

축방향 열전도와 유로 변형을 고려한 인쇄기판형 열교환기 열적 성능

박병하[†]·사인진·김응선

Thermal Performance of a Printed Circuit Heat Exchanger considering Longitudinal Conduction and Channel Deformation

Byung Ha Park[†], Injin Sah and Eung-seon Kim

(Received 24 May 2018, Revised 15 June 2018, Accepted 18 June 2018)

ABSTRACT

Printed circuit heat exchangers (PCHEs) are widely used with an increasing demand for industrial applications. PCHEs are capable of operating at high temperatures and pressure. We consider a PCHE as a candidate intermediate heat exchanger type for a high temperature gas-cooled reactor (HTGR). For conventional application using stainless steels, design and manufacturing of PCHEs are well established. For applications to HTGR, knowledge of longitudinal conduction and deformation of channel is required to estimate design margin. This paper analyzes the effects of longitudinal conduction and deformation of channel on thermal performance using a code internally developed for design and analysis of PCHEs. The code has a capability of two dimensional simulations. Longitudinal conduction is estimated using the code. In HTGR operating condition, about ten percent of design margin is required to compensate thermal performance. The cross-sectional images of PCHE channels are obtained using an optical microscope. The images are processed with computer image process technique. We quantify the deformation of channel with dimensional parameters. It is found that the deformation has negative effect on structural integrity. The deformation enhances thermal performance when the shape of channel is straight in laminar flow regime. It reduces thermal performance in cases of a zigzag channel and turbulent flow regime.

Key Words : PCHE (인쇄기판형 열교환기), HTGR (고온 가스 냉각원자로), Longitudinal conduction (축방향 열전도), Channel deformation (유로 변형), Thermal performance (열적 성능)

기호설명

μ = viscosity
 λ = longitudinal heat conduction parameter
 $\Delta\vartheta$ = terminal temperature difference
 dh/dx = differentiation of enthalpy
 h = heat transfer coefficient
 k = thermal conductivity
 \dot{m} = mass flow rate

c_p = isobaric heat capacity
 A = cross-sectional area
 A_{tot} = total heat transfer area
 D_h = hydraulic diameter
 F = correction factor by shape
 F_λ = correction factor by longitudinal conduction
 L = length
 P = perimeter
 T = temperature
 ΔT_{lm} = logarithmic mean temperature difference (LMTD)
 U = overall heat transfer coefficient

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : bhpark@kaeri.re.kr

TEL : (052)866-6265 FAX : (042)868-8767

Nu = Nusselt number
 Re = Reynolds number
 Pr = Prandtl number

Subscript

x = x-direction
 y = y-direction
 f = fluid
 w = wall
 h = hot side
 c = cold side
 i = node number

1. 서 론

인쇄기판형 열교환기(Printed Circuit Heat Exchanger, PCHE)는 일반적으로 금속 판에 에칭을 이용해 유로를 새겨 제작한다. 유로가 인쇄기판처럼 새겨진 유로 판을 층층이 모아 확산접합하여 제작한다. 인쇄기판형 열교환기의 장점은 면적 밀도가 높아 기존에 널리 사용되는 셸앤튜브형 열교환기보다 소형화에 유리하고 규칙적으로 배열되는 각 유로가 압력 경계로 기존 판형 열교환기보다 고온 고압의 조건에서 운전할 수 있는 점이다. 이러한 장점을 바탕으로 최근 산업계에서 인쇄기판형 열교환기의 수요가 증가하고 있다.

한국원자력연구원에서는 인쇄기판형 열교환기를 고온 가스 냉각 원자로(High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR)의 중간열교환기의 후보 형태로서 연구 개발을 수행하였다. 인쇄기판형 열교환기를 중간열교환기로 사용함으로써 자본비를 절약하고 높은 운전 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

인쇄기판형 열교환기는 각 산업 분야에서 요구 운전 요건에 적합한 최적화된 형상으로 주문 제작되고 있다. 열교환기의 설계나 분석을 위해 기존에는 대수 평균 온도차 (Logarithmic Mean Temperature Difference, LMTD) 방법을 보편적으로 활용하였으나 이 방법은 최근 수요가 증가하는 초임계 유체, 천연가스 등에 적용하기에는 유로 내에서 유체의 물성의 변화가 커서 어려움이 있다.

