

# 180 ° 곡관부를 가지는 회전 덕트에서의 열/물질전달 특성

원정호\* · 이세영\* · 조형희†

(2000년 9월 6일 접수, 2000년 12월 21일 심사완료)

## Heat/Mass Transfer Characteristics in A Rotating Duct with 180 ° Turn

Chung-Ho Won, Sei-Young Lee and Hyung-Hee Cho

**Key Words:** Turbine Internal Passage(터빈 이차유로), Rotating Duct(회전덕트), Duct Flow(덕트유동), Heat/Mass Transfer(열/물질전달)

### Abstract

The present study investigates convective heat/mass transfer and flow characteristics inside a rotating two-pass rectangular duct. A naphthalene sublimation technique is employed to determine the detailed local heat transfer coefficients using the heat and mass transfer analogy. The objective of this study is to determine the effects of turning geometry with rotation for  $0.0 \leq Ro \leq 0.24$ . The results reveal that the sharp-turn corner has the larger pressure drop and lower heat transfer in the post-turn region than those of the round-turn corner. The strong secondary flow enhances heat transfer for the round-turn corner. Coriolis force induced by the rotation pushes the high momentum core flow toward the trailing wall in the first passage with radially outward flow and toward the leading wall in the second passage with radially inward flow. Consequently, the high heat transfer rates are generated on the trailing surface and the leading surface in the first and second passage, respectively. However, the strong secondary flow due to the turning dominates the flow pattern in the second passage, thus the heat transfer differences between the leading and trailing surfaces are small with the rotation.

### 기호설명

$D_{naph}$  : 나프탈렌 확산계수 [ $m^2/s$ ]  
 $D_h$  : 유로 수력직경 [m]  
 $h_m$  : 물질전달 계수 [ $W/m^2C$ ]  
 $L$  : 가열면의 길이 [m]  
 $R$  : 유로 최대 회전반경 [m]  
 $Re$  : 레이놀즈 수,  $D_h U / \nu$   
 $Re_\Omega$  : 회전 레이놀즈 수,  $D_h^2 \omega / \nu$   
 $Ro$  : 로테이션 수,  $D_h \omega / U = Re_\Omega / Re$   
 $Sh$  : 셔우드 수,  $h_m D_h / D_{naph}$   
 $U$  : 주유동 속도 [m/s]

$W$  : 벽두께 [m]  
 $x$  : 주유동 방향 좌표 [m]

### 그리스문자

$\nu$  : 공기의 동점성계수 [ $m^2/s$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\omega$  : 회전 각속도 [rad/s]

### 상첨자

- : 선평균

### 하첨자

$b$  : 주유동 혼합 평균  
 $o$  : 원형관 내의 완전 발달 난류유동  
 $v$  : 증기  
 $w$  : 벽

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

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 터빈 입구온도(TIT; turbine inlet temperature)의 상승은 필수적이며, 최근의 항공용, 복합화력 발전용 가스터빈 엔진은 이러한 터빈 입구 온도의 상승에 따라 금속의 허용 한계온도를 크게 상회하는 1400-1500°C에서 운전되고 있다. 그러므로, 가스터빈내 블레이드(blade)와 베인(vane)등의 고온요소들이 받는 열부하 및 열응력의 해소를 위하여 막냉각(film cooling), 충돌제트냉각(impingement cooling), 내부관 대류냉각(internal passage convective cooling)등을 복합적으로 적용하는 발전된 냉각기술의 사용이 필요하다.

다수의 곡관부를 가지는 터빈 블레이드 내부의 냉각유로는 블레이드의 회전에 의한 유동의 코리올리 효과(Coriolis Effects)와 회전 원심부력효과에 의하여 복잡한 이차유동구조를 발생하게 된다. 또한, 곡관부를 지나는 유동에 의하여 발생된 원심력은 곡관부 이후 유동구조 및 국소 열전달 분포에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로, 회전 내부관에서의 코리올리 효과와 회전원심부력의 효과에 대한 이해와 이러한 효과에 의한 유로 내부의 열전달특성 변화를 예측하는 것은 최적의 터빈 블레이드 냉각유로설계를 위한 기초 자료가 된다.

Wagner 등<sup>(1,2)</sup>은 1:1의 단면비를 갖는 다유로 내부관에 대하여 회전에 의한 코리올리효과와 원심부력의 효과의 복합적인 결과로 야기되는 유로 내부에서의 열전달 변화에 대하여 연구하였다. 정지된 유로 내에서의 열전달 계수는 Reynolds 수와  $x/D_h$ 의 함수이며, 회전 유로의 경우 관 내부 유동을 지배하는 기본적인 무차원 유동변수는 Rotation 수(Ro)와 유체 밀도비( $\Delta\rho/\rho$ ), 수력직경에 대한 평균 회전 반경의 비( $\bar{R}/D_h$ )를 부가하여 다음과 같은 함수로 표현하고 각각의 변수들에 의한 덕트내부의 열전달 변화의 효과를 정리하였다.

