

상용 공정시뮬레이션 프로그램을 이용한 부유식 LNG 발전설비의 BOG 회수시스템 공정모사

서주완* · 유승열** · 이재철*** · 김영훈**** · 이순섭****†

* 경상대학교 해양시스템공학과 석사과정, ** 경상대학교 해양시스템공학과 박사과정,

*** 경상대학교 해양시스템공학과 교수, **** 경남대학교 조선해양시스템공학과 교수

Process Simulation of the BOG Re-Liquefaction system for a Floating LNG Power Plant using Commercial Process Simulation Program

Ju-Wan Seo* · Seung-Yeol Yoo** · Jae-Chul Lee*** · Young-Hun Kim**** · Soon-Sup Lee****†

* Master's Student, Department of Ocean System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

** PhD Candidate, Department of Ocean System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

*** Professor, Department of Ocean System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

**** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea

요 약 : 최근 환경규제가 강화됨에 따라 액화천연가스(Liquefied Natural Gas)를 이용하여 전력을 생산해내는 신규발전설비인 부유식 LNG 발전설비(floating LNG power plant)가 개발되고 있다. 부유식 LNG 발전설비는 운용 시 증발가스가 발생하고 이를 제거하거나 회수할 수 있는 시스템의 설계가 필요하다. 그러나 해양플랜트는 해상요건에 따라 설계가 상이하고, 부유식 LNG 발전설비의 설계 전 시행착오를 줄이기 위해 지속적으로 수정이 가능한 BOG 회수시스템 공정모사 모델이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 상용공정시뮬레이션 프로그램을 통해 부유식 LNG 발전설비에 적합한 모델을 모델링하고자 냉매사용 유무에 따라 서로 다른 BOG(Boil-Off Gas) 회수시스템을 모델링하여 BOG의 회수율과 액화점을 비교 및 분석하였으며, 그 결과 질소냉매를 사용한 BOG 회수시스템 모델을 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 모델로 제안하고자 한다.

핵심용어 : 액화천연가스, 부유식 LNG 발전설비, 증발가스, 회수시스템, 공정모사

Abstract : Environmental regulations have recently been strengthened. Consequently, floating LNG(Liquefied Natural Gas) power plants are being developed, which are new power generation plants that generate electricity by utilizing LNG. A floating LNG power plant generates BOG(Boil-Off Gas) during its operation, and the system design of such a plant should be capable of removing or re-liquefying BOG. However, the design of an offshore plant differs according to the marine requirements. Hence, a process simulation model of the BOG re-liquefaction system is needed, which can be continuously modified to avoid designing the floating LNG power plant through trial and error. In this paper, to develop a model appropriate for the floating LNG power plant, a commercial process simulation program was employed. Depending on the presence of refrigerants, various BOG re-liquefaction systems were modeled for comparing and analyzing the re-liquefaction rates and liquid points of BOG. Consequently, the BOG re-liquefaction system model incorporating nitrogen refrigerants is proposed as the re-liquefaction system model for the floating LNG power plant.

Key Words : Liquefied natural gas, Floating LNG Power Plant, Boil-off Gas, Re-liquefaction System, Process Simulation

* First Author : smart95@gnu.ac.kr, 055-772-9197

† Corresponding Author : gnusslee@gnu.ac.kr, 055-772-9191

1. 서론

최근 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서 온실가스 배출에 대한 규정이 강화됨에 따라 선박이 배출하는 이산화탄소, 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx)을 감소시켜야 한다. 친환경 에너지인 천연가스는 선박의 온실가스 배출량을 감소시킬 수 있는 에너지원 중 하나로써 최근 수요가 가파르게 증가하고 있으며, 2040년을 기점으로 석탄을 비롯한 석유 에너지원의 소비량을 넘어설 것으로 예상된다(Hwang and Lim, 2018).

LNG(Liquefied Natural Gas) 수요 증가는 LNG 추진 선박뿐만 아니라 LNG를 활용한 다양한 해양설비의 연구 및 개발로 이어졌으며, 특히 부유식 LNG 발전설비는 환경오염을 고려해야 하는 지역, 전력의 수요는 일정하나 전력 공급 시설이 열악한 섬들이 모여 있는 지역의 전력난을 해결하기 위한 전력 생산 설비로 주목받고 있다(Jeong et al., 2012).

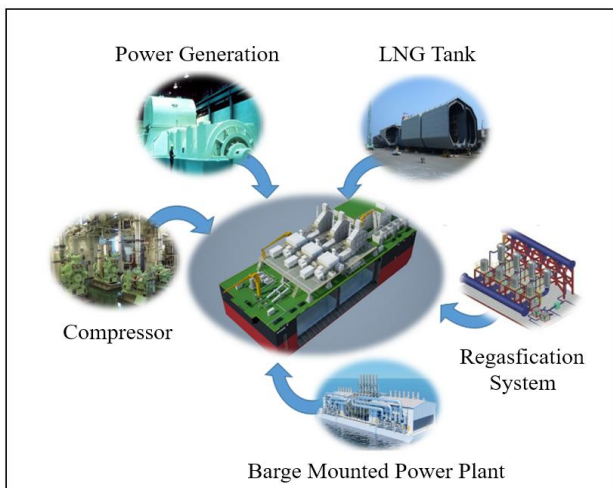


Fig. 1. Floating LNG power plant.

Fig. 1은 부유식 LNG 발전설비의 주요 시스템을 나타낸 것이다. 이들 시스템 중 BOG 회수시스템은 부유식 LNG 발전설비를 안전하게 운용하기 위해 특히 중요한 역할을 한다. 부유식 LNG 발전설비는 운용 시, 상압에서 LNG 저장탱크 내부를 평균적으로 -163°C 이하의 극저온의 상태로 유지해야 한다. 그러나 외부로부터 LNG 저장탱크로 유입되는 열을 전부 차단하는 것이 쉽지 않아, BOG의 발생을 방지하기 어렵다(Kim and Kim, 2005).

Lee et al.(2009)에 의하면 열 유입으로 인한 BOG의 하루 평균 발생량은 LNG 저장량의 0.1%~0.15%이며 안전한 설비 운용을 위해 BOG를 제거하기 위한 다양한 방법들이 고

안되었다. 특히 BOG 회수시스템은 생성된 BOG를 LNG로 재액화하여 회수함으로써 부유식 LNG 발전설비의 안전한 운용이 가능하도록 한다(Hwang and Lim, 2018).

