

매끈한 벽면을 가진 회전덕트 내 레이놀즈 수에 따른 열/물질전달 및 압력강하 특성 연구

김 경 민, 박 석 환, 이 동 현, 조 형 희*
연세대학교 대학원 기계공학부, *연세대학교 기계공학부

Experimental Study of Reynolds Number Effects on Heat/Mass Transfer and Pressure Drop Characteristics in a Rotating Smooth Duct

Kyung Min Kim, Suk Hwan Park, Dong-Hyun Lee, Hyung Hee Cho*
Graduate School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
*School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received February 3, 2006; revision received September 26, 2006)

ABSTRACT: The present study has been conducted to investigate the effects of Reynolds number on heat/mass transfer and pressure drop characteristics in a rotating smooth two-pass duct. For stationary cases, the heat/mass transfer and pressure drop is decreased on turning region of both leading and trailing surfaces as Reynolds number increases. For rotating cases, increment of Reynolds number affects differently the heat/mass transfer and pressure drop on the leading and trailing surfaces. In the first pass, for example, the heat/mass transfer on the leading surface is greatly increased, though the heat/mass transfer on the trailing surface is almost the same. The reason is that effect of the main flow is more dominant than effect of secondary flow. In particular, it gave decrement of the heat/mass transfer and the pressure drop at turning region and upstream region of second pass for both non-rotating and rotating cases.

Key words: Naphthalene sublimation technique(나프탈렌승화법), Heat/Mass transfer(열/물질전달), Pressure drop(압력강하), Rotating duct(회전덕트)

기 호 설 명

C_p : 국소압력강하

D_h : 수력직경

f : 마찰계수

f_0 : 요철이 없는 원형관에서의 f

H : 덕트높이

h : 열전달계수

h_m : 물질전달계수

P_{ref} : 기준압력

P_x : 국소압력

R : 유로 최대반경

Re : Reynolds 수, $D_h u_b / \nu$

Ro : Rotation 수, $D_h \Omega / u_b$

Sh : Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$

Sh_0 : 요철이 없는 원형관에서의 Sh 수

u_b : 평균 속도

W : 유로의 폭

x : 주유동방향 거리

y : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2123-2828; fax: +82-2-312-2159

E-mail address: hhcho@yonsei.ac.kr

z : 덕트 바닥면으로부터의 높이

그리스 문자

η : 열/물질 성능계수

μ : 점성계수

ν : 동점성계수

ρ : 밀도

Ω : 회전각속도

1. 서 론

가스터빈의 효율을 향상시키고 블레이드를 보호하기 위한 다양한 냉각기법 연구가 오랜 기간에 걸쳐 이루어져 왔다. 그 결과, 충돌제트 냉각, 막냉각, 내부관 냉각 등과 같은 다양한 기술들이 개발 및 발전되어 블레이드 냉각에 응용되고 있다. 그 중 내부관 냉각 기술은 터빈의 압축기로부터 나오는 냉각유체를 블레이드 내부의 유로에 주입하여 강제대류가 일어나게 함으로써 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하는 방법이다.

내부관 냉각 성능 및 효율은 여러 가지 인자에 의하여 결정되는데, 실제 블레이드 내부유로와 같이 곡관부를 갖는 덕트가 회전하는 경우, 복잡한 유동구조 및 열전달, 압력강하 특성을 갖게 된다. 따라서 보다 높은 성능을 갖는 터빈 블레이드 냉각유로의 설계를 위해서는 덕트의 회전과 냉각유체의 유량 및 덕트 형상 등이 미치는 열전달 및 압력강하 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 산업용 가스터빈의 경우, 수력직경에 대한 Reynolds 수는 20,000에서 30,000 정도이며, 무차원된 회전수(Ro)는 0.2에서 0.3 정도이다. 그러나 이러한 범위 내에서의 실험적 연구의 한계성으로 인해, 여러 가지 변수 중 한 변수만을 변화시켜 가며 열전달 및 압력강하에 어떠한 영향을 미치는지를 밝혀내는 연구들이 진행되었다.

