

## 단일 원형핀-원형관에 대한 강제대류열전달 상관식

강 희 찬<sup>†</sup>, 강 민 철<sup>\*</sup>

군산대학교 기계공학부, \*군산대학교 대학원

### Forced Convection Correlation for Single Circular Fin-tube Heat Exchanger

Hie-Chan Kang<sup>†</sup>, Min-Cheol Kang<sup>\*</sup>

Faculty of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

<sup>\*</sup>Graduate School, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

(Received February 10, 2004; revision received April 20, 2004)

**ABSTRACT:** This work was performed to investigate the heat transfer characteristics of the circular fin-tube heat exchanger. This paper contains the experimental data for the seven kinds of fin geometries. The correlation of Stasiulevicius agreed with the experimental data at high Reynolds number, however not well at low Reynolds number. The Nusselt number was well correlated with Graetz number, and showed a transition near  $Gz=10$ . An empirical correlation proposed in the present work agreed well with the experimental data.

**Key words:** Heat transfer(열전달), Heat exchanger(열교환기), Circular fin-tube(원형핀-원형관), Performance(성능), Correlation(상관식)

#### 기 호 설 명

$A$  : 열교환기 전체 표면적 [ $m^2$ ]  
 $D$  : 원형관 외경 [ $m$ ]  
 $D_o$  : 원형핀 외경 [ $m$ ]  
 $F_p$  : 핀 피치 [ $m$ ]  
 $F_{th}$  : 핀 두께 [ $m$ ]  
 $Gz$  : Graetz 수,  $RePr(s/L)$   
 $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]  
 $H$  : 핀 높이 [ $m$ ]  
 $k$  : 유체의 열전도율 [ $W/m \cdot K$ ]  
 $k_f$  : 핀의 열전도율 [ $W/m \cdot K$ ]  
 $L$  : 특성길이 [ $m$ ]

$L_m$  : Stasiulevicius 식의 특성길이 [ $m$ ]  
 $Nu$  : Nusselt 수,  $hs/k$   
 $Nu_D$  : 원형관 외경기준 Nusselt 수,  $hD/k$   
 $Nu_r$  : 수정 Nusselt 수,  $hL_m/k$   
 $Pr$  : Prandtl 수,  $c_p\mu/k$   
 $Q$  : 열전달량 [ $W$ ]  
 $Re$  : Reynolds 수,  $\rho us/\mu$   
 $Re_D$  : 원형관 외경 기준 Reynolds 수,  $\rho uD/\mu$   
 $Re_{fin}$  : 핀 Reynolds 수,  $\rho u_{fin}L_m/\mu$   
 $Re_m$  : 평균 길이 기준 Reynolds 수,  $\rho uL_m/\mu$   
 $s$  : 핀 간격 [ $m$ ]  
 $\Delta T_{lm}$  : 대수평균온도차 [ $K$ ]  
 $u_{fin}$  : 핀 기준 풍속 [ $m/s$ ]  
 $u_{fr}$  : 전면풍속 [ $m/s$ ]  
 $u_c$  : 최소단면에서 풍속 [ $m/s$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-63-469-4722; Fax: +82-63-469-4727

E-mail address: hckang@kunsan.ac.kr

그리스 문자

- $\mu$  : 유체의 점성계수 [kg/m·s]
- $\rho$  : 유체의 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

1. 서 론

열교환기의 대표적인 형식인 환-관 열교환기는 주로 공조기 및 난방기에서 사용되고 있다. 그 중에서도 원형환-원형관은 구조가 간단하고 저렴하여 널리 사용되고 있다. 원형환-원형관은 정방형 배열(in-line arrangement) 또는 엇갈림 배열(staggered arrangement)의 형태로 사용된다.<sup>(1,2,3)</sup> 단일 원형환-원형관은 이들 배열을 구성하는 기본 요소이다. 원형환-원형관 배열군의 열전달 성능을 예측하기 위하여 단일 원형환-원형관의 특성을 이해하는 것은 중요하다.

