

## 복합각도 요철을 가지는 사각 덕트 내의 열전달 및 압력강하 특성

최 청\* · 이동호\* · 조형희\*\*

### Characteristics of Heat/Mass Transfer and Pressure Drop in a Square Duct with Compound-Angled Rib Turbulators

Chung Choi\*, Dong Ho Rhee\*, Hyung Hee Cho\*\*

*Key Words:* Turbine internal passage(터빈내부 이차유로), Rib Turbulator(요철), Heat/Mass transfer(열/물질전달)  
Pressure Drop(압력강하), compound-angled(복합각도)

#### ABSTRACT

The present study investigates convective heat/mass transfer and flow characteristics inside the cooling passage of the gas-turbine blades. It is important to increase not only the heat transfer rates but also the uniformity of heat transfer in the cooling passage. The square duct has compound-angled ribs with 60°, 70° and 90° attack angles, which are installed on the test plate surfaces. a naphthalene sublimation technique is employed to determine the detailed local heat transfer coefficients using the heat and mass transfer analogy. The ribs disturb the main flow resulting in the recirculation and secondary flows near the ribbed wall and the vortices near the side-wall. The local heat transfer and the secondary flow in the duct are changed largely according to the rib orientation. Therefore, geometry and arrangement of the ribs are important for the advantageous cooling performance. The angled ribs increase the heat transfer discrepancy between the wall and center regions because of the interaction of the secondary flows. The average heat/mass transfer coefficient and pressure drop of the ribs with the 60°-90° compound-angle are higher than those with the 60° attack angle. Also, the thermal efficiency of the compound-angled rib is higher than that with the 60° attack angle. The uniformity of heat/mass transfer coefficient on the cross ribs array is higher than that on the parallel ribs array.

#### 기호설명

$D_{naph}$  = 나프탈렌 확산계수 [ $m^2/s$ ]  
 $D_h$  = 유로 수력직경 [m]  
 $h_m$  = 물질전달 계수 [ $m/s$ ], 식 (1)  
 $L$  = 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]  
 $x, z$  = 주유동, 폭 방향 좌표 [m]  
 $e$  = 요철 높이 [mm]

#### 그리스문자

$\nu$  = 공기의 동점성계수 [ $m^2/s$ ]  
 $\rho$  = 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\sigma$  =  $Sh/Sh_0$  분포의 표준편차

\* 연세대학교 대학원

\*\* 연세대학교 기계공학과

하첨자

- b = 주유동 혼합 평균
- o = 완전발달 난류영역 원형단면직관
- v = 증기
- w = 벽

1. 서 론

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 압축기의 압력비와 연소가스의 터빈입구온도(TIT; turbine inlet temperature)의 향상은 필수적이다. 그러나 이는 터빈 블레이드(blade)의 열부하를 가중시키고 이로 인해 부품의 수명 단축시키게 된다. 최근 고성능 가스터빈 엔진의 TIT는 금속 허용온도를 크게 상회하는 1400~1500°C 이상이며, 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드(blade)를 보호하고 적정수명을 유지하기 위하여 냉각이 필수적이다. 여러 냉각 방법과 병행하여 내부관 대류냉각(internal channel convective cooling)방법이 많이 사용되고 있다.

Han 과 Park<sup>(1)</sup>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. 우성계 등<sup>(2-3)</sup>, 이세영과 조형희<sup>(4)</sup>와 Cho 등<sup>(5)</sup>은 단면비가 1과 2인 경우에 덕트 내부의 요철의 각도, 형상 및 배열변화에 따른 국소적인 열전달계수 및 성능계수를 도출하였으며, Cho 등<sup>(6)</sup>은 단면비가 2인 경우에 나프탈렌 승화법을 이용하여 덕트내 요철의 충돌각 및 단락을 변화시키면서 국소적인 열전달계수 및 덕트내의 마찰계수를 측정하여 성능계수를 도출하였다.

