

개량 루버핀에 의한 열전달 성능향상에 관한 연구

정재동* · 박병규** · 이준식***

Numerical Analysis on the Heat Transfer Enhancement by Modified Louvour Fin

Jae Dong Chung, Byung Kyu Park and Joon Sik Lee

Key Words: Heat Transfer Enhancement (열전달촉진), Vortex Generator (와류발생기), Louvour Fin (루버핀)

Abstract

Numerical analysis on the three-dimensional laminar flows ($Re=1000$) and heat transfer in a rectangular channel with punched longitudinal vortex generator have been conducted to explore the heat transfer enhancement and the combined effect of the angle of attack α and the louvour angle β . Rectangular winglets have been used as vortex generators. Velocity and temperature fields and spanwise averaged Nu and friction factor were presented. Enhancement of heat transfer and flow loss penalty are evidenced. The results show performance characteristics allowing a reduction in heat transfer surface area of 62% for fixed heat duty and for fixed pumping power compared with that of channel flow without vortex generator. However, adding louvour angle to the vortex generator shows no positive effect on the heat transfer enhancement.

1. 서론

산업용 열교환기의 고성능화 및 고밀도화는 지난 수십 년간의 지속적인 연구개발의 대상이었다. 열교환기의 성능을 향상시키기 위해서는 발열원으로부터 냉각유체로의 열전달이 원활히 이루어져야 한다. 이러한 열전달촉진은 외부동력을 이용한 경우와 무동력법이 있으며 후자의 경우 일반적으로 슬릿, 루버, 웨이브 등의 다양한 핀 형상이 이용되고 있다. 하지만 오늘날 고밀집도 열교환기의 유로는 매우 협소하여 안정된 층

류흐름을 보이게 된다. 이러한 시공간적 와류발생이 없는 정상상태의 층류유동 하에서는 냉각유체의 혼합효과가 작아 고온의 열원으로부터 저온의 냉각유체로의 대류열전달이 활발히 이루어지지 못한다. 따라서 인위적인 와류를 발생시켜 열전달을 촉진시키고자 하는 연구가 활발히 진행되었다.⁽¹⁾

Russell 등⁽²⁾은 최초로 유동방향으로 진행하는 와류에 의해 편평판-핀 열교환기의 성능 향상을 연구하여 엇갈림 배열의 사각날개 와류발생기가 가장 효율적임을 제시하였다. Turk와 Junkhan⁽³⁾은 사각날개 와류발생기의 높이와 영각에 따른 영향을 실험적으로 살펴보았다. 최근, Mitra 그룹에서 수행된 일련의 연구들은⁽⁴⁻⁶⁾ 와류발생기의 형상, 영각, 배열, 와류발생기의 상호작용 등의 인자들에 의한 영향을 핀의 전도를 포함하여 3차원 수치해석하였다.

와류발생기에 의한 열전달촉진은 핀의 작은 수

* 회원, 세종대학교 기계공학과

** 회원, 한국기계연구원

*** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail: jslee@gong.snu.ac.kr

Tel: (02) 880-7117 Fax: (02) 883-0179

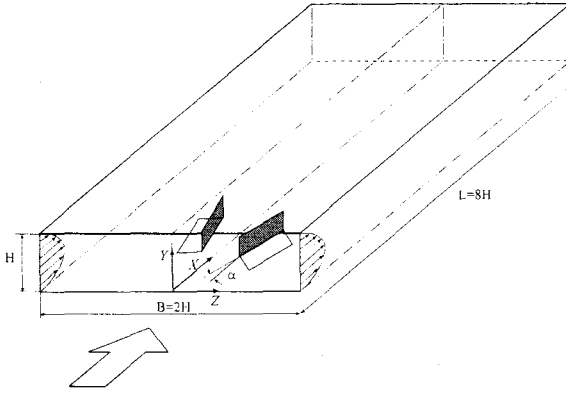


Fig. 1 The geometrical model of vortex generator

력직경과 낮은 기체 밀도 때문에 저 레이놀즈 수 유동영역에서 이루어지며, 이에 대한 연구는 아직까지 $Re < 500$ 영역에 대한 실험이 어려운 실정이므로 대부분 수치해석적 접근방법에 의존한다.

