

알루미늄 평행류 열교환기 헤더 내 냉매 분배에 관한 연구

김도영, 김내현[†], 김수환, 변호원, 이을중

[†] 인천대학교 기계공학과, 인천대학교 대학원

A Study on the Refrigerant Distribution in an Aluminum Parallel Flow Heat Exchanger Header

Do-Young Kim, Nae-Hyun Kim[†], Su-Hwan Kim, Ho-won Byun, Eul-Jong Lee

[†] Department of Mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon, 402-749, Korea
 Graduate school, University of Incheon, Incheon, 402-749, Korea

ABSTRACT: The refrigerant R-134a flow distributions are experimentally studied for a round header/ten flat tube test section simulating a brazed aluminum heat exchanger. Three different inlet orientations (parallel, normal, vertical) were investigated. Tests were conducted with downward flow for the mass flux from 70 to 130 kg/m²s and quality from 0.2 to 0.6. In the test section, tubes were flush-mounted with no protrusion into the header. It is shown that normal and vertical inlet yielded approximately similar flow distribution. At high mass fluxes or high qualities, however, slightly better results were obtained for normal inlet configuration. The flow distribution was worst for the parallel inlet configuration. Possible explanation is provided based on flow visualization results.

Key Words : Parallel flow heat exchanger, Header, Two-phase distribution, R-134a, Inlet direction

기 호 설 명

c_p : specific heat [kJ/kgK]
 D : header inner diameter [m]
 G : mass flux [kg/m²s]
 h : protrusion depth [m], enthalpy [kJ/kg]
 m : mass flow rate [kg/s]
 T : temperature [K]
 x : quality

하 침 자

f : saturated liquid
 g : saturated vapor
 i : inlet
 o : outlet
 r : refrigerant
 w : cooling water

1. 서 론

알루미늄 평판관 열교환기는 루버회과 평판관으로 구성된다. 공기는 루버회 사이를 흐르고 냉

[†] Corresponding author

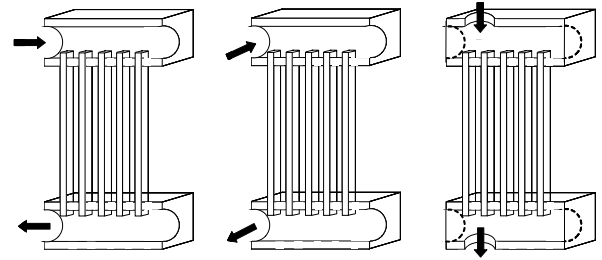
Tel.: +82-32-770-8420; fax: +82-32-770-8410

E-mail address: knh0001@incheon.ac.kr

매는 수력직경 1~2mm의 다채널 평판관 내로 흐른다. 이 열교환기는 기존의 흰-관 열교환기보다 전열성능이 우수하여 가정용 공조기의 증발기로 적극 검토되고 있다. 알루미늄 열교환기는 여러 개의 평판관이 하나의 패스로 구성된다. 이는 작은 유동 단면적을 갖는 단일 관으로 냉매회로를 구성하면 압력손실이 너무 커지게 되므로 다수의 평판관으로 분지함으로써 관내 압력손실이 과대해지는 것을 막기 위함이다. 이 경우 각각의 평판관에 균일하게 냉매를 분배하는 것이 중요하다. 최근 Kulkarni et al.⁽¹⁾의 보고서에 따르면 냉매 분배의 불균일에 따른 성능감소는 최대 20%까지 된다고 한다. 냉매분배 문제는 특히 증발기에서 중요하게 된다. 응축기에서는 증기가 응축하기 때문에 채널마다 증기와 액체의 비율이 다를지라도 전열성능에 미치는 영향은 그렇게 심각하지 않다. 하지만 증발기에서는 채널 벽면이 액막으로 덮여 있어야만 증발이 제대로 일어나게 되므로 채널마다 증기와 액체가 균일하게 분배되는 것이 중요하다.