우선, 회전에 따른 열전달 특성을 연구하기 위해, Han et al.⁽¹⁾ 및 Wagner et al.⁽²⁾은 회전덕트 내 곡관부 및 원심부력(buoyancy force)으로 인한 열전달 특성에 관해 연구하였으며, 곡관부로 인해 곡관부 이후 높은 열전달 특성이 나타난다는 것을 찾아내었다. 하지만, 평균적인 열전달 분포로는 가스터빈 블레이드 내 열설계의 한계를 가지고 있기 때문에 이를 해결하기 위해, 국소적인 열

전달 분포를 얻기 위한 연구가 진행되었다. Mo-chizuki et al.⁽³⁾은 열전대를 이용하여 매끈한 덕트와 90° 및 각도요철이 설치된 덕트 내에서의 열전달 분포를 구하였고, Liou et al.⁽⁴⁾은 감온액 정센서를 이용하여 덕트가 정지하였을 때와 회전하였을 때 곡관부에서의 열전달 분포를 구하였다. 또한 Cho et al.⁽⁵⁾과 Kim et al.^(6,7)은 나프탈렌 승화법을 이용하여 종횡비(Aspect Ratio, W/H)가 0.5인 매끈한 덕트와 70° 요철이 설치된 덕트 내에서 회전수에 따른 곡관부 및 곡관부 이후의 열/물질전달 특성 변화를 찾아내었다.

회전하는 덕트 내 형상에 따른 연구로는 주로 덕트의 종횡비 및 곡관부의 두께에 관한 연구가 주로 이루어졌다. Han et al.⁽⁸⁾은 덕트의 종횡비를 바꿔 가며 열전달을 측정하여 1차유로 및 2차유로에서의 열전달 특성을 밝혀내었다. 그리고 Prabhu and Vedula^(9,10)는 회전하는 덕트 내 곡관부 분리벽 두께에 따른 압력강하의 크기를 찾기 위한 연구를 진행하였으며, 곡관부의 두께가 증가할수록 압력강하가 감소하는 것을 찾아내었다.

또한, 덕트 내 Re 수에 따른 열전달 특성 연구는 Astarita and Cardone⁽¹¹⁾ 및 Krishnamoorthy and Kumar⁽¹²⁾에 의해 주로 이루어졌다. Astarita and Cardone⁽¹¹⁾은 곡관부를 가지는 정지한 매끈한 덕트 내에서의 Re 수 변화에 따른 열전달을 측정하여, Re 수가 증가할수록 열전달 비는 감소하며, 곡관부로 인한 1차 피크와 곡관부 이후 박리유동으로 인한 2차 피크가 생성된다는 것을 밝혀내었다. 그리고 Krishnamoorthy and Kumar⁽¹²⁾은 회전덕트 내 전·후연면 열전달에 미치는 영향에 대해 연구하여, 회전덕트 내 Re 수 증가에 따른 열전달 비는 전연면(Leading surface)에서는 크게 증가하지만, 후연면(Trailing surface)에서는 약간 감소한다는 것을 찾아내었다.

이처럼 기존의 대부분의 연구들은 회전덕트 내 열전달 특성에 중점을 두고 실험하거나, 압력만을 측정하였다. 그렇지만 가스터빈 내 내부유로 설계를 위해서는 국소적인 열전달 및 압력강하를 고려하여 설계하여야 하며, 내부관 내 흐르는 유량에 따른 연구가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 내부유로 내 유량에 따른 국소적인 열전달 및 압력강하를 실험적인 연구를 통해 그 특성을 알아보기 위해 Re 수에 따른 열전달 분포, 압력계수 분포 및 마찰계수를 통해 각 구간에서

의 특성에 대하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 회전덕트 실험장치의 개략도를 나타내며, 실험장치는 크게 송풍부와 회전부, 그리고 측정부로 크게 3부분으로 나누어진다. 실험장치의 자세한 구성은 Cho et al.⁽⁵⁾에 제시되어 있다.

