



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

현존 화물선의 배기가스 세정장치 개장 최적화
설계절차 수립에 관한 연구

Study on the Optimized Retrofit Design Procedure Establishment
of Exhaust Gas Cleaning System for Existing Bulk Carrier

지도교수 조권희

2020 년 2 월

한국해양대학교 대학원

해양플랜트운영학과
박 은 비

본 논문을 박은비의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 정진아



위원 조권희



위원 이지웅



2019년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

| | |
|--------------------------------------------|-----|
| List of Tables | iii |
| List of Figures | iv |
| List of Abbreviations | vi |
| Abstract | vii |
| 1. 서 론 | |
| 1.1 연구 배경 및 목적 | 1 |
| 1.2 연구의 범위 및 방법 | 4 |
| 1.3 연구의 내용 및 논문의 구성 | 5 |
| 2. 배기가스 세정장치의 개요 및 초기 설계 절차 수립 | |
| 2.1 배기가스 세정장치의 개요 | 6 |
| 2.2 배기가스 세정장치 개장 초기 설계 절차수립 및 모델선 검토 | 9 |
| 2.2.1 배기가스 세정장치 개장 초기 설계 절차수립 | 9 |
| 2.2.2 모델선 선정 및 검토 | 11 |
| 3. 주요 제한 조건 및 절차에 따른 수행 결과 | |
| 3.1 개요 | 14 |
| 3.2 고정식 소화설비 | 14 |
| 3.3 의장수 | 16 |
| 3.4 선교의 안전 | 17 |
| 3.5 국제해상충돌예방규칙 | 18 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 4. 개장 공사 설계 절차의 신뢰성 검증 | |
| 4.1 설계 구조 안정성 및 선박 복원성 검토 | 19 |
| 4.1.1 선박 복원성 | 26 |
| 4.1.2 경하중량 검토 결과 | 26 |
| 4.2 선급 승인을 통한 신뢰성 평가 | 28 |
| 4.2.1 화재 탐지기 배치 | 29 |
| 4.2.2 전기 부하 해석 및 개정 | 30 |
| 4.2.3 해수시스템 계통도 개정 | 31 |
| 4.2.4 배기관 시스템 계통도 개정 | 35 |
| 4.3 배기가스 세정장치의 세정수 배출요건 준수 검증 | 37 |
| 4.3.1 pH 회복 이론 | 38 |
| 4.3.2 화학적 중화 | 39 |
| 4.4 해상 시운전을 통한 성능 검증 | 43 |
| 4.4.1 해상 시운전 실시 | 44 |
| 4.4.2 최종 설계 절차 수립 | 47 |
| 5. 결론 | 48 |
| 참고문헌 | 50 |

List of Tables

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 2.1 | Information of project vessel | 11 |
| Table 3.1 | Calculation of required CO ₂ quantity before EGCS installation | 15 |
| Table 3.2 | Anchor specification of actual application | 16 |
| Table 4.1 | Scrubber design data | 22 |
| Table 4.2 | Coordinate system of finite element model | 24 |
| Table 4.3 | Working stress and displacement according to load conditions | 25 |
| Table 4.4 | Light weight calculation reflecting EGCS | 27 |
| Table 4.5 | The drawing list for class approval | 28 |
| Table 4.6 | Electrical load analysis after installation | 30 |
| Table 4.7 | National regulation regarding the discharging water of EGCS | 32 |
| Table 4.8 | IMO Requirements for pH measurements | 43 |
| Table 4.9 | Water samples used to produce dilution curves | 39 |
| Table 4.10 | IMO Requirements for other wash water element measurements ... | 43 |
| Table 4.11 | EGCS performance checklist at sea trial | 44 |
| Table 4.12 | Record sheet for instrument performance | 45 |
| Table 4.13 | EGCS running test | 46 |

List of Figures

| | |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1.1 EGCS installation market size forecast | 2 |
| Fig. 1.2 EGCS installation payback period forecast | 3 |
| Fig. 2.1 Open loop exhaust gas cleaning system | 6 |
| Fig. 2.2 Closed loop exhaust gas cleaning system | 7 |
| Fig. 2.3 Hybrid loop exhaust gas cleaning system | 8 |
| Fig. 2.4 General procedure of EGCS engineering | 9 |
| Fig. 2.5 Initial flow chart establishment | 10 |
| Fig. 2.6 Project vessel “DWT 180k bulk carrier” | 11 |
| Fig. 2.7 Data for captured using 3D scanning technique | 13 |
| Fig. 3.1 Actual view of interference masthead light | 18 |
| Fig. 4.1 Selection of install location after 3D Scanning | 19 |
| Fig. 4.2 Elevation view of installation EGCS | 20 |
| Fig. 4.3 Section view of installation EGCS | 21 |
| Fig. 4.4 Layout of actual smoke detector | 23 |
| Fig. 4.5 Arrangement of the discharged water outlet | 23 |
| Fig. 4.6 Structure analysis model | 24 |
| Fig. 4.7 Thickness scalar plot of model | 25 |
| Fig. 4.8 Layout of actual smoke detector | 29 |
| Fig. 4.9 Arrangement of the discharged water outlet | 33 |
| Fig. 4.10 Arrangement of dilution sea water line to outlet | 34 |
| Fig. 4.11 Arrangement of exhaust gas pipes | 36 |
| Fig. 4.12 Flow chart of sealing air | 36 |

| | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 4.13 | The principle of discharging wash water | 38 |
| Fig. 4.14 | Dilution ratio by pH according to ambient water alkalinity | 40 |
| Fig. 4.15 | Variation of neutralization action from outlet | 41 |
| Fig. 4.16 | Dilution ratio and pH limit of wash water | 42 |
| Fig. 4.17 | The optimized design procedure establishment of EGCS | 47 |



List of Abbreviations

| | |
|-----------------|------------------------------------------------------------|
| 180k | 180 × 1,000 |
| CEMS | Continuous Emission Monitoring System |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| CO ₂ | Carbon Dioxide |
| COLREG | International Regulations for Preventing Collisions at Sea |
| DWT | Dead Weight Tons(Tonnage) |
| E/R | Engine Room |
| ECA | Emission Control Areas |
| EGCS | Exhaust Gas Cleaning System |
| EN | Equipment Number |
| ETM | Exhaust Gas Cleaning System - Technical Manual |
| F.W. | Fresh Water |
| GT | Gross Tonnage |
| IMO | International Maritime Organization |
| LBP | Length Between Perpendiculars |
| LCG | Longitudinal of Center Gravity |
| LNG | Liquefied Natural Gas |
| MEPC | Marine Environmental Protection Committee |
| MSBD | Main Switch Board Distribution |
| NO | Nitrogen Monoxide |
| OMM | Onboard Monitoring Manual |
| PAH | Polycyclic Aromatic Hydrocarbon |
| SECP | SO _x Emissions Compliance Plan |
| SO _x | Sulphur Oxides |

Study on the optimized retrofit design procedure establishment of exhaust gas cleaning system for existing bulk carrier

Eun Bi Park

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

Abstract

As the IMO 2020 regulation, which limits sulfur content to less than 0.5% of all bunker fuel from January 2020, becomes a constant, the new building ship market prefers to install scrubbers due to the lack of LNG bunkering infrastructure, or install the exhaust gas cleaning system(EGCS) referred to as scrubber and some ships will be designed to be converted into LNG propulsion for the future.

In the case of existing ships, it is confirmed that under the current fuel oil price conditions, retrofitted exhaust cleaning systems are the most beneficial for ship owners, both economically, technically and environmentally. It is also expected that the demand for the installation of exhaust gas cleaning system on existing ships will increase by 2020.

Many studies have been conducted on exhaust gas cleaning system, however, little is known about the theoretical information on the consideration for general procedure of engineering and installation of existing vessel's retrofit.

In the absence of a design procedure, some unrecognized elements at the time of design process may act as critical variables during retrofit. To solve this problem, this study describes the implementation process to meet the major constraints that must be considered in the design for the existing

vessel's retrofit. The optimized design procedure was established based on these processes. The reliability assessment of procedure was conducted through structural and performance analysis during engineering procedure.

This study performed analysis of the performance of the discharged water and exhaust gas was emitted according to IMO.259 (68) Appendix 3. In the case of the pH at the wash water discharge, It was simulated by using CFD analysis based on ANSYS program. For the factors such as polycyclic aromatic hydrocarbon(PAH), turbidity, nitrate and temperature, were confirmed throughout parameter checks and continuous monitoring during sea trial and verified to comply IMO requirements.

As a result, this study offers to convey information on the process of establishing procedures to meet the major considerations in design through the case of existing vessel's installed exhaust gas cleaning system. In particular, this study aimed to suggest the economically and suitable design process according to vessel's operation purpose as the existing vessel's retrofit market will be expanded.

KEY WORDS: IMO 2020 regulation, Existing ships, EGCS, Scrubber, Retrofit, Optimized design procedure

현존 화물선의 배기가스 세정장치 개장 최적화 설계절차 수립에 관한 연구

박 은 비

한국해양대학교 대학원
해양플랜트 운영학과

초 록

2020년 1월부터 모든 bunker연료의 황 함유량을 0.5%이하로 제한하는 ‘IMO 2020규제’가 상수가 됨에 따라 신조 시장에서는 저유황유 사용 또는 LNG 병커링 인프라 부족 등으로 인해 스크러버 탑재를 선호하고 있으며, 일부 선박은 향후 LNG 연료 추진선박으로 개조할 수 있도록 설계되어 진다.

현존하는 선박의 경우 세 가지 방안 중 현재의 연료유 가격 조건에서는 배기가스 세정장치를 개조 탑재하는 것이 경제적, 기술적, 환경적으로 선주사에 가장 이득이 되는 것으로 확인되었으며, 2020년까지 현존선의 배기가스 세정장치 설치 수요가 증가할 것으로 전망되고 있다. 그러나 현존선의 개장공사에 대해 검토 절차 및 설계 시 주요 변수에 대한 이론적인 정보가 부족한 실정으로, 설계 당시에는 인지하지 못한 요소들이 개장공사(retrofit) 시에 변수로 작용하는 경우가 발생하기도 한다.

따라서 본 연구에서는 현존선의 배기가스 세정장치 탑재를 위해 설계 시 고려해야 하는 주요 제한 조건을 충족하기 위한 수행과정을 기술하였다. 이러한 과정을 토대로 최적화 설계 절차를 수립하고자 하였으며, 구조 해석 및 성능 분석을 통해 수립된 절차의 신뢰성에 대한 평가를 진행하였다. 세정 수 측정에 대한 성능 분석은 IMO에서 요구하는 Res. MEPC.259(68) Appendix 3에 따라 표본을 채취하여 pH의 경우 ANSYS 프로그램을 기반으로 한 CFD 분석을 통해 요건 충족 여부를 확인하였으며, 다환 방향족 탄화수소(PAH), 탁도(Turbidity), 질산염(Nitrate), 온도(Temperature) 등의 요소에 대해서는 해상 시운전 시 배기가스 및 세정수의 배출 모니터링 시스템을 통해 IMO에서 요구하는 배출 요건을 충족하고 있음을 확인하였다.

본 기술은 현시점에서 가장 최적화된 경제적인 방법으로 배기가스 세정장치 연구를 다루고 있으며, 향후 기술 발전을 고려하면 영구적인 방법이 될 수 없을 것이다. 그러나 “IMO 2020”은 곧 선박의 변화를 의미하기 때문에 향후 LNG 연료 추진에 대한 수요 증가로 현존 선박의 사양에 대한 개조 시장이 확대가 될 것으로 전망하고 있는 추세이다.

따라서 본 논문은 현시점에서 배기가스 세정 장치를 탑재한 선박의 실증 사례를 통해 설계 시 고려해야 하는 주요 제한 조건을 충족하기 위한 수행 과정에 대한 정보를 전달하고자 하며, 연료 규제에 의한 선박 개조 공사 시장이 확대됨에 따라 선박의 운항 목적에 따른 경제적이고도 적합한 설계 방안을 제시할 수 있을 것이라 기대한다.

주제어: IMO 2020 규제, 스크러버, 현존선, 개장, 최적화 설계 절차



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

2020년 1월부터 배출규제해역이 아닌 일반해역을 운항하는 전 세계 모든 적용 선박에 대하여 병커연료의 황 함유량을 0.5%이하로 제한하는 ‘IMO 2020규제[1]’가 시행됨에 따라 이에 대한 대책으로 선주사는 저유황유(low-sulfur)사용, 스크러버(scrubber)라고 부르는 배기가스 세정장치(EGCS[2], Exhaust Gas Cleaning System)¹⁾장착, 가스 추진 엔진 탑재 등 크게 세 가지 사항 중 선택할 수 있다.

신조 시장에서는 LNG 병커링 인프라 부족 등으로 인해 스크러버(scrubber) 탑재를 선호하고 있으며, 일부 선박은 향후 LNG 연료 추진선박으로 개조할 수 있도록 설계(LNG-ready design)를 한다. 이러한 선박 패러다임이 중·장기적으로 변화하는 시점에서 현존하는 선박의 경우 세 가지 방안 중 현재의 연료유 가격 조건에서는 배기가스 세정장치를 개조 탑재하는 것이 경제적, 기술적, 환경적으로도 선주사에 가장 이득이 되는 것으로 확인되고 있다[3][4][5]. Fig. 1.1은 2018년 골드만 삭스(Goldman Sachs) 투자 조사 결과를 나타낸 것으로 2025년까지 대략 5,000여척의 선박에 스크러버를 설치할 것으로 전망하였으며, 2021년과 22년에 설치 수요가 최고조에 이르고 이후 2025년까지 서서히 감소할 것으로 언급하였다[6].

1) 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 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).

