

흰 형상 및 유량에 따른 흰-관현열 열교환기의 전열 성능에 관한 연구

이 민 수

두산중공업 (minsu1.lee@doosan.com)

개 요

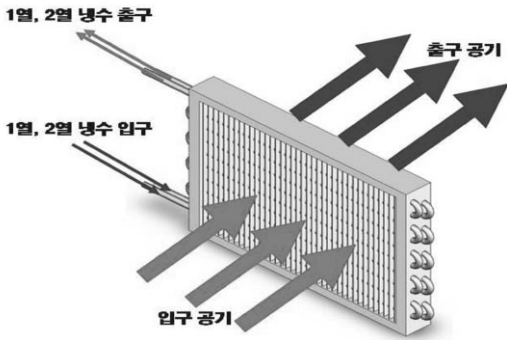
최근 들어 지역 냉방 또는 열병합 발전소 등과 같은 집단에너지 공급시설에서 공급되는 친환경 현열 냉매인 냉수로 주거용 공간을 집단으로 냉방할 경우 개별 에어컨 시스템과 비교하여 소비전력과 같은 에너지 절감 효과가 커 주목을 받고 있다. 이와 같은 지역 냉방 시스템을 도입하게 된다면 각 가정마다 에어컨을 설치할 필요가 없으며 실외기가 사라져 도시 경관을 개선하는 효과가 있다. 그리고 21세기에 들어 끝없는 에너지 사용으로 인해 지구온난화가 가속화되는 시점에서 지역 냉방을 이용한 냉방시스템은 에너지 요금을 절감할 수 있으며 이산화탄소 발생량도 크게 줄어 들 것으로 기대된다. 또한 하절기에 냉방을 위해 많은 전력을 소비함으로써 원활한 전력 공급이 이루어지지 못하여 모든 가전제품에 대한 에너지 소비효율 등급제를 시행으로 제품의 효율 개선이 요구되며 특히 계절용 가전인 냉방용 공조기의 효율 향상에 대한 노력이 필요하다.

주거용 건축물에서 전체 에너지 소비량의 약 1/4을 차지하는 냉방용 공기조화기의 고효율화는 에너지 절감과 이산화탄소 배출량 감소를 위해 빼놓을 수 없는 중요한 과제이다. 현재까지 공기조화시스템의 주요 구성 부품인 열교환기 및 압축기의 성능 개선을 위해 여러 가지 연구개발이 진행되어 왔으며 특히 과거 십 수 년간은 성능 향상에 팔목

할 만한 변화가 있었다. 흰-관 열교환기의 성능 향상을 위한 많은 방법들 중에서 지금까지는 전열 면적의 증대를 위해 루버, 슬릿, 파형, 평판흰 등 흰 형상 개선, 흰 매수의 증감, 단 간격, 열 간격, 관 열수, 관 직경 등과 같은 기하학적인 변화를 통하여 공기측 성능 향상을 꾀하였다. 그러나 이러한 열교환기의 기하학적 특성이 점차 복잡해지고 소형화 및 고성능화 되어가면서 열전달을 촉진시키는 기술은 한계에 다다르고 있는 실정이다.

중앙 집중식 냉방시스템을 이용하는 Fan Coil Unit의 현열 열교환기는 냉매의 잠열 열교환을 이용하는 기계 압축식 열교환기와 구분 없이 제작되어져 사용되고 있다. 흰-관 열교환기에 있어서 많은 연구자들의 관심 영역은 고정 풍량에서 열교환 성능과 공기측 압력강하 특성이며 열교환기 성능 향상을 위해 흰 형상 및 흰 간격에 관한 연구를 수행하고 있다. 하지만 잠열을 이용하는 흰-관 열교환기의 경우 열교환기 전체가 등온조건이지만 현열 열교환기의 경우는 등온조건이 성립되지 않으므로 냉수의 유량변화에 따라 열교환기의 성능이 달라지는 장점이 있지만 이를 고려한 열교환기의 제작은 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 실제 FCU용 열교환기에 적용 가능한 것으로서 기존 성능 향상 방안에 추가적으로 현열 냉매인 냉수의 유량변화를 각 열별 분리된 흰과 연결된 흰에 독립적으로 제어하여 공기측 열전달 성능 향상시키는데 주목적이 있다. 먼저 현열