평판관 열교환기의 증발기는 공기측의 결로에 의해 생성된 응축액 배출을 용이하게 하기 위하여 평판관은 수직으로(헤더는 수평으로) 배열된다. 이 경우 헤더로 유입되는 냉매의 회로 구성에는 세가지 방법이 있을 수 있다. Fig.1에 냉매가 헤더와 평행한 방향으로 유입되는 평행유입(parallel inlet)과 헤더의 측면에서 유입되는 측면유입(normal inlet), 헤더의 상부에서 유입되는 수직유입(vertical inlet)을 나타내었다. 냉매의 유출 방향은 열교환기의 입구와 같은 방향이거나 반대 방향일 수 있다. Fig.1에는 유입 방향과 유출방향이 동일한 위치에 있다. 유동 방향 외에 질량유속, 건도, 헤더 내로 돌출된 평판관의 삽입 깊이 또한 채널간 유량 분배에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Webb and Chung⁽²⁾, Hrnjak⁽³⁾, Lee and Lee⁽⁴⁾는 이 분야에 대하여 전반적인 리뷰 논문을 발표하였다.

그간 헤더 내의 2상류 분지에 관해서는 일부 연구결과가 보고되었다. Watanabe et al.⁽⁵⁾은 내경 20 mm의 수평 원형헤더와 4 개의 내경 6 mm 수직 원형 분지관에 대하여 R-11을 사용하여 상향류 분지 실험을 수행하였다. 실험은 질량유속 40~120 kg/m²s, 건도는 0~0.4 범위에서 수행되었고 헤더 입구의 유동 형태는 성층류이었다.



(a) Parallel inlet (b) normal inlet (c) Vertical inlet

Fig. 1 Flow inlet orientations

그들은 유량분배가 질량유속과 건도에 따라 크게 달라진다고 보고하였다. Vist and Pettersen⁽⁶⁾은 직경이 다른 두 개의 수평 원형헤더(내경 8 mm와 16 mm)에 내경 4 mm의 수직 원형 분지관이 10 개 장착된 시험부에서 R-134a를 사용하여 분지 실험을 수행하였다. 실험은 상향류와 하향류에 대하여 수행되었고 질량유속은 124~836 kg/m²s 건도는 0~0.5까지 변화되었다. 헤더 입구에서의 유동은 높은 질량유속을 제외하고는 성층류이었다. 그들은 하향류의 경우 대부분의 액체는 헤더의 앞부분에 있는 분지관으로 흐르고 상향류에서는 이와는 반대로 액체 대부분이 헤더 뒤쪽으로 흐른다고 보고하였다. 액체 유량 분포는 건도가 감소할수록 개선되었고 질량유속에는 크게 영향을 받지 않았다.

Cho et al.⁽⁷⁾은 원형헤더와 15 개의 평판관으로 구성된 시험부에서 R-22를 사용하여 헤더 방향과 냉매 주입관의 방향이 유량분배에 미치는 영향을 검토하였다. 질량유속은 60 kg/m²s로 고정되고 건도는 0~0.3까지 변화되었다. 수직헤더의 경우 대부분의 액체유량은 헤더의 전방으로 흘렀고 냉매주입 방향은 별다른 영향을 미치지 않았다. 하지만, 수평헤더에서는 냉매의 주입방향에 따라 유량분배가 크게 변화였다.

Kim et al.⁽⁸⁾은 원형헤더와 10개의 평판관으로 이루어진 시험부에서 물-공기를 사용하여 유동방향(parallel inlet, normal inlet, vertical inlet)에 따른 분배 영향을 검토하였다. 수직 유입 형상이 가장 분배가 좋았으며 측면 유입이 수직유입에 비해 다소 분배가 안 좋은 것으로 나타났다. 평행류 유입의 경우 수직, 측면 유입에 비해 확연히 유동 분배 불균형을 나타내었다.

