한국에너지공학회(2004년도)
추계 학술발표회 논문집 P13~18

고효율 Chevron형 판형열교환기의 실험적 연구

노선종, 유근종, 최훈기
국립 창원대학교

Experimental Study of the High Efficiency Chevron Type Plate Heat Exchanger

Noh Sun Jong, Yoo Geun Jong, Choi Hoon Ki
Changwon National University

1. 서론

산업계에 적용되고 있는 열교환기는 유체의 종류, 온도, 운전조건, 열전달 특성 및 압력강하 등 여러 조건에 의하여 종류가 결정되며 Shell & Tube형, Fin형, 판형열교환기 등은 산업계에 이용되고 있는 대표적인 열교환기이다. 그 중에서도 열전달 성능이 가장 우수한 열교환기는 판형열교환기이다. 판형열교환기는 전열판의 주름에 의하여 아주 낮은 Reynolds 수에서도 난류를 유도하기 때문에 두 유체의 열전달 계수가 Turbular 열교환기의 2~4배 정도로 크고, 구조상 By-pass와 누수가 없으며 항상 향류로 조업할 수 있어 열효율이 높은 것이 최대의 장점이다. 그리고 Shell & Tube 열교환기는 실제 온도 Approach를 약 5℃이상 되어야 하는 반면에, Plate 열교환기의 온도 Approach가 1℃까지 낮아도 가능하기 때문에 열회로용으로 아주 이상적이다. 또한 오염계수는 유체의 짧은 응답시간과 높은 난류효과, 그리고 국부적으로 유속이 낮은 지역이 없기 때문에 Turbular type보다 1/5정도이하이므로 침전에 의한 오염이 잘 되지 않으며, 용접을 하지 않는 간단한 구조로 되어 있기 때문에 보전과 정비를 위해 분해가 쉬워 유지보수가 용이한 장점이 있다.

판형열교환기는 판 사이에 흐르는 유체유동이 매우 복잡하여 수치적 연구는 거의 진행되지 않고 있으며 세브론형에 대한 기본적인 실험에 의한 연구만 한정되고 있는 실정이다. 서 등[1]은 표준 판형열교환기에 대하여 일정한 열유속조건으로 수치적 해석을 수행하였다. 판에서의 열전달은 입구영역과 출구영역에서의 온도 및 열전달 계수가 다르므로 서[1]등의 해석은 정확도 측면에서 한계성을 가진다. Focke 등[2], Thonon과 Marvillet[3]들은 세브론 타입 열교환기에 대하여 세브론 각의 변화에 따른 실험적인 연구를 실시하였다. 세브론 각도가 증가함에 따라 열전달 계수와 압력강하가 증가함을 보였다. Muley와 Manglik[4] 세브론 각이 30°인 판과 60°인 판을 서로 교차하여 시스템을 구성하여 실험을 실시하였고 판과 유체가 접하는 면적을 고려하여 레이놀즈 수와 열전달 계수와의 관계식을 구하였다. 김윤호와 이규정은[5] 세브론 각에 따른 증발 열전달 특성 및 압력강하에 관한 연구를 하였다. Ciofalo[6]은 열판의 무늬의 일부만을 구성하여 실험 및 수치해석을 실시하여 결과를 비교분석하였다.

지금까지 수행된 연구들은 V-파형이 1개만 있는 표준형 세브론전열판에 국한되어 수행되어왔다. 하지만 본 연구에서는 전열판의 V-파형의 무늬 개수를 늘려 유체유동이 한방향으로 쏠리는 현상을 방지하여 열전달 성능을 향상시키고, 판의 입구부분을 보다 최적화된 형상으로 설계하여 코너에서 발생되는 유동의 dead zone을 줄임으로서 열전달 성능을 향상시키고 압력강하를 감소시켜 효율이 향상된 열교환기의 개발에 그 목적이 있으며 아울러 실험을 실시하여 그 성능을 검증하였다.