$$\text{Nu} = f(\bar{R}/D_h, x/D_h, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Ro}, \Delta\rho/\rho, \text{flow direction}) \quad (1)$$

Han 등<sup>(3,4)</sup>은 반원형 곡관부를 가지는 정방향의 반경방향 유출,입 유로의 회전 내부관에 대하여 요철이 없는 경우와 주유동에 90°, 60° 경사의

요철을 갖는 경우 등은, 등열유속, 2면 등벽온도 조건의 3가지 경계조건에 대하여 Rotation 수 0.0~0.352, Reynolds 수 2,500~25,000의 범위에서 열전달 실험을 수행하여 체계적인 데이터를 제시하였다. Han 등의 결과에서 회전 내부관의 Rotation 수와 Reynolds 수가 증가함에 따라서 반경방향의 유출유동을 갖는 1차유로에서는 후연, 반경방향의 유입유동을 갖는 2차유로에서는 전연에서 열전달의 증가를 나타내었다. 또한 요철이 설치된 등온조건의 회전 내부관에 대하여 수치해석을 수행하기도 하였다.<sup>(5)</sup>

그 외에 Park and Lau<sup>(6)</sup>는 물질전달 실험을 통하여 단면비 1:1의 곡관부를 갖는 정방향 유로의 회전방향에 대한 유로의 경사도(duct orientation)에 따른 국소 열/물질전달특성을 연구하였으며, Kuo and Hwang<sup>(7)</sup>은 회전반경방향 유입 혹은 유출 유동을 갖는 단일 유로에 대하여 열전달 특성을 연구하였다.

본 연구에서  $\text{Re}=25,000$ 의 경우  $\text{Ro}=0.0, 0.04, 0.07, 0.1$ ,  $\text{Re}=12,500$ 의 경우  $\text{Ro}=0.24$ 의 각각 직각 모서리의 곡관부와 반원형 곡관부를 갖는 덕트의 Rotation 수의 변화에 대한 국소 열/물질전달 특성 및 곡관부의 형상변화에 대한 곡관부와 곡관부 이후 2차유로에서의 열전달 특성을 해석하였다. 실험에서  $\text{Sc}$ ,  $R/D_h$ 는 일정하므로 유로 내부의  $\text{Sh}$ 는  $\text{Re}$ ,  $\text{Ro}$ ,  $x/D_h$ ,  $\Delta\rho/\rho (= (\rho_b - \rho_w)/\rho_b)$ 가 지배인자이다. 본 실험에서 수행한 나프탈렌을 이용한 물질전달 실험에서 나프탈렌 표면에서의 증기와 공기의 밀도 차가 0.04% 이하이므로 벽면에서의 원심부력에 의한 효과는 무시된다.

## 2. 실험장치 및 방법

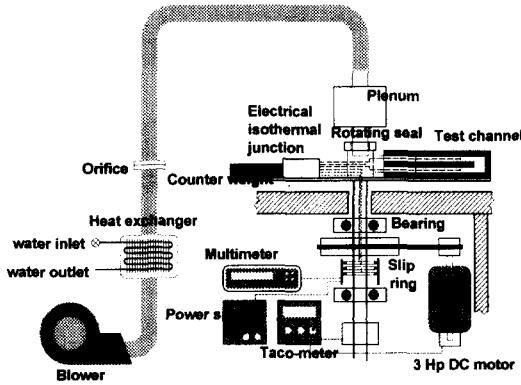
### 2.1 실험장치

Fig. 1(a)은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 송풍기로부터 유입되는 공기는 열교환기 이후 오리피스 유량계와 플리넘 챔버를 지나 회전 덕트로 유입된다. 회전축은 V 벨트를 통하여 3 마력 직류모터로 구동되고, 회전축에 설치된 광학센서로 검출된 회전수는 직류전압 제어를 통하여 0.2% 이내의 정확한 회전수의 조절이 가능하다. 회전 덕트와 플리넘에 각각 설치된 3개의 J-type 열전대에서 측정되어진 온도는 내부관과 함께 회전하

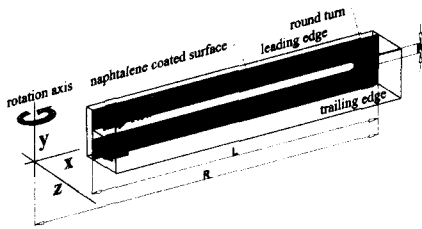
Table 1 Summary of experimental condition

Ro	Re	sharp turn	round turn
0.0	25,000	○	○*
0.04	25,000		○
0.07	25,000	○	○
0.1	25,000		○
0.24	12,500		○

\* To compare with the results of Han<sup>(3)</sup>



(a) Schematic diagram of rotating system



$D_h=26.7 \text{ mm}$ ,  $L/D_h=12.1$ ,  $R/D_h=23.2$ ,  $W/D_h=0.375$

(b) Detail of the rotating test duct

Fig. 1 Experimental apparatus

는 전기적 냉접점온도 보상기에 연결되어 증폭, 선형화된 후 슬리핑을 통하여 외부의 전압측정기를 통하여 계측된다.

