

회전하는 터빈 블레이드 이차유로내 요철 배열이 열/물질전달에 미치는 영향

이세영* · 조형희†

Effect of Heat/Mass Transfer in the turbine blade internal passage with various rib arrangement

Sei-Young Lee* and Hyung-Hee Cho†

Key Words: Internal Cooling Passage(내부 냉각 유로), Rotating Effect(회전효과), Coriolis Effect(코리올리 효과), Cross Rib(엇갈린 요철), 180 ° sharp turn(180 ° 곡관부), Heat/Mass Transfer(열/물질전달),

Abstract

The present study investigates the effects of various rib arrangements and rotating on heat/mass transfer in the cooling passage of gas turbine blades. The cooling passage has very complex flow structure, because of the rib turbulator and rotating effect. Experiments and numerical calculation are conducted to investigate the complex flow structures and heat transfer characteristics; the numerical computation is performed using a commercial code, FLUENT ver.5, to calculate the flow structures and the experiments are conducted to measure heat/mass transfer coefficients using a naphthalene sublimation technique.

For the rotating duct tests, the test duct, which is the cross section of is 20 mm×40 mm (the hydraulic diameter, D_h , of 26.7 mm, has two-pass with 180 ° turning and the rectangular ribs on the wall. The rib angle of attack is 70 ° and the maximum radius of rotation is $21.63D_h$. The partition wall has 10 mm thickness, which is 0.5 times to the channel width, and the distance between the tip of the partition wall and the outer wall of the turning region is 26.7 mm ($1D_h$). The turning effect of duct flow makes the very complex flow structure including Dean type vortex and high turbulence, so that the heat/mass transfer increases in the turning region and at the entrance of the second pass. The Coriolis effect deflects the flow to the trailing surface, resulting in enhancement of the heat/mass transfer on the trailing surface and reduction on the leading surface in the first pass. However, the opposite phenomena are observed in the second pass. The each rib arrangement makes different secondary flow patterns. The complex heat/mass transfer characteristics are observed by the combined effects of the rib arrangements, duct rotation and flow turning.

기호설명

D 두 물질간 물질확산계수

D_h 시험채널 수력직경

dt 송풍실험시간

dy 나프탈렌 승화깊이

e 요철 높이

h_m 물질전달계수

H 유로의 폭

L 시험덕트 길이

* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 연세대학교 기계공학과

Email : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : +82-2-2123-2828 FAX : +82-2-312-2159

\dot{m}	단위시간당 단위면적에서 나프탈렌 승화량
Nu	Nusselt수 $[hD_h/k]$
p	요철간 거리
P_{atm}	대기압
P_{naph}	나프탈렌의 포화증기압
Pr	Prandtl수
R	유로 최대 반경
R_{naph}	나프탈렌의 기체상수
Re	Reynolds수, $[\rho D_h V/\mu]$
Re_Ω	Rotation Reynolds수 $[D_h^2 \Omega / \nu]$
Ro	Rotation수 $[Re_\Omega / Re = D_h \Omega / U]$
Sc	Schmidt수 $[\nu / D]$
Sh	Sherwood수 $[hmD_h/D_{naph}]$
\overline{Sh}	피치 평균 Sherwood수
W	유로의 폭
x	주유동방향 거리
y	시험채널 중심으로부터의 횡방향 거리
z	시험채널 바닥면으로부터의 높이
$\overline{z_{sub}}$	평균 나프탈렌 승화량

그리스 문자

α	주유동과 요철이 이루는 충돌각
μ	점성계수
ν	동점성계수 $[\mu / \rho]$
ρ	밀도
Ω	회전 각속도

하첨자

0	요철이 없는 사각덕트 또는 원형관에서의 완전발달 영역
b	주유동 혼합평균
s	고체 나프탈렌
v	나프탈렌 증기
x	주유동방향평균
∞	덕트 유입공기

1. 서론

가스터빈의 효율을 증대시키기 위해서는 압력비를 향상시키거나 터빈 입구 온도를 높이는 것

은 필수적이다. 이를 위해서 최근 표면 처리 등을 이용한 열적 성능의 제고를 위한 연구들이 진행 중에 있다. 그러나 이러한 방법들을 이용한 블레이드의 보호 역시 한계를 지니고 있기 때문에 막냉각, 충돌제트 냉각, 강제대류 냉각 등 다양한 냉각방법을 사용하여 블레이드를 보호하는 방법이 응용되고 있다. 이 중에서 강제 대류 냉각은 다른 냉각 방법에 비해서 블레이드 표면에 추가적인 가공을 하지 않고 블레이드 내부에 있는 유로를 통해서 냉각시키는 방법으로 막냉각 등의 경우에 나타나는 냉각유체에 의해 발생하는 손실이 없는 효과적인 냉각 방법이다.

