

## 마이크로 채널 PCHE의 압력손실 특성에 관한 연구

김진혁<sup>†</sup>, 백승환, 정상권

한국과학기술원 기계공학과

### A Study on the Pressure Loss Characteristics of Micro-Channel PCHE

Jin-Hyuck Kim<sup>†</sup>, Seungwhan Baek, Sangkwon Jeong

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received May 25, 2010; revision received August 30, 2010)

**ABSTRACT:** A newly developed type PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger), which has a longitudinal corrugation flow channel, was fabricated using etching and diffusion bonding to evaluate its hydraulic performance. The pressure drop characteristics obtained from the experimental results are presented and the local friction factors associated with different hydraulic diameters and inclination angles are discussed. The results of a three-dimensional numerical simulation are presented, conducted using commercial CFD(Computational Fluid Dynamics) software at lower Reynolds number range. The numerical results were validated by experimental data obtained from helium gas experimental apparatus. The results of CFD prediction show fairly good agreement with the experimental data.

**Key words:** PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger 인쇄기판열교환기), Pressure loss(압력손실), Friction factor(마찰계수), CFD(전산유체해석)

#### 기 호 설 명

#### 그 리 스 문 자

$A$  : 유로 단면적 [ $m^2$ ]  
 $D_h$  : 수력직경 [m]  
 $f$  : 마찰계수  
 $G$  : 질량 유속 [ $kg/m^2s$ ]  
 $L_c$  : 특성길이 [m]  
 $\Delta P$  : 압력손실 [Pa]  
 $P_w$  : 접수길이 [m]  
 Re : Reynolds 수  
 $V$  : 속도 [m/s]

$\beta$  : 기울임 각(inclination angle)  
 $\nu$  : 동점성계수 [ $m^2/s$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]

#### 1. 서 론

저탄소 녹색성장을 위한 사회적인 노력과 함께 열유체 시스템의 고효율화에 대한 요구가 증가하고 있다. 이에 따라서 대부분의 열유체 시스템에서 중요한 역할을 차지하는 열교환기 성능의 고효율화가 필요하다. 열교환기의 효율을 높이기 위해서 열교환 면적을 크게 제작하면 되지만, 이로부터 시스템의 크기가 증가하게 된다. 따라서 열교환기의 소형화 및 고효율화를 함께 만족시킬 수 있는

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-350-3242; fax: +82-42-350-8207

E-mail address: jhkim05@kaist.ac.kr

고집적의 열교환기에 대한 요구가 지속되고 있다.

PCHE란 인쇄기판형 열교환기(printed circuit heat exchanger)를 나타내는 용어로서, 보통 1 mm 이하의 마이크로 채널과 2000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> 이하의 면적 집적도를 가지고 있어서 일반적인 판형 열교환기이나 평판-핀형 열교환기에 비해 소형화 및 고효율화가 가능한 열교환기를 의미한다.

이와 같이 PCHE는 다른 열교환기에 비해 매우 작은 채널 크기를 가지고 있기 때문에, 기존의 판형 열교환기와는 다른 제조 공정이 요구된다. 일반적인 PCHE의 단면 형상을 나타내는 Fig. 1에서 보인 것과 같이 PCHE는 마이크로 포토에칭(micro photo etching)과 확산접합(diffusion bonding) 기술을 사용하여 제작된다. 마이크로 포토에칭은 스테인리스와 같은 금속 판막에 유체가 통과하는 마이크로 채널을 정밀하게 가공하는 기술을 말한다. 또한 확산접합은 고체상태의 결합 과정으로 용융점 아래에서 금속판을 압착하여 표면간의 결정립 성장을 촉진하여 두 금속을 접합하는 기술이다. 이러한 확산접합을 사용하여 두 금속을 접합하면, 접촉 경계면이 모재와 완전히 같은 물리적, 기계적 성질을 갖게 된다.

이러한 마이크로 포토에칭 방식과 확산접합 방식을 사용한 열교환기는 영국의 Heatric사에서 최초로 개발에 성공하여 상용화되었다. 이러한 PCHE 열교환기는 극저온과 고압의 액화 플랜트, 연료전지 반응기 및 개질기, CO<sub>2</sub> 히트 펌프 및 온수기 등의 열교환장치 등에 적용되고 있으며, 그 응용범위가 점차 확대되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

PCHE에 대한 지금까지의 연구를 살펴보면 열교환기 내부 채널의 형태에 따라서 주로 가장 기본적인 형태로 제시된 지그재그 채널을 가진 형태의 열교환기에 대한 압력손실 및 열전달 성능에 대한 실험

적, 해석적 연구가 수행되었다. Tsuzuki et al.<sup>(3)</sup>은 Heatric사에서 제시한 지그재그 형상의 채널 모양을 갖는 PCHE에 대하여 압력손실 및 열전달 성능을 실험적, 해석적 연구를 통해 밝혔다. 또한 Kim et al.<sup>(4)</sup>은 지그재그 채널의 각도의 변화에 따른 압력손실 특성을 전산해석을 통해 알아보았다. 이외에도 Fra et al.<sup>(5)</sup>은 파형(wavy) 채널을 갖는 PCHE의 성능에 대한 실험적 연구와 전산해석 연구를 수행한 바 있다.

