

터빈 기익 선단부에 설치된 냉각유로에서의 요철배열에 따른 열전달 특성

이동현* · 김경민* · 이동호* · 조형희**

Heat Transfer Characteristics in a Leading Edge Cooling Channel of a Turbine Blade with Various Rib Arrangements

Dong Hyun Lee*, Kyung Min Kim*, Dong Ho Rhee*, Hyung Hee Cho**

Key Words : Coriois force(코리올리력), Equilateral triangular channel(정삼각유로), Gas turbine(가스터빈), Heat transfer(열전달), Internal cooling passage(내부냉각유로)

ABSTRACT

The present study investigates the heat transfer characteristics of a triangular channel. Three different rib configurations are tested. The ribs are installed on two sides of the channel. The rib height (e) to channel hydraulic diameter is 0.079 and the rib-to-rib pitch (p) is 8 times of the rib height. The rotation number ranges from 0.0 to 0.1 while the Reynolds number is fixed at 10,000. The copper blocks with heaters are installed on the channel walls to measure the regionally averaged heat transfer coefficients. For the stationary 45° and 135° ribbed channels, a pair of counter rotating vortices is induced by the angled rib arrangements, and high heat transfer coefficients are obtained on the regions near the inner wall for the 45° ribbed channel and near the leading edge for the 90° ribbed channel. The heat transfer coefficients of angled ribbed channels are changed little with rotation, whereas those of the transverse ribbed channel are changed significantly with rotation.

1. 서론

가스터빈의 성능을 향상시키기 위해 터빈입구온도(TIT)는 꾸준히 증가되어 왔으며, 현재의 가스터빈은 기익 재질의 허용한계를 훨씬 넘어서 온도에서 작동하고 있다. 이러한 고온의 환경 하에서 터빈 기익을 보호하기 위해서는 다양한 냉각방식의 적용이 필수적이다.

이중 내부유로 냉각기술은 터빈의 압축기로부터 나오는 냉각유체를 블레이드 내부의 유로에 주입하여 강

제대류시킴으로서 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하는 방법이다. 내부관의 냉각성능 및 효율은 여러 가지 인자에 의하여 결정지어지며, 이에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히, 회전하는 환경 하에서는 유로를 지나가는 냉각 유체에 회전에 의한 코리올리력이 작용하여 정지되었을 때와는 다른 유동 및 열전달 특성이 나타난다. 그렇기 때문에 향상된 냉각설계를 위해서는 회전하는 조건에서의 열전달 특성에 대한 연구가 필요하며, 최근 내부 유로 냉각에 대한 대부분의 연구는 회전에 의한 영향을 고려하여 이루어지고 있다. Lau이와 Han⁽¹⁾은 정사각형의 단면을 가지는 이차유로에서 회전방향과 유로의 상대적인 각도의 변화에 대한

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과, 책임저자

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

연구를 수행하였으며, Cho 등^(2,3)은 다양한 경사요철이 설치된 유로에서 회전에 의한 열전달 분포의 변화를 나프탈렌승화법을 이용하여 측정하였다. Wright 등⁽⁴⁾은 썩기형 요철이 설치된 직사각 유로에서의 냉각 성능에 대하여 연구하였으며, Liou와 Dai⁽⁵⁾는 45° 경사요철이 설치된 유로에서의 유동 특성 및 압력강하에 대하여 고찰하였다.

이와 같이 내부 유로 냉각에 관한 연구는 정사각형 또는 직사각형의 단면을 가지는 유로에 집중되어져 있다. 그러나 실제 터빈 기익은 사다리꼴이나 삼각형 등 다양한 단면 형상의 내부유로를 가지고 있다. 이러한 유로에서의 유동 및 열전달 특성은 직사각유로에서와는 다를 것이다. 특히 터빈 기익의 선단부는 가장 큰 열부하를 받는 영역이며, 위치에 따라 열부하가 급격하게 변화한다.⁽⁶⁾ 그러므로 터빈 기익의 선단부에 위치한 냉각 유로의 열전달 특성은 터빈 기익의 냉각시스템 설계에 있어 매우 중요한 역할을 한다. 터빈 선단부의 냉각 유로를 모사하기 위해서는 삼각형 형상의 단면을 가지는 유로가 흔히 사용된다.

