

상압건조 나노다공성 실리카 에어로젤에 대한 용매의 영향

류성욱*** · 김상식** · 오영제*†

Influence of solvent on the nano porous silica aerogels prepared by ambient drying process

Sung-Wuk Ryu***, Sang-Sig Kim**, and Young-Jei Oh*†

Abstract

Nano porous, transparent silica aerogels monoliths were prepared under ambient drying (1 atm, 270 °C) condition by the combination of sol-gel process and surface modification with subsequent heat treatment. Three kinds of solvent, n-hexane, n-heptane and xylene, were selected in the point view of low surface tension and vapor pressure in order to restrain a formation of cracks during drying. Crack-free silica aerogels with over 93 % of porosity and below 0.14 g/cm³ of density were obtained by solvent exchange and surface modification under atmosphere condition. Optimum solvent was confirmed n-heptane among these solvents through estimation of FT-IR, TGA, BET and SEM. Modified silica aerogel exhibited a higher porosity and pore size compare to unmodified aerogels. Hydrophobicity was also controlled by C-H and H-OH bonding state in the gel structure and heat treatment over 400 °C effects to the hydrophobicity due to oxidation of C-H radicals.

Key Words : aerogel, surface modification, ambient drying, solvent, surface tension

1. 서 론

에어로젤(aerogel)은 극 저밀도의 첨단 소재로서 낮은 열전도도(0.01-0.03 W/mK), 낮은 유전상수($k < 2.0$), 높은 비표면적(700-1200 m²/g) 등으로 인하여 재료의 특성상 초 단열재, 음파 지연재, 촉매 담체 및 차세대 반도체 소자의 초 고직접화용 금속층간 유전체(inter-metal dielectric material : IMD)로서 응용이 예상되고 있다^[1]. 현재 에어로젤의 연구는 전기·전자분야와 환경·에너지분야로 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 전기·전자분야에서는 최근 반도체 소자 공정의 고직접화에 따른 다층화(multi-level metalization)구조가 요구되고 있으나, 배선간층간 절연막의 유전 상수의 한계는 고직접화에 있어서 새로운 장애 요인으로 대두되고 있다. 소자 공정에 있어 RC-time delay 문제점은 배선

간 층간 절연 물질의 제한된 유전상수에 의해 야기 되는데 현재 대부분의 소자공정에서 사용되는 층간 절연 물질은 유전률이 3.7정도로서 보다 낮은 유전 재료의 응용이 요구되고 있다. 또한 지정된 분자만 선택적 분리/흡착 반응을 통한 분자인식기능을 바탕으로 한 화학센서 및 바이오센서로 이용할 수 있어 화학 공정 제어, 환경 오염 측정, 생화학 반응 검출 등으로의 응용이 기대되고 있다^[2].

이러한 기능성 응용으로는 소재의 형태가 분말이 아닌 나노 기공 구조의 박막 형태가 요구되고 있으며 박막 형성 뿐만 아니라 소자로의 적용을 위하여 패턴화 기술도 필요하다. 이외에도 환경·에너지 분야로의 가장 응용 가능성이 높은 분야로는 에어로젤이 갖고 있는 태양광 투과성 때문에 최근 건축, 에너지 분야에서 각광 받고 있는 건물 외피 단열 시스템 개발을 위한 투명 단열재(TIM) 및 태양열 난방 시스템 재료 등으로 활용함으로써 지금까지 개발되었던 어떤 재료보다도 뛰어난 단열 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

에어로젤은 그동안 위험하고 용적이 제한이 있는 고비용의 autoclave를 이용하는 고온/고압의 초임계 건조

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

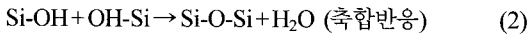
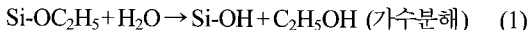
**고려대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Korea University)

†Corresponding author: youngjei@kist.re.kr

(Received : February 20, 2006, Accepted : July 24, 2006)

에 의해서만 합성이 가능하였으나, 현재는 상압 건조 공정에 대한 연구가 이루어졌다^{3,4)}. 상압 건조 공정 (ambient drying process)으로 제조된 실리카 에어로젤은 초임계 건조 공정으로 제조된 에어로젤보다 물성 면에서 큰 차이를 보이는 다소 불완전한 형태의 에어로젤 형태로 이루어져 있어 실용화를 이루기 위해서는 물성 증진 및 소수성(hydrophobicity)유지와 같은 문제점들 해결이 선행과제로 남아 있다⁵⁾.