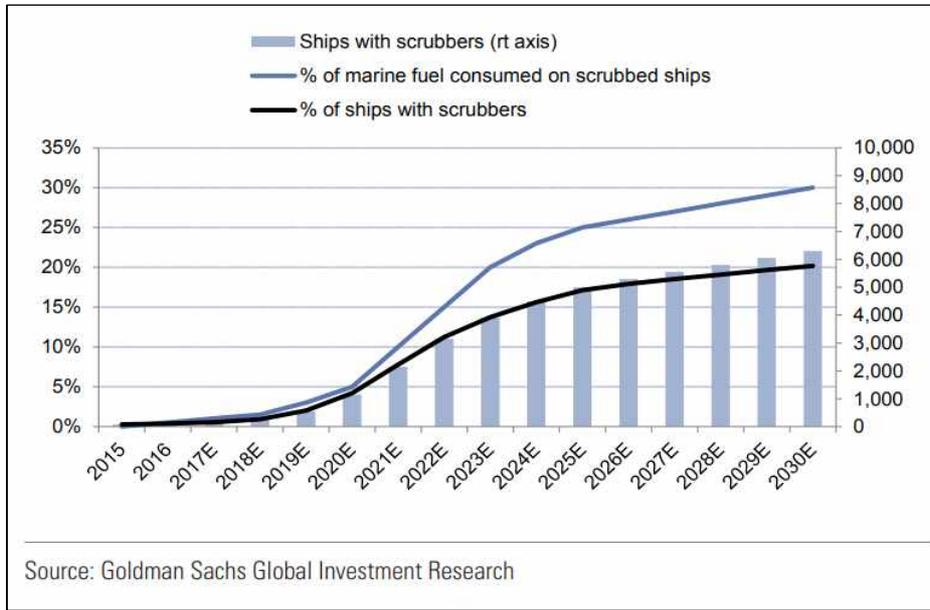


Fig. 1.1 EGCS installation market size forecast[5]

다만, 2016년 당시의 전망보다 현재 설치 수요가 크기 때문에 저유황유의 단가 상승 등의 요소에 따라 수요는 2025년까지는 꾸준할 것으로 전망하고 있다. 또한, Fig. 1.2는 투자비 회수 전망 기간 예측을 그래프로 나타낸 것으로 2020년을 기점으로 배기가스 세정장치 설비 자본회수기간이 2년으로 감축될 것으로 전망한다. 이러한 현상은 저유황유와 고유황유 사이의 가격차이가 확대될 것이라는 예상을 근거로 언급하였으며, 2022년 이후에는 이러한 가격차이가 줄어들면서 배기가스 세정장치 설치 수요도 감소할 것으로 전망하고 있다[6].

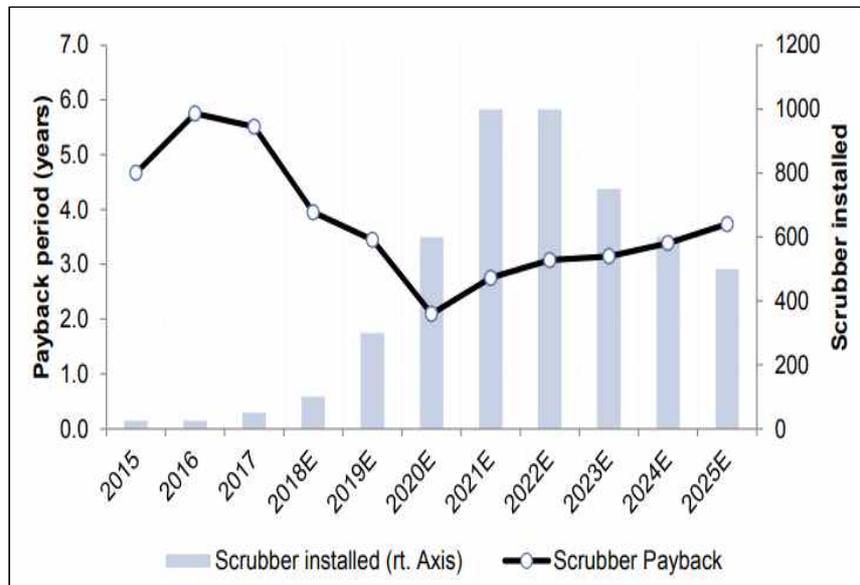


Fig. 1.2 EGCS installation payback period forecast[5]

배기가스 세정장치 기술은 선박 엔지니어링 공학을 기반으로 하며, 유기화학의 지식을 접목시켜 선박 추진 공학의 발전을 위한 다양한 연구들이 선행되어왔다. 배기가스 세정장치는 연료유 규제에 대한 영구적인 방법이 될 수 없으나, 'IMO 2020규제'에 따른 선박의 사양 변화와 이에 대한 기술 발전을 고려할 때 현존선의 개조 시장은 꾸준히 성장할 것으로 예측되어진다. 다만, 현존선의 개조 공사의 경우 설계 단계에서 인지하지 못한 요소들이 설치 과정에서 치명적인 변수로 작용하는 경우가 발생하기도 한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 경제적, 기술적 손실을 최소화하기 위한 검토 과정이 필요함을 느꼈으며, 선박의 사전환경 조사 및 엔지니어링 검토 절차에서 주요 설계 제한 요소들을 확인하고 검증하는 설계 절차에 대해 수립하고자 한다.

1.2 연구 범위와 연구 방법

개장(retrofit)²⁾공사의 경우 탑재되는 장비의 부품 등 제원에 관하여 성능, 재료, 가공방법, 비용, 납기 등 설계 조건이 어느 정도 규정되어 있으며, 이 범위 내에서 주어진 목적에 최적화를 도모하는 설계를 뜻한다.

그러나 이 사례 안에서도 주요 국제 규정 및 선급 강선 규칙 등이 설계 변수로 작용하였기 때문에 본 연구에서는 안전성과 유효성의 제약 조건 내에서 기능, 성능, 비용 등이 설계 목적에 적합하게 실현될 수 있도록 설계 변수의 최적화 방안을 수립하고, 수립된 설계 절차는 연구 대상 선박의 구조설계가 완료된 후 이에 대한 구조해석 및 선박의 복원성을 확인하여 타당성을 검증한다.

아울러 배기가스 세정장치 개장공사와 관련하여 개정된 내용의 선급 승인을 통해 신뢰성 평가를 진행하고, 해상 시운전 과정에서 세정수 측정에 대한 성능 분석은 IMO에서 요구하는 Res. MEPC.259(68) Appendix 3에 따라 표본을 채취하여 pH의 경우 ANSYS 프로그램을 기반으로 한 CFD 분석을 통해, 다환 방향족 탄화수소(PAH), 탁도(Turbidity), 질산염(Nitrate), 온도(Temperature) 등의 요소에 대해서는 배출 모니터링 시스템을 통해 IMO에서 요구하는 배출 요건을 충족하고 있음을 확인한다[7].

2) retrofit : 개장(改裝), 다시 새롭게 꾸민다. 선박의 장비를 뜯어 고친다.

1.3 연구의 내용 및 논문의 구성

본 연구의 내용 및 논문의 구성을 구체적으로 살펴보면 대략 다음과 같다.

제 1장에서는 배기가스 세정장치 설치 전망과 현존 선박의 개장 공사 설계 절차 수립 최적화에 연구 목적이 있음을 기술하였다. 또한 연구의 내용 및 논문 구성에 대해 안내하고자 한다.

제 2장에서는 배기가스 세정장치의 대해 요약하고 개장을 위한 선박의 환경 조사 방법 및 수행 과정에 대해 기술하였다. 또한, 이러한 조사를 토대로 초기에 수립된 설계 절차에 대한 내용으로 구성되었다.

제 3장에서는 초기 수립된 절차를 바탕으로 진행된 3차원 상세 설계에 대해 기술하였으며, 배기가스 세정장치 탑재 시 고려해야하는 주요 설계 제한 조건들과 이를 충족하기 위한 수행과정에 대해 나열하였다.

제 4장에서는 도출된 설계에 대한 선급 승인을 통해 신뢰성 평가를 실시하였으며 해상 시운전을 통해 성능 검증을 진행하였다. 이 과정에서 최종 설계 절차 수립 시 추가 확인되어야 하는 요소들에 대해 기술하였다.

마지막 결론에서는 설치 후 성능 검증을 통해 설계의 적합성에 대해 언급하였으며, 적합한 설계 절차가 도출되었음을 기술함으로써 끝을 맺고자 한다.

제 2 장 배기가스 세정장치의 개요 및 선박 환경 조사

2.1 배기가스 세정장치의 개요

배기가스 세정장치란 선박의 엔진, 발전기, 보일러에서 배출되는 배기가스의 황산화물을 절감시켜주는 장비를 말한다. 크게 습식 세정장치와 건식 세정장치로 구분되지만, 일반적으로 선박에는 습식 세정장치 탑재를 선호하고 있다. 습식 세정장치의 경우 시스템 구성에 따라 개방형 세정장치(Open-loop type)와 폐쇄형 세정장치(Closed-loop type), 혼합형 세정장치(Hybrid type)로 구분되어진다. 세 방식의 차이는 개방형 세정장치의 경우 해수의 알칼리성을 이용해 배기가스의 황산화물을 세정하는 원리로 Fig. 2.1과 같이 해수가 시스템으로 공급되어 SO_x를 제거 한 후 바로 선외로 배출된다. 이는 기본적으로 해수가 가지고 있는 알칼리성을 이용하여 SO_x를 흡수하더라도 자연 중화되어 세정수의 선외 배출에 대한 pH 기준을 만족시키는 방법이다.

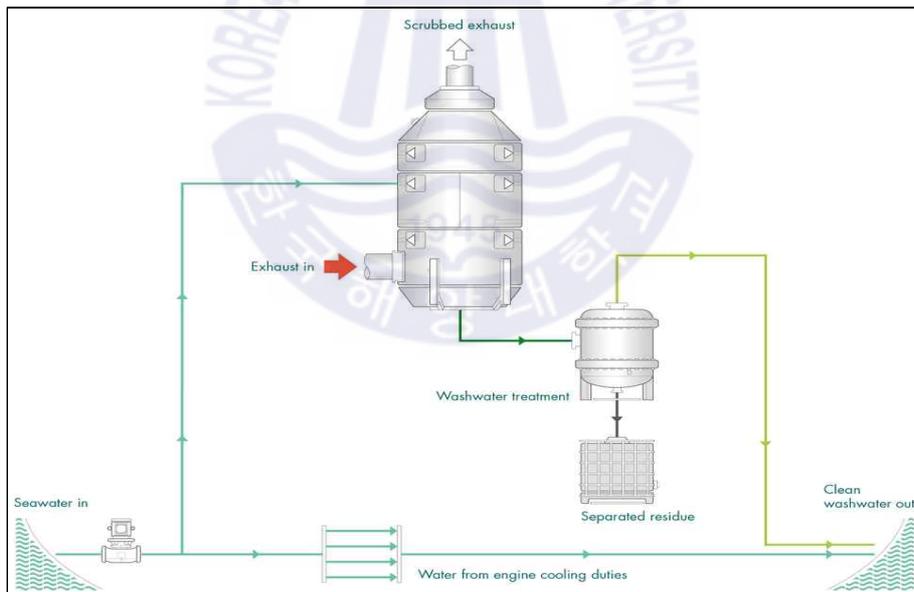


Fig. 2.1 Open loop exhaust gas cleaning system[2]

폐쇄형 세정장치의 경우 Fig. 2.2와 같이 세정수로 선박에 저장되어 있는 청수를 주로 사용하며 해수를 사용하는 경우도 있으나 이는 세정수로 사용되는 청수를 냉각하기 위한 목적으로 사용된다. 해수의 pH 농도에 의한 영향이 없기 때문에 모든 해역에서 시스템의 원활한 사용이 가능하다. 또한 SO_x 제거에 사용되는 청수는 사용 후 선외 배출되는 것이 아니라 NaOH로 중화시켜 계속 사용이 가능하므로 선외 배출의 양이 적으며, 배출수의 pH에 대한 제어가 쉽기 때문에 배출 시에도 규정 만족이 용이하다.

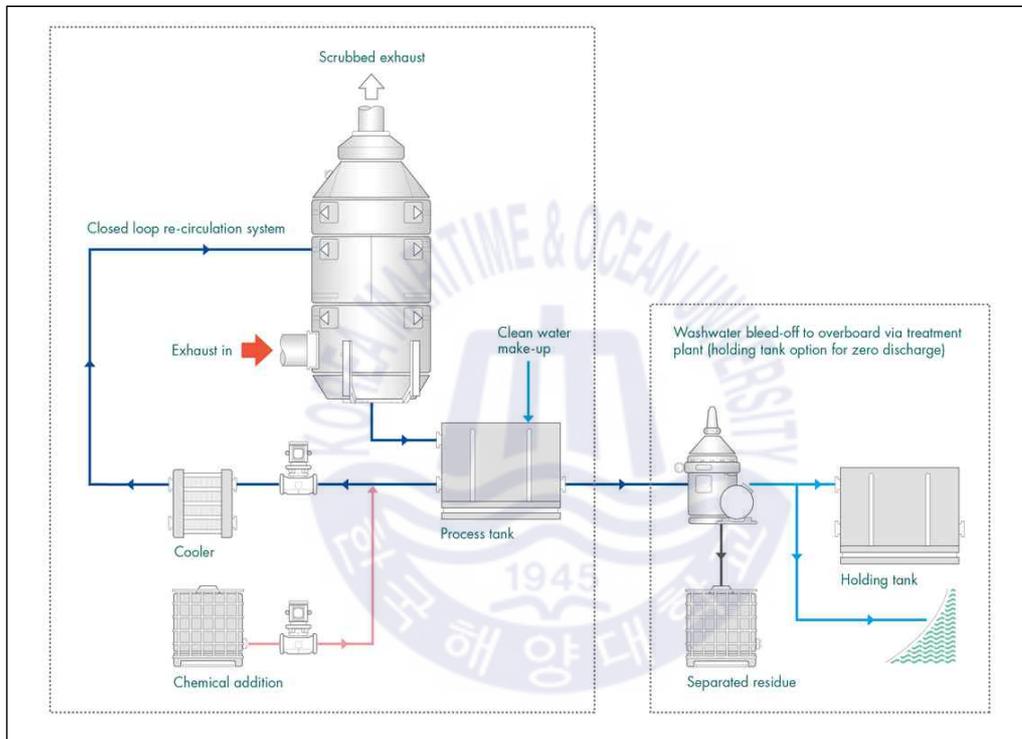


Fig. 2.2 Closed loop exhaust gas cleaning system[2]

혼합형 시스템은 Fig. 2.3과 같이 필요에 따라 개방형과 폐쇄형을 모두 사용할 수 있는 시스템으로 각 시스템의 장점을 모두 취할 수 있다. 즉, 해수의 알칼리성이 부족하거나 혹은 지역 규제에 따라 배출수의 규제 등이 있는 경우 폐쇄형 방식을 사용함으로써 배기가스의 원활한 SO_x 제거와 함께 세정수 배출 규정도 만족할 수 있다. 또한 해수의 알칼리성이 충분하고, 그에 따라 배출수의 pH 규정 만족이 확보 될 경우 개방형 방식을 사용하여 선내에 보관하고 있는 NaOH 및 청수의 사용량을 줄여 운전 및 유지비용 감소를 이룰 수 있다는 장점이 있다.

