

극저온 냉동기를 활용한 기체 수소 예냉 시스템 검증에 관한 연구 Part II: CFD 시뮬레이션

서영민 · 노현우 · 하동우 · 구태형 · 고락길[†]

한국전기연구원 전기모빌리티연구단 수소전기연구팀

Study on Validity of Pre-cooling System for Hydrogen Gas Using Cryocooler Part II: CFD Simulation

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

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

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

Received 4 August, 2023
Revised 29 August, 2023
Accepted 12 October, 2023

Abstract >> In this study, the computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted to verify the cooling capacity of the cryocooler used for pre-cooling of hydrogen gas. Based on the experimental results, the effect of the flow rate on a copper pipe attached to the bottom of the cryocooler was investigated. In this study, the temperature data was calculated through the change of boundary condition for heat flux in the copper pipe. In addition, the cooling capacity of the cryocooler for pre-cooling hydrogen gas was considered by calculating the cooling temperature according to the flow rate in the certified operating range. Consequently the pre-cooling system for hydrogen gas was validated with a reasonable accuracy through CFD simulations.

Key words : Cryocooler(극저온 냉동기), CFD(전산유체역학), Hydrogen gas(수소 가스), Cooling capacity(냉각 능력), Flow rate(유량)

1. 서론

액체 수소는 수소를 연료로 사용하기 위한 저장 방법 중 단위 질량당 저장 능력이 가장 우수하다고 알려져 있다. 하지만 수소를 액화하기 위해 많은 소비 동력이 필요하므로, 에너지 손실을 최소화하고 효율을 높이는 기술의 개발이 필요하다. 극저온 냉동기 시장에서 수소의 활용이 증가함에 따라 극저온 냉동

기 장비의 요구가 지속적으로 증가하고 있으며, GM 냉동기, Pulse 냉동기, Stirling 냉동기 등의 다양한 장비가 마그넷, 초전도 및 수소, 헬륨, 질소 등의 다양한 극저온 분야에서도 활용하고 있다¹⁻⁴⁾.

일반적으로 소규모 수소 액화 시스템은 예냉 시스템을 필수적으로 포함하고 있으며, 77 K의 끓는점을 가지는 액체 질소를 주로 활용하고 있다⁵⁻¹⁰⁾. 액체 질소의 예냉기를 이용하여 300 K와 77 K 사이의 수소

가스의 현열을 제거하고, O-P 수소 변환열의 상당한 양을 제거할 목적으로 활용하고 있으며, 이러한 예냉 시스템을 포함하는 소규모 수소 액화 시스템에 대한 다양한 기초 연구가 진행되었다¹¹⁻¹⁸⁾. 액체 질소를 활용한 예냉 시스템의 경우 수소 가스를 예냉하기 위한 지속적인 소비량이 존재하며, 많은 시간이 소요되는 등 어려움이 존재한다. 이를 대체하기 위해서 다양한 온도 범위에서 안정적인 냉각을 제공하는 냉동기를 이용한 열교환 냉각 시스템의 활용이 가능하다.

일반적으로 소규모 수소 액화 시스템은 칠러, 압축기, 수소 탱크, 수소 가스 공급 시스템, 예냉 시스템, 저장 용기 및 모니터링 시스템 등으로 이루어진다. 수소 가스는 수소 탱크로부터 H₂ 가스 공급 시스템으로 전달되며, 질량 유량 조절기를 통해 예냉 시스템으로 300 K의 가스가 공급된다. 예냉 시스템 내부에 존재하는 극저온 냉동기를 통해 수소 가스의 온도를 예비 냉각시키며, 이때 극저온 냉동기는 칠러에 연결되는 압축기의 헬륨 라인에 연결되어 작동한다. 최종 예냉된 수소 가스는 수소 액화 저장 용기로 이동하게 되며, 다른 극저온 냉동기 및 히트 파이프

등을 통해 소규모 수소 액화의 목표를 달성하게 된다. 액체 수소 저장 용기 및 예냉 시스템의 온도, 압력, 유량 등의 결과는 모니터링 시스템을 통해 자동으로 출력되도록 설정하였다. 본 연구에서 고려한 소규모 수소 액화 시스템은 Fig. 1과 같다.