그러나 해양플랜트들은 해상의 요건에 따라 다른 운용환경을 가지며, 특히 부유식 LNG 발전설비는 신규설비이므로 부유식 LNG 발전설비를 위한 BOG 회수시스템 설계 시 많은 시행착오가 발생할 것으로 예상된다. 설계 오류로 인해 발생하는 문제는 설계단계, 생산단계, 운용단계로 나아갈수록 이를 해결하기 위해 소요되는 시간, 비용 및 노력이 기하급수적으로 증가하므로 BOG 회수시스템을 설계하기에 앞서 공정모사를 진행할 필요가 있다. 부유식 LNG 발전설비의 운용환경과 해상요건을 고려한 BOG 회수시스템의 공정 과정을 시뮬레이션하여 설계 과정의 시행착오를 줄일 수 있는 공정모사 모델이 필요하다.

Jin et al.(2007)은 역 브레이튼 냉동사이클을 이용하여 BOG 재액화시스템 설계하고 열역학적 해석을 통해 시스템 상태가 두 개의 사이클 지점 온도에 의해 정의됨을 보였다. 그러나 LNG 운반선에 대한 것으로 부유식 LNG 발전설비에 적용하기에는 한계가 있다.

Lee et al.(2010a)은 LNG와의 열 교환을 통해 BOG를 12 bar 까지 압축하여 CNG(Compressed Natural Gas)의 형태로 만들고 최대 CNG의 유량과 이에 따른 전산모사를 통해 파이프라인(pipe line)의 필요 개수를 도출하였다. 그러나 BOG에 대해 냉매를 이용하여 냉각하는 부유식 LNG 발전설비에서 CNG의 유량을 통한 전산모사는 한계가 있다.

Hwang and Lim(2018)은 BOG 재액화시스템의 최적 설계를 진행하여 설치 및 운영 비용을 최소화할 수 있는 최적 설계 용량과 설계 변수를 도출하였다. 그러나 LNG 운반선을 대상으로 하여 부유식 LNG 발전설비에 적용하기 어렵다.

최근 들어 BOG 회수방법에 대한 연구가 다방면으로 이루어지고 있지만 선행연구들은 LNG 운반선 및 육상 LNG 설비에 대해 적용된 경우가 많고 신규설비인 부유식 LNG 발전설비에 대한 연구는 상대적으로 부족하였다. 또한 대부분의 경우 냉매를 사용하여 BOG를 회수하였으나 냉매를 사용하지 않는 BOG 회수시스템 또한 존재하며, BOG를 태워 제거하거나, 연료로 다시 쓰는 여러 방법들이 존재한다. 부유식 LNG 발전설비는 신규설비이므로 운용사례가 적고 이를 설계하기 위한 정보가 적기에 설계를 진행하기 공정모사를 통해 설계하고자 하는 BOG 회수시스템이 부유식 LNG 발전설비에 적합한지를 확인할 필요성이 있다.

본 연구에서는 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델링을 수행하였다. 먼저, LNG 발전설비들의 BOG 회수시스템 및 공정모사 모델을 분석하고, BOG 회수방

법에 대해 분석하였다. 분석 후 상용공정시뮬레이션 프로그램인 UNISIM Design을 사용하여 모델링된 BOG 회수시스템에 대한 비교 및 분석을 진행하였으며, 최종적으로 부유식 LNG 발전설비에서 BOG 회수시스템 설계 시 주어진 해상요건에 따라 지속적으로 설계의 수정이 가능한 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델링을 진행하였다.

2. BOG 회수시스템

2.1 BOG Re-liquefaction System

BOG 회수시스템이란 LNG 저장탱크 내부에서 외부 열 유입으로 인해 증발가스인 BOG가 발생 시, LNG 저장탱크 내의 압력을 일정하게 유지하기 위해 BOG를 외부로 방출하여 제거하거나 재액화하여 회수하는 시스템이다. BOG를 처리하기 위해서는 여러 가지 방법들이 존재한다. 첫 번째는 보조 연료로 재사용하는 하는 방법이다. LNG선의 경우 과거에는 BOG를 추진동력인 증기터빈의 연료로 공급하도록 하였다. 그러나 근래에 LNG선이 대형화되고 고효율의 디젤엔진 방식으로 변경됨에 따라 BOG를 운항 중의 보조 연료로 사용될 수 없게 되었다(Jin et al., 2007). 또한 해양플랜트에 적용하기에는 부적합하다. 두 번째 방법은 공기 중에서 태워 버리는 것이다. 그러나 환경규제가 한층 강화됨에 따라 부유식 LNG 발전설비에서 BOG를 태워 제거하는 것은 부적합하다. 세 번째는 압축기, 열교환기, 상 분리기와 같은 장비들을 통해 BOG를 재액화시켜 다시 LNG 저장탱크로 회수하는 방법으로, BOG 회수시스템을 사용하는 것이다. BOG 회수시스템은 LNG 저장탱크에서 BOG가 발생하게 되면 극저온으로 액화시켜 다시 LNG 탱크로 회수되는 순환 사이클(Park et al., 2013)을 가지는 공통점이 있으나, 냉매의 사용유무에 따라 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 냉매를 이용하여 BOG를 LNG로 회수하는 방법이다. 제한적 공간과 회수 설비의 비용 및 운영 시 발생하는 비용문제로 인해 냉매 사이클을 이용한 회수시스템(Hwang and Lim, 2018)은 제한적으로 적용되고 있다. 해양플랜트의 특성상 공간적 제약 조건을 고려하는 것도 필요하지만 부유식 LNG 발전설비에서 회수율이 우선시 되어야 한다. 두 번째는 별도의 냉매를 사용하지 않고 BOG를 회수하는 방법이다. 첫 번째 방법에 비하여 요구되는 BOG 회수시스템의 설비가 줄고, 설비에 따른 비용 문제가 줄어드는 장점이 있지만, BOG의 회수량이 상대적으로 떨어지며 압축기 용량의 고도화가 요구되어 비용이 상승하는 단점(Hwang and Lim, 2018)이 있다. 냉매의 사용 유무에 따른 두 가지 방법이 현재 해양플랜트에서 적용 가능성이 있는 BOG 회수시스템이며, 공정모사를 통해 부유식

LNG 발전설비에 보다 적합한 방법의 BOG 회수시스템을 확 인할 필요가 있다.