본 연구의 회전 덕트에 대한 상세도가 Fig. 1(b)에 제시되어 있다. 실험 덕트는 2:1(가로:세로)의 단면비를 가지며 수력직경 ( $D_h$ )은 26.7 mm, 수력직경 대비 최대회전 반경비( $R/D_h$ )는 23.2, 수력직경 대비 가열면의 길이비( $L/D_h$ )는 12.1이며 수력직경에 대한 직각과 반원형 곡관 내벽의 두께 ( $W/D_h$ )는 0.375이다. 일반적인 중·대형 가스터빈 냉각유로의 Reynolds 수는 약 25,000이고, 50~60 Hz의 정격 축 회전속도에 의한 Rotation 수는 0.07정도이므로 본 연구에서는  $Re=12,500$ , 25,000과  $Ro=0.0$ , 0.04, 0.1, 0.24에 대하여 실험을 수행하였다. 또한, 실제 냉각유로에서 고온의 연소가스와 접촉하는 블레이드의 압력면과 흡입면에서 냉각유체와 열전달이 발생하게 되므로, 본

실험에서는 2면 가열조건(전·후면)을 적용하여 가스터빈 블레이드 내부의 회전 다유로를 모사하였다. Table 1은 본 연구의 각 실험에서 덕트 곡관부 형상 및 유동조건을 나타낸다.

본 실험에서는 열전달 실험을 대신하여 나프탈렌( $C_{10}H_8$ ) 승화법을 이용한 물질전달 실험을 수행하였다. 고체 나프탈렌을 녹는점( $80.2^\circ\text{C}$ ) 이상 가열하여 완전히 액화시킨 후, 표면이 매끈하게 가공된 알루미늄 주형틀을 이용하여 균일한 표면을 얻도록 주조하였다. 실험전,후 나프탈렌 표면고도의 차를 측정하고 자연대류에 의한 승화량을 보정하여 국소 승화량을 얻는다. 나프탈렌의 표면고도 측정은 자동이송장치에 의하여 이송되는 선형가변차동변환기(LVDT; Linear Variable Differential Transformer)에 의하여 이루어지며, 장비의 측정팁 직경은 1.588 mm, 정밀도는  $0.025\mu\text{m}$ 이다. 실험중 평균 승화량은 0.0762 mm (3 mil)로 조정되므로 이에 대한 측정오차는 1% 이내이다.

열/물질전달의 상사성에 의하여 실험 중 나프탈렌 표면의 경계조건은 열전달 실험의 등온조건에 해당한다.

### 2.2 실험결과 처리

나프탈렌 표면의 국소 승화량으로부터 계산되는 물질전달계수는 다음과 같다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} = \frac{\rho_s(dy/dx)}{\rho_{v,w}} \quad (2)$$

여기서  $\dot{m}$ 은 단위면적당 국소 물질전달율이며,  $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 표면에서의 포화 증기밀도,  $\rho_{v,b}$ 는 혼합 평균 나프탈렌 증기밀도이다. 덕트 입구에서  $\rho_{v,b}=0$ 이고, 덕트 출구에서  $\rho_{v,b}$ 는  $\rho_{v,w}$ 의

1.8% 이하로 충분히 작으므로, 식 (2)에서  $\rho_{v,b}=0$ 인 입구조건으로 정의 하였으며,  $\dot{m}$ 은 고체나프탈렌의 밀도( $\rho_s$ ), 유동장 노출시간( $dt$ ), 나프탈렌 표면 승화깊이( $dy$ )로부터 계산된다. 위의 국소 물질전달계수로부터 Sherwood 수를 다음과 같이 구한다.

$$Sh = h_m D_h / D_{naph} \quad (3)$$

여기서  $D_{naph}$ 는 공기 중에서의 나프탈렌의 확산계수이다. 나프탈렌 확산계수의 5.1% 오차와 나프탈렌 증기밀도의 4.7% 오차 등 나프탈렌 물성치<sup>(8)</sup> 오차가 많은 부분을 차지하는 Sherwood 수의 불확실성(uncertainty)은 95%의 신뢰수준에서 7.1% 이내였다.<sup>(9)</sup>

Sherwood 수는 열/물질전달 유사성 관계식 ( $Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4}$ )에 의하여 Nusselt 수로 변환될 수 있다. 물질전달 실험결과는 물질전달계수비인  $Sh/Sh_0$ 의 형태로 제시되어있으며,  $Sh_0 (= 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}(Sc/Pr)^{0.4})$ 는 McAdams<sup>(10)</sup>에 의하여 제시된 매끈한 원형덕트에서 완전발달 난류영역의 Sherwood 수를 기준으로 하였다.

