Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 6 pp. 609~613, 2015
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.6.609

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

한 면에 리브가 설치된 확대 정사각 채널에서 리브 각이 열전달에 미치는 효과

이명성[1] · 안수환†

(Received March 13, 2015 ; Revised May 7, 2015 ; Accepted May 19, 2015)

Effects of Rib Angles on Heat Transfer in a Divergent Square Channel With Ribs on One Wall

Myung Sung Lee[1] · Soo Whan Ahn†

요약: 축방향 거리에 따라 확대되는 정사각 채널에서 발달된 난류유동의 국부 난류 열전달과 압력강하를 실험적으로 조사하였다. 정사각 확대채널에 한 면에만 높이가 10 mm인 리브를 설치하였다. 리브의 충돌 각은 30º, 45º, 60º 그리고 90º로 한 벽면에 만 설치하였다. 레이놀즈수가 22,000~ 79,000의 범위에서 실험을 수행하였다. 연구 결과 45º의 리브 충돌각이 가장 우수한 열전달 성능을 보였다.

주제어: 리브 충돌각, 확대채널, 전 마찰계수, 열전달, 열전달 성능

Abstract: In this study, the experiments are performed to investigate the local heat transfer and pressure drops of developed turbulent flows in the diverging square channels along the axial distance. The square divergent channels are manufactured with a fixed rib height (e) = 10 mm. Four different parallel angled ribs (a = 30°, 45°, 60°, and 90°) are placed on the channel's one-sided wall only. TThe measurement are conducted within the range of Reynolds numbers from 22,000 to 79,000. The results show that a rib angle-of-attack of 45° produces the best heat-transfer performance.

Keywords: Rib angle-of-attack, Divergent channel, Total friction factor, Heat transfer, Heat transfer performance

1. 서 론

가스터빈 엔진의 냉각시스템 설계를 위한 연구들을 보면, 리브(rib)가 설치된 직선의 정사각 채널 의 열전달 향상을 위한 연구로는 Ahn *et al* **[1]**이 리브를 한면, 양면, 그리고 4면 모두에 각각 설치하여 리브설치 벽면수에 따른 열전달과 마찰계수에 관해 연구를 수행하였다. Han *et al.***[2]**은 직선 정사각 채널의 실험에서 리브 충돌각 60°~ 75°에서 열전달계수가 최대값을 가지며, 일정한 유체이송동력 조건에선 충돌각이 30°~ 45°일 때 최대의 열전달 향상효과가 있었음을 보였다.

Hermanson *et al.***[3]**은 다양한 난류 모델을 적용하여 리브 충돌각이 45°인 직선채널 내부에 발생하는 유동현상을 조사하였다. 리브에 의하여 편향된 유동은 압력 차이에 의해 발생하는 이차유동구조를 갖게 되고 이러한 이차유동은 열전달의 불균형을 일으킨다.

수축과 확대 채널 내 벽면의 리브가 열전달에 미치는 연구로는 Wang *et al.***[4]**은 입구영역인 수축/확대 사각 채널에서 채널 입출구 단면적의 비가 국부와 채널 평균 열전달에 미치는 영향을 측정한 바 있다. 그 결과 채널 단면적의 변화는 채널 평균 열전달에 큰 영향을 준다는 것을 입증하였다. 최근에 Lee *et al.***[5]**은 완전히 발달된 영역의 수축/확대 사각채널에서 리브 충돌각이 90º인 경우 0.69, 0.86, 1.16 그리고 1.49인 입·출구 수력직경비가 열전달과 마찰계수에 미치는 효과를 실험적으로 조사하였다. 그 결과 시험부 입·출구 수력 직경비가 1.16인 확대 채널일 때 가장 열전달 성능이 높았다. Lee *et al.***[6]**은 완전히 발달된 확대채널에서 입출구 수력직경비가 1.16이고 리브 충돌각이 30º, 45º, 60º 그리고 90º인 확대 채널에 대해 열전달 성능을 실험적으로 조사한 결과 직선채널의 Han *et al.***[2]**의 결과와 다르게 60º에서 가장 높은 누셀트수가 나타났다. 이는 수축/확대 채널에서는 입·출구 수력 직경비에 따라 유동 충돌각이 열성능에 미치는 효과가 달라진다는 것을 입증한다. 이에 본 연구는 완전히 발달된 영역에서 입·출구 수력직경비가 1.33인 4벽면 확대 채널에서 한 벽면에 설치된 리브 충돌각이 열성능에 미치는 효과를 실험적으로 조사하여 최적의 리브 충돌각을 구하는데 목적이 있다.

