

LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지 공정모사 및 설계조건 변화에 따른 BOG 발생량 예측

†김동혁 · 이영범 · 서흥석 · 권용수 · 박창원 · 권휘웅

한국가스공사 가스연구원

(2022년 8월 24일 접수, 2022년 10월 20일 수정, 2022년 10월 21일 채택)

Process Simulation of LH2 Receiving Terminal with Membrane Storage Tank and Prediction of BOG Generation According to Change of Design Conditions

†Donghyuk Kim · Yeongbeom Lee · Heungseok Seo

Yongsoo Kwon · Changwon Park · Hweeung Kwon

KOGAS Research Institute, 960, Incheonsinhang-daero, Yeonsu-gu, Incheon, 21993, Korea

(Received August 24, 2022; Revised October 20, 2022; Accepted October 21, 2022)

요약

미래에 수소 산업이 활성화되면 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지는 대용량 액화수소를 저장하고 송출할 수 있는 주요한 방안이다. 현재 이러한 인수기지가 존재하지 않기에, 기존 LNG 멤브레인 저장탱크 인수기지 설계 자료를 참고하여 기지 공정모사 모델을 완성하였다. 이 모델을 베이스로 하여 멤브레인 저장탱크 인수기지 운영에서 매우 주요한 인자인 기지 설계조건 변화에 따른 BOG 발생량을 예측하였다. 이를 통하여 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지가 운영될 때를 대비하여 하역시 BOG 발생량을 최소화 할 수 있는 적절한 운전조건을 검토하고자 하였다.

Abstract - If the hydrogen industry is activated in the future, the LH2 receiving terminal with membrane storage tank is a major way to store and send large capacity hydrogen. Since such a LH2 receiving terminal does not currently exist, the process simulation model of it was completed by referring to the design data on existing LNG receiving terminal with same typed storage tank. Based on this model, the amount of BOG generation according to change of design conditions, which is a very important factor in the operation of LH2 receiving terminal, was predicted. Through this, it was attempted to review the appropriate operating conditions to minimize the amount of BOG generated during unloading in LH2 receiving terminal with membrane storage tank.

Key words : LH2(Liquefied hydrogen) receiving terminal, membrane tank, unloading, BOG(Boil-off gas)

1. 서론

전 세계적으로 기후위기 대응을 위해 탄소중립이 대두되고 있으며, 이에 대한 방안으로 정부는 수소경

제 활성화를 위한 기술개발 로드맵을 수립하고 있다 [1]. 로드맵에 의하면 수소 생산, 운송, 저장, 발전 산업 등에 대해 광범위한 시각으로 기술체계를 분류하고 대처해 나가고 있다. 본 논문에서는 수소 저장분야에 있어서 액화수소를 대용량으로 저장할 수 있는 LH2 (Liquefied Hydrogen) 멤브레인 저장탱크 인수기지에 대한 공정모사 모델을 완성하고 이 모델을 베이스로

†Corresponding author:dhkim@kogas.or.kr
Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

하여 하역시 기지 설계 조건 변화에 따른 BOG(Boil-off Gas) 발생량을 예측하였다.

현재 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지는 세계적으로도 존재하지 않으며, 공정설비 개발 또한 미흡한 실정이다. 그러나 미래에 수소 산업이 활성화 된다면 저장분야 또한 이에 대처하여야 하여야 한다. LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지는 대용량 액화수소를 저장하며 수요처에 송출할 수 있는 주요한 방안이다.

본 연구에서는 아직 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지가 존재하지 않기에 제주 및 삼척 LNG 멤브레인 저장탱크 인수기지의 설계 자료를 참고하여 기지 면적, 공정설비 구성, 운영조건을 가정하고 기지 공정모사 모델을 구축하였다.

기지 운영에 있어서 주요한 요소는 수요처로 보내지는 송출량이다. 송출량은 BOG 발생량에 영향을 미치며 또한 탱크 사이즈를 결정하는 큰 인자이다. 현재 국책과제로 300MW급 고효율 50% 수소 혼소용 가스 터빈 연소기 개발과제가 수행 중에 있다. 본 논문에서는 위 터빈이 가동될 때 필요한 수소 소요량을 인수기지 송출량으로 하였고 수소 혼소용 가스 터빈 과제에 참여중인 국내 개발업체에서 제시하는 터빈 사양[2] 및 현재 가스 터빈 복합발전 조건[3]을 고려하여 정하였다.

LNG 멤브레인 저장탱크 인수기지에서 하역시 BOG 발생량은 최대치로 증가하며, BOG 처리장치(BOG 압축기, 재액화기, SOG(Sendout Gas) 압축기 등)의 Sizing이 결정될 만큼 기지 운영에 있어서 매우 주요한 인자이다. 본 연구에서는 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지 공정모사 모델을 베이스로 하여 기지 설계 조건(하역유량, 인수기지 저장탱크 압력, LH2 운송선박 Cargo 탱크 압력) 변화에 따라 BOG 발생량을 예측하였다.

이러한 연구를 통하여 향후 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지가 운영될 때를 대비하여 하역시 BOG 발생량을 최소화 할 수 있는 적절한 운전조건 확립을 위한 자료를 제시하고자 한다.

II. 기지 공정모사 모델

LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지 및 설계조건 변화에 따른 BOG 발생예측 공정모사 모델은 Asepn Plus(ver. 11) 시뮬레이터[4]를 사용하였고, 열역학 모델식은 REFPROP[5]을 적용하였다. 기지에 대한 공정설비 구성 및 배치간격은 제주 LNG 인수기지설계 자료, 탱크 사이의 이격 거리는 도시가스 사업법 시행규칙[6]을 참고하여 모사하였다.

