

# 사각 덕트내 요철의 각도 변화에 따른 열전달 특성

우성제\* · 김완식\* · 조형희\*\*

(1997년 10월 29일 접수)

## Augmented Heat Transfer in a Rectangular Duct with Angled Ribs

S. J. Wu, W. S. Kim and H. H. Cho

**Key Words :** Duct Flow(덕트 유동), Rib Turbulator(요철), Angle of Attack(충돌각), Secondary Flow(2차 유동), Heat/Mass Transfer(열/물질전달)

### Abstract

Heat transfer augmentation in a rib-roughened duct is affected by the rib configurations, such as rib height, angle of attack, shape, rib to rib pitch, and aspect ratio of a duct. These have been the main subjects in studying the average heat transfer and the friction loss of the fully developed flow. Investigating distributions of local heat transfer coefficients and flow patterns in a duct with the rib turbulators is necessary to find the characteristics of heat transfer augmentation and to decide the optimal configurations of ribs. In the present study the numerical analyses and the mass transfer experiments are performed to understand the flow through a rib roughened duct and the heat transfer characteristics with various angles of attack of ribs. A pair of counter-rotating secondary flow in a duct has a main effect on the lateral distributions of local mass transfer coefficients. Downwash of the rotating secondary flow, reattachment of main flow between ribs and the vortices near ribs and wall enhanced the mass transfer locally up to 8 times of that in case of the duct without ribs.

### 기호 설명

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| $D_h$ : 시험덕트 수력직경                    | $Pr$ : 공기의 Prandtl수                          |
| $D_{naph}$ : 나프탈렌의 공기중 확산계수          | $Re$ : Reynolds수, $\rho D_h V / \mu$         |
| $e$ : 요철 높이                          | $Sc$ : 나프탈렌의 Schmidt수                        |
| $H$ : 시험덕트 높이                        | $Sh$ : 국소 Sherwood수, $h_m D_h / D_{naph}$    |
| $h_m$ : 물질전달계수                       | $\bar{Sh}$ : 평균 Sherwood수                    |
| $h$ : 열전달계수                          | $Sh_0$ : 요철이 없는 시험덕트에서 완전발달한 난류영역의 Sherwood수 |
| $L$ : 시험덕트 길이                        | $V$ : 시험덕트내 공기의 평균속도                         |
| $\dot{m}$ : 단위시간당 단위면적으로부터의 나프탈렌 승화량 | $W$ : 시험덕트의 폭                                |
| $Nu$ : Nusselt수, $h D_h / k$         | $x$ : 나프탈렌표면 시작선으로부터의 주유동방향 거리               |
| $p$ : 요철간 거리                         | $y$ : 시험덕트 바닥면으로부터의 높이                       |
|                                      | $z$ : 시험덕트 중심으로부터의 횡방향 거리                    |

\*호원, 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*호원, 연세대학교 기계공학과

## 그리스문자

- $\alpha$  : 총돌각(angle of attack)  
 $\mu$  : 공기의 점성계수  
 $\xi$  : 각 요철의 중심선으로부터의 주유동방향 거리  
 $\rho$  : 공기의 밀도  
 $\rho_s$  : 고체 나프탈렌 밀도  
 $\rho_{v,w}$  : 나프탈렌벽면에서의 나프탈렌 증기밀도  
 $\rho_{v,\infty}$  : 시험덕트 입구에서의 나프탈렌 증기밀도

## 하첨자

- 0 : 요철이 없는 덕트내 완전발달 영역  
 m : 물질전달  
 naph : 나프탈렌  
 s : 고체 나프탈렌  
 v : 나프탈렌 증기  
 $\infty$  : 덕트 유입공기

## 1. 서 론

덕트내 열전달을 향상시키는 방법의 일환으로 거친 표면을 이용하거나 돌출물을 설치하여 유동을 교란하는 여러 연구가 있어 왔다. 그 중 한 방법으로 가는 각봉 모양의 요철(rib turbulator)을 원형<sup>(1,2)</sup> 또는 사각통로에 설치하는 방법은 지금까지 활발히 연구되어 오고 있으며, 요철의 높이, 총돌각(angle of attack), 요철간 거리가 완전발달한 유동의 평균 열전달계수와 마찰계수에 미치는 효과에 대한 연구는 넓은 Reynolds수 영역에서 이루어졌다.<sup>(3~6)</sup> 이 밖에도 열전달과 마찰손실에 영향을 미치는 요철 조건으로는 요철의 형상, 단면 모양, 배치 형태 등이 있고 사각덕트의 경우 덕트의 종횡비(aspect ratio)도 중요한 조건이다.<sup>(7~9)</sup> 이러한 덕트내 요철을 설치하는 방법의 응용으로 기존 열교환기 외에 전자칩 배열의 냉각, 가스터빈 기익내 냉각통로 등에 적용되며, 가스터빈 기익의 냉각통로는 지난 30년간 각봉 모양의 요철이 설치된 형태로 사용되어져 왔다. 지금까지의 연구에 의하면 열전달 향상은 직사각형 덕트의 경우 총돌각이 60° 부근일 때 최대가 되고, 같은 유체이송동력을 사용하면 총돌각이 클수록 압력 손실로 유속이 줄어들므로 총돌각이 45° 부근에서 최대의 열전달 향상이 일어남이 알려져 있다.

기존의 연구들은 주로 평균적인 열전달 향상에

중점을 두고 실험을 수행하여 요철에 의한 유동 변화나 그에 따른 열전달계수 분포를 알 수 있는 자료는 부족한 상태이다. Chandra등<sup>(10)</sup>이 국소적인 열전달계수를 연구하기 위해 물질전달을 이용한 연구를 수행하였지만 시험덕트의 크기가 작아 요철이 있는 덕트내의 유동을 이해하거나 국소적인 열전달계수 분포를 구하는데 충분한 국소값을 얻지 못했다. 본 연구에서는 물질전달 방법을 이용해 자세한 국소 열/물질전달계수를 구하고, 수치해석을 통한 유동현상과 비교하였다. 이와 같이 수치해석을 통해 얻은 유동장 결과와 실험을 통해 얻은 전달계수를 함께 고찰함으로써 요철이 설치된 덕트내 유동 및 열전달 현상을 보다 정확하게 이해하여 요철의 최적 설계를 위한 자료를 제시하고자 한다. 그리고 본 실험에서 사용한 나프탈렌승화법은 열전달 실험에서 문제시 되는 전도, 복사 오차를 제거할 수 있으며, 매우 국소적인 전달계수 측정이 가능하므로 본 연구의 목적에 부합된다. 본 연구에서는 총돌각의 변경에 의한 유동의 변화와 이로 인해 발생하는 열/물질전달 양상의 변화를 살펴보고자 두 가지 각도(45°, 90°)에 관한 수치적 유동해석과 네 가지 각도(90°, 63°, 45°, 33°)에 관한 열/물질전달 실험을 수행하였다.

