

< 논문 >

## 각도요철 및 곡관부를 가진 회전덕트 내 압력강하 분포 (I)

- 엇갈린 요철 배열 -

김경민\* · 박석환\* · 이동현\* · 조형희†

(2006년 4월 10일 접수, 2006년 7월 18일 심사완료)

## Pressure Drop Distributions in Rotating Channels with Turning Region and Angled Ribs (I)

- Cross Rib Arrangements -

Kyung Min Kim, Suk Hwan Park, Dong Hyun Lee and Hyung Hee Cho

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

### Abstract

The present study investigates the pressure drop characteristics in rotating two-pass ducts. 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 crossly in the four different arrangements on the leading and trailing surfaces of the test ducts. 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 results show that the highest pressure drop among each region appears in the turning region for the stationary case, but appears in the upstream region of the second pass for the rotating case. Effects of cross rib arrangements are almost the same in the first pass for the stationary and rotating cases. In the second pass, however, heat transfer and pressure drop are high for the cases with cross NN or PP type ribs in the stationary ducts. In the rotating ducts, they are high for the cases with cross NP or PP type ribs.

#### 기호설명

AR : 덕트의 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  
 $h_m$  : 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,  $h_m D_h / D_{naph}$   
 $\overline{Sh}$  : 구간 평균된 Sherwood 수  
 $Sh_0$  : 요철이 없는 원형관에서의  $Sh$  수  
 $t_d$  : 분리벽의 두께  
 $u_b$  : 평균 속도

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

\* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학부

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

그리스문자

- $\alpha$  : 요철의 총돌각
- $n$  : 열/물질 성능계수
- $\mu$  : 점성계수
- $\nu$  : 동점성계수
- $\rho$  : 밀도
- $\Omega$  : 회전각속도

1. 서론

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 압축기의 압력비, 연소가스의 터빈 입구 온도의 향상은 필수적이다. 그러나 이는 터빈 블레이드와 베인의 열부하를 가중시키고 이로 인해 부품의 수명을 단축시키게 된다. 최근 고성능의 가스터빈 엔진의 터빈 입구 온도는 급속 허용 온도를 크게 상회하고 있다. 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드와 베인을 보호하고 적정수명을 유지하기 위한 연구가 수년간 지속되어 왔다.

이러한 연구 중 내부관 냉각기술은 터빈의 압축기로부터 나오는 냉각유체를 블레이드 내부 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 정지한 덕트에서의 요철의 높이, 총돌각, 요철 사이의 간격과 배열 등 다양한 요철의 설계 변수에 대한 최적 조건을 찾기 위한 많은 연구들이 수행되어져 왔으며, 대표적인 연

구로 Gee와 Webb,<sup>(1)</sup> Han 등,<sup>(2)</sup> Taslim 등<sup>(3)</sup> 및 Wu 등<sup>(4)</sup>이 있다. 이들은 요철의 총돌각이 60~75°일 때 열전달이 최대가 된다는 것을 밝혀내었다. 따라서 본 연구에서는 70°의 요철 총돌각을 선택하였다.

덕트 회전에 의한 영향을 찾기 위한 연구로는 Bons와 Kerrebrock,<sup>(5)</sup> Wagner 등,<sup>(6)</sup> Mochizuki 등,<sup>(7)</sup> Al-Qahtani 등,<sup>(8)</sup> Liou 등<sup>(9)</sup> 및 Cho 등<sup>(10)</sup>에 의해 주로 이루어 졌다. 이들은 회전하는 덕트 내 열전달을 측정하여 코리올리력(Coriolis force)과 원심부력(buoyancy force)에 의해 전·후연면에 다른 열전달 특성이 나타난다는 것을 찾아내었다. 이외에도 많은 연구자들에 의해 요철배열, 곡관부 및 회전에 의한 열전달 분포에 관한 연구가 진행되었다.<sup>(11-14)</sup>

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<sup>(15)</sup>은 90도 요철이 설치된 회전덕트 내에서 Ro 수에 따른 압력강하를 측정하였고, Prabhu와 Vedula<sup>(16,17)</sup>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.