최근에는 정익에 대한 연구뿐만 아니라 동익에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 회전에 의한 코리올리 효과는 전·후연간의 열전달의 차이를 나타내기도 하고 벽면의 열경계 조건에 의해서 원심 부력의 효과를 나타내어 전·후연간의 열전달의 불균일을 초래하게 된다. 이와 같이 여러 가지 인자에 의해서 좌우되는 터빈 블레이드 냉각 유로에서의 열전달 효과에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔다.

또한 가스터빈 내부를 효과적으로 냉각하기 위해서 냉각유로는 여러 개의 곡관부로 연결된 유로가 복잡한 구조를 가지게 된다. 이러한 구조는 곡관부 부근에서의 열전달에 많은 영향을 주게 된다. 회전 효과 및 유로 형상이 열전달에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 곡관부 부근에서의 유동과 회전에 의한 유동에 대한 이해가 필요하다. Wang과 Chyu^[1], 허남건 등^[2]과 Besserman과 Tanrikut^[3]는 수치적인 방법을 이용하여 180° 곡관부를 갖는 유로내의 유동특성을 파악하였다. 곡관부에서 유동의 방향이 바뀌면서 작용하는 원심력에 의해서 중심의 코어유동은 밖으로 향하게 되고 이때 دن와류(Dean type vortex)가 발생하게 된다. دن와류는 곡관부 이후 2차유로에서의 열전달에 많은 영향을 주게 된다. 이때 곡관부의 형상에 의해서 2차유로에서 دن와류가 존재하는 영역의 길이가 차이가 난다. 또한 Liou 등^[4]은 유로를 나누는 벽의 두께에 따른 유동특성에 대해 연구하였으며 Chen과 Liou^[5]는 LDV를 이용하여 회전하는 채널내의 속도를 측정하였다.

회전 채널 내에 요철의 설치는 열전달의 향상을 가져올 뿐만 아니라 적절한 요철 배열을 사용함으로써 회전에 의한 유동의 편향을 교란시켜

냉각 효과의 향상을 기대할 수 있다. Chandra와 Han^{[6],[7]}은 곡관부를 갖는 정지된 채널 내 요철의 설치에 의한 열/물질전달 효과를 고찰하였다. 요철의 설치는 열/물질전달의 향상을 가져오며 요철과 주유동과의 충돌각이 45°, 60°인 경우 요철에 의해서 발생하는 이차유동의 영향으로 측면벽의 열전달효과는 다르게 나타났다. Shih 등^[8]은 요철이 설치된 U형의 관에서의 유동 및 열전달 특성을 수치적으로 연구하였으며 Mokizuki 등^[9]과 Mokizuki 등^[10]은 평행한 요철이 설치된 정지 또는 회전 채널 내에서 1, 2차유로의 요철배열 변화에 따른 열전달 특성을 연구하였다.

열전달에 영향을 주는 요인은 크게 요철에 의해서 발생하는 이차유동, 회전에 의해 작용하는 코리올리 효과 그리고 곡관부를 지나면 발생하는 원심력 효과로 나누어 볼 수 있다. 곡관부 직전까지는 진행한 유동은 곡관부에 진입하면서 유동은 교란된다. 곡관부 직후 곡관부를 지나며 교란된 유동의 영향으로 높은 열전달이 일어나는 영역이 2차유로 하류까지 계속되게 된다. 그러나 회전하는 경우 코리올리 효과에 의해서 유출 유동과 유입유동이 형성되는 1, 2차유로에서 전후연간의 열전달은 상이하게 나타난다. 요철이 없는 경우 유출 유동이 형성되는 1차유로의 경우 후연이 전연보다 열전달이 많이 되고 2차유로의 경우 반대 현상이 나타난다^[11]. 이와 같이 실제 가스터빈에서 사용되는 유로는 180°의 곡관부의 영향과 회전의 효과가 동시에 나타나고 또한 요철에 의한 영향이 더해지면서 매우 복잡한 열전달 특성을 나타내게 된다. 본 연구에서는 정지채널에서의 요철배열 효과를 기초로 하여 곡관부를 가지는 회전 채널 내에 여러 가지 요철의 배열을 적용함으로써 요철배열의 변화에 따른 열전달 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 회전 채널 실험장치의 개략도를 보여 준다. 송풍기를 지난 유동은 열교환기를 거쳐 오리피스 유량계에서 유량이 측정되고 플리넘을 통해서 채널내부로 유입된다. 유량은 내경 40 mm인 오리피스 유량계에서 측정되고 송풍기 이후 설치된 유량조절밸브에서 조절된다. 회전 장

