한국동력기계공학회지 제19권 제5호 pp. 32-37 2015년 10월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2015.19.5.032
Vol. 19, No. 5, pp. 32-37, October 2015

한 벽면에 V형 리브가 있는 2면 확대 사각채널의 열전달
Heat Transfer in a Two Wall Divergent Rectangular Channel with V-Shaped Ribs on One Wall

이명성* · 안수환**†
Myung-Sung Lee* and Soo-Whan Ahn**†

(Received 16 June 2015, Revision received 10 August 2015, Accepted 17 August 2015)

Abstract : The present study is to investigates the convective heat transfer characteristics and pressure drop inside the rib-roughened cooling passage of gas turbine blades. The divergent rectangular channel is fabricated with V-shaped ribs on one wall only and the inlet hydraulic diameter to outlet hydraulic diameter ratio(D_{ho}/D_{hi}) of 1.49 is used. The current investigation has covered a Reynolds number (Re) range of 22,000~75,000, relative roughness height (e/D_h) of 0.1~0.2, and rib angle of attack (a) of 30°, 45°, and 60° for a fixed relative pitch of 10. Results show that the Nusselt numbers are the greatest in the 60°-angled ribs; however, the total friction factors are the highest in the 30°-angled ribs.

Key Words : Rib angle of attack, Heat transfer, Divergent channel, Total friction factor, V- Shaped rib

1. 서 론

사각 채널에서 벽면에 리브를 설치한 경우 열전달과 마찰계수 특성에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 대표적인 연구로 Han 등[1]은 직선 사각 채널에서 평행 경사 리브의 효과를 조사하였다. 그 결과 리브 충돌각 30°~45°일 때 최대 열전달 향상 효과를 보였다. Ahn 등[2]은 4벽면을 독립적으로 가열하고 90º 유동 충돌각의 리브가 설치된 정사각 직선채널에서 리브 벽면의 수와 가열 벽면의 수가 열전달과 압력강하에 미치는 영향을 조사하였다. Momin 등[3]은 직선 채널에서 30º, 45º, 60º 그리고 90º ∨형 리브의 열전달을 비교한 결과 60º ∨형 리브 채널이 가장 높은 누셀트수를 나타내었다. Han 등[4]은 직선 채널에서 ∧형 리브와 ∨형 리브의 형상 변화와 각도변화를 조사한 결과 ∧와 ∨형 리브가 평행경사형 리브보다 열전달 성능이 우수함을 보였다. 터빈 블레이드 냉각 통로와 같은 수축과 확대 채널에서 벽면의 리브가 열전달에 미치는 연구로 Wang 등[5]은 사각 채널에서 채널의 4면 수축 및 확대 효과를 조사한 결과 수축과 확대에 의한 채널 단면적의 변화가 열전달과 마찰 계수에 큰 영향을 준다는 것을 입증하였다. Lee 등[6]은 입출구 수력 직경비가 1.16이고 충돌 각이 30º, 45º, 60º 그리고 90º인 평행 리브가 있는 확대 채널에 대해 열전달 성능을 실험적으로 조사한 결과 직선 채널의 Han 등[1]의 결과와 다르게 60º에서 가장 높은 누셀트 수가 나타났다. 그러나 수축과 확대 채널에서 ∨형 리브가 마찰 계수와 열전달에

**† 안수환(교신저자) : 경상대학교 해양산업연구소 기계시스템공학과 E-mail : ahn9294@gnu.ac.kr,
Tel : 055-772-9105
* 이명성 : 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

**† Soo-Whan Ahn(corresponding author) : Dpt of Mechanical & System Engineering. E-mail : ahn9294@gnu.ac.kr,
Tel : +82-55-772-9105
* Myung-Sung Lee: Dpt of Mechanical & System Engineering, Gyeongsang National University.

미치는 효과의 연구는 보고되고 있지 않고 있는 실정이다.

