

섹터법을 이용한 연속핀 - 튜브형 열교환기의 유효율에 관한 연구 - 현열 열전달의 경우 -

정 형 호*

A Study on the fin efficiency of continuous fin - tube heat exchanger

- In the case of sensible heat transfer -

H. H. Jung

Key words : Sector method(섹터법), Continuous fin(연속핀), Fin efficiency(유효율), Sensible heat transfer(현열열전달)

Abstract

In this paper, a calculation method for fin efficiency of continuous fin is introduced. The continuous fin of in - line and staggered arrangement was divided into many sectors and fin efficiencies of each sectors were calculated by assuming that each sectors be the circular fins. To get the converged fin efficiency which is averaged by the each areas, the number of sectors was increased. The results were compared with equivalent method by varying the aspect ratios in both cases of in - line and staggered tube arrangement and showed some differences of fin efficiencies.

1. 서 론

기체와 액체 또는 기체와 기체 사이에서의 열을 수수하는 열교환기에서는 기체 측의 열전도도가 액체에 비해 아주 적으므로 기체 측의 전열면에 핀을 부착하거나 열전달 촉진 기술을 적용하여 열저항을 줄이고 있다. 특히 공조기기에서는 콤팩트화가 주 관심의 대상이 되므로 튜브의 직경을 줄이거나 핀의 형상을 변형하여 기체와 접하는 전열면을

크게 하고 또한 열전달계수를 향상시키고 있다.

튜브 내의 열은 온도 차이에 의해 튜브의 표면에 부착되어 있는 핀과 직접 기체와 접하는 튜브의 외 표면을 통하여 외부의 기체와의 열 수수가 이루어진다. 이러한 열전달과정에 대한 해석에는 실험 데이터를 처리하는 경우에서나 기존의 열전달 상관관계식을 이용하여 열교환량을 예측할 경우, 유효율의 계산법을 이용하고 있다. 그리고 유효율은 핀이 튜브에 부착되어 있는 형상에 따라 그 계산 방

* 정회원, 한국해양대학교, 기계시스템공학부

법이 다르다. 원형 튜브에 가로 방향으로 핀이 부착되어 있거나, 평평한 튜브에 핀이 부착되어 있는 경우의 원효율 계산은 간단한 1 차원의 열전도 방정식을 이용하여 해석적인 방법으로 쉽게 계산되어진다.¹⁾

그러나 다발로 이루어진 원형 튜브에 연속핀이 부착되어 있는 경우에서, 핀의 형상은 원형이며 핀과 핀 사이의 단열면은 튜브의 배열 방법에 따라 사각형 또는 육각형 모양을 하고 있어 해석적인 방법으로는 원효율을 구할 수 없다. 더우기 공기냉각기(air-cooler)와 증발기에서는 열교환기 표면에서의 온도가 노점 온도 이하가 되면 공기 중에 포함되어 있는 수증기의 응축이 일어나며, 응축수는 열전달에 저항으로 작용하므로 열전달 효율에 많은 영향을 주게 된다.

본 연구에서는 공기냉각기 또는 증발기에서 응축이 일어나는 경우 응축수가 열교환기의 원효율에 미치는 영향을 해석하기 전에 현열로만 전달되는 연속핀에서의 원효율을 원의 형상이 사각형 또는 육각형인 경우 핀을 여러 개의 섹터로 분할하여 각각의 섹터에서는 원형핀의 효율을 계산하는 방법(이하 섹터법이라 칭함)을 도입하여 전산화 하였다. 중횡비가 다른 다양한 형태의 연속핀 - 튜브의 원효율 계산 결과를 제시하고, 원효율 계산 방법에 따라 예측되는 열전달량은 많은 차이가 남을 보였다.

2. 이 론

2.1 1 차원 원형핀의 원효율

Fig. 1에 나타난 바와 같은 1 차원 원형핀의 원효율을 계산하기 위해서 원에서의 열전도는 정상 상태, 원의 두께, 원에서의 열전달계수와 모든 물성치는 일정하다고 가정하고, 온도차 함수 $\theta = T - T_\infty$ 를 도입하여, 유도하면 다음과 같다.

$$r \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\theta}{dr} \right) - m^2 \theta r^2 = 0 \quad (1)$$

원의 끝단에서는 원의 두께가 아주 얇아 대류에 열전달 손실을 무시하면, 열전도 방정식에 적용되는 경계조건은 다음과 같다.

