

< 논문 >

덕트 종횡비가 회전덕트 내 압력강하에 미치는 영향

김경민* · 이동현* · 조형희†

(2005년 11월 30일 접수, 2006년 4월 25일 심사완료)

Effects of Duct Aspect Ratios on Pressure Drop in a Rotating Two-Pass Duct

Kyung Min Kim, Dong Hyun Lee and Hyung Hee Cho

Key Words: Coriolis Force(코리올리력), Dean Vortex(딘와류), Pressure Drop(압력강하), Rib Turbulator(난류촉진기), Rotating Duct(회전덕트)

Abstract

The pressure drop characteristics in a rotating two-pass duct with rib turbulators are investigated in the present study. Three ducts of 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 with 1.5 mm \times 1.5 mm cross-section are attached on the leading and trailing surfaces. The pitch-to-rib height ratio (p/e) is 10 . The distance between the tip of the divider and the outer wall of the duct is $1.0W$. The thickness of divider wall is 6.0 mm or $0.225D_h$. The Reynolds number (Re) based on the hydraulic diameter is kept constant at $10,000$ and the rotation number (Ro) is varied from 0.0 to 0.2 . As duct aspect ratio increases, high friction factor ratios show in overall regions. The reason is that the rib height-to-duct height ratio (e/H) increases, but the divider wall thickness-to-duct width (t_d/W) decreases. The rotation of duct produces pressure drop discrepancy between the leading and trailing surfaces. However, the pressure drop discrepancy of the high duct aspect ratio ($AR=2.0$) is smaller than that of the low duct aspect ratio ($AR=0.5$) due to the decrement of duct height (H).

기호설명

AR : 덕트 종횡비, W/H
 C_p : 국소압력강하
 D_h : 수력직경, $2WH/(W+H)$
 e : 요철 높이
 f : 마찰 계수
 f_0 : 요철이 없는 원형관에서의 f

H : 덕트 높이
 h : 열전달계수
 h_m : 물질전달계수
 P_{ref} : 기준 압력
 P_x : 국소 압력
 p : 요철간 거리
 R : 유로 최대 반경
 Re : Reynolds 수, $D_h u_b / \nu$
 Ro : Rotation 수, $D_h \Omega / u_b$
 Sh : Sherwood 수, $h_m D_h / D_{nab}$
 Sh_0 : 요철이 없는 원형관에서의 Sh 수
 \overline{Sh}_p : 피치 평균 Sherwood 수
 \overline{Sh}_R : 구간 평균 Sherwood 수
 t_d : 분리벽의 두께

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부
 E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr
 TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학부

- u_b : 평균 속도
- W : 유로의 폭
- w : 요철의 폭
- x : 주유동방향 거리
- y : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리
- z : 덕트 바닥면으로부터의 높이

그리스문자

- η : 열/물질 성능계수
- μ : 점성계수
- ν : 동점성계수
- ρ : 밀도
- Ω : 회전각속도

1. 서론

가스터빈의 입구 온도를 높여 가스터빈 전체 시스템의 효율 향상을 위한 베인 및 블레이드 보호를 위한 냉각기법 연구는 오래전부터 수행되어 왔다. 그 중 내부관 냉각기술은 터빈의 압축기로부터 나오는 냉각유체를 블레이드 내부의 유로에 주입하여 강제대류가 일어나게 함으로써 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하는 방법이다. 특히, 블레이드 내부냉각유로 내 난류촉진기인 요철을 설치하여 표면 열전달을 크게 향상시키는 방법을 주로 사용하고 있다. 내부유로의 냉각성능 및 효율은 곡관부, 요철, 회전, 유로의 형상에 의해 크게 좌우된다. 따라서 보다 높은 냉각성능을 갖는 터빈 블레이드 내부 냉각 유로 설계를 위해서는 곡관부, 요철 및 회전 등의 각각의 인자가 열전달, 압력강하 및 내부 유동에 미치는 영향을 파악하는 것이 필수적이며, 더 나아가 이들의 복합적인 특성을 찾기 위한 연구를 진행하여야 한다.

