

열교환기 성능에 영향을 미치는 인자들의 특성과 연구동향

이동진 · 윤점열

Research Review for Parametric Characteristics on Heat Exchanger

Dong-Jin Lee · Jeom-Yul Yun



● 이동진 (금성사 생활시스템연구소)
● 1957년생
● 열전달을 전공하였으며, 냉동공조용 열교환기의 관내유동 및 열전달 특성 규명에 관심을 가지고 있다.



● 윤점열 (금성사 생활시스템연구소)
● 1960년생
● 열전달을 전공하였으며, 냉동공조용 열교환기의 성능해석과 최적설계에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

문화수준의 향상과 사회의 발전으로 인하여 인간의 생활수준이 급격히 향상되고 있으며, 이에 따라 합리적이고 쾌적한 생활 환경이 요구되고 있다. 요즘들어 가정용 및 사무실용으로 사용되는 소형 에어컨은 그 수요가 폭발적으로 증가하고 있으며, 앞으로 인간생활에 없어서는 안될 중요한 제품중의 하나로 자리잡고 있다. 그러나 최근 소비전력 규제 및 CO₂ 발생량 규제 등으로 인하여 에너지 절약형 제품에 대한 요구가 점점增高하여 핵심부품인 열교환기의 효율 향상은 숙명적인 과제라 할 수 있다.

에어컨에 사용되고 있는 응축기와 증발기(condenser/evaporator)는 대부분이 핀-튜브(fin-tube)형의 직교류형 열교환기(cross-flow heat exchanger)이다. 이와 같은 열교환기의 성능에 영향을 미치는 인자들은 크게

핀과 튜브로 구성되는 기하학적인 인자와 공기부와 냉매부로 나뉘어지는 물리적인 인자로 나눌 수 있다. 이 글에서는 핀-튜브형 열교환기의 설계시 고려하여야 할 기하학적 인자와 물리적 인자에 대하여 기술하고자 한다.

2. 기하학적인 인자

열교환기의 기하학적인 인자는 튜브부와 핀부로 나누어 생각할 수 있으며, 간단한 핀-튜브형 열교환기의 기하학적인 인자들을 그림 1에 나타내었다.

2.1 튜브 부

(1) 튜브 지름

공조기용 열교환기에는 일반적으로 $\phi 9.52$ 의 원형관을 채용하고 있으며 기기의 고효율, 소형화의 추세에 따라 점차 $\phi 7$ 열교환기로 대체시켜 나가고 있으며 점차 세경화

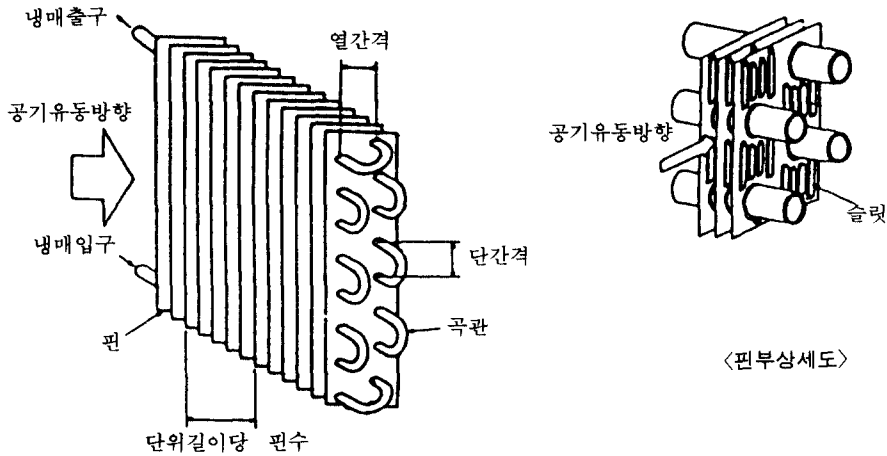


그림 1 핀-튜브형 열교환기

(細經化) 되는 추세이다.^(1~3)

(2) 관군 배열

다열(multi-row) 열교환기의 경우 관군 배열은 엇갈림(staggered)과 일렬(in-line)의 형상으로 나누어지며, 엇갈림 배열의 경우는 정삼각형 또는 이등변삼각형으로 구분된다. 공조기용 열교환기의 경우는 일반적으로 엇갈림 배열이 주로 사용되고 있으며, 특히 Haruo⁽⁴⁾는 소형화 측면에서 볼 때 이등변삼각형 형태가 우수하다고 하였다.

