

수소액화공정의 LNG예냉 계통설계에 따른 BOG 발생량 예측 Prediction of Boil-Off Gas Generation according to Liquefied Natural Gas Precooling System Design of Hydrogen Liquefaction Process

김선화* · 이사용* · 노영진* · 안석환***

Seon-Hwa Kim*, Sayong Lee*, Young-Jin Roh* and Seok-Hwan Ahn***

(Received 09 May 2023, Revision received 10 July 2023, Accepted 11 July 2023)

초록 : 수소 액화 공정에서 예냉 열원으로 천연 가스의 사용이 증가하고 있다. 그러나 액화 천연 가스를 사용함에 있어서 BOG(Boil-Off Gas) 문제가 있다. 본 논문에서는 액화 천연 가스(LNG) 취급설비 중 하나인 ABC(Reverse Brayton Cycle) 설비 가동 시 발생하는 BOG를 최소화하기 위해 예냉 정도와 BOG 발생량을 지수화하여 열전달 특성 간의 상관관계를 도출하였다. LNG를 예냉유체로 사용하는 총질량 64톤, 내용적 6.4 m³의 STS316강으로 건설된 설비를 모사하였으며, 설계압력은 10 barG로 적용하였다. 대상 장비는 질량, 체적, 열전달 면적만으로 모델링하였으며, 유한차분법을 적용하여 BOG 발생량을 예측하였다. 결과로부터 차분법을 적용하지 않은 경우의 예냉은 -121.9℃ 또는 적어도 -121.2℃ 이하의 끓는점 온도에 도달하였다. 차분법을 적용했을 때 열평형에 도달했는지 확인할 수 있었다. 또한 장치의 예냉온도가 -110℃에 이르면 사고가 발생하더라도 안전밸브의 용량을 초과하지 않아 배출이 없는 것으로 나타났다.

키워드 : 수소액화공정, Boil-Off Gas, 역 Brayton 사이클, 예냉, 액화 천연 가스

Abstract : The use of natural gas as a precooling heat source in the hydrogen liquefaction process is increasing. However, in the use of liquefied natural gas, there is a problem of boil-off gas (BOG). In this paper, in order to minimize BOG generated during the operation of ABC (Reverse Brayton Cycle) equipment, one of liquefied natural gas (LNG) handling facilities, the degree of precooling and the amount of BOG generated were indexed to derive a correlation between heat transfer properties. A facility built with STS316 steel with a total mass of 64 tons and an internal volume of 6.4 m³ using LNG as a precooling fluid was simulated, and a design pressure of 10 barG was applied. The target equipment was modeled only with mass, volume, and heat transfer area, and the amount of BOG generation was

*** 안석환(<https://orcid.org/0000-0002-9598-9995>) : 교수, 중원대학교 무인항공기계학과
E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942
*김선화(<https://orcid.org/0000-0001-5587-2939>) : 연구소장, (주)한국에너지기술단
*이사용(<https://orcid.org/0009-0001-3183-8856>) : 주임연구원, (주)한국에너지기술단
*노영진(<https://orcid.org/0000-0002-9494-6491>) : 대표이사, (주)한국에너지기술단

*** Seok-Hwan Ahn(<https://orcid.org/0000-0002-9598-9995>) : Professor, Department of Unmanned Aero Mechanical Engineering, Jungwon University.
E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942
*Seon-Hwa Kim(<https://orcid.org/0000-0001-5587-2939>) : General Director of Technology, Korea Energy Technology Group.
*Sayong Lee(<https://orcid.org/0009-0001-3183-8856>) : Research Engineer, Korea Energy Technology Group.
*Young-Jin Roh(<https://orcid.org/0000-0002-9494-6491>) : President, Korea Energy Technology Group.

predicted by applying the finite difference method. From the results, the precooling in the case where the difference method was not applied reached the boiling point temperature of -121.9°C or at least -121.2°C or less. When the difference method was applied, it was possible to check whether thermal equilibrium was reached. In addition, it was found that when the precooling temperature of the device reached. When the precooling temperature of the device reached -110°C in spite of an accident, there was no emission. The reason for this is that the capacity of the safety valve was not exceeded.

