

논문

공기청정기용 절곡필터의 절곡비가 필터성능지수에 미치는 영향

Effect of Pleating Ratio on Quality Factor of Pleated Filter in Air Purifier

권민선, 김예린, 김민성, 홍정화, 이명화, 이우근*
강원대학교 환경공학과

Min-Seon Kwon, Ye-Lin Kim, Min-Sung Kim, Jeong-Hwa Hong,
Myong-Hwa Lee, Woo Keun Lee*

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University,
Chuncheon, Republic of Korea

접수일 2020년 1월 17일
수정일 2020년 2월 10일
채택일 2020년 2월 11일

Received 17 January 2020
Revised 10 February 2020
Accepted 11 February 2020

*Corresponding author
Tel: +82-(0)33-250-6355
E-mail: woklee@kangwon.ac.kr

Abstract Electrostatic pleated filters are generally used in an air purifier. However, the pleating method has not been based on a theoretical approach but been dependent upon the manufacturer's know-how. In this study, an optimal pleating geometry was evaluated based on the filter quality factor considering collection efficiency and pressure drop of a filter. One flat filter and eight pleated filters (4, 6, 8, 10, 15, 21, 25, 30 pleats) with 29 mm in pleat height and 105 mm in filter width, were prepared, and their pressure drops and collection efficiencies were measured. Pressure drops of pleated filters with pleat number higher than 21 at the same gas flowrate increased with the number of pleats, which resulted from the increased filtration velocity due to decreased effective filtration area. However, collection efficiencies of a pleated filter for test particles (30, 50, 100, 200 nm) increased with increasing the number of pleats. Moreover, the highest filter quality factor for the pleated filter with 29 mm in pleat height was found at the pleats number of 21 (pleating ratio (=pleat height/pleat width), $\alpha=5.8$), which resulted in the optimal pleat geometry.

Key words: Pleated filter, Air purifier, Filter quality factor, Electret filter

1. 서론

최근 4년간의 서울시 초미세먼지 농도현황을 살펴 보면, 초미세먼지의 나쁨 일수는 2015년도 43일, 2018년도 63일로 점차 증가하는 추세를 보였다 (NIER, 2019). 또한 환경성 질환 환자의 수도 2009년 766만 명에서 2014년 896만 명으로 5년 사이에 17%나 증가하였다 (Gang, 2016). 현대인들은 주택, 지하역사, 어린이집 등 하루의 약 80~90%를 실내공간에서 머무르고 있으며, 차량 내에 머무르는 시간까지 포함하면 약 93%에 이른다 (Noh, 2018; Gang, 2016; Klepeis, 2001). 대기 중의 초미세먼지 나쁨 일수의 증가는 사람들이 외출하지 않고 실내에 머무르는 시간

을 더욱 증가시키게 하였다. 또한 쾌적한 실내 공기 질에 대한 국민들의 요구는 계속 증대하고 있으며, 이에 따라 실내 공기질 관리는 필수적인 요소로 대두되었다.

실내공기를 쾌적한 상태로 유지하기 위하여 기존에는 자연환기를 사용하여 왔으나, 이 경우 실내공기 질은 외부의 공기질에 의존하게 된다. 따라서 고농도 미세먼지 현상이 발생할 때 자연환기를 사용하는 것은 바람직하지 않으며, 미세먼지 제거능이 부여된 기계환기를 실시하거나 공기청정기를 이용하여 실내공간을 청정화하는 것이 필요하다. 국민들이 가장 손쉽게 접근할 수 있는 방법론이 공기청정기이므로, 최근에는 공기청정기에 대한 수요가 급격하게 증가하

고 있다(Seo, 2004). 공기청정기는 가정, 사무실, 지하상가 및 지하철 역사 등에 다양한 크기와 집진방식으로 적용되고 있지만(Kim, 2004), 필터를 사용하는 여과집진이 대체를 이루고 있다. 공기청정기의 성능은 일정한 공간을 얼마나 빨리 깨끗하게 만드느냐 하는 공기청정화능력에 의해 좌우되며, 공기청정화능력은 공기청정기의 풍량과 필터의 집진효율의 곱으로 나타나게 된다(Noh and Oh, 2015). 따라서 압력손실이 낮아지면서도 높은 집진효율을 가지는 필터의 개발이 요구되어지고 있다. 이를 달성할 수 있게 하는 것이 필터여재를 절곡하여 여과면적을 넓힌 절곡필터이다. 그러나 필터를 절곡하는 방법에 대해서는 충분한 이론적인 근거없이 제조업체들의 노하우에 의존하고 있다.

