

36 MTD급 천연가스 BOG 재액화 플랜트 기본설계[§]

고준석^{*†} · 박성제^{*} · 김기덕^{*} · 홍용주^{*} · 고득용^{*} · 김효봉^{*} · 염한길^{*}

* 한국기계연구원 극한기계부품연구본부

Basic Design of 36 MTD Class Natural Gas BOG Re-Liquefaction System

Junseok Ko^{*†}, Seong-Je Park^{*}, Ki-Duck Kim^{*}, Yong-Ju Hong^{*}, Deuk-Yong Koh^{*}, Hyobong Kim^{*} and Hankil Yeom^{*}

* Dept. of Extreme Energy Systems, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received May 10, 2013 ; Revised June 7, 2013 ; Accepted June 7, 2013)

Key Words: LNG(액화천연가스), Re-Liquefaction(재액화), Basic Design(기본설계), Process Flow Diagram(공정흐름도), Cryogenic Heat Exchanger(극저온 열교환기), Reverse Brayton(역브레이튼)

초록: LNG-극저온기계기술 시험인증센터에 구축되는 LNG 선박용 펌프 및 압축기 성능시험에서 발생하는 증발가스는 안전을 위하여 전량 회수가 요구된다. 본 논문에서는 36 MTD 용량의 천연가스 재액화 시스템에 대한 기본 설계 연구를 수행하였다. 대기압, -60℃, 일반적인 도시가스 조성비, 1,500 kg/hr 유량의 공급 가스를 기본 설계 조건으로 하여 공정 설계가 이루어졌고, 입구 온도 조건 및 가스 조성비에 따른 LNG 생산량 또한 계산하여 다양한 입구 설계 조건에 따른 시스템의 성능 변화를 비교, 분석하였다. 공정 설계 외에도 재액화 시스템의 핵심 기기인 송풍기, 압축기, 극저온 열교환기, 컴팬더의 제작 사양이 도출되었으며, 전력 및 냉각수의 유틸리티 요구조건 또한 기본 설계를 통해 도출되었다.

Abstract: In this paper, we carried out the basic design of 36 MTD natural gas BOG re-liquefaction system to recover the generated natural gas during performance test of LNG pump and natural gas compressor. The re-liquefaction process of natural gas is designed to have 1500 kg/h of liquefaction rate with reverse Brayton refrigeration cycle. With the designed process, the variation of liquefaction rate is calculated for various inlet conditions of feed gas. From results, the liquefaction rate is more sensitive for inlet temperature than gas composition. The specifications of equipments such as gas blower, natural gas compressor, cryogenic heat exchanger and nitrogen compander are determined on the basis of the designed process. The requirement of power consumption and cooling water are also determined through the basic design.

1. 서 론

석유 자원의 고갈과 환경 규제 심화로 인하여 세계 각국은 대체 에너지원의 확보에 심혈을 기울이고 있다. 장기적인 대책으로 수소 에너지와 핵융합 에너지에 대한 연구 개발을 수행 중에 있으나, 중단기적으로는 천연가스의 에너지 비중이 증가하고 있는 추세이다.^(1~4)

천연가스는 기체 상태에 비해 액체 상태에서 부피가 1/600로 줄어들어 단위체적당 에너지 밀도가 매우 높기 때문에 천연가스 산지에서 액화되어 수요 국가로 수송된다. 수송된 액화천연가스(LNG: Liquefied Natural Gas)는 인수기지의 저장탱크에 -162℃의 극저온 액체 상태로 저장된 후, 필요시 기화시켜 최종 사용자인 발전소, 공장, 가정 등으로 공급된다. 국내 조선업체의 세계 LNG 선박 발주량 및 건조량은 1위의 점유율을 차지하는 반면에, 핵심기자재인 펌프, 압축기, 밸브, 열교환기 등의 극저온 기기는 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다. 때문에, LNG 선박용 극저온 기기에 대한 국내 기술 개발과 인프라 구축을 목적으로 한국기계연구원과 경상남도, 경남테크노파크, 김해시는 우리나라 조선 산업의

§ 이 논문은 대한기계학회 플랜트부문 2013년도 춘계학술강연회(2013. 6. 4.-5., 한국수자원공사 교육원) 발표논문임

† Corresponding Author, jsko@kimm.re.kr

주요 거점인 경상남도 지역에 “LNG·극저온기계기술 시험인증센터”를 구축하는 중에 있다. 구축 사업 초기에 시험인증센터에 설치되는 성능 평가 설비의 설계 과정에서 LNG를 이용하는 성능 시험 중 발생하는 BOG(Boil-Off Gas)를 LNG 형태로 회수하기 위한 여러 방안이 고려되었고, 질소 역브레이튼 냉각 시스템을 이용한 재액화 장치는 그 방안 중 하나이다.

