

사각 습식 스크러버 내부구조에 따른 유동특성

이상민¹ · 권병민² · 박권하[†]

(Received October 29, 2018 ; Revised December 10, 2018 ; Accepted December 17, 2018)

Flow characteristics according to internal structure of square wet scrubber

Sang-Min Lee¹ · Byung-Min Kwon² · Kweon-Ha Park[†]

요약: 선박 디젤 엔진에서 배출되는 황산화물에 대한 규제가 강화되고 있으며, 대표적인 황산화물(SOx) 저감기술인 습식 스크러버에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 10MW급 디젤 엔진용 사각 습식 스크러버 내부구조의 변화에 따른 압력, 속도, 온도, 물 분포의 특성을 분석하였다. 기존 스크러버의 형상에서 외부 스크러버, 가이드날개와 hole plate, 패킹을 순차적으로 추가시키며 해석하였다. 해석결과 외부 스크러버를 설치함으로써 스크러버 전단에 걸리는 압력이 낮아지고 배기가스가 쏠리는 현상이 적어지는 것을 확인 하였다. 또한 대부분의 열 교환이 스크러버 내부에서 완료되어 입자의 포집에 긍정적인 영향을 주었다. 가이드날개와 hole plate를 설치함으로써 배기가스가 균일하게 분산되었으며, 외부 스크러버에서의 활발한 입자의 포집이 이루어짐을 알 수 있었다. 팩킹영역에서는 세정수가 넓게 분포되었고, 팩킹영역 이후 균일하고 낮은 온도 분포를 나타내며, 스크러버 내부에서 급격히 감소된 유동속도에 의하여 배기가스의 체류시간이 길어지는 것을 확인 할 수 있었다.

주제어: 사각 습식 스크러버, 내부구조, 가이드날개

Abstract: Sulfur oxides (SOx) emissions from marine diesel engines are being strongly regulated. Many studies have investigated wet scrubbers, which are the forerunners of SOx reduction technologies. This study analyzed the characteristics of pressure, velocity, temperature, and water distribution according to changes in the internal structure of a rectangular wet scrubber for a 10 MW-diesel engine. An external scrubber, guide vane, hole plate, and packing were sequentially added to the structure of a conventional scrubber for analysis. The results showed a pressure reduction at the front end of the scrubber. A uniform exhaust gas flow was produced with the installation of the external scrubber. Most of the heat exchange was completed before exhaust gas reached the inner scrubber. With the installation of the guide vane and hole plate, exhaust gas was uniformly dispersed, and active particles were trapped in the external scrubber. The cleaning water was found to be widely distributed in the packing region. A uniform and low-temperature distribution was observed after the packing region. The residence time of the exhaust gas was prolonged owing to flow rate reduction in the scrubber.

Keywords: Rectangular wet scrubber, Internal structure, Guide vane

1. 서 론

선박 디젤 엔진에서 배출되는 황산화물(SOx)은 주요한 대기오염물질로써 산성비의 원인이 되거나 기체 자체로 사람에게 유해하게 작용해 호흡기 질환을 일으키게 된다[1]. 국제연합(UN)산하의 국제해사기구(IMO)에서는 배출규제 지역(sECA)의 경우 2015년부터 황 함량 0.1%, sECA이외의 지역에 대해 2020년부터 황 함량 0.5%로 제안한다는 내용을 발표하였다. 이에 따라 선박에서 배출되는 가스 내

포함되어 있는 황산화물(SOx)의 제거에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 현재 개발 중이거나 개발된 가장 대표적인 SOx 저감 기술로는 습식 스크러버가 있다. 습식 스크러버를 이용한 황산화물의 처리기술은 저렴한 고유황 유 연료를 그대로 사용할 수 있고, 낮은 운영비용으로 인하여 선호하는 것으로 알려져 있다. 물 또는 해양에서 공급할 수 있는 해수를 이용하여 엔진의 배기가스를 세정할 수 있는 장점도 있다[2]. 이러한 장점들에 의해 습식 스크

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9460-8399>): Professor, Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: khpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4367

