

소규모 수소 액화 시스템을 활용한 파일럿 플랜트의 기체 전환 공정 시스템 구축에 관한 연구

서영민 · 노현우 · 구태형 · 고락길 · 하동우[†]

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

A Study on the Construction of the Gas Conversion Process System for a Pilot Plant Using a Small-scale Hydrogen Liquefaction System

YOUNG MIN SEO, HYUN WOO NOH, TAE HYUNG KOO, ROCK KIL KO, DONG WOO HA[†]

Hydrogen Electric Research Team, Electric Mobility Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, 12 Jeongjui-gil, Seongsan-gu, Changwon 51543, Korea

[†]Corresponding author :
dwha@keri.re.kr

Received 22 May, 2024
Revised 29 May, 2024
Accepted 5 June, 2024

Abstract >> In this study, several studies were conducted on the construction of gas conversion process system for a pilot plant using a small-scale hydrogen liquefaction system. The pilot plant considered in this study includes a liquefier, a storage tank, an evaporator, a gas booster, and a gas storage tank. First, the suspected leak area of the container was checked using the sprayed method of helium gas. The small-scale hydrogen liquefaction system was designed based on the analysis results of the pre-cooling system and the liquefaction system. Additionally, the program was developed to maintain pressure within vessel for an automatic production of liquid hydrogen. The evaporator for liquid hydrogen was manufactured based on the designed analysis data, and the pollution of gas in the vessel was analyzed through a gas recovery line system.

Key words : Pilot plant(파일럿 플랜트), Liquid hydrogen(액체 수소), Gas supply system(가스 공급 시스템), Evaporator(기화기), Helium leak test(헬륨 리크 테스트)

1. 서론

액화 수소 충전소는 기체 수소를 영하 253°C의 극저온으로 냉각해 액상화시킨 액화 수소를 수소 모빌리티에 공급하는 시스템으로 기체 수소 충전소 대비 우수한 경제성 및 안전성을 갖는 충전 시스템이다.

액화 수소 충전소의 핵심 설비로는 액화 수소 저장 탱크, 액화 수소 펌프, 액화 수소 기화기가 있으며 기화된 수소는 일반 기체 수소 충전소의 설비 중 고압 축압기 및 충전기를 통해 차량에 충전 서비스를 제공한다. 따라서 대용량 액화 수소 충전소 구축을 위하여 액화 수소를 저장할 수 있는 액화 수소 저장 탱

크, 액화 수소를 가스로 전환시켜 주는 기화기 등 기존의 수소 충전소에 없던 핵심 설비들에 대한 설계가 요구된다¹⁻³⁾.

액화 수소의 시장이 증대됨에 따라 액화 수소 충전소 및 산업용 모빌리티(수소 버스, 건설용 장비 및 수소 드론 등)의 산업 시장이 계속해서 성장할 것으로 추정된다. 따라서 국내에서도 다양한 규모의 수소 액화 플랜트 구축에 관한 연구가 진행되고 있다. 하지만 액화 수소의 활용 관련 저장 및 운송 기술은 세계적으로 일부 선진 기업만 보유하고 있으며 기술 격차의 축소가 어려워 현재까지는 액화 수소 인프라 구축을 모두 외국에 의존해야 하는 실정이다^{4,7)}.

최근 소규모 액화 기술에 관한 관심이 높아지면서 파일럿 플랜트를 통한 액체 수소의 생산, 저장 및 운송 등에 대한 다양한 연구가 진행되었다. Ha 등⁸⁾과 Seo 등⁹⁾은 실험과 해석을 통해 극저온 냉동기를 활용한 기체 수소 예냉 시스템의 검증에 관한 연구를 수행하였다. 수소 가스 유량에 대한 예냉 시스템의 극저온 냉동기 온도 분포를 분석하여 냉동기 냉각 능력을 검증하였다. 또한 Ha 등^{10,11)}은 액체 수소를 활용한 극저온 부품의 냉각 과정에서 발생하는 boil off gas에 관한 이론적 연구를 수행했으며 응축형 액화 수소 시스템에 대한 LabVIEW (National Instruments, Austin, TX, USA) 기반 데이터 저장 및 모니터링 프로그램을 개발하여 액체 수소의 생산에 관한 장기 저장 기술을 보고하였다.

