

## 극저온 고압액체수소 공급용 인쇄기판 열교환기의 열설계에 관한 연구

손상호<sup>1,†</sup> · 최병일<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국기계연구원 에너지기계연구본부 열시스템연구실, <sup>2</sup>한국기계연구원 에너지기계연구본부 플랜트융합연구실

### A Study on Thermal Design of Printed Circuit Heat Exchanger for Supply of Cryogenic High Pressure Liquid Hydrogen

SANGHO SOHN<sup>1,†</sup>, BYUNG-IL CHOI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Thermal System, Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 43103, Korea

<sup>2</sup>Department of Plant Technology, Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 43103, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
sangho@kimm.re.kr

Received 15 September, 2021  
Revised 6 October, 2021  
Accepted 11 October, 2021

**Abstract >>** This paper is a study on the thermal design of printed circuit heat exchanger (PCHE) to supply cryogenic high pressure liquid hydrogen stored from hydrogen liquefaction process by using computational fluid dynamics (CFD). This PCHE should be thermally designed to raise the temperature of cryogenic liquid hydrogen to a desired temperature and also to be anti-icing to avoid any local freezing in hot channel. This research presents the effect of inlet velocity and inlet temperature of hydrogen, and the effect of flow configurations of co/counter-flow on thermal design of PCHE heat exchanger based on various CFD simulation analysis.

**Key words :** Liquid hydrogen(액체수소), Printed circuit heat exchanger(인쇄기판 열교환기), Thermal design(열설계), Anti-icing(방빙), Flow configuration(유동흐름), Computational flow dynamics(전산유동해석)

## 1. 서론

세계적으로 인류에게 점차 큰 위협으로 다고 오고 있는 지구온난화에 따른 기후변화에 적극적으로 대응하기 위하여 세계 주요 선진국들은 포괄적이고 적극적인 대응 체계를 구축하며 탄소 중립시대를 준비해오고 있다. 이와 같은 세계적인 탄소중립 흐름에 따라 우리나라도 2050년까지 탄소 중립(carbon neu-

trality)을 선언하고 온실가스 감축을 위한 저탄소 정책들을 수립하며 에너지 혁신을 위한 마련하고 있다. 그 중에서도 지속가능하며 풍부한 친환경적인 수소 에너지에 주목하고 수소생산-저장-운송-활용의 전주 기 기술개발<sup>1)</sup>에 집중 투자를 하고 있다.

수소는 기체 상태를 고압으로 압축해 저장하는 기술이 상용화되어 있지만 낮은 에너지밀도와 고가의 탱크제작비의 단점이 있어, 이를 해결하기 위하여 수

소를 극저온인 영하 253°C에서 액화시켜 높은 에너지밀도로 저장할 수 있는 수소액화 플랜트 기술개발이 빠르게 발전하고 있으며 이와 관련 연구들<sup>2,4)</sup>도 활발히 진행되고 있다. 이렇게 액화된 수소를 다양한 차량 등에 공급하고 사용하기 위해서는 수소공급 인프라 구축이 필요하며 한국기계연구원에서는 기본사업으로 액체수소 공급시스템 핵심기자재 기술개발 사업을 수행하고 있다. 극저온 액체수소를 기체 상태로 공급하기 위해서는 고압의 초임계상태에서 기화 과정이 필요하며 이를 위한 새로운 열교환기 개발이 중요하게 요구되고 있다. 각 종 플랜트 분야에서 차세대 열교환기로 떠오르고 있는 인쇄기판 열교환기 (printed circuit heat exchanger, PCHE)는 내구성과 신뢰성이 우수하며 열전달 효율이 탁월하여 고압액체수소를 기화시킬 수 있는 유망한 열교환기로 주목 받고 있다.

Sun 등<sup>5)</sup>은 극저온 액화천연가스의 기화기의 전산해석 모델링의 주제로 전산 유체역학 해석기법 (computational fluid dynamics, CFD)을 통하여 극저온 액화천연가스가 초임계상태로 상온 공기와 열교환을 통하여 기화시키는 연구결과를 제시하였다. Ichard 등<sup>6)</sup>은 액체수소의 방출을 모사하기 위한 CFD 모델을 제시하고 실험과 비교하여 상온의 대기중으로 분사되는 특성을 연구하였다. Lee 등<sup>7)</sup> 선박용 액화천연가스 기화기에 대한 열전달 특성을 수치해석으로 연구하였으며, 천연가스의 유량과 가열열원인 글리콜 워터(glycol water)의 유량변화에 따른 기화 특성을 분석하였다. Huerta 등<sup>8)</sup>은 극저온 유체가 저장탱크에서 등압 증발하는 현상을 CFD 모델링을 통하여 연구하였고 탱크 내 기상 및 액상 간의 열전달 및 유동에 관하여 분석하였다. Baek 등<sup>9)</sup>은 극저온 PCHE 열교환기 성능을 개선시키기 위해서 헬륨가스를 이용하여 축방향 전도 열손실을 줄이는 연구를 수행하였다. Popov 등<sup>10)</sup>은 냉각공정 및 재생에너지 저장을 위한 극저온 열교환기에 대한 분석논문을 정리하였고 PCHE 열교환기는 고효율이고 고압에서도 안정적으로 구동가능한 장점이 있어 극저온 산업분야에서 유망한 기술로 평가하였다. 이와 같은 PCHE

