



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

고망간강 탱크를 채용한 LNG 연료 추진
산적화물선의 최적 기관 적합성 평가에 관한 연구

A Study on Optimum Engine Selection and Performance Analysis
of 50,000 DWT LNG Fueled Bulk Carrier with High-Mn LNG Tank



한국해양대학교 대학원
해양플랜트운영학과
이 다 희

본 논문을 이다희의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 조 권 회 (印)

위 원 이 강 기 (印)

위 원 최 재 혁 (印)

2018년 12월 18일

한국해양대학교 대학원

목 차

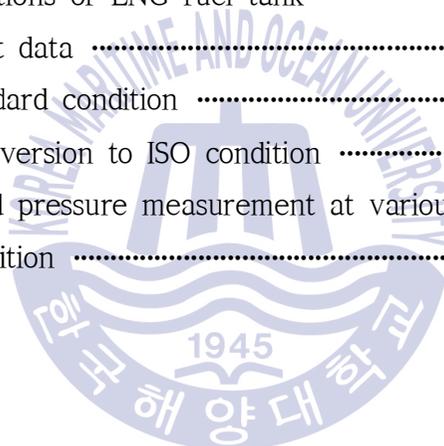
List of Tables	v
List of Figures	vi
Abstract	viii
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구 방법 및 목적	2
제 2 장 LNG 연료 추진선의 최근 동향과 관련 연구	4
2.1 환경법의 최근 동향에 따른 글로벌 주요 선박회사들의 대응 동향	4
2.2 LNG 연료 추진선의 현황과 선종의 추진기관별 분석	9
2.3 가스엔진의 기술 현황	13
2.4 LNG 연료 추진선에 대한 주요 해운국의 정책	19
제 3 장 대상 선박의 엔진, 연료 탱크 선정 및 엔진의 운항 데이터 평가	24
3.1 연구대상 선박 선정	24
3.1.1 선종 및 항로 선정 배경	24
3.1.2 연구대상 선박의 제원	25
3.2 추진엔진 선정의 적합성 평가	27
3.2.1 LNG 연료 추진선의 기술적 특이점	27
3.2.2 추진출력과 배치선도, 부하선도 분석	28
3.2.3 연료탱크 타입 및 용적의 선정 기준	31
3.2.4 LNG 연료 추진선의 주요 구성 요소	33
3.3 대상 엔진의 운항 성능 분석	36
3.3.1 성능 측정 방법 고찰	37

3.3.2 엔진 성능 분석	38
3.3.3 종합 분석	43
제 4 장 결론	48
참고문헌	50
감사의 글	53



List of Tables

Table 1-1	Global emission regulations	2
Table 2-1	Global shipping companies plans for environment	6
Table 2-2	Port's supports based on ESI index	21
Table 3-1	Principal particulars of Green Iris ILSHIN shipping, 2017)	26
Table 3-2	Physicochemical properties of natural gas, diesel and gasoline	27
Table 3-3	Principle particulars of target ship	28
Table 3-4	Minimum propulsion power requirements level 1	30
Table 3-5	Specifications of LNG fuel tank	32
Table 3-6	Shop test data	38
Table 3-7	ISO standard condition	39
Table 3-8	Data conversion to ISO condition	39
Table 3-9	Averaged pressure measurement at various engine loads in ISO condition	40



List of Figures

Fig. 2-1	Contribution of marine emissions to the total emission profile of Hong Kong. 2012 data (The Prevention and control of shipping and port air emissions in China, 2014)	4
Fig. 2-2	Choice of fuel (SMM, 2017)	8
Fig. 2-3	LNG fuel or scrubber choice for newbuilds (DNV-GL, 2016)	8
Fig. 2-4	Year of delivery on LNG fueled ships (DNV-GL, 2017)	9
Fig. 2-5	LNG fueled ships in service worldwide, March 2017 (Source: LNG World Shipping)	10
Fig. 2-6	LNG fueled ships on order that are not LNG carriers, March 2017(Source: LNG World Shipping)	11
Fig. 2-7	LNG fueled ships engine trends including order, March 2017 (Source: LNG World Shipping)	11
Fig. 2-8	LNG fueled ships trends including order, March 2017 (Source: LNG World Shipping)	12
Fig. 2-9	Low pressure gas injection with lean-burn Otto cycle combustion process (WIN-GD, 2017)	13
Fig. 2-10	High pressure gas injection with Diesel cycle combustion process (WIN-GD, 2017)	14
Fig. 2-11	Basic layout of a low-pressure fuel gas supply system for main and auxiliary engines (WIN-GD, 2017)	15
Fig. 2-12	Basic layout of a high-pressure fuel gas supply system for main and auxiliary engines (Source: MAN ES)	16
Fig. 2-13	Specific energy consumption comparison between Otto cycle and Diesel cycle engines (WIN-GD, 2017)	17
Fig. 2-14	CMA CGM gas-fueled newbuilds with GTT membrane tank (GTT, 2017)	28

Fig. 2-15 Global energy demand growth: Shell interpretation of Wood Mackenzie Q4 2017 data (Shell, 2018)	19
Fig. 2-16 Area of operation of LNG fueled vessels (DNV GL, 2018)	20
Fig. 2-17 LNG value chain in China (CCS, 2016)	22
Fig. 3-1 Navigation area of Green Iris (ILSHIN Shipping, 2017)	24
Fig. 3-2 Time spent in ECAs (Clarkson, 2018)	25
Fig. 3-3 General arrangement of Green Iris (ILSHIN Shipping, 2017)	26
Fig. 3-4 MAN ES 6G50ME-C9.5-GI(Methane) Layout diagram	29
Fig. 3-5 MAN ES 6G50ME-C9.5-GI(Methane) with high load tuning	31
Fig. 3-6 Design of LNG fuel tank (Ilshin shipping, 2017)	33
Fig. 3-7 Fuel gas supply system of Ilshin Green Irls (Ilshin, 2017)	34
Fig. 3-8 LNG bunker station and FGSS of Ilshin Green Irls (Ilshin, 2017) ·	35
Fig. 3-9 New parts on the ME-GI engine (MAN ES, 2017)	36
Fig. 3-10 System configuration of ME-GI (MAN ES, 2017)	37
Fig. 3-11 Averaged pressure measurement at various engine loads in ISO condition	40
Fig. 3-12 Maximum combustion pressure at various engine loads in ISO condition	41
Fig. 3-13 Comparison PT diagram (Source: MAN ES PMI)	42
Fig. 3-14 Engine load diagram and measurement (MAN ES CoCos EDS) ...	43
Fig. 3-15 Engine load-gas consumption comparison_ Ballast/Laden (NAPA)	44
Fig. 3-16 Gas consumption comparison_ Ballast/Laden (NAPA)	45
Fig. 3-17 Measured speed-power Data_Ballast (NAPA)	46
Fig. 3-18 LNG tank pressure & temperature (NAPA)	47

고망간강 탱크를 채용한 LNG 연료 추진 산적화물선의 최적 기관 적합성 평가에 관한 연구

이 다 희

해양플랜트운영학과
한국해양대학교 대학원

논문요지

국제해사기구(IMO)의 MEPC 70차, 71차 회의에서 선박연료의 황 규제(0.5% 이하)가 2020년부터 실제로 적용할 것을 결의함으로써 친환경 대책마련을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 최근 황 함유량이 거의 없는 LNG를 연료로 사용하여 황산화물 발생을 줄이는 방안이 증가하는 추세에 있다. 그 일환으로 포스코가 독자 개발한 고망간강 LNG 연료 탱크를 사용한 세계 최초의 5만톤 LNG 추진 벌크선 ‘그린아이리시호’가 2018년 2월말에 현대미포조선소로부터 선주사인 일신로지스틱스에 인도되었다. 이 선박은 포스코가 사용하는 석회석의 운송을 강원도 동해항에서 광양제철소까지 담당하며 2017년 1월 발효된 국제 가스 추진선 안전코드인 IGF코드(International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flash point Fuels)에 준거하여 한국선급과 영국 로이드 선급의 인증을 획득하였다.

본 논문에서는 ‘그린아이리시호’를 연구대상 선박으로 선정하고, LNG 연

료 추진선의 기술적 특이점, 추진출력과 배치선도, 부하선도의 분석을 통해 추진엔진 선정의 적합성을 평가하고, LNG 연료탱크의 형식이나 용적 선정의 기준을 제시하였다. 선정된 엔진과 연료탱크의 운항 성능을 분석하기 위해, 실제 운항되고 있는 ‘그린아이리스호’의 엔진관련 데이터를 중심으로 운항데이터를 수집하여 엔진 성능 분석을 수행하였다. 선박 운항 시에 추진기관의 출력과 기관 성능을 나타내는 주요 인자들을 선박의 데이터 전자 기록 시스템을 활용하여 수집하였으며, LNG 연료 탱크 관련되어서는 추진기관과 별도로 연료탱크 주요 인자 기록 시스템을 활용하여 데이터를 수집하였다.

부하선도 및 수집된 운항 데이터를 분석한 결과, 엔진의 선정 시 100% 출력인 연속최대출력(MCR)이 IMO의 최저출력요구조건을 만족하기 위하여 상향조정되었으며, 실선 엔진부하측정을 통하여 부하선도는 연속 및 과부하 작동에 대한 출력 및 속도 제한 범위 내에 있음을 확인하였다. 그리고 선박의 설계점인 14 노트에서 요구되는 10% 시마진을 포함한 해상 시운전 출력점은 상업운전 실측치와 거의 일치하여 선형, 프로펠러 등 선박의 설계와 선박 설계속도에 요구되는 출력을 내도록 엔진의 선정이 적절하게 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 또한 고압의 연료분사시스템을 갖는 이중연료엔진에서 LNG의 연소 적정성과 안정성을 확인하고, 엔진성능인자인 최고폭발압력, 압축압력 및 소기공기압력 등이 해상시운전 결과와 동일한 경향을 보이고 있어 엔진이 정상 작동 중임을 확인하였으며, 선형, 프로펠러 등 선박의 설계와 선박 설계속도에 요구되는 출력을 내도록 엔진의 선정이 적절하게 이루어졌음을 확인하였다. 그리고 고망간강을 사용한 LNG 연료 탱크는 최대 탱크 압력이 설계 압력인 7 barg보다 낮은 약 4.9 barg, 평균 탱크 압력이 3.23 barg로 LNG 연료공급시스템과 탱크의 안정성이 증명되었다.

주제어 : 산적화물선, LNG 연료 추진엔진, FGSS, 엔진 배치선도, 부하선도,
C 타입 고망간강 연료탱크

A Study on Optimum Engine Selection and Performance Analysis of 50,000 DWT LNG Fueled Bulk Carrier with High-Mn LNG Tank

Lee, Da Hee

Department of Offshore Plant Management
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Supervisor Lee, Kang Ki

Abstract

POSCO for their campaign of the clean environment and to encounter new era of gas fuel have developed alternative material of high manganese (High-Mn) steel, the new type of cryogenic steel which can be alternative to nickel-based alloy for cost competitive and new cryogenic steel for the storage of LNG as well as alternative extreme cold gases. As a big step forward for greener shipping industry, ILSHIN Logistics had chosen LNG as clean fuel amongst solutions to comply the new environmental requirement and ordered to build the world's first LNG fueled 50,000 DWT bulk carrier with High-Mn LNG tank at Hyundai Mipo Dockyard(HMD) as a part of POSCO program to verify their newly developed cryogenic steel on actual ship in service. The vessel to carry limestone for POSCO from Donghae to

Gwangyang (South Korea) which Korean Register (KR) and Lloyd' s Register (LR) provided dual classification and certification, verifying the compliance with the International Gas Fuel (IGF) Code.

On this paper, the procedures at the stage acknowledging shipowner' s requirement throughout layout diagram and load diagram in order to achieve the most optimum solution of main engine for the ship specification. Since after ship' s actual voyage, various measurements onboard have been performed and examined for the detail analysis of engine performance so as to confirm the aimed performance at the design stage.

The successful construction of this vessel and the verification through onboard measurements will be a very good trigger to draw the LNG industry' s attention to widespread adoption of LNG fueled ships as well as high-Mn steel in marine applications, for those who are hesitant to adopt LNG fueled systems due to higher CAPEX without compromising both safety and performance.

KEY WORDS : Bulk Carrier, LNG Fueled Engine, FGSS, Layout Diagram, Load Diagram, Type "C" Fuel Tank, High Manganese (High-Mn) Steel Fuel Tank.



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

선박으로부터 배출되는 유해 배기가스에 대한 인식이 높아지면서 전 세계적으로 주요 오염물질에 대한 규제가 강화되고 있다. 국제해사기구(International maritime organization, IMO)는 해양대기오염에 관한 단계별 규제를 시행 중이며 발트해, 북해 그리고 북아메리카 인근국가들은 인근 해역을 질소산화물(NO_x) 및 황산화물(SO_x) 배출통제해역(Emission control area, ECA)으로 지정하였다. IMO 해양환경보호위원회(Marine environment protection committee, MEPC)는 2016년 10월에 열린 70차 회의를 통해 2020년부터 전 세계 해역에서 사용하는 연료의 황 함유량의 농도를 0.5% 이하로 강화하기로 합의하였다[1]. 2018년 4월에 열린 MEPC 72차 회의에서는 선박에서 배출되는 CO_2 를 2050년까지 50%로 절감하는 것을 목표로 하였다[2].

유럽과 미국을 중심으로 해양대기 환경규제가 시작되었으며, 아시아에까지 확대되었다. 홍콩은 2015년 7월부터 외항선들을 대상으로 황 함유량 규제를 실시하였으며, 중국도 2015년 12월에 진주강 삼각주(Pearl river delta), 양쯔강(Yangtze river) 및 보하이만(Bohai bay)의 연안과 내수 지역을 대상으로 ECA에 준하는 규정을 제정하여 적용해왔으며 동 규정의 적용을 단계적으로 강화시키고 있다[3][4]. 인도양과 태평양을 연결하는 물류 허브인 싱가포르는 2011년에 해운항만청(Maritime and port authority in Singapore, MPA) 주도로 5년간 한화 약 8천억을 투자하는 등 친환경 해양항만 정책을 진행하고 있다[5].

이와 같이 환경오염에 대한 관심과 규제에 따라 LNG 연료 추진선을 비롯한 친환경 선박관련 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다. LNG 연료 추진선은 주로 유럽 해역을 항해하는 선박이 약 68%로 대부분 차지하고 있으나, 아시아 지역도 점차 증가하고 있다. LNG 연료 추진선에 관한 시장 예측분석이나 LNG를 포함한 새로운 연료에 관한 부분은 현재 연구가 많이 되고 있으나, 실제 LNG 연료 추진선의 데이터로 성능 분석을 진행한 연구는 극히 드물다.

1.2 연구 방법 및 목적

IMO가 중심이 되어 해양환경규제를 강화하고 있으며 국부적으로도 활발하게 진행되고 있다[6]. 미국 캘리포니아 대기환경청규정, 유럽연합지침, 중국 교통운수부 등의 지역 규정들을 통해 해역에서의 선박 배기오염 물질을 규제하고 있다. Table 1-1은 전 세계에서 진행되고 있는 규제들을 종합한 표이며 범세계적으로 강화되는 환경규제를 보여주는 동시에 한국해역에서 환경 규제가 멀지 않음을 인식하게 해준다.

Table 1-1 Global emission regulations

Area	Applicability	Regulations	
		SOX	NOX
Global	All ocean-going	0.5%(2020)	N/A*
Baltic Sea SECA	All vessels calling to ports of EU member states and vessels transiting this region	0.1%	N/A
North Sea SECA		0.1%	Tier III(2021) N/A
EU	All vessels calling to ports of EU member states and vessels transiting this region	0.5%(2020_EU water) 0.1%(2020_In Ports)	N/A
California coast (CARB fuel rule)	All ocean-going vessels within boundary	0.1%	N/A
North American ECA	All vessels within boundary	0.1%	Tier III
United States Caribbean Sea ECA	All vessels within boundary	0.1%	Tier III
China ECA	All vessels within boundary, except for fishing vessels, sport vessels and military vessels	0.5%	N/A
Hong Kong	All vessels at Hong Kong port	0.5%	N/A

* Global (Tier II) standards only.

스크러버(Scrubber) 사용은 기존의 사용하던 연료유를 사용하고 자금회수 (payback) 기간이 적은 등의 장점이 있지만, MEPC 72차 총회에서 CO₂의 절감에 대한 규제가 결정되었기 때문에 CO₂감소효과가 적은 스크러버는 최적의 대응방안이 될 수 없다.