소규모 수소 액화 시스템을 활용한 파일럿 플랜트

에서 액체 수소의 운송 관련 핵심은 기체 전환 공정 시스템에서 안정성을 확보하는 것이다. 따라서 기화 과정이나 충전 과정에서의 현상을 예측하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. Verfondern과 Dienhart¹²⁾는 액체 수소를 포함한 극저온 액체의 확산 및 기화를 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하였으며 Zheng 등¹³⁾은 단열재를 적용한 액체 수소 저장 탱크의 자가 증발을 막기 위한 열역학 모델을 구축하였다. Salzano 등¹⁴⁾은 액체 수소의 상변화 현상에 대한 수치적 접근 방식을 통해 안전성에 대해 고찰하였으며 Qiu 등¹⁵⁾은 저압 압축을 통한 고효율 수소 충전 시스템을 제시하였다.

액화 수소의 전주기 인프라 시설에 대한 핵심 부품 평가 및 안전 기준의 마련을 위하여 파일럿 플랜트에서의 기체 전환 충전 공정 개발 및 운전 중 안전성 확보를 위한 평가 기술 개발 등이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 소규모 수소 액화 시스템을 활용한 파일럿 플랜트의 기체 전환 공정 시스템 구축에 관한 연구를 수행하였다.

2. 파일럿 플랜트 실험 장비 구축

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 소규모 액화 수소 시스템을 활용한 파일럿 플랜트의 개략도를 나타낸다. 본 연구에서 고려한 액체 수소 파일럿 플랜트는 액화기, 저장 탱크, 기화기, 가스 부스터 및 가스 저장 탱크 등이 있다. 파일럿 플랜트의 기체 전환 공정 과

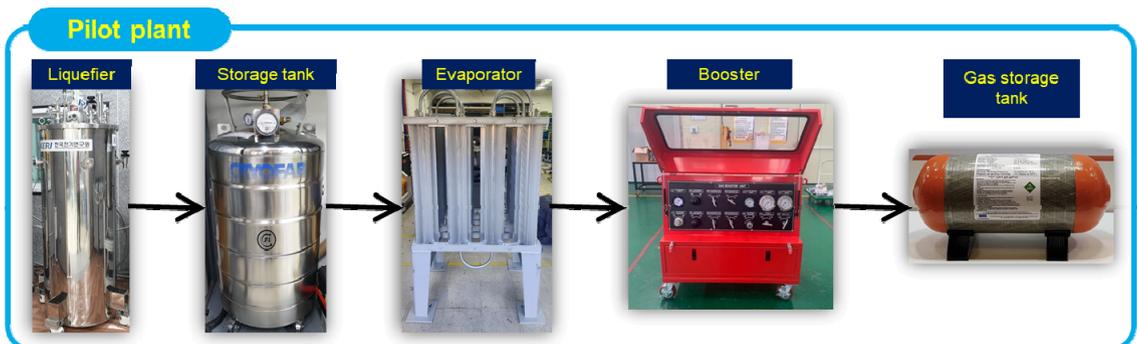


Fig. 1. Pilot plant with a small-scale hydrogen liquefaction system considered in the present study

정에서 고도로 정교한 알고리즘을 도입하여 효율적으로 제어할 수 있도록 하였으며 센터 네트워크와 자동화된 제어 시스템을 구현하여 실시간 데이터 모니터링 및 조절이 가능하도록 설정하여 유동적인 환경에서 신속하게 대응할 수 있는 자체 조정 기능을 갖춘 제어 시스템을 구축하였다.

본 연구에서는 ISO standard 및 KGS code 등을 통해 안전 프로토콜 및 규정 준수를 강화하여 잠재적 위험 상황에 대비할 수 있도록 하였다. 또한 장애 대응 시스템과 안전 장치를 강화하여 예기치 못한 사건이 발생할 경우 시스템의 안정성을 보장하기 위한 다양한 데이터베이스를 구축하고 위험 평가 및 모니터링을 통해 운전 환경에서의 잠재적 위험을 최소화하도록 하였다.

또한 수소 컨트롤러 자동화 등 수소 기체 전환 시스템의 부품 및 장비의 성능을 향상시켰다. 그리고 정기적인 유지 보수 및 모니터링을 통해 장기적인 운영을 위한 시스템의 신뢰성을 보장하도록 기술을 구축하고 신속한 대응을 위한 백업 시스템과 복구 기술을 구현하여 잠재적인 장애로부터의 복구 능력이 향상되도록 하였다.