출발 물질로 금속-알콕사이드(metal-alkoxide)를 사용하는 경우 일반적인 솔-젤 공정은 다음과 같이 가수분해(hydrolysis)와 축합반응(condensation)으로 구분되며 TEOS(tetraethoxysilane)을 사용한 경우를 보면 아래와 같다.



본 연구에서는 금속-알콕사이드 실리카 습윤젤(wet-gel) 표면의 -OH기를 반응성 없는 종으로 개질하여 상압 건조시 모세관력의 작용으로 나타나는 표면 -OH기의 연속적인 축합반응을 억제하고 건조이후 재팽창하는 효과(spring back effect)를 이용하여⁶⁾, 초임계 건조법(supercritical drying)으로 제조된 에어로젤과 비교해 물성이 차이가 없는 저밀도의 실리카젤을 상압하에서 합성하였다⁷⁾. 제조시 기존의 용매로 주로 사용된 n-hexane 외에도³⁾ 상압 건조 중 가장 문제시 되는 건조 중 크랙을 방지 목적으로 사용용매의 표면장력(surface tension)과 증기압(vapor pressure)을 고려하여 선정한 n-heptane, xylene을 이용하여 용매를 치환하였다. 또한 공정시 표면 개질을 실시한 젤과 표면 개질하지 않은 젤을 비교하여 물성을 비교하였다. 상압하에서 건조된 젤에 대하여 열처리를 하여 실리카 에어로젤의 물리적 특성에 따른 에어로젤의 물성을 조사하여 향후 나노 다공성 실리카 에어로젤 막 제조를 위한 기초연구로 활용코자한다.

2. 실험 방법

상압 건조 방법에 의한 극 저밀도 실리카 에어로젤을 제조하기 위한 전체 공정도를 그림 1에 표시한다. 각 단계별 공정에 대한 세부적인 설명은 다음과 같다.

2.1. 실리카 솔 및 습윤젤의 합성

금속-알콕사이드로 출발하는 TEOS(tetraethoxysilane, Fluka, Switzerland)와 이소프로판올(iso-propanol, Junsei, Japan : IPA)을 출발 물질로 하여, 산성 용액 내

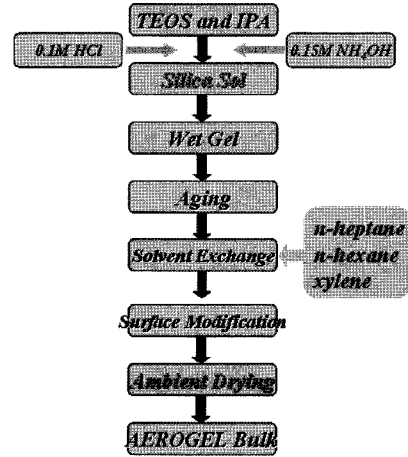


그림 1. TEOS로 제조된 실리카 에어로젤의 상압 합성 공정도

Fig. 1. Experimental procedure for the SiO₂ aerogels prepared from TEOS.

에서 가수분해를 촉진시킨 후에, 염기성 분위기 하에서 중합 반응을 가속화 시키는 2단계 솔-젤 공정(two-step sol-gel process)에 의해 실리카 솔(sol)을 제조 실시하였다⁸⁾.

