

# 지그재그채널 PCHE의 각도에 따른 열전달 및 압력강하특성

권오경<sup>†</sup>, 최미진, 최영종<sup>\*</sup>

한국생산기술연구원 에너지설비기술지원센터, <sup>\*</sup>(주)이노윌

## Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in Zigzag Channel Angles of Printed Circuit Heat Exchangers

Oh-Kyung Kwon<sup>†</sup>, Mi-Jin Choi, Young-Jong Choi<sup>\*</sup>

Energy System Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 330-825, Korea

<sup>\*</sup>Innowill, Daejeon, 305-343, Korea

(Received May 20, 2009; revision received August 5, 2009)

**ABSTRACT:** The objectives of this paper are to study the characteristics of heat transfer and pressure drop of the zigzag channel PCHE using diffusion bonding technology by numerical analysis. PCHE of five types are designed, which are zigzag channel angle 180°, 160°, 140°, 120° and 100°. The zigzag PCHE was numerically investigated for Reynolds number in a range of 150~800. The temperatures of the hot side were performed at 80°C while that of the cold side was conducted at 20°C. The results show that the performance of heat transfer rate for zigzag channel 100° increases about 11.5% compared to that of zigzag channel 180°. On the other hand, the performance of pressure drop for zigzag channel 100° is remarkably higher than that of zigzag channel 180°, about 2.4 times.

**Key words:** Compact heat exchanger(컴팩트 열교환기), Diffusion bonding(확산접합), Heat transfer rate(열전달률), PCHE(인쇄기판형 열교환기), Zigzag channel(지그재그채널)

### 기 호 설 명

$A_s$  : 열전달면적 [ $\text{mm}^2$ ]  
 $C_p$  : 비열 [ $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ]  
 $D_h$  : 수력직경 [mm]  
 $f$  : 마찰계수  
 $h$  : 채널높이 [mm]  
 $k$  : 열전도율 [ $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ]  
 $L$  : 채널길이 [mm]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [ $\text{kg/h}$ ]  
 $Nu$  : 누셀수  
 $p$  : 채널과 채널사이 피치 [mm]  
 $\Delta p$  : 압력강하 [kPa]

$Q$  : 열전달률 [kW]  
 $Re$  : 레이놀즈수  
 $W_{ch}$  : 채널폭 [mm]  
 $W_{fin}$  : 핀폭 [mm]

### 그리스 문자

$\theta$  : 채널각도 [ $^\circ$ ]

### 1. 서 론

확산접합(Diffusion bonding) 컴팩트 열교환기는 화학적 에칭된 마이크로채널 박판을 적층 밀착시켜 모재의 용점 이하 온도에서 소성변형이 생기지 않을 정도로 가압하여 접합면간에 생기는 원자의 확

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8528; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: kwonok@kitech.re.kr

산을 이용하여 접합하는 제작 기술을 말한다. 특징으로는 기존 열교환기 대비 크기를 획기적으로 줄일 수 있으며, 고온고압에 견딜 수 있고 온도 근접성이 우수하여 효율이 높다는 장점이 있다.

현재까지 확산접합 열교환기는 영국의 Heatric사에서 세계 최초로 상용화에 성공하였으며, 인쇄기판형 열교환기(PCHE: Printed Circuit Heat Exchanger, 이하 PCHE)라는 명칭으로 극저온 고압의 LNG 액화 플랜트, 연료전지 반응기 및 개질기, CO<sub>2</sub> 히트펌프 및 온수기 등의 열교환장치 등에 적용되고 있으며, 점차 그 응용범위가 크게 확대되고 있다.<sup>(1)</sup>

PCHE 열교환기 연구는 일본 동경공업대학의 Kato 연구팀에 의해 주로 수행되었다. Nikitin 등<sup>(2)</sup>은 초임계 CO<sub>2</sub> 냉매를 이용하여 실험적으로 열전달과 압력강하 특성을 규명하고 실험상관식을 제안하였다. 실험 레이놀즈수 범위에서의 총괄열전달계수는 300~650 W·m<sup>2</sup>/K 이었다. Ngo 등<sup>(3)</sup>은 온수를 제조하기 위해 CO<sub>2</sub> 냉매를 사용하였고 새로운 S 형태의 핀을 3차원 전산해석을 통해 PCHE의 열적 수력성능을 평가하였다. 제안한 S 형태의 핀을 가지는 PCHE는 기존 직관형태의 PCHE에 비해 체적은 3.3배 작고, CO<sub>2</sub> 측에서 압력강하는 37% 작게 나타난다고 주장하였다.

