

선박 디젤엔진 배출 미세먼지 저감을 위한 정전 여과 매연 집진기 개발에 관한 연구

김영훈^{1),2)} · 이건희¹⁾ · 홍기정¹⁾ · 김용진¹⁾ · 김학준¹⁾ · 박인용^{1)*} · 한방우^{1)*}

¹⁾한국기계연구원 지속가능환경연구소

²⁾연세대학교 기계공학과

(투고 2023년 7월 19일, 수정 2023년 9월 1일, 게재확정 2023년 9월 14일)

An Electrostatic Diesel Particulate Filtration System for Removal of Fine Particulate Matters from Marine Diesel Engines

Younghun Kim^{1),2)}, Gunhee Lee¹⁾, Kee-Jung Hong¹⁾, Yong-Jin Kim¹⁾, Hak-Jun Kim¹⁾,
Inyong Park^{1)*}, Bangwoo Han^{1)*}

¹⁾Department of Sustainable Environment Research, Korea Institute of Machinery & Materials

²⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received July 19 2023; Revised September 1 2023; Accepted September 14 2023)

Abstract

In order to reduce particulate matters (PM) from marine diesel engines, we developed novel electrostatic diesel particulate matter filtration system. Electrostatic diesel particulate filtration (DPF) system consists of electrostatic charger and filtration part. The electrostatic charger and filtration part are composed of a metal discharge electrode and a metal fiber filter (porosity: 68.1-86.1%), respectively. In the electrostatic charger part, diesel soot particles are reduced by electrostatic force. The filtration part after electrostatic charger part reduces diesel soot particles through inertial and diffusion forces. The filtration efficiency of electrostatic DPF system was examined through the experiments using engine dynamometer system (300 kW) and ship (200 kW). The PM reduction efficiencies due to inertial and electrostatic forces showed about 70-75% and 80-90%, respectively, according to the RPM of the engine. The differential pressure of the electrostatic DPF system applied to the ship was about 1-9 mbar, which was less than the allowable differential pressure for ship engines in South Korea (100 mbar). The results show that the electrostatic DPF system is suitable for application to the PM reduction emitted from ships.

Keywords: Electrostatic diesel particulate filtration, Particulate matter, Diesel engine, Marine diesel engine

* Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7282 (I. Park), +82-42-868-7068 (B. Han), Fax : +82-42-868-7284 (I. Park and B. Han)
E-mail : ipark@kimm.re.kr (I. Park), bhan@kimm.re.kr (B. Han)

1. 서론

우리나라는 연일 심해지는 미세먼지 관련 환경문제를 해결하기 위해서, '미세먼지 종합대책'을 통해서 수송, 발전, 산업, 생활 분야에 대한 분야별 미세먼지 관리 방안을 제정하여 실행하고 있다. 수송 분야의 미세먼지 배출은 크게 도로 이동오염원과 비도로 이동오염원으로 구분할 수 있다. 최근 국내 미세먼지 배출현황 조사에 따르면 비도로 이동오염원의 국내 미세먼지 배출량(10.1%) 이 도로 이동오염원 배출량(5.9%) 에 비해 높게 보고되고 있으며, 특히 비도로 이동오염원의 절반이상(51.4%) 이 선박에서 배출되는 것으로 보고되었다(Park, 2021). 선박에서 배출되는 환경오염물질은 국제해사기구의 국제협약에 관한 의정서 제정(MARPOL 73/78)을 통해서 제도적으로 배출량 감축에 대한 논의가 지속적으로 이루어지고 있다. 국제해사기구를 통해서 관리되고 있는 선박 배출 환경오염 물질은 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x)이다. 질소산화물을 경우 디젤엔진에서 활용되는 선택적 촉매 환원법(Selective catalytic reduction, SCR) 방법이 주로 연구되고 있다(Jeong et al., 2018; Kim et al., 2014; Ryu et al., 2015). 황산화물 저감을 위해서는 저유황연료 사용 및 스크리버를 이용한 황산화물 배출 저감장치의 적용 개발 연구가 꾸준히 진행되고 있다(Lee et al., 2019; Ha et al., 2020). 미세먼지의 경우, 기존 SCR에 디젤 매연 미립자를 포집할 수 있는 SCRf (Selective catalytic reduction on filter) 기술(Kim et al., 2013), 저배압 설계를 위한 partial-DPF (Diesel particulate filter) 기술(Park et al., 2020) 등이 연구되어 적용되고 있지만, 낮은 장치 배압 설계와 높은 여과 효율 달성의 상충관계에 대한 해결책 마련이 시급하다. 특히, 내연기관의 연소 후 배출되는 수 나노미터 크기 입자의 경우 심혈관 및 뇌혈관까지 침투할 수 있기 때문에 노출 시 건강 위해성(Stampfl et al., 2011; Frank et al., 2013)이 커 연소 후 배출되는 입자를 효과적으로 처리할 수 있는 기술 개발이 시급하다. 우리나라에 미세먼지 종합대책 및 항만미세먼지 감축 목표 달성 및 항만 인근 지역의 주민들의 건강 확보를 위해서는 선박에서 배출되는 미세먼지 저감 기술의 개발 및 현장 적용이 시급한 상황이다.