Key Words : Hydrogen Liquefaction Process, Boil-off Gas, Reverse Brayton Cycle, Precooling, Liquefied Natural Gas

1. 서 론

온실 가스 배출 감소에 대한 요구가 증가함에 따라 수소연료로 전환되는 시점에서 수소액화공정에 예냉 열원으로써 천연 가스(Natural Gas, NG)의 사용은 지속적으로 논의되어 왔다.^{1,2)} 또한 NG는 사용 가능한 가장 깨끗한 화석 연료로 인식되고 있다. NG의 연소는 다른 유형의 연료(석탄, 갈탄 및 원유 기반 연료)에 비해 오염 물질 배출이 훨씬 적고, 특히 액화 천연 가스(Liquefied Natural Gas, LNG)의 비체적은 기체 상태보다 약 600배 낮다는 장점이 있다. 이것은 저장을 훨씬 더 효율적으로 만들고 장거리 운송이 가능하게 한다. NG와 LNG는 에너지 시장과 에너지 전환 정책에서 점점 더 중요해짐으로 인해 최근 몇 년 동안 소비가 빠르게 증가하는 추세이다. 소비율은 평균 1.3%씩 증가하여 2040년에는 5조 2천억 m^3 에 달할 것으로 예상된다.³⁻⁵⁾ 또한 발전, 산업 및 운송을 위한 가능한 연료로서 LNG 사용에 대한 관심이 계속 증가하고 있다.^{6,7)}

액화 천연 가스는 BOG(Boil-Off Gas)의 문제점을 지니고 있으며, 선박으로 운송되어 저장 탱크에 저장되는 과정에서 LNG 하역 및 저장 중에 LNG의 일부가 기체 상태로 증발하는데, 이를 일반적으로 BOG라고 한다.⁸⁾ BOG는 연료로 활용되고, 재액화되고, 압축되어 가스 수송 네트워크에 투입되거나 플레어에서 연소될 수 있다. LNG 저장 과정 중 BOG 발생의 제어 및 열역학적 특성 평가는 LNG 저장 터미널 시스템의 기술 평가에서 핵심 문제이다. 주변 공기에서 저장 탱크로의 열 흐름과 저장된 액화 천연 가스의 구성은 증발

과정에 영향을 미친다. 과도한 BOG 발생은 LNG 저장 공정의 안정성과 안전성에 부정적인 영향을

미칠 수 있고, 이러한 이유로 기화 속도(비등 속도)를 정확하게 결정해야 한다.⁹⁻¹¹⁾ 예냉을 고려한 BOG 발생을 회피하는 기술은 LNG선박에서도 유용한 기술이다. BOG는 선박에서 LNG 탱크의 압력을 유지하기 위해 배출된다. BOG는 주로 온실 가스인 메탄으로 구성되며 지구 온난화에 심각한 영향을 미친다. BOG는 발열량 낭비의 주요 요인이다. 따라서 BOG는 선박 엔진의 연료로 유익하게 사용되거나 선상에서 재액화하려는 연구가 진행되어 왔다.¹²⁾ BOG 재액화에는 질소를 냉매로 사용하는 RBC(Reverse Brayton Cycle)가 대표적인데, 이는 소형화, 안전 및 작동이 용이한 특징이 있기 때문이다.^{13,14)} 그러나 이러한 RBC 기반 재액화 시스템은 터빈 출구 쪽으로 액체가 발생하는 문제가 있다. BOG의 완전한 재액화를 어렵게 하는 것은 BOG에 섞여 있는 질소가 비점을 낮추기 때문이며 불가피하게 일부 BOG는 방출하게 된다.^{15,16)} 본 연구는 액화수소 생산공정에서 LNG를 활용하여 냉각시키는 공정 중에서 LNG 취급 설비의 운전 중 발생하는 BOG를 최소화하기 위해 수행되는 질소 및 공기사이클 RBC를 활용한 예냉 공정에 관한 것이다. 기체상태의 수소를 액화시키기 위한 액화공정은 Linde, Joule-Tomson, Joule-Brayton 등 다양한 Cycle이 있다. 그중 Joule-Brayton Cycle은 다음 그림과 같이 초저온 냉열을 이용한 냉각과정이 요구된다(Fig. 1). 이때 사용되는 LNG의 BOG발생량에 대한 예측은 액화수소공정 계통설계의 관점에서 중요하게 다루어진다.¹⁾ 이때 필요한 예냉 정도를 산출하는 것은

