

기술보고

LPG 추진 VLGC ME-LGIP 엔진의 연료공급 시스템에 대한 고찰

한상호, 김현석, 한범우, 이동진(현대중공업)

1. 서론

선박의 배출 가스에 대한 IMO의 환경 규제가 강화되면서 전통적인 석유 연료에서 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas) 등 친환경 연료 사용이 요구되고 있다. 액화석유가스(LPG, Liquefied Petroleum Gas)는 환경적 측면에서 기존의 석유 연료에 비해 강점을 가지며, 액화 온도가 LNG 보다 높아 저장 및 취급이 용이하며 이미 잘 갖춰진 LPG 수출/수입 설비 및 이동식 육상 및 해상 LPG 설비를 선박 병커링에 이용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 상대적으로 비싼 LPG 가격, 그리고 효율적인 상선용 LPG DF 엔진의 신뢰성이 검증되지 않았다는 점에서 적용에 어려움이 있었다.

LPG는 석유 정제과정의 부산물로 전통적으로 중동의 산유국발 수출 비중이 컸기에 가격 또한 석유와 연동되어 등락의 폭이 심했다. 그러나 미국 셰일 가스전의 개발이 본격화되면서 미국 내 천연가스 가격이 폭락하면서, 상류부분 사업자들이 상대적으로 가치가 높은 NGLs(NGL: Ethane, Propane, Butane & etc.) 셰일층 개발에 집중함으로써 미국산 LPG 생산량이 크게 증가함에 따라 LPG 가격이 하락 안정화 되는 원인이 되었다.(Seo, 2017)

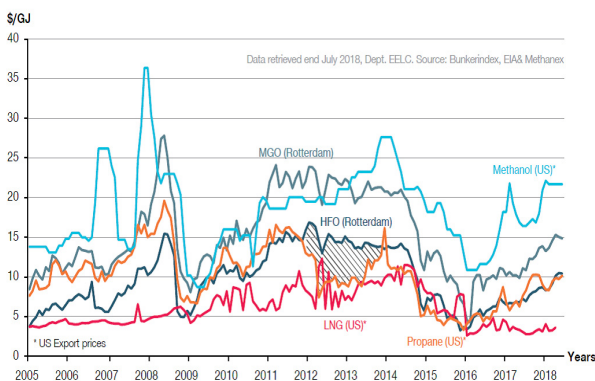


Fig. 1 Fuel price fluctuation for gaseous fuels and conventional fuel

현재까지 개발된 대형 선박용 LPG 엔진은 GE 사의 COGES (COmbined Gas turbine Electric and Steam)과

MAN-ES사의 ME-LGIP(Liquid Gas Injection LPG) 방식이 있다. 이중 GE사의 COGES는 초기 투자비가 크고 발생 전력을 이용하여 추진기를 작동시키는 방식이라 효율이 떨어진다는 단점이 있어 상선에서 사용하기에 효과적이지 않았다. 그러나 최근 MAN-ES사의 ME-LGIP의 육상 시험이 성공적으로 완료되면서 LPG를 화물로 하는 LPGC를 시작으로 상선에서 실제 적용이 활발히 진행되고 있다. (Comelli, Bonnalumi, Hijamas, Lori and Callegher, 2018)

Table 1 Comparisons for COGES and ME-LGIP

	Gas Turbine	ME-LGIP
Model	LM2500	-
Fuel type	LPG	LPG
Duel fuel capability	Yes	Yes
Pilot oil	-	MDO/HFO/LFO
Supply pressure (bar)	~ 40	~ 50
Injection pressure (bar)	30	500 ~ 600
Application fields	Naval and Cruiseships	LPGC and merchant ships

본 기술 보고에서는 MAN-ES사의 ME-LGIP 엔진을 위한 LPG 연료 특징 및 LPG를 위한 연료 공급 시스템(LFSS, Low-flashpoint Fuel Supply System)의 기술적 특징에 대하여 고찰하고자 한다.