1 M.S Candidate, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, E-mail: iddfll@naver.com, Tel: 051-410-4953

2 CEO, Atics Engineering, E-mail: bmkwon@atics.co.kr, Tel: 031-375-9355

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

러버에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. [3]에서는 스프레이형 스크러버의 배출가스에 포함된 액적의 제어방법에 관한 전산해석적 연구를 수행하였으며, [4]에서는 증진층식 스크러버의 스프레이 시스템 최적 설계에 대한 수치해석적 연구를 하였고, [5]에서는 습식 스크러버의 분무유량, 형상비 및 증진을 변화가 스모크 저감에 미치는 영향에 대해 연구하였다. [6]에는 증진제의 종류에 따른 습식 스크러버의 가스상 물질 제거 특성에 대해 연구하였으며, [7]에서는 수치해석을 이용한 중,대형 스크러버 시스템 내 유체유동 및 열적 특성 분석에 대한 연구를 진행하였으며 [8]에서는 CFD 해석 및 PIV 실험을 통한 연료유 스크러버의 노즐 위치 선정에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 [9]에서는 선박 배기가스 내 SOx/NOx 처리용 습식 스크러버에 대한 연구를 수행하였으며, [10]에서는 스월모양의 습식 스크러버로 오염물질을 제거하는 연구를 수행하였고, [11]에서는 미립자를 위한 저에너지 습식 스크러버의 작동매개 변수에 대한 연구를 진행하였다. 그리고 [12]에서는 증진층식 세정집진기의 집진특성에 대한 실험을 수행하였으며, [13]에서는 원심 분리식 습식 스크러버 내부의 세정액 흐름 패턴의 흐름 시각화 및 모델링에 대한 연구를 수행하였다. 이처럼 많은 연구들이 진행되고 있지만 스크러버 내부 형상 변형을 통한 저감효율 증가에 대한 연구는 미비한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 10MW급 엔진용 습식 스크러버의 새로운 내부구조를 제시하고 형상을 변형시키면서 배기가스의 온도와 속도 변화, 물 분포, 압력 등을 분석하고자 한다.

2. 수학적 모델 및 계산조건

2.1 수학적 모델

스크러버 내부 유동계산에 적용된 전달 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U \quad (3)$$

에너지 방정식은

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla U + S_E \quad (4)$$

여기서 U는 속도벡터, τ 은 응력 텐서, S_M 은 운동량 생성

항, T은 온도, δ 은 단위행렬, ρ 은 밀도, h 은 비정상 엔탈피, λ 은 열 전도도, S_E 은 에너지 생성항을 나타낸다.

스크러버에서의 가스 유동 해석을 위하여 대표적인 난류 모델인 k- ϵ 모델[14]을 사용하였고, 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\gamma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\gamma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

여기서, κ 는 난류에너지, ϵ 은 난류에너지의 소산율을 나타낸다.

2.2 계산조건

본 논문에서는 사각형상의 습식 스크러버의 내부 구조 변형이 압력, 배기가스의 온도, 속도 변화, 물 분포에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 총 4가지의 다른 조건으로 해석하였으며 그 조건은 Table 1과 같다. 스크러버의 형태를 기존 선박의 설치에 용이하게 사각으로 설계하였으며, 최소한의 부피를 사용하기 위해 기존 스크러버 외부에 외부 스크러버를 설치하였다. 형상은 NX9.0을 이용해 모델링하였으며 Figure 1은 외부 스크러버, Guide vane과 Hole plate, Packing의 위치를 나타내고 Figure 2은 Case 3의 형상을 나타낸다. ICEM-CFD를 이용하여 격자를 생성하였으며, 그리드의 형태는 Tetra/Mixed 이고 각각의 Case에 사용된 절점의 수는 약 90만개 정도를 유지하였다. Table 2는 해석에 사용되는 Input Data이며 배기가스와 노즐의 정보, Case 4에 사용된 패키징을 모사한 Porous의 정보를 나타낸다. 패키징은 세정수가 증진물을 통해 흐르게 함으로써 작은 부피 안에서 넓은 액체표면적을 가지게 하며, 이를 통해 액적과 가스의 접촉면적을 최대한으로 하는 역할을 한다.

