

초미세먼지 제거를 위한 전기집진 필터에 관한 연구

김용선*, 고상철*,**,#

*전주대학교 탄소연구소 **전주대학교 기계자동차공학과

Electric Collection Filter for Ultrafine Dust Removal

Yong Sun Kim*, Sang Cheol Ko***,#

*Institute of Carbon Technology, Jeonju Univ.

**Department of Mechanical and Automotive Engineering, Jeonju Univ.

(Received 12 January 2022; received in revised form 03 March 2022; accepted 23 March 2022)

ABSTRACT

In recent years, indoor air pollution has become a crucial environmental problem. Hence, the purification of indoor air is an important issue. Typical physical filters show relatively high dust collection efficiency at a dust particle size of more than 5.0 μm but extremely low efficiency at an ultrafine size of less than 2.5 μm . In this study, an electric field filter was proposed to capture ultrafine dust with a size of less than 5.0 μm . Simulation results showed that the electric field filter effectively removed ultrafine dust. In addition, sufficient dust collection efficiency was obtained even with a simple plate-shaped filter without bending the Chevron filter.

Keywords : Electric Collection Filter(전기집진 필터), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Charging Particle(하전입자), Collection Efficiency(집진효율), Ultra Fine Dust(초미세먼지)

1. 서 론

외출이 어려운 현재 시점에서 실내 공기의 오염도는 매우 중요한 환경적 요인이다. 실내에서 발생하는 오염원은 매우 다양한 형태로 발생하게 된다. 일반적인 주거형태에서 공기청정기와 주방의 후드는 실내 공기 오염물질을 실외로 배출 혹은 필터에 흡착하여 실내 공기를 정화한다.^[1-2]

공기청정기에 사용되는 필터는 주로 HEPA 형태의 필터를 사용하며, 주방에서 사용되는 필터의 경우

Mesh 형태 혹은 Baffle 형태의 필터를 사용한다.

HEPA 필터와 Mesh 혹은 Baffle 형태의 물리적인 필터의 경우 실험적인 연구와 시뮬레이션을 통한 연구가 많이 진행되어 왔다.^[3-4]

김 등은 “코안다효과를 이용한 필터에 관한 연구”에서 주방에서 사용하는 Baffle 형태의 필터를 단순한 형태로 구조를 변경한 Chevron 형태의 필터에 Coanda 효과를 적용하여 필터 성능 향상에 대한 연구를 진행하였으며, 후속연구로서 “서브필터 형상에 따른 Oil-mist Filter의 집진효율 향상에 관한 연구”를 통해 서브필터를 적용하여 집진 효율이 증가하는 효과를 얻었다.^[5-10]

그러나 기존의 논문에 의하면 물리적인 필터의

Corresponding Author : scko@jj.ac.kr

Tel: +82-63-220-2623, Fax: +82-63-220-3161

경우 5.0um 이상의 미세먼지 기준에는 적합한 결과를 얻었으나 2.5um 미만의 초 미세먼지의 집진에는 어려움을 겪었다.^[5-6]

이러한 단점을 극복하고자 본 연구에서는 최근 각광받고 있는 전기집진 필터를 응용하여 물리적인 필터에서 제거하지 못한 5.0um 이하의 먼지를 제거하고자 초미세먼지 제거를 위한 전기집진장치를 제안하고, 이에 대한 수치해석적 연구를 진행하였다.

2. 이론적 배경 및 수치해석

2.1 전기집진 필터의 원리

전기집진 필터는 오염물질을 음전하로 대전시키기 위하여 높은 농도의 음이온이 필요하다. 대기 중 음이온 생성 방법으로 다양한 방법이 존재하지만, 전기집진 필터를 적용하기 위해서는 코로나 방전을 이용하여야 충분한 음이온을 발생시킬 수 있다.

