

자동차 브레이크 미세먼지 포집을 위한 미니 사이클론의 난류모델에 따른 포집효율 변화

한동연*, 이영림**.#

*공주대학교 기계자동차공학부 기계설계공학전공, **공주대학교 기계자동차공학부

Variation of Collection Efficiency with Turbulence Model in a Mini Cyclone for Collecting Automobile Brake Fine Dust

Dong-Yeon Han*, Young-Lim Lee**.#

*Major in Mechanical Design Engineering, Div. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju Nat'l Univ., **Div. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju Nat'l Univ.

(Received 27 November 2020; received in revised form 17 December 2020; accepted 04 January 2021)

ABSTRACT

Fine dust generated from vehicle brakes accounts for a significant amount of fine dust from non-exhaust system. Since such brake fine dust contains a large number of heavy metal components that are fatal to the human body, a device capable of collecting them needs to be developed. A mini cyclone, one of the devices that can effectively collect fine dust, has the advantage of relatively simple shape and high collection efficiency. Therefore, in this study, the collection efficiency of the mini-cyclone was numerically analyzed using CFD in order to find out whether such a mini-cyclone is suitable for collecting brake fine dust. As a result, the cut-off diameter was predicted to be about $1.5\mu m$, which means that the particle trapping load of the filter can be drastically reduced. Therefore, there is a possibility that the mini-cyclone can be used to collect fine dust from disc brakes.

Key Words : Mini Cyclone(미니 사이클론), Brake Fine Dust(브레이크 미세먼지), Collection Efficiency(포집효율), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

미세먼지 문제가 전 세계적으로 대두되면서 차량에서 배출되는 배기가스 관련 규제가 강화되고, 결국 배기가스 내부의 입자상 물질(Particulate Matters, PM)이 상당히 감소되었다^[1]. 이에 따라 배기계 미세먼지가 아닌 주로 브레이크, 도로, 타이어로부터 나오는 비배기계 미세먼지를 감소시키는 노력이 중

요시되고 있다^[2]. 비배기계 미세먼지 중 브레이크 디스크와 브레이크 패드의 마찰로 인한 미세먼지가 상당량을 차지하고 있으며^[3], 인체에 치명적인 중금속 성분들이 다수 포함되어 있기 때문에 이러한 브레이크 미세먼지를 포집할 장치의 필요성이 커지고 있다.

미세먼지를 포집하기 위한 장치 중 하나인 미니 사이클론은 유체 속에 포함된 입자에 선회 유동을 이용해 원심력을 작용하여 분리 및 포집하는 장치이다. 이러한 미니 사이클론은 형상이 단순하여 쉽게 제작이 가능하고, 높은 분리효율을 가지고 있다.

Corresponding Author : ylee@kongju.ac.kr

Tel: +82-41-521-9261, Fax: +82-41-555-9123

또한 입자에 기계적인 원심력을 주는 장치에 비해 본체에 가동 부분이 없는 사이클론 분리기는 낮은 제조비용과 함께 필터에 걸리는 부하를 감소시킴으로써 사용주기를 늘려준다는 장점이 있고 극한 조건에서의 적응성이 우수하다. 그러나 미세입자의 크기가 작을수록 포집효율이 낮고, 압력손실이 발생한다는 단점이 있다^[4].

사이클론 내부의 복잡한 유동특성은 여러 형상의 사이클론 성능 예측에 관해 신뢰성과 정확성에 대한 문제를 야기하였다^[5]. 특히 여러 수치해석 방법 중 CFD(computational fluid dynamics)를 이용하여 다양한 방법의 접근을 통해 사이클론 분리기 관련 연구가 이루어져 왔으며, 최근까지도 활발히 진행되는 중이다. Park과 Jin^[6]은 사이클론 분리를 연마 장비의 먼지 포집장치에 적용시키는 연구를 진행하였다. Hoekstra^[7]는 두 가지 형상의 사이클론 유동의 특성을 파악하기 위해 실험과 수치해석을 진행하였다. Lee 등^[8]은 고효율사이클론의 분리효율과 내부 유동을 수치적인 방법으로 증명하였다. Souza 등^[9]은 여러 형상의 사이클론 분리의 성능을 LES(large eddy simulation) 해석을 통해 연구를 진행하였다. 하지만 LES 해석은 해석시간 과다로 사이클론을 장착한 브레이크 디스크 입자유동 해석에는 다소 부적절하다.

