

# 나노기공 에어로젤 소재의 응용과 개발 전망

글 \_ 김창열  
한국세라믹기술원 나노IT융합센터장

## 1. 초단열 나노기공 에어로젤 소재

에어로젤은 Kistler에 의하여 최초로 개발된 나노다공성 소재로 인류가 발명한 가장 가벼운 고체이다<sup>1)</sup>. 에어로젤 소재는 90% 이상의 기공율과 1~50nm의 기공크기를 가지는 초다공성 소재로서 특히 단열성능이 기존의 재료보다 몇 배 우수하여, 차세대 단열소재로서 주목받고 있는 재료이다. 그러나 현시점에서는 제조공정이 복잡하고,

제조단가가 높기 때문에 이러한 우수한 소재 특성을 가지고 있음에도 불구하고 극히 제한된 용도에 사용되고 있는 실정이다. 최근 고가의 금속 알콕사이드에 비해 매우 저렴한 출발원료를 사용하여 에어로젤을 제조하려는 노력과 저온/상압의 신건조공법의 개발로 충분한 경제성 확보의 가능성이 기대되어지고 있다. 특히 에어로젤 소재의 응용범위를 일반 건축용 단열소재 뿐만 아니라 산업용으로 확대시키기 위해서는 에어로젤 소재의 단열특

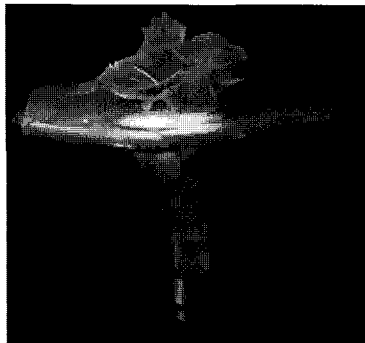


Fig. 1. 에어로젤의 초단열, 투명성, 초경량 특성.

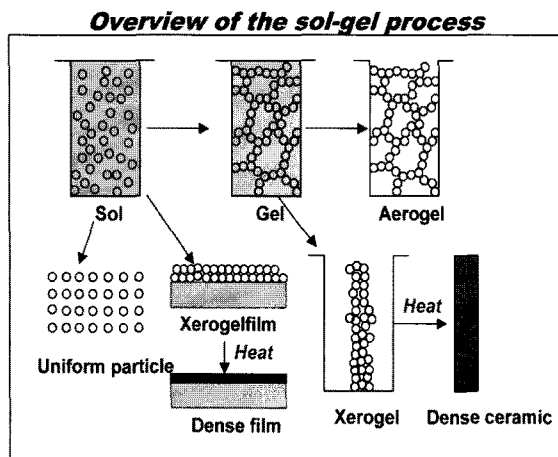


Fig. 2. 에어로젤 제조 개념도

성뿐만 아니라 가공성 또한 중요한 역할을 한다. 따라서 에너지의 95% 이상을 수입에 의존해야만 현실을 감안한다면 유연성(Flexible)을 가지면서도 기존의 단열소재 보다 3배 이상의 단열특성을 가지는 에어로젤소재의 개발은, 에너지 절감 및 효율향상에 대한 기술력의 한계를 극복하고 에너지의 위기를 슬기롭게 대처한다는 측면에서도 아주 중요한 연구가 될 것이다(Fig. 1).

## 2 에어로젤의 제조 및 특성<sup>1,2)</sup>

에어로젤(aerogel)의 개념도를 Fig. 2에 간략하게 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 졸(sol)은 1 $\mu$ m 이하의 입자 혹은 폴리머가 분산되어 있는 상태를 말하며, 이러한 입자 또는 폴리머가 3차원적으로 연결(network)되어 용매가 갇혀 있는 상태를 젤(gel)이라 한다. 이와 같은 젤 상태는 pH, 온도, 시간과 같은 변수에 의하여 일어나며 이를 젤화 (gellation) 라고 부른다. 에어로젤은 이러한 젤 상태의 용매를 초임계상태 (supercritical state) 에서 건

조시키거나 표면개질 및 상압건조방법에 의해 모세관현상에 의한 응축현상이 일어나지 않는 것에 의하여 크랙이 없는 다공성물질이 얻어지는데 이를 에어로젤이라 한다. 이러한 에어로젤은 밀도가 공기의 3배 정도인 0.003g/cc의 지구상에 존재하는 물질 중 가장 가벼운 것이 얻어지고 1-50nm의 기공이 약 95-99% 차지하는 새로운 소재를 합성하는 것이 가능하다. 에어로젤은 기존의 단열재의 단열특성보다 3배나 큰 특성을 보여서 단열재로서의 응용이 기대되고 있다.