절곡필터와 관련된 이론적인 연구를 살펴보면, 그동안 많은 학자들이 수치해석 방법을 이용하여 절곡필터에서의 압력손실 및 유동특성을 파악하였다(Feng *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2014; Fotovati *et al.*, 2012, 2011; Chen *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1991). Lee *et al.* (1991)은 동일한 여과속도에서 여재의 충진율이 클수록 압력손실이 증가하고, 동일한 충진율에서 여과속도를 증가시키면 압력손실이 커진다는 것을 보였다. Chen *et al.* (1995)은 Darcy-Lapwood-Brinkman 모델을 적용하여 먼지 부하가 없는 조건에서 절곡필터의 압력손실을 계산하였다. 그들은 절곡 수가 증가함에 따라 필터여재에서의 여과속도가 감소하여 압력손실이 낮아진다는 것과 일정한 절곡 수 이상에서는 압력손실이 오히려 증가한다는 것을 보였다. Fotovati *et al.* (2012, 2011)은 절곡형상이 다른 필터들에 대하여 먼지 부하 시 시간에 따른 필터 내부에서의 먼지 부착 현상을 수치해석을 통하여 계산하였다. 시뮬레이션 결과, 관성력이 작은 먼지는 직사각형 형태의 절곡필터보다 삼각형 형태의 절곡필터에 균일하게 침착되어 압력손실이 낮아진다는 것을 보였다. Feng *et al.* (2014)은 기존의 CFD 모델링 방식에서 명확하게 파악하지 못했던 층류의 흐름을 보완하기 위하여 다양한 층류 모델인 LES와 DES 모델 등을 시뮬

레이션하여 최적의 모델을 제안하였다. Feng *et al.* (2018)은 Eulerian-Markov method를 새로이 적용하여 기존의 Lagrangian method를 보완하여 절곡필터의 성능을 모델링하는 방법을 발전시켰다. Li *et al.* (2019)은 폴리에스테르 재질의 필터와 PTFE 막으로 코팅된 폴리에스테르 재질의 필터에 대하여 절곡비 (= 절곡높이/절곡폭)에 따른 압력손실의 변화를 실험적으로 살펴보았다. 그들은 여과속도가 증가함에 따라 압력손실도 점차 증가하며, 동일한 유량에서는 절곡비가 증가함에 따라 압력손실이 낮아진다는 것을 보였으며, 그 이유를 유효여과면적과 연계시켜 고찰하였다. 그러나, 절곡필터에서 최적의 절곡비는 집진효율과 압력손실을 모두 고려한 필터성능지수를 토대로 결정되어야 하나, 현재까지 대부분의 연구는 압력손실 결과만을 토대로 결정하였다(Li *et al.*, 2019; Théron *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1991). Hasolli *et al.* (2013)은 다중 층으로 구성된 절곡필터들의 성능평가에 필터성능지수를 도입하여 적절한 층 구조와 절곡 수의 결정에 사용하였다. 그러나 평가에 사용된 필터들의 재질과 물리적인 특성이 모두 달라서, 최적의 절곡비를 도출하기는 어려운 한계점을 가지고 있다. 앞서 언급된 절곡필터 연구에서 사용된 필터들과는 달리, 본 논문에서는 공기청정기에 사용되는 정전필터를 연구의 대상으로 삼고 있다. 정전필터를 사용하면 대전되지 않은 필터와 같은 압력손실에서 보다 높은 집진효율을 달성할 수 있다(Ji *et al.*, 2012; Brown, 1993). 평판형 정전필터의 집진효율과 압력손실에 관한 연구는 많이 진행되었으나(Kerner *et al.*, 2018; Tang *et al.*, 2018; Ji *et al.*, 2012; Romay *et al.*, 1998), 절곡형 정전필터에 대한 연구는 미비하다. 따라서, 본 연구에서는 공기청정기에 일반적으로 사용되어지는 한 가지 종류의 정전필터 여재를 이용하여 제작한 다양한 절곡비를 가진 절곡필터에 대하여, 먼지가 부하되어 있지 않은 초기 조건에서 압력손실과 집진효율을 측정하고, 필터성능지수를 계산하여 최적의 절곡비를 결정하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 필터여재

절곡필터를 제조하기 위하여 폴리에틸렌테레프탈레이트 (PETE) 재질의 지지체층과 대전된 폴리프로필렌 (PP) 재질의 멜트블로우 (MB) 여과체층으로 구성된 필터여재 (E12등급, E&H Co. LTD.)를 사용하였다. MB 여과체층이 필터의 성능을 좌우하게 되나, 물리적인 강도가 약하므로 여과성능에는 거의 영향을 미치지 않는 지지체층을 핫멜팅하여 사용하였다. 각 필터층의 물리적인 특성을 표 1에 나타내었다.

MB 여과체와 지지체층이 결합된 필터여재를 이용하여 다양한 절곡비를 가진 절곡필터를 제작하였다. 절곡높이는 S사의 필터를 기준으로 하여 29 mm로 고정하고, 절곡폭을 3.5~26.3 mm로 변화시켜 8가지 종류의 절곡필터를 준비하였다. 필터성능평가를 위해 절곡된 필터는 아크릴 챔버 (높이 120 mm, 폭 105 mm, 깊이 290 mm) 내부에 핫멜트 접착제를 이용하여 누설이 없도록 부착하였다. 필터성능평가는 상기 절곡필터 외에 평판형 필터도 함께 이루어졌다. 테스트

에 사용된 필터들의 구체적인 기하학적 형상을 표 2에 나타내었다. 또한 기하학적 구조를 무차원화하기 위하여 절곡높이와 절곡폭의 비를 절곡비, α 로 표현하여 나타내었다.

