



열 차단 소재와 실리카 에어로젤 개요

홍진호·김 일*·윤주호**·심상은†

인하대학교 화학공학과, *부산대학교 고분자공학과, **자동차부품연구원
접수일(2011년 1월 12일), 수정일(2011년 1월 20일), 게재확정일(2011년 1월 26일)

Introduction to Thermal Insulating Materials and Silica Aerogels

Jinho Hong, Il Kim*, Ju Ho Yun**, and Sang Eun Shim†

Department of Chemical Engineering, Inha University
253 Yonghyundong, Namgu, Incheon, S. Korea 402-751

*The WCU Center for Synthetic Polymer Bioconjugate Hybrid Materials, Department of
Polymer Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735 Korea

**Environmental Materials & Components R&D Center,

Korea Automotive Technology Institute, Chungnam 330-912 Korea

(Received January 12, 2011, Revised January 20, 2011, Accepted January 26, 2011)

요약 : 단열재(thermal insulating materials)는 외부의 온도에 저항하여 내부의 열 손실이나 외부로의 열 방출을 최소화 하기 위한 재료로 열의 전도, 복사, 대류 현상을 최소화 하여 기계의 효율을 높일 수 있는 재료를 말한다. 이러한 단열재는 건축 산업을 비롯하여 자동차, 우주 항공 및 석유화학 등 수 많은 분야에 다양하게 사용되고 있다. 특히 실리카 에어로젤은 어떤 고체보다 낮은 열전도율로 인해 열차단제로 많이 사용되어 왔다. 하지만 낮은 기계적 강도로 인해 기존의 소재를 대체하는데 있어 문제점이 있다. 본고에서는 단열재에 대해 소개하고 최근 각광을 받고 있는 열 차단소재로의 실리카 에어로젤에 대해 다룬다.

ABSTRACT : The term 'thermal insulating materials' describes a class of materials which can improve the thermal efficiency by reducing the thermal conduction, convection and radiation between the inside and outside of the system. As a thermal insulating material, numerous industrial applications are possible including the automobile, aerospace, aviation, and petrochemical. Especially, the silica aerogel, with their superior thermal insulating behavior, has been widely used as thermal insulating materials. Because the mechanical properties of the silica aerogel cannot meet the industrial demand, use of the silica aerogel is limited. This article aims to review the thermal insulating materials and silica aerogel, and to introduce the silica aerogel/polymer composites.

Keywords : thermal insulating materials, silica aerogel, thermal insulation, polymer composite.

I. 서 론

단열재는 일정한 온도가 유지되도록 하려는 부분의 외부 열전도도를 최소화 하여 내부의 열을 유지하는 재료로, 열을 나타내는 파동으로부터 차단성을 나타내는 재료이다. 사용 온도에 따라 100 °C 이하의 보냉재, 100-500 °C의 보온재, 500-1,100 °C의 단열재, 1,100 °C 이상의 내화 단열재로 나뉘는데 열전도율을 작게 하기 위해 다공질로 만드는 것이 일반적이다.

단열재는 소재 자체의 열전도율이 작은 것이 바람직하나, 대부분 열전도율이 그다지 작지 않다. 그러므로 대개의 경우

열전도율을 작게 하기 위해서 다공질이 되도록 만들어 기공 속의 공기의 단열성을 이용한다.

소재는 유기질과 무기질로 크게 나뉘며 유기질에는 코르크, 면, 펄트, 탄화코르크, 거품고무 등이 있으며, 약 150 °C 이하에서 사용하는데 적합하다. 무기질에는 석면, 유리솜, 석영솜, 규조토, 탄산마그네슘 분말, 마그네시아 분말, 규산칼슘, 펄라이트 등이 사용되며, 대부분 고온에서의 사용에 결될 수 있다. 이것들은 각기 소재의 연화 분해 온도가 사용 한계이다.

또 -200 °C 정도의 초 보냉재 등은 알루미늄박과 유리솜을 번갈아 포개고, 플라스틱으로 포장해서 속의 공기를 뺀 것도 개발되고 있다. 한편 1,000 °C 이상에서 사용되는 단열재의 대부분은 내화물을 다공질 모양으로 경합시켜 만들 내화 벽돌이 사용된다. 이 경우 열전도율 외에 열 팽창률이나 수축률 등이

† 대표저자 E-mail: seshim@inha.ac.kr

요구된다. 단열재는 노의 외벽, 반응탑, 기름의 저장탱크, 스팀도관이나 수도관의 외벽, 냉장고, 우주항공 산업에 많이 사용되는데 특히 우주항공산업용 단열재는 최첨단 기술이 필요하며 사용온도 범위 또한 큰 것이 특징이다.