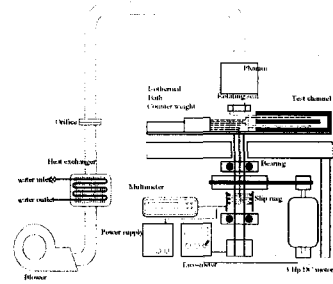


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

치는 3마력의 직류모터(3HP-DC motor)를 통해 구동되며 회전축에 설치된 광학속도센서를 통해서 회전수를 측정하게 된다. 이때 회전수의 오차는 0.2% 이내이다. 실험시 온도 조건을 측정하기 위해서 장치 내에 4개의 J형 열전대(Iron-Constantan)가 설치되어 있다. 오리피스와 플리넘 직후에 각각 한 개의 열전대를 설치하였으며 나프탈렌 표면의 온도를 측정하기 위한 열전대가 전후연 나프탈렌 시험 시편에 각각 한 개씩 설치되어 있다. 채널의 반대쪽에 설치된 ice-bath와의 전압차가 슬립 링(slip ring)을 통해서 외부에 있는 멀티미터에 연결하여 값을 얻어낸다. 실험시 채널은 고속으로 회전하기 때문에 실험 채널과 반대쪽의 무게는 정확히 일치해야 한다. 따라서 회전축을 중심으로 양쪽의 무게가 일치하도록 하였다.

회전채널의 단면적($W \times H$)는 20 mm × 40 mm로 종횡비($W:H$) 1:2이고 수력직경(D_h)은 26.7 mm인 직사각형의 채널이다. 수력직경 대비 최대 회전반경(R/D_h)은 21.63, 수력직경 대비 가열면의 길이(L/D_h)는 12.48이 된다. 180°적인 곡관부를 갖는 유로로서 곡관부 내벽 끝단은 반지름 5 mm를 갖는 반원형으로 되어 있다. 곡관부 내벽 끝과 곡관부 바깥쪽 벽과의 거리는 $1D_h$ 인 26.7 mm 떨어져 있으며 곡관부에는 요철이 설치되지 않는다. 채널에는 요철을 설치하기 위한 요철 체결용 홈이 가공되어 있으며 채널 내에는 총 67개의 요철이 설치된다. 이중 나프탈렌 표면 위에는 40개의 요철이 놓여지게 된다. 요철의 단면은 2 mm × 3 mm인 직각형 단면을 갖는 요철이다. 수력직경과 요철의 높이 비(e/D_h)는 0.075, 수력직경과 요철과 요철사이의 거리(p/D_h)는 7.5로 15 mm이고, 요철과 주유동과의 충돌각은 70°이다. 요철