Fig. 2는 블레이드 형상 및 실험에 사용된 매끈

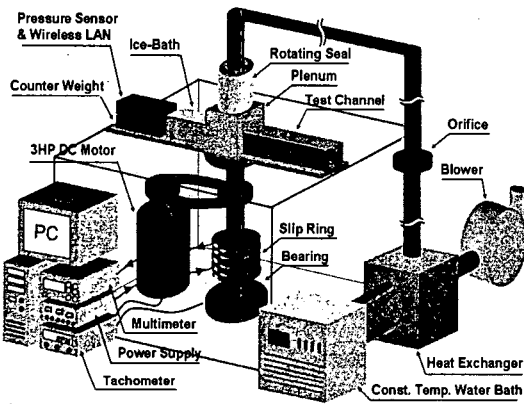
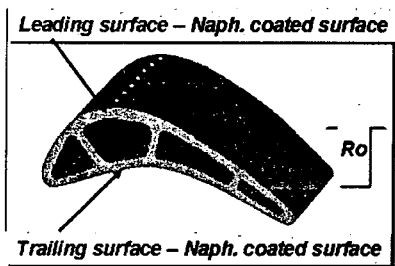
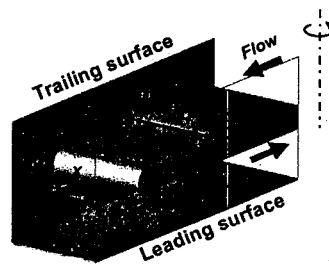


Fig. 1 Experimental apparatus.

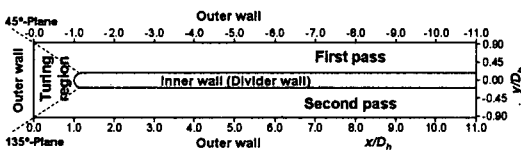


(a) Blase shape

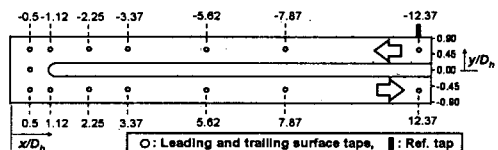


(b) Smooth duct

Fig. 2 Geometry of gas-turbine blade.



(a) Coordinate system



(b) Pressure tap location

Fig. 3 Coordinate system and tap location.

한 덕트의 형상을 나타낸다. 덕트는 중형비가 0.5인 직사각형 형태이고, 180°의 곡관부로 연결된 2층의 유로로 되어 있으며 아크릴로 제작되었다. 덕트의 수력직경(D_h)은 26.67 mm이며, 수력직경 대비 최대회전반경(R/D_h)은 21.63의 값을 갖으며, 시험부는 덕트의 입구로부터 약 $6 D_h$ 떨어진 지점에 설치하였다. 분리벽의 두께는 $0.375 D_h$ 이며, 끝단(tip)은 반원형으로 제작되었다. 곡관부의 90° 꺾어진 부분에서 분리벽의 끝과 곡관부 외벽과의 간격(W)은 $1.0 D_h$ 가 되도록 하였다.

Fig. 3(a)은 실험에 사용된 덕트의 전·후연면의 좌표계 및 열/물질전달에서의 가열면에 상사되는 부분을 나타낸다. 0.8 mm의 정압탭은 Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 전·후연면에 설치되어 있고, 기준 압력탭은 바깥면 $x/D_h = -12.37$ 위치에 설치하였으며, 기준 압력탭과 측정 압력탭 사이의 차압은 정밀도가 0.2%인 압력센서(PSI사, ESP-32HD)를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서는 Re 수 및 Ro 수에 따른 국소적인 열/물질전달과 압력강하 분포 및 각 구간에서의 마찰계수를 구하여 그 특성을 알아보기 위해, 수력직경 기준 Re 수는 10,000에서 25,000까지 변화시켜 가며, 정지한 경우($Ro=0.0$)와 회전하는 경우($Ro=0.1$)에 대하여 실험을 수행하였으며, 이때 최대회전속도는 520 rpm이었다.

