

단락요철이 회전덕트 내 압력강하에 미치는 영향

김 경 민, 이 동 현, 조 형 희[†]

연세대학교 대학원 기계공학부, *연세대학교 기계공학부

Effects of Discrete Ribs on Pressure Drop in a Rotating Two-Pass Duct

Kyung Min Kim, 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 December 19, 2005; revision received April 6, 2006)

ABSTRACT: The present study has been conducted to investigate the effects of rotation on heat/mass transfer and pressure drop characteristics in a two-pass square duct with and without discrete ribs. For stationary cases, the heat/mass transfer on the surfaces with and without discrete ribs is almost the same or reduced. For rotating cases, the gap flow affects differently the heat/mass transfer on leading and trailing surfaces with discrete ribs. On the leading surface of the first pass, the heat/mass transfer is slightly enhanced due to generating strong gap flow. On the trailing surface of the first pass, however, the heat/mass transfer is much decreased because the gap flow disturbs impingement of main flow. The phenomenon, that is, the heat/mass transfer discrepancy between the leading and trailing surfaces is distinctly presented with the increment of rotation number. The friction losses on each surface with discrete ribs are reduced because the blockage ratio decreases for both non-rotating and rotating cases. Therefore, high thermal performance appears in a duct with discrete ribs.

Key words: Coriolis force(코리올리력), Discrete ribs(단락요철), Heat/Mass transfer(열/물질전달), Pressure drop(압력강하), Rotating duct(회전덕트)

기 호 설 명

C_b : 국소압력강하

D_h : 수력직경 [m]

f : 마찰계수

f_0 : 요철이 없는 원형관에서의 f

h : 열전달계수 [$W m^{-2} K^{-1}$]

H : 덕트 높이 [m]

h_m : 물질전달계수 [$m s^{-1}$]

$P_{ref.}$: 기준압력

P_X : 국소압력

R : 유로 최대 반경 [m]

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

\overline{Sh} : 피치 평균 Sherwood 수

\overline{Sh}_R : 구간 평균 Sherwood 수

u_b : 평균 속도 [$m s^{-1}$]

W : 유로의 폭 [m]

[†] Corresponding author

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

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

- x : 주유동 방향거리 [m]
- y : 덕트 중심으로부터 횡 방향거리 [m]
- z : 덕트 바닥면으로부터의 높이 [m]

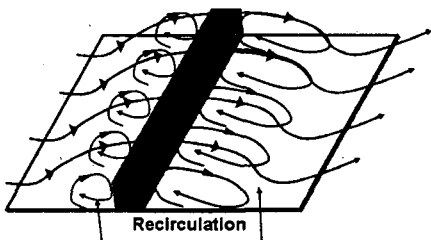
그리스 문자

- η : 열/물질 성능계수
- μ : 점성계수 [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]
- ν : 동점성계수 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
- ρ : 밀도
- Ω : 회전각속도 [rad s^{-1}]

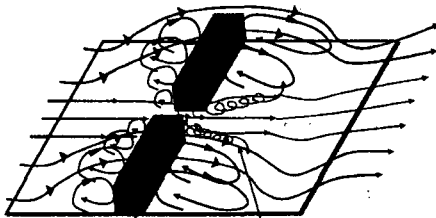
1. 서 론

가스터빈 블레이드와 같은 고온의 부품을 보호하기 위해 내부의 냉각유로를 만들고 요철을 설치하여, 열전달 성능을 높이고 냉각유체의 유량공급을 위한 동력을 최소화하기 위한 연구가 꾸준히 진행되었다. 특히, 요철에 의한 열전달 성능을 높이기 위해 요철의 형상과 배치(요철의 높이, 요철과 주유동과의 충돌각, 요철과 요철 사이의 거리 등)에 따른 연구가 진행되어 왔다.

Fig. 1은 연속요철과 단락요철에 의한 요철 근



(a) Continuous ribs



(b) Discrete ribs

Fig. 1 Schematic flow structures.

