

핀-관 열교환기에서의 접촉열저항 평가에 관한 연구

정진* · 김창녕** · 윤백*** · 길성호*** · 양진승****

A Study on the Thermal Contact Resistance Evaluation for Fin-Tube Heat Exchangers

J. Jeong, C. N. Kim, B. Youn, S. H. Gil and J. S. Yang

Key Words: Thermal Contact Resistance(접촉열저항), Fin-Tube Heat Exchanger(핀-관 열교환기), Heat Transfer(열전달)

Abstract

Usually the contact between fin collar and tube surface for fin-tube heat exchanger is secured by mechanical expansion of the tubes. The objective of the present study is to develop a method of measuring the thermal contact resistance between fin collar and tube surface for fin-tube heat exchanger. Also an experimental work has been performed to evaluate the thermal contact resistance, and a rigorous numerical analysis has been employed to calculate the contact resistance from the measured data. The experiments have been conducted for the fin-tube heat exchangers with the tube of outer diameters 7 and 9.52 mm.

기호설명

D	: 직경	[m]
\dot{m}	: 질량유량	[kg/s]
t	: 두께	[m]
w	: 폭	[m]
P_f	: 핀 피치	[m]
A_i	: 관 내부 면적	[m ²]
A_c	: 접촉부 면적	[m ²]
A_f	: 핀 단면적	[m ²]
A_m	: 로그평균면적	[m ²]
k	: 열전도계수	[W/m°C]
h	: 대류열전달계수	[W/m ² °C]
c	: 접촉열 컨덕턴스	[W/m ² °C]

U	: 총괄열전달계수	[W/m ² °C]
l_{eq}	: 등가 길이	[m]
Nu	: 누셀트수	
Re	: 레이놀즈수	
Pr	: 프란틀수	

하첨자

t	: 관
f	: 핀
c	: 냉수
h	: 온수
i	: 내부
o	: 외부
ci	: 냉수 입구
co	: 냉수 출구
hi	: 온수 입구
ho	: 온수 출구

* 경희대 대학원 기계공학과
 ** 경희대 기계·산업시스템공학부
 *** 삼성전자 주식회사 냉공조 사업부
 **** 명지대 기계공학과

1. 서 론

열교환기는 수증기 원동소, 화학공정 플랜트, 건물의 냉난방 및 공기조화, 자동차 방열기 등에서 널리 사용되고 있다. 핀-관 열교환기는 핀에 관을 삽입한 후 관을 기계적으로 확관하여 관과 핀칼라(fin collar)를 밀착시키는 방법으로 제작된다. 이때 관과 핀의 접합부분은 균질적이거나 연속적인 접합이 아닌 비균질적이며 단속적인 접합을 이루므로 접촉열저항이 발생하는데 이로 인하여 열교환기의 열전달 특성이 크게 달라질 수 있다.

열교환기의 성능 및 효율을 높이기 위한 연구는 오래 전부터 연구되어 왔으나 접촉열저항은 많은 영향 인자와 측정상의 어려움으로 인하여 많은 연구가 수행되지 못하였으며 따라서 접촉열저항이 열교환기에 미치는 영향은 종종 무시되어 왔다.

Dart⁽¹⁾는 일찌기 접촉열저항의 중요성을 인식하여 온수관과 냉수관을 단열된 챔버 안에 넣고 대류효과를 무시하여 전도에 의해서만 열전달이 이루어진다고 가정하고 관 두께, 확관률, 핀 간격 등이 접촉열저항에 미치는 영향을 연구하였다.

Eckels⁽²⁾는 젖은 핀과 마른 핀 사이의 접촉열저항의 상관관계를 Dart의 방법을 기본으로 오차 분석을 통하여 좀더 발전된 연구를 수행하였다.

