

자동차 브레이크 패드에서 발생하는 비산먼지 특성에 관한 연구

손 병 래^{1,2)} · 황 규 석³⁾

호남대학교 미래자동차공학부¹⁾ · 남부대학교 기계공학과²⁾ · 남부대학교 전기공학과³⁾

A Study on the Characteristics of Scattering Dust Generated from Automobile Brake Pads

Byeong Rea Son^{1,2)} · Kyu-Seog Hwang^{*3)}

¹⁾Department of Future Vehicle Engineering, Honam University, Gwangju 62399, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Nambu University, Gwangju 62271, Korea

³⁾Department of Electrical Engineering, Nambu University, Gwangju 62271, Korea

(Received 19 October 2020 / Revised 4 November 2020 / Accepted 4 November 2020)

Abstract : In this work, the properties of dust scattering in the automobile disk brake pads as a function of various testing conditions were fully analyzed. The dust scattering was measured by mounting a booth equipped with a particle counter according to measurement locations, distances, particle sizes, and cooling outlet shapes of a caliper. The collecting effect of dust scattering as a result of using the self-designed dust collector was also analyzed. Experimental conclusions conducted from this work will be utilized to develop a novel dust collector and the customized test modes for dust scattering on an automotive brake system.

Key words : Dust scattering(비산먼지), Brake pads(브레이크 패드), Particle counter(먼지 측정기), Caliper(캘리퍼), Cooling outlet(냉각배출구), Dust collector(포집기)

1. 서 론

일반적으로 도심지의 대기오염은 인구의 도시집중으로 인해 악화되고 있으며, 운송장비 증대와 도로의 확장으로 인해 도로에서 발생하는 비산먼지가 지속적으로 증가하고 있다. 운송장비에 의한 비산먼지 발생 주범은 과거 내연기관의 배기가스에 대한 원인이 크고 타이어나 브레이크 패드의 마모와 같은 비배기에 의한 원인은 일반적으로 낮은 것으로 알려져 있었다.¹⁻³⁾ 그러나 최근 국내·외의 연구들에 따르면 내연기관의 사용을 줄이거나 대체하는 방식의 운송장비들을 사용함에 따라 내연기관에서 발생하는 비산먼지는 점차적으로 감소하고 오히려 비산먼지의 주요인은 비배기에 의해 발생이 높아질 것이라는 연구 결과들이 발표되고 있다.^{4,5)} 특히, 내연기관의 배기가스로 인한 비산먼지에 대한 연구들과 기술적 진보 및 관련 규제는 꾸준히 존재했지만 비배기에

관한 연구는 상대적으로 미미한 수준임에 따라 비배기 비산먼지에 관한 연구의 필요성이 대두된다.⁶⁾

이에 본 연구에서는 차량의 브레이크 작동 시 패드의 마모에 의해 발생하는 먼지의 비산형태를 브레이크 디스크를 중심으로 먼지측정기(Particle counter)를 이용하여 측정위치별, 측정거리별, 먼지의 입자크기별 및 캘리퍼의 냉각배출구 형상별로 측정하였으며, 결과에 따른 먼지의 비산거동을 기반으로 향후 효율적인 비산먼지 포집을 위한 도구나 전용 시험법 개발을 위한 기초자료로 본 연구결과를 활용하는데 목적이 있다.

2. 브레이크 패드 마모에 의한 비산먼지 측정방법

브레이크 시스템에서 패드의 마모에 의해 발생하는 비산먼지를 측정하기 위해 실제 주행 차량에서 실험을 진행하고자 하였으나, 실제 차량에서는 패드의 마모에

*Corresponding author, E-mail: khwang@nambu.ac.kr

^{*}This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

의해 비산되는 먼지를 직접 포집할 경우 유해인자가 많기 때문에, 차량의 주행과 같은 조건을 실내에 구비하여 정량적으로 비산먼지를 측정할 수 있는 시스템을 구성하였고 이를 Fig. 1에 나타내었다. 측정 시스템은 차량의 주행 속도, 제동시간 및 제동압력을 일정하게 반복하여 제동할 수 있도록 구성하였으며, 브레이크 디스크 주위로 패드의 마모에 의해 비산되는 먼지의 측정은 먼지 측정기를 이용하여 측정할 수 있도록 구성하였다. 측정에 사용한 먼지 측정기는 대기 중에 부유하고 있는 입자성 물질(PM, Particulate Matter)에 빛을 조사하게 되면 입자에 의해 빛이 산란하게 되어 물리적 성질이 동일한 입자에 의한 산란광의 양이 질량농도에 비례하게 되는 원리인 광산란법을 이용하여 입자상물질의 양을 구하였으며, FLUKE 사의 985 모델을 이용하였다. 측정 시 온도 및 습도는 KIMO AMI 310 다기능 측정기를 활용하였으며, 캘리퍼 및 디스크는 시판 차량에 가장 많이 이용되는 Organic 패드를 사용하였다.

