



# 리브가 있는 확대 사각 채널에서 국부 열전달

## Local Heat Transfer in Ribbed Divergent Rectangular Channels

이명성\* · 정순억\*\* · 김범수\*\* · 안수환\*\*\*†

Myung-Sung Lee\*, Soon-Uk Jeong\*\*, Beom-Soo Kim\*\* and Soo-Whan Ahn\*\*\*†

(Received 03 January 2018, Revision received 26 March 2018, Accepted 27 March 2018)

**Abstract:** The local heat transfer of developed turbulent flows in the stationary ribbed divergent rectangular channels has been experimentally checked out. The rectangular divergent channels with the outlet hydraulic diameter(Dho) to inlet hydraulic diameter(Dhi) ratio of 1.49 have one-sided ribbed wall or two-sided ribbed walls, at which the ribbed walls with the flow attack angle of 60o are manufactured with a fixed rib height(e)=10 mm and the ratio of rib spacing(P) to rib height(e)=10. The measurements of heat transfer for V-shaped continuous ribs(case A), parallel broken ribs(case B), and V-shaped broken ribs(case C) have been conducted within the range of Re from 22,000 to 72,000.

The comparison indicates that among the three different rib arrangements of case A, case B, and case C with two ribbed walls, the case A has the greatest Nusselt number, at which case A and case C produce 158% and 122 higher than case B at Re of 54,000.

**Key Words :** Local heat transfer, Divergent rectangular channel, Three different rib arrangements, Channel average Nusselt number

### 1. 서 론

채널 내 열전달을 향상시키는 방법으로 거친 표면을 이용하거나 돌출물을 설치하여 유체유동을 교란시키는 연구들이 수행되어 왔다. 그 중에서 각봉의 리브(rib)를 사각채널 통로에 설치하는 방법은 지금까지 활발히 연구되어 오고 있으며, 리브의 높이(e), 유동 충돌 각( $\alpha$ ), 리브의 피치(P)

가 완전히 발달된 유동의 대류 열전달 계수와 마찰계수에 미치는 효과에 대한 연구가 수행되어 오고 있다.<sup>1,2,3)</sup> 이러한 채널 내 리브를 설치하는 방법을 응용하여 일반 산업용 열교환기 외에 전자 칩 배열의 냉각, 가스터빈 블레이드 냉각 통로 등에 적용되며, 특히 가스터빈 블레이드의 냉각통로는 지난 50년 동안 각봉모양의 리브를 설치해 오고 있다.

\*\*\* 안수환(교신저자), 정순억, 김범수: 경상대학교 해양 산업연구소 기계시스템공학과

E-mail : asw9294@naver.com, Tel : 055-772-9105

\*이명성 : 경남지역사업평가단, 연구원

\*\*\* Soo-Whan Ahn(corresponding author), Soon-Uk Jeong, Beom-Soo Kim : Dpt of Mechanical & System Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University. E-mail : asw9294@naver.com, Tel : +82-55-772-9105

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

Han 등<sup>1)</sup>은 가열되는 양 벽면에 9종류의 다양한 리브 형태와 리브 경사각이 국부 열전달 분포에 미치는 효과를 실험적으로 조사하였다. 그들은 60° 혹은 45° 경사리브가 90° 수직 리브보다 열전달 성능이 우수하였고 V-형 리브가  $\wedge$ -형 리브보다 열전달 성능이 우수하였다.

Park 등<sup>2)</sup>은 채널의 양 폭(W) 측에 평행 연속 리브를 가진 사각 채널에서 다양한 채널 형상(채널 폭/높이) 비와 유동 층돌 각(리브 경사각)이 열전달 성능에 미치는 효과를 실험적으로 조사하였다. 그 결과 좁은 형상 비(W/H < 1)의 채널이 넓은 형상 비의 채널(W/H > 1)보다 열전달 성능이 우수하였고, 정사각 채널 (W/H = 1)에서는 45°와 60°의 리브 경사 각( $\alpha$ )이 가장 열전달 성능이 우수하였으나 넓은 형상 비(W/H = 2 혹은 4)에서는 30°와 45°의 리브 경사 각이 가장 우수한 열전달 성능을 발생하였다.

Ahn 등<sup>3)</sup>은 정사각 채널에서 리브를 한 벽면, 양 벽면에, 그리고 4벽면 모두 설치한 경우에 대해 각각 열성능에 실험적으로 조사한 결과, 한 벽면에만 리브를 설치한 채널이 가장 우수한 열전달 성능을 발생한다는 사실을 밝혔다.

