

In-Line Recondenser와 Pre-cooler가 적용된 LNG선 연료관리 시스템 설계

이원구, 선현준, 이권영*
한동대학교 기계제어공학과

Design of Fuel Gas Management System for LNG Ships Using In-line Recondenser and Pre-Cooler

Wonkoo Lee, Hyunjun Sun, Kwon-Yeong Lee*
Department of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

요 약 액화천연가스(LNG)는 천연가스를 장거리로 운송하는 가장 경제적인 방법이다. LNG 운송 및 저장 과정에서 BOG(Boil Off Gas)가 발생하여 손실을 피할 수 없다. 이러한 손실을 막기 위해 BOG를 연료로 사용하거나 재액화 등의 방식을 취하고 있다. In-line Recondenser(이하 I-Recondenser)는 Static-Mixer와 같은 방식으로 BOG를 LNG에 빠르게 섞어 액화시키는 장치로서, 기존 Packed-Bed 형태 대비 부피는 2%, 무게는 1/15 수준이기 때문에 선박에 탑재하기에 용이하다. 이에 본 연구에서는 LNG 운반 및 추진 선박을 대상으로 I-Recondenser를 활용한 BOG 재액화 장치와 연료공급 시스템(FGSS)을 결합한 형태의 연료관리 시스템(FGMS)을 제안하고 개념설계를 수행하였다. BOG 전량을 액화시킨다는 설계 요건 하에서 Basic 모델과 Pre-cooling 모델로 나뉘어 진행되었다. 시뮬레이션을 통해 실현 가능성을 입증하였는데, 일정한 압력 조건에서 LNG의 질량유량이 증가함에 따라 BOG가 전량 액화되는 지점을 찾았다. 즉, Basic 모델은 LNG/BOG 질량유량 비율이 10일 때, Pre-cooling 모델은 8.22일 때 전량 액화되는 것을 확인하였다.

Abstract Liquefied natural gas (LNG) is the most economical way to transport natural gas over long distances. In the process of LNG transportation and storage, BOG(Boil Off Gas) is generated, and losses are unavoidable. In order to prevent this loss, methods such as using BOG as fuel or re-liquefying it are being used. A recently proposed in-line recondenser is similar to a static mixer. It has 2% of the volume and 1/15 of the weight compared to an existing packed-bed recondenser, making it easy to mount on a ship. The purpose of this research is to propose a fuel gas management system(FGMS) for LNG ships using the in-line type recondenser and to perform basic design of the system. It was designed under the requirement of liquefying the entire amount of BOG according to the temperature and pressure conditions. The design was divided into a basic model and a pre-cooling model. The feasibility of the design was verified through simulation, and the total amount of liquefaction was realized through a method of increasing the mass flow rate of LNG with a constant pressure. The basic model had a LNG/BOG mass-flow ratio of 10, and the pre-cooling model liquefied BOG when the ratio was 8.22.

Keywords : Boil Off Gas, Fuel Gas Management System, Fuel Gas Supply System, LNG Carrier, Recondenser

*Corresponding Author : Kwon-Yeong Lee(Handong Global Univ.)