각각의 인자 중 덕트 회전에 의한 영향을 찾기 위해 Bons와 Kerrebrock⁽¹⁾은 회전하는 덕트 내 열전달을 측정하여 회전으로 인해 발생하는 코리올리력(Coriolis force)의 영향을 찾아내었다. 또한 회전하는 덕트 내 곡관부로 인한 열전달 특성을 찾기 위해 Wagner 등⁽²⁾은 덕트 내부의 열전달을 측정하여 특성을 파악하고, 회전으로 인한 원심부력(buoyancy force)에 관해 연구하였다. 이들은 곡관부로 인해 곡관부 이후 높은 열전달 특성이

나타난다는 것을 찾아내었고 회전하는 덕트 내 냉각유체의 밀도차에 의해 전·후연면에 다른 열전달 특성이 나타난다는 것을 찾아내었다. 하지만 평균적인 열전달 분포로는 가스터빈 블레이드 내 냉각 유로 설계의 한계를 가지고 있기 때문에 이를 해결하기 위해, Mochizuki 등,⁽³⁾ Liou 등,⁽⁴⁾ Cho 등⁽⁵⁾은 다양한 실험방법을 적용하여 국소적인 열전달 분포를 측정하였다.

내부관 형상에 따른 연구로는 Park 등⁽⁶⁾과 Han 등⁽⁷⁾에 의해 이루어졌다. 이들은 정지한 덕트에서 90°, 60°, 45°, 30°의 각도를 갖는 요철과 다양한 Reynolds 수에서 종횡비 AR (=W/H)에 따른 열전달 변화를 연구하였다. 이들은 정지한 덕트 내에서 90°요철은 종횡비가 증가할수록 열전달이 증가하나 다른 각도를 가진 요철에서는 종횡비가 증가할수록 열전달이 감소한다는 것을 밝혀내었다. 이 외에도 많은 연구자들에 의해 요철, 곡관부 및 회전에 의한 열전달 분포에 관한 연구가 진행되었다.⁽⁸⁻¹³⁾

그렇지만 회전덕트 내 열설계 및 성능평가에 있어 중요한 마찰손실에 관한 연구가 실험적 어려움으로 인해 그 동안 이뤄지지 않았다. 그러나 최근 압력강하를 찾기 위해 Kim 등^(14,15)은 매끈한 덕트와 90도 요철이 설치된 회전덕트 내에서의 압력강하를 측정하였고, Prabhu와 Vedula^(16,17)는 회전하는 덕트 내 분리벽 두께를 바꿔가며 곡관부에서의 압력강하 특성을 찾아내었다. 이 연구로부터 이들은 곡관부의 두께가 증가할수록 압력강하가 감소하는 것을 찾아내었고 요철에 의해 큰 압력강하가 나타나는 것을 밝혀내었다.

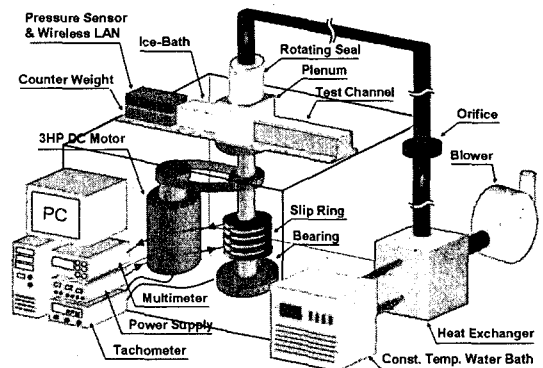


Fig. 1 Experimental apparatus

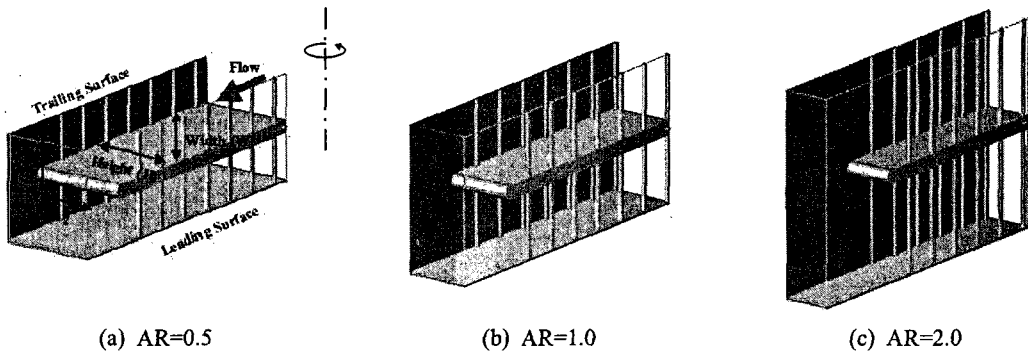


Fig. 2 Geometry of the test duct

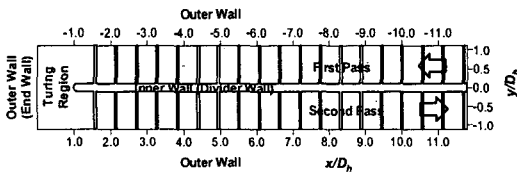


Fig. 3 Coordinate system (AR=1.0)

