

나노기공성 에어로겔의 합성 및 응용

김건수 현상훈
연세대학교 재료공학부

1. 서 론

나노기공성 에어로겔 (nanoporous aerogel)은 80~99.87 % 이상의 기공율과 1 ~ 100 nm 정도의 나노 기공 크기를 갖는 초다공성 물질로서 최근 이들 재료의 합성과 응용에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^{1,2)}

나노기공성 에어로겔은 Kistler^{3,4)}가 1931년에 최초로 sodium silicate 용액을 응축시킨 실리카 수화겔 (hydrogel)을 초임계건조하여 투명성과 낮은 밀도를 갖는 초다공성 실리카 에어로겔을 제조한 이후에 alumina, tungsten oxide, ferric oxide, tin oxide, nickel tartarate, cellulose, cellulose nitrate, gelatin, agar, egg albumen, 그리고 rubber에 이르기까지 다양한 물질의 에어로겔들이 합성되었으나 그 당시에는 별 관심을 끌지 못하였다. 그러나 1970년대에 접어들면서 많은 연구자들이 에어로겔의 중요성을 재인식하게 되었으며 그 중 Techner 등⁵⁾은 산소와 로켓 연료를 저장하기 위한 재료를 개발하는 과정에서 TMOS (tetramethylorthosilicate)를 메탄올 용액 내에서 가수분해시켜 제조한 습윤겔 (wetgel)을 고온 초임계건조하여 고순도의 실리카 에어로겔을 합성할 수 있는 새로운 공정을 개발하였다. 에어로겔의 실용화에 대한 연구는 1980년대 초부터 이루어지기 시작하였으며 특히 입자 물리학 분야에서 Cherenkov radiation의 매개체로서 실리카 에어로겔의 응용성을 연구한 결과 독일의 DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) Cherenkov detector에 실리카 에어로겔을 사용하게 되었을 뿐만 아니라⁶⁻⁸⁾ 스웨덴에서는 초임계건조 용매로 메탄올을 사

용한 TMOS 공정에 의하여 타일상의 실리카 에어로겔을 대량 생산하게 되었다. 또한 1983년에 Hunt와 Berkely Lab.의 Microstructured Material Group은 고가이고 독성이 강한 TMOS를 TEOS (tetraethylorthosilicate)로 대체한 공정을 개발함과 동시에 습윤겔 내부의 알코올을 초임계건조 이전에 액상 이산화탄소로 대체한 저온 초임계 공정도 개발하게 되었다.^{9,10)} 1980년대 후반에 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)에서는 공기 밀도의 3배 정도에 불과한 0.003 g/cm³의 가장 낮은 밀도의 실리카 에어로겔을 제조하는데 성공하였다.¹¹⁾ 반면에 Pekala¹²⁾는 resorcinol 혹은 melamine을 formaldehyde와 축중합반응시켜 제조한 습윤겔을 저온 초임계건조하여 유기질 폴리머 에어로겔을 합성하였으며 또한 RF (resorcinol-formaldehyde) 에어로겔을 열분해 (pyrolysis)하여 카본 에어로겔 (carbon aerogel)을 제조하기도 하였다. 최근 Marketech International은 Berkeley Lab. 및 LLNL 등과 공동으로 저온 초임계건조 공정을 이용하여 제조한 silica, resorcinol-formaldehyde 및 carbon aerogel 등의 상업화를 추진 중에 있으며 Brinker 등^{13,14)}은 건조 이전에 습윤겔을 화학적으로 표면 개질하여 초임계건조 단계를 생략한 획기적인 상압 건조 공정 개발에 성공하여 에어로겔의 상업화에 장애 요인이 되고있는 경제성 문제 해결에 밝은 전망을 제시하여 주었다.

나노기공성 에어로겔은 1931년 최초로 제조된 이후 1980년대 말까지 재료학자는 물론 물리학자나 화학자들조차도 관심을 갖지 않는 재료이었으나 오늘날에는 에어로겔에 관한 논문이 일년에 약 200편이나 발표될 정

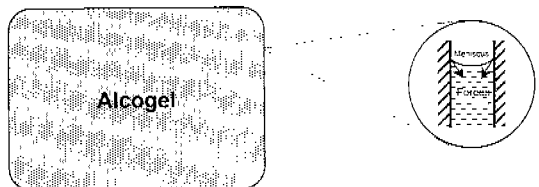
도로 과학적 연구의 대상으로서 뿐만 아니라 광범위한 실용적 응용성을 지닌 재료로 각광받고 있다.¹⁵⁻¹⁸⁾

2. 본 론

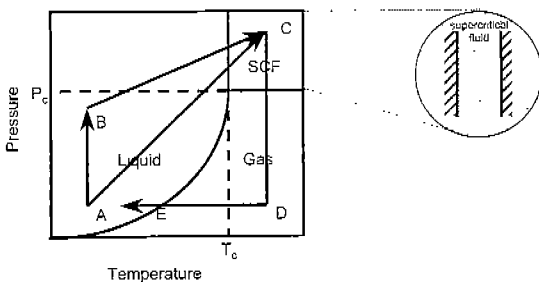
2-1. 나노기공성 에어로겔 합성공정

2-1-1. 고온 초임계건조 공정 (High-Temperature Supercritical Drying Process)

졸-겔 공정 (sol-gel processing)으로 제조된 습윤겔 (wetgel)은 단지 수 vol%의 고상 망목구조와 나머지 90% 이상의 기공 내에 알코올이 채워져 있는 상태로써 대기 중에서 건조할 경우 Fig. 1 (a)에 주어진 것과 같이 습윤겔의 기공에 기액 계면의 meniscus가 생성되게 된다.²⁾ 건조 단계가 계속되면 기공 내부의 용매가 증발되면서 생성된 meniscus는 겔 내부로 침투하게 되고 기액 계면에는 모세관 응력이 걸리게 된다. 따라서 겔은 수축하게 되며 기공도 소멸하게 된다. 이와 같은 기공의 소멸은 기공 내부에 존재하는 액상의 높은 인장 응력보다 강한 겔 구조가 형성될 때까지 계속되며, 이와 같이 건



(a) Upon normal drying, the wet gel experiences strong capillary forces that causes a collapse of the tenuous network.



(b) Upon supercritical drying, the development of liquid-gas interfaces within the gel is prevented by raising the pressure and the temperature above the critical conditions: A-C-D-E means additional solvent method and A-B-C-D-E means initial pressure method.

Fig. 1. Drying process: (a) normal and (b) supercritical drying.

조된 단단한 비정질상의 겔을 xerogel이라 한다. 수축 현상을 방지하고 미세한 겔 망목구조를 유지시키기 위하여 습윤겔을 용매로 채운 밀폐된 용기(autoclave)에 넣은 후 용매의 임계온도와 압력 이상의 고온 고압으로 유지하면 Fig. 1 (b)에서와 같이 용매는 초임계상태로 전이된다.¹⁹⁾ 초임계유체 상태는 모든 분자가 자유롭게 이동할 수 있는 상태로써 겔 내부에는 기-액 계면에 의한 표면 장력이 더 이상 존재하지 않게 된다. 이와 같은 초임계유체를 autoclave로부터 서서히 제거한 후 반응기의 온도를 상온으로 낮추면 증발건조에서 나타나는 수축이나 균열이 발생하지 않은 건조된 겔을 얻을 수 있다. 이와 같은 공정을 고온 초임계건조법이라고 한다. 고온 초임계건조법은 첨가용매의 양과 초기가압 여부에 따라서 용매첨가법 (Additional Solvent Method: ASM)과 초기가압법 (Initial Pressure Method: IPM)으로 분류된다.

