

초미세입자 제거를 위한 나노세라믹 필터의 성능 평가

김 종 원, 안 영 철^{†*}, 이 병 권, 정 현 재

부산대학교 건축공학과, 부산대학교 건축학부

Performance 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

ABSTRACT: In the perspective of saving energy in buildings, the high performance of insulation and air tightness for improving the heating and the cooling efficiency, has brought economically positive effects. However, these building energy saving technologies cause the lack of ventilation, which is the direct cause of increasing the indoor contaminants, and is also very harmful to the residents, because they spend over 90% of their time indoors. Therefore, the ventilation is important to keep the indoor environment clean and it can also save the energy consumption. In this study, a HEPA type nano ceramic filter is designed as a passive ventilation system to collect airborne particles and to supply fresh outdoor air. The double layer filter, which has $30\mu\text{m}$ in diameter at the conditions of 10wt% of concentration and 3kV/cm of the electric intensity, is produced by electrospinning. The filtration coating technology is confirmed in the solution with SiO_2 nano particles using polymer nano fibers. Also double layer filters are coated with SiO_2 nano particles and finally the porous construction materials are made by sintering in the electric furnace at $200\sim 1400^\circ\text{C}$. The efficiency is measured 96.67% at the particle size of $0.31\mu\text{m}$, which is slightly lower than HEPA filter. However the efficiency is turned out to be sufficient.

Key words: Ventilation(환기), Electrospinning(전기방사), Double layer filter(이중층 필터), Pressure drop(압력손실), Efficiency(효율)

1. 서 론

최근 산업의 발전에 따라 현대 사회의 사람들은 많은 오염물질에 노출되어 있다. 특히 대기 중에는 미세분진, 유해가스 등 여러 가지 환경오염물질로 이루어진 기체분자 또는 입자들이 부유 상태로 존재하고 있다. 이러한 물질들은 약 수 nm 크기로부터 수 백 μm 크기로 구성되어 있

다. 이 중 지름이 $10\mu\text{m}$ 이하를 미세먼지, 지름이 $2.5\mu\text{m}$ 이하를 초미세먼지라 하는데 이 가운데 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 초미세먼지는 사람의 폐포까지 깊숙이 침투해 각종 호흡기 질환을 일으키는 직접적인 원인이 된다.

나노 입자는 황산염, 질산염, 암모니아 등의 이온 성분과 금속화합물, 탄소화합물 등 유해 물질로 이루어져 있는데, 대부분이 고온의 연소과정에서 핵 응축현상에 의해 발생하므로 특히 경유를 사용하는 Diesel 엔진이나 지급연료를 사용하는 보일러 및 연소로에서 다량으로 발생한다. 이에 기존의 보일러 및 연소로 후단의 고온 배기가

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2492; fax: +82-51-514-2230

E-mail address: ycahn@pusan.ac.kr

스 정화용으로 전기집진기, 특수소재의 여과포, 금속 미디어를 이용한 필터 및 세라믹 필터를 주로 사용해 왔으나 나노 입자에 대한 낮은 제거효율, 높은 압력 손실로 인한 수명 단축, 낮은 처리유량으로 인한 적용 분야의 한계성 등 나노 입자의 포집에는 구조적 한계를 가진다. 이에 새로운 개념의 고온용 나노 필터에 대한 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 나노섬유를 제조하기 위한 여러 가지 방법들 중 고분자 나노섬유 제조에 가장 적합한 방법인 전기방사법을 이용하여 나노섬유를 제조하고 이 나노 섬유를 이용하여 초미세 입자 제거가 가능한 나노 세라믹 필터를 개발하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 나노 세라믹 필터 제조 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 제작하고자 하는 나노 세라믹 필터의 전구체를 제작하는 전기방사장치(Electrospinning)의 개략도이다. 기본 구성으로는 전압 인가부와 전압을 고분자에 인가하는 구리막대, 용액을 보관하고 방사하는 syringe 그리고 접지된 포집부가 주요 구성요소이다. 또한 실험 수행시 용매가 완전히 증발되지 않은 용액들이 포집부에 겹쳐 포집되는 현상을 방지하기 위하여 포집부를 회전시켜 실험을 수행하였으며, 용액의 유량을 제어하기 위하여 compressor를 이용하였다. 용매는 Polyethylene oxide(PEO: Sigma Aldrich, 분자량 200,000)를 사용하였으며 용매는 증류수와 Ethanol(MERCK)을 사용하였다. 분말로 된 PEO를 증류수와 Ethanol을 혼합한 용매 속에 넣고 교반기로 24시간 동안 교반하여 PEO용액을 제조한다. 본 연구에서 사용된 PEO의 농도는 2-10wt%로 조절하여 실험을 수행하였다. 전압을 인가하는데 사용하는 고전압 발생기((주)청과 EMT)는 10mA, 0-40kV의 범위를 가지며, 점도는 점도측정기(Brookfield, LVDP-I+)로 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°C, 상대습도 50%의 고정된 조건에서 실험

