

습식전기집진기를 활용한 입자상 물질 및 황산화물 저감 성능에 관한 실험적 연구

김종립* · 오원철** · 이원주*** · 최재혁****

* 한국조선해양기자재연구원 선임연구원, ** (주)정원이앤씨 대표, *** 한국해양대학교 교수

Experimental Study on Reduction of Particulate Matter and Sulfur Dioxide Using Wet Electrostatic Precipitator

Jong-Lib Kim* · Won-Chul Oh** · Won-Ju Lee*** · Jae-Hyuk Choi****

* Senior Researcher, International Standard Team Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 49111, Korea

** CEO, JUNGWON ENC.Co.,Ltd, Changwon 51793, Korea

*** Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요약 : 본 연구에서는 강화되는 황산화물 및 입자상물질의 배출규제를 만족시키기 위한 후처리장치로 습식전기집진기에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험을 위해 선박용 중유(HFO, 황함유량 약 2.1%)를 연료로 사용하는 선박용 4행정 디젤엔진(STX-MAN B&W)을 활용하였으며, 연돌에 설치된 습식전기집진기 입/출구에서 측정을 실시하였다. 미세먼지 측정을 위해서는 광학식 계측기(OPA-102) 및 중량농도측정방식(Method 5 Isokinetic Train)을 이용하였으며, 황산화물 계측을 위해서는 FT-IR(DX-4000)을 사용하였다. 엔진부하는 50%, 75%, 100%로 변화시키면서 실험을 실시하였다. 실험 결과로, 엔진부하가 50%에서 100%로 변화함에 따라 미세먼지 저감 효율은 모든 부하 조건에서 94~98% 정도의 높은 저감 효율을 나타내었다. 추가적으로 습식전기집진기 퀘칭존에서 배기가스의 온도를 낮추는 과정 중 세정액에 의한 이산화황(SO₂) 저감을 확인할 수 있었으며, 저감율은 엔진부하에 따라 55%~81%로 확인되었다.

핵심용어 : 황산화물, 이산화황, 입자상물질, 탈황장치, 스크러버, 습식전기집진기

Abstract : This experimental study aims to investigate the use of a wet electrostatic precipitator as a post-treatment device to satisfy the strict emission regulations for sulfur oxides and particulate matter (PM). The inlet/outlet of a wet electrostatic precipitator was installed in a funnel using a marine four-stroke diesel engine (STX-MAN B&W) consuming marine heavy fuel oil (HFO) with a sulfur content of about 2.1%. Measurements were then obtained at the outlet of the wet electrostatic precipitator; an optical measuring instrument (OPA-102), and the weight concentration measurement method (Method 5 Isokinetic Train) were used for the PM measurements and the Fourier transform infrared (FT-IR; DX-4000) approach was used for the sulfur oxide measurements. The experiment was conducted by varying the engine load from 50%, to 75% and 100%; it was noted that the PM reduction efficiency was a high at about 94 to 98% under all load conditions. Additionally, during the process of lowering the exhaust gas temperature in the quenching zone of the wet electrostatic precipitator, the sulfur dioxide (SO₂) values reduced because of the cleaning water, and the reduction rate was confirmed to be 55% to 81% depending on the engine load.

Key Words : Sulfur oxide (SO₂), Sulfur dioxide (SO₂), Particulate Matter (PM), Desulfurization, Scrubber, Wet electrostatic precipitator

1. 서론

국제항해를 종사하는 선박은 전 세계의 무역량 80% 이상의 물동량을 운송하고 있다. 선박은 약 10억 톤(전 세계 CO₂

배출량의 약 3%)의 이산화탄소(CO₂) 및 질소산화물(전 세계 NO_x 배출량의 약 15%), 황산화물(전 세계의 SO_x 배출량의 9%)의 및 입자상물질(PM), 일산화탄소(CO)를 배출하고 있다 (Eyring et al., 2010; UNCTAD, 2020; Toscano and Murena, 2019).

