

# 터빈 기익 내부관 열전달 증대를 위해 설치된 요철의 형상 효과

우성제\*·권혁진\*·조형희\*\*

(1998년 9월 21일 접수)

## Effects of Rib Cross Section Shapes on Heat Transfer of a Rib-Roughened Duct

Seong Je Wu, Hyuk Jin Kwon and Hyung Hee Cho

**Key Words:** Rib Turbulator(요철), Duct Flow(덕트 유동), Cross Section(단면), Heat/Mass Transfer (열/물질전달), Friction Factor(마찰계수)

### Abstract

Heat transfer in a duct is augmented remarkably by rib turbulators. However, increasing friction loss is accompanied due to ribs disturbing flows. Hence, pressure drops and heat transfer are considered simultaneously to decide heat/mass transfer performance in a rib-roughened duct. In the present study, the effects of rib cross section shape on pressure drop through a duct are investigated as well as those on heat transfer characteristics. The results show that the characteristics of heat/mass transfer and friction loss in the duct roughened with triangular ribs are similar to those with square ribs, while significantly different from those with semicircular ribs. The best performance in the duct is obtained by using semicircular shaped ribs among three types of ribs for the large rib angles of  $\alpha \geq 63^\circ$ .

### 기호설명

- $D_h$  : 시험덕트 수력직경
- $D_{naph}$  : 나프탈렌의 확산계수
- $e$  : 요철 높이
- $f$  : 마찰계수
- $f_0$  : 요철이 없는 덕트의 완전발달한 난류영역에서의 마찰계수
- $h_m$  : 물질전달계수
- $p$  : 요철간 거리
- Pr : 공기의 Prandtl수
- Re : Reynolds수,  $\rho D_h V / \mu$
- Sc : 나프탈렌의 Schmidt수
- Sh : 국소 Sherwood수,  $h_m D_h / D_{naph}$
- $\overline{Sh}$  : 평균 Sherwood수

- $Sh_0$  : 요철이 없는 덕트의 완전발달한 난류영역에서의 Sherwood수
- $V$  : 시험덕트내 공기의 평균속도
- $x$  : 나프탈렌표면 시작선으로부터의 주유동 방향 거리
- $y$  : 시험덕트 바닥면으로부터의 높이
- $z$  : 시험덕트 중심으로부터의 횡방향 거리
- $\alpha$  : 요철 충돌각(rib angle of attack)
- $\eta$  : 열/물질전달 성능계수,  $(\overline{Sh}/Sh_0)/(f/f_0)^{1/3}$

### 1. 서론

터빈 기익을 냉각하기 위하여 내부관을 이용한 강제대류 냉각방법(internal cooling passage)은 막냉각(film cooling)과 충돌제트(impinging jet)를 이용한 냉각방법과 더불어 현대적인 가스터빈에 많이 사용되고 있다. 이러한 내부관의 열전달

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 연세대학교 기계공학과

을 촉진시키기 위하여 난류촉진제인 요철(rib turbulator)을 반복적으로 설치하는 방법이 사용된다. 이와 같은 요철의 부착은 덕트내 유동을 교란시켜 벽면에서 열전달을 증가시키게 되는데, 이러한 기술은 보일러의 열교환기나 판형열교환기, 원자로 등에도 응용된다. 반복적으로 설치된 요철은 덕트를 통과하는 유동의 난류강도를 증가시키고 여러 가지 이차유동을 발생시키므로, 주유동의 혼합을 활발히 하여 국소적 또는 전체적인 열전달 증진효과를 가져오게 된다. 이러한 덕트 내부의 열전달은 설치되는 요철의 조건과 덕트의 모양, 유동 조건 등에 의해 좌우된다. 요철의 높이, 주유동과의 충돌각(rib angle of attack,  $\alpha$ ), 요철간 거리가 완전발달한 유동의 평균 열전달계수와 평균 마찰계수에 미치는 영향에 대한 연구는 넓은 Reynolds수 영역에서 이루어져 왔다.<sup>(1-4)</sup> Han등<sup>(3)</sup>은 정사각 덕트의 실험에서 충돌각  $60^\circ \sim 75^\circ$ 에서 덕트내 열전달계수가 최대값을 가지며, 일정한 유체이송동력 조건에선 충돌각이  $30^\circ \sim 45^\circ$ 일 때 최대의 열전달 향상효과가 나타남을 보여준다. 열전달과 마찰손실에 영향을 미치는 또 다른 요철 조건으로는 요철의 형상, 단면 모양, 배치 형태 등이 있고 사각 덕트의 경우 덕트의 종횡비(aspect ratio, Width/Height)도 중요한 조건이다.<sup>(4)</sup>

