

이차 냉각 유로를 가진 회전덕트에서 열/물질전달 특성 (I) - 요철 설치에 따른 영향 -

김경민*·김상인**·김윤영**·이동호*·조형희†
(2004년 1월 20일 접수, 2004년 6월 2일 심사완료)

Detailed Measurement of Heat/Mass Transfer in a Rotating Two-Pass Duct (I)

- Effects of Rib Tubulators -

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

Key Words: Rotating Duct(회전덕트), Rib Turbulator(요철), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Dean Vortex(딘와류), Coriolis Force(코리올리력), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법)

Abstract

The heat/mass transfer characteristics in a rotating two-pass duct with and without rib turbulators are investigated in the present study. The square duct has a hydraulic diameter (D_h) of 26.7 mm, and 1.5 mm×1.5 mm square 90°rib turbulators are attached on the leading and trailing walls. The pitch-to-rib height ratio (p/e) is 10. The Reynolds number based on the hydraulic diameter is kept constant at 10,000 to exclude the Reynolds effect, and the rotation number is varied from 0.0 to 0.20. In the smooth duct, the curvature of the 180°turn produces Dean vortices that enhance heat/mass transfer in the post-turn region. When rib turbulators are installed, heat/mass transfer is augmented 2.5 times higher than that of the smooth duct since the main flow is turbulated by reattaching and separating in the vicinity of the duct surfaces. The duct rotation results in heat/mass transfer discrepancy so that Sherwood number ratios are higher on the trailing surface in the first-pass and on the leading surface in the second-pass. In the turning region, Dean vortices shown in the stationary case transform into one large asymmetric vortex cell, and subsequent heat/mass transfer characteristics also change. As the rotation number increases, the heat/mass transfer discrepancy enlarges.

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

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

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

그리스문자

- μ : 점성계수
- ν : 동점성계수
- Ω : 회전각속도

1. 서론

가스터빈의 효율을 향상시키기 위하여 터빈입구 온도(TET; Turbine Entry Temperature)의 증대는 필수적이다. 최근 가스터빈 엔진의 터빈입구온도는 1500°C 이상으로, 금속의 허용한계온도를 상회하는 수준이다. 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드를 보호하기 위하여 각종 냉각기법에 대한 연구가 오랜 기간에 걸쳐 이루어져왔다. 그 결과, 충돌제트 냉각(impingement cooling), 막냉각(film cooling), 내부관냉각(internal passage cooling) 등과 같은 다양한 기술들이 개발 및 발전되어 블레이드 냉각에 응용되고 있다. 그 중, 내부관 냉각기술은 터빈의 압축기로부터 나오는 냉각유체를 블레이드 내부의 유로에 주입하여 강제대류가 일어나게 함으로써 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하는 방법이다.

내부관의 냉각성능 및 효율은 여러 가지 인자에 의하여 결정되는데, 실제 블레이드 내부유로와 같이 회전하는 경우 복잡한 유동구조 및 열전달 특성을 갖는다. 따라서, 보다 높은 성능을 갖는 터빈 블레이드 냉각유로의 설계를 위하여 회전이 미치는 효과를 이해하는 것이 필수적이다.

최근에는 이러한 회전덕트 내에서의 열전달 및 유동특성에 대한 연구가 여러 가지 조건에 대해 이루어지고 있다. Liou 등⁽¹⁾은 회전하는 유로 내부를 LDV와 TLCT를 이용하여 유동 및 열전달 특성에 대한 연구를 수행하였다. Han 등,⁽²⁾ Parsons 등⁽³⁾과 Al-Qahtani 등⁽⁴⁾은 정지한 매끈한 덕트에서와 충돌각이 90°인 요철이 설치된 내부유로에 열전달 특성을 고찰하였으며, 더 나아가 수치해석을 통해 회전하는 덕트 내에서의 유동구조 및 열전달을 해석하여 실험결과와 비교하였다. Mochizuki 등⁽⁵⁾은 히터와 열전대를 이용하여, 가열되는 내부관이 회전하였을 때 이차유로를 갖