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

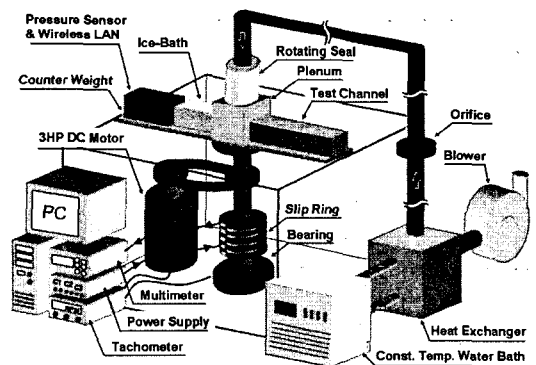


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

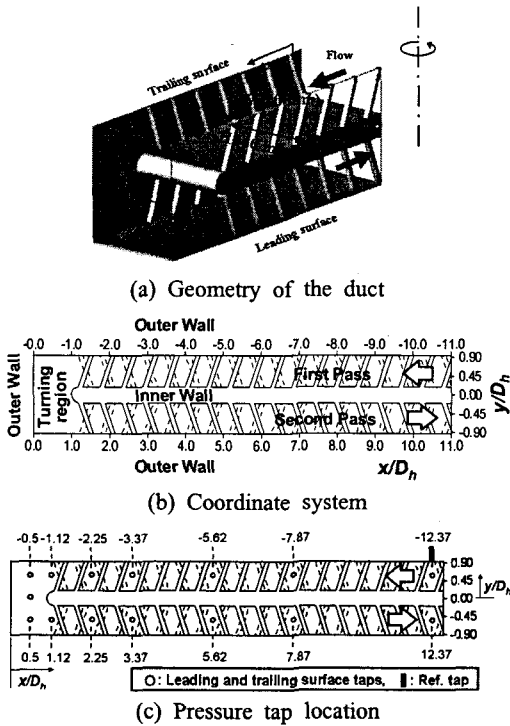


Fig. 2 Schematics of test duct (e.g. PN type ribs)

관한 종합적인 이해자료와 내부유로 설계 자료 및 수치해석을 위한 검증자료가 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 Cho 등<sup>(10)</sup> 및 Kim 등<sup>(18)</sup>에 의해 얻어진 엇갈린 요철배열에 따른 국소적인 물질전달 분포와 현재의 국소적인 압력강하 특성 및 마찰계수로부터 각각의 엇갈린 요철 배열에 따른 성능계수를 밝혀내었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 회전덕트 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 실험 장치는 크게 송풍부와 회전부 그리고 측정부로 나누어지며, 실험장치의 자세한 구성은 Cho 등<sup>(10)</sup>에 제시되어 있다.

Fig. 2는 한 예로 PN 배열의 요철이 설치된 덕트의 형상 및 각 부분의 명칭과 좌표계 그리고 압력탭의 위치를 나타내고 있다. 실험에 사용된 사각 덕트의 종횡비(AR)는 0.5이며, 각 덕트의 수력직경( $D_h$ )은 26.67 mm이다. 이 실험 덕트들은 180°의 곡관부로 연결된 2중의 유로로 제작하였

다. 또한, 분리벽의 끝단(tip)은 반원형으로, 분리벽의 두께는  $0.375 D_h$ 로 제작하였다. 곡관부의 90° 꺾어진 부분에서 분리벽의 끝과 곡관부 외벽과의 간격은  $1.0 D_h$ 가 되도록 하였다. 수력직경 대비 최대회전반경( $R/D_h$ )은 21.63의 값을 갖으며, 시험부는 덕트의 입구로부터 약  $6 D_h$  떨어진 지점에 설치하였다. 또한 회전축에 나타난 방향과 같이 회전할 때 앞선면을 전연면(Leading Surface)이라 하며 뒤에 따라오는 면을 후연면(Trailing Surface)라 명명하였다. 이 두면은 실제 가스터빈의 부압면(Suction Side)과 압력면(Pressure Side)과 상사한다. 덕트 내 요철은 곡관부를 제외한 유로의 내부에 설치하였으며, 이 때 요철의 단면은 2 mm( $e$ ) × 3 mm( $w$ )의 직사각형이다. 요철 높이 대 수력직경 비( $e/D_h$ )는 0.075, 요철사이거리 대 요철 높이 비( $p/e$ )는 7.5이며, 요철의 충돌각( $\alpha$ )은 70°로 하였다. 압력탭은 Fig. 2(c)에 나타난 것처럼 전·후연면에 대칭적으로 설치되어 있으며, 덕트의 기준 압력점은 바깥면  $x/D_h = -12.37$ 에 설치되어 있고, 기준 압력탭과 측정 압력탭 사이의 차압은 정밀도가 0.2%인 압력센서(PSI 사, ESP-32HD)를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서는 전·후연면에 요철이 엇갈리게 설치된 경우에  $Ro$  수 변화에 따른 영향과 전·후연면 및 1·2차유로의 요철 배열에 따른 특성 연구를 수행하기 위해 Fig. 3과 같이 배열을 4가지 형태로 바꿔가며 실험하였다. 여기서, P와 N은 덕트 전연면의 외벽과 요철과의 충돌각에 따른 표시인데, 앞의 문자는 1차유로이고 뒤의 문자는 2차유로를 나타낸다. 요철의 각도가 전연면 덕트 외벽과 반시계 방향으로 70°일 때 방향을 양(positive; P)이라고 정의하고, 시계 방향으로 70°일 때는 음(negative; N)이라고 정의하였다.

