



스크러버 내 충전층에서의 압력강하 특성에 관한 실험적 연구

한용식¹·도규형^{1,2}·정경열¹·최병일¹·유화롱¹·김창현¹·김민창¹·김태훈^{1,2†}
한국기계연구원 고효율에너지기계연구부¹
과학기술연합대학원대학교 융합기계시스템(친환경·에너지기계)²

Experiments for Pressure Drop of Scrubbing Layer in a Scrubber System

Yong-Shik Han¹·Kyu Hyung Do^{1,2}·Kyungyul Chung¹·Byungil Choi¹·Hwalong You¹·Changhyun Kim¹·
Minchang Kim¹·Taehoon Kim^{1,2†}

Innovative Energy Machinery Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)¹
Mechanical Engineering (Environment-Energy Machinery), University of Science and Technology (UST)²

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.

According to the regulation on the pollution of the marine environment, SOx emission from ships has to be reduced. A SOx scrubbing system installed in a funnel of a ship is considered in order to reduce SOx emission. A scrubbing layer with a porous material is present in the funnel to increase the contact area between exhaust gas and water. In this study, experiments on the pressure drop characteristics in the scrubbing layer are conducted to investigate the effect of the scrubber on the engine load. The pressure drop according to flow rate of air instead of exhaust gas was measured for fillers such as sphere, pall ring and saddle in the scrubbing layer. First of all, porosity is experimentally measured for the three types of filler and it is confirmed that the porosity of the saddle-type filler was the largest. The pressure drop according to the change in air flow rate was measured for the three types of fillers in the scrubbing layer. As a result, the pressure drop was the smallest in the scrubbing layer with the saddle-type filler which has the largest porosity. In addition, the effect of spraying water flowing counter flow against air flow is experimentally examined. It is known that the pressure drop is increased because the air flow space is reduced when water is sprayed. In the case of the saddle, the pressure drop is about 1.5 to 2 times greater than that when only air flows at the optimum exhaust gas-water injection ratio.

Keywords : SOx Scrubber(황산화물 스크러버), Scrubbing layer(스크러빙 층), Porous material(다공성 물질), Pressure drop(압력강하)

1. 서론

환경문제가 인류의 생존 문제로 주목받으면서 전 세계적으로 지구 온난화 문제 해결 및 대기환경 개선을 위해 노력하고 있다. 당연히 해양산업에서도 환경오염 문제가 큰 이슈로 대두되고 있으며 이와 관련하여 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서는 2020년 1월 1일부터 전 세계 해상에서 황 함유량을 0.5%까지 줄이는 것을 목표로 하는 강화된 황산화물 규제를 시행하였다(Jeong et al., 2018; Ahn, 2022). 신규 건조하는 선박뿐만 아니라 기존에 운항하고 있는 선박 모두에도 적용

하기 때문에 해운업계에 큰 영향을 미친다. 선박에서 황산화물 규제에 대응하는 방법으로 0.5% 저유황유 사용, 탈황장치(Scrubber) 적용, LNG 연료 추진 등 크게 3가지로 나눌 수 있다. 저유황유 선택 시 추가 설비가 필요 없는 장점이 있으나 연료의 가격이 증가하는 단점이 있다. 스크러버 적용 시 값싼 고유황유를 사용할 수 있으나 리트로핏(retrofit)을 통해 스크러버를 선박에 설치해야 하는 단점이 있다. LNG를 연료로 사용하는 선박의 경우 선박 건조 및 LNG 연료를 주입하는 병커링 인프라의 미비 등으로 당장 적용하기는 어려운 실정이다.

스크러버의 경우 배기가스에 포함된 질소산화물과 황산화물을 제거하기 위해 흡수제로서 해수나 화학 세정수 또는 건조된 화학

물질을 이용한다. 배기가스와 접촉된 흡수제는 황산화물을 흡수시키는 역할을 하므로 탈황 성능을 높이기 위해 접촉 면적을 최대화할 필요가 있다. 이를 위해 배기가스가 지나가는 통로인 굴뚝(funnel) 내부에 다공성 물질로 채워져 있는 충전층을 설치하게 된다. 충전층은 기-액 접촉 면적을 증가시켜야 하고 낮은 압력 손실을 가져야 하는 등의 성능이 요구된다. 이를 위해 굴뚝 내부의 유동 특성에 관한 많은 연구가 진행됐다.

Kim et al. (2015)는 노즐의 위치, 분사각 변화에 따른 PIV 실험을 통해 세정수 분사 노즐에서 분사되는 입자의 분포를 측정하여 분사 특성을 연구하였다. 추가로 세정수 분사에 대한 수치해석을 통해 최적화된 분사량 및 분사각을 제안하였다. Park and Park (2017)은 스크러버 효율 향상을 위해 스크러버 내부에 설치된 가이드 형상 변화에 따른 압력분포, 속도분포, 배기가스의 흐름 및 세정수 분포 특성 변화에 대해 수치해석을 진행하였고 유동 특성 측면에서 적절한 가이드 각도를 제시하였다. Lee and Park (2018)은 수치해석을 통해 가이드 형상 변화에 따른 스크러버 내부의 유동 특성을 연구하였으며 유동 특성 측면에서 최적의 스크러버 내부 구조를 제안하였다. Choi et al. (2019)은 기존의 논문과는 다르게 스크러버 내부의 유동 특성에 관한 연구보다는 세정수의 pH 회복을 위한 노즐 직경 설계에 관하여 유동 및 화학반응을 포함하여 수치해석을 수행하였고 이론적 화학반응에 근거하여 세정수의 적정 희석비를 확인하였다. Guo et al. (2020)은 MAN 6S50ME 엔진을 대상으로 설계한 스크러버에 대해 유동 및 농도에 관한 수치해석을 수행하였으며 스크러버 내부의 유동 균일성이 스크러빙 효율에 미치는 영향에 관해 연구하였다.