본 실험의 주유동방향의 위치는 덕트의 수력직경으로 무차원화하여 나타내었으며, 평균 Sherwood 수 ( $\overline{Sh}$ )는 국소 Sherwood 수를 주유동방향의 위치에서 덕트의 횡방향으로 선평균하여 계산하였다.

### 2.3 수치해석 조건

상용 열·유동해석 프로그램인 Fluent 5.0을 이용하여 정지된 덕트 내부의 유동 계산을 수행하였다. 수치해석에 사용된 기본 형상은 실험에 사용된 덕트와 동일한 것으로 회전축의 중심에서 덕트 입구유동은 균일한 완전발달 난류유동 조건을 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 (ReNomalization Group k-ε) 난류모델을 적용하였으며 벽에서는 two-layer zonal model을 적용하였다. 계산 영역내 격자 수

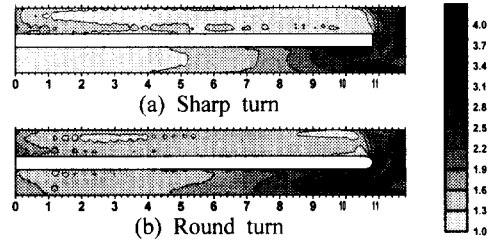


Fig. 2 Contours of local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) at  $Re=25,000$  and  $Ro=0.0$

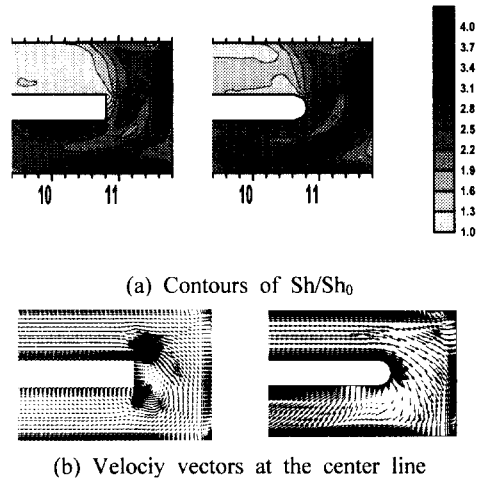


Fig. 3 Heat transfer contours and velocity vectors near the turning section at  $Re=25,000$  and  $Ro=0.0$

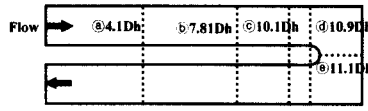
는 계산결과가 격자수에 무관하도록 x, y, z방향으로  $215 \times 40 \times 45$  개의 격자를 사용하였으며, 직관부에서 정렬 격자계를(structured grid), 곡관부에서 비정렬 격자계(unstructured grid)를 구성하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

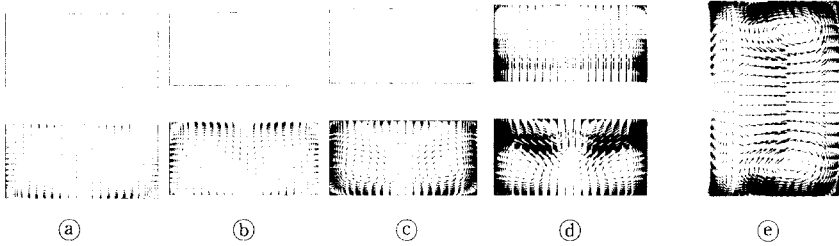
### 3.1 국소 Sherwood 수 분포

#### 3.1.1 정지된 덕트

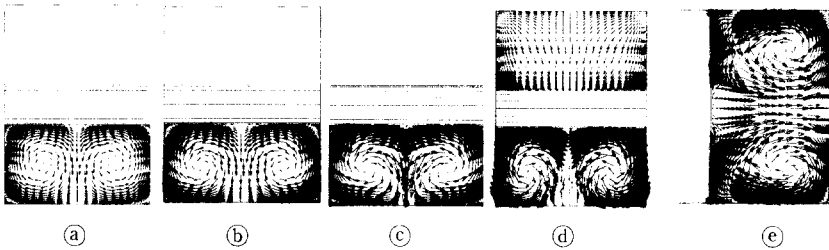
Fig. 2의 (a), (b)는 직각 모서리의 곡관부와 반원형 곡관부를 갖는 내부관에서 정지된 경우 ( $Ro=0.0$ )의 국소 열/물질전달 계수 분포를 나타내며, Fig. 3의 (a)는 Fig. 2의 곡관부만을 확대한 그림이다. 회전하지 않는 덕트에서의 국소 열/물질



(a) View point of secondary flow



(b) Sharp turn



(c) Round turn

Fig. 4 Calculated secondary flows in the stationary duct

전달 분포는 전, 후연이 대칭이므로 그림에서 전 연부만 제시하였다. 반경 방향으로 유출유동을 갖는 1차유로에서 입구로부터 발달하기 시작하는 경계층의 영향으로 국소 열/물질전달계수 분포는 하류 방향으로 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 곡관부의 영향이 나타나기 시작하는  $9 D_h$  정도까지 완전발달된 내부유동의 경우 발생하는 열/물질전달계수의 분포를 보인다. 단면비 2:1의 장방형 유로의 모서리에서 발생하는 모서리와류(coner vortex)의 영향으로 유로의 횡방향으로 중심보다 모서리 부분에서 높은 열/물질전달 분포를 나타내는 포물선형태의 등 열/물질전달 선도를 보인다.

