

극저온 액체수소 기화기용 인쇄기판 열교환기의 동결 조건에 관한 실험적 연구

김우경^{1†} · 김보겸² · 손상호¹ · 이공훈¹ · 김정철^{1,2}

¹한국기계연구원 탄소중립기계연구소 히트펌프연구센터, ²과학기술연합대학원대학교 융합기계시스템전공

Experimental Investigation on the Freezing Condition of Printed Circuit Heat Exchanger for Cryogenic Liquid Hydrogen Vaporizer

WOOKYOUNG KIM^{1 †}, BOKYEM KIM², SANGHO SOHN¹, KONG HOON LEE¹, JUNGCHUL KIM^{1,2}

¹Heat Pump Research Center, Research Institute of Carbon-neutral Energy Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 43103, Korea

²Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

†Corresponding author :
wookyoung@kimm.re.kr

Received 25 March, 2024

Revised 15 April, 2024

Accepted 24 April, 2024

Abstract >> The purpose of this study is to investigate the freezing phenomena in printed circuit heat exchanger (PCHE) for cryogenic liquid hydrogen vaporizer. Local freezing phenomena in hot channels should be avoided in designing PCHE for cryogenic liquid hydrogen vaporizer. Hence, the flow and thermal characteristics of PCHE is experimentally investigated to figure out the conditions under when freezing occurs. To conduct lab-scale PCHE experiment, liquid nitrogen is used as a working fluid in cold channels instead of using liquid hydrogen. Glycol water is used as a working fluid in hot channels. Based on the experimental data, ratio between mass flow rates of cold channels and that of hot channels is proposed as contour map to avoid the freezing phenomena in PCHE.

Key words : Printed circuit heat exchanger(인쇄기판 열교환기), Flow and thermal characteristic(열유동 특성), Freezing(동결), Cryogenic liquid hydrogen(극저온 액체수소), Vaporizer(기화기)

1. 서 론

2050 탄소중립 시나리오를 맞아 온실가스 저감을 위한 다양한 에너지 기술 개발이 현재 진행 중이다. 신에너지로 주목받는 수소의 경우 청정에너지로 꼽히며 수소에 관련된 전주기 기술 개발에 관련된 연

구와 투자가 활발히 진행되고 있다.

수소를 대용량으로 저장하기 위해서는 극저온 상태의 액체수소 형태로 액화가 진행되어야 하며 이에 따라 수소 액화 플랜트 기술¹⁻⁴⁾ 역시 활발하게 연구가 수행되고 있다. 액화된 수소를 다양한 분야에 활용하기 위해서는 액체수소 공급 인프라가 구축되어

야 한다. 그중 액체수소를 기체 상태로 기화시키는 과정에서 구조적 안정성이 높고 열전달 효율이 뛰어난 인쇄기판형 열교환기(printed circuit heat exchanger, PCHE)가 주목받고 있다.

Nikitin 등⁵⁾은 초임계 이산화탄소 루프를 구성하여 실험적으로 PCHE의 열전달량과 차압을 측정하였다. Kim 등⁶⁾은 고온가스 냉각 원자로(high temperature gas-cooled reactor)의 응용처에 사용할 수 있도록 최대 550°C, 19 bar에 이르는 helium 시험 설비를 구성하여 PCHE 열-수력 성능을 실험적으로 측정하고 computational fluid dynamics 결과와 비교하였으며 최종적으로는 PCHE 내 Nusselt number 상관식을 제시하였다. 일부 연구자들은 극저온 유체를 사용하여 PCHE를 기화기로 사용하고자 하였다⁷⁻¹⁰⁾. Baek 등⁷⁾과 Yang 등⁸⁾은 극저온 유체로 액체질소를 사용하여 PCHE 내 극저온 유체의 채널 내 열전달 특성 및 열교환기 효율 등에 대하여 보고하였다. 하지만 기화기로 사용될 수 있는 극저온용 PCHE의 경우 극저온 유체의 특성뿐 아니라 열원 유체의 열전달 특성이 분석되어 열 설계가 진행되어야 한다. Sohn과 Kim¹¹⁾은 극저온 유체로 인한 열원 유체를 고려하여 PCHE의 동결 방지 설계를 위한 복합 열전달 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 극저온 액체수소 기화기용 PCHE의 동결 조건을 파악하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 극저온 유체와 열원 유체를 이용하여 열교환 실험을 수행한 뒤 동결 현상을 파악하고 PCHE 사용 시 동결 현상을 회피할 수 있는 방안에 대하여 제시하였다.

