

양측면 수축/확대 사각채널에서 한면에 설치된 리브의 각도가 열성능에 미치는 효과

Effect of Rib Angle on Thermal Performance in a Two Wall Convergent/Divergent Channel with Ribs on One Wall

안수환(Soo Whan Ahn)¹, 이명성(Myung Sung Lee)^{1†}, 배성택(Sung Taek Bae)²

¹경상대학교 기계시스템공학과, ²한국생산기술연구원

¹Dpt. of Mechanical and System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, 650-160, Korea

²Korean Institute of Industrial Technology, Busan, 618-230, Korea

(Received December 24, 2014; revision received February 2, 2015; Accepted: February 9, 2015)

Abstract The thermal performance in the channels with two-wall rectangular convergent/divergent cross-sectional areas along the axial distance was investigated experimentally. The ribbed rectangular convergent/divergent channels were manufactured with a fixed rib height (e) = 10 mm and the ratio of rib spacing (p) to height (e) = 10. Three different parallel angled ribs ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$, and 60°) were each placed on the channel's one sided wall only. The convergent channel of $D_{ho}/D_{hi} = 0.67$ and the divergent channel of $D_{ho}/D_{hi} = 1.49$ were considered. The ribbed divergent channel produced better thermal performance than the ribbed convergent channel in three different restrictions; identical flow rate, identical pumping power, and identical pressure loss.

Key words Convergent/divergent rectangular channel(수축/확대 직사각 채널), Heat transfer(열전달), Total friction factor(전마찰계수), Rib angle(리브 각도), Thermal performance(열성능)

† Corresponding author, E-mail: leems@gnu.ac.kr

기호설명

A : 열전달 면적 [m^2]
 D_h : 채널 평균 수력 직경 [m]
 Nu : 채널 평균 누셀트 수, $\frac{\bar{h}D_h}{k}$
 \bar{h} : 채널 평균 열전달 계수 [W/m^2K],
 $\frac{Q-Q_c}{A_p(T_w-T_b)}$
 Pr : 프란트 수
 Q : 열전달 율 [W]

하첨자

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

1. 서 론

가스터빈 엔진은 단위체적당 발생하는 출력이 크고, 대기오염 물질의 배출이 다른 내연기관에 비해 적어 현재 항공, 선박, 발전 및 군사용으로 폭 넓게 사용되고 있다. 고성능의 터빈 개발에서 가스터빈의 블레이드 입구 온도 상승은 필연적이다. 하지만 이러한 온도상승은 연소기 라이너, 베인 블레이드 등 부품에 큰 열 부하를 주며 현재 사용 중인 재료는 높은 열 부하를 견딜 수 없다. 따라서 다양한 냉각 기술 개발은 가스 터빈 엔진 연구에서 중요한 요소로 신뢰성 및 내구성을 향상시키기 위해 많은 연구가 진행중이다. 대표적인 연구로 리브에 의한 냉각기술 개발이 있으며 리브 높이 비(e/D_h), 리브 피치비(p/D_h), 리브 충돌각, 채널 형상비, 리브 단면 모양, 그리고 리브 배열(직선 혹은 V형 배열) 등의 형상 파라미터들의 실험적 연구에 대해 광범위하게 수행되었다. 직선 사각채널 내 리브를 설치하여 열전달을 향상시키는 연구는 Han et al.⁽¹⁾은 채널 단면비가 다양한 채널에서 한면에 리브가 설치된 경우 리브 각도가 열

전달에 미치는 효과를 실험적으로 조사하였다. 그 결과 단면비가 1/2인 직사각 채널에서는 유동 충돌각이 45°에서 가장 높은 누셀트수를 보였다. Han et al.⁽²⁾은 정사각 채널의 실험에서 유동 충돌각 60°~75°인 리브가 최대 열전달계수이고, 일정한 유체이송동력 조건에선 충돌각이 30°~45°일 때 최대의 열전달 향상효과를 보였다. Ahn et al.⁽³⁾등은 4벽면을 독립적으로 가열하고 90° 유동충돌각의 리브가 설치된 정사각 채널에서 리브 벽면의 수와 가열 벽면의 수가 열전달과 압력강하에 미치는 영향을 조사하였다. 리브를 바닥면, 상하 양면, 그리고 4면 모두 각각 설치였고 가열조건은 상하 양면과 4면 모두 가열하는 2가지 경우가 되도록 하였다. 그 결과 리브가 한면에만 설치되고 양면 가열의 경우가 가장 열전달 성능이 우수하였다. Lau et al.⁽⁴⁾은 정사각 채널에서 90° 유동 충돌각의 일체형 리브, 90° 분리 리브, 병렬 및 다양한 흐름의 입사각과 분리된 리브의 교차 등에 관한 완전히 발달된 영역의 열전달과 마찰계수를 실험적으로 조사하였다.

