

상압건조 나노다공성 실리카 에어로젤에 대한 개질제 효과

김태정 · 오영제*

Effect of surface modifiers on the nano porous silica aerogels prepared by ambient drying process

Tae-Jung Kim and Young-Jei Oh[†]

Abstract

Nanoporous silica aerogels with various surface modifiers were prepared by ambient drying process. Tetraethylorthosilicate (TEOS) were used a raw material. Ambient drying process for various surface modifier was studied in the point of view of a crack-free monolith and thin films and low cost. Various kinds of surface modifiers like as hexamethyldisilazane (HMDSZ), trimethylchlorosilane (TMCS), methyltriethoxysilane (MTES), and methyltrimethoxysilane (MTMS) were studied in order to enhance hydrophobicity for the silica aerogel. Surface modified aerogels were evaluated by FT-IR, TG, BET, SEM and wetting angle measurement. Homogeneous and crack-free aerogels were obtained by modifying the HMDSZ and the TMCS. However silica xerogel was obtained when modified with MTMS, MTES.

Key Words : aerogel, surface modifier, ambient drying, TEOS, hydrophobicity

1. 서 론

지금까지 알려진 고체 중에서 에어로젤(aerogel)은 가장 높은 기공률을 갖는 고다공성 물질로 솔-젤(sol-gel) 반응을 통해서 화학적으로 균일한 조성을 가진 콜로이드(colloid) 상태의 SiO₂ 솔을 젤로 전이하는 과정에서 기공들과 입자들이 가시광선의 파장보다 작은 크기를 갖는 3차원적으로 망목구조를 이루면서 균일한 형상을 가진 다공성 고체이다. 이러한 다공성의 망목구조로 인해 높은 기공률과(~90%), 저밀도(3~120 mg/cm³), 저굴절률(~1.01), 저음속도(100 m/s), 고비표면적(≥700 m²/g), 저유전율(~1.1) 그리고 매우 낮은 열전도도(~0.01 W/K·m)의 물성을 가지고 있다^{1,2}. 따라서 에어로젤의 이러한 물리적 성질은 에너지·환경·전기전자 분야의 무한한 응용 가능성을 가진 소재이다. 최근 들어 인터넷 타임지에 에어로젤이 2002년 “Best Invention” 중의 하나로 선정되는데 이어 2004년 제7차 에어로젤 국제학술회의에서 에어로젤의 상용화 사례가 본격적으로 소개

되는 등 그 활용가능성 및 성장 가능성이 더욱 주목받고 있다. 그러나 상용화를 위해 해결되어야 할 문제점들이 아직 많이 남아 있지만, 실리카 에어로젤이 갖는 나노 다공성으로 인한 우수한 특성을 고려하면 21세기 나노소재로서 핵심적인 역할을 할 것이 분명해 보인다.

보통 에어로젤은 모세관력의 힘(capillary force)을 받지 않는 초임계건조 방법을 통하여 제조되는데 초임계건조법(supercritical drying process)은 고비용, 연속적인 공정의 어려움과 폭발의 위험성이라는 단점을 가지고 있어 상용화측면에서 상당한 어려움을 가지고 있어 근래 이러한 단점을 극복하고자 상압건조법(ambient drying process)을 이용한 에어로젤 연구가 활발히 진행되고 있다³⁻⁵.

상압건조법은 용매치환 및 습윤젤(wet gel)의 표면을 화학적으로 개질한 후 건조하여 에어로젤을 제조하는 방법이다. 용매치환은 표면 개질을 통하여 건조 과정에서 젤의 구조 파괴가 발생되지 않도록 하는 목적과 습윤젤의 용매와 표면개질용 화합물과 반응하지 않도록 하기 위하여 비극성 용매로 치환하는 과정이다. 표면개질은 습윤젤 표면에 OH기를 알킬기나 알콕시기등으로 바꾸어줌으로써 습윤젤의 표면 특성이 변화되도록 한다. 즉, 습윤젤 내의 OH기들 사이에 서로의 반응성이

한국과학기술연구원 박막재료연구소 (Thin Film Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology)

*Corresponding author: youngjei@kist.re.kr

(Received : September 25, 2006, Accepted : January 2, 2007)

감소하도록 함으로써 습윤젤 골격의 구조를 유지할 수 있게 된다. 따라서 성공적인 상압건조방법을 실현하기 위해서는 망목구조를 이루는 콜로이드 표면의 수화기를 다른 축합반응을 일으키지 않는 화학기들로 바꾸어 주는 것이 매우 중요하다^{4,5)}.

