

< 논문 >

곡관부를 가지는 내부 냉각유로에서 회전수 변화에 따른  
열전달 및 유동 특성 (I)  
- 엇갈린 요철배열 덕트 -

김경민\* · 김윤영\*\* · 이동호\*\*\* · 조형희†  
(2005년 1월 27일 접수, 2005년 4월 26일 심사완료)

Effects of Rotation Speed on Heat Transfer and Flow in a Coolant  
Passage with Turning Region ( I )  
- Cross Ribbed Duct -

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

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

Abstract

The present study investigates heat/mass transfer and flow characteristics in a ribbed rotating passage with turning region. The duct has an aspect ratio ( $W/H$ ) of 0.5 and a hydraulic diameter ( $D_h$ ) of 26.67 mm. Rib turbulators are attached in the cross arrangement on the leading and trailing surfaces of the passage. The ribs have a rectangular cross section of 2 mm ( $e$ )  $\times$  3 mm ( $w$ ) and an attack angle of 70°. The pitch-to-rib height ratio ( $p/e$ ) is 7.5, and the rib height-to-hydraulic diameter ratio ( $e/D_h$ ) is 0.075. The rotation number ranges from 0.0 to 0.20 while the Reynolds number is constant at 10,000. To verify the heat/mass transfer augmentation, internal flow structures are calculated for the same conditions using a commercial code FLUENT 6.1. The heat transfer data of the smooth duct for various Ro numbers agree well with not only the McAdams correlation but also the previous studies. The cross-rib turbulators significantly enhance heat/mass transfer in the passage by disturbing the main flow near the surfaces and generating one asymmetric cell of secondary flow skewing along the ribs. Because the secondary flow is induced in the first-pass and turning region, heat/mass transfer discrepancy is observed in the second-pass even for the stationary case. When the passage rotates, heat/mass transfer and flow phenomena change. Especially, the effect of rotation is more dominant than the effect of the ribs at the higher rotation number in the upstream of the second-pass.

기호설명

$D_h$  : 수력직경  
 $D_{naph}$  : 물질확산계수(나프탈렌-공기)  
 $e$  : 요철 높이

Gr : Grashof 수,  $r\Omega^2\beta D_h^4 q / (\lambda \nu^2)$   
 $H$  : 덕트 높이  
 $h$  : 열전달계수  
 $h_m$  : 물질전달계수  
 $p$  : 요철간 거리  
Pr : Prandtl 수,  $\mu C_p / k$   
 $R$  : 유로 최대 반경  
Ra : Rayleigh 수, GrPr  
Re : Reynolds 수,  $D_h u_b / \nu$   
Ro : Rotation 수,  $D_h \Omega / u_b$   
Sc : Schmidt 수,  $\nu / D$

\* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 연세대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 회원, 연세대학교 기계공학과  
† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

- $Sh$  : Sherwood 수,  $h_m D_h / D_{naph}$   
 $Sh_0$  : 요철이 없는 원형관에서의  $Sh$  수  
 $\overline{Sh}_p$  : 피치 평균 Sherwood 수  
 $\overline{Sh}_{ch}$  : 유로 평균 Sherwood 수  
 $u_b$  : 평균 속도  
 $W$  : 유로의 폭  
 $w$  : 요철의 폭  
 $x$  : 주유동방향 거리  
 $y$  : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리  
 $z$  : 덕트 바닥면으로부터의 높이

#### 그리스문자

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

## 1. 서론

최근 고효율 가스터빈엔진의 개발과 함께 고온의 가스터빈요소 냉각기술에 대한 중요성이 증가하고 있다. 금속의 허용한계온도를 상회하는 터빈 입구온도로부터 블레이드를 보호하기 위하여 각종 냉각기술들이 개발 및 발전되어 응용되고 있다. 그 중, 내부관 냉각기술은 터빈의 압축기로부터 나오는 냉각유체를 블레이드 내부에 유로에 주입하여 강제대류가 일어나게 함으로써 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하는 방법이다.

내부관의 냉각성능 및 효율은 여러 가지 인자에 의하여 결정되는데, 실제 블레이드는 두개 이상의 유로로 구성되어 있으며 회전하는 환경으로 인해 복잡한 유동구조 및 열전달 특성을 갖는다. 따라서 보다 높은 성능을 갖는 터빈 블레이드 냉각유로의 설계를 위하여 다중유로의 영향, 회전이 미치는 영향들을 이해하는 것이 필수적이다.

요철에 의한 내부관에서의 열전달 및 유동 특성에 대한 기본적인 특성 고찰을 위해 매끈한 회전덕트 내에서의 다중유로 연구가 여러 가지 조건에 대해 이루어지고 있다. Hwang 등<sup>(1)</sup>은 다중유로에서 단와류에 의한 열전달 특성 및 회전과 밀도차로 인해 발생하는 원심부력의 효과에 대해 연구하였다. Iacovides 등<sup>(2)</sup>은 회전덕트 내에서의 내부유동을 LDV(laser Doppler velocimetry)를 이용하여 유로 내부 및 곡관부에서 형성되는 와류의

구조를 각각의 위치에서 관찰하였으며, 이와 더불어 TLC(thermochromic liquid crystal)를 이용한 열전달 실험결과를 제시하였다. Liou 등<sup>(3)</sup>은 회전하는 매끈한 덕트 내부를 LDV와 TLC를 이용하여 곡관부에서의 유동 및 열전달 특성에 대한 연구를 수행하였다. Murata 등<sup>(4)</sup>은 회전하는 매끈한 덕트의 종횡비 변화에 관한 열전달 특성을 밝혀내었다. 그리고 Won 등<sup>(5)</sup> 및 Kim 등<sup>(6)</sup>은 가스터빈 내부유로를 모사하여, FLUENT를 이용한 수치해석을 통해 곡관부를 지나는 유동구조를 고찰하고, 회전하는 덕트 내부의 전·후연면간 열전달 차이를 물질전달법을 통해 밝혀내었다. Al-Qahtani 등<sup>(7)</sup>은 수치해석을 통해 회전하는 덕트 내에서의 유동구조 및 열전달을 해석하여 실험결과와 비교하였다.