요철은 사각 단면의 것을 사용하는 것이 일반적이는데, Taslim과 Spring<sup>(6)</sup>은 소형 가스터빈의 기익 구조시 일어날 수 있는 사각 요철의 모서리가 동급어지는 현상이 덕트 벽면 열전달에 미치는 영향을 살폈다. 이를 위하여 요철의 몇 가지 종횡비에 대하여 좁은 요철 간격 조건에서 실험을 수행하였다. 요철 모서리가 동급어지는 것은 요철의 종횡비가 작은 요철일수록 열전달에 많은 영향을 미쳐 열전달계수의 감소와 마찰계수의 감소를 가져왔다. Taslim과 Korotky<sup>(6)</sup>은 이러한 영향이 요철 자체의 열전달에 미치는 영향에 대하여 연구하였는데, 요철의 높이에 따라 결과가 다르게 나타났다. 비교적 높이가 낮은 요철에서는 요철 종횡비가 큰 요철이 높은 열전달계수를 나타냈지만, 높은 요철에서는 반대의 결과가 나타났다. 이러한 결과는 요철간의 간격에도 큰 영향을 받았다. Han등<sup>(2)</sup>과 Lockett과 Collins<sup>(7)</sup>도 요철을 사각요철을 유선형에 가깝게 몇 가지 방법으로 변형시켜 열전달에 미치는 영향을 고찰하였

다.

기존의 대다수의 연구들은 평균적인 열전달 향상에 중점을 두어 왔다. 요철의 최적 설계조건을 도출해내기 위해서는 요철에 의한 복잡한 유동현상을 예측하거나 그에 따른 열전달계수 분포에 대한 이해를 넓히는 것이 필요하며, 이런 이유로 국소적인 열전달에 관한 연구가 요구된다. Acharya등<sup>(8)</sup>은 열전대를 이용한 열전달 실험을 수행하여 요철사이의 국소적인 열전달계수 분포를 구하였다. 그러나 주유동 방향 열전달계수 분포를 평방향으로 한 지점에 대해서만 구하는데 그쳤다. Chandra등<sup>(9)</sup>과 Han등<sup>(10)</sup>은 열전달을 대신하는 나프탈렌을 이용한 물질전달실험을 수행하여 덕트 전체적인 국소 전달계수를 구하였지만 시험덕트의 작은 크기로 인해 자세한 열/물질전달 분포를 살필 수 없었다. 본 연구에서는 요철의 단면 형상을 사각, 삼각, 반원으로 변화시키며 이에 따른 열전달 특성 변화를 살피기 위하여 물질전달 방법을 이용하여 국소적으로 자세한 열/물질전달계수를 측정하였다.

요철을 설치해 덕트내 열전달을 향상시키면 마찰계수 증가가 수반되므로 압력강하에 대한 연구도 함께 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 압력강하 실험을 병행하였으며, 열/물질전달의 향상과 마찰계수의 증가를 함께 고려한 열/물질전달 성능계수를 제시하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 덕트는 덕트의 단면적( $W \times H$ )  $102 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 로 종횡비(aspect ratio,  $W/H$ )가 2.04이다.<sup>(11)</sup> 길이 1300 mm이며 덕트 입구에 설치된 수축부는 6:1의 면적비를 가진다. 수력직경(hydraulic diameter,  $D_h$ )은  $D_h=67.3 \text{ mm}$ 이며, 열/물질전달 촉진을 위해 요철이 설치된 구간이 중앙의 1000 mm로  $15D_h$ 에 해당한다. 실험실 내부 공기가 덕트 입구로 유입되어 시험덕트를 지나 하류에 설치된 플레넘(plenum)을 통과하고, 송풍기(blower)로 흡입되어 실외로 배출된다. 유량은 플레넘과 송풍기 사이에 설치된 오리피스 유량계(orifice flowmeter)에 의해 측정되며, 열/물질전달 실험시 시험단면에서의 평균속도는 7 m/s로 수력직경 기준 Reynolds수는 30,000이다.

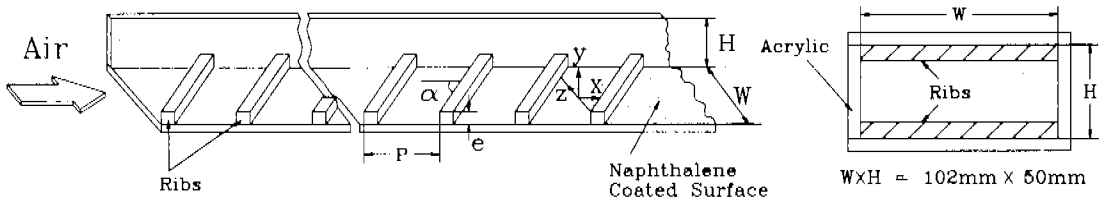


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental test duct.

본 실험에서는 열전달과 물질전달의 상사성을 이용해 열전달 실험을 대신하여 나프탈렌승화법(naphthalene sublimation method)을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 요철설치 시작지점으로부터  $7.6D_h$  지점에서 그 하류  $4.5D_h$  지점까지의 영역에 해당하는 착탈가능한 덕트 바닥면(시험시편)에 주조를 통하여 나프탈렌표면을 형성하였다.

나프탈렌의 포화증기압은  $1^\circ\text{C}$ 의 온도변화에 약 10%가 변화하므로 나프탈렌의 표면 온도의 정확한 측정을 위해 시험판에 주조된 나프탈렌에 J형 열전대(Iron-constantan)를 위치 시켰다.