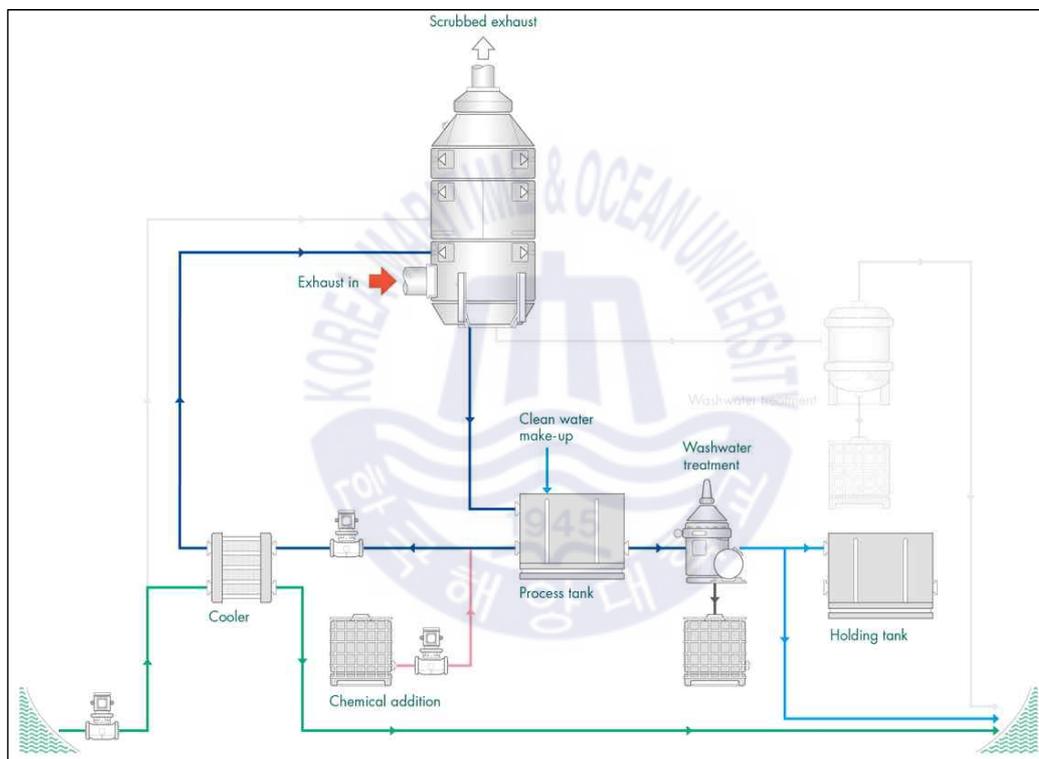


Fig. 2.3 Hybrid loop exhaust gas cleaning system[2]

2.2 배기가스 세정장치 개장 초기 설계 절차 수립 및 모델선 검토

2.2.1 배기가스 세정장치 개장 초기 설계 절차 수립

일반적으로 배기가스 세정장치 설치의 공학적 검토 및 설치기간은 평균적으로 33주 정도 소요된다. Fig. 2.4는 배기가스 세정장치 설치에 대한 일반적인 공학적 절차를 나타내고 있으며, 3차원 촬영의 경우 개장 설계의 정확도를 위해 반드시 실시되어야 하는 과정이다. 방선 시 선박의 3차원 촬영과 함께 배기가스 세정장치 탑재에 대한 선박 환경에 대해 조사가 진행된다.



Fig. 2.4 General procedure of EGCS engineering

Fig. 2.4를 기초로 하여 Fig. 2.5와 같이 초기 설계절차를 수립하였으며, 설계에 대한 검증 및 신뢰성 평가는 구조해석과 해상 시운전 단계에서 실시한 성능 검증을 통해 진행한다. 구조 해석에는 MSN Nastran과 구조 해석 전/후 처리 프로그램인 Patran을 사용하여 수행하며, 각 조건에 따른 von Mises 응력³⁾, 전단 및 변형(deformation)이 선급에서 규정하는 허용 응력 범위를 충족하는지 확인한다. 이후 시스템을 구성하는 장비 및 의장품의 배치와 같은 설계 조건을 고려하여 설계 절차를 수정 및 보완하며, ANSYS를 통한 CFD 분석 및 해상 시운전 시 성능 확인을 통한 IMO 배출요소 규제조건의 충족 여부를 확인한다.

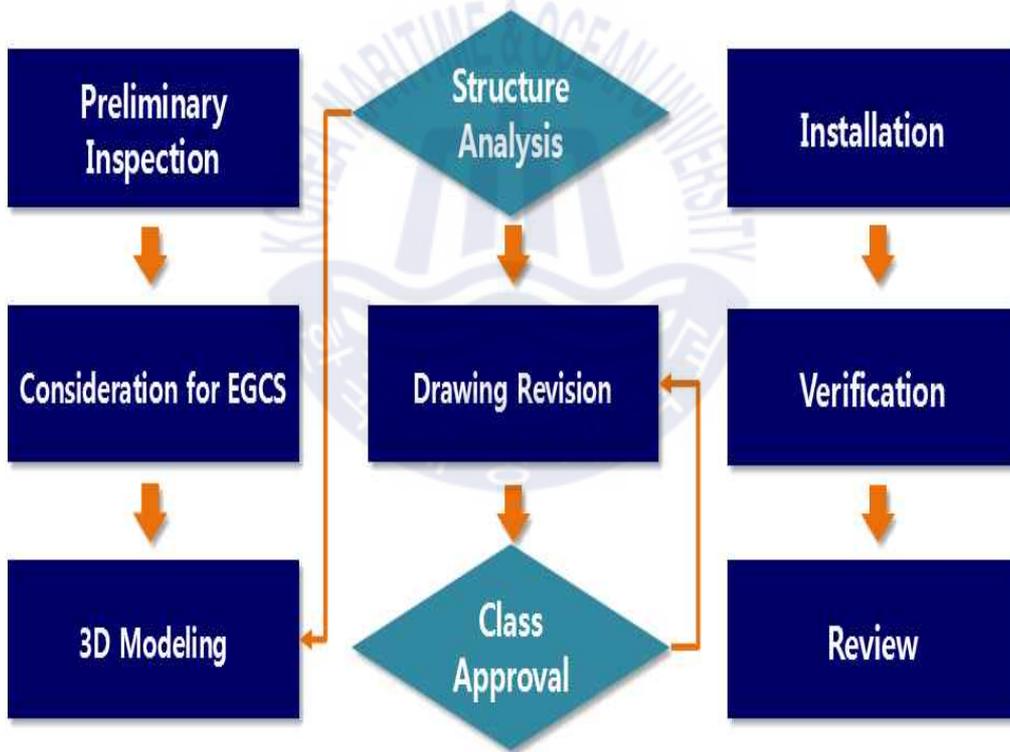


Fig. 2.5 Initial flow chart establishment

3) Von mises stress: 폰 미세스 응력은 다양한 방향(다축방향)으로부터 복합 하중이 가해졌을 시, 어느 한 부위의 응력장에 대해 1축의 인장 또는 압축 응력으로 투영시킨 값으로, 이 미세스 응력이 그 재료의 항복응력에 도달했을 때 그 재료는 항복한다는 의미로 구조해석에서는 이 응력을 등가응력 (effective or equivalent stress)이라 말하기도 한다. 미세스 응력은 방향을 취하지 않는 스칼라량이며, 실제의 구조물 내에 발생하고 있는 다축방향의 응력장에 대해 그 재료가 항복했는지를 판단할 수 있는 지표로 사용된다.

2.2.2 모델선 선정 및 검토

본 연구를 위한 모델 선박은 재화중량톤수 18만 톤의 화물선으로 기본 정보는 Table 2.1과 Fig. 2.6과 같다.

Table 2.1 Information of project vessel

| | |
|------------|-------------|
| Flag | Marshall Is |
| Class | KR |
| L.O.A. | 292.00 m |
| L.B.P. | 282.00 m |
| Breadth | 45.00 m |
| Depth(MLD) | 24.8 m |
| Draft | 18.3 m |



Fig. 2.6 Project vessel “DWT 180k bulk carrier”

Fig. 2.6의 프로젝트 호선의 배기가스 세정장치 개장을 위해서는, 본선이 신조시 EGCS의 설치 공간 및 부대 장비를 계획하여 건조되지 않았으므로, 본선의 기본 자원은 유지하되, 추가되어야 하는 부분을 파악하여 공사비용 및 소요 자재 절감과 최적의 공사 기간을 설정하기 위한 내용을 확인하는 것이 조사의 목적이다.

선박 환경 조사는 3차원 카메라를 활용한 3차원 스캐닝(scanning) 과정 기반으로 진행되며, 선박의 외관 및 실제 용적 등을 3차원 정보를 수집함으로써 실제와 거의 일치하는 기관실 장비 배치 및 배관 배치 등을 확인할 수 있다. Fig. 2.7과 같이 실제 모습과 촬영된 포인트 사진 비교를 통해 정확도를 확인할 수 있다. 3차원으로 시각화된 포인트 클라우드 정보는 모델링 프로그램에 업로드하여 배기가스 세정장치 장비 및 배관의 정확한 배치가 이루어질 수 있도록 한다.

선박의 사전 환경 조사단계에서는 연돌 및 케이싱의 확장 또는 개조 여부, 기관실 선외 배출구 및 해수 흡입구 증설 여부, 주 배전반 증설 여부가 중점으로 확인되어진다. 이는 선체의 연돌(funnel) 및 케이싱 (casing) 증설에 따라 선박의 복원성 및 종강도 등의 재검토 및 구조 해석이 진행되어야 하며, 3장에서 다룬 설계 시 주요 설계 제한 조건 중 고정식 소화장치 개조가 필요한 경우에 대한 검토가 진행되어진다. 또한, 배기가스 세정장치를 설치함으로써 장비 운용에 필요한 해수의 양과 본선에 설치된 시체스트(sea chest)의 용량이 충분한지를 파악하여 필요한 경우 시체스트를 증설해야하므로 함께 검토가 진행된다.

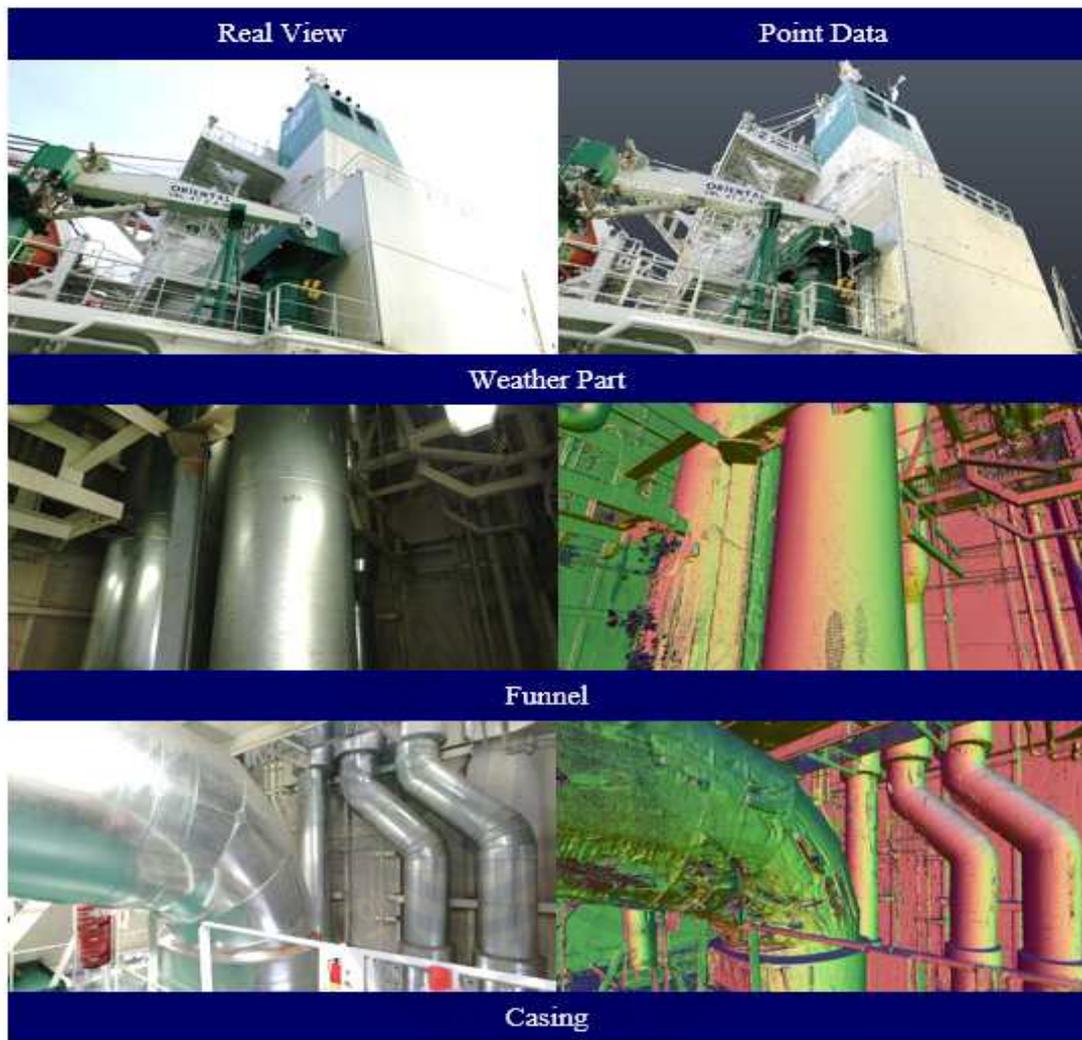


Fig. 2.7 Data for captured using 3D scanning technique

제 3 장 주요 설계 제한 조건에 따른 설계 수행

3.1 개요

일반적으로 배기가스 세정장치의 설치 위치에 대해서는 특별한 제약이 없으며, 제조사에 따라 기관실 내부 또는 외부에 설치할 수 있다. 하지만 배기가스 세정장치 몸체는 크기와 무게가 상당한 편이므로 기관실 내부에 설치하기 위해서는 확장되는 연돌 및 케이싱 내부에 배치 및 유지보수 공간이 충분한지 등을 확인해야 한다. 본 연구 대상 선박의 경우 설계 초기 아래의 조건들이 설치 시 변수로 작용하지 않도록 기존의 상태를 제한 값으로 정해 놓고 구조 설계를 진행하였다.