2. 시험 설비 및 시험 조건

2.1 시험 설비

PCHE 내 열교환 유체의 경우 극저온 유체로 액체 질소를 사용하였으며 열원 유체로는 글리콜 워터를 사용하였다. 글리콜 워터의 경우 물과 에틸렌글리콜을 질량 분율 50%로 섞어 사용하였다. 해당 유체들의 물성치는 Table 1과 같다.

대류로 인한 열손실을 최소화하기 위하여 진공 챔버 내에서 실험을 수행하였으며 전도로 인한 열손실을 최소화하기 위하여 PEEK block을 제작하여 점 접촉 상태에서 PCHE가 지지되도록 하였다. 시험 설비의 개략도는 Fig. 1과 같다.

PCHE의 극저온 채널의 입/출구와 열원 채널의 입/출구에서의 압력 및 온도의 경우 진공 챔버 내에서 측정하였다. 액체질소의 경우 개방 루프 형태로 구성하였다. 액체질소는 액체질소 펌프로부터 공급되어 극저온 레귤레이터(B-type; Cash Valve, McKinney, TX, USA)를 이용하여 압력 및 유량이 조절된 뒤 진

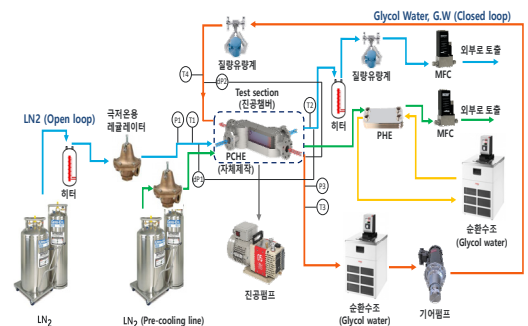


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

Table 1. Thermodynamic properties of nitrogen and glycol water

Working fluid	Density [kg/m ³]	Viscosity [μPa·s]	Thermal conductivity [W/m·K]	Heat capacity [kJ/kg·K]	Heat of vaporization [kJ/kg]
LN2*	700.5	8.01E-5	0.103	3.413	165
GW**	1053.4	2.1E-3	0.402	2.273	-

*7 bar, -175°C

**1 bar, 40°C

공 체임버 내 PCHE에서 열교환한 후에 외부로 토출되었다. 토출 전 질량 유량계(CMF010 Micromotion; Emerson Electric, St. Louis, MO, USA)를 사용하여 액체질소의 유량을 측정하였으며 질량 유량계의 측정 정확도를 유지하기 위하여 액체질소가 PCHE에서 열교환한 뒤 히터를 거쳐 상온의 기체질소가 되어 질량 유량계를 지나도록 하였다. 열원 채널의 경우 펌프 형태로 구성하였다. 순환 수조(Dyneo DD-1001F; Julabo, Seelbach, Germany)를 이용하여 일정한 온도로 유지되도록 하였으며 마그네틱 기어 펌프(DGS 2.3; ThrillCorp, Orlando, FL, USA)를 이용하여 일정한 유량으로 순환될 수 있도록 하였다. 사용한 요소 기기들과 계측기들의 사양은 Tables 2-4와 같다. 추가적으로 진공 체임버 내 이중관 열교환기를 구성하여 액체질소가 가능한 낮은 quality를 유지하여 PCHE 내부로 들어갈 수 있도록 구성하였다.

PCHE의 경우 기보유한 PCHE⁹⁾를 활용하였으며

해당 PCHE의 상세 규격은 Table 5와 같다. 채널 직

Table 5. Test conditions

	Cold channels	Hot channels
Working fluid	LN2	GW
# of plates [ea]	10	
# of channels [ea]	34	
Length of channels [mm]	180	200
Width of channels [mm]	100	
Heat transfer area [m ²]	0.1573	0.1748
Cross sectional area [mm ²]	133.5	
Flow configuration	Co-flow	40
Plate type	I type	N type
Channel configuration	Semi-circular	
Channel diameter [mm]	1	
Inlet temperature [°C]	-185 to -175	40
Inlet mass flow rate [kg/min]	0.15 to 0.31	0.4 to 2.4
Inlet Re [-]	170 to 400	24 to 142

Table 2. PCHE heat transfer test facility component specification

	Bath circulator	GW Pump	Regulator	Vacuum pump
Type	-	-	-	Rotary Vane
Manufacturer	Julabo	ThrillCorp	Cash Valve	Woosung Vacuum CO.
Model	DYNEO-DD-1001F	-	B-type	MVP60
Note	-	Inverter driven	-	-

Table 3. PCHE heat transfer test facility component specification for cold channels