방전부 끝단과 Ground 사이에 전위차가 형성되면 전류가 흐르게 되고 코로나 개시상태가 된다. 이때 전위차를 코로나 개시전압이라 하고 이러한 상태에서 공기 중의 전자들이 강한 전기장으로 인하여 운동에너지를 받는다. 이 전자들은 중성기체분자와 충돌하여 에너지를 전달하고 중성분자는 전자 하나를 잃고 양이온으로 전환되며 음이온을 방출하게 된다. 이때 발생한 음이온이 먼지입자에 대전되어 집진부의 전압에 의해 척력을 받아 집진된다.

2.2 입자 대전원리

입자 대전에서 중요한 원리는 전기적 효과이다. 전기장 내에 대전된 입자가 존재할 경우, 입자는 공간전하 밀도에 의하여 대전된다.

정전조건에서 전기장 E 는 아래 식과 같이 정의된다. 여기서 V 는 경계조건에서 주어지는 전압이며, AC/DC 모듈에서 전기장 E 값을 구할 수 있다.

$$E = -\nabla V \quad (1)$$

기본적인 입자간의 상호작용에 대한 기본방정식은 Ohm의 법칙으로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J_C = \sigma E \quad (2)$$

여기서 J_C 는 전류밀도이며, σ 는 전기전도율, E 는 전기장이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot J_c = 0 \quad (3)$$

전류밀도의 연속방정식 (3)을 이용하여 공간전하 밀도에 대한 아래 미분 방정식을 추론할 수 있다.

$$\rho(t) = \rho_0 e^{-t/\tau} \quad (4)$$

여기서 τ 는 Charge Relaxation time으로 식 (5)로 정의하며, ϵ 은 유전율, σ 는 전기전도율이다. τ 가 t 보다 클 경우 물리 인터페이스는 정적해석으로 진행한다.^[11-13]

$$\tau = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (5)$$

입자 대전량을 구하기 위한 대전 방법에는 전계대전(Field Charging)과 확산대전(Diffusion Charging)으로 나눌 수 있다.

전계대전은 전기장 안에서 코로나 방전에 의해 발생된 음이온에 의한 대전방법이며, 전기장 내의 빠른 이동속도로 인하여 충돌하며 대전되게 된다. 확산대전은 전기장이 없는 경우 음이온과 혼합되는 과정에서 Brown Force에 의해 대전되는 방법이다.

직경이 d_p 인 입자가 시간 t 동안 먼지입자 하나에 대전되는 전하의 수는 아래 식과 같이 표현할 수

Table 1 Independent variable

Name	Expression	Unit	Description
k	$1.38e^{-23}$	J/K	Boltzmann constant
d_p	0.3	um	Particle diameter
T	300	K	Temperature
e	$1.6e^{-19}$	C	Electron charge
C_i	0.00015	$m^2/V*s$	Mobility of Ions
t	0.38	s	Charging time

있으며, 식에 적용되는 변수를 Table 1에 나타내었다. 여기서 N_i 는 이온의 농도로서 식(4)에서 구한 공간전하 밀도를 이용하여 추론하였다.^[14-15]

$$n = d_p \frac{kT}{2e^2} \left[1 + \pi d_p C_i e^2 N_i \frac{t}{2kT} \right] \quad (6)$$

이러한 대전원리를 기반으로 대전되는 전하의 수를 구하고 입자거동해석에 적용하였다. 수치해석은 COMSOL Multiphysics를 이용하여 전기장 해석 및 입자거동에 관한 해석을 수행하였다.

3. 경계조건

기존의 연구에서 진행한 Chevron 필터를 기반으로 전기장 대전을 위한 대전부를 필터 입구부에 적용하였다. 유동은 하단에서 상단으로 흐르며 전극과 접지를 지나면 대전되고 Dust filter로 집진된다. 유속은 1.0m/s로 진행하였으며 Dust filter 또한 전극과 접지를 번갈아 주어 대전된 입자가 척력을 이용하여 접지에 집진될 수 있도록 하였다.