email: kylee@handong.edu

Received January 3, 2023

Accepted March 3, 2023

Revised February 13, 2023

Published March 31, 2023

1. 서론

천연가스(Natural Gas, 이하 NG)는 무독성, 무색, 무취 및 비부식성 화석 연료다. 입증된 매장량이 풍부하고 환경오염이 적어 천연가스에 관한 관심이 커지고 있다. 대부분의 NG 매장량은 연안에 있어 수요처로부터 멀리 떨어져 있기에 대량 운송을 위해 저온 액화시켜 천연가스의 부피를 실은 대비 약 600배 감소시켜 운반하는데, 이것이 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, 이하 LNG)이다. LNG의 극저온 특성으로 인해 저장 및 운송 중에 LNG 저장탱크 안과 밖에 큰 온도 차가 발생하고, LNG가 자연 기화되어 증발 가스(BOG: Boil Off Gas)로 지속해서 손실된다. 단열재 및 해상 조건에 따라 하루에 전체 화물 내용물의 약 0.1-0.15 %가 증발하여 BOG가 된다[1]. 증발률은 조건에 따라 크게 다르지만, 일반적인 항해에서 생성되는 BOG의 양은 전체 화물의 2-6 %까지 높아진다. 2007년에 2,264억 1,000만 m³의 NG가 LNG로 운송되어 약 165.3 MTPA(Million Ton per Annum)의 LNG가 이송되었고, 탄소중립 달성을 위한 온실가스 감축 및 분산자원의 브릿지(Bridge) 연료로써 LNG가 가교 역할을 수행하고 있다[2]. 또한, 2015년 천연가스 발전 전력 보고서에 따르면 글로벌 LNG 수요가 2030년까지 연평균 5.2 %씩 증가할 것이라 전망하고 있다[3]. 해운업계에서는 LNG 운반선을 확보하려 경쟁하고 있는 가운데, 국제해사기구(IMO)가 선박의 온실가스 감축을 위해 추가 환경규제를 채택하면서 기존 중유, 벙커C유 대비 친환경적인 LNG를 추진연료로 사용하는 LNG 추진선에 대한 수요도 증가하였다. Q class 사이즈 멤브레인 탱크 타입을 가진 선박의 경우 운송 중 증발로 인해 최소 3.3 MTPA의 LNG가 손실되는데, 2021년 기준 1 ton 당 1194.6 USD로 선박의 연간 BOG 손실 비용은 39억 4128만 USD를 초과한다[4].

과거에는 주로 BOG를 가스 연소 장치(GCU: Gas Combustion Unit)를 이용해 연소시켜 버리는 방식을 택했으나, 최근 에너지 가격이 급격히 상승하면서 LNG 선박에서 버려지는 BOG를 재액화하여 화물탱크로 회수하는 기술의 중요성이 커지고 있다. 기존에 연구되었던 재액화 설비(Reliquefaction plant)는 선박용 재액화 설비로써 다단의 압축기와 열교환기를 통해 BOG를 저온, 고압 상태로 만들어 액화시키는 방식으로, 전력 소모가 많으며 설비의 크기가 크고 복잡하다는 단점이 있다. 따라서, 기존 재액화 설비의 Capex(Capital expenditures) 및 Opex(Operating Expenditures)가

매우 높으므로 이를 대체할 새로운 시스템에 관한 연구가 필요한 시점이다.

BOG Recondenser는 LNG 터미널에서 발생하는 BOG를 재액화하는 용도로 주로 사용되고 있으며, LNG의 비열이 BOG의 비열보다 높다는 점을 이용하여 LNG와 BOG를 섞었을 때 BOG의 온도가 급격하게 떨어지면서 액화되는 원리를 이용한다. 가장 일반적인 형태의 BOG Recondenser는 Fig. 1과 같이 지름이 약 1.6 m, 높이가 약 3 m, 무게가 약 10 ton 등의 크고 무거운 타워 형태인 Packed-Bed Type으로써 선박용으로는 적용이 어렵다[5]. 반면 2017년도에 제안된 Static-mixer 형태의 In-line Recondenser(이하, I-Recondenser)는 기존 형태 대비 부피는 2 %, 무게는 1/15 수준으로 선박에 탑재하기에 용이하다. 또한, I-Recondenser 내부 nozzle을 통해 BOG를 작은 기포 상태로 만들기 때문에 LNG와의 접촉 면적을 넓혀 높은 효율의 재액화 성능을 낼 수 있다[6]. I-Recondenser에 관한 기존 연구는 JFE engineering 사에서 수행한 초소형 재액화 시스템 설계 및 실증 사례가 있으며, LNG 터미널의 1/15 규모의 시범 설비에서 수행한 테스트 결과를 바탕으로 실제 LNG 터미널에 I-Recondenser를 이용한 재액화 설비를 상용화하는 데 성공한 바 있다[7]. 하지만 LNG 선박의 BOG 처리를 위해서 I-Recondenser를 실제 시스템에 적용한 사례나 연구는 찾아볼 수 없다. 이에 선박용 I-Recondenser와 이를 이용한 재액화 장치에 대한 국산화 기술 개발을 통해 시장경쟁력을 확보할 필요가 있다.