그러나 아직껏 이에 관련된 연구가 미흡하여 본 연구에서는 이러한 반응을 다양한 개질제를 통하여 비교 연구코자 한다. 따라서 본 연구는 실리카 표면의 수화기들을 바꾸어 주어 축합반응을 더 이상 진행되지 않도록 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실리카 솔(sol) 제조

에어로젤의 특성은 건조시키기 이전의 알코젤(alco-gel)의 특성에 강하게 의존하며, 알코젤은 제조 온도, 농도 및 pH 등의 솔-젤 공정 변수에 따라서 그 특성이 크게 좌우된다. 또한 문헌상에 보고된 바에 의하면 단일 공정(one-step process)에 의해서 제조된 에어로젤은 그 밀도 범위가 $0.05\text{--}0.25\text{ g/cm}^3$ 이고⁶⁾ 두 단계 공정(two-step process)으로 제조된 에어로젤은 $0.003\text{--}0.5\text{ g/cm}^3$ 이다⁷⁾. 본 연구에서 사용된 실리카 솔의 제조는 산성 용액 내에서 수화반응을 촉진시킨 후에 염기성 분위기 하에서 응축(중합) 반응을 가속화시키는 두 단계 솔-젤 공정으로 하였으며, 솔-젤 공정의 대표적인 물질인 금속 알콕사이드인 TEOS를 출발물질로 하여 실리카 솔을 제조하였다⁸⁾.

첫 단계에서는 TEOS 1몰을 3몰의 2-propanol에 용해시킨 후 용액중의 TEOS:H₂O:HCl의 몰비가 1:1: 1.80×10^{-3} 이 되도록 0.1 M의 HCl 용액을 서서히 첨가하여 25°C의 상온에서 부분 가수분해시킨 다음 TEOS:H₂O:NH₄OH의 몰비가 1:3: 8.12×10^{-3} 이 될 때까지 다시 0.15 M의 NH₄OH 용액을 서서히 첨가함과 동시에 중합반응이 완결되도록 하는 두단계 공정에 의하여 최종 실리카 솔(TEOS:2-propanol:H₂O:HCl: NH₄OH의 몰비가 1:3:4: 1.80×10^{-3} : 8.12×10^{-3})을 제조하였다. 습윤 실리카 알코젤의 제조는 실리카 솔을 밀폐된 폴리프로필렌 용기에 넣고 50°C에서 2시간동안 젤화 시켰는데 이는 장시간의 젤화는 습윤젤 기공내 용매의 증발로 인하여 젤화시에 균열이 발생할 수 있기 때문이다. 이후 습윤젤의 망목구조 강화를 위해 폴리프로필렌 용기에 2-propanol을 채워 50°C에서 24시간 동안 숙성시켰다.