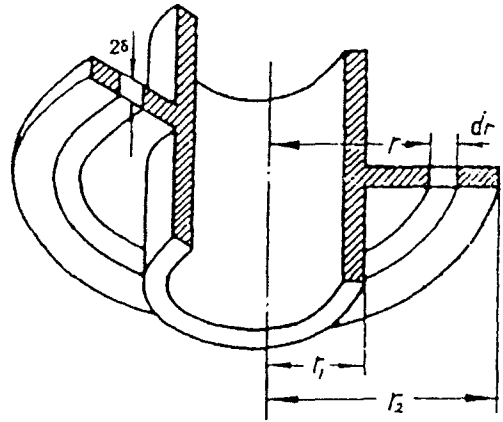


Fig. 1 Schematic of a constant - thickness fin on a circular tube

$$r=r_1 \text{에서 } \theta = \theta_w \quad (2)$$

$$r=r_2 \text{에서 } \frac{d\theta}{dr} = 0 \quad (3)$$

지배방정식 (1)은 수정된 베셀 함수의 형태의 일반해를 갖고 있으며, 경계조건 식(2)와 식(3)을 적용하여 원에서의 온도 분포를 계산하면 다음 식으로 된다.

$$\frac{\theta}{\theta_w} = \frac{I_1(mr_2)K_0(mr) + I_0(mr)K_1(mr_2)}{I_0(mr_1)K_1(mr_2) + I_1(mr_2)K_0(mr_1)} \quad (4)$$

원의 효율은 원의 전체 전열면의 온도가 원 베이스의 온도, θ_w 일 때, 전열량에 대한 실제 전열량으로 정의된다. 식(4)를 미분하여 원베이스에서의 열유속을 계산하고 원효율의 정의를 적용하면 원효율은 다음 식으로 계산된다.^{2,3)}

$$\eta_f = \frac{2}{(r_2/r_1 + 1)ml} \cdot \frac{I_1(mr_2)K_1(mr_1) + I_1(mr_1)K_1(mr_2)}{I_0(mr_1)K_1(mr_2) + I_1(mr_2)K_0(mr_1)} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에서 I 와 K 는 각각 1종과 2종의 수정된 베셀함수이며, 하첨자 1, 2는 오다를 의미한다.

2.2 사각핀과 육각핀의 원효율

연속핀에 튜브가 배열될 때, 튜브의 배치가 사각 직렬 배치(in line) 또는 3각 착렬 배치(stagger)에

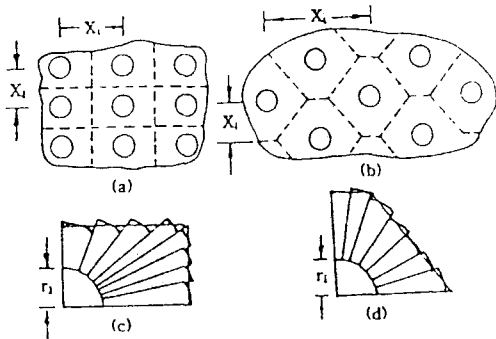


Fig. 2 Continuous fin over (a) an inline (b) a staggered tube arrangement : representative of the fin for (c) an inline and (d) a staggered tube

따라 흰 전열면의 형상은 사각 또는 육각형의 형상을 갖는다. 이러한 흰 형상을 각각 사각흰 또는 육각흰이라 한다. 이러한 흰 형상에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 단열면과 튜브의 형상이 일정하지 않으므로 해석적인 방법으로 흰효율을 계산할 수 없다.

그러므로 사각흰과 육각흰의 흰효율을 계산할 때, 흰의 전열면적과 같은 원형흰으로 가정하여 식(5)로 흰효율을 계산한다. 이 방법을 등가원법(equivalent annular method)이라 한다. 그러나 이 방법은 계산에는 아주 간편하고, 효율적이지만 튜브의 배치가 정사각형이 아니고 직사각형이며 또한 중형비(aspect ratio)가 커짐에 따라 실제와는 많은 차이가 있다.

이러한 경우에 Fig. 2에서와 같이, 흰을 많은 부채꼴 형태의 섹터로 분할하여 각각의 섹터에서 흰효율을 원형흰에서의 계산법으로 계산하고 식(6)과 같이 섹터의 면적을 가중치로 한 근사법이 적용되고 있다. 이 방법을 섹터법(sector method)이라 한다.

$$\eta_f = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{f,i} A_{f,i}}{\sum_{i=1}^N A_{f,i}} \quad (2)$$

이 근사법에서는 섹터의 수가 많아짐에 따라 정확도는 향상되며, 원하는 허용오차 내에 들 때까지 섹터 수를 증가시켜 계산을 수행한다.