2. 이론(실험 및 방법)

2-1 시험부

Fig. 1은 시험부의 조립형식과 열판의 구조를 나타내고 있다. 시험 열판은 세브론 타입 중 herring bone type이다. 총 판의 수는 11장이며, 직접 열전달을 하는 열판의 수는 9장이다. 유로는 단일 유로이며 U-type으로 구성되어져 있다. 채널수는 고온 유체, 저온 유체 각각 5개이다. 열판의 기하학적인 정보는 Table 1과 같다.

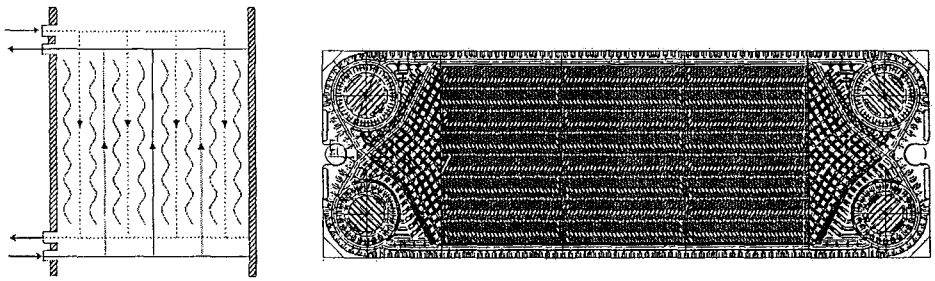

Fig. 1 Arrangement and Chevron plate

Table 1 Plate geometry information

구분	크기
Wavelength of surface corrugation	0.01299 m
Corrugation depth	0.0034 m
Plate width	0.336 m
Length between port	1.259 m
Chevron Angle	120 ℃

2-2 실험 장치 및 방법

실험 장치는 Fig. 2에 나타내었다. 판형열교환기의 고온부, 저온부의 입·출구에 각각 압력센서 와 온도센서를 장치하였고, 펌프에 의해서 입구로 들어오며 Super sonic flowmeter로 유량을 측정하였다.

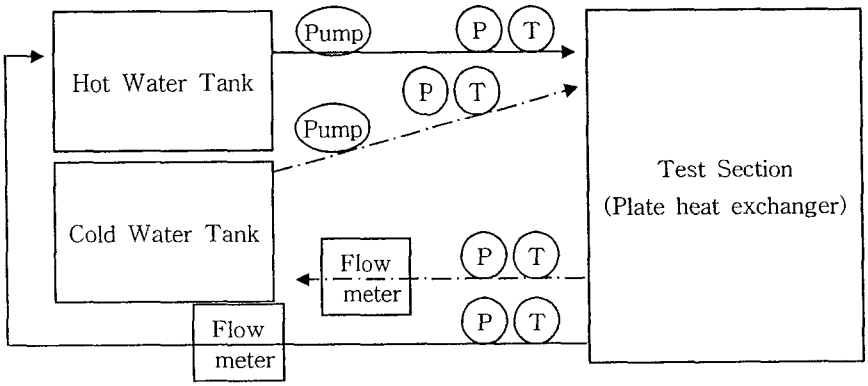

Fig. 2 Schematic of experimental system

압력센서는 오차가 ±1%인 Denfoss사의 MBS3000을 사용하였고, 온도센서는 K-type이며

오차가 ±2.2℃이다. 데이터 습득 장치는 Fluke 사의 2640와 0.01%로 정밀저항을 이용하였고, 데이터의 저장은 노트북과 동기화로 이루어진다. 작동 유체는 고온부 저온부 둘 다 물이며 실험은 Pr 3~5.5 와 Re 4000~10000인 범위 안에서 실시하였다. 두 유체의 진행 방향은 대향류이다.

