

양 벽면에 V/∧형 리브가 있는 수축 채널의 열전달과 전 마찰계수 Heat Transfer and Total Friction Factors in the Convergent Channels with V/∧-shaped Ribs on Two Opposite Walls

이명성* · 허민성** · 정의재** · 박영준** · 유정현** · 임건우** · 안수환***†
Myung-Sung Lee*, Meo-Seong Heo**, Ui-Jae Jeong**, Young-Joon Park**,
Jung-Hyun Yoo**, Gun-Woo Im** and Soo-Whan Ahn***†

(Received 18 July 2016, Revision received 27 September 2016, Accepted 27 September 2016)

Abstract: The measurements of heat transfer and total friction factors for turbulent flows in the convergent rectangular channels with two opposite in-line ribbed walls are reported. The study has covered three different angled ribs (30°, 45° and 60°) and Reynolds number in the range of 22,000 to 75,000. The channel, composing of ten isolated copper sections in the length of test section of 1 m, has the channel convergence ratio of $D_{ho}/D_{in}=0.67$. The results show that the ribs pointing downstream (∧-shaped) is somewhat greater than the ribs pointing upstream (V-shaped) in the dimensionless Nusselt number and total friction factors.

Key Words : V/∧-shaped ribs, Rib angle of attack, Heat transfer, Convergent channel, Total friction factor

1. 서 론

가스터빈 기관의 열효율을 향상시키기 위해 열역학적으로 압축기의 압력 비와 터빈 입구의 연소가스 온도를 상승시켜야 한다. 그러나 이러한 상승은 열 부하를 가중시켜 기관의 수명을 단축시킨다. 최근의 가스터빈 입구 온도는 1,400~1,500°C 이상이기 때문에 고온 연소가스로부터 블레이드와 베인을 보호하기 위해 가스터빈 냉각장치 개발에 관한 연구가 지속적으로 행해지고 있

다.¹⁾ 그 대표적인 방법은 블레이드 통로 내부관을 대류 냉각시키는 방법이다. 내부 유로의 냉각성을 향상시키기 위해 리브(rib)를 설치하는 방법이 주로 사용되고 있다. Ahn 등²⁾은 정사각형 채널에서 45° 유동 충돌각이 있는 평행 연속 리브(parallel continuous rib)를 한 벽면, 두 벽면, 그리고 네 벽면 모두에 각각 설치한 채널에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 그 결과 한 벽면에만 리브를 설치한 경우가 가장 우수한 열전달 성능을 발생한다는 것을 보고하였다. Han과 Zhang³⁾은 사각

*** 안수환(교신저자), 허민성, 정의재, 박영준, 유정현, 임건우 : 경상대학교 해양산업 연구소 기계시스템공학과
E-mail : asw9294@naver.com, Tel : 055-772-9105
*이명성 : 경남지역사업평가단, 연구원

*** Soo-Whan Ahn(corresponding author), Meo-Seong Heo, Ui-Jae Jeong, Young-Joon Park, Jung-Hyun Yoo, Gun-Woo Im : Dpt of Mechanical & System Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University.
E-mail : asw9294@naver.com, Tel : 055-772-9105
*Myung-Sung Lee : Gyeongnam Institute for Regional Program Evaluation.

채널에서 마주보는 양 벽면에 12가지의 다양한 리브를 설치하고 열전달과 마찰계수에 관한 실험을 수행하였다. 이 연구로부터 60°평행 단절 리브(parallel broken rib)와 V형 단절 리브가 45°평행 단절 리브(parallel broken rib)와 V형 단절 리브보다 열전달 증가가 컸다. 그리고 단절 리브가 연속 리브보다 또한 열전달 증가가 컸다.

그러나 위의 연구들은 유동방향 길이에 따라 채널의 단면적이 일정한 직선채널이기 때문에 다소간 확대와 수축형인 가스터빈 블레이드 내부 유로에 관한 연구로는 적절하지 못하다고 사료된다. 수축과 확대채널의 연구들은 다음과 같다. 리브가 한 벽면에만 설치된 수축과 확대 채널에서 채널입출구 수력직경비에 따른 열전달과 전 마찰계수의 연구는 Lee 등⁴⁾에 의해 수행되었다. 그 결과, $D_{ho}/D_{hi} = 1.18$ 인 확대채널이 가장 우수한 열성능을 보였다.

