

5 TPD급 수소액화용 헬륨 압축기 테스트베드 설계 및 시뮬레이션

변병창¹ · 윤하준² · 이정민³ · 최정웅² · 김동민¹ · 김모세¹ · 김기덕¹ · 김정훈¹ · 이상윤¹ · 이성우¹ · 백기영³ · 이철진² · 이근태^{1†}

¹한국기계연구원 김해극저온기계실증연구센터, ²중앙대학교 화학공학과, ³(주)에스에이엔지니어링

Design and Simulation of a Helium Compressor Testbed for 5 TPD Hydrogen Liquefaction

BYEONGCHANG BYEON¹, HA-JUN YOON², JUNGMIN LEE³, JUNG UNG CHOI², DONGMIN KIM¹, MO SE KIM¹, GI DOCK KIM¹, JUNG HUN KIM¹, SANGYOON LEE¹, SEONG WOO LEE¹, KIYOUNG BAIK³, CHUL-JIN LEE², KEUN TAE LEE^{1†}

¹LNG & Cryogenic Technology Center, Korea Institute of Machinery and Materials, 80-140 Golden root-ro, Juchon-myeon, Gimhae 50969, Korea

²Department of Chemical Engineering, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Korea

³SA Engineering, 40 Sinildong-ro 67beon-gil, Daedeok-gu, Daejeon 34324, Korea

†Corresponding author :
ktlee@kimm.re.kr

Received 4 September, 2024
Revised 23 September, 2024
Accepted 11 October, 2024

Abstract >> This paper describes the design and modeling processes for a testbed developed to evaluate the performance of helium compressors, essential components in a 5 TPD hydrogen liquefaction plant. The compressor operates under inlet of 7.0 bar and 293.1 K, and outlet of 25.9 bar and 315.1 K, and resulting in a specific energy consumption of 11.42 kWh/kgLH₂. The testbed is designed to supply gas, cooling water, and other utilities necessary for compressor operation. Furthermore, the testbed design was validated through static modeling using Aspen HYSYS, which included the compressor's performance curves, surge protection systems, stage-wise speeds, and detailed geometries of intercoolers and aftercoolers. The modeled calculations showed agreement within a 5% error compared to the testbed's design values.

Key words : Liquid hydrogen(액체 수소), Compressor(압축기), Process design(공정 설계), Liquefaction(액화), Helium(헬륨)

1. 서론

액체수소는 기체수소를 상압에서 -253°C (20 K) 이하로 냉각하여 액화한 수소를 칭하며 기체수소 대비 높은 에너지 저장 밀도와 상압 저장이 가능한 장

점 덕분에 차세대 에너지 캐리어의 한 축으로 주목 받고 있다^{1,2)}. 액체수소는 수소의 대량 운송과 수소 상용차 보급 촉진에 있어 중요한 역할을 하는데 1회 운송량, 충전소 구축 면적, 충전 속도, 안전성 등에서 기체수소 대비 확연한 장점을 지니며 이러한 이유들

로 액체수소는 수소경제를 구축하는 데 있어 ‘게임 체인저’로 통한다^{3,4)}.

상용급 규모의 액체수소 생산은 통상적으로 액화수소 플랜트에서 이루어진다. 국내 최초의 액화수소 플랜트는 경남 창원에 2024년 1월에 준공되었고(두산에너지빌리티) 일일 5톤의 액체수소를 생산하는 규모이다. 이후 인천에는 2024년 5월에 일일 90톤(일 30톤급 액화 설비 3기)의 액체수소를 생산하는 플랜트가 준공되었으며(SK E&S) 이는 단일 공장 기준 세계 최대의 수소 액화 설비이다. 곧이어 울산에서도 일일 15톤의 액체수소 생산이 가능한 플랜트(효성하이드로젠)가 가동될 예정이다⁵⁻⁷⁾.