처에서의 유동구조이다. Fig. 1(a)과 같이 연속요철 설치시, 요철로 인해 유동이 박리되어 요철과 유동의 재부착 지점 사이에 재순환 영역이 생성되고, 이로 인해 요철 뒤에서 국소적으로 낮은 열전달 분포가 나타나게 된다. 이를 극복하기 위해 요철을 벽면으로부터 띄우거나 다공성 요철을 사용한 연구들이 진행되었다. 이 연구들은 유로 내부의 요철을 벽면으로부터 분리하여 요철과 벽면의 간극을 형성하였을 때, 요철이 벽면에 붙어 있을 때보다 열전달이 균일하며 높아졌으나, 요철이 주유동의 높은 속도를 가지는 위치에 높이가 되어 압력강하가 증가한다는 것을 밝혀 내었다.⁽¹⁻³⁾

Hwang et al.^(4,5)과 Liou et al.⁽⁶⁾은 주유동 방향으로 많은 원형홀 및 사각홀을 가진 다공성 요철을 설치하면, 이 홀들을 통해 유동이 재순환 영역으로 유출되어 열전달 분포가 균일해지며, 열전달이 향상된다고 발표하였다.

그렇지만 이와 같은 요철은 실제 가스터빈 블레이드와 같이 주조를 통해 제작되는 부품들에 적용하기 어렵기 때문에, 이와 같은 문제점들을 최소화하기 위해 요철에 단락을 형성하여 Fig. 1 (b)과 같이 단락을 통해 가속된 유출유동을 이용하는 연구를 진행하였다. Chyu and Natarajan⁽⁷⁾은 정지한 덕트 내에서 충돌각이 90°인 요철에 단락이 있을 경우, 단락위치에서 요철에 의한 박리 및 재부착 현상이 나타나지 않아 열전달이 감소하는 것을 밝혀내었다. Hu and Shen⁽⁸⁾과 Cho et al.⁽⁹⁾은 정지된 덕트 내의 각도진 요철이 설치된 경우, 각도진 요철에 의한 이차유동의 상향류에 단락요철이 설치된 경우 국소적으로 열전달이 향상되었지만, 하향류에 단락요철이 설치된 경우에는 이차유동의 충돌을 방해하여 낮은 열전달 분포가 나타나는 것을 밝혀내었다. 또한 실제 가스터빈 블레이드의 경우 회전하는 환경에 놓여 있기 때문에 이를 모사하기 위해 Kim et al.⁽¹⁰⁾은 단락요철이 설치된 회전덕트에서의 열전달 특성을 밝혀내었다.

기존의 단락요철이 설치된 유로에서의 연구들은 정지한 경우에 대한 열전달 특성에 중점을 두고 실험을 수행하여 회전에 따른 국소적인 열전달 및 압력강하 분포를 알 수 있는 자료가 부족한 상태이다.

본 연구에서는 중황비가 1.0인 덕트에서, 기존 90° 연속요철 및 단락요철이 설치된 덕트에서의

열전달 분포^(10,11)와 현재 단락요철이 설치된 덕트에서의 회전에 따른 압력강하 특성을 밝히고, 이로부터 성능계수를 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 2는 회전덕트 실험장치의 개략도를 나타내며, 실험장치는 크게 송풍부와 회전부, 그리고 측정부의 3가지로 나누어진다. 송풍기를 통하여 들어오는 유동은 열교환기를 지남으로써 온도가 조절되며, 이는 다시 오리피스 유량계와 폴리넘을 거쳐, 터빈 블레이드의 내부관을 모사한 덕트의 내부를 통과하여 대기 중으로 방출된다. 송풍기의 회전수를 제어하여 유량을 일정하게 유지하였다. 회전축은 V-벨트로 연결된 3마력의 직류모터로 구동되며, 이때 회전수는 축에 설치된 광속도센서(Digital Tachometer)에 의하여 측정된다. 회전시 일어나는 진동을 최소화하기 위하여 덕트와 같은 무게를 지니는 추를 반대편에 설치하였다. 실험

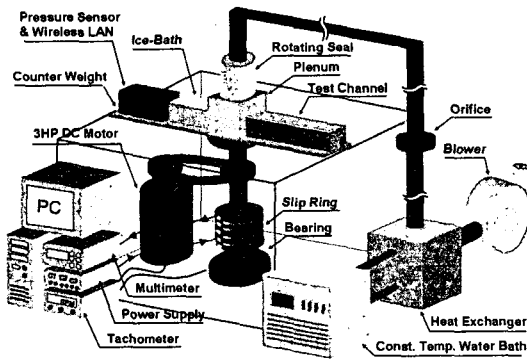


Fig. 2 Experimental apparatus.