공정모사 입력 데이터 중 몇 가지는 가정에 세워 입

력하였다. 배관 열 유입량, 공정 설비 열 유입량, 인수기지 저장탱크 BOG 토출온도, 하역시 선박으로의 BOG 반송라인(BOG Return line) 내 BOG 온도, 펌프 및 압축기의 Adiabatic efficiency 등이다. 향후 정밀한 열 유입량 분석과 펌프 및 압축기 제작사의 기기 스펙이 도출되어야 한다. 본 기지 공정모사에서는 진공단 열이 필요한 배관 열 유입량은 국내 전문가의 조언[7]을 참고로 하여 수치를 정하였다(10w/m^2). 공정설비로의 열 유입량은 없다고 정했으며, 인수기지 저장탱크 BOG 토출온도 및 하역시 BOG Return line 내 BOG 온도 조건은 LNG 기지 설계조건을 고려하여 하여 정했다. 펌프 및 압축기의 Adiabatic efficiency는 일반적으로 알려진 조건을 사용하였다.

LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지 설계 단계에 들어선다면 운영조건 변경 및 공정설비 구성 보완점도 연구되어야 할 부분이다.

2.1 송출량 및 저장탱크 Sizing

송출량은 300MW급 50% 수소 혼소용 가스 터빈 발전소에 공급되는 유량으로, 발전시스템은 가스 터빈 2기, HRSG 1기, 300MW급 스팀터빈 1기로 구성되며 총 발전량 900MW, 총 발전효율은 60%로 정하였다. 이때 발전소로 공급되는 수소와 천연가스의 유량은 50% 혼소(Volume basis at Normal Condition)조건에서 각각 9.6Ton/h, 85.9Ton/h로 계산된다. 따라서 LH2 인수기지 수소 송출량은 9.6Ton/h로 하였다.

멤브레인 저장탱크의 Sizing은 단위용량 $100,000\text{m}^3$ (Net Volume) 탱크 2기로 하였다. LH2 운송선박 Cargo 탱크 또한 멤브레인 타입이고 총 저장용량은 $50,000\text{m}^3$ 로 하였다.

기지 송출량이 9.6Ton/h이기에 탱크 1기(탱크 LH2 압력 0.25bar.g)에서 95%까지 공급($95,000\text{m}^3$)한다고 가정하면 28.3day를 탱크 1기가 담당할 수 있다. 탱크를 2기로 한 것은 발전소에 안정적인 수소 공급을 위하여 운송 지연 및 사고 등에 대비하여 예비 저장 개념으로 1기를 추가한 것이다.

LH2 운송선박은 1항차 당 $50,000\text{m}^3$ 를 공급할 수 있기 때문에 약 15일 간격으로 하역하면 인수기지에 9.6Ton/h를 정상적으로 공급할 수 있다.

2.2 기지 공정모사 설명

Fig. 1.은 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지에 대한 개략적인 공정흐름도이며, Table 1.은 공정흐름도에 표시된 Line 들의 열물질 수지도이다.

인수기지 공정을 개략적으로 설명하면, LH2 운송선박 Cargo 탱크에서 LH2는 인수기지 저장탱크로 하역된다. 이때 저장탱크 내에서는 하역으로 인해 BOG

LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지 공정모사 및 설계조건 변화에 따른 BOG 발생량 예측

Table 1. Heat and Material Balance

Line No.	Description	Pressure (bar,g)	Temperature (°C)	Mass Flow (kg/h)	Volume Flow (m ³ /h)
1	LH2 Carrier cargo tank discharge	1.92	-251.84	174,616	2,500
2	Vapor desuperheater suction	0.94	-251.68	746.81	10.75
3	LH2 tank suction	0.25	-252.11	173,869	3,726.52
4	LH2 pump discharge	9.81	-250.7	5,615.28	80.68
5	BOG recondenser suction	8.11	-250.53	5,615.28	81.23
6	BOG recondenser discharge	8.11	-245.32	6,061.31	99.94
7	LH2 Vaporizer Suction	33.5	-241.47	6,061.31	99.33
21	LH2 tank discharge	0.25	-250.0	6,017.77	4,165.94
22	Vapor desuperheater suction	0.22	-230.0	2,033.04	2,888.58
23	LH2 carrier cargo tank suction	0.176	-247.0	2,779.86	2,377.07
24	BOG compressor suction	0.15	-247.95	3,984.73	3,341.03
25	BOG recondenser suction	8.11	-202.93	446.04	138.5
26	SOG compressor suction	8.79	-205.94	3,538.69	972.55
27	SOG compressor discharge	32	-162.17	3,538.69	494.7
28	SOG heater discharge	31.5	0	3,538.69	1,250.92
29	Vaporizer discharge	31.5	0	6,061.31	2,142.66
30	Metering system discharge	30	0.04	9,600	3,554.91

가 최대로 발생되고 BOG는 LH2 운송선박 Cargo 탱크 부압을 방지하기 위해 일부가 선박으로 공급되며, 나머지는 BOG 압축기로 보내진다. BOG 압축기에서 토출된 BOG는 BOG 재액화기로 공급되어 LH2와 혼합과정을 거쳐 재액화된다. 재액화기로 공급될 수 없는 BOG는 SOG 압축기, SOG 히터를 거쳐 H2 송출라인으로 향한다. 저장탱크 LH2는 탱크 내 LH2 펌프에 의해 승압되고 BOG 재액화기로 공급되어 BOG를 재액화시킨다. 재액화된 LH2는 LH2 승압(Booster) 펌프로 공급되고 기화기를 거쳐 송출된다. 자세한 설명과 분석은 아래와 같다.