수축과 확대 채널 내 벽면의 리브가 열전달에 미치는 연구로는 Wang et al.⁽⁶⁾의 수축/확대 사각 채널 단면적의 비가 곡부와 채널 평균 열전달에 미치는 영향을 측정할 결과 채널 단면적의 변화는 채널 평균 열전달에 큰 영향을 준다는 것을 입증하였다. 그러나 Wang et al.⁽⁶⁾은 채널의 확대와 수축 각도가 1°이고 리브 유동 충돌각이 90° 유동인 수축/확대 채널의 한 경우에 대해서만 연구하였다. 최근에 Lee et al.⁽⁶⁾은 리브 충돌각이 90°로 설치된 입출구 수력직경비가 0.69, 0.86, 1.16 그리고 1.49인 수축과 확대 사각 채널의 완전히 발달된 영역에서 입출구 수력 직경비가 열전달과 마찰계수에 미치는 효과를 실험적으로 조사하였다. 그 결과 시험부 입출구 수력 직경비가 1.16인 확대 채널일 때 가장 열전달 성능이 높았다. Lee et al.⁽⁷⁾ 수력직경비가 1.16이고 충돌각이 30°, 45°, 60° 그리고 90°인 확대 채널에 대해 열전달 성능을 실험적으로 조사한 결과 직선채널의 Han et al.⁽¹⁾의 결과와 다르게 60°에서 가장 높은 누셀트수가 나타났다. 이는 수축/확대 채널에서는 입출구 수력 직경비에 따라 유동 충돌각이 열성능에 미치는 효과가 달라진다는 것을 입증한다. 그러므로 본 연구는 입출구 수력직경비가 0.69인 수축 채널과 수력직경비가 1.49인 확대채널에서 한면에 설치된 리브의 각도가 열성능에 미치는 효과를 실험적으로 조사하여 최적의 리브 유동 충돌각을 구하는데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험 장치를 도식적으로 나타낸 그림이다. 전체 채널 길이는 4,000 mm이고 시험부는 1,000 mm로 하였다. 시험부 입구에는 균질유동을 만들기 위해 300 mm

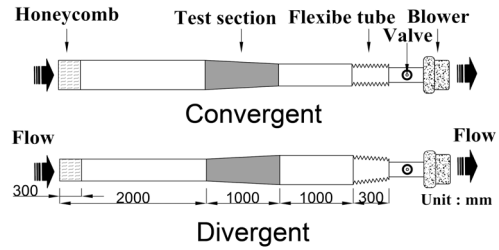


Fig. 1 Experimental setup.

길이의 허니콤을 설치하였다. 입구와 출구에는 외부의 영향을 최소화하기 위해 투명 폴리 카보나이트를 각각 2,000 mm와 1,000 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 피토포를 사용하여 원관중심에서 벽면까지 국부유속을 측정할 후 심프슨 법칙으로 원관의 체적평균 유속을 구하고 연속법칙으로 사각채널인 시험부의 체적평균 유속을 얻었다. 사각 채널 시험부에는 실리콘 포일 히터를 좌우면에 설치하고 상하 양면에는 단열이 되도록 하였다. 채널 구조는 좌우 벽면 만 수축 및 확대되며 입출구의 수력 직경의 수축비(D_{no}/D_{hi})는 0.67, 확대비(D_{no}/D_{hi})는 1.49로 제작하였다. 여기서 D_{no} 와 D_{hi} 는 각각 채널 시험부 출구와 입구의 수력직경이다.

리브는 한 면에만 설치하고 리브가 설치된 벽은 10 mm×100 mm×5 mm(t)의 리브를 연속적으로 배치되었다. 리브의 충돌 각은 30°, 45° 그리고 60°로 변화를 주었다. 리브의 피치(p)/높이(e)의 비는 10으로, 리브의 높이와 채널의 수력직경비(e/D_h)는 수축채널에서는 0.1에서 0.2로 확대채널에서는 0.2에서 0.1로 변한다.