## 2. 수치해석과 실험의 조건 및 방법

## 2.1 수치해석 조건

요철이 설치된 덕트내 유동현상을 이해하기 위해 범용 유동 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치계산을 수행하기 위하여 각각 x, y, z 방향으로 93×30×41개 규모의 격자체를 형성하고, 덕트는 높이(H) 50 mm×폭(W) 100 mm로 실험조건과 거의 동일하다. 요철의 높이는 5 mm로 정사각형 단면을 가지며 총돌각은 90°와 45°에서 계산을 수행하였고, 요철간 거리는 요철 높이의 10배(p/e=10)이다. 또한 덕트의 윗면과 바닥면을 상하 대칭조건으로 하여 아래, 윗면에 각각 요철이 설치된 것으로 가정하였다. 완전발달된 유동을 형성시키기 위하여 유동이 총 6개의 요철 중 4~5개 지난 영역을 고찰의 대상으로 하였다. 그리고 계산 모델을 3차원 정상상태로 가정하고, 박리 난류유동을 비교적 잘 예측하는 RNG k- $\epsilon$  난류모델을 사용하였다. 개방입구조건에 입구 주유동의 속도는 15 m/s으로 하고, 작동압력

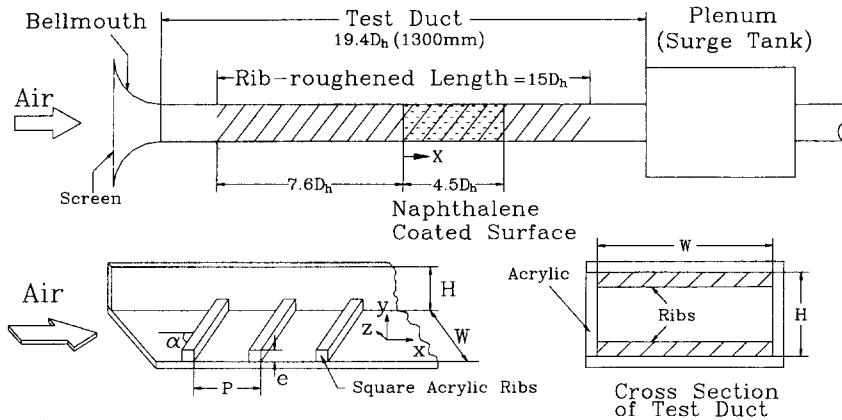


Fig. 1 Schematic diagram of the test duct for experiments.

은 대기압으로 가정하였다.

## 2.2 실험장치

열/물질전달 실험에 사용된 덕트는 Fig. 1에 도식적으로 나타나 있다. 길이(L) 1300 mm, 내부 단면적( $W \times H$ )은 102 mm $\times$ 50 mm로 덕트의 종횡비가(aspect ratio,  $W/H$ )가 2.04이며, 수력직경(hydraulic diameter,  $D_h$ )은 67.3 mm이다. 일반적으로 가스터빈 기국내 냉각통로의 길이와 수력직경비( $L/D_h$ )는 10~15이며, 본 실험에서는 열/물질전달 측진을 위해 요철이 설치된 구간이 중앙의 1000 mm로 약  $15D_h$ 에 해당한다. 설치된 요철은 재질이 아크릴이고 높이가 5 mm인 정사각형 단면봉으로, 덕트의 윗면과 바닥면의 같은 주유동방향 위치에서 나란하게 부착되었다. 요철간의 거리는 50 mm로 요철높이와의 비( $p/e$ )가 10이며, 요철과 주유동 방향이 이루는 충돌각(angle of attack)은 33°, 45°, 63°, 90° 네 가지에 대하여 실험을 수행하였다.

덕트 입구에 설치된 수축부는 6:1의 면적비를 가지며, 유동은 시험덕트의 하류에 설치된 큰 플레넘(plenum)을 거쳐 송풍기로 흡입되어 밖으로 배출된다. 유량은 플레넘과 송풍기 사이에 설치된 오리피스에 의해 측정되며, 시험단면에서 평균속도 13.6 m/s로 수력직경 기준  $Re$ 수는 약 56,000이다.

본 실험에서는 열전달 실험을 대신하여 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 주조를 통하여 나프탈렌을 요철설치 시작지점으로부터  $7.6D_h$  지점에서 그 하류  $4.5D_h$  지점까지 덕트

바닥면에 코팅하였다. 설치된 요철은 덕트의 위, 아래 한 면당 평균 19개이며 유동이 8~10개의 요철을 지난 이후 나프탈렌이 코팅된 영역에 도달하므로 유동적으로 완전발달한 상태에서 물질경계층이 발달하기 시작한다. 물질전달 실험의 경계조건은 열전달 실험의 등온조건에 상사되고 나프탈렌이 코팅된 부분이 가열부분에 해당한다. 본 실험의 방법으로 얻어진 많은 전달계수는 기존의 열전달 실험에 비해 복잡한 유동현상에 따른 국소적인 분포를 자세히 나타내었다.

본 실험장치에서 좌표계는 주유동방향을  $x$ , 횡방향을  $z$ , 높이방향을  $y$ 로 표시하며, 나프탈렌이 코팅된 영역 시작위치의 바닥면 중심을 원점으로 한다. 따라서 열/물질전달계수 측정영역은 주유동 방향으로  $0 \leq x \leq 60e$  ( $0 \leq x \leq 4.5D_h$ )이고 횡방향으로는  $-10.2e \leq z \leq 10.2e$  ( $-0.76D_h \leq z \leq 0.76D_h$ )가 되며, 요철이 설치된 영역(길이  $15D_h$ )은 나프탈렌 코팅영역(길이  $4.5D_h = 60e$ )과 그 전방영역(길이  $7.6D_h$ ), 후방영역(길이  $2.9D_h$ )의 세 부분으로 나뉜다.

## 2.3 실험 및 결과처리 방법

나프탈렌이 코팅된 덕트의 바닥면은 덕트 본체에서 탈착 가능한 시험시편을 사용하였다. 표면고도를 실험 전후에 측정하여 그 차이로부터 나프탈렌 표면승화량을 측정하고, 측정시간과 시험시편의 설치 및 분리시간 동안의 자연대류로 인한 승화량을 보정하여 이로부터 무차원 물질전달계수인 Sherwood수를 구하였다. 나프탈렌 표면고도의 측정은 선형가변차동변환기(LVDT; linear variable differ-

ential transformer)에 의해 이루어졌는데, 정밀도는 0.025 $\mu$ m로 매우 정밀하며 측정용 팁(tip)의 직경은 1.588 mm로 측정오차가 1% 이내이다. LVDT를 이용하여 1시간 평균 2500여점을 측정하는 것이 가능하므로 빠른시간에 많은 국소값을 구할 수 있었다. 나프탈렌의 증기밀도는 온도에 매우 민감하여 1°C에 10% 정도가 변한다. 그러므로 나프탈렌 표면에서의 정확한 온도측정을 위해 J형 열전대(iron-constantan)를 시험시편에 설치하였다. 이러한 과정에 의해 구해지는 물질전달계수는 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  $\dot{m}$ 은 나프탈렌 표면에서의 단위시간당 승화량이고  $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 벽면에서의 증기의 밀도이며, <sup>(11)</sup> 시험덕트입구의 공기는 나프탈렌을 포함하고 있지 않으므로  $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 일반적으로 내부 유동에서는 기준밀도로  $\rho_{v,b}$ (bulk vapor density)을 사용하지만 본 실험에서 덕트출구의  $\rho_{v,b}$ 가 통상  $\rho_{v,w}$ 의 0.9% 이하로 매우 작으므로  $\rho_{v,w} - \rho_{v,b} \approx \rho_{v,w} - \rho_{v,\infty} = \rho_{v,w}$ 임을 고려해  $\rho_{v,b}$ 를 대신하여  $\rho_{v,\infty}$ 를 사용하였다. 결국 나프탈렌의 승화깊이, 즉 실험전과 실험후의 표면고도차( $dy$ )와 실험시간( $dt$ ), 고체 나프탈렌의 밀도( $\rho_s$ )와 표면에서의 나프탈렌 증기밀도( $\rho_{v,w}$ )에 의해서 물질전달계수는 결정된다. 위의 물질전달계수는 무차원인 Sherwood수로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표시된다.