는 극저온 고압액체수소를 기화시킬 수 있는 유망한 열교환기로 기대받고 있지만 지금까지 이에 관한 연구사례는 찾아보기 힘들다. 그리고 극저온 고압액체수소를 기화시키는 열교환기는 결빙방지를 위한 열설계가 반드시 고려되어야만 한다. 왜냐하면 열교환기의 열원채널 내 글리콜워터가 어는점 이하로 냉각되면 채널 내에서 결빙이 성장하며 결국 채널이 막혀 열교환기 기능을 상실하게 되기 때문이다. 따라서 극저온 고압액체수소를 공급하는 열교환기에서는 결빙방지를 위한 열설계에 대한 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 고압액체수소 공급을 위한 PCHE 열교환기에서 결빙을 방지하는 열설계를 위하여 수소와 열원유체간의 열전달을 상세히 분석할 수 있도록 채널 및 판형으로 구성된 복합열전달 모델을 정의하였고, 이를 이용하여 다양한 CFD 시뮬레이션을 수행하며 액체수소 유속효과, 입구온도 효과, 유동흐름 효과

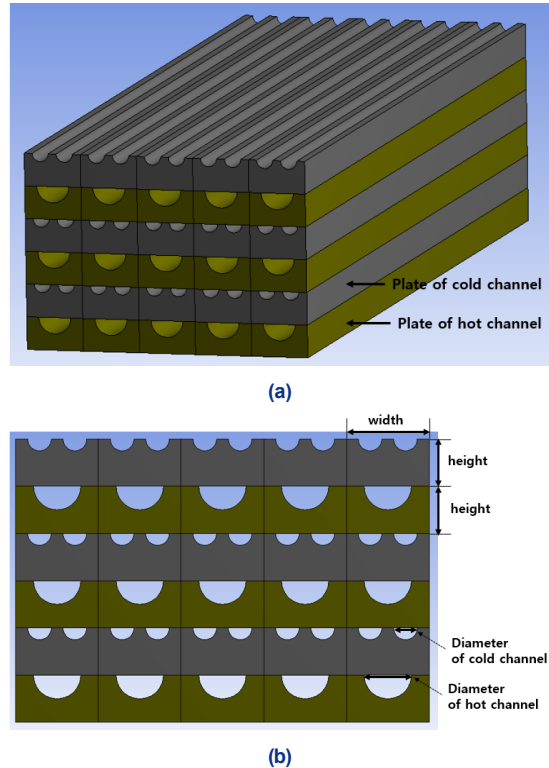


Fig. 1. Configuration of the printed circuit heat exchanger for hydrogen supply : (a) Isometric view of PCHE, (b) Cross section of multi-channels

등을 분석하고 PCHE 열설계 가이드를 제공하였다.

## 2. 모델 및 이론

### 2.1 인쇄기판 열교환기

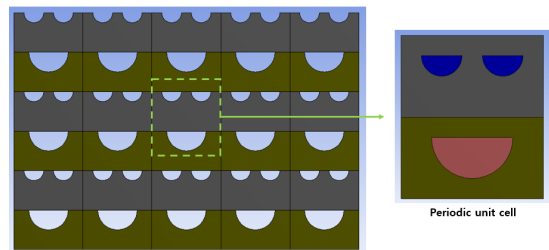
고효율 컴팩트한 PCHE 열교환기는 기존의 전열관형 열교환기에 비해 1/7 이하로 축소설계가 가능하여 부피를 4-6배 이상으로 절약할 수 있으며, 마이크로채널 크기로 열전달 효율을 극대화시킬 수 있다. 본 연구에서 고압액체수소를 공급하기 위한 PCHE의 구조는 Fig. 1과 같으며 액체수소가 흐르는 저온채널, 글리콜 워터(glycol water)가 공급되는 고온채널, 인쇄기판 판형구조물로 구성된다. 주요 형상치수는 Table 1과 같으며, 열원채널크기는 결빙문제로 저온채널의 2배 크기로 설정하였다. 극저온의 고압액체수소와 상온의 글리콜 워터 간의 열교환 설계를 통하여 수소의 출구온도를 원하는 온도로 설정할 수 있지만, 고온채널 내부에서 글리콜 워터의 온도가 국부적으로 어는점 이하로 떨어져 결빙되는 문제가 발생할 수 있다. 이와 같은 결빙은 채널 내부 표면에서 발생하기 시작하면 점차 성장하여 결국은 채널을 막아버리게 되어 극저온 열교환기 성능을 극심하게 악화시키는 요인이 된다. 고온채널로 유입되는 글리콜 워터는 에틸렌 글리콜(ethylene glycol)의 부피비율 함유량이 60%까지 증가할수록 그 어는점(freezing point)은 영하 53°C (220.15 K)으로 감소하는 특징이 있다<sup>11)</sup>. 따라서, 고압액체수소 공급용 PCHE는 채널 내 결빙이 발생하는 것을 방지하는 방빙(anti-icing)을 잘 고려하여 설계되어야 된다.