또한 외부에서 유입되는 먼지를 차단하기 위해 비산 먼지 측정 시스템을 1,200 mm(W) × 1,200 mm(L) × 1,500 mm(H) 크기의 부스 내부에 설치하였으며, 비산먼지의 경우 온도와 습도에 영향을 받을 수 있으므로 부스 내부의 온도를 25 °C ± 2 °C, 습도를 50 %로 일정하게 유지하기 위하여 환온, 환습 상태로 시험을 진행하였다. 부스 내의 먼지 측정은 측정 위치에 따라 위치를 변경하면서 측정하였고 각각의 위치별 측정 후 부스 내부에 발생된 비산먼지는, 부스에 장착된 환풍 시스템을 이용하여 비산먼지를 완벽하게 제거 후 측정하였다.

디스크의 회전 속도는 100 km/hr로 설정하였으며, 브



Fig. 1 Brake dust measuring system with a particle counter

레이크 제동 압력은 1.0 kg/cm²로 제동되도록 하였고 제동 시간은 10 초로 100회 반복하여 제동되도록 구성하였다. 브레이크 작동시간은 10초씩 100회 반복하였을 경우 약 17분이 소요되나 테스트 장비의 종료 소요시간 등을 감안한 안정화를 위한 1분 정도를 추가하여 18분 동안 측정위치 변화에 따라 측정되는 양을 포집 양으로 설정하였다.

2.1 브레이크 패드 주변으로 비산되는 먼지 측정

브레이크 작동 시 브레이크 패드의 마모에 의해 비산되는 먼지의 거동을 확인하기 위하여 브레이크 디스크를 중심으로 45° 각도로 총 8개소를 분할하고 브레이크 디스크에 장착된 캘리퍼를 기점으로 30 mm, 60 mm, 90 mm, 그리고 120 mm의 간격으로 먼지 측정기를 이동하면서 비산먼지를 측정하였으며, Fig. 2에 측정 방법을 나타내었다. 8개소의 측정위치는 캘리퍼로부터 디스크의 회전방향으로 1번부터 8번까지 측정위치를 부여하였으

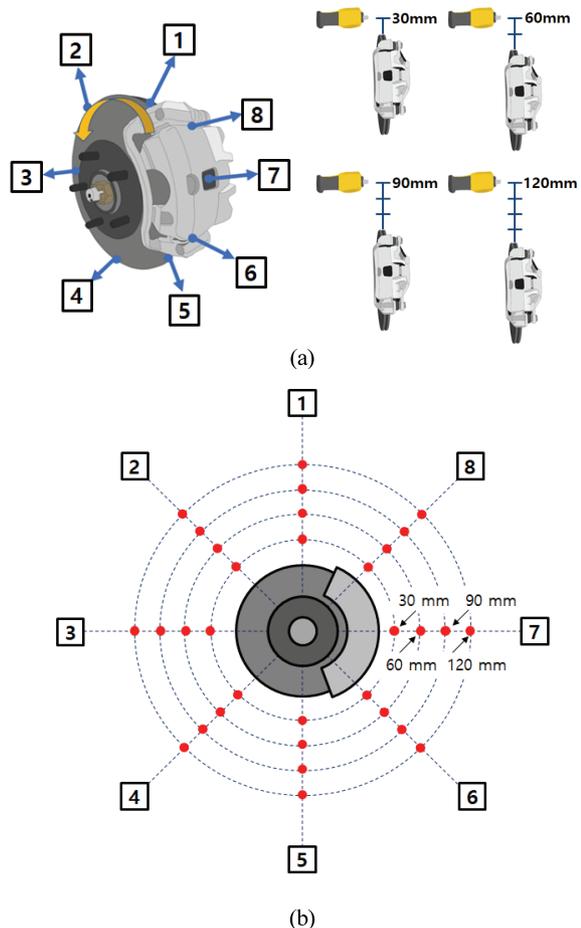


Fig. 2 Measurement method of dust scattering; (a) test setup using a particle counter, (b) schematic diagram of brake dust measuring point using a particle counter

며, 캘리퍼의 주위는 6번에서 8번 위치로 구분하였고 각 측정위치별 비산먼지의 크기는 0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.0 μm , 5.0 μm 그리고 10.0 μm 의 6단계로 구분하였다.

