

고밀도 폴리에틸렌 플렉시 필라멘트로 제조된 습식부직포의 에어 필터 여재 특성 연구

Air-Filter Media Characteristics of Wet-laid Nonwoven based on HDPE Plexi-filament

*Corresponding author

Sang Young Yeo
(miracle@kitech.re.kr)

배영환, 위재형, 이명성, 양병진, 김도균, 여상영*
한국생산기술연구원 섬유연구부문

Younghwan Bae, Jae-Hyung Wee, Myungsung Lee, Byeong Jin Yeang,
Dokun Kim, and Sang Young Yeo*

Advanced Textile R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Ansan, Korea

Received December 01, 2021
Revised December 10, 2021
Accepted December 14, 2021

Textile Coloration and Finishing
TCF 33-4/2021-12/302-308
© 2021 The Korean Society of
Dyers and Finishers

Abstract Air filters are being used in countless places from industrial sites to everyday life. The spread of the COVID-19 virus, which started in 2019, is disrupting people's daily lives, and the importance of air filters as a basic means to prevent the spread of these diseases is further highlighted. In this study, the purpose was to develop another type of air filter media with excellent barrier properties that can replace PP meltblown nonwoven fabrics widely used commercially due to its excellent electrostatic properties, differential pressure and filtration efficiency. Therefore, wet-laid nonwoven for air filters were manufactured using plexi-filaments formed through flash spinning and having various fiber diameter from hundreds of nanometers to tens of micrometers, and its applicability as an air-filter media was investigated compared to the meltblown nonwoven. As a result of the performance evaluation, it was found that the filtration efficiency and barrier performance at $0.3\mu\text{m}$ was superior to that of the meltblown nonwoven of the same weight, although the differential pressure was high due to morphological properties of the plexi-filament.

Keywords plexi-filament, flash spinning, air filter media, wet-laid, filtration efficiency

1. 서 론

에어필터는 일반빌딩 공조용 미디움 필터를 포함하여 반도체 공장 크린룸 헤파필터, 자동차용 에어필터, 가정용 공기청정기 필터 등 산업현장에서부터 일상생활 속까지 수없이 많은 곳에 활용되고 있다. 특히 COVID-19와 같은 바이러스의 전파를 막는 마스크용 필터는 사람의 건강을 지키는 수단으로 활용되어 지고 있으며 따라서 이와 관련된 에어필터 소재에 대한 연구가 현재 많이 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 에어필터 소재중 PP 멜트블로운 부직포는 용융방사 부직포로 방사시 노즐에서 발생하는 고압의 기류에 의해 연신이 되어 섬유 직경이 $1\sim 10\mu\text{m}$ 로 극세섬

유로 이루어져 있고 정전기적 특성 때문에 여과성능이 우수하여 상업적으로 가장 널리 이용이 되고 있다⁴⁻⁹⁾.

한편, 미국 듀폰사의 타이벡(Tyvek)은 플래시방사(Flash-spinning) 기술로 제조한 부직포로 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)과 용매를 고온·고압하에서 초임계상을 만들고 상온·상압으로 토출 시킴으로써 용매는 공기중에서 급격히 휘발되고 고분자는 망상 구조의 초극세섬유 즉, 플렉시 필라멘트(Plexi-filament)로 방사되면서 웹을 형성하고 이후 캘린더 가공공정 등을 통해 열융착을 시킴으로써 부직포로 제조된다. 이렇게 제조된 플래시 방사부직포는 인장강도와 인열특성이 우수하며 멤브레인에 버금가는 투습방수 특성을 갖는다^{10,11)}.