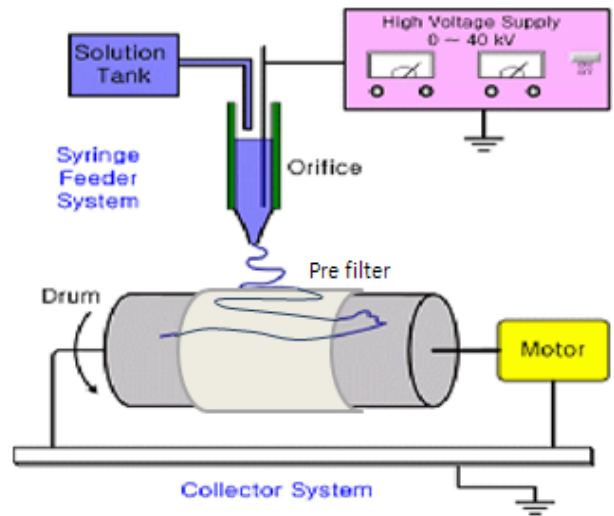


Fig. 1 Schematic diagram of the electrospinning.

을 수행하였다.

이전 실험 수행시 전기방사로 제작된 나노 섬유 필터의 경우 분진포집효율은 우수하나 압력손실이 높고 기계적 강도가 떨어져 필터로서의 기능을 하기에 적절치 못하였으므로, 효율은 그대로 유지하나 압력손실을 낮추고 강도를 보완하기 위하여 포집부 표면에 프리필터를 부착하였다. 그 결과 고효율은 그대로 유지하면서 매우 낮은 압력손실을 가지는 나노 섬유 필터를 제조할 수 있었다. 또한 보강제인 프리필터의 사용으로 인하여 두께를 확보할 수 있어서 높은 기계적 강도를 확보할 수 있었다.

2.2 Nano 세라믹 필터 제작 방법

일반적으로 사용되는 HEPA 필터는 글래스 화이버, 셀룰로오스 등의 섬유상 물질들이 바인더에 의해 부착되어 제작되며 보통 수 μm 의 섬유직경을 가지고 있다. 본 연구의 목표인 HEPA 필터급 효율을 가지는 나노 세라믹 필터를 제작하기 위해서 재질은 SiO_2 의 세라믹 재질을 고려하였으며 고효율을 위해 HEPA 필터와 유사한 $1\mu\text{m}$ 이하의 세라믹 섬유를 제작하고자 하였다.

Fig. 2에는 본 연구에서 제작하고자 하는 직경 $30\mu\text{m}$ 이하의 나노 세라믹 구조체 제조에 대한 순서를 나타내었다. 우선 프리필터 표면 위에 전기방사하여 나노 섬유 필터를 제조하였으며, 이 필터 표면을 30nm 정도의 SiO_2 나노입자가 분

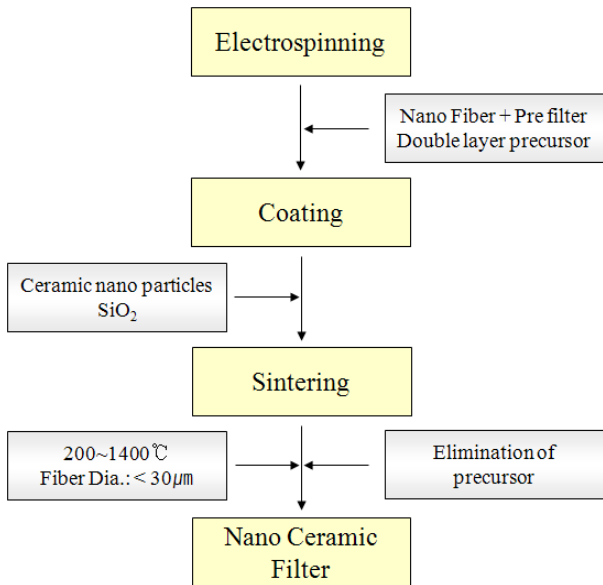


Fig. 2 Process to make the HEPA type nano ceramic filter.