국내에서는 단열을 위해 스티로폼, 우레탄폼, 유리면, 암면, 등이 주로 사용되고 있다. 이러한 단열재는 크게 무기질 단열재와 화학 합성 유기질 단열재로 구분되며 주로 많이 사용되는 것은 화학 합성 유기질 단열재 중 발포 폴리스티렌(스티로폼)과 발포 폴리우레탄이 있고 무기질 단열재 중에는 암면과 유리면 등을 들 수 있다. 그 외에 석면이나 우레아포름알데하이드 등이 사용되기도 하였으나 발암 성분 등 인체에 유해하여 현재는 사용이 금지되고 있거나 제한되고 있다. 국내의 단열재 시장은 유기질 단열재(스티로폼 55%, 압축 보드 6%, 폴리우레탄29%)가 71%를 차지하고 있으며 무기질 단열재(유리면, 암면)는 29% 정도의 시장 점유율을 나타내고 있다. 그러나 일반적으로 현재 사용되고 있는 단열재들은 비교적 단열 성능이 우수하고 화학적으로 비교적 안정되어 있고 물리적 강도나 흡수성, 시공성 등에서 성능이 우수하여 오랫동안 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 기존 단열재들은 환경 친화적 측면에서 다음과 같은 몇 가지 커다란 문제점을 가지고 있다. 첫째, 기존 단열재들은 귀중한 자원을 사용함으로써 자원 고갈 및 생태 파괴의 원인이 된다. 무기질 단열재는 광석을 채취하여 생산하므로 자원을 훼손할 수 있으며 화학 합성 단열재는 귀중한 석유 자원을 사용하고 있다. 둘째, 기존 단열재는 생산을 위해 막대한 에너지가 소비된다. 즉 제조 과정에서 용해 및 압축에 많은 에너지가 사용됨으로써 재료 자체에 내재 에너지가 이미 다량 함유되어 있다. 셋째, 기존 단열재는 건물의 해체 시 재활용되지 못하고 전부 폐기물로서 매립됨으로써 환경 오염의 원인이 된다. 넷째, 기존 단열재 중에서 가장 보편적인 화학 합성 단열재는 실내 오염의 원인이 되고 동시에 화재 시 유독 화학 가스를 발산하여 치명적 요인이 될 수 있다.

단열재는 원료의 종류, 형태 및 사용 용도에 따라 구분할 수는 있으나 일반적으로 재질에 따른 분류가 가장 많이 쓰인다.

II 본 론

단열재는 크게 무기질 단열재와 유기질 단열재로 나뉘며 단열재는 높은 강도를 가지면 서도 낮은 열전도도와 낮은 밀도를 가져야 하며 시공이 용이하며 사용 온도 범위가 커야 한다. 또한 장기간 사용시 물리적, 화학적으로 안정해야 제품의 신뢰성을 가질 수 있으며 흡수성이 적고 불연성일수록 좋은 단열재이다. 이외에도 산업적으로 사용하기 위해서는 값이 싸야 하고 유독성이 없어야 하며 내식성을 가지고 있어야 한다. 하지만, 이들 항목들을 모두 동시에 만족하는 단열재는 현재로서는 없으며 그 용도에 따라서 단열재의 특성을 검토하여 상기 항목을 가능한 한 많이 포함하는 재료를 선택하면

된다. 단열재의 가장 기본적인 요구 조건은 밀도, 열전도율, 기계적 강도, 연소성, 흡수율 등을 들 수 있다.

기존 국산 단열재의 상온에서의 열전도도는 다음의 순으로 높아진다.

경질우레탄 < 요소발포계, 페놀발포계 < 발포폴리스티렌 < 셀룰로즈, 발포폴리에틸렌 < 유리면 < 암면 < 규산칼슘 < 퍼라이트 < 질석 < 석면 < 화산력

대체로 유기질 단열재의 열전도도가 무기질 단열재의 열전도도 보다 낮으며 이 순서는 일반적으로 경향만을 보인 것으로 열전도율을 검토할 때 주의해야 할 점을 몇 가지 열거하면 다음과 같다. ① 열전도율은 사용 온도에 따라서 변화하는데 단열재의 열전도율은 일반적으로 온도의 상승에 따라서 증가하므로 단열재의 열전도율은 반드시 사용 온도에서 비교되어야 한다. ② 열전도율은 단열재의 밀도와 관계가 있다. ③ 열전도율은 흡습량에 따라 달라진다.

단열재는 유기소재나 무기소재에 공기층을 형성시켜 공기층의 단열효과를 최대한으로 이용하는 것이다. 그러나 공기층의 부피가 커질수록 밀도와 강도가 감소하고 내열성과 내후성이 악화된다. 밀도의 증가는 재료 투입량의 증가를 의미하며 이는 가격의 상승을 초래한다. 열전도율과 밀도는 서로 상관 관계를 가지고 있다. 단열재의 밀도가 크면 열전도율이 크고 밀도가 작으면 열전도율도 작은 것이 일반적이다. 또한 필요한 밀도와 열전도율을 앞으로서 이것을 만족하는 단열재도 찾을 수 있다.

국산 단열재를 밀도가 작은 순서대로 나열하면 다음과 같다.

요소발포계 < 발포폴리스티렌, 페놀발포계, 발포폴리에틸렌, 경질우레탄, 유리면, 셀룰로오즈보온재 < 암면 < 질석 <

Table 1. Service Temperature Range of Commercial Insulating Materials¹

발포폴리스티렌	————
경질 우레탄폼	————
페놀 발포재	————
유 리 면	————
암 면	————
석 면	————
퍼 라 이 트	————
규산칼슘 (Tobermolite)	————
규산칼슘 (Xonotlite)	————
질 석	————
세라믹 화이버	————
세라믹 화이버(고온용)	————
셀룰로오즈	————
폴리에틸렌	————
요소발포계	————
신 단 열 재	————

-2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

온도 (×100℃)

규산칼슘, 펄라이트 < 석면 < 화산력

단열재의 성능을 표시하는 강도로는 굽힘 강도와 압축 강도가 있다. 굽힘 강도는 단열재를 구부려 뜨리려는 힘에 어느 정도 견딜 수 있는가를 표시하는 것으로서 압력값(kg/cm²)으로 나타내며 압축 강도는 단열재가 판에 수직으로 가하는 힘에 얼마나 견딜 수 있는지를 표시하는 것으로서 역시 압력값(kg/cm²)으로 나타낸다. 일반적으로 강도는 밀도와 큰 상관관계를 가지고 있다. 밀도가 클수록 강도도 증가되는 경향을 보여 준다. 유기질 보온재를 굽힘 강도가 큰 순서대로 나열하면 다음과 같다.

