

와유동형 스크러버의 가이드 각도가 배기가스의 유동특성에 미치는 영향

박진우¹ · 박권하[†]

(Received July 21, 2017 ; Revised August 14, 2017 ; Accepted November 1, 2017)

Effect of guide angle of swirl-type scrubber on flow characteristics of exhaust gas

Jin-Woo Park¹ · Kweon-Ha Park[†]

요약: 최근 해양 환경오염에 대한 법적규제가 강화되고 있으며 선박 배기 중의 황산화물 저감이 요구되고 있다. 스크러버는 대표적인 황산화물 저감 장치이며 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 스크러버 효율 향상을 위하여 스크러버 내부에 가이드 날개를 설치하였으며, 이로 인하여 생성된 스윙 유동이 배기가스 저감에 미치는 영향을 계산을 통해 분석하였다. 가이드 각도를 0°에서 75°까지 15°씩 증가시킬 때의 압력분포, 속도분포, 배기가스의 흐름, 세정수 분포 특성에 대해 분석 하였다. 가이드 각도의 증가와 함께 서서히 증가되던 배기압력은 60°이후에 크게 증가되었다. 배기가스 이동거리는 45°에서 최대를 나타내었으며 세정수 분포 역시 45°에서 가장 넓게 분포되었다. 종합적인 분석결과 가이드 각도가 45°일 때 스윙 유동, 세정수와 접촉거리, 세정수 분포 및 배기 압력강하 측면에서 가장 적합한 것으로 확인 되었다.

주제어: 황산화물, 스크러버, 가이드 각도, 스윙 유동

Abstract: Recently restrictions on the pollution of the marine environment have be strengthened, and accordingly a reduction in SOx emission is required. A scrubber is a typical SOx reduction device and is being extensively researched. In this study, a guide vane was installed in the scrubber to improve the scrubber efficiency, and the effect of the guide angle-generated swirl flow on the exhaust gas reduction was analyzed. The pressure distribution, velocity distribution, exhaust gas flow, and cleaning water distribution tendency were analyzed when the guide angle was increased from 0° to 75°. The exhaust pressure increased greatly when the guide angle was increased beyond 60°. The exhaust gas movement distance was the maximum at 45 ° and the cleaning water distribution was distributed most widely at 45°. From the results of the analysis. we confirmed that a guide angle 45° was the most suitable in terms of swirl flow, gas moving distance contacting with cleaning water, cleaning water distribution and exhaust pressure drop.

keywords: SOx, Scrubber, Guide angle, Swirl flow

1. 서 론

최근 해양 환경오염에 대한 법적규제가 강화되고 있고 NOx와 SOx 저감에 대한 관심이 꾸준히 커지고 있는 상황이다. NOx와 SOx의 경우 토양 및 수질오염의 원인이 되는 산성비, 인체에 유해한 광화학 스모그의 원인이 되어 지속적인 규제가 이루어지고 있다[1][2]. 이러한 환경오염에 대한 문제를 해결하기 위한 여러 가지 장치가 개발되고 있으며 이러한 장치중 하나가 스크러버이다. 스크러버에 대한 많은 연구가 진행되고 있는데, [3]에서는 분무유량 및 형상비 그리고 충진을 변화에 의한 스크러버의 연구가 진행 되었고 [4]에서는 CFD해석과 PIV 실험을 통한 스크러버의 노즐위치 선정에 대한 연구가 진행 되었으며 [5]에서는

중대형 선박용 스크러버 시스템 설계를 위한 전산해석 연구가 진행되었다. [6]에서는 스프레이 시스템에서 분무되어 지는 액적분포 면적향상을 위한 스프레이 시스템 최적 설계에 대한 수치 해석적 연구가 진행되었다. [7]에서는 스크러버 내의 액적 분사 형태에 따른 압력 손실과 가스처리 효율에 대한 CFD 해석을 실시하였다. 많은 연구에도 불구하고 선박 설치를 위한 소형화에는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 배기 가스 저감 효율 향상과 스크러버 소형화를 위하여 와유동을 유도하는 가이드를 스크러버 내부 유입구에 설치하였으며, 가이드의 각도에 따른 배기가스 유동, 접촉거리, 세정수 분포 및 배기 압력에 미치는 영향을 분석하여 최적의 가이드 각도를 제시하고자 한다.

