

## 범용 단열재로 활용하기 위한 실리카 에어로젤 블랭킷의 처리 기술

최재욱<sup>1</sup>, 조영수<sup>2</sup>, 서동진<sup>1\*</sup><sup>1</sup>한국과학기술연구원 청정에너지연구센터, 02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길5<sup>2</sup>광장이노텍, 13516 경기도 성남시 분당구 판교로 700, D동 206호

(2023년 8월 29일 접수; 2023년 10월 12일 수정본 접수; 2023년 10월 12일 채택)

## Silica Aerogel Blanket Processing Technologies for Use as a Widespread Thermal Insulation Material

Jae-Wook Choi<sup>1</sup>, Young Su Cho<sup>2</sup>, and Dong Jin Suh<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Clean Energy Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Hwarang-ro 14-gil 5, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea<sup>2</sup>Gwangjang Innotech, D-206, 700, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13516, Korea

(Received for review August 29, 2023; Revision received October 12, 2023; Accepted October 12, 2023)

## 요 약

에어로젤은 지금까지 알려진 가장 단열성이 우수한 소재이지만 유연성이 없고 강도가 매우 낮아 부직포나 섬유에 에어로젤을 담지한 블랭킷이 현실적으로 가장 활용이 가능한 형태이다. 그러나 에어로젤 블랭킷도 분말 발생을 피할 수 없고 유연성이 부족하고 변형 가능성이 있는 문제가 있으므로 아직은 범용으로 사용되지는 못하고 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 진공 처리, 표면 처리, 복합 소재화 기술을 적용하였고 일부 시제품도 제작하였다. 에어로젤 블랭킷을 알루미늄 시트로 감싼 다음 네 끝을 봉하고 진공을 뽑으면 단열성이 블랭킷 자체보다도 우수한 소재가 될 수 있다. 에어로젤 블랭킷을 수지로도 포하여 표면 처리하면 에어로젤 성형체를 만들 수 있다. 에어로젤 블랭킷에 여러 겹으로 수지나 섬유로 라미네이팅하여 복합체로 만들면 유연성을 지닌 단열소재로 활용할 수 있다. 특히 기공이 조절된 테플론 멤브레인을 활용한 복합체는 투습 및 방수 기능까지 보유하여 의복에 사용할 수 있다. 수지와 섬유의 에어로젤 블랭킷 복합체를 활용하여 방한화용 깔창과 야외용 깔개 시제품도 제작하였다. 에어로젤을 활용하여 제작한 깔창 및 야외 깔개의 열전도는  $20 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  이하로 단열성이 뛰어났으며, 유연성과 내구성도 우수하였다.

주제어 : 에어로젤, 블랭킷, 단열, 복합체

**Abstract :** Aerogel is the most excellent insulation material known to date, but it is inflexible and has very low strength. A blanket containing aerogel in a nonwoven fabric or fiber is currently the most practical form. However, aerogel blankets are not yet widely used because they cannot avoid dust generation when handled, lack flexibility, and can possibly deform. In this study, vacuum treatment, surface treatment, and composite materialization technology were applied to solve this problem, and some prototypes were also made. If an aerogel blanket is wrapped in an aluminum sheet, sealed at the four ends, and vacuumed, it can become a material with better insulation than the blanket itself. An aerogel molded body can be made by coating the aerogel blanket with resin and treating the surface. If the aerogel blanket is multi-packed and laminated with resin or fiber in multiple layers to make it a composite material, it can be used as a flexible insulation material. In particular, this composite material, which utilizes a Teflon membrane with controlled pores, is breathable and waterproof, so it can be used for clothing. Prototypes of insoles for winter boots and outdoor roll mats were also produced using aerogel blanket resin and fiber composites. These prototypes showed low thermal conductivity of less than  $20 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , with good flexibility and durability.

**Keywords :** Aerogel, Blanket, Thermal insulation, Composite

\* 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.2023.29.4.237 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 젤에서 액체가 차지하는 부분을 그대로 공기가 차지하는 구조로 합성된 초다공성의 고체 물질이다. 1931년 Samuel Kistler가 에어로젤을 최초로 합성한 이후로 [1,2] 그 특유의 초다공성과 나노 영역의 3차원 기공 구조에 기인한 물성을 활용하여 다양한 분야에서의 가능성이 모색되고 있다[3-8]. 그중에서도 공기보다도 더 낮은 열전도도를 가진 실리카 에어로젤의 초단열성이 가장 주목받고 있으며 상업적인 활용을 위해서는 목적에 맞도록 어떤 형태로 제품화할 것인가가 범용화의 관건이라고 할 수 있다.

