



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.

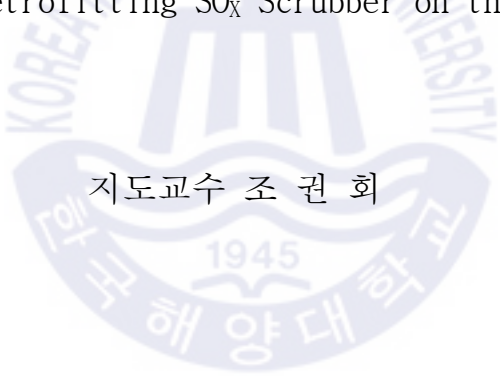
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

선박 스크러버 설치 후 디젤 기관의
성능 변화 및 운항 경제성 실증 연구

An Empirical Study on the Performance Change of
Diesel Engine and Operational Economic Efficiency
after Retrofitting SO_x Scrubber on the Ship



지도교수 조 권 회

2020년 8월

한국해양대학교 대학원

해양플랜트운영학과

배진경

본 논문을 배진경의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 이 지 응



위원 조 권 회



위원 이 원 주



2020년 7월

한국해양대학교 대학원

목 차

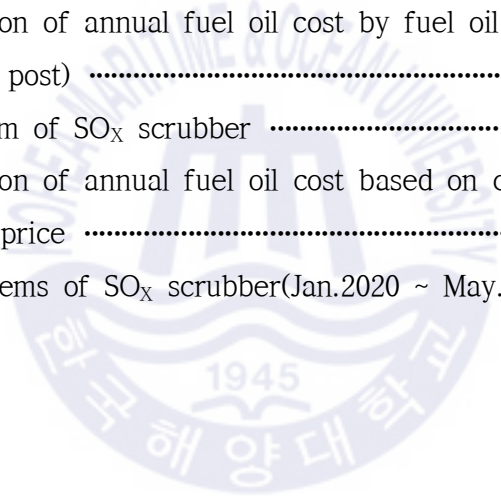
List of Tables	iii
List of Figures	v
List of Abbreviations	vii
Abstract	ix
1. 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 방법	3
2. 스크러버의 기술 현황	4
2.1 선박의 대기오염물질 배출규제	4
2.1.1 오존층 파괴물질(ODS)	5
2.1.2 질소산화물(NO _x)	7
2.1.3 황산화물(SO _x)	10
2.1.4 기타 대기오염물질	15
2.2 황산화물 저감 기술	18
2.2.1 습식 탈황 공정	19
2.2.2 건식 및 반건식 탈황 공정	21
2.3 선박의 스크러버 적용	23
2.3.1 개방형 스크러버	26
2.3.2 폐쇄형 스크러버	29
2.3.3 복합형 스크러버	31
3. 대상 선박과 스크러버의 선정 및 검토	33
3.1 선박의 제원	33
3.1.1 일반 사항	33
3.1.2 디젤 기관 제원	34

3.2 스크러버의 제원	35
3.2.1 일반 사항	35
3.2.2 스크러버의 구성	39
3.2.3 시스템의 작동 절차	44
3.3 설치 과정의 이해	46
4. 스크러버 설치 후 운항 경제성 검증	49
4.1 스크러버 설치 전 경제성 분석 결과	49
4.1.1 저유황유 사용 기준	51
4.1.2 스크러버 설치 기준	53
4.2 스크러버 설치 후 기관 성능 및 연료소모량 분석	56
4.2.1 주기관 성능 및 연료소모율의 변화	56
4.2.2 발전기 소요전력 및 연료소모량의 변화	63
4.3 스크러버 설치 후 운항 경제성 평가	65
4.3.1 최종 투자비용 검토	65
4.3.2 연간 연료소모량 변화에 따른 경제성 검증	66
4.3.3 스크러버 계획정비 비용 예측	67
4.3.4 현재 유가 기준 경제성 검증	68
4.3.5 스크러버 장기 운용에 따른 문제점 예측	71
5. 결론	74
참고문헌	76

List of Tables

Table 1.1	Optimum alternative of reduce SO _x emission(2017)	2
Table 2.1	IMO assembly resolution A.719(17)	6
Table 2.2	MARPOL annex VI regulation 12	6
Table 2.3	MARPOL annex VI NO _x emission limits at Global sea	10
Table 2.4	MARPOL annex VI NO _x emission limits in ECA	10
Table 2.5	Properties of SO ₂	11
Table 2.6	Effects of SO ₂ human body	12
Table 2.7	MARPOL Annex VI sulphur content limits of fuel oil at global sea	13
Table 2.8	MARPOL Annex VI sulphur content limits of fuel oil in ECA	13
Table 2.9	Classification of FGD processes	18
Table 2.10	Classification of wet scrubber	26
Table 3.1	Particulars of target vessel	33
Table 3.2	Specification of target diesel engine	34
Table 3.3	Required document for IMO	35
Table 3.4	Specification of SO _x scrubber	36
Table 3.5	Material of SO _x scrubber	37
Table 3.6	Monitoring system	38
Table 3.7	Specification of sea water supply pump	40
Table 4.1	Average navigational data per voyage in 2018	50
Table 4.2	Annual navigational data in 2018	52
Table 4.3	Estimation of annual fuel oil cost by fuel oil price ratio(ex ante)	53

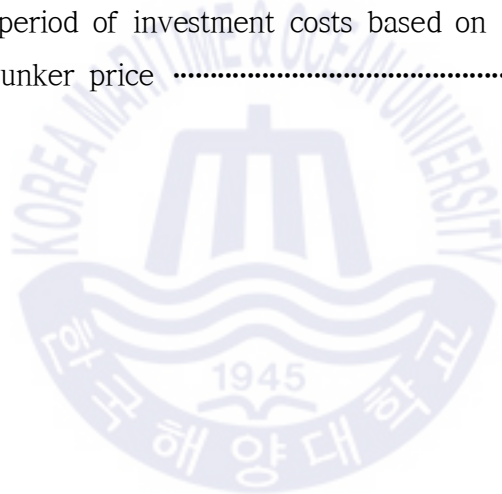
Table 4.4	Quotation for SO _x scrubber retrofit	54
Table 4.5	Result of SFOC(NCR) at sea trial in 2014	59
Table 4.6	Comparison table of main engine performance for before and after SO _x scrubber retrofit	60
Table 4.7	Comparison table of diesel generator performance for before and after SO _x scrubber retrofit	64
Table 4.8	Estimation of annual fuel oil cost by fuel oil price ratio(ex post)	66
Table 4.9	PMS item of SO _x scrubber	67
Table 4.10	Estimation of annual fuel oil cost based on current bunker price	70
Table 4.11	Claim items of SO _x scrubber(Jan.2020 ~ May.2020)	72



List of Figures

Fig. 2.1	Air pollutants from ships	4
Fig. 2.2	SO _x emission control areas	14
Fig. 2.3	MARPOL Annex VI regulation 13 & 14	14
Fig. 2.4	Element composition of diesel PM	15
Fig. 2.5	Granulated lime, Ca(OH) ₂	24
Fig. 2.6	Dry scrubber system	24
Fig. 2.7	Open loop scrubber system	27
Fig. 2.8	Close loop scrubber system	29
Fig. 2.9	Hybrid scrubber system	31
Fig. 3.1	Object of study “1,000 TEU container ship”	34
Fig. 3.2	SO _x scrubber system for target vessel	39
Fig. 3.3	Internal structure of SO _x scrubber	40
Fig. 3.4	Spray shielder & vane	41
Fig. 3.5	Saddle ring type packing	41
Fig. 3.6	Mist eliminator	42
Fig. 3.7	SO _x scrubber tower	43
Fig. 3.8	Bypass damper valve	44
Fig. 3.9	Electric system	45
Fig. 3.10	Scrubber capacity by standard model	47
Fig. 3.11	Retrofit of SO _x scrubber	48
Fig. 3.12	Schedule of SO _x scrubber retrofit	48
Fig. 4.1	Overview of trade route(south china sea)	49
Fig. 4.2	Bunker price in January 2019	51
Fig. 4.3	Payback period of investment costs(base)	55

Fig. 4.4	Comparison of main engine performance for before and after SOx scrubber retrofit	62
Fig. 4.5	Comparison of final investment costs and estimate	65
Fig. 4.6	Payback period of investment costs(review)	66
Fig. 4.7	Payback period forecast	68
Fig. 4.8	Bunker price in April 2020	69
Fig. 4.9	Payback period of investment costs based on current bunker price	71



List of Abbreviations

BC	Black Carbon
CARB	California Air Resources Board
CFCs	Chloro Fluoro Carbons
CMS	Continuous Monitoring System
ECA	Emission Control Areas
ECR	Engine Control Room
EEDI	Energy Efficiency Design Index for new ships
EGCS	Exhaust Gas Cleaning System
EGE	Exhaust Gas Economizer
EIAPP	Engine International Air Pollution Prevention certificate
EPA	Environment Protection Agency
FGD	Flue Gas desulfurization
FNU	Formazin Nephelometric Units
FOC	Fuel Oil Consumption
GHG	Green house gases
GRP	Glass fiber Reinforced Plastic
GWP	Global Warming Potential
HMI	Human Machine Interface
HSFO	High Sulphur Fuel Oil
IAPP	International Air Pollution Prevention certificate
IMO	International Maritime Organization
LBP	Length Between Perpendicular
LCV	Lower Calorific Value
LSFO	Low Sulphur Fuel Oil
LSMGO	Low Sulphur Marine Gas Oil
MARPOL 73/78	International convention for prevention of marine pollution from ships
MCP	Main Control Panel

MEPC	Marine Environmental Protection Committee
NO _x	Nitric Oxide
NTU	Nephelometric Turbidity Units
ODP	Ozone Depletion Potential
ODS	Ozone Depleting Substances
PAHs	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PE	PolyEthylene
PLC	Programmable Logic Controller
PM	Particulate Matter
PMS	Planned Maintenance System
PAN	PeroxyAcetyl Nitrate
RCP	Remote Control Panel
SCR	Selective Catalytic Reduction
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SFOC	Specific Fuel Oil Consumption
SHU	Saarberg-Hölter Umwelttechnik
SO ₄	Sulfates, can be removed by waters
SOF	Soluble Organic Fraction: Hydrocarbons adsorbed to the SOL, can be removed by an organic solvent
SOL	Solid carbon spheres(0.01 µm-0.08 µm) form to make solid particles agglomerates (0.05 µm-1.0 µm) with adsorbed hydrocarbons (Nonsolubles, Soot)
SO _x	Sulphur Oxides
UNEP	United Nations Environment Programmes
UTC	Universal Time Coordinated
VGP	Vessel General Permit
VOC	Volatile Organic Compounds

An Empirical Study on the Change of Performance of Diesel Engine and Operational Economic Efficiency after Installing SO_x Scrubber on the Ship

Bae, Jin Gyung

Department of Offshore Plant Management
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University
(Supervisor : Prof. Kwon-Hae Cho)

Abstract

As of January 1, 2020, the International Maritime Organization (IMO) implemented a more intense sulphur oxides emission regulation that reduces the upper limit of sulphur content of fuel oil used in global sea from 3.5% m/m to 0.5% m/m. Therefore, ship owners are choosing and implementing the most optimal method for reducing sulphur oxide emissions for the vessel in consideration of the type of ships they own, age of ships, and the navigation area. In particular, the existing ships have been found to be most beneficial to install scrubbers, a type of desulfurization facility, and the ships installing scrubbers account for a high percentage. However, up to present, the reference data of ships equipped with this facility is limited and may face additional costs or unforeseen problems due to changes in the performance of diesel engines in actual operation, so it is necessary to collect and analyze data from the beginning of the scrubber operation to verify economic efficiency and safety in the long term.

Thus, in this paper, 1,000 TEU container carriers recently installed scrubbers were selected as target ships, and the performance changes including the fuel consumption rate of diesel engines were considered based on the actual data in normal operation condition, and empirical studies were conducted on the economics of operation based on the current fuel price. It has been confirmed that there are no degradation performance from the retrofitting work due to the environmental factors that the target ship carried out the scrubber retrofitting work and major overhaul of the main engine at the same time as the docking repair. but the results were confirmed, such as a slight increase in fuel consumption due to increased electric power requirements and an extension of the payback period of investment costs due to sudden fluctuations in oil prices. In addition, problems in the early stages of operation were analyzed to predict problems caused by long-term scrubber operation, and it is expected that this research will eventually serve as basic data for economical and stable scrubber operation for the ships equipped with scrubbers and ship owners.

KEY WORDS: Global sulphur cap 2020; Existing ships; Scrubber; Diesel engine performance; Fuel price; Payback period of investment costs;

선박 스크러버 설치 후 디젤 기관의 성능 변화 및 운항 경제성 실증 연구

배진경

한국해양대학교 대학원
해양플랜트운영학과
(지도교수 : 조권희)

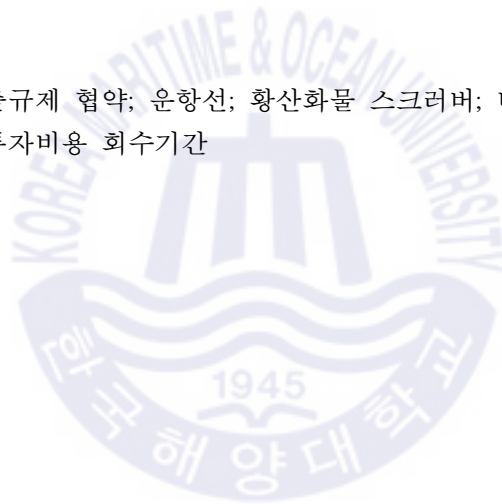
요약

국제해사기구(IMO)는 2020년 1월 1일부터 국제항해 선박에서 사용되는 연료유의 황 함유량 상한 비율을 질량분율 3.5%에서 0.5% 이하로 줄이는 강도 높은 선박 황산화물 배출규제 협약을 시행하였다. 이에 선주사는 보유 선박의 선종, 선령 및 항해구역을 고려하여 해당 선박에 가장 최적의 황산화물 배출저감 방법을 선택하고 이행하고 있으며, 특히 기존의 운항선은 탈황 설비의 일종인 스크러버를 설치하는 것이 가장 이득이 되는 것으로 확인되어 스크러버를 설치하는 선박이 높은 비율을 차지하고 있다. 그러나 해당 설비를 장착하여 운항한 선박들의 실적이 현재까지는 제한적이며, 실제 운항 시 디젤 기관의 성능 변화에 따른 추가적인 비용 발생 또는 예측하지 못한 여러 문제점에 직면할 수 있으므로 스크러버 운용 초기부터 자료를 수집하고 분석하여 경제성 및 안정성을 장기적으로 검증할 필요성이 있다.

따라서 본 논문에서는 최근 스크러버를 설치한 1,000 TEU급 컨테이너 운반선을 대상 선박으로 선정하여 운항 중 실측 데이터를 기준으로 디젤 기관의 연료 소모율을 포함한 성능 변화를 고찰하고, 현재의 연료 가격 기준 운항 경제성에 관한 실증적 연구를 수행하였다. 디젤 기관의 성능 측면에서는 대상 선박이 입거 수리와 동시에 스크러버 개장공사와 주기관 정기정비를 수

행한 환경적인 요인의 영향으로 개장공사로 인한 성능의 저하는 없는 것으로 확인되었다. 다만 소요전력 증가로 인한 연료소모량의 소폭 증가, 급격한 유가 변동에 의한 투자비용 회수 기간의 연장 등의 결과를 확인하였다. 아울러 스크러버 장기운용에 따른 문제점을 예측하기 위해 운용 초기 문제점을 분석하였으며, 최종적으로 본 연구 내용이 스크러버를 설치한 운항선 및 선주사에 경제적이며 안정적인 스크러버 운용을 위한 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

주제어: 황산화물 배출규제 협약; 운항선; 황산화물 스크러버; 디젤기관 성능; 연료 가격; 투자비용 회수기간



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 환경보호를 위한 국제사회의 요구가 국제기구 및 지역공동체의 정책으로 구체화 되고 환경보호 명분의 기술규제는 점차 강화되고 있다. 2015년 197 개국이 교토의정서를 대체하는 파리협정(Paris agreement)을 체결함으로써 전 세계는 환경보호, 에너지 절약, 탄소 배출량 감소, 지구온난화 및 기후변화방지 등에 총력대응을 하고 있다[1].

이와 같은 세계 각국의 환경보호에 대한 의식의 확대와 더불어 선박의 배기가스에 포함된 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 검댕(soot), 분진(dust) 등의 오염물질로 인한 대기환경 문제가 장기간에 걸쳐 국제적 문제로 당면하고 있기에 해운 관련 분야에서는 상당한 경제적 압박에도 불구하고 해양환경 보존을 위해 점차 강도 높은 규제를 제안하고 또한 철저히 이행해야 하는 실정이다.

특히, 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)는 2020년 1월 1일부터 국제항해 선박에서 사용되는 연료유의 황 함유량 상한 비율을 기존 질량분율 3.5%에서 0.5% 이하로 줄이는 선박 황산화물 배출규제 협약(Global Sulphur Cap 2020)을 시행하였다.

이 협약은 2016년 해양환경보호위원회(MEPC: Marine Environment Protection Committee) 70차 회의에서 승인 후 해운 산업 분야의 장기 불황 속에서 경제적 부담과 함께 이행 시점에 대한 많은 논란이 있었음에도, 현존선 적용이 2년 유예된 선박평형수 관리 협약과는 다르게 이행 시점이 연기되지 않고 시행되었다. 이는 현재의 기술동향을 고려하여 황산화물 배출 저감을 위한 대안으로 저유황유(황 함유량의 질량분율 0.5% 이하) 또는 액화천연가스(LNG) 등의 대체 연료 사용, 배기가스 세정장치(EGCS: Exhaust Gas Cleaning System) 설치 중 선택이 가능했으며 이러한 대안을 선박에 적용하기에 기술적으로 어렵지 않다는

점이 반영된 것으로 보인다.

Table 1.1은 2017년도 5월 기준으로 저유황유와 고유황유의 가격 차와 스크러버의 가격의 변수에 따라 황산화물 배출 저감 최적 대안을 분석한 자료이다. 특히 선령 10년 미만의 내용연수¹⁾가 많이 남은 선박은 스크러버 설치하는 것이 가장 경제적인 대안임을 알 수 있다. 또한, 설치 후 감가상각이 일정하게 이뤄지는 스크러버의 단가변동에 비해 세계 유가 수급 상황에 따라 가격 형성 예측이 어려운 저유황유의 단가변동이 최적 대안 선택에 더 큰 영향이 있음을 알 수 있다[2].

Table 1.1 Optimum alternative of reduce SOX emission(2017)

Case	Factor		Payback period of investment costs	Optimum alternative
	Ratio of price (VLSFO/HSFO)	Investment costs of Scrubber (standard:price for 2017)		
1	140%	100%	≤ 2y	Scrubber
2	120%	100%	≤ 5y	Scrubber
3	130%		≒ 10y	Scrubber
4	140%	200%	≤ 3y	Scrubber
5	140%	300%	≤ 4y	Scrubber
6	120%	200%	≤ 7y	Scrubber
7	130%	300%	≥ 20y	VLSFO
8	120%	170%	≤ 7y	Scrubber
9	132%	200%	≤ 8y	Scrubber
10	120%	180%	≤ 7y	Scrubber
11	128%	200%	≤ 8y	Scrubber

한국선급은 여러 가지 옵션을 고려하여 경제성 분석을 시행하였으며 연료 가격이 변동하는 경우, 관련 설비의 가격이 변동하는 경우 등 다양한 변수를 적용하여 비교했지만, 당시의 연료유 가격 조건에서는 EGCS를 설치하는 것이 선주사에 가장 이득이 되는 것으로 확인한 바 있다[3]. 이에 따라 많은 선주사에서는 EGCS²⁾의 일종인 탈황 설비 즉, 스크러버(SO_x scrubber)를 설치하여 선박

1) 내용연수 : 감가상각 대상 자산의 가치가 모두 다 감소하기까지의 기간으로 선박의 경우 건조부터 최대 25년을 내용연수로 산정한다.

2) EGCS : Marine exhaust gas cleaning systems(often referred to as scrubber) remove sulphur oxides from ship's engine and boiler exhaust gases. EGCS is composed of 3 basic components ① A vessel which enables the exhaust stream from an engine or boiler to be

황산화물 배출규제 협약을 이행하고 있다.

최근까지 수행된 탈황설비에 대한 연구는 설비의 개선을 통한 SO_x 저감을 위한 실험적 연구가 주를 이루며, 저유황유 사용에 비해 어느 정도 경제성이 있는지 여부나 기관 성능에 미치는 영향에 관한 연구는 전무한 실정이다[4]. 실제 운항 시 디젤 기관의 성능 변화에 따른 추가적인 비용 발생 또는 예측하지 못한 여러 문제점에 직면할 수 있기 때문에 스크러버 운용 초기부터 자료를 수집하고 분석하여 경제성 및 안정성을 장기적으로 검증할 필요성이 있다.

이에 본 연구에서는 현재 운항선의 경우 스크러버 설치가 황산화물 배출 저감을 위한 최적의 대안임을 실제적인 운항 경제성 분석을 통해 검증하고, 연구 기간 중 수집된 스크러버 운용 초기의 문제점을 분석하여 향후 발생 가능한 문제점을 예측하고 대비하는 데 도움이 되고자 한다.

1.2 연구 방법

본 연구에서는 선박의 대기오염물질 배출규제 및 스크러버의 원리부터 운항선에 적용하는 과정에 대하여 알아보고, 스크러버를 설치한 운항선을 연구 대상으로 선정하여 정상 운항 조건하에 스크러버 설치 전·후 디젤 기관의 연료 소모율(SFOC: Specific Fuel Oil Consumption)을 비롯한 기관의 성능인자를 비교 분석하여 스크러버 설치가 기관 성능에 어떠한 영향을 미치는지 고찰한다.

또한, 측정된 연료 소모량과 현재의 연료 가격을 기준으로 유지보수 비용을 포함한 스크러버 투자 비용 및 스크러버 운용 시 투자 비용의 회수 기간을 산정하고, 스크러버 설치를 위한 사전 경제성 분석 결과와 비교하여 운항 경제성을 실제로 검증한다.

마지막으로 스크러버의 장기 운용에 따른 경제성 및 안정성 유지를 위해 연구 기간 중 수집된 운용 초기의 문제점을 분석하여 향후 발생 가능한 문제점을 예측하고 이를 대비하고자 한다.

intimately mixed with water ② **A treatment plant(washwater treatment)** to remove pollutants from the wash water after the scrubbing process ③ **Sludge handling facilities**(Sludge must be retained onboard for disposal ashore).

제 2 장 스크러버의 기술 현황

2.1 선박의 대기오염물질 배출규제

연료, 원자재, 전자제품, 의약품, 식품 등 전 세계 물동량의 80% 이상이 매일 50,000여 척에 달하는 선박을 통해 운송되고 있다[5]. 선박에서 배출되는 대기오염물질은 대표적으로 Fig. 2.1과 같이 오존층 파괴물질(ODS: Ozone Depleting Substances), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x)과 입자상물질(PM: Particulate Matter), 휘발성 유기화합물(VOCs) 등이 있으며, IMO에서 채택한 선박으로부터 오염 방지를 위한 국제협약(MARPOL 73/78: International convention for prevention of marine pollution from ships) 부속서 VI의 선박으로부터의 대기오염 방지에 관한 규칙에 따라 규제된다.



Fig. 2.1 Air pollutants from ships

2.1.1 오존층 파괴물질(ODS)

오존층 파괴물질이란 오존층을 파괴하는 약 100여종의 화학물질의 생산과 사용 금지를 위해 1989년 1월 발효된 몬트리올 의정서³⁾에서 정의된 물질을 의미한다.