우선,  $Ro$  수 변화에 따른 영향을 고찰하기 위해, 엇갈린 PN 요철 배열 덕트에서 수력직경기준 Reynolds 수는 10,000으로 고정시키고,  $Ro$  수를 0.0에서 0.2( $\approx 420$  rpm)까지 0.05( $\approx 105$  rpm)씩 변화시켜가며 국소압력강하 및 각 구간에서의 마찰계수를 구하였다. 또한 Cho 등<sup>(10)</sup>에 의해 밝혀졌듯이 Fig. 4와 같이 요철배열에 따라 이차유동이 바뀌기 때문에, 이에 따른 영향을 고찰하고자  $Re$  수는 20,000으로 고정시키고, 정지한 경우( $Ro=0.0$ )와 회전하는 경우( $Ro=0.1$ )에 대해서 연구하였다. 그리고 본 연구에서 얻어진 마찰계수와 Cho 등<sup>(10)</sup>

에 의해 선행 연구된 물질전달 계수 비( $Sh/Sh_0$ )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.

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

전 · 후연면의 1차유로( $-12.37 \leq x/D_h \leq -2.25$ ), 곡관부( $-2.25 \leq x/D_h \leq 2.25$ ), 2차유로 상류( $2.25 \leq x/D_h \leq 5.62$ ) 및 2차유로 하류( $5.62 \leq x/D_h \leq 12.37$ )에서의 평균압력강하( $\Delta P/\Delta L$ )는 각 구간 시작압력과 구간 끝압력 사이의 국소차압( $\Delta P$ ) 측정 데이터의

선형맞춤에 의해 계산되고, 이를 이용하여 계산된 마찰계수는 다음과 같이 정의된다.

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

덕트를 통과하는 공기의 질량유량과 Reynolds 수의 불확실성은 Kline과 McClintock<sup>(19)</sup>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<sup>(20)</sup>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 향상에 따른 마찰손실을 고려하기 위해 Cho 등<sup>(10)</sup>