젤에서 액체 부분이 공기로 치환된 형태 자체, 소위 모노리스(Monolith)가 에어로젤 고유의 구조를 그대로 지니고 있어 초경량, 초단열이라는 에어로젤의 특성을 가장 잘 나타내지만 기계적 강도가 낮아 부서지기 쉽기 때문에 그 형태로는 매우 제한적인 용도로만 사용할 수 있다. 그래서 현재 상업적으로는 에어로젤 특유의 물성은 다소 저하되더라도 분말, 입자의 형태를 사용하거나 지지체에 에어로젤을 포함시켜 사용하고 있다. Cabot의 ENOVA®, JIOS의 AeroVa®와 같은 분말 형태는 도포 용액, 페인트 등에 넣어서 사용하고, Cabot의 LUMIRA®와 같은 입자 형태는 천정이나 벽면의 반투명 창 내부 충전재로 사용하고 있으나 활용되는 범위는 역시 제한적이다[9,10]. 반면에 세계적으로 미국의 Aspen Aerogels가 주도하고 있는 섬유나 부직포 등에 에어로젤을 담지시켜 사용하는 이불이나 시트와 같은 형태의 에어로젤 블랭킷(blanket)은 공장의 파이프, 용기 단열, 건축 단열 등에 사용되며 현재 가장 많이 사용되는 형태라고 할 수 있다[11]. 실제로 Aspen Aerogels는 고온용, 저온용, 건축용 등 용도에 적합한 블랭킷 형태의 여러 종류를 공급하고 있다. 그러나 에어로젤 블랭킷은 사용할 때 담지된 에어로젤 입자가 외부로 유출 및 비산되는 구조적인 문제점이 있을 뿐만 아니라 유연성이 부족하고 변형 가능성도 있어 다양한 용도로 사용하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 현재 가장 현실적으로 사용이 가능한 형태인 블랭킷형 에어로젤에 적용할 수 있는 몇 가지 기술을 접목하여 블랭킷 자체가 가지는 문제점을 극복하고 범용 단열재로서의 활용 가능성을 높이고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 에어로젤 블랭킷 원재료

Aspen Aerogels에서 공급하는 블랭킷이 여러 종류가 있으나 폴리에스테르계 강화섬유를 모재로 하는 건축용 단열재 Spaceloft를 원재료로 사용하였다. 제품은 두께가 5 또는 10 mm 형태로 제공되지만 필요한 경우에는 얇은 두께로 슬리팅(slitting) 하여 사용하였다. 실제로 다른 모재를 사용하는 Aspen Aerogels의 에어로젤 블랭킷 제품은 얇은 두께로 슬리팅하면 부스러져 본 연구에서는 사용할 수 없었다. 제조사에서 제공하는 Spaceloft 물성은 Table 1에 나타내었다.

**Table 1.** Physical properties of Spaceloft silica aerogel blanket

Property	Value	Comments
Thickness (mm)	5, 10	
Maximum use temperature (°C)	200	
Color	White	
Density (g cc <sup>-1</sup> )	0.15	
Hydrophobic	Yes	
Material form	1,450 mm wide	
Thermal conductivity (mW m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	13.1	at 0°C
	13.6	at 25°C
	14.3	at 50°C
	16.4	at 100°C
	19.3	at 150°C
	23.0	at 200°C

### 2.2 에어로젤 블랭킷의 진공 처리

기밀성을 가지는 외피 봉지재에 에어로젤 블랭킷을 심재로 넣고 내부가 진공상태가 되도록 처리하여 밀봉하였다[12]. 외피 재료는 일반적으로 진공 포장기에 사용하는 알루미늄 또는 비닐 필름을 사용하였다. 특히 가열 밀봉성 배리어(barrier) 필름을 사용하여 열프레스 접착 진공 처리를 하여 기밀성이 더욱 우수하고 완만한 형태의 3차원 구조를 구현할 수 있도록 하였다.

### 2.3 에어로젤 블랭킷의 수지 도포 및 표면 처리

에어로젤 블랭킷 상에 점도가 조절된 수지 조성물을 가압 도포하고 가열하거나 자외선 조사로 용매를 제거하여 수지 도포막을 형성하였다[13]. 열가소성 수지, 열경화성 수지, 광경화성 수지를 모두 사용이 가능하여 적절한 수지를 선택하여 수지 도포된 블랭킷의 물성의 조절이 가능하였다. 필요한 경우에는 금형 틀에 수지 도포된 에어로젤 블랭킷을 투입하여 수지 도포막이 형성된 결과물이 금형 틀의 성형부에 해당하는 형상으로 성형되게 하였다. 수지 조성물로 폴리아미드(Polyamic acid) 용액을 사용하여 가열하면 폴리이미드(Polyimide) 도포막이 형성되어 고온에서도 견딜 수 있는 에어로젤 블랭킷 성형체를 만들 수 있다[14]. 폴리아미드 용액은 Dianhydride계 단량체로 Pyromellitic Dianhydride(PMDA)와 Diamine계 단량체로 4,4'-Oxydianiline(ODA)를 1:1 몰비로 N-methyl-2-pyrrolidone(NMP)를 용매로 사용하여 중합하였으며, 적절한 점도를 유지하기 위해 고형분의 농도는 15~20% 정도가 되도록 조절하였다.

