

LNG 운반선 PCHE 열교환기 내 상변화에 대한 수치해석

류원석* · 서명진* · 유종근** · 정재호*†

Numerical Analysis of Phase-Change in PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger) for LNG Carrier

Won-Seok Ryoo*, Myeong-Jin Seo*, Jong-Keun Yu**, Jae-Ho Jeong*†

Key Words : PCHE(인쇄 회로 열교환기); CFD(전산유체해석); LNG(액화 천연가스); ICE Accretion(결빙)

ABSTRACT

In this study, we studied the ice accretion that occurs in the next-generation heat exchanger, the PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger) channel. PCHE heat exchanger is called the next-generation heat exchanger, and it has the advantage of being able to reduce the heat exchange efficiency by less than 1/10 compared to the existing heat transfer tube type method along with high heat exchange efficiency of more than 90%. Three CFD(Computational Fluid Dynamics) analysis were conducted prior to modeling and analysing PCHE heat exchanger through Ansys Fluent and Fensap-Ice. Through the established interpretation methodology, simulated heat exchange and phase changes caused by temperature differences between fluids through Hot Water and LNG(Liquified Natural Gas) flowing into the PCHE channel. First, setting the temperature of Hot Water to 10°C to 80°C, and identified the heat exchange according to each temperature through CFD simulation. Next setting the temperature of Hot Water to 10°C, 50°C and 90°C and identified the ice accretion in the channel according to each temperature through CFD simulation.

1. 서 론

최근 전 산업 분야에서 탄소배출저감 기술 개발 및 적용이 빠르게 진행되고 있다. 새로운 연료의 발굴 및 상용화 뿐만 아니라, 기존 화석연료의 효율적인 사용, 그리고 사용된 에너지의 회수/재사용에 대한 기술의 개발 필요성이 빠르게 증가하고 있다. 기존의 탄소배출저감 기술이 시스템 단위의 구성과 실현 가능성(Feasibility) 검증 수준이었다면, 최근에는 이를 현실화할 수 있는 핵심 기자재 발굴 및 개발이 주를 이루고 있다.

탄소 배출을 최소화하기 위한 시스템 개발에서 열관리(Thermal Management) 기술의 고도화는 필수적이며 다양한 열교환기의 적용 또한 필수적이다.(1) 초임계 CO₂ 시스템, CCS(Carbon Capture System), LNG 기화/냉열 회수 시스템 등에서 열교환기가 중요하다. 기상, 액상의 상변화를

통해 서로 다른 작동 유체의 열에너지를 교환하도록 고안된 장치이다. 운전 온도와 압력의 영역과 작동 유체의 점도, 부식성 등이 고려되어 열교환기를 설치하게 된다.(2,3)

PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger, 인쇄회로 기판형 열교환기)는 차세대 열교환기로 불리며, 90% 이상의 높은 열 교환 효율과 더불어 기존 전열 관형 방식에 비해 1/10 이하로 축소 제작이 가능한 장점이 있다. 스테인리스, 초합금 등 고급 재질을 사용하여 초고온(900°C 이하), 초고압(1500 bar 이하)의 가혹한 운전 환경에서도 적용이 가능하기 때문에 여러 탄소 저감 시스템에 적용을 검토하고 있다.(4~7)

최근 여러 연구를 통하여 PCHE의 설계 및 분석을 위해 개발된 코드를 사용하여 채널의 길이 방향 전도 및 변형이 열 성능에 어떤 영향을 끼치는지 분석을 하기도 하며, 2차원 시뮬레이션을 통해 세로 전도를 추정하는 연구 등이 진행되고

* 가천대학교 기계공학과(Gachon University Mechanical Engineering)

** 삼성중공업 조선해양연구소 친환경연구센터(Samsung Heavy Industries Senior Eco-Marine Research Engineer Green Energy Technology Center)

† 교신저자, E-mail : jaeho.jeong@gachon.ac.kr

있다. 현재까지 대부분의 선행 연구는 상온 부근에서 PCHE의 열적 성능에 초점을 맞추었으며, PCHE 내부의 2상 흐름의 열전달을 다룬 연구는 거의 없었다. PCHE의 유망한 대규모 응용 분야 중 하나인 LNG 공정을 고려할 때 극저온 및 2상 유동 조건에서 PCHE 열교환기의 열 성능을 아는 것은 매우 중요하다.

