



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

650kw급 황산화물 저감장치의 최적화에 대한 연구

A Study on Optimizing SOx Reduction Equipment for 650kw



지도교수 박권하

2019년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

이상민

본 논문을 이상민의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 손 동 우 (인)

위 원 이 영 호 (인)

위 원 박 권 하 (인)

2018년 12월 18일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
1. 서 론	
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
2. 황산화물 저감 기술	
2.1 황산화물	4
2.2 황산화물 저감 기술	6
2.2.1 습식 탈황 공정	6
2.2.2 건식 및 반건식 탈황 공정	9
2.3 스크러버 시스템	12
3. 스크러버 내부 구조 기초연구	
3.1 수학적 모델 및 계산 조건	15
3.1.1 수학적 모델	15
3.1.2 계산 조건	17
3.2 해석 결과 및 고찰	22
3.2.1 가이드 각도 변화에 따른 분석	22
3.2.2 배플 길이에 따른 분석	26
3.2.3 배플 간격에 따른 분석	29
3.2.4 배플 개수에 따른 분석	32
3.2.5 내부 유입구로부터의 거리에 따른 분석	35
3.3 요약	38

4. 650kw급 스크러버 제시 및 분석	
4.1 수학적 모델 및 계산조건	39
4.1.1 수학적 모델	39
4.1.2 계산 조건	41
4.2 해석 결과 및 고찰	46
4.2.1 압력분포 특성	46
4.2.2 속도분포 특성	49
4.2.3 온도분포 특성	52
4.2.4 물 분포 특성	55
5. 결론	57
참고문헌	59



List of Tables

Table 1	Properties of SO ₂	5
Table 2	Effects of SO ₂ on human body	5
Table 3	Classification of desulfurization technology	11
Table 4	Design variables at inlet speed of 1.5m/s	21
Table 5	Conditions for each case	43
Table 6	Boundary condition	45



List of Figures

Fig. 2.1 Shape of wet scrubber	14
Fig. 3.1 Modeling of wet scrubber	19
Fig. 3.2 Calculation grids	19
Fig. 3.3 Two-dimensional shape	20
Fig. 3.4 Pressure drop with guide angle	24
Fig. 3.5 Flow distance with guide angle	24
Fig. 3.6 Stream lines with guide angle	25
Fig. 3.7 Pressure drop with baffle length	27
Fig. 3.8 Flow distance with baffle length	27
Fig. 3.9 Stream lines with baffle length	28
Fig. 3.10 Pressure distribution with baffle length	28
Fig. 3.11 Pressure drop with gap between baffle	30
Fig. 3.12 Flow distance with gap between baffle	30
Fig. 3.13 Stream lines with gap between baffle	31
Fig. 3.14 Pressure distribution with gap between baffle	31
Fig. 3.15 Pressure drop with number of baffle	33
Fig. 3.16 Flow distance with number of baffle	33
Fig. 3.17 Stream lines with number of baffle	34
Fig. 3.18 Pressure distribution with number of baffle	34
Fig. 3.19 Pressure drop with distance from the hole	36
Fig. 3.20 Flow distance with distance from the hole	36
Fig. 3.21 Stream lines with distance from the hole	37
Fig. 3.22 Pressure distribution with distance from the hole	37

Fig. 4.23	Location of shapes	42
Fig. 4.24	Shape of case 3	44
Fig. 4.25	Calculation grids	44
Fig. 4.26	Inlet pressure	47
Fig. 4.27	Pressure distribution	48
Fig. 4.28	Velocity distribution	50
Fig. 4.29	Temperature distribution	53
Fig. 4.30	Water volume fraction distribution	56



A Study on Optimizing SO_x Reduction Equipment for 650kw

Sang Min Lee

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of
Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The regulations on sulfur oxides emitted from marine diesel engines have been strengthened, and a lot of research on the abatement technology is under way. Typical abatement technologies include scrubbers, which include cyclones, venturi, jet scrubbers, packed towers, and spray towers. Among them, the spray tower has to be bulky due to the nature of the scrubber, but when it is bulky, it can not be used for small and medium sized vessels. In order to overcome these drawbacks, it is necessary to study the internal structure of the scrubber which can reduce the volume and improve the performance.

Therefore, in this study, basic study was carried out to analyze pressure and flow according to deformation of internal structure of scrubber by installing guide angle and baffle inside a simplified scrubber through computational fluid analysis (CFD). Based on these basic studies, we present a new internal structure of wet scrubber and investigate pressure, temperature, velocity and water distribution to find the optimal internal structure while deforming the shape.

In basic research, the pressure drop and the average length of flow were measured by varying the angle of the guide and the structure of baffle in an inline scrubber for a 650kW engine. The guide angle was analyzed by increasing the angle from 0° to 75° in 15° increments. The structure was analyzed by varying the length of baffle, spacing between baffles, number of baffles, and distance from the inlet of the baffle. Experimental results showed that the values of the guide angle, spacing between baffles, number of baffles, and distance from the inlet of the baffle were 30° , 420mm, 200 mm, 4, and 1000 mm, respectively.

In this study, characteristics of pressure, velocity, temperature, and water distribution according to changes of internal structure of rectangular wet scrubber for 10MW diesel engine were analyzed. An external scrubber, a guide vane, a hole plate, and a packing in the structure of the conventional scrubber are sequentially added to analyze. As the result of the analysis, the pressure on the front end of the scrubber was reduced and the exhaust gas flow was uniformed by installing the external scrubber, and most of the heat exchange was completed before the inner scrubber. By installing the guide vane and hole plate, exhaust gas was uniformly dispersed and active particles were trapped in the external scrubber. It was confirmed that the cleaning water was distributed widely in the packing region, the uniform and low temperature distribution was observed after the packing region, and the residence time of the exhaust gas was prolonged by the flow rate reduced in the scrubber.

KEY WORDS: SO_x, Scrubber, Guide angle, Swirl flow, Internal structure

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

선박 디젤 엔진에서 필연적으로 발생되어지는 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx)은 스모그의 원인이 되어 인체에 유해하게 작용하거나, 주요한 대기오염 물질로써 산성비의 원인이 되어 기체 자체로 사람에게 유해하게 작용해 호흡기 질환을 일으키게 된다(Ko et al., 2014). 이러한 이유로 질소산화물과 황산화물의 배출규제가 점차 강화되고 있으며, 저감기술에 대한 관심이 높아지고 있다.

황산화물의 경우 연료내의 황 함량을 우선적으로 제한하였으며, 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 황산화물을 제거하기 위한 전, 후처리 저감 기술에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다.

질소산화물의 경우 2000년 1월 1일 이후로 시행된 Tier 1, 2011년 1월 1일 이후로 시행된 Tier 2, 2016년 1월 1일 이후에 시행된 Tier 3에 이르기까지 계속해서 배출규제를 강화하고 있는 실정이며, 점차 적용대상도 확대해 나갈 것으로 생각된다. Tier 3이전의 NOx 규제의 경우 분사 최적화, 피스톤 형상 최적화 등 엔진의 운전조건을 최적화하는 방법으로 규제를 만족 시켰지만, Tier 3 이후의 규제는 전, 후처리 과정이 선행되어야만 만족할 수 있을 만큼 강화되어 규제 만족을 위해 다양한 기술이 연구 개발되고 있는 실정이다(김성윤, 2016).

황산화물 규제를 만족하기 위한 저감 기술로는 대표적으로 습식 스크러버가 있다. 습식 스크러버를 이용한 황산화물 처리기술은 저렴한 고유황유 연료를 그대로 사용할 수 있고, 낮은 운영비용으로 인하여 선호하는 것으로 알려져 있다. 물 또는 해양에서 공급할 수 있는 해수를 이용하여 엔진의 배기가스를 세

정할 수 있는 장점도 있다(Lee et al., 2014). 이러한 장점들에 의해 습식 스크러버에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. Lee, et al. (2015)는 스프레이형 스크러버의 배출가스에 포함된 액적의 제어방법에 관한 전산해석적 연구를 수행하였으며, Ko, at al. (2007)는 충전층식 스크러버의 스프레이 시스템 최적 설계에 대한 수치해석적 연구를 하였고, Son, at al. (2015)는 습식 스크러버의 분무 유량, 형상비 및 충진을 변화가 스모크 저감에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Han, at al. (2007)는 충전제의 종류에 따른 습식 스크러버의 가스상 물질 제거 특성에 대해 연구하였으며, Heo (2016)는 수치해석을 이용한 중,대형 스크러버 시스템 내 유체유동 및 열적 특성 분석에 대한 연구를 진행하였으며 Kim, et al. (2015)는 CFD 해석 및 PIV 실험을 통한 연료유 스크러버의 노즐 위치 선정에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 Choi, et al. (2017)는 선박 배기가스 내 SOx/NOx 처리용 습식 스크러버에 대한 연구를 수행하였으며, Pourmohammadbagher, et al. (2011)는 스월모양의 습식 스크러버로 오염물질을 제거하는 연구를 수행하였고, Douglas, et al. (1976)는 미립자를 위한 저에너지 습식 스크러버의 작동 매개 변수에 대한 연구를 진행하였다. 그리고 Yoo, et al. (2003)는 충전층식 세정집진기의 집진특성에 대한 실험을 수행하였으며, Hassan, et al. (2017)는 원심 분리식 습식 스크러버 내부의 세정액 흐름 패턴의 흐름 시각화 및 모델링에 대한 연구를 수행하였다.

1.2 연구 목적

선박 디젤 엔진에서 배출되는 황산화물에 대한 규제가 강화되어, 그 저감 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 대표적인 저감 기술로는 스크러버가 있는데 그 종류로는 사이클론, 벤츄리, 제트 스크러버, 충전탑, 분무탑 등이 있다. 그 중 분무탑의 경우 스크러버 특성상 부피가 커질 수 밖에 없는데, 부피가 커지면 중소형 선박에 사용할 수 없게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 부피를 줄이는 동시에 성능을 높일 수 있는 스크러버 내부 구조에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 3장에서는 전산 유체 해석(CFD)를 통해 단순화된 스크러버 내부에 가이드 각도와 배플을 설치해 스크러버 내부 구조 변형에 따른 압력과 유동에 대해 분석하는 기초연구를 수행하였으며, 이에 따른 압력강하와 유동의 길이를 분석하여 유동의 경향을 파악하는 동시에 최적의 내부 구조를 찾고자 하였다. 그리고 4장에서는 습식 스크러버의 새로운 내부구조를 제시하고 형상을 변형시켜 유동특성을 분석하였으며, 이에 따른 압력, 온도, 속도, 물 분포의 분석을 통해 최적의 내부 구조를 찾고자 한다.

제 2 장 황산화물 저감 기술

2.1 황산화물 (SOx)

황산화물은 일반적으로 황과 산소가 결합한 것을 말하며, 대기환경 측면에서의 황산화물은 주로 이산화황(SO₂), 삼산화황(SO₃)을 일컫는다. 이러한 황산화물의 대부분은 화석연료에 포함된 황이 연소과정 중에 산화되면서 생성되는데, 이 밖에도 화산 폭발 시, 화력발전소, 벙커-C 및 연료를 사용하는 경우 발생된다. 연소과정에서 생성되는 SOx는 대부분 SO₂이며, 그 특성은 Table 1과 같다.

이러한 황산화물은 산성비의 원인이 되며 토양과 호수등을 산성화 시켜 어패류의 감소와 중금속 용출에 의한 오염을 발생시키고 Table 2(Son, 2017)과 같이 일정 농도 이상의 조건에서 인체 및 식물에 심각한 영향을 줄 수 있는 위험한 오염물질이다.

황성분의 산화에 의해 생성되는 SOx의 일반적인 생성과정은 아래와 같다.



온도가 높고 낮음에 따라 SO₂와 SO₃ 발생량이 증가, 감소한다고 알려져 있으나 화력발전소는 이와는 반대되는 경향을 보인다.

디젤기관의 연소에서는 연료를 함유한 황성분에 비례하여 배기가스의 SO₂, SO₃ 또한 증가하므로 비교적 정확한 SOx 배출량 예측이 가능한 특징을 가진다.(Son, 2017)

Table 1 Properties of SO₂

Property	Values
Molecular weight	64.04
Melting point	-75°C
Boiling point	-10°C
Density	2.8
Solubility	8.5g/100ml(25°C)
Vapor pressure	330kPa(20°C)

Table 2 Effects of SO₂ on human body

Concentration[ppm]	Effect
0.03	Increase in patients with chronic bronchitis
0.1	Show asthma symptoms on contact with cold air
0.24	Increase in patients with acute respiratory disease
0.25	Asthma symptoms during exercise
0.4~0.5	After 5 minutes of severe exercise, symptoms of asthma
1	Approximately 1% of local residents have asthma symptoms

2.2 황산화물 저감 기술

배연탈황(FGD)이란 흡수(Absorption), 흡착(Adsorption), 산화(Oxidation), 환원(Reduction) 등의 원리를 이용해 연소 후 배기가스 중 포함되어있는 SO_x 를 제거하는 기술을 말한다. 배연탈황기술은 흡수제의 수분량에 따라 크게 건식법, 습식법으로 나누며, 흡수제의 재생여부에 따라 다시 재생법과 비재생법으로 분류되며 그 종류는 Table 3(최병선 등, 1994)와 같다.

2.2.1 습식 탈황 공정

습식 배연탈황 공정은 1930년대에 영국에서 개발된 이래로 50년이상 기술이 축적되어 기술적 신뢰성과 경제성이 우수하고, 거의 완성단계에 도달한 공적으로써 일부 선진국가에서 이미 많은 습식 비연탈황 설비가 설치, 운전되고 있으며 그중에서도 특히 SO₂가스가 포함된 배기가스를 석회석 또는 소석회 슬러리와 접촉시켜 SO₂를 제거하고, 부산물로 석고를 생성시키는 습식 석회석-석고법이 주류를 이루고 있다. 일반적으로 배기가스 중에 포함된 황산화물을 제거하기 위한 탈황공정은 배기가스에 흡수제가 포함된 액을 분무하는 액 분산방식과 배기가스를 흡수액내에 직접 분사하는 가스분사방식의 두 가지로 대별할 수 있으며 현재 상용화되어 있는 탈황장치 중 대표적인 액분산방식에는 Spray tower 가 주류를 이루고 있고, 가스분사 방식으로는 Tray tower 와 Jet bubbling reactor등이 있으며 이들 공적들은 각각의 장단점이 있다. 또한 산화방식에 따라 별도의 산화용 반응조를 두는 별도 산화방식과 탈황 공정에서 일어나는 모든 화학반응이 하나의 흡수탑 내에서 이루어지도록 하는 강제 산화방식으로 구분할 수 있는데 금후 설비비와 운전동력 소모가 적은 강제산화 방식이 배연탈황 공정의 주류를 이룰 것으로 전망되고 있다.

