

< 논문 >

단락 요철이 설치된 내부 냉각유로에서 회전에 따른 열/물질전달 특성 연구

김경민* · 김상인* · 이동호** · 조형희†
(2004년 11월 22일 접수, 2005년 3월 18일 심사완료)

Experimental Study of Heat/Mass Transfer in Rotating Cooling Passages with Discrete Ribs

Kyung Min Kim, Sang In Kim, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words: Coriolis Force(코리올리력), Discrete Rib(단락요철), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법), Rib Turbulator(요철)

Abstract

The present study has been conducted to investigate the effect of discrete ribs and rotation on heat/mass transfer characteristics in a two-pass square duct with 90°-rib turbulators. The rib turbulator has a square cross section of 1.5 mm. The rib height-to-hydraulic diameter ratio (e/D_h) is 0.056, and the rib pitch-to-rib height ratio (p/e) is 10. The gap width is the same as the rib height. The rotation number ranges from 0.0 to 0.2 while Reynolds number is fixed to 10,000. In a stationary duct, the heat/mass transfer on the surfaces with discrete ribs is enhanced because the gap flow promotes local turbulence and flow mixing near the ribbed surface. In a rotating duct, 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, heat/mass transfer is increased due to the gap flow. On the trailing surface of the first pass, however, heat/mass transfer is decreased because the gap flow disturbs reattachment of main flow. The phenomenon, that is, the difference of heat transfer between the leading and the trailing surfaces is distinctly presented by rotation.

기호설명

D_h : 수력직경
 D_{naph} : 물질확산계수(나프탈렌-공기)
 e : 요철 높이
 H : 덕트 높이
 h : 열전달계수
 h_m : 물질전달계수
 p : 요철간 거리
 R : 유로 최대 반경
 Re : Reynolds 수, $D_h u_b / \nu$

Ro : Rotation 수, $D_h \Omega / u_b$
 Sc : Schmidt 수, ν / D
 Sh : Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$
 Sh_0 : 요철이 없는 원형관에서의 Sh 수
 \overline{Sh}_p : 피치 평균 Sherwood 수
 \overline{Sh}_{ch} : 유로 평균 Sherwood 수
 u_b : 평균 속도
 W : 유로의 폭
 w : 요철의 폭
 x : 주유동방향 거리
 y : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리
 z : 덕트 바닥면으로부터의 높이

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

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

그리스문자

μ : 점성계수
 ν : 동점성계수
 Ω : 회전각속도

1. 서론

가스터빈의 효율을 향상시키기 위해 터빈입구 온도(TET; Turbine Entry Temperature)를 높이는 것이 필수적이므로, 금속의 허용한계온도를 극복하기 위해 가스터빈 블레이드 내 냉각유로를 만들고, 요철을 설치하여 열전달 성능을 높이고 냉각 유체 유량을 최소화하여 효율을 높이는 연구들이 진행되었다. 또한 요철에 의한 열전달 성능을 높이기 위해 요철의 형상과 배치(요철의 높이, 요철과 주유동과의 충돌각, 요철과 요철 사이의 거리 등)에 따른 연구들도 진행되었다.

Fig. 1은 요철과 요철사이에서의 국소적인 열전달 분포이다. Fig. 1과 같이 요철 설치 시, 요철로 인해 유동이 박리하게 되어 요철과 유동의 재부착 지점 사이에 재순환영역이 생성되어, 요철 뒤에서 국소적으로 낮은 열전달 분포가 나타난다.

이를 극복하기 위해 요철을 벽면으로부터 분리하거나 다공성 요철을 사용한 연구들이 진행되었다. Tsia 등,⁽¹⁾ Liou 등⁽²⁾ 과 Ahn 등⁽³⁾은 유로 내부의 요철을 벽면으로부터 분리하여 요철과 벽면의 간극을 만들어 실험 및 수치해석 하였다. 이들은 요철이 벽면에 붙어 있을 때보다 벽면에서의 열전달이 높아지나, 요철이 주유동의 높은 속도를 가지는 위치에 놓이게 되어 압력강하가 증가한다는 것을 밝혀내었다. Hwang 등^(4,5)과 Liou 등⁽⁶⁾은 주유동 방향으로 많은 원형홀 및 사각홀을 가진 요철을 설치하여 이 홀들을 통해 유동이 재순환영역으로 유출되게 하는 연구를 수행하였다. 홀을 가진 요철을 설치하였을 때, 열전달 분포가 균일하며, 높은 열전달 성능을 가지는 것으로 발표하였다.