Fig. 3에서 90°의 직각 모서리를 갖는 곡관부의 입구 최초 모서리에서 유동의 박리로 인한 재순환 영역에서 국소적으로 매우 낮은 열/물질전달계수를 나타내는 부분이 발생하고 후류영역의 외곽에서 가속된 유동에 의하여 높은 열/물질전달계수를 나타낸다. 유동 박리로 인한 곡관부의 입구 모서리 이후 유동 재순환 영역은 반원형 곡

관부를 갖는 경우에는 축소되었음을 알 수 있다. 곡관부의 90° 이후에서 외벽에 형성되는 순압구배와 내벽에 형성되는 역압구배로 인하여 곡관부 외벽에는 가속된 높은 운동량의 유체가 편중되고 이 부분에서 높은 국소 열/물질전달계수의 분포를 보이게 된다. 곡관부의 출구 이후의 가속된 고 운동량의 유체에 의한 국소적 열/물질전달의 향상은 압력손실이 적은 반원형의 곡관부의 경우가 더욱 넓은 범위에서 나타남을 보인다.

곡관부를 지나는 유동에서 발생하는 원심력 ( $f = \frac{\partial p}{\partial r} = \rho w^2$ )은 높은 운동량과 낮은 농도(온도)를 갖는 코어 유동이 회전 반경의 외곽방향으로 압력구배를 발생시키고, 서로 상대 회전하는 한 쌍의 이차 와류 유동구조를 형성하게 된다. 이와 같은 곡관부에 의한 이차유동구조가 수치해석 결과인 Fig. 4에 제시되어있다. 곡관부에서 발생하는 이차 유동 구조는 전·후연의 곡관부의 외곽에 높은 국소 열/물질전달계수의 분포를 나타내게 하고, 이 와류는 곡관부의 출구 이후 반경방향 유입유동을 갖는 2차유로에서도 상당히

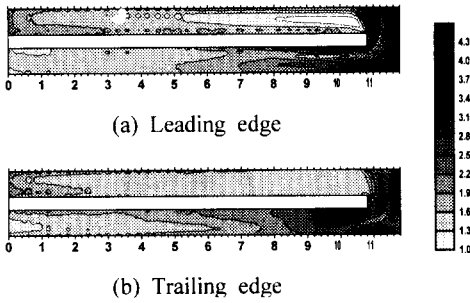


Fig. 5 Contours of  $Sh/Sh_0$  at  $Re=25,000$  and  $Ro=0.07$  for sharp turn

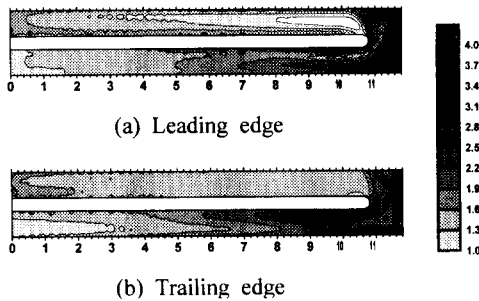


Fig. 6 Contours of  $Sh/Sh_0$  at  $Re=25,000$  and  $Ro=0.07$  for round turn

지속됨을 보인다. Fig. 4로부터 2차유로에서의 이차유동구조는  $90^\circ$ 의 직각 모서리의 곡관부보다 반원형의 곡관부를 갖는 경우가 더욱 강하게 발생하며 하루까지 더 지속적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 곡관부에 의한 이차유동구조로 인하여 내벽보다 외벽 쪽에 접한 전·후연에서 보다 높은 국소 열/물질전달 계수의 값을 나타내고, 반원형의 곡관부의 경우가 더욱 넓은 범위까지 이러한 경향이 지속되는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 2). 곡관부 직후 내벽 모서리에 곡관부를 지나는 유체에 작용하는 원심력에 의한 이차유동구조 이외에 반대로 회전하는 또 다른 한 쌍의 와류가 형성되고 이러한 와류유동구조의 영향으로 이차유로 입구부근에서 전·후연의 내벽 쪽에 국소적으로 높은 열/물질전달 계수를 나타내는 지점이 발생하게 된다. 내벽에 발생한 와류는 2차유로의 하루로 갈수록 점차적으로 약해져서 곡관부에 의하여 발생한 이차유동구조만 유력하게 된다.