실제의 경우, 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하기 위해 난류촉진제인 요철을 설치한 내부유로가 많이 사용하고 있다. 이에 대한 열전달 및 유동 특성을 고찰하기 위해 다양한 요철의 영향, 곡관부에 의한 영향, 덕트의 회전 등 복합적인 영향에 대해 많이 연구되었다. Mochizuki 등<sup>(8)</sup> 및 Murata 등<sup>(9)</sup>은 히터와 열전대를 이용하여, 가열되는 내부관이 회전하였을 때 이차유로를 갖는 매끈한 덕트에서와 요철이 설치되었을 때 발생하는 전·후연면간 열전달 특성을 고찰하였고, Azad 등<sup>(10)</sup> 및 Fu 등<sup>(11)</sup>은 45°의 각도를 갖는 덕트 내 요철의 배열 및 회전수 변화에 따른 평균적인 열전달을 통해 특성을 밝혀내었다. Rathjen 등<sup>(12)</sup>은 물질전달법을 이용하여 45°의 각도 요철을 설치하였을 때의 국소적인 열전달 분포를 구하였다. 또한 Cho 등<sup>(13)</sup>은 나프탈렌 승화법을 이용해서 종횡비(aspect ratio,  $W/H$ )가 0.5인 덕트에서, 충돌각이 70°인 요철의 다양한 배열에 따른 열전달 특성을 연구하였다.

기존의 연구들은 평균적인 열전달 특성에 중점을 두고 실험을 수행하거나 낮은 회전수에서의 유동을 측정하였다. 그러나 평균적인 열전달 실험은 열전달 구배를 통해 발생하는 열응력(thermal stress)과 열점(hot spot)을 예측하기 힘들며, 실제 가스터빈은 높은 회전수에서 작동하고 있기 때문에 회전수 변화에 따른 열전달 및 유동 특성에 관한 자료가 필요하다. 본 연구에서는 회전수 변화 및 요철 배열에 따른 특성을 고찰하기 위해 종횡비가 0.5인 덕트에서, 매끈한 덕트와 충돌각이 70°인 요철을 엇갈리게 설치한 덕트에 대해서 회전수를 변화시켜가며, 나프탈렌 승화법을 통해

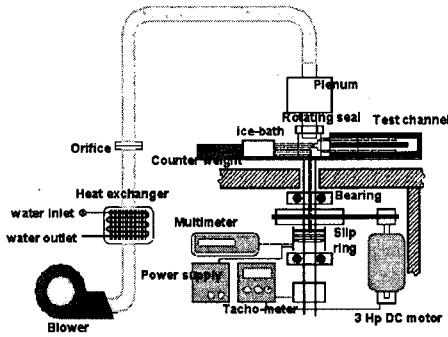


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

국소적인 열/물질전달 분포를 예측하고 수치해석을 통해 내부의 유동구조를 밝혀내었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 회전덕트 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 송풍부와 회전부 그리고 측정부의 3가지로 나누어진다. 실험장치의 자세한 구성은 Won 등<sup>(5)</sup> 및 Cho 등<sup>(13)</sup>에 제시되어 있다.

Fig. 2는 실험에 사용되는 덕트의 형상을 나타낸다. 180°의 곡관부로 연결된 2중의 유로로 되어 있으며, 덕트의 단면은 20 mm(*W*) × 40 mm(*H*)로 0.5의 종횡비(aspect ratio, *W/H*)를 갖는 직사각형 형태이고, 아크릴로 제작되었다. 덕트의 수력직경(*D<sub>h</sub>*)은 26.67 mm이며, 수력직경대비 최대회전반경(*R/D<sub>h</sub>*)은 21.63의 값을 갖는다. 분리벽의 두께는 0.375*D<sub>h</sub>*이며, 분리벽의 끝단(tip)은 반원형으로 제작되었다. 곡관부의 90°격어진 부분에서 분리벽의 끝과 곡관부 외벽과의 간격(*W*)은 1*D<sub>h</sub>*가 되도록 하였다. 요철이 설치된 덕트의 경우 곡관부를 제외한 유로의 내부에 요철을 설치하였으며, 이 때 요철의 단면은 2 mm(*e*) × 3 mm(*w*)의 직사각형이다. 요철높이 대 수력직경 비(*e/D<sub>h</sub>*)는 0.075, 요철사이거리 대 요철 높이 비(*p/e*)는 7.5이며, 요철의 충돌각은 70°로 하였다. 요철 배열은 Fig. 2에 나타난 것처럼 전후연면에 서로 엇갈리게 설치되어 있다. 덕트의 요철면 바닥에는 나프탈렌이 코팅되어 있으며, 이는 열전달에서의 가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작지점까지 거리는 약 6*D<sub>h</sub>* 정도로 여유를 두어, 요철에 의한 이차유동과 함께 완전 발달한 난류유동이 형성되도록 하였다.

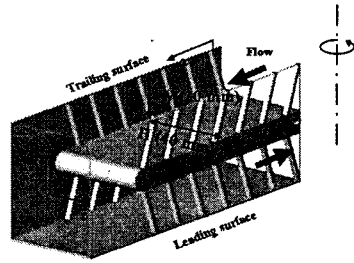
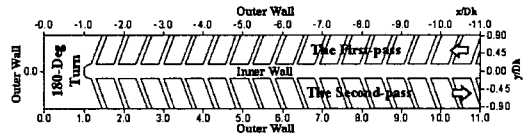
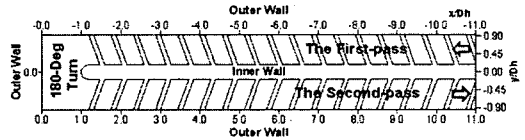


Fig. 2 Rib arrangement and geometry of ducts



(a) Leading surface



(b) Trailing surface

Fig. 3 The coordinate system

본 연구에서는 수력직경기준 *Re*는 10,000으로 고정시키고, 회전수 *Ro*를 0.0에서 0.20까지 0.05씩 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 좌표계는 Fig. 3에 나타난 것과 같으며, 측정 영역은 주유동 방향으로 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 곳까지  $-11.0 \leq x/D_h \leq 11.0$ 이며, 횡방향으로는 1차유로의 외벽부터 2차유로의 외벽까지 거리인  $-0.94 \leq y/D_h \leq 0.94$ 에 해당된다.