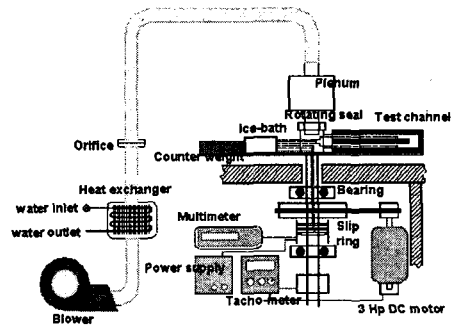


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

는 매끈한 덕트에서와 평행하게 90°요철 혹은 45°요철을 설치되었을 때 발생하는 전·후연간 열전달 특성을 고찰하였다. 그리고 Iacovides 등^(6,7)은 회전하는 상황에서의 내부유동을 LDA를 이용하여 유로 내부 및 곡관부에서 형성되는 와류의 구조를 각 위치에 따라 관찰하였으며, 이와 더불어 TLC를 이용한 열전달 실험결과를 제시하였다. Won 등,⁽⁸⁾ Lee 등⁽⁹⁾과 Cho 등^(10,11)은 가스터빈의 이차유로를 모사하여, Fluent를 이용한 수치해석을 통해 곡관부를 지나는 유동구조를 고찰하고, 회전하는 덕트 내부의 전·후연면간 열전달 차이를 물질전달법을 이용하여 밝혀내었다. 또한 나프탈렌 승화법을 이용해서 종횡비(aspect ratio, W/H)가 0.5인 덕트에서, 매끈한 덕트와 70°요철이 설치된 덕트에서 요철배열과 회전수를 바꾸어 가며, 열전달 특성을 연구하였다.

기존의 연구들은 평균적인 열전달 특성에 중점을 두고 실험을 수행하여 요철에 의한 유동 변화나 회전수 변화에 따른 국소적인 열/물질전달계수 분포를 알 수 있는 자료는 부족한 상태이다. 본 연구에서는 종횡비가 1.0인 덕트에서, 매끈한 덕트와 90°요철이 설치된 덕트에 대해서 회전수를 변화시켜가며 유로 내부의 국소 열/물질전달 특성에 대해서 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 회전덕트 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 송풍부와 회전부 그리고 측정부의 3가지로 나누어진다. 실험장치의 자세한 구성은 Lee 등⁽⁹⁾ 및 Cho 등⁽¹¹⁾에 제시되어 있다.