2.2 필터성능평가를 위한 실험장치 및 실험 방법

필터의 성능을 평가하기 위해서는 필터의 압력손실과 집진효율을 측정하여야 한다. 절곡 수에 따라 여과면적이 다르기 때문에 절곡필터의 종류별로 여과면적과 여과속도의 곱으로 실험유량을 결정하였으며, 그 유량은 팬과 연결된 인버터로 조절하였다. 인버터 단계 (1~9단계)와 유량과의 상관관계는 덕트 내에서 열선풍속계 (Model testo 425, Testo SE & Co. KGaA)로 유속을 측정하여 얻었다. 그림 1에 테스트용 필터의 압력손실과 집진효율을 측정하기 위한 실험장치도를 나타내었다. 실험장치는 먼지발생부, 여과집진부, 압력손실 및 집진효율 측정부로 구성되어 있다. 먼저 테스트용 필터의 압력손실은 일정한 가스유량 (1 m³/min) 또는 일정한 여과속도 (0.053 m/s)에서 필터의 종류별로 차압계 (Model testo 510, Testo SE & Co. KGaA)를 이용하여 측정하였다.

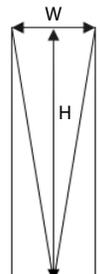
필터의 집진효율은 NaCl 시험먼지를 발생시켜 측정을 하였다. 1.0 wt%의 NaCl 용액을 내부압력이 25 psi로 조절된 Atomizer (Model 4810, HCT Co. Ltd.)로 분사하여 액적을 발생시킨 후, Diffusion dryer로 건조를 시켰다. 건조된 NaCl 시험먼지를 Soft X-ray charger (Model XRC-05, HCT Co. Ltd.)에 통과시켜 평형 대전상태로 만들어 여과집진부로 유입시켰다. 그 후 필터 전, 후단에서 시험먼지의 개수농도분포를 SMPS (Model 3936, TSI Co. Inc.) 장치를 이용하여 측정하였다. 시험먼지는 평균입경 105 nm, 기하표준편차 1.9를 가지면서 유입개수농도는 45,000~60,000 #/cm³의 값을 나타내었다. 필터의 집진효율, E 는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E(\%) = \frac{N_{in} - N_{out}}{N_{in}} \times 100 \quad (1)$$

Table 1. Physical properties of filter media.

	Melt blown layer	Support layer
Mean fiber diameter, d_f (μ m)	2.27	41.48
Thickness, L (mm)	0.16	0.28
Areal mass density (g/m ²)	24	68
Air permeability, κ (m ²)	7.78×10^{-12}	9.59×10^{-11}
Packing density, ρ_f (%)	15.8	17.6

Table 2. Pleating geometries of test filters.

	Pleat count	0	4	6	8	10
	H (mm)	-	29	29	29	29
W (mm)	-	26.3	17.5	13.1	10.5	
α (H/W)	-	1.10	1.66	2.21	2.76	
Pleat count	-	15	21	25	30	
H (mm)	-	29	29	29	29	
W (mm)	-	7.0	5.0	4.2	3.5	
α (H/W)	-	4.14	5.80	6.90	8.29	

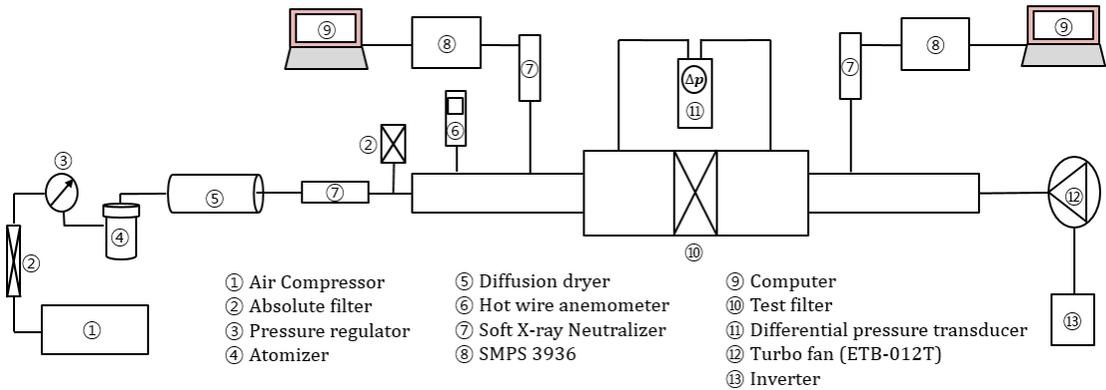


Fig. 1. Experimental setup to evaluate filtration performance.