2.2 BOG-N₂ Re-liquefaction System

냉매를 사용하는 BOG 회수시스템은 외부 열 유입으로 발생한 BOG를 설치된 별도의 냉매설비와 회수설비를 통해 다시 LNG 저장탱크로 회수되도록 한다. 이와 같은 방식의 BOG 회수시스템을 회수공정에서 가장 많이 사용하고 있다. 냉매는 불활성이며 급속냉각 및 동결이 가능한 질소 가스를 냉매로 사용하는 것이 대표적이다. Fig. 2는 질소 냉매를 사용하는 BOG 회수시스템 공정의 흐름을 나타낸 것이다.

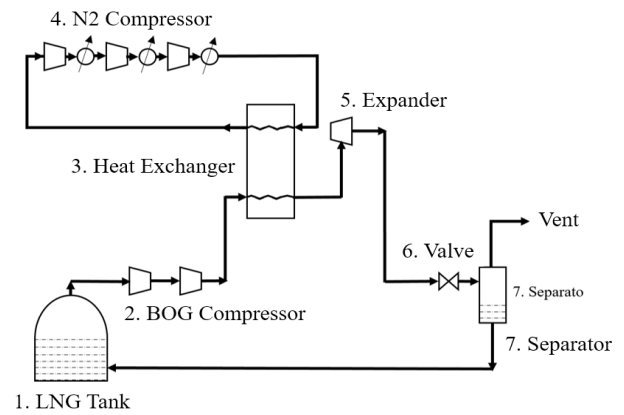


Fig. 2. Diagram of BOG-N₂ re-liquefaction system.

LNG 저장 탱크로부터 배출된 BOG는 승압, 응축, 열 교환 과정을 거쳐 LNG로 액화된 후 LNG 저장탱크로 회수된다. 이때 BOG 회수에 필요한 극저온의 냉열을 얻기 위해 질소 냉매를 활용한 냉각 장치를 사용한다. 질소 냉각 장치는 3단 압축 및 중간 냉각(intercooling) 과정을 통해 질소 가스의 압력을 상승시키고 고온 고압으로 승압시켜, 극저온의 상태로 냉각한다. 고압 질소가 열 교환기에서 BOG와 내부 열 교환을 통하여 저온 상태로 변하고 팽창 터빈(expander)을 지나면서 액화점에 가까운 극저온, 저압상태로 팽창하게 된다. 이렇게 충분히 온도가 낮아진 BOG는 상 분리기에서 LNG 탱크로 회수된다.

2.3 BOG-BOG Re-liquefaction System

BOG를 자체적으로 회수하는 시스템의 방법은 LNG와 BOG를 CNG의 형태로 만들어 회수하거나, 줄-튐슨 효과를 이용하여 회수하는 방법이 있다. 특히 줄-튐슨 효과를 이용하는 방법은 극저온 공정에서 널리 쓰이고 있는 방법으로써 (Kim, 1997), 압축된 기체를 좁은 배관이나 밸브를 통해 팽창

시켜 기체의 온도를 낮추는 방법이다. 줄-튐슨효과를 이용한 BOG 회수시스템의 흐름은 별도의 냉매설비가 없는 구조로 구성된다. Fig. 3는 이를 도식화한 것이다.

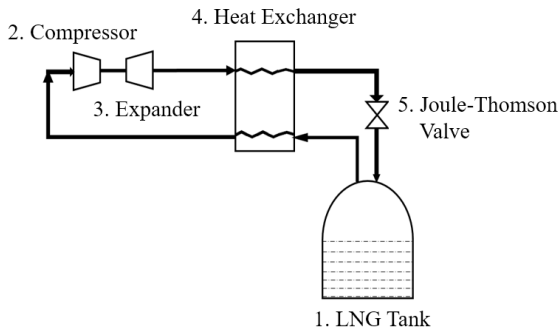


Fig. 3. Diagram of BOG-BOG re-liquefaction system.

응축압력을 상승시키기 위해 압축기에서 BOG를 압축 하고 압축된 BOG를 팽창 터빈으로 전달하여 냉각을 하고 다시 열교환기(heat exchanger)에서 열교환 후, 액화점에 가까운 극저온의 저압가스가 단열된 줄-튐슨 밸브로 보내어지게 된다. 이때 줄-튐슨 밸브의 입구와 출구의 면적차이를 이용하여 BOG가 빠져나가게 되면, 기체의 경우 분자 간 상호작용으로 인해 온도의 변화가 생기고 압축된 기체가 액화되어 LNG 저장탱크로 회수된다.

3. BOG 회수시스템 공정모사

3.1 공정모사 정의

공정모사란 공정장치를 연결하여 공정운용 방법에 따라 어떻게 운영되는지 시험하는 것이다. BOG 회수시스템의 공정모사는 시뮬레이션을 통해 BOG 회수시스템의 공정 흐름을 파악할 수 있으며(Lee et al., 2008), 각종 화학공정 장치들을 연결하고, 조작변수(operation parameter)를 달리하여 얻어지는 화학물질의 양과 품질을 평가할 수 있다. 공정장치들의 규격을 달리해서 공정장치들의 개별성능(performance of unit equipment) 또한 알아볼 수 있다. 공정모사는 전체 공정과정뿐만 아니라 개별 장치별로 시뮬레이션을 해볼 수 있으므로 부유식 LNG 발전설비의 BOG 회수시스템에 대해 BOG-N₂ 회수시스템과 BOG-BOG 회수시스템의 공정모사를 진행하여 부유식 LNG 발전설비에 적용 가능 여부를 확인하고자 한다. 공정모사를 진행할 수 있는 대표적인 프로그램은 Aspen Plus, HYSYS, Pro-II, UNISIM Design이 있다. 그 중 선박이나 해양플랜트 설비들에 대한 시스템의 시뮬레이션

시 많이 활용되는 상용공정프로그램은 UNISIM Design으로, 본 연구에서는 이를 사용하여 적용 가능 여부를 확인하고자 한다.

3.2 BOG Re-liquefaction System Modeling

공정모사를 위해서 먼저 BOG 및 LNG의 조성비를 구성해야 한다. 냉매의 사용여부에 따라 BOG 회수시스템 공정모사 모델에서 사용되는 화학물질의 구성은 한국가스공사의 전형적인 LNG, BOG의 구성비로 나타내었다(Lee et al., 2010b). 이는 공정모사 프로그램의 기본환경조성(simulation basis manager) 툴을 이용하여 구성하였다.

LNG의 조성은 89% 이상이 메탄(methane)이며, 에탄(ethane), 프로판(propane), 부탄(butane), 이소부탄(i-butane), 질소(nitrogen) 순으로 조성비를 이룬다.