지상으로부터 15 km~30 km 높이의 성층권에 오존(O₃)의 밀도가 높은 곳을 오존층이라 하며, 성층권에서 자외선에 의해 프레온가스 등으로부터 분리된 Cl 원자가 식 (2.1) 및 식 (2.2)와 같은 화학반응을 통해 오존층을 파괴하게 된다[6].



주목할 것은 O₃을 파괴한 Cl는 다시 분해되어 다른 O₃와 반응하면서 반복적으로 O₃을 분해한다는 것이다. 결국, 비교적 소량의 오존 파괴물질로 지속적인 오존층 파괴가 이루어지고 자외선이 그대로 들어오게 된다면 피부암 또는 백내장은 물론 면역체계에 영향을 주어 생각지도 못했던 질병이 생길 수도 있다.

유엔환경계획(UNEP: United Nations Environment Programmes)은 선박 소화설비의 소화제로 사용되는 할론이 오존층 파괴에 대한 높은 가능성이 있다는 것에 주목하기 시작하였고 몬트리올 의정서 등 국제적인 노력에 부응하기 위해 IMO는 1989년 10월 결의서 A.665(16)를 채택하여 선박에서 소화 목적으로 사용되는 할론의 사용 제한을 각 정부에게 촉구하였으며 이후 할론을 포함한 오존층 파괴물질에 대한 논의는 선박 기인 대기오염에 대한 방지의 전체적인 틀에서 다뤄졌다. 1991년 IMO 제17차 총회에서 채택된 선박 기인 대기 오염 방지에 대한 결의서 A.719(17)에 따라 MEPC에서 새로운 부속서를 준비하기 전까지 Table 2.1과 같이 오존층 파괴물질에 대한 구체적인 조치를 하도록 촉구하였다[7].

3) 공식명칭은 오존층 파괴물질에 관한 몬트리올 의정서(Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer)이며 오존층을 파괴하는 화학물질의 생산과 사용금지를 규제하기 위한 국제 환경협약으로 1987년 9월 15일 채택되어 1989년 1월에 발효되었다. UN 회원국 197개국이 모두 합의하여 지금까지 참여하고 있다.

Table 2.1 IMO assembly resolution A.719(17)

Material	Measures for prevention of air pollution
CFCs	1992년 11월 6일 이후에 건조되는 선박에 고정식냉동실, 에어컨 및 단열구조의 설치 시 CFCs(오존파괴 잠재성이 R-11의 5% 이상인 CFCs) 사용을 금지
할론	1992년 7월 1일 이후에 건조되는 선박에 설치되는 소화설비에서 할론의 사용을 금지. 단, 필수적 사용 ⁴⁾ 의 범주에 해당하는 경우는 제외

이후 1994년 10월 1일부터 할론 소화설비의 새로운 설치를 전면적으로 금지하는 강제요건이 SOLAS Reg. II 에 추가되고, 또한 MAPOL 73/78 부속서 VI이 추가되면서 제12 규칙에서는 선박으로부터 오존층 파괴물질이 고의로 배출되는 것과 오존 파괴물질을 포함한 새로운 설비의 설치를 금지하는 강제요건이 포함되었고, 2008년 10월 MEPC 58차 회의에서 오존층 파괴물질 설치 금지에 대한 구체화 된 요건은 Table 2.2와 같다[7].

Table 2.2 MARPOL annex VI regulation 12

Regulation	Subject to regulation
HCFCs 이외의 오존 파괴물질을 포함한 설비의 설치 금지	<ul style="list-style-type: none"> · 2005년 5월 19일 이후 건조된 선박 · 2005년 5월 19일 이전에 건조된 선박의 경우, 선박에 장비의 계약서상 납기 일이 2005년 5월 19일 이후, 계약서상 납기 일이 없는 경우 선박에 장비의 실제 납기가 2005년 5월 19일 이후인 경우
HCFCs가 포함된 설비의 설치 금지	<ul style="list-style-type: none"> · 2020년 1월 1일 이후 건조된 선박 · 2020년 1월 1일 이전에 건조된 선박의 경우 선박에 장비의 계약서상 납기 일이 2020년 1월 1일 이후, 계약서상 납기 일이 없는 경우 선박에 장비의 실제 납기가 2020년 1월 1일 이후인 경우

MAPOL 73/78 부속서 VI 제12 규칙에 선박에서는 냉동기의 염화불화탄소 (CFCs: ChloroFluoroCarbons, 프레온가스) 냉매 및 소화제용 할론가스 등이 오

4) MSC/Circ.599(New halon installations as being of essential use)

존 파괴물질의 범위에 포함이 되며, CFCs를 대체하기 위한 수소화염화불화탄소 (HCFCs: Hydro-ChloroFluoroCarbons) 또한 10% 정도이기는 하지만 이 역시 염소 (Cl) 성분을 가지고 있어 오존층 파괴물질로 분류되고 있다. HCFCs의 대체물질로 개발된 수소불화탄소(HFC: Hydro-FluoroCarbons)는 염소 성분이 없어 오존파괴지수(ODP: Ozone Depletion Potential)가 0이지만, 지구온난화 지수(GWP: Global Warming Potential)가 상당히 높은 온실가스라는 문제점을 가지고 있다.

또한, 오존층 파괴물질과 이를 포함하고 있는 설비가 선박으로부터 제거될 때 적절한 수용시설로 인도되어야 한다고 규정하고 있으며, 오존 파괴물질을 포함한 장비의 목록을 유지하고 충전, 수리, 배출, 공급 등이 발생한 경우 오존 파괴물질 기록부에 질량(kg) 단위로 기록 관리 되어야 한다.

2.1.2 질소산화물(NO_x)

NO_x는 질소와 산소로 이루어진 화합물로 안정한 N₂O, NO, N₂O₃, NO₂, N₂O₅ 등과 불안정한 NO₃가 존재하며, 공기 중에 가장 주요한 형태이자 대기환경에서 문제가 될 만큼 존재하는 NO와 NO₂를 일반적으로 대기오염 측면에서 질소산화물이라 한다. 특히 NO와 NO₂는 저층 대기인 대류권의 주요한 오염물질로서 LA에서 광화학 스모그가 발생한 이래 주목을 받게 되었다.

선박에서는 디젤 기관에 공급된 공기 중의 질소(N₂)나 연료 중에 함유된 질소 분(N)이 O₂ 또는 O₂의 혼합물로부터 분리된 산소 원자와 고온으로 반응하여 NO_x가 생성되며, NO_x 발생에 관여하는 주요 인자는 연소실의 온도, 산소의 국부농도 및 연소의 지속 시간 등이 있다. 연소실에서 반응 과정이 진행되는 동안 식 (2.3) ~ (2.5)와 같은 다수의 기본 반응들이 진행된다[6].



NO는 연소과정 중 초기에 생성되는 NO_x의 90% 이상을 차지하며, 반응 과

정 중 일부 NO₂와 N₂O를 생성하는데 각각 NO양의 5%와 1% 정도이다. NO₂는 NO 농도가 100 ppm 이상이고 O₂가 충분하며 온도가 1,100°C 이상인 상태의 연소실에서 직접 생성이 가능하다. 대기로 방출된 NO가 산소와 반응하여 적갈색의 NO₂로 산화되기도 하며, 자외선에 의하여 NO가 NO₂로 광산화 되기도 하여 대기 중에는 NO와 NO₂가 혼재한다[8].

연소과정에서 생성된 NO_x는 햇빛과 반응하여 광화학 스모그를 발생시킬 수 있다. 식 (2.6)과 같이 NO₂가 햇빛과 반응하면 산소 원자가 광화학 반응을 통해 NO₂에서 분리되고, 식 (2.7)에 의해 공기 중의 O₂와 결합하여 O₃를 생성한다.



O₃는 호흡 곤란, 두통, 피로 및 호흡기 관련 문제를 일으키는 것으로 알려져 있다. 식 (2.8)에서와 같이 NO₂, O₂ 및 VOCs 등은 햇빛에 반응하여 질산과산화아세틸(PAN: PeroxyAcetyl Nitrate)을 생성하며 눈을 자극하여 시력을 현저하게 떨어트릴 수 있다. 화학식은 CH₃CO-OONO₂로 공기 중의 수증기와 함께 짙은 안개를 형성하며, 이를 로스앤젤레스형 스모그라고 부르기도 한다.



MAPOL 73/78 부속서 VI 제13 규칙에서는 디젤 기관의 NO_x의 배출량이 제한치 내에 있지 않을 경우 디젤 기관의 운전을 금지하고 있으며, 제14 규칙에서는 선박에 사용된 연료유의 황 함유량을 제한하고 있다. 단, 제4 규칙에 의해 제13 규칙 및 제14 규칙에서 요구되는 것과 동등 이상의 효과를 가진다면 대체 방법의 사용을 허용하고 있다. 이에 따라 NO_x 배출량 규제는 배기가스 후처리 장치인 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 EGR(Exhaust Gas Recirculation)로, 연료유의 황 함유량 규제는 배기가스 세정장치인 스크러버로 만족시킬 수 있다.

NO_x 배출규제는 선박에 설치되는 디젤 기관의 출력이 130 kW를 초과하거나 2000년 1월 1일 이후 주요한 개조가 이루어지는 출력 130 kW를 초과하는 선박용 디젤 기관에 적용된다. 단, 구명정 또는 비상 발전기 등 비상용으로만 사용

할 목적의 디젤 기관에는 적용되지 않으며, 자국 내에서만 운항하는 연안 선박은 해당 주관청이 정한 NO_x 제어방법을 적용받는다. 새로 건조된 선박의 디젤 기관과 주요 개조가 이루어진 디젤 기관은 승인된 검사 기관에 의해 제조공장에서 NO_x 기술 코드에 따라 검사를 실시한 후 적합하게 제조되었다는 엔진의 국제대기오염방지증서(EIAPPC: Engine International Air Pollution Prevention Certificate)를 발급받아 선박에 보관해야 한다. 그리고 조선소는 모든 규제물질에 적합하게 선박을 건조했다는 국제대기오염방지증서(IAPPC: International Air Pollution Prevention Certificate)를 발급받아야 하고, 유효 기간(5년)동안 선박 내에 보관해야 한다.

IMO는 선박 건조 시기 및 해역 위치에 따라 NO_x 규제내용을 Tier I, II, III로 구분하고 있다. MARPOL 1997 의정서가 채택될 당시에는 디젤 기관으로부터의 NO_x 배출량이 크랭크 축 분당 회전수가 130 rpm 미만일 때는 17 g/kW·h, 130 이상 2000 rpm 미만일 때는 $45 \cdot n^{(-0.2)}$ g/kW·h, 2000 rpm 이상일 때는 9.8 g/kW·h 내에 있도록 요구하였으나, 여러 해가 지나면서 향상된 기술 등이 고려되어 2008년 MEPC 58차 회의에서 Tier I 수준보다 15%~20% 줄인 Tier II 기준, Tier I 보다 약 80% 감소시킨 Tier III 기준을 마련했다.

이에 따라 2011년부터 건조되는 선박은 모든 해역에서 Tier II 수준을 만족해야 하고, 2016년 1월 1일 이후에 건조되어(용골 거치, Keel-laying 기준) 운항하게 되는 선박부터는 일반 해역에서는 Tier II 수준, 북미 및 미국 캐리비안 배출 규제해역(ECA: Emission Control Area)에서는 Tier III 수준을 만족해야 한다. 추가로 2021년 1월 1일 이후에 건조되어 운항하게 되는 선박은 발틱 및 북해 해역의 ECA에서까지 Tier III 수준을 만족해야 한다[7].

NO_x 배출량은 디젤 기관의 운전으로부터 배출된 NO₂의 질량으로부터 계산되며, NO_x 배출량 제한치는 Table 2.3 및 Table 2.4와 같이 디젤 기관 크랭크 축의 분당 회전수에 따라 구분된다.

Table 2.3 MARPOL annex VI NO_x emission limits at global sea

n = rated engine speed	Total weighted emission limit of NO _x	
	Tier I	Tier II
	2000년 1월 1일 이후 2011년 1월 1일전에 건조된 선박에 설치되는 선박용 디젤 기관	2011년 1월 1일 이후에 건조된 선박에 설치되는 선박용 디젤 기관
n<130	17.0 g/kW·h	14.4 g/kW·h
130 ≤ n < 2000	45.0 × n ^(-0.2) g/kW·h	44.0 × n ^(-0.23) g/kW·h
2000 ≤ n	9.8 g/kW·h	7.7 g/kW·h

Table 2.4 MARPOL annex VI NO_x emission limits in ECA

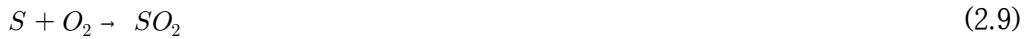
n = rated engine speed	Total weighted emission limit of NO _x	
	Tier III	
	2016년 1월 1일 이후 건조되고 북아메리카 배출규제해역 및 미국 캐리비안 배출규제해역을 운항할 때	2021년 1월 1일 이후 건조되고 발틱 배출규제해역 혹은 북해 배출규제해역을 운항할 때
n<130	3.4 g/kW·h	
130 ≤ n < 2000	9.0 × n ^(-0.2) g/kW·h	
2000 ≤ n	2.0 g/kW·h	

2.1.3 황산화물(SO_x)

SO_x는 황과 산소와의 화합물로 이산화황(SO₂, 아황산가스), 삼산화황(SO₃), 아황산(H₂SO₃), 황산(H₂SO₄) 등이 있으며, 황산구리(Cu₂SO₄), 황산칼슘(CaSO₄), 황산마그네슘(MgSO₄) 등의 황산염 등이 포함되나 대기오염물질로 가장 중요한 인자는 SO₂이며 이물질이 대기오염의 지표가 된다. SO_x는 자연적으로 화산활동에 의해 발생하기도 하지만, 황산공장, 염료 제조공정, 살충제·펄프공장 및 석탄연소, 중유 연소, 폐기물처리 등에서 발생하며, 황 함유 광석이나 화석연료의 연소에 의한 인위적인 배출이 주된 원인이다[9].

선박의 주기관으로 사용되는 저속 디젤 기관은 연료유의 황 함유량이 높기

때문에 운전 시에 높은 수준의 SO_x를 배출한다. 연료유에 포함된 황은 연소과정에서 산소와 결합하여 대부분 SO₂가 되며, 일부는 다시 산화되어 SO₃을 생성한다. 연소과정 중 SO_x의 생성과정은 식 (2.9) 및 식 (2.10)과 같다[6].



이러한 연소과정에서 생성된 SO₂와 SO₃는 대략 95:5의 비율로 배출된다[10]. 따라서 연소과정에서 생성되는 SO_x는 대부분 SO₂이며, 그 특성은 Table 2.5와 같이 25°C에서 용해도가 8.5 mL/100 mL로 물에 잘 용해되며 분자량이 약 64.1인 무색의 자극취가 있는 불연성 가스로, SO_x 중에서도 가장 많은 피해를 일으킨다.5). Table 2.6은 SO₂의 농도별 인체에 미치는 영향을 나타내고 있으며 일정 농도 이상에서 천식 등 기관지염을 유발하여 인체 심각한 영향을 줄 수 있는 위험한 오염물질이다[11].

Table 2.5 Properties of SO₂

Property	Values
Molecular mass	64.1
Boiling point	-10°C
Melting point	-75.5°C
Relative density(water=1)	1.4 (Liquid, -10°C)
Solubility in water(mL/100mL)	8.5 mL at 25°C
Vapor pressure	330 kPa at 20°C
Relative vapour density(air=1)	2.25

5) ILO International Chemical Safety Cards (ICSC)

Table 2.6 Effects of SO₂ 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 sever exercise, symptoms of asthma
1	Approximately 1% of local residents have asthma symptoms

용해도가 높은 SO₂는 구름의 액적, 빗방울, 지표수 등에 쉽게 녹아 식 (2.11)과 같이 약산성을 띠는 H₂SO₃을 생성한다.



이후 H₂SO₃의 산화 또는 SO₃와 수분의 결합에 의해 식 (2.12) 및 식 (2.13)과 같이 산성비를 유발하는 H₂SO₄을 만들게 된다.



산성비로 인해 물고기와 야생 동물들의 질병이 발생되고 호수와 하천의 산성화 및 건물의 부식 등이 촉진되며, 산림 및 토양의 식수 피해를 크게 일으킨다. 또한, 고농도의 SO₂에 노출되면 호흡 곤란이 유발될 수 있으며, 특히 폐 질환뿐만 아니라 폐기종 환자의 경우 기도가 막힐 수 있다는 보고가 있다.

1987년에 개최된 북해보호에 대한 제2차 국제컨퍼런스에서 처음으로 IMO와 같은 국제기구에서 해양 및 대기오염 경감을 위한 적절한 조치를 해야 한다는 취지의 선언문을 채택하면서, 1988년 MEPC 26차 회의에서부터 선박 기인 대기오염 문제를 논의의 주제에 포함시키기로 결정했다. 이후 MEPC에서는 1997년 9월에 개최된 외교회의에서 MARPOL 1997 의정서를 채택하여 선박으로부터의 대기오염 방지에 대한 부속서 VI를 추가하였다. 이 부속서는 약 8년 후인 2005

년 5월 19일에 발효되었고, 2008년 MEPC 58차 회의에서는 더 강화된 현재의 황 함유량 제한 요건이 채택되어 2010년 7월 1일 발효되었다[7].

이에 따라 ECA 이외의 해역에서 운항하는 선박은 2012년 1월 1일 전에는 연료유 황 함유율을 4.5% m/m, 2012년 1월 1일 이후는 3.5% m/m로 제한했으며, 2020년 1월 1일 이후부터는 선박의 연료유로 사용될 목적으로 선내 보관·운송을 포함한 모든 연료유의 황 함유율을 0.5% m/m로 명확하게 제한하고 있다.

Table 2.7은 일반 해역에서 연도별 연료유의 황 함유율 제한치를 나타낸다.

Table 2.7 MARPOL annex VI sulphur content limits of fuel oil at global sea

Area	Sulphur content limits of fuel oil		
	Global	2012년 1월 1일 전	2020년 1월 1일 전
4.5% m/m		3.5% m/m	0.5% m/m

또한 IMO는 북미, 캐리비안, 발틱 및 북해 해역의 ECA에서 운항하는 선박에 대해서는 Table 2.8과 같이 일반 해역보다 엄격한 규제를 시행하고 있다.

Table 2.8 MARPOL annex VI sulphur content limits of fuel oil in ECA

Area	Sulphur content limits of fuel oil		
	ECA	2010년 7월 1일 전	2015년 1월 1일 전
1.5% m/m		1.0% m/m	0.1% m/m

ECA에서 운항하는 선박은 2010년 7월 1일 전에는 1.5% m/m, 2010년 7월 1일 이후는 1.0% m/m, 2015년 1월 1일 이후부터는 황 함유율 0.1% m/m 이하의 연료유를 사용해야 한다. 그리고 ECA에서 운항하는 선박은 연료유 교환 절차서(Fuel oil changeover procedure)를 선박에 비치하고 해당 지역에 들어가기 전 황 함유량을 초과하는 연료유를 충분히 씻어낼 수 있도록 충분한 시간 동안 연료 전환이 수행되었다는 것을 증명하는 문서화된 절차가 수행되어야 하며, 로그북(log book)에 저유황 연료유 전환 작동이 완료되거나 개시된 선박 위치, 날짜, 시간, 용량 등을 기록해야 한다. Fig. 2.2는 지금까지 ECA로 정의된 지역을

나타내며, 이러한 ECA는 향후 확대될 수 있다.

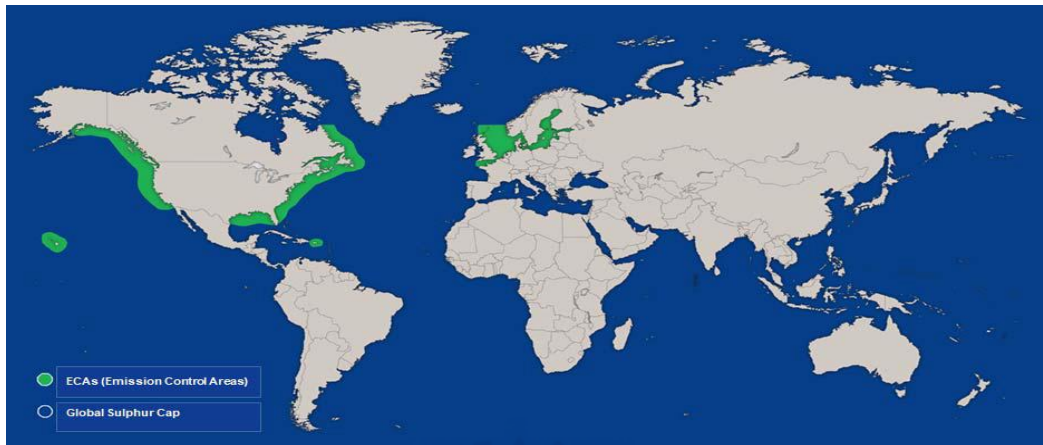


Fig. 2.2 SO_x emission control areas

Fig. 2.3은 MARPOL 73/78 부속서 VI에 따라 NO_x 및 SO_x의 저감 이행 시기와 연도별 제한치를 나타낸 것이다.

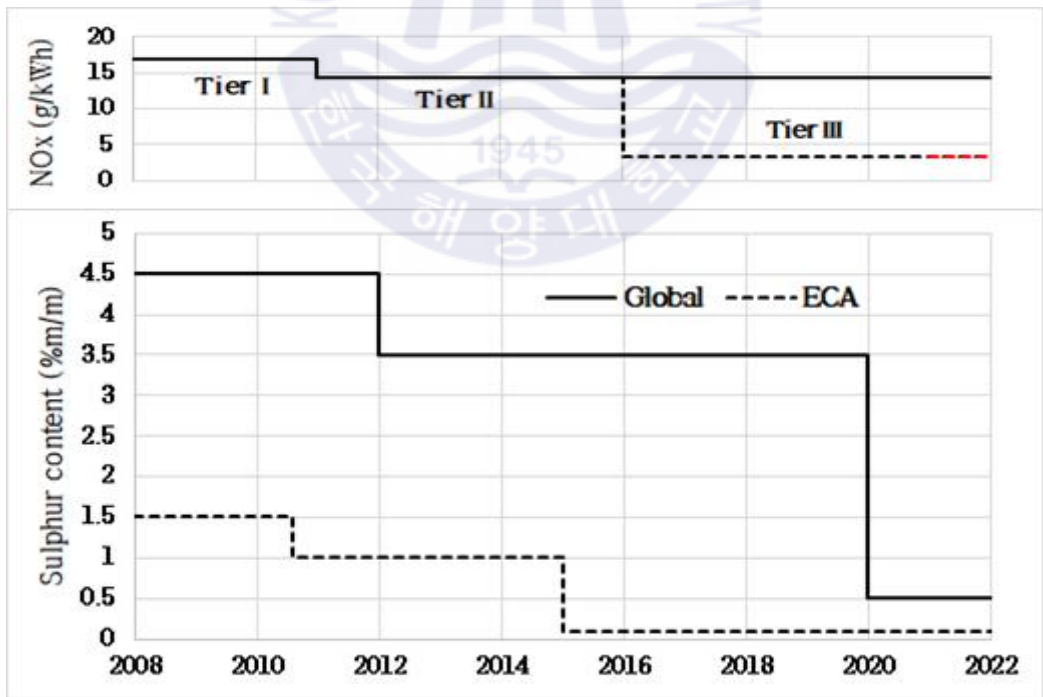


Fig. 2.3 MARPOL Annex VI Regulation 13 & 14

2.1.4 기타 대기오염물질

PM의 경우 IMO에서는 연소 되지 않은 연료 또는 불연성 물질로 높은 발암성을 가진 물질로 규정하고 있으며, 미국 캘리포니아 대기보전국(CARB: California Air Resource Board)에서는 51.7°C 이하의 공기로 희석된 필터에 포집 된 배출 성분 중 응축 수분을 제외한 미분(fines), 분진(dust), 그을음(soot), 미스트(mist), 연무(fog), 스모그(smog) 등의 모든 배출성분으로 정의하고 있다[6].

