

< 논문 >

## 각도요철 및 곡관부를 가진 회전덕트 내 압력강하 분포 (II)

- 평행한 요철 배열 -

김경민\* · 박석환\* · 이동현\* · 조형희†

(2006년 4월 10일 접수, 2006년 7월 14일 심사완료)

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

- Parallel 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 parallel 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 parallel 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 parallel NN or PP type ribs in the stationary ducts. In the rotating ducts, they are high for the cases with parallel NN or PN 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 충돌각
- $n$  : 열/물질 성능계수
- $\mu$  : 점성계수
- $\nu$  : 동점성계수
- $\rho$  : 밀도
- $\Omega$  : 회전각속도

1. 서론

난류축진기인 요철의 설치는 사각 유로 내에서 열전달을 크게 향상시키기 때문에 가스터빈 블레이드의 냉각성능을 향상시키기 위해 지속적으로 연구하고 있다. 2000년 이전에는 주로 내부관 냉각의 최적 성능계수를 찾기 위한 연구가 많은 연구자들<sup>(1-4)</sup>에 의해 수행되었으며, 이들은 주로 정지한 덕트 내에서의 다양한 요철의 높이, 간격, 각도, 배열 및 형상에서의 열전달과 압력계수를 찾아 높은 성능계수를 갖는 최적 조건을 찾는 연구를 수행하여, 요철 사이의 거리( $p$ )는 요철 높이( $e$ )의 7~10배에서, 요철 각도( $\alpha$ )는 60~75°일 때, 요철배열은 평행한 배열일 때, 요철의 단락은 요철의 의한 이차유동의 하향류 지점에 설치되어 있을 때 열전달이 최대가 된다는 것을 밝혀내었다.

그러나 실제 가스터빈 블레이드는 회전하는 환경하에 놓여있기 때문에, 회전이 미치는 영향들을 이해하는 것이 필수적이다. 따라서 1990년 후반부터 많은 연구자들<sup>(5-11)</sup>은 회전하는 덕트 내 열전달을 측정하여 전·후면에 다른 열전달 특성이 나타난다는 것을 찾아내고, 이는 코리올리력(Coriolis force)과 원심부력(buoyancy force)에 의해 나타난다는 것을 밝혀내었다. 또한 이들은 회전하는 덕트 내 곡관부로 인한 2차유로에서의 열전달 변화도 측정하여, 곡관부 직후 회전에 의한 국소적인 열전달 분포가 거의 일정하다는 것을 밝혀내었다.

그렇지만 회전덕트 내 열설계 및 성능평가에

있어 중요한 마찰손실에 관한 연구가 실험적 어려움으로 인해 그 동안 이뤄지지 않았으나, 측정 장비의 발달로 인해 최근 Prabhu와 Vedula,<sup>(12,13)</sup> Liou 등<sup>(14)</sup> 및 Kim 등<sup>(15,16)</sup>은 매끈한 덕트 및 90도 요철이 설치된 덕트 내에서 압력강하를 측정하여 국소적인 압력강하 분포를 찾아내었고, Wright 등<sup>(17)</sup> 및 Acharya 등<sup>(18)</sup>은 요철배열에 따른 덕트 전체에서의 마찰계수를 측정하였다. 하지만, 아직도 가스터빈 내부 유로 설계 자료 및 수치해석을 위한 검증자료가 부족한 상태이다.

따라서 본 연구의 1편에서는 엇갈린 요철 배열(cross rib arrangement)에 따른 압력강하 특성 및 성능계수를 알아보았으며, 본 연구(2편)에서는 평행한 요철(parallel rib arrangement)이 설치된 덕트에서의 Ro 수 변화 및 요철 배열에 따른 압력계수 분포 및 마찰계수 특성을 고찰하기 위한 실험을 수행하였다. 또한, Lee<sup>(10)</sup> 및 Kim 등<sup>(16)</sup>에 의해 얻어진 각도 요철 배열에 따른 국소적인 물질전달 분포로부터 각도 요철 배열에 따른 성능계수를 밝혀내었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 한 예로 NP 배열의 요철이 설치된 덕트의 형상 및 각 부분의 명칭과 좌표계 그리고 압력탭의 위치를 나타내고 있다. 여기서, NP는 Fig. 2와 같이 1차유로 및 2차유로에 요철의 배열 방법이며 NN, NP, PN, PP와 같이 4가지 형태로 배열할 수 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 제작하였다. 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. 수력직경대비 최대회전반경( $R/D_h$ )은 21.63의 값을 가지며, 시험부는 덕트의 입구로부터 약 6  $D_h$  떨어진 지점에 설치하였다. 또한 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