위의 연구들은 길이 방향 거리에 따라 채널 단면적이 일정한 직선 사각 채널에 관한 연구들인 반면에 채널이 확대 혹은 축소되는 채널에 관한 연구는 매우 드문 실정이다<sup>4,5)</sup>.

Lee 등<sup>4)</sup>은 채널 벽면의 경사 각이 0.72°에 해당하는 채널 확대 비가 1.16인 경우 채널 벽면에 한 벽면 혹은 양 벽면에 30°, 45°, 60°, 그리고 90°의 평행 연속(parallel continuous) 경사 리브를 각각 설치하고 열전달을 실험적으로 측정하였다. 그 결과 마주 보는 양 벽면에 리브를 설치한 경우 리브 경사 각에 대한 누셀트 수의 증가의 크기 순서는 90°, 30°, 60°, 그리고 45°이었다.

Lee와 Ahn<sup>5)</sup>은 한 벽면에 V-형 리브가 있는 채널 확대비가 1.16인 확대 사각 채널에서 V-형 연속 (V-shaped continuous) 리브 경사 각( $\alpha$ )이 30°, 45°, 60°인 경우의 열전달을 실험적으로 연구하였다. 그 결과 60° 경사각이 가장 누셀트 수가 컸고, 전 마찰 계수는 30°가 가장 컸다. 위의 연구들을

Table 1에 요약하였다. 본 연구의 목적은 2벽면 확대 사각 채널에서 리브 경사 각을 60°로 고정하고 한 벽면 혹은 양 벽면에 설치된 3 경우의 리브 배열이 열전달에 미치는 효과를 실험적으로 조사하는데 있다.

Table 1 Measurements in ribbed channels

Authors	Parameters	Channel inclination
Han et al. <sup>1)</sup>	parallel, crossed, V/ $\wedge$ -angled ribs, flow attack angle	straight
Park et al. <sup>2)</sup>	channel aspect ratio, flow attack angle	straight
Ahn et al. <sup>3)</sup>	number of ribbed walls, number of heated walls	straight
Lee et al. <sup>4)</sup>	flow attack angle, parallel continuous ribs	divergent
Lee & Ahn <sup>5)</sup>	flow attack angle, V-shaped continuous ribs	divergent

## 2. 실험장치

확대 사각 채널의 한 벽면 혹은 양 벽면에 각각 V-형 연속 리브(case A), 평행 단절형 리브(case B), 그리고 V-형 단절 리브(case C)의 3 종류 리브 배열은 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 시험 부 입구와 출구의 단면적이 각각 50 mm × 100 mm와 100 mm × 100 mm이고 시험 부 길이가 1,000 mm이며, 이는 채널 시험 부 입출구 수력 직경 확대 비 ( $D_{ho}/D_{hi}$ )는 1.49에 해당한다. 사각 채널 시험 부의 길이에 대한 출구 수력 직경의 비는 10이고 리브 높이에 대한 출구 수력 직경의 비( $e/D_{ho}$ )는 0.1이다. 양측 벽면 리브의 경우 서로 마주보는 배열 (in-line array)로 제작하였다.

작동 유체는 공기를 사용하였고, 가열 벽면은 사벽면 중에서 좌우 벽면만 일정 열유속으로 가열하였다.

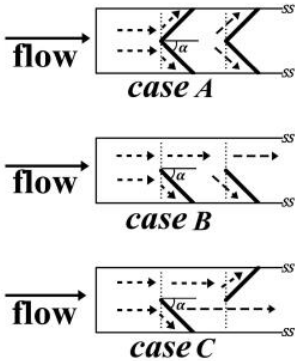


Fig. 1 Rib arrangements

길이 방향 열전도를 최소화하기 위해 시험부 채널 좌우의 가열벽면을 10개 영역으로 나누고 각 영역은 100 mm × 100 mm × 2 mm(t)의 구리판을 각각 설치하였다. 얇은 내열 고무 가스켓으로 각 구리판을 분리시켰다. 가열되지 않은 상하 벽면은 매끈하고 단열되었다.