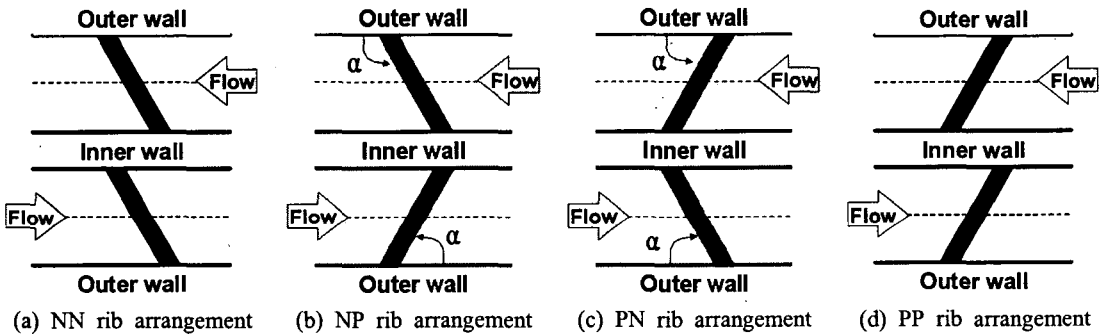


Fig. 3 Schematics of rib arrangements on leading surface in two-pass duct

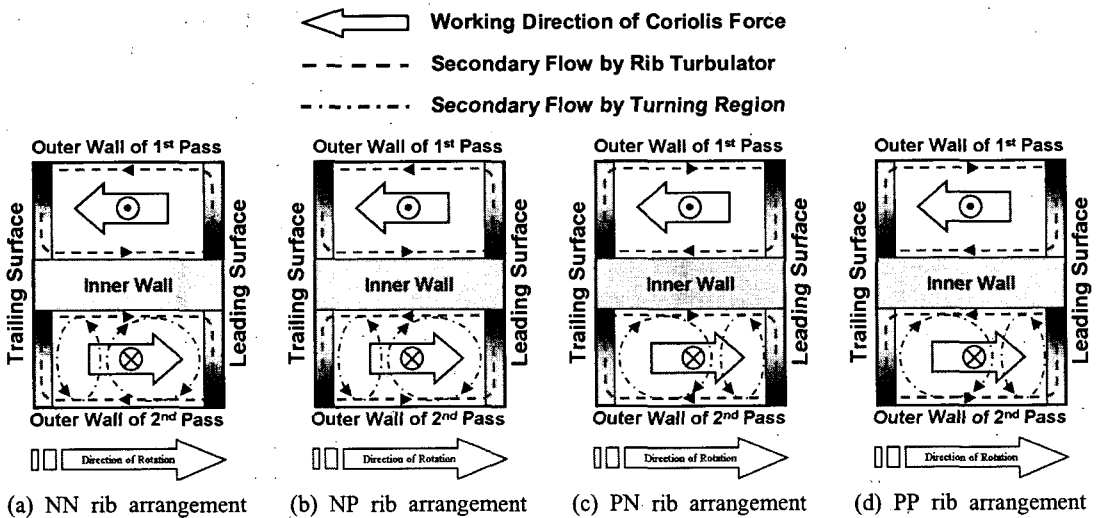


Fig. 4 Schematics diagram of expected individual secondary flow structures

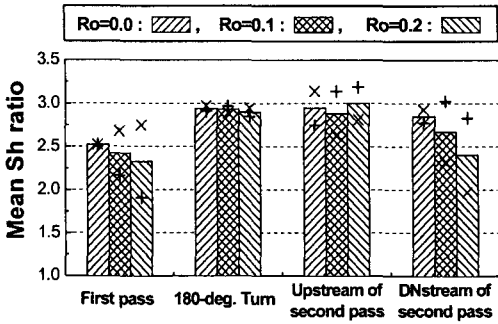


Fig. 5 Mean Sherwood number ratios of leading (+) and trailing (x) surfaces at various rotation numbers (PN type ribs)

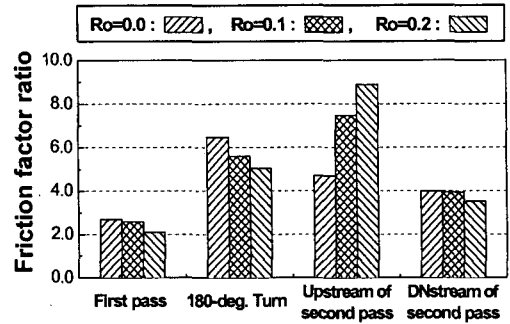
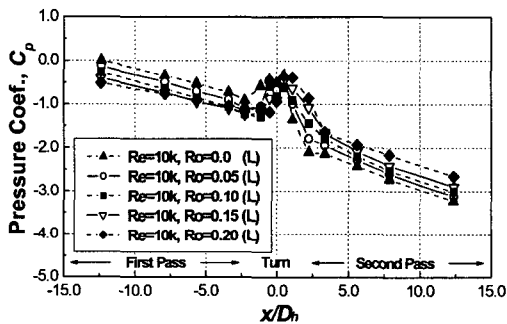
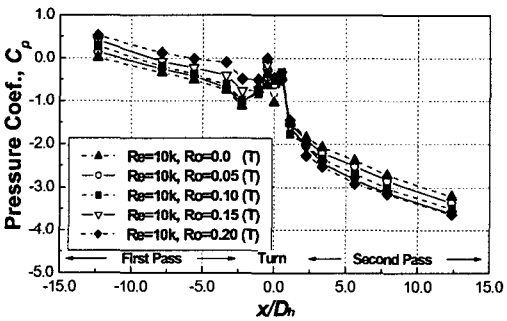


Fig. 7 Mean friction factor ratios at various rotation number (PN type ribs)



(a) Leading surface



(b) Trailing surface

Fig. 6 Local pressure coefficient distributions at various rotation numbers (PN type ribs)

및 Kim 등<sup>(18)</sup>에 의해 선행연구된 물질전달 계수로부터 각 구간에서의 평균 열/물질전달 계수 ( $\overline{Sh}/Sh_0$ )를 얻었으며 이 계수의 불확실성은 7.7%이다. 또한 이 열/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 Ro 수 변화에 따른 영향

Fig. 5는 Kim 등<sup>(18)</sup>에 의해 선행 연구된 엇갈린 PN 요철 배열을 가진 덕트에서의 전·후연면 물질전달 계수를 각 영역(1차유로, 곡관부, 2차유로 상류, 2차유로 하류)별로 평균한 값들을 나타내고 있다. 엇갈린 PN 요철 배열의 경우, Ro 수가 증가함에 따라 1차유로에서의 평균 물질전달 계수는 감소하였으나, 곡관부 및 2차유로 상류에서는 거의 같았다. 그렇지만 2차유로 하류에서는 1차유로의 평균 물질전달 계수의 감소보다 더욱 크게 감소하였다. 여기서 Ro 수가 증가할수록 1차유로와 2차유로 하류에서 열/물질 전달이 감소하였는데, 이는 회전으로 인한 코리올리력으로 인해 1차유로 전연면 및 2차유로 후연면의 재부착이 약화되기 때문이다. 또한 Kim 등<sup>(18)</sup>에 의해 밝혀졌듯이, 곡관부 이후 이차유동은 Ro 수가 증가할수록 빠르게 소멸되기 때문이다.

