

초경량 실리카 에어로젤 초단열재의 현황 및 전망

서동진*

한국과학기술연구원 청정에너지연구센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길5

(2022년 11월 17일 접수; 2022년 11월 29일 수정본 접수; 2022년 11월 30일 채택)

Status And Perspectives of Ultra-Lightweight Silica Aerogel Superinsulation Materials

Dong Jin Suh*

Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology
Hwarang-ro 14-gil 5, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea

(Received for review November 17, 2022; Revision received November 29, 2022; Accepted November 30, 2022)

요 약

나노다공성 실리카 에어로젤은 1931년 처음 합성된 이후 초경량 초단열재로서의 가능성이 꾸준히 주목받고 있다. 실리카 에어로젤은 현재까지 알려진 최고의 단열재이지만 소재 자체의 초다공성 특성으로 인해 본질적으로 피할 수 없는 부서지거나 깨지기 쉬운 성질 때문에 지금까지 실제 적용 가능성에는 한계가 있는 것도 사실이다. 단일체 형태의 실리카 에어로젤이 초경량 초단열 특성이 가장 우수하지만 그대로 사용할 수 없고 분말, 입자, 블랭킷 형태로 사용되고 있으며 그조차도 아직은 기대에 미치지 못하고 있다. 가장 널리 적용되는 형태의 실리카 에어로젤은 섬유에 담지시킨 에어로젤 블랭킷이지만 취급 시 먼지가 발생할 가능성이 있다. 실리카 에어로젤 입자가 인체에 독성이 없는 것으로 알려져 있지만 먼지 생성은 실리카 에어로젤 블랭킷의 광범위한 활용에는 가장 큰 장애요인으로 남아 있다. 본 논문에서는 실리카 에어로젤이 어떤 고유한 성질을 가지고 있는지, 그리고 그 고유한 성질을 이용하여 어떤 분야에 사용될 수 있거나 사용될 가능성이 있는지에 대해 살펴볼 것이다. 또한 지금까지의 중요한 합성 기술의 발전과 상용화가 진행되었던 과정을 살펴보고 향후 본격적인 상용화를 위해서는 어떤 문제점이 있고 그 극복 방안은 어떠한지 검토해 보고자 한다.

주제어 : 에어로젤, 초경량, 초단열, 블랭킷

Abstract : Since nanoporous silica aerogel was first synthesized in 1931, its potential as an ultra-lightweight superinsulation material has been steadily attracting attention. Silica aerogel is the best thermal insulation material to date. However, the potential applications of this lightweight material have so far been hindered by its inherent fragility and brittleness arising from its ultra-porous nature. Although the monolithic form of silica aerogel has the best ultra-lightweight superinsulation properties, it cannot be used in this form. Instead it is used in the form of powders, particles, and blankets. However, these forms still have shortcomings. Silica aerogel is most widely applied in the form of a fiber-reinforced aerogel blanket, but this form is likely to generate dust when handled. Although silica aerogel particles have been proven to be non-toxic to humans, dust formation remains a major barrier to the widespread application of silica aerogel blankets. This paper will investigate the unique properties of silica aerogel and determine what fields it can be used in or potentially be used in due to its unique properties. In addition, we will review the important advances in silica aerogel synthesis technology and its commercialization so far, and then consider the problems that exist for its widespread commercialization in the future and how to overcome them.

Keywords : Aerogel, Ultra-lightweight, Superinsulation, Blanket

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: djsuh@kist.re.kr; Tel: +82-2-958-5192; Fax: +82-2-958-5209

doi: 10.7464/ksct.2022.28.4.301 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

에어로젤(aerogel)은 이름에서 보듯이 거의 공기로 이루어진 가장 가벼운 고체이다. 젤(gel)의 골격은 그대로 유지하고 내부의 액체 부분을 수축 없이 제거하여 그 공간이 비어있도록 즉, 공기가 차지하도록 한 에어(air)가 채워진 젤(gel)이 에어로젤이다. Figure 1에 나타낸 바와 같이 일반적으로 솔-젤(sol-gel) 합성에 의하여 만들어진 젤을 초임계 건조하여 에어로젤을 제조하게 되는데, 젤을 일반 건조시키면 젤의 액체가 제거되면서 기-액 표면에서의 표면장력에 의한 심한 수축을 피할 수 없으므로 특별히 계면이 존재하지 않는 초임계(supercritical) 상태에서 건조하는 방법을 이용하게 되는 것이다. 일반 건조하여 얻는 젤은 지로젤(xerogel)이라 부르며 심한 수축으로 대부분이 미세기공으로 이루어져 있다.

1931년 Samuel Kistler가 최초로 합성된 에어로젤을 소개한 이래[1,2] 1980년대까지 상업화를 위한 큰 진전은 없었으나 이후 합성법의 발전이 이루어지면서 특유의 초다공성과 3차원 기공 구조로 인하여 나타나는 물성을 이용하여 다양한 분야에서 새로운 소재로 활용하고자 하는 노력이 계속되었다. 그중에서도 초경량 단열재로서 실리카(silica) 에어로젤의 활용이 가장 대표적인 상용화 사례라고 할 수 있다. 실리카 에어로젤의 단열성은 기네스북(Guinness Book)에 기록될 정도로 가장 열전도도가 낮은 고체라고 할 수 있으나 실제 상업적으로 활용하기에는 근본적으로 소재가 가지고 있는 한계가 있는 것은 사실이다.