본 연구는 열교환기 성능향상을 위한 기초 연구의 일환으로 독립적인 사각날개 와류발생기의 성능을 수치적 방법으로 평가하여 개선된 와류발생기의 가능성을 제안한다.

2. 해석

2.1 해석대상 모델

해석대상은 Fig. 1에 개략적으로 도시되었듯이 채널입구에 완전발달된 $T=0$ 인 유체가 유입되고 $T=1$ 인 상하 벽면으로부터 적절한 각도로 꺾여진 사각날개 와류발생기(rectangular winglet vortex generator)로 구성된다. 해석의 편의상 쌍으로 구성된 와류발생기에서 대칭성을 이용하여 한쪽면만을 해석하였다. 이러한 대칭성은 측면으로의 유동진동을 억제할 것으로 예측되고 있으나⁽⁷⁾ 계산격자의 감소라는 측면에서 대부분의 해석에서 도입되고 있는 가정이다.

와류발생기는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 $X_p=2H$, $Y_p=0$, $Z_p=0.2H$ 에 회전 기준점을 두고 유동방향에 대해 2개의 방향(영각 α , 루버 각 β)을 갖는다. 특히, $\alpha=90^\circ$ 는 기존의 루버핀에 해당하고 $\beta=0^\circ$ 는 기존의 사각날개 와류발생기에 해당한다. 와류발생기에서의 전도는 고려되지 않았고 두께가 0이고 $T=1$ 인 벽조건을 적용

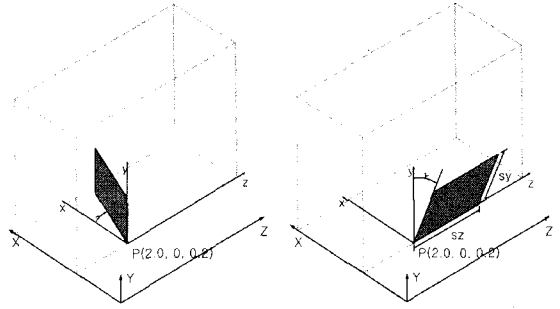


Fig. 2 Schematics of angle of attack, α and yaw angle, β

하였다.

해석대상은 주유동방향으로 $8H$, 폭방향과 채널 높이가 H 이며, 와류발생기의 크기는 $0.3H \times 0.2H$ 로서 전체 벽면에 대한 면적비가 1.5%에 불과하다.

2.2 수치해석

비압축성, 뉴턴유체에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_j} (U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial}{\partial X_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial X_j} (\theta U_j) = \frac{1}{RePr} \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\frac{\partial \theta}{\partial X_j} \right] \quad (3)$$

냉각 유체는 공기로서, $Re=1000$, $Pr=0.7$ 로 설정하였다. 와류발생기의 성능을 평가하기 위해서는 Re 수에 따른 영향을 살펴보아야 하나 본 연구에서는 고려할 인자를 단지 영각과 루버각 (α, β) (Fig. 2)에 국한하여 이루어졌다. Re 의 영향, 와류발생기의 높이와 폭, 두 개이상의 와류발생기의 상호작용 등은 추후의 과제로 하기로 한다.

해석은 상용 수치해석 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 이루어졌다. PISO 알고리즘에 의해 10^{-3} 오차한도에서 수렴을 판정하였다.

계산 격자계는 주흐름방향으로 80, 채널 높이 방향으로 45, 폭방향으로 45개의 격자가 구성하

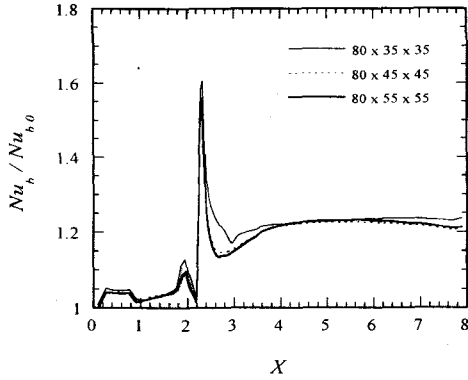


Fig. 3 Grid sensitivity test for angle of attack 30° and loavour angle 50°

였고, 유동 교란이 왕성한 와류발생기 부근에 격자를 집중시켰다. 80×35×35의 격자계와 80×55×55의 격자계에 대한 결과를 함께 비교하였을 때(Fig. 3) 그 차이는 무시할 만 하다.