시험부 좌우 벽면은 열전도성이 높은 구리판을 여러 영역으로 나누는 구리판법(copper plate method)을 이용하여 10개의 영역으로 구분하여 매 영역마다 1개의 구리판을 설치하고 영역 사이에는 열전도를 방지하기 위해 0.5 mm 두께의 고무 가스켓으로 분리하였다. 가열된 구리판과 리브는 가열되지 않는 벽면으로 복사 손실 열을 최소화하기 위해 매끈하게 제작하였다.

시험부 입출구를 차단하고 그 속에 단열재를 채운 상태에서의 열손실은 시험부 온도가 정상상태에서 공급되는 열 즉, 시험부 외부로 누설(손실)되는 열과 같다. 그러므로 단위면적 당의 열 손실(q_l)은 아래와 같이 계산된다.

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

여기서 T_{∞} 는 주위온도, Δy_1 과 k_1 는 운모의 두께와 열전도도, Δy_2 과 k_2 는 송판의 두께와 열전도도, Δy_3 과 k_3 는 유리 섬유층의 두께와 열전도도, 그리고 h_l 는 채널 주위의 자연 대류 열전달 계수이다.

모든 경우 열손실은 5.8%이내였다. 본 연구에서는 단상 교류 전원을 사용하였으며, 히터에서 공급되는 열전달율($Q-Q_l$)은 아래의 대류 열전달에 의해 점검하였다.

$$Q - Q_l = \dot{m}c_p(T_{bo} - T_{bi}) \quad (2)$$

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

채널 유동의 마찰 계수는 채널 수축과 확대에 의한 동압 성분의 변화 효과를 고려한 전 압력 강하(ΔP_T)의 식(3)을 이용하여 식(4)와 같이 구했다. 전압의 측정은 벽면에 설치된 압력 탭으로부터 측정된 정압(static pressure)과 시험부 입구와 출구의 평균유속에 의한 동압(dynamic pressure)을 합한 값으로부터 얻었다. 정압측정용 압력탭은 채널 상부의 단열된 매끈한 벽면에 100 mm 동일 간격의 9개의 구멍을 설치하여 제작하였다.

$$\Delta P_T = P_i - P_o + \frac{1}{2}\rho u_{bi}^2 - \frac{1}{2}\rho u_{bo}^2 \quad (3)$$

$$f_T = \frac{D_h}{2\rho u_b^2} \left| \frac{\Delta P_T}{\Delta L} \right| \quad (4)$$

여기서 P_i 와 P_o 는 각각 시험부 입구와 출구의 정압 강하이다. 수축과 확대 채널의 경우 x, y, z 방향의 속도 변동 성분을 고려해야하나 본 연구에서는 유동 방향에 대한 단면적의 변화가 체적 평균 속도(u_b)에 비해 크지 않기 때문(충돌각 = 0.7°, 1.4°)에 속도 변동 성분은 무시 하였다. 수력 직경(D_h)은 채널 평균값이다. 채널의 레이놀즈 수의 정의는 아래와 같다.

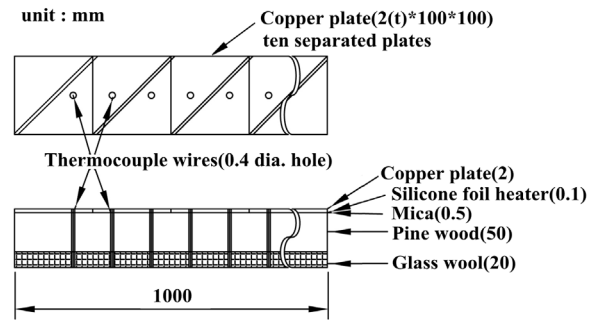
$$Re = \frac{u_b D_h}{\nu} \quad (5)$$

여기서 u_b 는 채널 입구와 출구 위치의 체적평균 유속이다. 모든 운전에서 레이놀즈 수는 질량 유량을 구하여 결정하였다. 국부 열전달 계수(h)는 아래와 같이 정의하였다.

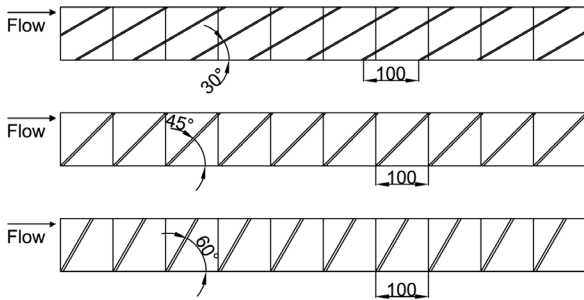
$$h = [(Q - Q_l)/A(T_{wx} - T_{wx})] \quad (6)$$

그리고 채널 평균 누셀트 수(Nu)은 아래와 같이 정의하였다.