3. 결과 및 고찰

3-1 실험 데이터 추출

대향류이기 때문에 식(1)과 (2)를 이용하여 평균온도를 구하였으며, 본 연구에서 사용되는 물성치는 아래의 온도에서 구한 값을 적용하였다.

$$T_{c,b} = (T_{c,i} + T_{c,o})/2, \quad T_{h,b} = (T_{c,b} + T_{lm}) \tag{1}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln[(T_{h,in} - T_{c,out}) / (T_{h,out} - T_{c,in})]} \tag{2}$$

식(3)을 이용하여 에너지 균형를 점검하였다. 그 결과 고온 유체에서 잃은 에너지와 저온 유체에서 얻은 에너지의 상대 오차는 4%이내 이며, 그 기준은 상호 열전달량의 산술 평균이다.

$$Q = [\dot{m}c_p(T_i - T_o)]_h = [\dot{m}c_p(T_i - T_o)]_c \tag{3}$$

Fig. 3에는 열전달량, Fig. 4에는 에너지 균형에 관한 상대오차를 나타내었다.

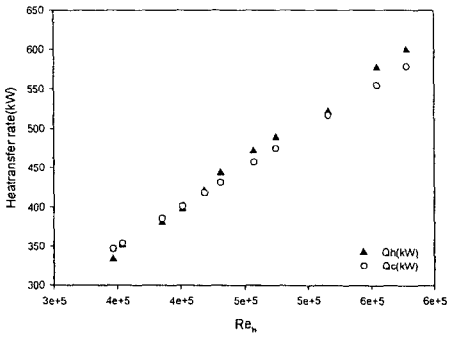

Fig. 3 Heat transfer rate

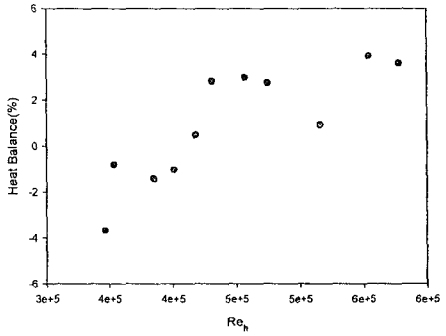

Fig. 4 Heat Balance

3-2 열전달 특성

열전달 유용도 ε는 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, 단위전달 수인 NTU는 대향류의 경우 식(5)와 같다.

$$\varepsilon = \frac{Q}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \tag{4}$$

$$NTU = \left[\frac{1}{(1 - C^*)}\right]\ln\left[\frac{(1 - \varepsilon C^*)}{(1 - \varepsilon)}\right] \tag{5}$$

$$C^* = C_{\min}/C_{\max}$$

본 연구에서는 Nusselt number를 구하기 위하여 Wilson plot방법을 적용하기로 하였다. 열관류율인 U는 식(4) 와 (5)에 구한 것을 이용하여 식 (6)으로 구한다.

$$U = \frac{(C_{\min} NTU)}{A} \tag{6}$$

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{Ah_h} + \frac{1}{Ah_c} + R_{plate} \tag{7}$$

판형열교환기에서는 새 판을 사용하여 오염도가 낮기 때문에 식(7)에서 오염계수 항을 생략하였다. Wilson plot 법에 적용하기 위하여 Dittus-Boelter correlation[7]을 이용한다. Dittus-Boelter correlation은 식(8)이며 C_1는 0.0791로 제시되어있다.

$$Nu = C_1 \cdot Re^{0.8} \cdot \mathrm{Pr}^{0.3} \tag{8}$$

Dittus-Boelter correlation은 2500<Re<105, 0.7<Pr≤120의 범위에 유효하다. 식(8)에 Re, Pr, Nu의 정의들을 대입한 뒤에 식(7)에 적용하면 식(9)와 같다

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{C_1}(\rho^{0.8} D_h^{-0.2} \mu^{-0.5} c_p^{0.3} k^{-0.7} u^{0.8})^{-1} + C_2 \tag{9}$$

식(9)와 같이 에너지 평형식을 변환한 후, 실험 데이타를 최소자승법을 이용하여 Fig. 5처럼 그래프를 완성하였다. 미지수 $\frac{1}{C_1}$은 그래프에서 기울기로, C_2는 절편으로 구한다. 구한 미지수를 앞의 식들에 다시 적용하여 열전달 계수 h를 구할 수 있다. Wilson plot 법은 판형열교환기에서 벽면 온도를 측정하지 못하는 한계를 극복 할 수 있는 방법이다.