경질우레탄 > 페놀발포계 > 요소발포계 및 폴리에틸렌, 발포폴리스틸렌

일반적으로 사용되는 단열재의 일반적인 사용 온도 범위를 Table 1에 나타내었다.¹

1. 무기질 단열재

무기질 단열재는 유리질, 광물질, 금속질, 탄소질 등으로 나눌 수 있다. 무기질 단열재의 일반적인 장단점은 열에 강하고 접합부 시공성이 우수하나 흡습성이 크고 암면, 유리면 등은 성형된 상태에서의 기계적인 성질이 우수하지 못해 벽체에는 시공하기가 힘들다는 것이다.

1.1 유리면

유리면은 현재 불규칙적으로 조합된 섬유 사이의 고정 공기를 이용한 경량이며 흡습성이 있는 재료로 널리 사용된다. 유리 원료인 규사를 고온 용융 고속 회전력을 이용하여 섬유화하고 일정한 형태로 성형한 인조 광물 섬유로 미세한 섬유가 연속 기공을 형성하고 있어, 보온, 단열 및 흡음재로 사용되고 있다. 18세기 프랑스의 Reaumer가 유리를 섬유상의 형태로 가동하여 천을 만들 수 있다고 주장하여 생산 시험을 하였다는 기록이 있으며, 1983년에는 Empress Enginie이 세인트루이스 세계 박람회에서도 유리 섬유로 짠 옷을 입었다는 기록이 있다. 1차 세계대전 초기 연합군에 의해 캐나다 산 석면의 수입을 봉쇄당한 독일이 석면을 대체할 수 있는 불연성 단열재로 유리면을 개발하기 시작했고, 1930년 미국의 Owens-Corning사에서 최초로 상품화 했으며 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서 보온 단열재, 흡음재로 널리 사용되고 있다. 우리나라는 1960년대 후반부터 국내에서 생산, 공급하기 시작했다. 유리면은 규사 등의 원료를 1500 °C의 고온에서 용융하고 고속 원심 회전 공법으로 섬유화시킨 후 binder를 사용하여 매트 또는 보드 형태로 성형한다.

1.2 암면

암면은 암석으로부터 인공적으로 만들어 진 내열성이 높은 광물 섬유를 이용하여 만든 제품으로 미네랄울이라고 한다.

불연성, 경량성, 단열, 흡음성, 내구성의 특징을 갖춰 건축설비, 플랜트 설비의 단열재 및 내화재료로서 널리 사용되고 있다. 미네랄울은 1897년 미국에서 석회암질의 절판암을 원료로 제조한 것이 시초가 되었으며, 미국의 Qkfaud에 뒤이어 1938년 일본에서 공업화되기 시작했다.

1.3 세라믹 파이버

1,000 °C 이상의 고온에도 견디는 섬유로 본래는 공업용 가열로의 내화 단열재로 많이 사용되었으나 최근 건축용, 특히 철골의 내화 피복재로 많이 사용되고 있다.

1.4 펄라이트판

천연 암석을 원료로 한, 일종의 천연 유리질의 펄라이트 입자를 무기 바인더로 하여 프레스 성형하여 제조한다. 질석(버미펄라이트)과 진주암(펄라이트)은 진주암, 질석 등의 원료를 높은 온도로 가열하여 팽창시킨 것으로 무게가 매우 가볍고 다공의 결정체이다. 흡차음과 불연성이 매우 뛰어나 건축용으로 사용되고 보비력, 보수력, 통기성, 배수성이 우수하다. 펄라이트는 화산의 활동 시 급냉된 진주암 계통의 원석으로 이를 분쇄하여 800 °C 이상의 고온으로 급열을 가하면 당초 부피의 20배 이상으로 팽창한다. 팽창된 펄라이트는 작은 공극을 가지고 있으며 이 공극을 이용해 단열, 보온, 보냉제, 토양개량제, 여과제로 사용된다.

1.5 규산 칼슘판

규산질 분말과 서피 분말을 오토클레이브중에서 반응시켜 얻은 겔에 보강섬유를 첨가하여 프레스 성형하여 제조한다. 내열성과 기계 강도가 뛰어나 철골 내화 피복재로 주로 이용되고 있으며, 결정의 종류에 따라 최고 사용 온도가 650 - 1,000 °C 까지 가능하다.