그러나 이와 같은 요철은 실제 가스터빈 블레

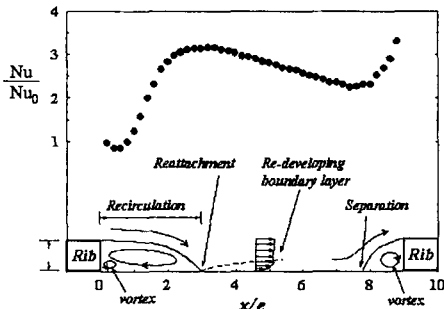


Fig. 1 Heat transfer distributions between the ribs

이드 내부 유로 요철에 적용하기에는 압력강화와 제작상의 문제점들이 생기게 된다. 이와 같은 문제점들을 최소화하기 위해 요철에 단락을 형성하여 단락유출 유동을 이용한 연구가 진행되고 있다. Chyu와 Natarajan⁽⁷⁾은 정지한 덕트 내에서 충돌각이 90°인 요철에 단락이 있을 경우와 없을 경우 그리고 요철이 반 피치(pitch) 이격되게 설치되었을 경우에 대해 물질전달 실험을 수행하였다. Hu와 Shen⁽⁸⁾은 충돌각이 45°인 요철이 설치된 정지한 덕트 내에서 열전달 및 유동가시화 실험을 통해서 단락된 위치에서 나타나는 작은 와류 유동의 흐름과 열전달 특성을 밝혀내었다. Cho 등⁽⁹⁾은 정지된 덕트 내의 충돌각이 60°인 요철을 설치하고 단락의 위치를 상류 또는 하류로 바꿔가며 열전달 실험 및 압력 실험을 수행하여, 국소적인 열전달 분포를 나타내고, 열전달 성능을 평가하였다. Tatsumi 등⁽¹⁰⁾은 수치해석을 통해 단락된 요철에 의해 나타나는 유동구조와 열전달 특성을 밝혀내었다.

기존의 단락 요철이 설치된 유로에서의 연구들은 정지한 경우에 대한 열전달 특성에 중점을 두고 실험을 수행하여 회전에 따른 국소적인 열/물질전달계수 분포 및 연속요철과의 차이점을 알 수 있는 자료가 부족한 상태이다. 본 연구에서는 중형비가 1.0인 덕트에서, 기존 90° 연속요철이 설치된 덕트⁽¹¹⁾와 현재 단락요철이 설치된 덕트에서의 회전에 따른 국소 열/물질전달 특성을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 회전덕트 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 송풍부와 회전부 그리고 측정부의 3가지로 나누어지며, 실험장치의 자세한 구성은 Kim 등⁽¹¹⁾에 제시되어 있다. Fig. 3은 실험에 사용한 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 중형비(Aspect Ratio, W/H)가 1.0인 정사각형 형태이고, 180°의 곡관부로 연결된 2중의 유로로 되어있으며 아르릴로 제작되었다. 덕트의 수력직경(D_h)은 26.7mm

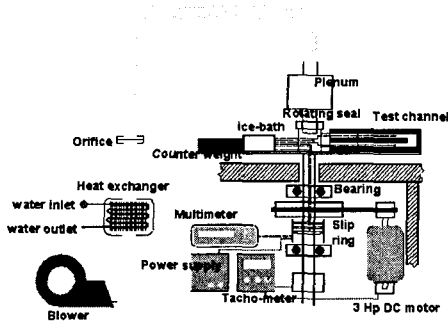
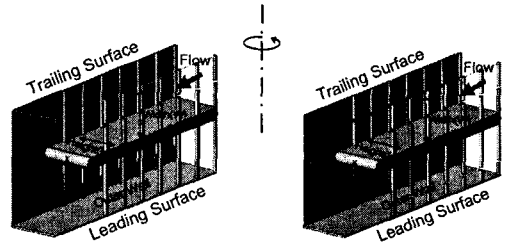


Fig. 2 Schematic view of experimental apparatus

이며, 수력직경대비 최대회전반경(R/D_h)은 21.63의 값을 갖는다. 분리벽의 두께는 $0.225D_h$ 이며, 끝단(tip)은 반원형으로 제작되었다. 곡관부의 90° 씩어진 부분에서 분리벽의 끝과 곡관부 외벽과의 간격(W)은 $1D_h$ 가 되도록 하였다. 요철이 설치된 덕트의 경우 곡관부를 제외한 유로의 내부에 요철을 설치하였으며, 이 때 요철의 단면은 $1.5\text{mm}(e) \times 1.5\text{mm}(w)$ 의 정사각형이다. 요철높이 대 수력직경비(e/D_h)는 0.056, 요철사이거리 대 요철 높이 비(p/e)는 10.0이며, 요철의 충돌각은 90° 로 하였다. 요철 배열은 Fig. 3에 나타난 것처럼 전·후연면에서 서로 평행하게 설치되어 있다. 요철단락의 위치는 1차유로에서는 중앙 $1/2W$ 지점에 단락을 내었으면 2차유로에서는 전연면은 외벽에서 $3/4W$ 되는 지점에 단락을 내고 후연면은 외벽에서 $1/4W$ 되는 지점에 단락을 내었다.

Fig. 4는 실험에 사용된 덕트의 요철배열 및 좌표계를 나타낸다. One-SDD 요철 덕트는 1차유로는 후연면에 단락요철을 2차유로는 전연면에 단락요철을 설치하였으며, Two-SDD 요철 덕트는 1차-2차유로의 전연면과 후연면 모두 단락요철을 설치하였다. 덕트의 요철면 바닥에는 나프탈렌이 코팅되어 있으며, 이는 열전달에서의 가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작 지점까지 거리는 약 $6D_h$ 정도로 여유를 두어, 요철에 의한 이차유동과 함께 완전 발달한 난류유동이 형성되도록 하였다.