그러나 엔진의 성능에 영향을 가장 크게 줄 수 있는 SOx 스크러버 내의 충전층(scrubbing layer)에서의 압력강하는 스크러버 설계에 매우 중요한 인자임에도 불구하고 충전층 내의 압력강하 특성에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 스크러버 설계에 매우 중요한 인자인 스크러버 충전층에서의 압력강하 특성에 대해 실험적 연구를 수행하고자 한다. 실험적 편의를 위해 엔진의 배기가스 대신에 공기를 작동유체로 사용하여 충전층의 충전물 변화에 따른 압력강하 특성을 살펴보기 위해 충전물을 바꿔가며 실험을 수행한다. 스크러버 내에서 흡수제는 배기가스의 유동 방향과 반대로 분사되며 이는 스크러버 충전층에서의 압력강하 특성에 영향을 미치게 된다. 이에 따라 흡수제를 모사한 물 분사가 충전층 내에서의 압력강하 특성에 미치는 영향에 대해 추가로 실험적 연구를 수행하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실제 선박에 장착되는 실제 스크러버 시스템은 매우 크기 때문에 실험실에서 수행할 수 있는 수준으로 스크러버 모사 압력강하 실험장치를 설계하는 것이 필요하다. 10,000 HP 급 선박에 사용될 Retrofit용 스크러버 기준 배기가스 및 세정수 유량에 대한 정보를 바탕으로 Fig. 1과 같이 스크러버 모사 충전층 내의 압력강하 측정을 위한 실험장치를 설계하였다.

10,000 HP급 스크러버의 내부 직경은 약 2,500 mm이지만

실험실 수준에서 실험을 수행하기 위해 실험장치의 내부 직경은 200 mm로 설계하였다. 엔진의 배기가스를 대체하는 공기는 압축기를 통해 실험장치에 공급된다. 공기의 유량은 질량유량계(mass flow controller, SLA5800, brooks instrument)에 의해 제어 및 측정된다. 공급된 공기의 균일한 유동 분포를 만들어 주기 위해 air inlet port에는 그림과 같이 스윌러(swirler)를 장착하고 추가로 덕트 내부에 다공성 물질을 포함하고 있는 층을 설치하였다. SOx를 Scrubbing 하기 위한 충전재 층(scrubbing layer)의 경우 길이는 53 cm로 설계하였으며 충전재 층에서의 압력강하를 측정하기 위해 충전재 층 전단과 후단의 차압을 차압계(micromanometer, FCO560, furness controls)를 이용하여 측정하였다. 실험 시 세정수 대신 물을 이용하였으며 탱크에 저장된 물은 펌프를 이용하여 노즐을 통해 실험장치에 공급되며 코리올리 질량유량계(coriolis flow meter, CMFS025, micro motion)로 유량을 측정한다. 실험장치는 내부 유동 변화(분사된 물과 공기의 거동 파악, 분사된 물이 충전재와 효과적 접촉 여부 확인 등)를 가시적으로 볼 수 있게 투명한 아크릴로 제작하였다.

설계에 따라 제작된 실험장치는 Fig. 2와 같다.

