

가스유동 해석을 이용한 선박용 전기집진기의 전극판 및 집진판 형상에 따른 집진효율 예측

공경주 · 이정욱* · 한승훈†

부경대학교(기관사) · *경상국립대학교(학생) · †경상국립대학교(교수)

Prediction of Dust Collection Efficiency According to the Shape of Electrode and Collecting Plate for Electrostatic Precipitators Using Gas Flow Analysis

Kyeong-Ju KONG · Jeong-Uk LEE* · Seung-Hun HAN†

Pukyong National University(engineer) · *Gyeongsang National University(student) ·

†Gyeongsang National University(professor)

Abstract

In order to reduce air pollution caused by fine dust, the emission standards for environmental pollutants generated from ships are being strengthened. The fine dust reduction device for ships needs a function that can be used in combination with SCR(Selective Catalytic Reduction) due to the limited space of the engine room. In this study, gas flow analysis was performed to predict the dust collection efficiency of the electrostatic precipitator to develop the electrostatic precipitator with low back pressure for 300 kW class of marine diesel engine. In order to analyze the dust collection efficiency according to the shape of the electrode and collecting plate, the gas flow was analyzed by modeling the three shapes, and the theoretical dust collecting efficiency was calculated for the three models. Based on the results of gas flow analysis, the dust collecting efficiency of the semicircular designed the electrode and collecting plate was found to be the highest. In the future, the gas flow analysis results of this study will be used to develop the semicircular electrode and collecting plate as well as to improve the dust collection efficiency of the electrostatic precipitator.

Key words : Electrostatic precipitator, Electrode and collecting plate, Dust collection efficiency, Gas flow analysis

I. 서론

세계보건기구(World health organization, WHO)에 따르면 전 세계의 90% 인구가 연평균 미세먼지 노출 기준을 초과하는 공기를 흡입하고 있으며, 한국은 연평균 24.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 미세먼지가 발생되며 대기질이 안 좋은 국가 26위로 발표되었다

(IQAir, 2020). 또한, 미세먼지특별대책위원회에서 발표한 미세먼지 관리 종합계획에 따르면, 연평균 초미세먼지 농도는 소폭 개선되었으나, 환경기준에는 미달되는 것으로 나타났다. 그 대책으로 미세먼지로 인한 대기오염을 저감하기 위해 선박에서 발생하는 환경오염물질의 배출 기준을 강화하고 있으며, 중소형 선박용 미세먼지 저감

† Corresponding author : 055-772-9105, shhan@gnu.ac.kr/orcid.org/0000-0002-9125-7439

* 이 논문은 2021년도 경상남도 지역혁신플랫폼사업 고급인재 지역기업 취업지원 양성과제 지원에 의하여 수행된 연구입니다.

장치 개발 및 상용화, 선박 배출 대기오염물질 통합저감기술 개발 등을 통하여 선박, 항만 등에 대해 적극적인 미세먼지 감축 조치를 추진할 예정이다(Special Policy Committee on Fine Dust, 2019).

선박에서 배출하는 대기오염물질에 대해서 국제해사기구(International maritime organization, IMO)는 황산화물, 질소산화물 등에 대해 규제를 시행하고 있고 이에 따라 스크러버(scrubber), 선택적 촉매 환원(Selective catalytic reduction, SCR) 등을 설치하고 있다(Jun et al., 2019). 미세먼지와 관련해서는 디젤분진필터(Diesel particulate filter, DPF), 습식 및 건식 방식의 배출가스 정화장치, 전기집진 장치 등을 설치하여 배출을 감소시키고 있다(Son and Bae, 2007).

저배압 전기집진기는 선박에서 발생하는 미세먼지를 저감시키기 위해 코로나 방전(Corona discharge)을 이용하는 장치이며, 전류 및 전압을 발생시키는 전극판(Electrode plate)과 미세먼지를 포집하는 집진판(Collecting plate)로 구성되어있다. 선박의 기관실에 한정된 공간에 적용하기 위해 미세먼지 저감장치는 NOx 저감 장치인 SCR(Selective catalytic reduction)과 복합적인 기능을 할 수 있는 장치의 개발이 필요하며, 본 연구에서는 300 kW급 선박용 디젤엔진에 적용할 수 있는 저배압 미세먼지 전기집진 복합장치의 개발을 위해 전기집진기의 집진효율을 예측하기 위한 가스유동 해석을 수행하였다.