## 3. 에어로젤 주요특징 및 응용

### 3.1. 에어로젤 블랑켓<sup>3-5)</sup>

에어로젤 블랑켓은 기존의 폴리머 단열재인 폴리스티롤이나 폴리우레탄보다 내열성 및 단열성이 우수한 신소재로, 향후 전개되는 에너지 절약 및 환경문제를 해결할 수 있는 첨단소재로 주목을 받고 있다. 에어로젤 블랑켓의 주요 특성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 실리카 에어로젤과 에어로젤 블랑켓의 주요특징을 살펴본 바와 같이 실리카 에어로젤은 초경량(공기의 3배정도 무게까지 제조가능) 이면서, 열전도율이 보통의 단열재보다 1/3 이상 낮은 장점을 가지고 있지만 매우 높은 기공률(95%)로 인하여 기계적인 강도가 매우 약하여 조그만 충격에도 쉽게 부서지는 단점이 있다. 알콕사이드와 같은 고가의 원료를 사용하고 초임계 건조공정을 사용하여 제조해야 하는 것으로 인하여 제조단가가 비싸다 (현재 플라스틱 폼의 약 10배) 는 단점이 있다. 이러한 기계적인 강도의 취약성을 해결하기 위한 하나의 방법이 파이버와 에어로젤의 복합재료를 제조함으로써 유연성 (flexibility)을 부여하고 기계적인 강도를 향상시키는 것이 가능하다. 에어로젤 블랑켓은 종래의 폴리머

Table 1. 에어로젤 블랑켓의 주요 특징

특성		실리카 에어로젤	에어로젤 블랑켓	비교
장점	밀도 g/cm <sup>3</sup>	0.003-0.35	0.1	보통값 0.1g/cm <sup>3</sup> (air: 0.001g/cm <sup>3</sup> )
	열전도율 mW/mK	8-15	15	30(보통의 유리섬유, 폴리우레탄)
	Pore Size/Porosity (nm/%)	~20nm / 95%	10-50	기공률은 85-99.9%이나 보통 95%
단점	Tensile Strength kPa	16	80-100	0.1g/cm <sup>3</sup> 의 에어로젤
	Fracture Toughness kPa · m <sup>1/2</sup>	~0.8	-	0.1g/cm <sup>3</sup> 의 에어로젤
	코스트(aerogel blanket)	-	45US\$/ft <sup>2</sup>	시장형성가액: 3US\$/ft <sup>2</sup>



Table 2. 에어로젤 블랑켓과 기존 단열재의 열전도특성 비교

항목	에어로젤 블랑켓	유리섬유	스티로폼	폴리우레탄 폼
열전도율	10-20mW/mK	50mW/mK	30-40mW/mK	20-30mW/mK

단열재를 대체할 수 있을 정도의 우수한 단열특성, 기계적인 강도, 유연성 (flexibility)으로 인한 다양한 형태로의 가공의 용이성 등으로 향후 기존의 건축용 단열재 시장을 대체할 것으로 예상되며, 또한 우주선과 우주복, 운동복과 운동화와 같은 생활용품에 이르기까지 응용가능성이 매우 확대될 것으로 예상된다.

Table 2는 에어로젤 블랑켓과 기존 단열재의 열전도특성을 비교한 것이다. 에어로젤 블랑켓의 경우는 유리 섬유, 스티로폼, 폴리우레탄 폼에 비해서 열전도특성이 1/2에서 1/3 정도로 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 기존의 단열재에 비하여 1/2이나 1/3 정도의 두께로도 같은 정도의 단열효과를 나타낼 수 있으며, 에어로젤 블랑켓은 500°C 까지 내열특성을 가지고 있으며, 유독가스를 방출하지 않으므로 보다 안전하고 환경 친화적인 단열재로 각광을 받을 것으로 생각된다.

Table 3은 에어로젤 블랑켓의 주요 특성과 응용에 대하여 나타낸 것이다. 에어로젤 블랑켓은 유연성을 가지고 있기 때문에 냉동탱크, 연료파이프, 냉장/냉동고, 재킷/운동화, 항공기, 운송용 단열재로 응용할 수 있다.

Table 3에서 보는 바와 같이 에어로젤 블랑켓은 밀도가 작고 열전도율이 기존의 단열재와 비교할 때 1/2에서 1/3정도로 작기 때문에 보다 얇은 두께로도 좋은 단열특성을 나타낸다. 내열성(약 -500°C)이 우수하고 유독가스를 방출하지 않으므로 공업용 단열재와 우주복, 교통 및 차량, 전력생산용 단열재, 재킷이나 운동화류 등과 같은 생활용품에도 적용이 가능하다.

