

# 지구상에서 가장 가벼운 고체 '에어로겔'

글 | 김경수 \_ 한국생산기술연구원 환경에너지본부 본부장 gskim@kitech.re.kr

에어로겔은 머리카락 1만분의 1 굵기인  $\text{SiO}_2$  나노구조체가 극히 성글게 얽혀 이루어진 구조로, 나노구조체에 들어 있는 공기 분자들이 전체 부피의 90% 이상을 차지한다. 2002년 미국의 로렌스 리버모어 연구소에서 제조된 에어로겔은 밀도가  $0.003\text{g}/\text{cm}^3$ (공기밀도:  $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ )밖에 되지 않아 현재까지 인류가 제조한 소재 중 가장 가벼운 고체로 기네스북에 등재되었다.

에어로겔의 어원을 살펴보면 공기를 의미하는 'aero'와 3차원 네트워크 구조를 의미하는 'gel'로 이루어져 졌다. 에어로겔의 어원에서도 유추할 수 있듯이 에어로겔은 이와 같은 나노다공성을 가진 구조적 특성으로 인하여 초경량, 초단열, 초방음성, 초저유전성 등 기존소재와 차별되는 독특한 성질을 갖게 되었다. 이 같은 특성은 투광성 단열재와 같은 친환경 고감성 에너지 절약 소재를 포함하여 IT, BT, NT 분야의 차세대 신소재로의 높은 잠재적 활용성을 가진 소재로 기대되고 있다.

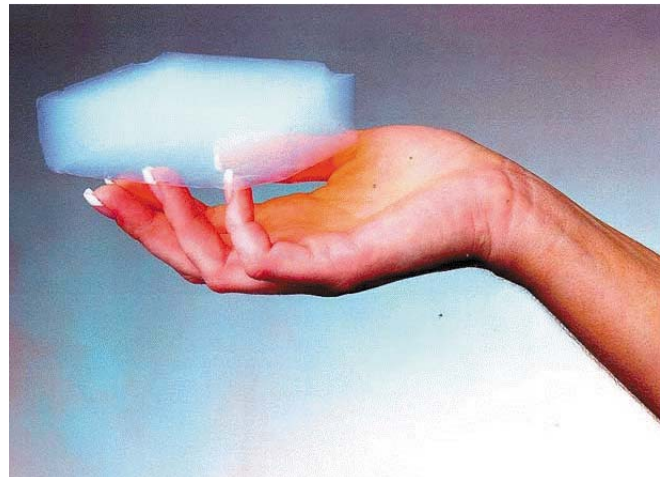
## 초임계 공정이용 습윤겔을 에어로겔로 변환

에어로겔은 고다공성 망목구조를 형성하는 습윤겔 제조공정과 나노기공구조를 유지한 채로, 기공 사이를 채우고 있는 액체를 기체로 교환하는 건조공정을 거쳐 제조된다. 전자로는 졸-겔공정을, 후자로는 초임계(또는 상압) 건조공정을 사용하는 것이 가장 일반적인 방법이다. 에어로겔은 Si, Ti, Zr, Ce, Sn, Al을 포함한 금속 산화물을 기반으로 하는 무기소재, 유기소재, 유무기하이브리드 등의 다양한 형태로 제조 가능하나, 실리카를 기반으로 하는 에어로겔이 가장 널리 사용된다.

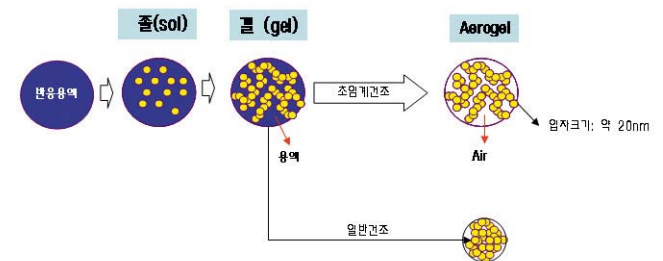
습윤겔을 제조하는 졸겔공정은 에어로겔의 고다공성 3차원 네트워크 구조를 결정하는 핵심적인 공정으로 전구체의 가수분해 반응과 가수분해된 전구체의 축합반응을 통한 네트워크 형성으로 이루어져 있다. 이 때 사용하는 전구체로는 금속알콕사이드나 물유리를

사용하며, 반응의 주요 변수로는 전구체의 종류,  $\text{H}_2\text{O}$  전구체, 용매의 종류 및 농도, pH, 온도, 숙성조건 등이 있다.