2.3 검증

와류발생기의 유동방향에 대한 영향을 살펴보기에 앞서 해석해가 존재하는 와류발생기가 없는 채널유동에 대한 검증이 수행되었다. 아래 식으로 정의되는 국소 Nu수를 유동에 수직인 방향(Z방향)으로 평균한 Nu수와 마찰계수 f 를 온도장이 충분히 발달했을 경우에 해석해와의 차이는 각각 0.17%와 0.62%이다. (실제 와류발생기가 없는 경우는 2차원 유동이기 때문에 폭방향으로 Nu수의 변화는 보이지 않는다.) 이 경우 유동이 단순하여 와류발생기가 있을 경우보다 훨씬 성긴 격자계를 사용하였음에 주의한다.

$$\overline{Nu} = \frac{B/2 \cdot q_i(H/k)}{\int_0^{B/2} (T_{uz} - T_b(x)) dz} \quad (4)$$

$$f = \frac{p_1 - p_2}{\rho/2 \cdot U_m^2} \left(\frac{H}{2\Delta x} \right) \quad (5)$$

여기서 하첨자 $i = b, t$ 는 채널 아랫면과 윗면에 대응한다. 본 연구에서는 와류발생기에 의한 채널윗면의 변화는 그다지 크지 않으므로 앞으로의 논의에서 평균 Nu수는 모두 채널 아랫면에 대한 값으로 한다.

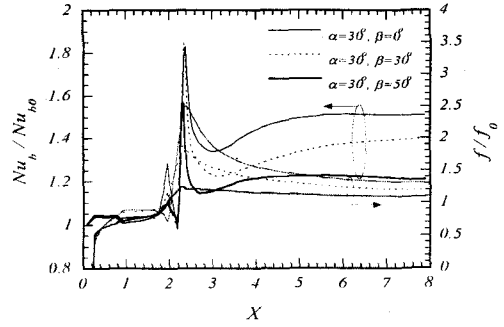


Fig. 4 The effect of loavour angle, β on the Nu and friction factor normalized with those of channel flow without vortex generator

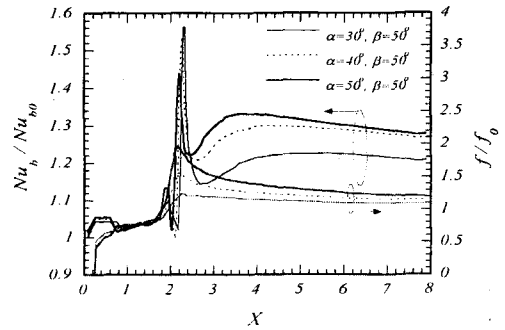


Fig. 5 The effect of angle of attack, α on the Nu and friction factor normalized with those of channel flow without vortex generator

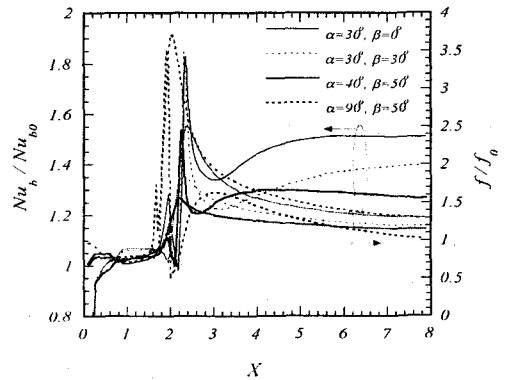


Fig. 6 The combined effect of angle of attack, α and loavour angle, β on the Nu and friction factor normalized with those of channel flow without vortex generator

