

덕트내 요철의 단락위치 변화에 따른 열/물질전달 및 압력강하 특성

- 정렬 단락배열 요철 -

이세영* · 최 청* · 이동호* · 조형희†
(2001년 4월 19일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

Heat/Mass Transfer and Friction Characteristic in a Square Duct with Various Discrete Ribs

- In-Lined Gap Arrangement Ribs -

Sei-Young Lee, Chung Choi, Dong-Ho Rhee and Hyung-Hee Cho

Key Words: Turbine Internal Passage(터빈 이차유로), Discrete Rib(단락요철), Duct Flow(덕트유동), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Pressure Drop(압력강하)

Abstract

The present study investigates the effects of various rib arrangements on heat/mass transfer in the cooling passage of gas turbine blades. A complex flow structure occurs in the cooling passage with rib turbulators which promote heat transfer on the wall. It is important to increase not only the heat transfer rates but also the uniformity of heat transfer in the cooling passage. A numerical computation is performed using a commercial code to calculate the flow structures and experiments are conducted to measure heat/mass transfer coefficients using a naphthalene sublimation technique. A square channel (50 mm×50 mm) with rectangular ribs (4 mm×5 mm) is used for the stationary duct test. The experiments focus on the effects of rib arrangements and gap positions in the discrete ribs on the heat/mass transfer on the duct wall. The rib angle of attack is 60° and the rib-to-rib pitch is 32 mm, that is 8 times of the rib height. With the inclined rib angle of attack (60°), the parallel rib arrangements make a pair of counter rotating secondary flows in the cross section, but the cross rib arrangements make a single large secondary flow including a small secondary vortex. These secondary flow patterns affect significantly the heat/mass transfer on the ribbed wall. The heat/mass transfer in the parallel arrangements is 1.5~2 times higher than that in the cross arrangements. However, the shifted rib arrangements change little the heat/mass transfer from the inline rib arrangements. The gap position in the discrete rib affects significantly the heat/mass transfer because a strong flow acceleration occurs locally through the gap.

기호설명

D_{naph} : 나프탈렌 확산계수 [m^2/s]

D_h : 유로 수력직경 [m]

h_m : 물질전달 계수 [W/m^2C]

L : 가열면의 길이 [m]

Re : Reynold 수, $D_h U / \nu$

Sh : Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$

U : 주유동 속도 [m/s]

W : 벽두께 [m]

x : 주유동 방향 좌표 [m]

* 연세대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

그리스문자

- ν : 공기의 동점성계수 [m^2/s]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

- b : 주유동 혼합 평균
 o : 원형관 내의 완전 발달 난류유동
 v : 증기
 w : 벽

1. 서론

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 압축비와 터빈입구온도(TIT; Turbine inlet temperature)의 향상은 필수적이다. 그러나 이는 터빈 블레이드(blade)의 열부하를 가중시키고 이로 인해 부품의 수명을 단축시키게 된다. 최근 고성능 가스터빈 엔진의 터빈입구온도는 재료의 허용온도를 크게 상회하는 $1400 \sim 1500^\circ C$ 이상이며, 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드를 보호하고 적정수명을 유지하기 위하여 냉각이 필수적이다. 여러 냉각 방법과 병행하여 내부관 대류냉각(internal passage convective cooling)방법이 많이 사용되고 있다.

강제대류 냉각에서는 냉각성능을 향상시키기 위해서 요철을 사용한 냉각방법이 많이 사용되고 있다. 요철에 의한 강제 대류냉각은 냉각유로의 형상, 설치된 요철의 높이, 요철과 주유동과의 충돌각, 요철과 요철 사이의 거리, 요철의 단락여부 등 여러 가지 인자에 의해서 냉각성능이 좌우되며 이에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.

Han 과 Park⁽¹⁾은 요철과 주유동과의 충돌각을 변화시키면서 덕트의 단면비가 1, 2 그리고 4인 경우에 대해서 열전달 실험을 수행하였다. 정사각 단면을 갖는 덕트에서는 요철사이의 거리가 10일 때 요철과 주유동과의 충돌각이 60° 인 경우 가장 높은 열전달 계수 값을 나타내며 압력강하 역시 이 경우 가장 크게 일어나는 것을 확인하였다. 조형희 등⁽²⁻⁵⁾은 단면비가 1과 2인 경우에 덕트 내부의 요철의 각도, 형상 및 배열변화에 따른 국소적인 열전달계수 및 성능계수를 도출하였으며, Cho 등⁽⁶⁾은 단면비가 2인 경우에 나

프탈렌 승화법을 이용하여 덕트내 요철의 충돌각 및 단락을 변화시키면서 국소적인 열전달계수 및 덕트내의 마찰계수를 측정하여 성능계수를 도출하였다. Hermanson⁽⁷⁾과 Bonhoff 등⁽⁸⁾은 여러 가지 난류 모델을 적용시켜 가면서 요철과 주유동과의 충돌각이 45° 인 경우 덕트 내부에 발생하는 유동현상을 고찰하였다. 요철에 의하여 편향된 유동은 입력차이에 의해서 발생하는 이차유동구조를 갖게 되고 이러한 이차유동은 덕트 좌우의 열전달의 불균일을 야기시킨다. 이러한 결과는 Cho 등⁽⁶⁾과 Taslim 등⁽⁹⁾의 열/물질전달 실험결과에서 확인할 수 있는데 하향류가 존재하는 영역에서는 상향류가 존재하는 영역에서보다 훨씬 높은 열전달 계수 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이러한 열적인 불균형을 효과적으로 제어하기 위해서 여러 가지 형태의 변형된 요철을 사용하게 된다. 이에 대하여 Cho 등,⁽⁶⁾ Taslim 등,⁽⁹⁾ Han 과 Zhang,⁽¹⁰⁾ Chyu와 Natarajan⁽¹¹⁾ 및 Lau 등⁽¹²⁾은 단락 요철을 사용하여 열전달 특성을 고찰하였다.

