

회전하는 터빈 블레이드 내부 이차냉각유로에서 엇갈린요철과 평행요철이 열/물질전달에 미치는 영향

이세영* · 이동호* · 조형희*
(2002년 1월 24일 접수, 2002년 7월 2일 심사완료)

Effect of Cross/Parallel Rib Configurations on Heat/Mass Transfer in Rotating Two-Pass Turbine Blade Internal Passage

Sei Young Lee, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words: Turbine Internal Cooling Passage(터빈내부냉각유로), Rib Turbulator(요철), Rotating Duct(회전 덕트), Two-Pass Duct(2선회관) Forced Convective Cooling(강제 대류 냉각)

Abstract

The present study investigates the convective heat/mass transfer inside a cooling passage of rotating gas-turbine blades. The rotating duct has various configurations made of ribs with 70° attack angle, which are attached on leading and trailing surfaces. A naphthalene sublimation technique is employed to determine detailed local heat transfer coefficients using the heat and mass transfer analogy. The present experiments employ two-surface heating conditions in the rotating duct because the surfaces, exposed to hot gas stream, are pressure and suction side surfaces in the middle passages of an actual gas-turbine blade. In the stationary conditions, the parallel rib arrangement presents higher heat/mass transfer characteristics in the first pass, however, these characteristics disappear in the second pass due to the turning effects. In the rotating conditions, the cross rib present less heat/mass transfer discrepancy between the leading and the trailing surfaces in the first pass. In the second pass, the heat/mass transfer characteristics are much more complex due to the combined effects of the angled ribs, the sharp turning and the rotation.

기호설명

D_h	시험채널 수력직경
dt	송풍실험시간
dy	나프탈렌 승화깊이
e	요철 높이
h_m	물질전달계수
L	시험덕트 길이
\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
Sh	Sherwood수 [$h_m D_h / D_{naph}$]
\overline{Sh}	피치 평균 Sherwood수

* 연세대학교 기계공학과
† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

w	요철의 폭
W	유로의 폭
x	주유동방향 거리
y	시험채널 중심으로부터의 횡방향 거리
z	시험채널 바닥면으로부터의 높이
\bar{z}_{sub}	평균 나프탈렌 승화량

그리스문자

a	주유동과 요철이 이루는 충돌각
μ	점성계수
ν	동점성계수 [μ / ρ]
ρ	밀도
Ω	회전 각속도

1. 서론

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 압축기의 압력비, 연소가스의 터빈입구온도의 향상은 필수적이다. 그러나 이는 터빈 블레이드(blade)와 베인(vane)의 열부하를 가중시키고 이로 인해 부품의 수명 단축시키게 된다. 최근 고성능의 가스터빈 엔진의 터빈입구온도는 금속 허용온도를 크게 상회하는 1400~1500°C 이상이며, 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드(blade)와 베인(vane)을 보호하고 적정수명을 유지하기 위한 연구가 수년간 지속되어왔다. 열차폐 표면처리 등을 이용한 블레이드 표면의 열적 성능을 높이는 방법과 더불어 고압단 압축기의 고압 유체를 추출하여 막냉각(film cooling), 충돌제트냉각(impingement cooling), 내부관 대류냉각(internal channel convective cooling)등을 복합 적용함으로써 고온요소의 표면 온도를 낮추고 열응력을 해소시키기 위한 기술들이 터빈 블레이드와 베인에 적용되고 있다.

가스터빈 블레이드 내부의 강제 대류냉각을 위해서는 여러 개의 유로가 연결되어있는 형태를 사용하게 된다. 이때 유로의 형상은 냉각성능에 큰 영향을 미치게된다. 따라서 적합한 유로 형상 및 내부 유동 패턴에 따른 열전달 특성에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔다. Metzger⁽¹⁾ 등과 Metzger와 Sahn⁽²⁾은 곡관부를 갖는 냉각유로에서의 압력강하 특성과 열전달 특성에 대해서 연구하였다. Chyu⁽³⁾는 곡관부를 갖는 유로에서

사면 가열조건하에서의 면적평균 열전달 계수 값을 구하였다. Chandra와 Han⁽⁴⁾와 Lee 등⁽⁵⁾은 나프탈렌 승화법을 이용하여 정지 채널에서의 국소 열/물질전달 계수 값을 얻었다. Ekkad 등⁽⁶⁾은 TLC (Thermochromic Liquid Crystal)를 이용하여 요철이 없는 덕트와 요철이 설치된 덕트 내부의 국소 열전달을 측정하였으며 Song과 Amano⁽⁷⁾는 non-linear $k-w$ model을 사용하여 수치적으로 내부 유동장을 예측하였다. Mochizuchi 등^(8,9)은 곡관부를 갖는 정지덕트에서 Cho 등⁽¹⁰⁾은 곡관부를 갖는 회전 덕트 내부에서 요철의 배열효과를 고찰하였다.

터빈 블레이드의 회전에 의해서 발생하는 코리올리 효과는 유동에 영향을 주게 되고 이로 인해서 유로 내부의 열전달 특성은 크게 영향을 받게 된다. 또한 가스터빈 내부의 냉각유로는 요철이 설치된 여러 개의 곡관부가 연결된 복잡한 유로 구조를 가지게 된다. 회전 효과, 요철배열 및 유로 형상이 열전달에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 우선적으로 곡관부 부근에서의 유동과 회전에 의한 유동에 대한 이해가 필요하다. Won 등⁽¹¹⁾은 매끈한 2선회덕트(two-pass duct) 내부의 회전이 열/물질전달에 미치는 영향에 대해서 고찰하였으며, Prabhu와 Vedula⁽¹²⁾는 2선회덕트에서의 압력강하 실험을 통해 정지시와 회전시의 압력강하 특성을 고찰하였으며 Jang 등⁽¹³⁾은 회전 덕트 내에서의 유동 및 열전달 특성을 Reynolds stress 난류 모델을 사용하여 수치적으로 예측하였다. Al-Qahtani 등⁽¹⁴⁾과 Azad 등⁽¹⁵⁾은 180° 곡관부를 갖는 유로에서의 유동 및 열전달 특성을 수치해석과 실험을 통해 고찰함으로써 내부 유동 특성 및 열전달 특성을 체계적으로 고찰하였다. 지금까지의 연구들은 대부분 열전달 특성에 영향을 미치는 인자를 개별적으로 제한하여 냉각 성능을 파악하였다. 그러나 실제 가스터빈 블레이드의 냉각은 요철, 유로 형상, 회전 등의 여러 가지 인자들이 복합적으로 작용함으로써 그 예측이 매우 어렵다. 본 연구에서는 이와 같은 여러 가지 인자들을 동시에 고려하여 회전하는 이차유로 내부에서의 국소 열전달 특성을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 회전채널을 포함한 실험장치의 개략도