하지만 일반적으로 연료유의 연소과정에서 배출되는 PM은 초기에는 탄소 입자로만 구성되고, 배기 과정에서 액상 미연탄화수소 및 SO_x 등과 결합하여 덩어리 형태가 된다. 선박의 디젤 기관에서 발생하는 PM은 대부분 탄화수소계 연료의 불완전연소에서 기인하고 일부는 윤활유에서 발생한다[6]. Fig. 2.4는 PM의 구성을 나타내며, 크게 SOL(Solid fraction), SOF(Soluble organic fraction), SO₄ (Sulfate particles)로 구성되어 있다[12].

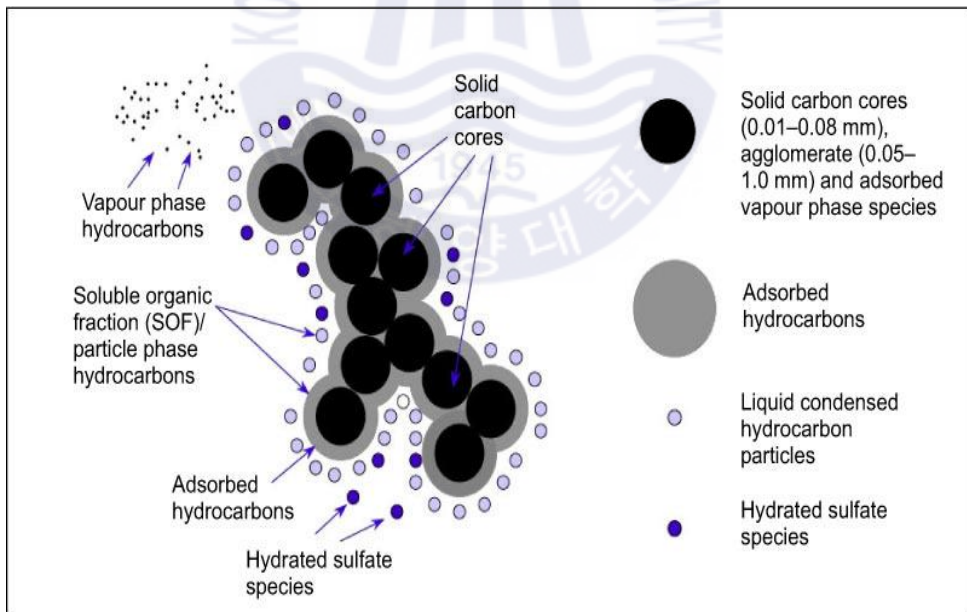


Fig. 2.4 Element composition of diesel PM

배출되는 PM은 그 크기가 0.01 μm ~ 0.3 μm가 가장 많으며 전기를 띄지 않고,

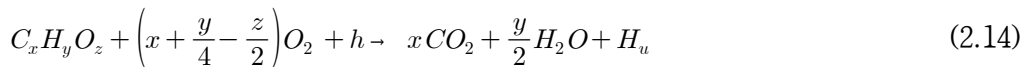
매우 작고 가벼워 대기 중에 오랫동안 떠돌아다니면서 대기를 오염시킨다. 또한, 스펀지 형태의 탄소 입자에 각종 유기성 탄화수소와 황산염 등이 함유되어 있어 호흡기로 흡입되면 폐포 깊숙이 침착되어 여러 가지 질병을 유발한다.

VOCs는 생활제품 등으로부터 우리가 살고있는 모든 영역에 존재하며 호흡기를 통해 쉽게 인체에 노출되는 유해물질이지만, 대기 중 VOCs의 종류뿐만 아니라 방출원 역시 매우 다양하므로 아직 국제적으로 통일된 정의나 대상물질의 범주가 마련되어 있지 않다. 따라서 VOCs의 정의나 관리범위는 규제의 배경과 산업구조에 따라 국가 및 지역별로 다소 다르게 적용되고 있다. 통상적으로 증기압이 높아 쉽게 증발하여 일반적인 대기환경에서 기체로 존재하는 유기화합물을 총칭하며, 탄화수소화합물 내 지방족 탄화수소, 방향족 탄화수소, 비균질 탄화수소 및 대기 중 독성이 강한 물질을 포함한다. 방향족 탄화수소나 할로겐화 탄화수소류는 그 자체만으로는 인체에 직접적인 유해성이 크지는 않으나, 사람의 건강이나 생태계에 영향을 줄 수 있으며 대기 중에서 NO_x 와 광화학반응을 일으켜 O_3 및 PAN 등 광화학 산화물 또는 발암성을 지닌 독성 화학물질의 전구물질(precursor)로 작용한다. 또한, 고농도의 VOCs에 노출되었을 때는 급성장해로 독성작용으로 인한 마취 현상, 의식 상실, 마비, 경련, 그리고 사망에까지 이를 수 있으며, 만성성장해로는 정서장애, 운동장애 등의 신경행동학적 장애가 발생할 수 있다[13].

MAPOL 73/78 부속서 VI 제15 규칙은 유조선에서의 휘발성 유기화합물(VOCs) 배출을 규제하고 있으며, 제16 규칙에서는 해상 소각에 의한 대기오염을 방지하기 위해 선내 소각기에 의한 소각만 허용하고 있다. 또한, 제18 규칙은 선박 연료유 품질에 대한 규제도 하고 있다[6].

이외에도 선박에서 배출되는 대기오염물질로 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO_2) 등이 있다. CO는 탄화수소계 연료의 불완전연소로 인해 연소의 중간 단계에서 생성되는 화합물로 무색·무미·무취의 기체로 피부나 점막에 대한 자극도 없어 감지가 어려우며 물에 잘 녹지 않고 공기에 비해 비중이 0.967배이다. 헤모글로빈(Hb)과의 결합력이 산소보다 300배 이상 커서 체내 산소 운반작용을 저해하여 조직의 저산소증을 일으키게 되며, 인지작용과 사고능력 감퇴,

반사작용 저하, 졸음과 협심증 유발, 무의식 및 사망을 유발하기도 한다. 임신 여성에 있어 태아성장 및 조직발달에도 영향을 미친다. CO₂ 또한 무색·무미·무취의 기체로 일반적으로 대기 중에 0.04%(400 ppm) 정도 포함되어 있으며, 탄화수소계 연료의 연소 과정에서 생성되는데 그 반응은 식 (2.14)와 같다.



즉, CO₂의 배출량은 연소한 연료의 양에 따라 증감하며 지구온난화를 초래하는 주된 온실가스에 포함된다. 1997년 부속서 VI가 제정될 당시에 선박에서 배출되는 CO₂는 그 양이 비교적 적다는 이유로 규제의 대상에서 제외되었으나, 1998년부터 MEPC에서 선박의 CO₂ 배출 통제 문제를 본격적으로 다루기 시작하게 되었다. 2004년에는 선박 온실가스 배출 통제에 관한 총회결의서 Resolution A.963(23)을 채택하여 선박의 국제운송에 따른 온실가스 배출규제를 위해 기준선을 설정하였다.

또한, 2009년 IMO에서는 선박에서 배출되는 온실가스 영향에 관한 연구를 시행한 후 2011년 7월 11일부터 5일간 영국 본부에서 개최한 MEPC 62차 회의에서 선박 온실가스(GHG: Green House Gases) 배출 감축안을 채택했다. 이에 따라 2013년부터 새로 건조되는 400 GT 이상의 선박에 대해서 ‘에너지효율 설계지수(EEDI)’를 적용하게 되었다. EEDI는 1톤의 화물에 대해 1해상마일 운송시 배출되는 이산화탄소의 양으로 나타내는데, 원유 및 가스선 등 에너지효율이 취약한 초대형선박 등에 적용됨에 따라 온실가스 배출량을 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다. 건조 계약이 있는 선박 중에서 2013년 7월 1일 이후 용골 거치가 실시되는 선박, 그리고 2015년 7월 이후 인도되는 선박에 적용된다. 벌크선, 가스선, 유조선, 컨테이너선, 일반화물운반선, 냉장화물운반선 등 총 6개 선종에 대해 EEDI가 적용되며, 2013년 이후 12년 동안 10%씩 3번 감축해 기준 대비 30%의 온실가스 감축 효과를 기대하고 있다[7].

또한, IMO는 모든 운항 선박에 대해서도 에너지효율을 증대시키는 에너지효율 관리계획(SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan)을 시행하고 있다.

2.2 황산화물 저감 기술

배연탈황(FGD: Flue Gas Desulfurization)이란 배기가스 중 포함되어 있는 SO_x를 흡수(absorption), 흡착(adsorption), 산화(oxidation), 환원(reduction) 등의 원리를 이용하여 제거하고 처리가스를 연돌을 통해 배출하는 공정으로서 **Table 2.9**와 같이 흡수제의 형태에 따라 습식법과 건식법, 반응생성물 처리방법에 따라 재생법과 비재생법으로 분류할 수 있다[14].

Table 2.9 Classification of FGD processes

Classification	Treatment method of reaction products	Technology
Wet process	Throwaway	<ul style="list-style-type: none"> - Wet lime/limestone scrubbing - Dual alkali scrubbing - DOWA basic aluminium sulfate - Sea water scrubbing
	Regeneration	<ul style="list-style-type: none"> - Wellman-lord - Mag-Ox - Citrate - SULF-X - CONOSOX (SO_x & NO_x)
Dry process	Throwaway	<ul style="list-style-type: none"> - Spray drying - Dry sorbent injection - Electron beam (SO_x & NO_x) - Invertex process
	Regeneration	<ul style="list-style-type: none"> - Aqueous carbonate - SFGT (SO_x & NO_x) - Adsorption (SO_x & NO_x) - NOXSO (SO_x & NO_x) - SNOX (SO_x & NO_x)

배연탈황 공정은 1928년 최초로 영국의 석탄 화력발전소에 도입되어 이용되었으며, 1935년과 1937년에 필터를 이용하여 흡수탑에서 배출되는 슬러지(sludge)로부터 고형물질을 분리, 제거하는 공정이 개발되었고, 1960년대 미국에서 습식 석회석 공정과 석회석을 노 내에 직접 분사하는 방식의 건식 공정이 연구개발되었다. 그러나 노 내에 석회석 분말을 분사하는 방식의 건식 공정은 보일러 튜브의 막힘과 SO_2 제거율 그리고 집진기 성능저하 등의 문제점 발생으로 1960년대 말 배연탈황 공정에 대한 연구개발은 건식 공정보다 습식 석회/석회석 흡수 공정으로 전환하게 되었다. 1960년대 이후 미국, 일본, 서독에서 경제적이고, 운전 신뢰성이 높은 고효율의 배연탈황 공정과 시스템에 대한 연구개발이 활발히 진행되어 현재는 약 50여종의 배연탈황 공정이 개발되어 있으며, 이들 공정 중 일부 공정만이 기술적 신뢰성과 경제성이 평가되어 상용화 운전 중이다[14].

2.2.1 습식 탈황 공정

습식 배연탈황 공정은 1930년대에 영국에서 개발된 이래로 50년 이상 기술이 축적되어 기술적 신뢰성과 경제성이 우수하고, 거의 완성단계에 도달한 공적으로써 일부 선진 국가에서 이미 많은 습식 배연탈황 설비가 설치, 운전되고 있으며 그중에서도 특히 SO_2 가 포함된 배기가스를 석회석 또는 소석회 슬러리(slurry)와 접촉시켜 SO_2 를 제거하고, 부산물로 석고를 생성시키는 습식 석회석-석고 공정이 주류를 이루고 있다. 일반적으로 배기가스 중에 포함된 SO_x 를 제거하기 위한 탈황 공정은 배기가스에 흡수제가 포함된 액을 분무하는 액분산 방식과 배기가스를 흡수액 내에 직접 분사하는 가스분사 방식의 두 가지로 대별할 수 있으며 현재 상용화되어 있는 탈황장치 중 대표적인 액분산 방식에는 분무탑(spray tower) 방법이 주류를 이루고 있고, 가스분사 방식으로는 단탑(tray tower)과 제트버블링반응기(jet bubbling reactor) 등이 있으며 이들 공정들은 각각의 장단점이 있다. 또한 산화방식에 따라 별도의 산화용 반응조를 두는 별도산화 방식과 탈황 공정에서 일어나는 모든 화학반응이 하나의 흡수탑 내에서 이루어지도록 하는 강제산화 방식으로 구분할 수 있는데 설비비와 동력 소모가 적은 강제산화 방식이 배연탈황 공정의 주류를 이룰 것으로 전망된다[14].

습식 석회석-석고 공정에서 SO₂제거 효율에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 흡수액의 pH와 L/G비(Liquid/Gas, 기액비)이다. 흡수액의 pH가 높아지면 SO₂ 제거효율은 증가하지만 석회석 이용률과 산화반응 속도는 낮아지게 된다. 일반적으로 강제산화 방식의 Spray type 습식 석회석-석고 공정에서 흡수액의 pH는 5~6정도 이고, 가스분사 방식인 Jet bubbling reactor에서는 3~5정도로 유지되고 있으며 pH 변화를 억제하여 안정한 화학반응을 유도하고, 석회석 이용률과 SO₂ 제거 효율을 증가시킬 목적으로 마그네슘화합물과 유기산(adipic, citric acid)을 첨가하는 공정도 개발되었다. Spray tower 에서의 L/G비를 증가 시키면 SO₂ 효율은 증가하지만 흡수액의 순환을 위한 동력 소모가 커지게 되므로 시스템 특성에 부합되도록 적절한 L/G비를 산정하여야 한다. 또한 SO₂ 제거 효율에는 영향을 주지 않으면서 L/G비를 감소시키기 위한 시도가 계속되어 왔으며, 그 일환으로 흡수액에 개미산을 첨가하여 SO₂ 흡수를 촉진, L/G비를 감소시킨 대표적인 공정이 SHU (Saarberg-Hölter Umwelttechnik) 공정이다. 특히 약유기산을 첨가하는 공정은 염소에 의한 영향을 거의 받지 않는다는 장점이 있다. 기존의 습식 석회석-석고 공정에서 해결해야 할 가장 큰 문제는 스케일 생성 방지이다. 스케일 생성의 억제를 위해서는 흡수액내에 종결정으로 작용할 수 있는 석고를 첨가하거나, 흡수탑 내부구조를 단순화하고 고형물의 누적이 예상되는 부분의 세척을 가능토록하고, 흡수액의 pH를 안정적으로 유지하기 위한 첨가제 주입 등의 방법이 있다[14].

이중염기(dual alkali) 공정은 기존 습식 석회석-석고 공정에서 석고에 의한 스케일 생성의 문제점을 해결하기 위해 개발되어 1970년대 초부터 미국에서 실용화된 공정으로 두 가지의 알칼리 화합물을 사용한다. 소다, 암모니아, 황산알루미늄 등과 같은 수용성 알칼리를 사용하여 SO₂를 흡수하고, 여기에 석회/석회석과 같은 다른 알칼리는 재생공정에 사용하여 반응생성물을 재순환시킨다[14].

이와 유사한 공정으로 DOWA 공정이 있으며, Wellman-lord 공정도 Dual alkali 공정의 일종으로 1960년대에 화학 비료 생산물에서 발생하는 황을 회수하기 위하여 Wellman-lord Inc. 에 의해 개발된 공정으로 처음에는 흡수제로 칼륨화합물을 사용하였지만 스케일 생성 문제와 소모된 흡수용액의 재생에 따른 증기 소모량의 과다로 인하여 나트륨화합물로 교체하여 사용하고 있다. 그러나 이 공

정들은 석회석-석고 공정에 비해 일반적으로 탈황 비용이 매우 높기 때문에 더 이상의 발전 가능성은 적은 것으로 판단된다[14].

산화마그네슘(Mag-Ox) 공정은 1964년 독일에서 처음 개발되었으며 $Mg(OH)_2$ 슬러리를 이용하여 SO_2 를 흡수하고 반응생성물인 $MgSO_3$, $MgSO_4$ 로부터 SO_2 를 회수하는 재생식 탈황공정으로 대부분 화력발전소에 이용되고 있고, 일본에서는 1971년 이후 제련공장과 황산제조공장에 도입되어 이용되고 있다. 이외에 흡수제로서 구연산나트륨(sodium citrate) 용액을 이용한 구연산(citrate) 공정과 황화철(ferrous sulfide) 슬러리를 이용하는 SULF-X 공정, 탄산칼륨(potassium carbonate) 용액과 같은 염화칼륨을 사용하여 SO_2 를 제거하고 황 원소를 회수할 수 있는 CONOSOX 공정 등이 일부 이용되고 있으나 전체적인 습식 배연탈황 공정개발의 추세는 역시 석회석-석고법의 공정 개선에 초점이 맞추어지고 있다[14].

2.2.2 건식 및 반건식 탈황 공정

건식 또는 반건식 탈황 공정이란 배기가스를 분말이나 펠릿(pellet)형태의 촉매층으로 통과시키거나 고온의 배기가스에 건조한 분말형태의 흡수 반응제 또는 슬러리 형태의 흡수 반응제를 분사하여 SO_2 를 흡수, 제거하는 방식의 배연탈황 공정으로 재생법과 비생법으로 크게 구분할 수 있다. 이 공정은 장치가 비교적 단순하고 수처리 공정이 필요 없다는 장점 때문에 현재 세계 각국에서 활발하게 연구가 진행되고 있다[14].

탈황공정 중 가장 단순한 공정인 건식 석회법은 고온의 노 내에 석회석($CaCO_3$) 또는 소석회[$Ca(OH)_2$] 분말을 분사하여 석회석의 분해로 생성된 생석회(CaO)가 SO_2 와 반응하여 황산칼슘($CaSO_4$)를 형성하면 이를 플라이애시(fly ash)와 함께 집진기에서 포집, 제거하는 방법이다. 반응식은 식 (2.15) ~ (2.17)과 같다[14].



그러나 1960년대에 연구개발이 시작된 이 공정은 SO_2 에 대하여 이론량의 약 2배 정도의 CaCO_3 를 주입해도 탈황효율이 30% 정도로 낮아 석회 이용률의 비경제성 등의 문제점으로 인하여 실용화 되지는 못했다. 그 이후, 여러 가지 변형 개선된 건식 공정이 세계 각국에서 연구되고 있으며, 그 중 대표적인 공정으로는 고정상 또는 유동상 흡착탑에서 활성탄을 이용하여 배기가스 중의 SO_2 , O_2 , H_2O 등을 흡착, H_2SO_4 를 생성시키고 소모된 활성탄은 재생하여 재순환 시키는 활성탄 흡착법과 플라이애시의 성분이 다공성 실리카와 알루미늄으로 구성되어 있다는 점에서 착안하여 소석회, 플라이애시, 석고 등의 혼합물을 가압, 성형한 흡착제(adsorbent pellet)에 SO_2 를 흡착시켜 제거하는 새로운 공정이 최근에 개발되었다.

대표적인 반건식 공정인 분무건조(spray drying) 공정은 소석회 슬러리를 150°C ~ 250°C 정도로 유지되는 흡수탑 내에 분사하여, 생성된 CaSO_3 를 가스의 열과 반응열로 건조시켜 분말상의 생성물을 흡수탑 하부와 전기 집진기 또는 백 필터에서 포집 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°C ~ 80°C 정도이기 때문에 재가열과 수처리가 필요치 않은 장점이 있는 반면, 분무노즐(spray nozzle)의 마모가 심하고, 흡수제로서 주로 소석회를 사용하기 때문에 SO_2 의 농도가 높은 배기가스를 처리할 경우 흡수제 비용이 높아지는 단점이 있으나 부산석고를 이용할 수 없는 조건하에서 배기가스 중 SO_x 의 농도가 800 ppm 이하의 비교적 농도가 낮은 가스를 처리하는 경우에는 습식법보다 유리할 수도 있다[14].

이외에 Spray drying 공정과 기본적인 원리는 같으나 흡수제로 탄산나트륨(Na_2CO_3) 용액을 사용하여 황을 회수하는 수용성탄산염공정(aqueous carbonate process)과 SO_2 를 CuO 와 반응시켜 황산염을 생성시킨 후 환원가스로 SO_2 를 회수하여 원소황, 황산 등을 생산하고 CuO 를 재생하는 산화동(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.

2.3 선박의 스크러버 적용

MAPOL 73/78 부속서 VI 제4규칙에서는 동등물에 대한 내용을 언급하고 있으며, 당사국 주관청은 동 부속서에 의해 요구되는 부속품, 재료, 기기 또는 장비의 선박에 설치, 다른 절차, 대체연료, 승인 방법을 동등물로 대체하는 것을 허용할 수 있다. 단, 이러한 동등물은 제13규칙 및 14규칙의 규정을 포함한 동 부속서에서 요구되는 것과 동등 이상의 효과를 가지는 것을 조건으로 한다. 이에 따라 배기가스 세정장치인 스크러버는 선박의 디젤 기관에서 배출되는 NO_x , SO_x 및 PM을 저감시키기 위한 가장 적합한 해결책으로 고려된다. 스크러버는 배기가스에 포함된 SO_x 나 NO_x 를 제거하기 위해 해수 또는 화학적으로 제조된 세정수를 이용하는 습식 스크러버와 건조된 화학물질을 이용하는 건식 스크러버가 있으며, 습식 스크러버와 건식 스크러버는 모두 선박에서 배출되는 배기가스를 처리하는 기술로 스크러버를 통해 정화된 배기가스는 대기로 방출된다. 스크러버는 운전방법에 따라 NO_x 와 SO_x 를 약 60, 99%까지 제거가 가능한 것으로 알려져 있다[15].

스크러버는 육상 산업으로부터 배출되는 SO_x 를 줄이기 위해 1930년부터 사용되었으며, 선박의 경우 1990년부터 유조선의 주기관에서 배출되는 배기가스를 세정하기 위한 목적으로 적용되었다. 선박의 디젤 기관에서 발생하는 오염물질 중 SO_x 는 대부분 SO_2 와 SO_3 로 이루어진 가스상 물질로 수용성이다. 건식 스크러버는 물이나 액체를 사용하지 않지만 Fig. 2.5와 같이 직경 3 mm-8 mm 정도 크기의 과립(granulate) 형태인 수산화칼슘[$\text{Ca}(\text{OH})_2$]을 배기가스에 노출시켜 SO_x 와 화학 반응을 통해 제거한다. 건식 스크러버는 배기가스가 물을 통과하지 않아 냉각되지 않기 때문에 선박의 EGE(Exhaust Gas Economizer) 전단에 설치하거나 선택적 촉매 환원장치(SCR)와 함께 사용할 수 있다. 그러나 건식 스크러버가 선박에 적용되는 사례는 극히 드물다. 현재 독일의 Couple System 만이 해양 시장에 건식 스크러버를 제공하고 있으나, 육상의 탈황설비에만 사용되고 있는 실정이다[16].

Fig. 2.6은 건식 스크러버의 시스템 개략도를 나타낸다.



