

공랭식 복수기 설계를 위한 열 전달계수 및 압력손실 측정과 상관 식 결정

김 성원 · 권 세준 · 이 지은 · 이 상호 · 이 정훈 · 이 재두

순천향대학교 공과대학 신소재화학공학부

Determination of Heat-Transfer Coefficients and Pressure Losses and their Correlation for Design of a Air-Cooled Condenser

Sung-Won Kim, Se-Joon Kwon, Gee-Eun Lee,
Sang-Ho Lee, Jung-Hoon Lee, Je-Doo Lee

Division of Materials & Chemical Engineering,
Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea

abstract

These experiments is to determine design equations for heat transfer and for pressure drop in a new designed heat exchanger with the waved circular fin tube bundles under various experimental conditions. The results with the waved circular fin tube bundles are compared with those with the flat circular fin tube bundles. Heat transfer coefficients in the waved circular fin tubes were enhanced to about 50 % in comparison with those in the flat circular fin tubes. This is expected to reduce the capacity of a heat exchanger up to 30%.

1. 서론

서로 다른 온도와 고체 벽으로 분리된 두 유체들 사이의 열 교환을 수행하는 열 교환기는 난방, 공기조화, 동력발생, 폐열 회수, 또한 많은 화학공정 등 공업용분야에서 필수적으로 설치 사용하는 장치이다. 이 열 교환기의 표면으로부터 대류에 의해 열을 제거하거나 흡수하는 속도는 소위 핀(fin)이라는 것으로 표면을 확장하면 증가시킬 수 있다. 실제적으로, 산업용 열 교환기를 설계함에 있어서 여러 모양의 핀 -- 직선(straight)형, 원(circular)형, 핀(pin)형 등 -- 이 사용된다. 또한 유체의 흐름이 난류이면 층류인 경우보다 더 많은 열을 전달할 수 있다. 이 핀의 확장표면적의 효과는 이 핀이 관의 안에 있던 밖에 있던

그 위치와는 상관없다.

열 교환기는 높은 효율, 적당한 압력손실, 긴 수명, 대량생산, 경제적 이익 등을 고려하여 설계 및 제작하는 것은 다른 장치와 마찬가지로 열 교환기 관련분야에서는 새로운 형태의 핀 튜브를 개발하여 다른 장점들을 동시에 해결할 수 있다.

fin-tube tek(주)에서 새로 개발한 fin tube는 보통의 평면 원형 핀이 아니라 그 원형 핀이 파동형이라는 것이다.

이 파동형 핀 튜브로 제작된 열 교환기의 효율은 평면 원형 핀 튜브로 제작된 것보다 높을 것으로 기대한다. 그 이유는 확장표면적의 차이는 그리 크지는 않지만 표면적의 요철로 인해 난류

를 유도할 수 있고 그로 인해 열 전달이 크게 향상되기 때문이다. 또한 이 파동형 핀은 접촉저항을 적게 하고 오랫동안 사용이 가능하다⁽¹⁾.

그림(1)은 간단하게 보여준 파동형 핀 튜브로 열 전달이 어떻게 증가할 수 있는가를 이해하게 한다. 이 파동형 핀 튜브에서는 흐름의 방향에 맞선 2 개의 표면 -- 흐름의 앞면(windward face)와 흐름의 뒷면(leeward face) -- 이 있을 수 있다. 흐름의 앞면에서는 흐름의 충돌 혹은 흐름의 순간적인 정지 때문에 열 전달이 크게 증가하고 흐름의 뒷면에서는 이차적인 흐름의 소용돌이가 생겨 분리된 흐름이 다시 붙는 과정 때문에 역시 열 전달이 증가한다. 또한 표면적의 증가로 인한 열 전달 효과를 무시할 수 없다.

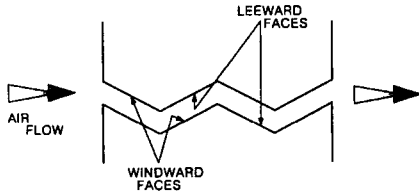


그림 1 흐름 방향에 2개의 면을 가진 파동형 핀 튜브

이 연구의 목적은 새로운 파동형 핀 튜브로 제작된 열 교환기의 열 전달계수와 압력손실을 측정하여 열 교환기의 설계방정식을 결정함으로써 설계 및 제작과정을 컴퓨터 화하려는데 있다. 그럼으로 원형 핀에 요철이 없는 경우(평면형 핀 튜브)와 요철이 있는 경우(파동형 핀 튜브)의 열 교환기에서의 열 전달계수 및 압력손실을 Reynolds No의 함수로 측정하여 비교한다.

