

초미세입자 제거를 위한 고온용 나노 세라믹 필터 개발

김 종 원, 안 영 철^{**}, 이 병 권, 정 현 재
 부산대학교 건축공학과, ^{*}부산대학교 건축학부

Development of Nano Ceramic Filter for the Removal of Ultra Fine Particles

Jong-Won Kim, Young-Chull Ahn^{**}, Byeong-Kwon Yi, Hyeon-Jae Jeong
 Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea
^{*}School of Architecture, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

(Received July 26, 2009; revision received November 23, 2009)

ABSTRACT: Airborne particulate matters have two modes of size distributions of coarse mode and fine mode. The coarse mode which is formed by break down mechanism of large particles has a peak around the 100 μm , and the fine mode formed by condensation and build up mechanism of evaporated vapors has a peak at several μm . The coarse mode particles can be removed easily by conventional collecting equipments such as a cyclone, an electrostatic precipitator, and a filter, however the fine mode particles can not be collected easily. Usually the fine mode particles are generated in the high temperature conditions especially through boilers and incinerators, so the high efficient and temperature filter is essential for the filtration. In this study, a nano ceramic filter for the removal of fine particles in the high temperature is developed and tested for several characteristics. The nano ceramic filter has double layer of micro and nano structure and the pressure drop and the filtration efficiency for 0.31 μm at 3 cm/s are 15.45 mmAq, and 96.75%, respectively. The thermal conductivity is 0.038 W/m · K, and the coefficient of water vapor permeability is 3.63 g/m² · h · mmHg. It is considered that the sensible heat exchange rate is very poor because the low thermal conductivity but it has high potential to exchange latent heat.

Key words: Double layer filter(이중층 필터), Pressure drop(압력손실), Efficiency(효율), Thermal Conductivity(열전도도), Water vapor permeability(투습성)

기 호 설 명

b : 시험편의 폭, [cm]
 F : 굴곡강도, [N/cm²]
 L : 시험편 지지점의 거리, [cm]
 t : 시험편의 두께, [cm]
 W : 최대하중, [N]

1. 서 론

대기 및 실내오염원으로서 인식되고 있는 입자상 오염물질들은 각종 필터, 원심집진기, 전기집진식 공기청정기 등을 이용하여 효과적으로 제거되고 있으나 수 μm 이하의 초미세 입자에 대한 효과적인 포집, 제거를 위해서는 HEPA급 이상의 고효율 필터를 사용하거나 전기집진방식 등을 활용한 정전집진의 방식들이 사용되고 있다. 특히 대기분진을 구성하는 입자상 오염물질들은 2개의 크기 모드를 가지는데 하나는 분쇄의 메커니즘에

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-51-510-2492; fax: +82-51 514-2230
 E-mail address: ycahn@pusan.ac.kr

의해 생성된 크기 약 $100\ \mu\text{m}$ 전후의 입자들이며 다른 하나는 응축 성장에 기인한 수 μm 정도의 미세 입자들이다.⁽¹⁾ 이 중 미세 입자들은 주로 보일러나 연소로와 같은 고온의 환경에서 형성되어 대기 중으로 배출되기 때문에 오염입자의 배출원에서 1차적으로 미세입자를 포집 제거할 경우 효과적인 제어를 할 수 있다. 그러나 고온의 배기가스의 특성상 일반 공조용 필터류는 적용이 불가능하며 금속성 필터로는 HEPA 급의 압력손실과 효율을 기대하기 어려우며 전기집진방식은 입자 자체의 비저항성이 커져서 효과적인 집진이 어렵다.⁽²⁾ 현재 고온용으로 널리 사용되고 있는 여과 방식은 세라믹 필터를 사용한 방식이 있으나 압력손실이 높은 것이 단점으로 작용하고 있다. 그래서 본 연구에서는 세라믹 재질을 이용하여 고온의 환경에서 적용이 가능하며 HEPA 급의 포집효율을 가지도록 하는 고성능 나노 세라믹 필터를 개발하여 특성을 분석해보고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 나노 세라믹 필터 제조 공정