**Table 1.** The geometrical parameters and values of printed circuit heat exchanger

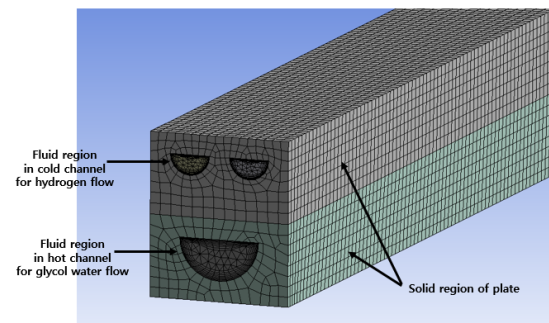
Geometrical parameters	Values (mm)
Plate width	3.5
Plate height	2.0
Diameter of cold channel	1.0
Diameter of hot channel	2.0

### 2.2 모델링 및 지배방정식

고압액체수소를 공급하기 위한 PCHE는 저온채널과 고온채널에 각각 액체수소와 글리콜 워터를 공급하여 채널 간의 열교환을 통하여 원하는 수소 온도까지 승온시키는 역할을 하며, 이와 함께 PCHE 내 국부적으로 어는점 이하에서 결빙이 발생되지 않도록 방빙(anti-icing) 설계를 고려하여야 한다. 이와 같은 고압액체수소 공급용 PCHE의 열설계를 위하여 상용 CFD 해석프로그램인 ANSYS (Canonsburg, PA, USA)의 Fluent<sup>12)</sup>를 이용하여 전산해석모델을 구성하였다. PCHE의 기본적인 구조는 다수의 고온채널과 저온채널 플레이트들을 교대로 적층한 멀티채널 형태로 Fig. 2와 같으며, 좌우 및 상하로 주기적으로 반복되는 단위 영역(periodic unit cell)을 Fig. 2의 점선부분으로 정의하고 전산 모델링하였다. Fig. 3은 고온채널과 저온채널의 유체영역과 플레이트 고체영역을 격자 모델링한 그림이며, 총 격자수는 격자테스



**Fig. 2.** Schematics for periodic modeling of printed circuit heat exchanger



**Fig. 3.** Numerical model of printed circuit heat exchanger for hydrogen supply

트를 통하여 245,635으로 결정하였다. 액체수소와 글리콜 워터의 물성치인 밀도, 점성계수, 열전도도, 비열 등은 온도가 20 K에서 400 K의 범위에서 NIST (Gaithersburg, MD, USA)의 refprop이 제공하는 값들로부터 온도함수식으로 정의되었고, 전산해석 프로그램인 Fluent (USA)에서 사용자정의함수(user defined function, UDF)에 각 온도함수식을 입력하여 적용하였다.

이와 같은 고압액체수소 공급용 PCHE의 전산 열유동해석을 위한 지배방정식은 다음과 같은 정상상태의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식으로 구성된다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) \tag{2}$$

$$\nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{3}$$

여기서  $\rho$ 와  $v$ 는 밀도와 속도이고,  $P$ 와  $\tau$ 는 압력과 전단응력을 의미한다.  $h$ 와  $k$ 는 엔탈피와 열전도도이고,  $T$ 는 온도를 나타낸다.

### 2.3 전산해석조건

고압액체수소 공급용 PCHE 열교환기 열설계를

**Table 2.** The simulation conditions for heat transfer analysis of PCHE

Contents	Values
Inlet temperature of liquid hydrogen (K)	60 <sup>a</sup> , 70, 80
Outlet temperature of liquid hydrogen (K)	243.2 <sup>a</sup>
Inlet pressure of liquid hydrogen (MPa)	90 <sup>a</sup>
Inlet velocity of liquid hydrogen (m/s)	0.03, 0.06 <sup>a</sup> , 0.1
Inlet temperature of glycol water (K)	333.15 <sup>a</sup> , 353.15
Length of channel (mm)	50 <sup>a</sup>
Flow configuration	Co-flow <sup>a</sup> , Counter-flow

<sup>a</sup>Indicates standard conditions.

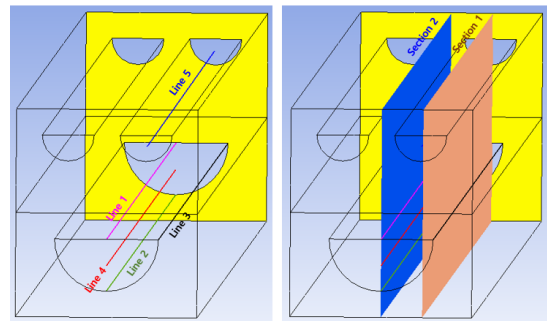
위하여 Table 2와 같은 운전조건에서 전산 열유동 시뮬레이션을 수행하였다. 액체수소는 90 MPa의 높은 압력에서 60 K의 온도로 PCHE로 유입되어 출구온도가 243.2 K이 되도록 글리콜 워터와 열교환을 하게 된다. 이 출구온도는 안전하고 신속하게 적정량의 수소연료를 공급하기 위해 규정된 수소 연료 공급 프로토콜인 SAE J2601<sup>13)</sup>에 의해 설정되었다. 유동흐름은 평행류(co-flow)와 대향류(counter-flow)를 고려하여 액체수소와 글리콜 워터의 유동방향이 평행한 경우와 반대인 경우의 효과를 살펴보았다.