2.2 캘리퍼의 냉각배출구 형상에 따른 비산먼지 측정

차량의 브레이크 시스템은 캘리퍼의 작동으로 회전하는 디스크와 브레이크 패드의 마찰을 발생시켜 차량의 속도를 제어함으로써 패드 마모로 인한 비산먼지가 발생하고 또한 마찰에 의한 열이 발생한다. 발생하는 마찰열은 바로 빠져나가도록 캘리퍼에 냉각배출구가 존재하며, 제조사별로 캘리퍼의 냉각배출구는 다양한 형태로 존재한다. 이러한 냉각배출구로 마찰열이 빠져나갈 때 냉각배출구의 형상에 따라 비산되는 먼지의 영향을 알아보기 위해 캘리퍼의 냉각배출구를 가공을 통해 실험적으로 배출구의 크기를 제어하도록 구성하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 디스크 주변에 발생하는 비산먼지의 측정방법은 먼지측정기를 이용한 측정방법과 동일하고(Fig. 2), 본 연구에서 설정한 캘리퍼에서부터 4단계의 측정거리 변화와 동시에 캘리퍼 냉각배출구의 형상 변화가 동시에 적용되면 측정변수가 너무 많아지므로, 본 연구에서는 중간 측정거리인 60 mm를 선택하여 분석을 행하였다. 캘리퍼의 배출구 크기는 냉각배출구가 없는 형태를 0 mm, 이후 넓이는 55 mm로 일정하게 유지하되 길이방향으로 30 mm, 60 mm 및 최대 90 mm 크기의 4단계로 구분하여 각각의 냉각배출구 크기에 따라 비산먼지를 측정하였다.

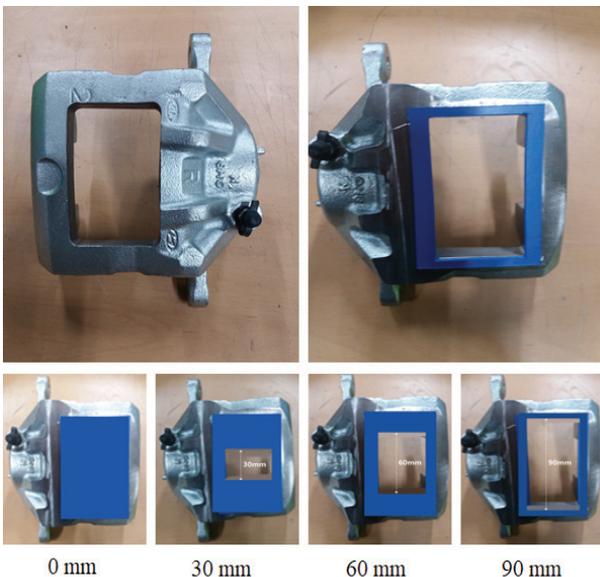


Fig. 3 Measurement method of dust scattering according to cooling outlet shape of a caliper

2.3 캘리퍼 형상의 포집장치 적용에 따른 비산먼지 측정

최근 비배기에 의한 비산먼지 중 브레이크 마모에 의한 비산먼지를 감소하기 위해 차량에 적용할 수 있는 여러 형태의 비산먼지 포집방법들이 제안되고 있다. 본 연구에서는 기존에 제안된 비산먼지 포집방법들과 차별화하여 현재 저자 등이 특허 출원 중인 포집방법을 적용하여 포집기(Dust collector)를 개발 및 제작하였고, 포집기의 장착에 따른 브레이크 디스크 주변에 비산되는 먼지의 영향을 확인할 수 있도록 비산먼지 측정 시스템을 구성하였다(Fig. 4).

앞서 언급한 것처럼 브레이크 작동 시 캘리퍼 주위에서 먼지 비산먼지가 발생함을 고려하여 캘리퍼를 감싸는 형태의 포집 구조를 가지며, 캘리퍼에서 배출되는 마찰열이 빠져나가도록 포집기에도 냉각배출구를 여러 개로 배열하였다. 본 연구에서 사용한 포집기는 냉각배출구에 비산먼지를 포집할 수 있는 필터망을 장착하여 비산먼지는 필터망에 포집이 되지만 마찰열은 잘 빠져나가는 작동원리를 가지고 있다.

비산먼지 측정방법은 동일한 방법으로 포집기를 장착하여 먼지측정기의 측정위치, 측정거리 및 비산먼지 크기별로 설정하였지만, 캘리퍼에 포집기가 장착됨에 따라 먼지측정기와 측정거리 중 30 mm 거리는 공간적 제약으로 인해 제외하였으며, 60 mm, 90 mm 및 120 mm에서 각각 측정하였다.



Fig. 4 Measurement method of dust scattering with the dust collector

3. 시험 조건별 비산먼지의 특성 분석

3.1 브레이크 패드 주변 비산먼지의 측정 결과 및 분석

본 연구에서는 먼지 측정기를 사용하여 측정 위치별로 측정된 비산먼지 양을 총 5회씩 측정하여 그 평균값을 이용하였다. Fig. 5는 브레이크 디스크를 중심으로 측정거리에 따른 측정량 결과를 나타내며, 그래프의 X 축은 브레이크 디스크를 중심으로 8개소로 나눈 측정위치를 나타내며, Y 축은 비산먼지의 크기(0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.0 μm , 5.0 μm , 10.0 μm)에 따른 측정량을 나타낸다.