한편 전 세계적으로 수소액화 관련 기술은 독일의 Linde, 프랑스의 Air Liquide, 미국의 Air Products 3사가 독점하고 있는 실정이다. 앞서 언급한 3곳(창원, 인천, 울산)의 액화수소 플랜트의 핵심 공정 기술과 부품 역시 모두 해외 선진사의 그것을 적용하였다. 액체수소 산업의 성장세와 잠재력을 미루어 보았을 때 해외 선진사로부터 기술적으로 종속되지 않도록 기술과 부품을 국산화하는 것이 시급하다고 볼

수 있으며 이와 관련하여 현재 여러 국가 연구 과제들이 수행되고 있는 실정이다.

한국기계연구원에서는 2022년부터 6년간 국토교통부의 지원을 받아 “상용급 액체수소 플랜트용 압축기 핵심기술 개발 및 실증 사업”을 수행하고 있다. 주관 연구개발 기관인 (주)에스에이엔지니어링에서는 상용급(5 TPD) 액화수소 플랜트용 헬륨 압축기를 개발 및 제작하고 있고 공동 연구개발 기관인 한국기계연구원에서는 헬륨 압축기 개발품을 검증할 테스트베드를 구축하고 있다. 이에 본 논문에서는 현재 구축 및 추진하고 있는 수소 액화용 헬륨 압축기 테스트베드가 어떻게 설계되었는지에 대한 전반적인 내용을 기술할 예정이다.

2. 본 론

2.1 헬륨 압축기 적용 대상 수소 액화 공정

수소 액화용 헬륨 압축기를 개발하기에 앞서 먼저 개발하고자 하는 압축기가 적용될 액화수소 플랜트

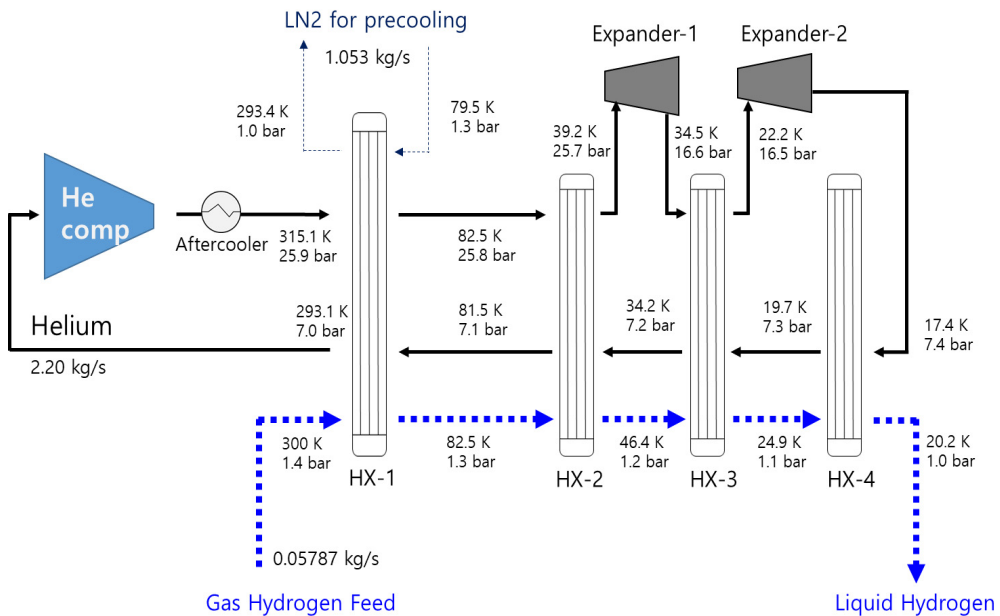


Fig. 1. Schematic diagram of He-Brayton cycle for hydrogen liquefaction

의 공정이 정의되어야 할 것이다. 주로 상용급 액화 수소 플랜트에 사용되는 액화 공정은 크게 두 가지가 있는데 하나는 헬륨을 냉매로 사용하는 He-Brayton cycle이고 다른 하나는 수소를 냉매로 사용하는 Claude cycle이다. 사업의 목표, 액화 용량(5 TPD), 안전성(가스 안전, 방폭 등), 효율적 운용 요소를 고려하여 헬륨을 냉매로 사용하는 He-Brayton cycle을 대상 공정으로 선정하고 본 연구를 진행하였다^{8,9)}.