2. LPG 연료의 특성

LPG는 원유 정제 과정에서 생기는 가스로 프로판(C₃H₈)과 부탄(C₄H₁₀)이 주 성분을 이룬다. ME-LGIP 엔진은 프로판, 부탄, 둘의 혼합물을 연료로 사용 가능하며 12%의 에탄(C₂H₆) 성분까지 혼합을 허용한다. LNG가 극저온 상태에서만 액화가 가능한 반면, LPG는 상온에서도 일정 압력을 가하면 액화가 되므로 현재 사용되고 있는 가스 연료 (LNG, 에탄) 대

비 보관 및 처리가 상대적으로 용이하다는 장점을 갖는다. 프로판과 부탄은 액체 상태에서는 물보다 밀도가 작으나, 기체 상태에서는 공기보다 무거운 특성을 갖는다. (McGuire and White, 2000) 이는 누설 가스의 확산 및 배출이 잘 되지 않을 수 있음을 의미하므로 벤트 마스트 가스 배출 시 거주부에 미치는 영향, 선박 기관실 혹은 LFSS 룸 등 밀폐된 공간에서 누출 시 가스 탐지 등 안전성 평가에 유의해야 한다.

Table 2 Physical properties of propane, butane and methane

	Boiling point (°C)	Vapour pressure (at 45 °C)	Liquid S.G.	Vapour S.G.
Propane	- 42,1	15 bar	0,583	1,55
Butane	- 0,5	4 bar	0,600	2,09
Methane	- 162,0	-	0,427	0,554

LPG 연료의 화재 위험성과 관련된 특성을 LNG와 비교해 보면 다음의 표와 같다.

Table 3 LPG and LNG comparisons for inflammability

	LPG	LNG
Self-ignition temperature (°C)	459 (Propane) 405(Butane)	595
Lower and upper flammable limit in air (%)	2,2 ~ 9,5 (Propane) 1,8~8,4(Butane)	5~15
Ignition point (°C)	-104 (Propane) -76(Butane)	-175
Ignition energy (mj)	0,25 (Propane) 0,26(Butane)	0,2

자연발화 온도(Self-ignition temperature)는 가스가 외부매체 없이 스스로 발화할 수 있는 온도로 LPG가 LNG 대비 상대적으로 낮으나 자연 상태에서 도달 가능한 온도는 아니다. 하지만 선박기관실 내부의 고온 장비 중 LPG 노출 가능한 곳에 대한 불연성 재료 피복 등의 조치가 검토되어야 한다. 인화성 온도 범위 (Lower and upper flammable limit) 역시 LNG 대비 적은 농도에서 인화될 수 있다는 점에서 불리하나 선급 규정에 의해 요구되는 가연하한치 (LFL, Lower Flammable Limit)의 20~30%에서 경보, 40~60%에서 연료공

급중단을 준수한다면 문제가 되지 않는다. 발화점(Ignition point)의 경우 LPG가 상대적으로 높은 값을 가지나 현실적으로 유의미한 차이는 아니다. 점화 에너지(Ignition energy)는 LNG와 비슷하게 작은 값을 갖으며 이는 누출될 경우 작은 불꽃 등에도 점화 될 수 있음을 의미하므로, 일반적인 가스선의 요구 조건인 위험 구역에서 방폭 장비를 사용해야 한다. 즉 인화성 측면에서 LPG 연료는 LNG와 다소 물성의 차이는 있으나 기존 국제 규약 (IGC and IGF code) 및 선급의 요구 수준을 상회하지 않는다. (Choi, 2018)

3. ME-LGIP VLGC 적용 사례

ME-LGIP 엔진 및 LPG DF 시스템을 구비한 VLGC 시장은 2018년 엔진의 육상 시험이 완료됨에 따라 구체화 되기 시작되었다. 현재 VLGC를 건조 가능한 조선소를 보유한 국가인 한국, 일본, 중국 중심으로 현황을 살펴 보면 다음과 같다.