선행 연구에서는 실험을 통해 수소 가스 유량에 대한 예냉 시스템의 극저온 냉동기 온도 분포를 분석하고 이론적 분석을 통해 수소 가스의 냉각 온도를 산출하여 냉동기의 냉각 능력을 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 computational fluid dynamics (CFD) 해석을 통해 극저온 냉동기 하단에 부착되는 열교환기를 통과하는 수소 가스의 최종 예냉 온도를 분석하는 데 초점을 맞추었다. 그리고 이를 통해 열교환기를 통과한 수소 가스의 예냉 온도 및 성능 데이터를 실험 결과와 비교 및 분석하였다. 또한 엄밀 해를 도출하여 쿨드 헤드 온도에 따른 냉각 성능 차이를 분석하고, 수소 공급 유량을 증가시킴으로써 검증된 작동 범위의 영역을 추가적으로 분석하였다.

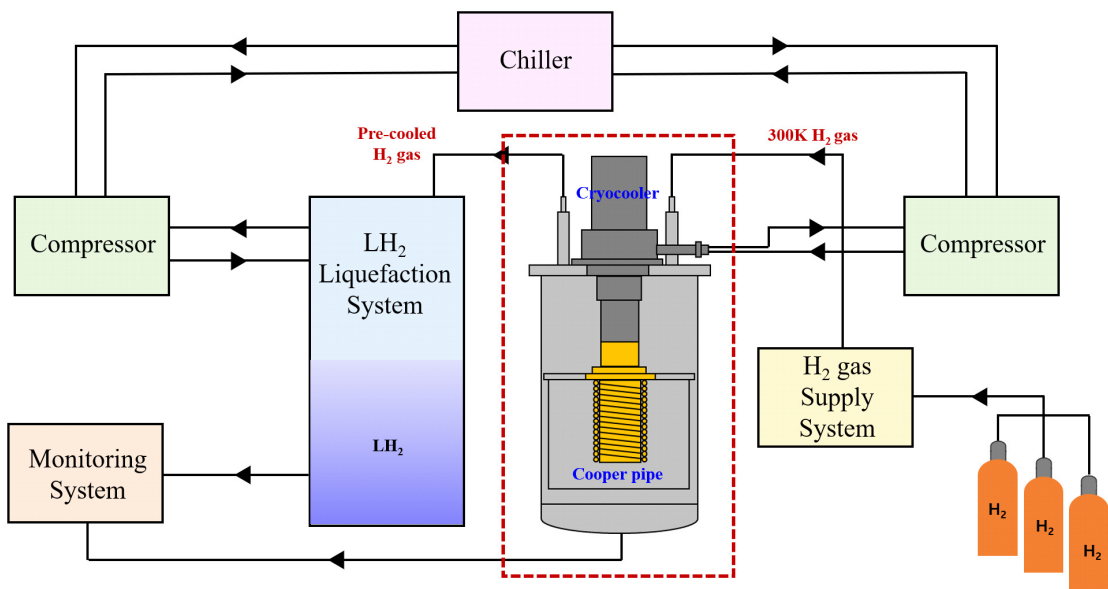


Fig. 1. Diagram of a condensing-type hydrogen liquefaction system with pre-cooler

2. 수치 해석 방법

2.1 지배 방정식

본 연구에서는 극저온 냉동기 하단에 부착된 코일 형태의 구리 열교환기의 열전달 성능을 유한체적법 (finite volume method)에 근거하여 전산 수치 해석 기반으로 평가하였다. 본 연구에서는 CFD 프로그램인 FLUENT v21.0 (ANSYS, Canonsburg, PA, USA)을 통해 계산을 수행하였다. 해석에 사용된 지배 방정식인 연속 방정식, 운동량 및 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho x_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_p u_i T) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(-k \frac{\partial T}{\partial x_i} + \rho C_p \overline{u'_i T'}) \quad (3)$$

여기서 u , P , 및 T 는 각각 속도 벡터, 압력 및 온도이다. 하첨자 i 및 j 는 텐서 표기($i, j=1, 2, 3$)를 나타낸다. ρ , u , k 및 C_p 는 각각 밀도, 점성계수, 열전도도 및 정압 비열을 나타낸다. 위의 지배 방정식은 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식이며, 모든 변수들은 시간의 평균값으로 계산된다.

