

경계층 이론을 이용한 고효율 열교환기 설계를 위한 이론적 접근법

이동연¹, 이무연^{2*}

¹영남대학교 기계공학부, ²동아대학교 기계공학과

Theoretical approach on the effective heat exchanger design using boundary layer theory

Dong-Yeon Lee¹ and Moo-Yeon Lee^{2*}

¹School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

²School of Mechanical Engineering, Dong-A University

요 약 본 연구의 목적은 경계층 해석법을 이용하여 고효율 열교환기 설계를 위한 이론적 접근법을 제시하고 기존 열교환기에 많이 사용되고 있는 사각 평판 핀과 이를 대체할 수 있는 원형 평판 핀에 대하여 경계층 형성과 간섭에 대하여 설명하고 속도 및 온도 경계층 성장에 따른 열전달계수의 변화를 나타내고자 한다. 더불어 한 개의 핀에서의 유동은 외부유동으로 간주할 수 있으나 다수의 핀 사이의 유동은 내부유동으로 간주하였고 이론적인 결과를 도출하였다. 결과적으로 열교환기의 고효율화 및 콤팩트화를 실현하기 위하여 경계층 간섭을 회피할 수 있는 방안을 이론적으로 제시하였고, 이러한 관점에서 원형 평판 핀이 사각 평판 핀에 비하여 열전달성능이 우수함을 알 수 있었다.

Abstract The objective of this study is theoretically to suggest the effective heat exchanger design method using boundary layer analysis. The boundary layer formation and interruption on rectangular plate and round plate fins are explained and the heat transfer coefficients showed with the variation of the velocity and temperature boundary layer. In addition, the flow pattern on one plate fin surface considered as external flow and flow pattern between fins considered as internal flow. As a result, theoretical method for the boundary layer interruption avoidance is suggested and the heat transfer coefficient of the round plate fin was higher than that of the rectangular plate fin because of the less thermal and velocity boundary layer thickness except the centerline.

Key Words : Boundary layer, Heat exchanger, Heat transfer coefficient, Interruption, Plate fin

기호설명

BL : 경계층 길이

Pr : Prandtl number

r : 반경, (m)

Re : 레이놀즈수

T : 온도, ($^{\circ}C$)

u : x-방향 속도성분, (m/s)

v : y-방향 속도성분, (m/s)

x : x-방향, 길이

y : y-방향, 길이

α : 열확산 계수, (m^2/s)

δ : 경계층 두께

본 논문은 이 논문(작품)은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Moo-Yeon Lee (Dong-A University)

Tel: +82-10-5440-8421 email: mylee@dau.ac.kr

Received September 18, 2012 Revised (1st September 27, 2012, 2nd October 12, 2012) Accepted December 12, 2012

하첨자

- c : 접촉
- o : 시작점
- s : 표면 (surface)
- t : 두께 or 온도
- ∞ : 무한대 (infinite)

1. 서론

열교환이 필요로 하는 산업 전반에 걸쳐 열교환기는 두루 사용되고 있다. 즉, 열교환기는 열교환기가 사용되는 주변 환경에 따라 열교환기 종류, 관내측 및 관외측의 기하학적 형상 및 유동 패턴 등이 결정된다. 일반적으로 착상 및 제상이 필요로 하는 환경에는 불리한 공기측 열전달성능에도 불구하고 사각 평판 핀이 많이 사용되고 있다. 이러한 이유로는 사각 평판 핀은 착상조건에서 제상수 처리가 상대적으로 용이하기 때문이다[1]. 그러나 국내는 물론 전 세계적으로 환경 규제에 대한 인식이 강화되면서 산업체 전반에 걸쳐 친환경-고효율 기기에 대한 관심이 증가되고 있다[2]. 이러한 추세에 맞추어 냉장고, 에어컨, 김치냉장고, 히트펌프 및 냉동고 등의 냉동시스템과 공조시스템을 적용하는 열장치 시스템에서도 에너지 효율을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 압축기, 응축기, 증발기 및 관련 부품들의 에너지 효율을 높이기 위한 연구가 진행되고 있으며, 기존에 응축기 및 증발기에 많이 적용되고 있는 사각 평판 핀의 열전달효율을 개선할 수 있는 방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 공기측 열전달효율이 떨어지는 기존의 사각 평판 핀을 대체하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