이처럼 기존의 대부분의 연구들은 회전덕트 내 평균적인 열전달 및 덕트 전체에서의 마찰계수 측정에 중점을 두고 실험을 수행하였다. 그러므로 회전덕트 내 각 영역에서의 열/유동 특성에 관한 종합적인 이해자료와 내부유로 설계 자료 및 수치해석을 위한 검증자료가 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 Kim 등⁽¹³⁾에 의해 얻어진 국소적인 물질전달 분포와 현재의 국소적인 압력강하 특성 및 마찰계수로부터 각각의 덕트 종횡비에 따른 성능계수를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 1은 회전덕트 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 송풍부와 회전부 그리고 측정부로 나누어진다. 실험장치의 자세한 구성은 Cho 등⁽⁶⁾에 제시되어 있다.

Fig. 2는 실험에 사용된 덕트의 형상을 나타내며, Fig. 3은 종횡비(aspect ratio, W/H)가 1.0인 덕트의 각 부분의 명칭 및 좌표계이다. 실험에 사용된 사각 덕트들의 종횡비는 0.5, 1.0, 2.0이며, 각 덕트의 수력직경(D_h)은 26.7 mm로 일정하게 제작하였다. 이 실험 덕트들은 180°의 곡관부로 연결된 2중의 유로로 제작하였다. 또한, 분리벽의 끝단(tip)은 반원형으로, 분리벽의 두께는 $0.225 D_h$

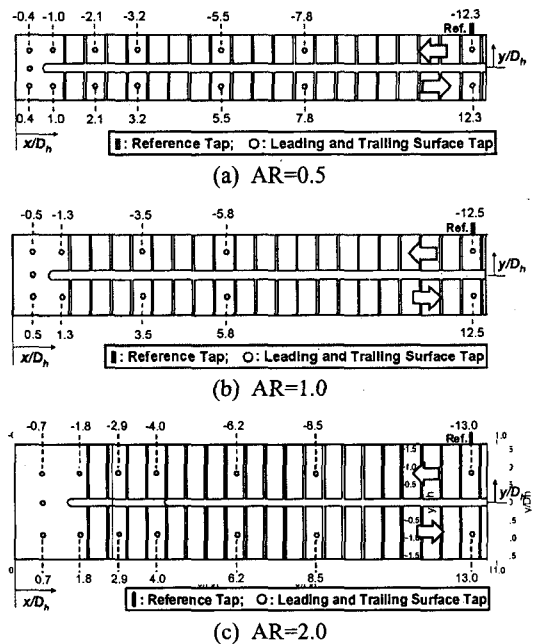


Fig. 4 Tap locations (I: reference; O: leading and trailing surface)

으로 제작하였다. 곡관부의 90° 꺾어진 부분에서 분리벽의 끝과 곡관부 외벽과의 간격은 $1.0 W$ 가 되도록 하여, 이 간격은 덕트의 종횡비가 0.5인 경우 $0.75 D_h$, 1.0인 경우 $1.0 D_h$ 이며 2.0인 경우 $1.5 D_h$ 이다. 수력직경대비 최대회전반경(R/D_h)은 21.63의 값을 갖고, 시험부는 덕트의 입구로부터 약 $6 D_h$ 떨어진 지점에 설치하였다. 또한 덕트 내 요철은 곡관부를 제외한 유로의 내부에 설치하였으며, 이 때 요철의 단면은 $1.5 \text{ mm}(e) \times 1.5 \text{ mm}(w)$ 의 정사각형이다. 요철 높이 대 수력직경비(e/D_h)는 0.056, 요철사이거리 대 요철 높이 비

(p/e)는 10.0이며, 요철의 충돌각은 90° 로 하였다. 압력탭은 Fig. 4에 나타난 것처럼 전·후연면 대칭적으로 설치되어 있다. 각 중횡비를 갖는 덕트의 기준 압력점은 바깥면에 $x/D_h = -12.3$ (AR=0.5), $x/D_h = -12.5$ (AR=1.0), $x/D_h = -13.0$ (AR=2.0)에 각각 설치되어 있으며, 기준 압력탭과 측정 압력탭 사이의 차압은 정밀도가 0.2%인 압력센서(PSI 사, ESP-32HD)를 이용하여 측정하였다.