	Temperature	Pressure (Abs)	Pressure (differential)	Flow rate
Type	T-type thermocouple	Pressure transmitter	Pressure transmitter	Coriolis
Manufacturer/Model	Omega/T-type	Rosemount/3051TG	Rosemount/2051CD2	Micromotion/CMF010
Spec	-	200 kPa	60 kPa	0.5 kg/min
Accuracy	0.1 K	0.065%	0.065%	0.1%

Table 4. PCHE heat transfer test facility component specification for hot channels

	Temperature	Pressure (G)	Pressure (differential)	Flow rate
Type	T-type thermocouple	Pressure transmitter	Pressure transmitter	Coriolis
Manufacturer/Model	Omega/T-type	Rosemount/2051CA	Rosemount/2051CD2	Oval/CA003
Spec	-	1000 kPa	60 kPa	2.4 kg/min
Accuracy	0.1 K	0.065%	0.065%	0.1%

경의 경우 극저온 채널 및 열원 채널 모두 1 mm의 반원으로 설계되었으며 각각 10장의 전열판 수로 제작되었다. 전열판의 경우 극저온 채널의 경우 I type 형태로 제작하였으며 열원 채널의 경우 N type 형태로 제작하였다. 확산 접합을 이용하여 PCHE의 코어 부분을 접합하였으며 추후 용접을 통하여 헤더를 코어 부분에 결합하였다. 제작된 PCHE는 Fig. 2와 같다.

2.2 시험 조건

본 시험에서는 PCHE 내 극저온 채널 및 열원 채널에서의 열전달량을 측정하였으며 각각 채널에서의 차압 역시 측정하였다. 모든 시험의 경우 글리콜 워터가 40°C인 조건에서 수행되었으며 열원 채널의 유량뿐만 아니라 극저온 채널의 유량 역시 변경하면서 시험을 수행하였다. 열원 채널의 유량을 줄여가며 PCHE 내 동결 조건이 발생할 경우 열전달량이 감소하는 것을 확인한 후에는 PCHE를 해동시킨 후 시험을 진행하였다. 동결을 회피하기에 유리한 형태를 취하기 위하여 counter flow가 아닌 co-flow로¹⁰⁾ 시험을 수행하였으며 극저온 유체는 I type에 흐르도록 하였

고 열원 유체는 N type에 흐르도록 하였다.

2.3 Data reduction

PCHE 입/출구 온도의 경우 T-type 열전대를 이용하여 측정하였고 압력의 경우 동일한 위치에서 압력계(3051TG/2051CA; Rosemount Inc., Shakopee, MN, USA)와 차압계(2051CD2; Rosemount Inc.)를 이용하여 측정하였다. 온도 측정에 의한 불확도를 최소화하기 위하여 정밀한 온도 교정을 통하여 열전대의 온도 측정 불확도가 0.1 K 내로 수렴하도록 하였다. 측정된 온도 및 압력을 이용하여 극저온 채널과 열원 채널의 입/출구 엔탈피를 산출하였으며 이를 바탕으로 극저온 채널과 열원 채널에서의 열전달량을 다음과 같이 산출하였다.

$$Q_c = \dot{m}_c (h_{c,in} - h_{c,out}) \quad (1)$$

$$Q_h = \dot{m}_h (h_{h,out} - h_{h,in}) \quad (2)$$

여기서 Q_c , Q_h 는 각각 극저온 채널과 열원 채널에서의 열전달량이고 \dot{m}_c , \dot{m}_h 는 각각 극저온 채널과 열원 채널 내 유체의 유량, $h_{c,in}$, $h_{c,out}$ 는 극저온 채널 내 유체의 입/출구 엔탈피, $h_{h,in}$, $h_{h,out}$ 는 열원 채널 내 유체의 입/출구 엔탈피를 나타낸다. 열전달량의 경우 PCHE가 정상 상태를 20분 이상 유지하였을 때 평가하였다. 본 연구에서 저온 유체 및 열원 유체의 모든 열전달 물성의 경우 각각 REFPROP와 COOLPROP을 이용하여 계산하였으며 이를 반영하여 열전달량을 산출하였다.