2.2. 용매치환 및 표면개질

상압건조를 위해서는 반드시 용매치환 및 표면개질

공정이 요구되는데 일반적으로 습윤젤의 용매치환은 젤 내부의 용매를 표면개질에 적합한 용매로 치환시켜 주는 공정으로 보통 표면장력이 낮은 유기 용매들이 사용된다. 대기 중의 건조에 있어서 습윤젤의 기공에 기액 계면의 메니스커스(meniscus)가 생성하게 된다⁹⁾. 건조 단계가 계속되면 기공 내부의 용매가 증발되면서 생성된 meniscus는 젤 내부로 침투하게 되고 기-액 계면에는 모세관 응력이 걸리게 되어 균열을 초래할 수 있다. 또한 높은 증기압을 갖은 용매는 습윤젤의 취급성에서나 건조시의 빠른 용매의 증발로 인해 균열이 발생하기 쉬워 빠른 실험의 진행이 요구되어진다. 따라서 본 실험에서는 매우 낮은 증기압(0.8825 kPa)을 갖는 xylene을 사용하였다. 실리카 습윤젤 부피의 10배가 되는 xylene으로 채워진 용기에 실리카 젤을 담아 뚜껑을 닫은 후 50°C에서 하루 동안 4번 용매를 바꿔주면서 용매치환을 실시하여 완전한 용매치환을 한 후 각각의 용기에 xylene과 각 개질제를 혼합하여 밀봉한 후 50°C에서 하루 동안 표면개질을 하였다. 개질제의 양은 용매의 6 vol%로 하였으며, 용매의 양은 용매치환과정과 같이 실리카 습윤젤의 10배가 되도록 하였다. 표면개질시 용매의 역할은 개질제와 반응을 하지 않을 뿐만 아니라 적정량의 xylene 용액은 혼합 용매 내 개질제의 농도를 낮추어 젤과의 반응속도를 감소시키며 표면 개질시의 반응용력을 완화시킬 뿐만 아니라 건조시의 급격한 증발에 의한 균열발생을 억제 할 수 있기 때문이다. 표면개질 실시 후 용기 안에 개질반응으로 인한 반응물이 생기는데, 실리카 젤에 묻어있는 이 반응물과 젤 내부에 남아있는 반응물을 제거하기 위하여 다시 xylene을 이용하여 용매치환 공정에서 사용한 방법으로 용매를 50°C에서 하루 동안 4번 같이주어 개질이 완료된 젤을 세척하였다.

2.3. 건조 및 열처리

용매치환 및 표면개질 공정을 거친 습윤젤을 건조 용기에 넣고 젤 내부에 존재하는 용매의 빠른 증발에 의한 균열 발생을 억제하게 함과 동시에 모든 샘플에 대해 xylene분위기가 유지되도록 하여 상온에서 3일간, 50°C에서 1일간, 100°C에서 1일간 단계적으로 건조하였으며, 승온속도를 0.5°C/min으로 270°C까지 2시간 동안 열처리를 에어로젤 제조를 위한 표준 열처리 조건으로 하여 최종 실리카 에어로젤을 얻을 수 있었다.

2.4. 특성평가

실리카 솔의 젤화 시간을 측정하기 위하여 점도계

(Viscometer, Brookfield, DV-II+)를 이용하여 솔의 점도를 각각 측정하였다. Thermo Gravimetry(TG TGA2050, TA Instruments, USA)을 이용하여 열감량 변화를 분석하였다. Fourier transnmision-infrared spectrometry(FTIR, Infinity Gold FTIR 60AR, Thermo Mattson, USA)에 의한 구조분석을 실시하였다. 주사전자현미경(FE-SEM, S-4200, Hitachi, Japan)으로 다양한 개질제를 이용하여 제조된 실리카 에어로젤들의 각각의 미세구조를 확인하였다. BET법으로 비표면적, 기공부피 및 평균 기공 크기 등 기공 특성을 측정하였다. 에어로젤의 소수성 여부를 확인하기 위하여 표면장력측정기(Goniostar 150-7, Surface Tech, Korea)를 이용하여 관찰하였다. 에어로젤의 밀도는 기하학적 방법으로 계산하여 얻었으며, 기공률은 비정질 실리카의 이론 밀도(2.19 g/cm³)와 기하학적 방법으로 얻어진 밀도로부터 산술적으로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실리카 솔-젤의 특성

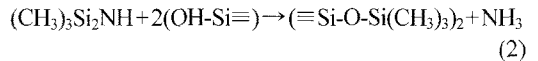
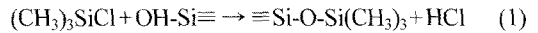
금속알콕사이드를 이용하여 제조되는 실리카솔은 습도 등 주위환경에 민감하게 반응한다. 특히 온도가 높을수록 빠른 젤화시간을 가진다는 특징을 보일뿐만 아니라 농도 및 pH 등의 솔-젤 공정 변수에 민감하다. 더욱이 최종 에어로젤의 특성은 본 실리카 솔의 제조 단계인 알코젤의 특성에 강하게 의존하여 본 연구에서는 실리카 솔의 제조를 상온(25 °C)에서 하였다. 촉매로서 HCl을 첨가한 경우 상온에서 솔은 5시간부터 솔의 점도가 3 cP에서 크게 증가하였으며 경사법으로 관찰했을 때 습윤젤이 완전히 형성되는 시간은 약 12시간이었다. 그러나 암모니아를 2단계로 첨가한 경우에는 솔의 점도가 2 cP로 일정하게 유지 되었다.