[그림 1] Schematic diagram of test heat exchanger

열교환 방식을 이용하는 열교환기의 경우 열교환을 일으키는 두 유체의 상태변화가 없이 열전달이 이루어지는 것을 말한다. 잠열 열교환 방식을 이용하는 열교환기의 경우는 큰 대류열전달계수를 갖는 냉매의 상태변화를 이용하여 공기를 냉각과 가열을 한다. 현열과 잠열 열교환의 차이점은 앞서 언급하였던 것처럼 냉매 또는 냉수가 열교환기 관 전체를 통과하는 과정에서 현열의 경우는 냉수유량의 변화에 따라 관 입·출구 온도변화가 이루어져 성능변화가 이루어질 수 있다. 그러나 잠열의 경우는 관 입·출구간 온도차이가 거의 없어 열교

환기 전체가 등온상태가 되어 열교환기 성능을 향상시키는데 한계가 있다.

일반적으로 흰-관 열교환기가 주거용 냉방시스템에 적용될 경우, 공기의 노점온도 이하의 냉수를 사용 시 결로로 인한 응축수가 발생되어 적절히 배수시키지 않는다면 냉방기 주위의 벽, 바닥재, 또는 가구의 부패를 초래하기 때문에 별도의 응축수 배출구가 필요하다. 그러나 공기의 노점온도 이상의 냉수를 사용 시 무결로로 공기 냉각이 가능하지만 재실자가 요구하는 냉방능력이 떨어지게 되어 냉방능력을 높이기 위해 환과 펌프의 소비동력이 커지게 되고 소비전력이 많아진다. 그리하여 공기의 노점온도보다 다소 낮은 냉수를 이용하게 된다면 충분한 냉방능력을 갖게 되어 에너지를 절약할 수 있다. 또한 흰-관 열교환기를 이용하여 열교환을 할 경우에 공기 유속에 따른 각 열별 열전달 기여도가 달라진다. 예를 들어 2열 이상의 열교환기를 통과하는 공기 유속이 낮은 경우 1열의 열전달 기여도가 후열에 비해 월등히 높고, 유속이 높아지면 2열의 열전달 기여도가 점차 상승하게 되어 1열의 것을 역전하는 현상이 발생한다.

본 실험에서는 1, 2열 분리된 흰과 연결된 흰에 공기의 노점온도보다 낮은 냉수를 이용하여 독립적 유량제어를 통해 공기유속에 따른 2열 열전달 기여도 향상과 열교환기의 성능 향상을 위한 최적 운전조건을 도출하고자 한다.

<표 1> Geometric parameter of fin-tube heat exchanger

Parameter	Specification
Tube outer diameter (mm)	9.52
Longitudinal tube spacing (mm)	21.7
Transverse tube spacing (mm)	25
Fin pitch (mm)	2.12
Fin thickness (mm)	0.115
Horizontal of fin (mm)	43.4
Height of heat exchanger (mm)	250
Length of heat exchanger (mm)	380
Number of test fin (FPI)	12, 8
Number of tube row	2
Number of tube	20
Fin material	Aluminum
Tube material	Copper
Fin type	Corrugated, Louver
Tube rows alignment type	Staggered

<표 2> Types of test fin-tube heat exchanger

	Fin type	Number of fin	1&2 rows separated/connected
CASE #1	Corrugated	12/12FPI	separated
CASE #2	Louver	12/12FPI	separated
CASE #3	Corrugated	8/8FPI	separated
CASE #4	Louver	8/8FPI	separated
CASE #5	Corrugated	12/12FPI	connected
CASE #6	Louver	12/12FPI	connected
CASE #7	Corrugated	8/8FPI	connected
CASE #8	Louver	8/8FPI	connected



실험장치

본 실험에 사용된 환-관 열교환기는 S사에서 주문제작한 것으로서 세부제원은 표 1과 같다. 환-관 열교환기는 2열 10단 직교류 형태로서 크기는 $250 \times 43.4 \times 380 \text{mm} (L_1 \times L_2 \times L_3)$ 이며 그림 1에 나타내었다. 냉수가 흐르는 관 직경은 9.52 mm이며 1열, 2열의 관이 분리가 되어 열별 독립적 냉수유량 제어가 가능하도록 하였다. 열교환기 환의 재질은 알루미늄이며 환 두께는 0.115 mm, 냉수관의 재질은 구리이며 관두께는 0.36 mm이다. 공기 흐름 방향으로 1, 2열 환은 분리된 것과 연결된 환으로 구성되어 있다. 환 종류는 코류게이트환과 루버 환 2가지로 선정하였다.