저유황유를 사용하여 규제를 만족하는 방법이 또 하나의 대안으로 채택되어 왔으나, 기존 HFO와는 다른 특성으로 인한 엔진 이상현상 및 가동중단(Shut down) 등의 문제 사례가 증가하고 있다. 이로 인해 보험금 청구 사례와 금액이 늘어나고 있어 저유황유의 사용 또한 최적의 대안이 될 수 없다[7].

본 논문에서는 강화된 환경규제의 대체방안으로 LNG를 선박연료로 사용하는 것이 종합적인 판단으로 최적 내지 유효한 수단으로 채택하여 한국이 조만간 ECA 지역으로 선포할 것에 대비 국내 연안선을 대상으로 학문적 고찰을 진행한다. 대상선박을 50k 벌크선(bulk carrier)으로 선정한 이유를 설명하고 선정된 벌크선의 LNG 추진용 기관을 기관 배치선도(Layout diagram)와 부하선도(Load diagram)분석을 통해 최적 기관의 선정여부를 평가하고자 한다.

선정된 엔진이 장착된 선박의 실제 운항 데이터 측정을 활용, 엔진 성능을 분석하여 연구대상 선박의 추진엔진에 최적선정 여부와 실제 LNG가 연료로 사용되었을 때의 기관 성능을 평가한다. 해상시운전시 엔진 데이터와 비교 분석을 통해 실제 운항에 있어서 LNG 연료 사용이 문제없음을 증명하고, 나아가 선박의 미치는 영향을 종합적으로 평가하고 유의점을 고찰한다. 또한 최초로 LNG 연료 탱크의 재질로 사용된 고망간강의 안정성 및 성능을 평가하고 저온 저장 탱크로서 적합성을 증명한다.

제 2 장 LNG 연료 추진선의 최근 현황과 관련 연구

2.1 환경법의 최근 동향에 따른 글로벌 주요 선박회사들의 대응 동향

질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x),미립자(Particulate matter, PM), 이산화탄소(Carbon dioxide, CO₂)는 현재 규제되고 있는 주요 유해 배기 오염물질이다. 기존에는 육상으로부터의 배기가스만 규제대상이 되어왔으나, Fig. 2-1과 같이 선박 배기가스의 인식이 높아지고 환경문제가 대두됨에 따라 선박에 대한 규제가 전 세계적으로 규제되고 있다.

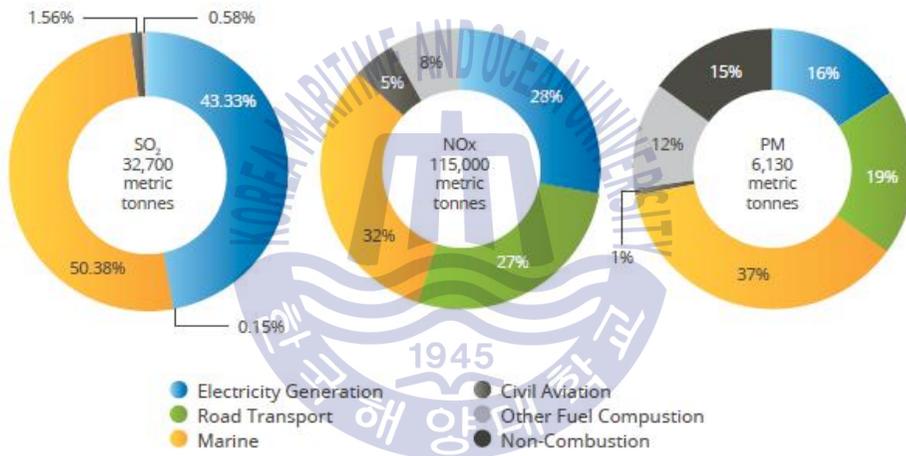


Fig. 2-1 Contribution of marine emissions to the total emission profile of Hong Kong, 2012 data (The Prevention and control of shipping and port air emissions in China, 2014) [8]

선박 유해배기오염 물질은 고효율 고풍력을 지향하는 선박 해운 시장의 요구에 부합하기 위해 엔진 연소의 고효율화의 산물이다. 연소의 고효율을 이루기 위해서는 필연적으로 고온 고압의 연소 조건이 요구되고 이는 유입된 공기 중 질소와 산소의 결합에 의한 질소산화물을 발생시킨다.

선박 유해배기오염 물질을 줄이기 위한 방법으로 연소 전 처리 방법과 연소 후 처리 방법으로 나뉜다. 연소 전 처리 방법은 연소 최적화 중 효율보다도 환경 최적화 연소를 이루어야 한다. 이는 연소 초기에 발생하는 최고 압력을 줄

이기 위해 연료 분사시기를 늦추되 연료 분사기간을 최적화 하여 연소 최고 압력을 줄임과 동시에 최고 온도도 낮추면서 연소기간이 상대적으로 길어짐을 의미한다. 이를 위해 연소용 공기의 일정 압력이상이 더 장시간 유입공급 되어야 하므로 과급기의 고성능이 요구되고, 연소실 총 용적, 연료 분사 시기, 피스톤 하부의 심(Shim) 두께 조정, 배기 밸브 개폐 시기 등의 최적화가 있다. 슬라이드연료 분사 끝에 섹(Sac)에 축적되는 연료는 후속 연소 시 연료의 분산을 방해하여 집중 연소를 국부적으로 야기시켜 질소산화물을 생성하기 좋은 조건을 만들기 때문에 분사기의 섹 용적(Volume)을 최소화 하는 것이 중요하다. 슬라이드(Slide) 밸브는 전 처리 방식 연료밸브이다.

연소 후 처리 방법은 배기가스 처리를 통해 유해 인자를 제거하는 방법으로 SO_x 및 PM 제거를 위한 배기관의 스크러버, NO_x 제거를 위한 환원촉매장치(Selective catalytic reduction, SCR) 또는 배기가스 재순환 장치(Exhaust gas recirculation, EGR)가 있다. 기존의 중유(Heavy fuel oil, HFO)를 그대로 사용하면서 스크러버의 설치를 통해 황산화물을 제거하기 때문에 경제적인 연료유를 계속 사용할 수 있다는 장점이 있지만 넓은 설치공간을 차지하며 약 3%~5%의 연료 소비율이 증가한다[9].

유해물질을 생성하는 인자를 다른 인자로 대체하는 원인제거 방안이 있다. 황함유량이 적은 저유황유를 사용하는 방안은 SO_x 규제를 만족할 수 있으나 NO_x 나 CO_2 는 기존의 발생량과 비슷하게 발생된다. 또한 증류유(Distillate fuel oil)의 사용은 기존 연료유와는 현저하게 다른 점성을 가지고 있기 때문에 이들은 추가적으로 고려되어야 할 사항이 많다. LNG를 연료로 사용하는 방안은 친환경적인 연료로의 대체이며 이미 육상에서는 LNG를 많이 사용하고 있어, 안정성 및 친환경성이 검증이 된 연료이다.

위에서 살펴본 것과 같이, 규제를 만족하기 위해서는 여러 방안들이 존재하며 실제 선사들의 2017년 지속가능경영 보고서(Sustainability report)를 통해 Table 2-1과 같이 국내 선사를 포함한 세계 주요 선사들의 대응방향을 본 논문의 방향성과 맞게 분류하여 정리하였다. 카테고리(Category) I은 아직 구체적인 대응책을 보이지 않는 선사들, 카테고리 II는 후 처리 방식을 택한 선사들, 카테

고리 III은 원인제거방식을 택하여 LNG등의 대체연료를 사용하는 선사들이다.

Table 2-1 Global shipping companies plans for environment

	Action	Contents	Shipping Companies
III	연료전환 (LNG, 저유황유 등)	<ul style="list-style-type: none"> - 환경법 대응책으로 여러 방안을 테스트 후에, Scrubber 사용이 결코 환경대응책이 될 수 없다고 판단. LNG 신조 및 기존선 Retrofit 가능성 시사(* 18.2.22) - 주 정책은 대체연료 사용이나 몇몇 선박(기존선 위주)은 Scrubber 사용 예정 및 고려 - LNG, 저유황유 등 대체 연료 고려(LNG, Ethanol, Biomass fuel, Hydrogen transport) 	M 사[10] G 사[11] C 사[12] H 사[13] E 사[14] L 사[15]
II	Scrubber 선택	<ul style="list-style-type: none"> - 장기운송계약 및 신조 VLCC에 Scrubber 탑재 예정[16] - 현존선 및 신조 VLCC에 Scrubber 탑재 	S 사[17] D 사[18]
I	대응 지연	<ul style="list-style-type: none"> - Scrubber나 LNG등 여러 대응책을 고려 중이나 아직까지 구체적인 대응책을 보이지 않음[19] 	K 사 Y 사 P 사

Table 2-1과 같이 주요 선사들은 자신들의 정책에 따라 환경 규제에 대해 대응하고 있으며 세 가지로 대응방안을 나누었을 때 많은 선사들이 Category III를 선택했다. 덴마크 선사 M사는 여러 연구 개발 프로젝트를 통해 환경 규제의 대응하는 최적의 방법을 찾기 위해 노력하였으며 지난 2017년 5월에는 39th Propulsion & emission conference에서 M사, L사, H 사 등 글로벌 대형 선사들이 SOx 제거용 스크러버 설치 및 운영 유지가 결코 황산화물 규제를 만족하는

것에 상쇄되지 않는다는 결론과 함께 부정적인 견해를 표하며 저유황유나 LNG를 연료로 사용하는 방안을 고려하겠다고 공식적으로 발표하였다.

여객 선박은 스크러버 사용보다 LNG 연료 추진선이 급증하는 추세를 보이고 있다. LNG 연료 추진 크루즈 선박은 지난 1년 동안 13척에서 18척으로 38%나 증가하였으며, 글로벌 크루즈 선사인 Princess Cruises는 신조되는 175,000톤 크루즈 선박 2척을 LNG 추진선으로 결정하는 등의 추가 LNG 추진 크루즈 신조 계획들이 발표되고 있다[20].

앞서 언급하였듯이, 저유황 사용이 환경규제 대응방안으로 선택되어 왔으나 이로 인한 선박엔진 손상 및 피해가 늘고 있다. 저유황의 점도는 HFO에 비하여 매우 낮기 때문에 연료유 냉각기(Fuel oil cooler)가 추가되어야 하며 운할성을 높이기 위한 부품이 추가로 탑재되어야 한다. 낮은 점성은 보일러에도 좋지 않은 문제를 일으키게 된다. 또한 ISO(International organization for standardization)에서는 초저유황의 품질표준을 2019년 하반기로 예정하여 글로벌 정유업계의 초저유황 시설 투자 속도가 정체되고 있다. 이는 SO_x규제를 만족할 통일된 연료의 공급 부족을 야기하며 블렌딩을 통한 저유황의 사용량 증가를 유발한다. 블렌딩을 통한 저유황 생산의 부산물인 촉매 미립자(Catalytic fines)는 선박엔진 내부에 침전물로 쌓이면서 필터와 파이프를 막고 실린더 내벽 긁힘과 파손을 야기한다.

2017년 SMM Hamburg에서 선주사 및 해운업계 종사자 2,500명을 대상으로 실시한 설문 조사에 따르면 Fig. 2-2와 같이 전체 대상자중 44%가 LNG를 다가오는 환경규제에 맞는 대체연료로 선택하였으며[21], DNV-GL에 따르면 2017년을 기준으로 Fig. 2-3과 같이 스크러버는 높은 증가수를 보이고 있지만 신조발주(Newbuilds) 부분에서는 LNG가 가장 많이 선택되었다[22].

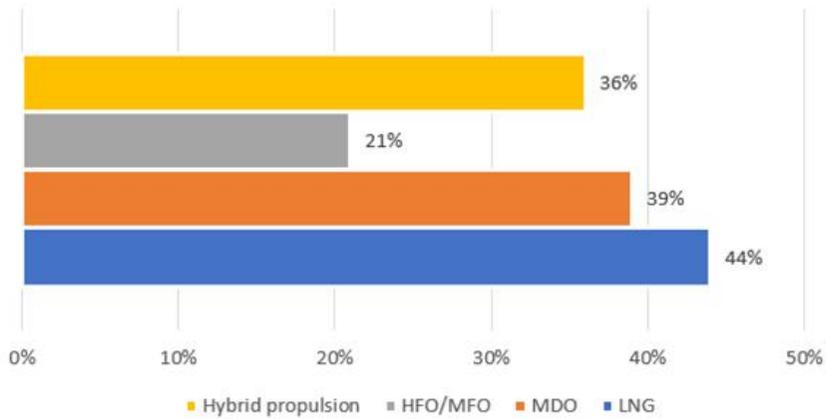


Fig. 2-2 Choice of fuel (SMM, 2017)

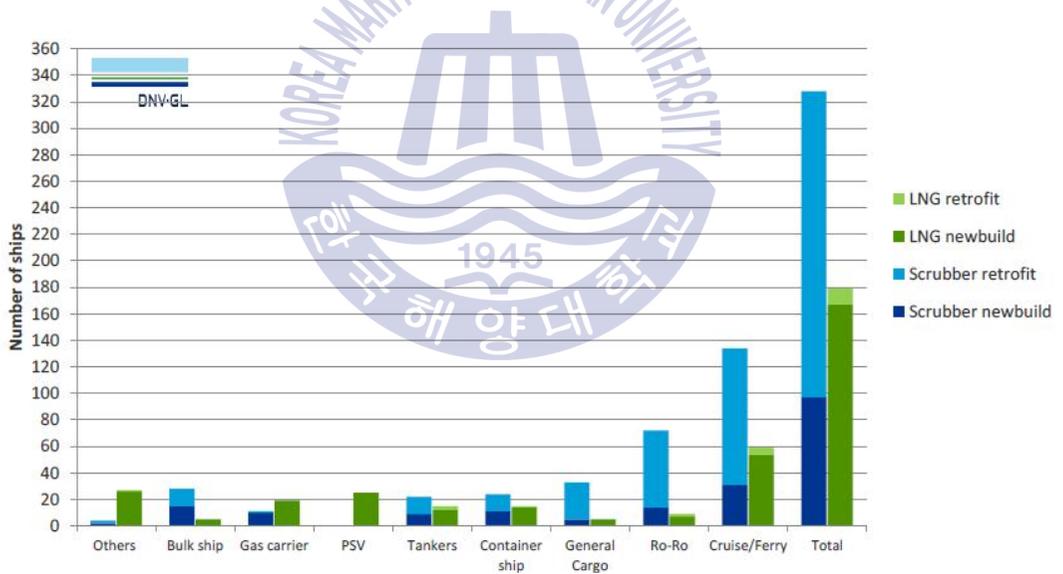


Fig. 2-3 LNG fuel or scrubber choice for newbuilds (DNV-GL, 2016)

2.2 LNG 연료 추진선의 현황과 선종의 추진기관별 분석

선박연료로서 LNG는 환경 문제가 이슈됨에 따라 함께 주목받았다. 실제 LNG를 연료로 사용한 선박의 등장은 2000년 이후이며, 꾸준한 증가 추세에 있다. Fig. 2-4는 LNG 운반선과 내륙수로를 항해하는 선박(Inland waterway vessel)을 제외한 LNG 연료 추진선의 증가를 DNV-GL선급에서 확정된 신조 발주를 바탕으로 통계 낸 자료이다[23]. 강화된 환경규제를 충족시키기 위한 대안으로 LNG를 해상연료로 쓰는 것에 대한 타당성 및 문제점을 동시에 인지하고, LNG 사용을 촉진시키기 위한 모임인 SEA/LNG에 의하면 2018년 8월 기준으로 119척의 LNG 추진선이 운항 중에 있으며 125선박이 발주(Order book) 중이다[24]. 114척의 LNG ready선의 운항과 오더북은 제외된 값이기 때문에 그 값을 더하면 LNG 추진선의 급격한 증가 추세를 알 수 있다.