Fig. 5의 (a)는 측정거리가 30 mm, (b)는 60 mm, (c)는 90 mm 및 (d)는 120 mm의 결과를 보여준다. 각각의 결과는 측정위치에서 포집된 비산먼지의 크기별 측정량을 한 번에 비교할 수 있도록 로그스케일로 표현하였다. 측정한 각각의 결과를 살펴보면 전체적으로 측정량 편차는 있지만, 측정거리별 브레이크 디스크 주변으로 패드의 마모에 의해 발생하는 비산먼지가 고르게 분포되어 있음을 보여준다. 한편, 측정거리를 120 mm까지만 측정

한 이유는 120 mm 이상의 측정거리에서는 전체적으로 비산먼지 크기에 따른 측정량의 편차가 매우 심해지며, 일부 측정위치에서는 측정이 되지 않는 위치도 존재함에 따라 120 mm까지만 측정하여 그에 따른 결과를 나타내었다.

이상과 같은 결과를 바탕으로 측정거리에 따른 비산먼지의 거동을 살펴보면 브레이크 디스크를 중심으로 60 mm 이내에서는 패드로부터 발생된 먼지가 패드를 감싸는 캘리퍼의 표면에 먼지 흡착되면서 공기 중으로 비산되는 과정 중에 먼지가 서로 혼재하기 때문에 약간의 측정량 편차가 발생할 가능성이 있으며, 90 mm에서 120 mm 내에서는 비산먼지의 부유 공간이 넓어지다 보니 점차적으로 편차가 낮은 형태의 안정적인 비산을 나타내고, 120 mm 이상에서는 부유 공간이 매우 커지다보니 먼지의 비산이 넓어짐에 따라 측정에 한계가 있음을 알 수 있었다. 이로 인해 비록 실제 주행 차량에서의 비산먼지 거동과는 차이가 발생할 가능성이 존재하지만 본 실험을 통해 대략적으로 브레이크 패드로부터 120 mm 이내

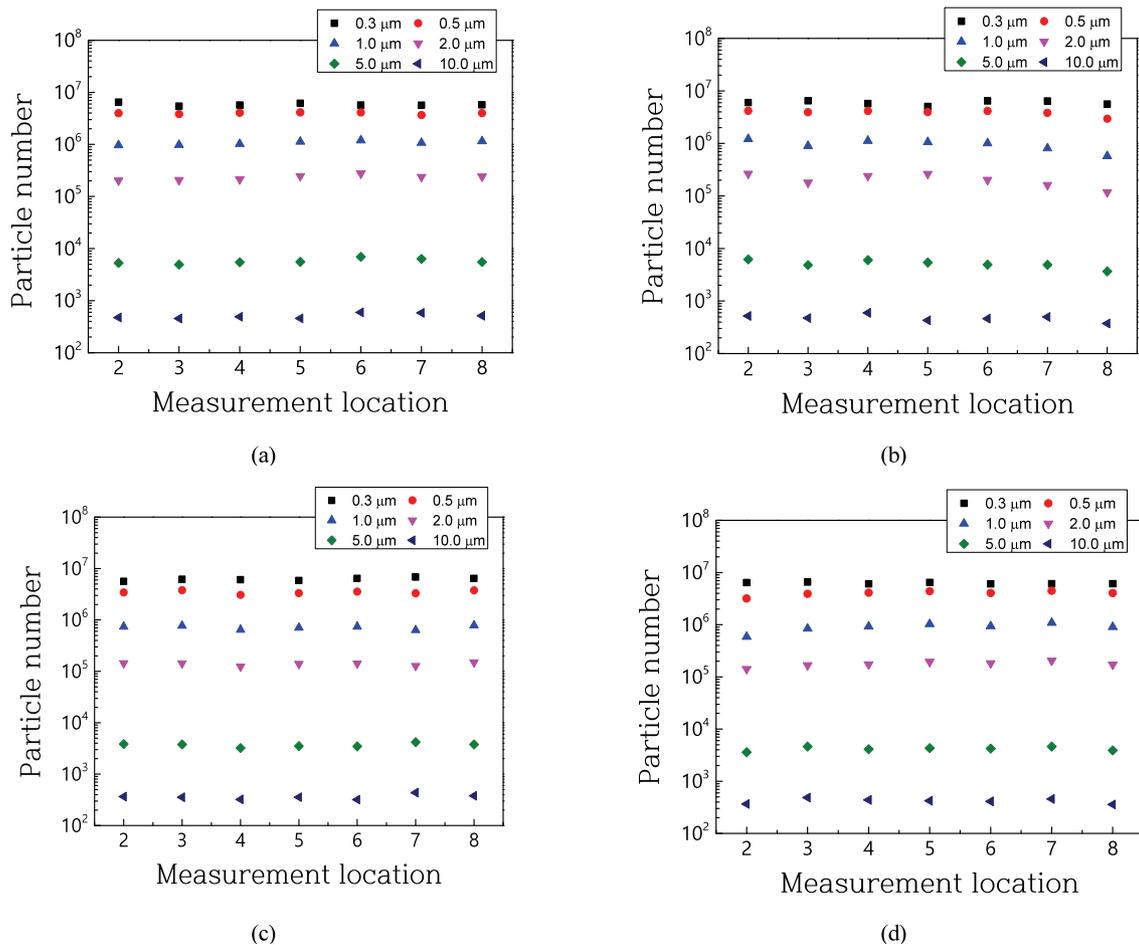


Fig. 5 Particle number according to measurement location and distance; (a) 30 mm, (b) 60 mm, (c) 90 mm and (d) 120 mm

