

# 단일 원형관-원형핀 열교환기의 자연대류 열전달 실험관계식

강 희 찬<sup>†</sup>, 장 현 순<sup>\*</sup>

군산대학교 기계공학부, 군산대학교 대학원\*

## Free Convection Correlation for the Single Circular Finned Tube Heat Exchanger

Hie Chan Kang<sup>†</sup>, Hyun Soon Jang<sup>\*</sup>, Cha Kun Hong<sup>\*</sup>

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

\*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kunsan National University

**ABSTRACT:** An experimental study has been conducted on the free convection heat transfer for the 7 kinds of circular finned tube heat exchangers. Empirical correlation was suggested at the range of  $3,500 < Ra < 800,000$ ,  $1.6 < D_o/D_i < 3.0$ ,  $0.19 < P_f/D_i < 0.34$ . The 92% of experimental data agreed with the correlation within 10%.

**Key words:** Heat transfer(열전달), Natural convection(자연대류), Heat exchanger(열교환기), Fin(핀), Air cooling(공기냉각)

### 1. 서 론

산업기기, 발전소, 식품, 농축산 분야에서 원형핀-원형관 열교환기가 널리 사용되고 있다. 용접, 전조, 확산 등과 같은 생산기술의 발전으로 원형핀-원형관의 생산성이 향상되고 있다. 따라서 원형핀-원형관 열교환기는 면적밀도가 낮음에도 불구하고 지속적인 활용이 예상된다.

핀 밀도가 커지면 열교환기는 핀 표면적이 증가하여 방열 성능이 향상되지만, 반면에 핀 간격이 임계값 이상으로 증가하면 유동저항이 증가하여 열전달계수가 감소한다. 따라서 최적 핀 형상이 존재할 것으로 예상된다. 열교환기의 효율적인 설계 및 운용을 위하여 방열 성능에 대한 정량적 자료가 필요하다.

권순석 등<sup>(1)-(4)</sup>은 원형관에 부착된 핀의 성능에 대하여 연구를 수행하였다. 수평관에 설치된

한 개의 길이방향 핀, 길이에 따른 성능 평가, 하향 설치된 핀 등 다수의 연구를 수행하였다. 이들은 최적 핀에 대하여 연구하였다. 박용진<sup>(5)</sup>도 수치계산을 이용하여 열원에 따른 최적 방열 성능을 도출하였다. 박현희<sup>(6)</sup>는 가열 실린더 주위의 자연대류 온도장을 가시화하여 사용코드에 의한 계산결과의 타당성을 검토하였다.

Churchill과 Chu<sup>(7)</sup>, Morgan<sup>(8)</sup>, Lienhard<sup>(9)</sup>, Yovanovich<sup>(10)</sup>는 유체에 잠긴 물체의 자연대류에 대한 상관식을 제시하였다. 이들 상관식이 원형관-원형핀 열교환기에 적용 가능한지에 대한 검토가 필요하다. 강희찬 등<sup>(11)</sup>은 원형핀-원형관 열교환기의 자연대류 열전달 성능에 대한 수치해석 결과를 소개하였다.

본 논문에서는 원형핀-원형관 열교환기 형상에 대하여 핀의 직경 5종, 핀 피치 3종의 형상에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 원형핀-원형관 열교환기의 자연대류 열전달 성능에 대한 정량적 자료 생산하고 실험상관식을 개발하는 것을 목표로 하였다.

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

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

Case	$D_o$	$P_f$	$D_i$	$t$	Symbol
D12P19	28.4	4.5	23.8	1.5	◆
D16P19	38.1	4.5			●
D19P19	44.5	4.5			▲
D24P19	57.2	4.5			■
D28P19	66.4	4.5			+
D19P25	44.5	6.0			△
D16P34	38.1	8.0			○
Bare tube <sup>1)</sup>	-	-			25.4
D30P20 <sup>1)</sup>	76.2	5.08	25.4	0.5	×

1) Conditions of the numerical simulation

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 열교환기 시료

Fig. 1은 본 연구에서 실험한 원형환-원형관 열교환기의 개략도이고 Table 1은 7종의 열교환기의 규격이다.