3. 결과 및 고찰

Fig. 2의 $\alpha = 90^\circ$ 는 기존의 루버핀에 해당한다. 이 경우 공기의 충돌각이 90° 로 한정되어 폭방향 및 축방향으로 와류가 생성되지 않는다. 높은 공기속도에서는 루버각을 따라 주유동이 형성되어 방향성을 가진 단락평판유동의 특성인 높은 열전달 계수를 나타내지만, 낮은 공기속도에서는 루버는 유동구조에 미미한 영향만을 끼치고 주유동은 루버방향으로 흐르지 않아 핀 사이의 덕트유동을 형성함으로써 열전달 계수가 현저히 낮아지는 바, 이는 저속 공기유동에서 이웃한 루버 사이에 성장하는 경계층이 충분히 두꺼워져서 유로를 완전히 막아서 핀배열을 통한 축방향 유동(덕트유동)을 초래하기 때문이다. 반면에 기존의 사각날개 와류발생기에 해당하는 Fig. 2의 $\beta = 0^\circ$ 의 경우는 단지 유동과의 각도 α 의 영향만을 살펴보았을 뿐이다. 하지만 유동이 이루는 두 개의 각도, α 와 β 를 개별적으로 살펴볼 때 이 두가지의 조합에 의한 최적의 와류발생기의 유동 방향에 대한 위치가 결정될 수 있을 것이다. Fig. 4는 영각 α 를 고정($=30^\circ$)하고 루버각 β 만을 변화($\beta = 0, 30, 50^\circ$)시켰을 때 유동에 수직인 방향(Z방향)으로 평균한 Nu수와 마찰계수 f 를 보여준다. 각 경우에 대해 하첨자 0으로 표시된 기준값은 와류발생기가 없는 채널유동에 해당하는 값이다. β 가 증가할수록 유동에 대한 저항이 줄어들고 또한 열전달 증가량도 줄어든다. 반면에 루버각 β 를 고정($=50^\circ$)하고 영각 α 만을 변화($\alpha = 30, 40, 50^\circ$)시켰을 때의 결과(Fig. 5)를 살펴보면 α 가 증가할수록 유동에 대한 저항과 열전달량이 함께 증가한다. 따라서 영각 α 가 증가하고 동시에 루버각 β 를 증가시킴에 따른 열전달 촉진/감소와 압력강하 증가/감소 효과가 어떻게 나타날지에 대한 관심이 제기된다. 이는 열전달 촉진과 압력강하가 단순한 상관관계를 보이지는 않기 때문이다. 압력강하는 주로 주유동방향의 속도차에 의하지만 열전달촉진은 주로 폭방향과 채널 높이 방향의 속도에 영향을 받기 때문이다.

Fig. 6는 유동에 대한 와류발생기의 위치를 결정하는 영각과 루버각이 조합된 몇 가지 경우에 대한 열전달량과 압력강하를 유동방향 길이에 대해 나타낸 것이다. 와류발생기가 설치된 경우는

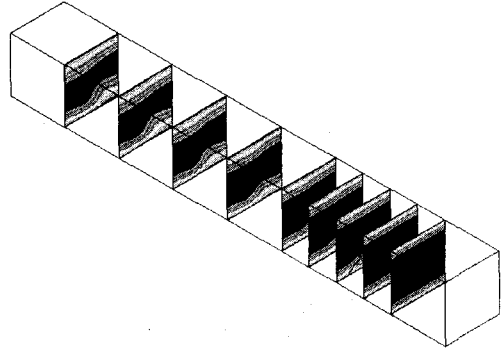


Fig. 7 Temperature contour for each section at $x=1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7$

와류에 의한 열전달 촉진의 영향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 와류발생기에 의한 유동의 박리로 유동방향에서 보았을 때 와류발생기 후면에서 저압 영역이 형성되고 전면에는 고압영역이 형성된다. 이러한 압력차에 의해서 주유동에 수직인 방향의 유동이 발생하여 와류가 형성되고 이 와류는 경계층을 교란시켜 열전달을 촉진시킨다. 와류발생기 대 핀의 면적비가 1.5%에 불과함에도 열전달 증가량이 와류발생기가 없는 경우에 비해 51%까지 증가된 것을 알 수 있다. 제시된 각 경우에 대한 성능평가는 다음 식⁽⁷⁾에 따르기로 한다.

