

극저온 냉동기를 활용한 기체수소 예냉 시스템의 검증에 관한 연구 Part I: 실험적 연구 및 이론적 분석

하동우[†] · 노현우 · 서영민 · 구태형 · 고락길

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

Study on Validity of Pre-cooling System for Hydrogen Gas Using Cryocooler Part I: Experimental Investigation and Theoretical Analysis

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

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 4 August, 2023
Revised 4 August, 2023
Accepted 21 August, 2023

Abstract >> In this study, the experimental investigation and theoretical analysis were conducted to verify the cooling capacity of the cryocooler used for pre-cooling of hydrogen gas. The effect of the flow rate on a copper pipe attached to the bottom of the cryocooler, which has a coil shape in a hydrogen line, was investigated. Temperature sensors were strategically placed at various positions on the cryocooler to analyze the temperature variations with respect to the flow rate. In this study, the thermal properties of hydrogen for the pressure and temperature were utilized using REFPROP to analyze the cooling capacity of the cryocooler. Based on the experimental results derived from this study, the cooling capacity of the cryocooler for pre-cooling hydrogen gas was considered by calculating the cooling temperature according to the flow rate through theoretical analysis.

Key words : Cryocooler(극저온 냉동기), Pre-cooling system(예냉 시스템), Hydrogen gas(기체수소), Cooling capacity(냉각 능력), Flow rate(유량)

1. 서론

최근 지구 온난화 및 대기오염 문제를 해결하기 위한 하나의 방안으로 미래의 운송 수단으로써 수소 연료를 활용한 수송 기계의 개발이 활발히 진행 중이다. 널리 알려진 수소 연료의 저장 방법은 크게 세 가지로 구분이 가능하며, 액화수소를 이용하는 방법,

금속수소화물을 이용하는 방법, 압축 기체로 저장하는 방법이 있다. 이 세 가지 방법은 모두 각각의 장단점이 존재하나 무게 또는 체적당 저장 에너지의 크기 면에서는 극저온 액화수소가 가장 우수하다고 평가받고 있다. 기체의 냉동 및 액화는 기체의 온도를 임계온도 이하로 떨어뜨려 임계압력 이하의 압력에서 액체 상태로 상변화시키는 것을 의미한다. 액화

용량에 따라 다양한 액화 사이클이 사용될 수 있다. 다중 열교환기를 장착하는 대용량 수소 액화와 달리 소용량의 경우 액화수소 온도 이하에서 일정량의 냉동량을 갖는 상용 극저온 냉동기를 저온조 내에 장착하여 액화하는 방법을 활용하고 있다¹⁻³⁾.

소용량 수소 액화의 경우 300 K의 기체수소를 20 K으로 냉각하기 위해서는 예냉 시스템이 필수적이다. 대부분의 소용량 수소 액화의 경우 액체질소의 예냉기를 이용하여 300 K과 77 K 사이의 수소 유동의 현열 83%를 제거할 뿐만 아니라 O-P 수소 변환열의 상당한 양을 제거할 목적으로 활용하였다^{4,11)}.

수소에 대한 관심이 높아지면서 예냉 시스템을 포함하는 소규모 수소 액화 시스템에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. Garceau 등¹²⁾은 액화수소 저장 탱크, 진공 재킷 이송 라인 및 수소 액화 장치를 설계, 구축 및 결합하여 소규모 수소 액화 플랜트를 형성하였다. 액화 장치에는 2개의 O-P 수소 변환기와 액체질소 예냉기 및 히트파이프 등이 포함되며, 액화수소를 저장하였다. Desserranno 등¹³⁾은 저장 탱크에 대한 열부하를 차단하여 비등 현상을 줄이는 극저온 냉동기에 대해 보고하였으며, 극저온 저장 응용 분야와 관련하여 다양한 냉동 기술과 기술의 활용에 대해 저술하였다.