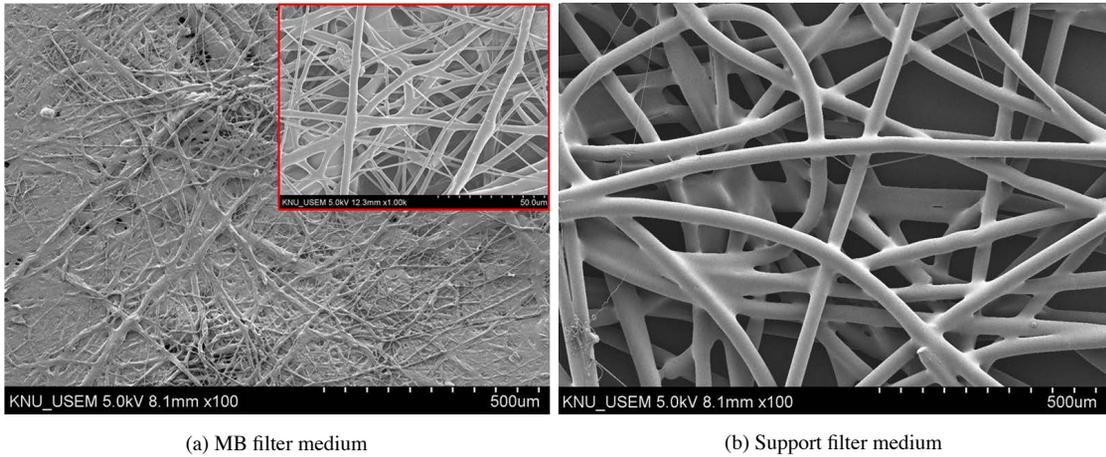


Fig. 2. Internal morphology of filter media.

여기에서 N_{in} 은 필터 상류측의 개수농도이고, N_{out} 은 필터 하류측의 개수농도이다.

실험을 통해 얻어진 필터의 압력손실과 집진효율 결과를 이용하여 식 (2)에 나타난 필터성능지수 (q_F , Filter quality factor)를 구할 수 있다(Chen *et al.*, 2008; Lücke and Fissan, 1995).

$$q_F = \frac{-\ln(1-E)}{\Delta p} \quad (2)$$

여기에서 Δp 와 E 는 앞서 언급한 필터의 압력손실과 집진효율이다. 필터성능지수는 압력손실이 낮을수

록, 집진효율이 클수록 높아지며, 필터성능지수가 높을수록 필터의 성능이 뛰어나다는 것을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 필터의 내부구조 및 공기투과도

그림 2는 고분해능 주사전자현미경 (Model S-4800, Hitachi Co. Ltd.) 분석을 통하여 측정한 MB 여과체층과 지지체층의 내부구조 이미지이다. MB 여과체층과 지지체층을 100배의 확대비율로 나타내었으며, MB

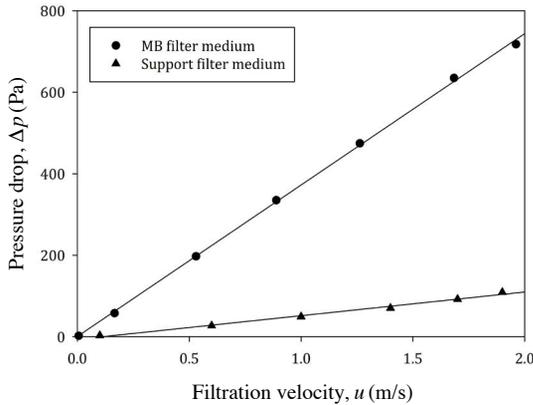


Fig. 3. Relationship between pressure drop and filtration velocity for MB and support filter media.

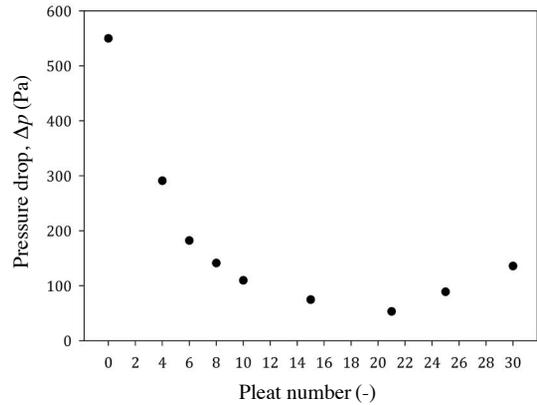


Fig. 4. Pressure drop of a pleated filter with different pleat number at the gas flow rate of 1.0 m³/min.

여과체층은 1,000배 확대비율의 사진도 100배 사진내에 함께 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 지지체층의 평균 섬유경이 MB 여과체층의 평균 섬유경에 비해 약 20배 큰 것을 알 수 있고, 표 1에 표시한 바와 같이 지지체층의 충진율은 17.6%, MB 여과체의 충진율은 15.8%로 비슷하다는 것을 알 수 있다.

또한 공기투과도는 아래의 식(3)에 나타낸 Darcy's law에 의해서 얻어질 수 있다.

$$\Delta p = \frac{\mu L}{\kappa} u \quad (3)$$

여기에서 Δp 는 압력손실, μ 는 유체의 점성계수 ($= 1.80 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$), L 은 필터의 두께, u 는 여과속도, κ 는 공기투과도를 나타낸다. 그림 3과 같이 필터의 압력손실과 여과속도의 상관관계를 도식화하면, 그 기울기가 $\mu L / \kappa$ 이 되고 이를 이용하여 공기투과도 값, κ 를 산출할 수 있다. 결과적으로 지지체층이 MB 여과체에 비해 약 10배 정도 높은 공기투과도 값을 가지며, 이는 지지체층이 MB 여과체층에 비해 공기가 쉽게 통과한다는 것을 의미한다.

