

# 선박용 디젤엔진의 미세먼지저감 장치에 다공판과 믹서의 장착이 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

윤병규\* · 조상현\*\* · 류영현\*\*\*†

\* 자동차융합기술원 파워트레인 연구센터 선임연구원, \*\* 자동차융합기술원 파워트레인 연구센터 센터장,  
\*\*\* 목포해양대학교 해양메카트로닉스학부 조교수

## Numerical Study of Impact for Particulate Matter Reduction Device According to Installation of Perforated Plate and Mixer on Marine Diesel Engine

Byoungkyu Yun\* · Sanghyun Cho\*\* · Younghyun Ryu\*\*\*†

\* Senior Research Engineer, Powertrain R&D Center, Jeonbuk Institute of Automotive convergence Technology, Gunsan 54158, Korea  
\*\* Center Manager, Powertrain R&D Center, Jeonbuk Institute of Automotive convergence Technology, Gunsan 54158, Korea  
\*\*\* Assistant Professor, Division of Marine Mechatronics, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**요약** : 본 논문에서는 선박용 디젤엔진의 미세먼지저감 장치에 장착된 다공판 및 믹서의 형상과 배치에 따른 압력강하와 유동균일도 특성에 대한 연구를 진행하였다. 미세먼지저감 장치에 장착된 다공판 및 믹서는 미세먼지저감 장치 내의 배출가스 및 산화/환원제의 유동균일도를 높여 배출가스 저감 성능을 높이는 긍정적인 효과와 함께 시스템의 배압을 상승시키는 부정적인 효과도 동시에 지니고 있다. 본 연구에서는 5개의 다공판, 1개의 믹서를 Case 별로 조합하여 6개의 사양에 대해서 유동해석을 통해 각각 유동균일도 및 압력 강하를 계산하였으며, 최적의 다공판 및 믹서의 형상과 배치를 선정하였다.

**핵심용어** : 선박용 디젤엔진, 미세먼지저감 장치, 다공판, 믹서, 압력강하, 유동균일도

**Abstract** : This study presents the characteristics of a pressure drop and uniformity index for a particulate matter reduction device with a perforated plate and mixer for marine diesel engines. The perforated plate and mixer equipped on the particulate matter reduction device induce an increase of exhaust gas reduction performance by increasing the uniformity index. Whereas, the perforated plate induces pressure drop increases in the particulate matter reduction device. Therefore to calculate the effect of the uniformity index and pressure drop of the perforated plates and mixer, this study combines several cases using five types of perforated plates and one type of mixer. Consequently, these results were analyzed to determine the optimized type and position of the perforated plate and mixer.

**Key Words** : Marine diesel engine, Particulate matter reduction device, Perforated plate, Mixer, Pressure drop, Uniformity index

### 1. 서론

국내 대기질 수준이 전 세계 180개국 중 173위이며, 초 미세먼지 농도는 세계 8위가 됨에 따라 2017년 05월 새 정부 출범 시 미세먼지문제 해결을 최우선 과제로 선정하였고, 국내 미세먼지 배출량을 2022년까지 30% 저감하겠다는 목표를 설립하였다(Ministry of Environment, 2017). 설립된 목표

를 만족하기 위하여 미세먼지 4대 핵심 배출원을 선정하였으며, 그중 수송 분야의 경우 노후 경유차 퇴출, 친환경차 보급 확대, 선박 및 건설기계 관리 강화 등의 강력한 감축방안을 마련하였다(Ministry of Environment, 2017). 수송 분야의 비도로 오염원 중 선박의 경우 배출 기여도가 45.6%로 매우 높아, 정부에서는 선박용 미세먼지저감 장치의 개발 및 상용화를 추진하고 있다(Ministry of Environment, 2017). 미세먼지저감 장치는 직접배출 미세먼지의 저감을 위한 매연여과장치(DPF; diesel particulate filter)와 간접배출 미세먼지의 저감을 위한 디젤산화촉매(DOC; diesel oxidation catalyst), 그리고

\* First Author : bkyun@jiat.re.kr, 063-472-2304

† Corresponding Author : yhyu@mmu.ac.kr, 061-240-7243

선택적 환원촉매(SCR; selective catalytic reduction) 등으로 구성되어 있다.

