

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.1.53

확산접합 콤팩트 열교환기의 성능에 관한 실험적 연구

권오경* · 차동안* · 윤재호*

(2008년 9월 19일 접수, 2008년 11월 19일 수정, 2008년 12월 8일 심사완료)

An Experimental Study on the Performance of Diffusion Bonding Heat Exchangers

Oh-Kyung Kwon, Dong-An Cha and Jae-Ho Yun

Key Words: Compact Heat Exchanger(콤팩트 열교환기), Diffusion Bonding(확산접합), Effectiveness(유효도), Micro Channel(마이크로채널), PCHE(인쇄형 열교환기)

Abstract

The objectives of this paper are to study the characteristics of heat transfer and pressure drop of the micro channel heat exchangers using diffusion bonding technology. Four types of heat exchangers are designed and manufactured, which are straight type, long dot type, splited wavy type and straight double side type. Heat transfer and pressure drop performance of each heat exchangers are measured in various operating conditions, and compared each other. The results show that the $(j/f)^{1/3}$ performance of splited wavy type and long dot type increases about 10.3% and 6.1% at the Reynolds number 470 compared to that of straight type, respectively. On the other hand, $(j/f)^{1/3}$ performance of straight double side type decreases 19.7%.

기호설명

A_s	: 열전달면적	[mm ²]
C	: 열용량	[W/°C]
C_p	: 비열	[J/kg·°C]
D_h	: 수력직경	[mm]
f	: f 인자	
j	: j 인자	
\dot{m}	: 질량유량	[kg/h]
Nu	: 누셀트수	
ΔP	: 압력강하	[kPa]
Q	: 열전달률	[kW]
Re	: 레이놀즈수	
T	: 온도	[°C]
ΔT	: 온도차	[°C]
U	: 총괄열전달계수	[kW/m ² ·°C]
ϵ	: 유효도	

1. 서론

최근 마이크로채널을 이용한 열교환기 기술은 컴퓨터, 반도체를 비롯한 IT분야에서 뿐만 아니라 에너지 관련산업의 ET분야의 열교환에 사용되는 핵심적인 장치로 발전하고 있다.

특히 확산접합(Diffusion Bonding) 콤팩트 열교환기는 화학적 에칭된 마이크로채널 박판을 적층 밀착시켜 모재의 용점 이하 온도에서 소성변형이 생기지 않을 정도로 가압하여 접합면간에 생기는 원자의 확산을 이용하여 접합하는 제작 기술을 말한다. 특징으로는 기존 열교환기 대비 크기를 획기적으로 줄일 수 있으며, 고온고압에 견딜 수 있고 온도근접성이 우수하여 효율이 높다는 장점이 있다.

현재까지 확산접합 열교환기는 영국의 Heatric사에서 세계 최초로 상용화에 성공하였으며, 인쇄형 열교환기(PCHE : Printed Circuit Heat Exchanger)라는 명칭으로 고온 고압의 석유화학 플랜트, 연

† 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 에너지설비기술지원센터

E-mail : kwonok@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8528 FAX : (041)589-8330

* 회원, 한국생산기술연구원 에너지설비기술지원센터

료전지 반응기 및 개질기, CO₂ 히트펌프 및 운수기 등의 열교환장치 등에 적용하고 있으며, 전세계적으로 수요처가 크게 확대되고 있다.⁽¹⁾

확산접합을 이용한 열교환기 연구는 일본 동경공업대학의 Kato 연구팀에 의해 주로 수행되었다. Nikitin 등⁽²⁾은 초임계 CO₂ 냉매를 이용하여 실험적으로 열전달과 압력강하 특성을 규명하고 실험상관식을 제안하였다. 실험 레이놀즈수 범위에서의 총괄열전달계수는 300~650 W·m²/K 이었다. Ngo 등⁽³⁾은 온수를 제조하기 위해 CO₂ 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, CO₂ 측에서 압력강하는 37% 작게 나타난다고 주장하였다.