### 2.4 에어로젤 블랭킷의 다층 복합화

제품으로 공급되는 에어로젤 블랭킷은 두께가 5 또는 10 mm인 형태만 있으므로 복합체 제조를 위해서는 2 mm 이하의 얇은 두께로 슬리팅하였다. 슬리팅한 소재를 부직포와 합포한 후 퀴팅(Quilting) 장비를 이용하여 누빔작업을 하였다. 이 과정은 유연성을 안정적으로 확보하고 실제 소재를 장기간 사용할 때 블랭킷이 뭉치는 것을 방지하기 위함이다. 다음에는 일정 온도와 압력으로 핫멜트(Hot Melt) 접착제를 이용하여 테플론

(PTFE) 필름을 압착하여 적층하였다. PTFE 필름은 소재의 투습 방수성을 확보하기 위한 것으로 전체 두께에 영향이 거의 없도록 30~40 μm 두께를 유지하였다. 마지막으로 부직포에 누벼진 에어로젤 블랭킷에 PTFE 적층된 소재의 위와 아래에 외피와 내피를 적층하여 에어로젤 블랭킷 다층 복합체를 제조하였다.

### 2.5 소재의 특성 분석

가장 기본적인 열전도도는 자체적으로 측정하였고 열저항성, 투습저항성, 두께, 면밀도는 공인시험기관인 FITI시험연구원에 의뢰하여 KS 표준 시험방법으로 측정하였다. 이러한 물성은 PTFE까지 적층된 에어로젤 블랭킷 복합체에 대해서만 측정하였다.

열전도도는 Netzsch사의 heat flow meter 모델 HFM 436/3/1 Lambda를 이용하여 측정하였다. 이 기기는 ISO 8301과 ASTM C518을 적용하여 0.005~0.5 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> 범위의 열전도도를 측정할 수 있는 장비이다. 또한 측정값의 신뢰도를 높이기 위하여 수시로 SRM1450C 표준시료를 이용하여 열량 센서의 출력을 보정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 진공 처리된 에어로젤 블랭킷

VIP (Vacuum Insulation Panel)는 열전도도가 7 mW m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> 정도로 매우 우수하지만, 고가이고 구조상 활용할 수 있는 분야가 매우 제한적이다. 그러나 일반적인 건축물에 사용되는 저가의 유무기 단열재와는 별도로 특별히 높은 수준의 단열이 필요한 건축물의 경우에는 VIP가 에어로젤과 함께 고려할만한 단열재가 될 수 있다[15,16]. VIP의 단열성은 시간이 지남에 따라 내부로 수분이나 공기의 확산으로 인해 점차 낮아지는 근본적인 문제점을 가지고 있는데 심재로 에어로젤이 있는 경우에는 그 영향을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 또한 VIP의 열전도도는 내부의 진공도를 낮출수록 4 mW m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> 이하까지도 더 낮출 수 있으나, 이 경우 앞서 설명한 문제점이 더욱 커질 수 있는데 에어로젤을 심재로 사용하면 진공도를 크게 높이지 않고도 유사한 열전도도를 얻을 수 있으므로 내구성을 확보할 수가 있다.

진공 처리된 에어로젤 블랭킷은 유연성은 전혀 필요 없으나 높은 단열성이 요구되는 분야로 의약품, 식품 등의 냉장 및 냉

동 저장, 운송과 같은 콜드체인 물류, 액화천연가스 및 액화석유가스의 냉동 선박 운송에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다 [17,18]. 예를 들면 초저온을 요구하는 화이자의 코로나19 백신의 보관, 유통과 같이 고도화된 콜드체인 시스템에 효과적일 것이다.

Figure 1에는 알루미늄을 외피로 하는 에어로젤 블랭킷 진공판과 이를 이용한 콜드체인 박스의 사진을 나타내었다.