PCHE 열교환기는 마이크로 채널(Micro channel)을 활용한 높은 열전달 성능이 장점이며, 기화기 또는 액화기로 활용할 경우 동일 채널 내에서 비등 또는 응축이 일어나게 됨. 이러한 상변화 현상은 유로 내부에 HTC(Heat Transfer Coefficient)의 불균일을 초래하기에 이러한 현상을 정량적으로 유로 설계의 주요 인자로 반영해야만 신뢰성 높은 열교환기를 설계할 수 있기에 PCHE 유로 내에서 발생하는 비등 및 응축 현상을 정량화하는 연구를 진행하였다.

2. 연구 방법

2.1 마이크로 채널 내에서의 냉매 기화 현상 해석 검증

본 연구는 마이크로 채널 내에 흐르는 유체의 기화 현상을 통해 버블이 발생하는 현상을 모의한 실험이 기존에 존재하였고, 이 실험을 바탕으로 기화 현상 시 발생하는 버블을 Ansys Fluent를 통해 직접 모의하여 실험의 해석을 검증하였다.

CFD 해석에 이용된 2차원 마이크로 채널 개략도를 Fig. 1을 통해 확인할 수 있다. 좌측 Inflow를 시작으로 R-134a 냉매가 유입된 후, 하단부의 Heated Wall의 열을 받으며 Outflow까지 흐름이 진행된다.

CFD 해석의 유동 조건은 앞선 실험을 바탕으로 Laminar로 설정하였다. 작동 유체 R-134a 냉매, 접촉각(Contact angle) 6.5°, 표면 장력(Surface tension) 8.0691 mN/m로 설정하였다. 파이프의 길이 609.6 mm, 유체가 흐르는 관의 직경의 길이 1 mm, Heated Wall의 높이 0.5 mm로 설정하였다.

Heated Wall의 Heat Flux값은 실험과 동일하게 8,021 W/m²로 설정하였다. 또한 Heated Wall의 재질도 실험과 동일하게 Copper로 설정하였다. 냉매 기화 현상 해석 검증 시 물레이션에 사용된 경계조건은 Table 1에 표시하였다.

시뮬레이션의 진행 과정에서 상변화 모의를 위해 Fluent 내 Evaporation-Condensation 설정에서 Lee Model을 적용했다. 또한 The Implicit Scheme을 사용하였는데, 이는 정상 상태에서 시간 정확성을 높여주며 결과값이 초기 유동 조건의 영향을 받지 않고 고유한 유입 경계가 있는 경우에 사용된다. 식 (1)에서 U 와 v 는 각각 작동 유체의 액상과 기상을 뜻하며, V 는 volume of cell, ρ 는 밀도를 뜻한다. 식 (2)는 이에 관련된 VOF Model에 대한 식이다.⁽⁸⁾ 식 (2)에서 $\alpha_{q,f}^n$ 는 face value of the d^h volume fraction을 뜻하며 U_f 는 volume flux through the face, p 와 q 는 각각 첫 번째 상과 두 번째 상을 뜻한다.⁽⁹⁾

마이크로 채널 하단부에서 발생하는 Heat Flux의 영향으로 R-134a 냉매의 상변화가 발생하고, Lee Model에 의해 상변화 중 버블이 형성됨을 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다.^(10,11) Fig. 2의 위쪽 그림은 기존 실험을 통한 상변화 결과이며, 아래쪽 그림은 본 연구의 CFD 해석 결과이다. 상변화 중 발생하는 버블의 형태가 기존 실험에서 해석된 내용과 유사함을 보이며 기존 해석에 대한 검증이 되었다.

