

대한기계학회 주최

제12회 전국학생설계경진대회(2022년)

설계 최종 보고서

참가부	고등부 () / 대학부 (o)				
참가분야	공모주제 (o) / 자유주제 ()				
참가팀명	MZ먼지				
설계제목	브레이크 미세먼지 제거 장치 설계				
지도교수/교사	(소속) 홍익대학교 (성명) 신정현				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	이혁진	홍익대학교 기계시스템디자인공 학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	이혁진	홍익대학교 기계시스템디자인공학과 / 4학년	
2	서장원	홍익대학교 기계시스템디자인공학과 / 4학년	
3	이지수	홍익대학교 기계시스템디자인공학과 / 4학년	
4	박이정	홍익대학교 기계시스템디자인공학과 / 4학년	

설계 요약문

참가분야	공모주제 (o) / 자유주제 ()
참가팀명	MZ먼지
설계제목	브레이크 미세먼지 제거 장치 설계
대표자명	이혁진
요약문	브레이크 미세먼지는 제동 시 브레이크 패드와 캘리퍼의 마찰로 인한 마모에 의해 생성된다. 그리고 제동장치가 만들어내는 미세먼지의 양은 디젤차 배기가스 배출량의 2배 이상이지만 비배기 미세먼지에 관한 규제가 거의 없는 실상에서 빠른 시일 내에 차량의 배출가스보다 마모로 인한 미세먼지의 문제가 더욱 심각해질 것으로 예상된다. 따라서 우리는 기존에 브레이크 패드 상단에 설치할 수 있는 필터형 먼지 포집 장치 및 다양한 연구를 참고하여 그들의 단점을 보완할 수 있는 방법으로 진공청소기의 원리에서 착안한 장치의 내, 외부의 공기압 차이를 이용한 먼지를 포집하는 방식을 생각해보았다. 우선 CFD를 활용한 공기 유동 해석 결과를 이용하여 집진 효율이 가장 높아지는 장치의 위치를 결정하고 suction이 가장 효과적으로 일어나는 압력 값을 설정한다. 이를 바탕으로 공기 및 다양한 입자가 들어오는 inlet, 먼지가 걸러지는 필터, 전체적 압력 강하를 발생시켜주는 모터를 선택 및 설계하고 이 내부 부품들의 가장 효율적인 배치와 이들을 패키징할 수 있고 캘리퍼와의 탈부착이 쉬운 외부 형상에 관한 설계가 필요하다. 설계가 마무리된 후 실제 프로토타입을 제작하여 최대한 미세먼지 거동을 시각화할 수 있는 실험 조건 조성 후 CFD 상의 미세먼지 집진 효율과 실제 실험 상의 효율을 비교해본다. 최종적으로 고효율의 미세먼지 제거 장치가 제작된다면 브레이크에서 발생하는 미세먼지를 크게 줄일 수 있을 것이라고 기대된다.
설계프로젝트의 입상 이력	※ 교외 출품실적이 있는 경우 작성 - 출품작명 : - 출품대회명 : - 수상 내역 : ※ 기 입상 프로젝트의 설계내용 및 차별설에 관한 세부사항은 별지(자유양식)를 사용하여 기술할 것

고효율 브레이크 미세먼지 집진 장치의 개발

서장원* · 이지수* · 이혁진* · 박이정*

*홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Design of High Efficiency Brake Fine Dust Collecting System

Jang Won Seo*, Ji Soo Lee*, Hyuk Jin Lee* and Lee Jung Park*

*Dept. of Mechanical System Design Engineering, Hongik Univ.,

Key Words: Brake Fine Dust(브레이크 미세먼지), Brake Filter(브레이크 필터), CFD(전산 유체역학), Suction Motor(흡입 모터), Flow Visualization(유동 가시화)

초록: 친환경 차량의 등장으로 배기가스에 의한 미세먼지 발생 비율은 시간이 지남에 따라 점차 낮아져 나중에는 결국 비배기 미세먼지가 대부분이 될 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 현재 연구된 브레이크 미세먼지 집진 필터는 효율이 약 40% 정도밖에 미치지 못한다. 본 연구에서는 차량 주행 시 타이어 및 디스크 주위의 유동을 해석하고, 유동 가시화 실험 및 위치별 포집량 비교 실험을 통해 포집량이 최대가 될 수 있는 최적 위치를 선정하였다. 미세먼지 포집을 위해 Suction Motor의 Suction power를 최적화한 후 디스크 주위의 미세먼지 집진 실험을 하였으며 이는 기존의 필터형 집진장치 효율의 2배 정도 되는 84.3%의 효율을 나타내었다. 결과로써, 본 연구에서는 브레이크 디스크 미세먼지 포집에 기존 필터형 방식과 달리 흡입 방식을 적용함으로써 고효율의 미세먼지 집진 장치 개발 가능성을 확인하였다.

Abstract: With the advent of eco-friendly vehicles, the proportion of fine dust generated by exhaust gas gradually decreases over time, and it is expected that non-exhaust fine dust will eventually become the majority. Nevertheless, the currently studied brake fine dust filter has only about 40% efficiency. In this study, the flow around tires and discs was analyzed during vehicle driving, and the optimal location where the collection amount could be maximized was selected through the flow visualization experiment and the comparison experiment of the collection amount by location. After optimizing the suction power of the suction motor to collect fine dust, a fine dust collection experiment was conducted around the disc, which showed an efficiency of 84.3%, about twice that of the existing filter-type dust collector. As a result, this study confirmed the possibility of developing a high-efficiency fine dust collector by applying the suction method, unlike the existing filter type, to the brake disc fine dust collection.

1. 서론

브레이크 미세먼지는 브레이크가 작동할 때 브레이크 패드와 디스크의 마찰로 인한 마모로 생성된다. 그리고 이때 발생한 미세먼지에는 금속 성분들이 포함되어 있어 심각한 대기 오염과 호흡기 질환을 유발하게 된다. 차량 제동 장치가 만들어내는 미세먼지의 양은 디젤차 배기가스 배출량의 2배 이상으로 현저히 높은 양을 보이며 미세먼지는 차량이 무거울수록, 제동 강도가 강할수록, 브레이크 온도가 높을수록 증가한다. 친환경차에 대한 관심과 개발이 증가하는 현재 추세에서 배터리와 여러 부품을 장착한 전기차는 일반적으로 내연기관보다 무거우므로 비배기 미세먼지가 약 20%가량 더 발생한다.

현재로서는 자동차에서 발생하는 미세먼지 중 비배기 미세먼지 발생 비율이 낮은 것으로 알려져 있으나, 최근 연구 논문들에 따르면 배기가스에 의한 미세먼지 발생 비율은 시간이 지남에 따라 점차 낮아져 나중에는 결국 비배기 미세먼지가 대부분이 될 것으로 예상된다.

이러한 예측에도 불구하고, 배기로 인한 미세먼지에 관한 연구들과 기술적 진보는 꾸준히 이루어졌지만, 브레이크 패드와 디스크의 마찰로 인한 미세먼지 등 비배기 미세먼지에 관한 연구는 상대적으로 적게 이루어지고 있다. 배기가스에 대한 규제는 강화되고 있지만, 비배기 미세먼지에 대한 환경 규제는 거의 없다시피 하다.

