

확대모형을 이용한 환-관 열교환기의 환 형상 및 환 간격 변화에 따른 공기측 성능에 관한 연구

김진우*, 변주석, 전창덕*, 이진호**

연세대학교 기계공학과 대학원, *충주대학교 기계공학과, **연세대학교 기계공학과

A study on airside performance of finned-tube heat exchanger according to fin combination and fin pitch variation of using large scale model

Jin-Woo Kim[†], Ju-Suk Byun, Chang-Duk Jeon^{*}, Jinho Lee^{**}

ABSTRACT: This study investigates the pressure drop and heat transfer characteristics of heat exchanger according to the combination of fin configuration and fin pitch of each row by the similitude experiments with the finned-tube geometry scaled as large as four times. Finned-tube heat exchanger has 2 rows, and fin geometry consists of two cases, louver-louver and louver-slit. Fin pitch is varied with three types in each case, 6-6 mm, 8-8 mm and 8-6 mm. Results show that total heat transfer can be occurred evenly at each row by varying the fin pitch of 1st row and 2nd row. Heat transfer rate and pressure drop characteristics change according to the combination for fin geometry and fin pitch.

Key words : large scale model(확대모델), heat transfer(열전달), pressure drop(압력강하), finned-tube heat exchanger(환-관 열교환기)

기호 설명

- A : 열교환기 전체 표면적 [m²]
- h : 열전달계수 [W/m²K]
- Q : 총열전달량 [kcal/h]
- ΔT_m : 대수평균온도차 [K]

하첨자

- w : 관벽면
- in : 공기측 입구
- ex : 공기측 출구
- 1st : 1열
- 2st : 2열

1. 서론

환-관 열교환기는 가정용 및 산업용 냉동 공조 분야에서 응축기와 증발기로써 광범위하게 사용되고 있다. 현재 환-관 열교환기의 형태는 점점 더 작아지고 가벼워지는 추세이다. 작고 가벼우면서도 기존 열교환기의 효율을 증가하는 성능을 발휘하기 위해 환-관 열교환기의 구조는 매우 복잡해지고 있다.

환-관 열교환기의 성능은 공기측과 냉매측 열저항에 의해 결정되며 특히 공기측 열저항이 냉매측 열저항 보다 5~10배 정도 크다. 따라서 공기측 열전달 성능의 향상은 전체 열전달 성능을 결정짓는데 매우 중요한 인자이다. 환-관 열교환기의 공기측 성능은 환 형상, 환 간격, 전열관의 간격과 열수, 직경 등에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 열전달 성능 향상을 위한 환 형상의 변화나 환 간격의 변화는 공기 유동의 저항으로 작용하여 압력강

[†] Corresponding author

Tel: +82-2-2123-2816; fax: +82-2-312-2159

E-mail address: yesboy@hanmail.net

하를 증가시킨다. 따라서 열전달 성능을 향상시키는 동시에 압력강하를 줄이기 위한 연구가 병행되어야 한다. 또한 겨울철 실외기에 발생하는 착상은 환-관 열교환기의 성능을 저하시켜 공조 및 냉동 장치의 전체 성능에 영향을 미치므로 환-관 열교환기 연구의 중요한 부분이다.

Kweon 등⁽¹⁾은 루버환과 슬릿환을 사용한 2열 환-관 열교환기의 공기유속에 따른 각 열의 전열 성능을 측정하였으며 1열 환과 2열 환의 연결여부는 전열량에 영향을 미치지 않는다고 발표하였다. Wang 등⁽²⁾은 31종의 슬릿환 열교환기 실험을 통해 1열의 열교환기는 환 간격이 감소할수록 열전달 성능이 증가한다고 발표하였다. 또한 슬릿의 길이가 작을수록 열전달에 미치는 전열관 열수의 영향은 무시할 만하다고 발표하였다. Wang 등⁽³⁾은 전열관의 중방향과 횡방향 간격을 고정시킨 15개의 평판환 열교환기를 이용하여 전열관의 열수, 환 간격, 환 두께와 같은 기하학적인 변수를 통해 열전달 및 압력강하를 예측할 수 있는 상관식을 제안하였다. Kays와 London⁽⁴⁾은 14종의 루버환 열교환기를 이용하여 전열특성 및 압력강하에 관한 자료를 최초로 발표하였다. Jeon 등⁽⁵⁾은 27종의 루버환 열교환기의 10배 확대된 상사실험을 통해 루버환의 기하학적 형상에 대한 국소 평균 열전달계수를 구하였고, 열후류의 영향을 규명하였다. O'Neal 등⁽⁶⁾은 1열과 2열의 환피치가 조합된 열교환기를 이용한 열펌프의 착상지연 효과에 대한 연구를 통