본 연구는 Kim et al.⁽⁸⁾의 후속 연구로 물-공기 대신에 냉매 R-134a를 사용하여 10개의 평판

관으로 이루어진 시험부에 대하여 질량유속 70~130 kg/m²s, 건도는 0.2~0.6 범위에서 유량분배 실험을 수행하였다. 시험 범위에서 헤더 입구 유동은 대부분 성층류로 관측되었다. 유사한 범위의 물-공기 실험에서 헤더 입구 유동은 환상류로 보고되었다. 이는 R-134a의 기액 밀도비가 0.011 (0°C에서)로 공기-물의 값보다 9배 가량 크기 때문에 나타나는 현상으로 동일한 질량유속과 건도 일지라도 유동양식은 현저히 다를 수 있다. 평판관이 헤더에 삽입되지 않는 세가지 유입방향 (parallel inlet, normal inlet, vertical inlet)에 대하여 냉매 유량분배 특성을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 2에 실험장치의 개략도를 나타내었다. Fig. 3에는 시험부의 상세도를 나타내었다. 시험부는 실제 평판관 열교환기를 모사하여 내경 17 mm의 상하부 헤더와 9.8 mm 핏치의 평판관 (10개)으로 구성되었다. 헤더는 가시화를 위하여 투명 PVC를 가공하여 제작 하였다. 헤더 하부에는 평판관이 삽입될 수 있도록 알루미늄 블록을 장착하였고 알루미늄 블록과 헤더 사이에는 O-ring을 장착하여 기밀을 유지하였다. 시험부 중간에는 평판관으로 흐르는 액체와 기체의 유량을 측정하기 위하여 평판관과 6.0 mm 내경의 원관을 연결하기 위한 연결부가 두 곳 설치 되었다. 시험부 입구에는 헤더 내경 (17.0 mm)과 같은 내경의 동관을 1 m 길이로 설치하여 발달된 유동이 시험부로 유입되도록 하였다. 시험부 전방에는 5 kW 용량의 예열기를 설치하여 유입 냉매의 건도를 조절하였다. 예열기의 가열 용량의 측정 오차는 ± 0.2 % 이내에서 유지하였다.

시험부 하부헤더에서 유출된 2상 냉매는 응축기에서 응축된 후 마그네틱 펌프로 유입된다. 냉매 유량은 펌프로부터 토출된 냉매 일부를 우회시켜 조절하였다. 예열기 전방에는 정확도 ± 1.5 x 10⁻⁶ kg/s의 질량유량계(0~400 kg/hr)를 설치하여 유량을 측정하였다. 질량유량계로 유량을 측정하기 위해서는 액체상태의 냉매가 공급되는 것이 중요하다. 이를 위하여 항온 칠러를 사용하여 응축액의 과냉도를 조절하였다. 평판관 채널을 흐르는 유량은 밸브를 조작하여 시험부를 흐르는 유동을 유량측정부로 보내어 측정하였다.