Lierop 등²⁰⁾은 건조 용매인 에탄올을 반응기에 첨가한 후 불활성 가스인 질소로 1200 psi 정도로 초기가압하므로써 300 °C와 3500 psi의 조건 하에서 수축이 전혀 발생하지 않고 균열이 없는 에어로겔을 제조한 반면에 Laudise와 Johnson²¹⁾은 초기에 가압하지 않은 경우에는 반응기를 에탄올로 100% 채운 후 250 ~ 400 °C와 8000 psi의 높은 압력 하에서 초임계건조 해야만 균열이 없는 에어로겔의 제조가 가능하였다. Kim 등²²⁾은 iso-propanal을 건조 용매로 사용하여 40 vol%의 용매만을 이용한 용매첨가법과 10 vol%의 용매에 질소로 400 psi 초기가압을 가한 초기가압법 두가지 초임계건조 공정으로 250 °C와 900 ~ 1150 psi의 범위에서 균열이 없는 에어로겔을 제조한 바 있다.

2-1-2. 저온 초임계건조 공정 (Low-Temperature Supercritical Drying Process)

저온 초임계건조법의 기본 개념은 습윤겔 내부에 포함된 알코올이나 물을 CO₂(l)에 녹일 수 있는 aceton으로 치환한 후 CO₂(l)의 임계점인 31 °C, 1057 psi 이상의 온도와 압력에서 에어로겔을 합성하는 방법으로 실리카 에어로겔 뿐만 아니라 유기질 에어로겔 합성이 가능한 방법이다.

LBL (Lawrence Berkeley Laboratory)에서 생체 재료

의 SEM 관찰을 위해 이용되던 임계점 건조 (Critical Point Drying: CPD)를 응용하여 CO₂(l)를 건조 용매로 사용하여 40 °C와 1200 psi에서 실리카 에어로겔을 제조한 바 있다.^{9,10)}

유기 에어로겔은 1984년 미국의 LLNL의 Krukons에 의해 polyethylene을 CO₂(l)를 이용한 저온 초임계 건조를 통하여 처음으로 만들어졌다. 이후 1989년 Pekala¹²⁾는 resosinol-formaldehyde, melamine-formaldehyde, phenolic-furfural과 같은 multifunctional monomer를 이용하여 습윤겔을 제조한 후 저온 초임계 건조하여 유기 에어로겔을 제조하였으며, 이를 pyrolysis하여 카본 에어로겔을 합성하였다.

2-1-3. 상압건조 공정 (Ambient Drying Process)

초임계 건조 공정은 높은 압력을 요하기 때문에 생산 원가가 높을 뿐만 아니라, 고압으로 인한 위험 부담이 크고, 연속 공정이 불가능한 autoclave를 이용하는 공정이기 때문에 공정의 경제성/안전성/연속성 면에서 많은 한계점을 갖고 있다. 최근에는 iso-propanal과 같은 용매를 선택하여 가액체의 계면이 사라지는 초임계점을 낮추어 좀 더 낮은 온도와 압력 하에서 에어로겔을 합성하고자 하는 노력²²⁾이 이루어지고 있지만 autoclave의 단점을 근본적으로 극복하고 고압이 아닌 상압 하에서 에어로겔을 합성할 수 있는 상압 건조 공정의 필요성이 대두되었다. 실리카 에어로겔 상압 건조는 1992년 Sandia National Lab.의 Brinker 등^{13,14)}에 의해 개발된 silane coupling법에 의해 최초로 이루어졌으며, 이후 Vrancken 등²³⁾도 유사한 방법을 이용하는 실리카 에어로겔의 상압 합성을 보고한 바 있다. Fig. 2에서 보듯이 silane coupling이란 습윤겔 (wet gel) 표면에 존재하여 건조시 축합 반응을 일으키는 -OH 기를 반응성이 없는 화학 종 (Si(CH₃)₃ : silane group)으로 개질시키는 표면 개질 (surface modification) 공정이며, 표면 개질을 위해서는 우선적으로 습윤겔 내부의 용매를 표면 개질에 적합한 용매로 치환하는 용매 치환 공정이 요구된다. 그런데 기존의 일반적인 용매 치환 공정은 겔 내부 용매와 치환 용매의 단순 농도 차에 의해서만 치환을 진행시키므로 많은 시간이 소모되고 용매를 여러 번 갈아주어야 하는 번거로움이 있어 실용화 공정으로는 부적합하

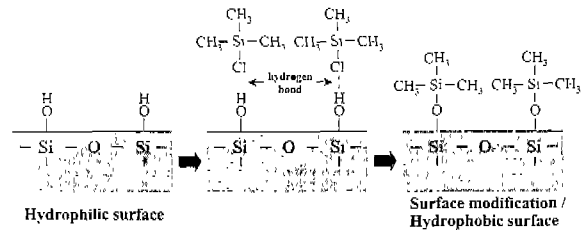


Fig. 2. Illustration of surface modification of wet silica gels with TMCS.

였다. 또한 용매 치환 이후 표면 개질을 실시하므로 공정의 효율성/편리성 면에서 많은 단점을 가지고 있었다. 1998년 Schwertfeger 등²⁴⁾은 상압 건조를 위한 표면 개질/용매 치환을 화학적 반응에 의해 동시에 진행시킬 수 있는 공정을 제시하였으나 건조/열처리시 균열 발생의 문제로 큰 부피의 에어로겔 벌크체를 제조할 수 없었고 그 적용범위를 에어로겔 분체 합성 분야로 제한하였다. 이에 반해 Lee 등²⁵⁾은 값이 싸고 비교적 덜 유해한 용매를 이용하여 균열이 없는 에어로겔 벌크/박막을 제조한 바 있다. 또 다른 방법으로는 극성 용매인 알코올을 비극성 용액으로 치환하여 속성시키므로써 망목구조 강화를 유도하여 상압에서 건조하여 에어로겔 박막을 제조한 바 있다.²⁶⁾

2-1-4. 동결 건조 공정 (Freeze Drying Process)

그 외의 건조 방법으로는 동결 건조 방법이 있다. 이 방법은 습윤겔을 건조할 때 발생하는 기액 계면에 의한 모세관력을 피해서 액-고 계면과 고-기 계면을 통과시킴으로써 건조하는 방법이다. Fig. 3에서 보듯이 동결 건조는 동결 (습윤겔 내부의 용매를 모두 고상으로 전이), 승

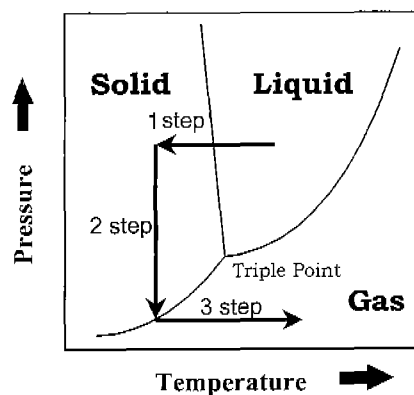


Fig. 3. Freeze drying process.

화 (압력을 낮추므로써 고상화된 용매를 직접 기상으로 전이), 탈착 (전이된 기상을 저압상태에서 제거) 단계를 거치게 된다. Scherer²⁷⁾와 Kim 등²⁸⁾이 균열이 없는 에어로겔을 제조한 바 있다.

3. 나노기공성 에어로겔의 물성 및 응용

3-1. 나노기공성 에어로겔의 물성

에어로겔은 낮은 열전도도, 낮은 굴절계수, 높은 비표면적과 기공율 등의 물성을 갖는 저밀도 물질로서 초경량 초단열 재료, 촉매 재료, 저유전성 재료 등 이들에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. Table 1과 Table 2에는 각각 실리카 에어로겔 및 유기질 에어로겔의 물리적 특성이 주어져 있는데 이들 특성들은 에어로겔의 미세구조 밀접한 관련이 있다. 따라서 본 절에서는 실리카 에어로겔의 미세구조와 에어로겔의 광학적 특성, 열적 특성 및 표면 특성과의 관계에 대하여 고찰하였다.