실험에 사용된 환-관 열교환기의 구성은 표 2와 같이 선정하여 각 열별 관 내부 냉수유량을 독립적 제어를 통하여 실험을 수행하였다.

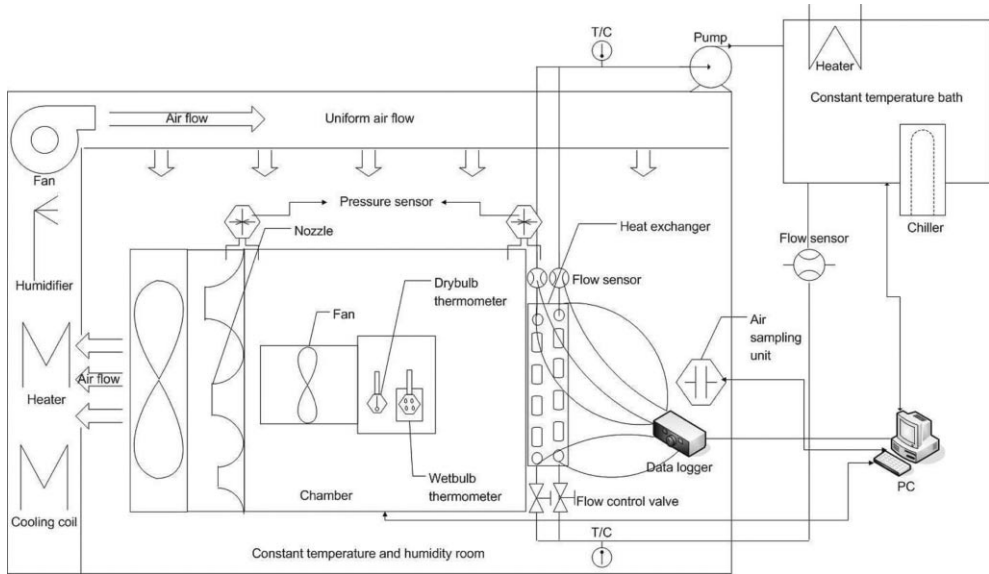
본 실험에서는 덕트가 없으며 실내의 온도 및 습도가 일정하게 유지되는 공기 엔탈피식 열량측정 장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 표 2는 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내었다.

실험 조건 및 방법

환-관 열교환기의 성능 측정에 관하여 KS B 6377의 환 코일 유니트 냉방 표준 시험 규격에 따라 입구 건구공기온도 27°C , 상대습도 50%로 하였다. 풍량은 공기측과 냉수측의 에너지 밸런스 $\pm 5\%$ 이내의 조건에 맞추어 풍량을 변화시켰다. 냉수측의 조건으로 입구 공기 노점온도인 15.9°C 보다 다소 낮은 13°C 의 냉수온도를 설정하여 현열 열전달을 높이고 냉수유량은 1열에 3~7으로 1씩 증가시켰다. 이와 동시에 2열에 7~3으로 1씩 감소시켜 독립적 냉수유량조절로 총합 10이 되도록 하여 주거용 1평당 약 407 W의 냉방 요구 능력에 맞추어 실험을 각 열교환기별로 공기측 열전달 및 압력강하 특성에 대한 실험을 수행하였다. 본 실험을 수행하기 위한 세부 조건은 표 3에 나타내었다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 보다 높은 온도에서 공급되는 현열 냉매 이용 고성능 열교환기의 개발을 위해 각