그러므로 본 연구는 2 벽면 확대 사각 채널에서 ∨형 리브의 각도 변화가 열전달에 미치는 효과를 실험적으로 조사하여 최적의 리브 충동 각을 구하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치 개략도이다. 전체 채널 길이는 4,000 mm이고 시험부는 1,000 mm로 하였다. 시험부 입구와 출구의 단면적은 각각 50 mm x 100 mm와 100 mm x 100 mm이고, 수력 직경의 확대 비(D_{hi}/D_{ho})는 1.49이며, 벽면 경사각은 1.43°로 제작하였다. 자세한 실험 장치에 관한 설명은 Kim 등[7]의 연구에 포함되어 있다. 작동 유체로는 실내공기를 사용하였고 공기는 시험부 출구 측에 설치된 송풍기에 의해 시험 부로 유입되었다. 시험 부의 공기 유량은 시험 부 뒤에 설치된 원형 튜브에서 피토 관을 사용하여 원관 중심에서 벽면까지 국부 유속을 측정한 후 심프슨 법칙으로 원관의 체적평균 유속을 구하고 연속 법칙으로 사각채널 시험부의 체적 평균 유속을 얻었다. 시험부에는 실리콘 포일 히터를 상하 벽면에 설치하고 좌우 양면에는 단열이 되도록 하였다. 리브는 한 면에만 설치하고 리브가 설치된 벽은 10 mm × 100 mm × 10 mm(t)의 ∨형 리브를 연속적으로 배치되었다. Fig. 2와 같이 유동충돌각 α값은 30°, 45° 그리고 60°이다. 리브의 피치(p)/높이(e)의 비는 10으로, 리브의 높이와 채널 국부 수력직경 비(e/D_{hx})는 0.1에서 0.2이다. 시험 부 상하 벽면은 열전도성이 높은 구리판을 여러 영역으로 나누는 구리판 법(copper plate method)을 이용하여 10개의 영역으로 구분하여 매 영역마다 1개의 구리판을 설치하고, 영역 사이에는 열전도를 방지하기 위해 0.5 mm 두께의 고무 가스켓을 설치하였다. 시험부의 입구와 출구 측은 외부의 영향을 고려해 75 mm 간격으로 그 외 구리판은 50 mm 간격으로 T형 구리-콘스탄탄 열전대를 2개씩 설치하여 벽면 온도를 구했다. 히터에서 공급되는 열전달 율(Q-Q_l)은 아래의 대류 열전달에 의해 점검하였다.

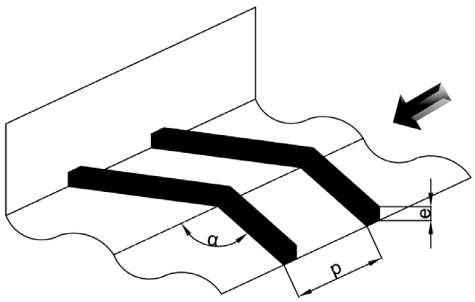
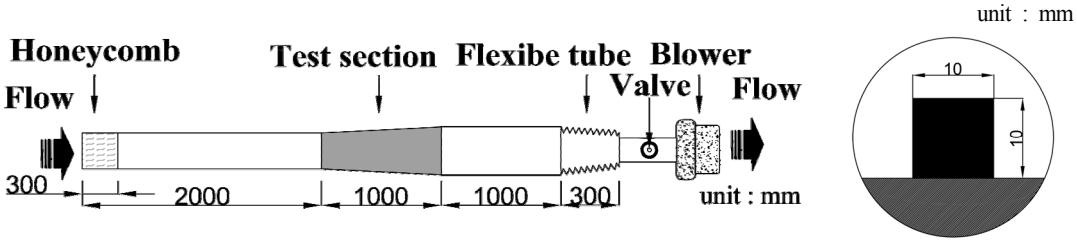


Fig. 2 Ribbed side wall

$$Q - Q_l = \dot{m} c_p (T_{bo} - T_{bi}) \quad (1)$$

여기서 $\dot{m}$은 공기 질량, T_{bo}와 T_{bi}는 시험부 출구와 입구의 체적 평균 온도이다.