3-1-1. 광학적 특성

에어로겔은 낮은 밀도 때문에 굴절계수가 거의 1에 가까우며 이와 같이 작은 굴절률 때문에 에어로겔에 입사된 광은 반사나 굴절에 영향을 받지 않고 에어로겔을 투과하면서 에어로겔 내부의 망목구조에 의해 산란이

Table 2. Currently Available Organic Aerogels

	Resorcinol-formaldehyde aerogel	Melamine-formaldehyde aerogel
Density	0.03 ~ 0.06 g/cm ³	0.01 ~ 0.80 g/cm ³
Surface area	350 ~ 900 m ² /g	875 ~ 1025 m ² /g
Cell/pore size	< 50 nm	< 50 nm
Particle	3 ~ 20 nm(interconnected)	under investigation
Color	dark red, transparent	colorless, transparent
Others	Carbonizable No mass/surface fractal dimensions	-

(Pyrolysis)

Carbon aerogel	
Density	0.05 ~ 0.80 g/cm ³
Surface area	600 ~ 800 m ² /g
Cell/pore size	< 50 nm
Particle	3 ~ 20 nm (interconnected)
Color	black, opaque
Others	amorphous

일어나게 된다. 산란 현상은 에어로겔의 내부에 존재하는 가시광의 파장보다 훨씬 작은 약 20 nm 정도의 기공에 의한 것이며, 직경 2 ~ 5 nm 정도의 고상 입자들은 산란 현상에 큰 영향을 미치지 않는다. 산란 효과는 scattering center의 크기에 의존하기 때문에 기공 크기

Table 1. Physical Properties of Silica Aerogels

Property	Value	Comment
Bulk density	0.003 ~ 0.35 g/cm ³	Most common density is ~0.1 g/cm ³
Internal surface area	600 ~ 1000 m ² /g	As determined by nitrogen adsorption/desorption
% solid	0.13 ~ 15 %	Typically 5 % (95 % free space)
Mean pore diameter	~ 20 nm	As determined by nitrogen adsorption/desorption (varies with density)
Primary particle diameter	2 ~ 5 nm	Determined by electron microscopy
Index of refraction	1.0 ~ 1.05	Very low for a solid material (cf. 1.2 for SiO ₂ glass)
Thermal tolerance	to 500 °C	Shrinkage begins slowly at 500 °C, increases with temperature. Melting point is > 1200 °C
Coefficient of thermal expansion	2.0 ~ 4.0 × 10 ⁻⁶	Determined using ultrasonic methods
Poisson's ratio	0.2	Independent of density. Similar to dense silica
Young's modulus	10 ⁶ ~ 10 ⁷ N/m ²	Very small(< 10 ⁴ ×) compared to dense silica(7.3 × 10 ¹⁰)
Tensile strength	16 kPa	For density = 0.1 g/cm ³
Fracture toughness	~ 0.8 k · Pa ^{1/2}	For density = 0.1 g/cm ³ Determined by 3-point bending
Dielectric constant	~ 1.1	For density = 0.1 g/cm ³ Very low for a solid material
Sound velocity through medium	100 m/sec	For density = 0.07 g/cm ³ One of the lowest velocities of a solid material

*Most of the properties listed here are significantly affected by the conditions used to prepare the aerogel and any subsequent post-processing.

에 따라서 각기 다른 파장들이 산란된다. 따라서 빛이 에어로겔을 투과할 경우 에어로겔은 붉은색을 나타내게 되며 (적색광은 보다 긴 파장을 갖고 있으며 미세한 에어로겔의 구조에 의해 상대적으로 덜 산란된다), 굴절될 경우에는 에어로겔을 푸르게 보이게 한다. 결론적으로 에어로겔에서 나타나는 Rayleigh scattering effect는 에어로겔 망목구조 내의 아주 작은 불균질성을 나타내는 nanostructure에 의해 발생하게 된다. 실리카의 진성 흡수 (intrinsic absorbance)는 가시광 영역에서 매우 낮으므로 이 영역에서의 투과는 주로 산란 효과에 의해서 약화된다. 파장수가 짧아짐에 따라서 산란은 증가하며 300 nm 부근에서 투과도는 사라진다. 스펙트럼이 적외영역으로 이동함에 따라서 산란의 영향은 다소 감소하게 되며, 기본 분자 진동에 의해 나타나는 스펙트럼의 구조에 의해서 에어로겔의 구조를 해석할 수 있게 된다. O-H stretching vibration에 의한 강하면서도 넓은 흡수대는 보통 3500 cm^{-1} 에서 나타내게 되며, 다소 약한 O-H bending vibration band는 1600 cm^{-1} 에서 관찰할 수 있다. 흡착수와 표면의 -OH기들 모두가 이와 같은 흡수대에 영향을 주게 되며, 1100 cm^{-1} 에서의 강한 흡수대는 Si-O-Si 기본 진동에 의한 것이다. 반면에 3300 과 2200 cm^{-1} 사이에서는 높은 적외선 투과 영역이 존재하며 이와 같은 높은 투과성 때문에 실리카 에어로겔을 통한 일정한 열방사가 발생한다.²⁰⁾

3-1-2. 열적 특성

에어로겔 내에서의 열전달 기구는 고상 망목구조를 통한 고체 전도, 기상을 통한 기체 전도, 그리고 적외선 방사를 통한 방사 열전도의 세 가지 기구를 통해서 발생하게 되며, 각 메커니즘의 기여 정도는 겔의 재료나 형상 (타일, 과립 및 분말상)에 따라 달라진다.²⁹⁻³²⁾ 또한 고상 전도, 기상 전도 및 방사 (적외) 열전도의 세 가지 전도 모두가 에어로겔의 총 열전도도를 결정한다. 고상 전도는 특정 물질의 고유한 성질이므로 치밀한 실리카의 경우 고상 전도는 상대적으로 크다. 그러나 실리카 에어로겔은 고상의 실리카를 단지 1 ~ 10 %의 매우 적은 양만을 함유하고 있으며 이들은 삼차원적 망목구조로 서로 연결된 매우 작은 입자로 존재하므로 실리카에