실제 가스터빈 엔진의 경우, Reynolds 수는 20,000~30,000 정도이며 회전수(Ro)는 0.2~0.4 정도이다. 그렇지만 본 연구에서는 실험의 한계로 인해 수력직경기준 Reynolds 수는 10,000으로 고정시키고, 회전수(Ro)를 0.0에서 0.2(≈ 420 rpm)까지 0.05(≈ 105 rpm)씩 변화시켜가며 국소압력강하 및 각 구간에서의 마찰계수를 구하여 회전수에 따른 영향을 고찰하였다. 또한, 본 연구의 마찰계수와 선행연구 된 Kim 등⁽¹³⁾의 물질전달 계수 비 (\overline{Sh}/Sh_0)로부터 열/물질 성능계수를 구하였다.

2.2. 실험결과 처리

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

$$C_p = (P_x - P_{ref}) / [(1/2)\rho u_0^2] \quad (1)$$

전·후연면 및 바깥면에서의 각 구간(1차유로, 곡관부 및 2차유로 상류, 2차유로 하류)에서의 평균압력강하($\Delta P/\Delta L$)는 각 구간 시작압력과 구간 끝압력 사이의 국소차압(ΔP) 측정 데이터의 선형맞춤에 의해 계산되고, 이를 이용하여 계산된 마찰계수는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \Delta P / [4(\Delta L/D_h)(1/2)\rho u_0^2] \quad (2)$$

덕트를 통과하는 공기의 질량유량과 Reynolds 수의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽¹⁸⁾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⁽¹⁹⁾에 의해 제시된 매끈한 파이프에서의 완전 발달한 난류 유동장에서의 마찰계수, $f_0 = (2(2.236 \ln Re - 4.639))^{-2}$ 와의 비, f/f_0 의 형태로 제시하였다. 또한 각 유로에서의 열전달 향

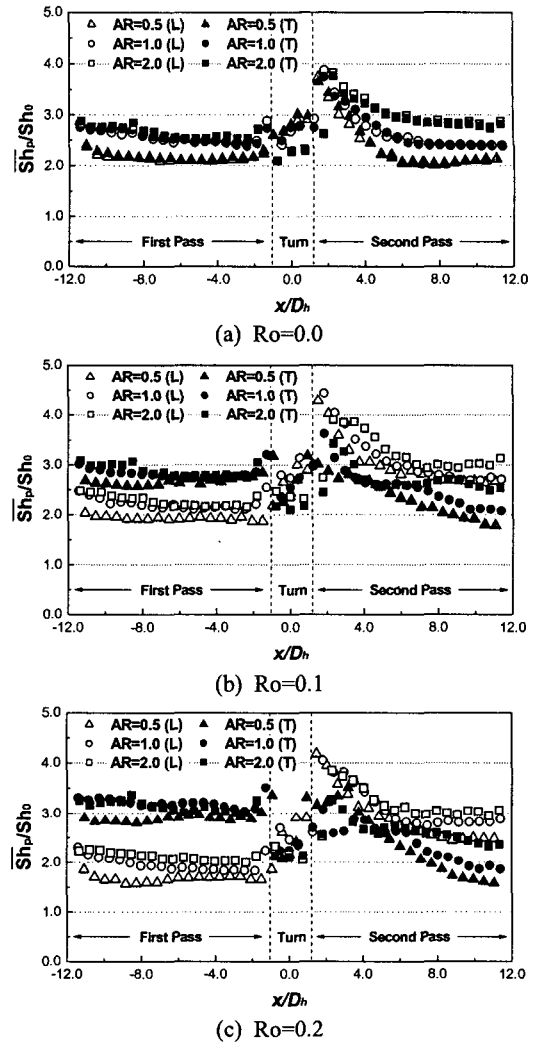


Fig. 5 Pitch-averaged Sherwood number ratio distributions [Kim 등⁽¹³⁾]

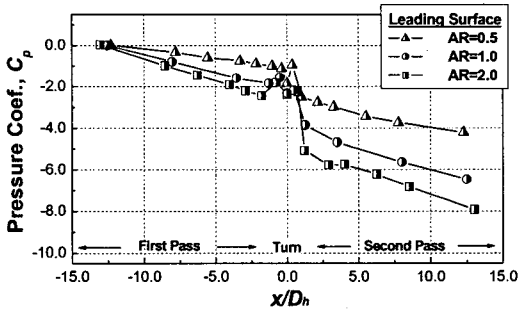
상에 따른 마찰손실을 고려하기 위해 Kim 등⁽¹³⁾에 의해 선행연구 된 물질전달 계수로부터 열/물질전달 성능계수를 다음식과 같이 정의하였다.