3. 계산 결과 및 검토

3.1 가로방향 흰과 원형흰

원형흰에서는 흰 반지름이 증가하면 할수록 흰의 단면적이 증가하므로 흰효율이 상당히 저하된다. Fig. 3은 흰 반지름의 증가에 따른 흰효율을 도시한 것으로 흰 반지름이 증가할수록 흰효율이 감소하고 있음을 보여주고 있다. 또한 이 그림에서는 흰이 튜브에 가로방향으로 부착되어 있을 때, 흰의 효율을 비교하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가로방향 흰의 효율은 원형흰에 비해서 아주 좋은 것으로 평가된다. 이 이유는 가로방향의 흰은 흰 단면적이 변하지 않으므로 흰 끝단으로 갈수록 흰의 온도가 원형흰에 비해서 높기 때문이다.

원형흰의 효율은 보통 0.5에서 0.8 사이에서 존재하며, r_2/r_1 가 2에서 3인 원형흰이 많이 이용되고 있다. 이때 흰의 효율은 가로방향 흰에 비해서 6%에서 14% 차이가 남을 알 수 있다.

3.2 정사각형과 정육각형 흰

섹터법에 의한 결과를 검토하기 전에 Fig. 4는 섹터의 수를 증가시키면서 계산된 흰효율의 경향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 흰효율은 섹터의 수가 10개 정도면 충분히 허용오차 이내에 들며, 각 부채꼴 형태의 섹터 면적을 합한 것은 흰효율보다 더 많은 섹터 수, 20개 정도가 허용오차 이내로 되었다.

