

내부구조물을 이용한 필터의 효율 및 수명 상승에 대한 연구

김지훈*, 윤상우*, 권성호**, 성수환**, 배문오**, 김주한**,#

*서울과학기술대학교 기계자동차공학과, **서울과학기술대학교 기계공학과

Study on Filter Efficiency and Lifetime Enhancement by using Internal Structures

Ji-Hun Kim*, Sangwoo Yoon*, Sung-Ho Kwon**, Su-Hwan Sung**, Mun-Oh Bae**, Joohan Kim**,#

*Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology,

**Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received 17 August 2018; received in revised form 30 August 2018; accepted 6 September 2018)

ABSTRACT

To improve the efficiency and lifetime of filters, we analyze the element distribution at the entrance and exit by using the flow inside a filter, confirming that the internal structure affects the filter efficiency. The flow in the pipe is predicted through computer simulations, and the filtration efficiency of each element is compared through experiments. The efficiency and lifetime of the filter are indirectly improved through the element distribution at the filter outlet according to the internal structure. Because pressure loss from the structure inevitably occurs, the efficiency and lifetime of filters against pressure loss must be considered.

Key Words : Internal Structure(내부 구조물), Internal Flow(내부유동), Lint Filter(린트필터), Laser-Induced Breakdown Spectroscopy(레이저 유도 플라즈마 분광분석법)

1. 서 론

최근 미세먼지 농도 증가로 인한 대기오염 문제가 심각한 사안으로 떠오르고 있다. 대기에 축적된 미세먼지는 호흡기 질환에도 악영향을 미치는 것으로 알려졌다^[1,2]. 대기 중 미세먼지 양이 증가하게 된 주요한 원인으로 산업 및 발전 부문의 고도화가 주된 요인이다^[3].

대기 중에 방출된 미세먼지를 비롯한 오염물질들을 줄이는 방법으로 필터를 통한 공기청정 기술이 도입되고 있다. 필터 기술은 주방용 후드, 산업 시설의 공기오염 통제 시스템, 흡연실 공기정화장치 등 실내외 공기 정화에 사용되고 있다. 중력 침강기^[4], 사이클론^[5], 전기 집진기^[6], 스크러버^[7] 등에 필터가 사용되고 있으며 필터의 종류로는 표면 필터와 심층 필터가 있다. 이들 중에 대기 오염 제어에서 널리 사용하는 필터는 심층 필터로, 담배의 필터와 공조기의 린트 필터에 이러한 종류의 필터가 주로 사용된다.

Corresponding Author : joohankim@seoultech.ac.kr

Tel: +82-2-970-6314, Fax: +82-2-970-6305

미세먼지를 비롯한 각종 실내 오염원을 제거를 목적으로 하는 공기청정 필터의 수요량 증가가 예상됨에 따라 필터의 수명과 교체시기 또한 중요한 요소로 고려되어야 한다. 심층필터에서는 기체가 필터를 통과할 때 입자가 필터의 섬유 전체를 통해 걸러진다. 필터 내부를 통과하는 기체의 유속은 필터의 물리적 구조에 영향을 받게 된다. 여과되는 양은 기체의 유속에 따라 다른데 원통형 필터의 경우 중심에서 유속이 가장 빨라 분진이 한쪽에 밀집되는 경향이 있다. 이 경우 필터의 섬유 일부를 통해서만 입자가 여과되며 이로 인해 필터의 교체시기가 앞당겨진다. 필터의 수명을 연장하기 위해서는 필터 내부를 통과하는 유속을 균일하게 분포시키는 것이 중요하다^[8]. 필터의 효율이 증가하게 되면 필터의 수명이 감소하게 된다. 반면에 압력 손실을 작게 하면서 필터 효율을 높이는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 필터 내부로 흐르는 미세 입자의 유동을 필터의 물리적 구조를 변형함으로써 제어하였고, 이에 따른 필터링 효과의 변화를 확인했다.