Xie 등¹⁴⁾은 극저온 냉동기를 기반으로 소규모 수소 액화 장치를 설계 및 제작하였으며, 액화와 동시에 운송하는 방식의 실현성을 입증하였고, 이를 통해 소규모 수소 액화의 설계 및 운영에 대한 기술 지원을 제공하였다. Wang 등¹⁵⁾은 극저온 냉동기의 쿨드 헤드, 재생기, 열교환기 및 디스플레이서 범퍼 등의 재설계와 작동 매개변수 최적화를 기반으로 개선 사항을 제시하였다. 새로운 범퍼 디자인을 활용하여 쿨드 헤드의 진동을 82%까지 줄였으며, 높은 냉각 용량과 냉각 속도를 제공할 수 있다고 언급하였다.

액체질소를 활용한 예냉 시스템의 경우, 기체수소를 예냉하기 위한 소비량이 존재한다. 따라서 지속적인 운영 비용이 증가하며, 액화수소를 생산하기 위해 많은 시간이 소요되는 등 다양한 단점도 분명히 존재한다. 이를 대체하기 위한 방법으로는 다양한 온도

범위에서 안정적인 냉각을 제공하는 냉동기를 이용한 열교환 냉각 시스템의 활용이 있다. 극저온 냉동기는 이미 여러 산업 분야에서 널리 사용되고 있으며, 수소 액화를 위한 예비 냉각 시스템으로도 적용되는 경우가 많다. 냉동기를 사용한 예비 냉각 시스템은 상대적으로 안정적이고 일정한 냉각 성능을 제공할 수 있다. 하지만 극저온 냉동기를 활용한 기체수소 예냉 시스템의 검증에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 논문에서는 실험을 통해 기체수소 유량에 대한 극저온 냉동기의 온도 분포를 분석하고 이론적 분석을 통해 기체수소의 냉각 온도를 산출하여 극저온 냉동기의 냉각 능력을 검증하였다.

2. 실험 방법 및 이론적 분석

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 기체수소의 예냉 시스템에 활용되는 극저온 냉동기와 쿨드 헤드에 부착된 기체수소 라인에 대한 코일 형태의 파이프를 보여준다. 본 연구에서 사용한 극저온 냉동기 모델은 AL600 (Cryomech, Syracuse, NY, USA)으로 가장 큰 단일 스테이지 Gifford-McMahon (GM) 극저온 냉동기이다. 플랜지 상단부에 압축기를 통한 헬륨 공급 라인이 존재하며, 헬륨 가스를 압축하고 팽창시키는 특수한 냉동 사이클의 반복 과정을 통해 극저온 온도를 생성한다. 이러한 과정에서 극저온 냉동기의

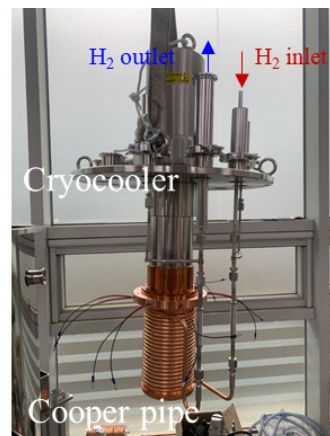


Fig. 1. Pre-cooling system of hydrogen gas

작동 주파수가 결정되며, 주파수에 따라 작동 조건에서 냉각 용량과 효율이 달라진다.