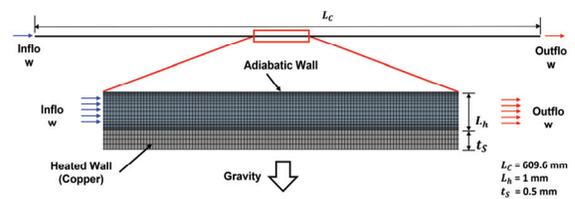


Fig. 1 Schematic diagram of a micro channel

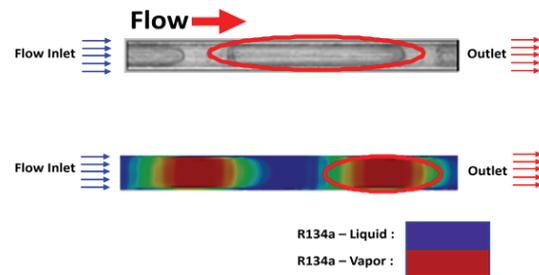


Fig. 2 R-134a CFD result

Table 1 Setting of CFD Boundary Conditions and Reference Properties about R-134a⁽¹¹⁾

Parameter [unit]	Value	Value	Value
Material	R-134a (Liquid)	R-134a (Vapor)	Copper (Solid)
Density [kg/m ³]	1201	33.75	8978
C _p [J/kg·K]	1430	1041	381
Thermal Conductivity [W/m·K]	0.08	0.01	387.6
Viscosity [kg/m·s]	2.01×10 ⁻⁴	1.16×10 ⁻⁵	-
Molecular weight [kg/kmol]	102.03	102.03	-
Standard State Enthalpy [J/kg·mol]	1.47×10 ⁻¹⁹	4.40×10 ⁻¹⁹	-
Reference Temperature [K]	298.15	298.15	-

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl} \quad (1)$$

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \Sigma_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = [S_{aq} + \Sigma_{p=1}^n (m_{pq} - \dot{m}_{qp})] \quad (2)$$

2.2 마이크로 채널 내에서의 LNG 기화 현상 모의

앞서 2.1에서 진행한 해석을 기반으로 유입 유체를 R-134a 냉매가 아닌 LNG의 주성분인 -163°C의 액화 메탄(Methane)으로 설정 후 실험을 진행하였다.

작동 유체를 액화 메탄으로 설정함에 따라, 접촉각(Contact angle)을 105°, 표면 장력(Surface tension)을 0.013 mN/m로 설정하였다. Heated Wall의 Heat Flux값은 임의값(10⁴ W/m²)으로 설정하였으며, 시뮬레이션의 진행 과정에서 앞서 해석과 동일하게 Lee Model을 적용시켰으며 이에 대해 사용된 경계조건은 Table 2에 표시하였다. 또한 파이프의 조건은 기존과 동일하게 설정하였다.

앞선 실험과 마찬가지로 마이크로 채널 하단부에서 발생하는 Heat Flux의 영향으로 액화 메탄의 상변화가 발생하고, Lee Model에 의해 상변화 중 버블이 형성됨을 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다.

2.3 파이프 내에서의 결빙 현상 모의

파이프를 통해 흐르는 유체가 파이프 외부의 냉열로 인하여 발생하는 응축(결빙) 현상을 모의하기 위해 Fensap-Ice 프로그램을 사용하였다.

파이프로 들어가는 유체는 Relative humidity 100%로 설정한 증기이며 Fensap 프로그램 내 3가지 단계를 통하여 기체→액체, 액체→고체 순으로 상변화 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 4는 Reynolds Number에 따라 달라지는 파이프 내에서의 결빙 현상을 모의하기 위해 설정한 3차원 파이프 모델이다. 파이프의 길이를 15m, 직경을 1.5m로 설정 후, 파이프의 외부 유동장은 가로 25m, 세로 11.5m, 높이 11.5

m로 설정하였다.

파이프에 유체를 주입함과 동시에 외부 유동장으로부터 받는 냉열을 통해 발생하는 결빙 현상을 확인하였다. 유체의 Reynolds Number의 값은 각각 4×10⁴, 8×10⁴, 16×10⁴, 32×10⁴으로 설정하였으며 파이프의 직경은 동일하기에 이에 따라 유속을 점점 증가시키며 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 5를 통해 Fensap-Ice를 통한 결과를 보여주며 파이프 내부에서의 결빙 현상을 확인할 수 있다. 총 4가지의 시뮬레이션을 통해 Reynolds Number 값이 커질수록(유속이 빨라질수록) 파이프 내부에서의 결빙은 파이프의 뒤쪽에서 일어나는 현상이 확인할 수 있다.