2. 실험 이론

2.1 필터 이론

필터를 통과하는 기체에서 유선을 벗어난 입자는 섬유 표면과 충돌하며 포집된다. 공기 중의 입자는 확산, 차단, 관성에 의한 충돌과 중력에 의한 침강을 통해 걸러지는데 입자가 작을 때는 입자가 유선을 따라 이동하지 않고 확산한다. 이때 섬유 표면에 도달한 입자는 반데르발스 힘에 의해 섬유 표면에 남는다^[9]. 입자의 크기가 작을수록 브라운 운동이 증가하고, 확산에 의해 부착되는 입자가 증가한다. 유속이 느리면 섬유 표면에 입자가 머무는 시간이 길어지므로 확산에 의한 여과가 증가하게 된다. 반대로 입자가 필터 섬유를 통과하지 못하는 큰 크기일 때 차단에 의한 효과는 유속과는 관계없이 적용된다^[10].

입자가 반데르발스 힘에 여과될 정도로 작지 않으면서 차단되지 않는 정도의 크기를 가질 경우 관성충돌에 의한 여과가 일어나게 된다. 섬유근처에

서 유체의 유선은 곡선을 이루는데 이때 입자의 관성 때문에 입자가 유선을 정확하게 쫓아가는 것은 아니다. 만약 유선의 곡률과 입자의 크기가 크다면 입자는 매체의 표면을 향하여 유선으로부터 이탈하여 충돌한다. 확산에 의한 여과와는 반대로, 공기의 속도가 증가하거나 입자가 클 때 관성 충돌에 의한 필터링 효과는 커진다^[11].

필터의 효율은 이외에도 중력침강 효과와 부하효과에 의해 정해질 수 있다. 단섬유의 효율은 이런 효율의 총합으로 가정할 수 있고, 이를 통해 필터 전체 효율을 유추할 수 있다. 필터를 통과하는 분진의 유입량을 G_1 , 유출량을 G_2 , 필터에 여과된 분진의 양을 G_3 라 할 때 필터의 전체효율을 유입량 대비 여과량으로 정의할 수 있으므로 식(1)과 같이 쓸 수 있다^[12]. 이 때 필터의 길이에 따른 여과량을 식(2)처럼 정리 할 수 있으며 입구와 출구에서의 여과량을 미소 길이로 정의하면 식(3)으로 정리되어 입구와 출구의 여과량을 비교함으로써 필터의 효율을 유추할 수 있다.

$$E = 1 - \exp\left[\frac{-4\eta aL}{\pi d_f(1-a)}\right] = \frac{G_3}{G_1} \quad (1)$$

$$G_3(x) = G_1 \left(1 - \exp\left[\frac{-4\eta ax}{\pi d_f(1-a)}\right]\right) \quad (2)$$

$$\frac{G_3'(L)}{G_3'(0)} = \exp\left[\frac{-4\eta aL}{\pi d_f(1-a)}\right] \quad (3)$$

여기에서 η 는 단섬유 효율, a 는 필터의 충전밀도, L 은 필터의 길이, d_f 는 섬유직경을 말한다. Fig. 1과 같이 입구와 출구의 여과량의 차이를 위 식에 적용할 때 필터효율을 간접적으로 알 수 있다. Fig. 2는 단섬유 효율에 따른 위치별 여과량 예시도이며 단섬유 효율이 높을수록 필터 입구와 출구에서의 여과량이 크게 차이나는 것을 보여준다.

필터의 효율을 높이는 방법으로 필터의 충전밀도를 높이는 방법이 있다. 섬유 간 간격이 줄어들어 내부 공간이 축소되면 필터의 충전밀도가 높아지게 되어 효율이 높아지게 되나 압력 손실이 크게 일어나 필터의 수명은 짧아지게 된다^[13]. Juda, Chrosciel이 제안한 여과량에 의한 압력손실 식은 아래와 같다^[14].

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \approx \frac{\ln a + K}{\ln(a + \sigma) + K} \quad (4)$$

K 는 실험적으로 얻어지는 상수로 σ 는 필터에 쌓인 여과물의 체적비이며 ΔP_0 는 초기 압력손실, ΔP 는 여과물에 의해 발생하는 압력손실이다.