Fig. 2는 AL600의 냉각 용량 곡선을 보여준다. 해당 모델의 경우 50-80 K의 인증된 작동 온도 범위가 존재하며, 50 K에서 350 W, 60 K에서 430 W, 70 K에서 510 W, 80 K에서 600 W의 성능을 나타낸다. 본 연구에서는 기체수소가 냉각되어 토출되는 온도에 따라 필요한 극저온 냉동기의 냉각 능력을 이론적으로 계산하기 위해 극저온 냉동기의 냉각 용량 곡선을 다음과 같은 3차원 수식을 통하여 구현하였다.

$$Q = 0.0046 T^3 - 0.8579 T^2 + 60.626 T - 1112.5 \quad (1)$$

극저온 냉동기의 사양과 주요 성능은 Table 1에 제시되어 있으며, 더욱 자세한 데이터는 Cryomech사 홈페이지에서 제공하고 있다¹⁶⁾. 본 논문에서는 극저온 냉동기의 성능을 사전 검증하기 위하여 콜드 헤드의 냉각 온도 및 cool down 시간 등을 실험을 통해 비교 및 분석하였다.

Fig. 3은 예냉 시스템 내부의 용기 내부에 위치한 온도 센서를 나타낸다. 온도 측정은 예냉 시스템 용기 내부에 위치한 thermocouple을 사용하여 수행되었다. 온도 센서의 측정 범위는 약 1.4-500 K인 실리콘 다이오드(silicon diode, SD) 센서가 사용되었으며 총 5개의 온도 센서(SD1-SD5)가 기체수소의 예냉 시스템에 대한 온도를 모니터링하기 위하여 다른 위치에 부착되었다. 각 센서의 위치는 Table 2와 같다.

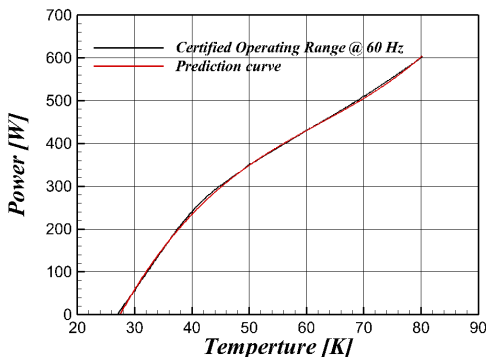


Fig. 2. Capacity curve of AL600 cryocooler

실험을 통해 도출된 극저온 냉각기의 냉각 능력을 이론적으로 분석하기 위하여 REFPROP 프로그램 (Version 10; NIST, Gaithersburg, MD, USA)을 이용하여 압력과 온도에 대한 수소의 열적 특성을 활용하였다. 압력의 범위는 1-5 bar이며, 온도의 범위는 20-300 K이고, 해당 범위에서 기체수소의 밀도 및 엔탈피 값을 추출하였다. 온도에 따른 극저온 냉동기의 냉각 능력을 도출하기 위하여 식 (2)와 같이 공급

Table 1. AL600 cryocooler data

Cooling capacity	600 W @ 80 K
Base temperature	25 K
Cool down weight	15 min to 80 K
Power consumption 60 Hz (input power)	440/480 VAC 3 PH / 12.5 kW
Helium pressure	230±5 PSI @ 60 Hz

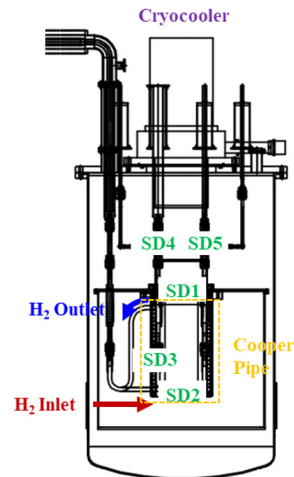


Fig. 3. Temperature sensors attached in pre-cooling system

Table 2. Position of temperature sensors

SD1	AL600 cold head
SD2	Cooper pipe at bottom of heat exchanger
SD3	Middle part of heat exchanger
SD4	Final temperature of pre-cooled hydrogen after heat exchange
SD5	Hydrogen gas input line

조건(300 K)에서 극저온 냉동기 온도에 따른 수소 엔탈피를 제거하면 온도 제거에 필요한 수소 엔탈피 변화량을 도출할 수 있다. 이때 T(C)는 콜드 헤드 온도를 의미한다.

$$\Delta H = H_{300K} - H_{T(C)} \quad (2)$$

여기서 발열 반응은 음의 엔탈피 변화량을 가지며 흡열 반응은 양의 엔탈피 변화량을 갖는다. 따라서 수소 엔탈피 변화량과 공급 유량의 곱의 값을 극저온 냉동기 냉각 능력과 비교하여 냉각 온도에 따른 적정 유량을 선정하고, 용기 열 침입량, 냉동기 마진 및 열교환기 효율 등을 적절하게 고려하여 최종 냉각 능력을 도출하였다.