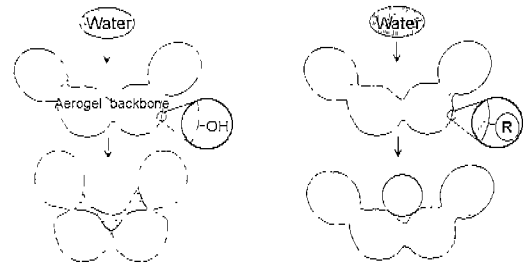
어로겔의 고상을 통한 열전달은 직선으로 흐르는 것이 아니라 구불구불한 삼차원적 망목구조를 통하여 일어나게 되며 따라서 열전도에 큰 영향을 미치지 못한다. 따라서 실리카 에어로겔의 경우 고체에 의한 열전도는 95 % 이상의 기공율이 의미하듯 에어로겔의 희박한 고상 구조의 사슬 (지름 5 nm)을 따라서 여기 (excitation) 전파가 제약받기 때문에 비정질 실리카에 비해서 100 ~ 1000 배정도 낮게 된다. 에어로겔은 진공 하에서가 아니라면 그 공간의 대부분은 고상이 아닌 기상으로 이루어져 있으므로 에어로겔을 통한 열전달은 기공 구조내의 기상을 통해서 발생하게 된다. 보고된 바에 의하면 10 mbar까지의 압력 하에서의 열손실계수는 에어로겔 내부의 기체 압력과는 무관하며, 100 mbar 이상에서부터 열손실계수의 증가가 관찰되었다.³³⁾ 기체 전도의 증가 현상은 Knudsen formula에 의한 기체 분자의 평균자유행로에 좌우되는 것으로써 열전도도의 변화로부터 계산한 유효 기공 크기는 50 ~ 100 nm이다. 에어로겔의 기공 크기는 1 ~ 100 nm 범위에 있으므로 에어로겔을 통한 기체의 평균자유행로는 1 ~ 100 nm 범위에 있게 된다. 대기압 하의 공기의 경우 평균자유행로는 약 70 nm 이므로 에어로겔 내부에서는 공기와 기공 벽과의 충돌 뿐만 아니라 공기 분자간의 충돌도 상당히 빈번하게 발생하게 된다.³¹⁾ 결과적으로 에어로겔의 열전도는 $0.005 \sim 0.010\text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로써⁴⁶⁾ 마이크로 혹은 밀리미터 정도의 기공을 갖는 단열재료가 비대류 공기에서 나타내는 열전도도인 $0.026\text{ W/m} \cdot \text{K}$ 보다 3 ~ 5 배 정도 낮은 값을 갖게 된다. 에어로겔의 방사 열전달은 적외선 흡수에 의해서 지배되는데, 20 °C 이하의 낮은 온도에서는 주로 30 μm 이상의 파장 대역에서 반면에 상온과 고온에서는 3 ~ 5 μm 범위에서 에어로겔을 투과하므로써 방사 열전달이 용이하게 일어나게 된다. 단열 재료로의 실리카 에어로겔의 응용의 장점 중의 하나는 가시광의 투과성에 있다. 즉, 투명창이나 채광창으로의 응용이 가능하다는 것이다. 그러나 에어로겔은 적외광 특히 3 ~ 5 μm 사이의 광도 투과한다. 저온에서는 열전달에 있어서 방사에 의한 기여도가 낮기 때문에 문제가 되지 않으나 고온에서는 방사 열전달이 열전달의 주 기구로 작동하면서 반드시 해결되어야 할 중요한 문제로 부각된다.

3-1-3. 표면 특성

실리카 에어로겔의 일차 입자는 직경 2 ~ 5 nm 정도이다. 이와 같이 작은 크기의 실리카 입자는 비정상적으로 큰 표면적 대 부피 비를 보이며 ($\sim 2 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$), 상대적으로 높은 비표면적 ($\sim 1000 \text{ m}^2/\text{g}$)을 나타낸다. 에어로겔 표면의 성질은 그 제조 조건에 강하게 의존한다. 예를 들어 알코올을 건조 용매로 사용하여 초임계건조한 에어로겔의 표면에는 주로 알콕시기 (-OR)들이 존재한다. 이와는 달리 이산화탄소 공정에 의해서 제조하면 표면은 대부분 수산기 (-OH)들로 덮혀있다. 표면이 수산기로 이루어진 에어로겔은 강한 산소 결합 효과 (hydrogen-bonding effect)를 나타낸다. 따라서 수산기 표면으로 이루어진 에어로겔은 흡습성을 나타내게 된다. 건조된 실리카 에어로겔은 습한 대기로부터 수분을 흡수하며, 질량이 최대 20 %까지 증가하기도 한다. 이러한 흡착은 가역 반응으로 에어로겔을 가열하므로써 완전히 건조시킬 수 있으며 냉각시키면 수분은 순간적으로 재흡착하게 된다. 수산기 표면으로 이루어진 에어로겔이 물과 같은 액상과 접촉할 경우 나노미터 단위의 에어로겔기공 속으로 물이 침투되면서 물의 표면 장력에 의해 고상의 실리카 구조가 파괴되어 일정한 모양의 투명한 고체에서 미세한 흰색 분말로 변하게 된다. 생성된 분말은 원래의 에어로겔과 같은 질량을 가질 뿐만 아니라 전 표면적도 동일하다. 따라서 완전히 표면이 수산화되었을 경우의 에어로겔은 친수성으로 분류된다. 표면의 수산기를 비극성의 -OR로 교환하는 표면 개질은 초임계건조 이전의 습윤겔 상태에서도 초임계건조 이후에 에어로겔 상태에서도 가능하다. 표면 개질에 의하여 물과 실리카 표면 사이의 인력을 제거하므로써 물에 의한 에어로겔의 손상을 방지할 수 있다. 이러한 종류의 에어로겔은 소수성으로 분류되며, 소수성 에어로겔은 물에 의해 젖지 않으며 물위에 장시간 부유할 수 있게 된다. Fig. 4에는 에어로겔의 고상 및 기공 망목구조와 물과의 상호 작용에 대하여 도식화하였다.

3-2. 나노기공성 에어로겔의 응용 및 전망

고에너지 물리학 분야에서 사용하는 Cherenkov detector에서 필요로 하는 저밀도 물질로서 투명한 에어로



(a) hydrophilic aerogel (b) hydrophobic aerogel
Fig. 4. Hydrophilic and hydrophobic natures of aerogels.

겔 타일이 사용된 이후 현재 가장 주목받고 있는 에어로겔의 응용성은 투명 단열재로서의 실용화이다. 스위스의 Ardon에서는 투명한 과립상 에어로겔을 건물 외벽의 단열재로 사용한 결과 연간 3000 l 의 석유가 소모되는 주택을 연간 300 l 의 석유만으로도 난방이 가능하다고 보고하였으며,³⁴⁾ 독일의 프라운호퍼 연구소 (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE)에서는 16 mm 두께의 반투명한 에어로겔을 두장의 창유리 사이에 넣은 단열 시스템을 이용하여 Bavaria 지방의 주택을 단열시키기도 하였다. 독일의 BASF에서는 CO₂ 치환법을 이용하여 sodium silicate로부터 1 ~ 8 mm 직경의 반투명 및 불투명한 실리카 에어로겔 구형 입자 (bead)를 대량 생산하고 있으며, "BASOGEL"로서 시판되고 있다. 단열재료로서의 에어로겔의 실용화를 위하여 유럽에서는 JOULE program의 한 과제로써 EC 지원하에 5개사에서 활발하게 연구되고 있다. NASA에서는 우주 먼지나 마이크론 단위의 운석 포집을 위해 에어로겔을 사용하였다.³⁵⁾ Phalippou 등³⁶⁾은 실리카 에어로겔을 이용하여 고순도 실리카 유리를 제조하였으며, Hrubesh 등³⁷⁻³⁹⁾은 극저유전 물질로 실리카 에어로겔 박막 (film)의 응용성을 제시한바 있다. Table 3에 에어로겔의 응용 가능한 분야를 분류하였으며, 에어로겔의 대표적인 응용 분야와 전망은 다음과 같다.

3-2-1. 투명 단열재 (Transparent Insulation Material : TIM)

실리카 에어로겔의 가장 유망한 응용성 중의 하나는 투명 단열재이다. 투명한 에어로겔을 단열 재료로 건물의 외벽에 사용할 경우 에어로겔의 높은 투광성으로 인

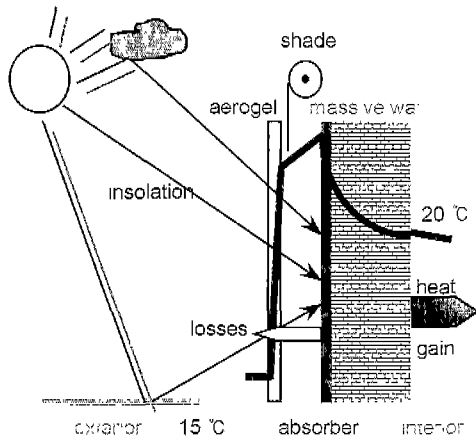


Fig. 5. Passive solar heating with a translucent aerogel insulation in front of a blackened house wall. Even on cold but sunny days heat gain can be achieved.

