

판형 열교환기의 피치 및 세브론각이 열에너지 성능에 미치는 영향

강병하[†], 한상규^{**}

*국민대학교 기계·자동차공학부, **국민대학교 대학원

Effects of Plate Pitch and Chevron Angle in a Plate Heat Exchanger on Thermal Energy Performance

Byung Ha Kang^{*†}, Sang Kyu Han^{**}

^{*}School of Mechanical & Automotive Engineering, Kookmin Univ.

^{**}Graduate School of Kookmin Univ.

861-1 Chonnung-dong, Sungbuk-gu, Seoul, 136-702 Korea

ABSTRACT

Thermal energy performance of a brazed plate heat exchanger has been evaluated experimentally. The effects of plate pitch as well as chevron angle of a plate heat exchanger on the heat transfer rate and pressure drop have been investigated in the wide range as mass flow rates in detail. This problem is of particular interest in the design of a plate heat exchanger. The results obtained indicate that both heat transfer rate and pressure drop are increased as mass flow rate is increased, as expected. It is also found that the heat transfer rate is increased with a decrease in the plate pitch while the heat transfer is decreased with a decrease in the chevron angle. Friction factor correlations are suggested based on the measured pressure drop and effectiveness of plate heat exchangers are also compared.

주요기술용어 : Plate heat exchanger(판형열교환기), Chevron angle(세브론각), Plate pitch(플레이트 간격), Effectiveness(유효도), Heat transfer coefficient(열전달계수), Pressure drop(압력강하)

1. 서론

냉동 및 공조시스템 구성 요소부품의 고성능화와 전열면적을 극대화시킨 고밀도 열교환

기의 개발이 요구되고 있다. 이에 따라 열교환기의 전열성능 향상 및 압력손실을 최소화하는 고효율 시스템 개발이 활발히 연구되고 있다.

판형 열교환기는 고밀도 열교환기의 일종으로, 구조가 간단하고 다른 열교환기에 비해 소형이며

[†]Corresponding author : bhkang@kookmin.ac.kr

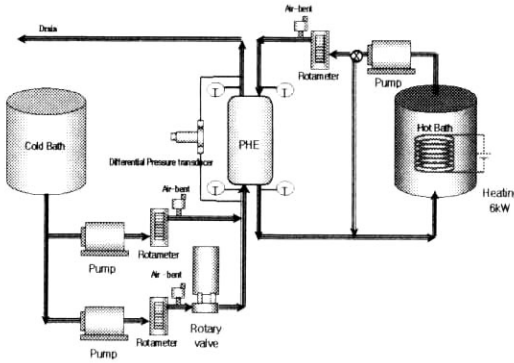


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

무게 또한 가볍다. 판형 열교환기에서는 유로 내에서 난류유동으로 유량분배가 일정하므로 채널 내부의 유동이 빠르고 열판의 표면이 매끄럽기 때문에 오염도가 매우 낮다. 판형 열교환기는 1930년도에 최초로 개발되어 식품산업의 열처리에 사용되다가 1950년대 후반에 빗살무늬(herringbone)형태의 열판이 도입되어 사용압력 및 온도를 이전보다 한 단계 높일 수 있었다. 1990년대에 이르러 기존의 개스킷형 판형 열교환기를 개량한 판과 판을 진공로에서 용접시키는 용접형 판형 열교환기가 개발되어 사용압력을 40 bar 까지 가능케 하였다¹⁾.

판형 열교환기의 열에너지 성능에 관한 연구가 많이 수행되었는데, Kim et al.²⁾이 용접식 판형 열교환기의 성능에 관한 실험적 연구를 통해 판형 열교환기에서 동일한 온도차를 갖는 경우 증발기의 열에너지 성능이 응축기보다 우수함을 보였다. Kim et al.³⁾은 판형 열교환기의 세브론각이 130°, 110°, 90°로 변환에 따라 열교환기의 응축열전달 특성 및 압력강하 특성을 건도에 따라 실험적으로 수행하여 세브론각이 클수록 열전달 계수와 압력강하량이 증가함을 보였다. 또한 Martin⁴⁾은 세브론각의 변화에 따른 열전달계수와 마찰계수, 물질전달계수와와의 관계에 관한 연구를 수행하여 열전달 특성 및 압력강하에 관한 상관식을 제시하였다. Kang and Kim⁵⁾은 판형열교환