본 연구의 목표인 초미세입자 제거를 위한 세라믹 재질의 고온용 필터를 제작하기 위해서 재질은 SiO_2 를 사용하였고, HEPA 필터 급의 효율

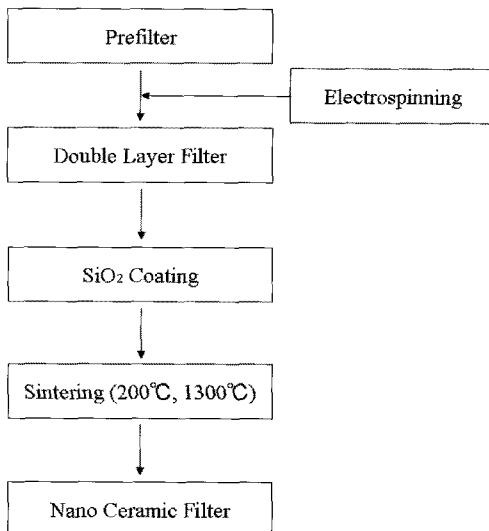


Fig. 1 Making process of the nano ceramic filter.

을 위하여 수 μm 이하의 필터 섬유를 제작하고자 하였다.

Fig. 1에는 본 연구에서 제작하고자 하는 나노 세라믹 필터에 대한 제작 순서를 나타내었다. 우선 충분한 강도 및 두께 확보를 위하여 두께 10 mm 인 일반 공조용 프리필터를 기본으로 하여 그 표면 위에 전기방사를 통하여 나노 섬유층을 형성시킴으로써 마이크로 구조 및 나노 구조를 동시에 갖는 2중층 필터를 제작하였다. 이 필터를 30 nm 크기의 SiO_2 나노입자가 분산된 용액을 이용하여 균일하게 코팅을 수행한다. 그 후 바람이 잘 통하는 그늘에서 충분히 건조시킨 뒤 고르게 코팅 및 건조된 나노 섬유 필터를 $200\ ^\circ\text{C}$ 에서 2시간 소결 후 $1300\ ^\circ\text{C}$ 에서 1시간동안 소결시킨다. 온도를 가변하여 소결시키는 이유는 이중층 필터를 구성하는 고분자 성분이 분해되어 사라지는데 필요한 온도 및 시간의 확보, 그리고 코팅 용액과 혼화제가 결합하여 밀착되는 온도가 서로 다르기 때문이다. 그 결과 프리필터와 나노섬유필터의 이중층 전구체가 분해되어 제거되면 최종적으로 나노 세라믹 필터가 얻어지게 된다.

Fig. 2는 본 연구에서 제작하고자 하는 나노 세라믹 필터의 전구체를 제작하는 전기방사장치(Electrospinning)의 개략도이다. 기본 구성으로는 전압 인가부와 전압을 고분자에 인가하는 구리재질의 전극, 고분자 용액을 저장 및 방사하는 주사기(Syringe)부 그리고 집진된 포집부가 주요 구성요소이다. 또한 실험시 용매가 완전히 증발되지 않은 상

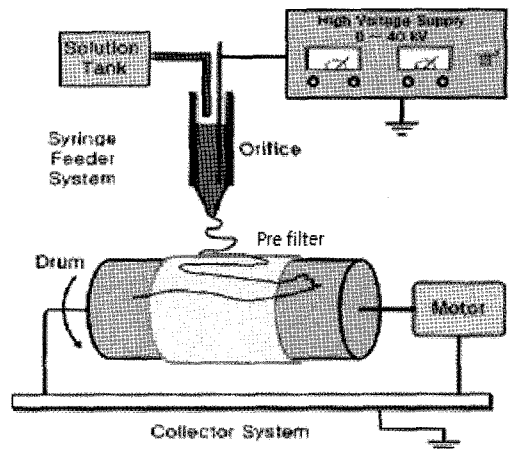


Fig. 2 Schematic diagram of the electrospinning.