건조공정은 졸겔 반응으로 형성된 습윤겔을 에어로겔로 변환시키는 공정으로 주로 초임계공정을 사용한다. 초임계 공정을 사용하는 이유는 일반적인 건조공정에서는 겔의 기공내에 액체와 기체가



지구상에서 가장 가벼운 에어로겔 소재



에어로겔의 제조 공정

에어로겔 물성

Property	물 성	비 고
밀도	0.003 ~ 0.35g/cm <sup>3</sup>	typically 0.1 g/cm <sup>3</sup>
비표면적	600 ~ 1600m <sup>2</sup> /g	
기공률	80~99.8%	typically 95%
기공크기	~20nm	
Thermal tolerance	500도까지	500도 이상에서 서서히 shrinkage. Melting point >1200C
skeletal density	1.700 ~ 2.100g/cm <sup>3</sup>	
굴절률	1.007 ~ 1.05	
열전도율	10 ~ 20 mW/mK	상압, 상온기준, typically 15mW/mk
열팽창계수	2.0 ~ 4.0ppm	
모듈러스, E	0.002 ~ 100 MP	
asound velocity, C <sub>L</sub>	100 ~ 300 m/s	
acoustic impedance,	103 ~ 106kg/m <sup>2</sup> s	

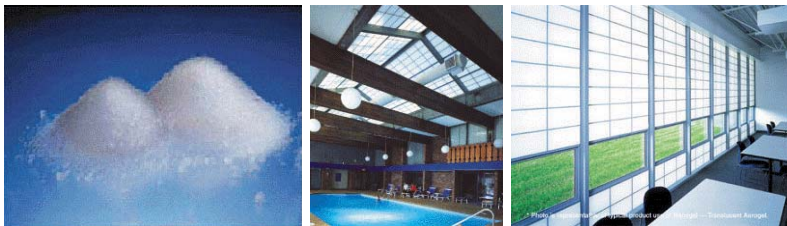
공존하게 되고, 액체가 증발함에 따라 기-액 계면에 표면장력에 의한 메니스커스가 형성된다. 이 때 기공내의 기-액 계면에서의 매우 큰 모세관압력을 받게 되는데, 이와 같이 큰 압력이 기공벽과 메니스커스가 만나는 매우 좁은 지역에 작용하기 때문에 이 같은 국부적인 힘은 젤을 수축하게 만든다. 따라서 습윤겔의 구조를 그대로 유지할 수 있도록 모세관력에 의한 수축을 방지하려면 기체-액체 계면이 존재하지 않은 조건, 즉 초임계 조건에서 습윤겔을 건조시

켜야 한다. 만약 습윤겔의 표면처리 없이 일반건조를 한다면 네트워크구조가 붕괴되면서 다공성이 크게 손상된 겔을 얻게 되며, 이 소재는 '제로겔'이라 불린다.

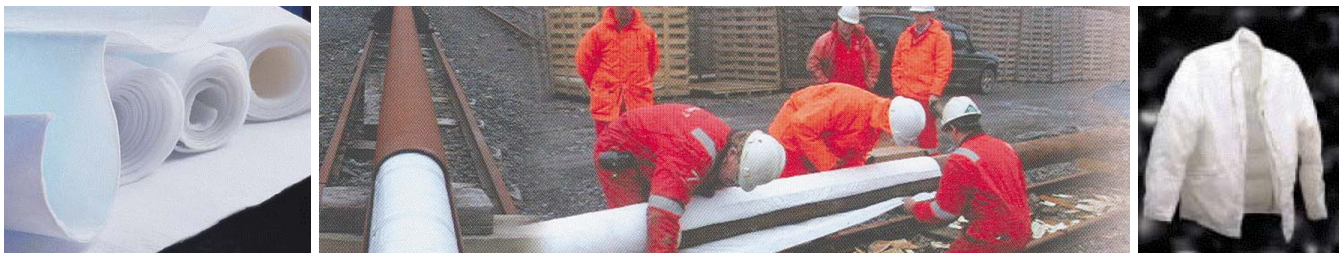
**단열재 패널 등 상용화 성공, 원가절감이 관건**

에어로겔은 1930년 키스틀러에 의해 최초로 보고되었으나, 긴 제조공정 및 고가의 원료소재로 인한 높은 제조원가문제로 상용화에 큰 어려움이 있었다. 이를 해결하기 위한 에어로겔의 실용화 관련 연구는 1980년대부터 NASA 등 미국의 정부기관을 중심으로 활발히 진행되었으며, 유럽에서도 대형 프로젝트를 통한 상용화 연구가 시도되었다. 그 결과, 최근 캐벗사, 아스펜 에어로겔사 등 일부 회사에서 에어로겔 상용화에 성공하였다.

웁스트의 기술을 인수한 캐벗사는 18mW/mK 수준의 열전도율을 가진 에어로겔을 생산하고 있으며, 이 나노겔을 이용한 고단열 투광성 패널 생산은 캐벗사와 유리단열재 제조 회사와의 공동개발을 통해 가시화되고 있다. 캐벗사는 반투명 패널 제조분야의 리더인 칼월사와 공동으로 에어로겔 복합체 패널을 개발하였는데, 이들이 개발한 에어로겔 단열재 패널의 단열특성은 기존의 최고 성능 유리제품에 비해 약 3배 정도 우수한 것으로 보고되었다. 또한 미국의 슈퍼스카이 프로덕트사가 캐벗의 나노겔과 GE의 폴리카보네이트를 이용하여 스카이 패널 기술을 개발하였는데, 이 기술은 패널의 단열특성을 최대 60%까지 증가시키고, 방음효과를 5데시벨까지 개선할 수 있는 것으로 보고되어 있다.