하여 태양열을 빛(복사열)의 형태로 받아들여 그 열을 외벽에 축적함과 동시에 에어로겔의 지극히 낮은 열손실계수에 의하여 축적된 열이 외부로 거의 방출되지 않으므로 획기적으로 건물의 에너지 절약에 기여할 수 있다. 이와 같은 응용을 위해서는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 에어로겔을 두 장의 유리 사이에 넣은 후 외부를 검은색으로 칠한 집벽의 외부에 설치하면 된다. 에어로겔은 건물의 외벽 뿐만 아니라 모든 창유리 계통에서도 뛰어난 열적 성질과 더불어 투명성으로 인하여 간유리

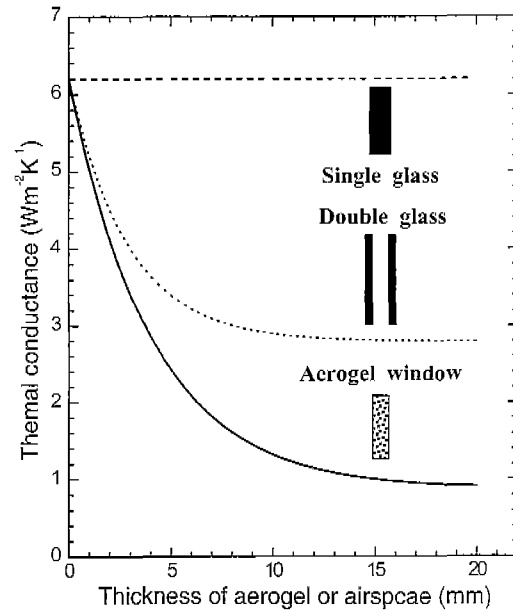


Fig. 6. Calculated insulation effect: aerogel vs double glass.

(frosted window)나 태양열 집적 장치의 덮개 등으로의 응용 가능성도 기대된다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 이중 유리 속에 에어로겔을 채우고 공기를 제거한 경우 열전도도는 $0.01 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 정도로 Ar을 채운 보통의 이중 유리 열전도도의 1/3에 해당하는 값이다.^{33,40)}

Table 3. Possible Applications of Aerogels

Field		Applications
Energy	Saving	<ul style="list-style-type: none"> - Transparent thermal superinsulation (TIM) - Window systems (Smart glazing) - Substitutes for polyurethane foams (CFC-blown insulating foams) - House wall insulation - Other superinsulation
	Storage/Generation	<ul style="list-style-type: none"> - Supercapacitor electrodes (Carbon aerogels) - Li-ion battery electrodes ($\text{MnO}_2/\text{Carbon aerogels}$) - Cover of solar pond
Environmental		<ul style="list-style-type: none"> - $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ photocatalysts - Catalytic systems for VOC/CH_4 oxidation and NO_x decomposition - Capacitive deionization electrodes (Carbon aerogels) - Gas/liquid separation filters/membranes
Electrics/Electronics		<ul style="list-style-type: none"> - Ultralow dielectrics (IMD/ILD) - Various types of electrodes for energy/environmental applications - Micro wave circuits, Impedance matching layer for piezoceramics, Light bulbs for diffusing light. Flat panel display, Extremely light weight electronic packages
Others		Chemical sensors, Photoluminescent light sources, Pure silica glass precursor, Acoustic delay lines. Sound isolation systems, Particle detector for high energy physics, Anti-reflection coating

3-2-2. 환경 친화적 고온형 단열재 (High Temperature Insulation Material)

PU 단열재에서 CFC 추진제로 사용되는 freon (F11)은 지구의 성층권 상에 있는 오존층을 파괴시키므로써 온실 효과에 지대한 영향을 미치는 환경적인 이유 때문에 2000년대에는 그 사용이 전면 금지될 예정이므로 최근 이들에 대한 대체 단열재로서 불투명화 에어로겔의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 에어로겔은 PU foam 보다 단열 특성이 우수할 뿐만 아니라 독성도 없고 가볍고 용적 면에서도 탁월한 특성을 갖고 있어서 냉장 및 열축적장치 이외에도 steam pipe에서와 같이 높은 온도에서도 사용될 수 있는 단열재로 알려지기 시작하였다. PU 단열재의 대표적인 열전도도는 프레온 (F11)을 이용하여 제조한 직후의 경우 300 K에서 0.02 W/m · K이다. 이와 같이 낮은 전도도는 F11의 열전도도가 비대류 공기의 열전도도인 0.026 W/m · K과 비교할 때 단지 0.008 W/m · K 정도로 낮기 때문에 가능하다.⁴¹⁾ PU foam은 고상도 내재되어 있고 방사 열전도도가 약 0.008 W/m · K 정도 되기 때문에 시간의 흐름에 따라 공기가 PU foam의 내부로 침투되는 반면에 F11이 밖으로 확산되면서 열전도도는 점진적으로 증가하게 된다. 결과적으로 공기로 채워진 PU foam의 총 열전도도는 0.03 W/m · K 이상의 값을 가지게 된다. 만일 순수 에어로겔의 적외 방사 열전달을 충분히 감소시킨다면 실리카 에어로겔의 PU foam의 대체는 충분히 실현 가능한 일이다. 불투명화제 (opacifier)를 실리카 줄에 첨가하여 겔 내부에 직접시킬 경우 순수 실리카 에어로겔에서 문제시되는 2 ~ 8 μm 영역에서의 적외에너지가 소멸되어 방사열전도를 현격하게 감소시킬 수 있다.^{29,30)} 따라서 순수 실리카 에어로겔의 열전도도가 300 K에서 0.020 W/m · K 정도인 반면에 불투명화시킨 에어로겔의 열전도도는 공기 중에서 분말과 타일상인 경우에 각각 0.017 W/m · K⁴²⁾ 와 0.013 W/m · K 정도이다.⁴³⁾ 만일 적절한 불투명화제를 충분히 사용한다면 500 K에서도 0.020 W/m · K 이하 정도의 열전도도를 유지할 수 있을 뿐만 아니라⁴⁴⁾ 에어로겔을 진공 하에 둔다면 분말상은 약 0.002 W/m · K 그리고 타일상은 0.006 W/m · K 정도의 초단열특성을 발휘할 수도 있다.