Sheffield, Stafford, and Sauer⁽³⁾는 표면 조도와 접촉열저항의 상관관계에 대하여 연구하였으며, Shah⁽⁴⁾는 접촉압력과 접촉열저항 사이의 상관관계를 연구하였고, Nho and Yovanovich⁽⁵⁾는 핀 두

께 및 collar 길이 등의 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 그러나 이제까지의 연구는 여러 가지 가정과 수학적 해석의 복잡성으로 인하여 많은 불확실성을 포함하고 있다.

본 연구에서는 전체 열저항에서 접촉열저항이 차지하는 크기를 이제까지의 방법과는 달리 실험-수치계산 방법을 이용하여 정확하게 계산하고자 한다.

2. 실험 및 수치계산

2.1 실험

2.1.1 실험장치 및 구성

Fig. 1은 실험장치 개략도를 나타낸 것으로 진공챔버 내에 열교환기를 설치하여 냉수와 온수가 흐를 수 있도록 제작되었다. 실험장치는 진공챔버, 저온형 항온수조, 고온형 항온수조, 유량계, 온도계, 압력계, 원심펌프, 진공펌프, 열교환기, 데이터 레코더 등으로 구성되어 있다.

진공챔버는 본체와 덮개로 구성되어 있으며, 본체와 덮개 사이에는 O링을 설치하고 볼트로 체결하였고 재질로는 고진공에서도 견딜 수 있도록 steel을 사용하였다. 압력계로는 고진공도 측정이 가능한 디지털 피라니 게이지를 사용하였으며, 냉수와 온수를 일정한 온도로 공급하기 위하여 2개의 항온수조와 원심펌프를 사용하였다. 또한 냉수와 온수의 유량은 챔버의 입구측에서 질량유량계를 사용하여 측정하였다. 냉수와 온수의 온도는 T Type의 열전대를 지름 1 mm의 센서

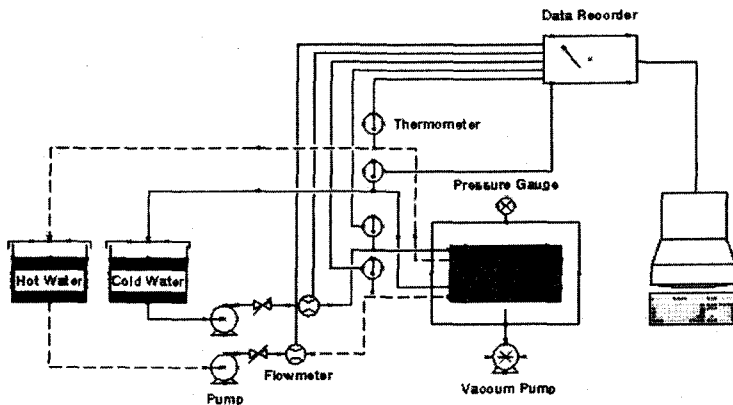


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

형태로 제작하여 챔버의 입구와 출구의 호스 중심에 각각 삽입하여 측정하였으며, 실험에 사용된 핀-관 열교환기는 grooved tube와 알루미늄 핀으로 이루어져 있으며 자세한 제원은 Table 1에 나타나 있다.

2.1.2 실험방법

본 실험에서는 열교환기 주위의 자연대류의 효과를 최소화하고 Fig. 2와 같이 열전달이 전도에 의해서만 이루어지도록 챔버 내부를 3.5 mmHg 이하의 진공 상태로 유지하여 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 2와 같으며 실험방법은 증류수를 작업유체로 사용하여 두 개의 항온조를 통하여 일정한 온도의 냉수와 온수를 진공챔버 내의 열교환기로 순환시키면서 열교환이 이루어지도록 하였다. 또한 냉수와 온수의 유량과 입출구 온도 및 진공도는 데이터 레코더를 통하여 동시에 실시간으로 기록하였다.