에 먼지가 가장 많이 비산되는 영역임을 확인하였고 이를 바탕으로 120 mm 이내에서 비산먼지를 포집할 수 있는 방법을 적용하면 대기 중으로 비산되기 전에 많은 양의 먼지를 포집할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 캘리퍼의 냉각배출구 형상에 따른 비산먼지 측정 결과 및 분석

캘리퍼의 냉각배출구 형상에 따른 비산먼지의 측정 결과는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 결과들은 캘리퍼의 냉각배출구 크기에 따른 비산먼지의 측정량이며, 차례대로 Fig. 6(a)는 0 mm, (b)는 30 mm, (c)는 60 mm 및 (d)는 120 mm의 냉각배출구 크기를 나타내며, 캘리퍼에서 60 mm 떨어진 위치에서 측정된 결과이다.

결과에서 알 수 있듯이 먼저 캘리퍼의 냉각배출구가 없는 형태는 기존의 측정 결과와 같이 냉각배출구를 가공하지 않은 캘리퍼의 결과와 거의 유사한 측정량을 나타내었다(Fig. 5b). 그러나 점차적으로 냉각배출구가 커

지는 30 mm에서의 크기부터는 냉각배출구가 있는 캘리퍼의 측정위치인 6번에서부터 8번 위치까지의 비산먼지 측정량이 약간 늘어나는 결과를 확인하였으며[Fig. 6(b)], 배출구가 커지는 크기인 60 mm와 90 mm에서는 6번에서부터 8번까지 측정위치에서 비산먼지가 급증하는 결과 [Figs. 6(c)&(d)]를 나타내었다. 반면에 나머지 측정 위치인 1번부터 5번까지에서는 비산먼지의 측정량이 전체적으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 예측이 가능한 결과로 캘리퍼의 냉각배출구가 커짐에 따라 패드 마모 시 발생하는 입자들이 캘리퍼에 흡착되는 양은 줄어들고, 냉각배출구에서 바로 먼지로 비산되기 때문이다. 이를 더욱 명확하게 확인하기 위하여, Fig. 7과 같이 각 측정위치별과 냉각배출구의 크기에 따라 비산되는 먼지의 크기별 (0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.0 μm , 5.0 μm , 10.0 μm) 측정량을 합산하여 측정위치에 따른 비산먼지의 총량을 비교하였다. 결과에서 알 수 있듯이 냉각배출구가 없는 형태에서는 측정위치별 비산먼지의 측정량은 변화가 없음을