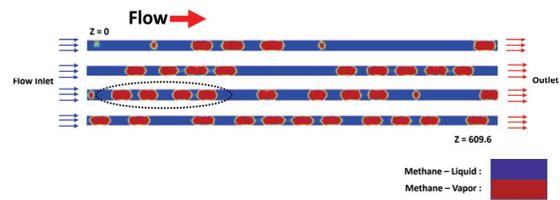


Fig. 3 LNG vaporization simulation and CFD results

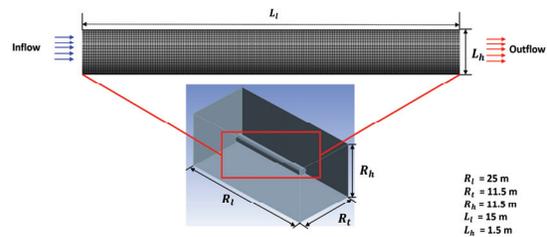


Fig. 4 Fensap Simulation Analysis Pipe Schematic

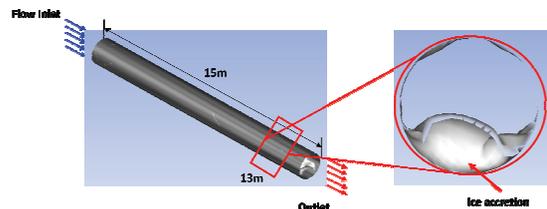


Fig. 5 Fensap-Ice simulation results (Reynolds Number: 32x10⁴)

Table 2 Setting of CFD Boundary Conditions and Reference Properties about LNG (Methane)⁽¹²⁾

Parameter [unit]	Value	Value	Value
Material	Methane (Liquid)	Methane (Vapor)	Copper (Solid)
Density [kg/m ³]	416.07	0.67	8978
C _p [J/kg · K]	Piecewise-polynomial	Piecewise-polynomial	381
Thermal Conductivity [W/m·K]	0.18	0.03	387.6
Viscosity [kg/m · s]	1.12×10 ⁻⁴	1.09×10 ⁻⁵	-
Molecular weight [kg/kmol]	16.04	16.04	-
Standard State Enthalpy [J/kg · mol]	-0.39	-7.49×10 ⁷	-
Reference Temperature [K]	110	298.15	-

Table 3 각 Case에 따른 Fensap-Ice 시뮬레이션 결과

Value [unit]	case 1	case 2	case 3	case 4
Reynolds Number	4×10^4	8×10^4	16×10^4	32×10^4
V(m/s)	0.58	1.17	2.34	4.67
X_{start} (Freezing point/Dia)	2.7	4.5	7.8	8.7

Reynolds Number 32×10^4 를 포함한 4가지의 시뮬레이션을 진행한 결과값은 Table 3를 통해 확인할 수 있다. Table 3의 X_{start} (Freezing point /Diameter)값을 통해 Reynolds Number의 값이 커질수록(유속이 빨라질수록) 결빙의 생성이 파이프의 후단에서 시작됨을 확인할 수 있으며 또한 중력의 영향으로 인해 결빙이 파이프 내부의 하단 부분에서부터 진행되는 것도 확인할 수 있다.^(13,14)

3. 연구 결과

3.1 PCHE Fluent 시뮬레이션

3.1.1 수립된 방법론들을 통한 PCHE 열교환기 시뮬레이션 방법론

앞서 수립된 방법론을 통하여 Fluent를 통해 모의한 Heat Flux를 Fensap에 적용하였고, 이후 Fensap을 통해 모의된 Heat Flux를 다시 Fluent에 적용하여 Coupling을 진행하였다.

이때, Heat Flux는 계속해서 값이 낮아지며 0에 수렴하는 모습을 보이며 이를 통해 Coupling이 아닌 One

Way 방법을 채택하였다. 동시 3상 변화에 대한 시뮬레이션 진행이 불가능하기 때문에 앞서 진행한 Fluent를 통한 기화 현상 방법론을 통하여 단상으로 PCHE를 적용하여 우선적으로 Heat Flux값과 온도 분포부터 확인하였다. 이후 Fensap-Ice 프로그램을 통해 Fluent에서 모의된 Heat Flux 값을 이용하여 PCHE 열교환기 채널 내에서 발생하는 결빙 현상의 위치와 정도를 확인하였다.