3.2 고정식 소화 설비

연돌 및 케이싱을 확장하는 경우 기관실의 체적(volume)을 계산하여 CO₂ 필요량을 재확인하여야 하며[8], Table 3.1과 같이 검토를 진행하고 필요한 경우 CO₂ 실린더의 추가 배치가 이루어져야 한다. 다만 본 연구 대상 선박의 경우 실린더 추가 개조를 진행하지 않는 범위 내에서 용적을 확장하였기 때문에 배기가스 세정장치 탑재에 따른 여분의 실린더 추가 및 노즐의 개조가 필요하지 않도록 설계되었다.

Table 3.1 Calculation of required CO₂ quantity before EGCS installation

| Name of space | Mixing ratio (%) | Gross vol. (m ³) | Qty of CO ₂ (kg) | Cal. No. of cylinders | Select no. of cylinders | Size of cylinders (kg) |
|--------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Engine room incl. casing | 35 | 14757 | 922.13 | 204.96 | 205 | 45 |
| Engine room excl. casing | 40 | 14507.2 | 10362.29 | 230.27 | 231 | 45 |
| Purifier Room | 40 | 415 | 296.43 | 6.59 | 7 | 45 |

본 연구 대상 선박의 케이싱 확장에 따른 CO₂ 필요량은 아래와 같다

- 1) 개조 후 연돌 및 케이싱의 부피변화
: 249.8 m³ → 1,790 m³으로 증가하여 변화량은 1,540.2 m³
- 2) 케이싱을 포함한 엔진룸의 면적
: 14,507.2 m³ + 1,540.7 m³ = 16,047.4 m³
- 3) 필요한 CO₂ 총량 : 16,047.4 m³ x 0.35 / 0.56
- 4) 필요한 CO₂ 실린더의 개수 : 10,029.625 / 45 = 222.880

본선에 기존에 탑재된 CO₂ 실린더 개수는 231개 이므로 개장 후 필요한 CO₂ 실린더 개수 223개 이상 기준을 만족한다. 따라서 별도의 실린더 또는 노즐의 추가 설치는 고려하지 않았다.

3.3 의장수(Equipment Number)

배기가스 세정장치를 탑재함에 있어 연돌 또는 케이싱의 확장 및 개조로 기존과 달리 선체 측면 투영 면적이 변하는 경우, 개조 후 면적을 반영한 의장수를 계산하여야 한다. 다만 의장기호에 변동이 생기는 경우에는 의장품을 변경 설치해야하므로 이에 대한 제한 조건을 반영하여 구조설계를 진행하였으며, 개장 후 측면 투영면적에 증감이 없었다. 따라서 의장기호는 개조 전과 동일하며, 본선에 설치된 앵커(anchor)는 고 파지력 앵커로서 이 경우에는 강선규칙 4편 8장 202절 2항에 의하여 의장기호 표에서 정하는 값의 0.75배로 할 수 있다[9]. 본 연구 선박의 의장기호는 Table 3.2와 같이 L3로 표에는 17,800 kg 질량의 앵커 사용을 권고하지만 고 파지력 앵커를 사용하므로 13,350 kg 이상의 앵커를 사용하면 되며, 이미 적용되어 있으므로 변경사항에 해당하지 않는다.

Table 3.2 Anchor specification of actual application

| EN = U53 | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------|
| Equipment list | | | |
| Item | | Required by rules | Actual application |
| Bow anchor | type | stockless | h.h.p. anchor |
| | number | 3 | 2 |
| | mass per anchor | 17,800 kg | 13,350 kg |
| Stud-link chain cable | total length | 742.5 m | 742.5 m (357.5 m/385 m) |
| | diameter | 102 mm | 102 mm |
| | grade | 3 | 3 |
| Mooring lines | number | 8 | 16 |
| | type | | polypropylene rope |
| | length of each | 200 m | 200 m |
| | minimum breaking strength | 706 kN | 490 kN |

3.4 선교의 안전

항해 선교 시야의 경우 SOLAS 규칙 제 5장 규정 22 3항에 따라, 조종 위치(Conning Position)에서 수평 시야는 225도 이상 확보해야 하며, 이는 즉, 전방 180도와 선박의 양 현에서 후방으로 각각 22.5도 이상을 확보해야 한다. 배기가스 세정장치를 선미부에 설치하는 경우, 해당 규정을 충족하지 못할 수가 있으므로 개장 후 개조된 연돌 및 케이싱의 구조가 기존 가시성 범위를 확보하고 있는지 반드시 확인하여야 한다[10].

본 연구 대상 선박의 경우 해당 규정을 충족하여 별도의 가시성 간섭에 대한 별도의 검증이 생략되었으나 조종위치에 대한 규정상 정의가 불분명하여 편널 및 케이싱 개조 범위 결정 시 위의 사항을 검토할 필요가 있다. 이는 조종 위치에 대해 원칙적으로 한 개의 위치를 도면상에 표시하여야 하나 일부 선박의 경우 좌현(portside), 우현(starboard side) 양 쪽에 각각 표시한 경우도 있으며, 규정상에도 대한 명확한 수치적 거리를 정의하고 있지 않다. 따라서 이러한 경우에는 한 쪽에서 시야 확보에 대한 규정을 충족하지 못할 수 있기 때문에 이에 IACS UI SC139에서는 “브릿지 윈에서 선체의 측면을 볼 수 있어야 하며, 주관청의 견해에 따라 이 규칙에 적합할 수 없는 것으로 인정하는 특수 설계의 선박에 대해서는 실행 가능한 이 규칙에 정하는 요건에 근접하는 시야 요건을 확보하는 설비를 갖추어야 한다.” 라고 명시하고 있다. 이때 설비는 “원격 카메라 시스템(Remote Camera System)” 으로 해석할 수 있다. 다만, 해당 시스템을 설치하는 것에 대해서는 반드시 기국의 허가를 받아야 한다[11].

3.5 국제해상충돌예방규칙

국제해상충돌예방규칙의 경우 설계 당시에는 인지를 하지 못했던 요소로서 설치 과정에서 연돌 및 케이싱의 높이 상승으로 선박 마스트 정부 등의 225° 수평 호를 비춰야 하는 시야 확보를 충족해야 하나[10], 개조 후 해당 규정을 일부 간섭하는 사실이 확인 되었다. 따라서 마스트 등의 높이를 1.6 m 정도 상승하여 수정 설치하였으며, 초기에 세운 설계 절차에 내용을 수정 보완하는 내용을 추가하였다[12].

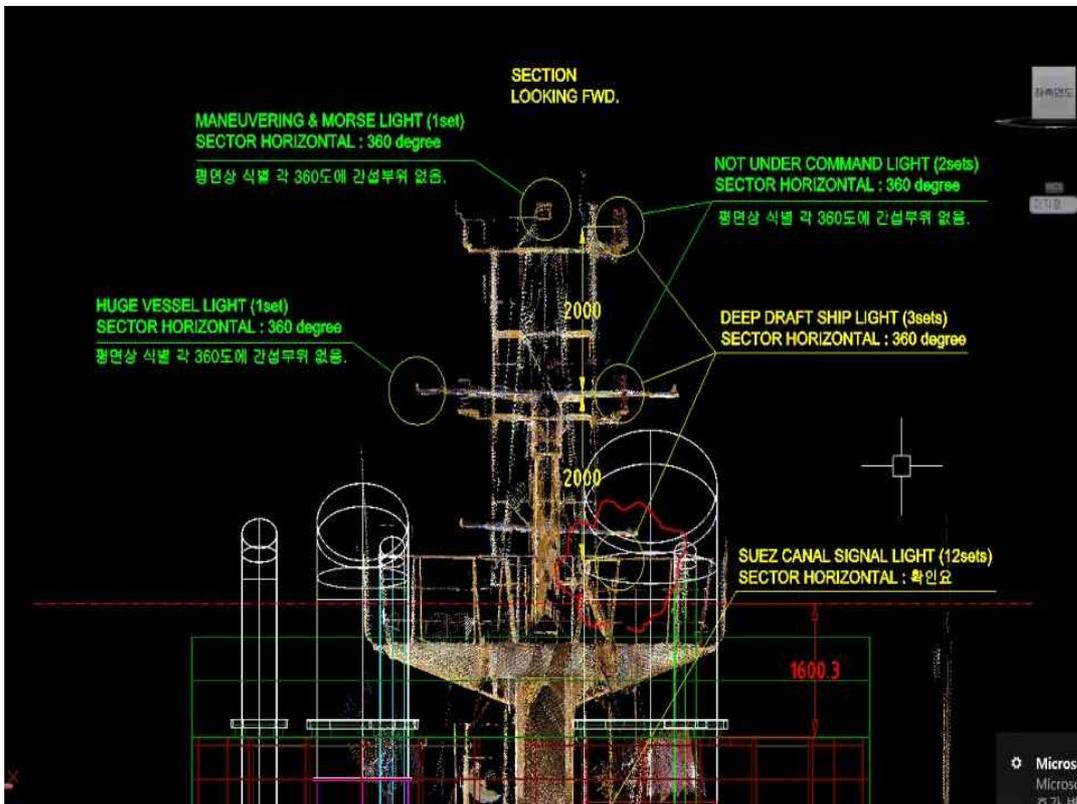


Fig. 3.1 Actual view of interference masthead light

제 4 장 개장 공사 설계 절차의 신뢰성 검증

4.1 설계 구조 안정성 및 선박 복원성 검토

본 연구 선박의 경우 설계 초기 단계에서 제 3장에서 소개한 설계 제한 조건 중 고정식 소화장치 개조 여부, 의장수 개조여부, 선박의 시야 확보 등 주요 세 가지의 조건에 대한 검토를 진행하였으며, 이를 토대로 연돌 및 케이싱의 개조 범위를 설정하였다. 확정된 구조는 Fig. 4.1과 같이 기존 연돌 및 케이싱을 제거 한 후 B-DECK 상부부터 확장된 용적의 새로운 블록으로 탑재할 것을 결정하였다. 개장 후 총톤수(GT, gross tonnage)는 91,373톤에서 91,836톤으로 증가하였다.



Fig. 4.1 Selection of install location after 3D scanning

Fig. 4.2는 개장되는 구조의 높이를 나타내며, Fig. 4.3을 통해 구획별 개조되는 형상을 확인할 수 있다. 상세설계 시 프로그램 상에 3차원으로 촬영된 선박의 포인트 클라우드 정보를 업로드하여 개조하고자 하는 형상의 폭, 너비, 높이를 측정하고 확인할 수 있다.