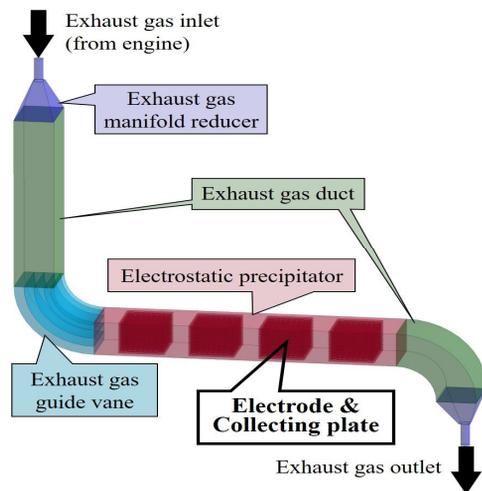
저배압 미세먼지 전기집진 복합장치에 대해 고장모드영향분석 및 구조해석 등의 선행연구를 진행하였으며, 저자의 이전 연구에서 2,427 kW 선박용 디젤엔진의 전기집진기의 예지보전단계에서 고장모드영향분석을 통해 위험 우선순위를 도출하여 설비의 안정성과 내구성을 높이고자 하였다(Han et al., 2020). 전극판에서 가장 많은 고위험 고장모드를 검출하였으며, 집중관리 부품으로 관리해야할 필요성을 확인하였다. 또한, 전극판과 집진판을 3가지 형상으로 설계하여 열응력, 열변

형 및 설계안전도, 구조적 안전성 등을 고려하여 최적의 설계를 찾고자 하였다(Lee et al., 2021). 반원 형상으로 설계한 집진판 및 전극판이 다른 형상으로 설계한 모델과 비교해 최대응력 및 최대변형량이 가장 적게 나타났으며 안전계수가 1.2로 나타나 안전성을 확인하였다.

본 연구에서는 집진판 및 전극판의 3가지 형상에 따라 집진효율을 예측하기 위해 가스유동 해석을 하였으며, 선행연구에서 구조해석을 수행하였던 모델과 동일한 형상인 평면, 삼각, 반원형으로 설계한 집진판 및 전극판을 대상으로 결과를 비교해보았다. 집진판 및 전극판의 형상에 따른 결과를 비교하기 위해 가스유동에 영향을 미치는 다른 인자들을 제외하고 모델링하였고, 집진효율을 비교하여 저배압 미세먼지 전기집진 복합장치의 개발에 활용하고자 한다.

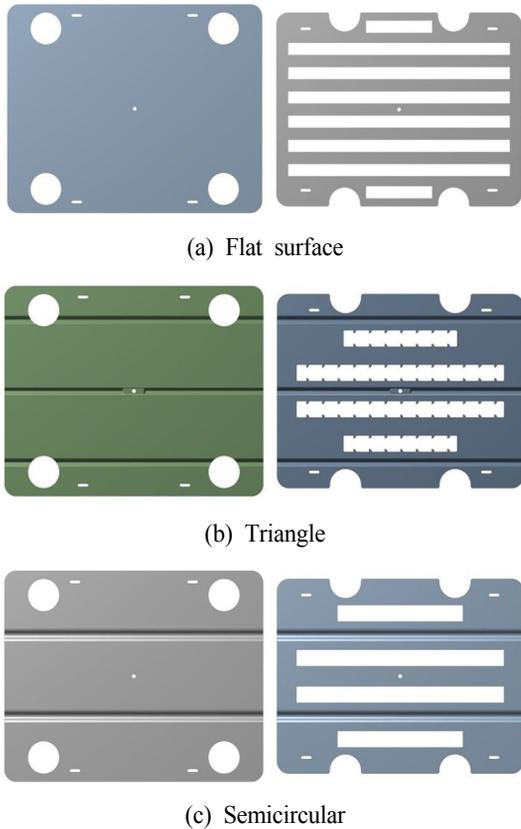
II. 연구방법 및 해석조건

[Fig. 1]은 저배압 미세먼지 전기집진 복합장치의 전체 시스템에 대해 나타낸 것으로 배기가스 매니폴드 리듀서(Manifold reducer), 덕트(Duct),