### 3.2 수지 도포된 에어로젤 블랭킷

에어로젤 코팅과 관련해서는 여러 종류의 소재에 에어로젤을 도포하여 에어로젤의 특성을 구현하고자 하는 시도가 대부분이다[19]. 특히 에어로젤 특유의 잘 부서러짐 때문에 표면 부착된 에어로젤의 내구성을 어떻게 유지할 것인가가 가장 중요한 이슈이며 이를 위해서 유무기 복합 에어로젤의 사용, 친수성/소수성 표면의 조절, 도포 방법의 최적화 등 다양한 연구가 진행되고 있다[20-23]. 그러나 이 경우에는 기본 소재에 도포된 에어로젤만으로는 에어로젤의 특성을 충분히 나타낼 수 없으므로 에어로젤을 기본 소재로 하고 그 표면에 원하는 물질을 도포하는 방법이 훨씬 더 범용성이 있다.

본 연구에서와 같이 에어로젤 블랭킷 모재에 수지를 도포하는 방법은 매우 간단해 보이지만 수지 용액이 모재의 표면에만 침투하여 균일한 도포막을 형성하기 위해서는 용액의 점도를 5,000~20,000 cps 정도로 적절하게 조절하는 것이 매우 중요하다. 점도가 너무 낮으면 수지 용액의 대부분이 모재 내부 깊숙이까지 침투하게 되므로 단열능력이 크게 저하될 수 있고, 점도가 너무 높으면 수지 용액이 모재 내부로 거의 침투되지 않아 균일한 도포막을 형성할 수 없다.

Figure 2에는 수지 도포된 에어로젤 블랭킷을 나타내었다. 그림에서 보듯이 여러 종류의 수지 도포가 가능하고 표면을 소



Figure 1. Vacuum insulation panel containing aerogel blankets.

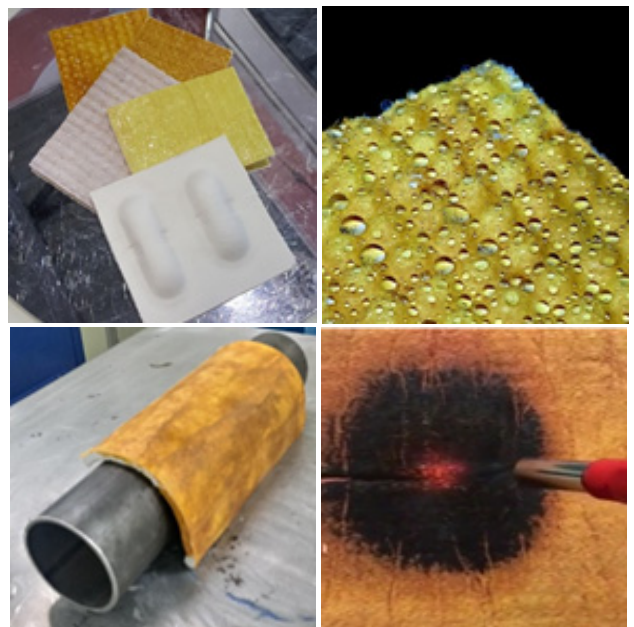


Figure 2. Resin-coated aerogel blankets.

수성으로 유지할 수 있으며 금형 틀을 이용하여 성형하면 재킷 (Jacket)처럼 파이프를 단열할 수가 있고 폴리이미드를 도포한 경우에는 화염에도 일정 시간 견딜 수 있어 화재 안전 분야에 활용할 수 있다.

### 3.3 다층 복합화된 에어로젤 블랭킷

실리카 에어로젤 블랭킷과 같이 에어로젤 분말을 여러 종류의 무기 또는 유기성 섬유에 담지시켜 복합화하는 시도는 이미 광범위하게 진행되었으며 결과물의 열전도도는 담지체의 종류에 따라 차이가 있지만 일부 결과를 제외하고는 14-27 mW m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> 정도로 공기의 열전도도 26 mW m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>보다도 낮다 [24]. 그러나 이러한 기술로서는 상업용 실리카 에어로젤 블랭킷과 마찬가지로 분진의 발생이라는 문제점을 극복할 수가 없다. 본 연구와 유사하게 실리카 에어로젤 블랭킷 양면에 투습성 멤브레인을 적층하고 그 위에 폴리에스터 필라멘트 원사를 붙인 연구 사례가 있으나 열전도도가 47.4 mW m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>로 크게 높아졌을 뿐만 아니라 무게가 증가하고 유연성도 나빠져 에어로젤 블랭킷 원소재보다 적층 소재가 에어로젤 블랭킷 복합체의 물성에 크게 영향을 미친 것을 알 수 있다[25]. 따라서 에어로젤 블랭킷에 적층하는 소재의 두께를 최소화하는 것이 원소재의 단열성과 경량성을 그대로 유지하면서 분진 발생의 문제점을 해결하는 데 가장 중요한 부분이 될 것이다.