또한 Tsuzuki 등<sup>(4)</sup>과 Ngo 등<sup>(5)</sup>은 S형상의 핀과 지그재그형상의 핀의 열적 수력성능을 3차원 전산해석을 통해 비교 평가하였으며, 지그재그형상이 열전달 성능은 24~34% 높지만, 압력강하는 4~5배 크다는 연구결과를 발표하였다.

국내에서는 확산접합과 마이크로 채널을 적용한 PCHE에 관한 연구는 진무한 실정이었으나(주)이노월에 의해 처음 시제품이 선보인 단계이며, 김 등<sup>(6)</sup>은 직관 마이크로채널 PCHE의 고온측 온도, 고온측과 저온측의 레이놀즈수 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성에 대한 실험을 수행하였고 열전달계수 및 마찰계수 상관식을 제안하였다. 김 등<sup>(7)</sup>은 지그재그채널과 유선형 핀형상의 채널 열교환기를 3차원 수치해석을 통하여 열전달 및 압력강하 특성을 평가하였다.

최근 권 등<sup>(8)</sup>은 straight, long dot, splitted wavy의 채널형상을 가지는 PCHE를 실험을 통하여 열전달 및 압력강하 특성을 정량적으로 비교하였다. 그러나 지금까지 지그재그채널 PCHE의 각도에 따른 열전달 및 압력강하특성을 비교한 연구

는 거의 수행되지 않았다.

본 연구에서는 지그재그채널 형상을 가지는 5 종류의 PCHE에 대한 수치해석을 범용 열 및 유체유동 해석 프로그램인 CFX-11을 사용하여 수행하고, 지그재그채널 각도에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 비교하고자 한다.

## 2. 해석영역 및 해석방법

### 2.1 해석모델

Fig. 1은 본 연구에서 해석하고자 하는 지그재그채널 열교환기를 나타낸 것이다. 해석대상 열교환기는 각도에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 비교하기 위해서 각 시편별로 20°의 각도를 변화시켜 각도가 180°인 시편 1과 채널각도가 160°, 140°, 120°, 100°인 시편 2~5인 총 5종류를 선정하였다.

본 연구에서 열교환기의 사양은 체적 135(L) × 40(W) × 1(H) mm, 채널폭(W<sub>ch</sub>) 1.5 mm, 핀폭(W<sub>fin</sub>)

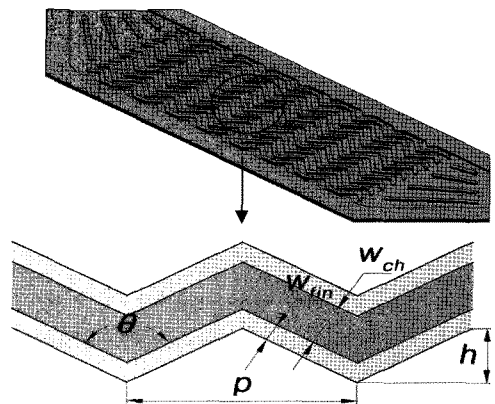


Fig. 1 Details of zigzag channel.

