

# 다공성 세라믹소재의 단열 효과 및 단열소재 연구 현황

송인혁, 박영조, 윤희숙 | 재료연구소  
황기영 | 국방과학연구소  
최상규 | 한국기계연구원

## [ 요약문 ]

현재 우리나라는 에너지 소비량의 97% 이상을 해외에 의존하고 있으며, 그 규모가 매년 증가하고 있는 실정이다. 이를 해소하기 위하여 다양한 시도가 이루어지고 있으며 이에 따른 관련 연구 분야의 정부 정책 지원도 증가하는 추세이다. 그러나 새로운 차세대 단열 소재의 개발을 통한 에너지 절감에 대한 노력은 아직 미흡한 상태이다. 본고에서는 이와 관련하여 에너지 효율 극대화 방안으로써, 기존의 단열 소재의 현황 및 향후 단열 소재의 연구방향을 다공질 세라믹(특히 에어로겔)을 중심으로 정리 기술함으로써 앞으로의 발전방향을 제시하고자 한다. 또한 이를 통하여 전체적인 다공성 무기질 단열 소재에 대한 이해를 높여 향후 친환경적이며, 에너지 효율적인 단열소재 연구 분야를 확립하는데 기여하고자 한다.

## 1. 서론

다공질 세라믹스는 내열 및 내식성이 우수하며, 기공률 및 기공 형태를 조절할 경우 고온 하에서 단열성이 양호하여, 고온 구조용 재료 등 다양한 응용 범위에 사용되고 있다. 또한 세라믹스 제조 기술의 진보에 따라 강도와 열충격 저항성 등이 개선됨으로써 응용범위가 광범위한 파급성을 가진다. 최근 들어 이와 같은 다공질 세라믹스는 재료 내부에 기공의 크기, 형상, 크기 분포, 배향성 등을 제어하려는 노력뿐만 아니라 다양한 나노물질과의 복합화를 통하여 종래에 재료가 갖지 못하는 새로운 특성을 발현하고자 하는 노력이 진행되고 있다.<sup>[1-5]</sup>

단열소재는 단순히 열을 제어하여 에너지 효율성을 증진시키는 역할뿐만 아니라 장비 및 인명을 안전하게 보호하는 역할을 하는 것도 매우 중요하다. 그림 1에서 보는 바와 같이 발사에정인 미국 우주 왕복선 디스커버리호 연료탱크 외부에 생긴 균열과 작은 단열재 조각이 떨어져 나감으로 우주 왕복선의 발사가 지연되는 일이 발생(2006. 7)하는 등 고온에서 단열 재료의 중요성은 매우 크다. 이와 같은 단열재는 크게 복합재형 단열재, 다공질 재료형 단열재, 코팅용 단열재 등으로 구분할 수 있다.

일반적으로 단열 소재는 열의 이동을 가능한 한 억제할 목적으로 사용되는 재료 전체를 총칭한다. 열의 이동을 억제할 목적으로 사용되는 단열 재료는 종래는 저온 영역에서는 보냉재, 상온에서부터 중온까지는 보온재, 이보다 고온 영역에서 사용되는 재료를 단열재라고 분류하였으나, 최근에는 3자를 총체적으로 단열재라고 부르고 있다. 단열 재료는 보통 다공질의 재료가 많으며, 열전도율이 낮을수록 단열능성이 좋은 것이라 할 수 있다. 열에 대하여는 같은 두께인 경우, 경량재료인 편이 단열에 더 효과적이고, 열을 표면에서부터 반사해 버리는 재료도 단열 재료의 일종이라고 할 수 있다. 단열 재료의 대부분은 흡음성도 우수하므로 흡음재료로서도 이용된다.

세라믹 재료 내부에 기공의 크기, 배향성, 형상, 분포 등을 원하는 대로 제어할 경우 새로운 특성의 단열재/내화물의 출현이 기대된다. 국내 5,500억원 규모의

디스커버리호 연료탱크 균열



액화산소 공급관 브라켓  
길이 13cm, 깊이 20cm  
균열 발견

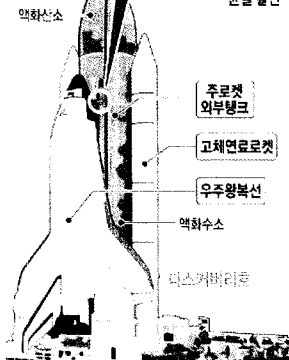


그림 1. 단열 소재의 중요성

단열재/내화물 시장의 상당 부분을 대체할 수 있을 것으로 예상된다. 세계의 단열재 수요는 향후 연간 4.6%로 증가하여, 2012년에는 366억 달러 규모로 확대될 전망이다.<sup>[6]</sup>

본고에서는 차세대 군용 전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되고 있는 마이크로 터빈용 고온 단열 및 내열 소재의 기술 개발에 필요한 연구 배경 및 연구 현황을 중심으로 기술 분석을 실시하였다. 그리고 이를 통하여 전체적인 다공성 무기질 단열 소재에 대한 이해를 높임으로써 향후 재료연구소에서 새로운 연구 분야를 확립하는데 도움이 되고자 한다.

## 2. 다공질 재료의 단열 이론

### 2.1 단열성에 영향을 미치는 주요인자

#### 2.1.1 열전도율

열전도율 또는 열전도도는 열이 이동하기 쉬운 정도를 나타낸다. 1m 입방체 재료의 서로 상대하는 양면에 1℃의 온도차가 있을 경우, 그 재료의 단위면적 1m<sup>2</sup>를 1시간에 통과하는 전체 열량 Q는

$$Q = \lambda \cdot \frac{(\theta - \theta_0)}{d} = (\text{열전도율}) \times \frac{\text{양표면온도차}}{\text{재료두께}}$$

로 나타내어진다.

여기서,  $\theta$  : 재료의 고온면 온도(℃)

$\theta_0$  : 재료의 저온면 온도(℃)

$\lambda$  : 열전도율(kcal/m · h · ℃)

일반적으로 열전도도 단위는 SI 단위인 W/(m · K)가 기준이나, 실제 자료엔 kcal/(h · m · ℃) 또는 kcal/(s · m · ℃)가 많이 사용된다. 단위 환산비율은 다음과 같다.

$$1 \text{ kcal}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{℃}) = 1.163\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$1 \text{ kcal}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{℃}) = 4.187 \times 10^3\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

표 1은 주요 소재의 열전도율을 나타내었다.

표 1. 기존 단열 소재의 분류에 따른 열전도도<sup>[7]</sup>

구분		명칭	최고 사용온도(℃)	열전도도(kcal/m · h · ℃)	비고	
무기 재료	섬유형	천연	석면	600	0.065이하	KS L 9100
		합성	유리면	400	0.042이하	KS L 9102-90
			암면	650	0.047이하	KS F 4701-90
			세라믹 파이버	1450	약 0.1	KS L 9104-92
	다공형	천연	규조토	500	0.097이하	KS F 3502
		합성	규산칼슘(시리카, HTB)	1000	0.053이하	KS L 9101-90
			펄라이트	650	0.053이하	KS F 3701,4714
			단열 내화 벽돌	1500	0.45이하	KS L 3301
유기 재료	섬유형	천연	탄화 코르크	130	0.046이하	KS F 3001
		합성	스티렌폼(스티로폼)	70	0.034이하	KS M 3808
	기포형	합성	경질 우레탄폼	100	0.022이하	KS M 3809
		합성	기포 경질 고무	100	0.036이하	KS F 4907 KS L 9016-90

### 2.1.2 함수율과 열전도율

단열재뿐만 아니라 재료의 열전도율에 가장 크게 영향을 미치는 요인의 하나가 함수율이다. 물의 열전도율은 약  $0.52\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 로 동일 온도의 공기의 약 24배, 얼음에서는  $1.9\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ( $0^\circ\text{C}$ )로 약 90배가 된다. 따라서 단열재 내부의 공극이 얼음으로 가득 차게 되면 공기층의 겹보기 열전도율은 증대한다. 또한 공극 중 수증기의 비열은 공기보다 훨씬 크므로, 대류나 확산에 의해서도 열전도율은 증대하고, Heat Pump 효과에 의해서도 단열성은 저하된다.

