

Micro-Channel형 열교환기에 부착된 핀의 열접촉저항이 열전달 특성에 미치는 영향

박용석*, 성홍석*, 성동민**, 서정세***,#

*LT정밀(주), **경상대학교 기계공학전공, ***경상대학교 기계공학부

Effect of Thermal Contact Resistance on the Heat Transfer Characteristics of Air Flow around the Finned Micro-Channel Tube for MF Evaporator

Yong-Seok Park*, Hong-Seok Sung*, Dong-Min Sung**, Jeong-Se Suh***,#

*LT Precision Co., LTD., **Major in Mechanical Engineering, Gyeongsang National UNIV.

***School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National UNIV.

(Received 05 September 2021; received in revised form 16 September 2020; accepted 23 september 2021)

ABSTRACT

In this study, the effect of thermal contact resistance between pin-channel tubes on the heat transfer characteristics was analytically examined around the channel tubes with the pins attached to two consecutive arranged channel pipes. The numerical results showed that the heat transfer coefficient decreased geometrically as the thermal contact resistance increased, and the corresponding temperature change on the contact surface increased as the thermal contact resistance increased. The thinner the pin, the more pronounced the geometric drop in the heat transfer coefficient. It was confirmed that the higher the height of the pin, the higher was the heat transfer coefficient, however, the greater the size of the thermal contact resistance, the smaller was the heat transfer coefficient. It was found that the temperature change in the inner wall of the channel tube did not significantly affect the heat transfer characteristics owing to the thermal contact resistance. Furthermore, the velocity of air at the entrance of the channel tube was proportional to the heat transfer coefficient due to a decrease in the convective heat resistance corresponding to an increase in the flow rate.

Keywords : Fin(핀), Channel Tube(채널관), Air(공기), Numerical Analysis(수치해석), Thermal Contact Resistance(열접촉저항)

1. 서 론

열공정이 이루어지는 기계산업분야에서 가열 및 냉각이 이루어지는 공정 등이 필수적인 요소이며,

가열과 냉각이 효율적으로 이루어지기 위해 작동유체 사이의 열교환기의 사용이 반드시 요구된다. 열공정 분야의 사용 용도에 따라 다양한 열교환기가 개발되어 왔으며, 대표적으로 적용되는 기계장치는 공조냉동시스템이다. 냉동 시스템을 구성하고 있는 요소 중에서 중요한 부분은 열을 흡수하는 증발기이며, 주로 핀-관 열교환기 형태로 제작된다. 핀-관

Corresponding Author : jssuh@gnu.ac.kr
Tel: +82-55-772-1625, Fax: +82-55-772-1577

열교환기의 전열 성능은 관외부 공기측의 대류 열저항, 핀과 관내에서의 전도 열저항, 핀과 관결합부의 접촉으로 인한 열접촉저항(thermal contact resistance) 및 관내부의 냉매측 대류 열저항 등에 의해서 결정된다. 열교환기의 전열성능에서 영향을 미치는 각각의 열저항이 차지하는 비중 및 영향은 열교환기의 형상과 재질 및 유동조건 등에 따라 달라지며, 최적의 열교환기를 설계하기 위해서는 이러한 열저항에 대한 평가가 선행되어야 한다. 따라서 신뢰성 있는 열교환기의 열전달 성능결과를 얻기 위해서는 이를 고려하는 연구가 필요하다. 공기측 대류 열저항을 고려한 열교환기 연구가 상당히 많이 이루어졌다.(1-3) 채널 튜브 열교환기에서는 동일한 체적에서 마이크로채널 튜브 열교환기가 핀-관 열교환기 보다 열교환성능이 우수함을 보여주고 있으며,(4) 채널관 열교환기내의 튜브를 연결하는 헤드(head)의 형상에 따른 성능 및 압력변화 등을 평가하였다.(5) 공기 측의 열저항을 줄이기 위해 개발된 웨이브 핀, 슬릿 핀, 루버 핀, 와류 발생기 핀 등의 형태에 따라 주변으로의 유동이 변하면서 열교환 촉진 메카니즘이 달라짐을 밝혔다.(6) 특히, 루버핀이 이러한 핀 중에서는 열전달 측면에서 비교적 효율적인 핀 형상으로 알려져 있으며, 자동차 및 항공기의 공랭식 열교환기에 주로 사용되고 있다.(7)