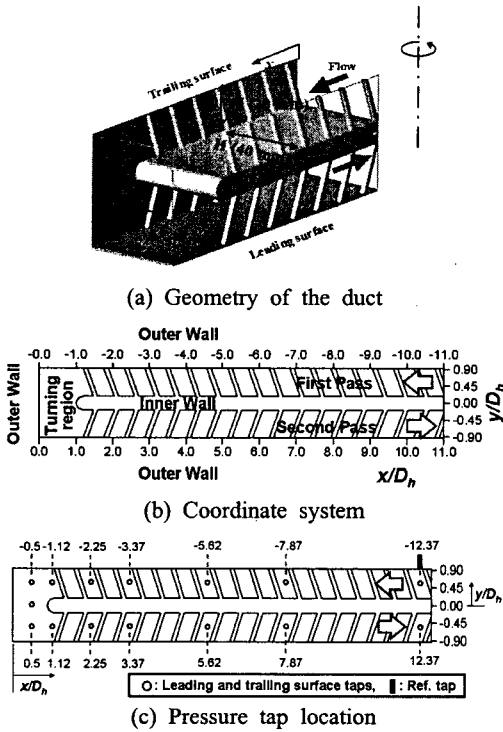


Fig. 1 Schematics of test duct (e.g. NP type ribs)

높이 비( $p/e$ )는 7.5이며, 요철의 충돌각( $\alpha$ )은  $70^\circ$ 로 하였다. 압력탭은 Fig. 1(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 평행하게 설치된 경우에  $Ro$  수 변화에 따른 영향과 전·후연면 및 1·2차유로의 요철 배열에 따른 특성 연구를 수행하기 위해 Fig. 2와 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  $70^\circ$ 일 때 방향을 양(positive; P)이라고 정의하고, 시계 방향으로  $70^\circ$ 일 때는 음(negative; N)이라고 정의하였다.

우선,  $Ro$  수 변화에 따른 영향을 고찰하기 위해, Kim 등<sup>(16)</sup>에 의해 연구된 평행한 NP 요철이 배열된 덕트에서 수력직경기준  $Re$  수는 10,000으로 고정시키고,  $Ro$  수를 0.0에서  $0.2(\approx 420 \text{ rpm})$ 까

지  $0.05(\approx 105 \text{ rpm})$ 씩 변화시켜가며 국소압력강하 및 각 구간에서의 마찰계수를 구하였다. 그리고 Lee<sup>(10)</sup>에 의해 밝혀졌듯이 Fig. 3과 같이 요철 배열 및 덕트의 회전으로 인해 이차유동의 특성이 바뀌기 때문에, 이에 따른 열전달, 이차유동 및 압력강하 특성을 고찰하고자  $Re$  수는 20,000으로 고정시키고, 정지한 경우( $Ro=0.0$ )와 회전하는 경우( $Ro=0.1$ )에 대해서 연구하였다. 또한, 본 연구에서 얻어진 마찰계수와 Lee<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.

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

전·후연면의 1차유로( $-12.37 \leq x/D_h \leq -2.25$ ), 곡관부( $-2.25 \leq x/D_h \leq 2.25$ ) 및 2차유로 상류( $2.25 \leq x/D_h \leq 5.62$ ), 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.

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

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,  $ff_0$ 의 형태로 제시하였다. 또한 각 유로에서의 열전달 항상에 따른 마찰손실을 고려하기 위해 Lee<sup>(10)</sup> 및 Kim 등<sup>(16)</sup>에 의해 선행연구된 물질전달 계수로부터 열/물질전달 성능계수를 다음과 같이 정의하였다.