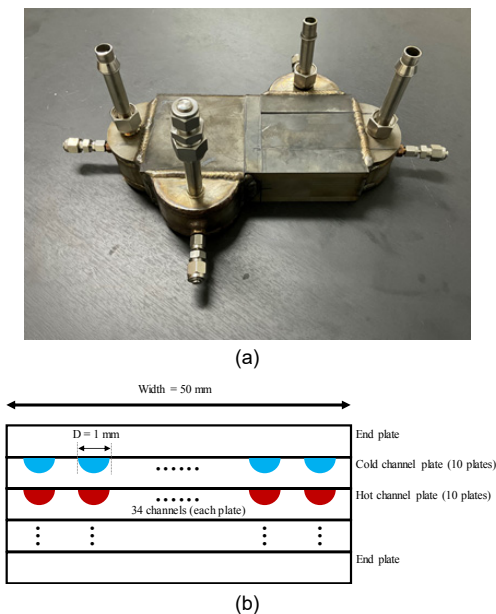


Fig. 2. (a) Fabricated PCHE and (b) configuration of PCHE

3. 결과 및 고찰

3.1 PCHE의 열전달 특성

PCHE 내에서 극저온 유체와 열원 유체가 열교환할 경우 시간에 대한 온도 경향은 Fig. 3과 같다. 각

각의 그래프의 경우 극저온 채널 입/출구 온도와 열원 채널 입/출구 온도에 해당한다. 시간이 지남에 따라 PCHE 입구로 공급되는 배관의 온도가 낮아지며 배관 내 액체질소로의 열 침입이 감소하게 된다. 최종적으로 질소는 액체 조건으로 PCHE 내 극저온 채널로 공급되며 열원 채널 내 글리콜 워터와 열교환하여 기체 상태로 PCHE에서 토출된다. 글리콜 워터의 경우 항온 순환 수조를 이용하였기 때문에 40°C의 일정한 온도 조건으로 PCHE 내 열원 채널로 공급되었으며 극저온 채널 내 질소와 열교환하여 비교적 낮은 온도 상태로 항온 수조로 재순환되었다.

Fig. 4는 시간에 따른 극저온 채널과 열원 채널에서의 열전달량을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 시간이 지남에 따라 극저온 채널의 열전달량과 열원 채널의 열전달량이 증가하여 정상 상태에 도달하였으며 그 뒤로는 차이가 유지된다. 극저온 채널의 열전달량과 열원 채널의 열전달량이 정상 상태에 도달했음에도 차이를 가지는 이유는 극저온 채널의 입구 건도가 일부 존재하기 때문으로 파악된다. 극저온 채널의 입구 조건을 완벽한 단상의 액체질소로 가정하였으나 열 침입으로 인하여 이상유동 상태의 입구 조건이 되었을 경우 항상 가정한 열전달량보다 실제 열전달량이 작은 값을 가지게 된다. 하지만 Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 극저온 채널과 열원 채널의 열전달량 차이는 미비하였다. 본 연구에서 수행한 다양한 실험 조건에서 극저온 채널과 열원 채널의 열전달량

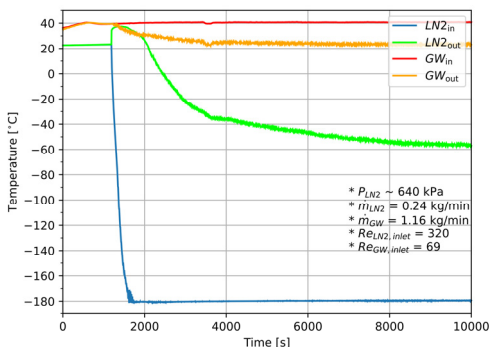


Fig. 3. Temporal data on inlet and outlet temperatures of LN2 and GW

차이는 Fig. 5와 같이 약 15% 수준으로 유지되었다. 따라서 해당 연구에서는 극저온 채널의 입구 조건을 단상의 액체질소 조건으로 가정하여 분석하였다. 추가적으로 기존 연구들과 비교하여 타당한 열전달량 실험이 수행된 것을 확인하였다(Table 6).

Fig. 6은 동결이 발생하지 않는 조건에서 액체질소의 유량과 글리콜 워터의 유량을 변화시켰을 때 발생하는 PCHE의 열전달량에 관한 등고선이다. 하