본 연구에서는 공조냉동시스템에서 증발기에 주로 사용되는 핀-튜브형 열교환기의 효율을 향상시키기 위한 방안으로, 핀-튜브 사이의 열접촉저항이 열교환기의 열전달과 밀접한 관련이 있을 것으로 예상하고, Fig. 1과 같이 외부로 노출된 핀이 부착된 MF(Multi-Flow)형 다관류 채널관 열교환 주위로 공기의 유동이 있을 경우, 핀-튜브사이의 열접촉저항이 열전달 특성에 미치는 영향을 수치 해석적으로 살펴보고, 열접촉저항에 영향을 주는 핀의 두께 및 높이가 열전달 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 문제설정 및 해석방법

본 연구에서의 주된 목적은 냉동기의 증발기용으로 사용되는 다관류(Multi-Flow) 채널관 열교환기에

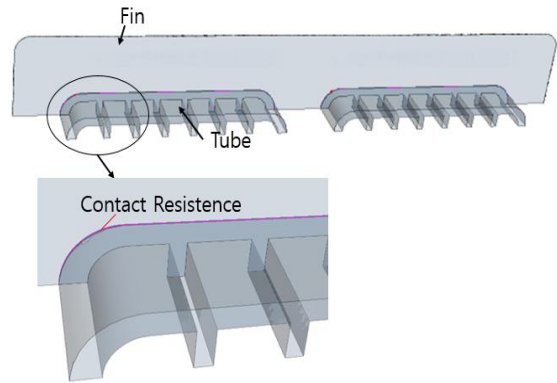


Fig. 1 Schematic diagram of MF evaporator with the finned channels

서 Fig. 1(a)에서와 같이 핀을 부착시, 채널관과 핀 사이에 열접촉저항이 존재하며, 이로 인한 채널관 외부로의 열전달 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하는 데 있다. 채널관은 내부로 저온의 냉매가 흐르며, 외부로부터 열을 흡수하여 증발하여 액체에서 기체로 된다. 증발이 이루어지는 동안 다관류 채널관 내부는 증발온도 T_w 로 일정하게 유지된다. 증발기는 Fig. 1(b)에 나타난 내부에 7개의 채널(channel)을 갖는 다관류 채널관(Tube)이 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 외부유체 유동방향으로 2개가 배열되어 있고, 유동방향에 직교 수직방향으로 6개가 배열되어 구성되어 있다. 다관류 채널관은 외부유체 유동방향으로 L_{gap} 만큼, 그리고 외부유체 유동 방향에 수직하여 $2L_c$ 만큼 각각 일정한 간격으로 떨어져 있다.(10) 증발기는 주변 외부 공기 유동으로부터 열전달 효과를 극대화 하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 다관류 채널관에 핀을 부착하였으며, 증발기로 V_i 의 속도로 공기가 T_i 의 온도를 가지고 균일하게 유입되면서, 다관류 채널관 외부로 직교류하여 흐르게 된다.(10) 다관류 채널관 주위로 흐르는 공기의 밀도는 온도와 무관하게 일정하다고 가정하였다. 본 연구에서는 핀 주변의 3차원 유동을 고려하여 3차원 정상상태에서 수치해석을 하고자 한다. 다관류 채널관 벽을 구성하는 고체내 열전달이 전도열전달 방정식을 적용하여 고려되었으며, 다관류 채널관 주위로 흐르는 공기의 유동에 대한

지배방정식과 관련방정식은 참고문헌(9,10)에 자세히 언급되어 있다.

본 연구에서의 해석 방법은 다관류 채널관과 핀에서의 계산에서 기본적으로 Park 등(10)에서 설정한 해석조건 및 해석모델을 적용하였다. 한편, 본 연구에서 열전달 특성의 변화를 파악하고자 하는 다관류 채널관과 핀의 접촉면에서 발생하는 접촉저항에 대해서는 추가적으로 저항이 더해지는 방법을 적용하였으며, 접촉저항 $R_{t,c}''$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$R_{t,c}'' = \frac{\Delta T}{q''} \quad (1)$$

여기서 q'' 는 접촉면을 통과하는 열유속을 나타내며, ΔT 는 접촉저항으로 인한 온도차를 나타낸다. 본 연구의 수치해석에 사용된 수치적 모델의 검증은 참고문헌 (8-10)에 자세히 언급되어 있으며, 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 핀주위의 열전달 특성

마이크로채널관(micro-channel)내에 낮은 온도의 냉매가 흐르면서 내벽온도가 주위보다 낮게 유지된다. 이로 인해 마이크로채널 주위로 흐르는 유체의 온도가 냉각되면서 함께 낮아지게 된다. 이 때 마이크로채널관(micro-channel) 외벽에 부착된 핀의 접촉저항이 마이크로채널관 외부 공기로의 열전달에 미치는 영향을 가장 대표적인 Table 1의 조건을 기준으로 살펴보고자 한다.