$$\eta = (\overline{Sh}/Sh_0) / (f/f_0)^{1/3} \quad (3)$$

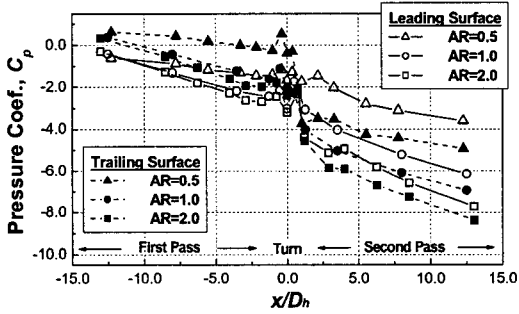
3. 결과 및 고찰

3.1. 열/물질전달 분포

Fig. 5는 Kim 등⁽¹³⁾에 의한 선행연구로부터 구해진 덕트의 회전수와 중횡비에 따른 요철 사이의 평균 물질전달 계수 비 분포를 나타내는



(a) $Ro=0.0$

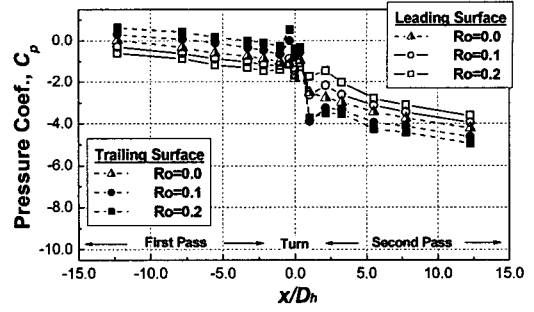


(b) $Ro=0.2$

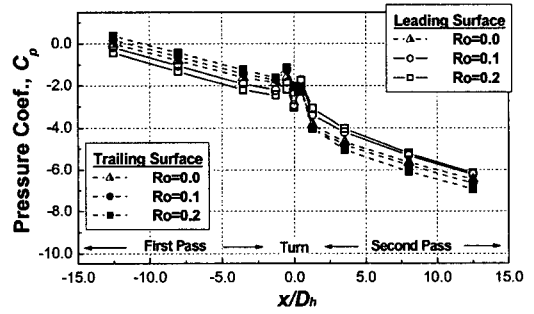
Fig. 6 Local pressure drop distributions for duct aspect ratios

그림이다. 이중유로를 가진 정지 덕트의 경우[Fig. 5(a)], 전·후연면의 물질전달 계수는 비슷하게 나타났다. 덕트의 1차유로에서는 종횡비가 증가할수록 요철높이 대 덕트높이 비(e/H)가 증가하여 평균 물질전달 계수가 증가하였지만, 곡관부에서는 종횡비가 작을수록 곡관부 내벽 끝단과 외벽 사이가 짧아져 턴와류(Dean vortex)가 미치는 영향이 상대적으로 커지게 되어 물질전달 계수가 높게 나타났다. 그리고 2차유로에서의 물질전달 계수는 1차유로와 마찬가지로 종횡비가 증가할수록 높게 나타났다.

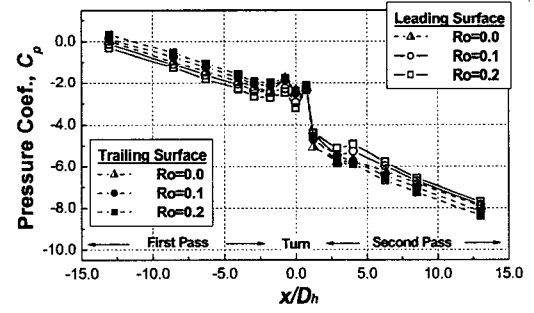
덕트가 회전할 경우[Fig. 5(b)]에 전·후연면의 물질전달 차이가 나타나기 시작한다. 이는 회전에 의해 덕트 내 코리올리력(Coriolis force)이 작용하여 한 쪽 면으로 치우친 유동으로 인해 발생하며, 코리올리력은 1차유로와 2차유로에서 서로 반대 방향으로 작용하기 때문에, 1차유로의 후연면과 2차유로의 전연면에서 높은 물질전달 분포가 나타나게 된다. Fig. 5(c)와 같이 회전수가 증가할 경우, 전연면과 후연면의 물질전달 차이는 더욱 커지게 된다. 하지만, 덕트의 종횡비에 따른 물질전달 분포는 정지한 경우와 유사하게 종횡비



(a) $AR=0.5$



(b) $AR=1.0$



(c) $AR=2.0$

Fig. 7 Local pressure drop distributions at rotation numbers

가 증가할수록 물질전달 계수가 증가한다.