2.2 관내유동

실제 유체의 점성은 수두손실을 초래하기 때문에 관수로에서 유체가 흐르는 형상은 위치에 따라 변한다^[15]. 유속이 일정한 유체가 흘러 들어올 때 관벽과의 마찰에 의해 관의 벽 부분은 유속이 0이 되고 마찰이 없는 중앙부는 흐름이 가속화 된다. 점성에 의해 발생하는 에너지 손실은 손실 수두로 나타낸다. 뉴토니안 유동에 있어 베르누이 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_L \quad (5)$$

수평관의 경우 위치 수두의 차이가 없으며 유량 Q 는 일정하다. 이에 의한 동일한 조건에서 유동에 수직한 원통 구조물들이 엇갈리게 나열된 경우와 유동에 평행하고 필터 출구 중앙에서 일정 길이만큼 자리한 구조물이 있을 경우 관내유동을 유동 해석 프로그램을 이용하여 전산모사를 수행한 결과 Fig. 3같이 나타났다. 구조물이 있을 경우 단면적의 감소로 유속이 증가했는데 유동에 수직한 구조물이 있을 경우에는 중앙 유속발달을 방해하며 난류가 일어나는 것으로 해석되었다. 유동에 평행한 구조물이 중앙에 있을 경우 그 외곽으로 유속이 발달하게 되었다.

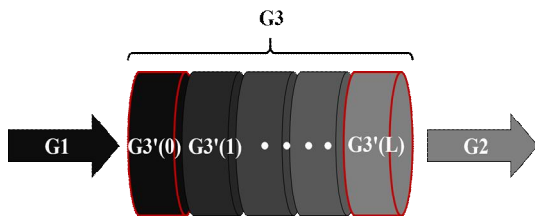


Fig. 1 Filtration diagram from inlet to outlet

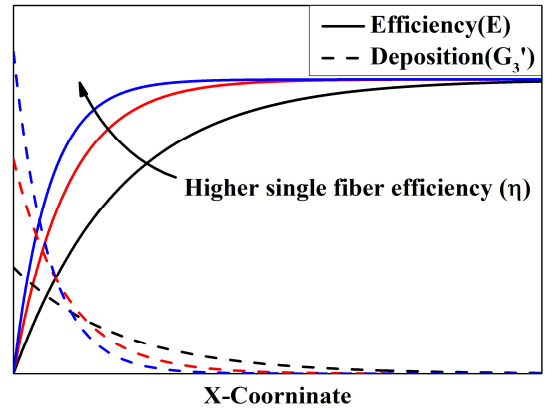


Fig. 2 Filter efficiency according to single fiber efficiency and residual amount scheme by position

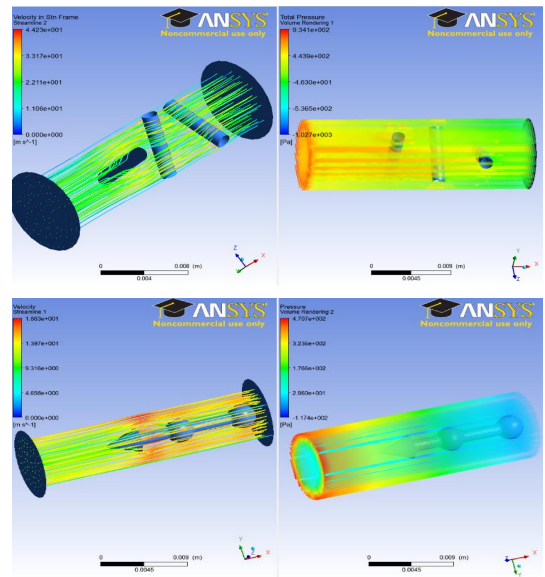


Fig. 3 Pipe internal flow simulations

3. 실험방법

실험에 있어 필터의 구조적 효과를 알아보기 위하여 담배의 필터를 이용하였다. 사용된 필터는 원통구조로 직경 7 mm, 길이는 24 mm이다. 필터 내부에 직경 1.5 mm인 구조물을 Fig. 4(A: 동굴형 구조, B: 삼입형 구조)와 같이 삼입한 후 60 ml 용량