3. 2 압력손실

다양한 절곡 수를 가진 절곡필터들에 대하여, 유량이 1 m³/min인 조건에서의 압력손실 측정결과를 그림

4에 나타내었다. 덕트에서의 유량이 동일하다는 것은 덕트의 유속은 동일하나 절곡필터의 종류에 따라서 필터를 통과하는 여과속도는 달라지게 된다. 절곡 수가 많아질수록 여과면적이 증가하고 필터를 통과하는 여과속도는 감소한다. 이로 인해 압력손실이 낮아지게 된다. 그러나 절곡 수가 25개 이상이 되면 이상하게도 오히려 압력손실이 증가하는 경향을 보인다.

절곡 수가 많아짐에 따라서 압력손실이 낮아진다는 것은 식(4)에 나타낸 Davies의 여과이론(Davies, 1952)으로 설명할 수 있다.

$$\Delta p = 64\mu u L \frac{\rho_F^{\frac{3}{2}}(1 + 56\rho_F^3)}{d_F^2} \quad (4)$$

여기에서 μ 는 유체의 점성계수, u 는 여과속도, L 은 필터의 두께, ρ_F 는 필터의 충진율, d_F 는 필터여재를 구성하는 섬유의 직경을 의미한다. μ , L , ρ_F , d_F 가 모두 동일한 필터에 대해서 압력손실 Δp 는 여과속도 u 에 의존하게 된다. 동일한 가스유량을 처리하는 데 여과면적이 늘어나게 되면 여과속도가 낮아지므로 압력손실은 낮아지게 된다.

절곡 수 25개부터는 압력손실이 증가하게 되는데, 절곡간격이 너무 좁아지게 되면 절곡 사이의 점성항력이 증가하고, 필터여재에서 여과에 사용할 수 없는 공간인 dead space가 점차 증가하여 여과속도가 증가

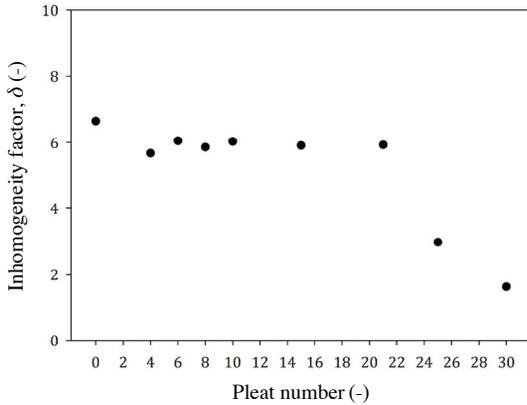


Fig. 5. Inhomogeneity factor of a pleated filter.

했기 때문인 것으로 사료된다(Chen *et al.*, 2008; Subrenat *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 1991).

그림 5에는 식(4)를 기반으로 계산한 절곡 수에 따른 이론적인 압력손실 값(Δp_f)과 실험을 통해 구한 압력손실(Δp_r)의 비로부터 구한 필터 층진의 불균일도, δ 를 나타내었다(식(5) 참조).

$$\delta = \frac{\Delta p_f}{\Delta p_r} \quad (5)$$

절곡 수가 21까지는 거의 일정한 값($\delta=6$)을 보이나, 그 이상의 절곡 수에서는 실험적인 압력손실이 높아져서 δ 값이 작아짐을 알 수 있다. 그림 5에서 얻은 불균일도 값을 고려하여 새로 예측한 이론값을 실측값과 비교하여 그림 6에 나타내었으며, 이론값이 실측값을 비교적 잘 반영함을 알 수 있다. Davies의 여과이론에 따른 압력손실의 변화는 실험에 의한 압력손실의 변화와는 다르게 절곡 수가 증가함에 따라 급격하게 감소하다가 절곡 수 10 이후로 완만하게 감소하는 경향을 보인다(Davies, 1952). 이는 이론식에서는 압력손실이 여과속도에만 영향을 받지만, 실제로는 여과속도뿐만 아니라 절곡으로 인해 발생하는 기하학적 요인에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 그리고 실제 측정된 압력손실 값보다 계산을 통한 이론적 압력손실 값이 약 6배 큰 것을 알 수 있는데, 이는 필터 층진의 불균일도에 의하여 발생한 현상이라 예상되어진다.

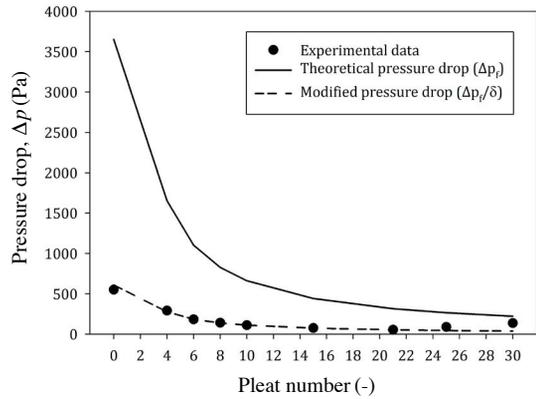


Fig. 6. Theoretical and experimental pressure drop of a pleated filter with different pleat number at the gas flow rate of 1.0 m³/min.