개발하고자 하는 압축기가 적용될 He-Brayton cycle 공정의 개략도는 Fig. 1과 같다. 굵은 실선이 헬륨 냉각 공정, 굵은 점선이 수소 액화 공정, 얇은 점선이 액체질소 예냉 공정을 뜻한다. 헬륨은 7.0 bar, 293.1 K로 압축기로 인입되어 aftercooler 후단으로 25.9 bar, 315.1 K로 토출된다. 이후 HX-1을 거치면서 액체질소와 열교환하여 82.5 K까지 예냉된 후 HX-2에서 39.2 K까지 냉각된다. 이후 expander-1에서 16.6 bar, 34.5 K까지 냉각 및 감압된 후 HX-3를 통해 22.2 K까지 온도가 떨어진다. Expander-2에서 다시 한 번 7.4 bar, 17.4 K까지 냉각 및 감압되고 HX-4에서 24.9 K의 기체수소와 최종 열교환하여 수소 액화를 위한 냉열을 제공해 준다. 이후 각 열교환기를 거치며 293.1 K까지 온도를 회복한 후 다시 압축기 입구로 인입된다.

본 공정에서 압축기의 소요 동력은 2,487 kW이며 expander-1의 회수 동력은 56.67 kW, expander-2의 회수 동력은 42.40 kW이다. 따라서 본 공정의 net

power는 2,377.93 kW이며 수소 유량은 208.3 kgLH₂/h 이므로 specific energy consumption (SEC)은 net power를 수소 유량으로 나눈 값인 11.42 kWh/kgLH₂로 도출되었다(Table 1).

2.2 5 TPD급 수소 액화용 헬륨 압축기

상기한 공정에 적용될, 현재 연구개발 중인 헬륨 압축기의 설계제원은 Table 2와 같다. 압축기의 종류는 원심식(티보) 압축기이며 작동 유체는 헬륨(기체)이다. 다만 압축(8단) 방식을 채택하였고 질량유량은 2.2 kg/s이다. 압축기 입구 온도는 20°C (293 K)이고 입구 압력은 7 bar.A이다. 압축기에서 헬륨이 압축되고 난 후의 출구 압력은 26 bar.A이다. 각 단별 허용 가능한 seal leakage는 3.5 g/s이며 tip speed는 485.7 m/s, rotation speed는 37,206 rpm이다. 압축기에서 발생하는 열을 제거하기 위한 cooler로는 3개의 intercooler와 1개의 aftercooler가 적용되었고 각 cooler로 제공되는 cooling water의 입구 온도는 32°C이다. 본 압축기의 specific power는 1,184 kWh/(kg/s)이며 국내 최초로 개발되는 액화수소 플랜트용 헬륨 압축기라는

Table 1. SEC calculation of hydrogen liquefaction plant

Item	Value
He comp power	2,487 kW
Expander-1 power	56.67 kW
Expander-2 power	52.40 kW
Net power	2,377.93 kW
H ₂ flow rate	208.3 kgLH ₂ /h
SEC	11.42 kWh/kgLH ₂

$$SEC(kWh/kgLH_2) = \frac{Net\ power\ consumption(kW)}{LH_2\ capacity(kgLH_2/h)}$$

$$= \frac{W_{comp} - W_{expander}(kW)}{LH_2\ capacity(kgLH_2/h)}$$

Table 2. Specification of helium compressor under development

Item	Value
Compressor type	Centrifugal (oil-less)
Working fluid	Helium (gas)
Compression stage	8
Mass flow	2.2 kg/s
Inlet temperature	20°C
Inlet pressure	7 bar.A
Outlet pressure	26 bar.A
Seal leakage per stage	3.5 g/s
Tip speed	485.7 m/s
Rotation speed	37,206 rpm
Cooling water inlet temperature	32°C
Cooler	3 intercooler + 1 aftercooler
Specific power	1,184 kWh/(kg/s)

데에 그 개발 의의가 있다.