2. 본 론

2.1 열 전달계수

고체-유체의 접촉면에서 전달되는 열 전달속도(Q)는 접촉면의 면적(A)과 유체와 고체사이의 온도차(ΔT)의 곱에 비례한다.

$$Q = hA\Delta T \quad (1)$$

여기에서 h는 열 전달계수이고 여러 가지 인자들의 함수이다.

두 유체가 서로 직각으로 한번씩만 통과하게 하는 열 교환기에서는 뜨거운 유체는 관속을 흐

르고 관 밖의 찬 유체는 직각으로 자유스럽게 섞이면서 흐른다⁽²⁾. 결과적으로 뜨거운 유체는 찬 유체에게 열을 잃고 찬 유체는 열을 얻는다.

전체 열 전달계수와 관의 외부 표면적의 곱을 구하려면 정상상태에서의 에너지 수지 식을 사용해야 한다. 이 수지 식을 적분하면 입력(T_i) 및 출력온도(T_o)의 함수로서 전체 열 전달계수를 구할 수 있다.

$$U_o A_o = \dot{m}_g C_{pg} \ln \left(\frac{T_i - T_s}{T_o - T_s} \right) \quad (2)$$

여기에서 U_o는 관의 외부 표면적(A_o)을 기준으로 한 전체 열 전달계수이고, \dot{m}_g 와 C_{pg}는 각각 증기의 질량유속과 열 용량이고 T_s는 관의 표면온도이다.

한편 핀 튜브의 외부표면적을 기준으로 하는 전체 열 전달계수는 다음과 같다.

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(A_i/A_o)}{2k} + \frac{1}{h_i A_i} \quad (3)$$

여기에서 k는 관의 열전도계수이고 A_i와 A_o는 각각 관의 내부 및 외부의 표면적이다.

대부분의 경우, 열전도에 의한 열 전달은 대류에 의한 것보다 훨씬 작으므로 무시할 수 있다.

열 전달의 지표인 열 전달계수는 Nusselt 수(Nu)로도 표현할 수 있다. Nu는 다른 무 차원인 Reynolds 수(Re)와 Prandtl 수(Pr)의 함수이다.

$$Nu \equiv \frac{hD}{k} = B Re^a Pr^\beta \quad (4)$$

여기에서 B, a, β는 실험으로만 구할 수 있는 실험상수이다.

2.2 압력손실

유체의 흐름으로 인한 마찰은 유체의 흐름속도와 같은 방향으로 작용하고 그 크기는 압력차이에 비례하고 특정면적과 단위 부피당 운동에너지(KE)에 반비례한다⁽²⁾. 이 유체의 마찰(압력손실)은 다른 무 차원인 압력과 관성력의 비인 Euler 수(Eu)로 유체의 흐름속도에 비례한다.

$$Eu \equiv \frac{\Delta p}{\rho v^2} = a Re^{-\beta} \quad (5)$$

여기에서 α 와 β 도 실험상수이다.

III. 측정

열 전달계수와 압력손실을 측정하기 위한 장치는 모형 열 교환기로 증기발생 장치, 응축기, 그리고 측정하는 부분(열량계) 등으로 되어 있다. 특히 열량계는 벽과의 열 손실을 막기 위하여 절연된 4개의 줄로 된 핀 튜브로 되어 있고 공기 송풍기와 공기의 속도를 일정하게 하기 위한 honey comb이 포함되어 있다(그림 2).

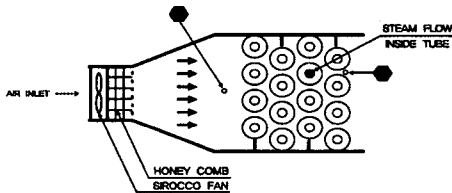


그림 2 온도와 압력을 측정하는 열량계의 대략도

증기발생 장치에서 생성된 100 °C의 수증기는 냉각공기의 방향에 수직으로 3번 째 줄에 있는 관을 통과한 후 긴 핀 튜브로 된 응축기를 걸쳐 물 저장tank로 들어간다. 물 tank로 들어 온 응축된 물은 다시 증기발생 장치로 보내진다.