(a) Schematic diagram of experimental apparatus (b) Rib

Fig. 1 Experimental setup

채널의 레이놀즈 수의 정의는 아래와 같다.

$$Re = \frac{u_{bm} D_h}{\nu} \tag{2}$$

여기서 u_{bm}는 채널 입구와 출구 위치의 체적 평균 유속이다. 모든 운전에서 레이놀즈 수는 질량 유량을 구하여 결정하였다. 국부 열전달 계수(h)는 아래와 같이 정의하였다.

$$h = [(Q - Q_l)/A(T_{wx} - T_{bx})] \tag{3}$$

그리고 국부체적 평균 온도(T_{bx})는 입구와 출구의 온도로부터 보간법으로 구했다. 채널 평균 누셀트 수(Nu)은 아래와 같이 정의하였다.

$$Nu = \frac{h D_h}{k_{air}} \tag{4}$$

k_{air}은 공기의 열전도 도이다. 확대되는 채널에서는 시험 부 입구와 출구에서 수력 직경을 평균하여 평균수력 직경을 구하였다.

$$D_h = \frac{D_{ho} + D_{hi}}{2} \tag{5}$$

채널 유동의 전(total) 마찰 계수는 채널 확대에 의한 동압 성분의 변화 효과를 고려한 전압력 강하($\triangle P_T$)의 식(6)을 이용하여 식(7)과 같이 구했다.

$$\triangle P_T = P_i - P_o + \frac{1}{2}\rho u_{bi}^2 - \frac{1}{2}\rho u_{bo}^2 \tag{6}$$

$$f_T = \frac{D_h}{2\rho u_b^2}\left|\frac{\triangle P_T}{\triangle L}\right| \tag{7}$$

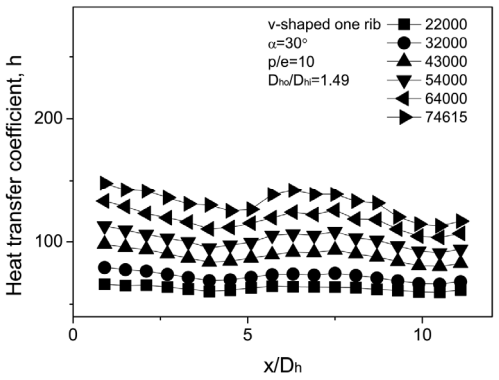
여기서 P_i와 P_o는 각각 시험 부 입구와 출구의 정압 강하이다.

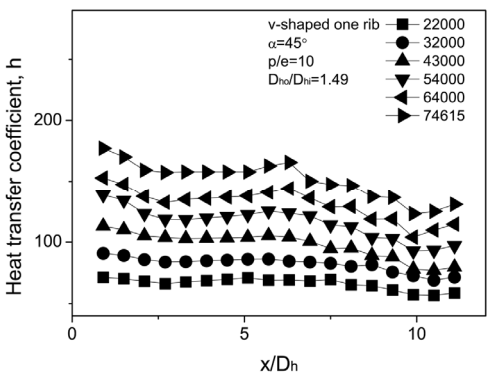
3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 ∨형 리브 각도에 따른 길이 방향 국부열전달 계수를 나타낸다. 모든 경우에서 x/D_h=6.1에서 6.8 사이에서 증가하였다가 감소한다. 이는 Fig. 4와 같이 리브 경사에 따른 이차 유동이 발생하는데 리브가 설치된 면을 바닥면으로 봤을 때 ∨형 리브의 경우 리브의 경사에 따라 이동한 유체가 벽면을 따라 이동한 후 채널 중심부에서 바닥 면으로 향하는 하향류가 발생하게 된다. 이러한 하향류가 형성되는 영역에서는 바닥면으로 향하는 유동의 스월(swirl) 효과로 인하여 채널 중심부의 상대적 차가운 공기를 바닥면으로 하향 유동하기 때문에 열전달을 촉진시킨다. 이러한 이유로는 스월 유동 때문이다[8]. 모든 경우 입구와 출구에서 국부 대류 열전달계수가 상승하였다. 이는 입구의 경우 낮은 공기 유입으로 인하여 벽면 온도가 낮아지고 출구에서는 열전도 손실로 인하여 벽면온도가 낮아지기 때문이라 사료된다. Fig. 5는 채널 내에서 리브가 설치된 벽면과 매끈한 벽면에 대한 채널 평균 누셀트 수를 각각 나타낸다. 리브가 설치된 벽면에서 누셀트 수가 훨씬 컸다. 이는 리브가 설치된 경우 리브에 의한 난류 유동의 증가로 벽면 온도가 낮아지기 때문으로 사료된다. Fig. 6은 레이놀즈 수에 따른 Nu/Nu_{ss}의 분포를 나타낸다. 매끈한 직선 원형 관 채널의 누셀트 수(Nu_{ss})는 아래의 Dittus-Boelter식[9]을 이용하였다.