Fig. 2는 본 연구에서 고려한 극저온 냉동기의 실제 모습과 CFD 해석 영역을 나타낸다. 예냉 시스템

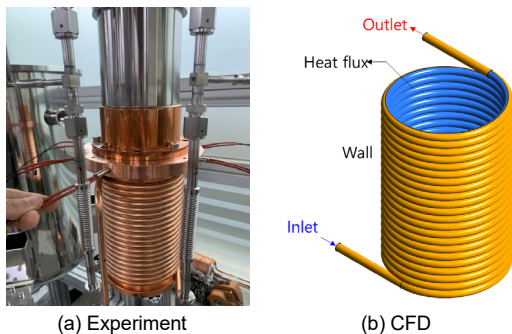


Fig. 2. AL600 cryocooler

에 활용되는 극저온 냉동기와 콜드 헤드에 부착된 수소 가스 라인에 대한 코일 형태의 파이프로 구성되어 있다. 기존 연구와 동일하게 극저온 냉동기 모델은 AL600 (Cryomech Inc., Syracuse, NY, USA)이며, CFD 해석 영역은 파이프 영역만 고려하였다. 주요 시뮬레이션 파라미터는 입구의 수소 공급 유량이며, 실험과 동일하게 20-90 L/min의 범위를 고려하였다. 자세한 해석 및 경계 조건은 Table 1과 같다.

Fig. 3은 실험을 통한 열전달과 해석 영역의 비교를 나타낸다. 실험에서는 극저온 냉동기의 콜드 헤드로부터 흡열이 발생하여 수소 라인을 냉각시키는 구조를 가진다. 그러나 CFD 해석 모델에서는 접점과 같이 파이프가 부착되는 고체 영역과 수소 라인 파이프의 유체 영역을 함께 고려하기 어려운 점이 존

Table 1. Operating and boundary conditions

Operating condition	
Flow regime	3D, Steady
Pressure-velocity coupling	Simple scheme
Analysis model	Laminar model
Grid type	Sweep method (Quad)
Number of grid	약 74만개
Boundary condition	
Inlet	Mass flow inlet
Outlet	Pressure outlet
Wall	Adiabatic wall
Cryocooler wall	Heat flux

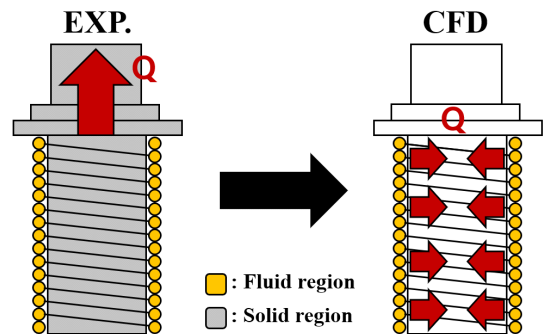


Fig. 3. Comparison of heat transfer between experiment and CFD

재한다. 따라서 본 연구에서는 구리 파이프가 부착되는 기둥에서의 전도 영향 및 온도 구배 등을 무시하고 파이프 안쪽 벽면에서 흡열이 된다고 가정하여 수치 계산을 수행하였다. 계산 영역에서 격자 구조는 Fig. 4와 같이 파이프 영역에 미세한 격자를 생성시키기 위하여 사각 형태의 메시로 이루어져 있다. 최소 격자 크기를 설정하기 위하여 격자 의존성 연구를 수행하였으며, 그 결과 약 74만 개 이상의 격자에서 출구 온도가 거의 일정한 값을 가졌다. 따라서 본 연구에서는 약 74만 개의 격자를 사용하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 고려한 극저온 냉동기의 성능 곡선 및 냉각 용량 경계 조건을 나타낸다. AL600 모델의 경우 검증된 작동 범위가 50-80 K이며, 선행 연구를 통해 20-90 L/min 범위의 수소 공급 유량에 따른 극저온 냉동기의 성능과 수소 가스의 예냉 온도 데이터를 확보하였다. 실험을 통해 도출된 수소