열교환기는 원형관에 다수의 원형환이 붙어 있는 형상이다. 열교환기 시료는 구리(C1100)로 제작하였다. 원형관의 외경( $D_i$ )은 23.8mm 이고 원형환의 외경( $D_o$ )은 각각 28.4, 38.1, 44.5, 57.2, 66.4mm 5종류이다. 원형관 외경에 대한 원형환 외경의 비 ( $D_o/D_i$ )는 각각 1.19, 1.60, 1.87, 2.40과 2.79이다. 원형관 외경에 대한 환 피치의 비 ( $P_f/D_i$ )는 0.189, 0.252 및 0.336 세 가지이다. 환 두께는 1.5mm 이고 전체 원형관의 길이는 75mm이다.

열교환기는 원형관 내부에 카트리지히터를 설치하여 가열하였다. 히터는 직경이 15.8mm, 유효 길이 75mm이다. 원형관 벽의 온도측정을 위하여 직경 1.0mm 깊이 40mm의 구멍을 원주방향으로 90° 간격으로 4개 열전대를 설치하였다. 본 연구에서 사용한 열전대는 직경 1mm 길이 60mm의 스테인리스 관에 봉입된 비접촉식이다.

### 2.2 실험장치

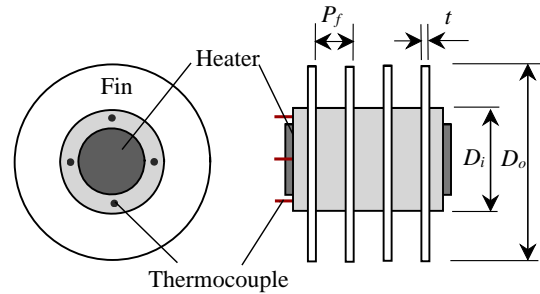


Fig. 1 Circular finned-tube heat exchanger studied in the present work.

원형환-원형관 열교환기의 성능을 평가하기 위한 자연대류 실험장치는 Fig. 2와 같고 원형환-원형관 열교환기, 전원부, 온도측정부로 구성된다.

실험을 위해 원형환-원형관 중심부에 카트리지히터를 삽입하고 슬라이닥스(slidacs)로 전열량을 조절하였다. 원형관에 원주방향으로 4개의 K형 열전대를 삽입하여 벽온도를 측정하였다. 원형관 표면과 측정위치의 거리는 1.5mm로 측정위치에 의한 온도측정 오차는 0.01°C 이내로 계산되었다. 공기의 온도는 주실험부에서 500mm 떨어진 지점에서 측정하였다. 온도측정 오차는 0.2°C 이내이다.

원형환-원형관 시료에 온도계를 장착하고 계측기를 동작시킨 후 카트리지히터(저항 218Ω)에 인가전압을 점차 증가시켰다. 시료의 벽온도는 슬라이닥스로 인가전압을 10V, 20V, 30V, 40V, 50V의 5단계로 증가하여 조절하였다. 정상상태 판정은 원형환-원형관의 온도가 0.2°C 이내로 온도의 변화 없이 120분 이상 지속되는 조건으로 하였다. 각 경우 측정은 4회 이상 반복하고 평균 값을 구하였다.

열전달계수, Nusselt수 및 Rayleigh수는 다음 식으로 계산하였다.

$$Q = h(A_b + A_f \eta_f)(T_w - T_f) \quad (1)$$

$$Q = \Delta V^2 / R \quad (2)$$

$$Nu = hD_i / k \quad (3)$$

$$Ra = g\beta(T_w - T_f)D_i^3 / \alpha\nu \quad (4)$$

여기서  $Q$ ,  $A_b$ ,  $A_f$ ,  $\eta_f$ ,  $T_w$ ,  $T_f$ ,  $\Delta V$ ,  $R$ 은 각각 전