확대채널에서 연속평행 리브가 유동충돌각에 대한 열전달과 마찰계수의 영향은 Lee 등⁵⁾에 의해 연구되었다. 그 결과, 양면에 리브가 있는 채널이 한 면에 리브가 있는 채널보다 열성능이 우수하였다. 한 벽면에 V형 리브가 설치된 사각 확대채널에서 유동 충돌각에 관한 연구는 이와 안⁶⁾에 의해 수행되었다. 그리고 리브가 한 벽면과 마주보는 양 벽면에 각각 설치된 채널에서 채널 입출구 수력 직경비(D_{ho}/D_{hi})에 대한 전 마찰계수와 열전달 특성을 Lee와 Ahn⁷⁾에 의해 수행되었다.

Lee와 Ahn⁷⁾은 마주보는 양면에 리브를 설치한 $D_{ho}/D_{hi} = 1.33$ 인 확대 채널의 누셀트 수의 값은 다른 채널에 비해 비슷하나 마찰계수의 값들이 작기 때문에 가장 우수한 열성능을 보였다.

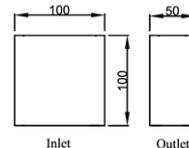
이에 본 연구의 목적은 V형과 \wedge 형 리브를 마주보는 사각채널의 양면에 설치하고 리브의 유동충돌각이 30°, 45°, 그리고 60°인 사각수축 채널의 열전달과 전 마찰 계수를 실험적으로 조사하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

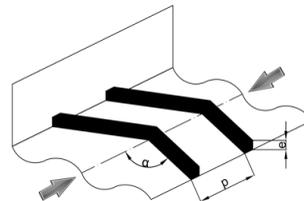
본 연구에서 사용된 실험장치의 언급은 참고문

헌^{4,7)}에 기술되었다. 작동 유체는 공기를 사용하였다. 공기는 시험부 뒷부분에 설치된 송풍기에 의해 허니콤(300 mm 길이), 입구길이(2,000mm), 시험부 (1,000 mm), 그리고 출구 길이(1,300 mm)를 거쳐 외부로 배출된다. 시험부 입구의 단면적은 Fig. 1과 같이 100×100 mm²이고, 출구는 50×100 mm²이며 입출구 수력직경 비(D_{ho}/D_{hi})는 0.67이다. 네 벽면 중 Fig. 1의 좌우 측의 리브가 설치된 두 벽면만 수축 경사이고 상하 측의 매끈한 두 면은 직선이 되도록 하였다. V형과 \wedge 형 리브를 마주보는 벽면에 각각 일열(in-line)로 설치하였다. 리브의 유동 충돌각(α)은 30°, 45°, 그리고 60°로 하였다. 리브의 높이는 10 mm이고 폭은 5 mm이며 리브의 간격과 높이의 비(p/e)는 10이다.

구리판의 가열 벽면은 2 mm 두께의 100×100 mm²의 구리판을 양벽면에 10개씩 분리시켰으며 0.2 mm의 고무 가스켓으로 구리판의 접촉을 막아 축방향의 열전도를 최소화하였다. 0.1 mm 두께의 실리콘형 히터(etched foil 형)를 사용하여 가열벽면이 일정 열유속이 되도록 하였고, 다른 두 벽면은 단열이 되도록 하였다. 각 구리판에는 T형 열전대를 연결시켰으며, 각 열전대는 구리판에 0.4 mm 직경의 구멍에 심고 고열전도 에폭시로 고정시켰다. 이 열전대는 자료획득 장치(Yokogawa DA 100와 DAQ32 plus data acquisition software)에 연



(a) Geometry of convergent channel (unit: mm)