전산해석모델의 상하 및 좌우면은 주기적 경계조건(periodic boundary condition)을 적용하여 고체영역의 상하 및 좌우면끼리 연결된 것으로 설정되었다. 액체수소의 입구조건은 Table 2의 유속과 온도로 정의되었으며, 글리콜 워터의 유속은 수소의 출구온도를 만족하도록 반복계산을 통하여 설정하였다. 압력 및 속도장 커플링 해석방법으로 coupled 기법을 적용하였고, 압력과 운동량 등을 2차로 공간이산화하였다.

## 3. 전산해석결과 및 고찰

### 3.1 액체수소 유속 효과

액체수소 공급용 PCHE 열교환기의 운전조건은 Table 2와 같으며 기준조건(standard conditions)에서 액체수소 유속이 PCHE 내 열전달에 따른 온도분포에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 4는 PCHE 내 방



**Fig. 4.** Data lines and sections in numerical model of PCHE for CFD simulation results

빙특성을 분석하기 위해 정의한 데이터라인과 길이 방향 단면들을 나타낸 그림이다. 데이터라인은 결빙이 발생할 가능한 높은 고온채널의 내부표면 모서리 부분(line 1, 2, 3)과 함께 각 채널 내 유동 중심부(line 4, 5)로 정의되었고, 길이방향 단면은 고온 및 저온채널 내 채널길이방향의 온도분포를 확인하기 위한 단면(section 1, 2)으로 설정되었다.

Figs. 5, 6은 액체수소 유속에 따른 채널의 길이방향 단면과 주요 데이터라인들에서 온도분포 결과를 그림과 그래프로 나타낸 것이다. 액체수소 유속의 0.03, 0.06, 0.1 m/s에서 PCHE 열교환기의 단위 채널당 열량은 대략 4.7, 9.7, 16.3 W 수준이고, 본 PCHE 열교환기에서는 열성능보다는 고온채널 내에서 결빙을 방지하는 열설계가 더 중요하게 요구된다.

우선 Fig. 5는 액체수소가 60 K의 온도도 유입되어 글리콜 워터와 열교환을 이루며 출구온도인 243.2 K으로 수렴하는 경향을 채널 길이방향 단면 상 온도

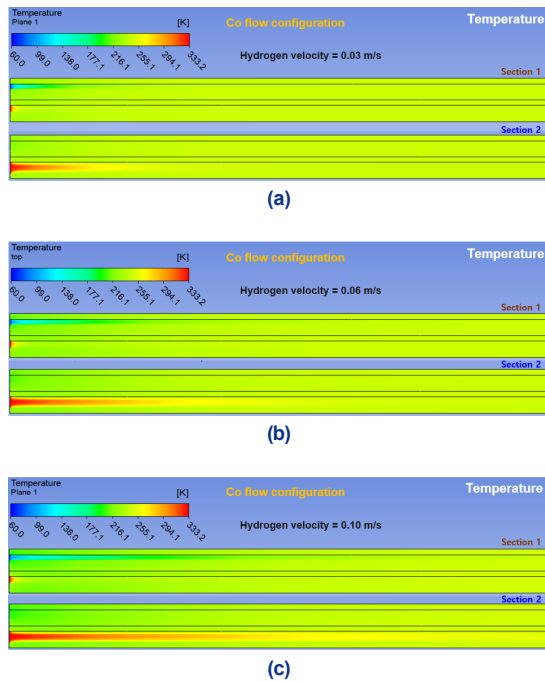


Fig. 5. Temperature distributions at section 1 and 2 due to hydrogen velocity in PCHE: (a) hydrogen velocity of 0.03 m/s, (b) hydrogen velocity of 0.06 m/s, and (c) hydrogen velocity of 0.10 m/s

