

대한기계학회 주선

제13회 전국학생설계경진대회(2023년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부 (○)				
참가분야	공모주제 () / 자유주제 (○)				
참가팀명	이피맵봇(epmapbott)				
설계제목	테슬라 압축기를 이용한 사이클론 집진기				
지도교수/교사	(소속) 인하대학교 기계공학과 (성명) 이선곤 (연락처)				(이메일)
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	유제운	인하대학교 기계공학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	김나희	인하대학교 전자공학과 / 3학년	
2	김현우	인하대학교 기계공학과 / 4학년	
3	안재현	인하대학교 전자공학과 / 3학년	
4	정현욱	인하대학교 기계공학과 / 4학년	
5			
6			

설계 요약문

참가분야	공모주제 () / 자유주제 (○)
참가팀명	이피맵봇(epmapbott)
설계제목	테슬라 압축기를 이용한 사이클론 집진기
대표자명	유제운
요약문	<p>가. 목적 및 필요성 산업 폐기물을 발생시키는 기존의 필터식 공기청정기와 달리, 필터를 사용하지 않는 사이클론 집진식 공기청정기를 새롭게 디자인하여 환경 친화적인 공기청정기 기술 발전을 추구한다.</p> <p>나. 기술 요약</p> <p style="margin-left: 20px;">a. 테슬라 압축기의 적용 사이클론 집진기에서 사이클론이 발생하는 원통 내부에 테슬라 압축기를 위치시켜 원심 분리와 공기 압축을 같은 공간에서 발생시킴으로써 공간 편의성을 확보한다.</p> <p style="margin-left: 20px;">b. 시스템 요약 테슬라 압축기에 의해 발생한 사이클론을 이용하여 미세 입자를 벽면으로 분리한다. 이후 원추형 구조물을 따라 집진기 하단으로 이동되는 미세입자는 하단에 위치한 “정화 스테이션”에 수집된다.</p> <p>다. 작동 방식 모터 작동을 통한 디스크의 회전 → 디스크의 회전에 맞춰 유체 회전 및 압력 발생 → 사이클로 발생 및 원심력 발생 → 원심력에 의해 미세 입자 포집 → 미세 입자가 걸러진 깨끗한 유체는 밖으로 나감 → 포집 입자 정화스테이션에 축적</p> <p>라. 활용 방안 미세먼지와 분진으로 인해 피해가 발생할 수 있는 다양한 산업 분야에 본 장치를 적용함으로써 호흡기 질환 피해를 예방할 수 있다. 더 나아가 대기질 개선 및 해파 필터 폐기물로 인한 환경 문제 개선에도 기여할 수 있다.</p>
설계프로젝트의 입상 이력	

테슬라 압축기를 이용한 사이클론 집진기

유제윤*·김현우*·정현욱*·김나희**·안재현**·이선곤*†
*인하대학교 기계공학과 · **인하대학교 전자공학과

Cyclone Dust Collector empowered by Tesla Compressor

Je Yoon Ryu*, Hyunu Kim*, Hyun Wook Chung*, Jaehyeon An**, Nahee Kim** and Sun
Kon Lee*†

* School of Mechanical Engineering, Inha University
** School of Electronic Engineering, Inha University

(Received September 11, 2023)

Key Words: Tesla compressor(테슬라 컴프레서), Cyclone dust collector(사이클론 집진기), Streamline Behavior(유선형 거동), Tesla Turbine(테슬라 터빈), Filter-less Air Purifier(무필터 공기청정기)

초록: 최근 대기 오염이 심해짐에 따라 공기청정기의 사용량이 증가하고, 많은 필터 폐기물이 발생 된다. 본 프로젝트에서는 테슬라 컴프레서를 사이클론 집진기에 접목시켜 blower 역할을 함으로써 유동을 형성시키고, 입구 질량 흐름의 원심력을 높여 filter-less 입자 집진을 유도하였다. 실 제작에 앞서 Ansys fluent 프로그램으로 CFD 해석을 통해 기류의 유선형 거동을 확인하였고, 이를 검증하기 위해 테슬라 컴프레서 및 사이클론 집진기상단부는 아크릴을 재질로 하여 모터가 디스크를 회전시킬 때 기류의 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 결과적으로 내부 기류는 유선형을 띄며 선회하는 유동을 보였으며, RPM의 증감에 비례하는 유속이 형성됨을 확인하였다.

Abstract: In this project, a Tesla compressor was grafted into a cyclone dust collector and used as a blower to form a flow and increase the centrifugal force of the inlet mass flow. The streamline behavior of the airflow was confirmed through CFD analysis with the Ansys fluent program, and to verify this, the upper part of the Cyclone dust collector and Tesla compressor was made of acryl to observe the behavior of the airflow when the motor rotates. As a result, it was confirmed that the internal airflow was streamlined and circulating, and a flow rate proportional to the increase or decrease of RPM was formed.

1. 서론

새로운 기술의 등장과 발전이 현대 사회의 고도 성장에 기여할 수록, 그 이면엔 여러 환경 문제들이 지속적으로 발생하고 있다. 특히 대기 오염은 급격한 산업화로 인해 발생한 주요 문제 중 하나로 공장, 자동차, 발전소 등의 연소 배출 가스로 발생하는 PM10, PM2.5의 미세 먼지의 경우 대한민국에선 별도의 대책으로 관리될 만큼 위험도가 높은 환경 문제로 취급된다. 이는 미세먼지가 호흡과정에서 코 점막을 통과하고 폐포로 직접 침투하기 때문에, 호흡계 관련 유병률과 조기 사망률을 증가시키는 것과

† Corresponding Author, sunkon.lee@gmail.com

같은 보건 문제를 유발하기 때문에 산업, 발전, 생활 부분 등의 전반적인 영역에서 정부 차원의 지원이 필요하기 때문이다. (1)