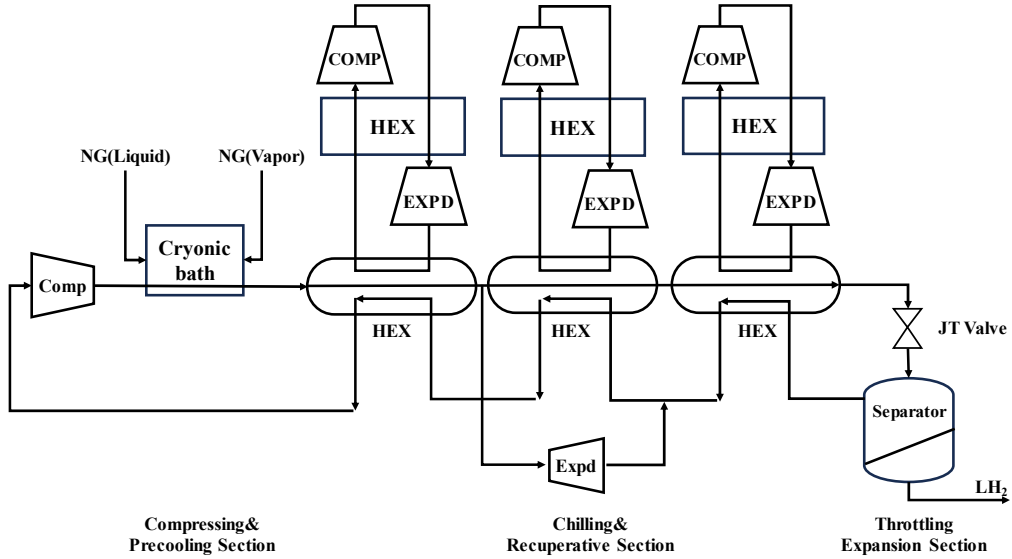


Fig. 1 Example of the Joule-Bryton auxiliary refrigeration cycles

시스템의 효율과 밀접한 관계가 있다. 또한 BOG로 인한 용기의 내압상승을 막기 위한 압력방출 밸브의 설계에도 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 예냉 정도와 BOG의 발생량을 지표화하여 열전달 물성치와의 상관 관계를 도출하였다. 이를 통하여 산업적으로 활용 가능한 BOG 발생량에 대한 예측 방법을 제시하고자 한다.

2. 적용범위와 방법

2.1 적용범위

LNG 취급 설비의 운전 중 발생하는 BOG를 최소화하기 위해 예냉 공정을 논의할 수 있고, 이때 필요한 예냉 정도를 산출하는 것은 안전밸브의 배출용량 산정과 밀접한 관계가 있다. BOG 발생으로 인한 과압 상태에서 사용 유체의 상태, 외기 온도, 예냉 정도에 따라 안전밸브의 적절한 정격 배출용량은 그 값이 달라진다.

Boiling Rate는 예냉 입열량에 비례하고 LNG의 증발잠열, λ 에 반비례한다(식 (1)). 이때, 예냉 입열량, Q_{pc} 는 LNG의 비점과 열전달면의 온도차, 비등열전달계수 그리고 열전달면의 크기(면적)에 곱으로 표현할 수 있다(식 (2)).

$$Boiling\ Rate = \frac{Q_{pc}}{\lambda} \quad (1)$$

$$Q_{pc} = \Delta T \cdot HTC \cdot A \quad (2)$$

여기에서, ΔT 는 비점과 열전달면의 온도차, HTC는 비등열전달계수, A는 열전달면적이다.

2.2 적용설비

본 연구에 적용한 설비는 예냉각 유체로 LNG를 사용하는 Table 1과 같은 가상의 설비로 가정하였다. 총 질량과 내부 체적이 각각 64 ton 및 6.4m³인 설비로써 STS316 강으로 건조된 것으로 가정하였다. 또한 예냉각 유체는 LNG를 적용하며 설계압력은 10 barG를 적용하였다.

Table 1 Specification of virtual facility

Classification	Designation
Control valve	Flow generation: 129 kg/s @ 100% open (liquid)
Equipment total mass	64604 kg
Material of equipment	STS316 steel
	Latent heat: 500 J/kg · K
Total area (inner)	195.600 m ²
Total volume	89.446 m ³
Piping	Inner diameter: 20 in.
Design pressure	10.0 barG
Operating pressure	4.5 barG

2.3 적용방법

유한차분법과 같은 일반적인 전산유체해석은 형상을 반영하기 위해 격자생성에 많은 노력과 계산을 위해 상당한 전산자원이 요구된다. 이러한 요구는 다양한 설비를 대상으로 하는 산업적 활용을 어렵게 한다.

반면, 식 (1) 및 (2)를 적용하여 설비 내부의 모든 면적에서 비등이 발생하는 것으로 가정하거나, 시간에 따른 금속의 온도 변화를 고려하지 않는 것은 지나치게 보수적인 결과를 도출한다.

따라서 본 연구에서는 대상이 되는 적용 설비를 질량과 체적, 열전달 면적으로만 모델링하고 유한차분법을 적용하여 비교적 적은 노력으로 합리적인 BOG 발생량을 예측하고자 하였다.