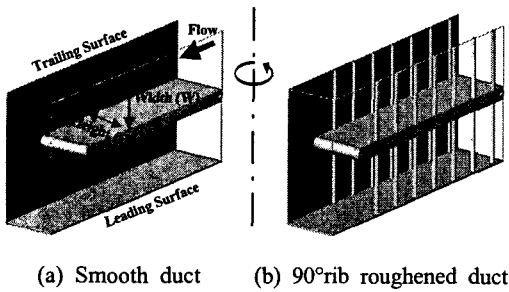


Fig. 2 Rib arrangement and geometry of ducts

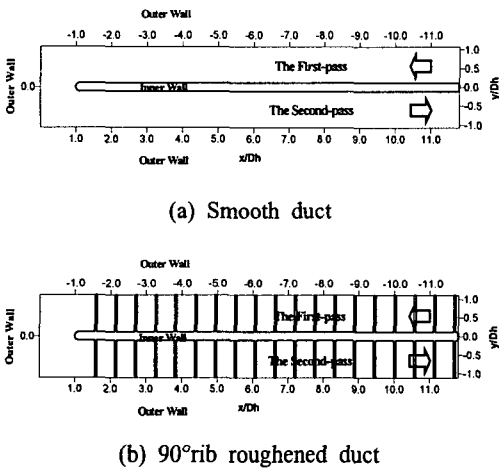


Fig. 3 The coordinate system

Fig. 2는 실험에 사용되는 덕트의 형상을 나타낸다. 덕트는 1:1의 종횡비를 갖는 정사각형 형태이고, 180°의 곡관부로 연결된 2층의 유로로 되어 있으며 아크릴로 제작되었다. 덕트의 수력직경 (D_h)은 26.7 mm이며, 수력직경대비 최대회전반경 (R/D_h)은 21.63의 값을 갖는다. 분리벽의 두께는 $0.225D_h$ 이며, 끝단(tip)은 반원형으로 제작되었다. 곡관부의 90°꺾어진 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. 요철 높이 대 수력직경 비(e/D_h)는 0.056, 요철사이거리 대 요철 높이 비(p/e)는 10.0이며, 요철의 충돌각은 90°로 하였다. 요철 배열은 Fig. 2(b)에 나타난 것처럼 전-후연면에서 서로 평행하게 설치되어 있다. 덕트의 요철면 바닥에는 나프탈렌이 코팅되

어 있으며, 이는 열전달에서의 가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작지점까지 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 를 0.0에서 0.2까지 0.05씩 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 좌표계는 Fig. 3에 나타난 것과 같으며, 측정 영역은 주유동 방향으로는 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 곳까지 $-11.8 \leq x/D_h \leq 11.8$ 이며, 횡방향으로는 1차유로의 외벽부터 2차유로의 외벽까지 거리인 $-1.11 \leq y/D_h \leq 1.11$ 에 해당된다.

2.2 실험결과 처리

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리 과정은 Lee 등⁽⁹⁾ 및 Cho 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 이용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 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.

$$Sh_0 = 0.023Re^{0.8}Sc^{0.4} \tag{2}$$

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.

3. 결과 및 고찰

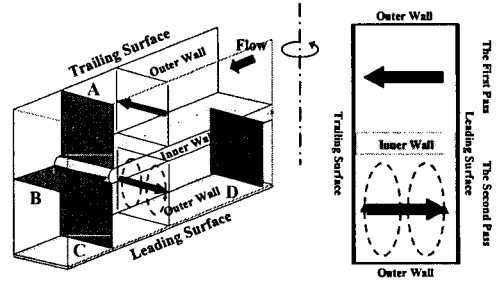
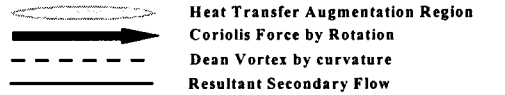
3.1 덕트 내부의 유동구조

곡관부를 갖는 이중유로 내에서 발생하는 이차 유동은 크게 꺾여진 곡관부를 지나가면서 유체가 받는 원심력으로 인한 딘와류(Dean type vortex), 덕트의 회전에 의하여 발생하는 코리올리력(Coriolis force)으로 인한 이차유동과 요철에 의한 재순환과 재부착 유동을 꼽을 수 있으며, 각각의 유동 형태는 Fig. 4(a)에 제시되어 있다. 이러한 이차유동이 복합적으로 작용하여 회전하는 덕트 내에서는 복잡한 이차유동이 발생한다.

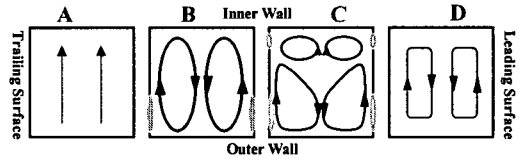
Fig. 4(b)와 (c)는 참고문헌^(1,4,7,9)의 연구결과와 본 연구의 열/물질전달 실험을 통해 추론한 180° 곡관부로 연결된 이중유로 내에서의 이차유동 개략도를 나타내는 그림이다. 이 그림은 곡관부 입구(A면), 곡관부 중앙(B면), 2차유로 입구(C면), 그리고 2차유로 하류(D면)에서 발생하는 이차유동의 구조를 나타내고 있다.