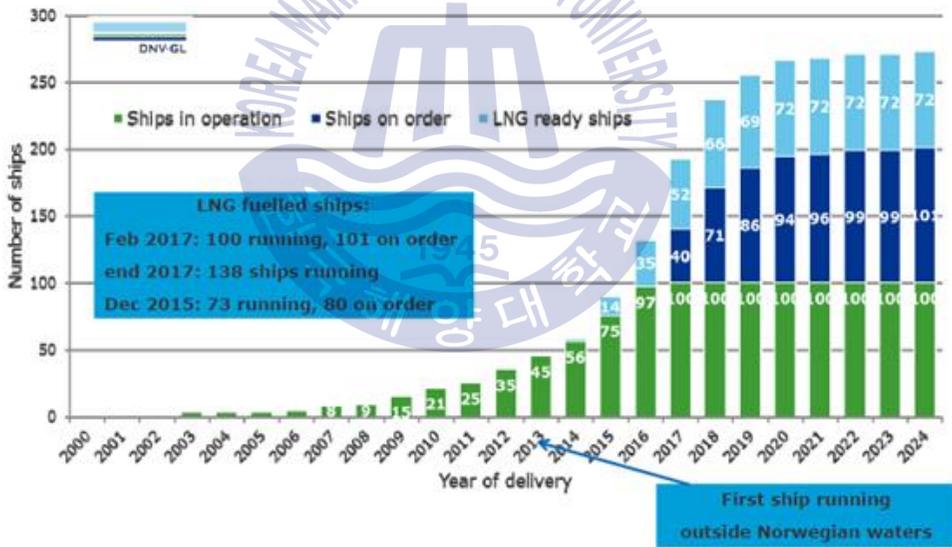
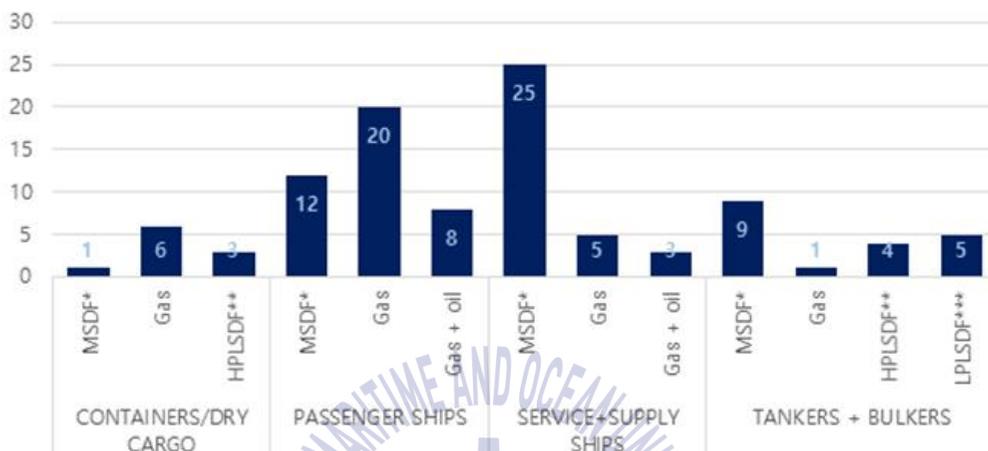


Fig. 2-4 Year of delivery on LNG fueled Ships (DNV-GL, 2017)

LNG World Shipping 저널에서는 2017년 3월 기준으로 항해 중인 LNG 연료 추진선과 신조 발주 예정인 LNG 연료 추진선의 선종 및 기관형식을 공개하였다[25][26]. 이는 LNG 운반선을 제외한 통계치이다. Fig. 2-5를 보면 RO-PAX(Roll-on roll-off passenger ferry), PSV(Platform support vessel)가 LNG 추진선박 활용도가 가장 높다. Fig. 2-5와 Fig. 2-6을 비교하여 보면 중속 이중

연료 엔진(MSDF)이 여객선에서 2배 이상의 신조 발주가 예상되며 대형선박에 추진기관으로 사용되는 저속 이중연료 엔진의 개발 및 발전으로 인해 컨테이너 및 탱커 등 기존에 디젤기관의 독점 영역인 선종들에 있어서 변화가 확인된다.



- * medium-speed, dual-fuel
- ** high-pressure, low-speed dual-fuel
- *** low-pressure, low-speed dual-fuel

Fig. 2-5 LNG fueled ships in service worldwide, March 2017
(Source: LNG World Shipping)

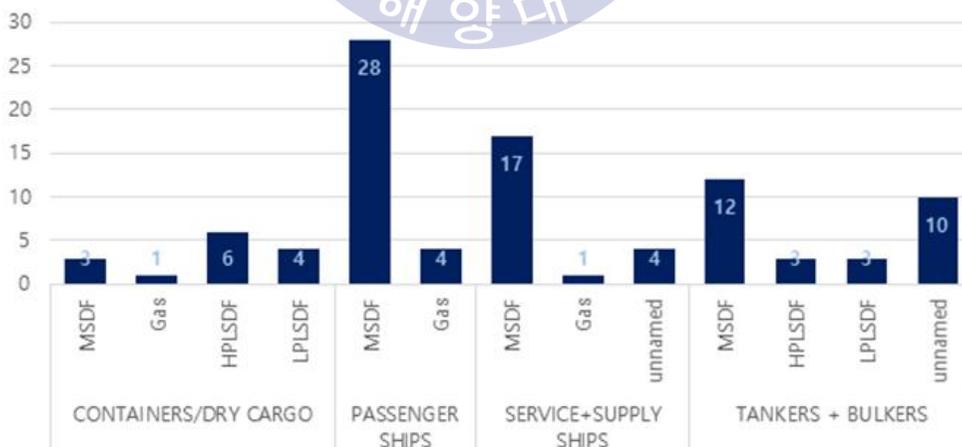


Fig. 2-6 LNG fueled ships on order that are not LNG carriers, March 2017(Source: LNG World Shipping)

본 자료를 통합하면 Fig. 2-7, Fig. 2-8과 같이 신조 발주 확정을 포함한 LNG 연료 추진선의 전체 경향을 알 수 있다. 본 자료는 2017년 3월 기준으로 2017년 11월에 발표된 G사의 2만2천TEU급 LNG추진 컨테이너선 9척은 포함되지 않았음을 고려하였을 때, 선박 추진용 저속엔진은 확실한 증가 추세이다.

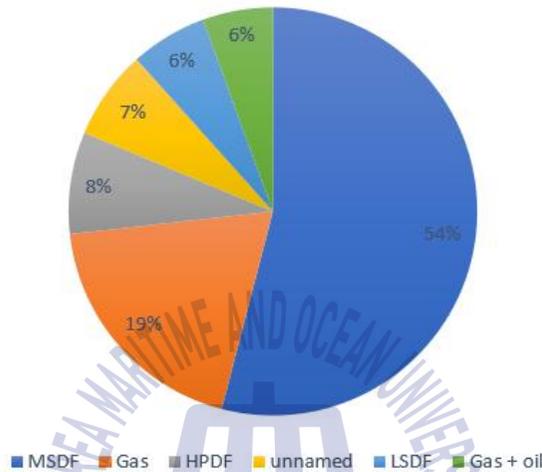


Fig. 2-7 LNG fueled ships engine trends including order, March 2017(Source: LNG World Shipping)

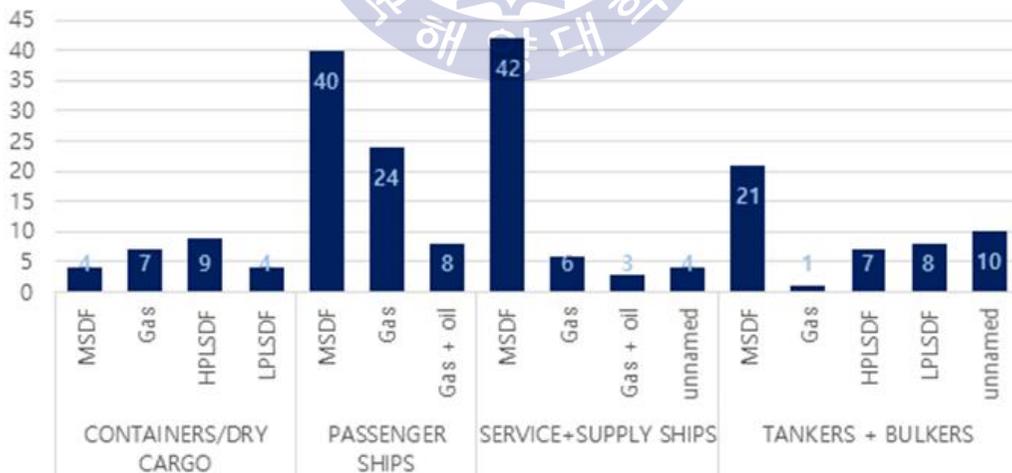


Fig. 2-8 LNG fueled ships trends including order, March 2017(Source: LNG World Shipping)

그 동안 이중연료엔진의 대표는 바르질라(Wärtsilä)사의 4행정 이중연료엔진 (Dual-fuel engine, DF) 이었다. 1980년대 후반부터 해상용 이중연료엔진을 개발해 왔으며 2001년에 FPSO(Floating production storage and offloading) Petrojarl I 에 설치된 18V32DF엔진을 시작으로 오랫동안 해상 이중연료엔진의 선두주자였다. 롤스로이스(Rolls-Royce)사의 불꽃점화가스기관(Spark ignition gas engine)과 미쯔비시(Mitsubishi)사의 이중연료엔진인 UEC-LSGi도 출시되었지만 많은 선택을 받지 못했다.

바르질라의 4행정 엔진은 5개의 기본 모델인 20DF, 31DF, 34DF, 46DF, 50DF 로 구성되어 있으며 모두 경유(Marine diesel oil, MDO)와 중유(HFO)의 사용 및 1%의 점화오일(Pilot oil)과 가스를 사용하여 가스운전이 가능하다. 이들은 500 rpm~10,000 rpm의 속도 범위를 갖는 0.9 MW~18.3 MW의 출력 범위에서 사용할 수 있다[27]. 그러나 MAN Diesel & Turbo사와 Winterthur Gas & Diesel사가 새롭게 저속 2행정 이중연료엔진을 개발하여 열효율이 보다 높은 차세대 이중연료엔진이 등장하였다.

2.3 가스엔진의 기술 현황

선박의 주기기관으로 가스연료를 사용하는 기관은 크게 디젤사이클을 사용한 고압분사방식과 오토사이클을 사용한 저압분사방식의 두 가지 형태이다. 저압분사방식을 채택한 Winterthur Gas & Diesel(WIN-GD)사의 X-DF 엔진은 기존의 RT-flex엔진 개념에 가스연료사용을 더한 개념으로 압축이 시작되는 단계인 하사점(Bottom dead center, BDC) 근처에서 연소실내로 가스가 분사되며 이때 연소실의 압력은 낮기 때문에 16 barg의 저압으로 분사가 가능하다. 분사된 가스는 상사점(Top dead center, TDC) 근처에서 발화가 시작되기 전에 공기와 혼합된다. 가스연료를 사용할 때는 약 1%정도의 MDO가 파일럿 연료로 필요하다. Fig. 2-9와 같이 공기와 예혼합 연소(Pre-mixed combustion)를 사용하여 연소 온도를 낮추어서 NO_x를 기존 대비 85% 줄여주어 엔진자체만으로 IMO Tier III NO_x의 규제를 만족시킨다.

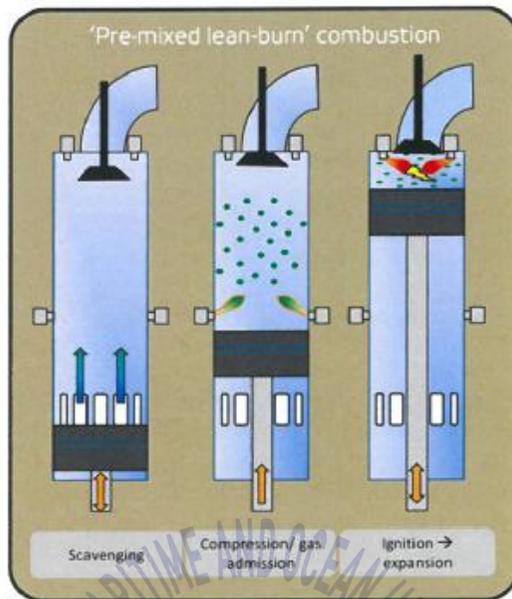


Fig. 2-9 Low pressure gas injection with lean-burn Otto cycle combustion process (WIN-GD, 2017) [28]

고압분사방식을 채택한 MAN Energy Solutions(MAN ES)사의 ME-GI 모델은 기존의 전자식 제어(Electronically controlled engine, ME)엔진에 가스연료사용을 더한 개념으로 디젤사이클을 사용하여 높은 효율을 가지며, 공기가 완전히 압축된 상사점(Top Dead Center, TDC) 근처에서 가스 연료가 직접 분사되기 때문에 300 barg의 고압이 필요하다. 가스 연소 시에는 3%의 MDO나 HFO의 파일릿 연료가 필요하며 확산 연소(Diffused combustion)의 특성으로 인해 연소실 온도는 매우 높게 유지되어 엔진자체로는 IMO Tier III NO_x규정을 만족하지 못하기 때문에 SCR, EGR 등의 추가 장치가 필요하다.

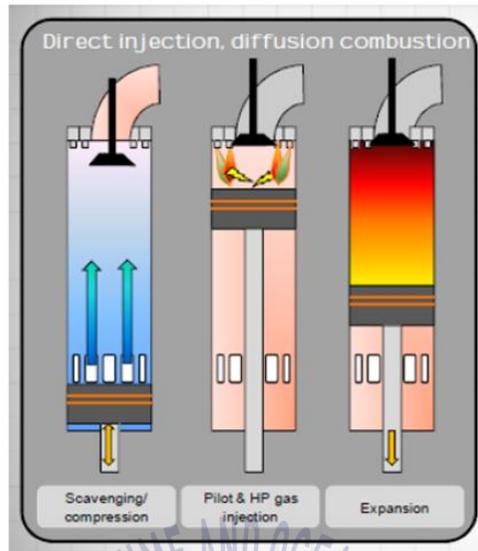
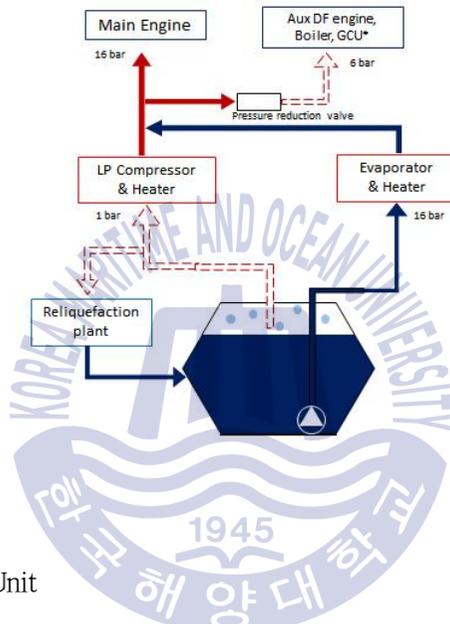


Fig. 2-10 High pressure gas injection with Diesel cycle combustion process
(MAN ES, 2017)

발화점은 연료가 공기의 존재 하에서 연소를 일으킬 수 있는 최저 온도를 말하며 천연가스는 약 540℃로 매우 높기 때문에 위에 천연가스를 연료로 사용하는 엔진의 경우, 파일럿 오일이 필요하다[29]. 그렇기 때문에 위 두 엔진은 모두 가스연료 사용 시에 1%~3% 내외의 파일럿 연료가 사용된다. 파일럿 연료량의 차이는 저압의 오토사이클의 사용과 고압의 디젤사이클의 차이 때문에 일어나게 되는데, 전자는 예연소실(Pre-chamber) 디자인을 사용하여 적은 양의 파일럿 연료로 예혼합 연소가스를 점화 시킨다. 후자는 가스가 분사되기 전에 파일럿 연료를 분사시켜 불꽃을 형성하여 가스 연소를 돕기 때문에 상대적으로 많은 양이 필요하다.

연료공급시스템(Fuel gas supply system, FGSS)은 실제 LNG 연료를 탱크로부터 엔진까지 공급하는 전 과정의 계통을 의미하며 시스템 설계는 규제 기관 및 선급 협회가 지정한 공식 기술 요구 사항 및 운영상의 요구 사항을 충족하여야 한다. LNG는 극저온의 액체 연료로써 탱크에 저장되는데 이때 탱크 내부의 온도는 약 -163℃의 낮은 온도이며 탱크 외부의 온도는 상온으로 탱크와 외부의 온도차가 200℃ 이상 나기 때문에 단열구조의 탱크라 하더라도 탱크 내부 온도 상승으로 인한 증발가스(Boil off gas, BOG)가 발생한다. 발생된 BOG 처리 및

추진 기관 연료 공급 시스템을 통합하여 FGSS라 하며 300 barg의 고압과 상대적으로 낮은 16 barg를 사용하는 엔진의 연료공급시스템은 Fig. 2-11, Fig. 2-12와 같이 기본시스템은 비슷하나, 고압을 사용하는 엔진은 저압과 비교하였을 때 FGSS 주요구성기기에 압축기, 펌프 등에 추가 필수 구성품이 있으며 요구사양이 높아 상대적으로 높은 초기투자비(Capital expenditure, CAPEX)가 요구된다.