최초의 LPG DF VLGC 신조선은 2018년 Exmar사 (벨기에)가 한진중공업(한국)에 발주한 바 있으나, 한진중공업의 경영 상황 악화로 인해 Jiangnan조선소(중국)에서 대체 건조 계약 (2019) 되었다. 이외 TSM사(중국)에서도 동 조선소에 LPG DF VLGC를 2019년 발주하였다. 일본도 Astomos 선사(일본)를 중심으로 자국 조선소와 LPG DF에 대한 논의를 활발히 진행하고 있는 것으로 알려져 있다.

국내에서는 2019년 복수의 유럽 선사에서 LPG DF 90K, 91K VLGC를 현대중공업 그룹에 발주하였으며 이외에도 여러 선사들의 발주 문의가 증가하고 있는 추세다.

4. ME-LGIP 엔진의 연료 공급 조건

ME-LGIP 엔진은 액체상태의 LPG와 전통적인 석유 연료 (HFO/LFO/MDO)을 모두 사용할 수 있는 2행정 디젤 사이클 기관이다. 상술한 데로 LPG의 자연발화 온도는 400 °C 이상이므로 점화를 위해 파일럿 오일(MDO/HFO/LFO) 사용이 필요하다. 액체 상태의 LPG 연료는 엔진에 50 bar로 공급된 후 부스터 밸브를 통해 가압되어 600 bar 로 연소실 내부에 주입된다. 이 때, 엔진에서 요구 하는 LPG 연료 공급 온도는 25 ~ 45 °C 이다. MAN-ES에서 권장하는 연료 공급 개략도는 Fig. 2와 같다.

연료밸브 트레인(LPG FVT, LPG Fuel Valve Train)은 LFSS와 엔진 사이에 위치하며 연료 공급 라인과 엔진에서

LPG가 LFSS로 재 순환되는 라인을 중간에서 연결해 준다. LPG FVT는 연료 공급 장치의 이상 작동 시 연료의 효과적인 차단 및 잔량의 LPG 연료를 안전하게 배출하는 것을 목적으로 한다. LPG FVT의 구성은 이중 차단 및 배출, 밴트, 압력 조절, 질소 공급 등 목적의 밸브와 필터, 각종 센서류로 이루어지며, 엔진 공급 업체에서 함께 공급하게 되므로 본 기술 보고서의 주제인 LFSS 논의 범위에서 제외하기로 한다. LFSS에서 FVT로 공급해야 하는 LPG 연료의 상태는 다음의 표와 같다.(MAN-ES, 2018)

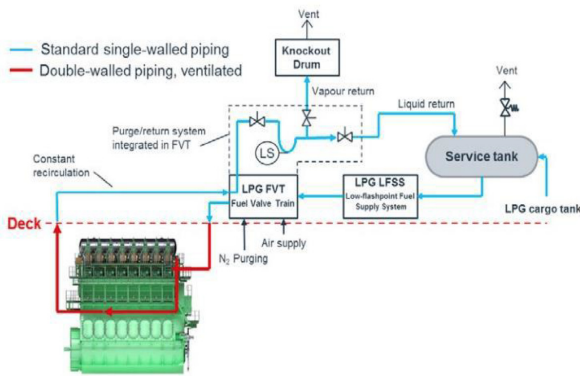


Fig. 2 System configuration for LPG dual fuel system for ME-LGIP

Table 4 LPG fuel supply condition

Pressure	50 ± 2 bar
Temperature	45 °C +0/-20 °C
LPG Fuel Flow Rate	as per engine requirement

5. ME-LGIP LFSS 구성 및 특징

LFSS는 압력 펌프, 열교환기(LPG heater and cooler), 필터 등의 장비와 압력 조절, 유량 조절, 밴트, 질소 공급 목적의 각종 밸브와 센서류로 이루어지며 보조적으로 서비스 탱크, 질소 공급 시스템, 글리콜 시스템, 기액 분리기 및 밴트 마스트가 추가된다. 각 장비의 특징 및 구성은 국제 규약 및 선급 규정이 허용하는 범위에서 달라질 수 있다. 본 연구에서는 가급적 MAN-ES의 권고사항 및 육상 시험 설비를 참고하여 주요 장비 구성 위주로 논의를 진행한다. Fig. 3은 MAN-ES에서 권고하는 구성을 보여 준다.

