겔의 건조 과정에서 "spring back" 효과 [11]에 의해 실리카 상을 팽창시킴으로써 기공율을 증진시키기 위하여 실란올(Si-OH)기로 분포된 친수성의 습윤겔의 표면을 소수성으로 개질하였다. n-hexane에 6 vol.%의 조성으로 희석한

TMCS (tetramethyl chloro silane)용액내에 제조된 습윤겔을 담그고 상온에서 24시간동안 개질반응이 일어나도록 하였다. Fig. 1은 이러한 TMCS를 이용하여 알킬기로 치환된 소수성의 실리카 상으로 개질하기 위한 반응 메카니즘을 보여주고 있다. 마지막으로 50 °C에서 열풍건조기를 이용한 상압 건조 단계를 거쳐 투명한 실리카 에어로겔 모노리스를 얻었다.

2.2.2. 메조포러스 실리카 모노리스 제조

메조포러스 실리카 모노리스 (MPS-M)의 경우 졸-겔 반응 공정 중 계면활성제polyethleneglycol hexadecyl ether (Brij C10)를 임계농도 이상으로 첨가하여 자기 조립에 의한 미셀을 형성시켜 실리카졸 상에 분산되도록 하였으며, 겔화 (Gellation) 및 숙성(Aging) 과정을 통하여 생성된 실리카 입자들이 망목구조의 실리카 상으로 변환되고 동시에 템플레이팅 구조 표면에 흡착되도록 하였다. 메조포러스 실리카 모노리스를 제조하는 경우에는 이미 형성된 기공 템플레이팅에 의한 크랙 발생 억제 및 기공 붕괴 방지 효과로 인하여 에어로겔 제조시 수행된 용매치환 및 표면개질 공정을 적용하지 않았으며, 단지 용매 건조 이후 유기 템플레이팅을 제거하기 위하여 500 °C에서 소결(Calcination) 공정만을 실시하였다. Fig. 2는 실리카 에어로겔 모노리스 (SA-M) 및 메조포러스 실리카 모노리스 (MPS-M)의 제조 공정 단계를 나타내고 있다.

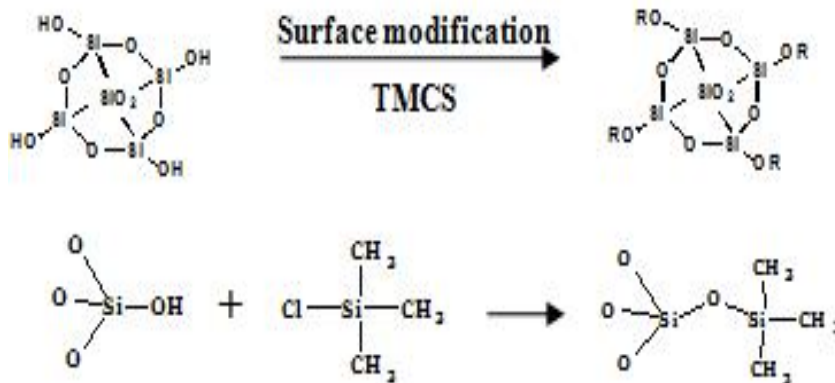


Fig. 1. TMCS-derived reaction mechanism for the surface modification of silica particle.