### 2.1.3 겹보기비중과 열전도율

일반적으로 재료가 치밀하여 비중이 커지면 열전도율도 커지는 경향이 있다. 그러나 단열재에서는 이와 반대가 되는 경우가 있으므로 주의하여야 한다. 유리면, 암면 등과 같은 섬유질 단열재는 겹보기비중과 섬유량이 작아지면 내부에 간극이 많아지므로, 대류가 발생하여 열전도율은 증대한다. 이 때문에 섬유질 단열재는 겹보기 비중이 클수록 단열성이 좋아진다. 또한 다공질 단열재의 경우에는 독립기포가 미세하고 균일하며, 기포막이 얇을수록 열전도율은 작아진다.

### 2.1.4 온도와 열전도율

여기서 말하는 온도는 단열재의 고온면과 저온면의 평균온도를 나타낸다. 건축 재료에서의 단열재의 사용온도 범위는 빙점하 수십도에서 빙점상 수백도 정도로 생각하여도 좋으며, 이 범위 내에서도 온도와 열전도율은 거의 비례 관계에 있다. 그러다가 중고온 영역에서 단열재의 열전도도가 급증하는 경향이 있다. 이것은 공기의 열전도율이 고온이 되면 증대하고, 복사가 열전도에 기여하는 효과가 지배적인 것과 관계한다. 따라서 단열재의 사용온도가 상온 영역에서 벗어날 때에는 그 온도영역에서의 열전도율을 이용하여 단열설계를 할 필요가 있다.

## 2.2 다공성 물질에서의 열전달<sup>17-12)</sup>

다공성 물질에서의 열전달은 기체 분자들의 충돌에 의한 전달, 대류에 의한 전달, 고체 골격의 진동에 의한 전달 그리고 적외선 복사에 의한 전달로 크게 나눌 수 있으며 전체 열전달량은 이들의 합으로 나타내진다.

$$K_{total} = K_g + K_c + K_s + K_r$$

여기서,  $K_{total}$ 은 다공성 물질에서의 전체 열전도도,  $K_g$ 는 기체 분자들의 충돌에 의한 열전도도,  $K_c$ 는 대류에 의한 열전도도,  $K_s$ 는 고체 골격을 통한 열전도도 그리고  $K_r$ 는 적외선 복사에 의한 열전도도이다.

다공성 물질에서의 열전달에 영향을 끼치는 요인으로는 밀도와 미세 구조가 있다. 그러나 같은 미세 구조를 가진 물질이라도 밀도가 높은 물질의 경우 전체 열전도도 값이 커지게 되며, 밀도가 비슷한 물질이라 하더라도 기공의 구조에 따라 열전도도가 달라진다.

일반적으로 스펀지(sponge)라고 불리는 열린 기공을 갖는 폴리우레탄은 큰 기공이 발달한 폼(foam)의 대표적인 예이다. 큰 기공이 발달한 폴리우레탄의 경우 기체 분자들의 충돌에 의한 열전도도가 커지게 된다. 또한 중기공(2-50nm)이 발달한 저밀도의 다공성 물질인 에어로겔의 경우 1기압의 공기의 열전도도보다 낮은 열전도도를 지닌다. 이는 에어로겔을 이루는 고체 입자들의 구조, 나노미터 단위의 셀과 기공 그리고 낮은 겹보기 밀도 등에 의한 것으로 알려져 있다. 에어로겔은 낮은 굴절률( $\sim 1$ ), 낮은 유전율( $\sim 1.1$ ), 낮은 열전도도( $< 0.025\text{W/mK}$ , 1기압), 낮은 밀도 등 단열재로서 뛰어난 물성을 보인다.

닫힌 기공을 가지는 대표적인 예로는 스티로폼이라고 불리는 폴리스타이렌폼을 들 수 있다. 닫힌 기공을 가지는 폼의 경우, 패널에 넣고 진공 상태를 유지하면 셀 안에 차있는 발포 기체가 패널 내부 압력과 평형을 이루기 위하여



확산하여 나오게 된다. 닫힌 기공을 갖는 물질의 경우 고체 골격과 발포기체에 의하여 열전도도가 달라진다.

### 2.2.1 다공성 물질에서 고체 격자에 의한 열의 전도

열전도도는 물질의 고유한 성질로 크기나 질량에 상관없이 같은 값을 갖는다. 그러나 에어로겔과 같이 미세 구조가 발달한 물질에 있어서는 그 구성물질보다 훨씬 작은 값을 갖기도 한다. 대표적인 유기 에어로겔인 리소시놀-포름알데하이드 고분자의 열전도도는 0.18W/mK이지만, 상압상온에서 R/F 에어로겔의 열전도도는 0.023W/mK 이하이며 고체 골격의 열전도도만을 고려한다면 0.015W/mK 이하라고 알려져 있다. 에어로겔의 경우, 고체 골격은 프렉탈 구조를 이루고 있으며, 이로 인하여 열전도 경로를 이루는 고체 입자의 접촉이 나빠져서 열전도가 제한된다. 실리카 에어로겔을 SAXS 방법으로 분석한 결과 프렉탈 구조를 이루고 있다는 견해가 현재 받아들여지고 있다.

고체 골격에 의한 열전도도는 Fricke등에 의하면 다음과 같이 모사된다.

$$K_s = C\beta^l$$

여기서 C는 물질에 따라 변하는 상수, 에어로겔에 대하여  $\beta$ 는 1.5, 그리고  $\rho$ 는 겉보기 밀도 [Kg/m<sup>3</sup>]이다. 한편 Caps등은 물질 고유의  $C_{v,s}$ ,  $l_s$ 와 다공성 물질의  $C_v$ ,  $l$ 이 같다고 보았다.

$$C_l = \frac{\rho_s \nu_s}{K_{s,s}} = \frac{\rho \nu}{K_s}$$

여기서 아래첨자 s는 물질의 고유 물성을 나타내게 된다. 따라서  $k_{s,s}$ 는 다공성 물질의 고체 골격의 열전도도 [W/mK],  $C_v$ 는 고체 골격의 열용량 [kJ/kgK],  $\nu$ 는 포논의 평균 속도 [m/s] 그리고  $l$ 은 포논이 충돌 전에 움직일 수 있는 평균이동경로 [m],  $\rho$ 는 겉보기 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]이고  $K_{s,s}$ 는 물질 고유 포논의 평균속도 [m/s] 그리고  $l_s$ 은 포논이 충돌 전에 움직일 수 있는 평균이동거리 [m],  $\rho_s$ 는 겉보기 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]이다.