$$Sh = \frac{h_m N_h}{D_{napn}} \quad (2)$$

여기서  $D_{napn}$ 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수이다. 여기에 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho<sup>(12)</sup>에 제시되어 있다. 본 실험에서의 Sherwood수는 Kline과 McClintock<sup>(13)</sup>의 방법에 의해 95% 신뢰수준(confidence level)에서 7.9%의 불확실성(uncertainty)을 가지며, 나프탈렌의 물성치인 증기밀도와 확산계수에 대한 불확실성이 각각 4.7%와 5.1%로 가장 큰 부분을 차지한다.

이와 같은 계산과정을 통하여 얻어진 물질전달계수는 물질전달과 열전달 사이의 유사성에 의하여 열전달계수로 변환될 수 있는데 상관관계식은 난류의 경우 아래와 같다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4} \quad (3)$$

본 실험에서는 요철에 의한 열/물질전달 향상 정도를 효과적으로 표현하기 위하여, 얻어진 물질전달계수의 무차원수(Sh)를 요철이 없는 경우에 완전발달한 영역에서 물질전달계수의 무차원수( $Sh_0$ )에 대한 비( $Sh/Sh_0$ )로서 나타내었다. 이와 같이 함으로써 나프탈렌 확산계수에 의한 오차를 줄일 수 있다. Dittus와 Boelter에 의해 제시된 원형관의 완전발달영역에서 열전달계수는 위의 열전달과 물질전달의 유사성에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$Sh_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (Sc/Pr)^{0.4} \quad (4)$$

여기서  $Sh_0$ 는 완전 발달된 물질전달계수를 나타낸다. 본 실험은  $Re=56,000$ ,  $Sc=2.16$ 인 조건에서 수행되었는데, 요철이 없는 경우  $x/e > 20$ 의 영역에서 물질전달계수가 거의 일정하게 수렴되었다. 그리고  $25 < x/e < 55$ 의 영역에서 평균한 Sherwood수는  $Sh_0=221$ 로 위 식 (4)의 결과인 194와 약 14%의 차이를 나타내었으며, 이 차이는 본 실험에서 사용된 덕트의 단면형상차이에서 기인된 것으로 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 실험결과를 물질전달계수의 무차원수비로 나타내는데 실제 사각덕트 유동조건에서 얻어진  $Sh_0=221$ 을 사용하였다.

평균적인 전달계수를 고찰한 기존의 연구에서는 수력직경( $D_h$ )을 기준으로 거리를 표시하는데, 본 연구에서는 국소적인 결과를 다루기 위해 요철의 높이( $e$ )를 기준길이로 사용하였다. 그러므로 모든 좌표는 요철의 높이로 나누어 무차원으로 표시되었다. 또한 유동현상과 국소 전달계수분포의 결과를 효과적으로 제시하기 위해 횡방향 분포 대신 요철과 나란한 방향의 속도, 전달계수 분포를 나타내었다. 이를 위해 각 요철 중심선으로부터의 주유동방향 거리를 표시하는 상대좌표계  $\xi$ 를 사용하였다.

또한 국소적으로 얻어진 많은 전달계수를 이용해 면적에 의한 평균을 구하였다. 우선 측정영역의 주유동 방향으로 전달계수의 선 길이에 의한 평균을 얻은 후 이러한 길이평균 전달계수를 다시 횡방향으로 길이평균함으로써 면적평균 전달계수를 계산하였다. 주유동방향 선평균을 구할 때 요철이 설치되는 영역은 평균의 계산에서 제거하였다. 전체 측정영역의  $0 \leq x/e \leq 60$ 에서 요철사이 영역의 국소 전달계수가 비교적 동일한 분포로 반복되는  $25 \leq x/e \leq 55$ 의 구간에서 평균을 계산하였으며, 결과값을 국소 전달계수와 마찬가지로 요철이 없는 경우의 완전발달영역 전달계수로 나누어  $\overline{Sh}/Sh_0$ 의 형

대로 제시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수치해석결과

사용한 좌표계는 Fig. 1에 나타난 실험장치의 경우와 동일하여 덕트의 바닥 중심에서  $z=0$ 이고, 덕트의 횡방향 범위는  $-10e \leq z \leq 10e$ 이다.

Fig. 2와 Fig. 3은  $xz$ 평면을 제외한 모든 그림에 있어서 덕트의 상하 대칭조건에 의하여 덕트단면은 바닥면으로부터 덕트의 절반 높이( $H/2$ )까지만을 나타내었다. 이로부터 다음과 같은 유동양상을 볼 수 있다.

먼저 Fig. 2는 요철 충돌각  $90^\circ$ 인 경우의 유동결과를 나타낸다. Fig. 2(a)는 상류에서 하류방향으로 바라본  $yz$ 단면의 속도성분으로 요철의 중심선으로부터  $\xi/e=6.5$  지점에서의 결과를 나타내고 있다. 여기서 덕트의 양 끝에 와동성분을 볼 수 있는데, 이는 요철 사이의 압력분포가 덕트의 측면벽에 의해 불균형을 이루어 발생하는 3차원 유동현상이다. 여기서 바닥면 근처의 유동을 살펴볼 때, 중심으로부터 측면벽 방향으로의 유동성분이 있으며, 이 영향이 바닥면 열/물질전달계수가 측면벽 근처에서 비교적 낮게 나타나는 원인이 된다. Fig.