2.1 진공 단열을 고려한 액화기 제작

Fig. 2는 액체 수소 생산 및 저장을 위한 액체 수소의 액화기를 나타낸다. 외부 열 침입에 대한 단열이 고려된 설계도를 바탕으로 실제 제작을 위한 모델링을 수행하였으며 액체 수소 생산 및 저장을 위한 용기 용량을 적용하였다. 또한 수소 취성을 고려하여 SUS316을 사용하여 제작을 진행하였으며 상부 플랜지로부터 전도에 의한 열 침입을 최소화하고 3 bar의 압력을 견디기 위해 약 1 mm의 두께로 제작하였다. 외용기에는 진공 배기를 위한 NW40 5개의 포트가 구성되어 있으며 외용기와 내용기 사이의 단열 성능 향상을 위한 LN₂ shield를 추가하여 제작하였다.

Fig. 3은 액체 수소 액화기의 상부 플랜지를 보여 준다. 본 연구에서는 파일럿 플랜트 내 기화 장치 및

이송 부품의 안정성 평가를 위한 플랜지를 제작하였다. 액체 수소의 생산을 위한 냉동기를 부착하였으며 액체 수소의 이송을 위한 라인의 부착을 고려하여 상부 플랜지의 모델링을 수행하였다. 상부 플랜지에 구축되어야 할 포트, 부품 및 배관 등을 고려하여 최적의 위치를 선정하였다.

상부 플랜지는 액체 수소 생산을 위한 핵심적인 역할을 하는 극저온 냉동기 및 내부 물리량 측정을 위한 각종 센서들을 연결하기 위한 포트 등으로 구성되어 있다. 수소 가스 공급 및 액체 수소 이송 등의 용도로 NW40, NW25 포트 등을 고려하였으며 용기 내부 압력 측정을 위한 파이프라인 등도 고려하였다. 상부 플랜지는 열전도에 의한 열 침입이 가장 많은 부분으로 열 침입을 최소화하기 위해 최적의 포트를 구성하였다.



Fig. 2. LH₂ liquefier



Fig. 3. Upper flange of LH₂ liquefier

2.2 수소 액화를 위한 열교환기 제작

Fig. 4는 효율적인 수소 액화를 위한 히트 파이프 열교환기를 나타낸다. 히트 파이프는 냉동기의 콜드 헤드에 부착되어 기체 수소를 액화하는 주된 역할을 하며 예냉 시스템을 통해 들어온 수소 가스를 20 K 까지 냉각시켜 액체 수소를 생산하게 된다. 히트 파이프 내부는 1기압에서 20 K까지 냉각되어야 하며 히트 파이프의 사이즈 및 형상에 따라 생산되는 액체 수소의 양이 달라진다. 히트 파이프는 최대 30 bar의 고압을 견디기 위해 SUS316 재질로 제작을 진행하였으며 열교환을 위한 핀은 열전도도가 좋은 구리를 사용하여 제작하였다. 히트 파이프 내부에는 예냉된 수소 가스를 효율적으로 액화시키기 위한 핀이 삽입되어 있으며 온도에 따른 수소 가스의 상변화를 위해 ortho-para convertor용 산화철 촉매를 주입하였다. 본 연구에서는 냉동기 콜드 헤드의 냉각 및 예냉된 수소 가스 공급에 따른 히트 파이프의 온도 변화와 공급된 수소 가스의 유동을 확인하기 위한 유동 해석을 수행하였다.

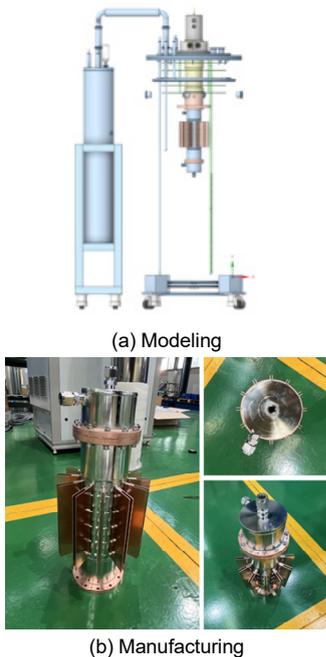


Fig. 4. Heat pipe heat exchanger

2.3 예냉 시스템 제작

Fig. 5는 액체 수소의 생산 효율 향상을 위한 액체 질소 예냉 시스템을 나타낸다. 액체 수소 생산 효율 향상을 위해 가장 중요한 부분은 공급되는 수소 가스를 최대한 냉각시키는 것으로 300 K에서 1 g당 약 4,500 J의 엔탈피를 갖는 수소 가스의 엔탈피를 최대한 제거해 주는 것이 중요하다. 300 K의 수소 가스를 액체 질소 예냉을 통해 약 80 K 냉각 시 3,000 J/g 이상의 엔탈피 제거가 가능하다. 액체 질소를 통한 수소 가스 예냉 시 300 K의 수소 가스를 80 K까지 냉각시키기 위한 내부 열교환기의 최적 설계 및 액체 수소의 증발량을 고려한 예냉 시스템의 극저온 용기 설계를 수행하였다. 그리고 LN₂ pre-cooler 예냉 시스템 구축 시 열교환 효율을 최대화하기 위한 구리 파이프 열교환기의 최적 면적에 대한 해석을 수행하였다.