본 실험장치에서 좌표계는 주유동방향을  $x$ , 횡방향을  $z$ , 높이방향을  $y$ 로 표시하며, Fig. 1에서와 같이 나프탈렌 코팅영역이 시작되는 위치에서 바닥면의 중심을 원점으로 하였다. 따라서 열/물질전달계수 측정영역은 요철의 높이  $e$ 를 기준 길이로 하여 주유동방향으로  $0 \leq x/e \leq 60$  ( $0 \leq x/D_h \leq 4.5$ )이고, 횡방향으로는  $-10.2 \leq z/e \leq 10.2$  ( $-0.76 \leq z/D_h \leq 0.76$ )가 된다. 요철이 설치된 영역( $-102 \leq x/e \leq 98$ , 길이  $15D_h$ )은 나프탈렌 코팅영역( $0 \leq x/e \leq 60$ , 길이  $4.5D_h$ )과 그 상류영역( $-102 \leq x/e \leq 0$ , 길이  $7.6D_h$ ), 하류영역( $60 \leq x/e \leq 98$ , 길이  $2.9D_h$ )의 세 부분으로 나뉜다.

설치된 요철은 아크릴과 황동을 사용해 제작하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 모든 요철의 높이는 5 mm로 덕트 수력직경과의 비( $e/D_h$ )가 0.0743이고, 덕트 높이의 1/10( $e/H=0.1$ )로 동일하다. 단면 형상은 정사각형, 직각이등변삼각형, 반원형의 세 가지이다. 요철을 일정 간격으로

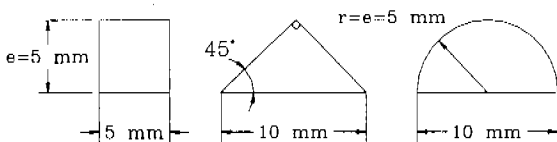


Fig. 2 Cross sections of ribs.

덕트 바닥면과 윗면의 동일한 주유동방향 위치에 서로 나란하게 설치하였으며, 요철간의 거리는 50 mm로 요철높이와의 비( $p/e$ )가 10이다. 요철과 주유동방향이 이루는 충돌각(angle of attack,  $\alpha$ )은, 사각과 반원 요철은  $90^\circ$ ,  $63^\circ$ ,  $45^\circ$  세 가지에 대하여, 삼각 요철은  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  두 가지에 대하여 실험을 수행하였다. 설치된 요철은 덕트의 위, 아래 한 면당 평균 19개이며, 유동이 8~10개의 요철을 지난 다음 나프탈렌이 코팅된 영역에 도달하므로 유동적으로는 완전발달된 상태에서 열/물질전달 정계층이 발달하기 시작한다.

물질전달계수의 계산을 위해 시험판의 나프탈렌 표면고도를 송풍실험 전후에 측정하였다. 이러한 측정은 2차원 자동이송장치로 이동되는 선형가변차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)에 의해 이루어졌다. 이 기기의 정밀도는  $0.025 \mu\text{m}$ 로 매우 정밀하며, 측정용 팁(tip)의 직경은 1.588 mm로 측정오차가 송풍실험시 평균 나프탈렌 승화량의 1% 이내이다. 선형가변차동변환기는 자동이송장치에 의해 빠르고 정확하게 이동되며 1시간 평균 2500여점을 측정하는 것이 가능하므로 빠른 시간에 많은 국소값을 구할 수 있었다.

물질전달 실험은 시험덕트내 요철의 설치하고 송풍실험으로 덕트내 나프탈렌 코팅면의 국소 승화량을 측정함으로써 이루어진다. 송풍실험 전후의 측정된 나프탈렌 코팅면의 표면고도 차이에서 송풍실험에 의하지 않고 표면고도 측정시간 동안 자연대류에 의해 승화된 양을 보정하여 이로부터 국소 물질전달계수를 구한다. 시험판에 형성된 나프탈렌 표면을 유동장에 노출시키는 송풍실험은 기온에 따라 유동적인 작동시간을 적용하여 나프탈렌의 평균 승화깊이가 약 3 mil( $=76.2 \mu\text{m}$ )이 되도록 하였다.

마찰계수를 구하기 위하여 압력강하 측정실험을 수행하였다. 덕트내 압력강하 특성을 고찰을

위해 덕트 측면벽에  $y=H/2$  위치에 25개의 정압 측정용 홀(pressure tap)을 뚫었다. 압력탭은 직경 1.5 mm으로 압력탭간 거리가 덕트의 입구와 출구 근방을 제외하고 요철간거리와 동일한 50 mm이다. 수력직경기준 Reynolds수가 25,000~70,000의 범위에서 실험을 수행하였으며 얻어진 평균압력강하로부터 마찰계수(friction factor)를 구하였다.

## 2.2 실험결과와 처리

송풍실험에 의한 나프탈렌 승화량으로부터 구해지는 국소물질전달계수( $h_m$ )는 다음 식으로 표시된다.