산된 용액을 이용하여 필터레이션 코팅(Filtration coating)한다. 그 후 고르게 코팅된 나노 섬유 필터를 바람이 잘 통하는 그늘에서 충분히 건조시킨 뒤 200~1400°C에서 소결시킨다. 그 결과 프리필터와 나노섬유필터의 이중층 전구체가 분해되어 제거되면 최종적으로 나노 세라믹 필터가 얻어지게 된다.

2.3 Nano 세라믹 필터 성능 평가 장치

본 연구는 초미세 입자 포집이 가능한 나노 세라믹 필터를 제작하기 위한 것이므로 Ifqksejr 효율평가방법인 중략법, Itor법으로는 평가하기가 곤란하기 때문에 입자카운터를 이용하는 계수법으로 성능평가를 실시하였다.

Fig. 3은 분진 포집효율 및 압력손실을 평가하기 위한 장치의 개략도이다. 성능평가 장치는 크게 입자 발생부, Test sample holder부, 입자카운터 부분으로 나눌 수 있다. 입자 발생부에는 입자를 발생시키는 Atomizer, Diffusion dryer와 Neutralizer(Kr-85)를 통과하면서 입자주위의 수분이 제거되고 대전된 입자가 중화되어 공급되어진다. 공급되는 입자의 최대 농도는 수만 개/cm³로 본 성능평가에 충분하였다. Test sample의 고정을 위해 상용화된 47mm filter holder를 이용하였다. Test sample 상·하류에 입자를 카운트하기

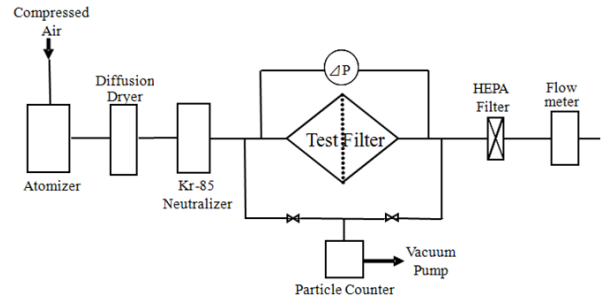


Fig. 3 Schematic diagram of aerosol filtration test system.

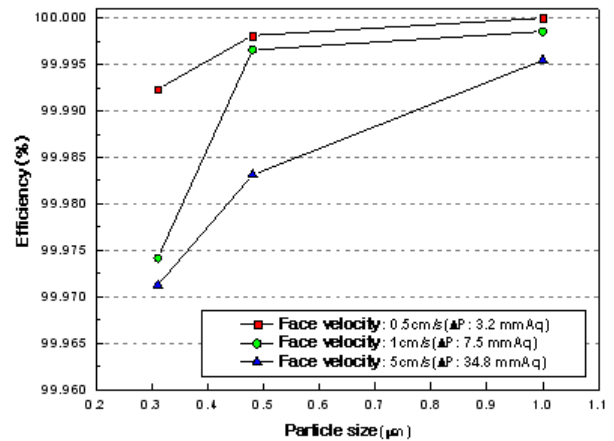
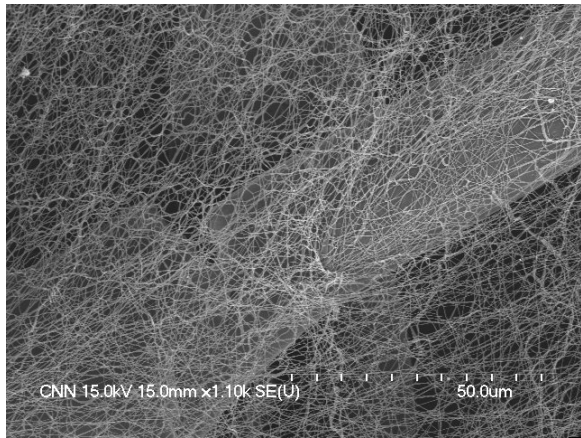


Fig. 4 The reliability test results of aerosol filtration test system (HEPA filter).