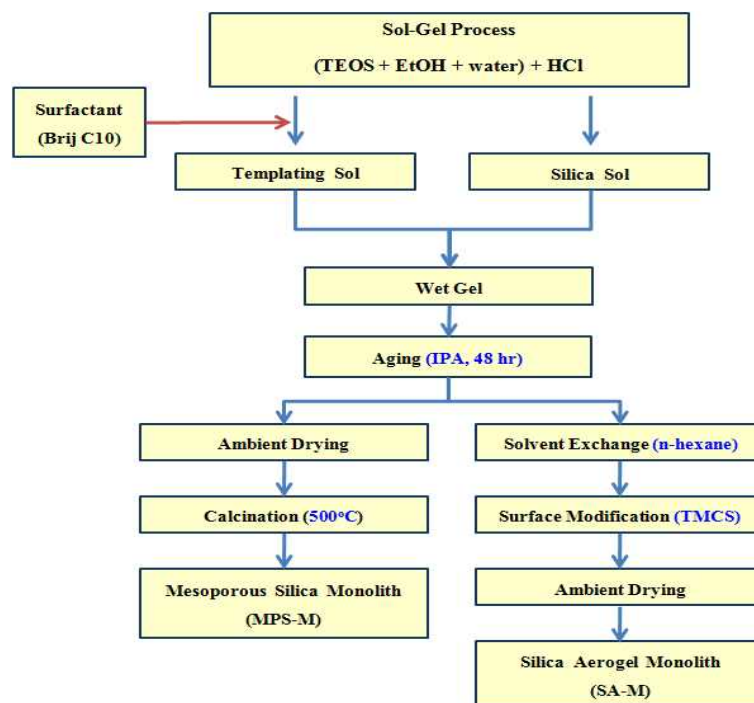


Fig. 2. Experimental procedures for preparation of SA-M and MPS-M.

2.3. 특성분석 및 기기

FT-IR 기기 (JASCO 430, Jasco사)를 이용하여 실리카 에어로겔 및 메조포러스 실리카 모노리스의 분자의 결합구조를 분석하였다. 또한 제조된 실리카 모노리스의 표면 성질을 분석하기 위해 쉬트 형태의 시편을 만들어 물 접촉각 측정기 (SEO 300, SEO 사)를 이용하여 시편에 형성된 액적 형상을 관찰하고 접촉각을 측정하였다. 샘플의 비표면적, 기공율, 평균 기공크기는 BET 분석기기 (BELSORP-max, BEL사)를 이용하여 측정하였다. 나노 기공성 실리카 모노리스의 단열 성능은 열전도도를 통해 평가하고자 하였으며, ASTM E1461에 의거하여 레이저 플래시 방식이 적용된 열확산도 측정기기 (LFA 457, Netzsch사)로 총 5회 측정하여 평균값을 취하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 SA-M과 MPS-M 샘플의 FT-IR 스펙트럼을 보여준다.

1080, 450 cm^{-1} 영역대에서 실록산기(Si-O-Si) 피크가 두 스펙트럼에서 모두 관찰된 것으로 보아 졸-겔 공정에 의해 망목 구조를 갖는 실리카가 생성되었음을 확인할 수 있었다. MPS-M 샘플의 경우 소겔 공정을 통해 템플레이트 유기 분자가 제거되고, 졸-겔 공정의 가수분해에 의해 생성된 실란올기 (Si-OH)로 인하여 3450, 960 cm^{-1} 영역대에서 Si-OH 피크를 갖는 스펙트럼을 보였다. 그러나 SA-M의 스펙트럼에서는 이러한 피크는 소멸되고 845 cm^{-1} 에서 Si-CH₃에 해당하는 피크가 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 1에서 보인 바와 같이, TMCS에 의한 표면개질을 통하여 실리카 표면에 존재하는 Si-OH 결합이 Si-O-Si(CH₃)₃ 결합으로 전환되었기 때문이라고 볼 수 있다[12].

Fig. 4(a), (c)는 TEOS로부터 얻은 습윤겔을 상압건조에 의해서 제조한 실리카 에어로겔 모노리스 (SA-M)와 공정 단계 축소가 가능한 계면활성제 기반의 템플레이팅 공법에 의해서 제조한 메조포러스 실리카 모노리스 (MPS-M) 샘플을 각각 보여주고 있으며, 또한 Fig. 4(b), (d)에서는

이들의 정성적인 투명성을 파악하기 위해 디지털 이미지 촬영 결과를 함께 나타냈다. SA-M은 전형적인 실리카 에어로겔의 외관으로 옅은 푸른색을 띠는 비교적 투명한 형태를 보이고 있으며, 반면에 MPS-M는 유리와 같이 색을 띠지 않으면서 SA-M보다 더욱 투명한 것으로 나타났다.