LH2 운송선박이 하역작업을 위해 인수기지에 접안시 선박 Cargo 탱크의 LH2는 0.175bar,g, -252.33°C 포화상태이며 탱크 BOR(Boil-off Rate)은 0.13이다. BOR 0.13의 의미는 탱크 내에 LH2가 100% 채워져 있

다고 할 때 전체 LH2 부피의 0.13%가 외부 열 유입에 의해 24시간 동안 증발하여 BOG(Boil-off Gas)가 된다는 의미이다.

선박 LH2 저장량이 50,000m³이며, 하역량은 2,500m³/h로 하역시간은 20시간 정도이다. 선박 저장탱크 내 LH2는 Cargo 펌프(adiabatic effi. : 0.7, 토출압 : 3.37bar,g)에 의해 하역되어 인수기지 하역압 전단에서 Line 1 상태가 되며 그 유량은 174,616kg/h이고 선박 내 압력 손실을 고려하여 압력은 1.92bar,g이다.

하역 유량 중 일부는 Vapor desuperheater로 Line 2와 같이 746.81kg/h가 공급된다. LH2 운송선박이 2,500m³/h의 하역유량을 인수기지로 공급하기 때문에 선박 Cargo 탱크 내부에서 부압이 형성될 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 하역시 인수기지 저장탱크에서 발생하는 BOG 중 일부가 운송선박 탱크로

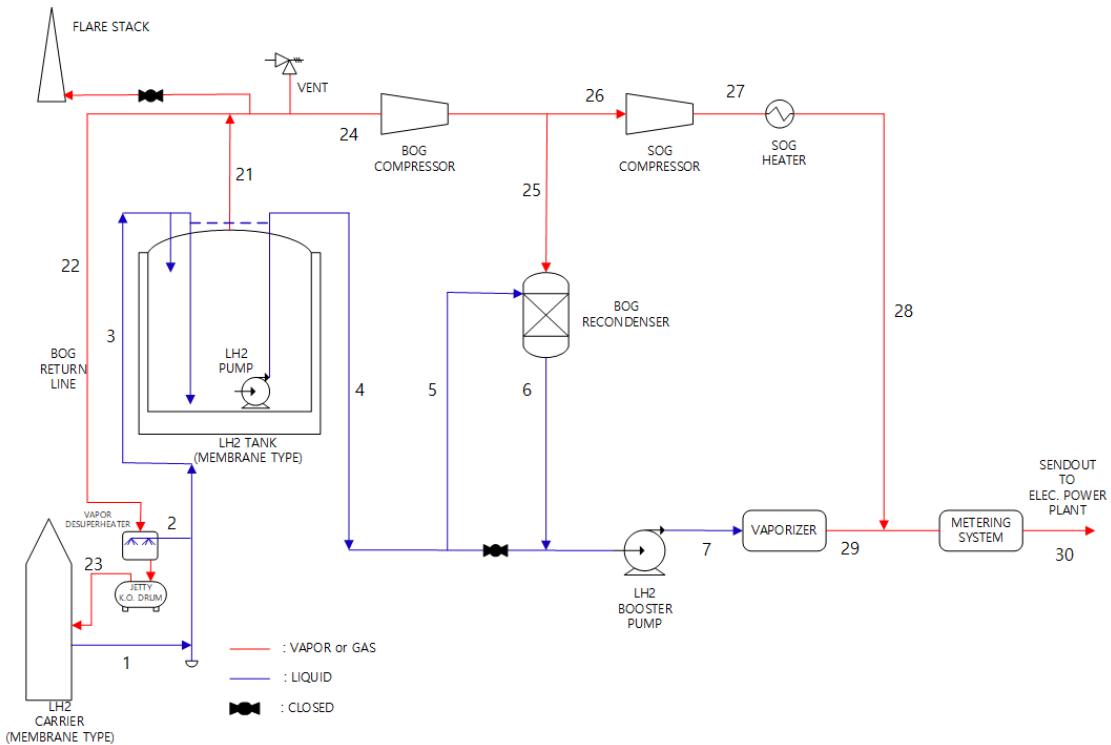


Fig. 1. The Process Flow Diagram of LH2 receiving terminal with membrane storage tank.

Table 2. Distribution Chart of BOG Generation

BOG 발생 분포 (저장탱크 압력 : 0.25bar.g)	BOG 발생량(kg/h)
저장탱크 BOR에 의한 열유입(A)	606.29
운송선박 Cargo 펌프 및 하역, LP 펌프 Kick-back 라인 열유입(B)	1,979.15
하역에 따른 저장탱크 LH2 부피 증가(C)	3,548.66
저장탱크 LP 펌프 Kick-back 라인으로 회송되는 LH2 부피 증가(D)	3.28
탱크 내 LP 펌프 가동에 따른 LH2 부피 감소(E)	119.61
총 BOG 발생량 (A + B + C + D - E)	6,017.77

반송되어 (Line 22, 23) 선박 Cargo 탱크 압력을 보충해 주는데, 반송 BOG의 온도를 낮추기 위해 하역되는 LH2 중 일부를 Vapor desuperheater 내에서 BOG에 스프레이 하여 온도를 낮춘다.

하역라인 내 LH2는 인수기지 저장탱크 입구에서 Line 3과 같이 저장탱크 압력인 0.25bar.g로 등압화되어 저장탱크 내로 하역된다.