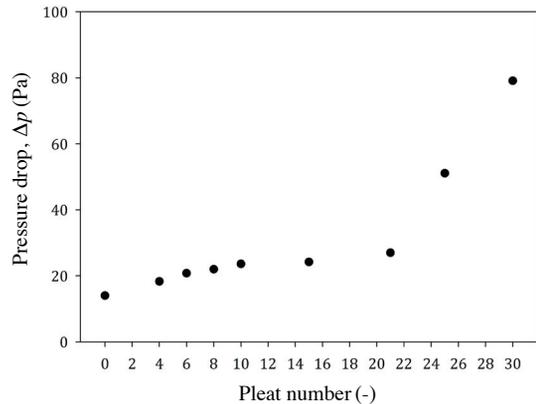


Fig. 7. Pressure drop of a pleated filter with a different pleat number at the filtration velocity of 0.053 m/s.

그림 7은 필터를 통과하는 여과속도가 0.053 m/s로 동일한 때의 절곡 수에 따른 압력손실 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 여과속도가 동일한 경우 압력손실 또한 비슷한 값을 보인다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 절곡 수가 21개일 때까지는 압력손실이 서서히 증가하나, 절곡 수가 25개부터는 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 이는 앞서서도 설명한 바와 같이 dead space 증가에 의한 유효여과면적(실질적으로 여과에 사용되는 필터의 면적)의 감소에 기인한 것으로 판단되어진다.

3.3 집진효율

그림 8은 동일한 가스처리 유량(1 m³/min)에서 시험면지의 크기가 30 nm, 50 nm, 100 nm, 200 nm일 때의 절곡 수에 따른 집진효율과 Peclet 수를 나타낸 그래프이다. 절곡 수가 0일 때에는 평판형 필터를 나타내며, 평판형 필터보다 절곡필터의 집진효율이 월등하게 뛰어남을 알 수 있다. 절곡필터의 절곡 수가 증가할수록 집진효율이 증가하다가 절곡 수가 15 이상에서는 비슷해지는 경향을 보인다. 앞서서도 설명한 바와 같이 절곡 수가 증가하게 되면 여과면적이 늘어나게 되고 이로 인해 여과속도가 감소하여 확산 메커니즘이 지배적으로 나타나 집진효율이 높아지게 된다. 확산에 의한 집진효율은 관성력과 확산력의 비인 무차원수 Peclet 수(= ud_p/D)에 의해 결정되어진다. 여기에서 u 는 여과속도, d_p 는 평균섬유직경, D 는 먼지의 확산계수이다. Peclet 수는 그 값이 작아질수록 확산의 효과가 커진다는 것을 의미하는 무차원수이다. 따라서 여과속도가 감소하고, 먼지의 크기가 작아질수록(먼지의 확산계수가 커짐) Peclet 수가 작아져서 확산에 의한 집진이 커지게 된다. 그림의 오른쪽 종축을 살펴보면, 절곡 수가 적을수록 먼지 크기가 클수록 Peclet 수가 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 작용하는 집진 메커니즘이 확산력뿐이라면 시험면지의 크기별로 집진효율을 비교를 하였을 때, 먼지의 크기가 작을수록 집진효율이 높아야 한다. 그러나 그림에서 볼 수

있듯이, 시험면지의 크기가 클수록 집진효율이 높아짐을 알 수 있다.

이는 확산 메커니즘뿐만 아니라 시험면지가 대전된 정전필터를 통과하면서 정전기적 분극을 일으켜 먼지가 집진되는 유기력(Dielectrophoretic force)에 의한 메커니즘이 지배적으로 나타나기 때문이다. 유기력의 강도를 나타내는 유기력 파라메타가 먼지 크기의 제곱에 비례하므로, 유기력에 의한 집진효율은 시험면지 크기가 클수록 높아지게 된다(Otani *et al.*, 1993).

3.4 필터성능지수

그림 9는 먼지의 크기별로 절곡 수에 따른 압력손실과 집진효율 측정데이터를 이용하여 산출해낸 필터성능지수 값을 나타낸 것이다. 필터성능지수는 절곡 수가 4까지는 완만하게 증가하다가 21까지 지속적으로 증가하는 경향을 보이나, 절곡 수가 21 이상일 때부터는 오히려 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 이는 그림 4에 나타낸 압력손실 그래프와 비슷한 양상을 보이고 있다. 절곡 수가 0인 평판형 필터에 비해 절곡 수가 4인 절곡필터의 압력손실이 크게 감소하는 경향을 보이나, 집진효율이 비교적 낮아 필터성능지수는 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 그리고 절곡 수가 21까지는 압력손실이 더욱 감소하고 집진효율이 높아져 필터성능지수는 더욱 높아지게 된다. 그러나 절곡 수가 21보다 많아지게 되면 유효여과면적이

