



자동차 브레이크 미세입자 포집을 위한 소형 사이클론에 관한 연구

황일선^a, 이영림^{b*}

A Study on Mini-cyclone for Collection of Fine Dust in Vehicle Brakes

Il Sun Hwang^a, Young Lim Lee^{b*}^a Postdoctoral fellow, Sustainable Eco-friendly Energy Center, Kongju National University^b Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	17	December	2020
Revised	20	January	2021
Accepted	28	January	2021

Keywords:

Brake dust filter
Cyclone
Particle matter
Computational fluid dynamics
Discrete phase model

ABSTRACT

There has been an increasing interest in the collection of fine dust generated by vehicle brakes ever since the significant decrease in emissions from the exhaust system. Herein, we investigated the effective collection of brake fine dust by applying a mini-cyclone. Numerical analyses of steady and unsteady flows for a rotating disk were performed. When the disk rotation speed was 1000 rpm, the brake cooling air exited the cooling passage at approximately 20 m/s and air flow entered the cyclone inlet at approximately 7 m/s. At this inlet velocity, the vortex flow in the cyclone was well developed, thereby indicating the potential of efficient particle collection. Numerical analysis of transient particle flows for a mini-cyclone was performed to determine the particle collection efficiency. Results indicated that the particle collection efficiency exceeded 90% for particle diameters exceeding 3 μm . Therefore, the mini-cyclone can be effectively used for collecting brake fine dust.

1. 서론

차량에서 발생하는 미세먼지 중 배기가스에 포함된 미세먼지는 여러 가지 환경규제로 인해 지속해서 감소되어 왔다. 하지만 타이어나 브레이크에서 발생하는 미세먼지에 대한 규제는 없어 비배기계에서 발생하는 미세먼지의 비중이 상대적으로 증가하고 있다^[1]. 또한 최근 들어 배기계에서 발생하는 미세먼지가 비배기계에서 발생하는 미세먼지보다 적다는 보고^[2]가 있어 향후 비배기계에서 발생하는 미세먼지에 대한 규제가 제정될 것으로 예상된다.

비배기계에서 발생하는 미세먼지 중 브레이크 미세먼지는 브레이크 패드와 디스크의 마찰로 발생한다. 브레이크에서 발생한 미세먼지는 활을 오염시켜 차량의 미관을 저하시킬 뿐 아니라 공기

중에 비산되어 대기 환경에 악영향을 준다. 브레이크 미세먼지의 성분은 브레이크 패드의 조성 성분에 따라 차이가 발생하지만 금속 성분이 다량 포함되어 있어 체내에 축적되면 치명적인 결과를 초래할 수 있다^[3].

지금까지 브레이크에서 발생하는 미세먼지에 관한 많은 연구가 이루어져 있다. 하지만 대부분의 연구는 다이내모 환경에서 발생한 미세먼지의 입자 분포나 성분분포를 알아보는 연구들이 주를 이루고 있다. Sanders 등^[4]은 도심 주행 모드에서 미세먼지의 질량 평균 직경은 6 μm , 수 가중 평균 직경은 1-2 μm 이고 반금속이나 비석면 유기계 라이닝 대비 저금속 라이닝의 미세먼지 발생량이 3~4배 많다고 보고하였고 마모된 미세입자 중 50%는 공기 중에 방출된다고 보고하였다. Mosleh 등^[5]은 두 개의 평

* Corresponding author. Tel.: +82-41-521-9261

E-mail address: ylee@kongju.ac.kr (Young Lim Lee).

균 입자 크기 분포 피크가 형성되는데 약 350 nm에서 첫 번째 피크가 관측되었고 2~15 μm에서 두 번째 피크가 형성됨을 알아냈다. Kukutschova 등^[6]은 상용화된 저금속 패드를 이용한 브레이크 마모 실험에서 약 10 nm~20 μm의 입자가 발생하고 마이크로 입자 수 보다 나노입자 수가 약 1,000배 이상 크다는 것을 알아냈다. 또한 로터 온도가 증가할수록 나노 크기의 입자가 증가한다는 것을 밝혀냈다. 이처럼 많은 연구가 이루어져 왔지만 다이 나모 성능평가 모드나 패드의 조성 성분 등에 따라 많은 차이를 보인다.

