

300 kW급 선박용 디젤엔진 저배압 미세먼지저감 전기집진장치 설계 Design of Particulate Matter Reduction of the Electrostatic Precipitator with Low Pressure for 300 kW Class of Marine Diesel

이정욱* · 한승훈*†
Jeong-Uk Lee* and Seung-Hun Han*†

(Received 03 December 2020, Revision received 25 February 2021, Accepted 25 February 2021)

Abstract : In recent years, regulations of environmental pollution have gradually been strengthened worldwide. The International Maritime Organization (IMO) has adopted the “agreement of air pollution prevention of ships” which regulates the emission of air pollutants from ships. Regulation of nitrogen oxide (NOx) emissions of large marine diesel engines below 130 rpm have been strengthened. In the case of large marine diesel engines, the regulations for Tier-III, which took effect in January 2016. It has been reinforced to less than 14.4 g/Kwh, which is a regulation that must reduce nitrogen oxides by more than 80% compared to Tier-II. In addition, since 2020, the emission of sulfur oxides (SOx) has been regulated to less than 0.5% and the ships sailing in coastal and exclusive economic zones are regulated to be limited to 0.05%. In order to reduce the emission of nitrogen oxides (NOx) and sulfur oxides (SOx) generated from ships, it is essential to install post-treatment devices such as SCR and scrubber. The annual average amount of particulate matter (PM) in Korea is 24.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which is said to be the worst among the OECD countries and the 26th most serious in the world. The government aims to reduce domestic particulate matter (PM) emissions by 30% until 2022. Currently, the port cities of Busan, Incheon, and Ulsan have poor air quality, and air pollutants generated from ships are introduced and are affected by serious environmental pollution. In the future, regulations on particulate matter (PM) are expected as environmental regulations are strengthened in the International Maritime Organization as well. Currently, most studies on post-treatment devices to reduce nitrogen oxides (NOx) and sulfur oxides (SOx) generated from ships are conducted; however, there is almost no research on the reduction of particulate matter (PM) for ships. Therefore, in this study, it was conducted on an electric precipitator for reducing particulate matter (PM) in a 300 kW class of marine diesel engine. The electrostatic precipitator is a device that collects particulate matter (PM) from a collecting plate by causing a corona discharge phenomenon. In this study, three types of dust collector plates and electrode plates, which are components of the electrostatic precipitator, were designed and structural stability was derived through numerical analysis.

Key Words : International maritime organization (IMO), Nitrogen oxide(NOx), Sulfur oxide (SOx), Post-treatment device, Particulate matter (PM)

*† 한승훈(ORCID:<https://orcid.org/0000-002-9125-7439>) :
교수, 경상대학교 기계시스템공학과
E-mail : shhan@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9150
*이정욱(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6918-255X>) :
대학원생, 경상대학교 기계시스템공학과

*† Seung-Hun Han(ORCID:<https://orcid.org/0000-002-9125-7439>)
: Professor, Department of Mechanical System Engineering,
Gyeongsang National University.
E-mail : shhan@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9105
*Jeong-Uk Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6918-255X>)
: Graduate student, Department of Mechanical System
Engineering, Gyeongsang National University.
E-mail : jeonglight1017@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9100

1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경오염규제가 크게 강화되고 있는 가운데 국제해사기구(International Maritime Organization)는 1997년 9월 26일 런던 IMO 본부에서 개최된 환경위원회(MEPC)에서 선박으로부터의 대기오염물질 배출을 규제하는 “선박의 대기오염방지협약”을 채택하였으며, 질소산화물(NOx) 배출규제를 2000년 1월 1일 이후 건조되는 선박에 적용하기로 하였다. 2005년 5월에 발효된 Tier-I의 경우 130 rpm 이하의 선박용 대형 저속 디젤기관의 질소산화물 배출량은 17.0 g/kwh 이하, 2011년 1월에 발효된 Tier-II의 경우 질소산화물 배출량을 14.4 g/kwh 이하, 2016년 1월에 발효된 Tier-III의 경우 14.4 g/kwh 이하로 규제가 강화되어지고 있으며, Tier-III의 경우 Tier-II 대비 80% 이상 질소산화물을 저감해야만 한다.^{1,2)}

국제해사기구에서 배기가스 배출 규제 구역(Emission Control Area)를 지정하여 공해상 200해리 내에서 운항하는 모든 선박은 환경규제 Tier-III를 만족해야 하며, 현재 북미 및 발틱해, 지중해 지역을 중심으로 규제를 강화하고 있으며, 향후 더 넓은 지역으로 규제를 강화시킬 예정이다. 또한 2020년부터 국제해사기구의 황산화물(SOx) 배출량을 0.5% 이하로 규제하기로 하였고, 연안 및 배타적 경제 수역 안에서 항해하는 선박의 경우에는 0.05%까지 제한하도록 규정하고 있다. 따라서 세계 선박 건조 시장은 고효율 친환경 선박의 요구와 2016년부터 발효된 IMO Tier-III규제를 만족하기 위해서는 SCR 및 스크러버(Scrubber)와 같은 배기가스 후처리장치의 설치가 필수적이다.^{3,4)}