Fig. 4는 용매치환/표면개질 및 상압건조에 의해 제

Table 3. 에어로젤 블랑켓의 주요특성 및 응용

항목	특성	응용
두께	10 mm	냉동저장탱크 (LNG), 파이프, 연료저장
밀도	0.1g/cc	
최대사용온도	-500°C	냉장 및 냉동고
열전도율	10-20mW/mK	스포츠 웨어, 운동화
인장강도	80-100kPa	우주항공, 교통용 차량
핸들링	가위로 자를 수 있음 접합부위 실링필요	화재보호 전력생산

조된 에어로젤 블랑켓의 미세구조 사진이다. 유리섬유 사이에 에어로젤이 잘 분포하고 있으며, 에어로젤을 확대해보면 미세기공이 존재하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 상압건조에 의해 제조된 에어로젤 블랑켓의 사진이다.

### 3.2. 투광성 에어로젤 시트

에어로젤은 10nm 크기의 나노기공을 갖고 있는데, 합성조건을 조절하여 균일한 크기의 기공을 조절하는 것에 의하여 가시광선 영역의 투광성을 조절하는 것이 가능하고 이를 이용하여 투광성 에어로젤 창을 제조하는 것이 가능하다. 미국의 Cabot사의 경우 두 장의 유리 판 사이에 에어로젤 분말을 충전하는 것에 의하여 투광성 스카이라이트를 제조하여 판매하고 있다. 이러한 투명성 및 투광성을 이용하여 필름시트를 제조하거나 코팅을 할 경우 단열 성능은 매우 뛰어나면서도 투광성을 갖는 특성을 응용하는 것이 가능하다. 예를 들면 조명시스템의 경우 빛과 함께 열이 발생하기 때문에 이 때 발생하는 열을 에어로젤 단열 코팅 및 시트를 이용하여 효율적으로 차단하는 것이 가능하다.

### 3.3. 카본 에어로젤을 이용한 슈퍼커패시터 응용<sup>6)</sup>

슈퍼커패시터는 많은 양의 전기를 단시간 내에 충전하고 방전하는 것이 가능하기 때문에 자동차와 같이 대용량의 전기를 사용할 때 리튬이온전지와 함께 겸용으로 사용하는 것이 가능하다. 보통 슈퍼커패시터는 활성탄을 사용하여 제조하나 카본에어로젤의 높은 비표면적을 이용하여 많은 양의 전기를 저장하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 한국세라믹기술원의 경우도 정책연구과제로 슈퍼커패시터용 나노기공 탄소소재를 연구개발 중이다(Fig. 7).

### 3.4. TiO<sub>2</sub> 에어로젤의 응용<sup>7)</sup>

TiO<sub>2</sub>는 아나타제 결정상의 경우 밴드갭 에너지가

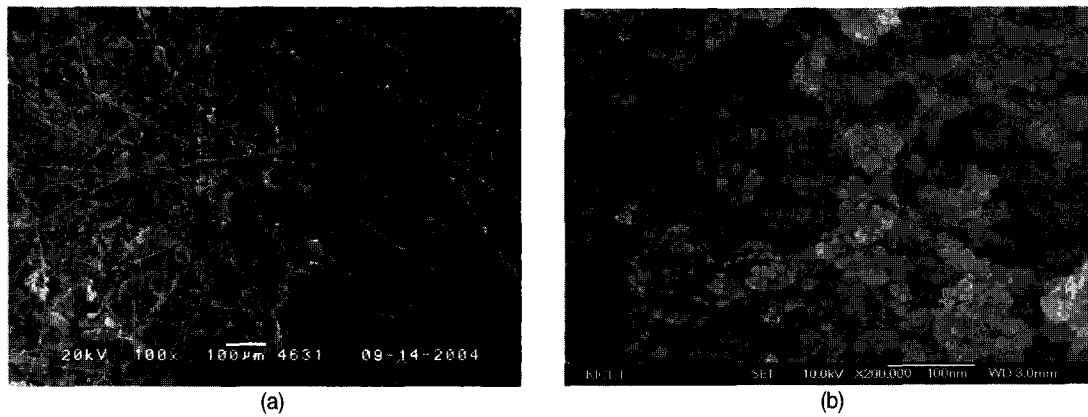


Fig. 4. KICET TEOS-based silica aerogel blanket 미세구조 사진((a) glass fiber/silica aerogel, (b) silica aerogel).