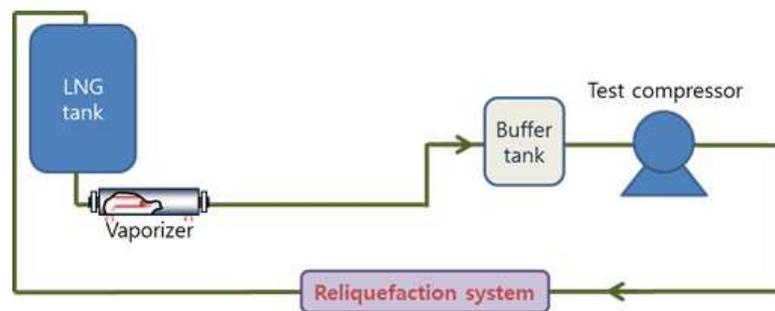
본 논문에서는 LNG 선박용 핵심기기의 성능시험에서 발생하는 증발천연가스의 재액화를 목적으로 하는 36 MTD(Metric Ton per Day)급 천연가스 재액화 시스템의 기본 설계를 수행하여, 공정 흐름도, 입력 조건에 따른 액화량 변화, 압축기, 팽창기, 열교환기 등의 기자재 사양을 도출하였다.

2. 설계 입력 조건

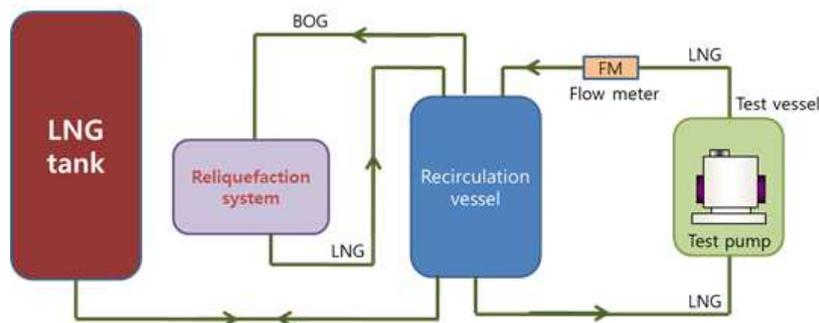
본 연구에서 설계되는 재액화 시스템은 천연가스 압축기와 LNG 카고 펌프 성능시험에서 발생하는 BOG의 재액화하는 것을 목표로 선정하였으며, Table 1과 Fig. 1에 두 가지 성능시험 설비의 개략도와 시험 사양을 나타내었다. 먼저 천연가스 압축기는 BOG 재액화용과 LD(Low Duty) 압축기의 두 종류의 압축기를 시험대상으로 하고, 시험유량은 최대 1,500 kg/hr로 동일한 반면에 입, 출구 온도가 다른 특징

Table 1 Test conditions of test facilities for NG compressor and LNG pump

Test item	Flow rate	Test conditions
BOG compressor	1,500 kg/hr	<ul style="list-style-type: none"> Inlet: -130 ~ ~110°C / 1 barA Outlet : -60°C / 4 ~ 7 barA
LD compressor	1,500 kg/hr	<ul style="list-style-type: none"> Inlet: 30 ~ 40°C / 1 barA Inlet: 40°C / 4 ~ 7 barA
LNG cargo pump	3,000 Nm ³ /hr	<ul style="list-style-type: none"> Outlet pressure : 10 barA Head: 180 m