본 총설에서는 초경량 단열재로서의 활용하기 위한 실리카 에어로젤에 초점을 맞추어 에어로젤의 특성, 발전 과정, 상용화를 위한 문제점과 극복 방안 등에 관하여 기술하고자 한다.

2. 에어로젤의 특성

Figure 1과 같이 실리카 에어로젤은 수 나노미터 크기의 실

리카 나노입자가 뭉쳐져 10 나노미터 이상의 2차 실리카 입자를 이루고 이 입자들이 초다공성의 3차원 구조의 네트워크를 이루는 형태를 이루고 있다. 이러한 구조적인 특성에 의하여 실리카 에어로젤은 Table 1과 같은 특유의 물성을 보인다[3]. 거의 기공으로 구성되어 있으므로 기공도가 95% 이상, 99%에 이르고 밀도가 0.1 g cm^{-3} 정도로 초다공성, 초경량이다. 비표면적은 $600 \sim 1,000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 으로 높지만 평균 기공경이 20 nm 정도로 미세기공이 거의 없이 mesopore 영역의 기공으로 구성되어 있어 흡착이나 촉매로 사용하는 경우 큰 분자량을 가진 물질의 기공 내부로의 물질전달 문제가 없으므로 높은 비표면적을 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다. Figure 1에서 보듯이 2차 입자 간의 mesopore 영역 기공이 대부분을 차지하며 1차 입자 내부의 micropore가 차지하는 비중은 크지 않다.

실리카 에어로젤은 거의 기공으로 구성되어 있으므로 굴절률이 공기와 거의 같은 1.08 이하로 작으며 투명한 형태로도 제조할 수 있으므로 이러한 특성을 이용하여 체렌코프 검출기(Cherenkov detector)에 실리카 에어로젤이 활용된 상용화 사례가 있다[4]. 또한 실리카 에어로젤의 유전상수가 1.1 정도로 어떤 고체보다도 낮은 값을 보이므로 초저유전(ultralow dielectric) 특성을 이용하여 미래 반도체 소자에 층간 절연물질로 활용 가능성이 커 이에 관한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다[5]. 실리카 에어로젤에서는 음속이 100 m s^{-1} 로 상온에서 공기 중의 343 m s^{-1} 보다 1/3 이상 느려 초경량 방음 소재로서의 효과도 기대할 수 있다[6].

실리카 에어로젤의 가장 큰 특징 중의 하나는 열전도도가 기네스북에 기록될 정도로 가장 낮은 고체라는 것이다. 일반적으로 열전달은 전도, 대류, 복사의 과정에 의하여 이루어지는데 전도 및 대류의 관점에서 보면 에어로젤이 가장 단열성이 높은 고체일 수밖에 없다. 물질의 상태에 따른 열전도도를 보면 고체, 액체, 기체의 순인데, 고체의 열전도도는 성분 자체에 따라 정해져 금속이 비금속보다 높고 실리카 자체는 열전도도가 낮

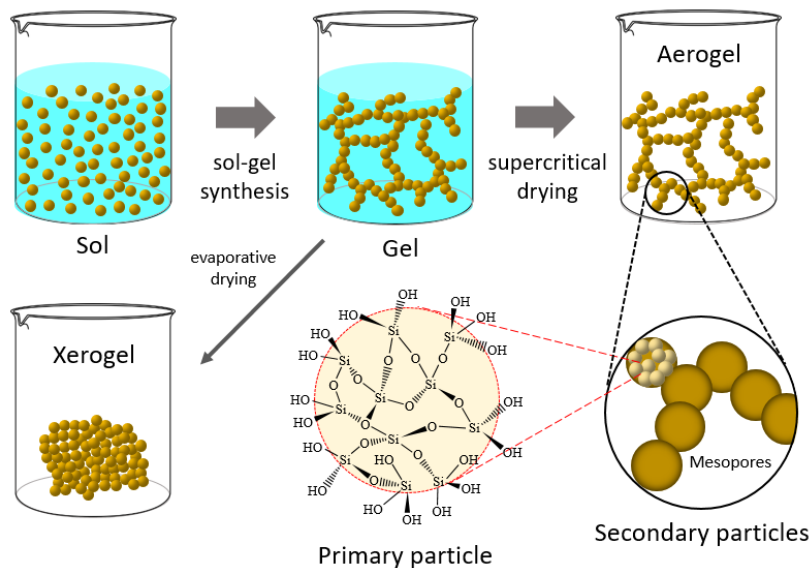


Figure 1. Synthesis and microstructure of silica aerogel.