또한 Tsuzuki 등⁽⁴⁾은 S 형태의 핀과 지그재그 형태의 핀의 열적 수력성능을 3차원 전산해석을 통해 비교 평가하였으며, S 형태의 핀이 열전달 성능은 동일하면서 압력강하는 1/5로 줄일 수 있는 형상이라고 제안하였다.

국내에서는 확산접합과 마이크로 채널을 적용한 PCHE에 관한 연구는 전무한 실정이었으나 (주)이노윌에 의해 처음 시제품이 선보인 단계이며, 김 등⁽⁵⁾은 직관채널의 확산접합 열교환기에 대해 질량유량과 고온측 온도를 변화시켜 열전달과 압력강하 특성을 실험적으로 평가하였다.

본 연구에서는 4종류의 채널 형상을 가지는 확산접합 열교환기를 설계, 제작하고 물 대 물 실험장치를 제작하여 채널 형상에 따라 열전달 및 압력강하에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 확산접합 열교환기

확산접합 열교환기의 재료는 SUS 304로 제작하였고 두 유체의 흐름조건은 대향류(Counter flow)로 고온측 10장, 저온측 10장을 번갈아 가며 적층하였으며 양쪽에 엔드플레이트를 설치하였다.

실험대상 열교환기는 채널면이 한면만 에칭된 Straight type, Long dot type, Splited wavy type 3종류와 채널면이 양면 에칭된 Straight type 1종류를 더하여 총 4종류를 실험하였다.

Fig. 1은 실험대상 확산접합 열교환기의 사진을 나타낸 것으로 열교환기의 크기는 135(L)×40(W)×21(H) mm로 동일하다. 한면 에칭된 채널판은 채널폭이 1.5 mm, 채널높이가 0.6 mm이고 양면 에칭된 채널판은 채널폭이 1.5 mm, 한면의 채널높이가 0.4 mm로 양면이므로 전체의 채널높이는 0.8 mm이다. 마이크로 채널의 상세 제원은 Table 1에 나타내었다.

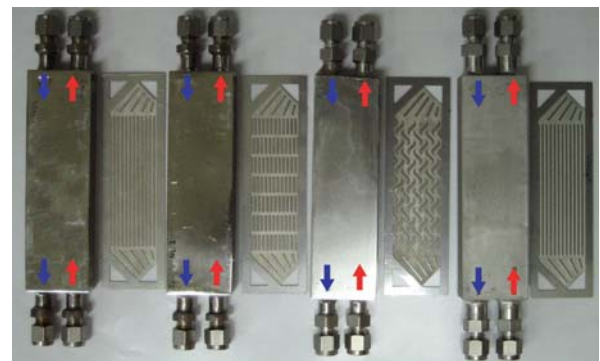


Fig. 1 Photos of diffusion bonded heat exchanger

Table 1 Specifications of micro channel

Type	Appearance	Dimensions
Straight		F _w : 1.0mm C _w : 1.5mm F _H : 0.6mm F _L : 81.5mm
Long dot		F _w : 1.0mm C _w : 1.5mm F _H : 0.6mm F _L : 9.8mm
Splited wavy		d _f : 1.4mm d _y : 5.67mm l _x : 5.72mm Ψ : 40.85mm Φ : 46.08mm
Straight double side		F _w : 1.0mm C _w : 1.5mm F _H : 0.4mm×2 F _L : 81.5mm

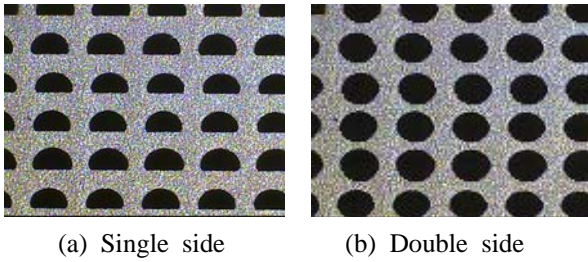


Fig. 2 The sections of diffusion bonded heat exchanger

Fig. 2는 확산접합 열교환기의 (a) 한면과 (b) 양면 단면 사진을 나타낸 것이다.