2.3.1 열전달 기구 및 열전달계수

본 연구에서는 상술한 것과 같이 적용 설비의 열전달 해석 모델을 질량과 체적, 면적으로만 고려하므로 전도는 고려하지 않는다. 전도를 고려하지 않으므로 설비 외부에 조사되는 태양광에 의한 복사열 또한 내부 유체로 전달되지 않기 때문에 복사도 고려하지 않는다. 다시 말하면 오직 대류열전달만 고려하며 열전달 계수는 비등열전달계수와 BOG(NG)의 대류열전달계수를 적용하는 것으로 하였다. 이 문제에서 비등열전달에 의한 열전달량이 지배적이므로 전도와 복사를 고려하지 않더라도 계산 결과의 보수성에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 동일 성분의 물질이라도 상과 상태에 따라 대류열전달계수는 크게 차이를 보인다. 또한 비등 상황에서는 일반적인 대류열전달계수(Convective heat transfer coefficient; Convective HTC)보다 큰 값을 가지므로 이 연구에서 기기와 유체 사이의 열전달은 LNG와 BOG에 대해서 각각 비등열전달계수와 대류열전달계수를 적용하였다. 기체의 대류열전달 계수는 일반적으로 다음의 식 (3)과 같이 Nusselt 수를 통해 구할 수 있다.¹⁷⁾

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (3)$$

여기서, k 는 유체의 열전도도, D 는 관경, h 는 열전달계수를 나타낸다. 이때 f 는 유체 마찰계수인데 Reynolds 수의 식으로 나타낼 수 있다 (식 (4)).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.02}{Re} \log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{13}{Re} \right) \right) \quad (4)$$

여기서, ϵ 는 표면거칠기이다. 또한 Re 는 Reynolds 수, Pr 는 Prandtl 수로서 이들은 식 (5) 및 식 (6)과 같이 각각 계산될 수 있다.

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (5)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (6)$$

여기서, V 는 유체의 속력이다. 일반적으로 단상 유체의 강제대류 열전달계수 산출 시 필요한 유체의 물성은 비열(C_p), 열전도도, 밀도(ρ), 점성계수(μ)이다.

또한 본 연구에서는 BOG의 상태를 예측하기 위해 액상 및 기상 열전달계수의 계산값 뿐만 아니라 문헌을 활용하여 비등열전달계수를 사용하였다.¹⁸⁾ NG의 물성치(Table 2)는 ASPEN PLUS를 사용한 공정 모사로부터 확보하였다.¹⁹⁾

Table 2 Properties of NG to calculate HTC

Property	NG
Temperature (K)	113.5
Bubble point temperature (K)	110.1
Dew point temperature (K)	113.5
Mass density (kg/m ³)	1.759
Molar density (kmol/m ³)	0.109
Mass heat capacity, mixture (J/kg · K)	2118.0
Heat capacity, mixture (J/kmol · K)	34100.0
Thermal conductivity, mixture (W/m ² · K)	0.012762063
Viscosity, mixture (N · sec/m ²)	4.49E-06

또한 본 연구에서는 ASPEN PLUS를 사용한 공정모사의 상태방정식으로 Peng-Robinson 방정식을 채택하였다.^{20,21)} 또한 증기표는 National Bureau of Standards Publications/National Research Council에서 개발된NBS/NRC를 사용하였다. 유도된 상태방정식은 식 (7)과 같다.^{22,23)}

$$p = \frac{RT}{\nu - b} \frac{a\alpha}{\nu(\nu + b)} \quad (7)$$

2.3.2 BOG 발생량 계산 모델

BOG 발생량 계산을 위해서 초기 상태를 입력으로 시간에 대해 전진 차분하여 미래 시점을 예측하여 시스템이 설계압력에 도달했을 때 BOG 발생 여부와 그 양을 계산하였다. 계산에 입력된 초기 상태는 Table 1과 같으며, 매 시점의 BOG 발생량은 식 (1)과 같이 계산된다. 시스템의 체적은 고정되어 있으므로 예냉각을 위한 LNG의 주입과 BOG 발생은 시스템 내의 물질의 양을 증가시켜 시스템의 상태를 변화시킨다.

상술한 일련의 절차를 통해 시간에 대한 전진 유한차분을 수행하였다. 이 계산에서는 아래의 식 (8)과 같이 표현되는 이상기체 상태방정식을 압축인자와 같이 적용하였다.

$$PV = ZmRT \quad (8)$$

여기에서, Z는 압축성 인자, R은 특정 기체상수를 의미한다. 본 연구에서 압축성 인자는 0.97811을 적용하였다. NG의 대류열전달계수는 식 (3) 및 (4)에 의해서 유속에 따라 계산되었으며, LNG의 비등열전달계수는 문헌조사를 통해 온도차에 따른 값을 수집하였다.^{24,25)} 압력에 따른 LNG의 비점은 ASPEN PLUS 공정모사를 통해 획득하였다. 이 세 가지 물성은 Curve fitting하여 차분 계산에 활용하였다.