0.1 mm 두께의 실리콘 히터를 좌우 벽면의 구리판 밑에 밀착시켰다. 구리판에는 정밀도가 0.1°C인 T형 열전대를 설치하고 열전대는 0.4 mm 직경의 구멍에 묻어 열 에폭시로 고정하였다. 시험 부 외부는 5 mm 두께의 마이카와 50 mm 두께의 송판으로 단열하고 그 외부는 두꺼운 유리 섬유로 단열을 보강하였다. 시험 중 최대 가열 벽면 온도는 약 85°C 이하이었다. 평균 가열 벽면 온도 ( $T_w$ )와 유체 체적 평균 온도( $T_b$ )의 차이는 12°C에서 25°C 이하였다.

시험 부 출구의 체적 평균 온도는 출구 단면의 수직 방향으로 5개 등 간격으로 설치된 열전대로부터 구하였다. 온도는 Yokogawa DA100로 각각 측정하였다. 벽면 온도 측정용 열전대 접합부는 벽면 중심선에 등 간격으로 설치하였다.

시험 부로부터 외부 공기로의 단위 면적당 열 유속 손실( $q_l$ )은 아래의 식으로부터 구하였다.

$$q_l = \frac{T_w - T_\infty}{\frac{\Delta y_1}{k_1} + \frac{\Delta y_2}{k_2} + \frac{\Delta y_3}{k_3} + \frac{1}{h_1}} \quad (1)$$

여기서  $T_w$ 와  $T_\infty$ 는 채널 길이 평균 가열 벽면 온도와 주위 온도,  $\Delta y_1$ 과  $k_1$ 은 마이카 두께와 열전도도,  $\Delta y_2$ 과  $k_2$ 는 송판의 두께와 열전도도,  $\Delta y_3$ 과  $k_3$ 은 유리 섬유 두께와 열전도도, 그리고  $h_1$ 은 주위의 자연 대류 열전달 계수이다. 본 연구의 경우 최대 열손실은 5.8% 이내였다. 채널 길이 국부 열전달계수( $h$ )는 다음과 같다.

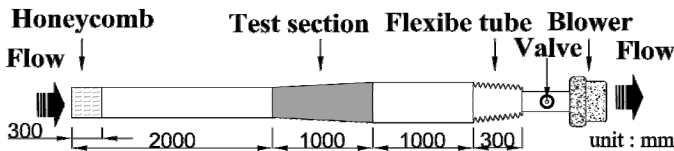
$$h = \frac{Q_x}{A_x (T_{wx} - T_{lx})} \quad (2)$$

여기서 ( $Q$ )는 가열 벽면의 순 열전달 율이고,  $A$ 는 가열 면적, 아래 첨자  $x$ 는 시험 부 입구에서 임의의 지점인 국부위치이다. 채널 길이 평균 누셀트수( $Nu$ )는 다음과 같다.

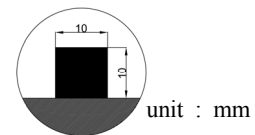
$$Nu = \frac{\bar{h} D_h}{k} \quad (3)$$

여기서  $\bar{h}$ 는 시험 부 길이 평균 열전달 계수이고,  $D_h$ 는 아래와 같이 채널 시험 부 평균 수력 직경이다.

$$D_h = \frac{D_{ho} + D_{hi}}{2} \quad (4)$$



(a) Schematic diagram of experimental apparatus



(b) Rib

Fig. 2 Experimental setup

여기서  $D_{hi}$ 와  $D_{ho}$ 는 시험 부 입구와 출구의 수력직경이다. 열전대 온도 센서의 오차는  $0.1^{\circ}\text{C}$ , 채널 유량의 오차는 1.9%였다.<sup>3,4)</sup> 불확실성에 대한 평가는 Kline과 McClintock<sup>6)</sup>에 의해 수행되었고, 누셀트 수의 최대 불확실성은 11%이었다.

Table 2 Experimental conditions

Room temp.	Relative humidity	Working fluid
21 ~ 30°C <sup>1)</sup>	50 ~ 65%	air

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 확대 채널에서 유동 충돌각(리브 경사각)( $\alpha$ )이  $60^{\circ}$ 이고, V-형 연속 리브(case A)가 좌측 벽에만 혹은 좌우 양측 벽면에 설치된 경우에 각각 길이에 방향 거리에 따른 국부 열전달 계수  $h$ 를 나타낸다. 한 벽면 V-형 리브와 양 벽면 V-형 리브의 전체적 국부 열전달 계수의 크기는 큰 차

이가 없었고, 낮은 레이놀즈 수(22,000, 32,000, 그리고 43,000)에서만 양 벽면 리브가 한 벽면 리브보다 열전달 계수가 근소하게 약간 컸다.