Fig. 2는 핀이 부착된 마이크로채널관 주변으로 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르는 공기의 온도분포를 접촉저항 값에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 중심부에 있는 냉각된 마이크로채널관의 온도가 낮게 나타나고 있으며, 여기에 부착된 핀의 온도도 주변 공기온도보다 낮게 분포하고 있다.

마이크로채널관과 여기에 부착된 핀과의 접촉저항이 적을수록 핀의 온도가 채널관 온도에 근접하는 것으로 나타나고 있으며, 접촉저항이 클수록 핀

Table 1 Boundary condition for analysis thermal transfer characteristic around tube

Specification	Physical Values
Convection term	Segregated Model
Turbulence model	k-epsilon standard
Inlet Velocity (Vi)	0.05 m/s
Wall Temperature of Channel(Tw)	300 K
Inlet Temperature of Air(Ti)	350 K
Number of Mesh	500k
Mesh type	Quadrilateral type (Body-Fitted coordinate)

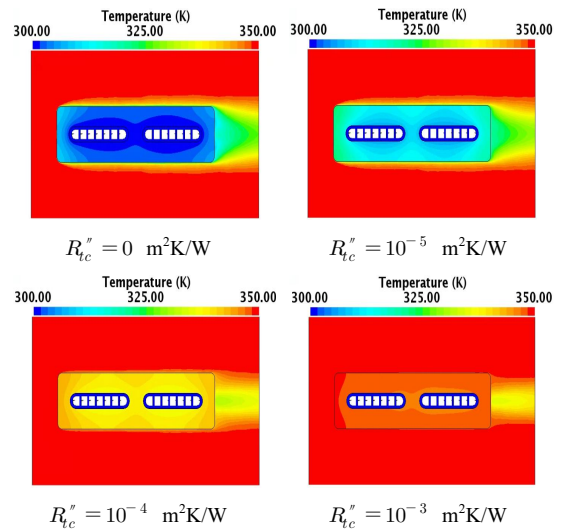


Fig. 2 Temperature distributions around the fin for several cases of contact resistances

의 온도가 채널관보다는 주변의 공기온도에 근접하는 경향을 보이고 있다. 이는 접촉저항이 증가할수록 핀의 기능이 떨어진다는 것을 의미한다. 이를 확인하기 위해, 유로수직방향에서 핀의 길이방향을 따라 온도분포를 접촉저항별로 Fig. 3에 나타내었다. 그림의 왼쪽은 마이크로채널관 표면위치이고, 그림의 오른쪽은 수직배열된 마이크로채널관 사이에 있는 유로의 대칭면이다.

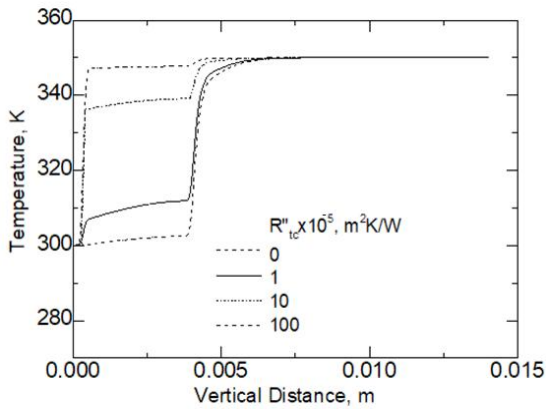


Fig. 3 Temperature distributions along the vertical line of fin from the front tube surface for several cases of contact resistances

마이크로채널관 표면위치 부근에서 온도의 급격한 상승은 접촉저항으로 인한 것이며, 핀의 길이방향을 따라 핀내부의 온도 상승은 거의 없으나, 핀의 끝부분인 3.64mm에서는 공기와의 대류열전달에 의한 전형적인 온도 상승 경향을 보이고 있다. 그림에서 접촉저항이 클수록 마이크로채널관 표면위치 부근에서의 온도상승이 급격하게 이루어지고 있으며, 따라서, 핀의 평균온도가 주변 공기온도에 근접하여 가장 높게 나타나고 있다. 이는 핀의 역할을 거의 이루어지지 않은 것을 의미한다.

3.2 핀 두께의 영향

접촉저항과 더불어 부착된 핀의 두께로 인한 마이크로채널관에서 대류열전달 특성을 파악하기 위해 총합열전달계수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 핀의 두께에 대해 점선은 0.04mm를, 실선은 0.08mm를, 그리고 대시선은 0.12mm의 경우를 각각 나타낸다. 먼저, 접촉저항의 변화에 따른 총합열전달계수의 변화 경향을 보면, 접촉저항이 증가할수록 초기에는 기하급수적으로 감소하다가 $R''_{tc} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ 이후에서는 거의 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 접촉저항이 발생할 때 핀의 열전달 특성에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 핀의 두께가 두터워질수록 전반적으로 총합열전달계수가 증가함을 보이고 있다.