따라서 배기 발생 미세먼지의 양은 상당량 감소하고 있는 반면에, 비배기 발생 미세먼지의 경우 발생량의 차이가 작아서 앞으로는 자동차에서 발생하는 미세먼지의 대부분이 비배기 미세먼지에 의할 것임이 자명하다. ⁽¹⁾

비배기 미세먼지에 관한 대책으로 독일의 MANN+HUMMEL사는 브레이크 패드의 상단에 설치할 수 있는 포집 장치를 개발하였는데, 이는 동력 없이 필터만을 사용한 장치이며 이 필터에 디스크를 따라 유동하는 미세먼지가 가두어지며 포집되는 형식이고 곧 출시 예정이다. 또한 현대 모비스의 2021 보고서에 따르면 자체적으로 개발한 필터 포집 기구를 통해 브레이크에서 발생하는 미세먼지를 약 40% 정도 감소시켰다고 한다. ⁽¹⁾

생각보다 적은 수치의 결과가 나온 이유로는 필터 형태의 포집 장치는 브레이크 냉각에 좋지 않은 영향을 주고, 먼지의 입자 지름이 작은 경우는 운동량이 작아 필터에 직접 부딪히는 경우가 적어 포집이 어려웠던 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 연구들을 참고하여 기존의 필터형 브레이크 미세먼지 집진 장치의 한계를 극복할 방법을 찾아 고효율의 흡입형 차량 브레이크 미세먼지 집진 장치를 개발하였다.

2. 설계 및 해석

2.1 설계 문제의 정의 및 방법

2.1.1 설계 문제의 정의

기존 필터형 브레이크 미세먼지 집진장치의 효율은 40% 정도이고 이는 크지 않은 수치이다. 따라서 기존 필터형 브레이크 미세먼지 집진 장치의 한계를 극복할 수 있는 고효율의 브레이크 미세먼지 집진 장치의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구는 기존의 필터형 브레이크 미세먼지 집진장치보다 큰 효율을 보일 수 있는 흡입 방식의 브레이크 미세먼지 집진장치를 개발하였다.

2.1.2 설계 방법

본 연구는 기존 필터 방식의 브레이크 미세먼지 집진장치의 낮은 효율을 개선하기 위하여 진공청소기의 원리에서 착안해 공기압 차이를 이용하여 압력 강하를 생성해 미세먼지를 빨아들이는

흡입 방식을 적용하였다. 집진 장치는 미세먼지가 들어오는 inlet, 압력 강하를 만드는 흡입 모터, 장치에 들어온 미세먼지를 걸러주는 필터로 구성하였다.

CFD를 이용하여 차량 주행 시 디스크와 타이어의 공기 유동을 분석하고 최적의 효율적인 브레이크 미세먼지 포집을 위해서는 차량 주행 시 디스크와 타이어의 공기 유동 양상을 파악해야 한다. 따라서 CFD를 이용하여 차량 주행 시 디스크와 타이어의 공기 유동을 분석하고 최적의 장치 위치를 찾았다. CFD를 이용한 최적의 장치 위치를 찾은 이후에는, 흡입 모터의 Suction Power를 최적화하였다. 실제 차량에 적용할 수 있는 크기의 흡입 모터를 선정한 후, 모터에 사용된 Impeller의 각속도에 따른 압력 분포를 구하였다. Impeller의 압력분포를 바탕으로 모터의 최대 각속도에서 Suction Power가 최대가 되는 inlet 면적을 구하여 흡입 모터의 Suction Power를 최적화하였다.

마지막으로 설계한 브레이크 미세먼지 집진 장치의 포집 효율을 알아보기 위해 미세먼지 농도 측정 센서를 이용하여 평상시 미세먼지 농도와 흡입 모터 작동 시 미세먼지 농도를 비교해서 최종 장치의 집진 효율을 구하였다.

2.2 브레이크 미세먼지 거동 해석

2.2.1 유동 해석을 위한 가정

브레이크 미세먼지의 거동 특성을 알아내기 위해 CFD (Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)를 사용하였다. 유동해석을 위한 가정은 다음과 같다.

1) 미세먼지는 공기의 유동을 따라 이동한다.

브레이크 마모 미세먼지는 크기가 매우 작은 입자로 PM10, PM2.5의 분율이 86%와 63%에 달한다고 보고되었다. 또한 질량 분포 곡선은 2~4 μm 의 입경 범위에서 최대값을 갖는 단봉 분포인 것으로 보고되었으며 공기 중에 분포하는 브레이크 마모 미세먼지를 포집하여 분석한 결과에서도 브레이크 마모 미세먼지가 2~3 μm 의 크기를 가지는 단봉 분포로 이루어져 있는 것을 발견하였다. 또한 제동 과정 중에는 브레이크 패드와 디스크에 고온의 열이 발생하므로 패드와 디스크에 포함된 유기화합물 및 오일류의 증발/응축 과정에 의해서 100nm 이하의 입경 사이즈를 가지는 다량의 초미세입자가 발생하게 된다.

이렇게 크기가 작은 입자는 항력(Drag force)의 영향을 지배적으로 받는다. 따라서 대다수가 입경이 매우작은 입자로 구성된 브레이크 미세먼지의 거동은 주변 공기의 움직임을 따라간다. ⁽¹⁾ 따라서 브레이크에서 발생하는 미세먼지는 공기의 유동을 따라 이동한다고 가정하였다.

2) 3차원, 비압축성, 정상상태이다.

차량 제동 시 과정은 시간에 따라 속력이 변하는 과도 상태(transient state)이다. 하지만 달리는 차량이 정지하기까지 속력을 구간별로 나누어 각각을 정상 상태(steady state)로 가정하였다. 구간은 타이어의 회전속도를 100rad/s에서 0rad/s까지 10구간으로 나누었다.

3) 타이어의 슬립(slip)이 없고 각속도와 차량의 속력이 선형 관계이다.

타이어의 슬립(slip)이 없고 각속도와 차량의 속력이 선형관계라고 가정하면 타이어의 지름이 18인치라고 가정했을 때 차량의 속력은 82.3km/h(22.86m/s)에서 정지시까지 10구간으로 나누어 각각을 정상 상태로 가정할 수 있다.

2.2.2 CFD 경계 조건 및 해석 모델

2.2.2.1 CFD 경계 조건

차량의 주행풍, 타이어의 회전에 의한 유동 등을 모두 고려하기 위해 Fig 1과 같이 차량의 휠 하우스 부분을 검사 체적 (control volume)으로 설정하였다.



Fig 1 Control Volume

CFD 해석을 위한 경계조건은 Fig 2와 같다. Velocity inlet에서 주행풍의 속력으로 공기가 유입되고 차량 뒤쪽의 Pressure Outlet과 휠 바깥쪽의 Pressure Outlet으로 유입된 공기가 빠져나간다. 브레이크 디스크와 휠, 타이어는 100 rad/s로 회전하는 Rotation Wall, 지면은 차량의 속력인 22.86 m/s로 움직이는 Moving Wall 조건을 주었다. 그 외의 휠 하우스로 인해 막힌 벽 부분과 캘리퍼는 Wall 조건으로 설정하였다.

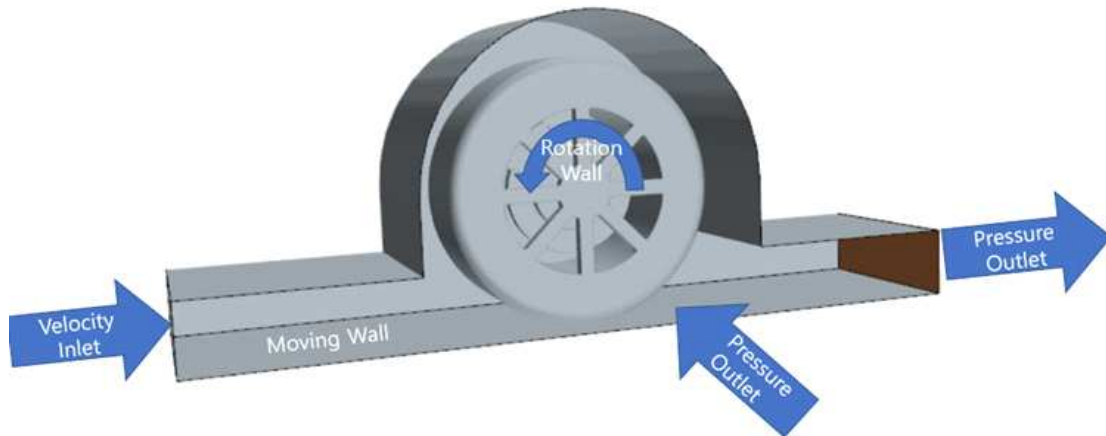


Fig 2 Boundary Condition

Table 1 Boundary Condition

Velocity inlet	22.86 m/s
Pressure outlet	0 Pa (gauge pressure, 1 atm)
Rotation wall	100 rad/s
Moving wall	22.86 m/s

2.2.2.2 CFD 해석 모델 설정

CFD 해석을 위해 Fig 3과 같은 격자(mesh)를 생성하였다. 벽 근처의 유동이 미세먼지 거동에서 가장 중요한 부분을 차지하므로 벽 주위에 10개의 프리즘 격자(prism layer)를 만들어 벽 주위에 더 조밀한 Mesh를 생성하였으며 총 942024개의 격자를 생성하였다.