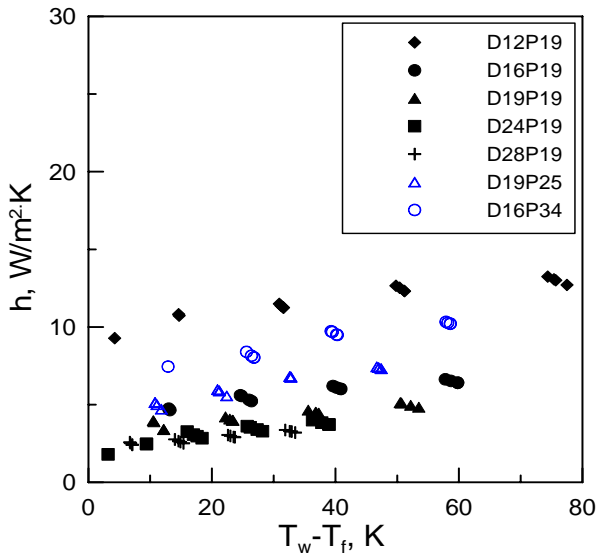


Fig. 2. Comparison of heat transfer coefficients for the present geometries.

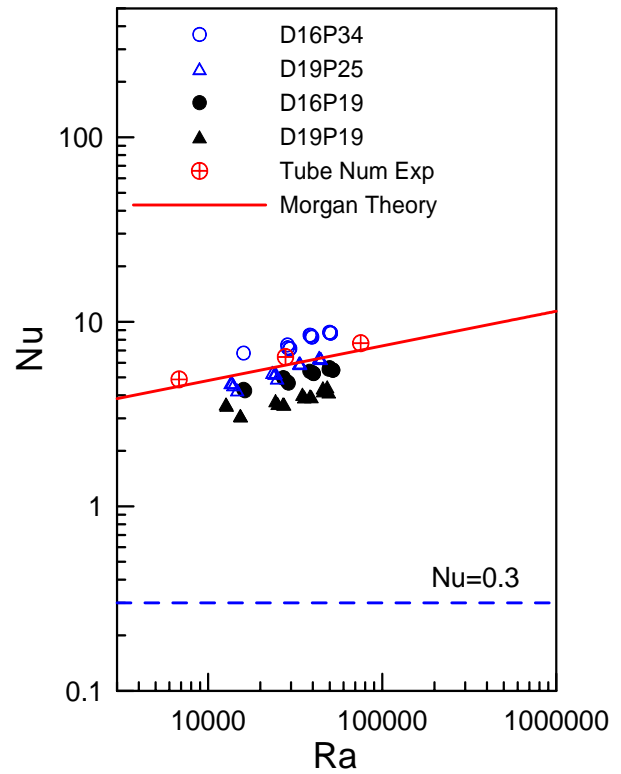


Fig. 4 Effect of fin pitch on the Nusselt number.

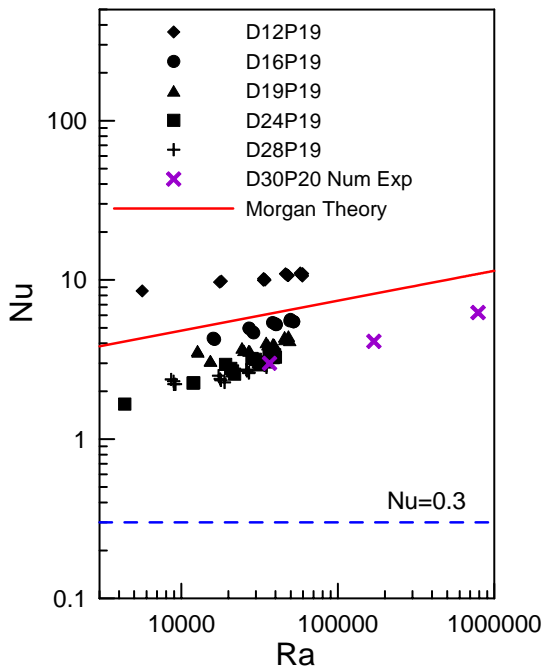


Fig. 3 Effect of fin diameter on the Nusselt number.

