

# 이차 냉각 유로를 가진 회전덕트에서 열/물질전달 특성 (II)

- 덕트 종횡비에 따른 영향 -

김경민\*·김윤영\*\*·이동호\*·조형희†  
(2004년 1월 20일 접수, 2004년 3월 12일 심사완료)

## Detailed Measurement of Heat/Mass Transfer in a Rotating Two-Pass Duct (II)

- Effects of Duct Aspect Ratio -

Kyung Min Kim, Yun Young Kim, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

**Key Words:** Rotating Duct(회전덕트), Rib Turbulator(요철), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Dean Vortex(딘와류), Coriolis Force(코리올리력), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법)

### Abstract

Measurements of local heat/mass transfer coefficients in rotating two-pass ducts are presented. Ducts of three different aspect ratios ( $W/H$ ), 0.5, 1.0 and 2.0, are employed with a fixed hydraulic diameter ( $D_h$ ) of 26.7 mm. 90°-rib turbulators are attached on the leading and trailing walls symmetrically. The rib height-to-hydraulic diameter ratio ( $e/D_h$ ) is 0.056, and the rib pitch-to-rib height ratio ( $p/e$ ) is 10. The experimental conditions are the same as those of the previous part of the study. As the rib height-to-duct height ratio ( $e/H$ ) increases, the core flow is more disturbed and accelerated in the midsections of ribs. Therefore, the obtained data show higher heat/mass transfer in the higher aspect ratio duct. Dean vortices also augment heat/mass transfer in the turn and in the upstream region of the second pass. However, the effect becomes less significant for the higher aspect ratio because the surface area increases in the present geometric condition. The effect of rotation produces heat/mass transfer discrepancy.

#### 기호설명

<p>AR : 덕트 종횡비, <math>W/H</math></p> <p><math>D_h</math> : 수력직경</p> <p><math>D_{naph}</math> : 물질확산계수(나프탈렌-공기)</p> <p><math>e</math> : 요철 높이</p> <p><math>H</math> : 덕트 높이</p> <p><math>h</math> : 열전달계수</p>	<p><math>h_m</math> : 물질전달계수</p> <p><math>p</math> : 요철간 거리</p> <p><math>R</math> : 유로 최대 반경</p> <p>Re : Reynolds 수, <math>D_h u_b / \nu</math></p> <p>Ro : Rotation 수, <math>D_h \Omega / u_b</math></p> <p>Sc : Schmidt 수, <math>\nu / D</math></p> <p>Sh : Sherwood 수, <math>h_m D_h / D_{naph}</math></p> <p><math>Sh_0</math> : 요철이 없는 원형관에서의 Sh 수</p> <p><math>\overline{Sh}_p</math> : 피치 평균 Sherwood 수</p> <p><math>\overline{Sh}_{ch}</math> : 유로 평균 Sherwood 수</p> <p><math>u_b</math> : 평균 속도</p> <p><math>W</math> : 유로의 폭</p> <p><math>w</math> : 요철의 폭</p>
--	--

\* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

- $x$  : 주유동방향 거리
- $y$  : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리
- $z$  : 덕트 바닥면으로부터의 높이

그리스문자

- $\mu$  : 점성계수
- $\nu$  : 동점성계수
- $\Omega$  : 회전각속도

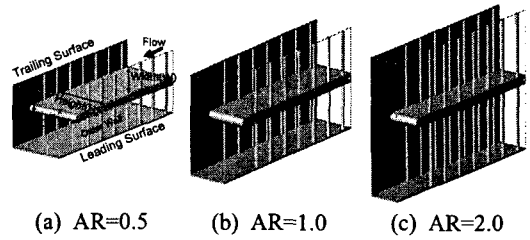


Fig. 1 Geometry of the ducts

1. 서론

가스터빈의 효율을 향상시키기 위하여 터빈입구온도(TET; Turbine Entry Temperature)의 증대는 필수적이다. 최근 가스터빈 엔진의 TIT는 1500℃ 이상으로, 금속의 허용한계온도를 상회하는 수준이다. 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드를 보호하기 위하여 각종 냉각기법에 대한 연구가 오랜 기간에 걸쳐 이루어져왔다. 그 결과, 충돌제트냉각(impingement cooling), 막냉각(film cooling), 내부관냉각(internal passage cooling) 등과 같은 다양한 기술들이 개발 및 발전되어 블레이드 냉각에 응용되고 있다. 그 중, 내부관 냉각기술은 터빈의 압축기로부터 나오는 냉각유체를 블레이드 내부의 유로에 주입하여 강제대류가 일어나게 함으로써 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하는 방법이다.