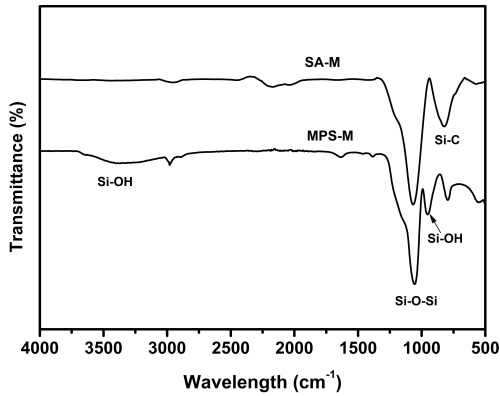


Fig. 3. FT-IR spectra of SA-M and MPS-M.

Fig. 5는 제조된 각 나노 기공성 실리카 모노리스 표면에 형성된 물 액적의 형상 및 접촉각을 보이고 있다. SA-M의 경우 표면개질에 의해 물

접촉각이 140° 이상으로 초소수성을 나타내고 있으며, 반면에 MPS-M은 Fig. 3의 FT-IR 결과로부터 확인하였듯이 졸-겔 반응으로부터 생성된 실란올(Si-OH)기로 인하여 물 접촉각이 28° 로서 친수성의 성질을 갖는 것으로 나타났다.

Table 1에 제조된 두 종류의 나노 기공성 실리카 모노리스에 대하여 BET 분석 기기를 이용하여 측정된 기공율, 비표면적, 평균기공크기 등의 특성과 레이저 플래쉬법을 이용하여 측정된 열전도도를 각각 나타냈다. 두 샘플 모두 높은 기공율(90% 이상), 높은 비표면적(800 ~ 840 m²/g), 수십 나노 nm 수준의 나노 기공 크기를 갖는 것으로 확인할 수 있었다. 나노 기공 크기를 갖는 다공성 실리카 모노리스의 열전도도는 10 ~ 20 mW/m·K 로서 단열재료로 보편적으로 이용되는 폴리스티렌 폼(K = 36 ~ 43 mW/m·K) 또는 폴리우레탄 폼(K = 24 ~ 26 mW/m·K)에 비해 우수한 단열 특성을 보였다. 또한 SA-M의 단열 특성이 MPS-M에 비해 우수한 것으로 나타났는데, 이는 기공 크기의 차이에 기인한다고 볼 수 있다. 즉, 앞의 서론에서 언급하였듯이 다공체내 기공 크기가 공기 분자의 평균 자유행로(mean free path) 크기보다 충분히 작게 되면 기공내에서의 대류 열전달은 무시할 만

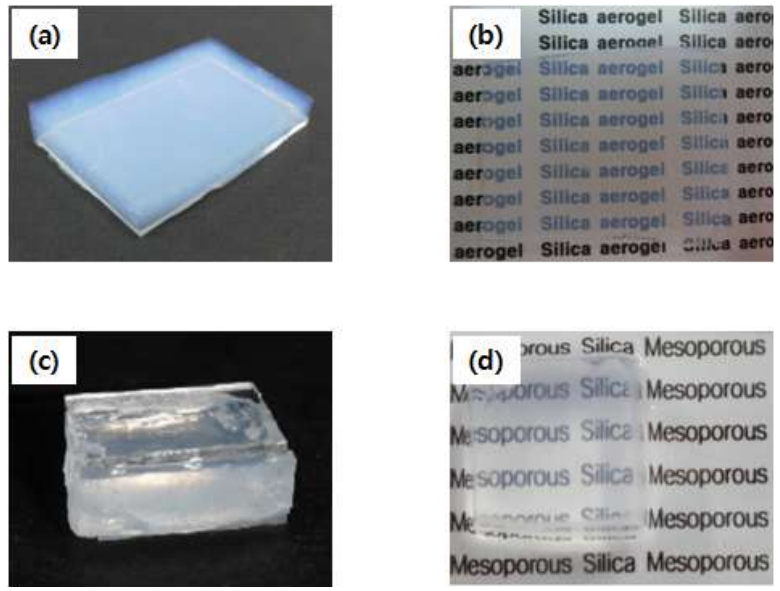


Fig. 4. Digital images showing the transparency for the two different samples of SA-M (a, b) and MPS-M (c, d).