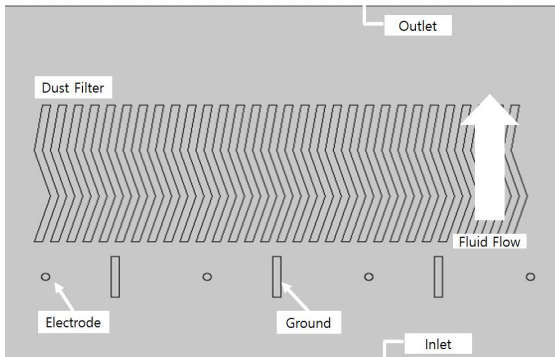


Fig. 1 Schematic domain of electric filter simulation

Table 2 Boundary conditions of simulation

Velocity	1.0 [m/s]
Pressure	1.0 [atm]
Electrode	-8.0 [kV]
Number of Particles	1000 [ea]

시뮬레이션에 필요한 경계조건을 Table 2에 나타내었다. 또한 전기장 필터의 경우에는 필터형상에 따른 집진효율 변화가 크지 않을 것으로 판단되어, 기존 Chevron 필터의 형상을 단순화 하여 절곡하지 않고 1차 형태의 필터도 설계하였으며, 그에 대한 수치해석을 수행하여 기존 형태와 비교 검토를 수행하였다. 이와 같이 형상을 단순화 하여 개발 할 경우 필요 공정수를 줄여 생산성을 높일 수 있다고 판단된다.

4. 시뮬레이션 결과

전기장 필터에서는 5.0um이하부터 1.0um이상까지는 1.0um 간격으로, 1.0um미만부터 0.1um까지는 0.1um간격으로 대전량을 계산하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 공기청정기표준 (SPS-KACA002-132) 기준인 직경 0.3um를 그림으로 도시하였다. Fig. 2에 유동해석 결과와 Fig. 3에 전기장 해석 결과 그리고 Fig. 4에 입경별 입자거동 결과를 도시하였다.

유동해석 결과, 유동은 입구부에서 1.0m/s로 균일하게 유입되어 Chevron type 필터 사이를 빠르게 빠져나가고 있음을 알 수 있으며, Fig. 3의 전기장해석은 입구 Electrode에서 전압이 인가되었고, 집진부에서 교대로 전압이 인가되는 것을 보여주고 있다.

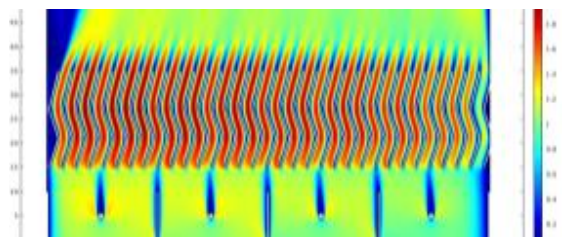


Fig. 2 Contour of flow field(Chevron type)

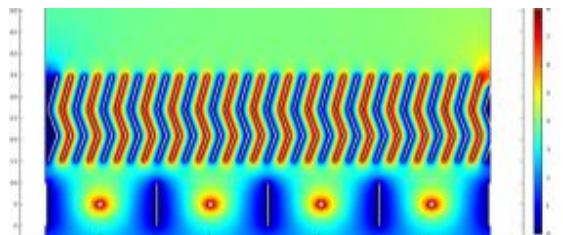


Fig. 3 Contour of electric field(Chevron type)