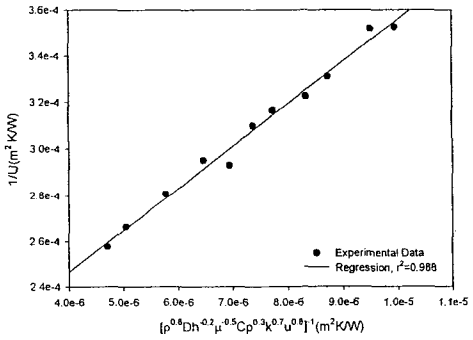

Fig. 5 Wilson plot result

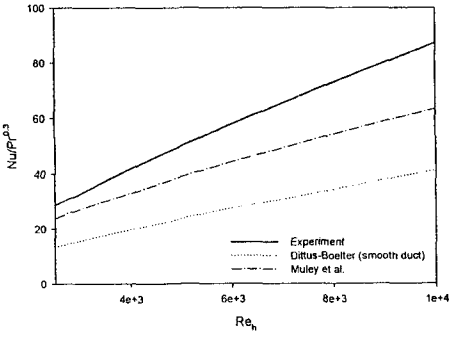

Fig. 6 Nu with Reynolds number

$$Nu = 0.05494 \cdot Re^{0.8} \cdot \mathrm{Pr}^{0.3} \tag{10}$$

본 실험에서 Wilson plot 법으로 구한 Nusselt number는 식(10)과 같다. Fig. 6은 실험에서 구한 correlation, Dittus-Boelter correlation 그리고 Muley and Manglik[4]의 correlation을 그래프로 나타내었다. Dittus-Boelter correlation 보다 실험에서 구한 Nusset number가 크

게 나오고 있으며, 그 기울기 또한 급하다. Muley and Manglik[4]와는 열판 형상의 차이로 직접적인 비교를 할 수는 없지만 그 결과는 유사하다. 그러나 높은 레이놀드 수에서는 본 연구에서 사용된 열교환기의 성능이 높게나오는 경향이 보인다. 이는 포트에서 코어 내로 유입하는 부분을 최적 설계하여 dead zone을 줄인 영향이 속도가 빠를 때 효과가 크기 때문이라고 보여진다.

3-3 압력강하 특성

실험에서 압력센서의 위치가 정확히 판형열교환기의 포트 부분에 설치되기 힘들기 때문에 포트에서 나온 유입 관에 설치된다. 그러므로 압력센서에서 측정되는 압력은 식(11)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Delta p_{measured} = \Delta p_{core} + \Delta p_{port} + \Delta p_{pipe} \tag{11}$$

판형열교환기 core부분의 무늬형상에 따른 압력강하 특성을 살펴보기 위해 core 부분의 압력에 관심을 가져야한다. pipe에서의 압력강하는 그 크기가 작아서 무시하고, port부분의 압력강하는 경험식에 의해서 식(12)처럼 표현 될 수 있다. 그러므로 측정된 압력강하에서 core 부분의 압력강하를 구하면 식(13)이 된다.