본 연구에서는 적층하는 소재의 두께를 최소화하여 적층된 복합체의 단열성이 에어로젤 블랭킷 원소재보다 크게 떨어지지 않도록 적층 관련 소재인 부직포, 봉재사, PTFE 필름, 핫멜트 접착제의 선정과 이를 적층하는 공정의 최적화에 주력하였다. 부직포는 두께가 0.14 mm로 매우 얇고 가벼우며 인장강도와 신율이 우수한 폴리프로필렌 시트를 사용하였고 PTFE 필름은 두께 30~40 μm, 통기성 2 m<sup>2</sup> Pa W<sup>-1</sup> 이하, 초기 방수성 100 kPa 이상인 것으로 사용하였다. PTFE 필름을 부착하기 위한 핫멜트는 물이나 유기용제를 전혀 사용하지 않는 100% 고흡분의 열가소성 코폴리에스터로 용융온도, 용융점도, 접착온도, 접착시간, 접착압력을 모두 고려한 제품으로 선정하였다.

실제로 에어로젤 블랭킷 복합체의 적층 구조를 보면 Figure 3과 같이 내피 - PTFE 필름 - 부직포 - 에어로젤 블랭킷 - 부직포 - PTFE 필름 - 외피의 순서로 되어 있다. 에어로젤 블랭킷은 부직포와 누벼진 상태에 있어 소재가 휘거나 압력을 받더라도

도 에어로젤 블랭킷이 한쪽으로 뭉쳐지지 않고 내구성을 지니게 된다. 내피나 외피는 사용 목적에 따라 필요한 소재를 핫멜트를 이용하여 PTFE 필름 위에 부착하면 된다.

적층된 에어로젤 복합체의 물성을 측정하기 위하여 1.8 mm 두께로 슬리팅된 에어로젤 블랭킷을 원소재로 하여 Figure 4와 같이 50 cm × 50 cm 크기의 시료를 준비하였다. FITI시험연구원에 의뢰하여 측정한 시료의 물성은 Table 2에 요약하였다.

일반적으로 Ret로 표시되는 투습저항성이 30~40 m<sup>2</sup> Pa W<sup>-1</sup> 이상이면 투습성이 거의 없는 것으로 보고, 13~20이면 어느 정도 만족할만한 투습성이 있는 것으로 본다[26,27]. Table 2에서 보듯이 에어로젤 블랭킷 복합체의 투습저항성은 26.8이므로 투습성은 있으나 일반 투습 소재와 비교하면 투습 기능이 다소 미흡한 것으로 보인다. 두께를 더 얇게 하고 좀 더 적층 공정을 최적화하면 투습저항성을 20 이하의 만족할만한 수준까지 낮출 가능성은 있으나 여기에 내피, 외피까지 적층된 제품이 단열성을 지니면서 높은 투습성을 가지는 데는 한계가 있을 것으로 보인다.

Rct로 표시하는 열저항성의 단위인 1 clo는 21°C, 0.1 m s<sup>-1</sup>, 습도 50% 이하의 공기가 있는 공간에서 사람이 편히 앉아 체온을 유지하는데 필요한 단열 능력으로 겨울철 두꺼운 신사복이 약 1.0, 여름철 얇은 신사복이 약 0.6 정도이다[28]. 보통 0.5~1.0 범위가 일반적인 환경에서의 의복으로서 무난한 값이다[29]. Table 2에 나타난 바와 같이 에어로젤 블랭킷 복합체의 열저항성 0.75 clo는 2.58 mm의 얇은 두께를 고려하면 단열성이 상당히 우수한 것을 알 수 있다. 실제 열전도도를 계산해 보면 22.2 mW m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>로 적층에도 불구하고 에어로젤 블랭킷 원소재의 단열성을(Table 1) 크게 떨어뜨리지 않고 있음을 알 수 있다.



Figure 4. Multilayered aerogel blanket composite samples prepared for testing.

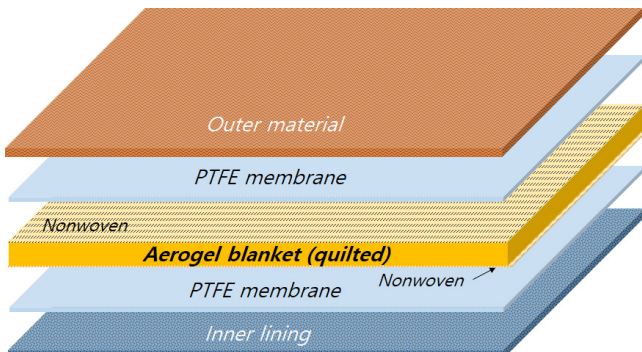


Figure 3. Scheme of a typical multilayered aerogel blanket composites.