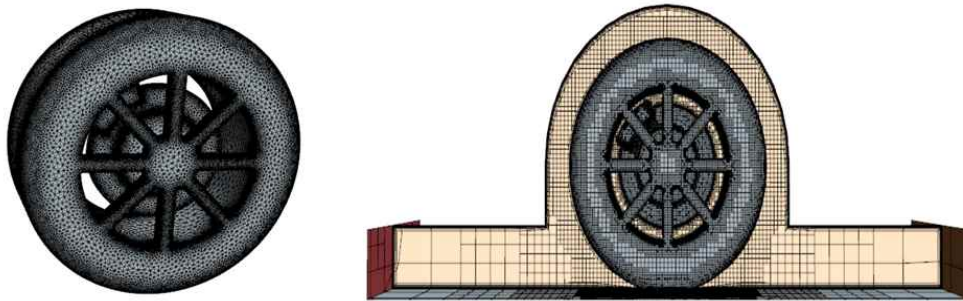


Fig 3 Surface Mesh(Left) and Volume Mesh(Right)

Three Dimensional, Segregated Flow, Constant Density, Steady State, RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes), K-Epsilon Turbulence 모델을 사용하였다.

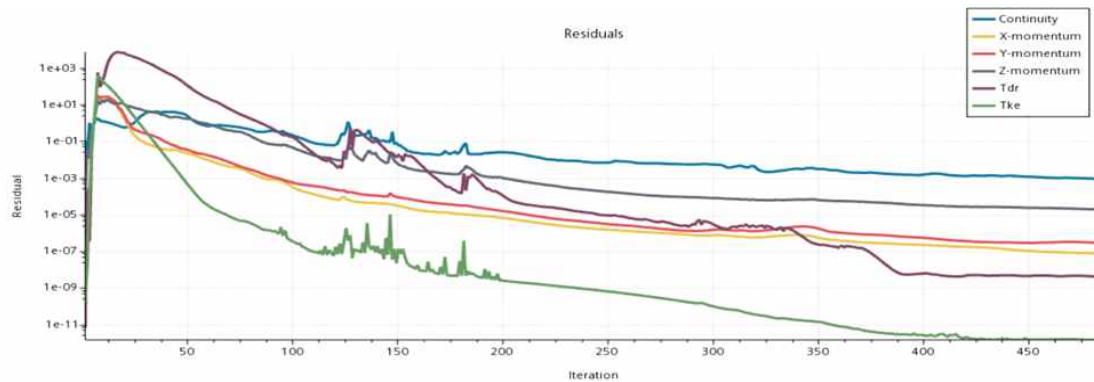


Fig 4 Residual

Fig 4와 같이 Residual 값이 10^{-3} 이하로 떨어지면 수렴한다고 보았다.

2.2.3 브레이크 미세먼지 거동 특성

앞서 설명한 바와 같이, 타이어의 회전속도가 100rad/s, 90rad/s, 80rad/s, 70rad/s, 60rad/s, 50rad/s, 40rad/s, 30rad/s, 20rad/s, 10rad/s일 때 각각의 디스크 주위 유동 특성을 CFD로 확인하였다. 10rad/s, 50rad/s, 100rad/s 일 때 디스크 주위의 유동을 Fig 5 에 나타냈다.

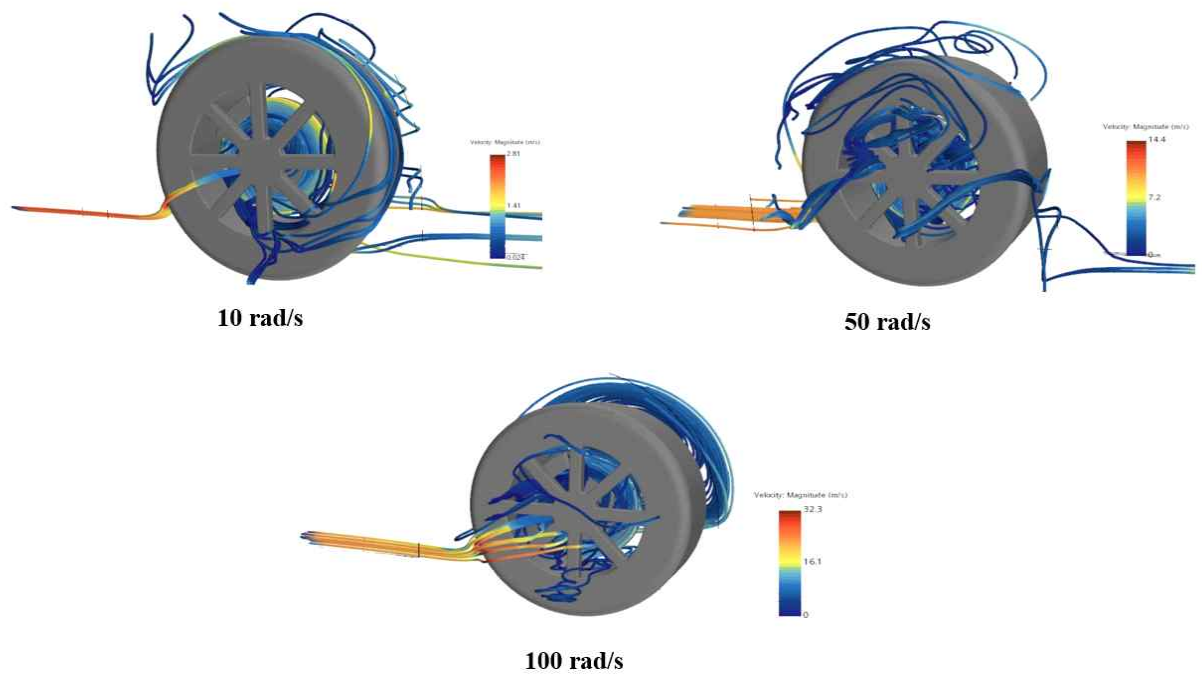


Fig 5 Streamline of Tyre and Disc

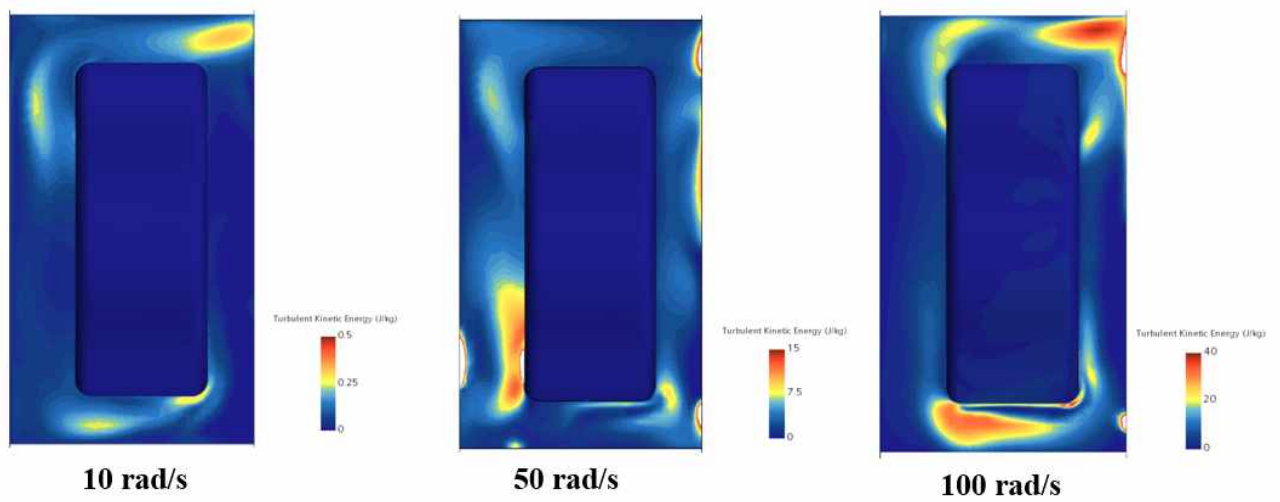


Fig 6 Turbulent Kinetic Energy of Tyre (Top View)