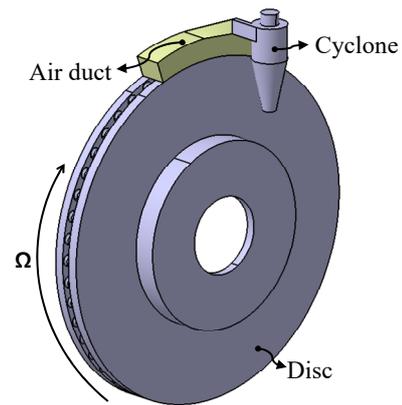
브레이크 미세먼지 포집을 위한 필터는 일부 해외 제조사에서 시제품을 시험하고 있지만 현재까지 상용화되어있지 않은 상태이다. 브레이크 미세먼지 포집용 필터 개발을 위해 Lee and Hwang^[7]은 유동해석과 기초실험을 통해 미세먼지의 배출 특성을 살펴보고 이를 통해 추가 동력이 필요 없는 두 가지 패시브 타입의 브레이크 필터를 제시하였다. Hascoet and Adamczak^[8]는 브레이크 패드의 구조변경과 진공펌프 및 필터를 사용하면 브레이크에서 발생하는 미세먼지를 질량 기준 최대 85% 포집할 수 있다고 보고하였다.

미세먼지를 포집할 수 있는 가장 쉬운 방법은 필터를 이용하여 미세먼지를 포집하는 방법이지만 필터 사용 내구성에 한계가 있어 일정 기간마다 교환이 필요하다. 이에 반해 사이클론 분리기의 경우 유체의 회전유동에 의해 발생하는 원심력을 이용하여 미세먼지를 포집하기 때문에 교체할 필요가 없어 일반적인 필터를 사용하는 방법 보다 경제적이다. 하지만 사이클론 분리기의 경우 PM2.5 이하의 미세입자를 효과적으로 포집하기 어려운 단점이 있다. 이에 따라 사이클론 분리를 pre-filter 개념으로 사용하여 PM2.5 이상의 입자를 포집하고 나머지 입자들은 필터를 사용해 포집하면 필터의 사용 내구성을 획기적으로 증가시킬 수 있다.

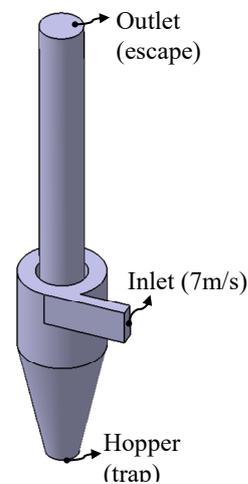
따라서 본 연구에서는 Souza 등^[9]이 고안한 소형 사이클론을 이용해 브레이크 미세먼지를 포집할 수 있는지 알아보고자 한다. 이를 위해 CFD (computational fluid dynamics)를 활용하여 브레이크에서 발생하는 냉각풍이 소형 사이클론을 작동시킬 수 있는지 알아보았고, DPM (discrete phase model)을 사용하여 소형 사이클론이 효과적으로 브레이크 미세입자를 포집할 수 있는지 알아보았다.

2. 수치해석 방법

차량의 브레이크 시스템에 사이클론을 적용하였을 때 브레이크에서 발생하는 미세입자 포집 가능성을 알아보기 위해 Ansys Fluent^[10]를 사용하여 수치해석을 진행하였다. Fig. 1(a)는 정상상태 수치해석 모델 개략도를 보여준다. 디스크의 회전운동으로 발



(a) Schematic of a steady-state model



(b) Schematic of a transient model

Fig. 1 Schematics of the numerical models

생하는 유동을 이용해 사이클론을 작동시킬 수 있는지 알아보기 위해 수치해석을 진행하였다. MRF (mesh reference frame) 모델과 moving wall 경계조건을 사용하여 디스크 회전운동을 모사하였다. 이때 디스크의 회전속도는 중형 승용차의 주행속도 약 100 km/h 내외에 해당하는 1000 rpm으로 가정하였으며 디스크 냉각 풍속 및 사이클론 입구 풍속, 사이클론 내부 유동 등을 알아보았다. 회전유동이 지배적인 사이클론 수치해석을 위해 난류모델은 RSM (reynolds stress model)을 사용하였다.