$$Nu_{ss} = 0.023 Re^{0.8} \mathrm{Pr}^{0.4} \tag{8}$$

비교를 위해 직선 채널에서 양측 벽면에 ∨와 ∧형 리브가 설치된 Han 등[4]의 결과를 포함하였다. 본 연구의 결과보다 대체로 무차원 누셀트 수가 작았다. 이는 길이방향 거리에 따라 단면적이 일정한 직선 채널보다 본 연구와 같은 확대 채널이고 리브 높이가 큰 구조가 반경 방향 난류유동 성분이 크기 때문이라 사료된다.





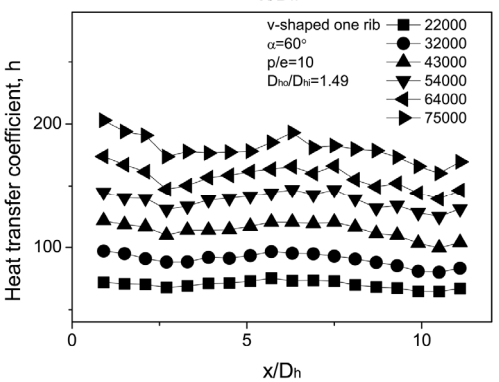


Fig. 3 Spanwise heat transfer coefficient

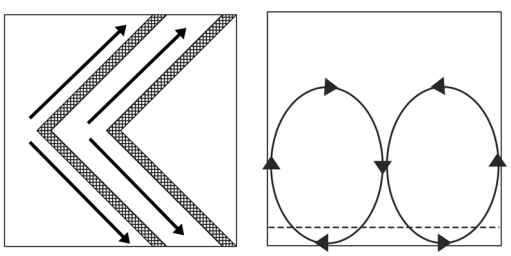
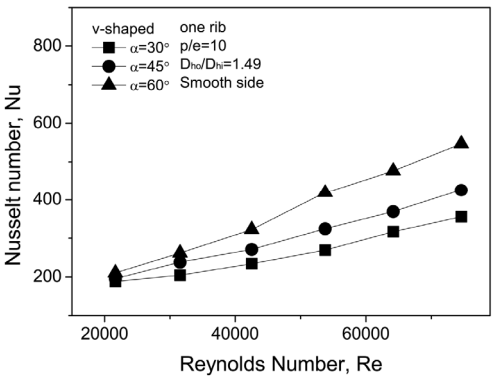
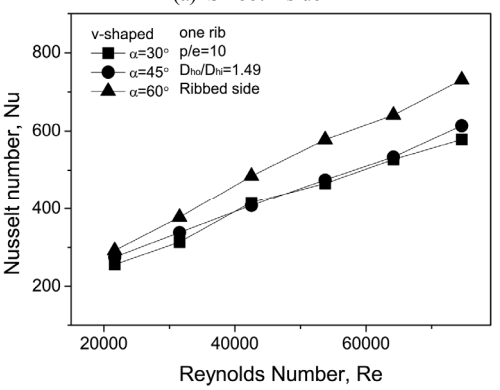


Fig. 4 Schematic view of secondary flow



(a) Smooth side



(b) Ribbed side

Fig. 5 Nusselt number

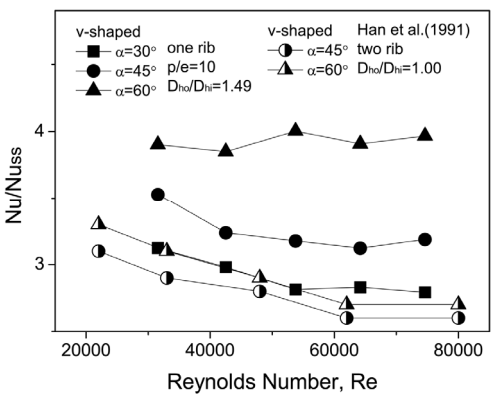


Fig. 6 Dimensionless Nusselt numbers

경사각 60°에서 가장 무차원 누셀트 수가 크고 30°에서 가장 작은 값을 나타냈다. 이는 60° 경사에서는 리브 뒤에서 발생하는 재순환 유동과 리브 경사에 의한 스월 유동의 복합 유동이