Table 1. Typical properties of silica aerogel

Property	Value	Comments
Apparent density (g cm^{-3})	0.003-0.10	$\sim 0.1 \text{ g cm}^{-3}$
Internal surface area ($\text{m}^2 \text{ g}$)	600-1000	By N2 adsorption/desorption
% Solids	0.13-15%	Typically 5%
Mean pore diameter (nm)	~ 20	By BET
Primary particle diameter (nm)	2-5	By electron microscopy
Refractive index	1.0-1.08	
Thermal tolerance	to 500°C	Melting point $> 1500^\circ\text{C}$
Dielectric constant	~ 1.1	For density = 0.1 g cm^{-3}
Sound velocity (m s^{-1})	100	For density = 0.07 g cm^{-3}
Thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	0.013-0.020	

다고는 할 수 없지만 실리카 에어로젤은 대부분이 실리카 고체가 아니라 기체로 구성되어 있어서 열전도도가 낮을 수밖에 없다. 다만 기체에서는 열전달이 대류에 의하여 일어나게 되는데 실리카 에어로젤의 기공 크기가 공기의 평균자유이동경로(mean free path) 60 nm보다 적어서 기체의 이동조차도 막을 수 있으므로 그 구조적인 특성으로 인하여 단열성이 높을 수밖에 없다는 것을 알 수 있다[7,8]. 실제로 실리카 에어로젤의 열전도도는 $0.013 \sim 0.020 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 정도로 실리카의 열전도도 $1.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 보다 매우 낮고, 심지어는 공기의 열전도도 $0.026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 보다도 낮다. Table 2에는 최소한의 냉난방으로 적절한 실내온도를 유지할 수 있게 설계된 주택을 말하는 패시브하우스(passive house)의 목표 열관류율($U = 0.13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)을 달성하기 위하여 필요한 여러 단열소재의 두께를 비교하였는데 고가이며 장기 안정성이 불확실한 진공단열을 제외하고는 에어로젤의 단열성이 얼마나 좋은지를 알 수 있다.

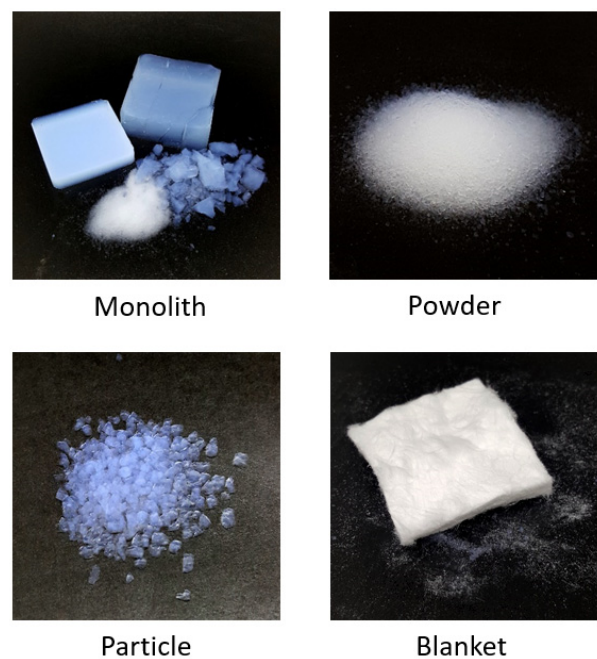
하므로 이러한 조건에서 장기간 안정된 물성을 유지하기 위해서는 소수성 표면이 유리하게 된다. 솔-젤 합성하는 과정에서 전구체의 선택이나 실란화(silylation) 물질의 사용, 저온의 이산화탄소 초임계 대신 고온 초임계 건조하는 과정의 활용, 화학적으로 기상이나 액상에서 표면을 소수성화 처리하는 과정 등 실리카 에어로젤의 표면을 소수성화 하는 방법은 여러 가지가 있다[11,12].

어떤 형태의 틀(molder)에 원료, 용매, 촉매 등을 넣고 조건을 맞추어 솔-젤 공정을 진행시켜 젤을 만든 다음, 이를 그대로 꺼내 초임계 건조시키면 틀의 형태와 같은 모양의 모노리스(Monolith)형 에어로젤을 얻을 수 있다. 이러한 형태의 에어로젤이 초경량, 초단열이라는 에어로젤의 특성을 가장 잘 지니고 있지만 부서지기 쉽고 기계적 강도가 약하여 그 형태 그대로 사용하는 데에는 한계가 있을 수밖에 없다. Figure 2에서 보듯이 실제 상업적으로는 에어로젤 특유의 물성은 다소 떨어지더

Table 2. Insulation thickness for passive house

Material	Heat conductivity $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Thickness (m) needed to meet $U = 0.13 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Reinforced concrete	2.3	17.69
Solid brick	0.80	6.15
Hollow brick	0.40	3.08
Wood	0.13	1.00
Porous brick/concrete	0.110	0.85
Straw	0.055	0.42
Glass wool	0.035	0.27
EPS foam	0.032	0.25
Silica aerogel	0.015	0.11
Vacuum insulation panel	0.008	0.06

실리카 에어로젤의 표면은 합성 조건에 따라 친수성(hydrophilic)이나 소수성(hydrophobic) 어느 것도 가능하다[9,10]. 표면에 Si-OH 그룹이 많이 존재하면 친수성이 되고 Si-R 그룹이 많이 존재하면 소수성이 되는데 실제 공기 중에는 수분이 존재

**Figure 2.** Various forms of silica aerogel based on appearance.

라도 분말, 입자의 형태를 사용하거나 지지체에 에어로젤을 포함시켜 사용할 수밖에 없다. 분말은 코팅 용액, 페인트 등에 넣어서 사용하고, 입자는 천정이나 벽면의 반투명 창 내부 충전재로 사용하고 있다. 섬유나 부직포에 에어로젤을 담지시켜 사용하는 이불과 같은 형태의 에어로젤 블랭킷(blanket)은 공장의 파이프, 용기 단열, 건축 단열 등 현재로서는 가장 널리 사용되는 형태이다. 다만 에어로젤 블랭킷은 사용할 때 지지체에 담지된 에어로젤 분말이 떨어질 수밖에 없는 문제점을 지니고 있다. Figure 3에는 같은 보온 및 보냉 효과를 보이는 단열재의 두께를 비교하였는데 다른 단열재에 비하여 실리카 에어로젤 블랭킷의 고온 및 저온 단열성이 매우 우수함을 알 수 있다.