사각 평판 핀에 대한 기존 연구는 다음과 같다. 7.5 mm 이상의 넓은 핀 피치를 가지는 사각 평판 핀-튜브 열교환기의 열전달성능과 착상 조건에서 사각 평판 핀-튜브 증발기의 열전달성능을 실험적으로 규명한 논문들이 있으며, 사각핀을 포함한 핀 형상 변화에 따른 냉동시스템 내 증발기의 착상 성능특성에 대하여 이론적으로 해석한 논문들도 있다[3-5]. 하지만 이러한 연구들은 열교환기 작동환경에 따른 열교환기 성능을 평가 및 해석하는 논문들로서 열교환 과정에서 발생하는 열 및 물질 전달특성을 규명하는 것에 국한되어 있다.

또한, 사각핀을 대체하기 위한 연구는, Mon and Gross (2004)가 원형 평판 핀-튜브 열교환기에서 핀 피치 변화에 따른 열전달성능을 수치해석을 통하여 고찰하였고,

Yun et al. (2005)는 원형 평판 핀-튜브 열교환기의 열전달특성을 실험적으로 규명하였다[6,7]. Lee et al. (2010)의 연구에서는 냉장고용 증발기로 사용가능한 원형 평판 핀-튜브 열교환기에 대하여 핀 피치 및 열수에 대하여 공기측 열전달성능을 고찰하였고 5.0 mm이상의 핀 피치에 대하여 적용가능한 상관식을 제시하였다[8]. 그러나 이러한 연구들은 열교환기가 적용되는 열기기의 사용 환경에 따른 열전달성능 및 특성을 평가하고 해석하는 논문들로서 열교환기 설계에 대한 일반적인 방향을 제시해주지는 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 사각 평판 핀의 장점인 제상수 처리의 장점을 그대로 유지하면서 공기측 열전달성능을 향상 시킬 수 있는 원형 평판 핀에 대하여 경계층 이론을 적용하여 열전달 특성을 이론적으로 연구하고 열교환기 설계시 가장 중요한 요소인 핀 길이 및 핀 피치와의 상관관계를 경계층 간섭을 이용하여 설명하고자 한다. 또한 원형 평판 핀과 사각 평판 핀과의 열전달성능 차이를 고찰하고자 한다.

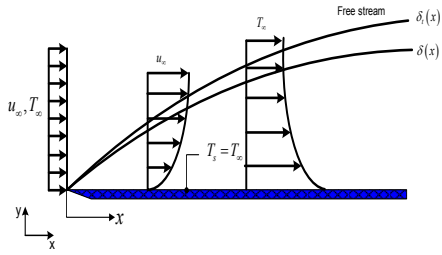
2. 이론적 해석

2.1 경계층 이론

일반적으로 단일 평판에서의 유동은 관외측 유동으로 해석되지만 열교환기는 여러 개의 핀이 튜브와 일정한 간격으로 결합되어 열교환을 수행하므로, 열교환기 내 핀 사이의 유동은 관내측 유동으로 간주될 수 있다. Fig. 1는 본 연구에서 사용된 단일 평판 핀 및 평판 핀 사이의 유동을 해석하기 위하여 고려된 속도 및 온도 경계층 해석 모델이다. 또한, 이러한 경계층 이론을 이용한 접근방법은 착상 및 무착상 조건에서 사용되는 열교환기를 설계할 때 경계층 간섭을 회피할 수 있는 핀 피치 설계에 이용될 수 있으며, 특히 시간이 경과함에 따른 열저항이 증가하는 착상 조건에서 열전달계수 감소를 최소화하여 열교환기 성능을 일정수준으로 유지시키는데도 사용된다.

2.2 이론적 해석

일반적으로 열교환기를 설계할 때 핀 형상 선정, 핀 사이 유동해석 및 핀 간격 설계는 열교환기의 성능과 밀접한 관련을 가지고 있다. 특히 핀 간격은 경계층 간섭(Boundary layer interruption)을 회피할 수 있도록 열교환기 사용 조건에 따라 적절하게 설계되어야 한다[9]. 왜냐하면, 핀 사이에서 경계층 간섭이 발생되면 열전달계수가 급격히 감소하기 때문이다[10].