일반적으로 미세먼지 배출 저감을 위해 실내 공간에서는 주로 HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) 필터를 활용한 여과 방식의 공기청정기가 가동되고 있다. (2) 하지만, 여과 방식은 주기적인 교체를 요구한다는 점과, 재활용이 불가능하다는 필터의 특성으로 인해 추가적인 환경 문제를 야기한다는 양면적인 상황이 연출되고 있다. 이에 여과식이 아닌 정전기를 활용한 전기 집진을 사용하거나 물을 필터로 활용하는 등의 방안책이 제시되고 있다. 다만, 이런 방식들은 지속적으로 배출물이 발생하는 산업 현장이나, 지하철 역 내와 같은 넓은 실내 공간에 적용하기에는 유지 보수 관점에서 적합하지 않을 수 있다. 이런 특징적인 공간에서는 오히려 사이클론 집진 방식의 간단한 역학적 원리를 활용하는 것이 유리할 수 있는데, 실제로 대형 산업현장에서는 이 방식을 공정 과정에서 발생하는 부산물 집진에 자주 활용한다.

사이클론 집진 방식은 원심력을 활용하여 부유중인 부산물과 대기 간의 분리속도 차이를 만들어 부산물의 침강을 유도한다. 집진기 형상에도 여러 종류가 있지만, 본 팀은 보다 다양한 환경의 현장에 적용시키기 위해서는 사이클론 집진기의 소형화가 필요하다 판단하였다. 따라서, 축상유입식 사이클론 집진 방식을 참고하여 전체 형상을 설계하되, 베인으로 인위적인 나선형 흐름을 유도하는 것이 아닌, 테슬라 컴프레서를 적용시켜 보다 효과적으로 선회류를 생성시키고자 하였다. (3)

2. 설계핵심내용

1. 설계의 목적

현재 가장 많이 사용되고 있는 공기청정 방식은 필터식이다. 이 방식은 주기적인 필터의 청소 및 교환을 필요로 하여 추가적인 유지비용을 지속적으로 발생시킨다. 또한, 주 필터 역할을 하는 ‘해파 필터’는 재활용 및 자연분해가 불가능하여 환경오염의 원인이 되고 있다.

산업현장에서 주로 사용되는 사이클론 집진 방식의 경우, 필터가 소모되지 않으므로 필터와 관련한 폐기물이 발생하지 않으며 필터 구매 비용이 들지 않아 경제적이란 이점이 있다.

본 설계에서는 ‘테슬라 터빈을 이용한 전기집진 방식의 공기청정기 모델’을 제안한다. 이는 1차적으로 테슬라 터빈을 압축기로 사용하여 입/출구 사이에 압력을 형성하고, 원심력을 이용해 입자를 분리하여 공기를 정화하는 방식이다. 결과적으로, 해당 방식은 필터 폐기물을 없애고 기존의 사이클론 집진기가 가진 단점인 비효율적인 공간 활용도를 개선할 수 있다.

2. 설계 핵심 내용

(1) 설계 문제의 정의

본 설계에서는 기존의 공기청정기에서 발생하는 환경문제의 대안으로 사이클론 집진기의 컴팩트한 형태를 제시한다. 기존 사이클론 집진기는 일반적으로 낮은 유지비라는 장점을 살려 산업체에 대형 규모로 구동된다. 본 설계에서는 이에 변화를 주어, 집진기 사이즈를 축소시키고, 기존 사이클론 집진기에

- (1) 미세먼지 종합대책, 대한민국 정책브리핑, <https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148864591>
- (2) INNOPOLIS 연구개발특구진흥재단, 가정용 공기청정기 시장 글로벌 시장동향보고서 2021.04
- (3) A Study on the Performance Test of Axial-flow Cyclone Separator, Do-Hun Chin, KSIC, 한국산업융합학회, 2020.02, <https://kiss-kstudy-com-ssl.openlink.inha.ac.kr:8443/Detail/Ar?key=3760603>

유동을 공급하던 블로어를 별도의 유체기기를 통해 하나의 집약된 구조를 갖는 기기로 설계하였다. 이를 통해 기존 실내에서 사용되는 필터식 공기청정기를 대체할 수 있는 새로운 “filter-less” 공기청정기 영역을 개척하고자 한다.

유동을 공급하는 기기로는 테슬라 유체기기를 선정하였다. 판의 경계층을 활용하는 해당 기기는 본래 고안된 테슬라 터빈을 압축기로 사용하여 제시하는 공기청정기의 내부에 배치된다. 테슬라 압축기를 활용할 경우 블로어의 원심 압축기를 소형화했을 경우 생기는 무게, 크기 등을 해결할 수 있다. 원심 압축기는 원심 압축기의 블레이드와 유동 방향이 수직이다. 하지만 테슬라 압축기는 유동 방향과 디스크가 평행이기 때문에 원심 압축기에서 발생하는 부식, 침식과 관련한 문제를 개선할 수 있다. 이는 효율성과 경제성 측면에서의 이점이 예상된다.

해당 기기를 설계하기 위해 사이클론 집진기와 테슬라 압축기를 하나의 시스템으로 구성해야 한다. 먼저, 테슬라 압축기를 원통 안에 위치시켜 원통 안에서 여러 층의 원형 디스크가 회전할 수 있도록 형상을 제작하고, 이에 충분한 토크를 가하여 회전시키면, 점착 조건에 따라 유속을 발생시킬 수 있다. 일반적으로 사이클론 집진기 특성상 10 μm를 초과하는 입자를 포집할 수 있다.