기존 연구에서는 초임계 이산화탄소 계통의 인쇄기판형 열교환기의 적용을 위해 실험적, 해석적

으로 연구를 수행하였다. 예냉각기로서 적용을 위해 1차원 인쇄기판형 열교환기 열 설계 코드를 작성하고 실험적으로 검증하였다.⁽¹⁾

그런데 인쇄기판형 열교환기를 고온 고압 환경에 적용하면 상대적으로 열교환기의 다공성이 낮아지게 되고, 이로 인해 유체의 열이 열교환기의 금속벽을 따라 우회 전도되는 현상 즉 축방향 열전도(Longitudinal wall conduction)가 뚜렷하게 나타나 전체 열교환기의 성능에 영향을 줄 수 있다. 이러한 영향을 정확히 평가하기 위해서는 2차원 인쇄기판형 열교환기 설계 코드가 필요하다.⁽²⁾

본 연구에서는 인쇄기판형 열교환기 설계 및 분석을 위해 2차원 인쇄기판형 열교환기 설계 코드를 개발하고 이를 이용하여 축방향 열전도가 열적 성능에 미치는 정도를 평가하였다.

한편, 인쇄기판형 열교환기에서 열 설계는 일반적으로 유로의 형상이 반원 형상이라 가정하고 열 설계를 수행한다. 하지만, 유로 판의 에칭과 확산접합 과정에서 유로의 형상이 이상적인 반원이 아니고 변형될 수 있는 여지가 있다. 유로의 변형 정도와 이와 관련한 열적 성능 평가에 관한 연구는 수행된 바가 드물다. 따라서, 본 연구에서 실제 제작된 인쇄기판형 열교환기의 유로 단면을 관찰하고 유로의 변형 정도와 열적 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

본 연구의 목적을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 축방향 열전도를 표현할 수 있는 2차원 인쇄기판형 열교환기 설계 코드의 개발
- (2) 축방향 열전도의 열적 성능에 미치는 영향 평가
- (3) 실제 제작된 유로의 변형 정도와 열적 성능 평가

2. 인쇄기판형 열교환기 설계 및 평가 방법

2.1 인쇄기판형 열교환기 코어 설계 코드

인쇄기판형 열교환기 코어 설계 코드는 유한차분법을 이용하여 열교환기 코어 내부에서 열전달을 모사할 수 있도록 개발하였다. 주요한 특징은 대향류 열교환기의 단상 및 이상 열전달의 계산 능력이다. Python 언어⁽³⁾를 이용하여 이를 구현하였다.

Fig. 1은 설계 코드에서 계산하는 영역의 모델링을 나타낸다. 유체 측은 1차원으로 모사되어 유동

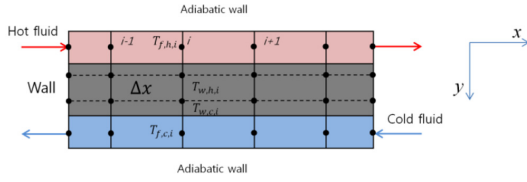


Fig. 1 Modeling of a counter-current heat exchanger

및 열전달을 해석하고 고체 측은 2차원으로 모사되어 유체 간의 열전달 뿐만 아니라 열교환기 내부 축방향 열전도를 표현할 수 있도록 하였다. 정상 상태 계산을 수행함으로써 열교환기 코어의 열 설계를 수행할 수 있고 열교환기 유로 내부 각 부분에서 온도와 압력 등의 열적 성능과 관련된 변수를 확인할 수 있다.