Fig. 2.5 Granulated lime, $\text{Ca}(\text{OH})_2$

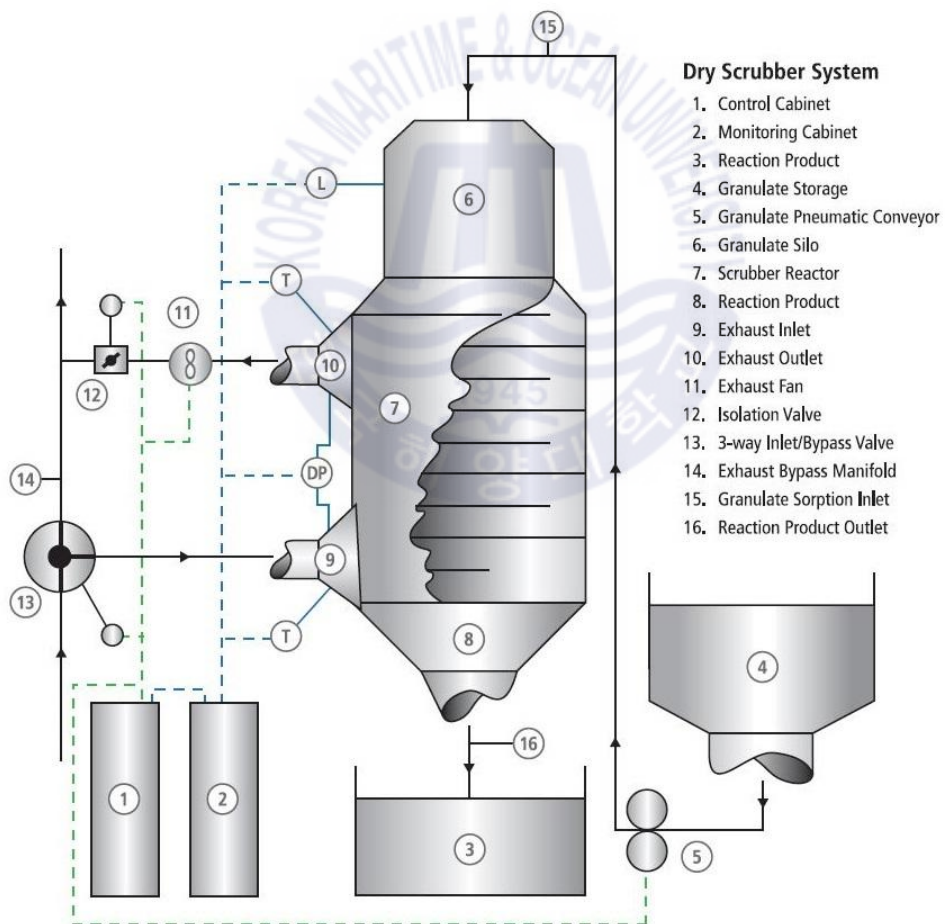


Fig. 2.6 Dry scrubber system

건식 스크러버에서 SO₂와 SO₃는 과립 형태의 Ca(OH)₂와 반응하여 칼슘화합물을 형성시킨다. 이때 생성된 칼슘화합물은 공기 중에서 산화되어 황산칼슘(CaSO₄) 또는 석고(CaSO₄ · 2H₂O)를 형성하는데, 식 (2.18) ~ (2.20)과 같은 화학 반응을 거친다.



이렇게 생성된 반응물은 최종적으로 육상으로 배출을 해야 하며, 습식 스크러버에 비해 부피가 크고 금액 또한 비싸기 때문에 선박에는 대부분 습식 스크러버를 적용하고 있다.

습식 스크러버는 흡수제와 디자인에 따라 다소 차이는 있으나, 기본 원리는 노즐에서 흡수제를 분사시키면 흡수제와 배기가스가 접촉되면서 배기가스에 포함된 수용성 가스인 SO_x를 용해시키는 것이다. 즉, 세정액을 배기가스에 분사함으로써 화학반응을 통해 배기가스를 처리하며, 기본적인 화학반응은 식 (2.21) ~ (2.22)와 같다.



산성의 SO_x를 용해·중화시키기 위해 일반적으로 해수나 화학세정수를 사용한다. SO_x가 용해되면 해수의 천연 알칼리성 물질 또는 화학세정수에 포함된 알칼리성 물질과 반응하여 용해성 황산염을 형성하게 되고 최종적으로 대기로 배출되는 배기가스 내 SO_x가 제거된다.

앞선 설명에 언급된 바와 같이 선박에 적용되는 습식 스크러버는 흡수제와 디자인에 따라 **Table 2.10**과 같이 개방형 스크러버(open loop scrubber)와 폐쇄형 스크러버(close loop scrubber)로 구분할 수 있으며, 이 두 가지를 결합한 복합형 스크러버(hybrid scrubber)가 있다.

Table 2.10 Classification of wet scrubber

Wet scrubber type	Wash liquid
Open loop scrubber	Sea water
Close loop scrubber	Fresh water (with neutralizing agent)
Hybrid scrubber	Enabled on both (S.W & F.W)

2.3.1 개방형 스크러버

흡수제로 해수만을 사용하는 개방형 스크러버는 전혀 새로운 방법이 아니며, 영국의 발전소에서 1933년부터 배연탈황에 이미 사용하고 있는 방법으로 해수 자체가 pH 8.0~8.3, 알칼리도 2.2 mg/L~2.4 mg/L인 성질을 이용한다. 해수에 포함된 알칼리성 물질(중탄산이온, HCO_3^-)에 의해 pH가 형성되며, 이는 대기 중의 CO_2 가 해수에 녹으면서 생성되는 것이 일반적이다. 해수 속의 중탄산이온은 Na_2CO_3 또는 CaCO_3 형태로 존재하게 되며, 식 (2.23) ~ (2.24)와 같이 SO_x 의 흡수에 의해 발생된 수소이온이 탄산이온과 반응하여 물과 탄산가스를 만들어 산성효과가 감소되고 흡수된 SO_x 는 황산염으로 산화되는 원리이다.



Ca^{2+} 이온의 경우에도 위와 동일한 식으로 반응한다.

따라서 개방형 스크러버는 세정수가 알칼리성인 경우에만 효과적이며, SO_x 흡수효율은 사용되는 해수의 화학적 성질에 높은 상관성이 있다. 많은 연구에서 해수의 온도와 SO_2 의 농도에 따른 SO_2 용해도(solubility)를 측정하여 화학 평형식을 제시하였다. 해수의 중탄산염으로 인해 SO_2 용해도는 청수와 비교하여 약 2~3 배 이상 높은 것으로 알려져 있다. 또한 탄산염을 제거한 해수와 청수를 흡수제로 사용한 경우 SO_2 분압 101.3 kPa, 해수 염분 0~40 g/kg 조건에서 탄산염이 제거된 해수는 청수보다 낮은 용해도를 나타낸다고 보고되기도 했다. SO_2 분압 22.4 Pa 조건에서 해수의 온도와 염도에 따른 SO_2 용해도를 측정하였으

며, 해수의 염분이 높을수록 SO₂ 용해도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이로 인해 해수가 청수에 비해 높은 SO_x 제거효율을 갖는 것으로 나타났다[17].

개방형 스크러버는 Fig. 2.7과 같이 해수가 스크러버로 공급되어 SO_x를 제거 후 바로 선외로 배출되는 방법으로, SO_x가 해수 속에 녹아 생성된 황산은 황산염 형태로 배출되며 희석을 통해 일정 pH 기준을 만족시킨 후 방류 가능하다.

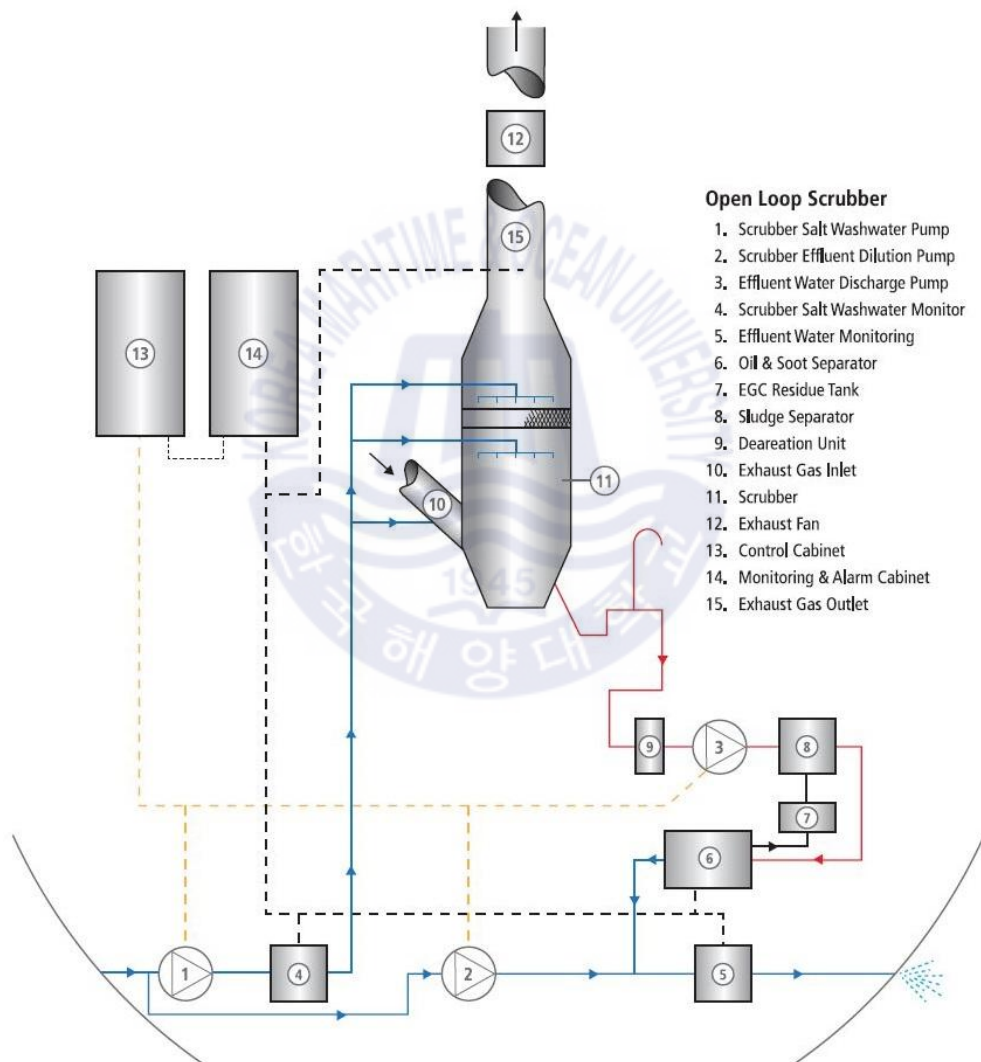


Fig. 2.7 Open loop scrubber system[18]

해수의 알칼리성을 이용하여 배출수를 중화시키기 때문에 별도의 중화제가 필요 없다는 장점이 있다. 하지만 해수의 알칼리성이 부족할 경우 혹은 담수 지역을 운항할 경우 SO_x 흡수 후 pH 조건을 만족하는 것이 어려울 수 있다. 통상적으로 희석용 해수를 추가로 공급하여 중화를 시킬 수 있으나, 그마저 어려울 경우 SO_x 배출 규정 및 배출수에 대한 규정을 동시에 만족하는 것이 어려울 수 있다. 따라서 개방형 스크러버를 적용할 경우 해수의 pH 값을 반드시 확인하여야 한다.

배출되는 세정수는 IMO의 2015 EGCS 지침서[Resolution MEPC.259(68)]에 따라 산성도, PAHs(다환 방향족 탄화수소), 탁도(turbidity), 질산염 농도 등은 기준 이하로 배출되어야 하며 연속적인 감시 및 기록이 가능해야 한다. 세정수의 산성도는 다음 두 가지 중 하나를 만족시켜야 한다. 선박의 이동 및 운항 중에 선박의 해수 흡입구와 선외 배출구에서 측정된 pH 차이가 최대 2 이내인 경우를 제외하고는 선외 배출구에서 pH 6.5 이상으로 유지하거나, 선박이 정지 중일 때 선외 배출 지점으로부터 4 m에서 측정된 pH가 6.5 이상이어야 한다. PAHs는 주로 화석연료의 연소에 의해 발생하는 물질로써 세계보건기구(WHO)가 지정한 1급 발암 물질인 벤젠 등 각종 발암물질과 신경 독성물질 등 인체에 특히 해로운 유해물질을 통칭한다. 자연적으로 잘 분해되지 않아 오랫동안 존재하면서 생물 섭취 시 암 또는 도연변이를 유발하는 독성이 강한 물질로 세정수의 최대 연속 PAH 농도는 유입 세정수 PAH 농도보다 기준치(세정수 유량이 45 t/MW·h일 때 50 μ g/L)를 초과해서는 안 되며, 세정수의 유량에 따라 동일한 수준의 농도차를 적용한다. 스크러버 작동 시 PAH 농도가 비정상적으로 증가할 수 있으며, 이 값은 12시간 동안 15분까지 허용되나 PAH 농도는 기준치의 2배를 초과할 수 없다. 최대 연속 탁도는 유입 세정수의 탁도와 비교하여 25 FNU(Formazin Nephelometric Units) 또는 25 NTU(Nephelometric Turbidity Units) 등 이와 동등한 단위보다 크지 않아야 한다. 정상적인 탁도의 지시를 위하여 평균 15분 이상이 소요되며 비정상적인 값은 12시간 동안 15분까지 허용되나 연속 탁도는 제한치의 20%를 초과할 수 없다. 이에 더불어 질산염, 첨가물 및 기타 물질들 역시 정해진 규정에 따라 기준 이하로 배출되어야 한다.

2.3.2 폐쇄형 스크러버

개방형 스크러버에서 해수가 SO_x를 직접 제거하고 배출된다면, 폐쇄형 스크러버에서는 Fig. 2.8과 같이 SO_x을 용해·중화시키기 위해 청수에 중화제가 포함된 알칼리성 화학세정수를 사용하며, 선박의 운항 중에 세정수의 선외 배출이 거의 없는 상태로 탈황 공정을 유지한다.

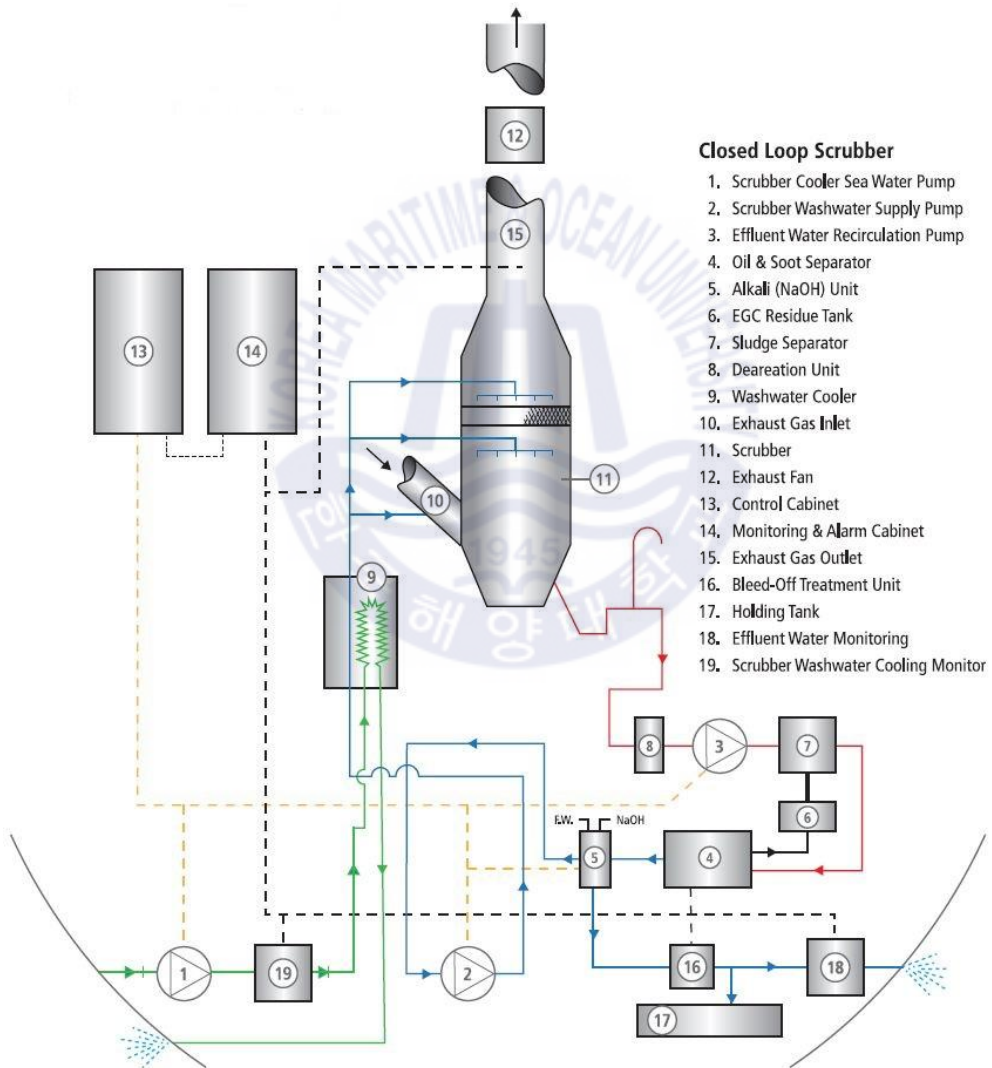


Fig. 2.8 Close loop scrubber system[18]

즉, 폐쇄형 스크러버에서 해수는 화학세정수를 단순히 냉각하기 위한 목적으로만 사용된다. SO_x 제거에 사용되는 청수는 중화를 위해 중화제가 투입되며 주로 수산화나트륨(NaOH)을 사용하고 극히 일부는 산화마그네슘(MgO)을 사용하기도 한다. 스크러버 내부 뿐만 아니라 SO_x 제거를 위한 화학반응은 개방형 스크러버와 유사하다. 폐쇄형 스크러버는 SO_x가 NaOH와 결합하고 해수의 천연 중탄산염과 반응하지 않기 때문에 CO₂의 방출이 없으며, 주요 화학반응은 식 (2.25) ~ (2.28)과 같다.



SO_x 제거에 사용되는 청수는 한 번 사용 후 선외로 배출하지 않고 NaOH를 직접 주입함으로써 알칼리도를 일정한 수준으로 유지하기 때문에 선외 배출의 양이 매우 적으며 배출수의 pH에 대한 제어가 쉬워 배출 시에도 규정 만족이 용이하다. 또한 해수의 pH 농도에 의한 영향이 없기 때문에 모든 해역에서 스크러버의 원활한 사용이 가능하다.

폐쇄형 스크러버에서 화학세정수는 재순환에 따른 오염물질이 축적되므로 세정수를 별도로 처리해야 한다. 세정수는 온도가 높은 상태이므로 재순환 및 열 교환 등을 통해 온도를 낮춰줄 필요가 있으며, 일반적으로 해수와 열 교환을 통해 세척수의 온도를 낮춘다. SO_x와의 반응으로 NaOH의 소모가 이루어지기 때문에 지속적으로 NaOH를 주입하여 일정한 pH를 유지시켜야 하며, 또한 폐수 처리를 통해 소모된 세정수를 보충하기 위해 청수도 지속적으로 주입해야 한다. 탈황 성능이 저하된 세정수는 별도의 폐수처리를 필요로 한다. 세정수에는 다량의 입자상 오염물질이 포함되어 있어 폐수처리 시스템은 주로 원심분리 또는 가압부상을 이용하여 세정수 내 입자상 물질을 분리한다. 따라서 개방형 스크러버에 비해 복잡한 구조를 갖으며, 설치 및 운전비용이 높은 단점이 있다.

2.3.3 복합형 스크러버

복합형 스크러버는 Fig. 2.9와 같이 필요에 따라 해수를 사용하여 흡수제 소모에 따른 스크러버 운전비용을 획기적으로 줄일 수 있는 개방형 스크러버와 화학세정수를 사용하여 선박의 위치와 상관없이 동일한 탈황 성능을 갖는 폐쇄형 스크러버를 모두 사용할 수 있는 시스템으로 주요 장점을 모두 얻을 수 있다.

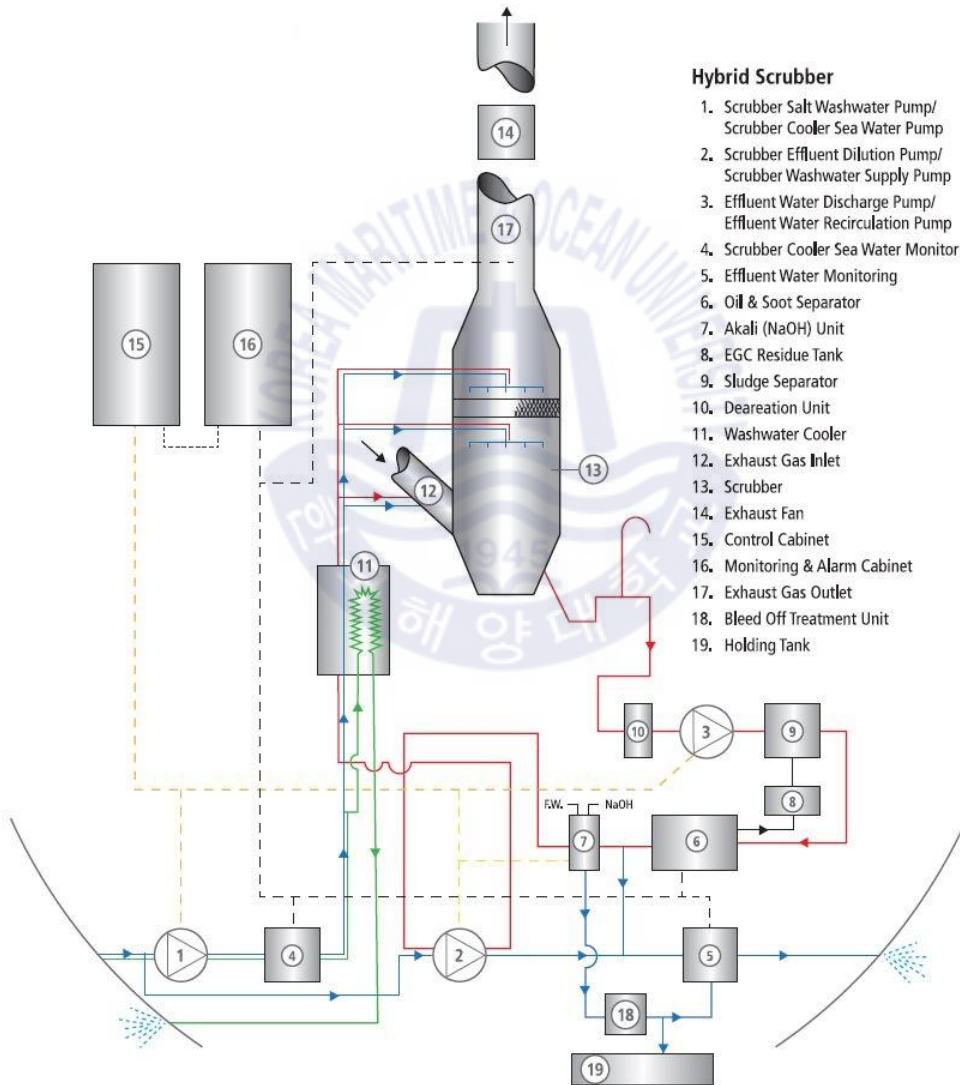


Fig. 2.9 Hybrid scrubber system[18]

일반적으로 배출규제해역이 아닌 해상에서는 세정수 배출에 대한 부담이 적기 때문에 해수를 이용한 개방형 스크러버를 운영하며, 배출규제해역이나 항만과 같은 연안에서는 세정수 배출 규정을 반드시 규제치 이하로 만족해야 하므로 폐쇄형 스크러버를 운영한다. 복합형 스크러버는 흡수제로 해수를 공급할 수 있는 시스템과 화학세정수를 공급할 수 있는 시스템이 동시에 설계되어 있는 구조로 개방형 스크러버에서 폐쇄형 스크러버로 전환하기 위해서는 열 교환장치, 투약 장치, 세정수 저장탱크 등 몇몇 부속 설비가 추가로 필요하다. 배출규제해역에서 폐쇄형 스크러버를 가동하면서 선박 내 저장탱크에 세척수를 저장하고, 선박이 공해상으로 진입할 경우 개방형 스크러버로 전환함과 동시에 세척수를 배출시킬 수 있는 장점이 있다.