LH2 저장탱크의 BOR은 0.1로 탱크 사이즈를 고려하여 정했다. Line 21은 하역시 저장탱크에서 발생하는 저장탱크 BOG 토출라인으로 저장탱크 BOG 발생량은 6,017.77kg/h이다. 저장탱크 압력인 0.25bar.g에서의 BOG의 평형온도 조건은 -252.11℃ 이나, 하역시 외부 열유입에 의해 탱크 내 기상영역에서 BOG의 온도가 약간 상승하기 때문에 Line 21의 온도는 -250℃로 적용하였다. 저장탱크에서 토출되는 BOG의 일부는 LH2 운송선박 탱크의 부압을 방지하기 위해 선박 탱크로 공급(Line 22, 23)되고 나머지는 BOG 처리장치로 공급(Line 24, 25, 26, 27, 28)된다.

Table 2.는 2기의 탱크 내 BOG 발생량에 대한 분포도이다. 첫 째 항목(A)은 저장탱크로 들어오는 외부 열유입(BOR)에 의해 발생하는 BOG로 606.29kg/h 발

생한다. 두 째 항목(B)은 운송선박 Cargo 펌프 가동에 따른 LH2 열유입 및 하역라인, LP(Low Pressure) 펌프 Kick-back 라인으로의 열유입에 의해 발생하는 BOG 발생량이다. 저장탱크 내에서 LH2를 송출하기 위한 LP 펌프의 정상적인 운전을 위해서는 Kick-back 라인이 필요하다. Kick-back 라인은 탱크 지붕 위에 위치하며, Fig. 1에서 탱크 위 점선라인으로 표기하였다. 이 라인은 항시 Keep-cooling 상태를 유지하여야 하기 때문에 LP 펌프에서 토출되는 LH2의 소량이 Kick-back 라인을 통하여 탱크 내로 회송된다.(본 논문에서는 Kick-back 라인 열 유입량을 고려하여 탱크 2기 Kick-back 라인을 통해 회송되는 LH2는 2.5m³/h로 함)

Cargo 펌프, 하역배관 및 Kick-back 라인을 통해 유입된 열이 모두 BOG 발생량으로 기여하지는 않는다. 하역 및 Kick-back 라인의 LH2는 가압상태에 있고 저장탱크로 들어가면서 저장탱크 압력인 0.25bar,g로 감소된다. 이때 LH2의 온도가 0.25bar,g의 평형온도(-252.11℃)보다 높을 경우 Flash(증발) 현상이 발생되면서 BOG가 발생되고 이 Flash 현상을 거친 후 LH2는 저장탱크 내에서 0.25bar,g에 해당하는 기액 평형(Vapor-Liquid Equilibrium)에 도달한다.[8] 만일 하역라인에서 저장탱크로 LH2가 인입될 때 그 온도가 저장탱크 압력의 평형온도 조건보다 낮다면 BOG는 발생하지 않는다. (B) 항목에서 보듯이 열유입에 의해 저장탱크 내에서 Flash 현상이 발생되며 그 발생량은 1,979.15kg/h이다.

세 째 항목(C)은 하역에 따른 저장탱크 내 LH2 부피가 증가한다. 이 증가되는 부피만큼 탱크 내 기상영역이 Line 21을 통해 BOG가 탱크 밖으로 토출되어야 하며, 그 유량을 의미한다. 탱크의 압력이 높다면 BOG의 밀도가 증가하게 되고 질량유량은 더욱 증가하게 된다. 토출되는 유량은 3,548.66kg/h로서 하역시 탱크 밖으로 토출되는 BOG 중 제일 큰 요소이다.

네 째 항목(D)은 Kick-back 을 통해 저장탱크로 회송되는 LH2에 의해 (C) 항목과 같은 이유로 토출되는 BOG 유량이다. Kick-back 유량이 크지 않기 때문에 BOG 유량은 3.28kg/h로 적은 유량을 형성한다.

다섯 째(E) 항목은 BOG 발생량을 감소시키는 요소로 작용한다. 탱크 내 LP 펌프가동으로 LH2 부피가 감소하므로 탱크 내 기상영역의 BOG 토출 유량을 감소시키며, 감소 유량은 119.61kg/h이다.

탱크에서 토출되는 BOG는 Line 22에서와 같이 하역에 따른 운송선박 탱크의 부압을 방지하기 위해 BOG 반송라인을 통해 운송선박 탱크로 공급된다. BOG 반송라인은 인수기지 비하역 기간 동안에는 Warm-up 되어 있고 하역시 BOG 공급용으로 사용되며, 그 유량은 2,033.04kg/h가 공급되며, 온도는 -230℃를 적용하

였다.

선박으로 반송되는 BOG는 Vapor desuperheater에서 LNG(Line 2)에 의해 Line 23과 같이 -247℃로 온도를 낮춘 후 선박 탱크로 공급된다. 선박으로 공급되는 부피유량은 2,377.07m³/h로 선박의 탱크압인 0.175bar,g를 유지시키는 유량이다.

Line 24는 인수기지 탱크에서 토출되는 BOG 중 선박으로 반송되지 않고 인수기지 내에서 처리되어야 하는 BOG로서 BOG 압축기로 공급되며, 0.15bar,g, 3,984.73kg/h이다.

BOG 압축기(adiabatic effi. : 0.8, 토출압 : 8.90 bar,g)를 통과한 BOG는 BOG 재액화기(BOG recondenser)(Line 25)와 SOG(Send out gas) 압축기(Line 26)로 나뉘어 공급된다. 각각의 유량은 446.04kg/h, 3,538.69kg/h이다.