2(b)는 바닥면에서  $0.2e$  떨어진 곳에서의  $x, z$ 방향 속도성분을 나타내며, 측면벽에 의한 벽근처의 3차원 유동현상을 잘 보여준다. 여기서 아래 부분에 나타나 있는 요철의 하류근접부의 유동을 살펴보면, 측면벽을 따라 유입된 다량의 역류가 돌아나가는 것에 의해 측면벽으로부터 중심방향으로의 속도성분이 관찰되며, 측면벽 근방에서 상대적으로 속도가 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 바닥면 전달계수가 측면벽 근처에서 상승하게 하는 이유가 되고, 전술한 내용과 함께 모두 Fig. 6(a)에 나타난 실험결과와 잘 일치한다. 또한 Fig. 2(b)에서 덕트의 횡방향 중심부분을 살펴보면, 상류쪽 요철 중심선으로부터  $0 < \xi/e < 3$  영역은 바닥면 근처에서 역류 성분을 가지므로 재순환 영역에 해당하고,  $4.5 < \xi/e < 9$  영역은 주유동방향 속도성분이 하류로 갈수록 증가하므로 재부착은  $\xi/e \approx 3.8$ 에서 일어나는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 2(c)는 덕트 중심선을 따라 나타난  $x, y$ 방향 속도성분으로 요철 하류의 유동의 재순환과 재부착을 잘 보여주고 있으며 역시 상류 요철로부터  $x$ 방향으로  $\xi/e \approx 3.8$  근방에서 재부착이 관찰된다. Fig. 2(d)는 측면벽에서 가까운 단면인  $z/e=9.8$ 에서의  $x, y$ 방향 속도성분을 나타내며, 여기서 요철 하류근접부의 역류성분이 상대적으로 커서 재순환

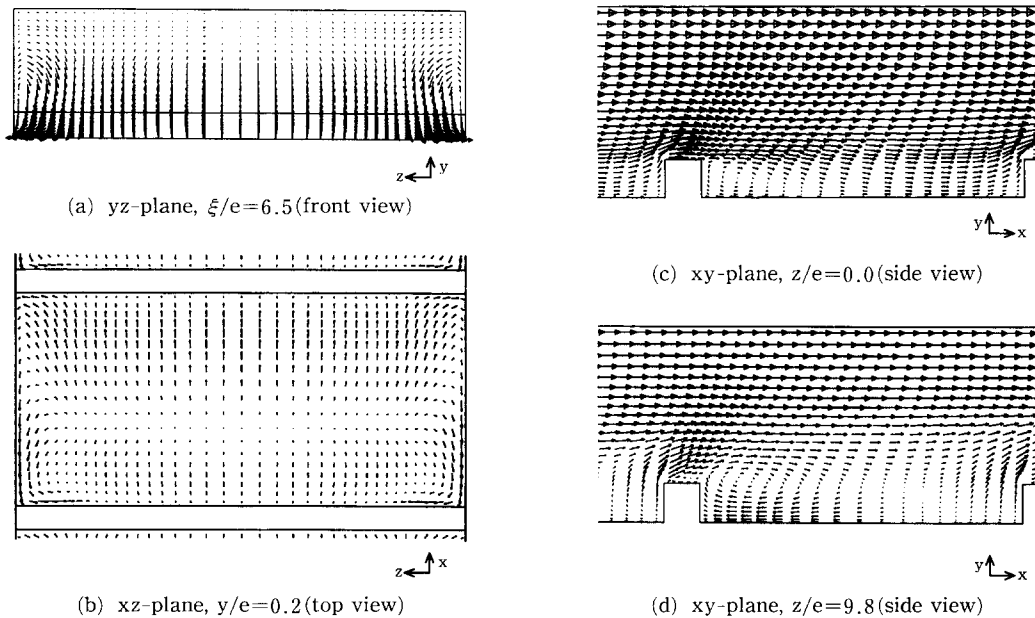


Fig. 2 Calculated velocity vectors at  $\alpha=90^\circ$ .

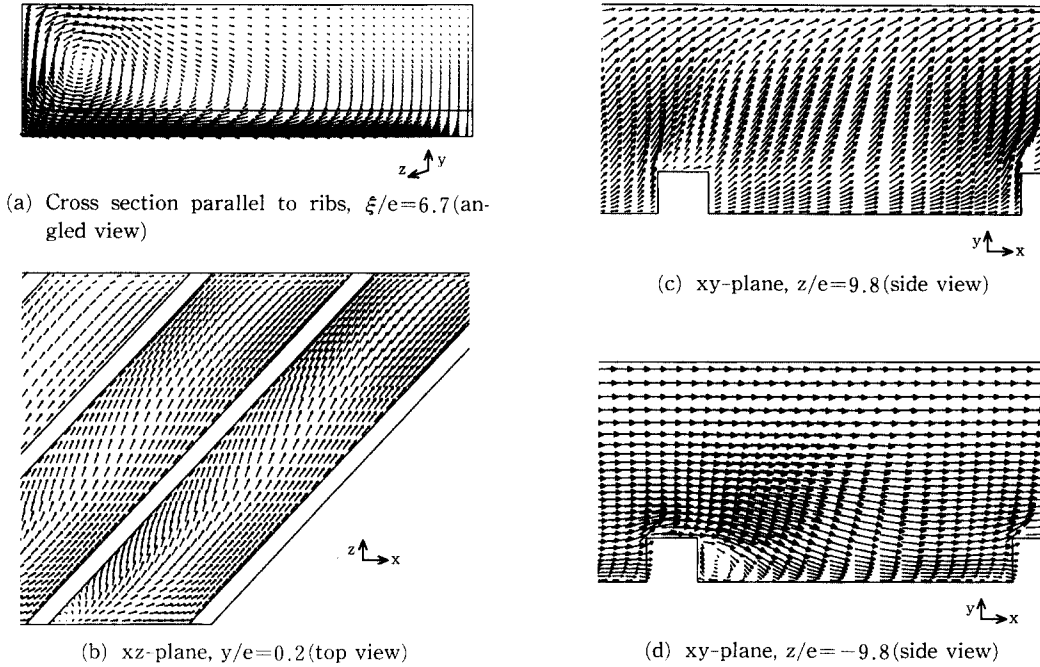


Fig. 3 Calculated velocity vectors at  $\alpha=45^\circ$ .

의 회전이 더욱 뚜렷이 나타나 요철 위를 지나는 주유동이 위로 밀리는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 요철의 충돌각이  $45^\circ$ 인 경우의 유동결과를 나타낸다. Fig. 3(a)는 상류에서 하류 방향으로 바라보고, 요철의 경사에 나란하게 자른 단면( $\xi/e=6.7$ )에서의 속도성분을 나타낸 것으로 이 면은 주유동 방향과  $45^\circ$  경사를 가진다. 여기서 왼쪽(+z영역)으로 치우친 하나의 큰 회전성분을 볼 수 있는데, 이것은 주유동 방향과 요철이  $45^\circ$  각도를 이루어 바닥면과 윗면에서 유동이 요철의 경사를 따라 횡방향으로 편향됨에 의한 것이다. 이 속도 성분이 바닥면에서는 덕트 왼쪽 영역(+z영역)의 상향류와 덕트 오른쪽 영역(-z영역)의 하향류를 발생시키고, 윗면에서는 덕트 왼쪽 영역의 하향류와 덕트 오른쪽 영역의 상향류를 발생시킨다. 따라서 덕트의 하반부에서는 시계방향, 덕트 상반부에서는 반시계방향인 한 쌍의 반대방향으로 회전(counter-rotating)하는 2차유동이 생성되며, 이것이 전달계수의 횡방향 분포가 불균일한 것의 주요 원인으로 작용한다. Fig. 3(b)는 바닥 근접 위치인  $y/e=0.2$ 에서의  $x, z$ 방향 속도성분을 나타내며 오른쪽(-z영역)에서 왼쪽(+z영역)으로의 비교적 큰 속도성분을 가진다. 여기서 바닥근처의 유동은 대