이는 확대채널에서  $30^{\circ}$  경사 V-형 연속 리브의 Lee와 Ahn<sup>7)</sup>의 연구와 직선 사각 채널의 Ahn et al.<sup>3)</sup>의 연구에서는 국부 열전달 계수가 리브 설치 벽면의 수가 클수록 크게 증가하는 경향을 보이는 것과는 다르게 나타났다. 이는 case A의 V-형 연속 리브에서는 Lee와 Ahn<sup>5)</sup>의 연구처럼 리브 상부에는 2차 유동 셀(cell)이 형성되어 리브가 설치된 벽의 가장자리에서는 채널 중앙부로 향하는 회전류가, 채널 중앙부에서는 리브가 설치된 바닥면으로 향하는 회전류가 각각 발생한다. 그러므로 리브 벽면으로 향하는 유동의 충돌 효과가 채널 중심부의 공기를 리브 벽면 측으로 끌어오기 때문에 리브 벽면의 수가 많을수록 열전달 촉진이 크게 발생한다. 그러나 본 연구와 같이 채널 확대비가 1.49인 확대채널에서 리브 경사각( $\alpha$ )이 직각에 가까운  $60^{\circ}$ 인 경우에는 경사 리브에 의

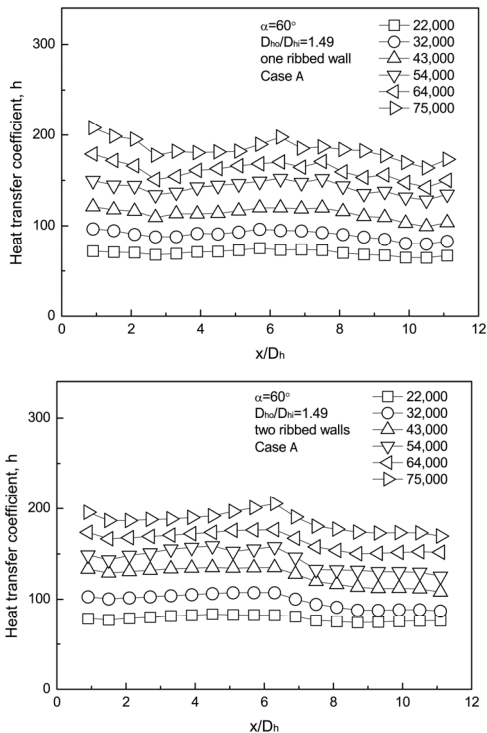


Fig. 3 Local heat transfer coefficients for case A

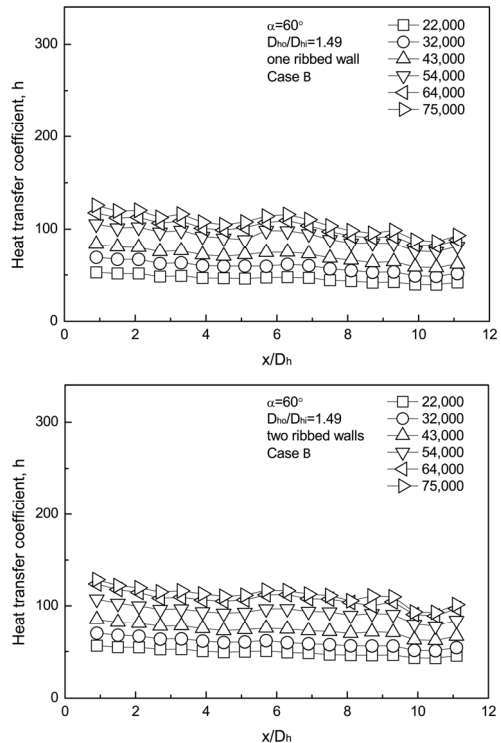


Fig. 4 Local heat transfer coefficients for case B

한 2차 유동 셀에서 리브 반대 벽측으로 향하는 상대적으로 큰 회전 튜와 채널 확대에 따른 유동 박리(separation) 때문에 일반적인 상식과는 다른 현상이 발생하였다고 사료된다.

모든 레이놀즈 수에서 대체로 입구 영역의 경우 국부 대류 열전달 계수  $h$ 가 컸다. 이는 입구 영역에서는 열 경계 층이 얇아서 공기 체적 평균 온도와 벽면의 온도 차가 작기 때문이다.

높은 레이놀즈 수에서는  $x/D_h = 6.3$ 에서 큰 국부 열전달 계수가 발생하였다. 이는 V-형 연속 경사 리브에 의한 2차 유동의 재부착 효과로 사료된다.