따라서 이런 투습방수성을 갖는 결정적인 이유 중 하나가 플

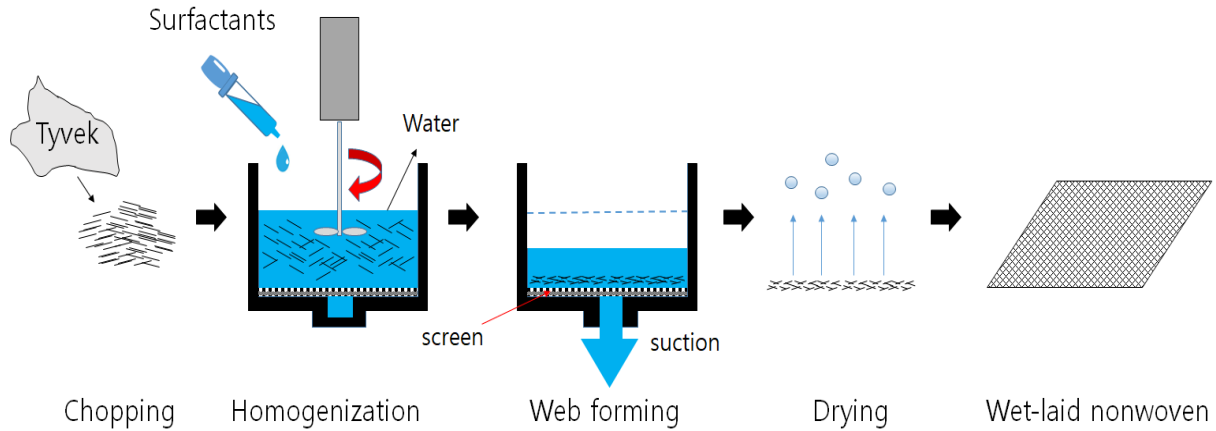


Figure 1. Preparation of plexifilament wet-laid nonwoven.

렉시 필라멘트의 형태적 특성에 기인하는 것으로 본 연구는 단면이 리본 형태이면서 다양한 굵기의 섬유가 넓게 분포되어 있고, 피브릴화된 형태를 가진 플렉시 필라멘트의 구조적 특성을 활용하여 에어필터 여재로 개발하고자 하였다¹²⁻¹⁴). 다만 플렉시 필라멘트는 현재 국내 기술로는 제조가 불가능하기 때문에 상용품인 듀폰사의 타이벡 부직포에서 섬유를 채취하여 이를 습식부직포로 재설계하고 에어필터 여재특성을 비교 평가하여 필터 소재로의 개발가능성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험

2.1 재료

습식부직포 제조를 위한 플렉시 필라멘트 섬유를 얻고자 HDPE 플렉시 방사부직포(Tyvek 1560B, Dupont)를 일정 길이 (<5mm)로 절단하여 단섬유(chopped fiber)를 채취하였으며 이 섬유의 균일 분산을 위해 비이온계 계면활성제(TRIOTON X-100)를 사용하였다. 또한 에어필터로의 응용가능성을 확인하고 물성 비교를 위해 PP 고분자(Melt index 800g/10min, PolyMirae)로 정전 처리 없이 자체 용융 방사하여 제조한 40g/m² 멜트블로운 부직포를 사용하였다.

2.2 플렉시 필라멘트 습식부직포 제조 방법

Figure 1에 나타난 것과 같이 플렉시 방사부직포인 타이벡을 5mm 이하의 길이를 갖도록 절단하여 얻은 플렉시 필라멘트 섬유를 이용하여 습식부직포로 제조하기 위해 물을 베이스로 분산제 1 wt%를 넣고 호모게나이저를 이용하여 물리적으로 균일 분산시킨 후, 물을 탈수하고 80°C에서 10시간 건조공정을 통해 중량 20, 30, 40g/m²의 플렉시 필라멘트 습식부직포를 제조하였다. 이렇게 제조한 습식부직포의 형태안정성을 높이고자 Figure 2에 나타난 것처럼 PET 스펀본드를 상하로 적층하

여 멜트블로운 부직포를 포함하는 에어필터 여재 시편 총 4종을 Table 1과 같이 준비하였으며, 공극률(porosity)은 식(1)을 통해 계산하였다¹⁵⁾.

$$\varepsilon (\%) = \left[1 - \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

where,

ε : Porosity

ρ_w : Fabric density

ρ_f : Fiber density

2.3 분석방법

주사전자현미경(SU-8010, HITACHI, Japan)을 통해 제조한 시료의 표면, 단면 구성 섬유의 직경을 분석하였으며, 에어필터 여재로의 기초 물성을 확인하기 위해 통기성(FX 3300, TEXTTEST AG, Germany)을 압력강하 125Pa 조건에서 측정하였으며, 기공특성분석 장비(CFP-1500AEX, PMI Porous Mate