Fig. 1(b)는 비정상상태 수치해석 모델을 보여준다. 디스크의 회전유동과 사이클론 두 가지를 고려해 비정상상태로 수치해석을 진행하면 과도한 해석 시간이 필요하기에 정상상태 수치해석 결과를 경계조건으로 하여 비정상상태 수치해석을 진행하였다. 사이클론의 포집효율 및 사이클론 내부에서의 미세입자 거동을 알아보기 위해 DPM을 사용하였다. 이때 입자 크기는 0.5~6 μm로 가정하였는데 본 연구에서 사용한 사이클론의 경우 약 4 μm 이상에서는 포집효율이 99% 이상이기 때문이다^[9]. 입자 분포는 Rosin-Rammler 분포를 사용하였다. 총 입자

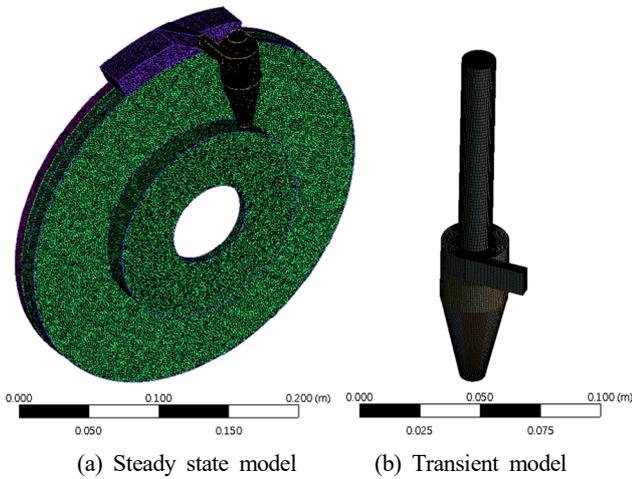


Fig. 2 Mesh systems

개수는 81,000개이고 time-step 크기는 5×10^{-5} 으로 진행하였다. 그리고 난류모델은 정상상태 해석 모델과 같이 RSM을 사용하여 수치해석 하였다.

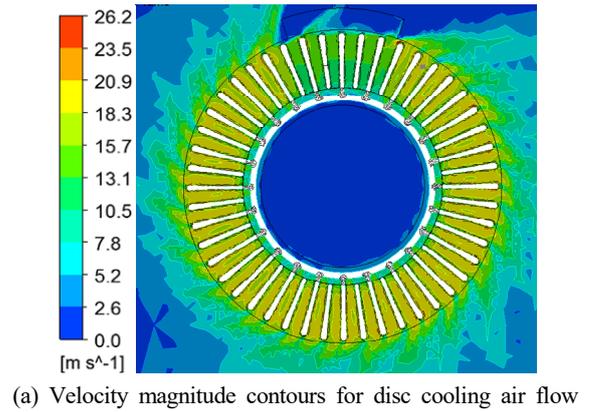
Fig. 2는 수치해석에 사용한 격자를 보여준다. 정상상태 모델의 경우 사면체 격자를 사용하였고 prism layer를 적용해 총 420만 개의 격자를 사용하였다. 그리고 비정상상태 모델의 경우 육면체 격자를 사용하였고 총 50만 개의 격자를 사용하여 수치해석 하였다.