전 세계 90%의 인구가 세계보건기구(WHO)에서 책정한 연평균 미세먼지(PM) 노출 기준($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과한 공기를 흡입하고 있으며, 한국은 대기질이 안 좋은 국가로 전체 90개국에서 26위로 발표되었다. 한국의 미세먼지 발생량은 $24.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 미세먼지를 발생하고 있으며 이는 세계보건기구의 기준보다 약 2.5배 높은 기준이다. 정부는 2022년까지 국내 미세먼지 배출량을 30% 감축을 목표로 하고 있다. 국내 대기오염물질 중 해양 부

분에서 발생하는 양은 전국의 대기오염물질 중 선박에서 배출되는 황산화물질 10.9%와 미세먼지(PM) 9.6%를 차지하고 있다. 현재 항구 도시인 부산이 2번째, 인천 3번째, 울산이 6번째로 대기의 질이 좋지 않으며, 육상 배출원에 못지않게 선박으로부터 발생하는 대기오염물질이 유입되어 심각한 환경오염의 영향을 받고 있다. 국내의 경우와 마찬가지로 전 세계적으로 선박에서 배출되는 입자상 물질인 미세먼지(PM)에 대한 규제 또한 강화될 것으로 예상된다.⁵⁾

하지만 현재까지 대부분의 연구는 대형 저속 디젤기관 선박의 질소산화물 저감하는 장치는 SCR과 황산화물을 저감하는 기술인 스크러버를 적용한 배기가스 후처리장치 기술이었고, 선박용 입자상 물질인 미세먼지 저감을 위한 기술에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 선박용 미세먼지입자 저감 장치인 300 kW급 저배압 전기집진장치에 관한 연구를 하였다. 전기집진장치는 선박용 디젤엔진의 후단에서 흘러나오는 배기가스에 코로나 방전을 일으켜서 전기집진판에 집진판과 전극판을 부착시켜 미세먼지를 저감시키는 장치이다. 코로나 방전현상을 이용한 전기집진장치의 구성은 고압의 전류와 전압을 발생시키는 전극판(Electrode plate)과 포집된 미세먼지를 수집하는 집진판(Collecting plate)으로 구성되어진다.

본 연구에서는 실제 대상 엔진인 300 kW 급 엔진에 적용할 수 있도록 전기집진장치의 구성요소인 전극판과 집진판을 3가지 평면(Flat surface), 삼각(Triangle), 반원형(Semicircular)타입으로 설계하였다. 그리고 수치해석을 통해서 열용력, 열변형 및 설계안전도(Safety factor), 구조적 안전성(Structural safety)에 따라 최적의 설계 조건을 찾고자 연구하였다.

2. 모델링 및 경계조건

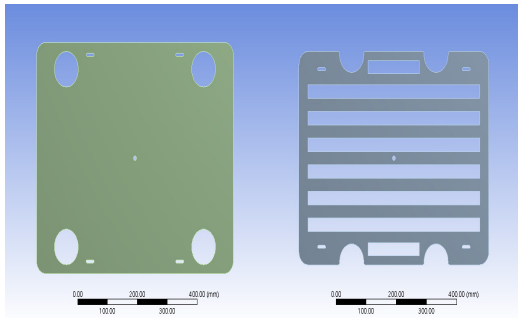
본 연구에서 대상인 전기집진장치의 형상 모델링은 Auto CAD로 모델링을 하였고, 설계한 집진판 및 전극판은 격자를 균일하기 위하여 Hyper

Mesh 프로그램을 이용하여 대상 모델링을 수정하였다. 집진판과 전극판 해석에는 유한요소 해석프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 수치해석을 수행하였고 모델링과 해석의 편리성을 위해 3D 모델링에 있어서 구조해석에 영향을 주지 않는 부분에 대해서는 단순하게 처리하였다.^{6,7)}

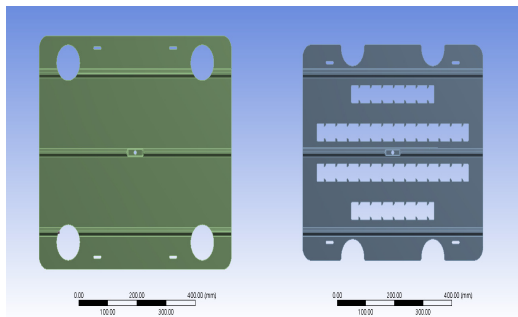
Fig. 1은 3가지 타입의 평면타입, 삼각타입, 반원형타입의 집진판과 전극판을 설계한 모델링을 나타낸다. 모델링된 평면타입 집진판과 전극판의 격자 수는 223,834개와 노드 수는 475,620개이며, 삼각타입 격자 수는 1,640,658개, 노드 수는 3,298,511개, 반원형타입 격자수는 968,971개, 노드 수는 968,971개로 설정하였다. 집진판과 전극판의 재료는 SUS316의 스테인레스강을 사용하였으며, Table 1은 전기집진장치의 집진판과 전극판의 물성치를 나타낸다.

