

IMO 배출계수 및 실선 운항 데이터 기반 LNG선 추진장치 성능에 관한 연구

Performance of Propulsion System for LNG Carrier Based on the IMO Emission Factor and Data from the Operating Ship

서강현* · 이재웅**†
Kang-Hyun Seo* and Jae-Ung Lee**†

(Received 25 January 2022, Revision received 24 February 2022, Accepted 25 February 2022)

Abstract : In the rapidly changing LNG market, securing stable energy has become very important due to the instability of the international situation with the continued rise in oil prices in 2013. Accordingly, South Korea is conducting stable LNG supply and demand through long-term LNG contract projects with the United States and Australia. In this paper, the performance of the propulsion system based on the data from the operating ship and the newly changed IMO emission factor was evaluated, and the results analyzed in the design stage were compared and verified. Fuel consumption based on the data from the operating ship of each propulsion increased by 230-240% between UST and FMDFE compared to the design stage while TLD FE showed fuel consumption with no significant difference in design and operating ships. Air pollutants CO₂, NO_x and SO_x were calculated by applying the IMO emission factor. In the case of CO₂, UST with the lowest fuel efficiency was the highest, and in the case of NO_x and SO_x, TLD FE, which consumes the most liquid fuel oil, was the highest. In the IMO, the NO_x emission factor was changed by engine type in 2020. This is an action according to the characteristics of the engine using LNG as fuel. At the time of design, the emission factor of each fuel type applied to analysis is proportional to the fuel consumption. So TLD FE shows the lowest emission when applying the fuel type factor. Therefore, the applying the factor reflecting the engine characteristics is judged to be reasonable for calculating the actual emission when calculating the NO_x emission of LNG carriers.

Key Words : Propulsion system, Data from operating ship, IMO emission factor, Air pollutants, LNG carriers

— 기 호 설 명 —

BOR : 기화율(Boil-Off Rate)

**† 이재웅(ORCID:https://orcid.org/0000-002-2839-0448) :
부교수, 한국해양대학교 기관시스템공학부
E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662
*서강현(ORCID:https://orcid.org/0000-002-6495-1820) :
대학원생, 한국해양대학교 해사IT공학과

**† Jae-Ung Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-002-2839-0448)
: Associate Professor, Division of Marine System Engineering,
Korea Maritime and Ocean University.
E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662
*Kang-Hyun Seo(ORCID:https://orcid.org/0000-002-6495-1820)
: Graduate student, Department of Marine Information
Technology, Korea Maritime and Ocean University.

CAPEX : 초기투자비용(Capital Expenditure)
 CBM : 입방 미터(Cubic Meter, m³)
 CST : 증기 터빈(Conventional Steam Turbine)
 EEDI, EEOI : 신조선 에너지효율설계지표(Energy Efficiency Design Index), 운항선 에너지효율지표(Energy Efficiency Operation Index)
 FBOG : 강제기화가스(Forced Boil-Off Gas)
 FGSS : LNG연료 공급시스템(Fuel Gas Supply System)
 FMDFE : 4행정 중속 이중연료엔진(Four-stroke Medium speed Dual Fuel Engine)
 GCU : 가스연소장치(Gas Combustion Unit)
 NBOG : 자연기화가스(Natural Boil-Off Gas)
 NCR : 연속상용출력(Normal Continuous Rating)
 OPEX : 운용비용(Operation Expenditure)
 TLD FE : 2행정 저속 이중연료엔진(Two-stroke Slow speed Dual Fuel Engine)
 UST : 초고압 증기 터빈(Ultra Steam Turbine)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

지난 2013년은 지속적인 유가 상승 속에 중동과 아프리카의 정치 불안, 일본 원전사태의 후유증으로 인해 세계 에너지 시장이 급변하는 시기였다. 이에 국내에서는 잠재성이 있는 유망 광구 확보를 통한 원천적 자원 확보와 동남아와 중동에 치우친 국내 천연가스 도입선의 다변화를 통해 저렴한 에너지를 안정적으로 공급하는 프로젝트로써 호주 GLNG(Gladstone LNG) 프로젝트(350만 톤)와 미국 Sabine Pass LNG 프로젝트(280만 톤)를 수행하였다. 두 프로젝트를 통한 안정적이고 경제성 있는 가스의 운송은 현재 운항 중인 국내 LNG 선대의 운영만으로는 부족하여 신규 선박의 발주를 추진하게 되었다.^{1,2)}

초기 프로젝트에서는 신규 물량의 운송을 위한 LNG선의 발주 척수 확정과 함께 화물창 크기, 화물창의 종류, 엔진 형태 등을 선정이 필요하였다. 이를 위해 설계적 관점에서 신규 발주 LNG선의 경제성과 친환경성 검토를 시행한 바 있다. 본 논문에서는 실선 운항 데이터와 새롭게 변경된 IMO

대기오염물질 배출계수를 기반으로 하여 상기 프로젝트를 위한 LNG선의 발주 시 분석한 데이터와의 비교 검토를 통해 추진장치의 성능을 실증하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 연구 내용

본 연구에서는 LNG선 추진장치의 성능 평가를 위해 신규 LNG 프로젝트의 연간 계약물량 달성을 위한 LNG 운반선 크기 및 항로의 특성을 검토하였다. 그리고 LNG선 추진장치 중 기존 스팀터빈시스템을 개선한 초고압 증기터빈인 UST, 전기추진방식의 중속디젤기관 FMDFE 및 저속디젤기관 TLD FE의 기술적인 특성을 조사 및 검토하였다. 또한 실선 데이터 및 IMO 배출계수를 적용한 추진장치의 경제성과 친환경성을 분석하여 설계 단계에서 분석된 특성과 비교 검토하였다. 하지만 설계단계의 세부적인 데이터는 관련 기관의 보안사항으로 각 부분 평가를 위한 산정된 결과값만을 취득하여 실선과 비교하였다.