첫 단계에서는 1 mol의 TEOS를 3 mol의 IPA에 용해시킨 용액에 0.1 M의 HCl 용액을 TEOS:H₂O:HCl의 몰비가 1:3:1.80×10⁻³이 되도록 첨가하여 부분 가수분해 시켰으며, 안정하고 균일하게 분산된 실리카 솔의 제조를 위하여 솔의 제조 온도는 25 °C로 고정시켰다. 두 번째 단계에서는 최종 TEOS:H₂O의 몰비가 1:4의 화학당량적조성비를 맞추기 위하여 0.15 M의 NH₄OH 용액을 TEOS:H₂O:NH₄OH의 몰비가 1:3:8.12×10⁻³이 될 때까지 서서히 첨가하여 중합 반응이 완결되도록 하였으며 이때 최종 실리카 솔에서의 TEOS:isopropanol:H₂O:HCl:NH₄OH의 몰비는 1:3:4:1.80×10⁻³:8.12×10⁻³이었다. 모든 공정은 비이커 내에서 자력 교반기를 이용하여 교반하며 충분한 시간을 주어 반응이 완결되도록 하였다.

제조된 실리카 솔을 원통형 폴리프로필렌 용기에 담아 밀봉한 후 상온 1시간 후 50 °C 오븐에서 중합반응을 진행시켜 젤화를 유도하였으며 젤화 시간은 24시간으로 고정하였다. 젤화가 끝난 습윤젤을 젤 내부에 존재하는 미반응물 및 물의 제거를 위하여 과량의 IPA로 숙성 및 세척을 50 °C에서 24시간 실시하였다. 숙성과 세척을 동시에 실시하는 이유는 공정 시간의 단축이유도 있지만 젤 내부의 망목구조(network structure)를 보다 강화시키기 위함이다.

표 1. 각 용매의 물성

Table 1. Physical properties of the selected solvents

Property	n-Heptane	n-Hexane	Xylene
MF	C ₇ H ₁₆	C ₆ H ₁₄	C ₈ H ₁₀
MW	100.20	86.18	106.17
MP[°C]	-90.6	-95.3	-25.2
BP[°C]	98.5	68.7	144.5
Density[g/cm ³]	0.68	0.65	0.88
Vapor pressure[kPa] ²⁵	6.09	20.2	0.88
Surface tension[mN/m] ²⁵	19.65	17.89	29.76

2.2. 용매 치환 및 표면 개질

IPA용액 내에서 숙성이 완료된 습윤젤에 대하여 n-heptane(Junsei, Japan)/n-hexane(daejung, Korea)/xylene (J.T. Baker, USA)을 이용하여 각각 50 °C, 24시간동안 용매 치환 공정을 진행하였다. 표 1에 사용된 각 용매의 물성을 나타내었다. 용매가 치환된 습윤젤을 TMCS (Tri-Methyl-Chloro-Silane; Lancaster, England) 6 vol%를 사용해 각각의 용매와 혼합하여 습윤젤을 용액에 넣은 후 상온 25 °C 48시간동안 표면 개질을 실시하였다.

2.3. 상압 건조 및 열처리

표면 개질이 완료된 습윤젤은 젤 내부의 미 반응물 제거를 위하여 일정 시간 동안 각 용매로 세척한 후 상온에서 48시간 동안 천천히 건조하였다. 건조된 실리카 젤을 각 용매의 분위기하에서 2 °C/min 속도로 270 °C 까지 승온하여 모노리쓰(monolith) 형태의 실리카 에어로젤을 제조하였다.

2.4. 특성 분석

합성된 실리카 에어로젤의 부피 밀도는 겉보기 부피에 대한 질량의 비로서 측정하였으며, Thermo Gravimetry Analysis(TGA, TGA2050, TA instruments, USA)와 Fourier Transmmission-Infrared spectrometry(FTIR, INFINITY Gold FTIR 60AR, Thermo Mattson, USA)을 이용하여 구조를 분석하였다. BET법으로 비표면적, 기공 부피 및 평균 기공 크기 등 기공 특성을 분석하였고 BJH법으로 기공분포를 측정하였으며, 주사전자현미경(FE-SEM, S-4200, Hitachi, Japan)으로 미세구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실리카 솔/습윤젤의 특성

