

## 원형환-원형관의 열전달 특성

강희찬<sup>†</sup>, 조도영\*, 강민철\*

군산대학교 기계공학부, \*군산대학교 대학원

### Heat Transfer Characteristics of a Circular Fin-tube Heat Exchanger

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

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

\*Graduate School, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

(Received October 29, 2003; revision received August 9, 2003)

**ABSTRACT:** An experimental study was conducted to investigate the heat transfer characteristics of a circular finned-tube heat exchanger. The nineteen cases of configuration varying fin material, fin outer diameter and fin pitch were tested by means of the experiment and the numerical calculation. The measured heat transfer data for the circular finned-tube heat exchanger were provided. A transition of heat transfer was found in the case of low fin pitch. The thermal conductivity of fin affected on the pure heat transfer coefficient.

**Key words:** Heat transfer(열전달), Heat exchanger(열교환기), Dehumidifier(제습기), Fin efficiency(환효율)

---

#### 기호설명

---

$V$  : 전면풍속 [m/s]

$A_s$	열교환기의 전체 표면적 [ $m^2$ ]
$D$	원형관 외경 [m]
$D_o$	원형환 외경 [m]
$h$	열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$j$	Colburn $j$ 계수
$k$	열전도도 [ $W/m \cdot K$ ]
$P_f$	환피치 [m]
$Pr$	Prandtl 수, $c_p\mu/k$
$Q$	전열량 [W]
$Re$	Reynolds 수, $\rho VD/\mu$
$t$	환 두께 [m]
$\Delta T_{lm}$	대수평균온도차 [°C]

#### 그리스 문자

$\eta_s$  : 표면효율

#### 1. 서 론

환-관 열교환기는 공조기 및 난방기기에 널리 사용되고 있다. 그중에서도 원형관-환 열교환기는 내압성과 경제성 측면에서 장점이 있어 대표적인 열교환기 형식이다. 열교환기에서 환은 열전달면적과 열전달계수의 곱( $A_s h$ )을 증가시켜 열저항을 감소시키는 데 그 목적이 있다(Shah<sup>(1)</sup>, Webb<sup>(2)</sup>). 상용 공조기에서 전체 열저항 중 공기에 접한 환 측의 열저항이 가장 커서 환은 열교환기의 성능에 중요한 요소이다.

열교환기의 환의 형상은 성능, 효율, 중량, 압력손실, 소음, 배수, 제습, 오염, 내구성, 가격 등

† Corresponding author

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

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

의 여러 요소들에 영향을 미치며 그동안 많은 연구가 수행되었다. 최근에는 소음의 감소, 배수성의 증대, 그리고 표면처리제의 내구성 향상 등에 대하여 관심이 집중되고 있다. 이러한 열교환기의 성능향상 및 설계과정에서 필수적으로 사용되는 인자가 휴효율이다. 재래의 열회수율이 낮은 기존의 열교환기에서 휴효율은 중요성이 크지 않다. 최근 열교환기는 고성능 및 경량화되어 휴효율의 중요성이 증대되고 있다. 그러나 휴효율에 대한 실험자료는 찾기 어렵다.

원형관-원형환은 저렴하고 구조가 간단하여 산업적으로 많이 사용되고 있다. 원형환의 열전달 성능에 대하여 Kays and London<sup>(3)</sup>은 8종의 원형환-원형관군에 대한 압력강하 및 열전달 실험자료를 제공하였다. Stasiulevicius et al.<sup>(4)</sup>은 원형관-원형환에 대한 이론을 정리하고 열전달상관식을 제시하였다. Kang et al.<sup>(5)</sup>은 연선법과 액정을 이용하여 단일 원형환의 열전달 및 유동특성을 실험적으로 연구하였다. 또한 Kang<sup>(6)</sup>은 실제 열교환기에 적용할 수 있는 휴효율에 대한 이론식을 제시하고 수치적으로 검증한 바 있다.

