

브레이크 캘리퍼에 장착한 비산먼지 포집기의 성능 평가

Evaluation of the Performance of the Scattering Dust Collector Mounted on the Brake Caliper

김덕호^{1*}, 손병래²

Deok-Ho Kim^{1*}, Byeong-Rea Son²

〈Abstract〉

The main cause of scattering dust generated by transportation equipment such as automobiles was largely due to exhaust gas from internal combustion engines in the past, but it was generally recognized that non-exhaust causes such as abrasion of the tires or brake pads were low. Accordingly, scattering dust generated by exhaust gas has consistently existed in many studies, such as technological progress and related regulations, but research on non-exhaust is relatively insignificant, and the need for research on scattering dust generated by non-exhaust is emerging. In this study, a dust collector that can be easily mounted on a caliper to collect scattering dust generated by pad wear during the brake operation of an automobile was manufactured. In this study, we developed a dust collector that is easy to mount on calipers to collect scattering dust caused by pad wear during brake operation of automobiles. According to the installation of the manufactured dust collector, the performance of scattering dust by brake operation and the temperature change characteristics of calipers according to the structure of the dust collector were evaluated.

Keywords : Scattering Dust Collector, Brake Pads, Particle Counter, Caliper, Cooling Outlet

1* 정회원, 교신저자, 김천대학교, 조교수
E-mail: dhkim@gimcheon.ac.kr

2 호남대학교, 부교수

1* Dept. of Smart Mobility Engineering, Gimcheon University

2 Dept. of Future Automotive Engineering, Honam University

1. 서론

자동차는 고속 주행이 가능하여 일반적으로 운전자와 동승자의 안전을 위해 다양한 시스템이 적용되어 있다. 이러한 다양한 시스템 중에서 자동차의 제동 시스템은 가장 기본적이고 중요한 안전 시스템이다. 자동차 브레이크 시스템은 캘리퍼 하우징 내의 피스톤이 유압에 의해 작동하여 디스크의 양 측면에 있는 마찰재인 패드가 밀착 및 마찰력에 의해 디스크의 회전이 감소되어 자동차를 제동한다. 이때, 브레이크 패드와 디스크의 마찰로 인해 발생하는 비산먼지와 마찰재의 성분인 이물질 등이 인체에 흡입되면 호흡기질환의 원인이 될 수 있으며,[1-2] 공기를 오염시켜 동식물 및 주변 환경에 악영향을 미친다.[3-5] 자동차와 같은 운송장비에 의한 비산먼지 발생 주범은 과거 내연기관의 배기가스에 대한 원인이 크고,[6-7] 타이어나 브레이크 패드의 마모와 같은 비배기에 의한 원인은 일반적으로 낮은 것으로 인식되었다.[8-10] 그러나 최근 국내외 연구들에 따르면 내연기관의 사용을 줄이거나 대체하는 방식으로 운송장비들을 사용함에 따라 내연기관에서 발생하는 비산먼지는 점차적으로 감소하고[11-12] 오히려 비배기에 의한 비산먼지의 발생은 높아질 것이라는 연구 결과들이 발표되고 있다.[13-14] 특히, 배기가스로 인한 발생하는 비산먼지는 많은 연구들과 기술적 진보 및 관련 규제와 같은 대책이 꾸준히 존재했지만,[15-16] 비배기에 관한 연구는 상대적으로 미미한 수준으로 비배기에 의해 발생하는 비산먼지에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다.[17-18]

본 연구에서는 자동차의 제동 시 패드 마모로 인해 발생하는 비산먼지를 포집할 수 있도록 캘리퍼에 간단하게 장착할 수 있는 포집기를 설계 및 제작하였다. 제작된 먼지 포집기의 장착에 따라 브레이크

작동에 의한 비산먼지를 포집 성능과 포집기의 구조에 따른 캘리퍼의 온도변화 특성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 결과분석

본 연구에서 제작한 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다.