아직까지 미니사이클론을 이용한 브레이크 미세 먼지 포집에 대한 연구는 전무하다. 이는 아직 브레이크 미세먼지에 대한 규제가 강제성이 없기 때문이다. 하지만, 유럽 등 여러 선진국에서는 2025년을 목표로 비배기계 미세먼지에 대한 규제 법안을 준비하고 있다^[10]. 이에 따라 이들 국가에서는 선제적으로 브레이크 필터 개발을 서두르고 있다.

따라서, 본 연구에서는 Souza 등^[9]이 제시한 미니 사이클론을 이용하여 브레이크 미세먼지를 효과적으로 포집할 수 있는지에 대한 타당성을 알아보았다. 또한, 다양한 난류모델과 DPM(discrete phase model)을 사용하여 해석시간이 긴 LES 모델을 대체할 수 있는지도 알아보았다.

2. 수치해석 방법

Fig. 1(a)는 미니 사이클론의 개략도와 경계조건을 보여준다. 또한, Fig. 1(b)에 미니 사이클론의 세

부 치수를 표시하였다.

난류모델의 경우 $k-\epsilon$ RNG(re-normalization group) 모델, RSM(Reynolds stress model), URSM(unsteady Reynolds stress model)을 사용하였고, 수치해석의 검증을 위해 Souza 등^[9]의 LES 해석결과와 비교하였다. 와점성계수 모델의 하나인 $k-\epsilon$ RNG 모델은 난류모델링을 위해 2개의 미분방정식만 추가적으로 풀면 되어 가장 계산 시간이 빠르나 물리적으로는 RSM 모델이 와점성계수의 등방성을 가정하지 않아 강한 스윙이나 회전 유동과 같은 복잡한 유동에 더 적합하다. 또한 URSM 모델은 유동이나 입자의 비정상상태 거동 해석에 더 유리하다. LES는 시간 평균 Navier-Stokes 방정식을 푸는 대신 필터링 된 Navier-Stokes 방정식을 풀어 가장 물리적으로 타당한 모델이나 와점성계수 모델 대비 계산시간이 너무 오래 걸리는 단점이 있다.

공기의 밀도는 1.205kg/m^3 , 점성계수는 $1.82 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 이다. 사이클론 입구에서 공기속도는 Souza 등^[9]의 LES 결과와 비교하기 위하여 10.67 m/s 로 가정하였는데 이는 중형 승용차 기준 디스크 회전속도가 약 500 rpm일 때의 디스크 냉각 유로 출구에서의 냉각풍속에 해당한다^[11].

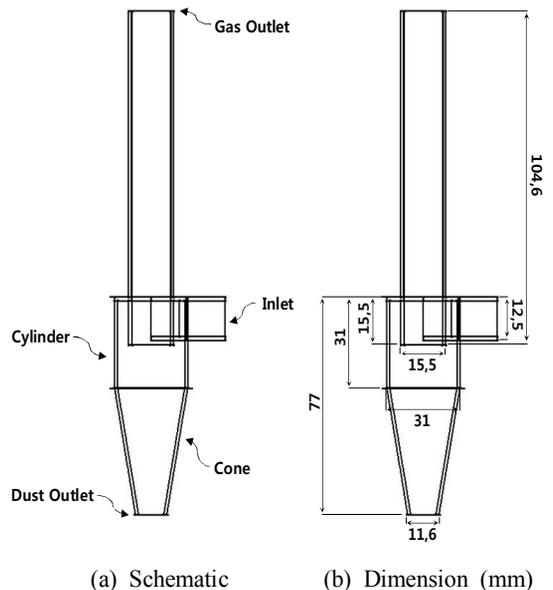


Fig. 1 Geometry of a mini cyclone



Fig. 2 Mesh system

입자 거동은 DPM을 이용하였고, 입자분포는 $0.5\sim 6\mu\text{m}$ 직경의 입자들이 Rosin-Rammler 모델을 따른다고 가정하였다. 입자의 밀도는 $1050\text{kg}/\text{m}^3$ 이고 유동 해석에는 Ansys Fluent[12]를 이용하였다.