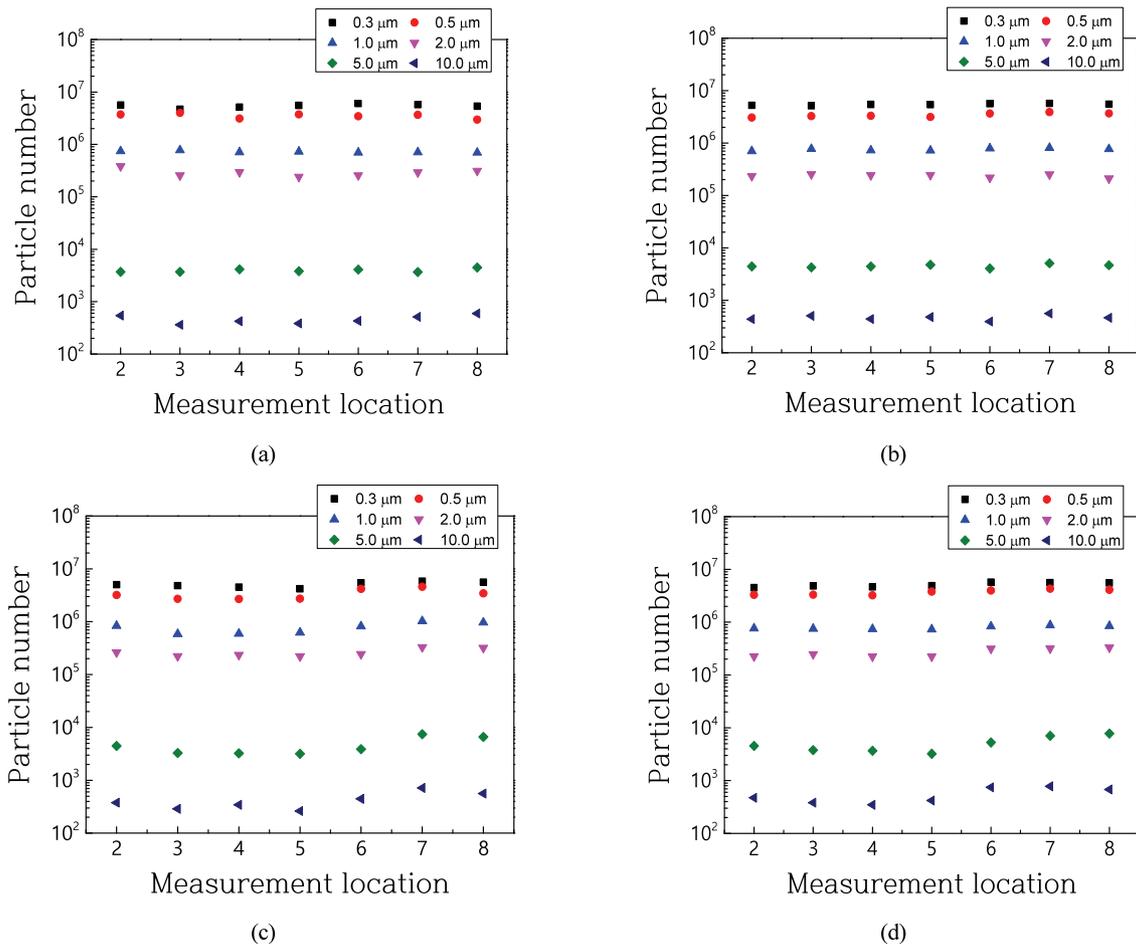


Fig. 6 Particle number according to 60 mm measuring distance and cooling outlet shape of a caliper; (a) 0 mm, (b) 30 mm, (c) 60 mm and (d) 90 mm

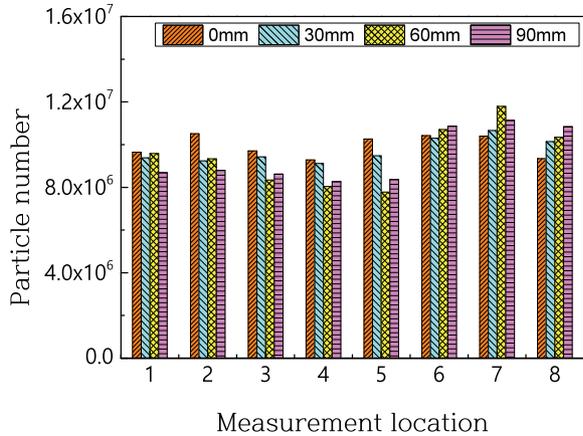


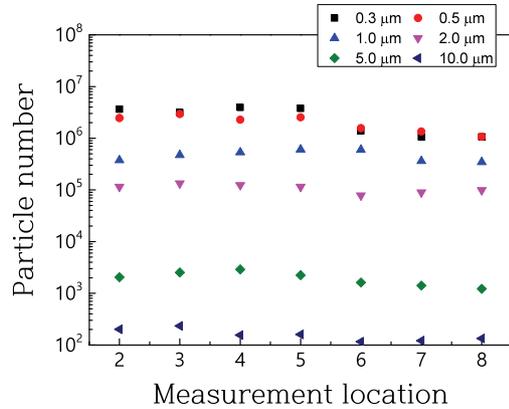
Fig. 7 Comparison of total particle number according to 60 mm measuring distance and cooling outlet shape of a caliper

알 수 있고, 30 mm부터 점점 냉각배출구가 커질수록 냉각배출구가 있는 측정위치의 6번, 7번, 8번 위치의 측정량은 점차 늘어나고, 그 외 캘리퍼가 없는 위치인 1번부터 5번까지는 측정량이 점점 감소됨을 알 수 있었다.

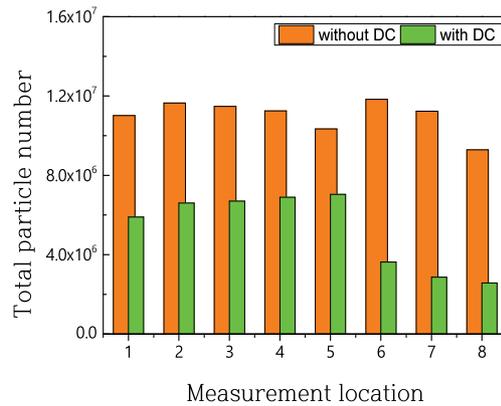
이러한 결과를 종합적으로 살펴보면 냉각배출구를 가공하지 않는 기존의 캘리퍼에서는 패드의 마모에 의해 캘리퍼 주위에서 비산먼지가 가장 먼저 발생하지만, 캘리퍼의 냉각배출구로 전부 빠져나가지 못하고 내부 표면에 흡착이 되면서 디스크 주변으로 먼지가 비산됨에 따라, 앞선 결과에서 언급한 것처럼 측정거리별 먼지의 비산거동을 알 수 있었다. 그리고 캘리퍼 냉각배출구의 크기를 점점 크게 하였을 때, 패드 마모에 의한 비산먼지가 캘리퍼에 흡착이 되지 못하고 마찰열이 대류 현상에 의해 배출되는 형태처럼 먼지가 비산되며, 이로 인해 냉각배출구가 없는 측정위치에서는 전체적으로 비산먼지의 측정량이 감소하였음을 확인할 수 있었다.

