

30° 경사 리브가 있는 확대 채널 통로 내의 열전달 증가

Heat Transfer Enhancement in a Divergent Passage with 30° Inclined Ribs

이명성(Myung Sung Lee)¹, 안수환(Soo Whan Ahn)^{2*}

¹경남지역사업평가단, ²경상대학교 해양산업연구소 기계시스템공학과

¹Evaluation Team, Gyeongnam Institute for Regional Program Evaluation, Changwon, 51401, Korea

²Dpt. of Mechanical and System Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, 53064, Korea

(Received February 9, 2017; revision received May 24, 2017; Accepted: May 26, 2017)

Abstract The effect of different rib geometries such as V-shaped continuous (case A), parallel broken (case B), and V-shaped broken (case C) ribs on local heat transfer distributions and pressure drops in a divergent channel with 30° inclined ribs on one wall or two walls was investigated for Reynolds numbers from 22,000 to 75,000. Top and bottom walls were insulated; two side walls were uniformly heated in the divergent channel. Heated walls were composed of 10 isolated copper sections and length-to-outlet hydraulic diameter ratio of 10. Rib height-to-outlet hydraulic diameter ratio was 0.1, and rib pitch-to-height ratio equaled 10. Results revealed that V-shaped continuous rib (case A) produced approximately 1.4 times higher average Nusselt number than in the parallel broken rib (case B), and V-shaped broken rib (case C) in the channel with two ribbed walls at $Re = 54,000$.

Key words Divergent channel(확대 채널), Rib geometries(리브 형상), Local heat transfer(국부 열전달), Nusselt number(누셀트 수), Total friction factor(전 마찰계수)

* Corresponding author, E-mail: asw9294@naver.com

기호설명

Dh : 수력 직경 [m], $\frac{4 \times A_c}{P_e}$
 Nu : 채널 평균 누셀트 수, $\frac{\bar{h} D_h}{k}$
 h : 열전달 계수 [W/m^2K], $\frac{Q - Q_l}{A_p (T_w - T_b)}$
 Pr : 프란트 수
 Q : 열전달 유효 [W]
 Re : 레이놀즈 수

f : 마찰계수

하첨자

b : 체적 평균
 i : 시험부 입구
 l : 손실
 o : 시험부 출구
 ss : 매끈한 직선 원관
 T : 전(total)
 w : 벽면
 x : 채널 길이 방향 거리

1. 서론

채널 벽면에 리브가 설치된 사각 채널은 많은 산업분야에 적용되고 있다. 벽면의 리브는 높은 난류를 발생시켜 열전달을 증가시키지만 압력손실이 추가적으로 발생시키기 때문에 벽면의 리브는 최적의 형상과 배열을 설치하는 것이 바람직하다.

본 연구는 유체역학적으로 완전히 발달된 영역에서 리브(rib)가 단면 혹은 마주보는 양면에 설치된 사각

확대 채널에서, 국부 열전달과 압력강하를 레이놀즈 수 22,000에서 75,000범위에서 실험적으로 연구하였다. 시험부 입구에 대한 출구의 수력 직경 확대율(D_{ho}/D_{hi})은 1.49이다. 사각 채널 시험부의 길이에 대한 출구 수력직경의 비는 10이고, 리브 높이에 대한 출구 수력직경의 비(e/D_{ho})는 0.1이다. 실험 파라미터는 3종류의 리브 형상이다. 양면에 리브를 설치 한 경우는 모두 서로 마주보는 일렬 배열(in-line array)로 위치 시켰다. 가열벽면의 국부 열전달 계수는 시험부 입구에서 출구방향으로 구하였다.

본 연구와 관련된 연구 자료들은 다음과 같다. 유동방향 길이에 따라 단면적이 일정한 사각 채널에서 벽면에 설치된 리브의 높이, 간격, 그리고 유동 충돌각의 리브 형상들이 열전달과 압력강하에 미치는 효과를 Han⁽¹⁾과 Han 등⁽²⁾에 의해 연구 되었다. 그리고 채널형상(aspect)비가 다른 사각 채널들에서 위의 리브형상 파라미터들이 국부 열전달과 압력강하에 미치는 영향을 연구하였다.⁽³⁻⁵⁾

연구 결과 평행(parallel) 경사방향 리브가 수직(transverse) 방향 리브보다 우수한 열전달 성능을 발생하였고, 좁은 단면 채널이 넓은 단면 채널보다 열성능이 우수하였다.