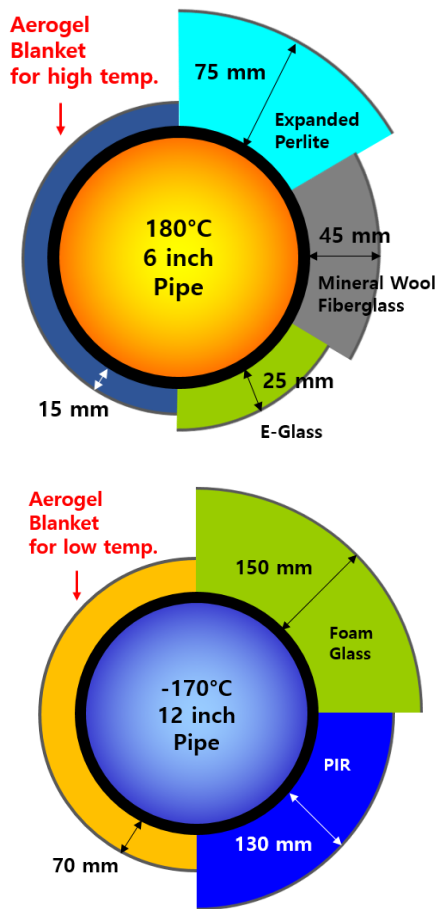


Figure 3. Comparison of thickness between silica aerogel blanket and traditional insulation (redrawn figures from Aspen Aerogels).

3. 에어로젤의 발전 과정

3.1. 최초의 에어로젤과 합성법의 획기적 발전

Samuel Kistler는 물유리를 이용하여 합성한 젤을 그대로 초임계 건조하면 초임계수가 실리카를 용해하고 건조하는 과정에서 침전이 형성되어 에어로젤을 만들 수 없는 점을 파악하고, 이후 합성된 젤을 물로 세척하여 염을 제거하고 다시 물을 알콜로 치환한 다음 알콜의 초임계 건조를 통하여 실리카 에어로젤을 성공적으로 합성하였다[1,2]. Kistler의 합성기술을 이용

하여 1942년 Monsanto Chemical에서 Santocel이라는 이름으로 실리카 에어로젤을 최초로 상용 생산하기 시작하였고 생산된 제품은 화장품, 치약 등의 첨가제 또는 유동성 변형제, 코팅에 중요한 소광제 등과 일부 저온 단열재로도 사용되었다[13]. 그러나 제조 비용이 많이 들어 활용이 제한적이었다가 그마저도 1960년대 저가의 흄드실리카(fumed silica)가 본격 생산되면서 1970년에 생산을 중단하였다.

1960년대 후반 프랑스의 한 연구자에 의하여 실리카 에어로젤 합성에 큰 진전이 있었다. 프랑스 Lyon에 있는 Universität Claud Bernard의 Stanislaus Teichner는 로켓 연료를 저장하는 다공성 소재의 개발을 정부로부터 요청받고 물을 알콜로 용매 치환하는데 소요되는 기간이 너무 긴 Kistler의 방법으로는 대량의 실리카 에어로젤 제조는 불가능하여 새로운 솔-젤 합성법을 찾아내지 않을 수 없었다. 그는 대안으로 알콕사이드(alkoxide)를 알콜 용매에서 가수분해(hydrolysis)하고 축합(condensation)하는 현상을 이용하여 메탄올 용매에 TMOS (Tetramethylorthosilicate)를 원료로 몇 시간 내에 알코젤(alcolgel)로 불리는 젤을 합성하고 추가 용매 치환 과정이 없이 알콜 초임계로 실리카 에어로젤을 제조하였다[14, 15]. 이후 1970년대 까지 한동안은 이러한 TMOS 합성법을 이용한 실리카 에어로젤 개발에 진전이 있었다.

3.2. 에어로젤 합성법의 발전과 대량생산

1980년도 초반에는 입자 물리학자들이 실리카 에어로젤이 체렌코프 검출기에 활용하기에 가장 이상적인 소재임을 인식하고 독일과 스웨덴에서 대량의 실리카 에어로젤을 체렌코프 검출기에 상업적으로 사용하였다[16,17]. 그 이후 TMOS 합성법을 이용한 최초의 실리카 에어로젤 모노리스(monolith) 파일럿 공장이 1984년 스웨덴에 세워졌다. 240°C, 80기압의 메탄올 초임계 조건에 맞추어 설계된 3,000 liter 규모의 autoclave(고압 용기)를 사용하였는데 운전 중 메탄올 증기의 유출로 인한 폭발 사고로 설비가 완전히 파괴되고 말았다.