해 1열의 환 간격이 2열의 환 간격보다 큰 열교환기를 사용한 경우 COP가 증가하고 열교환기 표면의 착상을 지연하는데 매우 효과가 있다고 발표하였다.

현재까지 환-관 열교환기에 대한 연구의 대부분은 양산되고 있는 실제모형을 대상으로 이루어졌으나 각종 실험조건에 필요한 실제 모델의 제작은 많은 금형비와 가공비를 필요로 하게 되어 새로운 형상의 열교환기를 개발하는데 큰 제약조건이 되었다. 그러나 실제모형을 확대 제작한 상사모형을 이용하게 되면 실험에 필요한 열교환기 모형의 제작비용을 절감할 수 있고 실제모형에서 얻기 힘든 국부적인 열유동 특성 또한 알 수 있는 장점이 있다. Kang 등⁽⁷⁾은 실제 환-관 열교환기를 3배 확대한 상사실험을 통해 상사실험의 결과와 실제실험의 결과가 일치함을 발표하였다. Hong⁽⁸⁾은 열교환기의 1열과 2열에 환 형상을 조합한 확대모형 실험을 통해 압력강하는 환의 배치보다는 종류에 영향을 받으며 열전달 성능은 후벌보다 전열의 환 형상에 영향을 받는다고 발표하였다.

본 연구는 4배로 확대 제작된 환-관 열교환기의 상사모형을 이용하여 1열과 2열의 환 형상과 환 간격이 서로 다른 조합형 환-관 열교환기의 열전달 특성과 압력강하 특성을 연구하고 전체 열전달에 대한 각 열의 열전달 특성에 대해 연구하여 보다 고효율의 환-관 열교환기를 개발하는 것이 목적이다.