의 소형 진공펌프를 이용하여 15회 (900 ml)를 여과했다. 여과량을 측정하기 위한 방법으로 레이저 유도 플라즈마 분광분석장치(LIBS: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)를 이용하여 입출입구에서 검출되는 원소를 분석하였다. LIBS(RT100, Applied Spectra)의 셋업은 Fig. 5와 같다. 레이저 소스로서 Nd:YAG 펄스 레이저가 사용되었으며 1064 nm의 파장과 펄스폭 최대 5 ns의 레이저 빔 특성을 가지고 있다. LIBS내에서 발생한 레이저는 집속렌즈를 거쳐 재료표면에 조사되어 플라즈마가 발생하고 이 신호는 CCD로 분석된다^[16]. 실험에서의 딜레이 타임은 1.05 us로 설정하였으며 분석지점은 필터 중앙으로부터 1 mm, 2 mm, 3 mm이며 측정된 원소는 카드뮴, 황, 납이다.

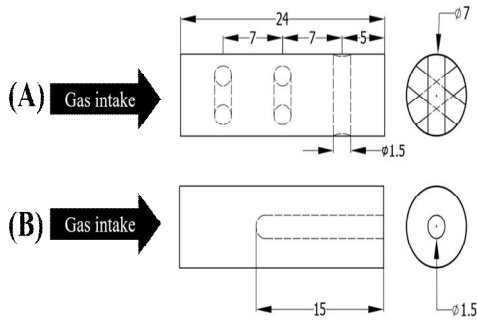


Fig. 4 Schematics of internal filter structure; (A) Cave structure, (B) Insert structure

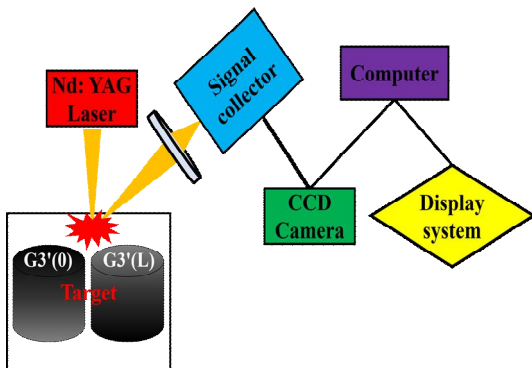


Fig. 5 Setup of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)

4. 실험결과 및 고찰

담배 필터의 경우 연소반응에 의해 일산화탄소가 생성되는데 체내에 흡수되는 것을 줄이기 위해 활성탄이 포함되어 있으며 유해물질의 농도를 낮추기 위해 필터 중간에 천공이 뚫려있다. 그 구멍으로 들어오는 공기의 유입으로 필터내부엔 Fig. 6과 같이 여과된 유해물질이 분포한다. LIBS를 이용한 원소 분석은 활성탄이 포함된 부분을 제외한 필터의 입출입구의 중앙으로 황, 납, 카드뮴 원소의 플라즈마 신호를 Fig. 7과 같이 얻을 수 있었다. LIBS신호는 필터 입구에서는 높게 측정되었으며 출구에서는 낮게 측정되었다. 그 중 카드뮴 원소의 신호가 가장 변화가 크게 나타났는데 이는 앞에 언급한 바와 같이 입구와 출입구에서 잔류량 차이가 큰 것은 여과효율이 높다는 것을 의미한다. 필터의 중앙에서 입자 신호가 가장 크게 나타났는데 필터의 중앙은 유속이 가장 높은 부분으로 유속이 가장 빠른 부분에서 신호가 큰 것은 관성충돌 분진여과이론이 지배적으로 작용한 것으로 해석된다. 따라서 담배연기에서 발생하는 유해한 중금속을 여과하기 위해서는 유속을 증가시키는 방법이 적절하다.