[Fig. 1] Schematic of the electrostatic precipitator with low back pressure in the exhaust gas system.

가이드 베인(Guide vane) 등으로 구성되어 있다. 집진판 및 전극판의 형상에 따른 집진효율을 분석하기 위해 한 세트의 집진판 및 전극판에 대해서 모델링하고 가스유동을 해석하였으며, 전극판과 집진판의 간격은 실험을 통해 가장 효율이 높았던 40 mm로 배치하여 모델링하였다.



[Fig. 2] Modeling for 3-type of the collecting plate and electrode plate (left: collecting plate, right: electrode plate).

전극판 및 집진판의 형상에 따른 유동의 특성을 분석하기 위해 다른 선행연구들이 진행되어 왔으며(Shen et al, 2018), 300 kW급 선박용 디젤 엔진에 적용할 수 있는 형상에 대한 유동 특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 3가지 형상의 집진판 및 전극판을 대상으로 가스유동을 해석하였다. [Fig. 2]는 전극판과 집진판의 3가지 형상에

따른 모델링을 나타낸 것으로 평면, 삼각 및 반원형으로 설계하였다. 집진판 및 전극판은 40 mm 간격으로 순차적으로 각 한 개씩 배치되어 전극판-집진판으로 구성되며, 실제 장치는 장치의 크기에 따라 전극판-집진판이 여러 세트 설치되지만, 각 판에 대한 집진효율을 분석하기 위해 한 세트의 전극판-집진판에 대해서만 가스유동을 해석하였다.

전기집진기의 집진효율은 Deutsch-Anderson 식을 사용하여 계산하였으며, 집진효율 η 은 식 (1)로 구할 수 있다. (Lin et al., 2012)

$$\eta = 1 - e^{-w(A/Q)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 w 는 입자의 이동 속도, A 는 집진 면적, Q 는 가스유량이며, 집진 면적이 크고 유동의 속도가 느릴수록 집진효율이 높아진다.

집진 면적은 집진판에 대한 값으로, 본 연구의 대상인 집진판의 3가지 형상에 따른 집진 면적을 <Table 1>에 나타냈다.

<Table 1> The effective collecting plate area according to the 3-type of shape

Shape	Effective collecting plate area (m ²)
Flat	0.3215
Triangle	0.3262
Semicircular	0.3294

평면, 반원, 삼각 형상 순으로 면적이 크게 나타났으며, 집진 면적이 가장 작은 평면 형상과 가장 큰 삼각 형상의 면적 차이는 2.5%이다.

가스유동을 해석하기 위해 Ansys Fluent 2020 R²를 사용하였으며 이 코드는 Ansys CFX와 함께 배기가스에 대한 유동해석에 사용되고 있다(Jee and Oh, 2019). 집진판 및 전극판의 집진효율에 미치는 인자를 최소화하기 위해 한 세트에 대해

서 유동이 지나가는 면적을 동일하게 하여 유동 영역을 모델링 하였다(Farnoosh et al, 2011). 가스 유동 해석을 위한 경계조건은 해석 결과의 타당성을 확인하고 향후 실험 결과와 비교해보기 위해 실험 조건과 동일하게 설정하였으며, 입구 경계조건은 실험에 사용된 배기가스의 상태와 동일하게 300 ℃의 배기가스가 3 m/s의 속도로 지속적으로 들어오고 있고 출구 경계조건은 대기로 방출되는 상태로 설정하였다.