(a) External flow on one fin surface
(b) Internal flow between fins
[Fig. 1] Schematic for a boundary layer analysis

식 (1)에서 (3)은 속도 및 온도경계층 해석을 위하여 사용된 연속방정식, 에너지 방정식, 운동량 방정식을 나타내고 있으며, Incropera and Dewitt (2002)이 제시한 상사법칙을 이용하였고 경계층 내의 유체는 점성, 비압축성 및 정상상태로 간주하였다[11].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{2}$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \tag{3}$$

속도 및 온도 경계층을 풀기 위한 경계조건은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} u(x,0) = v(x,0) = 0 \text{ and } u(x,\infty) = u_\infty \\ T(x,0) = T_s \text{ and } T(x,\infty) = T_\infty \end{aligned} \tag{4}$$

즉, 속도 및 온도 경계층 두께는 다음과 같이 계산될 수 있다[12].

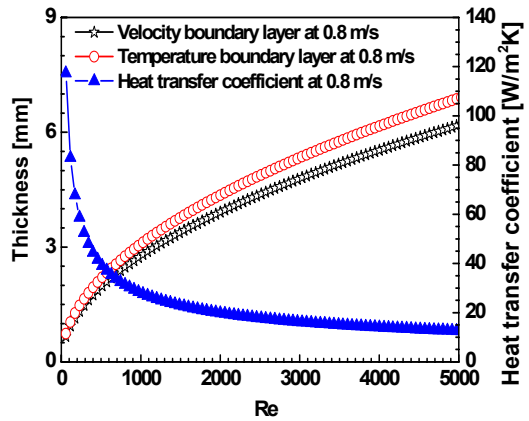
$$\delta = \frac{5.0x}{\sqrt{\text{Re}_x}} \tag{5}$$

$$\frac{\delta}{\delta_t} = Pr^{1/3} \tag{6}$$

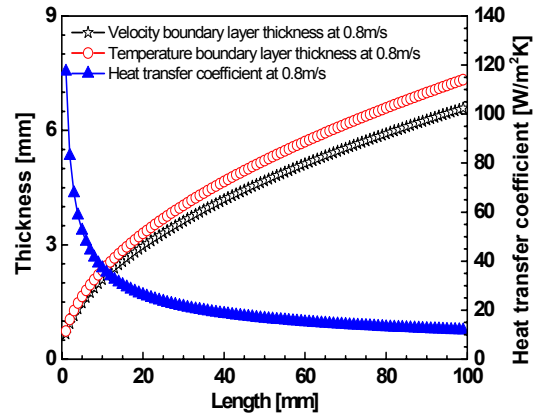
3. 결과 및 고찰

3.1 경계층 두께 및 열전달계수

Fig. 2는 핀 단면에서의 유동을 외부유동으로 간주할 경우 레이놀즈수 변화에 따른 속도 및 온도 경계층 두께의 변화 및 열전달계수의 변화를 나타내고 있다. 레이놀즈수가 증가할수록 경계층의 두께는 증가하였으나 열전달계수는 감소하였다.



[Fig. 2] Analysis of the boundary layer thickness and heat transfer coefficient on one fin surface as external flow with the variation of the Reynolds number



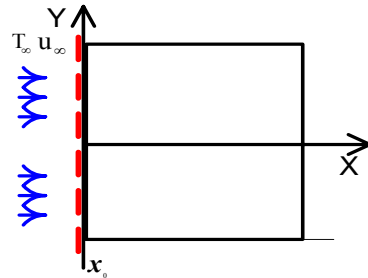
[Fig. 3] Analysis of the boundary layer thickness and heat transfer coefficient on one fin surface as external flow along plate length

Fig. 3는 핀 단면에서의 유동을 외부유동으로 간주할 경우 선단의 길이 증가에 따른 속도 및 온도 경계층 두께의 변화 및 열전달계수의 변화를 나타내고 있다. 선단의 길이가 증가할수록 경계층의 두께는 증가하였고 열전달계수는 감소하였다. Fig. 2과 3의 결과에서 알 수 있듯이, 경계층두께와 열전달계수는 서로 반비례하는 경향을 가지고 있다. 이러한 결과는 열교환기를 설계할 때 핀과 핀 사이의 유동을 내부유동으로 간주할 경우 핀 사이의 경계층 간섭을 회피하여 설계할 때 참고자료로 활용될 수 있다. 더불어 열전달계수는 열교환기가 적용되는 열장치 시스템에 따라 핀 길이를 선정하는 설계 자료로 활용될 수 있다. 결과적으로 레이놀즈수 및 평판 길이는 열교환기 설계 시 매우 중요한 요소이고 열교환기의 사용 목적에 따라 핀 피치를 설계함에 있어 유동의 간섭을 회피하면서 적절한 열전달계수를 갖도록 설계하는데 활용된다. 궁극적으로 이러한 접근법은 열교환기의 고효율화 및 컴팩트화를 실현할 수 있는 이론적 근거가 되며 산업체에서 새로운 열교환기 개발 시 제작 및 설계비용을 저감할 수 있다. 특히, 열교환기 내의 착상이 진행되는 경우 착상으로 인한 유동의 막힘현상 (Blockage effect)과 열전달성능 감소를 최소화 할 필요가 있을 때 서리성장에 따른 경계층 두께 증가를 고려하여 설계한다면 착상 열전달성능을 향상시킬 수 있다.