국제해사기구(IMO)는 배출통제구역(ECA, Emission Control Areas)를 지정하고, MARPOL 부속서 VI을 통하여 환경규제

* First Author : jlkim@komeri.re.kr, 051-400-5174

† Corresponding Author : choi_jh@kmou.ac.kr, 051-410-4257

습식전기집진기를 활용한 입자상 물질 및 황산화물 저감 성능에 관한 실험적 연구

를 강화함으로써 환경오염을 줄이기 위하여 많은 노력을 하고 있다. IMO는 2020년 1월 1일부터 황산화물 규제를 발효시켰고, 이로 인하여 국제항을 운항하는 모든 선박은 황산화물 규제 만족을 위해 탈황장치(Scrubber)설치, 황함유량 0.5% 이하의 저유황유 사용, LNG 연료 추진선박으로 개조와 같은 강화된 황산화물 규제 만족을 위한 방안을 선택하여 시행하고 있다. 선사들은 선박의 노후화 상태와 경제성 분석 및 2020년 1월 이후 COVID-19 확산으로 인한 저유황유 가격의 급락(Do and Lee, 2020)으로, 최근의 선사들은 저유황유 사용 62%, Scrubber 설치 36%, LNG 연료 2% 정도로 채택한 것으로 확인되었다(Ryu, 2019).

선사에서 가장 많이 선택한 저유황유의 사용은 추가적인 장비 설치가 없는 것이 장점이다. McCaffery et al.(2021) 및 Gysel et al.(2017)의 연구에서 저유황유를 사용하는 컨테이너 선박 및 초대형 원유 운반선과 고유황 HFO를 사용하는 선박과의 배기가스 비교 연구 결과 저유황유를 사용하는 선박에서 NO_x , SO_x , PM 및 CO 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 저유황유의 사용은 낮은 점도로 인한 연료유 펌프의 고착, 연료유 왁스 성분의 고체화 같은 문제가 초래될 수 있다는 단점이 있다(KR, 2018).

두 번째로 많이 선택한 Scrubber 설치의 경우 초기 투자비용은 많이 소모되나 HFO 사용으로 유지비용이 낮다는 장점이 있다. 2021년 기준으로 벌크선 1599척, 컨테이너선 962척, 유조선 646척, 케미컬선 569척, 기타 802척, 총 4,578척의 선박이 Scrubber를 설치하였으며, 2024년까지 Scrubber를 설치한 선박은 4,628척으로 증가할 것으로 확인되었다(ICCT, 2020; DNV GL, 2021). Scrubber를 설치하는 선박의 경우, 연료유는 중유(HFO) 또는 선박용 가스유(MGO)를 사용하고 있으며 HFO는 촉매분해법 공정에 의해서 생산되어 처리공정상의 잔류물을 포함하고 있다. HFO는 일반적으로 증류방식의 MGO보다 더 높은 황, 회분, 금속, 수분 등을 포함하고 있으며, 연소로 인한 SO_x , PM 배출량은 황 농도에 따라 달라진다(McCaffery et al., 2021; Winnes and Fridell, 2009; Yusuf et al., 2012). SO_x 의 주성분인 이산화황(SO_2)은 배기가스에서 산화되어 삼산화황(SO_3)이 되며, 배기가스 내 수분과 결합하여 황산염으로 변화되면서 PM 발생량에 영향을 준다(Cordtz et al., 2013). Scrubber의 경우 세정수량 및 처리방식에 따라 70~90% 정도의 PM 저감 효율이 있다고 알려져 있으며(LR, 2015), 추후 IMO에 의한 PM 규제가 강화될 경우 선박 내 한정된 공간에서 효율적으로 PM과 SO_x 를 동시에 저감할 수 있는 후처리 설비가 주요한 선택지가 될 것이다.

세 번째로 LNG 연료 추진선박으로 개조와 같은 대응방법은 SO_x 를 100% 제거할 수 있는 장점이 있으나, 많은 투자비용 및 LNG 병커링 인프라 부족으로 인하여 많은 채택이 이루어지지 않고 있다.

PM 제거에 가장 효율적으로 알려져 있는 전기집진방식은 건식집진방식과 습식집진방식으로 나눌 수 있으며, 전기장 강도에 따라 차이는 있으나 대략적으로 건식전기집진방식의 경우 약 73%(1실 기준), 습식전기집진방식의 경우 97%(1실 기준) 정도의 PM 제거 효율을 보인다(Kim et al., 2015).