리브 경사각이 국부 열전달과 압력강하에 미치는 효과는 나프탈렌 승화법을 이용하여 Han과 Zhang⁽⁶⁾에 의해 연구되었다. 그 결과 리브의 경사각이 국부 열전달과 압력강하 분포에 현저한 영향을 미친다는 것을 보고 하였다.

Ahn et al.⁽⁷⁾은 채널 시험부 입구와 출구의 수력직경 비가 1.16인 확대 채널에서 리브 피치에 대한 높이의 비(p/e)가 열전달과 전 마찰계수(total friction factor)에 대해 연구하였다. 그 결과 $p/e = 6$ 이 가장 높은 열전달, $p/e = 10$ 이 가장 큰 전 마찰계수를 보였다.

Lee와 Ahn⁽⁸⁾은 채널 시험부 입구와 출구의 수력 직경 비(D_{ho}/D_{hi})가 0.75, 1.0 그리고 1.33인 수축과 확대 채널의 난류유동에 대한 열전달과 전 마찰계수의 실험적 측정을 보고하였다. 리브 높이 대 평균 수력직경 비(e/D_{hm})가 0.114, 리브 피치 대 높이의 비는 10이다. 그리고 리브를 단면 혹은 마주보는 양면에 각각 설치 하였다. 그 결과 $D_{ho}/D_{hi} = 1.33$ 인 확대 채널에서는 예상과는 달리 정(+) 동압과 부(-) 정압이 발생하여 양면에 리브를 설치한 채널이 단면에 만 리브를 설치한 채널보다 오히려 전 마찰계수가 작았고, 양벽면 리브의 $D_{ho}/D_{hi} = 1.33$ 의 확대 채널이 가장 큰 열전달 증가를 보였고, $D_{ho}/D_{hi} = 0.75$ 의 수축 채널이 가장 큰 전 마찰계수 증가를 보였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 시험부 내벽면에 부착된 V형 연속 리브(case A), 평행 단절 리브(case B), 그리고 V형 단절 리브(case C) 3경우의 리브 배열이다. 실험장치 개략도는 본 연구자의 이전 연구^(7, 8)에 나타나 있다. 전체 채널 길이는 4,000 mm이고 시험부는 1,000 mm로 하였다. 시험부 입구와 출구의 단면적은 각각 50 mm×100 mm와 100 mm×100 mm이고 수력 직경의 확대 비(D_{hi}/D_{ho})는 1.49이다. 4벽면 중 가열되는 마주 보는 양면만 확대되며 벽면 경사각은 1.43°로 제작하였다.

작동 유체로는 실내공기를 사용하였고 공기는 시험부 출구 측에 설치된 송풍기에 의해 시험부로 유입 되었다. 시험부의 공기 유량은 시험부 뒤에 설치된 원형 튜브에서 피토관을 사용하여 원관 중심에서 벽면

Table 1 Measurements in ribbed channels

Authors	Parameters	Channel inclination
Han ⁽¹⁾ , Han et al. ⁽²⁾	rib pitch, flow attack angle	straight
Han ⁽³⁾ , Han and Park ⁽⁴⁾ , Han and Zhang ⁽⁵⁾	rib pitch, flow attack angle, channel aspect ratio	straight
Han and Zhang ⁽⁶⁾	flow attack angle on local heat transfer	straight
Ahn et al. ⁽⁷⁾	rib pitch ratio	divergent
Lee and Ahn ⁽⁸⁾	hydraulic diameter ratio between inlet and outlet	convergent, divergent

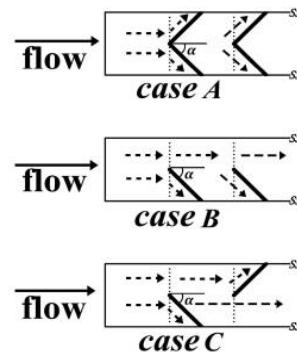


Fig. 1 Different rib arrangements.