Table 1 Specification of fin-tube heat exchangers (after expansion)

	Type A	Type B
D_o [mm]	9.85	7.3
D_i [mm]	9.25	6.76
w [mm]	21.65	12.7
t_l [mm]	0.3	0.27
t_f [mm]	0.11	0.11
P_f [mm]	1.5	1.3

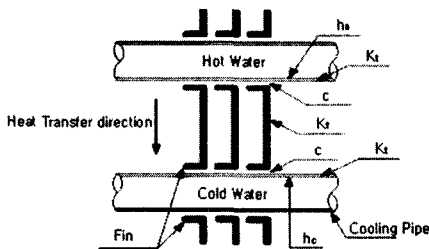


Fig. 2 Heat transfer schematic in a heat exchanger

2.2. 수치계산

2.2.1 수치계산 모델

인접한 두 전열관의 단면도를 Fig. 2에 도식적으로 나타내었다. 인접하고 있는 온수측과 냉수측 사이의 미소면적을 통한 열교환량 $d\dot{Q}$ 는

$$d\dot{Q} = U(T_h - T_c)dA_i$$

$$\frac{1}{U} = \frac{2}{h_h} + \frac{4t_l(dA_i)}{k_l(dA_m)} + \frac{4(dA_i)}{c(dA_c)} + \frac{l_{eq}(dA_i)}{k_f(dA_f)} + \frac{2}{h_c} \quad (1)$$

이다(Fig. 2 참조).

실험에 사용된 1열 12단 핀-관 열교환기는 온수와 냉수가 교차되어 흐르므로 좀더 복잡한 계산을 필요로 한다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 3에서와 같이 형상화하여 각각의 제어체적에 대하여 위 식에 튜브의 축방향 열전도와 유체 유동에 따른 대류의 효과를 추가하였으며, 열저항 개념을 사용하여 에너지 균형식을 사용하여 정상상태에 대하여 수치계산을 수행하였다.

한편 Table 3에 나타난 것처럼 온수관과 냉수관 내면에서의 대류열전달은 박혁범과 유승문⁶⁾이 제안한 grooved tube에 대한 열전달 상관식에 근거를 두고 있다. 또한, 저온관과 고온관 사이에 있는 핀을 통한 열전도에서 핀을 통한 유효 전도 길이를 고려할 필요가 있는데 이를 핀의 등가 길이 l_{eq} 로 나타내며 이는 2차원 열전도 편미분방정식을 수치계산하여 구하였다.

Table 2 Test conditions

	D_o [mm]	Cold Water		Hot Water	
		T_{ci} [°C]	\dot{m}_c [kg/min]	T_{hi} [°C]	\dot{m}_h [kg/min]
A	9.52	30.0	3.47	62.5	2.80
		35.0	3.48	60.8	2.80
B	7	25.0	1.93	65.5	1.72
		30.0	1.96	61.8	1.72
		35.0	1.98	59.1	1.72

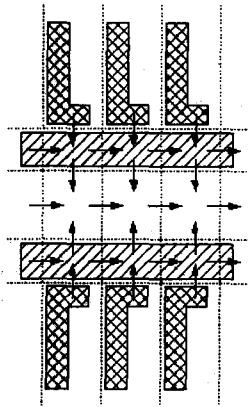


Fig. 3 Schematic of control volumes

Table 3 Correlations for heat transfer coefficients for grooved tubes

	D_o [mm]	대류열전달 상관식
A	9.52	$Nu = 0.00172 \times Re^{1.12} \times Pr^{0.3}$ ($3000 < Re < 21000$)
		$Nu = 0.0376 \times Re^{0.81} \times Pr^{0.3}$ ($21000 < Re < 45000$)
B	7	$Nu = 0.00211 \times Re^{1.11} \times Pr^{0.3}$ ($3000 < Re < 16000$)
		$Nu = 0.0382 \times Re^{0.81} \times Pr^{0.3}$ ($16000 < Re < 45000$)