2.2 실험장치

Fig. 3은 본 연구에 사용된 실험장치를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 작동유체의 고온 순환부, 냉각수의 저온 순환부, 고온측과 저온측의 작동유체가 열교환하는 시험부로 구성된다.

고온측과 저온측 작동유체의 온도와 유량을 일정하게 유지하기 위해 2대의 항온조(Jeio tech, RW-0525G)와 정유량펌프(Micropump, GB-P35)를 사용하였다. 시스템의 맥동방지를 위해 바이패스 밸브를 사용하였고, 냉각수의 이물질을 여과하기 위해 5 μ m의 마이크로 필터(Ultrafilter GmbH, P-SM 03/10)를 사용하였다. 시스템 및 시험부의 열손실을 막기 위해 실험장치 전구간에 걸쳐 단열처리를 하였다.

또한 열교환기 입출구의 유량과 온도를 측정하기 위해 질량유량계(Badger Meter, RCM-125) 및 열전대(Omega, T-type)를 설치하였다. 또한 입출구의 차압을 측정하기 위해 고온측과 저온측에 각각 차압계(Rosemount, 3051S)를 설치하였다. 각 계측장치는 보정(Calibration)을 수행한 후 유량, 온도 및 차압 등을 데이터 레코더(Yokogawa, MV200)를 이용하여 정상상태에서 모든 결과를 0.5초 간격으로 저장하였다.

Table 2 Experimental conditions

	Hot side	Cold side
Inlet Temp. (°C)	40 50 60 70 80	20
Flow rate (kg/h)	24 48 72 96 120	24 48 72 96 120

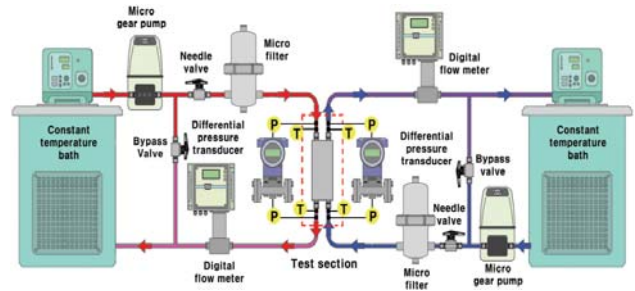


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

계측장비의 오차로써 유량은 $\pm 0.1\%$, 온도 $\pm 0.15\%$, 압력은 $\pm 0.1\%$ 이다. 실험 데이터에 대한 불확실성⁽⁶⁾ 해석을 통해서 열전달률 $\pm 0.76\%$, 총괄 열전달계수 $\pm 1.07\%$, f 인자(f factor) $\pm 0.22\%$, j 인자(j factor) $\pm 1.08\%$ 의 값을 가진다.

2.3 실험방법

실험에 사용된 고온측과 저온측의 작동유체는 증류수를 사용하였으며, 고온측과 저온측의 작동유체는 항온조를 통하여 일정하게 유지시켰다. 저온측은 20°C로 일정하게 고정시켜 놓고 고온측은 40°C에서 80°C까지 10°C간격으로 변화시켰으며, 고온측과 저온측의 유량조건은 정유량펌프를 통하여 동일하게 하였다.

실험은 ARI(Air-conditioning & Refrigeration Institute)의 성능 검사 규격⁽⁷⁾에 따라 해당 실험조건으로 실험장치를 가동하는 동안 첫째, 열교환기의 입구 및 출구의 각 온도값이 평균값으로부터 0.3°C 이상 변하지 않고 둘째, 고온측과 저온측의 유량이 평균값에서 $\pm 2\%$ 이상 변화지 않으며 셋째, 고온측과 저온측의 입출구온도로 계산한 열량이 평균값과 $\pm 5\%$ 이하의 차이를 보이면 정상상태로 판단하였으며 이 상태를 5분 이상 유지시킨 후에 데이터를 컴퓨터에 저장하였다. 저장하는 데이터는 열교환기 고온측 및 저온측의 입출구 온도, 유량, 차압이다.