2.3 5 TPD급 수소 액화용 헬륨 압축기 테스트베드 설계

2.2에서 기술한 헬륨 압축기 개발 시 설계 의도에 맞게 잘 제작되었는지 알아보기 위한 성능평가가 요구된다. 따라서 헬륨 압축기(Fig. 2)의 성능평가를 수행할 수 있는 테스트베드 구축이 필요하다. 그러나 개발한 헬륨 압축기를 실제 작동유체(헬륨)를 이용하여 성능 시험을 할 수 있는 설비가 국내에 존재하지 않기 때문에 한국기계연구원 김해극저온기계실중

연구센터에서는 약 800평 규모의 부지에 본 테스트베드 설비를 구축할 예정이다. 본 테스트베드는 압축기 운전을 위한 헬륨을 공급할 수 있어야 하고 압축기 및 작동유체의 냉각을 위한 냉각수를 공급할 수 있어야 한다. 일정한 온도, 압력, 유량의 냉각수 공급을 위해 충분한 냉각 용량을 확보하여야 하며 압축기 운전 전 퍼지용 질소를 공급할 수 있어야 한다. 테스트베드 및 압축기 운전 상태를 모니터링하기 위해 온도, 압력, 유량 데이터를 실시간으로 기록할 수 있어야 하며 각종 밸브를 이용하여 테스트베드 내 유체의 흐름을 조절할 수 있어야 한다. 테스트베드의 공정 흐름을 나타낸 개략도는 Fig. 3과 같다.

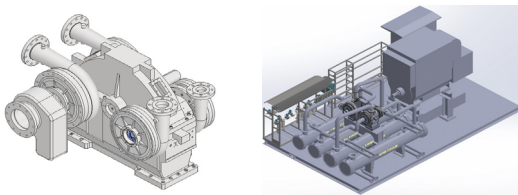


Fig. 2. Helium compressor (left) and compressor skid package (right)

7 bar, 18°C의 헬륨이 압축기(He compressor)에서 압축되어 26 bar, 42°C로 토출된다. 압축기 출구 측에서 본 공정의 유량을 측정하고 pressure control valve (PCV)를 지나며 감압되어 7 bar, 43.23°C (Joule-Thomson 효과로 온도 소폭 상승)가 된다. 이후 열교환기(heat exchanger)에서 헬륨은 냉각되어 7 bar, 18°C의 조건으로 다시 압축기 입구 측으로 인입되는 사이클을 이룬다. 헬륨 버퍼 시스템(He buffer system)과