태에서 포집부에 포집됨으로써 나노 섬유자체가 용착되어 끊어지는 현상을 방지하기 위하여 포집부를 회전시켜 실험을 수행하였다. 용매는 Polyethylene oxide(PEO : Sigma Aldrich, 분자량 200,000)를 사용하였으며 용매는 증류수와 에탄올을 사용하였다. 분말로 된 PEO를 증류수와 에탄올을 혼합한 용매 속에 넣고 교반기로 24시간 동안 교반하여 PEO용액을 제조한다. 본 연구에서 사용된 PEO의 농도는 2~10 wt%로 조절하여 실험을 수행하였다. 전압을 인가하는데 사용하는 고전압 발생기((주)청파EMT)는 10 mA, 0~40 kV의 범위를 가지며 실험결과는 전자현미경(SEM : Hitachi, S-4200)으로 측정하였다. 또한 전기방사실험에서 실내조건은 매우 중요한 영향을 미친다. 특히 온도와 상대습도는 정전기력에 많은 영향을 미치기 때문에 온도 20 ℃, 상대습도 50%의 고정된 조건에서 실험을 수행하였다.

일반적으로 전기방사에 의해 제조된 나노섬유 필터는 HEPA 필터와 유사한 수준의 분진포집효율을 가지고 있으나 두께가 수십 μm 정도로 매우 얇고 기계적인 강도가 약하기 때문에 보강재로서 프리필터와의 조합을 통한 2중층 필터를 사용하였으며, 그 결과 높은 효율은 그대로 유지하면서 상대적으로 낮은 압력손실을 가지는 나노 섬유 필터를 제조할 수 있었다. 또한 적절한 두께의 확보를 통하여 취급의 용이성 및 높은 기계적 강도를 확보할 수 있었다.

2.2 필터 성능 평가 장치

Fig. 3은 입자 포집 효율 및 압력손실을 평가하기 위한 실험장치의 개략도이다. 성능평가 장치는

크게 입자 발생부, 실험용 필터 설치부, 입자카운터 부분으로 나눌 수 있다. 입자 발생부에는 입자를 발생시키는 입자발생기(Atomizer), 확산 건조장치(Diffusion dryer)와 대전중화기(Neutralizer)를 통과하면서 입자주위의 수분이 제거되고 인위적으로 대전된 전하 입자들을 제거하여 공급되게 된다. 공급되는 입자의 최대 농도는 수만 개/ cm^3 로 본 성능평가에 활용하는데 충분하였다. 측정 시료의 고정을 위해 상용화된 47 mm 필터 홀더(Filter holder)를 이용하였다. 측정 시료의 상·하류에 입자를 카운트하기 위해 입자계수기(GRIMM #1.108)를 설치하여 상류와 하류의 입자의 개수를 측정하여 분진 포집 효율을 측정하였다. 실험에 사용된 압축공기는 고성능 필터를 거쳐서 유입되고, 시험 입자로는 0.31, 0.48, 1 μm 의 PSL(Polystyrene Latex, Duke Scientific Corporation)을 사용하였다.

제작된 성능평가 장치의 신뢰성 확보를 위하여 상용 HEPA 필터를 이용하여 테스트 한 결과 0.31 μm 입자에 대하여 99.97% 이상의 포집효율을 나타냄으로써 성능 평가 장치의 신뢰성을 확보 할 수 있었다.