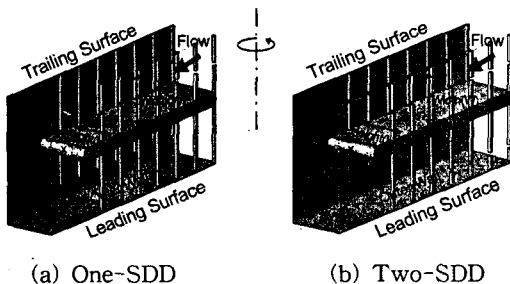


Fig. 3 Geometry of duct.

험시 온도조건은 덕트 입출구부에 설치된 J형 열전대에 의하여 측정된다.

Fig. 3은 실험에 사용된 덕트의 형상을 나타낸다. Fig. 3(a)은 전·후연면 중 한쪽의 단락요철을 설치한 덕트이며 One-SDD라 명명하였고, Fig. 3(b)은 전·후연면 양쪽 모두 단락요철을 설치한 덕트이며 Two-SDD 요철 덕트라 명명하였다. 덕트는 종횡비(Aspect Ratio, W/H)가 1.0인 정사각형 형태이고, 180°의 곡관부로 연결된 2중의 유로로 되어 있으며 아크릴로 제작되었다. 덕트의 수력직경(D_h)은 26.67 mm이며, 수력직경 대비 최대 회전반경(R/D_h)은 21.63의 값을 갖는다. 분리벽의 두께는 $0.225 D_h$ 이며, 끝단(tip)은 반원형으로 제작되었다. 곡관부의 90° 꺾어진 부분에서 분리벽의 끝과 곡관부 외벽과의 간격(W)은 $1.0 D_h$ 가 되도록 하였다.

덕트 내 요철은 곡관부를 제외한 유로의 내부에 전·후연면에 요철을 설치하였으며, 이때 요철의 단면은 $1.5 \text{ mm} (e) \times 1.5 \text{ mm} (w)$ 의 정사각형이다. 요철높이 대 수력직경 비(e/D_h)는 0.056, 요철 사이 거리 대 요철높이 비(p/e)는 10.0이며, 요철의 충돌각은 90°로 하였다. 요철의 배열은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 것처럼 전·후연면에서 서로 평행하게 설치되어 있다. 요철단락의 위치는 1차유로에서는 중앙 $1/2 W$ 지점에 단락을 내었으며, 2차유로에서는 전연면은 외벽에서 $3/4 W$ 되는 지점에 단락을 내고 후연면은 외벽에서 $1/4 W$

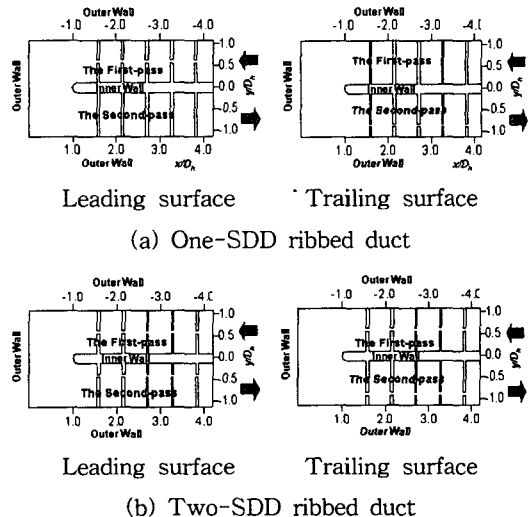


Fig. 4 Rib arrangement and coordinate system.

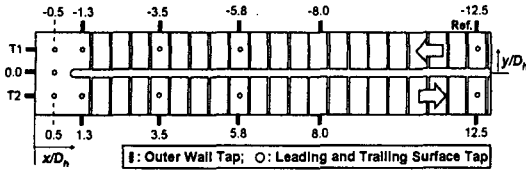


Fig. 5 Location of pressure taps.

되는 지점에 단락을 내었다.