본 연구에서는 발전, 산업분야에 널리 사용되는 전기 집진(Meij and Te Winkel, 2004; Yang et al., 2018) 원리를 이용하여 선박에 적용할 수 있는 정전 여과 매연 집진기를 개발하였다. 개발된 정전 여과 매연 집진기를 대형 디젤엔진에 적용하여 주요 기능 및 배기가스 내 입자상 물질의 배출 저감 성능을 시험하였다. 개발된 시스템을 실제 운용 중인 선박에 설치하여 실제 선박에서의 미세먼지 배출 저감 성능 및 선박 적용성을 시험하였다. 또한 질량단위의 배출 저감 목표 뿐 아니라 내연기관 연소 후 배출되는 입자상 물질의 크기 별로 수농도 감소 효과를 비교함으로써 잠재적 건강 위해성을 가지는 입자에 대한 저감 효과를 함께 시험하였다.

2. 실험방법

2.1 디젤 엔진 배출입자 저감을 위한 정전 여과 매연 집진기의 구성

선박의 배출 물질 저감장치는 선박 내부 기관의 허용 배압 기준(100 mbar 이하) 에 맞추어 설계해야 한다. 기관 내압은 낮으면서 높은 입자 저감 효율을 달성하기 위해 정전하전부와 여과 집진부로 구성된 다단의 정전 여과 매연 집진기를 구성하여 선박에 적용하였다.

정전 여과 매연 집진기의 상부의 정전 하전부의 작동 원리는 다음과 같다. 그림 1에 설명된 것과 같이, 방전극에서 연속적으로 이온을 발생하여 배기가스 내부의 배출입자를 단극 하전시키고 정전기적 인력을 통해서 접지극이 연결된 하전부의 금속 벽면으로 부착한다. 벽면에 부착된 배출입자는 연속적으로 하전 부착되는 탄소입자에 의해 조대화 되어 일정 크기 이상으로 성장할 경우 유체로 인한 항력 및 입자간의 충돌(Hinds, W. C. and Zhu, Y., 2022; John, W., 1995)로 의해 하전부의 벽면에서 탈착하여, 후단의 집진부로 전달된다. 따라서, 정전 여과 매연 집진기의 하전부를 통해 입자를 하전 및 일시적 포집을 하고, 추가적으로 입자의 조대화 효과를 이루고자 하였다.

하전부의 구성은 구조적으로 고전압을 인가할 수 있는 방전극과 접지극을 전기적으로 분리시켜 전계를 형성하고, 구조를 대칭적으로 구성하여 안정된 전계를 형

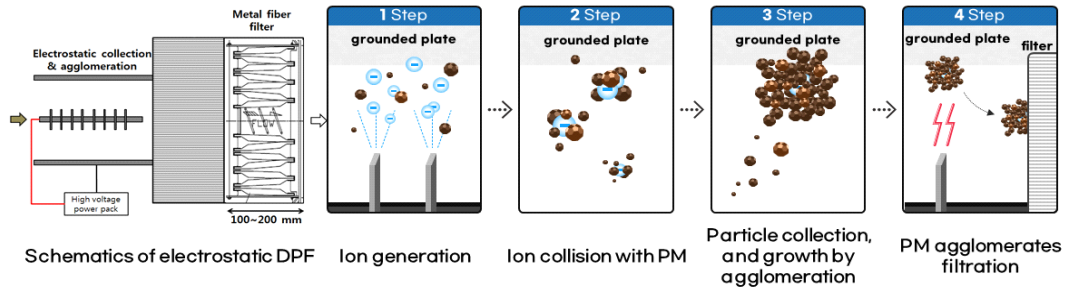


Figure 1 Operation mechanism of electrostatic PM filtration

성할 수 있도록 구성하는 것이 일반적이다. 내연기관에 이를 적용할 경우에는 배관의 중심부에 방전극을 위치하고, 외부 배관을 접지하여 관 형태의 정전 하전부를 구성한다. 선박엔진과 같은 대형 디젤엔진의 경우, 많은 배기용량을 처리 하기 위해서 관 형태의 정전 하전부를 다발형으로 병렬 구성하여 많은 양의 가스와 입자를 효과적으로 처리하는데 사용한다. 고전압은 음전압 고전압발생기(C.160, KSC Korea swithcing, Korea)를 이용하여 고전압을 인가하였다.