체로 요철과 나란하게 흐르며, 충돌각  $90^\circ$ 인 경우와 같은 주유동의 뚜렷한 재부착과 재순환은 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3(c), (d)는 측면벽 근접위치인  $z/e=9.8, -9.8$ 에서의  $xy$ 단면의 속도로 각각 상류에서 하류를 바라보고 좌측면(Fig. 3(c))과 우측면(Fig. 3(d))을 나타낸다. Fig. 3(a)에서 관찰되었듯이 덕트내 한 쌍의 큰 와동으로 인해 Fig. 3(c)에서는 바닥면으로부터 상향류가 나타나고, 이로 인해 요철근접 하류의 재순환이나 재부착은 관찰되지 않는다. Fig. 3(d)에서는 바닥면으로의 하향류 영향으로 주유동이 바닥면으로 유도되어 충돌각  $90^\circ$ 인 경우보다 상류쪽 요철에 더 가까운 영역에서 명확한 재부착이 일어나며 재순환 현상을 볼 수 있다. 이 같은 이유들로 전달계수의 주유동 방향분포가 횡방향 위치에 따라 점진적으로 변화할 것이 예상된다.

### 3.2 열/물질전달 실험결과

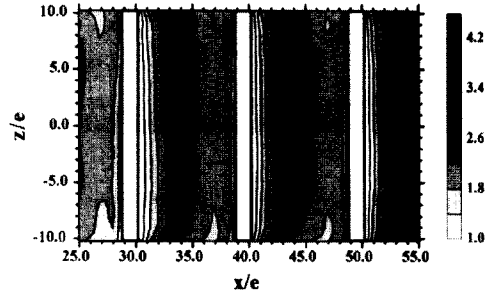
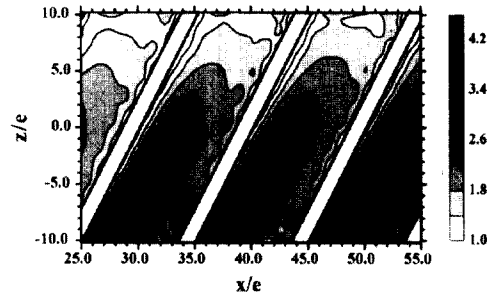
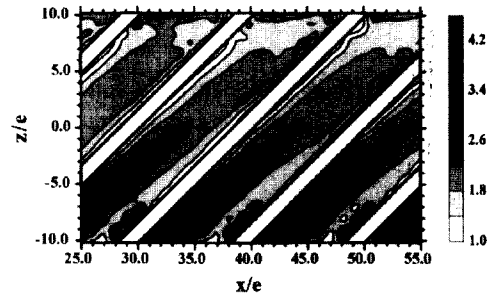
본 연구에서는 덕트내에 설치된 정사각 요철의 각도변화가 열/물질전달계수 변화에 미치는 영향을 살피기 위해 요철에 대한 주유동의 충돌각이  $33^\circ, 45^\circ, 63^\circ, 90^\circ$  네 가지 경우에 대하여, 동일한 요철의 설정과 열·유동조건하에 실험을 수행하였다.

기존의 실험들과 달리 국소적으로 많은 값들을 얻어 각 요철과 요철사이에서 주유동 방향으로 최대 42개, 횡방향으로는 27개로 총 1134개의 국소값을 확보하였다. 이로인해 열/물질전달계수의 주유동방향 및 요철과 나란한 방향 분포를 자세히 살필 수 있었으며 극대, 극소값의 위치를 파악하는 것이 용이하였다. 측정이 이루어진 영역은 Fig. 1에 표시된  $0 \leq x/e \leq 60$  ( $0 \leq x/D_h \leq 4.5$ ) 영역으로, 요철이 없는 실험에서는 주유동이 나프탈렌 코팅표면을 만나면서 나타나는 높은 열/물질전달계수가 급격한 감쇠를 보이다가  $x/e > 20$ 에서 거의 균일한 분포를 가졌다. 요철이 있는 경우 이러한 효과는 매우 적어 나프탈렌 코팅영역시작(가열시작)에 의한 높은 전달계수의 분포는 나프탈렌 코팅영역의 시작위치에 매우 근접한 영역에 국한된다.

측정에 있어서 좀 더 자세한 국소 전달계수분포를 살피기 위해  $40 \leq x/e \leq 55$  영역에서는 측정간격을 0.2e로 하였다. 이것은 평균 측정간격의 1/3 수준으로 측정간격이 매우 조밀해 다른 영역에서 표현되지 못한 국소 전달계수분포가 드러나기도 하였다.

본 실험과 같이 덕트의 윗면과 바닥면에 주유동방향과 각도를 이루는 요철을 나란하게 설치하는 경우, 경사진 요철에 의해 유도되는 2차 유동이 서로 반대방향으로 회전하는(counter-rotating) 한 쌍의 큰 와동을 이루어 서로 보강하게 되는데 이것이 두드러지게 관찰되는 전달계수 분포의 횡방향 구배의 가장 큰 원인이며 열/물질전달 향상에 주요하게 기여한다.

Fig. 4는 물질전달계수비( $Sh/Sh_0$ )가 동일한 곡선을 나타내며,  $Sh/Sh_0$  분포를 평면에 명도차이를 이용해서 제시한 것으로 요철의 각도변화에 의한 전달계수 분포의 변화를 잘 보여준다. Fig. 4(a)는 요철의 총돌각이  $90^\circ$ 인 경우로  $z/e=0$ 을 중심으로 대칭적인 형상을 이룬다. 요철과 요철사이의 중앙부와 인접 상류의 넓은 영역에서 높은 전달계수를 보여 요철이 없는 경우 보다 2배 이상의 향상을 나타내며, 비교적 균일하게 열/물질전달이 향상됨을 알 수 있다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 요철의 총돌각이 각각  $63^\circ$ 와  $45^\circ$ 인 경우로 경사진 요철에 의한 전달계수의 분포가 우측벽( $z/e=-10.2$ )에서 좌측벽( $z/e=10.2$ )으로 점점 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이는 전술한 수치계산에 의한 유동해석 결과의 Fig. 3(a), (b)에서 볼 수 있는 회전하는 2차유동

(a)  $\alpha = 90^\circ$ (b)  $\alpha = 63^\circ$ (c)  $\alpha = 45^\circ$ Fig. 4 Contour plots of  $Sh/Sh_0$ .

에 의한 것이다. 따라서 덕트 우측( $z < 0$ )의 넓은 영역에서  $Sh/Sh_0 = 3 \sim 6$  정도의 높은 열/물질전달 촉진을 보이다가 덕트 좌측벽( $z/e = 10.2$ )에 가까워짐에 따라  $Sh/Sh_0 = 1 \sim 2$ 의 비교적 낮은 전달계수의 촉진을 보인다.