먼지를 포함한 유체는 유체기기 출구로 빠져나감과 동시에 사이클론 집진기 입구로 들어가게 되며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_p \frac{d^2 r}{dt^2} - m_p \frac{V^2}{r} + C_d A_p \rho_g \frac{V_r^2}{2} = 0$$

이후 유체는 사이클론 집진기의 구조에 따라, 나선 형태의 유선을 그리며 회전한다. 이때, 유체는 원심력에 의해 먼지와 분리되고 집진기의 최하단까지 도달한 가스는 먼지 입자와 분리된 상태로 상승하여 집진기 출구로 배출된다. 입자의 분리 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = 1 - \frac{\dot{m}_{p-out}}{\dot{m}_{p-in}}$$

해당 공기청정 과정이 이루어지기 위해서는 테슬라 압축기 디스크의 제원 및 적용 구조에 대한 연구가 이루어져야 하며, 유입 가스로부터의 집진율을 확인하기 위해 분진 집진 정도를 파악하는 해석을 진행할 필요가 있다. 테슬라 압축기의 적용을 위해 자료 조사 및 설계를 통해 입자의 포집이 가능한 구조를 모색하고, 3D CAD 프로그램을 사용해 장치를 모델링하여 시뮬레이션 해봄으로써 작동 방식을 미리 구현 및 예측해야 한다. 이후, 설계된 테슬라 압축기의 타당성을 확인하기 위해 디스크의 회전속도와 입자 분리 효율 사이의 상관 관계를 실험을 통해 정의하여, 집진 효율에 대한 검증이 필요하다.

(2) 설계 방법 및 제약조건

첫 번째로 본 개념 설계를 토대로, 단계별 설계 과정을 설정하였다. 1차적으로 참조 논문들을 활용하여 테슬라 유체기기와 사이클론 집진기를 설계한다. 이때 모델 높이를 고려해 사이클론 집진기에 요구되는 inlet mass flow를 결정 한 후 이에 맞게 디스크 개수를 선정한다. 두 번째로, 테슬라 유체기기와 사이클론 집진기가 하나의 시스템으로 구성될 수 있도록 조정하여 설계한다. 이를 위해 사이클론 집진기에서 정화된 공기가 나올 수 있도록, 유체기기 중간에 outlet path를 만드는 것과, 이에 맞춰 구동축의 형태를 수정하는 것이 요구된다. 세 번째로, 제작된 모델을 기반으로 CFD를 활용하여 유체 거동을 파악한다. 테슬라 유체기기의 경우, 실제 프로토타입을 기반으로 검증 실험을 한다. 이때 풍속계 등을 활용하여 유체의 inlet과 outlet의 유속을 확인하여, 설계된 디스크 수로 충분한 inlet mass flow가 형성되는지 확

인한다. 네 번째로, 테슬라 유체기기와 사이클론 집진기 구조물을 결합하여, 이 하나의 구조물의 공기 정화 성능 실험을 실행한다. 이때 정화율은 미세먼지 측정기를 활용한다. 위 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 참조 논문 기반, 사이클론 집진기, 테슬라 유체기기 설계
- CFD를 활용한 사이클론 집진기 내 유체 거동 확인
- 테슬라 유체기기 성능 검증 실험
- 테슬라 유체기기와 사이클론 집진기 결합체 성능검증 실험

사이클론 집진기를 설계함에 있어서 기존에 표준화된 사이클론 집진기 치수를 참고하되, 테슬라 터빈과 결합하는 과정에서 사용되는 표준화 부품(베어링)의 치수를 고려하여 수정된 비율이 적용되었다. 설계에 참고한 표준화된 사이클론 집진기의 치수는 다음과 같다.

구 분	고효율 집진기		일반 집진기		고용량 집진기	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
몸통 직경 (D/D)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
입구 높이 (H/D)	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
입구 폭 (W/D)	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
상부 출구 직경 (De/D)	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
선회류 길이 (S/D)	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
몸통 길이 (Lb/D)	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
원추 길이 (Lc/D)	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
하부 출구 직경 (Dd/D)	0.375	0.4	0.25	0.25	0.375	0.4

Fig. 1 Cyclone dust collector standardization dimensions

고효율 집진기 (1)을 이용하여 설정한 치수는 다음과 같다.

- D = 180mm
- H = 90mm
- W = 15mm
- De = 35mm
- S = 80mm
- Lb = 260mm
- Lc = 450mm
- Dd = 67.5

이에 따라 설계된 사이클론 집진기는 직경 10 μm의 입자에 대해 50%의 집진 효율의 성능을 내기 위

해 입구 속도를 10m/s로 결정하였다. 이 속도는 미립 물질 제거를 위한 소형 사이클론 분리기의 이론적 연구 및 실험적 검증에 관한 타 논문에서 시뮬레이션한 결과를 참고하였다.

본 설계의 제약 조건은 테슬라 유체기기의 성능과 전체 구조물의 조밀도가 가장 큰 비중을 차지할 것이라 예상된다. 특히 테슬라 유체기기의 경우, 참조 논문을 기반해 계산된 요구 inlet velocity를 만족하기 위해, 높은 수준의 rpm을 갖는 모터를 요구하게 된다. 이러한 고출력 모터를 활용할 시 재질의 내구성, 시스템의 소음, 효율에 대한 문제점 등이 유발될 것이라 예상된다. 조밀도로 인해 발생하는 제약으로는, 사이클론 집진기 내부에 정화된 outlet mass flow에 먼지 입자가 함께 배출될 수 있는 가능성이 존재한다.

원통형 전기집진식 공기청정기 효율은 다음과 같다.

$$\eta = 1 - e^{-(2wL/RV)}$$

η : 집진효율[%], w : 분진입자의 이동속도[m/sec], L : 집진극(원통)의 길이[m], R : 원통의 반경[m], V : 가스유속[m/sec]

본 설계는 총 2단계로 단계별 설계 과정을 수립하였다.

먼저, 사이클론 집진기가 요구하는 outlet path를 테슬라 유체기기에 만들어주기 위해, 손잡이 형태의 shaft와 베어링을 활용하여 설계하였다. 이는 Fig 1에 제시된 것처럼, 테슬라 유체기기의 중심부 shaft를 빈 공간이 있는 중공 형태로 설계함으로써, outlet path가 확보됨을 확인할 수 있다.