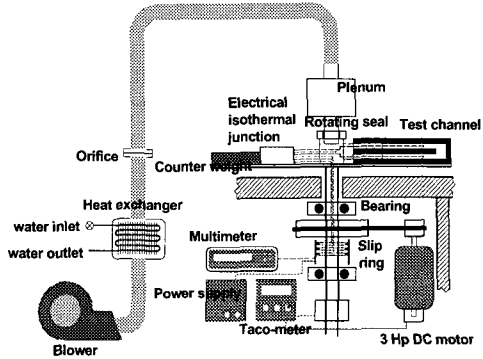


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

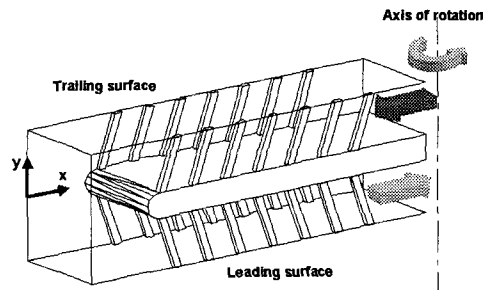


Fig. 2 Schematic view of rotating duct

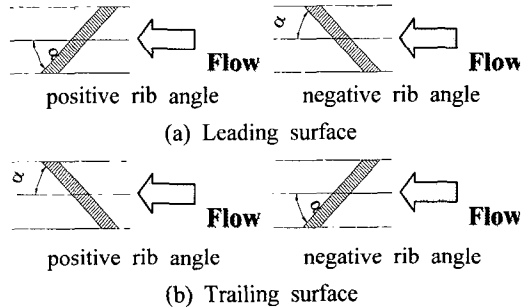


Fig. 3 Definition of rib angle in each surface

를 나타낸다. 송풍기 이후 열교환기를 지나 유입되는 유체는 오리피스 유량계와 플래넵 챔버를 지나 회전 덕트로 유입된다. 회전시 진동을 감소시키기 위하여 회전덕트가 설치된 반대쪽에는 회전덕트와 동일한 무게를 갖는 추(counter weight)를 설치하였다. 회전축은 V벨트를 통하여 3마력 직류모터로 구동되고, 회전축에 설치된 광학 속도센서로 검출된 회전수는 직류전압 제어를 통하여 0.2% 이내의 정확한 조절이 가능하다. 실험시 온도 조건을 측정하기 위해서 장치 내에 4개의 J형 열전대(iron-constantan)가 설치되어 있다. 오리피스와 플래넵 직후에 각각 한 개의 열전대를

설치하였으며 나프탈렌 표면의 온도를 측정하기 위한 열전대가 전/후연 나프탈렌 시험 시편에 각각 한 개씩 설치되어 있다. 채널의 반대쪽에 설치된 ice-bath와의 전압차가 슬립 링(slip ring)을 통해서 외부에 있는 멀티미터(digital multimeter; Keithley model 2000)에 연결하여 값을 얻어낸다.

Fig. 2는 요철이 설치된 실험채널의 개략적인 형태를 나타내는 그림이다. 실험 채널에서 회전 방향으로 앞쪽면은 전연면(leading surface), 뒤쪽면은 후연면(trailing surface)이다. 따라서, 터빈 블레이드의 회전방향과 연관시키면 전연면은 터빈 블레이드의 흡입면(suction side), 후연면은 압력면(pressure side)에 해당한다. 실험 채널의 유로는 1:2(20 mm×40 mm)의 단면비(W×H)를 가지며 수력직경(D_h)은 26.67 mm이다. 수력직경 대비 가열면의 최대 회전반경(R/D_h)은 21.63, 수력직경 대비 가열면의 길이(L/D_h)는 12.48이며 수력직경에 대한 반원형 곡관부의 벽두께는 $0.375D_h$ 이다.

Fig. 1에 제시된 것과 같이 송풍기를 통해서 공급되는 유동은 회전덕트의 위쪽 부분으로 공급되어 곡관부를 지난 뒤 아래쪽 채널을 지나 외부로 방출된다. 이때 채널 내부에 설치된 요철은 주유동과 70° 의 충돌각을 가지며 설치되어 있다. 요철 단면($w \times e$)은 3 mm×2 mm이며, 요철과 요철사이의 간격(pitch)은 요철높이의 7.5배(p/e)이다. 본 연구에서 유로 내에서의 유동의 Reynolds 수는 20,000으로 고정하여 실험을 수행하였다. 회전시 Rotation 수는 0.1로 고정하였으며, 이때 회전수는 약 410 rpm이다.

본 연구에서는 전연면과 후연면에서 요철의 배열을 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 다양한 요철배열을 간략하게 표기하기 위하여 Fig. 3에 제시한 바와 같이 요철과 주유동과의 충돌각을 4개의 문자로 표시되어 있다. 이는 주유동과 요철과의 충돌각에 따른 표시인데 앞에서부터 첫 번째 유로 전연, 후연 그리고 후연부 전연, 후연의 주유동과 요철의 충돌각을 나타낸다. 요철은 유로내부에 회전하는 이차유동을 발생시킨다. 이때 반시계 방향의 이차유동을 발생시키는 요철의 방향을 양(positive; p)이라고 정의하고 시계방향의 이차유동을 발생시키는 요철을 음(negative; n)이라고 정의하였다. 따라서 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이, 전연에서는 좌측으로 회전된 요철이 양(p)의 충돌각이고 우측으로 회전된 것이 음(n)의

