

한면에 리브가 설치된 4면 수축 사각채널에서 리브의 각도가 열전달에 미치는 영향

Effects of Rib Angles on Heat Transfer in a Square Convergent Channel with Ribs on One Wall

이명성* · 김범수** · 안수환***†

Myung-Sung Lee*, Beom-Soo Kim** and Soo-Whan Ahn***†

(Received 24 December 2015, Revision received 02 February 2016, Accepted 04 February 2016)

Abstract: The local heat transfer and pressure drops of developed turbulent flows in the convergent channels with square cross-sectional areas along the streamwise distance have been investigated experimentally. Four different parallel angled ribs ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, \text{ and } 90^\circ$) are placed to the one sided wall only, respectively. The ribbed walls are manufactured with a fixed rib height (e)=10 mm and the ratio of rib spacing (p) to height (e) = 10. The measurement was run within the range of Reynolds numbers from 22,000 to 79,000. The result shows that the increases in the Nusselt numbers for the flow attack angles can be seen in the order of $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ and 90° .

Key Words : Rib angle of attack, Heat transfer, Convergent channel, Total friction factor

1. 서 론

최근 가스터빈의 출력을 증대시키고 연료 소비를 감소시키기 위해 입구온도를 높이는 추세이다. 고성능 가스터빈의 경우 터빈 입구온도는 금속 허용한도를 상회하는 $1,700^\circ$ 이상으로 가스터빈에 사용되는 내열재의 허용 한계를 훨씬 상회하고 있다. 따라서 안정성을 유지하기 위해 효과적인 터빈 냉각기술의 연구가 필요하다. 또한 최대 부하조건에서 운전되는 가스터빈 요소의 벽면 온도를 10°K 낮추는 경우 그 수명이 2배까지 증가되는 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 사각채널에서 벽

면에 리브를 설치한 경우 열전달과 마찰계수 특성에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 대표적인 연구로 Han²⁾과 Lau 등³⁾이 유동방향으로 충돌각을 가진 구조가 수직 리브 구조보다 열전달 성능이 우수하였으며, 채널 종횡비가 높은 채널보다 낮은 채널의 경우가 열전달 성능이 우수함을 보였다. Han 등⁴⁾은 직선 사각 채널에서 리브 충돌각 $30^\circ \sim 45^\circ$ 일 때 최대 열전달 향상효과를 보였다. Ahn 등⁵⁾은 4벽면을 독립적으로 가열하고 90° 유동충돌각의 리브가 설치된 정사각 채널에서 리브 벽면의 수와 가열 벽면의 수가 열전달과 압력강하에 미치는 영향을 조사하였다. 수

*** 안수환(교신저자), 김범수 : 경상대학교 해양산업연구소 기계시스템공학과

E-mail : ahn9294@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9105

*이명성 : 경남지역사업평가단, 연구원

*** Soo-Whan Ahn (corresponding author), Beom-Soo Kim : Dpt of Mechanical & System Engineering, Gyeongsang National University.

E-mail : ahn9294@gnu.ac.kr, Tel : +82-55-772-9105

*Myung-Sung Lee : Gyeongnam Institute for Regional Program Evaluation.

축과 확대 채널에서 벽면의 리브가 열전달에 미치는 연구로 Wang 등⁶⁾은 사각채널에서 단면적의 비의 변화 즉, 채널의 수축 및 확대가 미치는 영향을 조사한 결과 채널 단면적의 변화가 채널 평균 열전달에 큰 영향을 준다는 것을 입증하였다. Lee 등⁷⁾은 수력직경비가 1.16이고 층돌각이 30°, 45°, 60° 그리고 90°인 확대 채널에 대해 열전달 성능을 실험적으로 조사한 결과 직선채널의 Han 등⁴⁾의 결과와 다르게 60°에서 가장 높은 누셀트수가 나타났다. 이는 수축과 확대 채널에서는 입출구 수력 직경비에 따라 유동 층돌각이 열성능에 미치는 효과가 달라진다는 것을 입증한다. 또한 Lee 등⁸⁾은 사각채널에서 양면이 수축 및 확대하는 경우와 모든 면이 수축 및 확대하는 경우 열성능을 비교한 결과 모든 면이 수축 및 확대되는 경우가 더 높은 열성능을 나타내는 것을 알았다. 이에 본 연구는 사각채널의 모든 면이 수축할 때 한면에 설치된 리브의 각도가 미치는 열전달 효과를 실험적으로 조사하여 최적의 리브 유동 층돌각을 구하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치 개략도이다.^{7,8)} 전체 채널 길이는 4,000 mm이고 시험부