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

여기서  $\dot{m}[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 은 나프탈렌 표면 단위면적에서의 단위시간당 승화량이고  $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 벽면에서의 증기의 밀도이며, 시험덕트입구의 공기는 나프탈렌을 포함하고 있지 않으므로  $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 일반적으로 내부유동에서는 기준밀도로  $\rho_{v,b}$ (bulk vapor density)를 사용하지만 본 실험에서 덕트출구의  $\rho_{v,b}$ 가 통상  $\rho_{v,w}$ 의 0.9% 미만으로 매우 작으므로  $\rho_{v,w} - \rho_{v,b} \approx \rho_{v,w} - \rho_{v,\infty} = \rho_{v,w}$ 임을 고려해  $\rho_{v,b}$ 을 대신하여  $\rho_{v,\infty}$ 을 사용하였다. 따라서 실험전과 실험후의 표면고도차( $dy$ )인 나프탈렌의 승화깊이와 실험시간( $dt$ ), 고체 나프탈렌의 밀도( $\rho_s$ )와 표면에서 나프탈렌 증기의 밀도( $\rho_{v,w}$ )로부터 물질전달계수는 계산된다. 나프탈렌의 증기밀도는 이상기체 방정식에 의해 나프탈렌 포화증기압으로부터 구할 수 있다.<sup>(12)</sup> 위의 물질전달계수는 무차원수인 Sherwood수로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표시된다.

$$\text{Sh} = \frac{h_m D_h}{D_{naph}} \quad (2)$$

여기서  $D_{naph}$ 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수이다.<sup>(13)</sup>

본 실험에서 구한 Sherwood수는 Kline과 McClintock<sup>(14)</sup>의 방법에 의해 95% 신뢰수준

(confidence level)에서 7.0%의 불확실성(uncertainty)을 가지며, 나프탈렌의 물성치인 증기밀도와 확산계수에 대한 불확실성이 각각 4.7%와 5.1%로 가장 큰 부분을 차지한다.

본 실험에서는 요철에 의한 열/물질전달 향상 정도를 효과적으로 표현하기 위하여, 얻어진 물질전달계수의 무차원수( $\text{Sh}$ )를 요철이 없는 경우에 완전발달한 영역에서 물질전달계수의 무차원수( $\text{Sh}_0$ )에 대한 비( $\text{Sh}/\text{Sh}_0$ )로서 나타내었다. Dittus와 Boelter<sup>(15)</sup>에 의해 제시된 원형관에서의 완전발달 열전달계수는 열전달과 물질전달의 상사성에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Sh}_0 = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} (\text{Sc}/\text{Pr})^{0.4} \quad (3)$$

여기서  $\text{Sh}_0$ 는 완전발달된 물질전달계수를 나타낸다. 본 연구에서는 국소적인 결과값 다루기 위해 요철의 높이( $e$ )를 기준길이로 사용하였다. 그러므로 모든 길이는 요철의 높이로 나누어 무차원으로 표시되었다. 얻어진 국소값으로부터 면적을 기준으로 하여 평균전달계수( $\bar{\text{Sh}}$ )를 구하였다. 평균전달계수도 역시 전달계수비( $\bar{\text{Sh}}/\text{Sh}_0$ )의 형태로 표시하였다.

덕트의 입구, 출구부분과 요철이 설치되어 있지 않은 부분을 제외하면 압력은 주유동방향을 따라 선형적으로 감소한다. 따라서 요철이 설치되어 있는 영역( $-102 \leq x/e \leq 98$ )에서 중앙의  $-40 \leq x/e \leq 70$  부분의 압력 데이터를 선형으로 곡선 맞춤(curve fitting)을 하여 주유동방향 길이에 대한 평균적인 압력강하( $dP/dx = \Delta P/L$ )를 구하였다. 이로부터 다음 식에 의해 마찰계수(friction factor)를 구하였다.

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

요철에 마찰계수에 미치는 영향을 효과적으로 나타내기 위해 요철이 없는 완전발달한 원형관 난류유동에서의 마찰계수( $f_0$ )로 실험에서 얻은 마찰계수를 나누어  $f/f_0$ 의 형태로 제시하였다. 완전발달한 원형관에서의 난류유동에 대한 마찰계수는 Petukhov가 Karman-Nikuradse 방정식에 맞도록  $10^4 < \text{Re} < 5 \times 10^6$  범위에서 제시한 식을 사용

하였고 다음과 같다.<sup>(16)</sup>

$$f_0 = 2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2} \quad (5)$$

요철이 설치된 덕트 벽면에서의 열전달 촉진 및 압력강하 특성을 함께 고려하여 최적의 요철 조건을 도출해내기 위해 다음과 같은 열/물질전달 성능계수(heat/mass transfer performance)를 사용하였다. 유체이송동력이 일정(constant pumping power)할 때를 기준으로 열전달 향상외 정도를 나타내는 지표로서 Gee와 Webb<sup>(17)</sup>이 제시한 식은 다음과 같다.

$$\eta = (\overline{Sh}/Sh_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (6)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 국소 열/물질전달