이러한 지그재그 형태의 채널과 달리 평판에 여러 가지 형상의 핀(fin)이 삽입되었을 때의 열교환기 성능을 알아본 연구가 수행되었다. Ngo et al.<sup>(6)</sup>은 S자 형상의 핀이 설치되어 있는 PCHE에 대하여 3차원 전산해석을 통해 성능을 평가하였으며, 지그재그 형태의 열교환기와 성능을 비교하였다. 또한 Kim et al.<sup>(7)</sup>은 에어포일(airfoil)형태의 핀을 갖는 PCHE에 대한 전산해석을 통해 성능을 평가하였다.

본 연구는 스테인리스 스틸 평판에 양면 에칭을 사용하여, 기존의 PCHE 연구와는 다른 새로운 형태의 마이크로 채널을 갖는 PCHE를 설계 및 제작하고, 이에 대한 압력손실 특성을 알아보는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 서로 다른 채널 크기와 기울임 각도를 갖는 여러 가지 PCHE를 제작하고 헬륨 가스를 사용하는 실험장치를 통해 실험적 연구를 진행하였다. 또한 상용코드를 사용한 3차원 전산해석을 통한 해석적 연구를 수행하였으며, 실험 결과를 토대로 전산해석의 타당성을 검증하였다.

2. 열교환기시편 및 실험장치

2.1 열교환기 시편

본 연구에서는 에칭을 통해 형성된 PCHE의 내부 채널의 크기 및 기울임 각도와 판의 적층수를

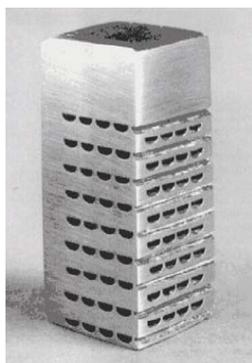


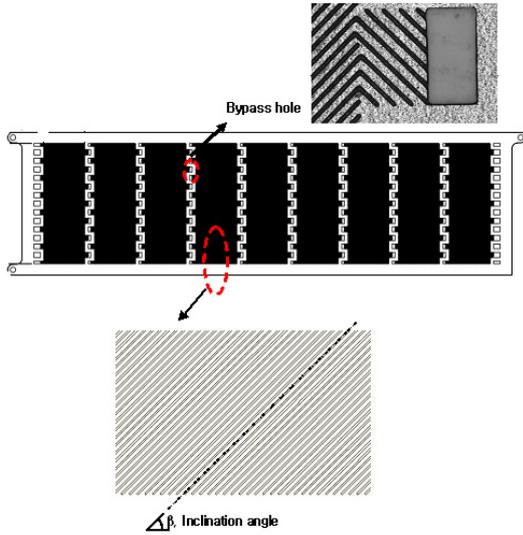
Fig. 1 Flow cross-section of PCHE fabricated using diffusion bonding.

Table 1 Specification of fabricated PCHE

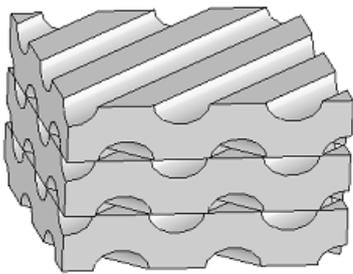
	Etching depth	Etching width	Etching angle	Number of plates
PCHE 1	26 μm	55 μm	45°	250
PCHE 2	26 μm	55 μm	45°	500
PCHE 3	200 μm	400 μm	30°	20
PCHE 4	200 μm	400 μm	45°	20
PCHE 5	200 μm	400 μm	60°	20

달리하면서 마이크로 포토에칭 및 확산접합 방식을 사용하여 총 5개의 열교환기를 제작하였으며, Table 1에 에칭 깊이와 너비 그리고 에칭된 각도와 적층수를 나타냈다.

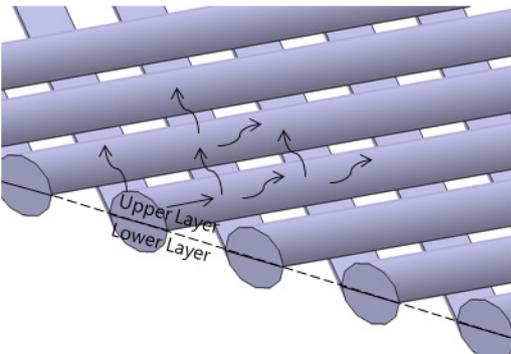
본 연구에서 제작한 PCHE의 도면과 개략도를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2(a)는 에칭 도면을 나타내고 있으며, 그림에서 보는 것과 같이 유로 중간에 유동 불균형을 해소하기 위한 여러 개의 횡 바이패스