2.2 실험결과 처리

본 연구에서는 열전달과 물질전달의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리과정은 Cho et al.⁽⁵⁾ 및 Kim et al.⁽⁶⁾에 제시되어 있다.

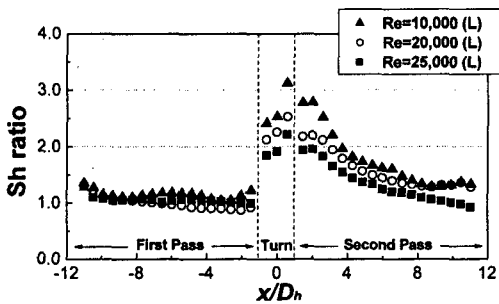
나프탈렌이 코팅되어 있는 면의 높이를 송풍 전과 후의 측정하여 국소 물질전달계수를 구하고 이로부터 Sherwood 수(Sh)를 구하였다. 또한 물질전달 실험결과를 무차원 물질전달계수비(Sh/Sh₀)로 나타내었고, 이때 Sh₀(=0.023Re^{0.8}Sc^{0.4})는 Mc-Adams⁽¹³⁾에 의해 제시된 완전 발달된 원형관에서의 Sh 수이다. 본 실험에서의 Sh 수의 불확실성은 Kline and McClintock⁽¹⁴⁾의 방법에 의하여 95% 신뢰수준에서 7.76%의 값을 갖는다.

국소적인 압력강하는 덕트의 1차유로 바깥면의 기준 압력(P_{ref})과 각 지점의 차압을 주유동의 동압으로 무차원화하여 다음과 같이 나타내었다.

$$C_p = \frac{(P_x - P_{ref.})}{\left[\left(\frac{1}{2} \right) \rho u_b^2 \right]} \quad (1)$$

전·후연면 및 바깥면에서의 각 구간(1차유로, 곡관부, 2차유로 상류, 그리고 2차유로 하류)에서의 평균 압력강하(ΔP/ΔL)는 각 구간 시작압력과 구간 끝압력 사이의 국소차압(ΔP) 측정 데이터의 선형맞춤에 의해 계산되고, 이를 이용하여 계산된 마찰계수는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{\Delta P}{4 \left(\frac{\Delta L}{D_h} \right) \left(\frac{1}{2} \right) \rho u_b^2} \quad (2)$$



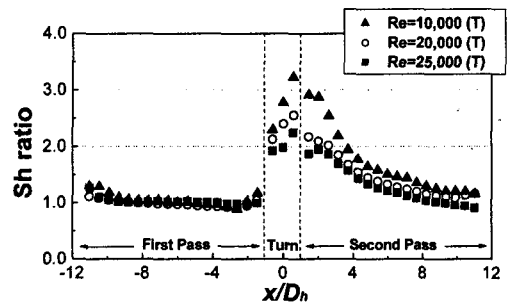
(a) Leading surface

덕트를 통과하는 공기의 질량유량과 Reynolds 수의 불확실성은 Kline and McClintock⁽¹⁴⁾의 기술방법에 의해 95%의 신뢰수준에서 각각 1.0%와 1.4%이며, 국소적인 압력강하와 각 구간에서의 마찰계수의 불확실성은 각각 4.7%와 4.9%이다. 마찰계수는 Petukhov⁽¹⁵⁾에 의해 제시된 매끈한 파이프에서의 완전 발달한 난류유동장에서의 마찰계수, f₀(=2(2.236 ln Re - 4.639) - 2)와의 비, f/f₀의 형태로 제시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