습식 석회석-석고공정에서 SO₂제거 효율에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 흡수액의 pH와 L/G비이다. 흡수액의 pH가 높아지면 SO₂ 제거효율은 증가하지만

석회석 이용율과 산화반응 속도는 낮아지게 된다. 일반적으로 강제산화방식의 Spray type 습식 석회석-석고법에서 흡수액의 pH는 5-6정도이고, 가스분사방식인 Jet bubbling reactor에서는 3-5정도로 유지되고 있으며 pH 변화를 억제하여 안정한 화학반응을 유도하고, 석회석 이용율과 SO₂ 제거 효율을 증가시킬 목적으로 Magnesium 화합물과 유기산을 첨가하는 공정도 개발되었다. 배연 탈황 공정중 Spray tower 에서의 L/G비를 증가 시키면 SO₂ 효율은 증가하지만 흡수액의 순환을 위한 동력소모가 커지게 되므로 System 특성에 부합되도록 적절한 L/G비를 산정하여야 한다. 또한 SO₂ 제거효율에는 영향을 주지 않으면서 L/G비를 감소시키기 위한 시도가 계속되어 왔으며, 그 일환으로 흡수액에 개미산을 첨가하여 SO₂ 흡수를 촉진, L/G비를 감소시킨 대표적인 공정이 SHU공정이다. 특히 약유기산을 첨가하는 공정은 염소에 의한 영향을 거의 받지 않는다는 장점이 있다. 기존의 습식 석회석-석고 공정에서 해결해야 할 가장 큰 문제는 Scale의 생성방지이다. 스케일 생성의 억제를 위해서는 1) 흡수액내에 종결정으로 작용할 수 있는 석고를 첨가하거나, 2) 흡수탑 내부구조를 단순화하고, 3) 고형물의 누적이 예상되는 부분의 세척을 가능토록하고, 4) 흡수액의 pH를 안정적으로 유지하기 위한 첨가제 주입 등의 방법이 있다.

Dual Alkali공정은 기존 습식 석회석-석고법에서 석고에 의한 Scaling 문제점을 해결하기 위해 개발되어 1970년대 초부터 미국에서 실용화된 공정으로 소다, 암모니아, 황산알루미늄 등과 같은 수용성 Sodium based alkali를 사용하여 SO₂를 흡수하고, 여기에 Lime, Limestone과 같은 Calcium based alkali를 주입하여 Calcium based alkali를 회수하여 흡수탑으로 재순환하는 공정이다. 또한 이와 유사한 공정으로 DOWA basic aluminum sulfate 공정이 있다. Wellman-lord 공정도 Dual alkali 공정의 일종으로 1960년대에 화학 비료 생산물에서 발생하는 황을 회수하기 위하여 Wellman-lord Inc. 에 의해 개발된 공정으로 처음에는 흡수제로 Potassium 화합물을 사용하였지만 Scaling 문제와 소모된 흡수용액의 재생에 따른 Steam 소모량의 과다로 인하여 Sodium 화합물로 교체하여 사용하고 있다. 그러나 이 공정들은 석회석-석고법에 비해 일반적으로 탈황비용이 매우 높기 때문에 더 이상의 발전 가능성은 적은 것으로 판단된다. Magnesium

-oxide공정은 1964년 독일에서 개발되어 Corrosion과 Erosion 문제를 제외한 기계적인 문제는 해결되어 있는 공정이다. 이 공정은 현재 미국내 설치운전중인 배연탈황 공정의 약 5%를 점유하고 있으며, 거의 대부분이 화력발전소에 이용되고 있고, 일본에서는 1971년 이후 제련공장과 황산제조공장에 도입되어 이용되고 있다 이외에 흡수제로서 Sodium citrate 용액을 이용한 Citrate공정과 Ferrous sulfide 슬러리를 이용하는 SULF-X공정, Potassium carbonate용액과 같은 Potassium염을 Packed tower에 사용하여 SO₂를 제거하고, 원소황을 회수할 수 있는 CONOSOX공정 등이 일부 이용되고 있으나 전체적인 습식 배연탈황 공정개발의 추세는 역시 석회석-석고법의 공정개선에 초점이 맞추어지고 있다.



2.2.2 건식 및 반건식 탈황 공정

건식 또는 반건식 탈황공정이란 배기가스를 분말이나 Pallet형태의 촉매층으로 통과시키거나 고온의 배기가스에 건조한 분말형태의 흡수 반응제 또는 슬러리 형태의 흡수 반응제를 분사하여 SO₂를 흡수, 제거하는 방식의 배연탈황 공정으로 재생법과 비생법으로 크게 구분할 수 있다. 이 공정은 장치가 비교적 단순하고 수 처리 공정이 필요 없다는 장점 때문에 현재 세계 각국에서 활발하게 연구가 진행되고 있다.

탈황공정 중 가장 단순한 공정인 건식 석회법은 고온의 노 내에 석회석 또는 소석회 분말을 분사하여 석회석의 분해로 생성된 생석회(CaO)가 SO₂와 반응하여 CaSO₄를 형성하면 이를 Fly ash와 함께 집진기에서 포집, 제거하는 방법이다.



그러나 1960년대에 연구개발이 시작된 이 공정은 SO₂에 대하여 이론량의 약 2배 정도의 CaCO₃를 주입해도 탈황효율이 30%정도로 낮아 석회이용율의 비경제성 등의 문제점으로 인하여 실용화 되지는 못했다. 그 이후, 여러 가지 변형 개선된 건식공정이 세계각국에서 연구되고 있으며, 그 중 대표적인 공정으로는 고정상 또는 유동상 흡착탑에서 활성탄을 이용하여 배기가스 중의 SO₂, O₂, H₂O 등을 흡착, H₂SO₄를 생성시키고, 소모된 활성탄은 재생하여 재순환 시키는 활성탄 흡착법과, Fly ash의 성분이 다공성 실리카와 알루미늄으로 구성되어 있다는 점에 착안하여 소석회, Fly ash, Gypsum등의 혼합물을 가압, 성형한 Absorbent pellet에 SO₂를 흡착시켜 제거하는 새로운 공정이 최근에 개발되었다.

대표적인 반건식 공정인 Spray drying공정은 소석회 슬러리를 150-250℃ 정도로 유지되는 흡수탑 내에 분사하여, 생성된 CaSO₃를 가스의 열과 반응열로 건조시켜 분말상의 생성물을 흡수탑 하부와 전기 집진기 또는 백 필터에서 포

집 제거하는 공정이다. 집진기에서 포집된 미 반응 흡수제를 함유한 생성물의 일부는 SO_2 제거율과 증발효과를 높이기 위하여 흡수탑으로 재순환시켜 사용한다. 반건식법은 비교적 탈황효율이 높고, 배기가스의 온도가 $70\text{-}80^\circ\text{C}$ 정도 이기 때문에 재가열과 수처리가 필요치 않은 장점이 있는 반면, Spray nozzle의 마모가 심하고, 흡수제로서 주로 소석회를 사용하기 때문에 SO_2 가스의 농도가 높은 배기가스를 처리할 경우 흡수제의 Cost가 높아지는 단점이 있으나 부산석고를 이용할 수 없는 조건하에서 배기가스 중 SO_x 의 농도가 800ppm 이하의 비교적 농도가 낮은 가스를 처리하는 경우에는 습식법보다 유리할 수도 있다. 이외에 Spray drying 공정과 기본적인 원리는 같으나 흡수제로 Na_2CO_3 용액을 사용하고, 황을 회수하는 ACP(Aqueous Carbonate Process)공정과 SO_2 를 CuO와 반응시켜 황산염을 생성시킨 후 환원가스로 SO_2 를 회수하여 원소황, 황산 등을 생산하고, CuO를 재생하는 Copper Oxide 공정 등이 있으나 경제성을 고려해 볼 때 이들 공정들은 에너지 소모가 적고 기술이 정립되어 있는 황산제조나 SO_2 액화에 이용하는 것이 유리할 것으로 판단된다(최병선 등, 1994).

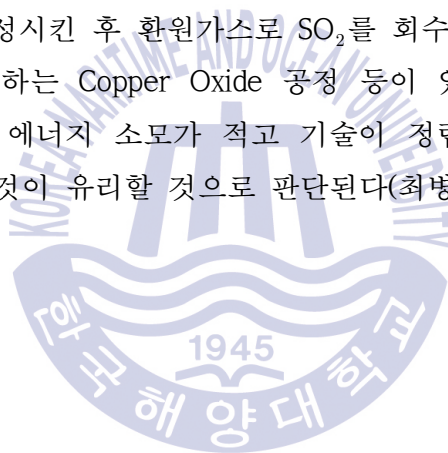


Table 3 Classification of desulfurization technology

Classification		Technology
Wetting reduction technology	Non-regeneration method	<ul style="list-style-type: none"> -Wet lime/limestone scrubbing -Dual alkali scrubbing -DOWA basic aluminium sulfate -Sea water scrubbing
	Regeneration method	<ul style="list-style-type: none"> -Wellman-lord -Mag-Ox -Citrate -SULF-X -CONOSOX(SO_x, NO_x Simultaneous abatement)
Drying reduction technology	Non-regeneration method	<ul style="list-style-type: none"> -Spray drying -Dry sorbent injection -Electron beam(SO_x, NO_x Simultaneous abatement) -Invertex Process
	Regeneration method	<ul style="list-style-type: none"> -Aqueous Carbonate -SFGT(SO_x, NO_x Simultaneous abatement) -Adsorption(SO_x, NO_x Simultaneous abatement) -NOXSO(SO_x, NO_x Simultaneous abatement) -SNOX(SO_x, NO_x Simultaneous abatement)

2.3 스크리버 시스템

스크리버는 액적, 액막, 기포 등에 의해 가스를 세정하여 입자에 부착하거나 입자간의 응집을 촉진시켜 가스 속에 부유하는 고체 또는 액체 입자를 포집하는 장치를 말하며 그 형태는 Fig. 2.1과 같다. 스크리버의 포집 원리는 1) 입자에 액적을 충돌시켜 부착 2) 확산에 의한 입자간의 응집 3) 습도 증가에 의한 입자의 부착 응집 4) 액막, 기포에 입자의 부착 등에 의해 입자를 포집하게 된다. 이 때 액적, 액막, 기포에 사용되는 액체는 주로 물을 사용하며, 액적이 역류되는 것을 막기 위해 액적제거기(Dimister)를 설치해 사용하게 된다.

스크리버의 목적으로는 크게 두 가지가 있으며, 그것은 바로 입자상의 물질 제거와 가스상의 오염물질 제거이다. 입자상 물질의 제거는 공기 중에 부유하는 입자들의 관성력에 의존한다. 정전기력도 또한 작용하지만 관성력에 비하여 크게 작용하지는 않는다. 입자상의 물질 제거에 사용되는 원리는 충돌, 확산이 있으며, 그 중 충돌은 입자상의 물질을 제거하는 가장 일반적인 방법이다. 오염물질을 가속시켜서 물방울에 충돌시키는 방법으로 입자의 운동에너지가 물방울의 표면 장력을 관통하여 물방울이 입자를 감싸게 되어 포집되는 원리는 이용한 것이다. 그리고 확산은 정전기력이 대두되기 시작하는 $0.5\mu\text{m}$ 이하의 입자상 물질에서 가장 현저한 현상이다. 이러한 미세한 입자상의 물질들은 분사되는 세정수로 인하여 불규칙한 가스밀도와 난류상태로 가스흐름을 따라서 스크리버로 들어온다. 확산 운동에 의하여 이 미세한 물질들은 포집용 세정액과 오염물질 사이의 매우 적은 에너지 차에 의하여 액적과 접촉하게 되어 포집되는 원리를 이용한 것이다. 이러한 확산은 세정수와 가스의 온도차가 클 경우 뚜렷이 나타나고, 증발이 가속될수록 밀도가 변하는 부분을 증가시켜서 입자를 밀도가 큰 부분에서 작은 부분으로 이동하게 만들어 액적과 접촉을 유도하는 원리는 이용한 것이다.

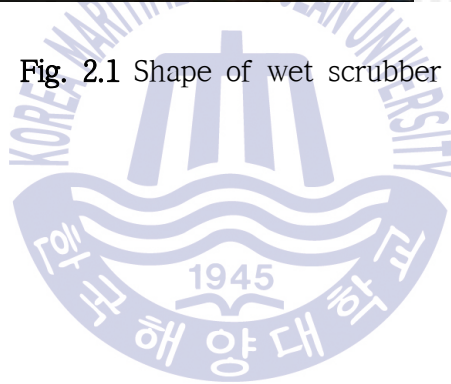
가스상의 오염물질 제거장치는 액적과 가스의 접촉면적을 최대한으로 증가시킴으로써 가스상의 오염물질이 세정수에 흡수되는 원리를 이용한다. 액체를 사

용하여 가스를 흡수하는 모든 스크러버는 여러 가지의 기계적인 방법에 의하여 액체의 표면적을 넓게 만든다. 이러한 방법에는 물 분사, 충격식 트레이, 버블 캡 트레이, 시이브 트레이, 충전물과 그 밖의 혼합된 방식으로 작은 부피 안에서 좀 더 많은 액체표면적을 가지게 하기 위하여 사용된다. 이러한 기술들은 크게 1)세정수가 어떤 형태의 물질(충진물, 그물망 등)을 통하여 흐르도록 하는 방법과 2) 물방울의 분사가 발생 되도록 하는 방법이다. 첫 번째 방법은 가스가 세정액의 표면과 접촉하며 충전물 등과 접촉하지 않는다. 두 번째 방법은 액구의 표면적이 접촉 면적이 되며, 가장 큰 표면적은 가장 작은 크기의 물방울을 가장 많은 개수로 만들어서 주어진 스크러버의 체적을 채울 때 일어나게 된다.

실제 스크러버의 운전에서 나타나는 $3\mu\text{m}$ 이상의 입자는 관성효과(운동량, 관성, 운동에너지)의 영향을 받아서 이동하는 경향을 갖는 반면, 그 이하의 입자는 가스의 흐름에 따라 이동하며 침전되지 않으며 관성력에 의한 포집이 되지 않는 경향이 있다. 이러한 작은 입자는 정전기력과 차가운 쪽으로 끌리는 온도편차, 세정수의 수증기압, 물방울의 크기에 따라 영향을 받는다. 작은 입자 제거가 목적인 장치의 경우 설계자는 비관성의 주된 요인들 중 하나 또는 그 이상의 높은 가능성을 가진 환경을 조성하려고 노력해야 한다. 오염지역 내에서 작은 물방울의 밀도를 높게 만들고 효과적인 입자제거에 필요한 충분한 시간동안 완벽한 환경을 유지함으로써 달성된다(Ko et al., 2014).



Fig. 2.1 Shape of wet scrubber



제 3 장 스크러버 내부 구조 기초 연구

본 장에서는 스크러버 내부 구조 변형에 따른 가스 유동의 경향을 파악하기 위하여 기초 연구를 진행하였다. 기체 단상유동을 이용해 스크러버 내부에 설치한 가이드 각도를 변형시키거나 배플을 설치하는 두 가지 방법을 통해 해석을 진행하였으며, 그에 따른 압력강하와 유동의 길이를 분석하여 유동의 경향을 파악하는 동시에 최적의 내부 구조를 찾고자 하였다.

3.1 수학적 모델 및 계산 조건

3.1.1 수학적 모델

스크러버 내부 유동계산에 적용된 전달 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{3-1}$$

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \tag{3-2}$$

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

에너지 방정식은

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla U + S_E \tag{3-4}$$

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.