열량, 기저부의 면적, 환의 면적, 벽온도, 공기온도, 전압차 및 전기저항이다. 위 식에서  $k$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\nu$ 는 각각 공기의 열전도율, 체적열팽창계수, 열확산율과 동점성계수이고  $g$ 는 중력가속도이다. 본

실험에서 복사 열전달의 효과를 줄이기 위하여 벽온도는  $80^{\circ}\text{C}$  이내로 하였다. 중간조건인 온도차가  $40^{\circ}\text{C}$  때의 열전달계수의 측정오차는 약 7% 수준이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험결과

Fig. 2는 원형관 벽과 공기의 온도차( $T_w - T_f$ )에 따른 열전달계수를 비교하였다. 열전달계수는 환 피치가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 열전달계수는 원형관 외경이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 열전달계수는 원형관보다 원형관 기저부에서 크다. 따라서 환 피치가 증가하고 원형관 외경이 감소할수록 전체면적에 대한 기저부의 면적의 비율이 증가하므로 열전달계수가 증가한다. Fig. 3은 환 피치가 동일한 경우 원형관 외경에 대하여 Nusselt수를 비교한 것이다. Nusselt수는 Rayleigh수의 1/4승에 근사적으로

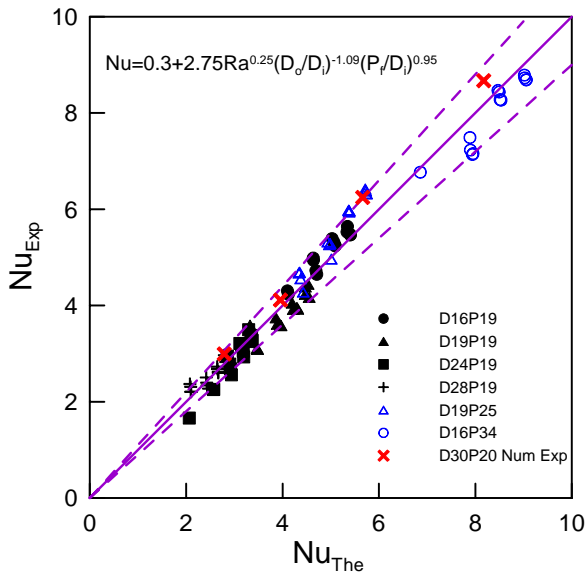


Fig. 5 Comparison of the present correlation with the experimental data for the natural convection of the circular fin-tube heat exchanger.

비례하였다. 본 연구의 Rayleigh수의 범위가 3,500-80,000으로 층류영역에 해당된다. 원형관에 대한 Nusselt수는 원형관에 대한 Morgan의 이론식 보다 대체적으로 작았다. 원형관에 대한 최소 Nusselt수는 0.3 이며 자연대류가 활발해지면 Nusselt수는 이보다 크다. 원형관의 외경비 ( $D_o/D_i$ )가 증가함에 따라 Nusselt수는 감소하는 경향을 보인다. 그림에서 강희찬 등<sup>(11)</sup>의 수치계산 결과는 실험결과보다 낮다. 이는 수치계산 조건이 원의 직경비가 3.0으로 크기 때문이다.

Fig. 4는 원 피치가 Nusselt수에 미치는 효과를 비교한 것이다. 원 피치가 증가할수록 열전달 계수는 증가하는 경향을 보였다. 원형관에 대한 Morgan의 이론식과 강희찬 등<sup>(11)</sup>의 수치계산 결과와 비교할 때 Rayleigh수에 대한 Nusselt수의 경향이 유사하다.

### 3.2 실험상관식

D12P19를 제외하고 본 연구에서 수행한 실험 6종과 수치계산 1종의 형상에 대한 실험상관식을 MINTAB<sup>(12)</sup>을 이용하여 구하였다. 상관식에 사용한 자료의 수는 94개이다. 실험상관식과 적용

범위는 아래와 같다.

$$Nu = 0.3 + 2.75Ra^{0.25}(D_o/D_i)^{-1.09}(P_f/D_i)^{0.95} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} 3,500 < Ra < 800,000 \\ 1.6 < D_o/D_i < 3.0 \\ 0.19 < P_f/D_i < 0.34 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)의 첫 항 0.3은 대류가 없는 경우 원형관에 대한 전도극한 Nusselt수이다. 본 연구영역은 층류영역이므로 Nusselt수는 Rayleigh수의 1/4 승에 비례한다. Nusselt수는 원형관의 직경 대비 원형관의 직경에 거의 반비례(-1.09 지수)한다. Nusselt수는 원형관의 직경에 대한 원 피치의 비에 거의 비례(0.95 지수) 한다. 본 상관식은 식(6)과 같이 Rayleigh수가 3,500-80,000에서 유효하다.