이러한 복합형 스크러버는 SO_x 배출과 EGCS 배출수 기준을 동시에 만족할 수 있지만, 현재 ECA를 포함한 일부 지역에서만 세정수 배출에 제한을 두고 있다는 점과 비용적인 측면이 함께 고려되어야 한다. 미국은 EPA의 VGP(Vessel General Permit) 규정에 따라 육지로부터 3마일 이내에서 배출되는 세정수는 배출구에서 pH 6.5 이상이어야 하고, 유럽 또한 독일, 벨기에 등 일부 지역의 연안 및 항내 배출이 금지되고 있으며, 최근 중국, 싱가포르, 말레이시아에 이어 아랍에미레이트의 일부 지역에서까지 세정수 배출을 규제하는 정책이 연이어 발표되면서 연안국의 세정수 배출 규제는 점차 강화될 것으로 전망된다[19].

제 3 장 대상 선박과 스크러버의 선정 및 검토

본 연구에서는 선박의 실제 운항 조건하에 스크러버 설치 전·후 디젤 기관 연료소모량의 변화 및 스크러버의 현실적인 경제성 검증을 위해 2020년도 1월 스크러버 개장(retrofit)공사를 완료한 1,000 TEU급 남중국해 정기 운항 컨테이너 운반선을 연구 대상으로 선정했다.

3.1 선박의 제원

3.1.1 일반 사항

연구 대상으로 설정한 1,000 TEU급 컨테이너 운반선은 2014년에 건조되었으며, 6700 kW급 전자제어 디젤 기관을 주기관으로 탑재한 선박이다. 대상 선박의 일반 제원은 Table 3.1 및 Fig. 3.1과 같다.

Table 3.1 Particulars of target vessel

Vessel	1,000 TEU container ship
Delivered	28-Oct-2014
L.O.A(m)	141.00
L.B.P(m)	132.00
Breadth(Mld)(m)	24.80
Depth(Mld)(m)	11.20
Draft(Summer)(m)	8.214
GT(ton)	9,998.00
NET(ton)	4,927.00
DWT(ton)	12,473.00
Speed(knots)	18.24
Cargo capacity(TEU)	1,003



Fig. 3.1 Object of study “1,000 TEU container ship”

3.1.2 디젤 기관 제원

Table 3.2는 대상 선박의 주기관 및 발전기의 디젤 기관 제원이다.

Table 3.2 Specification of target diesel engine

Diesel engine		Main engine	Generator engine
Maker		STX MAN B&W	STX ENGINE
Type		6S46ME-B8.3	6L23/30H × 3 sets
Cylinder		6	6
Bore(mm)		460	23
Stroke(mm)		1,932	30
Power	MCR(kW)	6,700 (122 rpm)	852 (720 rpm)
	NCR(kW)	6,030 (90% of MCR)	-
SFOC(g/kW·h)		167.1	192.0
Exhaust gas flow(kg/h)		55,080	8,082
Exhaust gas temperature		Max. 270°C	Max. 370°C

3.2 스크러버의 제원

3.2.1 일반 사항

IMO의 2015 EGCS 지침서[Resolution MEPC.259(68)]에 따라 스크러버의 승인 방법에는 Scheme A와 Scheme B 두 가지가 있으며, 주관청 또는 위임받은 기관에 승인을 위해 제출해야 하는 서류는 **Table 3.3**과 같다.

Table 3.3 Required document for IMO

Document	Scheme A	Scheme B
SECP(SO _x Emissions Compliance Plan)	○	○
SECC(SO _x Emissions Compliance Certificate)	○	
ETM (Exhaust Gas Cleaning System - Technical Manual) Scheme A	○	
ETM (Exhaust Gas Cleaning System - Technical Manual) Scheme B		○
OMM (Onboard Monitoring Manual)	○	○
EGC (Exhaust Gas Cleaning) Record Book or Electronic Logging System	○	○

Scheme A는 배기가스 배출기와 결합한 상태에서 매개변수 확인 및 성능 검증 후 증서를 발행하는 제도이며, 운항 중에는 EGCS 입구 측 세정수의 압력 및 유량, 배기가스의 입/출구 압력 및 온도, 연료유 연소 장비 부하 등 몇 가지 매개변수만 모니터링 하여 규정 만족을 증명한다.

Scheme B는 증서발행 없이 배기가스 내 SO₂(ppm)/CO₂(%)의 비율을 검출하는 연속 모니터링 시스템(CMS: Continuous Monitoring System)를 설치하여 운항 중 계속적인 계측을 통하여 규정 만족을 증명한다. 단, 두 방법 모두 배출되는 세정수 및 매개변수는 계속해서 모니터링 해야 한다. Scheme A에 비해 Scheme B가 승인 시에 절차 및 모니터링 방법이 간편하여 보편적으로 적용되고 있으며, 본 연구의 대상 스크러버도 Scheme B로 승인되었다. 모니터링의 결과는 별도의

확인 없이 시스템에 자동으로 저장되어 별도의 기록 유지가 필요하지 않다.

본 연구의 대상 선박에 설치되는 스크러버는 개방형 스크러버로 설치 공간을 작게 차지하는 I 형(In-line type)을 적용한다. 다양한 연결방식을 제공하여 연돌 케이싱 배치에 따라 유연한 설치가 가능하며 연돌과 케이싱을 수정하지 않고 설치가 가능하여 개장공사 시 설치비용을 절감할 수 있는 이점이 있다[19].

스크러버의 용량은 주기관 및 발전기관의 배기가스 질량유량을 기준으로 산정하며 제조사마다 다른 산정기준을 가지고 있다. 대상선박의 주기관과 2대의 발전기를 90% 부하로 운전할 때 배기가스 질량유량은 각 49,572 kg/h, 14,585 kg/h이며, 이를 합산한 약 64,120 kg/h을 해당 제조사의 산정기준(7,600 kg/h당 1 MW)으로 환산한 값이 8.4 MW이다. 따라서 Table 3.4[20]와 같이 9 MW 용량의 스크러버가 선정되었다.

Table 3.4 Specification of SO_x scrubber

Equipment	Item	Specification
Scrubber	No. of set(s)	One(1) set/ship
	Capacity	9 MW (Open loop)
	Dimension(mm)	∅2,700 x H 8,300
	Weight(kg)	Abt. 8,500
Sea water pump	Capacity	432 m ³ /h x 65 m W.C.
	No. of set(s)	Two(2) x 100%
	Elec. motor	128 kW
Exhaust gas sealing air damper	Main engine	900 A x 2 sets
	Gen. engine	400 A x 6 sets
Sealing air fan	Capacity	9.0 m ³ /min x 500 mmAq
	No. of set(s)	Two(2)
	Material	SS400
	Elec. motor	2.2 kW

Load profile (Sea going)	Main engine	90%
		49,572 kg/h
	Generator engine	90% x 2 sets
		14,585 kg/h
Total	Abt. 64,120 kg/h	

스크러버에서 SO_x 및 PM 등의 불순물을 제거한 세정수와 세정수에 의해 반응한 분무상태의 황산은 강한 산성을 띤다. 이 분무상태의 황산은 배기가스의 배출 압력에 의해 날려 스크러버 장비 및 배기관 장치에 심각한 부식을 유발할 수 있으므로 스크러버 장치는 Table 3.5[19]과 같이 내식성재료를 요구한다.

Table 3.5 Material of SO_x scrubber

Section	Pipe material
Scrubber inlet(sea water)	PE(Polyethylene) coated steel or other sea water resistant material
Scrubber outlet (sea water discharge)	GRP(Glass fiber reinforced plastic)
Exh. gas pipe outlet	Duplex stainless steel or coated(glass flake) mild steel
Scrubber body	SMO 254

스크러버 타워, 세정수 파이프 및 노즐, 수분제거기의 재료는 SMO 254를 사용한다. SMO 254는 다량의 크롬(Cr) 및 몰리브덴(Mo)을 함유한 고내식 스테인리스강으로, 고온 해수와 같은 가혹한 환경에서도 뛰어난 내식성을 가지며, 환경에 따라서는 니켈(Ni) 합금강이나 티타늄(Ti)에 필적하는 내식성을 갖는 경제성 높은 강종이며 몰리브덴(Mo) 함량이 6%로 6% Moly라고도 부른다.

하이씨체스트(high-sea chest)에서 해수펌프를 통해 스크러버로 공급되는 세정수 파이프는 일반 스틸파이프의 내부에 고무(rubber) 재질의 PE(polyethylene) 코팅을 하여 부식 등을 방지할 수 있도록 설치된다.

배기가스 세정 후 세정수는 강산성으로 바뀌므로 세정수를 해상으로 배출하

는 파이프는 일반 스틸 또는 스테인리스 스틸 재질로 사용하는 경우 산에 의한 부식 및 파공이 발생한다. 이에 따라 해당 파이프는 유리섬유강화플라스틱 (GRP: Glass fiber Reinforced Plastic) 파이프로 설치한다. GRP는 내노후성이 우수하며 가볍고(강관의 1/3, 시멘트관의 1/10), 내구성, 외압강도, 내압강도, 내부식성의 장점을 가지고 있다[21].

스크러버의 배기가스 출구, 해수의 입·출구의 경우 작동 중 Table 3.6과 같은 기준으로 모니터링 및 측정이 실행되며, 해당 기록은 별도로 설치된 감지기(sensor)에서 모니터링하고 자료는 시스템에 자동 저장된다.

Table 3.6 Monitoring system

Monitoring unit	Monitors	Measures	Value
Gas monitoring (G7000)	Exhaust gas	F.O. sulphur (% m/m)	SO ₂ (ppm)/ CO ₂ (% v/v) emission ratio
		0.10	4.3
		0.50	21.7
		1.00	43.3
		1.50	65.0
		3.50	151.7
Water monitoring (G6100)	Water to scrubber	pH	1) pH 6.5 at 4m 2) pH 2 difference between ship's inlet and outlet
		PAH	< 50 µg/L
		Turbidity ⁶⁾	< 25 FNU or 25 NTU

세정수 배출(drain)이 원활하지 않은 경우를 대비하여 별도의 레벨 센서가 설치되어 경고 및 비상 정지가 되도록 설계되어 있다. 세정되는 과정에서 발생하는 황산의 경우 해수의 염기성을 이용하여 중화시켜 중성의 세정수로 배출하며 추가로 세정수의 탁도(turbidity)도 감소시킨다. 이때 배출지점(배출구)로부터 최소 4 m 떨어진 지점에서 pH 6.5이상의 세정수가 배출되어야 한다.

6) 일반적으로 수질지표의 탁도는 빛을 입사시킨 후 부유물질에 의해 산란되는 빛의 정도를 측정하여 나타낼 수 있으며 단위는 NTU를 사용한다. 수질환경기준을 보면 심미적 영향물질 항목에서 먹는 물의 탁도는 0.5 NTU이하, 먹는 샘물의 경우는 1 NTU이하여야 한다.

3.2.2 스크러버의 구성

대상 선박에 적용된 스크러버는 개방형 스크러버이며, 배기가스로부터 SO_x 제거하는 데 해수를 사용하도록 설계되어 있다. 스크러버의 구성은 Fig. 3.2와 같이 아래의 네 구간으로 나뉜다[22].

- 해수 펌프에서 흡입된 세정수 공급 및 분사되는 구간
- 배기가스로부터 황산화물을 제거하는 스크러빙(scrubbing) 구간
- 황산화물 제거에 사용된 세정수를 선외로 배출하는 구간
- 배기가스가 스크러버를 통하지 않고 바로 배출되는 바이패스(by-pass) 구간

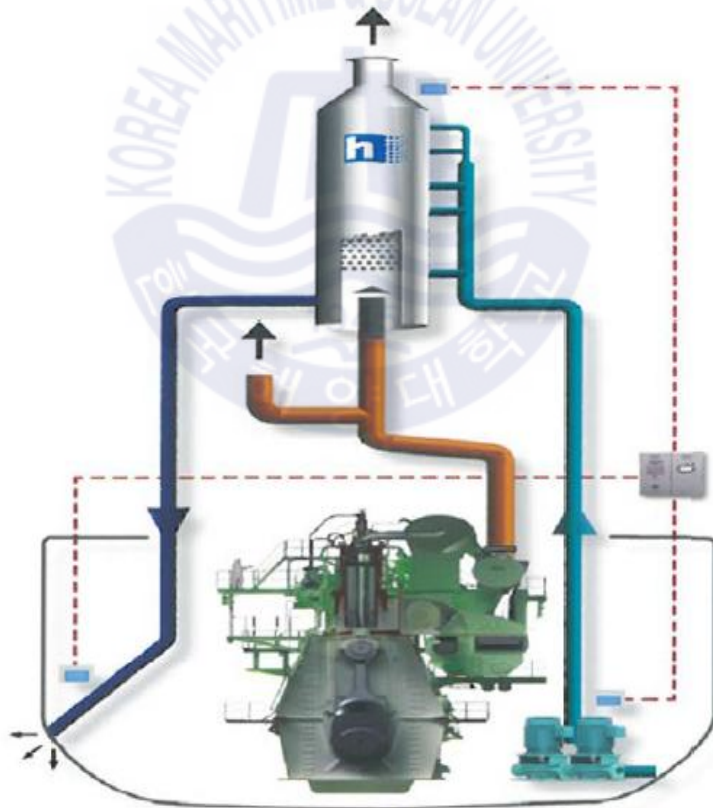


Fig. 3.2 SO_x scrubber system for target vessel

Table 3.7은 세정수 공급용 해수펌프의 사양으로 대상 선박에는 2대가 추가 설치되었으며, 하이씨체스트에서 펌프를 통해 흡입된 해수는 스크러버 타워의 세정수 노즐을 통해 배기가스에 분사된다. 또한, 설치된 해수펌프는 가변속도 드라이브(VSD: Variable Speed Drives)가 적용되어 연료유연소장치(FOCU: Fuel Oil Combustion Unit)의 부하에 따라 유량을 조절하여 에너지를 절감할 수 있다.

Table 3.7 Specification of sea water supply pump

Description		Specification
No. of set(s)		2
Capacity (m ³ /h)		432
Total head (m)		65
Motor	Output (kW)	128
	Volt / Phase / Hz	440 V / 3 PH / 60 Hz

Fig. 3.3은 스크러버의 스크러빙 구간 내부구조를 보여준다.



Fig. 3.3 Internal structure of SO_x scrubber

주기관 및 발전기에서 발생 된 배기가스가 스크러버 측으로 들어오는 통로에는 Fig. 3.4와 같이 안내 날개가 별도로 설치되어 배압 발생을 방지한다.



Fig. 3.4 Spray shielder & vane

스크러버 시스템에서의 충전층(packing bed)은 배기가스와 세정수가 접촉하는 장소이며, 충전물(packing)은 배기가스의 체류시간 및 세정수와와의 접촉률을 증가시킨다. 충전물은 기체와 액체의 접촉면적 증대, 낮은 압력손실, 구조적 강도 및 경량화, 우수한 약품성, 내열성, 부식성을 요구하며 스크러버의 성능을 좌우하는 역할을 한다. 충전물에서의 차압은 유속에 비례하고, 충전물의 크기가 작을수록 더 큰 차압이 발생하지만 크기가 작을수록, 표면적이 클수록 가스 제거 효율이 우수한 경향을 나타내고 있다[23]. 대상 스크러버의 경우 제작사의 설계 조건에 따라 Fig. 3.5와 같은 새들링형(saddle ring type) 충전물을 사용한다.



Fig. 3.5 Saddle ring type packing

해수에 의해 세정된 배기가스의 경우 다량의 수분이 함유되어, 장기간 노출 시 배기관 및 기타 선체 구조의 부식을 유발할 수 있다. 이를 예방하기 위해 수분제거기(mist eliminator)를 설치하여 배기가스 세정 후 남아 있는 수분을 분리, 여과 및 회수한다. 수분제거기는 Fig. 3.6과 같이 아주 얇은 금속선으로 기층을 중복시켜 매트 상태를 유지하고 있다. 해수에 세정된 배기가스가 수분제거기를 통과할 때 미립자는 패드 표면에서 관성충돌원리에 의해 체적이 커지므로 점차 큰 물방울이 되어 낙하하게 된다. 수분제거기를 통과 한 불순물이 제거된 가스는 대기로 방출된다.



Fig. 3.6 Mist eliminator

노즐은 배기가스에 세정수를 분무(spray)한다. 노즐은 최적의 위치에서 세정수를 분사시켜 배기가스와 세정수의 접촉면적을 넓혀야 하며 이는 스크러버 운전효율을 결정한다. 특히 하나의 스크러버에 주기관 및 발전기 배기관을 모두 연결하는 경우 불규칙한 상태에서의 분사는 환류 또는 편류를 유발하여 과도한 배압을 발생할 가능성이 있다. 스크러버 타워에는 Fig. 3.7과 같이 총 9개의 노즐(N1~N9)이 있다. 이 중 N3, N4, N5, N6은 세정수 노즐로, 하부 세 부분의 노즐은 충전물 측으로 분무되어 배기가스의 황산화물을 제거하는 역할을 하며, 가장 상부의 노즐은 수분제거기 소제용으로 설치된다.

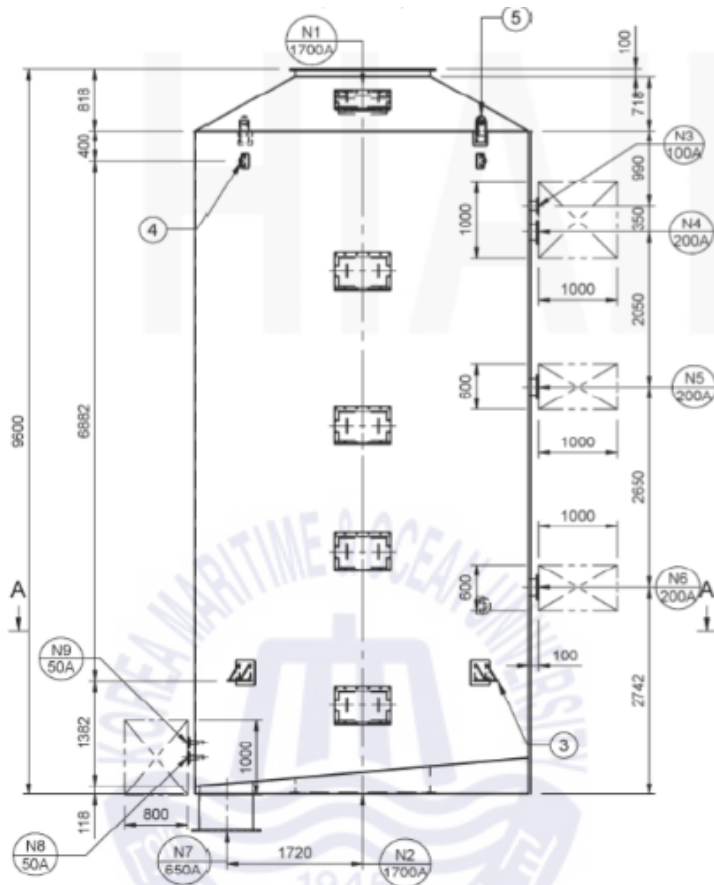


Fig. 3.7 SO_x scrubber tower

스크러빙 구간에서 황 성분을 제거한 세정수는 선외로 배출된다. 본 연구에 사용된 스크러버는 Scheme B 적용을 받으므로 연속 모니터링 시스템을 통한 배기가스 내 SO₂/CO₂의 비율 검출 및 배출수 매개변수에 대한 모니터링을 실시하며, 세정수 배출 시 IMO에서 요구하는 측정항목 및 제한치를 준수해야 한다.

IMO의 2015 EGCS 지침서[Resolution MEPC.259(68)] 의거 세정수의 배출기준은 스크러버 시스템의 초기 지침 역할을 수행하기 위함이며 배출수의 영향에 대한 많은 데이터가 쌓이면 그 기준은 향후 수정되어야 한다. 주관청은 스크러버의 승인시험 또는 커미셔닝(commissioning) 후 2년간 12개월 간격으로 배출수의 샘플 분석을 통해 관련 데이터를 수집하여야 한다.

주기관 및 발전기의 각각의 배기관에는 Fig. 3.8과 같이 비상운전을 대비하여 바이패스 댐퍼밸브(bypass damper valve)가 설치되며 저유황유가 공급될 수 있도록 구성되어 있다. 스크러버의 정지버튼 또는 비상정지버튼이 눌러지거나 오작동할 경우 바이패스 밸브가 공기압 작동기(pneumatic actuator)로 열려 대기 중 배기가스를 스크러버를 거치지 않고 바로 연돌로 방출하도록 한다. 업테이크 댐퍼밸브(uptake damper valve)는 바이패스 밸브가 완전히 열리기 전까지는 닫힐 수 없으며 반대의 경우에도 마찬가지로 작동되도록 안전장치가 되어 있다. 또한, 실링에어댐퍼(sealing air damper)는 운전 중인 스크러버에서 배출되는 배기가스가 정지해 있는 장비로 역류하는 것을 방지한다.

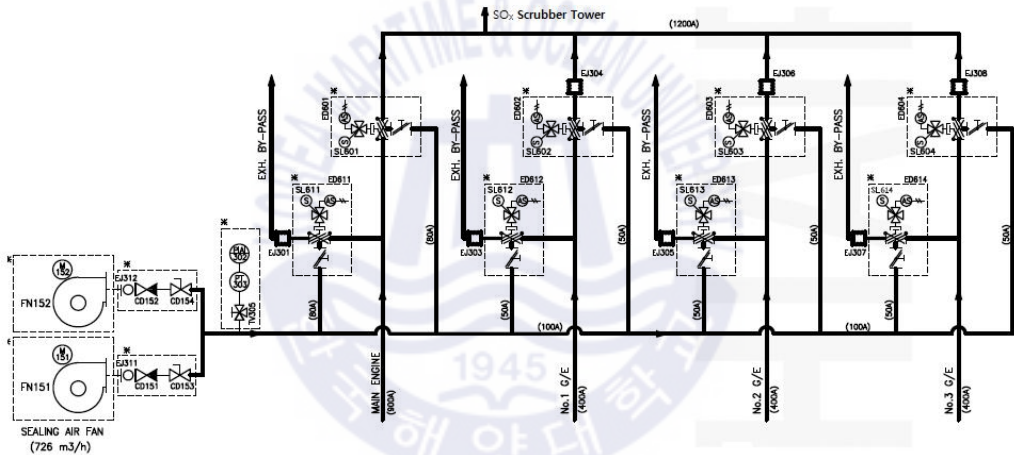


Fig. 3.8 Bypass damper valve

3.2.3 시스템의 작동 절차

항해 및 정박 중 스크러버 사용이 가능한 경우에는 고유황유를 사용하여 주기관 및 발전기를 운전한다. 운전 후 발생 되는 배기가스는 스크러버를 통하여 해수로 세정 후 대기 방출된다. 스크러버 사용이 불가능한 구간에서는 주기관 및 발전기는 저유황유를 사용하여야 한다. 보조보일러는 항해 중 별도로 설치된 EGE를 사용하는 관계로 운전이 거의 되지 않으며, 스크러버 사용이 허가되지 않은 구간과 정박 중에는 저유황유를 사용하여 운전해야 한다.

스크러버의 작동 및 운전상태 확인은 주제어판넬(MCP: Main Control Panel)과 원격제어판넬(RCP: Remote Control Panel)에서 할 수 있다. 주제어판넬은 주로 스크러버 주변에 설치되며 원격제어판넬은 ECR(Engine Control Room)에 설치된다. 주제어판넬은 PLC(Programmable Logic Controller), 데이터로거, HMI(Human Machine Interface)로 구성된다. 주제어판넬은 Fig. 3.9에 나타난 바와 같이 선박의 AMS, GPS 정보를 받아 연동되어 선박의 알람뿐 아니라 선박의 위치 및 UTC(Coordinated Universal Time) 등의 정보를 가져온다.