는 1,000 mm로 하였다. 시험부 입구에는 균질유동을 만들기 위해 300 mm 길이의 허니컴을 설치하였다. 입구와 출구에는 외부의 영향을 최소화하기 위해 투명 폴리 카보나이트를 각각 200 mm와 100 mm를 설치하였다. 작동 유체로는 실내공기를 사용하였고 공기는 시험부 출구 측에 설치된 송풍기에 의해 시험부로 유입되었다. 시험부 출구와 송풍기 사이에는 원형 유동직진기 튜브를 두어 송풍기에 의한 스윙 효과를 최소화 하였다. 시험부의 공기 유량은 시험부 뒤에 설치된 원형 튜브에서 피토판을 사용하여 원관중심에서 벽면까지 국부유속을 측정 후 심프슨 법칙으로 원관의 체적평균 유속을 구하고 연속법칙으로 사각채널 시험부의 체적평균 유속을 얻었다. 시험부에는 실리콘 포일 히터를 좌우면에 설치하고 상하 양면에는 단열이 되도록 하였다.

리브는 한 면에만 설치하고 리브가 설치된 벽은 10 mm × 100 mm × 5 mm(t)의 리브를 연속적으로 배치되었다. 리브의 층돌 각은 Fig. 2와 같이 30°, 45°, 60° 그리고 90°로 변화를 주었다. 채널구조는 Fig. 3과 같이 4벽면 모두 정사각형으로 수축되며 입출구의 수력 직경의 수축비 (D_{hi}/D_{ho})는 0.67로 제작하였다. 여기서 D_{ho} 와 D_{hi} 는 각각 채널 시험부 출구와 입구의 수력직경이다. 리브의 피치(p)/높이(e)의 비는 10으로, 리브

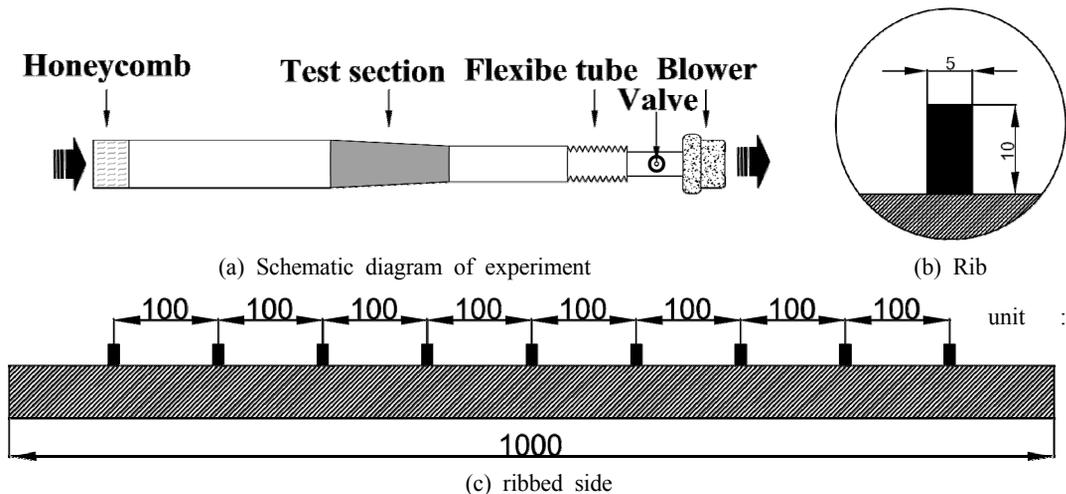


Fig. 1 Schematic layout of experimental setup and test section

의 높이와 채널 국부 수력직경비(e/D_h)는 0.1에서 0.13으로 변한다.