Table 2 Specifications of zigzag channel

Samples No.	h (mm)	p (mm)	W <sup>ch</sup> (mm)	W <sub>fin</sub> (mm)	θ (°)
1	-	-	1.5	1	180
2	1.14	12.93	1.5	1	160
3	2.2	12.09	1.5	1	140
4	3.16	10.95	1.5	1	120
5	4	9.53	1.5	1	100

1.0 mm로 동일한 것으로 하였으며, 채널각도가 바뀔 때 따라 한판에 들어가는 채널수는 시편 1~3에서 12개, 시편 4는 11개, 시편 5는 10개로 변하게 되며 채널길이의 영향은 고려하지 않았다.

시편 2~5에서 채널각도가 달라짐에 따라 채널 사이의 피치(P)와 높이(h)는 다르게 되며 그 상세 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 2는 CFD 모델에 사용된 경계조건을 나타낸 것이다. 지그재그채널 PCHE는 고온부에는 고온의 물이 저온부에는 저온의 물이 흐르고 양 유체는 서로 열교환할 수 있도록 모사하였다. 해석의 수행을 위해서 고온부와 저온부 각 한판과 그 위로 흐르는 작동유체를 해석영역으로 선정하였다. 고온부와 저온부를 적층하게 되면 단면은 반원형태가 되며, 이를 대상으로 해석하였다. 또한 해석 영역의 최상부면과 최하부면에 주기조건을 사용하

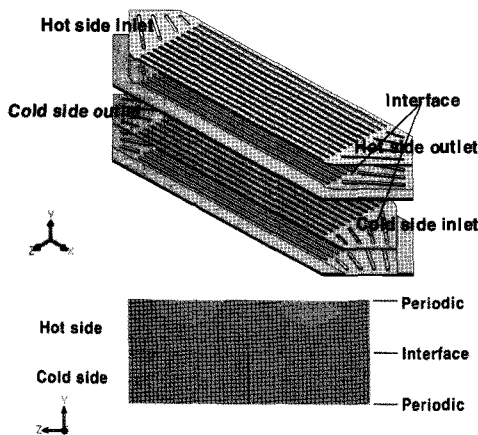


Fig. 2 Boundary conditions of the CFD model.

Table 2 Numerical conditions

Conditions		
Material	Solid	SUS 304
	Fluid	Water
Inlet temp. (°C)	Hot side	80
	Cold side	20
Inlet flow rate (kg/h)	2.4~12	
Reynolds number	150~800	
Hydraulic diameter (mm)	0.75	

여 실제 열교환기와 같이 연속되어 있음을 모사하고자 하였다.

Table 2는 수치해석 조건을 나타낸 것이다. 확산접합 열교환기의 재질은 SUS304이며 작동유체는 물을 사용하였다. 고온부 80 °C와 저온부 20 °C의 물이 대향류로 흘러 들어가며 각각의 유량은 2.4~12 kg/h(레이놀즈수 150~800)로 변화를 주었다. 레이놀즈수 계산에 사용된 수력직경은 0.75 mm이다.

## 2.2 해석방법 및 조건

CFD 해석은 다음과 같은 가정 하에 수행하였다.

- i) 3차원 정상상태이다.
- ii) 열교환기 외부로의 열손실이 없다.
- iii) 내부 유동은 층류이다.
- iv) 중력에 의한 영향은 무시한다.

해석에 사용된 방정식은 아래와 같다.

### (1) 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

### (2) 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left\{ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$$

### (3) 에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ u_i \left( \rho c_p T + \rho \frac{u_i^2}{2} \right) \right\} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j \tau_{ij} \right) \quad (3)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0$$

격자점에 대한 지배방정식의 이산화는 CFX-11에서 제공하는 2차항 이상의 정확도를 가지는 high resolution schem을 사용하였으며 결과의 수렴도는 10<sup>-5</sup>이하를 유지하였다.