현재, 선박분야에서는 미세먼지저감 장치에 대한 기술 개발 및 상용화 기간을 단축시키고자 일반 디젤 차량에서 개발된 미세먼지저감 장치의 적용을 위해 노력하고 있으나 일반 차량과 운행 조건, 연료의 황 함유량, 미세먼지의 배출 특성 등이 매우 상이하다. 따라서 선박의 미세먼지 배출 특성에 적합하도록 기초 연구 및 상용화 연구를 진행하고 있다. Lee et al.(2018)은 직접배출 미세먼지저감 장치인 매연저감 장치의 재생 효율을 높이기 위하여 미세먼지를 매연저감 장치에 포집한 후 연료 첨가제를 적용하여 각각의 첨가제별 재생 특성을 분석하였다. 그리고 An et al.(2018)의 연구에서는 황 함유량이 높은 선박 운항 조건에 적합한 선택적환원촉매(SCR) 장치를 개발하기 위하여 전구체(precursor) 별로 SCR 촉매를 개발하였으며 개발된 촉매의 질소산화물(NOx : Nitrogen oxygen) 저감 성능을 측정하였다.

선박용 디젤엔진의 미세먼지저감 장치용 촉매 자체의 성능 향상을 높이기 위한 다양한 연구가 진행되었으나 미세먼지저감 장치의 성능과 밀접한 관계를 가지고 있는 유동균일도 및 압력 강하에 대한 연구는 매우 미미한 수준이다. 일반적으로 다공판과 믹서를 적용하여 미세먼지저감 장치의 유동균일도를 향상시킬 경우 촉매의 성능은 향상되지만 시스템의 배압 상승은 필수적으로 발생된다. 하지만 선박용 미세먼지저감 장치의 압력강하 요구 정도는 제조사의 요구에 따라 결정되므로(MEPC. 132(53), 2016) 일반적으로 그 수준은 매우 낮다. 따라서 유동 균일도를 높이기 위해서는 압력강하가 반드시 고려되어야 하므로 다공판과 믹서의 최적 형상 설계와 위치 선정이 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 수치해석을 이용하여 선박용 디젤엔진의 미세먼지저감 장치 내에 설치된 믹서와 다공판의 형상 및 위치에 따른 미세먼지저감 장치의 유동균일도 및 압력강하 정도를 고찰하고자 한다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 해석모델

선박용 디젤 엔진의 미세먼지저감 장치에 다공판 및 믹서의 형상과 설치위치에 따른 유동균일도 및 압력 강하의 변화를 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 미세먼지저감 장치를 설계하였다. 그리고 Fig. 2와 같이 다공판과 믹서를 설계하였으며 미세먼지저감 장치의 다공판 및 믹서의 형상과 배치에 따른 유동균일도 및 압력강하를 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 다공판과 믹서를 조합하였다. 유동해석 시 Fig. 1에서 표기된 CAT 1~4의 Porosity가 압력강하에 미치는 영향이 매

우 높아 유동해석 시 Porosity 값은 Case에 무관하게 촉매 별로 일정하게 지정하였다. 다공판 및 믹서의 조합 방식에 대해서는 Table 1과 같이 선정하였으며 Case 별 유동균일도 및 압력강하는 상용해석 코드인 AVL社의 FIRE-M을 이용하여 분석하였다. Table 1에 기재된 6개의 사양에 대한 설계 수치들은 본 연구에 매우 중요한 변수들이다. 하지만 각 사양에 대하여 설계 업체의 지적재산권과 관련되어 있어, 본 연구에서는 기재하지 않았다.