가스유동 해석의 결과 중에서 속도 및 난류 운동에너지를 비교 대상으로 하여 집진효율을 평가하였다. 전기집진기를 통과하는 입자의 분포는 엔진의 상태, 배기가스의 수분함량 및 먼지의 알칼리 성상 등에 따라 변하며 불균일하게 분포되어있는 상태이다. 집진판 및 전극판의 형상에 따른 집진효율을 비교하고자 입구 경계조건을 통해 들어오는 입자의 분포가 균일하다고 가정하고 동일한 해석조건에서 3가지 형상에 대한 가스유동을 해석하였다.

집진판 및 전극판의 가스유동을 해석하는데 사용된 격자는 격자수에 따라 정상상태로 해석하고 속도 결과를 비교하여 격자 의존성을 확인하였으며, <Table 2>는 격자 의존성을 확인하기 위해 생성한 격자수 및 속도 결과이다.

<Table 2> Number of meshes and velocity results for 3-type of the collecting plate and electrode plate

Shape	Number of meshes	Average velocity (m/s)
Flat	64,581	2.58
	104,721	2.19
	180,098	2.18
Triangle	98,096	3.00
	180,981	2.81
	276,090	2.79
Semicircular	60,966	2.60
	100,694	2.20
	164,404	2.18

평면, 삼각, 반원 형상의 격자는 각각 104,721개, 180,981개, 100,694개 이상 밀도의 격자에서 속도 결과가 0.9% 이하의 차이로 나타났으며, 이 격자 모델을 본 연구의 가스유동 해석에 사용하였다. 삼각 형상은 전극판의 삼각홈 형상으로 인해 조밀한 격자를 생성하였기 때문에 다른 형상에 비해 격자수를 많이 생성하여야 격자의 품질을 높일 수 있었다.

III. 결과 및 고찰

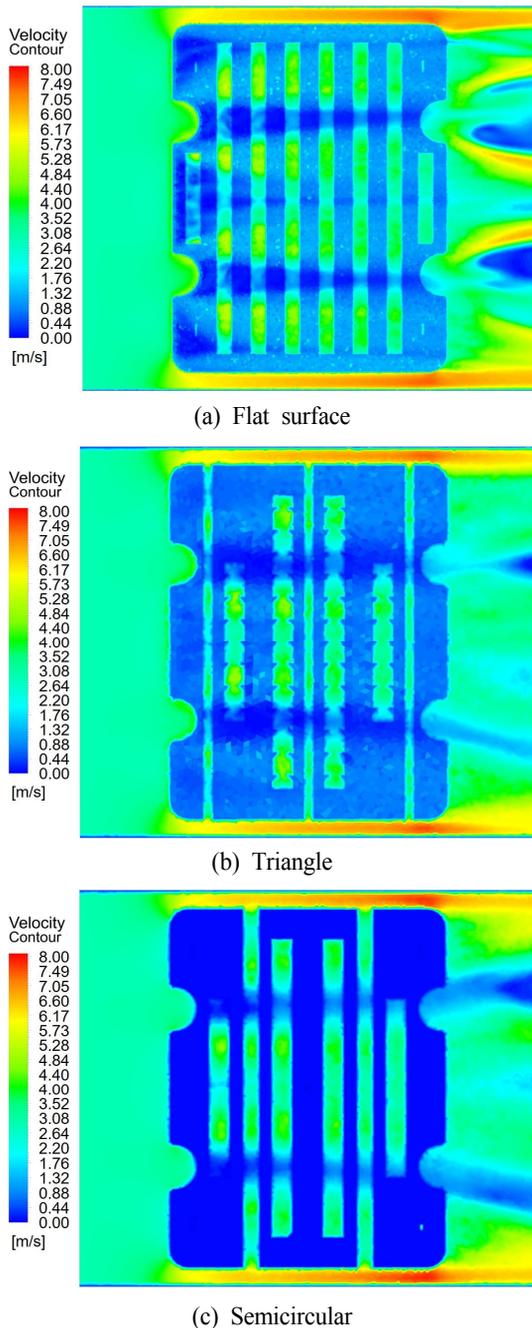
[Fig. 3]은 집진판 및 전극판을 대상으로 가스유동을 해석한 속도 결과의 분포를 나타낸 것이다.