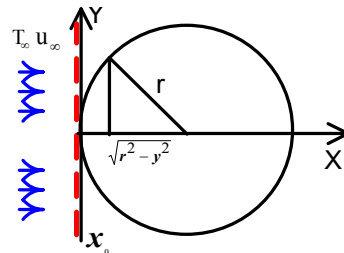
3.2 사각 평판 핀과 원형 평판 핀에서 경계층 간섭 비교

최근에 무공해 자동차용 전동식 공조시스템으로 전동식 히트펌프 시스템에 대한 연구를 진행하고 있으며, 실외기로 원형 평판 핀-튜브 열교환기에 대한 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 절에서는 일정한 길이를 가지는 사각 평판 핀과 원형 평판 핀에서 경계층 간섭과 열전달성능과의 상관관계를 다루고자 한다. Fig. 4에서 보는 것처럼, 경계층의 초기 형상은 원형 평판 핀과 사각 평판 핀은 중심선의 시작점만을 제외하고는 다른 위치에서 경계층 형성이 시작됨을 알 수 있다. 사각 평판 핀의 경우 경계층 형성 시작점은 유동이 핀에 접하는 부분으로 모두 일정하지만, 원형 평판 핀의 경우 핀의 원주 방향을 따라서 경계층 형성점이 달라지는 것을 알 수 있다. 즉 유동이 접하는 원형 평판 핀의 원주방향으로 경계층 형성 시작점이 식 (7)과 같이 변화고 경계층 길이 및 두께도 변화가 된다. 이와 더불어 원형 평판 핀에서 열전달계수도 원주방향에 따라 달라짐을 Fig. 3의 결과로부터 알 수 있다. 따라서 원형 평판 핀은 중심선 (Centerline)을 제외하고 사각 평판 핀보다 경계층이 줄어들어 열전달성능은

향상됨을 알 수 있다. 이러한 이유로는 속도 및 온도 경계층 두께가 감소하여 전체적인 열교환기의 전열면적은 감소하지만 열전달계수는 증가하기 때문이다[13]. 따라서 열교환기 설계 시 원형 평판 핀을 사용하여 기존의 사각 평판 핀을 대체하면 고효율 열교환기를 설계할 수 있으며 적은 전열면적으로 동일한 열전달성능을 달성할 수 있다. 또한 원형평판 핀은 착상처럼 열교환기 내 열전달성능을 저감시키는 경우에도 사각 평판 핀 보다 핀 표면에서 서리 성장에 따른 경계층 간섭 (Boundary layer interruption)의 가능성을 경감시킬 수 있기 때문에 착상 조건에서도 효율적인 열전달성능을 유지할 수 있다. 또한, 이러한 경계층 이론을 실제 열교환기 설계에 접목한다면 실험에만 의존했던 기존의 열교환기 설계법에 비하여 시간과 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.