디젤엔진 배출입자의 저감장치는 주로 디젤 미립자 필터(Diesel particulate filter, DPF)를 통해서 매연 속 미세 입자를 여과 분리하여 저감한다. 상용으로 널리 활용되는 세라믹 소재의 DPF의 경우 효과적인 매연 입자 분리를 위해서 상대적으로 높은 장치 차압을 가지고 있다. 본 연구에서 구성하는 디젤 정전집진기의 경우 매우 낮은 장치 차압을 목적으로 하기 때문에, 기본 차압 저감을 위해서 금속선(Metal fiber)로 구성된 금속선 필터(Metal fiber DPF, FiberTech Co., LTD., Korea)를 디젤 미립자 필터로 활용하여 실험을 진행 하였다. 금속선 필터의 경우, 단위 부피 당 설치된 금속선의 밀도를 조정하면서 자유롭게 집진부의 공극률을 조정할 수 있어, 효과적으로 장치 차압을 조절할 수 있는 장점을 가진다 (표 1). 본 연구의 정전 여과 매연 집진기에는 filter media density가 1.5 kg/m³ (공극률 79.2%)의 금속선 필터를 적용하였다.

Table 1 Porosity of metal fiber DPF

Filter media density (kg/m ³)	Porosity (%)
2.3	68.1
1.5	79.2
1.3	82
1.0	86.1

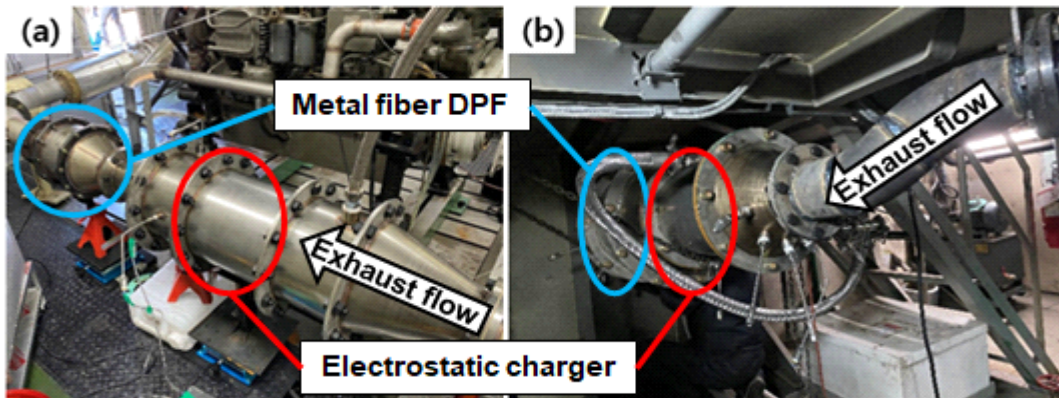


Figure 2 Pictures of electrostatic DPF installed at (a) engine dynamometer system and (b) Tamnara ship

본 연구에서는 높은 공극율을 가지는 여과 집진부를 구성하여 장치의 허용 배압을 낮추고, 떨어지는 여과 효율은 정전하전을 이용한 입자 조대화를 통해서 극복하는 방법으로 고효율-저차압 장치를 구성하고자 한다. 실제 실험에 사용된 정전 여과 매연 집진기를 그림 2에 표시하였다.

정전 여과 매연 집진기의 하전부는 충분한 하전을 일으킬 수 있는 -8 kV의 전압을 인가하였으며, 그 때 약 200 μ A 이상의 전류가 확인되어 하전기에서 음 전하가 활발하게 방출되는 것을 확인하였다. 육상시험 및 해상 시험 중 정전 여과 매연 집진기의 하전부에 각각 -8, -11 kV 전압을 인가하여 집진 성능을 시험하였다.