본 실험에서는 사각, 삼각, 반원형의 세 가지 단면 형상의 요철을 차례로 덕트에 설치하며 실험하여 열/물질전달의 특성 변화를 고찰하였다. 그런데 요철이 설치된 덕트는 요철의 총돌각에 의해 열/물질전달계수 분포가 크게 변한다. 따라서 이와 같은 형상 효과가 요철의 총돌각에 미치는 영향을 함께 고려하기 위해 요철의 총돌각을

45°, 63°, 90°로 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

요철의 총돌각이 90°인 경우 덕트 바닥면의 요철사이 영역에 주유동이 재부착되는 곳을 중심으로 넓은 부분에서 전달계수가 크게 향상되고, 요철 주변의 작은 와류에 의해 좁은 영역에서 높은 값이 나타난다. 요철이 주유동과 비스듬하게 놓인 총돌각 63°와 45°의 경우에 있어서는, 요철이 설치된 면에 가까운 주유동이 정사진 요철을 따라 편향되어 덕트를 나선형으로 회전하는 이차유동이 발생하게 된다. 이러한 이차유동의 하향류 영역에서 바닥면의 전달계수는 높은 분포를 보이고, 이 영역으로부터 덕트의 횡방향을 따라 전달계수가 감소하여 이차유동의 상향류 영역에서는 낮은 전달계수 분포를 보인다. 요철 주변의 작은 와류도 요철을 따라 이동하게 되므로 요철근처에 더욱 높은 전달계수가 나타나게 된다.<sup>(11)</sup>

Fig. 3은  $Sh/Sh_0$ 가 동일한 지점을 연결하여 값이 높은 곳을 진한 음영으로 나타내었다. 총돌각이 90°인 경우인 Fig. 3(a)~(c)를 살펴보면 세 가지 단면형상의 모든 요철이 횡방향으로 대체로 균일한 전달계수 분포를 형성함을 볼 수 있다. 재부착에 의해 요철사이 영역의 중앙부 부근에서 높은 전달계수가 넓은 영역에 걸쳐 나타나며, 덕트 양쪽 측면벽 부근에서는 벽면에 의한 3차원적인 유동의 영향으로 약간 높은 전달계수 분포를

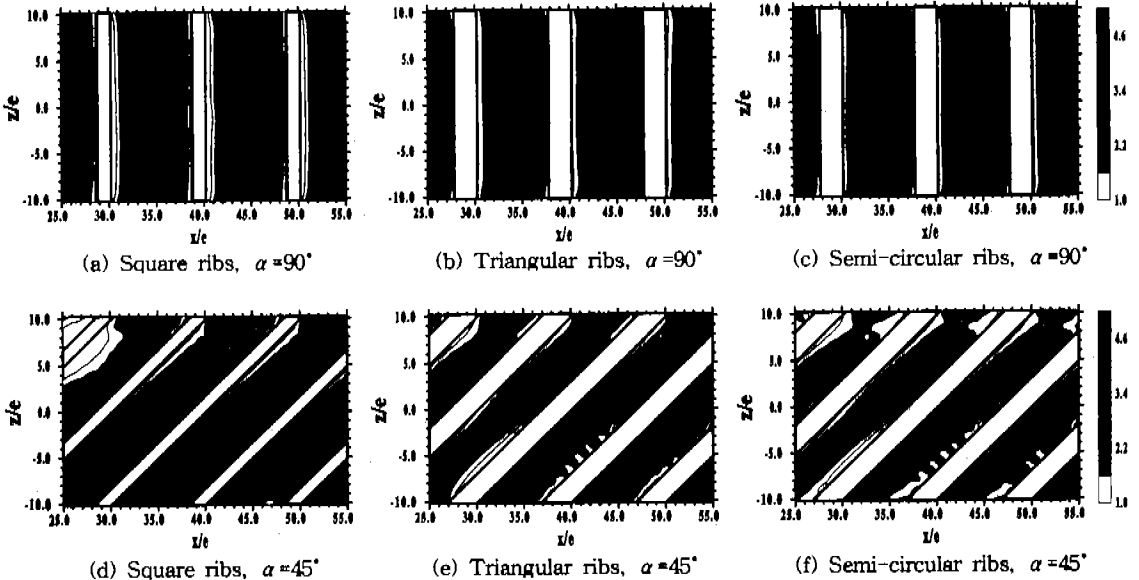


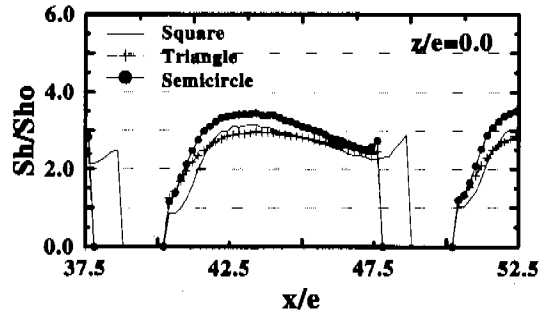
Fig. 3 Contour plots of  $Sh/Sh_0$  for various cross section shaped ribs.