이중유로를 가진 정지 덕트의 경우[Fig. 4(b)], 곡관부 입구(A면)에서는 유동이 곡관부로 유입되면서 약하게 내벽 쪽으로 향하는 유동이 형성된다. 주유동이 곡관부를 지나면서 유체가 원심력을 받아 외벽쪽으로 편향되면서 곡관부 내에서 압력차로 인해 한 쌍의 대칭적인 딘와류가 형성된다. 이러한 딘와류로 인해 곡관부 출구로 갈수록 외벽근처에서는 높은 열전달이 발생하게 된다. 2차유로 입구(C면)에서는 하류로 향하는 주유동이 곡관부를 지난 직후 내벽으로부터 박리되어, 한 쌍의 와류가 내벽에서 떨어져 외벽근처에 남아있게 된다. 이로 인해 상대적으로 강도가 약한 대향류(counter flow)가 내벽 인접영역에서 형성되어 이차유로 입구에서 크게 두 쌍의 와류가 형성된다. 이후 주유동이 하류로 진행하면서 내벽 근처에 발생한 이차유동은 소멸되고 딘와류의 강도가 약해진다[Fig. 4(b)의 D면].

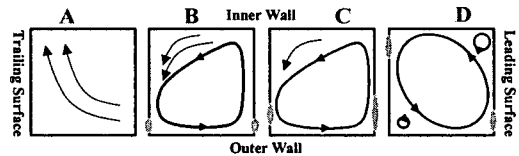
덕트가 회전하게 되면 내부유동은 딘와류와 회전에 의한 코리올리력에 의해 영향을 가장 크게 받으며, Fig. 4(c)와 같은 유동구조를 갖는다. 1차유로에서는 속도분포가 코리올리력에 의해 후연면쪽으로 치우치게 되며, 곡관부 입구(A면)에서의 속도분포는 유동의 곡관부 유입으로 내벽으로 향하며 코리올리력에 의해 중앙부는 후연면쪽으로 치우치는 유동이 나타난다. 그리고 곡관부 중앙



(a) Conceptual secondary flow structures



(b) Secondary flows in a stationary duct



(c) Secondary flows in a rotating duct

Fig. 4 Schematic diagram of secondary flow pattern in a two-pass duct

(B면)을 보면 속도분포가 후연면쪽으로 치우쳐 유입되기 때문에 회전수가 커짐에 따라 하나의 와류가 약해져 높은 회전수에서는 하나의 비대칭적인 와류가 생성된다. 2차유로 입구(C면)에서는 곡관부 내에서의 유동구조와 유사하며, 후연면 내벽 근처에서는 곡관부 끝단에서 박리된 유동이 관측된다. 그 후 하류로 진행하면서 박리된 유동은 2차유로 하류(D면)에서와 같은 이차유동 구조를 가진 후, 강도가 약해진다.

요철이 설치된 경우, 유동이 바닥면에 설치된 요철을 타고 넘어감에 따라 박리와 재부착이 일어나고, 요철 근처의 모서리에는 재순환영역이 형성되어 요철 사이에서 높은 열전달이 일어나게 된다.