원형환의 열전달성능에 대하여 Kays and London<sup>(4)</sup>은 8종의 원형환-원형관 군에 대한 압력강하 및 열전달성능에 대한 실험자료를 제공하였다. Stasiulevicius et al.<sup>(5)</sup>은 단일 원형환-원형관에 대한 이론을 정리하고 열전달 상관식을 제시하였다. Stasiulevicius의 연구 외에 단일 원형환-원형관에 대한 연구는 찾기 어려웠다. 최근 Kang et al.<sup>(6)</sup>은 연선법과 역정을 이용하여 단일 원형환-원형관의 열전달 및 유동 특성에 대한 실험 및 수치해석 자료를 소개하였다.

본 논문은 원형환 외경과 환 피치가 다른 7종의 원형환-원형관 열교환기의 강제대류 특성에 대하여 실험적으로 연구하였다. 열전달 특성을 기존의 이론과 비교하고 독자적인 상관식을 제시하였다.

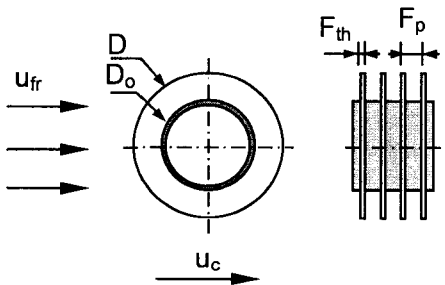


Fig. 1 Schematic diagram of the circular finned-tube heat exchanger.

2. 실험 및 결과처리

Fig. 1은 원형환-원형관의 개략도이다. Table 1은 본 연구에서 실험한 열교환기의 규격을 정리한 것이다. 원형관의 외경( $D$ )은 16.7 mm와 25.4 mm이고 원형환 외경( $D_o$ )은 28.3 mm, 38.1 mm, 44.6 mm, 그리고 57.2 mm이다. 원형관 외경에 대한 원형환 외경의 비( $D_o/D$ )는 1.50, 1.69, 1.75와 2.25이다. 원형관 외경에 대한 환 피치의 비( $F_p/D$ )는 0.10, 0.18 및 0.21의 세 가지이다. 환의 두께는 0.4와 0.5 mm이다. 환과 관의 재료는 구리이다.

단일 원형환-원형관 열교환기의 성능은 풍동에서 실험하였다. 시료 열교환기는 니크롬선을 사용하여 전기적으로 가열하였다. 가열량은 정밀 전력계로 측정하였다. 시료 열교환기에 대하여 공기유량, 입구온도, 출구온도 및 가열량을 측정하였다. 실험한 전면풍속은 0.2~5 m/s의 범위이다. 실험장치와 실험방법의 세부적인 사항은 Kang et al.<sup>(6)</sup>에 소개되어 있다.

열전달량은 다음 식으로 표현된다.

$$Q = Ah\Delta T_m \tag{1}$$

여기서  $A$ ,  $h$ 와  $\Delta T_m$ 은 각각 열교환기의 전체 표면적, 열전달계수, 그리고 대수평균온도차이다.

Reynolds 수, Graetz 수, 그리고 Nusselt 수는 다음과 같이 정의하였다.

$$Re = \frac{\rho u_s D}{\mu} \tag{2}$$

Table 1 Dimensions and the circular-fin tube heat exchanger used in the present work (Unit: mm)