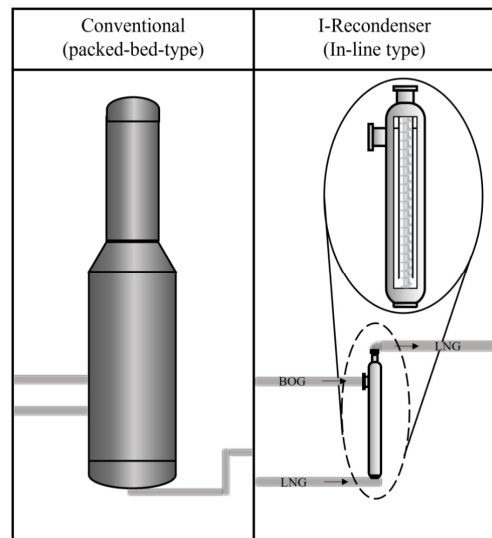


Fig. 1. Size Comparison by Recondenser Type

본 연구에서는 LNG 운반·추진선을 대상으로 LNG를 엔진에서 사용할 수 있는 온도, 압력 조건으로 공급하는 연료공급 시스템(FGSS: Fuel Gas Supply System)과 I-Recondenser를 활용한 재액화 설비의 복합 공정으로써 연료관리 시스템(FGMS: Fuel Gas Management System)을 제안했다. 또한, FGMS의 개념설계를 수행하여 선박에의 적용 가능성을 검토하였다. 이를 위해 FGMS의 주요 변수를 파악하고, 소비 전력의 관점에서 최적화된 시스템 레이아웃을 도출한다.

2. 본론

2.1 FGMS 설계요건 설정

FGMS를 설계하기 위한 기본 요건으로 대상 선박, 엔진, BOG 발생량, 연료소비량 등의 정보들이 요구된다. 본격적인 설계에 앞서 위 요건들을 결정한 과정에 대해 설명하였다.

대상 선박은 LNG 운송 용량에 기반하여 LNG 선박 시장에서 가장 많이 보급된 중형 LNG 선박 중 Fig. 2의 SK Audace로 선정했다. 2016년 인도되어 현재 운행 중인 선박이며, 180,031 m³의 LNG 운반 용량을 가지고 있다. 파워트레인은 LNG 연료만으로도 운영할 수 있도록 설계되었으며, LNG 연료탱크는 6,453 m³의 용량을 가지고 있다. 해당 선박에 대한 기타 제반사항을 Table 1에 정리하였다.



Fig. 2. LNG Carrier (SK Audace)[8]

Table 1. LNG Carrier Specifications

Model	SK Audace
Type	LNG Carrier
Ship owner	SK shipping
Delivery Date	2016
LNG transport capacity	180,031 [m ³]
LNG fuel tank capacity	6,453 [m ³]

BOG 발생량은 LNG 운반·추진선의 화물창과 연료탱크 용량을 모두 포함하여 선박의 실제 운항 조건에서 발생하는 BOG량을 실험적 데이터 기반으로 산정하였다. Hasan M 등이 실제 선박 실험데이터를 기반으로 제시한 Cargo BOG(이하 CBOG) 발생률 값을 활용하였으며, 아래 Table 2에 따른 산정조건 하에서 Eq. (1)을 통해 시간당 BOG 발생량은 총 2.47 ton/hr로 산정되었다.

$$Q_{CBOG} = V \times C_{rate} \times t \times \rho_{LNG} \quad (1)$$

Where, Q_{CBOG} denotes CBOG mass flow rate[kg/hr], V_{total} denotes total tank capacity[m³], C_{rate} denotes CBOG occurrence rate in 20 days, t denotes time[hr], ρ_{LNG} denotes LNG density

Table 2. Calculation Conditions for CBOG Flow Rate [9]

BOG Type	CBOG
LNG Formation	Lean-LNG (methane 90 % / ethane 10 %)
Measuring Method	Measurement of LNG change after 20 days of operation
Atm Temperature	25 °C
Pressure	1.01 atm
Total Heat Transfer Coefficient	0.4 kJ/h·m ² ·°C