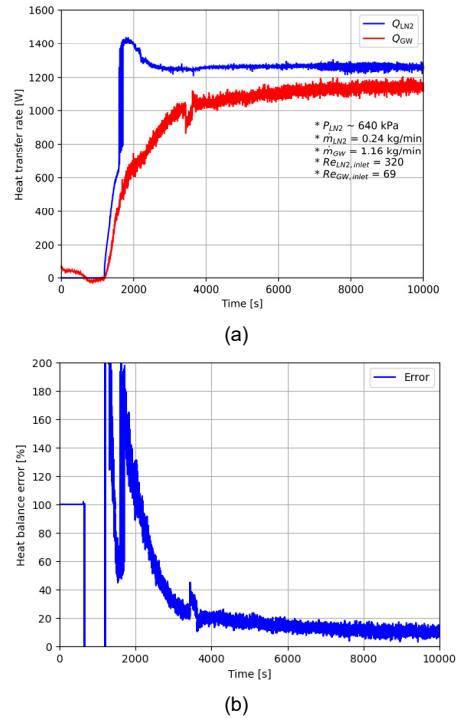


Fig. 4. Temporal data of (a) heat transfer rate and (b) heat balance error

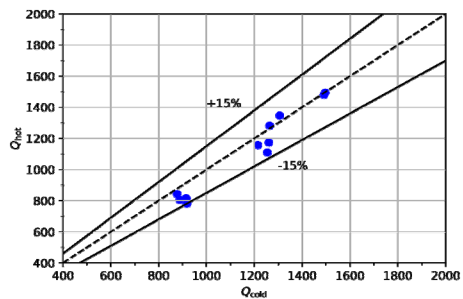


Fig. 5. Heat balance test

안색 점들의 경우 실험을 통해 측정된 결과이며 나머지 데이터의 경우 외삽법을 이용하여 추정하였다. 이를 통해 액체질소의 유량이 증가하거나 글리콜 워터의 유량이 증가함에 따라 PCHE의 열전달량은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 글리콜 워터의 유량 증가에 비해 액체질소의 유량 증가가 PCHE의 열전달량 증가에 효과적인 것으로 파악되었다. 이는 글리콜 워터에 비해 액체질소의 열전달계수가 유량에 따라 크게 변하기 때문으로 예상된다. 글리콜 워터의 높은 점도로 인하여 실험을 수행한 모든 영역에서 열원 채널은 층류 조건에서 운전된다. 하지만 액체질소가 흐르는 저온 채널의 경우 상변화가 일어나서 기체 상태로 존재할 뿐 아니라 액체질소의 점도가 글리콜 워터에 비해 상대적으로 낮아 비교적 높은 Reynolds number (Re) 값을 가진다. 따라서 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 저온 채널의 Re 값이 열원 채널에 비해 굉장히 높으며 대부분 난류 조건에서 운전됨을 확인할 수 있다. 그렇기 때문에 글리콜 워터의 유량 변화에 비해 액체질소의 열전달계수가 유량에 따라 크게 변한 것으로 예상되며 이로 인해 액체질소의 유량이 증가할 때 PCHE 열전달량이 크게 증가한 것으로 판단된다. 즉 열전달계수 및 열전달량 변화 폭이 적은 글리콜 워터의 유량을 변화시키며 Fig. 8과 같이 동결 현상을 관측하였다.

Fig. 8은 극저온 채널로 유입되는 액체질소의 질량 유량이 동일한 조건에서 열원 채널로 유입되는 글리콜 워터의 질량 유량을 점차 감소시켰을 때 발생하는 동결 현상을 나타낸다. Fig. 3과 유사하게 극저온채널과 열원 채널의 입/출구 온도를 나타낼 뿐 아니라 액체질소와 글리콜 워터의 유량을 나타낸다. 동결이 일어나지 않는 조건의 경우 Fig. 8(a)와 같이

온도, 유량 모두 일정하게 정상 상태로 진입하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 글리콜 워터의 유량이 감소하여 동결이 발생하는 조건에서는 저온 채널과 열원 채널이 열교환을 하지 못하게 되고 Fig. 8(b)와 같이 저온 채널의 출구 온도가 점차 감소함을 확인할 수 있다. 또한 동결이 발생하는 영역이 증가하게 되

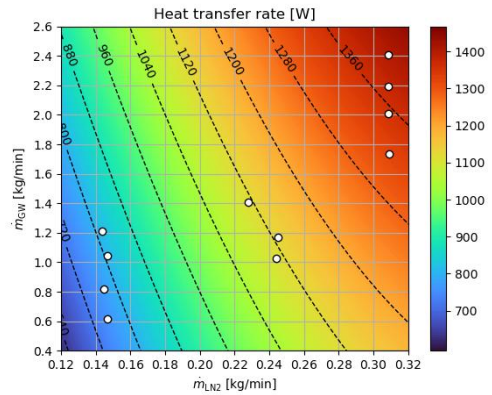


Fig. 6. Heat transfer rate of the fabricated PCHE for various mass flow rates of LN2 and that of GW