구조물에 따라 출구에서 검출되는 카드뮴 신호는 Fig. 8과 같이 나타났다. 기존 필터의 경우 중앙에서 필터 벽면까지 플라즈마 신호가 급격히 감소했으나 동굴형 구조나 삼입형 구조에서는 상대적으로 완만하게 감소했다. 구조물에 의해 중앙에서의 속도가 늦어졌으며 이를 보상하기 위해 벽 근처의 유속이 빨라졌기 때문이다. 필터의 체적은 여과 용량에 절대적이므로 필터의 모든 부분을 골고루 이용하는 것이 바람직하다. 따라서 기존 필터보다 본 연구에서 제안한 구조물이 필터의 용량에 있어서 이점이 있다고 말할 수 있다.

효율의 관점에서 볼 때 필터에 삼입된 구조물에 의해 단면적의 감소와 함께 유속이 증가하게 된다. 관성충돌 분진여과이론에서 유속이 증가하면 단섬유효율이 상승하므로 필터 전체 효율이 상승한다. 필터에 유입되는 분진의 양은 G_1 으로 일정하며 여과되는 양 G_3 이 증가하면 필터의 전체



Fig. 6 Cross section of cigarette dust filtration

효율이 증가했다고 말할 수 있으며 출구에서 검출되는 신호가 낮을수록 효율이 좋다고 할 수 있다. 구조물을 사용한 경우 반경 1 mm에서는 카드뮴 원소의 신호가 감소했으나 반경 2 mm, 3 mm에서는 신호가 증가했다. 동굴형 구조와 삼입형 구조를 비교했을 때 삼입형 구조가 동굴형 구조에 비해 신호가 낮으므로 효율이 더 높다고 판단할 수 있다. 또한 삼입형 구조물이 동굴형 구조물에 비해 차지하는 체적이 적어 필터의 용량 면에서도 삼입형 구조물이 우세하다. 따라서 관성충돌 분진여과에서는 유속이 높은 부분을 차단하는 구조물 설계가 바람직하다.

5. 결론

필터의 효율과 수명의 상승에 있어 필터 내부 유동에 의한 입출입구에서의 원소 분포분석 연구를 수행하였으며 내부 구조물이 필터효율에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 전산모사를 통해 관내 유동을 예측하였으며 실험을 통해 원소별 여과 효율을 비교했다. 내부 구조물에 따른 필터 출구에서 검출되는 원소분포를 통해 간접적으로 필터의 효율과 수명의 변화를 확인하였다. 구조물에 의한 압력손실이 불가피하게 일어나기 때문에 압력손실 대비 필터의 효율 및 수명을 고려해야 한다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

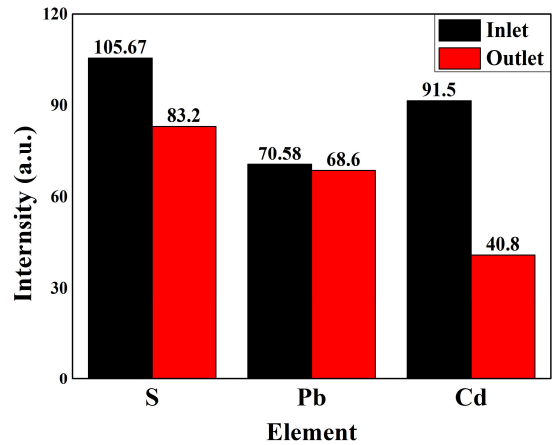


Fig. 7 Peak spectrum of the Sulfur, Lead and Cadmium element

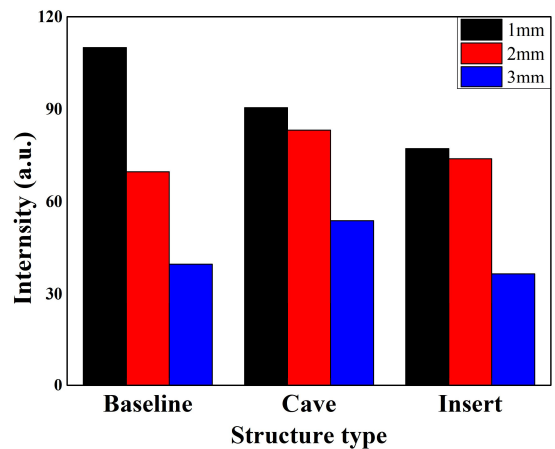


Fig. 8 Peak spectrum of cadmium element respect to structures at various radii.