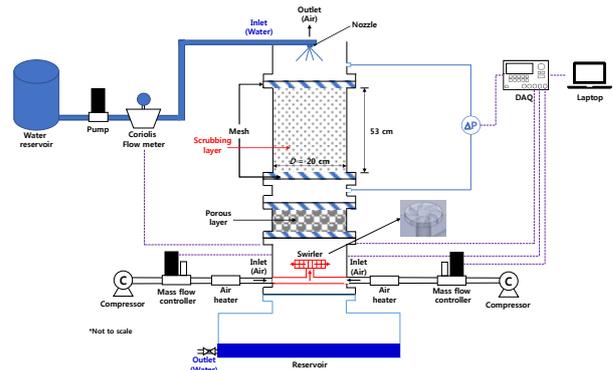


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

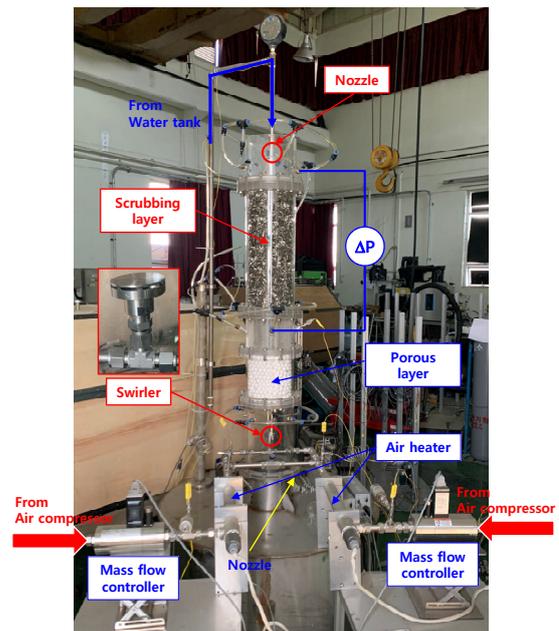


Fig. 2 Picture of experimental apparatus

본 연구에서 Fig. 2의 scrubbing layer에 들어가는 충전물은 Fig. 3과 같이 총 3종류(sphere, pall ring, saddle)를 사용하였다. Sphere의 경우, 스크러빙을 위한 충전재로 사용되지 않지만, 실험장치 검증에 위해 사용하였다. 다공성 매질로 충전된 층의 경우, 압력강하 특성을 이해하기 위해서는 충전층의 공극률 (porosity)을 측정해야 한다. 공극률은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\epsilon_b = V_{void} / V_{total} \quad (1)$$

충전층의 공극률은 실험적으로 측정하였다. Fig. 3과 같이 충전재가 채워진 충전층의 무게를 측정한 후, 충전층에 물을 채운다. 이때 충전층의 공간(공극)은 물로 채워지게 된다. 물을 채운 충전층의 무게를 측정한 후 충전층 내부의 물 무게(충전재 층의 공간에 채워진 물의 양)를 계산하게 된다. 물의 밀도를 이용하여 충전층의 빈(void) 영역의 부피를 계산할 수 있다. 이 과정을 통해 측정된 충전층의 공극률은 Table 1과 같다. 표에서 보듯이 구(sphere)의 경우, 공극률이 0.43-0.44를 가지며 크기 변화에 따른 공극률 변화는 크게 없는 것을 확인할 수 있다. Pall ring의 경우, 공극률이 0.84-0.91, Saddle의 경우, 공극률이 0.95-0.98을 가지며, 크기가 커질수록 공극률이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 공극률이 1에 가깝다는 의미는 충전재가 충전층에 채워져 있기는 하지만 충전재가 충전층에서 차지하는 부피가 거의 없다는 것을 의미한다. 즉, 공극률이 클수록 충전층 내에서의 압력강하는 매우 작을 것으로 예측할 수 있다.



(a) Packed bed (Sphere) (b) Pall ring type (PP) (c) Saddle type (STS)

Fig. 3 Filler materials of scrubbing layer

Table 1 Porosity of scrubbing layer

Type	Unit size	공극률(Porosity, ϵ_b)
Sphere	Large ($D_p = 27.2$ mm)	0.44
	Small ($D_p = 18.6$ mm)	0.43
Pall ring	Large (1 inch)	0.91
	Small (0.5 inch)	0.84
Saddle	Large (1 inch)	0.98
	Small (0.5 inch)	0.95

스크러버 충전층에서의 압력강하 특성 실험을 위한 조건은 다음과 같다. 실험은 충전층 내의 충전물 변화, 배기가스 모사 공기 유량 및 세정수 모사 물의 유량을 변화시키면서 수행하였다. 우선 세정수 모사 물을 분사하지 않았을 때 충전층 내의 충전물의 변화 및 배기가스 모사 공기 유량 변화에 따른 실험을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 충전물은 총 3종류를 사용하였으며 이 중에 구(sphere, packed bed)의 경우 실험장치 검증용으로도 사용하였다. 배기가스 모사 공기 유량 범위는 300~2,000 liter/min이다. 다음으로 세정수 모사 물을 분사할 때 충전층 내의 충전물의 변화 및 배기가스 모사 공기 유량 변화에 따른 실험을 수행하였다. 세정수 모사 물의 유량은 배기가스 모사 공기 유량에 따라 달라진다. 일반적으로 스크러빙 효율을 고려하여 부피비 기준으로 배기가스 유량이 1,000 liter/min일 때 세정수 유량을 8 kg/min을 흘려주게 된다. 이 비율에 맞춰서 세정수 모사 물의 유량을 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험장치의 타당성 검증

실험장치를 검증하기 위해 다공성 매질 내의 압력강하를 예측할 수 있는 모델을 조사하였다. 스크러버에 일반적으로 사용하는 폴링(pall ring), 새들(saddle) 등을 포함하는 다공성 매질 내의 압력강하를 예측할 수 있는 모델은 없다. Packed bed(sphere), fiberglass, foam metal과 같은 다공성 매질 내의 압력강하를 예측할 수 있는 모델은 다수 존재한다. 따라서 packed bed(sphere)를 가지는 다공성 매질 내의 압력강하 기본 모델 활용 실험 장치를 검증하고자 한다.