따라서 다공성 물질의 고체 골격의 열전도도,  $k_{s,s}$ 는 다음과 같이 모사된다.

$$k_s = k_{s,s} \frac{\rho \nu}{\rho_s \nu_s}$$

### 2.2.2 다공성 물질에서 기체 분자에 의한 열의 전도

다공성 물질에서 누센 수(Knudsen number, Kn)는 기체 분자의 자유이동 경로와 기공 크기의 비로 정의된다.

$$Kn = \frac{l_{mfp}}{l_c}$$

여기서 Kn은 누센 수,  $l_{mfp}$ 는 기체 분자의 자유이동경로 [m],  $l_c$ 은 특성 길이로 평균기공 크기 [m]이다. 유체의 흐름을 구분함에 있어서,  $Kn \gg 1$ 인 경우를 누센 흐름(Knudsen flow),  $Kn \ll 1$ 인 경우를 점성 흐름(Viscous flow) 그리고  $Kn \sim 1$ 인 경우를 과도 흐름(Transient flow)이라고 한다. 기체 분자의 자유이동경로는 기체 운동학에 의하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l_{mfp} = \frac{k_b T}{\sqrt{2} n d_g^2 p}$$

여기서  $k_b$ 는 볼츠만 상수 ( $1.380 \times 10^{-23}$  J/K), T는 온도 [K],  $d_g$ 는 기체 분자의 지름 [m], p는 압력 [atm]이다. 1기압 공기의 자유이동경로는  $10^{-7}$ m 정도이므로, 실제로 접할 수 있는 대부분의 흐름은 점성 흐름이다. 일반적인 기체 분

자의 열전달 매커니즘인 기체 분자사이의 충돌에 의하여 열전도가 일어나게 된다. 누셀 흐름은 세공이 발달한 다공성 물질 내에 존재하게 된다. 세공이 발달한 물질의 경우 특성크기인 기공의 크기가 기체 분자의 자유이동경로보다 작으므로, 기체 분자가 다른 기체 분자와 충돌을 하기보다는 기공벽과 충돌하게 된다. 따라서 기체 분자들의 충돌에 의해 열전도가 억제되게 된다. 즉  $K_n$ 이 커질수록 기체 분자의 충돌에 의한 열전도도가 억제된다. 대표적인 예로 에어로겔의 열전도도는 1기압 질소 기체의 열전도도인  $0.0267\text{W/mK}$ 보다 낮다. 이는 위에서 언급한 에어로겔 고체 구조의 특이성에 기인한다. 에어로겔은  $500\text{\AA}$ 을 넘지 않는 중기공이 발달되어 있다. 이러한 미세 기공의 크기는 기체 분자의 자유 이동 경로보다 작거나 비슷하다. 즉 에어로겔의 미세 기공내의 기체의 흐름은 누셀 흐름 또는 과도 흐름으로, 기공 속 기체 분자는 다른 분자와 충돌하기보다는 기공 벽과 충돌하는 누셀 확산 경향을 보인다. 이러한 누셀 확산에 의하여 에어로겔 기공 속 기체의 열전도도는 매우 낮아지는 것으로 알려져 있다. 또한 다공성 물질 내에서 기체 분자의 충돌에 의한 열전도도는 기체 분자의 흐름이 점성 흐름을 따를수록 열린 공간에서 기체 분자의 충돌에 의한 열전도도와 비슷한 경향을 보인다.

### 2.2.3 다공질 물질에서 열의 복사

대부분의 유기 고분자들은 적외선 영역에서 적외선 복사를 잘 흡수한다. 따라서 상온에서 적외선 복사에 의한 열전도는 매우 작은 비중을 차지하게 된다. 그러나 고온의 경우 적외선 복사에 의한 열전도는 전체 열전도에 매우 큰 영향을 미치므로 고온조업용도로 제조할 때는 적외선 복사를 최대한 줄여야한다.

Caps등은 적외선 복사에 의한 열전도를 다음과 같이 예측하였다.

$$k_r = \frac{16}{3} \frac{aT^3}{PKa/\rho_s}$$

여기서  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만 상수 ( $5.67 \times 10^8 \text{W/m}^2\text{K}^4$ ),  $T$ 는 온도[K],  $Ka$ 는 흡수계수,  $\rho$ 는 시편의 겉보기 밀도 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\rho_s$ 는 시편의 참밀도 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $n$ 은 굴절률( $\sim 1$ )이다.

Zeng등은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$k_r = \frac{16}{3} \frac{aT^3}{Ka}$$

### 2.2.4 다공성 물질에서 대류에 의한 열의 전달

다공성 물질의 열전달에서 대류는 작은 비중을 차지한다. 대류에 의한 열전도도는 1기압에서 1mm이하의 기공을 갖는 다공성 물질의 전체 열전도도에 거의 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다. 대류에 의한 열전도도에서 저압에서는 기체의 평균 이동거리가 길어지므로, 더 큰 기공에서도 전체 열전도도에는 영향을 미치지 않는다.

### 2.2.5 단열 재료의 요구 특성

단열성을 높이기 위해서는 의도하는 단열소재가 열전달을 방해 할 수 있는 높은 다공성을 가져야 하며, 기공의 크기는 가능한 미세 ( $10 \sim 100\text{nm}$ )하여야 하고 그 분포가 균일하여야 한다. 이를 위해서는 단열소재의 저밀도화 ( $0.05\text{g/cm}^3$ )가 필수적이다. 그러나 밀도가 낮아질수록 소재의 기계적 강도가 약화되어 가공성이 떨어지며, 단열재로 설치된 후에도 내구성이 떨어지게 된다. 따라서 목적하는 단열소재는 저밀도이면서 동시에 내구성이 뛰어나도록 하는 상호 모순되는 물성을 갖도록 하는 것이 당면과제이다. 이를 해결하기 위해서는 미세구조의 특성을 결정짓는 주요변수의 파악과 단열재 전체의 미세 기공들이 모두 열린 기공구조로 균일한 크기를 갖도록 하여야 한다.

## 2.3 열전도도 측정 방법

열전도도의 측정법은 크게 정상상태 측정법과 전이상태 측정법으로 나눌 수 있다. 그림 2는 열전도율에 따른 적정

열전도도 측정 방법을 도시한 것으로서, 열전도도가 낮은 단열 재료의 경우 Guarded hot plate 법이나 Heat flow meter법이 적당하다.

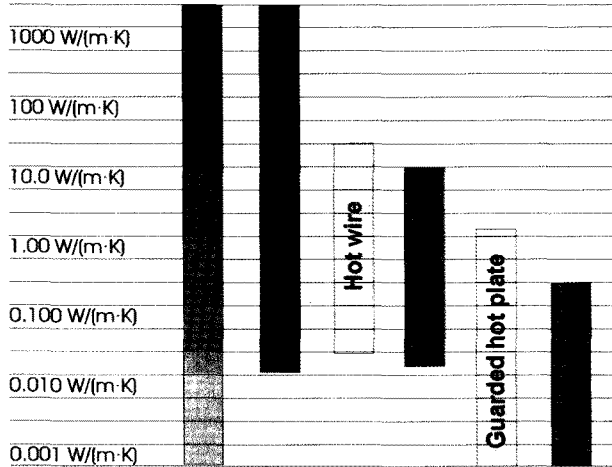


그림 2. 열전도도에 따른 열전도도 측정 방법

### 2.3.1 Heat Flow Meter 법(정상법)

단열재용으로 널리 사용하는 방법으로 두 개의 주 가열판 사이에 시료를 넣고 Heat Flux Transducer를 통과하는 열량을 계산하여 열전도도를 측정하는 방법이다.

### 2.3.2 Guarded Heat Flow Meter법(정상법)

시료의 크기가 Heat Flow Meter 법보다 작고 열전도도가 좋은 시료용으로 상판의 열이 시료를 통과 할 때 주위로 열이 손실되는 것을 막기 위해 주위에 Guard Heater를 채용한 방법이다.

### 2.3.3 Guarded Hot plate 법(정상법)

중앙에 주 열판이 있고 양쪽에 시료를 넣어 열을 중앙에서 상하로 전달하는 방법을 사용하며 Heat Flowmeter 법과는 다른 상하로 전달되는 열을 계산하여 보정 시료 없이 열전도도를 직접 측정할 수 있는 방법이다.