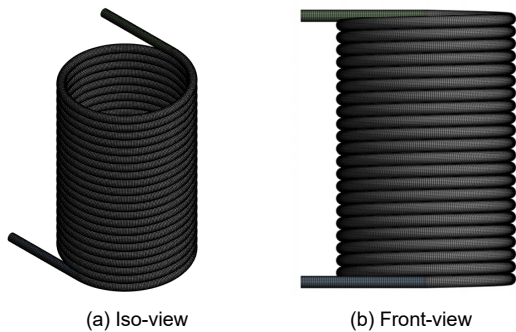


Fig. 4. Grid distribution of cooper pipe

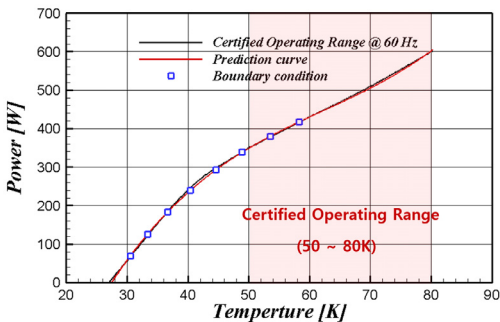


Fig. 5. Capacity curve of AL600 cryocooler

공급 유량에 대한 콜드 헤드의 온도를 바탕으로 성능 예측 곡선을 통해 계산에 활용할 냉각 용량 경계 조건을 각각 도출하였다¹⁹⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 CFD results for validation

Fig. 6은 수소 가스 공급 유량에 따른 파이프의 온도 분포를 보여준다. 온도의 범위는 20-300 K까지이며 15개의 영역으로 고려하였다. 파이프 안쪽 내부에서 발생하는 흡열 반응으로 인해 수소 온도가 파이프 하단의 300 K의 입구 영역에서 파이프 상단의 출구 영역으로 갈수록 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 수소 공급 유량에 따라 콜드 헤드의 온도가

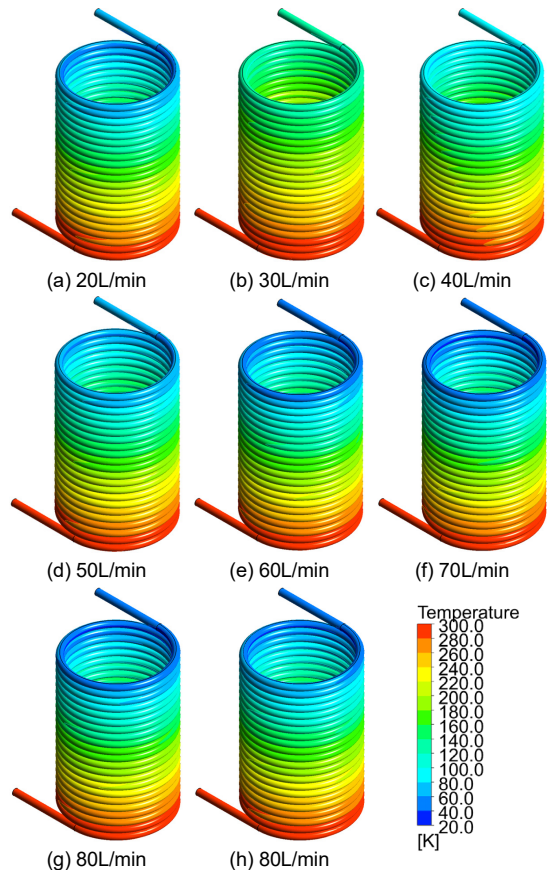


Fig. 6. Thermal fields at different flow rates

변화하고 극저온 냉동기의 냉각 용량이 변화하므로 수소 공급 유량에 따른 출구 온도의 결과가 다르게 도출되는 것을 알 수 있다. 그러나 실험의 결과와 같이 출구의 온도가 단조롭게 증가하지 않으므로, 이를 분석하기 위하여 heat flux 경계 조건을 수정함으로써 실험 결과와 동일한 엄밀 해를 추가적으로 계산하였다.