2.2.2 계산방법 및 흐름도

수치계산 방법은 각각의 제어체적에 대한 선형 연립방정식을 SOR(Successive Over-Relaxation) 방법을 사용하여 열교환기에서의 열의 흐름을 계산하였고, 실험에서 얻은 냉수와 온수의 출구 온도를 수치계산 프로그램의 출력치와 비교하여 접촉열 컨덕턴스(c)의 값을 변화시켜가면서 c 값을 찾는다. 자세한 계산순서는 Fig. 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과

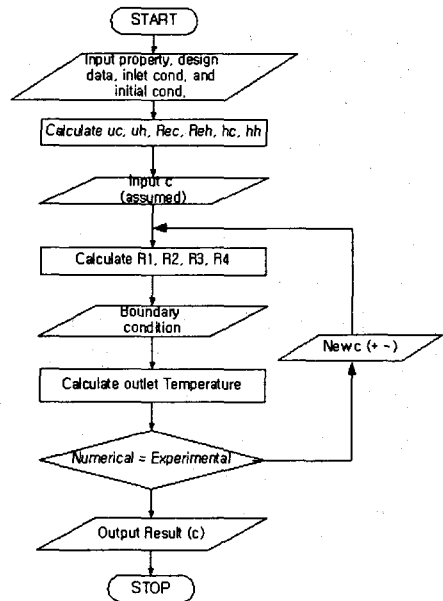


Fig. 4 flow chart of program

본 실험에서는 실험과 수치해석을 이용하여 핀-관 열교환기에서 접촉열저항의 크기를 평가하였다.

온수측과 냉수측 사이의 정확한 에너지 평형을 해석하기 위하여 챔버 내부를 고진공 상태로 유지하여 자연대류에 의한 열손실을 최소화 하였다. Table 4는 온수측과 냉수측 출구 온도 및 열전달량을 비교하여 나타난 것으로 여기서 나타난 약간의 편차는 챔버벽에서 입출구 관으로 미소한 열전달이 일어나기 때문이다.

Table 4 Energy balance of heat exchanger

	D_o [mm]	T_{co} [°C]	T_{ho} [°C]	\dot{Q}_c [W]	\dot{Q}_h [W]
A	9.52	33.3	58.1	798.10	858.66
		37.7	57.3	654.87	683.03
B	7	34.0	55.3	1210.63	1222.76
		37.0	53.7	956.24	971.01
		40.3	53.0	731.40	731.26

Table 5 Equivalent length of fins

	Type A	Type B
l_{eq} [mm]	20.2	15.8

3.2 수치계산결과

Table 5는 수치계산 프로그램으로 계산된 등가 길이로서 A, B 각각 물리적으로 타당한 값을 나타내었다. Table 6은 실험을 통하여 얻은 데이터로 수치계산을 수행하여 계산된 출력값들을 나타내고 있다. 계산에 사용된 물성치들은 냉수측의 경우는 20℃, 온수의 경우는 60℃를 기준으로 하였다. 접촉열 컨덕턴스 (c)는 9.52 mm tube와 7 mm tube에서 편차가 약 7% 이내로 계산되었다. 또 전체 열저항(식(1) 참조)에서 접촉열저항이 차지하는 비율을 구하였다. Fig. 5와 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 9.52 mm tube의 경우에 접촉열저항이 핀의 전도열저항 다음으로 큰 약 19.9%를 차지하고 있으며 tube를 통한 전도열저항은 아주 미세한 것으로 나타났다. 7 mm tube의 경우에도 역시 핀의 열저항 다음으로 접촉열저항이 약 11.8%의 매우 큰 비율을 차지하고 있다. 여기에서 R_f 는 핀의 전도열저항, R_c 는 접촉열저항, R_t 는 tube의 전도 열저항, R_{hc} 와 R_{hh} 는 각각 냉수와 온수의 대류열저항을 나타낸다.

접촉열저항이 9.52 mm tube에서 더 큰 비율을

차지하는 이유는 접촉면적이 상대적으로 넓기 때문으로 생각되며 이는 관직경이 접촉열저항의 크기를 결정하는 중요한 영향인자가 될 수 있다는 것을 의미한다.