2.2 연구 방법

2.2.1 신규 발주 LNG선 운항 Profile

미국 Sabine Pass LNG 프로젝트에 투입된 신규 발주 선박의 크기는 174,000 CBM으로 결정되었다. Table 1은 미국 Sabine pass 프로젝트를 위해 결정된 LNG 운반선의 기본적인 정보와 연간 계

Table 1 174,000 CBM LNG carrier general information

General Information	
LNG Tanker size	174,000 m ³
NCR, Laden	18.5 knot × 59.8 rpm
Distance	9987 NM
Shaft loss efficiency	98-99%
Gen' alternator loss efficiency	97%
BOR, Laden/Ballast	0.15%
Engine margin	20%
Voyages per year	7 times

Table 2 174,000 CBM Operation profile (Laden voyage)

Laden voyage	Speed (knot)	Distance (NM)	Time (Hrs)	UST		FMDFE			TLDFE			% (time/yr)
				Engine output (kW)	Fuel gas rate (kg/hr)	Engine output (kW)	Fuel gas rate (kg/hr)	Pilot oil rate (kg/hr)	Engine output (kW)	Fuel gas rate (kg/hr)	Pilot oil rate (kg/hr)	
Manoeuvring	12	60	5	6500	2425	16640	2047	80.3	4370	600	50.0	0.4%
Normal sea going	18.5	9807	530.1	23670	5644	25450	5351	35.0	16087	2180	170.0	42.3%
Panama canal	5	60	12	5300	2200	3850	1500	50.0	700	100	10.0	1.0%
Manoeuvring	12	60	5	6500	2425	16640	2047	80.3	4370	600	50.0	0.4%
Waiting			12	5300	2200	3850	1500	50.0	1800	250	10.0	1.0%
Unloading time			12	6500	2425	16640	2047	80.3	4370	600	50.0	1.0%

Table 3 174,000 CBM Operation profile (Ballast voyage)

Ballast voyage	Speed (knot)	Distance (NM)	Time (Hrs)	UST		FMDFE			TLDFE			% (time/yr)
				Engine output (kW)	Fuel gas rate (t/hr)	Engine output (kW)	Fuel gas rate (t/hr)	Pilot oil rate (t/hr)	Engine output (kW)	Fuel gas rate (t/hr)	Pilot oil rate (t/hr)	
Rest in port			79.2	5300	2200	8000	1913	114.0	1800	250	10.0	6.3%
Bunkering			20	5300	2200	8000	1913	114.0	1800	250	10.0	1.5%
Manoeuvring	12	60	5	6000	2350	16000	2095	75.0	4300	590	50.0	0.4%
Normal sea going	18.5	9807	530.1	22000	5303	24470	4952	35.0	15938	2150	170.0	42.3%
Panama canal	5	60	12	5300	2200	3700	1500	50.0	700	100	10.0	1.0%
Manoeuvring	12	60	5	6000	2348	16000	2095	75.0	4300	590	50.0	0.4%
Waiting			12	5300	2200	3700	1500	50.0	1800	250	10.0	1.0%
Loading time			12	6000	2348	8000	1913	114.0	2500	400	30.0	1.0%
Total												100.0%

약된 물량을 운송하기 위해 필요한 항차 수를 나타내고 있다. 운항 속력의 경우, 최근 발주된 선박들이 대부분 19.5 knot 이상을 가능속력으로 표시하고 있으나 기상 변화와 연료 절감효과 및 안정적인 운항일정 확보를 위해 18.5 knot의 속력을 NCR로 고려하여 연간 항차 수를 결정하였다. 또한 2016년 새롭게 확장된 파나마 운하 통항을 고려하였다.

Table 2와 3은 인천과 Sabine Pass 항로 간의 운항 Profile에 따른 실선 기관출력과 시간당 연료소비량을 나타낸 것이며, 이를 기반으로 연간 및 20년간 누적 연료사용량과 대기오염물질 배출량을

산정하였다.

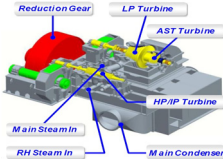
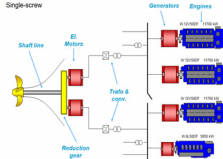
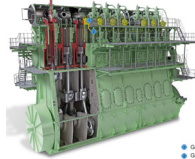
2.2.2. LNG선 추진장치별 특성

본 절에서는 신규 발주된 LNG선 추진장치 중 기존 스틱터빈 시스템인 CST을 개선한 초고압 증기터빈인 UST, 전기추진방식의 4행정 디젤기관인 FMDFE 및 저속 2행정 디젤기관인 TLDFE의 기술적 특성 및 추진장치의 성능 평가를 위한 경제성, 친환경성 및 안정성 요소에 대한 기본적 사항을 검토하였다.