금속 알콕사이드를 이용하여 상압(ambient pressure)

하에서 저 밀도/고 기공률의 실리카 에어로젤을 재현성있게 제조하기 위해서는 초기 단계인 용액과 솔의 제조로부터 마지막 단계인 표면개질, 상압 건조 및 열처리 공정 사이에 내재되어 있는 많은 공정 변수들에 대한 정확한 이해와 공정 제어가 요구되어 진다. 솔의 안정성과 솔 입자의 균일성에 의해 좌우될 수 있는 솔의 투명도가 높을수록 안정하고 투명한 습윤젤의 제조가 용이하다.

실리카 솔은 합성온도가 높을수록 젤화 시간이 빨라지므로 본 연구에서는 실리카 솔의 제조 온도를 25 °C로 고정시켰다. 첫 단계에서 산성 촉매의 양이 같으면 두 번째 단계의 중합 반응시 첨가되는 염기성 촉매양이 많을수록 젤화 시간이 빨라짐을 관찰할 수 있었다. 이는 산성 촉매인 HCl의 경우, 가수분해를 촉진시키는 반면 염기성 촉매인 NH₄OH는 축합 반응을 가속화시키기 때문이다.

그림 2는 상온에서 실리카 솔의 시간에 따른 젤화 시간을 관찰하여 측정한 결과이다. (a)는 최종 실리카 솔에 대한 젤화 진행을 나타낸 것이다. 5시간 이후부터 솔의 점도가 급격히 올라감을 알 수 있고 솔의 유동성이 사라지며 경사법으로 관찰 했을 때 습윤젤이 완전히 형성됨을 알 수 있고 (b)는 암모니아를 첨가하지 않은 산성 분위기하 에서는 젤화가 서서히 진행되고 있음을 알 수 있다. 젤화를 거친 습윤젤은 숙성 및 세척, 용매치환의 공정이 뒤따르는데 이 공정들을 용이하게 하기 위해서는 다른 용기로 빠르게 이동시켜야 한다. 이러한 과정에서 습윤젤이 대기중에 노출되고 이러한 노출은 습윤젤 표면에서 용매의 급격한 증발을 초래시키므로 많은 미세크랙을 유발시켜 이 단계에서 습윤

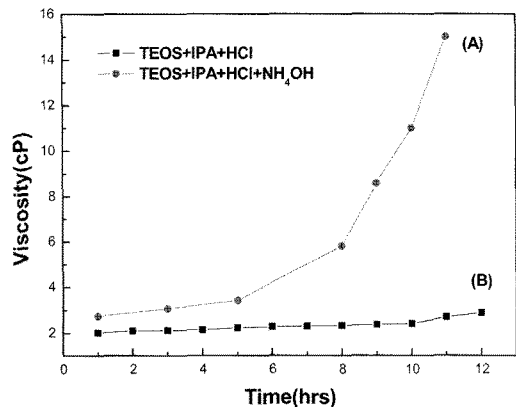


그림 2. 실리카 솔의 시간경과에 따른 점도 변화
Fig. 2. Viscosity variation of Silica sol as a function of aging time.

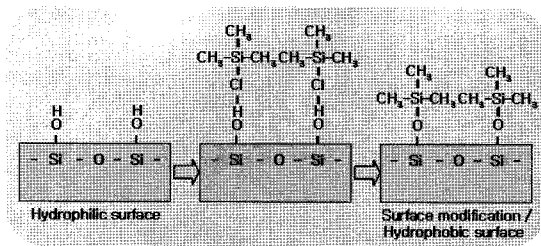


그림 3. TMCS를 이용한 표면 개질 모식도
Fig. 3. Mechanism of surface modification by TMCS.

젤 변화가 크게 나타날 수 있다. 따라서 이러한 습윤젤의 대기중 노출을 최소화 하기 위하여 본 실험에서는 독자적인 방법으로 습윤젤 이동시, 다음 공정의 용매를 일정량씩 첨가하여 분위기를 서서히 만들어주는 조건 하에서 이동을 실시해 습윤젤의 변형을 최소화하는 공정을 실시하였다.