시험부 좌우 벽면은 열전도성이 높은 구리판을 여러 영역으로 나누는 구리판법을 이용하여 10개의 영역으로 구분하여 매 영역마다 1개의 구리판을 설치하고 영역 사이에는 열전도를 방지하기 위해 0.5 mm 두께의 고무 가스켓을 설치하였다. 가열된 구리판과 리브는 가열되지 않는 벽면으로 복사 손실 열을 최소화하기 위해 매끈하게 제작하였다. 시험부의 입구와 출구측의 구리판을 제외하고 각 구리판에 T형 구리-콘스탄탄 열전대를 2개씩 설치하여 벽면온도를 구했다. 입구와 출구측은 1개를 설치하였다. 열전대는 동판의 중간 높이에 입구와 출구영역을 제외하고 50 mm 간격으로 0.4 mm 직경의 구멍을 만들고 그 속에 열전대 접합부를 삽입 한 후 열 에폭시로 고정시켰다. 입구와 출구영역은 75 mm 간격을 유지하였다. 열전대는 Yokogawa DA100에 연결하고 컴퓨터에 설치된 DAQ32 Plus Data Acquisition Software 에 의해 자료를 취득하였다. 히터에서 공급되는 열전달율($Q-Q_l$)은 아래의 대류 열전달에 의해 점검하였다.

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

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

채널의 레이놀즈 수의 정의는 아래와 같다.

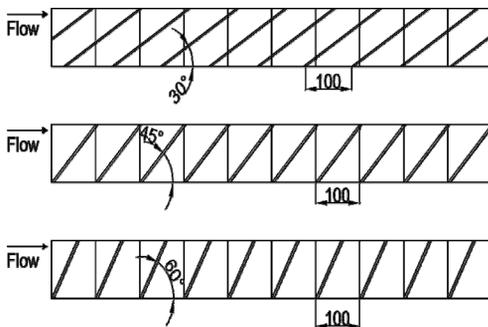


Fig. 2 Rib angle

$$Re = \frac{u_b D_{hm}}{\nu} \quad (2)$$

여기서 u_b 는 채널 입구와 출구 위치의 체적평균 유속이다. 국부 열전달 계수(h)는 아래와 같이 정의하였다.

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

그리고 채널 평균 누셀트 수(Nu)은 아래와 같이 정의하였다.

$$Nu = \frac{h D_{hm}}{k_{air}} \quad (4)$$

D_{hm} 은 시험부 채널 평균 수력 직경이고 k_{air} 은 공기의 열전도도이다. 국부 수력 직경(D_h)은 채널의 국부 둘레 (P_e)와 단면적(A_c)의 비로 식 (5)와 같이 정의하였다.

$$D_h = \frac{4 \times A_c}{P_e} \quad (5)$$

실험식 입구와 출구에서 수력 직경이 변하므로 아래와 같이 평균하여 수력 직경을 구하였다.

$$D_{hm} = \frac{D_{ho} + D_{hi}}{2} \quad (6)$$

전 압력 강하(ΔP_T)의 식 (7)을 이용하여 식 (8)과 같이 구했다.

$$\Delta P_T = P_i - P_o + \frac{1}{2} \rho u_{bi}^2 - \frac{1}{2} \rho u_{bo}^2 \quad (7)$$

$$f_T = \frac{D_h}{2\rho u_b^2} \left| \frac{\Delta P_T}{\Delta L} \right| \quad (8)$$