### 2.2 유동해석을 위한 격자 형성

차량용 미세먼지저감 장치에 유동장 분석을 위한 격자 크기를 선박용 미세먼지저감 장치에 적용할 경우 격자 개수가 수천만 개 이상 형성되어 적절한 계산 시간을 확보할 수가 없다. 따라서 선박용에 적합한 격자크기 선정이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 선박용 미세먼지저감 장치의 유동장 분석을 위한 격자를 형성하기 위하여 FIRE-M의 Auto meshing 기능을 적용하였으며, 유동의 흐름이 복잡한 믹서, 다공판, 촉매 부분에는 격자 조밀도를 차량용 미세먼지저감 장치 수준까지 높여 해석의 정확도를 높였으며, 또한 계산 시간도 줄일 수 있었다.

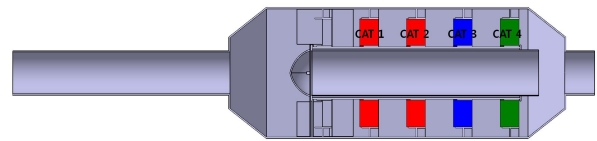


Fig. 1. Particulate matter reduction device.

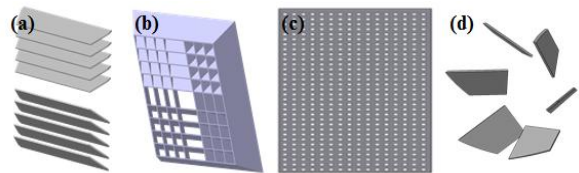


Fig. 2. Perforated plates and mixer (a) Straight type, (b) Mesh type, (c) Perforated type, (d) Mixer.

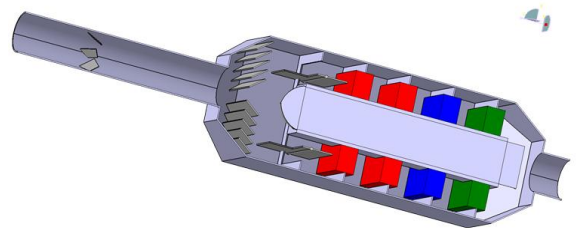


Fig. 3. 3D Numerical model for analysis of uniformity index and pressure drop.

Table 1. Case index

Case	Composition	
	Perforated plate	Mixer
Case 1	Straight	O
Case 2	Mesh	O
Case 3	X	O
Case 4	Straight	X
Case 5	Perforated (3 EA)	X
Case 6	Perforated (2 EA)	X

### 2.3 지배방정식

선박용 디젤엔진의 미세먼지저감 장치의 유동균일도 및 압력강하 해석을 위하여 아래와 같이 Conservation law와 Momentum equation, 그리고 Energy equation을 식(1)~(3)과 같이 적용하였다(AVL, 2019).

$$\hat{\rho} \frac{D\hat{\phi}}{Dt} = \hat{\rho} \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial t} + \hat{\rho} \hat{U}_j \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial x_j} \quad (1)$$

여기서,  $\hat{\phi}$  은 Corresponding property(per unit mass),  $\hat{\rho}$ 는 유체의 밀도,  $U_j$ 는 격자 j에서의 속도를 의미한다.

$$\hat{\rho} \frac{D\hat{U}_i}{Dt} = \hat{\rho} g_i - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \hat{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{U}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \hat{U}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

여기서,  $\hat{\rho}$ 는 유체의 밀도,  $\hat{U}_i$ 은 유속,  $g_i$ 는 중력가속도,  $\hat{p}$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성계수, 그리고  $\delta_{ij}$ 는 Unit tensor를 의미한다.

$$\hat{\rho} \frac{D\hat{H}}{Dt} = \hat{\rho} q_g + \frac{\partial \hat{p}}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{\tau}_{ij} \hat{U}_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial \hat{T}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

여기서,  $\hat{H}$ 는 엔탈피,  $\hat{\tau}_{ij}$ 은 전단응력,  $\lambda$ 는 Heat conductance,  $\hat{p}$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성계수, 그리고  $\hat{T}$ 는 온도를 의미한다.