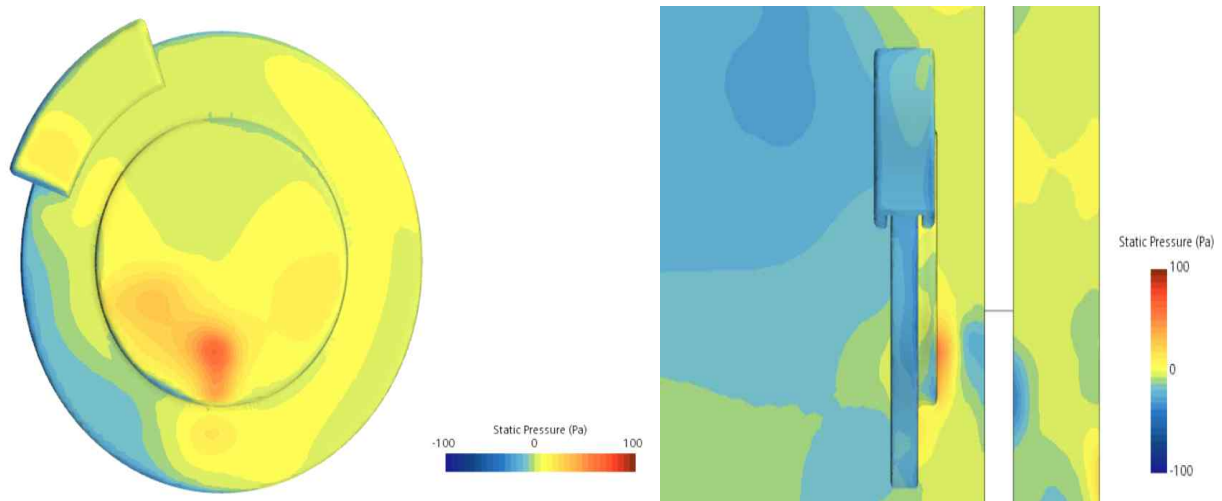


Fig 7 Static Pressure Distribution

유동 해석 결과를 통해 알아낸 검사체적의 유동 특성은 다음과 같다.

- 1) 디스크 주위 유동은 차량의 주행풍보다 회전에 의한 영향을 더 지배적으로 받는다. 이는 디스크가 타이어 안쪽에 있어 주행풍이 직접적으로 영향을 주지 못하기 때문이다.
- 2) 회전속도가 커질수록 디스크 주위의 유동이 복잡해진다.
- 3) 회전속도가 작을수록 velocity inlet을 통해 들어온 공기가 디스크에 오래 머무르는 경향이 있다.
- 4) velocity inlet을 통해 들어온 공기는 대체로 타이어 안쪽에 오랜시간 머무르다 차량의 뒤쪽과 휠 바깥쪽의 pressure outlet을 통해 나간다.
- 5) 정체점이 타이어 안쪽에서 생기는 것을 확인할 수 있다.

따라서 브레이크에서 발생된 미세먼지는 타이어 안쪽에서 포집하는 것이 효과적이며, 와류가 가장 심하고 포집이 어려울 것이라고 판단되는 100rad/s를 기준으로 미세먼지 제거 장치를 설계하였다.

2.3 흡입모터의 Suction Power 최적화

2.3.1 흡입 모터 선정



Fig 8 MB3640-SUC

실제 장치에 적용할 수 있는 크기의 흡입모터로 15V 60W의 로봇 청소기용 소형 흡입모터를

선정하였다. 흡입모터의 Suction Power를 최적화하기 위해서는 압력강하를 만들어내는데 중요한 역할을 하는 모터의 Impeller에 관한 압력분포 및 진공압 계산이 필요하다.

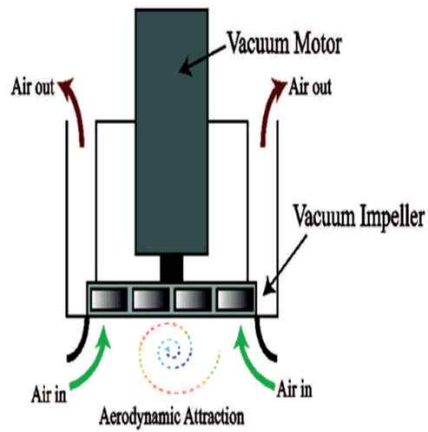


Fig 9 Principle of Vacuum motor

2.3.2 각속도에 따른 Impeller의 진공압

Impeller의 각속도별 진공압을 구하기 위하여 CFD를 이용하였다.