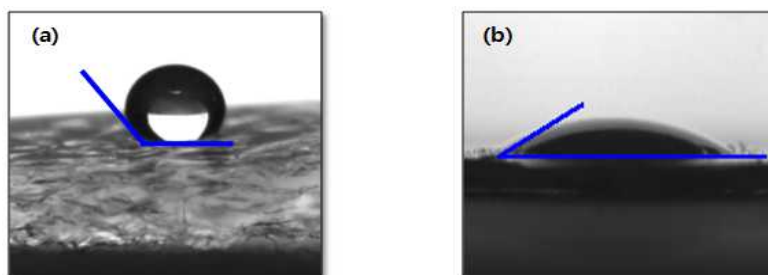


Fig. 5. Photographs showing the water droplet and contact angle of the (a) SA-M ($\theta=140^\circ$) and (b) MPS-M ($\theta=28^\circ$).

Table 1. BET data and thermal conductivities of silica monoliths prepared with different manufacturing techniques

Sample	Bulk density (g/cm^3)	Porosity (%)	Specific surface area (m^2/g)	Mean pore size (nm)	Thermal conductivity ($\text{mW}/\text{m}\cdot\text{K}$)
SA-M	0.12	92.3	840.1	13.9	10
MPS-M	0.11	94.7	796.7	23.9	19

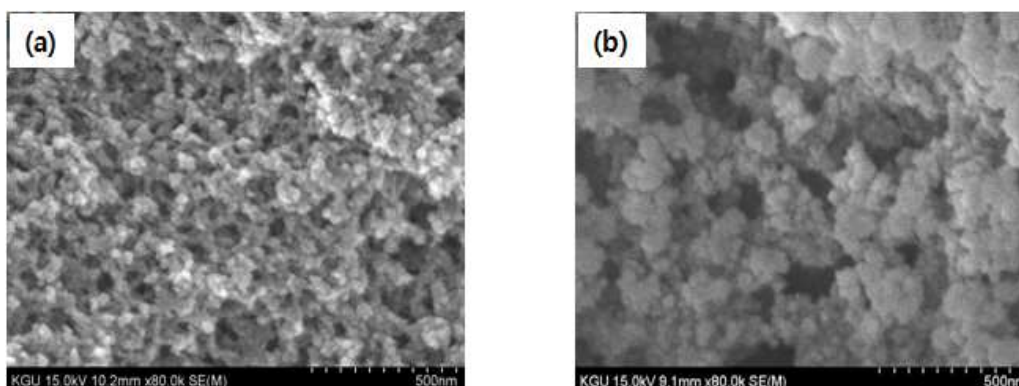


Fig. 6. SEM micrographs of (a) SA-M and (b) MPS-M.

크 거의 일어나지 않게 됨으로써 단열 성능이 높아지는 것으로 생각된다. 이러한 결과로부터 나노 기공성 실리카 모노리스의 기공 크기와 단열 성능과의 상관 관계를 파악할 수 있었다.

Fig. 6은 제조된 두 종류의 실리카 모노리스의 미세 구조를 SEM으로 관찰한 사진이다. SA-M 샘플의 경우 10 nm 수준의 많은 기공들이 전 영역에 매우 균일하게 분포된 매우 치밀한 구조를

나타냈는데, 이는 표면개질에 의한 스프링백 (spring back) 효과로 인해 습윤젤 내의 기공들이 재생성되고 상압건조 단계에서 용매제거에 따른 미세크랙의 발생이 효과적으로 억제되었음을 의미한다[14]. 반면에 MPS-M의 경우 기공 크기 및 그 분포가 클 뿐만 아니라 불균질한 기공 분산 상태를 보이고 있다. 또한 MPS-M에서는 큰 도메인의 실리카 클러스터가 관찰되었는데, 이는

표면개질을 실시하지 않은 습윤겔 내 실리카 입자 표면의 실란올기 (Si-OH)의 연속적인 축합반응으로 인한 응집 (aggregation) 현상에 따른 결과라고 볼 수 있다.