### 2.3.4 열선법(전이법)

열선법은 직선구간의 열원/열선이나(cross-wire technique) 열원으로부터 일정거리의 한부분을(parallel-wire technique) 측정하는 방법으로 먼저 두개의 열선과 열전대를 두 개의 시료 사이에 놓고 시간에 따라 온도가 증가하면 시료를 통해 전달되어 흐르는 열을 계산하여 열전도도를 측정하는 방법이다.

### 2.3.5 레이저법(전이법)

레이저 펄스를 디스크 형태의 시료 전면에서 조사하여 흡수된 열이 두께방향으로 이동되어져 뒷면의 온도를 상승시키는데 뒷면의 온도가 최대가 되는 시간의 half-time를 측정하여 열확산도를 측정한다. 비교적 열전달 특성이 낮은 고분자 시료의 열 방사도를 향상시키기 위해 디스크 시료 양면에 graphite 코팅을 한 후 열확산도를 측정한다.

### 3. 기존의 단열 재료로 사용되는 무기물 다공질 소재 현황

현재 단열재 시장은 크게 유기와 무기계로 나누며, 유기계의 경우 난연제의 첨가에 의한 상대적인 저온에서 난연 효과가 있으나, 어느 내열온도 이상에서는 유기물 자체의 분해로 인해 유독 가스가 발생한다. 이는 대형 화재가 아닌 데도 불구하고 화재시 치사율이 증가하는 가장 큰 원인 중의 하나이다. 그러므로 한국에서도 무기계 단열재의 개발은 이러한 시장 및 수요처의 문제점을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

국내 단열재 시장에서 유기 단열재는 Polystyrene foam이 55%, 압축보드 6%, Polyurethane foam이 29%이며 전체적으로 71%를 차지하고 있다. 무기질 단열재의 경우에는 유리면과 암면이 주종을 이루고 전체 단열재 시장의 29% 정도를 차지한다.<sup>[13]</sup>

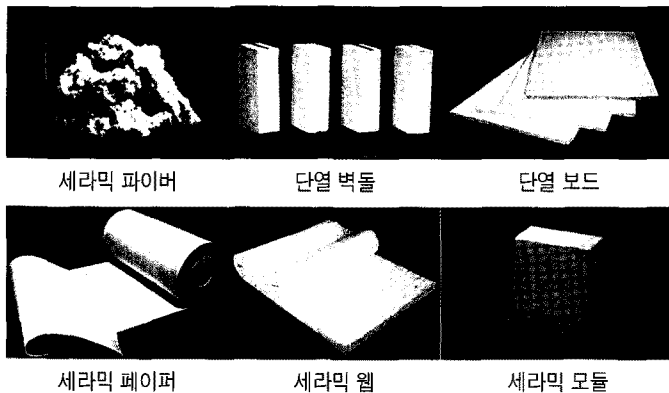


그림 3. 기존의 다양한 종류의 세라믹 단열재의 형태

#### 3.1 미네랄 울(암면)

현무암, 화산암, 안산암 등 내열성이 높은 규산 칼슘계의 광석을 전기로를 이용하여 1500~1700℃의 고열로 용융한다. 이어 고속기류 및 스피너를 이용한 원심분리 방법으로 섬유화한 다음 용도에 맞게 성형화하여 제조한다. 미세 섬유 구조로 단열효과가 뛰어나며 사용온도의 범위가 매우 넓다. 유리면과 함께 건축자재 중 흡음력이 가장 좋은 재질이다. 무엇보다 무기질 자재로 내화성이 우수, 불에 타지 않으며 화재시 유해가스 발생이 없다는 장점을 갖고 있다. 이밖에 절단가공성, 유연성, 이음매 처리가 용이하여 시공성이 좋다. 이러한 장점으로 각종 산업용 열사용 설비, 탱크, 덕트의 보온 보냉, 선박 및 기타 내화 구조의 단열, 소음설비 및 방음구조의 흡음과 차음재로 사용된다.

#### 3.2 유리면(glass wool)

석회사, 규사, 소다회 등을 응용한 유리자체를 화염, 압축공기, 원심력 등으로 확산 또는 강제로 불어 날려서 만든 면상의 섬유제품이다. 유리면은 특히 내열성이 높고 내풍화성, 전기절연성이 우수하여 암면에 비하여 산성과 흡습성이 강하기 때문에 습기가 적고 공기가 잘 통하는 곳에 저장해야 한다. 주 용도는 산업용 열설비의 보온 단열과 공조, 냉동설비 및 건축의 벽, 보온 단열 방음재로 사용된다.

#### 3.3 석면

석면이란 천연적으로 생겨 섬유상태가 된 무기질 결정 광물의 총칭을 말한다. 일반적으로 섬유로서 공업용으로 이용할 수 있는 것을 가리킨다. 즉 내진동성, 내충격성, 내열성이 매우 높고 많은 기포를 가지고 있어 흡음, 결로 방지에 효과적이거나, 암을 유발시키는 발암물질이 있음이 밝혀져 선진국에서는 현재 사용하지 않고 있다.

### 3.4 펄라이트

펄라이트는 점성의 용암이나 마그마가 지표의 호수로 흘러들어 급격히 냉각되면서 형성된 휘발분이 응집된 비정질의 암석으로 보통 회색, 갈색, 청색이며, 주성분은  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  등으로 이루어져 있다.

크게 펄라이트라고 불리는 광물에는 흑요석(Obsidian), 진주암(Perlite), 송지암(Pitch-stone) 등이 있다. 물리적으로 펄라이트는 희고 매우 기공이 많은 가벼운 물질 형태로 되어 있는 함수 화산성 유리질(Hydrated Volcanic Glass)로써 이를 폭발 성형시켜 팽창 펄라이트를 얻는다.

### 3.5 단열 특성을 이용한 파인 세라믹

가장 대표적으로 사용되는 단열재는 섬유상 세라믹으로 이루어진 섬유상 단열재이다. 요구되는 사용 온도 조건에 따라서 실리카계 섬유 단열재, 알루미늄계 섬유단열재, 탄화규소계 섬유 단열재 등이 사용되고 있다. 보다 극단적인 단열성능이 요구되는 부위에는 나노 분말과 세라믹 섬유 등이 복합화된 단열재가 적용되나, 이 경우에는 사용온도가  $1000^\circ\text{C}$  이하로 제한된다. 국외의 경우 미국, 러시아 등지에서는 실리카 섬유, 알루미늄 섬유 및 탄화규소계 섬유의 원료부터 생산 가능하며, 이를 이용한 각종 섬유상 단열재가 항공 우주 및 유도무기 부품에 적용되고 있다. 또한 미국, 영국 등에서는 실리카 나노 분말과 실리카 섬유,  $\text{TiO}_2$  등이 복합화된 나노 단열재가 패드나 성형체 형상으로 제작되어 적용되고 있다. 그림 4는 다양한 세라믹 소재에 대한  $22^\circ\text{C}$ 에서 기공률 변화에 따른 상대적인 열전도도의 변화를 나타낸 결과로서 기공률이 증가함에 따라 상대적인 열전도도가 감소하는 경향을 보여 주고 있다.

이외에도 엔지니어링 세라믹스를 이용한 열차폐 및 단열에 대한 연구는 다양하게 이루어지고 있다. 미국 항공 우주 산업에서 NASA (미 항공 우주국)는 단열소재로서 최첨단 고온 세라믹 물질을 사용하고 있다. 우주 왕복선의 외부 표면은 세라믹 타일로 덮여 있으며, 이는 지구의 대기권으로 돌아오는 동안 발생하는 약  $1300^\circ\text{C}$ 의 높은 고열로부터 우주 왕복선과 조종사를 보호한다. 최고로 높은 온도가 가해지는 앞부분 끝과 날개의 모서리 부분은 카본 피이버의 세라믹 복합체로 만들어지고, 높은 온도에서 산소와의 접촉을 차단하기 위해  $\text{SiO}_2$ 로 코팅된다.