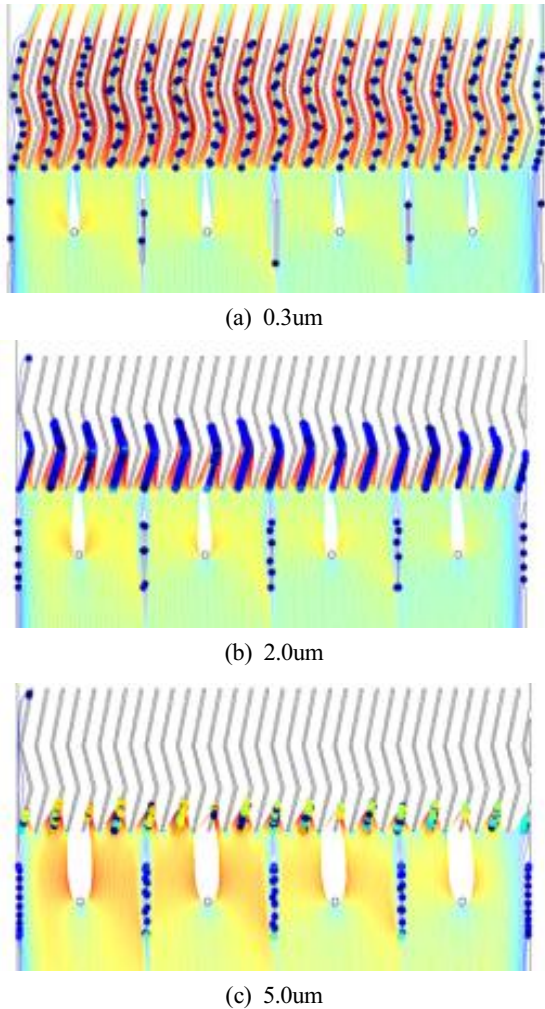


Fig. 4 Particle tracking according to particle size

입자크기에 따른 입자추적 결과를 나타내는 Fig. 4에서 점들은 입자의 최종 위치를 나타낸 것으로 0.3um 일 경우에는 입자 대전량이 매우 작은 값을 가지기 때문에 집진부에 모두 집진되지 않고 필터를 통해 흘러나가는 것을 확인 할 수 있으며, 2.0um 입자의 경우는 필터의 중간위치에서 사라져 모두 포집되었음을 나타내고 있고, 5.0um 경우는 필터 입구부에서 모두 포집되었음을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 입자의 크기가 커질수록 입자 대전량이 커지면서 Filter의 입구부에 가깝게 집진되는 것을 확인할 수 있다.

입자 크기에 따른 집진효율 그래프를 Fig. 5에 도시하였다. 일상생활에서 초 미세먼지로 분류되는 2.0um 이상의 입자는 거의 100% 집진됨을 확인하였다.

입자거동 결과를 확인한 후, 전기집진 필터의 경우 집진부의 형상과 관계없이 입자 대전량에 의한 영향이 매우 크다고 판단하여 Chevron 형태의 절곡된 필터를 I자 형태로 단순하게 변형하여 시뮬레이션을 진행하였다. I자 형태의 필터에 대한 유동해석 결과와 전기장 해석 결과를 각각 Fig 6과 Fig. 7에 도시하였고, 입자거동 결과를 Fig. 8, 입자크기에 따른 집진효율을 Fig. 9에 나타내었다.

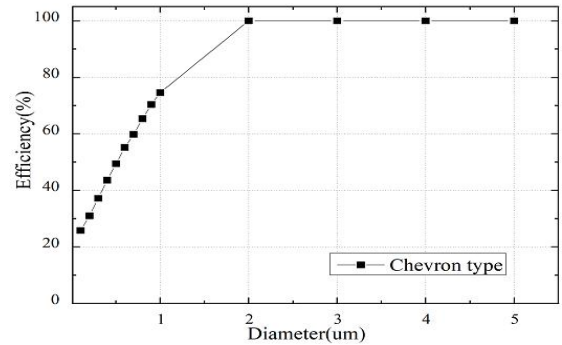


Fig. 5 Collection efficiency of chevron type

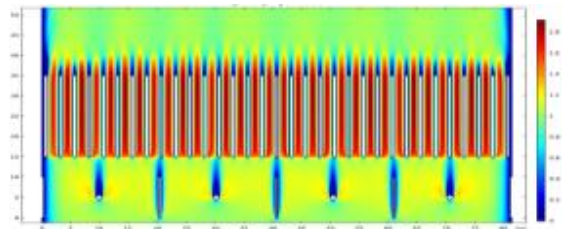


Fig. 6 Contour of flow field(I type)