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

1 Department of Marine Engineering, Korea Marine Engineering University, E-mail: pakjw463@naver.com Tel: 051-410-4953

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.

2. 수학적 모델 및 계산 조건

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 U 는 속도벡터, τ 은 응력 텐서, S_M 은 운동량 생성항, T 은 온도, δ 은 단위행렬, ρ 은 밀도, h 은 비정상 엔탈피, λ 은 열 전도도, S_E 은 에너지 생성항을 나타낸다.

난류계산은 SST(Shear Stress Transport) 난류 모델을 사용하였다.

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} = \frac{a_1 k}{\max(a_1, (\frac{\partial u}{\partial y}) F_2)} \quad (5)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (6)$$

$$\arg_2 = \max(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega}) \quad (7)$$

k 은 단위 질량당 난류 운동 에너지, ω 은 각 속도를 나타낸다.

스크러버 내부 세정수 액적거동에 적용된 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p \quad (8)$$

여기서 u_p 는 입자 속도, u 는 유체 위상 속도, ρ_p 는 입자 밀도, ρ 는 유체밀도를 나타낸다.

2.2 계산 조건

Figure 1은 내부직경 200mm 외부직경 300mm 높이 1,425mm

의 크기를 가지는 스크러버를 나타내며, Figure 2는 배기가스 유입구를 나타내며 크기는 15mm 개수는 52개이다. Figure 3은 내부 유입구를 지난 배기가스의 와류동을 유도하기 위한 60° 가이드라인이며 가이드라인의 각도는 각각 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°이다. Figure 4는 ICEM-CFD를 이용하여 스크러버 모델에 격자를 생성한 그림이며, 격자의 개수는 모든 경우에서 약 2,000,000개 정도를 유지 하였다. Figure 5는 스크러버의 구조를 상세히 표시한 것으로 외부 영역과 내부영역을 나타낸다. Table 1은 해석에 적용되는 Input Data이며 배기가스의 입구와 출구, 세정수가 분무되는 노즐과 세정수의 출구를 나타내는 표이다. 배기가스 입구는 직경 63.6mm, 속도 22.4m/s의 조건을 주었고, 배기가스 출구는 100mm, Outlet의 조건을 주었으며, 노즐은 Full Cone Nozzle Type을 이용하고, 직경 3mm, 세정수 분사속도는 6.36m/s를 주었다. 세정수 출구는 벽으로 설정하였으며, 물이 닿으면 모두 흡수되는 조건을 주었다.



Figure 1: Scrubber modeling

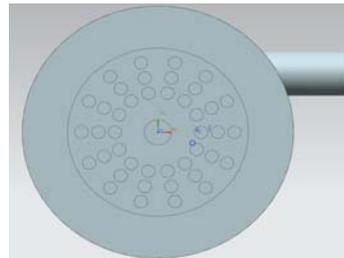


Figure 2: Swirl plate inlet holes

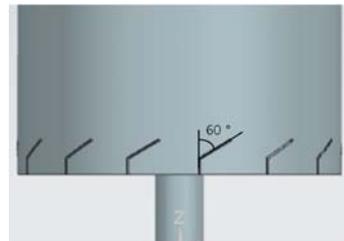
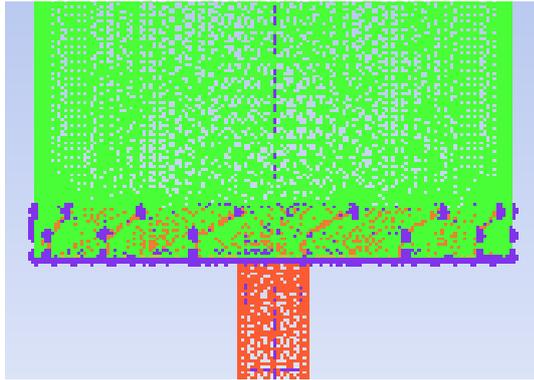
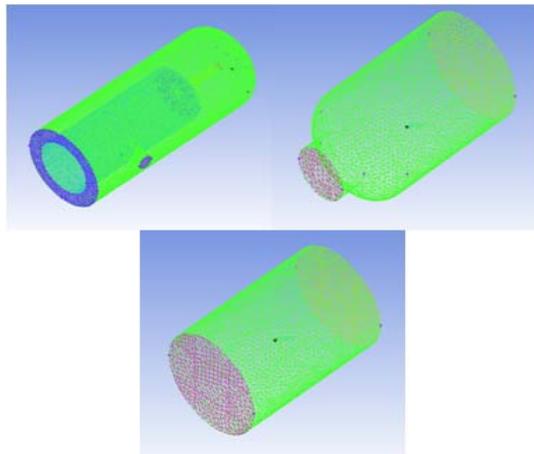