Table 2. Physical properties of silica aerogel composite blanket

Property	Unit	Value	Method
Evaporative resistance	Pa m <sup>2</sup> W <sup>-1</sup>	26.8	KS K ISO 11092 : 2014
Thermal resistance	clo	0.75	KS K 0466 : 2021
	m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup>	0.117	
Thickness	mm	2.58	KS K ISO 5084 : 1996
Area density	g m <sup>-2</sup>	440.8	KS K 0514



### 3.4 에어로젤 블랭킷 복합체를 이용한 시제품

Figure 5에 나타난 바와 같이 적층된 에어로젤 블랭킷을 이용한 가장 간단한 시제품으로 방한용 신발 깔창과 야외 깔개를 만들었다. Figure 6에 나타난 바와 같이 초기에 에어로젤 블랭킷을 부직포에 퀴팅 하지 않은 복합체를 이용한 깔창은 굽힘에 유연성이 부족하고 장기간 사용하면 일정 부위에만 압력이 가해져 분말이 유출될 뿐만 아니라 에어로젤 블랭킷이 한쪽으로 몰려서 세부 격자화가 필요하다고 생각하였다. 그 결과 퀴팅 공정을 도입하여 이 문제를 해결하였다.

Figure 7에는 신발과 관련된 소재 및 기존 깔창과 비교하여 에어로젤 블랭킷을 사용한 깔창과 에어로젤 진공 패널의 열전도도를 비교하였다. 기존 깔창의 열전도도 40.1  $\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$ 에

비하여 에어로젤 블랭킷 복합체가 들어있는 깔창의 열전도도는 20 이하로 단열성이 매우 우수하였다. 하지만, 같은 종류의 소재라도 초기에 퀴팅을 하지 않고 적층을 촘촘하게 하지 않았을 때는 열전도도가 26.2  $\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$ 이며 적층 공정에 따라 단열성이 얼마나 달라질 수 있는지를 알 수 있다. 에어로젤 블랭킷 진공 패널의 열전도도는 예상할 수 있는 바와 같이 10.4  $\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$ 로 매우 낮으나 유연성이 없어 신발 깔창의 소재로는 사용할 수 없고 냉동 물류 시스템에 효과적일 것이다. 에어로젤을 이용한 야외 깔개도 열전도도가 20  $\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$  정도로 깔창과 유사한 수준이었으며 유연성과 내구성도 확인하였다. 야외 깔개는 침낭 세트에 바닥의 냉기를 차단하기 위한 삽입용 깔개로도 활용이 가능하다.

실제로 미항공우주국 (NASA)이 Aspen Aerogels와 협력한 Polar Wrap의 Toasty Feet™[30], PrimaLoft의 Gold Insulation Aerogel[31]을 비롯하여 OrthoLite의 폴리우레탄 폼(foam)과 에어로젤을 결합한 O-Therm[32] 등의 신발 깔창과 그 외 야외 의류, 장갑 등 이미 에어로젤을 이용한 많은 방한 제품이 시장에 나와 있기는 하다. 그러나 그 어떤 제품도 아직은 기대한 만큼 관련 시장에서 안정적인 신뢰성을 주고 있지는 못한 것으로 보인다. 지금까지 의류에서 에어로젤을 활용하는 연구도 꾸준히 진행됐으며 활용 가능성이 큰 만큼 기대는 되지만 아직은 본격적인 활용을 위한 문제점을 극복하지는 못한 것으로 보인다[33].

본 연구에서는 비교적 간단한 에어로젤 활용 시제품인 신발 깔창과 야외 깔개를 시작으로 최근에는 민군 겸용으로 판초 우의, 슬리핑 포켓, 야전 깔개, 2인 텐트, 위장 가리개 기능을 가지는 다목적 생존 슈트와 전투화 탈착식 버선의 개발을 착수하였다.

## 4. 결 론

진공 처리된 에어로젤 블랭킷은 열전도도가 10.4  $\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$ 로 단열성이 매우 우수하지만 유연성은 전혀 없으므로 콜드체인 물류 및 냉동 선박 등에 효과적으로 활용될 수 있다. 수지도포된 에어로젤 블랭킷은 도포한 수지의 특성에 따라 표면 특성의 조절이 가능하므로 광범위한 활용이 가능한 성형체로 만들어 복잡한 구조의 단열이 가능할 뿐만 아니라 방염 소재로의 활용도 가능하다. 상업적으로 구매할 수 있는 에어로젤 블랭킷을 얇게 슬리팅하고 이를 부직포로 도포 및 퀴팅하고 그 위에 PTFE 필름을 도포한 다음 내피와 외피를 붙여서 제작하는 다층 에어로젤 블랭킷 복합체는 경량성과 단열성이 요구되는 다양한 산업 소재 및 의류 소재로서의 활용이 기대된다.

