

연구과제명	풍력발전기의 숨겨진 원심력효과를 이용한 미세먼지 제거 기술 적용 연구		
연구기간	2020년 3월 ~ 2020년 12월(10개월)		
연구비	40,000천원		
과제분류	연구분야 및 세부연구분야		
	하폐수 처리	상수도 및 정수	수질관리
<input type="checkbox"/> 정책연구 <input type="checkbox"/> 조사연구 <input checked="" type="checkbox"/> 기술개발연구 <input type="checkbox"/> 산학연연구	<input type="checkbox"/> 물리화학적 처리 <input type="checkbox"/> 생물학적 처리 <input type="checkbox"/> 막처리 및 재이용 <input type="checkbox"/> 하수처리 시스템 <input type="checkbox"/> 질소 및 인 제거 <input type="checkbox"/> 하폐수 처리 기타 <input type="checkbox"/> 축산폐수 처리	<input type="checkbox"/> 막분리 <input type="checkbox"/> 정수처리 및 수질관리 <input type="checkbox"/> 고도정수처리 <input type="checkbox"/> 상수관망	<input type="checkbox"/> 수질오염 <input type="checkbox"/> 수질모델 <input type="checkbox"/> 수질관리기타
	자연환경분야	폐기물관리	대기관리
	<input type="checkbox"/> 환경정책 <input type="checkbox"/> 생활환경 <input type="checkbox"/> 건강위해성 <input type="checkbox"/> 생태관리 <input type="checkbox"/> 환경오염사고대비 <input type="checkbox"/> 소음관리 <input type="checkbox"/> 청정기술개발	<input type="checkbox"/> 매립 및 침출수 처리 <input type="checkbox"/> 슬러지 처리 <input type="checkbox"/> 소각 및 열분해 <input type="checkbox"/> 재활용 및 자원화 <input type="checkbox"/> 음식물 쓰레기 처리 <input type="checkbox"/> 폐기물 관리 기타	<input type="checkbox"/> 대기오염측정 및 관리 <input type="checkbox"/> 대기오염모델링,위해도 <input checked="" type="checkbox"/> 대기오염 처리기술 <input type="checkbox"/> VOCs 및 악취 처리
	토양지하수오염	기타환경분야	기후변화대응분야
	<input type="checkbox"/> 오염토양처리관리 <input type="checkbox"/> 폐광토양오염,지하수처리 <input type="checkbox"/> 지하수 환경관리	<input type="checkbox"/> 기타	<input type="checkbox"/> 온실가스배출량산정 <input type="checkbox"/> 온실가스배출량감축연구 <input type="checkbox"/> 배출권거래 <input type="checkbox"/> 기타
연구의 목적 및 필요성	<p>○ 연구의 배경 및 필요성</p> <p>－ 대한민국에서 최근에 대두되고 있는 미세먼지는 인간의 보건 및 기술 시스템에 심각한 영향을 미칠 수 있는 다른 자연 및 기술적 문제를 암시하고 있음. 특히 대기 중에 분산된 고체 입자나 액체 입자를 흡입하고, 피부접촉으로도 사람의 건강에 위협할 수 있음. 또한 공기와 접촉하는 표면에 침전하여 생기는 원치 않는 먼지 층을 제거하기 위해, 막대한 에너지, 자원을 들이고 있음. 그림 1과 같이 황사와 미세먼지, 초미세먼지는 2013년 겨울부터 국내에서 빠르게 성장한 것으로 인식된 건강 문제를 일으킴. 황사는 몽골의 사막에서 발생하는 자연현상이며, 수십 년 동안 봄철마다 발생한다는 것을 잘 알려진 사안임. 그러나 2013년 하반기 몇 달 동안, 한국에서 미세먼지와 초미세먼지와 관련된 심각한 문제가 갑자기 발생했음. 성분들이 대체로 자연적인(땅껍질에서 나오는 모래와 물질) 황사와는 달리 미세 먼지와 초미세먼지는 인간의 산업 활동에서 비롯됨. 예를 들어, 입자들은 황산과 질산, 암모늄염, 휘발성 유기화합물, 검은 탄소를 형성하는 다른 입자들의 산화에서 비롯되었음.</p>		

연구의 목적 및
필요성
(계속)

미세 먼지와 초미세먼지는 과학적으로 미세먼지(PM)는 $10\mu\text{m}$ 이하, 초미세먼지 PM은 $2.5\mu\text{m}$ 이하로 명칭 되고, 입자 크기에 따라 나뉘짐. 미세먼지는 폐내부에 침투가능하지만, 초미세먼지는 혈액이나 임파계에 침투해 뇌나 태아 기관에 도달해 세포막을 통해 뇌혈액이나 안정장벽 등에 침투할 수 있음. [1]–[2]에 따르면, 미세먼지는 폐암, 기관지 천식, 심혈관질환, 폐사망률, 동맥경화, 관상동맥질환, 조기사망 등 많은 질병과 건강상의 문제를 안고 있음. PM의 추가적인 병리학적 영향으로는 산화 스트레스, 미토콘드리아 섭동, 염증, 단백질 변성, 핵흡수, 뉴런 조직 흡수 및 폐이거시 함수 섭동, 내피질 기능 장애, 신안티겐 생성 및 DNA 손상이 있음[3].



그림 1. 미세먼지 농도에 따른 대기 상태 변화.

– 미세먼지와 초미세먼지의 주요 공급원은 화석연료의 연소 생산물임. 또 한국 대기 중 황산 30%, 질산 40%가 중국에서 날아온 것으로 확인되었음. 따라서 과학, 행정, 정치적 측면에 관한 양국 간 협력적 조치가 필요함. 그러나 국경을 초월한 오염물질에 대한 조사는 아직 걸음마 단계에 있음. 대기 질은 세제곱미터 마이크로그램으로 측정된 미세먼지 농도 양호($0-30\mu\text{g}/\text{m}^3$), 정상($31-80\mu\text{g}/\text{m}^3$), 나쁨($81-150\mu\text{g}/\text{m}^3$), 매우 나쁨($>150\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 의해 결정됨. 일단 대기 질이 "나쁨" 범주로 분류되면, 독성 입자를 다루기 위한 비상조치가 발효된 됨. 정부는 화력발전소 생산량의 80%를 감산하라고 지시했음. 2.5톤 이상의 오래된 디젤 차량은 보통 시내에서 운전이 금지됨. 공공기관 주차장을 많이 폐쇄해야 하고, 운영시간 단축을 위해 배출가스 시설도 많이 갖춰야 함.