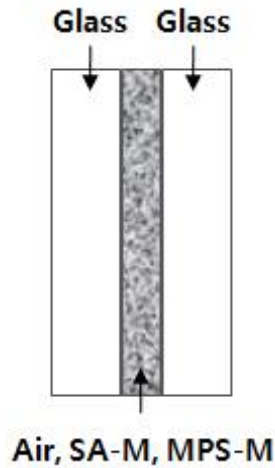


Fig. 7. Structure of sandwich type window system (thickness of glass plate : 3 mm).

현재 상용화되어 있는 이중 또는 삼중의 복층 유리는 유리와 유리사이에 공기층을 두어 소음차단 및 단열 목적으로 건물 창유리에 적용되고 있다. 본 연구를 통해 제조된 실리카 에어로겔 모노리스의 열전도도가 공기 ($K = 25 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$)보다 낮기 때문에 기존의 이중층 창유리의 공기층을 이러한 실리카 모노리스로 대체하게 되면 더욱 단열성능이 우수한 윈도우 시스템을 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있다. Fig. 7에서 제조된 실리카 모노리스를 3 mm 두께의 유리 기판 사이에 고정된 샌드위치 형태의 윈도우 시스템을 나타냈다. 이러한 윈도우 시스템의 유효 열전도도 (K_{eff})는 복합 적층물질의 총괄 열전도도와 각 구성물질의 열전도도와의 관계를 나타내는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$\frac{1}{K_{eff}} = \frac{L_m}{K_m} + \frac{L_g}{K_g} \quad (2)$$

여기서 L_m 과 L_g 는 중간층과 유리 기판의 두께 분율이며, K_m 과 K_g 는 각 층의 열전도도를 나타낸다. 중간층이 공기, SA-M, MPS-M일 때 식 (2)를 이용하여 층의 두께에 따른 각 윈도우 시스템

의 계산된 유효 열전도도 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 이 때, SA-M 및 MPS-M의 열전도도는 Table 1에서 제시된 측정값을 이용하였으며, 유리의 열전도도값은 본 실험에서 사용된 유리 기판에 대한 측정값 ($K_g = 895 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$)을 이용하여 계산하였다.

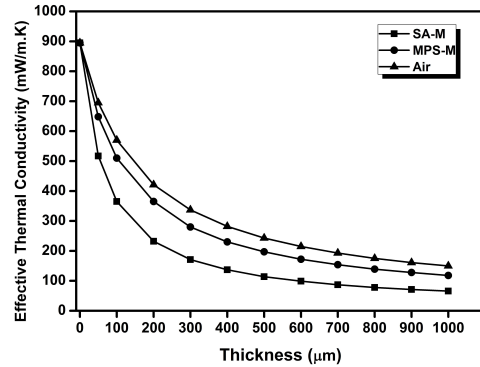


Fig. 8. Effective thermal conductivity as a function of middle layer thickness in the sandwich type window system

세 종류의 윈도우 시스템의 열전도도는 중간층의 두께에 따라 지수 함수적으로 감소하였으며, SA-M 및 MPS-M를 적용한 윈도우가 공기층을 포함한 윈도우보다 전 두께 영역에서 우수한 단열 성능을 나타냈다. SA-M 적용 윈도우 시스템의 경우 모노리스 두께가 600 μm 일 때 그 유효 열전도도가 99 mW/m·K 로서 공기층 삽입 이중층 윈도우 시스템에 비해 약 54 % 정도 향상된 단열 특성을 보인다. 그러나 실리카 모노리스의 두께가 증가하면 단열 성능은 향상되지만 투명성 및 충격성 등의 기계적 성질이 취약해질 수 있기 때문에 실제 산업적인 응용을 위해서는 나공 기공성 실리카 모노리스의 물성 보안을 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 공법을 이용하여 초 단열 성능을 갖는 두 종류의 나노 기공성 실리카 모노리스를 합성하고, 그 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실리카 에어로겔 모노리스 (SA-M)는 표면 개질에 의한 실리카 표면의 실란올기의 소멸에 기인하여 초소수성을 띄고, 반면에 메조포러스 실리카 모노리스 (MPS-M)는 잔류한 실란올기로 인하여 친수성의 성질을 나타냈다. 두 종류의 샘플 모두 균열이 없는 비교적 투명한 형태로 제조되었으며, MPS-M이 더욱 투명한 것으로 관찰되었다.
2. 본 연구를 통해 제조된 두 종류의 실리카 모노리스는 높은 기공율 (90 % 이상), 높은 비표면적(800 - 840 m²/g), 10~50 nm 수준의 나노 기공 크기를 갖는 것으로 확인할 수 있었으며, SA-M가 MPS-M에 비해 더욱 미세하고 균질한 나노 기공 구조를 보이고, 또한 단일 성능도 더욱 우수한 것으로 나타났다.
3. SA-M 및 MPS-M를 중간층으로 적용한 복층 창유리의 단일 성능이 기존의 공기층을 삽입한 제품보다 우수한 단일 성능을 보였으며, 이로부터 나노 기공성 실리카 모노리스의 실제 단일 윈도우 시스템으로의 적용 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2014 학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