4종류의 확산접합 열교환기를 동일한 방법으로 실험하였으며, Table 2는 실험에 사용된 실험조건이다.

2.4 결과처리

고온측과 저온측의 열전달율은 식 (1)과 (2)를 이용하여 구하였다.

$$Q_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (1)$$

$$Q_c = \dot{m}_c C_{p,h} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2)$$

여기서, 첨자 h 와 c 는 고온측과 저온측을 i 와 o 는 입구와 출구를 나타낸다.

총괄열전달계수는 대수평균온도차(LMTD)와 평균 열전달률(Q_m)을 이용하여 식 (5)와 같이 구하였다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (3)$$

여기서 $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$, $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$ 이다.

$$Q_m = \frac{Q_h + Q_c}{2} \quad (4)$$

$$U = \frac{Q_m}{A_s \Delta T_{LMTD}} \quad (5)$$

고온측과 저온측 작동유체의 열전달 유용도 (Effectiveness)는 식 (6)과 같이 구하였다.

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (6)$$

$$C_h = \dot{m}_h C_{p,h}, \quad C_c = \dot{m}_c C_{p,c} \quad (7)$$

여기서, C_{\min} 은 C_h 와 C_c 중에서 작은 쪽의 열용량으로 정의한다.

열교환기의 f 인자와 j 인자는 식 (8)과 (9)를 이용하여 구하였다.

$$f = \frac{2\Delta P \cdot D_h}{\rho u^2 L} \quad (8)$$

$$j = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{1/3}} \quad (9)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 질량유량에 따른 확산점합 열교환기의 열전달률을 나타낸 것이다. 고온측 작동유체의 온도는 80°C , 저온측 작동유체의 온도는 20°C 로 일정한 조건에서 동일한 질량유량으로 평균 열전달률을 비교하였다.

질량유량이 증가함에 따라 모든 채널형상에서 열전달률이 증가하였으며, Splited wavy type이 고온측과 저온측의 유체 교란효과가 우수하여 가장 높은 열전달률을 보였다. 한편만 에칭된 열교환기(Splited wavy type, Long dot type, Straight type)가 양면 에칭된 열교환기(Straight type)에 비해 열전달률이 전체적으로 높게 나타났다. 이것은 양면 에칭된 열교환기의 수력직경이 크기 때문에