경사진 요철은 덕트 내에서 회전하는 이차유동을 발생시킨다. 이렇게 회전하는 이차유동에 의해 하향류가 발생하는 부분에서는 유동의 충돌효과(impingement effect)에 의해서 국소적으로 높은 열전달이 일어나게 된다. 반면 상향류가 존재하는 영역에서는 유동의 재부착이나 충돌효과가 적어지게 되어서 상대적으로 열전달이 감소하는 특징을 나타낸다. 이와 같이 요철에 의한 유동 패턴은 덕트 내 요철이 설치된 면의 열전달 특성을 결정짓는 중요한 인자가 되고 이때 발생하는 열전달의 차이는 냉각의 불균일을 초래함으로써 블레이드의 열적 특성을 약화시키기도 한다. 이때 요철이 양면에 평행하게 배열되어 있는가 엇갈리게 배열되어 있는가에 따라 상이한 이차유동 패턴을 나타낸다. 요철의 배열에 의해 발생하는 이차유동 구조가 열전달의 불균일을 초래한다. 이를 개선하고자 다각적인 노력이 진행되어 왔다. 지금까지 연구된 바에 의하면 단락된 요철은 그 사이의 좁은 유로를 통하여 국소적으로 가속되는 유동이 좁은 영역에서의 열전달을 향상시킬 수 있으며 가스터빈 이차유로내에서는 이를 응용하고 있다. 본 연구에서는 열전달이 취약할 수 있는 영역에 설치된 요철의 단락을 통하여 열전달을 효과적으로 제어할 수 있는 방법을 모색하고자 한다.

2. 수치해석, 실험장치 및 방법

2.1 수치해석 조건

먼저 내부에 설치된 요철에 의한 유동 특성을 확인하기 위해서 상용 수치해석 코드인 FLUENT V5.4를 사용하여 유동장을 해석하였다. 덕트 내에서의 유동구조를 파악하기 위해서 비정렬격자계를 사용하여 요철이 설치된 덕트내의 유동구조를 수치적으로 해석하였다. 계산모델은 3차원 비압축성 정상상태로 가정하였다. 일반적으로 요철이 설치된 덕트의 유동은 요철을 3-4개정도 지나면 완전 발달된다고 알려져 있다. 따라서 계산시간을 줄이기 위해서 관심영역인 3번째의 요철이 지난 구간 이후부터 조밀격자를 구성하여 수치해석을 수행하였다. 실험 조건과 유사한 조건 하에서의 유동구조를 파악하기 위해서 실험장치와 같은 크기의 덕트(50 mm× 50 mm)와 요철(4 mm× 5 mm)을 모사하여 형상을 구성하였다. 또한 실험 조건과 같은 Re수 30,000을 기준으로 입구 유속은 9.5 m/s로 하였으며 입구 난류강도는 10%로 가정하였다. 일반적으로 박리 유동장에 적합하다고 알려진 RNG k-ε 난류 모델을 적용하였으며 벽면에서는 two-layer zonal 난류모델을 적용하였다.

비정렬 격자계를 사용하였으므로 계산 형상에 따라서 격자의 개수가 약간씩은 차이가 나지만 격자속에 해석 결과가 영향을 받지 않는 수인 약 40-50만개 정도의 격자를 구성하였다.

2.2 실험장치

실험 장치는 크게 수축부, 시험부, 플리넘, 오리피스 파이프, 송풍기 등으로 이루어져 있다. 수축부는 6:1의 면적비를 가지며, 시험부 덕트는 단면적(W× H)은 50 mm× 50 mm이므로 종횡비(aspect ratio, AR=W:H)는 1:1이다. 이 때의 수력직경(Dh)은 50 mm이다. 시험부 덕트는 아크릴로 제작되었으며 총 길이는 750 mm로 15Dh가 된다. 출구에는 플리넘을 설치하여 시험 덕트 하류에서 상류로의 유동교란이 전파되는 것을 방지하였다. 송풍기는 실험실 내부의 공기를 흡입하게 되며 흡입된 공기는 시험부를 거쳐 내경 77.5 mm인 오리피스 유량계에서 유량이 측정되고 송풍기를 통해 실외로 배출된다. 본 실험에서는 온도 측정을 위하여 3개의 J형 열전대

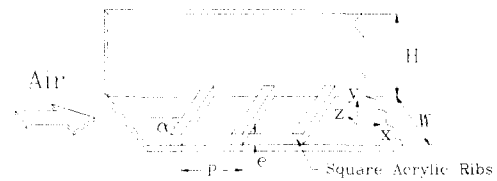


Fig. 1 Schematic of test duct and coordinate system

(Iron-Constantan)를 사용하였다. 본 실험에서는 평균속도는 약 9.5 m/s로 수력직경기준 Reynolds 수는 약 30,000이다. 본 실험에서 사용된 좌표계는 Fig. 1에서 보여주듯이 주유동 방향을 x, 횡방향을 y, 높이 방향을 z로 표시하였으며, x방향으로는 나프탈렌 코팅영역이 시작되는 지점에서부터, y방향으로는 중간지점을 z방향으로는 바닥을 원점으로 하였다.