지르코니아 세라믹 내화 격벽 코팅은 공업용 가스 터빈, 군사용 제트 엔진에 가하여 높은 온도에서 작동 가능케 하여 출력을 높이고 사용 연료의 양을 줄일 수 있게 한다. 항공기용 세라믹 부품이 버터플라이 밸브의 세라믹 베어링, 밀봉재 등에 사용되며, 세라믹 복합체 부품은 초고속 전투기의 재연소 장치, NASA 초음속 수송기의 연소 시스템, 가스 터빈 엔진 등에 사용되고 있다.

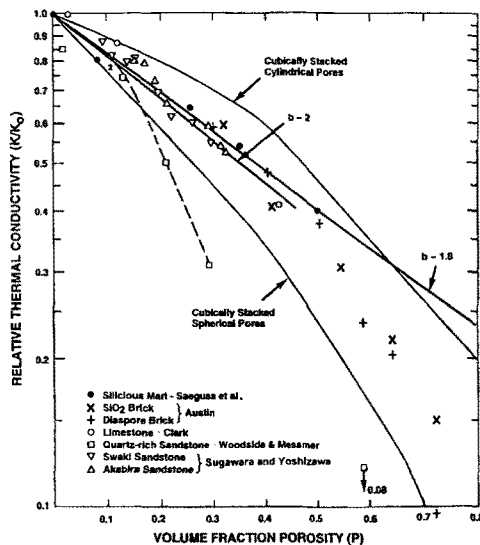


그림 4. 다양한 세라믹 소재에 대한 기공률 변화에 따른 상대적인 열전도도의 변화.<sup>[14]</sup>



## 4. 단일 소재로서의 에어로겔

### 4.1 에어로겔 소재

에어로겔(aerogel)은 졸겔 반응으로 합성된 습윤겔을 기-액 계면이 존재하지 않는 초임계조건이나 다른 방법으로 수축 없이 건조하여 겔의 나노기공구조를 그대로 유지 할 수 있도록 제조되는 물질이다. 특히 실리카 에어로겔(aerogel)은 이산화규소( $\text{SiO}_2$ ) 나노 구조체가 부식포처럼 성글게 얽혀 전체 부피의 98%를 차지하는 공간에는 공기가 가득 들어차 있으며 기공 크기가 약 5~50nm 범위로 구성된 메조기공을 갖는 다공체이다.<sup>[15]</sup>

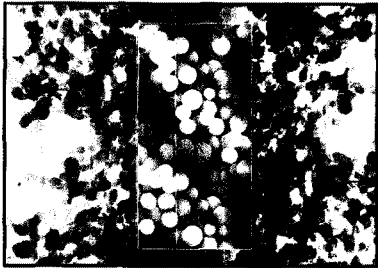


그림 5. 실리카 에어로겔의 미세구조 (배율: 20만배)<sup>[15]</sup>

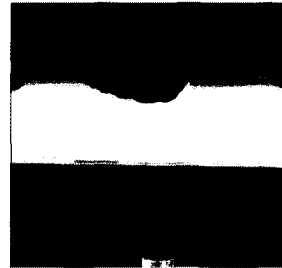


그림 6. 에어로겔의 단일 특성 평가 모습<sup>[16]</sup>

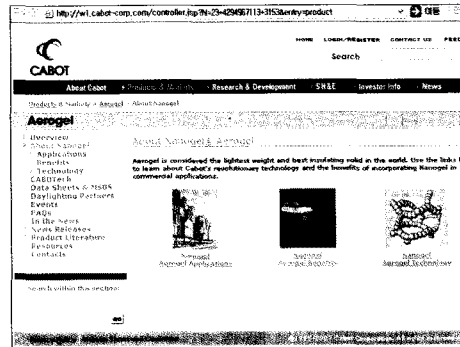
일반적으로 에어로겔의 졸겔 반응은 전구체의 가수분해(hydrolysis)에 이은 3차원적 구조를 형성하는 중합(condensation)으로 이루어진다. 대부분의 졸겔 공정에서는 친핵 반응성이 좋고 적절한 용매의 선택이 용이한 금속 알콕사이드가 전구체로 널리 사용된다. 그러나 현재 전구체로 많이 사용되고 있는 알콕사이드는 고가의 원료이므로 이를 물유리 등 값싼 물질로 대체하려는 노력이 계속되고 있다.

에어로겔을 합성하는 방법은 제조된 습윤겔을 건조하는 방법에 따라 크게 분류할 수 있다. 즉 초임계 상태에서 건조하는 방법과 상압 분위기에서 건조하는 방법으로 크게 구분할 수 있다. 일단 겔이 생성되면 겔 구조 내에 함유되어 있는 용매를 제거하는 건조 과정이 필요하다. 건조 과정에서 겔의 기공 내에 액체와 증기가 공존하게 되고 액체가 증발함에 따라 기-액 계면에 표면장력에 의한 메니스커스(meniscus)가 형성되는데, 이 때 기공구조를 파괴할 수 있는 기공 내 기-액 계면에서의 모세관압력이 발생한다. 일반적으로 사용되는 용매에 대하여 미세 기공에서의 모세관 압력은 매우 큰데, 예를 들면 반경 20nm의 실린더형 기공에 에탄올이 채워져 있는 경우,  $\sigma = 22.75 \text{ dyn/cm}$ ,  $\rho = 0.7893 \text{ g/cm}^3$ 으로 압력은 22.5기압이나 된다. 이 힘은 젖은 기공 벽과 메니스커스가 만나는 매우 좁은 지역에 작용하므로 이러한 국부적인 힘에 의하여 겔이 수축하여 그 구조가 파괴될 가능성이 높다. 그러나 모세관 압력 그 자체보다도 다른 크기의 기공들 간의 압력 차이가 기공 구조에 오히려 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제는 일정한 크기의 기공 즉, 기공 크기 분포가 좁은 겔을 제조함으로써 최소화 할 수 있다. 이를 위해 가수분해나 중합속도를 조절하여 좁은 기공 크기 분포를 가지는 겔을 형성시키기 위하여 DCCA(Drying Control Chemical Additives)라고 불리는 폼아미드(formamide)나 글리세롤과 같은 유기물을 사용 할 수 있다.

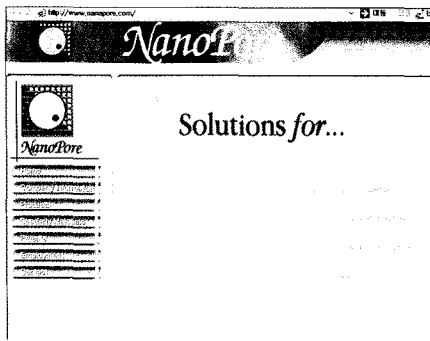
나노 기공성 에어로겔은<sup>[17-23]</sup> Kistler가 1931년에 최초로 sodium silicate 용액을 응축시킨 실리카 수화겔(hydrogel)을 초임계 건조하여 투명성과 낮은 밀도를 갖는 초다공성 실리카 에어로겔을 제조한 이후에 alumina, tungsten oxide, ferric oxide, tin oxide, cellulose nitrate, gelatin, agar, egg albumen 그리고 rubber에 이르기까지 다양한 물질이 합성되었으나 그 당시에는 별 관심을 끌지 못하였다. 그러나 1970년대에 접어들면서 많은 연구자들이 에어로겔의 중요성을 재인식하게 되었으며 그 중 Techner 등은 산소와 로켓연료를 저장하기 위한 재료를 개발하는 과정에서 TMOS(tetramethylorthosilicate)를 메탄올 용액내에서 가수분해시켜 제조한 습윤겔(wet gel)을 고온 초임계 건조하여 고 순도의 실리카 에어로겔을 합성할 수 있는 새로운 공정을 개발하였다. 에어로겔의 실용화에 대