건식전기집진기는 발생하는 분진을 재활용함으로써 처리비용을 낮출 수 있으며, 여러 실을 연속적으로 설치하여 PM 저감 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 하지만 여러 실을 연속적으로 설치할 경우 설치 공간이 많이 필요하다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 현재 PM 규제의 부재로 실증 연구가 많이 이루어지고 있지 않지만 추후 PM 규제가 강화될 경우를 대비하여 선박의 한정된 공간에서 높은 PM 저감 효율을 가지며, 세정액에 의해 물에 용해되는 SO_2 , 암모니아(NH_3)와 같은 배기오염물질도 제거할 수 있는 습식전기집진방식의 기술(Kim et al., 2015)을 채택하여 PM과 SO_x 저감 성능에 대한 실증 연구를 실시하였다.

2. 실험장치 및 연구방법

2.1 실험장치 및 시험장비 구성

Fig. 1에서 본 연구에서 사용되는 실험 장비, 측정 위치 및 전체적인 개략도를 그림으로 나타내었다. 선박용 4행정 엔진에서 배출되는 배기가스는 습식전기집진기를 통과하여 대기 중으로 배출되며, 습식 전기집진기의 입/출구에서 미세먼지측정기(광학식) 및 가스분석기를 이용하여 PM, SO_2 , 및 CO_2 값을 측정하였다. 추가적으로 습식전기집진기 출구에서 PM-2.5 중량농도법 측정 장비를 통하여 PM-2.5 제거 효율을 확인하였다.

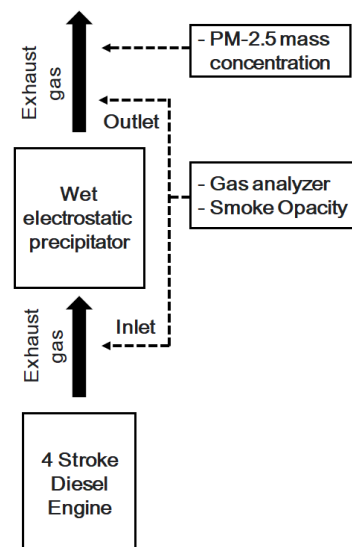


Fig. 1. Layout of experiment.

Fig. 2는 습식전기집진기의 내부 구조를 간략히 나타내고 있다. 4행정 선박 엔진용 후처리장치이며, 장치 전체의 높이는 4500 mm이다. 상세 사양에 대해서는 Table 1을 참조 바란다. 집진기 내부에서의 배기가스 유동 흐름으로 살펴보면 4행정 디젤엔진에서 발생한 배기가스가 아래쪽에서 유입되어 1차적으로 웬칭존에서 배기가스 온도 감소, 2차적으로 습식전기집진 장치를 거치면서 PM이 처리되는 방식이다.

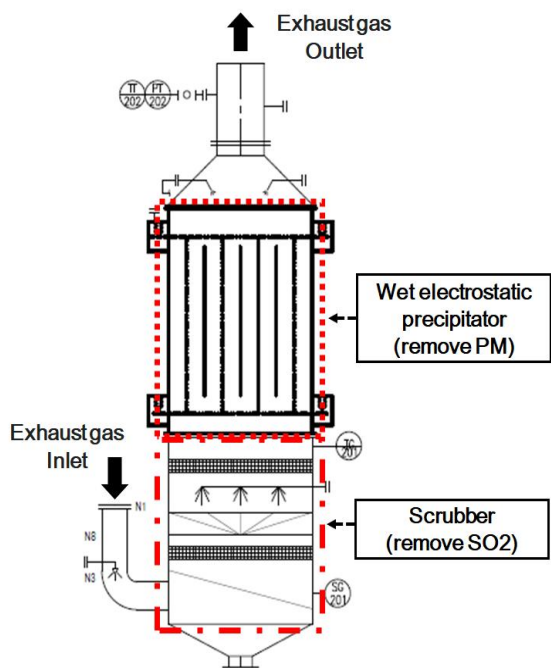


Fig. 2. Internal structure of wet electrostatic precipitator.

본 연구에서는 선박의 롤링, 피칭에 의하여 습식전기집진기가 흔들리더라도 세정액이 세정액 흐름 홈에서 튀어나가지 않고, 강하하는 상태를 유지하며 스파크를 방지할 수 있도록 고안된 집진판을 사용하였다.