(3) 열 간격

열 간격은 공기의 유입 방향에 대해 튜브와 튜브 사이의 간격을 일컫는 것으로 열교환기 전체 크기에 있어서 깊이를 결정지워주는 요인 중의 하나이다. 일반적으로 열 간격의 결정은 튜브간의 표면온도에 의한 핀부의 열전도 영역이 과다하게 중복되거나, 열교환 사수(死受) 영역이 크지 않게 설계, 제작되어야 한다.

(4) 단 간격

한 열에 있어서 공기의 유입 방향에 대해 수직으로 배열된 튜브와 튜브 사이의 간격을 말하는 것으로, 열교환기의 전체 크기 측면에서 볼 때 열교환기 높이를 결정지워주는 인자중의 하나이다.

Haruo⁽⁴⁾의 열 간격 및 단 간격에 관한 무차원화 연구에서 단 간격이 증가할수록 열전달률은 떨어지는 경향을 보이며, 통풍저항의 경우는 최적값이 존재하는 것으로 나타났다. Hiroaki⁽⁶⁾의 열교환능력에 대한 연구에서 Haruo⁽⁴⁾의 결과와 마찬가지로 전반적으로 동일 관지름에 대해 단 간격이 적을수록 열교환 능력은 우수함을 입증하였다. 그러나 일정 지점에서는 열통과율보다 외표면적의 감소가 크게 되어 역효과가 나타날 수도 있다.

(5) 유로 개수

핀-튜브형 열교환기는 다수의 튜브가 곡관에 의해 연결되는 냉매의 유로를 형성하고 있는데, 냉매를 몇 개의 유로로 분리하느냐에 따라서(단위유로당 튜브길이, 그때의 냉매유량 및 운전조건) 열교환기의 성능이 변화된다. 응축기의 경우는 냉매 유로의 수가 많으면, 튜브 내의 냉매 압력 손실이 작아지기 때문에 응축 온도가 상승되어 공기와 냉매와의 온도차가 커지게 된다. 그러나 냉매 유속이 저하되어 열전달률이 작아지므로 필요 열전달 면적은 증대된다. 반면, 유로 수를 적게 하면 큰 냉매 압력 손실이 발생하기 때문에 냉매측 열전달률이 커짐에도 불구하고

고 필요 열전달 면적은 증대된다. 이는 열전달 면적을 최소로 하는 최적 유로 수가 존재함을 의미한다. 증발기의 경우 동일 냉매 유량을 흐르게 하면 유로 수가 증가할수록 냉매 온도는 내려가지만 냉매측 열전달률이 저하되어 두 요인의 상쇄효과로 필요 열전달 면적이 거의 일정하게 된다. Haruo⁽⁴⁾는 유로당 냉매 유량의 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 제시된 조건에 대해 고찰하여 보면, 냉방능력 시험 조건인 실내 건구 온도 27°C, 습구 온도 19.5°C, 증발 온도 5°C에서 일반적으로 운전된다고 볼 때, 유로당 튜브 길이를 대략 5m, 그때의 냉매 유량을 약 45 kg/h로 하는 것이 유리함을 입증하였다. Takao⁽⁹⁾는 열 펌프(heat pump) 개발과 관련, 냉매유량 360 kg/h, 풍량 110 cm, 2열의 조건에서 응축기와 증발기의 최적 유로 선정에 대한 연구 결과를 제시하였다.

(6) 곡 관

증발기나 응축기 내에서 발생하는 2상류의 압력 변화는 세 가지 주요 인자에 의해 결정된다. 즉, 첫째로는 직관내에서의 압력 손실량, 두번째로는 직관내에서의 모멘텀항, 세번째로는 전체 곡관에서 발생하는 압력손실이다. 곡관부가 열교환기 전체의 압력손실에 미치는 영향이 거의 50% 정도까지 이르고 있기 때문에 튜브내에서의 온도 구배에 의한 영향은 매우 크다고 볼 수 있다. 따라서 열교환기를 설계할 경우 압력 손실 측면에 있어서 곡관부에 의한 영향을 반드시 고려할 필요가 있다. Toshihiko⁽³⁾와 Geary⁽⁵⁾는 곡관의 설계에 적용할 수 있는 상관 관계식을 제시하였다.

2.2 핀 부

(1) 핀 형상

핀 형상은 공기측 유동과 밀접한 관계를 가지고 있는데, 경계층 가장자리(edge) 효과를 촉진하고, 유효 외표면적을 확대함으로써 활류의 촉진을 유발하여 열전달률을 향상시

키면서 동시에 통풍저항은 가능한 한 작게 설계되어야 한다.