2.3 해석결과의 검증

Fig. 3은 시편 1번에 대한 해석영역의 격자수의 변화에 따른 총괄열전달계수와 압력강하의 결과이다. 총괄열전달계수와 압력강하는 격자수 590,000개 이후에 거의 변화가 없어 본 연구에서는 해석시간을 고려하여 약 590,000개의 격자수를 사용하였다. 해석결과의 검증을 위해서 권 등<sup>(8)</sup>의 실험 결과와의 비교결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

권 등의 실험에 사용한 시편은 시편 1과 동일한 사양으로 고온부, 저온부 각 10장씩 총 20장이 적층되어 있다. 지그재그채널 180°에 대해서 해석결과는 총괄열전달계수의 경우 실험결과보다 3.4~11.9% 정도 다소 높게 나타났다. 또한 압력강하의 경우 실험결과보다 약간 낮게 나타나지만

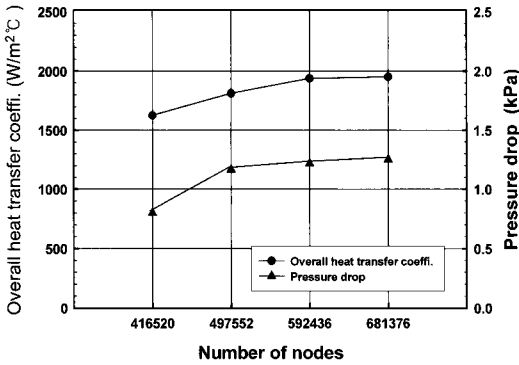


Fig. 3 Sensitivity of mesh grid.

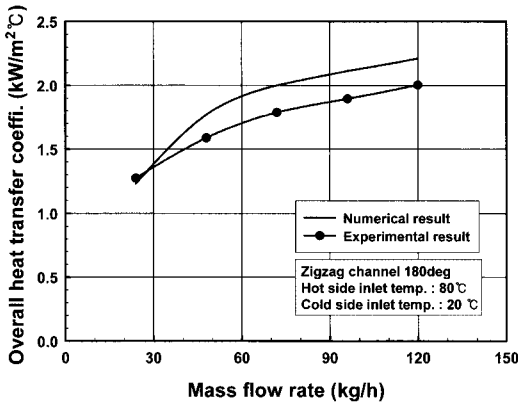


Fig. 4 Comparison of overall heat transfer coefficient for numerical and experimental result.

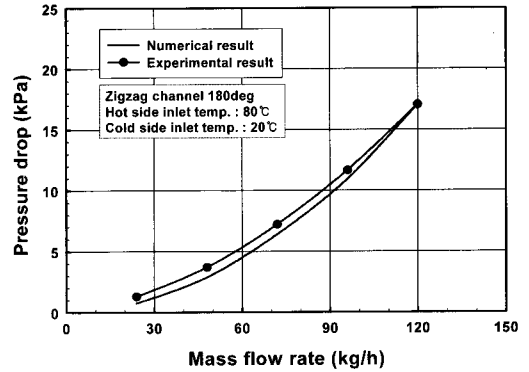


Fig. 5 Comparison of pressure drop for numerical and experimental result.

정성적으로 거의 유사한 경향을 나타내었다.

실험결과와의 차이는 실험에서는 온도와 압력강하의 측정을 위하여 열교환기 입출구 양단에 tee fitting을 사용하였으나 수치해석에서는 이를 고려하지 않았으며 이에 따른 영향으로 오차가 발생한 것으로 판단된다.

2.4 결과처리

확산접합 열교환기의 수력직경과 레이놀즈수는 Pra 등<sup>(9)</sup>에 의해 제시된 방법을 이용하여 계산하였고 식(4)와 식(5)에 나타내었다.

$$D_h = \frac{2 W_{ch} H_{ch}}{W_{ch} + H_{ch}} \tag{4}$$

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \tag{5}$$

여기서,  $W_{ch}$ 는 채널의 폭,  $H_{ch}$ 는 채널의 높이이며  $v$ 는 각 채널로 분배된 작동유체의 유속이다.

고온측과 저온측의 열전달률은 식(6)과 식(7)을 이용하여 구하였다.

$$Q_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{6}$$

$$Q_c = \dot{m}_c C_{p,h} (T_{c,o} - T_{c,i}) \tag{7}$$

여기서, 첨자 h와 c는 고온측과 저온측을 i와 o는 입구와 출구를 나타낸다.