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} = \frac{a_1 k}{\max(a_1, (\frac{\partial u}{\partial y}) F_2)} \quad (3-5)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3-6)$$

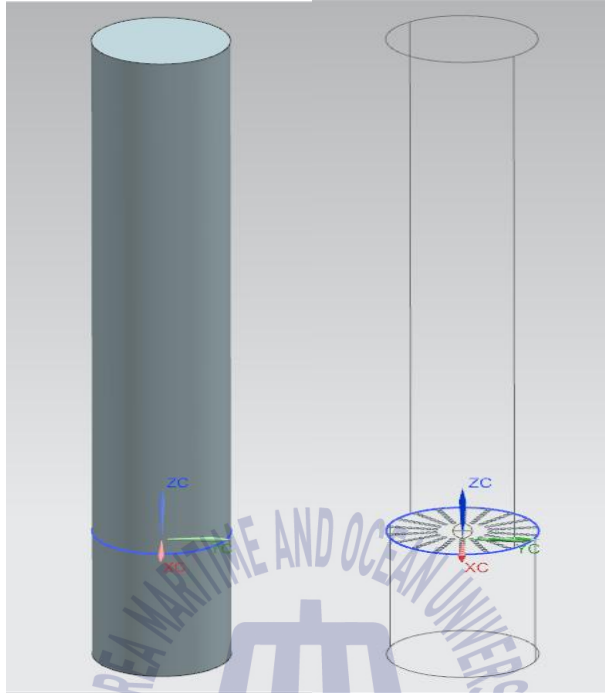
$$\arg_2 = \max(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega}) \quad (3-7)$$

k 은 단위 질량당 난류 운동 에너지, ω 은 각 속도를 나타낸다.

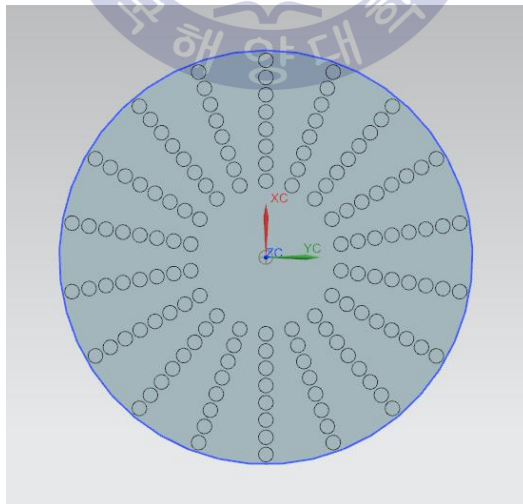


3.1.2 계산 조건

본 논문에서는 스크러버 내부 구조 변형에 따른 기초 연구로 인라인 타입의 습식 스크러버의 내부 구조가 유동과 압력에 미치는 영향을 분석하였다. 본래 스크러버는 액체와 기체의 다상 유동이지만, 본 논문에서는 Guide angle과 배플이 배기가스 유동의 형태와 거리에 미치는 영향을 해석하기 위하여 기체 단상유동을 사용하였다. Fig. 3.1 (a)은 직경 840mm, 높이5000mm을 나타내는 스크러버 내부를 3D CAD를 이용해 모델링 한 형상이다. 높이 3000mm의 원통 1개와 높이 1000mm의 원통 2개로 이루어져 있으며 Volume mesh를 사용하였다. 또 그리드의 형태는 Tetra/Mixed 이며 본 스크러버에 사용된 절점의 수는 총 975,859개이다. Fig. 3.1 (b)는 배기가스 유입구를 나타내며 구멍크기는 직경 30mm 이고 개수는 144개이다. Fig. 3.1 (c)은 내부의 유입구멍을 지난 후 부딪히는 가이드의 형상을 나타낸다. 각도 θ 는 0° 에서 75° 까지 구분하였다. Fig. 3.2는 모델의 그리드를 나타낸다. 배플의 위치(배플 길이, 배플간격, 배플개수, 유입구멍으로부터의 거리)를 자세하게 설명하기 위한 2차원 형상을 Fig. 3.3에 나타내었고, 설계 변수들은 Table 4과 같다. 유동의 속도는 실제 650kw급 디젤 엔진에 맞는 습식 스크러버에서 유동의 평균 속도인 1.5m/s로 설정하였다.



(a) Inner structure modeling of wet scrubber



(b) Inlet holes



(c) Inlet angle

Fig. 3.1 Modeling of wet scrubber

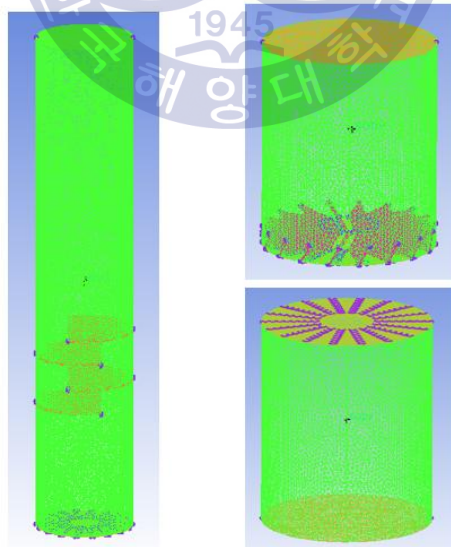


Fig. 3.2 Calculation grids

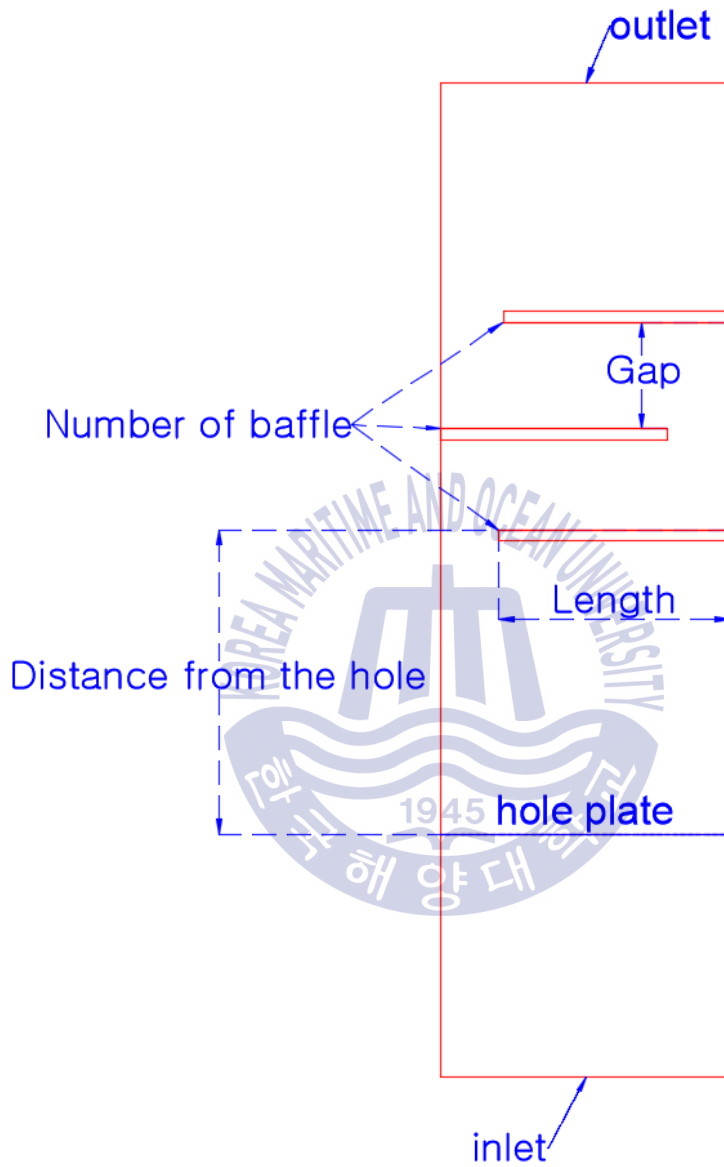


Fig. 3.3 Two-dimensional shape

Table 4 Design variables at inlet speed of 1.5m/s

Angle(°)	0	15	30	45	60	75
Gap between baffle (mm)	100	200	300	400		
Number of baffle	2	4	6	8		
Length (mm)	420		560		700	
Distance from the hole(mm)	1000		2000		3000	
Inlet speed (m/s)	1.5					



3.2 전산 해석 결과 및 고찰

본 해석에서는 스크러버 내부에 가이드 각도, 배플의 길이, 배플간의 간격, 배플의 개수, 내부 유입구로부터의 거리를 변형시키면서 그에 따른 압력강하와 유동의 길이에 대해 분석하였다. 압력강하의 경우, 엔진에 직접적으로 영향을 주기 때문에 압력강하가 적게 걸리도록 설계하는 것이 좋으며, 본 논문에서의 압력강하 제한치는 600pa이하로 설정하였다. 유동의 길이의 경우 1000개의 스트림 라인이 스크러버를 통과하는 유동의 평균거리를 나타내며, 가스 유동의 평균길이가 길다는 것은 세정수와 접촉할 수 있는 가능성이 높다는 것을 의미하기 때문에 입자의 포집과 황산화물 저감에 긍정적인 영향을 준다고 판단할 수 있다.

3.2.1 가이드 각도 변화에 따른 분석

Fig. 3.4는 유동의 속도가 1.5m/s인 조건에서 가이드의 각도가 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°로 변화할 때의 압력강하를 나타낸다. Fig. 3.5는 1000개의 스트림 라인이 스크러버를 통과하는 유동의 평균거리를 나타낸다. 0°의 경우 압력은 73Pa로 가장 낮은 값을 나타냈고, 유동의 평균거리 또한 5.11m로 가장 작은 값을 나타냈다. 15°의 경우 압력은 77Pa이며 유동의 평균거리는 7.49m로 30° 다음으로 가장 긴 유동의 거리를 나타내었다. 30°일 경우는 압력이 92Pa이며 유동의 거리는 가장 긴 값인 7.82m의 값을 나타내었다. 45°의 경우 압력이 120Pa이며 유동의 평균거리는 6.91m를 나타내었다. 60°의 경우 압력은 172Pa이며 유동의 평균거리는 6.75m를 나타내었다. 그리고 75°에서는 압력이 가장 큰 값인 460Pa이며 유동의 길이는 6.58m를 나타내었다. Fig. 3.4를 통해 가이드 각도가 증가함에 따라 압력강하 또한 증가하는 것을 확인할 수 있고, 가이드 각도로 인해 30°까지 유동의 평균거리가 증가하다가 그 후 75°까지 점차 짧아지는 결과를 Fig. 3.5를 통해 확인할 수 있다. 이는 Fig. 3.6을 통해 설명할 수 있는데, Fig. 3.6은 스트림 라인의 흐름과 속도 분포를 나타낸 것이다. 가이드 각도가 생김으로써 모든 유동은 와유동을 형성해 유동의 평

균거리가 길어진다. 하지만 각도가 더욱 증가하면 가이드 직후에 크게 증가된 유속이 전체 와유동의 형성에 좋지 못한 영향을 미친다. 결국 일정 각도까지 즉, 30° 까지 가이드각도에 의해 유동의 평균길이가 길어지다가 30° 이후부터 평균길이가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.



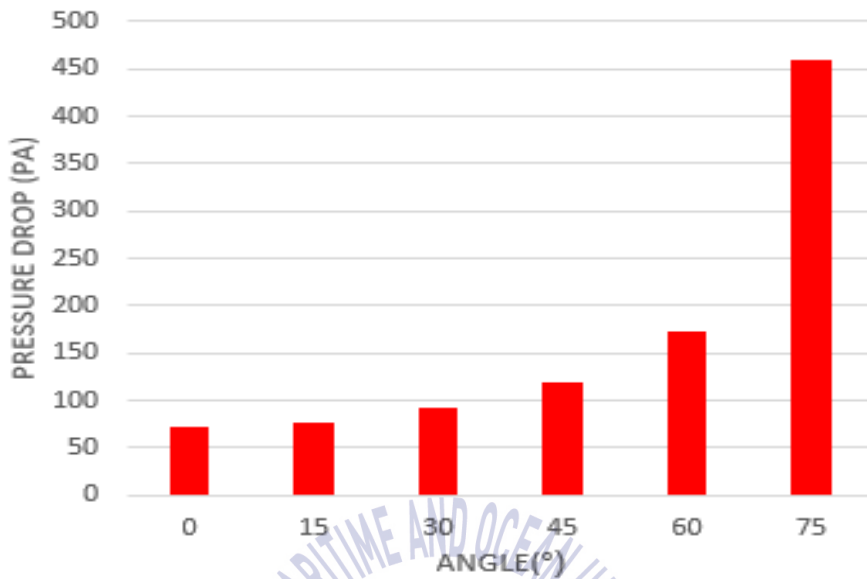


Fig. 3.4 Pressure drop with guide angle

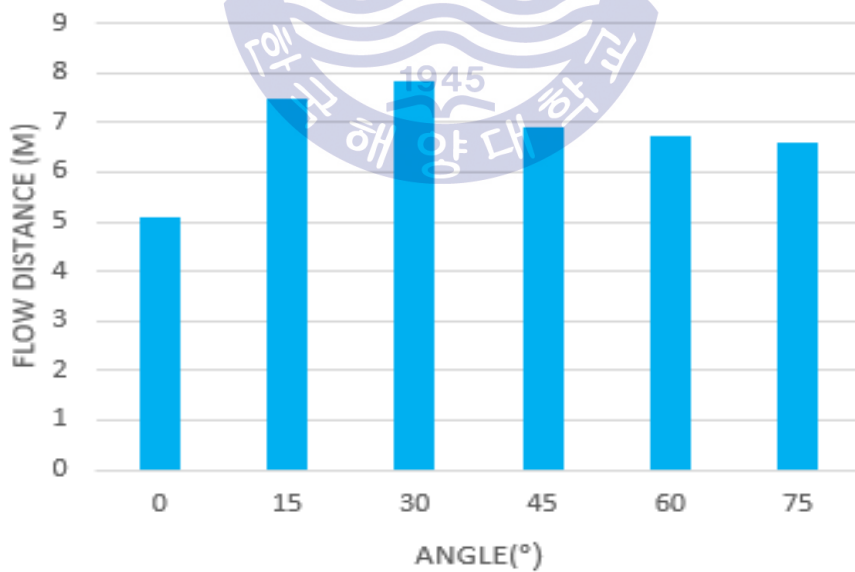


Fig. 3.5 Flow distance with guide angle

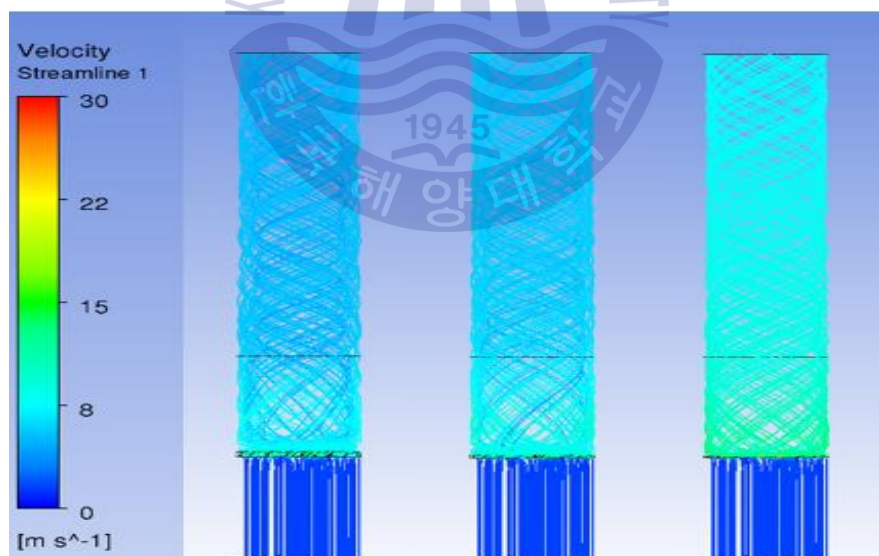
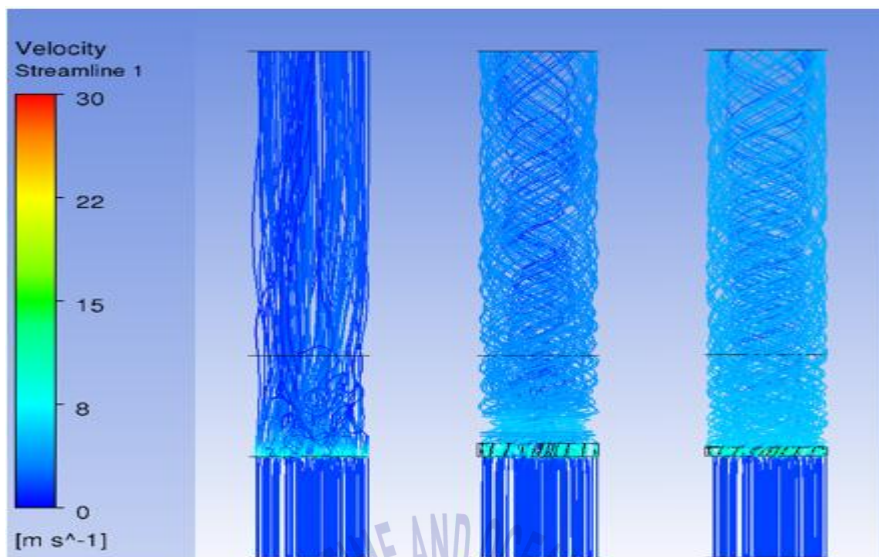