(a) Natural gas compressor



(b) LNG cargo pump

Fig. 1 Schematic diagram of test facilities with using LNG as working fluid

Table 2 Composition of LNG, mol%

Component	Typical	Pump gas	Rich
N2	0.04	0.92	0
CH4	89.26	99.06	85.12
C2H6	8.64	0.02	8.63
C3H8	1.44	0	4.14
i-C4H10	0.27	0	1.1
n-C4H10	0.35	0	0.9
i-C5H12	0	0	0.1
n-C5H12	0	0	0.01

Table 3 Description of design case and simulation case

	Pressure, barA	Temperature, °C	Composition
Design case	1.03	-60	Typical
Simulation case #1	1.03	-60	Pump gas
Simulation case #2	1.03	+50	Typical
Simulation case #3	1.03	-60	Rich
Simulation case #4	1.03	-100	Pump gas

이 있다. 압축기 시험루프에서는 LNG 저장탱크로부터 기화기를 이용해 기화시킨 후에 버퍼 탱크로 유입되고 시험 대상인 압축기에서 압축된다. 압축된 천연가스는 팽창 밸브에서 감압된 후에 재액화 시스템에서 재액화되어 LNG 저장탱크로 회수된다. LNG 카고 펌프는 LNG 선박의 저장 탱크 내부에 잠긴 상태로 위치하여 LNG 선박으로부터 인수기지의 저장탱크로 이송하는데 사용되며, 대유량의 특징이 있다. 펌프 시험루프에서는 LNG가 저장탱크로부터 순환탱크(Recirculation vessel)로 이송된 후, 시험 펌프에 의해 압력이 10 barA까지 상승한다. 고압의 LNG는 순환탱크로 유입되며 단열 팽창에 의해 BOG가 발생한다. 이 때 발생하는 BOG를 재액화 시스템에서 재액화되어 순환탱크로 회수된다.

시험 대상인 압축기와 펌프의 출구 온도 조건은 재액화 시스템의 입구 조건이 되어 설계 입력 조건으로 사용된다. 압축기 시험설비에서는 다양한 조성비의 천연가스가 사용될 수 있기 때문에 본 연구에서는 입구 온도 조건 외에도 천연가스 조성비에 따른 액화 성능을 비교하였다. 펌프 시험에서는 운전 조건에서 혼합가스 물성에 의해 발생하는 BOG는 대부분이 메탄 가스로 구성되어 있다. Table 2에 본 연구에서 고려된 천연가스 조성비를 나타내었고, Table 3에는 시험설비 운전 조건과 가스 조성비를 고려한 설계 입력 조건을 나타내었다. 본 연구에서는 일반적인 조성비의 천연가스를 이용한 BOG 압축기 시험설비에서 토출되는 천연가스를 재액화하는 경우를 기본 설계 조건으로 선정하였으며, 그 외에 네 가지 해석 조건을 이용하여 기본 설계된 시스템으로부터 얻을 수 있는 액화량을 계산하였다.

3. 공정 설계

36 MTD급 천연가스 재액화 시스템의 기본설계에서는 가장 기본이면서 핵심인 공정흐름도(PFD: Process Flow Diagram)이 도출되고, 기본 공정에 공급기체의 상태를 변화시키며 해석 조건에 따른 액화생산량을 계산한다. 또한, 기본 설계를 통해 공정에 사용되는 송풍기, 압축기, 열교환기, 팽창기 등의 주요 기자재의 요구 사양과 전기 및 수도의 유틸리티 요구 조건, 대략적인 전체 시스템 윤곽이 결정된다.

Fig. 2는 기본 입력 조건에 대하여 설계된 공정 흐름도 결과를 보여주며, 각 지점에서의 상태는 Table 4에 나타내었다. 천연가스 액화 사이클을 먼저 살펴보면, -60°C, 상압의 천연가스가 시스템으로 공급되면 압축기 흡입부에서의 대기압 이상의 압력을 유지하도록 송풍기(C-1100)을 통해 1.3 barA까지 승압된다. 승압된 천연가스는 재액화 된 LNG의 일부와 섞여 온도가 약간 낮아진다. 이는 다양한 조건의 입구 온