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

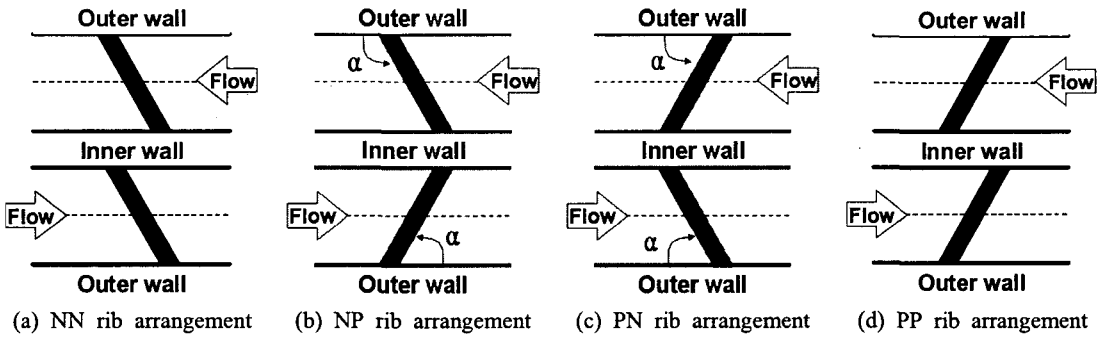


Fig. 2 Schematics of rib arrangements in two-pass duct

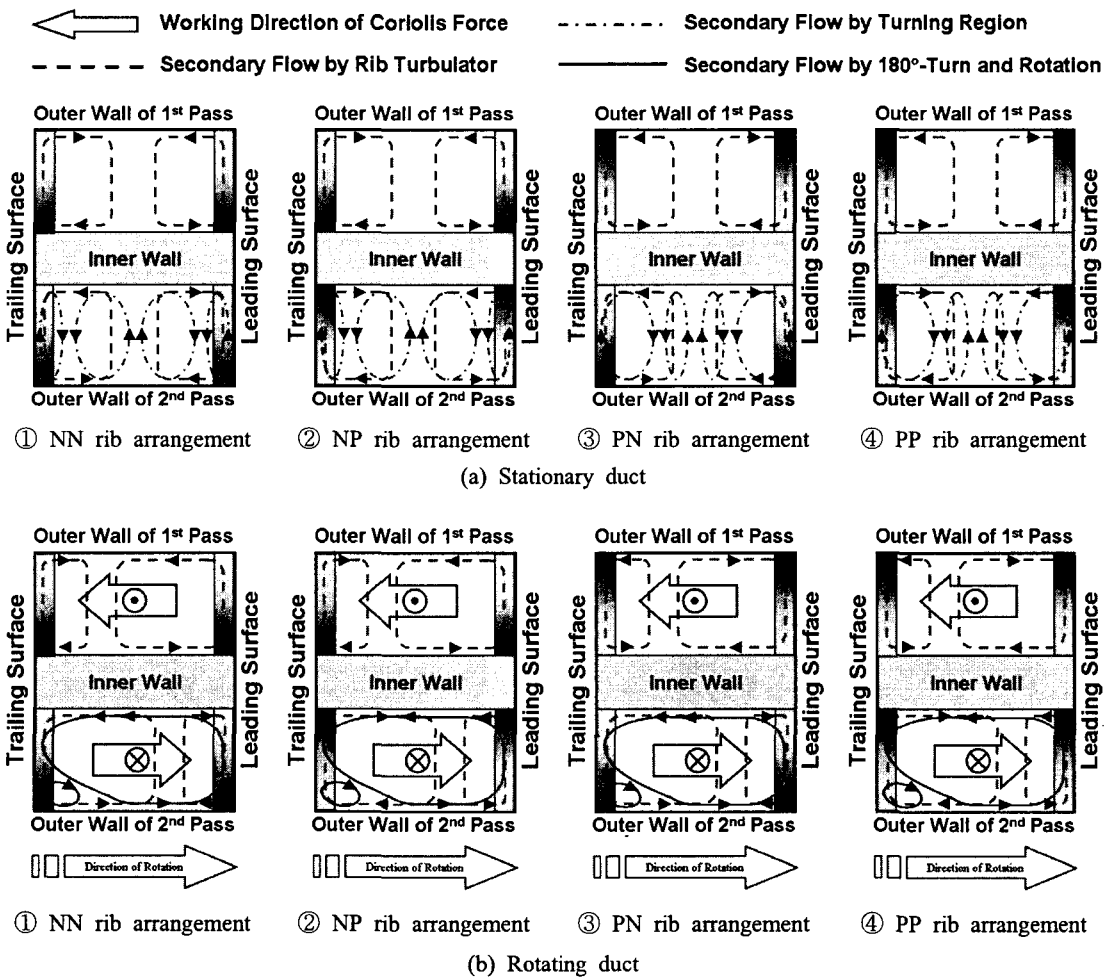


Fig. 3 Schematics diagram of expected individual secondary flow structures [Lee<sup>(10)</sup>]

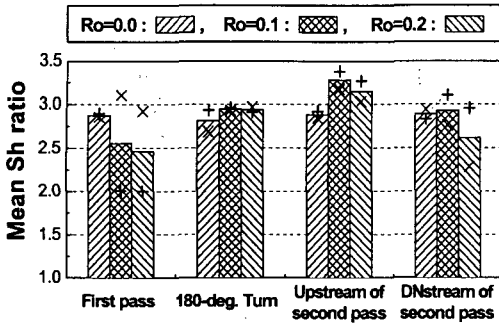


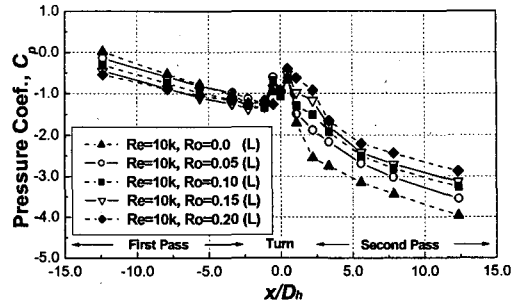
Fig. 4 Mean Sherwood number ratios of leading (+) and trailing (x) surfaces at various rotation numbers (NP type ribs)

### 3. 결과 및 고찰

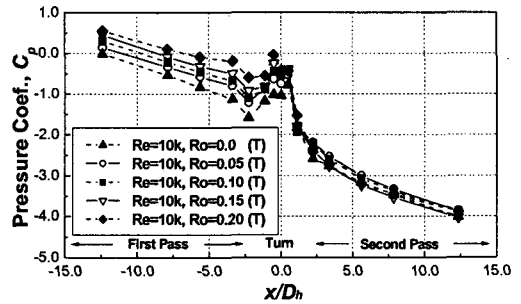