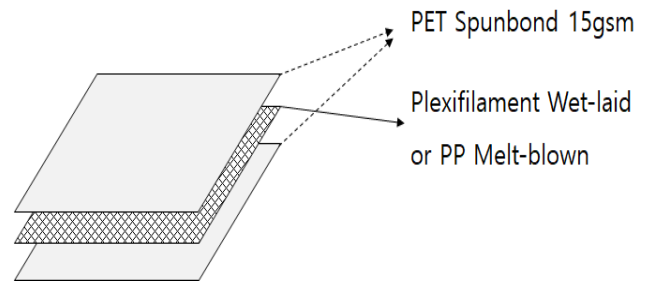


Figure 2. Basis structure of the air filter media.

Table 1. Specification of air filter media samples

Sample ID	Material	Web forming process	Filter media without spunbond		
			Basis weight (g/m ²)	Fabric density (g/cm ³)	Porosity (%)
WL20	HDPE	Wet-laid	20±0.5	0.262	72.5
WL30			30±0.5	0.226	76.4
WL40			40±0.5	0.211	77.9
MB40	PP	Meltblown	40±1.0	0.121	86.6

rials Int., USA)로 galwick(15.9 dynes/cm)을 습윤제로 활용하여 ASTM F316 규격에 따라 시편의 기공크기와 분포를 측정하였다. 또한 표면전위계(983v2, Meech, UK)를 이용하여 필터 여재의 여과효율에 영향을 미칠 수 있는 정전기를 25mm 거리에서 측정하였으며, 최종적으로 Figure 3의 필터 여재성능평가장치(TSI 8130, TSI Incorporated, USA)를 이용하여 유량에 따른 차압 변화를 확인하고 BS EN 143:2000 규격에 따라 NaCl 에어로졸을 발생시켜 유량 95l/min에서의 여과효율은 다음의 식(2)을 통해 측정하였다.

$$\eta(\%) = \frac{C_u - C_d}{C_u} \times 100 \tag{2}$$

where,

η : Filtration efficiency

C_u : Counts at the upstream

C_d : Counts at the downstream

3. 결과 및 고찰

3.1 에어필터 여재 구조적 특성 분석

Figure 4의 SEM에 나타난 것과 같이 듀폰사의 기존 타이벡 HDPE 플래시 방사부직포의 표면은 기공이 거의 없고 섬유 밀도가 매우 높을 것을 확인할 수 있었으며 실제 통기도, 기공,

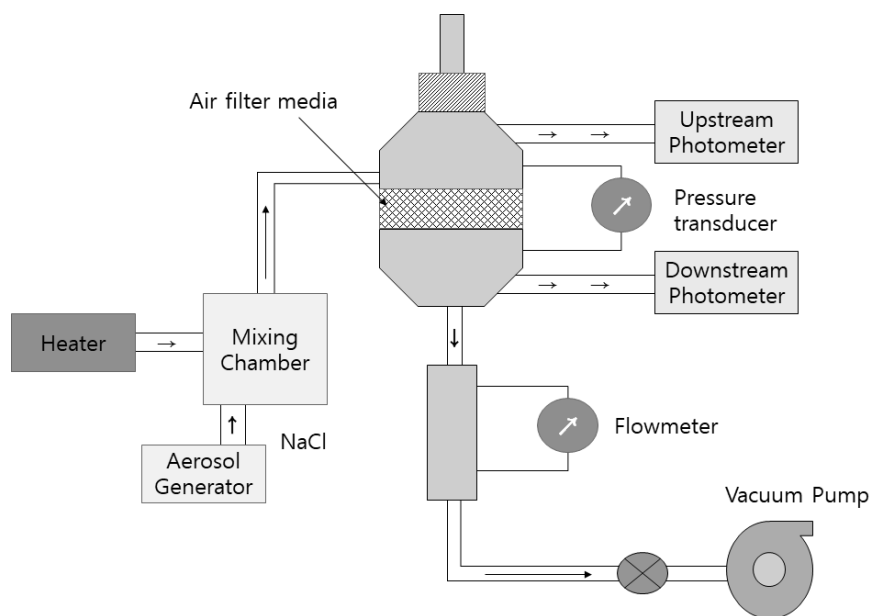


Figure 3. Schematic diagram of filter differential pressure and efficiency measuring device.