### 2.4 경계조건

유동균일도와 압력강하 분석을 위하여 본 연구에서는 연안 소형선박에 장착되어 있는 420PS 급 엔진을 적용 대상으로 선정하였다. 대상 엔진에 대한 자세한 사양은 Table 2에서 보여준다. 유동균일도 및 압력강하 분석을 위해 Table 3과 같이 대상엔진의 ISO8178의 E3 모드의 시험 값 중 배압이 가장 높을 것으로 예상되는 모드 1의 유량과 온도 값을 적용하여 유동균일도 및 압력강하를 해석하였다.

Table 2. Test engine


Engine specification		Engine
Type	4 stroke, Water cooled	
Cylinder	6	
Displacement	12,920 cc	
Max. Power	430 PS (@ 2000 RPM)	
Model Year	1998	

Table 3. Condition of ISO 8178 E-3 mode

Mode	Mass flow rate (kg/h)	Temperature (°C)	Speed (RPM)	Power (kW)
1	1,963	410	1,900	300
2	1,539	350	1,730	220
3	1,092	325	1,520	150
4	662	286	1,200	75

### 2.5 성능지수

다공판과 믹서적용에 따른 유동균일도 분석을 위하여 Uniformity index를 식(4)와 같이 계산하였다(AVL, 2019).

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{i=0}^n \| u_i - \bar{u} \| A_i}{\left\| \sum_{i=0}^n u_i A_i \right\|} \quad (4)$$

여기서,  $\gamma$ 는 Uniformity index,  $n$ 은 속도분포단면에 분포되는 총 격자의 개수,  $A_i$ 는 격자 i의 단면적,  $u_i$ 는 격자 i에서의 유속, 그리고  $\bar{u} = \sum_{i=0}^n u_i A_i / \sum_{i=0}^n A_i$ 를 의미한다.

압력강하 분석을 위해서 식(5)와 같이 입구압력과 출구 압력의 차를 이용하였다.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (5)$$

여기서,  $P$ 은 압력, in은 Inlet, out은 Outlet을 의미한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Case 별 압력강하

Table 3에서 제시한 Case 별 압력강하 분석 결과를 Fig. 4에서 볼 수 있다. Case 1~4의 경우 압력강하가 20 mbar 수준으로 매우 낮으며 Case 5의 경우 69.87 mbar, Case 6의 경우

선박용 디젤엔진의 미세면지저감 장치에 다공판과 믹서의 장착이 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

59.96 mbar로 Case 1~4 비해 Case 5, 6이 압력강하 정도가 높음을 알 수 있다.

Case 1, 2, 5를 통해 다공판의 형상 및 배치에 대한 압력강하 정도를 비교할 수 있다. 다공판 형상과 배치가 제일 복잡한 Case 5의 경우 69.87 mbar로 압력강하가 계산되었으며, Case 1과 2의 경우 압력강하가 각각 20.10 mbar, 19.08 mbar로 다공판 형상 및 배치는 압력강하에 미치는 영향이 높음을 알 수 있다.

Case 1과 3 및 4의 압력강하를 비교하여 믹서의 유무에 따른 압력강하 정도를 비교할 수 있다. Case 1과 3을 비교할 경우 압력강하는 0.68 mbar이며, Case 1과 4를 비교할 경우 1.02 mbar로 Straight perforated plate 와 믹서의 장착은 선박용 미세면지저감 장치의 배압에는 크게 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

Case 5와 6을 비교해 보면, 다공판의 배치에 대하여 압력강하 분석이 가능하며 그 수치는 9.91 mbar로 다공판의 배치도 압력강하에 매우 높은 영향이 있음을 확인할 수 있다.

Figs. 5~10은 각 Case별 압력강하분포 결과를 보여주고 있다. Straight type perforated plate를 적용한 Case 1과 4의 경우 Cone 이후에 배치되는 벽면에 압력분포가 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Straight type 형상의 특성상 한 방향으로만 유동을 배분하기 때문인 것으로 판단된다. Mesh type perforated plate를 적용한 Case 2와 Perforated type을 적용한 Case 5, 6에는 이러한 현상이 발생되지 않았다.