$$\Delta p_{port} = 1.5(\rho u_{port}^2/2) \tag{12}$$

$$\Delta p_{core} = \Delta p_{measured} - \Delta p_{port} \tag{13}$$

$$f = \frac{\Delta p_{core}}{2\rho u_m^2}\frac{d_e}{L} \tag{14}$$

식(13)에서 구하여진 core 부분의 압력강하를 식(14)에 대입하여 마찰계수를 구한다. 설계에 적용 할 수 있게 Blasius correlation을 기반으로 하여 상관식을 만들었다. Blasius correlation은 $4000<Re<10^5$ 범위에서 유효하다. 식(15)는 Blasius correlation이며 식(16)은 실험의 데이터로 Blasius correlation형태로 상관식을 만든 것이다. 그에 관한 것을 Fig. 7에 나타내었다.

$$f = 0.0791Re^{-0.25} \tag{15}$$

$$f = 0.430887Re^{0.0624984} \tag{16}$$

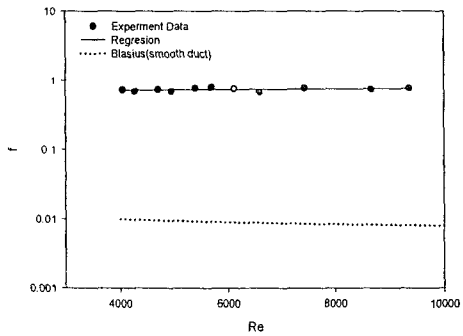

Fig. 7 Friction factor with Reynolds number

Fig. 7에서 보면 매끄러운 덕트에서의 마찰계수는 레이놀드 수가 증가할수록 매우 완만하게 작아지고 있다. 그러나 본 실험의 결과 그런 경향을 보이지 않고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 세브론 타입 판형열교환기 중 herring bone 형의 열판을 단일 유로 U 타입으로 구성하여 실험하였다. 작동유체는 물이며, 진행 방향은 대향류이다. 압력강하는 레이놀드 수수의 증가에 따라 증가하지만 그에 따른 마찰 계수는 변화가 크지 않았다. 실험 데이타를 근간으로 해서 Core부분의 압력강하를 예측하는 마찰계수에 관한 상관식을 만들어 같은 herring bone 형이 연속적으로 적용된 열판이나 비슷한 herring bone 형 설계에 길잡이 역할을 할 수 있다고 생각한다. 포트에서 유체가 유입도는 부분과 코어 부분의 최적 설계로 열전달 성능이 향상되었고, 그 영향은 높은 레이놀드 수에서 큰 것으로 나타나고 있다. 또한 상관식을 만들어 위의 압력강하와 마찬가지로 열교환기 설계에 도움이 될 수 있게 하였다.

5. 후 기

본 논문은 산업자원부 부품·소재 기술개발 사업비의 지원 하에 수행된 연구이며 이에 감사 드립니다

6. 참고문헌

1. 서무교, 박재홍, 김영수 "판형열교환기의 열전달 및 압력강하 특성에 관한 연구" 한국박용기계학회지 제25권 제3호, 2001
2. W.W. Focke, J.Zachariades and I. Olivier " The effect of corrugation inclination angle on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers" International Journal Heat Mass Transfer, Vol. 28, No.8, pp. 1469-1479, 1985
3. B. Thonon, R. ViDil and C. Marvillet "Recnet Research and Developments in Plate Heat Exchangers" Journal of Enhanced Heat Transfer, Vol. 2, Nos. 1-2, pp. 149-155, 1995
4. Muley, A. and Manglik, R.M. "Experimental Study of Turbulent Flow Heat Transfer and Pressure Drop in a Plate Heat Exchanger With Chevron Plates" ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 121, pp. 110~117, 1999
5. 김윤호, 이규정 "판형열교환기의 세브론각에 따른 증발 열전달 특성 및 압력강하에 대한 실험적 연구" 대한기계학회논문집 B권, 제26권 제2호, pp. 269~277, 2002
6. M. Ciofalo "Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages" International Journal Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 1, pp. 165~192, 1996
7. Ramesh K. Shah and Dusan P. Sekulic "Fundamentals of Heat Exchanger Design", WILEY, 2003