식 (2)는 Ergun (1952)이 제시한 packed bed 내에서의 압력강하 모델로서 벽면 효과를 고려하지 않은 모델이다.

$$\Delta P = (a\mu U + b\rho U^2)L \quad (2)$$

여기서

$$a = 150 \frac{(1-\epsilon_b)^2}{\epsilon_b^3 d_p^2}, \quad b = 1.75 \frac{(1-\epsilon_b)}{\epsilon_b^3 d_p},$$

$$\epsilon_b = 0.39 + \frac{1.74}{(D/d_p + 1.14)^2}.$$

식 (3)은 Einfeld and Schnitzlein (2001)이 제시한 모델로서 벽면 효과를 고려한 것이 특징이다.

$$\Delta P = \rho U^2 (L/d_p) [(1-\epsilon_b)/\epsilon_b^3] \Psi \quad (3)$$

여기서 $\Psi = \frac{154E^2}{Re_p} (1-\epsilon_b) + \frac{E}{E'}$, $Re_p = \frac{\rho U d_p}{\mu}$,

$$E = 1 + \frac{2}{3(D/d_p)(1-\epsilon_b)},$$

$$E' = [1.15(D/d_p)^{-2} + 0.87]^2.$$

Fig. 4는 packed bed(sphere)의 크기 변화에 대해 공기 유량 변화에 따른 다공성 매질 내의 압력 강하량을 기존 모델과 실험 결과를 비교한 그래프이다. Fig. 4(a)의 큰 구($D_p = 27.2$ mm)의 경우, 벽면 효과를 고려하지 않은 Ergun (1952) 모델과 실험 결과를 기준으로 평균 14.4%, 벽면 효과를 고려한 Einfeld and Schnitzlein (2001) 모델과 실험 결과는 평균 3.2%의 오차를 보인다. Fig. 4(b)의 작은 구($D_p = 18.6$ mm)의 경우, 벽면 효과를 고려하지 않은 Ergun (1952) 모델과 실험 결과는 평균 18.4%, 벽면 효과를 고려한 Einfeld and Schnitzlein (2001) 모델과 실험 결과는 평균 2.0%의 오차를 보인다. 본 연구에서 수행한 실험 장치의 경우 실제 스크러버 시스템 대비하여 약 1/10 배율로 축소하였기 때문에 벽면 효과가 유동에 미치는 영향이 존재하게 된다. 이에 따라 실험 결과가 벽면 효과를 고려하지 않은 Ergun (1952)

모델과는 큰 차이를 보이지만 벽면 효과를 고려한 Einfeld and Schnitzlein (2001) 모델과는 오차 5% 내외로 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 배기가스가 지나가는 채널 단면의 크기가 큰 실제 스크러버의 경우 스크러버 벽면이 충전층 내의 압력강하에 미치는 영향은 없을 것이므로 Ergun (1952) 모델을 쓰는 것이 맞다고 판단된다.

3.2 공기 유량 변화에 따른 충전층 내의 압력강하

앞서 언급한 바와 같이 다양한 충전재 변화가 스크러버 모사 장치의 압력강하 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 Pall ring, Saddle 형태의 충전재에 대해서 실험을 수행하였다. 먼저 세정수 모사 물 분사의 영향이 없는 상태에서 배기가스 모사 공기 유량을 변화시키면서 실험을 수행하였다.

Fig. 5(a)는 Pall ring을 사용하였을 때 충전재 층의 압력강하 실험 결과를 보여준다. Pall ring(large)의 경우 특성 길이가 약 1 인치로 sphere(large)의 크기와 유사하며 유량 변화에 따라 충전재 층 내에서의 압력 강하량이 3-80 Pa까지 변화한다. Pall ring (small)의 특성 길이는 약 0.5인치로 sphere(small)의 크기와 유사하며 유량 변화에 따라 충전재 층 내에서의 압력 강하량이 5-170 Pa까지 변화하는 것을 알 수 있다. Pall ring 크기의 변화가 충전재 층에서의 압력강하에 미치는 영향을 살펴보면, 크기가 1 인치에서 0.5 인치로 줄어들면 충전재 층에서의 압력강하가 약 2 배로 늘어나는 것을 실험적으로 확인할 수 있다.

Fig. 5(b)는 Saddle 형태의 충전재를 사용하였을 때의 압력강하 실험 결과를 보여준다. Saddle(large)의 경우 특성 길이가 약 1인치로 Sphere(large)의 크기와 유사하며 유량 변화에 따라 충전재 층 내에서의 압력 강하량이 1.7-52 Pa까지 변화한다. Saddle(small)의 특성 길이는 약 0.5인치로 sphere(small)의 크기와 유사하며 유량 변화에 따라 충전재 층 내에서의 압력 강하량이 2.6-70 Pa까지 변화하는 것을 알 수 있다. Saddle의 크기가 충전재 층 내에서의 압력강하에 미치는 영향을 살펴보면, 그림에서 보는 바와 같이 Saddle의 크기가 1인치에서 0.5인치로 줄었지만, 공기 유량이 1,900 liter/min일 때 압력강하는 약 28% 정도 증가한 것을 확인할 수 있다. Saddle의 공극률이 매우 커서 Saddle 크기가 압력강하에 미치는 영향이 다른 충전재(sphere, pall ring)보다 작은 것을 의미한다.