Fig. 3.6 Stream lines with guide angle

3.2.2 배플 길이에 따른 분석

Fig. 3.7은 유동의 속도가 1.5m/s 이고 내부 유입구로부터의 거리가 1000mm, 배플 사이의 간격 200mm, 배플의 개수 4개인 조건에서 배플의 길이가 420mm, 560mm, 700mm일 때의 압력 강하를 나타낸다. Fig. 3.8은 유동의 평균 거리를 나타낸 것이다. 배플의 길이가 420mm 인 경우, 압력은 474Pa이며 유동의 평균 길이는 8.95m 의 값을 나타내었다. 배플의 길이가 560mm 인 경우는 압력은 570Pa 이며 유동의 평균거리는 8.21m를 나타내었다. 길이가 700mm 인 경우 압력은 1460Pa이며 유동의 평균거리는 가장 긴 10.3m 의 값을 나타내었다. 압력 강하는 예상대로 420mm 일 경우 가장 작은 값을 나타내었고 700mm 로 길어지면서 급격히 높아지는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 유동의 평균거리는 길이가 700mm 일 경우 가장 길고, 560mm와 420mm에서는 유동의 길이가 거의 유사한 결과를 나타내었는데 700mm에서 가장 긴 이유는 배플의 길이가 매우 길어서 배플에 부딪힌 유동이 유입구와 배플 사이에서 와유동을 형성하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 3.9은 스트림 라인의 흐름과 속도 분포를 나타낸 것이고 Fig. 3.10은 수직 단면에서의 압력분포이다. Fig. 3.10를 보면 알 수 있듯이 배플을 지나면서 압력이 점차 줄어드는 것을 확인 할 수 있고, 420mm의 경우나 560mm인 경우와 비교해 700mm 인 경우는 압력강하가 매우 높게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 유동의 형태는 비슷하지만, Fig. 3.9에서 볼 수 있듯이 배플의 길이가 증가하면 국부적인 속도가 크게 증가된다. 길이가 700mm 인 경우 속도가 최고 속도인 30m/s에 가깝게 도달하며 매우 빨라지는 것을 확인 할 수 있으며 이는 배플의 길이가 길어지면서 압력강하 또한 많이 걸리기 때문에 속도 또한 빨라지는 것으로 판단된다. 결국 길이가 700mm인 경우는 유동의 평균길이는 가장 길게 나오나, 걸리는 압력강하가 매우 크게 나오는 것을 확인 할 수 있었고, 420mm 인 경우나 560mm인 경우는 유동의 평균길이는 유사하나, 걸리는 압력강하의 값이 420mm인 경우 더 적게 나오는 것을 확인 할 수 있다.

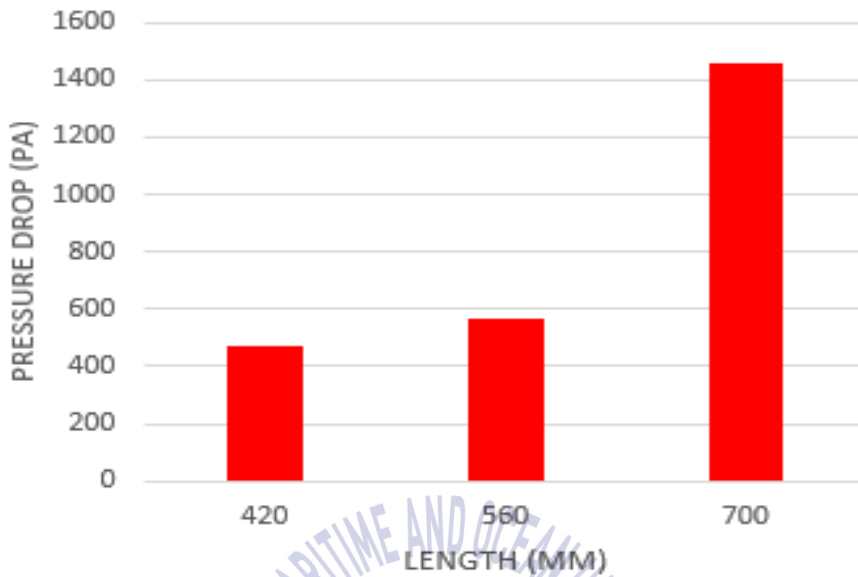


Fig. 3.7 Pressure drop with baffle length

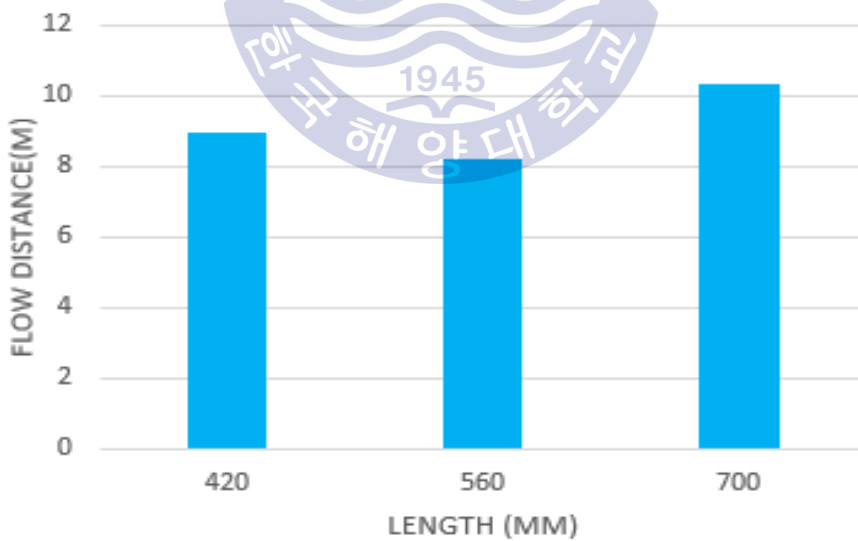
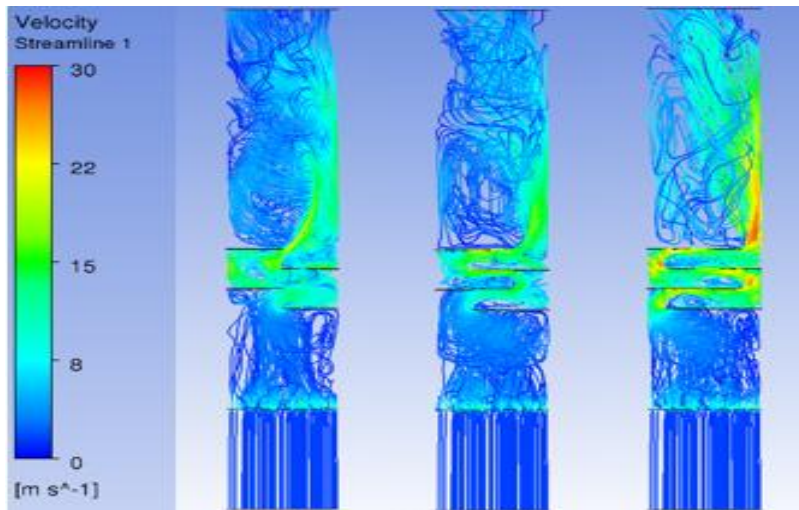
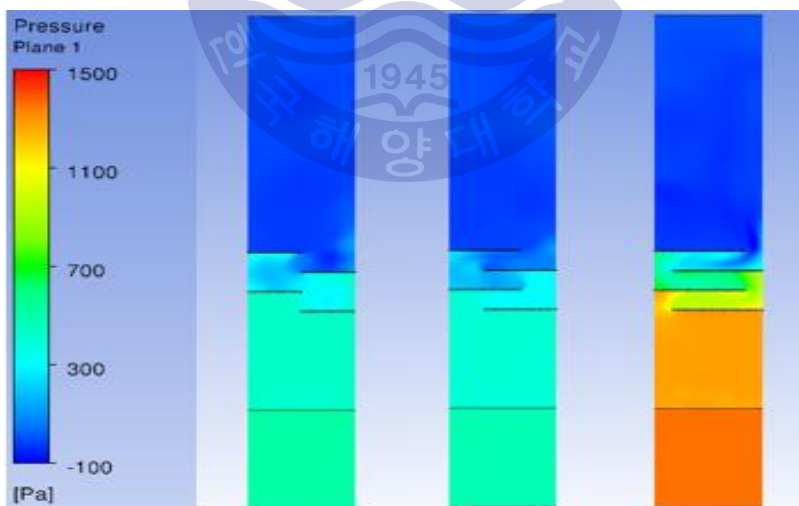


Fig. 3.8 Flow distance with baffle length



(a) 420mm (b) 560mm (c) 700mm

Fig. 3.9 Stream lines with baffle length



(a) 420mm (b) 560mm (c) 700mm

Fig. 3.10 Pressure Distribution with baffle length

3.2.3 배플 간격에 따른 분석

Fig. 3.11은 유동의 속도가 1.5m/s 이고 내부 유입구로부터의 거리가 1000mm, 배플의 길이 560mm, 배플의 개수 4개인 조건에서 배플 사이의 간격이 100mm, 200mm, 300mm, 400mm 일 때의 압력강하를 나타낸다. Fig. 3.12는 유동의 평균 거리를 나타낸다. 배플 사이의 간격이 100mm 인 경우, 입구 압력은 가장 높은 1402Pa이며 유동의 평균길이는 5.76m를 나타내었다. 간격이 200mm 인 경우, 입구 압력은 577Pa이며 유동의 평균길이는 8.38m를 나타내었으며 간격이 300mm 인 경우, 입구 압력은 360Pa이며 유동의 평균길이는 7.8m를 나타내었다. 그리고 간격이 400mm 인 경우, 압력은 가장 낮은 313Pa이며 유동의 평균 길이는 7.91m의 값을 나타내었다. 예상대로 간격이 넓어짐에 따라 압력강하는 작아지는 결과를 나타내었고, 유동의 평균거리는 간격이 100mm 인 경우 가장 작은 값을 나타냈다. 200mm 인 경우 가장 긴 값을 나타내다가 300mm와 400mm에서 점차 감소하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 3.13은 스트림 라인의 흐름과 속도 분포이고 Fig. 3.14은 수직 단면에서의 압력분포를 나타낸 것이다. Figure 9를 보면 알 수 있듯이 간격이 100mm인 경우 배플과 부딪히면서 최고 속도인 30m/s에 도달 하는 것을 확인할 수 있으며 증가한 속도에 의해 배플을 지난 후 와류가 거의 생성되지 않고 직진 형태로 배출되는 것을 확인 할 수 있다. 400mm는 유동이 배플을 통과한 후 와류를 형성되기 전에 배출되는 것을 확인 할 수 있고 그에 비해 200mm와 300mm는 많은 와류가 형성되어 긴 값의 평균거리를 나타내는 것으로 판단된다. 간격이 300mm와 400mm의 경우 Fig. 3.14을 통해 유사한 압력분포를 나타내는 것을 확인 할 수 있으며, 이를 통해 간격이 300mm 이상이 되면 압력강하는 크게 변화하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 결국 간격이 100mm인 경우는 압력강하가 매우 크게 나타나고, 유동의 평균길이 또한 가장 짧은 것을 확인 할 수 있고, 200mm 인 경우는 300mm나 400mm 와 비교했을 때 상대적으로 압력이 많이 걸리나, 유동의 평균길이는 가장 긴 값을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