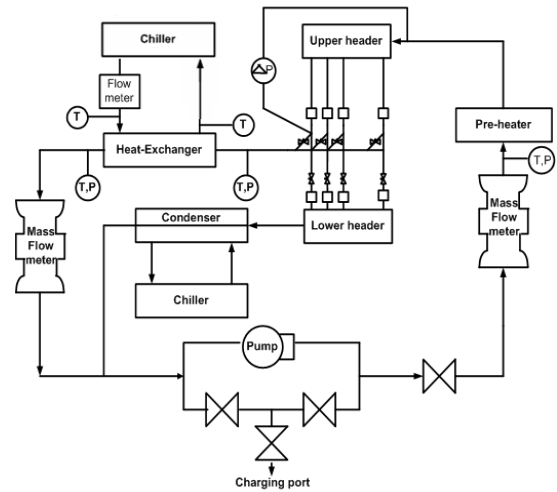


Fig. 2 Schematic drawing of the apparatus

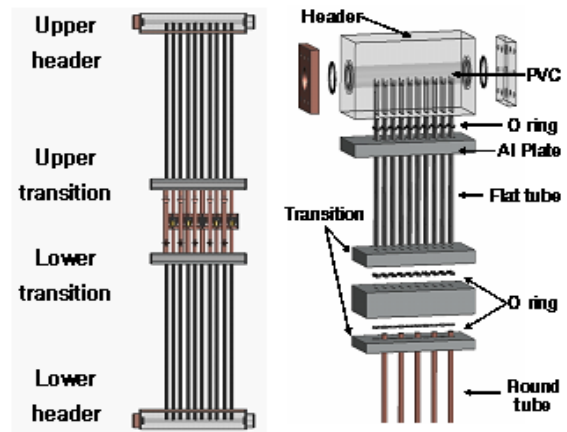


Fig. 3 Detailed drawing of the test section

채널 내를 흐르는 액체유량과 기체유량의 측정은 열교환기에서 2상 유체를 응축시킨 후 전체 유량과 열정산에 의해 계산된 건도로부터 구하였다. Fig. 4에 유량계측장치를 도시하였다. 유량계측장치는 이중관 열교환기로 관내로 냉매가 흐르며 관 외측의 냉각수에 의해 응축된다. 열교환기의 유동은 대향류로 구성되며 채널간 유량 변화에 따른 광범위한 열부하를 감당할 수 있도록 항온 칠러를 이용하여 냉각수의 유량과 온도를 조절하였다. 유량계측장치에서 온도는 냉매 입출구와 냉각수 입출구의 4곳에서 측정하였다. 측정의 정확도를 높이기 위하여 한곳의 온도를 4개의 열전대로 동시에 측정하였다. 냉매 입출구에서 절대압력도 측정되었다. 또한 냉매는 충분히 과냉시켜 유량계에 액체 상태로 유입되도록 하였다. 채

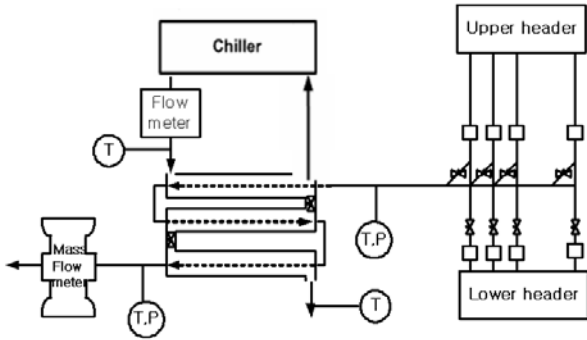


Fig. 4 Schematic drawing of the channel flow rate measurement section

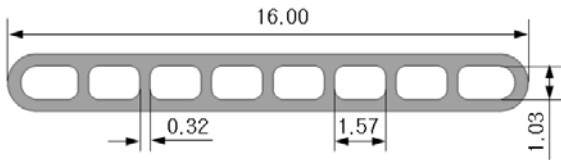


Fig. 5 Cross-sectional view of the flat tube used in this study (unit: mm)

널 내 냉매의 건도는 다음 식으로부터 계산된다.

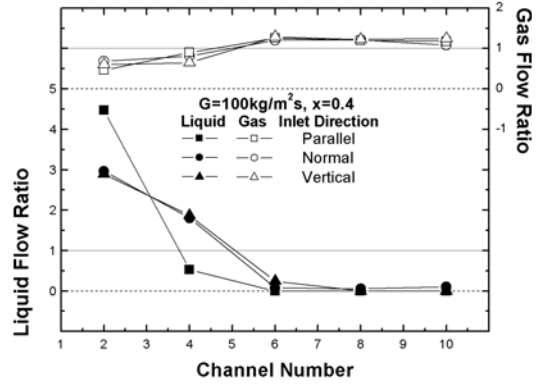
$$x = (h_{ri} - h_f) / (h_g - h_f) \quad (1)$$

$$h_{ri} = h_{ro} + m_w c_{pw} (T_{wo} - T_{wi}) / \dot{m}_r \quad (2)$$

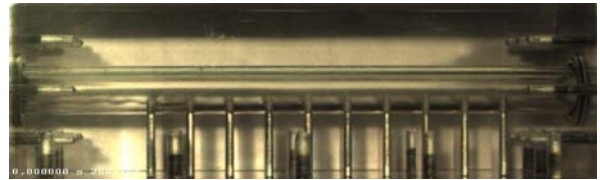
본 연구에서 액체와 기체 유량 데이터는 각 채널에 흐르는 유량을 평균 유량값 (전체 유량이 각 채널에 균일하게 분배됐을 때 얻어지는 값) 으로 나눈 유량비 (liquid flow ratio and gas flow ratio) 로 나타내었다. Fig. 5에 본 실험에 사용된 평판관의 단면을 나타내었다. 수력직경은 1.32 mm이고 유동 단면적은 12.24 mm²이다.