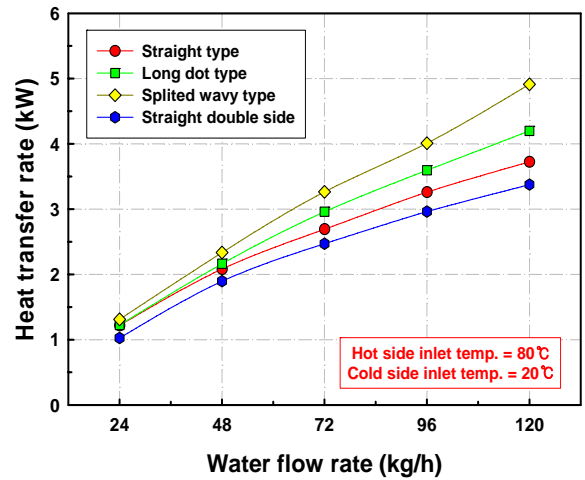


Fig. 4 Variation of heat transfer rate with the flow rate

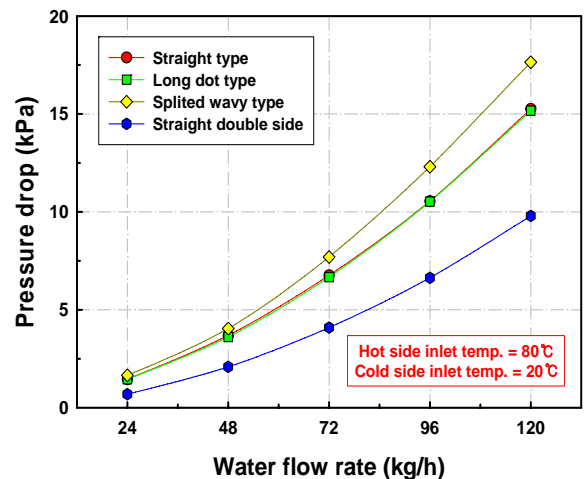


Fig. 5 Variation of pressure drop with the flow rate

열전달 성능이 저하되는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 질량유량에 따른 확산접합 열교환기의 압력강하를 나타낸 것이다. Fig. 4와 동일한 조건에서 질량유량이 증가함에 따라 압력강하는 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. Fig. 4의 열전달률의 경향과는 반대로 한면의 Splited wavy type이 압력강하가 가장 크고, 양면의 Straight type이 가장 낮게 나타났다.

Fig. 6은 고온측 작동유체의 온도변화에 따른 확산접합 열교환기의 열전달률을 나타낸 것이다. 고온측 작동유체의 온도는 40℃에서 80℃까지 10℃씩 변화시켰으며 저온측 작동유체의 온도는 20℃로 일정한 조건에서 동일한 질량유량으로

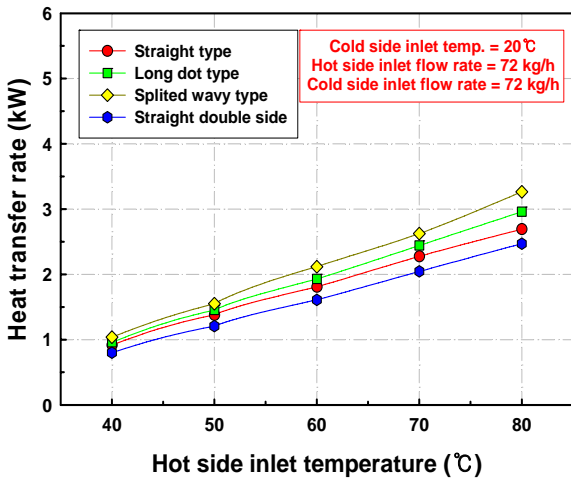


Fig. 6 Variation of heat transfer rate with hot side inlet temperature

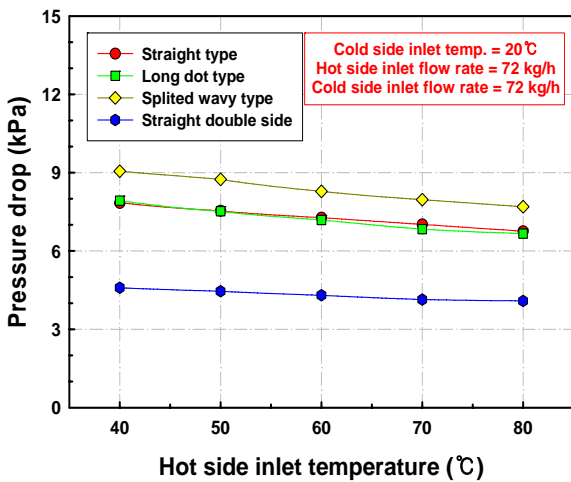


Fig. 7 Variation of pressure drop with hot side inlet temperature

평균 열전달률을 비교하였다.

고온측과 저온측의 온도차가 커질수록 모든 채널형상에서 열전달률은 증가하는 경향을 보였으며, Splited wavy type이 가장 높은 열전달률을 보였다.