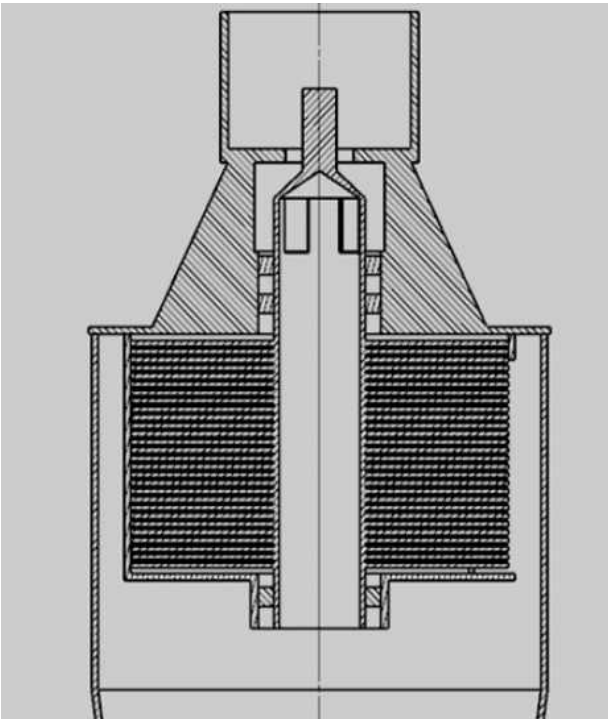


Fig. 2-1 Tesla Compressor Sectional Diagram

상부에 배치된 테슬라 유체기기 부는 내부 유체의 거동 확인을 위해 아크릴을 이용하여 구성하였다. 아크릴의 경우 내마모성이 알루미늄과 가깝고, 높은 표면 경도와 우수한 표면을 갖는다는 장점을 갖고 있다. 특히, 우수한 표면의 경우, 경계층 내 유속의 감소를 최소화할 것이라 기대한다. 또한, 여러 겹의 아크릴 디스크를 회전시켜야 하는 상황에서, 아크릴의 상대적으로 낮은 무게는 추가적인 이점으로 작용할 것이라 예상하여 해당 재질을 선정하였다. Fig 2를 통해 해당 상단부의 디스크를 제외한 전체 외부

홀더의 프로토타입 형상을 확인할 수 있다.

테슬라 유체기기에 설치되는 디스크의 개수는 총 28개로, 각각에 유동을 위한 4개의 구멍을 뚫었다.



Fig. 2-2 Telsa disk

디스크 사이 공간은 1mm로 설정하였고, 각각의 공간에 3D 프린팅으로 제작된 snap ring을 설치함으로써 각 디스크 사이의 공간을 확보하였다.

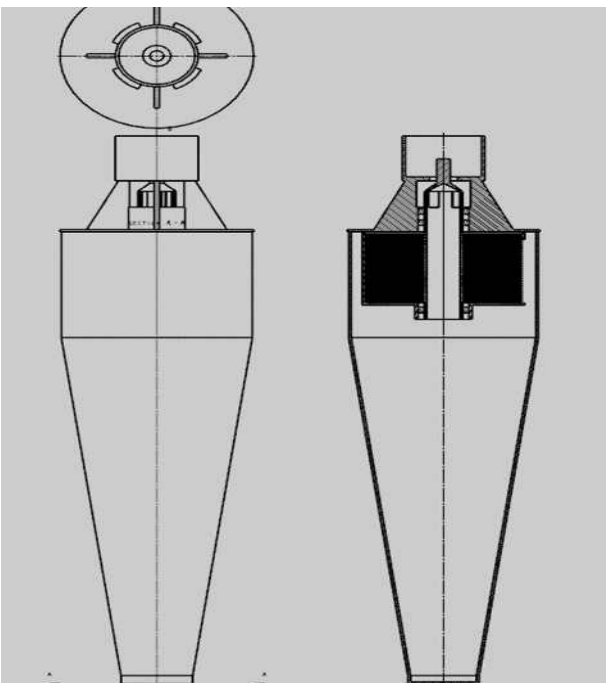


Fig. 2-3 Entire Structure



Fig. 3 upper part of cyclone separator

하단 사이클론 집진기의 형상은 점차 좁아지는 구조의 특성상 아크릴 가공에 어려움이 있어, 3D 프린터를 활용하였다. PLA filament를 활용하여 출력된 하단 사이클론 집진부 형상의 내부는 사포 등을 활용한 추가적인 후처리 가공을 통해 유체와 접촉이 이뤄지는 접촉면의 표면 가공성을 확보하였다.



Fig. 4 lower part of cyclone seperator

Fig 4에서, 사이클론 집진 과정 중 포집되는 입자를 한 곳에 응집시킬 수 있도록 사이클론 집진부 최하단에 원통형의 홀더를 추가했음을 확인할 수 있다.

다음 단계로 CFD를 활용하여 사이클론 집진부의 유동 현상을 확인하기 위해, ANSYS FLUENT 프로그램을 활용하였다. 기본 유동 해석 조건들로는 해석의 용이성을 위한 층류 조건과 10m/s로 설정된 inlet mass flow rate이 있다.