Figure 3: Inlet guide vane

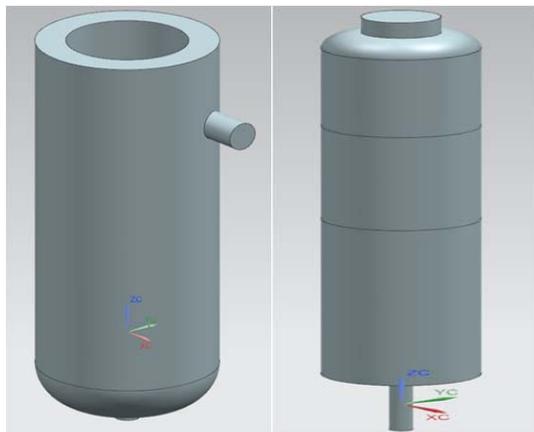


(a) Swirl area grids at 60°



(b) External gas exit packing area grids

Figure 4: Calculation grids



(a) External area (b) Internal area

Figure 5: Scrubber structure

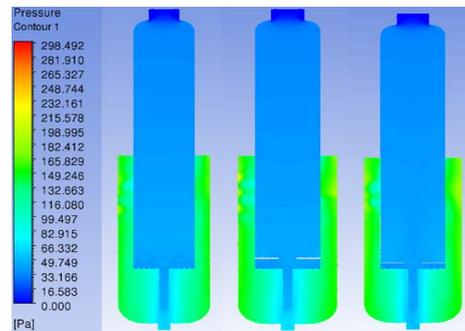
Table 1: Input data

	Diameter	Condition
Air inlet	63.6mm	Inlet gas velocity 22.4m/s
Air outlet	100mm	Outlet
Water inlet	3mm	Nozzle velocity 6.36m/s
Water outlet	50mm	wall

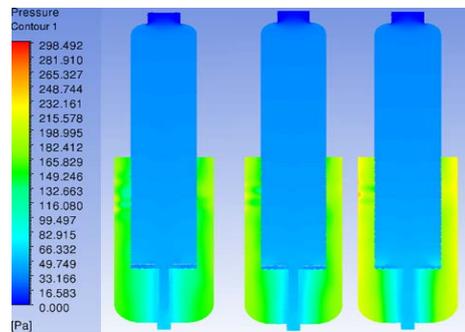
3. 결과 및 고찰

3.1 압력 분포 특성

Figure 6는 가이드 날개의 각도 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°에서 스크러버 전체의 수직 단면 압력 분포를 나타낸다. 가이드 각도가 증가함에 따라 외부영역의 압력이 증가함을 나타낸다. 외부 영역의 가장자리에서 최댓값을 나타내며 하부중심축 부위에서는 압력이 낮아진다. 모든 경우에 내부영역의 압력은 100Pa 이하의 낮은 압력을 나타낸다. Figure 7은 배기가스 입구높이의 수평 단면 압력 분포이다. 날개의 각도가 증가하면서 내부압력에는 변화가 없지만 외부압력은 크게 증가된다. 스월 유동의 원심력을 받는 가장 자리에 높은 압력이 나타난다. Figure 8은 날개 각도에 따른 외부 평균 압력 변화를 나타낸다. 외부 평균 압력은 0°일 때 131 Pa에서 45°일 때 150 Pa로 소량 증가하지만, 60°부터 크게 증가하여 75°일 때 193Pa이 된다.