1) 초고압 증기 터빈(UST)

UST는 고압터빈, 중압터빈 및 저압터빈으로 추

Table 4 Characteristics by propulsion type

	UST	FMDFE	TLDFE
Figuration			
Advantage	<ul style="list-style-type: none"> - High reliability and stability - Low maintenance cost - Long endurance span - Bundle inspection possible at drydock due to long maintenance period - High fuel oil flexibility 	<ul style="list-style-type: none"> - High reliability and stability - Low LNG injection pressure (6 bar) - High thermal efficiency (46%) - Low engine room volume ratio (Effect of increasing cargo tank capacity) - Relatively easy to operate - High familiarization for crew - High flexibility for fuel oil 	<ul style="list-style-type: none"> - High thermal efficiency(50%) - Low engine room volume ratio (Effect of increasing cargo tank capacity) - Relatively easy to operate - High familiarization for crew - High flexibility for fuel oil
Disadvan-tage	<ul style="list-style-type: none"> - Low thermal efficiency(33%) - High engine room volume ratio - Difficulty in self-maintenance - High familiarization for crew 	<ul style="list-style-type: none"> - High CAPEX - High maintenance cost - Low propulsion efficiency - Need to repair regularly 	<ul style="list-style-type: none"> - High LNG injection pressure (300 bar): If leaking, high risk compared to other engines - Need to repair regularly

진장치로서, 과열증기의 초온 및 초압을 상승시켜 열용량을 극대화하고, 기존 재생사이클에 재열기와 중압터빈을 새롭게 채택하여 CST 대비 전체열 효율을 약 15% 개선시켰다.³⁾

2) 4행정 중속 이중연료 엔진(FMDFE)

FMDFE은 이중연료(dual fuel) 엔진을 구동하여 전력을 생산하고 생산된 전력으로 전기모터를 구동하여 선박에 추진력을 제공하며, 이중화 추진시스템을 만족할 수 있는 추진 형태로서, 두 가지 연료를 사용한다는 의미에서 Dual Fuel Engine(이중연료엔진)이라고 불리며 전기추진방식(electric)의 추진방식을 채택하고 있다.^{4,5)}

3) 2행정 저속 이중연료 엔진(TLDFE)

TLDFE은 전자제어엔진(electronic control engine)에 Pilot-oil를 사용하여 FGSS를 통해 압축된 고압(300 bar)의 천연가스를 연료로 사용할 수 있도록 한 추진장치이다. TLDFE은 혼합기를 사용하지 않고 고압의 가스를 실린더 내로 직접 분사하는 방식이므로 UST와 FMDFE 타입 대비 엔진의 열효율이 높다.^{6,7)}

본 논문의 연구 수행을 위해 선정된 대상 추진장치별 특성을 엔진제조사 및 여러 연구 내용을 참고하여 Table 4와 같이 정리하였다.

2.2.3 추진장치 성능 평가 고려사항

1) 경제성

화물창에서 자연 기화되는 가스를 처리하는 가장 쉬운 방법은 BOG를 연료로 사용하는 것이다.

BOG는 그간 단순히 보일러의 연료로 스팀터빈을 구동하는데 사용되었으나 이중 연료 디젤엔진이 개발된 이후에는 BOG를 내연기관의 실린더 내에서 연료로 사용할 수 있게 되어 에너지 효율을 높일 수 있게 되었다. 항해 중 발생하는 NBOG 양은 외부 온도에 따라 달라지므로 추진에 필요한 에너지가 부족할 경우 HFO나 MGO를 추가로 사용하여야 한다. 또한 BOG가 추진설비에서 필요한 양보다 많을 경우를 대비해 잉여 가스를 연소장치로 소비할 수 있는 GCU 또는 다시 화물창으로 유입시킬 수 있는 재액화설비를 설치해야 하는 부분이 있다.^{8,9)}

2) 친환경성

국제해사기구(IMO)는 해양 대기환경 보전, 오염물질 저감, 온실가스 감축을 위하여 CO₂, NOx 및 SOx에 대한 배출량 기준을 점차적으로 강화하고 있는 상황이다. CO₂는 2015년 기준 대비 10% 감소하는 것을 시작으로 2050년까지 최대 70%까지 저감해야 한다. NOx는 2000년도에 시행되었던 Tier I 보다 약 20% 강화된 Tier II 이후 2016년에는 Tier I 대비 약 80%로 더욱 강화된 NOx Tier III 규정이 발효되어 시행 중이다. 또한 SOx 저감을 위해 2012년 황합유량 3.5% 이하의 연료유를 사용하도록 했고, 동년에 ECA지역은 0.1% 이하로 규제하였다. 2020년에는 전 해역 0.5% 이하의 연료유를 사용하도록 하였다. 이러한 규제 강화에 따라 추진장치의 성능 평가를 위해 친환경성 요소에 대한 고려가 필요하게 되었다.¹⁰⁾

3. 결과 및 고찰

3.1 설계단계 추진장치 성능 평가

3.1.1 경제성 평가

초기투자비용 CAPEX는 관련 기관들 간의 이해 관계가 복잡하게 얽혀 있으며, 보안사항으로 관리되고 있고, 또한 Project의 장비 가격에 대한 정보를 취득하는 것은 어려운 부분이다. 이러한 이유로 추진장치별로 상대적인 경향과 경험식을 통한 Hunt의 선박건조비용 추정방법을 통해 비교하였다.¹¹⁾

Table 5는 CAPEX 산정을 위한 주요 구성품 및 CAPEX 비율이다. UST의 초기투자비용을 100%로 보았을 때, FMDFE는 105%이고, TLDFE는 95%로 분석되어 TLDFE가 타 추진장치보다 상대적으로 낮게 나타났다. FMDFE는 전기추진방식으로 인한 다수의 발전기와 이중화 시스템을 탑재함에 따라 상대적으로 CAPEX가 높게 나타난 것으로 판단된다.