Fig. 5와 Fig. 6은  $Sh/Sh_0$ 의 국소분포를 각각 주유동방향( $x/e$ ), 요철과 나란한 방향(일정한  $\xi$  위치)을 따라 나타내었다. 주유동방향 전달계수 분포는 전체 횡방향 범위인  $-10.2 \leq z/e \leq 10.2$  중에서  $z/e = -8.1, -3.0, 5.0, 9.2, 10.0$ 의 다섯 위치에서 각 총돌각에 따라 Fig. 5(a)  $90^\circ$ , (b)  $63^\circ$ , (c)  $45^\circ$ , (d)  $33^\circ$ 에 나타내었다. 특히  $z/e = 10.0$  위치는

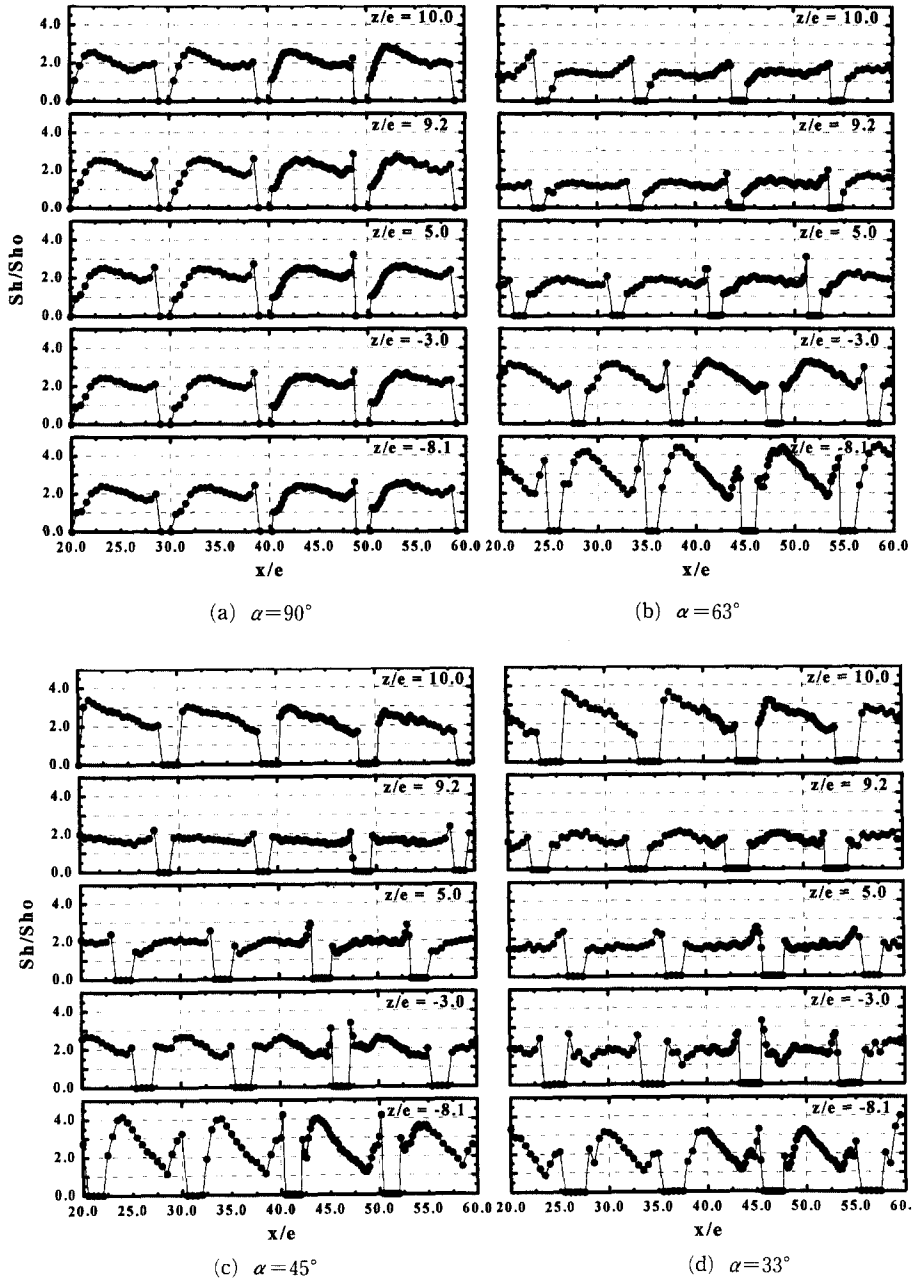


Fig. 5 Streamwise distributions of  $Sh/Sh_0$ .

덕트의 좌측벽으로부터  $0.2e$  떨어진 측정점으로 측  
면벽에 의한 3차원 유동의 영향이 잘 나타나는 곳  
이다. 우선 Fig. 5(a)는 충돌각이  $90^\circ$ 인 경우의 주  
유동방향 전달계수 분포로 Fig. 4(a)에서 보여지듯  
이 횡방향을 따라 전달계수 분포에 변화가 매우 적  
음을 알 수 있다. Fig. 2(b), (c)에서 나타나 있듯

이 유동이 상류요철을 지나며 요철사이  $\xi/e \approx 3.8$   
에서 주유동의 재부착이 일어나므로, 그 인접상류  
인  $\xi/e \approx 3.5$ 에서 첫 번째 극대값이 나타나고 그  
크기가 2.5~3.0에 이른다. 재부착했던 주유동이  
하류요철에 의해 상승하며 생성되는 재순환에 의한  
와류로 인해 요철에 근접한 요철상류부분에 두 번



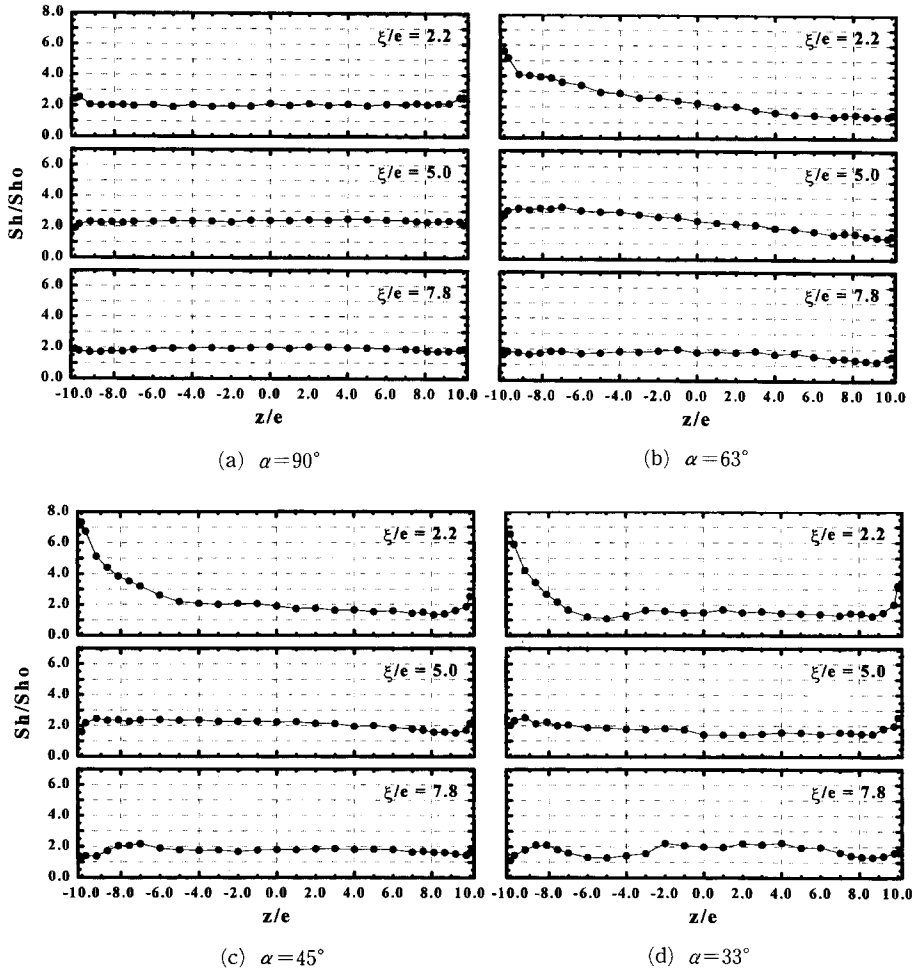


Fig. 6 Rib-direction distributions of  $Sh/Sh_0$ .