LNG를 연료로 활용하면서 높은 효율을 보이는 이중 연료 엔진 방식이 현재 LNG 추진선의 동력원으로 주목 받고 있다. 이에 180,000 CBM 급 선박의 추진 및 운영에 적합한 출력을 가진 WinGD 사의 5X72DF 엔진과 8L34DF 엔진을 선정했다[6]. Table 3에 정리된 엔진의 설계 사양으로부터 FGSS의 설계 요건을 결정하였으며, 엔진에 공급되는 연료의 목표 온도 및 압력은 각각 45 °C, 11.5 bar이다. 대상 선박은 twin-screw 추진방식으로 Fig. 3(a)의 5X72DF 엔진 2대로부터 추진 동력을 얻는다. 선박에서 사용되는 생활 전력을 위한 발전용으로는 Fig. 3(b)의 8L34DF 엔진을 4대 장착하여 50 %의 가동률로 운영되도록 설계하였다. 계약연속최대출력(SMCR: Specified maximum continuous rating) 상태로 가동되는 추진 엔진과 발전 엔진에서 소비하는 연료량을 합하여 총 연료소비량을 계산하였다. 아래 Table 3에 따른 산정조건 하에서 Eq. (2)를 통해 WinGD 사가 제공하는 엔진 사양을 기준으로 계산한 결과, 시간당 총 연료 소비량은 4,160 kg/hr이다.

$$Q_{fuel} = SMCR_p \times n_p \times BSGC_p \times \varepsilon_p + SMCR_g \times n_g \times BSGC_g \times \varepsilon_g \quad (2)$$

Where, Q_{fuel} denotes fuel total mass flow rate[kg/hr], $SMCR$ denotes SMCR[kW], n denotes number of engines, $BSGC$ denotes BSGC[g/kWh], ε denotes engine utilization rate[%], p denotes propulsion engine, g denotes power generation engine

위에서 선정된 선박, BOG 발생량, 연료소비량을 바탕으로 선정된 엔진의 조건에 맞추어 연료를 공급함과 동시에 발생하는 BOG를 전량 액화할 수 있는 FGMS를 개발하는 것을 목표로 시스템 설계를 수행했다.

Table 3. Selected Engines and Specifications

Engine Type	propulsion	power generation
Brand	WinGD	
Model	5X72DF	8L34DF
SMCR* at 69 rpm [kW]	10,400	4,000
BSGC* [g/kWh]	140.3	155.3
fuel consumption per hour [kg/h]	1,459	621
Fuel Temperature [°C]	45	45
Fuel Pressure [bar]	11.5	11.5

* SMCR : Specified maximum continuous rating (계약연속최대출력)

* BSGC : Brake Specific Gas Consumption (제동 연료소비율)

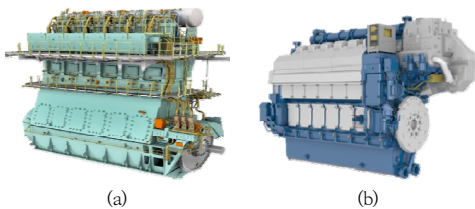


Fig. 3. WinGD Engines[5]
(a) 5X72DF (b) 8L34DF

2.2 FGMS 레이아웃 설계

FGMS는 Basic 모델과 Pre-cooling 모델로 설계되었다. Basic 모델은 FGMS의 필수요소를 포함한 기초적인 모델이며, Pre-cooling 모델은 Basic 모델에 Pre-cooler를 장착하여 액화 성능을 개선한 모델이다. 두 모델의 시뮬레이션을 통해 Pre-cooler의 유무로 인한 성능 개선을 비교하였다.

2.2.1 Basic 모델 레이아웃

Basic 모델은 Fig. 4과 같이 I-Recondenser와 FGMS에 필수적인 압축기, 펌프, 기화기 등의 장치들이 포함된 레이아웃이다. Basic 모델에서 FGMS가 작동하는 과정을 설명하면 다음과 같다.

화물창과 연료탱크에서 발생한 BOG는 압축기(LP Comp)를 통과하면서 재액화 압력까지 승압되어 I-Recondenser로 향하며, LNG는 저장탱크에 있는 극저온 수중펌프를 통해서 BOG와 동일한 압력까지 승압되어 I-Recondenser로 투입된다. I-Recondenser에서 BOG가 전량 액화되고, 토출된 혼합물은 고압 펌프(HP Pump)를 통해 연료 압력까지 승압된다. Sea-water Vaporizer를 통해 LNG는 0 °C까지 승온 되고, 설계 요건인 연료 온도까지 승온하기 위해서 전기히터(Electric Heater)를 통과한다. 전기히터를 통한 승온 방법 외에도 엔진 쿨링자켓 및 배기가스 폐열을 이용하는 방법 또한 존재하지만, 본 연구에서는 생략한다. I-Recondenser는 LNG를 BOG와 혼합하는 방식을 통해 액화시키기 때문에, 발생하는 BOG를 전량 액화시키기 위해서는 엔진 연료로 소모되는 양보다 많은 양의 LNG가 필요하다. 따라서, I-Recondenser를 통과한 혼합물 중 연료로 공급되는 양을 제외한 나머지는 다시 저장탱크로 회수할 수 있도록 LNG Return Line을 설계하였다.