3. 실험결과 및 고찰

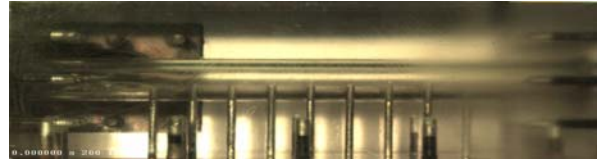
본 연구에서 수행한 입구 방향이 유량 분배에 미치는 영향을 검토하였다. Fig. 6에 $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x = 0.4$ 에서 유입 방향에 따른 유량 분배와 유동 형태 사진을 나타내었다. 액체와 기체의 유량 분배 데이터는 유량비로 나타내었다. 세 가지 입구 방향 모두 헤더의 전방부로 액체가 대부분 공급되었다. 특히 평행류 유입의 경우 2번 채널의 액체 유량비가 4.5로 상당량의 액체가 공급되고 4번 채널에서는 0.5로 감소한다. 6번 채널



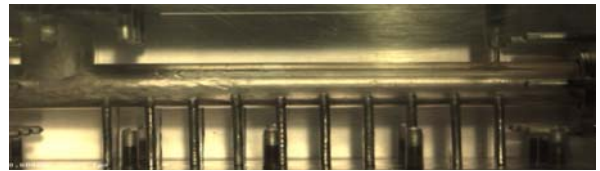
(a) flow distribution data



parallel



normal

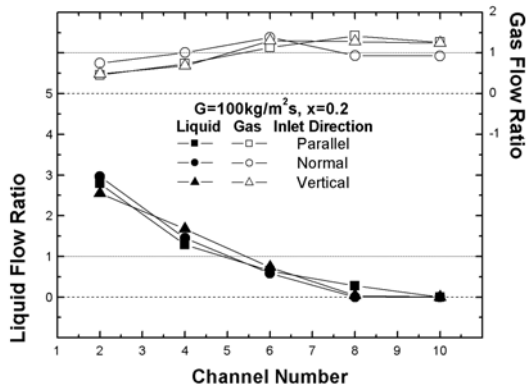


vertical

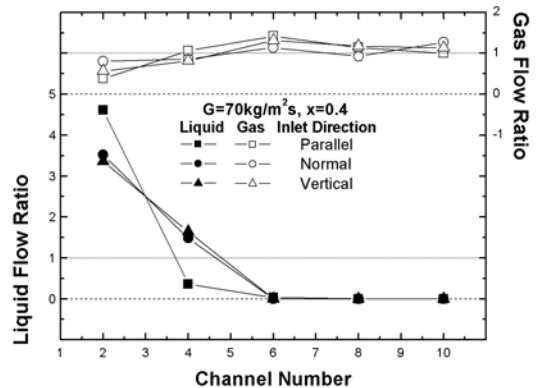
(b) corresponding photos

Fig. 6 Flow distribution data and photos at $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x = 0.4$, $h/D = 0.5$

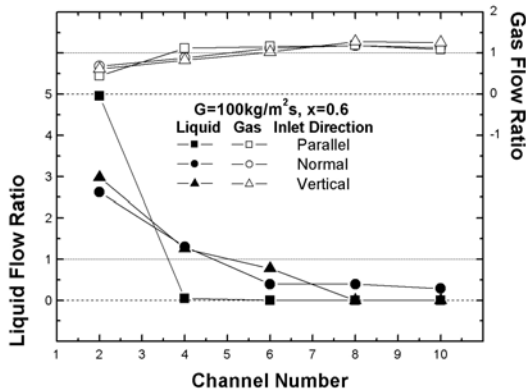
부터는 거의 액체가 공급되지 않는다. 유동 형태 사진을 통해서도 전방부로 대부분의 액체가 공급되고 후방부는 액체 유입이 거의 없음을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 측면 유입과 수직유입의 유동분배 영향은 유사하게 나타났다. 수직 유입 유동의 경우 2번채널에서 2.9의 유량비를 보이며 4번 채널은 1.8, 6번 채널에선 0.3으로 점차 감소함을 보인다. 6번 채널 이후 후방부로 공급되는 액체의 양은 미미하다. Table 1에 입구 형태에 따른 액체 유량 분배의 표준편차를 나타내었다. $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x = 0.4$ 에서 평행유입은 1.75, 측면유입은 1.19, 수직유입은 1.17이다. 측면유입과 수직유입이 평행유입보다 유량분배가 좋게 나