Table 1 Material properties of collecting plate & electrode plate

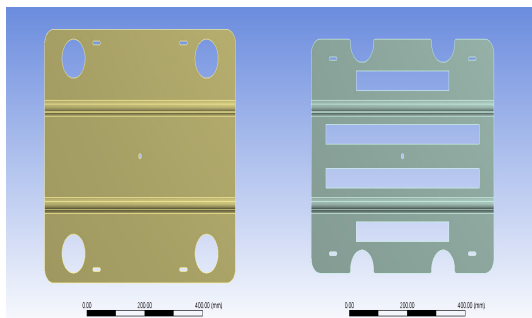
Material name	SUS 316L	-
Density	7930	kg/m ³
Young's modulus	193	GPa
Poisson's ratio	0.3	-
Yield strength	290	MPa
Tensile ultimate strength	580	MPa
Compressive yield strength	250	MPa



(a) Flat surface of collecting plate & electrode plate



(b) Triangle of collecting plate & electrode plate



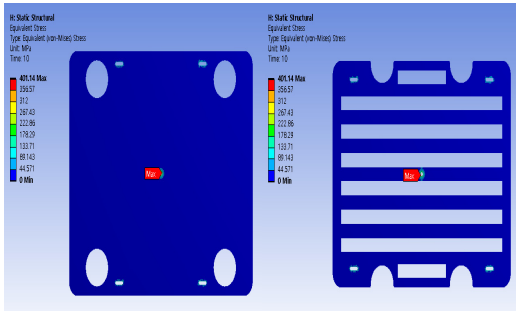
(c) Semicircular of collecting plate & electrode plate
Fig. 1 Design of 3-type collecting plate & electrode plate

3. 수치해석 결과 및 고찰

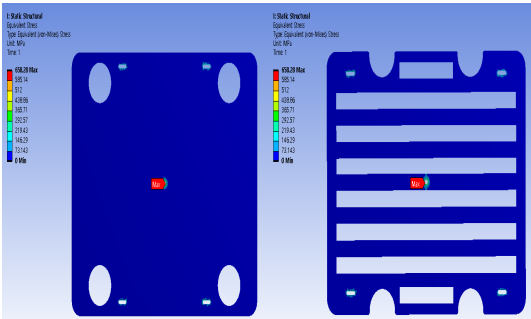
선박용 디젤엔진의 매니폴더(manifolder) 배기가스 후단에서 나오는 배기가스의 온도는 400℃ 이상이지만 배기가스 후처리장치 SCR 및 스크러버를 거친 후의 온도는 현저히 낮아지게 된다. 실제 대상으로 하는 300 kW급 선박용 엔진에서 배기가스 후처리장치를 통과한 후의 온도를 실측을 하여 온도조건을 부여하였다. 즉, 전기집진장치에 도달하였을때의 배기가스 온도는 실험을 통한 측정값을 적용하였다.⁸⁻¹¹⁾ 실측한 값은 여러 가지 조건에 의해서 온도범위가 약 100~250℃ 전·후로 나타났다. 따라서 온도조건으로 100℃, 150℃, 200℃, 250℃로 설정하여 수치해석을 수행하였다. 설계한 3가지 평면, 삼각, 반원형 타입 전기집진장치의 집진판과 전극판에 실측한 배기가스 온도값을 설정하였으며, 상온 22℃의 조건으로 대류 열전달 계수는 $5 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 로 하였다.¹²⁻¹⁵⁾

3.1 평면(Flat surface)

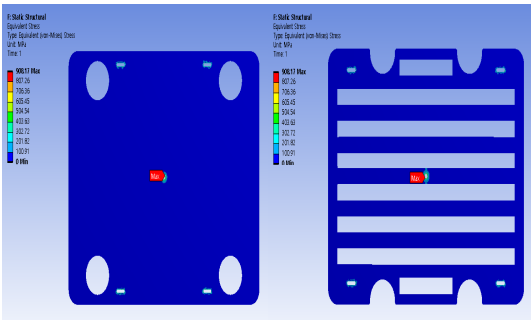
Fig. 2는 배기가스 온도 100~250℃ 온도별 평면 타입 집진판과 전극판의 최대응력을 나타낸다. 수치해석을 통해서 최대응력값을 도출하여, 재료의 항복응력 값을 이용해서 안전계수를 도출하였다. Fig. 2의 (a)는 100℃에서 최대응력은 401.14 MPa 이었고, 안전계수는 0.7이었다. (b)는 150℃에서 최대응력은 658.28 MPa이었고 안전계수는 0.4이다.



(a) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate & electrode plate (100℃)

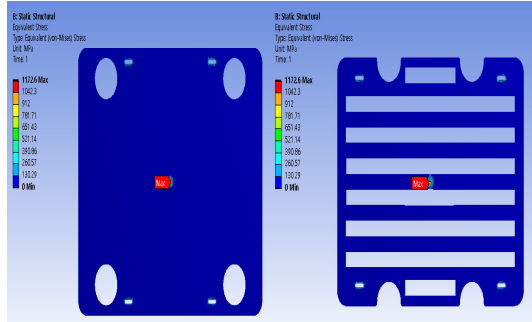


(b) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate & electrode plate (150℃)



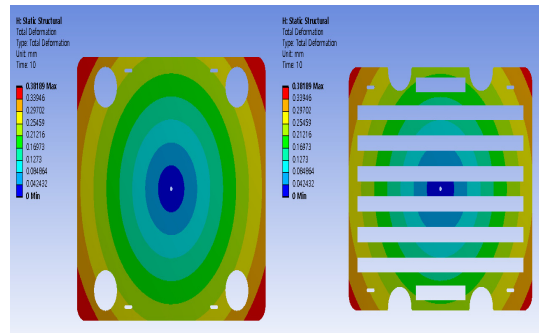
(c) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate & electrode plate (200℃)