3.2. 국소적인 압력강하 분포

Fig. 6은 전연면과 후연면의 각 x/D_h 지점에서의 종횡비에 따른 압력강하 분포를 정지한 덕트와 회전하는 덕트에 대해서 나타낸 그림이다.

Fig. 6(a)과 같이 정지한 경우, 전·후연면의 압력강하 값이 1차유로, 곡관부 및 2차유로의 전 구간에서 오차범위 내이므로 전연면만 제시하였다. 1차유로에서는 종횡비가 클수록 압력강하가 크게 나타났는데, 이는 요철높이 대 덕트높이 비(e/H)가 종횡비가 클수록 유동의 막힘 현상이 커져 압

Leading: —△— AR=0.5, —○— AR=1.0, —□— AR=2.0
 Trailing: - -△- - AR=0.5, - -●- - AR=1.0, - -■- - AR=2.0

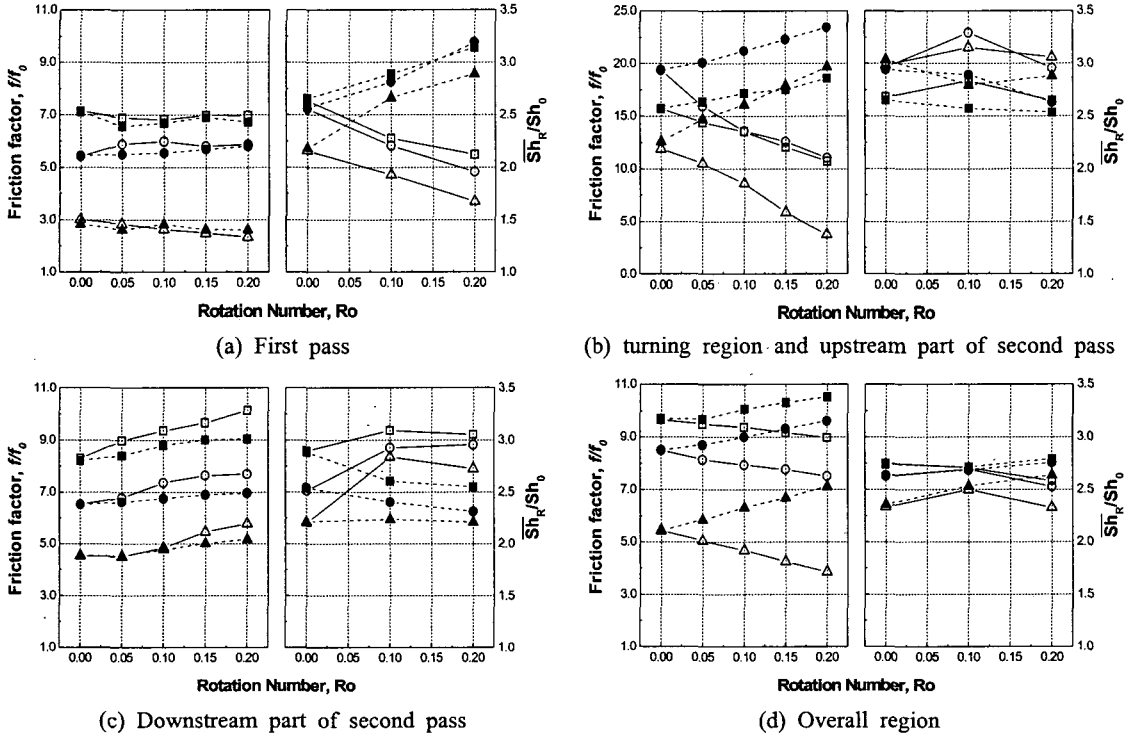


Fig. 8 Friction factors for each zone

력강하가 커졌기 때문이다. 곡관부에서도 종횡비가 클수록 곡관부 전·후로 하여 압력강하가 크게 나타나는데, 이와 같은 곡관부에서의 압력강하는 Prabhu와 Vedula^(16,17)에 의해 밝혀졌듯이 분리벽의 두께 대 유로의 폭 비(t_0/W)가 클수록 곡관부 직후 박리유동(separation bubble)이 약해져 압력강하가 작아지기 때문이다. 본 연구에서는 분리벽의 두께가 일정하기 때문에 종횡비가 클수록 박리유동의 영향이 커져 압력강하가 증가하게 된다. 2차유로에서의 압력강하 특성은 1차유로의 경향과 같게 나타났다.