몇몇 연구자들에 의해서 삼각형 형상의 단면을 가지는 유로에서의 열전달 특성에 대한 연구가 이루어졌다. Metzger와 Vedular⁽⁷⁾는 정지된 정삼각 유로에서 요철의 배열에 따른 열전달 분포를 국소적으로 측정하였으며, Zhang 등⁽⁸⁾은 직각 삼각형의 유로에 요철이 전체적으로 설치된 경우와 부분적으로 설치된 경우의 열전달 계수와 압력강하를 측정하였다. Ahn 과 Son⁽⁹⁾은 한 면에만 요철이 설치된 삼각 유로에서의 열전달 및 압력강하 특성을 연구하였으며, 요철의 설치에 따른 유동의 속도분포 변화를 측정하였다. 회전하는 삼각유로에서의 열전달 특성은 Dutta 등⁽¹⁰⁻¹²⁾에 의해 이루어졌으며, 요철이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 회전에 의한 열전달 특성의 변화가 서로 다르다고 보고하였다. 삼각형 형상의 유로에 대한 몇몇 연구가 이루어져 왔지만, 회전하는 삼각 유로에서의 다양한 요철 배열에 따른 열전달 특성에 대한 연구는 아직 부족한 상황이다.

따라서 본 연구는 회전하는 정삼각형 단면의 유로에 대하여, 요철의 배열에 따른 영향을 고려한 열전달 특성을 파악하는 것에 초점을 맞추었으며, 이와 함께 기익의 선단부에서 발생하는 급격한 열부하의 변화를 고려한 냉각 유로의 성능평가를 위해 각 면을 선단부에 가까운 곳과 기익 내부유로사이의 격벽에 가까운 곳으로 나누어 각각 측정하였다.

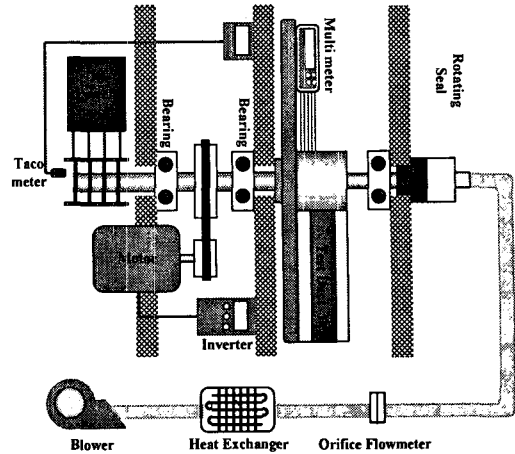


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

2. 실험 장치

2.1 회전 장치

Figure 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이다. 회전판은 회전부의 무게중심을 맞추기 쉽도록 세로로 설치되어 있으며, 인버터로 제어되는 3상 모터에 의하여 구동된다. 회전축의 하부에는 회전 속도계가 설치되어 있다.

송풍기에 의해 공급된 공기는 열교환기와 오리피스형 유량계를 거친 후, 회전 장치 내부에 설치된 시험 유로로 공급된다. 시험 유로 입구에는 유동을 안정화시키기 위한 플리넘이 설치되어 있으며, 이후 시험 유로를 통과한 공기는 대기로 방출된다.

시험 유로와 디지털 멀티미터(Agilent, 34970A)는 회전판 위에 설치되어 있으며, 회전부에서 측정된 신호를 PC로 전송하기 위해 한 쌍의 시리얼 어댑터(Korwin, KW-SA5)가 사용되었다. 회전판 위의 멀티미터와 히터에 필요한 전원은 회전축 끝단에 설치된 슬립링을 통하여 공급하였다.

2.1 시험 유로

Figure 2는 실험에 사용된 정삼각 유로의 개략도와 단면도를 나타낸 그림이다. 시험 유로의 입구는 회전 중심으로부터 $4.7 D_h$ 떨어져 있으며, 유로의 총 길이는 $22 D_h$ 에 해당한다. 시험 유로는 $8.1 D_h$ 의 발달구간, $10.9 D_h$ 의 가열구간 그리고 $3.0 D_h$ 의 출구부로 구성되어 있다. 유동은 10개 이상의 요철을 지나 발달구간에 이르므로, 열전달 계수는 완전 발달된 난류유동장

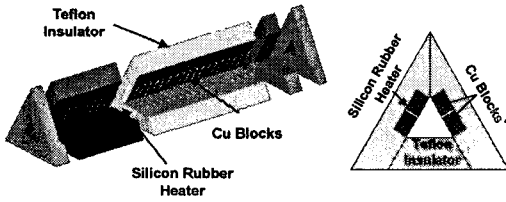


Fig. 2 Schematics of experimental apparatus

에서 획득된다.