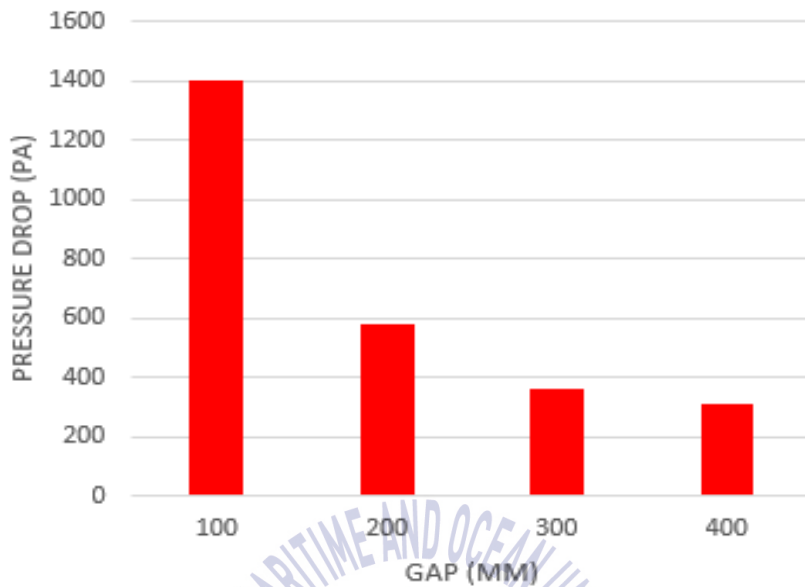


Fig. 3.11 Pressure drop with gap between baffle

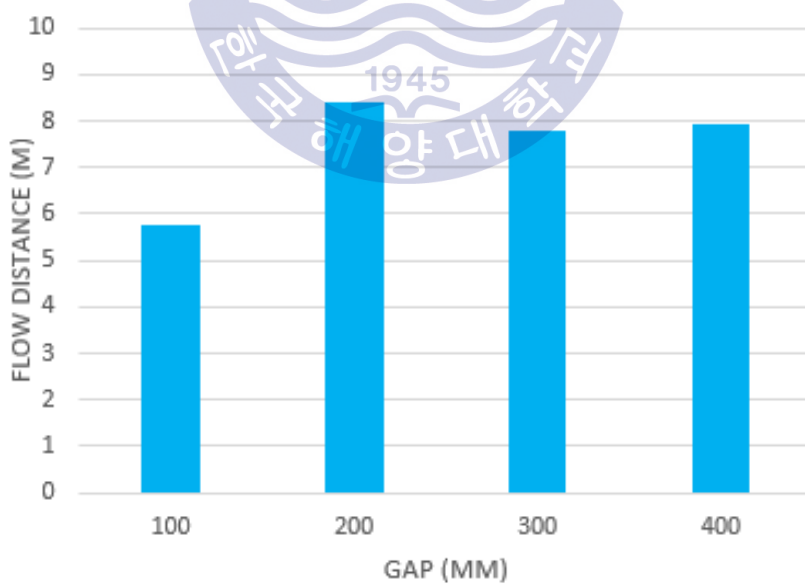
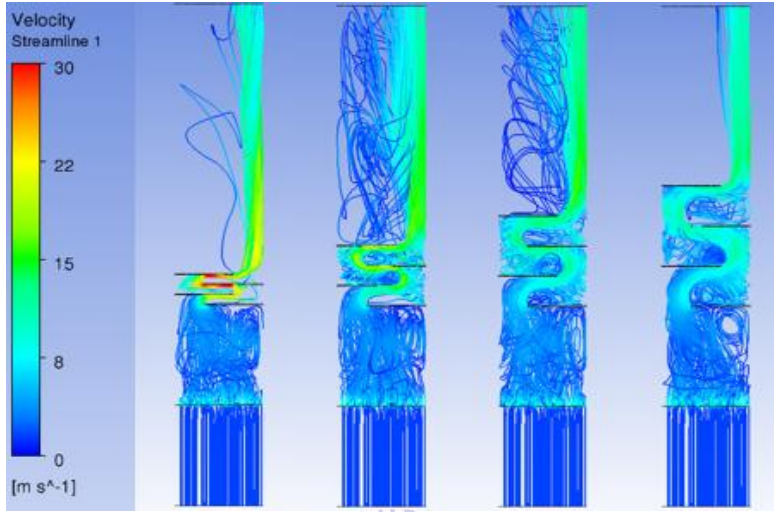
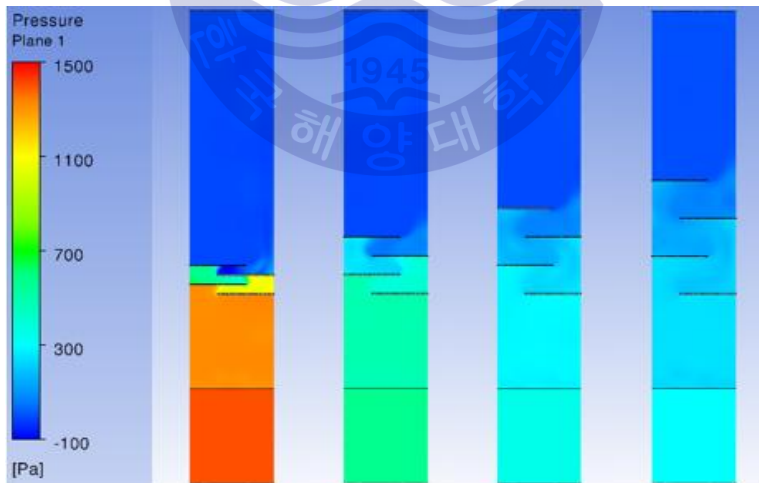


Fig. 3.12 Flow distance with gap between baffle



(a) 100mm (b) 200mm (c) 300mm (d) 400mm

Fig. 3.13 Stream lines with gap between baffle



(a) 100mm (b) 200mm (c) 300mm (d) 400mm

Fig. 3.14 Pressure Distribution with gap between baffle

3.2.4 배플 개수에 따른 분석

Fig. 3.15은 유동의 속도가 1.5m/s 이고 내부 유입구로부터의 거리가 1000mm, 배플의 길이 560mm, 배플사이의 간격이 200mm인 조건에서 배플의 개수가 2개, 4개, 6개, 8개일 때의 압력강하를 나타낸다. Fig. 3.16는 유동의 평균 거리를 나타낸 것이다. 배플의 개수가 2개인 경우, 압력은 가장 낮은 값인 229Pa이며 유동의 평균길이 또한 6.75m 로 가장 작은 값을 나타내었다. 배플의 개수가 4개인 경우, 압력은 575Pa이며 유동의 평균 길이는 8.02m 의 값을 나타내었다. 배플의 개수가 6개인 경우, 압력은 793Pa이며 유동의 평균길이는 8.79m 의 값을 나타내었다. 배플의 개수가 8개인 경우, 압력은 가장 높은 1030Pa이며 유동의 평균 길이는 8.69m의 값을 나타내었다. 개수가 많아짐에 따라 압력 강하는 커지는 결과를 나타내었고, 유동의 평균거리는 개수가 증가함에 따라 증가하다가 8개에서부터 다시 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 3.17은 스트림 라인의 흐름과 속도 분포이고 Fig. 3.18은 수직 단면에서의 압력분포를 나타낸 것이다. Fig. 3.17을 통해 개수가 8개인 경우를 제외한 나머지의 경우, 배플을 지난 후 와류가 형성되는 것을 확인 할 수 있으나 8개인 경우는 충분한 공간이 없어 와류가 형성되기 전에 배출되는 것을 확인 할 수 있다. 또 유동이 배플을 지나면서 최고속도 20m/s의 속도를 갖게 되는데 배플의 개수가 증가해도 20m/s를 크게 벗어나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 결국 개수가 2개인 경우는 압력강하는 적게 걸리나 유동의 길이 또한 가장 짧은 결과를 나타내었고, 8개의 경우 유동의 평균길이가 길게 나오지만 압력강하는 매우 크게 걸리는 것을 확인 할 수 있다. 스크러버에 허용되는 압력강하의 범위에 따라 달라지지만 4개인 경우와 6개인 경우가 최적이라고 판단되며, 본 논문에서는 상대적으로 평균길이는 짧지만 압력강하가 적게 걸리는 4개를 최적으로 판단하였다.

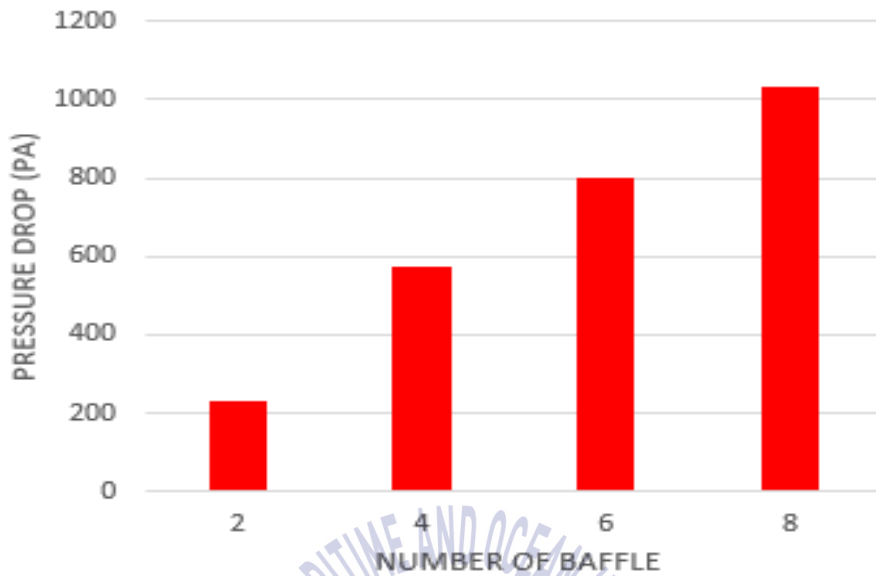


Fig. 3.15 Pressure drop with number of baffle

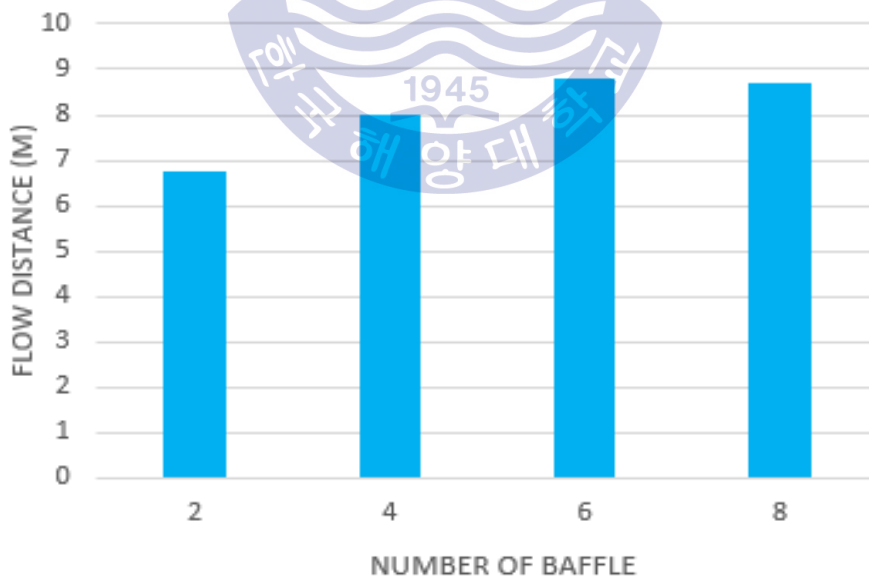


Fig. 3.16 Flow distance with number of baffle

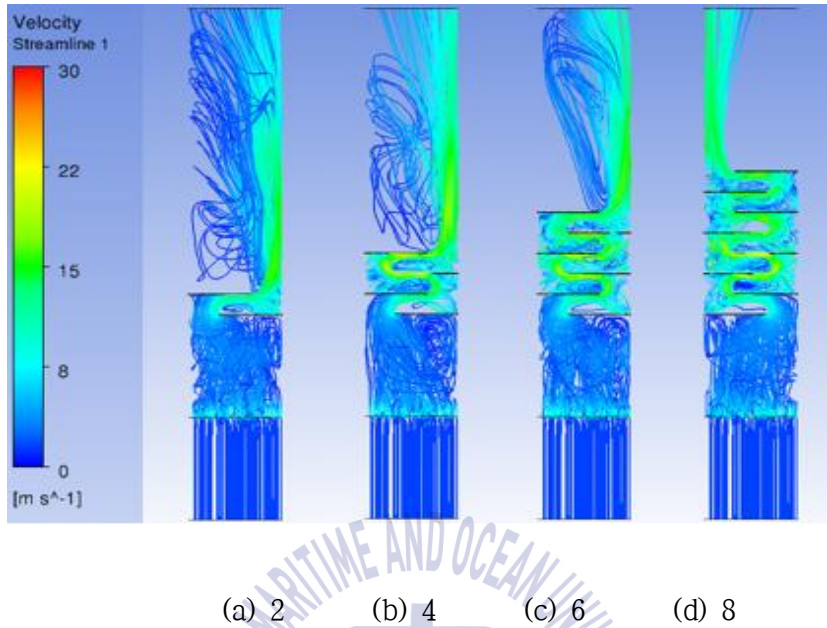


Fig. 3.17 Stream lines with number of baffle

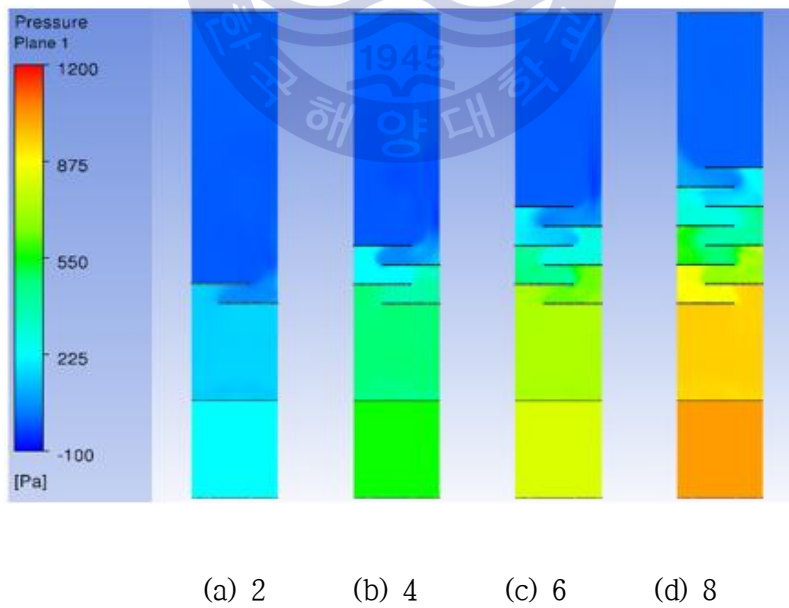


Fig. 3.18 Pressure Distribution with number of baffle

3.2.5 내부 유입구로부터의 거리에 따른 분석

Fig. 3.19은 유동의 속도가 1.5m/s 이고 배플의 개수가 4개, 배플의 길이 560mm, 배플사이의 간격이 200mm인 조건에서 내부 유입구로부터의 거리가 1000mm, 2000mm, 3000mm 일 때의 압력강하를 나타낸다. Fig. 3.20는 유동의 평균 거리를 나타낸 것이다. 유입구로부터의 거리가 1000mm 인 경우 압력은 583Pa이며 유동의 평균길이는 7.92m의 값을 나타내었다. 그리고 거리가 2000mm 인 경우는 압력이 551Pa, 유동의 평균거리가 6.65m 의 값을 나타내었다. 거리가 3000mm인 경우는 압력이 582Pa이며 유동의 평균거리가 6.59m 의 값을 나타내었다. Fig. 3.21은 스트림 라인의 흐름과 속도 분포이고 Fig. 3.22은 수직 단면에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 배플이 위치하는 거리가 증가해도 압력강하는 유사한 값을 가지는 것을 확인 할 수 있고 유동의 평균길이는 1000mm 일 경우에 가장 긴 것을 확인 할 수 있다. 이는 유동이 배플을 지난 후에 생기는 와류에 의한 것으로 판단되며, 2000mm 나 3000mm 인 경우는 1000mm와 비교해 와류가 형성 될 수 있는 충분한 공간이 없기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 3.21을 보면 알 수 있듯이 배플을 지날 때의 속도 분포도 별 차이를 보이지 않고 최고 속도 또한 20m/s를 넘어가지 않는 것을 알 수 있다. 결국 압력강하는 거리에 상관없이 유사한 값을 보였으며, 유동의 평균거리가 와류에 의해 1000mm에서 가장 긴 결과를 확인 할 수 있다.