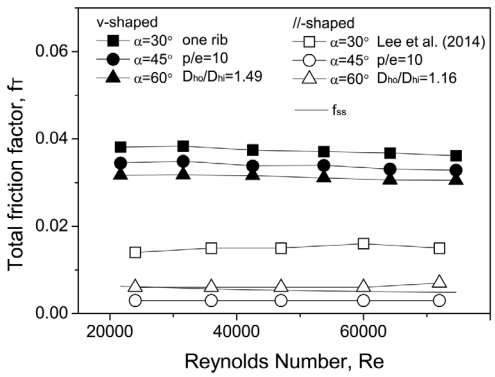


Fig. 7 Total friction factor.

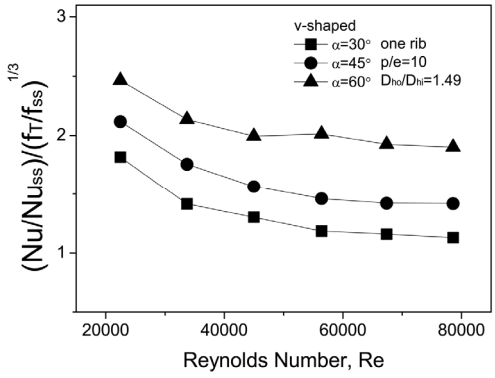


Fig. 8 Heat transfer performance

발생하기 때문으로 사료된다. Fig. 7은 채널이 확대됨에 따라 발생하는 동압 성분 변화 효과를 고려한 식(7)로부터 구한 전 마찰 계수(total friction factor)의 결과이다. 수축과 확대 채널에서 평행 경사 리브의 효과에 관한 Lee 등[6]의 값을 포함하였다. 본 연구는 Lee 등[6]의 결과보다 훨씬 컸다. 이는 1) ∨형 리브 구조가 평행 경사 리브보다 주 유동을 방해하는 유동 저항이 커고 2) 시험부 입출구 수력 직경의 확대 율이 커서 재순환 유동이 발생하기 때문이라 사료된다. 예상과는 달리 30°가 가장 큰 전 마찰 계수를 보였다. 이는 전 마찰계수는 정압과 동압이 포함된 식(6)을 이용한 (7)에 의해 계산되기 때문이다. Fig. 8는 열전달 성능 곡선을 나타낸다. 60°리브가 가장 유리하였고 30°리브가 가장 불리하였다. 그러나 모든 경우 1보다 크기 때문에 본 연구의 어떠한 경우도 모두 유익한 설계가 되었다.

4. 결 론

양면이 확대되는 채널에서 ∨형 리브의 각도 변화가 열전달과 전 마찰 계수(total friction factor)의 효과를 실험적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1) 국부 열전달 계수는 x/D_h=6.1에서 6.8 사이에서 증가하였다가 감소하였고 입구와 출구에서 증가하였다.

2) 채널평균 누셀트 수는 60° 리브 채널에서 전 마찰계수는 30° 리브 채널에서 크게 나타났다.

3) 60° 리브 채널이 가장 좋은 열전달 성능을 보였다.

References

1. J. C. Han, S. Ou, J. Park and C. Lei, 1989, “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.
2. S. W. Ahn, H. K. Kang, S. T. Bae and D. H. Lee, 2008, “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.
3. A. E. Momin, J. Saini and S. Solanki, 2002, “Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, No. 16, pp. 3383-3396.
4. J. C. Han, Y. Zhang and C. Lee, 1991, “Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs”, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 590-596.
5. L. Wang, W. Tao, Q. Wang and T. T. Wong, 2001, “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.
6. M. S. Lee, S. S. Jeong, S. W. Ahn and J. C. Han, 2014, "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.
7. W. C. Kim, M. S. Lee, S. T. Bae and S. W. Ahn, 2014, "Heat transfer and friction in rectangular convergent channels with ribs on one wall, Journal of the Korean Society for Power System Engineering", Vol. 18, No. 2, pp. 12-18.
8. X. Gao and B. Sunden, 2001, Heat transfer distribution in rectangular ducts with V-shaped ribs, Heat and Mass Transfer, Vol. 37, pp. 315-320.
9. F. W. Dittus and L. M. Boelter, 1930 "University of California (Berkeley) Publications in Engineering 2. Berkeley, pp. 443-461.