*GCU: Gas Combustion Unit

Fig. 2-11 Basic layout of a low-pressure fuel gas supply system for main and auxiliary engines (WIN-GD, 2017)

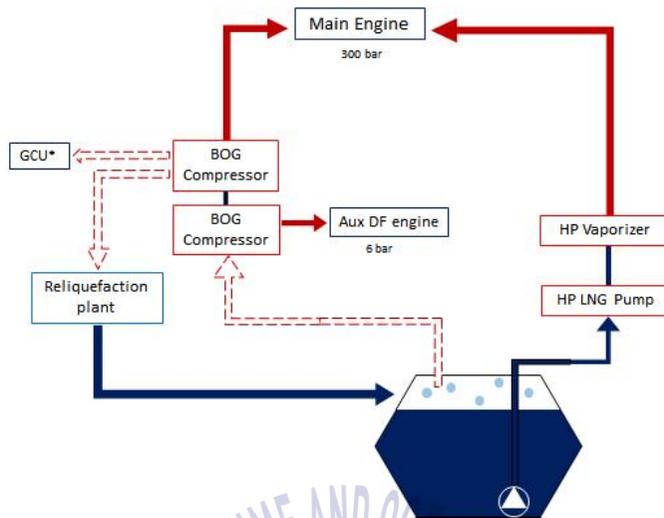


Fig. 2-12 Basic layout of a high-pressure fuel gas supply system for main and auxiliary engines (Source: MAN Energy Solutions) [30]

두 엔진에서 사용하는 사이클의 종류가 다르므로 인해 열역학적 효율의 특성도 다르게 된다. X-DF엔진은 최적 성능이 고부하 영역(High load)에 맞춰져 있으나, ME-GI엔진은 부분 하중(Part load)에 맞춰져 있다. Fig. 2-13과 같이 저부하로 이동할 때, 디젤 사이클은 연료 소비를 향상시키지 않지만 오토 사이클은 약간 증가하면서 평탄한 곡선을 갖는다. 사이클 종류의 차이이기 때문에 정확하게 두 엔진의 성능을 비교하기 위해서는 엔진자체만 보기보다는 전체 시스템 및 전제조건들이 고려되어야 한다.

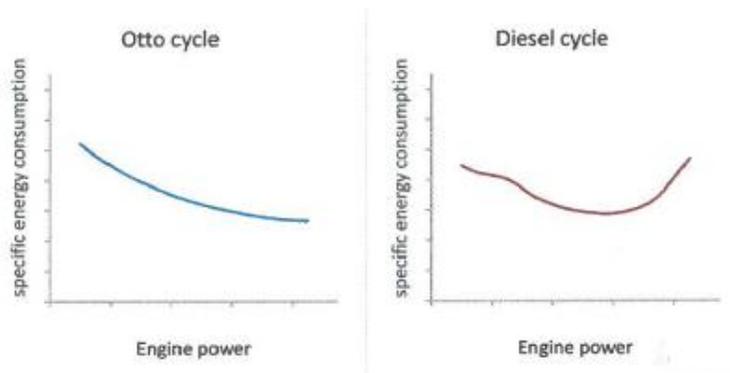


Fig. 2-13 Specific energy consumption comparison between Otto cycle and Diesel cycle engines (WIN-GD, 2017)

IMO는 LNG의 하중을 선체 구조강도에 영향을 주지 않고 탱크자체로 견딜 수 있는 자체지지(Self-supporting) 능력 여부에 따라 탱크종류를 멤브레인 탱크(Membrane tank)와 독립형 탱크(Independent tank)로 구분한다. 독립형 탱크는 설계압력 및 구조안정성을 고려하여 타입 A, B, C로 구분한다. LNG 연료추진선에 사용되는 연료탱크로는 운항중인 대부분의 선박이 타입 C 독립형 탱크를 채택하였다[31]. 타입 C 독립형 탱크는 구형 혹은 실린더형의 압력용기로 2 barg 이상의 높은 압력을 유지하여 증발가스(BOG) 압력을 견딜 수 있으며, 슬로싱에 강하고 유지비(Maintenance cost)가 적게 드는 장점이 있기 때문이다.

이와는 다르게 자체지지 능력이 없는 멤브레인 탱크(Membrane tank)는 하중이 내각(Inner hull) 자체에 전해지는 구조로 압력변화에 매우 민감하며 슬로싱 문제가 있다. LNG 운반선 화물탱크로는 많이 사용되고 있으나, LNG 연료 탱크 적용사례는 아직 없다. 2020년에 인도될 CMA CGM선사의 2만2천 TEU급 LNG 추진 컨테이너선 9척에 처음 적용될 예정이다[32].



Fig. 2-14 CMA CGM gas-fueled newbuilds with GTT membrane tank (GTT, 2017)



2.4 LNG 연료 추진선에 대한 주요 해운국의 정책

전 세계는 이미 대기오염문제 및 친환경 에너지의 인식 증가로 환경 정책을 여러 방향으로 실시하고 있다. Fig. 2-15는 전 세계의 에너지 수요를 Shell에서 예측한 자료로 가스연료에 대한 지속적인 증가가 예측된다. LNG 추진선의 보급을 위한 국제적 노력도 최근 강화되고 있는데, 싱가포르항만청(MPA)은 LNG 연료를 선박용 연료로 확대하기 위해 SIBCON 2016(2016년 10월 개최)년 기조연설과 행사로 전 세계 6대국가/항만당국을 초청하여 LNG 병커링 표준화 MOU를 체결하였다. 일본정부(요코하마항), 한국(울산항만공사), 벨기에(안트워프항, 지브르게항), 네덜란드(로테르담항), 미국(잭슨빌항), 싱가포르(싱가포르항)가 초청되었으며 중국도 차기 회의부터 참여하기로 하였다[33].

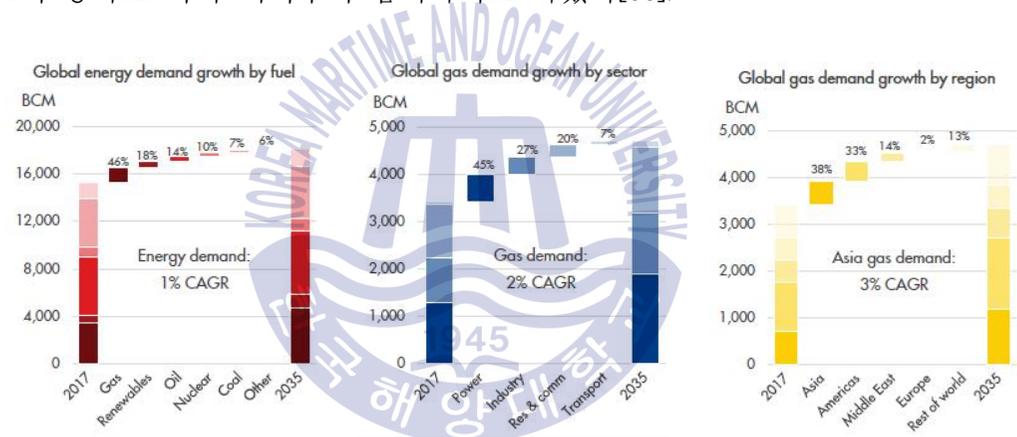


Fig. 2-15 Global energy demand growth: Shell interpretation of Wood Mackenzie Q4 2017 data (Shell, 2018) [34]

LNG 연료 추진선 시장은 Fig. 2-16과 같이 유럽중심으로 시작되어 선주사, LNG 조선기자재 회사, LNG 회사/에너지사의 협력을 통해 LNG 연료 추진선과 병커링의 문제점을 해결하고자 하였다. 최근에는 TOTE, Matson, Crowley 등 다수의 미국 선사가 최근 총 9척을 발주하면서 LNG를 연료로 사용하는 선박 건조에 적극 나서 북미를 중심으로 신조발주가 빠르게 증가하고 있다. TOTE사의 3,100 TEU급 LNG 추진 컨테이너선을 2척 추가 발주에 이어, 최근 Pasha Hawaii사가 2척의 컨테이너선을 추가 발주하였다[35].

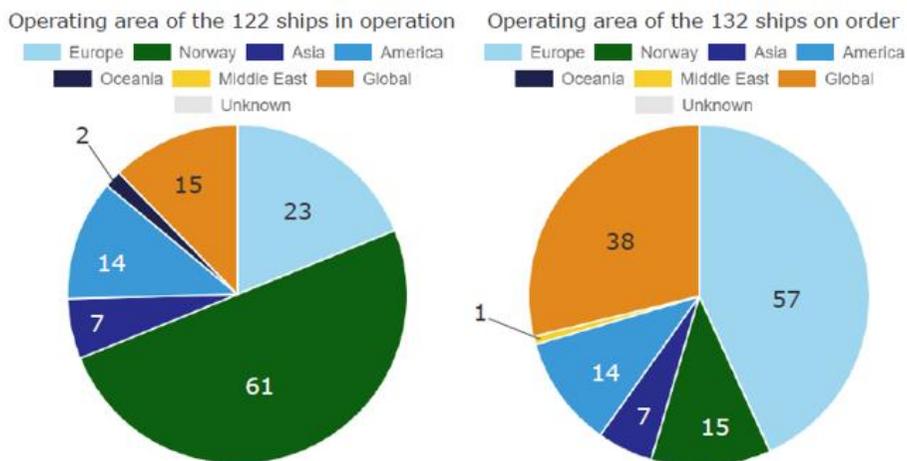


Fig. 2-16 Area of operation of LNG fueled vessels (DNV GL, 2018) [36]

국가적 차원의 지원도 많아지고 있어 해외 선진국들은 LNG 추진선을 포함한 친환경 선박 운항, 개조, 건조 시 세제 및 인센티브를 적극적으로 지원하고 있다. 싱가포르의 Green Ship Program 정책에 따라 LNG 추진선박에 대해 초기등록비 최대 75% 감면, 연간 톤세 최대 50% 환불정책을 진행하고 있으며, 2018년까지 총 987억원(선사 별 최대 2건, 척당 최대 약 16억원)지원을 약속했다. 또한 항만 내 LNG 연료추진선에 대한 입항료를 5년간 면제하는 정책을 실시하고 있다. 중국은 2020년까지 약 10,000여척의 LNG 추진선박 확보를 위한 LNG 추진선의 보조금 등의 세부지원책을 진행하고 있다[37]. Table 2-2는 세계의 주요 친환경 선진 항만의 지원을 보여주며 환경선박지수(Environmental ship index, ESI) 점수 비율로 항비를 감면하거나 고정금액의 인센티브를 제공하고 있다[38].

Table 2-2 Port's supports based on ESI index

	ESI	Supports
뉴욕뉴저지 항 (Port of New York and New Jersey)	20점 이상	재정적 인센티브 제공
요코하마 항 (Port of Yokohama)	30점 이상	선박 입출항비 15% 감면
고텐버그 항 (Port of Gothenburg)	30점 이상 또는 친환경 선박으로 분류	항비 10% 할인 (LNG 연료추진선에 한하여 항비 30% 할인 적용_2018년 12월까지 적용되며 2019년에는 20%, 2020년에는 10%로 할인비율감소예정)
로테르담 항 (Port of Rotterdam)	31점 이상	선박 입출항비 10% 감면 (LNG 연료추진선에 한하여 항비 20% 할인, LNG 추진 바지선박은 항비 30% 할인)
브레멘 항 (Port of Bremerhaven)	31점 이상	선박 입출항비 10% 감면
안트워프 항 (Port of Antwerp)	31점 이상	선박 입출항비 10% 감면
LA 항 (Port of Los Angeles)	점수대별 차등	30~34점: 750달러(약 85만원) 인센티브 등
함부르크 항 (Port of Hamburg)	50점 이상	최대 2,000유로(약 240만원) 항비 할인 상한을 높임

LNG 병커링에 있어서도 전 세계적으로 많은 인프라가 조성 중에 있다. 노르웨이에서는 TTS(Truck to ship), PTS(Pipe to ship), STS(Ship to ship) 등의 모든 방법의 병커링 인프라가 운영 중에 있으며 벨기에는 지브리케항(Zeebrugge Port)과 안트워프항(Antwerp)의 LNG 인수기지를 LNG 병커링 터미널로 활용한다. 이외에도 유럽은 많은 나라들이 각국 정부 또는 EU 주도하에 병커링 관련 활동을 폭넓게 진행하고 있으며 북미지역도 강력한 환경 규제 및 LNG 가격 경쟁력을 바탕으로 LNG 병커링 산업이 활성화되고 있다. 중국에서의 LNG병커링은 TTS(Truck to ship), Pontoon, STS(Ship to ship)으로 나눌 수 있으며 중국내

에서는 소규모 LNG운반선 건조에 집중하고 있으며 이는 LNG병커링에 사용될 것으로 전망된다. 중국선급협회(China classification society, CCS)에 의하면 Fig. 2-17과 같은 중국 LNG value chain이 구축되어 있으며 이를 활용한 LNG 관련 연구 개발이 활발하게 진행 중에 있다고 밝혔다[39].



Fig. 2-17 LNG value chain in China (CCS, 2016)

한국은 아시아 최초 LNG 연료추진선인 에코누리호 건조와 이의 병커링으로 싱가포르, 중국보다 앞서 시작하였으나, 정부의 LNG 관련 정책 수립의 지연, 국내 선주사의 무관심, 한국가스업계의 소극적인 기술개발 및 사업투자로 인해 뒤쳐져 있었다. 그러나 2016년 11월 16일 해양수산부와 산업통상자원부가 제18차 경제관계장관회의에서 의결한 ‘LNG 추진선박 산업을 미래 新해양산업으로 육성’의 정책발표를 통해 가스연료추진선에 지원을 강화하고 있다.

해양수산부는 28개 기관이 참여하는 ‘LNG 추진선박 연관 산업 육성단’을 구성하여 정책 추진현황 점검 및 신규정책 추진 실행을 진행하고 있다. LNG 추진선박 도입 활성화를 위한 LNG 추진선 공공발주 및 민간발주 추진, 친환경선박 보조금 지급 등에 세부 지원을 진행 중이다. 건조 역량 강화를 위한 핵심

기술 개발 및 표준화를 추진중에 있으며, LNG 병커링 기반 및 운영 규정 등의 기준을 통한 운영 기반 구축을 진행하고 있다. 특히 LNG 추진선박 도입 활성화를 위해 해양환경 규제 강화 및 국내 배출제한구역(ECA) 지정 타당성 검토를 진행하고 있어 실제 한국 영해에서의 배출규제가 가시화되어가고 있다.



제 3 장 대상 선박의 엔진, 연료 탱크 선정 및 엔진의 운항 데이터 평가

3.1 연구대상 선박 선정

3.1.1 선종 및 항로 선정 배경

한국 영해를 ECA로 선포할 것을 전제하에 ECA를 향해하는 선박을 평가한다. ECA를 향해하는 주요 선박을 추정하기 위해서는, 대형선박에서 운반된 물자가 소형선에서 분배 운송되는 물류구조를 이해하여야 한다. 2015년 신조 준비 당시 선대가 증가하는 추세에 있으며 ECA 점유율이 높을 것으로 예상되는 핸디막스(Handymax)급 벌크선(Bulk carrier)에 대해 신조 결정을 하였으며, 그 결과 재화중량 5만톤(DWT) 벌크선인 ‘그린아이리스(Green Iris)호’가 2018년 2월에 인도되었다. 본 논문의 연구 대상이 된 ‘그린아이리스호’는 화주인 포스코와 선주인 일신로지스틱스 사이의 운송 계약에 따라 Fig. 3-1과 같이 동해에서 광양 제철소까지 석회석의 국내 운송을 담당한다. 가장 최근 Clarkson에서 발표한 자료 Fig. 3-2와 같이 2016년에 전 세계 선박의 항로를 추정해본 결과 벌크선이 최다 ECA 점유율을 가지고 있다.