Tube diameter ( $D$ )	Fin diameter ( $D_o$ )	Fin pitch ( $F_p$ )	Fin thickness ( $F_{th}$ )	Symbol
25.4	38.1	2.54	0.40	△
25.4	38.1	4.68	0.40	○
25.4	44.6	2.54	0.40	◇
25.4	44.6	4.68	0.40	□
25.4	57.2	2.54	0.40	☆
25.4	57.2	4.68	0.40	+
16.7	28.3	3.45	0.50	●

$$Nu = \frac{hs}{k} \tag{3}$$

$$Gz = RePr \left( \frac{s}{L} \right) = \frac{us^2}{\alpha L} \tag{4}$$

$$L = \frac{D+D_o}{2} \tag{5}$$

$$u = \frac{u_{fr} + u_c}{2} \tag{6}$$

여기서  $\rho$ ,  $Pr$ ,  $L$ ,  $s$ 와  $\mu$ 는 각각 공기밀도, 정압 비열, 특성길이, 환 사이의 간격 및 평균 풍속이다. 전면풍속 ( $u_{fr}$ )과 최소단면풍속 ( $u_c$ )은 각각 입구와 최소흐름단면에서의 풍속이며 Fig. 1에서 나타내었다. 공기의 물성치는 열교환기의 입구와 출구의 평균 온도인 막온도에서 구하였다.

원형관 외경 ( $D$ )을 대표길이로 하는 Reynolds 수와 Nusselt 수는 다음과 같다.

$$Re_D = \frac{\rho u D}{\mu} \tag{7}$$

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \tag{8}$$

Stasiulevicius<sup>(5)</sup>는 수정 Nusselt 수 ( $Nu_r$ )를 환을 기준으로 한 Reynolds 수 ( $Re_{fin}$ )의 함수로 정리하였다. 환 기준 Reynolds 수 ( $Re_{fin}$ )는 환 사이를 통과하는 풍속 ( $u_{fin}$ )과 평균 유동길이 ( $L_m$ )로 정의된다. 풍속 ( $u_{fin}$ )은 다시 평균 풍속 ( $u$ )과 평

균 유동길이 ( $L_m$ )로 정의되는 Reynolds 수 ( $Re_m$ )의 함수로 정리하였다. 이들이 사용한 식은 다음과 같다.

$$Re_{fin} = \frac{\rho u_{fin} L_m}{\mu} \tag{9}$$

$$Nu_r = \frac{h L_m}{k} \tag{10}$$

$$\frac{u_{fin}}{u} = \frac{1 - (2.5/Re_m^{0.25})(H/s)^{0.25}(D/H)^{0.25}}{s/F_p} \tag{11}$$

$$Re_m < 10^4$$

$$\frac{u_{fin}}{u} = \frac{1 - (0.36/Re_m^{0.04})(H/s)^{0.5}(D/H)^{0.25}}{s/F_p} \tag{12}$$

$$Re_m > 10^4$$

$$Re_m = \frac{\rho u L_m}{\mu} \tag{13}$$

$$L_m = \frac{\pi D}{2} \sqrt{1 + \left( \frac{H}{D} \right)^2} \tag{14}$$

$$H = \frac{D_o - D}{2} \tag{15}$$

여기서  $H$ 는 환의 높이이다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2와 Fig. 3은 실험결과를 평균 풍속에 대한

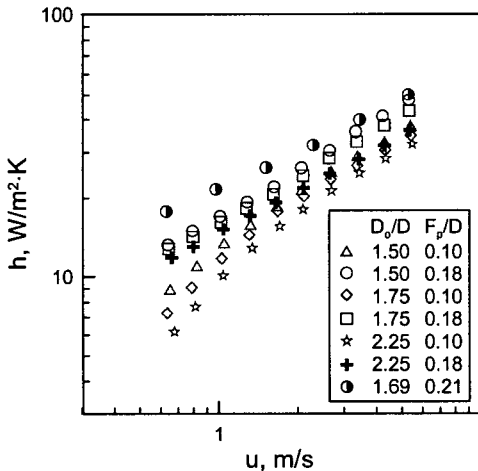


Fig. 2 Comparison of heat transfer coefficient.