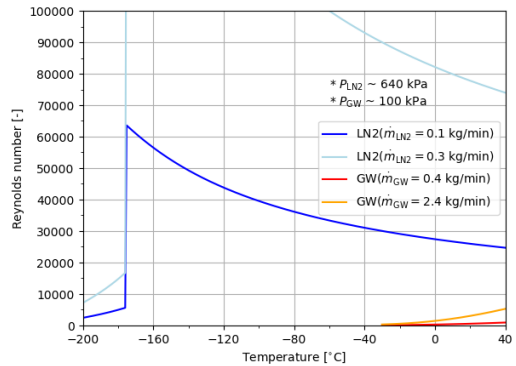


Fig. 7. Reynolds number of each channels for various temperature conditions

Table 6. Comparison with previous studies

Study	Working fluid [-]	Heat transfer area [m ²]	Mass flux [kg/m ² /s]	Heat transfer rate [W]
This study	LN2 / GW	1.57E-1	18.7 to 37.5	877 to 1,497
Kwon et al. ¹²⁾	LN2 / N2	8.99E-03	52.1 to 81.6	85 to 179
Shin and Yoon ⁹⁾	LN2 / N2	1.99E+01	18.6 to 44.8	37,801 to 91,084
Yoo et al. ¹³⁾	Propane / N2	1.66E-02	40 to 90	20 to 147

면서 글리콜 워터의 유량이 점진적으로 하락하게 된다. 글리콜 워터의 유량을 열원 채널의 압력 강하량과 비교하여 보게 되면 Fig. 9와 같은 경향을 확인할 수 있다. 동결이 발생하지 않을 경우 Fig. 9(a)와 같이 열원 채널의 압력 강하량이 일정하게 유지되는 반면 동결이 발생할 경우 Fig. 9(b)와 같이 글리콜 워터의 유량 감소와 함께 열원 채널의 압력 강하량이 증가함을 확인하였다.

따라서 글리콜 워터의 동결 현상을 대표할 수 있는 가장 간단한 인자로써 열원 채널의 차압을 다양한 조건에서 비교하였다. Fig. 10은 다양한 액체 질소 유량과 글리콜 워터 유량 조건에서 열원 채널의 차압 등고선이다. 비어 있는 점들의 경우 실험적으로 얻은 열원 채널의 차압 데이터이며 이를 바탕으로 외삽법을 이용하여 나머지 영역에서의 열원 채널의 차압을 추정하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 액체 질소의 유량이 증가함에 따라 동결이 발생할 가능성이 증가하게 되어 열원 채널의 차압이 증가하게 된다. 글리콜 워터의 유량이 증가할 경우 열원 채널 내

유속이 증가하여 열원 채널의 차압은 증가하게 된다. 하지만 특정 글리콜 워터의 유량이 특정한 값 이하로 감소하게 될 경우 마찬가지로 동결이 발생할 가능성이 증가하게 되어 열원 채널의 차압은 증가하게 된다. 따라서 PCHE 내 동결을 회피하기 위해서는 액체 질소의 유량에 따라 적절한 글리콜 워터의 유량을

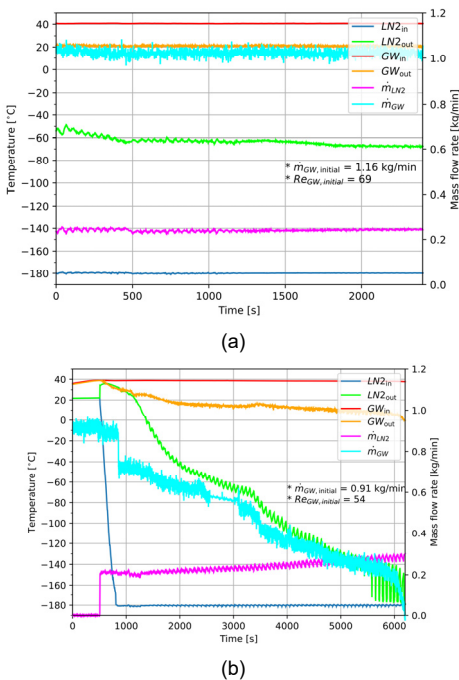


Fig. 8. Temporal data on temperatures and mass flow rates. (a) Non-freezing and (b) freezing condition

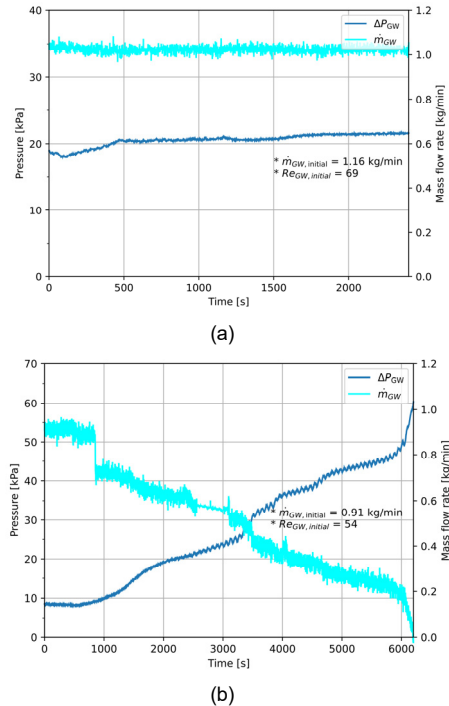


Fig. 9. Temporal data on pressures and mass flow rates. (a) Non-freezing and (b) freezing condition