#### 3.1 Ro 수 변화에 따른 영향

Fig. 4는 Kim 등<sup>(16)</sup>에 의해 선행 연구된 평행한 NP 요철 배열을 가진 덕트에서의 전·후연면 물질전달 계수를 각 영역(1차유로, 곡관부, 2차유로 상류, 2차유로 하류)별로 평균한 값들을 나타내고 있다. 평행한 NP 배열 요철이 설치된 덕트에서는 Ro 수가 증가할수록 1차유로 및 2차유로 하류에서의 평균 물질전달 계수는 감소하였지만, 곡관부 및 2차유로 상류에서의 평균 물질전달 계수는 증가하였다. 이는 회전으로 인한 코리올리력으로 인해 1차유로 전연면 및 2차유로 후연면의 재부착은 약화되었지만, 곡관부 이후의 이차유동의 강도가 덕트의 회전에 의해 더욱 강해졌기 때문이다.

Fig. 5는 NP 요철 배열을 가진 덕트의 각  $x/D_h$  지점에서의 Ro 수에 따른 압력계수 분포를 전연면과 후연면에 대해서 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)와 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 전환되면서 코리올리력의 작동 방향이 바뀌었기 때문이다. 이와 반대로, 후연면의 경우[Fig. 5(b)], 1차유로에서는 Ro 수가 증가함에 따라 압력계수는 점차 증가하였지만, 곡관부 이후에서는 압력계수는 점차 감소하였다. 그러나 코리올리력에 따른 압력계수의 증가 및 감소율은 각 지점에서 다르게 나타났다.