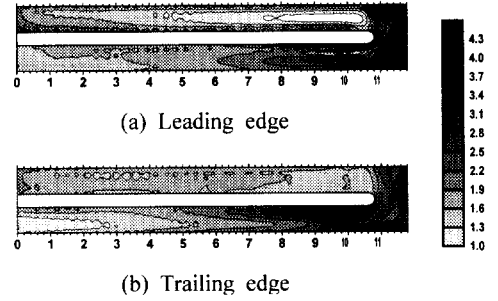


Fig. 7 Contours of  $Sh/Sh_0$  at  $Re=25,000$  and  $Ro=0.1$  for round turn

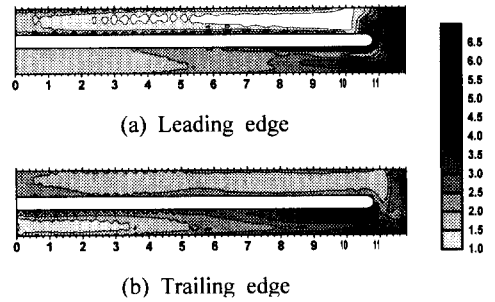


Fig. 8 Contours of  $Sh/Sh_0$  at  $Re=12,500$  and  $Ro=0.24$  for round turn

### 3.1.2 회전덕트

회전하는 직관에 대한 내부유체의 반경 방향의 유출 유동은 코리올리 효과(Coriolis effects)를 발생시키고, 이러한 상대운동의 효과는 직관 내부 중심부의 저 농도(온도), 고 운동량의 코어 유동(core flow)을 후연으로 이동시키는 이차유동구조를 발생시키게 된다. 이와같은 유동현상은 후연부에서 얇은 경계층 두께의 영역이 형성되어 열/물질전달계수가 전연부보다 높게 된다. 위와 같은 유로 내부에서 발생하는 냉각유체의 회전에 대한 상대운동의 효과는 반경방향의 유입유동을 갖는 직관에서는 반대의 현상이 나타나 전연부가 후연부보다 높은 열/물질전달계수의 분포를 갖게 된다.

Fig. 5는  $Re=25,000$ ,  $Ro=0.07$ 에서 직각 곡관부를 가진 내부관, Fig. 6~8은  $Re=12,500$ ,  $25,000$ ,  $Ro=0.07$ ,  $0.1$ ,  $0.24$ 에서 반원형 곡관부를 가지는 내부관에서의 국소 물질전달계수비( $Sh/Sh_0$ )의 분포를 각각 나타낸다. 전술한 바와 같이 1차유로

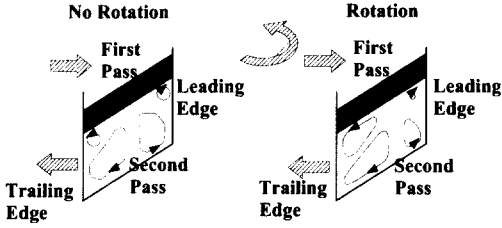


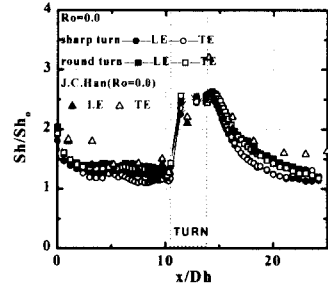
Fig. 9 Secondary flow structure at the exit of round turn

에서는 후연부가 상대적으로 높은 열/물질전달계수 값을 나타내는 것을 알 수 있고, 이러한 경향은 회전수의 증가함에 따라 더욱 확연히 나타난다. 1차유로의 전연  $x/D_h = 8 \sim 11$  영역에서 매우 낮은 값을 갖는 부분이 발생하고 이러한 영역은 Rotation 수 증가에 따라 확장되는 경향을 보인다. 이것은 회전반경의 증가나 회전 각속도의 증가에 따른 원주속도( $v = r\omega$ )의 증가가 코리올리 효과를 강화시키고 유로 내부의 이차유동구조를 더욱 강화시키기 때문이다.

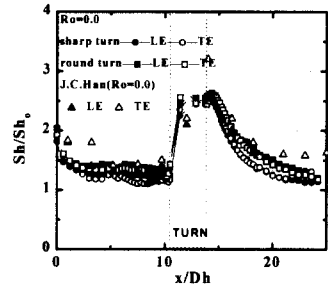
곡관부 출구에서 원심력에 의한 와류와 내벽 모서리에 형성된 2쌍의 와류는 회전에 의한 상대운동의 효과로 높은 운동량의 유체가 전연부의 하단 모서리 부근으로 이동함에 따라 후연쪽의 와류가 강화되며, 전연부의 와류는 약화되는 현상을 나타내게 된다. 회전하지 않는 경우와 회전하는 경우 곡관부 출구 영역( $x/D_h = 14 \sim 15$ )의 2차유로에서의 이차유동 구조의 개략도를 수치해석 결과를 참고하여 Fig. 9에 도시하였다. 이와 같은 이차유동 구조로 인하여  $Ro=0.0$ 의 경우 이차유로의 곡관 출구 직후 전·후연의 내벽부근에 발생하는 국소적인 매우 높은 열/물질전달계수를 나타내는 부분은 회전하는 경우 후연부로 편중되는 결과를 나타낸다.