1983년 미국 BNL (Berkeley National Laboratory)의 Micro-structured Materials 그룹에서는 Arlon Hunt를 중심으로 독성이 강한 TMOS를 대체하여 보다 훨씬 안전한 TEOS (Tetraethylorthosilicate)를 원료로 물성의 저하 없이 실리카 에어로젤을 합성하였다[18]. 같은 해, 같은 연구진에서는 초임계 건조 전에 젤 내부의 알콜을 이산화탄소로 치환한 다음 이산화탄소를 매개로 하는 초임계 건조로 실리카 에어로젤을 합성하여 훨씬 더 안전한 조건에 초임계 건조를 할 수 있게 되었다[19]. 1983년 독일의 BASF에서는 물유리를 원료로 이산화탄소 치환 방법으로 BASOGEL이라는 이름의 실리카 에어로젤 구형 입자를 상업적으로 생산하기 시작하여 1996년까지 유지하였다[20].

1980년대 초 에어로젤 개발에 관한 관심이 높아지면서 독일의 Jochen Fricke 교수가 주도하여 1985년 제1회 국제 에어로젤 학술대회가 독일의 Würzburg에서 열렸고[21], 이후 3년마다 유럽과 미국에서 진행되었으나 기대만큼 상업화 진전이 이루어지지 않다가 2003년 제7회 미국 Alexandria에서의 학회를 마지막으로 중단되고 말았다[22].

1988년 미국 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)의 Rick Pekala가 주도하는 연구팀은 최초로 유기 고분자 에어로젤을 합성하여 당시까지 무기 에어로젤에만 국한된 제품의 범위를 유기물까지 확대하였다. RF (Resorcinol-Formaldehyde), MF (Melamine-Formaldehyde)를 원료로 에어로젤을 합성하였으며 이러한 유기 에어로젤을 열분해시키면 탄소 에어로젤을 얻을 수 있었다[23].

1989년 Arlon Hunt 등이 설립한 Thermalux에서는 300 liter autoclave를 갖추고 TEOS를 원료로 이산화탄소 치환 초임계 공정을 이용하여 실리카 에어로젤 모노리스를 대량 생산하였으나 1992년 중단하고 말았다. 1994년 Aerojet은 BNL과 협력하여 이산화탄소 치환 초임계 건조 공정의 상용화 프로그램이 시작되어 이전 Thermalux의 300 liter autoclave를 이용하여 실리카, RF, 탄소 등의 여러 에어로젤을 생산하였으나 1996년 중단되었다.

3.3. 에어로젤의 상업화

1992년 C. Jeffrey Brinker와 Doug Smith가 주도하는 뉴멕시코대학 연구진은 먼저 젤의 표면을 화학적으로 실란화와 같이 소수성화 하는 방법을 이용하여 에어로젤 생산을 위하여 필수적인 초임계 건조를 하지 않고 일반 건조하는 새로운 방법을 개발하였다[24]. 이 기술은 Hoechst를 거쳐 후에 Cabot에 이전되어 2003년부터 독일 Frankfurt에서 Nanogel이라는 상표명으로 반투명한 과립(granule) 형태의 실리카 에어로젤을 비교적

저렴한 비용으로 상업적 생산할 수 있게 되었다. 현재까지도 과립 형태의 실리카 에어로젤 공급의 선두주자는 Cabot이라고 할 수 있으며 채광창에 사용되어 반투명이므로 눈부시지 않고 은은한 채광에 발수, 단열, 방음 효과까지 보이고 있다.

1990년대 후반 미국 항공우주국(NASA)의 우주 탐사에 실리카 에어로젤은 중요한 역할을 하였다[25]. 화성탐사선 Pathfinder의 탐사차 Rover에 에어로젤 단열재를 사용하여 밤과 낮의 기온 차가 100°C 이상 되는 환경에서 안정적으로 배터리와 전자기기의 단열이 가능하게 하였다. 또한 1999년 2월 지구를 떠나서 2006년 1월에 돌아온 NASA Stardust 우주선에 우주 미립자 채취를 위하여 투명하고 완충성이 있는 실리카 에어로젤 블록을 사용하였다.

미국 Massachusetts에 1984년 설립된 Aspen Systems가 1993년부터 NASA의 지원을 받아 실리카 에어로젤 연구를 시작하여 1999년부터 블랭킷형 에어로젤을 생산하기 시작하였다. 2001년 Aspen Aerogels가 스피노프(spin-off) 설립되어 본격 생산하기 시작하였고 현재에도 고온용, 저온용, 화재 예방용과 같은 활용 목적에 따라 Pyrogel, Cryogel, Spaceloft, PyroThin 등의 상표명으로 적합한 제품을 판매하고 있으며 사실상 이 기업이 실리카 에어로젤 블랭킷 공급의 선두주자라고 할 수 있다.