2.2 집진 성능 실험 및 측정 방법

2.2.1 육상 성능 시험

육상성능 시험의 경우 엔진동력계를 이용하여, 대형 디젤엔진에서 배출하는 매연 속 입자 저감 성능 시험 평가하였다. 이 때, 사용된 엔진 제원은 표 2에 표시하였다. 엔진 동력계를 활용하여 E3 mode (ISO 8178-4) 실험을 통해서 점진적인 부하 변동 상황을 설정하여 다양한 부하조건에서의 성능을 시험하였다. 입자 발생량의 측정은 국제해사기구(International maritime organization, IMO)의 측정방안에 따라 FSN (Filter smoke number)법을 이용하는 매연측정기(AVL smoke meter 415SE, AVL List GmbH, Austria)를 활용해서 매연 속의 배출 미세먼지 양을 측정하였다 (Lappi and Ristimäki, 2019). 매연측정기를 통한 배출 미세먼지 측정은 sampling 10초, purging 10초를 5회 반복하여 평균값을 사용하였다. 매연 속 입자상물질의 질량 및 수농도 분포는 Dekati 사의 Electrical low pressure impactor(ELPI, High Resolution ELPI+, Dekati Ltd., Finland) 기기를 이용하여 측정하였다. 측정 전, 입자의 응축 성장을 방지하기 위해서 고온 희석기(eDiluter Pro, Dekati Ltd., Finland)를 이용하여 배출 매연을 약 200 °C의 clean air로 1차 희석(10배 희석) 후 상온의 clean air로 2차 희석(10배 희석)하여 ELPI를 이용한 입자 측정을 진행하였다 (총 100배 희석). 매연 여과장치의 내부 차압은 장치의 전후단에 포트를 연결하여 차압계(Testo 400, Testo

SE&Co., Germany)를 통해서 실시간으로 측정하여 엔진 운전시간에 대한 차압 증가에 대한 경향을 측정하였다. 성능시험은 결과의 오차를 줄이기 위해 3회 반복 실험 하였다.

Table 2 Test engine specifications

DD6CAM Engine	Specifications
Maximum power	430 PS (@ 2,000rpm)
Displacement (L)	12.92
Number of cylinder	6
Bore x stroke (mm)	133 × 155
Compression ratio	17:1
Inhaler type	Turbo charged with cooler
Cooling system	Forced lubrication with gear pump
Weight (kg)	1,560

2.2.2 해상 성능 시험

해상 성능 시험은 실제 운항 선박에 정전 여과 매연 집진기를 설치하여 진행하였다. 실증 시험에 사용된 선박은 내수면 운항 선박(탐나라호, ㈜나미나라)으로 208 kW급 주기관을 탑재한 선박이다. 주기관의 배관에 개발된 정전 매연여과장치를 설치하여 실제 선박에서 기동과 성능을 검토하였다. 선박 운항 중 발생하는 입자상 물질과 저감 성능을 평가하고자 선박의 운항 부하를 엔진 회전수를 저, 중, 고 부하로 구분하여 실험하였다 (Idle 상태, 900 rpm, 1200 rpm). 입자 발생량 측정 및 차압 성능 지수 측정은 육상시험과 동일하게 FSN법과 ELPI를 활용하여 측정하였다. 나아가, 입자 크기에 따른 제거 메커니즘(확산, 정전기력, 관성)을 파악하고자 수농도 및 부피농도로 비교하였다. 수농도 분포를 통해 확산 및 정전기력으로 인한 <1 μ m 입자들, 부피농도를 통해 정전기력 및 관성으로 인한 수마이크로미터 입자들의 제거 메커니즘을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 육상 디젤 엔진 시험을 통한 정전 여과 매연 집진기 성능

시험용 정전 여과 매연 집진기를 엔진동력계 상에 적

용하였을 때 입자의 저감 성능은 표 3을 통해 정리하였다. 시험 디젤엔진의 배출 매연 중 입자상 물질은 상대적으로 저부하 조건(50% 이하)에서 미세먼지의 질량이 약 10 mg/m³의 수준으로 배출됨을 파악했다. 또한, 엔진의 출력이 한계 부하조건으로 상승할수록 저부하 조건과 비교하였을 때, 상당히 많은 양의 입자상 물질이 배출되는 것을 확인 하였다. 정전 여과 매연 집진기의 성능은 엔진 출력의 E3 운전 모드의 전체 실험 조건에서 80%에 근접하는 높은 효율을 관찰하였다. 특히 25% 이하 부하 영역에서는 정전 여과 매연 집진기를 통해 배출되는 입자상물질의 질량을 약 90%이상 저감하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 배기유량이 작은 저유량 조건에서 하전기를 통과하는 배기가스의 속도가 느려짐에 따라 하전부 체류시간이 증가하여 효과적으로 매연 속 검댕입자가 하전되어 전기집진 효율이 증가되었을 것으로 판단된다. 높은 부하조건에서는 배기유량 증가에 따른 하전부 체류시간의 감소가 예상되지만 입자의 관성력의 증가에 따라서 집진부에서의 여과 효율이 증가됨에 따라 약 79% 이상의 저감 효율을 확인하였다(Hinds, W. C. and Zhu, Y., 2022; Mizuno, A., 2000).