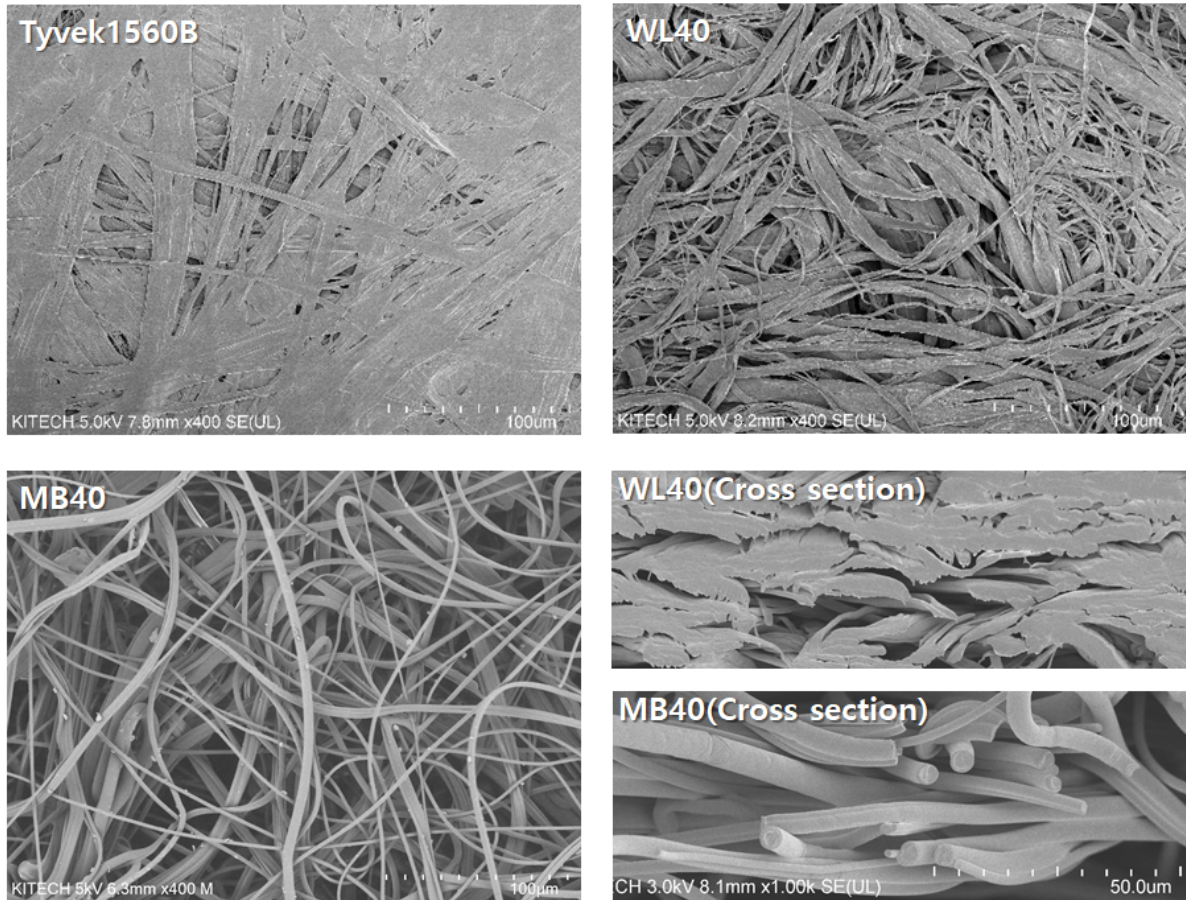


Figure 4. SEM images of the air filter media.