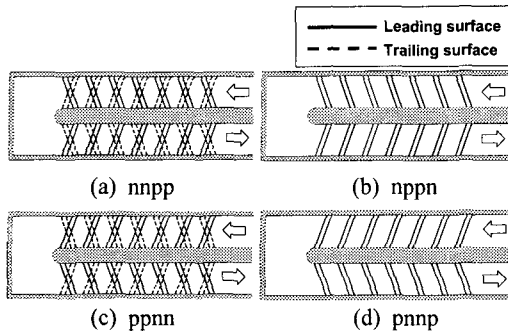


Fig. 4 Schematic diagrams of rib array in rotating channel

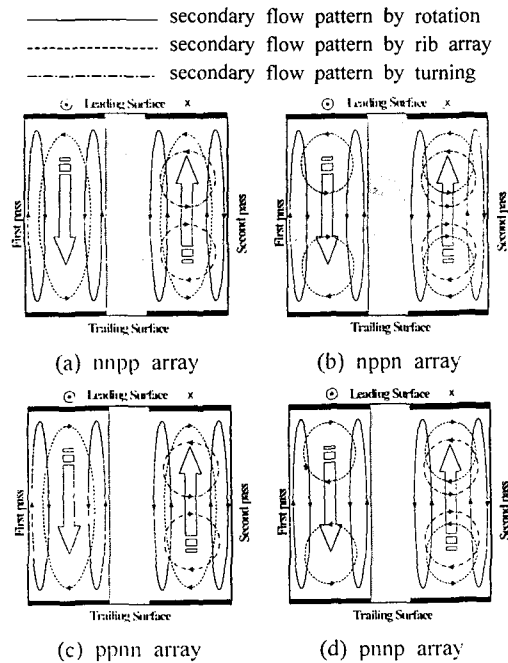


Fig. 5 Secondary flow structures for various rib arrangements

충돌각을 나타내고, 후연에서는 좌측으로 회전된 것이 음(n)의 충돌각을, 우측으로 회전된 것이 양(p)의 충돌각을 나타낸다.

Fig. 4는 덕트 내부의 다양한 요철배열에 대한 개략도를 나타내고 있다. 여기서 실선은 전연면에서의 요철배치를 나타내며, 점선은 후연면에서의 요철배치를 나타낸다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)는 전연면과 후연면에서의 요철이 엇갈린 배열인 경우, Fig. 4(b)와 Fig. 4(d)는 평행한 배열인 경우를 나타내며, 전연면 및 후연면에서의 요철의 충돌각 변화에 따라 총 47-

지의 요철배열에 대한 실험을 수행하였다.

2.2 결과 처리

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

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

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 증기밀도(bulk density)를 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⁽¹⁶⁾에 의해서 제시된 식을 사용하였다.

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

유동의 평균 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,b}$)는 피치 평균 승화량을 기준으로 사용하였으며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{v,b} = \frac{\rho_s W x}{Q \Delta t} \frac{1}{z_{sub}} \Big|_x \quad (3)$$

위의 물질전달계수는 무차원수인 Sherwood 수로 나타낼 수 있으며 다음같이 표시된다.

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

여기서 D_{naph} 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수이다. 여기서 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho⁽¹⁷⁾에 의하여 제시되어있다. 본 실험에서의 Sherwood수는 Kline과 McClintock⁽¹⁸⁾의 방법에 의해 95%신뢰수준에서 7.76%의 불확실성을 가진다. 본 실험에서는 국소 물질전달 계수를 요철이

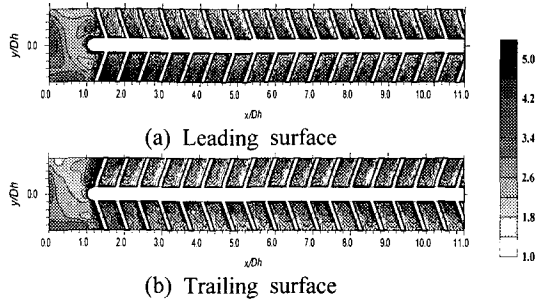


Fig. 6 Contour plot of Sh/Sh_0 for npp at $Re=20,000$ and $Ro=0.0$

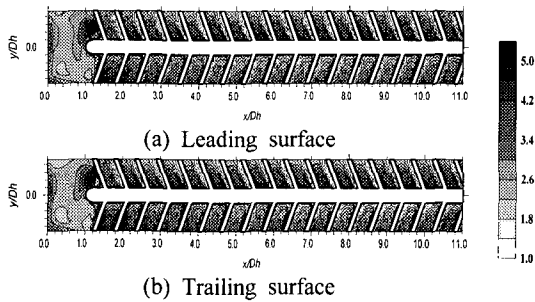


Fig. 7 Contour plot of Sh/Sh_0 for nppn at $Re=20,000$ and $Ro=0.0$

없는 완전 발달한 원형관에서의 물질전달계수로 나누어 그 비(Sh/Sh_0)로 나타내었다. 완전 발달한 원형관의 물질전달계수는 Dittus와 Boelter⁽¹⁹⁾에 의해서 제시된 식에 열/물질전달의 유사성을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

3. 결과 및 고찰

3.1 덕트내 유동고찰

Fig. 5는 요철이 설치된 2선회덕트 내부에 발생하는 이차유동의 구조를 도식적으로 나타낸 그림이다. 회전에 의한 이차유동은 실선으로, 요철에 의한 이차유동은 점선으로, 180° 곡관부에 의해서 발생하는 이차유동은 일점쇄선으로 각각 표현되어있다. Fig. 5(a)와 (c)에서 볼 수 있는 바와 같이 엇갈린 요철은 단일 셀(cell)의 이차유동 구조를 형성시키고 평행한 요철의 경우 Fig. 5(b)와 (d)와 같이 두 개의 쌍을 이루는 이차유동 구조를 나타내게 된다.