Fig. 2는 모델을 시각화하여 나타낸 것이다.

Table 4는 각 Curve fitting으로 구한 식의 계수를 정리한 것이다.

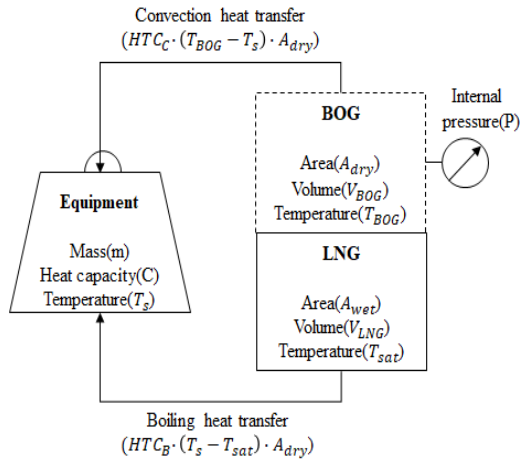


Fig. 2 Analytical model to calculate BOG generation

Table 3 Composition of NG

Composition	Mole fraction (%)
Methana	90.09
Ethana	6.04
Propane	2.54
ISO-buthana	0.54
N-buthana	0.58
Nitrogen	0.21

Table 4 Coefficient of curve fitting

Properties	1 st term	2 nd term	3 rd term	Constant
HTC _C	301.207	-84.8319	25.0347	4.18442
HTC _B	12873.76	-	-	-84.9702
T _{sat}	0.00942	-3.17×10 ⁻¹⁷	5.13×10 ⁻¹²	153.033

2.3.3 적용 Case 검토 및 비교

먼저 검토되어진 Case를 Table 5와 같이 정의하였다. 모든 Case는 LNG 주입밸브가 100% 개방되는 예냉각 사고를 가정하여 예냉각 온도에 따른 BOG 과다 발생과 과압으로 인한 안전밸브 방출을 가정하였으며, 안전밸브의 정격배출용량은 KOSHA 지침(D-18-2020)에 따른 외부화재 조건에서 계산된 값에 2배의 여유도를 고려하여 72,000 kg/h로 가정하였다. Case 1~3은 차분법을 적용하지 않은 경우로서 시간에 따라 변화하는 열전달 면적이나 기기의 온도를 고려할 수 없으므로 기기의 온도는 상수, 열전달 면적은 전체 내부면적

Table 5 Definition of cases

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
T_s @ accident (°C)	-120.4	-120.9	-121.2	-100.0	-120.9	-121.1.2
$\Delta T(=T_s-T_{sat})$ (°C)	1.5	1.0	0.7	1.5	1.0	0.7
HTC ($W/m^2 \cdot K$)	18271.0	12810.0	8898.0	29633.0	12810.0	8898.0
Contact area ratio (%)	100.0	100.0	100.0	1.96	9931.0	100.0
Latent heat (J/kg)	510395.0					

으로 고려한 것이다. Case 4~6은 차분법을 적용한 경우로서, Case 1~3을 대조군으로 하여 본 연구의 방법과 비교·검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대조된 Case의 계산 결과

10 barG의 설계압력 조건 하에서 BOG 발생량은 Case 1~3으로부터 각각 70,427 kg/h, 31,210 kg/h, 15,174 kg/h이다. 이 결과는 모두 안전밸브의 정격 방출 용량을 만족한다. 다만, 비점과 기기의 온도 차가 1.5°C 이하에 도달할 때까지 매우 조심스러운 예냉 운전을 수행해야 하는 것을 의미한다. Table 6은 Case 1~3의 BOG 발생량 계산 결과를 정리한 것이다.

Table 6 Calculated results of cases without finite difference method

	Case 1	Case 2	Case 3
BOG generation (kg/h)	70427	31210	15174
Design ratio (BOG generation / Valve capacity)	0.973	0.431	0.210

3.2 차분법을 적용한 Case의 계산 결과

차분법을 적용한 Case 4의 경우는 10 barG의 압력에 도달 시 BOG 발생 및 분출이 있었지만 안전밸브의 정격방출용량을 초과하지 않았다. Case 5와 6의 경우 10 barG의 압력에 도달하기 전 LNG와 기기 사이의 열적평형에 도달하여 BOG가 발생하지 않으므로 안전밸브 방출은 없는 것으로 계산되었다. Table 7은 Case 4~6의 계산 결과를

Table 7 Calculated results of cases with finite difference method

	Case 4	Case 5	Case 6
Time to equilibrium (s)	21.25	20.00	19.00
Time to 10barG (s)	13.50	29.50	43.00
Temperature difference at time to 10barG ($\Delta T, T_s-T_{sat}$) (°C)	11.66	0	0
BOG generation (kg/h)	67070	0	0
Design ratio (BOG generation / Valve capacity)	0.927	0	0

정리한 것이다.