Table 1 Specifications of the plate heat exchangers.

characteristics	case 1	case 2	case 3
size (length×height ×width)	112×310×78	130×210×45	112×310×78
Number of plates	10	12	10
Number of thermal plates	8	10	8
Heat transfer area for each plate	0.0325m ²	0.0320m ²	0.0325m ²
plate material	AISI 316	STS-304	AISI 316
chevron angle	120°	120°	60°
plate pitch	2.45 mm	1.42 mm	2.45 mm
Hydraulic diameter	4.795 mm	2.20 mm	4.795 mm

기의 열에너지 성능평가를 수행하여 레이놀즈수와 전달단위수가 증가할수록 열전달계수가 증가함을 보였다. Yan and Lin⁶⁾은 R-134a를 냉매로 이용하여 판형 열교환기의 증발열전달과 압력강하에 대한 연구를 수행하여 높은 건도에서 대류 열전달계수와 압력강하가 모두 높아짐을 보였다.

그러나 판형 열교환기의 주요 인자인 세브론각과 플레이트 피치의 변화에 따른 판형 열교환기의 열에너지 성능평가에 관한 체계적인 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 세브론각과 플레이트 피치의 변화가 판형 열교환기의 열전달 성능과 압력강하 특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 한다.

2. 성능시험

2.1 성능시험장치

본 연구에 사용된 판형 열교환기의 제원을 Table 1에 표시하였다. 판형 열교환기의 주요인자인 세브론각과 플레이트 피치에 따라 case 1,

case 2, case 3의 세 가지 경우로 분류하였다. Case 1과 case 2는 120°의 세브론각을 가진 광각 전열판으로 되어있고, case 3의 경우 60°의 세브론각을 가진다. 또한 case 1과 case 3는 2.45 mm의 플레이트 피치를 가지나, case 2의 플레이트 피치는 1.42 mm 이다.

판형 열교환기의 성능을 평가하기 위한 시험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 시험장치는 시험부인 판형 열교환기와 저온 항온조, 고온 항온조로 구성된다. 판형 열교환기의 작동 유체로는 물을 사용하였다. 저온측과 고온측의 입·출구 온도는 일정하게 유지시키면서 유량의 변화에 따른 열전달 성능과 압력강하의 변화를 실험하였다.

고온측과 저온측의 출구에서의 유량의 정확한 측정을 위해, 초시계와 비이커, 전자저울을 이용하여 60초간 측정된 유량의 평균값을 이용하여 유량계(Rotameter, Dwyer)를 보정하였다. 판형 열교환기의 저온측과 고온측의 입·출구 유로에 열전대 (T-type, Omega)를 설치하여 유로 내 물의 입·출구 온도를 측정하였다. 실험에 사용된 열전대는 동일한 온도를 측정할 수 있도록 정밀도 0.1°C의 수은 온도계를 이용하여 보정하였다. 압력강하를 측정하기 위해 판형 열교환기 입·출구에 차압계(Differential pressure gauge, Sensotec)를 설치하여 입·출구에서의 차압을 측정하였다. 본 실험에서 얻어지는 온도 및 압력측정 데이터는 데이터 취득장치(Yokogawa, DR230)를 이용하였다.

2.2 성능시험 방법

판형 열교환기의 성능을 평가하기 위하여 정상 유동(steady flow) 시험을 수행하였다. 저온측 입구의 온도는 25±0.2°C, 고온측 입구의 온도는 40±0.2°C가 유지될 수 있도록 하였고, 고온측이 저온측과 열교환 후 잃는 열량은 가열기로 보상하도록 하였다. 고온측에는 원심펌프 출구에 바이패스 밸브를 설치하여 유량을 조절하고, 저온측에는 유량조절이 가능한 유량계를 설치하여 유량을

조절하였다.

열교환기에서 대류 열전달계수로 열전달 성능을 평가하기 위해 저온측과 고온측의 질량유량을 동일하게 맞추어 유량을 각각 0.04, 0.06, 0.09, 0.11, 0.12 kg/s 로 변화시키며 실험을 수행하였다. 판형 열교환기의 입·출구 온도가 정상상태(steady state)에 도달한 후 3분간의 온도를 평균하여 온도데이터를 취득하였으며, 데이터 측정주기는 1초당 2개로 설정하였다. 저온측과 고온측의 유량, 압력강하량은 저온측과 고온측 입·출구의 온도가 정상상태가 된 후에 모든 데이터를 측정하였다.