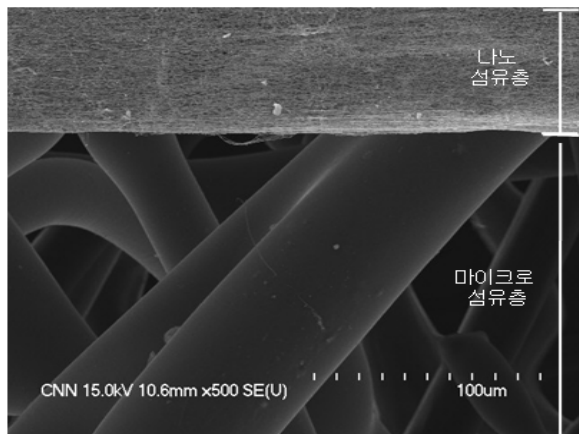
위해 입자계수기(GRIMM #1.108)를 설치하여 상류와 하류의 입자의 개수를 측정하여 여과효율을 측정하였다.

정확한 입자계수를 위해 입자계수기에 PC를 연결하여 전용 프로그램 (GRIMM Software 1.177)을 이용하여 측정되었다. 실험에 사용되어진 압축공기는 고성능 필터를 거쳐서 유입되고, 시험 입자로 0.31, 0.48, 1µm의 PSL(Polystyrene Latex, Duke Scientific Corporation)을 사용하였다.

제작된 성능평가 장치가 ASHRAE 52.2의 계수법을 만족하는지 기존의 HEPA 필터를 이용하여 테스트 수행하였다. 그림 4.6은 효율 평가를 통한 실험장치의 신뢰도 검증 결과를 나타내는 그래프이다. 효율은 입자 0.31µm일 때 99.97% 이상이며, 면속도가 증가할수록 확산에 의한 포집효율이 감소하는 일반적인 결과를 볼 수 있다.



(a) Plane view



(b) Sectional view

Fig. 5 Scanning electron micrographs of the double layer filter (PEO + prefilter).

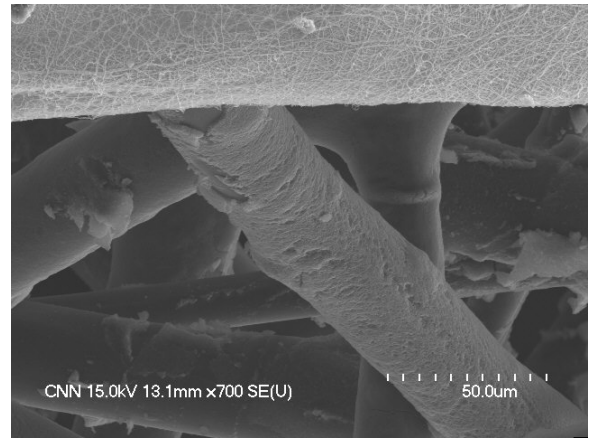
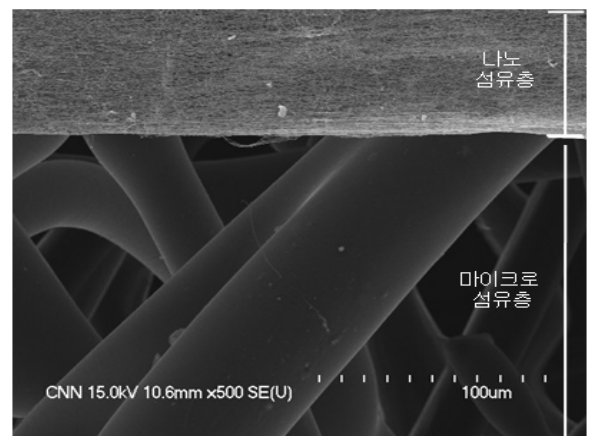


Fig. 6 Coated the double layer filter (PEO + prefilter).