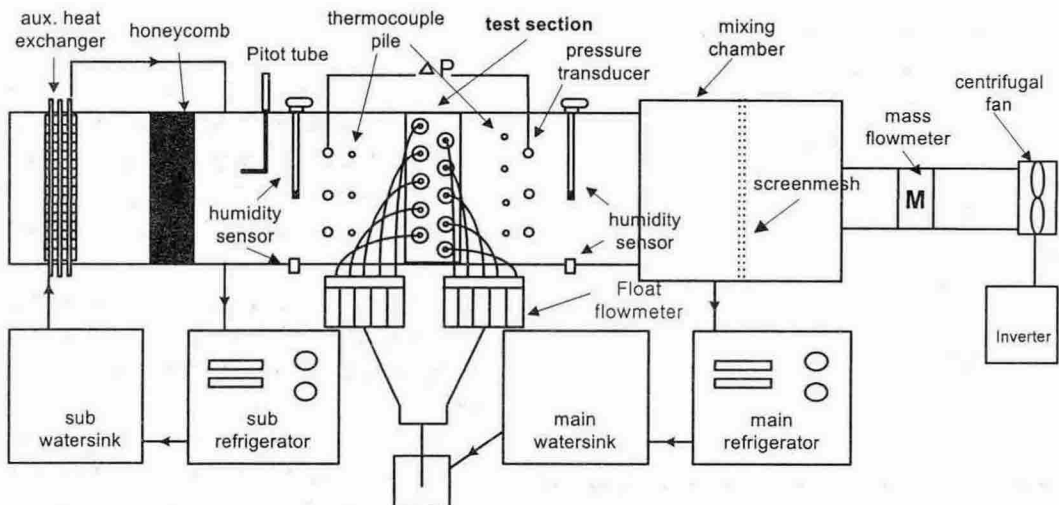


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

2. 실험

2.1 실험장치

상사관계로부터 4배 확대모형에 대한 상사실험을 위해서는 매우 낮은 풍속이 요구되므로 10 mm 두께의 아크릴을 이용하여 소형 풍동을 제작하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 이 장치는 흡입 개방형 소형 풍동으로써 공기의 유입을 위한 팬, 입구공기의 온도조절을 위한 입구 열교환기, 균일한 공기속도의 분포를 위한 정류부, 확대 제작된 실험 열교환기가 설치되는 주실험부, 그리고 유량측정을 위한 출구부로 구성되었다. 팬의 규격은 최대풍량이 $8 \text{ m}^3/\text{min}$, 최대정압이 200 Pa로 전압조정장치(slidacs)에 의해 입력전압을 조절함으로써 주실험부의 전면 풍속을 0.2~2.0 m/s 범위로 가변시킬 수 있다. 흡입공기의 온도를 일정하게 실험 열교환기로 공급하기 위해 폭 418 mm, 높이 68 mm, 길이 38.1 mm인 3열 흰관 열교환기를 풍동입구에 설치하였고, 입구 열교환기와 실험 열교환기에 온도가 일정한 작동유체를 공급하기 위하여 2 kW 용량의 냉동기와 3 kW 히터가 부착된 항온조를 사용하였다. 또한 펌프를 사용하여 항온조에서 실험 열교환기의 각 전열관을 일정 온도인 작동유체를 공급하지만 흰과

전열관의 위치에 따라 대류 열전달계수가 다르게 나타나기 때문에 공기측으로 전달되는 열전달량이 전열관마다 변하므로 모든 전열관을 일정한 온도로 유지할 수 없다. 그러므로 유량제어밸브를 입구측 각 전열관에 설치하고 유량을 제어함으로써 열유속의 조절을 통해 모든 전열관의 온도를 일정하게 유지하였다. 그리고 유입 공기의 유질을 안정화시키고 향상시키기 위해 정류부에 허니컴을 설치하였다. 주실험부의 크기는 폭 420 mm, 높이 70 mm, 길이 101.6 mm로, 4배 확대 제작된 상사핀을 6 mm의 흰 간격일 경우 10개, 8 mm의 흰 간격일 경우 8개를 설치할 수 있도록 하였고 상사핀 후방에서 발생하는 와류가 충분히 소멸될 수 있도록 주실험부 길이의 5배 정도의 공간을 조성하였다. 공기량의 측정은 혼합실(mixing chamber) 후방에 설치된 $\pm 0.2\%$ 의 정밀도를 갖는 질량유량계를 사용하였다. 주실험부에서 발생하는 공기측 압력강하량은 주실험부 입구 및 출구 벽면에 각각 6개의 정압탭을 가공하여 $\pm 0.2\%$ 정밀도를 가지는 미세차압변환기(differential pressure transducer)를 사용하여 측정하였으며, 주실험부 입출구의 공기온도는 입구부 3개, 출구부 4개의 T형 열전대(직경: 0.254 mm)를 설치하여 측정하였다. 그리고 각 전열관의 온도는 관의 중심부에 설치된 측온저항체(Pt100 Ω)를 사용하여 측정하였다.

	A type (Louver-Louver)	B type (Louver-Louver)	C type (Louver-Louver)	D type (Louver-Slit)	E type (Louver-Slit)	F type (Louver-Slit)
Geometry						
Pitch						
	6 mm/6 mm	8 mm/8 mm	8 mm/6 mm	6 mm/6 mm	8 mm/8 mm	8 mm/6 mm

Fig. 2 Fin geometry and fin pitch of finned-tube heat exchanger

Tabel 1. Dimensions of finned-tube heat exchanger

Parameter	Value
Tube outer diameter	29.2 mm
Longitudinal tube spacing	50.8 mm
Traverse tube spacing	84 mm
Fin pitch	6/6, 8/8, 8/6 mm
Number of tube row	2 row
Number of test fin	10/10, 8/8, 8/10 EA
Number of test tube	10 EA
Air velocity	0.2 ~ 1.0 m/s
Scale factor	4