3.2 평균 Shwerwood 수의 분포

Fig. 10은 직각 모서리의 곡관부와 반원형 곡관부를 가지는 내부관에서  $Ro=0.0$ ,  $Ro=0.07$ 의 경우 횡방향 평균 물질전달계수비의 분포를 나타낸다. LE(leading edge)와 TE(trailing edge)는 각각 전연과 후연을 의미하며, 삼각형의 데이터는 단면비 1:1,  $R/D_h=36$ ,  $Re=25,000$ 의 Han<sup>(4)</sup>의 열전달 실험



(a)  $Ro=0.0$



(b)  $Ro=0.07$

Fig. 10 Effect of the turning shapes on  $\overline{Sh}/Sh_0$  at  $Re=25,000$  and  $Ro=0.07$

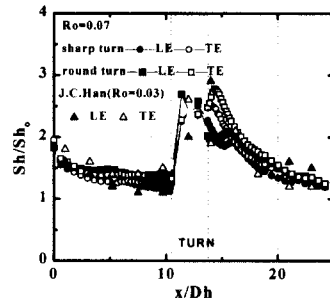


Fig. 11 Effect of  $Ro$  on  $\overline{Sh}/Sh_0$  with round-turn at  $Re=25,000$ , except  $Ro=0.24$  at  $Re=12,500$

결과를 나타낸다. Fig. 10(a)에서  $Ro=0.0$ 의 1차유로의 입구로 부터 평균 물질전달 계수비는 2에서 곡관부의 영향이 나타나기 시작하는  $x/D_h=9$  까지 점차로 감소하며 약 1.4로 수렴하며, 1차유로에서의 평균 열/물질전달 특성은 직각의 곡관부와 반원형의 곡관부를 갖는 내부관에서 같은 경향을 갖는다. 곡관부를 지난 2차유로에서 반원형의 곡관부에 의한 열/물질전달의 향상이 직각

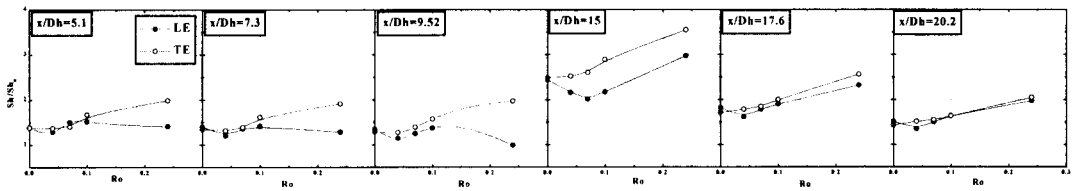


Fig. 12 Effect of rotation number on  $\overline{Sh}/Sh_0$

모서리의 곡관부의 경우보다 전반적으로 높게 나타났다. 이것은 곡관부의 모서리 형상에서 기인하는 유체의 운동량손실과 이차유동의 강도의 차가 원인으로, 반원형의 곡관부를 지난 냉각유체는 이차유동에서 곡관부에 의한 더욱 강한 이차유동구조를 형성하여 공통적으로 전·후연에서 열/물질전달의 향상을 발생시킨다.

$Ro=0.07$ 로 회전하는 관 내부의 평균 열/물질전달 계수의 분포는 곡관부와 곡관부의 출구 직후 ( $x/D_h=14\sim 17$ ) 영역을 제외하고는 회전하지 않는 경우와 큰 차이를 보이지 않는다. 국소 열/물질전달계수의 분포에서 전술한 바와 같이 곡관부 출구이후 발달하는 이차유동구조는 곡관부의 형상, 유로의 단면비에 의하여 상당히 변하게 되고, 특히 반원형의 곡관부를 지나며 발생하는 원심력에 의한 이차유동구조는 직각의 곡관부 이후보다 더욱 강하게 된다. 이차유로 입구(곡관부 출구 직후)에서 회전에 의한 상대운동 효과는 후연부의 와류를 강화시키고, 강화된 후연부 와류구조는 반원형 곡관부의 경우가 더욱 우세함을 나타낸다. 이러한 곡관부 이후 이차유동 강도의 변화가 평균 열/물질전달 계수의 분포의 차이를 발생시킨다.