3.2. 상압 건조 공정의 표면 개질

본 연구에서 상압 건조 공정은 표면 개질에 의해 가능 하여진다. 표면 개질시의 모식도를 그림 3에 나타내었다. 용매치환은 일반적으로 표면 개질을 위한 전처리 단계이며 표면 개질은 건조시 축합 반응을 일으키는 OH기를 반응성이 없는 화학종으로 개질 시키는 공정이다.

그림 4는 상압 건조 공정시 표면 개질을 실시한 젤과 그렇지 않은 젤에 대하여 비교하여 미세 사진을 나타낸 것이다. 표면개질을 실시한 젤은 많은 기공이 관찰되는 반면 그렇지 않은 젤에 대하여는 매우 치밀한 구조를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 개질된 젤은 스프링백 효과에 의하여 젤 내의 기공들이 다시 생성되는 것을 의미하며, 표면개질을 실시하지 않은 젤은 연속적인 축합반응으로 인하여 용매가 증발하여 젤 구조

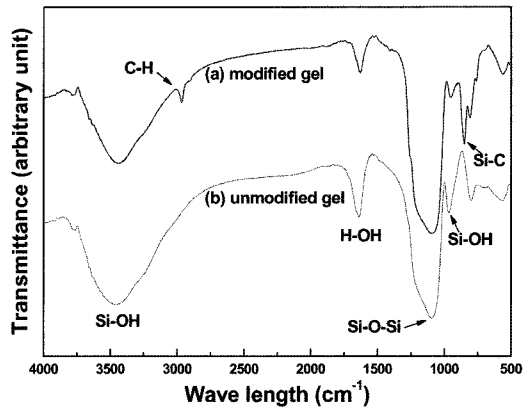


그림 5. 표면 개질 유무에 따른 실리카 에어로젤의 FT-IR 스펙트라 분석
Fig. 5. FT-IR spectra of the Silica aerogel with and without surface modification.

가 지로젤(xerogel) 형태로 수축됨을 알 수 있다.

그림 5는 FT-IR로 TMCS에 의한 습윤젤의 표면 개질 여부를 확인하기 위해 개질을 실시한 젤과 개질을 하지 않은 젤에 대하여 비교 분석하였다. 그림에서 TMCS로 개질한 경우 960 cm⁻¹ 부근에 존재하던 Si-OH 결합 피크가 거의 소멸됨과 동시에 1629 cm⁻¹ 부근의 H-OH 피크가 감소하고 있으며, TMCS로 처리하지 않은 경우에서 볼 수 없었던 C-H피크(2965 cm⁻¹)가 발견됨을 알 수 있었다. 이는 에어로젤의 표면 친수, 소수성 여부를 나타내는 지표로 에어로젤의 표면이 친수성에서 소수성으로 바뀌었음을 나타내는 결과이다.

표 2는 밀도와 기공 크기, 기공률을 나타내고 있다. 표면 개질을 실시한 에어로젤의 물성이 비표면적 840 m²/g, 기공크기 15.6 nm, 기공률 93 %, 밀도 0.14 g/cm³ 으로서 개질 않은 것에 비하여 월등히 우수한 특성을

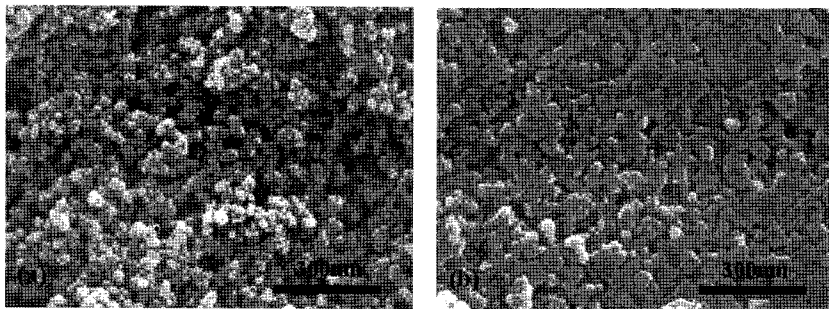


그림 4. (a) 표면 개질 및 (b) 미 개질된 에어로젤 표면의 SEM 사진
Fig. 4. FE-SEM images of (a) the modified and (b) the unmodified silica aerogels, respectively.