$$\frac{Re}{Re_0} = \left(\frac{j}{j_0} \cdot \frac{f_0}{f} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\frac{A}{A_0} = \frac{j_0}{j} \cdot \frac{Re_0}{Re} \quad (7)$$

여기서 Colburn factor, j 는 다음과 같다.

$$j = \frac{Nu_m}{Re \cdot Pr^{1/3}} \quad (8)$$

주의할 것은 식 (6)은 우변도 Re/Re_0 의 함수이나 본 연구에서는 Re 수의 변화에 대해 고려하지 않았으므로 근사적으로 주어진 고정된 Re 수에 대해 식(6)의 우변을 계산하였다. 와류발생기의 성능은 식(7)에 의해 동일한 열전달량과 요구 동력하에서 기준 조건에 대한 표면적의 감소로 평가한다. $\alpha = 90^\circ, \beta = 50^\circ$ 인 루버핀의 경우 와류발생기가 없는 채널유동에 비해 97.7%의 표면적이

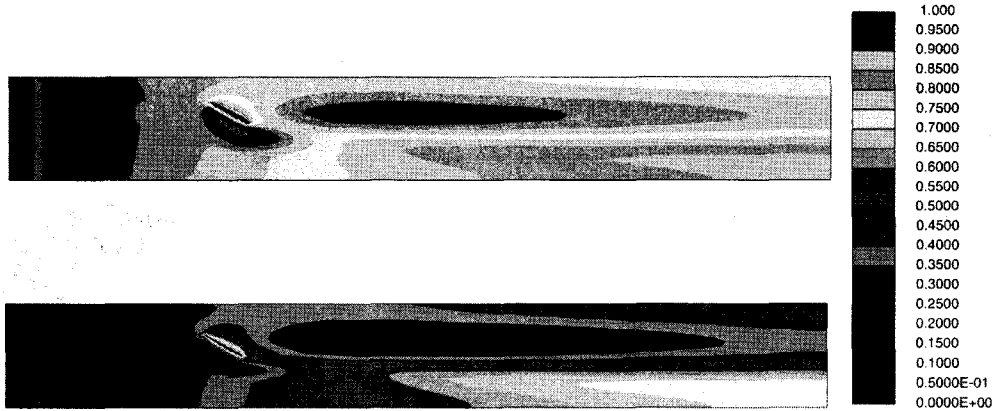


Fig. 8 Temperature contour for x-z plane at $y=0.05, 0.1$

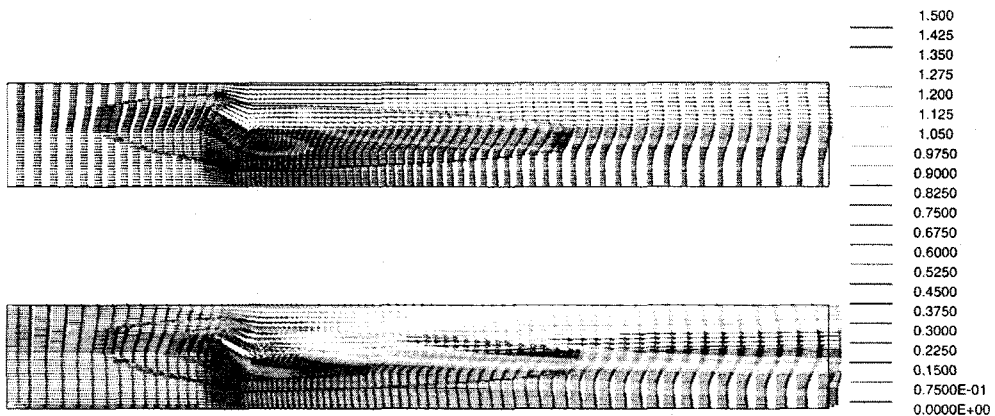


Fig. 9 Velocity plot for x-z plane at $y=0.05, 0.1$

필요하여 채널유동에 비해 약간 개선된 결과를 보이고, $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 0^\circ$ 인 경우 채널유동에 비해 61.6%만의 표면적으로 채널유동과 동일한 성능을 나타내었다. 하지만 연구의 동기가 되었던 유동에 대한 와류발생기의 각도 α , β 가 조합된 경우 오히려 $\beta = 0^\circ$ 인 기존의 와류발생기보다 조금 낮은 성능을 나타내었다. 이는 Re수의 변화, 편칭된 와류발생기의 꺾인 위치, 그리고 다양한 α , β 의 조합이 충분히 검토되지 않았기 때문으로 생각되며 추후 이에 대한 보완이 이루어질 것이다.

와류발생기의 정성적인 거동을 살펴보기 위해 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 50^\circ$ 인 경우에 대한 온도장(Fig. 7, Fig. 8)과 속도장(Fig. 9)을 나타내었다. Fig. 7은 x

= 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7의 위치에서의 y-z단면 온도장이며, Fig. 8은 $y = 0.05, 0.1$ 의 위치에서의 x-z단면 온도장이다. Fig. 9는 $y = 0.05, 0.1$ 에서의 x-z단면 속도장을 나타낸다. 와류발생기에 의한 와류의 생성과 그에 따른 온도장의 변화를 확인할 수 있다.

4. 결 론

열교환기 성능향상을 위한 기초 연구의 일환으로 독립적인 사각날개 와류발생기의 성능을 수치적 방법으로 평가하여 개선된 와류발생기의 가능성을 연구하였다. 유동에 대한 와류발생기의 위치를 결정하는 영각과 루버각이 조합되었을 때

핀의 성능을 살펴보았다.

와류발생기에 의한 열전달촉진은 와류발생기가 없는 채널유동에 비해 최고 51%까지 증가하나 상대적인 압력강하도 30% 증가한다. 핀의 성능평가는 동일한 열전달량과 요구 동력하에서 기준 조건에 대한 표면적의 감소로 나타낼 때 와류발생기가 없는 채널유동에 비해 최고 61.6%의 표면적 감소를 보였다. 하지만 영각과 루버각이 조합된 경우 기존의 와류발생기보다 조금 낮은 성능을 나타내었다. 이는 Re수의 변화, 편칭된 와류발생기의 꺾인 위치, 그리고 다양한 α , β 의 조합이 충분히 검토되지 않았기 때문으로 생각되며 추후 이에 대한 보완이 이루어질 것이다.