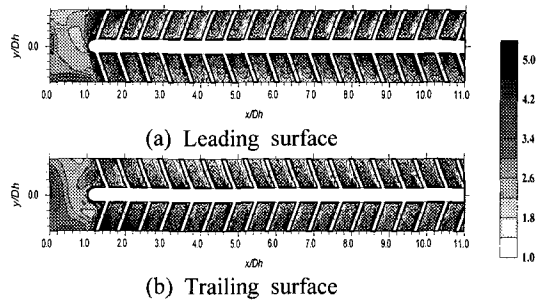


Fig. 8 Contour plot of Sh/Sh_0 for ppnn at $Re=20,000$ and $Ro=0.0$

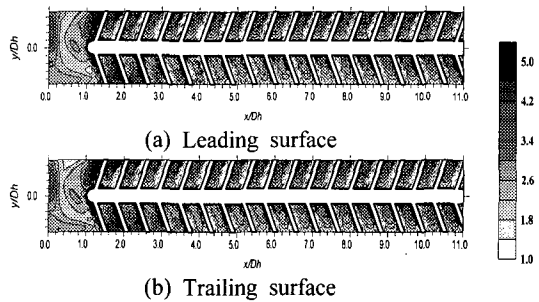


Fig. 9 Contour plot of Sh/Sh_0 for pnpn at $Re=20,000$ and $Ro=0.0$

3.2 정지 덕트

Fig. 6은 $Re=20,000$, $Ro=0.0$ 인 npp배열의 정지 덕트에서의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. 경사진 요철에 의해서 발생하는 이차유동은 요철이 설치된 면의 좌우에 비대칭적인 열/물질전달 계수 분포를 나타내게 된다. Fig. 6(a), (b)에 나타나 있는 바와 같이 전연 (leading surface)에서는 내벽 (inner wall)쪽에 후연 (trailing surface)에서는 외벽 (outer wall)쪽에 극대값을 나타낸다. 엇갈린 요철배열의 경우 전/후연 근처에서의 요철에 의한 이차유동의 방향이 반대가 된다. 따라서 전연 근처에서의 요철에 의한 이차유동의 방향은 외벽쪽으로 향하고 후연 근처에서는 내벽 쪽으로 향하게 된다. 곡관부입구에서는 이와 같은 이차유동의 영향으로 Fig. 6(a), (b)에서 볼 수 있는 바와 같이 전/후연간에 열/물질전달이 차이가 난다. Fig. 6(a), (b)의 곡관부 외벽에는 유동의 충돌에 의해서 높은 열/물질전달 계수 값이 나타난다. 곡관부를 지난 유동은 Dean 와류의 영향이 지배적으로 나타난다. 2차유로의 입구 측, 곡관부 출구 부근에서는 Dean 와류에 의해서 외벽 쪽에 강한 하향류가 존재하게 된다. 따라서 전연에서는 Dean 와류의 방향과 요철에

의한 이차유동의 방향이 일치하여 외벽 쪽에 매우 높은 열/물질전달 계수 값이 나타난다. 반면 후연의 경우 요철에 의한 이차유동의 방향과 Dean 와류의 방향이 반대가 된다. 이 후 이차유동의 혼합은 매우 복잡한 이차유동 구조를 나타내고 이 부근(2차유로 후연 입구)에서는 내/외벽에 비교적 고른 열/물질전달이 나타난다. 그러나 이런 현상은 요철을 2~3개 통과하면서 바로 사라지고 요철에 의한 이차유동이 지배적이 된다.

Fig. 7은 $Re=20,000$, $Ro=0.0$ 인 nppn배열의 정지채널에서의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. 이 배열은 Fig. 6의 엇갈린 요철 배열의 전연의 요철을 고정시키고 후연의 요철의 방향을 바꾸어 전/후연의 요철배열이 평행한 배열이 되도록 한 것이다. 평행한 요철을 설치한 경우 덕트의 중심을 기준으로 대칭인 유동 구조가 나타나기 때문에 전/후연의 열/물질전달 특성도 대칭적인 형태가 된다. 1차유로에서는 요철에 의한 이차유동의 하향류가 내벽쪽에 발생하므로 내벽 부근에 열/물질전달의 극대값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 엇갈린 요철의 경우와 달리 곡관부에 들어서도 전/후연의 열/물질전달은 대칭으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 곡관부 외벽 부근에서는 역시 유동의 충돌에 의한 높은 열/물질전달 계수 분포가 나타나는 영역을 볼 수 있다. 2차유로에 진입하면서 곡관부를 지나면서 생성된 Dean 와류가 2차유로의 요철에 의한 이차유동의 방향과 일치하여 외벽부근에 높은 열/물질전달 계수 분포가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이후 2차유로의 하류로 향하면서 Dean 와류의 영향이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 $Re=20,000$, $Ro=0.0$ 인 ppnn배열의 정지채널에서의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. Fig. 8(a)와 (b)는 각각 전/후연의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. 이 경우 회전의 효과가 없기 때문에 앞서 설명한 nnpp배열과 전/후연의 위치가 바뀌어 열/물질전달 특성이 나타난다. 따라서 Fig. 6(a)에서 나타나 특성은 Fig. 8(b)에 나타나고, Fig. 6(b)에서 나타나 특성은 Fig. 8(a)에 나타난다.

Fig. 9는 $Re=20,000$, $Ro=0.0$ 인 pnpn배열의 정지채널에서의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. 이 배열은 Fig. 8의 요철 배열의 전연의 요철을 고정시키고 후연의 요철의 방향을 바꾸어

전/후연의 요철배열이 평행한 배열이 되도록 한 것이다. 이 경우도 전/후연의 열/물질전달과 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 1차유로에서는 외벽 쪽에 열/물질전달의 극대값이 나타난다. 곡관부 중앙에 높은 열/물질전달이 일어나는 것을 볼 수 있으며, 외벽 쪽에 나타나는 높은 열/물질전달 영역이 좀더 모서리 쪽으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 이는 1차유로의 이차유동의 방향과 Dean 와류의 방향이 일치하기 때문에 Dean 와류가 좀더 일찍 발달하는 것으로 사료된다. 2차유로의 입구에서는 곡관부 직후의 Dean 와류의 영향이 좀더 강하게 나타난다. 엇갈린 요철의 경우 Dean 와류의 영향이 2차유로 입구에서 요철 2~3개정도 지날 때까지만 지속되지만(Fig. 6(b)와 Fig. 8(a)) pnpn요철배열에서는 1차유로에서부터 발달된 이차유동이 곡관부를 지나면서 더욱 강화되어 2차유로 입구에서 요철을 약 3~4개 지날 때까지 외벽 쪽에 열/물질전달의 극대값을 나타낸다. 이후 3~4개의 요철을 더 지날 때까지도 영향이 남아 내벽 쪽에 뚜렷한 극대값이 보이지 않는다. 즉, 2차유로의 입구에서부터 요철을 약 7~8개 지나서야 열/물질전달의 극대값은 내벽 쪽에 나타나고 이후 이 극대값은 하류로 향할수록 점점 증가한다. 따라서 이와 같은 요철 배열의 경우 2차유로의 중앙부근에서 열적으로 취약한 부분이 발생할 수 있다.