Fig. 4는 나노 세라믹 필터의 열전도도 측정장치의 개략도를 나타낸 것으로 고온 조건에서 나노 세라믹 필터를 사용할 경우 폐열의 회수 측면이나 혹은 열충격에 의한 파손 등에 대비하기 위하여 열전도도 값을 측정, 분석하였다. 본 장치에는 $T_1 \sim T_{10}$ 까지 10개의 T 타입 열전대를 직경 40 mm, 길이 440 mm인 구리봉에 설치하였으며 두께 2 mm의 샘플을 40 mm의 간격으로 두 곳에 설치하였다. 실험장치가 정상상태에 도달한 뒤 상부의 고온수조로부터 전도에 의해 전달되는 열량을 측정하여 필터 매질에 의해 발생하는 열저장 값으로부터 열

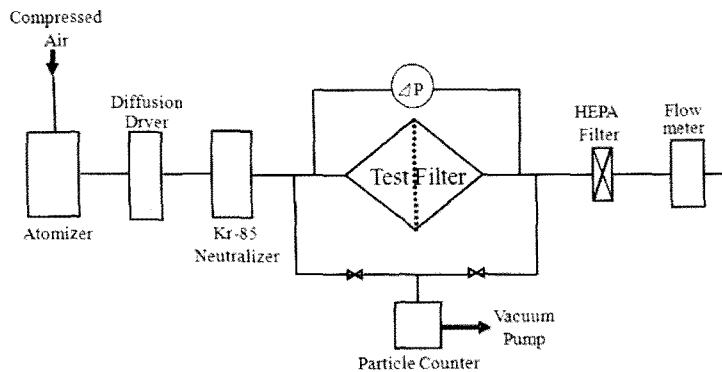


Fig. 3 Schematic diagram of aerosol filtration test system.

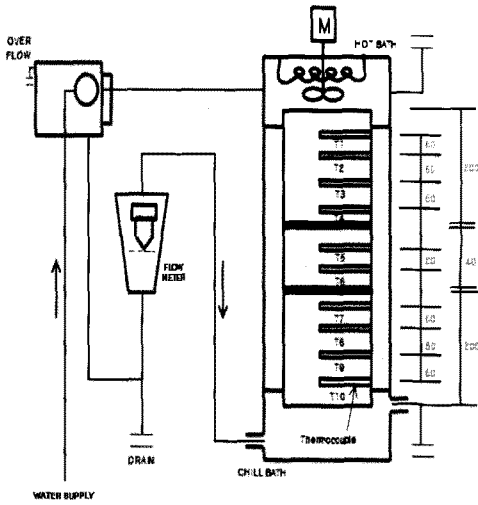


Fig. 4 Schematic diagram of thermal conductivity test system.

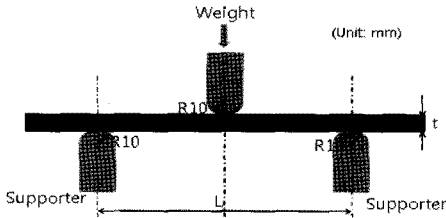


Fig. 5 Schematic diagram for the measurement of flexural strength.

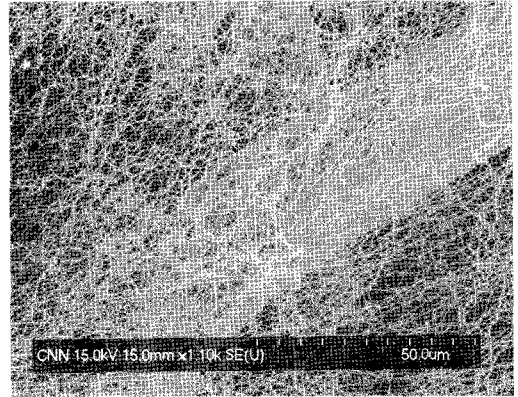
전도도 값을 측정하며, 샘플 두 곳에서 측정된 열전도 값은 산술평균하여 사용한다. 또한 KS F2607⁽³⁾ “건축 재료의 투습성 측정 방법”에 의하여 투습계수를 측정함으로써 잠열의 전달 정도를 분석하였으며 필터의 기계적 강도 분석을 위해서는 Fig. 5와 같은 2점 지렛대 원리에 의한 굴곡강도를 분석하였으며 식(1)에 의해 값을 계산하였다.