해석에 사용한 격자시스템은 Fig. 2에 나타냈다. 이때 셀 개수는 약 50만개를 사용하였다. 해의 격자 의존성을 알아보기 위하여 셀 개수를 약 100만개를 사용하였을 때 RSM 기준 입자 포집효율 변화는 약 2% 미만이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 사이클론 공기속도 및 압력 비교

본 연구에서는 4개의 난류모델(LES, RSM, URSM, RNG) 사이클론 정 중앙의 평면($X = 0$)에서 $Y = 0.03\text{m}$, $Y = 0.11\text{m}$ 에서의 속도분포와 $Y = 0.03\text{m}$ 에서 압력분포를 비교하였다.

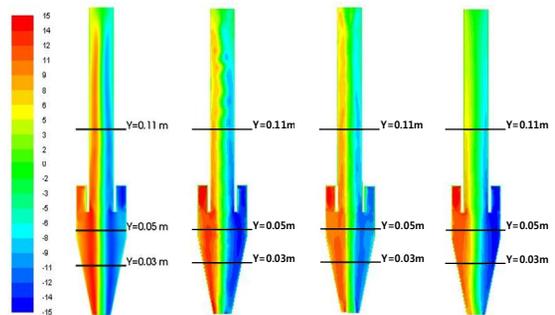
Fig. 3은 접선 방향의 전체 속도 분포를 보여준다. 최고 속도와 최저 속도는 각각 15m/s , -15m/s 이다. RSM과 URSM은 RNG 모델 대비 LES 모델과 상대적으로 잘 일치한다. RNG 모델의 경우 다른 모델들과 속도가 일치하지 않아 정확성이 떨어진다고 사료된다.

Fig. 4(a)와 (b)는 $Y = 0.03\text{m}$ 일 때 접선 방향과 축 방향의 속도 분포를 각각 나타낸다. 접선 방향 속도 분포의 경우 RSM과 URSM은 LES와 비교적 잘 일치하는 속도 분포를 보여주나, RNG 모델의 경우 속도 피크 값의 위치가 상대적으로 양쪽으로 치우쳐져 있다. 축 방향 속도분포의 경우 URSM이 LES 모델과 가장 근접한 결과를 나타낸다. RSM의 경우 경향은 유사하지만, 0.01m 의 위치에서 속도 피크가 LES 결과에 비해 다소 낮았다. RNG 모델은 다른 모델에 비해 전혀 다른 속도 분포를 보여준다.

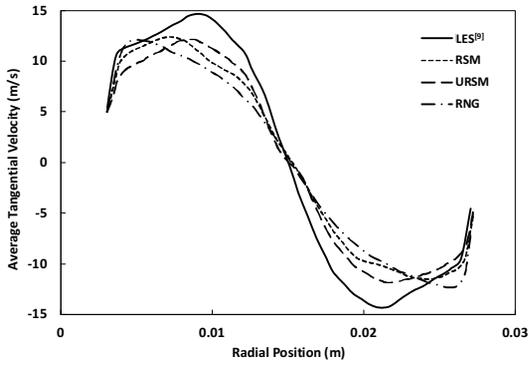
Fig. 5(a)와 (b)는 $Y = 0.11\text{m}$ 일 때 접선 방향과 축 방향의 속도 분포를 각각 나타낸다. 접선 방향 속도 분포의 경우 RSM과 URSM, RNG 모델 전부 LES 모델과 유사한 속도 분포를 보여주나 RNG 모델이 LES와 가장 큰 피크 값의 차이가 난다. 축 방향 속도의 경우도 RSM과 URSM, RNG 모델 전부 LES 모델과 유사한 분포를 보여준다. 하지만 RNG 모델의 경우가 속도의 피크 값에서 LES와 가장 큰 차이가 나므로 RNG 모델이 다른 RSM과 URSM 대비 상대적으로 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 $Y = 0.03\text{m}$ 에서 반경에 따른 압력 분포를 보여준다. RSM과 URSM의 압력분포는 거의 유사하나 LES 압력분포와는 피크값에서 다소 차이를 보여준다. 압력 분포의 경우 RNG 모델도 RSM이나 URSM과 비교할 때 거의 유사한 경향을 보여준다.