시험 유로의 요철이 설치된 두면은 각각 터빈 기의 압력면과 흡입면을 모사하며, 요철이 설치되지 않은 면은 내부 유로 사이의 격벽을 모사한다. 시험유로는 테프론으로 제작되었으며, 단열재로 채워진 프레임 안에 설치하여 시험중 열손실을 최소화 하였다. 각 가열면에는 피치당 한 쌍의 구리블록이 설치되어져 있으며, 각 구리블록은 요철을 포함하여 제작되었다. 구리블록의 평균온도를 측정하기 위해 J-type 열전대를 각 구리블록의 중앙에 삽입하였으며, 구리블록간의 전도를 줄이기 위해 구리블록의 사이에는 1mm 두께의 테프론을 삽입하였다.

구리블록을 가열하기 위해 각 가열 면의 구리블록 아래에 실리콘 리버 히터(Minco, 126Ω)를 설치하였다. 히터에 공급되는 전류는 히터와 직렬로 연결된 셉트를 통하여 측정되었다. 또한, 유동의 평균 출구온도를 측정하기 위한 혼합부가 시험 유로의 출구에 설치되어 있다.

좌표계의 원점은 회전 중심에 위치하며, 주유동 방향은 x 로, 가열되지 않은 면에 수직인 방향과 평행한 방향을 각각 y 와 z 로 표현하였다.

2.1 요철 배열

Figure 3은 실험에 사용된 요철의 배열을 나타낸 그림이다. 서로 다른 층돌각을 가지는 3 가지 요철 배열이 사용되었으며, 각 요철의 층돌각은 45°, 90° 그리고 135° 이다. 모든 경우에 대하여 요철은 압력면과 흡입면에 엇갈리게 설치되어져 있다. 요철은 정사각 단면을 가지고 있으며, 요철과 요철간의 거리는 요철 높이의 8배, 요철 높이대 수력직경의 비는 0.79이다.

각 가열면은 2개의 구간으로 나누어져 있으므로, 열전달계수는 총 4개의 구간으로 나누어져 측정되어 졌다. 각 영역은 PL, PI, SL 그리고 SI로 표현되며, 각 영역의 위치는 Fig. 4에 도시되어 있다. 여기서, P는 압력면(pressure side)을, S는 흡입면(suction side)

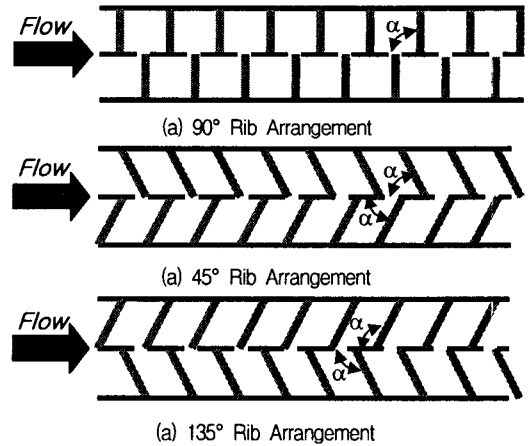


Fig. 3 Schematics of rib arrangement

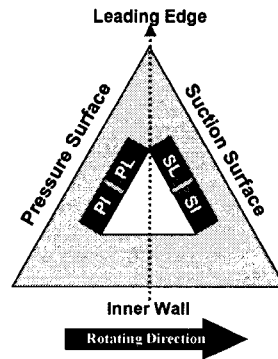


Fig. 4 Rotating direction and notations of four regio

을 의미한다. 또한, L(leading edge)은 각 면에서 전연부에 가까운 영역을, I(inner wall)는 내부 유로 사이의 격벽에 가까운 영역을 나타낸다.

3. 측정 방법 및 결과 처리

3.1 열전달 계수 측정

영역 평균된 열전달 계수는 구리블록의 평균 열전달율, 유동에 노출된 면적, 그리고 각 구리블록의 표면온도와 주유동의 평균 온도의 차이로부터 다음과 같이 계산된다.

$$h = \frac{\dot{Q} - Q_{loss}}{A_p(T_s - T_b)} \quad (1)$$

열전달율(\dot{Q})은 히터에 공급된 전류와 히터의 저항

을 통해 계산되며, 총 열손실(Q_{loss})은 실험 중 히터에 공급된 열과, 유로를 통과한 공기의 온도상승의 차이를 통해 구해진다. 또한, 각 구리블록마다의 열손실은 일정하지 않으므로, 별도의 실험을 통해 보정하였다.