[그림 2] Schematic diagram of experimental apparatus

열별 흰을 분리시키고 냉수유량을 독립적으로 조절하여 열전달 성능 및 압력강하 특성을 실험적으로 조사하였다. 흰을 분리시킨 것은 공기가 열교환기의 1열을 통과하고 2열에 들어갈 때 새로운 선단부(leading edge)로서 연속적이 아닌 단속적인 새로운 얇은 경계층을 형성, 열저항을 감소하여 열전달을 촉진시키는 것이 주목적 이었다. 흰의 연결 유무에 따른 비교결과 분리된 흰의 열교환기가 연결된 흰의 열교환기 보다 열전달 효과가 낮았다. 그러나 압력강하의 비교결과 분리된 흰 열교환기가 연결된 열교환기 보다 높은 것으로 보아 새로운 선단부로서의 역할을 하는 것으로 보인다. 또한 각 열별 독립적 냉수유량조절로 열전달 성능 향상이 가능함을 확인할 수 있었다.(그림 3 ~ 7 참조) 각 열별 흰을 분리시켜 열전달 성능을 향상시키기 위

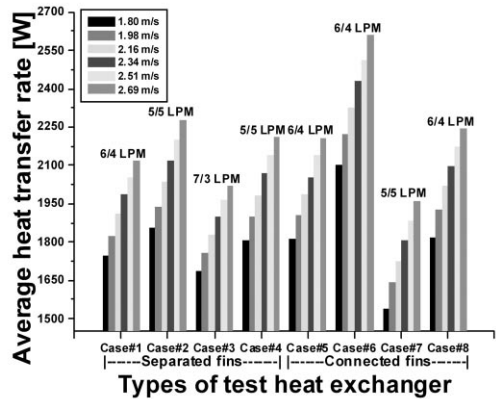
해서는 열별 흰이 분리된 거리를 현재 0.1 mm보다 더 크도록 제작하고(2~3 mm) 후열의 냉수유량을 증가시키면 열전달 기여도를 높일 수 있다.

현열 열교환기의 성능 향상

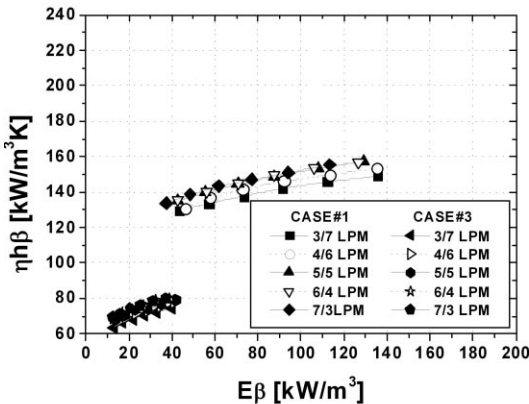
지역 냉난방과 같은 집단에너지 공급시설에서 공급하는 냉수를 이용하여 보다 높은 온도에서 공급되는 현열 냉매에 대한 고효율 열교환 및 성능 향상을 위한 운전조건을 찾고자 하였다. 실험결과, 각 열별 흰이 분리된 열교환기 가운데 Case#2가 가장 우수한 현열비를 나타내며 현열 열교환량이 냉수유량조절 범위 4/6 LPM에서 최대 약 89%를

<표 3> Experimental conditions

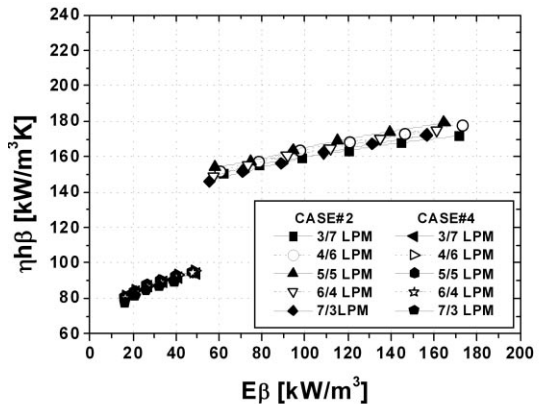
Air side	Temperature (°C)	DB 27°C, WB 19.68°C					
	Relative humidity (%)	50					
	Air velocity (m/s)	1.8 ~ 2.7					
Water side	Temperature (°C)	13°C					
	l/min	Row1	3	4	5	6	7
		Row2	7	6	5	4	3