까지 국부 유속을 측정된 후 심프슨 법칙으로 원관의 체적평균 유속을 구하고 연속 법칙으로 사각 채널 시험부의 체적 평균 유속을 얻었다. 시험부에는 실리콘 포일 히터를 상하 벽면에 설치하고 좌우 양면에는 단열이 되도록 하였다. 리브는 좌우(경사)벽면 10 mm×10 mm(t) 리브를 연속적으로 배치하였고, 유동 충돌각 α 값은 30°이다. 리브의 피치(p)/높이(e)의 비는 10으로, 리브의 높이와 채널 시험부 입구 수력직경 비(e/D_{ho})는 0.1이다. 시험부 상하 벽면은 열전도 성이 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.

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

여기서 \dot{m} 은 공기 질량, T_{bo} 와 T_{bi} 는 시험부 출구와 입구의 체적 평균 온도이다. 열손실(Q_l)은 모든 경우 5.8% 이내였다.⁽⁷⁾ 채널의 레이놀즈 수의 정의는 아래와 같다.

$$Re = \frac{u_{bm}D_h}{\nu} \quad (2)$$

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.

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

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

$$Nu = \frac{\bar{h}D_h}{k_{air}} \quad (4)$$

k_{air} 은 공기의 열전도 도이고 \bar{h} 는 채널 시험부길이 이 평균 열전달계수이다. 시험부 입구와 출구에서 수력 직경을 평균하여 평균수력 직경을 구하였다.

$$D_h = \frac{D_{ho} + D_{hi}}{2} \quad (5)$$

채널 유동의 전(total) 마찰 계수는 채널 확대에 의한 동압 성분의 변화 효과를 포함한 전 압력 강하(ΔP_T)의 식(6)을 이용하여 식(7)과 같이 구했다.

$$\Delta P_T = P_i - P_o + \frac{1}{2}\rho u_{bi}^2 - \frac{1}{2}\rho u_{bo}^2 \quad (6)$$

$$f_T = \frac{D_h}{2\rho u_b^2} \left| \frac{\Delta P_T}{\Delta L} \right| \quad (7)$$

여기서 P_i 와 P_o 는 각각 시험부 입구와 출구의 정압 강하이다.

Blasius⁽⁹⁾가 제안한 매끈한 직선 원형관의 마찰 계수(f_{ss})을 비교를 위해 식(8)을 포함하였다.

$$f_{ss} = 0.046Re^{-0.2} \quad (8)$$

정압측정에 사용한 디지털 마노미터의 정밀도는 19.99 mm H₂O에서 0.01 mm H₂O이고 열전대 온도측정의 정밀도는 0.1℃이다. 실험의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽¹⁰⁾의 방법으로 실시하였다. 실험의 변수들은 벽면 온도, 공기 체적평균 온도, 유체속도, 그리고 압력손실이다. 레이놀즈수, 마찰 계수, 그리고 누셀트 수의 불확실성은 2.5%, 10.1%, 그리고 7.8%이었다.⁽⁸⁾

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 D_{ho}/D_{hi} 가 1.49인 확대 채널에서 Fig. 1의 3가지 30° 유동 충돌각을 가진 리브에 대한 정압 강하를 나타낸다. 모든 경우에서 양면에 리브가 설치된 채널이 한 면에 리브가 설치된 채널 보다 높은 절대 값을 나타냈다. 이는 리브가 양면에 설치되어 리브에 의한 유체 유동경계층이 서로 간섭을 받기 때문이다.

V형 연속 리브(case A)가 평행 단절 리브(case B)와 V형 단절 리브(case C)보다 정압 강하의 절대값이 컸다. 이는 유동흐름을 방해하는 리브의 수직방향 단면적이 case A가 가장커서 리브 뒤에서 발생하는 재순환 유동이 가장 강력하게 발생하기 때문이라 사료된다.

Fig. 3은 확대 채널에서 3가지 30° 유동 충돌각의 리브 채널의 전압강하이다. 단절 리브 채널인 case B와 C에서는 양면에 리브가 설치된 경우가 높은 전압강하 값을 나타내고 case A에서는 한 면에 리브가 설치된 경우에서 큰 값을 나타냈다. 이는 채널이 확대됨에 따라 발생하는 동압의 값이 정(+)을 나타내기 때문이다.