보인다. 전달계수의 크기에 있어서 반원 요철이 설치되었을 때 다소 높은 분포가 나타났다. 충돌각이 45°인 경우의 결과를 나타내는 Fig. 3(d)~(f)에서는 요철의 형상 변화가 전체적인 전달계수 분포에 영향이 매우 적음을 보여준다. 단지 사각 요철의 경우  $z/e=-10.2$  부근에 하향류의 영향으로 크게 열/물질전달이 촉진되는 영역의 전달계수 분포가 다른 형상의 요철의 경우보다 다소 높게 나타났다. 이것은 사각의 요철이, 요철이 설치된 바닥면 근처의 유동을 가장 효과적 가로막아 요철을 따라 흐르게 만듦으로써 이차유동인 하향류가 강화되기 때문이라고 생각된다.

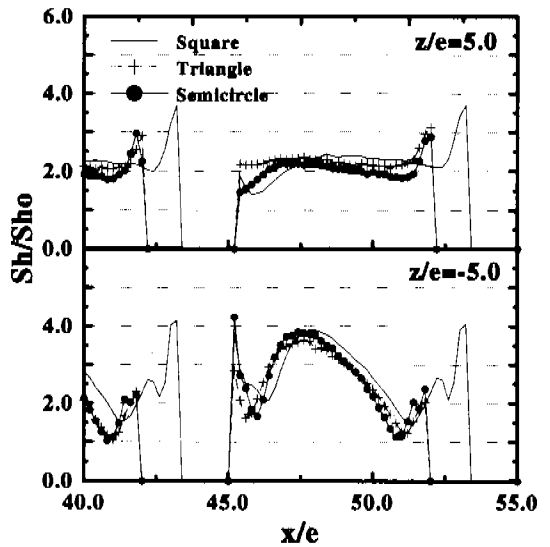
Fig. 4에서는 국소적인 주유동 방향 전달계수 분포를 대표적인 몇 가지 횡방향 위치에 대하여 자세히 나타내었다. 세 가지 형상 요철 모두 충돌각 90°의 경우 Fig. 4(a)와 같이 재부착에 의한 높은 전달계수를 보인다. 재부착에 의한 극대값 위치는 요철의 하류끝단에서 약  $3e$  떨어진 곳으로 거의 동일하지만 극대값에서는 다소 차이를 보인다. 유선형에 가장 가까운 반원 형상의 요철이 가장 높은 극대값을 나타내고 삼각과 사각 요철은 근소한 차이만을 보인다. 이것은 요철의 형상에 따른 박리·재부착 유동, 난류의 변화와 더불어 요철의 폭이 다른 것에 기인한다고 예상된다. 부연하면 반원 요철은 유선형으로 인해 가장 좁은 후류를 형성하여, 이에 따라 반원 요철은 유동을 교란하는 것이 다른 단면형상에 비해 경미할 것이다. 그러나 적은 유동손실로 인해 더 빠른 속도로 바닥면에 충돌하거나 바닥면에서 더 얇은 경계층을 형성할 수 있다.

모든 경우에 요철의 상류에 발생하는 순환유동과 이로 인해 유도되는 요철 상류면과 덩트 바닥면 사이의 와류에 의해 날카로운 극대값이 관찰된다. 이 가운데 사각 요철이 바닥면 근처의 유동을 가장 효과적으로 가로막으므로 이러한 극대값이 가장 두드러진다. 또한 요철 하류의 재순환 유동의 영역에서 사각 요철이 설치되었을 때 가장 낮은 전달계수 분포를 나타내 열점(hot spot) 발생에 있어서 사각 요철이 가장 불리하다.

충돌각이 45°인 경우를 나타내는 Fig. 4(b)를 살펴보면 사각, 삼각 및 반원요철이 설치된 경우의 주유동방향 국소 전달계수는 분포와 값의 크기에 있어서 대동소이함을 알 수 있다. Fig. 3에 나타난 바닥면 그림에서 하반부 영역인 아래쪽



(a)  $\alpha=90^\circ$



(b)  $\alpha=45^\circ$

Fig. 4 Streamwise distributions of  $Sh/Sh_0$  for various cross section shaped ribs.

측면벽( $z/e=-10.2$ )에 가까운 영역에서는 Fig. 4(b)의  $z/e=-5.0$ 에서와 같이 하향류의 영향으로 뚜렷한 재부착에 의한 전달계수의 극대값이 나타났다. 이 때 반원과 삼각 요철의 경우에 사각 요철보다 좀 더 상류에서 재부착이 일어나는 것을 알 수 있다. 반면 바닥면 그림의 상반부 영역에서는 Fig. 4(b)의  $z/e=5.0$ 에서와 같이 유동의 재부착이 약화되거나 나타나지 않아 대체로 균일한 분포가 나타났으며, 삼각 요철은 거의 평탄한 전달계수 분포를 보여준다. 요철주변에 발생된 작은 크기의 와류가 충돌각 90°인 경우와 달리 요철을 따라 횡방향으로 이동함으로 인해 삼각이나 반원