(b) V/ \wedge -shaped rib

Fig. 1 Test section

결되었다. 가열 시험부는 50 mm 두께의 송판을 외부에 설치하여 단열시키고 시험부 전체는 유리 섬유로 단단히 포장하였다. 시험 전 열전대는 보정하였고 그 정밀도는 0.2 °C 이내이었다. 정압은 19.99 mm H₂O의 압력에서 0.01 mmH₂O의 정밀도를 갖는 디지털 마노미터로 측정하였다. 정압 측정용 압력탭은 매끈한 벽면에 12개의 등 간격으로 2 mm 직경 구멍을 중심선에 설치하였다. 레이놀즈 수는 22,000에서 75,000의 범위이다. 레이놀즈 수의 정의는 아래와 같이 채널 길이 평균 수력 직경(D_h)과 평균 유속(u_b)을 기준으로 계산하였다.

$$Re = \frac{u_b D_h}{\nu} \quad (1)$$

국부 열전달 계수 h 는 단위 가열 투영 표면적 (A)으로부터 냉각 공기의 국부 순수 열전달율 ($Q-Q_{loss}$)에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$h = \frac{(Q - Q_{loss})}{A(T_{w,x} - T_{b,x})} \quad (2)$$

채널 길이 평균 누셀트 수(Nu)는 다음과 같다.

$$Nu = \frac{(\bar{h} D_h)}{k} \quad (3)$$

여기서 \bar{h} 는 채널 길이 평균 열전달 계수이다. 수축채널의 전 마찰계수(f_T)는 식 (4)에 의해 정의된다.

$$f_T = \frac{D_h}{2\rho u_b^2} |\Delta Pe/L| \quad (4)$$

여기서 전 압력차 (total pressure drop) ΔPe 는 $P_i - P_o + 1/2\rho u_{bi}^2 - 1/2\rho u_{bo}^2$ 이고, L 은 시험부 길이이며, 정압은 $P_i - P_o$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 양 벽면에 리브가 설치된 수축 채널에

서 국부 대류 열전달 계수를 나타낸다. 대류 열전달 계수의 계산은 식 (2)에 의해 계산되었다. 순수 열전달율($Q-Q_{loss}$)은 이와 안⁶⁾과 같이 구하였다. 유동 충돌각(α)이 30°, 45° 그리고 60° 모두에서 V형 리브는 유체의 주 유동을 가장자리로 이동시키는 반면에, Λ형 리브는 유체의 주 유동을 채널 중심부로 이동시킨다.⁶⁾ 가열 벽면은 Λ형 리브가 설치된 마주보는 양 벽면만 가열하고 다른 두 면은 단열된 매끈한 벽면으로 제작되었다. 이러한 벽면 구조가 V형 리브보다 Λ형 리브가 열전달 계수를 더 크게 증가시킨다고 판단된다. V형 리브와는 달리 Λ형 리브는 $x/D_h=6$ 근처에서는 국부 열전달 계수가 증가하였다가 감소하였다. 이는 Λ형 리브가 설치된 반대측 벽면으로부터의 이차 유동 때문이라 사료된다.

모든 경우 출구 근처에서는 국부 열전달 계수가 증가하였다. 이는 출구측의 가열 벽면은 외부와 접촉되어 상대적으로 온도가 높은 가열 벽면의 열량이 다소간 외부로의 열전달이 발생할 것으로 사료된다. 이러한 이유로 출구측의 가열 벽면의 온도는 낮아지기 때문이라 판단된다.

모든 경우 입구 근처에서 높은 국부 열전달 계수를 보였다가 대체로 감소하였다. 이는 입구측에 가까울수록 열 경계층이 얇아져서 유체 체적 평균 온도와 벽면 온도 간의 온도 차가 작아지기 때문이다. 레이놀즈 수가 클수록 국부 열전달 계수가 증가하였다. 이는 유체 유속이 클수록 난류 혼합이 증가하여 가열 벽면의 온도가 낮아지기 때문이라 사료된다.

Fig. 3은 레이놀즈 수에 따른 Nu/Nu_{ss} 의 국소 분포를 나타낸다. Fig. 2의 국부 열전달 계수를 채널길이 평균한 값을 식 (3)으로부터 구하였다.