3.3 캘리퍼 형상의 포집장치 적용에 따른 비산먼지 측정 결과 및 분석

Fig. 8(a)는 포집기를 장착한 캘리퍼에서 측정거리가 60 mm 거리일 때, 8개소에서 측정되는 비산먼지의 전체 양을 나타내었으며, Fig. 8(b)는 포집기가 없을 때 측정 (without DC)하였던 8개소의 비산먼지의 크기별 합산 양과 포집기를 장착 후, 측정(with DC)한 8개소의 비산먼지 크기별 합산 양을 비교하여 나타내었다. Fig. 8(a)의 결과에서도 쉽게 볼 수 있듯이 6~8번 위치에서 비산 양이 크게 감소함을 알 수 있었으며, 분석 결과를 보다 명확히 하기 위하여 Fig. 8(b)와 같이 포집기 장착 전후의 비산먼지 크기별 합산 양을 직접적으로 비교함으로써, 포집기



(a)



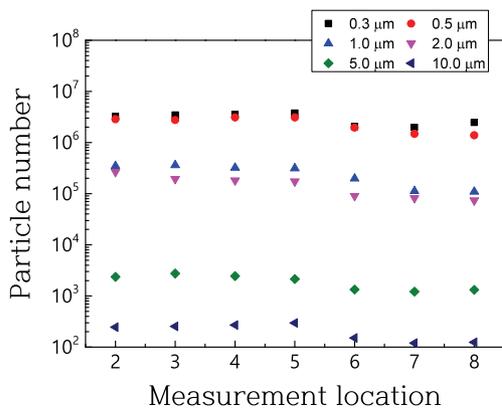
(b)

Fig. 8 Particle number according to 60 mm measuring distance with our dust collector

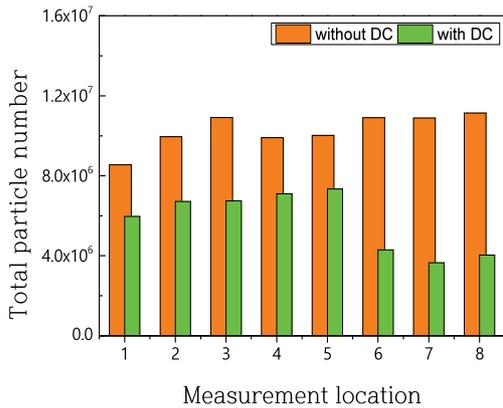
장착에 따라 전체적으로 측정위치 별로 약 40% 정도의 비산먼지가 감소되었지만, 포집기가 장착된 6~8번 위치에서는 최대 70% 가량의 비산먼지가 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 9와 Fig. 10은 캘리퍼를 중심으로 각각 90 mm 거리와 120 mm 거리에서 포집기 장착여부에 따른 비산먼지의 측정량 결과를 나타내었다. Table 1은 포집기의 장착유무에 따라 포집기가 있는 캘리퍼 주변의 6~8번 측정위치와 포집기가 없는 1~5번 측정위치에서 측정된 비산먼지 평균 측정량을 각 측정거리에 따라 비교하여 나타내었으며, 이러한 측정 결과를 바탕으로 60 mm 거리일 때가 가장 비산먼지가 줄어들었음을 알 수 있었고, 측정 거리가 점점 멀어지는 순(60 mm > 90 mm > 120 mm)으로 비산먼지의 측정량이 조금씩 늘어남을 알 수 있었는데, 이는 브레이크 패드에서 점점 멀어지면 포집기를 직접적으로 통과하여 측정되는 양도 있겠지만 공기 중으로 먼지가 비산되어 서로 혼합됨에 따라 측정되는 양이 늘어난 것으로 추정된다.

Table 1 Comparison of total particle number according to measuring distance and position with and without self-designed dust collector

Measuring distance	Measuring position	Without DC	With DC
60 mm	1 ~ 5	11,015,781	5,902,087
	6 ~ 8	10,782,642	3,023,552
90 mm	1 ~ 5	9,867,971	6,772,778
	6 ~ 8	10,974,442	3,996,037
120 mm	1 ~ 5	11,284,534	7,821,767
	6 ~ 8	11,437,296	4,658,402



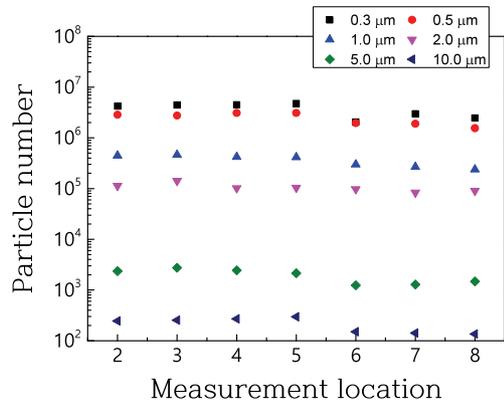
(a)