Table 4 Process description - state of each point

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fluid	CNG	CNG	CNG	CNG	CNG	CNG	LNG	LNG	LNG
T, °C	-60	-41	-45	35	179	40	-155.1	-155.1	-155
P, barA	1.03	1.3	1.3	1.15	6.9	6.8	6.7	6.7	3.2
Flow, Nm³/h	1876	1876	1896	1896	1896	1896	1896	1876	1876
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Fluid	LNG	LNG	GAN						
T, °C	-155.1	-157	33.5	205	40	-108.2	-160.6	33.5	37
P, barA	9.6	1.3	9.6	40.6	40.4	40.3	9.83	9.63	9.615
Flow, Nm³/h	20	20	25777	25777	25627	25627	25627	25627	150

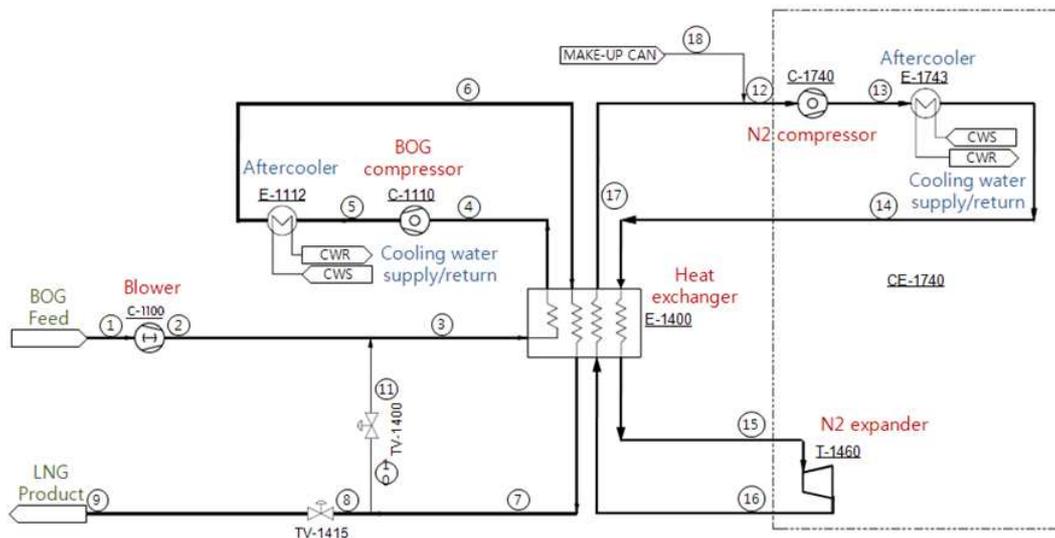


Fig. 2 Process flow diagram of designed 36 MTD BOG re-liquefaction system

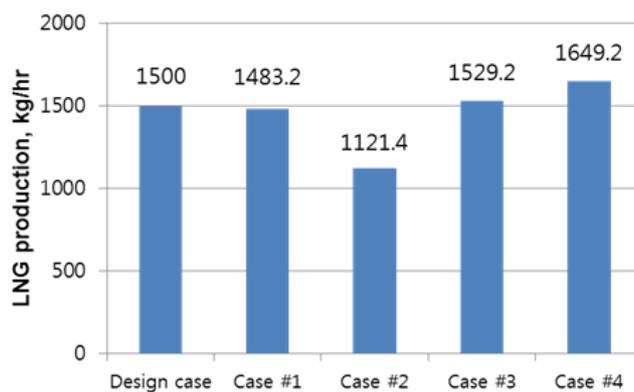


Fig. 3 LNG production rate as condition of BOG feed gas

도 조건에 대하여 열교환기에서의 효율을 확보하기 위한 목적을 갖는다. 즉, 생산되는 LNG의 냉열을 이용하여 열교환기 내부에서 열교환하는 유동 사이의 온도차이가 과도하게 증가하는 것을 방지하는 역할을 한다. 이 후에는 열교환기를 통과하며 냉열이 회수되고, 압축기에서 6.9 barA까지 승압된다. 압축열에 의해 179°C까지 상승된 작동 유체는 냉각수를 이용한 열교환기를 통과하며 40°C까지 냉각되어, 고압, 상온의 상태가 된다. 압축된 천연가스는 극저온 열교환기를 통과하며 역브레이튼 질소 냉각 시스템에서 생성된 냉열에 의해 액화되고, 팽창 밸브를 통해 LNG 저장 탱크보다 높은 압력인 3.2 barA까지 감압되