3.3 고찰

먼저 Table 5의 Case 1과 Case 4는 안전밸브의 방출용량을 만족할 수 있는 최소조건이다. 이들 결과로부터 사고 발생 시 안전밸브의 방출용량을 만족하는 기기 온도는 차분법을 적용한 Case에서 20°C 이상 낮게 확인되었다. 또한 Table 7에서 알 수 있듯이 차분법을 적용하여 계산한 Case에서는 기기의 온도변화를 반영하여 열평형 여부를 확인할 수 있을 뿐만 아니라 상태 변화에 따른 BOG 발생량을 확인할 수 있어 예냉각 시간을 단축하기 위한 운전 절차 도출에 활용할 수 있다. 다만, 이 연구의 모델에서는 열전달 기구 중 전도와 복사를 고려하지 않았으므로 인해 시점에 대한 신뢰성에 있어서는 다소 제고의 여지가 남아 있다고 판단된다. 따라서 시스템의 상태 변화 경향과 물의 활용을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구는 안전밸브의 방출용량

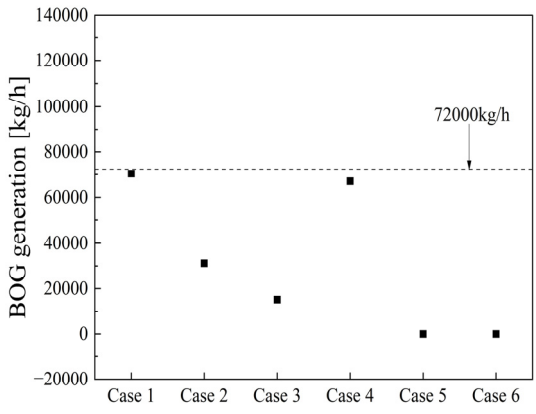


Fig. 3 BOG generation obtained from each cases (conventional calculation of cases 1~3; calculation by finite difference method of cases 4~6)

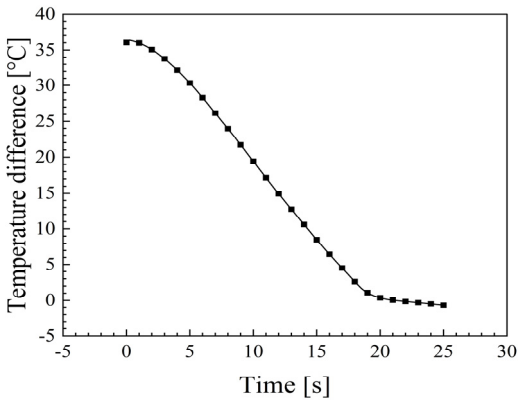


Fig. 4 Time versus temperature difference in the case 4

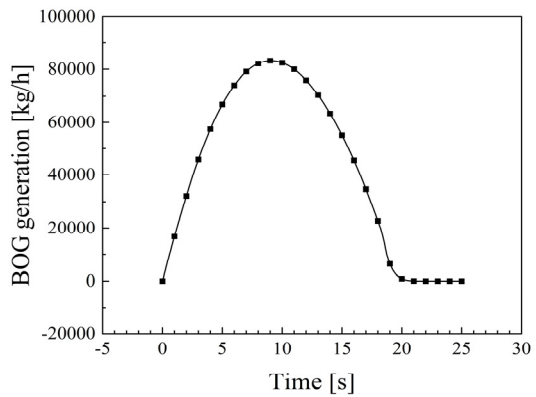


Fig. 5 Time versus BOG generation in the case 4

을 산정하는 방법에 대한 것이므로 구해진 해의 정확한 시점을 구하는 것은 본 연구 범위를 벗어나기 때문에 이번 연구에서는 고려되지 않았다. 이는 전도 및 복사 열전달을 고려하기 위해서는 설비의 형상이 반영되어야 하므로 본 연구의 범위를 벗어나기 때문이다.

Table 6과 7에 나타난 Case 1~3 및 Case 4~6에서 구한 BOG 발생량을 Fig. 3에 함께 나타내었다. 그림 속의 72,000 kg/h는 안전밸브의 정격방출용량을 나타낸다.