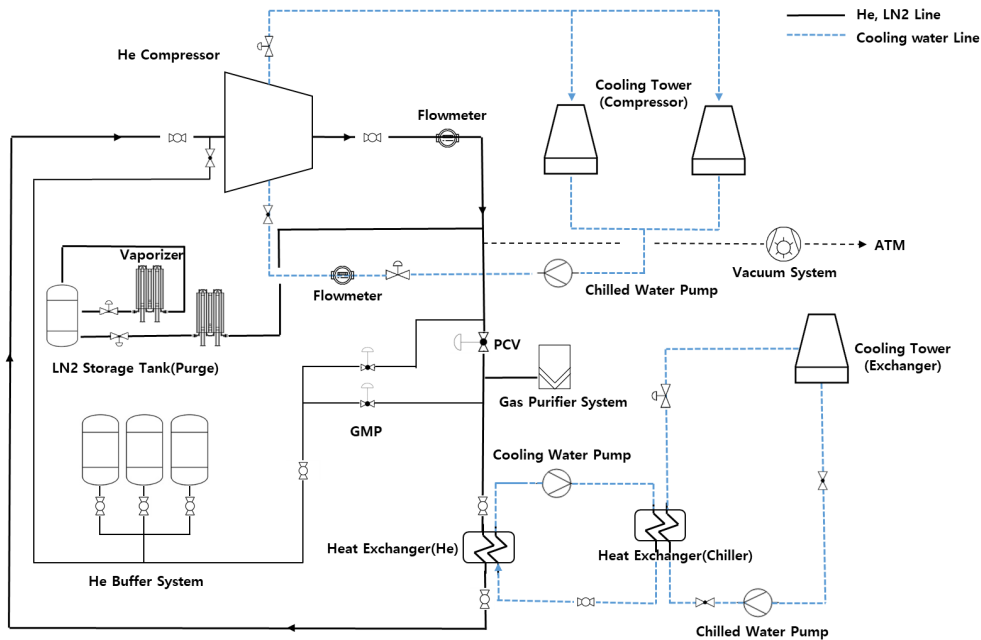


Fig. 3. Schematic diagram of helium compressor testbed

gas management system은 압축기 테스트베드 공정 내의 유량이 과도하거나 부족할 시 헬륨을 공급 또는 회수하는 역할을 한다. 압축기와 열교환기에서 발생한 열은 냉각수(점선)를 통해 제거되며 냉각수의 열은 냉각탑(cooling tower) 및 칠러(chiller)를 통해 최종적으로 제거된다. 시스템 가동 전 질소 퍼지 용도로 액체질소 탱크 및 기화기가 시스템에 연결되어 있으며 시스템 내 헬륨 주입 전 진공 형성을 목적으로 한 진공 펌프도 존재한다. 마지막으로 압축기 가동 중에 공정 유체의 순도를 유지하기 위한 gas purifier system이 PCV 후단에 위치하고 있다. 압축기 테스트베드의 주요 설계 사양(design specification)은 상기한 운전 조건(operating condition)에서 약 10% 이상 마진을 더하여 Table 3과 같이 선정하였다.

압축기 테스트베드의 시운전은 다음의 순서로 이루어진다. 압축기와 연결되어 있는 main loop의 퍼지

작업을 수행하여 main loop의 이물질질을 제거한다. 이후 main loop 내 퍼지용 가스의 제거를 위해 진공펌프를 이용하여 main loop 내에 진공을 형성한다(목표 진공도, 0.1-0.01 Torr). 이후 실험 유체(He)를 main loop 내에 공급하여 7 barA 이상의 압력을 형성한다. 이후에는 냉각수 순환계통의 충수 및 펌프 가동을 실시한다. 그리고는 실험 대상 압축기의 최초 가동을 시작하여 성능 시험을 수행하는 것으로 절차는 마무리된다.

2.4 5 TPD급 수소 액화용 헬륨 압축기 테스트베드 모델링 및 시뮬레이션

2.3에서 설계하였던 테스트베드 공정을 검증하기 위하여 공정 시뮬레이션 프로그램인 Aspen HYSYS (AspenTech, Bedford, MA, USA)를 사용하여 정적 모델링을 구현 및 고도화하고 이를 토대로 본 테스트베드 공정의 건전성을 확인하였다. 본 테스트베드의 Aspen HYSYS 정적 모델링은 Fig. 4와 같다. 본 모델링은 8단 압축기의 성능곡선을 반영하였고 압축기 서지 방지를 위하여 첫 단은 multiple inlet guide vane, 나머지 단은 single molecular weight로 모델링하였다. 1-4단은 low speed (37,206 rpm), 5-8단은 high speed (40,183 rpm)로 작동하고 compressor link를 사

Table 3. Design specification of helium compressor testbed

Item	Design specification
Compressor inlet pressure	9 barA
Compressor inlet temperature	18°C
Mass flow rate	2.4 kg/s
Compressor outlet pressure	30 barA
Compressor outlet temperature	46°C