3. 성능시험 결과의 해석

저온측과 고온측의 열전달량은 식(1)과 식(2)로 구하였다. 식(3)을 이용하여 열에너지 평형이 ±5% 이내에서 이루어짐을 확인하였다.

$$Q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (1)$$

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2)$$

$$Error(\%) = \left| \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \right| \times 100 \quad (3)$$

총합 열전달계수를 계산하기 위하여 저온측과 고온측 열전달계수의 평균값을 식(4)로 구하였다.

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

열전달량과 대수평균온도차에 관한 식은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = UA\Delta T_{LMTD} \quad (5)$$

대수평균온도차는 열교환기의 입·출구 온도차를 이용하여 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (6)$$

for $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$

$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$

총합 열전달계수 U는 식(5), (6)을 이용하여 식(7)과 같이 나타내었다.

$$\frac{1}{U} = \frac{\Delta T_{LMTD} A}{Q} \quad (7)$$

식(7)에서의 총합 열전달계수 U는 저온측과 고온측의 대류 열저항과 전열판의 전도 열저항으로 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{t}{k_{ss}} + \frac{1}{h_h} \quad (8)$$

정상유동과정에서 저온측과 고온측의 유량이 같을 때, 저온측 대류 열전달계수와 고온측 대류 열전달계수를 같다고 가정하였다. 따라서 판형 열교환기의 대류 열전달계수는 식(9)로 구하였다.

$$h = \frac{2}{\frac{1}{U} - \frac{t}{k_{ss}}} \quad (9)$$

유량에 따른 레이놀즈수는 식(10)으로 나타내었다.

$$Re = \frac{uD}{\nu} \quad (10)$$

본 연구에서의 유동은 저온측과 고온측의 유량이 동일한 균형 대향류이므로 판형 열교환기의 유용도 ϵ 는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

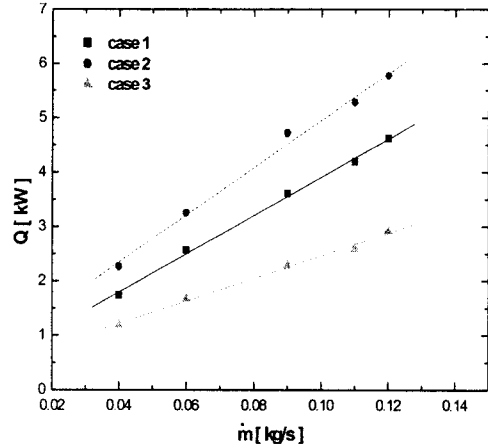


Fig. 2. Heat transfer rate variation as a function of mass flow rate.

$$\epsilon = \frac{Ntu}{1 + Ntu} \quad (11)$$

전달단위수 (number of transfer units) Ntu 는 저온측과 고온측의 유량이 같으므로 식(12)와 같이 저온측 열용량에 관한 식으로 정의하였다.

$$Ntu = \frac{UA}{C_c} \quad (12)$$

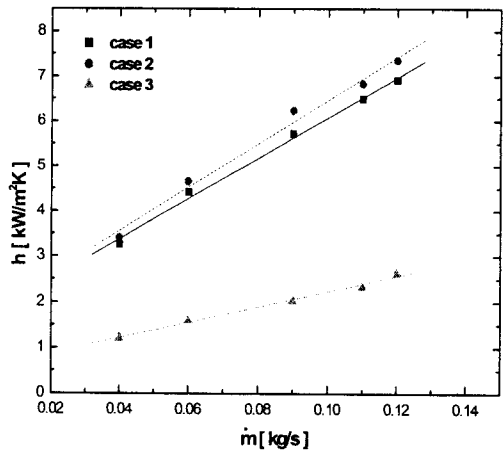


Fig. 3. Heat transfer coefficient variation as a function of mass flow rate.