정사각과 정육각형으로 형상의 흰효율을 계산

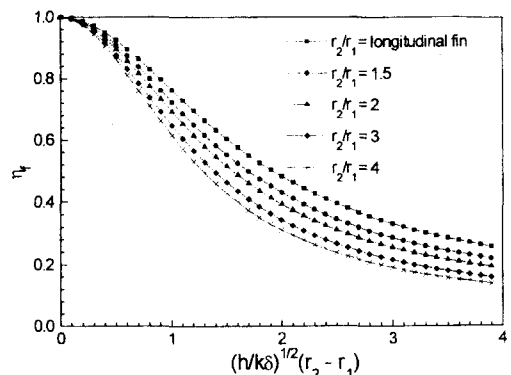


Fig. 3 Comparison of fin efficiency of longitudinal fin and of circular fins

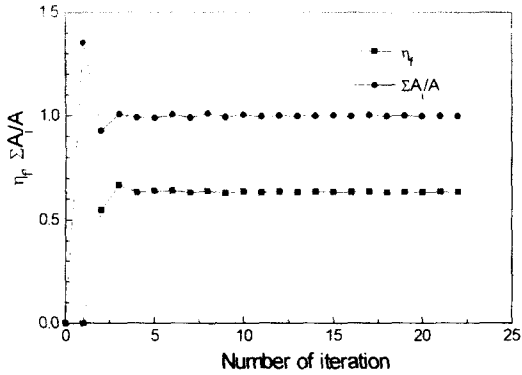


Fig. 4 Convergence of the fin efficiency and the sum of sector area

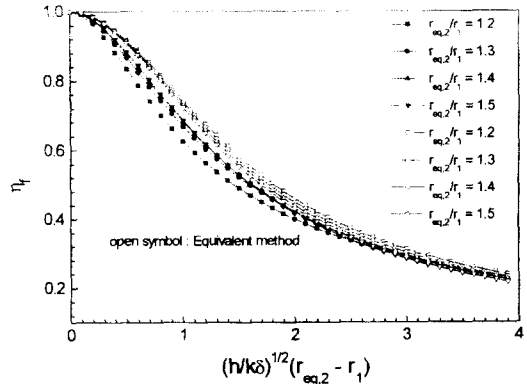


Fig. 7 Comparison of fin efficiencies by equivalent method and sector method

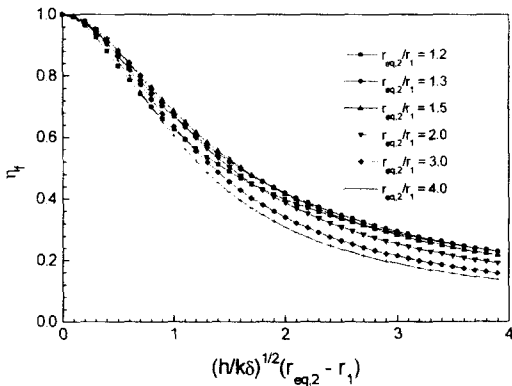


Fig. 5 Fin efficiencies of square fin

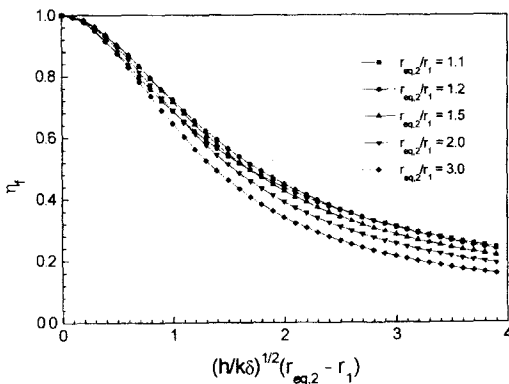


Fig. 6 Fin efficiencies of a regular hexagonal fin

한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. Fig. 2에 표시한 바와 같이 정사각형의 환은 대각선에 대해서 대칭이므로 45도까지 섹터를 분할하였으며, 정육각형 환은 3개의 동일한 형태가 이루어진

것이므로 30도까지 섹터를 분할하였다. 또한 이 그림에서 $r_{eq,2}$ 는 평균 환 길이는 등가반경으로 나타내었으며, 내반경에 대한 등가반경의 비의 변화에 대한 유효율 효과도 나타내었다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 정사각형 환의 효율은 $r_{eq,2}/r_1 = 1.5$ 에서 가장 최대치를 보이고 있으며, 이 값보다 적은 경우나 큰 경우에도 유효율이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 6에서는 정육각형 환의 효율을 등가반경을 변화시키면서 계산한 결과인데, 이 경우에는 $r_{eq,2}/r_1 = 1.2$ 에서 최대치를 보이고 경향은 정사각형 환에서와 동일하였다. 이러한 경향과 정량적인 결과는 Sparrow^{5,6)}의 결과와 비교하였으며, 동일한 결과를 보여주었음을 확인하였다.

Fig. 7은 정사각형 환에서 등가원법과 섹터법을 이용하여 계산한 유효율을 비교하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 $r_{eq,2}/r_1$ 가 적을 수록 차이는 증가하며, 최대 13%의 차이를 보이고 있다.

한편 환의 형상에 따른 유효율의 정량적인 비교는 등가반경을 동일하게 하여 전열면을 동일하게 하여 비교하여야 가능하다. 가로방향의 환, 정사각형과 정육각형의 전열면을 동일하게 하여 유효율을 계산한 결과를 Fig. 8에 표시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이, $r_{eq,2}/r_1 = 1.2$ 로 반경비가 적은 경우에는 등가원법으로 계산한 유효율은 파잉에 촉하며, 튜브가 직렬로 배치할 때, 그 차이는 19%에 달하며, 착렬로 배치할 때는 5%의 차이를 보여주고 있다. 이러한 차이는 $r_{eq,2}/r_1$ 가 증가하면 할수

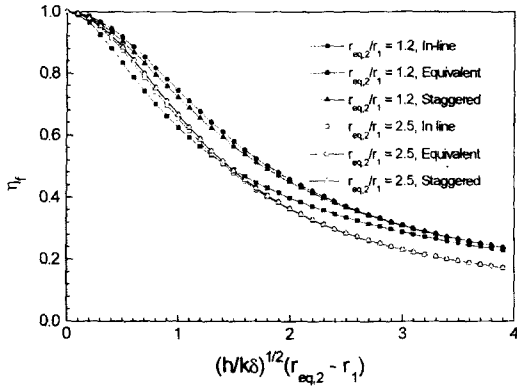


Fig. 8 Differences of fin efficiency at $r_{eq,2}/r_1 = 1.2$ and $r_{eq,2}/r_1 = 2.5$

를 감소하는 경향을 보여 주었다.

그러나 일반적으로 이용되는 $r_{eq,2}/r_1 = 2.5$ 에서는 등가원법과 섹터법의 결과는 착렬로 배치될 때는 0.1% 이하의 차이로 거의 일치하나, 직렬로 배치되는 경우는 약 2에서 3%의 차이가 있음을 확인하였다.