### 2.2 실험결과 처리

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리 과정은 Won 등<sup>(5)</sup> 및 Cho 등<sup>(13)</sup>에 제시되어 있다.

나프탈렌이 코팅되어있는 면의 높이를 송풍 전후로 측정하여 국소 물질전달 계수를 구하고, 이로부터 무차원 물질전달 계수인 Sherwood 수를 구할 수 있다.

$$Sh = h_m D_h / D_{naph} \tag{1}$$

이 때, *D<sub>naph</sub>*는 공기중에서의 나프탈렌 확산계수이다. 물성치는 Goldstein과 Cho<sup>(14)</sup>에 의하여 제

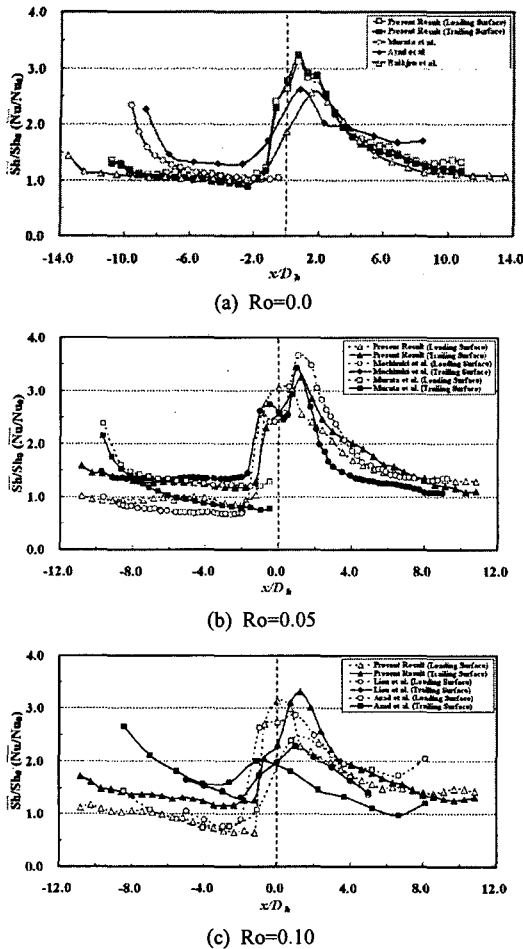


Fig. 4 Pitch-averaged Sherwood number ratios ( $\overline{Sh}_p/\overline{Sh}_0$ ) for the estimation of centrifugal buoyancy force effect

시된 값을 이용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 Kline과 McClintock<sup>(15)</sup>의 방법에 의하여 95% 신뢰수준에서 7.76%의 값을 갖는다.

본 연구에서는 물질전달 실험결과를 무차원 물질전달 계수의 비( $\overline{Sh}/\overline{Sh}_0$ )로 나타내었다. 이때  $\overline{Sh}_0$ 는 McAdams<sup>(16)</sup>에 의해 제시된 원형관에서의 완전 발달 열전달계수는 열전달과 물질전달의 상사성에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{Sh}_0 = 0.023Re^{0.8}Sc^{0.4} \quad (2)$$

또한, 한 피치 내의 각 지점에서 얻어진 Sh값들을 해당 면적에 대하여 평균한 결과를  $\overline{Sh}_p$ 와

Table 1 Experimental conditions of investigations referred for data validation

Authors	Exp. Method	Aspect Ratio	Heating Condition	Reynolds Number
Present Study	Mass Transfer	0.5	Two-side	10,000
Murata et al.(8)	Heat Transfer	1.0	Four-side	15,000
Azad et al.(9)	Heat Transfer	2.0	Four-side	5,000
Rathjen et al.(10)	Mass Transfer	1.0	Four-side	50,000

Table 2 Experimental conditions of investigations referred for estimation of centrifugal buoyancy force effect

Parameters	Mochizuki et al.(7)	Murata et al.(8)	Azad et al.(9)	Liou et al.(2)
Rotation Number	0.062	0.052	0.11	0.10
Reynolds Number	15,000	15,000	10,000	10,000
Aspect Ratio	0.5	1.0	2.0	1.0
Buoyancy Parameter	$Ra=1.58 \times 10^8$ $-1.62 \times 10^8$	$Ra=0.88 \times 10^8$	$\Delta\rho/\rho=0.11$	N/A
Heating Condition	Four-side	Four-side	Four-side	Two-side

각각의 유로에서의 Sh값들을 면적 평균한 값의 결과를  $\overline{Sh}_{ch}$ 로 나타내었다.

### 2.3 수치계산

곡관부를 가진 회전하는 덕트 내에서의 유동특성을 정성적으로 고찰하기 위해 FLUENT 6.1을 이용하여 엇갈린 배열의 요철을 가진 덕트 내부의 유동구조를 계산을 수행하였다. 수치해석에 사용된 기본 형상은 실험에 사용된 덕트와 동일한 것으로 회전축의 중심에서 덕트 입구유동은 균일한 속도분포를 갖도록 적용하였다. 또한 벽면가열 조건을 생략하고 운동량 방정식의 계산만을 수행하여 덕트의 회전과 곡관부의 영향에 의한 유동장의 해석을 수행하였다. 계산모델은 3차원 비압축성 유동의 정상상태로 가정하였고, 덕트의 회전과 곡관부에 의한 순환 이차유동과 박리 난류유동을 비교적 잘 예측하는 RNG k-ε 난류모델(re-normalization group k-ε)을 적용하였으며, 벽면에서는 non-equilibrium wall function을 적용하였다. 전체 격자의 수는 약 1,500,000개로 격자수가 수치해석 결과에 영향을 주지 않도록 선택 하였으