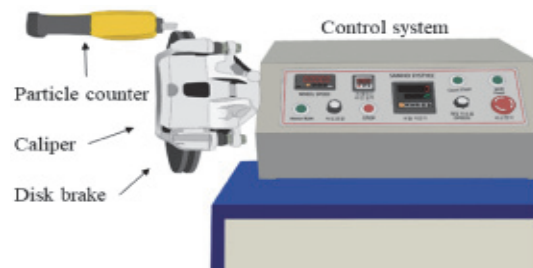
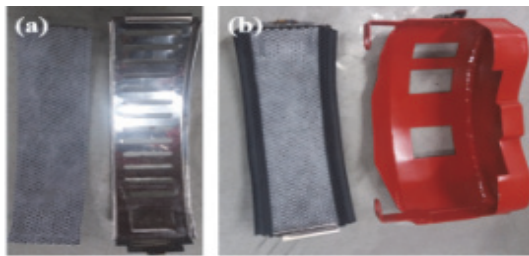


Fig. 1 Brake dust measuring system

2.1 필터가 장착된 먼지 포집기의 제작

최근 비배기에 의한 비산먼지 중 패드의 마모에 의한 비산먼지를 감소하기 위해 차량에 적용 가능한 여러 형태의 비산먼지 포집방법들이 있다. 비산먼지를 포집하기 위한 방법으로는 브레이크 시스템에서 배출되는 비산먼지를 직접적으로 흡입/필터링하는 시스템을 장착하는 방법과 브레이크 디스크나 타이어의 마모에 대한 비산먼지 저감형 최적 소재를 개발하여 적용하는 방법으로 구분할 수 있다. 본 연구의 포집기는 기존의 연구들에서 제안된 비산먼지 포집방법들과 차별화된 기술의 포집방법[19]을 적용하였고 Fig. 2에 나타내었다.

먼지 포집기는 브레이크 작동에 의한 캘리퍼의 냉각 배출구에서 방출되는 비산먼지를 필터부에 직접적으로 포집이 되도록 캘리퍼를 감싸는 구조이다. 그리고 필터부를 캘리퍼와 연결이 될 수 있



(a) a filter unit, (b) a frame of the dust collector



(c) and (d) the dust collector installed in the caliper

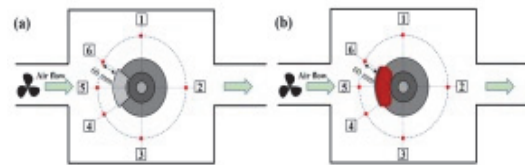
Fig. 2 Our dust collector with a micro filter

도록 프레임을 제작하여 연결하였고, 프레임 또한 캘리퍼의 열 방출이 용이하도록 냉각 배출구를 여러 개로 제작하였다. 포집기에 장착된 필터는 최소 0.1 μm 의 먼지를 여과할 수 있는 필터로, 비산먼지 포집 후 포집기의 프레임에서 필터만 간단하게 탈부착으로 교체할 수 있는 구조로 필터망을 통해 비산먼지는 필터망에 의해 포집이 가능하지만 패드의 마찰로 인한 열은 잘 방출되는 매우 간단한 원리이다.

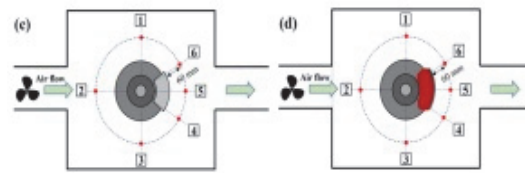
2.2 제동 시 브레이크 패드의 마모에 의한 비산먼지 측정방법

자동차 제동 시 브레이크 패드의 마모에 의해 발생하는 비산먼지를 측정하기 위해 실제 차량의 주행과 동일한 실험장치를 실내에 설치하여 정량적으로 비산먼지를 측정하였고, 측정방법을 Fig. 3에 나타내었다.

측정 시스템은 차량의 주행 속도와 제동시간



(a), (b) without and with our dust collector on forward caliper.