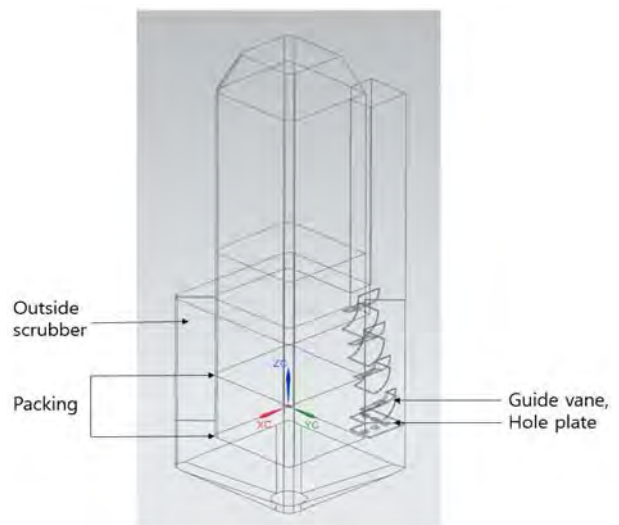


Figure 1: Location of each part

Table 1: Conditions for each case

Case1	Case2	Case3	Case4
Outside scrubber none	Outside scrubber existence	Outside scrubber existence	Outside scrubber existence
Guide Vane, Hole Plate none	Guide Vane, Hole Plate none	Guide Vane, Hole Plate existence	Guide Vane, Hole Plate existence
Packing none	Packing none	Packing none	Packing existence

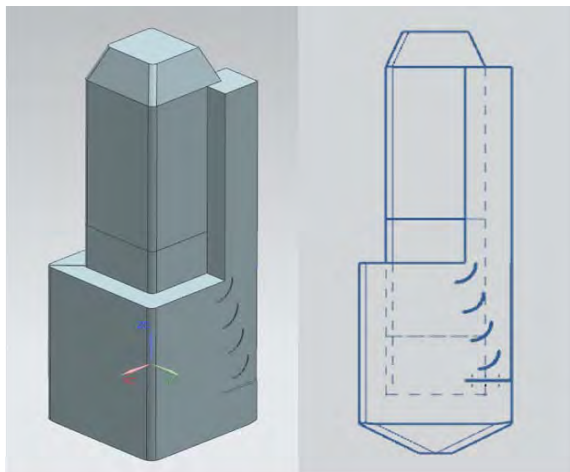


Figure 2: Shape of case 3

Table 2: Boundary Condition

Inlet	Material	Air ideal gas
	Reference pressure	1 [atm]
	Mass flow rate	6.74 [kg/s]
	Temperature	222 [°C]
Nozzle inlet	Material	Water
	Folw rate	162.1 [m^3/h]
	Cone Definition	Full Cone/40 [degree]
	Temperature	20 [°C]
Outlet	Pressure	0 [bar]
Porous Domain	Volume porosity	0.978
	Quadratic Coefficient	50 [kg/m^4]
Turbulence Model	k-epsilon	
Heat Transfer	Ranz marshall	

3. 결과 및 고찰

스크러버 전단에 걸리는 압력은 엔진에 직접적으로 영향을 주는 매우 중요한 인자이다. 그리고 스크러버 내부에서의 배기가스 온도, 속도 변화, 물 분포를 통해 배기가스의 거동을 예측할 수 있으며 이러한 유동 특성들은 SOx의 저감에 많은 영향을 미친다. 해석은 Ansys13.0의 상용코드를 사용하였으며 CFX-post를 통해 분석한 결과는 다음과 같다.

3.1 압력분포 특성

Figure 3는 각 Case 별 스크러버 전단에 걸리는 압력을 나타낸 그래프이며, **Figure 4**는 한 단면을 압력분포로 나타낸 것이다. Case 1의 경우 스크러버 전단에서 걸리는 압력이 511pa를 나타내었으며, 배기가스 유입구의 반대편 벽면에도 국부적으로 300pa 이상의 압력이 걸리는 것을 확인할 수 있다. Case 2의 경우 Case 1에 비해 57%의 압력이 저하된 221pa이 걸리는 것을 확인할 수 있으며, 외부 스크러버의 가장 밑에 존재하는 Water outlet주위에 국부적인 압력이 걸리는 것을 확인할 수 있다. Case 3의 경우 외부 스크러버가 없는 Case 1에 비해 62%의 압력이 저하된 198pa를 나타낸다. 또 Case 2에 비해 약 11%의 압력이 저하되고 국부적으로 걸리는 압력이 극히 적은 것을 확인할 수 있다. Case 4의 경우 패킹이 없는 Case 3과 비교해 약 280%의 압력 증가를 확인할 수 있다. 결과적으로 외부 스크러버에 의해 스크러버 전단에 걸리는 압력이 낮아지며, Guide vane 과 Hole plate에 의해 압력이 분산되어 국부적인 압력이 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