운영비용 OPEX는 유지보수비용과 연료비용을 합산하여 산정하였다. Table 6은 추진장치별 연간 유지보수비용을 분석한 결과이다. 이는 입거수리비용을 제외한 운항 중 발생할 수 있는 비용만을 산정한 결과이며, 이를 실선 OPEX 산정에도 공통으로 적용하였다.

Table 5 Major items for CAPEX calculation and ratio

UST	FMDFE	TLDFE
Main boiler	FMDFE (redundancy)	Main engine
Main turbine	Electric system	DF Gen. sets (redundancy)
Feed water pump & turbine	Fuel gas supply system	Electric system
Generator turbine	Reduction gear box	Fuel gas supply system
Diesel generator(em'cy)	-	
100%	105%	95%

Table 6 Maintenance cost based on design data

	2-stroke engine (kW)	USD (kW/yr)	4-stroke engine (kW)	USD (kW/yr)	Total (USD/yr)
UST	-	-	-	-	160,000
FMDFE	-	-	28,000 (주기)	× 35	1,330,000
			10,000 (발전기)		
TLDFE	30,000	× 11	11,112	× 25	607,800

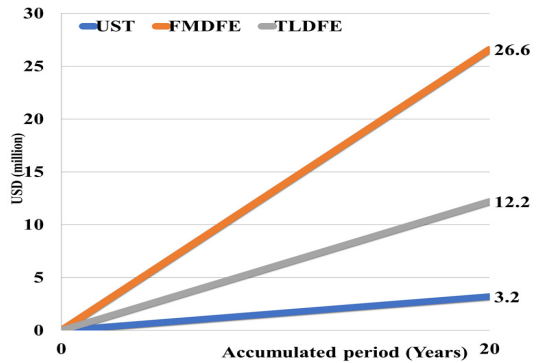


Fig. 1 20 years maintenance cost based on design data

- ① UST의 연간 유지보수비용은 160,000 USD이다.
 - ② FMDFE는 주기관용과 발전기용을 합산하여 연간 유지보수비용은 1,330,000 USD가 된다.
 - ③ TLDFE는 주기관과 DF 발전기를 합산하면 연간 유지보수비용은 607,800 USD이다.
- UST는 주기관 수리가 대부분 입거수리기간에

시행되고 운항 중에는 고비용의 추가적인 소모품이 필요치 않아서 디젤기관인 FMDFE와 TLDFE 보다는 유지보수비용면에서 가장 유리한 것으로 분석되었다. FMDFE는 TLDFE에 비해 다수의 발전기 엔진 Cylinder 정비 시 소요되는 기부속의 종류가 많고 상대적으로 단가가 높아서 유지보수비용이 가장 높았다. 이러한 유지보수비용 Data를 근거로 향후 20년간의 총 비용을 추산한 결과는 Fig. 1에서 나타낸 것과 같다. UST와 FMDFE 간의 유지보수비용 격차는 연간 약 1.2 Million USD(M\$)에서 20년간 누적비용 차이가 23.4 Million USD로 커지는 것으로 나타났다.

총 운용비용은 연료사용량에 따른 연료비용과 유지보수비용을 합산하여 연간 및 20년간의 누적비용을 비교하였다. Table 7은 가스모드 시 추진장치별 연간 연료사용량을 분석한 결과이다. UST가 연료사용량이 가장 많은 것으로 나타났는데, 이는 엔진 열효율이 타 엔진에 비해 낮기 때문이라고 판단된다.

Fig. 2는 Table 7을 토대로 추진장치별 연간 연료비용을 계산한 결과를 나타낸다. UST는 연간 10.4 M\$, FMDFE는 10.0 M\$, TLDFE는 연간 8.8 M\$의 연료비용이 발생하는 것으로 분석되었다. UST의 BOG(NBOG+FBOG) 사용량이 가장 많은 이유는 디젤엔진에 비해 효율이 낮기 때문인데 그것이 연료비용이 가장 높은 이유라 판단된다.

Fig. 3은 상기 사항을 토대로 향후 20년간 추진장치별로 소요되는 유지보수비용과 연료비용을 합산하여 산정한 총 운용비용을 나타낸다. FMDFE가 25.6 M\$, UST가 211.8 M\$, TLDFE는 188.2 M\$의 비용이 필요한 것으로 분석되었다.

초기투자비용, 유지보수비용과 연료비용을 고려한 총 운용비용 기준으로 분석한 설계단계에서의 경제성 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 초기투자비용은 UST를 100% 기준으로 했을 경우 상대적으로 FMDFE가 5% 가량 높았고 TLDFE는 5% 가량 낮은 것으로 확인되었다.

둘째, 연간 유지보수비용은 UST 0.16 M\$, TLDFE 0.6 M\$, FMDFE 1.3 M\$ 순으로 분석되었다.

Table 7 Fuel Consumption based on design data

	UST (Gas mode)	FMDFE (Gas mode)	TLDFE (Gas mode)	Remark
MGO (ton/yr)	0	190.5	47.6	Pilot-oil (FMDFE/ TLDFE)
HFO (ton/yr)	0	0	645.2	Pilot-oil (TLDFE)
BOG (ton/yr)	12116.3	17045.5	14597.9	-
FBOG (ton/yr)	6113.8	0	0	-
Total (ton/yr)	18230.1	17236	15290.7	-