요철에 의하여 편향된 유동은 압력차이에 의해서 발생하는 이차유동구조를 갖게 되고 이러한 이차유동은 덕트 좌우의 열전달의 불균일을 야기시킨다. 이러한 결과는 Cho 등<sup>(6)</sup>과 Taslim 등<sup>(9)</sup>의 열/물질전달 실험결과에서 확인할 수 있는데 하향류가 존재하는 영역에서는 상향류가 존재하는 영역에서보다 훨씬 높은 열전달 계수 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 경사진 요철은

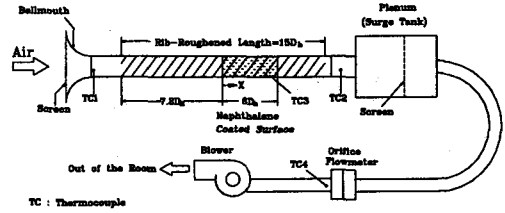


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

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 되어 상대적으로 열전달이 감소하는 특징을 나타낸다. 이와 같이 요철에 의한 유동 현상은 요철이 설치된 면의 열전달 특성을 결정짓는 중요한 인자가 되고 이때 발생하는 열전달의 차이는 냉각의 불균일을 초래함으로써 블레이드의 열적 특성을 악화시키기도 한다. 이때 요철이 양면에 평행하게 배열되어 있는가 엇갈리게 배열되어 있는가에 따라 상이한 이차유동 패턴을 나타낸다. 결과적으로 요철의 배열에 의해 발생하는 이차유동 구조가 열전달의 불균일을 초래하며, 이를 개선하고자 다각적인 노력이 진행되어 왔다. Cho<sup>(6)</sup> 등, Taslim 등<sup>(9)</sup>, Han 과 Zhang<sup>(10)</sup>, Chyu 와 Natarajan<sup>(11)</sup> 및 Lau 등<sup>(12)</sup>은 단락요철을 사용하여 열전달 특성을 고찰하였다. 단락된 요철은 그 사이의 좁은 유로를 통하여 국소적으로 가속되는 유동이 좁은 영역에서의 열전달을 향상시킬 수 있으며 가스터빈 이차유로내에서 이를 응용하고 있다.

본 연구에서는 덕트 내부에서의 열전달 향상 및 불균일성 감소를 위한 하나의 방법으로 상향류 영역의 낮은 열전달계수 분포를 개선하고자 복잡각도를 가지는 요철을 설치한 경우에 대하여 국소 열/물질전달 및 압력강하 특성을 고찰하였다. 이에 본 연구에서는 열전달 실험에서 발생하는 전도, 복사, 오차를 제거할 수 있고, 국소적인 열/물질전달계수의 측정이 가능한 물질전달실험방법 중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하였으며, 국소적인 열/물질전달계수에 의해 성능계수 및 균일도를 나타내었다.

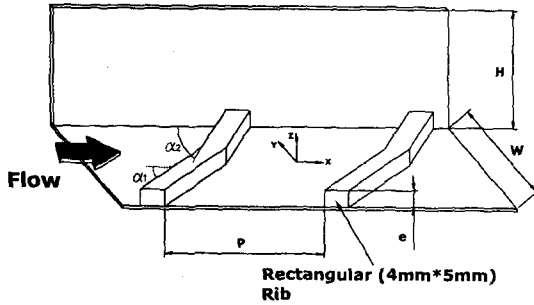


Fig. 2 Schematic of test duct and coordinate

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1에 제시된 바와 같이 실험 장치는 크게 수축부, 시험부, 폴리넵, 오리피스 파이프, 송풍기 등으로 이루어져 있다. 수축부는 6:1의 면적비를 가지며, 시험부 덕트는 단면적( $W \times H$ )은  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 이므로 종횡비(aspect ratio,  $AR=W:H$ )는 1:1이다. 이 때의 수력직경( $D_h$ )은  $50 \text{ mm}$ 이다. 시험부 덕트는 아크릴로 제작되었으며 총 길이는  $750 \text{ mm}$ 로  $15D_h$ 가 된다. 출구에는 폴리넵을 설치하여 시험 덕트 하류에서 상류로의 유동교란이 전파되는 것을 방지하였다. 송풍기는 실험실 내부의 공기를 흡입하게 되며 흡입된 공기는 시험부를 거쳐 오리피스 유량계에서 유량이 측정되고 송풍기를 통해 실외로 배출된다. 본 실험에서는 온도 측정을 위하여 3개의 J형 열전대(iron-constantan)를 사용하였으며, 평균속도는 약  $9.5 \text{ m/s}$ 로 수력직경기준 Reynolds 수는 약 30,000이다. 본 실험에서 사용된 좌표계는 Fig. 2에서 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  $4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 의 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  $60^\circ \sim 70^\circ$  정도의 충돌각을 많이 이용하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 결과를 토대로 요철과 주유동의 충돌각을  $60^\circ$  및  $70^\circ$  를 가지는 복합각도요철을 사용하여 실험을 수행하였다. Fig. 3에는 본