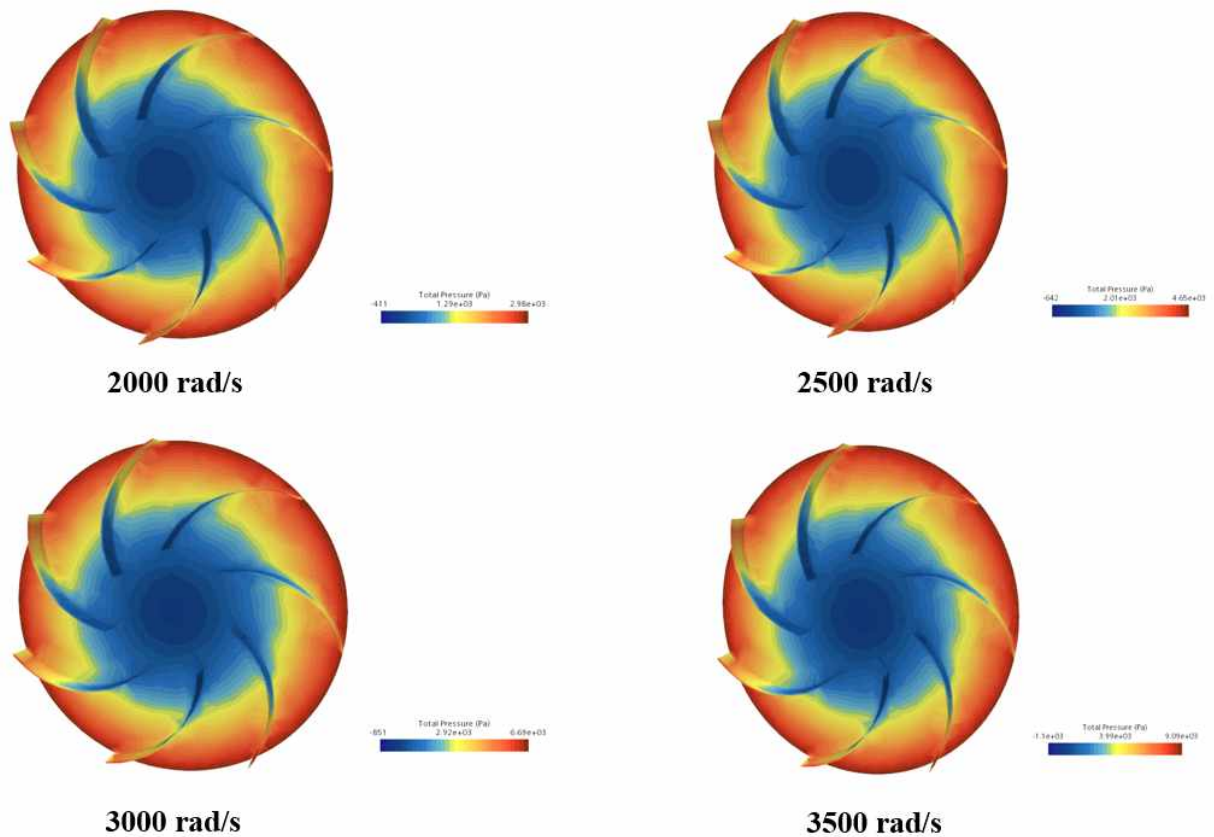


Fig 10 Static Pressure Distribution of Impeller

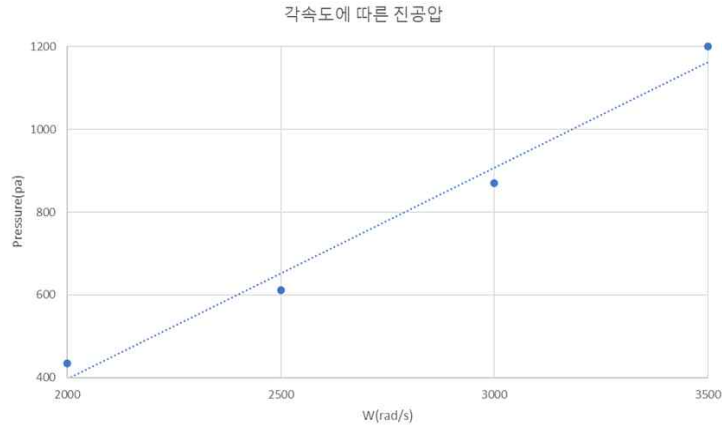


Fig 11 Vacuum Pressure by Angular Velocity

CFD를 이용하여 각속도별 Impeller의 진공압을 확인할 수 있었으며, Impeller에 의해 회전하는 유체가 원심력을 받고 있다고 가정하면 Impeller의 압력분포를 구할 수 있다.

2.3.3 Suction Power 최적화

원심력을 받는 유체의 압력과 가속도는 Eq(1),(2)와 같이 표현 가능하다.

$$dp = \rho a_c dr \quad (1)$$

$$a_c = r\omega^2 \quad (2)$$

이 때 압력분포를 식으로 나타내면 Eq(3)과 같다.

$$\begin{aligned} dp &= \rho a_c dr \\ dp &= \rho r \omega^2 dr \\ p &= -p_{vac} + \int_0^r dp = -p_{vac} + \int_0^r \rho \omega^2 r dr \\ p &= -p_{vac} + \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \end{aligned} \quad (3)$$

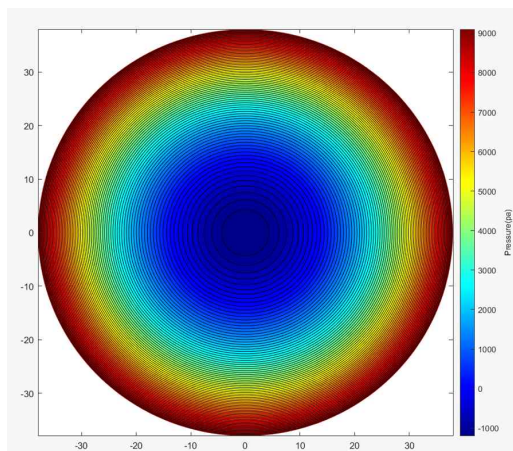


Fig 12 Pressure Contour of Impeller

압력강하에 의한 Suction Force와 Suction Power는 각각 Eq(4),(5)와 같이 표현 가능하다.

$$dF = -pdA = (p_{vac} - \frac{1}{2}\rho\omega^2r^2)2\pi r dr$$

$$F = \int_0^r (p_{vac} - \frac{1}{2}\rho\omega^2r^2)2\pi r dr$$

$$F_{Suction} = \pi r^2(p_{vac} - \frac{1}{4}\rho\omega^2r^2) \quad (4)$$

$$P_{Suction} = F_{Suction}v = Q(p_{vac} - \frac{1}{4}\rho\omega^2r^2) \quad (5)$$

$\omega = 3500\text{rad/s}$, $Q = 0.01\text{m}^3/\text{s}$ 일 때, Suction Power가 최대가 되는 입구의 지름은 24mm이고, 이 때 Suction Power는 6.8W이다.

2.4 장치 입구 위치 별 유동 해석

앞서 브레이크 주위 유동을 분석한 결과에서 타이어 안쪽에서 미세먼지를 포집하는 것이 효과적이라는 결론이 나왔다. 입구 위치 별 유선의 경향성을 파악하여 타이어 안쪽에서 적절한 suction inlet의 위치를 결정하였다.

브레이크 미세먼지는 캘리퍼와 브레이크 디스크가 마찰하여 발생한다. 따라서 유동해석에서는 미세먼지가 생성되는 Fig 13과 같이 캘리퍼 안쪽 아래 면이라고 가정하고 그 면에서부터 유선이 생성되도록 설정하였다. 따라서 나타낸 유선은 미세먼지를 포함하고 있는 공기이다.

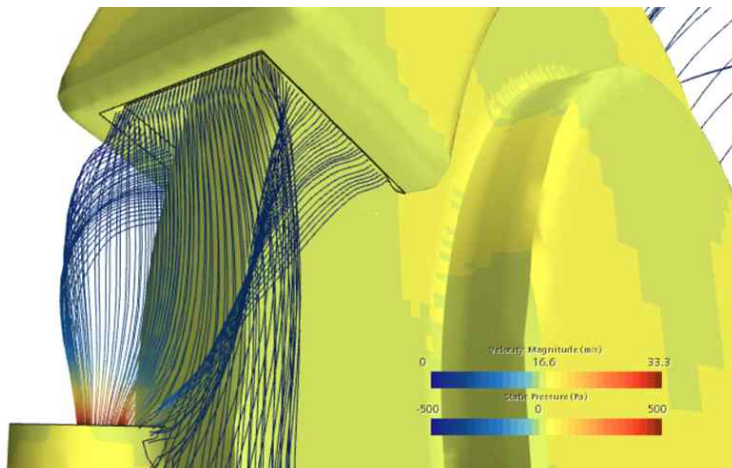


Fig 13 Streamline Containing Fine Dust

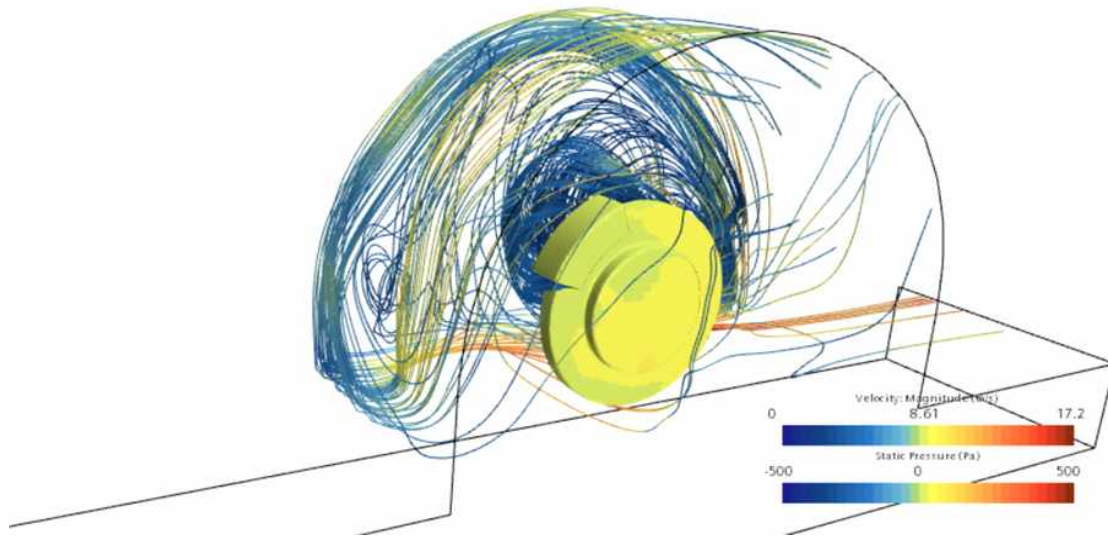


Fig 14 Streamline (No Suction)

먼저 Suction이 없을 때 유선은 Fig 14와 같다. 공기의 유동은 브레이크 회전의 영향으로 디스크 회전의 접선 방향인 아래쪽으로 이동한 후 Fig 15와 같이 디스크 뒤편에 형성되어 있는 와류에 합류하고 이후 휠 하우스 벽면에서 와류를 형성한 후 휠쪽 pressure outlet과 차량 뒤편 pressure outlet으로 나간다.