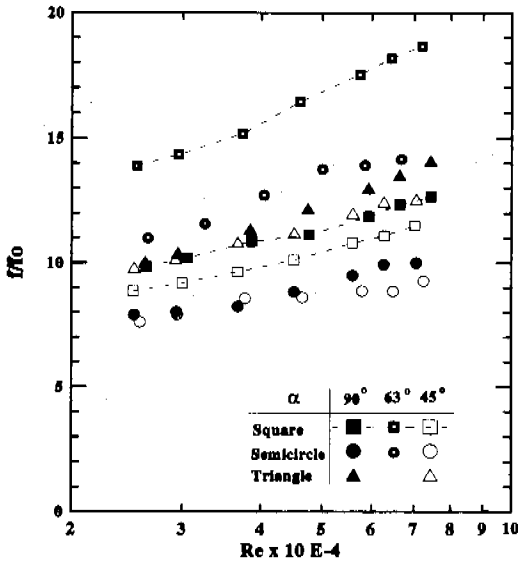


Fig. 5 Friction factor ratios,  $f/f_0$ .

요철의 경우에도 요철 근접영역의 전달계수의 상승이 뚜렷하게 관찰된다. 그러나 여전히 이러한 날카로운 전달계수의 극대값은 사각 요철의 경우가 가장 강조되어 나타났다.

3.2 마찰계수

요철에 의해 유동을 교란함으로써 열/물질전달을 향상시키면 덕트내 추가적인 압력강하에 의해 마찰손실이 증가한다. 그러므로 요철설치에 따른 압력강하 특성을 함께 고려해야 한다. 본 실험에서는 Reynolds수 25,000~70,000의 유동영역에서 실험을 수행하였다.

마찰계수를 나타낸 Fig. 5에서 같은 충돌각에 대하여 삼각 요철의 마찰손실이 가장 크게 나타났음을 알 수 있다. 또한 사각 요철과의 마찰손실과의 차이가 Reynolds수가 증가함에 따라 더욱 벌어졌다. 반원 요철의 경우 사각이나 삼각 요철에 비해 매우 작은 압력강하를 나타내고 있다. 삼각 요철의 경우 요철과 바닥면과 이루는 각(135°)이 사각 요철의 경우(90°)보다 더 크고 유선형에 더 가깝지만, 높은 Reynolds수 영역에서는 오히려 삼각요철이 형성한 높이방향의 빗면을 따라 요철을 지나는 유동이 바닥면에서 멀어지는 방향으로 밀려나게 된다. 따라서 주유동이 요철을 지나 바리되며 생성되는 후류영역이 증가하는 효과를 가져오기 때문에 더 큰 손실을 초래한다.

그러나 Reynolds수가 비교적 작은 경우에는 이러한 효과가 줄어들어 마찰계수가 사각 요철과 비슷해진다. 충돌각이 63°인 경우 반원과 사각 요철 모두 다른 충돌각에 비하여 급격한 마찰계수의 증가를 나타내었다.

3.3 평균 전달계수 및 열/물질전달 성능계수

평균적인 열전달 향상율 고려하기 위하여 국소값으로부터 면적평균한 전달계수비( $\overline{Sh}/Sh_0$ )를 구하였다. 요철이 설치된 덕트에 작동유체를 일정한 동력으로 이송시켰을 때 열전달이 향상되는 정도를 판단하기 위하여 식(6)에서와 같은 성능계수가 쓰인다. 이러한 평균 전달계수비와 성능계수는 Fig. 6에 나타내었다. 반원요철이 충돌각 90°일 때 다른 단면형상의 요철에 비해 평균전달계수가 높음을 보여주고 있다. 그리고 반원요철의 작은 마찰손실로 인해 성능계수는 더욱 높아져 다른 단면형상의 요철과의 차이가 더 큰 쪽으로 벌어지는 것을 알 수 있다. 사각 요철의 경우

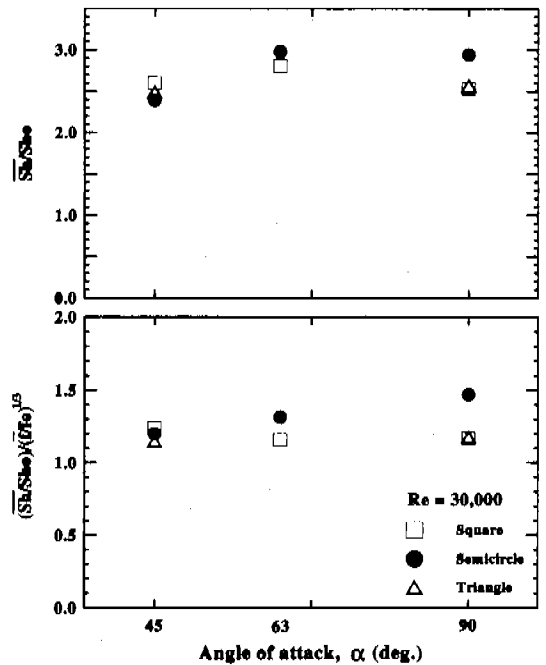


Fig. 6 Averaged Sherwood number ratios,  $\overline{Sh}/Sh_0$  and heat/mass transfer performances,  $(\overline{Sh}/Sh_0)/(\overline{f}/f_0)^{1/3}$ .