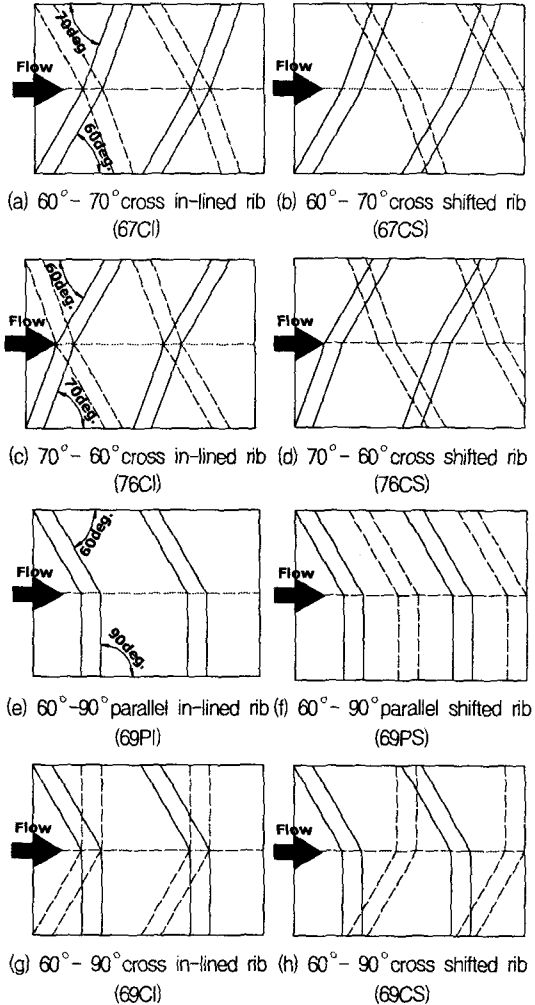


Fig. 3 Schematics of rib arrangements

연구에서 사용된 요철배열의 개념도가 나타나 있다. Fig. 3에서 실선은 측정면의 요철을 나타내며 점선은 반대면의 요철을 나타낸다. 요철은 한 면당 23개씩 설치되었으며 나프탈렌 표면에 이르기 전에 약 10여 개의 요철을 통과하여 유동이 완전 발달한 상태에서 열/물질전달 경계층이 생성된다. 유동방향을 기준으로 요철의 각도에 의하여 67, 76, 69로 구분하였으며, 윗면과 밑면에 설치된 요철이 평행하게 설치되어 있으면 P(parallel)로 엇갈려 있으면 C(cross)로 표기하였으며, 또한 윗면과 밑면의 요철이 같은 위치에 있으면 I(in-lined)로, 한 쪽면의 요철이 반 피치 이동되어 있는 경우에는 S(shifted)로 표기하였다. 또한 요철이 설치된 덕트 내 압력강하 특성을 고찰하기 위해서 덕트

의 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 mmH<sub>2</sub>O, 0.01 mmH<sub>2</sub>O, 측정범위 ±199.9 mmH<sub>2</sub>O, ±19.99 mmH<sub>2</sub>O인 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 이동되는 선형가변 차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)를 이용하여 이루어진다. 이 장치의 정밀도는 0.025 μm로 매우 정밀하며, LVDT의 측정오차는 평균나프탈렌의 승화깊이(3.5mil)의 1%이내이다.