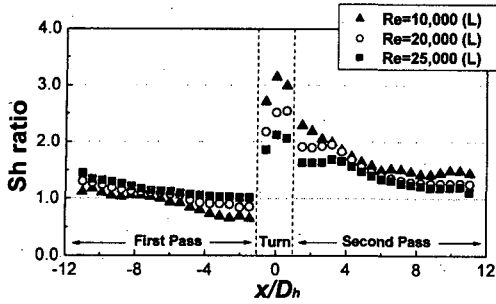
3.1 열/물질전달 특성

Fig. 4는 정지한 덕트 내 전·후연면의 물질전달계수비를 유로 내 각 구간에서의 면적 평균으로 나타낸 그림이다. 정지한 경우, 전연면과 후연면의 열/물질전달 분포는 비슷하게 나타났고, 1차유로에서는 모든 Re 수에 대해서 완전 발달된 원형관에서의 Sh 수와 같았다. 그러나 곡관부에서는 급속한 유동의 방향전환으로 인해 높은 열/물질전달 분포가 나타났으며, 특히 x/D_h=0.59에서 가장 높은 Sh 수가 측정되었다. Re 수에 따른 변화는 Re 수가 커질수록 무차원한 물질전달비는 감소하였는데, 이는 Re 수의 증가율에 비해 상대적으로 이차유동으로 인한 열전달 증가율이 작고 열전달이 국소적으로 증가하기 때문이다. 2차유로에서는 곡관부에서 생성된 이차와류로 인해 2차유로 하류까지 높은 열/물질전달 분포가 나타났으며, 2차유로 역시 Re 수가 증가할수록 물질전달 계수비는 감소하였는데, 이는 Re 수가 클수록 주요동의 속도 증가로 인해 이차유동이 빨리 소멸되기

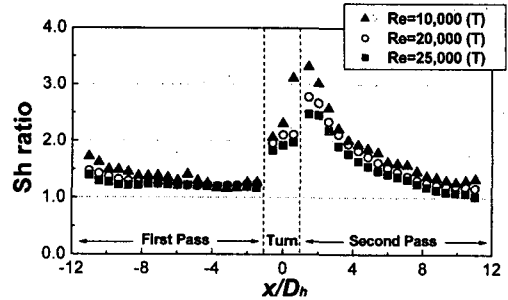


(b) Trailing surface

Fig. 4 Regional averaged Sh ratios in the stationary duct (Ro=0.0).



(a) Leading surface



(b) Trailing surface

Fig. 5 Regional averaged Sh ratios in the rotating duct (Ro=0.2).

때문이다. 이러한 결과는 Astarita and Cardone⁽¹¹⁾에 의한 선행 연구결과와 일치하였다.

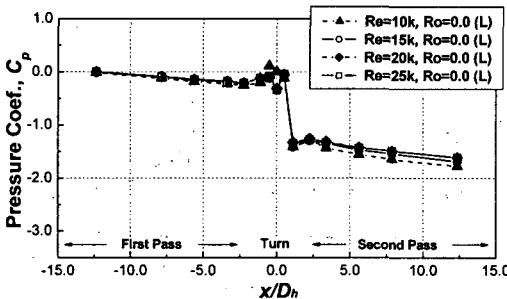
덕트가 회전하는 경우(Fig. 5), 회전에 의한 코리올리력으로 인해 1차유로에서는 유동이 후연면으로 치우치게 되어 전·후연면의 Sh 수의 차이가 나타난다. 즉, 전연면의 Sh 수는 감소하지만, 후연면의 Sh 수는 증가한다. 또한, Re 수 변화에 따른 열/물질전달 특성은 Krishnamoorthy and Kumar⁽¹²⁾의 결과와 마찬가지로 Re 수가 증가할수록 전연면의 Sh 수는 크게 증가하였지만, 후연면의 Sh 수는 약간 감소하였다. 이는 빠른 주유동 속도로 인해 덕트의 회전에 의한 전·후연면의 열/물질전달 차가 감소하였기 때문이다. 곡관부에서는 Kim et al.⁽⁶⁾에 의해 밝혀졌듯이, 1차유로에서 후연면으로 치우친 유동으로 후연면 쪽의 와류가 소멸되고, 전연면 쪽의 와류가 강해져 전연면에서 높은 Sh 수 분포가 나타나게 된다. 또한, 이 이차유동으로 인해 전연면에서는 $x/D_h = 0.0$ 에서, 후연면에서는 $x/D_h = 1.47$ 에서 가장 높은 Sh 수가 나타난다. 여기서, 후연면 $x/D_h = 1.47$ 에