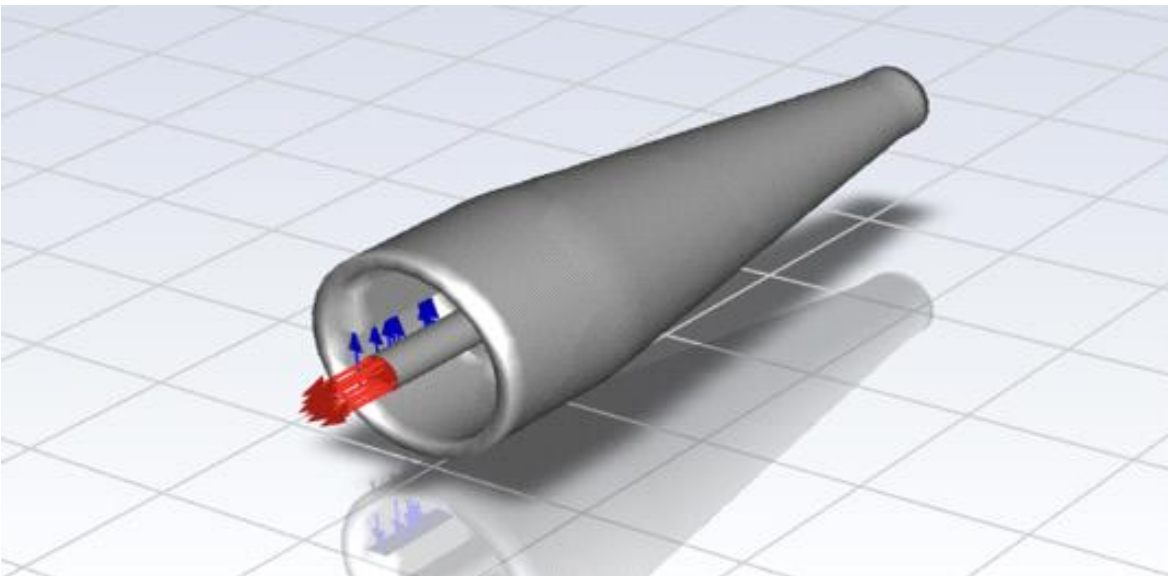


Fig. 5 Simulation results of the ANSYS FLUENT

테슬라 유체기기의 outlet mass flow가 사이클론 집진기로 유입됐을 때, 유체는 사이클론 집진기의 하단부를 거쳐 중심부를 통해 outlet mass flow를 형성하는 것을 확인할 수 있다.

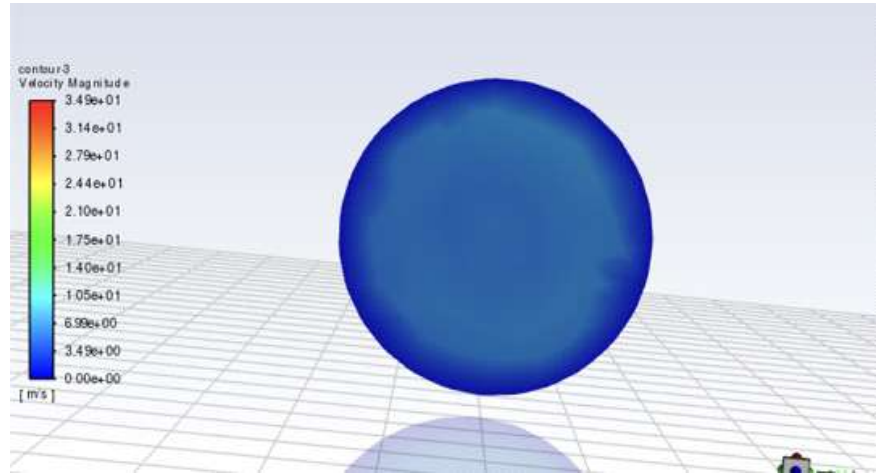
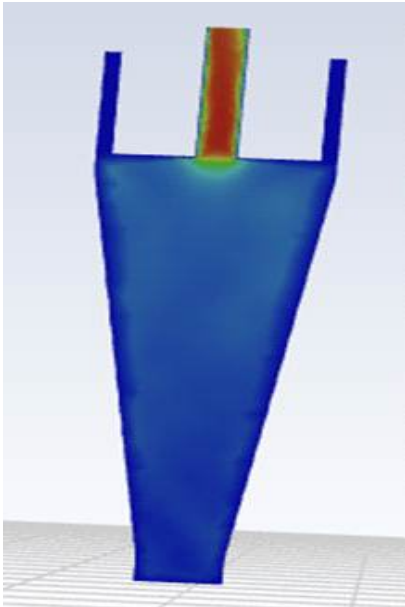


Fig. 6 Side view of the flow inside the dust collector **Fig. 7** Top view of the flow inside the dust collector

집진기 내부의 유동현상은 Fig 6와 Fig 7를 통해 확인할 수 있다. 구조물을 따라 가면서 사이클론 형상이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

결과적으로, 간단한 CFD 해석을 통해, 전체적인 유동 현상이 실험 설계 단계에서 기대한 바와 유사함을 확인할 수 있었다. 따라서, 설계된 테슬라 유체기기가 발생시키는 outlet mass flow가 10m/s 정도이면 구조물 내 사이클론 형상이 생성되는 것을 기대할 수 있다는 결론에 도달했다.

설계 1, 2단계를 완료함에 있어 CFD 해석의 경우 간단한 조건들을 활용했다는 한계점이 있다. 그렇기에 변화되는 유속에 따른 전체 형상에서의 유동 현상을 실험을 통해 확인했다. 이는 설계 3단계에 해당하는 테슬라 유체기기의 성능 검증 실험을 통해, 아크릴 재질 디스크를 에이징 해보며 아크릴의 내구성과 적합성을 검증하며 진행되었다. (하지만, 하단 사이클론 집진부 벽면의 표면 건전성이 좋지 않아 집진 효율이 낮은 문제가 존재하였고, 이는 추가적인 후처리(레진)를 통해 개선하는 방법을 고려할 수 있다.)

(3) 경제성 분석

설계 구현 비용의 대부분을 차지하는 모터 및 관련 부품의 비용은 약 5만원 내외이다. 저렴한 비용으로 필터 없이 사용할 수 있는 공기청정기 제작이 가능하므로 비용 문제로 인해 공기 정화 시설을 갖추지 못한 낙후된 사업장 등에 본 결과물이 도입된다면 비용 대비 효용이 상당히 높을 것으로 기대한다. 산업 현장에서 오염된 공기에 노출된 작업자들을 호흡기 질환으로부터 보호해주는 장치로 활용될 수 있으며 이로써 의료비 지출을 절감하여 건보 재정에 도움이 될 수 있다.