3. 결과 및 토론

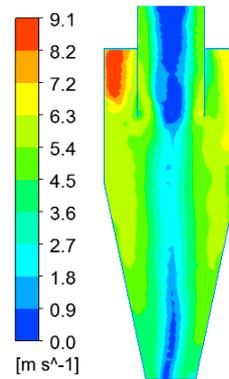
3.1 사이클론 작동 가능성 수치해석

디스크 회전으로 발생하는 냉각풍을 이용하여 소형 사이클론을 작동시킬 수 있는지 알아보기 위해 수치해석을 진행하였다. Fig. 3(a)는 1000 rpm일 때 디스크 냉각풍의 속도 컨투어를 보여준다. 디스크 냉각풍의 평균 풍속은 약 20 m/s이고 회전 방향으로 휘어져 토출되는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 사이클론 내부의 속도 컨투어를 보여준다. 약 20 m/s의 속도로 토출된 냉각풍은 사이클론으로 유입되며 평균 약 7 m/s까지 속도가 감소한다. 이는 Fig. 3(c)와 같이 공기 유로와 사이클론에서 발생하는 압력저항 때문이다. 이때 공기 유로에서 발생하는 압력저항은 평균 약 86 Pa이다. 이에 따라 공기 유로를 최적화하면 사이클론으로 유입되는 공기의 속도를 증가시킬 수 있다.

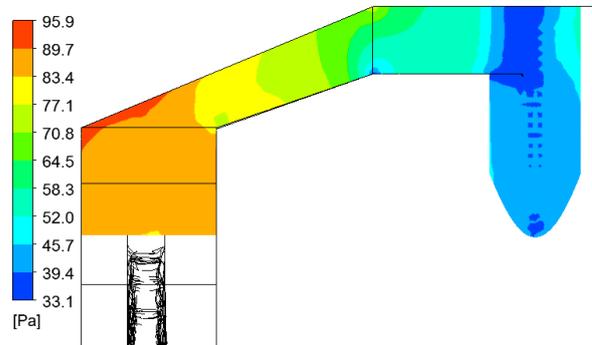
Fig. 4는 사이클론 내부에서의 유선을 보여준다. 사이클론 내부로 유입된 공기는 사이클론 벽을 타고 회전하며 하강하는 것을 볼 수 있다. 이때 공기 중에 미세입자가 포함되어 있다면 내부 공기와 같이 하강하며 포집될 가능성을 보여준다.