Fig. 4는 Case 4에 대한 온도차를 시간에 따라 나타낸 것이다. 또한 Fig. 5는 Case 4에 대한 BOG 발생량을 시간에 따라 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구는 수소액화공정 중 예냉 정도와 BOG의 발생량을 지표화하여 열전달 물성치와 그 상관 관계를 도출한 것으로, 얻어진 결론은 다음과 같다.

예냉 정도에 따라 초기온도를 가정하고, 상 및 운전상태에 따른 열전달 계수에 따라 시스템의 열적평형상태를 모사할 수 있었다. 이때 열전달계수는 기상 및 비등 시의 값으로 도출 가능하였다.

차분법을 적용하지 않은 경우에는 예냉각은 비등점 온도인 -121.9°C 를 달성하거나 적어도 -121.2°C 이하로 하여야 한다. 차분법을 적용한 경우에는 열평형 도달 여부를 확인할 수 있었으며, 예냉각 온도가 -110°C 에 도달하면 사고가 발생하더라도 안전밸브 용량을 초과하지 않아 방출이 없는 것을 알 수 있었다.

본 연구의 적용범위는 안전밸브의 정격방출용량 산정이므로 계산된 해의 시점보다는 BOG 발생량이 더 중요하다. 따라서 얻어진 결과들은 예냉각 운전의 미확보 시 안전밸브의 배출용량을 선정하는데 유용할 것으로 사료된다. 또한 NG의 BOG뿐만 아니라 수소액화공정의 운전 상황과 유체상태에 따른 BOG 발생량의 상관관계를 해석하여 운전 절차를 도출하여 기존의 방법이 갖는 지나친 보수성을 합리적으로 완화할 뿐만 아니라

복잡한 형상을 모두 포함하는 전산해석의 어려움을 해결함으로써 산업적으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

다만, 본 연구의 모델은 전도와 복사를 고려하지 않았으므로 계산된 상태의 시점은 정확하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 모델은 시스템의 상태 변화 경향과 상태값은 최소, 최대를 확인하는 정도에는 적합하지만, 시점의 신뢰성을 확보하기 위한 후속 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2022년도 과학기술정보통신부의 재원으로 2022년도 연구개발특구육성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-DD-RD-0476-01-101).

Author contributions

S. H. Kim; Conceptualization. S. H. Kim & S. Y. Lee; Data curation. S. Y. Lee; Formal analysis. Y.J. Roh; Funding acquisition. S. H. Kim & S. Y. Lee; Investigation. S. H. Kim & S. H. Ahn; Methodology. S. H. Kim & Y. J. Roh; Project administration. S. H. Ahn; Resources. S. Y. Lee; Software. S. H. Kim; Supervision. S. H. Kim & S. Y. Lee; Validation. S. H. Kim; Visualization. S. H. Kim; Writing-original draft. S. H. Ahn; Writing-review & editing.

References

1. M. Aasadnia and M. Mehrpooya, 2018, "Large-Scale Liquid Hydrogen Production Methods and Approaches: A Review", *Applied Energy*, 212, 57-83. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.033>)
2. J. Y. Jung and Y. T. Seo, 2022, "Onboard CO₂ Capture Process Design using Rigorous Rate-based Model", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 36(3), 168-180.

- (<https://doi.org/10.26748/KSOE.2022.006>)
3. E. A. Roszak and M. Chorowski, 2013, "Energy Analysis of Combined Simultaneous Liquid Natural Gas Vaporization and Adsorbed Natural Gas Cooling", *Fuel*, 111, 755-762. (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.074>)
4. N. Paltrinieri, A. Tugnoli and V. Cozzani, 2015, "Hazard Identification for Innovative LNG Regasification Technologies", *Reliability Engineering & System Safety*, 137, 18-28. (<https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.12.006>)
5. S. Kumar et al., 2011, "LNG: An Eco-Friendly Cryogenic Fuel for Sustainable Development", *Applied Energy*, 88(12), 4264-4273. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.035>)
6. J. L. Osorio-Tejada, E. Llera-Sastresa and S. Scarpellini, 2017, "A Multi-criteria Sustainability Assessment for Biodiesel and Liquefied Natural Gas as Alternative Fuels in Transport Systems", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 42, 169-186. (<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.046>)
7. A. Arteconi, C. Brandoni, D. Evangelista and F. Polonara, 2010, "Life-cycle Greenhouse Gas Analysis of LNG as a Heavy Vehicle Fuel in Europe", *Applied Energy*, 87(6), 2005-2013. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.012>)
8. J. W. Kim, J. Y. Jeong and D. J. Chang, 2020, "Optimal Shape and Boil-Off Gas Generation of Fuel Tank for LNG Fueled Tugboat", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 34(1), 19-25. (<https://doi.org/10.26748/KSOE.2019.103>)
9. T. Włodek, 2019, "Analysis of Boil-Off Rate Problem in Liquefied Natural Gas (LNG) Receiving Terminals", in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214(1), 012105. (DOI:10.1088/1755-1315/214/1/012105)