(c)는 200℃에서 최대응력은 908.17 MPa이었고 안전계수는 0.3이었다. (d)는 250℃에서 최대응력 1172.6 MPa이었고 안전계수 0.2이다. 최대응력이

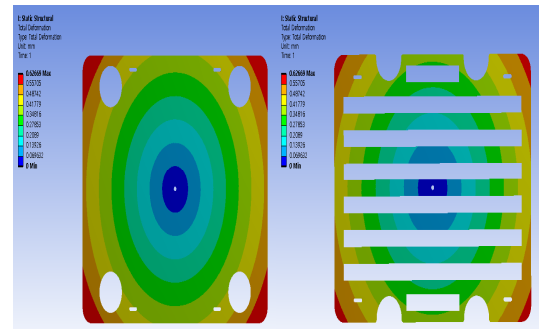


(d) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate & electrode plate (250℃)

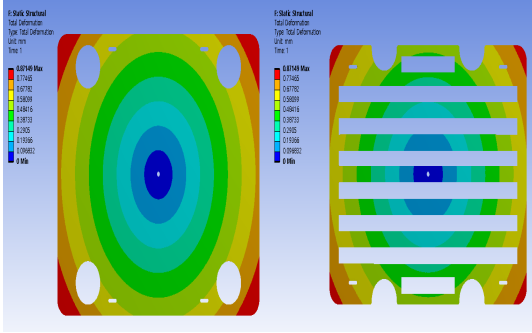
Fig. 2 Equivalent stress of collecting plate & electrode plate of flat surface type



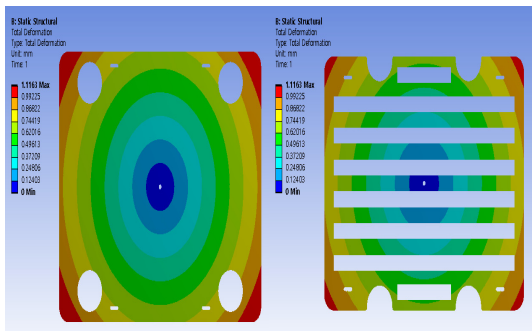
(a) Deformation of collecting plate & electrode plate (100℃)



(b) Deformation of Collecting plate & Electrode plate (150℃)



(c) Deformation of collecting plate & electrode plate (200°C)



(d) Deformation of collecting plate & electrode plate (250°C)

Fig. 3 Deformation of collecting plate & electrode plate of flat surface type

및 전극판의 고정 부분에서 가장 높게 나타났으며, 온도가 증가할수록 최대응력 값이 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3은 배기가스 온도 100~250°C 온도별 평면타입 집진판과 전극판의 최대변형량을 나타낸다. Fig. 3의 (a)는 100°C에서의 최대변형량은 0.381 mm이었고, (b)는 150°C에서 최대변형량은 0.626 mm이며, (c)는 200°C에서 최대변형량은 0.871 mm를 나타내었다. (d)는 250°C에서 1.116 mm의 최대변형량을 나타냈다. 수치해석 결과 평면타입의 집진판과 전극판의 변형량은 중심부에서 멀어질수록 최대변형이 크게 나타나고 있음을 알 수 있었고, 집진판과 전극판의 양 끝단에서 최대변형량이 나타남을 알 수 있다. 또한 온도 조건이 250°C에서 최대변형량이 나타남을 알 수 있다.

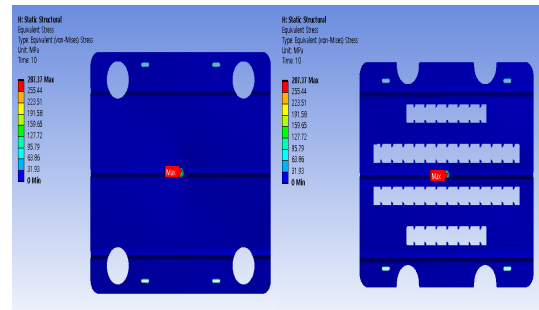
Table 2 Results of structure analysis

Temperature (°C)	Max. equivalent stress (MPa)	Max. deformation (mm)	Safety factor
100	401.14	0.381	0.7
150	658.28	0.626	0.4
200	908.17	0.871	0.3
250	1172.6	1.116	0.2

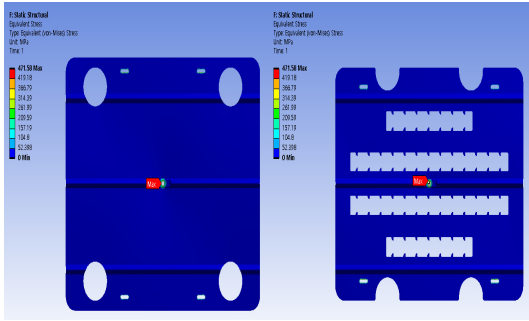
Table 2는 배기가스 온도 100~250°C 온도별 평면타입 집진판과 전극판의 최대응력과 최대변형량 및 안전계수를 나타낸다. 수치해석 결과를 보면 평면타입의 집진판과 전극판은 최대응력 및 최대변형량이 온도가 높아질수록 크게 발생되어 안전계수가 낮아짐을 알 수 있다. 또한 집진판과 전극판의 재료인 SUS 316L의 항복강도인 290 MPa의 기준으로 안전계수가 낮아져 항복이 발생되어 파손되어짐을 알 수 있다.