초임계 유체와 이상 유동의 물성을 정확히 반영하기 위해 인체기판형 열교환기 코어 설계 코드와 NIST (National Institute of Standards and Technology)의 REFPROP 라이브러리를 동적으로 연결하여 매 반복 계산에서 각 노드의 유체 물성 값을 정확히 반영한다. 사용된 라이브러리는 NIST REFPROP Standard Reference Database 23, Version 9.0⁽⁴⁾이다.

유체에서의 열전달은 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{m}(dh/dx) = hA(T_{f,h,i} - T_{w,h,i}) \quad (1)$$

고체에서 열전달은 다음과 같이 계산한다.

$$k_w A_x (\partial T_w^2 / \partial x^2) dx + k_w A_y (dT_w / dy) + hA(T_{f,h,i} - T_{w,h,i}) = 0 \quad (2)$$

설계 코드가 수학적으로 잘 계산되는지 확인하기 위해 간단한 헬륨 열교환기를 모사하여 계산한 후,

Table 1 Operating condition of a heat exchanger for the code verification

Fluid	Helium
Temperature	200°C (In) / 400°C (Out)
Pressure	2 MPa
Channel mass flow rate	3.5e-5 kg/s
Channel length	400 mm
Channel diameter	1 mm
Channel horizontal pitch	1.01mm
Channel vertical pitch	0.51mm

대수 평균 온도차 방법으로 열용량을 계산하였을 때 일치하는지 확인하였다. 모사 및 비교 계산에 사용된 조건은 다음 Table 1과 같다. 축방향 열전도와 같은 효과를 최소화 하기 위해 유로의 피치를 작은 값으로 선택하였다.

2.2 축방향 열전도 평가

축방향 열전도를 나타내는 변수는 다음과 같다.

$$\lambda = \left(\frac{k_w - A_w}{L} \right) / \dot{m} c_p \quad (3)$$

축방향 열전도에 의한 효과를 평가를 위해 물성 변화에 따른 효과들을 배제하기 위해 헬륨을 기초로 하는 가상의 유체를 선정하였다. 가상의 유체는 열전도도, 열용량, 점성도, 밀도 등의 물성을 상수로 가진다. Nusselt 수를 층류일 때 반원형 유로에 적용할 수 있는 4.089로 고정하여 열전달 계수를 상수로 계산하였다.⁽⁵⁾

축방향 열전도 변수에서 분자와 분모의 열용량은 상수로 가정하였으므로, 분모의 질량 유량을 바꾸어 축방향 열전도 변수를 바꾸었다.

축방향 열전도 외의 다른 효과들은 상수 물성을 취함으로써 배제되었으므로, 축방향 열전도를 보정 계수로서 표현한다면 대수 평균 온도차 방법을 이용하여 열교환기의 열용량을 구할 수 있다. 대수 평균 온도차는 다음과 같이 정의된다.⁽⁵⁾

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta \vartheta_1 - \Delta \vartheta_2}{\ln(\vartheta_1) / (\Delta \vartheta_2)} \quad (4)$$

열교환기의 전체 열적 성능은 축방향 열전도 보정 계수를 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{Q} = F_\lambda (UA_{tot}) \Delta T_{lm} \quad (5)$$

축방향 열전도에 의한 보정 계수를 사용함으로써 실제 열적 성능이 축방향 열전도에 얼마나 영향을 받는지 알 수 있다.

고온 고압 환경에서 사용할 열교환기는 소재는 Alloy 617로 선택하고, 열교환기 구조 설계 코드인 PCHE-MD를 참조하여 대략적인 설계 값을 얻었다.⁽⁶⁾ Table 2의 설계 변수를 코어 설계 코드에 입력하여 축방향 열전도를 평가하였다.