오른쪽 방향으로 유동이 진행하고 있는 상태로 전극판과 집진판 사이의 가스유동의 속도이다. 평면, 삼각 및 반원 모델의 평균 유동 속도를 <Table 3>에 비교하였으며 각각 2.19 m/s, 2.81 m/s 및 2.20 m/s로 나타났다. 유량은 유동의 속도에 비례하므로 속도 결과를 통해 집진효율을 예상해보면, 평면, 반원, 삼각 형상 순서로 집진효율이 높을 것으로 생각되며, 평면 모델과 반원 모델의 유동 속도는 0.01 m/s 차이로 집진효율에 큰 차이가 없을 것으로 생각한다.

<Table 3> Average velocity results at the clearance of the electrode and collecting plate

Shape	Average velocity (m/s)
Flat	2.19
Triangle	2.81
Semicircular	2.20

코로나 방전을 이용하는 전기집진기는 정전력이 배기가스의 유동에 작용하는 것이 아니라 입자에만 작용된다. 배기가스 내에 불균일하게 분포되어 있는 입자는 농도가 높은 부분에서



[Fig. 3] Velocity results for 3-type of the collecting plate and electrode plate.

코로나 전류가 상대적으로 감소하기 때문에 대전이 어려우며, 입자가 균일하게 분포되어 있는

상태가 집진효율이 높게 나타난다. 입자가 균일하게 분포될 수 있는 형상을 찾고자 가스유동의 난류 운동에너지의 결과를 비교하였다.

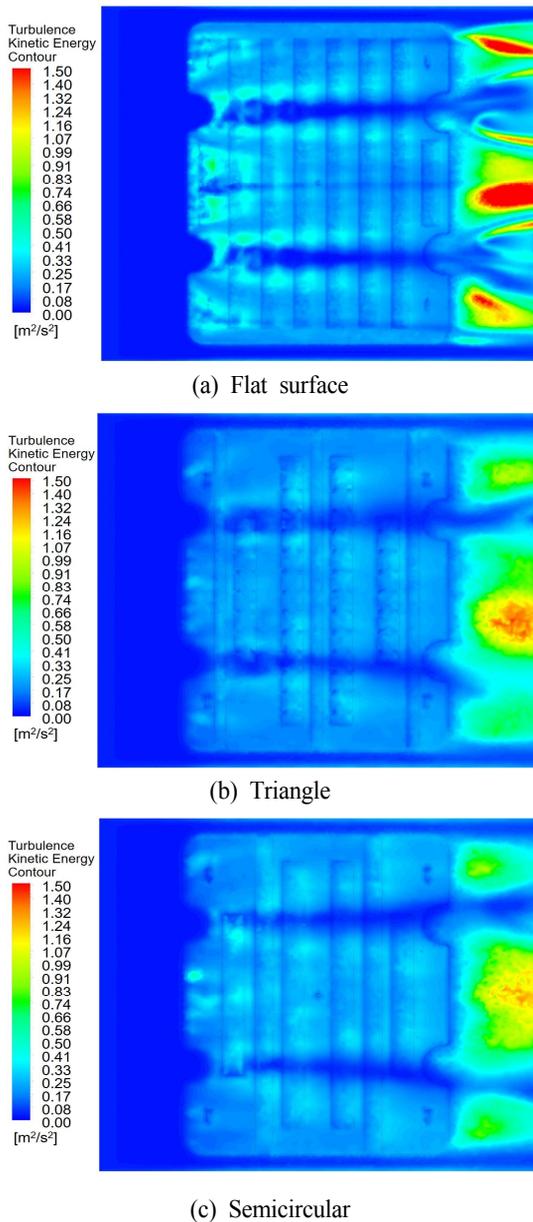
집진효율 식 (1)은 균일유동과 균일전기장의 조건에서 농도분포가 균일분포를 이루는 무한 난류 확산을 전제로 사용된다(Jeong et al.,1995). 실제 전기집진기에서 입자의 분포는 불균일하게 되기 때문에 집진효율 식 (1)과 함께 유한 난류확산모델을 사용하여 집진효율을 예측하고 있다. 난류확산모델에서 난류 운동에너지가 증가하면 입자의 농도분포는 균일분포화 되고 집진효율이 증가하게 된다.