3.2 삼각(Triangle)

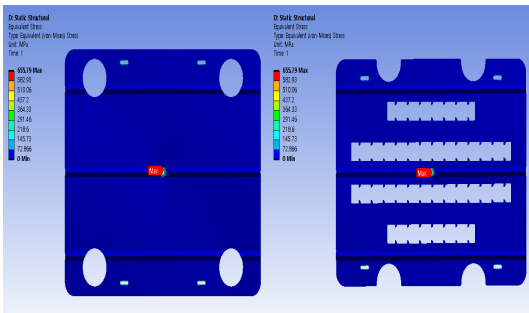
Fig. 4는 배기가스 온도 100~250°C 온도별 삼각타입 집진판과 전극판의 최대응력을 나타낸다. Fig. 4의 (a)는 100°C 온도에서 최대응력 287.37 MPa이었고 안전계수는 1.0이었다. (b)는 150°C 배기가스온도에서 최대응력은 471.58 MPa이었고, 안전계수는 0.6이다. (c)는 200°C의 온도에서 최대응력은 655.79 MPa이었고 안전계수는 0.4이었다. (d)는 250°C 온도에서 최대응력은 840 MPa이었고 안전계수는 0.3이다. 설계한 삼각타입의 수치해석 결과, 집진판과 전극판은 100°C 온도에서는 구조



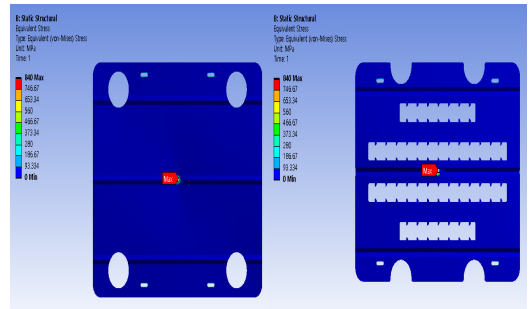
(a) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate & electrode plate (100°C)



(b) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate & electrode plate (150°C)



(c) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate & electrode plate (200°C)



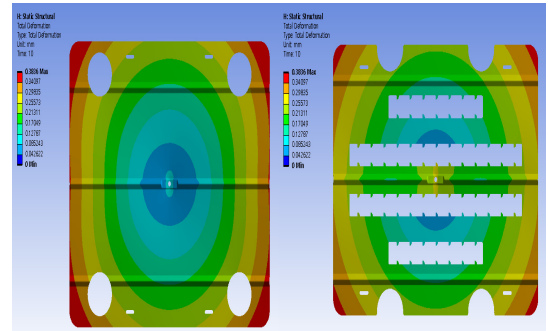
(d) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate & electrode plate (250°C)

Fig. 4 Equivalent stress of collecting plate & electrode plate of triangle type

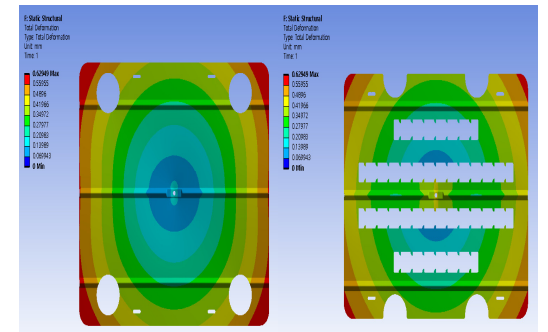
적으로 안정적이지만 150, 200, 250°C 온도에 대해서는 최대응력이 커져서 항복이 발생되어 파손되어짐을 알 수 있다. 수치해석 결과를 보면, 평면타입과 마찬가지로 온도가 올라갈수록 최대응

력이 상승함을 알 수 있었고, 최대 응력이 발생하는 곳은 집진판 및 전극판의 고정 부분에서 가장 높게 나타났다.

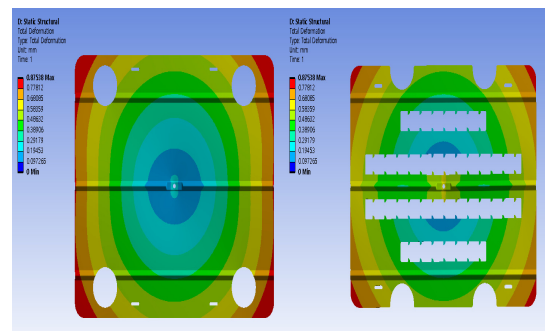
고정 부분의 볼트와 너트의 체결된 힘에 의해 응력이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.