– 하지만 정부는 미세먼지 문제에 대한 장기적인 계획을 세우지 않았고, 활동과 미세먼지 증가의 상관관계에 대해 국민들을 잘 교육하지도 않았음. 게다가, 업계는 대기 오염 문제를 무시한 채 이윤을 내는 것에만 관심이 있음. 따라서 대규모 미세먼지를 대폭 해소하기 위해서는 새롭고 경제적인 접근이 시급함.

연구의 목적 및
필요성
(계속)

○ 연구의 목적

– 이 연구는 회전하는 기기에서 발생되지만 사용되지 않는 "숨은 원심력"의 바탕으로 대기 중의 미세먼지를 제거하는 혁신적인 아이디어를 제시함. 이러한 숨겨진 원심력은 각각의 특정 목적을 실현하기 위해 설계된 대부분의 회전기기에서 본질적으로 발생하지만 따로 이용되지는 않음. 이용되지 못한 원심력은 상당한 에너지를 가지고 있으며 이를 이용해 미세먼지를 제거할 수 있음. 이는 에너지 낭비를 줄이고 장치의 효율을 증가시키는 방법이기도 함.

– 미세먼지 제거에 이용할 수 있는 원심력이 있는 회전 장치의 예로는 전기 에너지 발생을 위한 풍력 발전기, 온도 및 습도 조절을 위한 에어컨, 기기내 유체의 압력증가를 위한 압축기 및 팬, 사람, 동물, 물건의 수송을 위한 차의 바퀴, 가정용 회전식 모터등이 있음.

○ 국내외 선행연구 및 기술 동향

– 미세먼지를 대규모로 제거하는 효과적인 방법은 비가 내릴 확률을 높이기 위해 은요오드화물과 같은 화학물질을 구름에 주입해 인공 비를 만드는 것임. 첫 실험은 이미 서해 상공에서 한국 정부가 실시 했지만 그 결과는 실질적으로 적용할 수 없는 상황임. 섬 가까이에서 강수 가능성이 극히 적은 것으로 확인되었고 건조한 공기로 인해 지상에서 가까운 곳에서는 비가 전혀 내리지 않았음. 추가 실험은 평균 시간당 0.1mm에서 1mm로 전국 강수량을 증가시켰음. 하지만 이 정도 수준으로는 미세먼지를 효과적으로 제거하기에는 턱없이 부족함. 2시간 연속 시간당 10mm의 강수량이 필요함. 비록 한국 당국이 이미 중국 정부와 인공 강우 기술을 교환하기로 합의했음에도 불구하고, 이 기술은 아직 상용화가 되지 못했음[4].

– 오염물질 제어 기술로는 원심분리기, 정전기침전기(ESP), 식물필터 또는 집진장치, 황화석탄 하부, 습윤 및 건성 스크러버, 건조흡착기 주입(DSI), 선택적 촉매감소(SCR), 선택적 비촉매감소(SNCR), 하이브리드 SNCR/SCR, 활성탄주입(ACI), 할로겐, 추가 아모 등이 있음. [5]. 현재까지 개발된 주요 오염물질 제어 기술은 다음 단락에서 간략하게 기술되어 있음. 하지만 풍력 발전기의 숨겨진 원심력을 이용해 미세먼지를 제거하는 방식은 아직 활용되지 않고 있음. 실제로, 이 개념에 대한 과거의 기술 및 과학 문헌, 분석 보고서는 찾지 못했음.

1. 원심분리기

- 원심분리기는 원심력을 이용하여 공기 흐름에서 입자를 분리하는 장치임. 먼지 입자가 사이클론 상단을 닫고 공기 소용돌이의 아래쪽으로 나선형으로 내려감. 그림 2와 같이 입자가 사이클론 입구에 들어가게 되면, 원심력과 관성 효과는 입자를 사이클론의 안쪽 벽 쪽으로 밀어 넣고, 입자들은 경계 흐름에 갇히게 됨. 그 후에 입자가 내려가서 바닥에서 모이게 됨. 작은 사이클론은 큰 사이클론보다 효율적이지만 습한 공기와 거친 입자에 의해 더 잘 막힐 우려가 있음. 따라서 사이클론 분리기는 높은 유속을 견뎌야 하기 때문에 유지와 보수가 필요하며 사용시 주의를 요함. 사이클론의 성능은 원통형 부분의 길이뿐만 아니라 원뿔 각도, 피드 압력 및 피드 농도, 피드의 오리피스 크기, 오버플로 및 언더플로 개구부를 포함한 몇 가지 요인에 따라 달라짐. 그러나 지름은 사이클론의 효율과 응용에 가장 큰 영향을 미치는 요인임. 입자 지름이 매우 작을 때 원심분리기만으로는 효율이 낮음[6].

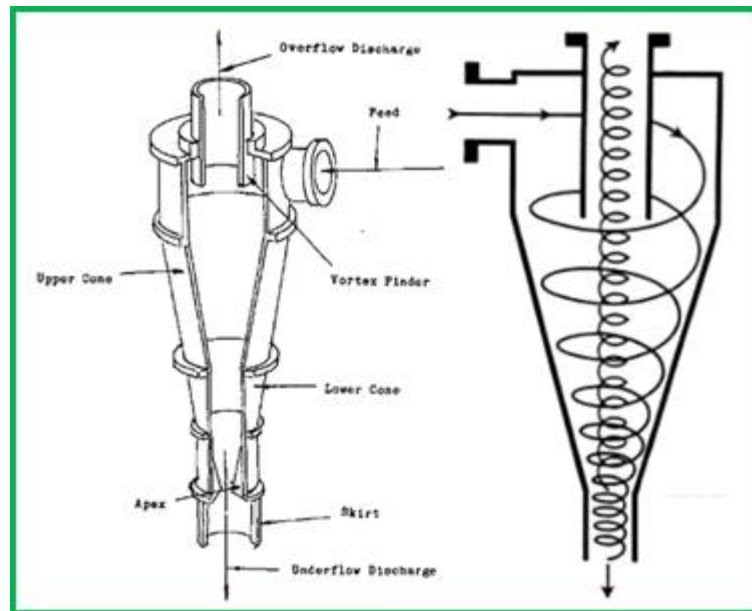


그림 2. 사이클론의 설계 (좌)와 작동원리 (우)

- Dirgo와 Leigh [7]는 서로 다른 사이클론 모델을 비교하여 계단식 고효율 원심분리기의 사례를 분석함. 먼지를 포함한 공기의 입구 속도가 25 m/s 이상 일 때 5 μ m 이하 입자 직경에 대해 제거 효율은 극적으로 떨어짐. 따라서 더 작은 입자를 분리하기 위해 추가 수단을 사용해야 함. Wadenpohl [8]은 중앙 전극이 장착된 사이클론을 사용하여 나노미터 범위의 디젤 그을음 입자를 정전기 효과로 분리할 수 있음을 보여주었음. 생성되는 전압은 입자를 사이클론 벽 쪽으로 밀어내고, 입자가 골재(骨材)를 형성함. 그러나 이러한 방법은 전도성 입자로만 작동하므로 산업에서는 효용성이 떨어짐.