매끈한 직선 원형 관 채널의 누셀트 수 (Nu_{ss})에 대한 상관 관계식은 아래의 Dittus-Boelter⁸⁾식을 이용하였다.

$$Nu_{ss} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

모든 유동 충돌각(α)에서 Λ형 리브가 V형 리브보다 컸다. 이는 Fig. 2의 결과에 기인한다. V형

리브에서는 모든 유동 충돌각(α)의 무차원 누셀트 수는 서로 비슷하였지만, \wedge 형 리브에서는 45° 가 30° 와 60° 유동 충돌각의 경우보다 컸다. 이는 V형의 경우 주 유동이 모두 가열벽면 가장자리로 이동하기 때문에 모두 비슷한 무차원 누셀트수를 보였으나, \wedge 형 리브의 경우 주 유동이 가열 벽면의 중심부로 이동하기 때문에 리브에 의한 재순환 유동과 리브 경사에 의한 스월(swirl)유동의 복합적 요인 때문으로 45° 유동 충돌각에서 무차원 누셀트 수가 크게 나타났다고 사료된다.

레이놀즈 수가 작을 수록 무차원 누셀트 수가 큰 값을 나타내는데, 이는 유속이 증가 함에 따라 매끈한 원형관의 누셀트 수의 증가폭이 더 크게 나타났기 때문이다. 비교를 위하여 양 벽면에 유동 충돌각이 45° 와 60° 인 리브를 직선 사각채널 중에서 양 벽면에 설치한 Han과 Zhang⁹⁾의 결과를 포함하였다. 본 연구의 결과보다 Han과 Zhang⁹⁾의 결과가 작은 무차원 누셀트 수를 보였다. 이에 대한 주된 원인은 Han과 Zhang⁹⁾의 경우 리브의 크기 (e/D_h)가 0.0625로 본 연구보다 작고 직선 채널