총괄 열전달계수는 대수평균온도차(LMTD)와 평균 열전달률( $Q_m$ )을 이용하여 식(10)과 같이 구하였다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \left[ \frac{(T_{h,i} - T_{c,o})}{(T_{h,o} - T_{c,i})} \right]} \quad (8)$$

$$Q_m = \frac{Q_h + Q_c}{2} \quad (9)$$

$$U = \frac{Q_m}{A_s \Delta T_{LMTD}} \quad (10)$$

확산접합 열교환기의 경우 고온측과 저온측이 계속적인 대칭인 형태로 이루어져 있으므로 고온측과 저온측의 전열면적은 같다고 할 수 있다. 따라서

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{k_w} \quad (11)$$

이다. 누셀수는 식(12)와 같이 구하였고  $j$  인자는 식(13)을, 마찰계수  $f$ 는 식(14)를 이용하여 구하였다.

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (12)$$

$$j = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{1/3}} \quad (13)$$

$$f = \frac{2\Delta P \cdot D_h}{\rho u^2 L} \quad (14)$$

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 6과 Fig. 7은 지그재그채널 PCHE 내부의 속도분포와 온도분포를 나타낸 것이다. 지그재그채널 각도 160°에서 미세한 유체의 재순환과 소용돌이치는 현상이 나타나며, 100°인 경우에는 그 형태가 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

이것은 채널각도가 좁아짐에 따라 꺾어진 내부 유로에서 발생하는 유동불안정성이 증가하며 난류의 전이가 촉진되기 때문이다. 이러한 영향으로 인해 열전달 상승효과와 더불어서 압력강하를 유

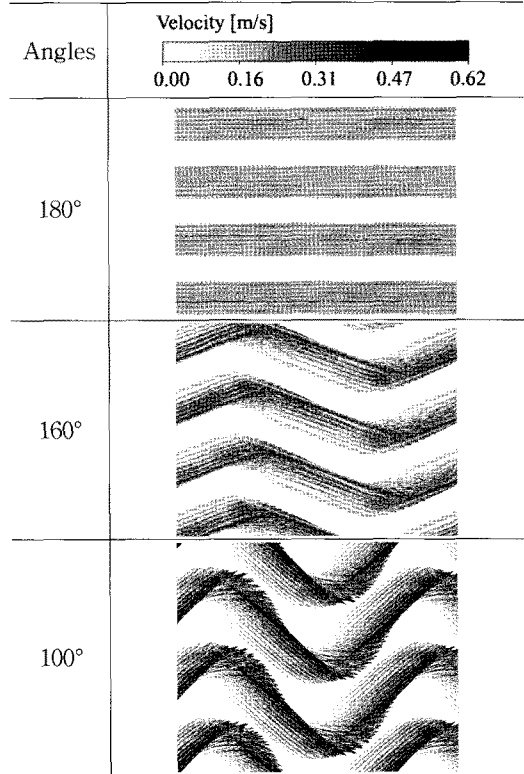


Fig. 6 Velocity distributions in zigzag channel.

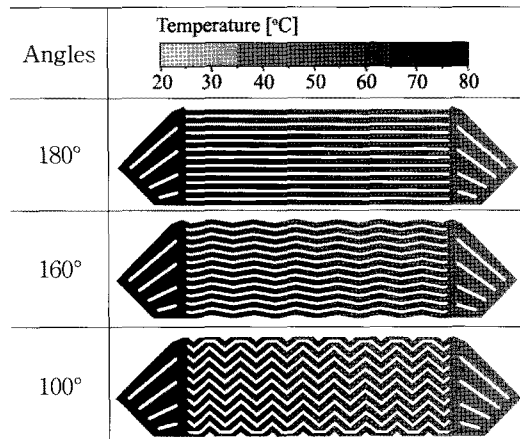


Fig. 7 Temperature distributions in zigzag channel.

발시키는 원인으로 작용하는 것으로 판단된다.