2.2 실험열교환기

본 실험에 사용된 흰 형상은 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 루버핀과 슬릿핀 두가지 형상이다. Hong⁽⁸⁾의 실험에서 루버핀을 1열에 배치한 경우 열전달 특성이 우수한 예를 참고하여 루버핀을 1열에 배치하였다. 그리고 1열과 2열의 흰을 모두 루버핀을 사용한 열교환기와, 1열에는 루버핀을 사용하고 2열에는 슬릿핀을 사용한 열교환기를 제작하였고 각각의 열교환기에 대하여 1열과 2열의 흰 간격을 각각 6-6 mm, 8-8 mm, 8-6 mm로 변화시킨 6종류의 흰-관 열교환기에 대하여 실험하였다. 열교환기는 직경 29.2 mm의 엇갈림 배열을 갖는 2열 전열관 구조로써 공기흐름 방향으로 길이 101.6 mm, 두께 0.4 mm인 구리관으로 제작하였다. Fig. 2와 Table 1은 실험 열교환기의 형상 및 제원을 나타내고 있다.

2.3 실험방법

실험은 각각의 흰 형상 및 흰 간격 조합 흰으로 구성된 확대모형 열교환기를 주실험부에 설치하고 모든 계측기를 작동시켜 작동상태의 양호여부를 확인한다. 그리고 풍동의 축류환을 가동하여 원하는 풍속으로 조정한다. 입구 열교환기와 실험 열교환기에 연결된 항온조와 냉동기를 가동하여 원하는 온도에 이르게 한다. 실험 열교환기는 유량제어 밸브를 이용하여 전체 전열관이 일정한 온도를 이룰 수 있도록 한다. 전체 전열관의 온도편차가 0.5°C 이내로 조정되고 온도변화 없이 10분 이상 지속되면 측정을 시작한다. 입구공기온도와 실험 열교환기의 전열관 온도차를 20~25°C로 유지하여

실험 열교환기와 공기와의 열전달이 충분히 일어날 수 있도록 하였다. 실험은 0.2~1.0 m/s의 풍속 범위에서 반복하였고, 전체 열전달 및 압력강하 특성에 대한 데이터를 측정하기 위한 2열 실험과 각 전열관의 열전달 및 압력강하 특성에 대한 데이터를 측정하기 위한 1열 실험으로 구분하여 실시하였다.

2.4 데이터처리

본 실험에서 총열전달량, Q는 공기의 엔탈피 변화량으로부터 계산할 수 있다. 공기의 엔탈피 변화량은 다음과 같다.

$$Q = \dot{m}c_p(T_{ex} - T_{in}) \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 는 질량유량계로부터 측정된 공기량이며 c_p 는 공기의 비열이다. 그리고 총열전달량, Q는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = hA\Delta T_{lm} \quad (2)$$

여기서 A는 열교환기의 전체표면적이고 ΔT_{lm} 는 대수평균온도차로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{w1st} - T_{in}) - (T_{u2nd} - T_{ex})}{\ln((T_{w1st} - T_{in}) / (T_{u2nd} - T_{ex}))} \quad (3)$$

여기서 1열과 2열의 평균 전열관의 벽온도, T_{w1st} 와 T_{u2nd} 는 다음과 같이 구한다.

$$T_{w1st} = \frac{(T_{u2} + T_{u3} + T_{u4})}{3} \quad (4)$$

$$T_{u2nd} = \frac{(T_{u7} + T_{u8} + T_{u9})}{3} \quad (5)$$

T_{w1} , T_{w5} , T_{w6} , T_{w10} 은 유동 경계층이 온도변화에 영향을 미칠 수 있으므로 평균온도 계산에서 제외하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 흰 형상 및 흰 간격 조합에 따른 열전달계수

Fig. 4는 1열과 2열의 흰 형상과 흰 간격을 다르게 하여 조합한 6개의 열교환기에 대한 공기 유속에 따른 열전달계수를 나타내고 있다. 1열과 2열의 흰 형상이 모두 루버핀을 사용한 A, B, C형 열교환기의 경우, A형 열교환기의 열전달계수가 B형 열교환기 보다 19% 높았으며 C형 열교환기 보다