덕트가 회전하는 경우[Fig. 6(b)]도 역시 종횡비가 증가함에 따라 덕트의 모든 영역에서 높은 압력강하가 나타났으며, 전·후연면의 압력 계수의 차이가 발생하였다. 이는 덕트의 회전에 의해 코리올리력이 발생하였기 때문이다. 따라서 1차유로에서는 후연면으로 유동이 편향되어 후연면의 압력 계수가 높아졌으며, 2차유로에서는 전연

면으로 유동이 편향되어 전연면의 압력 계수가 높아졌다. 종횡비가 클수록 전·후연면의 압력 계수의 차이가 작아지는 데, 이는 전·후연면의 거리(덕트높이, H)가 짧아졌기 때문이다. 이로부터 전·후연면의 압력 계수 차는 코리올리력과 덕트높이(H) 차로부터 생성되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 종횡비가 다른 유로 내 각 x/D_h 지점에서의 회전수 변화에 따른 국소적인 압력분포를 나타내는 그림이다. 모든 종횡비에서 1차유로에서는 회전수가 증가함에 따라 전연면에서의 압력은 감소하게 되고, 후연면에서의 압력은 증가하게 된다. 곡관부에서의 압력손실은 전연면보다 후연면에서 크게 나타났는데, 이는 1차유로에서의 유동이 후연면쪽으로 치우쳐 후연면의 유량이 많아졌기 때문이다. 2차유로에서는 코리올리력이 1차유로와 반대로 작용하기 때문에, 회전수 증가에 따라 1차유로와 반대로 전연면에서의 압력은 증가하였지만, 후연면은 감소하였다. 이와 같은

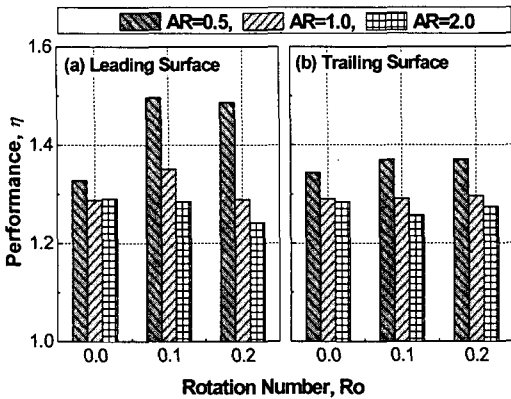


Fig. 9 Thermal performance for overall region

회전수 증가에 따른 전·후연면의 압력 값 차이는 종횡비가 클수록 줄어들게 되는데, 이는 Fig. 6에서 언급했듯이 덕트높이(H)가 감소하였기 때문이다.

3.3. 각 구간에서의 마찰계수 및 성능계수

Fig. 8은 덕트 내 각 구간에서의 회전에 따른 마찰손실을 완전 발달된 난류 유동관의 경우와 비교를 위해 마찰손실 비, f/f_0 의 형태로 각각의 종횡비를 가지는 덕트에 대해서 나타내었다. 대부분의 구간에서 종횡비가 증가할수록 마찰손실 비도 증가하였는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 요철높이 대 덕트높이 비(e/H)가 증가하지만, 분리벽 두께 대 유로의 폭 비(t_d/W)가 감소하였기 때문이다.

세부적인 마찰손실 비를 보면 1차유로[Fig. 8(a)]에서는 전·후연면의 회전수의 증가에 따른 마찰손실의 변화가 크지 않았다. 하지만, 곡관부 입구부터 2차유로 상류까지의 마찰손실[Fig. 8(b)]은 1:2차유로에 비해 크게 변화하였다. 또한 회전수 증가에 따라 전연면에서 마찰계수는 감소하지만, 후연면에서는 증가하였다. 이는 덕트의 회전수가 증가하면서 곡관부에서의 이차유동의 중심이 전연면에서 후연면 방향으로 이동하여 벽면 근처의 이차유동의 강도가 상대적으로 약해지기 때문이다. 2차유로 하류에서는 Fig. 8(c)과 같이 회전수 증가함에 따라 전연면과 후연면에서의 마찰손실이 증가하는데, 곡관부 및 덕트 회전에 의한 이차유동으로 인해 난류강도가 증가하기 때문이다. 각 면 전체에서의 마찰계수[Fig. 8(d)]는 Fig. 8(b)의 곡관부에서의 마찰계수와 유사하게

나타났는데, 이는 2중 유로를 가진 덕트 내에서는 곡관부에 의한 압력강하가 가장 큰 비중을 차지하고 있기 때문이다.