열교환기에서 열전달 성능과 함께 중요한 요소인 압력강하를 평가하기 위해서 식(13)과 식(14)로 f -factor를 도출하였다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2} \quad (13)$$

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

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열전달 특성

질량유량의 변화에 따른 열전달량과 대류열전달계수의 분포를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 실험한 구간 내에서 질량유량이 증가할수록 모든 열교환기의 열전달량과 대류 열전달계수가 증가하였고, 세브론각이 크고 플레이트 피치가 좁은 case 1이 가장 큰 열전달량 값과 대류 열전달계수를 나타내었다. Case 3의 경우에는 열전달량 값과 대류 열전달계수 모두 가장 낮은 값을 보여주었다. 세브론각이 클수록 열전달계수가 커지는 이유는 세브론각이 증가함에 따라 높은 난류도를 형성하여 열전달계수를 향상시키기 때문이다.

Fig. 3에는 같은 세브론각을 가지면서 플레이트 피치가 다른 case 1과 case 2의 경우 열전달계수가 거의 비슷한 값을 보였다. 이는 플레이트 피치가 열전달계수에 미치는 영향은 세브론각에 의한 영향보다 작음을 보여준다.

판형 열교환기의 질량유량의 변화에 관한 유용도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 세 종류의 열교환기 모두 질량유량이 증가할수록 유용도가 감소하였으며, 세브론각이 크고 플레이트 피치가 좁은 case 2의 경우가 가장 유용도가 높게 나타났다. 같은 세브론각을 가진 열교환기에서 피치의 차이가 날지라도, 유용도는 크게 변하지 않았다. 세브론각이 작은 case 3의 경우는 유용도가 case 1과 case 2에 비해 0.2 이상 작게 나타나 판형 열교환기의 세브론각이 유용도에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.

4.2 압력강하 특성

판형 열교환기에서 유량에 따른 판형 열교환기의 단위 길이당 압력강하를 Fig. 5에 나타내었다. 질량유량이 증가할수록 판형 열교환기의 유동저항이 증가하여 압력 강하량은

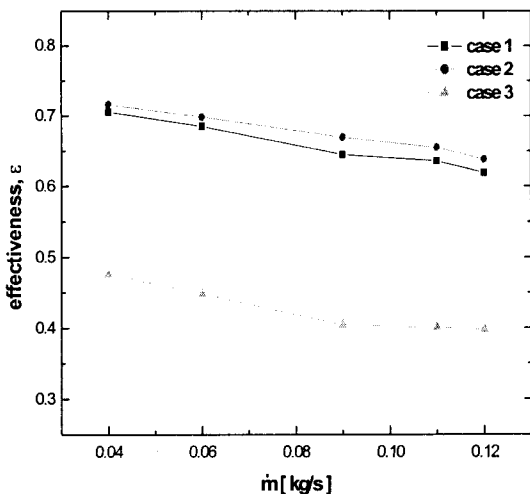


Fig. 4. Comparison of the effectiveness of plate heat exchangers.

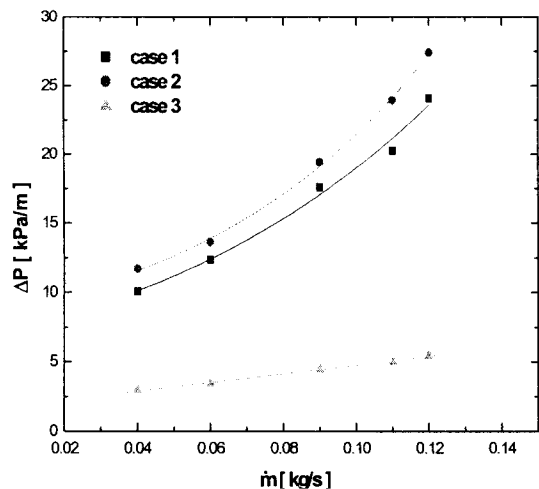


Fig. 5. Pressure drop variation as a function of mass flow rate.

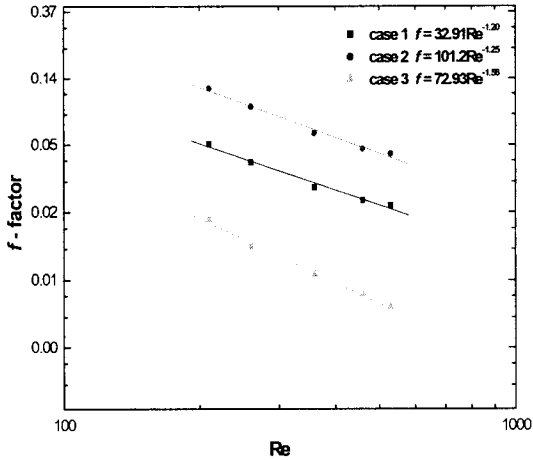


Fig. 6. *f*-factor correlations of the plate heat exchangers.