(a) Velocity magnitude contours for disc cooling air flow



(b) Velocity contour inside the cyclone



(c) Pressure contour at air duct

Fig. 3 Velocity and pressure contours

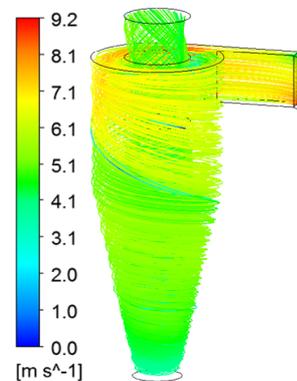


Fig. 4 Streamlines inside the cyclone

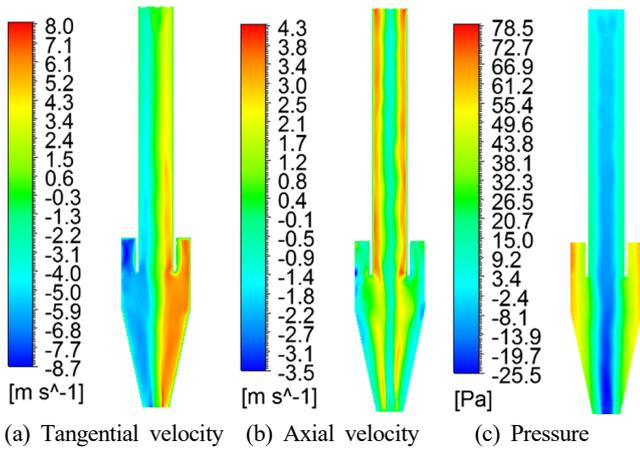


Fig. 5 Velocity and pressure contours

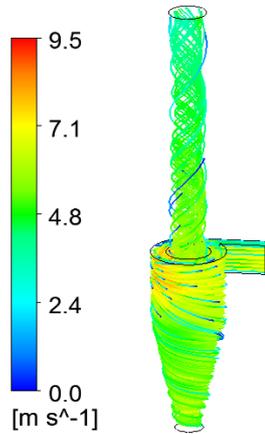


Fig. 6 Streamlines inside the cyclone

3.2 소형 사이클론 내부 유동 비정상상태 수치해석

정상상태 수치해석을 통해 사이클론의 입구 유속을 구하고 그 결과를 이용해 비정상상태 수치해석을 진행하였다. Fig. 5에 사이클론 중앙 단면에서의 속도 및 압력 컨투어를 나타냈다. Fig. 5(a)는 접선방향 속도 컨투어를 보여준다. 속도는 중앙축을 기준으로 좌우 대칭되는 형태를 보여주고 있으며 평균 유속은 약 6 m/s 이고 사이클론 입구 부근에서 최대 약 8.7 m/s의 속도가 발생한다. 이를 통해 사이클론 내부의 회전유동이 잘 발달되었다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 축 방향 속도를 보여준다. 사이클론 벽 근처에서 최대 약 3.5 m/s의 하강 기류가 발생해 유체 내부에 포함된 미세입자가 포집될 가능성이 크다. 하지만 사이클론 중앙과 출구 관 벽 근처에서는 위로 상승하는 기류가 발생한다. 이로 인해 원심력이 약한 작고 가벼운 입자들은 상승기류에 포함되어 누설될 가능성이 있다.

Fig. 5(c)에 압력 컨투어를 나타냈다. 사이클론 내부의 압력 분포 또한 속도 분포와 같이 사이클론 중앙축을 기준으로 대칭되는 형태를 보여준다. 또한 사이클론 입구에서 약 78 Pa, 출구에서 대

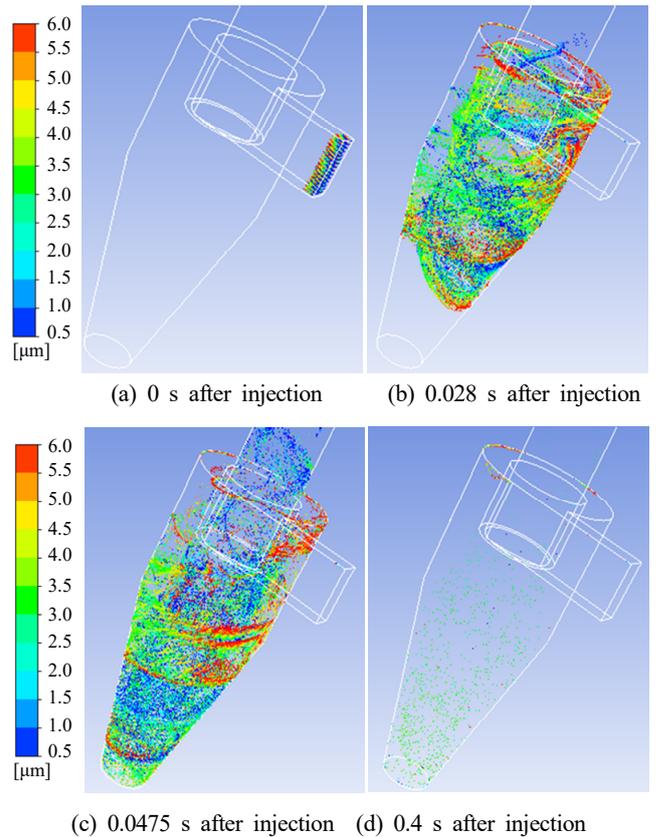


Fig. 7 Particle behaviors with time

기압으로 사이클론을 통한 압력강하는 약 78 Pa로 나타났다.

Fig. 6은 사이클론 내부 유선을 보여준다. 유속 및 흐름의 형태는 Fig. 4와 유사한 경향을 보인다. 이는 사이클론 내부의 압력저항이나 입출구 속도 및 미세입자 포집 가능성 여부 등은 정상상태 수치해석을 이용해도 충분히 유의미한 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 사이클론 내부 유동을 자세히 파악하고 미세 입자 거동을 비교적 정확히 예측하기 위해서는 비정상상태 수치해석이 필요하다.