Fig. 3-1 Navigation area of Green Iris (ILSHIN Shipping, 2017) [40]

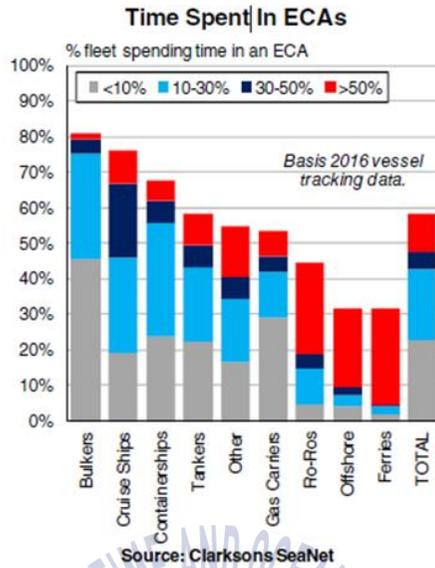


Fig. 3-2 Time spent in ECAs (Clarkson, 2018) [41]

3.1.2 연구대상 선박의 제원

Fig. 3-3은 본 연구대상 선박의 일반배치도(General arrangement, GA)이며 본 선박의 주요 제원(Principal particulars)은 Table 3-1과 같다.

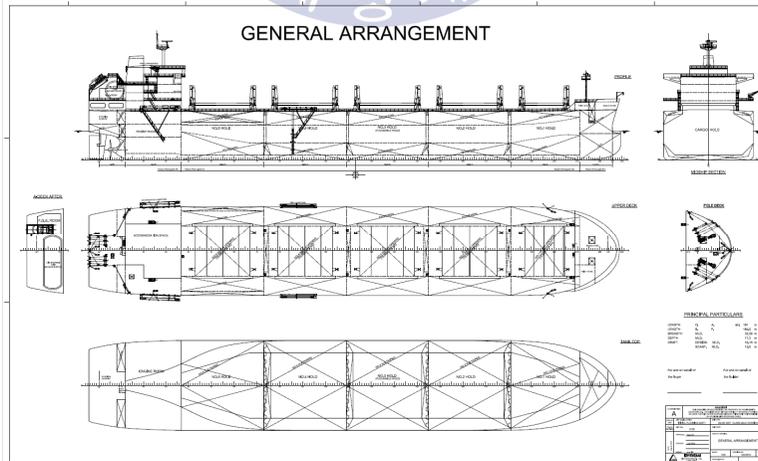
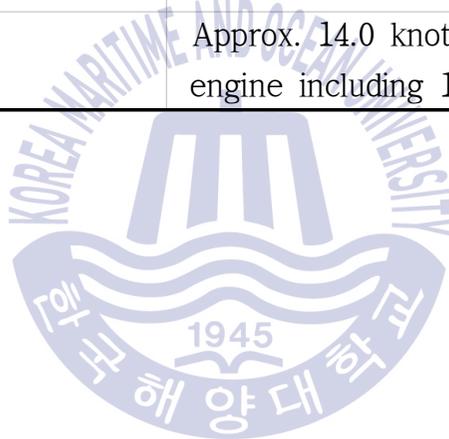


Fig. 3-3 General arrangement of Green Iris (ILSHIN Shipping, 2017)

Table 3-1 Principal particulars of Green Iris (ILSHIN Shipping, 2017)

Principal Particulars		
Length(m)	L.O.A.	Abt. 191
	L.B.P.	184
Breadth MLD.(m)		32.26
Depth MLD.(m)		17.30
Draft(m)	Design MLD.	10.15
	Scant. MLD.	12.00
Gross tonnage(ton)		31,005
Deadweight(tonne, M/T)		50,655
Service Speed	Approx. 14.0 knots at NCR of main engine including 10% power margin.	



3.2 추진엔진 선정의 적합성 평가

3.2.1 LNG 연료 추진선의 기술적 특이점

본 연구의 대상 선박은 LNG를 연료로 사용하여 선박을 추진하기 때문에 기존의 HFO를 사용하던 엔진과 상이한 연료의 특성으로 인한 차이가 발생한다. LNG는 메탄, 에탄, 프로판 등 다양한 가스의 혼합물이며 메탄(Methane)이 87%~96% 정도를 차지하기 때문에 메탄의 물리 화학적 성질이 LNG의 특성을 결정한다. Table 3-2는 LNG, 디젤 및 가솔린의 물리 화학적 성질을 비교한 표이다[42].

Table 3-2 Physicochemical properties of natural gas, diesel and gasoline

Fuel properties	Natural gas	Diesel	Gasoline
Low heating value (MJ/kg)	48.6	42.5	43.5
Cetane number	-	52.1	13~17
Octane number	130	-	85~95
Auto-ignition temperature(°C)	537	180~220	310
Stoichiometric air-fuel ratio (kg/kg)	17.2	14.3	14.56
Carbon content (%)	75	87	85.5

3.2.2 추진출력과 배치선도, 부하선도 분석

선박의 목적에 맞는 최적 기관선정 후 기본 엔진 성능 분석을 위해 선주사양을 근거로 선정된 프로펠러 디자인 점(Propeller design point)을 고려한 엔진 배치선도(Layout diagram)와 부하선도(Load diagram)를 계산한다. 본 연구에서는 엔진 성능 및 요구 사항에 대한 필수 데이터를 얻을 수 있는 MAN ES사의 CEAS(Computerized engine application system) 프로그램을 통해 분석 고찰한다.

엔진 배치선도는 특정 엔진 타입에 따라 다른 모양을 형성하며 일정한 두개의 평균유효압력선과 두개의 엔진 속도선으로 영역이 구성된다. 영역 안에서는 엔진설계 시에 선주 요구에 따라 엔진이 계속해서 운전될 수 있는 최대출력을 나타내는 특정연속최대출력(Specified maximum continuous rating, SMCR)이 존재한다. 부하선도는 선박사양에 맞는 SMCR을 가진 기관의 연속 및 과부하 작동에 대한 출력 및 속도 제한을 나타낸다. Table 3-3은 연구 대상이 된 엔진의 제원이며 이를 활용하여 값을 적용하면 Fig. 3-4와 같다.

Table 3-3 Principle particulars of target ship

Principle Particulars of Target Ship		
Main Engine	Type	MDT 6G50ME-C9.5-GI, Tier II
	MCR	7,250 kW × 88.7 rpm
	NCR	5,597 kW × 81.4 rpm
(10% power margin) 5,088 kW × 78.7 rpm × 14 kts		
Turbocharger	Type	HYUNDAI-ABB A165L37_1 set

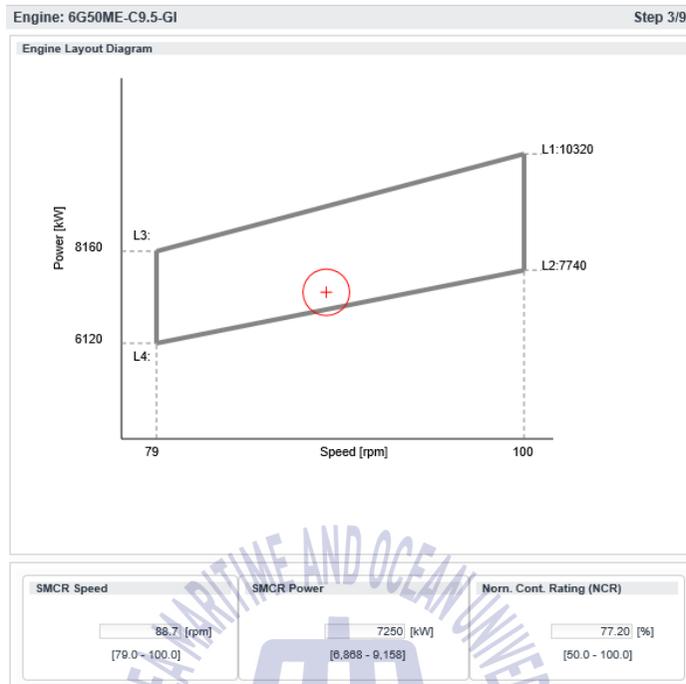


Fig. 3-4 MAN ES 6G50ME-C9.5-GI(Methane) Layout diagram

NCR은 SMCR의 77.2%으로 5,597 kW가 되며, 이때의 속도는 프로펠러 법칙에 의해 다음과 같은 식으로부터 구하여 진다

$$p = cn^3$$

p : Power

c : Constant number

n : Revolution per minute

회전수의 3제곱의 비례하므로, NCR에서의 속도를 x 라 하면 $x = \sqrt[3]{88.7^3 \times 5597 / 7250}$ 이 되므로 81.4 rpm이 된다. 즉, 본 엔진의 경제적 출력은 5,597 kW x 81.4 rpm이 된다.

본 선박의 NCR이 SMCR의 77.2%로 약 23%의 큰 엔진마진이 된 이유는 최저 출력요구조건(Minimum propulsion power requirements to maintain the

maneuverability of ships in adverse conditions)이 적용되었기 때문이다. 선박엔진 출력설정 시에 NCR이 먼저 설정된 후 SMCR이 산정되는데 이 과정에서 Table 3-4와 같은 최저출력요구조건 Level 1이 본 선박에 적용되었으며, 이에 따라 다음과 같은 식으로 최소 요구 MCR을 구한다.

$$a \times DWT + b = 0.0763 \times 50,655 + 3,374.3 = 7,239.3 \text{ kW}$$

7,239.3 kW가 본 선박의 최소 요구되는 MCR이 되며, 이에 따라 본 선박의 SMCR은 7,250 kW로 설정한다[43].

Table 3-4 Minimum propulsion power requirements level 1

Ship type	a	b
Bulk carrier which DWT is less than 145,000	0.0763	3,374.3
Bulk carrier which DWT is 145,000 and over	0.0490	7,329.0
Tanker	0.0652	5,960.2
Combination carrier	See tanker above	

부하선도를 종합하여 보면, 본 연구 대상 선박은 Fig. 3-5에 나타난 것과 같이 일정 영역(Load diagram)에서 연속 운전이 가능하고 이때 최고 회전수는 기준점 회전수의 105%이다. 즉 100% 회전 속도로 운전을 하여도 출력이 100% 이상 증가하기 않는다면 5% 속도 증가를 지속적으로 허용한다.

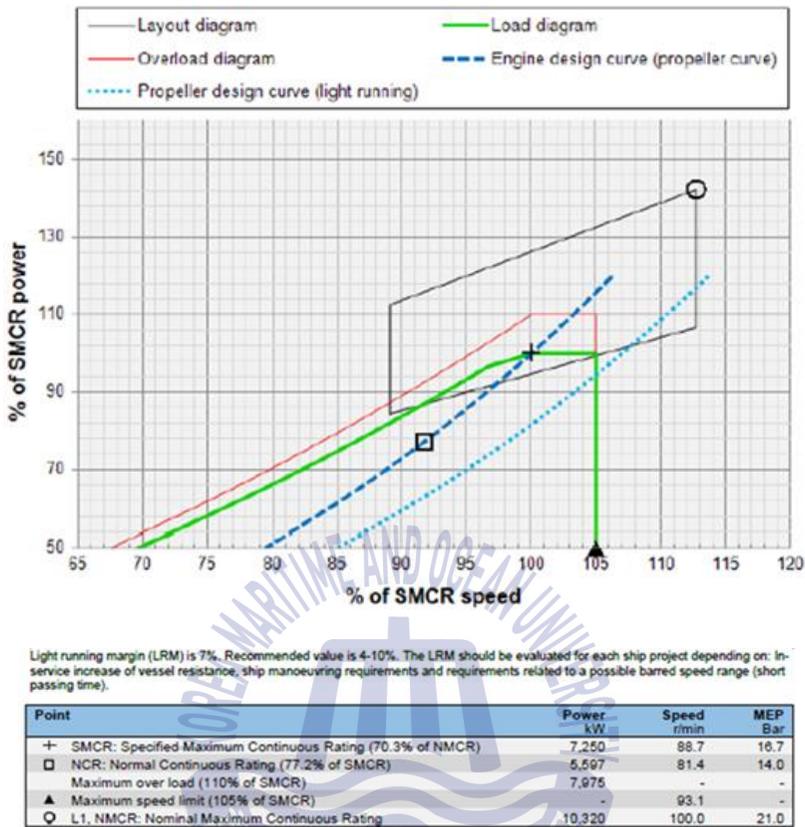


Fig. 3-5 MAN ES 6G50ME-C9.5-GI(Methane) with high load tuning

3.2.3 연료탱크 타입 및 용적의 선정 기준

LNG를 연료로 사용하게 되면 기존의 사용되던 HFO와 상이한 물성의 성질 및 요구사항에 따라 종합적으로 약 2배정도의 용량이 요구된다. LNG의 밀도는 15°C에서 약 450 kg/m³이며 이는 약 1,000 kg/m³의 밀도를 가지고 있는 HFO의 절반도 되지 않는 값으로 약 2.2배의 증가가 필요하다. 이와는 상이하게 발열량은 LNG가 평균적으로 50 MJ/kg으로 약 40.6 MJ/kg의 HFO보다 1.2배 크기 때문에 0.84배의 탱크용량 감소요인이다. 이외에도 LNG연료탱크의 안전에 관한 요구사항들을 포함하여 종합적으로 판단하였을 때, 연료탱크는 최소 2배로 증가해야 한다.

LNG 연료탱크는 극저온의 LNG를 저장하므로 열수축이 없고, 열전도는 낮으

며, 강도는 높은 성질의 금속 재질이 필요하다. 이를 만족하는 금속 재질은 9% Ni steels, nickel-based austenitic stainless steels, aluminum alloys 및 high manganese austenitic steel 등이 존재한다. 본 연구의 대상 선박은 세계 최초로 20%이상의 망간이 함유된 고망간강을 사용한 LNG연료탱크를 채택하였다. 연료 탱크 타입으로서는 가장 많은 실적이 있는 타입 C 독립형 탱크를 사용하며 탱크의 용량은 엔진의 연료소모량과 선속, 항해일수를 고려하여 책정하였다.

책정된 MAN ES사의 6G50ME-C9.5-GI 엔진은 이중연료 엔진으로 저위 발열량(Lower calorific value, LCV)이 42.7 MJ/kg(10,200 kcal/kg)인 액체연료를 사용하여 상용출력(Normal continuous rating, NCR)로 항해할 경우, 약 20.98 MT/day의 연료가 소모된다. LCV가 50 MJ/kg인 가스연료를 사용하여 NCR로 항해할 경우 약 16.41 MT/day의 가스연료가 소모된다.

연료유 모드로 사용할 때 약 5,300마일을 항해할 수 있는 탱크용량과 가스 모드일 때 약 3,600마일을 항해할 수 있는 용량에 3일의 여유용량을 더하여 LNG연료탱크의 용량을 500 m³로 정하였다. Table 3-5는 연료탱크의 기본 사양이며 Fig. 3-6은 탱크 디자인이다.

Table 3-5 Specifications of LNG fuel tank

Specifications of LNG Fuel Tank	
Type	IMO type C tank (500 m ³)
Design pressure	0.7 MPa
BOR(Boil-off rate)	≤ 0.2 vol.%/day, Vacuum-Pearlite insulation
Dimension(mm)	φ 7,000 (O.D.) × L 18,700
Material	High Mn steel (Inner tank) + SA 516-70(Outer tank)

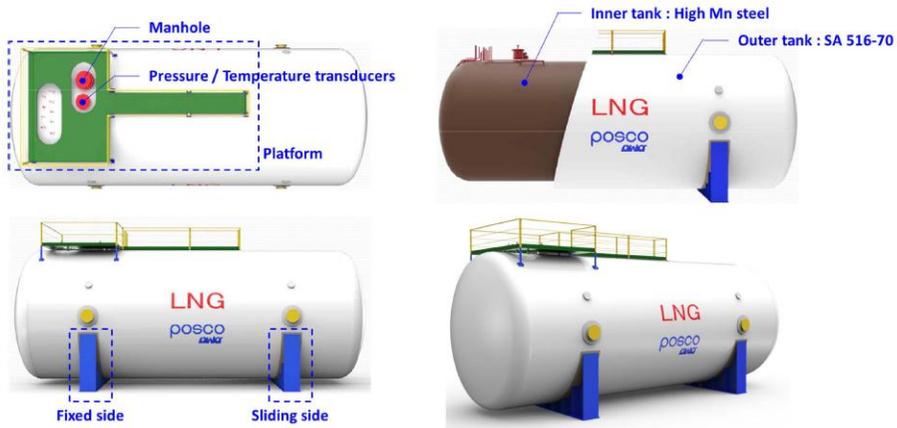


Fig. 3-6 Design of LNG fuel tank (Ilshin shipping, 2017)

3.2.4 LNG 연료 추진선의 주요 구성 요소

LNG를 연료로 사용하기 위해서는 기존의 연료유 대비 극저온의 가스연료를 다루기 위한 구성 요소들이 추가된다. LNG연료를 저장할 수 있는 극저온용 연료탱크가 설치되며, 연료탱크로부터 엔진까지의 연료공급계통인 FGSS가 구성되기 때문에 관련 기자재들이 추가된다. 선박의 설계 및 각종 기기 배치에 관한 사항은 IGF Code에 따라 선박의 안전성 측면에서 고려 및 최적 배치된다.