Fig. 7은 수소 공급 유량에 따른 출구 온도를 나타낸다. 실험으로 도출한 콜드 헤드의 온도를 바탕으로 성능 예측 곡선을 통해 냉각 용량 경계 조건을 계산에 활용했음에도 불구하고 50 L/min 이하의 영역에서는 수소 공급 유량이 감소할수록 오차가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 성능 곡선에서 알 수 있듯이 검증된 작동 범위가 아니며, 작은 온도 차이에도 불구하고 성능이 크게 변동되기 때문이다. 따라서 검증된 작동 범위에서 극저온 냉동기를 활용하는 것이 중요한 사안임을 알 수 있다.

Fig. 8은 실험으로 도출된 결과와 본 연구에서 추가적으로 분석한 엄밀 해와의 비교를 나타낸다. 수소 공급 유량에 따른 콜드 헤드 온도를 비교해 볼 때 최대 온도 차이가 약 1.6°C 미만으로 유사한 경향을 보인다. 그러나 이러한 온도 차이에도 불구하고 유량에 따라 냉각 용량에 차이를 분석해 보니 상대적으로 큰 차이가 나타났다. 50 L/min 이하의 영역에서는 수소 공급 유량이 감소할수록 극저온 냉동기의 냉각 용량 성능 오차가 증가하며, 최대 32.9%의 오차를 보였다. 그러나 60 L/min 이상의 영역에서는 수소 공

급 유량과 큰 관계없이 극저온 냉동기의 냉각 용량 성능이 미세한 오차 범위를 보였다. 이는 수소 공급 유량에 따라 극저온 냉동기의 냉각 용량 성능이 증가하며, 전체 냉각 용량에 따라 콜드 헤드 온도의 오차가 미치는 영향이 감소하기 때문이다.

특히 수소 공급 유량이 감소할수록 냉각 용량의 오차가 크게 증가하며, 냉각 용량이 감소함에 있어서 큰 비중을 차지하는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 20 L/min의 경우 실험에서는 극저온 냉동기가 약 70 W의 냉각 성능이 나타났다면, CFD에서는 약 102 W의 냉각 성능을 통해 동일한 출구 온도로 계산될 수 있다. 약 1.6°C의 오차만으로도 약 32.9%의 큰 냉각 성능의 차이가 나타나는 것이다. 이는 냉각 성능이 점점 증가하는 영역에서는 오차 범위가 크지 않은 이유와 상충될 수 있다. 90 L/min의 경우, 실험에서는 극저온 냉동기가 약 418 W의 냉각 성능을 나타냈다면 CFD에서는 약 411 W의 냉각 성능을 통해 동일한 출구 온도로 계산될 수 있는데, 약 1°C의 오차로

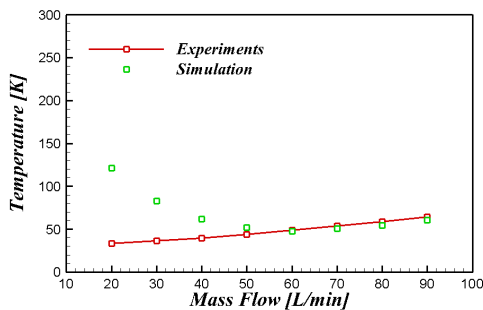
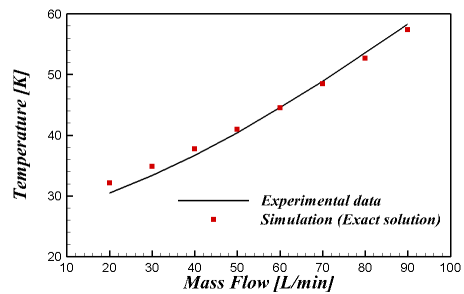
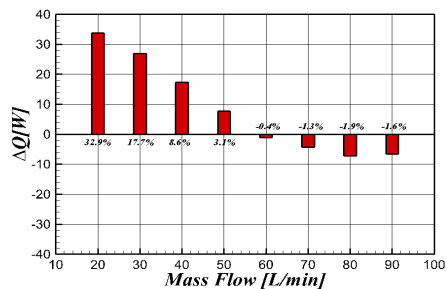