(a) Drawing of PHCE plate



(b) Schematic of stacked plate

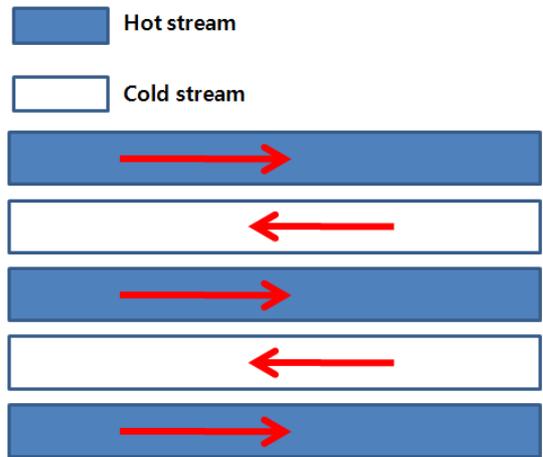


(c) Schematic of channel configuration

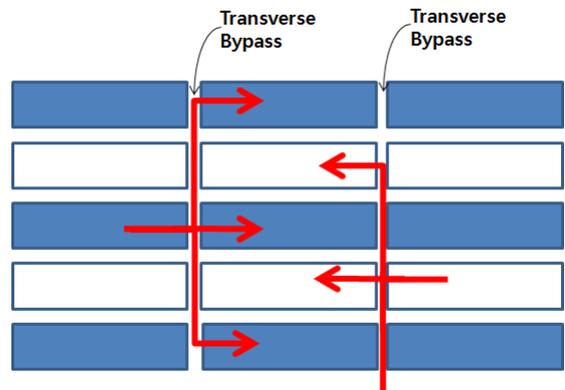
Fig. 2 Drawing and schematic of proposed PCHE.

스 홀이 삽입되어 있다. 그림에서 기울임각(inclination angle)은 판의 수평 방향(주 유동방향)에 대한 에칭된 채널의 각도를 의미한다. 마이크로 에칭은 판의 윗면과 아랫면에 각각 실시하였으며(양면 에칭), 이러한 판이 Fig. 2(b)의 그림과 같이 여러 장 쌓여 열교환기가 된다. 열교환기 내부의 유로는 Fig. 2(c)의 그림에서 보는 것과 같이 위판의 에칭된 빈 공간과 아래 판의 빈 공간이 서로 만나서 지그재그의 형태로 형성되며, 일반적인 웨브론 타입의 판형 열교환기와 유사한 형태를 갖는다.

제작과정 등에서 발생될 수 있는 열교환기 내부의 결함은 유동의 불균형 현상을 가져오며, 이러한 요인으로 열교환기의 성능은 저하될 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작한 PCHE는 이러한 유동 불균형 현상을 해소하기 위해 유동의 중간에 횡 바이패스 홀을 설치하였다. Fig. 3은 이러한 바이패스 홀의 개략도를 나타내고 있다. Fig. 3(a)의 그림과 같이 바이패스 홀이 없는 경우 유동의 중간에 결함 등으로



(a) without bypass



(b) with bypass

Fig. 3 Schematic of transverse bypass hole.

인해 유동이 막힐 경우에는 찬 유체와 뜨거운 유체 사이의 유동이 균등하지 못하게 형성될 수 있다. 반면 Fig. 3(b)의 그림과 같이 횡 바이패스 홀이 설치된 경우에는, 각 유체의 채널에서 결함이 발생되면 다음 층으로 유입될 수 있기 때문에 유동 불균형 현상을 상당히 개선할 수 있다.<sup>(8)</sup>

본 연구에서는 Table 1에서 보인 것과 같이 채널의 크기를 두 가지로 달리하고, 내부 채널의 기울임 각도를 30°, 45°, 60°로 변화하였으며, 작은 채널 사이즈의 열교환기의 경우 적층수를 달리하면서 총 5가지 열교환기를 제작하여 압력손실 특성을 알아보 고자 하였다.

2.2 실험장치

본 연구에서는 마이크로 채널 PCHE의 압력손실을 알아보기 위해 헬륨가스를 사용한 실험장치를 설계하고 제작하였다. 이때, 본 연구에서는 적용하지 않았지만 약 30~70 K 정도의 극저온 영역에서 성능특성을 알아볼 수 있도록 헬륨가스와 액체질소를 사용할 수 있도록 설계하였다.

실험장치는 헬륨압축기, 진공챔버, 실리콘 다이오드, 압력계, 유량조절장치 등으로 구성되어 있으며, Fig. 4는 개략도를 보여주고 있다. 실험장치는 열전달과

압력손실을 동시에 측정할 수 있도록 제작하였으나, 본 논문은 열교환기의 압력손실 특성을 중심으로 서술하였다.

헬륨 압축기(Genesis Vacuum Technology, 2.1 Helium Compressor)는 PCHE 열교환기 내부의 헬륨 가스 유동을 형성시켜주기 위해 사용되며, 열교환기로 유입되는 헬륨 가스의 유량은 유량조절장치(MFC, Mass Flow Controller)를 통해 제어된다. 열전달 성능을 알아보기 위해 열교환기의 고온부는 헬륨 압축기로부터 상온의 가스가 공급되며, 저온부의 경우는 그림에서 보는 것과 같이 액체질소 통에 설치된 또 다른 열교환기를 통해 액체질소의 온도만큼 냉각되어 공급될 수 있도록 하였다. 열교환기의 저온 및 고온부의 입구와 출구의 온도와 압력을 측정할 수 있도록 2개의 압력계(SENSYS, PSHD, 30 bar)를 고온부, 다른 2개의 압력계(Kulite, CT-375M, 30 bar)를 저온부에 설치하였으며, 4개의 실리콘 다이오드(DT-670-SD, Lakeshore)를 각각 설치하였다. 또한 내부의 열유입을 차단하기 위하여 진공챔버 내에 실험 열교환기가 위치되도록 하였다.