(a) Guide vane angle 0°, 15°, 30°

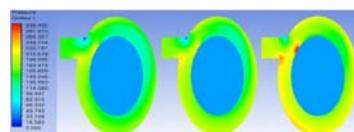


(b) Guide vane angle 45°, 60°, 75°

Figure 6: Pressure Distribution of Vertical Section



(a) Guide vane angle 0°, 15°, 30°



(b) Guide vane angle 45°, 60°, 75°

Figure 7: Pressure distribution of horizontal section

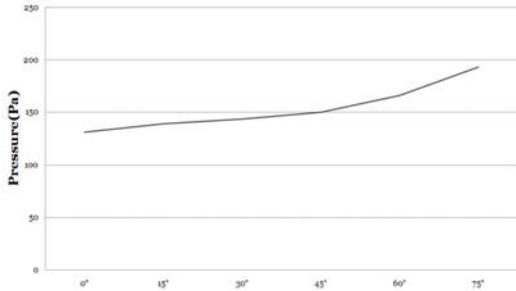
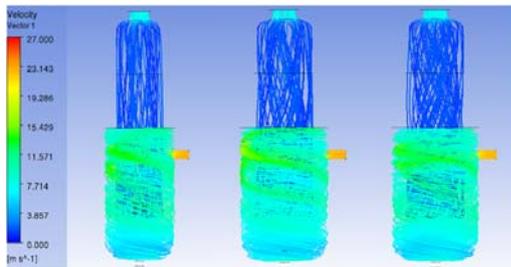


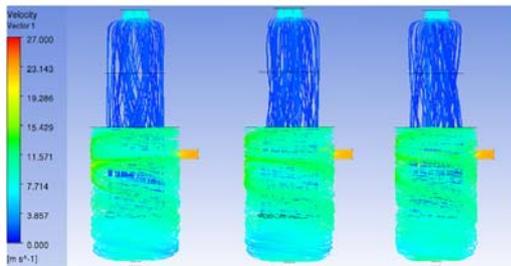
Figure 8: Pressure variation with vane angle

3.2 배기가스 유동 특성

Figure 9은 스크러버 전체의 배기가스의 흐름을 스크러버 전체의 수직 단면으로 나타낸 그림이다. 외부 통로에 접선으로 들어온 가스가 회전운동을 하면서 하부로 내려가는데 내부 배기가스 유입구멍을 지나기 전까지의 외부영역에서는 날개의 각도가 증가하면서 회전수가 증가된다. Figure 10는 내부 영역에서의 배기가스 흐름을 수직 단면으로 나타낸 그림이다. 배기가스는 날개의 각도에 따라 회전운동을 하면서 유입되는데 0°에서는 와류동이 없으며 45°에서 최대가 되고 75°에서는 감소하는 경향을 나타낸다. Figure 11은 내부 배기가스의 이동거리를 나타낸다. 배기가스가 세정수와 접촉할 수 있는 거리를 나타낸 것으로 가장 중요한 인자이다. 30°까지 급격히 증가되며 45°에서 최댓값을 갖고 이후 감소하는 경향을 나타낸다. 내부 배기가스 이동거리는 CFD-POST 기능을 이용하여 계산하였으며 내부 배기가스 유입구멍을 시작으로 배기가스 출구까지의 거리를 측정하였다.