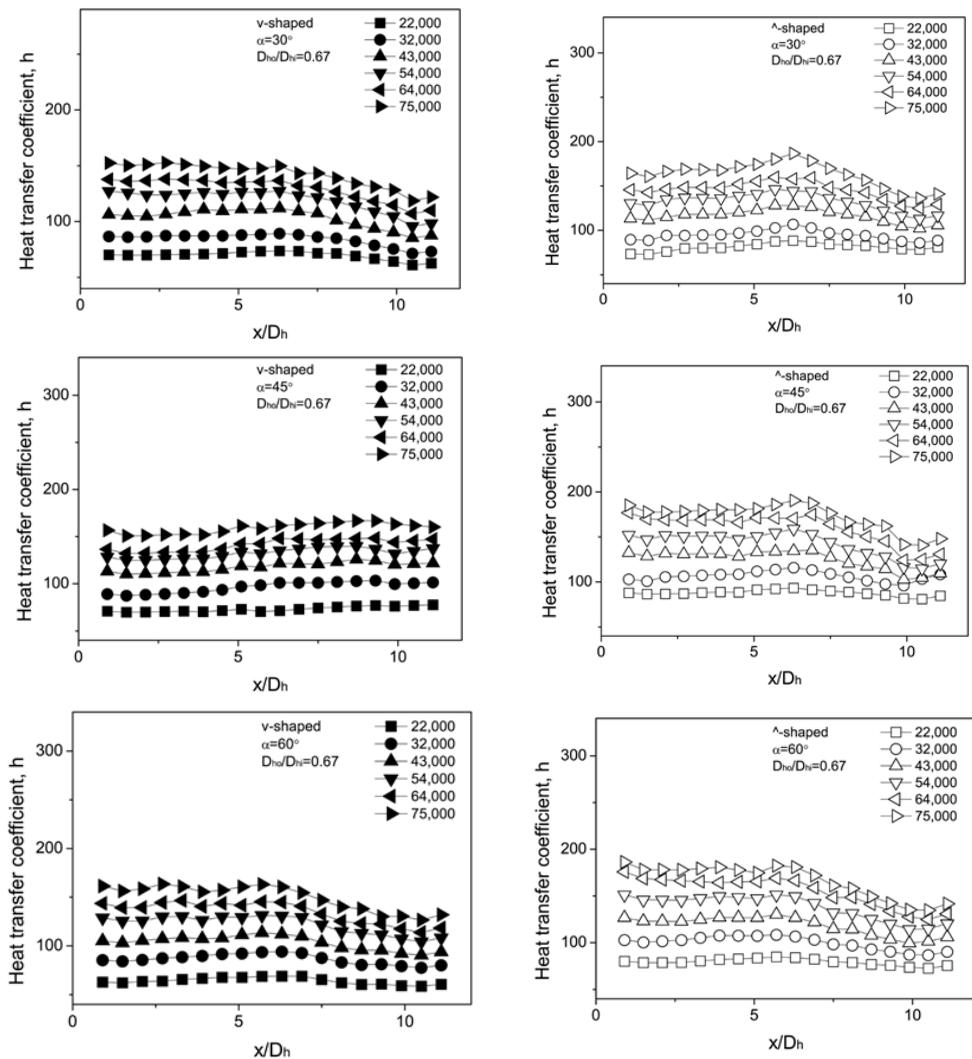


Fig. 2 Local convective heat transfer coefficient

이기 때문에 동압이 발생하지 않기 때문이라 사료된다.

Fig. 4는 식 (4)에 의한 정압과 동압을 고려한 전 마찰 계수를 나타낸다. 대체로 V형 리브보다 Λ

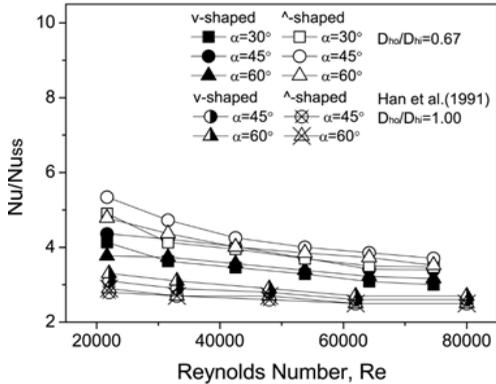


Fig. 3 Normalized channel average Nusselt number

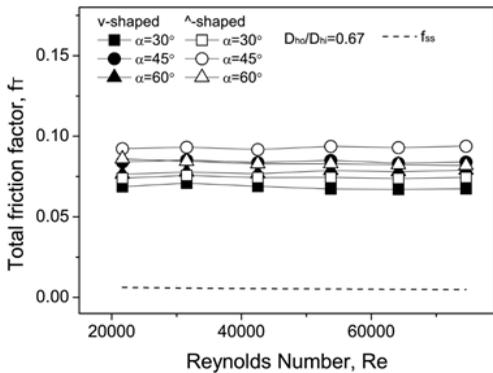


Fig. 4 Total friction factor

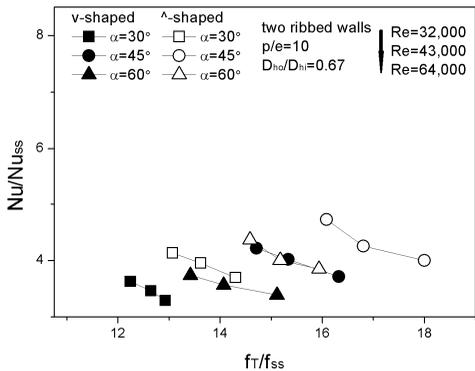


Fig. 5 Heat transfer performance

형 리브가 큰 전 마찰 계수를 보였다. 이는 열전달과 마찰 계수는 서로 비례한다는 레이놀즈 상사성에 의한다고 볼 수 있다. 일반적인 상식과는 다르게 V형과 Λ형 리브 모두 60° 충돌각보다 45° 유동 충돌각에서 전 마찰 계수가 가장 컸다. 이는 리브에 의한 재순환 유동 저항과 경사 리브에 의한 스윙유동 저항의 복합적 요소에 의해 주 유동을 방해하기 때문이라 사료된다. V형과 Λ형 리브 모두 30° 유동 충돌각에서 전 마찰계수가 가장 작았다. 이는 경사각이 작은 경우 리브 경사각이 주 유동방향과 비슷한 방향에 놓이기 때문에 리브 돌출에 의한 재순환 유동보다 스윙 유동이 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 비교를 위해 매끈한 직선 원형관의 마찰 계수는 Blasius¹⁰⁾가 제안한 식 (6)을 이용하여 구하였다.