3.3 소형 사이클론 입자 거동 수치해석

소형 사이클론 내부의 입자 거동 및 입자 포집효율을 알아보기 위해 DPM을 이용하여 비정상상태 수치해석을 진행했다. Fig. 7은 입자 분사 후 시간에 따른 입자 거동을 보여준다. 여기서 색은 입자 지름을 나타낸다. 입자 분사 후 입자들은 벽을 타고 회전하다 0.028 s부터 약 2 μm 미만의 입자들이 출구 관으로 유입되는 것을 볼 수 있다. 그리고 약 0.0475 s 후 입자들이 사이클론 하단부에 포집되며 약 0.4 s가 지나면 대부분의 입자들은 누설되거나 포집된다. 이를 통해 3 μm 이상의 입자들은 회전유동에 의한 원심력에 의해 잘 포집되지만 3 μm 미만의 입자들은 사이클론 중앙의 상승 기류에 포함되어 누설됨을 알 수 있다.

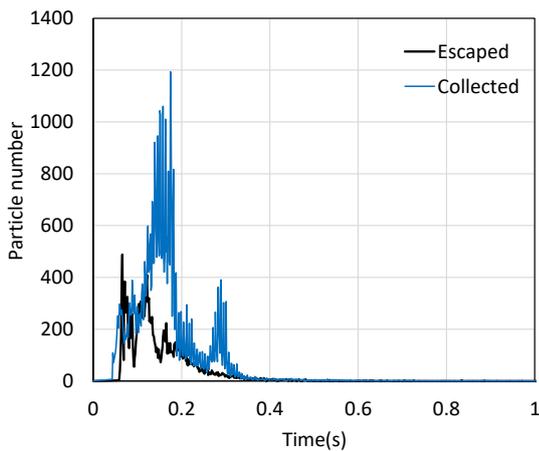


Fig. 8 Number of escaped and collected particles with time

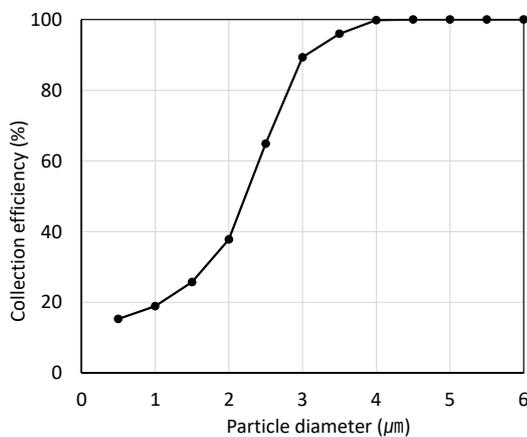


Fig. 9 Collection efficiency vs. particle diameter

시간에 따른 입자 누설량 및 포집량을 더 자세히 알아보기 위해 Fig. 8에 시간에 따른 입자 누설량과 포집량을 나타냈다. 본 논문에서 고려한 사이클론은 입자 분사 후 0.058 s가 지나야 누설이 시작된다. 이는 출구관 길이에 의한 효과로 출구관의 길이가 변하면 입자 누설 시작 시각 역시 변한다. 입자 분사 후 약 0.2 s까지 총누설량 중 80%가 누설되고, 총 포집량 중 80%가 포집된다. 그 후 누설 및 포집량은 천천히 감소하다 약 0.4 s가 지나면 대부분의 입자는 누설되거나 포집된다.

Fig. 9에 입자 크기에 따른 포집효율을 나타냈다. 입자 크기가 3 μm 이상일 때 입자 포집효율은 90% 이상으로 높은 효율을 보인다. 하지만 입자 크기가 3 μm 보다 작아질수록 입자 포집효율은 기하급수적으로 감소해 입자 크기가 1 μm 이하가 되면 포집효율은 20% 이하로 급격히 감소한다. 이는 입자 크기가 작아질수록 입자에 가해지는 원심력이 작아져 포집효율도 감소하게 된다. 하지만 PM 10 기준으로 최소 60% 이상의 효율을 보이기 때문에 차량에서 발생하는 미세입자를 효과적으로 포집할 수 있고 필터와 같이 사용하면 필터의 수명을 상당히 증가시킬 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 브레이크에서 발생하는 미세먼지를 효과적으로 포집하는 방법 중 사이클론 분리기를 이용한 방법을 제안하였고 정상상태 및 비정상상태 수치해석을 통해 사이클론 작동 가능성 확인 및 미세먼지 포집효율을 알아보았다.