내부관의 냉각성능 및 효율은 여러 가지 인자에 의하여 결정지어진다. 일반적으로 내부관의 열전달 성능은 그 요철의 형상, 내부관의 형상과 작동조건에 따라 크게 좌우된다. 이러한 설계변수들의 최적 조건을 찾기 위해서 많은 연구들이 수행되고 있다. 이러한 설계 변수 중 내부관 형상에 따른 연구가 많이 이뤄지고 있는데, 그 가운데 덕트의 종횡비에 따라 내부 유동구조가 달라져 열전달에 영향을 미치게 되므로, 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

Park 등<sup>(1)</sup>과 Han 등<sup>(2,3)</sup>은 정지한 덕트에서 90°, 60°, 45°, 30°의 각도를 갖는 요철과 다양한 레이놀즈 수에서 종횡비(AR,  $W/H$ )를 0.25~4.0까지 변화시켜가며 내부유로에서 일어나는 열전달을 측정하였다. 이를 통해 정지한 덕트 내에서 90°요철은 종횡비가 증가할수록 열전달이 증가하나 다른 각도를 가진 요철에서는 종횡비가 증가할수록 열전달이 감소한다는 것을 밝혀내었다. Agarwall

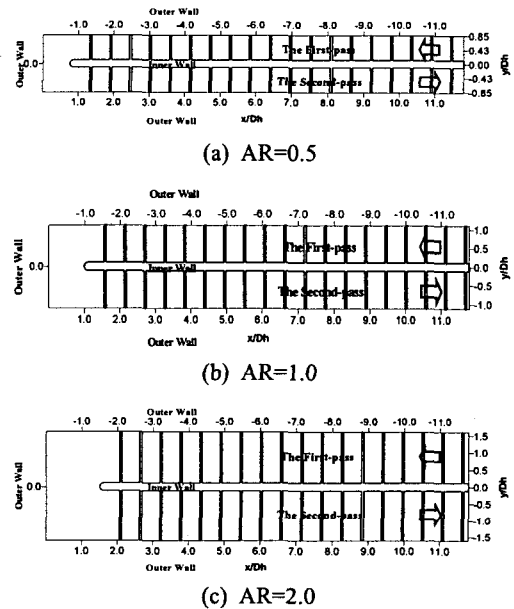


Fig. 2 The coordinate system

등<sup>(4)</sup>은 종횡비가 작은 덕트(AR=0.25)에서 회전수와 레이놀즈 수를 변화시켜가며 그 영향을 알아 보았으며, Sparrow와 Tao<sup>(5)</sup>는 종횡비가 큰 덕트(AR=6.4, 12.8)에서 한 면에 요철을 설치하였을 때 나타나는 영향을 연구하였다. Cardone 등<sup>(6)</sup>과 Astarita 등<sup>(7)</sup>은 이차유로를 가진 정지한 매끈한 덕트에서 종횡비를 1.0~5.0까지 변화시키며, TLC와 열전달장치를 이용하여 곡관부에서 나타나는 특성과 열전달 계수를 측정하여, 종횡비가 클수록 곡관부를 지난 후 2차유로 외벽에서 열전달이 높게 나타난다는 것을 보여주었다. 그리고 Murata 등<sup>(8-10)</sup>은 종횡비를 0.25~4.0까지 변화시켜가며 매끈한 덕트와 90°와 60°요철을 설치한 단일 유로에서 덕트가 회전을 할 때 나타나는 유동과 열전달 특성을 수치해석을 통해 나타냈다.

기존의 연구들은 정지한 덕트에서 실험을 하거

나, 평균적인 열전달 향상에 중점을 두고 실험을 수행하여 회전수 변화에 따른 국소적인 열/물질전달계수 분포를 알 수 있는 자료는 부족한 상태이다. 본 연구에서는 90°요철이 설치된 덕트에 대해서 덕트의 종횡비와 회전수를 변화시켜가며 유로 내부의 국소 열/물질전달 특성에 대해서 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치에 설치되는 덕트의 형상을 나타낸다. 덕트는 종횡비( $W/H$ )가 0.5, 1.0, 2.0인 사각형 형태이고, 180°의 곡관부로 연결된 2중의 유로로 되어있으며 아크릴로 제작되었다. 이 덕트들의 수력직경( $D_h$ )은 26.7 mm, 내벽의 두께는  $0.225D_h$ 로 일정하다. 내벽 끝단(tip)은 반원형으로 제작되었다. 곡관부의 90°꺾어진 부분에서 내벽의 끝과 곡관부 외벽과의 간격은  $1W$ 가 되도록 하였다. 따라서 이 간격은 덕트의 종횡비가 0.5인 경우  $0.749D_h$ , 1.0인 경우  $1.0D_h$ 이며 2.0인 경우  $1.498D_h$ 이다. 요철은 곡관부를 제외한 유로의 내부에 설치되었으며, 이 때 요철의 단면은  $1.5\text{ mm}(e) \times 1.5\text{ mm}(w)$ 의 정사각형이다. 요철높이 대 수력직경 비( $e/D_h$ )는 0.056, 요철사이거리 대 요철높이 비( $p/e$ )는 10.0이며, 요철의 충돌각은 90°로 하였다. 요철 배열은 Fig. 1에 나타난 것처럼 전·후연면에 서로 평행하게 설치되어 있다. 덕트의 요철면 바닥에는 나프탈렌이 코팅되어 있으며, 이는 열전달에서의 가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작지점까지 거리는 약  $6D_h$  정도로 여유를 두어, 요철에 의한 이차유동과 함께 완전발달한 난류유동이 형성되도록 하였다.