본 연구에서는 적층된 에어로젤 블랭킷 복합체를 이용하여 시제품으로 신발 깔창과 야외 깔개를 제작하고 그 성능을 평가하였다. 에어로젤을 활용한 깔창의 열전도도는 20  $\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$  이하로 기존 깔창의 열전도도 40.1  $\text{mW m}^{-1} \text{K}^{-1}$ 에 비하여 매우 낮았으며 유연성과 내구성도 확인하였다. 야외 깔개도 에어로젤 깔창과 유사한 단열성을 지니며 유연성과 내구성을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 다기능 생존 슈트 및 전투화 탈착식 버선 등 다른 에어로젤 시제품도 제작하여 활용 가능성을 확인할 예정이다.



Figure 5. Prototypes of shoe insoles and an outdoor mat made of aerogel blanket composites.



Figure 6. Durability problems after a long term use of aerogel blanket-based shoe insole prototypes.

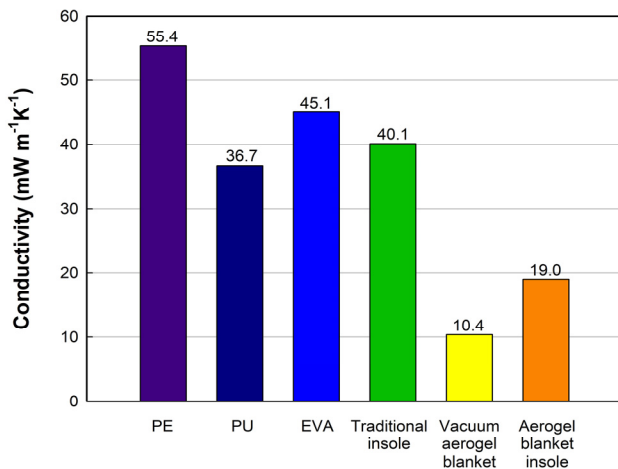


Figure 7. Comparison of thermal conductivities between traditional materials for shoe insoles and aerogel blanket-based materials.