내부 및 외부 용기 및 상부 플랜지, 히트 파이프 등 응축형 수소 액화기 제작을 위한 핵심 부품을 조립하였으며 액화기 내부 물리량 측정을 위한 온도 센서, 압력 센서 및 레벨 미터 센서 등을 부착하였다. 또한 각종 센서로부터 측정된 물리량을 디스플레이 하기 위한 계측기 등도 연결하였다.

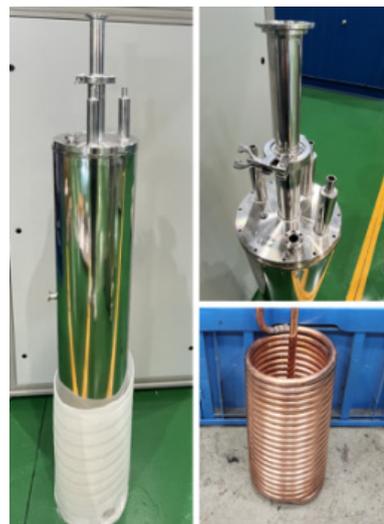


Fig. 5. LN₂ pre-cooling system

Fig. 6은 본 연구에서 제작된 수소 액화기의 각종 부품을 보여준다. 극저온 냉동기와 액화기 및 예냉기 등을 결합하여 응축형 수소 액화기를 제작하였다. 액체 수소 생산을 위한 가스 공급 라인 연결과 내부 물리량 측정을 위한 센서 계측에 대한 컨트롤 랙 등도 연결하였다. 본 연구에서는 액화 장비를 보관하기 위해 컨테이너를 설치하였으며 방폭 인증을 받은 압력 센서 등을 설치하였다.

2.4 자동 가스 공급 시스템

Fig. 7는 액체 수소 생산의 자동화를 위한 하드웨어 구축에 대한 가스 공급 시스템을 나타낸다. 액체 수소의 생산 효율 증대를 위해 액체 수소 생산 운전 공정의 최적화가 필요하며 이를 위한 액체 수소 생산 자동화 하드웨어를 구축하였다. 본 연구에서는 액화 수소 생산이 용이하도록 각 구성 요소를 연결하고 제작된 장비의 기능성을 정상적인 작동 조건에서 검증하였다. 외부 수소 가스 저장고로부터 수소를 공



Fig. 6. Fabricated LH₂ liquefier



Fig. 7. Hydrogen gas supply system

급하는 라인을 밸브, 레귤레이터 압력 센서, 체크 밸브, 질량 유량계 (mass flow meter), 릴리프 밸브, 압력계 등 다양한 부품을 이용하여 가스 컨트롤러에 연결하였다. 질량 유량 제어기 및 밸브 on/off를 통한 액체 수소 생산 자동화를 위한 하드웨어를 구축하였으며 밸브 on/off 제어를 위해 공압 밸브를 적용하였다. 또한 소프트웨어와 local area network 통신을 위한 programmable logic controller 회로를 적용하였다.

2.5 액체 수소용 기화기 제작

Fig. 8은 본 연구에서 제작한 액체 수소용 기화기를 나타낸다. 응축형 수소 액화기를 통해 생산된 액체 수소를 기화하기 위한 기화기의 설계를 수행하였다. 전기적 신호가 필요 없는 대기 기화식 방식의 열교환기로 설계를 수행하였으며 액체 수소의 특성에 따른 안전을 고려하여 액체 수소가 직접 접촉하는 부위는 SUS316 재질로 설계하였다. 최대 20 bar까지 견디도록 제작하였으며 공급되는 액체 수소의 양을 고려하여 각 파이프라인을 따라 플레이트 핀을 통해 제작하였다. 설계 온도의 범위는 -253°C에서 65°C이며 제작에 사용된 재료는 SA312-TP316L이고 설계 및 누설 압력은 2.0 MPa로 고려하였다. 본 연구에서는 액체 수소용 기화기의 열교환 면적에 따른 액체 수소의 기화량 및 온도를 예측하기 위한 전산 해석을 수행하였다.