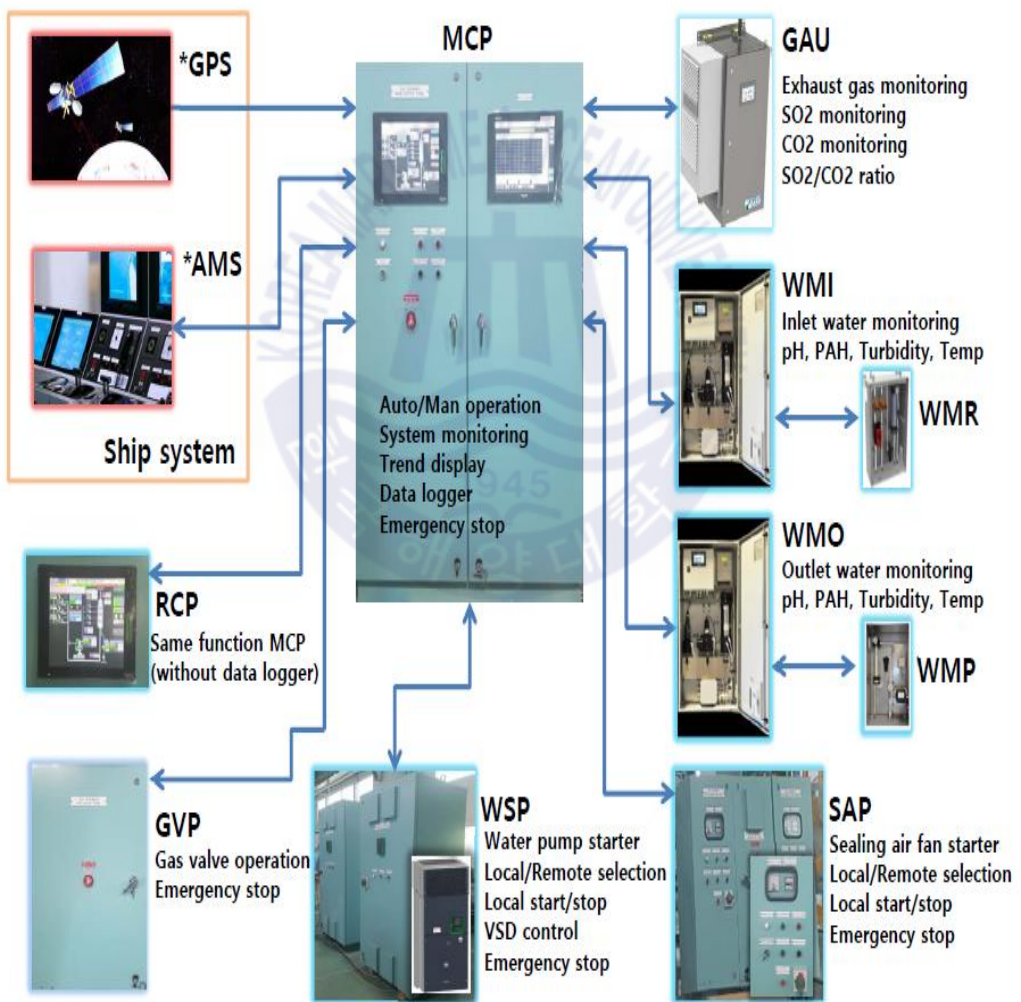


Fig. 3.9 Electric system

데이터로거에서는 GPS 데이터, 가스 모니터링(GAU), 세정수 모니터링(WMI), 배출수 모니터링(WMO) 및 주기관 및 발전기의 부하 등을 매 3분마다 수집하여 매일 24시간마다 데이터파일을 작성하며, 작성된 데이터파일은 전자파일로 다운로드 가능하다. HMI를 사용하여 스크러버를 자동 및 수동으로 작동, 정지, 비상정지 시킬 수 있으며 운전 시 각 부의 상태를 스크린을 통해 확인할 수 있다. SO_x를 제거하는 데 필요한 세정수 및 배출수의 유량은 FOC(Fuel Oil Consumption)의 부하, 해수펌프의 RPM 및 IMO에서 규정한 배기가스 SO₂/CO₂ 비율에 따라 계산하여 제어한다. 원격제어판넬의 기능은 데이터로거를 제외하고 주제어판넬과 같다. 두 판넬의 명령우선순위는 주제어판넬의 제어위치 버튼에 의해 선택된다.

3.3 설치 과정의 이해

벨기에, 독일 등 일부 유럽국가와 미국이 개방형 스크러버의 세정수 배출을 규제하고 있다. 본 연구의 대상 선박은 동남아항로를 운항중인 선박으로 개방형 스크러버를 채택하였으며 향후 세정수 배출 규제지역에서는 저유황유를 사용하여 운항 예정이다.

일반적으로 스크러버는 특별한 위험성이 없으므로 기관실 내부에 설치할 수 있으며 이에 대한 제한사항이 없다. 하지만 상당한 크기를 가지므로 기관실 내부에 설치하기 위해서는 기본적으로 스크러버의 형식 및 용량을 설정하고 설치 전에 운전 및 정비에 필요한 충분한 공간이 있는지 검토해야 하며 선박의 복원성 및 전력 부하 등에 대해서도 추가로 고려해야 한다. 기관실 상부에 스크러버 타워가 설치됨에 따라 연돌 및 케이싱의 확장공사가 수반될 수 있다. 이 경우 기관실의 체적을 계산하여 CO₂ 소화제의 필요량을 재확인하여 필요 시 고정식 소화설비의 추가 또는 개조가 필요하다. 또한 스크러버 설치로 인해 기존 경하중량의 2% 이상이거나 길이방향 무게중심 변화량이 L.B.P.(Length Between Perpendiculars, 수선간장)의 1% 이상일 경우에는 추가로 경사시험이 요구된다[24].

스크러버 설치 시 세정수 펌프, 실 에어 댐퍼, 검출 및 기록장비 등 추가 장비 운전으로 운항 중 전력 부하가 높아진다. 특히 세정수 펌프의 경우 스크러버가 운

전되는 동안 많은 양의 해수를 기관실 상부 스크러버 타워의 세정수 노즐까지 계속해서 공급해야하기 때문에 큰 용량의 펌프가 필요하다. 이에 따라 스크러버 운전에 따른 추가 소요전력을 분석하여 예비발전기의 가동 가능성 등에 대하여 확인해야 한다. SOLAS Reg. II-1/41의 요건에 따르면 “발전장치의 용량은 어느 1개의 발전장치가 정지한 경우에도 통상의 추진 및 안전성을 유지하기 위하여 필요한 전기설비에 급전할 수 있는 것이어야 한다” 라고 명시되어 있다. 스크러버를 설치하고 추가되는 전력량을 합산한 부하율은 발전기 용량의 90%를 넘지 않도록 선정하여야 하며 90%를 넘는다면 추가의 발전기 설치를 고려해야 한다[24].

스크러버의 용량은 운항 중 주기관의 부하를 고려하여 채택해야 한다. 단, 배기가스 내에 SO₂(ppm)/CO₂(%) 비율은 기준치 이하로 유지하여야 하며, Fig. 3.10 과 같이 감소시킨 용량과 비슷한 비율로 스크러버의 부피와 무게는 감소한다.

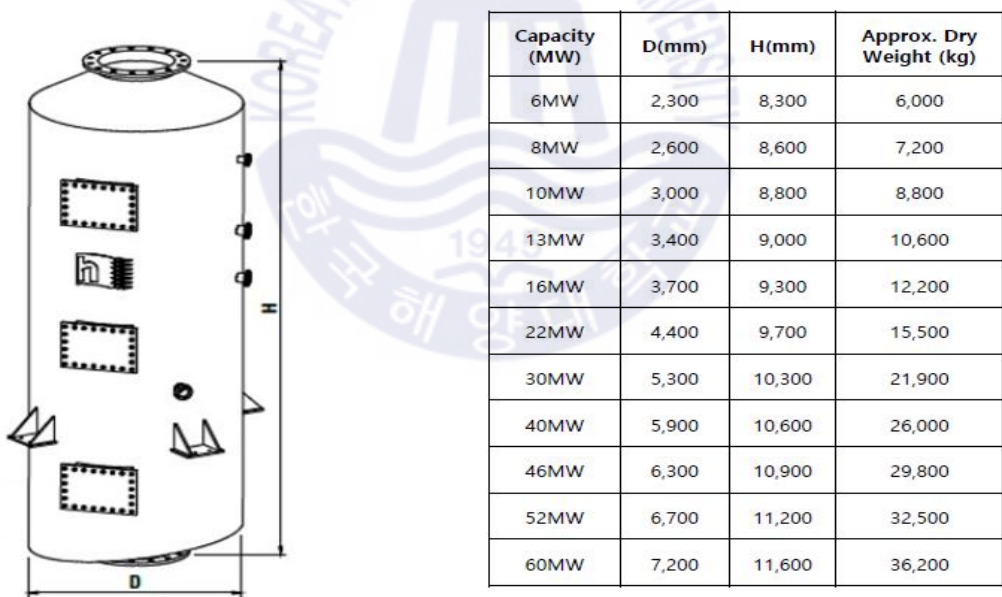


Fig. 3.10 Scrubber capacity by standard model

이 밖에 스크러버 개장공사를 위해서는 세정수 관장치를 포함하여 배기관관의 배치, 배압, 부식 및 선체구조에 대한 사항 외에도 재료, 자재 납기, 입거시설 등의 고려가 필요하다[24].



Fig. 3.11 Retrofit of SO_x scrubber

본 연구의 대상 선박은 국내조선소에서 입거수리와 동시에 개장공사를 진행 하였으며, 스크러버 승인 및 납기에 소요된 약 5개월은 제외 한 순수 개장공사 의 일정표는 Fig. 3.12와 같다. 일정 중 선저 세정수 배출구 설치 시에는 입거 시설에서 공사가 가능하며 나머지 공정은 하가 후에도 진행이 가능하다. 총 29 일간의 작업공기가 발생하였으며, 주말 등 휴일을 고려했을 때 약 40일 정도의 기간이 소요되었다.

Sector	Description	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
A Hull & Outfitting & Painting																														
A-1	Preceding work	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
A-2	Remove	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
A-3	Block loading																													
A-4	Painting & Cleaning																													
B Exhaust gas system																														
B-1	Installation																													
B-2	Piping																													
C Sealing air system																														
C-1	Installation	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
D Insulation																														
D-1	Installation																													
E Sea water system																														
E-1	Installation	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
E-2	Installation	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
E-3	Piping																													
F Electric system																														
F-1	Installation	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	
G KR inspection																														
G-1	Hull																													
G-2	Outfitting																													
H Commissioning & Sea trial																														
H-1	Shop trial																													
H-2	Sea trial																													

Fig. 3.12 Schedule of SO_x scrubber retrofit

제 4 장 스크러버 설치 후 운항 경제성 검증

4.1 스크러버 설치 전 경제성 분석 결과

대상 선박은 Global Sulphur Cap 2020을 대비하여 2019년 당시 SO_x 배출저감 대응방안을 채택하기 위해 2018년 연간 운항데이터를 분석하여 최적의 방안을 모색하였다.

Abstract-Log 기준 1년간의 운항데이터를 분석한 결과 연 평균 한 항차 14일 중 항해시간은 190시간, 평균속력은 14.2 knots, 입·출항을 포함한 정박 및 묘박은 136시간, 총 항해거리는 3,048 마일로 항차별 일부 변동사항은 있으나 대상 선박의 정기 항로는 Fig. 4.1과 같으며, 항목별 세부사항은 Table 4.1과 같다.



Fig. 4.1 Overview of trade route(south china sea)

Table 4.1 Average navigational data per voyage in 2018

Category		Average value
Sea steaming (R/up to S/B)	Period of sailing	7D 22H
	Distance	2,698 nm
	Speed	14.2 knots
	Fuel oil consumption	HSFO 157.79 ton LSMGO 19.88 ton
Harbour in/out	Period of harbour in/out	1D 20H
	Distance	350 nm
	Speed	7.99 knots
	Fuel oil consumption	HSFO 6.09 ton LSMGO 14.40 ton
In port	Period of in-port	3D 20H
	Fuel oil consumption	HSFO 6.65 ton LSMGO 4.70 ton
Total	Period of 1 voyage	13D 14H
	Distance	3,048 nm
	Fuel oil consumption	HSFO 170.53 ton LSMGO 38.98 ton

대상 선박은 연간 26항차를 수행하였으며, 주기관 및 보조기관 총 연료소모량은 고유황유 4,433.78 tonne, 저유황유 1,013.48 tonne으로, 이때 소모된 황 함유율 0.5% m/m 이하의 저유황유는 중국의 ECA에서 사용된 것이다. 향후 5년간 연료소모량의 큰 변화를 야기하는 항로 변경은 없을 것으로 예상되어 상기 데이터를 기준으로 사전 경제성 분석을 시행하고 Global Sulphur Cap 2020을 대비하였다. 다만, 기존 운항선에 LNG 연료를 사용하는 방안은 저유황유 사용 또는 스크러버 설치 방안과 비교하여 현 시점에서 경제적인 이점이 전혀 없을 뿐만 아니라 개장공사가 불가능할 것으로 판단되어 사전 분석에서 제외하였다.

4.1.1 저유황유 사용 기준

저유황유 사용에 대한 경제성 분석에서 가장 중요한 요소는 연료유의 가격이며, 특히 저유황유와 고유황유의 가격차이다. Fig. 4.2는 2019년 1월 사전 분석 당시 지역별/유종별 가격을 나타내고 있다. 대상 선박은 정기항로에 따라 한국과 홍콩에서만 연료유를 수급 받으므로 한국과 홍콩의 유가만을 고려했을 때 고유황유 평균 거래가는 톤당 409 US\$, 저유황유 평균 거래가는 585 US\$로 고유황유 대비 176 US\$ 정도(고유황유 대비 143%) 높은 가격으로 거래되었다.

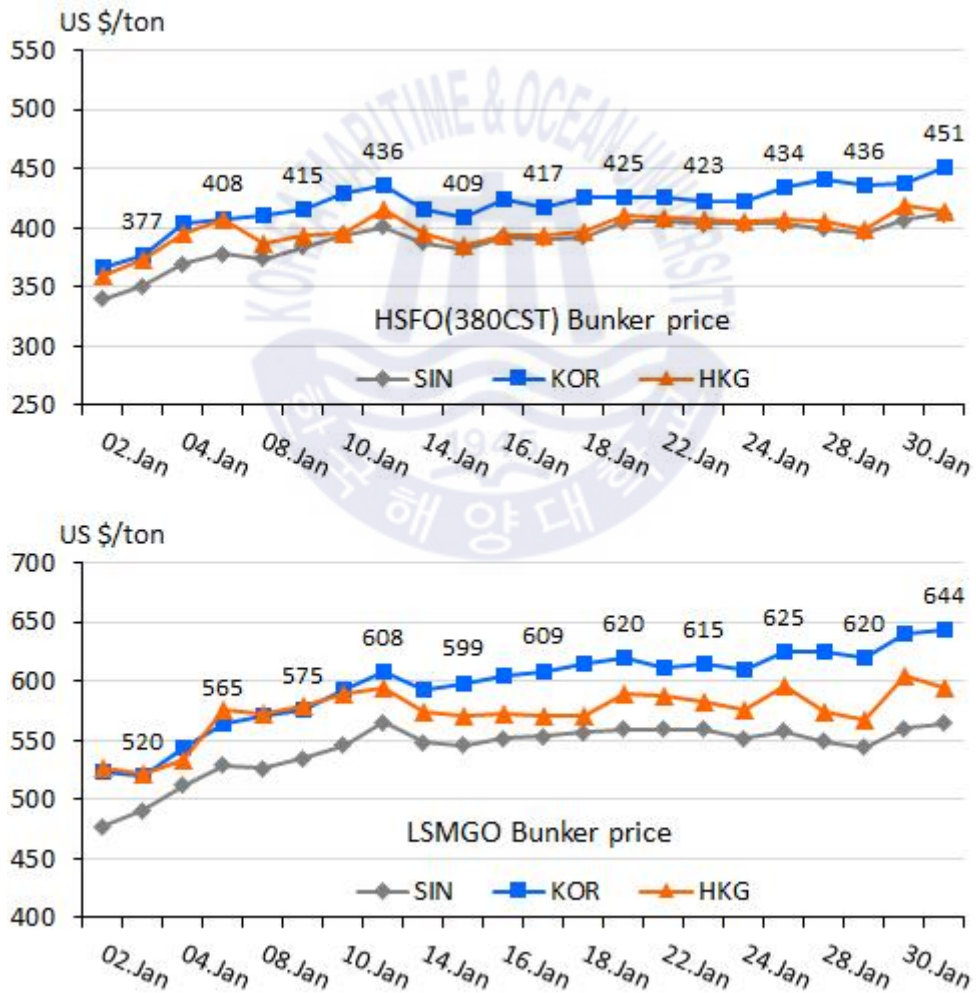


Fig. 4.2 Bunker price in January 2019

2015년 ECA 규제 발효와 함께 LSMGO(0.1% S)의 공급 증가로 HSFO(3.5% S)와의 가격차이가 큰 폭으로 감소했던 사례가 있어 2020년 규제 발효에 따른 저유황유의 가격 변동이 기존 운항선의 최적 대응방안 선택에 중요한 요인이 될 것이다. 따라서 고유황유의 가격변동이 없다는 전제 하에 저유황유와 고유황유의 가격차이(110%, 130%, 150%)에 따른 경제성 분석을 시행하였으며, Table 4.2의 2018년 연간 항해데이터를 기준으로 Table 4.3에 나타낸바와 같이 유종별 가격차에 의한 연간 연료비용을 추정하였다. 또한, 분석 당시에는 LSFO(0.5% S)의 원활한 공급이 불분명했을 뿐만 아니라 향후 중국 정부의 황 함유율 규제 강화가 예상되어 LSFO는 사전 분석에서 제외하였다.

Table 4.2 Annual navigational data in 2018

Category			Value
Number of voyage		times	26
Total sailing mile		nm	79,248
Average speed		knots	14.2
Time of sea steaming		hours	4,940
Time of in-port(include in/out)		hours	3,536
SFOC	Main engine	g/kW·h	167.1
	Gen. engine	g/kW·h	192.0
Running hours	Main engine	hours	5,636
	Gen. engine	hours	9,415 (sum of 3 sets)
Average road	Main engine	% of MCR	55.0
	Gen. engine	% of MCR	44.4
Total fuel oil consumption	HSFO	ton	4,433.78
	LSMGO	ton	1,013.48
Fuel oil price (Jan.2019)	HSFO	US\$/ton	409
	LSMGO	US\$/ton	585
Annual fuel oil cost		million US\$	2.40

Table 4.3 Estimation of annual fuel oil cost by fuel oil price ratio(ex ante)

Ratio of fuel oil price (LSMGO/HSFO)			Case I	Case II	Case III
			110%	130%	150%
HSFO price		US\$/ton	409		
LSMGO price		US\$/ton	450	532	614
Annual fuel oil cons.	HSFO + LSMGO	ton	4433.78 + 1013.48		
	LSMGO Only	ton	5447.26		
Annual fuel oil cost	HSFO + Scrubber, LSMGO at ECA	million US\$	2.27	2.35	2.44
	LSMGO Only	million US\$	2.45	2.90	3.34

비중이 낮은 저유황유는 단위질량당 발열량이 높아 총 연료소모량은 소량 감소할 것으로 예상되나 발열량은 보통 비중으로 단순 환산하므로[25], 당시 고유황유 대비 저유황유의 가격이 110%일 경우 연간 약 18만 US\$, 130%일 경우 약 55만 US\$, 150%일 경우 약 90만 US\$의 연료비용이 추가적으로 발생한다. 또한 저유황유 사용을 위해서는 여러 가지 고려할 사항이 있지만 기본적으로 저유황유 사용 시 기관의 안정적인 운전을 위해 적당한 점도와 윤활성을 유지해야 한다. 기관에 공급되는 연료의 점도는 최소 2 cst 이상 되어야 하며, LSMGO의 점도는 1.5 cst 정도로 2 cst 이상의 점도를 유지하기 위해서는 연료 공급 배관에 쿨러 등을 설치하여 점도를 높여줘야 한다. 따라서 추가적인 기기설치의 비용이 발생하고, 적절한 관리가 되지 않을 경우 기관의 연료유 펌프 고착이나, 누유, 불충분한 연료분사 압력, 증속 제한 등의 문제가 발생할 수도 있다. 그리고 저유황유는 윤활성이 약해 연료유 펌프의 고착을 야기할 수 있으므로 윤활성 향상을 위해 연료유 첨가제를 저유황유 탱크에 넣어 적절한 윤활성을 유지하도록 하는데, 이 또한 추가적인 비용이 발생할 수밖에 없다.

4.1.2 스크러버 설치 기준

SO_x 배출저감 대응방안으로 스크러버를 설치하고 고유황유를 사용할 경우 경제성 분석에서 가장 중요한 요소는 저유황유 사용 시 증가하는 누적 연료비용

이 스크러버 설치비를 넘어서는데 소요되는 기간 즉, 스크러버 설치를 위한 투자비용의 회수기간이다. 투자비용이 회수가 가능해야 될 뿐만 아니라, 회수기간이 짧을수록 최적의 방안이라 판단할 수 있다. 따라서 선사 입장에서의 현실적인 경제성 분석은 스크러버의 설치비용을 산출하고, 여기에 선박별 실제 소모된 연료량과 비용을 비교 분석하는 방법이다. Table 4.4는 대상 선박에 스크러버 설치를 위한 비용 산출내역이다.

Table 4.4 Quotation for SO_x scrubber retrofit

Section	Description	Cost (US\$)
Design	3D scanning	200,000
	Basic design	
	Detailed design	
	Installation design	
	Supervision for construction work at dry-dock	
	Stability calculation	
Material	Sox Scrubber - 1 set	728,000
	Sox Scrubber tower(9 MW)	
	Sox scrubber elec. panel	
	Scrubber equipment	
	Scrubber instrument	
	Installation supervision	
	Commissioning onboard	
	Sea trial for MARPOL	
	Crew training	
Shipyard	Scrubber retrofit	1,095,000
	Hull, outfitting & painting	
	Exhaust gas system installation & piping	
	Sealing air system installation	
	Insulation	
	Sea water system installation & piping	
	Electric system installation	
	Sea trial	
Total cost		2,023,000

대상 선박에 9 MW 용량의 스크리버를 설치할 때 예상되는 투자비용은 202만 US\$ 정도이며, 투자 비용의 회수 기간은 Fig. 4.3에 나타난 바와 같이 고유황유 대비 저유황유의 가격이 110%일 경우 약 11.2년, 130%일 경우 약 3.7년, 150%일 경우 약 2.2년의 기간이 소요될 것으로 분석되었다.