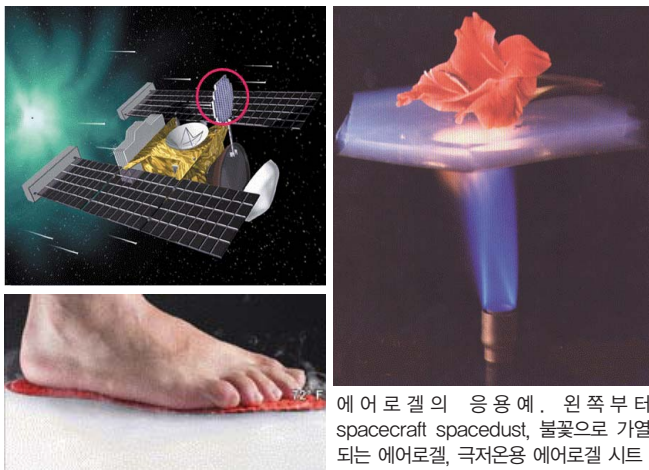
캐벗사의 에어로겔 입자 및 투광성 단열패널로의 응용예



아스펜 에어로겔사의 에어로겔 플렉시블 시트 및 단열재료의 응용예



한국생산기술연구원에서 제조한 다양한 형태의 에어로겔단열재. 위쪽부터, 에어로겔 모노리스, 에어로겔 파우더, 유리 위에 코팅된 에어로겔 코팅제, 플렉시블 에어로겔 blanket 순임



에어로겔의 응용 예. 왼쪽부터 spacecraft spacedust, 불꽃으로 가열되는 에어로겔, 극저온용 에어로겔 시트

해 유전 파이프라인용 단열재를 공급하고 있다.

국내의 에어로겔 연구는 10여 년 전부터 서강대, KIST, 연세대, 한서대 등에서 진행되고 있었으나, 거의 기초연구단계 수준으로 에어로겔의 상용화를 위한 연구가 많이 필요한 수준이었다. 에어로겔의 상용화를 위한 연구는 최근에 이르러서야 한국생산기술연구원과 한국에너지기술연구원을 중심으로 본격적으로 진행되고 있다.

한국생산기술연구원에서는 기관고유사업으로 에어로겔 생산기술개발사업을 진행하고 있다. 그 결과, 에어로겔의 상용화에 요구되는 핵심기반 기술인 깨어지기 쉬운 에어로겔을 사용 목적에 맞도

록 다양한 형태로 가공하는 제품화 기술 및 제조공정 개선을 위한 에어로겔 저가격화 기술 개발에 큰 진보가 있었다. 현재 한국생산기술연구원에서는 에어로겔 모노리스, 입자 제조 및 개질, 투명·반투명 코팅제, 그리고 플렉시블 에어로겔시트, 에어로겔 유무기 복합체 패널 등 다양한 형태의 에어로겔 단열제 제조 기술을 확보했으며, 원가절감을 위해 물유리, 폐유리 등의 다양한 원료소재 개발을 계획하고 있다. 또한 국내 최초로 에어로겔 건조용 파일럿 스케일 초임계 장치를 설치할 예정이다.

### 에너지절약소재 시장 진출시 잠재력 무궁무진

에어로겔은 매우 가볍고 높은 나노다공성 구조로 인하여 매우 다양한 분야에 적용 가능한 소재다. 1999년 화성탐사선인 패스파인더의 우주먼지 채집기와 화성표면 탐사차 전자기기를 위한 극저온용 단열재로 사용된 바 있고, 상기한 바와 같이 일부 선진사에서 시제품을 공급하고는 있으나, 현재까지 에어로겔은 높은 제조가격으로 인하여 제한적으로 사용되고 있었다.

에어로겔의 여러 응용분야 중 그 파급효과가 가장 클 것으로 기대되는 분야는 에어로겔의 상용화가 최초 시도된 에어로겔 단열제 분야이다. 현재 전세계 단열제 시장규모는 연간 150억~200억 달러 정도의 매우 큰 규모이며, 매년 2~4% 사이의 지속적인 성장이 예상되는 분야다. 그러나 단열제시장에서는 기존 단열제에 비해 가격이 높아 기존단열제의 틈새시장 위주로 매우 제한적으로 사용되고 있다. 그러나 환경규제가 강화되고, 고유가로 인한 에너지비용이 상승하게 되면, 현재의 단열시스템으로는 한계가 있으며, 기존 단열제의 단열성을 뛰어넘는 신개념의 단열제에 대한 개발 요구가 증가될 것이다. 따라서 향후 에어로겔 생산기술 향상으로 저가격 고단열 에어로겔 단열제가 개발된다면, 에너지 절약 소재 시장에서의 에어로겔의 잠재시장은 무한히 클 것으로 예상된다. ㉔



글쓴이는 아주대학교 화학공학과 졸업 후 웨인주립대학에서 석사 및 박사학위를 받았다. 현재 경기대학교 토목환경공학부 교수를 겸임하고 있다.