Fig. 8. Evaporator

2.6 이송 배관, 가스 부스터 및 가스 분석기 구축

Fig. 9는 파일럿 플랜트에서 필요한 액체 수소 이송 배관, 가스 부스터 및 가스 분석기 등을 나타낸다. 응축형 수소 액화기를 통해 생산된 액체 수소를 LH₂ 탱크로 이송하고 LH₂ 탱크에 저장된 액체 수소를 기화기로 이송하기 위한 이송 배관을 설계하였다. 구축된 응축형 수소 액화기 및 기화기의 특징을 고려하여 이송 배관은 withdrawal lance with right angle shutoff valve 타입으로 구성하였다. 응축형 수소 액화기, LH₂ 탱크, 액체 수소 전용 기화기의 높이 및 포트 규격을 고려하여 이송 배관의 제작을 완료하였다.

본 연구에서는 기화기를 통해 기화된 수소 가스를 최대 200 bar까지 재압축하기 위한 2단 가스 부스터를 구축하였다. 1단 가스 부스터는 최대 28 bar까지

(inlet pressure, 3.5-5 bar) 압축이 가능하며 3,880 nL/min의 유량을 보유하고 있다. 2단 가스 부스터는 최대 210 bar까지(inlet pressure, 28 bar) 압축이 가능하며 564 nL/min의 유량을 보유하고 있다. 또한 기화 수소 전환 공정 시 액체 수소를 기화하고 가스 부스터를 통해 재압축하는 여러 공정에서 외부 공기의 혼입 및 장비에서 발생하는 오일 등의 영향으로 수소 가스의 오염이 발생할 가능성이 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 최종 압축된 수소 가스의 오염도를 측정하기 위해 휴대용 가스 분석기를 구축하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 헬륨 리크 테스트

본 연구에서 제작된 응축형 수소 액화기는 단열을 위한 이중 용기로 제작되었으며 상부 플랜지의 전도에 의해 내조 용기로 들어오는 열을 차단하기 위해 내조와 외조 사이에 77K LN₂ shield가 삽입된 구조이다. 77K LN₂ shield에 액체 질소 주입 시 금속의 열 수축으로 인해 리크 발생 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 SUS316 용기의 극저온 열 수축으로 인한 리크 발생 용기의 진공 누출 부위 탐지를 실행하였다. 진공 누출 부위 탐지를 위해 리크가 발생된 극저온 용기에 헬륨 리크 디텍터 및 진공 배기 펌프를 연결하였다.

Fig. 10은 헬륨 리크 테스트 과정 및 결과를 보여준다. 해당 극저온 용기의 진공 누출 부위 탐지를 위해 선택한 시험 방법은 진공법 중 스프레이 방식이다. 이와 같은 방식을 채택한 이유는 극저온 냉매에 의한 열 수축 차이에 의한 리크의 경우 대부분 용접부 주위에서 발생하며 리크의 의심 부위를 알고 있을 경우 스프레이 방식을 통해 빠르게 리크 부위를 탐지할 수 있기 때문이다. 극저온 용기의 리크 의심 부위를 체크하고 해당 부위에 헬륨 가스를 분사하며 헬륨 리크 디텍터를 통해 누출 부위를 선행 탐지하고 응축형 수소 액화기의 리크를 최소화하였다.

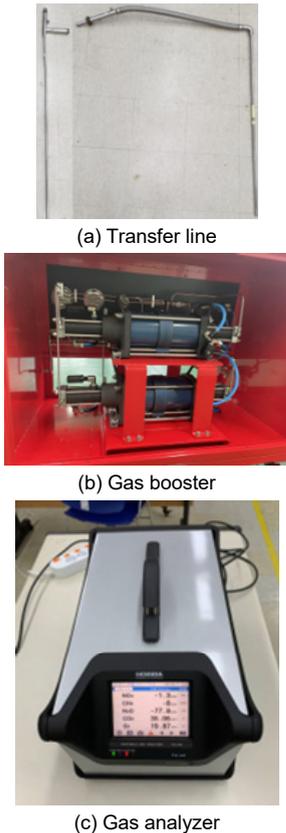


Fig. 9. Other components for pilot plant

3.2 예냉 시스템 및 액체 수소 생산 전산 해석

본 연구에서는 예냉 시스템 및 액체 수소 생산에 대해 상변화 열유동 해석을 수행하여 수소 가스의 공급에 대한 액체 수소의 생산량을 분석하였다. Fig. 11은 예냉 시스템 및 액체 수소 생산에 대한 전산 해석 결과를 보여준다. 본 연구에서는 computational fluid dynamics (CFD) 프로그램인 FLUENT v23.0 (ANSYS, Canonsburg, PA, USA)을 통해 계산을 수행하였다. 해석 모델은 standard k-ε model을 활용하