이러한 경향은 황 등<sup>(10)</sup>의 연구에서도 유사한 결과가 제시되었다. 그들은 리큐퍼레이터 내부 유로의 꺾임각 변화에 따른 전열면에서의 국소적인 열/물질전달 특성을 실험적으로 고찰하였는데 덕트

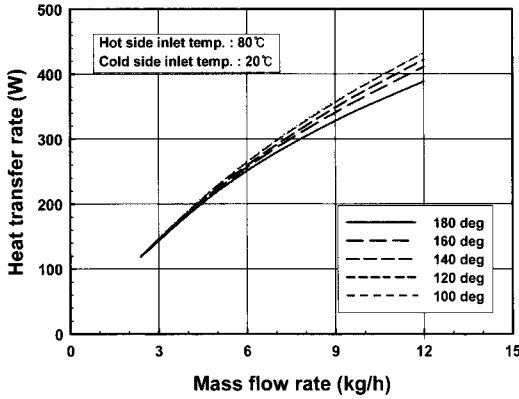


Fig. 8 Variation of heat transfer rate with the flow rate.

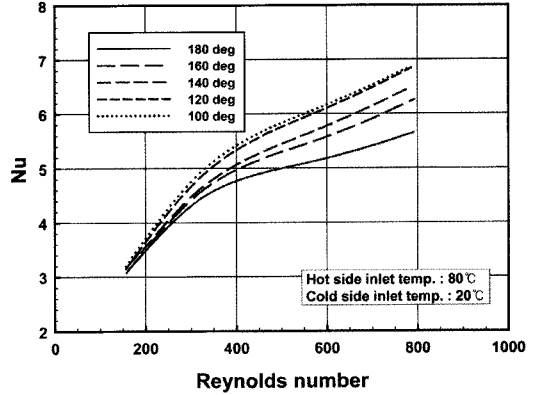


Fig. 10 Variation of Nusselt number with the Reynolds number.

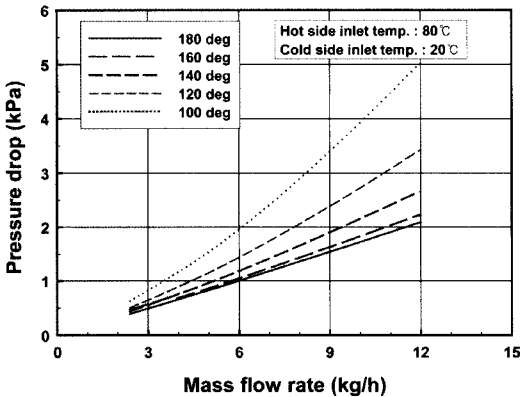


Fig. 9 Variation of pressure drop with the flow rate.

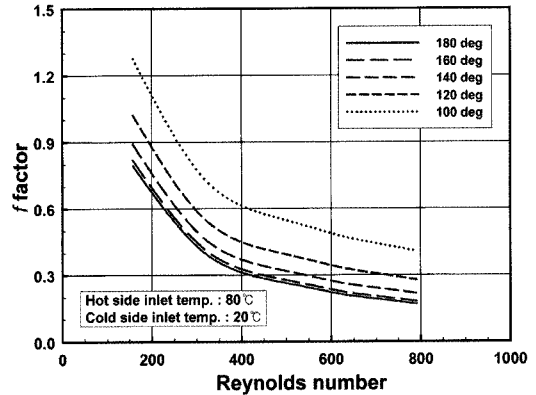


Fig. 11 Variation of f factor with the Reynolds number.

꺾임각이 좁아짐에 따라 유동불안정성이 증가하여 열/물질전달 특성은 증가하였으나, 압력손실이 증가하여 마찰계수 또한 증가한다고 보고하였다.