Fig. 3은 고안된 집진판과 집진판 성능 확인을 위한 기울임 테스트(좌우 5°, 10°, 15°) 모습이다.



Fig. 3. Dust Collector and Inclining Test.

2.2 실험 장치

Fig. 4는 습식전기집진기 및 선박용 디젤엔진을 비롯해 본 연구에서 사용된 장비 사진들이다. Table 1~5는 본 연구에서 사용되는 실험 장비의 사양이며 장비의 신뢰성 확보를 위하여, 가스분석기, PM측정기(광학식)는 교정된 장비를 사용하였다. 엔진은 5기통 650 kW의 4행정 엔진을 활용하였으며, 엔진의 배기가스 유량은 5,510 kg/h이다. 황산화물 등 배기가스를 측정하기 위해 사용된 가스계측기는 FT-IR 방식의 계측기를 이용하였다. 특히 입자상물질을 측정하기 위해서 투과광감쇄법(Light extinction method) 방식과 중량측정 방식 두 가지를 이용하였다.

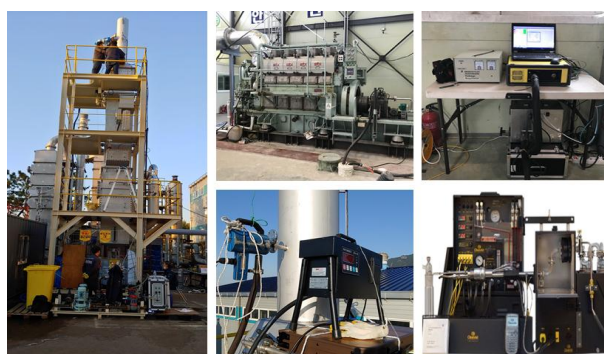


Fig. 4. Equipment components.

Table 1. Specification of wet electrostatic precipitator

Item	Description
Capacity	For 650 kW Diesel Engine
Height	4500 mm
Foot print	about 1650 × 650
Type	Wet electrostatic precipitator

Table 2. Specification of diesel engine

Item	Description
Model	5L23/30
Maker	STX-MAN B&W
Cylinder	5
Output	650 kW @ 720 rpm
Fuel	MGO, MDO, HFO
Exhaust gas flow	5,510 kg/h

습식전기집진기를 활용한 입자상 물질 및 황산화물 저감 성능에 관한 실험적 연구

Table 3. Specification of gas analyzer

Item	Description
Model	DX - 4000
Maker	GASMET
Measurement method	FT-IR
Measuring Gas	CO, CO ₂ , NO ₂ , NO, SO ₂ , NH ₃ etc.

Table 4. Specification of smoke opacity

Item	Description
Model	OPA-102
Maker	QROTECH
Principle	Light extinction method
Light source	Green LED (565 nm)
Detector	Photo diode
Range	0.0 ~ 100.0 %
Accuracy	Less than 1 %

Table 5. Specification of PM-2.5 mass concentration equipment

Item	Description
Model	Method 5 Isokinetic Train
Maker	CleanAir
Principle	Weight concentration method

2.3 실험 방법

선박과 유사한 조건으로 실험을 진행하기 위하여 황함유량 약 2.1%의 HFO를 사용하였다.

디젤엔진 부하를 50%, 75%, 100%로 변화시켰으며, 각 부하에서 배출되는 배기가스를 습식전기집진기의 입/출구에서 매연측정기(광학식) 및 가스분석기를 활용하여 PM 및 SO₂, CO₂를 측정하였다. 추가로 엔진 부하 100%에서 PM-2.5 집진효율을 확인하기 위하여 PM 측정(중량농도법) 장비를 활용하여 추가적으로 PM을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 PM 농도 측정 결과(광학식)

Fig. 5는 엔진부하 50%, 75%, 100%에서 습식전기집진기의 입/출구에서 배출되는 PM 농도에 대하여 회당 3[sec]간, 20회 측정하여 평균값을 계산하였다.