(a) rectangular plate fin



(b) round plate fin

[Fig. 4] Configurations of the rectangular plate fin and round plate fin

$$BL_x = x_0 + (r - \sqrt{r^2 - y^2}) \tag{7}$$

4. 결론

본 연구에서는 경계층 이론을 이용하여 효율이 우수한

열교환기 설계를 위한 방법을 제안하고 기존의 열장치 시스템에 많이 사용되고 있는 사각 평판 핀의 제상수 처리 장점을 그대로 유지하면서 불리한 공기측 열전달성능을 개선할 수 있는 원형 평판 핀을 제안하였다. 더불어 평판 핀에서 속도 및 온도 경계층과 열전달계수와의 상관관계를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 열교환기에 적용되는 평판 핀은 개별적으로는 외부유동으로 간주할 수 있으나 열교환기는 다수의 핀들이 사용되기 때문에 핀 사이의 유동은 내부유동으로 간주할 수 있다.
- (2) 평판에서 길이가 증가할수록 속도 및 온도 경계층의 두께는 증가하나 열전달계수는 감소한다.
- (3) 원형 평판 핀은 중심선 (centerline)을 제외하고 사각 평판 핀보다 경계층의 길이 및 두께가 줄어들어 사각 평판 핀에 비하여 전열면적은 감소하나 열전달계수는 증가한다.
- (4) 열교환기 설계 시 핀 길이 및 핀 간격은 성능과 밀접되는 중요한 설계 변수로, 핀 사이의 경계층 간섭을 회피하는 방향 및 사용 환경에 따라 열전달계수를 효과적으로 유지할 수 있도록 적절히 설계되어야 한다.

References

[1] M. Y. Lee, H. S. Lee, Y. H. Jang, Y. C. Kim, "Numerical analysis on the frosting performance of a fin-tube evaporator used in a refrigerator", Trans. of the KSME, Vol. 32, No. 4, pp. 307-316, 2008.

[2] M. Lee, S. Kim, Y. Kim, "Performance evaluations of a residential small multi-refrigeration system considering the adiabatic characteristics", Trans. of the KSME, Vol. 31, No. 10, pp. 868-875. 2007.

[3] Y. H. Kim, Y. C. Kim, "Heat transfer characteristics of flat plate finned-tube heat exchangers with large fin pitch", Int. J. of Refrigeration, Vol. 28, pp. 851-858, 2005, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[4] M. Y. Lee, H. S. Lee, Y. H. Jang, Y. C. Kim, "Numerical analysis on the frosting performance of a fin-tube evaporator used in a refrigerator", Trans. of the KSME, Vol. 32, No. 4, pp. 307-316, 2008.

[5] M. Y. Lee, S. H. Lee, H. W. Jung, Y. C. Kim, J. J. Park, "Frosting heat transfer characteristics of evaporators used for household refrigerators according to fin configuration", Trans. of the KSME, Vol. 34,

No. 12, pp. 1071-1078, 2010.

[6] M. S. Mon, U. Gross, "Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp. 1953-1964, 2004, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[7] R. Yun, Y. C. Kim, S. Kim, J. M., Choi, "Experimental study on the heat transfer characteristics of spiral fin-tube heat exchanger", trans. of the SAREK, Vol. 17, No. 6, pp. 529-535, 2005.

[8] M. Y. Lee, T. H. Kang, Y. C. Kim, "Air-side heat transfer characteristics of spiral-type circular fin-tube heat exchangers", Int. J. of Refrigeration, Vol. 33, pp. 313-320, 2010, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[9] M. Y. Lee, "Heat and mass transfer characteristics of a spirally-coiled circular fin tube heat exchanger", Ph.D. Thesis, Korea University, Seoul, Korea, February 2010.

[10] Y. H. Kim, Y. Kim, "Heat transfer characteristics of flat plate finned-tube heat exchangers with large fin pitch", Int. J. Refrigeration, Vol. 28, pp. 851-858, 2005, [Article\(CrossRefLink\)](#)

[11] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, "Fundamentals of heat and mass transfer", John Wiley & Sons, 4th edition, pp. 88-431, 2002.

[12] Y. H. Kim, "Study on the frosting and defrosting performance of fin-tube heat exchangers", Ph. D. Thesis, Korea University, 2004.

[13] M. Y. Lee, T. H. Kang, Y. Kim, "Air-side heat transfer characteristics of spiral-type circular fin-tube heat exchangers", Int. J. Refrigeration, Vol. 28, pp. 313-320, 2010, [Article\(CrossRefLink\)](#)

이 동 연(Dong-Yeon Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학부 (공학석사)
- 2007년 2월 : 한국과학기술원 기계공학부 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2008년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

Nano-mechatronics, Nano-design, Scanning-Probe Microscope

이 무 연(Lee, Moo-Yeon)

[정회원]



- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 1월 : 고려대학교 기계공학과 (연구교수)
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 자동차부품 연구원 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 전동식 히트펌프, 신재생에너지 변환시스템, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체, 자성유체