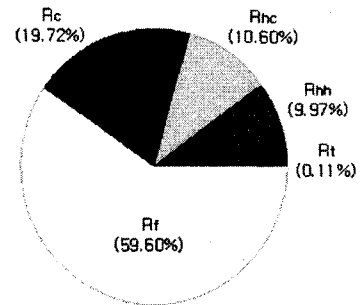


Fig. 5 Percentage of thermal contact resistance(R_c) for 9.52 mm tube

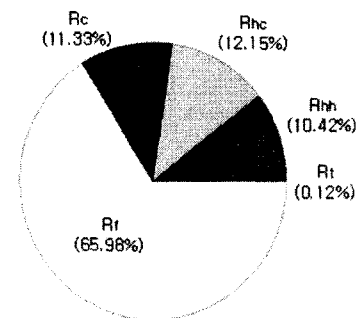


Fig. 6 Percentage of thermal contact resistance(R_c) for 7 mm tube

Table 6 Results of numerical calculation

	D_o [mm]	T_{ci} [℃]	Re_c	Re_h	h_c [W/m ² ℃]	h_h [W/m ² ℃]	c [W/m ² ℃]	U [W/m ² ℃]	R_c 의 비율 [%]
A	9.52	30.0	12091.91	13636.67	6776.22	7208.47	12835	359.35	19.72
		35.0	12126.76	13636.67	6798.10	7208.47	12557	357.91	20.08
B	7	25.0	9202.76	11462.35	7647.00	9072.20	31345	467.98	11.98
		30.0	9345.80	11462.35	7779.05	9072.20	33469	472.56	11.33
		35.0	9441.17	11462.35	7867.21	9072.20	31066	469.08	12.12

4. 결론

본 연구에서는 핀-관 열교환기에서 접촉열 컨덕턴스의 크기와 접촉열저항이 전체 열저항에서 차지하는 비율이 9.52 mm tube와 7 mm tube에 대하여 실험-수치계산 방법에 의하여 계산되었다.

접촉열 컨덕턴스는 7 mm tube가 9.52 mm tube에 비해서 2.5배 정도 크게 나타났으며, 전체 열저항에서 접촉열저항이 차지하는 비율은 9.52 mm tube가 7 mm tube보다 2배 정도 크게 나타났다.

핀-관 열교환기에서 접촉열저항은 10~20% 정도의 무시할 수 없는 비중을 차지하고 있음이 밝혀졌다. 향후에는 접촉열저항에 영향을 주는 인자에 대해서 지속적인 연구가 수행될 예정이다.

후기

본 연구는 공조기술연구센터와 삼성전자주식회사의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Dart, D. M., 1959, "Effect of Fin Bond on Heat Transfer," ASHRAE J., pp.67-71
- (2) Eckels, P. W., 1977., "Contact Conductance of Mechanically Expanded Plate Finned Tube Heat Exchangers," ASME Paper, No. 77-HT-24,
- (3) Sheffield, J. W., Stafford, B. D., & Sauer, H. J. Jr., 1985., "Finned Tube Contact Conductance: Investigation of Contacting Surfaces," ASHRAE Trans., Vol. 91, Pt. 1, pp. 442-452,
- (4) Shah, P. R., 1986., "Microscopic and Macroscopic Fin Collar Effect in the Prediction of Finned Tube Contact Conductance," Ph.D. Thesis, Univ. of Missouri-Rolla,
- (5) Nho, K. M. & Yovanovich, M. M., 1989., "Effect of Oxide Layer on Measured and Theoretical Contact Conductances in Finned Tube Heat Exchangers," A. L. London Sympo. on Compact Heat Exchangers, Stanford Univ., Mar. 23-24,
- (6) 박혁범, 유승문, 윤백, 유국철, 1997., "평활관 및 미세회관 내에서의 물을 이용한 열전달 및 압력강하 특성에 관한 실험," 공기조화·냉동공학 논문집 Vol. 9, No 4, pp.454-461