엔진부하 50%, 습식전기집진기 입구에서 측정된 PM 농도 평균값은 6.7[%]이었으며, 출구에서 측정된 PM 농도 평균값은 0.1[%]이다. 엔진부하 75%, 습식전기집진기 입구에서 측정된 PM 농도 평균값은 4.8[%]이었으며, 출구에서 측정된 PM 농도 평균값은 0.1[%]이다. 엔진부하 100%, 습식전기집진기 입구에서 측정된 PM 농도 평균값은 3.4[%]이었으며, 출구에서 측정된 PM 농도 평균값은 0.2[%]이다.

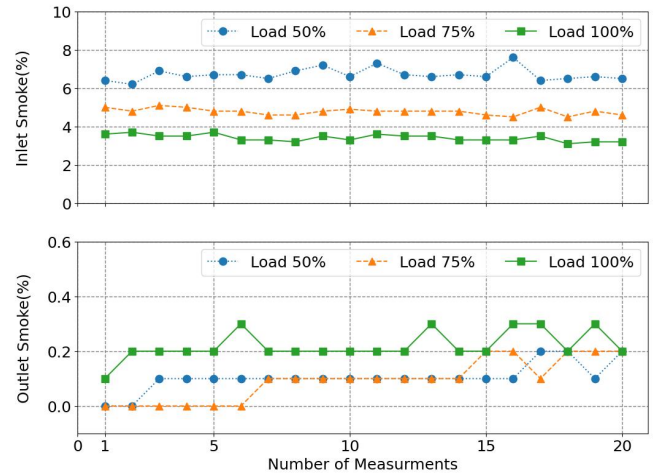


Fig. 5. Graph of smoke concentration.

Table 6은 엔진 부하별 PM 농도 측정 데이터를 나타내고 있다. 고부하 영역보다 저부하 영역에서 PM이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 습식전기집진기의 약 94~99% 정도의 높은 PM 저감 효율을 확인할 수 있었다.

Table 6. Smoke measurements and reduction rates by engine load

Load	Inlet (%)	Outlet (%)	Reduction rate (%)
50%	6.7	0.1	98.51
75%	4.8	0.1	97.92
100%	3.4	0.2	94.12

· Reduction rate (%)
= [Inlet(%) - Outlet(%)] / Inlet(%)

3.2 중량농도법을 활용한 입자상물질 측정

초미세먼지(PM-2.5)에 대한 집진효율을 확인하기 위하여 중량농도법 측정장비를 활용하여 측정을 실시하였다. 측정은 대기오염공정시험기준의 배출가스 중 굴뚝 배출 시료채취방법을 준용하여 측정하였으며, 엔진 부하 100%에서만 측정하였다.

Table 7은 중량농도법으로 측정된 PM-2.5 및 수분율을 나타내고 있다. 습식전기집진기 입구측의 PM-2.5 측정값은 114.6[mg/Sm³], 수분율은 3.51[%]이었으며, 출구측 PM-2.5 측정값은 21.3[mg/Sm³], 수분율은 5.31[%]으로 확인되었다.

중량농도법으로 측정된 PM-2.5 저감율은 광학적 PM 농도 저감률과 약 10% 정도의 차이를 확인할 수 있었다. 습식전기집진기의 입/출구 수분이 51.38% 증가한 것으로 미루어 출구측 배기가스에 포함된 수분의 염분 또는 기타 물질이 중량농도법에서 사용되는 여과지에 영향을 준 것으로 판단된다.

Table 7. Results of PM-2.5 mass concentration & moisture

Item	Inlet	Outlet	Reduction rate (%)
PM 2.5	114.6 (mg/Sm ³)	21.3 (mg/Sm ³)	81.41
Moisture	3.51 (%)	5.31 (%)	-51.38

· Reduction rate (%)
= [Inlet(%) - Outlet(%)] / Inlet(%)

3.3 엔진 부하별 황산화물 및 이산화탄소 측정

습식전기집진기의 켄칭존에서 배기가스 온도를 낮추는 과정 중 세정액에 의한 SO₂ 저감 효율을 확인하였다.

IMO (MEPC.259(68))의 황산화물 배출 규제 제한치 기준을 활용하기 위하여 SO₂와 CO₂를 동시에 측정하였다.

Table 8은 IMO MEPC 259(68)에서 규정하고 있는 SO₂ 및 CO₂ 배출가스에 의한 연료유 황함유량(0.5%) 제한치를 나타내고 있다.