BOG는 메탄이 99% 이상이며, 에탄, 질소 순으로 조성된다. Table 1에서 본 연구에서 쓰이는 LNG 와 BOG의 조성비에 대하여 나타내었다.

Table 1. LNG and BOG components

Component	LNG	BOG
Methane	89.26 %	99.64 %
Ethane	8.64 %	0.02 %
Propane	1.44 %	
Butane	0.35 %	
I-Butane	0.27 %	
Nitrogen	0.04 %	0.34 %
Total (%)	100.00 %	100.00 %

Table 1과 같이 LNG와 BOG의 조성비는 같지 않다. LNG 저장탱크 내부에 열이 유입되면 LNG 성분 중 비점이 낮은 메탄성분이 먼저 증발하고 LNG의 구성물질 중에서 프로판, 부탄, 이소부탄 등 메탄에 비해 무거운 구성물질들은 증발량이 많지 않으므로 메탄이 BOG 조성의 대부분을 이룬다.

부유식 LNG 발전설비의 BOG 회수시스템 공정모사 모델에서 LNG와 BOG를 다루기 위해서 LNG 및 BOG와 같은 고압, 고온, 극저온의 상황의 계산에서 가장 적합하며, 공정모사에서 가장 많이 쓰이는 팽-로빈슨 열역학 방정식을 적용하였으며, 팽-로빈슨 방정식은 공정모사 프로그램인 UNISIM Design의 유체패키지 툴을 이용하여 상태방정식(equation of state) 형태로 아래와 같이 적용하였다.

The Peng-Robinson equation of state

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2} \quad (1)$$

$$a = \frac{0.45724R^2T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b = \frac{0.07780RT_c}{P_c} \quad (3)$$

상기 방정식의 식(1)의 P와 식(2), 식(3)의 P_c 는 시스템의 압력, 임계압력, 식(1) T와 식(2), 식(3)의 T_c 는 시스템의 온도, 임계온도, 식(1)의 V_m 은 부피, 식(2), 식(3)의 a , b 는 매개변수, 식(1)의 α 는 편심인자의 항으로 표현된 함수, 식(1), 식(2), 식(3)의 R은 기체상수를 나타낸다.

부유식 LNG 발전설비의 BOG 회수시스템 공정모사 모델에 쓰이는 장비들과 각 장비의 파라미터를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Equipment parameter

Equipment	BOG-N2 parameter	BOG-BOG parameter
Heat Exchanger	- Press (bar): 20.0/5.0 - Temp (°C): 60/-190	- Press (bar): 20.0/5.0 - Temp (°C): 60/-190
N2 Tank	- Press (bar): 7.0 - Temp (°C): 100/-20	-
N2 Compressor	- Press (bar) · SUC: 3.0/8.30 · DIS: 7.0/21.6 (MAX) - Power (kW): 159	-
BOG Compressor	- Press (bar) · SUC: 3.0/8.30 · DIS: 7.0/21.6 (Max) - Power (kW): 159	- Press (bar) · SUC: 3.0/8.30 · DIS: 7.0/21.6 (Max) - Power (kW): 159
Expander	- Press (bar): 21.0/7.0 - Power (kW): 18.7	- Press (bar): 21.0/7.0 - Power (kW): 18.7
Separator	- Press (bar): 10.0 - Temp (°C): 60/-190	- Press (bar): 10.0 - Temp (°C): 60/-190

BOG-N2 회수시스템과 BOG-BOG 회수시스템의 구성 장비는 열 교환기, 질소 탱크, 질소압축기, BOG 압축기, 팽창터빈, 상 분리기로 구성하였으며 냉매공정의 설비를 제외하고, 비교를 위해 냉매공정에 필요한 설비를 제외하고 같은 장비

로 구성하였다. 각 장비들의 파라미터는 육상 플랜트와 LNG 선박을 참조하여 선정하였다.

BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델에서, 50°C의 온도 조건에서 BOG가 발생하게 되면 압력은 7.0 bar로 상승한다. 발생한 BOG는 인입 압력이 최소 3.0 bar에서 최대 8.3 bar로 설계된 BOG 압축기에서 최소 7.0 bar에서 최대 21.6 bar까지 압축되어 열교환기로 전달된다.

이때 질소 냉매는 정격용량이 1480Nm³/h인 질소 압축기를 통해 열교환기로 전달되어 BOG를 냉각한다. 냉각된 BOG는 팽창 터빈을 통과한 후 상 분리기로 전달되고, 대부분 LNG 탱크로 회수되며 나머지는 벤트라인(vent line)을 통해 대기 로 방출된다.

BOG-BOG 회수시스템은 별도의 냉매를 필요로 하지 않아 공정모델에서 냉매설비가 존재하지 않는다. 시뮬레이션 조건은 동일하게 50°C의 온도에서 BOG가 7.0 bar의 압력으로 발생하도록 하였다. 발생한 BOG는 인입 압력이 최소 3.0 bar에서 최대 8.3 bar로 설계된 BOG 압축기에서 최소 7.0 bar에서 최대 21.6 bar까지 압축되어 열교환기로 전달된다. 이는 고온 및 고압이 20.0 bar/60°C이며, 저온 및 저압이 5.0 bar/-190°C인 열 교환기를 통과하고, 팽창터빈으로 전달되어 냉각시킨다. 이후 팽창터빈을 21.0 bar의 압력으로 통과하여 다시 열 교환기를 통해 BOG와 BOG간의 열 교환이 진행된다. 이후 BOG는 7.0 bar에서 액화되어 상 분리기에서 단열된 줄-톱슨밸브로 전달되고, 입구와 출구의 압력차를 이용한 줄-톱슨밸브를 통해 냉각된 BOG는 LNG 탱크로 회수된다.

4. BOG 회수시스템 공정모사 결과

부유식 LNG 발전설비에 적합한 회수시스템을 확인하고 자 공정모사를 모델을 냉매사용 유무에 따라 공정모사 모델링을 진행한 결과이다. 이는 부유식 LNG 발전설비가 신규 설비이고, 운용사례가 적어 다양한 회수방법 중 냉매의 사용유무에 따른 비교를 진행하였고, 부유식 LNG 발전설비에서 사용되는 장비들에 대한 값을 동일하게 입력하여 시뮬레이션을 진행하였다.