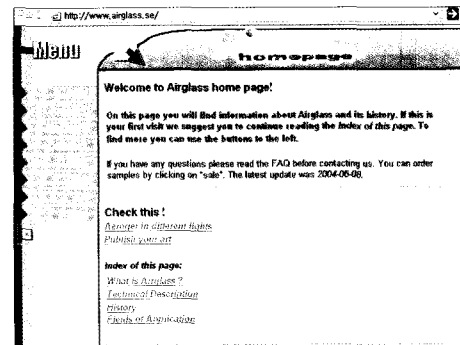
(a) Aspen사



(b) Cabot사



(c) Nonopore사



(d) Airglass사

그림 7. 현재 에어로겔을 상용화 중인 외국 기업 홈페이지

한 연구는 1980년대 초부터 이루어지기 시작하였으며 특히 입자 물리학 분야에서 Cherenkov radiation의 매개체로서 실리카 에어로겔의 응용성을 연구하였다. 또한 1983년에 Hunt와 Berkely Lab.의 Microstructured material Group은 고가이고 독성이 강한 TMOS를 TEOS로 대체한 공정을 개발함과 동시에 습윤겔 내부의 알코올을 초임계조건 이전에 액상 이산화탄소로 대체한 저온 초임계 공정도 개발되었다. 1980년대 후반에 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서는 공기 밀도의 3배 정도에 불과한 0.003g/cm<sup>3</sup>의 가장 낮은 밀도의 실리카 에어로겔을 제조하는데 성공하였다. 반면에 Pekala<sup>9)</sup>는 resorcinol 혹은 molamine을 formaldehyde와 축합반응시켜 제조한 습윤겔을 저온 초임계 건조하여 유기질 폴리머 에어로겔을 합성하였으며 또한 RF(resorcinol-formaldehyde) 에어로겔을 열분해하여 카본 에어로겔(carbon aerogel)을 제조하기도 하였다. 최근 Marketech International은 Berkeley Lab. 및 LLNL 등과 공동으로 저온 초임계조건 공정을 이용하여 제조한 silica, resorcinol-formaldehyde 및 carbon aerogel 등의 상업화를 추진 중에 있다. 그림 7은 현재 에어로겔을 상용화 중인 외국 기업 홈페이지를 정리한 것이다. 또한 표2는 현재 상용화되고 있는 미국 Aspen사의 에어로겔 특성을 정리한 것이다.

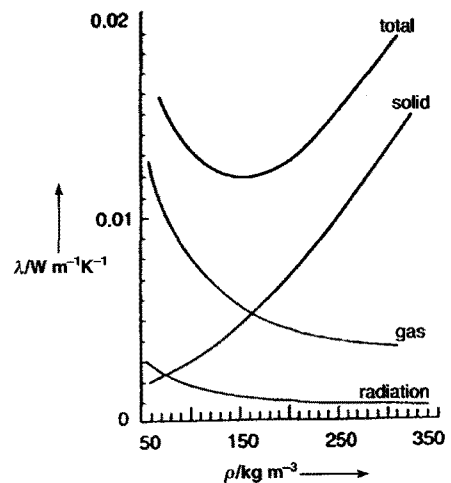


그림 8. 에어로겔의 열전도도 특성 분석<sup>11)</sup>

표 2. 현재 상용화 되고 있는 미국 Aspen사의 에어로겔 특성

Product Name	Nominal Thickness		Thermal Conductivity		Density		Maximum Use Temperature		Typical Applications
	mm	in	mW/m·K	Btu-in/h·ft <sup>2</sup> ·°F	g/cc	lb/ft <sup>3</sup>	°C	°F	
<b>Dryogel™ 6000</b> Data Sheet MSDS-English	6.0	0.24	13.5	0.094	0.13	8.0	40	100	Cryogenic pipelines, vessels, and equipment
<b>Spaceloft™ 3251</b> Data Sheet MSDS-English	3.0	0.12	14.0	0.087	0.15	9.4	200	390	Low-pressure steam pipes, vessels and equipment, subsea pipelines, hot pipes, vessels, and equipment, footwear
<b>Spaceloft™ 6251</b> Data Sheet MSDS-English	6.0	0.24	14.0	0.097	0.15	9.4	200	390	CASE STUDIES: Engine Heat Shielding
<b>Spaceloft™ 9251</b> Data Sheet MSDS-English	9.0	0.36	14.0	0.097	0.15	9.4	200	390	Hot Water Pipes
<b>Spaceloft™ 6250</b> Data Sheet MSDS-English	6.0	0.24	12.5	0.087	0.13	8.0	200	390	Solar Panels
<b>Pyrogel® 2250</b> Data Sheet MSDS-English MSDS-French MSDS-Italian	2.0	0.08	15.5	0.107	0.17	10.7	250	480	Medium-to-high pressure steam pipes, vessels and equipment; aerospace & defense applications; fire barriers; welding blankets
<b>Pyrogel® 6250</b> Data Sheet MSDS-English MSDS-French MSDS-Italian	6.0	0.24	15.5	0.107	0.17	10.7	250	480	CASE STUDIES: Underground Steam Lines Ship Boiler Exhaust Duct
<b>Pyrogel® 6350</b> Data Sheet MSDS-English MSDS-French MSDS-Italian	6.0	0.24	15.5	0.107	0.17	10.7	350	660	Insules-Mt. Everest Insules-Ultramarathon

#### 4.2 단열 소재로서 에어로겔

실리카 에어로겔의 열전도도는 0.02W/mK 이하로 기존의 유기 혹은 무기단열재보다 열전도도가 낮으며, 진공하에서는 더욱 낮은 값을 갖는 초단열 재료이다. 최근에는 LNG 수송선, 냉장고, 냉동기 및 열축적 장치 등에 적용하기 위한 실리카 에어로겔 연구가 이루어지고 있다. 그림 8은 에어로겔의 열전도도 특성을 분석한 것으로 열전달의 매개체인 기상, 고상, 복사전도를 구분하여 각각의 영향에 대하여 나타낸 것이다. 에어로겔의 고상 입자에 의한 열전도도는 밀도가 증가함에 따라 증가하며, 기상 및 복사에 의한 열전도도는 밀도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여 준다. 전체적인 에어로겔의 열전도도는 밀도가 0.150g/cm<sup>3</sup>일 경우 최소값을 갖는다. 또한 기상에 의한 열전달은 진공처리