본 연구에서는 수력직경기준 Re 는 10,000으로 고정시키고, 회전수 Ro 는 0.0과 $0.2(\approx 420\text{rpm})$ 에 대해서 실험을 수행하였다. 좌표계는 Fig. 4에 나타난 것과 같으며, 측정 영역은 주유동 방향으로 $-11.8 \leq x/D_h \leq 11.8$ 이며, 횡방향으로는 1차유로의



(a) One-SDD ribbed duct (b) Two-SDD ribbed duct
Fig. 3 Geometry of duct

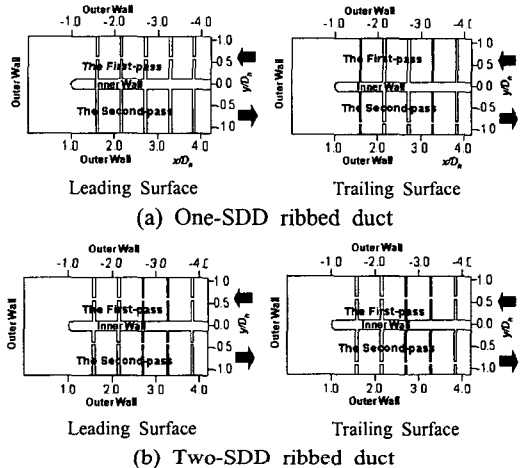


Fig. 4 Rib arrangement and coordinate system

외벽부터 2차유로의 외벽까지 거리에 해당하는 $-1.11 \leq y/D_h \leq 1.11$ 이다.

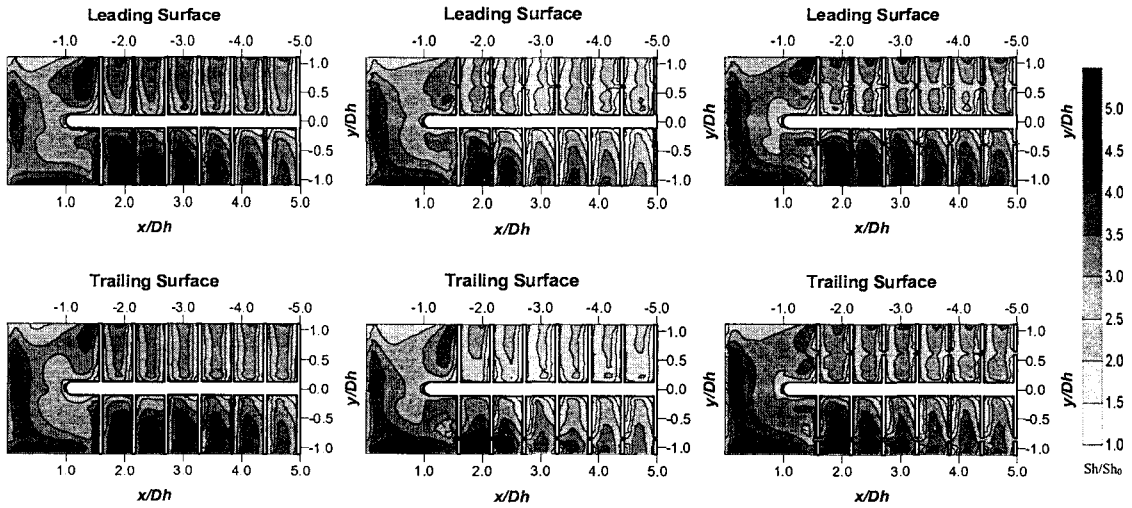
2.2 실험결과 처리

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과와 처리 과정은 Cho 등⁽⁹⁾ 및 Kim 등⁽¹¹⁾에 제시되어 있다.

나프탈렌이 코팅되어있는 면의 높이를 송풍 전후로 측정하여 국소 물질전달 계수를 구하고, 이로부터 무차원 물질전달 계수인 Sherwood 수를 구할 수 있다.