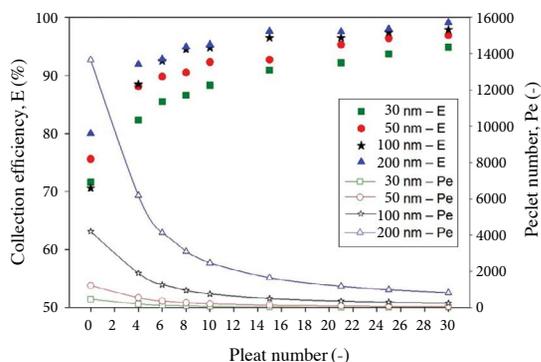


Fig. 8. Collection efficiency and Peclet number of a pleated filter with different pleat number at the gas flow rate of 1.0 m³/min.

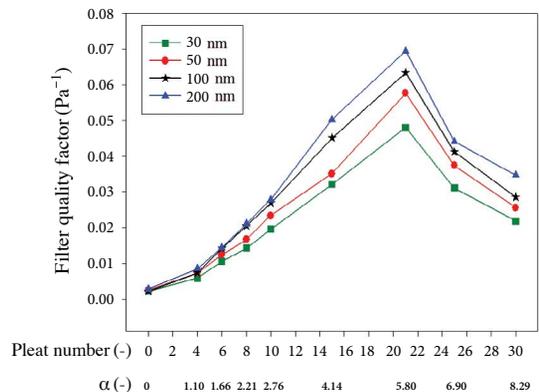


Fig. 9. Filter quality factor of a pleated filter with different pleat number.

감소하게 되어 압력손실이 오히려 높아지며 집진효율은 일정한 경향을 나타내어 필터성능지수는 급격하게 감소하게 된다. 이러한 결과를 토대로 할 때, 본 실험에 사용한 필터여재(E12등급)는 21의 절곡 수를 갖도록 절곡하는 것이 최적임을 알 수 있다. 이를 절곡비 ($\alpha = \text{절곡높이}/\text{절곡폭}$, 절곡높이가 29 mm이고 절곡폭은 3.5~26.3 mm)로 표현하면, α 는 1.10~8.29의 범위를 가지게 된다. 또한 $\alpha = 5.8$ 에서 가장 높은 필터성능지수를 가지므로, 절곡높이 29 mm인 E12등급의 정전 필터는 절곡폭 대비 절곡높이를 5.8배 정도로 하여 절곡하는 것이 최적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 공기청정기에 사용되는 정전필터를 이용하여 절곡필터를 만드는 데 있어서 필터성능지수에 기반을 둔 최적의 절곡 수를 도출하고자 하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절곡 수가 늘어남에 따라서 필터의 여과면적이 증가하게 되고, 그로 인해 여과속도가 낮아져 압력손실도 낮아지게 된다. 그러나 절곡폭을 너무 좁게 하여 절곡을 하게 되면 유효여과면적이 줄어들게 되어 오히려 압력손실이 증가하는 역효과를 나타낸다.
- (2) 절곡 수가 늘어나게 되면 필터의 여과면적이 증가하여 여과속도가 낮아지게 되므로 집진효율은 높아지게 된다. 그리고 먼지의 크기에 따른 집진효율은 필터자체가 대전되어 있기 때문에 먼지가 커질수록 정전기력의 영향으로 높아지게 된다.
- (3) 압력손실과 집진효율을 고려한 필터성능지수를 살펴본 결과, 본 연구에 사용된 정전필터는 절곡 수를 21개로 하였을 때 가장 높은 성능을 보였다. 이는 절곡비(절곡높이와 절곡폭의 비)가 5.80일 때 최적이라는 것을 알 수 있다.

그러나 본 연구결과는 필터등급이 E12, 절곡높이가

29 mm일 때의 조건이며, 절곡방법의 일반화를 위해서는 다양한 절곡높이를 가진 필터들을 이용한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 서울시 2018년도 미세먼지저감기술개발 지원사업(미세먼지 배출저감 및 위험회피 R&D 및 실증)의 경제적인 지원으로 수행되었습니다. 또한 필터 내부구조에 대한 전자현미경 사진은 강원대학교 공동실험실습관의 지원으로 촬영되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Brown, R.C. (1993) Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters, Pergamon press, Ltd.
- Chen, C.-W., Huang, S.-H., Chiang, C.-M., Hsiao, T.-C., Chen, C.-C. (2008) Filter Quality of Pleated Filter Cartridges, *Annals of Occupational Hygiene*, 52(3), 207-212, <https://doi.org/10.1093/annhyg/men008>.
- Chen, D.-R., Pui, D.Y.H., Liu, B.Y.H. (1995) Optimization of Pleated Filter Designs Using a Finite-element Numerical Model, *Aerosol Science and Technology*, 23(4), 579-590, <https://doi.org/10.1080/02786829508965339>.
- Davies, C.N. (1952) The Separation of Airborne Dust and Particle, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 167(1b), 185-213, <https://doi.org/10.1177/002034835316701b13>.
- Feng, Z., Long, Z., Chen, Q. (2014) Assessment of Various CFD Models for Predicting Airflow and Pressure Drop through Pleated Filter System, *Building and Environment*, 75, 132-141, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.022>.
- Feng, Z., Pan, W., Wang, Y., Long, Z. (2018) Modeling Filtration Performance of Pleated Fibrous Filters by Eulerian-Markov Method, *Powder Technology*, 340, 502-510, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.037>.
- Fotovati, S., Hosseini, S.A., Vahedi Tafreshi, H., Pourdeyhimi, B. (2011) Modeling Instantaneous Pressure Drop of Pleated Thin Filter Media during Dust Loading,