2. 장치 및 방법

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0863-3577): Department of Mechanical & System Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, 38 Cheondaegukchi-gil, Tongyeong, Gyeongsangnam-do, 650-160 Korea, E-mail: ahn9294@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9105

1 Department of Mechanical & System Engineering. Gyeongsang National University, E-mail: leems@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9105

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

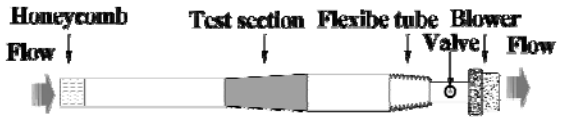


Figure 1: Experimental setup

Figure1은 실험 장치를 도식적으로 나타낸 그림이다. 전체 채널 길이는 4,000 mm이고 시험부는 1,000 mm로 하였다. 시험부에는 좌우면에 실리콘 포일 히터를 설치하여 가열하고 상하 양면에는 단열이 되도록 하였다. 채널구조는 4면 모두 확대되며 입·출구의 수력 직경의 확대비(D_{ho}/D_{hi})는 1.33으로 제작하였다. 여기서 D_{ho}와 D_{hi}는 각각 채널 시험부 출구와 입구의 수력직경이다. 작동 유체로는 실내공기를 사용하였고 공기는 시험부 출구 측에 설치된 송풍기에 의해 시험부로 유입되었다. 시험부 출구와 송풍기 사이에는 원형 유동직진기 튜브를 두어 송풍기에 의한 스월 효과를 최소화 하였다. 시험부의 공기 유량은 시험부 뒤에 설치된 원형 튜브에서 피토관을 사용하여 원관중심에서 벽면까지 국부유속을 측정한 후 심프슨 법칙으로 원관의 체적평균 유속을 구하고 연속법칙으로 사각채널인 시험부의 체적평균 유속을 얻었다. 리브는 한 면에만 설치하고 리브가 설치된 벽은 10 mm x 100 mm x 5 mm(t)의 리브를 연속적으로 배치되었다. 리브의 충돌 각은 30°, 45°, 60°그리고 90°로 변화를 주었다. 리브의 피치(p)/높이(e)의 비는 10으로, 리브의 높이와 채널의 수력직경비(e/D_h)는 0.2에서 0.1로 변한다. 시험부 좌우 가열 벽면은 열전도성이 높은 구리판을 여러 영역으로 나누는 구리판법(copper plate method)을 이용하여 10개의 영역으로 구분하여 매 영역마다 1개의 구리판을 설치하고 영역 사이에는 열전도를 방지하기 위해 0.5 mm 두께의 고무 가스켓으로 분리하였다. 가열된 구리판과 리브는 가열되지 않는 벽면으로 복사 손실 열을 최소화하기 위해 매끈하게 제작하였다. 시험부 입·출구를 차단하고 그 속에 단열재를 채운 상태에서의 열손실은 시험부 온도가 정상상태에서 공급되는 열 즉, 시험부 외부로 누설(손실)되는 열과 같다. 그러므로 단위면적 당의 열 손실(ql)은 아래와 같이 계산된다.

$$q_l = \frac{T_w - T_\infty}{\triangle y_1/k_1 + \triangle y_2/k_2 + \triangle y_3/k_3 + 1/h_1} \tag{1}$$

여기서 T∞는 주위온도, Δy1과 k1는 운모의 두께와 열전도도, Δy2과 k2는 송판의 두께와 열전도도, Δy3과 k3는 유리 섬유의 두께와 열전도도, 그리고 h1는 채널 주위의 자연대류 열전달 계수이다. 채널 유동의 마찰 계수는 채널 수축과 확대에 의한 동압 성분의 변화 효과를 고려한 전 압력강하($\triangle P_T$)의 **식 (3)**을 이용하여 **식(4)**와 같이 구했다. 전압의 측정은 벽면에 설치된 압력 탭으로부터 측정한 정압(static pressure)과 시험부 입구와 출구의 평균유속에 의한 동압(dynamic pressure)을 합한 값으로부터 얻었다. 정압측정용 압력탭은 채널 상부의 단열된 매끈한 벽면에 100 mm 동일 간격의 9개의 구멍을 설치하여 제작하였다.