Fig. 7. Outlet temperature at different flow rates



(a) Cold head temperature



(b) Variation of cooling capacity

Fig. 8. Comparison between experimental data and exact solution

약 1.6%의 냉각 성능 차이가 난다. 그러므로 냉각 용량이 증가할수록 콜드 헤드의 온도차에 따른 오차 범위가 감소하며, 검증된 작동 범위에서 극저온 냉동기를 활용해야 함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 내용을 검토하기 위하여 수소 공급 유량을 증가함으로써 검증된 작동 범위의 영역을 추가적으로 분석하였다.

3.2 CFD results in certified operating range

Fig. 9는 Cryomech에서 제공하는 극저온 냉동기 성능 곡선의 검증된 작동 범위에서 수소 가스 공급 유량에 따른 파이프의 온도 분포를 보여준다. 이는 기존 온도 분포와 유사한 경향을 보이며 수소 공급 유량이 증가할수록 출구 영역의 온도가 단조롭게 증가하는 것을 알 수 있다. 검증된 작동 범위에서는 기존 실험 결과와 같이 유량이 증가할수록 극저온 냉동기의 콜드 헤드 온도 및 냉각 용량 성능이 증가하며, 수소 가스 예냉 시스템에 영향을 끼침을 알 수 있다. 그러므로 검증된 작동 범위에서는 본 연구에서 고려한 해석 영역 및 수소 공급 유량에 따른 극저온

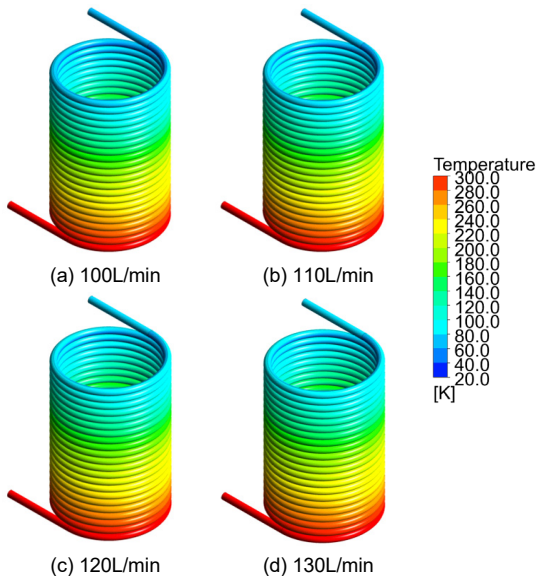
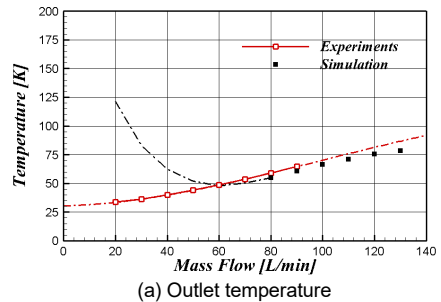


Fig. 9. Thermal fields at different flow rates in certified operating range

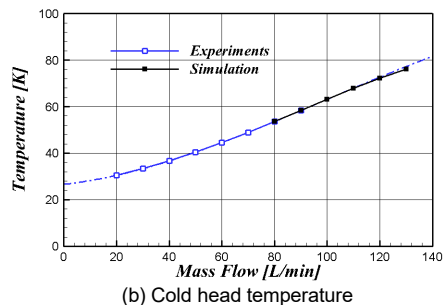
냉동기에 대한 냉각 용량을 분석하기 위한 해석 기법이 타당함을 알 수 있다.