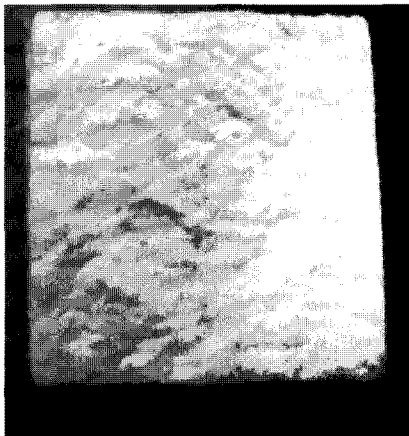


Fig. 5. Silica aerogel blanket sample 사진 (KICET).

3.2eV로 가장 좋은 광촉매 산화물 반도체로 알려져 있다. 또한 그래첼이 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 이용하여 광전변환 효율이 10%가 넘는 염료감응태양전지를 제작하여 많은 연구가 이루어져 오고 있다. 한국세라믹기술원의 경우, TiO<sub>2</sub> 에어로젤을 제조하고 이를 페이스트화하고 후막을 코팅하는 것에 의하여 염료감응태양전지를 제작하고 이로 말미암은 광전변환효율의 향상이 기존 나노입자에 대비하여 10% 이상 증가하는 것을 확인하였다. 이는 TiO<sub>2</sub> 에어로젤이 비표면적이 크기 때문에 염료의 흡착량이 많아지고 이로 말미암아 태양전지의 효율이 향상된 것으로 파악된다. Fig. 8은 TiO<sub>2</sub> 에어로젤을 초임계건조공정에 의하여 제작한 벌크상의 에어로젤 소재이고, 이를 투과 전자현미경 (TEM)으로 관찰한 것이 Fig. 8(b)이며, Fig.



Fig. 6. 투광성 에어로젤과 스카이라이트 응용.

8(c) 사진은 6.5cm×6.5cm의 태양전지 셀의 샘플사진을 나타낸 것이다.

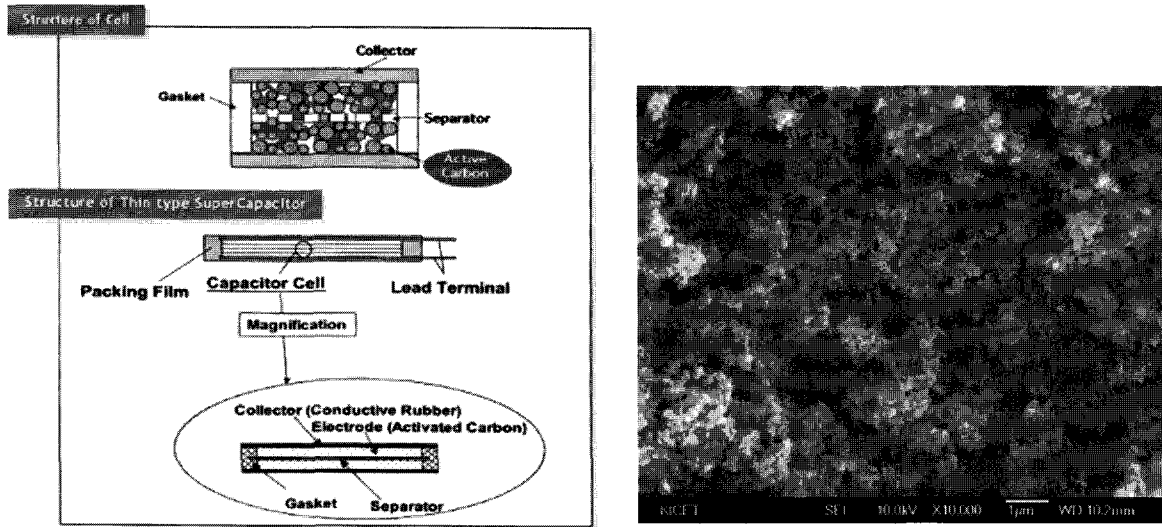


Fig. 7. 슈퍼커패시터의 개념도(왼쪽) 및 카본에어로젤의 전자현미경 사진.