PCHE 열교환기에서 발생하는 두 유체 사이의 열교환 및 열교환으로 인해 발생하는 기화 현상을 모의하기 위해 Ansys Fluent 프로그램을 사용하였다. 시뮬레이션을 진행하기 위한 3차원 개략도를 Fig. 6에 나타냈다.

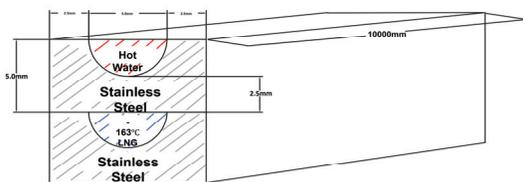


Fig. 6 Schematic diagram of PCHE heat exchanger

CFD 해석의 유동 조건은 Transition SST 모델을 사용하였으며, PCHE 열교환기 내 유체가 들어가는 유로의 직경은 5 mm, 유로 사이의 거리는 2.5 mm, PCHE 열교환기의 높이는 10 mm, 길이 10^4 mm로 설정하였다. 작동 유체인 물의 유속은 1 m/s 설정하였다. 액화 메탄의 경우 유체가 흘러가는 것이 아닌 파이프 관 안에 -163°C 로 가득 차 있는 상태로 설정 후 시뮬레이션을 진행하였다.

3.1.2 PCHE Fluent 시뮬레이션 결과

PCHE 열교환기의 작동 유체의 온도 조건을 10°C , 20°C , 30°C , 40°C , 50°C , 60°C , 70°C , 80°C 로 총 8가지로 설정 후 PCHE 채널의 각 지점의 단면적에서 발생하는 온도 변화와 온도 분포 정도를 확인하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 Hot Water(50°C)이 채널에 진입 이후 -163°C 의 LNG(액화 메탄)와의 열교환이 발생하였으며, 이로 인하여 채널을 통과하는 Hot Water의 온도가 약 4.85×10^2 mm 이후 영하로 낮아진 후 일정 온도로 수렴하는 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 8을 통해 Hot Water의 온도가 50°C 일 때 PCHE 열교환기 전단에서의 Hot Water와 LNG의 열교환 성능을 확인할 수 있다. Water의 경우 PCHE 열교환기의 약 1×10^3 mm 지점까지 약 94°C 감소하여 -45°C 까지 낮아지며, 4.5×10^3 mm 이후 약 -116°C 로 유지되는 모습을 보이며 채널 후단에서는 약 14°C 상승하는 모습을 확인할 수 있다. 반면, LNG의 경우 PCHE 열교환기의 약 1×10^3 mm 지점까지 약 24°C 증가하여 -136°C 까지 높아지며, 4.5×10^3 mm 이후 약 -116°C 로 유지되는 모습을 보이며 채널 후단에서는 약 6°C 상승하는 모습을 확인할 수 있다.

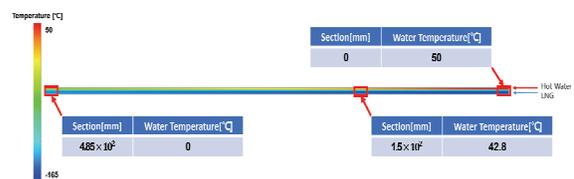


Fig. 7 Hot Water 50°C side temperature field

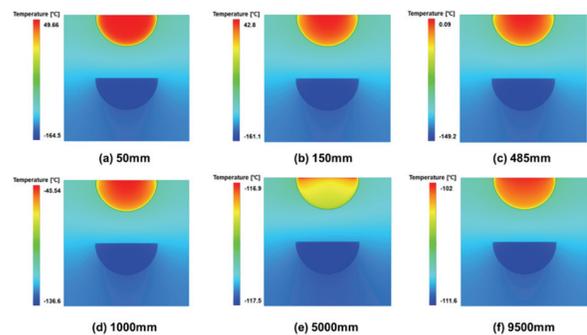


Fig. 8 Hot Water 50°C front temperature field

50°C의 Hot Water뿐만 아니라 다른 온도 조건의 Hot Water의 경우 또한 각각 일정한 온도까지 감소 후 유지되는 모습, 채널의 후단에서 온도가 약간 증가하는 모습 그리고 Heat Flux 값이 온도가 일정하게 유지되는 부분까지 감소 후 일정한 값으로 수렴되는 모습을 보이며 유사한 결과를 확인할 수 있다.