본 연구에서 사용된 작동유체는 공기이고, 수력직경기준 레이놀즈 수는 10,000으로 고정시켰으며, 회전수  $Ro$ 를 0.0에서 0.2까지 0.05씩 증가시키며 실험을 수행하였다. 좌표계는 Fig. 2에 나타난 것과 같으며, 측정 영역은 주유동 방향으로는 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 곳까지  $-11.8 \leq x/D_h \leq 11.8$ 이고, 횡방향으로는 1차유로의 외벽부터 2차유로의 외벽까지 거리가, 종횡비가 0.5인 덕트의 경우는  $-0.86 \leq y/D_h \leq 0.86$ 이며, 종횡비가 1.0인 덕트의 경우는  $-1.11 \leq y/D_h \leq 1.11$ 이고, 종횡비가 2.0인 덕트의 경우는  $-1.61 \leq y/D_h \leq 1.61$ 이다.

### 2.2 실험결과 처리

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였다. 나프탈렌이 코팅되어있는 면의 높이를 송풍 전후로 측정하여 승화된 깊이를 구한다. 이로부터 무차원 물질전달 계수  $Sh$ 를 계산한다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = h_m D_h / D_{naph} \quad (1)$$

이 때,  $h_m$ 은 국소 물질전달 계수이며  $D_{naph}$ 는 공기중에서의 나프탈렌 확산계수이다. 물성치는 Goldstein과 Cho<sup>(11)</sup>에 의하여 제시된 값을 이용하였다. 본 실험에서  $Sh$  수의 불확실성은 Kline과 McClintock<sup>(12)</sup>의 방법에 의하여 95% 신뢰수준에서 7.76%의 값을 갖는다.

본 연구에서는 물질전달 실험결과를 무차원 물질전달 계수의 비( $Sh/Sh_0$ )로 나타내었다. 이때  $Sh_0$ 는 McAdams<sup>(13)</sup>에 의해 제시된 원형관에서의 완전발달 열전달계수는 열전달과 물질전달의 상사성에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$Sh_0 = 0.023Re^{0.8}Sc^{0.4} \quad (2)$$

또한, 한 피치( $p$ ) 내의 각 지점에서 얻어진  $Sh$  값들을 해당 면적에 대하여 평균한 결과를  $\overline{Sh}_p$ 와 각각의 유로에서의  $Sh$ 값들을 면적 평균한 값의 결과를  $\overline{Sh}_{ch}$ 로 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 정지한 덕트에서의 열전달 특성

Fig. 3은 덕트가 정지한 경우( $Ro=0.0$ ), 종횡비 변화에 따른 국소적인 열/물질전달 분포를 나타내는 그림이다. 정지한 경우에 전·후연면의 열전달 차이가 오차범위 내이기 때문에 한 면만 제시하였다. 모든 경우, 90°요철에 의해 재부착이 일어나 요철 사이에서 반복적으로 높은 열/물질전달이 일어난다. 또한 곡관부에서 형성된 دن와류로 인해 곡관부 외벽  $x/D_h=0$  근처와 2차유로 외벽에서 높은 열/물질전달 분포가 보이고, 이후 하류로 진행하면서 점차 분포가 작아지며 소멸하는 것을 볼 수 있다.

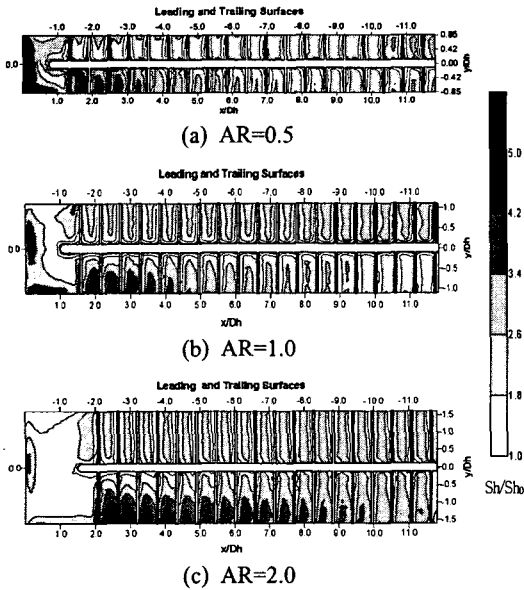


Fig. 3 Local Sherwood number ratio distributions for AR=0.5, 1.0, and 2.0 at Ro=0.0