(a) Leading surface



(b) Trailing surface

Fig. 5 Local pressure coefficient distributions at various rotation numbers (NP type ribs)

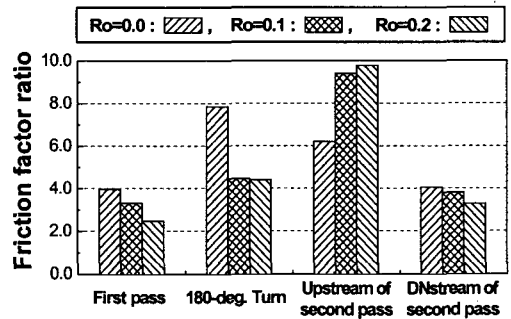


Fig. 6 Mean friction factor ratios at various rotation number (NP type ribs)

즉, Fig. 3(b)과 같이 1차유로에서는 코리올리력에 의해 주유동이 후연면 방향으로 편향되어, 요철에 의해 나타나는 한 쌍의 이차유동 중 후연면 방향의 이차유동의 크기가 작아지기 때문이며, 전연면 방향의 이차유동의 크기는 커지기 때문이다. 또한 곡관부에서의 전연면의 압력계수는 크게 감소하였으나, 후연면의 압력계수는 거의 변하지 않았는데, 이는 회전에 의해 후연면 방향의 이차유동의 크기가 작아져 곡관부에서의 이차유동의 와류의 수가 감소하여 압력강하가 작아진

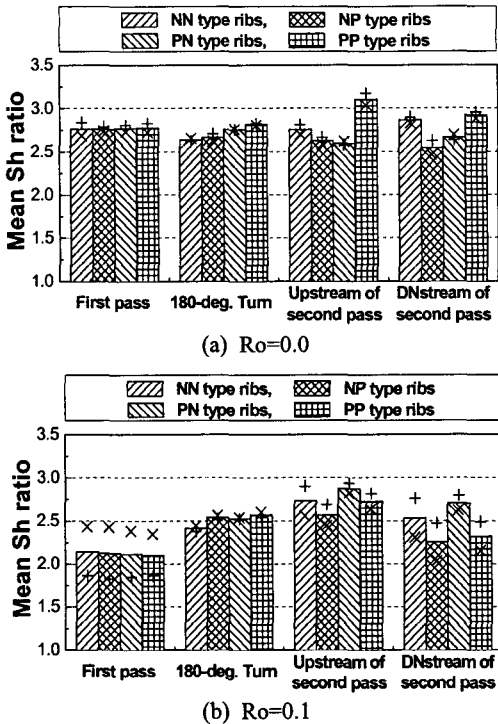


Fig. 7 Mean Sherwood number ratios of leading (+) and trailing (x) surfaces at each region

것으로 사료된다.

Fig. 6은 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>(16)</sup>에 의해 밝혀졌듯이, 회전에 의해 곡관부에서의 이차유동의 와류의 개수가 하나로 줄었지만, 곡관부에서 유동의 급선회 후 하나의 이차유동이 더욱 강해졌기 때문이다.  $Ro$  수 증가에 따른 마찰계수는 이차유동의 재부착의 저하로 1차유로, 곡관부 및 2차유로 하류에서는 점차 감소하였지만, 2차유로 상류에서는 회전에 의해 이차유동의 강도가 강해져 높게 나타났다.