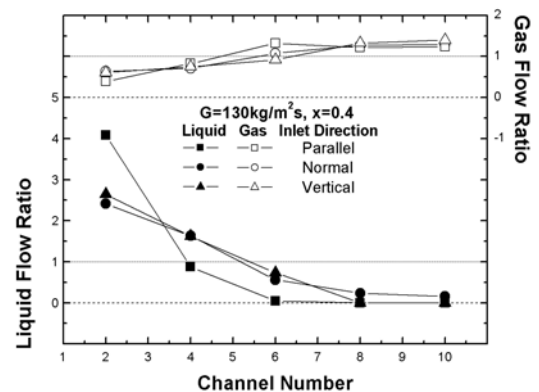
(a) $x = 0.2$



(a) $G = 70 \text{ kg/m}^2\text{s}$



(b) $x = 0.6$



(b) $G = 130 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Fig. 7 Flow distribution data taken at different qualities ($x = 0.2$ and 0.6)

Fig. 8 Flow distribution data taken at different mass fluxes ($G = 70$ and $130 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

타났다. Fig. 6에 나타난 사진을 통해서 측면유입의 경우 측면으로 유입된 액체가 헤더의 옆 벽면에 부딪힌 후 벽면을 타고 후방으로 전달되고 수직유입은 상부로부터 공급된 액체가 하부 벽면에 부딪힌 후 충돌 반력에 의하여 후방까지 공급되어 유량 분배가 개선됨을 확인 할 수 있다.

Fig. 7에 다른 건도($x = 0.2, 0.6$)에서 유량분배를 나타내었다. 낮은 건도 $x = 0.2$ 에서 입구형상에 따른 유동분배 영향은 미미하다. 건도가 낮아지면 측면과 수직 유입으로 인해 유동에 미치는 영향은 작아진다. 이로 인해 입구형상에 따른 유동분배는 평행류와 유사하게 나타난다. 반면 높은 건도 $x = 0.6$ 에서 입구형상에 따른 유동분배 영향은 확연한 차이를 보인다. 액체 유량비의 표준편차는 평행유입에서 1.98, 측면유입에서 0.89, 수직유입에서 1.10으로 측면유입의 유량 분배가 가장 좋게 나타난다. Fig. 6에 나타난 건도 $x=0.4$ 의 유동분배는 측면유입과 수직유입의 유량 분배 차이가 미미하다. 하지만 Fig.7에 나타나 있듯이

건도가 증가함에 따라 측면유입이 수직유입보다 유량 분배가 우수하게 나타났다.

Fig. 8에 질량유량($G = 70, 130 \text{ kg/m}^2\text{s}$) 변화에 따른 유량분배를 나타내었다. 건도는 0.4이다. 낮은 질량유량 $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서 측면과 수직유입의 유량분배는 거의 유사하게 나타났다. 평행유입은 유입 액체의 대부분이 2번 채널에 공급되고 측면과 수직유입에 비해 유량분배가 불균형하게 나타났다. 질량유량이 $130 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 높아지면 표준편차는 측면유입이 0.88, 수직유입이 1.02, 평행유입이 1.58로 측면 유입의 유량 분배가 가장 좋게 나타났다. 이러한 결과는 Kim et al.^[8]의 공기-물 유량분배 연구결과와 대비된다. 그들은 질량유량과 건도에 상관없이 수직유입이 유량분배가 가장 좋다고 보고하였다. 물-공기의 유량분배의 경우 기액 밀도비가 크고 입구에서 환상류로 유체가 공급되므로 성층류로 유입되는 R-134a 유량분배와 다른 경향을 보이는 것으로 판단된다.