Saddle(large)의 경우 pall ring(large)의 경우와 특성 길이가 비슷하며, saddle(small)의 경우도 pall ring(small)의 경우와 특성 길이가 유사하다. 그러나 saddle(large)의 경우, 충전재 층 내의 압력강하가 pall ring(large) 경우의 압력강하보다 약 30% 정도 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 크기라도 saddle의 공극률이 pall ring보다 크기 때문에 생긴 결과이다. Pall ring과 saddle을 비교하면 그 표면적의 차이가 크게 나지 않는다. Pall ring과 saddle의 단면적이 비슷하므로 saddle을 scrubbing을 위한 충전재로 사용하게 되면 압력강하가 작으므로 다른 충전재 보다 엔진의 부하에 주는 영향이 적을 것으로 기대할 수 있다.

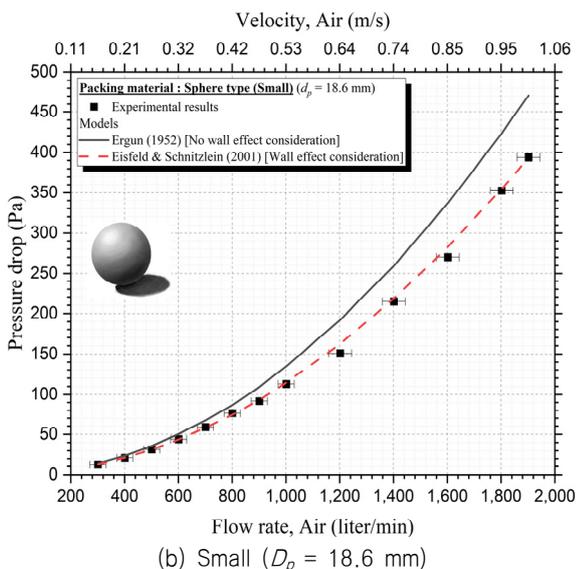
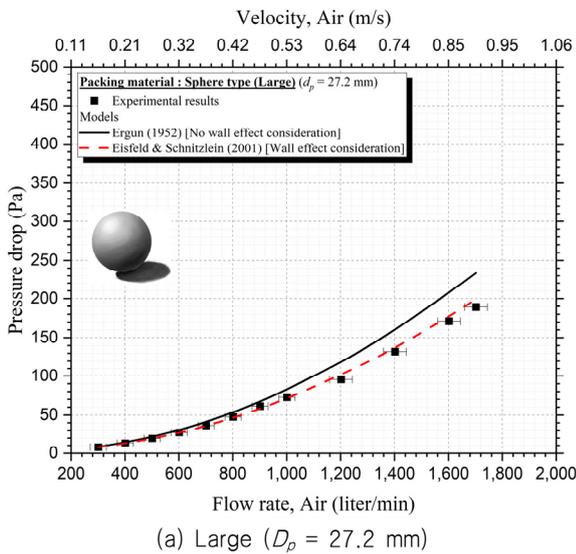
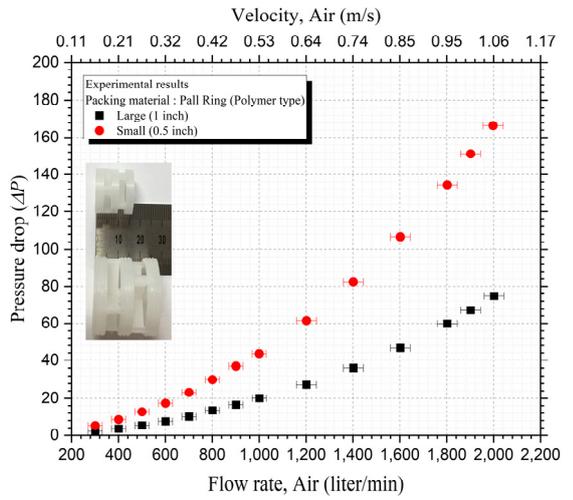
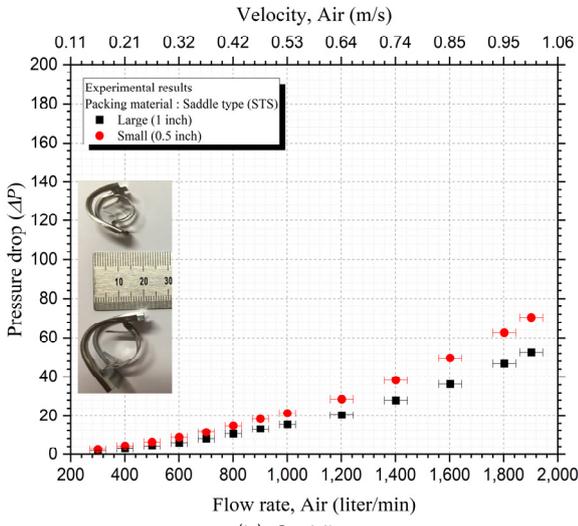


Fig. 4 Comparison of pressure drop in a scrubbing layer with packed bed between experimental and model results