Fig. 6은 PN 요철 배열을 가진 덕트의 각  $x/D_h$  지점에서의 Ro 수에 따른 압력계수 분포를 전연면과 후연면에 대해서 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)과 같이 전연면의 경우, 1차유로에서는 Ro 수가 증가할수록 압력계수는 점차 감소하였지만, 곡관부 이후 2차유로에서는 Ro 수가 증가할수록 압력계수는 점차 증가하였다. 이는 주유동의 방향이 축 바깥쪽에서 축 안쪽으로 전환되어 코리올리력의 작용 방향이 바뀌었기 때문이다. 이와 반대로, 후연면의 경우[Fig. 6(b)], 1차유로에서는 Ro 수가 증가함에 따라 압력계수는 점차 증가하였지만, 곡관부 이후에서는 압력계수는 점차 감소하였다.

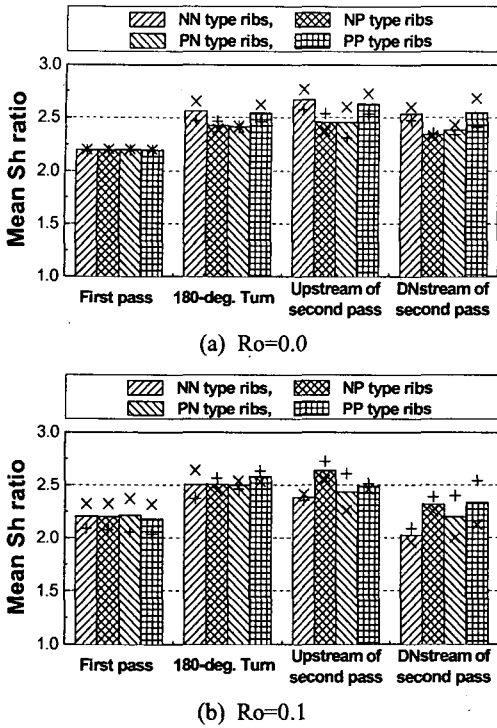


Fig. 8 Mean Sherwood number ratios of leading (+) and trailing (x) surfaces at each region

그리고 각각의  $Ro$  수에서의 각 지점의 전·후연면의 압력차가 같다는 것으로부터 전·후연면의 압력차가 코리올리력에 의해서 정해진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 덕트 내 각 구간에서의 회전에 따른 마찰손실을 완전 발달된 난류 유동관의 경우와 비교를 위해 마찰손실 비,  $f/f_0$ 의 형태로 각 영역에서 나타내었다. 가장 큰 마찰손실은 정지한 경우는 곡관부에서 나타났으나, 회전하는 경우에는 2차유로 상류에서 일어났다. 이는 Kim 등<sup>(18)</sup>에 의해 밝혀졌듯이, 회전에 의해 곡관부 이후 나타나는 이차유동의 방향이 요철에 의한 이차유동과 반대이기 때문이다.  $Ro$  수가 증가함에 따라, 이차유동의 재부착이 저하되어 1차유로, 곡관부 및 2차유로 하류에서는 점차 압력강하가 감소하였지만, 2차유로 상류에서는 회전에 의해 이차유동의 강도가 강해져 큰 압력강하가 나타났다.

3.2 엇갈린 요철 배열에 따른 영향

Fig. 8은 Cho 등<sup>(10)</sup>에 의해 선행되어 얻어진 엇갈린 요철 배열에 따른 물질전달 계수를 각 영역

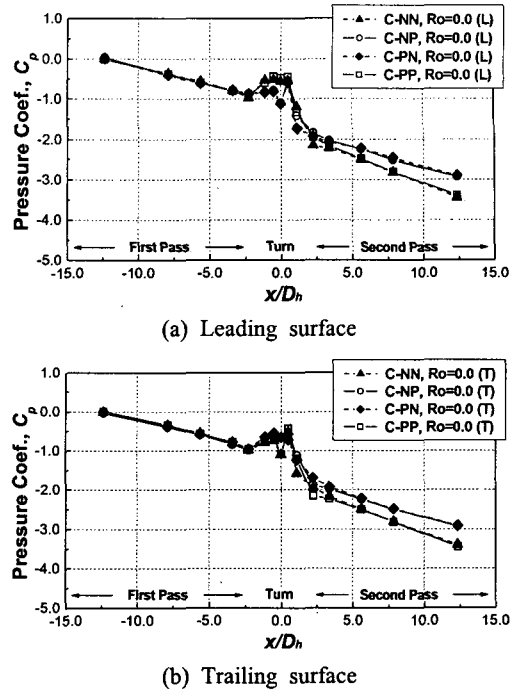


Fig. 9 Local pressure coefficient distributions for the stationary case ( $Ro=0.0$ )