Fig. 2의 정압강하와는 다르게 Fig. 3의 전압강하는 모든 경우 정(+)의 값을 보였다. 이는 식(6)의 동압변화 때문이라 판단된다.

식(7)에 의한 Fig. 4는 채널의 확대됨에 따라 발생하는 유속에 의한 정압과 동압을 고려한 전 마찰계수를 식(8)의 매끈한 원관의 마찰계수로 무차원화 그림을 보여준다.

리브가 단면과 양면에 설치된 모든 경우에서 case B와 C가 case A보다 전 마찰계수가 컸다.

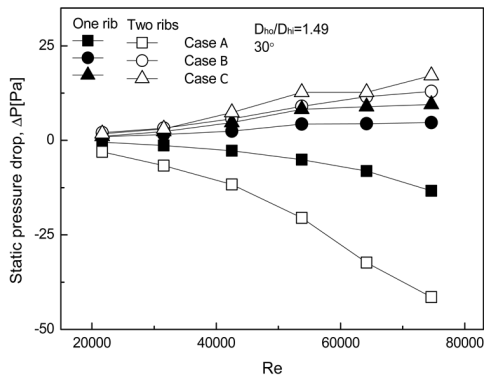


Fig. 2 Static pressure drop(P_1-P_0) for different rib arrangements.

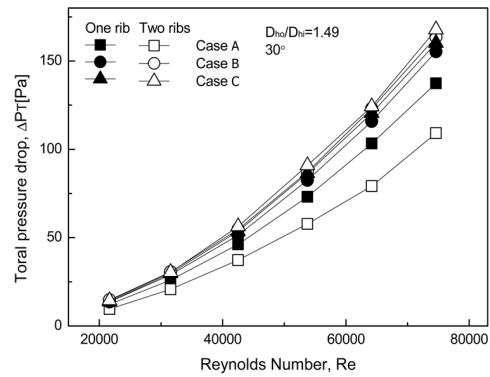


Fig. 3 Total pressure drop for different rib arrangements.

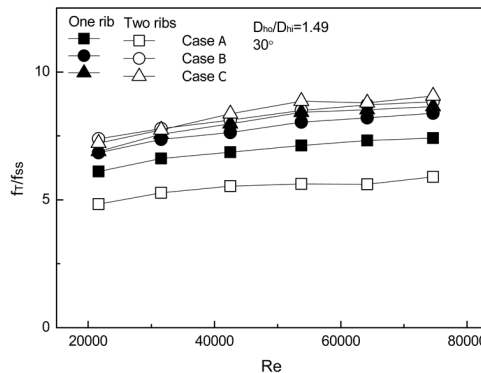


Fig. 4 Dimensionless total friction factor for different rib arrangements.

이는 일반적 예상과는 달리 Fig. 1과 같이 case B와 C에서 채널 확대와 리브에 의한 박리 유동으로 인한 2차 유동이 활발히 발생하였기 때문으로 사료된다. 확대 채널에서는 리브 벽면의 구조와 채널 확대율에 따라 전마찰계수가 영(0)에 가까운 채널을 제작할 수 있으므로 열전달 성능 측면에서 보면 유동방향 길이에 따라 단면적이 일정한 채널보다 확대 채널이 유리하다는 것을 입증한다. 모든 채널에서 리브가 설치된 확대 채널은 매끈한 원형관에 비해 약 4.8~8.8배 높은 전 마찰계수를 나타냈다. 이는 확대 사각 채널의 모서리 효과와 리브에 의한 난류 발생에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 5~Fig. 7은 각 채널의 국부 열전달 계수를 나타낸다. case A의 양면 리브 채널인 경우 출구 측으로 가면서