(c), (d) without and with our dust collector on rearward caliper.

Fig. 3 Measuring method of scattering dust according to measurement location

및 제동압력을 설정하여 제동할 수 있으며, 브레이크 디스크 주변으로 패드의 마모에 의한 비산먼지의 측정은 먼지 측정기를 이용하였다. 측정에 사용한 먼지 측정기는 FLUKE 사의 985 모델이며, 대기 중에 부유하고 있는 입자상 물질(PM, Particulate Matter)에 빛을 조사하여 입자에 의해 빛이 산란하게 되어 물리적 성질이 동일한 입자상에 산란광의 양이 질량농도에 비례하게 되는 원리인 광산란법을 이용하여 입자상물질의 양을 구하였다. 측정 시 온도 및 습도는 KIMO AMI 310 다기능 측정기를 활용하였으며, 캘리퍼 및 디스크는 차량에 가장 많이 이용되는 organic 패드를 사용하였다. 또한 외부에서 유입되는 먼지를 차단하기 위해 비산먼지 측정 시스템을 1200 mm(W) × 1200 mm(L) × 1500 mm(H) 크기의 부스 내부에 설치하였으며, 비산먼지의 경우 온도와 습도에 영향을 받을 수 있으므로 이러한 영향인자를 해소하기 위해 부스 내부의 온도를 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 습도를 50 %로 일정하게 유지하기 위하여 항

온, 항습 상태로 시험을 진행하였다. 부스 내의 먼지 측정기는 측정 위치에 따라 위치를 변경하면서 측정하였고 위치별 측정 후 부스 내부에 발생되어진 비산먼지는 부스에 장착된 환풍 시스템을 이용하여 비산먼지를 완벽하게 제거 후 측정하였다. 디스크의 회전 속도와 브레이크 제동압력은 100 km/hr와 1.0 kg/cm²로 각각 설정하였으며, 제동시간은 10초로 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 측정위치별 측정되는 양을 포집 양으로 설정하였다. 브레이크 캘리퍼는 차량마다 요구하는 최소 제동마력에 따라 브레이크 시스템의 사양이 다르고 패키징 과정에서 서스펜션과 스티어링 시스템의 간섭과 영향 등의 여러 이유에 따라 차량의 브레이크 캘리퍼의 위치가 결정된다. 따라서 브레이크 시스템을 차량의 전방과 후방 방향으로 나누었을 때, 디스크를 중심으로 전방에 위치하면 전치형, 후방에 위치하면 후치형이라 구분할 수 있다. 이에 디스크의 장착 위치에 따라 포집기를 장착하여, 전치형 포집기(Fig. 3(b))와 후치형 포집기(Fig. 3(d))로 구분하였다. 브레이크 작동 시 브레이크 패드의 마모에 의해 비산되는 먼지의 거동을 확인하기 위하여 브레이크 디스크를 중심으로 6개소를 분할하고 브레이크 디스크에 장착된 캘리퍼를 기점으로 60 mm의 간격으로 먼지 측정기를 이동하면서 비산먼지를 측정하였다. 그리고 주행 풍의 조건을 위해 실험부스에 11 m/s의 풍속을 가했으며, 풍속 조건과 포집기의 장착 유무에 따른 전치형 포집(Fig. 3 (a), (b))과 후치형 포집 방법(Fig. 3(c), (d))을 각각 나타내었다. 6개소의 측정위치는 캘리퍼로부터 디스크의 회전방향으로 1번부터 6번까지 측정 위치를 부여하였으며, 캘리퍼의 주위는 4번에서 6

번 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 크기를 측정하였다.

2.3 먼지 포집기의 장착과 미장착에 따른 비산먼지 측정 결과 비교

패드의 마모에 의해 브레이크 디스크 주변에서 발생하는 비산먼지는 먼지 측정기를 이용하여 측정 위치에 따라 총 5회씩 측정하여 그 평균값을 산출하였으며, 전치형 캘리퍼와 후치형 캘리퍼에서 먼지 포집기의 미장착과 장착에 따른 결과를 Fig. 4에 각각 나타내었다.