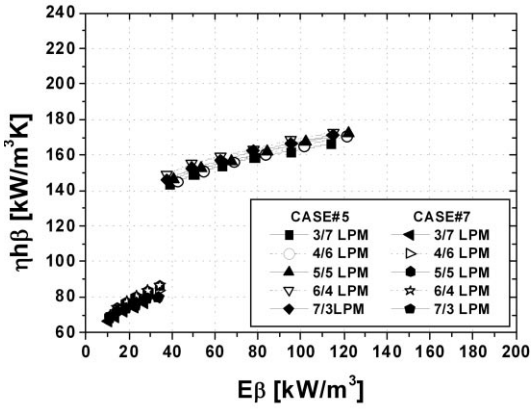
[그림 3] Maximum heat transfer rate by flowrate control of each row



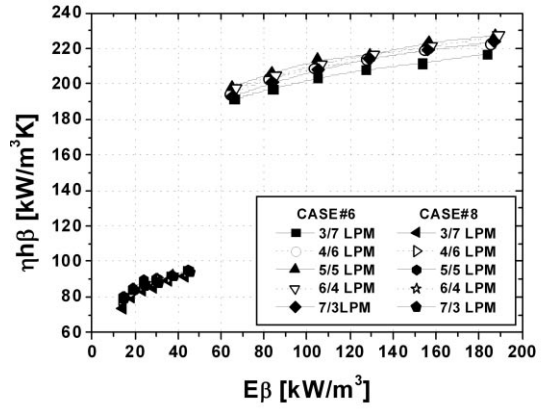
[그림 4] Volume goodness factor of 12/12FPI, Corrugated fins and 8/8FPI, Corrugated fins (separated)



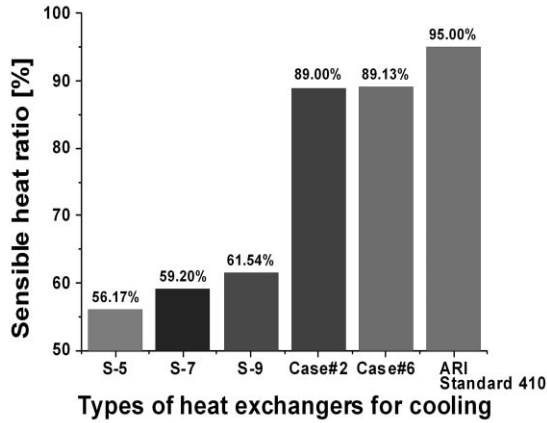
[그림 5] Volume goodness factor of 12/12FPI, Louver fins and 8/8FPI, Louver fins (separated)



[그림 6] Volume goodness factor of 12/12FPI, Corrugated fins and 8/8FPI, Corrugated fins (connected)



[그림 7] Volume goodness factor of 12/12FPI, Louver fins and 8/8FPI, Louver fins (connected)



[그림 8] Sensible heat ratio of heat exchangers for cooling

나타내었다. 각 열별 환이 연결된 열교환기 가운데 Case#6이 가장 우수한 현열비를 나타내며 현열 열교환량이 냉수유량조절 범위 6/4 LPM에서 최대 약 89.1%를 나타내었다.(그림 8 참조) 한편 실험을 통하여 현열비 95%이상 유지되는 현열 열교환기 개발을 위한 방법은 아래와 같이 제시할 수 있다.

① 공기 유속을 낮추도록 하면 열교환기의 전열면적에서 머무르는 시간이 길어져 출구온도를 낮추도록 한다.

② 냉수유량을 낮추어 냉수측 출구온도가 노점온도에 근접 또는 이상이 되도록 한다.

③ 환-관 열교환기 제작 시, 환 매수를 더 증가시켜 전열면적을 높이도록 한다.

결론

환 형상에 따른 비교결과 루버환 열교환기의 독립적 냉수유량제어로 2열의 기여도를 향상시킬 수 있었다. 이것은 루버환이 코류게이트환 열교환기에 비해 후열에서 공기유동변화가 크기 때문이다. 열별 환이 연결된 열교환기의 경우 열전도의 영향으로 2열의 기여도가 환이 분리된 열교환기 보다 다소 높아졌다. 2열의 기여도가 1열의 기여도를 역전 또는 동등하게 되는 냉수유량 범위로 3/7 LPM으로 나타났다. 그러나 냉수유량제어를 통하여 열교환기 전체 열전달량을 높일 수 있는 냉수유량범위는 환 형상, 환 매수에 따라 각각 다르게 나타났다. 전체 환-관 열교환기 중에서 가장 우수한 열전달 성능과 마찰특성을 나타내는 Case#6의 경우 최대 열전달량을 나타내는 냉수유량범위로 6/4 LPM으로 나타났다.