식 (1)에 사용된 구리블록의 표면 온도는 구리블록의 중앙에서 측정된 평균 온도로부터 1차원 전도 방정식을 통해 계산되며, 평균온도와 표면온도의 차이는 0.3℃ 미만이므로, 1차원 가정에 의한 오차는 매우 작다고 할 수 있다. 가열면에 설치된 히터는 표면에서 균일한 열유속을 발생시키므로 유동의 평균 온도는 입구에서 출구까지 선형적으로 상승한다고 가정하였으며, 유동의 입구온도는 시험 유로 입구에 설치된 열전대를 통해, 출구온도는 유로 출구에 위치한 혼합부에 설치된 4개의 열전대를 통해 측정하였다.

Nusselt 수는 측정된 열전달 계수로부터 다음과 같이 구해지며,

$$Nu = \frac{hD_h}{k_{film}} \quad (2)$$

여기서, 공기의 전도계수는 표면온도와 유동의 평균 온도의 평균값(film temperature)에서의 물성치를 사용하였다.

열전달 계수에 대한 Reynolds 수의 영향을 배제하기 위하여 Nusselt 수는 매끈한 원형관 내에서 완전발달한 난류유동장에서 나타나는 Nusselt 수인 $Nu_0 (=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4})$ 에 대한 비로 나타내었다.

Nusselt 수의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽¹³⁾의 방법에 의해 95%의 신뢰수준에서 9.8% 이내이며, 열유속과 출구 평균온도의 오차가 불확실성의 가장 큰 원인으로 작용하였다.

3.2 압력 강하 측정

시험 유로의 정압은 가열되지 않는 면에 설치된 10개의 압력탭에서 측정되었다. 각 위치에서의 정압은 소형 압력 스캐너(PSI, ESP-32hd)에 의하여 측정되었다. 평균 압력 강하량은 국소 차압 측정값의 선형 맞춤에 의해 계산되며, 다음과 같이 정의된다.

$$f = \Delta P / [4(\Delta L/D_h)(1/2)\rho V^2] \quad (3)$$

유로를 통과하는 공기의 질량유량과 Reynolds 수의 불확실성은 각각 1%와 1.4%이며, 평균 압력 강하와

마찰계수의 불확실성은 각각 4.7%와 4.9%이다. 마찰계수 또한 매끈한 원형 유로내의 완전발달한 난류유동장에서의 마찰계수, $f_0 (=2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2})$ 와의 비의 형태로 제시되었다.

열전달 성능계수는 일정 유체 이송동력을 기준으로 다음과 같이 정의되고, 이는 요철 설치로 인한 열전달 향상과 마찰손실의 증가를 함께 고려한 것이다.

$$\eta = (\overline{Sh}/Sh_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (4)$$

4. 결과 및 고찰

45°, 90°, 135°의 충돌각을 가지는 요철이 설치된 정삼각형 단면의 유로에서의 열전달 계수와 압력강하를 회전수를 변화시켜 가며 측정하였다. 실험 조건은 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1 Test parameters and operating condition

Attack Angle	Ro	e/D_h	p/e	Re_{Dh}	H.F.
45°	0.00				
90°	0.05	0.079	8.0	10,000	10KW/m ²
135°	0.1				

4.1 수치해석 결과

요철에 의한 이차유동과 회전에 의한 코리올리력은 유로 내의 열전달 특성에 영향을 미치는 가장 중요한 인자이다. Fig. 5는 각각의 시험 유로에서의 주유동의 속도분포와 이차유동의 구조를 상용 코드인 Fluent 6.1을 이용하여 계산한 결과이다. 회전이 없는 경우 주유동의 속도분포는 대칭적으로 나타나며, 45°와 135°의 충돌각을 가지는 경사요철이 설치된 경우에 한 쌍의 와류가 생성된 것이 관찰된다. 유로가 회전하게 되면, 코리올리력의 영향으로 주유동의 속도분포는 압력면 쪽으로 편향되며, 90° 요철이 설치된 경우 이전에는 관찰되지 않던 이차유동이 발생하게 된다. 45°와 135° 경사요철의 경우 정지상태에서 대칭적으로 형성되었던 이차유동이 코리올리력에 의해 변형됨을 알 수 있다.