3.2. 실리카 에어로젤의 표면개질

개질제에 따른 실리카 에어로젤의 표면개질 여부를 확인하기 위하여 Table 1에서와 같이 여러 종류의 개질제로 표면개질을 하고 난 시편들을 상온에서 건조하

여 얻은 건조젤에 대해 FT-IR 측정 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 젤 구조 내 메틸(CH₃)기를 가지는 trimethylchlorosilane(TMCS)와 hexamethyldisilazane(HMDSZ)로 개질한 에어로젤에서는 CH기(2965 cm⁻¹)가 나타났으며, 메틸기나 에틸기(C₂H₅)에 산소하나가 더 붙어있는 메톡시기(CH₃O⁻)와 에톡시기(C₂H₅O⁻)의 개질제에서는 C-H(2965 cm⁻¹) 피크가 거의 발생하지 않았으며, 이는 실리카 에어로젤 표면의 개질반응이 거의 일어나지 않음을 확인할 수 있다.

TMCS와 HMDSZ 개질시 표면개질 과정의 겔보기 관찰결과는 다음과 같다. TMCS 표면개질의 경우 반응이 진행됨에 따라 용기 바닥에 옅은 노란색의 HCl 수용액 층이 생성되었으며 HMDSZ의 경우에는 암모니아 기체가 빠져나오는 것을 확인 할 수 있었다. 다음 두 개질제의 주 메커니즘은 출발원료를 물유리를 사용했던 것과 같은 기구로서 다음과 같은 반응식으로 설명되어지며 염산과 암모니아의 형성과정도 설명할 수 있다^[5].

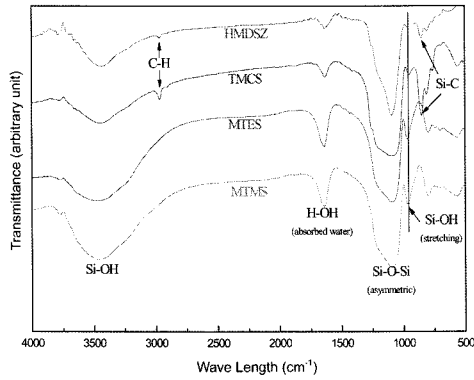


즉, 표면개질제로 TMCS를 사용한 경우에는 식 (1)과 같이 실란(silane) 하나에 메틸기 3개와 하나의 Cl이 결합되어 있는데, 개질시 습윤젤 표면 부분 O-H기의 H와 반응하여 HCl이 생성되고 이때 Cl과 결합이 끊어진 H자리에 trimethylsilane ((CH₃)₃Si)이 결합하게 되어 개질을 이룬다. HMDSZ를 사용한 경우에는 NH의 양쪽으로 trimethylsilane이 붙어있는 결합을 하고 있으며 개질시 습윤젤 표면(O-H)의 H두개와 NH가 결합을 하여 NH₃가 형성되고 습윤젤 표면의 H가 붙어있던 자리에 trimethylsilane이 하나씩 차지하게 되어 개질을 이룬다(식 (2)). 실험결과 개질 후 HCl과 NH₃가 생성됨을 확인 하였다.