Fig. 10은 $Re=20,000$ 인 정지덕트($Ro=0.0$)에서 nnpp, nppn, ppnn 및 pnpn 요철배열일 때의 면적 평균 열/물질전달계수 분포이다. 완전 발달된 유동은 $x/D_h = -11.85$ 부근에서부터 열/물질전달을 시작하게 된다. 그림에 나타난 바와 같이 평행한 요철의 경우 엇갈린 요철에 비해서 전체적으로 높은 열/물질전달 계수가 나타나는 것을 볼 수 있다. 열경계조건이 시작되는 1차유로 입구에서부터 출구 쪽으로 가면서 점차 열/물질전달 계수는 감소한다. 특히 엇갈린 요철(Fig. 10(a)와 (c))의 경우 평행한 요철(Fig. 10(b)와 (d))배열보다 열/물질전달 계수의 감소율이 큰 것을 볼 수 있다. 이는 엇갈린 요철의 경우 단일셀 구조의 이차유동 구조를 가지므로 지속적으로 나프탈렌이 승화된 선회 유동이 요철이 설치된 면에 높은 나프탈렌 농도로 영향을 주기 때문이다. 이로 인해 엇갈린 요철의 경우 1차유로의 입구에 비해서 출구의 열/물질전달 계수가 약 20%정도 낮게 나타나

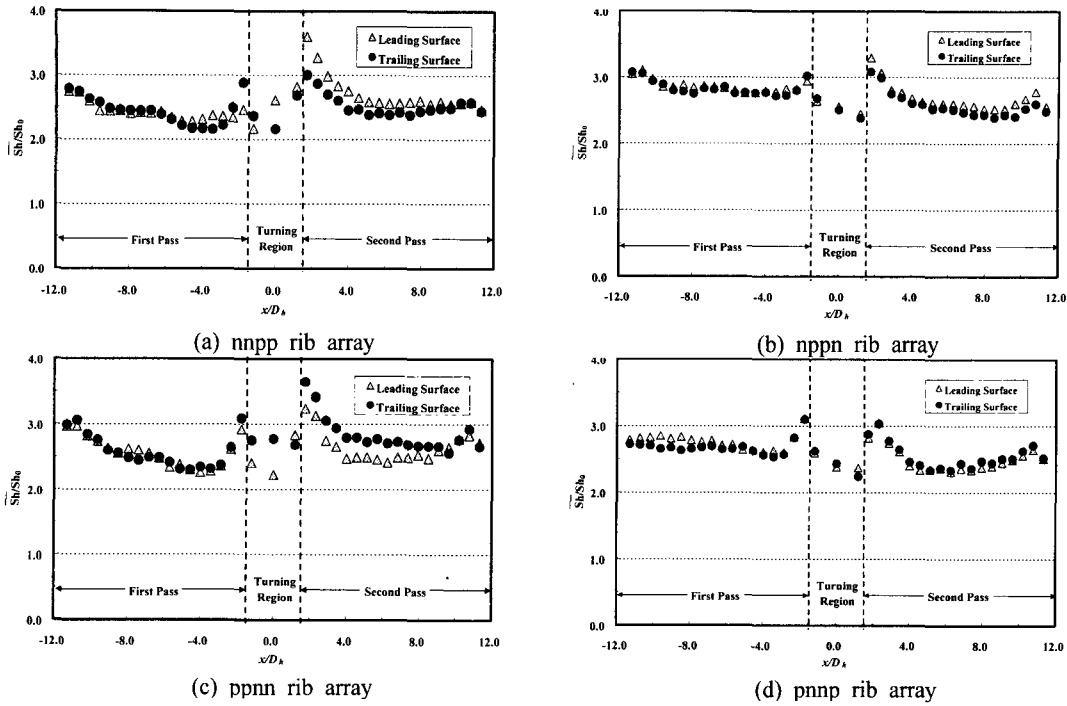


Fig. 10 Average Sh/Sh_0 distributions at $Re=20,000$ and $Ro=0.0$

는 것을 볼 수 있다. 그러나 평행한 요철의 경우 덕트의 중심을 기준으로 대칭인 두개의 셀을 갖는 이차유동 구조를 갖게 된다. 이로 인해 중심부에 상대적으로 저농도의 코어유동이 요철이 설치된 면에 접촉하므로 1차유로내에서 비교적 균일한 열/물질전달 계수를 나타낸다. 이 경우 1차유로의 입구에 비해서 출구의 열/물질전달 계수 강하는 10%이내이다.

Fig. 10(a)와 (c)의 엇갈린 요철 배열의 경우 국소값에서 볼 수 있는 바와 같이 전/후연의 열/물질전달 분포가 바뀌어 나타나며 평균값에서도 전/후연의 값이 바뀌어 나타난다. 2차유로 입구에서는 곡관부 직후 유동이 요철을 만나면서 매우 급격히 교란되어 높은 면적 평균 열/물질전달 분포가 보인다. 특히 Fig.10(a)의 nppp배열의 전연이 후연보다, Fig. 10(c)의 ppnn배열의 후연이 전연보다 높은 면적 평균 열/물질전달 계수가 나타난다. 이는 앞선 국소값 분포에서 설명한 바와 같이 곡관부 직후 Dean 와류의 영향이 요철에 의한 영향과 병합되면서 나타나는 결과이다. 평행한 요철의 경우 2차유로의 면적평균 열/물질전달 계수 분포는 약간 다른 형태를 나타내게 된다. Fig. 10(b)의 nppn의 경우 2차유로 입구에서 면적

평균 열/물질전달 계수는 급격하게 올라갔다 하류로 진행하면서 점차 낮아진다. Fig. 10(d)의 pnpn배열의 경우도 2차유로 입구에서 급격히 올라가고 하류로 가면서 점차 낮아지기는 하지만 2차유로 중간지점 이후부터는 다시 상승한다. 이는 Fig. 9에서 설명한 바와 같이 Dean 와류의 방향과 2차유로의 요철에 의한 이차유동의 방향이 달라 2차유로 입구에서는 곡관부의 영향이 좀 더 강하게 나타나 Dean 와류의 영향이 더 강하지만 하류로 진행할수록 요철에 의한 영향이 더 강하게 나타나면서 2차유로 중간부분에 두 이차유동이 상충되는 지점에서 극대값이 없는 영역이 나타나고 여기에서 최저 면적평균 열/물질전달 계수가 나타난다. 이후 요철에 의한 이차유동이 발달하면서 2차유로 하류로 가면서 면적평균 열/물질전달 계수는 증가한다.