1차유로에서는 종횡비가 증가함에 따라, 요철 사이에서의 열전달이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 덕트의 수력직경은 일정하므로 종횡비가 커질수록 요철높이 대 덕트높이 비( $e/H$ )가 증가하여 국소적으로 유동이 가속되기 때문이다. 곡관부에서는 종횡비가 커짐에 따라 거리가 길어지게 되므로 دن와류가 외벽 가까이에서 생성되어 외벽에 높은 열전달 영역이 나타난다. 2차유로 입구에서는 دن와류에 의해 나타나는 외벽 근처의 높은 열/물질전달 분포가 종횡비가 클수록 외벽에 가깝게 위치하며 오래 지속되는 것을 볼 수 있다. 이는 종횡비가 클수록 요철높이 대 유로높이 비( $e/H$ )가 증가하여 유동이 가속되고, 유로의 폭( $W$ )이 커질수록 박리의 영향이 커져 دن와류가 외벽에 가깝게 생성되고 دن와류의 강도가 커지기 때문이다.

Fig. 4는 덕트가 정지한 경우, 요철 사이에서의 평균 물질전달 계수비 분포를 나타내는 그림이며, 정지한 덕트에서의 Chandra와 Han<sup>(14)</sup>의 결과와 비교하여 나타냈다. Chandra와 Han<sup>(14)</sup>의 경우 정사각 덕트에서 분리벽의 두께는  $0.25D_h$ , 요철의 크기는  $e/D_h=0.063$ 이며,  $Re=30,000$ 에서 실험을 하였기 때문에 약간의 값의 차이는 있지만 전체적으로 본 연구의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 1차유로에서는 유동이 완전 발달되면서 일

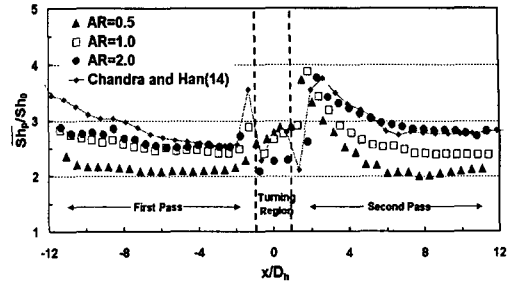


Fig. 4 Pitch-averaged Sherwood number ratios for AR=0.5, 1.0, and 2.0 at Ro=0.0

정한 값을 갖으며, 종횡비가 클수록 높은 열/물질전달 계수를 갖는다. 그러나 곡관부에서는 종횡비가 클수록 열/물질전달 계수가 작아진다. 이는 دن와류로 인한 높은 열전달 부분이 곡관부 전·후연면 외벽에서 나타나는데, 종횡비가 클수록 دن와류로 인해 열전달이 향상된 영역이 곡관부 내에서의 상대적인 면적이 작기 때문이다. 2차유로에서는 1차유로와 같이 종횡비가 커질수록 열/물질전달 값이 증가하였고 종횡비에 따른 값 또한 증가하였다. 이는 앞서 국소적인 열/물질전달 분포에 따른 영향에서 언급했듯이 종횡비가 증가함에 따라 요철 높이 대 덕트 높이 비( $e/H$ )가 증가하여 유로 내에서의 유동이 가속되고, دن와류의 강도가 강해졌기 때문이다.

### 3.2 회전하는 덕트에서의 열전달 특성

Fig. 5는 덕트의 회전 수( $Ro$ )가  $0.10(≅210rpm)$  일 때, 종횡비 변화에 따른 국소적인 열/물질전달 분포를 나타내는 그림이다. 덕트가 회전할 때는 회전에 의해 코리올리력이 생기게 되어 정지한 경우와 다른 유동 및 열전달 특성이 나타난다. 1차유로에서는 전·후연면의 열/물질전달 차이가 나타나고, 곡관부에서는 비대칭적인 와류가 발생하여 전·후연면에 서로 다른 열/물질전달 분포가 보인다. 2차유로에서는 곡관부에서 발생한 와류로 인해 전연면은 외벽에서 높은 열/물질전달 분포가 보이는 반면 후연면은 내벽에서 높은 열/물질전달 분포가 보인다.