각각의 BOG 회수시스템 공정모사 모델은 Fig. 4, Fig. 5와 같이 나타내었고, Fig. 4는 질소냉매를 이용한 공정모사 모델이며, Fig. 5는 별도의 냉매를 사용하지 않은 공정모사 모델이다. 두 공정모사 모델은 UNISIM Design툴 중에서 그래프 툴(UNISIM Design utilities)을 이용하여 액화점에 따른 그래프를 이용하여 비교 및 분석하였다. Fig. 4에서 열 교환기를 기준으로 오른쪽은 질소 공정을 왼쪽은 BOG 공정을 나타내었

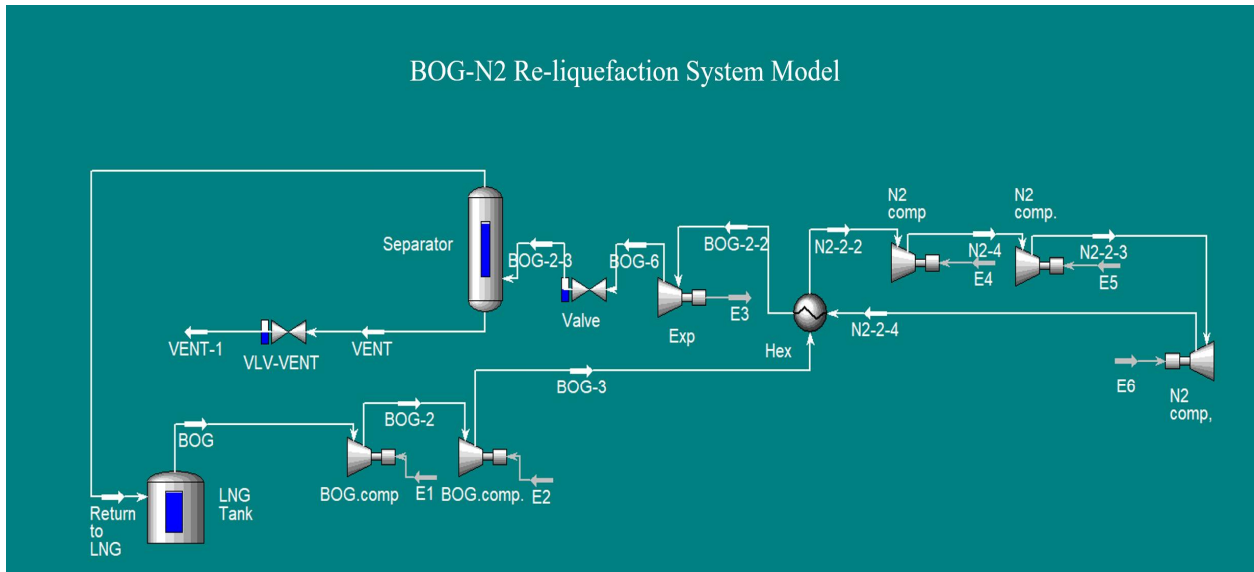


Fig. 4. BOG-N2 re-liquefaction system PFD.

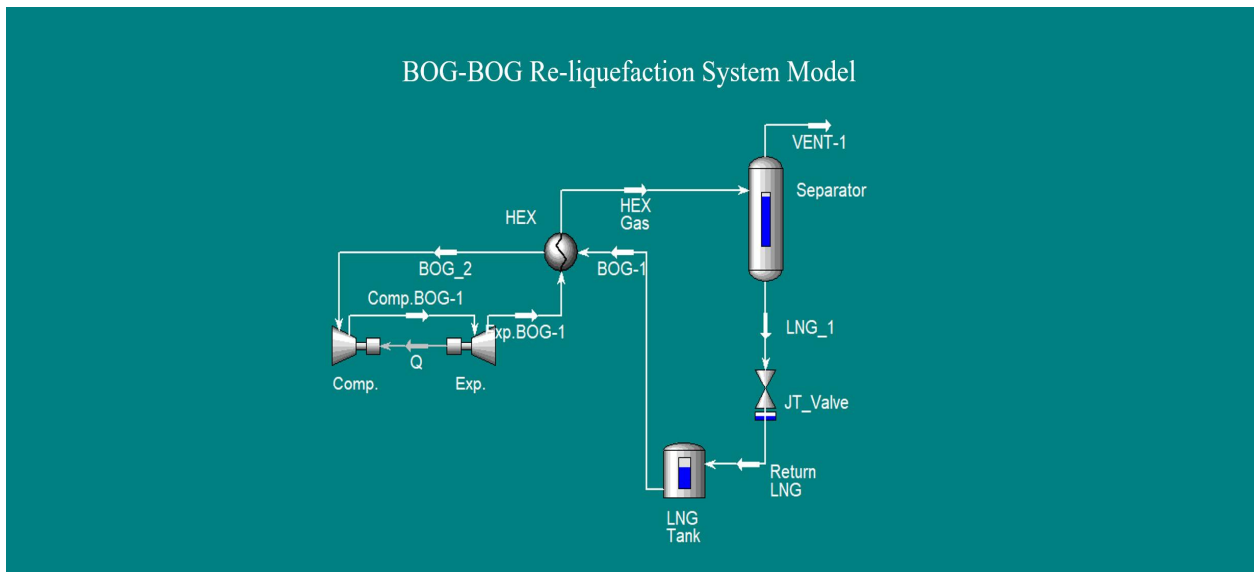


Fig. 5. BOG-BOG re-liquefaction system PFD.

고, Fig. 5에서는 LNG 탱크를 기준으로 왼쪽은 BOG 공정을 오른쪽은 BOG 회수 공정을 나타내었다.

Fig. 4와 Fig. 5에서는 공정모사 모델의 PFD(Process Flow Diagram)를 나타내었으며, 216,600 m³의 용량을 가진 LNG 탱크에서 0.1%인 BOG가 단위시간 당 216 kg/h 정도의 유량을 가진 BOG가 발생한다고 가정하였다.

Fig. 4의 BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델에서 열 교환기를 통해 온도 -185℃의 질소를 3.1 bar의 압력으로 1850 kg/h 만큼의 유량을 전달받게 된다. 이와 같이 질소 냉매를 이용한 BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델을 통해서 회수되는

회수율이 BOG-BOG 회수시스템에 비해서 높았지만 냉매설비가 따로 설치되기에 BOG-BOG 회수시스템에 비해 공간이 더 필요하였다.