PCHE 열교환기 내부로 흐르는 헬륨가스의 유량을 유량조절장치를 통해 0~3 g/s로 조절하면서 장치가 정상상태에 도달하였을 때, 열교환기의 저온부와 고온부의 입구와 출구의 온도와 압력을 각각 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

헬륨가스 실험장치를 통해 채널 사이즈가 작은 열교환기 두 개(PCHE 1&2)의 유량변화에 따른 압력손실 특성을 Fig. 5에 나타냈다. 열교환기의 압력손실은 기존 연구결과에서 알려진 것과 같이 유량이 증가함에 따라서 증가하는 경향을 보인다. 열교환기 1(PCHE 1)에 비해 열교환기 2의 경우 적층수를 2배로 증가시켜 동일한 유량조건에서 열교환기 내부 채널의 속도를 감소시킴으로써 압력손실을 줄이고자 제작한 모델이다. 열교환기의 압력손실 크기는 아래의 식과 같이 일반적으로 유체의 밀도와 속도의 제곱에 비례한다.

$$\Delta P \sim \frac{1}{2} \rho V^2 \tag{1}$$

적층수가 250장인 열교환기의 경우 500장의 열교환기에 비해 동일한 유량에서 속도가 2배이지만 압

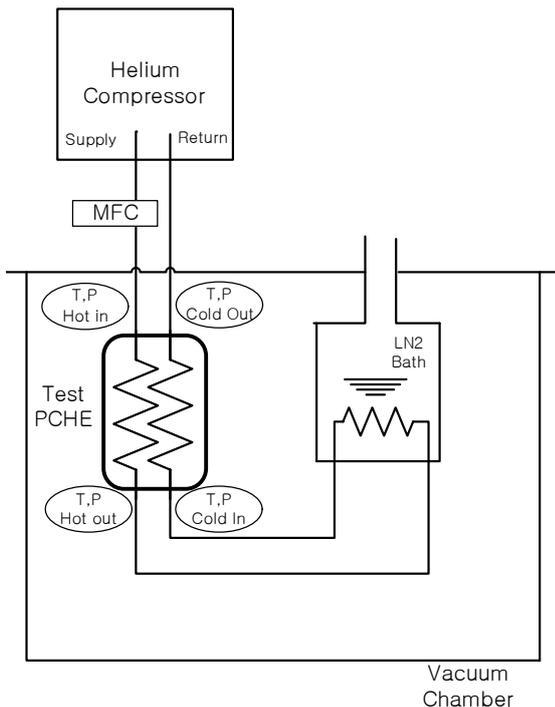


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus.

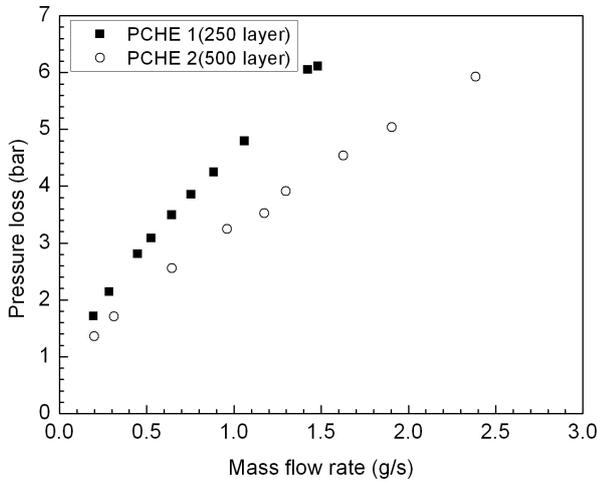


Fig. 5 Variation of pressure loss with mass flow rate(PCHE 1&2).

력손실이 커서 열교환기 내부 헬륨가스의 밀도가 작아지기 때문에 두 열교환기의 압력손실 차이가 속도의 차이에 비해 크지 않은 것을 알 수 있다.

압력손실의 크기를 정량적으로 비교하기 위해 아래의 식(2)에서 나타내는 것과 같이 마찰계수로 무차원화하고 유량은 식(3)의 Re(Reynolds number)로 무차원화하여 비교하였다. 이때 수력직경은 식(4)와 같이 정의된다.

$$f = \frac{\Delta P D_h \bar{\rho}}{2 G^2 L_c} \quad (2)$$

$$Re = \frac{V D_h}{\nu} \quad (3)$$

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (4)$$

여기서  $\Delta P$ 는 압력손실,  $D_h$ 는 수력직경,  $\bar{\rho}$ 는 평균밀도,  $G$ 는 질량 유속,  $L_c$ 는 특성길이,  $V$ 는 유체의 속도,  $\nu$ 는 동점성 계수,  $A$ 는 채널의 단면적,  $P_w$ 는 채널 단면의 접수길이를 나타낸다.