차압 분석이 불가할 정도로 필름화가 되어 있어 일반 에어필터 여재로는 부적합함을 알 수 있었다.

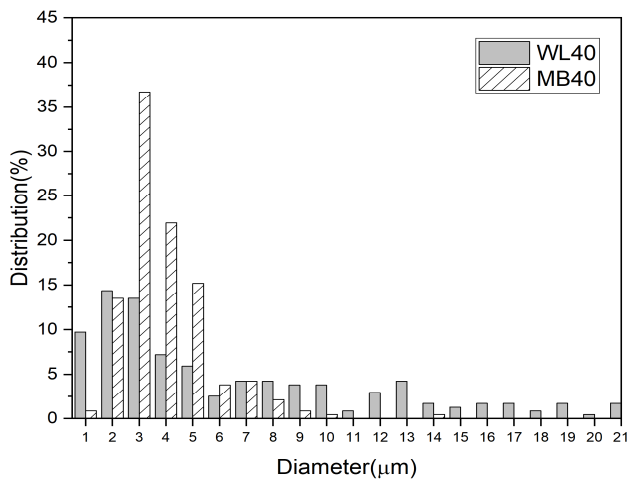


Figure 5. Distribution of fiber diameter of the air filter media.

반면 타이벡을 절단하여 얻은 플렉시 필라멘트를 습식부직포 제조공정으로 만든 WL40은 타이벡에 비해 밀도가 낮으면서 플렉시 필라멘트의 특성을 유지하고 있음을 알 수 있었는데, 섬유 단면 SEM 이미지에서 나타났듯이 납작한 리본 모양의 형태를 가지고 있으면서 수백 나노미터부터 수십 마이크로미터 굵기의 섬유가 혼재되어 있는 형태를 보였다.

일반적으로 에어필터 여재로 많이 활용되는 멜트블로운 부직포의 경우는 섬유 단면 모양이 둥근 형태를 가지고 있었으며 비교적 균일한 굵기의 크기를 가진 섬유로 이루어져 있음을 관찰할 수 있었다. 실제 섬유직경을 250회 측정하여 계산한 Figure 5의 직경 분포를 보면 멜트블로운 부직포인 MB40은 2~5µm 굵기의 섬유가 약 85%를 차지하고 있었으며 평균 직경은 4.37µm(최저 1.7µm, 최대 14.3µm)로 나타났다. 반면에 WL40은 평균 섬유직경이 7.68µm(최저 665nm, 최대 41.7µm)이었으나, 1µm이하 굵기의 섬유가 약 15%였으며, 2~5µm 39%, 6µm 이상이 42%를 차지하고 있어 멜트블로운 부직포에 비해 비교적 섬유직경 분포가 넓은 것을 알 수 있었다.