결과 그래프의 X 축은 브레이크 디스크를 중심으로 6개소로 나눈 측정 위치를 나타내며, Y 축

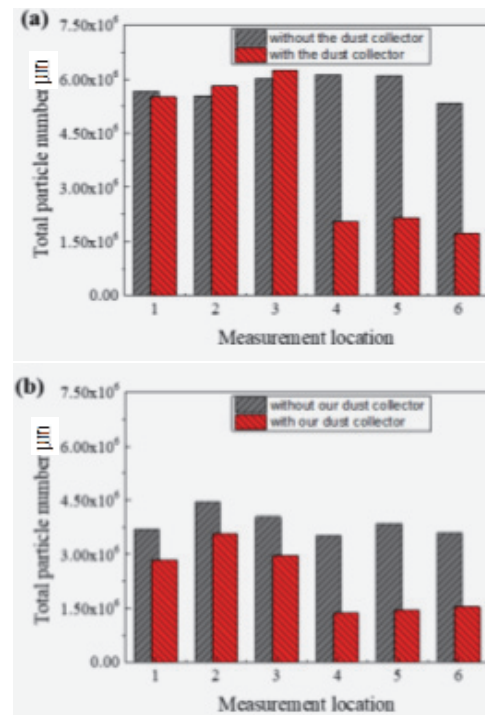


Fig. 4 Measuring results according to 60 mm measuring distance

은 비산먼지 크기별(0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.0 μm , 5.0 μm , 10.0 μm)에 따른 측정량을 한 번에 비교할 수 있도록 로그스케일로 표현하였다. 먼지 전치형 캘리퍼에서 먼지 포집기의 유무에 따른 측정 결과를 토대로 비교 분석하면 포집기 장착 전 비산먼지의 분산 형태가 풍속의 조건에서도 비교적 고르게 비산됨을 알 수 있었으며, 포집기가 장착된 4~6번 위치에서는 약 60 % 이상의 비산먼지가 감소됨을 확인하였다. 이와 반대로 후치형의 포집 결과는 포집기 유무에 따라 포집기 장착 위치에서는 전치형과 마찬가지로 50 % 이상의 비산먼지가 감소됨을 알 수 있었는데 전치형과는 다르게 포집기전의 비산먼지가 위치별에 따라 많이 감소되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 풍속의 방향과 캘리퍼의 장착 위치가 후치형임을 감안하면 패드 마모 시 비산먼지가 대기 중에 비산되기 전 풍속의 방향으로 인해 포집기 필터에 대부분 먼지 포집되었음을 나타낸다.

브레이크 패드의 마모에 의한 비산먼지는 Fig. 5(a)에서와 같이 일반적으로 패드나 캘리퍼 주변에 붙어 있거나 공기 중으로 비산되지만, 제작한 우리의 먼지 포집기의 단순한 장착만으로 비산되는 먼지의 50% 이상은 필터에 의해 단순하게 필터링할 수 있으며, 필터링 전후의 필터의 상태를 Fig. 5(b)와 4(c)에 비교하여 나타내었다.

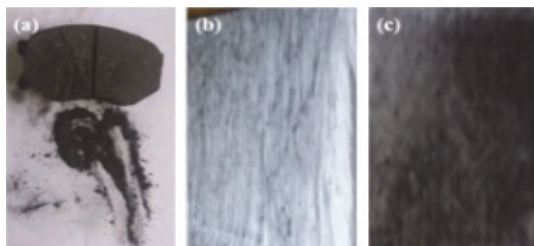


Fig. 5 (a) Scattering dust attached around the pad, (b) and (c) a micro-filter before and after filtering.