표 2. 용매에 따라 표면 개질된 에어로젤과 개질하지 않은 젤의 물성 비교

Table 2. Physical property of the modified and the unmodified silica aerogels as a function of solvent

Properties	n-Heptane		n-Hexane	xylene
	Modified	Unmodified		
Specific surface area(m ² /g)	840	874	859	862
Pore size(nm)	15.6	5.9	15.5	15.1
Porosity(%)	93	83	93	90
Density(g/cm ³)	0.14	0.37	0.14	0.21

보여 에어로젤 제조에 있어서 상압 건조 공정 시 표면 개질은 중요한 공정임을 알 수 있다.

3.3. 용매에 따른 실리카 에어로젤의 특성 분석

상압 건조 공정을 이용하여 에어로젤 제조 시 가장 문제가 되고 있는 것이 건조 중 크랙 발생이며 이것은 에어로젤이 여러분야로의 응용 가능성의 제한을 받게 되는 근본적인 원인이 된다. 따라서 본 연구는 에어로젤의 실용화에 있어 문제시 되고 있는 건조 시 크랙 방지 목적으로 표면장력과 증기압이 다른 각각의 용매 n-heptane/n-hexane/xylene을 이용하여 상압 건조법으로 실리카 에어로젤을 제조하였다.

그림 6은 각 용매에 따른 상압 합성된 실리카 에어로젤의 외관과 미세구조 사진이다. 대체적으로 모두 비슷한 물성을 보였으나 xylene의 경우에서는 기공률이 조금 낮게 측정되었다. 크랙방지 면에서는 n-heptane이 가장 우수하였고 그 다음으로는 n-hexane으로 물성 면

에서는 비슷하였으나 n-hexane은 건조 중 크랙발생이 빈번하게 나타남을 알 수 있었다. 이는 제조공정 시 사용되는 용매의 증기압과 표면장력으로 대변함으로서 그 상관관계로 알 수 있다. 크랙 방지 용매로서 가장 우수한 n-heptane의 경우는 다른 용매들에 비하여 비교적 낮은 표면장력과 증기압을 갖고 있음을 알 수 있었다. 반면 xylene의 경우에서는 증기압이 아주 낮아 용매의 대기 중 휘발이 늦기 때문에 크랙 방지 차원의 효과를 기대했으나 크랙이 심하게 나타났으며 이는 xylene의 오히려 큰 표면장력으로 인해 크랙이 심하게 나타나는 것으로 생각된다. 또한 표 2의 결과를 보면, 각 용매 모두 90%이상의 높은 기공률을 나타내어 본 상압 건조에 의한 방법도 초임계건조법으로 합성한 실리카 에어로젤과 유사한 고 기공률이 나타남을 알 수 있었다. 초임계 건조법으로 제조된 실리카 에어로젤의 경우 일반적으로 밀도 0.1 g/cm³ 이하, 기공률 90% 이상을 나타낸다^[7].