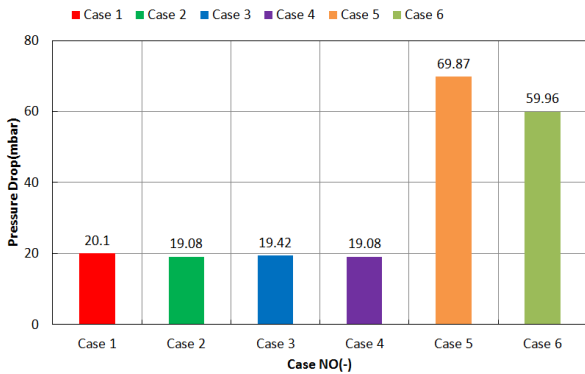


Fig. 4. Pressure drop results of each case.

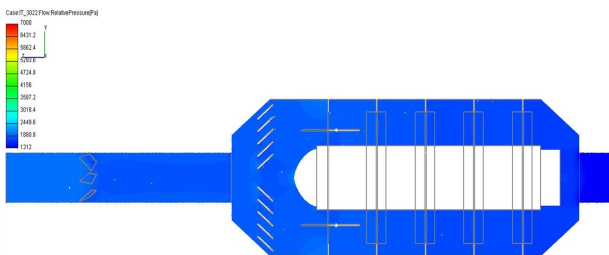


Fig. 5. Pressure distribution of case 1.

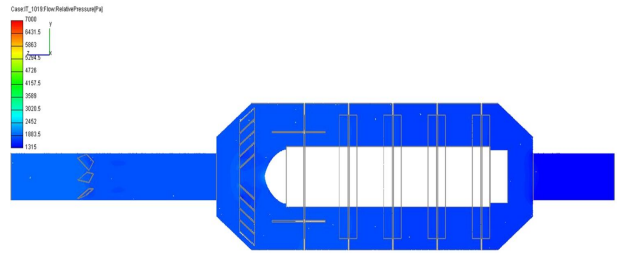


Fig. 6. Pressure distribution of case 2.

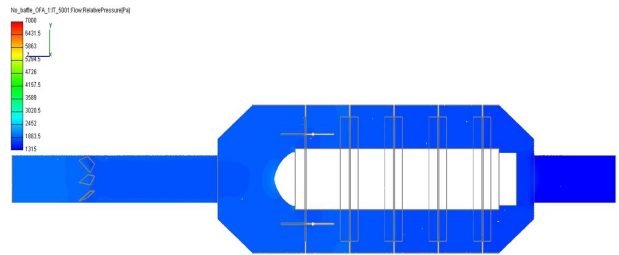


Fig. 7. Pressure distribution of case 3.

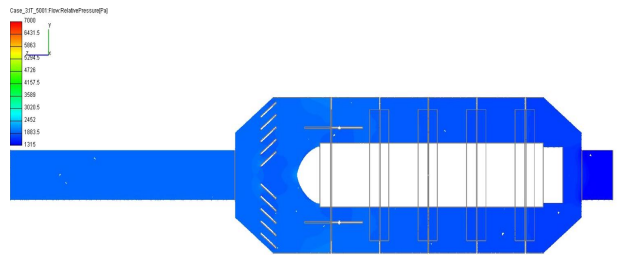


Fig. 8. Pressure distribution of case 4.

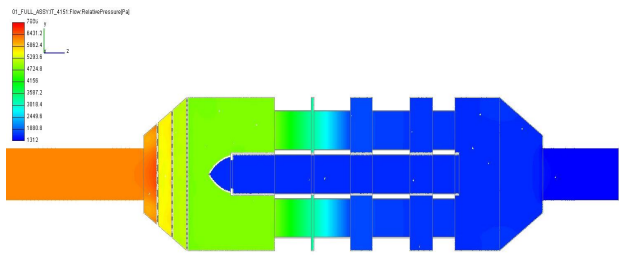


Fig. 9. Pressure distribution of case 5.