REFERENCES

1. Mustafa S., Taner G., Önder Ö., Mehmet S., Sadettin Ç., Zehra G., and Ahmet A., "To Investigate the Effects of Air Pollution (PM10 and SO2) on the Respiratory Diseases Asthma and Chronic Obstructive Pulmonary Disease", Turk Thorac J., Vol. 18, No. 2, pp. 33-39, 2017.
2. Choe, J. I. and Lee, Y. S., "A Study on the

2. Choe, J. I. and Lee, Y. S., "A Study on the Impact of PM2.5 Emissions on Respiratory Diseases", Korea Environmental Policy And Administration Society, Vol. 23, No. 4, pp. 155-172, 2015.
3. Jang, K. S. and Yeo, J. H., "The Effects of Korean and Chinese Economic Growth on Particulate Matter in Korea: Time Series Cointegration Analysis", Korea Environmental Policy And Administration Society, Vol. 23, No. 1, pp. 97-117, 2015.
4. Feather, G. A., & Chen, B. T., "Design and use of a settling chamber for sampler evaluation under calm-air conditions", Aerosol Science & Technology, Vol. 37, No. 3, pp. 261-270, 2003.
5. Kim, B. H., Jung, D. S., "Flow Analysis for the Sludge Pneumatic Dehydrator with Cyclone Type", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 4, pp. 1-6, 2009.
6. Han, B. W., Kim, H. J., Kim, Y. J., Song, D. K., Hong, W. S., & Shin, W. H., "Characteristics of Charging and Collection of 10-nm-Class Ultrafine Nanoparticles in an Electrostatic Precipitator", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 35, No. 10, pp. 1013-1018, 2011.
7. Han, B. W., Kim, H. J., Kim, Y. J., & Han, K. S., "Removal characteristics of gaseous contaminants by a wet scrubber with different packing materials", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 23, No. 6, pp. 744-751. 2007.
8. Goldrick, S., Joseph, A., Mollet, M., Turner, R., Gruber, D., Farid, S. S., & Titchener-Hooker, N. J., "Predicting performance of constant flow depth filtration using constant pressure filtration data", Journal of Membrane Science, Vol. 531, pp. 138-147, 2017.
9. Jung, Y. W., "An Experimental Study on Transient Behavior of Granular Aerosol Filtration -Effect of Particle Deposition on Pressure Drop", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 13, No. 3, pp. 193-205, 1997.
10. Ramarao, B. V., Tien, C., & Mohan, S., "Calculation of single fiber efficiencies for interception and impaction with superposed Brownian motion", Journal of Aerosol Science, Vol. 25, No. 2, pp. 295-313. 1994.
11. Lee, K. W., "Principles of particle filtration by fibrous filters", Magazine of the SAREK, Vol. 26, No. 1, pp. 1-7, 1997.
12. Lee, J. Y., & Kim, I., "Characteristics of a Filter Module Adsorption for Fine Dust Removal on Road", Journal of Korean Society Environmental Engineers, Vol. 39, No. 1, pp. 19-25, 2017.
13. Jabri, W., Vroman, P., & Perwuelz, A., "Study of the influence of synthetic filter media compressive behavior on its dust holding capacity", Separation and Purification Technology, Vol. 156, pp. 92-102. 2015.
14. Juda, J., & Chrosciel, S., "A theoretical model of pressure loss increase during the filtration process", Staub-Reinhal. Luft, Vol. 30, No. 5, pp. 12-15. 1970.
15. Brown, G. O., "The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance", In Environmental and Water Resources History, pp. 34-43. 2003.
16. Kang, D., Kim, J., "A Study on the Corrosion Characteristics of a Metal Surface by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 1. pp. 83-89, 2017.