Fig. 7은 고온측 작동유체의 온도변화에 따른 확산접합 열교환기의 압력강하를 나타낸 것이다. 모든 채널형상에서 고온측 작동유체의 온도가 증가할수록 압력강하는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 고온측으로 갈수록 작동유체의 점성계수가 작아지기 때문이다. 압력강하는 Splited wavy type이 가장 크고, 양면의 Straight type이 가장 낮게 나타났다.

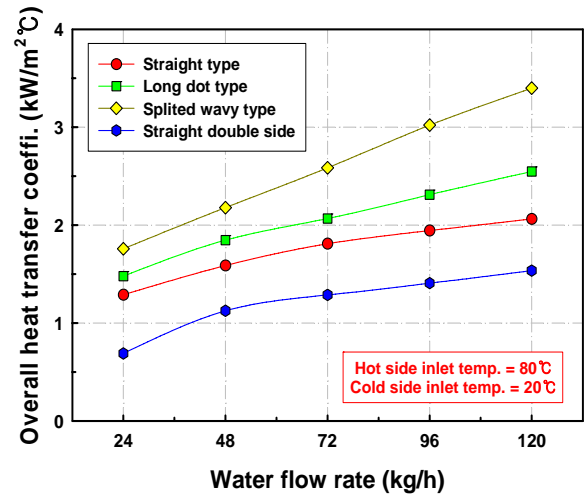


Fig. 8 Variation of overall heat transfer coefficient with the flow rate

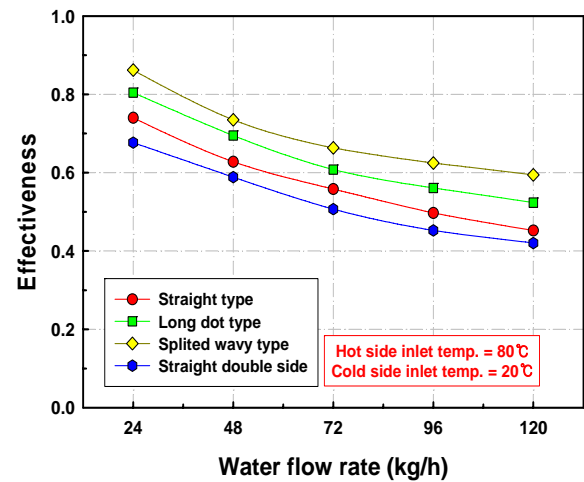


Fig. 9 Variation of effectiveness with the flow rate

Fig. 8은 질량유량에 따른 확산접합 열교환기의 총괄열전달계수를 나타낸 것이다. 질량유량이 증가함에 따라 총괄열전달계수는 증가하는 경향을 보였다. 각 채널형상에 따른 총괄열전달계수는 Fig. 4의 열전달률의 경향과 유사하게 나타났다. 기준유량인 72 kg/h에서 Splited wavy type은 2.58 kW/m²°C로 가장 높게 나타났고, 양면의 Straight type은 1.28 kW/m²°C로 가장 낮게 나타났다.

Fig. 9는 확산접합 열교환기의 성능을 나타내는 유용도를 나타낸 것이다. 질량유량이 증가함에 따라 유용도는 감소하는 경향을 보였다. 각 채널형상에 따른 유용도는 질량유량 24 kg/h에서 Splited wavy type 0.86, Long dot type 0.80, Straight type 0.74, 양면의 Straight type은 0.68로