$$f_{ss} = 0.046Re^{-0.2} \quad (6)$$

본 연구의 리브가 설치된 수축 채널은 매끈한 직선관보다 훨씬 큰 마찰 계수를 보였다. 이는 채널의 수축과 벽면 리브에 의한 유동 저항 때문이라 사료된다.

Fig. 5는 Λ 혹은 V형 리브가 양 벽면에 설치된 수축채널에서 레이놀즈 수에 대한 열전달 성능을 보여준다. 레이놀즈 수가 클수록 무차원 채널 길이 평균 누셀트 수(Nu/Nu_{ss})는 작아지고 무차원 전 마찰계수(fr/fr_{ss})는 증가한다.

45°유동 충돌각의 경우 Λ형 리브에서는 무차원 누셀트 수(Nu/Nu_{ss})가 4.0에서 4.8이고 V형 리브는 3.8에서 4.2이었다.

4. 결론

사각채널의 마주보는 양면이 수축할 때 양면에 설치된 Λ/V형 리브의 각도가 열전달과 전 마찰 계수에 미치는 효과를 실험적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) V형 리브보다 Λ형 리브가 열전달 계수 값이 더 크고 V형 리브와는 달리 Λ형 리브는 $x/D_h=6$ 근처에서는 국부 열전달계수가 증가하였다가 감소하였다.

2) V형 리브에서는 모든 유동 충돌각(α)의 무차원 누셀트 수는 서로 비슷하였지만 \wedge 형 리브에서는 45° 가 30° 와 60° 유동 충돌각의 경우보다 컸다.

3) V형과 \wedge 형 리브 모두 60° 유동 충돌각보다 45° 유동 충돌각에서 전 마찰계수가 컸다.

4) 45° 유동 충돌각의 경우 \wedge 형 리브에서는 무차원 누셀트 수(Nu/Nu_{ss})가 4.0에서 4.8이고 V형 리브는 3.8에서 4.2이었다.

References

1. J. C. Han, S. Dutta and S. V. Ekkad, 2000, "Gas turbine heat transfer and cooling technology". Tylor & Francis, Inc. New York, pp. 1-781.
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 J. of Turbomachinery, Vol. 130, No. 3, pp. 034501-5.
3. J. C. Han, P. Zhang, 1989, "Pressure loss distribution in three-pass rectangular channel with rib turbulators", ASME J. of Turbomachinery, Vol. 111, pp. 515-521.
4. M. S. Lee, S. S. Jeong, S. W. Ahn and J. C. Han, 2013, "Heat transfer and friction in rectangular convergent and divergent channels with ribs", AIAA J. of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 27, No. 4, pp. 660-667.
5. 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", Int. J. of Thermal Sciences, Vol. 84, pp. 1-8.
6. M. S. Lee and S. W. Ahn, 2015, "Heat transfer in a two wall divergent rectangular channel with V-shaped ribs on one wall", J. of Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, pp. 32-37 (in Korean).
7. M. S. Lee and S. W. Ahn, 2016, "Heat transfer and friction factors in the ribbed square convergent and divergent channels", Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 6, pp. 1109-1116.
8. F. W. Dittus and L. M. Boelter, 1930 "University of California (Berkeley) Publications in Engineering 2. Berkeley", pp. 443-461.
9. J. C. Han and P. Zhang, 1991, "Effect of rib-angled orientation on local mass transfer distribution in a three-pass rib-roughened channel", ASME J. of Turbomachinery Vol. 113, pp. 123-130.
10. F. P. Incorpera and D. P. Dewitt, 1996, "Fundamental of heat and mass transfer", 4th ed., John Willy and Sons, Inc., p. 424.