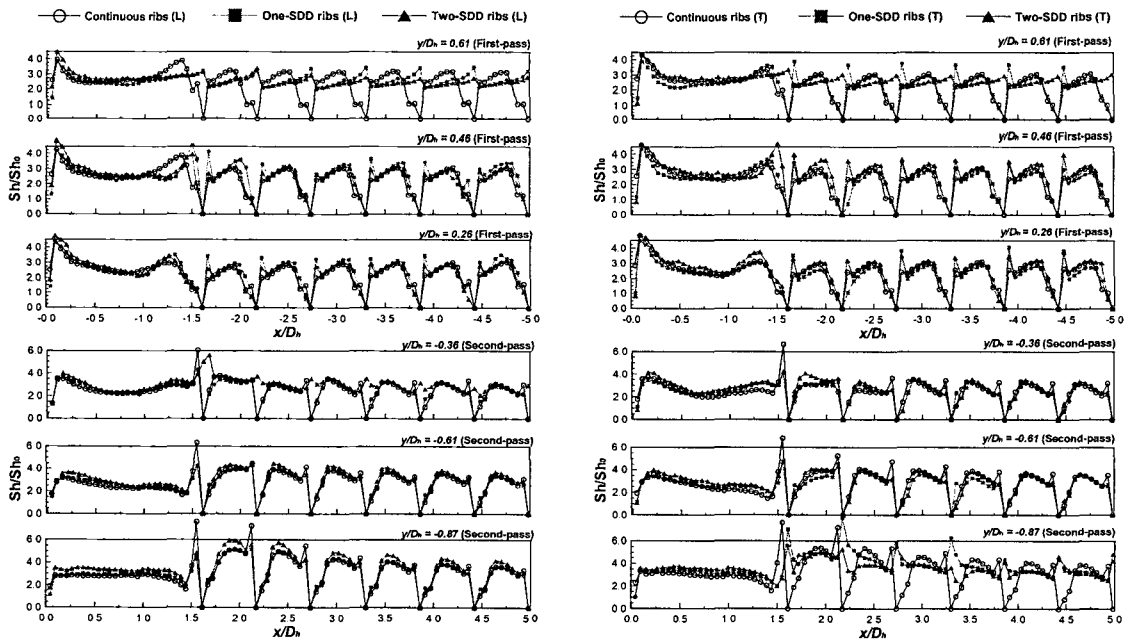
$$Sh = h_m D_h / D_{naph} \tag{1}$$

이 때, D_{naph} 는 공기중에서의 나프탈렌 확산계수이다. 물성치는 Goldstein과 Cho⁽¹²⁾에 의하여 제시된 값을 사용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불



(a) Continuous ribbed surface (b) One-SDD ribbed surface (c) Two-SDD ribbed surface

Fig. 5 Contours of Sherwood number ratios, Sh/Sh_0 for the stationary duct($Ro=0.0$)



(a) Leading surface

(b) Trailing surface

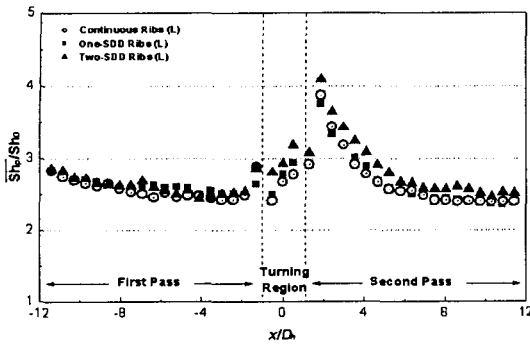
Fig. 6 Local plots of Sherwood number ratios, Sh/Sh_0 for the stationary duct($Ro=0.0$)

확실성은 Kline과 McClintock⁽¹³⁾의 방법에 의하여 95% 신뢰수준에서 7.76%의 값을 갖는다.

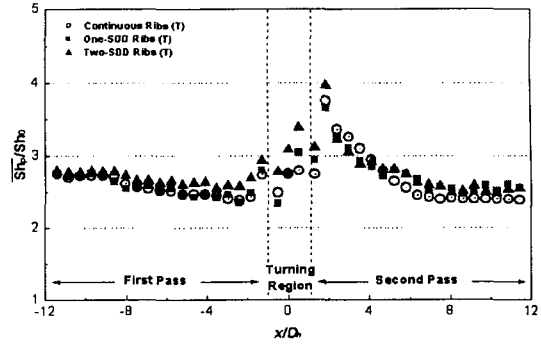
본 연구에서는 물질전달 실험결과를 무차원 물질전달 계수의 비(Sh/Sh_0)로 나타내었다. 이때 Sh_0 는 McAdams⁽¹⁴⁾에 의해 제시된 원형관에서의 완전발달 열전달계수는 열전달과 물질전달의 상사성에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$Sh_0 = 0.023Re^{0.8}Sc^{0.4} \quad (2)$$

또한, 한 피치 내의 각 지점에서 얻어진 Sh 값들을 해당 면적에 대하여 평균한 결과를 \overline{Sh}_p 와 각각의 유로에서의 Sh 값들을 면적 평균한 값의 결과를 \overline{Sh}_{ch} 로 나타내었다.



(a) Leading surface



(b) Trailing surface

Fig. 7 Pitch-averaged Sherwood number ratios, \overline{Sh}_v/Sh_0 for stationary duct ($Ro=0.0$)

3. 결과 및 고찰

3.1 정지한 덕트에서의 열전달 특성

본 연구에서는 연속요철과 단락요철 설치에 따른 열전달 특성을 파악하기 위해 기존 Kim 등⁽¹¹⁾에 의해 제시된 중형비가 1.0이고 이차유로를 가지는 덕트에서의 90° 연속요철 설치에 따른 열전달 결과와 비교하였다.