## 사 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).
- Sonu, S. S., Nisha, R., and Indu, C., "Multifunctional Aerogels: A Comprehensive Review on Types, Synthesis and Applications of Aerogels," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **105**, 324-336 (2023).
- Fricke, J., "Aerogels and Their Applications," *J. Non-Cryst. Solids*, **147-148**, 356-362 (1992).
- Hrubesh, L., "Aerogel Applications," *J. Non-Cryst. Solids*, **225**, 335-342 (1998).
- Ji, C., Zhu, S., Zhang, E., Li, W., Liu, Y., Zhang, W., Su, C., Gu, Z., and Zhang, H., "Research Progress and Applications of Silica-Based Aerogels - A Bibliometric Analysis," *RSC Adv.*, **12**, 14137-14153 (2022).
- Park, J.-M., Kim, D.-H., and Suh, D. J., "Recent Research Trends for Green Building Thermal Insulation Materials," *Clean Technol.*, **18**(1), 14-21 (2012).
- Suh, D. J., "Status and Perspectives of Ultra-Lightweight Silica Aerogel Superinsulation Materials," *Clean Technol.*, **28**(4), 301-308 (2022).
- <https://www.cabotcorp.com/solutions/products-plus/aerogel/particles> (accessed Aug. 2023).
- <https://jiosaerogel.com/aerogel-technology/> (accessed Aug. 2023).
- <https://www.aerogel.com/#> (accessed Aug. 2023).
- Suh, D. J., Yang, G. S., Yoon, Y. H., Park, T.-J., Suh, Y.-W., Choi, J.-W., Kim, H. J., Yoon, K. E., and Kim, D. S., "Method for Preparation Vacuum Insulation Panel Using Monolithic Porous Material and Vacuum Packing Material, and Vacuum Insulation Panel," Korea Patent No. 1,071,677 (2011).
- Suh, D. J., Yang, G. S., Yoon, Y. H., Choi, J.-W., Ha, J.-M., Jae, J. H., Cho, Y. S., Jung, M. H., Jo, Y. S., Kim, S. S., Lee, K. U., Park, H. Y., and Lee, T. S., "Method of Manufacturing Aerogel Insulation Materials with Excellent Long-term Durability and the Same," Korea Patent No. 1,966,406 (2019).
- Suh, D. J., Yang, G. S., Yoon, Y. H., Choi, J.-W., Ha, J.-M., Jae, J. H., Cho, Y. S., Cho, Y. S., Jung, M. H., Jo, Y. S., Kim, S. S., Lee, K. U., Park, H. Y., and Lee, T. S., "Polyimide Surface Treated Aerogel Insulation Materials and Method of Manufacturing the Same," Korea Patent No. 1,912,455 (2018).
- Jelle, B. P., "Traditional, State-of-the-art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions - Properties, Requirements and Possibilities," *Energy Build.*, **43**, 2549-2563 (2011).
- Galatioto, A., Ricciu, R., Salem, T., and Kinab, E., "Energy and Economic Analysis on Retrofit Actions for Italian Public Historic Buildings," *Energy*, **176**, 58-66 (2019).
- Gasmen, E., Marchetta, J., and Sabri, F., "Simulation and Optimization of Aerogel Packaging Solutions for Cold-Chain Biologistics," *J. Package. Technol. Res.*, **7**(2), 1-11 (2023).
- Sambucci, M., Savoni, F., and Valente, M., "Aerogel Technology for Thermal Insulation of Cryogenic Tanks— Numerical Analysis for Comparison with Traditional Insulating Materials," *Gels*, **9**, 307-323 (2023).
- Mekonnen, B. T., Ding, W., Liu, H., Guo, S., Pang, X., Ding, Z., and Seid, M. H., "Preparation of Aerogel and its Application Progress in Coatings: a Mini Overview," *J. Leather Sci. Eng.*, **3**, Article 25 (2021).
- Rostami, J., Khandel, O., Sedighardekani, R., Sahneh, A. R., and Ghahari, S., "Enhanced Workability, Durability, and Thermal Properties of Cement-Based Composites with Aerogel and Paraffin Coated Recycled Aggregates," *J. Clean Prod.*, **297**, Article 126518 (2021).
- Lin, L., Li, Z., Mao, H., Li, W., and Wang, C., "Optically Active Polyurethane/Silica Aerogel Coated Cotton Fabrics for Thermal Protection," *Front Mater.*, **8**, Article 681678 (2021).
- Krzemińska, S., Cieślak, M., Kamińska, I., and Nejman, A., "Application of Silica Aerogel in Composites Protecting Against Thermal Radiation," *Autex Res. J.*, **20**(3), 274-287 (2020).
- Xu, L. H., Wang, L. M., Pan, H., Shen, Y., Ding, Y., Zhang, X. Y., and Sheng, Y., "Preparation of Superhydrophobic Porous SiO<sub>2</sub> Aerogel Using Methyl Trimethoxy Silane Single Precursor and Superhydrophobic Cotton Fabric Coating from It," *J. Nanosci Nanotechnol.*, **19**, 7799-7809 (2019).
- Linhares, T., de Amorim, M. T. P., and Durães, L., "Silica Aerogel Composites with Embedded Fibres: A Review on their Preparation, Properties and Applications," *J. Mater. Chem. A*, **7**, 22768-22802 (2019).
- Prevolnik, V., Zrim, P. K., and Rijavec, T., "Textile Technological Properties of Laminated Silica Aerogel Blanket," *Contemp. Mater.*, **V-1**, 117-123 (2014).
- <https://www.quechua.com/> (accessed Aug. 2023).
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Breathability> (accessed Aug. 2023).
- Kim, S.-C., Lee, K.-H., Hwang, S.-Y., Jang, H. S., and Lee, J.-H., "Comparative Studies of Thermal Insulation Performance of Life Vests by Numerical Analysis and Experiment," *J. Navig. Port Res.*, **40**(1), 7-14 (2016).
- ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 (2017).
- [https://www.nasa.gov/offices/oct/home/tech\\_life\\_aerogel.html](https://www.nasa.gov/offices/oct/home/tech_life_aerogel.html)

- (accessed Aug. 2023).
31. <https://primaloft.com/news/primaloft-expands-use-of-its-high-performance-primaloft-cross-core-technology-with-increased-emphasis-on-sustainability/> (accessed Aug. 2023).
  32. <https://www.prnewswire.com/news-releases/ortholite-creates-worlds-first-and-only-aerogel-infused-open-cell-pu-foam-301235738.html> (accessed Aug. 2023).
  33. Du, Y. and Kim, H.-E., "Research Trends of the Application of Aerogel Materials in Clothing," *Fash. Text.*, **9**, Article 23 (2022).