Table 2 Tentative structural design

	Value	Unit
Channel diameter	1.5	mm
Plate thickness	2.5	mm
Channel pitch	3.8	mm
Channel length	600	mm
Design temperature	920	°C
Allowable design pressure	10	MPa

2.3 유로 변형 평가

Alloy 617 소재 인쇄기판형 열교환기는 현재 개발 단계의 기술로 유로 변형 평가에 적합하지 않아, 제작 및 성능이 안정된 SS316소재의 인쇄기판형 열교환기를 활용하였다. 해당 열교환기는 10층의 유로판을 확산접합하여 제작하였다. Fig. 2는 접합 후 단면 관찰을 위해 절단하여 고정한 시편의 사진이다.



Fig. 2 Mounted specimens

광학현미경을 이용하여 인쇄기판형 유로의 단면 영상을 얻었다. 유로 단면 영상은 형상 변수를 얻기 위해 컴퓨터 영상 처리 기법을 이용하였다. 여기에 사용된 것은 Python 기반으로 SciPy, NumPy와 OpenCV의 오픈 소스 라이브러리를 사용하였다.^(7,8,9) SciPy는 영상 필터링에 사용하였고 OpenCV는 영상에서 유로 단면적과 유로 둘레를 얻기 위해 사용하였다. 영상 처리를 통해 화질을 개선하고 영상의 이진화를 통해 윤곽선을 쉽게 찾을 수 있도록 하였다. Fig. 3은 영상 처리 전후 영상을 보여준다. OpenCV 라이브러리가 찾아낸 윤곽을 빨간색 선으로 표시하였다. 그림에서 영상 처리 편의상 기준 크기를 제거하였다.

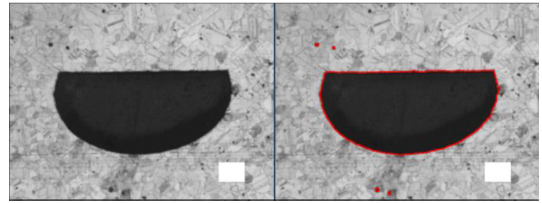


Fig. 3 Raw image and computer processed image

3. 결과

3.1 설계 코드 확인 결과

설계 코드 계산을 확인하기 위해 간단한 헬름 열교환기의 설계를 수행한 후 얻은 결과를 대수 평균 온도차 방법으로 다시 계산하여 비교하였다. 대수 평균 온도차 방법에서 사용된 물성은 입출구의 산술 평균을 이용하였다. 헬름은 해당 구간에서 물성 변화가 적어 계산 결과의 정확성을 확인하기에 적합하다. 이러한 계산을 비교함으로써 확인 방법으로 축방향 열전도에 의한 효과를 정확하게 계산하는지 검증은 할 수 없으나, 작성된 코드가 수학적으로 정확한 값을 계산하는지 확인을 할 수 있다.

정해진 유로 길이 내에서 노드 숫자를 변경시켜 가며 대수 평균 온도차 방법에서 얻은 결과와 비교하였다. Fig. 4는 비교 결과를 나타낸 그래프이다. 유한차분법으로 얻은 열교환기의 열용량이 항상 대수 평균 온도차에서 얻은 열용량보다 크다.

그래프에서 전체 400mm 유로를 계산할 때 단위 노드 크기가 5mm 수준이면 대수 평균 온도차 방법으로 얻은 결과와 차이가 2% 정도로 수용할 수 있는 수준이라고 판단한다.

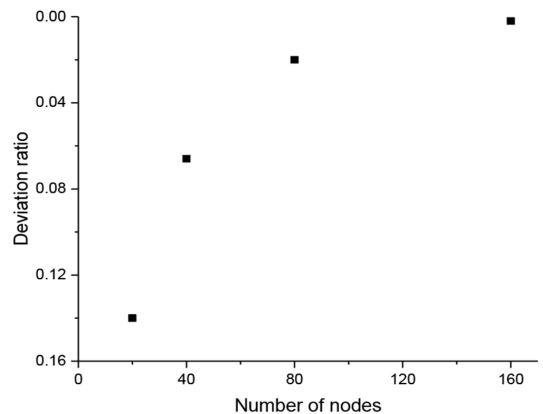


Fig. 4 Node sensitivity in terms of the deviation between FDM and LMTD method

3.2 축방향 열전도 평가 결과

유로 내 유량을 조절하여 축방향 열전도 변수를 변화시켜서 축방향 열전도 보정 계수의 변화 값을 얻었다.