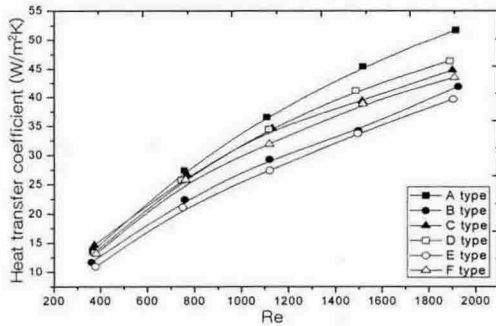


Fig. 4 Heat transfer coefficient of combination finned-tube heat exchanger

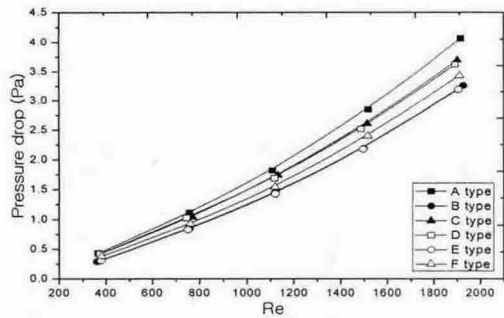


Fig. 5 Pressure drop of combination finned-tube heat exchanger

는 14% 높았다. 1열에 루버핀을 사용하고 2열에 슬릿핀을 사용한 D, E, F형 열교환기의 열전달계수는 D형 열교환기가 E형 열교환기와 F형 열교환기 보다 각각 16%, 6% 높았다. 일반적으로 저속보다 고속에서 높은 효율을 발휘하는 루버핀의 특성 때문에 A, B, C형 열교환기의 열전달계수는 저속영역에서는 D, E, F형 열교환기와 비슷하였으나 고속영역으로 갈수록 D, E, F형 열교환기의 열전달계수와 차이가 커졌다. 전체적으로 1열과 2열이 루버핀으로 설치된 A, B, C형 열교환기의 열전달계수는 루버핀과 슬릿핀이 조합된 D, E, F형 열교환기보다 큰 값을 나타내어 A형 열교환기는 D형 열교환기보다 13%, B형 열교환기는 E형 열교환기보다 7%, C형 열교환기는 F형 열교환기보다 3% 높은 값을 갖는 것으로 나타났다.

3.2 흰 형상 및 흰 간격 조합에 따른 압력강하

Fig. 5는 6개의 조합형 흰-관 열교환기의 공기 유속에 따른 압력강하를 나타내고 있다. 조합형 흰-관 열교환기의 압력강하 측정 결과는 열전달계수와 유사한 경향을 보인다. 1열과 2열 모두 루버핀을 사용한 A, B, C형 열교환기의 경우 A형 열교환기는 B형 열교환기 보다 20% 높은 압력강하량을 보였으며 C형 열교환기 보다는 9% 높았다. 또한 1열 루버핀, 2열 슬릿핀을 사용한 D, E, F형 열교환기는 D형 열교환기가 E형 열교환기 보다는 12%, F형 열교환기 보다는 5% 높은 압력강하를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 F형 열교환기는 C형 열교환기 보다 작은 압력강하량을 나타내어 우수한 마찰특성을 갖는 것으로 나타났다. C형 열교

환기의 압력강하량은 F형 열교환기 뿐만 아니라 D형 열교환기 보다도 높았다. 즉, 1열과 2열 모두 루버핀을 사용한 C형 열교환기는 1열과 2열의 흰 형상을 다르게 한 D형 열교환기 보다 열전달 특성과 마찰 특성 모두 좋지 않았다. B형 열교환기는 열전달계수의 비교에서 동일한 흰 간격을 갖은 E형 열교환기보다 높은 열전달 계수를 보였으나 압력강하는 거의 같았으므로 좋은 공기측 성능을 나타냈다.