Table 2. Precursors, Solvents, and Catalysts Used in Sol-gel Reaction³

전구체	용 매	촉 매	첨가물
TMOS	EtOH/water	HCl	
MTMS	MeOH/water	Oxalic acid, NH ₄ OH	
PEDS	Ethyl acetate	HF	
PEDS	EtOH/water	HF	
PFAS/PEDS	EtOH/water	HF	
MTEs	CH ₂ Cl ₂ /water	TFA	
TMOS	Ionic liquid	HCO ₂ H	
TMOS	Aceton/water	HCO ₂ H	
TMOS	MeOH/water	CH ₃ CO ₂ H/NH ₄ OH	
TMOS	EtOH/water	HNO ₃ /H ₂ SO ₄ /oxalic acid	
TMOS	MeOH/water	NH ₄ OH/HCl	
TMOS	EtOH/water	NH ₄ OH/HCl	
TEOS	EtOH/water	HCl	PEG

2. 유기질 단열재

유기질 단열재는 화학적으로 합성한 물질을 이용하여 단열재로 사용하는 것으로 흔히 '스티로폼'으로 불리는 발포 폴리스타이렌, 발포 폴리우레탄, 발포 염화비닐, 기타 플라스틱 단열재 등이 있다. 유기질 단열재는 흡습성이 적고 시공성이 우수하지만 열에 약한 것이 가장 큰 단점이다. 그러므로 독자적으로 사용되지는 못하고 다른 재료와 복합적으로 사용이 된다.

2.1 셀룰로즈 섬유판

천연의 목질 섬유 등을 원료로 하고 내구성, 발수성, 방수성 등을 부여하기 위해 약품 처리를 하여 제조한다.

2.2 연질 섬유판

원료는 식물 섬유이나 A급(목재편)과 C급(면조각, 벗집, 펄프 등)으로 나뉜다. 이것들에 높은 열을 가한 다음, 내수제를 첨가하여 성형한다.

2.3 폴리스타이렌 폼

발포 플라스틱 중에서 가장 대표적인 것의 하나이며 제조 방법에 따라서 연속 압출 발포 폼과 비스를 용착 성형시킨 2차 발포 폼으로 나뉜다.

2.4 경질 우레탄 폼

발포제에 프레온 가스를 사용하여 열전도율이 낮으며 내약 품성, 방수성, 내투습성이 뛰어나 방습층을 겸한 단열재로 사용된다.

3. 실리카 에어로젤

실리카 에어로젤은 높은 표면적 ($500 - 1,200 \text{ m}^2/\text{cm}^3$)을 가지고 많은 나노 기공을 가지고 있으며 (88 - 99.8%) 낮은 밀도 ($\sim 0.003 \text{ g}/\text{cm}^3$), 높은 열 차단성 ($0.005 \text{ W}/\text{mK}$) 등의 독특한 성질을 지닌 인류가 합성한 가장 가벼운 물질이다.²

실리카 에어로젤은 1930년대 처음 만들어졌으나 그 이후 연구는 거의 없었다. 이후 졸-겔 법의 유행에 힘입어 Claud Bernard 대학의 Teichner는 로켓 연료의 저장을 위해 실리카 에어로젤을 생산하였다. 상업적 이용을 위해 단열 창문을 만들거나 방음제, 고축전기용 등의 사용이 제안되어 왔으나 실제 적용된 사례는 많지 않다. 하지만 단일구조로 된 실리카 에어로젤의 경우 고에너지원자핵물리학에서 Cherenkov radiation을 탐지하는데 사용되었으며 고에너지를 사용하는 다양한 물리학 분야에서 사용이 되었다.

지난 20년 동안 실리카 에어로젤의 합성은 많은 관심을 받았는데 그중 일부는 다양한 전구체를 사용하여 실리카 에어로젤을 합성하는데 초점이 맞춰져 있으며 나머지는 합성에 영향

을 미치는 변수의 조절에 초점이 맞춰져 있다. 최근 많은 연구자들의 관심은 상업에서 건조하는 과정에 연구 초점이 맞춰져 있는데 이는 실리카 에어로젤을 상업적으로 생산하는데 있어 매우 중요한 과정이다. 이러한 상업 건조 과정은 저렴한 물유리를 출발원료로 하지만 최근까지도 실리카 에어로젤의 상업 건조 공정을 수일이 소요되는 장시간의 공정이며 사용되는 소비성 원료 및 시약의 영향으로 고비용 공정으로 각인되어 상용화에 어려움을 겪고 있다.

이러한 첨단 소재를 이용하여 에너지절약이 필요한 시대 상황에 맞는 단열재를 개발하고자 하는 노력은 지금도 계속되고 있다. 미국에서는 NASA 등을 중심으로 에어로젤을 이용한 우주항공산업용 소재로 개발하여 왔다. 하지만 에어로젤은 나노다공성 기공으로 인하여 기계적으로 취약한 특성을 가지고 있다.

3.1 실리카 에어로젤의 합성

실리카 에어로젤의 합성은 일반적으로 크게 3단계로 분류된다.

3.1.1 겔 준비과정

실리카 겔은 졸-겔 법을 통해 합성하며 졸은 실리카를 주원료(일반적으로 alkoxysilane)로 한 용액에 촉매(일반적으로 산 촉매)를 가하여 gelation 과정을 거친다. 이렇게 제조된 겔은 분산 용매에 따라 분류 되는데 물의 경우 aquagel, 알코올의 경우 alcogel, 공기의 경우 aerogel로 불린다.³

3.1.2 Aging 과정

첫 번째 공정에서 제조된 실리카 겔은 mother solution이라 불리는 alkoxysilane과 용매의 혼합물에 침지하여 aging과정을 거친다. aging과정을 거치게 되면 겔의 강도를 높게 하고 건조 과정 동안 일어나는 체적 감소를 줄일 수 있다.