였으며 3차원 비정상 상태를 고려하여 상변화 해석을 수행하였다. 예냉 시스템에 대한 전산 해석과 액체 수소 생산에 대한 상변화 해석을 통해 액체 수소의 생산 과정에 대한 전반적인 CFD 해석 기법을 도출하였다. 이러한 해석 결과를 바탕으로 예냉 시스템 및 액화기 설계에 기여하고 소규모 수소 액화 시스템의 액체 공정에 대한 상변화 해석 기법을 정립하였다.

3.3 생산 자동화 공정 최적화

본 연구에서는 액체 수소의 생산 자동화를 위한 LabVIEW 기반 프로그램 제작을 수행하였다. 수소 가스 공급을 위한 히트 파이프 및 LH₂ 용기로의 공급 밸브 자동 on/off 제어가 가능하도록 설정하였다. 액체 수소 생산 자동화를 위해서는 히트 파이프 및 LH₂ 용기의 설정 압력을 유지하기 위해 질량 유량 조절기에서 자동으로 조절되도록 하였다. 유량에 따른 압력 관성 제어를 위해 P, I 제어값을 조절하여 반응성을 조절하도록 제작을 완료하였다.

Fig. 12는 액체 수소 생산 자동화 프로그램과 이를 통한 공정 최적화 결과를 나타낸다. 액체 수소 생산의 자동화를 위해 프로그램 작동 시 용기 내 압력을 질량 유량 조절기를 통해 유지하며 액체 수소 생산을 진행하였다. 설정 압력 도달 조건 최적화를 위한 P-gain 제어(비례 제어) 및 정상 상태에서의 오차 최소화를 위한 I-gain 최적화(적분 제어) 등을 수행하였다.



Fig. 10. Helium leak detector test

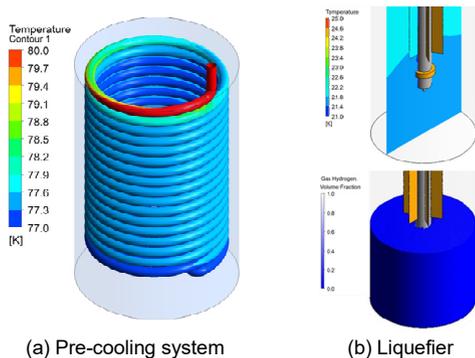


Fig. 11. CFD results for pre-cooling system and LH₂ liquefier

3.4 기화기 전산 해석

Fig. 13은 액체 수소 전용 기화기의 해석 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 설계된 액체 수소용 기화기의 열교환 면적에 따른 액체 수소의 기화량 및 온도를 예상하기 위한 기화기 모델링 및 전산 해석을 수행하였다. 전체 온도 범위에 따라 핀에서 전달되는 전도에 의한 열전달의 가시화가 어려워 기화기 내부관의 온도 분포만 나타내었다. 공급되는 액체 수소

유량에 따른 기화기 위치별 온도 변화 예측에 대한 전산 해석을 수행하였으며 설계된 해석 데이터를 바탕으로 액체 수소용 기화기를 제작하였다.