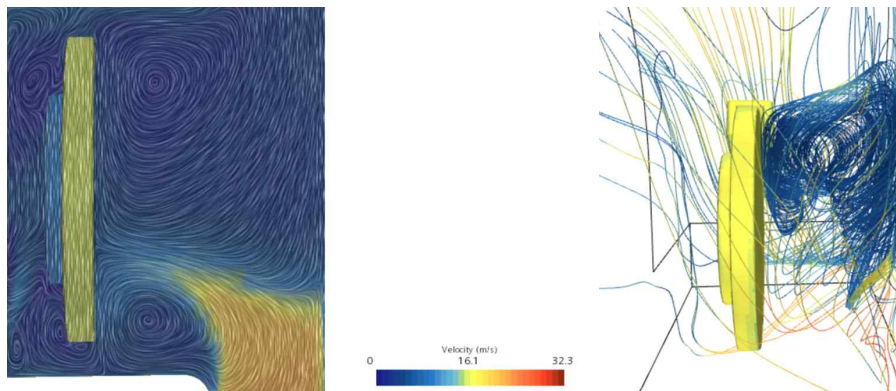


Fig 15 Vortex around the Disc (Side View)

타이어와 디스크의 회전 속도를 100rad/s로 가정하고 CFD 해석을 바탕으로 suction inlet의 위치에 따른 유선의 경향성을 파악하여 적절한 suction inlet의 위치를 예상해 보았다.

먼저 실제 장치가 부착되는 위치를 캘리퍼에 고정되며 브레이크 디스크와 휠 사이 빈 공간으로 가정하여 Suction 00~03의 부착위치를 Fig 16과 같이 설정하였다. 오염원과 가까울수록 포집효율이 증가한다는 가설으로 Suction 00과 Suction 01의 위치를 비교하였다. 또한 높은 난류 운동에너지는 나타내는 곳에서 미세먼지의 혼합이 크게 일어나 포집 효율이 높을 것이라는 가설으로 Suction 02와 Suction 03의 위치를 선정하였다.

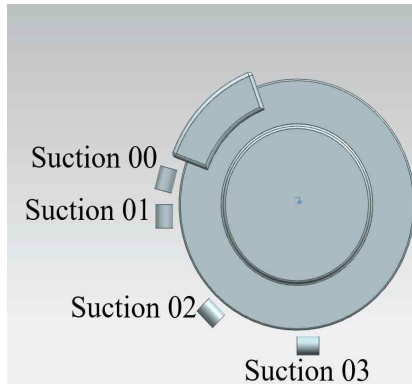


Fig 16 Suction Inlet Positions

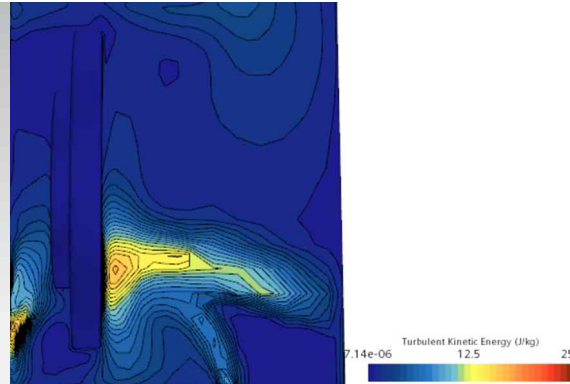


Fig 17 Turbulent Kinetic Energy (Side View)

앞의 유동 해석 결과 Fig 14에서 suction을 추가하면 suction inlet으로 들어가는 유선과 pressure outlet으로 나가는 유선 두 종류로 나뉘어진다. Suction inlet 으로 들어가는 공기는 미세먼지가 제거된 공기라고 가정하고, Pressure outlet으로 나가면 공기가 정화되지 않고 외부에 오염된 공기가 주변으로 빠져나갔다고 가정하였다. 유선이 suction inlet에 들어가면 유선의 추적을 멈춘다.

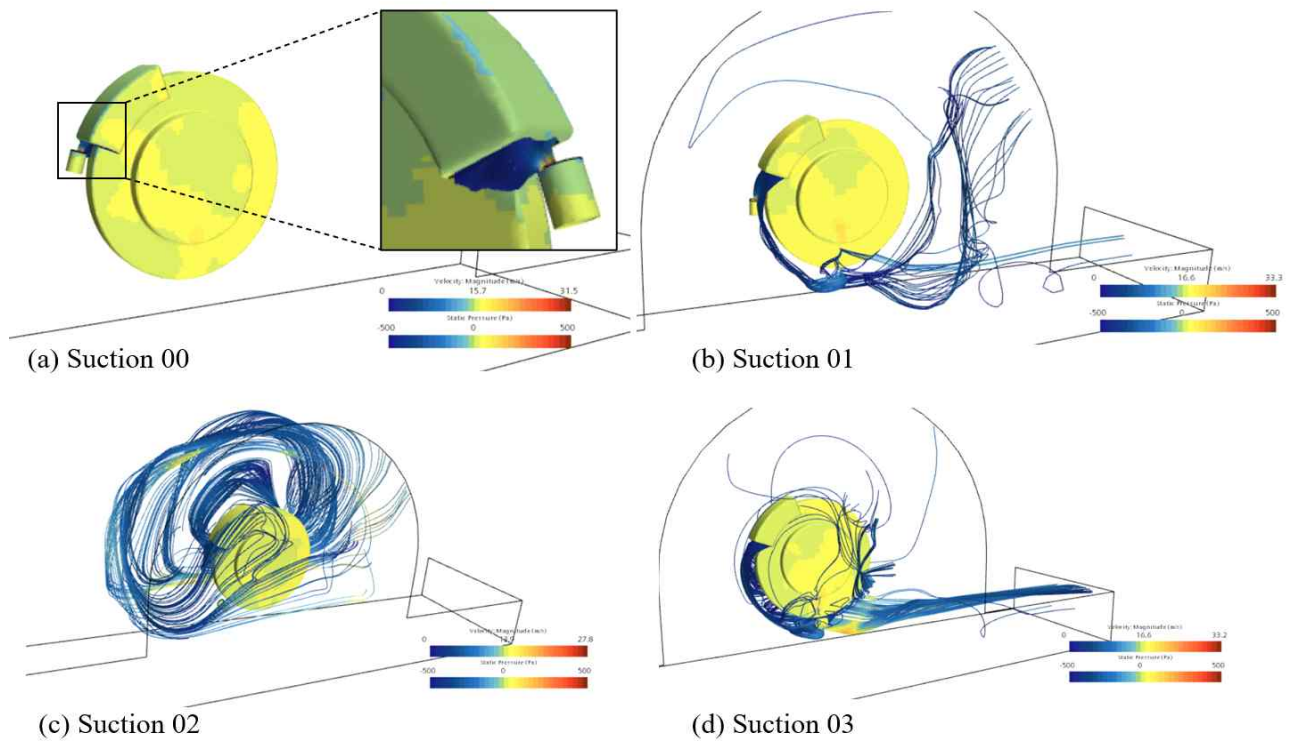


Fig 18 Streamline by Inlet Position

먼저, Fig 18 (a)와 같이 오염원과 가장 가까운 Suction 00에서는 오염된 공기의 유선의 대부분 Suction inlet으로 들어가는 경향성을 보였다. Fig 18 (b)와 같이 오염원과 흡입구 사이의 거리가 떨어진 Suction 01에서는 유선의 일부는 suction inlet으로 들어가지만 일부는 Pressure outlet을 통해 나가는 것을 볼 수 있다.