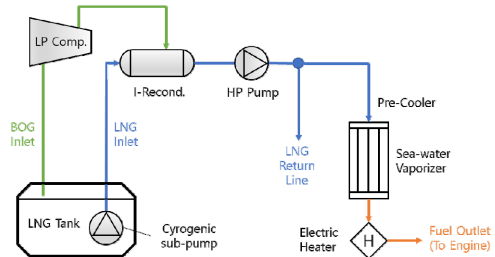


Fig. 4. FGMS Basic 모델 개략도

2.2.2 Pre-Cooling 모델 레이아웃

I-Recondenser에서 재액화된 LNG를 엔진의 연료로 활용하기 위해서는 Sea-water Vaporizer 및 전기히터를 이용하여 LNG를 기화시키고 엔진 사양에 맞는 적정 온도까지 승온시키는 과정이 필요하며, 이 과정에서 엄청난 양의 냉열이 버려진다. Pre-cooling 모델은 Fig. 5과 같이 Basic 모델을 기반으로 LNG의 버려지는 냉열을 사용하여 BOG 온도를 낮추는 용도로 활용할 수 있도록 Pre-cooler를 도입한 레이아웃이다. 압축기에서 1차 승압된 BOG와 고압 펌프에서 2차 승압된 LNG가 Pre-cooler

에서 열교환을 함으로써 I-Recondenser로 투입되는 BOG의 온도가 감소한다. 재액화 전 BOG의 온도가 감소함으로써 I-Recondenser의 액화 성능은 개선되며, 이는 전량 액화를 위해 필요한 LNG 유량의 차이로 확인된다. 동시에, 2차 승압된 LNG는 Sea-water Vaporizer에 투입되기 전 Pre-cooler를 통과하면서 열을 흡수하면서 일정 온도까지 승온되어 Vaporizer 및 Heater의 열부하를 줄이는 효과가 있다.

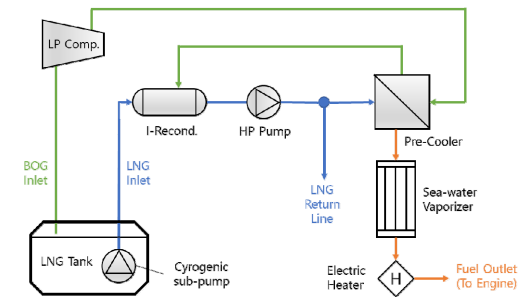


Fig. 5. FGMS Pre-cooling Model 개략도

2.3 FGMS 시뮬레이션 및 분석

설계된 FGMS의 최적화를 위해 DWSIM을 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. DWSIM은 공정 설계 소프트웨어로, 시스템 설계 및 열역학 모델을 통해 부분별 데이터 및 상(phase)을 계산하는 프로그램이다. 본 설계에서 열역학적 분석 시 사용된 LNG 및 BOG의 물성치는 Peng-Robinson의 상태 방정식으로부터 얻었다[10]. 모델에 포함된 압축기와 펌프의 등엔트로피 효율은 모두 75%로 가정하였고, Pre-cooler 양측 흐름의 압력강하는 모두 0.1 bar로 가정했다. Vaporizer 및 Heater의 압력강하는 각각 0.3, 0.1 bar로 가정하여 FGMS가 최종적으로 연료를 연료 압력인 11.5 bar에 맞게 공급할 수 있도록 설계하였다.