(a) Pall ring



(b) Saddle

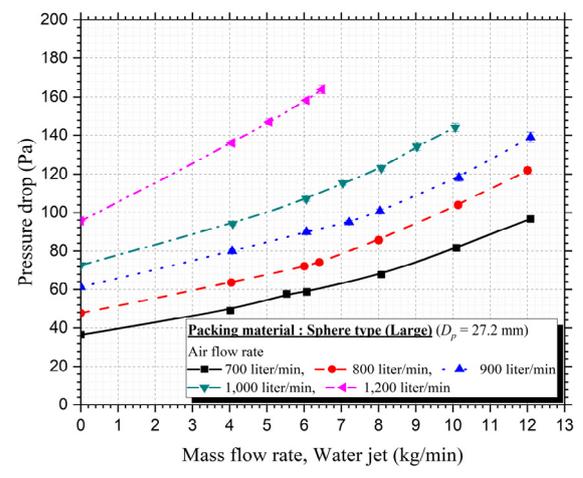
Fig. 5 Pressure drop in a scrubbing layer with pall ring and saddle materials

3.3 물 분사에 따른 충전층 내의 입력강하

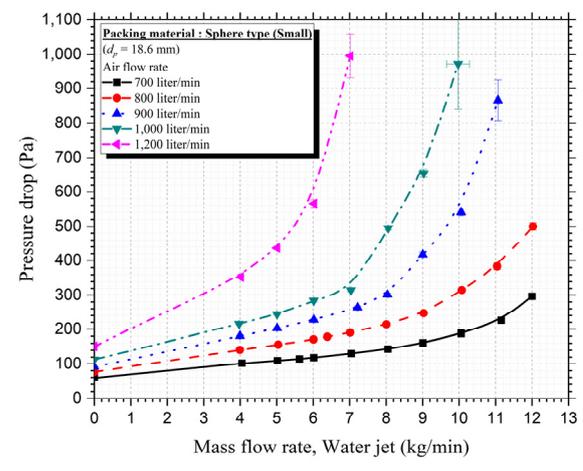
물 분사가 충전층 내에서의 입력강하에 미치는 영향을 살펴보기 위해 물을 노즐을 통해 충전층 내로 분사하였을 때의 충전층 내의 입력강하 측정 실험을 수행하였다.

Packed beds(sphere) 형태의 충전층에 물을 분사하였을 때의 입력강하 실험 결과는 Fig. 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 물이 공기 유동 방향과 반대로 흐르는 대향류(counter flow) 형태 일 때 물 분사량이 증가할수록 충전층 내의 입력강하가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 물이 sphere 사이에 흐르면서 층을 형성하고 이는 공기가 흘러갈 수 있는 단면적을 줄여주는 효과를 가지게 하여 생긴 현상으로 볼 수 있다.

스크리빙을 효율적으로 할 수 있는 공기-물 분사비가 1,000 (liter/min)-8(kg/min)인 경우의 입력강하를 살펴보면 물을 분사하지 않았을 때 입력강하가 58-70%(sphere large), 95-440%(sphere small) 정도 큰 것을 확인할 수 있다. 특히, sphere



(a) Large ($D_p = 27.2$ mm)

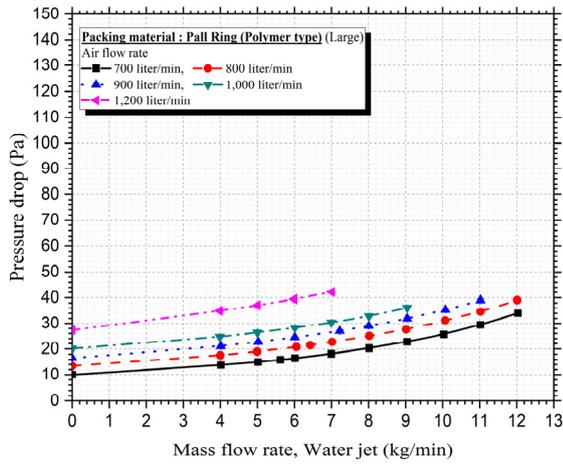


(b) Small ($D_p = 18.6$ mm)

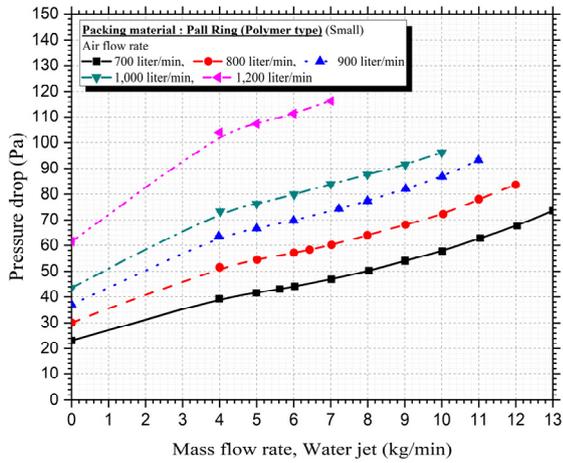
Fig. 6 Pressure drop in a scrubbing layer with packed bed under a water jet condition

(small)의 경우에 공기 유량이 클 때, 물 분사량이 증가함에 따라 입력강하가 기하급수적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 물 분사량이 10 kg/min, 공기 유량이 1,000 liter/min일 때 입력강하가 매우 크고 실험값의 불확도가 큰 이유는 분사된 물이 물 저장소로 원활하게 빠져나가지 못하고 충전층에 정체되어 있어 공기가 충전층을 잘 빠져나가지 못해서 생긴 결과이다. 따라서 Packed bed를 스크리빙을 위해 사용하게 되면 물 분사 시에 충전층 내에서의 입력강하가 매우 커지게 되어 엔진에 큰 무리를 가하기 때문에 스크리빙을 위해서는 적절치 못하다.