3.2 평행한 요철 배열에 따른 영향

Fig. 7은 Lee<sup>(10)</sup>에 의해 선행 연구되어 얻어진 평행한 요철 배열에 따른 물질전달 계수를 각 영역별로 평균한 값들이며, 덕트가 정지한 경우 ( $Ro=0.0$ )와 회전하는 경우( $Ro=0.1$ )에 대해서 나타

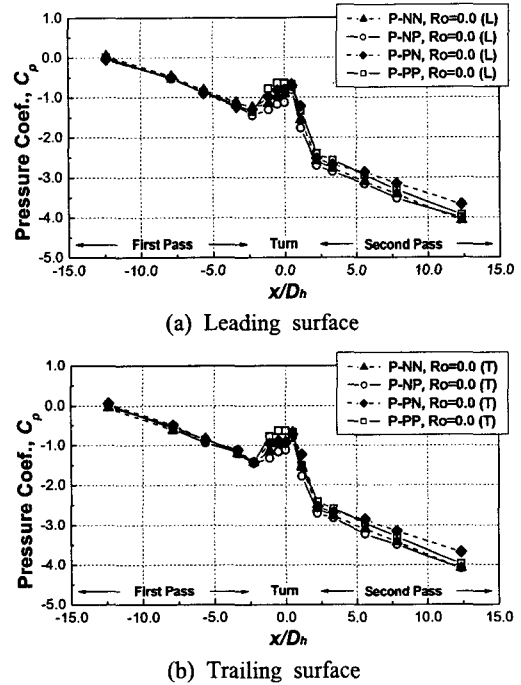


Fig. 8 Local pressure coefficient distributions for the stationary case ( $Ro=0.0$ )

내었다.

덕트가 정지한 경우[Fig. 7(a)], 1차유로에서의 평균 물질전달 계수는 요철 배열에 상관없이 물질전달 계수비가 2.7로 전·후연면 모두 일정하게 나타났으나, 곡관부 및 2차유로에서는 요철 배열에 따라 다르게 나타났다. 즉, Kim 등<sup>(16)</sup>에 의해 밝혀졌듯이 Fig. 3(a)과 같은 곡관부 이후 나타나는 두 쌍의 이차유동 중 큰 이차유동의 회전 방향과 요철에 의한 이차유동의 방향이 같은 NN 요철 배열 및 PP 요철 배열이, NP 요철 배열 및 PN 요철 배열보다 높은 물질전달 값을 가졌다. 여기서 2차유로 상류에서의 이차유동은 1차유로의 요철배열이 N형인 경우는 안쪽의 이차유동이 컸으며, P형인 경우는 바깥쪽의 이차유동이 컸다.

덕트가 회전하는 경우[Fig. 7(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 NN 요철 배열 및 PN 요철 배열이 높은 물질전달 값을 가졌다. 이는 Fig. 3(b)과 같이 곡관부 이후 회전에 의해 발생된 반시계 방향의 하

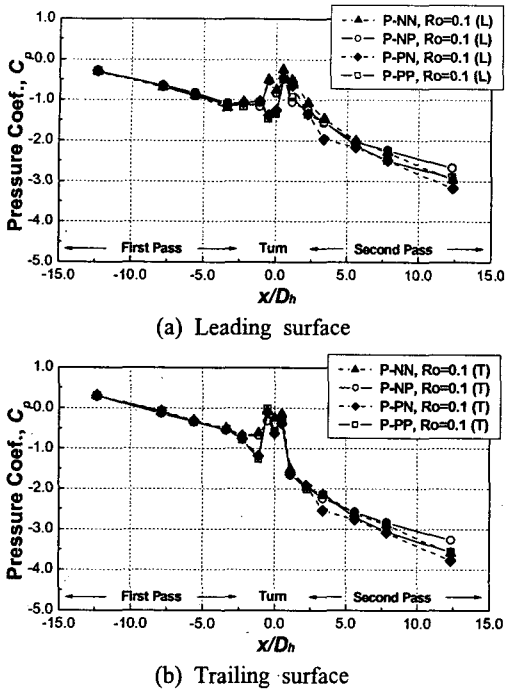


Fig. 9 Local pressure coefficient distributions for the rotating case ( $Ro=0.1$ ).

나의 큰 이차유동이 2차유로에서 요철과 회전에 의해 발생된 N형 요철 배열에 의한 이차유동과의 교란이 작기 때문이다.