3.2 에어필터 여재의 가공 특성

Figure 6 (a)에 나타낸 것과 같이 평균 가공크기는 습식부직

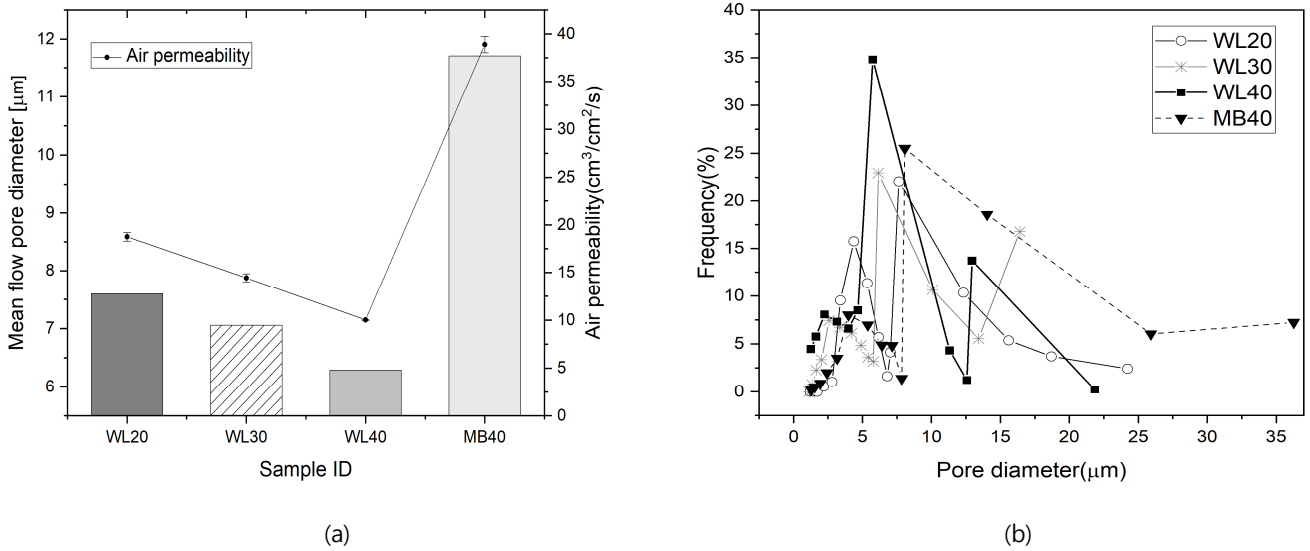


Figure 6. Pore characteristics of the air filter media; (a) pore diameter and (b) pore distribution.

포의 중량이 상승함에 따라 평균 기공크기는 점차 작아졌으며, 이에 비례하여 통기도 역시 낮아졌고, 평균 기공크기가 가장 컸던 멜트블로운 부직포 MB40 샘플의 통기도가 가장 높게 나타났다. 기공분포를 보면 평균 기공크기가 가장 작았던 WL40 샘플은 6μm 이하의 기공이 약 75%를 차지하고 있었는데 이런 작은 기공의 비율이 높은 이유 역시 플렉시 필라멘트의 특성에 기인한 것으로 사료된다. 반면에 MB40 샘플은 6μm 이하의 기공이 22%에 불과하였고 8μm 크기의 기공이 약 25%, 14μm 크기의 기공이 18%를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

3.3 에어필터 여재의 차압 및 효율 특성

Figure 7은 표면전위계를 25mm 거리에 두고서 측정된 필

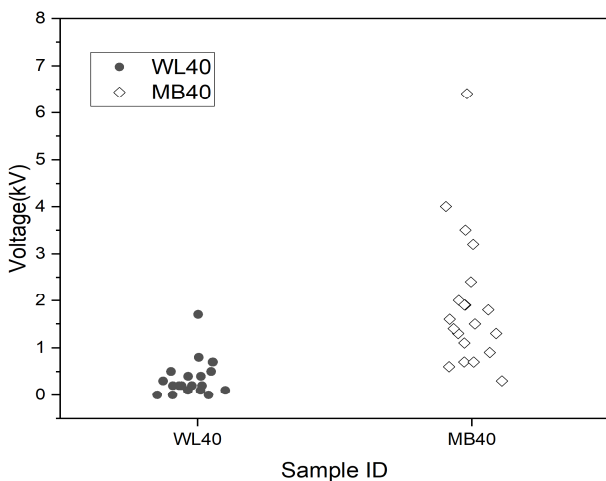


Figure 7. Electrostatic characteristics of air filter media.

터 여재의 정전기 전압으로 MB의 경우 코로나 차징을 하지 않았음에도 섬유 방사공정 및 소재 특성상 정전기 전압이 평균 1.93kV로 평균 0.37kV인 WL에 비해 높게 형성되어 있었다. WL의 정전기가 낮게 나타난 것은 습식부직포의 제조공정에서 공정 및 소재 특성이나 공정에서 활용한 계면활성제의 잔류 영향 등으로 판단되지만 정확한 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