Pall ring이 들어 있는 충전층에 공기 및 물을 분사하였을 때의 입력강하 실험 결과는 Fig. 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 pall ring(large) 및 pall ring(small) 모든 경우에 대해, 물이 분사되면 공기가 흘러갈 수 있는 면적이 줄어들기 때문에 충전층 내의 입력강하가 커지는 것을 확인할 수 있다. 황산화물을 적절하게 제거할 수 있는 공기(배가스 모사)-물 분사비가 1,000 (liter/min)-8(kg/min)인 경우의 입력강하를 살펴보면 물을 분사하지 않았을 때보다 물을 분사할 때의 입력강하가 약 60%(pall ring large), 90-100%(pall ring small) 정도 큰 것을 확인할 수



(a) Large (1 inch)

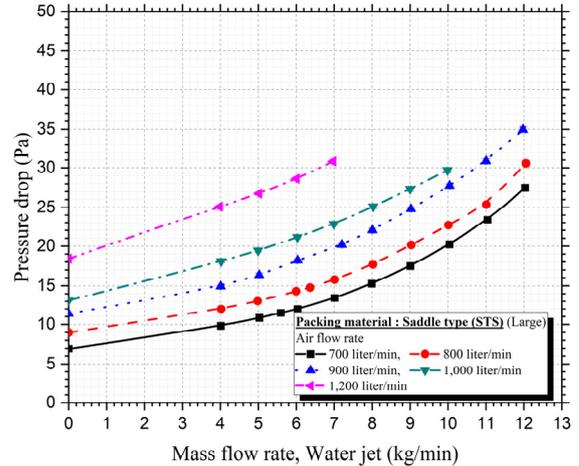


(b) Small (0.5 inch)

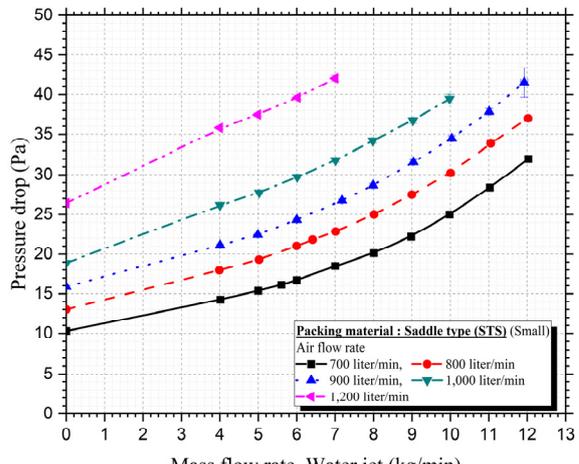
Fig. 7 Pressure drop in a scrubbing layer with pall ring material under a water jet condition

있다. 실험 결과에 따르면 같은 공기 유량 및 물 분사량 기준으로 살펴보면 sphere(large)가 들어 있는 충전층 내에서의 압력 강하량은 pall ring(large)을 가지고 있는 충전층 내에서의 압력 강하량의 약 3.6배 정도 크며 sphere(small)를 가지고 있는 충전층 내에서의 압력 강하량은 pall ring(small)을 가지고 있는 충전층 내에서의 압력 강하량의 약 2.7배 정도 크다.

Saddle이 들어 있는 충전층에 공기 및 물을 분사하였을 때의 압력강하 실험 결과는 Fig. 8과 같다. Sphere 및 pall ring 형태의 충전층 층에서 보는 바와 같이 saddle의 경우에 대해서도, 물이 분사되면 공기가 흘러갈 수 있는 면적이 줄어들기 때문에 충전층 내의 압력강하가 커지는 것을 확인할 수 있다. 황산화물을 적절하게 제거할 수 있는 공기(배가스 모사)-물 분사비가 1,000 (liter/min)-8(kg/min)인 경우의 압력강하를 살펴보면 물을 분사하지 않았을 때보다 압력강하가 saddle(large)의 경우 약 65-91% 정도 늘어나며 saddle ring(small)의 경우는 약 57-81% 정도 늘어나는 것을 알 수 있다. 같은 공기 유량 및 물 분사량 기준으로 살펴보면 saddle을 가지고 있는 충전층 층의 압력강하가 pall ring을 가지고 있는 충전층 층의 압력강하보다 작은 것을 확



(a) Large (1 inch)



(b) Small (0.5 inch)

Fig. 8 Pressure drop in a scrubbing layer with saddle material under a water jet condition

인할 수 있다.