인수기지 저장탱크 내 LH2는 LP 펌프(adiabatic effi. : 0.7, 토출압 : 10.56bar,g)에 의해 송출된다. 송출라인(Line 5)을 거쳐 BOG 재액화기로 인입(Line 6)된다.

BOG 재액화기 내에서 BOG(Line 25)와 LH2(Line 6)는 혼합과정을 거쳐 BOG가 재액화된다. Fig. 1.에서 보듯이 재액화기로 들어가는 BOG 유량이 많으면, SOG 압축기로 공급되는 BOG 유량을 줄일 수 있어 동력소모량을 줄일 수 있다. 재액화된 LH2는 일정부분 과냉되어 있어야 한다. 재액화된 LH2(Line 6)는 LH2 승압 펌프로 인입되며, 펌프 공동화(Cavitation) 현상을 발생되지 않기 위해서이다. 과냉정도는 LH2(Line 6)에서와 같이 압력 8.11bar,g 조건에서 -245.32℃이다. 8.11bar,g에서의 LH2의 평형온도는 -242.5℃로서 2.82℃ 정도 과냉 시킨다는 것이다. LH2(Line 6)와 BOG(Line 25)의 질량비를 보면 12.59 : 1 (5615.28kg/h : 446.04kg/h)이다. 이 혼합비가 감소한다면(LH2 유량 감소 또는 BOG 유량 증가) BOG 재액화기에서 토출되는 LH2의 온도는 -245.32℃보다 높아지며 이럴 경우 LH2 승압 펌프에서 펌프 공동화 현상이 발생될 수 있다는 의미이다. LNG 기지 운영에 있어서도 이 재액화 혼합비율과 토출온도는 매우 중요하다. LNG 기지 설계시 LNG 펌프에서 공동화 현상을 피하기 위해 정해지는 BOG 재액화기 토출온도는 -135℃이며, 그때의 혼합비율은 약 10.5:1(LNG 질량 : BOG 질량)로 형성된다. 본 논문에서 BOG 재액화기 토출온도 -245.32℃로 산정한 것은 LNG 기지에서의 BOG 재액화기 토출라인에서의 과냉정도를 고려한 수치이다. 향후 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지 설계 단계에 들어 서다면, 이에 대한 BOG 재액화기 토출라인의 과냉정도는 재 분석되어야 한다.

BOG 재액화기에서 토출된 LH2는 LH2 승압펌프(adiabatic effi. : 0.7, 토출압 : 35 bar,g)에서 승압된다. 승압된 LH2는 기화기(Vaporizer)에서 기화된다. Line

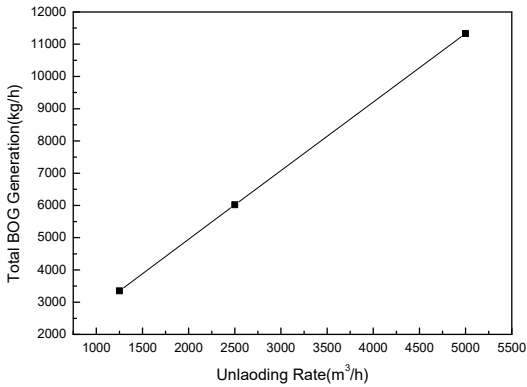


Fig. 2. Total BOG generation according to the change of unloading rates.

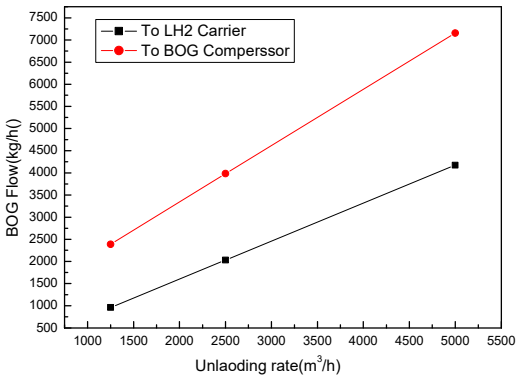


Fig. 3. BOG flow according to the change of unloading rates.

7과 같이 33.5bar,g, -241.77℃, 6,061.31kg/h 으로 기화기로 인입되고 Line 29와 같이 31.5bar,g, 0℃ 로 기화기에서 토출된다.

앞에 설명하였듯이, BOG 재액화기에서 처리할 수 없는 BOG는 SOG 압축기(adiabatic effi. : 0.8, 토출압: 32 bar,g)에서 송압되어 송출된다. Line 26은 SOG 압축기 인입단의 상태로 8.79bar,g, -205.94℃, 3,538.69kg/h 이다. Line 27은 SOG 압축기 토출단의 상태로 32bar,g, -162.17℃ 이다.

SOG 압축기에 토출된 H2 가스의 온도는 -162.17℃ 로서 인수기지에서 바로 수요처로 송출할 수 없으므로 SOG 히터에서 온도를 상승시킨다. Line 28과 같이 SOG 히터에서 토출되는 상태는 31.5bar,g, 0℃

기화기 및 SOG 히터에서 토출된 H2 가스는 혼합되고 Metering 을 거쳐 수요처(수소 혼소 가스터빈 발전

소)로 보내진다. Metering 토출단의 상태는 Line30과 같이 30bar,g, 0.04℃, 9,600kg/h이다. Metering 토출단 압력을 30bar,g로 한 것은 가스터빈 발전소로 공급되는 H2 가스가 발전소 입구에서 25bar,g로 가정했기 때문이다. 또한 Metering 토출온도가 0.004℃로 미소하게 상승한 이유는 Line28, 29에서 31.5bar,g, 0℃가 Metering 시스템에서 30bar,g로 감압되는데 H2 가스의 경우 Joule-Thomson effect가 역으로 나타나기 때문에 1.5bar 감압에 의해 온도가 미소하게 상승된 것이다.