째 극대값이 나타나며, 횡방향의 가운데 영역에서 그 크기가 3.0~3.5로 첫 번째 극대값보다 다소 높다. 그러나 측면벽 근처( $z/e=10.0$ )에서는 첫 번째 극대값이 약간 상류로 이동하고 두 번째 극대값이 횡방향 중심영역에 비해 낮아진 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 총돌각이  $63^\circ$ 인 경우의 주유동방향 전달계수 분포로 횡방향 위치에 따라 점진적인 변화가 관찰된다. 덕트의 우측벽( $z/e=-10.2$ )에 가까운 곳인  $z/e=-8.1$ 에서는 요철에 의해 유도된 하향류에 의해 주유동의 재부착으로  $\xi/e \approx 3.5$  근방에서 높은 첫 번째 극대값이 나타나고  $-10.2 < z/e < -6$ 에서 그 값이  $Sh/Sh_0=4 \sim 6$ 에 이른다. 횡방향 위치가 우측벽( $z/e=-10.2$ )에서 멀어질수록 재부착에 의한 첫 번째 극대점의 크기가 감소해  $-5$

$< z/e < 2$ 에서는 그 값이  $Sh/Sh_0=2.5 \sim 4$ 로 작아진다.  $z/e \geq 5$ 에서는 첫 번째 극대점의 크기가  $Sh/Sh_0=2$  이하로 작아져 요철에 인접한 요철 상류부분의 와류에 의한 두 번째 극대값을 제외하고 전달계수가 거의 균일한 분포를 보인다. 요철에 인접한 요철 상류에 유도되는 와류에 의한 두 번째 극대값은 우측벽( $z/e=-10.2$ ) 근처에서 최대  $Sh/Sh_0 \approx 5$ 의 값을 가지다 횡방향으로 좌측벽에 가까워짐에 따라 감소해 최소  $Sh/Sh_0 \approx 2$ 에 이른다. 이러한 두 번째 극대값은  $z/e > 0$ 에서 첫 번째 극대값보다 큰 값을 나타낸다.

Fig. 5(c), (d)는 주유동의 총돌각이  $45^\circ$ ,  $33^\circ$ 로 비교적 총돌각이 작은 경우에 관한 주유동방향 전달계수 분포이다. 두 경우 모두 덕트의 우측벽( $z/e$

= -10.2) 부근 영역에서는 하향류의 영향으로 상류에서 박리된 주유동이 재부착하는 것과 그 후 다시 상승하며 재순환유동을 형성하는 것에 의해 Fig. 5(a), (b)의 경우와 같이 두 개의 극대값이 나타난다. 그러나 덕트의 45°의 경우엔  $z/e > 7.5$  영역에서, 33°의 경우엔  $z/e > -3$  영역에서 총돌각 90°, 63°의 경우와 같은 둥근 봉우리 모양의 첫 번째 극대값은 사라지고, 요철 상·하류 근접부에서의 돌출적인 극대값을 제외하고 비교적 균일한 전달계수 분포를 보인다. 또한 이 영역에서 대체로  $Sh/Sh_0 = 1.5 \sim 2$ 의 전달계수 향상을 보였다. 이와 같은 전달계수분포의 변화는 총돌각이 감소함에 따라 주유동의 재부착이 일어나는 곳이, 회전하는 2차유동에 의한 하향류가 있는 덕트의 우측벽( $z/e = -10.2$ ) 근방으로 제한되어지기 때문이다. 덕트의 좌측벽 근접부인  $z/e = 10.0$ 에서는 총돌각이 45°이하의 경우  $z/e$ 의 증가에 따라 감소하던 전달계수가 다시 증가하고, 주유동방향 전달계수 분포가 상류쪽 요철부근에서 최대값을 가지고 하류쪽 요철방향으로 갈수록 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 총돌각이 작을수록 더욱 뚜렷해 지는데, 이는 Fig. 3(a)에서 보여지듯이 요철이 바닥면의 유동을 편향시킴으로써 생성되는 와동의 회전 중심이 좌측벽( $z/e = 10.2$ )에 가까게 형성되어 바닥면의 공기가 좌측벽 부근에서 빠른 속도로 상승을 하고, 이에 따라 유도되는 좌측벽 아래부분의 2차와류에 의한 것으로 사료된다. 또한 총돌각이 45°, 33°의 경우 요철에 인접한 요철하류부에서 생성된 와류가 요철을 따라 덕트의 우측벽( $z/e = -10.2$ )에서 좌측벽( $z/e = 10.2$ ) 방향으로 이동하며 열/물질전달을 촉진시켜, 이 부분에서 전달계수의 주유동방향 극대값이 뚜렷하게 나타난다. 이 극대값은 좌측벽에 가까울수록 감소하게 된다.

Fig. 6은 측정영역의 주유동방향 후반부 요철사이에서 요철에 나란한( $\xi/e$ 이 일정) 열/물질전달계수 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 총돌각이 90°인 경우로 매우 균일한 전달계수 분포를 보인다. 단지 측면벽 인접부에서 평균과 차이가 적은 최대, 최소값이 나타나 요철사이 상류쪽 영역( $\xi/e = 2.2$ )은 최대값이, 중앙의 1/3 부분( $\xi/e = 5.0$ )은 최소값이 나타난다. 90°를 제외한 모든 총돌각의 경우에 Fig. 6(b)~(d)에서 볼 수 있듯이, 요철에 의해 발생된 2차유동에 의해 그림의 좌측영역(덕트의 우측영역)은 높은 전달계수를 가지고  $z/e$ 가 증

가함에 따라 감소하는 분포를 가진다. 이와 같은 감소추세는 총돌각이 감소할수록 심화되어 Fig. 6(d)의 총돌각 33°의 경우에  $\xi/e = 2.2$ 에서는 전달계수가  $z/e = -10.2$  부근의  $Sh/Sh_0 \approx 6.5$ 로부터 급격하게 감소하여  $z/e > -7$ 에서는  $Sh/Sh_0 = 1 \sim 2$ 에 머무른다. 하류 요철에 가까워질수록 전달계수 분포는 좌우 비대칭이 완화되어 비교적 균일한 분포를 이룬다. 이러한 좌우 비대칭 분포의 완화는 총돌각이 작을수록 급격하게 일어나서, 총돌각이 63°인 경우 요철사이 주유동방향 중앙부까지 두드러진 좌우 비대칭 전달계수 분포가 관찰되는 반면 총돌각 45°, 33°의 경우 비대칭 분포가 요철사이 상류부분에만 국한되는 것을 Fig. 6(b)~(d)에서 볼 수 있다. 또한 총돌각이 작아질수록 좌측벽 부근(그림의 우측)에서 전달계수의 증가가 촉진되어  $\xi/e = 2.2$ 에서 총돌각 33°의 경우 그 값이  $Sh/Sh_0 \approx 3.3$ 에 이른다.