요철은 아크릴과 황동을 이용하여 제작하였다. 요철은 4 mm× 5 mm의 직사각형의 단면을 갖는 요철을 사용하였다. 따라서 요철의 높이와 덕트 수력직경과의 비(e/D_h)와 요철의 높이와 덕트 높이와의 비는 모두 0.08이다. 실제 가스터빈에서는 열전달의 향상을 위해서 60° - 70° 정도의 충돌각을 많이 이용하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 결과를 토대로 요철과 주유동의 충돌각을 60°로 하여 실험을 수행하였다. Fig. 2에는 본 연구에서 사용된 요철배열의 개념도가 나타나 있다. 그림에서 실선은 측정면의 요철을 나타내며 점선은 반대면의 요철을 나타낸다. 요철은 한 면당 23개씩 설치되었으며 나프탈렌 표면에 이르기 전에 약 10여 개의 요철을 통과하여 유동적으로 완전 발달한 상태에서 열/물질전달 경계층이 발달한다. Fig. 2(e)-(l)에 나타나 있는 바와 같이 요철길이의 1/3이 되는 지점에 요철의 폭과 같은 너비(5mm)의 단락을 주어 국소적인 열전달의 계어를 시도하였다. 이때 단락의 위치에 따라서 여러 가지 단락배열을 고려할 수 있다. 표현의 편의를 위해서 약자를 사용하여 각 요철 배열을 표현하였다. Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 나란한 배열의 요철은 P(Parallel), 엇갈린 배열의 요철은 C(Cross)로서 나타내었으며 가열면 양쪽에 설치된 요철의 중심이 일치하면 I(In-line), 일치하지 않고 반 꺾어 이동되어 있으면 S(Shift)로 나타

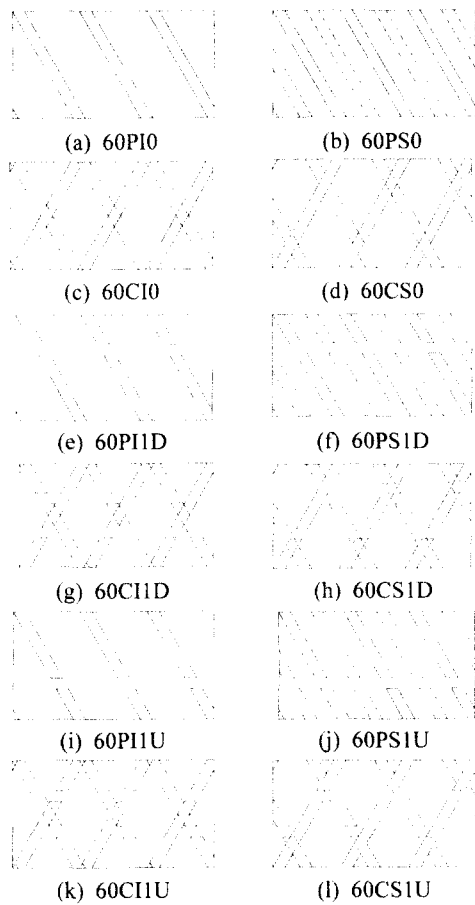


Fig. 2 Schematics of rib arrangements

내었다. 또한 단락의 수를 표시하였으며 1개의 단락이 있는 경우 단락의 위치가 이차유동의 회전방향에서 하향류쪽에 있으면 D(Downward), 상향류쪽에 있으면 U(Upward)로 표시하였다.

요철이 설치된 덕트내 압력강하 특성을 고찰하기 위해서 덕트의 측면벽의 중앙지점($y=H/2$)에 정압 측정용 홀(pressure tap)을 만들었다. 압력측정을 위해서 정밀 차압계(micro-manometer; FCO12 Kurness controls ltd., bexhill England)를 사용하였으며 측정 범위에 따라 각각 분해능 0.1 mmH₂O, 0.01 mmH₂O, 측정범위 ± 199.9 mmH₂O, ± 19.99 mmH₂O인 압력계를 사용하여 정밀한 측정이 가능하도록 하였다. 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달계수의 측정을 위해서 나프탈렌의 표면고도를 실험 전·후에 측정하여 계산하게 된다. 이를 위해 2차원 자동 이송장치로 이송되는

선형가변차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)를 이용하여 이루어진다. 이 장치의 정밀도는 0.025 μm 로 매우 정밀하며, LVDT의 측정오차는 평균나프탈렌의 승화깊이(3.5mil)의 1%이내이다.

2.3 실험결과처리

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.

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

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 덕트를 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⁽¹²⁾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.

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

위의 물질전달계수는 무차원수인 Sherwood 수로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표시된다.

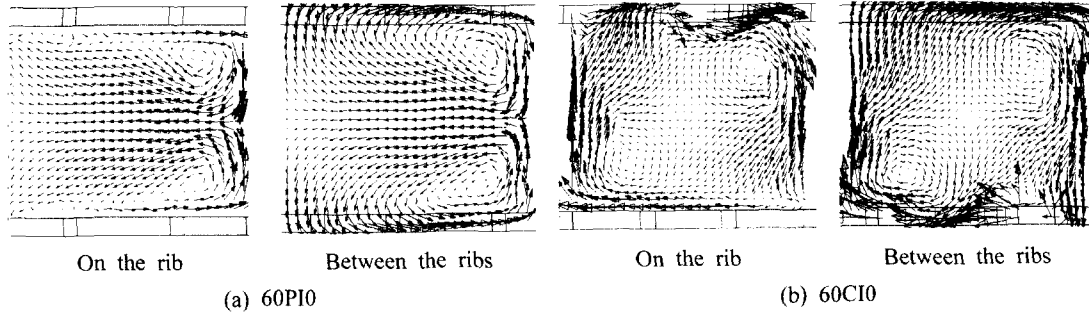


Fig. 3 Velocity vectors in continuous rib array

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

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 7.8%의 불확실성을 가진다.