어 저장탱크로 회수된다. 기체 질소가 작동 유체로 폐순환되는 역브레이튼 시스템에서는 압축기와 팽창기가 결합된 컴팬더(compander)에 의해 시스템 작동 압력이 결정되며, 고압과 저압은 각각 40.6 barA와 9.6 barA로 설계되었다. 특히, 압축기와 팽창기에서는 누설이 존재하기 때문에 시스템 압력을 유지하기 위한 기체 보충 장치가 추가되었다. 질소 역브레이튼 사이클에서 팽창 후의 기체는 -160.6℃의 극저온을 생성하여 -155.1℃에서 액화되는 천연가스로부터 열을 제거하도록 사이클이 설계되었다.

Fig. 2의 공정은 기본 입력 조건의 공급 천연가스를 재액화하여 1,500 kg/hr의 LNG를 생산할 수 있도록 공정 설계가 이루어졌다. 다양한 설계 입력 조건에 대하여 LNG 생산량을 계산한 결과 Fig. 3과 같이 설계 입력 조건에 따라 1121.4 ~ 1649.2 kg/hr까지 변화하는 것으로 나타났다. 기본 설계 조건과 case #1, case #3는 동일한 입구 온도에서 공급 BOG의 조성비만 다른 경우인데, 생산량 차이가 수십 kg/hr에 불과해 차이가 크지는 않으나, 고분자 탄화수소의 조성비가 클수록, 반대로 가장 가벼운 성분인 메탄(CH4)의 조성비가 작을수록 액화량은 증가하는 것으로 나타났다. 이는, 가벼운 기체인 메탄의 끓는점이 낮아

Table 5 Required specifications of NG blower and NG compressor.

	NG blower	NG compressor
Type	Roots	2 stage/centrifugal/oil-free
Flow (Nm ³ /hr)	Max. 2088	Max. 2093
Suction P. (barA)	1.03	1.15
Inlet T. (℃)	-60 (-95 ~ +50)	35 (-20 ~ by vendor)
Discharge P. (barA)	1.3	6.9
Main voltage	440 V / 60 Hz	6600 V / 440 V / 60 Hz

Table 6 Required specifications of 4 stream cryogenic heat exchanger

Type	Braze Aluminum Heat Exchanger			
Fluid	99.5% CH4 + 0.5% N2	99.5% CH4 + 0.5% N2	100% N2	100% N2
Flow rate (Nm ³ /hr)	2093	2093	25613	25613
Density (kg/m ³)	1.11/0.72	4.26/415.6	43.4/102.9	35.5/10.6
Viscosity (cP)	0.008/0.011	0.011/0.10	0.019/0.013	0.009/0.018
Spec. Heat (kJ/kg-K)	2.11/2.24	2.29/3.53	1.12/1.50	1.30/1.06
Therm. Cond. (W/m-K)	0.025/0.035	0.036/1.177	0.028/0.020	0.012/0.027
Temperature (℃)	-45/35	40/-155.1	40/-108.2	-161/33.2
Operating P. (barA)	1.3	6.8	40.4	9.83
Allowable P. drop (bar)	0.15	0.1	0.1	0.2
Design P./Test P. (bar)	5	10	55	15
Design T. (Min/Max)	-196/65	-196/65	-196/65	-196/65

Table 7 Required specifications of nitrogen compander

Compressor side	Type	3 stage centrifugal and oil free
	Fluid	100% N2
	Flow (Nm ³ /hr)	Max. 25,763
	Suction P. (barA)	9.615
	Inlet T. (℃)	37 (-20 ~ by vendor)
	Discharge P. (barA)	40.6
	Main voltage	6600 V / 440 V / 60 Hz
Turbine side	Flow (Nm ³ /hr)	25,613
	Temperature (℃)	-108.2 (inlet) / -161 (outlet)
	Pressure (barA)	40.3 (inlet) / 9.88 (outlet)
	Density (kg/m ³)	102.85 (inlet) / 35.68 (outlet)

액화에 더 많은 에너지가 요구되기 때문이다. 반면에 가스 조성비가 동일한 조건에서 입구 온도 조건이 다른 기본 설계 조건과 case #2의 결과 비교, case #1과 case #4의 결과 비교로부터 LNG 생산량은 입구 온도 조건에 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 특히, -60°C 의 BOG가 공급되는 기본 설계 조건에 비해 상온의 천연가스가 공급되는 case#2의 경우에는 생산량이 1121.4 kg/h 로 75 % 수준에 불과한 것을 알 수 있다. 때문에, 성능시험에서 발생하는 BOG의 냉열을 잘 회수하는 것이 재액화 시스템의 성능 향상에 매우 중요하다고 말할 수 있다.