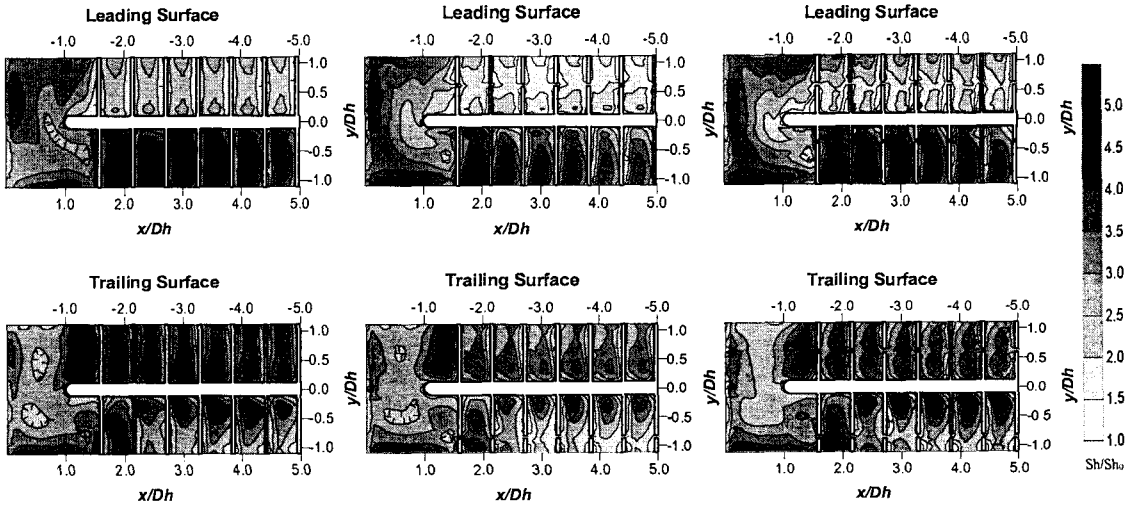
Fig. 5와 Fig. 6은 덕트가 정지한 경우($Ro=0.0$), 연속요철 덕트, One-SDD 덕트와 Two-SDD 덕트에서의 연속요철 및 단락요철 설치에 따른 국소적인 열/물질전달 계수 분포를 나타내는 그림이다. 각각의 덕트가 정지하였을 경우엔 1차유로에서의 전·후연면의 열전달 분포 및 경향은 비슷하였다. 즉, 연속요철 및 두 가지 단락요철 모두, Fig. 1과 같이 요철에 의해 박리된 후 재부착으로 높은 열전달 영역이 나타났으며, 유동이 완전발달 되면서 차츰 열전달이 감소하였다. 단락요철의 경우, 요철 단락지점에서 높은 열전달 영역이 관측되었는데, 이는 요철 단락부분에서 좁은 틈새 효과로 유속이 가속되고 단락 끝에서 와류가 생성되어 난류강도가 증가하기 때문으로 사료된다. 그러나 단락요철과 연속요철의 열전달 분포를 비교하였을 때, 단락위치에서 주유동 방향 ($y/D_h=0.61$)의 열전달은 연속요철에 비해 열전달이 감소하였는데, 이는 단락에 의한 빠른 유속이 주유동의 재부착을 방해하였기 때문이다.

곡관부에서의 열/물질전달 계수 분포는 연속요철보다는 단락요철이 설치된 경우가 약간 높은 열전달 분포를 보였으며, One-SDD 덕트 보다 Two-SDD 덕트에 단락요철이 설치된 경우 더 높

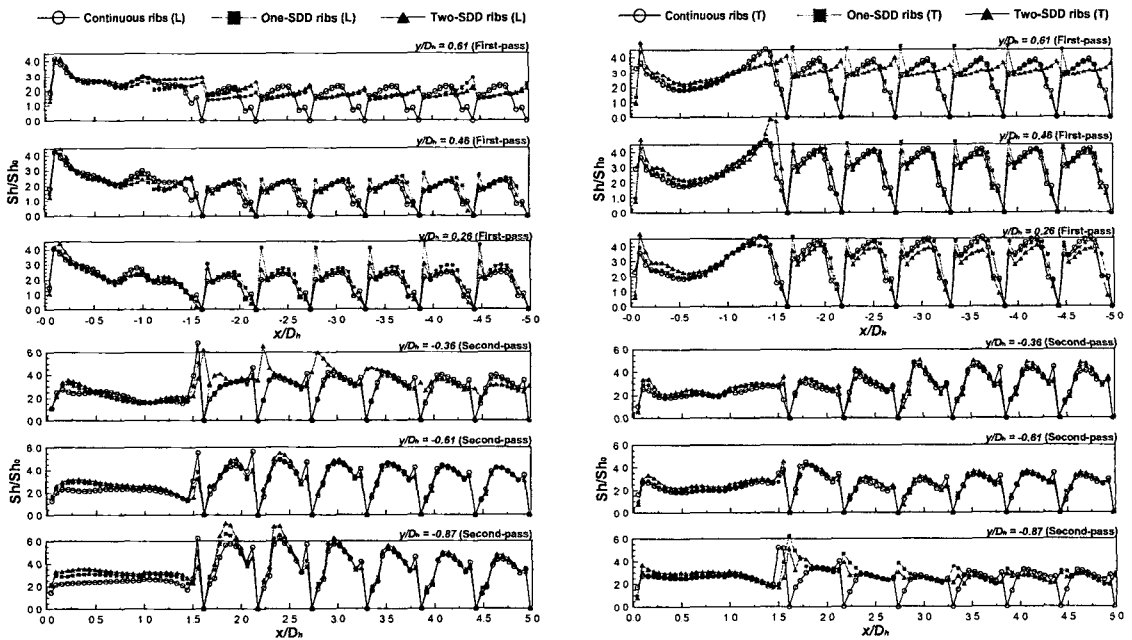
은 열전달 분포가 나타났다. 이는 1차유로를 지나 곡관부로 유입되는 주유동의 난류강도가 1차유로 마지막 단락요철로 인해 생성된 작은 와류와 빠른 틈새유동으로 인해 증가되었기 때문으로 사료된다. 단락요철이 설치된 One-SDD의 전연면과 Two-SDD의 전연면을 비교하였을 때 Two-SDD 단락요철이 설치된 면에서 열전달이 증가하였는데, 이는 단락의 개수가 많을수록 곡관부에서 난류강도가 증가하기 때문이다.