Fig. 4는 평행 단절 리브(case B)에 대한 국부 대류 열전달 계수  $h$ 이다. 국부 대류 열전달 계수가 V-형 연속 리브(case A)보다 대체로 작다.

이는 벽면의 절반에만 단절 리브가 설치되어 2차 유동 셀이 약하게 발생하여 유동의 스윙(swirl)이 작게 일어나기 때문이다.

한 벽면 리브와 양 벽면 리브의 국부 열전달 계수의 값들은 큰 차이를 보이지 않는 것은 case A (Fig. 3)의 설명과 같다. Case B는 레이놀즈 수에 따른 국부 열전달 계수  $h$ 의 변화가 가장 작았다. 이는 벽면에 설치된 경사 리브가 주 유동(main stream)에 미치는 효과가 가장 작기 때문이다. 모든 경우 시험 부 마지막 부분에서 국부 열전달 계수가 상승하였다. 이는 시험부의 길이 방향 열전도 손실로 인하여 벽면 온도가 낮아졌기 때문이다.

Fig. 5는 단락된 V-형 리브(case C)의 국부 열전달 계수이다. 연속 V-형 리브(case A)보다 전체적으로 국부 대류 열전달 계수가 작았다. 이는 단락 V-형 리브의 경우 리브 단락으로 인하여 2차 유동 셀에서 상방향 일부가 누설되어 길이 방향으로 가속시키는 현상이 발생하기 때문이다. 동일한 리브 면적 비율을 갖는 case B보다 case C가 전체적으로 큰 국부 열전달 계수  $h$ 를 보인다. 이는 리브의 배치가 case B의 경우 벽면의 절반에, case C의 경우 벽면 전체 폭에 걸쳐서 설치되어 있어 주 유동에 미치는 리브 효과가 case C의 경우가 크기 때문이다.

Fig. 6은 case A, case B, 그리고 case C의 채널 평균 누셀트 수( $Nu_{av}$ )이다. 모든 경우 레이놀즈 수가 클수록 채널 평균 누셀트 수가 컸다. 이는 유속이 클수록 가열 벽면 온도( $T_w$ )와 유체 체적 평균 온도( $T_b$ )의 차이가 작아지기 때문이다. Case A보다 case B와 case C에서 한 벽면 리브보다 양 벽면 리브의 채널 평균 누셀트 수의 차이가 더 컸다. 이는 case B와 case C에서는 경사 리브에서 발생하는 2차 유동에 의한 스윙(swirl)이 작아 리브가 주 유동에 미치는 효과가 제한적이기 때문이다.

양면에 리브가 있고  $Re = 54,000$ 에서는 case A와 case C의 채널평균 누셀트 수는 case B보다 각각 158%, 122% 컸다. Fig. 7은 Dittus와 Boelter의 실험식<sup>8)</sup>으로 채널 길이 평균 누셀트 수를 무차원한 그림이다.

모든 경우 레이놀즈 수가 증가할수록  $Nu/Nu_{ss}$  값은 점차 감소하였다. 이는 매끈한 직선 원형관의 경우 낮은 레이놀즈 수에서는 난류 혼합이 벽