분포 그림으로 나타낸 것이며, 출구부에서는 고온 및 저온채널과 인쇄기관 관형구조물이 열평형에 도달하

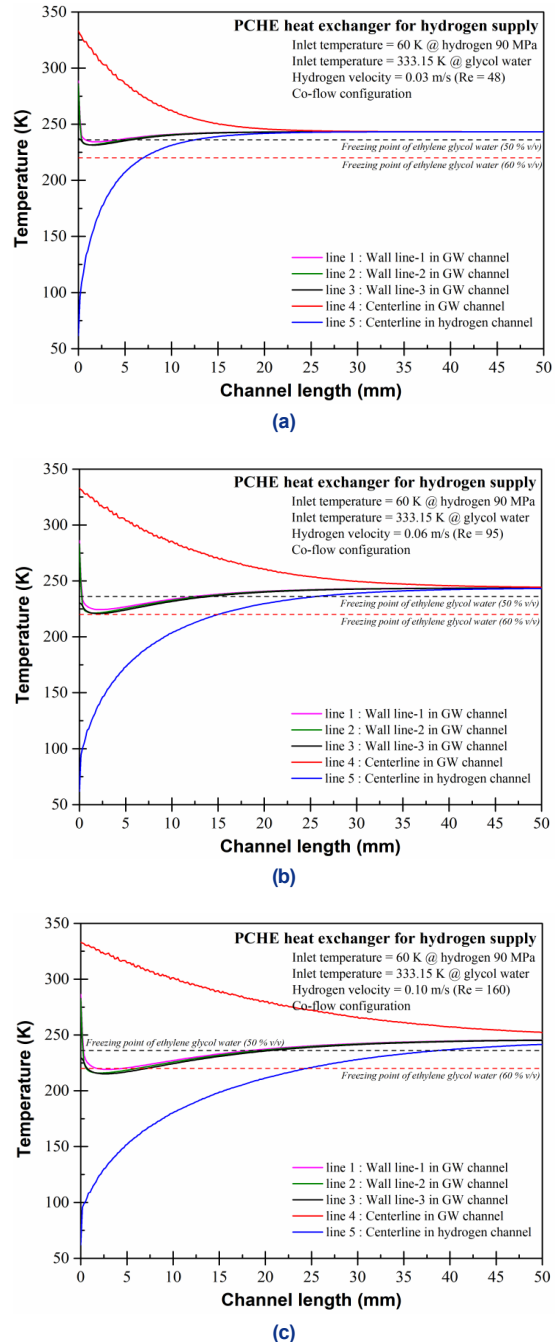


Fig. 6. Temperature profile results on 5 data lines due to hydrogen velocity in PCHE: (a) hydrogen velocity of 0.03 m/s, (b) hydrogen velocity of 0.06 m/s, and (c) hydrogen velocity of 0.10 m/s

여 온도가 모두 같아지는 것을 보여준다. 유속이 0.03 m/s에서 0.1 m/s로 상승할수록 열평형 도달하는 거리가 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 이를 보다 정밀하게 분석하기 위하여 Fig. 6과 같이 채널 내 주요 데이터라인들에서 온도분포들을 그래프로 비교하여 도시하였다. 고온채널의 내부표면 모서리 부분(line 1, 2, 3)의 온도는 극저온의 액체수소와 고온의 글리콜 워터의 온도 사이에서 결정되고, 유속이 빨라질수록 이 모서리 부분의 최저온도가 글리콜 워터의 어는점(freezing point of ethylene glycol water) 이하로 떨어지며 결빙이 발생하는 가능성이 높아지는 경향을 보여준다. 에틸렌 글리콜(ethylene glycol)의 부피비율 함유량이 50%와 60%에서 어는점은 영하 37°C (236.15 K)와 영하 53°C (220.15 K)이며 Fig. 6에 점선으로 함께 나타내었으며, 유속이 0.03 m/s와 0.06 m/s인 경우에는 최저온도가 에틸렌 글리콜 부피비율이 60%인 어는점보다 높아 결빙을 방지할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 유속이 0.1 m/s인 경우에는 최저온도가 60%의 에틸렌 글리콜 부피비율의 어는점 이하로 떨어져 결빙이 발생하므로 부적합 운전조건으로 판단되고, 또한 채널 길이방향으로 열평형에 도달하지 못하여 출구단면에서 온도편차가 존재할 수 있는 문제도 예상된다. 세 가지 액체수소 유속의 0.03, 0.06, 0.1 m/s에 대응하는 글리콜 워터 유속은 7.3, 15, 27 mm/s이고, 이에 대한 PCHE의 고온채널 및 저온채널에서 채널길이방향의 압력분포는 Fig. 7과 같다. 저온채널 내 압력차 이는 약 2-8 Pa 수준이지만, 고온채널에서는 액체수소보다 약 50배인 글리콜 워터의 점성계수로 인하여 압력 차이는 280-740 Pa 정도임을 보여준다.

### 3.2 PCHE 입구온도 효과

수소액화공정을 통하여 액체수소탱크에 약 25 K 상태로 저장되어 있는 액체수소는 고압펌프를 통하여 90 MPa까지 가압되어 고압액체수소로 PCHE에 공급되지만 펌프의 구조와 효율에 따라서 그 온도가 60 K에서 80 K까지 다소 변동될 수 있다. 본 절에서

는 이와 같이 변화 가능한 액체수소 입구온도가 PCHE 내 온도분포에 미치는 영향을 분석하기 위한 전산 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 Fig. 8와 같이 각 데이터라인의 온도분포 그래프로 정리하였다. 액체수소의 기준유속인 0.06 m/s에서 입구온도를 60 K의 기준온도에서 10-20 K이 증가된 70 K과 80 K으로 설정하였고, 추가로 글리콜 워터의 입구온도도 20 K이 상승된 353.15 K에서 시뮬레이션하였다. Fig. 8은 액체수소와 글리콜 워터의 입구온도 상승에 따른 채널 내 데이터라인에서 온도분포 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 8(a), (b)는 액체수소의 입구온도가 70 K과 80 K 일 때의 온도분포 결과이며 최저온도의 변화는 거의 없는 것으로 확인되었다. Fig. 8(c)는 액체수소