2.3.1 Basic 모델 시뮬레이션

Fig. 6은 DWSIM을 이용하여 Basic 모델의 공정 흐름을 구현한 모습이며, 시뮬레이션에 활용된 주요 입출력 조건은 Table 4, 5에 정리하였다. Table 4, 5의 지점 번호는 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

LNG 저장탱크 내의 LNG와 BOG의 압력은 대기압보다 약간 높은 1.06 bar 수준으로 유지하도록 relief 밸브를 통해 BOG를 배출시킨다. 저장탱크 내 연료를 액상으로 유지하기 위해서 냉각시스템은 LNG 온도를 -162 °C 수준으로 유지하도록 설계하였다. 저장탱크에서 배출된

BOG의 온도는 참고문헌의 실험데이터를 기반으로 -120 °C로 설정했다 [8]. I-Recondenser에서 BOG와 LNG가 혼합되는 압력(이하, I-Recondenser 압력)은 4 bar로 설정되었다. 이는 BOG 저압 압축기가 1단 압축 공정으로 설계되었을 때, input 대비 output의 압력비가 5 이하에서 높은 효율을 유지할 수 있기 때문이다. 본 시뮬레이션에서는 압력 조건을 4 bar로 고정한 채 LNG 질량유량을 증가시키면서 BOG가 전량 액화되는 구간을 확인하였다. I-Recondenser에 투입되기 전 BOG와 LNG의 온도는 각각 -41.9 °C와 -161.8 °C이며, 두 흐름이 만나서 BOG가 전량 액화되도록 설계하였다.

LNG 질량유량을 증가시키면서 시뮬레이션한 결과, 23,400 kg/h에서부터 I-Recondenser 후단인 L3 지점의 혼합물이 액상이 되는 것을 확인함으로써 BOG가 전량 액화되었음을 판단하였다. 전량 액화가 되는 L3 지점의 온도는 I-Recondenser 압력에서의 포화온도와 같은 -140 °C이다. 안정적인 시스템 구현을 위해 L3 지점의 온도를 1 °C 더 낮은 -141 °C로 설계하였고, 이에 따라 L1 지점의 LNG 질량유량은 각각 24,700 kg/h로 결정되었다.

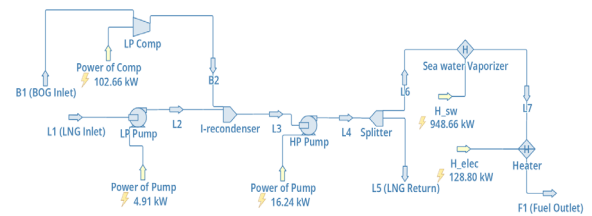


Fig. 6. Basic model DWSIM flowsheet

Table 4. Basic model Simulation input/output

Point Number	L1	B1	L5	F1
Temperature [°C]	-162.0	-120.0	-140.5	45.0
Pressure [Bar]	1.06	1.06	12	12
mass flow rate [kg/h]	24,700	2,470	23,010	4,160
phase	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor

Table 5. Basic model I-Recondenser input/output

Point Number	B2 (BOG)	L2 (LNG)	L3 (Mixture)
Temperature [°C]	-41.9	-161.8	-141.0
Pressure [Bar]	4	4	4
mass flow rate [kg/h]	2,470	24,700	27,170
phase	Vapor	Liquid	Liquid

2.3.2 Pre-cooling 모델 시뮬레이션

Fig. 7는 DWSIM을 이용하여 Pre-cooling 모델의 공정 흐름을 구현한 모습이다. 시뮬레이션에 활용된 주요 입력조건은 Table 6, 7에 정리하였다. Table 6, 7의 지점 번호는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. Pre-cooling 모델은 Basic 모델과 동일한 구성요소에 Pre-cooler를 추가하였다. BOG가 Pre-cooler를 통해 온도가 더 낮아진 상태로 I-Recondenser에 투입된다. LNG 질량유량을 증가시키면서 시뮬레이션한 결과, 전량 액화를 위한 최소 질량유량은 19,300 kg/h에서 혼합물이 액상이 되는 것을 확인함으로써 BOG가 전량 액화되었음을 판단하였다. Base 모델과 같이 L3 지점을 $-141\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 설계 시 L1 지점의 질량유량은 20,300 kg/h로 결정되었다.