3.2 PCHE Fluent 연계 Fensap 시뮬레이션

PCHE 열교환기의 온도 조건을 10°C, 50°C, 90°C 총 3가지로 설정 후 PCHE 채널의 각 지점(최초 결빙의 생성 지점, 150 mm, 500 mm, 10³ mm, 5×10³ mm, 9.5×10³ mm)의 단면적에서 발생하는 결빙을 모의하였다. 이때, 앞서 Fluent 시뮬레이션을 통해 얻은 Heat Flux 값을 바탕으로 Fensap 시뮬레이션을 진행하였다.

앞서 Fluent에서 유추한 Heat Flux 값을 바탕으로 50°C Hot Water의 결빙 현상에 대해 모의하였다. Fig. 9를 통해 각 위치별 채널에서 발생하는 결빙의 정도를 확인할 수 있으며, Fig. 10의 정면 단면을 통해 채널 내 결빙이 어떤 형상으로 어느 정도 생기는지 확인할 수 있다. 정면 단면 그림을 통해 50 mm 위치일 때 채널 가장자리부터 결빙 생성을 확인할 수 있으며, 채널의 후단으로 갈수록 결빙의 정도가 심해지며 채널이 얼음으로 막히는 정도가 심해짐을 확인할 수 있다.

50°C의 Hot Water보다 온도가 낮은 10°C Hot Water의 경우 50mm보다 앞쪽인 약 40mm 위치일 때 채널 가장자리

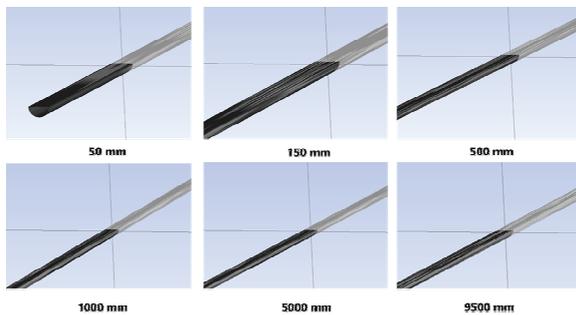


Fig. 9 Hot Water 50°C Ice accretion by location

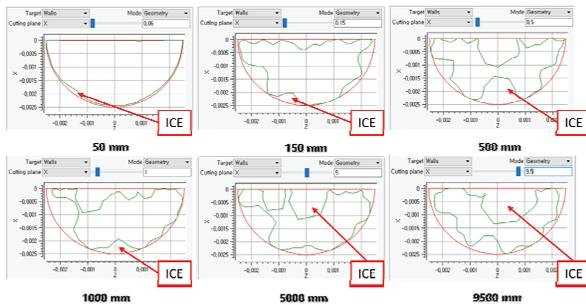


Fig. 10 Hot Water 50°C Ice accretion by location (Front)

부터 결빙의 생성이 시작되는 것을 확인할 수 있었으며, 90°C Hot Water의 경우 50mm보다 뒤쪽인 약 80mm 위치일 때 채널 가장자리부터 결빙의 생성이 시작되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Hot Water의 온도가 10°C, 50°C Water보다 높기 때문에 앞서 진행된 10°C, 50°C Water의 결과와는 다르게 채널의 후단으로 가도 결빙으로 인하여 채널이 막힘의 정도가 덜한 모습을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 LNG의 기화에 따른 관 내에서의 버블의 형성을 확인하였으며, 이를 통해 구축된 해석 방법론을 이용하였다. 최종적으로 PCHE 열교환기에 대한 열교환 해석을 진행하였으며 해석 결과는 다음과 같다.