별로 평균한 값들이며, 덕트가 정지한 경우 ( $Ro=0.0$ )와 회전하는 경우( $Ro=0.1$ )에 대해서 나타내었다.

덕트가 정지한 경우[Fig. 8(a)], 1차유로에서의 평균 물질전달 계수는 요철 배열에 상관없이 물질전달 계수비가 2.2로 전·후연면 모두 일정하게 나타났으나, 곡관부 및 2차유로에서는 요철 배열에 따라 다르게 나타났다. 즉, 곡관부 이후 이차유동과 요철에 의한 이차유동의 방향이 같은 NN 요철 배열 및 PP 요철 배열이 NP 요철 배열 및 PN 요철 배열보다 높은 물질전달 값을 가졌다.

덕트가 회전하는 경우[Fig. 8(b)], 역시 1차유로의 평균 물질전달 계수는 거의 일정하였으나, 곡관부 이후는 다르게 나타났다. 즉, 정지한 경우는 곡관부 이후 NN 요철 배열 및 PP 요철 배열이 높은 물질전달 계수가 나타났지만, 회전하는 경우는 NP 요철 배열 및 PP 요철 배열이 높은 물질전달 값을 가졌다. 이는 Kim 등<sup>(18)</sup>에 의해 밝혀졌듯이, 요철 배열에 상관없이 곡관부 이후 엇갈린 P형 요철 배열과 같은 방향의 이차유동이 발생하기 때문이다. 따라서 이차유동의 방향이

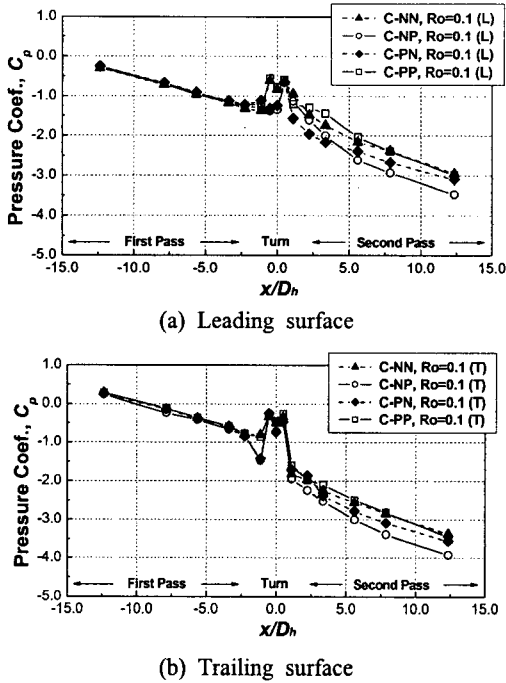


Fig. 10 Local pressure coefficient distributions for the rotating case ( $Ro=0.1$ )

같이 열전달이 높아지게 된다.

Fig. 9는 엇갈린 요철 배열을 가진 정지한 덕트 내 각  $x/D_h$  지점에서의  $Ro$  수에 따른 압력계수 분포를 전연면과 후연면에 대해서 나타낸 그림이며, 정지한 경우는 전연면[Fig. 9(a)]과 후연면[Fig. 9(b)] 압력계수 분포가 거의 비슷하였다. 1차유로에서의 압력계수 및 압력강하(기울기)는 요철 배열에 상관없이 거의 일정하게 나타났지만, 곡관부 이후 2차유로에서는 요철배열에 따라 압력강하가 다르게 나타났다. 즉, NP 및 PN 요철 배열을 가질 경우에는 압력강하가 작았고, NN 및 PP 요철 배열을 가질 경우에는 압력강하가 크게 나타났다. 이는 앞서 물질전달 분포에서 언급했듯이 곡관부 이후의 이차유동과 요철 배열에 의한 이차유동의 방향이 같을 경우에 이차유동이 더욱 강해지기 때문이다.