서 높은 Sh 수가 나타난 이유는 Kim et al.⁽⁶⁾에 의해 밝혀졌듯이, 이차유동의 중심이 후연면 방향으로 이동하면서 후연면 내벽 근처에서 강한 충돌을 일으키기 때문이다. 2차유로에서는 점차 곡관부로 인한 와류가 소멸되어, 2차유로 하류에서는 완전 발달된 원형관에서의 물질전달계수와 비슷해지게 된다. 곡관부와 2차유로 역시 정지한 경우와 마찬가지로 Re 수가 증가할수록 물질전달계수비는 작아지게 된다.

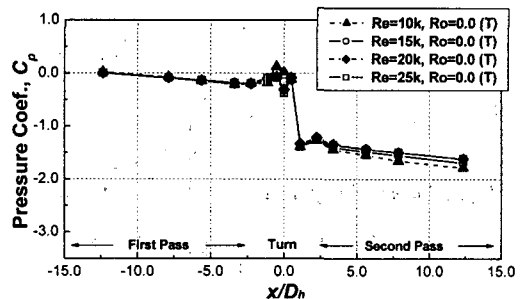
3.2 국소 압력계수 분포

Fig. 6과 Fig. 7은 전연면과 후연면의 각 x/D_h 지점에서의 Re 수에 따른 압력계수를 정지한 경우(Fig. 6)와 회전하는 경우(Fig. 7)에 대해서 나타낸 그림이다.

Fig. 6과 같이 정지한 경우, 전·후연면의 압력강하계수 분포가 모든 구간에서 비슷하였다. 2차유로 $x/D_h = 3.37$ 이후를 제외한 모든 구간에서 압력계수 분포는 Re 수와 상관없이 거의 일정하

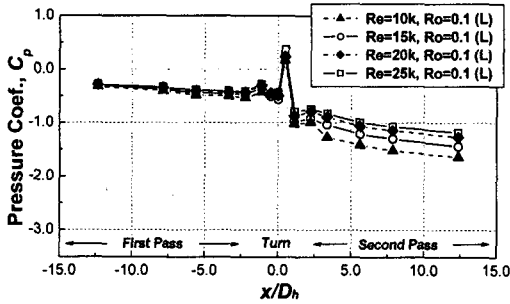


(a) Leading surface

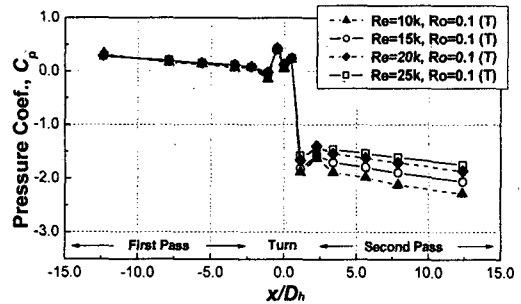


(b) Trailing surface

Fig. 6 Local pressure coefficient distributions for the stationary duct (Ro=0.0).



(a) Leading surface



(b) Trailing surface

Fig. 7 Local pressure coefficient distributions for the rotating duct (Ro=0.1).

게 나타났다. 그렇지만 $x/D_h = 3.37$ 이후는 Re 수가 증가할수록 압력계수가 증가하였다. 즉, Re 수가 증가할수록 2차유로 상류에서의 압력강하가 감소하였는데, 이는 Re 수가 높을수록 빠른 주유동 속도로 인해 곡관부에서 생성된 이차유동이 빠르게 소멸되었기 때문이다.