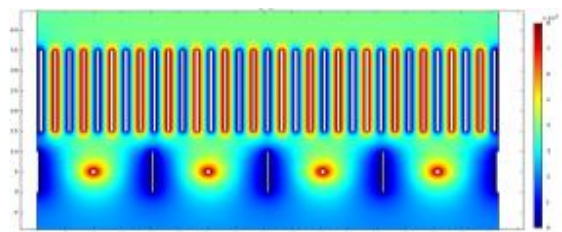
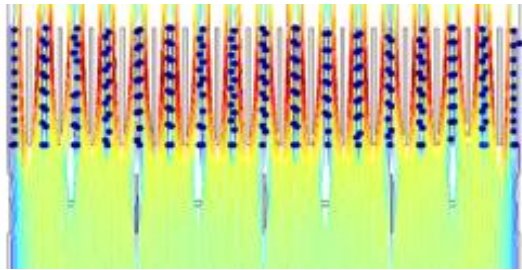
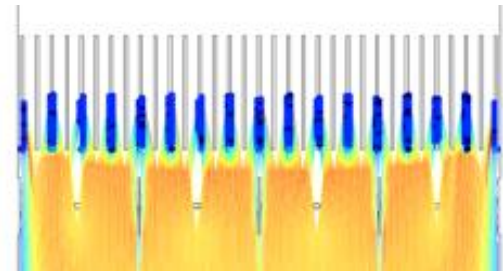


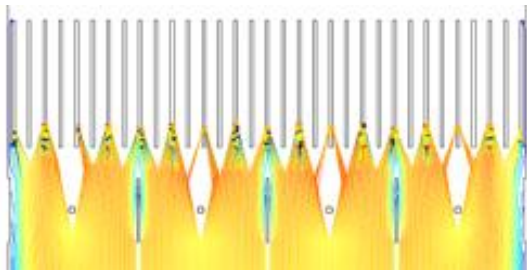
Fig. 7 Contour of electric field(I type)



(a) 0.3um



(b) 2.0um



(c) 5.0um

Fig. 8 Particle tracking according to particle size

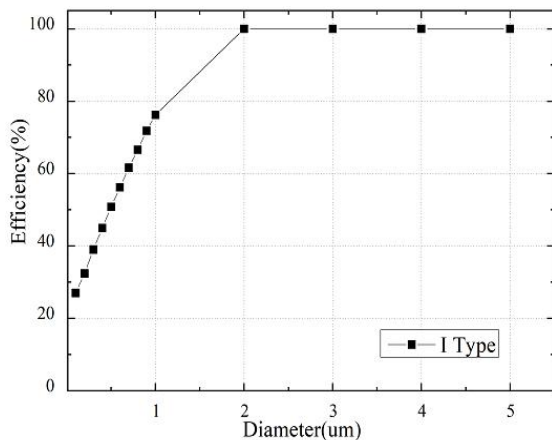


Fig. 9 Collection efficiency of I-type

단순화된 I형태의 필터의 경우도 절곡된 Chevron 필터와 마찬가지로 입자의 직경이 커질수록 입구부에 가깝게 집진되는 것을 확인 할 수 있었으며, 특히 2.0um 이상 크기의 미세먼지는 약 100% 포집되는 것을 확인할 수 있다. 1.0um 크기의 입자 또한 80% 가까이 포집할 수 있었고, 공기청정기 성능평가 기준인 0.3um의 입자도 약 50%정도의 집진효율을 보였다.