후기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업 (기계설비요소 기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Jacobi, A. and Shah, R. K., 1995, "Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: A review of recent progress," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 11, pp. 295-309.
- (2) Russell, C. M. B., Jones, T. V. and Lee, G. H., 1982, "Heat transfer enhancement using vortex generators," *Proc. 7th Heat Transfer Conf.*, Vol. 3, pp. 283-288, Hemisphere, New York.
- (3) Turk, A. Y. and Junkhan, G. H., 1986, "Heat transfer enhancement downstream of vortex generators on a flat plate," *Proc. 8th Heat Transfer Conf.*, Vol. 6, pp. 2903-2908, Hemisphere, New York.
- (4) Chen, Y., Fiebig, M. and Mitra, N. K., 1998, "Heat transfer enhancement of a finned oval tube with punched longitudinal vortex generators in-line," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 3961-3978.
- (5) Chen, Y., Fiebig, M. and Mitra, N. K., 1998, "Conjugate heat transfer of a finned oval tube with a punched longitudinal vortex generator in form of a delta winglet-parametric investigations of the winglet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 4151-4166.
- (6) Chen, Y., Fiebig, M. and Mitra, N. K., 2000, "Heat transfer enhancement of finned oval tubes with staggered punched longitudinal vortex generators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 417-435.
- (7) Brockmeier, U., Guentermann, Th. and Fiebig, M., 1993, "Performance evaluation of a vortex generator heat transfer surface and comparison with different high performance surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 2575-2587.
- (8) Kakac, S., Shah, R. K. and Aung, W., 1987, *Handbook of single phase convective heat transfer*, Wiley, New York.