본 연구 대상 선박은 MAN ES사의 주기관을 사용하므로 FGSS는 가스연료가 45℃, 300 barg의 조건이 되도록 시스템이 구성된다. Fig. 3-7은 실제 연구 대상 선박의 FGSS이다. 엔진으로 가는 가스는 HP 펌프(pump)를 통해 300 barg로 압력을 올리며 HP 기화기(Vaporizer)를 통해 40℃~45℃로 온도를 올려주어 가스 공급 및 차단을 담당하는 Gas valve train을 통해 엔진으로 공급된다. 낮은 온도의 가스를 공급하게 되면 가스 파이프가 견디지 못하여 파공 현상 및 가스 공급이 원활하지 않을 수 있기 때문에 가스 온도를 올려 미연의 사고를 예방한다. 본 선박은 발전기 엔진도 가스연료가 사용가능한 엔진이기 때문에 FGSS가 발전기라인으로도 이어진다. 발전기는 주기관과 같이 고압이 필요하지 않기 때문에 4 barg~6 barg의 저압 가스가 공급된다.

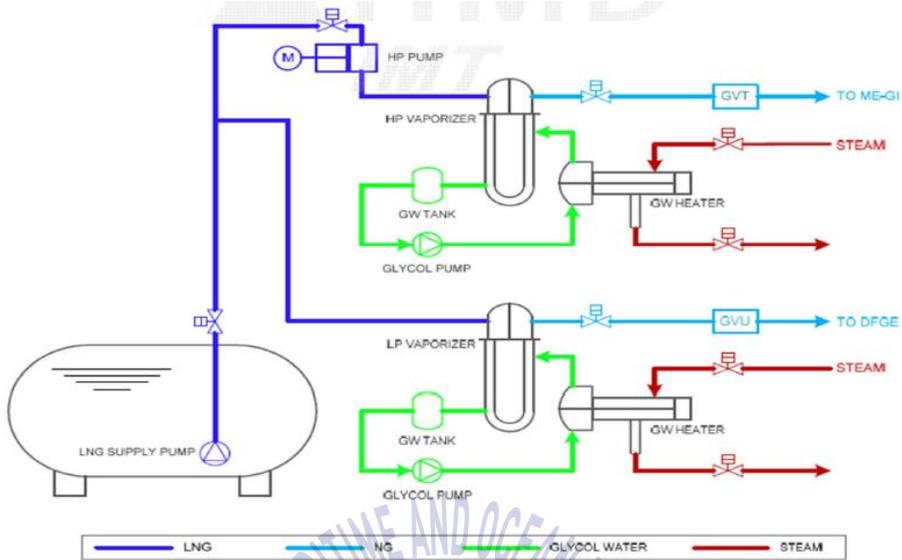


Fig. 3-7 Fuel Gas Supply System of Ilshin Green Irls (Ilshin, 2017)

LNG연료를 병커링 하는 절차도 새롭게 구성된다. 본 대상 선박은 동해항에서 탱크로리를 통한 LNG병커링을 실시한다. 탱크로리 4대로 60톤을 수급 받는 데 약 9시간이 소요되며 병커링 이후 탱크로리까지 본선으로 부터 N_2 를 이용하여 환기(Venting)시켜준다. 병커링 안전에 관한 계획은 IGF Code, IACS(International association of classification society) Guidelines, IAPH(International association of ports and harbors) Check list 및 Guideline 등 국제 규정에 따른다. Fig. 3-8은 대상 선박의 LNG bunker station 및 LNG병커링 계획이다.

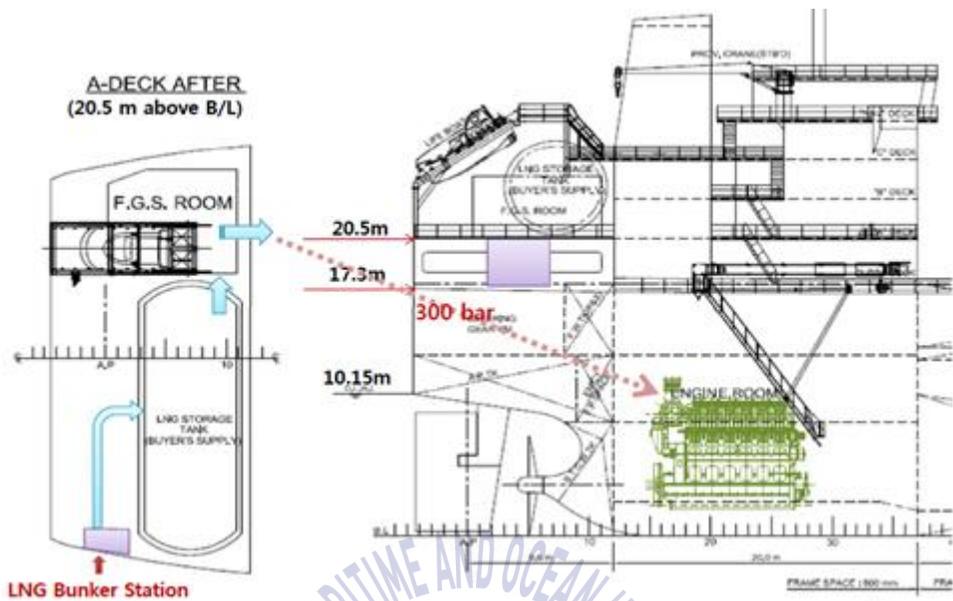
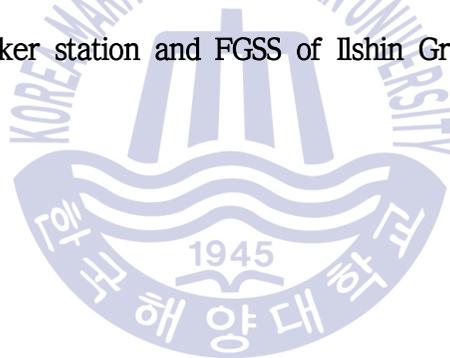


Fig. 3-8 LNG bunker station and FGSS of Ilshin Green Irls (Ilshin, 2017)



3.3 대상 엔진의 운항 성능 분석

본 논문에서는 MAN ES사의 ME-GI 엔진을 연구 대상 선박의 주 기관으로 선정하였다. 기존 전자제어 방식인 ME엔진에서 가스연료를 사용함에 따른 이중 연료기관(Dual fuel engine), 이중배관장치(Double wall pipes), 안전장치(Safety) 특성이 더해진 개념이다[44]. Fig 3-9는 ME-GI 가스연소를 위한 주요 구성이며 가스공급배관, 가스분사밸브 및 분사가스 제어용 Gas control block이 설치되었다. 가스연료는 유압을 사용하여 Window 밸브를 거쳐 실린더 커버를 통해 분사되는데 운전은 파일럿 오일과 가스로 운전되는 가스운전모드, 가스와 연료유의 비율을 적절하게 조절하여 운전하는 모드, 연료유만 사용하여 운전하는 모드로 운전 가능하다.

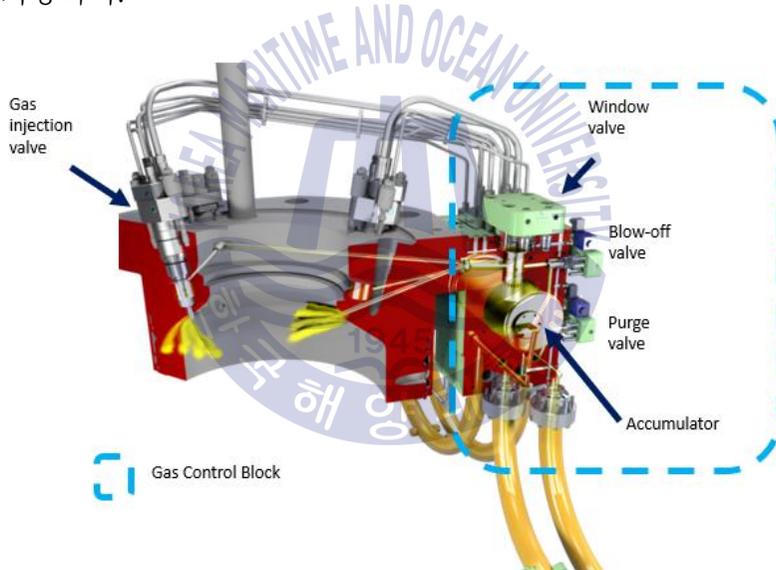


Fig. 3-9 New parts on the ME-GI engine (MAN ES, 2017) [45]

고압(300 barg)가스를 주 연료로 사용하므로 배관장치는 이중배관으로 정상압력의 150%로 설계되며 커먼레일(Common rail) 방식이다. 외부 파이프의 주요 구성품은 밀봉오일장치(Sealing oil system), 환기장치(Ventilation system), 불활성가스 공급장치(Inert gas system), 가스공급장치(Gas supply system)이다. 이중관 사이 공간에 HC(Hydrocarbon)센서를 설치하여 가스 누설 시 가스공급을 차단한다.

고압의 가스를 사용하기 때문에 조금의 오작동에도 신속히 감지 및 대처를 위해 Fig. 3-10과 같이 LNG연료 탱크에서 가스연료밸브까지의 일련의 과정 전 시스템 내에 10개가 넘는 센서가 존재한다. 모든 제어는 전자제어장치인 ECS(Engine control system)에서 이뤄지며, 기존 전자엔진에서 SF(Second fuel) 관련 ECS가 추가된다. SF-EDS는 크게 Safety와 Control이 있으며 Safety unit으로 인해 가스공급이 차단되며 Control unit으로 인해 가스운전이 정지되고 연료유 사용모드로 즉시 바뀌게 된다.

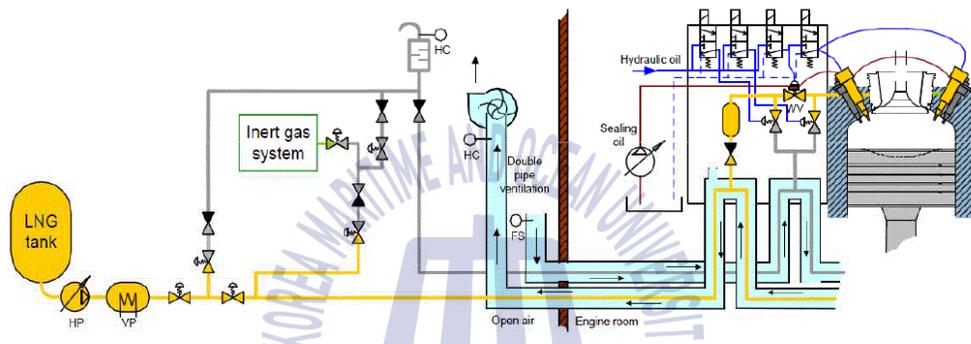


Fig. 3-10 System configuration of ME-GI (MAN ES, 2017)

3.3.1 성능 측정 방법 고찰

POSCO-MAN ES-NAPA와 협력하여 2018년 4월 9일, 6월 6일 2차례에 걸쳐 ‘그린아이리스호’를 방선하여 측정 및 확보한 실제 LNG를 연료로 운항 중인 엔진의 데이터를 활용한다. 엔진의 출력 및 기본 인자들은 선박의 데이터 전자 기록 시스템인 MAN ES사의 CoCos-EDS 및 PMI를 활용하며, 엔진 성능 분석을 위하여 성능 데이터인 MAN ES사의 PMI 데이터를 활용한다. 속도와 엔진 출력의 상관관계 및 가스관련 분석을 위하여 NAPA사의 성능분석 데이터를 활용한다.

실제 선박 가스 운항 중 엔진 부하를 50%, 65%, 77.2%(NCR)로 하여 PMI 데이터를 측정하여 해상 시운전시 PMI 데이터와 가스 운항 시 엔진 성능 및 종합

적 성능을 비교 분석한다. 가스 운항 중 보다 정확한 엔진 성능 분석을 위해 CoCos-EDS를 활용하여 엔진 기본 인자들을 해상 시운전 데이터와 비교한다. 이때 ISO 표준조건에 맞게 데이터 전환 후에 비교 분석을 진행한다.

Table 3-6은 분석 구간의 공장시운전 데이터로 성능 분석 시에 기준을 위해 나타내었다.

Table 3-6 Shop test data

Pressure			50%	75%	77.2%
P _{max}	bar	Measured	150	183	184
		Corrected	144.96	176.67	178.3
P _{comp}		Measured	110	143	147
		Corrected	105.8	137.04	141.36
P _{scav}		Measured	0.9022	1.7063	1.814
		Corrected	0.8796	1.6514	1.7561

3.3.2 엔진 성능 분석

해상 시운전은 선박이 인도되기 전에 해상에서 선박에 전체적 성능을 테스트 및 측정하는 단계로 실제 운항과 가장 비슷한 조건이다. 본 논문에서는 실제 가스 운항 시에 엔진의 종합적 성능을 평가하는 것이 목적이 되므로 해상 시운전과의 비교 분석을 진행한다. 해상 시운전은 2017년 12월 1일부터 7일까지 진행되었다.

해상 시운전과 운항 시에 데이터는 각각 측정 당시의 대기조건에 영향을 받은 겉보기 데이터 값이므로 동일 조건에서 비교를 위해서는 ISO 표준대기조건에 맞게 전환한 후에 비교를 진행하여야 한다. Table 3-7은 ISO 표준 조건을 나타내며 ISO 표준 조건으로 측정된 데이터를 전환하기 위해서는 Table 3-8과 같은 전환식이 사용된다.

Table 3-7 ISO standard condition

ISO Standard Condition		
Ambient	air pressure	1,000 mbarg
Ambient	air temperature	25°C
Cooling	water temperature	25°C

* For practical reason, scavenge air temperature can be used 37°C

Table 3-8 Data conversion to ISO condition

Data Conversion Formula	
ISO P_{max}	$m(100 - 0.2198 \times \Delta T_{inl} + 0.081 \times \Delta T_{sc} + 0.22 \times \Delta P_{amb} - 0.005278 \times \Delta P_{back})/100$
ISO P_{comp}	$m(100 - 0.2954 \times \Delta T_{inl} + 0.153 \times \Delta T_{sc} + 0.0301 \times \Delta P_{amb} - 0.007021 \times \Delta P_{back})/100$
ISO P_{scab}	$m(100 - 0.2856 \times \Delta T_{inl} + 0.222 \times \Delta T_{sc} + 0.0293 \times \Delta P_{amb} - 0.006788 \times \Delta P_{back})/100$

* Δ : reference-measured, m: m: measured, T_{inl} : T/C inlet temp, T_{sc} : scavenging-air temp, P_{amb} : ambient pressure, P_{max} : maximum pressure, P_{comp} : compression pressure, P_{sca} : scavenging-air pressure, P_{back} : back pressure

측정값들은 동일한 조건에서 비교하기 위해 ISO 표준대기조건으로 전환하였으며 그 결과는 Table 3-7과 Fig. 3-11과 같다. 실제 운전 시에 압축압력과 실린더 내의 최고 압력이 대체적으로 낮아지는 경향을 보이고 65%부하에서 낮아지는 압력이 10 barg정도로 가장 크다. 실제 운항의 값들이 해상 시운전보다 낮게 나타나는 이유는 대기조건, 해상상태 및 화물 적재량의 차이에 따른 영향으로 사료된다.