두 가지 열교환기의 적층된 판의 수는 다르지만 내부 채널의 구조는 완전히 동일하기 때문에, 동일한 Re에 대하여 두 가지 열교환기의 마찰계수는 같아야 한다. 마찰계수의 변화를 나타내는 Fig. 6의 결과를 보면 앞서 설명한 것과 같이 두 열교환기의 마찰계수 값이 거의 같은 것을 알 수 있다. 따라서 두 가지 열교환기의 제작 및 실험이 비교적 잘 이루어진 것으로 판단할 수 있다.

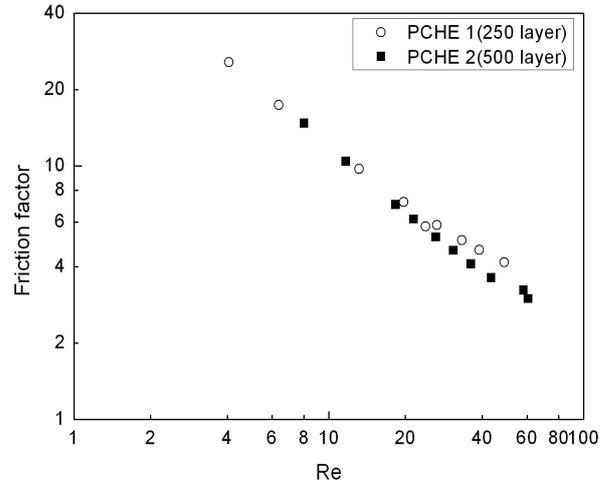


Fig. 6 Variation of friction factor with Reynolds number(PCHE 1&2).

다음에는 열교환기 채널 크기가 1과 2에 비해 커지고 서로 다른 기울임 각(30°, 45°, 60°)을 가지고 있는 열교환기 3~5에 대한 압력손실 측정결과를 Fig. 7에서 보이고 있다. 열교환기 내부 채널의 기울임 각이 커지면 열교환기 입구에서 출구까지의 내부 유동의 총 길이가 증가하기 때문에 이로 인해 표면마찰이 작용하는 길이가 증가하고 열교환기의 압력손실이 증가하게 된다. 또한 이러한 표면마찰 길이의 증가 이외에도 유로 내부의 꺾이는 부분의 각이 증가함으로 인하여 압력손실이 증가하는 결과를 가져온다. 따라서 그림에서 보는 것과 같이 열교환기의 기울임 각이 커짐에 따라서 압력손실이 증가하는 것을 알 수 있다.

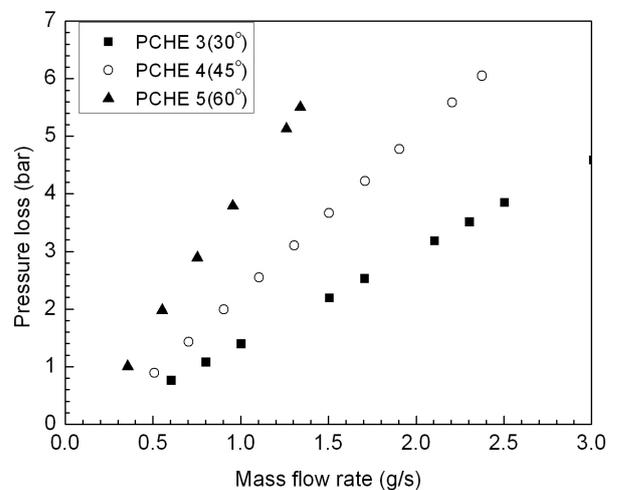


Fig. 7 Variation of pressure loss with mass flow rate(PCHE 3-5).

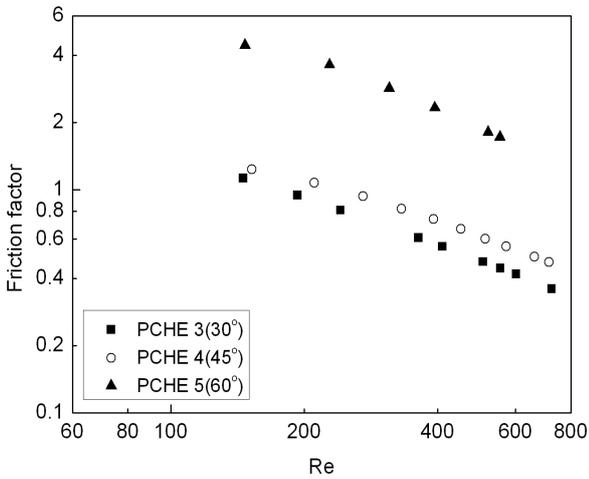


Fig. 8 Variation of friction factor with Reynolds number(PCHE 3-5).