Fig. 9는 일정 이송동력 조건 하에서의 전연면과 후연면에서의 열/물질 성능계수를 제시한 것으로, 일반적으로 높은 물질전달이 일어나면서 낮은 마찰 손실 특성을 나타내는 경우 높은 성능계수를 예상할 수 있다. 전체 구간에 대한 성능계수는 요철에 의한 열전달 향상이 마찰손실의 크기보다 작기 때문에 성능계수가 1.0보다 크게 나타났으며, 종횡비가 작을수록 마찰손실이 크게 감소하기 때문에 열/물질 성능계수가 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 곡관부를 가진 덕트 내에서 회전수 변화에 따른 국소적인 압력강하 특성을 고찰하였다. 국소 압력강하 분포와 마찰계수, 성능 평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정지한 덕트 및 회전하는 덕트 내에서의 가장 큰 압력강하 및 마찰손실은 곡관부 및 2차유로 상류에서 발생하였으며, 종횡비가 증가할수록 압력강하가 증가하였다. 이는 곡관부로 인해 급속히 유동 방향이 전환되면서 강한 이차유동을 생성시키기 때문이다. 또한, 종횡비의 증가에 따라 요철높이 대 덕트높이 비(e/H)가 증가하기 때문에 유동의 막힘 현상이 커지게 되어 압력강하가 증가하고, 요철에 의해 난류강도가 증가하기 때문이다.

(2) 회전수가 증가할수록 코리올리력이 커져 전·후연면의 압력차가 커지나, 종횡비가 클수록 압력차는 작아진다. 즉, 1차유로에서는 후연면으로 유동이 치우치게 되며, 2차유로에서는 1차유로와 달리 전연면으로 유동이 힘을 받게 된다. 이와 같이 회전에 의한 코리올리력의 압력차는 덕트높이(H)가 클수록 강해지게 된다. 이는 덕트의 전·후연면 뿐 아니라 국소적으로도 다른 압력 분포와 마찰계수를 갖게 하여, 표면에서의 열전달에도 영향을 미치는 원인이 된다.

(3) 전체적으로 종횡비가 클수록 열전달 및 압력강하가 크게 나타난다. 하지만, 일정 이송동력 조건 하에서의 전연면과 후연면에서의 열/물질 성능계수는 종횡비가 작은 경우에 마찰손실이 더

속 감소하여 더 높게 나타나게 된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Bons, J. P. and Kerrebrock, J. L., 1999, "Complementary Velocity and Heat Transfer Measurements in a Rotating Cooling Passage With Smooth Walls," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 651~652.
- (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 a Two-Pass Rotating Rectangular Duct With and Without 70°-angled Ribs," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 467~475.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Agarwal, P., Achaya, S. and Nikitopoulos, D. E., 2003, "Heat/ Mass Transfer in 1:4 Rectangular Passages with Rotation," *ASME Paper No. GT2003-38615*.
- (9) Sparrow, E. M. and Tao, W. Q., 1983, "Enhanced Heat Transfer in a Flat Rectangular Duct with Streamwise Periodic Disturbances at One Principal Wall," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 851~861.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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 the KSME(B)*, Vol. 28, No. 8, pp. 910~920.
- (13) Kim, K. M., Kim, Y. Y., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2004, "Detailed Measurement of Heat/Mass Transfer in a Rotating Two-Pass Duct (II)," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 8, pp. 921~928.
- (14) Kim, K. M. and Cho, H. H., 2005, "Pressure Drop Characteristics in a Coolant Passage With Turning Region and Rotation," *KFMA J. Fluid Machinery*, (submitted for publication).
- (15) Kim, K. M., Lee, D. H. and Cho, H. H., 2006, "Influence of Turning Region and Channel Rotation on Pressure Drop in a Square Channel with Transverse Ribs," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 30, No. 2, pp. 126~135.
- (16) Prabhu, S. V. and Vedula, R. P., 2000, "Pressure Drop Characteristics in a Rotating Smooth Square Channel With a Sharp 180° Bend," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp.

321~330.

- (17) Prabhu, S. V. and Vedula, R. P., 2003, "Pressure Drop Characteristics in a Rib Roughened Rotating Square Duct with a Sharp 180° Bend," *J. Enhanced Heat Transfer*, Vol. 10, pp. 363~378.
- (18) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953,

"Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.

- (19) Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 6, pp. 503~504, Academic Press, New York.