(b) Sectional view

Fig. 7 Nano ceramic filter fabricated at 200 ~ 1400°C.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 나노 세라믹 필터 제조

Fig. 5에는 전기방사에 의해 제조된 프리필터와 나노 섬유 필터의 이중층 전구체 사진을 나타내었다. Fig. 5(a)는 이중층 전구체 필터의 평면을 촬영한 사진이고, Fig. 5(b)는 이중층 전구체 필터의 세로 단면을 촬영한 사진이다. 나노 섬유층과 마이크로 섬유층의 이중층으로 이루어져 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 고분자의 특성상 균일하게 나노섬유가 제조되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 이중층 필터를 SiO₂ 등의 세라믹 재료로 필트레이션 코팅하여 제작한 나노 세라믹

전구체를 전자현미경으로 촬영한 사진이다. 세라믹 입자가 이중층 필터에 균일하게 도포되어 코팅되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 이중층 전구체 필터를 200~1400°C에서 소결시킨 나노 세라믹 필터를 전자현미경으로 촬영한 사진이다. 실험 수행시 기계적 강도 면에서 200°C에서 2시간 소결 후 1300°C에서 1시간을 소결시킨 나노 세라믹 필터가 가장 기계적 강도도 우수하였으며 단면과 측면 모두 고르게 소결된 것을 확인 할 수 있었다. 이는 이중층 필터가 소결하여 사라지는데 필요한 온도와, 코팅액과 혼화제가 결합하여 밀착되는 온도가 서로 다르기 때문이라 생각된다. Table 1은 나노 세라믹 필터를 제조하기 위한 최적의 조건을 나타낸다.

Table 1 Optimal conditions for the nano ceramic filter.

Polymer	PEO
Solvent	water, ethanol
Concentration	10wt%
Electric field strength	3kV/cm
Coating	10 μ m cement particles
Sintering temp. & time.	200 $^{\circ}$ C 2hr \rightarrow 1300 $^{\circ}$ C 1hr

3.2 Nano 세라믹 필터 성능 평가

Fig. 8에는 나노 세라믹 필터의 면속도별 압력 손실을 프리필터를 사용하지 않고 전기방사법만으로 제작된 나노 세라믹 필터, 이중층 전구체 필터로 제작된 나노 세라믹 필터, 프리필터만을 전구체로 사용하여 제작된 필터 그리고 HEPA 필터와 비교하여 나타내었다. 그 결과 전기방사만으로 제작된 나노 세라믹 필터가 가장 압력 손실이 크게 나왔다.

Fig. 9는 각각 HEPA 필터와 이중층 필터, 나노섬유필터를 전구체로 제작한 필터들의 분진포집효율을 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구에서 목표로 하고 있는 초미세 입자 포집을 위한 HEPA 필터급의 효율을 가지게 하기 위하여 0.31 μ m 입자에 대해 이중층 필터는 96.67%, 나노섬유 필터는 96.5%, HEPA 필터는 99.98%를 나타내었다.

즉 압력손실에선 프리필터가 분진포집효율에선 나노섬유필터가 가장 좋은 결과를 나타내었으나 프리필터는 분진포집효율이 너무 떨어지고 나노섬유필터는 압력손실이 너무 높게 나타나 이중층으로 제조한 나노 세라믹 필터가 압력손실이 낮으면서도 분진포집효율이 높게 나와 가장 성능이 우수한 필터인 것으로 나타났다. 또한 보강제인 프리필터를 사용하여 이중층으로 제조하였으므로 어느 정도의 두께를 만족시켜 기계적 강도도 확보할 수 있었다. 이렇게 제조된 나노 세라믹 필터의 경우 제조 및 취급이 용이하여 고성능 필터로서의 소형화 대형화, 경량화에 큰 이점이 있을

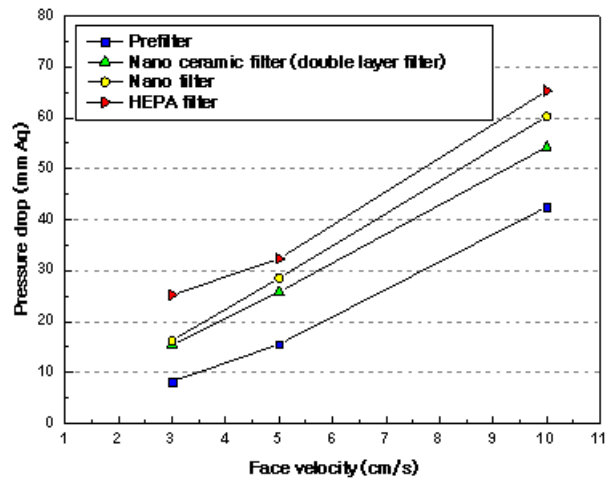


Fig. 8 Pressure drop of the nano ceramic filter compared with the HEPA filter, nano fiber and prefilter.