Fig. 5와 같이 BOG-BOG 회수시스템의 공정모사 모델에서 열교환기를 통해 온도 50℃의 BOG를 7.0 bar의 압력으로 216 kg/h 만큼의 유량을 전달받게 된다.

이와 같이 별도의 냉매를 이용하지 않는 BOG-BOG 회수시스템 공정모사 모델을 통해서 회수되는 회수율은 BOG-N2 회수시스템에 비해 회수율은 낮았지만, 줄-톰슨 밸브의 입구와 출구의 압력차에서 압력이 낮을수록, 압력강하 폭이 클

수록 BOG의 온도가 더 낮아졌다. 즉, BOG 회수시스템에서 필요한 장비의 수를 냉매를 사용하지 않아 감소시킬 수 있으나, 고도화된 압축기 사양이 요구된다.

BOG-N2 회수시스템과 BOG-BOG 회수시스템의 압력과 온도의 관계에서 회수의 시작점은 각각 Fig. 6, Fig. 7과 같다.

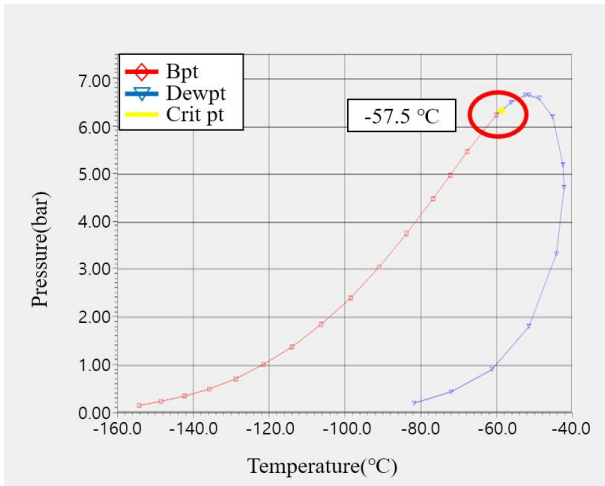


Fig. 6. BOG-N2 re-liquefaction point graph.

Fig. 6과 같이 BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델에서 빨간색 선은 고온, 고압을 의미하고 파란색 선은 저온, 저압을 의미한다. BOG는 고온, 고압으로 상승 후 -57.5°C에서 액화점을 가지게 된다.

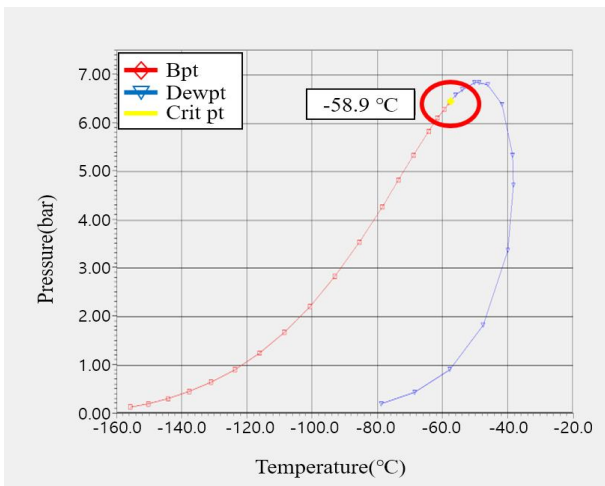


Fig. 7. BOG-BOG re-liquefaction point graph.

Fig. 7과 같이 BOG-BOG 회수시스템 공정모사 모델에서 빨간색 선은 고온, 고압을 의미하고, 파란색 선은 저온, 저압

을 의미한다. BOG는 고온, 고압으로 상승 후 -58.9°C에서 액화점을 가지게 되었다. 결과적으로 BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델과 BOG-BOG 회수시스템 공정모사 모델은 -1°C 정도의 액화점의 차이를 가지게 된다. BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델이 액화점에 더 빠른 시간 내 도달하는 것을 확인 할 수 있었고, BOG-BOG 회수시스템 공정모사 모델은 BOG-N2 공정모사 모델보다 낮은 액화점이 요구되었다. 이를 바탕으로 극저온의 LNG가 -163°C에서 -174°C사이의 BOG가 온전한 LNG로 회수되는 과정에서 BOG의 회수율에 대한 그래프는 Fig. 8과 같다.

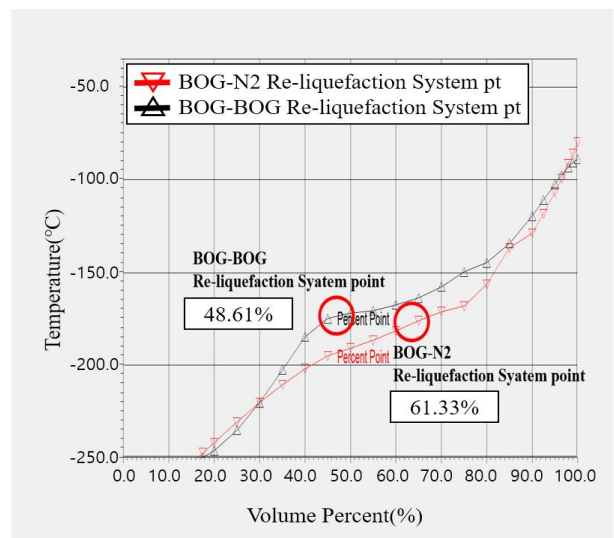


Fig. 8. BOG re-liquefaction ratio of BOG re-liquefaction system graph.

Fig. 8은 냉매 사용 유무에 따른 BOG 회수시스템 공정 모델의 BOG 회수율을 그래프로 나타낸 것이다. BOG-N2 방식과 BOG-BOG 방식의 공정모사 모델을 이용하여 회수율을 나타내었으며, 빨간색 선은 BOG-N2 공정모사 모델의 회수율을, 검은색 선은 BOG-BOG 모델의 회수율을 나타낸다. Table 3은 그 결과를 보여준다.