본 실험에서는 국소 물질전달 계수를 요철이 없는 완전 발달한 원형관에서의 물질전달계수로 나누어 그 비로 나타내었다. 완전 발달한 원형관의 물질전달계수는 Dittus와 Boelter⁽¹⁶⁾에 의해서 제시된 식에 열/물질전달의 유사성을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

압력강하 실험은 입구부근의 기준 정압과 임의의 위치에서의 차압을 측정함으로써 얻어진다. 유동이 충분히 발달된 상태에서 압력은 선형적으로 감소한다. 따라서 전체 측정구간 중에서 열/물질전달 실험이 수행되는 구간을 중심으로 하여 곡선맞춤(curve fitting) 하여 주유동 방향으로의 평균 압력강하(dP/dx)를 구하고 이를 다음 식으로부터 평균 마찰계수를 구하였다.

$$\bar{f} = \frac{\Delta P}{4(L/D_h)(1/2)\rho V^2} \quad (6)$$

본 실험에서의 평균 마찰계수는 Kline과 McClintock⁽¹⁵⁾의 방법에 의해 95% 신뢰수준에서 4.9%의 불확실성을 가진다.

요철이 설치되지 않은 경우 덕트내 평균 마찰

계수는 요철이 없는 원형관에서의 마찰계수 상관관계식으로 나누어서 표현하였다. 완전 발달 원형관에서의 마찰계수는 Petukov가 Karman - Nikuradse 방정식에 맞도록 $10^4 < Re < 5 \times 10^6$ 범위에서 제안한 식을 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$$f_0 = 2(2.236 \ln Re - 4.369)^{-2} \quad (7)$$

국소적으로 얻어진 물질 전달계수로부터 면적 평균을 구하였다. 이때 요철이나 분리벽 등에 의해서 나프탈렌이 가려진 영역은 평균 계산에서 제외하였다.

물질전달 실험과 동시에 요철의 배열에 따른 압력강하 실험을 수행함으로써 요철설치에 따른 마찰계수의 증가를 동시에 고려하여 유체 이송동력이 일정(constant pumping power)할 때의 열전달 정도를 나타내는 성능계수의 개념을 도입하였다. 이때 성능계수는 다음과 같이 표현된다.

$$Thermal Performance = (\bar{Sh} Sh_0) / (\bar{f} / f_0)^{1/3}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과

본 연구에서는 정지하고 있는 단일 유로에서의 유동현상을 고찰하기 위해서 상용 수치해석 코드인 FLUENT V5.4를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 냉각유로내 열전달은 내부 유동에 매우 민감하므로 이러한 유동 패턴의 파악은 본 연구에 있어서 필요하다.

Fig. 3(a)는 60PI0의 요철배열을 갖는 유로내에서의 유동 구조를 나타낸다. 요철이 설치된 양쪽면이 대칭적인 구조를 가지고 있으므로 덕트

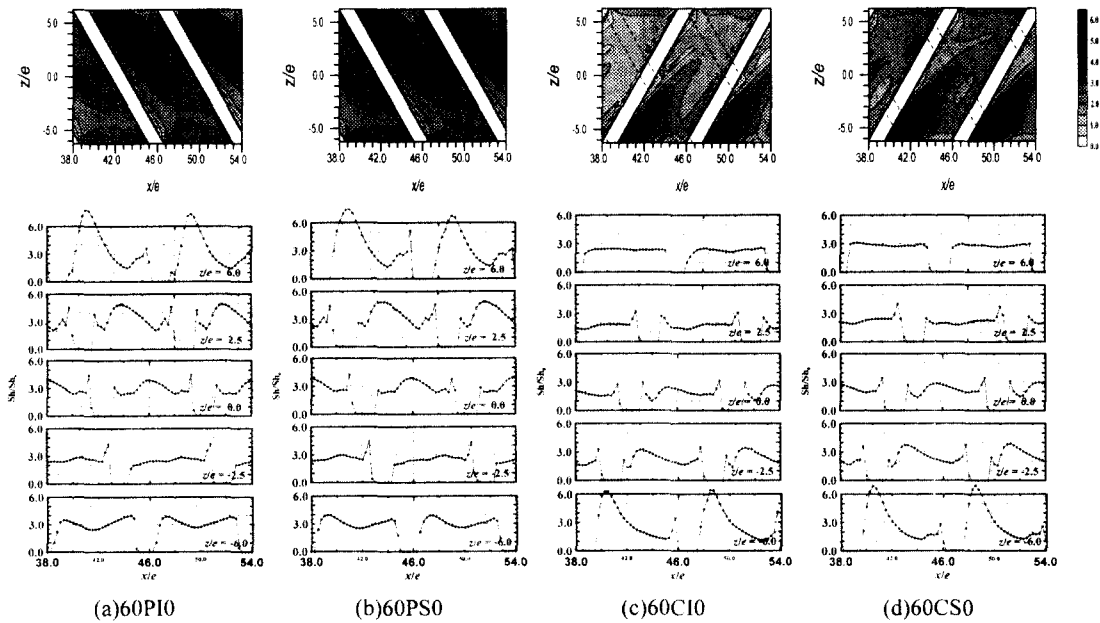


Fig. 4 Contour and local plots of Sh/Sh_0 with 60° attack angle (continuous rib)

중심선을 기준으로 대칭적인 이차유동 구조를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 요철이 설치된 면을 기준으로 하향류와 상향류가 존재하는 한 쌍의 이차유동의 구조를 Fig. 3(a) 확실히 관찰할 수 있다. 요철을 따라 덕트의 우측으로 편향된 유동은 중심영역으로 올라오게 되고 덕트중심에서는 요철이 설치된 반대면에서 오는 유동과 부딪히며 반대쪽으로 흐르게 된다. 이때 하향류가 발생하는 영역에서는 유동의 충돌효과에 의한 영향으로 높은 열전달효과를 기대할 수 있다.