3.1.3 건조과정

건조과정은 겔이 기공 속에 있는 액체로부터 자유로워지는 과정이다. 겔 구조가 붕괴되는 것을 막기 위해 건조과정은 특정 조건하에서 이루어지는 것이 일반적이다(Figure 1). 이러한 건조 과정 중에 spring-back이라는 현상이 일어나는데 이는 건조 중에 증발되는 용매로 인한 모세관 현상으로 인해 체적이 줄어들었다가 용매가 실리카 구조 안에서 독립된 droplet을 형성하게 되면 이웃한 silyl group간의 화학적 반발력으로 인해 다시 체적이 커지는 현상이다 (Figure 2). 에어로젤의 생산 과정은 위의 3가지 방법을 모두 포함하고 있으며 최종 생산물의 구조나 특성에 따라 추가적인 공정이 포함된다.

3.2 실리카 에어로젤의 성질

실리카 에어로젤은 다른 고체에서는 볼 수 없는 매우 특이

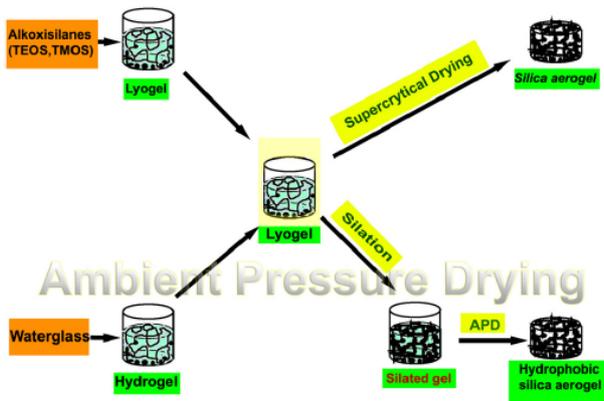


Figure 1. Drying process of silica aerogel.⁴

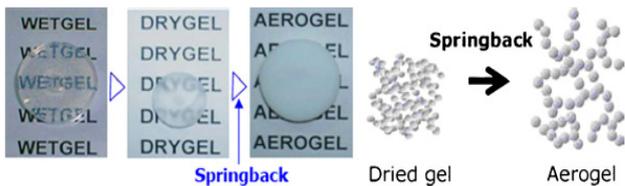


Figure 2. Springback phenomenon happening at the drying process of silica aerogel.⁴

Table 3. General Properties of Silica Aerogel⁴

성질	비고
밀도	0.003-0.35 g/cm ³ 가장 일반적 밀도 0.1 g/cm ³
표면적	600-1000m ² /g
고체 %	0.13-15% 약 5% (95% 공극)
기공크기	약 20nm BET측정
입자크기	2-5nm electron microscopy 측정
reflective index	1.0-1.08
열팽창 계수	2.0-4.0×10 ⁻⁶ ultrasonic 방법으로 측정
dielectric constant	~1.1 밀도 0.1g/cm ³ 의 경우
음전파속도	100m/s 밀도 0.07g/cm ³ 의 경우

한 성질을 가지고 있다. 이러한 실리카 에어로젤의 일반적인 성질을 Table 3에 나타내었다.

3.2.1 기공구조

IUPAC의 기공 크기에 따른 분류에 따르면 2 nm 이하의 기공 사이지를 가질 경우 'micropores', 2-50 nm 사이의 기공사이즈일 경우 'mesopores', 50 nm이상의 기공 사이지를 가질 경우 'macropores'로 규정하고 있다. 실리카 에어로젤은 이 세가지 모두의 기공사이즈를 가지고 있으나 대부분 mesopores한 기공 사이지를 가지고 약간의 micropores를 가지고 있는 것이 일반적이다. 실리카 에어로젤 기공의 중요한 특징은 기공 사이가 연결되어 있다는 것인데 이로 인해 유체가 제한적으로 에어로젤을 통과해 흐를 수 있다. 이러한 기공 구조를 이용하여 필터

로 사용되거나 건조과정의 흡착제, 폐기물 운반체로 사용되기도 한다.

3.2.2 밀도

실리카 에어로젤의 밀도측정에는 체적밀도와 골격밀도 두 가지 밀도가 사용된다. 체적밀도는 에어로젤의 부피에 대한 질량의 비로 일반적으로 알고 있는 밀도이다.

에어로젤의 구체 부분은 매우 미세한 실리카 입자들의 집합으로 이 입자들의 골격 밀도는 체적 밀도와 매우 가깝다고 추정한다.

3.2.3 광학적질

많은 연구에서 실리카 에어로젤은 투광성을 나타내는 것이 입증 되었다. 이것은 기공을 가지고 있는 재료에서 볼 수 없는 매우 특이한 성질로 에어로젤의 micro구조가 빛의 파장보다 작아서 일어나는 현상이다. 가시광선의 경우 아주 약간만이 산란 현상을 일으키는데 산란된 빛의 대부분은 방성 산란을 일으키나 약간은 비등방성 산란을 일으킨다.