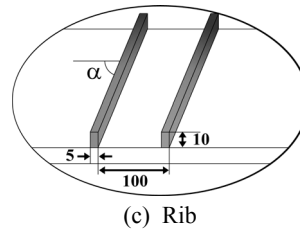
$$Nu = \frac{\bar{h} D_h}{k} \quad (7)$$



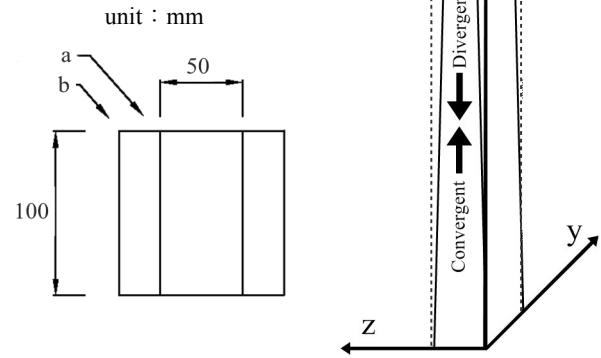
(a) Rib size and arrangement(right side surface)



(b) Rib size and arrangement(right side surface)



(c) Rib



(d) Convergent(b → a) and divergent(a → b)

Fig. 2 Diagram of test section.

불확실성은 Kline and McClintock⁽⁸⁾가 제시하는 방법으로 수행하였고 최대 불확실성은 평균누셀트수에서는 11%와 마찰계수에서는 12%이었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3는 수축과 확대 채널에서 한 면에 설치된 리브 각도 변화에 따른 전압강하를 보여준다. 확대채널에서는 양(+)의 값을 나타내고 수축채널에서는 음(-)의 값을 나타낸다. 이는 확대채널의 경우 유속방향으로 단면적이 확대됨에 따라 유속이 감소하기 때문으로 사료된다. 수축 채널인 경우에는 이와 반대로 유속방향으로 단면적이 감소함에 따라 유속이 증가하기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 리브각도에 따른 전 마찰 계수를 보여준다. 비교를 위해 유동 충돌각이 90°인 리브가 설치된 Lee et al.⁽⁷⁾의 값을 포함하였다. Lee et al.⁽⁷⁾의 결과와 동일하게 수축채널에서 더 큰 값을 나타내었다. 이는 유동 막힘으로 인한 것으로 사료된다. 수축 및 확대 채널

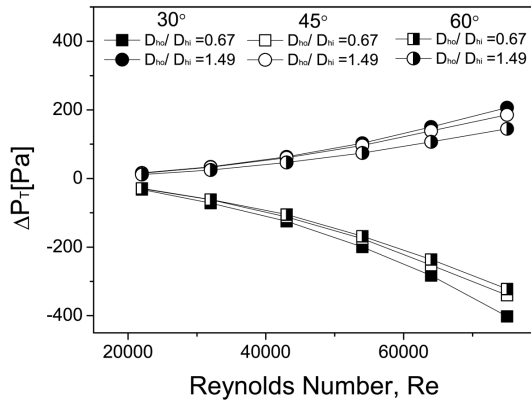


Fig. 3 Total pressure drops.

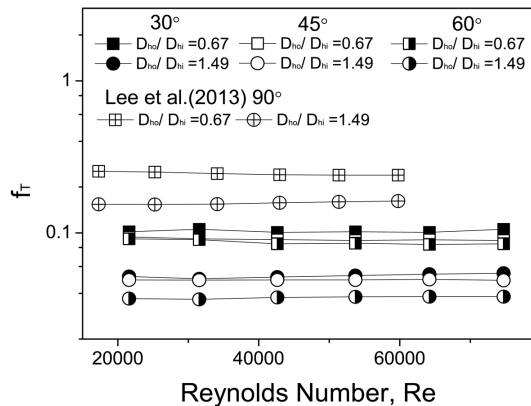


Fig. 4 Total friction factors.