2차유로에서는 전·후연면의 열전달 분포 및 경향을 비슷하였으나, 단락의 위치가 다르기 때문에 단락 근처에서 열전달 분포가 다소 다르게 나타났다. 전연면에 단락요철이 설치된 Two-SDD 덕트의 경우, 단락의 위치에서 곡관부로 인한 이차유동의 상향류가 존재하여 열전달이 상승하였고 곡관부를 지난 후 유동의 난류강도 높기 때문에 전체적으로 높은 열전달 분포가 나타났다. 후연면의 단락을 형성한 One-SDD 및 Two-SDD 덕트는 곡관부에서 생성된 دن와류(Dean-vortices)에 의해 벽면에 충돌되는 유동(이차유동의 하향류)이 단락을 통한 틈새유동으로 인해 방해받게 되어 연속요철보다 낮은 열전달 영역이 형성된 것으로 보인다.

Fig. 7은 열전달 계수비를 유로내 각 x/D_h 지점에 해당하는 피치 한 구간의 영역에서 면적 평균한 값을 전연면[Fig. 7(a)]과 후연면[Fig. 7(b)]에 대해서 나타낸 그림이다. 1차유로에서는 연속요철 덕트의 전·후연면에서의 평균 열전달과 비교하였을 때 단락요철이 설치된 One-SDD 덕트의 전연면 및 Two-SDD 덕트의 전·후연면에서의 평균 열전달 값은 비슷하였다. 이는 단락에 의해 열전



(a) Continuous ribbed surface (b) One-SDD ribbed surface (c) Two-SDD ribbed surface
Fig. 8 Contours of Sherwood number ratios, Sh/Sh_0 for the rotating duct ($Ro=0.2$)



(a) Leading surface

(b) Trailing surface

Fig. 9 Local plots of Sherwood number ratios, Sh/Sh_0 for the rotating duct ($Ro=0.2$)

달이 향상된 부분과 재부착 방해로 열전달이 감소한 부분이 상사하기 때문이다. 곡관부에서는 주유동의 난류성분이 큰 순서인 Two-SDD, One-SDD, 연속요철 순으로 열전달이 높은 것을 관측할 수 있었다. 2차유로 전연면 역시 단락요

철이 설치된 Two-SDD 덕트에서 단와류에 의한 하향류가 형성되는 지점에 단락을 형성하여 열전달이 향상되었다. 후연면 2차유로 입구에서의 One-SDD 및 Two-SDD 단락요철에 의한 평균 열전달 계수는 덕트 입구의 단락요철에서 상향류가

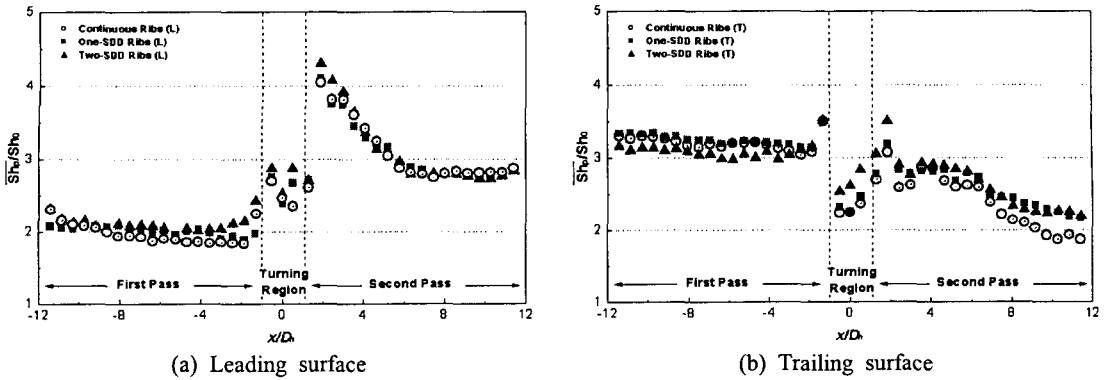


Fig. 10 Pitch-averaged Sherwood number ratios, \overline{Sh}_p/Sh_0 for rotating duct ($Ro=0.2$)

형성되어 낮게 나타나지만, 2차유로 출구로 향할수록 단와류가 약화되면서 후연면의 열전달은 증가하였다.