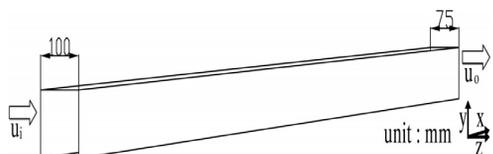


Fig. 3 Diagram for derivation of effective pressure

여기서 P_i 와 P_o 는 각각 시험부 입구와 출구의 정압 강하이다. 불확실성은 Kline과 McClintock⁹⁾가 제시한 방법으로 누셀트 수는 최대 11%, 전마찰계수는 최대 12%이었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 레이놀즈 수에 따른 Nu/Nu_{ss} 의 국소 분포를 나타낸다. 매끈한 직선 원형 관 채널의 누셀트 수 (Nu_{ss})에 대한 상관 관계식은 아래의 Dittus-Boelter¹⁰⁾식을 이용하였다.

$$Nu_{ss} = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (9)$$

모든 레이놀즈 수에서 30°가 가장 크고 90°가 가장 작은 값을 나타냈다. 이는 Fig. 5와 같이 리브가 설치된 채널에서는 재순환 유동과 30°에 가까울수록 크게 발생하는 스월(swirl)유동의 복합적 요인 때문으로 사료된다. 레이놀즈 수가 22,000일 때 가장 큰 값을 나타내는데 이는 유속이 증가함에 따라 매끈한 원형관의 누셀트 수의 증가폭이 더 크게 나타났기 때문이다.