한편 Figure 8 (a)는 유량에 따른 차압 변화 데이터로 중량과 유량이 증가하면서 차압도 증가하였으며 동일 중량 대비 통기도가 낮은 MB40의 차압이 가장 낮게 나타났다. Figure 8 (b)는 95lpm에서 측정된 0.3μm 입자 크기에 대한 여과효율 결과로 중량이 증가함에 따라 여과효율은 높아졌고 동일 중량인 MB40과 비교하여 WL40의 여과효율이 높게 나타났다. WL40의 정전기 세기가 MB40에 비해 낮음에도 불구하고 여과효율이 조금 더 우수하게 나온 이유는 극세섬유부터 굵은섬유까지 다양한 섬유직경이 넓게 분포되어 있는 플렉시 필라멘트의 섬유의 물리적 특성에 기인한 것으로 판단된다. 특히 주요 여과메커니즘이 충돌(impaction)과 차단(interception)으로 이루어지는 1μm 이상의 큰 입자에서의 여과효율은¹⁵⁾ 멜트블로운에 비해 플렉시 필라멘트 습식부직포가 매우 우수할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구는 HDPE 플래시 방사부직포를 구성하고 있는 플렉시 필라멘트 섬유의 고유 특성을 활용하여 습식부직포로 제조하고 섬유 특성 분석과 여과성능(차압 및 효율)을 측정하여 에어필터 여재로의 적용 가능성에 대해 조사하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 플렉시 필라멘트 습식부직포의 SEM 이미지 분석 결과 섬유

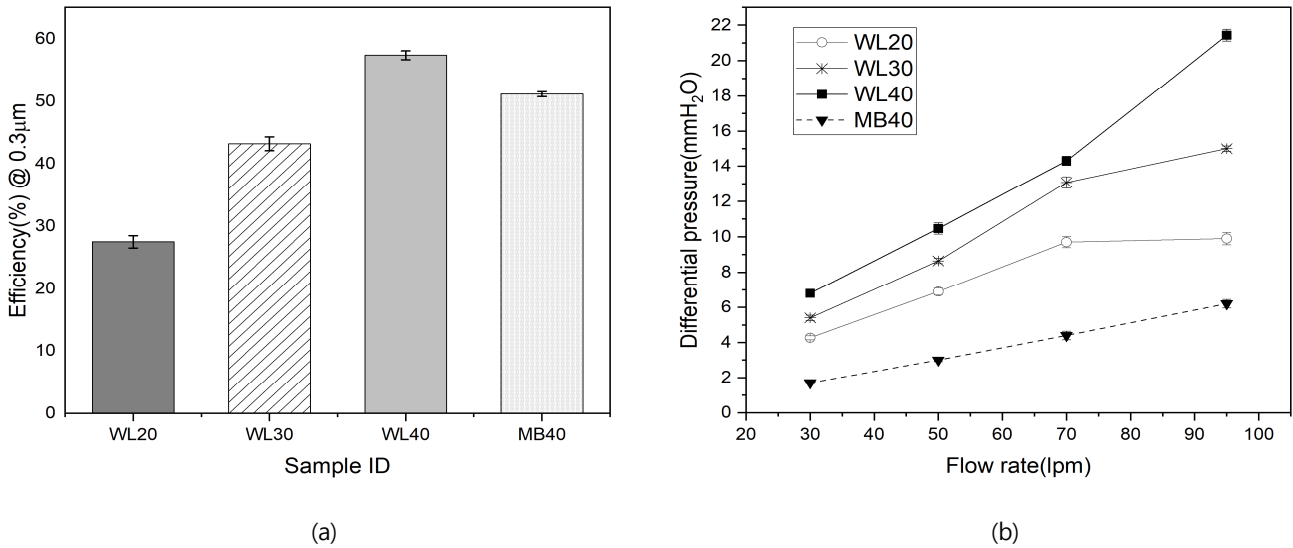


Figure 8. Filtration characteristics of the air filter media; (a) differential pressure and (b) filtration efficiency.

- 직경이 비교적 균일하여 직경분포가 좁은 멜트블로운 부직포에 비해 구성되어 있는 섬유 직경 분포가 1µm이하의 극세섬유부터 40µm 이상의 섬유까지 넓은 분포로 관찰되었다.
- 동일한 중량의 멜트블로운 부직포가 6µm 이하의 기공이 25% 비율을 갖는 것에 비해 플렉시 필라멘트 습식부직포는 6µm 이하의 작은 기공이 약 75% 이상을 차지하는 것으로 확인되었으며 이로 인해 동일 중량의 멜트블로운 부직포에 비해 낮은 통기성을 나타냈다.
 - 플렉시 필라멘트의 단순한 형태적 특성에 기인하여 습식부직포 제조시 멜트블로운 부직포에 비해 작은 크기의 기공이 형성이 되었고 이로 인해 차압은 높고 정전기의 세기가 낮았지만 0.3µm 입자 여과효율은 높았다.