## 2.2 실험 결과 처리

송풍실험 전후 시험관의 나프탈렌 고도차이로부터 국소 나프탈렌 승화량을 구하고 측정 전후의 자연대류에 의한 승화량을 보정하여 이로부터 무차원 물질전달 계수인 Sherwood 수를 구한다. 이 때 구해지는 물질전달계수( $h_m$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서  $\dot{m}(\text{kg}/\text{m}^2\text{s})$ 은 나프탈렌 표면의 단위면적에서 단위시간당 승화량을 나타내며  $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 벽면에서의 증기밀도를 나타낸다.  $\rho_{v,b}$ 는 덕트를 지나 는 유동의 나프탈렌 평균 증기밀도를 나타내며 나프탈렌 승화량은 송풍실험 전후의 고도차이와 실험 시간 그리고 고체 나프탈렌의 밀도( $\rho_s=1162 \text{ kg}/\text{m}^3$ )로부터 구해진다. 나프탈렌의 증기밀도( $\rho_{v,w}$ )는 이상기체 상태 방정식에 의해서 다음과 같이 구할 수 있으며 이때 나프탈렌의 포화 증기압은 Ambrose 등<sup>(13)</sup>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 나프탈렌 표면 시작점부터 선형적으로 증가한다는 가정에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{v,b}(x) = \frac{\rho_{air}\rho_s}{\rho_{air}} \int_0^x \int_0^w (dz dx) \rho dx \quad (3)$$

위의 물질전달계수( $h_m$ )는 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<sup>(14)</sup>에 의하여 제시되어 있으며 주요 물성치의 관계식은 다음과 같다. 본 실험에서의 Sherwood수는 Kline과 McClintock<sup>(15)</sup>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<sup>(16)</sup>에 의해서 제시된 식에 열/물질전달의 유사성을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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)을 통해 주유동 방향으로의 평균 압력강하( $dP/dx$ )를 구하고 이를 이용하여 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<sup>(15)</sup>의 방법에 의해 95%신뢰수준에서 4.9%의 불확실성을 가진다.

요철이 설치되지 않은 경우 덕트 내 평균 마찰계수는 요철이 없는 원형관에서의 마찰계수 상관 관계식으로 나누어서 표현하였다. 완전 발달 원형관에서의 마