5. 결론

물리적인 필터에서 집진하지 못한 5.0um 미만의 미세먼지를 집진하기 위하여 전기집진 방식의 필터를 제안하였다. 전기집진 방식의 필터를 수치해석적으로 연구하기 위하여 유동해석-전기장해석-입자 거동해석의 다중물리해석을 진행하여 입자크기에 따른 집진효율과 집진 위치 등을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전기장 필터 해석에서 입자가 커질수록 입자 대전량이 증가하는 것을 확인하였고, 입자거동 해석을 통해 입자가 집진되는 것을 가시화 하였다.
- (2) 입자의 포집은 입자의 크기가 작으면 대전량이 작기 때문에 집진부에 인가된 전압의 척력으로는 완벽하게 집진되지 못 함을 알 수 있고, 입자의 크기가 커질수록 대전량이 증가하여 집진부 입구에 집중되어 있는 것을 가시적을 확인할 수 있었다.
- (3) 집진부에 인가되는 전압을 높여주거나 전극에 인가 전압을 높인다면 대전량이 높아지기 때문에 집진효율을 더 상승될 것으로 판단되며, 동일 조건일 경우 집진부의 길이가 늘어난다면 집진효율은 더욱 상승할 것으로 판단된다.
- (4) 기존의 Chevron Filter와 I 형태로 구조 단순화된 필터의 집진효율 차이는 미미하였기 때문에 향후 전기집진 필터의 생산성을 고려한다면 I-Type의 필터가 유리할 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 한국연구재단의 2017년도 이공학개인 기초연구 사업(NRF-2017R1D1A1B03036070)과 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원

을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2016R1A6A1A03012069).”

REFERENCES

1. Kim, Y. J., Kang, I. K., Byun, H. S., “Development Trend of Nanofiber Filter”, Membrane Journal, Vol. 16, No. 1, pp. 1-8, 2006.
2. Kim, K. J., Bae, G. N., Kim, Y. I., Hur, N. K., “A Numerical Study on the Particle Collection Characteristics of a Grease Filter for Kitchen Ventilation”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 792-801, 2002.
3. Lee, K. K., Kim, H. G., Ko, S. C., Kang, S. S., “The Development of Technology for oil Mist and Odor Removal Using Cab Type Filter”, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 2009, pp. 452-455, 2009
4. Kim, H. G., “A Study on the Design of Filter Assembly Automation System”, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 111-117, 2008.
5. Kim, Y. S., Seok, J. J., Shin, H. J., Ko, S. C., “A Study on Improving Filter Performance Using Coanda Effect”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 99-104, 2020.
6. Kim, Y. S., Yun, S. M., Shin, H. J., Ko, S. C., “A Study on the Collecting Efficiency of Oil-mist Filter according to the Sub-filter Shape”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 1, pp. 16-23, 2019.
7. Yun, S. M., Kim, Y. S., Shin, H. J., Ko, S. C., “A Numerical Study for Optimum Design of Dust Separator Screen Based on Coanda Effect”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 177-185, 2018.
8. Lee, D. W., Lee, S., Kim, B. J., Kwon, S. B., “A Study on Jet Characteristic using a Coanda Effect in a Constant Expansion Rate Nozzle”, Journal of the Korean society for aeronautical & space sciences, Vol. 35, No. 8, pp. 706-713, 2007.
9. Kim, K. M., Kim, Y. J., Kwac, J. S., “Improvement of Film Cooling Performance of a Slot on a Flat Plate Using Coanda Effect”, The KSFM journal of fluid machinery Vol. 20, No. 2, pp. 5-10, 2017.
10. Seo, D. W., Oh, J. K., Jang, J. H., “Performance analysis of a horn-type rudder implementing the Coanda effect”, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 177-184, 2017.
11. Ristivojevic, Zoran, and Zoran Lj Petrović. "A Monte Carlo simulation of ion transport at finite temperatures," Plasma Sources Science and Technology, Vol. 21, No. 2, 2012
12. Skullerud, H. R. "The stochastic computer simulation of ion motion in a gas subjected to a constant electric field.," Journal of Physics D: Applied Physics Vol 1, No. 11, 1968
13. Yin, Y. and Sawin, H. H., “Surface Roughening of Silicon, Thermal Silicon Dioxide, and Low-k Dielectric Coral Films in Argon Plasma”, J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 26, No. 1, pp. 151-160, 2008.
14. Adamiak, K. and Atten, P., “Simulation of Corona Discharges in Point-Plane Configuration”, Journal of Electrostatics, vol. 61, pp. 85-98, 2004.
15. Hinds, W. C., Aerosol Technology, Wiley, pp. 323-345 1999.