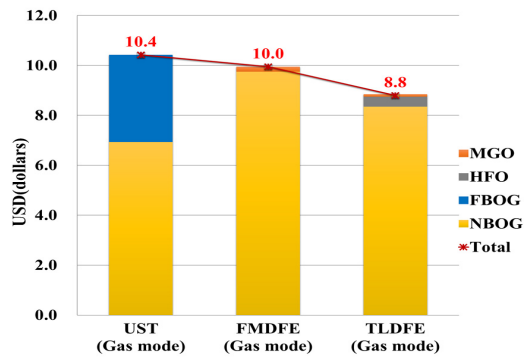


Fig. 2 Yearly fuel cost based on design data

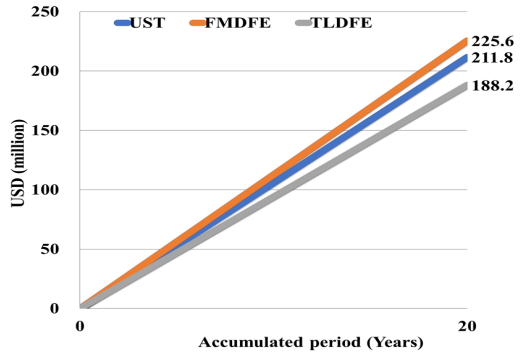


Fig. 3 20years OPEX based on design data

셋째, 연간 연료비용은 TLDFE 8.8 M\$, FMDFE 10.0 M\$, UST 10.4 M\$인 것으로 계산되었다.

넷째, 20년간 총 운용비용은 TLDFE 188.2 M\$, UST 211.8 M\$, FMDFE 225.6 M\$인 것으로 계산되었다.

3.1.2 친환경성 평가

국제적으로 대기오염으로부터 환경을 보호하기 위한 일환으로써 배기가스에 대한 각종 규제가 진술한 성능 평가 고려사항에서와 같이 점차 강화되는 추세이다. 따라서 엔진 타입별 친환경성을 검토하여 규제 대응에 필요한 사항을 식별하였다.

Fig. 4는 가스모드에서의 추진장치별 CO₂, NO_x 및 SO_x 배출 수준을 상대적으로 나타낸 것이다. CO₂ 발생량은 UST를 100%, NO_x 및 SO_x 발생량은 TLDFE를 100%를 기준으로 상대 비교한 결과이다.

첫째, 각 추진장치별 CO₂ 발생량은 UST 100% 대비, TLDFE는 82%이고 FMDFE는 77% 수준으로 분석되었는데, 이는 CO₂의 배출성능을 표시하는 지표로 신조선 에너지효율설계지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)와 운항선 에너지효율지표(EEOI, Energy Efficiency Operational Indicator)에 공통으로 적용된 요소인 연료사용량이 CO₂ 발생량과 비례관계를 보여 주는 결과라 판단된다.

둘째, NO_x 발생량은 TLDFE 100% 대비, FMDFE는 18%, UST는 6%로 분석되었는데, 이는 디젤사이클 엔진의 특성상 높은 압축비에 의한 연소온도 상승에 기인한 결과라 볼 수 있다. NO_x의 경우, 2016년부터 발효된 ‘IMO-Tier III’ 요건을 만족할 수 있어야 한다. 이를 위해 배기가스후처리 장치로 질소산화물 저감장치(EGR, Exhaust Gas Recirculation) 또는 선택적환원촉매장치(SCR, Selective Catalytic Reduction)를 추가로 설치해야 한다.¹²⁾

셋째, SO_x 발생량은 TLDFE 100% 대비, FMDFE이 48%로 분석되었다. 통상 SO_x 발생량은 액체 연료유 사용량에 비례하므로 상대적으로 사용량이 많은 TLDFE에서 발생량이 높게 나타난 것으로 볼 수 있다. SO_x 배출량은 저유황연료유를 사용하거나 배기가스 탈황기술을 사용하여 억제할 수 있다. 질소산화물과 황산화물 감소를 위한 기술들이 선박에 탑재될 경우, 초기투자비용 및 운용비용은 증가하게 되지만, IMO 환경규제에 따른 각 조건을 만족할 수 있게 된다.

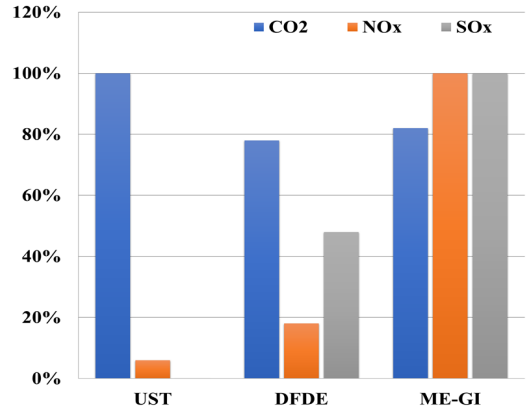


Fig. 4 Comparison of air pollutants based on design data

3.2 실선 운항데이터 기반 추진장치 성능 평가

3.2.1 경제성 평가

실선 운항데이터 기반 경제성 평가는 연료사용량, 연간연료비용, 20년간 누적 운용비용 순으로 수행되었다. 운용비용은 설계단계에서의 유지보수 비용과 실선 데이터 기반 연료비용을 합산하여 산정하였다. 연료비용 산정을 통해 실선 운항데이터 기반 경제성 평가를 수행하는데 Table 8과 같이 2021년 9월 기준 유가정보를 반영하였다.

Table 9는 설계단계와의 비교를 위한 실선 데이터 기반이 되는 선박들의 제원을 나타낸 것이다.