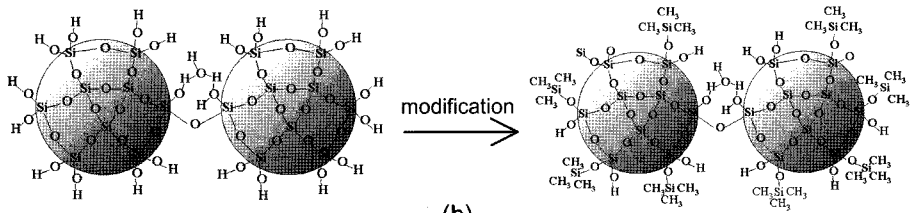
에어로젤의 개질은 친수성에서 소수성으로 바뀌는 것으로 에어로젤의 표면과 표면에 떨어뜨린 D.I. water의 젖음각으로 개질의 정도를 알 수 있는데 젖음각(θ)

표 1. 선정된 표면개질제의 물리적 성질
Table 1. Physical properties of the selected surface modifiers

Surface modifier	Formula	Molecular weight	Density (g/ml)	Boiling point (°C)
TMCS	(CH ₃) ₃ SiCl	109	0.890	57
HMDSZ	(CH ₃) ₃ SiNHSi(CH ₃) ₃	161	0.774	125
MTES	CH ₃ Si(OC ₂ H ₅) ₃	178	0.895	152
MTMS	CH ₃ Si(OCH ₃) ₃	136	0.955	103



(a)



(b)

그림 1. (a) 여러 표면개질제로 제조된 실리카 에어로젤의 FT-IR 스펙트럼 및 (b) 표면개질 모식도

Fig. 1. (a) FT-IR spectra of silica aerogels prepared by several surface modifiers and (b) surface modification diagram.

이 크면 클수록 개질효과가 우수하여 소수성이 강하다고 할 수 있다. 젖음각 측정에 있어 물방울의 지름이 커지면 중력의 영향을 크게 받게 된다. 따라서 젖음각의 변화를 주기 때문에 좀더 정확한 젖음각을 위해서 다음의 식 (3)을 이용하였다.

$$\theta = 2 \tan^{-1}(2h/W) \quad (3)$$

여기서 h는 물방울의 높이, W는 접촉면의 폭을 나타내며 h와 W는 현미경 카메라로 젖음각 θ 를 측정할 수 있다.

Fig. 2는 에어로젤의 젖음각을 측정한 것이다. TMCS와 HMDSZ의 젖음각이 각각 138°와 121°이었으며, TMCS가 HMDSZ보다 본 실험 조건에서 개질효과가 우수한 것으로 나타났다. 나머지 개질제로 개질한 에어로젤은 표면에 떨어뜨린 물방울을 흡수하여 젖음각을 측정할 수 없었다. 다시 말하면 TMCS, HMDSZ는 친수성에서 소수성으로의 표면개질이 이루어졌고, methytriethoxysilane(MTES), methytrimethoxysilane(MTMS)의 개질제를 사용한 에어로젤은 표면개질이 이루어지지 않아 수분을 잘 흡수하는 친수성을 확인하였다.

실리카 에어로젤은 초단열 및 초저유전체(ultra low-k)등의 광범위한 응용성을 갖고 있으나 에어로젤의 높

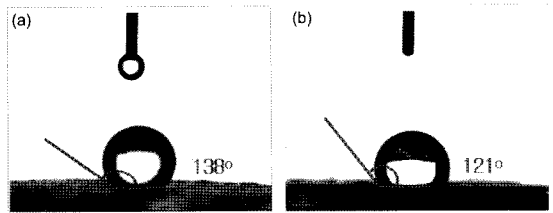


그림 2. (a) TMCS와 (b) HMDSZ로 개질된 실리카 에어로젤 표면의 물방울 젖음성 사진

Fig. 2. Photographs showing a water droplet on the surface of silica aerogel samples modified by : (a) TMCS and (b) HMDSZ.

은 기공률(90% 이상)로 인한 낮은 기계적 강도와 표면 특성이 문제시 되고 있다. 이를 위하여 개질이 완료된 실리카 에어로젤의 열적거동을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 열감량분석을 행하였다. TMCS로 개질한 알콕사이드 에어로젤은 420 °C, HMDSZ로 개질한 390 °C 범위에 무게 감소가 나타났다. 또한 MTMS나 MTES는 100 °C 이하에서 무게 감량이 일어났으며 이는 출발원료가 물유리일 때와는 다른 결과이다. 따라서 출발원료의 선택은 애당초 습윤젤의 구조에서부터 영향을 미쳐 최종 에어로젤의 미세구조나 물성에 큰 차