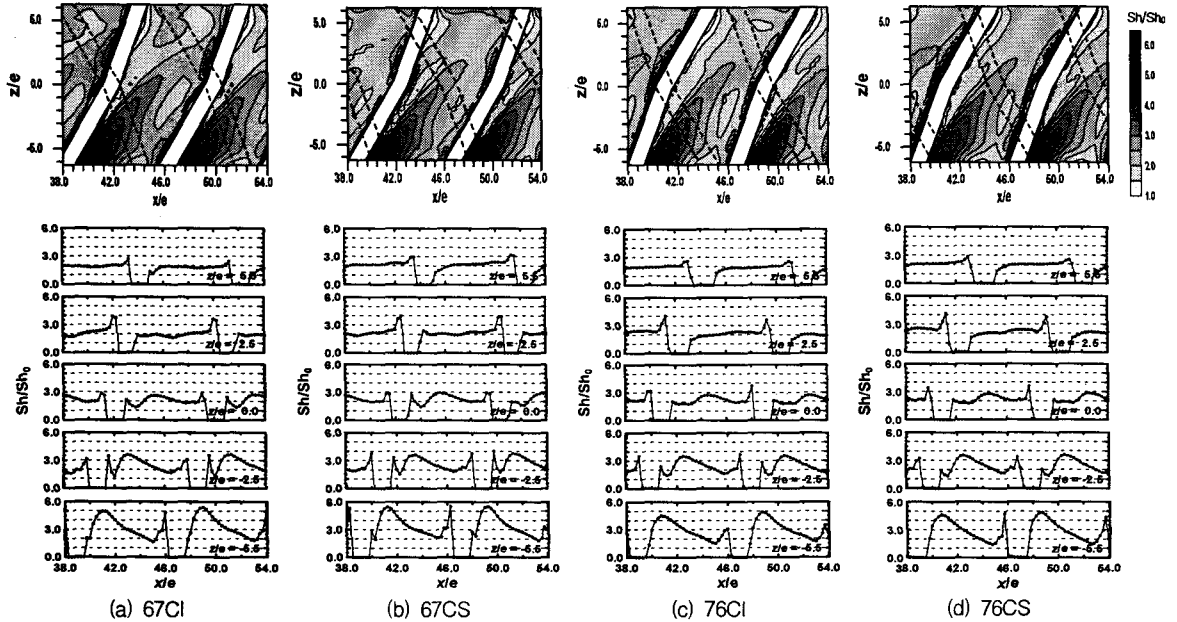


Fig. 4 Contour and local plots of  $Sh/Sh_0$  with  $60^\circ-70^\circ$  and  $70^\circ-60^\circ$  angled ribs

찰계수는 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.

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

요철에 대한  $Sh/Sh_0$ 의 균일도를 나타내고자 측정면의 면적평균  $Sh/Sh_0$ 값을 구하고 각 측정점의 표준편차 ( $\sigma$ , standard deviation)을 구하여 다음과 같이 표현하였다.

$$Uniformity = 1 - 0.5 \times \sigma$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 국소 Sherwood 수의 분포

Fig. 4는 주유동에 대해서 요철의 배열 각도가  $60^\circ-70^\circ$  및  $70^\circ-60^\circ$ 이며, 요철의 배열 형태가 엇갈린 (cross) 연속요철에 대한  $Sh/Sh_0$  분포를 나타낸다. Figs. 4(a), (c)는 윗면과 밑면의 요철이 같은 위치에 배열된 것(67CI, 76CI)이고 Figs. 4(b), (d)는 윗면과 밑면의 요철이 반 꺾이 이동되어 설치된 경우(67CS, 76CS)이다. Fig. 4(a)의 경우 요철의 충돌각으로 인해서 발생하는 이차유동의 하향류에 해당하는  $z/e \approx -5.0$  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  $z/e \approx 0.0$  영역까지 지속되는 것으로 보인다. 이후  $z/e > 0.0$  영역에서 상향류로 인한 상대적으로 낮은 열/물질전달계수 분포를 나타낸다. 이는 이세영과 조형희<sup>(4)</sup>의  $60^\circ$  경사 요철의 결과에서와