Table 3. BOG re-liquefaction percent of re-liquefaction system

Case	BOG-N2	BOG-BOG
Pressure (bar)	7.0	7.0
Temp (°C)	50	50
Capacity of BOG (kg/h)	216	216
ReLiq. Percent (%)	61.33	48.61

상용 공정시뮬레이션 프로그램을 이용한 부유식 LNG 발전설비의 BOG 회수시스템 공정모사

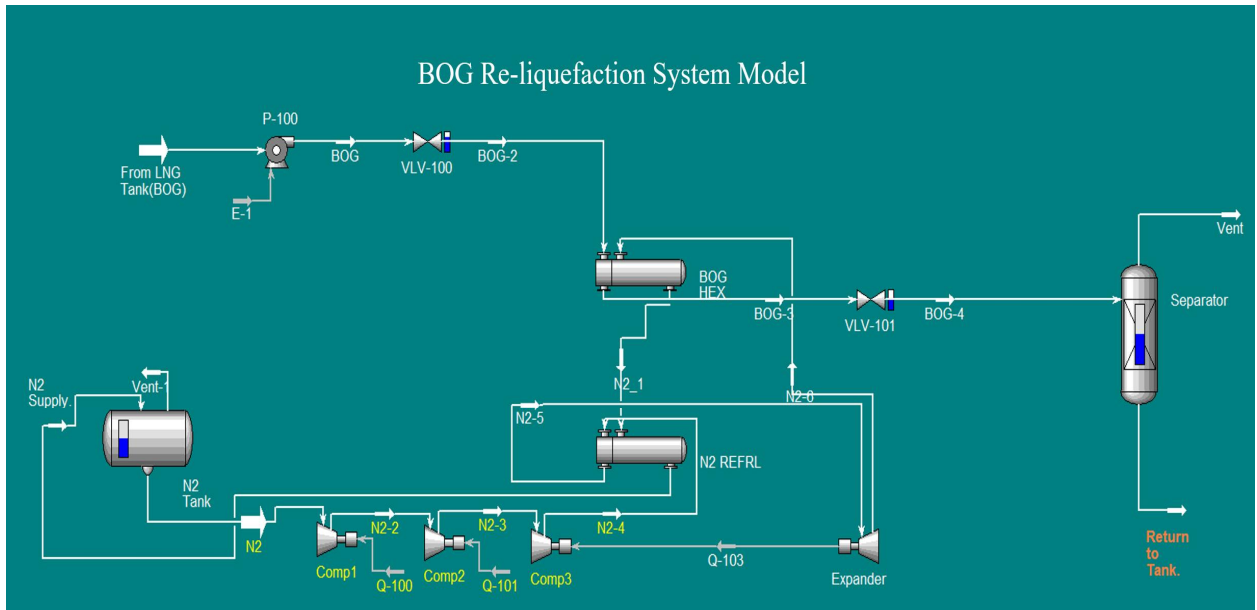


Fig. 9. BOG re-liquefaction system of floating LNG power plant.

Table 3과 같이 LNG탱크에서 단위시간 당 발생하는 BOG의 유량은 216 kg/h로 가정하였을 시 극저온의 LNG가 -163°C 에서 -174°C 사이의 BOG가 온전한 LNG로 회수되는 과정에서 BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델에서는 132.47 kg/h의 유량이 회수되었고, BOG-BOG 회수시스템 공정모사 모델에서는 104.99 kg/h의 유량이 회수되었다. 즉, BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델은 61.33%의 회수율을 보였고, BOG-BOG 회수시스템 공정모사 모델은 48.61%로 약 13% 낮은 회수율을 보였다. 부유식 LNG 발전설비의 BOG 회수시스템을 냉매 사용 유무에 따라 공정모사 모델로 만들어 비교한 결과 BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델이 액화점에 도달하는 시간과 회수율에서 BOG-BOG 회수시스템 공정모사 모델에 비해 결과가 우수했다. 즉, BOG-BOG 회수시스템은 부유식 LNG 발전설비에 적용하기에 부적합하다는 결론을 내릴 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템의 최종적인 BOG 회수시스템 공정 모델을 만들기 위해서 질소냉매를 이용한 방법을 선정하여 Fig. 9와 같이 도식화 하였다. 부유식 LNG 발전설비에서 BOG는 50°C 에서 발생한다고 가정을 하였으며, 7.0 bar의 압력을 가지고 있다고 가정하였다. Fig. 9는 BOG 열 교환기를 기준으로 위쪽은 BOG의 전반적인 회수공정을, 아래쪽은 질소 냉매의 사이클 순환공정을 나타내었다. 열 교환 후에 상 분리기로 전달된 BOG는 재액화되지 못한 기체를 배출하기 위한 벤트라인과 재액화된 BOG가 LNG 탱크로 회수되는 회수라인으로 나뉘어, 최종적으로 -174°C 의 극저온의 LNG로 재액화되어

회수된다고 가정하였다. 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델은 Fig. 10과 같은 액화점을 가지게 되며, 빨간색 선은 고온, 고압을 의미하고, 파란색 선은 저온, 저압을 의미한다. BOG는 고온, 고압으로 상승 후 -55.63°C 에서 액화점을 가진다.

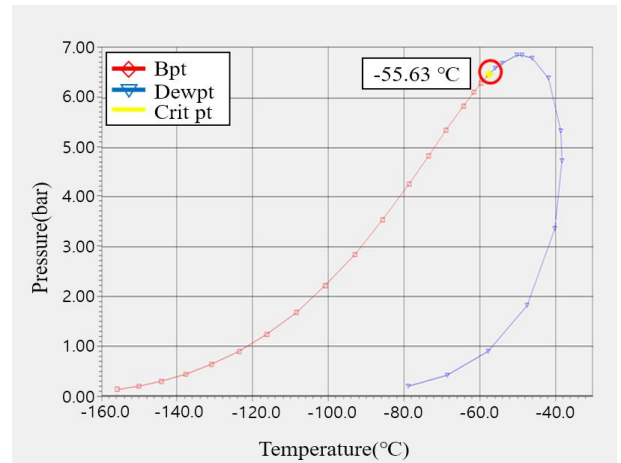


Fig. 10. BOG re-liquefaction point graph.

Fig. 10과 같이 고온, 고압으로 상승한 BOG는 액화점이 -55.63°C 로서 BOG-N2 공정모사 모델의 액화점과 비교했을 때 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델과 -2°C 가량 액화점의 차이가 나게 되었고, 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델이 더 빠르게 액화

점에 도달했다. 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델의 회수율은 Fig. 11과 같고, 단위시간 당 216 kg/h BOG가 발생한다고 가정하였을시, 158.8 kg/h의 유량이 회수되었고, -163℃에서 -174℃사이의 BOG가 LNG로 회수되는 과정에서 회수율은 73.52% 도출되었다.