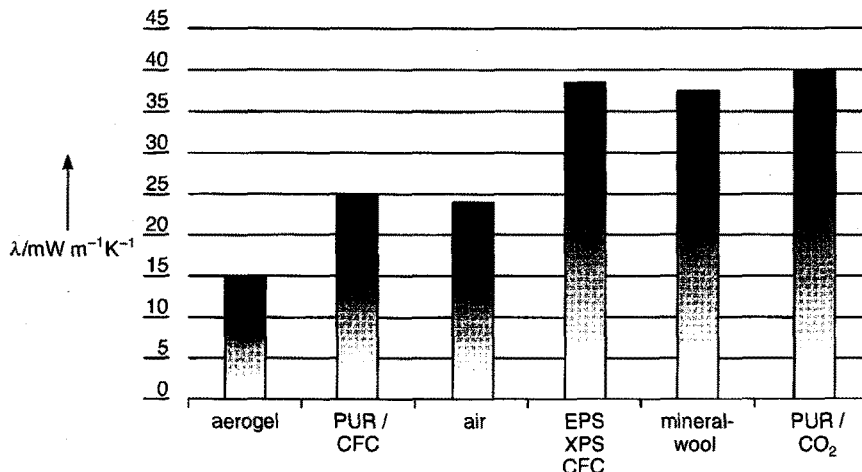


그림 9. 기존의 단열 특성이 우수한 재료와의 열전도도 비교<sup>[25]</sup>



에 의하여 저지될 수 있다. 예로서 진공 상태에서 300K의 온도에서 열전도도는  $0.010\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 에 해당하며, 공기 중에서 열전도도  $0.020\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 에 절반에 해당한다. 실리카 에어로겔의 열전도도를 억제할 수 있는 또 다른 가능성은 복사열에 의한 전달을 억제하는 방법으로 고온에서 매우 중요하다. 왜냐하면 복사열의 최대치는 실리카 에어로겔이 충분히 흡수하지 않는 3-5 $\mu\text{m}$  파장 영역 대이기 때문이다. 이 온도 영역에서의 열전도도를 억제시키기 위해서는 카본이나  $\text{TiO}_2$ 와 같은 원적외선 불투명화제를 첨가함으로써 조절이 가능하다. 그림 9는 에어로겔이 기존의 모든 고체 물질의 열전도도와 비교하여 최소값을 갖는 것을 보여준다. 그러므로 현존하는 단열 재료 중 가장 훌륭한 것은 분명하며, 추가적으로 내열성이 우수하며 투명하다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 특성을 이용하기 위한 방안으로 창 유리 시스템의 효율화에 적용하고자 많은 노력이 이루어지고 있다.

#### 4.3 에어로겔 상용화를 위한 노력<sup>[26]</sup>

에어로겔은 우수한 물성을 지니고 있음에도 불구하고 경제성 문제와 몇 가지 기술적인 문제로 특수 용도로 활용 되는 것을 제외하고는 아직 본격적인 상용화가 이루어지지 않고 있다. 사실 솔-겔 반응의 일반적인 원료인 알록사이드는 고가이고 겔의 초임계 건조를 위해서는 고온, 고압이 필요하므로 상대적으로 에너지 소모량이 클 수밖에 없다. 여기에서는 에어로겔의 상용화를 위하여 극복하여야 할 몇 가지 문제점에 대하여 살펴보도록 한다.

(a) 저가의 솔-겔 원료 사용 : 현재 전구체로 많이 사용되고 있는 알록사이드는 고가의 원료이므로 이를 값싼 물질로 대체하려는 노력이 계속되고 있다. 실리카 에어로겔 제조시 TMOS의 1/14, TEOS의 1/5 정도로싼 물유리를 사용하는 경우에도 전체 제조경비에서 원료비가 차지하는 비율이 40% 이상 되고, 세척 및 용매 치환과 같은 추가 처리 공정이 필요한 단점을 지니고 있다. 최근에 개발된 비알록사이드 솔-겔 공정이 본격적으로 도입되면 제조 비용의 절감이 기대된다. RF나 MF와 같은 유기 에어로겔에서도 전체 제조비의 50% 이상을 차지하는 고가의 원료비가 가장 큰 문제이며 이러한 점에서 비교적 저가의 원료를 사용하는 phenol-formaldehyde (PF) 에어로겔의 상용화 가능성이 기대된다.

(b) 건조 조건의 완화 : 일반적으로 용매로 사용되는 알코올을 그대로 초임계 건조하는 경우에는 공정 중에 폭발의 위험성이 있을 뿐만 아니라 고온, 고압이 필요하므로 에너지 소비나 장치 비용 면에서 상용화에 매우 불리하다. 따라서 조업 온도를 크게 낮출 수 있고 비교적 안전한 이산화탄소 초임계 공정의 경우 용매 치환 공정이 추가로 필요 하기는 하지만 전반적으로 유리한 것으로 보인다. 최근에는 New Mexico 대학과 Sandia 국립연구소 등을 중심으로 보다 완화된 조건에서 건조시켜 에어로겔을 제조하려는 시도가 이루어져 부분적으로 성과를 거두고 있다. 실제로 Nanogel도 물유리로 제조한 hydrogel의 표면을 먼저 silation시켜 기공 구조를 안정시킨 후 상압에서 일반 건조를 통해 제조된 것으로 알려져 있다.

(c) 제조 형태의 다양화 : 에어로겔은 안정된 구조를 지니고 있으므로 자체 무게의 1,000배 이상도 지탱이 가능하지만 초경량이므로 충분한 기계적 강도를 지니고 있다고 할 수 없다. 또한 범용으로 사용되기 위해서는 물성의 큰 변화 없이 다양한 형태로 제조가 가능하여야 할 것이다. 에어로겔은 특수 용도로 사용되는 고가의 단일체 형태를 제외 하고는 일반적으로 분말이나 입자의 형태로 제조되는데, 이러한 경우에는 molding 등을 통해 사용 목적에 적합한 형태로 제작하여야 할 것이다. 그러나 이때 에어로겔의 물성을 그대로 유지하는 것이 쉽지 않아 이를 극복하기 위하여 구조적 matrix를 사용한 복합 에어로겔의 제조도 시도될 필요가 있다. 미국의 Aspen Aerogel사의 flexible aerogel blanket은 이러한 면에서 다양한 분야에서의 활용 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

(d) 물성의 개선 및 미세 조절 : 복사에 의한 열손실을 최소화하기 위하여 carbon black과 같은 opacifier가 첨가된 에어로겔을 제조하여 단열도를 더욱 높이거나, 기계적 강도를 높이기 위한 복합 에어로겔의 제조, 단일형 실리카 에어로겔의 투명도를 높이기 위한 무중력 상태에서의 솔-겔 합성 등과 같은 물성의 개선을 위한 다양한 연구가 시도 되고 있다. 또한 사용 목적에 따른 에어로겔 특유의 물성을 솔-겔 변수나 초임계 조건의 변화로 미세하게 조절하기 위한 노력도 계속되고 있다.

#### 4.4 KIMS에서의 에어로겔 연구 현황

구미 선진국들의 연구개발 성과에 비하면 국내에서의 에어로겔 연구는 미미한 수준이라고 할 수 있다. 10여 년 전부터 에어로겔에 대한 연구가 KIST, 서강대, 연세대 등에서 진행되고는 있다. 또한 최근 들어 에너지연구원, 생산기술연구원 등의 출연연구소를 중심으로 양산화를 위한 연구개발이 결실을 맺고 있는 실정이다.

현재 KIMS에서는 차세대 군용 전원특화연구센터 사업의 일환으로 마이크로터빈용 고온 단열 및 내열 소재 기술에 관한 연구를 수행하고 있다. 본 연구의 한 분야로서 다공성 세라믹스 기지상에 에어로겔 등의 나노물질을 in-situ로 복합화시킴으로서 기계 구조적 특성 및 나노 기공소재의 단열 등 기타 특성을 동시에 구현할 수 있는 복합소재에 관한 연구가 진행 중에 있다.