3.3 종횡비에 의한 원효율의 영향

실제 연속원 튜브가 제작될 때, 정사각형 또는 정육각형으로 배열되지 않고, 튜브의 종횡비가 변한다. Fig. 9와 Fig. 10은 전열면적은 $r_{eq,2}/r_1 = 2.5$ 로 동일하고, 종횡비가 변할 때, 직렬과 착렬로 튜브가 배치될 때, 섹터법으로 계산된 원효율을 표시한 것이다. 또한 등가원법으로 계산한 결과와 비교하기 위하여 같은 그림에 나타내었다.

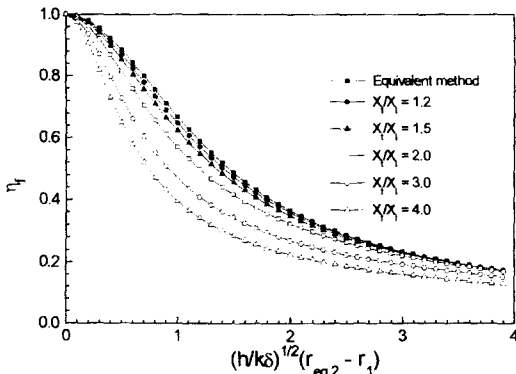


Fig. 9 Effect of aspect ratio on the fin efficiencies of rectangular fin

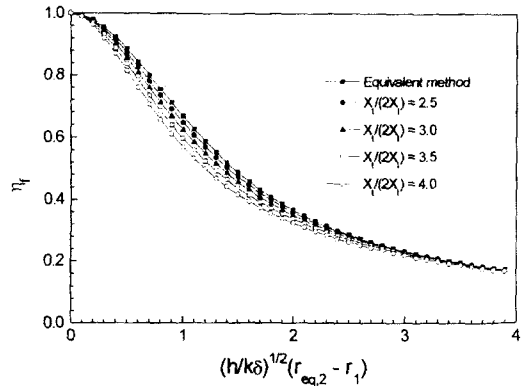


Fig. 10 Effect of aspect ratio on the fin efficiencies of hexagonal fin

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 튜브의 종횡비가 커질 수록 원효율은 감소함을 알 수 있었으며, 착렬에 비해, 직렬배치인 경우가 더욱 많이 감소함을 알 수 있었다. 등가원법으로 계산한 경우에는 직렬배치의 경우 종횡비가 1.2인 경우에는 3%, 종횡비가 3인 경우에는 30% 등 과잉예측에 의한 차이가 급격히 증가함을 보여주고 있다. 착렬배치인 경우에는 과잉예측의 정도는 직렬배치에 비해 덜하지만, 종횡비 $X_1/(2X_2)$ 이 2.5인 경우 약 4% 3.5인 경우에는 14% 과잉예측함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 1차원 원형원의 원효율에 대한 식을 이용하고, 섹터법을 도입하여 다양한 형태의 사각형과 육각형 원의 효율을 계산하였다. 가로방향의 원과 원형원에서의 효율을 비교하였으며, 사각형과 육각형의 원효율은 등가원법과 섹터법으로 계산한 결과를 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 가로방향 원은 원형원의 효율보다 약 16%로 과잉예측된다.
- (2) 등가원법에 의한 정사각형 원의 효율은 반경비가 적으면 적을 수록 많은 차이가 있다.
- (3) 사각형과 육각형의 원 효율은 종횡비가 커질 수록 차이는 증가한다.

참고문헌

- 1) Holman, J. P. 1992, Heat Transfer, McGraw Hill, 7th ed., pp. 41 - 47.
- 2) Arpaci, V. S., 1966, Conduction Heat Transfer, Addison - Wesley Pub. Co. pp. 132 - 144.
- 3) Stasiulevicius, J., Skrinska, A., Zukauskas, A., and Hewitt, G. F., 1988, Heat Transfer of Finned Tube Bundles in Crossflow, Hemisphere Pub. Co., pp. 22 - 27.
- 4) Shah, R. K., 1988, "Compact Heat Exchanger", Handbook of Heat Transfer ed. by Rohsenow, W. M., Hartnett J. P., Ganic, E. N., McGraw - Hill Book Co., pp. 4 - 183 - 4 - 188.
- 5) Sparrow, E. M., 1964, "Heat Transfer Characteristics of Polygonal and Plate Fin", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 7, pp. 951 - 953.
- 6) 김세영, 1988, 열교환기 설계핸드 북, 역편, 도서출판 한미, pp. 284 - 285.