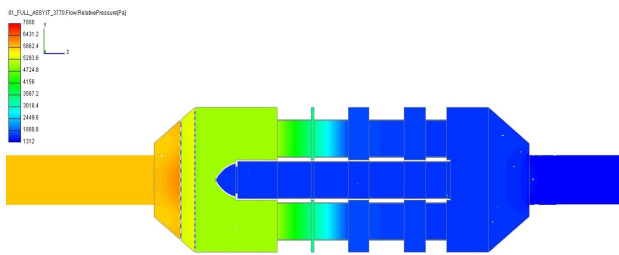


Fig. 10. Pressure distribution of case 6.

### 3.2 Case 별 유동분포

Table 1에서 제시한 Case 별 유동 분포를 Figs. 11~16에 도시하였다. Case 1, 2, 5를 통해 다공관의 형상 및 배치에 대한 유동분포 정도를 정성적으로 분석할 수 있다. 다공관 형상과 배치가 제일 복잡한 Case 5의 경우 Case 1과 2에 비교하였을 때 유동이 안정적인 것을 확인할 수 있다. Case 1, 2, 3의 비교를 통해 Perforated plate 장착 여부에 따른 유동분포 결과를 정성적으로 분석이 가능하다. Perforated plate(Straight type, Mesh type)와 믹서가 장착되어 있을 경우가 믹서만 장착된 경우보다 유동분포가 중앙에 집중되지 않고 넓게 분포되고 있음을 확인할 수 있다. Case 1과 3, 4의 결과 분석을 통해 믹서의 유무에 따른 유동분포를 정성적으로 파악이 가능하다. Case 1과 3을 비교할 경우 유동이 Case 3에서 중앙으로 몰리는 경향이 더 높게 나오고 있으며, Case 1, 4를 비교할 경우 유사한 유동 패턴을 보이는 것으로 보아, 유동균일도 향상을 위해서는 믹서는 큰 의미가 없는 것으로 판단된다. Case 5와 6을 보았을 때 다공관의 배치에 대한 유동분포 분석이 정성적으로 가능하다. Case 6의 경우 Case 5에 비해 다공관이 1개가 부족함에도 불구하고, 유동 분포는 Case 5와 유사하게 분포하고 있음을 알 수 있다. Case 1과 4의 경우 모두 벽면에 유동이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 압력분포 결과와 마찬가지로 Straight type 다공관 형상의 특성 상, 한 방향으로만 유동을 배분하기 때문인 것으로 판단된다. Mesh type perforated plate를 적용한 Case 2의 경우는 중앙으로 유동이 집중되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Mesh type의 경우 유동을 배분하는 hole의 직경이 일반적인 다공관에 비해 너무 커서 유동이 적절히 배분되지 못하고 집중되기 때문인 것으로 판단된다. Perforated type을 적용한 Case 5와 6에는 이러한 현상이 발생되지 않았다.

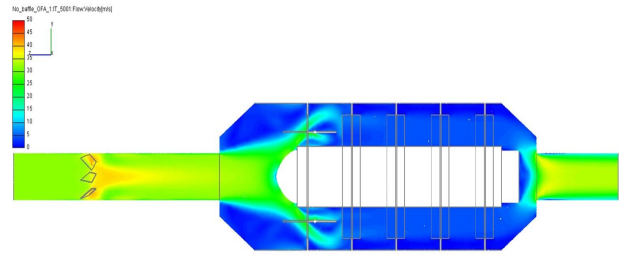


Fig. 13. Velocity distribution of case 3.

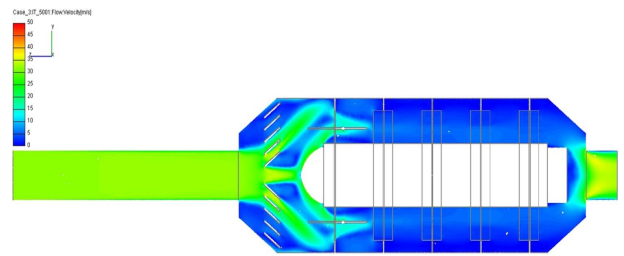


Fig. 14. Velocity distribution of case 4.