본 논문에서는 원형관-원형환 열교환기의 열전달성능의 정량적인 실험자료를 제공하고 수치해석의 결과를 비교하는 데 목적을 두었다. 원형환의 형상 및 재질의 영향을 고찰하기 위하여 열전도율이 다른 구리, 스테인리스강, 알루미늄 및 석영 등 4가지 재질의 환에 대하여 19종의 조건에 대하여 실험자료를 생산하였다. 실험결과는 휴효율 이론의 타당성을 검증하는 데 이용하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 열교환기 시료

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 원형환-원형관 열교환기에 대하여 실험을 수행하였다. Table 1은 본 실험에서 사용한 열교환기의 규격을 정리한 것이다. 원형관의 외경( $D$ )은 25.4 mm이고 재료는 구리이다. 환의 열전도율의 영향을 검토하기 위하여 환을 구리, 스테인리스강, 알루미늄 및 석영으로 제작하였다. 환의 외경 대 원형관 외경의 비( $D_o/D$ )는 1.50, 1.75, 2.0, 2.25로 네 종류이다. 환의 두께는 0.4 mm로써 직경의 0.0157배이다. 단, 석영 환은 두께가 2.1 mm이다. 원형관의 외경에

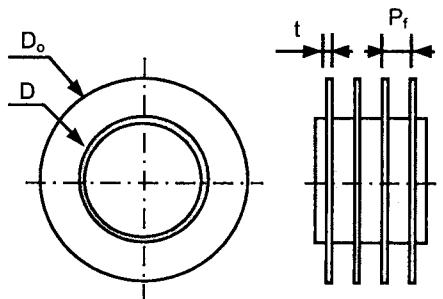


Fig. 1 Schematic diagram of the circular finned-tube heat exchanger.

대한 휴의 피치의 비( $P_f/D$ )는 0.10 및 0.184의 두 가지이다. 석영 휴인 경우, 그 비( $P_f/D$ )가 0.140이다.

모형 열교환기의 가열장치는 니크롬선에 의한 가열방식을 이용하였다. 전기가열기는 직경 10.2 mm, 유효길이 37.2 mm인 테플론 봉의 외부에 석면테이프를 감고 그 위에 직경 0.18 mm의 니크롬선을 0.5 mm 간격으로 균일하게 감았다. 그 위에 석면테이프로 다시 감은 후에 모형 휴과 내경 12.7 mm, 외경 25.4 mm, 두께 2.14 mm의 구리 링을 교대로 끼워 넣은 후 끝단을 볼트로 체결하였다. 또한 모형 휴과 전열관을 모사하는 구리 링

Table 1 Dimensions and specifications of the circular-finned tube heat exchanger used in the present work

Name	Symbol	Unit	Dimension
Tube diameter	$D$	m	0.0254
Fin outer diameter	$D_o$	m	0.0381
			0.0446
			0.0508
			0.0572
Fin thickness	$t$	m	0.0004
			0.0021
Fin pitch	$P_f$	m	0.00254
			0.00360 (Qz)
			0.00468
Thermal conductivity of fin	$k_f$	W/m · K	383 (Cu)
			204 (Al)
			13.4 (STS)
			1.4 (Qz)

사이에 열저항을 최소화하기 위하여 고전도성 도료를 삽입하였다.

## 2.2 실험장치

원형환-원형관 열교환기의 성능을 평가하기 위한 실험장치는 Fig. 2와 같다. 실험장치는 풍동, 차암계, 컴퓨터 및 데이터취득장치로 구성된다.

풍동은 크게 입구부, 주실험부, 출구부, 댐퍼부 및 훈으로 구성된다. 입구부는 공기의 유질을 향상시키기 위해 스크린과 수축부로 구성하였다. 주실험부의 규격은 높이 74 mm, 폭 224 mm, 길이 610 mm이다. 주실험부에는 열교환기의 시료와 측정 센서를 설치하였다. 주실험부의 외벽은 두께 40 mm의 스티로폼으로 단열하였다. 출구부에는 공기의 유량을 측정할 수 있도록 노즐유량계를 설치하였다. 노즐유량계는 British Standard<sup>(7)</sup>의 규격에 따라 제작하였다. 주실험부부터 유량측정부까지는 고무관과 고무 오-링을 사용하여 실험장치 외부와 공기의 유출입이 없도록 밀봉하였다. 훈은 주실험부에서 최대풍속이 5 m/s까지 얻을 수 있는 터보훈(400 W, 정압 75 mmH<sub>2</sub>O)을 사용하였다. 주실험부의 풍속은 댐퍼의 개도로 조절하였다. 댐퍼부를 제외하고는 관찰이 가능한 투명 아크릴로 제작하였다.