4.2 90° 요철에 의한 열전달 특성

Figure 6은 90° 요철이 설치된 유로에서의 Nusselt 수의 비를 나타낸 그림이다. 좌표계의 원점이 회전 중

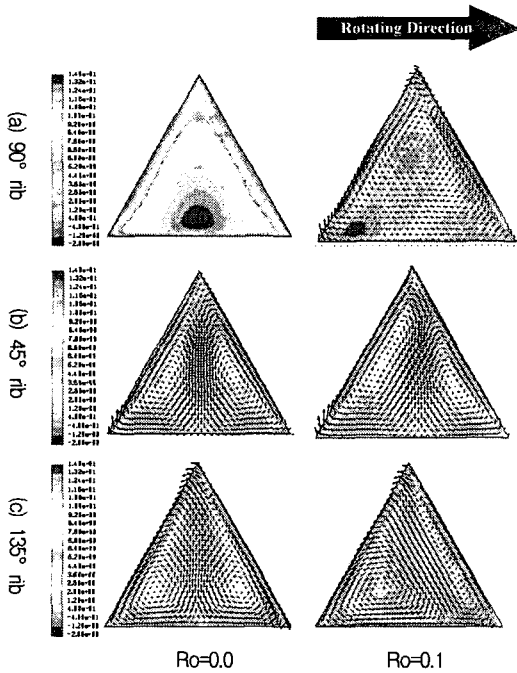
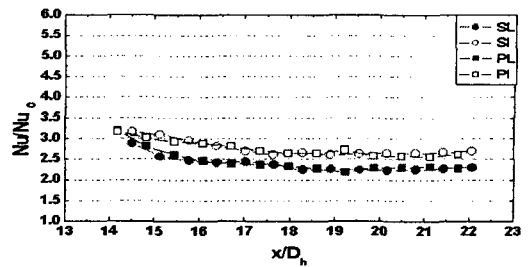


Fig. 5 Predicted mainstream distributions and secondary flow structures

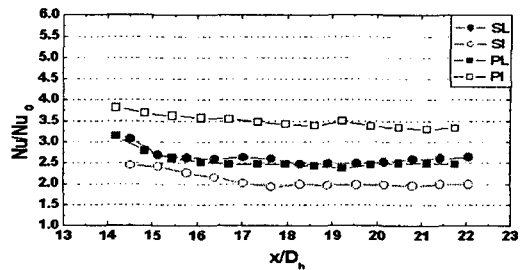
심에 위치하므로, 그림의 x -축은 회전중심으로 부터의 무차원화된 거리를 의미한다.

정지된 경우, 압력면과 흡입면의 열전달 계수는 차이가 없다. 그러나 선단부에 가까운 영역 (SL, PL) 의 열전달 계수는 격벽에 가까운 영역 (SI, PI) 에 비해 약 15% 정도 낮게 나타난다. 이는 선단부쪽에 가까워 질수록 두 가열면 사이의 거리가 가까워지고, 이에 따라 유동의 온도가 증가하기 때문이다.

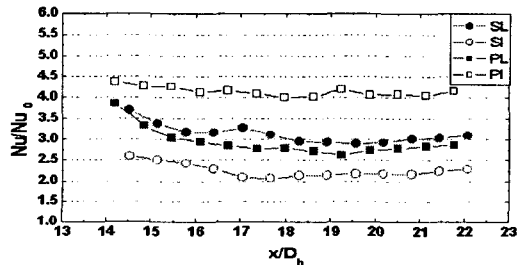
유로가 회전하게 되면, 코리올리력에 의해 유동이 압력면 쪽으로 편향되며, 유로 내의 압력차이에 의한 이차유동이 발생한다. 이에 따라 압력면 근처의 주유동의 속도는 정지된 경우에 비하여 증가하며, 유로 중심의 상대적으로 온도가 낮은 유동이 이차유동에 의해 PI 영역에 충돌하게 된다. 그러므로 Fig. 6(b) 와 (c)에서 볼 수 있듯이 PI 영역의 열전달은 크게 증가하게 된다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 유로의 선단부에 가까운 곳의 속도도 크게 증가하며, 빠른 유속에 의해 선단부에 가까운 PL 과 SL 영역의 열전달도 향상된다. 반면, SI 영역의 경우 SL 영역을 지나 가열된 유동이 공급되며, 주유동의 속도 또한 낮아지므로, 회전수가 증가함에 따라 열전달계수가 점차 감소하게 된다.