Fig. 6은 각 채널의 평균 누셀트 수를 보여준다. 비교를 위해 양벽면이 확대 채널에서 각도에

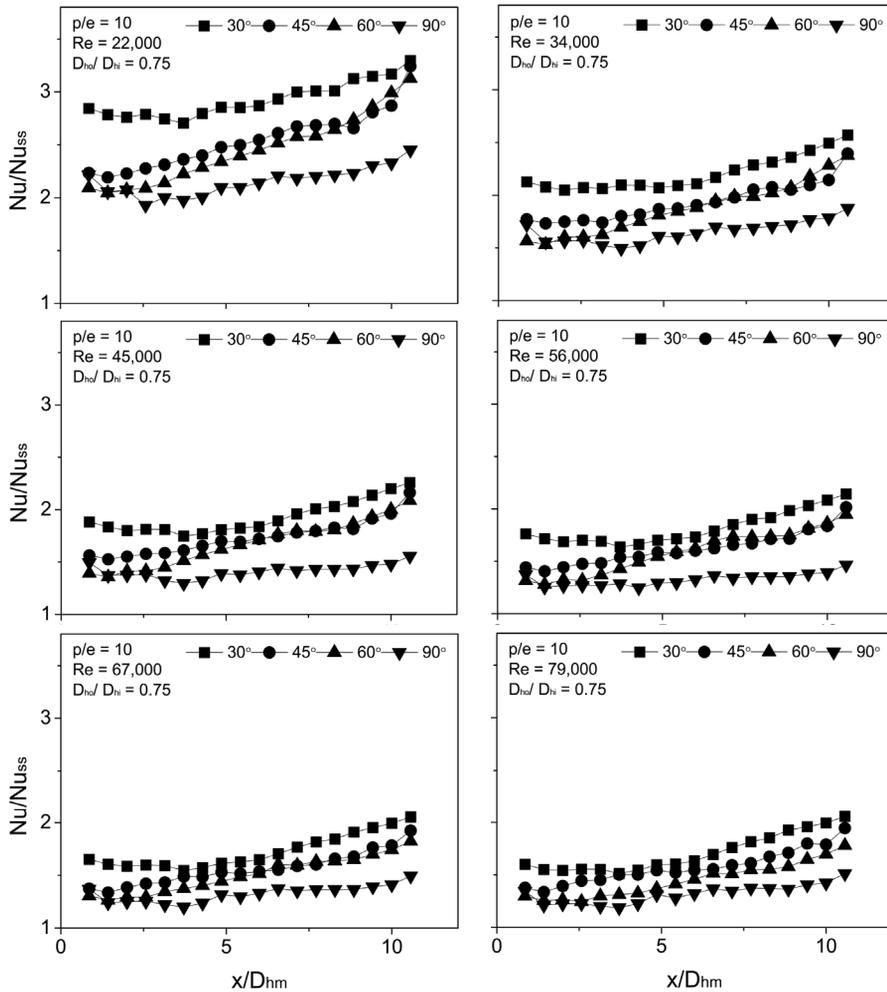


Fig. 4 Spanwise distribution of Nu/Nu_{ss}

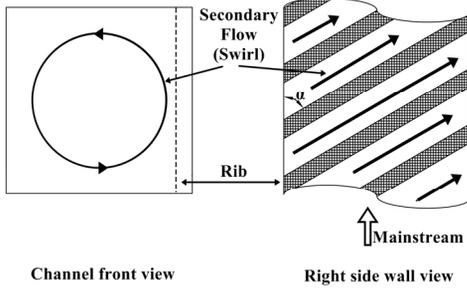


Fig. 5 Effect of rib angle on secondary flow

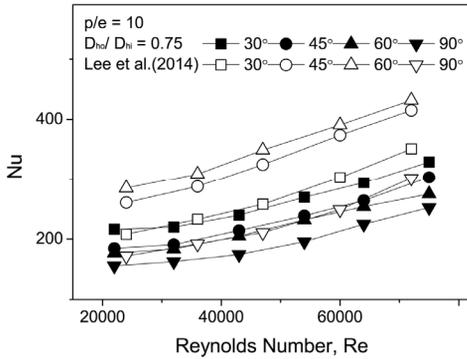


Fig. 6 Channel average Nusselt numbers

따른 Lee 등⁷⁾의 결과를 포함하였다. Lee 등⁷⁾은 60°, 45°, 30° 그리고 90° 순으로 나타난 반면 본 연구는 30°, 45°, 60° 그리고 90° 순으로 나타났다. 이는 모든 벽면이 수축됨에 따라 리브 경사에 의해 발생하는 스윙유동의 영향을 많이 받기 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 리브각도에 따른 전 마찰 계수를 보여준다. 비교를 위해 Lee 등⁷⁾의 결과를 포함하였다. Lee 등⁷⁾과 다르게 90°에서 가장 높은 전 마찰 계수 값을 나타냈다. 이는 채널이 수축함에 따라 발생하는 유동의 재 부착지점 변화 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 f_T/f_{ss} 를 나타낸다. 매끈한 직선 원형관의 마찰 계수는 Blasius¹¹⁾가 제안한 식 (10)을 통해 구하였다.