충돌각 63°에서 최대 전달계수비가 나타나지만 반원 요철의 경우 충돌각 63°와 90°에서 비슷한 열/물질전달 향상을 보인다. 충돌각이 45°인 경우에는 오히려 사각 요철이 반원 요철 보다 다소 높은 평균 전달계수비를 가진다. 충돌각 63°에서 반원과 사각 요철 두 경우 모두 가장 높은 평균 전달계수비를 갖지만 큰 마찰손실로 인해 성능계수가 감소하게 된다. 반원의 경우 충돌각 90°에서, 사각 요철의 경우 45°에서 최대의 성능계수를 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 수행된 열/물질전달 및 압력강하 실험에 의해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 덕트의 열/물질전달과 압력강하 특성에 있어서 사각 요철과 비교할 때, 반원 요철은 여러 가지 차이점을 보였으나 삼각 요철은 큰 차이를 보이지 않았다. 요철의 형상에 따른 평균 열/물질전달 변화는 충돌각이 90°일 때 가장 두드러졌다.

(2) 충돌각이 90°와 63°인 경우 반원 요철이 다른 단면형상의 요철에 비하여 높은 평균 열/물질전달계수를 나타내었지만, 충돌각이 45°에서는 다소 낮은 값을 가졌다. 그리고 반원과 사각 요철에 있어서 충돌각 63°에서 가장 높은 열/물질전달 향상을 나타내었다.

(3) 같은 충돌각에서 삼각요철이 가장 큰 마찰손실을 일으키고, 반원 요철이 가장 적은 마찰손실을 보였다. 이와 함께, 특히 충돌각 63°에서 반원과 사각 요철은 다른 충돌각에 비하여 급격한 마찰손실의 상승이 일어났다.

(4) 사각 요철은 45°에서 최대 열/물질전달 성능계수를 가지는 반면, 반원 요철은 90°에서 최대 열/물질전달 성능계수를 가지다가 충돌각이 감소함에 따라 값의 감소를 보였다.

#### 후 기

본 연구는 1997년도 한국전력공사의 지원(관리 번호:97-057)에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 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. Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 360~366.
- (2) Han, J. C., Glicksman, L. R. and Rohsenow, W. M., 1978, "An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-Roughened Surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 1143~1156.
- (3) Han, J. C., Park, J. S. and Lei, C. K., 1985, "Heat Transfer Enhancement in Channels with Turbulence Promoters," *ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 628-635.
- (4) Han, J. C., Ou, S., Park, J. S. and Lei, C. K., 1989, "Augmented Heat Transfer in Rectangular Channels of Narrow Aspect Ratios with Rib Turbulators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 9, pp. 1619~1630.
- (5) Taslim, M. E. and Spring, S. D., 1994, "Effects of Turbulator Profile and Spacing on Heat Transfer and Friction in a Channel," *J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 8, No. 3, pp. 555~562.
- (6) Taslim, M. E. and Korotky, G. J., 1997, "Low-Aspect-Ratio Rib Heat Transfer Coefficient Measurements in a Square Channel," *ASME International gas turbine and aeroengine congress and exposition*, Orlando, Florida, U.S., paper No. 97-GT-388.
- (7) Lockett, J. F. and Collins, M. W., 1990, "Holographic Interferometry Applied to Rib-Roughness Heat Transfer in Turbulent Flow," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 11, pp. 2439~2449.
- (8) Acharya, S., Myrum, T., Qiu, X. and Sinha, S., 1997, "Developing and Periodically Developed Flow, Temperature and Heat Transfer in a Ribbed Duct," *Int. J. Heat Mass Transfer*,



- Vol. 40, No. 2, pp. 461~479.
- (9) Chandra, P. R., Han, J. C. and Lau, S. C., 1988, "Effect of Rib Angle on Local Heat/Mass Transfer Distribution in a Two-Pass Rib-Roughened Channel," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 233~241.
- (10) Han, J. C., Chandra, P. R., and Lau, S. C., 1988, "Local Heat/Mass Transfer Distributions Around Sharp 180 deg Turns in Two-Pass Smooth and Rib-Roughened Channels," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 91~98.
- (11) 우성제, 김완식, 조형희, 1998, "사각 덕트내 요철의 각도 변화에 따른 열전달 특성," *대한기계학회논문집B*, Vol. 22, No. 4, pp. 530~541.
- (12) Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (13) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (14) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (15) Dittus, P. W. and Boelter, L. M. K., October 17, 1930, Univ. Calif. Publ. Engng, Vol. 2, No. 13, pp. 443-461; 1985, reprinted in *Int. Commun. Heat Transfer*, Vol. 12, pp. 3~22.
- (16) Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 6, pp. 503-504, Academic Press, New York.
- (17) Gee, D. L. and Webb, R. L., 1980, "Forced Convection Heat Transfer In Helically Rib-Roughened Tubes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 1127-1136.