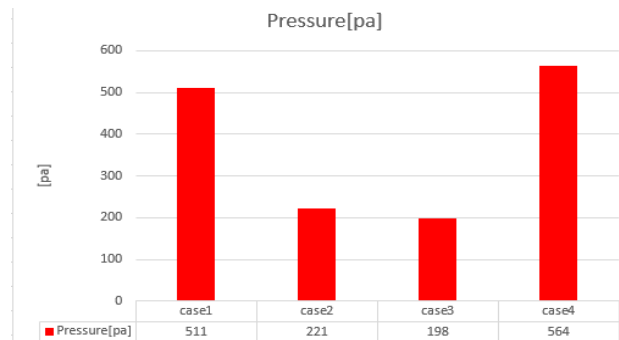
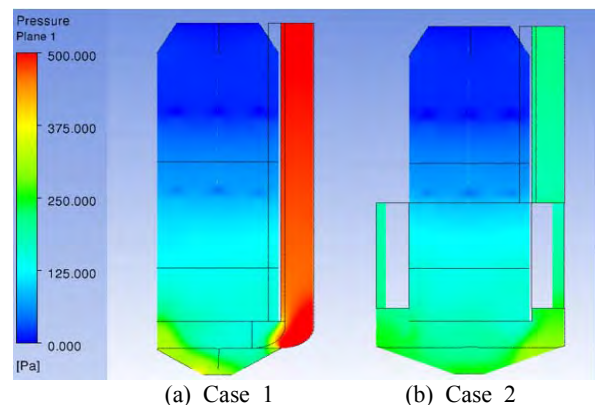


Figure 3: Inlet pressure



(a) Case 1 (b) Case 2

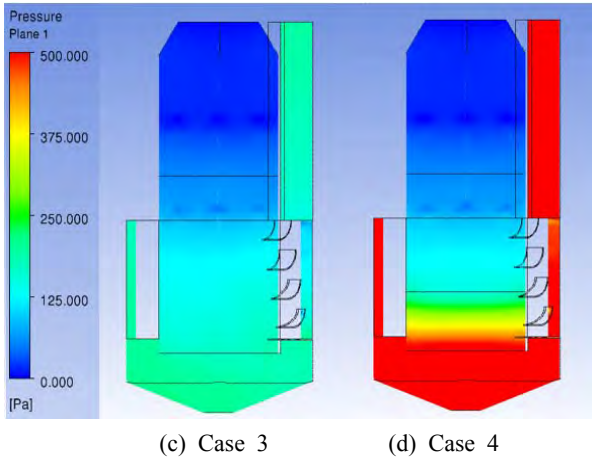


Figure 4: Pressure distribution

3.2 속도분포 특성

Figure 5은 Case별로 단면을 속도로 나타낸 것과 모델의 가장 아래인 Water outlet을 기준으로 (a) 3m, (b) 2.2m, (c) 1.4m, (d) 0.5m일 때의 xy평면을 나타낸다. Case 1의 경우 스크리버 내에서 배기가스가 분산되지 못하고 높은 속도를 유지한 채 모서리부분을 따라 위로 이동하는 것을 확인 할 수 있다. Case 2는 Case 1에 비해 내부 스크리버에서의 속도가 분산되는 것을 확인 할 수 있지만, 배기가스가 외부 스크리버에 고르게 분포되지 않고 높은 속도를 유지한 채 외부 스크리버 바닥인 Water outlet에 도달하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 외부 스크리버 바닥에 국부적으로 20m/s에 가까운 높은 속도를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 그에 비해 Case 3은 Guide vane과 Hole plate에 의해 배기가스가 외부 스크리버로 분산되어 Guide vane을 지난 후엔 평균 10m/s이하의 속도를 가지는 것을 확인 할 수 있다. Case 4는 Case 3과 유사한 속도 분포를 보이지만 Packing을 통과하면서 내부 스크리버에서의 속도가 5m/s 이하로 균일해 지는 것을 확인 할 수 있다. 속도가 감소한다는 것은 스크리버 내부에서의 체류시간이 길어진다는 의미이며, 이는 세정수와 접촉할 수 있는 가능성이 높아져 입자 포집율이 증가한다는 것을 의미한다. 결과적으로 외부 스크리버에 의해 배기가스가 쏠리는 현상이 적어지지만, 스크리버 내부에서 여전히 높은 속도를 가지는 것을 확인 할 수 있다. 이에 Guide vane을 설치함으로써 배기가스가 분산되어 많은 속도 감소가 있는 것을 확인 할 수 있다. 또 Packing을 설치함으로써 내부 스크리버에서의 속도가 급격히 감소하여 배기가스가 긴 체류시간을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