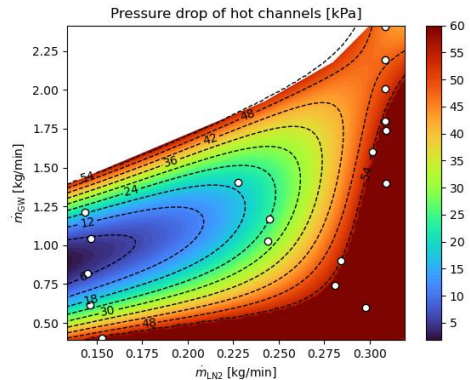


Fig. 10. Pressure drop of GW channels for various mass flow rates of LN2 and that of GW

선정하여 운전해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 채널 내 동결 현상을 회피하기 위하여 시험 가능한 액체질소와 글리콜 워터의 유량 범위를 나타낸 차압 등고선이다. 각각 점선으로 되어 있는 등고선의 경우 실험적으로 동결 현상이 발생하기 직전의 등고선과 안정적인 열교환기 운영을 위하여 제시하는 영역을 의미한다. 해당 등고선보다 낮은 열원 채널 차압을 유지하는 영역에서 열교환기를 작동할 경우 동결 위험을 회피하며 안정적으로 설비를 운영할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서 수행한 PCHE와 유사한 열교환기를 비슷한 영역에서 운영하게 되면 Fig. 11의 차압 등고선을 참고하여 동결을 회피할 수 있도록 글리콜 워터의 유량을 선정할 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 수행한 실험과 비교하였을 때 사용된 유체의 종류가 상이하거나 PCHE 내부의 채널 직경이 크게 차이가 난다면 내부 채널에서의 열전달 현상이 변화하게 되어 동결을 회피할 수 있는 적정 글리콜 워터 유량을 재설계해야 할 것이다. Fig. 12와 같이 질소와 수소의 물성치를 다양한 온도에서 비교할 경우 큰 차이가 난다는 것을 확인할 수 있다. 다른 물성치에 비해 정압 비열 값과 열전도도 값이 두 유체 간 큰 차이가 나게 된다. 두 물성치의 경우 열전달 현상에 직간접적으로 크게 영향을 주기 때문에 다양한 유체를 사용할 때에 동결 현상을 회피하기 위해서는

추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히 동결 현상을 나타낼 수 있는 무차원수를 이용하여 무차원화하여 해석할 수 있다면 다양한 유체, 입구 조건 등을 반영하여 동결 현상을 회피할 수 있는 디자인 가이드라인을 제시할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 극저온 액체수소의 기화기로 사용될 수 있는 PCHE의 동결 현상에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 극저온 유체와 열원 유체가 열교환을 할 때 일어날 수 있는 동결 현상을 관측하고 이론적 분석을 바탕으로 동결 현상을 회피할 수 있는 방안을 제시하였다.

1) 실험실 규모에서 PCHE 성능 시험을 수행하기 위하여 극저온 유체로 액체질소를 선정하였으며 열원 유체로 글리콜 워터를 선정하여 열교환 성능 시험을 수행하였다. 액체질소와 글리콜 워터의 유량을 변경시키며 입/출구 온도와 차압 등을 측정하였다. 그 결과 액체질소의 유량이 증가함에 따라 PCHE의 열전달량이 크게 증가함을 확인하였다. 열원 유체의 점도가 높을 경우 극저온 유체의 열전달계수가 열전달량에 지배적인 효과를 가짐을 알 수 있다.

2) 액체질소의 유량을 고정시킨 상황에서 글리콜 워터의 유량을 감소시켜가며 동결 현상을 관측하였다. 그 결과 액체질소의 유량이 증가하거나 글리콜

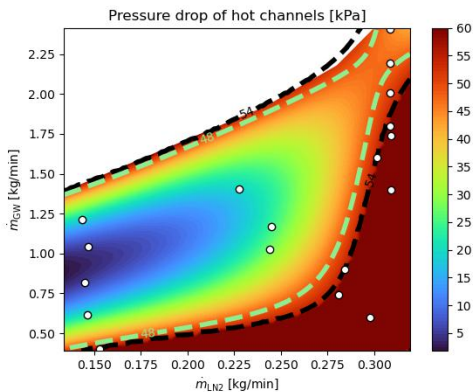


Fig. 11. Allowable mass flow rates of LN2 and that of GW for avoiding freezing phenomena