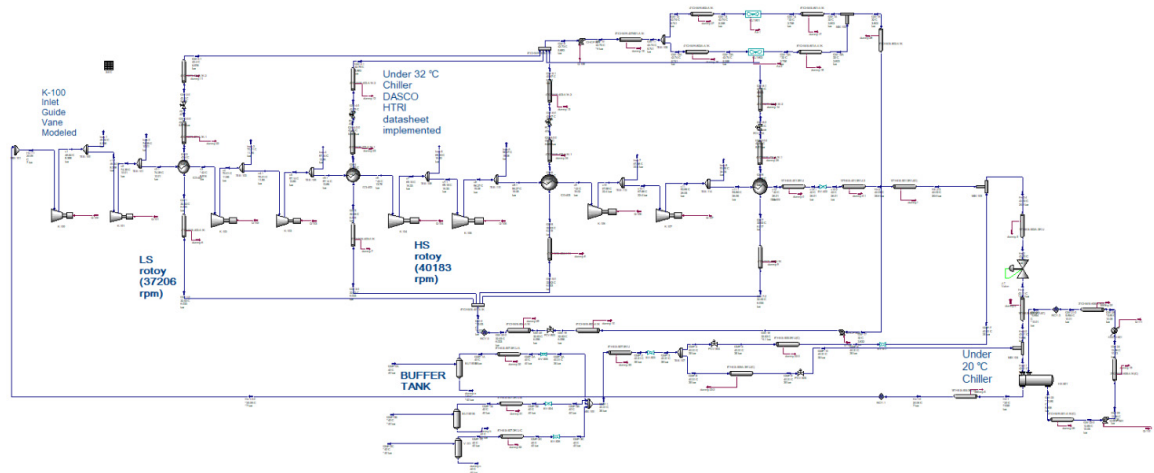


Fig. 4. Aspen HYSYS static modeling of a compressor testbed

용하여 1-4단 및 5-8단이 같은 speed로 작동할 수 있도록 모사되었다. 압축기 회전관성 데이터(inertia mass, radius of gyration) 또한 고려되었다. 압축기의 inter-cooler 및 aftercooler는 실제 기하학적(geometric) 수치가 반영되었으며 shell, tube의 외경, 두께, tube 개수, TEMA type 등의 정보를 기반으로 하였다. 또한 설계안의 piping and instrumentation diagram (P&ID) 및 배관 도면인 isometric DWG (Fig. 5)를 기반으로

하여 실제 파이프라인의 기하학적 수치(길이, 외경, 내경, 피팅, 고저차)가 반영되었고 이에 따른 압력 강하도 계산되었다. 앞서 언급한 대로 각 기자재의 설계 데이터를 적용 및 구현한 Aspen HYSYS 모델링 계산값과 테스트베드 설계 시 도출한 heat and mass balance (HMB) 데이터와의 비교를 통해 테스트베드 설계안을 검증하였다. Fig. 6에서 테스트베드 내의 각 스트림의 HMB 데이터와 Aspen HYSYS 모델링