Table 1에 액체 유량비의 표준편차를 나타냈

Table 1 Standard deviations of the liquid flow ratio

G (kg/m ² s)	x	Standard Deviation (Liquid)		
		Parallel	Normal	Vertical
70	0.4	1.81	1.38	1.34
100	0.2	0.99	1.12	0.98
100	0.4	1.75	1.19	1.17
100	0.6	1.98	0.89	1.10
130	0.4	1.58	0.88	1.02

다. 평행유입의 표준편차가 가장 크고 높은 건도와 질량유속을 제외하고는 측면유입과 수직유입이 유사하게 나타났다. 모든 입구 형상에서 질량유속이 증가 할수록 표준편차는 감소한다. 건도는 입구형상에 따라 다른 경향을 보인다. 평행유입은 건도가 증가할수록 표준편차가 커지나 측면과 수직유입은 건도에 따른 경향차이가 확연하지 않다.

4. 결론

본 연구에서는 10 채널로 구성된 평판관 열교환기에서 헤더의 유입 방향이 평판관 헤더내 유량 분배에 미치는 영향을 R-134a 냉매를 사용하여 실험적으로 검토하였다. 평판관이 헤더에 삽입되지 않는 하향류에 대하여 질량유속 $70 \leq G \leq 130$ kg/m²s, 건도 $0.2 \leq x \leq 0.6$ 범위에서 수행되었다. 시험부 내의 유동은 성층류였고 주된 결론은 다음과 같다.

(1) 측면유입과 수직유입의 액체분배는 유사하게 나타났으며, 높은 건도와 질량유속에서 측면유입이 다소 분배가 좋은 것으로 나타났다.

(2) 평행유입의 액체분배가 가장 안 좋은 것으로 나타났으며 대부분의 액체가 헤더의 전방부에 공급되고 후방부에는 거의 공급되지 않았다.

(3) 측면유입의 경우 측면으로 유입된 액체가 헤더의 옆 벽면에 부딪힌 후 벽면을 타고 후방으로 전달되고 수직유입은 상부로부터 공급된 액체가 하부 벽면에 부딪힌 후 충돌 반력에 의하여 후방까지 공급되어 유량 분배가 개선되는 것으로 판단된다.

(4) 모든 입구 형상에서 질량유속이 증가할수록 액체분배가 좋게 나타났다.

참고 문헌

1. Kulkarni, T. Bullard, C. W. and Cho, K., 2004, Header design tradeoffs in microchannel evaporators, Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp. 759~776.
2. Webb, R. L. and Chung, K., 2004, Two-phase flow distribution in tubes of parallel flow heat exchangers, Heat Transfer Engineering, Vol. 26, pp. 3~18.
3. Hrnjak, P., 2004, Flow distribution issues in parallel flow heat exchangers, ASHRAE Annual Meeting, AN-04-1-2.
4. Lee, S. Y., 2006, Flow distribution behaviour in condensers and evaporators, Proceedings of the 13th International Heat Transfer Conference, KN-08, Sydney, Australia.
5. Watanabe, M., Katsuda, M. and Nagata, K., 1995, Two-phase flow distribution in multi-pass tube modeling serpentine type evaporator, ASME/JSME Thermal Engineering Conf., Vol. 2, pp. 35~42.
6. Vist, S. and Pettersen, J., 2004, Two-phase flow distribution in compact heat exchanger manifolds, Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 28, pp. 209~215.
7. Cho, H., Cho, K. and Kim, Y., 2003, Mass flow rate distribution and phase separation of R-22 in multi-microchannel tubes under adiabatic condition, 1st Int. Conf. Microchannels and Minichannels, pp. 527~533.
8. Kim, N.-H., Kim, D.-Y., Cho, J.-P., Kim, J.-O. and Park, T.-K., 2008, Effect of flow inlet or outlet direction on air-water two-phase distribution in a parallel flow heat exchanger header, Int. J. Air Conditioning Refrigeration, Vol. 16, No. 2, pp. 1~7.