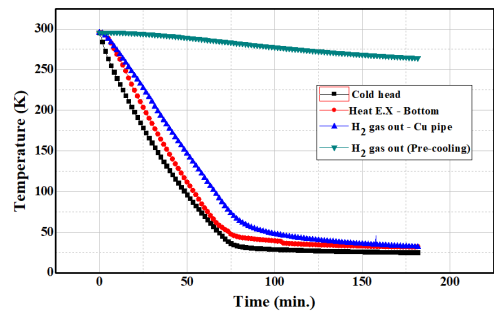
3. 결과 및 고찰

3.1 Cool down/warm up test

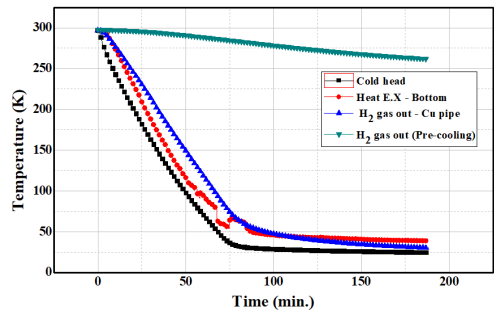
Cool down test는 냉동기가 주어진 시간 내에 원하는 온도로 빠르게 냉각하는 능력을 평가하는 시험이다. 극저온 냉동기는 매우 낮은 온도를 생성하고 유지해야 하므로 냉동기가 목표 온도에 도달하는데 걸리는 시간과 그 과정에서의 냉각 성능을 확인한다. Fig. 4는 AL600 극저온 냉동기의 성능을 검증하기 위한 cool down 테스트 결과를 보여준다. 총 2회에 걸친 실험을 수행하여 해당 냉동기의 냉각 성능과 안정성을 확인하였다. 평균적으로 온도가 감소하는 영역의 순서는 SD1 (콜드 헤드) > SD2 (열교환기 바닥 부분) > SD3 (열교환기 중간 부분) > SD4 (최종 수소 온도) > SD5 (300 K 기체수소)이다. 극저온 냉동기가 동작을 하게 되면 콜드 헤드 온도가 가장 먼저 감소하며, 이후 전도에 의해 열교환기 바닥의 온도가 감소하게 된다. 이 과정에서 빠르게 목표 냉각 온도에 도달하며, 냉각 효율이 결정된다. 이러한 결과를 바탕으로 콜드 헤드의 냉각 온도 및 cool down 시간 등을 비교하였다.

Fig. 5는 극저온 냉동기의 콜드 헤드의 cool down 테스트 성능 데이터를 나타낸다. 실험 결과 평균 cool

down 시간은 55분, 기준 온도는 25.8 K으로 도출되었다. 기존의 성능 데이터와 비교하여 기준 온도는 유사하나 cool down 시간이 상대적으로 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 기존의 성능 데이터의 경우 정상 상태 헬륨 압력이 230±5 PSI인 것과 비교하여 본 논문에서 고려한 압축기의 헬륨 압력은 190 PSI로 상대적으로 작기 때문이다. 또한 극저온 냉동기 하단부에 부착된 기체수소 라인의 구리 파이프에 따라 영향을 받았을 것으로 판단된다. 하지만 기준 온