정전 하전기의 장치 차압은 전체 부하 영역에서 선박에서의 규제 조건인 100 mbar이하로 구동하는 것을 확인하였다(그림 3). 저, 중부하의 운전에서는 운전 시간 증가에 대한 장치 차압의 증가가 크지 않지만, 최고 부하 조건에서는 장치의 차압이 빠르게 증가하는 것을 확인하였다. 실험에 사용된 엔진의 특성상 최고부하조건에서의 입자상물질 배출량이 특히 많아, 배출 매연이 여과집진부에 빠르게 축적되어 장치의 차압이 크게 증

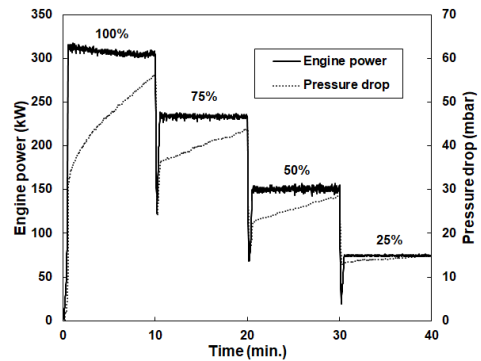


Figure 3 Pressure drop of electrostatic DPF under E3 cycle mode

가한 것으로 확인할 수 있다. 실선박의 경우 최고 부하의 조건으로 장시간 운전하는 방식은 거의 없기 때문에 이처럼 빠르게 차압이 증가하지 않을 것으로 예상할 수 있으나, 일정 시간 가동 후, 여과 집진부의 차압을 효과적으로 재생할 수 있는 수단의 적용이 필요하다. 기존 재생에 활용되는 flame burner, electric heater and microwave heater (Zhang et al., 2023)등을 적용하면 금속섬유필터의 높은 공극률을 통해 보다 빠른 재생시간을 이끌어 낼 수 있을 것이라 판단된다.

3.2 선박 실증 실험을 통한 디젤 선박 배출 정전 여과 매연 집진기 성능

정전 집진장치의 해상 검증을 위해서, 개발된 장치를 실제 내수면 운항 선박의 주기판의 배관에 설치 후 운행하면서 장치의 성능 및 기능에 대한 시험을 수행하였다.

그림 4는 배출 가스 내 입자상 물질의 수농도 변화를

Table 3 Experimental results (Engine dynamometer)

Load (%)	Engine Output (kW)	PM at engine exhaust (mg/m ³)	PM at electrostatic DPF exhaust @E3 cycle run #1 (mg/m ³)	PM at electrostatic DPF exhaust @E3 cycle run #2 (mg/m ³)	PM at electrostatic DPF exhaust @E3 cycle run #3 (mg/m ³)	PM at electrostatic DPF exhaust @average (mg/m ³)	Efficiency (%)
25	75	9.6	0.69	0.88	1.03	0.87	90.97
50	150	10.01	1.59	1.54	2.03	1.72	82.81
75	225	17.71	3.31	3.64	3.94	3.63	79.50
100	315	48.03	9.02	10.51	10.47	10.00	79.17