Fig. 5와 Table 3은 열교환기의 축방향 열전도 변수에 따른 보정 계수의 변화를 나타낸다. 열전달 계수가 고정되었음을 고려하면 유로 내 유체의 유량이 작을수록 축방향 열전도 효과가 크게 나타난다. 인쇄기관형 열교환기 유로의 크기가 작아 압력 강하가 크게 나타난다. 따라서, 고온 가스 냉각원자로 헬륨 환경에서는 층류 영역에서 운전하는 것을 고려하고 있다. 계산 결과에서 Reynolds 수가 461 일때 보정 계수는 0.888이다. 즉, 대수 평균 온도차 방법 등으로 인쇄기관형 열교환기를 설계한다면 축방향 열전도를 위해 11.2%의 추가적인 설계 여유도를 확보해야 한다는 것과 같다.

Table 3 Effect of longitudinal heat conduction

		Re
0.000086	0.998	16135
0.000863	0.965	1614
0.001511	0.940	922
0.003022	0.888	461
0.008633	0.748	161
0.015109	0.646	92
0.030218	0.508	46
0.060435	0.372	23
0.086333	0.307	16

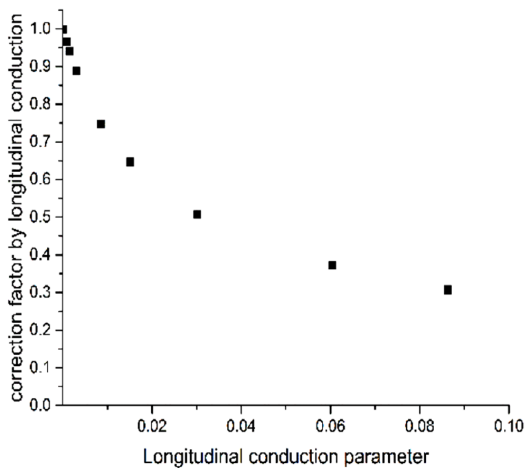


Fig. 5 Correction factor vs. Longitudinal conduction parameter

3.3 유로 변형 평가 결과

유로 변형 평가 결과를 다음 표에 정리하였다. 총 15개의 유로를 분석하였고 각 층당 최대 2개의 다른 위치에서 얻은 유로 사진을 분석하였다. Table 4에 측정 결과를 요약하여 표시하였다.

Table 4 Summary of dimensional parameters of PCHE channel

Case	Cross-sectional area (mm ²)	Perimeter (mm)	Hydraulic diameter (mm)	Diameter (mm)	Depth (mm)
1	1.22	4.94	0.99	1.69	0.83
2	1.23	4.85	1.02	1.70	0.82
3	1.34	6.26	0.85	1.74	0.84
4	1.30	4.87	1.07	1.72	0.86
5	1.25	5.05	0.99	1.71	0.82
6	1.33	4.92	1.09	1.72	0.89
7	1.33	5.10	1.05	1.74	0.85
8	1.12	4.64	0.97	1.64	0.79
9	1.33	4.95	1.07	1.77	0.86
10	1.37	5.07	1.08	1.75	0.88
11	1.25	4.86	1.03	1.69	0.82
12	1.26	4.87	1.04	1.72	0.84
13	1.36	5.34	1.02	1.73	0.87
14	1.33	5.29	1.00	1.73	0.87
15	1.25	4.84	1.03	1.70	0.82
Average	1.29	5.06	1.02	1.72	0.85
σ	0.07	0.38	0.06	0.03	0.03

실제 제작된 인쇄기관형 열교환기의 유로는 이상적인 반원형이 아니다. 따라서 유로의 직경과 깊이는 다음 Fig. 6과 같이 정의하였다.