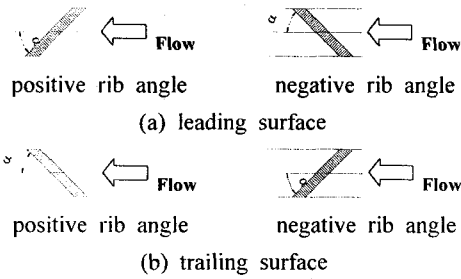


Fig. 2 Definition of rib angle

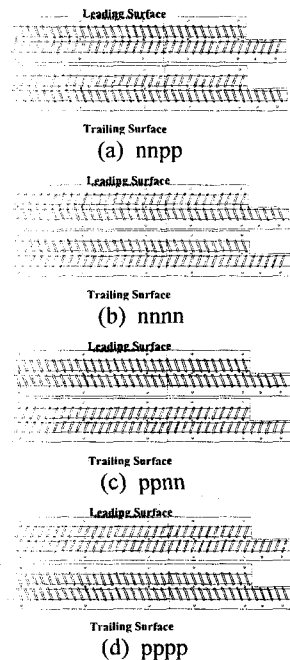


Fig. 3 Schematic diagrams of rib array in rotating channel

과 주유동과의 충돌각은 표기의 편의를 위하여 4개의 문자로 표시되어 있다. 이는 주유동과 요철과의 충돌각에 따른 표시인데 앞에서부터 전연 1차 유로 전연과 후연, 2차유로 전연과 후연의 주유동과 요철의 충돌각을 순서대로 나타낸다. 주유동과 요철의 충돌각은 Fig. 2와 같이 표시된다. 전연의 경우 주유동과 반시계 방향의 각을 이루는 것을 p로서 표현하고 시계방향의 것을 n으로 표현하며 후연에서는 시계방향이 p, 반시계방향이 n으로 표현된다. 덕트내부의 요철은 Fig. 3에 도식적으로 나타나 있다.

나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달계수의 측정을 위해서 나프탈렌의 표면고도를 실험 전 후

에 측정하여 계산하게 된다. 이를 위해 2차원 자동 이송장치로 이송되는 선형가변차동변환기(LVDT)를 이용하여 이루어진다. 이 장치의 정밀도는 $0.025 \mu\text{m}$ 로 매우 정밀하며, 측정용 팁(tip)의 직경은 1.588 mm 로 송풍 실험시 평균 나프탈렌 승화량은 3.5 mil 이므로 측정오차는 1%이내이다.

본 연구에서는 평균 속도 약 11 m/s , 수력직경 기준 Re 는 20,000을 기준으로 실험을 수행하였다. 곡관부 외벽 중심을 기준으로 주유동 방향을 x , 횡방향을 y , 그리고 높이 방향을 z 로 표시하였다. 측정 영역은 수력직경을 기준으로 하여 주유동 방향으로는 $0 \leq x/D_h \leq 11$, 횡방향으로는 $-0.9374 \leq y/D_h \leq 0.9374$ 가 된다. 요철은 나프탈렌 가열면이 시작되기 전에 11개를 지나 유동적으로 충분히 발달하도록 하였다.

2.2 실험결과 처리

송풍실험 전후의 시험관의 나프탈렌의 고도차이로부터 국소 나프탈렌 승화량을 구하고 측정 전후의 자연대류에 의한 승화량을 보정하여 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수를 구한다. 이때 물질전달계수 h_m 은 다음과 같이 구한다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} = \frac{\rho_s \frac{dy}{dt}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} \quad (1)$$

여기에서 $\dot{m}(\text{kg/m}^2\text{s})$ 은 나프탈렌 표면의 단위 면적에서 단위시간당 승화량을 나타내며 $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 벽면에서의 증기밀도를 나타낸다. $\rho_{v,b}$ 는 채널을 지나는 유동의 나프탈렌 평균 증기밀도를 나타내며 나프탈렌 승화량은 송풍실험 전후의 고도차이와 실험 시간 그리고 고체 나프탈렌의 밀도($\rho_s = 1162 \text{ kg/m}^3$)로부터 구해진다. 나프탈렌의 증기밀도($\rho_{v,w}$)는 이상기체 상태 방정식에 의해서 다음과 같이 구할 수 있으며 이때 나프탈렌의 포화 증기압은 Ambrose 등^[13]에 의해서 제시된 식을 사용하였다.

$$\rho_{v,w} = \frac{P_{naph}}{R_{naph} T_w} \quad (2)$$

유동의 평균 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,b}$)는 피치

평균 승화량을 기준으로 사용하였으며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{v,b} = \frac{\rho_s W x}{Q \Delta t} \left. \frac{z_{sub}}{x} \right|_x \quad (3)$$

위의 물질전달계수는 무차원수인 Sherwood 수로 나타낼 수 있으며 다음같이 표시된다.

$$Sh = \frac{h_m D_h}{D_{naph}} \quad (4)$$

여기서 D_{naph} 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수이다. 여기서 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho^[14]에 의하여 제시되어 있으며 주요 물성치의 관계식은 다음과 같다. 본 실험에서의 Sherwood 수는 Kline과 McClintock^[15]의 방법에 의해 95% 신뢰수준에서 7.76%의 불확실성을 가진다.