$$F = \frac{3WL}{2bt} \quad (1)$$

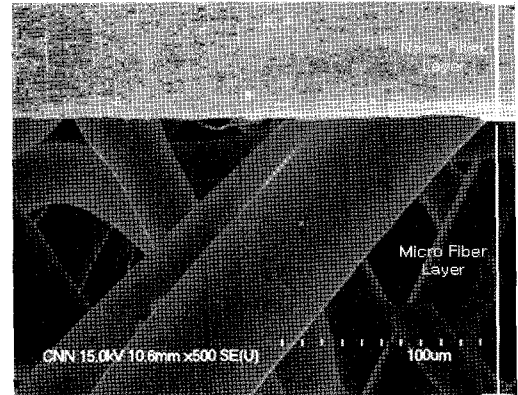
3. 실험결과 및 고찰

3.1 나노 세라믹 필터 제조

Fig. 6에는 전기방사에 의해 제조된 프리필터와 나노 섬유가 조합된 2중층 필터의 사진을 나타내



(a) Plane view



(b) Sectional view

Fig. 6 Scanning electron micrographs of the double layer filter.

었다. Fig. 6(a)는 이중층 전구체 필터의 평면을 나타낸 것이고 Fig. 6(b)는 세로 단면을 나타낸 것이다. 사진을 통해서 보면 프리필터가 구성하고 있는 마이크로 섬유층과 전기방사에 의해 형성된 나노 섬유층이 명확히 확인되고 있으며 나노 섬유층도 균일하게 형성되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 이중층 필터를 SiO₂ 재질로 코팅한 후 전자현미경으로 촬영한 사진이며 Fig. 8은 이중층 필터를 200 ℃와 1300 ℃에서 소결시킨 후의 사진을 나타내고 있다. 실험 수행시 기계적 강도 면에서 200 ℃에서 2시간 소결 후 1300 ℃에서 1시간을 소결시킨 나노 세라믹 필터가 가장 우수하였으며 단면과 측면 모두 고르게 소결된 것을

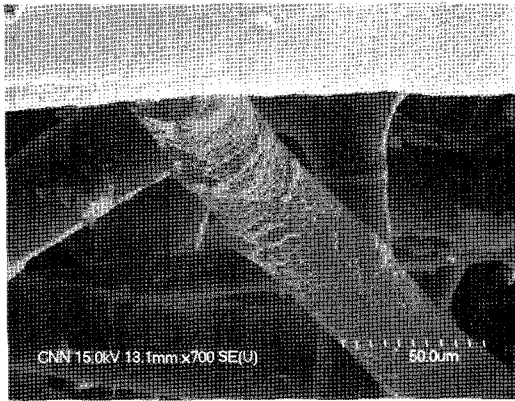


Fig. 7 SiO₂ coated double layer filter.

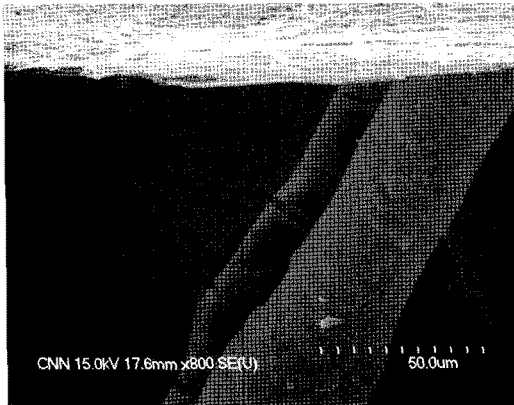


Fig. 8 Sintered nano ceramic structure at 200 °C and 1300 °C.

확인 할 수 있었다.