Fig. 11은 Rotation 수의 변화에 따른 반원형 곡관부를 갖는 관내부 열/물질 전달 계수의 변화를 나타낸다. Rotation 수 0.24의 경우를 제외하고 모든 Rotation 수에서 주유동의 Reynolds 수는 25,000으로 고정되어 실험이 수행되었다. 회전수 증가는 이차유동구조로 인한 유동혼합의 증가로 곡관부 근접영역을 제외한 관내부 열/물질전달계수의 분포를 회전하지 않는 경우에 비하여 전반적으로 향상시킨다. 회전에 의하여 발생하는 이차유동구조는 곡관부를 가지지 않는 직관의 경우 회전 반경방향 유출유동의 직관내부에서 후연부,

유입유동의 직관내부에서는 전연부가 상대면에 대하여 높은 열/물질전달 계수를 나타내게 된다. 그러나, 본 연구의 2차유로에서는 회전효과와 함께 곡관부에 의한 와류 유동이 하류까지 상당히 지속되는 결과로 인하여 상대적으로 회전에 의한 전·후연 간의 열/물질전달 차는 미비함을 나타내었다.

Fig. 12은 유로 내 몇 지점,  $x/D_h=5.1, 7.3, 9.52$  (1차유로); 15, 17.6, 20.2 (2차유로)에서 Rotation 수 변화에 대한 평균 물질전달계수비를 나타낸다. 열/물질전달계수는 1차유로의 후연에서 Rotation 수의 증가에 대하여 일반적으로 증가하는 경향을 나타내었고, 전연부는 회전효과가 증가함에 따라 Rotation 수 0.09 까지는 오히려 증가하다가 0.09 이후에는 오히려 감소하는 결과를 나타내었다. 2차유로의 후연은 Rotation 수 증가에 대하여 하류로 갈수록 증가폭이 감소 하나 일관된 경향을 나타내었고, 전연은 Rotation 수 0.05 부근에서 기울기가 반전되며 증가하는 결과를 나타내었다.

#### 4. 결론

180°의 곡관부를 갖는 회전 덕트에서의 곡관부의 형상변화, Rotation 수의 변화에 대하여 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달 실험에서 얻은 덕트 내부의 열/물질전달 특성은 다음과 같다.

$Ro=0.0$ 의 직각의 곡관부를 갖는 덕트는 곡관부 내 모서리에서의 유동박리와 반원형 곡관부에 비하여 약한 이차유동구조로 곡관부이후 높은 압력강하 특성과 함께 곡관부와 곡관부 이후 2차유로에서 반원형 곡관부의 덕트에서 보다 평균 8.8% 낮은 열/물질전달계수값을 갖는다.

회전방향에 대하여 상대운동을 하는 관내부 유



동을 갖는 덕트내에서 반경방향의 유출, 유입 주 유동의 방향에 대하여 코리올리 힘의 방향은 1, 2차유로에서 반대가 되고, 상반된 이차유동구조로 인한 열/물질전달의 불균일성이 전연과 후연간에 발생한다. Rotation 수의 증가는 1차유로의 후연에서 2차유로의 전연에서 경계층 두께 감소로 열/물질전달의 향상을 발생시키나, 본 연구에서는 2차유로에서 곡관부에서 발생한 이차와류가 지배적인 역할을 함으로써 회전에 의한 전·후연간 평균 열/물질전달계수의 차이는 적었다. 따라서, 1차유로의 후연, 2차유로의 전·후연에서 회전수 증가에 따라 모두 평균 열/물질전달이 증가하였으나 1차유로의 전연에서는  $Ro \geq 0.1$  영역에서는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Wagner, J. H., Johnson, B. V. and Hajek, T. J., 1991, "Heat Transfer in Rotating Passages with Smooth Walls and Radial Outward Flow," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 42~51.
- (2) Wagner, J. H., Johnson, B. V. and Koppe, F. C., 1991, "Heat Transfer in Rotating Serpentine Passages with Smooth Walls," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 321~330.
- (3) Han, J. C. and Zhang, Y. M., 1992, "Effect of Uneven Wall Temperature on Local Heat Transfer in a Rotating Square Channel with Smooth Walls and Radial Outward Flow," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 850~858.
- (4) Han, J. C., Zhang, Y. M. and Kalkuehler, K., 1993, "Uneven Wall Temperature Effect on Local Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Square Channel with Smooth Walls," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 912~920.
- (5) Chen, H. C., Jang, Y. J. and Han, J. C., 2000, "Computation of Heat Transfer in Rotating Two-Pass Square Channels by a Second-Moment Closure Model," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 1603~1616.
- (6) Park, C. W. and Lau, S. C., 1998, "Effect of Channel Orientation of Local Heat (Mass) Transfer Distributions in a Rotating Two-Pass Square Channel with Smooth Walls," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 624~632.
- (7) Kuo, C. R. and Hwang, G. J., 1996, "Experimental Studies and Correlations of Radially Outward and Inward Air-Flow Heat Transfer in a Rotating Square Duct," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 23~30.
- (8) 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.
- (9) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (10) McAdams, W. H., 1942, *Heat Transmission*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.