Fig. 8은 질량유량에 따른 지그재그채널 PCHE의 열전달률을 나타낸 것이다. 고온측 작동유체의 온도는 80 °C, 저온측 작동유체의 온도는 20 °C로 고정된 상태에서 동일한 질량유량으로 평균 열전달률을 비교하였다. 질량유량이 증가함에 따라 지그재그채널 PCHE 모든 각도에서 열전달률이 증가하였으며, 각도가 작아짐에 따라 높은 열전달률을 보였다. 각도가 100°인 경우 180°에 비해 최대 약 11.5%의 열전달률이 상승함을 알 수 있다.

Fig. 9는 질량유량에 따른 지그재그채널 PCHE의 압력강하를 나타낸 것이다. Fig. 8과 동일한 조건에서 질량유량이 증가함에 따라 압력강하는 증

가하는 일반적인 경향을 나타내었다. Fig. 8의 열전달률의 경향과는 반대로 각도가 작아짐에 따라 높은 압력강하를 보였다. 각도가 100°인 경우 180°에 비해 최대 약 2.4배의 압력강하가 증가하고 140°에 비해서는 약 27.7%의 압력강하가 증대됨을 알 수 있다. 따라서 최적의 지그재그채널 PCHE를 설계하기 위해서는 열전달률과 압력강하의 증가율을 고려해서 적절한 각도선택이 중요함을 알 수 있다.

Fig. 10은 누셀수의 이론식인 식(12)와 Fig. 8의 열전달률의 결과값을 무차원화하여 레이놀즈수와 누셀수로 나타낸 것으로 누셀수의 상관식을 구하고자 나타낸 그림이다. 해석결과로는 레이놀즈수가 증가함에 따라 누셀수는 증가하는 경향을 보였으며 Fig. 8에서 열전달률이 가장 크게 나타난 100°의 누

셀수가 가장 높게 나타났다. 이는 각도가 작아지면서 지그재그 형상의 꼭지점 부근에서의 유동이 복잡해지고 이러한 현상이 열전달 성능에 유리하게 작용하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 11은 압력강하 이론식인 식(14)와 Fig. 9의 압력강하 결과값을 무차원화하여 레이놀즈수와 마찰계수  $f$ 로 나타낸 것으로 마찰계수 상관식을 구하고자 나타낸 그림이다. 해석결과로는 레이놀즈수가 증가함에 따라 마찰계수  $f$ 는 감소하는 경향을 보였다. 지그재그채널 PCHE 180°의 마찰계수가 가장 낮게 나타나고 있으며, 반면에 PCHE 100°가 가장 높은 마찰계수를 나타내었다.

Fig. 12는 열전달과 압력강하의 성능을 비교할 수 있는  $j/f$ 를 도입하여 채널각도에 따른 성능을 비교하였다. 레이놀즈수 증가에 따라  $j/f$ 는 증가하는 경향을 나타내었으며 채널각도 160°에서 가장 높은  $j/f$ 를 나타내었다. 채널각도 160°의  $j/f$ 는 100°에 비해 약 53~105% 증가하는 경향을 나타내었다. 본 해석결과를 토대로 누셀수와 마찰계수  $f$ 에 대한 상관식을 식(15)와 식(16)과 같이 작성하였다.

식(15)와 식(16)은  $150 \leq Re \leq 800$ 의 범위에서 적용가능하며 해석결과와 상관식의 오차는 누셀수에 대해서 약 0.81~9.56%, 마찰계수  $f$ 에 대해서 약 0.15~14.0% 이내에서 비교적 잘 일치하였다.

$$Nu = 0.278 Re^{0.452} \left(\frac{h}{p}\right)^{0.051} Pr^{0.333} \quad (15)$$

$$f = 95.431 \left(\frac{1}{Re}\right)^{0.836} \left(\frac{h}{p}\right)^{0.396} Pr^{0.333} \quad (16)$$

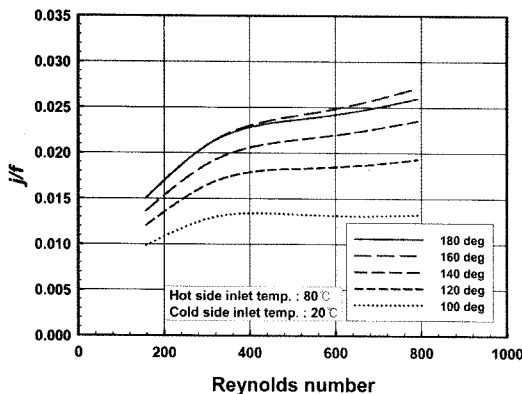


Fig. 12 Variation of  $j/f$  with the Reynolds number.