디스크 회전수가 1,000 rpm일 때 발생하는 냉각풍의 평균 유속은 약 20 m/s이고 사이클론 입구에서의 속도는 평균 7 m/s이다. 또한 사이클론 내부의 회전유동이 잘 발달하여 디스크 냉각풍을 이용해 소형 사이클론을 작동시킬 수 있음을 확인하였다.

비정상상태 수치해석 결과 사이클론 벽 근처에서 하강 기류가 발생해 미세입자 포집 가능성을 확인하였고 미세입자의 원심력이 작으면 사이클론 중앙의 상승기류에 영향을 받아 미세입자가 포집되지 못하고 누설될 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 고려한 소형 사이클론은 입자 분사 후 약 0.058 s가 지나면 입자 누설이 시작되며 0.4 s가 지나면 대부분의 미세입자는 누설되거나 포집된다. 또한 3 μm 이상 크기의 입자에 대해 최소 90% 이상의 포집효율을 보여주어 브레이크 미세먼지 포집에 효과적임을 알 수 있다. 또한 필터와 같이 사용하게 되면 필터의 수명을 대폭 증가시킬 수 있다.

향후 브레이크 다이내모 실험을 통해 실제 패드와 디스크 마모시 발생하는 미세먼지 포집에 관한 연구가 필요하다.

후기

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(‘20003782’).

References

- [1] Woo, S. H., Kim, Y., Lee, S., Choi, Y., Lee, S., 2020, Characteristic of Brake Wear Particles under Various Test Driving Cycles, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 36:3 346-359, <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.346>.
- [2] Timmers, V., Achten, P., 2016, Non-exhaust PM Emissions from Electric Vehicles, Atmos. Environ., 134 10-17, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017>.
- [3] Gonet, T. A., Maher, B. A., 2018, Magnetic Properties of Brake Wear Emissions – Preliminary Results, 16th Castle Meeting New Trends on Paleo, Rock and Environmental Magnetism, 39-40.
- [4] Sanders, P. G, Xu, N., Dalka, T. M, Maricq, M. M., 2003,

Airborne Brake Wear Debris: Size Distributions, Composition, and a Comparison of Dynamometer and Vehicle Tests, *Environ. Sci. Technol.*, 37:18 4060-4069, <https://doi.org/10.1021/es034145s>.

- [5] Mosleh, M., Blau, P. J., Dumitrescu, D., 2004, Characteristics and Morphology of Wear Particles from Laboratory Testing of Disk Brake Materials, *Wear*, 256:11-12 1128-1134, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.07.007>.
- [6] Kukutschová, J., Moravec, P., Tomášek, V., Matějka, V., Smolík, J., Schwarz, J., Seidlerová, J., Šafářová, K., Filip, P., 2011, On Airborne Nano/Micro-sized Wear Particles Released from Low-metallic Automotive Brakes, *Environ. Pollut.*, 159:4 998-1006, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.036>.
- [7] Lee, Y. L., Hwang, I. S., 2020, Flow Analysis for the Development of Automobile Brake Fine Dust Filter, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. - B*, 44:4 245-253, <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2020.44.4.245>.
- [8] Hascoët, M., Adamczak, L., 2020, At Source Brake Dust Collection System, *Results in Engineering*, 5 100083, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100083>.
- [9] Souza, F. J., Vasconcelos Salvo, R., Moro Martins, D., 2015, Simulation of the Performance of Small Cyclone Separators Through the use of Post Cyclones (PoC) and Annular Overflow Ducts, *Sep. Purif. Technol.*, 142 71-82, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.12.032>.
- [10] Ansys Fluent, 2015, V16, Ansys Inc.



Il Sun Hwang

Postdoctoral fellow in Sustainable Eco-friendly Energy Center, Kongju National University. His research interests are brake filters and linear compressors.

E-mail: hisjj@kongju.ac.kr



Young Lim Lee

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. His research interests are brake filters and linear compressors.

E-mail: ylee@kongju.ac.kr