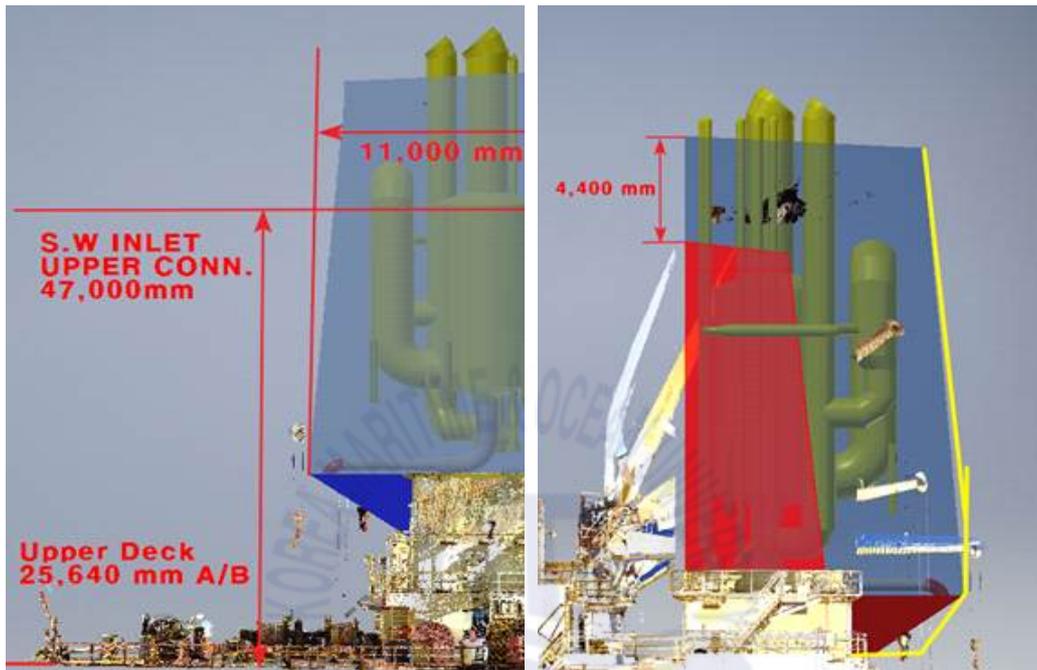


Fig. 4.2 Elevation view of installation EGCS

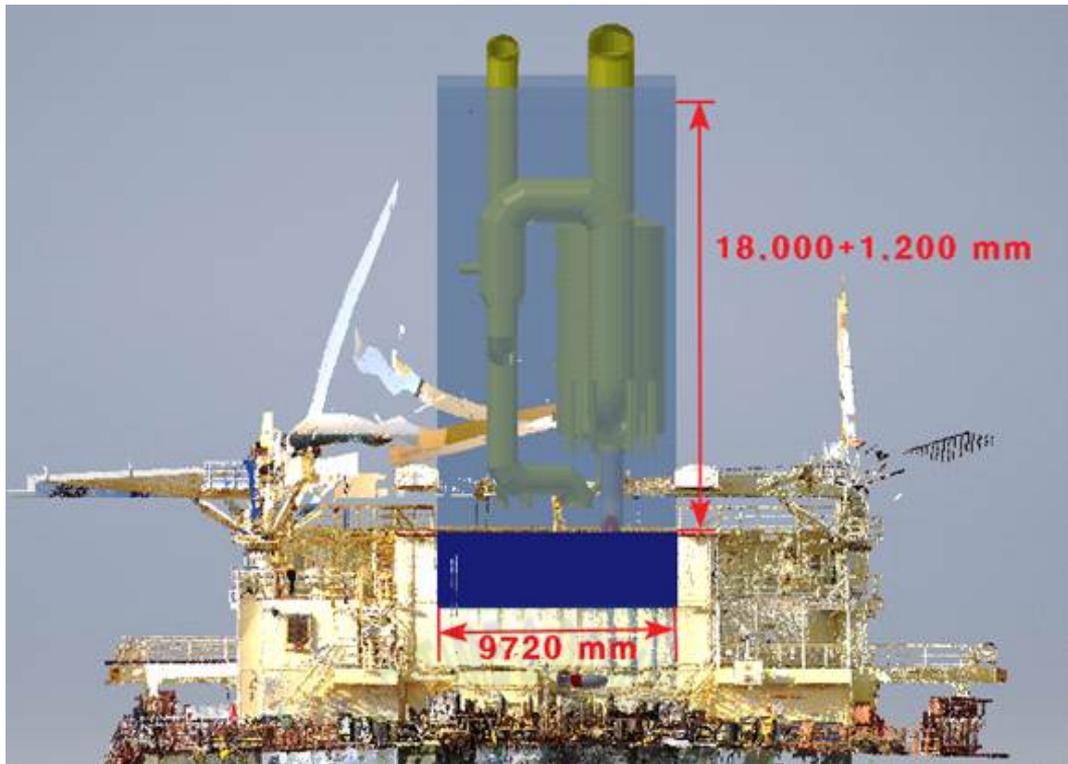


Fig. 4.3 Section view of installation EGCS

선체구조에 대한 개조 범위 설정 후에는 유지 보수 공간을 확보한 시스템 구성품의 배치를 위한 검토 과정이 진행된다. Table 4.1의 디자인 시트(design sheet)를 통해 설치 예정 장비의 사양을 확인하여 의장품을 포함한 배기가스 세정장치를 구성하는 시스템의 배치를 고려한 상세설계 과정이 수행된다. 이후 구조 해석 및 선박 복원성에 대한 검토를 진행하였다.

Table 4.1 Scrubber design data

| Scrubber data | |
|---------------------------|--------|
| Length | 7,743 |
| Diameter 1 (mm) | 4,416 |
| Diameter 2 (mm) | 1,912 |
| Height 1 (mm) | 10,268 |
| Height 2 (mm) | 7,219 |
| Weight (dry, ton) | 19.4 |
| Weight (operational, ton) | 23.0 |

장비 모델링 단계에서는 배기가스 세정장치 시스템을 구성하는 장비와 화재 탐지기, 구조 변경에 따른 전장품, 조명의 추가 및 재배치가 이루어지고, 장비 배치에 따른 배관 및 보강재 등 의장품 설계가 진행된다. 특히 배기가스 세정장치 장비의 경우 상당한 하중을 갖기 때문에, 이에 따른 설치 장소의 하부 보강이 적절하게 이루어져야 하며, 진동 및 소음에 대해 충분히 고려하여 보강재 설계를 수행한다.

본 연구의 대상선박은 기존 연돌 및 케이싱을 제거하고, B-데크부터 새로운 블록을 탑재하였다. 아래와 같이 연돌 및 케이싱 개조를 고려하는 경우 배기가스 세정장치 설치를 위한 구조 강도에 대한 안정성 검토가 필수적이며, 실시 결과 허용응력 및 하중, 전단응력에서 규정치를 만족하는 것으로 확인되었다. Fig. 4.4는 개조 전 배치도이며, Fig. 4.5는 B-데크부터 개조되는 선박의 외형 및 장비를 안착한 후의 모습을 확인할 수 있는 배치도이다.

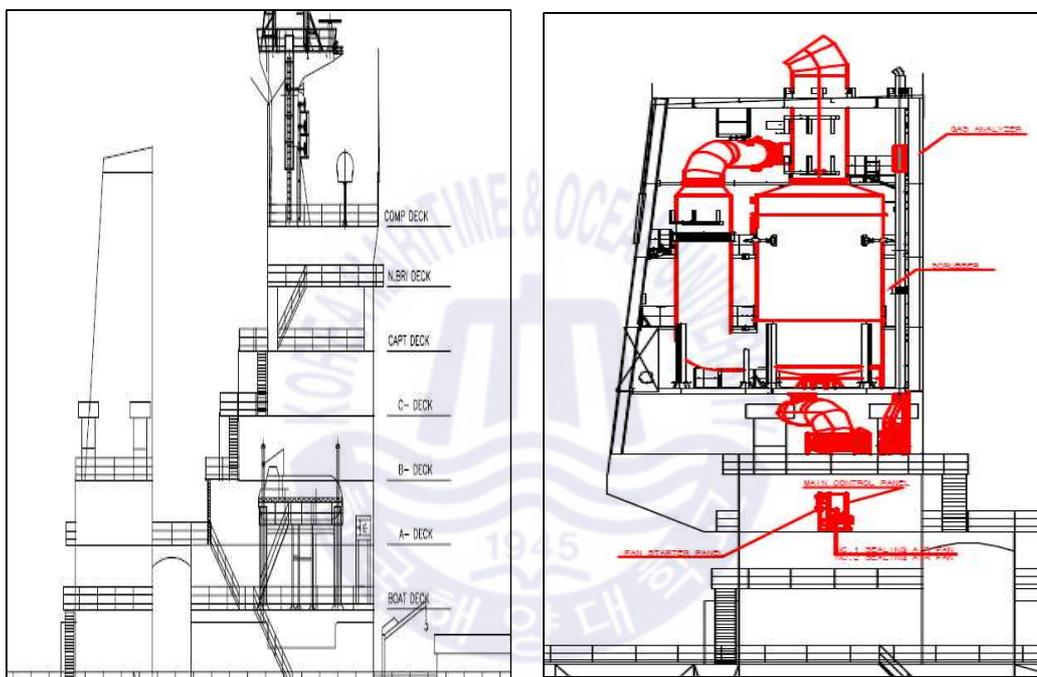


Fig. 4.4 Arrangement before EGCS installation Fig. 4.5 Arrangement after EGCS installation

본 해석모델은 외판, 갑판, 횡격벽 및 주요거더와 특설늑골은 판 요소로, 힘 보강재는 보(beam) 요소로, 마지막으로 거더와 늑골 등의 면재는 장대(rod) 요소로 이상화하여 해석모델을 완성하였다. 구조 해석모델 형상은 Fig. 4.6과 같고, 유한 요소 모델의 좌표계는 Table 4.2와 같이 확인할 수 있다.

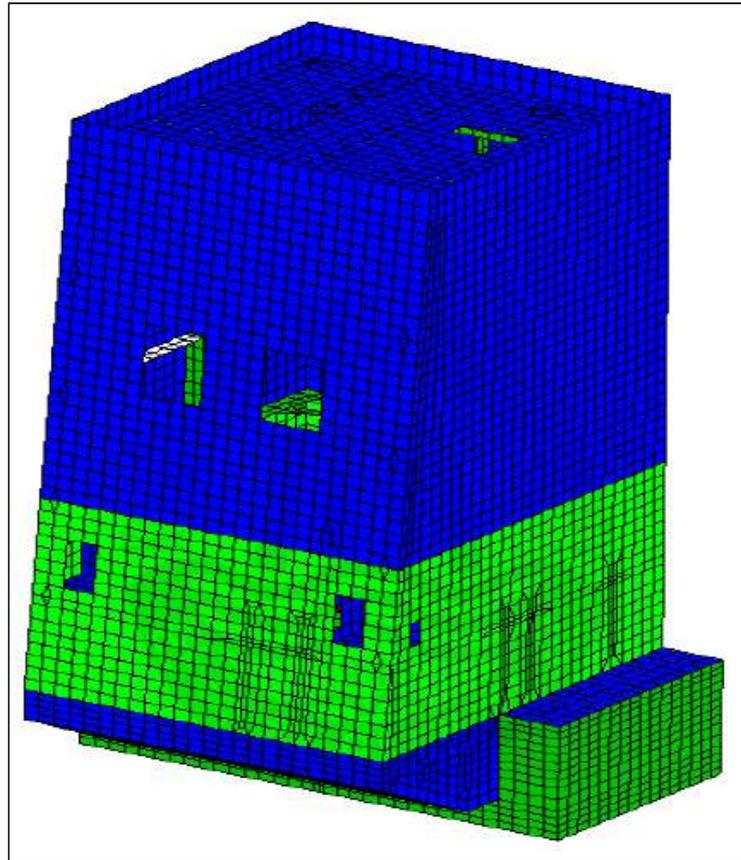


Fig. 4.6 Structure analysis model

Table 4.2 Coordinate system of finite element model

| Axis | Direction | Remark | |
|------|---------------------|-------------|---|
| x | The Length of Ship | FR.57 → FWD | + |
| y | The Breadth of Ship | C. L → PORT | + |
| z | The Depth of Ship | B. L → TOP | + |

구조 해석 결과 발생한 응력은 각 요소가 선급 강선 규칙에서 요구한 허용응력을 초과하여서는 안 되며, 허용응력을 초과한 구조부재에 대해서는 해당 부재의 치수(scantling)를 증가시켜 발생 응력이 허용응력 범위 안에 있도록 해야 한다. 구조 해석에는 MSN Nastran과 구조 해석 전/후 처리 프로그램인 Patran을 사용하여 수행하였으며, 각 조건에 따른 von Mises 응력, 전단 응력 및 변형(deformation)은 Table 4.3과 같았으며, Fig. 4.7은 셸(shell)요소의 요소 특성치를 나타낸다. 구조 안전성 검토 결과 작용 응력이 모두 허용응력 범위를 초과하지 않아 구조적으로 안전하다고 선급의 인정을 받았다.

Table 4.3 Working stress and displacement according to load conditions

| Loading Case | von MiSES Stress (MPa) | Max. Shear Stress (MPa) | Remark |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------|
| LC1 | 106 | 56 | |
| LC2 | 70.5 | 37.1 | |
| Allowable combined stress : 175 MPa, Allowable shearing stress : 90 MPa | | | |

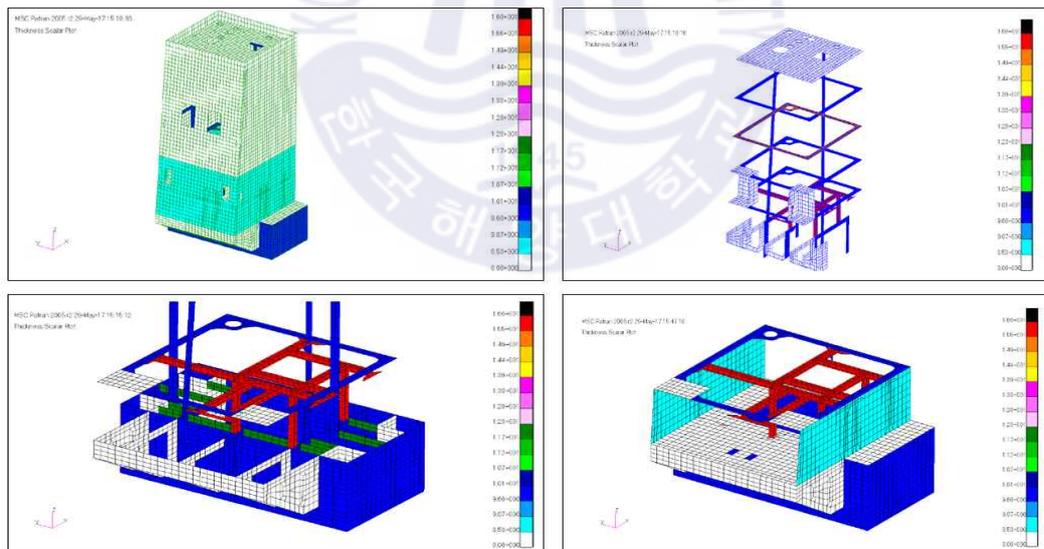


Fig. 4.7 Thickness scalar plot of model

4.1.1 선박 복원성

배기가스 세정장치 탑재 시에는 시스템을 구성하는 장비가 다수 추가되며, 여기에는 상당한 배관을 포함한 의장품의 증설도 포함되어 있다. 이에 따른 본선의 경하중량에 변동이 발생하기 때문에, 총톤수 및 경하중량 증가에 따른 선박의 복원성 변화와 관련하여 다음의 사항들에 대한 검토가 진행되었다.

4.1.2. 경하중량 검토결과

배기가스 세정장치 시스템을 탑재함에 따라 선박의 무게중심의 변화 및 경하중량 변화에 대한 경하중량산정계산표 작성하여 설치 공사 시 선급 검사관의 확인을 받아야한다. 경하중량 변화량이 기존 경하중량 대비 2% 증감 또는 종방향 무게중심위치(L.C.G., Longitudinal of Center of Gravity) 변화량이 수선간장 (L.B.P., Length Between Perpendicular)의 1% 이상일 경우 경사시험이 실시되어야 하며, 이를 반영한 복원성 자료의 재작성이 요구된다. 본 연구대상 선박의 개장 후 경하중량 산정표는 **Table 4.4**와 같다.