Table 3-9 Averaged pressure measurement at various engine loads in ISO condition

Pressure(bar)		Official sea trial			Real operation		
		Pmax	Pcomp	Pscav	Pmax	Pcomp	Pscav
50%	Measured	159.6	119	1.1	155.6	116.1	1.04
	Corrected	154.24	114.46	1.0724	150.37	111.67	1.0137
65%	Measured	182.4	152.6	1.86	172.7	133.3	1.45
	Corrected	176.19	136.66	1.5872	166.9	128.21	1.4136
77.2%	Measured	184.5	158	2.03	185	152.7	1.95
	Corrected	178.82	151.94	1.9652	178.6	146.24	1.8873

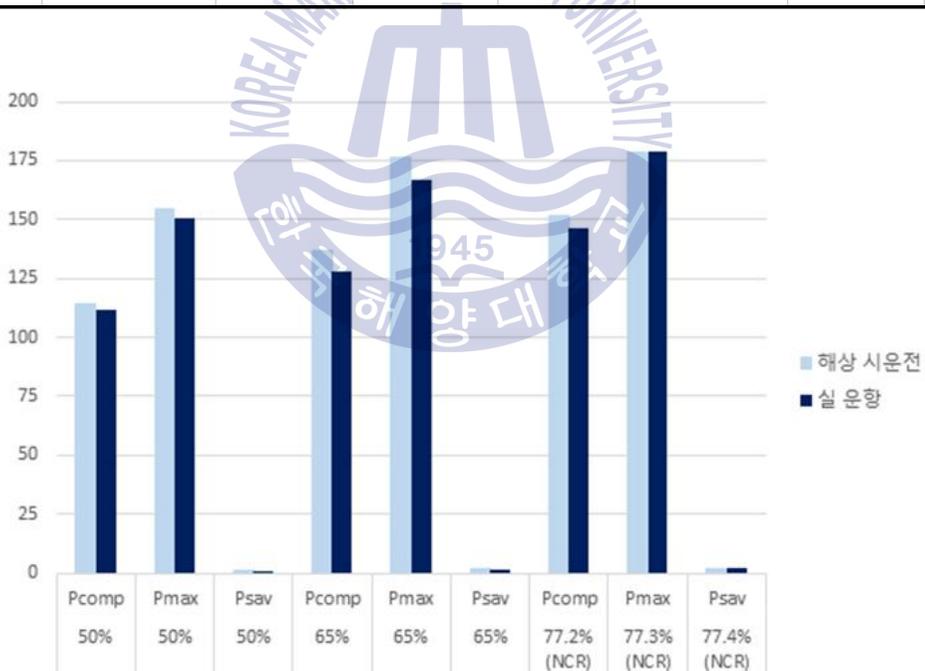


Fig. 3-11 Bar graph_Averaged pressure measurement at various engine loads in ISO condition

Fig. 3-12는 ISO전환 실린더내의 최고압력을 부하별로 표시하여 선형을 만들어 본 결과이며 최고 압력은 비슷한 기울기를 가지고 증가한다.

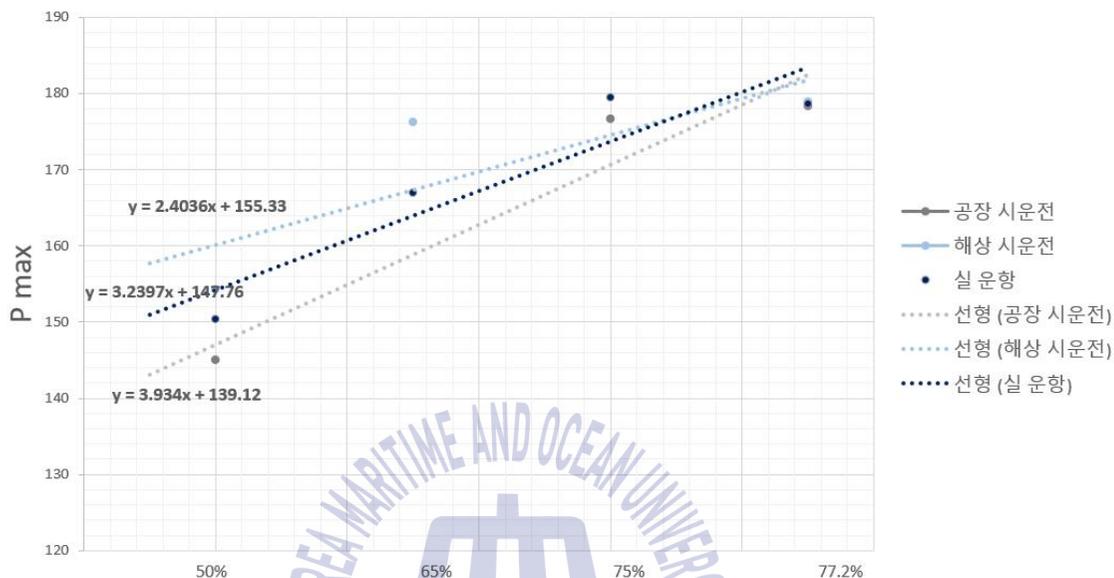


Fig. 3-12 Maximum combustion pressure at various engine loads in ISO condition

시험선박의 추진엔진 성능을 해상 시운전과 실제 운항 시의 자세한 비교를 위해 실린더내 압력을 크랭크각도 5도마다 측정하였다. 엔진 크랭크각도 TDC 전 50도에서 TDC 후 50도까지는 연소과정으로 인한 압력변화가 크기 때문에 크랭크 각도 매 2도마다 측정하였고 그 결과는 Fig. 3-13과 같다. 착화지연기부터 후연소기를 모두 포함한 연소특성이 해상 시운전과 실제 운항에서 비슷하게 나타났다. 실린더내 압력은 엔진 부하 65%에서 가장 크게 차이가 나타났으며 상용 연속운전출력에 해당하는 77.2%에서는 실제 운항과 해상 시운전의 연소특성이 거의 일치한다. 해상 시운전과 실제 운항에서의 연소 특성의 차이는 대기 조건, 해상상태 및 화물 적재량의 차이에 따른 영향으로 사료된다.

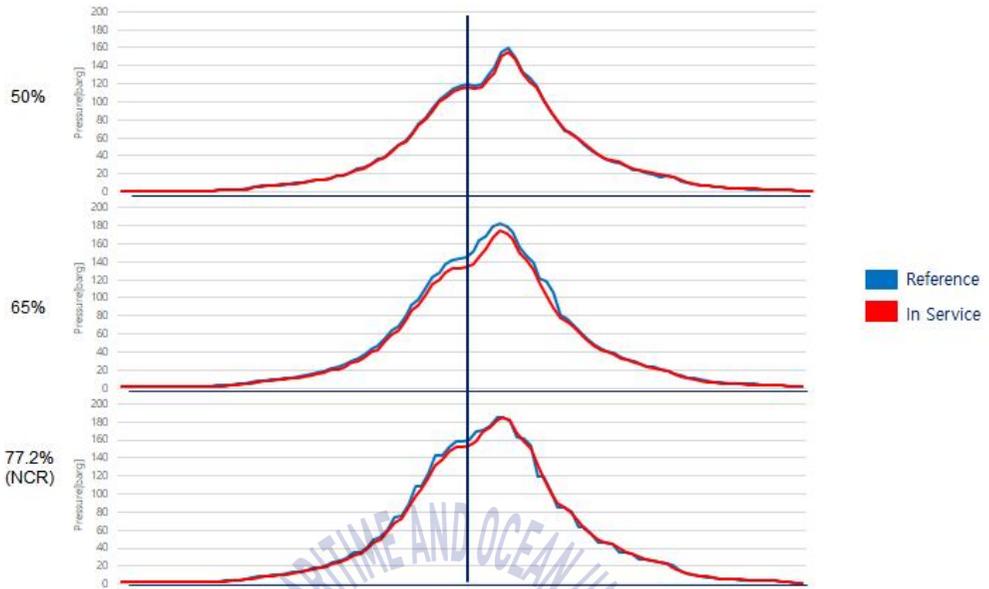


Fig. 3-13 Comparison PT diagram (Source: MAN ES PMD)

가스의 분사 후 확산과정에서 일어나는 기화열때문에 실린더내의 온도는 약 700 K까지 강하하기 때문에 발화점이 약 811 K인 천연가스의 가스연료는 착화 실패로 이어진다. 이를 극복하기 위해 가스연료사용시에도 소량(2%~3%)의 파일럿 오일을 분사하여 착화를 유도한 후 가스를 분사하여 본 연소가 이루어지도록 하는 방법을 사용하고 있다. Fig 3-13에서 보여 진 바와 같이 50%, 65%, 77.2% 엔진부하에서 실 운영 시에 측정된 실린더 내 압력곡선이 해상시운전시 측정된 곡선보다 대체로 약간 낮으나 그 차이는 측정시의 대기조건, 선박 흘수의 차이 등 외부요인에 따른 것으로 보여 진다.

3.3.3 종합 분석

본 연구 대상 선박이 인도된 후 5월까지 운항한 데이터들을 기반으로 종합적 분석을 진행한다. 데이터 수집 기간 동안의 측정은 Fig. 3-14와 같이 대부분 본 선박의 Load diagram의 5%의 속도 증가를 지속적으로 허용하는 105%곡선과 정상 프로펠러 곡선아래에 있기 때문에 종합 분석에 사용된 데이터는 엔진이 정상 작동 중인 상태에서 수집된 것을 알 수 있다.

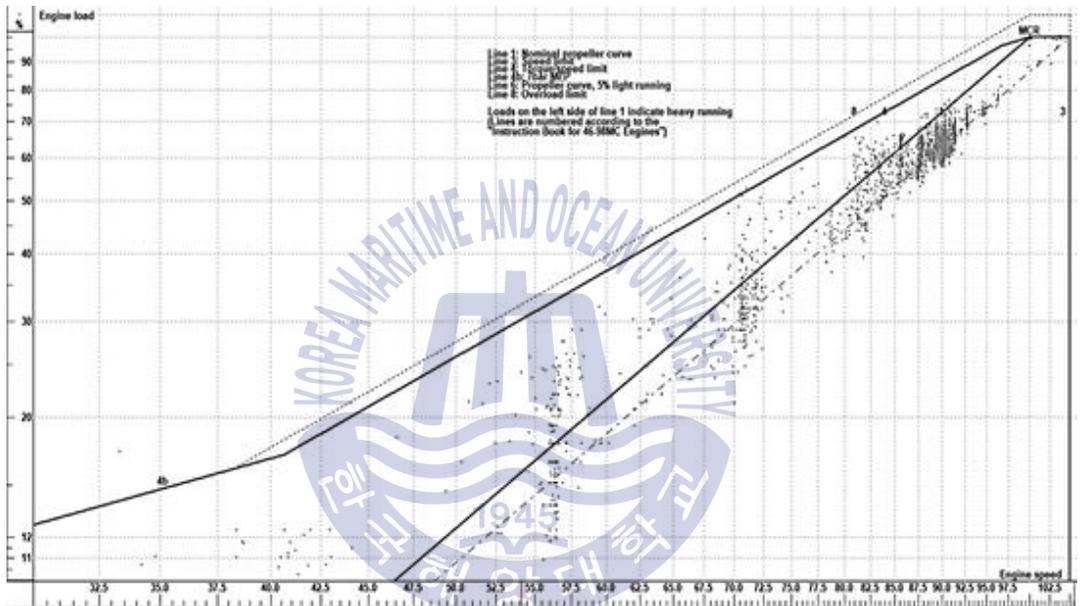


Fig. 3-14 Engine Load Diagram and Measurement (MAN ES CoCos EDS)

Fig. 3-15는 엔진 부하에 따른 가스연료 소모량을 화물적재 상태에 따라 비교한 것으로 화물적재(Laden) 상태의 연료 소모량이 공선(Ballast)상태 보다 약간 상회함을 보여준다[46]. Fig. 3-16은 선박의 속도에 따른 가스 소모량을 화물적재 상태에 따라 비교한 것이다. 선박의 속도에 따른 연료가스 소모량은 Ballast 상태일 때가 더 적게 소모되고 있음을 확인할 수 있다. 13 knots의 선속에서 두 가스연료 소비량의 차이가 약 50 kg/h정도 차이가 남을 보여준다. Fig. 3-15에서 본 시험 선박은 엔진 부하 50%에서 77.2%(NCR) 사이를 주로 운항을 하고 있으며, Fig. 3-15와 Fig. 3-16을 통해 연료가스 소모량은 화물적재 상태, 엔진

부하에 따라 비례하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 일반적으로 적재량의 2/3승에 비례하여 연료소비량이 증가하므로, 본 연구에 사용된 측정시스템을 통한 엔진 성능 분석은 유효한 것으로 본다.

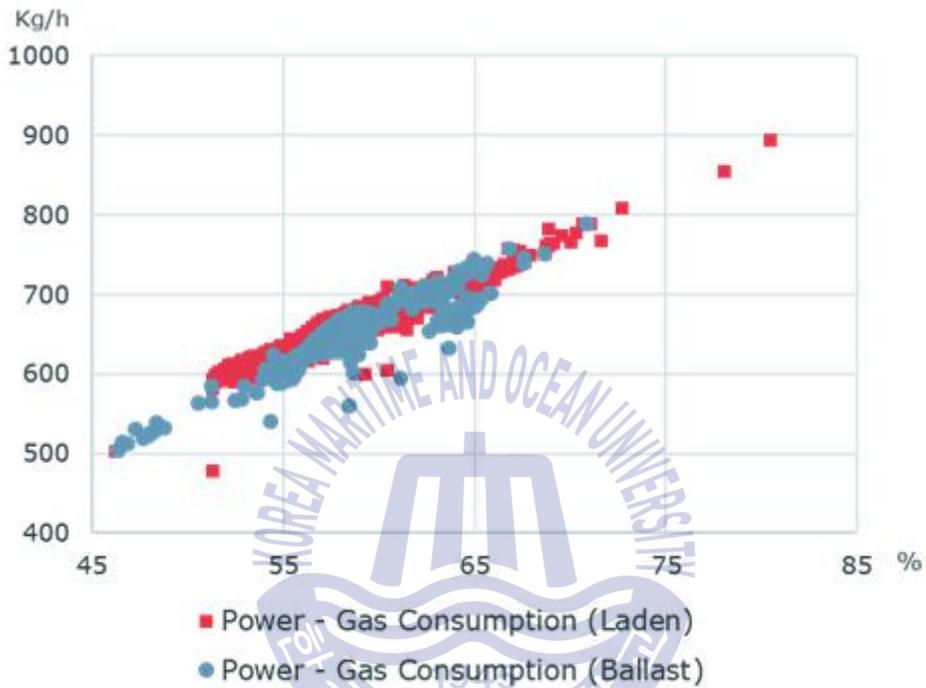


Fig. 3-15 Engine load-gas consumption comparison_ Ballast/Laden (NAPA)