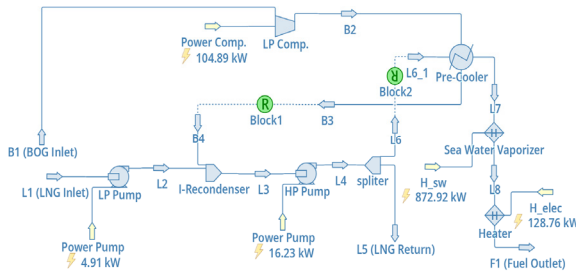


Fig. 7. Pre-cooling model DWSIM flowsheet

Table 6. Pre-cooling model Simulation input/output

Point Number	L1	B1	L5	F1
Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	-162.0	-120.0	-140.5	45.0
Pressure [Bar]	1.06	1.06	12	12
mass flow rate [kg/h]	20,300	2,470	18,610	4,160
phase	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor

Table 7. Pre-cooling model I-Recondenser input/output

Point Number	B2 (BOG)	L2 (LNG)	L3 (Mixture)
Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	-40.2	-161.8	-140.4
Pressure [Bar]	4	4	4
mass flow rate [kg/h]	2,470	20,300	22,770
phase	Vapor	Liquid	Liquid

2.3.3 시뮬레이션 분석

I-Recondenser 내에서는 액상과 기상이 섞이면서 열교환이 이루어지며, 두 상에서의 비열 차이 (LNG :

$3.34 / \text{BOG} : 2.04 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$) 및 질량유량의 차이로 BOG가 액화되는 현상이 일어난다. Fig. 8은 Basic 모델과 Pre-cooling 모델의 L3 지점에서 질량유량에 따른 온도 변화를 나타낸다. Basic 모델의 경우 23400 kg/h에서, Pre-cooling 모델의 경우 19300 kg/h에서 이론적 전량 액화됨을 확인할 수 있다. BOG를 전량 액화시킨다는 조건으로 설계를 진행했고 안정적인 결과물을 위해 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 더 낮은 온도에서의 결과를 사용하여 각 공정 레이아웃에 따른 필요한 LNG 질량유량의 수준을 도출했다. Basic 모델의 경우, BOG 2,470 kg/h를 액화시키기 위해 24,700 kg/h의 LNG 질량유량이 필요했고, 이는 LNG/BOG 비율이 10에 해당한다. 이에 비해, Pre-cooling 모델은 보다 개선된 LNG/BOG 비율이 8.22인 LNG 20,300 kg/h 수준으로 책정하였다. 결과적으로 Pre-cooling 모델은 Basic 모델 대비 투입되는 질량유량은 17.81 % 감소하였고, 더 적은 양의 질량유량으로 모든 BOG가 액화되는 것을 확인할 수 있다.

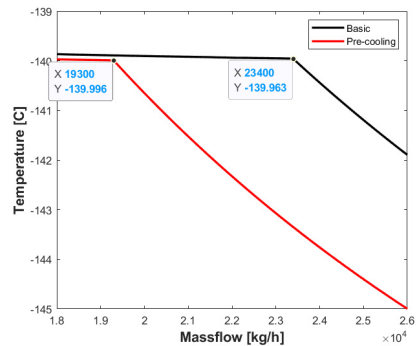


Fig. 8. Basic & pre-cooling model liquefaction graph at L3

또한 가정한 질량유량에 따라 두 모델의 소비 전력과 열량의 합을 도출했다. Basic 모델의 경우 Cycle에 구동되는 압축기, 펌프의 소비 전력을 합하면 129 kW가 소비되며 LNG를 기화시키고 연료 온도까지 승온하기 위해서 투입되는 열량의 합은 252.61 kW로 산출되었다. Pre-cooling 모델의 경우 소비 전력의 합은 126 kW이며 열량의 합은 238.56 kW이다. 이는 Basic 모델 대비 소비 전력과 투입 열량 모두 2.33 %, 5.56 % 감소한 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 Pre-cooling 모델이 Basic 모델보다 적은 양의 LNG를 사용하기 때문에 더 효율적이라는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 BOG의 기화로 인해 발생하는 손실을 막기 위한 선박용 I-Recondenser와 이를 이용한 재액화 장치에 대하여 제안하였고 액체 상태인 연료를 공급할 수 있는 FGSS와 BOG 처리를 위한 장치를 복합적으로 구현한 새로운 시스템인 FGMS를 설계 및 검증하였다. 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1. DWSIM 시뮬레이션을 기반으로 새로운 시스템의 역학적 해석을 수행했고, 기본 설계를 통해 LNG 선박에서 발생하는 BOG 손실을 줄일 수 있는 시스템을 제시하였다.
2. Basic 모델의 경우 LNG/BOG의 질량유량 비율이 10 이상일 때부터 전량 액상으로 유지되었고, Pre-cooling 모델의 경우 Basic 모델보다 더 적은 LNG/BOG의 질량유량 비율이 8.22인 수준에서 전량 액화가 되는 것을 확인할 수 있다.
3. 질량유량은 17.81 % 감소, 소비 전력과 투입 열량 또한 2.33 %, 5.56 % 감소한 것을 확인할 수 있다.