(a) 1st cool down test



(b) 2nd cool down test

Fig. 4. Cool down test of AL600 cryocooler

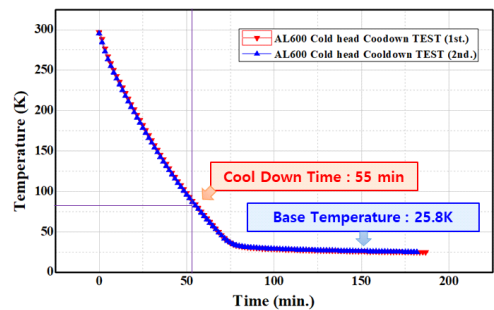


Fig. 5. Performance of AL600 cryocooler in cool down test

도가 오차 범위 내에서 잘 일치하므로, 해당 극저온 냉동기를 활용하여 기체수소 유량에 따른 영향을 분석하였다.

Warm-up test는 냉동기를 극저온 상태에서 일반적인 운전 온도로 빠르게 변화시키는 시험이다. 이 시험은 냉동기가 주어진 시간 내에 극저온 상태에서 일반적인 작동 온도로 돌아가는 능력을 검증한다. Fig. 6은 AL600 극저온 냉동기의 성능을 검증하기 위한 warm-up 테스트 결과를 보여준다. 실험 결과 측정된 온도 데이터가 극저온 상태에서 상온으로 단조롭게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 극저온 냉동기가 환경 변화에 잘 적응하고 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 warm-up test 데이터는 SUS304와 같은 금속별 냉각을 위한 엔탈피 데이터 등과 함께 수소 용기의 열 침입량을 역으로 계산하는 데 활용이 가능할 것으로 예측된다.

3.2 유량에 따른 극저온 냉동기 성능

유량에 따른 극저온 냉동기의 성능과 기체수소의 예냉 온도 데이터를 확보하기 위해 수소의 공급 유량에 변화를 주면서 온도를 측정하였다. 기체수소 공급 유량의 범위는 기존에 보유하고 있는 질량 유량 제어기(mass flow controller)의 성능에 따라 20-90 L/min을 고려하였으며, 10 L/min 간격으로 공급하였다. Fig. 7은 수소 가스 공급 유량에 따른 온도 프로파일을 나타낸다. 원활한 실험의 진행을 위해 cool down 이후 기체수소의 공급 유량을 순차적으로 증

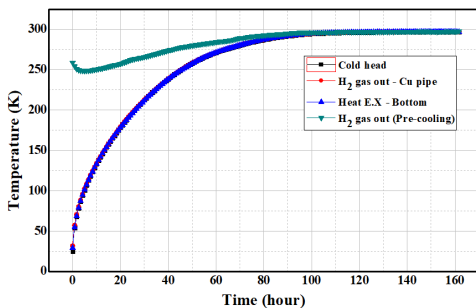


Fig. 6. Performance of AL600 cryocooler in warm-up test

가시키면서 결과를 도출하였다. 유량이 증가함에 따라 콜드 헤드와 최종 예냉된 기체수소의 온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 성능 곡선에서 볼 수 있듯이 극저온 냉동기는 콜드 헤드의 온도가 증가할수록 냉각 용량이 증가하므로, 온도가 감소할수록 냉각 용량이 감소한다. 결과적으로 유량이 증가할수록 기체수소의 예냉 온도가 증가하며, 이러한 사항은 Fig. 8에서 알 수 있다. 따라서 수소를 액화하기 전 예냉 시스템에서 적절한 수소 공급 유량을 선정하여 온도를 냉각하는 것이 중요하다.