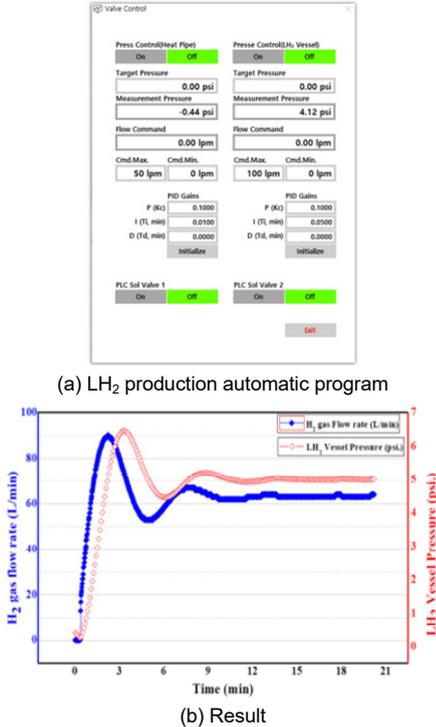


Fig. 12. Optimization of automatic process for LH₂ production

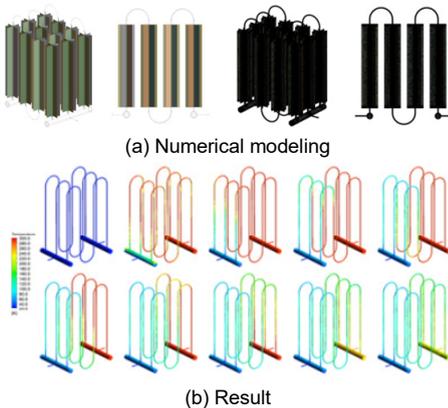


Fig. 13. CFD results for evaporator

3.5 가스 회수 라인 오염도 분석

액체 수소가 공급되는 용기, 탱크 및 기화기 등은 내부에 산소, 질소, 수분 등의 불순물이 0%에 가까워야 한다. 초기 용기, 탱크 및 기화기 등의 장비 내부에는 공기를 포함한 불순물이 주를 이루며 이는 퍼지를 통해 제거하여야 한다. 액체 수소 관련 장비의 불순물을 제거하는 방법은 아래와 같이 크게 3가지로 나뉜다.

- 1) 산소, 질소 등이 불순물의 농도가 0%에 가까워질 때까지 H₂ gas를 지속적으로 퍼징한다.
- 2) 액체 수소 관련 장비의 진공 배기를 통해 산소, 질소 등을 제거 후 H₂ gas를 공급하여 남아있는 불순물이 제거될 때까지 퍼징한다.
- 3) 용기 내부에 고압으로 수소 가스를 가압 후 상압으로 토출하는 과정을 10차례 가량 반복하여 내부 불순물의 농도를 낮춘다.

Fig. 14와 같이 본 연구에서는 액체 수소 저장 용기의 불순물 제거를 위해 수소 가스를 흘리면서 가스 분석기를 통해 내부 가스 분포를 실시간으로 측정하기 위한 시스템을 구축하였다. 또한 가스 분석기에 공급되는 가스 유량 제어를 위한 밸브 구성 및 용기 내부 진공 배기를 위한 시스템을 제작하였다.

Fig. 15는 수소 가스 공급량에 대한 가스 회수 라인 오염도 분석 시스템을 통한 분석 결과를 나타낸다. 수소 가스 공급 초기의 경우 빠른 시간 동안 용기의 불순물(질소, 산소 등)이 제거되지만 일정 수준의



Fig. 14. Gas recovery line pollution analysis system

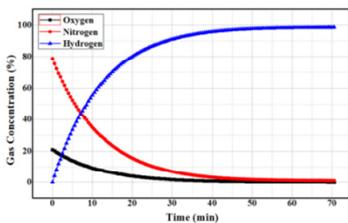
불순물이 제거된 이후(약 30분)부터 가스 회수 라인의 오염도가 쉽게 낮아지지 않았다. 가스 회수 라인의 수소 가스 농도를 90%로 만들 때까지 약 600 L (30분, 20 L/min)의 수소 가스가 소비되었으며 95%로 만들 때까지 추가로 160 L의 수소 가스가 소비되었다.

가스 회수 라인의 오염도를 효과적으로 낮추기 위해 용기 내부를 10^{-2} torr 가량 진공 배기 후 수소 가스를 공급하였다. 용기 내부 진공 배기 후 수소 가스 공급을 통해 가스 회수 라인의 오염도를 효과적으로 낮추었으며 오염도를 낮추기 위해 공급되는 수소의 소비량도 절약됨을 알 수 있었다.

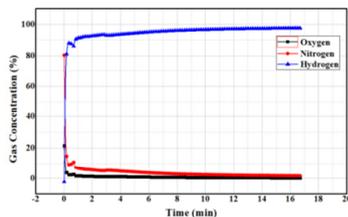
4. 결론

소규모 수소 액화 시스템을 활용한 파일럿 플랜트의 기체 전환 공정 시스템 구축에 관한 다양한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 구축한 파일럿 플랜트는 액화기, 저장 탱크, 기화기, 가스 부스터 및 가스 저장 탱크 등이 있으며 기체 전환 공정 과정에서 고도로 정교한 알고리즘을 도입하여 효율적으로 제어할 수 있도록 하였다. 또한 네트워크와 자동화된 제어 시스템을 구현하여 실시간 데이터 모니터링 및 조절이 가능하도록 설정하였다.