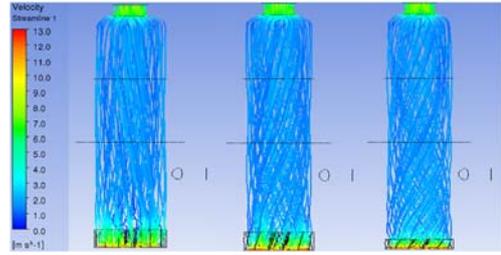


(a) Guide angle 0°, 15°, 30°

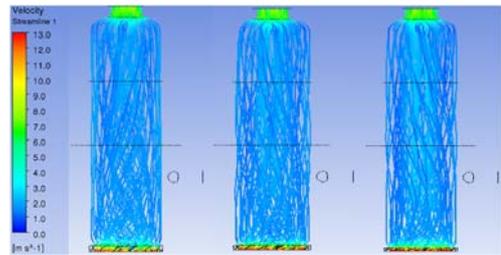


(b) Guide angle 45°, 60°, 75°

Figure 9: Streamlines of exhaust gas



(a) Guide angle 0°, 15°, 30°



(b) Guide angle 45°, 60°, 75°

Figure 10: Streamlines in internal area

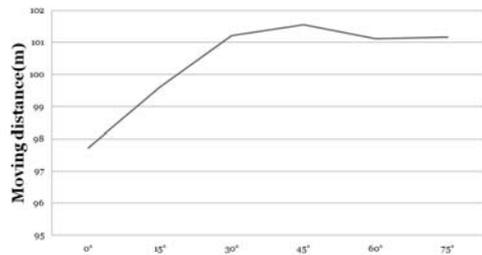


Figure 11: Moving distance of internal gas

3.3 속도 분포 특성

Figure 12은 가이드 각도 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°일 때 스크러버 전체의 수직 단면 속도 분포를 나타낸다. 스크러버 외부영역으로 유입된 배기유동은 상부에 강한 와류운동을 동반하면서 하부로 내려가고 바닥 근처에서 가이드 날개가 있는 상부로 이동하여 가이드 날개를 통과한 후에 내부영역의 속도가 크게 줄어든다. Figure 13는 가이드 각도 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°일 때 배기가스 입구에서 스크러버 전체의 수평 단면 속도 분포를 나타낸다. 배기가스 입구에서의 속도는 22.4m/s 가장자리 벽면 부근에서 국부적으로 평균 26m/s 까지 증가하는 것을 확인하였다. Figure 14은 가이드 날개 (guide vane) 전후의 가스유동에 대한 수평 단면 속도 분포를 나타낸다. 가이드날개 직전과 날개 영역에서는 가이드 각도의 증가와 비례하여 와류동이 증가하지만, 날개 후단의 경우는 0°에서 30°까지 증가된 후에 45°부터 감소하는 경향을 나타낸다. 전후단의 유동을 종합하면 스월유동이 가장 활성화된 조건은 30°에서 45° 사이인 것으로 판단된다. 각 그림은 수평단면을 나타낸 그림이며 그림에서의 화살표의 크기가 커질수록 수평적인 힘 즉 와류동이 커진다고 판단된다.

3.4 세정수 분포

Figure 15는 가이드 날개 각도가 0°에서 75°까지 변화할 때의 세정수 분포와 스월판 하부의 유동속도를 나타낸다. 세정수는 외부영역 상부에 4개, 내부영역 상부에 4개의 물 분사 노즐에서 분사된다. 외부영역에서 분사된 세정수 액적들은 배기가스의 강한 스월 유동의 영향으로 가장자리로 밀리면서 아래로 내려간다. 하부 가장자리에 모인 세정수의 일부는 유동을 따라 스크러버 내부영역으로 유입되는데, 가이드 날개 0°의 경우는 바닥에서 거의 수직으로 올라와 유입되고 각도가 증가하면서 유입각도도 증가하여 거의 수평 방향으로 유입된다. 한편 내부에서 분사된 세정수는 스월판 근처에 쌓이면서 높은 농도를 나타낸다. 0°의 경우 세정수 분포가 하부에 집중되지 못하며 날개각도가 45° 이상이 되면 스월판 상부 전체를 채우게 된다. 즉 날개각도가 0°에서 30°일 때는 스월판의 중심으로 유입된 배기가스가 상부로 빠르게 유동을 하면서 세정수와 혼합되지 못하고 배출된다. 각도가 45°이상이 되면 유입된 배기가스는 외부의 충분한 와유동에 의하여 스월판에 균일하게 분포되어 세정수와 잘 혼합되고 접촉 면적이 크게 증가할 것으로 판단된다.