이와 같은 연구의 배경은 오랜 기간 많은 연구가 이루어진 에어로겔이 자체적으로 우수한 특성을 가지고 있어 많은 응용범위에 이용되고는 있으나 아직도 많은 부분이 실용화에 제약을 받고 있는 실정이다. 그 이유는 자체적으로 기계적 강도를 가지지 않으므로 분말형태, 비드(bead) 형태, 브랭킷트(blanket) 형태 등으로 응용이 한정되기 때문이다. 그러므로 다공질 세라믹스와 에어로겔의 복합화 공정은 각자의 독특한 장점을 발현시킴으로써 기존의 공정에서 가질 수 없는 특별한 특성을 가질 수 있을 것으로 판단된다. 그림 10은 KIMS에서 제조된 복합화 에어로겔 소재의 모습으로, 글리세롤 첨가유무에 따른 건조 수축률을 제어함으로써 건전한 세라믹/에어로겔 복합화를 보여주고 있다. 즉 기존의 합성공정과는 달리 다공질 세라믹스 소재 및 구조체가 용액에 잠입된 상태에서, 초음파 합성공정(sono-gel process)을 이용하면 다공성 세라믹 소재 및 구조체 내부에서 자발적으로 균일한 졸-겔 반응을 일으켜 자체적(in-situ process)인 합성 공정으로 복합화된 소재를 얻을 수 있다. 즉 다공질 세라믹스의 구조적 특성 및 에어로겔의 나노 기공 특성을 극대화시킴으로써 향후 차세대 단열재만 아니라 흡착제, 담체, 전극 소재로의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

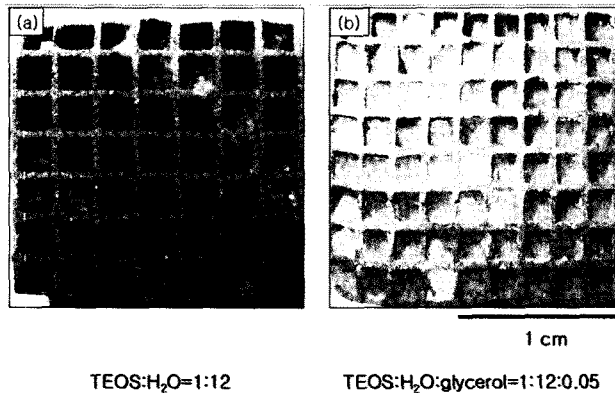


그림 10. KIMS에서의 에어로겔/세라믹스 복합화 공정 모습

## 5. 결 론

다공질 재료는 기존의 치밀한 재료가 갖지 못하는 특성을 부여할 수 있기 때문에 치밀한 재료와 더불어 산업적 중요성이 증대되고 있으며, 기존 재료가 갖지 못하는 새로운 특성을 창출할 수 있다. 특히 단열 소재는 기공 구조가 단열 특성을 제어함으로써 산업적 중요성이 증대되고 있으며, 앞으로 기존의 유기단열재를 무기단열재로 전환시키려는 노력은 많은 진행이 예상되어 진다. 2009년 LG Business insight 리포트에서 미래 유망 소재를 환경친화형, 에너지 절약형, 정보화 지원형, 첨단 기능형 등 4가지로 분류하였으며, 에너지 절약형 소재 중 차세대 단열재가 향후 유망

한 소재의 하나로 제시되고 있다. 이때 대표적인 차세대 단열재로 에어로겔이 일정 역할을 할 것으로 예상된다. 기존의 무기 단열 소재에 비하여 에어로겔 소재는 미래의 단열재로 평가받고 있으며, 1930년대에 나왔지만 1997년 화성탐사 로봇 소저너의 단열재로 쓰이면서 다시 주목받기 시작했고 앞으로 많이 기대되는 소재이다. 향후 대량 생산에 의한 건축자재는 물론 촉매, 흡착제, 자동차 소재로서의 다양한 응용이 기대되며, 특히 기계구조적 특성 향상 및 응용성 확대를 위한 에어로겔의 복합화 공정 등도 많은 연구가 기대된다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] F. F. Lange and K. T. Miller, *Adv. Ceram. Mater.*, 2 (4) 827-31 (1987).
- [2] J. Adler, *Int. Appl. Ceram. Technol.*, 2 (6) 429-439 (2005).
- [3] M. Fukushima, Y. Zhou, H. Miyazaki, Y. Yoshizawa, K. Hirao, *J. Am. Ceram. Soc.*, 89 (5) 1523-29 (2006).
- [4] Y.-W. Kim, S. H. Kim, I. H. Song, H. D. Kim, and C. B. Park, *J. Am. Ceram. Soc.*, 88 (10) 2949-2951 (2005).
- [5] P. Colombo and J. R. Hellmann, *Mater. Res. Innovat.*, 6, 260-72 (2002).
- [6] Global Information Inc. *World Insulation to 2012 (Industry forecasts for 2012 & 2017)*.
- [7] 조홍곤, 배영문, 강현무 “건축용 단열재료”, 정보통신연구진흥원, 2002.
- [8] 유기풍, “유기계 초경량 단열재 개발”, 보고서, 산업자원부 (2000).
- [9] J. Gross, J. Fricke, R. W. Pekala, L. W. Hrubesh, *Phys. Rev. B.*, 45(22) 775 (1984)
- [10] L. B. Loeb, “The kinetic Theory of Gases”, Dover publications, 31-237(1934)
- [11] L. W. Hrubesh, R. W. Pekala, *J. Mater. Res.*, 9(3) 731 (1994).
- [12] J. Fricke, *J. Non-cryst. Solid*, 147, 356 (1992).
- [13] 안영수, “신 단열재제조기술 최종 보고서” 에너지기술연구원 (2001)
- [14] Roy W. Rice, “Porosity of Ceramics”, Marcel Dekker, Inc, pp. 343 (1998).
- [15] Katalin Sinkó, “Influence of Chemical Conditions on the Nanoporous Structure of Silicate Aerogels”, *Materials*, 3, 704-740 (2010).
- [16] Hüsing Nicola and Schubert Ulrich, *Angew. Chem. Int. Ed.* 37, 22-45 (1998).
- [17] S.S Kistler, “Coherent Expanded Aerogels and Jellies,” *Nature*, 127, 741(1931).
- [18] 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 (1994)
- [19] 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).
- [20] 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)
- [21] R. W. Pekala. C. T. Alviso. and D. LeMay. “Organic Aerogel; a New Type of Ultrastructured Polymer”; Presented at the 5th Ultrastructure Processing Conference, Orlanodo. FL. Feb., 1991
- [22] 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 tansactions*, 31, Ed. K. Ishizaki, Westerville, Ohio, 1992.

- [23] 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)
- [24] J. Fricke, Spektrum der Wissenschaft 1988, 7, 60; ibid. 1992, 11, 14; Sci. Am. 1988, 256(5), 92 (1988)
- [25] F. Schwertfeger, "Future Special Science" the Hoechst magazine, 1997, 2, 28.
- [26] 서동진, "에어로겔의 연구개발 동향" 나노기술분석보고서, NANO WEEKLY, 187호 (4월7일) (2006)

## Acknowledgments

본 기고는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대 군용 전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.



송 인 혁

- 재료연구소 기능재료연구본부 엔지니어링세라믹 연구그룹 책임연구원
- 관심분야 : 다공질 재료, 세라믹 분말 공정
- E-mail : sih1654@kims.re.kr



박 영 조

- 재료연구소 기능재료연구본부 엔지니어링세라믹 연구그룹 책임연구원
- 관심분야 : 구조세라믹스, 방음소결, 세라믹스필터
- E-mail : yjpark87@kims.re.kr



윤 희 숙

- 재료연구소 기능재료연구본부 엔지니어링세라믹 연구그룹 선임연구원
- 관심분야 : 나노다공체, 나노바이오, 나노에너지
- E-mail : yuni@kims.re.kr



황 기 영

- 국방과학연구소 1기술연구본부 5부 PM
- 관심분야 : 내열/단열 설계 및 열해석
- E-mail : kyhwang@add.re.kr



최 상 규

- 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부 책임연구원
- 관심분야 : 고속/고정밀 회전기기, Micro Power Generation
- E-mail : skchoi@kimm.re.kr