3.3 이론적 분석을 통한 극저온 냉동기 성능 분석

극저온 냉각기의 냉각 능력을 이론적으로 분석하여 실험을 통해 도출된 결과와 비교 및 검증하였다. 기체수소의 냉각은 엔탈피 변화량과 밀접한 관계가 있으며, 엔탈피 변화량을 통해 극저온 냉동기의 성능

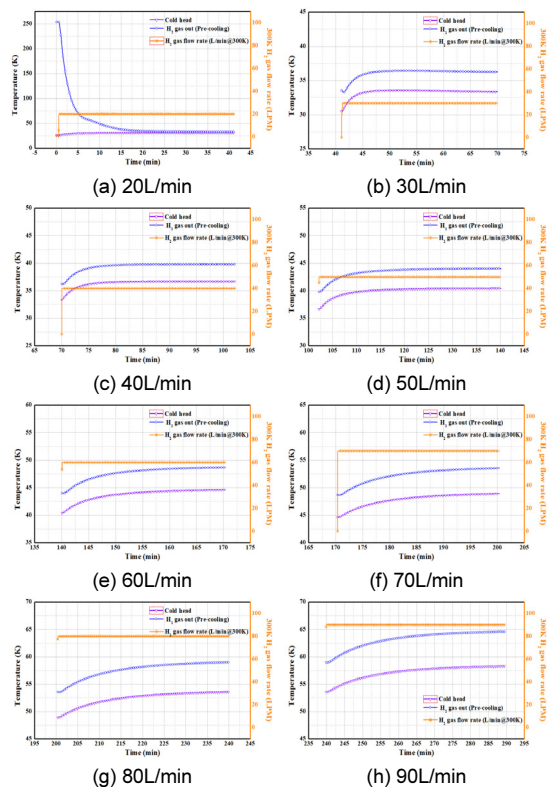


Fig. 7. Temperature profiles at different flow rates

을 개략적으로 파악할 수 있다. 성능 곡선에서 콜드 헤드 온도에 따른 극저온 냉동기의 냉각 용량을 확보할 수 있으며, 용기 열 침입량이나 냉동기 마진, 열교환기 효율 등의 가정을 통해 최종 냉각 능력을 이론적으로 도출하였다.

Fig. 9는 본 연구에서 고려한 다양한 가정에 대해 이론적으로 도출한 온도 데이터의 비교 결과를 보여 준다. 이론적으로 분석한 결과들은 실험에서 도출한 온도 결과와 비교하면서, 용기 열 침입량은 10-20 W, 냉동기 마진은 0-11 W, 열교환기 효율은 90-100%로 고려하였다. 해당 이론 분석이 도출된 자세한 운전 조건은 Table 3에 자세히 명시되어 있다.

용기 열 침입량, 냉동기 마진 및 열교환기 효율 등은 극저온 냉동기의 최종 냉각 능력을 저하시키는 요인들이며, 수소 액화 시스템에서 잘 알려져 있는 요소들이다. 하지만 정확한 계산이 어렵기 때문에 Table 3의 조건과 같이 가정하여 이론적으로 계산을 수행하였다. 또한 REFPROP 프로그램을 이용하여

압력과 온도에 대한 수소의 열적 특성을 활용함으로써 기체수소의 온도 변화에 따른 엔탈피를 계산하였으며, 수소 공급 유량에 따른 냉각 온도를 산출하였다. 이를 보면 전체적으로 수소 공급 유량에 따라 최종 예냉 온도가 증가하는 경향이 매우 유사함을 알 수 있다. 이론적 분석을 통해 도출한 수소 공급 유량에 따른 온도 분석 결과는 case 2, case 3, case 4, case 1 순으로 정확도가 높았으며, 가장 정확한 case 2의 경우 실험 결과와 최소 1% 미만의 오차를 보였다. 따라서 수소 공급 유량에 따라 극저온 냉동기의 성능에 대한 기체수소의 최종 예냉 온도는 이론적 분석을 통해 오차 범위 내에서 도출이 가능하며, 이론적 분석 결과가 수소 액화 시스템에서도 활용도가 높을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기체수소의 예냉 시스템에 사용되는 극저온 냉각기의 냉각 능력을 검증하기 위하여