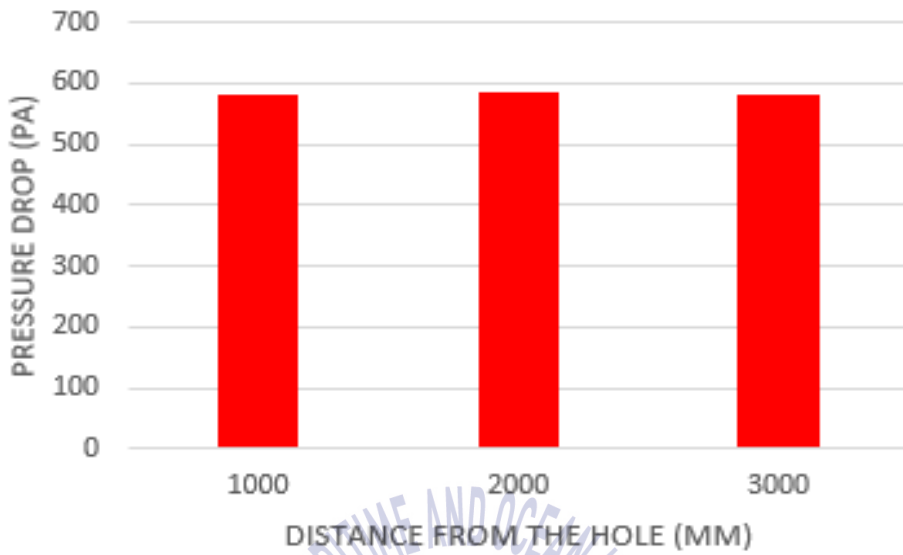


Fig. 3.19 Pressure drop with distance from the hole

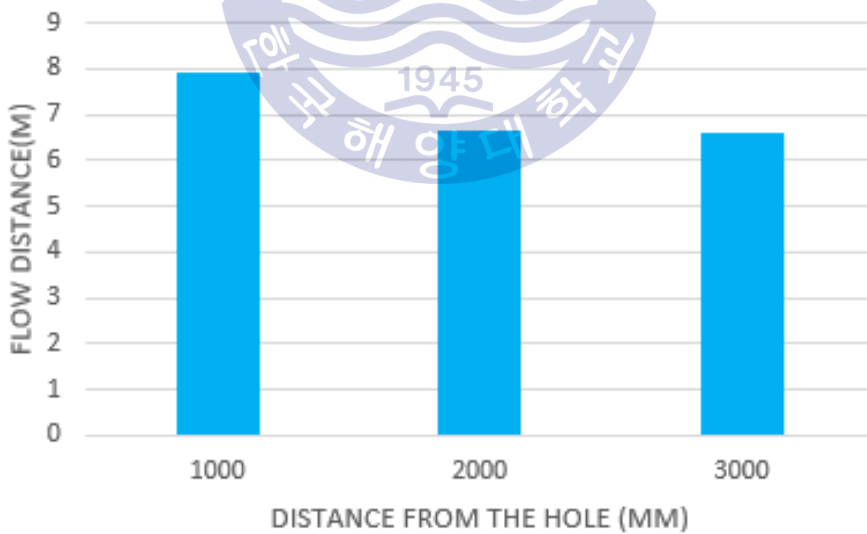
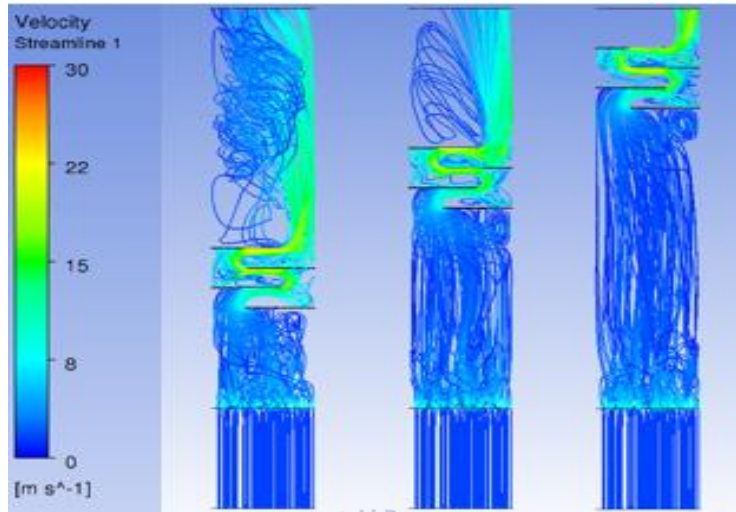
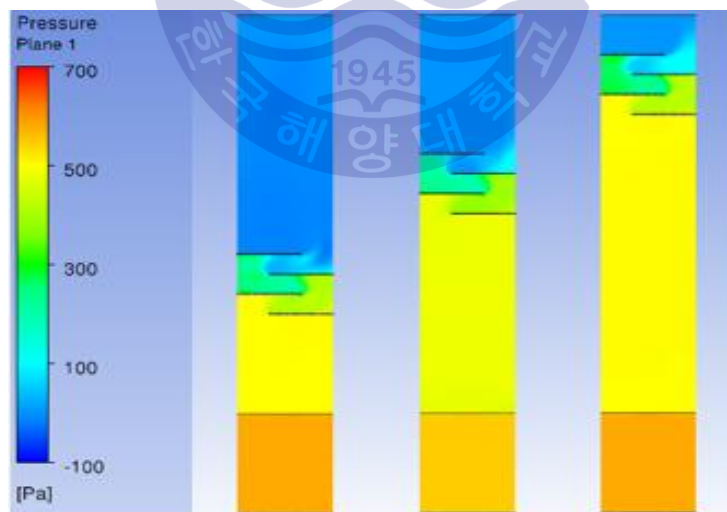


Fig. 3.20 Flow distance with distance from the hole



(a) 1000mm (b) 2000mm (c) 3000mm

Fig. 3.21 Stream lines with distance from the hole



(a) 1000mm (b) 2000mm (c) 3000mm

Fig. 3.22 Pressure Distribution with distance from the hole

3.3 요약

본 연구에서는 인라인 스크러버의 내부구조 변형에 의한 최적의 내부 설계를 위해 압력강하와 유동의 평균거리를 측정하였다. 압력강하의 경우 600pa의 제한치 내에서 적게 걸리는 경우 최적으로 판단하였다. 또한 세정수와의 접촉 가능성을 높여주는 유동의 길이가 긴 것을 최적으로 판단하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 스크러버 내부 가이드 각도에 의해 와유동이 형성 되어 유동의 평균거리가 길어지는 결과를 나타내었다. 하지만 30° 를 초과한 각도에서는 감소하는 결과를 나타내었고 압력강하 또한 급격히 높아져 좋은 효율을 나타내지 못하였다. 유동거리가 가장 길고 압력강하가 비교적 낮은 30° 가 최적으로 판단된다.

2) 스크러버 내부에 배플의 길이, 간격, 개수, 유입구로부터의 거리별로 해석을 수행하였으며 배플을 설치함으로써 유동의 평균거리가 길어지는 결과를 나타내었다. 배플의 길이, 간격, 개수, 유입구로부터의 거리별로 유동의 평균거리가 가장 길거나 압력강하가 낮은 구조를 최적으로 판단하였고 최적조건은 배플의 길이 420mm, 간격 200mm 개수 4개, 유입구로부터의 거리 1000mm 이다.

종합적으로 볼 때 최적의 가이드 각도는 30° 최적의 배플구조는 길이 420mm, 간격 200mm, 개수 4개, 구멍으로부터의 거리는 1000mm이다.

제 4 장 650kw급 스크러버 제시 및 분석

본 장에서는 스크러버의 새로운 내부구조를 제시하고 내부 형상을 변형시켜 유동특성을 분석하였다. 기체와 액체 2상 유동을 사용하여 배기가스의 흐름과 노즐 분무를 모사하였으며, 그에 따른 압력강하, 온도, 속도 변화, 물 분포를 분석하여 최적의 내부구조를 찾고자 하였다.

4.1 수학적 모델 및 계산 조건

4.1.1 수학적 모델

스크러버 내부 유동계산에 적용된 전달 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4-1)$$

모멘텀 방정식은

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (4-2)$$

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U \quad (4-3)$$

에너지 방정식은

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

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.

스크러버에서의 가스 유동 해석을 위하여 대표적인 난류모델인 $k-\epsilon$ 모델

(Launder & Spalding)을 사용하였고, 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\gamma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] \quad (4-5)$$

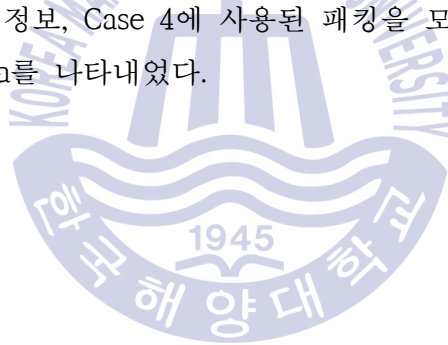
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\gamma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \quad (4-6)$$

여기서, κ 는 난류에너지, ϵ 은 난류에너지의 소산율을 나타낸다.



4.1.2 계산 조건

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 5**과 같다. 스크러버의 형태를 기존 선박의 설치에 용이하게 사각으로 설계하였으며, 최소한의 부피를 사용하기 위해 기존 스크러버 외부에 외부 스크러버를 설치하였다. 형상은 NX9.0을 이용해 모델링하였으며 **Fig. 4.23**은 외부 스크러버, Guide vane과 Hole plate, Packing의 위치를 나타내고 **Fig. 4.24**은 Case 3의 형상을 나타낸다. **Fig. 4.25**는 모델의 그리드를 나타낸다. ICEM-CFD를 이용하여 격자를 생성하였으며, 그리드의 형태는 Tetra/Mixed 이고 각각의 Case에 사용된 절점의 수는 약 90만개 정도를 유지하였다. 해석에서는 물과 공기 2상의 유동을 사용하였으며, **Table 6**에 가스유동과 노즐의 정보, Case 4에 사용된 패킹을 모사한 Porous의 정보, 열교환 모델의 Input Data를 나타내었다.



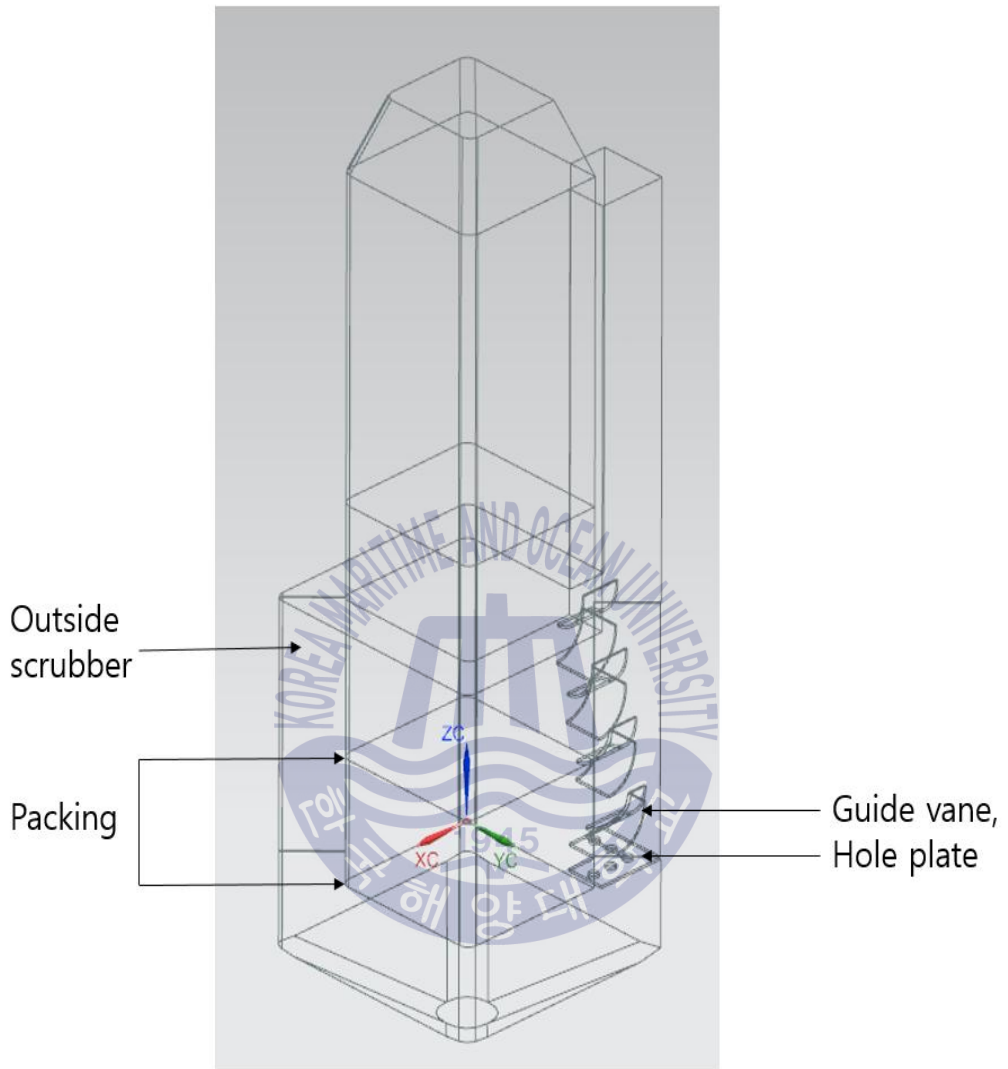
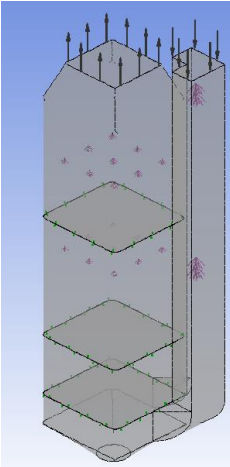
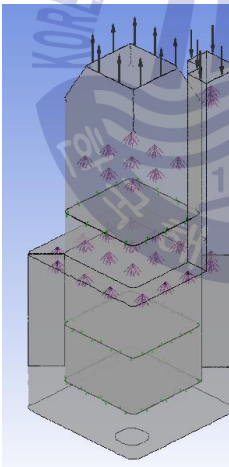
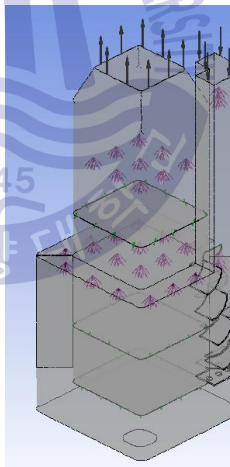
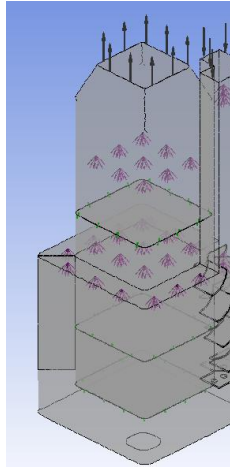


Fig. 4.23 Location of shapes

Table 5 Conditions for each case

Case1	Case2	Case3	Case4
Outside scrubber X	Outside scrubber O	Outside scrubber O	Outside scrubber O
Guide vane, Hole plate X	Guide vane, Hole plate X	Guide vane, Hole plate O	Guide vane, Hole plate O
Packing X	Packing X	Packing X	Packing O
			

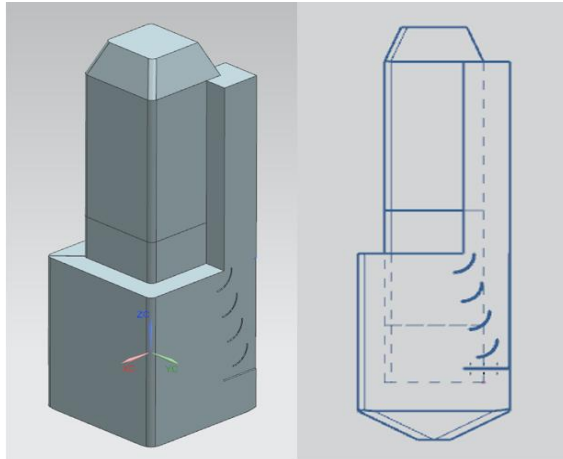


Fig. 4.24 Shape of case 3

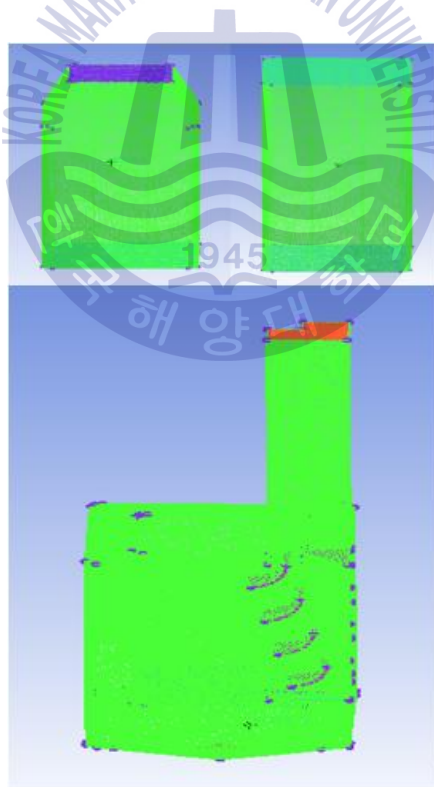


Fig. 4.25 Calculation grids

Table 6 Boundary Condition

Inlet	Material	Air ideal gas
	Morphology	Continuous fluid
	Reference pressure	1[atm]
	Mass flow rate	6.74[kg/s]
	Temperature	222[°C]
Nozzle inlet	Material	Water
	Morphology	Particle transport fluid
	Flow 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 model	Ranz marshall	

4.2 전산 해석 결과 및 고찰

4.2.1 압력 분포 특성

Fig. 4.26은 각 Case 별 스크러버 전단에 걸리는 압력을 나타낸 그래프이며, Fig. 4.26은 형상의 한 단면을 압력분포로 나타낸 것이다. Case 1의 경우 스크러버 전단에서 걸리는 압력이 511pa를 나타내었으며, 배기가스 유입구의 반대편 벽면에도 국부적으로 300pa 이상의 압력이 걸리는 것을 확인 할 수 있다. Case 2의 경우 Case 1에 비해 57%의 압력이 저하된 221pa이 걸리는 것을 확인 할 수 있으며, 외부 스크러버의 가장 밑에 존재하는 Water outlet주위에 국부적인 압력이 걸리는 것을 확인 할 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 확인 할 수 있다. Case 4의 경우 패키징이 없는 Case 3과 비교해 약 280%의 압력 증가를 확인 할 수 있다. 결과적으로 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.