Table 10은 실선 데이터를 기반한 추진장치별 연료사용량 결과이다. 설계단계 분석 결과와 비교한 경우, UST와 FMDFE는 230~240% 증가하였다. 이는 다음과 같은 특성에 기인한 것이라 판단된다. 첫째, 엔진 특성상 발전기의 연료사용량이 포함된 데이터가 사용되었다. 둘째, 엔진에서 최종 프로펠러까지의 동력전달체계에서 감속기어, Propulsion motor, Frequency converter 등에 의한 축손실발생하는 것과 다르게, TLDFE는 주기관만의 연료사용량과 엔진과 직접적으로 연결된 프로펠러에 의한 손실이 거의 없기에 상대적으로 낮은 출력이 요구되어진다. 이에 설계단계와 큰 차이가 없는 약 15% 가량만 증가한 것으로 판단된다.

Table 8 Fuel oil price information (2021.09)

Fuel properties	Density ⁱⁱⁱ⁾ (kg/m ³)	LCV ⁱⁱⁱ⁾ (KJ/kg)	Price (US/ton)
NBOG ⁱ⁾	470	50000	211
FBOG ⁱ⁾	470	47500	211
HFO ⁱⁱ⁾		40400	527
MGO ⁱⁱ⁾		42700	637

- i) Unit conversion basis : 1 toe=52 mmBtu
- i) NBOG/FBOG price : 4 \$/mmBtu_Average 6month
(Source: Henry Hub Natural Gas Price)
- ii) HFO/MGO price : Average 6month
(Source : Clarkson)
- ii) HFO : 0.5% Sulphur
- iii) by Korea Gas Corporation

Table 9 Specification from operating ships

	UST	FMDFE	TLDFE
Tank Type	Moss	Membrane	Membrane
Tank Capacity	155,000 CBM	155,000 CBM	174,000 CBM
LOA	288	288	295
BOR	0.15	0.15	0.15
MCR	26,000 kW, 74 rpm	28,000 kW, 90 rpm	24,100 kW, 74 rpm
NCR	23,400 kW, 71.4 rpm	25,200 kW, 82 rpm	21,690 kW, 71.4 rpm
Design Speed	19.5 knot	21 knot	21 knot
Propeller Diameter	9.4 m	9.6 m	8.3 m
Propeller Pitch(0.7R)	8.150 mm	7.215 mm	8.853 mm
Propeller Blade	6	5	4
BuiltYear	2016	2008	2017

Fig. 5는 Table 10을 토대로 실선 추진장치별 연간 연료비용을 산정한 결과이다. UST는 연간 9.2 M\$, FMDFE는 8.9 M\$, TLDFE은 4.2 M\$의 연료 비용이 발생하는 것으로 분석되었다. UST가 연료 비용이 가장 높게 나타난 이유는 다음과 같은 것으로 판단된다. 먼저 UST는 디젤엔진에 비해

Table 10 Fuel Consumption based on operating ship's data

	UST (Gas mode)	FMDFE (Gas mode)	TLDFE (Gas mode)	Remark
MGO (ton/yr)	0	383.2	0	Pilot-oil (FMDFE)
HFO (ton/yr)	0	0	1287.2	Pilot-oil (TLDFE)
BOG (ton/yr)	37320.1	36772.6	16480.8	-
FBOG (ton/yr)	6339.4	3947.6	0	-
Total (ton/yr)	43659.5	41103.4	17768.0	-

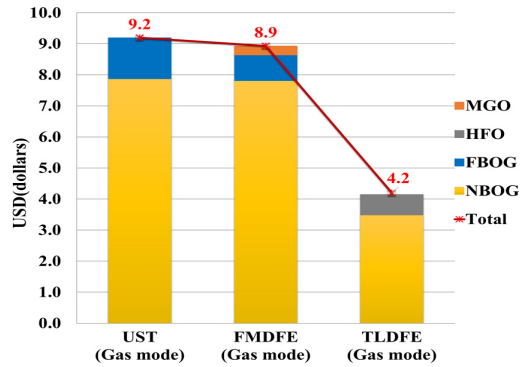


Fig. 5 Yearly fuel cost based on operating ship's data

엔진의 열효율이 낮고 화물창 압력을 제어하기 위해 추진장치에 필요한 BOG 외에도 추가 발생된 BOG를 보일러 또는 GCU에서 연소를 통해 버려지게 된다.

반면에 TLDFE는 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 부분재액화 시설을 통해 화물창으로 액화된 LNG를 재유입시키므로 화물창 압력을 제어하기에 추진장치를 위한 BOG 외에 버려지는 BOG가 거의 발생하지 않기에 연료사용량이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

향후 20년간 실선 데이터 기반 추진장치별 소요되는 운용비용(OPEX)을 산정하니 Fig. 7과 같이 TLDFE는 96.2 M\$, UST는 187.2 M\$, FMDFE는 206.6 M\$ 순으로 그 결과가 나타났다.

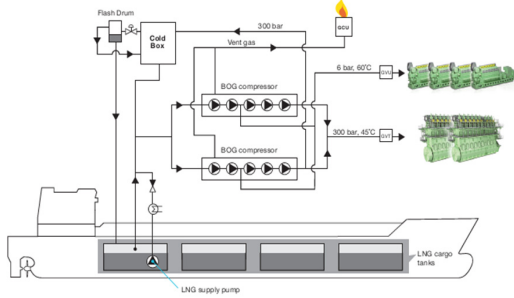


Fig. 6 Partial re-liquefaction plant & GCU plant flow

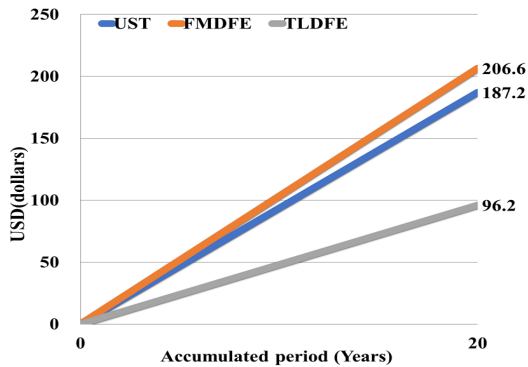


Fig. 7 20 years OPEX based on operating ship's data

실선 데이터를 통해 나타난 결과를 통한 경제성 평가결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 초기투자비용과 연간 유지보수비용은 설계단계에서와 동일한 비용을 적용하였다.