Fig 18 (c)와 같이 Suction 02 위치에서는 유선이 Suction inlet으로 거의 들어가지 않고 뒤쪽 벽 부분에서 회전하다가 훅 쪽 Pressure Outlet으로 나간다. Fig 18 (d)와 같이 Suction 03 위치에서는 낮은 압력으로 인해 유선이 밑쪽으로 끌려당겨지지만 흡입구로 들어가지 않고 뒤쪽 Pressure Outlet으로 나가는 경향성을 보였다. 따라서 Suction 02와 Suction 03같이 오염원과 멀리 떨어진 위치에서 장치

흡입구를 설치하는 것은 무의미하다는 결론을 얻었다.

따라서 캘리퍼 바로 아래쪽에, 오염원과 가까운 위치에 suction inlet을 설치하는 것이 바람직하다. 하지만 유선만으로는 절대적인 수치를 통해 값을 비교할 수 없으므로 이후 실험을 통해 바람직한 Suction inlet의 위치를 검증하였다.

3. 실험

3.1 실험 장치 제작

앞서 진행한 해석과 선정된 모터를 바탕으로 실험 환경을 조성하였다. 실제 차량을 이용한 실험에는 어려움이 있어 실제 브레이크 디스크와 같은 크기로 레이저 커팅된 MDF를 이용하였다. 그리고 이 MDF와 CFD의 경계조건에 적용된 디스크 회전수만큼의 출력을 낼 수 있는 중형 모터를 3D 프린팅으로 제작한 커플러를 이용하여 연결하였다.

아이소핑크를 이용하여 캘리퍼를 대체하였으며 제작된 MDF에는 사포를 부착하여 아이소핑크와의 마찰력을 증대시켰다.

기본적인 실험 방법은 RPM 측정기를 이용하여 디스크가 연결된 모터 회전수가 원하는 값에 도달할 때까지 모터 컨트롤러를 이용하여 조절한 뒤, 아이소핑크와 MDF 디스크 사이의 마찰로 인해 발생한 미세 입자를 앞서 선정한 흡입 모터로 포집하는 것이다.

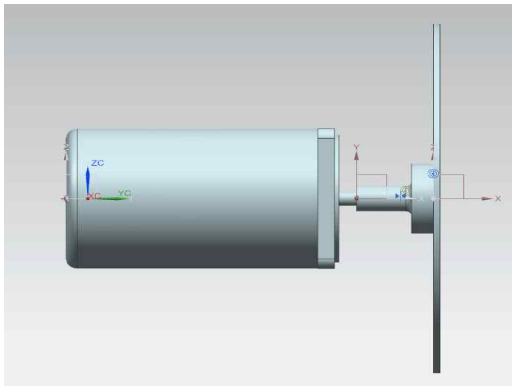


Fig 19 Modeling of Experiment device



Fig 20 Measurement of Disc RPM

Fig.19는 중형 모터와 커플러, MDF를 서로 연결한 전체적인 모습을 NX를 이용하여 나타낸 것이고, Fig.20는 RPM 측정기를 이용하여 모터의 회전 속도를 조절하는 모습이다.

디스크 회전을 위한 모터에는 1.5V 건전지 10개를 직렬 연결하여 사용하였으며, 흡입 모터에는 15V, 4A의 어댑터를 이용하여 외부 전원을 공급하였다.

3.2 미세먼지 유동 가시화

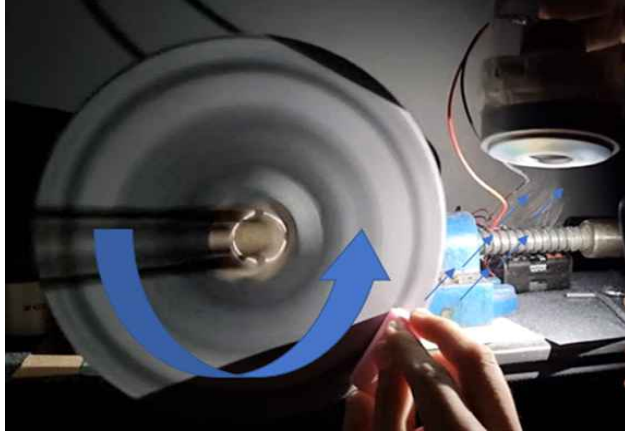
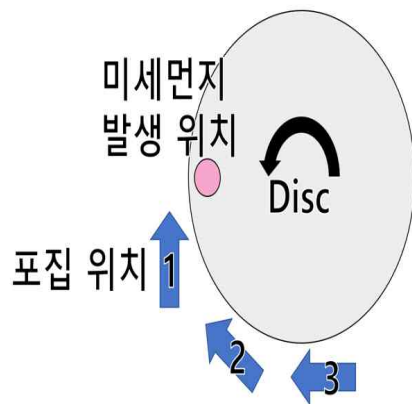


Fig 21 Flow Visualization

유동 가시화 실험을 나타낸 Fig.21에서 볼 수 있듯이 디스크가 화살표 방향으로 회전하면 그 영향으로 아이소핑크와 디스크가 닿는 지점에서 접선방향으로 유동이 발생한다. 따라서 장치의 inlet 위치를 미세먼지 발생 위치의 접선 방향으로 결정하면 포집 효율을 높이는데 도움이 될 것이라 판단하였다.

이를 검증하기 위해 3.3에서 장치 위치 별 미세먼지 포집량 측정 실험을 진행하였다.

3.3 장치 위치 별 미세먼지 포집량



위치	포집량(mg)
1	216.65
2	83.35
3	60

* 생성된 미세먼지 500mg 당 포집량



Fig 22 Result of Experiment

캘리퍼의 위치를 고려하여 아이소 핑크를 위치시키고, 흡입 모터의 위치를 1, 2, 3으로 변화시켜가며 포집량을 측정하였다. 장치의 inlet에 얇은 필터를 부착하고, 아이소핑크와 디스크를 마찰시켰을 때 감소한 아이소핑크의 무게와 필터에 포집된 아이소핑크 입자의 무게를 전자 저울을 이용하여 0.01g 단위까지 측정해보았다.

생성된 미세먼지가 500mg으로 동일하다고 설정했을 때 위치 1에서는 216.65mg, 위치 2에서는 83.35mg, 위치 3에서는 60mg이 포집되었으며 포집 비율은 각각 43.3%, 16.67%, 12% 정도였다.

예상했던 대로 위치 1에서의 포집량이 가장 많았고, 위치 3에서는 실질적으로 포집되는 입자가 거의 없었으며 이는 3.2의 유동가시화 실험에서 판단한 것과 같이 먼지 발생 위치의 접선방향으로 장치를 설치하는 것이 적합하다는 의미를 갖는다.

3.4 최종 장치의 집진 효율

흡입형 브레이크 미세먼지 제거 장치의 집진 효율을 구하기 위해 Fig23과 같이 전체적인 실험 장치를

구성하였으며 GP2Y1010AUOF를 미세먼지 센서로 이용하여 Fig24와 같이 아두이노 회로를 만들었다.