III. 설계조건 변화에 따른 인수기지 BOG 발생량 예측

앞의 II.장 에서 멤브레인 저장탱크 인수기지 공정에 대한 전산모사 작업을 하였다. 이 모델을 베이스로 하여 여러 설계조건 변화에 따른 인수기지 BOG 발생량을 예측하였다.

설계조건 변화에 따라 모델 내 하역라인 및 BOG 라인의 Sizing 및 열 유입량은 조건 변화에 따라 수정하였다.

3.1. 하역유량 변화

베이스 모델에서 하역유량은 2,500m³/h이었다. 이 하역유량이 1,250m³/h와 5,000m³/h로 변화될 때의 인수기지 저장탱크에서의 BOG 발생량을 예측하였다.

Fig. 2.는 하역유량이 변화될 때의 인수기지 저장탱크에서의 총 BOG 발생량이다. 하역유량이 1,250m³/h, 2,500m³/h(베이스 모델), 5,000m³/h일 때 BOG 발생량은 각각 3,351.15kg/h, 6,017.77kg/h, 11,327.28kg/h이다.

하역유량이 증가되면 BOG 발생이 증가된다. 그러한 이유는 Table 2.의 (C) 항목인 “하역에 따른 저장탱크 LH2 부피 증가”에 의한 것이다. 이 (C) 항목에 의해 발생되는 BOG 발생량을 보면 하역유량이 1,250m³/h, 2,500m³/h, 5,000m³/h일 때 각각 1,772.0kg/h, 3,548.66kg/h, 7,102.52kg/h로 증가된다.

Fig. 3.은 위 Fig. 2에서의 저장탱크에서 발생된 BOG가 탱크에서 토출되어 LH2 선박으로 향하는 유량과 BOG 압축기로의 향하는 유량을 보여준다. 인수기지서 실제 처리되어야 할 BOG 유량은 BOG 압축기로 흐르는 유량이다. 그 유량은 1,250m³/h, 2,500m³/h, 5,000m³/h일 때 각각 2,387.5kg/h, 3,984.73kg/h, 7,155.38kg/h 이다. LH2 선박으로 흐르는 유량은 하역유량이 커질수록 LH2 선박 탱크 공간을 채워져야 하므로 하역유량에 정비례로 증가된다.

3.2. 인수기지 저장탱크 압력 변화

베이스 모델에서 인수기지 저장탱크 압력은 0.25bar,g 이었다. 이 저장탱크 압력이 0.25bar,g ~ 0.8bar,g로 그 운영압력이 변화될 때의 인수기지 저장탱크에서의 BOG 발생량을 예측하였다.

Fig. 4.는 인수기지 저장탱크 운영압력이 변화될 때의 저장탱크에서의 총 BOG 발생량이다. 베이스 모델인 0.25bar,g에서 압력을 크게 할수록 BOG 발생량은 0.45bar,g까지 감소된다. 이 압력을 기점으로 해서 BOG 발생량은 다시 증가하게 된다. 탱크압력 0.25bar,g, 0.45bar,g, 0.8bar,g일 때의 BOG 발생량은 각각 6,017.77 kg/h, 4,721.8kg/h, 5,898.18kg/h이다.

하역유량은 베이스 모델 조건인 2,500m³/h를 공통으로 적용하였기 때문에 LH2 선박으로 향하는 BOG 유량은 탱크압 변화에 의해 미소한 차이는 있으나 거의 같은 유량을 갖는다. 저장탱크 압력 0.25bar,g, 0.8bar,g일 때 LH2 선박으로 향하는 BOG 유량은 각각 2,033.04kg/h, 2,042.36kg/h이다.

저장탱크 BOG 발생량이 Fig. 4.와 같이 “V” 형태로 나타나는 주요 이유는 Table 2.의 (B), (C)항목에 기인하기 때문이다. 저장탱크의 압력이 증가할수록 온도도 높아지기에 (B)항목 “운송선박 Cargo 펌프 및 하역, LP 펌프 Kick-back 라인 열유입”에 의한 Flash 현상이 줄어들어 BOG 발생량이 감소한다. 또한 압력이 증가할수록 저장탱크 내 BOG의 밀도도 높아지기에 동일한 하역유량일 지라도 (C)항목 “하역에 따른 저장탱크 LH2 부피 증가”에 의한 BOG 발생량은 증가한다. 저장탱크 압력이 증가할 때 상기와 같이 (B)항목에 의한 BOG 발생량 감소와 (C)항목에 의한 BOG 발생량 증가가 발생되고 그 증감현상에 의해 총 BOG 발생량의 최저점이 존재하며, 이 최저점을 가르키고 있는 저장탱크 압력이 0.45bar,g이다.

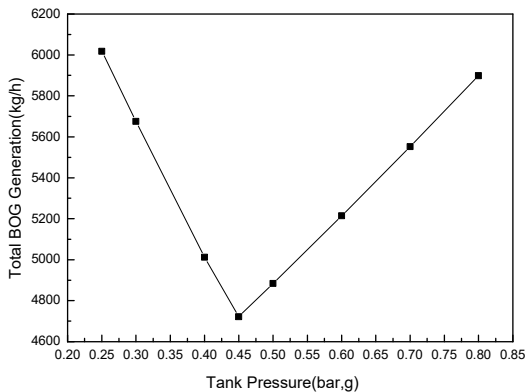


Fig. 4. Total BOG generation according to the change of pressure in LH2 tank.