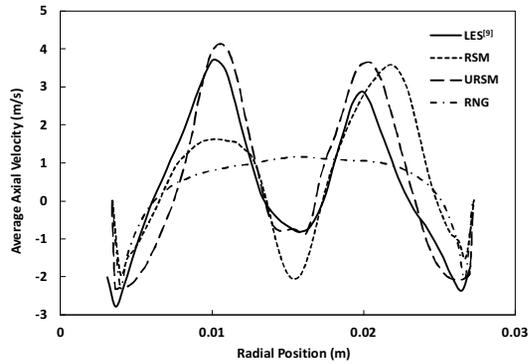
이와 같이 미니 사이클론의 성공적인 유동해석을 위해서는 RMS이나 URSM은 적절하다고 판단되나 RNG모델은 정확도가 상대적으로 떨어진다고



(a) LES^[9] (b) RSM (c) URSM (d) RNG
Fig. 3 Contour of the average tangential velocity

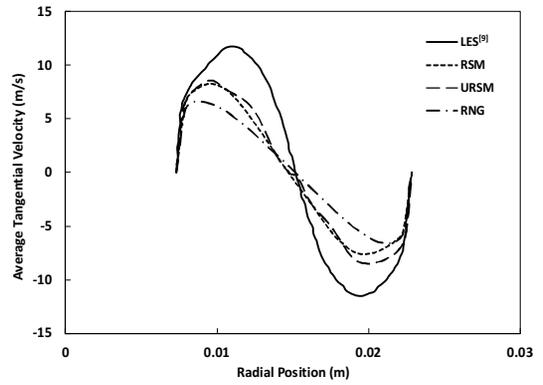


(a) Tangential velocity

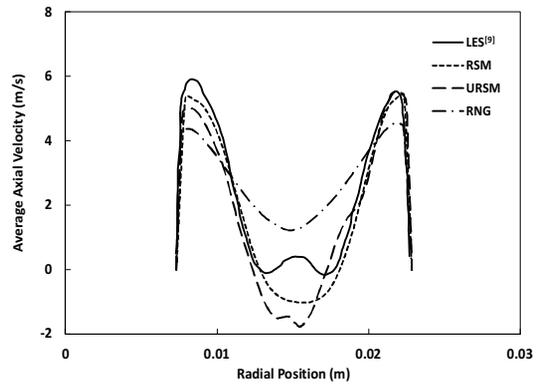


(b) Axial velocity

Fig. 4 Average tangential and axial velocity profiles for $Y = 0.03m$



(a) Tangential velocity



(b) Axial velocity

Fig. 5 Average tangential and axial velocity profiles for $Y = 0.11m$

3.2 전체 유동장 비교

Fig. 7은 난류 모델에 따른 미니 사이클론 내의 유선 분포를 나타낸다. RSM, URSM, RNG 모델 모두 LES와 유사한 유선 패턴을 보여주고 있다. 입구를 통해 들어온 유체는 나선상으로 빠르게 회전하며 하강하여 집진구에서 반전된 후, 반대방향으로 회전하며 상승하여 출구를 통해 빠져나간다. 4개의 모델 모두 원통부와 원뿔부 부근에서 가장 높은 속도를 보였고, 출구관을 통해 올라가면서 속도는 감소한다. 여러 모델 중 URSM이 LES 모델과 가장 유사한 유선 패턴을 보여주는데 특히 원통부에서 회전하는 유선 패턴이 가장 유사하다. RSM과 RNG 모델은 원통부와 원뿔부에서의 공기속도가 다소 높게 예측되었다.