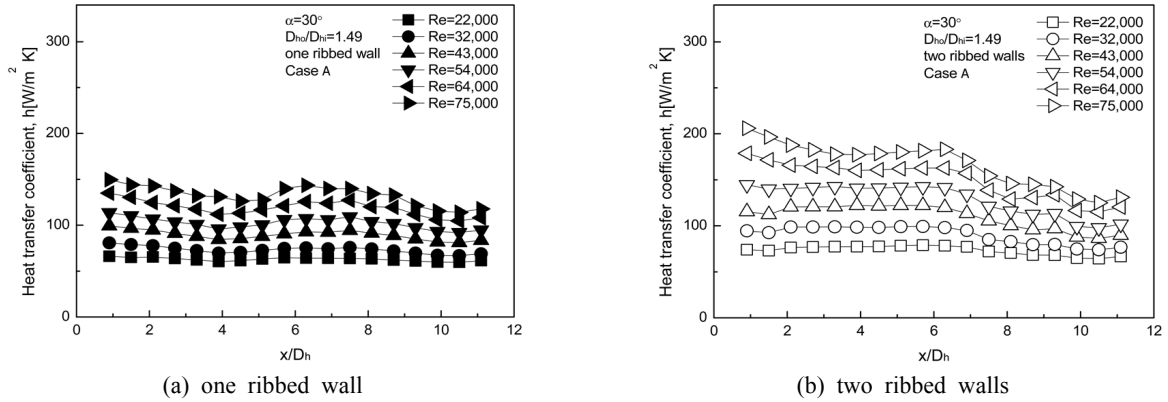


Fig. 5 Local heat transfer coefficients for different rib arrangements(case A).

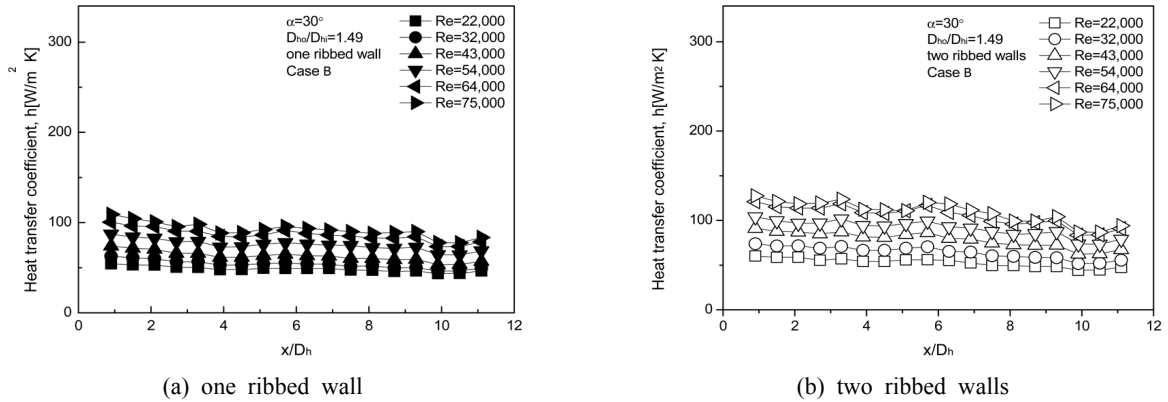


Fig. 6 Local heat transfer coefficients for different rib arrangements(case B).

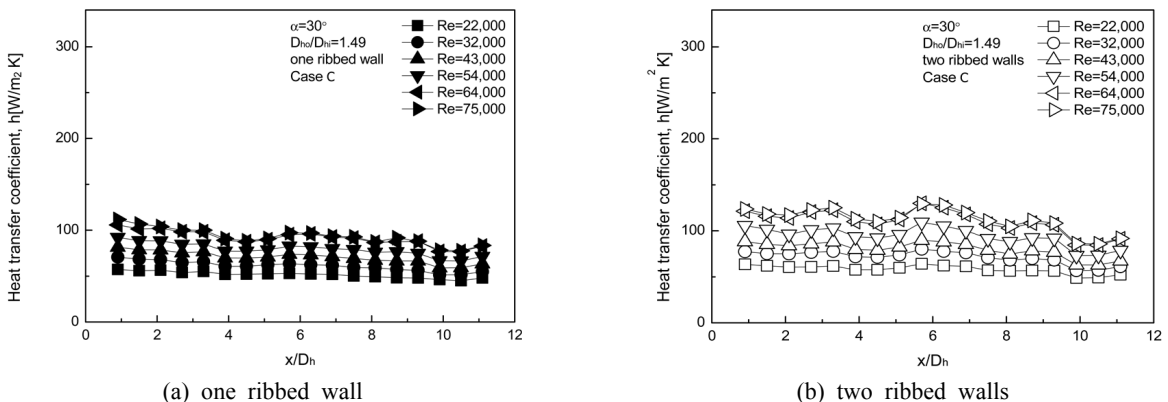


Fig. 7 Local heat transfer coefficients for different rib arrangements(case C).