히다찌⁽⁶⁾에서는 응축기에 있어서 건조 공기 상태의 경우 슬릿(slit) 핀형 열교환기의 공기측 열전달률 및 통풍저항을 슬릿수에 대한 함수의 형태로 나타낸 식을 제안하였다. Hiroaki⁽⁶⁾는 $\phi 7$ 튜브 채용 열교환기 개발과정에서 핀의 고효율화 연구를 수행하였다. 특히 유동 문제에 있어서는 핀간의 기류 가시화 실험을 통하여 속도 분포의 불균일현상이 소음의 원인이 됨을 확인하였다. Yoshiaki⁽⁷⁾는 루버(louvered) 핀의 개발과 관련된 연구 결과를 제시하였으며, 특히 통풍저항 및 열전달률을 예측할 수 있는 관계식을 제안하였다. Fisher⁽¹³⁾는 핀 형상을 유한요소법을 이용하여 정성적으로 해석하였다.

(2) 단위길이당 핀수

열교환기내의 핀은 튜브의 길이방향을 따라 일정한 등간격으로 조립되는데, 특히 1인치당 핀의 수를 단위길이당 핀수로 정의한다. Haruo⁽⁴⁾는 열교환기 최적설계를 위한 프로그램에서 단위길이당 핀수를 통풍저항에 영향을 미치는 판단 인자로 삼아 해석을 수행하였다. 히다찌⁽⁶⁾에서는 단위길이당 핀수에 따른 건조 공기 상태에서의 통풍저항식이 제시되었으며, 新津靖⁽⁹⁾는 공기의 질량 속도와 단위길이당 핀수에 따른 공기측 열전달률에 대한 관계식을 제안하였다. Rich⁽¹⁰⁾ 또한 레이놀즈수에 따른 통풍저항 및 열전달률에 대한 관계식을 제시하였다.

3. 물리적인 인자

열교환기의 물리적 인자는 크게 공기부와 냉매부로 나누어 생각할 수 있다.

3.1 공기부

(1) 입구공기의 온도 및 습도

입구공기의 온도 및 습도는 기본적으로 열

교환기 시험 규격(KS, JIS 등)에 의하여 결정되며, 냉방능력 및 과부하 등의 시험조건 만족 여부를 사이클상에서 검토할 필요가 있다.

Haruo⁽⁴⁾는 입구의 공기 온도 조건과 유로(path)당 냉매유량의 변화에 따른 냉방능력의 변화에 대한 연구를 수행한 결과, 각 입구공기 조건에 따라서 최적의 냉매 유량이 존재함을 확인하였다. Takao⁽¹¹⁾는 입구공기의 온도, 비열 및 비중량에 따른 열교환량 관계식을 제안하였다. 히다찌⁽⁸⁾에서는 건공기 및 습공기 조건에 따른 공기측 열전달률 관계식을 제시하였다.

(2) 공기 속도분포

공조기기에 사용되는 공기 대 냉매 열교환기는 일반적으로 균일 유동장으로 가정하여 실험 및 해석을 수행한다. 그러나 실제 시스템은 대부분 가정과 매우 다르며, 특히 소형화의 추세에 따라 유동 불균일현상이 더욱 크게 발생되고 있는 것으로 알려져 있다.

Fagan⁽¹²⁾은 평균 코일 속도와 최대 불균일 크기의 비율에 따른 열교환 능력의 손실에 대한 관계를 고찰하였다.

(3) 전면풍속

전면풍속이란 공급 공기의 풍량을 열교환기의 전면 면적으로 나눈 값이다. 최근, 쾌적한 환경의 추구로 소음 문제가 제기됨에 따라 전면 풍속을 가능하면 최소화하려는 시도가 행해지고 있으며, 전면 풍속이 공기측 대류 열전달 계수의 결정에 매우 중요한 인자로 자리잡고 있어서, 이의 최적화를 위하여 무수히 많은 연구를 수행하여 왔다. 특히 Haruo⁽⁴⁾와 히다찌⁽⁸⁾에 의하면 전면풍속은 핀의 형상과 더불어 열교환기의 성능에 75% 정도의 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Haruo⁽⁴⁾는 전면 풍속 및 통풍 저항과 열전달률과의 관계를 이용한 최적의 유동장을 제시하였다. 히다찌⁽⁸⁾는 통풍저항을 전면풍속의 함수로써 표현한 관계식을 제시하였고, Takao⁽¹¹⁾는 응축기에 있어서 단상역에 대한