3.2 회전하는 덕트에서의 열전달 특성

Fig. 8과 Fig. 9는 덕트가 회전수 0.2로 회전하는 경우에 연속요철 덕트 및 One-SDD 덕트와 Two-SDD 덕트에서의 국소적인 열/물질전달 계수 분포를 나타내는 그림이다.

덕트의 1차유로에서는 회전하는 경우, 회전에 의하여 유동이 후연면으로 치우치면서 연속요철이 설치된 경우와 단락요철이 설치된 경우 모두 전·후연면의 열전달차가 커진다. 이와 같은 회전수 변화에 따른 열전달 특성은 Kim 등⁽¹¹⁾에 상세하게 언급되어 있다. One-SDD와 Two-SDD 덕트의 전연면은 정지한 경우와 같이 열전달이 상승하였다. 하지만, Two-SDD 덕트의 후연면에서의 국소적인 열전달 분포는 전체적으로 열전달이 감소하는 경향을 보인다. 이는 연속요철은 코리올리력에 의해 후연면으로 치우치는 유동으로 열전달이 향상되지만, 단락요철은 단락으로 인해 생기는 틈새 유동이 후연면으로 치우친 주유동의 재부착을 방해하기 때문이다. 즉, 덕트의 회전에 의해 단락의 위치에서 상향류가 생기는 전연면에서는 열전달이 상승하였으나, 단락의 위치에 하향류가 존재하는 후연면에서는 열전달이 감소하는 경향이 나타났다.

곡관부에서의 열/물질전달 계수 분포는 정지한 경우와 마찬가지로, 연속요철보다는 단락요철이 설치된 경우가 높은 열전달 분포를 보였으며, One-SDD 덕트 보다 Two-SDD 덕트에 단락요철이 설치된 경우에 전·후연면 모두 열전달 분포가 높

게 나타났다. 이는 1차유로를 지나 곡관부로 유입되는 유동이 단락으로 인해 교란되면서 난류강도가 증가했기 때문이며, One-SDD 단락요철이 설치된 경우보다 Two-SDD 단락요철이 설치된 경우에 곡관부에서 열전달이 증가한 것은 단락의 개수가 많을수록 더욱 난류강도가 증가하기 때문으로 사료된다.

덕트의 회전과 곡관부로 인한 이차유동의 영향으로 2차유로의 전연면은 외벽 근처에서, 후연면은 내벽 근처에서 열전달이 높게 나타났다. 단락요철이 설치된 Two-SDD 덕트 전연면의 경우에 곡관부 직후 한 두 피치에서 높은 난류강도로 인해 열전달이 높게 나타났으나, 이 후 열전달 분포는 연속요철과는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 2차유로로 진입하는 유동에 대한 곡관부에 의한 와류의 영향이 요철의 영향보다 크기 때문이며, 세 번째 피치 이후에는 전연면은 곡관부와 회전에 의해 와류의 충돌로 인한 높은 열전달 영역이 넓기 때문에 열전달 향상은 크게 나타나지 않았다. 하지만, One-SDD와 Two-SDD 덕트의 후연면에서는 단락의 위치에서 상향류가 일어나기 때문에 열전달은 증가하였다.

Fig. 10은 열전달 계수비를 유로내 각 x/D_h 지점에 해당하는 피치 한 구간의 영역에서 면적 평균한 값을 전연면[Fig. 10(a)]과 후연면[Fig. 10(b)]에 대해서 나타낸 그림이다. 1차유로에서는 단락요철이 설치된 One-SDD와 Two-SDD 덕트의 전연면에서는 열전달이 향상되었으나, Two-SDD 덕트의 후연면에서는 열전달이 감소하였다. 이는 앞서 언급한 유동의 교란, 즉 코리올리력에 의해 후연면으로 치우친 유동의 재부착을 단락 유동이 방해했기 때문으로 사료된다. 곡관부에서는 단락요

Table 1 Channel-averaged Sherwood number ratio, \overline{Sh}_{ch}/Sh_0 on the leading surface

Rotation number	Continuous		One-SDD		Two-SDD	
	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2
First pass	2.553	1.954	2.615 (+2.4)	2.014 (+3.1)	2.614 (+2.4)	2.088 (+6.8)
Turning region	2.731	2.469	2.756 (+0.9)	2.497 (+1.1)	2.973 (+8.9)	2.680 (+8.5)
Second pass	2.679	3.109	2.680 (+0.1)	3.094 (-0.5)	2.862 (+6.8)	3.129 (+0.6)

Table 2 Channel-averaged Sherwood number ratio, \overline{Sh}_{ch}/Sh_0 on the trailing surface

Rotation number	Continuous		One-SDD		Two-SDD	
	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2
First pass	2.563	3.199	2.564 (+0.0)	3.239 (+1.6)	2.681 (+4.6)	3.074 (-3.6)
Turning region	2.702	2.610	2.775 (+2.7)	2.659 (+1.9)	3.058 (+13.2)	2.916 (+11.7)
Second pass	2.694	2.387	2.756 (+2.3)	2.583 (+8.2)	2.773 (+2.9)	2.619 (+9.7)

철 설치에 따른 열전달 증가가 정지한 경우와 비슷하게 나타났다. 2차유로에서는 연속요철과 단락요철이 설치된 Two-SDD 덕트를 비교하였을 때 곡관부 이후 전연면에서는 와류의 충돌 영역이 크기 때문에 단락에 의한 열전달은 크게 상승하지 않았지만, 이차유동의 상향류 영역에 단락요철이 설치된 One-SDD 및 Two-SDD 덕트의 후연면은 열전달은 증가하였다.