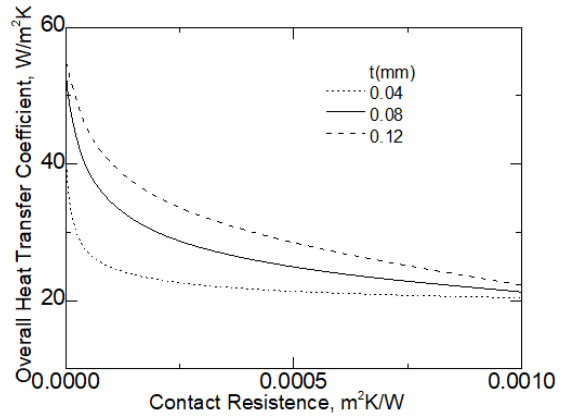


Fig. 4 Variation of the overall heat transfer coefficient with respect to contact resistance for several cases of fin thicknesses

이는 핀의 두께가 증가하면서 접촉저항을 포함하는 핀내의 전체 전도열전항이 감소하면서 비롯된 것에 기인한다. 핀의 두께에 의한 총합열전달계수의 변화가 접촉저항이 클수록 적게 나타나고 있다. 이는 핀내의 전체 전도열저항에 미치는 영향이 접촉저항이 클수록 접촉저항의 영향보다는 핀의 두께 변화의 영향이 상대적으로 적다는 것을 의미한다. 결국, 접촉이 적을때는 핀의 두께 영향이 총합열전달계수 변화에 상당히 미친다는 것을 확인할 수 있다.

3.3 핀 높이의 영향

마이크로채널관에 핀을 부착함으로써, 열전달 표면적을 증가시키 열전달 성능을 향상시키수 있다. 이런 방법의 일환으로 핀의 높이를 증가시키수 있으며, 핀의 높이를 증가시킬 때 총합열전달계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 핀의 높이에 대해 점선은 2mm를, 실선은 5mm를, 그리고 대시선은 10mm의 경우를 각각 나타낸다. 그림에서 핀의 높이 클수록 총합열전달계수가 높게 나타나고 있다. 이는 핀에 의한 열전달면적이 증가하는 데서 비롯된데 기인하는 것이다. 그리고, 접촉저항이 없을 경우에는 핀의 높이변화에 따라 총합열전달계수의 변화가 상당히 의미있게 나타나고 있으나, 접촉저항이 증가할수록 핀의 높이변화에 따른 총합열전달계수의 변화가 상대적으로 적게 나타나고 있다.

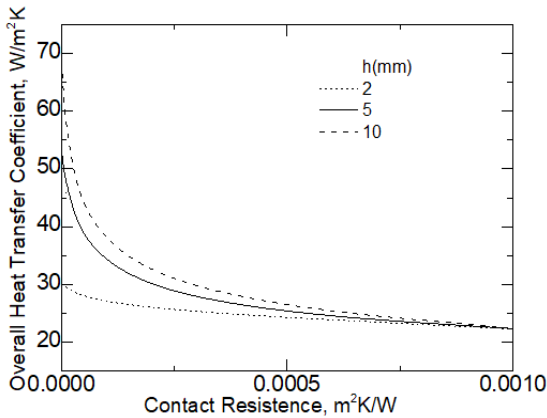


Fig. 5 Variation of the overall heat transfer coefficient for the finned tubes with the half horizontal gap between fins

특히, $R_{tc}'' = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ 이후에는 핀의 높이 변화에 따른 총합열전달계수의 변화가 거의 나타나지 않는다. 이는 접촉저항이 큰 경우에 핀내의 전체 전도열저항에 미치는 영향이 핀 자체의 전도열저항 보다는 접촉저항에 의해 주로 이루어짐을 의미한다.

3.4 채널관 유속의 영향

채널관 핀 주변으로 흐르는 공기의 유속변화와 더불어 접촉저항의 변화에 따른 열전달특성을 파악하기 위해 총합열전달계수의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 대시선은 접촉저항 $0 \text{ m}^2\text{K/W}$ 를, 점선은 $10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$ 를, 실선은 $10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ 를, 그리고 일점쇄선은 $10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$ 의 경우를 각각 나타낸다. 그림에서 역시 접촉저항이 클수록 총합열전달계수가 감소하는 것을 확인할 수다. 그러나, 공기의 유속 증가와 더불어 총합열전달계수가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 공기의 유속증가로 인한 핀주변에 형성된 대류열전달의 효과가 증가하는 데서 기인한 것이다. 접촉저항이 낮을수록 이러한 효과가 더욱 뚜렷하게 나타나, 총합열전달계수의 증가가 더 크게 나타나고 있다. 이는 총합열전달계수가 접촉저항 감소로 인해 Fig. 3에서 보듯이 열전달로 인한 온도변화가 핀 표면에서 많이 이루어지면서 대류열전달의 영향을 많이 받는 데서 비롯된 것이다.