3.3 조합형 흰-관 열교환기에서 열별 전열성능

Fig. 6은 1열과 2열 모두 루버핀을 사용한 열교환기에서 흰 간격의 변화에 의한 각 열의 전열성능을 나타낸 것이다. 전체적으로 공기유속이 증가함에 따라 1열의 열전달 비율은 감소하고 2열의 열전달 비율은 증가한다. 공기 유속이 저속일수록 그리고 흰 간격이 좁을수록 1열이 차지하는 열전달 비율이 높았다. 그러나 1열과 2열의 흰 간격이 각각 8 mm, 6 mm인 C형 열교환기의 경우 1열의 열전달 비율이 B형 열교환기 보다 8%, A형 열교환기 보다는 15% 작았다. 즉, C형 열교환기는 B형, A형 열교환기 보다 열전달 분배가 1열과 2열에 대해서 골고루 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 1열에 루버핀, 2열에는 슬릿핀을 사용한 흰 형상 조합 열교환기의 흰 간격 변화에 의한 각 열의 전열성능을 나타낸 것이다. 1, 2열의 흰 형상을 조합한 경우도 각 열의 흰 간격을 다르게 함으로써 전체 열전달을 1열과 2열에 골고루 분배시킬 수 있다. F형 열교환기에서 1열의 열전달 비율은 E형, D형 열교환기 보다 각각 7%, 10% 낮았

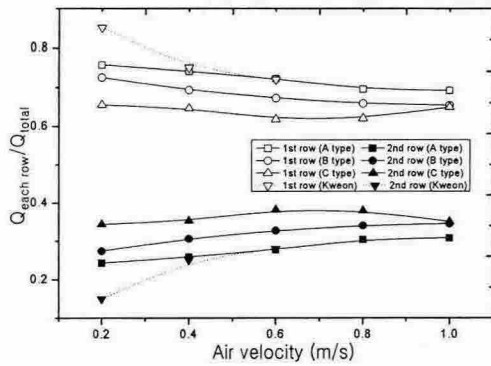


Fig. 6 Heat transfer ratio of each row for finned-tube heat exchanger (louver-louver)

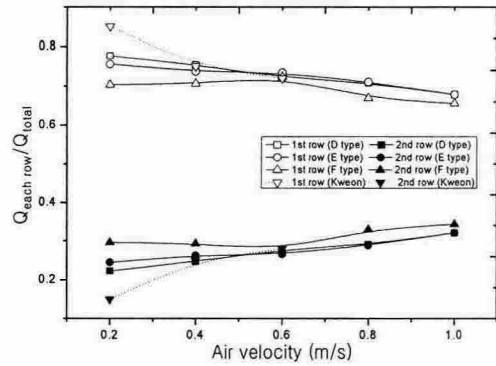


Fig. 7 Heat transfer ratio of each row for finned-tube heat exchanger (louver-slit)

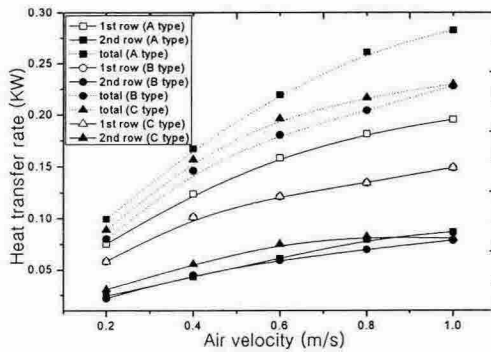


Fig. 8 Heat transfer rate of each row for finned-tube heat exchanger (louver-louver)

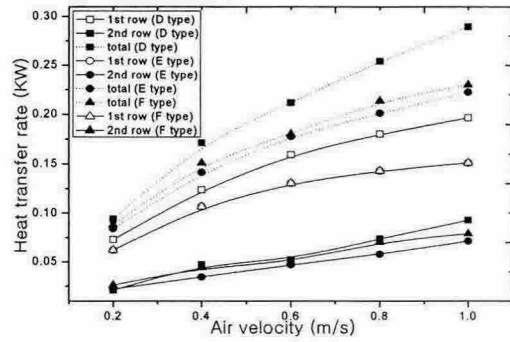


Fig. 9 Heat transfer rate of each row for finned-tube heat exchanger (louver-slit)

다. 따라서 1, 2열에 모두 루버핀을 사용한 C형 열교환기는 F형 열교환기보다 1열과 2열의 흰간격을 다르게 함으로써 각 열에 열전달을 골고루 분배함을 알 수 있었다.