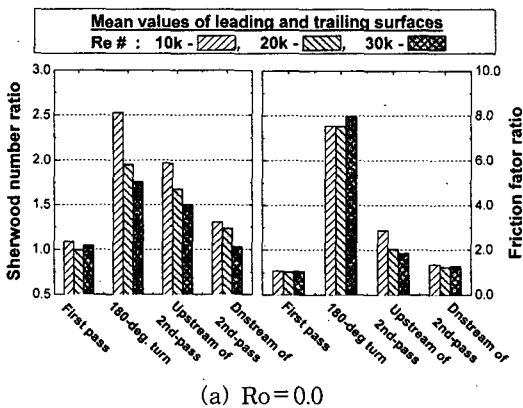
덕트가 회전하는 경우(Fig. 7), 역시 정지한 경우와 같은 경향을 갖지만, 덕트가 회전하는 경우, 1차유로에서의 압력계수는 전연면에서 작게 후연면에서 크게 나타났다. 또한, Re 수가 증가할수록 압력계수가 전연면이 후연면보다 약간 더 높게 나타났는데, 이는 앞서 열/물질전달 특성부분에서 언급했듯이 빠른 주유동으로 인해 이차유동의 강도가 약해졌기 때문이다. 곡관부 직후 2차유로에서의 압력계수 분포는 1차유로와 반대로 전연면의 압력계수가 크게 나타났으며, 후연면의 압력계수는 작게 나타났다. 이는 유동의 방향이 전환되면서 코리올리력의 방향이 바뀌게 되어 압력계

수의 차이가 1차유로와 반대로 나타나게 된 것이다. 또한, Re 수가 증가할수록 압력계수가 크게 나타났다고 압력계수의 증분도 정지한 경우보다 더욱 크게 나타났다. 이는 정지한 경우와 마찬가지로 Re 수가 커질수록 주유동의 속도가 빨라져 곡관부 및 2차유로에서의 이차유동이 빨리 약해지고 빠르게 소멸되기 때문이다.

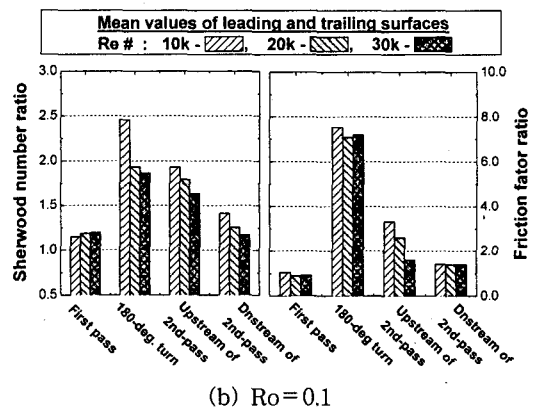
3.3 평균 열/물질전달 및 마찰계수

Fig. 8은 각 구간(1차유로, 곡관부, 2차유로 상류 및 2차유로 하류)에서의 전·후연면 평균 Sh 수 및 마찰손실비로 각각의 Re 수에 대해서 나타내었다.

덕트가 정지한 경우(Fig. 8(a)), 1차유로에서는 완전 발달된 원형관 내 유동에 의한 물질전달계수와 비슷하게 나타났으며, 곡관부에서는 완전 발달 원형관에서의 물질전달계수보다 Re 수가 10,000일



(a) Ro=0.0



(b) Ro=0.1

Fig. 8 Mean Sherwood number and friction factor ratios at each region.

때는 2.5배, Re 수가 25,000일 때는 1.7배 정도 증가하였다. 이후 2차유로에서의 평균 Sh 수는 점차 감소하였다. Re 수 증가에 따른 평균 Sh 수는 1차유로를 제외한 나머지 영역에서 점차 감소하는데, 이는 곡관부로 인한 이차유동의 국소적인 열전달 증가와 빠른 주유동이 이차유동을 빠르게 소멸시켰기 때문이다. 마찰계수비 분포 역시 곡관부에서 1차유로의 8배 정도로 가장 크게 나타났으며, 2차유로에서는 점차 감소하였다. 이는 곡관부에서의 방향전환으로 생성된 이차유동으로 인한 큰 압력강하 때문이며, 2차유로 하류로 갈수록 이차유동이 점차 소멸되기 때문이다.