[Fig. 4]는 집진판 및 전극판 사이를 지나는 유동의 난류 운동에너지의 분포를 나타낸 것이며 평면, 삼각 및 반원 모델의 평균 난류 운동에너지를 <Table 4>에 비교하였다.

<Table 4> Average turbulence kinetic energy results at the clearance of the collecting plate and electrode plate

Shape	Average turbulence kinetic energy (m^2/s^2)
Flat	0.41
Triangle	0.27
Semicircular	0.43

평면, 삼각 및 반원 모델의 평균 난류 운동에너지는 각각 $0.41 m^2/s^2$, $0.27 m^2/s^2$ 및 $0.43 m^2/s^2$ 로 나타났으며, 평면 모델은 집진판 및 전극판 사이를 통과하기 시작하는 시점에서 난류 운동에너지가 높게 나타났다. 삼각 및 반원 모델은 난류 운동에너지가 집진판 및 전극판 전체 면적에 걸쳐 고르게 나타났으나 삼각 모델의 경우 난류 운동에너지가 낮게 나타났다. 난류 운동에너지의 결과를 분석해보면 입자가 반원 모델에서 가장 균일하게 분포될 것으로 생각되며(Choi and Fletcher, 1998), 난류 운동에너지가 가장 낮은 삼각 형상은 입자의 균일분포도가 낮으므로 집진효율이 낮을 것으로 생각된다.

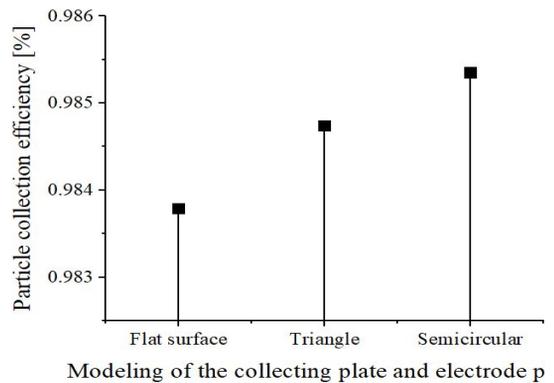


[Fig. 4] Turbulence kinetic energy results for 3-type of the collecting plate and electrode plate.

입자의 이동 속도는 가스유동의 속도와 동일하다 가정하고 가스유동의 해석 결과와 식 (1)을 통해 이론적인 집진효율을 계산하여 비교해보면 [Fig. 5]와 같다. 반원, 삼각, 평면 형상 순서로 집

진효율이 높게 나타났으며 실제 전기집진기는 집진판 및 전극판을 13 겹이 한 조로 구성되어 네 개의 조 이상 설치되기 때문에 한 겹으로 모델링하여 계산한 이론적 집진효율보다 실제 장치에서 집진효율의 차이가 크게 나타날 것으로 생각한다.

전기집진기의 집진판 및 전극판의 형상에 따라 가스유동의 속도 및 난류 운동에너지를 해석한 결과를 종합해보면, 반원, 삼각, 평면형상의 순서로 집진효율이 높을 것으로 생각한다. 또한, 반원형상의 집진판 및 전극판은 구조해석을 통해 안전계수를 확인하였던 선행연구의 결과에서 가장 안전계수가 우수했던 형상으로 전기집진기의 구조적 안전성뿐만 아니라 높은 집진효율을 얻을 수 있는 형상이라 생각한다.



[Fig. 5] Theoretical particle collection efficiency for 3-type of the collecting plate and electrode plate.