4. 기자재 및 시스템

본 장에서는 공정 설계 결과를 바탕으로 시스템 구축을 위해 필요한 기자재의 주요 사양과 재액화 시스템 운전을 위해 필요한 유틸리티 요구조건, 최종 시스템 외형에 대해 설명한다.

본 재액화 시스템에서 배관을 제외한 주요 기자재로는 천연가스 송풍기, 천연가스 압축기, 극저온 열교환기, 질소 컴팬더의 네 종류가 있으며, 각 기자재의 주요 사양은 Table 5 ~ 7에 정리하였다.

천연가스 송풍기는 공급되는 BOG의 압력을 대기압 기준으로 선정하였을 때 천연가스 압축기 흡입부에서 대기압 이하가 되는 경우를 방지하기 위하여 사용된다. 주요 요구 조건으로는 시스템 운전 조건에서 최적 성능을 발휘하며, $-95 \sim +50^{\circ}\text{C}$ 의 작동 기체 온도에 대해 운전 가능할 것을 주요 조건으로 선정하였다. 천연가스 압축기는 원심형으로 최소 2단의 다단 방식이 요구되며, 특히 작동기체인 천연가스가 극저온으로 액화되기 때문에 극저온에서 응고가 발생하는 윤활유 사용 배제 조건을 적용하였다. 재액화 시스템의 성능에 가장 민감한 영향을 미치는 극저온 열교환기는 냉열 회수 및 질소 역브레이튼 시스템과의 열교환을 목적으로 네 개의 흐름(stream)을 가지며, 각 흐름의 작동기체 조성, 입, 출구의 온도 및 압력, 허용 압력 강하 등을 설계 조건으로 선정하였다. 기본 설계 조건에서 158 kW/K 의 유효 열전달 계수값을 보이며, Table 3에 나타난 다양한 설계 입력 조건에서 $135 \sim 171 \text{ kW/K}$ 의 유효 열전달 계수를 갖는 것으로 나타났다. 극저온 열교환기의 총 열교환량은 약 2 MW 이다. 마지막으로, 질소 컴팬더에서 압축기와 팽창기 모두 원심형이며, 압축기는 3단으로 구성되는 다단 구조가 요구된다. 팽창기 부분은 입구와 출구 조건을 명확히 하여 재액화에 필요한 충분한 냉열을 생성할 수 있도록 하였다. 본 기본설계에서 도출된 기자재 요구조건은 최소한의 항목만으로 제한하였고, 그 외의 각 기기별 사양은 제작사와 토의를 거쳐 결정되어야 한다.

Table 8은 기본 설계에서 도출된 기기별 전력 소모량과 냉각수량을 계산한 결과이다. 이 결과는 대략적인 값이며, 정확한 수치는 기기 제작사에서 결정되고, 제시되어야 한다. 재액화 시스템 운전을 위해서 필요한 총 전력은 2.45 MW 로 예측되었으며, 질소 역브레이튼 냉각시스템의 압축기에서 대부분의 전력을 소모하는 것으로 나타났다. 냉각수는 대부분의 전력을 소모하는 질소 압축기와 천연가스 압축기에

Table 8 Utility requirements - power consumption and cooling water

Power consumption (kW)		Cooling water		Flow (m^3/hr)	Heat (kW)
N2 Comp. Lube Oil Heater	5	N2 Compan. intercooler 1	55	55	642
N2 Comp. Aux. Lube Oil Motor	3	N2 Compan. intercooler 2	55	55	642
N2 Comp. Motor	2100	N2 Compan. aftercooler	55	55	642
NG Comp. Motor	300	N2 Compan. motor cooler	7	7	82
NG Comp. Lube Oil Heater	5	N2 Compan. lube oil cooler	7	7	82
NG Comp. Aux. Lube Oil Motor	3	NG Comp. intercooler 1	12	12	140
NG Blower Motor	30	NG Comp. aftercooler	12	12	140
		NG Comp. lube oil cooler	3	3	35
Total	2450	Total	206		