증가하였으며, 세브론각이 120°인 case 1과 case 2의 경우 세브론각이 60°인 case 3 보다 압력강하량이 크게 나타났다. 세브론각이 크고 플레이트 피치가 좁은 case 1의 압력강하량이 가장 크게 나타났다. Case 1과 case 2는 판형 열교환기의 질량유량이 증가함에 따라 압력강하량의 증가량이 커진 반면, case 3는 질량유량의 변화에 따른 압력강하 증가량의 폭이 작았다. 따라서 본 연구에서는 압력강하량에 영향을 미치는 주요 인자는 세브론각임을 알 수 있다.

세 경우의 판형 열교환기에서 *f*-factor와 레이놀즈수의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 레이놀즈수가 증가 할수록 *f*-factor는 감소하는 경향을 보인다. *f*-factor 또한 압력강하와 마찬가지로 세브론각이 크고 피치가 작은 case 1이 가장 큰 값으로 나타났다. 판형 열교환기에 따른 정상유동의 *f*-factor의 상관식은 식(15)로 도출되었다.

$$\begin{aligned}
 f &= 32.91Re_c^{-1.20} \quad (\text{case 1}) \\
 f &= 101.2Re_c^{-1.25} \quad (\text{case 2}) \\
 f &= 72.93Re_c^{-1.56} \quad (\text{case 3})
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

for (210 ≤ Re ≤ 610)

5. 결론

본 연구에서는 판형 열교환기의 세브론각 및 플레이트 피치가 열교환기의 열전달 성능과 압력강하 특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. 세브론각이 120°와 60°, 플레이트 피치가 2.45 mm와 1.42 mm인 경우 실험을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 판형 열교환기의 세브론각이 커질수록 대류 열전달계수가 증가하였으며, 플레이트 피치가 좁아지면 대류 열전달계수는 소폭 상승하였다.
- 2) 열교환기 유용도는 세브론각이 크고, 플레이트 피치가 좁은 경우가 가장 높게 나타났다. 플레이트 피치의 변화에 따른 유용도의 변화량은 작았으며, 유용도에 영향을 미치는 주요 인자는 세브론각으로 나타났다.
- 3) 질량유량이 증가할수록 판형 열교환기의 압력강하는 증가하였으며, 세브론각이 클수록 압력강하량은 증가하였다. 세브론각이 작은 경우에는 질량유량이 증가하여도 압력강하의 증가량이 작았으며, 세브론각이 크고 플레이트 피치가 좁은 판형 열교환기에서 압력강하가 가장 크게 나타났다. 압력강하 측정 데이터를 통해서, 각 판형 열교환기의 *f*-factor 상관식이 도출되었다.

후 기

본 연구는 과학재단의 특정기초연구(과제번호 R01-2003-000-10132-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) H. S. Ryu. and J. S. Yun., “Application of Plate Heat Exchangers in HVAC System and Air-Conditioning System,” Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No. 3, 1998, pp. 218-231.
- 2) J. H. Kim., O. K. Kwon., J. H. Yun. and C. S. Lee., “An Experimental Study on the Performance of a Brazed Plate Heat Exchanger,” Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 1, 2002, pp. 83-90.
- 3) Y. H. Kim., D. H. Han. and K. J. Lee., “Experiments on Condensation Heat Transfer and Pressure Drop in Plate Heat Exchangers with Different Chevron Angles,” Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 11, 2001, pp. 1141-1148.
- 4) H. Martin, “A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers,” Chemical Engineering and Processing, Vol. 35, 1996, pp. 301-310.
- 5) B. H. Kang. and D. K. Kim., “Evaluation on thermal energy performance of a plate heat exchanger,” Transaction of the Korean Hydrogen Energy Society, Vol. 14, No. 1, 2003, pp. 53-60.
- 6) Y. Y. Yan. and T. F. Lin., “Evaporation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a plate heat exchanger,” ASME J. Heat Transfer, Vol. 121, 1999, pp. 118-127.