Pall ring 및 saddle 형태의 충전층에 대하여 황산화물을 적절하게 제거할 수 있는 공기(배가스 모사)-물 분사비가 1,000 (liter/min)-8(kg/min)인 경우의 압력 강하량과 물 분사가 없는 경우와 압력 강하량의 비를 정리하면 Table 2와 같다. Table 2에서 정의한 압력 강하량의 비는 식 (4)와 같다.

$$\Delta P_{ratio} = \frac{\Delta P_{Water\ jet}}{\Delta P_{No\ water\ jet}} \quad (4)$$

Table 2에서 보는 바와 같이 황산화물을 적절하게 제거할 수 있는 공기(배가스 모사)-물 분사비가 1,000(liter/min)-8(kg/min)인 경우의 압력 강하량과 물 분사가 없는 경우의 압력강하 비는 약 1.58-2.01을 가지는 것을 확인할 수 있다. 유동 측면에서 물 분사를 하지 않은 충전층 내의 압력 강하량 기준 최대 2 배 정도가 스크러빙 시스템의 부하(back pressure)로 걸린다는 것을 고려하여 스크러버 시스템을 설계하면 될 것으로 판단된다.

Table 2 Ratio of pressure difference with water jet to without water jet

Air flow rate (liter/min)	Water flow rate (kg/min)	Pressure difference ratio (ΔP_{ratio})			
		Pall ring (Large)	Pall ring (Small)	Saddle (Large)	Saddle (Small)
700	5.6	1.58	1.86	1.66	1.57
800	6.4	1.59	1.94	1.65	1.68
900	7.2	1.63	2.01	1.78	1.68
1,000	8.0	1.63	2.01	1.91	1.81

4. 결론

본 연구에서는 스크러버 설계에 매우 중요한 인자인 스크러버 충전층에서의 압력강하 특성에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 스크러버 모사 압력강하 실험장치를 설계하고 제작하였다. 스크러빙을 위해 필요한 충전층의 충전물(sphere, pall ring, saddle) 변화에 따른 압력강하 특성을 살펴보기 위해 충전물을 바꿔가며 실험을 수행하였다. 추가로 스크러버 내부에서 배기가스 유동과 반대 방향으로 분사되는 흡수제가 압력강하 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 흡수제 모사 물을 분사하여 스크러버의 압력강하 측정 실험을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 스크러버 충전층 내에서의 압력강하 특성에 영향을 미치는 인자인 공극률은 본 연구에서 고려한 세 가지 충전물 중에서 Saddle 형태의 충전물이 가장 큰 것을 실험적으로 확인하였다.
- 2) 본 연구에서 고려한 sphere, pall ring, saddle 형태 중에서 saddle 형태의 충전물을 사용하였을 때 스크러빙 층에서의 압력강하량이 제일 적다.
- 3) 공기 유동과 반대 방향으로 물 분사 시, 물이 충전물 사이에 흐르면서 층을 형성하고 이는 공기가 흘러갈 수 있는 단면적을 줄여주는 효과를 가지게 하여 충전층에서의 압력강하가 물 분사를 하지 않았을 경우보다 매우 커지는 것을 확인하였다.
- 4) Saddle 형태의 충전물을 사용하였을 경우, 황산화물을 효과적으로 처리할 수 있는 공기(배가스 모사)-물 분사비가 1,000 (liter/min)-8(kg/min)인 경우의 압력 강하량과 물 분사가 없는 경우의 압력강하 비는 약 1.5 - 2.0을 가지는 것을 확인하였다. 유동 측면에서 물 분사를 하지 않은 충전층 내의 압력 강하량을 기준으로 하여 최대 2배 정도가 스크러빙 시스템의 부하(back pressure)로 걸린다는 것을 고려하여 스크러버 시스템을 설계하면 될 것이다.

후 기

본 연구는 해양수산부 IMO 선박 국제규제 선도기술개발사업 (과제고유번호:1525010933) 및 한국기계연구원 기본사업(액체수소 공급시스템 핵심 기자재 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Ahn, J., 2022, A study on improvement for greenship certification scheme to achieve net-zero. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(6), pp.372-384.

Choi, Y., Cha, M., Kim, M. and Lim, T., 2019, Designing of nozzle diameter based on the IMO regulation for discharging scrubber wash-water. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 43(4), pp.285-291.

Ergun, S., 1952. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Process*, 48, pp.89-94.

Eisfeld, B. and Schmitzlein, K., 2001, The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds. *Chemical Engineering Science*, 56(14), pp.4321-4329.

Guo, H., Zhou, S., Shreka, M. and Feng, Y., 2020, A numerical investigation on the optimization of uneven flow in a marine De-SOx scrubber, *Process*, 8, 862.

Jeong, T.H., Kang, S.G., Lee, J.K. and Ahn, J., 2018. IMO GHG emission regulation trends and responses. *Journal of the Society on Naval Architects of Korea*, 55(4), pp.48-54.

Kim, I., Kim, C., Park, S., Cho, D. and Lee, Y., 2015, Designation of fuel oil scrubber nozzle positioning using CFD analysis and PIV methods, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 39(7), pp.773-778.

Lee, S. and Park, K., 2018, Study of inner structure of in-line scrubbers. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 42(1), pp.1-9.

Park, J. and Park, K., 2017, Effect of guide angle of swirl-type scrubber on flow characteristics of exhaust gas. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 41(9), pp.767-772.