$$\triangle P_T = P_i - P_o + \frac{1}{2}\rho u_{bi}^2 - \frac{1}{2}\rho u_{bo}^2 \tag{3}$$

$$f_T = \frac{D_h}{2\rho u_b^2}\left|\frac{\triangle P_T}{\triangle L}\right| \tag{4}$$

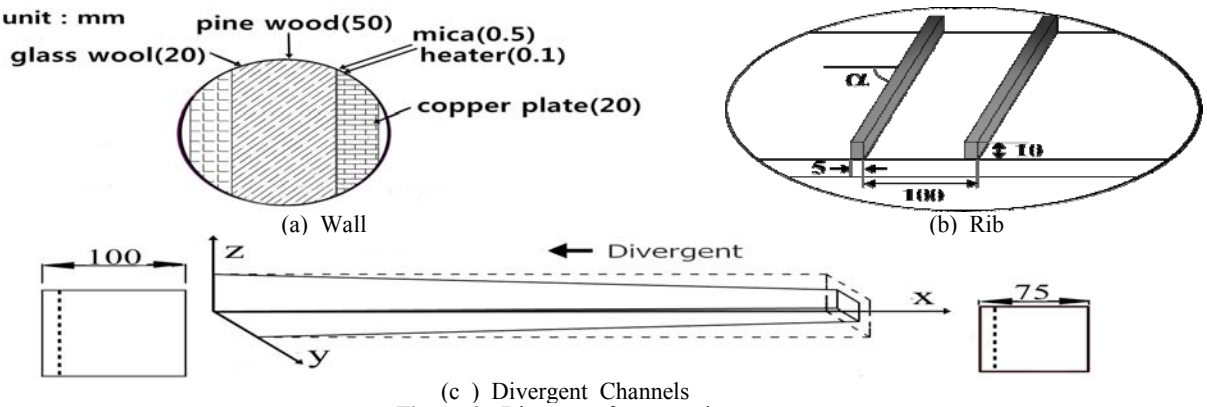
여기서 P_i와 P_o는 각각 시험부 입구와 출구의 정압 강하이다. 국부 열전달 계수(h)는 아래와 같이 정의하였다.

$$h = [(Q - Q_l)/A(T_{wx} - T_{bx})] \tag{5}$$

그리고 채널 평균 누셀트 수(Nu)은 아래와 같이 정의하였다.

$$Nu = \frac{\overline{h} D_h}{k} \tag{6}$$

불확실성은 Kline과 McClintock**[7]**가 제시하는 방법으로 수행하였고 최대 불확실성은 채널평균 누셀트수에서는 11%와 전 마찰계수에서는 12%이었다.