#### 4. 개발동향 및 향후 전망

에어로젤의 2006년 세계 시장규모는 3천6백만불 규모로 작지만, 2011년에는 7억 5천만 달러규모로 성장할 것으로 예상된다(BCC research). 에어로젤은 단열 및 흡음체로서의 응용이 70%를 차지할 것으로 예상되며, 복합화 및 실리카 에어로젤이 대부분의 에어로젤 소재로 사용될 것으로 예상된다. 미국의 NASA 프로젝트에서 시작되어 에어로젤 복합화 블랑켓으로 ASPEN사가 처음으로 에어로젤 블랑켓을 상용화하여 시장을 확대해나

가고 있는 상황이며 국내에서도 몇 개 회사(화인텍, 엠파워, 휴먼싸이디)가 에어로젤 생산에 투자하여 시장을 개척해나가고자 하고 있다. 현재적으로 에어로젤의 시장 진입에 가장 큰 걸림돌은 상용 폴리우레탄 단열재에 비하여 가격이 10배가량 비싸다는 것이다. 이러한 가격 문제가 해결되고 시장이 확대되면 에어로젤은 최고의 단열재로 보급될 것으로 예상된다. 그 중에서도 에어로젤의 기계적인 취약성을 보완한 에어로젤 블랑켓이 시장에서 많이 사용될 것으로 예상된다. 또한 투광성 단열재, 카본 에어로젤과 같은 슈퍼커패시터 전극소재응용, 냉장고의 단열재, 그리고 촉매 담체 등과 같은 신규의 소재시장이

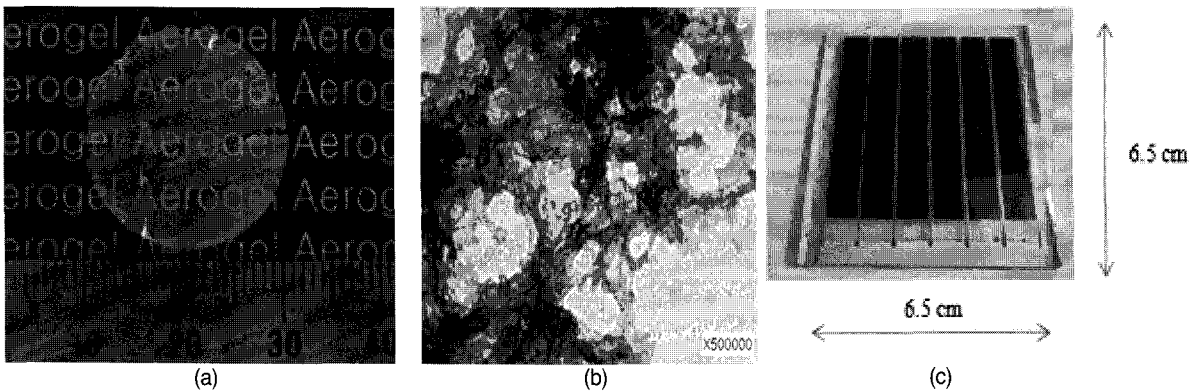


Fig. 8. TiO<sub>2</sub> 에어로젤(a), TiO<sub>2</sub> 에어로젤의 투과전자현미경 사진(b) 그리고 열로감응태양전지 샘플사진(c).

향후 대두될 것으로 기대된다. 향후에는 카본에어로젤의 경우 슈퍼커패시터 전극소재, TiO<sub>2</sub>의 경우 염료감응태양 전지 및 광촉매 소재 등에 응용이 가능할 것으로 생각된다.

**참고문헌**

1. Kistler S, *Nature*, **127** 741 (1931).
2. Sol-Gel Science : the Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. C. Jeffrey Brinker, George W. Scherer. Boston;Tokyo Academics Press. 1990.
3. www.aerogel.com (ASPEN aerogel Inc).
4. C. Y. Kim, A. R. Jang, B. I. Kim, and D. H. Suh, "Surface Silylation and Pore Structure Development of Silica Aerogel Composites from Colloid and TEOS-based Precursor", *J. Sol.-Gel. Sci. Technol.*, **48** 336-43 (2008).
5. C. Y. Kim, J. K. Lee, and B. I. Kim, *Colloids and*

*Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **313-314** 179-82 (2008).

6. 슈퍼커패시터용 탄소/니켈 복합에어로젤 전극에 대한 연구, 장아름, 석사학위논문, 한양대학교, 2009년 8월.
7. 수열합성법으로 제조한 아나타제형 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 이용한 염료감응형 태양전지 제조박유식, 공학석사학위 논문, 2010년 2월 인하대학교

●● 김창열



- 한양대학교 무기재료공학 석사
- 오사카대학교 물질화학 공학박사
- 삼성전자 LCD 공장개발 근무
- 현재 한국세라믹기술원 미래융합세라믹본부 나노IT융합센터 센터장