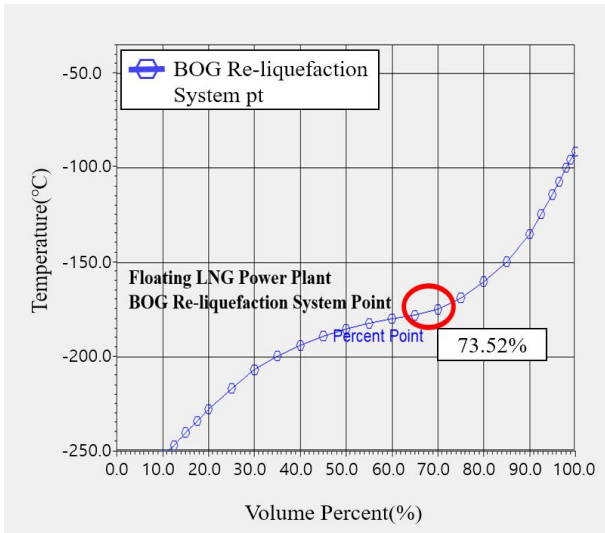


Fig. 11. BOG re-liquefaction ratio of BOG re-liquefaction system graph.

회수율의 차이는 펌프를 사용하여 BOG 압축기를 사용한 BOG-N2 공정모사 모델보다 설치면적을 감소하였으며, 이때 펌프의 압력을 최대로 설정한 결과 진행한 두 공정모사 모델 중 회수율이 좋은 BOG-N2 공정모사 모델의 회수율보다 12% 정도 회수율의 차이가 발생했다. 최종적으로 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델이 압축기로 인한 설치면적을 펌프를 이용하여 감소시킬 수 있었으며 회수율 또한 비교적 우수하였다.

5. 결론

부유식 LNG 발전설비를 운용할 시에 외부 열 유입으로 인한 BOG의 발생으로부터 LNG의 손실 및 사고를 방지하는 것이 중요하다. 부유식 LNG 발전설비와 같은 해양플랜트들은 해상의 요건에 따라 설계가 상이하여 부유식 LNG 발전설비에 적합한 BOG 회수시스템 설계 진행 시 많은 시행착오가 발생할 것으로 예상되었다. 따라서 부유식 LNG 발전설비의 BOG 회수시스템에 대한 데이터들을 설비가 설치되어 질 환경과 해상요건에 적합하도록 시뮬레이션을 하여 데이터들을 변경할 수 있는 공정모사 모델이 필요하였다. BOG 회수시스템 공정모사 모델에 대해 다양한 회수방법 중 냉매

사용 유무에 따라 두 가지 방법으로 나누어 비교 및 분석하였다. 냉매를 사용하는 BOG-N2 회수시스템과 냉매를 사용하지 않는 BOG-BOG 회수시스템의 공정모사 모델을 모델링하여 비교한 결과 BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델이 약 13% 정도의 차이로 BOG-BOG 회수시스템보다 회수율이 높았다. 또한 액화점에 달하는 온도의 차이가 약 -1℃ 정도로 더 빠른 시간 내에 액화점에 도달하는 것을 확인하였다. 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템에 대한 공정모사에서 적합한 회수율을 보이는 BOG-N2 회수시스템 공정모사 모델로 선정하여, 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델링을 하였다. 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델의 시뮬레이션 결과 액화점은 BOG-N2 회수시스템 모델과 BOG-BOG 회수시스템 모델에 비해 -2℃ 정도 액화점의 차이가 나게 되었고, 펌프를 이용하여 압축기의 설치면적을 감소시키고 회수율은 73.52%로 가장 높은 회수율을 보이게 되었다. 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델이 정확하고 신뢰성 있는 BOG 회수시스템 공정모사 모델이 되기 위해 향후에는 상용 프로그램을 이용하여 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템 공정모사 모델에 대해서 폭발 및 화재에 따른 위험성 평가를 진행하여 부유식 LNG 발전설비용 BOG 회수시스템에 대한 공정모사 모델을 구체화하는 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 경상대학교 연구년제연구교수 과제와 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원 (2020년 산업혁신인재성장지원사업, 과제 번호: P0001968) 및 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제(광역)협력권산업 육성사업 (과제 번호: P0004736)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Hwang, C. M. and Y. S. Lim(2018), Optimal Process Design of Onboard BOG Re-liquefaction System for LNG Carrier, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 32, No. 5, pp. 372-379.
- [2] Jeong, N. S., S. K. Jeong, and I. I. Kim(2012), Improvement of Thermal Efficiency for LNG-FSRU-type Combined Cycle Power Plant, The Korean Society of Mechanical Engineers, November 2012, pp. 1701-1706.
- [3] Jin, Y. W., J. W. Moon, Y. P. Lee, and H. M. Jang(2007), Thermodynamic Analysis of Re-liquefaction Cycle of LNG

Boil-off Gas, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 485-490.

- [4] Kim, M. E. and Y. T. Kim(2005), The BOG Handling System for LNG Carrier, Proceedings of the KFMA Annual Meeting, Korean Society for Fluid Machinery, December 2005, pp. 557-561.
- [5] Kim, Y. J.(1997), Temperature Variations in the Natural Gas Pipeline with the Joule-Thomson Effect, The Korean Institute of Gas, September 1997, pp. 14-19.
- [6] Lee, D. H., C. B. Jang, S. Y. Jung, J. H. Kim, H. S. Lee, B. S. Kim, and J. W. Ko(2010b), Study on the Comparison of New and Used Reliquefaction System of Boil-off-Gas by Lng Cold Energy, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 14, No. 1, pp. 42-46.
- [7] Lee, J. M., Y. G. Yeo, S. C. Lee, and S. C. Moon(2008), Process Design Using HYSYS, AJIN, Inc.
- [8] Lee, J. S., Y. C. Lee, J. O. Han, and J. H. Cho(2010a), A Study on the BOG Recondensation Through Exchanging Heat with LNG, The Korean Institute of Gas, October 2010, pp. 181-183.
- [9] Lee, Y. P., Y. H. Shin, S. H. Lee, and K. H. Kim(2009), Boil-Off Gas Reliquefaction System for LNG Carriers with BOG-BOG Heat Exchanger, Journal of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 4, pp. 444-451.
- [10] Park, C. W., K. S. Cha, S. G. Lee, C. G. Lee, and K. H. Choi(2013), Study on the Simulation and Optimization of C3MR Liquefaction Cycle, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 17, No. 1, pp. 67-72.

Received : 2020. 08. 03.

Revised : 2020. 08. 25. (1st)

: 2020. 10. 12. (2nd)

Accepted : 2020. 10. 28.