덕트의 종횡비 변화에 따른 효과를 살펴보면, 1차유로에서는 전·후연면 모두 종횡비가 0.5일 때 열/물질전달 분포의 값들이 가장 낮고 종횡비 1.0과 2.0은 비슷하며, 2차유로에서는 종횡비가

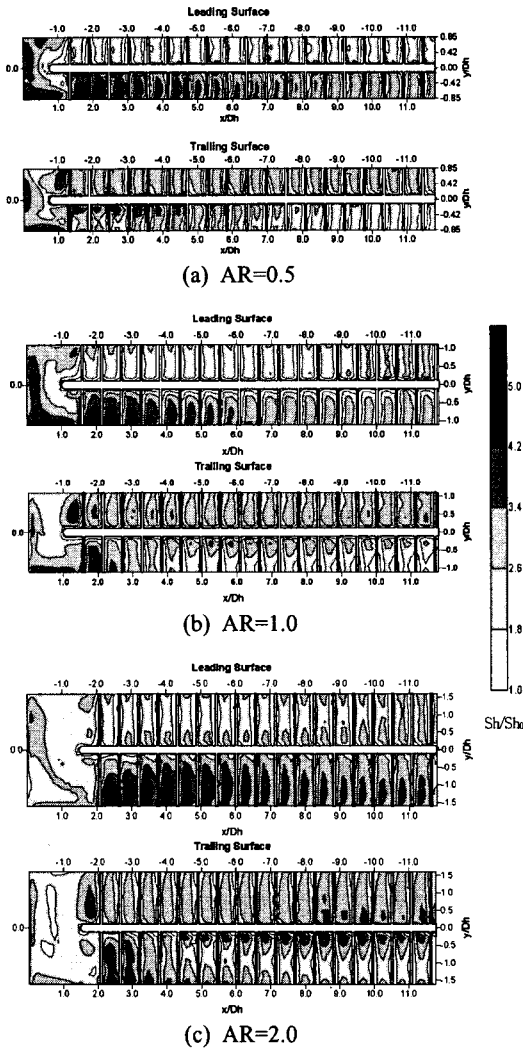


Fig. 5 Local Sherwood number ratio distributions for AR=0.5, 1.0, and 2.0 at Ro=0.1

커짐에 따라 전·후연면 모두 열/물질전달 분포의 값들이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 곡관부에서는 회전과 곡관부 영향이 중횡비가 클수록 작은 것을 알 수 있는데, 이는 곡관부 내벽과 외벽 사이의 거리가 길어짐에 따라 이차와류가 외벽에서 생성되기 때문이다. 중횡비 변화에 따른 가장 큰 변화는 2차유로 상류에서 나타난다. 2차유로 전연면에서는 중횡비가 작은 경우(AR=0.5), 외벽과 내벽 사이에서 높은 열/물질전달 분포가 나타났으나, 중횡비가 큰 경우(AR=2.0)에는 외벽 가까이에서 높은 열/물질전달 분포가 나타났다. 또한 2차유로 후연면에서는 곡관부 직후의 외벽

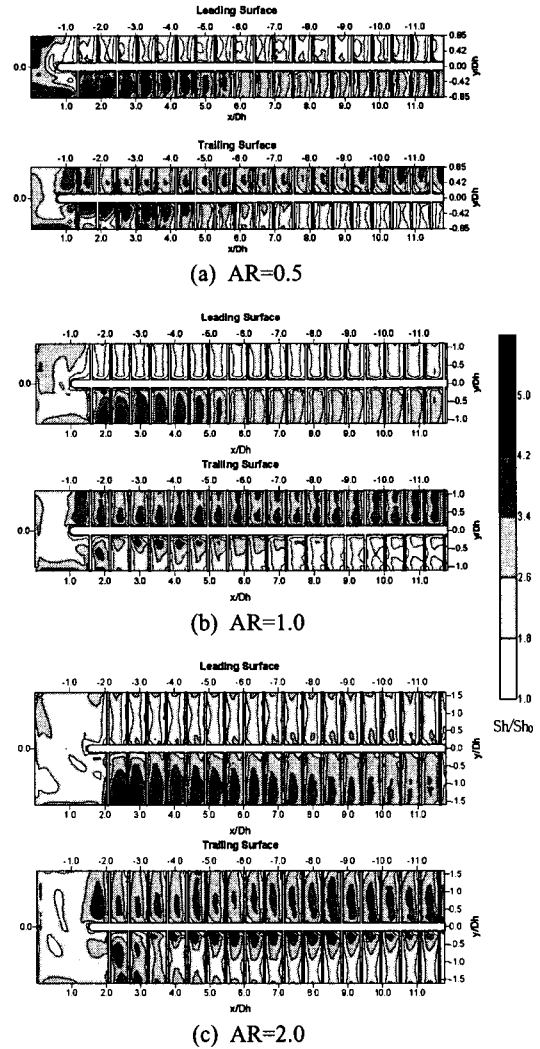


Fig. 6 Local Sherwood number ratio distributions for AR=0.5, 1.0, and 2.0 at Ro=0.2