(a) Wall (b) Rib

(c) Divergent Channels

Figure 2: Diagram of test section

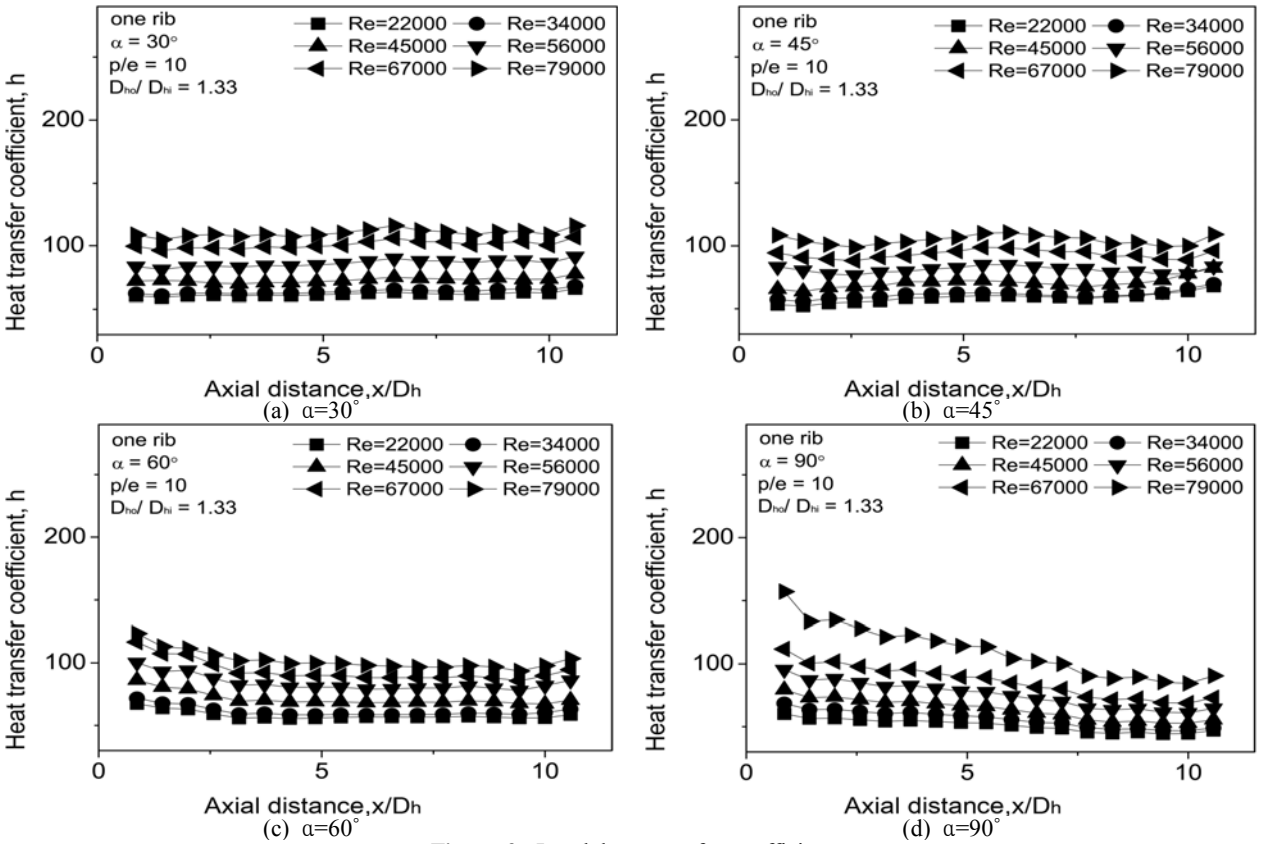


Figure 3: Local heat transfer coefficient

3. 실험결과 및 고찰

Figure 3은 리브 각도에 따른 국부 열전달 계수를 나타낸다. 30°와 45° 채널의 경우는 비교적 일정한 값을 나타내는 반면 90° 채널은 지속적으로 흐름 방향 거리에 따라 감소하였다. 이는 **Figure 4**와 같이 주 유동방향과 경사진 리브각도에 의한 스월 유동보다 **Figure 5**와 같이 리브를 넘어 바닥에 재 부착되는 유동이 크게 작용하여 유동방향 거리에따라 열전달에 관련된 반경방향 유동성분이 크게 줄어드는 것을 보여준다. **Figure 6**은 채널평균 누셀트수를 나타낸다. 비교를 위해 2면이 수력직경비 1.16으로 확대되는 Lee *et al.***[6]**의 값을 포함하였다. Lee *et al.***[6]**은 누셀트수의 크기가 60°, 45°, 30°, 90° 순으로 나타난 반면 본 연구에서는 45°, 30°, 60°, 90° 순으로 나타났다. 이는 리브가 설치된 채널에서 채널확대 크기에 따라 크게 변하는 스월유동 때문인 것으로 사료된다.