연구의 목적 및
필요성
(계속)

2. 전기집진기 (ESP)

– ESP는 전기력을 이용하여 공기 내의 먼지를 집진판으로 운반하는 입자 제어 장치임. 침전기 (Precipitator)를 통과하는 입자들은 코로나 방전을 통하여, 음전하를 띠게 됨. 이후 음전하를 띤 입자들은 양전하를 띤 판 쪽으로 이동됨(그림 3).

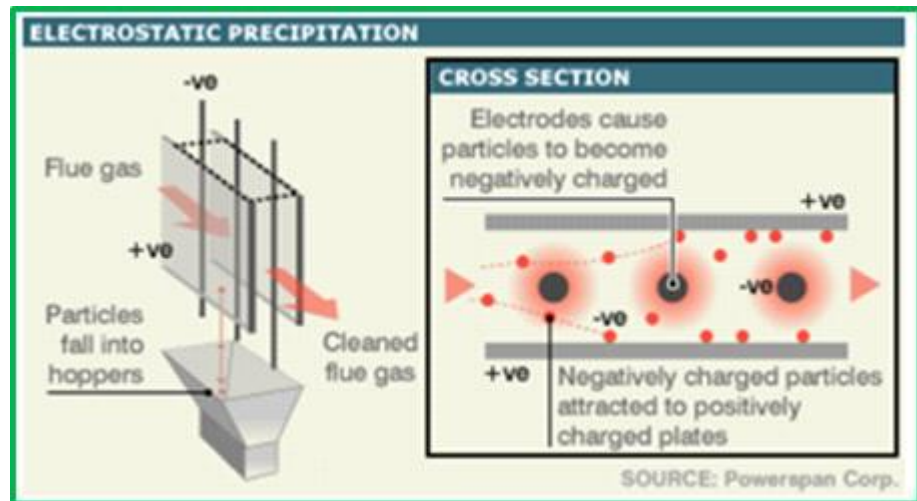


그림 3. 전기집진기의 작동원리.

– ESP는 일반적인 배기 시스템에 비해 상당한 초기 투자 비용이 요구됨. 그러나 회전을 하거나 유동적인 부품이 없기 때문에 비교적 관리 및 정비가 수월함. 또한, 설치 시간과 운영비도 다른 배기 시스템에 비해 저렴함. 그러나 전기집진기는 장치의 크기, 높은 운영비용 및 수집 효율성에 한계가 있음[12]. 사이클론 장치와 전기집진기를 합쳐 효율을 향상 시킨 특허가 있음. 공기 흡입구에는 공기 먼지 입자를 이온화 하기 위해 코로나 전극이 장착되어 있으며, 사이클론의 외부 몸체에 자기 코일이 장착되어 있음. 미세먼지의 제거 효율은 일반 사이클론에 비해 크게 개선되었음.[13] 그 밖에 폐열을 이용하여 전기를 생산 하는 전기 집진기 [14], 자성필터를 이용한 전기 집진기 [15] 및 광촉매를 이용한 전기 집진기등이 보고 되었음. [16]

3. 패브릭 필터 (Fabric filters)

– 백하우스라고 불리는 패브릭필터는 수집된 소재를 지속적으로 제거하는 많은 필터 백으로 구성되어 있음. 먼지가 가득한 공기는 필터 안쪽에서 바깥쪽으로 흐름. 셰이커 메커니즘 또는 블로링이 연속적으로 위아래로 움직이면 먼지가 연속적으로 제거됨(그림 4).

연구의 목적 및
필요성
(계속)

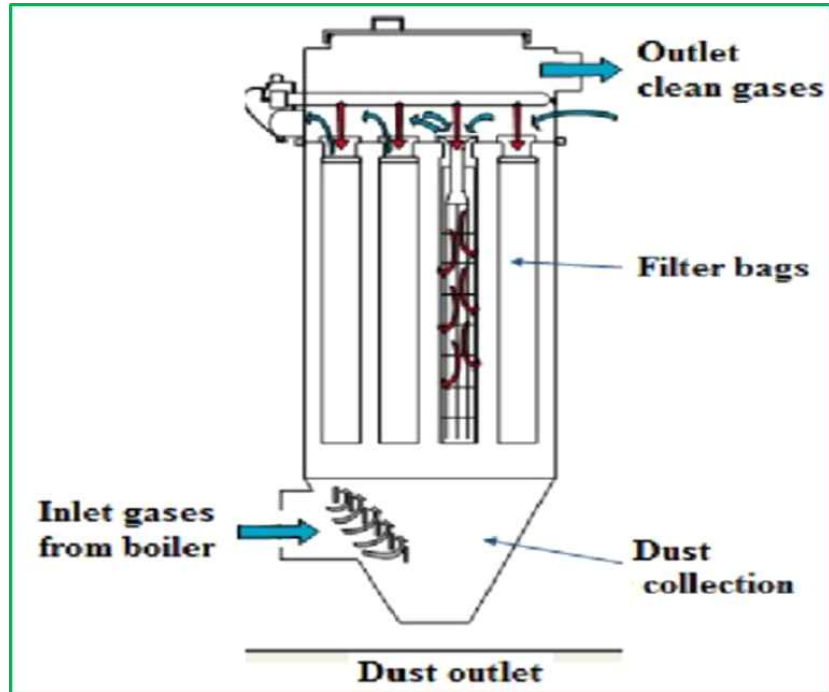


그림 4. 패브릭 필터의 작동원리

- 패브릭 필터는 사이클론에 비해 효율성이 높으며 보통 2차 수집 시스템으로 사이클론 하단부에 위치함. 산업계의 일반적인 관행은 사이클론에 의해 먼지의 주요 부분을 분리하고 필터로 작은 부분만 분리하는 것임. 직물 필터는 직물 재료로 제작되며, 크기가 수집되는 입자의 크기보다 훨씬 큰 개구부를 가지고 있음. 입자가 많은 공기는 필터를 저속으로 통과하고 먼지 입자는 차단됨. 먼지는 시간이 지날수록 쌓이는 양이 많아지기 때문에 간헐적으로 또는 지속적으로 제거할 필요가 있음. 직물 필터는 먼지가 많은 공기의 수분 함량이 높으면 막힐 우려가 높기 때문에 작동하지 않는다는 단점이 있음. 때로는 응결을 피하기 위해 먼지가 많은 공기 흐름을 예열하여 이슬점 위로 온도를 올릴 필요가 있음[17].