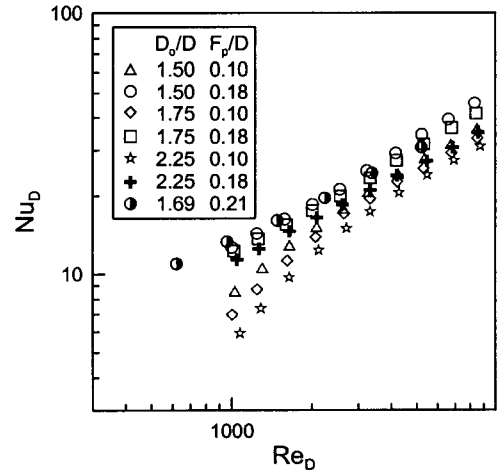


Fig. 3  $Re_D$  vs.  $Nu_D$ .

열전달계수, 그리고 원형관의 직경을 기준으로 한 Reynolds 수와 Nusselt 수로 정리한 것이다. 환의 외경이 동일하면 환 피치가 클수록 열전달계수가 증가하는 경향을 보인다. 환 피치가 동일하면 환의 외경이 증가함에 따라 열전달계수는 감소한다. 열전달계수가 감소하는 경향은 풍속이 작을수록 두드러진다. 본 실험결과로부터 원형환의 선단으로부터 열경계층이 성장하는 것을 알 수 있다. 동일한 형상에서 유속이 증가하면 열경계층의 두께는 감소하고 열전달은 증가한다. 반면에 원형환의 직경이 증가하면 평균 열경계층의 두께는 증가하고 열전달계수는 감소한다. 유속이 낮고, 환 피치가 작고, 그리고 환 외경이 큰 경우 각 환의 선단에서 성장한 열경계층은 환을 떠나기 전에 서로 만날 수 있다. 이 경우 열전달 거동은 평행평판에서의 발달을 마친 유동과 유사하게 된다. 따라서 낮은 유속, 작은 환 피치, 외경이 큰 환인 경우 열전달계수가 더욱 낮아진다.

Fig. 4는 Stasiulevicius가 제안한 Reynolds 수와 Nusselt 수에 대하여 실험결과와 상관식을 비교한 그림이다. 그는 특성길이를 대략 환 평균 원주의 절반으로 생각하였다. 또한 환 사이를 흐르는 유속( $u_{fm}$ )을 대표유속이라 하고 식(11)과 식(12)와 같이 환의 기하학적 인자로 표현하였다. Reynolds 수가 약 3,000 이상에서 상관식은 열전달 성능을 잘 예측한다. 그러나 Reynolds 수가 작아질수록

오차가 점차 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 Graetz 수에 대한 Nusselt 수를 나타낸 그림이다. Nusselt 수는 Graetz 수와 상관관계가 크다는 것을 알 수 있다. 여기서 Graetz 수는 환의 간격, 환의 평균 직경, 그리고 평균 유속으로 정의하였다. 그림으로부터 Graetz 수가 10 부근에서 열전달의 천이가 있음을 알 수 있다. 이는 Graetz 수가 증감함에 따라 발달중인 흐름이 완전발달 흐름으로 변화되기 때문으로 사료된다. 단일 원형환-원형관의 실험결과로부터 Nusselt 수에 대한 상관식과 적용범위는 다음과 같다.

$$Nu = 0.157Gz, \quad Gz < 10 \quad (16)$$

$$Nu = 0.388Gz^{0.6}, \quad Gz > 10 \quad (17)$$

$$1.50 < \frac{D_o}{D} < 2.25$$

$$1.00 < \frac{F_p}{D} < 0.210 \quad (18)$$

$$3 < Gz < 135$$

위 상관식으로부터 Graetz 수가 10 이하에서 Nusselt 수는 Graetz 수에 비례하고, Graetz 수가 10 이상에서 Nusselt 수는 Graetz 수의 0.6승에 비례하는 것을 알 수 있다. 상관식에 대한 실험값의 표준편차는 3% 이내로 상관식은 실험결과를