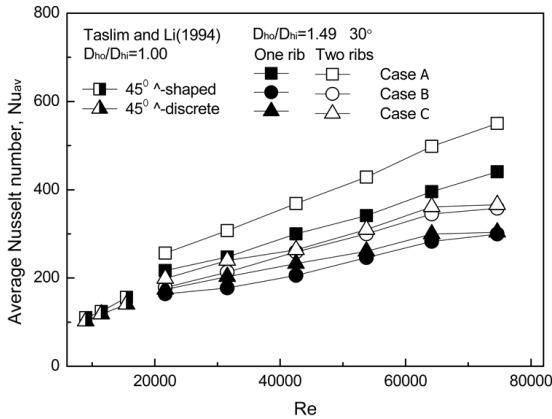


Fig. 8 Average Nusselt numbers for different rib arrangements(30°).

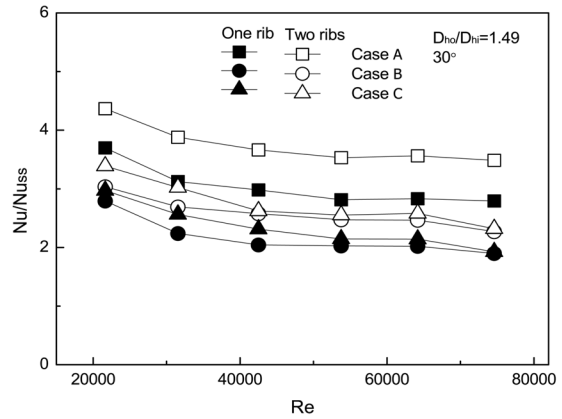


Fig. 9 Nu/Nuss for different rib arrangements.

국부 열전달계수가 점점 작아지는 반면 case A의 단면 리브 채널, case B와 C의 단면과 양면 리브 채널에서는 상대적으로 비교적 일정한 값을 나타냈다. 이는 양면에 연속 리브가 설치된 case A는 리브에 의한 열 경계층이 증가가 급격히 되었기 때문이라 판단된다. 모든 채널 출구부분에서 값이 증가하는 현상은 채널출구에서 50 mm 지점에 열전대가 삽입되어 있어, 이로 인한 외부의 열전도 영향으로 판단된다.^(7, 8)

$Re = 54,000$ 에서 case A가 case B와 C보다 각각 1.41, 1.36배 더 높은 값을 나타내는데 이는 case A에서 리브가 차지하는 면적이 많으며, 이로 인한 발생하는 난류로 인해 열전달을 증가시키기 때문으로 사료된다. Figs. 6과 7의 양면 리브에서 레이놀즈 수가 높은 경우 유동방향 거리(x/D_h)에 따라 국부 열전달계수(h)가 불규칙한 모습을 보인다. 이는 가열 벽면의 단절 리브에 의한 와류유동의 불안정성 때문이라 판단된다.

시험부 중간 부분에서 열전달계수가 공통적으로 증가하는 것은 리브 위의 주유동이 리브에 의한 박리된 유동과 요철사이에 나타나는 모서리 와류에 기인한다고 사료한다.⁽¹¹⁾

Fig. 8은 채널 평균 누셀트 수를 나타낸다. 비교를 위해 45° 리브 유동충돌각의 ^-형 리브와 ^-형 불연속 리브가 설치된 경우 직선채널에서의 Taslim과 Li⁽¹²⁾의 결과를 포함하였다. Taslim과 Li⁽¹²⁾의 결과와 동일하게 case A(^-shaped)채널에서 높은 값을 나타냈다. 이는 가열되는 벽면에서 리브가 차지하는 면적이 case B, C보다 많기 때문이며, Taslim과 Li⁽¹²⁾의 결과보다 높은 값을 나타냈는데 이는 채널의 확대에 따른 재순환 유동 효과 때문으로 판단된다.

양 벽면에 리브가 설치된 경우 $Re = 54,000$ 에서 V형 연속 리브(case A)가 평행 단절 리브(case B)와 V형 단절 리브(case C)보다 채널 평균 누셀트 수가 약 1.4배 컸다.