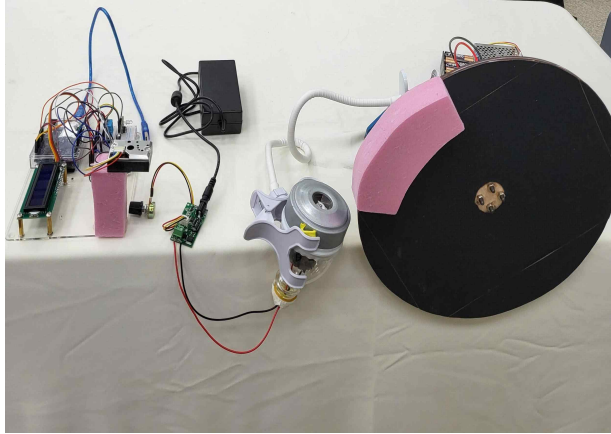


Fig 23 Experiment of Dust collection efficiency

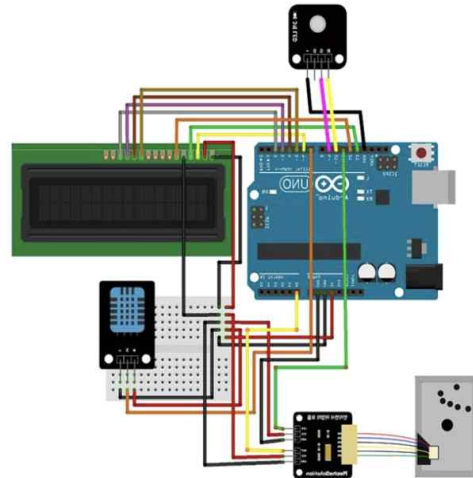
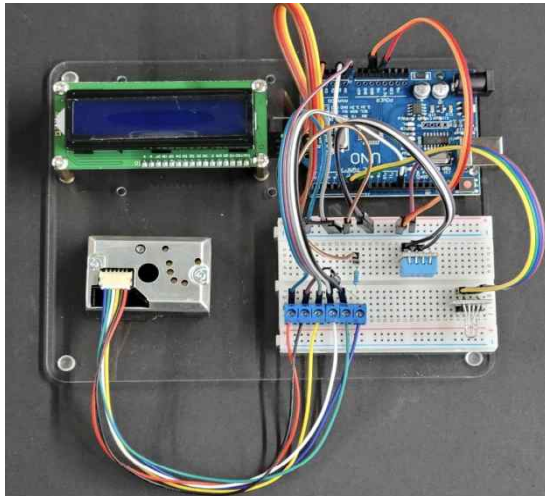


Fig 24 Fine dust Density measurement circuit

디스크가 연결된 모터가 실제 차량 주행 속도로 회전할 때 캘리퍼 모양의 아이소핑크를 마찰시키면 아이소핑크 가루와 같이 미세한 입자가 발생한다. 이 때 미세먼지 측정 센서가 읽어들이는 대기 중 미세먼지 농도 데이터를 그래프로 변환해보았다.

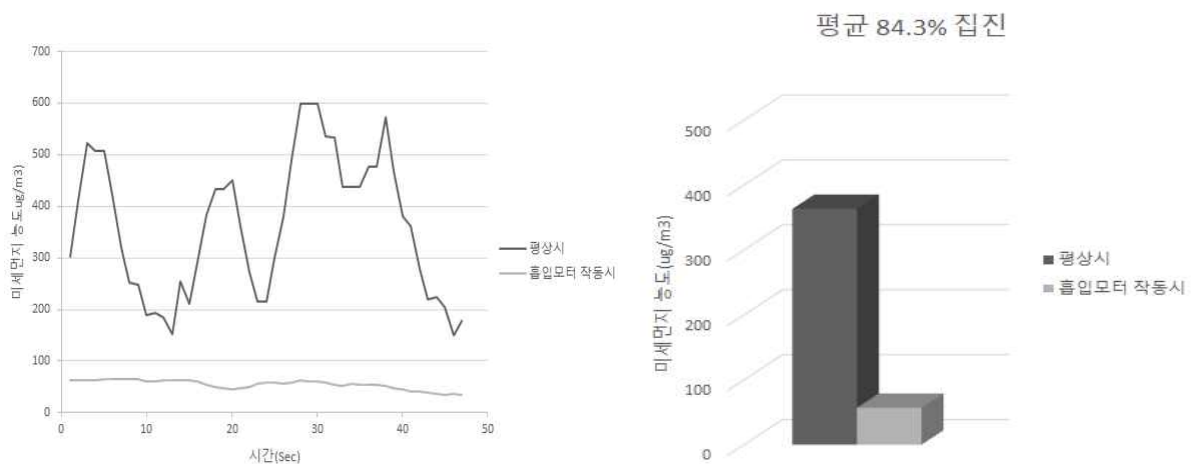


Fig 25 Result of Fine dust collection efficiency Experiment

Fig.25 에서 정상시는 브레이크와의 마찰로 인해 아이소 핑크 입자가 생성될 때의 농도를 측정한 것이고, 흡입 모터 작동 시는 미세 입자를 모터가 작동하면서 흡입했을 때 주위의 미세먼지 농도를 그래프로 나타낸 것이다. 두가지 상황의 농도는 항상 일정한 값을 가지는 것이 아니므로 각각의 평균값을 이용하였다.

$$\text{집진효율} = \frac{\text{장치 ON, OFF 미세먼지 농도차 } [\mu\text{g}/\text{m}^3]}{\text{장치 OFF 미세먼지 농도 } [\mu\text{g}/\text{m}^3]} \times 100\%$$

측정한 농도를 위의 집진 효율 식에 대입하여 84.3%의 최종 장치 효율을 얻었으며 이는 기존 필터형 미세먼지 제거 장치의 40% 효율에 비하여 높은 수치임을 알 수 있다.

4. 결 론

브레이크 미세먼지 제거 장치 개발을 위한 미세먼지의 유동 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 필터형 미세먼지 제거장치에 비해 Suction motor을 사용한 흡입형 미세먼지 집진 장치는 미세먼지의 효율적인 포집이 가능하다.
- (2) CFD 를 이용한 유동 해석을 통해 타이어 안쪽에서 정체점을 찾았고 공기가 휠 안쪽에 머무른다는 유동 양상을 파악했다.
- (3) 장치의 부착 위치는 효율성과 부착 가능성을 고려하여 미세먼지 발생 위치의 집진 방향에 설치하는 것이 적절하다.
- (4) 미세먼지 농도 변화를 측정하여 실험한 결과, 84.3%의 효율을 달성하였으며 이는 필터형 미세먼지 제거장치의 효율보다 약 2 배 이상의 수치이다.

향후 소형화된 브레이크 미세먼지 제거 장치를 설계 제작하여 미세먼지 저감효과를 달성할 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 친환경 차량의 등장으로 배기가스에 의한 미세먼지 발생 비율은 시간이 지남에 따라 점차 낮아지고 비배기 미세먼지가 대부분이 될 것이므로 본 연구에서 제시한 고효율의 미세먼지 집진장치의 개발은 비배기 미세먼지 감소에 기여할 것이다.

참고문헌 (References)

- (1) 유동현, 2017, 자동차 운행 중 타이어 및 브레이크에서 발생하는 미세먼지 집진장치의 개발, 6-23
- (2) 이영림, 황일선. 2020, 자동차 브레이크 미세먼지 필터 개발을 위한 유동 해석. 대한기계학회논문집 B, 44(4), 245-253.
- (3) Seokhwan Lee, Characterization of Non-exhaust Particulate Matters(PM) Generated from Tire and Brake, Auto Journal 2017. 08
- (4) Brusell, Angelica & Andrikopoulos, George & Nikolakopoulos, George. (2016). A Survey on Pneumatic

Wall-Climbing Robots. 10.1109/MED.2016.7535885.

(5)김동주, 정석민.(2020).입자 충돌 및 다상 유동 해석을 위한 CFD-DEM.Journal of the KSME,60(9),45-49.

(6)이완규, 조영빈, 김상명, 조성욱, 황희지, 브레이크 미세먼지 배출 규제 대응을 위한 마찰재 및 포집 장치 연구, 현대모비스, 2021