(a) $Ro=0.00$



(b) $Ro=0.05$



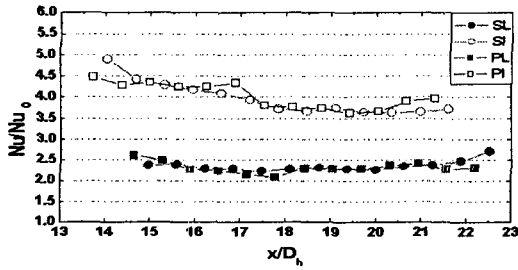
(c) $Ro=0.10$

Fig. 6 Regionally averaged Nu/Nu_0 distributions for 90° ribbed channel

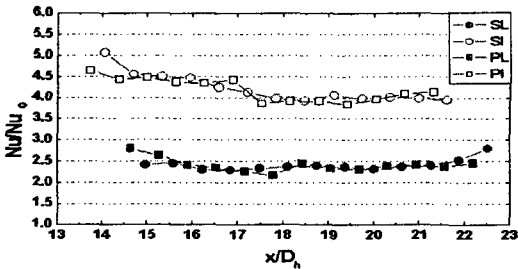
4.3 45° 경사요철에 의한 열전달 특성

정지된 경우(Fig. 7(a)), 한 쌍의 대칭적인 이차유동이 요철에 의하여 생성된다. 이 이차유동은 유로 중심의 상대적으로 온도가 낮은 유동을 격벽에 충돌시키며, 유동은 가열되지 않은 상태에서 격벽에 가까운 SI와 PI 영역에 도달하게 된다. 이로 인해 이 영역들 (SI, PI) 의 열전달 계수는 선단부에 가까운 영역 (SL, PL) 에 비하여 50% 이상 높은 값을 가진다.

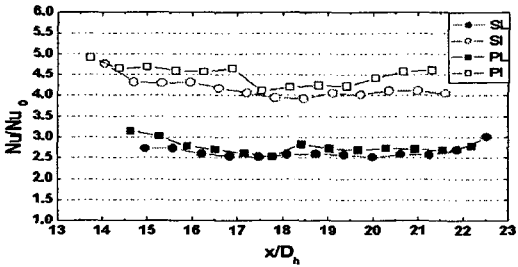
Figure 7(b)와 (c)는 각각 회전수가 0.05, 0.10 일 때의 Nusselt 수의 비를 나타내고 있다. 회전에 의해 발생한 코리올리력은 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 유동구조를 변형시키며, 주유동은 압력면 쪽으로 치우치게 된다. 압력면 근처의 주유동의 속도는 증가하며, 이로 인해 회전수가 0.1일 때 PL 영역과 PI 영역의 열전달 계수는 정지상태에 비해 각각 19%, 13% 정도 증가한



(a) $Ro=0.00$



(b) $Ro=0.05$



(c) $Ro=0.10$

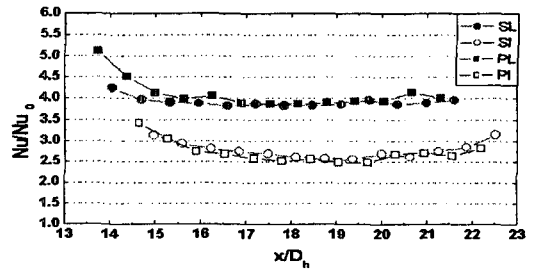
Fig. 7 Regionally averaged Nu/Nu_0 distributions for 45° ribbed channel

다. SL 영역의 열전달 계수도 압력면 쪽의 주유동 속도 증가의 영향과 변형된 이차유동에 의해 형성된 하향류로 인해 증가된다. SI 영역 근처의 경우 주유동의 속도 분포나 이차유동 구조의 변화가 미미하며, 이에 따른 열전달 계수의 변화도 크지 않다.

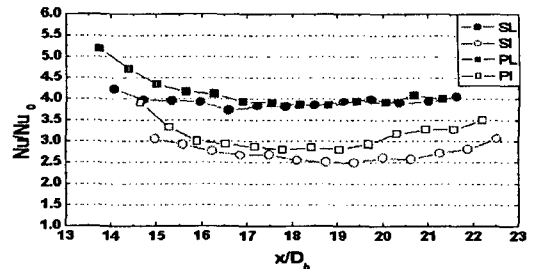
45° 경사요철이 설치된 유로의 경우 회전의 영향은 90° 요철이 설치된 유로에 비하여 상대적으로 훨씬 작은 것으로 나타났다. 이는 요철에 의한 강한 이차유동에 의하여 회전에 의한 유동 구조의 변화가 크지 않았기 때문이다.