Fig. 4는 실험에 사용된 덕트의 요철배열 및 좌 표계를 나타낸다. One-SDD 요철 덕트는 1차유로는 후연면에 단락요철을, 2차유로는 전연면에 단락요철을 설치하였으며, Two-SDD 요철 덕트는 1차·2차유로의 전연면과 후연면 모두 단락요철을 설치하였다. 덕트의 입구로부터 시험면의 시작지점까지 거리는 약 $6D_h$ 정도로 여유를 두어, 요철에 의한 2차유동과 함께 완전 발달한 난류유동이 형성되도록 하였다.

각 위치의 정압을 측정하기 위해 0.8mm의 구멍을 뚫고 압력탭을 Fig. 5에 나타난 것처럼 전·후연면 및 바깥면에 설치하였고, 기준 압력탭은 바깥면 $x/D_h = -12.5$ 위치에 설치하였다. 본 실험에서는 기준 압력탭과 측정 압력탭 사이의 차압을 정밀도가 0.2%인 압력센서(PSI사, ESP-32HD)를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서는 수력직경 기준 Reynolds 수는 10,000으로 고정시키고, 회전수(Ro)를 0.0에서 0.2 (≈ 420 rpm)까지 0.05(≈ 105 rpm)씩 변화시켜 가며 실험을 수행하여 국소압력강하 및 각 구간에서의 마찰계수를 구하고, 선행 연구된 Kim et al.⁽¹⁰⁾의 열/물질전달계수 비(\overline{Sh}/Sh_0)로부터 열/물질전달 성능계수를 구하였다.

2.2 실험결과 처리

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

$$C_p = \frac{P_x - P_{Ref}}{\frac{1}{2} \rho u_b^2} \quad (1)$$

전·후연면 및 바깥면에서의 각 구간(1차유로, 곡관부, 2차유로 상류, 그리고 2차유로 하류)에서

의 평균 압력강하($\Delta P/\Delta L$)는 각 구간 시작압력과 구간 끝압력 사이의 국소차압(ΔP) 측정 데이터의 선형맞춤에 의해 계산되고, 이를 이용하여 계산된 마찰계수는 다음과 같이 정의된다.

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

덕트를 통과하는 공기의 질량유량과 Reynolds 수의 불확실성은 Kline and McClintock⁽¹²⁾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⁽¹³⁾에 의해 제시된 매끈한 파이프에서의 완전 발달한 난류유동장에서의 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 Kim et al.⁽¹⁰⁾에 의해 선행연구된 물질전달계수로부터 열/물질전달 성능계수를 다음식과 같이 정의하였다.

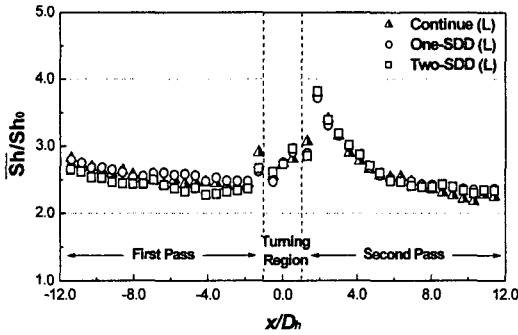
$$n = \frac{\overline{Sh}/Sh_0}{\left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3}} \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

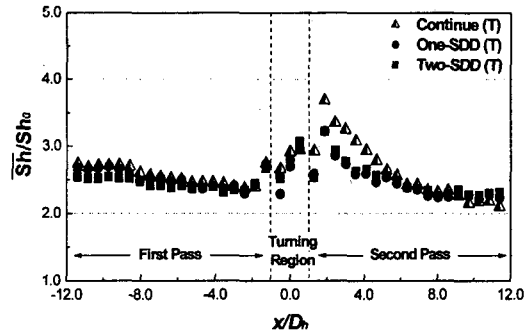
3.1 단락요철에 의한 열전달 특성(Review)

Fig. 6과 Fig. 7은 Kim et al.⁽¹⁰⁾에 의해 밝혀진 전·후연면의 열/물질전달계수 비를 유로 내 각 x/D_h 지점에 해당하는 요철과 요철 사이 영역의 면적 평균값을 정지한 경우와 회전하는 경우에 대해서 나타낸 그림이다.