Fig. 5.는 인수기지 저장탱크 운영압력이 변화될 때의 저장탱크에서의 BOG 발생에 대해 Table 2. (B), (C)항목에 대한 발생량을 보여주고 있다. 저장탱크 압력이 증가할 때 저장탱크로 인입되는 LH2의 Flash 현상이 줄어들기 때문에 BOG 발생량(B)은 감소된다. 탱크압력 0.45bar,g에서 15.73kg/h정도 발생되며 압력이 더 증가되더라도 그 수치를 유지한다. 이 15.73kg/h의 물리적 의미는 다른 열유입에 의한 Flash 현상은 사라지고 Kick-back 라인 열유입의 Flash 현상에 의한 BOG 발생량만이라는 것이다.

저장탱크 압력 증가에 따른 BOG 밀도 증가에 의해 BOG 발생량(C)은 지속적으로 증가하며 0.25bar,g, 0.8bar,g에서 각각 3,548.66kg/h, 5,453.91kg/h를 보인다.

3.3. LH2 선박 Cargo 탱크 압력 변화

베이스 모델에서 LH2 선박 Cargo 탱크의 압력은 인수기지 저장탱크 압력은 0.175bar,g이었다. 이 Cargo 탱크 압력이 0.04675bar,g(1.06bar,a)로 변화될 때의 인수기지 저장탱크에서의 BOG 발생량을 예측하였다. 인수기지 저장탱크의 압력은 2.2 절에서와 같이 0.25bar,g ~ 0.8bar,g로 그 운영압력이 변화되는 상황으로 분석하였다.

베이스 모델에서 LH2 선박 Cargo 탱크 압력 0.175bar,g로 정한 것은 LNG 기지 설계 수치로서 LNG 인수기지에 하역시 Cargo 탱크 내 LNG의 최대 포화 압력조건이 0.175bar,g이기 때문이었다. 그러나 일반적으로 LNG 선박의 만적운전(Laden voyage) 조건에서 정상 Cargo 탱크 운전압력은 0.04675bar,g이다.

Fig. 6.은 LH2 선박 Cargo 탱크 압력이 0.04675bar,g일 때 인수기지 저장탱크 압력이 0.25bar,g ~ 0.8bar,g 상황에서의 저장탱크에서 발생하는 총 BOG 발생량

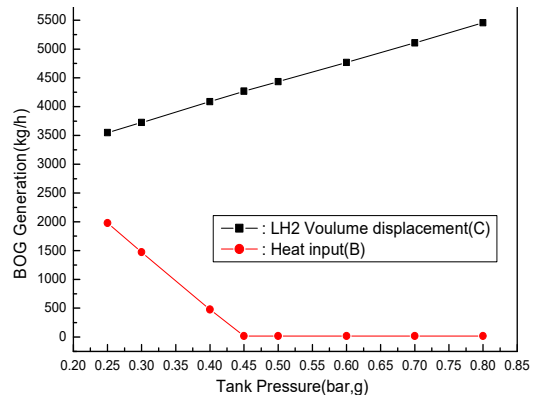


Fig. 5. Major cause of BOG generation according to the change of pressure in LH2 tank.

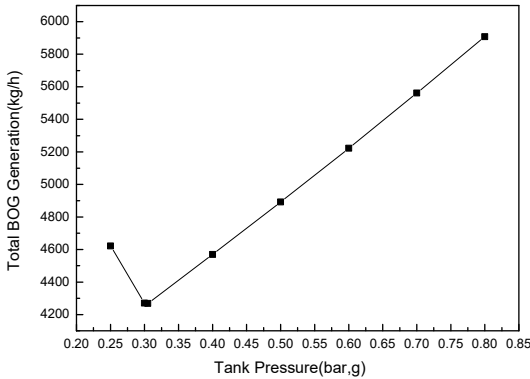


Fig. 6. Total BOG generation according to the change of pressure in LH2 tank(LH2 cargo tank pressure : 0.04675bar.g).

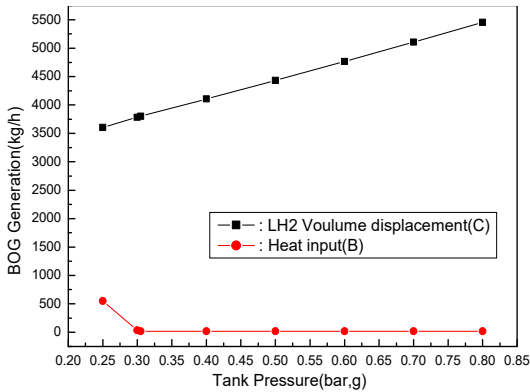


Fig. 7. Major cause of BOG generation according to the change of pressure in LH2 tank (LH2 cargo tank pressure : 0.04675bar.g).

이다. 저장탱크 총 BOG 발생량의 형태는 Fig. 4와 같은 “V”자 형태를 보이며, 그러한 이유는 앞 3.2 절에서 설명한 Table 2. (B), (C)로 설명한 바와 같다.