Fig. 3(b)는 60CI0의 요철배열을 갖는 경우 내부의 유동 구조를 나타낸다. 이와 같은 요철배열은 요철이 설치된 면의 양쪽에 나타나는 유동구조가 서로반대의 유동패턴을 가지게 된다. 따라서, Fig. 3(b)에서 보이는 바와 같이 전체적으로 크게 순환하는 하나의 이차유동구조를 형성하게 한다. 덕트의 좌측과 우측에서는 서로 반대 방향의 유동이 형성된다. 전체적으로는 덕트를 순환하는 이차유동이 지배적으로 나타나지만 덕트의 우측 상단과 좌측하단에 작은 이차유동이 미약하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 상향류가 발생하여 반대면으로 향할 때 반대쪽 바닥 부근의 압력보다 중심부의 압력이 낮아 유동의 일부가 중심부로 향하면서 발생하는 것으로 보인다.

3.2 국소 Sherwood 수 분포

Fig. 4는 주유동과 요철의 충돌각이 60° 인 경우 연속요철을 사용한 여러 가지 요철배열에 대한 Sh/Sh_0 분포를 나타낸다. Fig. 4(a), (b)는 윗면과 아랫면의 요철이 평행하게 배열된 것으로 Fig. 4(a)의 경우 위면과 아랫면의 요철이 일치되게 설치된 것(60PI0)이고 (b)의 경우 윗면의 요철이 반 피치 이동되어 설치된 경우(60PS0)이다. 요철의 충돌각으로 인해서 발생하는 이차유동의 하향류에 해당하는 $z/e > 0$ 영역에서는 국소적으로 매우 높은 Sh/Sh_0 값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 이차유동의 하향류 영향에 의한 충돌효과와 더불어 요철을 지나 요철의 하류에서 박리된 유동이 하향류에 의해 눌러져 발생하는 재부착의 효과가 동시에 일어나면서 열/물질전달이 향상되는 것이다. 이와 같이 유동의 재부착은 열/물질전달 결과에서 보면 횡방향으로 $z/e = -3.5$ 영역까지 지속되는 것으로 보인다. 반면 상향류가 존재하는 영역($z/e < 0$)에서는 상향류에 의해 상대적으로 낮은 열/물질전달 계수 분포를 나타내지만 이때 상향류에 반대로 회전하는 또 하나의 작은 이차와류에 의해서 측면 벽 근처에서 Sh/Sh_0 가 높아지는 영역이 발견된다. 또한 요철 인접 상류영역에서는 요철을 만나면서 다시 박리된 유동과 그 사이에 나타나는 작은 모서리 와류

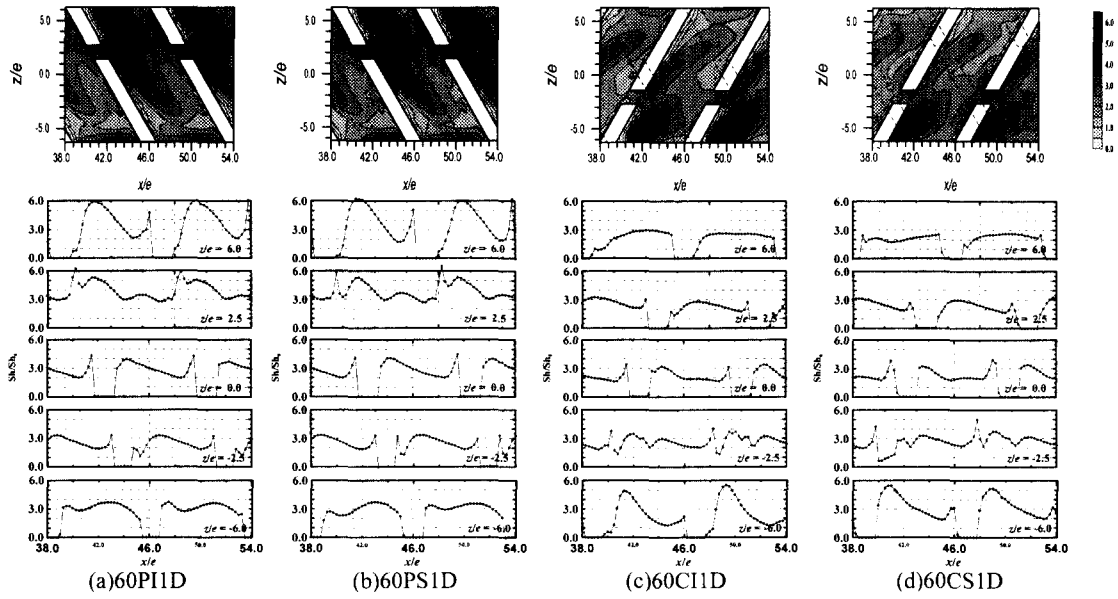


Fig. 5 Contour and local plots of Sh/Sh_0 with 60° attack angle (discrete rib - gap at downward flow side)