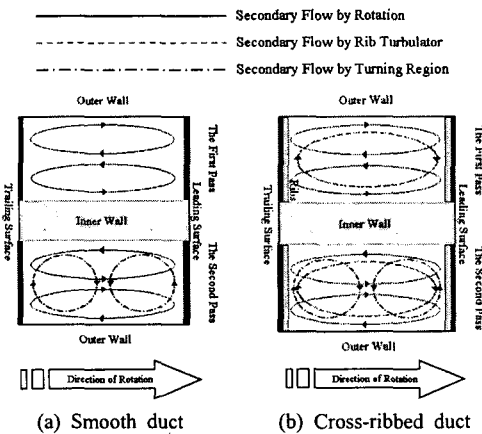


Fig. 5 Schematic diagram of secondary flow pattern in a two-pass duct

며 벽 및 요철 근처에 조밀하게 주었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 매끈한 덕트 내 열/물질전달 분포

Fig. 4는 요철이 없는 매끈한 덕트 내 열/물질 전달계수 비를 유로의 각  $x/D_h$  지점에 해당하는 피치 한 구간의 영역에서 면적 평균한 값을 정지한 경우[Fig. 4(a)]와 회전하는 경우[Fig. 4(b), (c)]에 대해서 나타낸 그림이다. 회전수에 따라 Liou 등<sup>(3)</sup> 및 Mochizuki 등,<sup>(8)</sup> Murata 등,<sup>(9)</sup> Azad 등,<sup>(10)</sup> Rathjen 등<sup>(12)</sup>의 결과와 비교하였으며, 각각의 실험 방법 및 조건, 변수들은 Table 1과 Table 2에 제시되어 있다.

Fig. 4(a)와 같이 정지한 경우, 1차유로에서는 완전 발달된 값인  $Nu/Nu_0=1.0$ 에 근사함으로써 Murata 등<sup>(9)</sup>의 실험결과와 잘 일치하였으나, 전체적으로 Azad 등<sup>(10)</sup> 및 Rathjen 등<sup>(12)</sup>과는 열전달 값의 차이가 나타났다. 이는 곡관부의 종횡비 및 Re 수의 차이로 인해 곡관부에서 생성되는 딘와류(Dean vortex)의 강도 및 크기가 다르기 때문이다.

Fig. 4(b), (c)는 매끈한 덕트에서의 회전수 변화에 따른 전·후연면의 열전달 계수 분포를 나타내는 그림이다. 여기서, Murata 등<sup>(9)</sup>의 덕트는 1차유로에서의 유동이 중심축으로의 유입유동이므로 전·후연면의 경향이 반대로 나타났다. 전체적으로 Kim 등<sup>(6)</sup>에 의해 언급되었듯이 회전수가 증가함에 따라 전·후연면의 열전달 차이가 증가하는 것

을 볼 수 있다. Fig. 4(b)의 Mochizuki 등<sup>(8)</sup> 및 Murata 등<sup>(9)</sup>의 1차유로에서의 결과에서 볼 수 있듯이 회전수가 작을 때에는 열전달 차이가 크지 않다. 하지만, Fig. 4(c)의 Liou 등<sup>(2)</sup> 및 Azad 등<sup>(9)</sup>의 결과와 비교하였을 때는 Hwang 등<sup>(1)</sup>에 의해 발표된 원심부력(centrifugal buoyancy force)의 효과로, 전연면의 열전달을 감소하고 후연면의 열전달은 증가하는 경향이 나타났다. 원심부력은 회전에 의한 코리올리력(Coriolis force)의 편향된 속도 분포와 온도분포로 인해 생성된다. 나프탈렌 승화법은 이 원심부력을 제외한 덕트 내에서의 열전달을 측정하였기 때문에, 열전달방법과 다소 열전달 차이는 있으나, 원심부력의 효과를 제외한 실험을 통해 회전에 의한 영향을 분석하여 연구할 수 있는 장점이 있다.

#### 3.2 엇갈린 요철 배열에 따른 유동구조

곡관부를 갖는 이중유로 내에서 발생하는 이차유동은 크게 꺾여진 곡관부를 지나가면서 유체가 받는 원심력으로 인한 딘와류, 덕트의 회전에 의하여 발생하는 코리올리력으로 인한 이차유동과 요철에 의한 재순환과 재부착 유동 및 이차유동을 꼽을 수 있으며, 각각에 의해 발생하는 이차유동 형태는 Fig. 5에 제시되어 있다. 이러한 이차유동이 복합적으로 작용하여 회전하는 덕트 내에서는 복잡한 이차유동이 발생한다.

Fig. 6은 회전수가 증가함에 따라 엇갈린 요철 배열에 따른 이중유로 내에서의 유동을 수치해석한 결과이다. 이 결과는 곡관부 입구( $x/D_h=-1.225$ ), 곡관부 중앙( $y/D_h=0.0$ ), 2차유로 입구( $x/D_h=1.225$ ), 2차유로 상류( $x/D_h=1.787$ ) 그리고 2차유로 하류( $x/D_h=10.775$ )에서 발생하는 이차유동의 구조를 나타내고 있다.