정지한 경우(Fig. 6), 1차유로에서는 연속 요철 덕트의 전·후연면에서의 평균 열전달과 비교하였을 때 단락요철이 설치된 One-SDD 덕트의 전연면 및 Two-SDD 덕트의 전·후연면에서의 평균 열전달값은 비슷하거나 약간 낮게 나타났다. 이는 단락을 지난 유동의 가속으로 요철 바로 뒤에서 열전달이 향상되나, 이후 요철에 의한 박리 및 재부착이 일어나지 않아 열전달이 감소하였기 때문이다. 곡관부에는 요철이 설치되어 있지 않

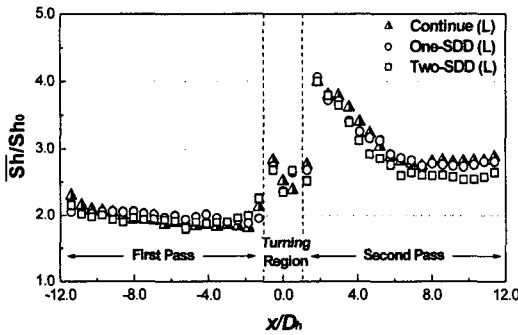


(a) Leading surface

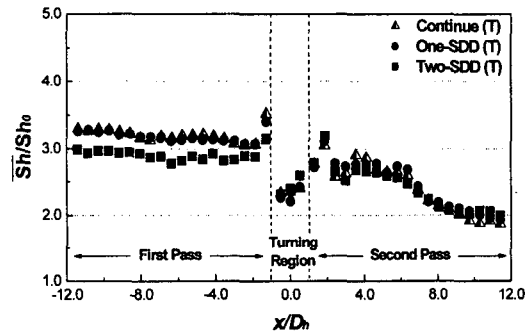


(b) Trailing surface

Fig. 6 Pitch-averaged Sh ratios in the stationary duct ($Ro=0.0$).



(a) Leading surface



(b) Trailing surface

Fig. 7 Pitch-averaged Sh ratios in the Rotating duct ($Ro=0.2$).

으며, 또한 유동의 급격한 선회로 인해 발생된 단와류(Dean Vortices)의 영향이 지배적이기 때문에 비슷한 열전달 분포가 나타났다. 2차유로 전연면은 단락요철이 설치된 Two-SDD 덕트에서 단와류에 의한 하향류가 형성되는 지점에 단락이 형성되어 있어 열전달은 비슷하거나 향상되었다. 하지만, 후연면 2차유로 입구에서는 열전달이 크게 감소하였는데, 이는 곡관부로 인한 단와류의 충돌을 단락유동이 방해하였기 때문이다. 이후, 2차유로 출구로 향할수록 단와류가 약화되면서 후연면의 열전달은 약간 증가하였다.

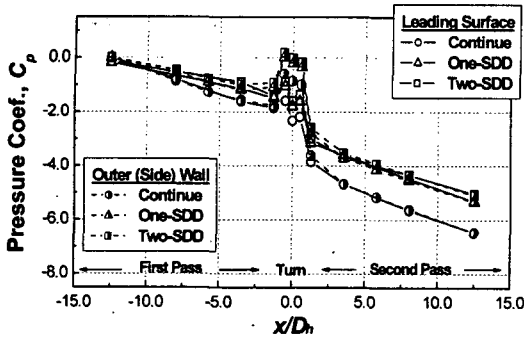
덕트가 회전하는 경우(Fig. 7), 1차유로에서는 단락요철이 설치된 One-SDD와 Two-SDD 덕트의 전연면에서는 열전달이 약간 향상되었으나, Two-Pass 덕트의 후연면에서는 열전달이 크게 감소하였다. 이는 앞서 언급한 유동의 교란, 즉 코리올리력에 의해 후연면으로 치우친 유동의 재부착을 단락유동이 방해했기 때문으로 사료된다. 곡관부

에서의 열전달은 모두 비슷하게 나타났다. 2차유로에서는 연속요철과 단락요철이 설치된 Two-SDD 덕트를 비교하였을 때 곡관부 이후 전연면에서는 와류의 충돌 영역에 단락이 형성되어 열전달은 약간 감소하였지만, 이차유동의 상향류 영역에 단락요철이 설치된 One-SDD 및 Two-SDD 덕트의 후연면은 열전달이 약간 증가하거나 비슷하였다.