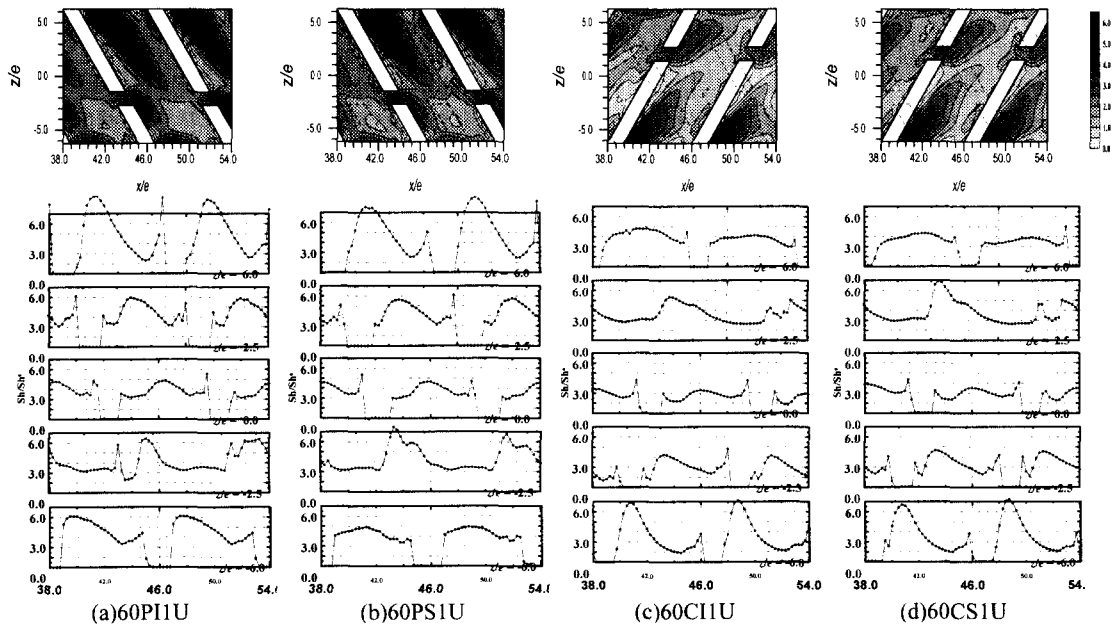


Fig. 6 Contour and local plots of Sh/Sh_0 with 60° attack angle (discrete rib - gap at upward flow side)

에 의한 영향으로 열/물질전달이 높은 영역이 국소적으로 나타난다. 이러한 유동 및 열/물질전달의 특성은 한 쪽면의 요철을 반 피치 이동시키는 것에는 크게 영향을 받는 것으로 보이지 않는다. Fig. 4의 (a)와 (b)를 비교하여 보면 두 Sh/Sh_0 분포는 거의 비슷한 것으로 나타난다.

Fig. 4(c)와 (d)는 윗면과 아랫면의 요철을 엇갈리게 배열한 경우의 Sh/Sh_0 분포를 나타낸다. 이 경우 수치해석 결과에 나타난 바와 같이 이차 유동이 약하여 Sh/Sh_0 의 최대값 및 전체적인 열/물질전달은 평행하게 배열된 경우보다 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 엇갈리게 배열한 경우에

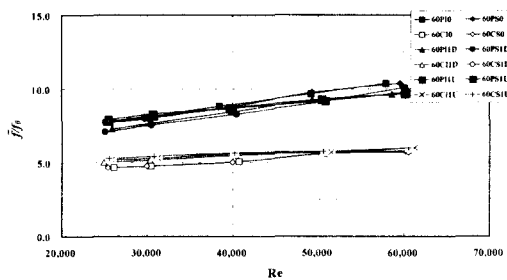


Fig. 7 Friction factor ratio

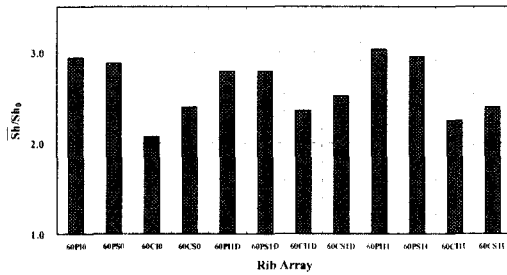


Fig. 8 Average heat/mass transfer ratio

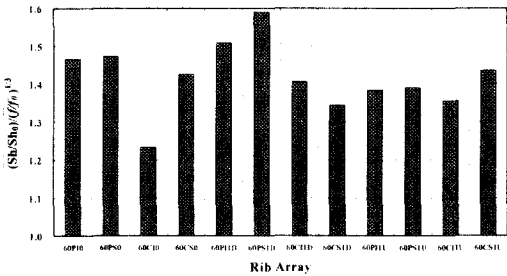


Fig. 9 Thermal Performance

는 요철을 반 피치 이동시켜 배열할 경우 약간 높은 Sh/Sh_0 분포가 나타나는 것으로 관찰되는데 이는 윗면과 아랫면의 중심이 일치되도록 한 경우(60C10) 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 X형의 요철구조를 갖는 반면에 반 피치 이동시켜 배열시키는 경우(60CS0)에는 덕트내의 구조가 나선형의 구조가 된다. 이와 같은 구조의 차이는 60CS0의 Sh/Sh_0 를 좀 더 높게 하는 것으로 보인다.