따라서 차후 PP 소재를 플렉시 필라멘트 형태로 제조하여 정전기를 부여한다면 초저중량을 구현하면서 여과성능이 우수한 필터 여재 제조가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 20015746).

References

- C. Liu, P. C. Hsu, H. W. Lee, M. Ye, G. Zheng, N. Liu, W. Li, and Y. Cui, Transparent Air Filter for High-Efficiency PM_{2.5} Capture, *Nature Communications*, **6**, 6205(2015).
- V. K. Vijayan, H. Paramesh, S. S. Salvi, and A. A. K. Dalal, Enhancing Indoor Air Quality, The Air Filter Advantage, *Lung India*, **32**(5), 473(2015).
- L. Edelman, Air Filtration: Air Filter Media-an Industry Evolves, *Filtration and Separation*, **45**(9), 24(2008).
- J. D. Lee, Y. K. Hong, and K. S. Bae, Development of Composite Filter with High Performance Meltblown Non-Woven, *Textile Coloration and Finishing*, **17**(2), 40(2005).
- X. Zhang, J. Liu, H. Zhang, J. Hou, Y. Wang, C. Deng, C. Huang, and X. Jin, Multi-Layered, Corona Charged Melt Blown Nonwovens as High Performance PM_{0.3} Air Filters, *Polymers*, **13**(4), 485(2021).
- Y. K. Hong, Functional Finishing of Nonwoven Filter for Dust-proof/Medical Masks by Corona Discharging Treatment, *Textile Coloration and Finishing*, **25**(3), 232(2013).
- Y. E. Lee and C. W. Joo, Surface Modification of Polypropylene Meltblown(PP MB) Nonwovens by Plasma Treatment, *Textile Coloration and Finishing*, **18**(1), 20(2006).
- I. H. Song, J. S. Kim, and Y. K. Hong, Manufacture and Characteristics of Sound Absorption Materials by Finishing of Meltblown Nonwovens, *Textile Coloration and Finishing*, **23**(4), 304(2011).
- Y. Pu, J. Zheng, F. Chen, Y. Long, H. Wu, Q. Li, S. Yu, X. Wang, and X. Ning, Preparation of Polypropylene Micro and Nanofibers by Electrostatic-Assisted Melt Blown and Their Application, *Polymers*, **10**(9), 959(2018).
- R. Nayak, R. Padhye, I. L. Kyratzis, Y. B. Truong, and L. Arnold, Recent Advances in Nanofibre Fabrication Technique, *Textile Research Journal*, **82**(2), 129(2011).
- S. Y. Kim, P. Purnama, and S. H. Kim, Fabrication of

- Poly(L-lactide) Fibers/Sheets Using Supercritical Fluid through Flash-Spinning Process, *Macromolecular Research*, **18**(12), 1233(2010).
12. H. B. Wilmington and J. R. White, U.S. Pat. US3081519A(1962).
13. M. Weinberg, G. Dee, and T. Harding, U.S. Pat. US20060135020A1(2006).
14. D. A. Christopherson, W. C. Yao, M. Lu, R. Vijayakumar, and A. R. Sedaghat, High-Efficiency Particulate Air Filters in the Era of COVID-19: Function and Efficacy, *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, **163**(6), 1153(2020).
15. G. Zhu, D. Kremenakova, Y. Wang, and J. Militky, Air Permeability of Polyester Nonwoven Fabrics, *AUTEX Research Journal*, **15**(1), 8(2015).

Authors

배영환 한국생산기술연구원 연구원
위재형 한국생산기술연구원 연구원
이명성 한국생산기술연구원 연구원
양병진 한국생산기술연구원 수석연구원
김도군 한국생산기술연구원 연구원
여상영 한국생산기술연구원 수석연구원