3. 결과 및 토의

3-1. 테슬라 압축기

설계된 사이클론 집진기에 원하는 유동 현상을 구현하기 위해서는 테슬라 압축기로부터 10m/s 수준의 inlet velocity를 요구한다. 테슬라 압축기는 하나의 축에 여러 디스크가 겹겹이 쌓인 로터와 이를 감

싸는 하우징으로 이루어져 있는데, 축을 회전시키면 디스크와 그 사이를 거동하는 유체 사이에서 운동 에너지가 교환되며 압력을 증가시키고 유속을 형성한다. 테슬라 압축기의 압축 효율을 결정 짓는 요소는 디스크의 회전 속도, 토출 시 발생하는 손실, 디스크의 내외경, 유체 특성, 디스크 간 간격 등이 있다. (Warren Rice)

본 팀이 처음 사용한 아크릴 디스크는 최대 inlet velocity 가 2.4m/s 수준으로 28개의 디스크를 지지하는 축에 모터가 충분한 힘을 전달함에 어려움이 있었다. 이에 디스크 두께를 1T로 감소시켜 3D 프린팅으로 PLA 재질의 디스크 27개를 제작하여 기존의 21개 아크릴 디스크를 대체하였다.

테슬라 압축기와 사이클론 집진부 형상을 결합시에, 직접적인 유속 측정이 어려워지기 때문에, 사이클론 집진부의 inlet velocity, 즉 테슬라 압축기의 토출 속도와 모터의 RPM간 관계 및 유속이 10 m/s 수준에 도달 가능한지를 먼저 확인하였다.

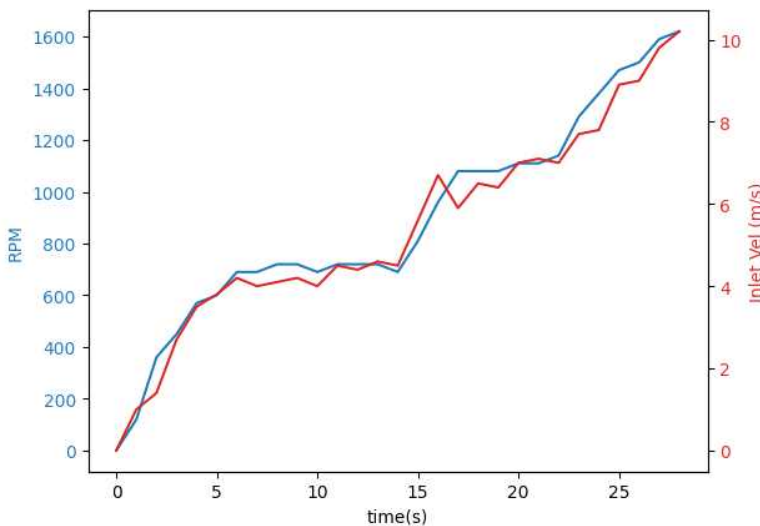


Fig. 8 Relationship between Motor RPM and Cyclone Inlet Velocity

결과적으로, inlet velocity가 10m/s에 도달하기 위해선 1600 RPM 수준의 모터 토크를 요구한다는 것과, 디스크의 대부분을 PLA 재질로 제작함으로써 아크릴 대비 거칠어진 표면과 감소된 무게가 유속 형성에 도움을 준다는 결론을 얻을 수 있었다. 또한, RPM과 inlet velocity 간의 비례관계가 존재함을 확인함으로써, 테슬라 압축기를 사이클론 집진부와 결합을 했을 때, 내부에서 압력 손실이 발생하더라도 대략적인 inlet velocity를 인가된 RPM 값 기반으로 예측할 수 있게 됐다.

3-2 미세먼지 집진 성능

테슬라 압축기를 적용시킨 사이클론 집진기의 미세먼지 집진 성능 검증 실험을 진행하였다. 미세먼지 발생기로는 향을 연소시키는 것을 활용하였고, 기기 전체와 향을 비닐로 덮어서 외부로부터 미세 입자가 유출되는 것을 방지하였다.

실험 1

(Fig. 10) 약 2분 30초 동안, 향이 충분히 연소되는 것을 기다리면서 측정되는 PM 양이 일정해질 때까지 대기하였다. 이후 모터에 약 1400 RPM (fig. 8 참고)과 약 1600 RPM을 인가했을 때, 포집되는 먼지 양을 기기 토출구에서 측정하였다



Fig. 9 Particulate Matter Generation through incense burning (left), Air Purification Validation Test Set-up (Middle), PM Sensor Installed at the outlet (Right)

계측된 결과를 확인했을 때, PM 1.0의 경우 오염도가 지속적으로 감소하였고, PM 2.5와 PM 10 영역에서는 센서가 측정할 수 있는 최대치인 5000ppm을 초과했기 때문에 약 1400 RPM 회전 시의 집진을 확인할 수 없었다. 이후 RPM을 1600 까지 증가시켜 약 10m/s의 유속을 생성시키자, 오염도가 측정가능한 수준으로 하락하여 PM 1.0의 물질은 1600 RPM이 인가된 후 약 10%, PM 2.5의 물질은 50% 이상, 그리고 PM 10의 물질은 약 40% 감소하였다. 다만 실험 1에서 미세먼지 농도 하락의 원인이 미세입자가 단순히 공기청정기 내부의 공기에 희석됨에 따른 것인지 또는 사이클론 집진에 의한 것인지 규명하는 것이 불분명하였다. 따라서 이를 개선한 실험 2를 진행하였다.