쪽에 높은 열/물질전달 계수가 나타나지만, 내벽 끝단에 의한 박리에 의한 영향이 소멸되면서 차츰 내벽에서 열전달이 높아지게 된다. 이때, 중횡비가 작을 때는 유로의 폭(W)이 좁아 박리의 영향도 작아지게 되어, 후연면 내벽의 높은 열/물질전달 분포가 2차유로 입구 가까이에서 일어나게 된다. 반면에 중횡비가 클 때는 박리의 영향이 커져, 2차유로 하류에서 생기게 된다. 또한 중횡비가 커짐에 따라 요철 높이 대 덕트 높이 비 ( $\epsilon/H$ )가 증가하여 유동이 가속되어, 곡관부와 덕트의 회전에 의해 발생한 이차와류의 강도가 강화되어 열/물질전달 계수가 크며 이러한 분포가 오래

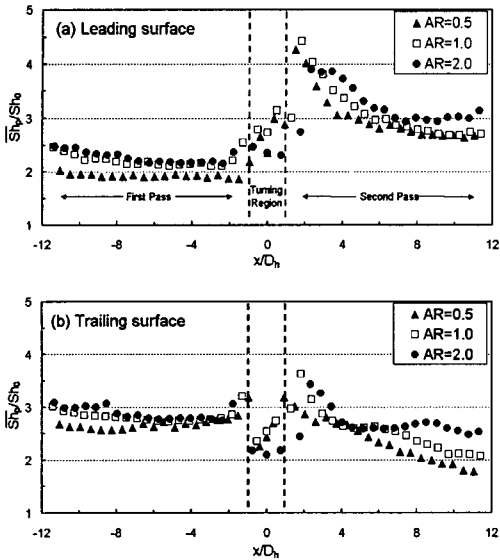


Fig. 7 Pitch-averaged Sherwood number ratios for AR=0.5, 1.0, and 2.0 at Ro=0.10

지속된다.

Fig. 6은 덕트의 회전 수(Ro)가 0.20( $\cong 420\text{rpm}$ )일 때, 종횡비 변화에 따른 국소적인 열/물질전달 분포를 나타내는 그림이다. Fig. 5와 비교하였을 때, 회전수가 증가함에 따라 1차유로와 2차유로는 전·후연면의 열/물질전달 계수의 차이가 커졌다. 그리고 2차유로 후연면의 내벽쪽에서 나타나는 높은 열/물질전달 분포가 회전수가 작은 경우에 비해 2차유로 상류쪽, 즉 2차유로 입구영역에서 나타났다. 이는 곡관부를 지나 2차유로로 유입되는 유동이 회전수가 낮을 때는 박리의 의한 대항류의 영향이 크나, 회전수가 높을 때는 코리올리력의 영향이 커지면서 대항류의 영향이 줄어들기 때문이다. 앞서 Fig. 5에서 언급했던 2차유로 후연면 내벽에서의 높은 열/물질전달 분포가 덕트가 종횡비가 커질수록 이차유동의 강도가 강해지고 유로의 단면적 감소로 인해 유동의 속도가 증가하여 2차유로 하류에서 생기는 현상이 명확해진다.

Fig. 7은 덕트가 회전수 0.10인 경우, 요철사이에서의 평균 물질전달 계수비 분포를 나타내는 그림이다. Fig. 7에서는 앞서 Fig. 5에서 설명한 종횡비에 따른 영향이 명확하게 나타난다. 회전수 0.10인 경우 1차유로에서는 후연면의 열전달이 높고, 요철높이 대 덕트높이 비( $e/H$ )가 클수록

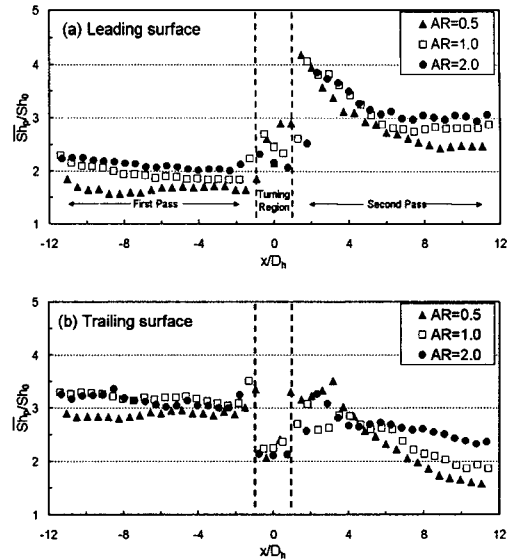
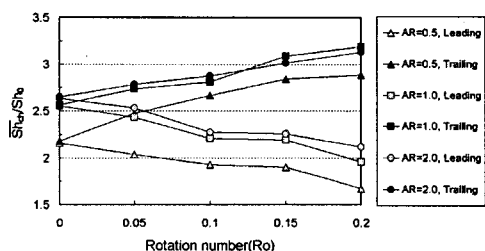