IV. 결론

300kW급 선박용 디젤엔진 전기집진기를 개발하기 위해 집진판 및 전극판의 형상에 따른 가스유동을 해석하고 집진효율을 분석해본 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 집진판 및 전극판의 간극을 통과하는 가스유동의 속도 결과는 삼각 형상이 높게 나타났으며, 평면 및 반원 형상은 유사하게 나타났다.

(2) 난류 운동에너지를 해석한 결과는 반원 형상이 가장 높게 나타났으며 입자가 전기집진기 내에 가장 고르게 분포될 것으로 생각한다.

(3) 이론적인 집진효율은 반원, 삼각 및 평면 형상 순서로 나타났으며, 집진판 및 전극판이 여러 겹 설치되는 실제 전기집진기는 집진효율의 차이가 더욱 크게 나타날 것으로 생각한다.

집진판 및 전극판의 형상에 따라 가스유동을 해석한 결과를 종합해보면, 반원 형상이 가장 집진효율이 높게 나타났다. 향후 본 연구의 결과와 구조해석을 통한 열 변형률, 전단응력 등을 고려하여 선박용 전기집진기를 개발하는 데 활용할 수 있을 것으로 생각한다.

References

- Choi BS and Fletcher CAJ(1998). Turbulent Particle Dispersion in an Electrostatic Precipitator. *Applied Mathematical Modelling* 22, 1009~1021.
[https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(98\)10034-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(98)10034-3).
- Farnoosh N, Adamiak K and Castle GSP(2011). Three-dimensional Analysis of Electrohydrodynamic Flow in a Spiked Electrode-plate Electrostatic Precipitator. *Journal of Electrostatics* 69, 419~428.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.06.002>.
- Han SH, Lee JU, Lee SY, Hwang JD and Kang DK(2020). FMEA of Electrostatic Precipitator for Preventive Maintenance. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 26(6), 706~714.
<https://doi.org/10.7837/kosomes.2020.26.6.706>.
- IQAir(2020). 2019 World Air Quality Report Region & City PM2.5 Ranking, 5~13.
- Jee JH and Oh C(2019). A Study on the Flow Analysis of Economizer Soot Blower for Ship by using CFD Method. *Journal of the Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education* 31(5), 1397~1407.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.10.31.5.1397>.
- Jeong SH, Kim SS and Kim YJ(1995). Effects of Turbulence Diffusion and Secondary Flows on the Particle Concentration Distribution in Single Stage ESP. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers* 19(9), 2271~2282.
<https://doi.org/10.22634/KSME.1995.19.9.2271>.
- Jun HY, Kong KJ and Jeong TY(2019). Effect of Mixer and Urea-water-solution Injection Angle on Flow Mixing in SCR Systems. *Journal of the Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education* 31(5), 1417~1423.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.10.31.5.1417>.
- Lee JU and Han SH(2021). Design of Particulate Matter Reduction of the Electrostatic Precipitator with Low Pressure for 300 kW Class of Marine Diesel. *Journal of Power System Engineering* 25(1), 60~69.
<https://doi.org/10.9726/kpspe.2021.25.1.060>.
- Lin GY, Chen TM and Tsai CH(2012). A Modified Deutsch-Anderson Equation for Predicting the Nanoparticle Collection Efficiency of Electrostatic Precipitators. *Aerosol and Air Quality Research* 12, 697~706.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.04.0085>.
- Shen H, Yu WX, Jia HW and Kang YM(2018). Electrohydrodynamic Flows in Electrostatic Precipitator of Five Shaped Collecting Electrodes. *Journal of Electrostatics* 95, 61~70.
<https://doi.org/10.1016/j.jelstat.2018.08.002>.
- Son BH and Bae JU(2007). A Study on the Performances of Exhaust Gas Purification at Process on the Development of Corona Discharge Type Electrostatic Precipitator for Diesel Engines. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology* 31(8), 904~910.
<https://doi.org/10.5916/jkosme.2007.31.8.904>.
- Special Policy Committee on Fine Dust(2019). Comprehensive Plan on Fine Dust(2020~2024), 53~58. in Korean.

-
- Received : 20 July, 2021
 - Revised : 04 August, 2021
 - Accepted : 09 August, 2021