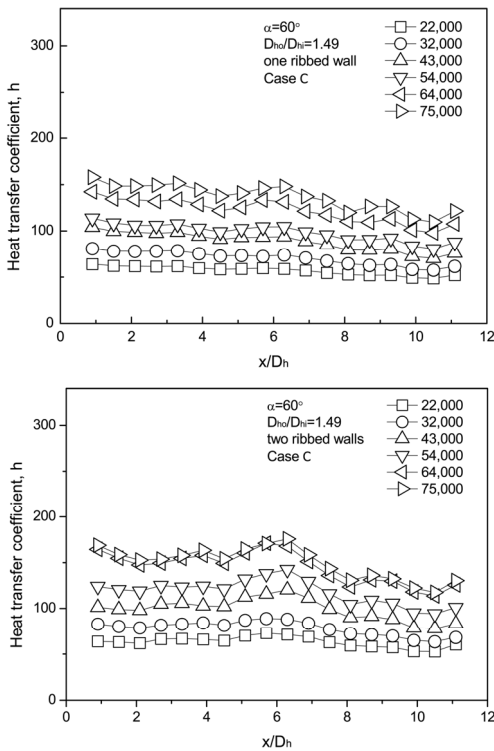


Fig. 5 Local heat transfer coefficients for case C

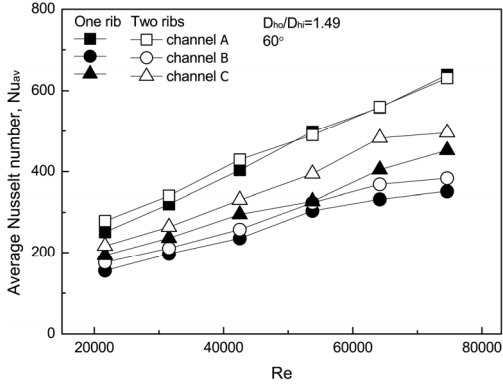


Fig. 6 Channel average Nusselt number

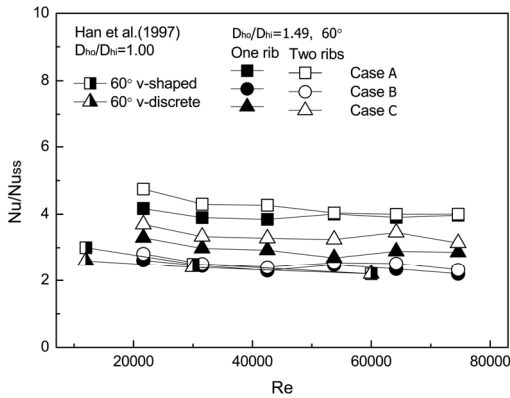


Fig. 7 Dimensionless Nusselt number

면에서부터 발생하는 크기가 작고 높은 레이놀즈 수에서는 강한 난류 혼합이 발생하기 때문이라 사료된다. 이는 난류 영역에서 리브가 누셀트 수에 미치는 영향은 레이놀즈 수가 높을수록 상대적으로 증가율이 작다는 것을 의미한다. 무차원 누셀트 수의 크기 순서는 case A, case C, 그리고 case B이다. 비교를 위해 직선 사각형 채널에서 리브의 유동 충돌각이 60°인 V-형 연속 리브(V-shaped)와 V-형 단절(V-discrete) 리브에 관한 Han 등<sup>1)</sup>의 연구를 포함하였다. 본 연구의 확대 채널이 직선 채널<sup>1)</sup>보다 무차원 누셀트 수가 컸다. 이는 확대 채널의 경우 길이 방향 거리에 따라 채널 단면적이 커져 채널 내 재순환 유동이 발생하여 공기 체적 평균 온도와 가열 벽면온도의 차이가 줄어들기 때문이라 사료된다.

## 4. 결론

사각 확대 채널에서 리브를 한 벽면과 양 벽면에 3 경우의 리브 배열을 설치하고 대류 열전달 계수를 실험적으로 측정된 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 한 벽면 V-형 연속 리브와 양 벽면 V-형 연속 리브는 전체적으로 국부 열전달 계수의 크기 차이는 별로 없었고, 낮은 레이놀즈 수(22,000, 32,000, 그리고 43,000)에서만 양 벽면 리브가 한 벽면 리브보다 열전달 계수가 근소하게 약간 컸다.

2) 양면에 리브가 있고 Re = 54,000에서는 case A와 case C의 채널 평균 누셀트 수는 case B보다 각각 158%, 122% 컸다.

3) 확대 채널의 경우 길이 방향 거리에 따라 채널 단면적이 커지기 때문에 채널 내 재순환 유동으로 인하여 공기 체적 평균온도와 가열 벽면 온도의 차이가 줄어 확대 채널이 직선 채널보다 무차원 누셀트 수가 컸다고 사료된다.

## References

1. J. C. Han, Y. M. Zhang and C. P. Lee, 1991, "Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 590-596.
2. J. S. Park, J. C. Han, Y. Huang and S. Ou, 1992, "Heat transfer performance comparisons of five different rectangular channels with parallel angled ribs", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 2891-2903.
3. 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.
4. 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.
5. 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).
  6. S. J. Kline and F. A. McClintock, 1953, "uncertainty in a single sample experiment", *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-5.
  7. M. S. Lee and S. W. Ahn, 2017, "Heat transfer enhancement in a divergent passage with 30° inclined ribs", *Korean J. of Air-Cond. and Refrig. Eng.*, Vol. 29, pp. 401-407.
  8. F. W. Dittus and L. M. Boelter, 1930 "University of California(Berkeley) Publications in Engineering 2", Berkeley, pp. 443-461.