-이 필터 방식도 이미 미세먼지 제거에 활용되고 있음. 독일 필터 제조업체인 MANN+HUMMEL이 미세먼지 입자 필터를 성공적으로 테스트했음. 이 장치는 지붕이나 차량 바닥 아래에 설치할 수 있음. 회사는 필터가 PM10에 대해 80%의 최소 목표 분리 효율을 달성하며, 그에 상응하는 추가 에너지 소비량은 무시할 수 있다고 보고함[18]. 이 패브릭 필터 방식은 원형 선풍기와 사용하여 먼지를 제거 하거나 [19], 글리세린 코팅 접착제를 이용하여 미세먼지 제거 효율을 높이기도 함.[20] 유해 가스와 먼지를 동시에 제거 하기 위한 노력도 있음. [21],[22]

주요 연구내용

○ 연구의 목표

- 현재 사용되고 있는 미세먼지 제거 시스템은 몇 가지 단점이 있음. 예를 들어 지름이 매우 작은 입자의 경우 사이클론은 분리 효율이 낮고, 전기집진기의 경우 장치의 크기에 제한이 있으며, 높은 운영비용 및 미세 먼지제거 효율성에 한계가 있음. 패브릭 필터는 먼지가 많은 공기의 수분 함량이 높으면 막힐 수 있는 단점이 있음.

따라서 이러한 기존 기술의 단점을 보완 할수 있는 연구를 제안 하려고 함. 우리는 대기 중의 미세먼지를 효율적으로 제거하고 아울러 에너지를 발생 시키는 미세먼지제거용 소형 풍력 발전기를 제안함. 이 장치에 사용 되는 중심축이 되는 아이디어는 회전 장치에서 발생 하는 " **숨은 원심력**"의 활용임.

- 이 아이디어는 아래와 같이 설명될 수 있음

1. 미세먼지가 포함된 공기를 먼지를 제거하기 위한 위치로의 이동.
2. 분산입자와 연속유체상 밀도차이에 의한 입자의 분리.

미세먼지가 포함된 공기는 바람에 따라 이동 하므로 추가적인 에너지가 필요하지 않고, 바람의 운동에너지를 이용한 회전식 시스템을 이용하여 위 아이디어를 실현 할수 있음.

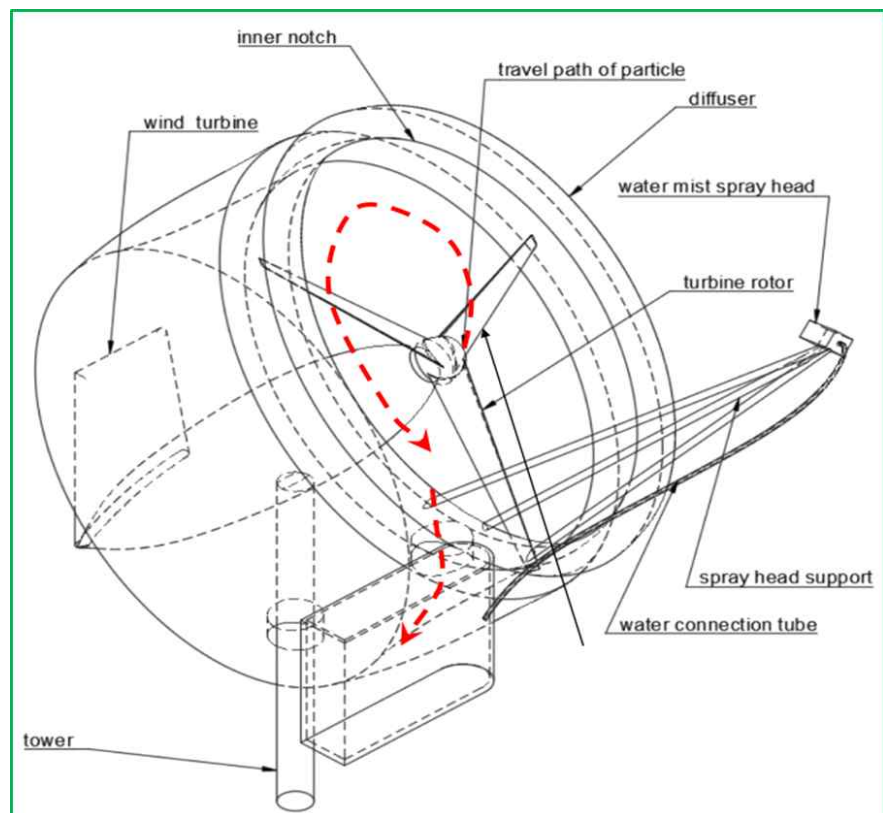


그림 5. 제안된 미세먼지 제거용 풍력 발전기의 개괄적인 설계도

- 그림 5와 같이 특수 설계된 디퓨저 (diffuser)와 먼지통 (sedimentation tank)이 장착된 소형 풍력발전기 (지름 1.4m, 생산 전력 400와트, 타워 높이 6m)를 제안함.

주요 연구내용
(계속)

- 디퓨저는 회전 날개 주변에 배치되어 미세먼지를 포함한 오염된 공기를 바닥으로 이동 시킴. 먼지통은 풍력발전기의 바닥 부분에 위치하여 대기 중의 미세먼지를 제거함. 디퓨저 내부 표면은 미세 먼지 입자의 움직임 및 먼지통에 의한 미세먼지 제거 효율은 물 분무 시스템에서 나오는 물에 의해서 더욱 향상 시킬수 있음.

○ 연구의 추진 전략 및 방법

- 본 제안의 전체적인 목표는 소형 풍력 발전기와 같은 특정 회전 장치들의 "숨은 원심력"의 활용을 통해 대기 중의 미세먼지를 제거하기 위한 혁신적인 아이디어를 입증하는 것임. 그림 6과 같이 이 연구는 11개월 동안 네 개의 단계로 진행될 것임.