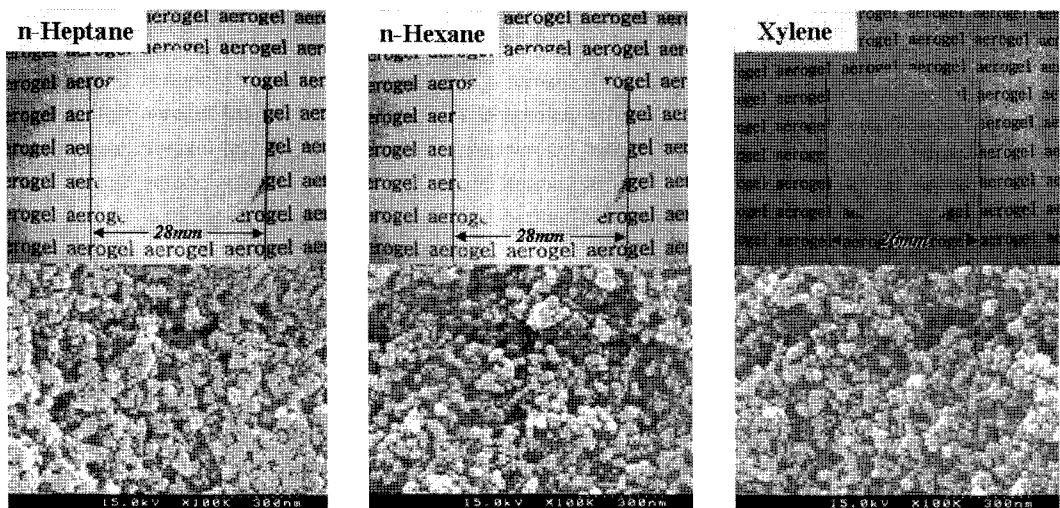


그림 6. 각 용매에 따라 표면 개질된 실리카 에어로젤 외관과 미세구조 비교
Fig. 6. FE-SEM images of the silica aerogels according to solvent.

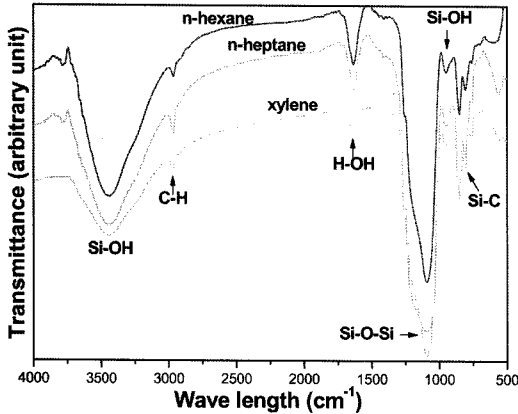


그림 7. 각 용매에 따른 실리카 에어로젤의 FT-IR 분석
Fig. 7. FT-IR spectra of the SiO₂ aerogels from different solvent.

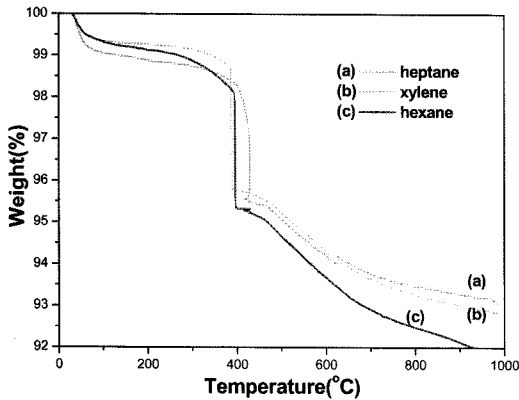


그림 8. 각 용매에 따른 실리카 에어로젤의 열중량 곡선
Fig. 8. TGA curves of the SiO₂ aerogels with a different solvent.

그림 7과 그림 8은 각각의 용매에 따른 FT-IR 및 TGA 분석 결과를 나타낸 것이다. 각 용매 공히 C-H 피크(2965 cm^{-1})가 발견되어 TMCS로 표면 개질이 이루어진 것임을 알 수 있으며 또한 열처리에 따른 중량 변화를 관찰하기 위해 TGA 분석을 실시하였다. 열처리 온도가 $400\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 일차 급격한 무게의 감소가 나타나는데 이 온도 범위에서 C-H 피크(2965 cm^{-1})가 거의 소멸하고, 수분의 물리적 흡착에서 기인하는 Si-OH 피크(3420 cm^{-1})와 H-OH 결합피크(1629 cm^{-1})가 증가한 것이라 할 수 있는데, 실리카 에어로젤의 표면의 CH₃기가 산화되어 공기 중 수분이 많이 흡착되기 때문이라고 생각된다⁹⁾. 따라서 $400\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 사이에서 CH₃기의 산화가 일어나 에어로젤의 표면 특성이 소수성에서 친수성으로 전이 되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

상압 건조법으로 제조된 실리카 에어로젤의 용매에 관한 특성 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초임계 건조 공정보다 경제적이고 안전한 상압 건조법으로 각각의 용매에 따른 실리카 에어로젤을 제조하여 저 밀도 $<0.14\text{ g/cm}^3$, $>93\%$ 의 고 기공률 실리카 에어로젤을 제조할 수 있다.