2.4 포집기 장착에 의한 캘리퍼의 온도 변화 측정 결과 및 분석

자동차 브레이크는 급정거나 급감속 시 되면 브레이크 캘리퍼가 빠르게 과열되어 작동이 원활하지 않을 수가 있어, 제작된 포집 장치가 캘리퍼에 설치되어 캘리퍼의 냉각에 미치는 영향을 연구하기 위해 Fig. 6(a)와 같이 캘리퍼의 냉각 홀 근처에 온도센서를 부착하였다. 사용된 캘리퍼는 약 25mm × 25mm 크기의 냉각 배출부가 있는 구조로 실제 차량에서 좌측 캘리퍼에는 포집기를 장

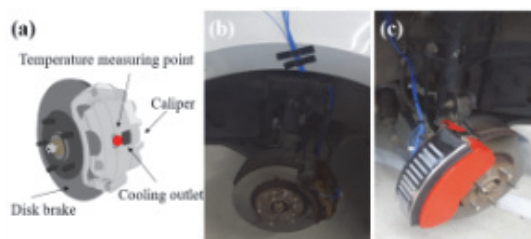


Fig. 6 (a) Measuring method of temperature at the cooling outlet of the rearward caliper, (b) Temperature measurement system of the rearward caliper without our dust collector, and (c) with our dust collector

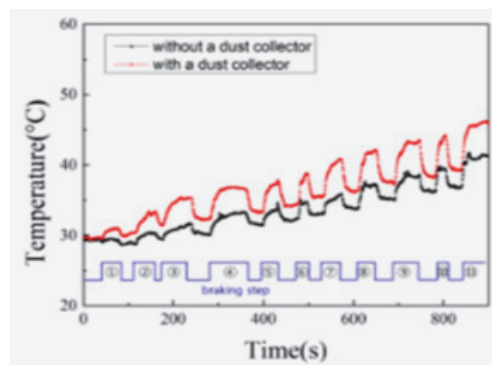


Fig. 7 Comparison of the results of temperature changes at a caliper depending on the presence or absence of our dust collectors during rapid deceleration.

착하지 않았고(Fig. 6(b), 우측 캘리퍼에는 제작된 포집기를 장착(Fig. 6c)하였다.

차량의 속도는 100km/h까지 일정하게 증가시키면서 주기적으로 브레이크를 급제동을 하였으며, 온도변화를 실시간으로 측정하여 Fig. 7에 나타내었다.

브레이크 급제동 시 제작된 포집기가 장착된 캘리퍼와 장착하지 않는 캘리퍼의 온도 변화는 최대 5°C 이내에서 온도의 상승과 냉각이 잘 이루어지는 것을 확인하였다. 이는 필터와 포집기의 프레임에 의한 영향으로 온도 차이가 발생함을 알 수 있지만 제작된 포집기의 구조가 큰 온도변화를 발생시키지 않으면서 포집을 할 수 있는 적절한 구조라고 간주할 수 있다. 또한 캘리퍼의 냉각배출구 구조와 포집기 구조 등을 개선한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

3. 결론

본 연구에서는 자동차의 브레이크 작동 시 페드의 마모로 인해 발생하는 비산먼지를 포집할 수 있는 포집기를 개발하였고, 포집기의 장착에 따른 비산먼지 포집 성능을 평가하였다. 자동차 제동 시 브레이크의 마모에 의해 발생하는 비산먼지는 브레이크 디스크를 중심으로 먼지 측정기를 이용하여 측정하였으며, 캘리퍼의 냉각부를 통해 브레이크 디스크를 중심으로 고르게 분포되어 있음을 확인하였다. 이를 기반으로 마이크로 필터망이 있는 먼지 포집기를 제작하여 캘리퍼의 냉각 배출부에 장착하였으며, 냉각 배출부에서 방출되는 비산먼지를 포집기의 필터를 통해 최대 60% 이상의 비산먼지를 포집할 수 있었다. 또한 제작된 포집기 장착에 따라 캘리퍼의 냉각에 미치는 영향을 확인하고자 차량의 주행 시 반복적인 급감속에 따