본 실험에서는 국소 물질전달 계수를 요철이 없는 완전 발달한 원형관에서의 물질전달계수로 나누어 그 비(Sh/Sh_0)로 나타내었다. 완전 발달한 원형관의 물질전달계수는 Dittus/Boelter^[16]에 의해서 제시된 식에 열/물질전달의 유사성을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Sh_0 = 0.023 Re^{0.8} Sc^{0.4} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 덕트내 유동 특성

Fig. 4는 곡관부를 갖는 회전 이차유로내에서 발생할 수 있는 이차유동의 형태를 개념적으로 나타낸 그림이다. 여기에서 ⊗는 유출유동을 ⊙는 유입유동을 나타낸다. 터빈 블레이드의 회전은 실선으로 나타난 바와 같은 이차유동을 일으킨다. 회전 축을 중심으로 유출유동이 형성되는 1차유로에서는 후연으로, 유입유동이 형성되는 2차유로에서는 전연으로 각각 편향되는 유동이 발생한다. 또한 냉각성능의 향상을 위하여 덕트 내부에는 요철을 설치하게 되는데 본 논문에서는 엇갈린 배열의 요철을 설치하여 실험을 수행하였다. 엇갈린 요철은 Fig. 4의 점선으로 나타난 바와 같은 한 개의 셀을 갖는 이차유동을 발생시킨

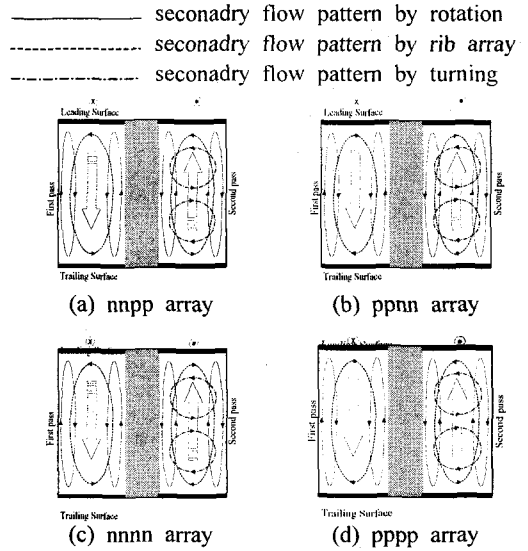


Fig. 4 Secondary flow structure

다. 요철이 없는 매끈한 덕트의 경우 곡관부를 통과하면서 유동의 관성력에 의한 이차와류(Dean tyoe vortex)가 곡관부에서부터 발생하여 2차유로의 입구부근에 영향을 미치게 되는데^[11] 이는 Fig. 4에 일점 쇄선으로 나타나있다. 이와같이 회전하는 터빈 블레이드내에 요철이 설치된 내부 냉각 유로에는 여러 가지 원인에 기인한 이차유동이 복합적으로 작용하여 매우 복잡한 유동 특성 및 열전달 특성이 나타나게 된다.

3.2 회전 덕트

Figure 5-8은 $Re=20,000$, $Ro=0.1$ 인 회전 덕트의 국소 서우드 값을 나타낸다. 회전 덕트의 경우 Coriolis 효과는 유동장에 영향을 주어 열/물질전달 특성을 변화시킨다. 회전중심을 기준으로 바깥쪽으로 향하는 경우 Coriolis 효과에 의해서 유동은 후연 쪽으로 편향되고 안쪽으로 향하는 유동은 정연쪽으로 편향되게 된다. 그러므로, 일반적으로 중심에서 바깥쪽으로 향하는 유동이 발생하는 1차유로에서는 후연쪽의 열/물질전달이 촉진되고 안쪽으로 향하는 2차유로에서는 전연의 열/물질전달이 촉진된다고 알려져 있다. Figure 5-8에 나타나 있는 바와 같이 1차유로에서는 후연의 열/물질전달이 전연보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이때 요철에 의한 이차유동의 영향으로 1차유로에 nn 배열이 있는 경우에는 안

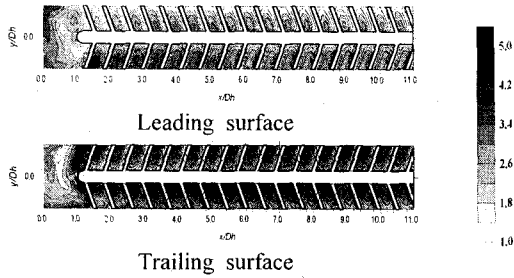


Fig. 5 Contour plot of Sh/Sh_0 for nnpp at $Re=20,000$, Fig. 7 Contour plot of Sh/Sh_0 for nnnn at $Re=20,000$, $Ro=0.1$