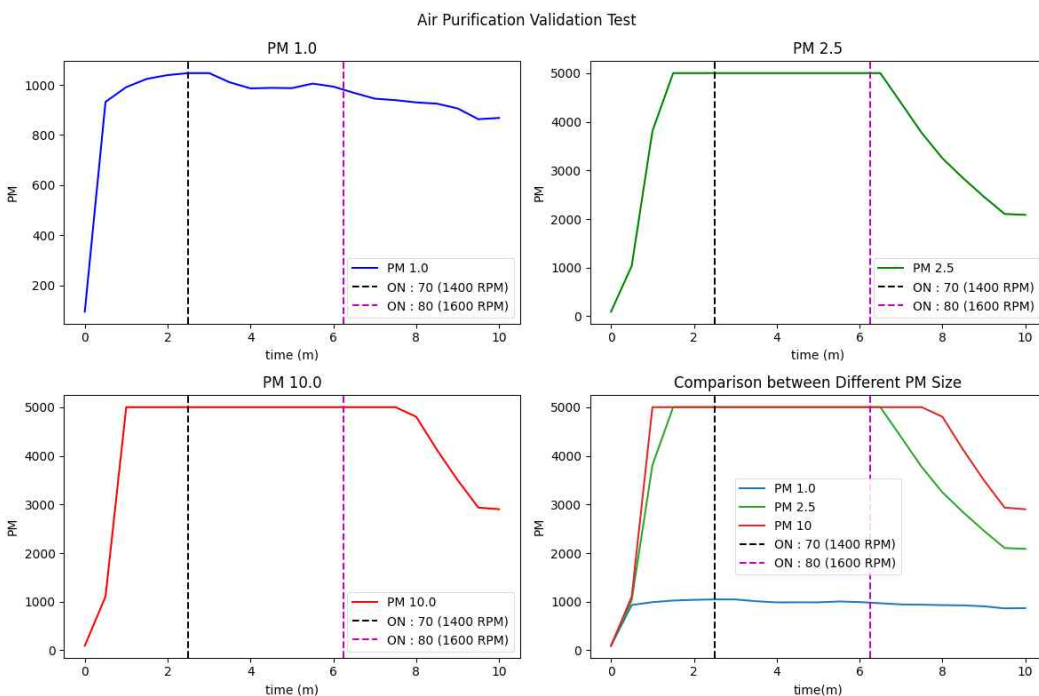


Fig. 10 Air Purification Validation Test_1 Result

실험 2

(Fig. 11) 실험 2에서는 실험 1과 반대로 집진기 내부를 미세먼지로 채우고 집진기 바깥의 공간은 청정한 상태에서 집진을 시작하였다. 공기청정기를 가동하자 집진기 내외부의 공기가 순환하여 미세먼지 농도가 급격하게 상승하였다. 계속하여 집진기가 가동됨에 따라 미세먼지 농도가 하락하였고 400s에서 집진기 가동을 중지시키자 미세먼지 농도 하락폭이 크게 감소하였다.