열교환량을 전면 풍속의 함수로 표현하였고, 이들을 이용한 설계 과정을 제시하였으며, 新津靖⁽⁹⁾은 전면 풍속과 관내를 흐르는 물의 유속 변화에 따른 총합 열전달 계수의 관계 및 열교환기의 최소 유로 단면적을 흐르는 공기의 평균 중량 유량(G_a)와 핀 간격의 변화가 공기측 대류열전달 계수(h_0)에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하기 위하여 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$h_0 = a(G_a)^b \quad (1)$$

여기서, a , b 는 핀 간격에 의하여 결정되는 상수이다. Fischer⁽¹³⁾도 新津靖과 유사한 형태의 다음식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \alpha_L \eta_R &= a(V_\infty \rho_{L1})^b \\ \Delta P_L &= c(V_\infty \rho_{L1})^d \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, α_L 은 공기측 대류 열전달 계수($W/m^2 \cdot ^\circ C$), η_R 은 리브(rib)의 효율, V_∞ 는 입구공기 전면풍속(m/sec), ρ_{L1} 은 공기 단위 체적당의 중량(kg/m), a , b , c , d 는 열교환기 형상에 따라 결정되는 상수를 나타낸다.

相原利雄⁽¹⁴⁾도 유사한 결과를 제시하였는데, 특히 물질전달 상수는 전면풍속의 지수 함수 형태로 나타난다. Takao⁽¹⁵⁾는 기존의 공기와 핀 사이의 관계와는 달리 공기와 튜브 사이의 열교환량을 구할 수 있도록 등가 엔탈피 전달상수인 kia 라는 개념을 도입하였다. kia 와 전면풍속의 관계는 실험을 통하여 구하였다.

3.2 냉매부

(1) 냉매의 입구 조건

일반적으로 열교환기는 냉매 입구조건에 따라 성능이 크게 영향을 받는데, 특히 천이 운전 상태의 경우 열교환량과 입구 조건은 유기적인 관계가 있다.

Haruo⁽⁴⁾는 냉매 입구 상태를 입력값으로 하여 최적 설계 과정을 제시하였고, 손병진

(16)은 증발기에 있어서 보정계수를 고려한 압력강하식을 활용, 성능을 예측하는 프로그램을 개발하였으며, Pearson⁽¹⁷⁾과 Boot⁽¹⁸⁾는 온수 및 냉수를 관대로 흘려 유량의 단계적 변화에 따른 공기측 토출 온도의 동특성에 대한 연구를 수행하여, 이를 예측할 수 있는 관계식을 제안하였다.

(2) 증발기에 있어서의 냉동유의 영향

냉동 공조 사이클에서는 압축기로부터 고온, 고압의 냉매 가스와 더불어 냉동기유가 작은 기름 입자 상태로 유출되고 있다. 유출 농도는 대체로 15% 이하로 알려져 있다. 또한 최근 인버터를 이용한 회전수 제어의 채용이 늘어나고 있어서, 회전수 변화에 의한 냉동기유 농도의 변화도 매우 큰 것으로 나타나고 있다. 소형 공조 시스템에서는 압축기 출구에 유분리기가 설치되어 있지 않기 때문에 냉동기유는 냉매와 함께 냉동 사이클 내를 항상 잔류하게 된다.

김중수⁽¹⁹⁾는 냉매, 유혼합액의 열물성치 및 증발관내의 유동양식, 압력손실 및 열전달률에 미치는 냉동기유의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 압력손실의 경우 순수 냉매는 건도가 대략 0.8~0.9 사이에서 최대치를 나타낸 반면, 유농도 2% 이상의 경우 건도의 증가와 함께 압력 손실도 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 건도가 0.4 이하일 경우와 0.9 이상일 경우의 영역에서의 압력손실은 유농도가 혼입됨에 따라 더욱 현저하게 증대된다. 열전달률 측면에서 살펴보면 건도가 0~0.8 범위에서는 초기 유농도가 2~4%의 경우에 열전달률이 증대되며, 특히 초기 유농도가 7%까지는 순수 냉매보다 높은 열전달률을 보인 것으로 나타났다. 질량유속 110~290 kg/(m sec)의 실제사용 범위에서는 유농도가 3~4%에서 최대치를 가지며, 그 이상의 유농도에서는 열전달률이 서서히 저하되어 유농도 8% 이상에서는 순수 냉매보다도 나빠지는 것으로 나타났다.