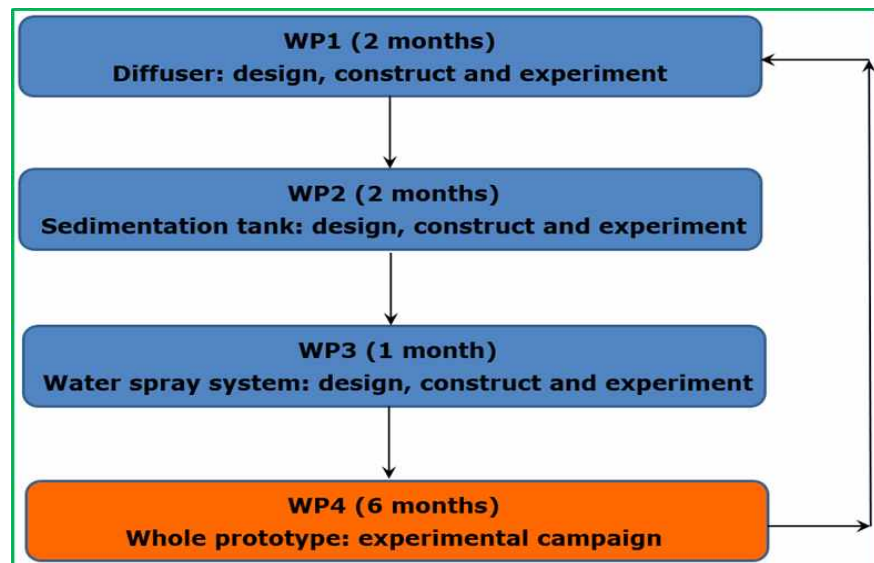


그림 6. PERT (program evaluation and review technique) 순서도

- 첫 2개월 동안 진행될 WP1의 목적은 회전 날개를 밖에 배치될 디퓨저의 설계, 시공 및 실험적으로 평가하는 것임. 디퓨저 구성은 회전 날개의 효율을 높이는 것과 동시에 공기, 미세먼지, 물로 구성된 다상 흐름을 침전 탱크가 위치한 바닥까지 운반하는 것을 목적으로 함. 디퓨저에 의한 미세먼지의 이동 효율은 미세먼지 농도 측정기, SEM, Particle size analyzer 등의 분석 기기로 분석될 것임.

- 2개월 동안 진행될 WP2의 목적은 회전 날개의 하단부에 배치되어야 하는 먼지통을 설계, 시공 및 실험적으로 평가하는 것임. 이 탱크는 미세먼지와 공기를 분리하는 것을 목표로 하고 있음. 침전 탱크의 성능은 미세먼지 농도 측정기, SEM, Particle size analyzer 등의 분석 기기로 분석될 것임.

주요 연구내용
(계속)

– WP3의 목적은 물 분무 시스템을 설계, 시공 및 실험적으로 평가하는 것이다. 후에 디퓨저 내부 표면에서 미세 먼지 입자의 움직임과 먼지통에서의 공기/먼지 분리를 용이하게 하기 위해 공기 내에서 물 입자를 균일하게 분포 하게 만드는 것을 목표로 함. 물 분무 시스템의 미세먼지 농도 측정기, SEM, Particle size analyzer 등의 분석 기기로 분석될 것임.

– WP4의 목적은 다음과 같은 성능 지표를 연구 하는 것임.

i) 풍력 발전기의 전력 계수를 측정하기 위해 장치에 대한 광범위한 실험을 수행하는 것임. 이는 풍력 발전기에 의해 생산된 실제 전력의 비율을 회전 날개에 흐르는 총 풍력으로 나눈 값임. 이를 위해 시스템 전압과 전류, 터빈 회전 속도, 풍속을 측정함.

ii) 미세먼지 제거 효율 분석에 "실험 설계"(DOE) 방법론을 활용할 것임. DOE는 출력에 대한 각 독립 변수의 변동의 평균 효과를 계산할 수 있는 잘 알려진 기법임. 따라서 이 방법은 에너지 성능을 최적화하기 위해 어떤 독립 변수가 시스템의 반응에 가장 큰 영향을 미치는지 알 수 있음. WP4의 결과는 위에서 언급한 시스템 구성 요소, 즉 디퓨저(WP1), 먼지통 (WP2) 및 물 분무 시스템(WP3)의 설계를 업데이트 하기 위한 반복 단계로 6개월 동안 진행될 것임.

○ 주요 연구 내용

– 앞서 기술한 바와 같이, 회전 장치 (rotating devices)의 원심력은 공기 중에 존재하는 미세먼지 제거에 이용될 수 있음. 여러 회전장치 (풍력발전기, 공장에서 사용되는 터빈 및 컴프레서, 자동차 휠) 중에, 본 제안서에서는 풍력발전기를 이용할 것임. 왜냐하면, 공장의 터빈과 컴프레서는 특정 장소에만 설치할 수 있으나, 소형 풍력 터빈은 어디에나 설치할 수 있고, 자동차 휠의 경우도 미세먼지를 도로와 아주 가까운 곳에서만 제거 할수 있음. **풍력 발전기는 설치 장소에 제약이 적고 미세먼지 제거의 기능과 함께 에너지를 생산 할 수 있는 장점이 있음.** LSTM은 최근 다목적 최적화 방법 (Multi-objective optimization)을 이용하여 풍력 발전기의 설계와 최적화를 위한 이론 및 수치적, 실험적 작업을 수행 하였고, 풍력 발전기 연구 개발에 오랜 경험이 있음. [23~27]

– 본 연구는 실제 풍력 발전기의 제작이 아닌 컴퓨터 수치해석을 통해서 회전디스크 근처의 유량을 계산하는 것으로 부터 시작하고 이 수치해석 데이터를 기반으로 실제 장치 제작을 목표로 함. 비록, 회전디스크의 수치 시뮬레이션이 풍력발전기의 복잡한 유장 분포 (Flow field)를 정확하게 재현하지는 못하지만, 유속과 정압 (Static pressure)등은 실제 실험 결과와 매우 일치하게 재현 할수 있음.[28] Stokes number는 입자반응시간 (particle response time)과 시스템반응시간 (system response time)의 비를 나타내는 것임.

주요 연구내용
(계속)

유효 Stokes number는 1 보다 훨씬 작다는 것과 이때 입자들이 유체의 흐름을 잘 따름을 증명할 것임. Stokes number가 낮은 경우, 입자는 흐름에 의해 이동하지만, Stokes 수가 높으면 관성이 우세해지면서, 입자는 유체의 흐름과 다르게 입자의 초기 궤적을 따라 운동을 함.