Fig. 5와 Fig. 6은 덕트 폭의 1/3이 되는 지점에 단락이 있는 경우의 국소 Sh/Sh_0 분포이다. 요철에 작은 단락을 사용하여 단락된 영역에서 가속된 유동으로 국소적으로 열전달 향상을 기대할 수 있다. Fig. 5는 이차유동의 하향류 쪽에 단락이 있는 경우의 Sh/Sh_0 분포로 윗면과 아랫면의 요철이 평행한 경우에는 주유동 방향 기준으로

볼 때 측정면의 좌측에 엇갈린 요철의 경우에는 주유동 방향 기준으로 측정면의 우측에 단락이 위치되게 된다. Fig. 5에 나타나 있는 바와 같이 단락은 요철 전체에서 매우 작은 부분이 되므로 전체적인 유동 구조는 크게 변하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 연속요철에서 나타난 것과 비슷하게 상향류와 하향류의 영향이 나타난다. Fig. 5의 (a), (b)와 같이 평행한 배열의 경우 주유동 방향을 기준으로 볼 때 좌측에 높은 Sh/Sh_0 분포가 나타나는 것을 볼 수 있으며 반대로 우측에서는 상향류와 그에 따른 모서리유동에 의한 영향으로 인해 상대적으로 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 연속요철과 같이 이차유동의 영향으로 덕트 우측 벽면 근처에서 열/물질전달계수가 약간 상승하는 것을 볼 수 있다. 여기에 단락된 틈을 통해서 요철의 하류로 진입한 유동은 단락 직후 영역에서 이차유동과 요철을 따라 주유동방향 기준으로 좌측($z/e < 0$)에서 우측($z/e > 0$)으로 흐르며 국소적으로 높은 열/물질전달을 발생시킨다. 이때 단락을 통한 유출유동은 하향류 영역에서의 재순환 유동을 방해하여 이때 발생하는 재부착에 의한 열/물질전달 촉진은 방해하지만 가속유동에 의한 열/물질전달의 촉진이 더 높고 크게 나타난다. 하향류가 발생하는 $z/e > 0$ 영역에서는 Sh/Sh_0 의 최대값이 연속요철에 비해서 약간 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이 경우에도 연속요철과 마찬가지로 전체적인 열/물질전달의 경향은 윗면과 아랫면의 요철 위치(반 피치 이동)에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 보인다. Fig. 5(c)와 (d)에 나타난 엇갈린 요철의 경우에도 이와 비슷한 경향이 나타나서 최대값은 낮아지지만 단락에 의해서 비교적 균일한 Sh/Sh_0 분포가 나타나는 것으로 보인다.

Fig. 6은 상향류가 존재하는 영역에 단락을 내어 설치한 요철 배열에서의 Sh/Sh_0 분포를 나타낸다. 이 경우 평행한 배열의 경우 주유동 방향 기준으로 우측에, 엇갈린 배열의 요철의 경우 주유동 방향을 기준으로 좌측에 단락이 위치된다. Fig. 6(a)와 (b)에서 보여주듯이 평행한 요철을 사용한 경우 단락이 상향류 영역에 위치하기 때문에 단락에 의한 국소적인 가속유동은 하향류의 충돌효과나 이로 인한 요철 하류에서의 재순환 유동에 영향을 주지 않는다. 따라서 하향류가 발생하는 영역($z/e > 0$)에서의 열/물질전달 특성은 연

속요철을 사용한 경우와 비슷한 경향을 나타낸다. 그러나 $z/e < 0$ 의 상향류 영역에서는 요철 인접하류로 향하는 단락을 통한 유출유동의 영향으로 이 영역에서 국소적으로 높은 열/물질전달 특성이 나타난다. 이때 단락에 의한 가속유동의 영향이 나타나기는 하지만 하향류 영역에 단락을 낸 경우보다 그 영향이 나타나는 영역이 작은 것을 볼 수 있다. Fig. 6(c)와 (d)의 엇갈린 배열의 경우 요철에 의한 이차유동이 하나의 셀로 나타나 단락사이를 빠져 나온 가속유동이 평행한 배열의 경우보다 상대적으로 강하게 작용하므로 좀 더 넓은 영역에서 나타나는 것을 볼 수 있다.

3.3 압력강하 및 성능계수

요철에 의한 열전달 향상 방법은 이에 따른 마찰계수의 증가를 초래하게 된다. 따라서 열/물질전달의 향상과 마찰의 증가를 동시에 고려하여 요철을 설계할 하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 압력강하 실험을 통해 요철의 설치에 따른 마찰계수의 증가를 고려하였다.

Fig. 7은 주유동과 요철의 충돌각이 60° 인 경우 $25,000 < Re < 60,000$ 영역에서 압력강하 실험으로부터 얻은 평균 마찰계수비(\bar{f}/f_0)를 나타낸다. 이 경우 Reynolds 수에 따른 마찰계수 비는 증가한다. 엇갈리게 배열된 경우인 60CI0과 60CS0은 평행하게 배열된 요철인 60PI0과 60PS0에 비해서 약 30-40%정도 낮은 마찰계수비를 나타낸다. 이는 내부 유동구조가 엇갈린 배열의 경우 하나의 이차와류를 포함하지만 평행한 배열의 경우 한 쌍의 이차와류를 갖기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 윗면과 아랫면의 요철의 위치(반 피치 이동)에 의한 변화는 거의 없는 것으로 보인다.

단락된 요철의 경우도 Reynolds 수에 따른 마찰계수 비는 증가한다. 하지만 평행한 배열의 경우 단락을 줌으로써 마찰계수비가 약간 감소하였다. 낮은 Re수에서는 60PI1D와 60PS1D(discrete rib - gap at downward flow side)가 작은 마찰계수비를 갖고, Re수 증가에 따라 60PI1U와 60PS1U(discrete rib - gap at upward flow side)가 마찰손실이 감소함을 알 수 있다. 이는 요철 사이에 간극을 줌으로써 요철후면에 생기는 재순환영역을 작게하여 마찰 손실이 감소되는 것으로 사료된다. 엇갈린 배열의 경우 낮은 Re수에서는 단락 요철이 연속 요철보다 마찰계수비가 약간

높지만 Re수 증가에 따라 같은 값을 가짐을 알 수 있다. 이 경우도 윗면과 아랫면의 요철의 위치(반 피치 이동)는 마찰계수비에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8의 각각의 요철배열에 따른 평균 Sh/Sh_0 를 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구의 요철배열에 있어서는 매 피치마다 열/물질전달의 특성이 반복적으로 나타나므로 한 피치를 기준으로 하여 면적평균 Sh/Sh_0 를 계산하였다.