4.4 135° 경사요철에 의한 열전달 특성

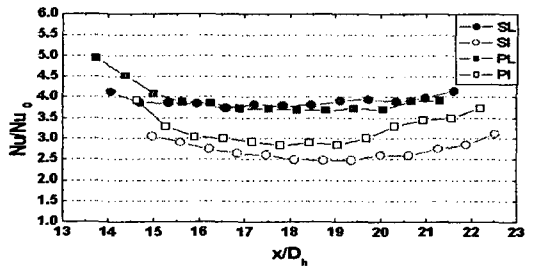
정지된 경우, 45° 경사요철이 설치된 유로와 마찬가지로 한 쌍의 와류가 형성되지만, 와류의 회전 방향은 반대로 나타난다. 이 경우, 이차유동은 선단부 쪽에 충



(a) $Ro=0.00$



(b) $Ro=0.05$



(c) $Ro=0.10$

Fig. 8 Regionally averaged Nu/Nu_0 distributions for 135° ribbed channel

돌하게 되며, Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이, 선단부 근처 (PL, SL)의 열전달 계수를 크게 증가시킨다. 유로가 회전하게 되면, 유속이 가장 빠른 영역은 압력면과 격벽 사이에서 관찰되며, 다른 세 영역 (SL, SI, PL) 근처의 유속은 감소한다. 그 결과, PI 영역의 열전달 계수만이 회전수가 높아질수록 따라 증가하며, 회전수가 0.1일 경우 정지 상태에 비하여 17%정도 증가된 값을 보인다. 하지만 다른 영역들의 열전달 계수는 모두 회전수의 증가에 따라 감소하지만, 그 감소폭은 6% 이내로 매우 작다.

4.5 평균 Nusselt 수와 압력강하

각 영역의 Nusselt 수의 비율 $x/D_h=16$ 에서 21인 구간에서 평균하여 Fig. 9에 나타내었다. 90° 요철의 경우 PI 영역의 열전달 계수가 회전수가 높아짐에 따라

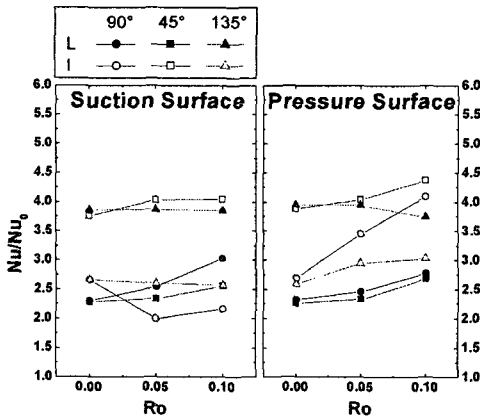


Fig. 9 Average Nusselt number ratio

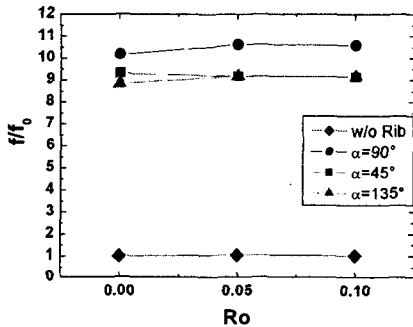


Fig. 10 Friction factor ratios with various rotation number

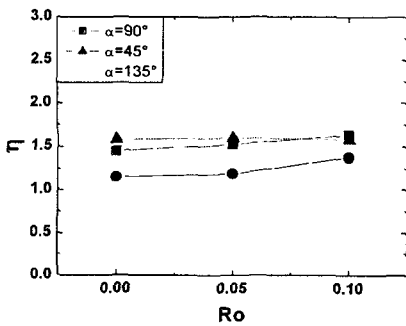


Fig. 11 Thermal performances with various rotation number

가장 크게 증가하며, 회전수가 0.1일 경우 정지된 경우에 비하여 52%나 높은 값을 가진다. SL과 PL 영역의 열전달 계수도 정지된 경우에 비하여 각각 32%와 20% 증가하는 반면, SI 영역의 열전달 계수는 감소한다. 45° 경사요철의 경우 격벽에 가까운 영역이 선단부에 가까운 영역에 비하여 50% 정도 높은 열전달 계수를

나타내며, 135° 경사요철의 경우 45° 경사요철과는 정반대의 결과를 보인다. 90° 요철의 경우와는 다르게, 45°, 135° 경사요철이 설치된 유로에서의 열전달 특성은 회전에 따라 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

Figure 10은 평균 마찰계수를 나타낸 그림이다. 90° 요철이 설치된 경우 가장 높은 압력강하를 보이며, 45°와 135° 경사 요철은 비슷한 압력강하를 갖는 것으로 나타났다. 이는 사각 유로에서의 실험결과와 일치한다. 실험 범위 ($Ro=0.0\sim 0.1$) 내에서 회전에 따른 압력강하량의 변화는 미미한 것으로 나타났다.