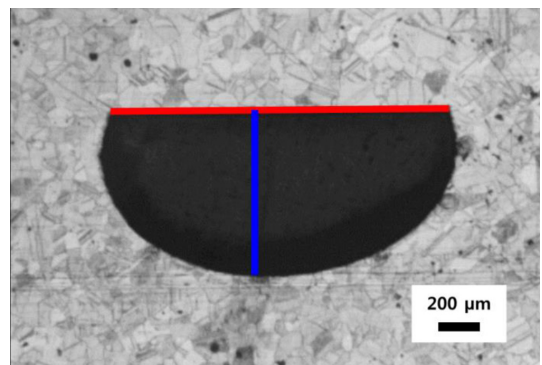


Fig. 6 Red line shows the diameter and blue line shows the depth

실제 직경의 설계 값은 1.5mm였지만 제작 후 측정된 유로의 직경은 평균 1.72 mm였다. 이는 에칭과 확산접합 과정에서 발생한 차이라고 판단한다. 이를 바탕으로 설계 변수와 실제 형상 변수와의 비교를 Table 5에 나타냈다.

Table 5 Comparison of dimensional parameter between semicircle and real channel

	Ideal semicircle	Real channel
Diameter (mm)	1.5	1.72
Cross-sectional area (mm ²)	0.88	1.29
Perimeter (mm)	3.86	5.06
Hydraulic diameter (mm)	0.92	1.02
P/ Dh	4.21	4.91
P/A	4.36	3.91
Dh /A	1.04	0.80

열전달은 전도도(conductance)로 평가하였다. 전도도는 열전달 계수와 열전달 면적의 곱으로 나타낸다. 유로 내부 운전 영역을 대표적으로 셋으로 나누어 분석한다. 첫째, 인쇄기판형 열교환기 내부 유로가 직선형이고 층류일 때 Nusselt 수는 상수이다. Nusselt 수가 상수일 때 열전달 계수는 다음과 같이 수력 직경에 반비례한다.

$$D_h = 4A/P \tag{6}$$

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k} \tag{7}$$

$$h \sim \frac{1}{D_h} \tag{8}$$

전체 열 전달 면적은 유로의 길이가 같다면 유로 둘레에 비례한다.

$$A_{tot} \sim P \tag{9}$$

따라서 전도도는 다음과 같이 나타낸다.

$$hA_{tot} \sim \frac{P}{D_h} \tag{10}$$

Table 5를 참조하면 실제 제작된 유로가 설계에서 고려된 이상적인 유로보다 열적 성능이 높다.

열적 성능은 증가했지만, 구조 설계의 관점에서 유로 직경이 커짐으로써 설계 여유도가 줄어들 수 있음을 고려해야한다.

둘째, 지그재그 유로 형상에서 Nusselt 수는 Reynolds 수에 비례한다.⁽¹⁰⁾

$$Nu = 4.089 + 0.00365 \cdot Re^{1.0} Pr^{0.58} \tag{11}$$

$$0 < Re < 2500, 0.66 < Pr < 13.41$$

$$Nu \sim Re \tag{12}$$

수식 7과 수식 12를 결합하여 다음 식을 얻었다.

$$h \sim \frac{Nu}{D_h} \sim \frac{Re}{D_h} \tag{13}$$

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{\dot{m} \cdot Dh}{A \cdot \mu} \tag{14}$$

각 유로 내 유량은 동일하다고 가정하여 다음 식을 얻었다.

$$Re \sim \frac{D_h}{A} \tag{15}$$

수식 13과 수식 15를 결합하여 열전달계수 관계를 얻었다.

$$h \sim \frac{1}{A} \tag{16}$$

전도도는 다음과 같이 얻었다.

$$hA_{tot} \sim \frac{P}{A} \tag{17}$$

유로 둘레와 유로 단면적의 비를 비교하면 직경 1.5mm인 설계상 이상적인 반원 유로가 실제 제작된 직경 1.72 mm의 유로보다 높다. 따라서 열적 성능은 설계보다 실제 제작품이 낮은 값을 가진다.