4. 맺음말

이상에서 언급한 바와 같이 핀 튜브형 열교환기는 관련된 인자들이 매우 다양하며, 상호 영향을 미치기 때문에 설계 최적화를 위해서는 이들의 특성과 상호관계가 우선적으로 파악되어야 한다. 그러나 일반적으로 공조기용 열교환기는 샘플 제작시의 비용이 많이 들고, 실험 데이터의 측정이 매우 어려워 실험적 접근에 제약을 받기 때문에 일반적으로 성능 평가 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 통하여 성능에 대한 인자들의 영향을 조사한다.

현재 국내업체와 학계 등을 중심으로 최적의 열교환기 설계를 위한 활발한 연구가 진행되고 있으며, 냉동공조 제품의 열교환기에 대한 관련기술의 향상이 여타제품에 미치는 파급효과가 매우 크기 때문에 이 부문에 대한 활성화된 연구를 통하여 선진국과의 설계 기술 격차를 최소화해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Shah, R. K., 1981, "Compact Heat Exchanger Design," Hemisphere Publishing Co., Washington, D. C., pp. 496~536.
- (2) Rich, D. G., 1974, "Computer Aided Design of Direct Expansion Evaporator Coils," ASHRAE Transactions, pp. 487~501.
- (3) Toshihiko, F., 1977, "Simulation of Refrigeration Cycle for Air Conditioners," 冷凍, Vol. 52, No. 593.
- (4) Haruo, N., 1989, "공조용 열교환기에 있어서의 최적 설계와 경제성," 기계연구, Vol. 41, No. 9, pp. 1005~1011.
- (5) Geary, D. F., 1975, "Return Bend Pressure Drop in Refrigeration Systems,"

- ASHRAE Transaction., No. 2342, pp. 250~265.
- (6) Hiroaki, K. and Shinichi, I., 1989, "소형 고효율 열교환기," National Technical Report, Vol. 35, No. 6, pp. 653~661.
- (7) Yoshiaki, A., Yoshinori, W. and Akira, Y., 1986, "Study on Improvement of Performance of Heat Exchangers for Air Conditioners," Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, pp. 252~256.
- (8) 히다찌 제작소, 1976, "공기조화기용의 슬리트 환형 열교환기," pp. 383~388.
- (9) 新津靖, 1965, "Studies on Characteristics of Heat Exchangers with Fins and Its Design," Journal of the S.H.A.S.E., Vol. 39, No. 4, pp. 372~386.
- (10) Rich, D. G., 1975, "The Effect of the Number of Tube Rows on Heat Exchanger Performance of Smooth Plate Fin and Tube Heat Exchanger," ASHRAE Transactions, No. 2345, pp. 307~317.
- (11) Takao, S., 1984, "Design of Air Refrigerant Heat Exchangers Utilized in Heat Pump Air Conditioners," 冷凍, Vol. 59, No. 682, pp. 731~739.
- (12) Fagan, T. J., 1980, "The Effect of Air Flow Maldistribution on Air to Refrigerant Heat Exchanger Performance," ASHRAE Transactions, DV-80-7, No. 4, pp. 699~713.
- (13) Fischer, O., "Thermal Hydraulic Optimization of Finned Tube Bundle Heat Exchangers for Dry Cooling Towers," Swiss Federal Institute for Reactor Research.
- (14) 相原利雄, 1965, "공조용 열교환기의 성능해석(제1보)," 冷東, Vol. 39, No. 444, pp. 21~28.
- (15) Takao, S., Toshio, H. and Kyuaei, I., 1981, "Heat and Mass Transfer Performance of Air Coolers under Wet Conditions," ASHRAE Trans., No. 2641, pp. 109~115.
- (16) 손병진, 민묘식, 최상경, 1988, "평판편이 부착된 증발기의 시뮬레이션," 공기조화 냉동공학논문집, Vol. 1, No. 4, pp. 297~304.
- (17) Pearson, J. T., Leonard, R. G. and McCutchan, R. D., 1974, "Gain and Time Constant for Finned Serpentine Crossflow Heat Exchangers," ASHRAE Trans., No. 2321, pp. 255~267.
- (18) Boot, J. L., Pearson, J. T. and Leonard, R. G., 1981, "An Improved Dynamic Response Model for Finned Serpentine Cross-Flow Heat Exchangers," ASHRAE Trans., No. 2444, pp. 218~239.
- (19) 김종수, 1991, "증발기 성능에 미치는 냉동기유의 영향," 냉동공조공학회지, Vol. 9, No. 1, ■