Table 8. Fuel oil sulphur limits corresponding emissions values

Fuel oil sulphur content (% m/m)	Ratio emission SO ₂ (ppm)/CO ₂ (vol-%)
4.50	195.0
3.50	151.7
1.50	65.0
1.00	43.3
0.50	21.7
0.10	4.3

Fig. 6과 Fig. 7은 엔진부하 50%, 75%, 100%에서 습식전기집진기의 입/출구에서 배출되는 SO₂ 및 CO₂에 대하여 회당 20[sec]간, 20회 측정하여 평균값을 계산하였다.

엔진부하 50%, 습식전기집진기 입구에서 측정된 SO₂의 평균값은 412.61[ppm], CO₂ 평균값은 4.38[vol-%]이었으며, 출구에서의 SO₂의 평균값은 76.89[ppm], CO₂ 평균값은 3.96[vol-%]이었다.

엔진부하 75%, 습식전기집진기 입구에서 측정된 SO₂의 평균값은 413.57[ppm], CO₂ 평균값은 4.60[vol-%]이었으며, 출구에서의 SO₂의 평균값은 123.63[ppm], CO₂ 평균값은 4.29[vol-%]이었다.

엔진부하 100%, 습식전기집진기 입구에서 측정된 SO₂의 평균값은 406.27[ppm], CO₂ 평균값은 4.64[vol-%]이었으며, 출구에서의 SO₂의 평균값은 179.66[ppm], CO₂ 평균값은 4.52[vol-%]이었다.

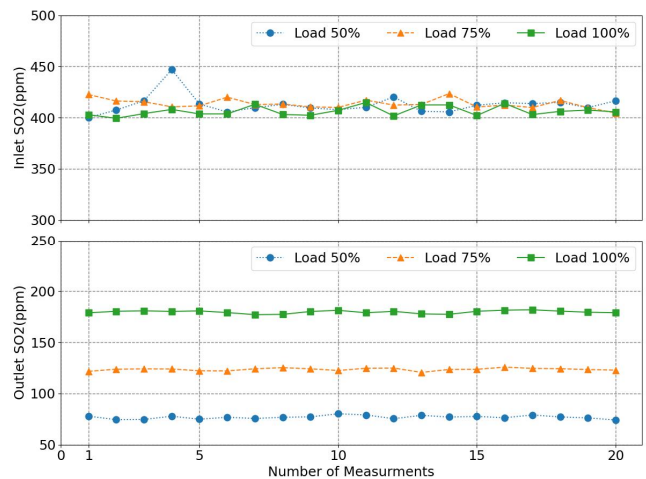


Fig. 6. Graph of SO₂ emissions.

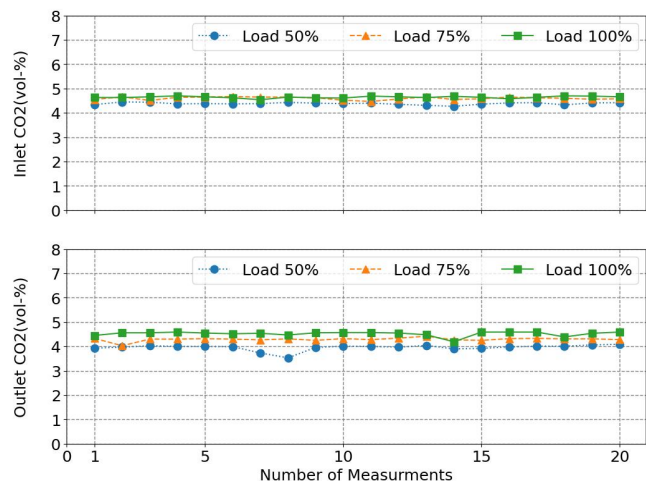


Fig. 7. Graph of CO₂ emissions.