경하중량의 변화량은 기존 경하중량 대비 178.364 톤, 0.75% 증가하였으며, 선박 복원성에 대해 개정된 결과가 충분함을 선급에 제출하였다, L.C.G. 변화량은 경사시험이 필요한 사항에 해당하지 않기 때문에 경사시험을 생략하였다.

Table 4.4 Light weight calculation reflecting EGCS

| Items | Weight (ton) | LCG (m) | LCG-Moment (ton-m) | KG (m) | KG-Moment (ton-m) |
|-------------------------|------------------|----------------|--------------------|---------------|-------------------|
| Old light weight | 24737.830 | 133.673 | 3306779.950 | 13.902 | 343905.313 |
| Added items (new) | 228.364 | 15.126 | 3454.268 | 35.883 | 8194.445 |
| Deducted items (new) | -50.000 | 15.200 | -760.000 | 35.468 | -1773.400 |
| New light weight | 24916.194 | 132.824 | 3309474.218 | 14.060 | 350326.358 |

본 연구 대상 선박의 배기가스 세정장치 탑재 후 경하중량 변화량은 아래와 같다

- 1) 경하중량 변화량은 기존 24737.830 톤에서 개장 공사 후 증가 및 제거되는 물량을 포함하면 2491.194 톤으로 178.364 톤 증가한다. 증가율은 0.5 %를 초과하기 때문에 복원성 자료의 재 작성 및 승인이 요구되어지는 대상 선박이다.
- 2) 종 방향 무게중심위치의 변화량은 기존 133.673에서 132.824로 -0.849 감소하였으며, 수선간장의 1% 미만으로 경사시험 대상 선박의 경우에는 해당하지 않는다.

4.2 선급 승인을 통한 신뢰성 평가

본 연구 대상 선박의 경우 배기가스 세정장치 개조와 관련하여 설계의 신뢰성 평가를 위해 다음 Table 4.5의 도면 및 자료를 선급에 제출하여 승인받았다. SECP, ETM, OMM, EGC Record Book은 협약 요구사항이며, 보통 제조사에서 제출하여 승인을 받는다.

Table 4.5 The drawing list for class approval

| Part | Documents and Drawings |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Stability & tonnage team | Light weight calculation |
| | * Result of inclining experiment and deadweight |
| | Loading manual |
| | Damage stability calculation |
| | Loading computer test report |
| Dry cargo ship team | General arrangement |
| | Fire detection drawing |
| | Equipment number |
| | Mooring arrangement |
| | Funnel arrangement |
| | Hull outfitting drawing |
| | Construction drawing |
| Machinery & Electrical team | Electrical load analysis |
| | Electric equipment arrangement |
| | Wiring diagram for EGCS |
| | Electrical layout of EGCS |
| Environment & Piping team | Machinery arrangement |
| | CO ₂ calculation result |
| | Calculation of exhaust gas back pressure |
| | Piping diagram in engine room |
| | Arrangement and details of shipside valve and distance piece |

4.2.1 화재 탐지기 배치

연돌 및 케이싱 확장에 따른 화재 탐지기의 재배치 또는 추가 배치가 요구된다. 화재 탐지기의 경우 탐지기 중심 간의 거리가 11 m, 격벽으로부터 5.5 m 규정을 준수하여 배치해야 한다. 본 프로젝트 호선의 경우 Fig. 4.8에서처럼 개조된 스트링거(stringer) 마다 2개씩 화재 탐지기가 설치되었다[8].

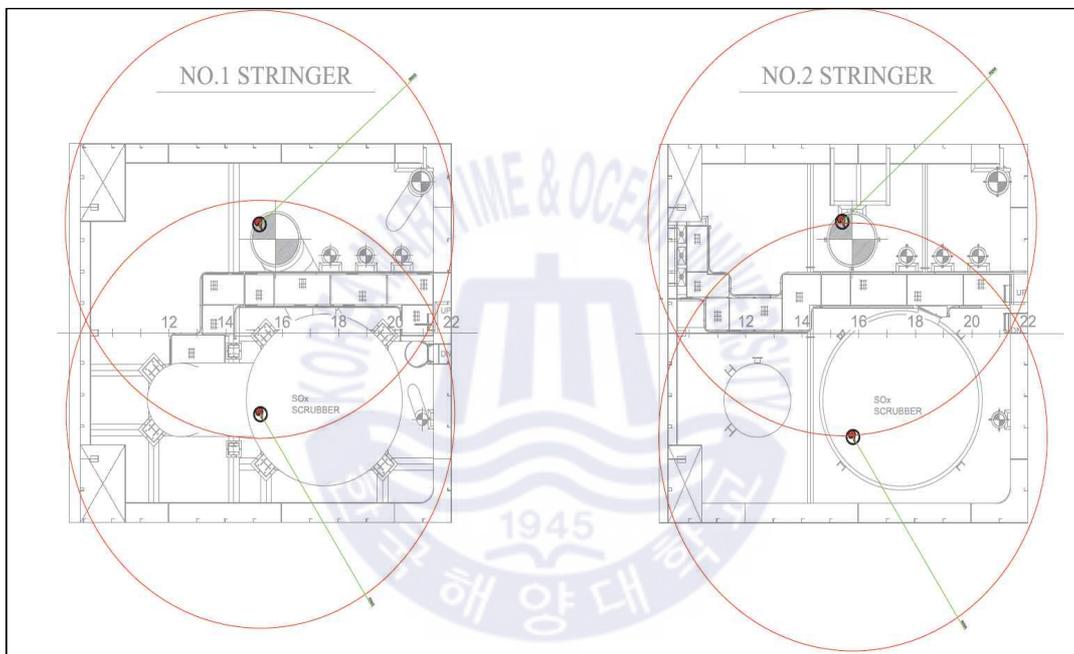


Fig. 4.8 Layout of actual smoke detector

4.2.2 전기 부하 해석 및 개정

배기가스 세정장치 설치 후 전력이 주 배전반 정격 전력량을 초과하지 않아야 하며, SOLAS Reg.II-1/41에 “SEA GOING” 에서 총 전력부하가 90%를 초과하지 않을 것을 명시하고 있다. 따라서 개정 후에 추가되는 전력 부하를 포함한 총 부하가 90%를 초과할 경우 발전기를 추가로 설치하거나, 우선차단 (preferential trip)을 통해 전력 부하를 낮출 것을 권고하고 있다. 프로젝트 호선의 경우 Table 4.6에서 확인할 수 있듯이 전력량 180.77 kW 증가하였으며, 총 부하가 90%를 초과하지 않아 발전기 추가 설치는 고려되지 않았다.

Table 4.6 Electrical load analysis after installation

| Without Ballast Pump | | | | |
|-------------------------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|
| | Sea Service | Maneuvering | Loading & unloading | Reset in port |
| Running Generators (kW x set) | 900 x 2 | 900 x 2 | - | 900 x 1 |
| Standby Generators (kW x set) | 900 x 1 | 900 x 1 | - | 900 x 2 |
| Load Factor (%) | 62.1 (52.5) | 79.0 (69.9) | - | 66.9 (48.6) |
| With Ballast Pump | | | | |
| | Sea Service | Maneuvering | Loading & unloading | Reset in port |
| Running Generators (kW x set) | 900 x 3 | - | 900 x 2 | - |
| Standby Generators (kW x set) | 900 x 0 | - | 900 x 1 | - |
| Load Factor (%) | 64.9 (87.8) | - | 69.3 (60.1) | - |

4.2.3 해수시스템 계통도 개정

배기가스 세정장치 사용을 위한 해수 펌프가 본선에 3대 추가 설치 예정이었으며, 시체스트 용량을 확인하였을 때 시체스트 및 해수 흡입 밸브 입구 단면적 비가 선급 규정을 만족하여 증설은 고려되지 않았다. 통상적으로 세정수 중화방식과 관련하여 희석 펌프(dilution pump)를 추가 설치하여 세정수에 순수 해수를 추가로 하여 공급하는 방식도 있으며, 일부 선박은 청수(fresh water)를 대량으로 공급하여 중화를 시키는 방식도 있으나 세정수 중화방식에 대해 명확히 방식을 제한하고 있지는 않다[13].

Scheme B 승인의 적용을 받는 배기가스 세정장치의 경우 연속 모니터링 시스템 (CMS, Continuous Monitoring System)을 통해 배출수 파라미터에 대한 모니터링을 실시하여 일정 기준 이하의 상태로 바다에 배출하고 있다. 다만 대량으로 배출되기 때문에 해양 오염을 고려하지 않을 수가 없는 실정이며, 이에 Table 4.7과 같이 일부 지역 및 국가에서 개방형 배기가스 세정장치의 세정수 배출을 엄격하게 규제하는 추세다[14]. 따라서 경제성 등을 고려하여 Fig 4.9에서 확인할 수 있듯 희석용 펌프를 설치하지 않았으며, Fig 4.10과 같이 청수 사용대신 청수 냉각기(fresh water cooler)를 통과하는 해수 라인을 스크러버 오버보드 라인에 연결하여 배출되는 세정수를 중화시키는 추가 해수로 사용하기로 하였다.

Table 4.7 National regulation regarding the discharging water of EGCS[12]

| Country | The scope of regulation |
|------------|--------------------------------------------------|
| China | A ban on the discharge of wash water in ECA |
| Singapore | A ban on the discharge of wash water within port |
| India | Allowance |
| Abudabi | Conditional allowance |
| Belgium | A ban on the discharge of wash water |
| Germany | A ban on the discharge of wash water some region |
| Lithuania | A ban on the discharge of wash water |
| Latvia | A ban on the discharge of wash water |
| Dublin | A ban on the discharge of wash water |
| Norway | A ban on the discharge of wash water |
| Hawaii | Conditional allowance |
| California | A ban on the discharge of wash water |



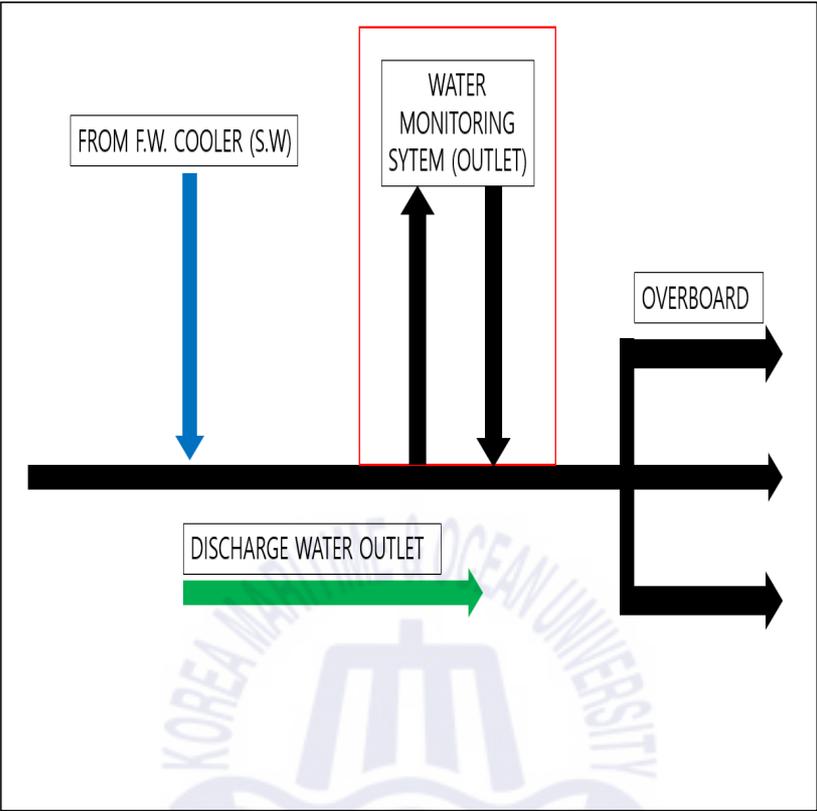


Fig. 4.9 Arrangement of the discharged water outlet

4.2.4 배기관 시스템 계통도 개정 (Exhaust gas pipe arrangement revision)

연구 선박의 배기가스 배관의 경우 시스템이 주 기관 및 발전기에 적용되었으며, 이때 설치된 배기관들은 다른 장비로의 배기가스 역류 및 배압 등을 고려하여 서로 연결되지 않고 독립적으로 배기가스를 대기로 방출할 수 있는 구조로 설치되었다. Fig. 4.11과 같이 비상 운전을 대비하여 배기관 상에 바이패스 밸브(by-pass valve)가 설치되며 저유황유가 공급될 수 있도록 시스템을 구성하였다. 또한, 실 에어 댐퍼(sealing air damper)를 추가하여 운전 중인 세정장치에서 배출되는 배기가스가 정지해있는 장비로 역류하는 것을 방지하고자 하였으며, 차단 밸브는 Fig. 4.12와 같이 이중 디스크 사이로 실 에어(sealing air)가 공급되어 누설 방지 역할을 한다[14].