3.2.4 열전도도

에어로젤이 가지는 수많은 나노기공에 의해 실리카 에어로젤은 공기보다 낮은 매우 뛰어난 단열성을 보인다. 대기압 하 공기 중에서 열전도도가 0.02 W/mK에 달하며 공기가 없을 경우 0.01 W/mK에 달한다. 실리카 에어로젤의 경우 1-10%에 달하는 매우 적은양의 낮은 전도율을 가지는 고체 실리카를 포함하고 있어 낮은 열에너지전달 수치를 보이는 것으로도 알려져 있다. 기체의 경우에 실리카 에어로젤을 통과 할 수 있기 때문에 기체가 실리카 에어로젤을 통과하면서 열을 전달하는 것이 가능하다. 에어로젤을 통한 열전달의 중요한 것은 적외선을 통한 열전달이다. 이러한 열전달은 실리카 에어로젤의 두께에 민감한 영향을 받는데 낮은 온도에서는 복사에 의한 열전달은 낮은 것으로 알려져 있다.

3.2.5 물과의 친화력

실리카 에어로젤은 합성 방법을 따라 친수성이 되거나 소수성이 될 수 있다. 실리카 에어로젤의 기본 골격이 되는 Si-OH의 silanol 극성 부분은 수분을 흡수하는데 좋은 성질을 가지고 있다. 일반적으로 alkylorthosilicate의 축합반응으로 얻어진 에어로젤을 높은 온도에서 초임계 건조 과정을 거치게 되면 소수성을 가지게 되나 CO₂로 건조를 하게 되면 친수성 성질을 가진다. 이러한 차이점은 초임계 건조과정중에 다른 기능이 생성되기 때문인데 낮은 온도에서 초임계건조과정을 거치게 되면 -OH 기능이 생성되어 친수성을 가지는데 반해 높은 온도에서의 초임계 건조는 표면의 -OH 기기능기가 용매와 반응하여 methoxy (-OCH₃)_x 기능을 가지게 되어 소수성을 가지게 된다 (Figure 3).

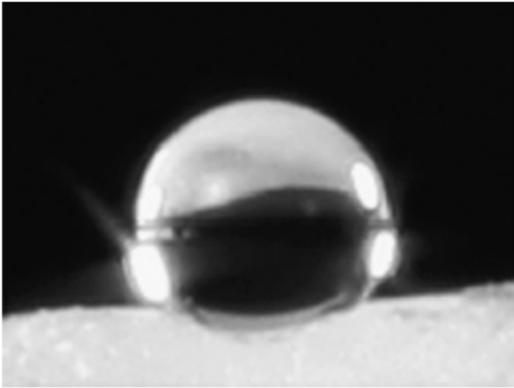


Figure 3. Water droplet on hydrophobic silica aerogel.⁴

4. 실리카 에어로젤/고분자 복합재료

실리카 에어로젤은 어떤 고체보다 낮은 열전도율과 dielectric constant, 낮은 밀도, 높은 표면적으로 인해 열차단제로 많은 사용이 되어왔다. 하지만 이러한 뛰어난 단열 성능에도 불구하고 실리카 에어로젤은 그 자체만으로 사용이 되어 왔으며 기공이 차지하는 부분이 많은 이유로 인해 기계적 강도가 떨어져 지금까지 사용되었던 단열재료는 사용이 불가능 하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고분자와의 복합재료 개념을 1998년 M. Schmidt 연구팀이 제안하였으나 아직도 그 발전은 미미한 상황이다.⁴ 대용량의 에어로젤 상업화가 종종 보고되고는 있지만 높은 가격과 제한적인 사용방법에 의해 성공한 사례는 없는 것으로 알려져 있다.

최근에는 실리카 에어로젤 외에 알루미늄, 카본 에어로젤의 생산이 가능하며 aerogel/epoxy 복합재료의 가능성을 열고 있다. 이외에도 에어로젤을 사용한 바이어센서, 가볍고 낮은 dielectric constant를 보이는 재료의 개발이 많이 이루어지고 있다. 특히 aerogel/epoxy 복합재료의 경우 열적, 전기적, dielectric 성질을 조절하면서 가볍고 기계적 성질 또한 원하는 사양에 맞게 맞추는 것에 초점을 두고 있다. Clay aerogel/polymer 복합재료 또한 몇몇 연구가들에 의해 연구되고는 있지만 이러한 연구는 아직 aerogel 복합재료의 개념을 이해하는데 부족한 상황이다.

열 차단제로의 실리카 에어로젤/고분자 복합재료의 개념은 1998년도 M. Schmidt에 의해 제안 되었다.⁵ 실리카 에어로젤은 그 자체만으로 insulator, chemistry, kinetic energy absorber, electronics, pharmacy, agriculture 등에 사용이 가능하나 이 외에도 filler로서의 사용이 가능한 것으로 알려져 있다. 1998년 M. Schmidt 연구팀은 실리카 에어로젤을 처음 필러로 사용하여 낮은 열전도율을 가지는 polyvinylbutyral (PVB) (0.120 W/mK) 입자와 섞은 후 고온 프레스 작업을 하여 실리카 에어로젤/고분자 복합재료를 제조하였다. 실리카 에어로젤의 함량에 따른

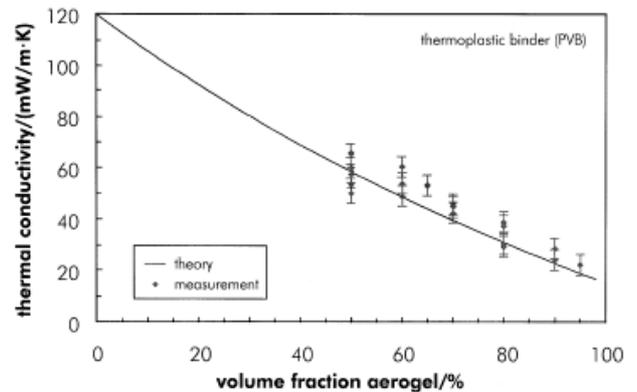


Figure 4. The effect of the amount of silica aerogel on the thermal conductivity of aerogel/PVB composites.⁵