정지 덕트의 경우[Fig. 6(a)], 1차유로에서는 Azad 등<sup>(10)</sup> 및 Cho 등<sup>(13)</sup>에 의해 밝혀졌듯이 엇갈린 요철로 인해 Fig. 5(b)의 점선과 같이 요철을 따라 유동이 진행하면서 하나의 큰 이차유동을 형성한다. 이처럼 비대칭적인 이차유동을 형성한 주유동은 곡관부 입구에서 나타나듯이 곡관부로 인해 내벽과 전연면 부근으로 유동이 편향되게 된다. 이로 인해 상대적으로 압력이 낮은 후연면 방향으로 관성력을 크게 받아 후연면의 이차유동이 큰 비대칭적인 딘와류를 형성하며, 이는 2차유로 입구까지 유지된다. 그리고 곡관부를 지나온

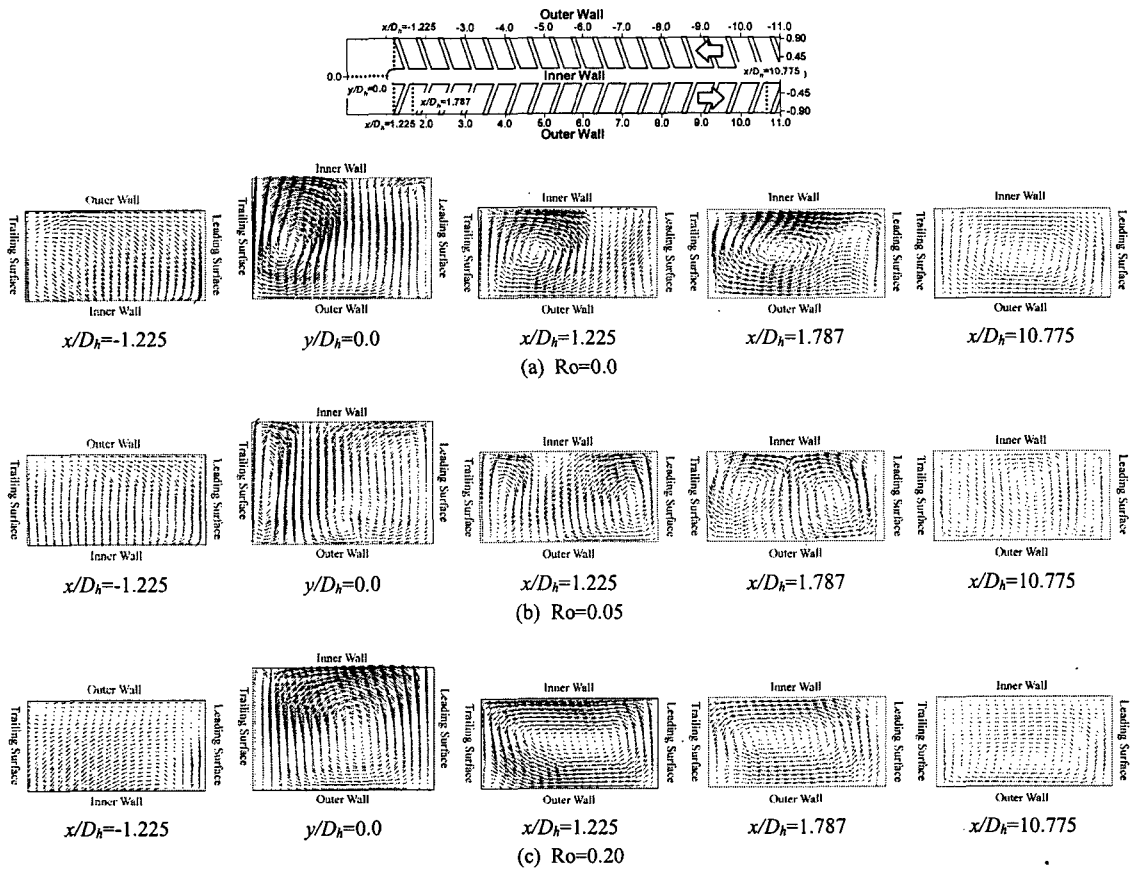


Fig. 6 Secondary flow patterns in the cross-ribbed duct at various Ro

주유동은 2차유로 상류에서 하류로 진행하면서 후연면으로 치우친 유동의 방향과 엇갈린 요철배열로 인한 유동의 방향이 같아 점차 강화되면서, 1차유로와 같은 하나의 큰 이차유동을 형성한다.

덕트의 회전수가 증가하는 경우[Fig. 6(b), (c)], 1차유로 내 유동은 코리올리력으로 인해 후연면으로 치우치는 유동을 형성한다. 이로 인해 곡관부로 유입되는 이차유동은 정지한 경우와 반대로 후연면 부근으로 편향된다. 따라서, 곡관부 중앙에서 정지하였을 때 후연면 부근에 크게 나타났던 와류는 점차 줄어들고, 관성력에 의해 압력이 상대적으로 낮은 전연면 부근의 와류는 점차 커지게 되며, 가장 높은 회전수(Ro=0.20)에서는 2차유로 입구에서 하나의 큰 이차유동을 형성한다. 2차유로에서는 곡관부에서 발생한 이차유동과 엇갈린 요철에 의해 발생한 이차유동의 회전방향이 반대이므로 이차유동은 약화된다. 점차 곡관부에

의한 와류의 강도가 줄어들면서 2차유로 하류에서는 엇갈린 요철에 의한 효과가 지배적이게 되며, 회전수가 빠를수록 코리올리력이 전연면쪽으로 작용하게 되어 엇갈린 요철배열에 의한 하나의 큰 이차유동 형성을 촉진한다.

### 3.3 엇갈린 요철 배열에 따른 열/물질전달 특성

Fig. 7과 8은 다양한 회전수에 대하여 엇갈린 요철 덕트 내부의 전연면과 후연면에서의 국소적인 열/물질전달 분포를 나타내는 그림이다.