공업용 송풍기로 방안의 공기는 honey comb을 지나 열량계의 측정 핀 튜브 안을 통과하는 수증기를 냉각시킨다. 냉각공기의 속도는 열량계의 입구에 있는 속도조절장치로 조절한다.

이 장치의 열 전달계수를 측정하기 위하여 냉각공기의 유속은 열량계의 출구에서 측정하고 온도는 열량계의 출구와 입구에서 열전대로 측정한다. 또한 압력손실은 핀 튜브 bundle의 앞과 뒤에 설치한 작은 구멍을 통하여 물을 채운 압력계 혹은 차이 압력계로 측정한다.

IV. 결론

측정한 온도차 및 압력 차와 컴퓨터 프로그램을 통하여 냉각공기의 속도, 즉 Reynolds 수의 함수로 열 전달계수와 압력손실을 계산하여 상관관계를 구하였다.

그림(3)은 Reynolds 수의 함수로 구한 열 전달계수의 변화를 보여준다. 이것은 평면형 핀 튜브

와 파동형 핀 튜브에서 구한 결과를 비교하였다. 또한 이 측정된 열 전달계수는 미국의 Heat Transfer Research Institute(HTRI)⁽⁹⁾이 평면형 핀 튜브에서 구한 상관 식과 모든 가능한 물리적 상수를 고려하여 개발한 컴퓨터 프로그램으로부터 계산한 값과도 비교하였다.

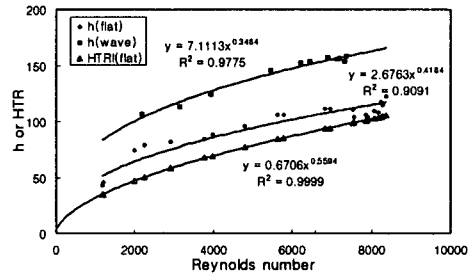


그림 3 2 종류의 핀 튜브에서 속도의 함수로 측정된 열 전달계수의 비교

열 전달계수의 측정결과는 다음과 같다.

1. 원형 평면형 핀튜브(HTRI)

$$h_{HTRI} = \alpha (Re)^\beta \quad (6)$$

여기에서 $\alpha = 0.65 \sim 0.75$, $\beta = 0.55 \sim 0.57$

2. 원형 평면형 핀튜브(측정)

$$h_{Flat} = \alpha (Re)^\beta \quad (7)$$

여기에서 $\alpha = 2.0 \sim 3.0$, $\beta = 0.40 \sim 0.60$

3. 원형 파동형 핀튜브(측정)(measured)

$$h_{Wave} = \alpha (Re)^\beta \quad (8)$$

여기에서 $\alpha = 6.0 \sim 7.0$, $\beta = 0.34 \sim 0.36$

한편 압력손실 혹은 Euler수는 Reynolds수가 증가함에 따라 지수적으로 감소하나 $Re > 2,000$ 에서는 핀 튜브의 연결방식이나 핀의 모양에 상관없이 일정하다.

$$Eu = 2 \sim 4 \quad (9)$$

이 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻는다.

1. 새로 개발한 원형 파동형 핀 튜브에서 구한 열 전달계수는 현재 사용하고 있는 평면형 핀 튜브에서 보다 30 ~ 50 %의 증가를 보였다.

2. 파동형 핀 튜브에서 구한 열 전달계수의 상관 식은 HTRI에서 제시한 평면 핀 튜브에서 것과는 차이를 보였다.

3. 파동형 핀 튜브에서의 압력손실은 평면형 핀 튜브에서보다 약간의 증가를 보였으나 높은 Reynolds 수에서는 비슷하였다.

그럼으로 이 파동형 핀 튜브로 제작된 열 교환기의 가열 혹은 냉각능력을 증가시킴으로 장치의 크기를 크게 줄일 수 있고 경제적 효과도 클 것으로 기대한다.

또한 제작하여 사용하고 있는 기존의 장치도 관의 설치나, 전력선 혹은 조절판 등을 바꾸지 않고 관(튜브)으로 이루어진 부분만을 새로운 핀 튜브로 간단히 교체함으로써 대량생산능력을 향상시킬 수 있다.

V. 참고 문헌

- [1]. Danahy, V., "Heat Transfer of Finned tube bundles in Crossflow", HPC(1988)
- [2]. Bird, R. B. et al., "Transport Phenomena", John Wiley & Sons(1960)
- [3]. correlation provided at HTRI