3.4 흰 형상 및 흰 간격 조합에 따른 열전달량

Fig. 8은 1열과 2열 모두 루버핀을 사용한 열교환기에서 흰 간격의 변화에 의한 열전달량 변화를 나타낸다. C형 열교환기의 전체 열전달량은 전체 실험 범위에서 B형 열교환기 보다 8% 높았으며 A형 열교환기 보다는 18% 낮았다. 그러나 2열의 열전달량의 경우, C형 열교환기의 2열 열전달량이 A형과 B형 열교환기 보다 25% 높았으며 그 차이는 저속영역에서 더 두드러졌다. 이것은 C형 열교환기가 A형과 B형 열교환기 보다 2열의 유용성이

높다는 것을 의미한다.

Fig. 9는 1열에는 루버핀을 사용하고 2열에는 슬릿핀을 사용한 흰 형상 조합 열교환기의 흰 간격 변화에 의한 열전달량 변화를 나타내고 있다. F형 열교환기의 전체 열전달량은 전체 실험 범위에서 E형 열교환기 보다 4% 높았으며 D형 열교환기 보다는 20% 낮았다. 또한 2열의 열전달량은 1열과 2열 모두 루버핀을 사용한 경우와 달리 F형 열교환기의 2열 열전달량이 E형 열교환기 보다는 11% 높았지만 D형 열교환기의 2열 열전달량 보다는 18%로 작은 값을 나타냈다. 따라서 루버핀과 슬릿핀을 조합한 경우 2열의 유용성은 1, 2열 모두 루버핀을 사용한 열교환기 보다 낮다.

4. 결론

본 연구는 2열로 구성된 열교환기의 확대모형에 대한 상사실험을 통해 각 열의 흰 형상과 흰 간격을 다양하게 변화시킨 흰-관 열교환기의 열전달 특성과 압력강하 특성을 연구하였다. 실험에 사용된 흰은 대표적인 불연속 표면인 루버흰과 슬릿 흰이며 흰 간격은 1, 2열 모두 6 mm와 8 mm인 경우와 그리고 1열과 2열의 흰 간격을 8 mm와 6 mm로 다르게 한 경우이다. 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공기 유속이 작고 흰 간격이 좁을수록 전체 열전달량에 대한 1열의 의존도가 높으며 2열의 유용성은 떨어진다.
- (2) 2열의 흰 간격을 1열의 흰 간격 보다 작게 할 경우 전체 열전달량이 1열에 치우치지 않고 각 열에 골고루 분배 되게 함으로써 보다 우수한 성능의 열교환기를 얻을 수 있다.
- (3) 1열과 2열의 흰 형상과 흰 간격을 조합함으로써 원하는 열전달계수와 압력강하량을 조절할 수 있다.

참고문헌

1. Young Chul Kweon et al., 2004, Heat transfer performance of individual rows in fin-tube heat exchanger, Journal of SAREK, Vol. 16, No. 3, pp. 280-286
2. Y.J. Du and C.C. Wang, An Experimental Study of the Air-side Performance of the Super-slit Fin-and-Tube Heat Exchangers, Int. J. Heat and Mass Transfer, 43, pp 4475-4482, 2000.
3. C.C. Wang, Y.C. Hsieh, Y.J. Chang, Y.T. Lin, Sensible heat and friction characteristics of plate fin-and-tube heat exchangers having plate fins, Int. J. Refrig. 19 (4) (1996) 223-230.
4. W.M. Kays and A.L. London, Compact Heat Exchanger, 3rd ed., McGraw-Hill, 1984.
5. C.D. Jeon, J.T. Hong, and J. Lee, Experimental Study of Heat Transfer Characteristics in the Louvered-Fin Type Heat Exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 8, No. 1, 1996.
6. R.J. Watters and D.L. O'Neal, Effect of Fin Staging on Frost/Defrost Performance of a Two-Row Heat Pump Evaporator at Standard Test Conditions ASHRAE Transaction, 2001, pp. 240-249.
7. H.C. Kang, and M.H. Kim, Effect of Strip Location on the Air-side Pressure Drop and Heat Transfer in Strip Fin-and-Tube Heat Exchanger, Int. J. of Refrigeration, 22 pp 302-312, 1999.
8. Hong, Man Ki, 2004, A Study on heat transfer and pressure drop characteristics of large scale model of fin and tube heat exchanger, MS thesis, Yonsei University, Seoul, Korea.