른 캘리퍼의 온도변화를 비교하였으며, 포집기의 장착 유무에 따라 비교적 낮은 온도 차이로 인해 포집기로 인한 캘리퍼의 냉각효율에 큰 영향이 없음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(과제관리번호: 2021RIS-002)

참고문헌

- [1] U. Olofsson, "A study of airborne wear particles generated from the train traffic—Block braking simulation in a pin-on-disc machine", *Wear*, Vol.271, pp.86-91, (2011).
- [2] S. Abbasi, J. Wahlström, L. Olander, C. Larsson, U. Olofsson and U. Sellgren, "A study of airborne wear particles generated from organic railway brake pads and brake discs", *Wear*, Vol.273, pp.93-99, (2011).
- [3] L. Garland, L. Jones, C. Szanto, L. Gleeson, J. Sammut, B. Blannin, K. Hampshire, K. King, "Report: Air Pollutant Inventories for England, Scotland, Wales and Northern Ireland: 2005-2020", (2022).
- [4] D. Diana, & Ł. Szymon. "Handling high-dimensional data in air pollution forecasting tasks", *Ecological Informatics*, Vol.34, pp.70-91, (2016).
- [5] H. Jung, B. Kim, J. Ryu, S. Maskey, J. Kim, J. Sohn and C. Ro, "Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using

- quantitative single-particle analysis, *Atmos. Environ.*, Vol.44, pp.2287-2293, (2010).
- [6] F. Amato, F. R Cassee, R. Gehrig, M. Gustafsson, W. Hafner, R. M Harrison, M. Jozwicka, F.J Kelly, T. Moreno, A. S H Prevot, M. Schaap, J. Sunyer, X. Querol, "Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions, *Journal of Hazardous Materials*", Vol.275, pp.31-36, (2014).
- [7] F. Amato, S. Nava, F. Lucarelli, X. Querol, A. Alastuey, M. Pandolfi, "A comprehensive assessment of PM emissions from paved roads: Real-world Emission Factors and intense street cleaning trials, *Science of the Total Environment*", Vol.408, pp.4309-4318, (2010).
- [8] K.Y. Kim, Y.S. Kim, Y.M. Roh, C.M. Lee and C.N. Kim, "Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul Metropolitan Subway stations, *J. Hazard. Mater.*", Vol.154, pp.440-443, (2008).
- [9] Cusack, M., Talbot, N., Ondráček, J., Minguillón, M. C., Martins, V., Klouda, K.Ždímal, V. "Variability of aerosols and chemical composition of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ on a platform of the Prague underground metro", *Atmospheric Environment*, Vol.118, pp.176-183, (2015).
- [10] D. Park and K. Ha, "Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environ. Int.*", Vol.34, pp.629-634, (2008).
- [11] S.C Rho, Y. H. Kim, S. H. Kim, "A study on the Electrostatic Precipitator evolution for PM-10 elimination of subway station", 2004 Spring Conference of the Korean Society for Railway, pp.256-262, (2004).
- [12] S.B. Kwon, W. Jeong, D. Park, K. T. Kim and K. H. Cho, "A multivariate study for characterizing particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁) in Seoul metropolitan subway stations, Korea", *Journal of Hazardous Materials*", Vol.297, pp.295-303, (2015).
- [13] H. H. Lee, C. H. Um, S. K. Jeoung, Y. K. Ko, P. C. Lee, H. W. Lee, and J. U. Ha, "Study on the Generated Particular Matters of TBR Tire with Different Tread Rubber Formulation", *Polym. Korea*, Vol.45(2), pp.303-308, (2021).
- [14] 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(4), pp.152-159, (2014).
- [15] 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).
- [16] 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(7), pp.445-452, (2020).
- [17] 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(2), pp.196-201, (2018).
- [18] W. Jeong, S. B. Kwon, S. Ko, D. Park "Dust collection system optimization with air blowing and dust suction module" *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*", Vol.17(1), pp.290-297, (2016).
- [19] B. R. Son, "Brake dust collecting device for a vehicle", Korea Patent 10-2261576. (2021).