Fig. 8은 평행한 요철 배열을 가진 정지한 덕트 내 각  $x/D_h$  지점에서의  $Ro$  수에 따른 압력계수 분포를 전연면과 후연면에 대해서 나타낸 그림이며, 정지한 경우의 전연면[Fig. 8(a)]과 후연면[Fig. 8(b)]의 압력계수 분포는 거의 비슷하였다. 1차유로에서의 압력계수 및 압력강하(기울기)는 요철 배열에 상관없이 거의 일정하게 나타났지만, 곡관부에서의 압력강하는 유동의 교란이 제일 큰 PN 요철배열일 경우가 가장 작았으며, 이후 2차유로에서는 PP 요철 배열을 가질 경우가 압력강하가 크게 나타났다. 이는 앞서 언급했듯이 Fig. 3(a)과 같이 곡관부 이후의 큰 이차유동과 요철 배열에 의한 이차유동의 방향이 같을 경우, 이차유동이 더욱 강해지기 때문이다.

Fig. 9는 평행한 요철 배열을 가진 덕트가  $Ro$  수 0.1로 회전할 때 각  $x/D_h$  지점에서의 압력계수 분포를 전연면과 후연면에 대해서 나타낸 그림이다. Fig. 9(a)와 같이 전연면의 경우, 정지한 경우와 같이 1차유로에서의 압력계수 및 압력강하는

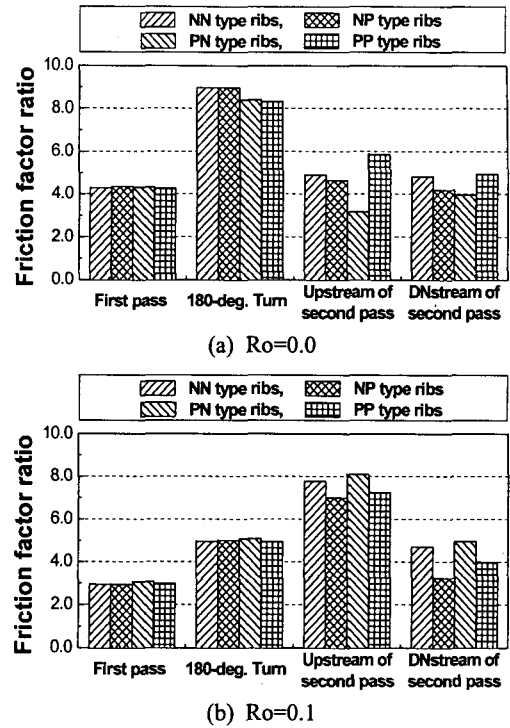


Fig. 10 Mean friction factor ratios at each region

요철 배열에 상관없이 거의 일정하게 나타났지만, 곡관부 이후 2차유로에서는 NP 및 PP 요철 배열이 압력강하(기울기)가 작았고, NN 및 PN 요철 배열을 가질 경우 압력강하가 크게 나타났다. 이는 2차유로의 요철배열이 N형인 경우가 회전에 의해 곡관부 이후 나타나는 큰 이차유동의 회전 방향과 같기 때문에 2차유로에서의 이차유동이 강해지기 때문이다. 후연면[Fig. 9(b)]도 전연면과 마찬가지로 2차유로에서 NN 및 PN 요철 배열이 압력강하(기울기)가 크게 나타났다.

Fig. 10은 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. 10(a)]의 곡관부에서 나타났고, 2차유로에서는 NN 및 PP형 요철배열을 가진 덕트에서 큰 마찰손실을 가졌다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 곡관부 이후 큰 이차유동과 요철에 의한 이차유동의 방향이 같기 때문이다. 회전하는 경우[Fig. 10(b)]에는 2차유로 상류에서 높은 마찰손실이 일어났다. 그리고 요철 배열에 따른 마찰손실은 NN 및 PN 요철 배열을 가질 경우에 가장 크게

나타났는데, 이는 앞서 언급한 것과 같이 회전에 의해 나타나는 2차유로 상류에서의 큰 이차유동의 방향이 2차유로의 N형 요철배열에 의한 이차유동과 같기 때문이다.