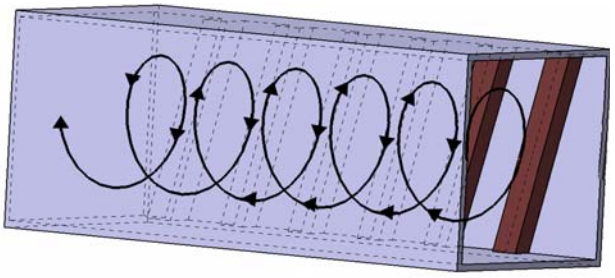


Figure 4: Effect of rib angle on swirl flow

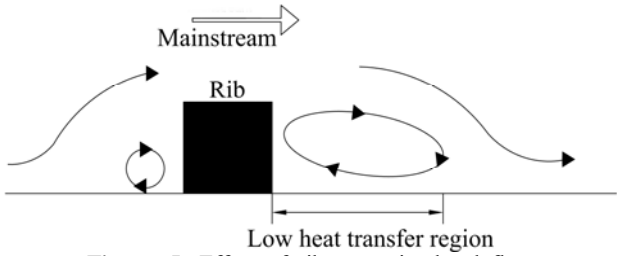


Figure: 5: Effect of rib on recirculated flow

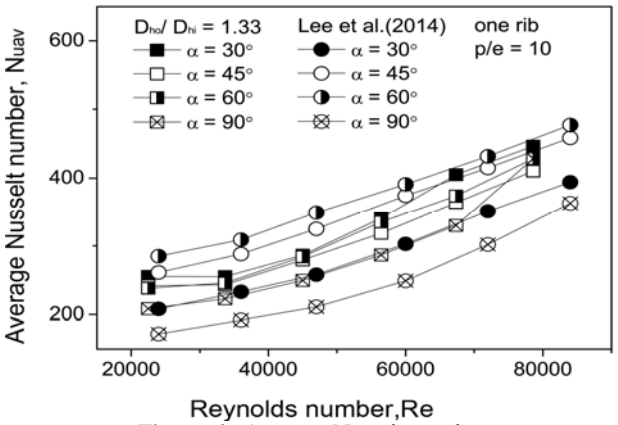


Figure 6: Average Nusselt number

Figure 7은 4벽면 모두 확대되는 채널에서 리브각도에 따른 전 마찰계수를 나타내었다. Lee등[6]의 결과와 동일한 유형을 보여주나 더 큰 값을 나타냈었다. 이는 거리에 따른

단면적이 확대됨에 따라 입구와 출구에서의 운동에너지 차이가 크게 발생하며 Lee등[6]의 2면 확대 채널보다 단면적 확대가 크기 때문에 더 큰 값을 나타내는 것으로 사료된다. **Figure 8**은 레이놀즈수 34,000에서의 누셀트수와 마찰계수를 각도에 따라 비교하였다. 아래첨자 ss는 매끈한 원형관을 의미한다. 비교를 위해 레이놀즈수 30,000에서의 Han과 Park **[8]**의 값과 직선채널 실험값을 포함하였다. 세 가지 채널 모두 90° 채널의 경우 리브가 부착된 면과 매끈한 면의 누셀트수 차이가 가장 작았고 45°, 60°, 30° 순으로 큰 차이가 났다. 이는 주 유동과 리브가 이루는 충동 각에 의해 발생하는 이차유동과 재순환 유동에서 발생하는 난류가 복합적으로 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

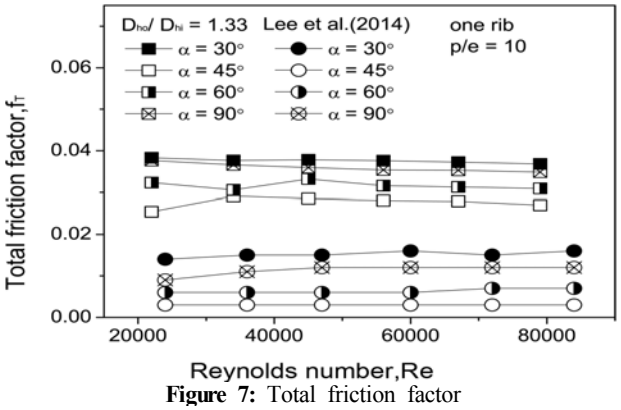


Figure 7: Total friction factor

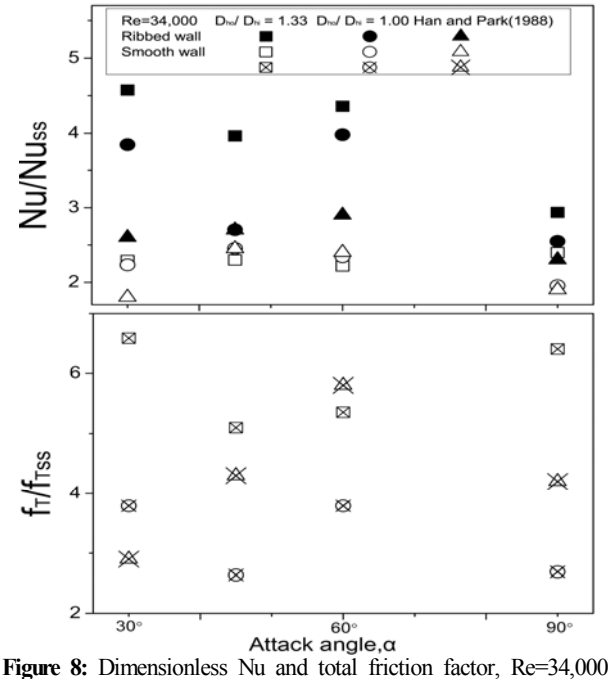


Figure 8: Dimensionless Nu and total friction factor, Re=34,000

마찰계수는 90°채널에서 직선채널과 D_{ho}/D_{hi}= 1.33인 채널 간에 가장 큰 차이를 보였다.