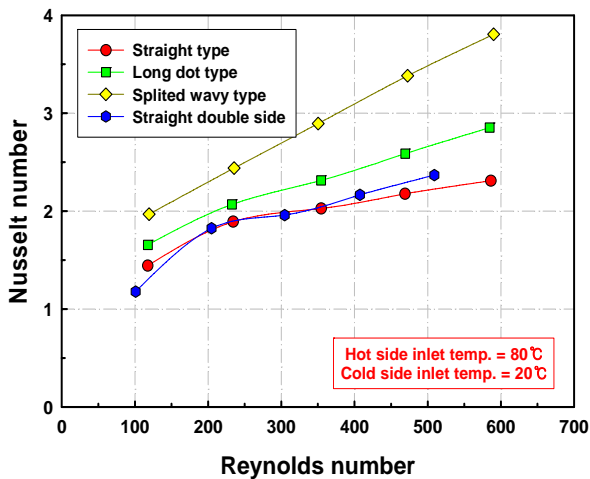


Fig. 10 Variation of Nusselt number with the Reynolds number

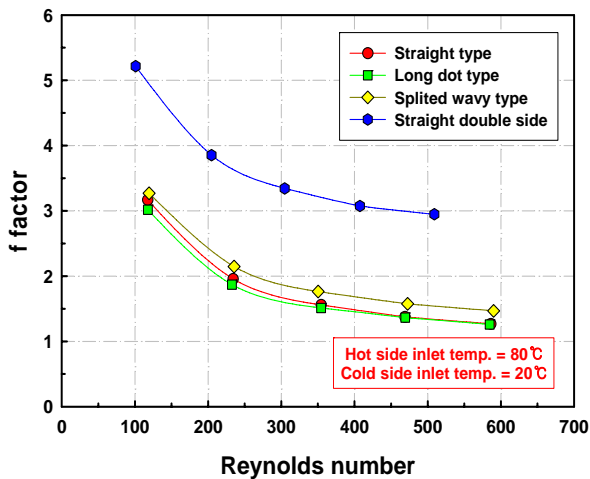


Fig. 11 Variation of f factor with the Reynolds number

나타났다.

Fig. 10은 레이놀즈수 증가에 따른 누셀트수의 변화를 나타낸 것이다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 누셀트수는 증가하는 경향을 보이며, Splited wavy type이 가장 높고, 한편 Straight type과 양면의 Straight type은 거의 유사한 경향을 나타내었다. 이것은 한편인 경우 열전달계수는 크지만 수력직경이 작기 때문에 누셀트수는 양면과 거의 유사한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 레이놀즈수 증가에 따른 마찰계수인 f 인자를 나타낸 것이다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 f 인자는 감소하는 경향을 보이며, 양면인 Straight type이 가장 높은 값을 나타내었다. 이것은 양면인 Straight type이 압력강하는 가장 낮지만,