분말 및 입자 형태의 실리카 에어로젤 공급의 선두주자라 할 수 있는 CABOT는 단열 채광창용 과립 형태의 에어로젤은 LUMINAR라는 상표명으로 단열 코팅용 분말은 ENOVA라는

Table 3. Major aerogel manufactures and suppliers

Company	Location	Product (Brand name)
Aspen Aerogels	Northborough, MA USA	Blanket Pyrogel, crypgel, Spaceloft, PyroThin
Cabot	Boston, MA USA	Powder, bead, blanket Nanogel, Luminar [®] , Enova [®] , ThermalWrap
Aerogel Technologies	Boston, MA USA	Polymer panel Airloy [®] Ultramaterials
Svenska Aerogel	Gavle Sweden	Powder for paint and coating (Quartzene [®])
Active Aerogels	Coimbra Portugal	Panel, powder, particle, foam (Aeroflex, silfles, silfiller, silfoam)
Green Earth Aerogels	Barcelona Spain	Powder, particle, pellet, block, blanket from rice husk
ENERSENS	Lonhumeau France	Particle, blanket (Kwark [®] , Skogar [®])
BASF	Frankfurt Germany	Panel (PU & silica) (SELENTITE [®] , SELENTEX [®])
NANO TECH	Zhejiang China	Felt, blanket, particle, panel
Guangdong Alison Hi-Tech	Guangdong China	Blanket, panel, particle (DTR06, GR10, GY10)
Armancell JIOS Aerogel	Osan Korea	Powder, shield, tape, blanket (AeroVa [®] , roVa TM , ArmaGel TM)
Intellignet Insulation	Ashford, Kent UK	Blanket, strip, panel, board (Thermblok)
TAASI Corp	Delaware, OH USA	Various forms (Pristina TM)

상표명으로 공급하고 있으며 파이프 단열용 팩과 ThermalWarp이라는 이름으로 블랭킷도 공급하고 있기는 하다.

Table 3에는 대표적인 에어로젤 생산, 판매 기업을 요약하였다. 현재 Aspen Aerogels와 Cabot 이외에는 에어로젤의 생산량이 많지는 않으나 미국, 유럽, 중국과 국내에 생산 및 판매하는 기업이 있다. 2004년 설립된 미국의 Aerogel Technologies는 실리카에 비하여 기계적 강도를 지닌 고분자 성분의 모노리스형 에어로젤을 Airloy라는 이름으로 공급하고 있다. 2000년 설립된 스웨덴의 Svenska Aerogel은 Quartzene이라는 이름으로 소수성 및 친수성이 조절된 실리카 에어로젤 분말을 주로 페인트 및 코팅용으로 공급하고 있으며 2020년 1월에는 아시아 시장에도 진출하였다. 2013년 설립된 포르투갈의 Active Aerogels는 패널, 분말, 입자, 발포 형태의 에어로젤을, 2008년 설립된 스페인의 Green Earth Aerogel Technologies는 왕겨를 원료로 실리카 및 탄소 에어로젤을 생산하고 있다. 2010년 설립된 프랑스의 Enersens는 Kwark라는 상표명의 입자형, Skogar라는 상표명의 블랭킷형 실리카 에어로젤을 생산하고 있다. 독일의 BASF는 2016년에 Aspen Aerogels와 전략적 제휴를 통하여 건축 내외장 에어로젤 단열재를 개발하였는데 폴리우레탄 에어로젤은 SELENTITE라는 이름으로 실리카 에어로젤은 SELENTEX라는 이름으로 생산하고 있다. 중국에도 2004년 설립된 NANO TECH과 2007년 설립된 Guangdong Alison Hi-Tech의 두 기업이 다양한 형태의 에어로젤을 생산하고 있으나 제품 생산 과정에서 Aspen Aerogels 특허 [27] 침해로 인한 미국과 독일에서의 소송에서 잇달아 패소하여 2018년부터 판매 금지를 당하고 있다. 국내에서는 2013년 JIOS Aerogel이 설립되어 코팅, 블랭킷, 테이프 등 여러 형태의 에어로젤을 생산하고 있는데 2016년 12월에는 Armacell과 Armacell JIOS Aerogel이라는 에어로젤 블랭킷 생산을 위한 합작법인을 설립하였다. 이 밖에도 규모가 크지는 않지만 Levron Chemicals (터키), Aerogel UK (영국), Intelligent Insulation (영국), Surnano Aerogel (중국), Dow Corning (미국), Blueshift International Materials (미국), Ocellus (미국), TAASI (미국), Gelanggang Kencana (말레이시아), KIM OIL & GASLLP (인도), Protective Polymers (영국) 등의 에어로젤 생산 및 공급 기업이 있다.

전 세계 에어로젤 시장은 2019년 589.5 백만 달러이며 연평균 10.4% 성장하여 2025년에는 1,045.1 백만 달러에 이를 것으로 예상된다[27]. Figure 4에 나타난 것처럼 지역별로는 2019년 미국을 중심으로 북미 시장이 61.4%를 차지하고 있으나 19.1%인 아시아/태평양 시장이 가장 크게 성장하고 있다. Figure 5에 나타낸 바와 같이 성분별로는 실리카 에어로젤이 95% 정도이지만 점차 유기 에어로젤 시장이 확대되고 있다. 형태별로는 블랭킷이 78%, 입자가 12%, 패널이 8%이고 모노리스는 미미하다[28].