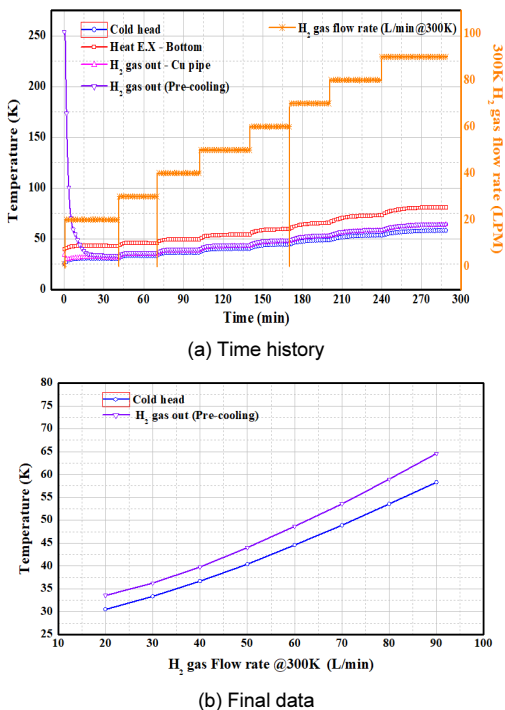


Fig. 8. Temperature results at different flow rates

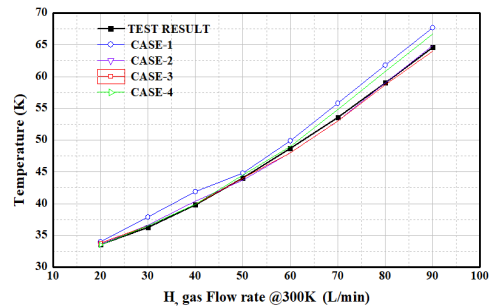


Fig. 9. Performance of cryocooler obtained from theoretical analysis

Table 3. Case selected from theoretical analysis

Case	Heat capacity of vessel (W)	Margin of cryocooler (W)	Efficiency of heat exchanger (%)
1	10	10	90
2	10	5	95
3	20	11	100
4	10	0	90

실험적 조사와 이론적 분석을 수행하였다. 수소 라인에 코일 모양을 한 극저온 냉각기 바닥에 부착된 구리 파이프에 대한 유량의 영향을 조사하였고, cool down 및 warm-up test를 통해 극저온 냉동기가 목표 온도에 도달하는데 걸리는 시간과 그 과정에서의 냉각 성능을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 수소 공급 유량에 따른 극저온 냉동기의 성능과 기체수소의 예냉 온도 데이터를 확보하기 위해 유량을 변화하면서 온도를 측정하였다. 극저온 냉각기의 냉각 능력을 이론적으로 분석하기 위해 REFPROP 프로그램을 이용하여 압력과 온도에 대한 수소의 열적 특성을 활용하였다. 그리고 도출된 실험 결과를 바탕으로 이론적 분석을 통해 유량에 따른 냉각 온도를 산출하여 기체수소의 예냉을 위한 냉동기의 냉각 능력을 고찰하였다. 결과적으로 수소 공급 유량에 따라 극저온 냉동기의 성능에 대한 기체수소의 최종 예냉 온도가 이론적 분석을 통해 오차 범위 내에서 잘 일치함을 보였다. 향후 연구에서는 computational fluid dynamics 해석을 통해 극저온 냉동기 하단에 부착되는 열교환기를 통과하는 기체수소의 최종 예냉 온도에 대한 결과를 분석하여 검증하고자 한다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(23A02135, 액화수소 저장탱크를 적용한 대용량 수소충전소 전환기술 및 실증). 이 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 기본 사업임(No. 23A01043).