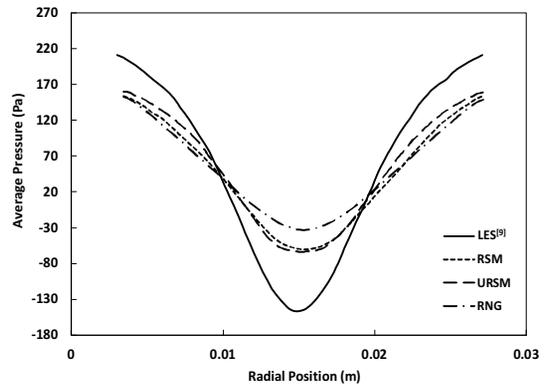


Fig. 6 Average pressure profiles for $Y = 0.03m$

3.3 포집효율 비교

Fig. 8은 미니 사이클론의 난류모델에 따른 포집 효율을 보여준다. 직경 $0.5\sim 6\mu\text{m}$ 의 입자들이 직경 별로 얼마나 포집되었는지를 나타내며 집진구에 부딪힌 입자들은 전부 포집되었다고 가정하였다. LES 모델을 기준으로 나머지 모델들(RSM, URSM, RNG)이 얼마나 유사한 효율을 보이는지 비교하였다. 네 개의 난류모델 모두 입자의 크기가 커질수록 포집 효율이 높아지며, 직경 $3\mu\text{m}$ 이상의 입자들은 거의 완전히 포집되는 결과를 나타내었다. 반면에 직경 $1.5\mu\text{m}$ 이하의 미세입자들은 난류모델에 따라 차이가 두드러졌다.

RSM의 경우 전반적으로 LES 모델과 유사한 경향을 보여주지만, 입자의 직경이 $0.5\sim 1.5\mu\text{m}$ 일 때 LES 모델보다 약 20%정도 더 많이 포집되었다. URSM은 RSM과 같이 전체적인 포집효율이 LES 모델과 비슷하게 나타났다. 그러나 직경 $1.5\mu\text{m}$ 입자의 포집효율이 다른 모델 대비 많이 떨어진 결과를 보여주었다. RNG 모델의 경우 LES 모델에 비해 경향이 다소 상이하다. 특히 직경 $1.5\mu\text{m}$ 이하의 미세입자들이 다른 모델들 보다 월등히 잘 포집된 결과를 나타내었다. 입자의 직경이 $0.5\mu\text{m}$ 일 때 LES 모델보다 약 30% 정도의 입자들이 더 포집되었다.

이와 같이 난류모델에 따라 미세입자 포집효율은 차이가 발생하는데 특히 입자 직경이 작아지면 이러한 차이가 두드러진다.

4개의 난류모델별 컷 오프(Cut-off) 직경은 Fig. 9에 나타내었다. 이 때 컷 오프 직경은 포집효율이 50%에 도달할 때의 입자 크기를 의미한다.