정지된 덕트의 경우(Ro=0.0), 유동구조[Fig. 5(b), 6(a)]로부터 알 수 있듯이, 1차유로에서는 엇갈린 요철로 인해 Fig. 5(b)의 점선과 같은 하나의 큰 이차유동이 형성된다. 이로 인해 전연면은 외벽에서 높은 열전달이 일어나며, 후연면은 내벽에서 높은 열전달이 일어난다. 곡관부 입구에서 유동은 엇갈린 요철로 인해 전연면 부근으로 편향되어

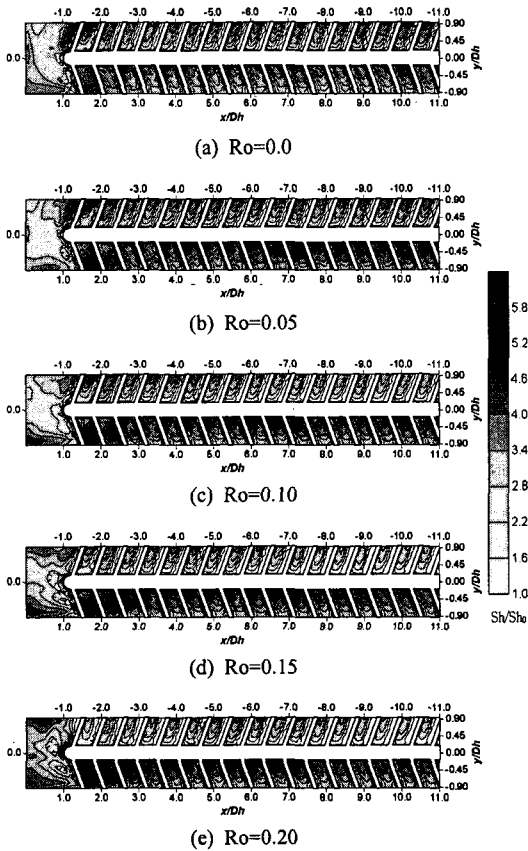


Fig. 7 Contour plots of local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) on the leading surface

전연면에서 열/물질전달 계수가 높게 나타난다. 전연면으로 치우친 유동으로 인해 곡관부 중앙에서의 단와류는 후연면 부근에서 크게 생성되어 후연면 외벽에서 높은 열전달이 나타나며, 이 유동으로 인해 2차유로 상류에서도 후연면의 열전달이 높게 나타난다. 곡관부를 지나온 유동은 엇갈린 배열요철에 의해 유동이 발달되어 가며 2차유로 하류로 진행하면서 1차유로와 같이 하나의 큰 와류를 형성하게 되어 전연면은 내벽에서 후연면은 외벽에서 열전달이 높아진다.

덕트가 회전할 경우, 1차유로에서는 코리올리력이 후연면으로 작용하여 유동은 후연면쪽으로 치우친다. 이로 인해 회전수가 증가할수록 전연면은 열전달이 감소하고 후연면의 열전달은 점차 증가한다. 그리고 곡관부 입구에서의 열전달도 회전수가 증가할수록 전연면은 열전달이 감소하고 후연면의 열전달은 증가하게 된다. 이는 회전수가 증가할수록 Fig. 6의  $x/D_h=1.225$ 의 유동과 같이 유

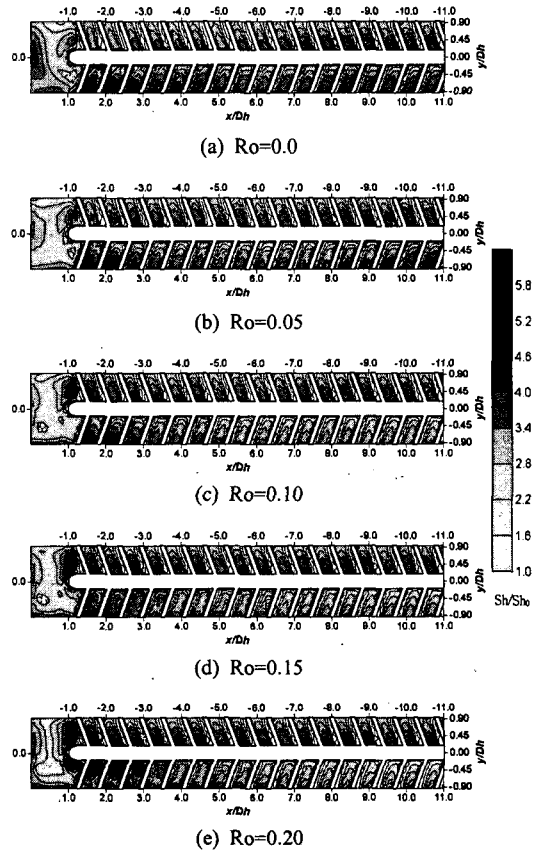


Fig. 8 Contour plots of local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) on the trailing surface

동이 후연면으로 치우치기 때문이다. 곡관부에서의 열전달은 1차유로와 반대로 회전수가 증가할수록 전연면은 열전달이 증가하고, 후연면은 열전달이 감소하게 된다. 이는 회전수가 증가할수록 1차유로 후연면 부근으로 유동이 많이 편향되어, 곡관부를 지나면서 압력이 비교적 낮은 전연면으로 관성력이 작용하여 Fig. 6(b), (c)의  $y/D_h=0.0$ 과 같은 유동을 형성하기 때문이다. 이 유동으로 2차유로 상류의 전연면은 내벽 및 중앙에서 높은 열전달 분포가 나타났으나, 후연면의 열전달 분포는 낮은 회전수( $Ro=0.05$ )에서는 외벽에서, 높은 회전수( $Ro=0.20$ )에서는 내벽에서 열전달 분포가 높게 나타났다. 이는 곡관부를 지나온 유동의 영향으로 Fig. 6의  $x/D_h=1.225$ 의 2차유로 입구 유동과 같이 낮은 회전수에서는 한 쌍의 이차유동이 회전수가 증가할수록 하나의 큰 이차유동을 형성하기 때문이다. 2차유로 하류로 주유동이 진행하면서 이 유동은 엇갈린 요철배열의 와류방향이 반대로 작용

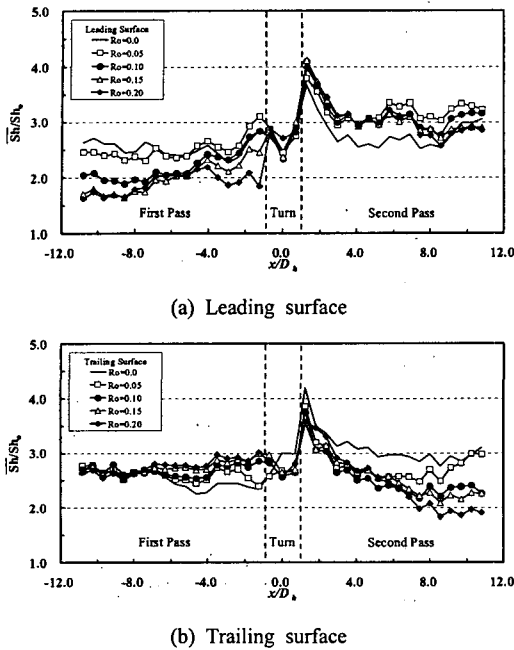


Fig. 9 Pitch-averaged Sherwood number ratios ( $\overline{Sh}_p/\overline{Sh}_0$ ) in the cross-ribbed duct