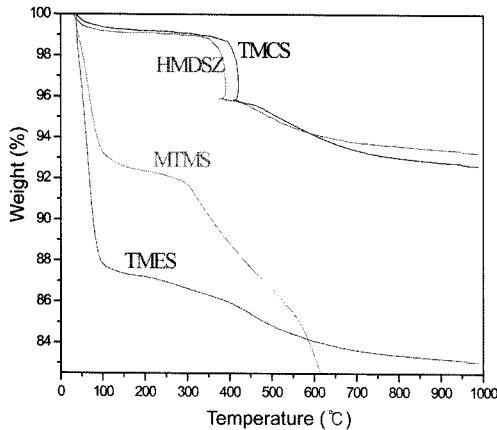
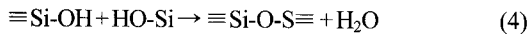


그림 3. 다양한 표면개질에 따른 실리카 에어로젤의 열감량 곡선 (공기 중, 가열속도 10 °C/분)
 Fig. 3. TG curves of the silica aerogels with different surface modifiers (in air, +10 °C/min).

이를 나타내주고 있음을 알 수 있다. TG 곡선에서 모든 에어로젤에 대하여 급격한 무게 감소 이후 계속적인 무게 감소는 silanol group이 응축(condensation)되면서 siloxane bond를 형성함으로써 발생한 것으로 식 (4)와 같은 화학식으로 표현될 수 있다.



열처리 온도를 높여줄 때 표면기의 변화는 약 400 °C 온도범위에서 C-H 피크(2965 cm⁻¹)와 Si-C 피크(850 cm⁻¹)가 거의 소멸하고, H₂O의 물리적 흡착에서 기인하는 Si-OH 피크(3420 cm⁻¹)와 H-OH 결합 피크(1629 cm⁻¹)가 증가한 것이라 할 수 있다. 이는 실리카 에어로젤 표면의 CH₃기가 산화되고 다시 공기 중 수분이 많이 흡착되기 때문이다^[5]. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 약

400~450 °C 범위에서 CH₃기의 산화가 일어나 표면특성이 소수성에서 친수성으로 다시 바뀌게 되었음을 확인하였다.

3.3. 비표면적 및 기공관찰

실리카 에어로젤의 미세구조는 Fig. 4의 SEM 사진에서 확인할 수 있는 바와 같이 HMDSZ, TMCS를 사용하여 합성된 에어로젤이 다공질의 형태를 보이고 있으나 나머지 개질제를 이용한 에어로젤에서는 HMDSZ나 TMCS에 비하여 입자들이 치밀하게 응집되어 있는 모습을 보였다.

HMDSZ, TMCS를 사용한 에어로젤의 비표면적 측정 결과는 Table 2에 나타나 있듯이 에어로젤의 비표면적과 기공부피, 기공크기에 있어서 TMCS 개질제(각각 862 m²/g, 3.4 m³/g, 15.2 nm)가 HMDSZ 개질제(각각 838 m²/g, 1.2 m³/g, 5.4 nm) 보다 더 큰 값을 보였으며 이로써 상압건조시 고다공성의 에어로젤을 얻기 위해서는 TMCS가 보다 우수한 개질제임을 알 수 있다.

이상 4개의 개질제를 사용하여 실리카 에어로젤 제조시 HMDSZ, TMCS는 Fig. 4에서 보는바와 같이 크랙이 없는 monolith 형태의 실리카 에어로젤을 제조할 수 있었으나, MTMS, MTES 개질제의 경우에는 크랙

표 2. TMCS와 HMDSZ로 개질된 SiO₂ 에어로젤의 BET 값
 Table 2. BET data of the SiO₂ aerogels prepared by TMCS and HMDSZ

Surface modifier	Surface area (m ² /g)	Average pore volume (cm ³ /g)	Average pore diameter (nm)
TMCS	862	3.4	15.2
HMDSZ	838	1.2	5.4