Figure 11은 일정 이송동력하에서의 성능계수를 나타낸 것으로 90° 요철의 경우, 상대적으로 낮은 열전달 계수와 높은 압력강하의 영향으로 낮게 나타났으며, 회전수의 증가에 따라 상승함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 90°, 45° 그리고 135°의 충돌각을 가지는 요철이 설치된 정삼각형 단면의 유로에서의 열전달 계수 및 압력강하에 대해 회전수를 0.0에서 0.1까지 변화시키며 실험을 수행하였다.

90° 요철이 설치된 정지 유로의 경우 선단부 근처의 평균 열전달 계수는 격벽 근처에 비하여 15% 정도 낮은 값을 가진다. 유로가 회전하게 되면 코리올리력에 의한 유동의 편향과 이차유동이 발생하며 열전달 계수는 크게 변화한다. 회전수가 0.1일 때, SL과 SI 영역의 열전달 계수의 차이는 33% 까지 증가하며, PL과 PI 영역의 열전달 계수의 차이도 38%로 증가한다.

45° 경사요철이 설치된 정지 유로에서는 요철에 의하여 한 쌍의 와류가 발생하며, SI와 PI 영역의 열전달 계수가 SL과 PL 영역에 비하여 50% 정도 높은 값을 가진다. 유로가 회전하게 되면, 유동은 압력면 쪽으로 치우치며, 이차유동의 구조가 변형된다. 하지만 회전에 의한 열전달 계수의 변화는 크지 않다.

135° 경사요철이 설치된 정지유로에서는 45° 요철이 설치된 경우와 마찬가지로 한 쌍의 와류가 발생하며, SL과 PL 영역의 열전달 계수가 SI와 PI 영역에 비하여 50% 정도 높게 나타났다. 유로가 회전하더라도, 열전달 계수의 분포는 요철에 의한 이차유동에 지배되며, 크게 변화하지 않는다.

후기

본 연구는 에너지관리공단 주관 에너지기술학술진

홍 사업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다..

참고문헌

- (1) A. H. Luai and J. C. Han, 2003, "Effect of Rotation on Heat Transfer in Two-Pass Square Channels with Five Different Orientations of 45° Angled Rib Turbulators," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 653~669.
- (2) H. H. Cho, S. Y. Lee, J. H. Won and D. H. Rhee, 2004, "Heat/Mass Transfer in a Two-Pass Rotating Rectangular Duct with and without 70°-Angled Ribs," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 467~475.
- (3) H. H. Cho, S. Y. Lee and D. H. Rhee, 2004, "Effects of Cross Ribs on Heat/Mass Transfer in a Two-Pass Rotating Duct," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 743~755.
- (4) L. M. Wright, W. L. Fu and J. C. Han, 2004, "Thermal Performance of Angled, V-Shaped, and W-Shaped Rib Turbulators in Rotating Rectangular Cooling Channels (AR=4:1)," *J. Turbomachinery*, Vol. 126, pp. 604~614.
- (5) T. M. Liou and G. Y. Dai, 2004, "Pressure and Flow Characteristics in a Rotating Two-Pass Square duct with 45-Deg Angled Ribs," *J. Turbomachinery*, Vol. 126, pp. 212~219.
- (6) 이동호, 조형희, 2005, "환형 캐스케이드 내 고정된 터빈 블레이드 및 슈라우드에서의 열/물질전달 특성 (I)," *대한기계학회논문집 B권*, 제29권 제 4호, pp. 485~494.
- (7) D. E. Metzger and R. P. Vedula, 1987, "Heat Transfer in Triangular Channels With Angled Ribs on Two Walls," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 31~44.
- (8) Y. M. Zhang, W. Z. Gu and J. C. Han, 1994, "Augmented Heat Transfer in Triangular Ducts with Full and Partial Ribbed Walls," *J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 8, No. 3, pp. 574~579.
- (9) S. W. Ahn and K. P. Son, 2002, "Heat Transfer and Pressure Drop in the Roughened Equilateral Triangular Duct," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 4, pp. 479~488.
- (10) S. Dutta, J. C. Han and C. P. Lee, 1995, "Experimental Heat Transfer in a Rotating Triangular Duct: Effect of Model Orientation," *J. Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 1058~1061.
- (11) S. Dutta, J. C. Han and C. P. Lee, 1996, "Local Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Ribbed Triangular Duct with Two Model Orientations," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 707~715.
- (12) S. Dutta, J. C. Han, Y. Zhang, and C. P. Lee, 1994, "Local Heat Transfer in a Rotating Two-pass Triangular Duct With Smooth Walls," *J. Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 435~443.
- (13) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, 75, pp. 3~8.