하여 강도가 약화되지만, 전연면으로 작용하는 코리올리력의 영향을 받아 Fig. 5(b)의 2차유로의 점선과 같은 이차유동을 형성하게 되어 전연면은 내벽에서 후연면은 외벽에서 열전달이 높아지게 된다. 또한 회전수가 증가할수록 2차유로에서 코리올리력은 전연면으로 작용하게 되어 전·후연면의 열전달 차이가 커진다.

Fig. 9는 열전달계수 비를 유로 내 각  $x/D_h$  지점에 해당하는 피치 한 구간의 영역에서 면적 평균 값을 전연면[Fig. 9(a)]과 후연면[Fig. 9(b)]에 대해서 나타낸 그림이다.

Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 전연면 1차유로에 해당하는 영역은 회전수가 증가함에 따라 코리올리력이 커지게 되어 열/물질전달 계수는 점차 낮아진다. 곡관부에서는 곡관부와 회전에 의해 생성된 이차유동에 의해 곡관부 입구를 지난 다음 영역에서 높은 열전달 값이 나타났으나, 회전수변화에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 2차유로에서는 정지한 경우보다 회전한 경우가 크게 열전달이 증가하였다. 2차유로 상류에서는 회전수 변화에 따른 열전달 차이가 거의 나타나지 않았지만, 2차유로 하류에서는 회전수가 증가할수록 열전달은 감소하였다. 이는 회전으로 인해 곡관부

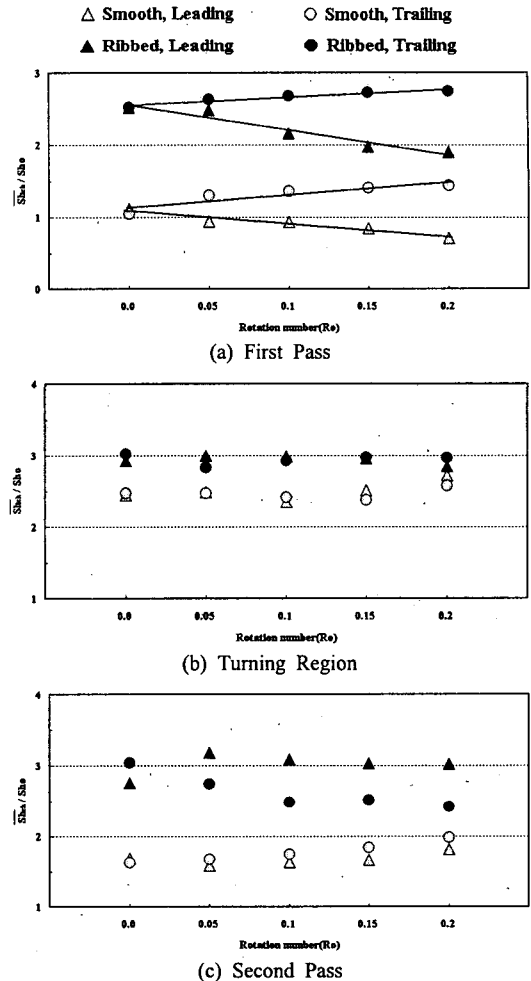


Fig. 10 Channel-averaged Sherwood number ratios ( $\overline{Sh}_{ch}/\overline{Sh}_0$ ) at various rotation numbers for smooth and cross-ribbed duct

직후 전연면 부근에서 크게 형성된 이차유동이 엇갈린 요철배열에 의한 이차유동의 회전방향과 반대로 작용하기 때문이며, 회전수가 증가할수록 회전에 의한 이차유동의 강도가 커지면서 엇갈린 요철에 의한 상쇄 또한 커지기 때문이다.

Fig. 9(b)의 후연면 1차유로에서는 회전수가 증가함에 따라 코리올리력이 증가하여 열전달이 상승하였으나, 곡관부에서는 회전하는 경우가 정지한 경우에 비해 열전달이 감소하였다. 이는 코리올리력으로 인해 후연면 부근의 이차유동이 약화되었기 때문이다. 2차유로에서는, 코리올리력에 의해 곡관부 후연면 부근에서의 이차유동이 약화되어 정지한 경우에 비해 열전달이 크게 감소하였



으며, 곡관부 이후의 이차유동은 엇갈린 요철배열의 이차유동과 반대로 작용하기 때문에 이차유동의 강도가 약해진다. 그러나  $Ro=0.05$ 에서와 같이  $x/D_h=7.0$  이후 엇갈린 요철배열에 의해 이차유동이 형성되면서 열전달이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 회전수 변화에 따른 덕트 내 각 유로에서 면적 평균한 열/물질전달 값을 각각의 유로에 대해서 나타낸 그림이다. 1차유로의 경우, 매끈한 덕트와 엇갈린 요철배열 덕트 모두 회전수가 증가함에 따라 전연면과 후연면 사이의 열/물질전달 계수 차가 커지는 것으로 나타났으며, 엇갈린 요철배열의 경우가 매끈한 덕트에 보다 전연면의 열전달 감소율이 크고 후연면의 열전달 상승률은 작았다. 이는 코리올리력에 의해 후연면으로 엇갈린 요철배열에 의한 이차유동이 치우쳐 이차유동의 재부착을 감소시켰기 때문이다. 곡관부에서는 회전수 변화에 따른 열/물질전달 값의 차이 거의 없는 것으로 나타났다. 2차유로의 경우, 회전수가 증가함에 따라 매끈한 덕트는 전·후연면 모두 열전달이 상승하였다. 하지만, 엇갈린 요철배열 덕트의 경우에는 전연면의 열전달은 변화가 거의 없었으나, 후연면의 열전달은 크게 감소하였다. 이는 앞서 언급했듯이 곡관부 이후 이차유동의 와류방향과 엇갈린 요철에 의한 와류방향의 차이 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 엇갈린 요철 설치 및 회전수 변화에 따른 덕트 내에서의 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 국소 물질전달계수 분포와 평균 물질전달 계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 엇갈린 요철 배열을 가진 이차유로 덕트 내 유동에 가장 큰 영향을 주는 요인으로는 엇갈린 요철에 의한 이차유동과 유체가 곡관부를 지난 후 원심력을 받게 되어 생성되는 딴와류, 그리고 덕트가 회전할 때 유동의 편향을 일으키는 코리올리력 등이 있다. 이러한 이차유동이 복합적으로 작용하여 1차유로와 곡관부, 2차유로에서 다른 열전달 특성을 갖게 한다.