Fig. 11은 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. 11(a)]에는 곡관부에서 급속한 유동의 방향전환으로 높은 마찰손실이 일어나, 가장 낮은 성능계수가 나타났다. 하지만, 요철배열에 따른 성능계수는 요철 배열에 상관없이 거의 일정하였다. 회전하는 경우[Fig. 11(b)]는 2차유로 상류에서 곡관부 및 회전에 의한 강한 이차유동이 발생하여, 가장 낮은 마찰계수 분포를 보였다. 비록 요철 배열에 따라 국소적인 영역에서는 열전달 및 마찰계수의 차는 나타났지만, 성능계수의 차는 거의 나타나지 않았다.

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) 평행한 NP형 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) 1차유로에서의 압력계수는 정지한 경우 및 회전하는 경우 모두 요철배열과 상관없이 비슷하였으나, 곡관부 이후에서는 요철 배열에 따라 다르게 나타났다. 즉, 정지한 경우는 NN 및 PP 요철배열이 설치된 경우에 압력강하가 크게 나타났고, 회전하는 경우는 NN 및 PN 요철배열이 크게 나타났다. 이는 곡관부에서 발생한 이차유동의 회전 방향이 2차유로의 큰 이차유동의 회전 방향과 일치하기 때문이다.

(3) 열전달 성능계수는 가장 강한 이차유동이

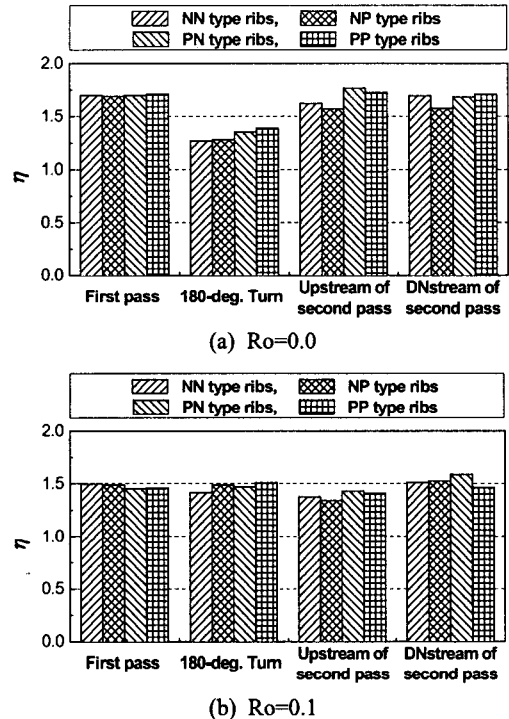


Fig. 11 Thermal performance at each region

생성되는 위치에서 높은 마찰손실로 인해, 정지한 경우에는 곡관부에서 가장 낮았고, 회전하는 경우에는 2차유로 상류에서 가장 낮았다. 국소적인 영역에서의 열전달 및 마찰계수는 달랐지만, 요철배열에 따른 성능계수의 차는 크지 않았다.

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) Liou, T. M., Chen, C. C. and Chen, M. Y., 2003, "Rotating Effect on Fluid Flow in Two Smooth Ducts Connected by a 180-Degree Bend," *ASME Journal of Fluid Engineering*, Vol. 125, pp. 138~148.
- (9) 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.
- (10) Lee, S. Y., 2000, "Effects of the Rib Arrangements and Rotation on Heat/Mass Transfer in Turbine Blade Cooling Passage," Master Thesis, Yonsei University, Korea.
- (11) Lin, Y. L., Shih, T. I. P. and Stephens, M. A., 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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 (II) - Parallel Ribbed Duct," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 8, pp. 911~920.
- (17) Wright, L. M., Fu, W. L. and Han, J. C., 2004, "Thermal Performance of Angled, V-Shaped, and W-Shaped Rib Turbulators in Rotating Rectangular Cooling Channels," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 126, pp. 604~614.
- (18) Acharya, S., Zhou, F., Lagrone, J., Mahmood, G. and Bunker, R. S., 2005, "Latticework (Vortex) Cooling Effectiveness: Rotating Channel Experiments," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 127, pp. 471~478.
- (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.