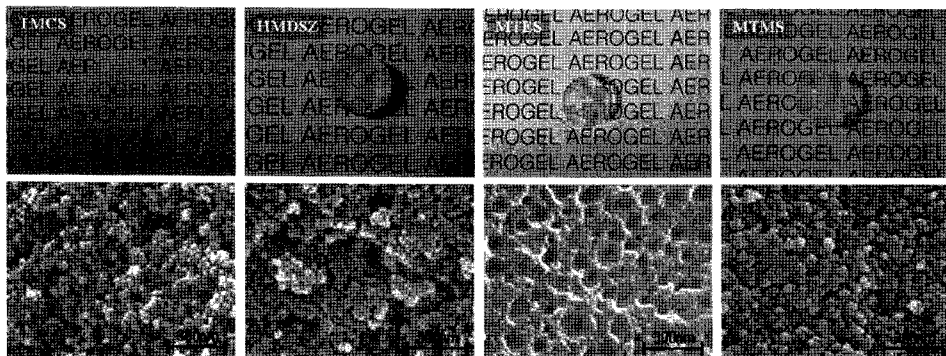


그림 4. 상압건조법으로 제조된 모노리스 실리카 에어로젤의 표면개질제 종류에 따른 주사현미경 사진과 외관
 Fig. 4. SEM micrographs and appearances of the monolith silica aerogels with different surface modifiers prepared by an ambient drying method.

표 3. 각 개질제 별 SiO₂ 에어로젤의 밀도와 기공률
Table 3. Density and porosity of the SiO₂ aerogels modified by various surface modifier

Surface modifier	Volume shrinkage (vol%)	Density (g/cm ³)	Porosity (%)
TMCS	7.2	0.14	94.6
HMDSZ	68.1	0.39	82.2
MTMS	73.6	0.48	78.1
MTES	71.5	0.44	79.9

을 가지며 수축이 확연히 일어나 투명하기는 하지만 수축이 더 크고 또 매우 단단한 xerogel을 얻었다. 이러한 xerogel은 표면개질이 알킬기로의 충분한 치환이 일어나지 않아 계속적인 수화기의 응축(condensation) 반응에 의해 치밀한 구조를 얻었기 때문이다. TMCS와 HMDSZ로 제조된 monolith 타입의 실리카 에어로젤의 밀도와 수축률은 기하학적 방법으로 측정하기 용이하였으며, Table 3에 개질제에 따른 수축률, 밀도, 기공률 등을 나타내었다. TMCS로 개질된 에어로젤이 다른 개질제에 의한 에어로젤 보다 낮은 밀도와 높은 기공률을 가졌으며 수축률 또한 약 7% 정도로 가장 낮은 값을 보였다. 따라서 이를 스프레이 코팅에 의한 박막화 하였을 때의 미세구조를 Fig. 5에 나타내었는데 우수한 에어로젤의 특성을 갖는 투명한 막을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

TEOS를 출발원료로 하여 균열이 없이 박막화가 가능한 실리카 에어로젤을 저가의 상압건조 방법을 사용하여 성공적으로 제조할 수 있었으며 이때 사용된 여러 개질제에 따른 에어로젤의 특성 변화는 다음과 같은 결론을 얻었다.

TMCS와 HMDSZ를 개질로 사용한 실리카 에어로젤은 각각 밀도 0.14 g/cm³, 기공률 94.6%, 비표면적 862 m²/g 와 밀도 0.39 g/cm³ 기공률 82.2% 비표면적 838 m²/g의 투명한 실리카 에어로젤을 제조할 수 있으며 기공을 및 기공크기 관점에서 박막화에는 TMCS를 표면 개질로 사용하는 것이 유리하다.

Xylene을 용매로 사용한 상압건조 에어로젤은 400~440°C까지 소수성을 보이다가 이 이상의 온도에서 CH₃기의 산화가 일어나 표면특성이 소수성에서 친수성으로 다시 바뀌게 되며, TMCS와 HMDSZ로 개질된 에어로젤의 젖음각은 각각 138°와 121°로 우수한 소수성을 갖는다.