$$f_{ss} = 0.046Re^{-0.2} \quad (10)$$

비교를 위해 Han 과 Park¹²⁾의 결과를 포함하였

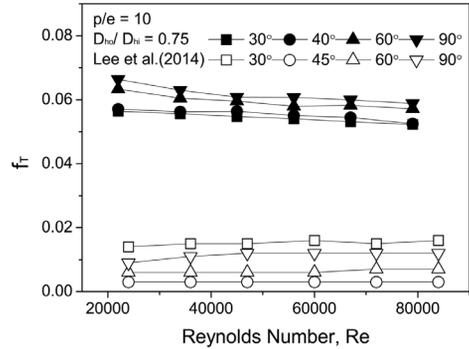


Fig. 7 Total friction factor

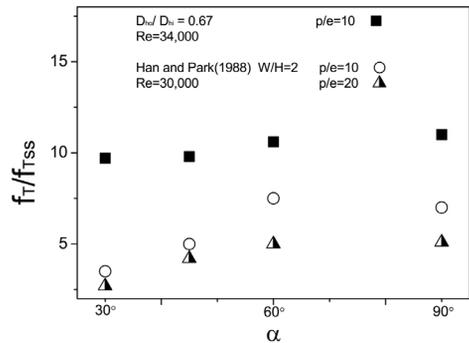


Fig. 8 Total friction factor enhancement

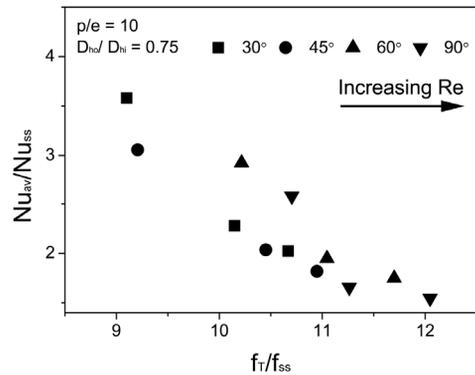


Fig. 9 Heat transfer performance (Re=22,000, 45,000, 67,000)

다. 직사각 채널¹²⁾과 비슷한 유형을 나타내며 직사각 채널¹²⁾보다 대체로 1.6-3.2배 큰 값을 나타냈다. 이는 모든 면이 수축하면서 발생하는 유동 막힘현상 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 9는 열 성능곡선을 나타낸다. 낮은 레이놀즈 수 30° 채널이 가장 유리한 채널로 나타났다.

모든 채널에서 마찰이 커질수록 누셀트 수는 작아짐을 나타냈다.

4. 결 론

사각채널의 모든 면이 수축할 때 한 면에 설치된 리브의 각도가 미치는 효과를 실험적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 누셀트 수는 유체 흐름 방향에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 경사각 $30^\circ > 45^\circ > 60^\circ > 90^\circ$ 순으로 나타났다.

2) 경사각이 가장 큰 90° 채널에서 가장 큰 마찰계수를 보였다.

3) 30° 리브와 레이놀즈 수가 22,000인 채널이 가장 우수한 열성능을 나타냈다.

4) 레이놀즈 수가 낮을수록 대체로 열전달 성능이 향상되었다. 이는 난류혼합의 강도는 레이놀즈 수에 비례적으로 증가하지 않는다는 것은 의미한다.

후 기

이 연구는 2015년도 경상대학교 발전기금 재단 재원으로 수행되었습니다.

Reference

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. J. C. Han and P. Zhang, 1989, "Pressure loss distribution in three-pass rectangular channel with rib turbulators", ASME J. Turbomachinery, Vol. 111, pp. 515-521.
3. S. C. Lau, R. D. McMillin and J. C. Han, 1991, "Turbulent heat transfer and friction in a square channel with discrete rib turbulators", ASME J. Turbomachinery, Vol. 113, pp. 360-366.

4. J. C. Han, S. Ou, J. Park and C. Lei, 1989, "Augmented heat transfer in rectangular channels of narrow aspect ratios with rib turbulators", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp. 1619-1630.
5. 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.
6. 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", Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol. 22, No. 6, pp. 603-613.
7. 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.
8. M. S. Lee and S. W. Ahn, 2014, "Effect of inclined wall number on heat transfer and friction in the smooth channel", J. of the Korea Society For Power System Engineering, Vol.18, No. 3, pp. 66-72.
9. S. J. Kline and F. A. McClintock, 1953, "Describing uncertainty in single sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-8.
10. F. W. Dittus and L. M. Boelter, 1930, "University of California (Berkeley) Publications in Engineering 2. Berkeley, pp. 443-461.
11. F. P. Incorpera and D. P. Dewitt, 1996, "Fundamental of heat and mass transfer", 4th ed., John Willy and Sons, Inc., p. 424.
12. J. C. Han and J. S. Park, 1988, "Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators", Int. J. Heat. Mass Transfer. Vol. 31, pp. 183-195.