3.2 나노 세라믹 필터 성능 평가

Fig. 9는 본 연구를 통해 개발된 나노 세라믹 필터와 전기방사만을 통해 제조된 나노 필터 및 HEPA 필터의 분진 포집 효율 측정 결과를 비교하여 나타내었다. 0.31 μm 입자에 대하여 나노 세라믹 필터와 나노 필터 및 HEPA 필터는 각각 96.75%, 99.97%, 99.98%의 효율을 보였다. 나노 필터와 HEPA 필터의 효율은 거의 동등한 것으로 측정되었으나 나노 세라믹 필터는 다소 낮은 효율을 가지는 것으로 측정되었다. 이는 전기방사에 의해 제조된 나노 필터 층을 SiO₂로 코팅하여 소결시키는 과정에서 일부 나노 섬유들이 용착되거나 또는 파손이 되었기 때문에 다소 낮은 효율을 가지

는 것으로 분석되었으며 0.5 μm 이상의 입자에 대해서는 모두 유사한 포집효율을 나타내었다.

Fig. 10은 나노 세라믹 필터의 면속도별 압력손실을 HEPA 필터 및 나노 필터와 함께 비교하여 나타내었다. 가장 높은 효율을 보인 HEPA 필터가 가장 높은 압력손실을 나타내었으며 나노 필터의 경우 효율은 HEPA 필터와 유사하였으나 두께가 매우 얇기 때문에 압력손실은 다소 낮게 측정되었고, 나노 세라믹 필터는 가장 낮은 압력손실 값을 나타내었다. 유속 3 cm/s의 저속에서는 나노 세라믹 필터를 구성하는 마이크로 섬유층의 장점인 낮은 압력손실이 크게 부각되지 않아 나노 필터와 유사한 값을 나타내고 있으나 유속이 빨

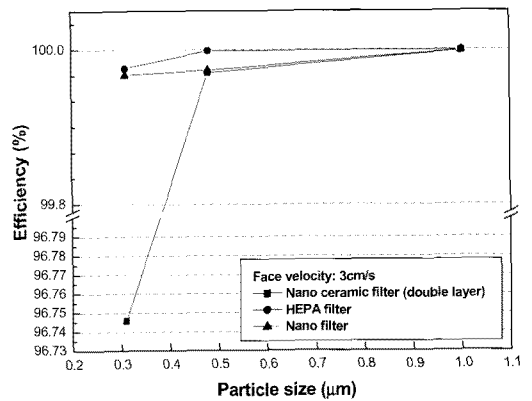


Fig. 9 Efficiency of the nano ceramic filter compared with the HEPA filter, nano fiber and prefilter.

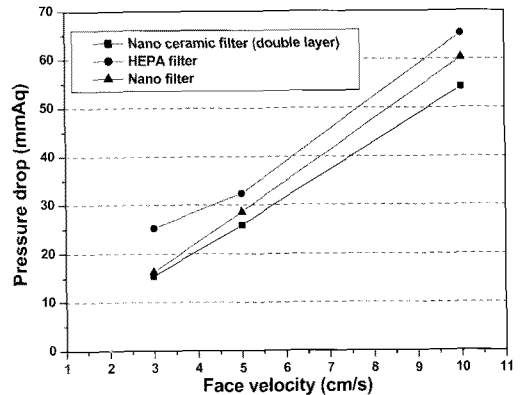


Fig. 10 Pressure drop of the nano ceramic filter compared with the HEPA filter, nano filter and prefilter.

Table 1 Thermal Conductivity of the nano ceramic filter

Characteristics	Value
Density	39 kg/m ³
Thermal conductivity	0.038 W/m · K
Coefficient of water vapor permeability	3.63 g/m ² · h · mmHg
Flexural strength	52.5 N/cm ²

라질 때 이러한 장점이 크게 나타나고 있다.