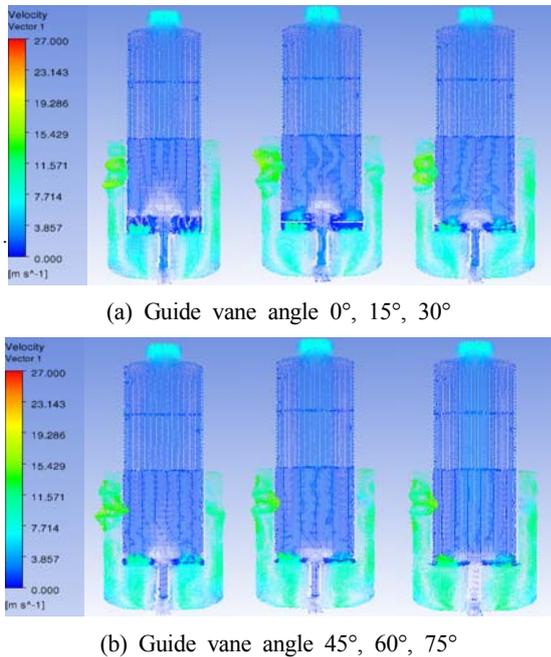


Figure 12: Vector distribution of vertical section

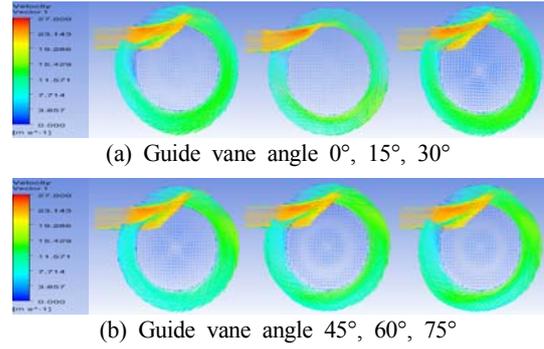


Figure 13: Vector distribution of horizontal section

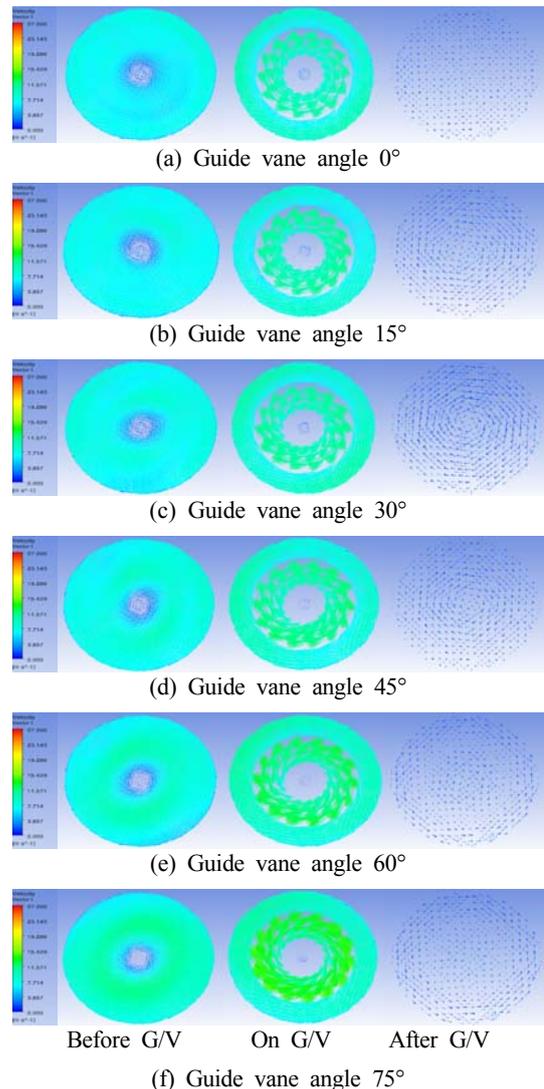


Figure 14: Gas flow vector distributions in the horizontal sections

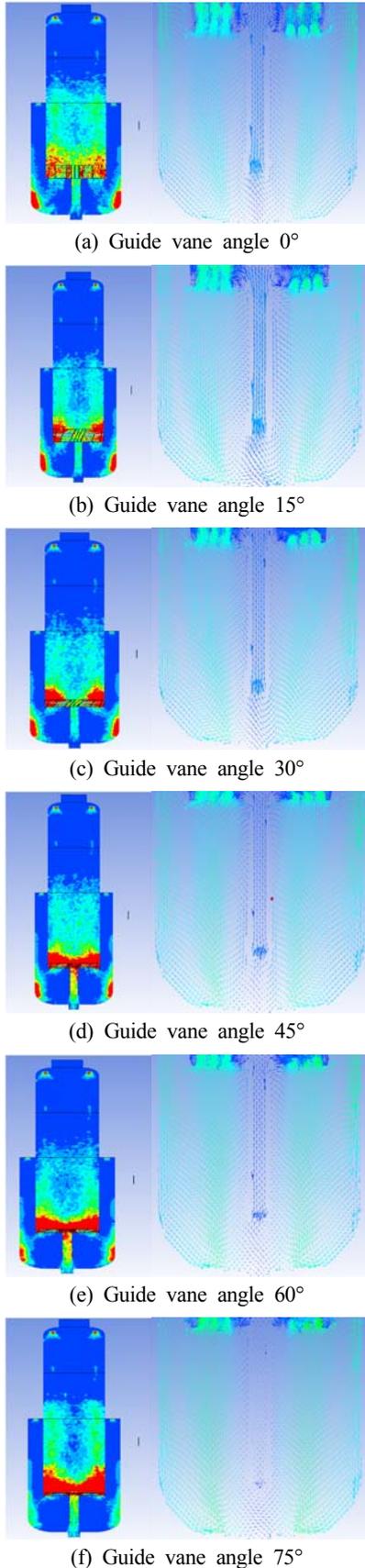


Figure 15: Cleaning water distribution and flow velocity under the guide vane

4. 결 론

본 연구에서 분석한 와유동형 스크러버의 가이드 각도에 따른 유동특성을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 가이드 각도에 따른 배압특성은 0°에서 45°까지 서서히 증가 되지만 60°이상이 되면 크게 증가 되는 경향을 나타냈다.
- (2) 스크러버 내부로 유입된 배기가스가 배출 될 때까지 이동한 거리, 즉 세정수와 접촉거리는 날개 각도가 45°때 최대가 되며 그 이상에서는 감소하는 경향을 나타냈다.
- (3) 가이드날개 부근에서의 와유동 특성은 가이드날개의 전후단의 유동을 종합하였을 때 30°와 45° 사이에서 가장 활성화되는 것으로 판단된다.
- (4) 세정수 분포특성은 가이드 각도가 45°이상이 되면 충분한 와유동에 의하여 배기가스와 잘 혼합되고 접촉 면적이 크게 증가할 것으로 판단된다.

배압증가, 접촉거리, 와유동 및 세정수분포를 종합적으로 판단할 때 스월판 가이드 날개의 각도는 45°가 적당할 것으로 판단된다.

References

- [1] J. N. Armor, "Catalytic reduction of nitrogen oxides with methane in the presence of excess oxygen : A review," *Catalysis Today*, vol. 26, no. 2, pp. 147-158, 1995.
- [2] K. A. Bethke, M. C. Kung, B. Yang, M. Shah, D. Alt, C. Li, and H. H. Kung, "Metal oxide catalysts for lean NOX reduction," *Catalysis Today*, vol. 26, no. 2, pp. 169-183, 1995.
- [3] 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," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 3 pp. 217-222, 2015 (in Korean).
- [4] 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).
- [5] J. S. Heo, Y. B. Chae, K. B. Kim, S. T. Kim, and S. H. Lee, "Computational analysis of scrubber system for midium and large marine engines," *Proceedings of the SAREK 2016 Summer Annual Conference*, pp. 1061-1062, 2016 (in Korean).
- [6] 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*, wol 12, no. 1 pp. 28-34, 2007 (in Korean).
- [7] H. S. Jo, S. M. Koo, and H. S. Jang, "CFD analysis on the pressure drop and gas removal efficiency in the spray type scrubber," *Proceedings of Korean Society for Atmospheric Environment*, pp. 94-96, 2016 (in Korean).