- 그림 7과 같이, 흐르는 유체에 담겨진 회전디스크 근처의 흐름을 분석함. 디스크는 평평하고 평면에 수직인 축을 중심으로 회전함. 원심력에 의해 회전디스크 가까운 유체의 층이 바깥쪽으로 운반됨. 이러한 현상은 다음과 같이 완전한 3차원 Navier-Stokes와 질량보존 공식에 의해 계산됨.

$$u \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u}{r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \nu \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\} \quad (2)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

- 여기서 μ, ν, w 은 속도장의 구성요소인 반지름 (r), 원주 (ϕ) 그리고 축방향 (z)을 각각 나타냄. 문제의 회전대칭 때문에 각좌표 ϕ 에 관해서는 파생물을 무시하였음. 방정식 (1)-(4)의 경계 조건은 다음과 같음.

$$z = 0, \quad u = 0, \quad v = r\omega, \quad w = 0 \quad ; \quad z = \infty, \quad u = 0, \quad v = 0 \quad (5)$$

- 여기서 ω 은 각속도를 나타냄. 여기에 변수 $\zeta = z \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ 를 대입 하고 속도요소와 압력을 다음 식으로 가정함.

$$u = r\omega F(\zeta), \quad v = r\omega G(\zeta), \quad w = \sqrt{\nu\omega} H(\zeta), \quad p = \rho\nu\omega P(\zeta) \quad (6)$$

- 여기서 ν 는 운동점성률을 나타냄. 식(6)을 (1)-(4)으로 대체 함으로써 다음과 같은 일반 차등 방정식(ODE)을 얻을수 있음.

$$2F + H' = 0 \quad (7)$$

$$F^2 + F'H - G^2 - F'' = 0 \quad (8)$$

$$2FG + HG' - G'' = 0 \quad (9)$$

$$P' + H'H - H'' = 0 \quad (10)$$

- 다음 경계조건을 함께 사용하였음.

$$\zeta = 0, \quad F = 0, \quad G = 1, \quad \zeta = \infty, \quad F = 0, \quad G = 0 \quad (11)$$

$$H = 0, \quad P = 0$$

- 우리는 Matlab에서 구현된 해결 방법 ODE45 루틴을 사용하여 해당 경계 조건(11)과 함께 세 방정식(7)-(9)의 시스템을 수치해석적으로 해결함. 결과는 함수 H의 절대값이 표시된 아래 그림 8에서 볼 수 있고 이 결과는 문헌 보고와 일치함.[29]

주요 연구내용
(계속)

- 다음으로 속도장의 크기를 계산함.

$$|\vec{v}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} = \sqrt{r^2 \omega^2 (F^2 + G^2) + v \omega H^2}$$

- 유효 Stokes 수를 계산하기 위해 활용하는 방법은 식 13와 같음.

$$Stk_{eff} = Stk \cdot \psi(Re_o). \quad (12)$$

- 여기서 ψ 는 자유흐름 (Freestream) 레이놀즈수 (Reynolds number) Re_o 의 함수다. ψ 함수는 $Re_o \ll 1$ 이면 비형상적으로 1을 나타내며, Re_o 가 증가하면 감소한다. Stokes 수 Stk 의 표시방법은 다음과 같음:

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 |\vec{v}|}{18 \mu l_0} \quad (13)$$

- 여기서 ρ_p 와 d_p 는 각각 입자의 밀도와 입자의 직경이다. μ 는 유체의 운동점성률이고, 속도 $|\vec{v}|$ 는 속도의 반경 성분이 최대인 지점 ξ 에서 선택됨. 마지막으로 l_0 는 장애물의 크기이며 여기서는 $l_0=R$ 을 선택함.

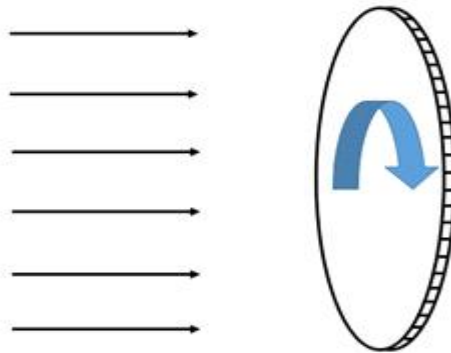


그림 7. 회전디스크 근처의 유체 흐름

- $r=0.7$ [m], $\omega=400$ rpm, $\rho_p=2000$ kg/m³, $d_p=10 \cdot 10^{-6}$ m, $\mu = 1.81 \cdot 10^{-5}$ kg/(m*s)의 평균 반지름을 가정하면, Stokes number는 $Stk_{eff}=0.014 \cdot \psi(Re_o)$ 로 계산됨.

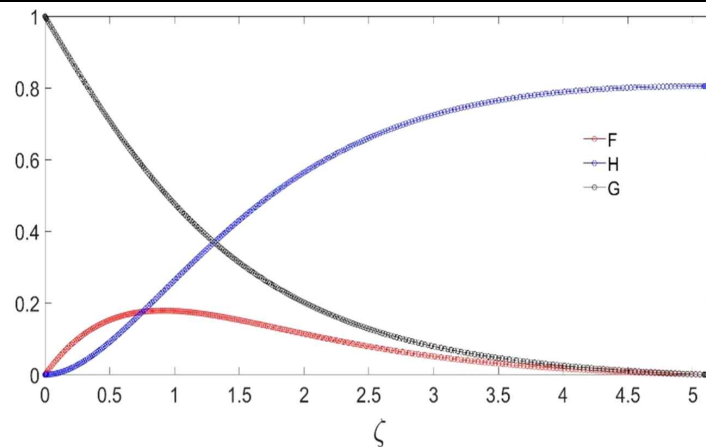


그림 8. 유체 내 회전 디스크 근처의 속도 분포.

주요 연구내용 (계속)

– 이 계산에서 회전디스크의 회전 속도가 400 rpm 이상 일 때, Stokes number가 1이하로 떨어지는 것을 알 수 있음. 즉, **풍력발전기 회전 날개의 회전 속도가 400 rpm 이상이면, 먼지 입자들을 원하는 방향으로 보낼 수 있다고 예상됨.** 이러한 수치해석적 방법을 통해서 아래 미세먼지 제거 겸용 풍력발전기를 제안함.