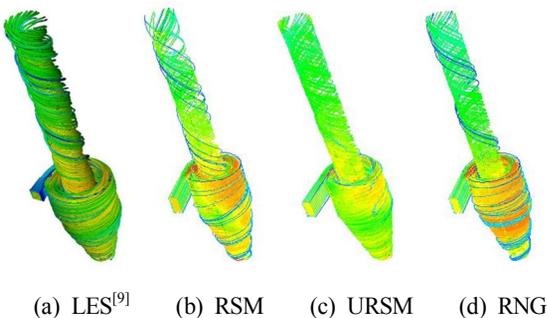


Fig. 7 Streamlines colored by velocity magnitude in the mini cyclone

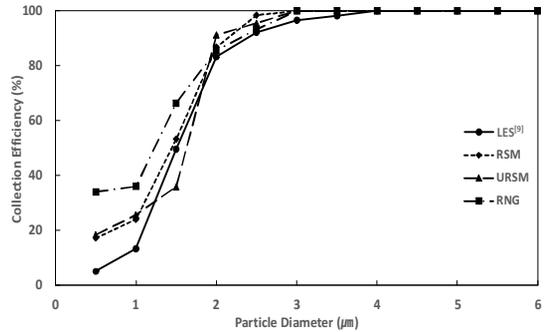


Fig. 8 Collection efficiency curves with turbulence model

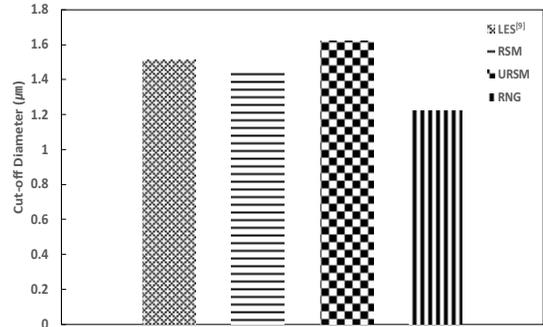


Fig. 9 Cut-off diameters with turbulence model

모델 별 컷 오프 직경의 차이는 $0.4\mu\text{m}$ 정도이며 RSM과 LES 모델의 컷 오프 직경은 각각 $1.51\mu\text{m}$, $1.44\mu\text{m}$ 로 거의 일치한다. URSM의 컷 오프 직경도 LES 컷 오프 직경과 거의 유사한 약 $1.6\mu\text{m}$ 로 예측되었다. 하지만 RNG 모델의 컷 오프 직경은 약 $1.2\mu\text{m}$ 로 다른 모델들에 비해 가장 낮은 컷 오프 직경을 보여 준다. 이는 RNG 모델이 다른 모델에 비해 상대적으로 높은 포집효율을 예측하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 여러 가지 난류모델(LES, RSM, URSM, RNG)을 이용한 시뮬레이션으로 미니 사이클론의 내부유동과 입자의 분리효율에 대해 고찰하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 고려한 미니 사이클론의 경우 직경이 약 $2\mu\text{m}$ 이상인 입자에 대해서는 포집효율이 80% 이상이다. $2\mu\text{m}$ 이하의 매우 작은 입자를 포집하기 위해서는 해파 필터급의 필터가 추가적으로 사용해야 한다.
- 2) 미니 사이클론의 컷 오프 직경은 약 $1.5\mu\text{m}$ 로 나타났다. 이는 사이클론 사용 시 필터가 포집해야 하는 미세입자 양을 대폭 감소시켜 필터의 내구성을 획기적으로 증대할 수 있다는 것을 의미한다.
- 3) RSM과 URSM 결과는 LES 모델 결과와 전반적으로 잘 일치한다. 따라서, 이러한 모델을 사용하여 자동차 미세먼지 포집용 미니 사이클론 개발 기간을 단축시킬 수 있다.

향후 미니 사이클론을 브레이크에 장착하여 실제 브레이크 미세입자의 포집효율에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20003782').

REFERENCES

1. Woo, S. H., Kim, Y. R. and Lee, S. H., "Characteristic of Brake Wear particles under Various Test Driving Cycles," Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 36, No. 3, pp. 346-359, 2020.
2. Lee, Y. L. and Hwang, I. S., "Flow Analysis for the Development of Automobile Brake Fine Dust Filter," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 44, No. 4, pp. 245-253, 2020.
3. Timmers, V. R. and Achten, P. A., "Non-exhaust PM Emissions from Electric Vehicles," Atmospheric Environment, Vol. 134, pp. 10-17, 2016.
4. Lee, C. W., "A Numerical Analysis on Flow Characteristic in a Standard Cyclone Dust Separator," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 97-103, 2011.
5. Hoffman, A. C. and Stein, L. E., "Gas Cyclones and Swirl Tubes," Springer, New York, 2008.
6. Park, M. J. and Jin, T. S., "Flow Characteristic of Cyclone Dust Separator for Marine Sweeping Machine," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 24, No. 5, pp. 512-517, 2014.
7. Hoekstra, A. J., "Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators," Doctorial thesis, Delft University of Technology, Kingdom of the Netherlands, 2000.
8. Lee, J. H., Kim, B. S., Hong, C. H. and Park, K. W., "Numerical Analysis of Flow Characteristics and Separation Efficiency for Stairmand Cyclone," The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 95-99, 2011.
9. Souza, F. J., Salvo, R. V. and Martins, D. M., "Simulation of the Performance of Small Cyclone Separators through the Use of Post Cyclones (PoC) and Annular Overflow Ducts," Separation and Purification Technology, Vol. 142, pp. 71-82, 2015.
10. Bock, L., Kolczyk, M., Drummond, R., Klein, G-M., Lehmann, M., Jessberger T., Kümmerling, V., Thébault, E, Beck, A., "The Brake Dust Particle Filter for Fine Dust Reduction," Euro Brake, EB2019-EBS-014, Dresden, Germany, 2019.
11. Lee, Y. L. and Hwang, I. S., "Flow Analysis for the Development of Automobile Brake Fine Dust Filter," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 44, No. 4, pp. 245-253, 2020.
12. Ansys Fluent version 15, Ansys Inc.