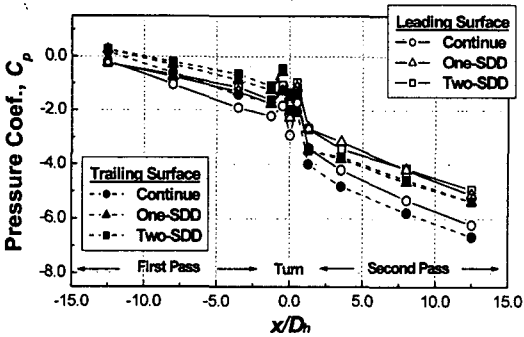
3.2 국소 압력계수 분포

Fig. 8은 전연면과 후연면의 각 x/D_h 지점에서의 요철설치에 따른 압력강하분포를 각각의 회전수에 대해서 나타낸 그림이다.

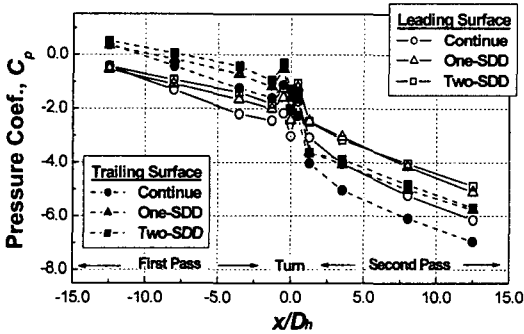
Fig. 8(a)과 같이 정지한 경우, 전·후연면의 압력강하계수가 모든 구간에서 오차범위 내이므로 전연면만 제시하였다. 바깥면의 압력강하계수 분포는 곡관부를 제외한 나머지 부분에서 일치하였



(a) $Ro=0.0$



(b) $Ro=0.1$



(c) $Ro=0.2$

Fig. 8 Local pressure coefficient distributions for discrete location.

다. 실험결과에서 보듯이, 1차유로 및 2차유로에서는 요철의 단락의 개수가 많을수록 압력손실(기울기)이 감소하는데, 이는 요철에 의한 막힘(blockage ratio) 현상이 감소하였기 때문이다. 하지만, 곡관부에서의 압력손실(곡관부 전·후의 압력차)의 크기는 비슷하게 나타났는데, 이는 곡관부의 요철이 설치되어 있지 않고, 유동의 급선회

로 인한 단와류의 압력강하가 크기 때문이며, 바깥면에서 높은 압력계수를 갖는 이유는 단와류가 바깥면에 충돌하기 때문이다.

덕트가 회전하는 경우(Fig. 8의 (b), (c))도 역시 단락의 개수가 증가할수록 각 면의 압력손실이 감소하였다. 하지만, 회전에 의해 전·후연면의 압력값의 차이가 발생하였는데, 이는 덕트의 회전에 의한 코리올리력이 전·후연면의 유동분포를 비대칭적으로 만들기 때문이다. 따라서 1차유로에서는 후연면으로 유동이 편향되어 후연면의 압력계수 및 열전달을 높이지만, 2차유로에서는 전연면으로 편향되어 전연면의 압력계수 및 열전달을 높게 된다. 또한 모든 덕트의 높이(H)와 회전수가 같기 때문에 모든 요철배열에서 전·후연면의 압력계수의 차가 비슷하였다.

3.3 각 구간에서의 마찰계수 및 성능계수

Fig. 9는 덕트 내 각 구간에서의 회전에 따른 마찰손실을 완전 발달된 난류유동관의 경우와 비교를 위해 마찰손실 비, f/f_0 의 형태로 각각의 요철배열에 대해서 나타내었다.