4. 실리카 에어로젤의 상용화 방안 및 전망

실리카 에어로젤의 기계적 강도를 높이고 유연성을 확보하기 위하여 고분자, 섬유, 유기물 등으로 강화하거나 복합화하

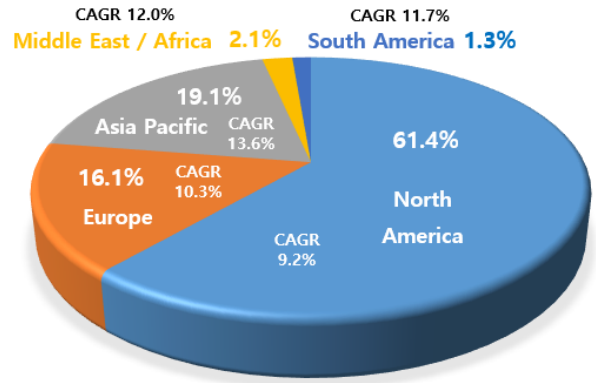


Figure 4. Aerogel market share (2019) and growth (CAGR 2020-2025) by region (redrawn [27]).

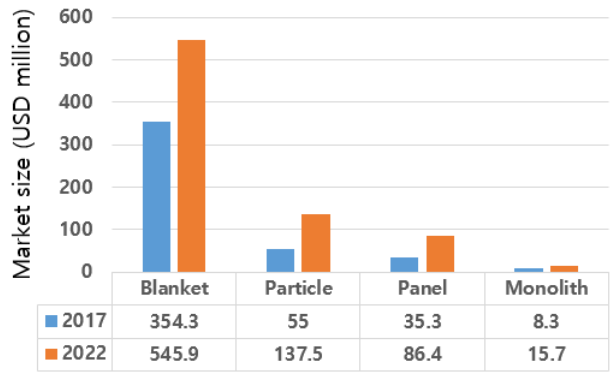
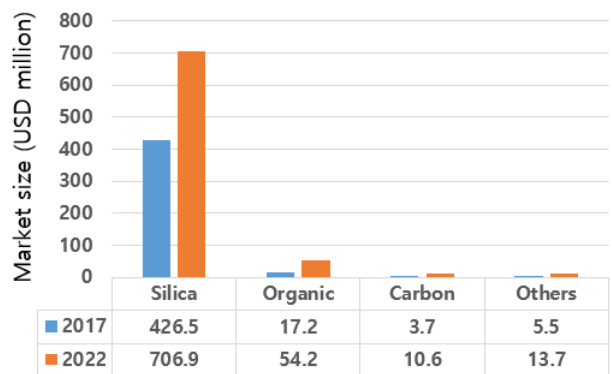


Figure 5. Aerogel market size by types and forms (2017 and 2022) (redrawn [28]).

는 방법을 사용하기도 한다[29-31]. 이 분야에 관하여 많은 연구 결과가 발표되고 있고 실리카 에어로젤 자체의 물성에 큰 저해 없이 복합 에어로젤의 합성이 가능한 것으로 알려져 있으나 아직은 기술이 상용화 수준까지는 이르지 못하고 있는 것으로 보인다. 최근에는 고분자나 바이오매스 물질만으로 에어로젤을 합성하여 유연성을 확보하거나 재생 가능한 물질을 사용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Aspen Aerogels가 주로 공급하고 있는 블랭킷 형태의 에어로젤이 가장 널리 사용되고 있기는 하지만 취급 과정에서 에어로젤 분진 발생이 불가피하여 범용으로 사용하려면 이 문제를 해결하여야 할 것이다. 이를 해결하는 방법으로 블랭킷 표면을

코팅하여 원하는 형태로 성형하면 분진 발생 없이 그대로 사용할 수 있을 것이다. 또한 블랭킷을 수지나 섬유 등으로 복합화하거나 안정적으로 라미네이션(lamination) 하면 경량성, 단열성이 강화된 다양한 산업소재, 의류소재 등으로도 활용이 가능할 것이다.

실리카 에어로젤은 1931년에 최초로 합성된 이래로 합성 기술이 꾸준히 발전되어 왔으나 일부 특수 목적으로만 사용되었고 2000년대에 이르러서야 Aspen Aerogels와 Cabot을 중심으로 본격적인 상용화가 시작되고 시장도 확대되고 있다. 그러나 아직도 실리카 에어로젤 특유의 경량성과 단열성을 활용한 시장이 기대만큼은 성장하지 못하고 있는 것은 사실이다, 그것은 지금까지 에어로젤에 관한 수많은 연구가 원천적인 소재 합성 기술의 개발에 치우쳐 있었고 실제로 활용할 분야에 가장 적합한 실질적인 소재의 변형, 처리 기술과 같은 상용화 기술 개발이 부족했던데 그 원인이 있었던 것으로 보인다. 최근 기후 위기에 따른 에너지 절약의 중요성이 한층 높아지는 만큼 경량성, 단열성에서 어떤 소재보다도 우수한 에어로젤에 관한 관심이 높아지고 상용화 기술도 더욱 발전될 것으로 기대한다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부 및 방위사업청 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비(과제번호: 22-SN-CO-07) 지원으로 수행되었습니다.