Fig. 9는 매끈한 원형관에 대한 평균 누셀트 수를 나타낸다. 연속리브 채널인 case A에서 높은 값을 나타냈다. case B와 C는 비슷한 값을 나타냈다. 모든 경우에서 양면 리브 채널이 단면 리브 채널에 비해 약 1.1~1.3배 높은 값을 나타냈다. 전마찰계수 Fig. 4에서 양면 리브가 작거나, 거의 비슷하게 나타났지만, Fig. 9의 무차원 누셀트 수에서는 양면에 리브를 설치한 경우가 모두 단면에 리브를 설치한 경우보다 컸다. 이는 확대 채널에서는 양면에 리브를 설치하는 것이 유리하다는 것을 입증한다.

4. 결 론

D_{ho}/D_{hi} 가 1.49인 확대 채널에서 리브를 단면과 양면에 V형 연속 리브(case A), 평행 단절 리브(case B), 그리고 V형 단절 리브(case C)에 대한 열전달과 마찰계수의 효과를 연구한 결과는 아래와 같다.

- (1) V형 연속리브(case A)가 평행 단절 리브(case B)와 V형 단절 리브(case C)보다 정압 강하의 절대 값이 컸다.
- (2) 단절 리브 채널인 case B와 C에서는 양면에 리브가 단면보다 높은 전압 강하 값을 나타내고 case A에서는 한 면에 리브가 양면보다 큰 전압 강하를 나타냈다.

- (3) 양 벽면에 리브가 설치된 경우 $Re = 54,000$ 에서 V형 연속 리브(case A)가 평행 단절 리브(case B)와 V형 단절 리브(case C)보다 채널 평균 누셀트 수가 약 1.4배 컸다.
- (4) 확대 채널에서는 리브 벽면의 구조와 채널 확대율에 따라 전 마찰계수가 영(0)에 가까운 채널을 제작할 수 있으므로 열전달 성능 측면에서 보면 유동방향 길이에 따라 단면적이 일정한 채널보다 확대 사각 채널이 유리하다는 것을 입증하였다.

References

1. Han, J. C., 1984, Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls, ASME J. Heat Transfer, Vol. 106, No. 4, pp. 774-781.
2. Han, J. C., Park, J. S., and Lei, C. K., 1985, Heat transfer enhancement in channels with turbulence promoters, ASME J. Engng Gas Turbine Pwr, Vol. 107, No. 3, pp. 629-635.
3. Han, J. C., 1988, Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators, ASME J. Heat Transfer, Vol. 110, No. 2, pp. 321-328.
4. Han, J. C. and Park, J. S., 1988, Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 1, pp. 183-195.
5. Han, J. C. and Zhang, P., 1989, Pressure loww distribution in three-pass rectangular channels with rib turbulators, ASME J. Turbomachinery, Vol. 111, No. 4, pp. 515-521.
6. Han, J. C. and Zhang, P., 1991, Effect of rib-angle-orientation on local mass transfer distribution in a three-pass rib-roughened channel, ASME J. Turbomachinery, Vol. 113, No. 1, pp. 123-130.
7. Ahn, S. W., Lee, M. S., Jeong, S. S., and Bae, S. T., 2014, Effect of rib pitch on heat transfer and friction factor in a two wall divergent channel, Korean J. of Air-Cond. & Refri. Eng., Vol. 26, No. 4, pp.175-180(in Korean).
8. Lee, M. S. and Ahn, S. W., 2016, Heat transfer friction factors in the ribbed square convergent and divergent channels, Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 6, pp. 1109-1116.
9. Bergman, T. L., Incropera, F. P., and Lavine, A. S., 2011, Fundamentals of Heat and Mass Transfer.
10. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-8.
11. Choi, C., Rhee, D. H., and Cho, H. H., 2002, Heat/mass transfer and pressure drop in a square duct with V-shaped ribs, Trans. of KSME(B), Vol. 26, No. 11, pp. 1542-1551(in Korean).
12. Taslim, M. E., Li, T., and Kercher, D. M., 1994, June, Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped and discrete ribs on two opposite walls, In ASME 1994 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, pp. V004T09A018.