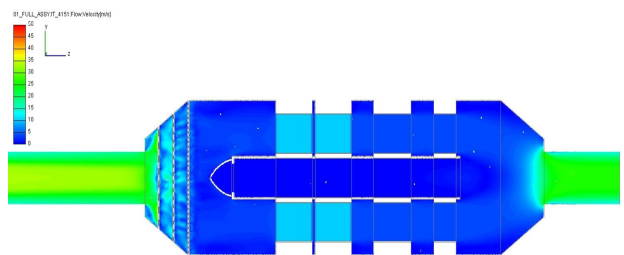


Fig. 15. Velocity distribution of case 5.

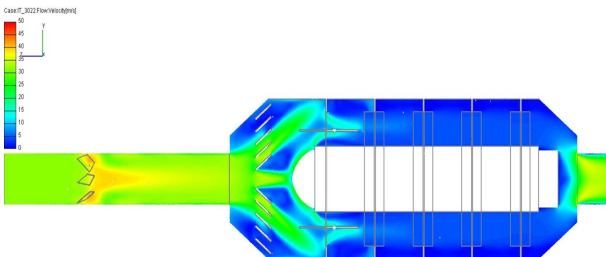


Fig. 11. Velocity distribution of case 1.

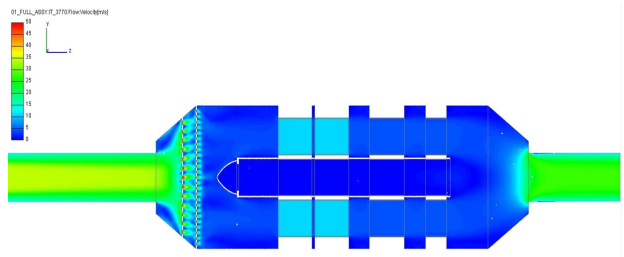


Fig. 16. Velocity distribution of case 6.

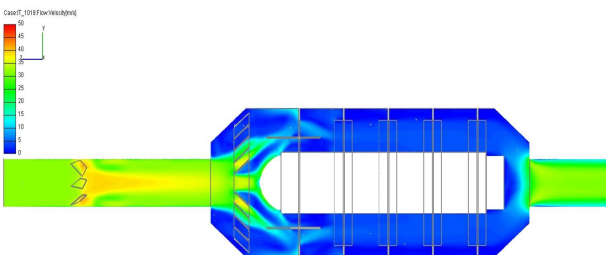


Fig. 12. Velocity distribution of case 2.

### 3.3 Case 별 유동균일도

Table 1에서 제시한 Case 별 유동균일도 분석 결과를 Fig. 17에 도시하였다. 유동균일도 분석은 식(4)에서 정의한 Uniformity index를 적용하여 분석하였다. 유동균일도는 모든 Case에서 90% 이상으로 높게 분석이 되었으나, 좀 더 면밀한 분석을 위하여 CAT 1의 표면에서의 속도 분포를 분석하였다. Fig. 18은 각 Case 별로 CAT 1의 표면에서의 유동분포를 보여주고



있다. Case 1~4의 CAT 1 표면의 속도 분포를 보여주고 있는 Fig. 18(a)~(d)의 결과를 통해 계산된 유동균일도 값은 높으나 유속의 분포가 매우 불안정함을 알 수 있다. Case 5와 6의 CAT 1 표면에서의 속도 분포를 도시하고 있는 Fig. 18의 (e), (f)의 결과를 통해 Perforated type을 적용하였을 때 다른 Case에 비해 양호한 유동분포를 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.