3-2-3. Impedance Matching Layer for Transducer

에어로겔에서의 음속은 100 ~ 300 m/s로 실리카 유리에서의 5000 m/s와 비교할 때 상당히 느린 값이다. 에어로겔은 음속과 밀도가 동시에 낮으므로 이 둘의 곱인 acoustic impedance ($Z = \rho c$ ($c =$ 음속))도 낮게 된다. 에어로겔의 대표적인 acoustic impedance는 $10^4 \sim 10^5$ 정도이다.⁴⁵⁾ 압전 세라믹스 transducer에서 초음파를 방출하면 공기 내에서 사용 가능한 초음파의 에너지는 두 매질의 acoustic impedance의 비에 비례하게 된다. 따라서 공기와 유리와 같은 세라믹스로 이루어진 transducer의 경우 $400/10^7 = 4.0 \times 10^{-5}$ 으로 매우 낮다. 따라서 사용 가능한 음향 에너지를 감소시키며 결과적으로 생성되어 압전 세라믹스에서 감지되어야 할 음향파는 기상으로 전파되므로써 signal-to-noise ratio에도 악영향을 미치게 된다. 이러한 문제는 acoustic quarterwave matching layer에 의해서 해결될 수 있다. 즉 압전 세라믹스 앞에 에어로겔을 붙인 transducer는 $400/10^5 = 4.0 \times 10^{-3}$ 으로 보통의 transducer보다 에너지가 100 배나 강하다. 에어로겔을 이용하여 30 dB 이상의 음향 투과도의 증가를 보였으므로 다른 물질과 결합된 다층 구조에 의하여 출력, 감도 및 대역폭에 있어서 변환기 시스템의 최적화를 이룩할 수 있을 것으로 예상된다.⁴⁶⁾

3-2-4. 고집적 소자용 극저유전 박막 (Ultra-low Dielectrics for ICs)

최근 ULSI 소자에서의 고속화 및 고집적화는 필연적으로 소자의 다층화 구조를 초래하게 될 뿐만 아니라 소자의 동작 속도가 giga 급에 이르고 또한 배선 물질의 선폭도 0.10 μm 정도로 감소하게 될 것이다. 복잡한 소자의 구조에서는 좁고 긴 배선간의 상대적인 전기적 용량 증가로 인하여 신호가 지연되고 (signal delay) 전기적인 상호 간섭 (cross talk)에 의하여 소자 전체의 동작 속도가 제한된다. 이러한 문제는 새로운 배선 금속 (Cu)의 개발과 함께 기존의 층간 절연막 (intermetal dielectric : IMD)의 유전 상수의 감소로도 효과적으로 실현될 수 있다. 따라서 층간 절연막을 현재 소자 공정에서 사용되는 유전을 약 3.9 인 CVD-SiO₂ 보다 훨씬 더 낮은 유전 상수를 갖는 나노기공성 에어로겔 박막 ($k \leq 2.0$)

으로 대체할 경우 고집적 소자의 성능은 상당히 증진될 수 있다고 예상되어 많은 연구가 진행 중에 있다.^{26,28,37,38,39)}

3-2-5. Cherenkov Counter

Cherenkov counter는 거대한 가속기나 우주선 (cosmic ray)에서 생기는 빠른 속도를 가진 입자들을 탐지하는데 사용된다.^{9,47,48)} 매질로 에어로겔을 사용하기 전에는 주로 압축 기체를 사용하였다. 굴절률이 1.007 ~ 1.24인 에어로겔로 만든 Cherenkov counter가 현재 CERN, Lawrence Berkeley 및 DESY의 가속기에 사용되고 있다. 현재 에어로겔이 가장 많이 사용되고 있는 분야이며, 에어로겔 관련 기술을 선도하기도 하였다.

3-2-6. 촉매 및 촉매담체 (Catalytic Materials)

에어로겔의 망목구조는 20 ~ 100 nm 범위의 기체 여과 장치로 사용될 수 있다. 에어로겔은 다른 물질과는 달리 높은 기공율로 인하여 상대적으로 높은 기체 투과도를 나타내게 된다. 또한 에어로겔의 내부 표면은 제로겔과 비교할 때 기체 분자가 접근하기에 훨씬 용이하다.⁴⁹⁾ 따라서 에어로겔은 촉매나 촉매 담체로써 이용될 수 있으며, 1960년대 말 에어로겔에 대한 관심이 다시 일어나게 되는 중요한 계기가 되었었으며 많은 연구가 진행 중에 있다.⁵⁰⁻⁵²⁾

3-2-7. 슈퍼캐패시터용 전극 (Supercapacitor Electrode)

카본 에어로겔은 전기전도도가 우수할 뿐만 아니라 고비표면적을 가지므로 전극 재료로 가장 이상적인 재료이다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 슈퍼캐패시터용 전극은 전압차에 의해 쉽게 전기이중층을 형성해야 되고 단위부피당 높은 비표면적을 가져야 하며, 전해질과 연속적으로 접촉해야 하는데 이를 가장 이상적으로 만족시키는 재료가 카본 에어로겔이다⁵³⁻⁵⁴⁾. 카본 에어로겔 전극을 이용한 슈퍼캐패시터는 고출력 밀도 (power density : 7.5 kW/kg)와 높은 에너지 밀도 (energy density)를 가지며 전기저장용량 (F/g)이 현재 사용되고 있는 범용 커패시터의 100 ~ 1000 배 이상이라고 보고되고 있다.⁵⁵⁾

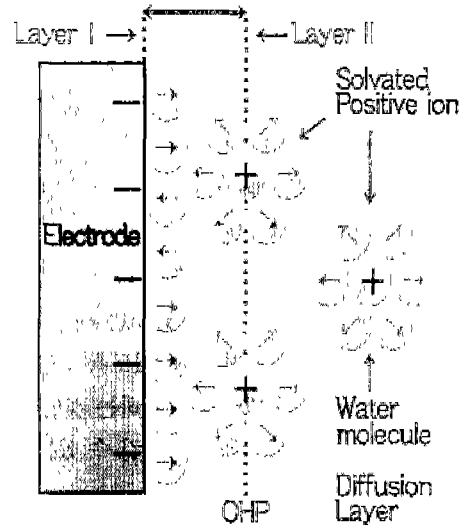


Fig. 7. Schematic diagram of Supercapacitor Electrode.

3-2-8. 해수 담수화용 전극 (Capacitive Deionization Electrode)

최근에 Lawrence Livermore National Lab. (LLNL)에서는 카본 에어로겔을 이용하여 기존의 담수화/이온폐수처리 공정에 비해 훨씬 경제적이고 효율적인 새로운 Capacitive Deionization (CDI) 공정 개발을 위한 연구가 진행 중에 있다.⁵⁶⁾ Fig. 8에 나타낸 바와 같이 CDI 공정은 두 개의 반대 전하를 갖는 카본 에어로겔 전극을 사용하여 약간의 전압 차에서 전기이중층을 형성하게 함으로서 두 전극 사이를 지나가는 해수, 폐수 또는 반도체 공정에서의 공급수 등으로부터 이온을 제거하는 공정으로서 종래의 공정에 비해 10~20 배 정도의 에너지 효율성이 높을 뿐만 아니라 멤브레인이나 고압 펌프

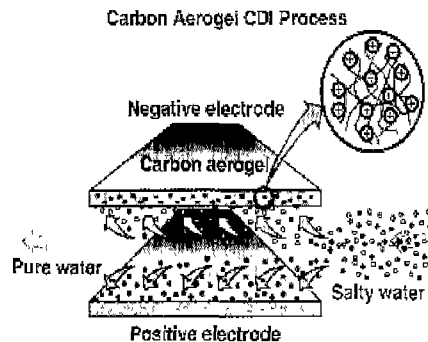


Fig. 8. Schematic diagram of capacitive deionization process.

등을 사용하지 않기 때문에 훨씬 단순하고 공정 자체의 오염을 최소화할 수 있다. 따라서 CDI 공정은 담수화나 폐수 처리 등에 의한 식수의 공급 사용을 가능하게 하는 것 이외에도 열 교환기나 보일러 등의 산업 기기에서의 공업용수 처리, 독극물이나 방사능 물질을 포함한 폐용수 처리, 광물 추출, 의학 분야 및 분석 측정 기기에의 적용 등 다양한 분야에 응용될 수 있다. 이처럼 혁신적인 CDI 공정에서 가장 핵심적인 요소는 해수나 폐수내의 많은 양의 이온들을 제거할 수 있도록 하기 위해서 비표면적과 기공율이 큰 전극을 개발하는 것인데, 그 중 카본 에어로겔이 이들 특성을 만족시킬 수 있는 최적 재료로 평가되고 있다.