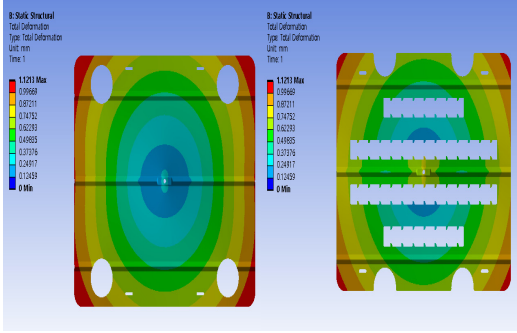
(a) Deformation of collecting plate & electrode plate (100°C)



(b) Deformation of collecting plate & electrode plate (150°C)



(c) Deformation of collecting plate & electrode plate (200°C)



(d) Deformation of collecting plate & electrode plate (250℃)

Fig. 5 Deformation of collecting plate & electrode plate of triangle type

Table 3 Results of structure analysis

Temperature (℃)	Max. equivalent stress (MPa)	Max. deformation (mm)	Safety factor
100	287.37	0.383	1.0
150	471.58	0.629	0.6
200	655.79	0.875	0.4
250	840	1.121	0.3

Fig. 5는 배기가스 온도 100~250℃ 온도별 삼각 타입 집진판과 전극판의 최대변형량을 나타낸다. Fig. 5의 수치해석 결과, 중심부에서 멀어져 갈수록 최대변형이 나타나며 집진판과 전극판의 양 끝단에서 최대변형량이 나타남을 알 수 있다. Fig. 5의 (a)는 100℃의 배기가스온도에서 최대변형량 0.383 mm이었고, (b)는 150℃의 온도에서 0.629 mm이며, (c)는 200℃의 온도에서 0.875 mm이었고, (d)는 250℃의 온도에서 1.121 mm의 최대변형량을 가지며, 온도 높아짐에 따라 변형량이 크게 증가되어 나타나는 것을 알 수 있다.

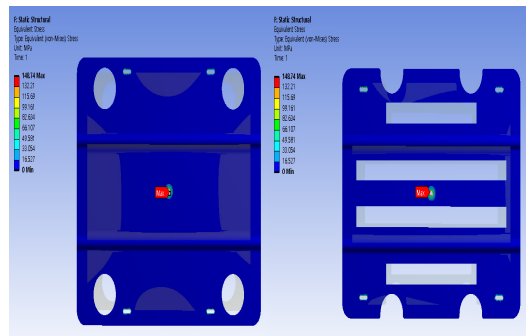
Table 3은 배기가스 온도 100~250℃ 온도별 삼각 타입 집진판과 전극판의 최대응력과 최대변형량 및 안전계수를 나타낸다. 수치해석 결과를 보면 각 온도별 배기가스 변화에 따른 삼각타입의 집진판과 전극판의 최대응력 및 최대변형량이 평면 타입에 비해 작게 나타나는 것을 알 수 있으나

100℃의 온도조건 이외에는 안전계수가 낮아져서 구조적으로 안전하지 못하고 항복이 발생할 것을 알 수 있다.

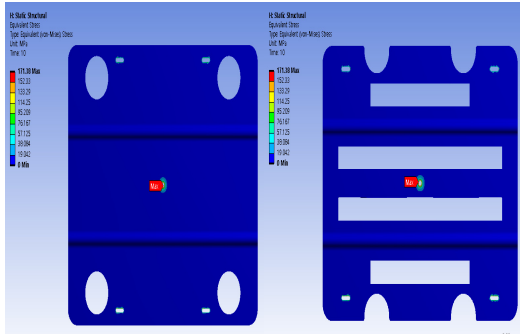
3.3 반원형(Semicircular)

Fig. 6은 배기가스 온도 100~250℃ 온도별 반원형 타입 집진판과 전극판의 최대응력을 나타낸다. Fig. 6의 (a)는 100℃ 온도에서 최대응력 148.74 MPa이었고, 안전계수는 1.9이었다. (b)는 150℃ 온도에서 최대응력 171.38 MPa이었고 안전계수는 1.6이다. (c)는 200℃의 온도에서 최대응력은 210.18 MPa이었고 안전계수는 1.4이었다. 250℃ 온도에서 최대응력 236.05 MPa이었고 안전계수는 1.2이었다. 수치해석 결과, 100~250℃의 모든 배기가스 온도조건에서 최대응력이 인장항복강도의 기준값보다 작게 나타났으며, 평면타입, 삼각타입에 비해 최대응력이 작게 발생되어 구조적으로 안정함을 확인할 수 있었다.

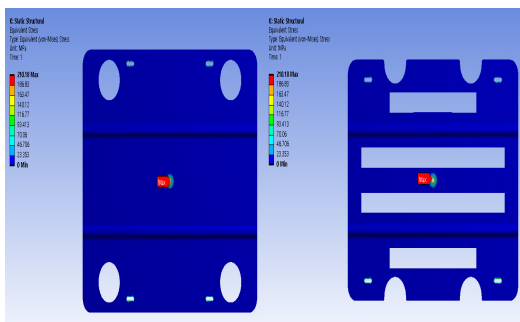
Fig. 7은 배기가스 온도 100~250℃ 온도별 반원형 타입 집진판과 전극판의 최대변형량을 나타낸다. 평면타입과 삼각타입의 경우와 같이 중심부에서 멀어져 갈수록 변형량이 증가되어 나타나며, 집진판과 전극판의 양 끝단에서 최대변형량이 나타남을 알 수 있다. Fig. 7의 (a)는 100℃의 온도에서 최대변형량은 0.225 mm, (b)는 150℃의 온도에서 최대변형량이 0.259 mm이며, (c)는 200℃의 온도에서 최대변형량은 0.318 mm를 나타내고, (d)는 250℃의 온도에서 최대변형량은 0.357 mm를