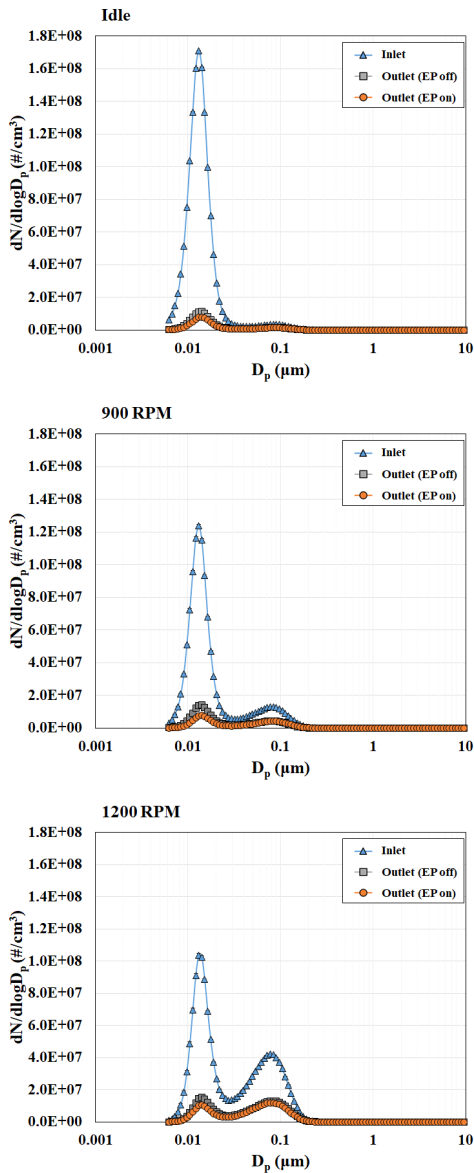


Figure 4 Number concentration of exhaust PM under ship experiment(without load)

나타낸 그림이다. 선박 기관 출력이 증가함에 따라서, 축적모드(Hinds, W. C. and Zhu, Y., 2022)에 해당하는 영역(30-300 nm)의 입자상 물질 수농도 변화가 뚜렷하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 해당 크기 영역의 입자는 배기가스 내 배출입자의 질량 기여 분에 해당하는 크기 영역의 입자로서, 선박의 출력이 증가함

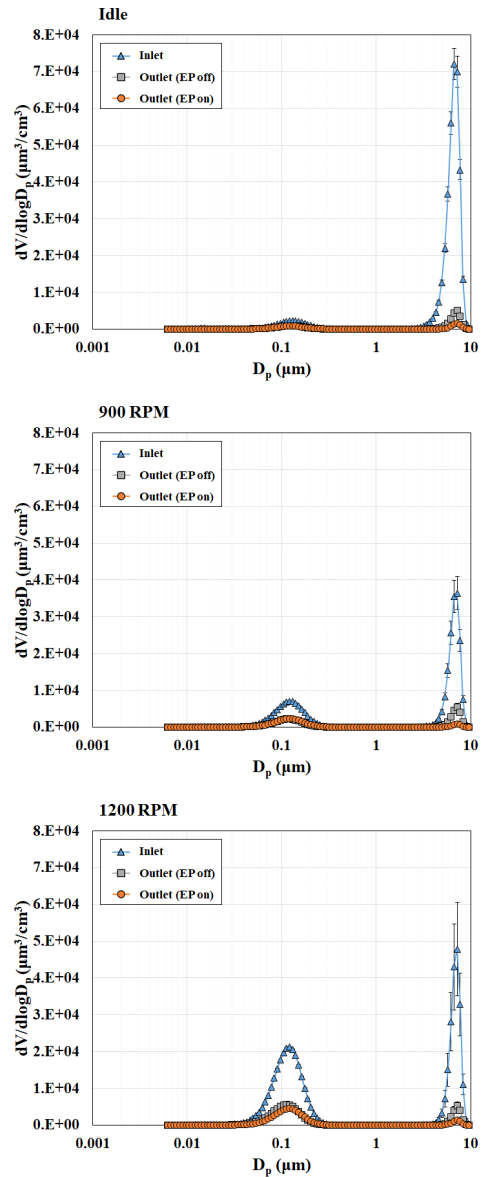


Figure 5 Volume concentration of exhaust PM under ship experiment(without load)

에 따라 많은 양의 미세먼지가 배출될 것으로 예측할 수 있다. 본 연구에서 제한한 정전 여과 매연 집진기를 적용하였을 때, 모든 운전영역에서 입자상 물질 배출 수농도가 급격히 감소되는 것을 확인할 수 있다. 특히 핵화모드에 해당하는 영역(6-30 nm)의 수 나노미터 크기의 입자의 저감량이 높음을 확인할 수 있으며, 고

Table 4 Experimental results (ship test)

Operation condition	Engine RPM	PM at engine exhaust (mg/m ³)	PM at electrostatic DPF exhaust (mg/m ³)	Efficiency (%)	pressure drop (mbar)
Electrostatic DPF off (w/o load)	600	2.377	0.420	82.3	1
	900	4.654	1.047	77.5	1
	1200	9.910	2.446	75.3	2
Electrostatic DPF on (w/o load)	600	2.377	0.145	93.9	1
	900	4.654	0.892	80.8	3
	1200	9.910	1.841	81.4	3
Electrostatic DPF on (Full load)	600	10.769	1.152	89.3	3
	900	27.731	5.413	80.5	5
	1200	50.182	6.452	87.1	9