앞서 설명한 바와 같이 60° 평행한 배열의 요철은 60° 엇갈린 배열의 요철에 비해서 높은 \bar{Sh}/Sh_0 를 나타낸다. 60° 평행요철의 경우 경우에 따라 약간의 차이는 있지만 60° 엇갈린 요철에 비해서 열/물질전달이 평균적으로 약 20%정도 향상되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 각각의 요철배열에 따른 성능계수 분포를 나타낸다. 일반적으로 높은 열/물질전달이 일어나면서 낮은 마찰 손실 특성을 나타내는 경우 높은 성능계수를 예상할 수 있다. 본 연구의 경우 여러 요철 배열 중에서 60CI0은 매우 낮은 성능계수를 나타내며 이 경우는 평균값에서도 상당히 낮은 값들을 갖는 경우들이다. 60PS1D가 매우 높은 성능계수 값을 나타내며 엇갈린 요철 배열 중에서도 60CS0과 60CS1U가 상당히 높은 성능계수 값을 갖는다.

4. 결 론

(1) 요철의 배열이 평행한 경우 엇갈린 경우보다 약 20%정도 높은 열/물질전달이 일어나며, 윗면과 아랫면의 요철이 이격되어 위치되는 경우에 미치는 열/물질전달에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타난다.

(2) 압력강하의 경우 단락의 유무에 관계없이 평행한 요철의 경우 높게, 엇갈린 요철의 경우 낮게 나타나는데 이는 단락의 크기가 전체 요철에 비해 매우 작기 때문에 내부에 발생하는 이차 유동에는 큰 영향을 주지 않기 때문인 것으로 보여진다.

(3) 성능계수는 열/물질전달과 마찰계수가 연계되어 60PI1U, 60CS1D의 경우가 같은 요철배열에 비해서 상대적으로 높은 성능계수 값을 가졌다.

(4) 이차유동에 큰 영향을 주지 않는 범위 내에

서 설치된 작은 단락은 국소적으로 높은 열/물질 전달을 나타내는 부분을 만들 수 있으며 이는 동력손실을 최소화하면서 전체적인 열/물질전달의 균일성을 얻을 수 있는 방법으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Han, J. C., and Park, J. S., 1988, "Developing Heat Transfer in Rectangular Channels with Rib Turbulators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 1, pp. 183~195.
- (2) 우성제, 김완식, 조형희, 1998, "사각 덕트내 요철의 각도 변화에 따른 열전달 특성," 1998 대한기계학회논문집B, 제22권, 제4호, pp. 530~541.
- (3) 우성제, 권혁진, 조형희, 1999, "터빈 기역 내부 열전달 증대를 위해 설치된 요철의 형상 효과," 1999 대한기계학회논문집B, 제23권, 제1호, pp. 149~157.
- (4) 이세영, 조형희, 2000, "요철의 배열 변화에 따른 사각덕트에서의 열/물질전달 및 압력강하 특성," 2000 유체공학 학술대회 논문집, pp. 23~26.
- (5) Cho, H. H., Wu, S. J., and Kim, W. S., 1998, "A Study on Heat Transfer Characteristics in a Rib-roughened Rectangular Duct," *Proceeding of 11th International Symposium on Transport Phenomena*, Hsinchu, Taiwan, Paper-No. 61, pp. 364~369.
- (6) Cho, H. H., Wu, S. J., and Kwon, H. J., 2000, "Local Heat/mass Transfer Measurements in a Rectangular Duct with Discrete Ribs," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 579~586.
- (7) Hermanson, K., Parneix, S., Wofersdorf Von, J., and Semmler, K., 2000, "Prediction of Pressure Loss and Heat Transfer in Internal Cooling Passages," ICHMT, Turbine 2000.
- (8) Bonhoff, B., Parneix, S., Leusch, J., Johnson, B. V., Schabacker, J., and Bolcs, A., 1999, "Experimental and Numerical Study of Developed Flow and Heat Transfer in Coolant Channels with 45 Degree Ribs," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 311~319.
- (9) Taslim, M. E., Li, T., and Kercher, D. M., 1996, "Experimental Heat Transfer and Friction in Channels Roughened with Angled, V-Shaped, and Discrete Ribs on Two Opposite Walls," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 20~28.
- (10) Han, J. C., and Zhang, Y. M., 1992, "High Performance Heat Transfer Ducts with Parallel Broken and V-Shaped Broken Ribs," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 2, pp. 513~523.
- (11) Chyu, M. K., and Natarajan, V., 1989, "Local Heat Transfer on a Falt Surface Roughened Ith Broken Ribs," *1989 ASME Winter Annual Meeting San Fransisco, CA, ASME, HTD*, pp. 25~31.
- (12) Lau, S. C., McMillin, R. D., and Han, J. C., 1991, "Turbulent Heat Transfer and Friction in a Square Channel with Discrete Rib Turbulators," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 360~366.
- (13) Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, 7, pp. 1173~1176.
- (14) 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.
- (15) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (16) Dittus, P. W., Boelter, L. M. K., 1930, Univ. Cali. Publ. Engng, Vol. 2, No. 13, pp. 443-461; 1985 reprinted in *Int. Commun. Heat Transfer*, Vol. 12, pp. 3~22.