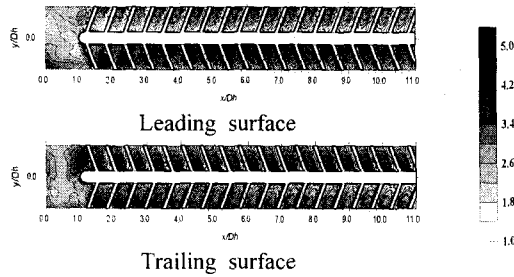
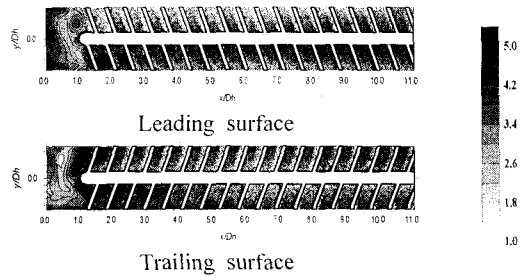
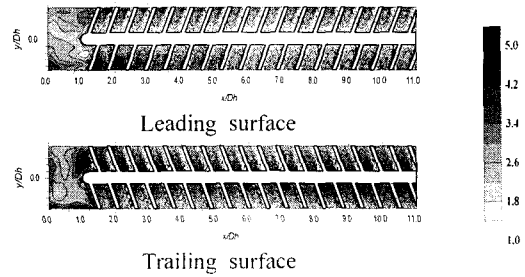


Fig. 6 Contour plot of Sh/Sh_0 for ppnn at $Re=20,000$, Fig. 8 Contour plot of Sh/Sh_0 for pppp at $Re=20,000$, $Ro=0.1$

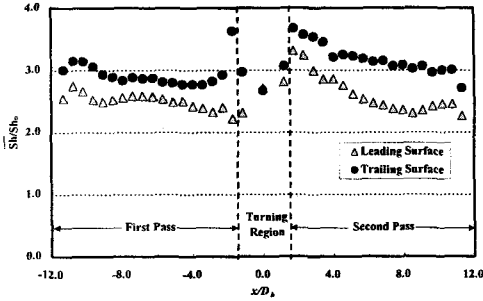


쪽벽근처에, pp배열이 있는 경우에는 바깥쪽 벽 근처에 국소적으로 높은 열/물질전달 값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 이 값들 역시 회전의 영향으로 정지된 경우보다 전연에서는 낮고 후연에서는 높은 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 1차유로의 출구 부근에서는 후연쪽에 국소적으로 매우 높은 Sherwood 수가 나타나는 영역을 볼 수 있다. 이는 회전에 의한 유동의 평행과 요철에 의한 이차유동 그리고 곡관부쪽으로 진입하려는 유동이 복합적으로 작용하여 이 부근의 열/물질전달을 급격하게 촉진시키는 것으로 생각된다.

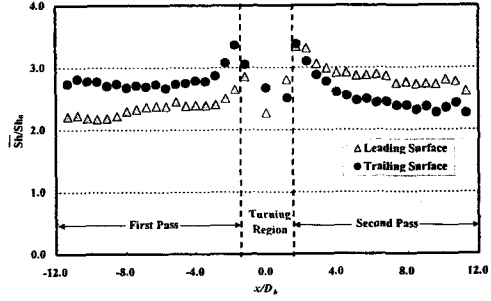
곡관부에서는 Fig. 4에서 설명한 세가지 이차유동-요철에 의한 이차유동, 회전효과, Dean 와류의 영향이 동시에 작용하여 매우 복잡한 열/물질전달 특성이 나타난다. Figure 5과 7에 나타난 바와 같이 1차유로에 nn의 배열을 갖는 경우 곡관부의 바깥쪽 벽부근과 모서리 부근의 열/물질전달 계수 값이 매우 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 후연에서는 전연에 비해서 상대적으로 낮은 Sherwood 수를 나타내며 특히 곡관부의 중심부근에 매우 낮은 Sherwood 수가 나타나는 영역이 발견된다. 이는 국소적인 hot spot이 될

수 있다. Figure 6와 8에서는 1차유로에 pp 배열을 갖는 경우 전체적으로 Fig. 5과 7에 나타난 경우보다 낮지만 비교적 균일한 열/물질전달 계수 분포를 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5과 7의 후연에서 나타났던 국소적으로 열/물질전달이 취약한 영역은 나타나지 않는다. 이로부터 곡관부에서 1차유로의 pp배열이 nn배열보다 hot spot의 발생가능성이 더 적다는 것을 알 수 있다.