10. S. M. Chung, Y. S. Seo, G. M. Jeon, J. W. Kim and J. C. Park, 2021, "Parameter Study of Boiling Model for CFD Simulation of Multiphase-Thermal Flow in a Pipe", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35(1), 50-58.
(<https://doi.org/10.26748/KSOE.2020.071>)
11. E. Y. Park and J. H. Choi, 2021, "Greenhouse Gas Emission Analysis by LNG Fuel Tank Size through Life Cycle", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35(6), 393-402.
(<https://doi.org/10.26748/KSOE.2021.071>)
12. S. K. Kochunni and K. Chowdhury, 2022, "Concept and Evaluation of Energy-Efficient Boil-Off Gas Reliquefiers in LNG Carrier Ships Propelled by Dual-Fuel Engines", *Cryogenics (Guildf)*, 123, 103453.
(<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103453>)
13. M. Mansoury, S. Jafarmadar and S. Khalilarya, 2018, "Energetic and Exergetic Assessment of a Two-Stage Organic Rankine Cycle with Reactivity Controlled Compression Ignition Engine as a Low Temperature Heat Source", *Energy Conversion and Management*, 166, 215-232.
(<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.019>)
14. H. Mahabadipour and H. Ghaebi, 2013, "Development and Comparison of Two Expander Cycles Used in Refrigeration System of Olefin Plant Based on Exergy Analysis", *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 771-780.
(<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.050>)
15. H. Yu, D. Kim and T. Gundersen, 2019, "A Study of Working Fluids for Organic Rankine Cycles (ORCs) Operating Across and below Ambient Temperature to Utilize Liquefied Natural Gas (LNG) cold energy", *Energy*, 167, 730-739.
(<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.021>)
16. T. He and Y. Ju, 2015, "Optimal Synthesis of Expansion Liquefaction Cycle for Distributed-Scale LNG (Liquefied Natural Gas) Plant", *Energy*, 88, 268-280.
(<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.046>)
17. Y. A. Çengel, A. J. Ghajar and M. Kanoglu, 2011, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications", McGraw Hill Higher Education.
18. Z. Rogala, A. Brenk and Z. Malecha, 2019, "Theoretical and Numerical Analysis of Freezing Risk during LNG Evaporation Process", *Energies (Basel)*, 12(8), 1426.
(<https://doi.org/10.3390/en12081426>)
19. J. Haydary, 2019, "Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications", John Wiley & Sons.
20. X. Liu, G. Michal, A. Godbole and C. Lu, 2021, "Decompression Modelling of Natural Gas-Hydrogen Mixtures Using the Peng-Robinson Equation of State", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(29), 15793-15806.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.129>)
21. M. Ghanbari, M. Ahmadi and A. Lashanizadegan, 2017, "A Comparison between Peng-Robinson and Soave-Redlich-Kwong Cubic Equations of State from Modification Perspective", *Cryogenics (Guildf)*, 84, 13-19.
(<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.04.001>)
22. J. L. M. Fernandes, 1994, "A Computer Program for the Evaluation of Thermodynamic Properties of Water Using the NBS/NRC Formulation", *Revue générale de thermique*, 33.
23. E. E. Michaelides, 1986, "NBS/NRC Steam Tables: Thermodynamic and Transport Properties and Computer Program for Vapor and Liquid States of Water in SI Units", *Nuclear Technology*, 75(2), 232.
(<https://doi.org/10.13182/NT86-A33869>)
24. H. Ackermann, L. Bewilogua, A. Jahn, R.

Köner and H. Vinzelberg, 1976, "Heat transfer in nitrogen-methane mixtures under pressure with film boiling", *Cryogenics (Guildf)*, 16(8), 497-499.

([https://doi.org/10.1016/0011-2275\(76\)90009-6](https://doi.org/10.1016/0011-2275(76)90009-6))

25. K. Bier and M. Lambert, 1990, "Heat transfer in nucleate boiling of different low boiling substances", *International Journal of Refrigeration*, 3(5), 293-300.

([https://doi.org/10.1016/0140-7007\(90\)90060-A](https://doi.org/10.1016/0140-7007(90)90060-A))