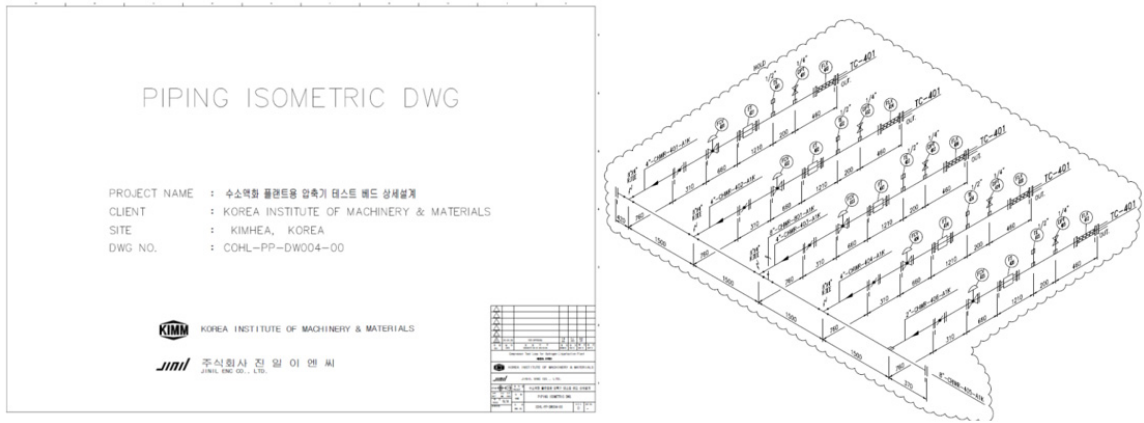


Fig. 5. Isometric DWG of the testbed design

Stream No.	Unit	HMB	Calc.	Error (%)	HMB	Calc.	Error (%)	HMB	Calc.	Error (%)	HMB	Calc.	Error (%)	HMB	Calc.	Error (%)	HMB	Calc.	Error (%)
Stream No. Unit																			
Description																			
Temperature [°C]																			
Pressure [barA]																			
Flowrate (Total) [kg/s]																			
Helium [kg/s]																			
30 vol% Glycol W [kg/s]																			
Mole Frac																			
Helium																			
30 vol% Glycol Water																			
Volumetric flow [m³/h]																			
Density [kg/m³]																			
Compressibility factor																			
Cp [kJ/kg-K]																			
Cv [kJ/kg-K]																			
Enthalpy [kJ/kg]																			
Entropy [kJ/kg-K]																			
Stream No. Unit																			
Description																			
Temperature [°C]																			
Pressure [barA]																			
Flowrate (Total) [kg/s]																			
Helium [kg/s]																			
30 vol% Glycol W [kg/s]																			
Mole Frac																			
Helium																			
30 vol% Glycol Water																			
Volumetric flow [m³/h]																			
Density [kg/m³]																			
Compressibility factor																			
Cp [kJ/kg-K]																			
Cv [kJ/kg-K]																			
Enthalpy [kJ/kg]																			
Entropy [kJ/kg-K]																			
Equip. No. Unit																			
Description																			
Aero power [kW]																			
Rotational speed [rpm]																			
Isen. Efficiency																			

Fig. 6. Static model validation - comparison of HMB data and HYSYS modeling calculations

계산값의 비교 결과를 볼 수 있다. 각 스트림의 온도, 압력, 질량유량, 부피유량, 밀도, 압축기 power, rotational speed, efficiency, 비열, 엔탈피 등이 5% 이내의 오차로 Aspen HYSYS 모델링이 HMB 데이터를 비교적 잘 모사 및 예측함을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 5 TPD급 액체수소 플랜트의 핵심 기자재인 헬륨 압축기의 성능평가를 위한 테스트베드 설계 과정과 이에 대한 모델링 및 시뮬레이션 과정을 기술하였다. 본 설계안을 바탕으로 현재 테스트베드는 구축 중에 있으며 구축 완료 후 실제 시운전 데이터와 설계 데이터의 비교 연구를 후속 연구로 진행할 예정이다. 본 테스트베드 설계 연구를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 하루 5톤의 액체수소를 생산할 수 있는 플랜트의 공정 설계가 수행되었으며 국산화하고자 하는 압축기의 사양이 설계되었다. 헬륨을 냉매로 사용하는 He-Brayton cycle이며 냉매의 유량은 2.2 kg/s이다. 압축기의 입구 조건은 7.0 bar, 293.1 K이며 출구 조건은 25.9 bar, 315.1 K이다. 압축기의 소요 동력은 2,487 kW이며 액체수소 플랜트의 SEC는 11.42 kWh/kgLH₂로 도출되었다.