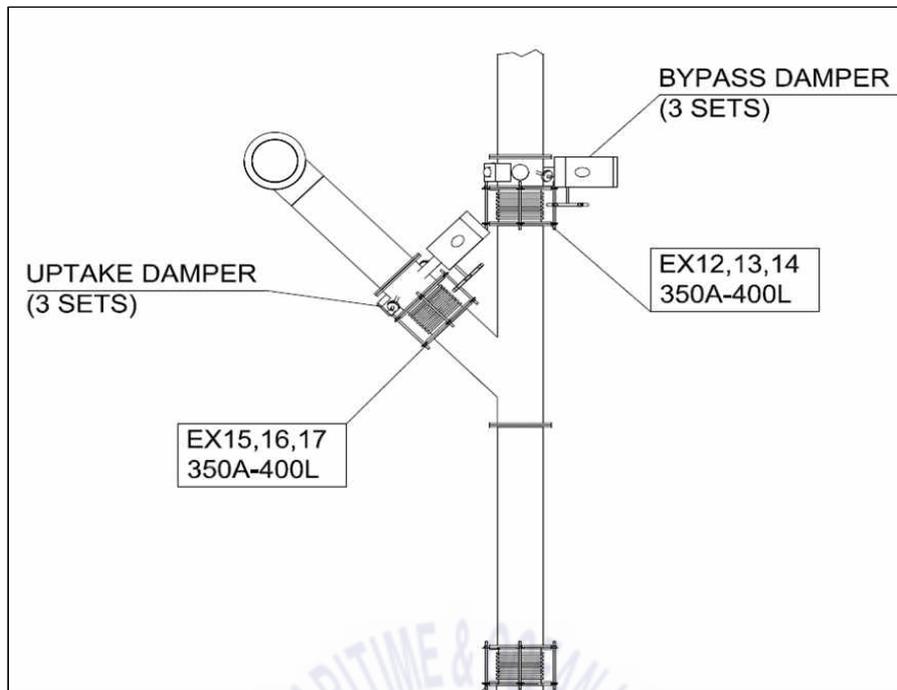


Fig. 4.11 Arrangement of exhaust gas pipes

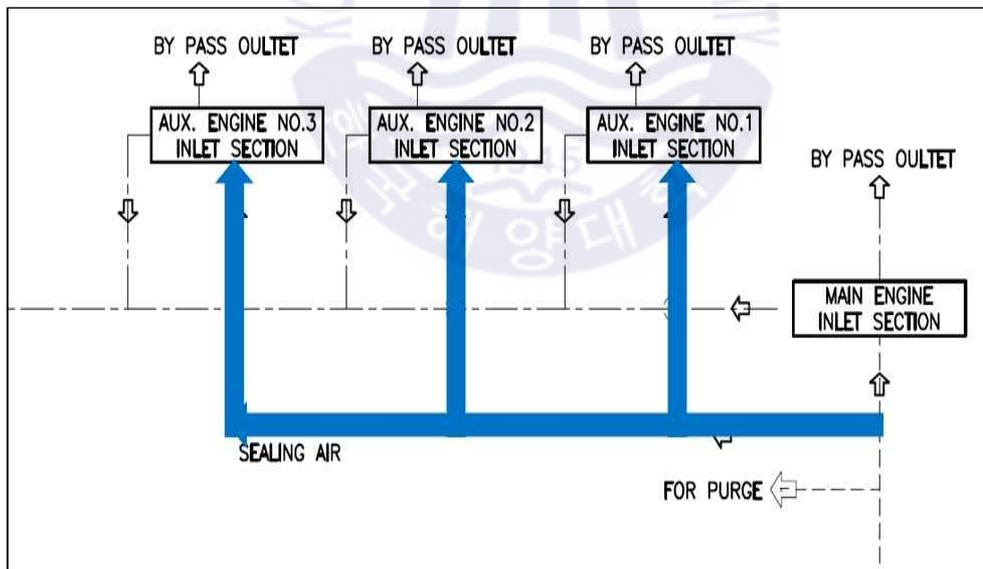


Fig. 4.12 Flow chart of sealing air

4.3 배기가스 세정장치의 세정수 배출요건 준수 검증

본 연구 대상 선박의 경우 Scheme B 승인을 받은 제품을 설치하였으므로, 해당 승인 기준을 준수한다. IMO의 세정수 배출 요구조건 Table 4.8 중 1)의 경우 방대한 양의 방출로 확인이 어려운 점이 있어 2)의 방법 중 CFD 분석 방식을 사용하였다.

Table 4.8 IMO Requirements for pH measurements[16]

| IMO Requirements | Location of measurement |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) No less than 6.5 measured at the ship's overboard discharge except for maneuvering and transit as described above | Both upstream and downstream of the water treatment equipment. |
| 2) Minimum pH 6.5 at 4 m from the overboard discharge point when the ship is stationary (a calculation- based methodology may be applicable such as CFD or other equally scientifically established empirical formulae) | If there is dilution device, both upstream of the water treatment equipment and upstream of washwater dilution |

4.3.1. pH 회복 이론

배기가스 세정장치를 통과한 세정수 배출시 산성화된 수의 pH 중화과정은 물리적 혼합(Physical mixing), 화학적 혼합(Chemical mixing) 같은 두 가지 요소의 혼합으로 작용하며, 물리적 혼합은 유량 및 관 직경과 같은 물리적 요소에 의한 혼합 방식으로 이는 세정수가 시스템을 통과한 직후 선외로 배출되기 전까지의 pH에는 영향을 줄 수 있으나, Fig. 4.13과 같이 선외로 배출된 순간부터 4m 지점에 도달할 때까지 중화에는 큰 영향을 주는 요소가 아니다. 하지만 화학적 혼합, 즉, 해수의 알칼리성을 이용한 중화 방식의 경우 세정수 pH에 명확하게 영향을 주며, 이는 pH가 낮은 세정수일수록 강하게 적용되는 주된 요소이다. 프로젝트 호선에 설치된 제품의 pH 성능 검증을 위해 다음과 같은 확인이 진행되었다[15].

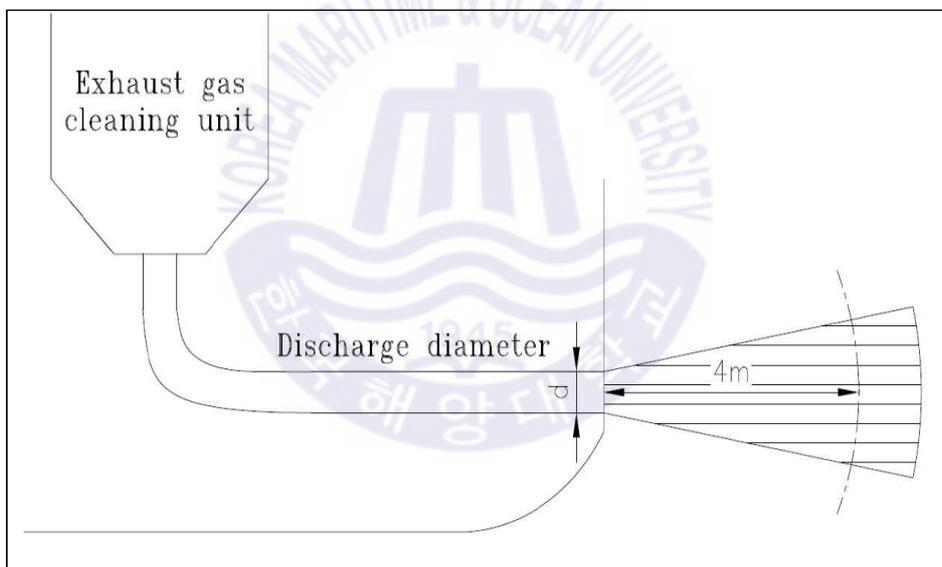


Fig. 4.13 The principle of discharging wash water[15]

4.3.2. 화학적 중화

세정수의 배출에 있어 pH 중화 작용은 해수가 기본적으로 가지고 있는 알칼리성을 이용하여 SO_x 를 흡수하더라도 자연 중화되어 선의 배출될 수 있도록 한다. 이에 앞서 실제 해수의 알칼리성과 해수(주변수)를 이용하여 산성화된 세정수를 중화시킴으로써 pH 배출변화를 기록할 수 있었다. 이 과정은 각기 Table 4.9의 다른 알칼리성을 가진 샘플 수 4개와 배출 수 pH 중화도 확인에 대해 수행되었으며, 채취한 해수를 pH 2.5, 3.0, 3.5의 실험수로 분배하여 실험에 사용하였다. pH가 안정화된 후 희석비 10에 도달 할 때까지, 추가적인 해수(주변수)를 추가하였으며, 모든 경우에서 이 희석 작용으로 pH 6.5를 상회했다.

Table 4.9 Water samples used to produce dilution curves[15]

| Sample | Source | Alkalinity |
|--------|------------------------------------|------------|
| 1 | Changwon purified water | 500 |
| 2 | Changwon tap water | 900 |
| 3 | Sinsudo sea water + Purified water | 2,000 |
| 4 | Samchenpo sea water | 2,300 |
| 5 | Doomido sea water | 2,700 |

실험 결과는 Fig. 4.14의 희석 곡선과 같이 나타났다. 이는 pH를 달리 한 실험수에 알칼리도가 다른 해수를 첨가하여 희석하였을 때 pH = 6.5에 도달한 희석비를 설명하고 있으며, 물리적인 혼합과 화학적 중화의 영향을 결합하기 때문에 세정수의 배출 지점으로부터 pH 한계를 결정할 수 있는 pH 등고선으로 해석할 수 있다. 다만 그래프의 플롯이 이상 곡선에서 벗어나는 이유는 pH 미터의 오류(수동 오류)등의 이유이며, 따라서 트렌드 라인은 곡선을 매끄럽게 하기 위해 활용되었다. 다만, 이러한 오류들을 확실히 알지 못하는 것은 실제 세정수 배출 시 방대한 양이 바다에 방출되는 것을 고려할 때, 트렌드 라인을 통해 고려하는 것이 적절하다고 판단된다.

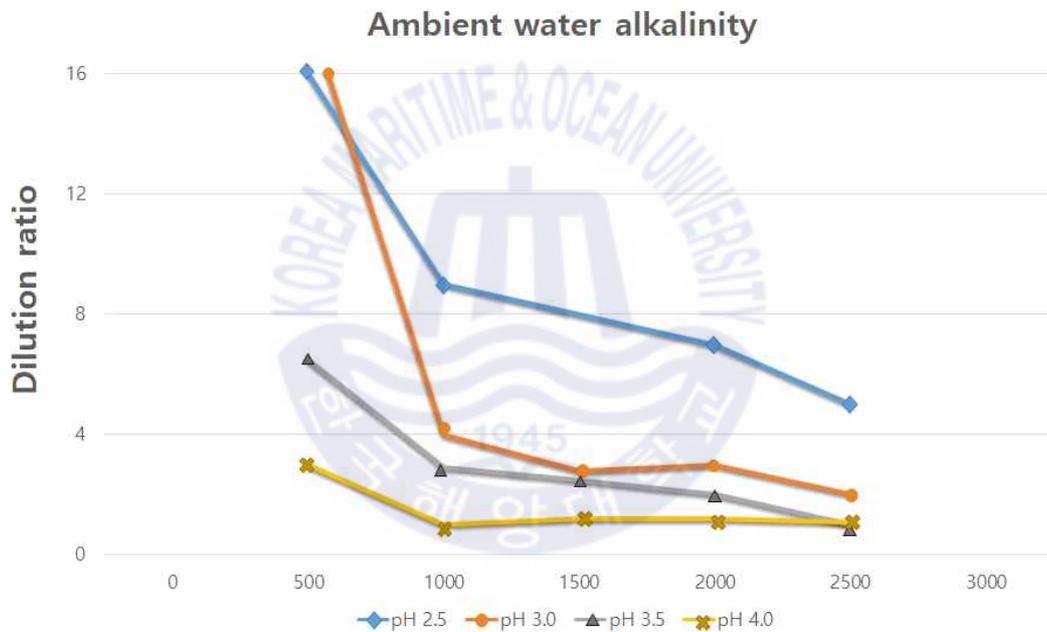


Fig. 4.14 Dilution ratio by pH according to ambient water alkalinity[15]

Fig. 4.14의 그래프를 통하여 배기가스 세정장치의 세정수 방출 지점에서 pH 한계는 해수의 알칼리성에 의존한다는 것을 알 수 있으며, 이는 pH가 낮을수록 명확하게 확인된다. 또한, 표준 해수 알칼리도 ($2,200 \text{ M}\mu/\text{L}$)를 기준으로 하는 빨간색 선을 Fig. 4.15와 같이 나타내면 그 결과를 확인할 수 있다.



Fig. 4.15 Variation of neutralization action from outlet[15]

즉, 배기가스 세정장치 설치와 관련하여 세정수의 배출 시 pH 배출 한계를 결정하여 배출 지점으로부터 최소 4m 지점에서 6.5까지 회복하는지의 여부 확인이 실험의 목표이며, 연구 대상 선박에 설치된 배기가스 세정장치 시스템의 세정수는 직경 DN250 관의 원형 출구를 통해 배출된다. 이때, 배출 지점으로부터 4m에서 확인되는 희석비는 Fig. 4.16과 같이 예측되며, CFD 그래프에 따르면 DN250 관의 희석 비율은 3이었다. 이를 직접 표시하면 방출 pH의 한계는 2.85로 $\text{pH} \geq 2.85$ 의 세정 수를 배출하면 배출구로부터 4m 지점에서 $\text{pH} \geq 6.5$ 를 충족한다[14].

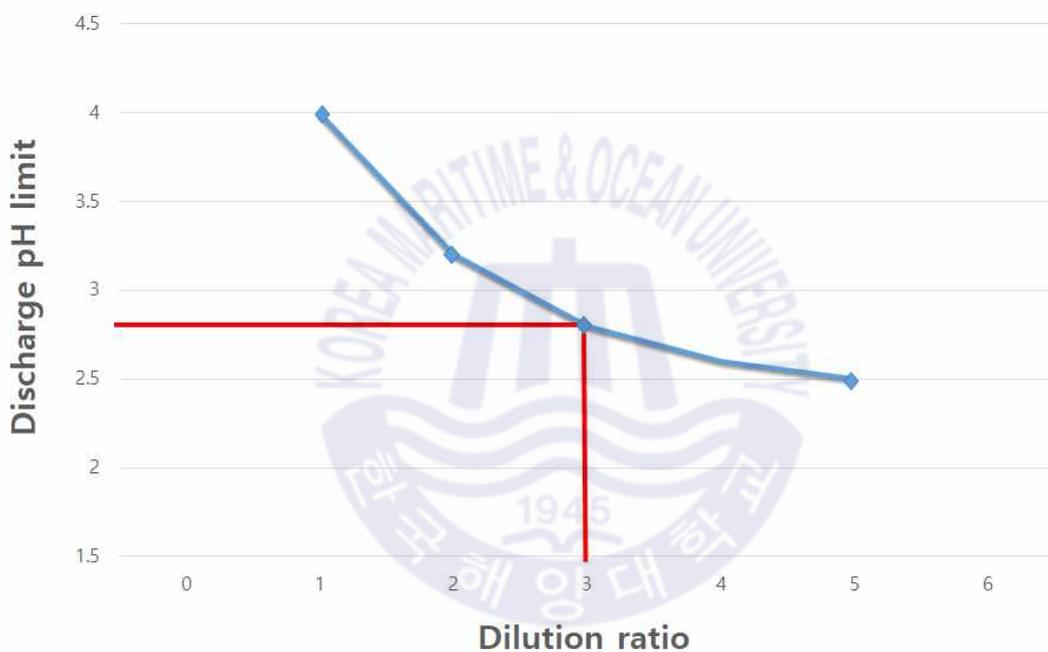


Fig. 4.16 Dilution ratio and pH limit of wash water[15]

4.4 해상 시운전을 통한 성능 검증

시스템 성능 검증을 위한 해상 시운전은 MEPC.259(68) 규정에 따라 선급 검사관 입회 하에 진행되었으며, 기록된 데이터는 완전한 승인을 위해 선급 본부에 제출되어졌다. IMO에서 요구하는 세정수 배출시 측정항목은 **Table 4.10**과 같다.