Fig. 10은 엇갈린 요철 배열을 가진 덕트가  $Ro$  수 0.1로 회전할 때 각  $x/D_h$  지점에서의 압력계수 분포를 전연면과 후연면에 대해서 나타낸 그림이다. Fig. 10(a)과 같이 전연면의 경우, 정지한 경우와 같이 1차유로에서의 압력계수 및 압력강하는 요철 배열에 상관없이 거의 일정하게 나타났

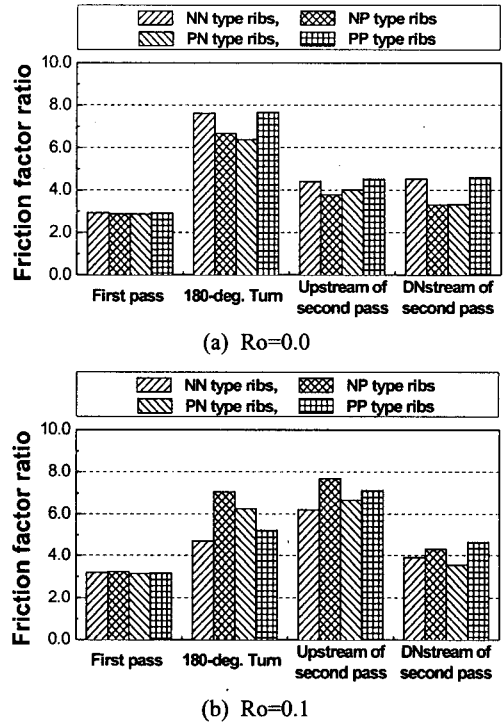


Fig. 11 Mean friction factor ratios at each region

지만, 곡관부 이후 2차유로에서는 NN 및 PN 요철 배열이 압력강하(기울기)가 작았고, NP 및 PP 요철 배열을 가질 경우 압력강하가 크게 나타났다. 이는 2차유로의 요철배열이 P형인 경우가 회전에 의해 곡관부 이후 나타나는 이차유동의 회전 방향과 같기 때문에 2차유로에서의 이차유동이 강해졌기 때문이다. 후연면[Fig. 10(b)]도 전연면과 마찬가지로 2차유로에서 NP 및 PP 요철 배열이 압력강하(기울기)가 크게 나타났다.

Fig. 11은 덕트 내 각 구간에서의 회전에 따른 마찰손실을 완전 발달된 난류 유동관의 경우와 비교를 위해 마찰손실 비,  $f/f_0$ 의 형태로 각 영역에서 나타내었다. 가장 큰 마찰손실은 정지한 경우[Fig. 11(a)]는 곡관부에서 나타났고, NN 및 PP형 요철배열을 가진 덕트에서 큰 마찰손실을 가졌다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 곡관부 이후 이차유동과 요철에 의한 이차유동의 방향이 같기 때문이다. 회전하는 경우[Fig. 11(b)]에는 2차유로 상류에서 높은 마찰손실이 일어났다. 그리고 요철 배열에 따른 마찰손실은 NP 및 PP 요철 배열을 가질 경우에 가장 크게 나타났는데, 이는 Kim 등<sup>(18)</sup>에 의해 밝혀진 회전에 의해 나타나는 2차유

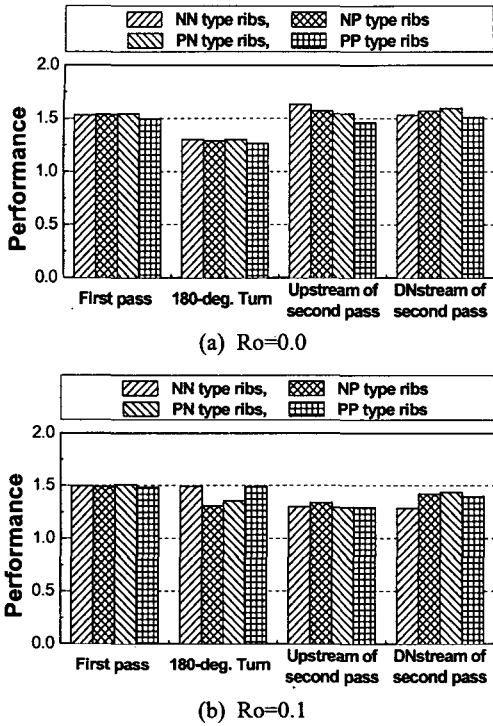


Fig. 12 Thermal performance at each region

로 상류에서의 이차유동의 방향이 2차유로의 P형 요철배열에 의한 이차유동과 같기 때문이다.