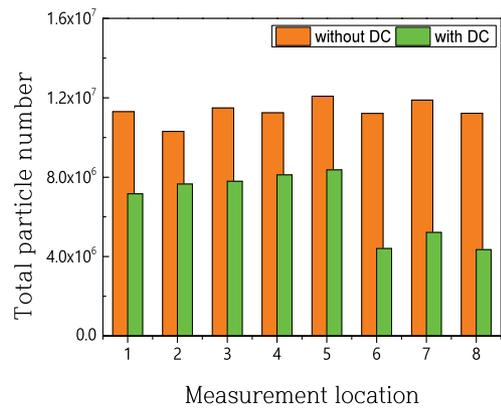
(b)

Fig. 9 Particle number according to 90 mm measuring distance with self-designed dust collector

이렇듯 본 연구에서 확인한 바와 같이 캘리퍼에 필터가 장착된 포집기를 장착하는 것만으로도 비산먼지를 크게 줄일 수 있었으며, Fig. 11은 실제 차량에서 사용되는 브레이크 시스템에 자체 제작한 포집기를 장착을 통해 브레이크 시스템 구동이나 휠의 회전 등에 전혀 간섭



(a)



(b)

Fig. 10 Particle number according to 120 mm measuring distance with self-designed dust collector



Fig. 11 A caliper integrated self-designed dust collector in an automotive disk brake system

이 없음을 확인하였다. 또한 캘리퍼의 냉각배출구 구조와 포집기 구조 등을 개선한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차의 브레이크 작동 시, 패드의 마모에 의해 발생하는 비산먼지의 거동형태를 먼지 측정기를 활용하여 측정위치별, 측정거리별, 먼지의 입자크기별, 캘리퍼의 냉각배출구 크기별과 자체 제작한 포집기 장착여부에 따라 측정 및 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 패드 마모에 의한 비산먼지의 거동은 캘리퍼로부터 측정거리가 60 mm 이내에서는 측정 시마다 편차가 다소 있었지만, 90 mm에서 120 mm에서는 안정적인 측정량을 얻을 수 있었으며, 브레이크 디스크를 중심으로 측정위치별 비산먼지가 고르게 분포됨을 알 수 있었다.
- 2) 캘리퍼 냉각배출구의 크기를 실험적으로 제어하여 크기를 크게 할수록 패드 마모에 의한 비산먼지가 캘리퍼 주변에서 비산먼지가 많이 측정됨을 확인하였고, 반면에 다른 측정위치에서는 전체적으로 비산먼지 측정량이 감소함을 확인하였다.
- 3) 자체 제작한 필터망이 있는 형태의 포집기를 캘리퍼에 장착한 것만으로도 비산먼지의 측정량을 통해 최대 70 % 정도 감소할 수 있는 포집성능을 확인할 수 있었다. 향후 본 연구의 결과들을 기반으로 더욱 개선된 비산먼지 포집을 위한 도구로 개발을 진행할 계획이며, 더불어 전용 시험법을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

References

- 1) J. K. Shin, H. Lee, C. S. Yoon and H. Kim, "Analytical Study on Re-solidification Materials for NO_x Reduction of Exhaust Emission in Diesel Engine with Solid SCR," Transactions of KSAE, Vol.22, No.4, pp.152-159, 2014.
- 2) J. Su, M. Xu, P. Yin, Y. Gao and D. Hung, "Particle Number Emissions Reduction Using Multiple Injection Strategies in a Booster Spark-Ignition Direct-Injection Gasoline Engine," SAE International Journal of Engines, Vol.8 No.1, pp.20-29, 2015.
- 3) S. Hong, D. Jung and M. Sunwoo, "A Control Strategy of Fuel Injection Quantity and Commonrail Pressure to Reduce Particulate Matter Emissions in a Transient State of Diesel Engines," Transactions of KSAE, Vol.23, No.6, pp.623-632, 2015.
- 4) M. Matissen, V. Scheer, U. Kirchner, R. Vogt and T. Benter, "Non-exhaust PM Emission Measurements of a Light Duty Vehicle with a Mobile Trailer," Atmospheric Environment, Vol.59, pp.232-242, 2012.
- 5) S. P. Jung and H. B. Park, "Analysis of Influence Parameters for Brake System's Performance during High Speed Braking," Transactions of KSAE, Vol.25, No.2, pp.196-201, 2018.
- 6) S. P. Jung and P. G. Lee, "Analysis of PM10 Level Fine Dust Content Rate According to Braking Conditions of an Automotive Disc Brake System," Transactions of KSAE, Vol.28, No.7, pp.445-452, 2020.