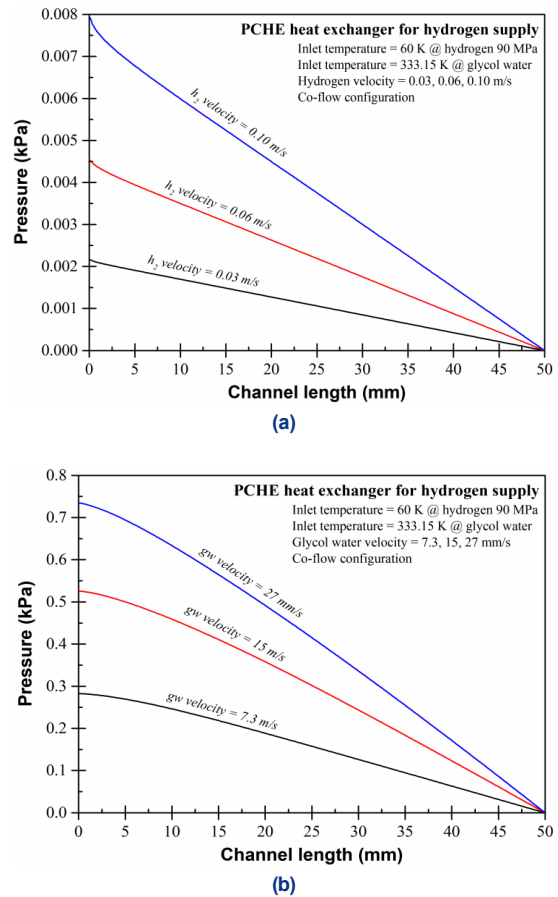
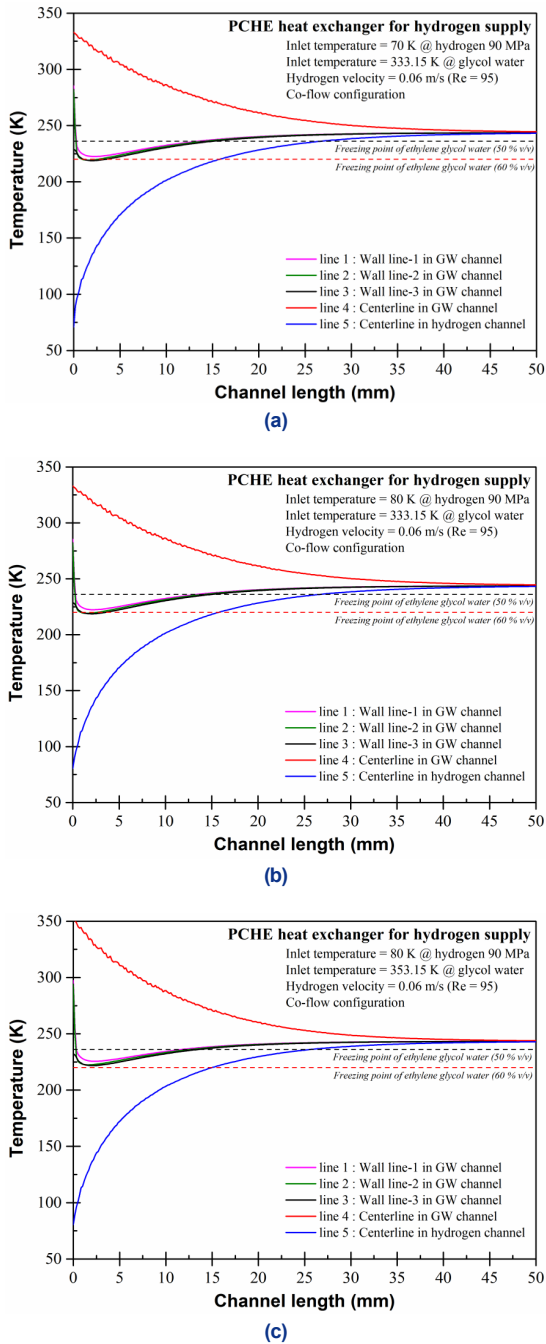


Fig. 7. Pressure distributions along each channel length in PCHE : (a) hydrogen channel and (b) glycol water channel

의 입구온도가 80 K이고 글리콜 워터의 입구온도는 353.15 K 일 때의 온도분포 그래프이고 최저온도가

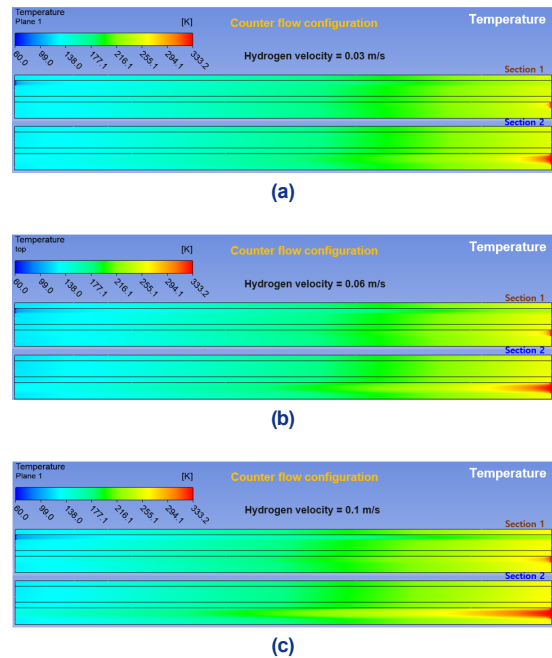


**Fig. 8.** The effect of inlet temperature of hydrogen on temperature distributions in PCHE: (a) inlet temperature of 70 K, (b) inlet temperature of 80 K, and (c) inlet temperature of 80 K and inlet temperature of 353.15 K in glycol water channel

기준조건에서의 결과값보다 아주 미미하게 개선되는 것을 확인하였다. 입구온도의 상승과 함께 채널 내 최저온도도 오를 것으로 예상하였지만, 극저온 조건에서는 입구온도의 소폭 상승은 방빙 설계에 크게 효과적이지 않음을 확인하였다. 다만, 고온채널 내 최저온도가 글리콜 워터의 어는점보다 높도록 액체 수소의 입구온도를 60 K 이상으로 설정해야 한다.