3.3 회전 덕트

Fig. 11은 $Re=20,000$, $Ro=0.1$ 인 nppp배열의 회전덕트에서의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. Fig. 11(a)는 전연의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타내고 Fig. 11(b)는 후연의 국소 열/물질전달 계수를 나타낸다. 1차 유로의 전연

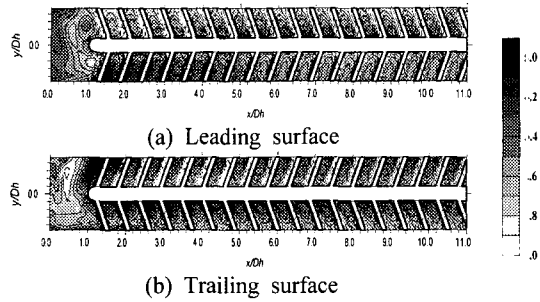


Fig. 11 Contour plot of Sh/Sh_0 for nppp at $Re=20,000$ and $Ro=0.1$

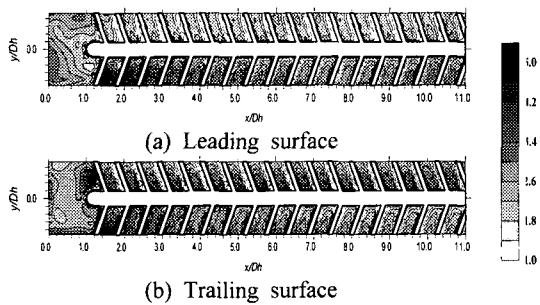


Fig. 12 Contour plot of Sh/Sh_0 for nppn at $Re=20,000$ and $Ro=0.1$

에서는 내벽 근처에 후연에서는 외벽 근처에 높은 열/물질전달이 일어난다. 약간 차이가 나기는 하지만 전체적인 열/물질전달 패턴은 정지되어 있는 경우와 비슷하게 나타난다. 곡관부에서는 회전에 의한 영향이 분명하게 나타난다. 정지된 경우와 비교하면 곡관부의 국소 열/물질전달 계수 분포는 분명한 차이가 나타난다. 회전 덕트의 전연의 경우 정지한 경우 보다 곡관부의 모서리부분 전체에서 높은 열/물질전달이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 1차유로 직후에서 요철에 의한 바닥근처의 이차유동이 외벽 쪽으로 향하므로 곡관부 쪽으로 들어오기 위해서 곡관부 전체를 냉각시키면서 들어오기 때문에 이런 영역이 넓게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 후연에서는 곡관부 직후의 높은 열/물질전달이 나타나는 것은 정지된 경우와 마찬가지로이지만 그보다 값은 크게 나타난다. 곡관부 중심에서는 열/물질전달이 매우 취약한 부분이 보인다. 2차유로 입구에서는 내벽과 외벽쪽 양쪽에 극대값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 곡관부, 요철 그리고 회전의 복합적인 효과로 전연쪽에서는 외벽쪽에 하나의 셀을 갖는 강한 이차유동이 형성되지만 후연 쪽에서는 여러 개의 이차유동이 형성됨을 설

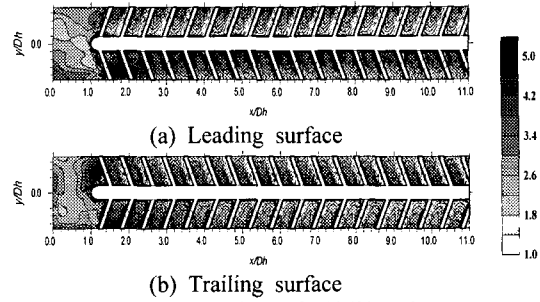


Fig. 13 Contour plot of Sh/Sh_0 for ppnn at $Re=20,000$ and $Ro=0.1$

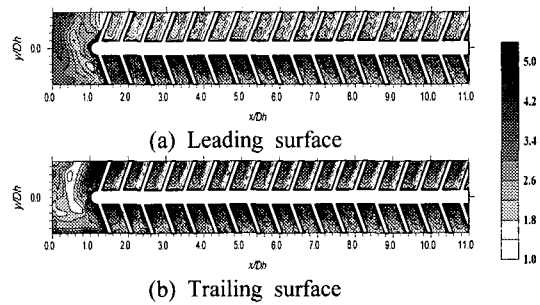


Fig. 14 Contour plot of Sh/Sh_0 for pnpn at $Re=20,000$ and $Ro=0.1$

명한다. 따라서 2차유로의 후연의 열/물질전달은 이와 같이 상당히 교란된 유동에 의해서 매우 높게 나타난다.

Fig. 12는 $Re=20,000$, $Ro=0.1$ 인 pppn배열의 회전 덕트에서의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. 이 경우 평행한 요철이 설치되어 있으므로 회전이 없는 경우 덕트의 중심(z/D_h)으로 대칭인 이차유동 구조가 나타난다. 이때 회전은 이와 수직 방향으로 하게되므로 이차유동 구조는 회전에 의한 Coriolis 힘에 의해서 한쪽으로 일그러진 형태가 되게 된다^(14,15). Fig. 12에 나타난 바와 같이, 평행한 요철의 경우 앞선 엇갈린 요철의 경우보다 회전에 의한 효과가 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있으며 이때 전연의 열/물질전달은 후연에 비해서 매우 낮다. 곡관부에서 역시 주유동은 Fig. 5에 나타난 바와 곡관부의 전연에서는 정지된 경우와 완전히 다른 패턴을 갖는다. 반면 후연에서는 정지된 경우와 비슷한 패턴을 갖는 것으로 보인다. 이 경우 앞서 설명한 바와 같이 곡관부의 Dean 와류의 방향과 요철에 의한 이차유동의 방향이 일치하기 때문에 외벽 쪽에 매우 높은 열/물질전달이 일어나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13은 $Re=20,000$, $Ro=0.1$ 인 pppn배열의 회