셋째, 유로 내부 유동이 난류 영역인 경우, Dittus-Boelter 상관식을 적용할 수 있다.⁽⁵⁾ 지그재그 유로와 유사하게 전도도를 구하면 다음과 같다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \tag{18}$$

$$hA_{tot} \sim \left(\frac{D_h}{A} \right)^{0.8} \left(\frac{P}{D_h} \right) \tag{19}$$

두 번째 경우와 마찬가지로 설계보다 실제 제품 열적 성능이 낮다. 이러한 경우, 설계 단계에서 여유도를 충분히 고려하지 않았다면 원하는 성능이 나오지 않을 것이 분명하다.

상관식을 이용하여 설계에서 이용한 이상적인 반원형 유로와 실제 제작된 유로의 열적 성능을 비교한 결과, 내부 유동이 층류인 직선 유로에서는 열적 성능이 설계보다 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 내부 유동이 층류인 지그재그 유로에서는 열적 성능이 감소하고 내부 유동이 난류인 경우 열적 성능이 감소하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

(1) 인쇄기판형 열교환기의 설계 및 평가를 위해 2차원 유한차분법을 이용하는 설계 코드를 제작하고 계산을 수학적으로 확인하였다.

(2) 고온 가스 냉각 원자로 운전 조건에서 기존의 널리 사용하는 대수 평균 온도차 방법으로 설계를 한다면 축방향 열전도 보정 계수를 고려하여 추가적인 열 설계 여유도가 필요하다.

(3) 본 연구에서 유로의 변형 정도를 확인한 결과 이상적인 반원이 아님을 확인하였다. 유로 형상 및 운전 영역에 따라 열적 성능이 변할 수 있음을 상관식을 이용하여 확인하였다.

(3-1) 내부 유동이 층류인 직선 유로에서는 열적 성능이 설계보다 증가하는 것을 확인하였다.

(3-2) 내부 유동이 층류인 지그재그 유로에서는 열적 성능이 감소하고 내부 유동이 난류인 경우 열적 성능이 감소하는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 원자력기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2017M2A8A1014758)

참고문헌

- (1) Baik, S., Kim, S. G. and Lee, J. I., 2017, "Study on CO₂ - Water Printed Circuit Heat Exchanger Performance Operating Under Various CO₂ Phases for S-CO₂ Power Cycle Application," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 1536-1546.
- (2) Park, B. H., Kim, C. S. and Kim, E., 2017, "Numerical Study on Longitudinal Heat Conduction in Printed Circuit Heat Exchange," *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Korean Nuclear Society, Gyeongju.
- (3) Python Software Foundation, 2018, Python, <https://www.python.org>
- (4) National Institute of Standards and Technology, 2018, REFPROP, <https://www.nist.gov/srd/refprop>
- (5) Hesselgreaves, J.E., Law, R. and Reay D. A., 2017, *Compact Heat Exchangers*, Second Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier, pp. 275-290.
- (6) Kim, Y. W., PCHE-MD, private communication
- (7) NumPy developers, 2018, NumPy, <http://www.numpy.org>
- (8) SciPy developers, 2018, SciPy, <https://www.scipy.org>
- (9) OpenCV team, 2018, OpenCV Library, <https://opencv.org>
- (10) Kim, I. H. and NO, H. C., 2013, "Thermal-hydraulic Physical Models for a Printed Circuit Heat Exchanger covering He, He-CO₂ Mixture, and Water Fluids Using Experimental Data and CFD," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 48, pp. 213-221.