부하 운전 시에 축적모드의 수농도 저감효과도 상당히 높음을 확인하였다. 하전부에 고전압을 인가함에 따라서, 핵화 영역의 입자들의 저감효과가 다소 증가하는 것을 확인하였다. 이는 정전 여과 매연 집진기를 활용할 경우 정전기력이 지배적인 영역에서의 입자 저감 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 그림 4와 5를 통해서 입자의 크기 별 저감 효율에 관한 관계를 살펴보면, 하전부 off (EP off) 조건에서 20 nm보다 작은 입자 크기 범위에서는 확산력을 통해 입자가 여과 집진부에서 저감되고, 2 μm보다 큰 입자 크기 범위에서는 관성력을 통해 입자가 여과 집진부에서 저감되었음을 알 수 있다(Hinds, W. C. and Zhu, Y., 2022). 하전부 on (EP on) 조건에서는 추가적인 정전기력을 통해 대부분의 질량기여분에 해당하는 약 200 nm보다 작은 입자 크기 범위와 2 μm보다 큰 입자 범위에서 저감효율이 소폭 상승하는 것을 확인할 수 있다.

표 4는 운행조건에 대한 입자 저감 성능을 정리한 결과이다. 본 연구에서 제안한 정전 집진방법을 활용할 경우 선박의 다양한 운전조건에서 약 75% 이상의 입자 질량 저감 효율을 달성하였다. 배기가스 내 입자의 크기분포를 통해서 관찰하였듯이, 정전 하전기를 적용하였을 때 입자 저감 성능 향상을 기대할 수 있고, 질량 저감 기여 분 효과를 표시하면 약 5-12%의 효율 향상의 역할을 관찰하였다. 이러한 성능향상이 장치의 배압은 증가시키지 않으면서 배출 입자상 물질 저감 효율을 증가시킬 수 있기 때문에 제한적 배압 조건을 가지는

응용분야에 적용성이 유망한 기술임을 판단하였다. 개발된 장치는 실제 선박에서 초기 설치 차압 및 운전 차압이 10 mbar 이하의 매우 작은 수준으로 작동하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 정전하전기와 여과집진기를 조합하여 선박 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질 저감용 정전 여과 매연 집진기를 개발 하였다. 개발된 장치를 엔진 동력계 및 실제 선박에 적용하여 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질의 저감 성능을 파악하였다.

엔진동력계 상에서 400 kW 급 디젤엔진에 적용 개발된 E3 시험 모드에서 배출 물질 질량농도 기준으로 약 79% 이상의 저감 성능을 확인하였다. 정전 여과 매연 집진기를 활용할 경우 핵화 모드 및 축적모드에 배출되는 입자의 명확한 저감 효과를 배기가스 내부의 입자상 물질의 수농도 분포를 통해 확인하였다. 장치의 차압은 전 운전 영역에서 저감장치 배압 규제 이하로 운전되는 것을 확인하였다.

실제 선박에 개발된 정전 여과 매연 집진기를 적용하였을 때, 다양한 운전조건에서 75%이상의 배출 입자상 물질의 질량 저감 효과를 관찰하였다. 개발된 정전 여과 매연 집진기는 10 nm정도의 작은 영역의 입자상 물질은 확산력과 정전기력을 통해서 집진하고, 수백 나노미터 크기의 입자상 물질은 관성력을 통해서 집진되

는 것을 입자상 물질 크기에 대한 입자 저감 성능 판별을 통해 확인하였다. 핵화모드에 해당하는 수 나노미터 크기의 입자상 물질의 경우 심혈관 및 뇌혈관 질환을 유발할 수 있는 물질로써, 본 연구에서 개발된 정전 여과 매연 집진기를 이용할 경우, 이러한 극 미세먼지를 효과적으로 저감할 수 있는 것을 확인하였다. 배출 미세먼지 질량 저감 통한 항만 미세먼지 저감 목표 달성뿐 아니라 잠재적 질환 유발 물질의 효과적 저감을 동시에 달성할 수 있다.

본 연구에서 개발된 정전 여과 매연 집진기를 적용할 경우 상대적 저배압 조건에서 80% 수준의 고효율 집진이 가능하고, 향후 디젤엔진을 주 기관으로 사용하는 선박에 적용하여 배출물질 저감 장치로 활용성을 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20220568, 중소선박 보급형 온실가스 등 저감장치 개발).