(2) 덕트가 회전하지 않을 경우에는 엇갈린 요철배열 덕트에 의해 하나의 큰 이차유동이 형성되어 1차유로는 전연면의 외벽에서 후연면은 내벽에서 열전달이 높게 일어난다. 곡관부에서의 열

/물질전달 분포는 1차유로의 엇갈린 요철배열로 인한 편향된 유동으로 인해 비대칭적인 것으로 나타났다. 2차유로에서는 후연면으로 치우친 유동으로 인해 후연면에서 높은 열전달 분포를 보이며, 2차유로 하류로 진행할수록 엇갈린 배열요철에 의해 유동이 발달해가며 전연면은 내벽에서 후연면은 외벽에서 높은 열전달 분포가 나타난다.

(3) 덕트의 회전수가 증가함에 따라, 1차유로에서는 코리올리력이 커져 전연면의 열전달은 감소하고 후연면의 열전달은 증가하였다. 곡관부에서의 유동은 회전수가 증가함에 따라 엇갈린 요철배열에 의한 후연면 부근의 이차유동이 코리올리력에 의해 점차 감소하며, 전연면 부근의 하나의 큰 와류를 형성한다. 이 이차유동으로 인해 2차유로 상류에서는 전연면의 외벽과 후연면의 내벽에서 높은 열전달 분포를 보이다가 엇갈린 요철에 의한 이차유동의 영향을 받아 2차유로 하류에서는 전연면의 내벽과 후연면의 외벽에서 열전달이 높게 일어난다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Hwang, J. J. and Lai, Y. Y., 1998, "Three-Dimensional Mixed Convection in a Rotating Multiple Pass Square Channel," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 979-991.
- (2) Iacovides, H., Jackson, D. C., Kelemenis, G., Launder, B. E. and Yuan, Y. M., 1999, "Experiments on Local Heat Transfer in a Rotating Square-Ended U-bend," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 302-310.
- (3) Liou, T. M., Chen, C. C. and Chen, M. Y., 2001, "TLCT and LDV Measurements of Heat Transfer and Fluid Flow in a Rotating Sharp Turning Duct," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1777-1787.
- (4) Murata, A. and Mochizuki, S., 1999, "Effects of Cross-Sectional Aspect Ratio on Turbulent Heat Transfer in an Orthogonally Rotating Rectangular

- Smooth Duct," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3803~3814.
- (5) Won, J. H., Lee, S. Y. and Cho, H. H., 2001, "Heat/Mass Transfer Characteristics in a Rotating Duct with 180° Turn," *Transactions of KSME(B)*, Vol. 25, No. 3, pp. 405~413.
- (6) Kim, K. M., Kim, S. I., Kim, Y. Y., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2004, "Detailed Measurement of Heat/Mass Transfer in a Rotating Two-Pass Duct ( I )," *Transactions of KSME(B)*, Vol. 28, No. 8, pp. 910~920.
- (7) Al-Qahtani, M., Jang, Y. J., Chen, H. C. and Han, J. C., 2002, "Flow and Heat Transfer in Rotating Two-Pass Rectangular Channels (AR=2) by Reynolds Stress Turbulence Model," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 1823~1838.
- (8) Mochizuki, S., Beier, M. and Murata, A., 1996, "Detailed Measurement of Convective Heat Transfer in Rotating Two-Pass Rib-Roughened Coolant Channels," *ASME Paper No. 96-TA-6*.
- (9) Murata, A., Mochizuki, S. and Takahashi, T., 1999, "Local Heat Transfer Measurement of an Orthogonally Rotating Square Duct with Angled Rib Turbulators," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3047~3056.
- (10) Azad, G. S., Uddin, M. J. Han, J. C., Moon, H. K. and Glezer, B., 2002, "Heat Transfer in a Two-Pass Rectangular Rotating Channel with 45-deg Angled Rib Turbulators," *J. Turbomachinery*, Vol. 124, pp. 251~259.
- (11) Fu, W. L., Wright, L. M. and Han, J. C., 2004, "Heat Transfer in Two-Pass Rotating Rectangular Channels (AR=1:2 and AR=1:4) with 45° Angled Rib Turbulators," *ASME Paper No. GT2004-53261*.
- (12) Rathjen, L. Hennecke, D. K., Sivade, C. and Semmler, K., 2002, "Detailed Experimental and Numerical Heat/Mass Transfer Investigation in a Rotating Two-Pass Coolant Channel with Staggered 45° Ribs," *9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamic of Rotating Machinery*, Paper No. HT-ABS-034.
- (13) Cho, H. H., Lee, S. Y. and Rhee, D. H., 2001, "Heat Transfer Characteristics in a Two-Pass Rotating Rectangular Duct with 70°Attack Angle Ribs," *International Conference on Energy Conversion and Application (ICECA 2001)*, pp. 605~610.
- (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) McAdams, W. H., 1942, "Heat Transmission, 2nd Edition," *McGraw-Hill*, New York.