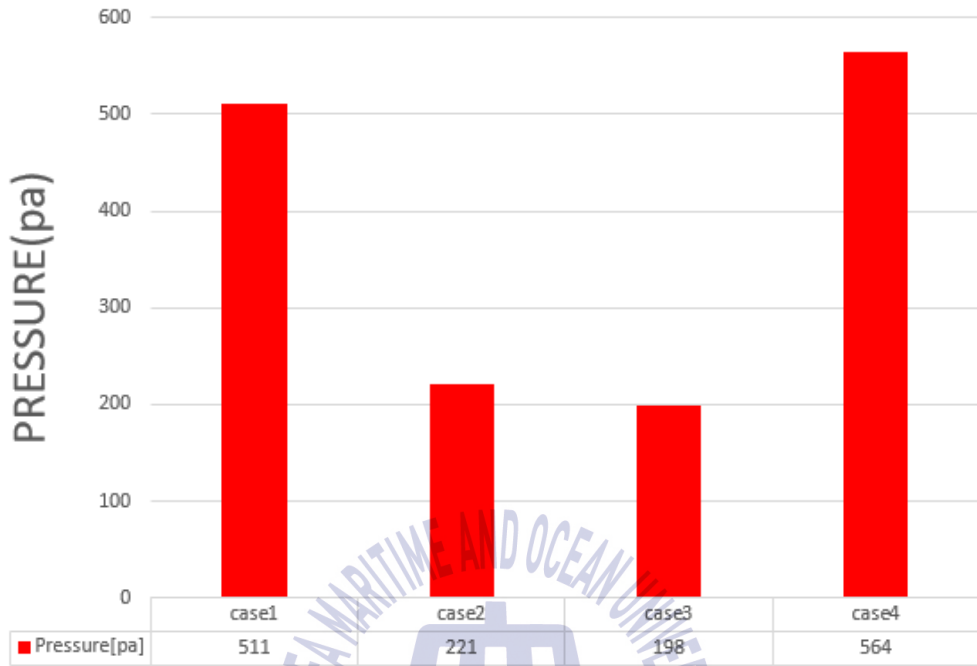
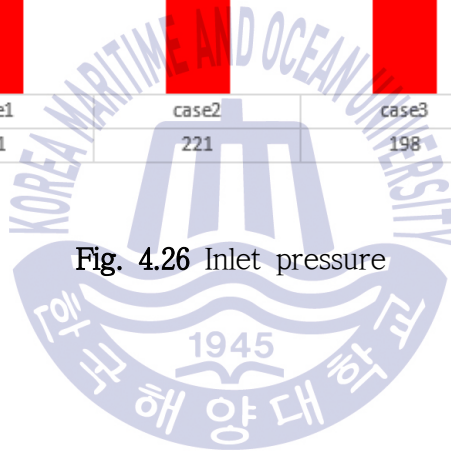
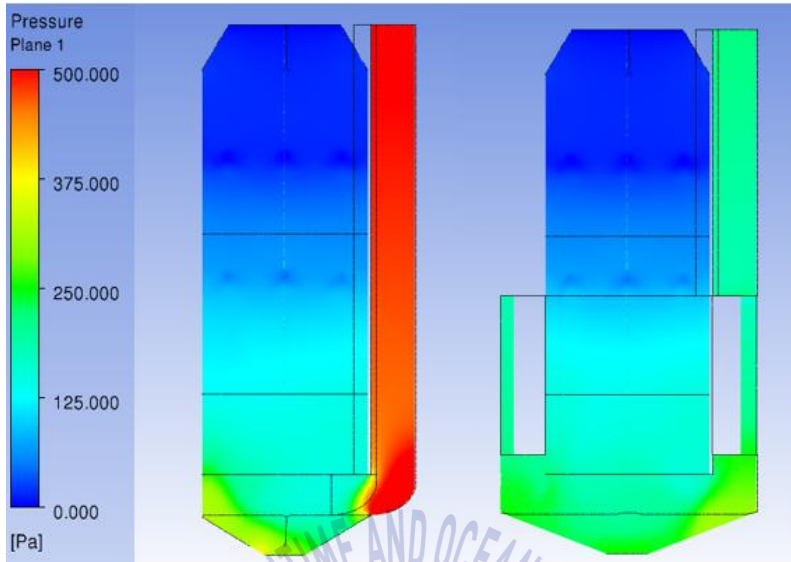


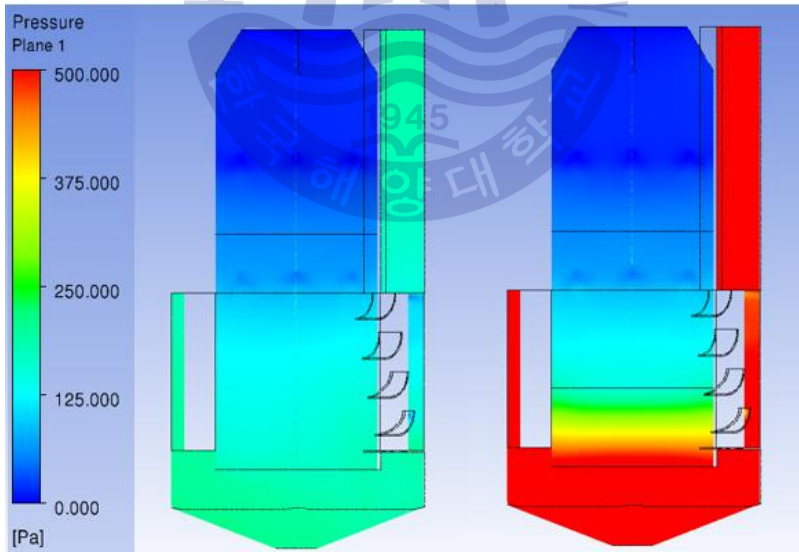
Fig. 4.26 Inlet pressure





(a) Case 1

(b) Case 2



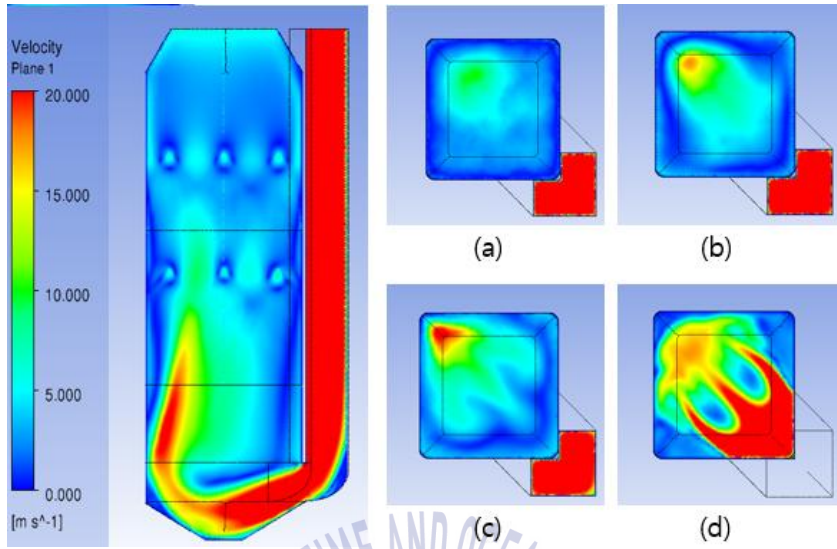
(c) Case 3

(d) Case 4

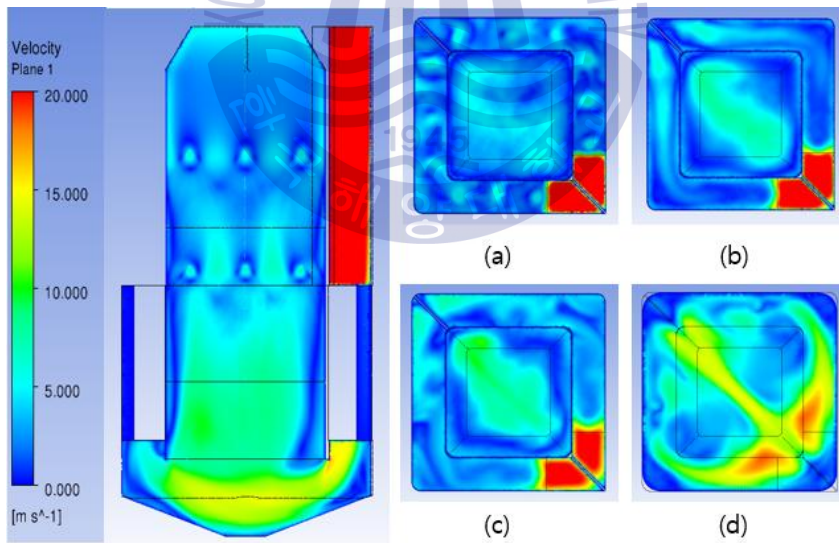
Fig. 4.27 Pressure distribution

4.2.2 속도 분포 특성

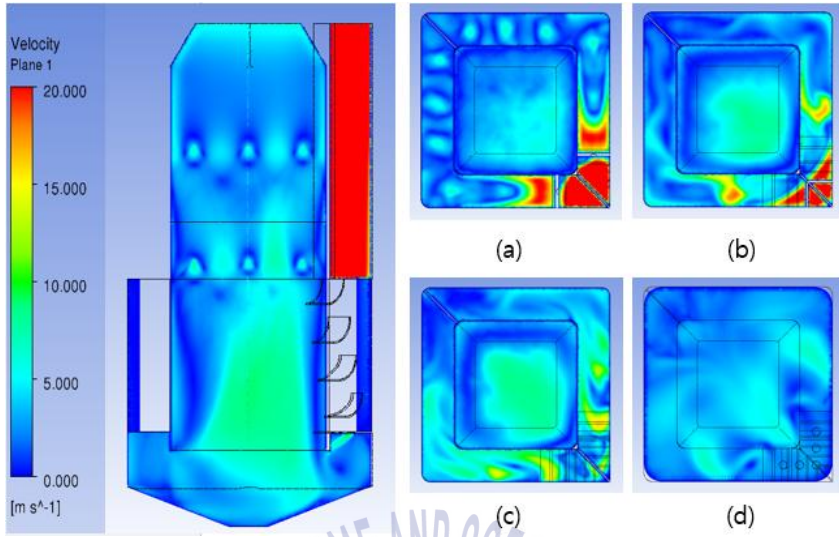
Fig. 4.28은 Case별로 단면을 속도로 나타낸 것과 모델의 가장 아래인 Water outlet을 기준으로 (a) 3m, (b) 2.2m, (c) 1.4m, (d) 0.5m일 때의 xy평면을 나타낸다. Case 1의 경우 스크러버 내에서 배기가스가 분산되지 못하고 높은 속도를 유지한 채 모서리부분을 따라 위로 이동하는 것을 확인 할 수 있다. Case 2는 Case 1에 비해 내부 스크러버에서의 속도가 분산되는 것을 확인 할 수 있지만, 배기가스가 외부 스크러버에 고르게 분포되지 않고 높은 속도를 유지한 채 외부 스크러버 바닥인 Water outlet에 도달하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 외부 스크러버 바닥에 국부적으로 20m/s에 가까운 높은 속도를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 그에 비해 Case 3은 Guide vane과 Hole plate에 의해 배기가스가 외부 스크러버로 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 스크러버에서의 속도가 5m/s이하로 균일해 지는 것을 확인 할 수 있다. 결과적으로 외부 스크러버에 의해 배기가스가 쏠리는 현상이 적어지지만, 스크러버 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 스크러버에서의 속도가 급격히 감소하여 내부 스크러버에서의 입자 포집 가능성을 높여 주는 것을 확인 할 수 있다.