Fig. 12는 일정 이송동력 조건 하에서의 정지한 덕트와 회전하는 덕트의 각 영역에서의 열/물질 성능계수를 제시한 것으로, 일반적으로 높은 물질전달이 일어나면서 낮은 마찰 손실 특성을 나타내는 경우 높은 성능계수를 예상할 수 있다. 정지한 경우[Fig. 12(a)]에는 곡관부에서 가장 낮은 성능계수가 나타났다. 그리고 요철배열에 따른 성능계수는 요철배열에 상관없이 거의 비슷하였다. 회전하는 경우[Fig. 12(b)]는 2차유로 상류에서 가장 낮은 마찰계수 분포를 보였으며, 회전하는 경우도 역시 정지한 경우와 마찬가지로 요철배열에 따른 성능계수 차가 크게 나타나지 않았다. 즉, 요철의 배열에 따라 국소적인 영역에서는 열전달 및 압력강하의 차는 나타나지만, 성능계수의 차이는 크지 않다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 곡관부를 가진 덕트 내에서  $Ro$  수 변화 및 요철 배열에 따른 국소적인 압력강하

특성을 고찰하였다. 국소 압력강하 분포와 마찰계수, 성능평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엇갈린 PN형 요철이 설치된 덕트에서  $Ro$  수가 증가할수록 1차유로 전연면 및 2차유로 후연면에서의 압력계수는 감소하였으나, 1차유로 후연면 및 2차유로 전연면에서는 증가하였다. 각 영역별 마찰계수는 정지하였을 때는 곡관부에서 가장 크게 나타났지만,  $Ro$  수가 증가할수록 2차유로 상류에서 크게 나타났다.

(2) 요철 배열에 따른 압력계수 및 마찰계수를 보면, 1차유로에서는 정지한 경우 및 회전하는 경우 모두 비슷하였으나, 곡관부 이후에서는 요철 배열에 따라 다르게 나타났다. 즉, 정지한 경우는 NN 및 PP 요철배열이 설치된 경우에 압력강하(마찰계수)가 크게 나타났고, 회전하는 경우는 NP 및 PP 요철배열이 크게 나타났다. 이처럼 곡관부에서 발생한 이차유동의 회전 방향이 2차유로의 이차유동의 회전 방향과 일치할 경우 높은 압력강하가 나타났다.

(3) 열전달 성능계수는 정지한 경우에는 곡관부에서 가장 낮았고, 회전하는 경우에는 2차유로 상류에서 가장 낮았다. 또한 국소적인 영역에서의 성능계수도 정지한 경우 및 회전하는 경우 모두 요철배열과 상관없이 성능계수는 차이가 크지 않았다. 하지만, 열전달 및 압력강하는 요철 배열에 따라 각각의 위치에서 다르게 나타났다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

(1) Gee, D. L. and Webb, R. L., 1980, "Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib-Roughened Tubes," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 3, pp. 1127~1136.

(2) Han, J. C., Park, J. S. and Lei, C. K., 1985, "Heat Transfer Enhancement in Channels with Turbulence Promoters," *ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 628~635.



- (3) Taslim, M. E., Li, T. and Spring, S. D., 1998, "Measurements of Heat Transfer Coefficients and Friction Factors in Passages Rib-Roughened on All Walls," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 709~716.
- (4) Wu, S. J., Kim, W. S. and Cho, H. H., "Augmented Heat Transfer in a Rectangular Duct with Angled Ribs," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 4, pp. 530~541.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Iacovides, H., Jackson D. C., Kelemenis, G., Launder, B. E. and Yuan, Y. M., 2001, "Flow and Heat Transfer in a Rotating U-Band with 45 Ribs," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 308~314.
- (12) Lin, Y. L., Shih, T. I. P., Stephens, M. A. and Chyu, M. K., 2001, "A Numerical Study of Flow and Heat Transfer in a Smooth and Ribbed U-Duct With and Without Rotation," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 219~232.
- (13) Murata, A. and Mochizuki, S., 2004, "Effect of Rib Orientation and Channel Rotation on Turbulent Heat Transfer in a Two-pass Square Channel with Sharp 180 Turns Investigated by Using Large Eddy Simulation," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 2599~2618.
- (14) Fu, W. L., Wright, L. M. and Han, J. C., 2005, "Heat Transfer in Two-Pass Rotating Rectangular Channels (AR=1:2 and AR=1:4) with 45 Deg Angled Rib Turbulators," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 127, pp. 127~174.
- (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," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21, pp. 198~205.
- (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) Kim, K. M., Kim, Y. Y., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2005, "Effects of Rotation Speed on Heat Transfer and Flow in a Coolant Passage with Turing Region (I) - Cross Ribbed Duct," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 6, pp. 737~746.
- (19) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (20) Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 6, pp. 503~504, Academic Press, New York.