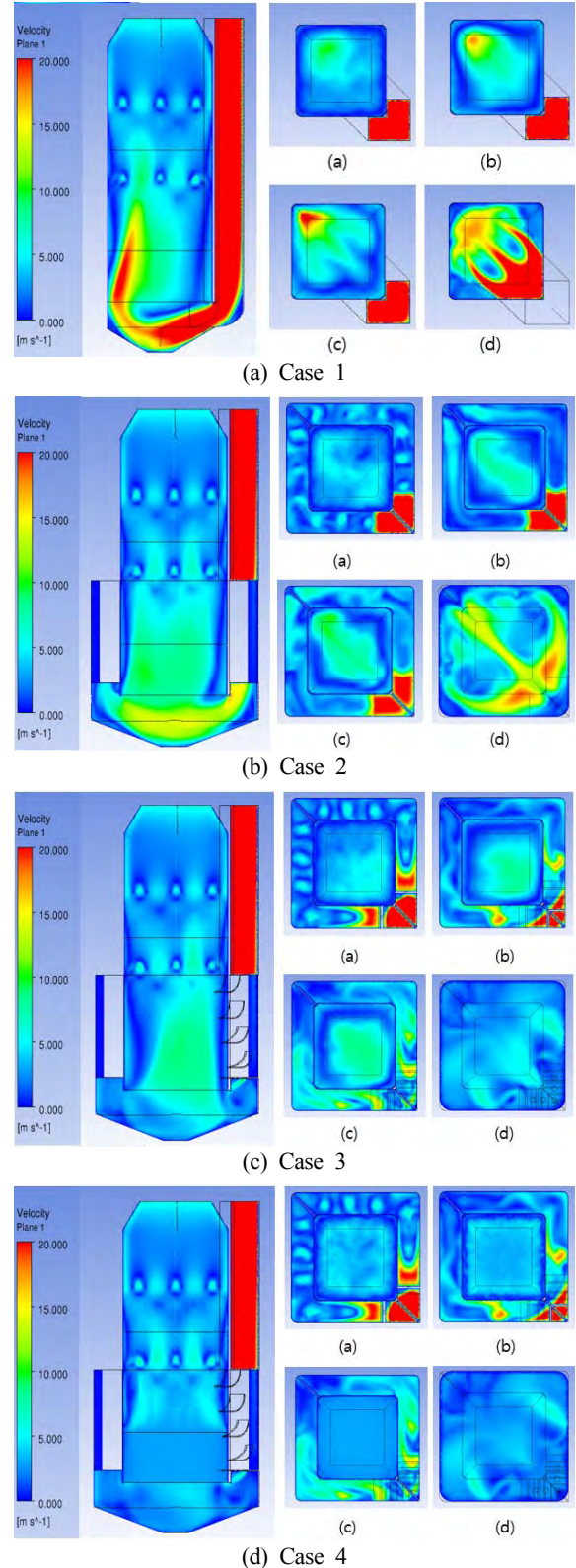
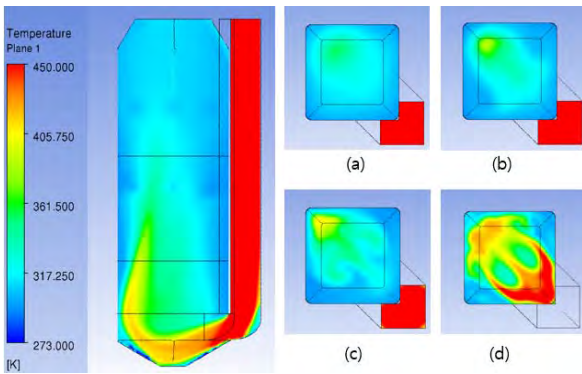