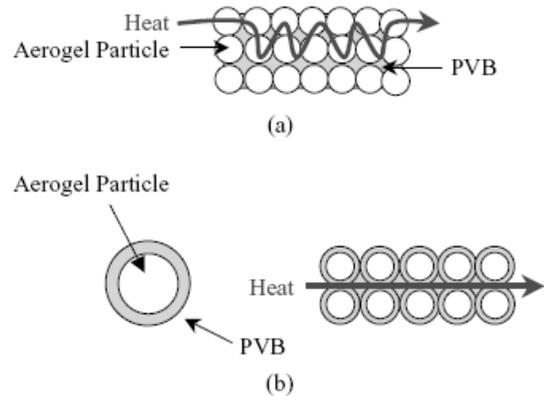


Figure 5. Heat transportation path upon the mixing method: (a) dry mixing and (b) wet mixing.⁶

열전도도 변화를 (Figure 4)에 나타내었다.

그림에서 보듯이 실리카 에어로젤의 함량에 따라 열전도도가 낮아지고는 있지만 에어로젤의 함량이 증가할수록 복합재료가 안정되지 못하는 단점을 보였는데 이는 후에 약간의 섬유형 필러나 박막형 필러를 첨가함으로써 열전도도의 증가 없이 이러한 문제를 극복할 수 있다는 해결책을 열어두었다.

이후 2003년도에 연세대학교에서 세 가지 다른 방법(wet, dry, dual mixing)으로 PVB와 실리카 에어로젤 입자를 섞어 실리카 에어로젤/PVB 복합재료를 제조하여 열적, 기계적 성질을 연구하였다.⁵ 그 결과 복합재료의 기계적 성질은 에어로젤의 함량 증가에 따라 급격하게 낮아지는 양상을 보였으며 열전도도의 경우 dry mixing을 한 경우에 더 낮았다. 이 이유는 dry mixing을 할 경우 실리카 입자들 간의 close packing이 되어 실리카 에어로젤을 통한 열전도가 일어나지만 wet mixing을 하게 될 경우는 PVB를 통한 열전도가 일어나기 때문이다 (Figure 5).

이후 2008년과 2009년 각각 다른 몇몇 연구팀에서 실리카 에어로젤/epoxy 복합재료에 관한 연구를 하였다. 2008년 Gupta

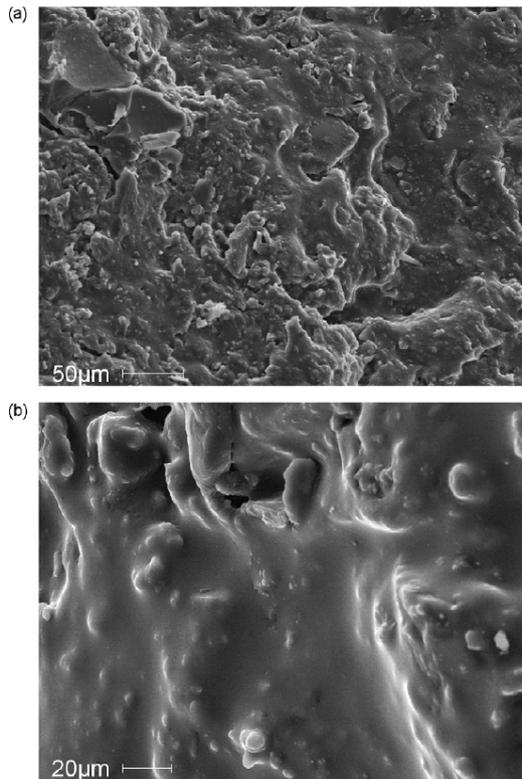


Figure 6. SEM morphology of silica aerogel/epoxy composite (a) at low magnification, and (b) at low magnification.⁷

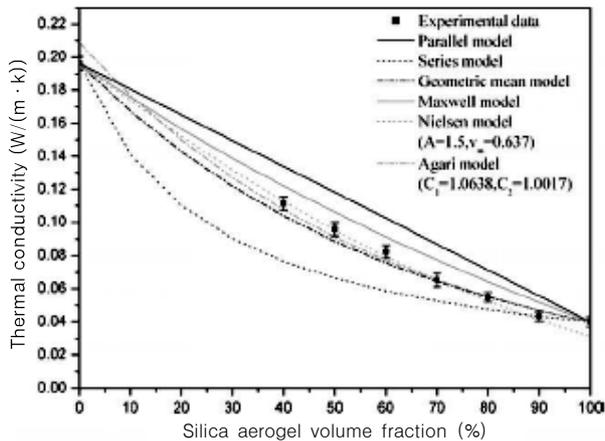


Figure 7. The effect of the content of silica aerogel on the thermal conductivity of epoxy composites.⁸

연구팀은 epoxy resin이 가지는 높은 점도로 인해 mixing이 힘들어지자 용매를 도입하고 curing 시간을 변화시키며 여러 방법으로 제조방법을 다르게 하였다. 그 결과 온도를 가하여 epoxy의 점도를 낮추어 mixing을 진행하여 복합재료를 제조하였을 때 가장 좋은 결과를 보였다. 이렇게 제조된 복합재료의 단면 사진을 Figure 6에 나타내었다. 하지만 이 연구에서 복합재료의 제조 방법과 제조 방법에 따른 성능차이의 개념은