본 상관식의 타당성은 Fig. 5에 정리하였다. 본 연구의 상관식의 표준편차가 0.079이며 잔류항의 제곱은 95.8%이다. 실험값의 92%가 상관식과 10% 이내로 만족하였다. 본 연구의 상관식은 단일 원형관-원형관의 자연대류 열전달계수의 예측에 유효하며 실험범위를 초과할 경우 주의가 필요하다.

### 4. 맺음말

본 연구에서 7종의 원형관-관 열교환기의 자연대류 열전달 성능에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일 원형관-원형관 열교환기에 대한 자연대류 열전달계수의 측정값을 제시하였다. 열전달 계수는 원형관 벽과 공기의 온도차가 증가할수록, 원의 외경이 감소할수록, 원 피치가 증가할수록 증가하였다.

(2) 실험결과로부터 원형관-원형관 열교환기의 자연대류 열전달계수를 예측할 수 있는 실험상관식을 제시하였다. 상관식은 실험값의 92%를 10% 이내로 예측할 수 있었다.

(3) 자연대류 열전달계수에 대한 강희찬 등<sup>(11)</sup>의 수치계산 결과는 실험상관식과 10% 이내에서 일치하였다.

향후 넓은 원형관-원형관의 형상에 대한 실험결과를 확보한다면 정교한 실험식을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

## 참 고 문 헌

1. 권순석, 김선정, 홍남호, "동관 핀이 부착된 수평원통에서의 자연대류 열전달", 동아대학교 한국자원개발연구소 연구보고, 제 11권, 제 1호, pp. 11-17, 1987.
2. S. S. Kwon, T. H. Kuehn and A. K. Topadi, "Conjugate Natural Convection Heat Transfer Convection Heat Transfer from a Short Vertical Longitudinal Fin Below a Heated Horizontal Cylinder", ASME 83-HT-100, pp. 1-8, 1983.
3. S. S. Kwon, T. H. Kuehn and A. K. Topadi, "On Natural Convection from a Short Conducting Plate Fin Below a Heated Horizontal Cylinder", ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 661-664, 1984.
4. S. S. Kwon, T. H. Kuehn and A. K. Topadi, "Conjugate Natural Convection Heat Transfer Convection Heat Transfer from a Horizontal Cylinder with a Long Vertical Longitudinal Fin", Numerical Heat Transfer, Vol. 6, pp. 85-102, 1982.
5. 박용진, 열원에 따른 최적 방열 원 형상에 관한 연구, 석사학위 논문, 연세대학교 대학원, 2000.
6. 박현희, 가열된 수평 실린더 주위에서 자연대류의 가시화에 관한 연구, 석사학위 논문, 부산대학교 대학원, 2002.
7. S. W. Churchill and H. H. S. Chu, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1323-1329, 1975.
8. V. T. Morgan, "The Overall Convective Heat Transfer from Smooth Circular Cylinders", in T. F. Irvine and J. P. Hartnett eds., Advanced Heat Transfer, Vol. 16, Academic, New York, pp. 199-269, 1975.
9. J. H. Lienhard, "On the Commonality of Equations for Natural Convection from Immersed Bodies", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 6, pp. 2121-2123, 1973.
10. M. M. Yovanovich, "On the Effect of Shape, Aspect Ratio and Orientation upon Natural Convection from Isothermal Bodies of Complex Shape", ASME HTD-Vol. 82, pp. 121-129, 1987.
11. 강희찬, 장현순, 홍차근, "원형환-원형관 열교환기의 자연대류 열전달 성능", 학술논문집, 대한설비공학회, pp. 1163-1167, 2007.
12. 이레테크 미니탭사업팀, 새 MINITAB 실무완성, (주) 이레테크, 2005.