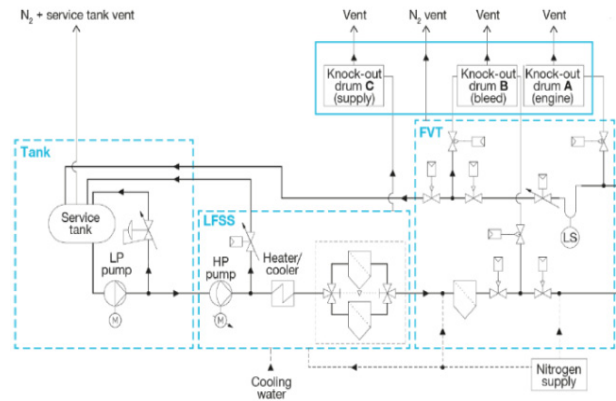


Fig. 3 LFSS and auxiliary system arrangement for VLGC

5.1 Service tank part

ME-LGIP 엔진은 LPG FVT를 통해 공급받은 액체 LPG 연료 중 일부를 고온 고압의 상태로 LFSS로 재순환 시킨다. 이는 기체 상태 연료를 사용하는 기타 가스 이중 연료 시스템(LNG, Ethane)과 구별되는 ME-LGIP만의 특징이며, 이를 어떻게 처리하느냐에 따라 시스템 특징이 달라질 수 있다. 재순환 되는 LPG 연료에는 엔진의 윤활유가 포함되어 있으며, MAN-ES가 권고하는 디자인에서는 재순환 LPG를 별도의 서비스 탱크로 수용하여 LPG 연료/화물 탱크를 오염으로부터 방지한다. 또한 서비스 탱크는 엔진 정지 및 질소 가스 퍼징 시, 액체 상태의 LPG 유출을 방지하는 목적으로도 사용된다. 서비스 탱크의 설계 압력은 프로판의 증기압을 고려하여 20 bar 이상의 가압식 탱크 디자인이 요구된다. 서비스 탱크 용량 및 배치는 MAN-ES의 추천을 따를 수도 있으나 필수 규정은 아니므로 화물 오염 방지 및 퍼지 과정 중 기액 분리라는 목적에 부합하면서 규정을 따르는 다른 설계 또한 허용될 수 있다.

저압 펌프는 상술한 서비스 탱크에서 고압 펌프로 LPG를 공급하는 역할을 한다. 연료 펌프와 같은 회전 기기류는 국제 규약에 의해 1대가 고장 나더라도 선박 운항이 가능해야 하므로 엔진 요구의 100% 용량 2대 혹은 50% 용량 3대로 구성한다. LP pump는 갑판 구역에 배치되는 서비스 탱크의 LPG 수위를 고려하여 낮은 유효흡입양정(NPSH, Net Positive Suction Head)이 요구되며 배출 압력은 고압 펌프의 NPSH 및 배관 손실을 고려하여 선정되어야 한다. 또한 프로판 및 부탄의 밀도 차이 및 엔진 부하에 따른 연료 소모량을 고려하여 VFD (Variable Frequency Drive) 적용이 필요할 수 있다.

Table 5 Tank main equipment

Main equipment		Q' ty	Specification
Tank part	Service tank	1 set	20 bar and over
	LP pump	2 ~3 sets	100% ~ 50% each, VFD

5.2 Low-flashpoint fuel supply system part

LFSS의 주요 장비는 고압 펌프(HP pump) 2~3대, 엔진 보호용 필터, LPG 온도를 맞추기 위한 열 교환기(Heater/cooler)로 구성된다. 고압 펌프는 저압 펌프와 같이 100% 2대 혹은 50% 3대로 구성되며 VFD 역시 적용될 수 있다. 고압 펌프는 84K VLGC 급 기준으로 저압 펌프에서 공급 받은 약 5 m³/h의 LPG 를 50 bar 수준으로 가압하여 LPG FVT로 공급해야 하므로, 소용량 고압 특성을 만족해야 한다.