본 연구에서는 먼저 극저온 용기의 리크 의심 부



(a) Initial condition



(b) After vacuum exhaust

Fig. 15. Pollution test results

위를 체크하고 해당 부위에 헬륨 가스를 분사하며 헬륨 리크 디텍터를 통해 누출 부위를 선형 탐지하고 응축형 수소 액화기의 리크를 최소화하였다. 또한 예냉 시스템 및 수소 액화기의 해석 결과를 바탕으로 설계에 기여하고 소규모 수소 액화 시스템의 액체 공정에 대한 상변화 해석 기법을 정립하였다. 액체 수소의 생산 자동화를 위한 LabVIEW 기반 프로그램을 통해 용기 내 압력을 유지하며 안전하게 액체 수소 생산을 진행하였다. 공급되는 액체 수소 유량에 따른 기화기 위치별 온도 변화 예측에 대한 전산 해석을 수행하여 설계된 해석 데이터를 바탕으로 액체 수소용 기화기를 제작하였으며 수소 가스 공급량에 대한 가스 회수 라인 오염도 분석 시스템을 구축하여 오염도를 분석하였다. 결과적으로 용기 내부 진공 배기 후 수소 가스 공급을 통해 가스 회수 라인의 오염도를 효과적으로 낮출 수 있었다. 추후 연구에서는 전반적인 파일럿 플랜트에서의 운전을 통해 안전성 확보를 위한 평가 기술을 개발하고 실증 장치 운전 과정에서 발생할 수 있는 문제점의 가능성에 대해 고찰하고자 한다.

후 기

본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 24A01070). 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 24A02090, 액화수소 저장탱크를 적용한 대용량 수소충전소 전환기술 및 실증).

References

1. L. Degiorgis, M. Santarelli, and M. Cali, "Hydrogen from renewable energy: a pilot plant for thermal production and mobility", *Journal of Power Sources*, Vol. 171, No. 1, 2007, pp. 237-246, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.01.060>.
2. S. Krasae-in, J. H. Stang, and P. Neksa, "Development of large-

- scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 10, 2010, pp. 4524-4533, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.109>.
3. M. Aasadnia and M. Mehrpooya, “Large-scale liquid hydrogen production methods and approaches: a review”, *Applied Energy*, Vol. 212, 2018, pp. 57-83, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.033>.
 4. 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>.
 5. 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>.
 6. H. R. Azizabadi, M. Ziabasharhagh, and M. Mafi, “Introducing a proper hydrogen liquefaction concept for using wasted heat of thermal power plants-case study: Parand gas power plant”, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 40, 2021, pp. 187-196, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.02.023>.
 7. J. Incer-Valverde, J. Mörsdorf, T. Morosuk, and G. Tsatsaronis, “Power-to-liquid hydrogen: exergy-based evaluation of a large-scale system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 31, 2023, pp. 11612-11627, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.026>.
 8. D. W. Ha, H. W. Noh, Y. M. Seo, T. H. Koo, and R. K. Ko, “Study on validity of pre-cooling system for hydrogen gas using cryocooler part I: experimental investigation and theoretical analysis”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 4, 2023, pp. 350-357, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.4.350>.
 9. Y. M. Seo, H. W. Noh, D. W. Ha, T. H. Koo, and R. K. Ko, “Study on validity of pre-cooling system for hydrogen gas using cryocooler part II: CFD simulation”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 439-446, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.439>.
 10. D. W. Ha, H. W. Noh, Y. M. Seo, T. H. Koo, and R. K. Ko, “A theoretical study on boil-off gas generated from cooling process for cryogenic components using liquid hydrogen”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 615-622, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.615>.
 11. D. W. Ha, H. W. Noh, Y. M. Seo, T. H. Koo, and R. K. Ko, “Development of LabVIEW-based data storage and monitoring program for a condensed hydrogen liquefaction system”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 456-464, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.456>.
 12. K. Verfondern and B. Dienhart, “Pool spreading and vaporization of liquid hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 13, 2007, pp. 2106-2117, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.015>.
 13. J. Zheng, L. Chen, J. Wang, Y. Zhou, and J. Wang, “Thermodynamic modelling and optimization of self-evaporation vapor cooled shield for liquid hydrogen storage tank”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 184, 2019, pp. 74-82, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.053>.
 14. E. Salzano, M. Carboni, and G. Pio, “The effects of low-temperature phenomena on rapid phase transition of liquid hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 56, 2020, pp. 32676-32685, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.140>.
 15. G. Qiu, K. Wang, S. Zhu, and L. Qiu, “Hydrogen refueling station synergistically driven by liquid hydrogen pump and thermal compression”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 56, 2024, pp. 441-451, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.108>.