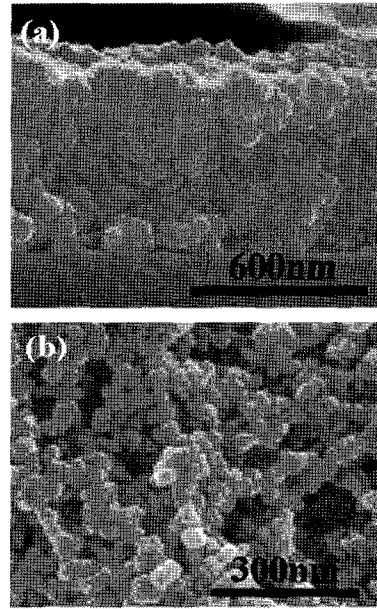


그림 5. 유리 기판 상에 스프레이 법으로 코팅한 TMCS개질 에어로젤의 (a) 단면도 및 (b) 이의 표면에 대한 FE 주사현미경 사진

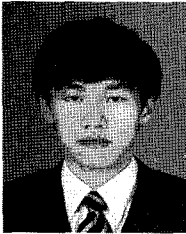
Fig. 5. FE-SEM images of (a) cross sectional view of spray coated aerogel thin film on glass substrate modified with TMCS and (b) surface morphology of (a).

개질반응에 있어서 메틸기를 가진 표면개질제에서는 효과적인 개질반응이 일어났으나, 에톡시나 메톡시를 가진 알콕시기의 개질제에서는 개질반응이 거의 일어나지 않으며, 실리카 에어로젤의 친수성 소수성은 각각 실리카 에어로젤의 표면에 형성된 Si-OH 결합과 비극성 유기종의 C-H 결합에 의해 지배된다.

참고 문헌

- [1] A. R. Buzykaeb, A. F. Danilyuk, S. F. Ganzhur, E. A. Kravchenko, and A. P. Onuchin, "Measurement of optical parameters of aerogel", *Nuclear Instrum. Methods Phys. Res.*, vol. 433, pp. 396-400, 1999.
- [2] L. Kocou, F. Despetis, and J. Phalippou, "Ultralow density silica aerogels by alcohol supercritical drying", *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 220, pp. 96-100, 1998.
- [3] F. Schwertfeger, D. Frank, and M. Schmidt, "Hydrophobic waterglass based aerogels without solvent exchange of supercritical drying", *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 225, pp. 24-29, 1998.

- [4] 권영근, 최세영, 강신규, “실리카 에어로젤의 상압합성 및 특성연구(II)”, 세라믹학회지, 제36권, 제11호, pp. 1189-1197, 1999.
- [5] 김태정, 남산, 오영제, “상압건조 물유리 에어로젤에 대한 표면개질제 영향”, 센서학회지, 제15권, 제3호, pp. 173-178, 2006.
- [6] L. W. Hrubesh, T. M. Tiloson, and J. F. Poco, 5th Conf. Ultrastructure Processing, Orlando, Florida, February pp. 17-21, 1991.
- [7] G. W. Scherer, In Sol-Gel Science and Technology, eds. M. A. Aegeter, M. Jaffellicci, Jr., D. F. Souza, and E. E. Zanotto, World Scientific, Singapore, pp. 181, 1988.
- [8] 류성욱, 김상식, 오영제, “상압건조 나노다공성 실리카 에어로젤에 대한 용매의 영향”, 센서학회지, 제15권, 제5호, pp. 371-377, 2006.
- [9] J. Fricke and A. Emmerling, “Aerogels”, J. Am. Ceram. Soc., vol. 75, no. 8, pp. 2027, 1992.



김 태 정

- 2004년 강릉대학교 세라믹공학과(공학사)
- 2006년 고려대학교 대학원 재료공학과 (공학석사)
- 2005년~2006년 한국과학기술연구원 학생연구원
- 2006년~현재 LG전자 RMC사업부 연구원
- 주관심분야 : 에어로젤, 투명유전체



오 영 제

- 1977년 연세대학교 세라믹공학과(공학사)
- 1979년 연세대학교 대학원 세라믹공학과 (공학석사)
- 1987년 연세대학교 대학원 세라믹공학과 (공학박사)
- 1988-89년 미국 일리노이즈 대학(Urbana-Champaign) 포스트닥
- 1982년~현재 KIST 재료연구부 책임연구원
- 2000년 KIST 신산업창업보육센터장
- 2002년 Academician, International Academy of Engineering
- 주관심분야 : 화학센서, 광센서 및 기능성 나노재료