References

- Frank, B., Schuster, M. E., Schlögl, R., and Su, D. S. (2013). Emission aktivierter Rußpartikel: die Kehrseite der Medaille moderner Dieselmotoren. *Angewandte Chemie*, 125(10), 2736-2741.
<https://doi.org/10.1002/ange.201206093>
- Ha., S.-Y., and Gug, S. (2020). Improving the Port-Reception-Facility System, *Journal of Navigation and Port Research*, 44(6), 488-493.
<https://doi.org/10.5394/KINPR.2020.44.6.488>
- Hinds, W. C. and Zhu, Y. (2022). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, John Wiley & Sons.
- ISO 8178-4 (2007). London, International Organization for Standardization.
- Jeong, H., Kim, T., Im, E. , and Lim, D. -H. (2018). Optimum Synthesis Conditions of Coating Slurry for Metallic Structured De-NOx Catalyst by Coating Process on Ship Exhaust Gas, *Clean Technology*, 24(2), 127-134.
<https://doi.org/10.7464/ksct.2018.24.2.127>
- John, W. (1995). Particle-surface interactions: charge transfer, energy loss, resuspension, and deagglomeration, *Aerosol science and technology*, 23(1), 2-24.
<https://doi.org/10.1080/02786829508965291>
- Kim, C., Kim, H., Lee, G., Choi, J., Chon, M., Shin, S. S., and Suh, H. K. (2013). PM Reduction Characteristics of Partial Metal DPF with Screen Mesh Filter Structure, *Transactions of KSAE*, 21(3), 82-87.
<https://doi.org/10.7467/KSAE.2013.21.3.082>
- Kim, S. W., Jung K. S., Kim, H. S. and Choi, J.S. (2014). Prediction of NOx emission for marine diesel engines of existing ship, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 38(6), 674-680.
<https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.6.674>
- Lappi, M. K., and Ristimäki, J. M. (2019). Comparison of filter smoke number and elemental carbon from thermal optical analysis of marine diesel engine exhaust, *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(2), 602-609.
<https://doi.org/10.1177/1475090218776196>
- Lee, C., and Chang, H. (2019). The Numerical Study on Effect of the Droplet Sizes on Internal Mass Transfer in the Spray Type Scrubber, *Clean Technology*, 25(1), 19-32.
<https://doi.org/10.7464/ksct.2019.25.1.019>
- MARPOL 73/78 (1998), London, International Maritime Organization.
- Meij, R., and Te Winkel, B. (2004). The emissions and environmental impact of PM10 and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD, *Fuel processing technology*, 85(6-7), 641-656.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.11.012>
- Mizuno, A. (2000). Electrostatic precipitation, *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, 7(5), 615-624.
<https://doi.org/10.1109/94.879357>
- Park, J. S., (2021). Trends in development of integrated reduction technology for fine dust emissions from ships, Seoul, Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion

- Park, N.-K., Kwon, B. C., Lee, S. W., Kang, D., Lee, J. H., Hwang, S. Y., and Seo, M. J. (2020). Research Trend of Hybrid De-NOx Process and Catalytic Filter for Denitrification of Combustion Exhaust Gas, *Journal of energy & climate change*, 15(1), 48-64.
<https://doi.org/10.22728/JECC.2020.15.1.048>
- Ryu, Y. H., Kim, H.Y., Cho, G.B., Kim, H. S. and Nam, J. G. (2015). A study on the installation of SCR system for generator diesel engine of existing ship, *Journal of Adavanced Marine Engineering and Technology*, 39(4), 412-417.
<https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.4.412>
- Stampfl, A., Maier, M., Radykewicz, R., Reitmeir, P., Gottlicher, M., and Niessner, R. (2011). Langendorff heart: a model system to study cardiovascular effects of engineered nanoparticles, *ACS nano*, 5(7), 5345-5353.
<https://doi.org/10.1021/nn200801c>
- Yang, Z., Zheng, C., Liu, S., Guo, Y., Liang, C., Wang, Y., Hu, D. and Gao, X. (2018). A combined wet electrostatic precipitator for efficiently eliminating fine particle penetration, *Fuel Processing Technology*, 180, 122-129.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.013>
- Zhang, Z., Dong, R., Lan, G., Yuan, T., and Tan, D. (2023). Diesel particulate filter regeneration mechanism of modern automobile engines and methods of reducing PM emissions: A review, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(14), 39338-39376.
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-25579-4>