### 3.3 유동흐름 효과

열교환기의 유동흐름에는 평행류(co flow)와 대향류(counter flow)가 있으며 두 유체의 흐르는 방향이 같은 경우와 반대인 경우로 구분되고, 일반적으로 대향류 열교환기가 평행류보다 열전달 효율이 더 우수하다. 고압액체수소 공급용 PCHE에서도 열전달 성능이 우수한 대향류가 결빙을 방지하는 열설계에 유리한지 분석하기 위하여 CFD 시뮬레이션을 수행하였고, 대향류 PCHE 내 온도분포 결과들을 단면그림



**Fig. 9.** Temperature distributions at section 1 and 2 due to hydrogen velocity in PCHE: (a) hydrogen velocity of 0.03 m/s, (b) hydrogen velocity of 0.06 m/s, and (c) hydrogen velocity of 0.10 m/s

과 그래프로 정리하여 Figs. 9, 10으로 나타내었다.

Fig. 9는 대향류에서 액체수소 유속변화에 따른

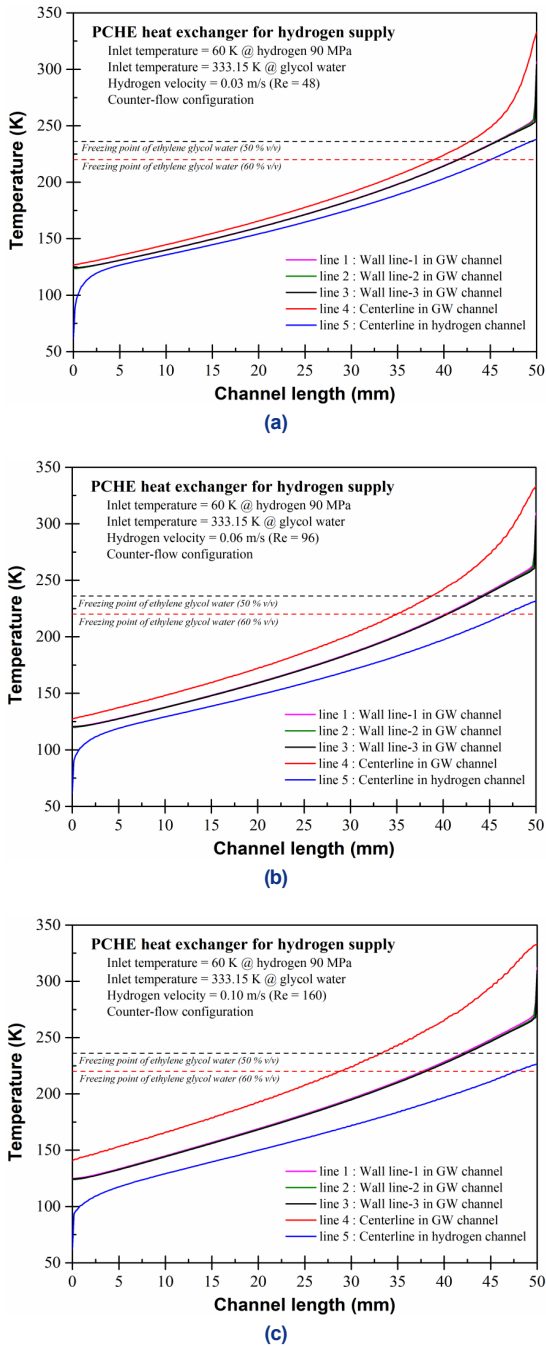


Fig. 10. The effect of counter flow configuration on temperature distributions in PCHE: (a) hydrogen velocity of 0.03 m/s, (b) hydrogen velocity of 0.06 m/s, and (c) hydrogen velocity of 0.10 m/s

온도분포 결과를 채널길이 방향의 단면그림으로 나타낸 것이다. 극저온 액체수소의 유동흐름 방향은 좌측에서 우측방향이고, 글리콜 워터는 우측에서 좌측 방향이다. 대향류 유동의 특성으로 글리콜 워터의 입구 및 출구측의 온도차이가 평행류보다 더 컸으며, 유속이 증가함에 따라 그 차이는 점차 줄어드는 경향을 보여준다. Fig. 10은 채널 내 데이터라인에서 온도분포를 그래프로 비교 도시한 것이며, 전형적인 대향류 열교환기의 온도분포 경향과 유사하다. 하지만 액체수소의 유속변화에도 글리콜 워터 출구측에서 온도가 125-140 K 수준으로 매우 낮게 형성되어 글리콜 워터의 어는점인 236.15 K (부피비율 50%)와 220.15 K (부피비율 60%)보다 80-100 K 정도로 크게 낮음을 확인할 수 있고, 글리콜 워터의 출구측의 온도가 가장 낮아서 출구측 채널부터 결빙이 쉽게 발생하고 빠르게 성장할 것으로 예상된다. 이와 같이 대향류에서 발생하는 극심한 온도편차는 극복하기 어려운 문제이므로 고압액체수소 공급용 PCHE의 대향류 흐름은 채널 내 결빙을 방지하는 방빙 설계에 매우 부적합한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 극저온 고압액체수소를 공급하는 PCHE 열교환기의 고온채널에서 발생가능한 결빙을 방지하는 열설계를 위하여 전산 해석모델을 기반으로 3차원 복합열전달 해석을 수행하고 액체수소 유속 효과, 입구온도 효과, 유동흐름 효과를 분석하였다.