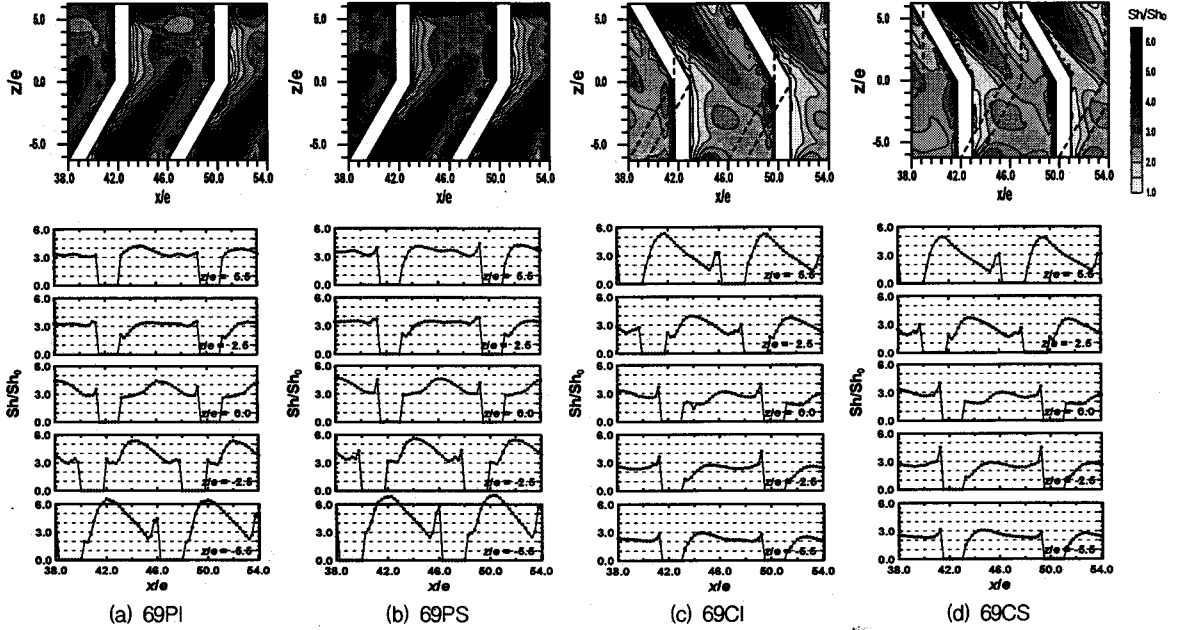


Fig. 5 Contour and local plots of  $Sh/Sh_0$  with  $60^\circ$ - $90^\circ$  angled ribs

같은 형태이나, 상향류 부근에서 열/물질전달계수의 분포 차이를 보이고 있다. Fig. 4(a)의 국소 열/물질전달계수 분포를 보면  $z/e \geq 2.5$  영역에서 이세영과 조형희<sup>(4)</sup>의 결과에 비하여 유동방향으로 열/물질전달계수의 구배가 보다 완만하다. 이는  $70^\circ$  요철에 의해 상향류 영역의 유동이 정체되었으며 벽면에서 발생하는 와류(coner vortex)의 강도가 약해졌음을 알 수 있다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 윗면과 밑면의 요철이 같은 위치일 때(in-lined)와 반 피치 이동한 경우(shifted)에 대한 결과로서 윗면의 요철이 반피치 이동한 경우에 유동의 형태 및 국소적이 열/물질전달계수 분포의 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 하지만 압력강하 측면에서는 다른 결과를 나타낼 것을 기대할 수 있다.

Figs. 4(c), 4(d)는  $70^\circ$ - $60^\circ$  요철 배열의 결과도 마찬가지로 요철의 충돌각으로 인해서 발생하는 이차유동의 하향류에 해당하는  $z/e \approx -5.0$  영역에서는 국소적으로 매우 높은  $Sh/Sh_0$  값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 유동의 형태 및 열/물질전달계수의 분포가 Figs. 4(a), 4(b)와 같은 결과를 보이고 있으나, 평균 열/물질전달계수에서 약 4% 낮은 값을 가진다. 이와 같이 요철의 이차각도의 변화가  $10^\circ$  일 때에는  $60^\circ$  경사요철에 대하여 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었으며, 이에 보다 더 이차각도의 변화를 크게 하여 실험을 하였다.

Fig. 5는 주유동에 대해서 요철의 배열 각도가  $60^\circ$ - $90^\circ$ 이며 윗면과 밑면의 요철이 평행한(parallel) 경우와 엇갈린 배열(cross)에 대하여, 각각 요철이 같은 위치(in-lined) 또는 반피치 이동된(shifted) 위치에 따른 결과이다. Fig. 5(a)에서 이차유동의 하향류에 해당하는  $z/e \approx -5.0$  영역에서는 국소적으로 매우 높은  $Sh/Sh_0$  값이 나타나는 것을 볼 수 있으며,  $z/e \geq 0.0$  인 영역에서는  $90^\circ$  요철배열에서 볼 수 있는 요철 후방에서의 순환영역(recirculation region)이 보인다. 이는 상향류 영역의 유동이 개선되어 이세영과 조형희<sup>(4)</sup>의 결과인  $90^\circ$  요철의  $Sh/Sh_0$  분포를 나타낸다. 결과적으로 하향류 영역( $z/e \approx -5.0$ )에서의 높은  $Sh/Sh_0$  값을 유지하며 상향류 영역( $z/e \geq 0.0$ )에서는 낮은 분포가 개선되어 보다 높은  $Sh/Sh_0$  값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 요철이 반피치 이동된 결과인 Fig. 5(b)에서 보여 주듯이  $60^\circ$ - $70^\circ$  요철배열 결과에서와 마찬가지로 유동 및 열/물질전달계수 분포의 큰 차이가 보이지 않았다. 하지만 Fig. 5(c), (d)에서 요철이 엇갈린 배열(cross)이 되었을 경우에는 열/물질전달계수 분포는 비슷하나 평균 열/물질전달계수에서 약 30%의 차이가 보인다. 이는 Fig. 6의 개략도에 의해 설명할 수 있는데, 요철의 배열이 평행한(parallel) 경우에는 한 쌍으로 회전하는 이차유동이 생성되는 반면에 엇갈린