위의 결과와 같이 열/물질전달계수는 불균일 분포를 가지며 그 원인을 영역별로 살펴보면 다음과 같다. 전달계수가 높은 영역은 (1) 덕트내 주유동이 요철에 의해 박리된 후 바닥에 재부착되는, 요철사이의 주유동방향 중앙부 인접상류 영역, (2) 주유동방향과 비스듬히 각도를 이루는 요철은 바닥면과 윗면 부근의 유동을 요철을 따라 편향시키는데, 이로 인해 유도되는 한 쌍의 회전하는 2차유동에 의한 하향류가 바닥면에 충돌하는 덕트의 오른쪽 영역( $z < 0$ 영역), (3) 주유동방향과 각도를 이루는 요철에 인접한 요철 상·하류부근에 재순환 유동 혹은 이에 의해 유도된 와류가 요철의 경사면을 따라 이동하는 영역이다. 전달계수가 낮은 영역은 (1) 요철 하류 부근에 재순환으로 인해 압력이 낮고 속도가 작은 영역, (2) 경사진 요철이 발생시킨 한 쌍의 와동에 의해 바닥면으로부터 상향류가 발

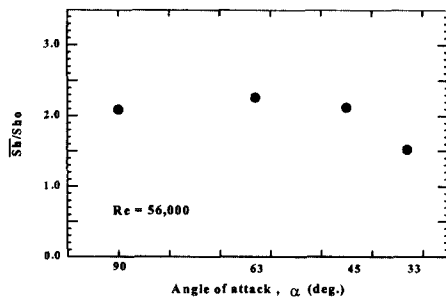


Fig. 7 Averaged Sherwood number ratios,  $\overline{Sh}/Sh_0$ .

생하는 덕트의 왼쪽 영역( $z > 0$  영역), (3) 요철과 요철사이에 재부착했던 유동이 다시 하류의 요철에 의해 상승하며 재순환 유동을 형성하는 영역으로 나누어 볼 수 있다.

전달계수의 측정영역 평균에 대한 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 총돌각이  $63^\circ$ 인 경우  $\overline{Sh}/Sh_0 \approx 2.3$ 으로 가장 큰 열/물질전달 촉진을 보였으며, 총돌각  $33^\circ$ 인 경우  $\overline{Sh}/Sh_0 \approx 1.5$ 로 가장 적은 전달 촉진을 나타냈다. 총돌각  $33^\circ$ 인 경우를 제외하고  $45^\circ \sim 90^\circ$ 의 모든 총돌각에서 전달계수의 평균값  $\overline{Sh}/Sh_0$ 이 2.1이상으로 큰 차이를 보이지 않았다.

#### 4. 결 론

덕트내 열/물질전달을 촉진하기 위하여 덕트의 바닥면과 윗면에 서로 평행하게 설치된 요철의 총돌각이  $90^\circ \sim 33^\circ$  범위에서 변화할 때 유동특성과 열/물질전달에 미치는 영향에 대하여 수치계산적, 실험적으로 연구를 진행하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 주유동 방향과 경사진 각을 이루는 요철에 의해 덕트내 유동은 요철을 따라 편향됨으로써 한 쌍의 서로 반대로 회전하는 2차유동을 형성하고, 그 회전의 중심이 덕트의 왼쪽 영역( $z > 0$ )에 치우쳐 나타났다.

(2) 총돌각이 작아지면 요철사이 주유동의 재부착이 잘 일어나지 않지만, 회전하는 2차유동의 하향류에 의해 덕트의 우측벽( $z/e = -10.2$ ) 근방 영역에서는 재부착 현상이 나타났다.

(3) 주유동과 경사진 요철에 의해 형성된 2차유동이 열/물질전달계수를 횡방향을 따라 크게 변화시키는 원인이 되어, 이 2차 유동의 하향류 영역은 최대  $Sh/Sh_0 = 7 \sim 8$ 에 이르는 매우 높은 전달계수 값을 나타냈고, 상향류 영역은 반대로 낮은 전달계수 분포를 보였다.

(4) 요철의 총돌각이 클수록 요철에서 박리된 주유동의 재부착에 의한 열/물질전달 향상효과가 두드러져 극대값이 나타나고,  $90^\circ$ 의 경우  $\xi/e = 3.5 \sim 4.0$ 에서 재부착이 일어났다.

(5) 총돌각이 작으면 요철의 인접 상·하류 영역에서 발생된 와류가 요철을 따라 이동하는 것에 의해 열/물질전달이 촉진되어 전달계수의 극대값이 나타났다.

(6) 평균적인 전달계수에 있어서 총돌각이  $63^\circ$ 인 경우 최대,  $33^\circ$ 인 경우 최소 나타났으며,  $45^\circ \sim 90^\circ$ 의 총돌각에서 전달계수의 평균값  $\overline{Sh}/Sh_0$ 이 2.1이상으로 큰 차이를 보이지 않았다.

#### 후 기

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비(과제번호: 01-E-0830)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 실험을 도와 준 함진기, 오세관, 정용은군에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., 1971, "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness," *International J. of Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 601~617
- (2) Gee, D. L. and Webb, R. L., 1980, "Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib-Roughened Tubes," *International J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 1127~1136
- (3) Han, J. C., 1988, "Heat Transfer and Friction Characteristics in Rectangular Channels with Rib Turbulators," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 321~328
- (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," *International J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 9, pp. 1619~1630
- (5) Han, J. C., Zhang, Y. M. and Lee, C. P., 1991, "Augmented Heat Transfer in Square Channels With Parallel, Crossed, and V-Shaped Angled Ribs," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 590~596
- (6) Taslim, M. E., Bondi, L. A. and Kercher, D. M., 1991, "An Experimental Investigation of Heat Transfer in an Orthogonally Rotating Channel Roughened with 45 deg Criss-Cross Ribs on Two Opposite Walls," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 346~353
- (7) Han, J. C. and Park, J. S., 1988, "Developing heat transfer in rectangular channels with rib

- turbulators," *International J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 1, pp. 183~195
- (8) Han, J. C., Zhang, Y. M. and Lee, C. P., 1991, "Influence of Surface Heat Flux Ratio on Heat Transfer Augmentation in Square Channels with Parallel, Crossed and V-Shaped Angled Ribs," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 872~880
- (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) 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. of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 233~241
- (11) Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. of Chem. Thermodynam.*, 7, pp. 1173~1176
- (12) 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
- (13) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, Jan., pp. 3~8.