#### 4. 결 론

채널각도가 다른 5종류의 지그재그채널 PCHE의 열전달 및 압력강하 특성을 수치해석으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 질량유량이 증가함에 따라 지그재그채널 PCHE 모든 각도에서 열전달률이 증가하였으며, 각도가 작아짐에 따라 높은 열전달률을 보였다. 각도가 100°인 경우 180°에 비해 최대 약 11.5%의 열전달률이 상승함을 알 수 있었다.

(2) 질량유량이 증가함에 따라 지그재그채널 PCHE 각도가 작아짐에 따라 높은 압력강하를 보였다. 각도가 100°인 경우 180°에 비해 최대 약 2.4배의 압력강하가 증가하고 140°에 비해서는 약 27.7%의 압력강하가 증대됨을 알 수 있었다.

(3) 레이놀즈수가 증가함에 따라 지그재그채널 PCHE의 누셀수는 증가하고 마찰계수  $f$ 는 감소하는 경향을 보였다. 채널각도 100°에서 누셀수는 가장 크게 나타났지만 마찰계수도 가장 크게 나타났다.

(4) 열전달과 압력강하의 성능을 나타내는  $j/f$  비교에서 채널각도 160°에서 가장 높은  $j/f$ 를 나타내었으며, 100°에 비해 약 53~105% 증가하는 경향을 나타내었다.

(5) 본 해석결과를 토대로 누셀수와 마찰계수  $f$ 에 대한 상관식을 작성하였으며 해석결과와 상관식의 오차는 누셀수에 대해서 약 0.81~9.56%, 마찰계수  $f$ 에 대해서 약 0.15~14.0% 이내에서 비교적 잘 일치하였다.

#### 후 기

본 연구는 부품소재 전문기업 기술지원사업과 산업계연계형 기술지원사업에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. Pua, L. M. and Rumbold, S. O., 2003, Industrial microchannel devices—where are we today?, First International Conference on Microchannels and Minichannels, pp. 773–780.
2. Nikitin, K., Kato, Y. and Ngo, L., 2006, Printed circuit heat exchanger thermal-hydraulic performance in supercritical CO<sub>2</sub> experimental

- loop, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, No. 5, pp. 807-814.
3. Ngo, L., 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, No. 8, pp. 811-819.
  4. Tsuzuki, N., Kato, Y. and Ishiduka, T., 2007, High performance printed circuit heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 10, pp. 1702-1707.
  5. Ngo, L., Kato, Y., Nikitin, K. and Ishizuka, T., 2007, Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with s-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 560-570.
  6. Kim, Y. H., Moon, J. E., Choi, Y. J. and Lee, K. J., 2008, Heat transfer characteristics and pressure drop in straight microchannel of the printed circuit heat exchangers, *Transaction of the KSME*, Vol. 32, No. 12, pp. 915-923.
  7. Kim, D. E., 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, No. 12, pp. 3269-3276.
  8. Kwon, O. K., Cha, D. A. and Yun, J. H., 2009, An experimental study on the performance of diffusion bonding heat exchangers, *Transaction of the KSME*, Vol. 33, No. 1, pp. 53-59.
  9. Pra, F., Tochon, P., Mauget, C., Fokkens, J. and Willemsen, S., 2008, Promising designs of compact heat exchangers for modular HTRs using the brayton cycle, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 3160-3173.
  10. Hwang, S. D., Jang, I. H. and Cho, H. H., 2006, Experimental study on flow and local heat/mass transfer characteristics inside corrugated duct, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, pp. 21-32.