기울임 각도가 서로 다른 열교환기의 마찰계수를 나타낸 Fig. 8을 보면, 마찰계수는 Re 증가에 따라서 Re의 지수승에 비례하여 비교적 큰 폭으로 감소하는 경향을 보인다. Fig. 7에 나타낸 열교환기의 압력손실이 클수록 마찰계수가 큰 것을 알 수 있으며, 마찰계수의 크기는 기울임 각이 30°와 45°인 열교환기의 경우 큰 차이를 보이지 않지만 60°인 경우 상대적으로 큰 차이가 나는 것으로 나타났다.

이러한 실험 결과를 정리해보면 열교환기의 적층된 판의 수가 증가하면 속도가 감소하여 압력손실이 감소하지만 마찰계수는 같은 값으로 나타난다. 또한 열교환기 채널의 기울임 각도가 커지면 압력손실 및 마찰계수가 함께 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 전산해석 결과 및 고찰

실험을 통해 알아본 PCHE 열교환기의 압력손실 결과를 검증하고, 압력손실 예측 방법을 제시하기 위해, 상용코드인 ANSYS CFD를 사용하여 3차원 전산해석을 수행하였다.

4.1 전산해석 모델 및 방법

편형 열교환기 내부의 압력손실을 예측하기 위한 열교환기 모델링을 할 때, 열교환기 유로 전체영역을 계산하면 격자의 수가 너무 많아져서 컴퓨터 메모리와 계산시간이 지나치게 커지는 문제가 발생한다. 따라서 열교환기 채널 내부를 일정한 단위영역으로 나누어 해석하는 방법을 생각할 수 있다. 기존

편형 열교환기와 혹은 단순한 형상의 PCHE의 경우에 이렇게 단순화하여 전산해석을 수행한 사례가 적지 않으며, Fig. 9는 웨브론 타입의 편형 열교환기에 대한 단위영역 해석의 사례를 나타내고 있다.<sup>(9,10)</sup> 이와 유사한 방법으로 본 연구에서는 앞에서 보인 유로를 Fig. 10과 같이 단위 영역으로 단순화하였다.

본 열교환기와 같은 유동의 특성을 갖는 열교환기의 경우 Fig. 2(c)의 유로에서 지그재그의 유동특성이 아닌 유로의 고랑(furrow)을 따라 직선으로 흐르는 유동특성을 보일 수도 있다. 하지만, Fig. 10에서 보인것과 같이 본 연구에서는 유동이 아래 판의 빈 공간(고랑)을 따라 흐르다가 위판과 마주하

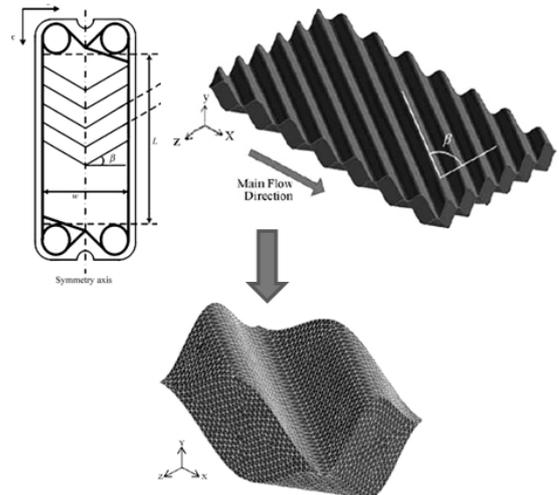


Fig. 9 Grid of unitary cell for plate heat exchanger(Fernandes et al.<sup>(9, 10)</sup>).

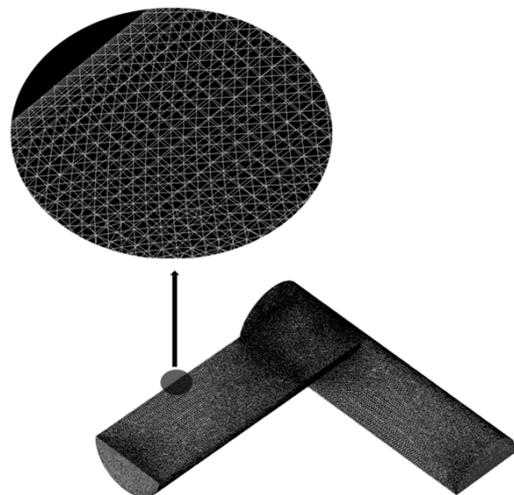


Fig. 10 Grid of unitary cell for proposed PCHE(PCHE 1,  $\beta = 45^\circ$ ).

면서 유동이 위로 이동하여 90°(기울임 각도 45°의 경우)로 꺾여, 위판에 형성된 고랑을 따라 다시 이동하고, 다시 반복하여 아래 판의 고랑을 따라 이동하여 결국 지그재그의 형상으로 유동이 흐른다고 가정하고 있다. 이러한 유동을 기존 연구에서 종단 파형 유동(longitudinal wavy flow)이라고 정의하고 있으며, 위판과 아래 판으로 유동이 이동하지 않고 그냥 끝을 따라 계속 흐르는 유동을 고랑 유동이라고 정의한다.<sup>(11~13)</sup> 유동의 속도와 열교환기의 종횡비 그리고 기울임 각도에 따라서 이러한 유동 형태가 결정되는 데, 기존 연구결과<sup>(11~13)</sup>를 토대로 본 연구에서 실험한 열교환기인 경우, 유동속도가 느리고 종횡비가 크기 때문에 세 가지 각도의 열교환기 모두 종단 파형 유동을 갖는다고 할 수 있으며, 따라서 Fig. 10과 같은 단순화 모델이 타당하다고 판단된다.