습식전기집진기를 활용한 입자상 물질 및 황산화물 저감 성능에 관한 실험적 연구

Table 9는 엔진부하별 습식전기집진기의 입/출구에서 측정된 SO₂의 평균값으로 각 부하에서의 저감률을 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이 입구에서 측정된 각 부하에서의 SO₂ 농도 측정 결과를 통하여, SO₂ 농도는 엔진 부하와는 관계가 없으며 연료유에 포함된 황함유량에 의하여 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 출구에서 부하가 50%에서 100%로 증가함에 따라 저감률은 81.36%에서 55.78%로 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 엔진 부하가 증가함에 따라 배기가스 유량이 증가하였고, 퀀칭존에서 일정한 유량의 세정액에 SO₂가 충분히 용해되지 않은 것으로 판단된다.

Table 9. SO₂ measurements and reduction rates by engine load

Load	Inlet (ppm)	Outlet (ppm)	Reduction rate (%)
50%	412.61	76.89	81.36
75%	413.57	123.63	70.11
100%	406.27	179.66	55.78

· Reduction rate (%)
= [Inlet(ppm) - Outlet(ppm)] / Inlet(ppm)

Table 10은 엔진부하별 습식전기집진기의 입/출구에서 측정된 CO₂의 평균값으로 각 부하에서의 저감률을 계산하였으며, 입/출구 측정 결과 저감률이 크지 않은 것으로 확인할 수 있었다.

Table 10. CO₂ measurements and reduction rates by engine load

Load	Inlet (vol-%)	Outlet (vol-%)	Reduction rate (%)
50%	4.38	3.96	9.59
75%	4.60	4.29	6.74
100%	4.64	4.52	2.80

· Reduction rate (%)
= [Inlet(ppm) - Outlet(ppm)] / Inlet(ppm)

Table 11은 Table 9와 Table 10의 습식전기집진기의 출구에서의 SO₂와 CO₂ 평균값을 이용하여, Table 8의 배출가스를 통한 연료유 황함유량 배출률 계산한 결과, 엔진부하 50%에서는 19.42[% m/m]로 황함유량 0.5% 배출률 기준인 21.7[% m/m]에 대하여 만족하는 반면, 엔진부하 75%, 100%에서는 각각 28.82[% m/m]와 39.75[% m/m]로 기준치를 초과하는 것으로 확인되었다. 이것은 본 연구의 대상인 집진기의 퀀칭존 세정액 유량이 엔진의 75% 이상의 고부하 영역에서 발생하는 SO₂를 용해하기에 적기 때문이라 생각된다.

Table 11. SO₂ / CO₂ ratio emission

Load	SO ₂ Outlet (ppm)	CO ₂ Outlet (vol-%)	Ratio emission
50%	76.89	3.96	19.42
75%	123.63	4.29	28.82
100%	179.66	4.52	39.75

· Ratio emission
= SO₂(ppm)/CO₂(vol-%)
· 0.5% Fuel oil sulphur content
: 21.7[% m/m] Ratio emission [SO₂(ppm)/CO₂(vol-%)]

시험 결과를 통하여 습식전기집진기의 입자상물질과 황산화물 동시 저감 성능을 확인하였다. 하지만, 세정액 유량이 일정한 본 실험 장치의 특성상 습식전기집진기에서 황산화물 저감 효율이 엔진 고부하 영역에서 IMO 규제를 만족하지 못하였다. 그러나 전 부하 영역에서 실측 데이터를 통해 높은 입자상물질 저감률을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 650 kW 4행정 엔진을 활용하여 습식전기집진기의 황산화물 및 입자상물질 저감 효율 및 성능에 대하여 실험하였다.

그 결과를 요약하면 다음과 같다

- (1) 입자상물질의 경우 광학식으로 측정했을 때 94~98% 수준의 높은 저감 효율 및 성능을 확인할 수 있었다.
- (2) 중량농도법을 활용한 PM-2.5 저감률은 광학식 PM 농도 저감률과 약 10% 정도의 차이를 확인할 수 있었다. 이는 습식전기집진기 입/출구의 수분 차이 확인 결과, 출구측 수분 51% 높은 것으로 확인되었으며, 수분에 포함된 염분 또는 기타 물질의 영향으로 추정되었다.
- (3) 습식전기집진기 내 퀀칭존의 세정수에 의해 용해되어 제거되는 SO₂의 경우, 엔진 부하가 50%에서 100%로 증가함에 따라 저감률은 81.36%에서 55.78%까지 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 엔진 부하가 증가함에 따라 배기가스 유량이 증가하여 본 연구의 대상인 습식전기집진기 퀀칭존의 세정액에 황산화물이 충분히 용해되지 않은 것으로 판단된다.
- (4) CO₂의 경우, 엔진부하의 변화에 따라 약 3~10% 정도의 저감률을 확인할 수 있었다