모두 전 마찰계수의 크기는 30°, 45° 그리고 60°순으로 나타났다. 그 이유는 주유동과 리브가 이루는 충돌각이 때문인 것으로 사료된다. 이는 Fig. 5와 같이 리브가 설치된 채널에서는 리브 유동 충돌각이 90°에 가까울수록 크게 발생하는 재순환 유동과 30°에 가까울수록 크게 발생하는 스월(swirl)유동의 복합적 유동이 작용하기 때문이라 사료된다. 수직인 가로 축방향의 리브가 설치된 Lee et al.⁽⁷⁾의 결과가 경사 리브인 본 연구보다 대체로 크게 나타났다. 이는 본 연구에서는 D_h 를 $(D_{hi} + D_{ho})/2$ 로, u_b 를 $(u_{wo} + u_{wi})/2$ 로 정의된 반면에 Lee et al.⁽⁷⁾의 연구에서는 0.67, 0.86, 1.16, 1.49 채널을 모두 비교하기 위해 수력직경이 0.1인 즉 수축채널 ($D_{hi}/D_{ho} = 0.67$)인 경우 D_{hi} 와 u_{hi} 를 정의하였고 확대채널($D_{hi}/D_{ho} = 1.49$)인 경우 D_{ho} 와 u_{ho} 로 각각 다르게 사용하였기 때문이다.

Fig. 6는 리브각도에 따른 채널평균 누셀트수를 나타낸다. 수축과 확대채널 모두 30°의 값이 가장 크게 나타났다. 비교를 위하여 채널 단면적의 비가 1/2인 직사각형 직선 채널에 관한 Han et al.⁽¹⁾의 연구결과와 수력직경이 1.16인 확대채널⁽⁷⁾값을 포함하였다.

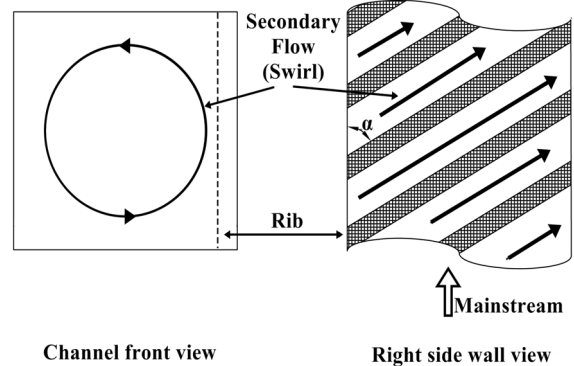


Fig. 5 Effect of rib angle on secondary flow.

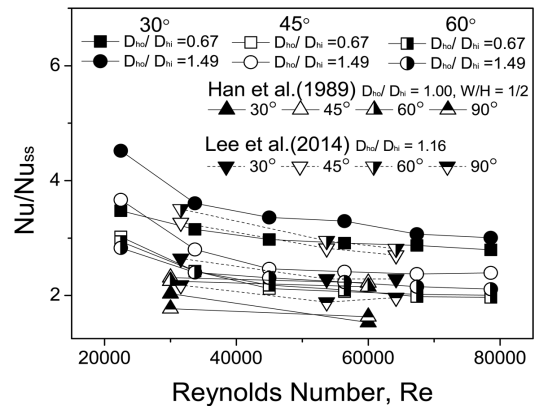
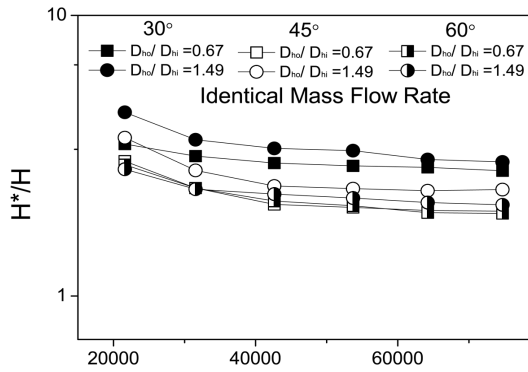


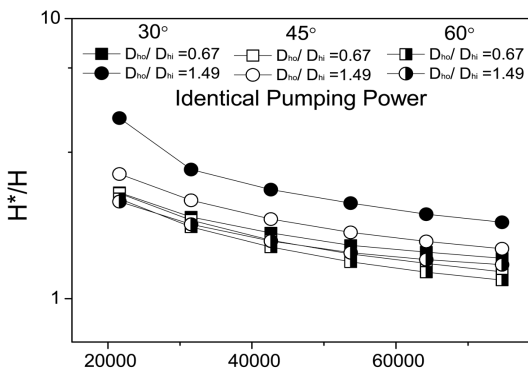
Fig. 6 Channel average Nusselt numbers.

Han et al.⁽¹⁾의 연구결과에서는 충돌각 45°에서 수력 직경이 1.16인 확대채널⁽⁷⁾에서는 60°에서 각각 최대 누셀트수가 되었다. 이는 리브가 설치된 채널에서 수축과 확대 정도에 따라 크게 변하는 스윙유동 때문인 것으로 사료된다.