계산 모델의 격자수가 증가하면 계산의 정확도가 증가하는 반면, 계산시간도 함께 증가하게 된다. 따라서 두 가지를 함께 고려하여 격자의 개수를 결정하게 되는데, 격자수가 일정 수 이상에 도달하면 계산 정확도가 크게 변화하지 않기 때문에 이를 고려하여 본 연구에서는 약 80~90만개 정도의 격자를 형성하였다.

본 연구에서는 3차원 전산해석을 위해 상용코드를 사용하여 연속 방정식, 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식을 모두 2차 상향 차분법을 사용하여 해석하였으며, 압력과 속도의 연계 알고리즘은 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 해석하였다.

본 연구의 유량 영역은 Re가 비교적 작고 (Re < 800), 앞서 성능해석 결과를 보았을 때 마찰계수가 Re에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보이기 때문에 층류유동에 가깝다고 판단하여 층류유동으로 전산해석을 수행했다.

경계조건은 실험과 동일하게 헬륨 가스를 사용하고, 실험과 동일한 유동조건을 입구조건으로 설정하였다. 전산해석을 위해 개인용 컴퓨터(Intel Core2 duo E8400 3GHz CPU, 4GB RAM)를 사용하였으며, 각각의 속도에 대해 약 8~10시간의 계산시간이 소요되었다.

4.2 전산해석 결과

본 연구에서는 열교환기의 내부 채널의 크기가 열교환기 입구 및 출구에 설치된 헤더(header)와 내부에 설치된 바이패스 홀에 비해서 매우 작기 때문에,

헤더 및 바이패스 홀에서의 압력손실은 무시하였다. 이러한 가정으로부터 전산해석을 통해 마찰계수를 계산하였으며 실험결과와 비교하였다.

열교환기의 채널 크기가 작은 열교환기 1과 2의 압력손실 결과를 전산해석과 비교한 Fig. 11을 보면, Re가 증가하면 마찰계수는 급격히 감소하는 경향을 보이며 전반적으로 실험결과와 전산해석 결과가 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 전산해석의 경우 유동을 완전발달유동(fully developed flow)으로 가정하여 해석을 수행하였는데, 실험한 열교환기의 경우 유동 중간에 설치된 바이패스 홀에 의해

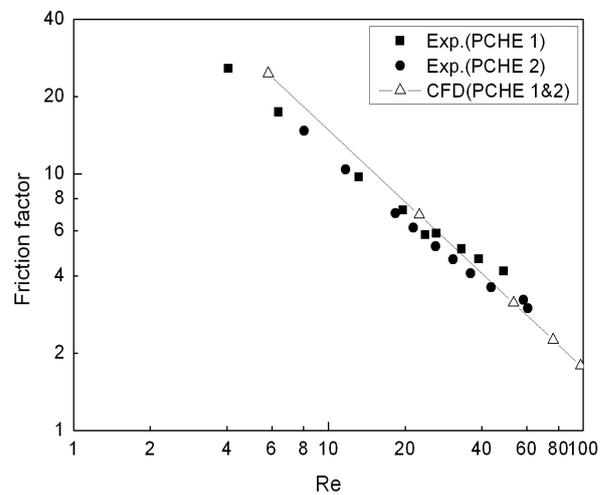


Fig. 11 Comparison of calculated friction factor with experimental data(PCHE 1&2).

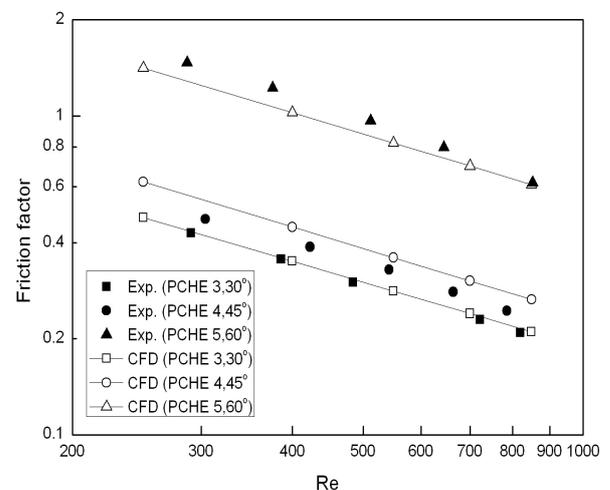


Fig. 12 Comparison of calculated friction factor with experimental data(PCHE 3~5).