본 연구에서 PM, SO₂의 실측된 데이터를 바탕으로 세정수 유량 조절 또는 켄칭존의 반응 시간 및 구조 개선과 같은 후속 연구가 진행된다면 입자상물질 저감 효율뿐만 아니라 황산화물 규제도 만족할 수 있는 습식전기집기 기술을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 입자상물질 중량농도 측정법에서 식별된 수분에 의한 문제점들을 해결할 수 있는 방안이 연구된다면 추후 유사한 성능 검증 연구에서 신뢰성 있는 데이터 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Cordtz, R., J. Schramm, A. Andreasen, S. S. Eskildsen, and S. Mayer(2013), Modeling the distribution of sulfur compounds in a large two stroke diesel engine. *Energy Fuels*, Vol. 27, No. 3, pp. 1652-1660.
- [2] DNV GL(2021), *Alternative Fuels Insight Platform 2021*.
- [3] Do, H. J. and S. Y. Lee(2020), A Study on Strategies to Respond to the Bunkering Industry in the Reinforcement of Environmental Regulations of the International Maritime Organization, Korea Energy Economics Institute, Basic Research Report 2020-10.
- [4] Eyring, V., I. S. A. Isaksen, T. Berntsen, W. J. Collins, J. J. Corbett, O. Endresen, R. G. Grainger, J. Moldanova, H. Schlager, and D. S. Stevenson(2010), Transport impacts on atmosphere and climate: shipping. *Atmos Environ*, Vol. 44, No. 37, pp. 4735-4771.
- [5] Gysel, N. R., W. A. Welch, K. Johnson, W. Miller, and D. R. Cocker(2017), Detailed analysis of criteria and particle emissions from a very large crude carrier using a novel ECA fuel. *Environ Sci Technol.*, Vol. 51, No. 3, pp. 1868-1875.
- [6] ICCT(2020), The International Council On Clean Transportation, Scrubbers on ships: Time to close the open loop (hole), Posted 18. June 2020, assessed 01. Sep 2021, <https://theicct.org/blog/staff/scrubbers-open-loop-hole-062020>.
- [7] Khan, M. Y., M. Giordano, J. Gutierrez, W. A. Welch, A. Asa-Awuku, J. W. Miller, and D. R. Cocker(2012), Benefits of two mitigation strategies for container vessels: cleaner engines and cleaner fuels. *Environ Sci Technol.*, Vol. 46, No. 9, pp. 5049-5056.
- [8] Kim, H. J., J. H. Kim, and J. H. Kim(2015), Evaluation of Particle Collection Efficiency in a Wet Electrostatic Precipitator Using an Electrosprayed Discharge Electrode, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 31, No. 6, pp. 530-537.
- [9] KR(2018), Korea Register, Ship's Guidance for Response to Reinforced Global SO_x Regulations.
- [10] LR(2015), Lloyd's Register Marine.
- [11] McCaffery C., H. Zhu, G. Karavalakis, T. D. Durbin, J. W. Miller, and K. C. Johnson(2021), Sources of air pollutants from a Tier 2 ocean-going container vessel: main engine, auxiliary engine, and auxiliary boiler, *Atmos Environ*, Vol. 245:118023.
- [12] Ryu, Y. S.(2019), Current status of response to ship environmental regulations in the shipping industry, *Maritime Korea Forum*. 10th, pp. 100-134.
- [13] Toscano, D. and F. Murena(2019) Atmospheric ship emissions in ports: A review. Correlation with data of ship traffic, *Atmospheric Environment: X* Vol. 4:100050.
- [14] UNCTAD(2020), *Review of Maritime Transport 2020*.
- [15] Winnes, H. and E. Fridell(2009), Particle emissions from ships: dependence on fuel type. *J Air Waste Manage Assoc* Vol. 59, pp. 1391-1398.

Received : 2021. 09. 14.

Revised : 2021. 10. 05.

Accepted : 2021. 10. 28.