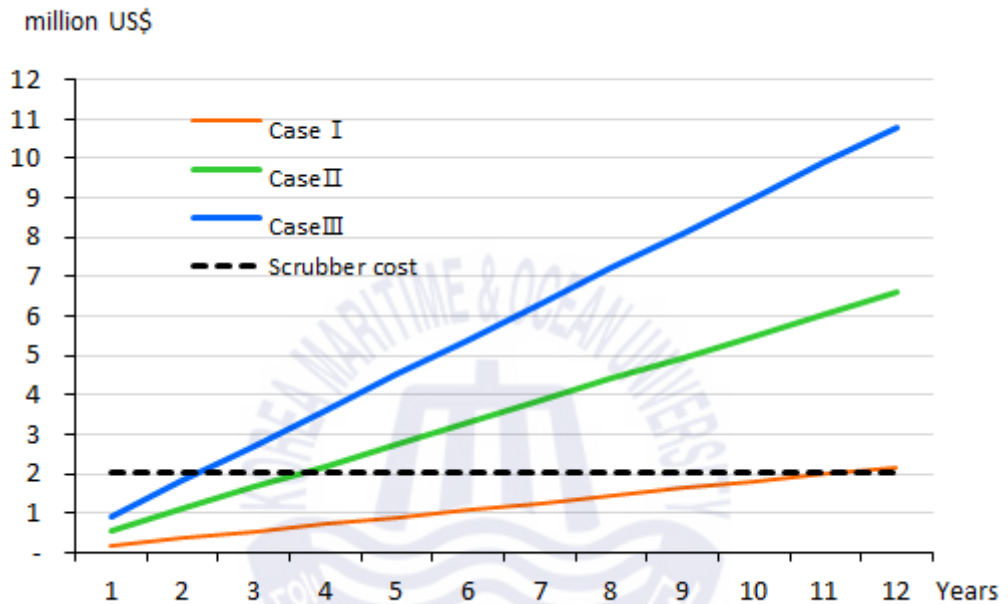


Fig. 4.3 Payback period of investment costs(base)

결론적으로 당시 해당 연료유의 거래가격 기준으로 고유황유 대비 저유황유의 가격이 110%까지 하락하였을 경우에도 약 11년 내에 투자비용 회수가 가능했으며, 대상 선박의 선령(약 5년)을 고려하여 스크리버를 설치하는 방안이 가장 경제적임을 예상할 수 있었다.

4.2 스크리버 설치 후 기관 성능 및 연료소모량 분석

기관의 운전 상태를 파악하고 성능을 평가하기 위해서는 성능 관련 인자들이 의미하는 바를 이해하여야 하며 기관의 정상적인 운전이란 이 변수들이 정상영역에 머물도록 운전하는 것이다. 성능을 측정하는데 중요한 변수들은 기압, 기관 회전수, 평균지시압력, 최고폭발압력, 압축압력, 연료펌프 랙 포지션, 배기가스 압력, 배기가스 온도, 소기압력, 소기온도, 과급기 회전수, 과급기 후단의 배기관 배압, 과급기 필터 전의 공기온도, 공기 필터 압력강하, 공기 냉각기 압력강하, 공기 냉각기 전·후의 공기와 냉각수 온도 등이 있으며, 계통별로 분류해 보면 흡·배기 계통, 냉각 계통, 윤활 계통, 연료 계통, 제어 계통의 변수로 나눌 수 있다. 디젤 기관 운전 중에 이러한 변수들을 주기적으로 또는 실시간으로 점검하여 연소상태, 일반적인 실린더의 상태, 디젤 기관의 상태 변화에 따른 운전상의 문제점을 찾아내어 문제점이 더 확대되기 전에 필요한 조치를 해야 한다[26].

4.2.1 주기관 성능 및 연료소모율의 변화

많은 인자가 기관 성능에 관계하지만 본 연구에서는 스크리버 설치에 따라 변화가 예측되는 성능 인자들을 설정하여 비교 분석하고, 대상 선박의 실측값을 ISO 기준조건으로 보정 후 연료소비율 및 기관 성능 변화를 고찰하였다.

1. 도시평균유효압력(P_{mi})

도시유효압력의 평균값으로 어느 정도의 부하를 기관에 걸 수 있는지 판단할 수 있다. 각 실린더의 P_{mi} 는 전체 평균값에서 0.5 bar 이상 벗어나지 않도록 해야 하며, 부하가 고르게 분배되지 않으면 거버너의 동작이 불안정해 질 수 있다. 특히 각 배기가스온도를 기준으로 하여 이 부하평형을 조절하면 안 된다.

2. 최고폭발압력(P_{max})

각각의 P_{max} 가 평균값보다 3 bar 이상 차이가 나면 그 원인을 찾아내어 바로 잡아내야 하며, 압력상승($P_{max}-P_{comp}$)은 35 bar로 규정된 제한 값을 초과하지 않도록 해야 한다.

3. 배기가스온도(T_{exh})

공기공급시스템과 연소가스시스템에 이상이 발생하면 배기가스온도가 올라간다. 기후변화와 나빠진 운전조건하에서도 기관을 운전시키기 위하여 제한된 범위 내에서 열부하의 증가를 허용하도록 설계된다.

4. 압축압력(P_{comp})

시운전 당시에 ISO 기준조건으로 보정한 P_{comp} 와 유효마력(P_e) 사이의 관계를 나타낸 모델곡선과 실측치와의 편차는 소기압력의 감소, 기관 부품의 기계적인 손상(피스톤링의 블로우 바이, 배기밸브의 손상 등), 배기밸브 스핀들과 밸브피스의 과도한 마모에 의해 발생하며, 실린더에서 측정된 압축압력은 리시버의 공기/가스의 자연적인 맥동 때문에 평균값과 차이가 난다. 이 편차는 시운전시에 계산된 $P_{comp,abs}/P_{scv,abs}$ 값을 정수로 갖고 역으로 실측의 소기압력으로 예측압축압력을 구해서, 그 차이가 기계적인 손상이나 연마에 의해서 발생했음을 인지할 수 있다.

5. 소기압력(P_{scav})

소기압력의 편차는 배기온도와 마찬가지로 전반적인 기관 상태를 평가하는데 중요한 변수가 된다. 주어진 부하에서 소기압력이 떨어지면 연소실의 열부하가 증가한다. 공기필터, 공기냉각기, 과급기의 오손이 소기압력에 큰 영향을 준다. 단순히 소기압력의 변화만으로는 원인을 진단하기 어려우나, 소기압력의 변화는 공기냉각기의 상태, 과급기의 상태, 캠 타이밍의 변화들과 밀접하게 연관되어 있다.

6. 연료소모량

연료소비율 $SFOC(g/kW \cdot h)$ 을 계산하려면 일정기간 동안 기관의 마력과 소모된 연료유의 총량(kgf)을 측정해야 한다. 소모량의 오차는 해당 연료의 저위발열량(LCV)의 차이에 의해서 정해지며, 통상 42,700 kJ/kgf 또는 10,200 kcal/kgf의 값으로 보정한다. 또한 주위 조건(블로워 입구의 온도와 압력, 소기 냉각수의 온도)도 연료유 소모량에 영향을 주지만 LCV에 비해 크게 중요한 변수는 아니다.

Table 4.5는 2014년 조선소에서 대상 선박을 인도하기 전 해상시운전 시 측정된 SFOC 결과서를 나타내고 있다.

인도 전 해상시운전 및 스크러버 설치 전·후 데이터에서 공칭 연료소비율 167.1 g/kW·h을 상회하고 있으나 SMCR에서 5% 허용오차를 인정함으로 범위에 는 만족함을 알 수 있다.



Table 4.5 Result of SFOC(NCR) at sea trial in 2014

LOAD	DURING SPEED TEST	NCR(90%)
ASSUMPTION RPM		117.8
START		22,246.4
STOP		26,616.2
L(ENG. OUT)	FLOWMETER OUTLET	4,369.8
MEASURING TIME (SECONDS)		7,200
L/H(ENG. OUT)	A (FILL)	2,184.9
START		17,181.7
STOP		19,396.5
L(ENG. OUT)	FLOWMETER INLET	2,214.8
MEASURING TIME (SECONDS)		7,200
L/H(ENG. IN)	B (RTN)	1,107.4
L/H(ENG. IN-OUT)	(A-B)	1,077.5
m ³ /DAY	(A-B)/1000*24	25.9
kg/h(ENG. IN-OUT)	(A-B)*C*D	994.9
F.O. TEMP		120
GRAVITY, G	C	0.9869
VOLUME AT INDICATED TEMP	D	0.9356
ENGINE OUTPUT(kW)		5379
g/kW·h B3=AL*1000/kW		185.0
Ambient temp.(T1)		32
Conversion factor by ambient temperature		
T1F=0.002×(25-T1)/10		-0.0014
Charge air coolant temp.(T2)		34
Conversion factor by air coolant temperature		
T2F=0.006×(37-T2)/10		0.0018
Ambient pressure(P)		1025
Conversion factor by ambient pressure		
PF=0.0002×(P-1000)/10		0.0005
Fuel oil lower calorific value(H)		9590.0
Conversion factor by lower calorific value		
HF=(H-10200)/10200		-0.059803922
Total conversion factor, TCF=T1F+T2F+PF+HF		-0.059
Converted of fuel consumption based on ISO(g/BHP,H) B1=B3+(B3*TCF)		
FUEL OIL CONSUMPTION(ISO)	g/kW·h	174.1
Ton/Day when using MDO(10,200kcal/kg)	Ton/Day	22.4

Table 4.6은 스크러버 설치 전·후 정상운항 상태에서 주기관의 운전성능을 나타내고 있으며, 주기관의 연평균 부하 기준으로 운전하고 획득한 성능인자들의 실측값과 ISO조건으로 변환한 값을 나타내고 있다.

Table 4.6 Comparison table of main engine performance for before and after SO_x scrubber retrofit

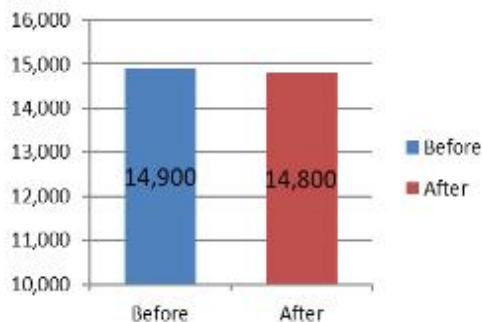
Main engine type		6S46ME-B8.3		
MCR(kW x rpm)		6,700 x 122		
Test condition		Before retrofit	After retrofit	
Date		2019.09.28	2020.01.14	
Oil brand		IFO380	IFO380	
Sulphur	%	2.89	3.01	
Gravity	-	0.9905	0.9741	
Revolution	rpm	103.4	102.8	
Engine load	%	55.0	55.0	
Fuel index	-	72.2	65.5	
Ship's speed	knot	14.5	14.8	
Scav. air temp.	℃	38	35	
T/C speed	rpm	14,900	14,800	
Daily fuel consumption	Ton/day	18.80	18.80	
SFOC	g/kW·h	Actual	183.7	182.1
		ISO	173.2	172.0
Max. combustion pressure	bar	Actual	128.1	121.3
		ISO	128.9	120.2
Compression pressure	bar	Actual	91.6	92.5
		ISO	92.0	91.1
Scav. air pressure	kg/cm ²	Actual	1.60	1.60
		ISO	1.59	1.57
Exhaust gas temp.(A.T/C)	℃	Actual	308	298
		ISO	301.1	297.8

Fig. 4.4는 획득한 성능인자를 ISO 기준으로 변환 값을 스크러버 설치여부에 따라 비교한 막대그래프로 좌측은 스크러버 설치 전의 결과 값을 나타내며, 우측은 스크러버 설치 후의 결과 값을 나타낸다.

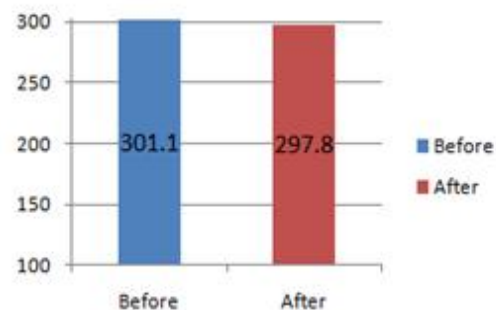
일반적으로 엔진의 출구에 추가 장착되는 기기로 인해 배압은 증가하며, 이로 인해 엔진의 부조화 또는 성능의 악화를 초래하게 된다. 스크러버 개장 전후의 배압 및 성능의 변화를 비교하기 위해서는 개장 전후 동일 조건에서 운항 데이터를 구해 비교해야 했으나, 대상선박의 경우 5년차 정기검사를 위한 입거수리 중 스크러버 개장공사와 동시에 선저정비 및 주기관 정기 분해정비(major overhaul)를 시행하여, 의미 있는 비교 조건을 갖추지 못하였다. 따라서 Fig.4.4와 같이 주기관의 성능이 오히려 개선된 것으로 확인되었다. 이는 스크러버의 장착에 따른 성능 개선은 아니라고 사료되며, 엔진 정비의 효과로서 스크러버 설치로 인한 성능 저하는 일단은 우려할 수준이 아니라고 판단된다. 그러나 운항시간의 경과에 따라 성능 변화의 추이도 꾸준히 관찰해야 할 필요가 있으며, 차후 누적 운항시간에 따른 변화 및 경년 열화에 따른 변화는 재검증해야 할 사안으로 생각된다.

엔진 성능의 지표로 연료소비율이 $1.2 \text{ g/kW}\cdot\text{h}$ 향상되었다. 이는 엔진 정비로 인해 향상된 연소 분위기가 완전연소에 기여하고 이것이 열효율 향상으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 과급기의 분당회전수는 스크러버 설치 전 14,900 rpm에서 설치 후 14,800 rpm으로 100 rpm 줄어들고, 최고폭발압력의 경우 설치 전 128.9 bar에서 설치 후 120.2 bar로 8.7 bar가 낮아졌다. 이 밖에도 배기온도, 압축압력, 소기압력의 경우에도 스크러버 설치 후에 성능인자의 결과 값이 설치 전 대비 약 1%~2%의 낮은 결과 값을 관찰할 수 있다.

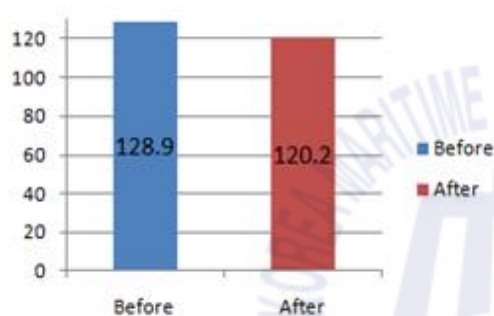
T/C speed(rpm)



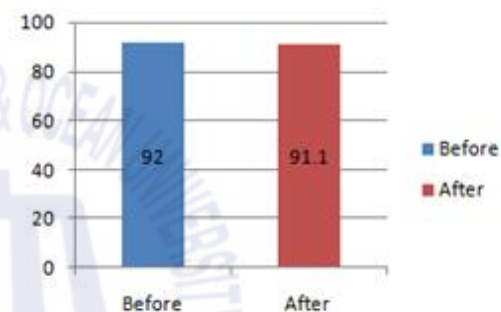
Exh' gas temp.(°C)



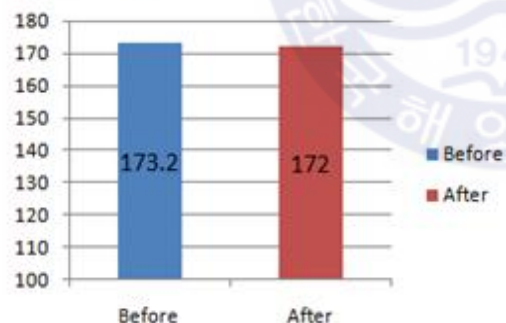
P.Max(bar)



P.Comp(bar)



SFOC(g/kWh)



Scav. air pressure(kg/cm²)

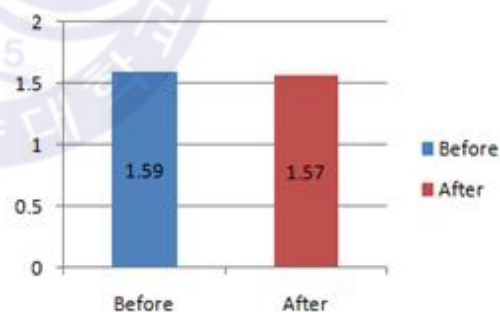


Fig 4.4 Comparison of main engine performance for before and after SO_x scrubber retrofit

4.2.2 발전기 소요전력 및 연료소모량의 변화

스크러버 설치를 검토할 당시 추가 소요전력은 아래 나타낸 바와 같이 설계상 118 kW 증가를 기준으로 하였다.

Sea water pump	:	106.2 kW
Sealing air fan	:	1.8 kW
Control panel	:	10.0 kW
- Water analyser		
- Gas monitoring unit(based on heated sample line 12m)		
<hr/>		
Total	:	118 kW

스크러버 설치 전 대상 선박의 발전기는 정상 운항 중에 평균 420 kW(MCR의 약 49.3%), 정박 중에는 평균 320 kW(MCR의 약 37.6%)의 부하로 운전되었으며, 또한 동일 용량의 발전기가 3대가 있으므로 스크러버 설치에 따른 추가 소요전력을 별도의 조치 없이 충분히 감당할 수 있는 상태임을 알 수 있다.

발전기의 경우 총 3대가 교대로 또는 함께 운전되는 다양한 조건과 냉동컨테이너 선적에 따른 부하 변동의 변수가 매우 다양하여 실제 운항 중 단시간 내 성능변화에 대한 객관적 평가가 다소 어려운 점이 있다. 하지만 스크러버 설치 전·후의 일반적인 성능점검 결과 주기관과 동일하게 스크러버 설치에 따른 유의미한 성능변화는 관찰되지 않았다. 따라서 발전기의 경우 스크러버 설치에 따른 운항 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 항목은 전체 소요전력의 증가이며, 즉 연료소모량의 증가이다.

Table 4.7은 스크러버 설치 전·후에 평균 소요전력과 연료소모량 실측치를 나타내고 있다.

Table 4.7 Comparison table of diesel generator performance for before and after SO_x scrubber retrofit

	Sea steaming		
	Electric power consumption (kW)	Fuel oil consumption(ton/h)	
		HSFO	LSMGO
Before	420	0.080	0.073
After	480	0.086	0.080
	In port(include in/out)		
	Electric power consumption (kW)	Fuel oil consumption(ton/h)	
		HSFO	LSMGO
Before	320	0.067	0.062
After	380	0.072	0.067

실측치를 기준으로 스크러버 설치 후 발전기당 소요전력은 약 60 kW의 증가를 보이며, 발전기의 연료소모량은 항해 중 시간당 0.006 ton, 입출항을 포함한 정박 중 시간당 0.005 ton의 증가를 확인할 수 있었다. 발전기 3대의 연간 총 운전시간 9,415 시간 중에서 평균적으로 항해 5,487 시간, 정박 3,928 시간인 점을 고려한다면 연료소모량은 연간 52 ton 정도 증가할 것으로 예측된다.

4.3 스크러버 설치 후 운항 경제성 평가

본 절에서는 스크러버 설치 후 확인된 최종 투자비용 및 연료소모량의 변화, 그리고 현재의 연료 가격을 적용하여 실제적인 운항 경제성을 검증하고, 스크러버 장기 운용에 따른 예측 가능한 문제점에 대해서 고찰하고자 한다.

4.3.1 최종 투자비용 검토

최종 투자비용에는 각종 검사 및 승인을 위한 부대비용이 추가로 발생하였으나, 이는 사전 비용 산출내역에도 고려되지 않은 항목이며 전체 투자비용에서 차지하는 비율이 매우 낮은 관계로 비교 분석에서 제외하였다. 사전 분석 당시 스크러버 설치를 위한 비용은 202만 US\$ 정도로 예상되었으나, 최종 투자비용은 199만 US\$ 정도로 집계되었다. Fig. 4.5와 같이 설계 부분에서 2만 US\$, 자재 부분에서 만3천 US\$, 조선소에서 2천5백 US\$이 절감되었으나 이는 동형선 추가 공사에 따른 관련 업체의 관행적인 할인조건이 적용된 결과이며 예상 비용과 거의 동일하게 집행된 것으로 판단된다.

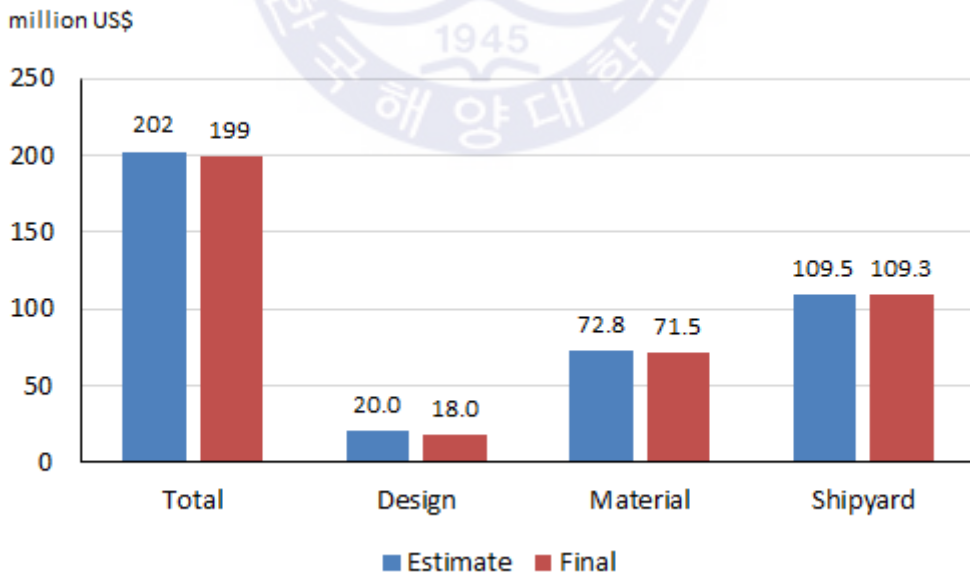


Fig. 4.5 Comparison of final investment cost and estimate

4.3.2 연간 연료소모량 변화에 따른 경제성 검증

연간 연료소모량의 증가는 앞선 분석에서 나타난 바와 같이 스크러버 설치에 따른 발전기의 소요전력 증가에서 발생한다. 이는 사전 분석에서는 고려되지 않은 사항으로 대상 선박의 경우 실측기준 연간 연료소모량의 약 1%에 해당하는 양이 증가하게 되며 사전 경제성 분석결과에 연료소모량 증가분을 반영하여 비교하면 Table 4.8과 같으며, Fig. 4.6은 투자비용 회수 기간을 나타낸다.

Table 4.8 Estimation of annual fuel oil cost by fuel oil price ratio(ex post)

Ratio of fuel oil price (LSMGO/HSFO)			Case I	Case II	Case III
			110%	130%	150%
Annual fuel oil cost	HSFO + Scrubber, LSMGO at ECA	million US\$	2.29	2.37	2.45
	LSMGO Only	million US\$	2.47	2.92	3.37

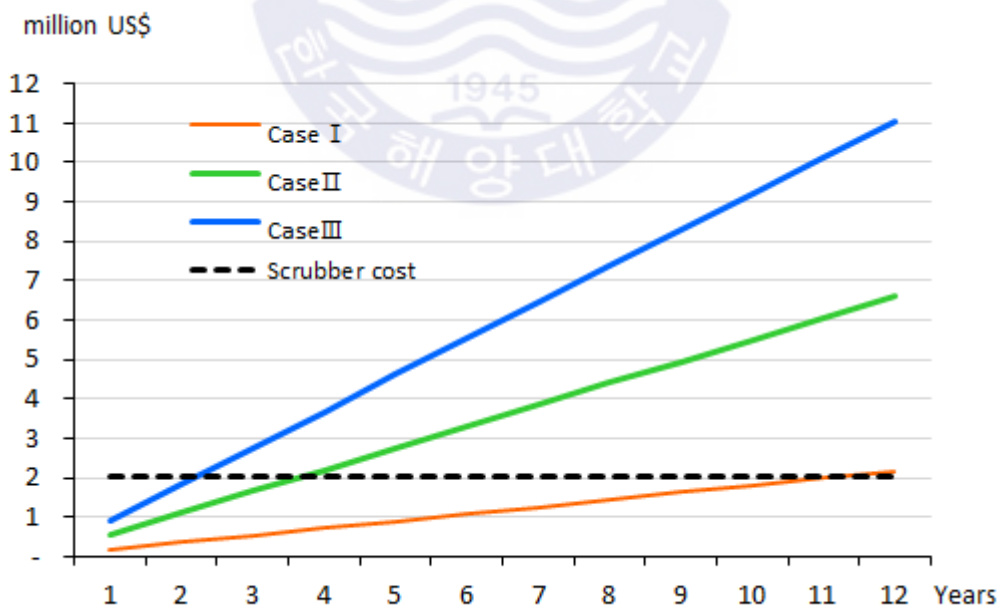


Fig. 4.6 Payback period of investment costs(review)

따라서 발전기 소요전력 증가에 따른 연료소모량 증가분을 고려한 투자비용의 회수 기간은 고유황유 대비 저유황유의 가격이 150%일 경우에서만 미세하게 연장되는 것을 확인하였으며, 이는 사전 분석 대비 투자비용 회수 기간은 변화가 없는 것으로 볼 수 있으나 선사 입장에서는 연료비 증가에 따른 연간 운항비 산출에는 의미 있는 결과가 될 것이다.