이는 유체유동의 저항은 리브 충돌각이 클수록 채널 입출구 수력직경비의 영향을 많이 받는다는 것을 입증한다.

Figure 9은 열 시스템의 열전달 성능 값을 나타내며 1보다 큰 경우 유익한 설계를 의미한다. 2벽면 확대채널에 관한 Lee *et al.***[6]**의 연구에서는 60°가 가장 유익한 채널을 나타낸 반면 4벽면 모두 확대된 채널에 대해 취급한 본 연구에서는 충돌각이 45°인 리브가 설치된 채널에서 가장 유익하였다.

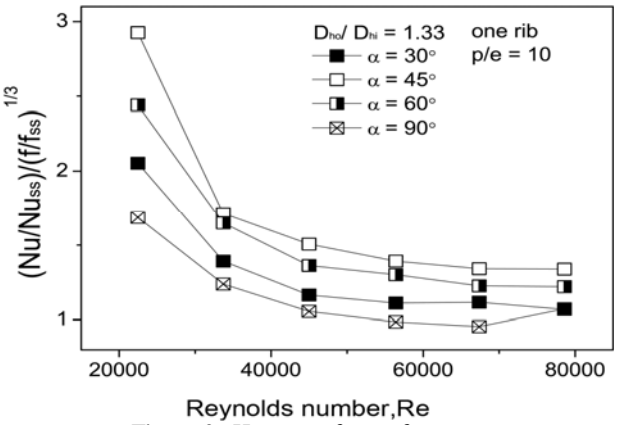


Figure 9: Heat transfer performance

4. 결 론

완전히 발달된 유동영역에서 4면이 확대되는 채널에서 한 벽면에 리브 충돌각이 30°, 45°, 60° 그리고 90°인 경우 열전달과 전마찰계수를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 90° 리브 충돌각의 채널에서 국부 열전달 계수가 유동방향 거리에 따라 가장 크게 변하였고, 리브 충돌각이 작을수록 작게 나타났다.

2) 90°리브 충돌각의 채널에서 리브가 부착된 면과 매끈한 면의 누셀트 수 차이가 가장 작았고 30° 채널에서 가장 크게 나타났다.

3) 45°리브 충돌각의 채널에서 열전달 성능이 가장 우수하였다.

후 기

이 논문은 2012-2014년도 미래 창조 과학부의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업입니다(과제번호 : 2012001401).

References

[1] S. W. Ahn, H. K. Kang, S. T. Bae, and D. H. Lee, “Heat transfer and friction factor in a square channel with one, two, or four inclined ribbed walls,” ASME Journal of Turbomachinery, vol. 130, no. 3, pp. 034501-5, 2008.

[2] J. C. Han, S. Ou, J. S. Park, and C. Lei, “Augmented heat transfer in rectangular channels of narrow aspect

ratios with rib turbulators," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 32, no. 9, pp. 1619-1630, 1989.

[3] K. Hermanson, S. Parneix, J. Wolfersdorf and K. Semmler, "Prediction of pressure loss and heat transfer in internal cooling passages," Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 934, no. 1, pp. 448-455, 2001.

[4] L. Wang, W. Tao, Q. Wang, and T. T. Wong, "Experimental study of developing turbulent flow and heat transfer in ribbed convergent/divergent square ducts," International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 22, no. 6, pp. 603-613, 2001.

[5] M. S. Lee, S. S. Jeong, S. W. Ahn, and J. C. Han, "Heat transfer and friction in rectangular convergent and divergent channels with ribs," AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 27, no. 4, pp. 660-667, 2013.

[6] M. S. Lee, S. S. Jeong, S. W. Ahn, and J. C. Han, "Effects of angled ribs on turbulent heat transfer and friction factors in a rectangular divergent channel," International Journal of Thermal Sciences, vol. 84, pp. 1-8, 2014.

[7] S. J. Kline and F. A. McClintock, "Describing uncertainty in single sample experiments," Mechanical Engineering, vol. 75, pp. 3-8, 1953.

[8] J. C. Han and J. S. Park, "Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 31, no. 1, pp. 183-195, 1988.