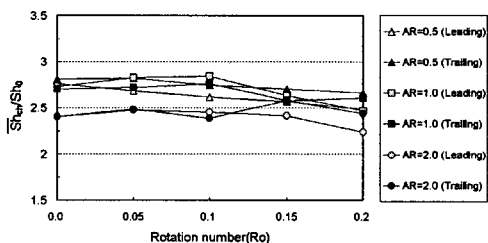
Fig. 8 Pitch-averaged Sherwood number ratios for AR=0.5, 1.0, and 2.0 at Ro=0.20

유동이 가속되어 전·후연면 모두 종횡비가 0.5인 경우가 열/물질전달 계수가 가장 작으며, 종횡비가 2.0인 경우 열/물질전달 계수가 제일 높은 것으로 나타났다. 곡관부에서는 종횡비가 2.0인 경우가 열전달이 가장 작고 0.5와 1.0은 비슷한 것으로 나타났다. 2차유로에서는 전체적으로 전연면의 열전달이 높고, 종횡비가 증가할수록 요철에 의한 가속과 외벽근처에서의 강한 이차유동 형성으로 1차유로와 달리 열전달 또한 증가한다. 곡관부와 회전으로 발생한 이차유동과 곡관부 내벽에 의한 박리유동에 의해 전연면은  $x/D_h=6.0$  전·후와 후연면은  $x/D_h=5.0$  전·후에서 열전달 분포가 달라진다.

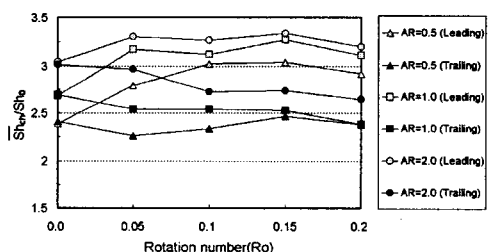
Fig. 8은 덕트가 회전수 0.20인 경우, 요철사이에서의 평균 물질전달 계수비 분포를 나타내는 그림이다. Fig. 8에서는 앞서 Fig. 6에서 설명한 종횡비와 회전수에 따른 영향이 명확하게 나타난다. 종횡비가 2.0인 경우, 종횡비 변화에 따른 열전달 특성은 종횡비 1.0인 경우와 유사하다. 그러나 후연면 2차유로 상류( $x/D_h \leq 5.0$ )에서는 곡관부 끝단에서의 박리유동의 크기가 회전수가 증가함에 따라 작아지고, 종횡비가 작을수록 박리유동에 의한 영향이 작아지기 때문에, 2차유로 하류( $x/D_h \geq 5.0$ )에서 나타나는 열전달 분포, 즉 종횡비가 커짐에 따라 열전달이 증가하는 경향과 다른



(a) First Pass



(b) Turning Region



(c) Second Pass

Fig. 9 Channel-averaged Sherwood number ratios for AR=0,5, 1.0, and 2.0

것을 알 수 있다.

회전수가 증가하는 경우 Fig. 7과 Fig. 8을 비교해보면, 1차유로에서는 코리올리력이 증가하여 전·후연면의 차이가 커지게 되고, 곡관부에서는 곡관부에 의한 영향이 커서 회전수 증가에 따른 영향은 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 또한 2차유로 상류에서는 회전수가 증가할수록 코리올리력이 커져 곡관부 끝단에서 박리된 유동의 영향이 작아지게 되어, 후연면의 열전달은 감소한다. 2차유로 하류 후연면에서의 열전달은 코리올리력에 의해 전연면으로 편향되어, 2차유로 상류와 하류에서의 열전달 분포가 달라지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 회전수가 변함에 따라, 종횡비가 0.5, 1.0, 2.0인 덕트의 전·후연면에서 유로 면적으로

평균한 열/물질전달 값을 각각의 유로에 대해서 나타낸 그림이다. 1차유로에서는 종횡비가 커질수록 평균 열/물질전달 계수가 증가하지만 그 차이는 점차 줄어든다. 또한 회전수가 증가할수록 코리올리력에 의한 영향으로 전·후연면의 차이가 커지며, 종횡비가 작을수록 회전수 증가에 따른 전·후연면의 열전달 차이는 커진다. 이는 종횡비가 작을수록 덕트 높이(H)가 높아져 회전에 의한 유동의 편향이 커지기 때문이다.

곡관부에서는 종횡비가 0.5와 1.0의 열전달은 비슷하고 종횡비가 2.0일 때는 값이 가장 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 종횡비가 큰 경우 단와류가 영향을 주는 면적이 상대적으로 작기 때문이다. 회전수가 높아짐에 따라 곡관부 전연면의 평균 열/물질전달 계수가 감소하는 데, 이는 1차유로에서 곡관부로 유입되는 유동이 코리올리력의 영향을 받아 후연면으로 편향되었기 때문이다.