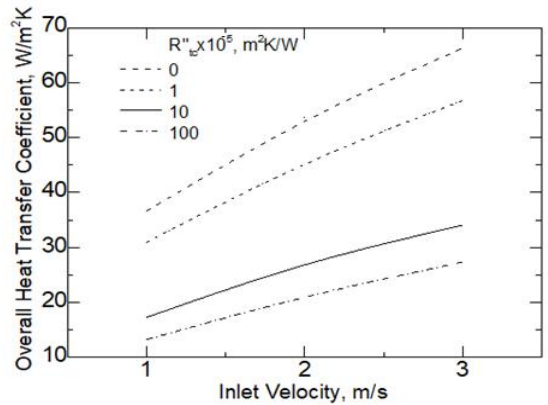


Fig. 6 Variation of the overall heat transfer coefficient for the finned tubes with the inner wall temperature of tube

4. 결론

본 연구에서는 2개의 연속으로 배치된 채널관에 핀이 부착되었을 때, 핀-채널관 사이의 열접촉저항이 채널관주위에서의 열전달특성에 미치는 영향을 수치 해석적으로 살펴보았다. 수치해석적 결과에서 열접촉저항이 증가할수록 열전달계수가 기하 급수적으로 감소하였으며, 상응하여 접촉면에서의 온도변화가 더욱 크게 나타남을 확인하였다. 동시에 핀의 두께가 얇아질수록 열전달계수의 기하 급수적 감소 더욱 뚜렷하게 나타남을 알았다. 핀의 높이가 변하는 경우에 대해서는 높이가 클수록 열전달계수는 상대적으로 높게 나타나고 있으나, 열접촉저항의 크기가 클수록 열전달계수의 감소가 더욱 크게 이루어짐을 확인하였다. 채널관 입구의 공기유입속도에 따른 열전달계수의 증가가 서로 비례적으로 나타남을 확인하였다. 이는 유속의 증가로 인한 대류열저항의 감소로 인한 열전달량이 증가하는 데서 기인함을 확인하였다.

5. 후기

본 과제(결과물)는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.

REFERENCES

1. Jang, J.-Y., Wu, M.-C. and Chang, W.-J., "Numerical and experimental studies of three dimensional plate-fin and tube heat exchangers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No.14, pp. 3057-3066, 1996.
2. Romero-Mendez, R., Sen, M., Yang, K.T. and McClain, R., "Effect of fin spacing on convection in a plate fin and tube heat exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 1, pp. 39-51, 2000.
3. Tao, Y. B., He, Y. L., Huang, J., Wu, Z. G. and Tao, W. Q., "Numerical study of local heat transfer coefficient and fin efficiency of wavy fin-and-tube heat exchangers," *International Journal of Thermal Sciences* Vol. 46, pp. 768-778, 2007.
4. Park, C. Y., Pega H., "Experimental and numerical study on microchannel and round-tube condensers in a R410A residential air-conditioning system", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, pp. 822-831, 2008.
5. Park, Y. S., Sung, H. S., Suh, J. S., "A Study on the Basic Shape of an MF Evaporator," *Journal Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 6, pp. 39-44, 2019.
6. Jacobi, A. M., & Shah, R. K., "Air-side flow and heat transfer in compact heat exchangers:A discussion of enhancement mechanism," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 29-41, 1998.
7. Sahnoun, A and Webb, R. L., "Prediction of heat transfer and friction for the louver fin geometry," *ASME Trans. J. Heat Transfer* Vol. 114, pp. 893-900,1992.
8. Lee, C .H., Suh, J. S., "Numerical Analysis on the Freezing Process of Internal Water Flow in a L-Shape Pipe," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 144-150, 2018.
9. Park, Y. S., Suh, J. S., "Numerical Analysis of Freezing Phenomena of Water in a U-Type Tube," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 12, pp. 52-58, 2019.
10. Park, Y. S., Seong, H. S., Suh, J. S., "An Analytical Study on the Heat Transfer Characteristics of MF Evaporation Tubes Attached with a Fin," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 48-56, 2021.