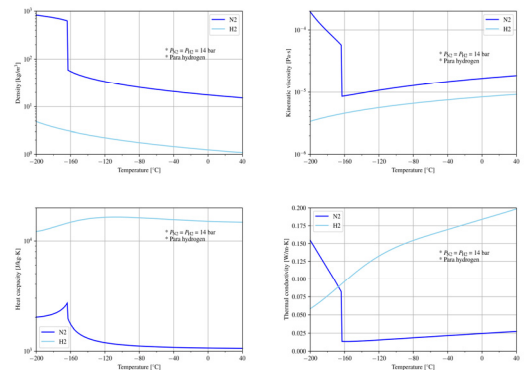


Fig. 12. Thermodynamic properties of nitrogen and that of hydrogen for various temperature

위터의 유량이 감소함에 따라 동결 발생 가능성이 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 열원 채널 내 차압을 분석하여 동결을 회피할 수 있는 영역을 제시하였다. 하지만 질소에서 수소로 유체를 변경하거나 PCHE의 구조가 변경되면 동결이 발생할 수 있는 영역이 변경될 여지가 있다. 이에 추후 동결 현상에 대한 추가적인 열전달 실험 및 무차원수 분석을 통해 극저온 기화기의 안정적인 운영을 위한 가이드라인을 제시하고자 한다.

후 기

본 연구는 2023년 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(1415181949) 한국기계연구원 기본 사업인 ‘액체수소 공급시스템 핵심 기자재 개발(NK237B)’의 지원으로 연구한 결과물입니다.

References

1. Ø. Wilhelmsen, D. Berstad, A. Aasen, P. Nekså, and G. Skaugen, “Reducing the exergy destruction in the cryogenic heat exchangers of hydrogen liquefaction processes”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 10, 2018, pp. 5033-5047, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.094>.
2. 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>.
3. J. W. Leachman, B. Jacobson, S. Penoncello, and E. Lemmon, “Fundamental equations of state for parahydrogen, normal hydrogen, and orthohydrogen”, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 38, No. 3, 2009, pp. 721-748. Retrieved from https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=832374.
4. P. J. Donaubaauer, U. Cardella, L. Decker, and H. Klein, “Kinetics and heat exchanger design for catalytic ortho-para hydrogen conversion during liquefaction”, *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 42, No. 3, 2019, pp. 669-679, doi: <https://doi.org/10.1002/ceat.201800345>.
5. K. Nikitin, Y. Kato, and L. Ngo, “Printed circuit heat exchanger thermal-hydraulic performance in supercritical CO₂ experimental loop”, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, No. 5, 2006, pp. 807-814, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrefrig.2005.11.005>.
6. I. H. Kim, H. C. No, J. I. Lee, and B. G. Jeon, “Thermal hydraulic performance analysis of the printed circuit heat exchanger using a helium test facility and CFD simulations”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, No. 11, 2009, pp. 2399-2408, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.07.005>.
7. S. Baek, J. H. Kim, S. Jeong, and J. Jung, “Development of highly effective cryogenic printed circuit heat exchanger (PCHE) with low axial conduction”, *Cryogenics*, Vol. 52, No. 7-9, 2012, pp. 366-374, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2012.03.001>.
8. S. Yang, Z. Zhao, Y. Zhang, Z. Chen, and M. Yang, “Effects of fin arrangements on thermal hydraulic performance of supercritical nitrogen in printed circuit heat exchanger”, *Processes*, Vol. 9, No. 5, 2021, pp. 861, doi: <https://doi.org/10.3390/pr9050861>.
9. J. H. Shin and S. H. Yoon, “Thermal and hydraulic performance of a printed circuit heat exchanger using two-phase nitrogen”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 168, 2020, pp. 114802, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114802>.
10. S. Sohn and B. I. Choi, “A study on thermal design of printed circuit heat exchanger for supply of cryogenic high pressure liquid hydrogen”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 5, 2021, pp. 347-355, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.347>.
11. S. Sohn and W. Kim, “A study on anti-icing design by conjugate heat transfer analysis in a lab-scale printed circuit heat exchanger for supply of cryogenic high pressure liquid hydrogen”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 5, 2022, pp. 541-549, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.5.541>.
12. D. Kwon, L. Jin, W. S. Jung, and S. Jeong, “Experimental investigation of heat transfer coefficient of mini-channel PCHE (printed circuit heat exchanger)”, *Cryogenics*, Vol. 92, 2018, pp. 41-49, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.03.011>.
13. J. W. Yoo, C. W. Nam, and S. H. Yoon, “Experimental study of propane condensation heat transfer and pressure drop in semicircular channel printed circuit heat exchanger”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 182, 2022, pp. 121939, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121939>.