대부분의 구간에서 단락의 개수가 많을수록 마찰손실 비가 감소하였는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 요철에 의한 막힘 현상이 감소하였기 때문이다. 또한 세부적인 마찰손실 비를 보면, 1차유로(Fig. 9(a))의 전·후연면에서는 회전에 의해 이차유동이 발생하여 마찰손실이 약간 증가하였지만, 회전수 증가에 따른 마찰손실은 크게 변하지 않았다. 하지만, 곡관부 입구부터 2차유로 상류까지의 마찰손실(Fig. 9(b))은 1·2차유로에 비해 크게 증가하였으며, 회전수가 증가함에 따라 전연면에서는 마찰계수는 감소하지만, 후연면에서는 증가하였다. 이는 덕트의 회전수가 증가하면, 곡관부에서의 이차유동의 중심이 전연면에서 후연면 방향으로 이동하게 되어 벽면 근처의 이차유동의 강도가 상대적으로 약해지기 때문이다. 2차유로 하류에서는 Fig. 9(c)와 같이 회전수 증가에 따라 전연면과 후연면에서의 마찰손실이 증가하였는데, 이는 곡관부 및 덕트의 회전에 의해 이차유동의 난류강도가 증가하였기 때문이다. 전체 구간에서의 마찰계수(Fig. 9(d))는 곡관부에서의 마찰계수(Fig. 9(b))와 경향이 비슷하게 나타났다. 이는 이중유로를 가진 덕트 내에서는 곡관부에 의

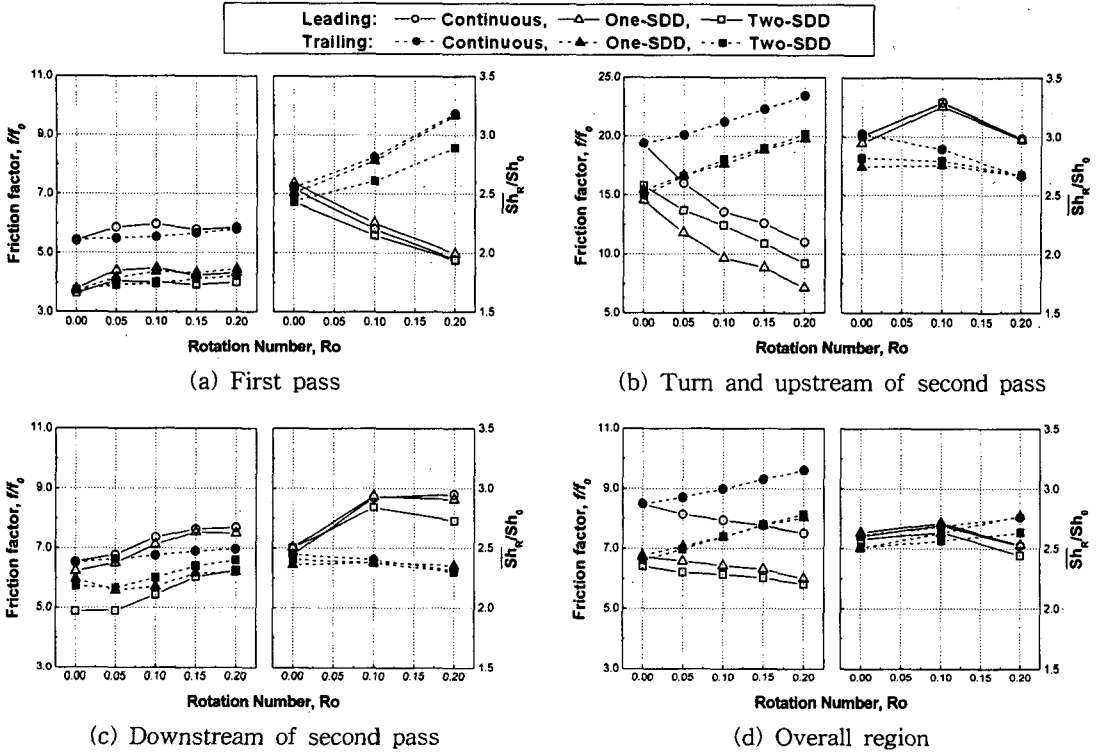


Fig. 9 Friction factor and mead Sh ratios for each zone.

한 압력강하가 가장 큰 비중을 차지하고 있기 때문이다.

Fig. 10은 일정 이송동력 조건 하에서의 전연면과 후연면에서의 열/물질성능계수를 제시한 것으로, 일반적으로 높은 열/물질전달이 일어나면서 낮은 마찰손실 특성을 나타내는 경우 높은 성능계수를 예상할 수 있다. 전체 구간에 대한 성능계

수는 단락요철에 의한 압력손실이 작기 때문에 높게 나타났으며, 단락이 양쪽 다 있을 때보다 코리올리력에 의해 유동이 치우치지 않는 방향에 한쪽만 단락을 낸 경우에 더 높은 성능이 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 곡관부를 가진 덕트 내에서 요철배열 및 회전수 변화에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전체적으로 단락이 설치된 경우는 설치되지 않은 경우와 비슷한 열전달계수를 갖지만, 덕트 회전 및 곡관부 등으로 유동이 한 면으로 치우치거나 충돌이 일어나는 면에 단락이 있을 경우에는 오히려 단락유동이 열전달을 방해하여 낮은 열전달계수가 나타났다.