1) 액체수소 유속에 따른 PCHE 열교환기 채널 내 온도분포를 정리하여 글리콜 워터의 어는점과 비교하여 결빙가능성에 대해 분석하였다. 고온채널에서 최저온도는 채널 내부표면의 모서리 부분에서 나타나며, 유속이 0.06 m/s까지는 에틸렌 글리콜의 부피비율 함유량이 60%이면 어는점이 채널 내 최저온도보다 낮아져 결빙을 방지할 수 있다. 그리고, 유속이 0.03 m/s에서 0.1 m/s로 상승할수록 열평형 도달하는 거리가 늘어나는 경향을 보여주며 채널길이가 50 mm에서는 0.06 m/s가 적절한 속도로 판단된다. 고온채



널에서 압력차이가 저온채널보다 약 50배 수준임을 확인하였다.

2) 액체수소 입구온도의 변화에 따른 PCHE 내 온도분포 결과곡선을 비교 정리하고 분석하였다. 액체수소와 글리콜 워터의 입구온도를 20 K 상승시켜도 고온채널 내 최저온도의 변화는 거의 발생하지 않거나 아주 미미하게 개선되었다. 극저온 조건에서는 입구온도의 소폭 상승은 방빙 설계에 효과적이지 않으며, 다만 고온채널 내 최저온도가 글리콜 워터의 어는점보다 높도록 입구온도는 60 K 이상이어야 한다.

3) 액체수소 공급용 PCHE 열교환기의 대향류 유동흐름이 채널 내 결빙을 방지하는 방빙 설계에 미치는 영향을 분석하였다. 대향류 흐름에서 글리콜 워터의 입구 및 출구측의 온도차이가 평행류보다 더 커지면서 출구측에서 온도가 어는점보다 80-100 K 정도 크게 낮아짐을 확인하였다. 글리콜 워터의 출구측의 채널부터 결빙이 쉽게 생성되고 급속히 성장할 것으로 예상되므로, 고압액체수소 공급용 PCHE에서 대향류보다 평행류 흐름이 고온채널 내 결빙을 방지하는 방빙 설계에 유리하고 적합한 것으로 판단된다.

앞으로도 극저온 고압액체수소 공급용 PCHE 열교환기 내 결빙을 방지하는 방빙 설계를 개선할 수 있는 추가적인 연구가 지속적으로 필요하다.

## 후 기

본 연구는 2021년 한국기계연구원 기본사업인 ‘액체수소 공급시스템 핵심 기자재 개발(NK231B)’의 지원으로 연구한 결과물입니다.

## References

1. Q. Wilhelmsen, D. Berstad, A. Aasen, and P. Neksa, "Reducing the exergy destruction in the cryogenic heat exchangers of hydro liquefaction processes", *Int. J. 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 pulot platn with a small capacity", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 41-48, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.41>.
3. J. W. Leachman, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, and E.W. Lemmon, "Fundamental equations of state for parahydrogen, normal hydrogen, and orthohydrogen", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 38, No. 721, 2009, doi: <https://doi.org/10.1063/1.3160306>.
4. P. J. Donaubaer, U. Cardella, L. Decker, and H. Klein, "Kinetics and heat exchanger design for catalytic ortho-para hydrogen conversion during liquefaction", *Chem. Eng. Technol*, Vol. 42, No. 3 2019, pp. 669-679, doi: <https://doi.org/10.1002/ceat.201800345>.
5. B. Sun, D. Wadnerkar, R. P. Utikar, M. Tade, N. Kavanagh, S. Faka, G. M. Evans, and V. K. Pareek, "Modeling of cryogenic liquefied natural gas ambient air vaporizers", *Ind. Eng. Chem. Res*, Vol. 57, No. 28, 2018, pp. 9281-9291, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b01226>.
6. M. Ichard, Q. R. Hansen, P. Middha, and D. Willoughby, "CFD computations of liquid hydrogen releases", *Int. J. hydrogen energy*, Vol 37, No. 22, 2012, pp. 17380-17389, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.145>.
7. D. C. Lee, H. Afrianto, H. S. Chung, and H. M. Jeong, "Numerical analysis of LNG vaporizer heat transfer characteristic in LNG fuel ship", *The Korean Society of Marine Eng*, Vol. 37, No. 1, 2013, pp. 22-28, doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.1.22>.
8. F. Huerta and V. Vesovic, "CFD modelling of the isobaric evaporation of cryogenic liquids in storage tanks", *Int. J. heat and mass transfer*, Vol. 176, 2021, pp. 121419, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121419>.
9. S. Beak, 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>.
10. D. Popov, K. Filkin, B. Stankov, G. Alvarez, M. Y. Idrissi, A. Damas, J. Evans, and T. Brown, "Cryogenic heat exchangers for process cooling and renewable energy storage: a review", *App. Thermal Eng*, Vol. 153, 2019, pp. 275-290, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.106>.
11. "Standard test method for freezing point of aqueous engine coolants", *ASTM D1177-17*, 2017, Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/D1177.htm>.
12. "ANSYS fluent theory guide", ANSYS, 2013.
13. "Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles J2601\_202005", *SAE MOBILUS*, 2020, Retrieved from [https://www.sae.org/standards/content/j2601\\_202005/](https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/).