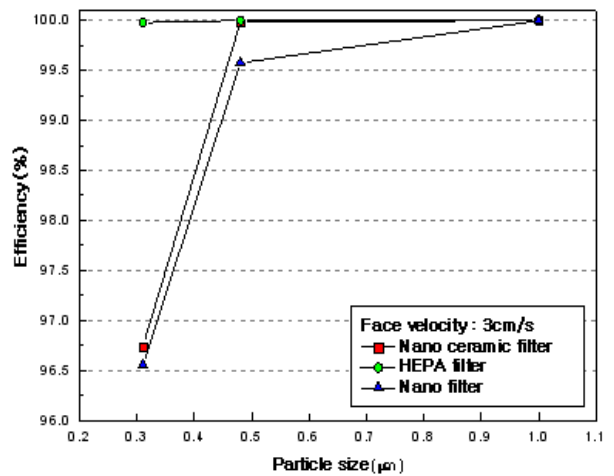


Fig. 9 Efficiency of the nano ceramic filter compared with the HEPA filter, nano fiber and prefilter.

것으로 추측된다. 또한 면속도가 변하여도 효율의 변화가 크지 않고 상당히 높은 분진포집효율을 가지므로 고정정 환경을 요구하는 곳에 응용될 수도 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 초미세 입자 제거를 위한 고효율 분진포집 성능을 가지는 나노 세라믹 필터를 제작하기 위하여, 다음과 같은 실험적 연구를 수

행하였다.

(1) 전기방사법으로 PEO 재질을 용매(증류수, Ethanol)에 중량 10wt%로 녹여 만든 용액에 전계강도 2~10kV/cm를 인가하여 100nm정도의 균일한 직경을 갖는 고분자 나노 섬유를 전기방사법으로 제조하였으며 농도 10wt%, 전계강도 3kV/cm의 조건에서 균일한 직경을 가지는 나노 섬유와 프리필터의 이중층 필터를 제조하였다.

(2) 필터레이션 코팅을 통해 SiO₂ 나노 입자를 이용, 이중층 필터의 표면을 코팅하였고, SiO₂ 세라믹 입자가 코팅된 이중층 필터 전구체를 200~1400℃사이에서 소결시키는 공정을 통해 섬유를 분해시켜 나노 세라믹 필터를 제작하였다..

(3) 초미세 입자 제거를 위한 나노 세라믹 필터를 제작하여 분진포집효율 및 압력손실 등의 성능 평가를 실시하였다. 그 결과 분진포집효율은 면유속 3cm/s 일 때 0.31 μ m 입자 제거 효율이 96.67%이상으로 측정되어 HEPA filter급 효율인 99.97%에 비해 다소 효율이 떨어지나 매우 우수한 효율을 지닌 것으로 측정되었다. 압력손실은 15.45mmAq로 프리필터보다는 높게 나왔으나 나노 섬유필터 전구체만으로 제작한 필터보다는 낮게 측정되었다.

참고문헌

1. Christopher J., Loui. B., Chen. C., and Shen. Y., 1999, Processing and microstructural characterization of porous bipcompatible protein polymer thin films, Polymer Vol. 49, pp.7397-7407.
2. Deitzel. J.M., Kleinmeyer. J., Harris. D., Tan, N.C., 2001, The effect of processing variables on morphology of electrospun-nanofibers and textiles, Polymer Vol. 42, pp.261-272.
3. Doshi. J., and Reneker. D.H., 1995, Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers, Journal of Electrostatics, Vol. 35, pp.151-160.
4. Fong. H., Chon. L., Reneker. D.H., 2001, Beaded nanofibers formed during electrospinning, Polymer Vol. 40.
5. Gil-Tae Kim, 2007, A study on the Fabrication and Performance Evaluation of Filter For HVAC Using of Electrospinning Process, Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol.4, No. 3, pp. 65-70.
6. Jo, S.M., Lee, W.S., and Chun, S.W., 2002, Nanofiber technology and applications, Fiber Technology and Industry Vol. 6.
7. Lee, S.G., Choi, S.S., and Joo, C.W., 2002, Nanofiber formation of polyetherimide under various electrospinning conditions, Journal of the Korean Fiber Society Vol. 39.
8. Shin, Y.M., Holman. M.M., Brenner. M.P., Rutledge, G. C., 2001, Electrospinning :A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers, Applied physics letters, Vol. 78, No. 8, pp.1149-1151.