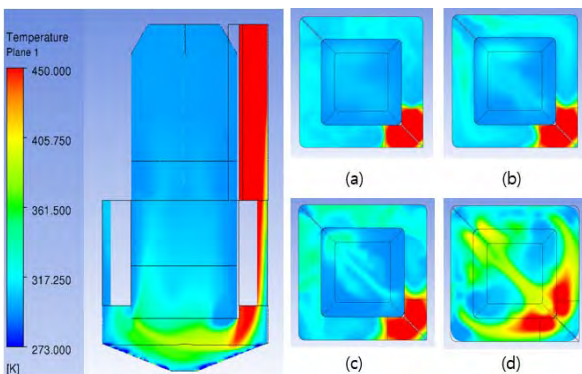
Figure 5: Velocity distribution

3.3 온도분포 특성

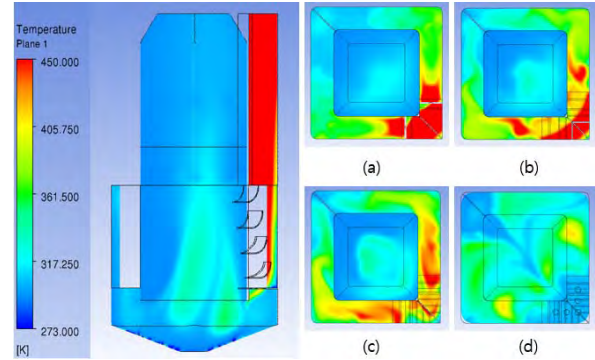
Figure 6는 Case별로 단면을 온도로 나타낸 것과 모델의 가장 아래를 기준으로 (a) 3m, (b) 2.2m, (c) 1.4m, (d) 0.5m일 때의 xy평면을 나타낸다. 각 Case별로 속도 분포와 유사한 형태를 가지는 것을 확인 할 수 있다. Case 1의 경우 속도와 마찬가지로 배기가스가 쏠리는 현상을 나타내며, 그로인해 3m에서도 부분적으로 100℃에 가까운 높은 온도를 확인 할 수 있다. Case 2는 배기가스가 높은 온도를 유지한 채 외부 스크러버 바닥인 Water outlet까지 도달하며 대부분의 열 교환이 외부 스크러버의 밑 부분에서 이루어지는 것을 확인 할 수 있다. Case 3과 Case 4는 매우 유사한 형태를 나타내며 대부분의 열 교환이 외부 스크러버에서 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 Case 3과 비교해 Case 4는 Packing을 지난 후 열 교환이 거의 일어나지 않으며 평균30℃ 이하의 균일한 온도를 나타낸다. 열 교환이 발생했다는 건 밀도 변화에 의한 확산현상이 일어났으며 이러한 확산현상에 의해 미세입자의 포집이 증가했다고 판단할 수 있다. 또한 낮은 온도는 황산화물 반응율에 직접적인 영향을 준다. 결론적으로 외부 스크러버에 의해 대부분의 열 교환이 스크러버 내부에서 완료되며, 입자의 포집에 긍정적인 영향을 주는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Guide vane과 Hole plate를 설치함으로써 외부 스크러버에서 많은 입자의 포집이 이루어지게 하여 입자 포집율을 높이는 것을 확인 할 수 있다. Packing을 지난 후 매우 낮고 균일한 온도 분포를 나타내어 황산화물 반응율에 긍정적인 영향을 주는 것을 확인 할 수 있다.



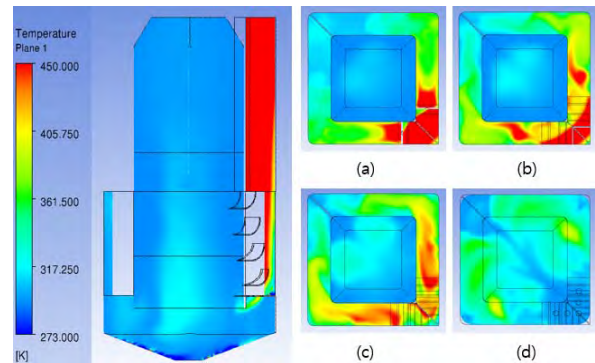
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