공기측 현열 열교환량은 공기 풍속이 증가함에 따라 점차 감소하였다. 이것은 빠른 공기유속으로 인해 공기측 건구온도변화가 작아졌기 때문이다. 루버환은 코류게이트환 열교환기 보다 현열 열교환 성능이 우수하였다. 이것은 루버환을 통과하는

공기의 유동 혼합이 코류케이트원 보다 많아 건구 온도 변화량이 크기 때문이다. 12 FPI가 8 FPI 열교환기에 비해 높은 현열비를 나타내었는데 이것은 열교환기 전열면적이 약 12% 더 크기 때문이다. 전체 열교환기 중에서 가장 우수한 현열 열교환 성능을 나타내는 열교환기는 Case#6으로서 최적 냉수유량 범위로 6/4 LPM으로 도출되었다.

참고 문헌

1. 권영철, 정지환, 장근선, 홍기수, 진심원, 2004, "2열 핀-관 열교환기의 열별 전열성능 측정", 설비공학논문집 Vol.16, No. 3, pp. 280~286
2. 윤백, 김영생, 박현연, 1996, "직교류 핀-관 열교환기의 성능 평가", 설비공학논문집 Vol. 25, No. 2, pp. 151~160
3. 변주석, 이진호, 전창덕, 홍만기, 2005, "확대 모형 열교환기를 이용한 공기측 열전달 성능에 관한 연구", 대한기계학회논문집(B), Vol. 29, No. 9, pp.1032~1041
4. 장근선, Thanh-Long Phan, 2007, "습표면 조건에서 슬릿 핀-튜브 열교환기의 열전달 및 압력강하 특성", 설비공학논문집 Vol. 19, No. 1, pp. 1~9
5. A. M. Jacobi, V. W. Goldschmidt, 1990, "Low Reynolds number heat and mass transfer measurements of an overall counterflow, baffled, finned-tube, condensing heat exchanger", Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 33, No. 4, pp. 755~765
6. Chi-chuan Wang, Yi-chung Hsieh, Yur-tsai Lin, "Performance of Plate Finned Tube Heat Exchangers Under Dehumidifying Conditions", Journal of Heat Transfer, Vol. 119, pp109~117
7. K. Hong, R. L. Webb, 1999, "Performance of Dehumidifying Heat Exchangers With and Without Wetting Coatings", Journal of Heat Transfer, Vol. 121, pp. 1018~1026
8. Wei-Mon Yan, Pay-Jen Sheen, 2000, "Heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43, pp. 1651~1659
9. Yur-Tsai Lin, Kuei-Chang Hsu, Yu-Juei Chang, Chi-Chuan Wang, 2001, "Performance of Rectangular Fin in Wet Conditions: Visualization and Wet Fin Efficiency", Journal of Heat Transfer, Vol. 123, pp. 827~836
10. Chi-Chuan Wang, Ralph L. Webb, Kuan-Yu Chi, 2000, "Data reduction for air-side performance of fin-and-tube heat exchangers", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 21, pp. 218~226
11. T. H. Kuehn, J. W. Ramsey, J. L. Threlkeld, 2002, Thermal Environmental Engineering, Prentice-Hall, Inc. pp. 325~366
12. Ramesh K. Shah, Dusan P. Sekulic, 2003, "Fundamentals of Heat Exchanger Design", John Wiley & sons, Inc. pp. 118~158
13. S. A. Idem, A. M. Jacobi, V. W. Goldschmidt, 1990, "Heat Transfer Characterization of a Finned-Tube Heat Exchanger(With and Without Condensation)", Journal of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 64~70
14. W. M. Kays, A. L. London, 1984, "Compact Heat Exchanger", 3rd ed., McGraw-Hill, pp. 186~279
15. ASHRAE, 1993, "Fundamentals - SI Edition".