Table 4.10 IMO Requirements for other wash water element measurements[16]

| Contents | IMO Requirements | Location of measurement |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PAH | <ul style="list-style-type: none"> - Not be greater than 50 $\mu\text{g/L}$ PAH above the inlet water PAH concentration - Continuous monitoring | <ul style="list-style-type: none"> - Both upstream and downstream of the water treatment equipment. - If there is dilution device, both upstream of the water treatment equipment and downstream of wash water dilution |
| Turbidity | <ul style="list-style-type: none"> - Not be greater than 25 FNU or 25 NTU or equivalent units, above the inlet water turbidity - Continuous monitoring | Same as above |
| Nitrates | <ul style="list-style-type: none"> - Not discharge nitrates beyond that associated with a 12% removal of NO_x from the exhaust, or beyond 60 mg/l normalized for washwater discharge rate of 45 tons/MWh whichever is greater - Analysis of sample overboard discharge drawn from each EGC system with the previous three months prior to each renewal survey. | Sample overboard discharge drawn from downstream of each EGC system |
| Temperature | <ul style="list-style-type: none"> - Continuous monitoring | Both upstream and downstream of the water treatment equipment |

4.4.1 해상 시운전 실시

시험에 앞서 배기가스 세정장치 시스템 유닛의 작동 기능 및 안전 종료 (safety shut down), 데이터의 기록 및 처리장치의 작동이 원활한지 확인한 후 검증을 진행한다. 실제 시운전 및 설치 점검 목록은 입회 검사원의 요구에 의해 진행되었다. 시운전에 사용된 연료유는 황 함유량이 가장 높은 질량분을 3.50%의 연료유를 사용하였으며, 이미 정지된 선박에서 pH 검증에 대한 사실은 5.2에서 언급하였기에 본 장에서는 해상 시운전 성능 검증 결과에 대해서만 기술하도록 한다. Table 4.10의 측정항목 중 질산염은 현장에서 채취된 시료를 표준 EN ISO/IEC 17025에 따라 인가된 실험실에서 분석되었다. 성능 검증은 Table 4.11과 같이 총 네 가지 항목에 대해 진행되었다. 수행된 시운전 테스트 결과 중 TEST2, TEST4의 결과를 Table 4.12, Table 4.13에서 확인할 수 있다.

Table 4.11 EGCS performance checklist at sea trial

| Test | Details |
|--------|-------------------------------------------------------|
| Test 1 | Record sheet for instrument performance / calibration |
| Test 2 | Record sheet for instrument performance |
| Test 3 | Wash water overboard pH limit verification |
| Test 4 | EGCS running test |

Table 4.12 Record sheet for instrument performance

| Instrument | Local instrument reading | Main ECR | Data logger reading | Remark |
|----------------------------------------|--------------------------|----------|---------------------|--------|
| Exhaust gas | | | | |
| CEMS - SO ₂ [ppm] | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.3 |
| CEMS - CO ₂ [% v/v] | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| SO ₂ /CO ₂ ratio | 1.0 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| Washwater inlet Monitoring | | | | |
| pH | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 |
| Turbidity | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Temp | 29 | 28.7 | 28.7 | 28.672 |
| Washwater outlet Monitoring | | | | |
| PAH | 31 | 31 | 31 | 31.645 |
| pH | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.408 |
| Turbidity | 0 | 0 | 0 | 0.195 |
| Temp | 32 | 32.4 | 32.5 | 32.420 |

해상 시운전시 사용된 연료유의 황 함유량은 질량분을 3.50%로, 이때 배출되는 배기가스의 SO₂/CO₂ 규제치는 151.7 미만이어야 한다[6]. 따라서 해상 시운전 결과 배출요건을 충족하는 설계가 이루어졌다고 확인할 수 있다.

Table 4.13 EGCS running test

| Parameter | unit | #1 | #2 | #3 | Remark |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------|------|------|--------|
| Sulphur in fuel | %-mass | 2.76 | | | |
| SOx scrubber load | % | 84 | 87 | 91 | |
| Main engine load | % | 32 | 48 | 66 | |
| Auxiliary engine No.1 load | % | 80 | 70 | 71 | |
| Auxiliary engine No.2 load | % | / | / | / | |
| Auxiliary engine No.3 load | % | 79 | 66 | 69 | |
| Exhaust gas | | | | | |
| SO ₂ | ppm | 4 | 3.5 | 4 | |
| CO ₂ | % v/v | 5 | 4.9 | 4.8 | |
| SO ₂ /CO ₂ | ppm/ %v/v | 0.88 | 0.7 | 0.9 | |
| Wash water | | | | | |
| Flow | m ³ /h | 800 | 880 | 972 | |
| Density | kg/m ³ | 1,025 kg/m ³ | | | |
| Discharge pH | pH | 5.4 | 5 | 4.4 | |
| Discharge PAH | μg/L | 31 | 31 | 27 | |
| Discharge turbidity | NTU | 0 | 1 | 3 | |
| Discharge temperature | °C | 32.4 | 33.3 | 33.3 | |

4.4.2 최종 설계 절차 수립

본 연구 대상 선박은 개방형 배기가스 세정장치 설계와 관련하여 개장사항을 반영하는 자료 및 구조해석 결과를 선급에 제출하여 승인을 받는 방식의 신뢰성 평가를 실시하였고, 이러한 수행과정을 통해 설계의 적합성을 판단하였다. 또한 수행과정에서 발견된 설계 요소들을 수정 및 보완하는 절차를 Fig. 4.17과 같이 완성하였다.

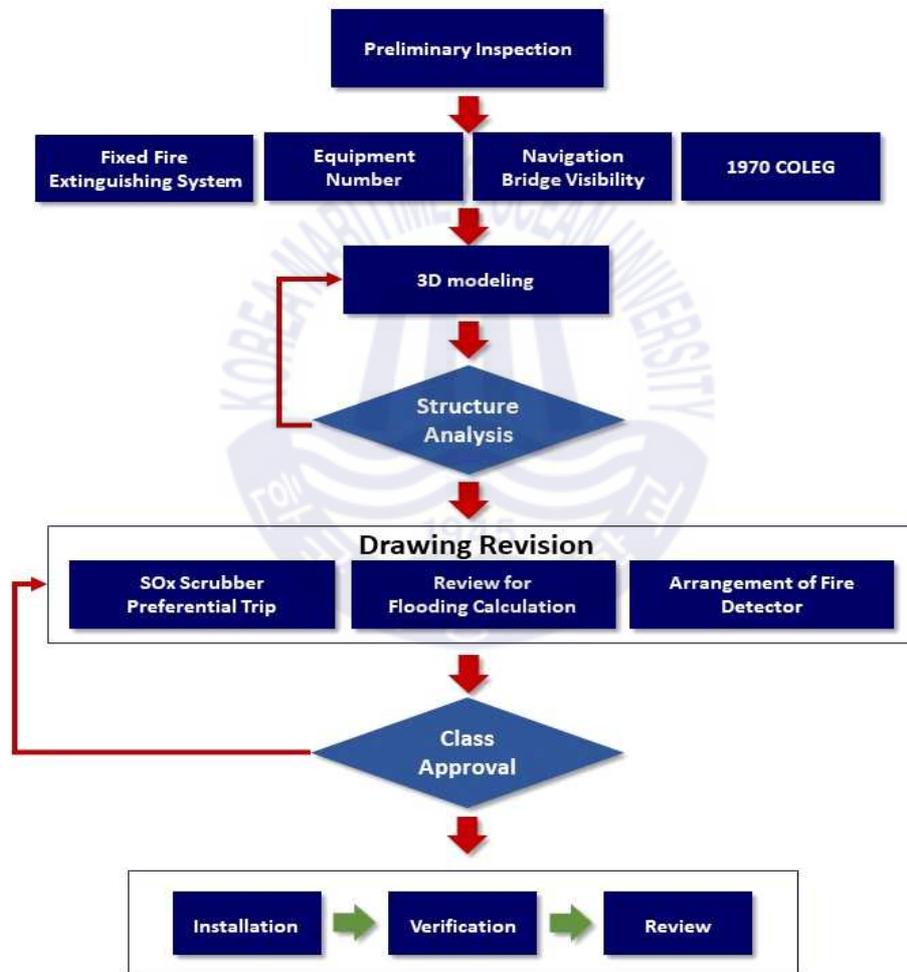


Fig. 4.17 The optimized design procedure establishment of EGCS

제 5 장 결 론

본 논문에서는 ‘IMO 2020 규제’에 대한 대응 방안으로 현존선의 배기가스 세정장치 탑재를 위한 최적화 설계 절차 수립에 대한 연구를 수행하였으며, 구조해석 및 유동해석을 통한 성능 분석을 통해 검증을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 현존선의 배기가스 세정장치 개장 공사의 경우 설계 과정에서 인지하지 못한 요소들이 설치 과정에서 치명적인 변수로 작용하여 이러한 경제성, 기술적 손실을 줄이고자 설계 단계에서 고정식 소화장치, 의장수, 선교의 안전 등의 요소를 고려하는 설계 절차를 수립하였다.
2. 수립된 절차를 토대로 기존 연돌 및 케이싱의 일부를 제거하였으며, B-DECK부터 새로 블록을 탑재한 후의 용적이 1,540.2 m³로 증가하였다. 이후 실시한 구조 안전성 검토 결과 175 MPa, 90 MPa로 작용 응력이 모두 선급에서 명시하는 허용응력 범위를 초과하지 않아 설계 기준에 부합함을 알 수 있었으며, 수립한 설계 절차가 타당함을 확인하였다.
3. 설치 과정에서 배기가스 세정장치 탑재 후 높아진 연돌 및 케이싱으로 인해 선박의 등화 규정 중 마스트 등의 시계 조건을 충족하지 못함을 확인하였다. 따라서 연돌 및 케이싱의 구조 설계 시 선박의 등화 규정 등 추가 조건들에 대해서도 충족하는지의 검토가 진행될 수 있도록 설계 절차를 수정 및 보완하였다.

4. CFD 분석을 통해 방출되는 세정수의 $\text{pH} \geq 2.7$ 의 조건으로 배출할 때 배출구로부터 4 m 지점에서 $\text{pH} \geq 6.5$ 를 충족한다는 결과를 도출할 수 있었다.
5. 해상 시운전시 사용된 연료유의 황 함유량은 질량분율 3.50%로, 이때 배출되는 배기가스의 SO_2/CO_2 규제치는 151.7 미만이어야 한다. 해상 시운전 결과 측정된 SO_2/CO_2 는 88, 70, 90의 수치가 확인되었다. 따라서 해상 시운전 결과 IMO에서 명시하는 배출 요소들의 제한치를 충족하는 설계가 이루어졌다고 확인할 수 있다.

본 연구에서 사용된 배기가스 세정장치의 설계 절차는 본 연구 대상 선박의 선종 및 선형에 기초한 것으로, 배기가스 세정장치 탑재를 고려할 시에는 적용하고자 하는 선박의 선형 및 선종에 맞는 경제성 확보를 위한 정밀한 결과 도출이 필요하다.



참고문헌

- [1] RESOLUTION MEPC.278(70)(Adopted on 28 October 2016) AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO Amendments to MARPOL Annex VI.
- [2] [https://www.egcsa.com/technical-reference/What is an exhaust gas cleaning system?](https://www.egcsa.com/technical-reference/What%20is%20an%20exhaust%20gas%20cleaning%20system?) accessed on Dec.12, 2019.
- [3] 하이투자증권, 하이투자증권, “메이드인 코리아, 신상 “을 가지고 싶다. pp.13~28. 2018. 11.
- [4] 양창호, KMI, 2019년 IMO 국제해사 정책동향. pp.1~4. 2019.
- [5] 삼정 KPMG 경제연구원, IMO 2020 황산화물 환경 규제, 규제를 기회로 삼다. pp.20~22. 2019.
- [6] Goldman Sachs, IMO 2020 : Global Shipping’ s Blue Sky Moment, 2018. 05.
- [7] RESOLUTION MEPC.259(68)(Adopted on 15 May 2015) AMENDMENTS 2015 GUIDELINES FOR EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS.
- [8] FSS Code 10 Amend Chapter 10.2.3, Code 12 Amend Chapter 5.2.2
- [9] 2018 한국선급 강선규칙 제 4편 8장. 의장수 및 의장품.
- [10] SOLAS Rule, Chapter 5 Regulation 22, SAFETY OF BRIDGE.
- [11] IACS UI SC 139, NAVIGATION BRIDGE VISIBILITY (CHAPTER 5, REG.22).
- [12] COLREGS - International Regulations for Preventing Collisions at Sea. 1970.

[13] 한국선급, Technical information of EGCS for ship owners and surveyors, pp. 23~28, pp.30~36.2019.

[14] ABS 선급, ABS ADVISORY ON EXHAUST GAS SCRUBBER SYSTEMS 2018. pp.10~14.

[15] KANGRIM HEAVY INDUSTRIES, OPEN SCRUBBER PH COMPLIANCE REPORT, pp.11~18. 2019.

[16] RESOLUTION MEPC.259(68)(Adopted on 15 May 2015) AMENDMENTS 2015 GUIDELINES FOR EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS.