덕트가 회전하는 경우(Fig. 8(b)), 평균 물질전달 및 마찰계수비는 정지한 경우와 거의 같았다. 단지, 곡관부를 제외한 영역에서의 평균 물질전달 및 마찰계수비가 높게 나타났는데, 이는 회전으로 인한 이차유동 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 곡관부를 가진 매끈한 덕트 내 Re 수 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

정지한 경우 및 회전하는 경우 모두, 곡관부에서의 급격한 유동 방향전환으로 인해 이차유동이 발생하게 되며, 이로 인해 높은 열전달과 압력강하가 일어나게 된다. 그러나 Re 수가 증가할수록 1차유로 전면부의 열전달은 크게 증가하였지만, 1차유로 후면부의 열전달은 약간 감소하였다. 또한 곡관부에서는 정지한 경우 및 회전하는 경우 모두 물질전달비 및 압력강하가 감소하였는데, 이는 빠른 주유동으로 인해 이차유동이 빠르게 소멸되기 때문이다. 특히 회전하는 덕트 내 곡관부 이후에서 Re 수가 커질수록 열/물질전달 및 압력강하가 더욱 크게 감소하였는데, 이는 회전으로 인한 코리올리력이 곡관부에서 발생한 이차유동을 방해하기 때문이다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업기술개발사업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 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 Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 912-920.
2. Wagner, J. H., Johnson, B. V. and Kopper, F. C., 1991, Heat transfer in rotating serpentine passages with smooth walls, *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 321-330.
3. Mochizuki, S., Murata, A., Shibata, R. and Yang, W. J., 1999, Detailed measurement of local heat transfer coefficients in turbulent flow through smooth and rib-roughened serpentine passages with a 180° sharp bend, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1925-1934.
4. 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.
5. Cho, H. H., Lee, S. Y., Won, J. H. and Rhee, D. H., 2004, Heat/mass transfer in two-pass rotating rectangular duct with and without 70°-angled ribs, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 467-476.
6. Kim, K. M., Kim, Y. Y., Lee, D. H. and Cho, H. H., 2005, Effects of rotation speed on heat transfer and flow in a coolant passage with turning region (I)—Parallel Ribbed Duct, *Transactions of KSME(B)*, Vol. 29, No. 6, pp. 737-746.
7. Kim, K. M., Kim, Y. Y., Lee, D. H. and Cho, H. H., 2005, Effects of rotation speed on heat transfer and flow in a coolant passage with turning region (II)—Parallel Ribbed Duct, *Transactions of KSME(B)*, Vol. 29, No. 8, pp. 911-920.
8. Fu, W. L., Wright, L. M. and Han, J. C., 2005, Heat transfer in two-pass rotating rectang-

- ular channels (AR=1:2 and 1:4) with smooth walls, ASME Journal of Turbomachinery Vol. 127, pp. 255-277.
9. Prabhu, S. V. and Vedula, R. P., 2000, Pressure drop characteristics in a rotating smooth square channel with a sharp 180° bend, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 21, pp. 198-205.
 10. Prabhu, S. V. and Vedula, R. P., 2003, Pressure drop characteristics in a rib roughened rotating square duct with a sharp 180° bend, Journal of Enhanced Heat Transfer, Vol. 10, No. 4, pp. 363-377.
 11. Astarita, T. and Cardone, G., 2000, Thermo-fluiddynamic analysis of the flow in a sharp 180° turn channel, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 20, pp. 188-200.
 12. Krishnamoorthy, V. and Kumar, C. V. K., 2002, Effect of Reynolds number on heat transfer in a rotating smooth square duct with radially outward flow, Proceeding of 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Paper No. HT-ABS-008.
 13. McAdams, W. H., 1942, Heat Transmission, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
 14. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainty in single-sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-8.
 15. Petukhov, B. S., 1970, Advances in Heat Transfer, Academic Press, New York, Vol. 6, pp. 503-564.