Table 6 LFSS main equipment

Main Equipment		Q' ty	Specification
LFSS SKID	HP Pump	2 ~3 sets	100% ~ 50% each, VFD
	Filter	2 sets	100% each
	Fuel Heater/Cooler	1 set	Fuel Temp. conditioning

MAN-ES에서는 엔진으로 유입되는 연료용 LPG에 대하여 10 μ m 수준의 필터링을 요구하며, 필터 교환 시에도 엔진에 지속적인 LPG 공급이 가능하도록 복수의 필터 배치가 요구된다. 그리고 공급되는 LPG의 온도 조건(25~45°C)을 맞추기 위한 열 교환기를 배치한다. 열 교환기는 서비스 탱크의 LPG 온도에 따라 연료를 가열 혹은 냉각하여 엔진 공급 온도 조건을 만족시킬 수 있는 열 용량을 갖추어야 한다.

상기 서술된 LFSS는 위험 구역에 위치해야 하므로 방폭 설비를 고려해야 하며, VLGC의 경우 기존 재역화 장치와 함께 카고 컴프레서 룸에 위치할 수 있다.

5.3 N2 system

질소 시스템은 엔진, LPG FVT, LFSS 및 서비스 탱크의 퍼징을 목적으로 하며 연료 공급 시스템의 기밀성 시험을 위해서도 사용될 수 있다. MAN-ES는 서비스 탱크의 설계 압력에 7 bar를 더한 퍼징 압력을 요구하며(서비스 탱크 설계 압이 20 bar일 경우 질소 공급 압력은 27 bar가 되어야 함),

연료 공급 시스템의 기밀성 시험을 위해서는 50 bar 이상의 질소 공급 압력이 필요한 경우도 있다. 그러므로 질소 공급 시스템은 질소 발생기로 생성된 질소를 버터 탱크를 거쳐 가압 압축기(Booster compressor)로 압축하여 고압 실린더에 보관한다. 보관된 질소 가스는 엔진 운전 중 필요 시 실린더의 고압 질소 가스를 이용하여 퍼지 과정을 수행한다.



Fig. 4 LFSS test model used in MAN-ES ground test

Table 7 N2 system main equipment

Main Equipment		Q' ty	Specification
N2 system	N2 generator	1 set	-
	Booster compressor	1 set	According to bottle bank pressure
	N2 bottle bank	1 lot	50 bar and over

5.4 기타 장비

LFSS의 LPG 열 교환기의 열원은 증기(steam)가 사용된다. 이 때 열 교환기 내에서 증기와 LPG간 직접 열 교환을 할 경우 열 교환기 파손 시 선박의 안전성을 저해 할 수 있다. 그러므로 중간 매개체로 글리콜 부동액 펌프를 두어 증기로 글리콜 부동액을 가열하고 글리콜 부동액이 LPG를 가열하는 방식이 선호되며 글리콜 탱크, 글리콜/증기 열 교환기, 글리콜 펌프가 필요하다.

LPG 연료의 냉각이 필요할 경우, 냉각원은 선박 냉각수(fresh water) 및 해수(sea water)가 모두 사용될 수 있으며, 상술한 글리콜 펌프를 통해 LPG를 냉각하게 되지만 해수를 이용할 경우 직접 냉각하는 방법도 고려할 수 있다. 하지만 해수 직접 열 교환을 사용할 경우 열 교환기 내 해수 침식 및 불순물에 의한 막힘 문제를 고려한 설계를 적용해야 한다.

ME-LGIP가 적용이 될 경우 추가적인 벤트 마스트가 적용

되어야 하며 추가 벤트 마스트는 기액 분리기(knock out drum)를 포함한다. 기액 분리의 목적은 액체 상태의 LPG를 연료가 엔진 정지 후 퍼징 과정에서 액체로 바로 유출됨을 방지하는 것이다. 벤트 마스트의 수량은 MAN-ES에서는 2개 이상을 권장하나 선급 규정을 만족하는 범위에서 다양한 설계가 가능하다.