References

- Kistler, S. S., "Coherent expanded aerogels and jellies," *Nature*, **127**, 741 (1931).
- Kistler, S. S., "Coherent expanded-aerogels," *J. Phys. Chem.*, **36**, 52-64 (1932).
- Dorcheh, A. S. and Abbasi, M. H., "Silica aerogel; synthesis, properties and characterization," *J. Mater. Proc. Technol.*, **199**, 10-26 (2008).
- Kharzheev, Y. N., "Use of silica aerogels in Cherenkov counters," *Phys. Part. Nucl.*, **39**, 107-135 (2008).
- Kim, Y., Yoo, S., Lee, H. G., Won, Y., Choi, J., and Kang, K., "Structural analysis of silica aerogels for the interlayer dielectric in semiconductor devices," *Ceram. Int.*, **47**, 29722-29729 (2021).
- Mazrouei-Sebdani, Z., Begum, H., Schoenwald, S., Horoshenkov, K. V., Malfait, and W. J., "A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications," *J. Non-Cryst. Solids*, **562**, 120770-120786 (2021).
- Fricke J., Hümmer, E., Morper, H.-J., and Scheuerpflug, P., "Thermal properties of silica aerogels," *J. Phys. Colloq.*, **50**, C4-87-C4-97. (1989).
- Zeng, S. Q., Hunt, and A., Grief, R., "Transport properties of gas in silica aerogel," *J. Non-Cryst. Solids*, **186**, 264-270 (1995).
- Wagh, P. B. and Ingale, S. V., "Comparison of some physico-chemical properties of hydrophilic and hydrophobic silica aerogels," *Ceram. Int.*, **28**, 43-50 (2002).
- Anderson, A. M. and Carroll, M. K., "Hydrophobic Silica Aerogels: Review of Synthesis, Properties and Applications," in Aegerter, M., Leventis, N., Koebel, M., Eds., *Aerogels Handbook. Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies*. Springer, New York, NY. (2011).
- Deshpande, R., Smith, D. M., and Brinker, C. J., "Preparation of high porosity xerogels by chemical surface modification," US Patent No. 5,565,142 (1996).
- Lee, K. H., Kim, S.-Y., and Yoo, K.-P., "Low density, hydrophobic aerogels," *J. Non-Cryst. Solids*, **186**, 18-22 (1995).
- Kistler, S. S., "Aerogels," US Patent No. 2,249,767, assigned to Monsanto Chemical Co. (1941).
- Nicolao, G. and Teichner, S. J., "New preparation process for silica xerogels and aerogels, and their textural properties," *Bull. Soc. Chim. Fr.*, **5**, 1900-1906 (1968).
- Teichner, S. J. and Nicolao, G. A., "Method of preparing inorganic aerogels," US Patent No. 3,672,833 (1972).
- Burkhardt, H. et al., "The TASSO gas and aerogel Cherenkov counters," *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, **184**, 319 - 331 (1981).
- Henning, S. and Svenson, L., "Production of Silica Aerogel," *Phys. Scr.*, **23**, 697-702 (1981).
- Tewari, P. H. and Hunt, A. J., "Process for forming transparent aerogel insulating arrays," US Patent No. 4,610,863 (1986).
- Tewari, P. H., Hunt, A. J., and Lofftus, K. D., "Ambient-temperature supercritical drying of transparent silica aerogels," *Mater. Lett.*, **3**, 363-367 (1985).
- Herrmann, G., Iden, R., Mielke, M., Teich, F., and Ziegler, B., "On the way to commercial production of silica aerogel," *J. Non-Cryst. Solids.*, **186**, 380-387 (1995).
- Fricke, J., Ed. *Aerogels; Proceedings of the First International Symposium, Wurzburg, FRG, Sept. 23-25, 1985*, Springer-Verlag, Berlin, (1986).
- Rolison, D. R. (eds), "Aerogels 7, Proceedings of the 7th International Symposium on Aerogels (ISA-7)," *J. Non-Cryst. Solids*, **350** (2004).
- Pekala, R. W., "Organic aerogels from the polycondensation of resorcinol with formaldehyde," *J. Mater. Sci.*, **24**, 3221-3227 (1989).
- Smith, D. M., Deshpande, R., and Brinker, C. J., "Preparation of low-density aerogels at ambient pressure," in *Better Ceramics through Chemistry V*, Hampden-Smith, M. J., Klemperer, W. G., Brinker, C. J., Eds., 271 of MRS Proceedings, 567-572 (1992).
- Bheekhun, N., Talib, A. R. A., and Hassan, M. R. "Aerogels in aerospace: An review," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2013**, 1-18 (2013).
- Stepanian, C. J., Gould, G. L., and Begag, R., "Aerogel composite with fibrous batting," US Patent No. 7,078,359 (2006).

27. Aerogel Market - Global Forecast to 2025, Markets and Markets (2020).
28. Aerogel Market - Global Forecast to 2022, Markets and Markets (2017).
29. Wang, X. and Jana, S. C., "Synergistic hybrid organic-inorganic aerogels," *ACS Appl. Mater. Interf.*, **5**, 6423-6429 (2013).
30. Capadona, L. A., Meador, M. A. B., Alunni, A., Fabrizio, E. F., Vasilaras, P., and Leventis, N., "Flexible, low-density polymer crosslinked silica aerogels," *Polymer*, **47**, 5754-5761 (2006).
31. Duan, Y., Jana, S. C., Reinsel, A. M., Lama, B., and Espe, M. P., "Surface modification and reinforcement of silica aerogels using polyhedral oligomeric silsesquioxanes," *Langmuir*, **28**, 15362-15371 (2012).