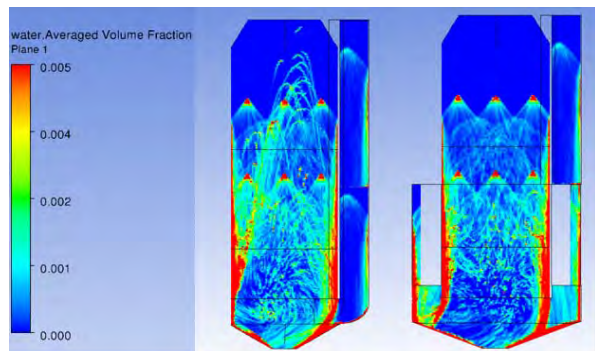


(d) Case 4

Figure 6: Temperature distribution

3.4 물 분포 특성

Figure 7은 형상의 단면을 Volume fraction으로 나타낸 것이다. Case 1과 Case 2의 경우 세정수가 벽면을 따라 흐르다가 배기가스의 영향을 받아 쏠리는 현상을 확인 할 수 있다. 입자의 포집율을 증가시키기 위해 세정수의 액적과 배기가스의 접촉면적을 최대한으로 해야 하며, 세정수는 액체표면적을 크게 하기 위하여 작은 크기의 물방울을 많은 개수로 만들어 스크러버의 체적을 채워야 한다. 하지만 이러한 쏠림 현상은 세정수가 넓게 분포되지 못하게 해 입자의 포집에 좋지 않은 영향을 줄 것으로 판단된다. 이에 따라 Guide vane과 Hole plate를 설치함으로써 세정수가 쏠리는 현상이 줄어든 것을 확인 할 수 있으며, Packing에 의해 세정수가 넓게 분포되며 큰 액체 표면적을 가지는 것을 확인 할 수 있다.



(a) Case 1

(b) Case 2

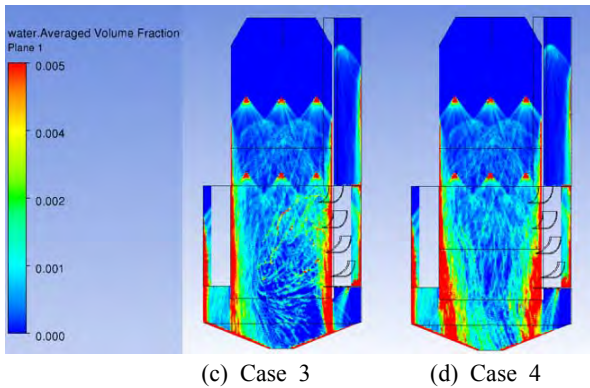


Figure 7: Water volume fraction distribution

4. 결 론

본 연구에서는 습식 스크러버의 내부형상을 변경시키며 압력, 배기가스의 온도와 속도 변화, 물 분포 등을 해석하고 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 외부 스크러버에 의해 스크러버 전단에 걸리는 압력이 낮아지며, Guide vane과 Hole plate에 의해 압력이 분산되어 국부적인 압력이 거의 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 엔진에 직접적으로 영향을 주는 스크러버 전단에 걸리는 압력은 외부 스크러버와 Guide vane, Hole plate를 모두 가지고 있는 Case 3의 경우에 가장 낮은 값을 나타내었다.
- 2) 외부 스크러버에 의해 배기가스가 쏠리는 현상이 적어 지지만, 스크러버 내부에서 여전히 높은 속도를 가지는 것을 확인 할 수 있다. 이에 Guide vane과 Hole plate를 설치함으로써 배기가스가 분산되어 속도가 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 또 Packing을 설치함으로써 내부 스크러버에서의 배기가스 속도가 급격히 감소하여 긴 체류시간을 가지는 것을 확인 할 수 있다.
- 3) 외부 스크러버에 의해 대부분의 열 교환이 스크러버 내부에서 완료되며, 입자의 포집에 긍정적인 영향을 주는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Guide vane과 Hole plate를 설치함으로써 외부 스크러버에서 활발한 입자의 포집이 이루어지게 하며, Packing을 지난 후 매우 낮고 균일한 온도 분포를 나타낸다.
- 4) Case 1과 Case 2의 경우 세정수가 배기가스에 의해 쏠리는 현상이 나타나며, 이러한 쏠림 현상은 세정수가 넓게 분포되지 못하게 해 입자의 포집에 좋지 않은 영향을 줄 것으로 판단된다. 이에 따라 Guide vane과 Hole plate를 설치함으로써 세정수가 쏠리는 현상이 줄어든 것을 확인 할 수 있으며, Packing에 의해 세정수가 넓게 분포되며 큰 액체 표면적을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

이상을 종합하면 외부 스크러버, Guide vane과 Hole plate가 설치된 경우 스크러버 전단에서 걸리는 압력이 가장 낮은 값을 나타내었으며, 외부 스크러버, Guide vane과 Hole

plate, Packing이 모두 설치된 경우 스크러버 전단에서의 압력이 크게 나오지만, 속도, 온도, 물 분포의 해석결과를 통해 황산화물 저감과 입자의 포집측면에서 최적의 형상인 것을 확인 하였다.