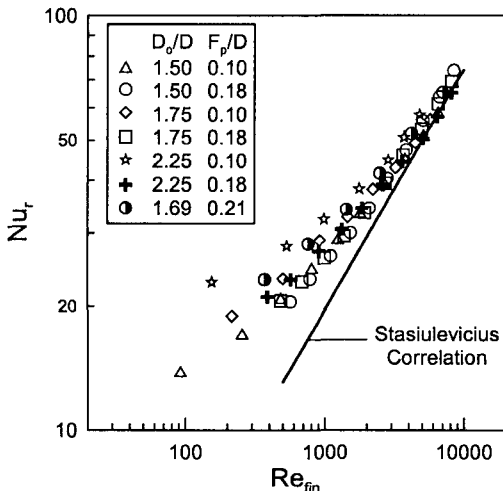


Fig. 4 Comparison of the present data with the correlation of Stasiulevicius.

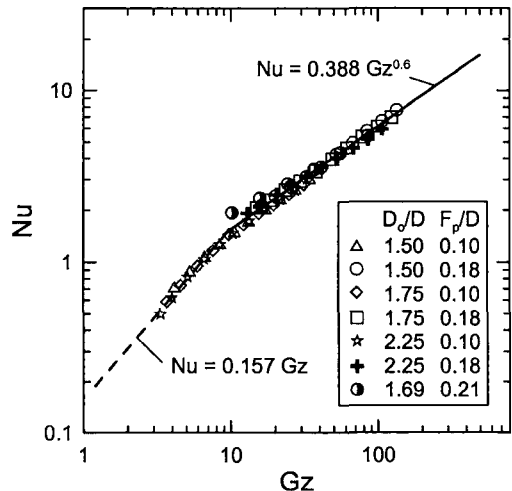


Fig. 5 Comparison of the present correlations with experimental data.

잘 반영하고 있다. 위 식은 적용범위 내에서 유용하며 확장하여 적용할 경우 세심한 고려가 필요하다.

#### 4. 결 론

원 외경과 원 피치가 다른 7종의 단일 원형원-원형관 열교환기의 강제대류 열전달 특성을 실험 및 이론적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일 원형원-원형관의 열전달 성능에 대한 실험결과를 제공하고 Stasiulevicius가 제안한 상관식과 비교하고 검토하였다. Stasiulevicius의 상관식은 높은 Reynolds 수에서는 유용하나 Reynolds 수가 감소할수록 열전달 성능을 하향 예측하였다.

(2) 원의 간격, 원의 평균 직경, 그리고 평균 유속으로 정의한 Graetz 수는 대표길이가 원 간격인 Nusselt와 상관성이 크게 나타났다. Graetz 수가 10 근처에서 열전달의 천이가 관찰되었다.

(3) 본 연구에서 독자적이고 간단한 상관식을 제시하였고, 본 상관식은 실험결과와 표준편차 3% 이내로 잘 일치하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(2000-1-30400-009-2) 과제 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. Shah, R. K., 1983, Compact heat exchanger surface selection, optimization and computer aided thermal design, in Low Reynolds Number Heat Exchanger, Hemisphere Publishing Co., Washington, pp. 845-874.
2. Webb, R. L., 1994, Principles of Enhanced Heat Transfer, John Wiley and Sons, pp. 125-159.
3. Zukauskas, A., 1987, Heat Transfer of Finned Tube Bundles in Crossflow, Hemisphere Publishing Co., New York, U.S.A.
4. Kays, W. M. and London, A. L., 1964, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill, U.S.A., pp. 220-224.
5. Stasiulevicius, J., Skrinška, A., Zukauskas, A. and Hewitt, G. F., 1988, Heat Transfer of Finned Tube Bundles in Crossflow, Hemisphere Publishing Co., New York, pp. 50-74.
6. Kang, H. C., Kim, M. H. and Cho, D. Y., 2001, Heat transfer coefficient of a single circular fin-tube heat exchanger, Proc. of Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 1, pp. 460-465.