2차유로에서는 종횡비가 커짐에 따라 평균 열/물질전달이 증가하는 것으로 나타났다. 한 예로 종횡비가 2.0인 경우가 종횡비가 0.5인 경우보다 약 10~25% 높은 것을 알 수 있다. 하지만, 회전수의 증가에 따른 전·후연면 간의 열/물질전달 계수 차이는 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 2차유로에서 회전수의 영향보다 곡관부의 영향이 지배적이기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 덕트의 종횡비 및 회전수 변화에 따른 덕트내에서의 열/물질전달 특성을 고찰하였으며, 국소 물질전달계수와 평균 물질전달계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 전체적으로 종횡비가 증가함에 따라, 90°요철에 의해 유로의 단면적이 감소하게 되고 이로 인해 유동이 가속되어 요철사이에서 열전달이 증가하게 된다. 1차유로에서는 종횡비가 증가할수록 덕트의 높이가 다르기 때문에 회전에 따른 영향이 달라진다. 종횡비가 작을수록 유동이 후연면으로 편향되는 정도가 커지게 되어 후연면의 열전달 증가율이 높아진다.

(2) 곡관부에서는 종횡비가 작을수록 곡관부 내벽 끝단과 외벽 사이가 좁아지기 때문에 단와류가 미치는 영향이 상대적으로 커져서 종횡비가 작을수록 열전달이 높아진다. 덕트의 회전에 따

른 열전달 분포는 비슷하나 종횡비가 클수록 와류에 의해 영향을 주는 영역이 상대적으로 감소하기 때문에 전체적인 열전달은 감소한다.

(3) 2차유로에서는 종횡비가 증가함에 따라 오철높이 대 덕트높이 비( $e/H$ )가 증가하고 외벽에서의 단와류의 강도가 커지게 되어 전체적인 열전달 분포는 증가하고, 덕트가 회전할 때 종횡비가 증가함에 따라 곡관부 내벽 끝단에 의한 박리유동이 커지게 되어, 후연면 내벽의 높은 열전달 분포가 2차유로 하류에서 관측된다.

(4) 회전수가 증가할수록 1차유로에서 코리올리력이 후연면으로 편향되어 전·후연면의 열전달차가 커지지만, 곡관부에서는 회전수의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 2차유로에서는 회전수가 증가하여도 전·후연면의 차는 거의 비슷하게 나타나는데, 이는 곡관부의 영향이 크기 때문이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Park, J. S., Han, J. C., Huang, Y. and Ou, S., 1992, "Heat Transfer Performance Comparisons of Five Different Rectangular Channels with Parallel Angled Ribs," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 35, No. 11, pp. 2891~2903.
- (2) 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," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 91~98.
- (3) Han, J. C., Park, J. S., Huang, Y. and Ou, S., 1992, "Heat Transfer Performance Comparisons of Five Different Rectangular Channels with Parallel Angled Ribs," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 11, pp. 2891~2903.
- (4) Agarwal, P., Achaya, S. and Nikitopoulos, D. E., 2003, "Heat/ Mass Transfer in 1:4 Rectangular Passages with Rotation," *ASME Paper No. GT2003-38615*.
- (5) Sparrow, E. M. and Tao, W. Q., 1983, "Enhanced Heat Transfer in a Flat Rectangular Duct with Streamwise Periodic Disturbances at One Principal Wall," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 851~861.
- (6) Cardone, G., Astarita, T. and Carlomagno, G. M., 1995, "Surface Flow Visualization Around a 180 Deg Turn Channel for Different Aspect Ratios," *In Flow Visualization VII*, Crowder J. ed., Begell House, pp. 977~982.
- (7) Astarita, T., Cardone, G. and Carlomagno, G. M., 1998, "Average Heat Transfer Measurements Near a Sharp 180 Degree Turn Channel for Different Aspect Ratios," *IMECHE Conference Transactions*, Mechanical Engineering Publications, pp. 137~146.
- (8) Murata, A. and Moschizuki, S., 1999, "Effect of Cross-Sectional Aspect Ratio on Turbulent Heat Transfer in an Orthogonally Rotating Rectangular Smooth Duct," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3830~3814.
- (9) Murata, A. and Moschizuki, S., 2000, "Large Eddy Simulation with a Dynamic Subgrid-Scale Model of Turbulent Heat Transfer in an Orthogonally Rotating Rectangular Duct with Transverse Rib Turbulators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 1243~1259.
- (10) Murata, A. and Moschizuki, S., 2003, "Effect of Cross-Sectional Aspect Ratio on Turbulent Heat Transfer in an Orthogonally Rotating Rectangular Duct with Angled Rib Turbulators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3119~3133.
- (11) 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.
- (12) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (13) McAdams, W. H., 1942, "Heat Transmission, 2nd Edition," *McGraw-Hill*, New York.
- (14) Chandra, P. R. and Han, J. C., 1989, "Pressure Drop and Mass Transfer in Two-Pass Ribbed Channels," *J. Thermophysics*, Vol. 3, No. 3, pp. 315~320.