둘째, 연간 연료비용은 TLD FE 4.2 M\$, FMDFE 8.9 M\$, UST 9.2 M\$ 순으로 결과가 나타났다.

셋째, 20년간 총 운용비용은 TLD FE 96.2 M\$, UST 187.2 M\$, FMDFE 206.6 M\$ 순으로 결과가 나타났다. 이는 LNG 프로젝트 계약기간인 20년 동안 TLD FE가 FMDFE보다 약 47% 낮은 운용비용으로 운항될 수 있음을 보여주는 것이다.

3.2.2 친환경성 평가

실선에서의 대기오염물질 발생량은 IMO GHG gas study 2020에 새롭게 적용된 배출계수를 반영하였다. 또한 Table 2와 3에서 나타난 운항 Profile

Table 11 Emission factors for fuel type (g pollutant/g fuel)

	HFO	MGO	LNG
CO ₂	3.114	3.206	2.75
SO _x	0.01158	0.00264	0.00002

Table 12 Emission factors for engine type (g NOx/kWh)

	UST	FMEFE	TLD FE
NO _x	1.3	1.3	3.4

상의 연료사용량과 기관출력을 기반으로 CO₂와 SO_x 발생량은 Table 11에서 나타난 연료기반 배출계수를 식 (1)과 같이 연료사용량과의 곱으로 산정하였고, NO_x 발생량은 LNG를 연료로 사용하는 이중연료 엔진을 고려한 Table 12에서의 출력당 배출량을 나타내는 에너지기반 배출계수와 엔진 유형에 따른 출력과의 곱으로 식 (2)와 같이 산정하였다.¹³⁾

$$EM_i = FC_i \times EF_f \quad (1)$$

$$EM = FC_i \times EF_f \times (D/V)$$

EM_i : The hourly emission (g pollutant/hr)
 EM : Total emission
 FC_i : The hourly fuel consumption (g fuel)
 EF_f : Fuel emission factor (g pollutant/g fuel)
 D : Distance (NM)
 V : Ship's speed (knot)

$$EM_i = EF_e \times W_i \quad (2)$$

$$EM = EF_e \times W_i \times (D/V)$$

EM_i : The hourly emission (g pollutant/hr)
 EM : Total emission
 EF_e : Energy emission factor (g pollutant/kWh)
 W_i : Engine's power output (kW)
 D : Distance (NM)
 V : Ship's speed (knot)

실선 데이터를 기반한 연료사용량과 엔진출력을 토대로 가스모드에서 추진장치별 CO₂, NO_x 및 SO_x 배출 수준을 Fig. 8과 같이 나타난 것이다. 비교 기준은 설계단계의 기준과 동일하다.

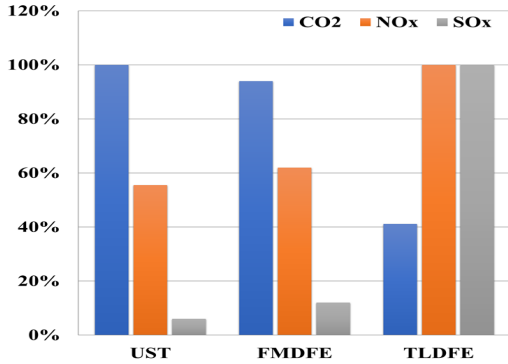


Fig. 8 Comparison of air pollutants based on operating ship

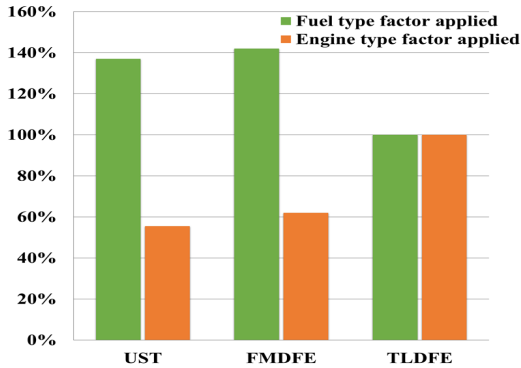


Fig. 9 NOx emission comparison by fuel type and engine type for operating ship

CO₂ 발생량의 경우, UST 100% 대비, FMDFE는 94%, TLDFE는 41% 수준으로 나타났다. CO₂ 발생량은 연료사용량과 비례한다는 것이 확인되었다. TLDFE를 제외한 UST와 FMDFE는 설계단계와 동일하게 많은 양의 CO₂를 배출하는 결과를 나타냈고, TLDFE는 82%에서 41%로 상대적인 감소를 나타냈다.

NO_x 발생량의 경우, TLDFE 100% 대비, FMDFE는 62%, UST는 56%로 나타났다. TLDFE는 설계 및 실선 단계에서 동일하게 가장 많은 양이 발생했는데, 이는 2행정 디젤사이클 특성에 기인한 것이라 판단된다. 한편, UST와 FMDFE는 설계단계에서 TLDFE 대비 20% 이하 수준이었던 것에 비해 상당한 양이 증가한 것으로 나타났다. 이는 설계단계 대비 증가한 연료사용량에 따른 결과라고 판단된다.