실험부에 흐르는 공기유량은 오리피스노즐 유량계의 상류와 하류에 설치된 8개의 정압공의 차압의 평균값을 최대측정 범위가 2,000 Pa인 압력변환기(Furness, FCO12)로 측정하였다. 이 압력변환기는 미세 U관 액주계로 보정하였다. 입구공기의 온도는 열교환기 시료의 전방에 설치된 6개

의 T형 열전대(직경 0.25 mm)로 측정하고 평균값을 사용하였다. 열교환기의 가열은 전기가열기로 하였고 공급되는 전력량은 정밀전력계(Yokogawa, 2534)로 측정하였다. 열교환기의 온도는 T형 열전대를 훈에 직접 납으로 용접하여 측정하였다. 알루미늄 훈과 석영 훈은 구리 링에 T형 열전대를 납으로 용접하였다. 용접된 훈과 구리 링은 전체 훈 중 1/3번째에 위치하도록 하였다. 모든 측정결과는 데이터처리장치(AOIP, SA32)로 처리하였다. 본 연구에서 사용한 노즐유량계의 타당성은 노즐 후류에서 피토관으로 유속을 측정하고 적분하여 검증하였다. 측정오차는 0.5% 수준이었다. 온도계와 열량계의 측정오차는 각각 0.2°C 및 0.1%이다.

## 2.3 실험방법

조립된 모형 열교환기를 주실험부에 설치하고 모든 계측기를 동작시킨 후 정상상태에 이르면 영점조정을 한다. 공기의 유속을 조절하고 관에 설치된 니크롬선에 전기를 공급하여 서서히 모형 열교환기의 온도를 상승시킨다. 모형 열교환기와 흡입되는 공기의 온도차가 30°C 수준을 유지하도록 전열량을 조절하였다. 이러한 실험을 전면 풍속 0.2~5 m/s의 범위에서 반복 실험하였다.

순수열전달계수  $h$ 는 아래의 식으로 계산하였다.

$$Q = A_s \eta_s h \Delta T_{lm} \quad (1)$$

여기서  $Q$ ,  $A_s$ ,  $\eta_s$ , 그리고  $\Delta T_{lm}$ 은 각각 전열량, 열교환기의 전체 표면적, 표면효율 및 대수평균

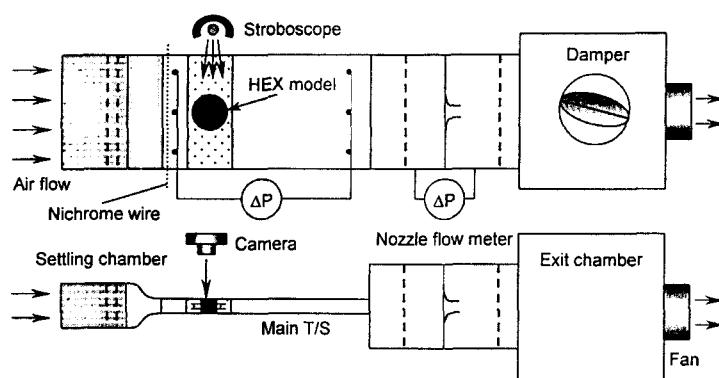


Fig. 2 Schematic diagram of wind tunnel used in the present work.

온도차이다.

Reynolds 수와 Colburn  $j$  계수는 순수열전달계수를 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2)$$

$$j = \frac{h Pr^{2/3}}{\rho c_p V} \quad (3)$$

여기서  $\rho$ ,  $c_p$  와  $Pr$ 은 각각 막온도에서 구한 공기 밀도, 정압비열 및 Prandtl 수이다. 자료처리 프로그램으로 구한  $Re_D$ 수와  $j$  계수의 측정오차는 각각 0.6%와 1.5% 수준이다.

#### 2.4 수치해석

수치해석은 상용프로그램인 CFX 4.4를 사용하여 계산을 수행하였다. 수치해석의 대상은 구리 흰으로 원형관의 외경이 25.4 mm, 흰의 외경이 57.2 mm, 두께가 0.4 mm 인 경우이다. 입구조건은 균일온도 및 균일유속으로 0.6~5 m/s 범위에 대하여 해석하였다. 해석모델은 비압축성, 종류, 그리고 정상상태 조건으로 하였다. 전체 격자수는 418,000개이고 이중 흰에 형성한 격자수는 115,000개이다.