References

1. H. S. Kim, S. K. Jeong, and S. H. Jeong, Experimental Research about Thermal insulation Performance of Various Powder Insulation Methods, *J. Kor. Inst. Appl. Supercond. Cryog.*, **12**, 49 (2010).
2. J. E. Fesmire and S. D. Augustynowicz, Thermal Performance Testing of Glass Microspheres under Cryogenic Vacuum Conditions, *Transactions of the Cryogenic Engineering Conference*, **49**, 612 (2004).
3. R. G. Baumgartner, E. A. Myers, J. E. Fesmire, D. L. Morris, and E. R. Sokalski, Demonstration of Microsphere Insulation in Cryogenic Vessels, *Transactions of the Cryogenic Engineering Conference*, **51**, 1351 (2006).
4. N. Y. Kim, Y. W. Chang and S. W. Kim, Thermal Insulation Property of UV Cure Coatings Using Hollow Micro-Spheres, *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**, 621 (2012).
5. Y. W. Chang and S. W. Kim, UV curable transparent urethane-acrylate/clay nanocomposite coating materials with thermal barrier property, *Surf. & Coat Technol.* **232**, 294 (2013).
6. S. S. Kistler, Coherent Expanded Aerogels and Jellies, *Nature*, **127**, 741 (1931).
7. M. Schmidt and F. Schwertfeger, Application for silica aerogel products, *J. Non-Cryst. Solids*, **225**, 364 (1998).
8. I. S. Han, J. C. Park, S. Y. Kim, K. S. Hong, and H. J. Hwang, Fabrication and Network Strengthening of Monolithic Silica Aerogels Using Water Glass, *J. Kor. Ceram. Soc.*, **44**, 162 (2007).
9. P. H. Tewart, A. J. Hunt, and K. D. Loffus, *Mater. Lett.*, **3**, 363 (1985).
10. K. I. Jensen, J. M. Schultz, and F. H. Kristiansen, Development of windows based on highly insulating aerogel glazings, *J. Non-Cryst. Solids*, **350**, 351 (2004).
11. S. D. Bhagat, C. S. Oh, Y. H. Kim, Y. S. Ahn, and H. G. Yeo, Methyltrimethoxysilane based monolithic silica aerogel via ambient pressure drying, *Microporous and Mesoporous Materials*, **100**, 350 (2007).
12. T. Y. Wei, T. F. Chang, and S. Y. Lu, Preparation of Monolithic Silica Aerogel of Low Thermal Conductivity by Ambient Pressure Drying, *J. Am. Ceram. Soc.*, **90**, 2003 (2007).
13. J. L. Gurav, D. Y. Nadargi, A. V. Rao, Effect of mixed Catalysts system on TEOS-based silica aerogels dried at ambient pressure, *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 3019, (2008)

14. S. W. Ryu, S. S. Kim, and Y. J. Oh, Influence of solvent on the nano porous silica aerogels prepared by ambient drying process, *J. Korean Sensors Society*, 15, 371 (2006).