4. 결 론

이상에서 나노기공성 에어로겔의 기존 개발된 여러 합성방법, 대표적인 물성과 응용분야에 대해서 간단히 살펴보았다. 이와 같이 나노기공성 에어로겔은 그 성분과 제조과정에 따라 사용목적에 맞는 적절한 크기나 형상을 제작할 수 있어서 그 응용범위는 광범위하다 할 수 있다.

최근에 나노기공성 에어로겔에 대한 관심이 상당히 고조되고는 있으나 본격적인 실용화에는 제조 공정/원가상의 문제와 기계적 강도와 같은 물성면에서 해결해야 할 많은 문제점들을 갖고 있다. 일반적으로 기존의 에어로겔은 주로 졸-겔(sol-gel) 공정과 초임계 건조법으로 제조되는데 초임계 공정 자체가 매우 까다로운 뿐만 아니라 졸 용매의 임계점보다 높은 온도(250 °C 이상)와 압력(1500 psi 이상)을 요하기 때문에 생산원가가 높고 안전성을 고려한 정교하고 복잡한 공정을 요한다는 것이 최대 단점으로 지적되고 있다. 따라서 나노기공성 에어로겔의 실용화를 위해서는 보다 낮은 온도와 압력 하에서 또는 초임계건조가 아닌 상압건조 방법, 특히 현재 주로 사용되고 있는 고가의 금속 알콕사이드(metal alkoxide)계 출발물질 대신 보다 저렴한 출발물질을 이용한 상압건조법으로 에어로겔을 합성할 수 있는 신공정 개발이 필수적이라고 할 수 있다. 일례로서 선진국에서도 1990년도 초까지만 해도 초임계건조에 의한 에어로겔의 제조 원가가 너무 고가이어서 실용화가

거의 이루어지지 않았으나 지난 10년 동안 합성공정 개선 및 새로운 상압건조 공정 개발에 의해 제조 원가의 90 % 정도가 절감될 수 있었기 때문에 오늘에 이르러 본격적인 실용화 단계에 접어들고 있다고 볼 수 있다.

그러나 국내의 경우 나노기공성 에어로겔의 합성과 응용에 관한 연구는 극소수의 대학과 연구소에서 매우 한정된 분야에 관한 기초 연구에 국한되어 있어서 나노기공성 에어로겔 소재 기술에 관한 국내 기술 수준 및 축적 정도는 매우 미미한 실정이다. 반면에 선진국들은 이러한 최첨단 나노기공성 에어로겔 소재 개발에 관한 기술이전은 물론 소재 자체의 국외반출을 기피하고 있는 실정이어서 국내의 독자적인 에어로겔 관련 기술 개발 및 축적을 위한 과감한 연구 개발 투자가 이루어져야만 할 것이다.

참고 문헌

1. J. Fricke. "Aerogel-High Tenuous Solids with Fascinating Properties," *Non-Cryst. Solids*, **100**, 169 (1988).
2. J. Fricke and A. Emmerling, "Aerogels," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**(8), 2027 (1992).
3. S. S. Kistler. "Coherent Expanded Aerogels and Jellies," *Nature*, **127**, 741 (1931).
4. Idem, "Coherent Expanded Aerogels," *J. Phys. Chem.*, **34**, 52 (1932).
5. G. A. Nicolaon and S. J. Teichner, "Preparation of Silica Aerogels from Methylorthosilicate in an Alcoholic Medium and Their Properties," *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **5**, 1900 (1968).
6. M. Cantin, M. Casse, L. Koch, R. Jouan, P. Messtran, D. Roussel, P. Bonin, J. Moutel and S. J. Techner, "Silica Aerogels Used as Cerenkove Radiators," *Nucl. Instrum. Meth.*, **118**, 177 (1974).
7. S. Henning and L. Svensson, "Production of Silica Aerogel," *Phys. Scr.*, **23**, 697 (1981).
8. G. Poelz and R. Rirthmuller, "Preparation of Silica Aerogel for Cerenkov Counters," Rept. No. DESY 81-055. DESY, Hamburg, FRG, 1981.
9. P. H. Tewari, A. J. Hunt and K. D. Lofftus, "Advances in Production of Transparent Silica Aerogels for Window Glazings," p. 31 in *Aerogels*, ed J. Fricke, Springer Progress in Physics, **6** (Springer, Heidelberg, New York, 1986).

10. P. H. Tewari, A. J. Hunt, J. G. Lieber and K. Loffus, "Microstructural Properties of Transparent Silica Aerogels," *ibid.*, P. 142.
11. T. M. Tillotson and L. W. Hurbesh, "Transparent Ultra-density Silica Aerogels Prepared by a Two-step Sol-Gel process," *J. Non-Cryst. Solids*, **145**, 44 (1992).
12. R. W. Pekala, C. T. Alviso, and D. LeMay, "Organic Aerogels; a New Type of Ultrastructured Polymer"; presented at the 5th Ultrastructure Processing Conference, Orlando, FL, Feb., 1991.
13. D. S. Smith, R. Deshpande, and C. J. Brinker, "Preparation of Low-density Aerogels at Ambient Pressure for thermal Insulation," p. 71 in *Porous Materials: Ceramic Transactions*, **31**, Ed. K. Ishizaki, Westerville, Ohio, 1992.
14. S. S. Prakash, C. J. Brinker, A. J. Hurd and S. M. Rao, "Silica aerogel films at ambient pressure by using surface derivatization to induce reversible drying shrinkage," *Lett. to Nature*, **374**, 439 (1995).
15. J. Friche(Ed.), *Aerogels*, Springer Proceedings in Physics, Vol. 6, Springer Verlag, Heidelberg, FRG, 1986.
16. R. Vacher, J. Phalippou, J. Pelous and T. Woignier(Eds.), 2nd International Symposium on Aerogels, Montpellier, France, Sept. 1988: to be published in *Rev. Phys. Appliquee* 24, Coll. C4, Lws Editions de Physique, Les Ulis (1989).
17. R. A. Weeks(Ed.), 3rd International Symposium on Aerogels, Wurzburg, Germany, Sept./Oct. 1991: to be published in *J. Non-Cryst. Solids*, **145** (1992).
18. R. A. Weeks(Ed.), 3rd International Symposium on Aerogels, Berkeley, CA, USA, Sept. 1994: to be published in *J. Non-Cryst. Solids*, **186** (1995).
19. D. W. Maston and R. D. Smith, "Supercritical Fluid Technologies for Ceramic-Processing applications," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(6) 871 (1989).
20. A. J. Hunt, "Light Scattering Studies of Silica Aerogels," p. 549 in *Ultrastructure Processing of Ceramics, Glasses, and Composites*, eds. L. L. Hench and D. R. Ulrich, John Willey & Sons (1984).
21. R. A. Laudise and D. W. Johnson Jr., "Supercritical Drying of Gels," *ibid.*, **79**, 155 (1986).
22. D. J. Kim, "Synthesis of Silica Aerogels by the Isopropanol- Supercritical Drying Technique and Effects of Heat-treatment on Their Properties," D. E. Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea (1997).
23. K. C. Vrancken, K. Possemiers, P. Van Der Voort and E. F. Vansant, "Surface modification of silica gels with amino- organosilanes," *Colloids and Surfaces A ; Physicochemical and Engineering Aspects*, **98**, 235 (1995).
24. F. Schwertfeger, D. Frank and M. Schmidt, "Hydrophobic Waterglass based Aerogels without Solvent Exchange or Supercritical Drying," *J. Non-Cryst. Solids*, **225**, 24 (1998).
25. C. J. Kim, "Synthesis of Silica Aerogels from Waterglass by Ambient Drying," M. E. Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea (2001).
26. G. S. Kim, S. H. Hyun, and H. H. Park, "Synthesis of Low-Dielectric Silica Aerogel Films by Ambient Drying," *J. Am. Ceram. Soc.*, **84**[2], 453 (2001).
27. G. W. Scherer, "Freezed Gels," *J. Non-Cryst. Solids*, **155**, 1 (1993).
28. S. H. Hyun, T. Y. Kim, G. S. Kim and H. H. Park, "Synthesis of Low-k Porous Silica Films via Freeze Drying," *J. Mater. Sci. Lett.*, **19**, 1863 (2000).
29. J. Fricke, X. Lu, P. Wang, D. Buttner and U. Heinemann, "Optimization of Silica aerogel Insulant," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **35**, 2305 (1992).
30. J. Fricke, "Thermal Transport in Porous Superinsulations," see Ref. 9, 94.
31. D. Buttner, R. Caps, U. Heinemann, E. Hummer, and A. Kadur, "Thermal Conductivity of SiO₂-Aerogel Tiles," see Ref. 9, 104.
32. D. Buttner, E. Hummer, and J. Fricke, "Thermal Conductivity of granular SiO₂-Aerogel," see Ref. 9, 116.
33. R. Caps and J. Fricke, "Radiative Heat Transfer in Silica Aerogel," see Ref. 9, 110.
34. Novakov: Report on the Cite' Solaire, Adon Switzerland, 2nd Int. Wksp. Transparent Insulation, March 1988, Freiburg, Germany.
35. P. Tsou, "Silica Aerogel Capture Cosmic Dust Intact," *J. Non-Cryst. Solids*, **186**, 415 (1995).
36. J. Phalippou, T. Woignier, and J. Zarzychi, "Behavior of Monolithic Silica Aerogels at Temperatures above 1000 °C," p. 70 in *Ultrastructure Processing of Ceramics, Glasses, and Composites*, Ed. L. L. Hench and D. R. Ulrich, Gainesville, Florida, 1984.
37. L. W. Hrubesh, L. E. Keene, and V. R. Latorre, "Dielectric Properties of Aerogels," *J. Mat. Res.*, **8**, 7, 1736 (1993).
38. L. W. Hrubesh, "Silica Aerogel: An Intrinsically Low Dielectric Constant Material," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **381**, 267 (1995).
39. L. W. Hrubesh and J. F. Poco, "Thin Aerogel Films for Optical, Acoustic and Electrical Applications," *J. Non-Cryst. Solids*, **188**, 46 (1995).
40. M. Rubin and C. M. Lampert, *Solar Energy Materials*, **7**, 393 (1983).
41. J. Kuhn, H. P. Ebert, M. C. Arduini-schuster, D.