2) 위에서 기술한 압축기의 개발 단계 중 요구되는 성능평가를 위한 테스트베드가 설계되었다. 헬륨을 이용하여 압축기를 성능 시험할 수 있는 설비가 국내에 존재하지 않는 관계로 한국기계연구원에서는 본 테스트베드를 설계 및 구축 중에 있다. 본 테스트베드는 압축기 운전을 위한 가스, 냉각수, 기타 유틸리티를 공급할 수 있다. 압축기 운전 조건에 약 10% 가량의 마진을 더해 테스트베드가 설계되었으며 시운전을 위한 절차까지 수립되었다.

3) 설계한 테스트베드를 검증하기 위하여 공정 시뮬레이션 프로그램 Aspen HYSYS를 사용하여 정적 모델링을 구현 및 고도화하였다. 본 모델링은 테스트베드 내 압축기의 성능곡선, 서지 방지 시스템, 각 단의 speed 등을 반영하였으며 intercooler 및 aftercooler의

기하학적 수치도 반영하였다. 뿐만 아니라 설계안의 P&ID 및 isometric DWG를 기반으로 실제 파이프라인의 길이, 외경, 내경, 피팅, 고저차까지 반영되었다. 이렇게 모델링한 계산값은 테스트베드의 HMB 설계값과 5% 이내의 오차를 나타내었다.

후 기

본 연구는 2022년도 기획재정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2022-00155807, 상용급 액체수소 플랜트용 압축기 핵심기술 개발 및 실증)이며 지원에 감사드립니다.

References

1. H. You, B. Choi, K. Do, T. Kim, C. Kim, M. Kim, and Y. Han, "Analysis of Cool-down Operation of Liquid Hydrogen Tank", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 641-649, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.641>.
2. B. Byeon, H. You, D. Kim, K. T. Lee, M. S. Kim, G. D. Kim, J. H. Kim, S. Y. Lee, and D. Y. Koh, "Design of BOG re-liquefaction system of 20,000 m³ liquid hydrogen carrier", *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, Vol. 25, No. 3, 2023, pp. 49-55, doi: <https://doi.org/10.9714/psac.2023.25.3.049>.
3. H. Kim, Y. J. Hong, H. Yeom, J. Park, J. Ko, S. J. Park, and S. In, "Thermal analysis of a cold box for a hydrogen liquefaction pilot plant with 0.5 TPD capacity", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 571-577, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.571>.
4. T. Kim, B. I. Choi, Y. S. Han, and K. H. Do, "Thermodynamic analysis of a hydrogen liquefaction process for a hydrogen liquefaction pilot plant with a small capacity", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 41-48, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.41>.
5. S. Park and J. Hwang, "Analysis of droplet formation under sloshing phenomena in liquid fuel tank", *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol. 21, No. 2, 2023, pp. 102-110, doi: <https://doi.org/10.5407/jksv.2023.21.2.102>.
6. H. J. Kim, B. H. Song, S. S. Tak, H. Y. Joe, and S. K. Kang, "Establishing the safety of the hydrogen industry through the revision of domestic liquefied hydrogen safety standards". *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 25, No. 6, 2021, pp. 98-105, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.6.98>.
7. M. J. Park, H. M. Kim, Y. J. Gu, C. H. Jeong, B. M. Kang, S.

- W. Ha, and D. W. Jeong, "A study on fostering plan for the hydrogen industry in Changwon City", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 509-521, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.509>.
8. Y. Bi and Y. Ju, "Design and analysis of an efficient hydrogen liquefaction process based on helium reverse Brayton cycle integrating with steam methane reforming and liquefied natural gas cold energy utilization", *Energy*, Vol. 252, 2022, pp. 124047, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124047>.
9. Z. Hu, J. Li, and H. Tan, "Helium screw compressor for 5tpd large-scale hydrogen liquefier", *Cryogenics*, Vol. 141, 2024, pp. 103890, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2024.103890>.