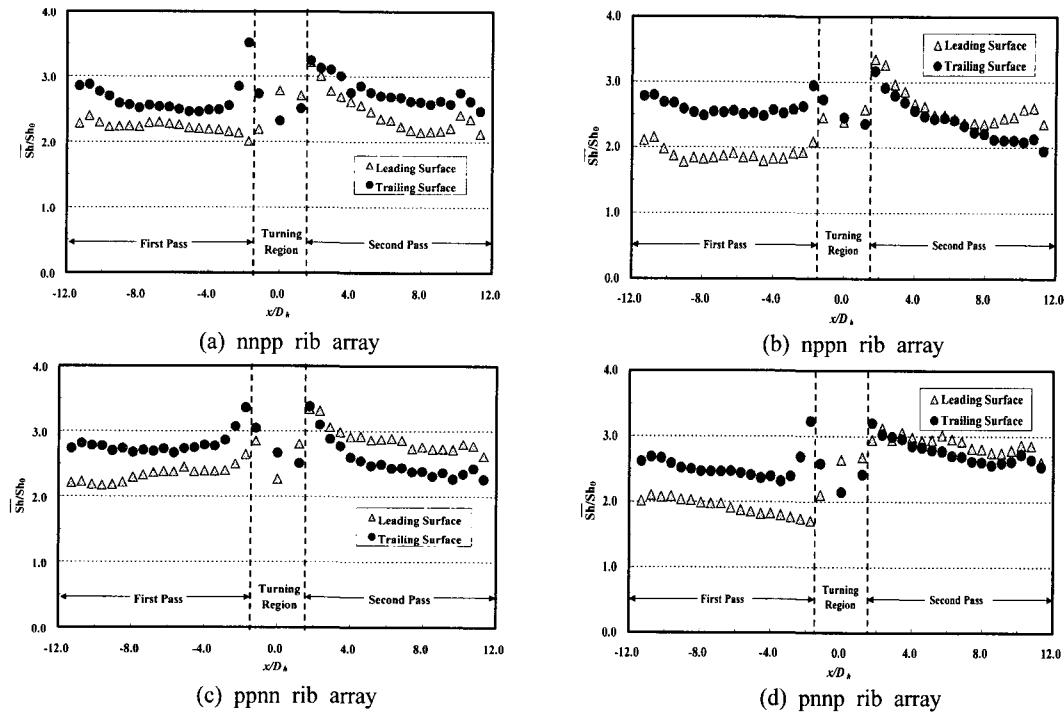


Fig. 15 Average Sh/Sh_0 distribution at $Re=20,000$ and $Ro=0.1$

전덕트에서의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. 정지된 경우와 달리 Fig. 13의 경우 회전에 의해서 내부 유동은 수직방향의 힘 (Coriolis 힘)을 받기 때문에 열/물질전달 패턴은 Fig. 11의 경우와 같을 수 없다. 1차유로에서는 요철에 의한 이차유동의 영향으로 전연에서는 외벽 근처에 후연에서는 내벽근처에 극대값이 나타난다. 곡관부에서는 Fig. 11의 nppp의 경우와는 전혀 다른 열/물질전달 분포를 나타낸다. 비록 전연 중심부에 열/물질전달이 약한 부분이 나타나기는 하지만 크게 차이가 나지는 않으며, 이 경우 Fig. 11 (b)의 곡관부 중심부에 나타났던 취약한 영역은 없다. 2차 유로 입구에서는 Dean 와류의 영향으로 외벽쪽에 높은 열/물질전달이 일어난다. 전연 근처에서는 Dean 와류의 방향과 요철에 의한 이차유동의 방향이 반대가 되지만 Fig. 11의 nppp에서 보이던 형태의 열/물질전달 특성은 보이지 않는다. 후연에서는 Dean 와류의 방향과 요철에 의한 이차유동이 일치하여 외벽쪽에 매우 높은 열/물질전달이 일어난다. 이상의 결과로부터 회전익에서는 엇갈린 요철이 설치된 경우 2차유로의 외벽 근처의 열/물질전달을 향상시키는 이차유동 구조가 발달할 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 14는 $Re=20,000$, $Ro=0.1$ 인 pnpn배열의 회전덕트에서의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타낸다. 이 경우에서 1차유로에서는 전/후연간의 열/물질전달은 확연하게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. nppn과 마찬가지로 후연의 곡관부 입구에서는 매우 높은 열/물질전달 분포를 나타내지만 중심부에 매우 낮은 열/물질전달 계수가 나타나는 영역이 나타난다. nppp와 pnpn의 결과로부터 1차유로 후연의 요철배열이 음(n)이면 후연 곡관부 중심에는 낮은 열/물질전달이 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 회전익의 경우 1차유로 후연의 요철배열은 양(p)인 것을 사용함으로써 열적으로 취약한 부분을 제거할 수 있다. 2차유로 입구에서는 정지된 요철보다 Dean 와류의 영향이 상대적으로 줄어든다. 전연에서는 요철에 의한 유동이 정지덕트보다 일찍 발달하기 시작하며 후연에서는 입구에서부터 요철의 영향이 나타난다.

앞선 4개의 결과로부터 1차유로에서는 요철의 배열에 크게 좌우됨을 볼 수 있다. 그러나 2차유로에서는 열/물질전달은 요철의 회전각도에 더 큰 영향을 받는다. 즉, pnpn는 평행한 요철배열이고 nppn는 엇갈린 요철배열임에도 불구하고 pnpn의 후연 2차유로의 열/물질전달 계수 분포

는 $nnpp$ 의 후연 2차유로의 열/물질전달 계수 포와 비슷한 것을 볼 수 있다.

Fig. 15는 $Re=20,000$ 인 회전덕트($Ro=0.1$)에서의 면적평균 열/물질전달계수 분포이다. 그림에 나타난 바와 같이 1차유로에서는 회전에 의해 전연의 면적평균 열/물질전달 계수는 후연보다 낮다. 그리고 엇갈린 요철의 경우 평행한 요철보다 평균적으로 전/후연간의 면적평균 열/물질전달의 차이가 적게 나타난다.

곡관부에서의 면적평균 열/물질전달 계수는 Dean 와류에 의한 유동의 혼합으로 1차유로의 전/후연의 면적평균 열/물질전달 계수 값의 중간값 정도가 된다. 2차유로 입구에서 요철에 의한 와류, Dean 와류 그리고 회전에 의한 와류의 동시작용으로 면적평균 열/물질전달 계수 값은 급격하게 올라가는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 반경방향으로 유입유동을 하는 경우 Coriolis 힘은 유동을 전연쪽으로 편향시켜 전연의 열전달이 큰 것으로 알려져 있지만 $nnpp$ 요철 배열의 경우 전연의 면적 평균 열/물질전달 계수가 후연보다 낮게 나타난다 (Fig. 15(a)). 이는 정지된 경우의 $nnpp$ 배열의 면적 평균 열/물질전달 계수의 분포와도 반대의 결과이다. Fig. 10에서 2차유로의 경우 엇갈린 요철에서는 정지덕트에서도 전/후연간의 면적평균 열/물질전달 계수는 차이가 나는 것을 볼 수 있지만 평행한 요철은 전/후연의 열/물질전달 계수는 거의 같게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 곡관부에 의한 Dean 와류의 방향과 요철에 의한 이차유동의 방향이 일치하는가 일치하지 않는가에 의한 결과로 두 이차유동의 방향이 일치하는 경우 매우 높은 열/물질전달 계수를 나타내지만 일치하지 않는 경우 두 이차유동의 강도가 약해져 전체적으로 약한 열/물질전달 계수 값이 나타나는 것으로 볼 수 있다. 회전하는 경우 면적평균 열/물질전달 계수가 정지덕트의 것과 반대로 나타나는 것은 Coriolis 힘에 의해 두 이차유동이 강하게 혼합될 경우 이에 반하는 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 반면 두 이차유동의 방향이 서로 반대가 되어 약한 이차유동구조가 형성되는 경우 덕트회전의 효과는 이 이차유동 구조를 강화시켜 열/물질전달을 촉진시키는 것으로 보인다.