- (1) 10~80°C의 Water 모두 채널 내에서 열교환이 발생함을 확인할 수 있으며, 이로 인해 채널 내에서 흐르는 Water의 온도가 일정하게 유지되는 모습을 볼 수 있다. (50°C Water의 경우 -113°C에서 유지) Heat Flux의 경우 Water의 유입 직후부터 열교환에 의해 온도가 일정하게 유지되는 모습을 확인할 수 있다.
- (2) 10°C, 50°C, 90°C의 Water를 통한 결빙 현상의 경우 Fluent를 통해 얻은 Heat Flux 값을 바탕으로 모의하였다. 이때 10°C의 경우 채널 시작 후 40mm 위치에서, 50°C의 경우 50mm에서, 90°C의 경우 80mm 위치에서부터 결빙이 시작됨을 확인할 수 있다. 시작된 결빙은 채널의 후단으로 갈수록 더욱 심해지며 10°C, 50°C, 90°C Water 순으로 결빙의 정도가 심함을 확인할 수 있다.

본 연구를 통해 구축된 여러 상변화에 관한 해석 방법론을 통하여 추후 PCHE 열교환기의 세밀한 분석과 추가적인 연구 해석 수행이 가능할 것으로 기대가 된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 연구한 과제입니다.(No. 2021202080023B)(No. 2022400000140)

본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (P0020612, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)

References

- (1) Fankai Meng, Lingen Chen, Yuanli Feng, Bing Xiong, 2017, "Thermoelectric generator for industrial gas phase waste heat recovery," Energy, Vol. 135, pp. 83~90.

- (2) Chul min Hwang, Sung kyun Oh, Dong hoi Kim, Truls Gundersen, Young sub Lim, 2022, "Energy, economic and environmental analysis of a BOG re-liquefaction process for an LNG carrier," *Energy reports*, Vol. 8, pp. 2351~2362.
- (3) Liang Yin, Yonglin Ju, 2020, "Design and analysis of a process for directly Re-liquefying BOG using subcooled LNG for LNG carrier," *energy*, Vol. 199.
- (4) In Hun Kim, Xiaodong Sun, 2014, "CFD study and PCHE design for secondary heat exchangers with FLiNaK-Helium for SmAHTR," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 270, pp. 325~333.
- (5) Byung Ha Park, In jin Sah, Eung seon Kim, 2018, "Thermal Performance of a Printed Circuit Heat Exchanger considering Longitudinal Conduction and Channel Deformation," *Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 14, pp. 8~14.
- (6) Do hoon Kwon, Lingxue Jin, Woo Seok Jung, Sang kwon Jeong, 2018, "Experimental investigation of heat transfer coefficient of mini-channel PCHE (printed circuit heat exchanger)," Vol. 92, pp. 41~49.
- (7) Jeong Heon Shin, Seok Ho Yoon, 2022, "Thermal and hydraulic performance of a large scale printed circuit heat exchanger (PCHE)," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 35.
- (8) ANSYS Inc., ANSYS Fluent Theory Guide, 14.7.5, 2022.
- (9) ANSUYS Inc., ANSYS Fluent Theory Guide, 14.3.4, 2022.
- (10) L.E. Klebanoff, J.W. Pratt, C.B. LaFleur, 2017, "Comparison of the Safety-related Physical and Combustion Properties of Liquid Hydrogen and Liquid Natural Gas in the Context of the SF-BREEZE High-Speed Fuel-Cell Ferry," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, pp. 757~774.
- (11) Il hwan Yeo, Seunghyun Lee, 2018, "2D computational investigation into transport phenomena of subcooled and saturated flow boiling in large length to diameter ratio micro-channel heat sinks," *International Journal Heat and Mass Transfer*, Vol. 183.
- (12) Jiguo Tang, Hongli Liu, Min Dua, Wei Yanga, Licheng Sun, 2021, "A machine-learning based phase change model for simulation of bubble condensation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 178.
- (13) Chankyu Son, Taeseong Kim, 2020, "Development of an icing simulation code for rotating wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 203.
- (14) Ningli Chen, Xian Yi, Qiang Wang, Deling Chai, 2022 "An analysis of heat transfer inside the ice layer and solid wall during ice accretion," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 137.