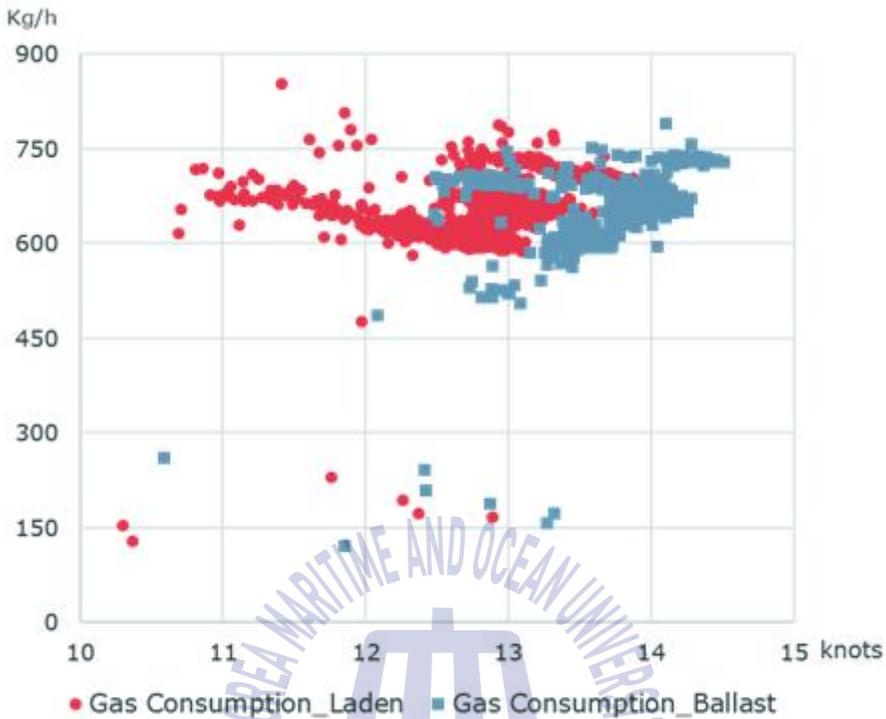
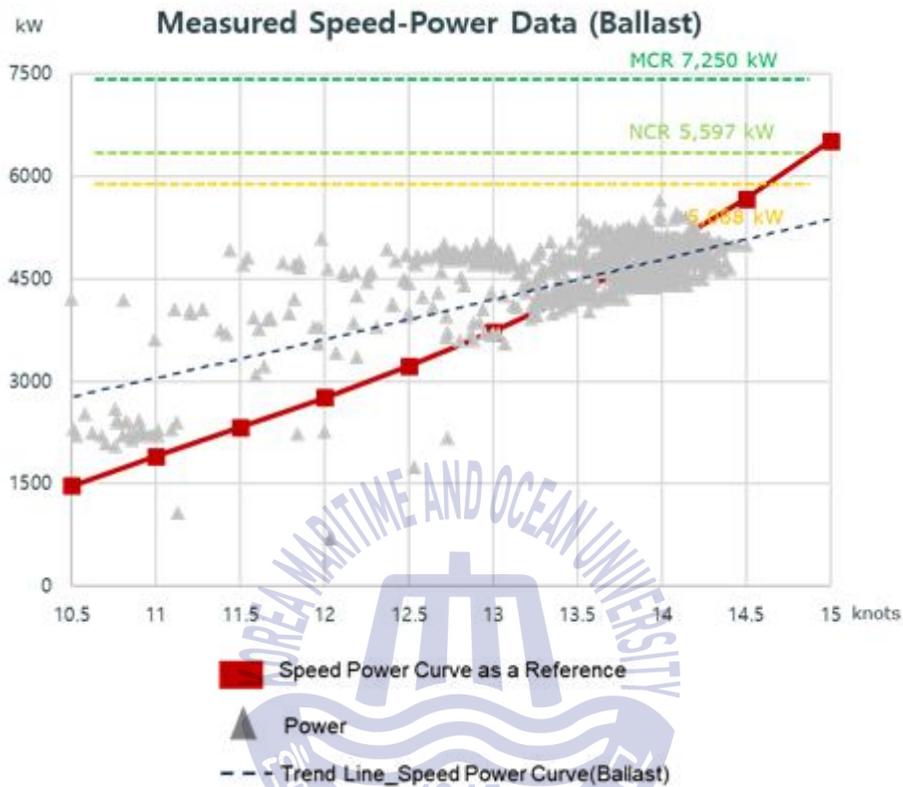


Fig. 3-16 Gas consumption comparison_ Ballast/Laden (NAPA)

Fig. 3-17은 Ballast 상태에서 선박의 속도와 엔진출력의 상관관계를 보여준다. 엔진부하는 해상 시운전보다 실제 운항에서 더 높으나 부하증가율은 더 낮음을 알 수 있다. 선박의 설계점인 14 knots에서 요구되는 해상 시운전 출력점과 10% Sea Margin을 포함한 해상 시운전 출력점이 모두 실측치와 거의 일치한다. 따라서 선형, 프로펠러 등 선박의 설계와 선박 설계속도에 요구되는 출력을 내도록 엔진의 선정이 적절하게 이루어졌음을 확인할 수 있다.



*Ballast Draft at reference: A.P 4.641 m F.P 7.11 m
 Actual Draft(Average) on Ballast condition: A.P 4.46 m F.P 7.31 m

Fig. 3-17 Measured speed-power data_Ballast (NAPA)

Fig. 3-18를 통해 본 선박 LNG 연료탱크의 압력과 온도의 일반적 상관관계를 보여준다. 탱크 온도는 탱크 압력에 비례하여 증가하며 압력과 온도는 엔진이 작동 중일 때 약간 더 빠르게 상승하고 LNG 병커링 중에 압력과 온도는 급격하게 낮아진다. 정박상태일 때 압력 상승률은 시간당 약 0.0041 barg이며, 항해 중 압력 상승률은 시간당 약 0.0149 barg이다. 데이터 수집 기간 동안 최대 LNG 탱크 압력은 설계 압력인 7 barg보다 낮은 약 4.9 barg이며 평균 탱크 압력은 3.23 barg로 탱크의 안정성을 증명한다.

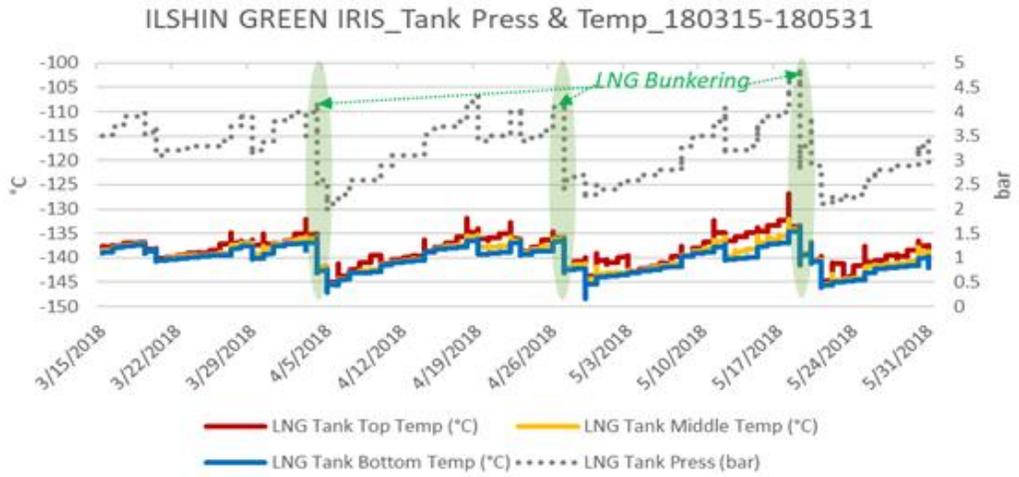


Fig. 3-18 LNG tank pressure & temperature (NAPA)



제 4 장 결 론

본 논문에서는 강화되는 해양환경규제로 인해 증가하고 있는 LNG 연료 추진선의 동향 및 기술을 고찰하고, 재화중량 5만톤 벌크선을 연구 선박으로 선정하고 본 선박에 사용된 엔진과 연료탱크의 적합을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

본 논문의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 엔진의 선정시 100% 출력인 연속최대출력(MCR)이 IMO의 최저출력요구조건을 만족하기 위하여 상향조정(up-rate) 되었음을 확인하였고, 실선 엔진부하 측정을 통하여 부하선도는 연속 및 과부하 작동에 대한 출력 및 속도 제한 범위 내에 있음을 확인하였다.

2. 선박의 설계점인 14 노트에서 요구되는 10% 시마진을 포함한 해상 시운전 출력점은 상업운전 실측치와 거의 일치한다. 따라서 선형, 프로펠러 등 선박의 설계와 선박 설계속도에 요구되는 출력을 내도록 엔진의 선정이 적절하게 이루어졌음을 확인할 수 있다.

3. 고압의 연료분사시스템을 갖는 이중연료엔진에서 LNG의 연소 적정성과 안정성을 확인하였고, 엔진성능인자인 최고폭발압력, 압축압력 및 소기공기압력 등이 해상시운전 결과와 동일한 경향을 보이고 있어 엔진이 정상 작동 증임을 확인하였다.

4. 선형, 프로펠러 등 선박의 설계와 선박 설계속도에 요구되는 출력을 내도록 엔진의 선정이 적절하게 이루어졌음을 확인하였다.

5. 고망간강을 사용한 LNG 연료 탱크는 최대 탱크 압력이 설계 압력인 7 barg보다 낮은 약 4.9 barg, 평균 탱크 압력이 3.23 barg로 LNG 연료공급시스

템과 탱크의 안정성이 증명되었다.

본 연구의 결과를 통하여 LNG연료의 사용은 성능측면에서 효율적이라고 판단하였다. 그러나 생소한 LNG를 연료로 사용함에 있어 LNG 병커링에 관한 절차서 개발 및 관련 인프라 조성이 필요하다. 향후 LNG 연료추진선의 증가에 대비한 항만시설로부터의 LNG 연료추진선의 관한 보안에 관하여서도 연구가 진행되어야 할 것이다.



참 고 문 헌

- [1] Lloyd' s Register, 2017. *2020 - 0.50% m/m sulphur marine fuel oils*. p.4.
- [2] Class NK, 2018. *Preliminary Report of MEPC 72*. pp.1-2.
- [3] The International Council on Clean Transportation, 2016. *Action Plan for Establishing Ship Emission Control Zones in China*. pp.1-4.
- [4] Seatrade Maritime News [Online] Available at: <http://www.seatrade-maritime.com/news/asia/china-s-yangtze-delta-eca-comes-into-force.html>. [Accessed Apr, 14th, 2018]
- [5] Maritime and Port Authority of Singapore, 2017. *Maritime Singapore Green Initiative Brochure*. pp.1-2.
- [6] GAS4SEA, 2017. *Advancing LNG for Cleaner Marine*. pp.1-5.
- [7] 하나금융그룹, 2018. *저유황의 역습, 최적의 대안은 LNG 연료*. pp.1-7.
- [8] IGU, 2017. *Enabling Clean Marine Transport*. p.19.
- [9] DNV-GL, 2016. *Global Sulphur Cap 2020*. p.12.
- [10] A.P. Moller-Maersk, 2017. *Sustainability Report*. pp.14-15.
- [11] CMA CGM, 2017. *Sustainability Report* [Online] Available at: <https://www.cma-cgm.com/the-group/corporate-social-responsibility/environment>. [Accessed Apr, 14th, 2018]
- [12] COSCO, 2016. *Sustainability Report* [Online] Available at: <https://www.hapag-lloyd.com/en/about-us/sustainability/on-board.html>. [Accessed Apr, 14th, 2018]
- [13] Hapag-Lloyd, 2017. *Sustainability Report*. pp.10-11.
- [14] Evergreen, 2016. *Sustainability Report*. pp.59-60.
- [15] MOL, 2016. *Sustainability Report*. pp.16-20.
- [16] 한국선주협회, 2018. *배출가스 규제 동향과 해운사 대응 현황, 탑사이트 모듈 개발 과제 및 BOG 핸들링 개발 과제 공동 세미나*. pp.9-10.
- [17] MSC, 2017. *Experience of MSC for ship exhaust gas emission level moderation*. pp.14-17.

- [18] World Maritime News, [Online] Available at: [https:// world maritime -news.com/archives/256182/dht-holdings-to-equip-twelve-vlccs-with-scrubbers](https://worldmaritimeweb.com/archives/256182/dht-holdings-to-equip-twelve-vlccs-with-scrubbers). [Accessed Apr, 14th, 2018]
- [19] 해양수산부, 2018. LNG 추진선박 연관산업 육성을 위한 전문가 초청 세미나. pp.37-38.
- [20] MFame, 2018. [Online], Available at: http://mfame.guru/lng-versus-scrubbers/?utm_source=Subscriber&utm_campaign=c2df568ab1-EMAIL_CAMPAIGN_2018_08_08_08_11&utm_medium=email&utm_term=0_b54ceee1a2-c2df568ab1-98428309. [Accessed Aug, 10th, 2018]
- [21] SMM, 2017. *Trends in SMMart Shipping*. p.7.
- [22] DNV-GL, 2016. *Update in Alternative Maritime fuels*. p.8.
- [23] DNV GL, 2017. *LNG as a ship fuel*. p.10.
- [24] SEA/LNG, [Online] Available at: <https://sea-lng.org/bunker-navigator>. [Accessed Aug, 10th, 2018]
- [25] LNG World Shipping, 2017. [Online], Available at: http://www.lngworldshipping.com/news/view,the-worlds-lngfuelled-ships-on-order-2017_47089.htm. [Accessed Aug, 10th, 2018]
- [26] LNG World Shipping, 2017. [Online], Available at: http://www.lngworld-shipping.com/news/view,the-worlds-lngfuelled-fleet-in-2017_47076.htm. [Accessed Aug, 10th, 2018]
- [27] Wärtsilä, 2015. *Dual Fuel Engine Brochure*. pp.3-4.
- [28] WIN-GD, 2017. *Application of WIN-GD X-DF engines for LNG fueled vessels*. pp.4-13.
- [29] 조권희, 2015. 선박 유류 이론과 실무 II 연료유·윤활유편, 다솜출판사. pp.67-68.
- [30] MAN Energy Solutions, 2017. *ME-GI Control System Standard Operation Course Materials*. pp.4-5.
- [31] 온누리, 이장기, 2017. LNG 연료추진선박의 격자형 LNG 연료 탱크 적용에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교. p.17.
- [32] GTT, 2017. *Developing LNG Bunkering solutions, Natural gas for High Horsepower Summit 2017*. p.29.
- [33] 김기동, 조원준, 2017. LNG 병커링 현황과 발전방향 [Online] Available at: <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=76593>.

[Accessed Aug, 10th, 2018]

- [34] Shell, 2018. *Shell LNG Outlook 2018*. p.8.
- [35] 이강기, 정병건, 구자윤, 박성도, 온누리, 이다희, 2017. *고Mn강 LNG 연료 Tank의 항해 안전성 검증 확보방안 연구*, POSCO 2017 연구용역 보고서. pp.14-17.
- [36] DNV GL, 2018. *LNG as a ship fuel*. p.9.
- [37] LNG 추진선박 연관 산업 육성단, 2018. *제5차 민관 협의회 자료*. p.31.
- [38] WPCI, [Online] Available at: <http://www.environmentalshipindex.org/Public/Home>. [Accessed Aug, 10th, 2018]
- [39] Luo Xiaofeng, 2016. *LNG as marine fuel and bunkering technology & practice*, CIMAC. p.51.
- [40] 일신해운(주), 2017. *The World's First Commercial 50,000 DWT LNG Fueled Bulk Carrier*, Kormarine Conference 2017. pp.3-9.
- [41] Clarkson Research Services, Autumn 2017. *Shipping Review and Outlook*, London. p.37.
- [42] Lijiang Wei, Peng Geng, 2016. *A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance*, ScienceDirect, vol. 142, pp 264-278 February 2016.
- [43] Class NK, 2015. *Technical Information_ Minimum propulsion power requirements to maintain the manoeuvrability of ships in adverse conditions (EEDI related requirements)*. pp.1-2.
- [44] 김성국, 2005. [특집: LNG선박 추진용 디젤엔진] *LNG 선박 주기용 ME 및 ME-GI 디젤엔진*, 한국마린엔지니어링학회지, vol. 29(6), pp. 603-611.
- [45] René Sejer Laursen, 2016. *ME-GL/LGI and GI retrofit*, Diesel Course 2016 p.4.
- [46] NAPA, 2018. *ISGI Ship Performance Analysis*. pp.4-6.

감사의 글

논문을 마무리하면서 저희 석사시절을 생각해보니 그 어느 것도 저 혼자만의 힘으로 한 것이 없다는 것을 깨달았습니다. 처음에는 젊음의 패기로 시작하였으나, 모든 것이 새롭고 낯설었으며 그럴 때 마다 저에게 도움을 주시는 많은 분들이 있었기에 제가 지금 감사하게 학위논문을 마무리할 수 있었습니다.

이번 학위 논문 완성을 통해 석사학위 졸업까지 조언과 도움을 주신 주변 분들에게 감사의 말씀들 드립니다. 항상 사랑을 전하여 주시고 아낌없이 도와주신 지도교수님인 이강기 교수님께 감사를 드립니다. 비단 논문만이 아니라 여러 방면에서 제가 해야 할 것들과 방향들을 제시하여 주셔서 다방면에서 성숙할 수 있었습니다. 아울러 2년의 석사과정을 진행하며 저에게 따뜻한 아버지의 마음으로 학업을 지도하여 주시고 도와주신 조권희 교수님께 감사를 드립니다. 진심어린 조언과 사랑으로 제가 무사히 논문을 마무리 할 수 있었습니다. 또한 논문심사에 노고가 많으셨던 최재혁 교수님께 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

개인적으로 제가 석사과정 중에 많이 의지하고 따랐던 온누리 선배와 본 논문에 관하여 여러 부분에서 정보를 제공해 주신 많은 분들에게 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 그리고 항상 저의 뒤에서 저를 하염없이 도와주고 응원하여 주는 우리 어머니 윤성혜 여사님에게 감사하고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.