Fig. 10은 검증된 작동 범위에서 수소 가스 최종 예냉 온도 및 콜드 헤드 온도를 나타낸다. 검증된 작동 범위에서는 실험을 통해 도출한 데이터를 다항 회귀식(polynomial regression)을 통해 CFD 결과와 경향을 비교하였다. 검증된 작동 범위에서는 수소 가스 공급 유량이 증가할수록 단조롭게 증가하며 50 L/min 이하의 영역과 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 다항 회귀식과 오차 범위 내에서 잘 일치하므로, 실제 실험 결과와도 잘 일치할 것으로 예상된다. 콜드 헤드 온도의 경우, 실험 결과의 경향과 잘 일치하며 극저온 냉동기의 냉각 용량 성능도 유사하게 도출되는 것으로 판단된다.

극저온 냉동기의 냉각 용량 성능 곡선에서 알 수 있듯이 낮은 온도 영역에서는 작은 온도 차이에도 냉각 성능이 큰 차이를 보였다. 또한 수소 공급 유량에 따라 극저온 냉동기의 냉각 용량 성능이 증가하며, 전체 냉각 용량에 따라 콜드 헤드 온도의 오차가



(a) Outlet temperature



(b) Cold head temperature

Fig. 10. Comparison between experiment and CFD in certified operating range

미치는 영향이 감소하였다. 극저온 냉동기는 쿨드 헤드의 온도 영역에 따라서 냉각 성능이 달라지며, 그 종류가 매우 다양하다. 그러므로 본 연구의 해석 결과를 통해 검증된 쿨드 헤드 온도 작동 영역에서 활용이 가능한 극저온 냉동기를 선정하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수소 가스의 예냉에 사용되는 극저온 냉각기의 냉각 성능을 검증하기 위하여 CFD 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 결과를 바탕으로 극저온 냉각기 바닥에 부착된 파이프에 대한 수소 공급 유량의 영향을 조사하였다. 본 연구에서는 파이프의 열유속에 대한 경계 조건의 변화를 통해 온도 데이터를 계산하였다. 결과적으로 수소 공급 유량에 따라 극저온 냉동기의 냉각 용량 성능이 증가하며, 전체 냉각 용량에 따라 쿨드 헤드 온도의 오차가 미치는 영향이 감소하였다. 이러한 이유로 수소 공급 유량을 증가시킴으로써 검증된 작동 범위의 영역을 추가적으로 분석하였다. 검증된 작동 범위에서 유량에 따른 냉각 온도를 계산하여 수소 가스 예냉을 위한 극저온 냉각기의 냉각 능력을 고려하였다. 결과적으로 CFD 시뮬레이션을 통해 수소 가스 예냉 시스템에 타당한 정확도로 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로 검증된 작동 영역에서 활용이 가능한 극저온 냉동기를 선정하는 것이 중요함을 고찰하였다.

후 기

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

References

1. D. Sun, X. Qiao, Y. Qi, S. Su, and Y. Xu, "Speed up the cooling process of superconducting magnets by applying a large cooling capacity Stirling cryocooler", *Cryogenics*, Vol. 98, 2019, pp. 87-91, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.1.007>.
2. X. Pei, A. C. Smith, and M. Barnes, "Superconducting fault current limiters for HVDC systems", *Energy Procedia*, Vol. 80, 2015, pp. 47-55, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.405>.
3. S. Zhu, G. Yu, X. Li W. Dai, and E. Luo, "Parametric study of a free-piston Stirling cryocooler capable of providing 350 W cooling power at 80 K", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 174, 2020, pp. 115101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115101>.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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>.
8. 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 design", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, Pt. A, 2016, pp. 283-294, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.051>.
9. 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>.
10. J. H. Baik, S. W. Karng, N. Garceau, Y. H. Jang, C. M. Lim, S. Y. Kim, 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. 13-57-1364, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4860864>.
11. 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.heatmasstransfer.2023.124089>.
 12. J. H. Baik, S. W. Karng, H. Kang, N. Garceau, S. Y. Kim, and I. H. 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>.
 13. 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>.
 14. 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>.
 15. 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>.
 16. 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>.
 17. 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>.
 18. N. M. Garceau, J. H. Baik, C. M. Lim, S. Y. Kim, I. H. 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>.
 19. Cryomech, "AL600 Gifford-McMahon Cryocooler", Cryomech, 2012. Retrieved from <https://bluefors.com/products/gifford-mcmahon-cryocoolers/al600-gifford-mcmahon-cryocooler/>.