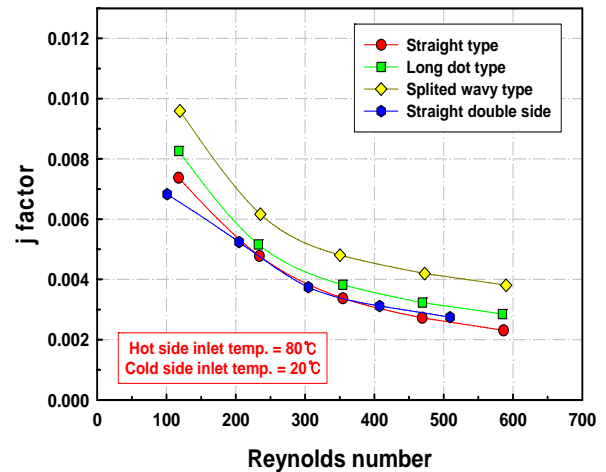


Fig. 12 Variation of j factor with the Reynolds number

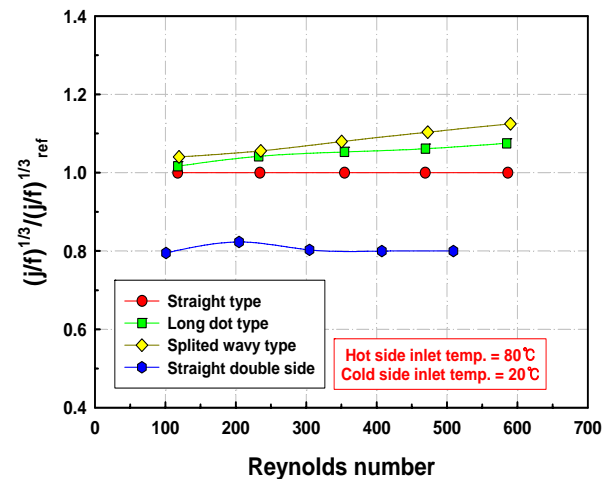


Fig. 13 Comparison of $(j/f)^{1/3} / (j/f)^{1/3}_{ref}$ with the Reynolds number

상대적으로 열교환기내 유속이 느리고, 수력직경이 크기 때문에 f 인자는 큰 것으로 판단된다.

Fig. 12는 레이놀즈수 증가에 따른 열전달 무차원계수인 j 인자를 나타낸 것이다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 j 인자는 감소하는 경향을 보이며, 실험유량 범위에서 한면의 Splited wavy type이 가장 높은 값을 나타내었다.

Fig. 13은 열전달성능과 압력손실이 함께 고려된 정량적인 비교를 위하여 j 인자와 f 인자의 비인 $(j/f)^{1/3}$ 를 이용하여 한면의 Straight type과 비교한 열교환기의 성능향상을 알아본 것이다. 동일한 레이놀즈수 470에서 한면의 Straight type과 비교하여 Splited wavy type은 10.3%, Long dot type은 6.1% 증가하였으며, 레이놀즈수가 증가함에 따라 상대적인 성능은 계속 증가하였다. 그러나 양면의 Straight type은 오히려 19.7% 작게 나타났으며, 레이놀즈수에 따른 변화는 거의 없었다.

4. 결 론

4종류의 채널 형상을 가지는 확산접합 열교환기의 성능을 실험적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 질량유량이 증가함에 따라 모든 채널형상에서 열전달률과 압력강하가 증가하였으며, Splited wavy type이 열전달률과 압력강하가 가장 높게 나타났다.

(2) 고온측과 저온측의 온도차가 커질수록 모든 채널형상에서 열전달률은 증가하였으며, 고온측 작동유체의 온도가 증가할수록 점성계수의 영향으로 압력강하는 감소하는 경향을 나타내었다.

(3) 총괄열전달계수는 기준유량인 72 kg/h에서 Splited wavy type은 2.58 kW/m²°C로 가장 높게 나타났고, 양면의 Straight type은 1.28 kW/m²°C로 가장 낮게 나타났다.

(4) 확산접합 열교환기의 성능을 나타내는 유용도는 질량유량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 각 채널형상에 따른 유용도는 질량유량 24 kg/h에서 Splited wavy type 0.86, Long dot type 0.80, Straight type 0.74, 양면의 Straight type은 0.68로 나타났다.

(5) 열전달성능과 압력손실이 함께 고려된 $(j/f)^{1/3}$ 를 이용하여 비교한 결과 레이놀즈수 470에서 한면의 Straight type과 비교하여 Splited wavy type

은 10.3%, Long dort type은 6.1% 증가하였으나 양면의 Straight type은 오히려 19.7% 작게 나타났다.

후 기

본 연구는 부품소재 전문기업 기술지원사업(과제번호 : 08-FS-1-0011)에 의해 수행되었으며 열교환기 제작에 협조해주신 (주)이노월 관계자 여러분께 감사드립니다.

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 CO₂ 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) Kim, Y. H., Lee, K. J., Moon, J. E. and Choi, Y. J., 2008, "An Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop in Diffusion Bonded Micro-channel Heat Exchangers," *Proceedings of the KSME 2007 Fall Annual Meeting*, pp. 1691~1696
- (6) Holman, J.P., 2000, *Experimental Method for Engineer*, 7th ed., McGraw-Hill pp. 51~60.
- (7) ARI STANDARD 400-2001 with Addendum 2, 2005, *Liquid to Liquid Heat Exchangers*