* Comp. = compressor, Compan. = compander

** Cooling water temperature = $32/42^{\circ}\text{C}$ (in/out)

*** intercooler 1 = between 1st and 2nd stage / intercooler 2 = between 2nd and 3rd stage

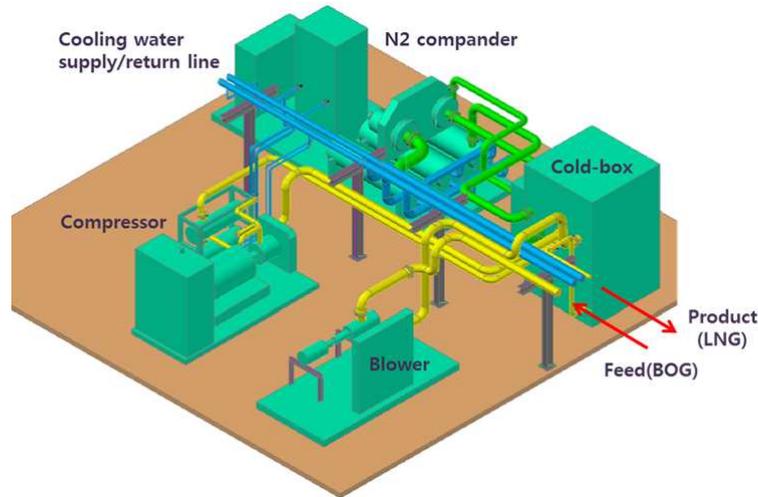


Fig. 4 3D plot of 36 MTD BOG re-liquefaction system

사용된다. 재액화 시스템 운전에 필요한 총 냉각수량은 $206 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 2.4 MW의 열을 제거해야 하기 때문에 그에 상응하는 냉각탑의 설치 또한 요구된다. Fig. 4는 기본설계를 바탕으로 그려진 36 MTD BOG 재액화 시스템의 3차원 도면으로 상용으로 판매되는 각 기기의 외형을 참고로 그려졌으며, 천연가스, 기체 질소 및 냉각수 배관 설치 형상을 포함한다. 도출된 3차원 도면으로부터 재액화 시스템의 설치를 위해 필요한 바닥 면적은 $15 \times 15 \text{ m}$ 이다.

5. 결론

본 논문에서는 LNG 선박용 핵심기기인 압축기 및 펌프의 성능시험에서 발생하는 BOG를 재액화하여 전량 회수하는 것을 목적으로 시간당 1,500 kg 혹은 하루에 36 ton의 천연가스 재액화 능력을 갖는 재액화 시스템의 기본 설계 연구를 수행하였다. 기본 설계 입력 조건에 대하여 요구 성능을 만족하는 공정 설계가 이루어졌고, 동일한 설계 공정에서 공급 가스의 입구 온도 및 조성비가 변화하는 경우에 대하여 액화량 변화를 비교, 분석한 결과 입구 온도 조건이 시스템의 액화량을 결정하는 주요 변수임이 확인되었다. 공정 설계 외에도 시스템 구축에 필요한 송풍기, 압축기, 열교환기, 팽창기 등의 제작 사양과 전력 및 냉각수의 유틸리티 요구 조건 등 향후 시스템 상세 설계 및 구축에 필요한 기본 정보를 도출한 데 본 연구의 의의가 있다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 자체사업으로 진행 중인 “LNG-극저온기계기술시험 인증 체계 구축” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Tusiani, M. D. and Shearer, G., 2007, LNG : A Nontechnical Guide, PennWell, Tulsa, pp. 25~65.
- (2) Kidnay, A. J. and Parrish W., 2006, Fundamentals of Natural Gas Processing, Taylor & Francis, Boca Raton, pp. 1~8.
- (3) Shively, B., Ferrare, J. and Petty, B., 2010, Understanding Today's Global LNG Business, Enerdynamics Corp., Laporte, pp. 13~48.
- (4) Griffin, P., 2012, Liquefied Natural Gas: The Law and Business of LNG, 2nd ed., Globe Business Publishing Ltd., London, pp. 55~90.