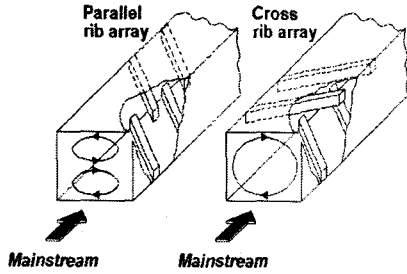


Fig. 6 Schematic of secondary flow in a duct with 60° ribs

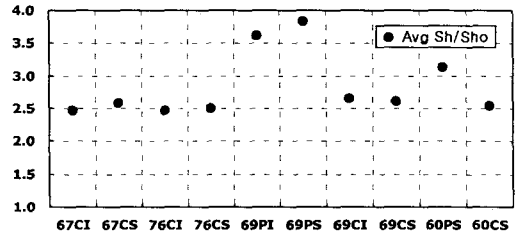
(cross) 배열일 경우에는 한 개의 이차유동이 생성된다. 이에 따라 이차유동이 한 쌍으로 생성되어 그 강도가 커진 평행한 배열의 경우가 열/물질전달의 큰 향상을 가져옴을 알 수 있다. 하지만 압력강하 측면에서는 한 쌍의 이차유동이 생성 될 경우 큰 손실이 있을 것으로 예상할 수 있다.

### 3.2 평균 열/물질전달계수 및 마찰계수

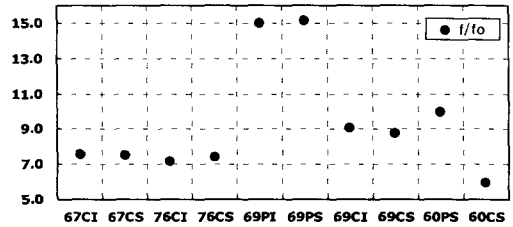
요철에 의한 열전달 향상 방법은 이에 따른 마찰계수의 증가를 초래하게 된다. 따라서 열/물질전달의 향상과 마찰의 증가를 동시에 고려하여 요철을 설계하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 압력강하 실험을 통해 요철의 설치에 따른 마찰계수의 증가를 고려하였다.

Fig. 7(a)는 국소적인 열/물질전달계수 분포 데이터를 토대로 계산한 나프탈렌 측정표면의 면적 평균값을 나타낸다. 여기서 60PS와 60CS는 이세영과 조형희<sup>(4)</sup>의 60° 경사요철의 결과이다. 60°-70° 와 70°-60° 요철배열의 경우 60CS와 평균 열/물질전달계수 차이를 보이지 않는다. 이는 이차각도를 10° 변화 시켰을 경우에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 반면에 69PI와 69PS의 경우에는 60PS에 비해 평균 열/물질전달계수가 크게 상승한 것을 알 수 있다. 이는 60° 경사요철의 상향류 영역의 낮은 열/물질전달계수 분포가 개선되었다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 각 경우에 대한 Re수 30,000일 때 압력 실험에 의해 얻은 평균 마찰계수비( $\bar{f}/f_0$ )를 나타낸다. 60°-70° 와 70°-60° 요철배열의 경우 60CS보다 큰 압력강하는 나타내었는데, 이는 이차각도가 10° 변화함에 따라 열/물질전달에는 큰 영향이 없지만 주유동을 방해하는 효과가 상승하여 평균 마찰계수비가 커진 것을 알 수 있다. 결과적으로 열/물질전달 향상이 없



(a) Average heat/mass transfer ratio



(b) Average friction factor ratio

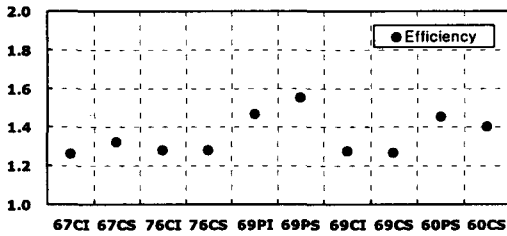
Fig. 7 Results of average  $Sh/Sh_0$  and average friction loss