- Chemical Engineering Science, 66(18), 4036-4046, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.038>.
- Fotovati, S., Vahedi Tafreshi, H., Pourdeyhimi, B. (2012) A Macroscale Model for Simulating Pressure Drop and Collection Efficiency of Pleated Filters over Time, Separation and Purification Technology, 98, 344-355, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.07.009>.
- Gang, S.-H. (2016) Indoor Air Quality Management (Air purifier), Air Cleaning Technology, 29(1), 43-50.
- Hasolli, N., Park, Y.O., Rhee, Y.W. (2013) Filtration Performance Evaluation of Depth Filter Media Cartridges as Function of Layer Structure and Pleat Count, Powder Technology, 237, 24-31, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.002>.
- Ji, S.-M., Sohn, J.-R., Park, H.-S. (2012) Influence of Particle and Filter Charge on Filtration Property of Air Filter under Particle Loading, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(6), 644-655, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.6.644>.
- Kerner, M., Schmidt, K., Hellmann, A., Schumacher, S., Pitz, M., Asbach, C., Ripperger, S., Antonyuk, S. (2018) Numerical and Experimental Study of Submicron Aerosol Deposition in Electret Microfiber Nonwovens, Journal of Aerosol Science, 122, 32-44, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.05.004>.
- Kim, Y.-J. (2004) Technology Trend of Indoor Air Purifier, The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 33(4), 12-16.
- Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C., Engelmann, W.H. (2001) The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 11(3), 231-252, <https://doi.org/10.1038/sj-jea.7500165>.
- Lee, J.-H., Chung, S.H., Cho, S.J., Kim, K.Y. (1991) A Numerical Study on Pressure Drop and Flow Characteristics in Pleated Filters, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 3(3), 176-185 (in Korean with English abstract).
- Li, S., Hu, S., Xie, B., Jin, H., Xin, J., Wang, F., Zhou, F. (2019) Influence of Pleat Geometry on the Filtration and Cleaning Characteristics of Filter Media, Separation and Purification Technology, 210, 38-47, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.002>.
- Lucke, T., Fissan, H. (1996) The Prediction of Filtration Performance of High Efficiency Gas Filter Elements, Chemical Engineering Science, 51(8), 1199-1208, [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00366-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00366-5).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) Monthly/annual report on atmospheric environment, http://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125.
- Noh, G.-C. (2018) Field Testing of HVAC and Air Purifier in an Apartment, Air Cleaning Technology, 31(3), 1-11.
- Noh, K.-C., Oh, M.-D. (2015) Variation of Clean Air Delivery Rate and Effective Air Cleaning Ratio of Room Air Cleaning Devices, Building and Environment, 84, 44-49, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.031>.
- Otani, Y., Emi, H., Mori, J. (1993) Initial Collection Efficiency of Electret Filter and Its Durability for Solid and Liquid Particles, KONA Powder and Particle Journal, 11, 207-214, <https://doi.org/10.14356/kona.1993023>.
- Romay, F.J., Liu, B.Y.H., Chae, S.J. (1998) Experimental Study of Electrostatic Capture Mechanisms in Commercial Electret Filters, Aerosol Science and Technology, 28(3), 224-234, <https://doi.org/10.1080/02786829808965523>.
- Seo, K.-S. (2004) Necessity and Principle of Air Purifier, The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 33(4), 8-11.
- Subrenat, A., Bellettre, J., Le Cloirec, P. (2003) 3-D Numerical Simulations of Flows in a Cylindrical Pleated Filter Packed with Activated Carbon Cloth, Chemical Engineering Science, 58(22), 4965-4973, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.07.012>.
- Tang, M., Thompson, D., Chang, S.-C., Pui, D.Y.H. (2018) Filtration Efficiency and Loading Characteristics of PM_{2.5} through Commercial Electret Filter Media, Separation and Purification Technology, 195, 101-109, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.11.067>.
- Théron, F., Joubert, A., Le Coq, L. (2017) Numerical and Experimental Investigations of the Influence of the Pleat Geometry on the Pressure Drop and Velocity Field of a Pleated Fibrous Filter, Separation and Purification Technology, 182, 69-77, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.034>.

Authors Information

권민선 (강원대학교 환경공학과 학부 학생)
 김예린 (강원대학교 환경공학과 석사과정 학생)
 김민성 (강원대학교 환경공학과 학부 학생)
 홍정화 (강원대학교 환경공학과 학부 학생)
 이명화 (강원대학교 환경공학과 조교수)
 이우근 (강원대학교 환경공학과 교수)