– 그림 9는 제안된 미세먼지제거 겸용 풍력발전기 설계를 나타냄. 이 장치는 **풍력 변환기에 의해 유도되는 숨겨진 원심력을 이용하여 고체 입자를 제거하는 것에 관한 것임.** 우선 대기 중의 미세먼지를 제거하기 위해 회전수가 많은 소형 풍력발전기를 선택함. 회전 속도가 높은 소형 풍력 발전기 터빈은 크기가 큰 터빈보다 대기 중 공기와 입자를 더 효율적으로 분리할 수 있음. 소형 풍력 발전기는 약 1-2m의 비교적 짧은 날개폭 (회전장치) 때문에, 도시 지역에 설치 하기가 수월함. 많은 주요 도시들은 이미 추가 전력망이 필요 없는 가로등, 기상관측소, 시계 LED 보드등을 위해서 소형 풍력 발전기를 설치함. 따라서 이미 설치된 소형풍력발전기들의 일차적인 목표는 전기에너지를 생성하는 것이지만, **바람의 운동 에너지를 전기 에너지로 전환하는 동안 자동으로 발생하는 숨겨진 원심력을 이 제안서에서 주장하는 바와 같이 사용된 예는 없음.**

– 우리가 제안한 장치를 설명하면, 먼지를 포함한 공기가 바람의 운동 에너지에 의해 회전 날개를 향해 이동되며, 동시에 회전 날개를 강제로 회전시킴. 일반적인 환경에서는 충분히 고밀도(연속 영역)의 유체가 고체 벽에 붙기 때문에, 회전은 회전 날개 표면의 분산된 먼지를 포함한 공기로 전달됨. 추가적인 점성 효과는 회전으로 인한 각 모멘텀을 회전 날개에 인접한 층으로 전달하여 대량 흐름을 만듦.

주요 연구내용
(계속)

이러한 기본적인 물리적 과정 때문에, 회전은 오염된 공기 속에서 숨겨진 원심력을 유도함. 풍력발전기의 경우, 확산 모멘텀 스케일 $\sigma = \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}$ 의 크기 순서에 따라 서스펜션은 회전 날개에 근접한 층에서 회전하기 시작한다는 것은 잘 알려져있음. (여기서 ν 는 서스펜션의 운동점성률을 나타내고, ω 는 각속도를 나타냄, $\omega = 2\pi n$) 그러나 웨이크 영역 회전은 회전 날개 직경의 약 10배까지 지속됨. 따라서 제안된 장치에 따라 숨겨진 원심 효과는 입자를 원하는 분리 영역으로 이동하기에 충분한 시간을 갖음.

- 그림 9는 공간 분리 영역 (Spatial separation region)을 나타내는 회전 날개 주변에 설치된 디퓨저 (diffuser)를 보여줌. 단면적이 증가하는 디퓨저의 설계는 집중적인 입자 제거를 위한 효과적인 조치임. 면적이 증가하기 때문에, 디퓨저에 인접한 지역 유체의 축방향 속도 (axial velocity)가 떨어짐. 따라서, 입자에 작용하는 중력 에너지는 유체의 축방향 운동에너지 보다 커지게 되고, 결과적으로 바닥으로 입자들이 떨어지게 됨. 숨겨진 원심력은 이러한 입자의 침전을 가속화 시킨다는 것은 주목할 필요가 있음. 제안된 아이디어에 따라, 그림 9는 디퓨저 아래에 위치한 먼지통에 먼지가 모아지는 과정을 묘사하고 있음.

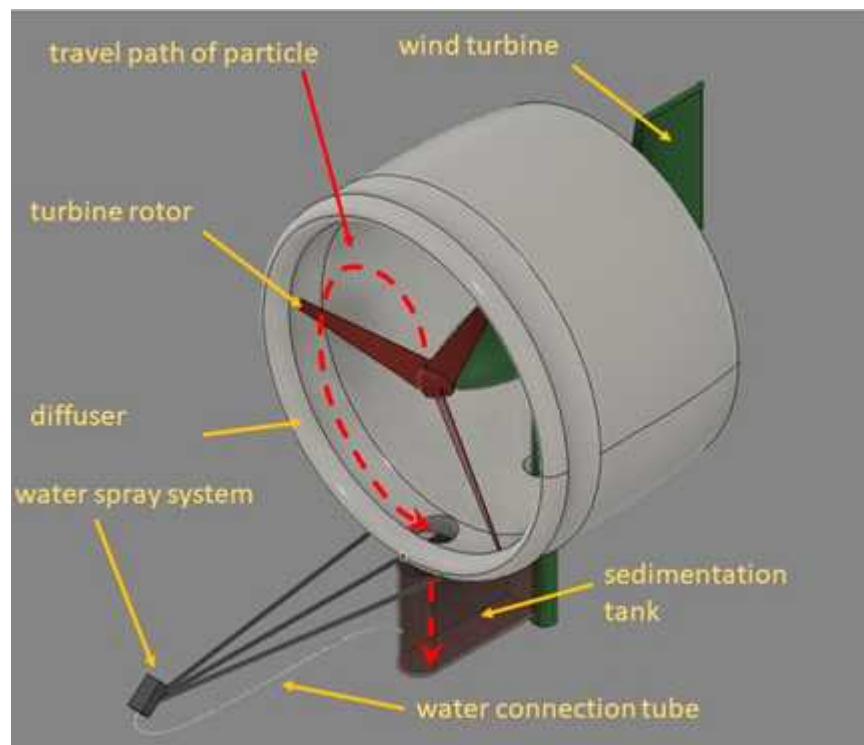


그림 9. 디퓨저와 물 분무 장치를 사용하는 미세먼지 제거용 풍력발전기.

주요 연구내용
(계속)

- 게다가, 물 분무 시스템 (Water spray tower)은 그림 9와 같이 입자를 공기로부터 분리하는 효율을 향상시킬수 있음. 풍속이 매우 낮은 경우에 물분무 시스템을 켜, 입자의 분리 효율성을 향상시킴. 물에 의해 젖은 먼지 입자들은 디퓨저의 안쪽 표면을 향하여 방사가속하게 됨. 디퓨저의 내부는 입자가 내측 노치를 따라 먼지통으로 쉽게 미끄러지도록 함. 내측 및 외측 노치의 상세한 단면은 그림 10과 같음.

- 회전 날개의 최적 설계로 분리 효율을 높일수 있음. 앞서 기술한 바와 같이, 이 설계는 전기에너지 발생에 방해를 주지 않아야 함. 이러한 이유로 회전날개의 각도와 설계는 풍력발전기의 먼지 분리 효율과 에너지 출력에 영향을 미치기 때문에, 시뮬레이션이나 수치해석 과정을 통해서 신중하게 진행 되어야함.