Table 1은 나노 세라믹 필터의 밀도, 열전도도, 투습계수 및 굴곡강도에 대한 측정결과를 요약하여 나타낸 것이다. Fig. 4의 실험장치를 이용하여 측정된 열전도도 값은 평균 0.038 W/mK로 상당히 낮게 측정되었으며 이는 단열재로 사용되는 발포 폴리스티렌과 유사한 수준의 값으로 나타났다. 이는 재질 자체가 상당한 공극을 포함하고 있기 때문에 공기 자체가 가지는 낮은 열전도 값 때문인 것으로 판단된다. 또 본 연구에서 개발하고자 하는 나노 세라믹 필터의 적용분야는 고온의 환경이고 다소간의 증기가 배출되는 고습한 환경에서도 사용이 가능할 것으로 예상된다. 특히 고온고습의 조건에서 사용될 경우 전열교환기와 유사하게 현열과 잠열의 형태로 버려지는 폐열을 회수 할 수 있다면 초미세 입자의 제거라는 환경적인 측면과 에너지 절약이라는 두 가지 장점을 가지게 되므로 본 연구에서는 KS F 2607 건축 재료의 투습성 측정 방법에 준하여 투습성능을 측정, 분석해 보았으며, 그 결과 나노 세라믹 필터는 3.63 g/m² · h · mmHg로 측정되었다. 전통한지에서 투습성능을 분석한 선행연구⁽⁴⁾에서 제시한 평균 투습계수가 2.4~3.2 g/m² · h · mmHg인 것을 감안하면 나노 세라믹 필터 자체도 어느 정도 잠열에 의한 전열교환 특성을 가질 수 있음을 확인하였다. 또한 재질의 굴곡강도에 대한 측정결과 두께 10 mm인 경우 52.5 N/cm²로 측정되었는데 실제 상용화하기에는 다소 부족한 면이 있어서 추후 강도 보완에 대한 연구가 보완되어야 할 것으로 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온 연소가스로부터 나노입자를 효과적으로 포집, 제거할 수 있는 고성능 고

온용 나노 세라믹 필터를 개발하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 프리필터와 전기방사에 의한 나노섬유 필터의 조합으로 구성된 마이크로 섬유층과 나노섬유층의 2중층 필터를 제조하였다.

(2) 2중층 필터에 SiO₂ 나노 입자를 이용하여 섬유 표면을 코팅하였고, 코팅된 2중층 필터를 200~1300 °C사이에서 소결시키는 공정을 통해 고분자 섬유를 분해시켜 나노 세라믹 필터를 제작하였다.

(3) 초미세 입자 제거를 위한 나노 세라믹 필터를 제작하여 분진포집효율 및 압력손실 등의 성능 평가를 실시한 결과, 분진포집효율은 면유속 3 cm/s일 때 0.31 μm 입자 제거 효율이 96.75%, 압력손실은 15.45 mmAq로 측정되었다. 입자 포집 효율은 HEPA 필터에 비하여 다소 낮은 값을 가지고 있으나 비교적 낮은 압력손실을 가지는 것으로 분석되었고 이는 소결 등의 과정을 거치면서 나노 섬유 구조의 융착 또는 파손 등의 손상이 발생하기 때문인 것으로 분석되었다.

(4) 나노 세라믹 필터의 기타 물성치에 대해 분석한 결과 밀도는 39 kg/m³, 열전도도는 0.038 W/mK, 투습계수는 3.63 g/m² · h · mmHg, 굴곡강도는 52.5 N/cm²로 분석되었다. 열전도도 값은 단열재와 유사한 수준으로 낮게 분석되어 폐열 회수시 현열에 의한 회수 보다는 다소 높은 투습계수의 영향으로 잠열에 의한 효과가 클 것으로 기대가 되며 재질의 기계적 강도 측면에서는 추가적인 보완이 필요할 것으로 분석되었다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00063).

참고문헌

- Lee, J. K., Kim, S. C. and Liu, B. Y. H. 2001, Effect of Bi-Modal aerosol mass loading on the pressure drop for gas cleaning industrial filters, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 805-814.
- Ahn, Y. C. and Lee, J. K., 2006, Physical, chemical, and electrical analysis of aerosol

- particles generated from industrial plants, Journal of Aerosol Science, Vol.37, No.2, pp. 187-202.
3. KS F 2607, 2007, Measuring method of water vapor permeability for building materials, Korean Standard.
 4. Lee, J. W. and Lim, J. M., 2004, The experimental study on an effect of Korean Paper (Hanji) on indoor humidity control, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.16, No.6, pp.599-607.