몇 번의 유동교란이 발생할 수 있지만,  $Re$ 가 매우 작기 때문에 매우 짧은 거리에서 유동이 완전발달 유동에 도달하기 때문에, 이러한 가정은 결과에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

열교환기의 채널 내부의 기울임 각도가 다른 경우의 전산해석 결과와 실험결과를 비교한 Fig. 12를 보면, 앞서 설명한 결과와 마찬가지로 실험과 해석결과가 매우 잘 일치하는 결과를 알 수 있다. 전산해석의 경우 내부 채널의 기울임 각도가 커지면 식(2)에서 특성길이  $L_c$ 가 작아지게 되므로, 동일한 열전달 면적을 가진 열교환기에서 단위 영역의 수가 많아지고 이로부터 유동마찰 길이가 커지기 때문에 마찰계수가 큰 결과를 보인다.

이러한 결과로부터 본 연구에서 사용한 PCHE 열교환기의 경우, 일정한 단위영역으로 나누어 층류유동으로 가정하여 얻은 계산결과와 실험결과가 모두 신뢰할 수 있는 결과임을 알 수 있으며, 이로부터 본 연구에서 사용한 마이크로 채널 PCHE의 압력손실 예측방법은 타당하다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

마이크로 포토에칭과 확산접합 기술을 사용하여 열교환기 채널 크기와 채널의 기울임 각도가 서로 다른 다섯 가지의 마이크로 채널 PCHE 열교환기를 설계하고 제작하였으며, 헬륨가스를 사용한 실험과 3차원 전산해석을 수행하였다. 열교환기의 적층된 판의 수가 증가하면 채널 내부의 유동 속도가 감소하여 열교환기의 압력손실이 감소하지만, 채널의 형상은 동일하기 때문에 압력손실을 무차원화한 압력손실의 크기는 같은 값을 갖는다. 열교환기 내부 채널의 기울임 각도가 증가하면 표면 마찰을 받는 유로의 총 길이가 증가하기 때문에 압력손실과 마찰계수가 커지는 것을 알 수 있다. 마이크로 채널 PCHE의 유로를 단순화하여 단위영역으로 모사하여 수행한 전산해석의 마찰계수 결과는 실험결과와 비교하였을 때, 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이로부터 실험결과와 타당성을 검증하였으며, 앞서 설명한 방법과 같은 압력손실 전산해석 방법이 타당하다고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부의 가스플랜트사업단의 연

구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 태산 LCD의 연구 장비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Kwon, O. K., Choi, M. J. and Choi, Y. J., 2009, Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in Zigzag Channel Angles of Printed Circuit Heat Exchangers, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 475-482.
2. Nikitin, K., Kato, Y. and Ngo, N., 2006, Printed circuit heat exchanger thermal-hydraulic performance in supercritical CO<sub>2</sub> experimental loop, International Journal of Refrigeration, Vol. 29, pp. 807-814.
3. Tsuzuki, N., Kato, Y. and Ishiduka, T., 2007, High performance printed circuit heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 1702-1707.
4. Kim, D. Y., Kim, M. H., Cha, J. E. and Kim, S. O., 2008, Numerical study for heat transfer and pressure drop of supercritical carbon dioxide fluid with channel bending angle in Printed Circuit Heat Exchanger, Proc. of Korean Society of Mechanical Engineering conference, Division of Thermal Engineering, pp. 298-305.
5. Pra, F., Tochon, P., Mauget, C., Fokkens, J. and Willemsen, S., 2008, Promising designs of compact heat exchanger for modular HTRs using the Brayton cycle, Nuclear Engineering and Design Vol. 238, pp. 3160-3173.
6. Ngo, T. R., Kato, Y., Nikitin, K. and Tsuzuki, N., 2006, New printed circuit heat exchanger with s-shaped fins for hot water supplier, Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 30, pp. 811-819.
7. Kim, D. Y., Kim, M. H., Cha, J. E. and Kim, S. O., 2008, Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model, Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, pp. 3269-3276.
8. Jung, J., Jeong, S. and Hwang, G., 2008, Miniature PCHE-Type Recuperator with Trans-

- verse Bypass, Proc. of the 15th Int, cryocooler conference, pp. 363-372.
9. Fernandes, C. S., Dias, R. Nobrega, J. and Maia, J., 2007, Laminar flow in chevron-type plate heat exchangers : CFD analysis of tortuosity, shape factor and friction factor, Chemical Engineering and Processing, Vol. 46, pp. 825-833.
  10. Fernandes, C. S., Dias, R. Nobrega, J. and Maia, J., 2008, Friction factors of power-law fluids in chevron-type plate heat exchangers, Journal of Food Engineering, Vol. 89, pp. 441-447.
  11. Gaiser, G. and Kottke, V., 1990, Effects of corrugation parameters on local and integral heat transfer in plate heat exchangers and re-generators, Proc. of 9th International Heat Transfer Conference, Vol. 5, pp. 85-90.
  12. Gaiser, G. and Kottke, V., 1998, Effects of wavelength and inclination angle on the homogeneity of local heat transfer coefficients in plate heat exchangers, Proc. of 11th International Heat Transfer Conference, Vol. 6, pp. 203-208.
  13. Focke, W. and Knibbe, P., 1986, Flow visualization in parallel-plate ducts with corrugated walls, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 165, pp. 73-77.