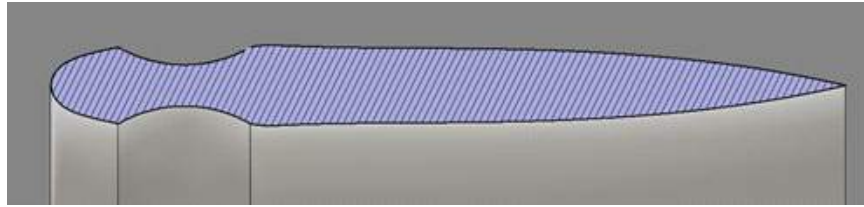


그림 10. 디퓨저의 단면

○ 연구결과의 기대효과 및 파급효과

- 제안된 해결책은 대한 민국의 환경, 사회, 경제적 이익을 제공하고, 한국의 혁신 기반을 구축하며, 미세먼지 제거에 효과적인 기반시설을 구축하여, 대한민국 국민들의 건강을 증진 시키는데 기여 할 것임. 유체역학적 관점에서 한국의 유체역학기술 및 풍력 발전기의 기술을 향상시킬수 있음.

- 경제적 측면에서 보면, 이 제안서는 과학 기술적으로 높은 잠재력을 가지고 있는 한국의 기술을 실제 제품으로 실현 시킬수 있는 가능성으로 기여 할수 있음. 실제로, 이 기술이 상업화가 될 경우 기업들은 새로운 시장을 개척 할수 있을 뿐만 아니라 한국 기업이 미세먼지 제거 시장에서 세계를 선도하는 기업으로 자리 매김 할수 있음. 새로운 기업이 설립 될 수도 있고 기존 기업이 크기를 늘릴수 있으며, 이에 따라 새로운 일자리 창출이 수반 될것으로 보임

- 미세먼지의 제거는 시민들의 건강과 안전을 지키기 위한 것 일 뿐만 아니라 시민들의 적극적인 요구이기도 함. 정부가 미세먼지 제거 하는 기술에 대한 투자를 하여 성공적일 경우, 정부의 행정이 공공의 불편을 해소하는 좋은 사례로 남을수 있음.

연구성과
활용방안

○ 연구 성과 지표 및 목표

성과 지표	성과 목표(정량적 기재)
논문 및 학회	>5
국내외 특허	>1
풍력 발전기의 효율	>80% Betz limit
미세먼지 제거 효율	>40%

○ 연구 성과 활용내용(계획)

활용내용(계획)	활용기관	활용가능기간/대상
풍력 발전기를 부산시 변화가에 설치하여 미세 먼지 제거. 성공적일 경우 한국 전역의 대도시에 설치 가능.	부산시	2년~3년 (예상 수명, 지속적으로 관리 했을시 장시간 사용 가능)
부산의 풍력 발전기 제조 업체에 기술이전을 하여, 제조 업체의 기술력 및 매출 향상에 기여.	미래테크 (부산 소재 풍력발전기 제조 회사)	협의에 따라 변경 가능
풍력 발전기에서 발생된 에너지를 교통신호, 가로등, LED 전광판등에 사용 가능함.	부산시	2년~3년 (예상 수명, 지속적으로 관리 했을시 장시간 사용 가능)

References

1. Raaschou-Nielsen O, Andersen ZJ, Beelen R, et al. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). Lancet Oncol. 2013; 14(9):813-822.
2. Basu R, Harris M, Sie L, Malig B, Broadwin R, Green R. Effects of fine particulate matter and its constituents on low birth weight among full-term infants in California. Environ Res. 2014; 128(2):42-51.
3. Nel A, Xia T, Mädler L, Li N. Toxic potential of materials at the nanolevel. Science (80). 2006; 311(5761):622-627.
4. <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20190227000638>.
5. Staudt JE. Control Technologies to Reduce Conventional and Hazardous Air Pollutants from Coal-Fired Power Plants. Nescaum. 2011:36.
6. Gutierrez-Torres CDC, Quinto-Diez P, Jimenez-Bernal JA, Lopez-Lobato A, Barbosa-Saldaña JG. Effects of particle diameter correction factor on the performance of cyclone collection efficiency models for an industrial application. Int J Miner Process. 2012;102-103:156-160.
7. Dirgo J, Leith D. Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions. Aerosol Sci Technol. 1985;4(4):401-415.

8. Wadenpohl C, Löffler F. Electrostatic agglomeration and centrifugal separation of diesel soot particles. Chem Eng Process. 1994;33(5):371-377.
9. Mizuo M, Isao S. Dust separator. Patent JP2015131265(A), 2015.
10. Goo HT, Gyu KT, Woo CS, Geun AC. Multi-cyclone fine dust capture. Patent KR101863026(B1), 2018.
11. Takai Y, Suzuki H, Ebe K, Kojima K. Patent EP3323337 (A1), 2018.
12. Peters J, Smith S, Uytiepo B. Keeping Dust Under Control, World Coal. 2017; 26(4): 43-46.
13. Ling S. Electromagnetic cyclone dust remover. Patent CN107470040 (A), 2017.
14. Dong PS. Electrostatic dust collector using waste heat gas. Patent KR20190012919 (A), 2019.
15. Park DS, Cho YM, Jung WS, Kwon YJ. Removal device of fine particulate matter. Patent KR20180090417 (A), 2018.
16. Jung NK, Lee SJ. Air purifying deice having both air sterilization and fine dust removal functions. Patent WO2019004629 (A1), 2019.
17. Menden G. Filtering separators without pre-separators in grinding plants in the quarrying industry, Aufbereitungs-Technik. 1984.
18. <https://www.mann-hummel.com>.
19. Min KJ, Hwan KD, Ho KM, Min KJ. An air purification cover for electric fan. Patent KR20190001577(A), 2019.
20. Shin SY, Vahc YW. Adhesive filter for removing fine dust. Patent KR101925847B1, 2018.
21. Kim HG, Lee DG, Lee HS, Lee JY, Park JS. Mobile air cleaning apparatus for treating various types of noxious gas, acid gas and dust, Patent KR20040086224 (A), 2018.
22. Hyen HS, Jung KY. Air cleaner assembly for vehicle, Patent KR20180111352 (A), 2018.
23. Schlichting H. Boundary Layer Theory, 2014.