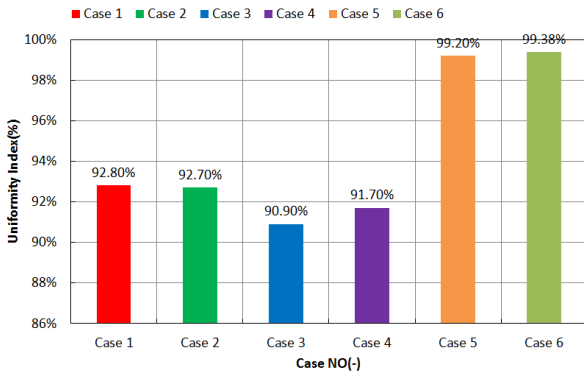


Fig. 17. Uniformity index results of each case.

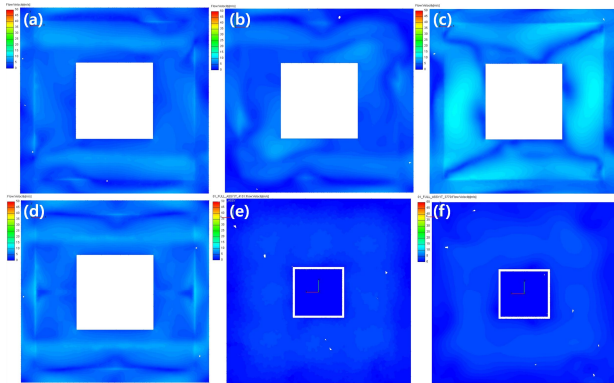


Fig. 18. Velocity distribution on surface of CAT 1 for each case, (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4, (e) case 5, (f) case 6.

#### 4. 결론

본 연구에서는 설계된 선박용 미세먼지저감 장치 내에 다공판과 믹서의 형상 및 배치가 압력강하 및 유동 균일도에 미치는 영향에 대해서 분석하였으며, 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 압력강하는 Straight type 다공판이 장착된 Case 4가 19.08 mbar로 제일 낮았으며, Perforated type 다공판 3개가 장착된 Case 5가 69.87 mbar로 제일 높았다.

(2) 유동균일도의 경우, 믹서만 장착된 Case 3이 90.90%로 가장 낮았으며 Perforated type 다공판 2개가 장착된 Case 6이 99.38%로 제일 높았다.

(3) 각 Case 별 압력강하 및 유동균일도 분석 결과를 조합해 볼 경우 배압이 59.96 mbar이며 유동균일도가 99.38%인 Case 6(Perforated type 다공판 2개 적용 사양)이 설계된 선박용 미세먼지 저감 장치에 가장 적합한 사양으로 사료된다.

(4) 유동균일도가 높고 압력 강하가 낮은 Case 6을 적용할 경우, 장착된 CAT 1~4의 촉매 성능을 높일 수 있을 것으로 판단되며, 이를 통해 높은 효율의 미세먼지 저감 장치 설계가 가능할 것으로 사료된다.

#### 후 기

“이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박배출 미세먼지통합저감기술개발사업 400kW급 이하 선박용 저가보급형 PM-NOx 동시저감을 위한 p-SDPF 시스템 개발).”

#### References

- [1] An, Y. M., D. S. Park, J. G. Nam, and Y. H. Ryu(2018), Preliminary study of reducing nitrogen oxide emissions according to vanadia precursor of Urea-SCR catalyst in diesel engines, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 42, No. 9, pp. 697-701.
- [2] AVL FIRE V2019 Manual(2019).
- [3] Lee, S. H., G. B. Cho, H. S. Kim, S. Y. Lee, W. B. Choi, Y. M. An, E. S. Lee, and K. Y. Lee(2018), Study on DPF regeneration using a fuel-borne catalyst in diesel engine with high sulfur fuel, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol 42, No. 9, pp. 690-696.
- [4] Ministry of Environment(2017), [http://www.me.go.kr/home/web/policy\\_data/read.do?menuId=10262&seq=7053](http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=7053).
- [5] NOx technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines (MEPC.132(53)) (2016), [https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC\\_2419\\_14/1/](https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_2419_14/1/).

Received : 2019. 11. 21.

Revised : 2019. 12. 13. (1st)

: 2019. 12. 26. (2nd)

Accepted : 2019. 12. 27.