음에도 불구하고 압력강하가 심해 성능계수는 많이 떨어질 것을 알 수 있다. 반면에 69PI, 69PS의 경우 평균 열/물질전달계수의 향상이 이루어졌으나 평균 마찰계수비 또한 큰 폭으로 상승하였다. 이에 따라 유체 이송동력이 일정(constant pumping power)할 때의 열/물질전달계수의 상승을 비율로 나타낸 성능계수의 도입이 필요하다.

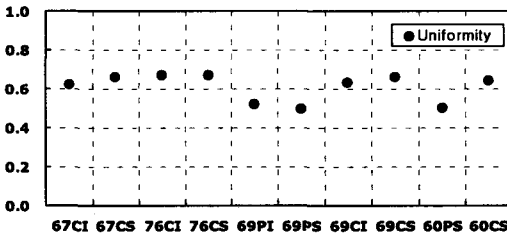
### 3.3 열/물질전달 성능계수 및 균일도

Fig. 8은 각각의 요철배열에 따른 성능계수 분포를 나타낸다. 일반적으로 높은 열/물질전달이 일어나면서 낮은 마찰 손실 특성을 나타내는 경우 높은 성능계수를 예상할 수 있다.

Figs. 7(a), (b)에서 60°-70° 와 70°-60° 요철배열의 경우 60CS와 비교하여 비슷한 평균 열/물질전달계수를 나타내지만 높은 압력강하로 인해 Fig. 8(a)의 결과처럼 낮은 성능계수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유로 60°-70° 와 70°-60° 요철배열은 열전달 향상을 위해 좋은 선택이 아니라고 볼 수 있다. 반면에 69PI와 69PS의 경우 60PS에 비하여 향상된 평균 열/물질전달계수를 가지고 있지만, 높은 압력강하 효과도 나타내고 있다. 이러한 경우 성능계수를 통하여 설명할 수 있는데, 높은 압력강하가 있음에도 불



(a) Thermal efficiency



(b) Uniformity

Fig. 8 Results of thermal efficiency and uniformity

구하고 효과적인 평균 열/물질전달계수의 상승으로 인해 69PS의 경우 60PS의 성능계수보다 큰 값을 나타내고 있다.

Fig. 8(b)는 각각의 요철배열에 따른 균일도 분포를 나타낸다. 일반적으로 요철배열이 평행한(parallel) 경우 균일도 측면에서는 엇갈린 배열(cross)보다 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있는데, 이는 다른 요철배열에 비하여 평행한(parallel) 경우 하향류 영역에서 국소 열/물질전달계수가 큰 값을 가지기 때문이다.

#### 4. 결론

(1) 60°-70° 와 70°-60° 요철배열에서 열전달 및 압력강하 특성은 60° 요철배열과 유사하였다.

(2) 나란한(in-lined) 요철배열과 반피치 이동한(shifted) 요철의 경우 열전달 및 압력강하에는 큰 영향을 주지 않는다.

(3) 요철의 배열이 69PS인 경우에 가장 높은 열전달과 압력강하가 나타난다. 60PS 요철에 비해 약 18% 높은 열전달 수를 가지며 압력강하는 약 34%정도 높은 값을 가진다.

(4) 성능계수는 열/물질전달과 마찰계수가 연계되어 69PI, 69PS 요철배열의 경우에 상대적으로 높은 성능계수 값을 가졌다.

(5) 균일도는 엇갈린(cross) 요철의 경우 일반적으로

높은 값을 나타내었다.

#### 후기

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 대한기계학회 논문집B, 제22권, 제4호, pp. 530-541.
- (3) 우성제, 권혁진, 조형희, 1999, "터빈 기의 내부관 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 flat surface roughened with broken ribs," 1989 ASME Winter Annual Meeting San Francisco, 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. Cal. Publ. Engng, Vol. 2, No. 13, pp. 443-461; 1985 reprinted in Int. Commun. Heat Transfer, Vol. 12, pp. 3-22.