이 외 공기보다 무거운 LPG 기체의 거동을 고려하여 가스 검출 위치를 결정해야 하며 기관실 내 이중 연료 공급관 및 공기 순환 시스템이 추가 되어 한다.

6. 결론

MAN-ES의 BW ME-LGIP 엔진 개발에 따라 LPG DF VLGC 건조를 위한 LPG 연료 특성 및 연료 공급 시스템(LFSS) 특성에 대하여 고찰하였다.

LPG 연료는 상대적으로 낮은 증기압으로 인해 보관 및 처리가 용이하다는 장점을 갖는다. 반면 기체 상태에서 공기보다 높은 밀도로 인해 누출 가스 처리에 주의를 기울여야 한다.

MAN-ES에서 권고하는 LPG 이중연료 시스템은 서비스 탱크, LFSS, LPG FVT 그리고 ME-LGIP 연료로 구성되는데 이중 LPG FVT와 ME-LGIP는 엔진 제작사에서 함께 공급한다.

본 기술 보고에서는 LPG DF 시장 활성화 및 관련 종사자들의 이해를 증진하고자 MAN-ES에서 권고하는 LFSS 및 보조 시스템의 요구 사항 및 특징을 정리하였고 설계 유의 사항을 기술하였다.

ME-LGIP 시스템의 가장 큰 특징은 약 50 bar의 액체 상태로 엔진에 LPG를 공급하고 이중 일부가 고온 고압의 상태로 다시 LFSS로 재순환 된다는 점, 그리고 이 재순환 되는 LPG에는 엔진의 유통유가 일부 섞여 있다는 점이다. LFSS 설계자는 위 사항을 염두에 두고 엔진이 요구하는 LPG 공급 조건, 국제 규약 및 선급 규정을 만족시키도록 시스템을 구성해야 한다.

참고 문헌

Choi, W.S., 2018. A Study on the Feasibility and Safety of LPG Propulsion Ship. Korean Register Report 2018.
Comelli R., Bonalumi S., Hjalmas T., Lori L., Callegher M.Z., 2019. Innovative LPG Fuel Supply System for MAN B&W LGI-P Engines: Design Challenges and Performance Results. CIMAC Congress 19, Vancouver, Canada, 10-14 June 2019.

MAN-ES, 2018. MAN B&W ME-LGIP dual-fuel engines, MAN energy Solution Report 5510-0210-00.

McGuire and White, 2000. Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals, Third Edition, London, Witherby.

Seo, J.K., 2017. Recent Trends and Implications of the Global LPG Market. World Energy Market Insight, 17-1, January 2017.



한 상 호

- 1981년생
- 2014년 서울대학교 기계항공공학부 박사 졸업
- 현 재 : 현대중공업 기본설계2부 차장
- 관심분야 : Cryogenic System, Fluid Dynamics
- 연락처 : 02-746-1787
- E-mail : s_han@hhi.co.kr



김 현 석

- 1977년생
- 2004년 인하대학교 조선공학 석사 졸업
- 현 재 : 현대중공업 기본설계2부 차장
- 관심분야 : Cryogenic System
- 연락처 : 02-746-5708
- E-mail : maverick1977@hhi.co.kr



한 범 우

- 1973년생
- 2017년 서울대학교 기계항공공학부 박사 졸업
- 현 재 : 현대중공업 기본설계2부 부장
- 관심분야 : Naval Architect
- 연락처 : 02-746-1783
- E-mail : sayyes@hhi.co.kr



이 동 진

- 1972년생
- 1996년 경북대학교 기계공학 석사 졸업
- 현 재 : 현대중공업 기본설계2부 상무
- 관심분야 : Cryogenic System
- 연락처 : 02-746-5781
- E-mail : dongjinlee@hhi.co.kr