4.3.3 스크러버 계획정비 비용 예측

스크러버 설치 후 관련된 계획정비항목 증가로 정비 비용이 고정적으로 발생한다. 장기 운용에 따른 정기 수리비용 또한 투자비용에 영향을 미치는 요인으로 고려해야 할 사항이다. **Table 4.9**는 제작사에서 제공한 스크러버 관련 계획정비항목 및 예상 비용을 나타내고 있다.

Table 4.9 PMS item of SO_x scrubber

Component	Action	Interval	Cost (US\$)
Gas analysis unit	Replace gas pump membrane (Replacement must be performed by the supplier.)	3Y	1,344
Water analysis unit	Pump : Replace pump impeller and end cover	6M	479
	Pump : Replace pump seal	1Y	240
	Turbidity wiper blade replacement	6M	11
	pH electrode replacement	1Y	6,663
	Factory calibration of PAH sensor	2Y	3,513
Control panel	Replace instrument air filters	1Y	21
	Replace battery for PLC	4Y	8
	Replace battery for touch screen	4Y	8
Variable speed drives	Replace cooling fan	3Y	429

제시한 정비항목에 따라 정기적으로 진행한다고 가정했을 경우, 정비주기가 가장 긴 4년차 정비항목까지 수행하면 총 4만 US\$ 비용 지출이 발생하며 고장에 의한 수리를 제외한다면 연평균 최소 1만 US\$의 정비 비용이 발생할 것으로 예상 가능하다.

4.3.4 현재 유가 기준 경제성 검증

많은 연구에서 저유황유의 단가 상승 등의 요소에 따라 스크러버의 수요는 2025년까지 꾸준할 것으로 예상했으며, 또한 Fig. 4.7은 투자비 회수 기간 예측을 그래프로 나타낸 것으로 2020년을 기점으로 투자비 회수 기간이 2년으로 감축될 것으로 전망했다[27]. 이러한 현상은 저유황유와 고유황유의 가격차가 확대될 것이라는 예상을 근거로 언급하였으나 예상치 못한 정치적 문제, 국제적 재난 상황, 경기침체, 원유가격의 급격한 변동, 다양한 원인에서 야기되는 공급과 수요의 불안정 등의 문제가 발생함에 따라 실제 운항 중 스크러버의 경제성을 재검증하고 동시에 데이터 추적 및 분석을 통해 최대한 경제적이고 안정적인 운용을 위한 대비가 필요한 상황이다.

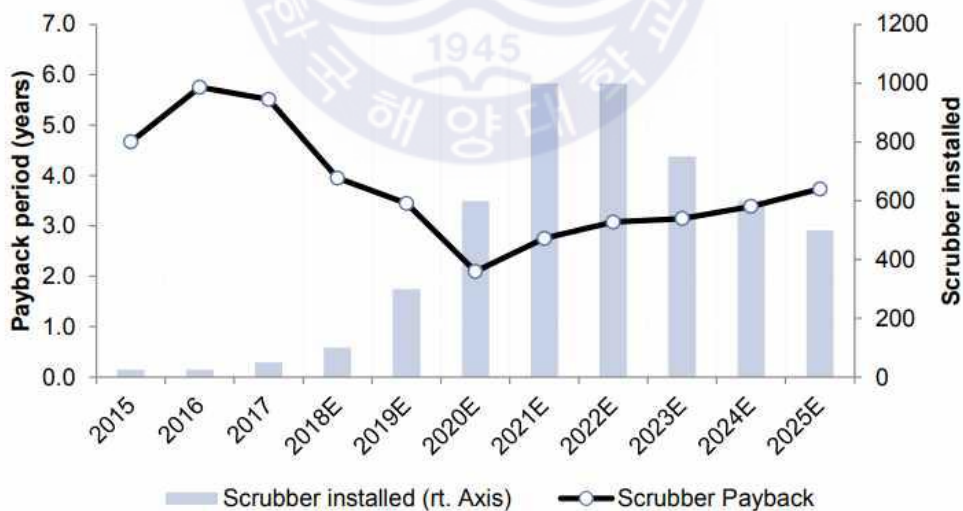


Fig. 4.7 Payback period forecast

Fig. 4.8은 최근(2020년 4월) 지역별/유종별 가격을 나타내고 있다. 사전 분석과 동일하게 한국과 홍콩의 유가만을 고려했을 때 고유황유 평균 거래가는 톤당 200 US\$, 저유황유 평균 거래가는 273 US\$로 고유황유 대비 73 US\$ 정도(고유황유 대비 137%) 높은 가격으로 거래되었다. 이는 사전 분석 당시보다 저유황유와 고유황유의 단가가 각 51%, 55% 정도 크게 하락한 수치이며, 가격차는 약 6% 감소한 것으로 확인되었다.

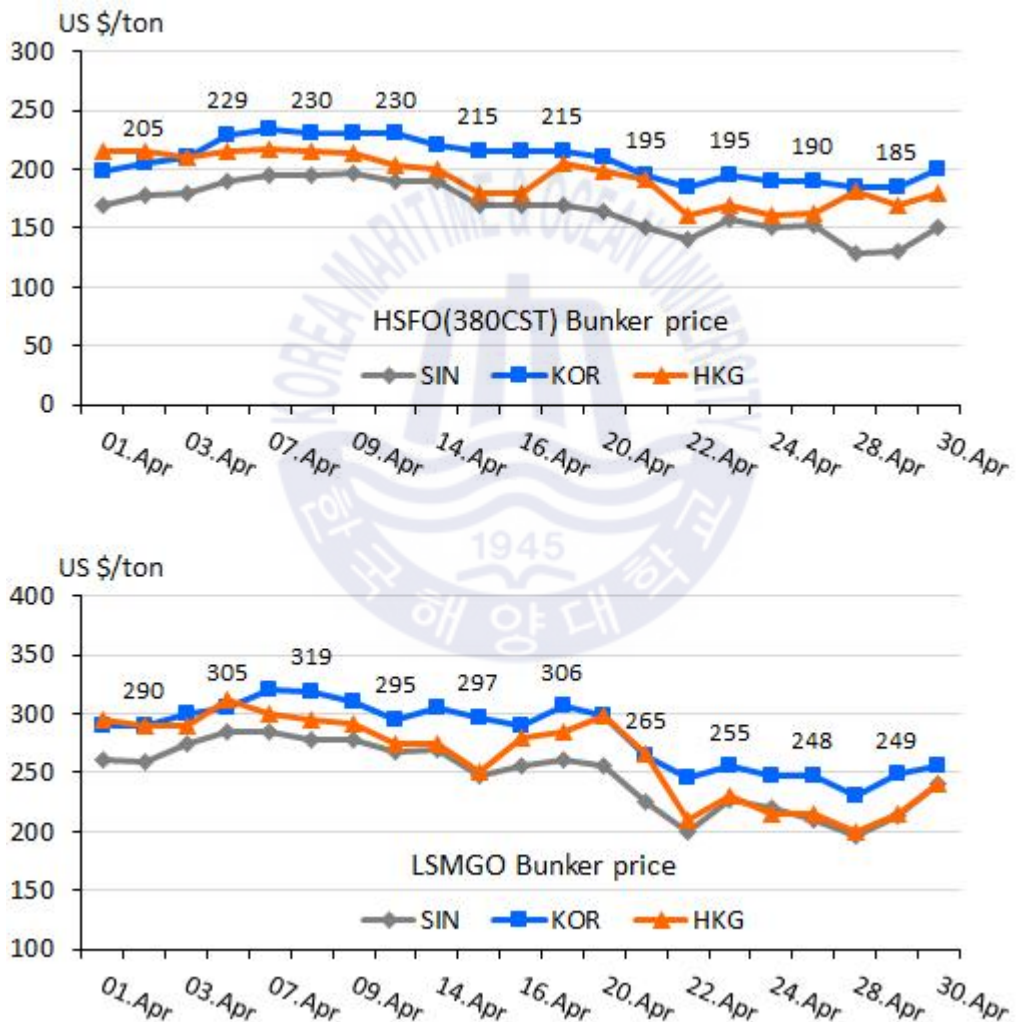


Fig. 4.8 Bunker price in April 2020

Table 4.10은 스크러버 설치로 인한 연료소모량 증가분과 현재의 연료 가격을 반영하여 연간 연료비용을 추산한 결과이다.

Table 4.10 Estimation of annual fuel oil cost based on current bunker price

Ratio of fuel oil price (LSMGO/HSFO)		US\$/ton	Case I	Current	Case II
			110%	137%	150%
HSFO price		US\$/ton	200		
LSMGO price		US\$/ton	220	273	300
Annual fuel oil cons.	HSFO + LSMGO	ton	4478.12 + 1013.48		
	LSMGO Only	ton	5668.95		
Annual fuel oil cost	HSFO + Scrubber, LSMGO at ECA	million US\$	1.12	1.17	1.20
	LSMGO Only	million US\$	1.21	1.50	1.65

따라서 스크러버를 설치하지 않았다면, 현재 시점에서 고유황유 대비 저유황유의 가격이 137%로 연간 약 33만 US\$의 연료비용이 추가적으로 발생할 것이며, 추가로 현재 유가를 기준으로 고유황유 대비 저유황유의 가격이 110%일 경우 약 9만 US\$, 150%일 경우 약 45만 US\$의 연료비용이 추가적으로 발생할 것이다. 즉, 스크러버를 설치한 대상 선박의 경우 Fig. 4.9에 나타난 바와 같이 현재 기준 연간 1만 US\$ 수리비용을 포함한 투자비용의 회수 기간은 약 6.2년이 소요될 것이며, 현재 유가를 기준으로 향후 고유황유 대비 저유황유의 가격이 110%, 150%가 될 경우 스크러버 투자비용의 회수 기간은 각각 24년, 4.5년으로 예상된다. 이는 2019년 1월 사전 분석결과 고유황유 대비 저유황유의 가격이 110%까지 하락하였을 경우에도 약 11년 내에 투자비용 회수가 가능할 것이라고 분석한 것과 대비하여 투자비용 회수 기간이 2배 이상 연장된 결과이다. 따라서 유가 및 유종별 가격차에 따라 경제성 변동이 심한 스크러버 설치 방안은 스크러버뿐만 아니라 디젤 기관의 올바른 정비를 통한 성능 유지 및 고장을 최소화하는 것이 지속적인 운항 경제성을 유지하기 위한 최선의 대비책이 될 것이다.

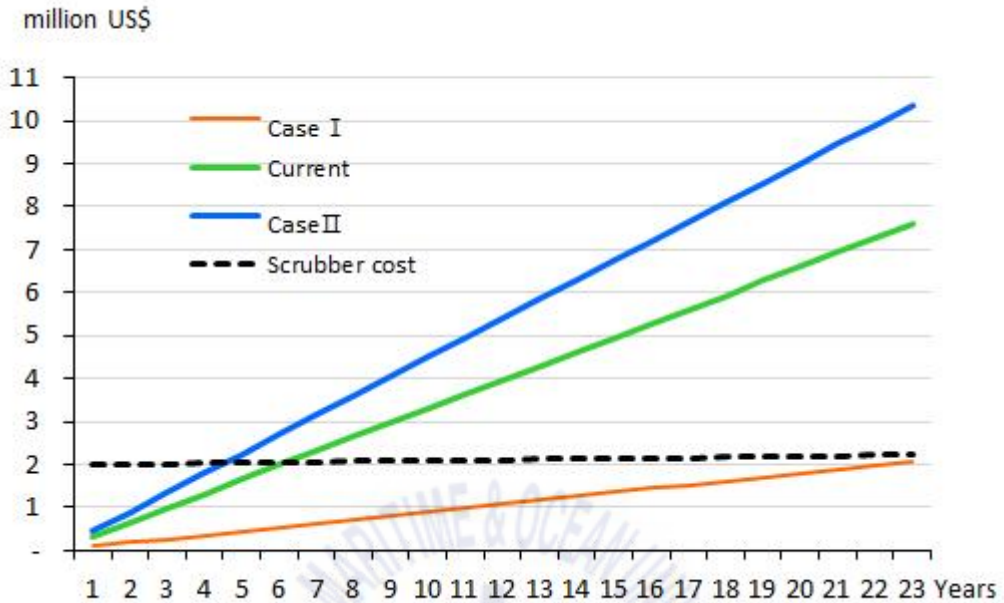


Fig. 4.9 Payback period of investment costs based on current bunker price

4.3.5 스크러버 장기 운용에 따른 문제점 예측

스크러버 운용 중 발생 가능한 문제점을 예측하기 위해 대상 선박을 포함하여 최근 스크러버를 설치한 동형선 4척에서 접수된 클레임보고서(claim report) 자료를 이용하였다. 동형선 4척은 2020년 1월부터 2020년 3월 사이에 스크러버 설치를 완료하였으며, Table 4.11은 2020년 5월까지 접수된 클레임 사항을 항목별로 나타내고 있다.

총 49건의 클레임 사항 중 단순 설치 불량 및 조작 미숙 6건을 제외하고 스크러버 설치에 따른 문제점만을 고려한다면 43건 중 전기(전자)적 문제점이 21건(49%)으로 가장 큰 비율을 차지하고 있으며, 재질 불량, 진동 및 소음 과대, 누수, 설계 결함 순으로 집계되었다. 문제 발생의 직접적 원인으로는 센서 오작동 및 불량, 프로그램 오류, 재질 불량, 진동 과대, 설계/설치 결함 등으로 확인되었으며, 간접적 원인으로는 해수의 흡입유량 증가로 인한 시체스트(sea chest) 내 공기 유입이 대표적이다.

Table 4.11 Claim items of SO_x scrubber(Jan.2020 ~ May.2020)

Category	Trouble	Cause	Frequency
Electric & Electron	SO ₂ /CO ₂ ratio alarm	Sensor malfunction	4
	Various temp. alarm		3
	Washwater level alarm		2
	Washwater press. alarm		2
	Washwater flow alarm		1
	Washwater pH alarm		1
	Exh. gas press. alarm		1
	Turbidity alarm		1
	Valve position failure		2
	Communication failure	Program error	4
	Total		21
Material	Pump impeller(analyzer)	Material defect	3
	Pump seal(analyzer)		4
		Total	
Vibration & Noise	Pump & motor	Installation/design defect	1
	Pipe & Valve		2
	Other structures		3
		Total	
Leakage	Pipe & flange	Installation/material defect	4
	Sensing line		1
		Total	
Design	Inflow of air into sea-chest	Design defect	1
	Installation position of valve		2
	Deposition of soot in scrubber		1
		Total	
Others	Installation errors	Lack of familiarization	4
	Poor operating skills		1
	Others	-	1
		Total	
Grand total			49

따라서 운항 중 안정적인 운용을 위해서는 기본적으로 납기를 고려한 적정수량의 예비품 확보가 필요하며, 장기 운용에 따른 각종 누설을 감시하고 비상상황에 대한 대비책을 마련해야 할 뿐만 아니라 초기 문제점을 면밀히 파악하여 계획정비제도(PMS)에 반영하는 등 추가적인 보완이 필요할 것이다.

또한 최근에는 스크러버 타워 내부에 검댕(soot) 과다 퇴적 현상이 접수되고 있는 실정이며, 이는 스크러버의 성능저하 및 배압 증가로 인한 디젤 기관 성능저하, 빈번한 내부 소재로 인한 불필요한 정비시간/인력 투입 등으로 이어질 가능성이 매우 크므로 조속히 개선방향을 찾아야 할 것이다. 이와 같은 문제점은 스크러버를 실제로 운용하기 전에는 쉽게 예측하지 못한 현상으로 추가적인 비용 발생 또는 운항 손실을 예방하기 위해서는 지속적인 모니터링과 함께 관련 데이터 수집을 필요로 하고 있다.



제 5 장 결론

본 논문에서는 2020년 황산화물 배출규제 협약 이행을 위한 방안으로 스크러버 설치를 채택한 1,000 TEU급 컨테이너 운반선을 연구 대상으로 선정하여 스크러버 설치 후 디젤 기관의 연료소모율을 포함한 성능 변화를 고찰하고 현재의 연료 가격 기준 운항 경제성에 관한 실증적 연구를 수행하였으며, 스크러버 운용 초기 문제점을 분석하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

1. 9 MW 용량의 스크러버 설치 이후 대상 선박의 6,700 kW 주기관 및 852 kW 발전기의 디젤 기관이 연평균 부하로 운전될 경우 기관의 배압 증가로 인한 기관 성능저하를 예측하였으나, 오히려 성능이 개선된 결과 값을 확인하였다. 이는 개장공사 시 병행한 엔진 정비의 효과로서 스크러버 설치로 인한 성능 저하는 일단은 없다고 판단된다. 또한, 최종 투자비용 또한 사전 예측한 비용 대비하여 약 1.5% 감소하여 큰 변화가 없다는 것을 확인하였다.
2. 대상 선박은 스크러버 설치 후 소요전력 증가로 인한 발전기의 연료소모량이 이전 대비 약 1% 증가한 것으로 분석되었으며, 이는 투자비용 회수 기간에 미치는 영향으로는 무시할만한 수치이나, 연간 운항비 산출을 위한 근거자료가 될 수 있음을 확인하였다.
3. 사전 분석 당시보다 저유황유와 고유황유의 단가는 각 51%, 55% 정도 크게 하락하고 가격 차는 약 6% 감소한 현재 상황에서 발전기의 연료소모량 증가까지 고려한다면 투자비용 회수 기간(약 6.2년)이 2배 이상 연장된 결과를 보이지만 대상 선박은 선령 5년의 선박으로, 값비싼 저유황유를 사용하는 것에 비해 스크러버를 설치하여 값싼 고유황유로 운항하는 것이 더 경제성이 있음을 검증하였다.
4. 스크러버 운용 초기 문제점 중 49%가 전기(전자)적 문제이며, 이 중 81%가 센서 오작동 또는 불량으로 분석되었다. 또한, 문제점 발생의 간접적 원인으로서는 시체스트 내부 공기 유입, 스크러버 내부 퇴적물 과다 등이 확인되

있으며 이는 향후 추가적인 문제점으로 발전할 가능성을 확인하였다.

본 연구 내용은 스크러버를 설치한 운항선 및 해당 선사에서 스크러버의 경제적/안정적 장기 운용을 위한 기초 자료가 될 것으로 기대한다. 그러나 운항시간의 경과에 따라 성능 변화의 추이도 꾸준히 관찰해야 할 필요가 있으며, 차후 누적 운항시간에 따른 변화 및 경년 열화에 따른 변화는 재 검증해야 할 사안으로 생각된다. 또한, 좀 더 개선된 방향으로 환경보호 정책에 동참하기 위해서는 다양한 조건에서 여러 변수를 적용한 데이터를 축적하고, 실증을 통한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.



참고문헌

- [1] 김성국, 윤대근, 2018. 선박용 탈황설비(SO_x Scrubber)의 수출경쟁력에 관한 연구. 무역상무연구, 79, pp.119-141.
- [2] 박재영, 2017. 해운기업의 황산화물(SO_x) 배출저감 최적대안에 대한 연구. 석사학위논문. 서울: 중앙대학교 글로벌인적자원대학원.
- [3] 한국선급, 2017. 강화된 Global SO_x 규제 대응을 위한 선주 지침서, 부산: 한국선급.
- [4] 심상인, 2019. 선박용 탈황설비의 산업경쟁력 분석. 석사학위논문. 고양: 한국항공대학교 항공·경영대학원.
- [5] IMO, 2018. *Annual Report 2018 IMO Technical Cooperation*. International Maritime Organization.
- [6] 노범석, 2018. 선박연료유의 연소과정에서 배출되는 입자상물질의 특성에 관한 연구. 박사학위논문. 부산: 한국해양대학교 대학원.
- [7] 석지훈, 2012. 선박기인대기오염에 대한 기국의 국제책임에 관한 연구. 박사학위논문. 부산: 한국해양대학교 대학원.
- [8] 조권희, 이진욱, 이상득, 2004. 선박용 발전기관의 배기배출물에 관한 실험적 연구. 해사산업연구소논문집, 제15권, pp.24-25.
- [9] 국립환경연구원, 2001. 산성가스 배출계수 산정을 위한 공동 조사. 국가배출계수 자료집(Ⅲ). 국립환경연구원.
- [10] EPA, 1995. *AP-42 : Compilation of Air Pollutant Emissions Factors*. U.S. Environmental Protection Agency.
- [11] 손권, 2017. 중소선박용 습식 스크러버의 최적설계에 관한 연구. 박사학위논문. 부산: 한국해양대학교 대학원.

- [12] 이원주, 2015. 선박용 디젤엔진에서 이단지연분사에 따른 배기배출물 저감에 관한 실험 연구. 석사학위논문. 부산: 한국해양대학교 해사산업대학원.
- [13] 김수현, 2019. 휘발성유기화합물(VOCs)이 인체에 미치는 위해성과 관리현황에 대한 추이분석. 석사학위논문. 서울: 한양대학교 대학원.
- [14] 최병순, 박승수, 박권순, 김영환, 1994. 배연탈황, 탈질기술의 현황과 전망. 한국대기환경학회 학술대회논문집, 제1권, pp.3-11.
- [15] S. Ibrahim, 2016. *Process Evaluation of a SO_x and NO_x Exhaust Gas Cleaning Concept for Marine Application*. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- [16] 엄한기, 박병현, 정순관, 김성수, 2019. 선박 연료의 황함유량 규제에 따른 스크러버 기술의 동향과 전망. 한국공업화학회 공업화학전망, Vol.22 No.5, pp.1-13.
- [17] G. Al-Enezi, H. Ettouney, H. El-Dessouky, & N. Fawzi, 2001. *Solubility of sulfur dioxide in seawater*. Ind. Eng. Chem. Res., 40, pp.1434-1441.
- [18] ABS, 2018. *Exhaust Gas Scrubber Systems Status and Guidance*. Houston, USA: ABS.
- [19] 한국선급, 2018. 선주와 검사원을 위한 EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS TECHNICAL INFORMATION. 부산: 한국선급.
- [20] 하이에어코리아, 2019. HAK형 Scrubber 소개, 김해: 하이에어코리아.
- [21] 오진오, 2013. 외압 또는 내압을 받는 GRP 복합재관의 장기성능 예측. 석사학위논문. 구미: 금오공과대학교.
- [22] 하이에어코리아, 2019. *Operation manual for exhaust gas cleaning system*, 김해: 하이에어코리아.
- [23] 한방우, 김학준, 김용진, 한경수, 2007. 증진제의 종류에 따른 습식 스크러버의 가스상 물질 제거특성. 한국대기환경학회지, 23(6), pp.744-751.

- [24] 한국선급, 2019. *Technical information of EGCS for ship owners and surveyors*. 부산: 한국선급
- [25] 조권희, 2019. *선박연료 및 운할 이론과 실무*. 다솜출판사, pp.223.
- [26] 조경미, 2013. *원전용 비상디젤발전기 성능열화에 관한 연구*. 석사학위논문. 부산: 한국해양대학교 대학원.
- [27] Goldman Sachs, 2018. *IMO 2020 : Global Shipping' s Blue Sky Moment*