또한 면적평균 열/물질전달 계수분포로부터 알 수 있는 것은 2차유로에서는 요철의 배열 (평행요철/엇갈린요철)에 의해서 받는 영향보다 요철의

충돌각(n/p)에 의해서 열/물질전달 특성이 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 2차유로 전연에서 같은 반시계 방향의 요철 충돌각 (p)을 나타내는 $nnpp$ 의 전연의 면적평균 열/물질전달 계수는 $nppn$ 의 전연의 면적평균 열/물질전달 계수와 비슷한 특성을 나타낸다. 이는 덕트의 종횡비가 2:1로 크므로 국소적으로는 요철에 의해서 더 많은 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

정지 덕트

(1) 1차유로에서는 평행요철배열이 엇갈린요철배열보다 높은 열/물질전달 계수를 나타낸다. 이는 요철 배열에 의해서 내부에 생성되는 이차유동이 엇갈린요철의 경우 단일 셀의 형태이지만 평행요철의 경우 두 개의 셀을 갖는 이차유동의 형태를 갖기 때문이다.

(2) 2차유로 입구에서는 곡관부를 지나면서 발달하는 Dean 와류와 요철에 의한 이차유동의 영향을 동시에 받는다. 따라서 요철배열은 국소 열/물질전달 계수 분포에 큰 영향을 미친다.

회전덕트

(1) 1차유로에서는 Coriolis 힘의 영향으로 후연의 열/물질전달 계수 값이 전연보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이때 전/후연간의 열/물질전달의 차이는 평행요철배열이 엇갈린요철배열보다 크게 나타난다.

(2) 2차유로에서는 엇갈린요철 배열은 전/후연간의 면적평균 열/물질전달의 차이가 크게 나타나는 반면 평행요철배열은 면적평균 전/후연의 열/물질전달은 거의 비슷한 값을 나타낸다.

(3) 엇갈린 배열인 $nnpp$ 요철배열의 2차유로 전연의 열/물질전달 계수 값은 후연보다 낮게 나타나며 $ppnn$ 은 전연이 후연보다 높게 나타난다. 이는 정지 덕트의 경우와 같다. 평행요철의 경우 $pnnp$ 는 $nnpp$ 보다 높은 열/물질전달이 나타나지만 정지덕트에서는 반대의 특성이 나타난다. 2차유로에서의 열/물질전달 특성은 요철의 배열보다는 요철과 주유동의 충돌각에 더욱 영향을 받는다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Metzger, D. E., Plevich, C. W. and Fan, C. S., 1984, "Pressure Loss through sharp 180 Deg Turns in Smooth Rectangular Channels," *ASME J. of Engineering Gas turbines and Power*, Vol. 106, pp. 677~681.
- (2) Metzger, D. E. and Sahm, M. K., 1986, "Heat Transfer around Sharp 180-Deg Turns in Smooth Rectangular Channels," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 500~506.
- (3) Chyu, M. K., 1991, "Regional Heat Transfer in Two-Pass and Three-Pass Passages with 180-Deg Sharp Turns," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 63~70.
- (4) Chandra, P. R. and Han, J. C., 1989, "Pressure Drop and Mass Transfer in Two-Pass Ribbed Channels," *J. of Thermophysics*, Vol. 3, No. 3, pp. 315~320.
- (5) Lee, S. Y., Choi, C., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2001, "Heat/Mass Transfer and Friction Characteristics in a Square Duct with Various Discrete Ribs," *Transaction of KSME B*, Vol. 25, No. 11, pp. 1640~1649.
- (6) Ekkad, S. V. and Han, J. C., 1997, "Detailed Heat Transfer distributions in Two-Pass Square Channels with Rib Turbulators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 11, pp. 2525~2537.
- (7) Song, B. and Amano, R. S., "Application of Non-Linear k-w model to the Turbulent Flow inside a Sharp U-Bend," *ASME Paper No. 2000-GT-0225*.
- (8) Mokizuchi, S., Murata, A. and Fukunaga, M., 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.
- (9) Mokizuchi, S., Murata, A., Shibata, R. and Yang, W. J., 1999, "Detailed Measurements of Local Heat Transfer Coefficients in Turbulent Flow Through Smooth and Rib-Roughened Serpentine Passages with a 180° Sharp Bend," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1925~1934.
- (10) Cho, H. H., Lee, S. Y., Rhee, D. H. and Won, J. H., 2001, "Heat Transfer Characteristics in a Two-Pass Rotating Rectangular Duct with 70° Attack Angle Ribs," *Proc. of ICECA*, pp. 605~610.
- (11) Won, J. H., Lee, S. Y. and Cho, H. H., 2001, "Heat Transfer Characteristics in a Rotating Two-Pass Duct," *Transaction of KSME B*, Vol. 25, No. 3, pp. 405~413.
- (12) Prabhu, S. V. and Vedula, R. P., 2000, "Pressure Drop Characteristics in a Rotating Smooth Square Channel with a sharp 180° bend," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21, pp. 198~205.
- (13) Jang, Y. J., Chen, H. C. and Han, J. C., 2000, "Flow and heat transfer in a rotating square channel with 45° angled ribs by Reynolds stress turbulent model," *ASME paper No. 2000-GT-0229*.
- (14) Al-Qahtani, M., Jang, Y. J., Chen, H. C. and Han, J. C., 2001, "Prediction of Flow and Heat Transfer in Rotating Two-Pass Rectangular Rotating Channel with 45° Angled Rib Turbulators," *ASME Paper No. 2001-GT-187*.
- (15) Azad, G. S., Uddin, M. J., Han, J. C., Moon, H. K. and Glezer, B., 2001, "Heat Transfer in a Two-Pass Rectangular Rotating Channel with 45° Angled Rib Turbulators," *ASME Paper No. 2001-GT-186*.
- (16) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (17) Goldstein, R. J., and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (18) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (19) Dittus, P. W., Boelter, L. M. K., 1930, Univ. Cal. Publ. Engng, Vol. 2, No. 13, pp. 443~461; 1985 reprinted in *Int. Commun. Heat Transfer*, Vol. 12, pp. 3~22.
- (20) 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 Paper No. 2001-GT-175*.