- Buttner and J. Fricke, "Thermal Transport in Polystyrene and Polyurethane Foam Insulations," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **35**(7) 1795 (1992).
42. E. Hummer, Th. Rettelbach, X. Lu, and J. Fricke, "Opacified Aerogel Powder Insulations," Presented at 11th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, CO, June 1991.
43. X. Lu, P. Wang, M. C. Arduini-schuster, J. Kuhn, D. Buttner, O. Nilsson, U. Heinemann and J. Fricke, "Thermal Transport in Monolith Organic and Opacified Inorganic Aerogels," *J. Non-Cryst. Solids*, **145**, 207 (1992).
44. X. Lu, P. Wang, D. Buttner, U. Heinemann, O. Nilsson, J. Kuhn, and J. Fricke, "Thermal Transport in Opacified Monolithic Silica Aerogels": Present at the XII European Conference on Thermophysical Properties, Vienna, Austria, Sept., 24, 1990.
45. J. Fricke, "Aerogels," *Scientific American*, May, 92 (1988).
46. R. Gerlach, O. Krauss, and J. Fricke, in *Ultrasonic International '91 Conference Proc.*, Butterworth Heinemann, Oxford, p. 323 (1991).
47. L. Lagamba, E. Cisbani, S. Colilli, R. Crateri, R. De Leo, S. Frullani, F. Garibaldi, F. Giuliani, M. Gricia and M. Iodice, "Silica Aerogel Threshold Cherenkov Counters for the JLab Hall A Spectrometers: Improvements and Proposed Modifications," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **471**, 325 (2001).
48. D. Barancourt, F. Barao, G. Barbier, G. Barreira, M. Bucnerd, G. Castellini, E. Choumilov, J. Favier, N. Fouque and A. Gougas, "The AMS-01 Aerogel Threshold Cherenkov counter," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **465**, 306 (2001).
49. J. Zarzycki, M. Prassas and J. Phalippou, "Synthesis of Glasses from Gels: Problem of Monolithic Gels," *J. Mater. Sci.*, **17**, 3371 (1982).
50. D. J. Suh, T. J. Park, S. H. Lee and K. L. Kim, "Nickel-Alumina Composite Aerogels as Liquid-Phase Hydrogenation Catalysts," *J. Non-Cryst. Solids*, **285**, 309 (2001).
51. M. Signoreto, L. Oliva, F. Pinna and G. Strukul, "Synthesis of Sulfated-Zirconia Aerogel: Effect of the Chemical Modification of Precursor on Catalyst Porosity," *J. Non-Cryst. Solids*, **290**, 145 (2001).
52. H. Bozorgzadeh, E. Kemnitz, M. Nickkho-Amiry, T. Skapin and J. M. Winfield, "Catalytic Reactions of Chlorofluoroethanes at Fluorinated Alumina and Chromia Aerogels and Xerogels; A Comparison of Reaction Pathways in Alumina and Chromia based catalysts," *Journal of Fluorine Chemistry*, **110**, 181 (2001).
53. C. Schmitt, H. Probstle and J. Fricke, "Carbon Cloth-Reinforced and Activated Aerogel Films for Supercapacitors," *J. Non-Cryst. Solids*, **285**, 277 (2001).
54. Elzbieta Frackowiak and Francois Beguin, "Carbon Materials for the Electrochemical Storage of Energy in Capacitors," *Carbon*, **39**, 937 (2001).
55. R. W. Pekala, J. C. Farmer, C. T. Alviso, T. D. Tran, S. T. Mayer, J. M. Miller and B. Dunn, "Carbon Aerogels for Electrochemical Applications," *J. Non-Cryst. Solids*, **225**, 74 (1998).
56. J. C. Farmer, D. V. Fix, G. V. Mack, R. W. Pekala and J. F. Poco, "Capacitive Deionization of NaCl and NaNO₃ Solutions with Carbon Aerogel Electrodes," *J. Electrochem. Soc.*, **143**(1), 159 (1996).



김건수

- 1994-1998년 연세대학교 세라믹공학과 학사
- 1998-현재 연세대학교 세라믹공학과 석박사 통합과정



현상훈

- 1966-1970년 연세대학교 화학공학과 학사
- 1970-1972년 연세대학교 화학공학과 석사
- 1975-1977년 연세대학교 세라믹공학과 박사과정 수료
- 1977-1980년 미국 Pennsylvania State University 화학공학과 M. S.
- 1980-1982년 미국 Pennsylvania State University 화학공학과 Ph. D.
- 1991-1992년 미국 University of Wisconsin-Madison, Visiting Scholar
- 1983-현재 연세대학교 세라믹공학과 교수
- 1994-1994년 일본 Yokohama National University, Visiting Scholar
- 1998년 미국 Sandia National Laboratory, Visiting Scholar
- 2000-현재 연세대학교 재료공학부, 부장
- 2001-현재 연세대학교 첨단재료연구소 소장