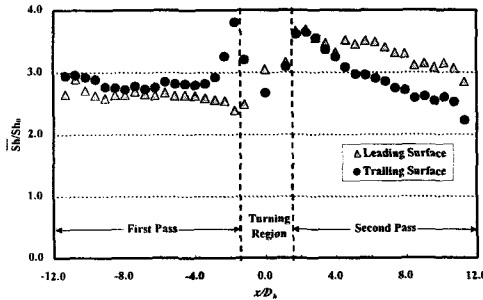
2차유로 입구에서 네가지 경우 모두 외벽쪽의 열/물질전달이 촉진되는 것을 볼 수 있다. 이는 곡관부를 지나면서 발달하는 Dean 와류와 이로 인한 모서리 와류의 영향으로 생각된다. 요철이 설치되지 않은 곡관부를 지나면서 유동은 Dean 와류의 영향을 지배적으로 받게 된다. 따라서 2차유로 입구에서의 열/물질전달은 Dean 와류와 요철에 의한 이차유동이 동시에 영향을 주게 된다. 2차유로내의 요철배열이 pp인 경우 (Fig. 5, 8) 요철에 의한 이차유동은 전연 부근에서의 이차유동은 Dean와류의 방향과 일치되어 외벽부근에 매우 높은 열/물질전달이 일어나는 것을 볼 수 있다. 반면 후연에서는 두 방향이 반대가되며 이로 인한 복잡한 이차유동 구조로 인해 내벽과 안쪽벽 모두가 비교적 높은 열/물질전달이 일어



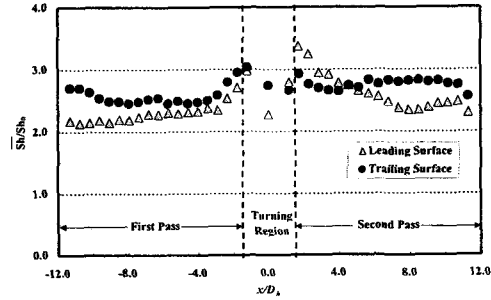
(a) nnp rib array



(b) ppnn rib array



(c) nnnn rib array



(d) pppp rib array

Fig. 9 Average Sh/Sh_0 distribution at $Re=20,000$ $Ro=0.1$

나는 것을 볼 수 있다. 2차유로내 요철구조가 nn인 경우 (Fig. 6, 7) 전연에서는 요철에 의한 이차유동과 Dean 와류의 방향이 반대가 되어 내벽부터 외벽까지 전체적으로 높은 열/물질전달 분포가 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면 후연에서는 두 이차유동의 방향이 일치하므로 외벽부근에 매우 높은 열/물질전달이 나타나는 것을 볼 수 있다.

Figure 9은 $Re=20,000$, $Ro=0.1$ 인 경우 네 가지 요철배열의 피치 평균 셔우드 수비를 나타낸다. 반경방향으로 바깥쪽을 향하는 유동이 발생하는 1차 유로에서는 회전에 의한 Coriolis 힘이 코어 유동을 후연쪽으로 편향시켜 전연보다 후연의 열/물질전달이 크게 촉진됨을 볼 수 있다. 1차 유로의 출구($x/D_h \approx -1.2$)부근에서는 전연의 열/물질전달은 향상되는 것을 볼 수 있으나 후연에서는 1차유로의 요철 배열이 nn배열인 경우 감소하고 pp배열인 경우 증가하는 것을 볼 수 있다. 곡관부는 요철이 설치되어 있지 않기 때문에 요철이 설치된 1, 2차유로보다 상대적으로 낮은 열/물질전달 계수비를 나타낸다. 곡관부를 통해서 심하게 교란된 유동이 2차유로에 진입하면서 요철에

의해 다시 한 번 교란되면서 셔우드수 비는 급격하게 증가한다. 이후 유동이 2차유로를 빠져나가면서 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 일반적으로 알려진 바와 같은 회전에 의한 열/물질전달 특성은 나타나지 않는다. 원정호 등^[11]에 의하면 본 연구의 2차유로와 같이 반경방향으로 유입유동을 하는 경우 Coriolis 힘은 코어 유동을 전연쪽으로 편향시켜 전연의 열/물질전달이 높게 나타나야 한다. 그러나 본 연구에서는 1차유로의 요철과 곡관부에 의해서 교란된 유동이 2차유로 들어오기 때문에 앞서 설명한 바와 같은 현상이 나타나지는 않는다. 따라서 Figure 9에서 보이는 바와 같이 2차유로의 요철배열이 pp인 경우 후연의 열/물질전달이 더 높게 나타나고 nn인 경우에는 전연의 열/물질전달이 더 촉진된다.