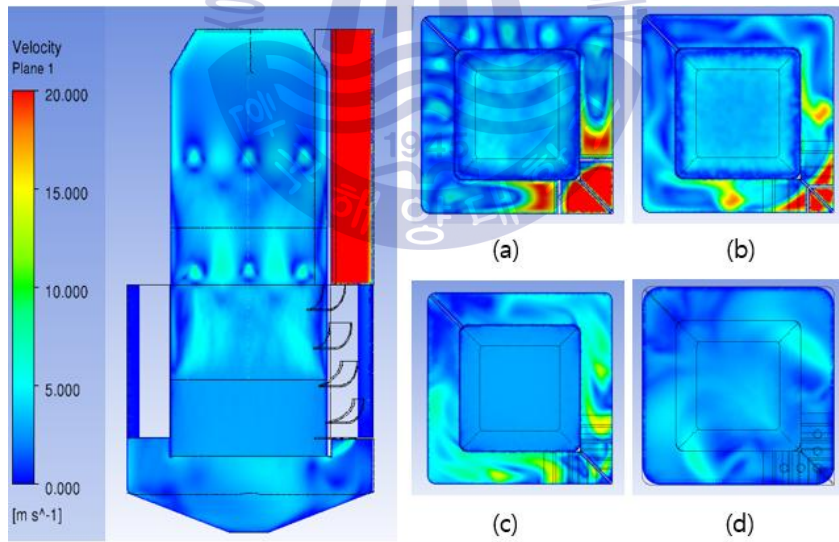
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

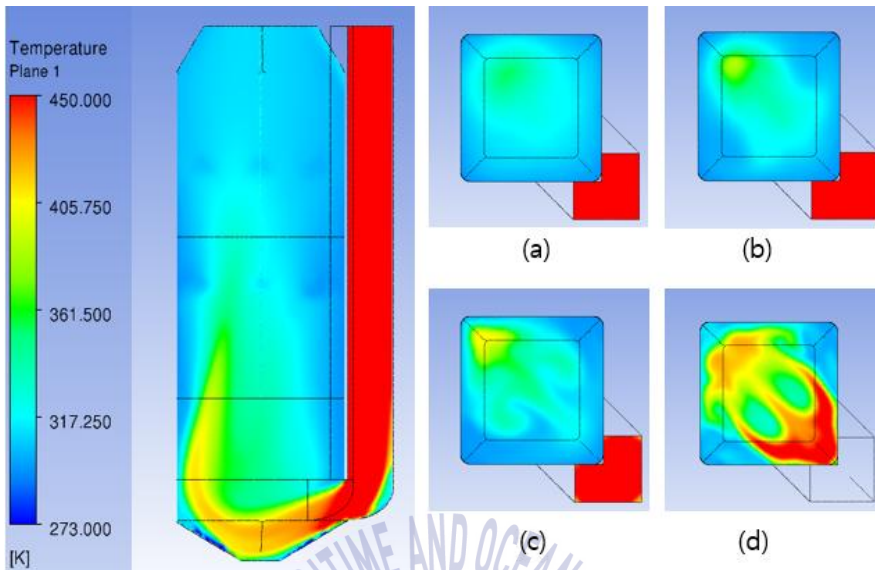


(d) Case 4

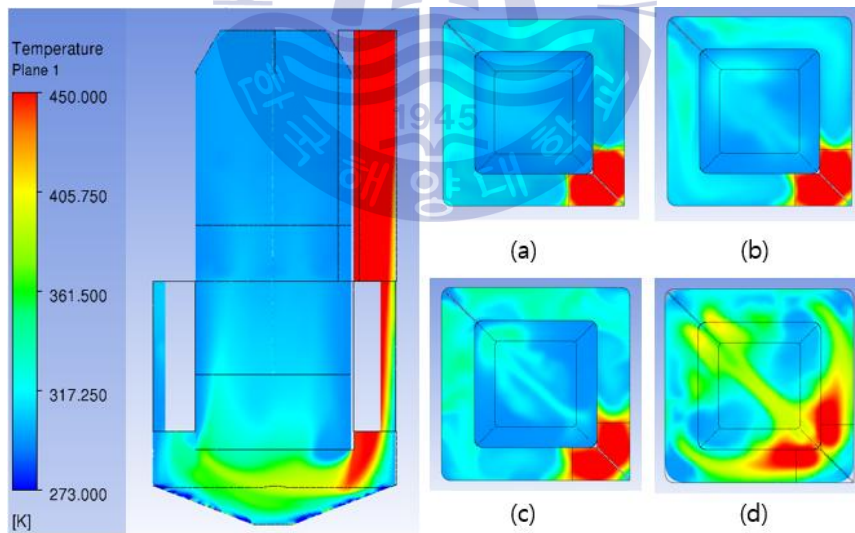
Fig. 4.28 Velocity distribution

4.2.3 온도 분포 특성

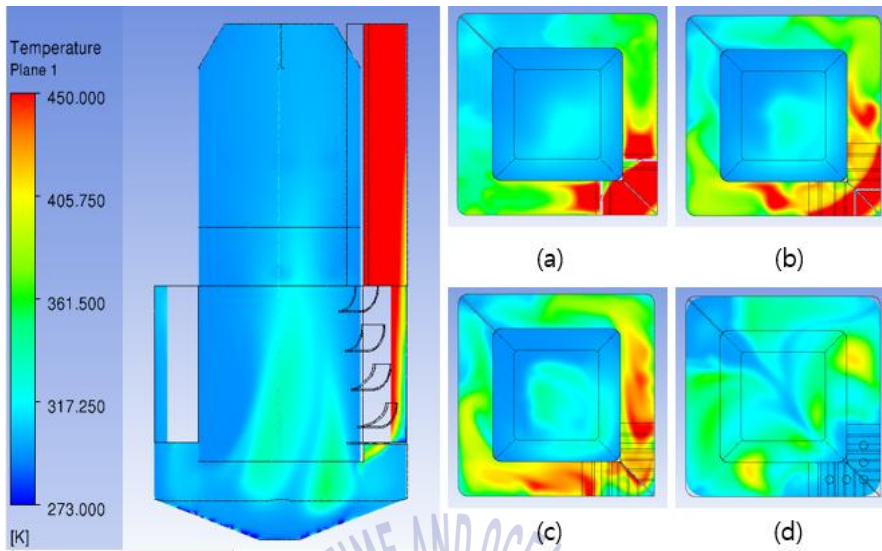
Fig. 4.29는 Case별로 단면을 온도로 나타낸 것과 모델의 가장 아래를 기준으로 (a) 3m, (b) 2.2m, (c) 1.4m, (d) 0.5m일 때의 xy평면을 나타낸다. 각 Case별로 속도 분포와 유사한 형태를 가지는 것을 확인 할 수 있다. Case 1의 경우 속도와 마찬가지로 배기가스가 쏠리는 현상을 나타내며, 그로인해 3m에서도 부분적으로 100°C에 가까운 높은 온도를 확인 할 수 있다. Case 2는 배기가스가 높은 온도를 유지한 채 외부 스크러버 바닥인 Water outlet까지 도달하며 대부분의 열 교환이 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°C 이하의 균일한 온도를 나타낸다. 열 교환이 발생했다는 건 밀도 변화에 의한 확산현상이 일어났으며 이러한 확산현상에 의해 미세입자의 포집이 증가했다고 판단할 수 있다. 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 활발한 입자의 포집이 이루어지게 하며, Packing을 지난 후 매우 낮고 균일한 온도 분포를 나타낸다.



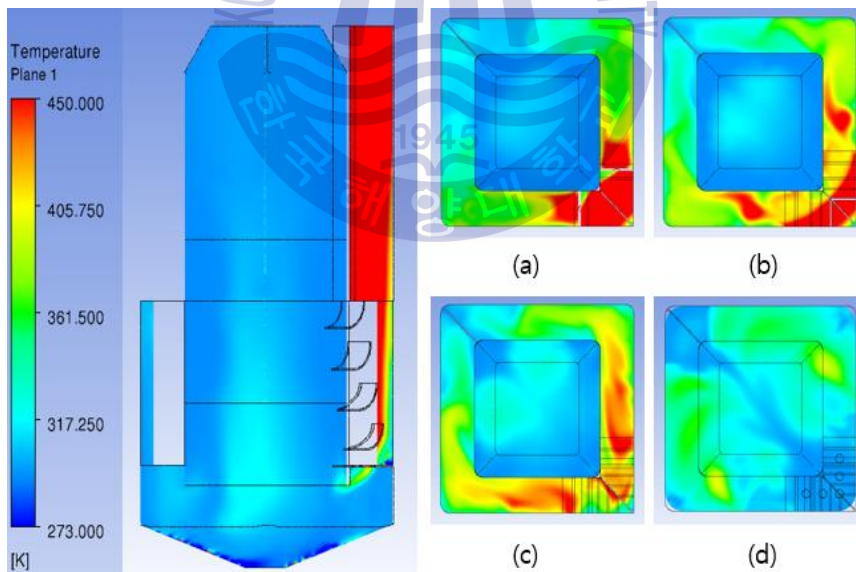
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



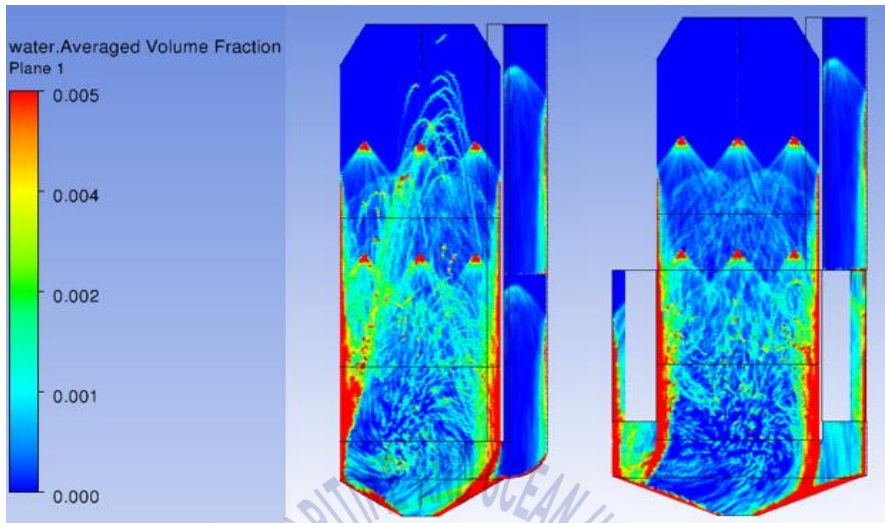
(d) Case 4

Fig. 4.29 Temperature distribution

4.2.4 물 분포 특성

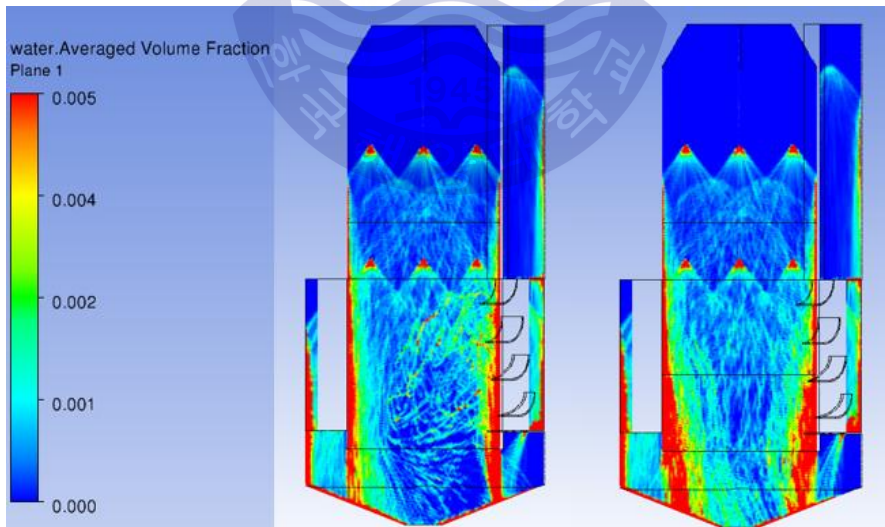
Fig. 4.30은 형상의 단면을 Water averaged volume fraction으로 나타낸 것이다. Case 1과 Case 2의 경우 세정수가 벽면을 따라 흐르다가 배기가스의 영향을 받아 쏠리는 현상을 확인 할 수 있다. 세정수는 액체표면적을 크게 하기 위하여 작은 크기의 물방울을 많은 개수로 만들어 스크러버의 체적을 채워야 한다. 하지만 이러한 쏠림 현상은 세정수가 넓게 분포되지 못하게 해 입자의 포집에 좋지 않은 영향을 줄 것으로 판단된다. 이에 따라 Guide vane과 Hole plate를 설치함으로써 세정수가 쏠리는 현상이 줄어들 것을 확인 할 수 있으며, Packing에 의해 세정수가 넓게 분포되며 큰 액체 표면적을 가지는 것을 확인할 수 있다.





(a) Case 1

(b) Case 2



(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 4.30 Water volume fraction distribution

제 5 장 결론

본 연구에서는 스크러버의 내부구조 변형에 의한 최적의 내부 설계를 위해 기초연구를 수행하였으며, 새로운 내부구조를 제시하고 형상을 변형시켜 유동 특성을 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 기초연구를 종합하면 최적의 가이드 각도는 30° 최적의 배플구조는 길이 420mm, 간격 200mm, 개수 4개, 구멍으로부터의 거리는 1000mm이다.

2) 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.

3) 외부 스크러버에 의해 배기가스가 쏠리는 현상이 적어지지만, 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 내부 스크러버에서의 입자의 포집 가능성을 높여주는 것을 확인 할 수 있다.

4) 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.

5) 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 설

치함으로써 세정수가 쏠리는 현상이 줄어든 것을 확인 할 수 있으며, Packing에 의해 세정수가 넓게 분포되며 큰 액체 표면적을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

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 포집 측면에서 최적의 형상인 것을 확인 하였다.



참고문헌

1. J. C. Ko, H. O. Song, G. S. Sin, Hybrid Scrubber, Seoul, Korea : G. S. Song, 2014
2. C. H. Lee, D. G. Hyun, 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, 88-88, 2014 (in Korean)
3. C. H. Lee, H. S. Jang, S. M. Koo, "Computational Analysis on the Control of Droplet Entrained in the Exhaust from the Spray Type Scrubber system", Clean technology, v.21, no.3, pp.191 - 199, 2015
4. S. W. Ko, K. C. Ro, H. S. Ryou, "Numerical Study on the Optimal Design of Spray System in Packed Bed Scrubber", Journal of computational fluids engineering, v.12, no.1 = no.36, pp.28 - 34, 2007
5. K. Son, J. Y. Lee, 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, v.39, no.3, pp.217 - 222, 2015
6. B. W. Han, H. J. Kim, Y. J. Kim, K. S. Han, "Removal Characteristics of Gaseous Contaminants by a Wet Scrubber with Different Packing Materials", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, v.23 no.6, pp.744 - 751, 2007
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, Y. H. Lee, "Designation of fuel oil scrubber nozzle positioning using CFD analysis and PIV methods", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, v.39, no.7, pp.773 - 778, 2015
9. J. S. Choi, J. G. Kim, B. H. Park, J. Y. Lee, "Study on Wet Scrubber for SOX/NOX Treatment in Ship Flue Gas", Journal of oil & applied science, v.34, no.1, pp.183 - 188, 2017

10. A. Pourmohammadbagher, E. Jamshidi, H. Ale-Ebrahim, B. Dabir, M. Mehrabani-Zeinabad, "Simultaneous removal of gaseous pollutants with a novel swirl wet scrubber", Chemical engineering and processing = Génie des procédés = Verfahrenstechnik, v.50 no.8, pp.773 - 779, 2011
11. P. L. Douglas, F. A. L. Dullien, D. R. Spink, "An investigation of the operating parameters of a low energy wet scrubber for fine particulates", The Canadian journal of chemical engineering, v.54 no.3, pp.173 - 176, 1976
12. K. H. Yoo, H. H. Roh, E. S. Choi, J. K. Kim, "An Experiment on the Particle Collection Characteristics in a Packed Wet Scrubber", Korean journal of air-conditioning and refrigeration engineering, v.15, no.4, pp.305 - 311, 2003
13. A. Hassan, P. Floren, M. Anthony, "Flow visualization and modelling of scrubbing liquid flow patterns inside a centrifugal wet scrubber for improved design " Chemical engineering science, v.173, pp.98 - 109, 2017
14. K. Son, "A Study on Optimal Design of Wet Scrubbers in small and Medium-sized Vessels", Doctor's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Korea maritime and Ocean University, Korea, 2017
15. B. E. Launder and D. B. Spalding, 1972, "Lectures in Mathematical Models of Turbulence," Academic Press, London, England
16. 김성윤 '선박 디젤엔진용 Urea-SCR 시스템의 성능개선을 위한 최적화 연구' 공학박사 학위논문 부산:한국해양대학교 2016.
17. 최병선, 박승수, 박권순, 김영환, "배연탈황, 탈질기술 현황" 한국대기환경학회 1994년 학술대회논문집 제1권, 1994.1, 3-11 (9 pages)