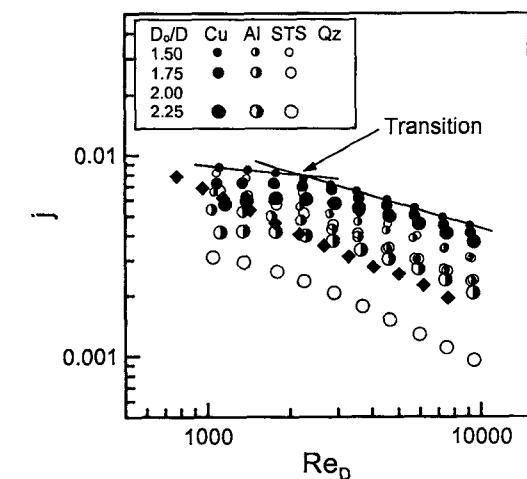


Fig. 3 Comparison of  $j$  factors of the circular finned-tube heat exchangers ( $P_f/D=0.10$  for copper, aluminum and stainless steel fins,  $P_f/D=0.14$  for quartz fin).

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열전달계수

Fig. 3과 Fig. 4는 여러 종류의 원형환에 대하여 Reynolds 수에 따른 Colburn  $j$  계수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3은 흰피치( $P_f/D$ )가 0.10인 경우이며, Fig. 4는 0.184인 경우이다. 그림에서 흰의 재질은 구리, 알루미늄, 스테인리스강 및 석영이다. 흰의 규격은 원형관 대비 흰 외경의 비( $D_o/D$ )가 1.50, 1.75 및 2.25의 세 가지이며 석영인 경우는 2.0이다. 본 실험결과에서 열전달계수는 흰 효율이 배제된 순수열전달계수( $h$ )이며 측정된 값의 범위는  $2\sim40\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 이다. 열전달계수는 흰의 외경이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 두 그림에서 보는 바와 같이 동일한 형상( $D_o/D$ )에 대하여 석영 흰, 스테인리스강 흰, 알루미늄 흰, 그리고 구리 흰 순으로 열전달계수가 크게 나타났다. 한 예로 동일한 형상 및 유동조건( $D_o/D=2.25$ ,  $Re_D=3,000$ )에 대하여 구리 흰( $k=386\text{ W/m}\cdot\text{K}$ )은 스테인리스강 흰( $k=13.4\text{ Wm}\cdot\text{K}$ )보다 열전달계수가 약 37% 크다. 이 차이는 흰의 외경과 유속이 증가할수록 크게 나타났다. 즉, 흰 효율이 작을수록 차이가 큰 것으로 사료된다. 흰

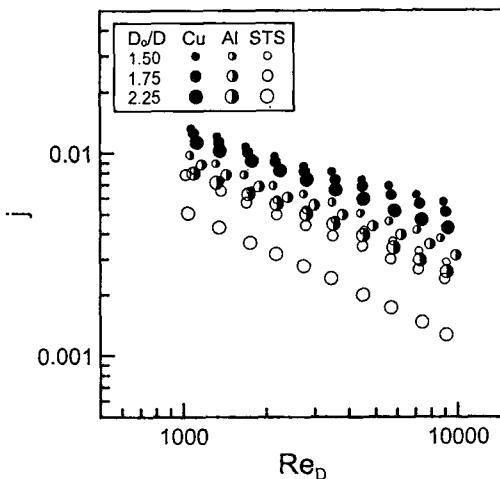


Fig. 4 Comparison of  $j$  factors of the circular finned-tube heat exchangers ( $P_f/D=0.184$ ).

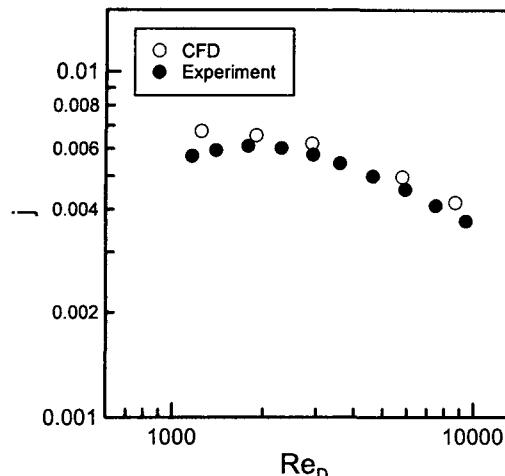


Fig. 5 Comparison of  $j$  factor obtained by the numerical calculation and the experiment.