2. 상압 건조 시 크랙 방지 용매로는 n-heptane이 보다 우수하였으며 이는 용매의 증기압 보다는 표면장력이 낮은 것이 더 효과적이다.

3. 표면개질을 하지 않은 실리카 에어로젤은 표면 개질을 실시한 것과 비교하여 기공 크기와 기공률이 현저히 감소된다.

4. 실리카 에어로젤의 표면 친수성, 소수성 여부는 젤 구조 내에 존재하는 C-H, H-OH 결합 관계로 알 수 있고 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상의 열처리에서 C-H기의 산화가 일어나 표면이 소수성에서 친수성으로 전이된다.

참고 문헌

- [1] L. W. Hrubesh and J. F. Poco, "Thin aerogel films for optical, thermal, acoustic and electronic applications", *J. Non-Crystalline Solid*, vol. 188, pp. 46-53, 1995.
- [2] J. A. M. McDonnell, M. J. Burchell, and H. Yano, "APSSIS-aerogel position-sensitive impact sensor: Capabilities for in-situ collection and sample return", *Advances in Space Research*, vol. 25, pp. 315-322, 2000.
- [3] 강신규, 최세영, "실리카 에어로젤의 상압합성 및 특성연구(I)", 한국세라믹학회지, 제33권, 제12호, pp. 1394-1402, 1996.
- [4] 권영근, 최세영, 강신규, "실리카 에어로젤의 상압합성 및 특성연구(II)", 한국세라믹학회지, 제36권, 제11호, pp. 1189-1197, 1999.
- [5] D. M. Smith, R. Deshpande, and C. J. Brinker, "Preparation of low-density aerogels at ambient pressure", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 271, pp. 567-572, 1992.
- [6] S. S. Prakash and C. J. Brinker, "Silica aerogel film prepared at ambient pressure by using surface derivatization to induce reversible drying shrinkage", *Nature*, vol. 374, pp. 439-443, 1995.
- [7] J. Fricke, "Aerogels-highly tenuous solids with fascinating properties", *J. Non-Crystalline Solid*, vol. 100, pp. 169, 1988.
- [8] S. H. Hyun, J. J. Kim, and H. H. Park, "Synthesis

and characterization of low-dielectric silica aerogel films”, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 83, no. 3, pp. 533, 2000.

[9] 김태정, 남산, 오영제, “상압건조 물유리 에어로젤의 대한 표면개질제의 영향”, *센서학회지*, 제15권, 제3호, pp. 173-178, 2006.



류 성 옥

- 2004년 고려대학교 물리학과(이학사)
- 2004년~현재 고려대학교 대학원 전기공학과 석사과정
- 2004년~현재 한국과학기술연구원 학생연구원
- 주관심분야 : 에어로젤, 투명유전체, 저유전 박막



김 상 식

- 1985년 고려대학교 물리학과(이학사)
- 1987년 고려대학교 대학원 물리학과(이학석사)
- 1996년 Columbia University 고체물리학(공학박사)
- 1996년~1998년 미국 일리노이즈 대학(Urbana-Champaign) 포스트닥
- 1999년~현재 고려대학교 전기공학과 부교수
- 2000년~현재 고려대학교 반도체기술연구소 연구실장
- 주관심분야 : 반도체 재료, 나노입자 및 소자



오 영 제

- 1977년 연세대학교 세라믹공학과(공학사)
- 1979년 연세대학교 대학원 세라믹공학과(공학석사)
- 1987년 연세대학교 대학원 세라믹공학과(공학박사)
- 1988년~1989년 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