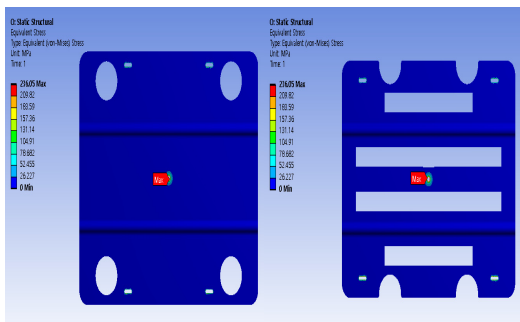
(a) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate electrode (100℃)



(b) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate electrode (150°C)



(c) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate electrode (200°C)



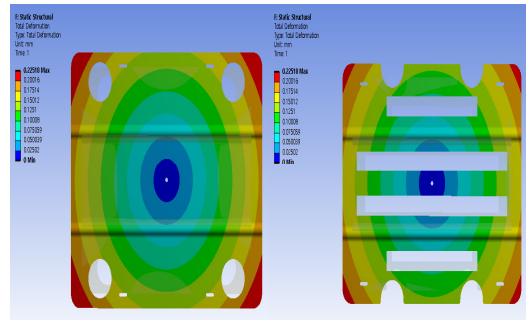
(d) Equivalent (von-Mises) stress of collecting plate electrode (250°C)

Fig. 6 Equivalent stress of collecting plate & electrode plate of semicircular

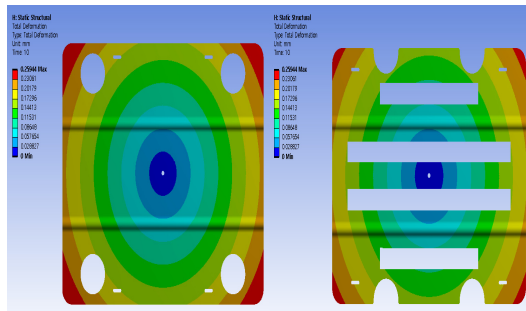
온도가 높아짐에 따라 변형량이 증가하지만 설계한 평면 및 삼각 타입의 집진판과 전극판에 비해 변형량이 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 4 Results of structure analysis

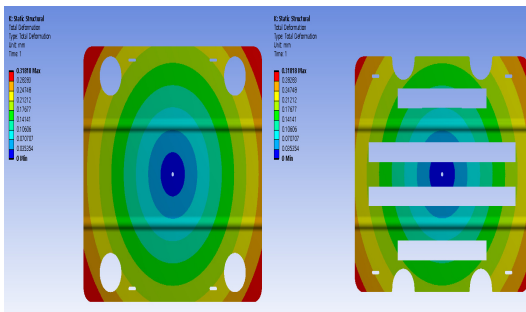
Temperature (°C)	Max. equivalent stress (MPa)	Max. deformation (mm)	Safety factor
100	148.74	0.225	1.9
150	171.38	0.259	1.6
200	210.18	0.318	1.4
250	236.05	0.357	1.2



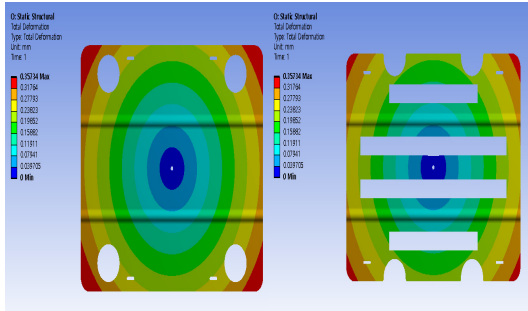
(a) Deformation of collecting plate & electrode plate (100°C)



(b) Deformation of collecting plate & electrode plate (150°C)



(c) Deformation of collecting plate & electrode plate (200°C)



(d) Deformation of collecting plate & electrode plate (250°C)

Fig. 7 Deformation of collecting plate & electrode plate of semicircular

Table 4는 배기가스 온도 100~250°C 온도별 반원형타입 집진판과 전극판의 최대응력과 최대변형량 및 안전계수를 나타낸다. 각 배기가스 온도의 변화에 따른 최대응력 및 최대변형량의 결과 값이 평면, 삼각타입의 집진판과 전극판에 비해 현저히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 설계한 3가지 타입의 집진판 및 전극판 중 반원형 타입의 집진판과 전극판이 가장 구조적으로 우수하고 안정하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 3가지 타입의 집진판과 전극판을 설계하고, 3가지 타입의 평면, 삼각, 반원형의 집진판과 전극판에 대하여 각 배기가스 온도별 구조해석을 수행하였다. 각각의 수치해석 결과로부터 최대응력, 최대변형량, 안전계수를 도출하였고, 이를 통해 집진판과 전극판에 안전성 및 변형 여부를 판단하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 3가지 타입의 평면, 삼각, 반원형 타입에 모두 동일한 조건으로 구조해석을 진행하였다. 구조해석 결과, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C 온도별 평면, 삼각, 반원형 타입의 집진판, 전극판에서 최대응력이 고정부분에서 나타났으며, 최대변형량은 집진판과 전극판의 끝단에서 발생되어짐을 알 수 있었다.