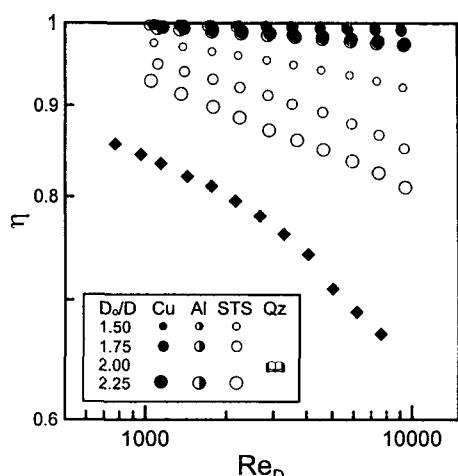


Fig. 6 Fin efficiency versus Reynolds number ( $P_f/D=0.10$  for copper, aluminum and stainless steel fins,  $P_f/D=0.14$  for quartz fins).

의 이론에 따르면 동일한 형상 및 유동조건에서 흐름을 배제한 열교환기의 순수열전달계수는 같아야 한다. 본 실험결과로부터 열전달계수는 재료의 열전도율에 영향을 받는다는 중요한 사실을 추론할 수 있다.

원형환의 열전달에서 특이한 사항은 흐름이 작은 경우( $P_f/D=0.10$ ) Reynolds 수가 약 2,000에서 열전달의 천이가 일어난다는 점이다. 공기의 흐름에 대하여 원형환의 선단에서 열경계층이 성장한다. 흐름이 크거나 유속이 큰 경우에는 각 환에서 성장한 열경계층은 얕고 열경계층 간의 간섭이 적다. 반면에 유속이 작은 영역에서는 각 환에서 성장한 열경계층의 두께가 두껍다. 열경계층의 두께가 환 간격( $P_f-t$ )의 절반보다 커지면 원형환 사이를 흐르는 유동은 내부유동에 근접한다. 이러한 경향은 환의 직경이 클수록 현저히 나타남을 알 수 있다. Fig. 5는 실험결과를 수치계산 결과와 비교한 것이다. 수치계산결과는 실험결과와 약 18% 수준으로 일치함을 보였다. 또한 실험결과에서 나타난 천이현상이 수치해석 결과에서도 관찰되었다.

### 3.2 흐름률

Fig. 6은 Reynolds 수에 따른 흐름률을 도시한

것이다. 그림에서 Reynolds 수가 증가함에 따라 흐름률은 감소하는 경향을 보였다. 구리 환인 경우 흐름률은 본 실험의 모든 경우에서 95% 이상이었다. 환의 열전도율이 감소할수록 흐름률은 감소하였다. Reynolds 수에 대하여 흐름률은 대체적으로 선형적으로 감소하는 경향을 보인다.

## 4. 결 론

환의 재질, 환 외경 및 흐름률을 변화시킨 총 19종의 원형환-원형판 열교환기에 대하여 실험 및 수치계산을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험 및 수치계산으로부터 원형환-원형판에서 흐름률이 작은 경우 특정 Reynolds 수에서 열전달계수의 천이가 관찰되었다.

(2) 열전달계수는 환의 직경이 감소할수록, 그리고 흐름률이 증가할수록 증가한다.

(3) 순수열전달계수는 환의 열전도율이 클수록 높다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(2000-1-30400-009-2) 과제지원으로 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. Kays, W. M. and London, A. L., 1964, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill, U.S.A., pp. 220-224.
4. Stasiulevicius, J., Skrinska, A., Zukauskas, A. and Hewitt, G. F., 1988, Heat Transfer of Finned Tube Bundles in Crossflow, Hemisphere Publishing Co., New York, pp. 50-74.
5. 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.
6. Kang, H. C., 1999, Numerical study for the fin efficiency of the heat exchanger having plate fins, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 11, pp. 903-911.
7. British Standard Institution, 1964, Method for the measurement of fluid flow in pipes – Part 1: Orifice plates, nozzles and venturi tubes, British Standard 1042.