실선에서는 NO_x 배출량 산정을 위해 LNG를 연료로 하는 이중연료 엔진의 특성을 감안한 에너지 기반 배출계수가 적용되었다. 이런 배출계수 변경에 의한 NO_x 발생량 차이를 확인하기 위해 엔진유형과 연료유형에 따른 계수를 적용하여 Fig. 9와 같은 결과를 산출하였다. 연료유형 계수를 적용한 경우, 연료사용량이 가장 적은 TLDFE가 가장 낮게 나타났다. 이는 LNG를 연료로 사용할 경우, 2행정 사이클 저속엔진에서 고압으로 압축된 LNG에 의한 NO_x 발생량이 증가하는 특성을 고려하지 않은 결과라고 판단된다. 따라서 NO_x 배출량 산정을 위해 엔진유형에 따른 계수를 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

SO_x 발생량의 경우, TLDFE 100% 대비 FMDFE는 12%, UST는 6%로 나타났다. 각 추진장치별 상대적인 비교 결과이지만, FMDFE는 설계단계에서보다 상당히 감소한 결과를 나타내었다. SO_x는 액체 연료유의 사용량에 비례함을 나타낸 결과이다.

4. 결 론

실선에서 취득한 운항데이터를 기반으로 LNG 운반선의 추진장치별 성능 평가를 수행하였고, 이를 설계단계 분석 결과와 비교 검토하여 확인된 결론은 다음과 같다.

1) 연료사용량은 설계단계와 실선에서 가장 두드러진 차이점을 나타내는 부분이었다. 특히, UST와 FMDFE는 실선에서 설계단계보다 약 230~240% 증가하였다. 반면, TLDFE는 설계단계와 실선에서 연료사용량 차이가 크지 않음을 확인하였다. 연료사용량의 차이는 경제성 평가 항목중 OPEX에서 높은 엔진 열효율을 가진 TLDFE가 가장 유리한 엔진의 형태임을 나타낸 것이라 판단된다.

2) 각 오염물질별 배출계수가 대기오염물질 발생량 산정을 위해서 적용되었다. CO₂ 발생량은 연료사용량이 가장 많은 UST가, NO_x와 SO_x는 액체 연료사용량이 가장 많은 TLDFE의 발생량이 가장 높은 것으로 확인되었다. NO_x 발생량 산정의 경우, 설계단계와 동일한 연료유형에 따른 배출계수를 적용하게 되면 연료사용량과 비례하는 결과를

나타내었는데, 실제적인 NOx 발생량 산정을 위해서는 IMO의 GHG gas study 2020에 새롭게 반영된 추진장치 형태에 따른 출력당 발생량을 나타내는 에너지 기반 배출계수를 적용하는 것이 LNG 연료 및 각 엔진의 특성을 반영한 합리적인 것이라 판단된다.

3) 본 연구를 수행하는 가운데 설계 단계에서의 평가는 실선의 연료사용량 데이터에 포함된 여러 환경적인 요인들이 배제된 결과이기에 차이가 발생하는 것으로 판단되었다. 또한 선내 전력을 담당하는 발전기 출력에 따른 연료사용량의 명확한 분리와 정기입거수리 비용이 포함된 유지보수비용의 산정이 필요함을 확인하였다.

사 사

본 논문은 2021년도 한국동력기계공학회 추계 학술대회에 발표된 논문을 개선한 것입니다.

본 논문은 2021년도 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원 연구비 지원으로 수행된 ‘자율운항 선박 기술개발사업(20200615)’의 연구결과이며, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2021R1F1A1047115) 이에 감사드립니다.

Author contributions

K. H. Seo; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Visualization, Resources, Writing-original draft. J. W. Lee; Funding acquisition, Project administration, Supervision, Validation, Writing-review & editing.

References

1. W. H. Han, 2013, "The future of the international LNG market", Quarterly Review of Center for Gas Economics & Management, Vol. 12, No. 3, pp. 1-14.(in Korean)
2. K. S. Hwang, 2013, "Natural gas futures market and domestic LNG import price stabilization plant", Quarterly Review of Center for Gas Economics & Management, Vol. 12, No. 4, pp. 56-66.(in Korean)
3. Mitsubishi heavy industries, LTD, <https://www.mhi.com> (Lasted accessed by: 2022.01.14.).
4. J. G. Nam and J. W. Kim, 2005, "The Introduction of Wärtsilä DF50 Engine for LNG Carrier", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 612-617.
5. Wärtsilä, 2008, "Technical review and development 50DF".
6. S. K. Kim, 2005, "The Introduction of MAN B&W M/E and ME-GI Engine for LNG Carrier", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 603-611.
7. Man Energy Solutions, 2020, "LNGC-optimised designs of ME-GI engines and fuel gas supply systems".
8. H. K. Chung, 2005, "Propulsion System for LNG Carrier", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 25-32.
9. K. S. Lee and H. K. Jang, 2005, "Introduction of LNG Carrier", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 17-24.
10. J. U. Lee, 2020, "Investigation on Environmental Impact of Marine LNG Propulsion Systems through a Life Cycle Assessment", Journal of Power System Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 75-81. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.3.075>)
11. J. E. Kim, 2006, "A study for RFR decision on Ship Economic Evaluation", Master, Pusan National University.
12. I. A. Fernández, M. R. Gómez, J. R. Gómez, and Á. B. Insua, 2017, "Review of propulsion systems on LNG carriers", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 67, pp. 1395-1411. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.095>)
13. IMO, 2021, Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020.