4. 결론

실제 가스터빈 블레이드에서는 요철, 회전 그리고 곡관부 등 여러 가지 요인에 의해서 유동이 변화하면 이에 따라 매우 복잡한 유동 및 열전달

특성이 나타난다.

다양한 요철의 배열의 변화를 통해 내부에 발생하는 유동을 조절할 수 있다. 곡관부나 곡관부 직후의 열/물질전달은 곡관에 의해 발생하는 Dean 와류, 회전에 의한 코리올리 효과의 영향 그리고 요철에 의한 이차유동이 복합적으로 작용하여 나타나면 이는 매우 복잡한 양상을 띄게 된다. 또한 요철배열에 따라 국소적으로 열전달이 취약나 부분이 발생할 수 있다. 2차유로에서의 열/물질전달은 요철배열에 따라 상이하게 나타나면 본 실험의 경우에 있어서는 회전의 효과보다 1차유로의 요철과 곡관부의 영향을 받은 유동의 영향이 좀더 지배적이며 이로 인해 각 배열에 따라 다른 열/물질전달 특성이 나타난다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] T. S. Wang and M. K. Chyu, 1994, "Heat convection in a 180-deg turning duct with different turn configuration," *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 8, No. 3, pp. 595-601.
- [2] 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, 1993, "회전하는 r자형 관내의 유동에 관한 수치해석적 연구," *대한기계학회 논문집*, 제 17권, 제 6호, pp. 1621-1632.
- [3] D. L. Besserman and S. Tanrikit, 1992, "Comparison of heat transfer measurements with computations for turbulent flow around a 180 deg bent," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 865-871.
- [4] T. M. Liou, Y. Y. Tzeng and C. C. Chen, 1999, "Fluid flow in a 180 deg sharp turning duct with different divider thickness," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 569-576.
- [5] C. C. Chen and T. M. Liou, 2000, "Rotating effect on fluid flow in a smooth duct with a 180 deg sharp turn," *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2000*, paper No. 2000-GT-0228.
- [6] P. R. Chandra, J. C. Han and S. C. Lau, 1988, "Effect of rib angle on local heat/mass transfer distribution in a two-pass rib-roughened channel," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 233-241.
- [7] P. R. Chandra and J. C. Han, 1989, "Pressure drop and mass transfer in two-pass ribbed channels," *J. of Thermophysics*, Vol. 3, No. 3, pp. 315-320.
- [8] T. I-P. Shih, Y. L. Lin, M. A. Stephens and M. K. Chyu, 1998, "Computation of Flow and Heat Transfer in a ribbed internal coolant passage with and without rotation," *The Eleventh International Symposium on Transport Phenomena, ISTP-11*, pp. 250-258.
- [9] S. Mokizuki, A. Murata, and M. Fukunaga, 1997, "Effects of rib arrangements on pressure drop and heat transfer in a rib-roughened channel with a sharp 180 deg turn," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 610-616.
- [10] S. Mokizuki, A. Murata, R. Shibata, and W. J. Yang, 1999, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1925-1934.
- [11] 원정호, 이세영, 조형희, 2001, "180° 곡관부를 가지는 회전 덕트에서의 열/물질전달 특성", *대한기계학회 논문집 B권*, 제 25권, 제 3호, pp. 405-413.
- [12] Cho, H. H., Lee, S. Y. and Wu, S. J., 2001, "The Combined effects of rib arrangements and discrete ribs on local heat/Mass transfer in a square duct," *ASME Turbo EXPO 2001*, ASME paper No. 2001-GT-175.
- [13] D. Ambrose, I. J. Lawrenson, and C. H. S. Sparke, 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, 7, pp. 1173-1176.
- [14] R. J. Goldstein, and H. H. Cho, 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416-434.
- [15] S. J. Kline, and F. A. McClintock, 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
- [16] P. W. Dittus, L. M. K. Boelter, 1930, *Univ. Cal. Publ. Engng*, Vol. 2, No. 13, pp. 443-461; 1985 reprinted in *Int. Commun. Heat Transfer*, Vol. 12, pp. 3-22.