References

- G. D. Nam, H. J. Sung, D. W. Ha, H. W. No, T. H. Koo, R. K. Ko, and M. Park, "Design and analysis of cryogenic cooling system for electric propulsion system using liquid hydrogen", *Energies*, Vol. 16, No. 1, 2023, pp. 527, doi: <https://doi.org/10.3390/en16010527>.
- S. W. Karng, N. Garceau, C. M. Lim, J. H. Baik, S. Y. Kim, and I. H. Oh, "Performance of a 5 L Liquid Hydrogen Storage Vessel", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 26, No. 3, 2015, pp. 234-240, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.3.234>.
- Y. Shen, D. Liu, L. Liu, C. Qiu, R. Zhuan, and Z. Gan, "Experimental study on a simplified precooled JT cryocooler for liquid hydrogen zero boil-off storage", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 216, 2022, pp. 119087, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119087>.
- H. M. Chang, D. J. Park, and B. H. Kang, "Thermodynamic analysis of hydrogen liquefaction systems using Gifford - McMahon cryocooler", *International Journal Of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 8, No. 2, 2000, pp. 39-50. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE00676927>.
- D. J. Park, H. M. Chang, and B. H. Kang, "Prediction of liquid amount in hydrogen liquefaction systems using GM refrigerator", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 11, No. 3, 1999, pp. 349-358. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00673427>.
- H. Jung, D. Han, W. Yang, and Y. Baek, "A simulation study on the hydrogen liquefaction through compact GM refrigerator", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 5, 2022, pp. 534-540, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.5.534>.
- J. H. Baik, S. W. Karng, H. Kang, N. Garceau, S. Y. Kim, and I. W. Oh, "Design and operation of a small-scale hydrogen liquefier", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 26, No. 2, 2015, pp. 105-113, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.2.105>.
- C. Qiu, S. Chen, Y. Shen, X. Tao, and Z. Gan, "Numerical and experimental study on a tube-in-tube heat exchanger working at liquid-hydrogen temperature with a large temperature span", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 208, 2023, pp. 124089, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124089>.
- J. H. Baik, S. W. Karng, N. Garceau, Y. H. Jang, C. M. Lim, S. Y. Lim, and I. H. Oh, "Development of 1 L hr⁻¹ scale hydrogen liquefier using Gifford-McMahon (GM) cryocooler", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1573, No. 1, 2014, pp. 1357-1364, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4860864>.
- J. H. Baik and W. U. Notardonato, "Initial test results of laboratory scale hydrogen liquefaction and densification system", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 823, No. 1, 2006, pp. 1530-1537, doi: <https://doi.org/10.1063/1.2202577>.
- Y. W. Liu, R. J. Wu, P. Yang, T. G. Wang, H. H. Liu, and L. H. Wang, "Parameter study of the injection configuration in a zero boil-off hydrogen storage tank using orthogonal test de-

- sign”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, Pt. A, 2016, pp. 283-294, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.051>.
12. N. M. Garceau, J. H. Baik, C. M. Lim, S. Y. Kim, I. W. Oh, and S. W. Karng, “Development of a small-scale hydrogen liquefaction system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 35, 2015, pp. 11872-11878, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.135>.
 13. D. Deserranno, M. Zagarola, X. Li, and S. Mustafi, “Optimization of a Brayton cryocooler for ZBO liquid hydrogen storage in space”, *Cryogenics*, Vol. 64, 2014, pp. 172-181, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2014.04.025>.
 14. F. Xie, S. Xia, Y. Zhu, Y. Ma, and Y. Li, “Experimental study on small-scale hydrogen liquefaction of 0.5 L/h”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 90, 2022, pp. 38258-38270, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.304>.
 15. C. Wang, A. Olesh, and J. Cosco, “Performance improvement of a large capacity GM cryocooler”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 278, 2017, pp. 012166, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/278/1/012166>.
 16. Cryomech, “AL200 cryorefrigerator capacity curve”, Cryomech, 2002. Retrieved from https://www.cryomech.com/wp-content/uploads/2018/11/AL600_cc.pdf.