2) 250°C에서 평면, 삼각, 반원형타입의 집진판 및 전극판의 수치해석 결과는 평면타입에서는 최대응력 1172.6 MPa, 최대변형량 1.116 mm, 안전계수 0.2로 나타났으며, 삼각타입은 최대응력 840 MPa, 최대변형량 1.121 mm, 안전계수 0.3으로 나타났고 반원형타입은 최대응력 236.05 MPa, 최대변형량 0.357 mm, 안전계수 1.2로 나타났다.

3) 설계한 3가지 타입의 집진판과 전극판 중 반원형 타입이 평면타입, 삼각타입보다 250°C의 온도에서 최대응력 및 최대변형량이 적게 나타나며 안전계수는 1.2로 나타나 안전하게 설계되었음을 확인하였다. 따라서 설계한 반원형 타입의 집진판 및 전극판이 가장 우수한 집진판과 전극판임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2019년 경상대학교 발전기금재단 재원으로 수행되었음.

Author Contributions

J. U. Lee; formal analysis, Software, writing-original, S. H. Han; Project Administration, Supervision, writing-review & editing.

References

1. Y. H. Ryu, K. S. Jung and, J. G. Nam, 2019, "Improvement of combustion performance and exhaust emissions through engine initialization in smallmarine diesel engines", Journal of The Korean Society of Marine Engineering, Vol. 43, No. 7, pp. 504-510. (DOI:10.5916/jkosme.2019.43.7.504)
2. K. H. Ryu and J. G. Won, 2020, "Performance Evaluation of Aftertreatment Parts for the Reduction of Exhaust Gas Emissions by Design of Experiments", Journal of Power system Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 68-76.

- (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.4.068>)
3. H. L. Shao, S. y. Lee, J. H. Doh, D. H. Lee and J. S. Lee, 2018, "Heat Transfer and Thermal Stress Analysis According to Wheel Web Shapes Considering Tread Braking", *Journal of The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, Vol. 42, No. 2, pp. 159-166.
(DOI:10.3795/KSME-A.2018.42.2.159)
 4. K. B. Lee, K. W. Oh, T. B. Kim and H. S. Kwon, 2017, "Analysis of Control Region and NOx Reduction Characteristics of NH₃ Direct Injection System(ASDS) and Urea-SCR System", *Journal of The Korean Society of Automotive Engineers*. pp. 234-237.
 5. S. H. Han, J. U. Lee, S. Y. Lee, J. D. Hawng and D. K. Kang, 2020, "FMEA of Electrostatic Precipitator for Preventive Maintenance", *Journal of The Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 26, No. 6, pp. 706-714.
(<http://www.kosomes.or.kr/journal/article.php?code=76495>)
 6. Y. H. Ryu, K. S. Jung and J. G. Nam, 2019. "Improvement of combustion performance and exhaust emissions through engine initialization in smallmarine diesel engines", *Journal of The Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 43, No. 7, pp. 504-510.
(DOI:10.5916/jkosme.2019.43.7.504)
 7. B. Y. Lee, M. H. Im and J. Y. Shon, 2004. "Temperature Distribution and Thermal Stress Analyses of a Large LPLi Engine piston", *Journal of The Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 28, No. 3, pp. 538-550.
 8. C. M. Park, W. S. Kim and G. j. Park, 2002, "Analysis of Thermal Stress and Deformation of Casting Roll in Twin Roll Strip Casting Process", *Journal of The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, Vol. 26, No. 9, pp. 1943-1951.
 9. M. S. Han and J. U. Cho, 2015, "Thermal Stress Analysis Disk Rotor by Configuration of Bike Brake", *Journal of The Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 23, No. 3, pp. 287-291.
(<https://doi.org/10.7467/KSAE.2015.23.3.287>)
 10. K. S. Kim, J. C. Lee, Y. J. Kim, 2005, "Thermal Stress Analysis and Flow Characteristics of a Bellows-Seal Valve High Pressure and Temperature", *Journal of The Korean Society for Fluid Machinery*, Vol. 8, No. 6, pp. 40-46.
 11. P. Hwang, H. C. Seo and X. Wu, 2010, "Temperature Field and Thermal Stress Simulation of Solid Brake Disc Based on Three-dimensional Model", *Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol. 26, No. 1, pp. 31-36.
(<https://doi.org/10.9725/kstle.2010.26.1.031>)
 12. K. J. Kim and S. T. Won, 2020, "Coupled Simulation of Thermal Stress by using Input Values Through Temperature Distribution by Thermal Conduction After Heat Transfer Analysis for 2.9 Liter Indirect Injection Engine Piston", *Journal of Korean Society of Mech. Technol*, Vol. 22, No. 3, pp. 463-468.
(<https://doi.org/10.17958/ksmt.202006.463>)
 13. C. M. Park, W. S. Kim and G. J. Park, 2002, "Analysis of Thermal Stress and Deformation of Casting Roll in Twin Roll Strip Casting Process", *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers - A*, Vol. 26, No. 9, pp. 1943-1951.
 14. Y. D. Park, S. G. Byeon and B. S. Gang, 1998. "Thermal Deformation and Thermal Stress Analysis of Pipe During Pipe Internal Fluid Freezing", *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers - A*, Vol. 22, No. 1, pp. 227-237.
 15. M. S. Han and J. U. Cho, 2015, "Thermal Stress Analysis Disk Rotor by Configuration of Bike Brake", *Journal of The Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 23, No. 3, pp. 287-291.
(<https://doi.org/10.7467/KSAE.2015.23.3.287>)