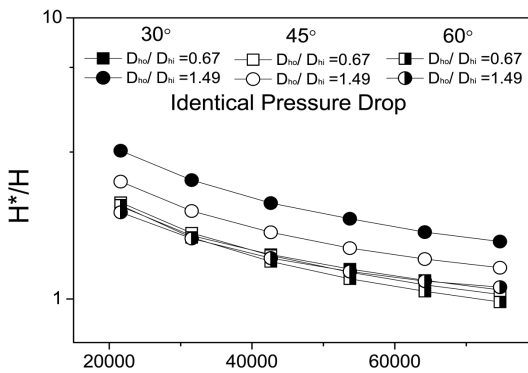
Fig. 7은 열전달 성능곡선을 나타내었다. 열성능 비



(a) Identical mass flow rate



(b) Identical pumping power



(c) Identical pressure drop

Fig. 7 Thermal performance comparisons.

교를 위해 3가지 보편적인 제약 조건을 채택 하였다. 즉 동일유량(식(8)), 동일 펌프 동력(식(9)) 그리고 동일한 압력 강하(식(10))이다.

$$Re^* = Re(D_h^*/D_h)(A_c/A_c^*) \quad (8)$$

$$Re^* = \sqrt[3]{\frac{fRe^3}{f^*}} \quad (9)$$

$$Re^* = Re\sqrt{f/f^*} \quad (10)$$

유체와 벽면사이에 동일한 온도 차이의 조건에서 비교 채널과 기준 채널 사이의 열전달의 비율은 다음과 같이 공식화 하였다.

$$\frac{H^*}{H} = \frac{[Nu(Re)]^*}{Nu(Re)} \quad (11)$$

여기서 위첨자 *은 비교 채널을 나타내며 *가 없는 값은 기준(원형관) 채널을 나타낸다. 3가지 조건 모두 수축채널보다 확대채널이 컸고 30° 유동 충돌각의 리브가 설치된 확대채널에서 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 30° 경사진 리브에 의해 발생된 스윙류로 인해 난류가 가장 활발하게 발생하였기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

시험부 입구와 출구의 수력직경비가 각각 0.67과 1.49인 수축 및 확대 채널에서 리브의 충돌 각이 30°, 45° 그리고 60°인 경우 전 마찰계수, 누셀트 수, 그리고 열성능의 연구 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 확대채널보다 수축채널의 전 마찰계수가 컸다. 수축 및 확대 채널 모두 전 마찰계수의 크기는 30°, 45° 그리고 60°순으로 나타났다.
- 2) 채널평균 누셀트수는 직선채널에서는 리브의 유동 충돌각이 45°에서, 입출구 수력직경비가 1.16인 확대 채널에서는 60°, 그리고 수력직경비가 0.67과 1.49에서는 30°의 유동 충돌각이 가장 크게 나타났다.
- 3) 열성능은 3가지 조건 모두 수축채널보다 확대채널이 컸고 30° 유동 충돌각의 리브가 설치된 확대채널에서 가장 큰 값을 나타내었다.

후 기

이 논문은 2012~2014년도 미래 창조 과학부의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업입니다(과제번호 : 2012001401).

References

1. Han, J. C. and Zhang, P., 1991, Effect of rib-angle orientation on local mass transfer distribution in a three-pass rib-roughened channel, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, No. 1, pp. 123-130.
2. Han, J. C., Ou, S., Park, J., and Lei, C., 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.
3. Ahn, S. W., Kang, H. K., Bae, S. T., and Lee, D. H., 2008, Heat transfer and friction factor in a square channel with one, two, or four inclined ribbed walls, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 130, No. 3, pp. 034501-5.
4. Lau, S., McMillin, R., and Han, J., 1991, Turbulent heat transfer and friction in a square channel with discrete rib turbulators, *Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, No. 3, pp. 360-366.
5. Wang, L., Tao, W., Wang, Q., and Wong, T. T., 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. Lee, M. S., Jeong, S. S., Ahn, S. W., and Han, J. C., 2013, Heat transfer and friction in rectangular convergent and divergent channels with ribs, *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 27, No. 4, pp. 660-667.
7. Lee, M. S., Jeong, S. S., Ahn, S. W., and Han, J. C., 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.
8. Kays, W. M. and Crawford, M. E., 1990, *Convective Heat and Mass Transfer*, 2nd, McGraw-Hill, NY.