BOG 총 발생량이 최저점을 가리키는 저장탱크 압력은 0.305bar.g로 나타난다. Fig. 4.인 Cargo 탱크압 0.175bar.g의 포화온도인 -252.33℃와 비교하여 0.04675 bar.g의 포화온도인 -252.73℃가 더 낮은 온도에 위치하기 때문에 인수기지 저장탱크 동일한 압력조건에서 Table 2.의 (B)항목에 의한 BOG 발생량이 Fig. 4.와 비교하여 발생량이 더 적다. 즉, Flash 현상에 의한 BOG 발생량이 적다는 의미이며, 저장탱크 압력 0.305 bar.g에서 Kick-back 라인 열유입에 의한 Flash 현상에 의한 BOG 발생량을 제외하고는 (B)항목에 의한 BOG

는 발생하지 않는다.

탱크압력 0.25bar.g, 0.305bar.g, 0.8bar.g일 때의 BOG 발생량은 각각 4,622.21kg/h, 4,268.49kg/h, 5,908.31kg/h이다.

하역유량은 3.2절에서와 같이 2,500m³/h이기에 LH2 선박으로 향하는 BOG 유량은 거의 같은 유량을 갖는다. 저장탱크 압력 0.25bar.g, 0.8bar.g일 때 LH2 선박으로 향하는 BOG 유량은 각각 1,800.51kg/h, 1,808.75kg/h이다.

Fig. 7.은 LH2 선박 Cargo 탱크 압력이 0.04675bar.g일 때 인수기지 저장탱크 압력이 0.25bar.g ~ 0.8bar.g 상황에서의 저장탱크에서의 BOG 발생에 대해 Table 2. (B), (C)항목에 대한 발생량을 보여주고 있다. 그림의 형태는 Fig. 5.와 유사한 형태를 보인다. 차이점은 앞서 설명하였듯이 Cargo 탱크 온도조건이 더 낮아 (B)항목의 BOG 발생량이 Fig. 5.보다 더 적다. 총 BOG 발생량이 최저인 저장탱크 압력 0.305bar.g에서 15.56kg/h 정도 발생되며 압력이 더 증가되더라도 Fig. 5.와 같이 그 수치를 유지한다.

BOG 발생량(C) 또한 Fig. 5.와 같이 저장탱크 압력 압력이 증가할 때 BOG 밀도 증가에 의해 지속적으로 증가 0.25bar.g, 0.8bar.g에서 각각 3,605.99kg/h, 5,456.26kg/h를 보인다.

IV. 결론

액화수소를 대용량으로 저장할 수 있는 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지에 대한 공정모사 모델을 완성하였다. 모델은 인수기지 저장탱크 100,000m³ 2기로 구성하였으며, 송출량은 9.6Ton/h이며, 하역시 저장탱크 BOG 발생량은 약 6Ton/h로 계산된다. 이 인수기지 모델을 베이스로 하여 하역시 설계조건 변화에 따른 BOG 발생량 예측을 하였다.

하역유량 증가시 BOG 발생량은 하역유량 증가에 비례하여 증가됨을 알 수 있었다. 하역유량 증가는 하역시간을 단축할 수 있다. 그러나 하역설비, 하역 및 BOG 라인의 환경, BOG 처리량이 증가된다. 향후, 기지 설계시 적절한 하역유량은 위와 같이 설비 규모, BOG 처리능력 등을 고려하여 결정되어야 한다.

LH2 인수기지 저장탱크 압력에서 BOG 발생량이 이 최저점을 형성하는 압력이 존재함을 확인할 수 있었다. 그 압력은 0.45bar.g로 분석되었다. 이 압력은 LNG 멤브레인 저장탱크의 운영 압력인 0.25bar.g와는 큰 차이를 보이기에 향후 LH2 인수기지 저장탱크 설계시에 최적 탱크 운영 압력 설정에 대한 고려가 필요하다.

LH2 선박 Cargo 탱크 압력이 낮아질 경우 그 포화

온도 조건도 낮아지게 되어 BOG 발생 최저점을 가르키는 저장탱크 압력이 적게 형성되며, BOG 발생량 또한 감소됨을 알 수 있었다.

본 논문은 미래 수소 산업이 대규모로 활성화되었을 때를 대처하기 위해 액화수소를 대용량으로 저장할 수 있는 LH2 멤브레인 저장탱크 인수기지에 대해 공정 모사 모델을 구축하여 분석한 내용이다. 그러나 이러한 인수기지는 현재 세계적으로도 존재하지 않고 관련 공정 설비 개발 또한 미흡한 상황이다. 따라서 입력 데이터 중 몇 가지는 가정을 세워 분석하였다. 향후 이에 대한 보완 연구가 필요하며, LH2 인수기지 특성을 고려한 운전조건 및 공정설비 구성에 대한 보완 점도 연구되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20213030040460)

REFERENCES

- [1] 과학기술정보통신부, 한국에너지기술연구원, “수소 기술개발 로드맵 2.0 공청회”, 2022년 한국수소 및 신에너지학회 춘계 학술대회, 14-34,(2022)
- [2] *Products-energy-Gas_Turbine_Brochure*, https://www.doosanenerbility.com/kr/business/gas_turbine_product,(2021)
- [3] 손정락, “고효율 복합 발전 기술”, *Journal of the Electric World/Monthly Magazine*,pp.29,(2013.8)
- [4] *Aspen Plus ver.11*, Aspen Technology Inc,(2019)
- [5] Jacob W. Leachman et al, *Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids 2nd*, 8-9(2017)
- [6] *도시가스법 시행규칙[별표5]*,pp.2,(개정 2020.8.25.)
- [7] 박준형, 정우 ENE(주), (2022)
- [8] J.M.Smith, H.C.Van Ness, *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics 7th*, 367-377, (2005)