도입 하였지만 열전도에 관한 연구는 부족하였다.⁶

같은 해 Teh 연구팀은 epoxy 입자를 실리온 에어로젤 입자와 mixing한 후 curing을 통해 복합재료를 제조 하였다. 이 실험에서 Teh 연구팀은 두 가지 다른 종류의 aromatic amine과 aliphatic amine을 가교제로 사용하여 0-40 vol%의 실리카 에어로젤을 투입하였다. Aromatic amine을 가교제로 사용하였을 경우 기계적 강도가 좋아지고 유리전이온도가 증가하였다. 하지만 열팽창 성질의 경우는 가교제의 종류에 상관없이 비슷한 수치를 보였다. 그러나 이 복합재료의 제조에서도 열전달에 관한 내용은 다소 미흡하였다.⁷

2009년 Ge 연구팀은 실리카 에어로젤/epoxy 복합재료의 단열재료의 사용을 연구하였다. 실리카 에어로젤을 trimethylchlorosilane (TMCS)로 표면을 개질하여 epoxy 파우더와 mixing한 후 복합재료를 제조 하였다. 실리카 에어로젤의 양을 40-80 vol% 까지 다양하게 하여 열차단 효과를 보았으며 (Figure 7) 그에 따른 밀도와 기공도를 연구하였다. 수소성인 실리카 에어로젤의 함량이 증가 할수록 물방울이 소수성인 복합재료의 표면에 존재하게 되며 실리카 에어로젤의 함량에 따라 열 전도도가 약 0.20 W/mK에서 0.04 W/mK 까지 감소하여 실리카 에어로젤을 충전제로 사용할 경우 뛰어난 열차단 성능을 보일 수 있다는 것을 보였다. 또한 실리카 에어로젤의 함량에 따라 밀도는 감소하고 기공도는 증가하는 것을 보였는데 이는 실리카 에어로젤을 충전제로 사용할 경우 가벼운 복합재료의 생산이 가능하다는 것을 보여주며 기공도 증가로 인한 복합재료 센서의 가능성도 볼 수 있다.⁸

III. 결 론

실리카 에어로젤/고분자 복합재료에 있어서 가장 큰 문제점은 실리카 에어로젤 함량 증가에 따른 물성의 저하이다. 친수성 실리카의 경우 하이드록시 그룹(-OH)을 가지고 있는데 이는 실리온 고무에 사용할 경우 실리온 고무와의 친화력을 높여 일반 실리카와 같이 사용할 경우 물성을 증대 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 수용성 고분자를 사용하여 단열 코팅으로 사용이 가능하며 유리섬유, 각종 clay 등을 함께 첨가하여 물성 저하를 막을 수 있을 것으로 기대된다. 소수성 실리카 에어로젤의 경우 methoxy [-OCH₃]_x) 그룹을 가지고 있어 일반 고분자 및 수소성 고무의 필러로 사용이 가능하다. 이 경우에 있어서 silane coupling agent를 사용한 친화력 증가를 기대할 수 있다. 현재 사용되는 실리카 에어로젤의 대부분이 고가이고 실리카 에어로젤 자체의 단열성을 이용한 연구가 많이 진행되고 있지만 유기 단열재를 기질로 사용한 실리카 에어로젤의 복합재료가 연구될 경우 단열성과 가격 측면에서 뛰어난 성능을 보일 것으로 기대된다.

실리카 에어로젤의 함량 증가로 인한 물성 감소 문제를 해결하기 위해 다양한 coupling agent 및 보강용 필러의 개발 및

응용 또한 필요하다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부 지원 소재원천기술개발사업 (10037176)의 연구지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 『EPS 단열재 대체를 위한 신단열재 개발 [R&D of the new insulation alternating Expanded Poly-Styrene Insulation(Styrofoam)]』 산업자원부, 09. 21 (2001).
- J. Fricke, “Aerogels - highly tenuous solids with fascinating properties”, *J. Non-Cryst. Solids*, **100**, 169 (1988).
- A. Soleimani Dorcheh and M. H. Abbasi, “Silica aerogel; synthesis, properties and characterization”, *J. Mater. Process. Tech.*, **199**, 10 (2008).
- M. Schmidt and F. Schwertfeger, “Applications for silica aerogel products”, *J. Non-Cryst. Solids*, **225**, 364 (1998).
- G. S. Kim and S. H. Hyun, “Effect of mixing on thermal and mechanical properties of aerogel-PVB composites”, *J. Mater. Sci.*, **38**, 1961 (2003).
- N. Gupta and W. Ricci, “Processing and compressive properties of aerogel/epoxy composites”, *J. Mater. Process. Tech.*, **198**, 178 (2008).
- P. L. Teh, M. Mariatti, A. N. R. Wagiman, and K. S. Beh, “Effect of curing agent on the properties of mineral silica filled epoxy composites”, *Polym. Composite.*, **29**, 27 (2008).
- D. Ge, L. Yang, Y. Li, and J. Zhao, “Hydrophobic and thermal insulation properties of silica aerogel/epoxy composite”, *J. Non-Cryst. Solids*, **355**, 2610 (2009).