Author Contributions

The following statements should be used “Conceptualization, S. M. Lee, B. M. Kwon, and K. H. Park; Methodology, S. M. Lee; Software, S. M. Lee; Validation, S. M. Lee and K. H. Park; Formal Analysis, S. M. Lee; Investigation, S. M. Lee; Resources, S. M. Lee; Data Curation, S. M. Lee; Writing–Original Draft Preparation, S. M. Lee; Writing–Review & Editing, K. H. Park; Visualization, S. M. Lee; Supervision, K. H. Park; Project Administration, K. H. Park; Funding Acquisition, K. H. Park”.

References

- [1] J. C. Ko, H. O. Song, G. S. Sin, Hybrid Scrubber, Seoul, Korea : GS-intervision, 2014.
- [2] C. H. Lee, D. G. Hyun, and H. S. Chang, "Analysis of internal flow in the desulfurization scrubber using eulerian-eulerian, eulerian-lagrangian analysis method," Proceeding of the 57th Meeting of KOSAE, p. 88, 2014 (in Korean).
- [3] C. H. Lee, H. S. Jang, and S. M. Koo, "Computational analysis on the control of droplet entrained in the exhaust from the spray type scrubber system," Clean Technology, vol. 21, no. 3, pp. 191-199, 2015 (in Korean).
- [4] S. W. Ko, K. C. Ro, and H. S. Ryou, "Numerical study on the optimal design of spray system in packed bed scrubber," Journal of computational fluids engineering, vol. 12, no. 1, pp. 28-34, 2007 (in Korean).
- [5] K. Son, J. Y. Lee, and K. H. Park, "The effect of spray flow rate, aspect ratio, and filling rate of wet scrubber on smoke reduction," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 39, no. 3, pp. 217-222, 2015 (in Korean).
- [6] B. W. Han, H. J. Kim, Y. J. Kim, and K. S. Han, "Removal characteristics of gaseous contaminants by a wet scrubber with different packing materials," Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, vol. 23, no. 6, pp. 744-751, 2007 (in Korean).
- [7] J. S. Heo, Numerical Analysis of Fluid Flow and Thermal Characteristics within Medium and Large Size Ship Scrubber System, M.S. Thesis, Department of

- Mechanical Engineering, Wonkwang University, Korea, 2016 (in Korean).
- [8] I. C. Kim, C. G. Kim, S. J. Park, D. Y. Cho, and Y. H. Lee, "Designation of fuel oil scrubber nozzle positioning using CFD analysis and PIV methods," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 773-778, 2015 (in Korean).
- [9] J. S. Choi, J. G. Kim, B. H. Park, and J. Y. Lee, "Study on wet scrubber for SOX/NOX treatment in ship flue gas," *Journal of Oil & Applied Science*, vol. 34, no. 1, pp. 183-188, 2017 (in Korean).
- [10] A. Pourmohammadbagher, E. Jamshidi, H. Ale-Ebrahim, B. Dabir, and M. Mehrabani-Zeinabad, "Simultaneous removal of gaseous pollutants with a novel swirl wet scrubber," *Chemical Engineering and Processing*, vol. 50, no. 8, pp. 773-779, 2011.
- [11] P. L. Douglas, F. A. L. Dullien, and D. R. Spink, "An investigation of the operating parameters of a low energy wet scrubber for fine particulates," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 54, no. 3, pp. 173-176, 1976.
- [12] K. H. Yoo, H. H. Roh, E. S. Choi, and J. K. Kim, "An experiment on the particle collection characteristics in a packed wet scrubber," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 305-311, 2003 (in Korean).
- [13] A. Hassan, P. Floren, and M. Anthony, "Flow visualization and modelling of scrubbing liquid flow patterns inside a centrifugal wet scrubber for improved design," *Chemical Engineering science*, vol. 173, pp. 98-109, 2017.
- [14] B. E. Launder and D. B. Spalding, *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London, England, 1972.