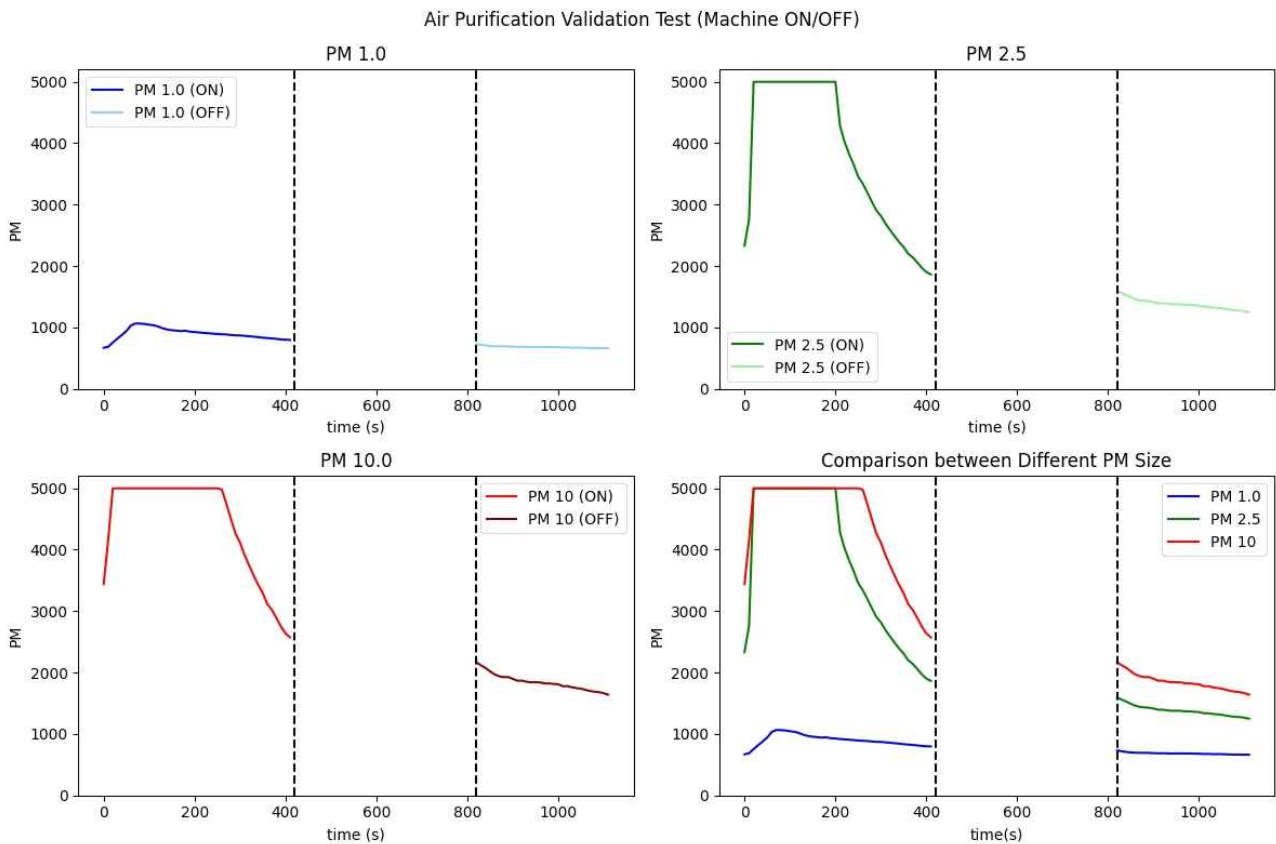


Fig. 11 Air Purification Validation Test_2 Result

4. 결론

본 연구를 통해 테슬라 컴프레서를 활용하여 대기 오염으로 인한 건강문제 및 미세먼지로 인해 발생하는 다양한 산업 분야에서의 피해를 줄일 수 있는 공기청정기를 제작하였다. 기존 컴프레서 및 블로워와 달리 테슬라 컴프레서는 블레이드가 없는 블로워로, 디스크를 회전시켜 유체 전단력에 의해 유동을 형성하였다. 이는 기존의 블레이드에 직접 유체를 충격시켜 유동을 만들어내는 방식 대신 경계층 효과를 적용시킨다. 결과적으로 기존에 주로 사용되는 필터식 공기청정기에서 발생하는 HEPA 필터 폐기물 문제를 해결하고 입자 충돌에 의해 발생하는 블레이드의 내구성 문제를 개선하였다. 또한, 사이클론 집진기의 내부에 이를 배치하여 기존 집진기보다 공간 효율성을 높였다. 해당 원리를 이용하여 제작한 집진기에 형성되는 Inlet Velocity를 풍속계로 측정된 결과 절반 정도의 모터 출력에서 1620RPM의 디스크 회전이 가능했으며, 이를 통해 10.2m/s의 유속과, 사이클론 집진기 내부에 유선형 유동이 형성되었다. 홀센서를 이용하여 측정된 RPM과 그에 따른 Inlet velocity를 비교해 보았을 때 서로 비례하는 것을

알 수 있으며, 기존 공기청정기보다 강한 흡입력은 알레르겐과 같이 큰 입자로 이루어진 먼지들을 안정적인 출력으로 포집할 수 있음을 의미해 공사장 및 건설현장, 지하철에서의 활용 또한 가능한 것을 알 수 있다. 실제로 테슬라 컴프레서 작동 전, 후로 상황을 구분하고 미세먼지 센서를 통해 오염도를 측정 한 결과 PM 1.0에서의 초미세먼지에 대한 저감 효과가 미비했으나, PM 2.5와 PM 10.0의 미세먼지 농도는 측정 가능 범위에서만 50% 이상의 감소함을 확인할 수 있었다. 이 결과는 입자 직경이 감소할수록 분리효율이 감소하는 기존의 연구 결과와 일치한다.



Fig. 12 Cyclone dust collector empowered by Tesla compressor

후 기

본 연구를 보완할 방안으로, 제작한 집진기의 사이클론 집진부에 전압을 인가하여 정전기를 사용하는 전기집진 방식을 적용시킨다면 2.5 μm 미만의 입자에 대한 분리 효율이 감소하는 사이클론 집진기의 단점을 개선할 수 있을 것으로 기대한다. 더 나아가 모터 회전으로 인한 진동 특성을 파악해 주요 저감 필요 대역을 선정하고, Connector, Attachments, Insulator와 같은 진동 감쇄용 기체를 함께 설치한다면, 진동 및 소음 문제로 인해 발생하는 운용의 어려움을 보완하고, 부품에 가해지는 손상을 최소화할 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 주로 유체의 점성력을 이용하여 발전에 사용하는 테슬라 터빈을 반대로 직접 회전시켜 컴프레서로 활용해 공기청정기를 제작해보았다. 기존 방식의 공기청정기들에 존재하는 폐기물 문제, 공간 효율성 문제, 내구성 문제 등의 단점을 보완하며 기존 제품들과의 차별점을 두었다. 유체의 거동을 예측하여 수식으로 나타내 접근하는 것은 하지 못했지만, 관련 reference와 논문들을 찾아보며 하드웨어의 치수를 설계하였고 이를 토대로 CFD를 활용해 미리 내부에 유선형 형상의 유동을 확인했다. 제작을 마친 후 테스트를 통해 테슬라 컴프레서가 블로어로 사용되어 내부에 배치됐을 때에도 유선형 형상의 유동이 형성되는 긍정적인 결과를 도출하였으며, 미세먼지를 발생시켜 비교 측정한 결과 PM 2.5 및 10.0에서 입자 포집이 이뤄지는 성과를 도출할 수 있었다. 본 연구에서는 테슬라 컴프레서를 사이클론 집진기에 적용하여 공기청정기로 활용할 수 있다는 가능성을 확인하였으며, 향후 산업 현장 및 미세먼지 농도가 높은 환경 전반에 도입되어 IARC가 규정한 1군 발암물질인 미세먼지로부터 건강 문제 및 피해를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) 구자건, 강미연, 서용철, 2009, “건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감 기술 적용사례 비교분석”, 한국생태환경건축학회논문집, Vol.9, pp. 55~60.
- (2) 고한결, 김홍석, 2013, “미립 물질 제거를 위한 소형 사이클론 분리기의 이론적 연구 및 실험적 검증”, 대한기계학회 논문집, Vol.37, pp. 77~82.
- (3) AKele, M.Ejededawe, G.A.Udoeong, A.Uwadiae, M.E. Oviawe, B.O.Ayewa, 2021,
- (4) “Design, Construction and Simulation of Tesla Turbine, SMG.”, International Journal of Engineering and Management Research, Volume.11
- (5) Andre Luis Ribeiro Thomazoni, Condrade Ermel, Paulo Smith Schneider, Lara Werncke Vieira, Julian David Hunt, Sandro Barros Ferreira, Charles Rech, Vinicius Santorum Gouvea, “Influence of operational parameters on the performance of Tesla turbines: Experimental investigation of a small scale turbine”, 2022, Energy, Volume.261, Part B
- (6) Warren Rice, 1991, “Tesla turbomachinery”, Proc IV International Nikola Tesla Symposium
- (7) Abhijit Guha, Sayantan Sengupta, 2012, “The fluid dynamics of the rotating flow in a Tesla disc turbine”
- (8) Mohammad Zuber, Adithya Ramesh, Darpan Bansal, 2019, “The Tesla Turbine – A Comprehensive Review”