(2) 정지한 경우와 회전하는 경우에 가장 큰 압력손실은 곡관부 및 2차유로 상류에서 일어났으며, 단락의 개수가 증가할수록 요철에 의한 막힘현상이 감소하여, 전체적인 압력손실은 감소하였다.

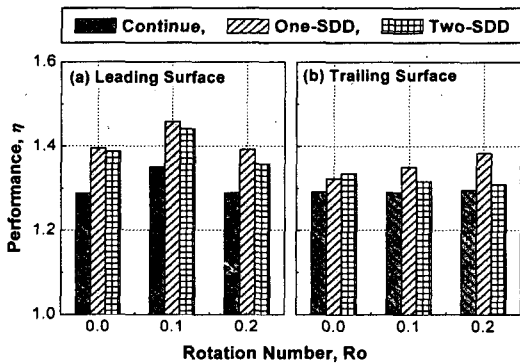


Fig. 10 Thermal performance for all regions.

(3) 전체적으로 단락에 의해 열전달은 큰 차이가 나타나지 않지만, 압력손실은 크게 감소한다. 따라서 일정 이송동력조건에서의 전·후연면에서의 열/물질전달 성능계수는 단락이 치우치지 않는 면에만 단락이 설치된 경우에 높은 성능계수가 나타났다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업 기술개발사업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Tsia, J.P. and Hwang, J.-J., 1999, Measurements of heat transfer and fluid flow in a rectangular duct with alternate attached-detached rib-arrays, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2071-2083.
2. Liou, T.-M., Chen, M. Y. and Wang, Y.-M., 2003, Heat transfer, fluid flow and pressure measurements inside a rotating two-pass duct with detached 90-deg ribs, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 565-574.
3. Ahn, J., Choi, H.C. and Lee, J.S., 2004, Large eddy simulation of flow and heat transfer in a channel with a detached rib array, *Proceedings of The 3rd National Congress on Fluids Engineering*, Paper No. UD01.
4. Hwang, J.-J. and Liou, T.-M., 1995, Effect of permeable ribs on heat transfer and friction in a rectangular channel, *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 265-271.
5. Hwang, J.-J. and Liou, T.-M., 1997, Heat transfer augmentation in a rectangular channel with slit rib turbulators on two opposite walls, *ASME J. Turbo-machinery*, Vol. 119, pp. 617-623.
6. Liou, T.-M., Chen, S.-H. and Shih, K.-C., 2002, Numerical simulation of turbulent flow field and heat transfer in a two-dimensional channel with periodic slit ribs, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 4493-4505.
7. Chyu, M.K. and Natarajan, V., 1989, Local heat transfer on a flat surface roughened with broken ribs, *ASME Winter Annual Meeting, HTD*, pp. 25-31.
8. Hu, Z. and Shen, J., 1996, Heat transfer enhancement in a covering passage with discrete ribs, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 1719-1727.
9. Cho, H.H., Kim, Y.Y., Rhee, D.H., Lee, S.Y. and Choi, C., 2003, The effects of gap position in discrete ribs on local heat/mass transfer in a square duct, *J. Enhanced Heat Transfer*, Vol. 10, pp. 287-300.
10. Kim, K.M., Kim, S.I., Rhee, D.H. and Cho, H.H., 2005, Experimental study of heat/mass transfer in rotating cooling passages with discrete ribs, *Transactions of KSME(B)*, Vol. 29, No. 5, pp. 590-598.
11. Kim, K.M., Kim, S.I., Lee, D.H. and Cho, H.H., 2005, Heat/Mass transfer and pressure drop in a rotating two-pass duct with transverse ribs, *Asian Congress on Gas Turbines 2005*, Paper No. ACGT2005-028.
12. Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, Describing uncertainty in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
13. Petukhov, B.S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, New York, Vol. 6, pp. 503-564.