FGMS를 통하여 기대되는 주요 효과로 비용 절감과 자유도 측면에서 월등한 개선점을 보인다는 점이다. 기존 LNG선에서 개별로 존재하던 FGSS와 재액화 설비를 I-Recondenser를 활용한 FGMS라는 통합 시스템으로 개발하여 선박 운영 비용 및 공정 유지 관리 비용을 절감할 수 있을 뿐 아니라 기존 대비 구조가 단순하고 부피, 무게 및 설치 비용이 모두 감소하여 선박 제조에 자유도를 높일 수 있다.

뿐만 아니라 기존 대비 환경친화적이라 국제해사기구에서 채택한 선박의 환경규제에 대응하기에 적합한 방법이다. BOG를 재액화 시킴으로써 버려지는 BOG의 양을 최소화할 수 있기에 배출되는 탄소 및 온실가스가 줄어드는 효과를 볼 수 있다.

References

- [1] Chen, Q.-S., J. Wegrzyn, and V. Prasad. "Analysis of Temperature and Pressure Changes in Liquefied Natural Gas (LNG) Cryogenic Tanks." *Cryogenics* 44, no.10, 2004, 701-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2004.03.020>.
- [2] D. H. Kim, C. M. Hwang, Truls Gundersen, and Youngsub Lim. "Process Design and Economic Optimization of Boil-off-Gas Re-Liquefaction Systems for LNG Carriers." *Energy* 173, 2019, 1119-29.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.098>

- [3] Natural Gas Industry Development Strategy, Plan Report, Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, pp.5, 2015.
- [4] Grose, I.; Flaherty J, LNG Carrier Benchmarking. Presented at LNG15, Barcelona, Spain, April 24-27, 2007, Poster PO-01.
- [5] K. Hayashi, K. Yarimizu and S. Furutani, Super-compact BOG recondensing system minimizes equipment lifecycle costs, Research Report JFE Engineering Corp, Japan, pp.1.
- [6] Mixing and Reaction Technology Pace Setting Technology, Sulzer Chemtech, Commercial Report, pp.12.
- [7] HAYASHI, K., ASAKA, R., ODA, H., & KOZUKA, M, New Bog recondensing system utilizing gas-liquid direct mixing technology, *Journal of the Japan Institute of Energy*, 97(5), 2018, 119-123. DOI: <https://doi.org/10.3775/jie.97.119>
- [8] Rao, Harsha N., Khai H. Wong, and Iftekhar A. Karimi. "Minimizing Power Consumption Related to Bog Reliquefaction in an LNG Regasification Terminal." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 55, no.27, 2016, 7431-45. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b01341>
- [9] Hasan, M. M., Alfred Minghan Zheng, and I. A. Karimi. "Minimizing Boil-off Losses in Liquefied Natural Gas Transportation.", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 48, no. 21, 2009, 9571-80. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie801975q>
- [10] Peng, Ding-Yu, and Donald B. Robinson. "A New Two-Constant Equation of State.", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 15, no.1, 1976, 59-64. DOI: <https://doi.org/10.1021/i160057a011>

이 원 구(Wonkoo Lee)

[준회원]



- 2018년 2월 : 한동대학교 기계제어공학 (공학사)
- 2023년 2월 : 한동대학교 기계공학 (석사)
- 2018년 1월 ~ 2020년 5월 : 고려강선
- 2023년 2월 ~ 현재 : 한국조선해양 연구원

<관심분야>

기계공학, 열유체, 가스시스템

선 현 준(Hyunjun Sun)

[준회원]



- 2018년 3월 ~ 현재 : 한동대학교
기계제어공학부

<관심분야>

기계공학, 열유체, 가스시스템

이 권 영(Kwon-Yeong Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 포항공과대학교
기계공학 (공학사)
- 2008년 2월 : 포항공과대학원
기계공학 (공학박사)
- 2008년 8월 ~ 2010년 6월 : 삼성
엔지니어링 과장
- 2010년 7월 ~ 2015년 2월 : 한국
원자력연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 교수

<관심분야>

기계공학, 원자력공학, 열유체