Table 1과 Table 2는 전연면과 후연면에서 각각의 요철배열에 따른 회전에 영향을 나타낸 것이다. Table 1은 연속요철 덕트, One-SDD 덕트와 Two-SDD 덕트 전연면에서의 정지한 경우와 회전하는 경우에 대해서 유로 면적으로 평균한 열/물질전달 계수 및 열전달 향상률을 각각의 유로에 대해서 나타낸 표이다. One-SDD 덕트는 정지된 경우에 단락요철로 인해 열전달이 크게 증가하지 않았다. 회전하는 경우엔 회전에 의해 단락의 위치에서 상향류가 형성되어 약 3% 열전달이 향상되었다. Two-SDD 덕트는 정지하였을 경우는 1차유로, 곡관부 및 2차유로 모두 단락으로 인해 3~9% 열전달이 증가하였으며, 회전하였을 경우에

도 One-SDD 덕트와 같이 1차유로 및 곡관부에서 열전달이 크게 증가하였다. 하지만, 2차유로에서는 곡관부와 회전에 의한 영향이 커져 연속요철의 열전달과 유사하게 나타났다. 이와 같이 전연면에서의 단락요철에 의한 열전달 특성은 정지또한 회전하는 경우 모두 연속요철과 비슷하거나 향상되었다.

Table 2는 연속요철 덕트, One-SDD 덕트와 Two-SDD 덕트 후연면에서의 정지한 경우와 회전하는 경우에 대해서 유로 면적으로 평균한 열/물질전달 계수 및 열전달 향상률을 각각의 유로에 대해서 나타낸 표이다. 후연면 역시 Table 1에서의 전연면과 같이 대체로 요철이 설치된 면에서는 정지한 경우에는 열전달이 상승한다. 그러나 회전하였을 경우에는 Two-SDD 덕트의 1차유로에서는 열전달이 약 4% 감소하였다. 이는 덕트가 회전하면서 코리올리력이 작용하여 후연면으로 치우치는 유동을 단락에 의한 틈새유동이 방해하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 두 가지 단락요철 설치 및 회전에 따른 덕트 내에서의 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 국소 물질전달계수 분포와 평균 물질전달 계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 전체적인 열/물질전달계수 분포는 연속요철과 단락요철 모두 유사하게 나타났다. 이는 요철의 각도로 인한 영향과 덕트의 곡관부로 인한 딥와류의 영향, 그리고 덕트의 회전으로 인한 코리올리력의 영향이 크기 때문이다.

(2) 정지한 덕트의 경우, 요철의 단락으로 인해 요철 사이에서 유속이 가속되어 1차유로, 곡관부 및 2차유로의 전·후연면 모든 면에서 열전달은 비슷하거나 향상되었다. 국소적인 열전달 분포는 단락 근처에서 틈새유동으로 인해 열전달이 향상되었으나, 한편으로 틈새유동은 주유동의 재부착을 방해하게 되어 요철과 요철의 단락 사이에서 낮은 열전달 영역을 형성하였다.

(3) 덕트가 회전하였을 때, 코리올리력으로 인해 상향류가 형성되는 영역인 1차유로의 전연면에서는 단락요철로 인해 열전달이 3~7% 증가하였으나, 하향류 영역인 후연면에서는 열전달이 약 4% 감소하였다. 이는 코리올리력에 의해 후연

면으로 치우치는 유동이 단락유동으로 인해 방해를 받았기 때문이다. 곡관부는 1차유로 마지막 단락요철로 인해 강화된 난류강도로 인해 전·후연면의 열전달은 약 9% 증가하였다. 2차유로의 전연면은 이차유동의 충돌영역이 넓기 때문에 열전달은 비슷하였으나, 단락의 위치에서 상향류가 형성된 후연면에서의 열전달은 8~10% 정도로 크게 상승하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업 지원의 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," *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," *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," *J. Turbomachinery*, 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 Converging 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) Tatsumi, K., Iwai, H. and Inaoka, K., 2002, "Numerical Simulation for Heat and Fluid Characteristics of Square Duct with Discrete Rib Turbulators," *Int. J. Heat/Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 4353~4359.
- (11) Kim, K. M., Kim, Y. Y., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2004, "An Investigation of Duct Aspect Ratio Effects on Heat/Mass Transfer in a Rotating Duct with 90°Ribs," *ASME Paper No. GT2004-53533*.
- (12) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (13) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (14) McAdams, W. H., 1942, "Heat Transmission, 2nd Edition," *McGraw-Hill*, New York.