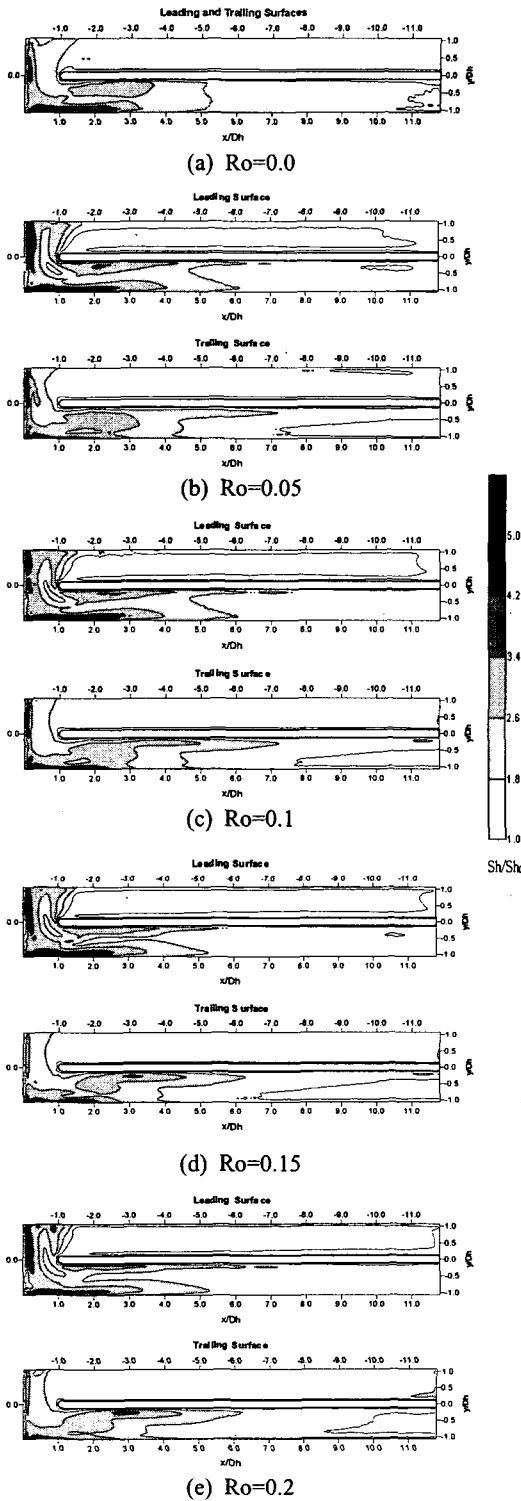


Fig. 5 Contour plots of local sherwood number ratio (Sh/Sh_0) for the smooth duct

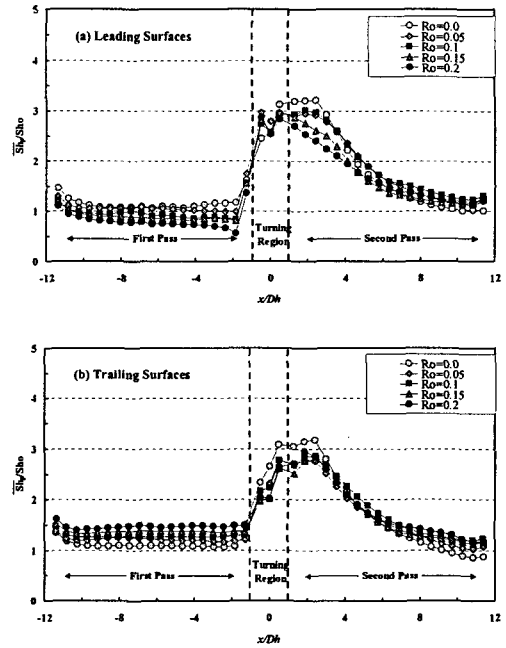


Fig. 6 Pitch-averaged sherwood number ratio (\overline{Sh}_p/Sh_0) for the smooth duct

3.2 열/물질전달 특성

3.2.1 요철이 없는 경우

Fig. 5는 다양한 회전수에 대하여 매끈한 덕트 내부의 전연면과 후연면에서의 국소적인 열/물질 전달 분포를 나타내는 그림이며, Fig. 6은 열전달 계수비를 유로내 각 x/D_h 지점에 해당하는 피치한 구간의 영역에서 면적 평균한 값을 전연면 [Fig. 6(a)]과 후연면 [Fig. 6(b)]에 대해서 나타낸 그림이다.

정지된 덕트의 경우 [Fig. 5(a)], 유동구조 [Fig. 4(b)]로부터 알 수 있듯이, 곡관부 입구에서 유동은 내벽쪽으로 향하며, 주유동 속도분포를 따라 $-1.5 \leq x/D_h \leq -1.0$ 의 외벽쪽이 높은 열/물질전달 분포를 가지게 된다. 곡관부를 지나면서 원심력에 의한 외벽쪽으로 향하는 한 쌍의 دن와류가 형성되고 이 와류로 인해 곡관부 외벽의 $x/D_h=0.0$ 근처에서 높은 열/물질전달 분포를 가지며, 평균 열/물질전달 계수는 3배이상 증가하였다. 곡관부에 의한 دن와류가 주유동 방향으로 유동이 진행되면서, 압력차와 곡관부 직후 내벽에서의 박리로 인해 한 쌍의 دن와류와 한 쌍의 대향류가 만들어져

$1.0 \leq x/D_h \leq 3.0$ 의 외벽과 $1.5 \leq x/D_h \leq 3.0$ 의 내벽 근처에서 높은 열전달 영역이 형성된다. 이 분포는 $x/D_h=5.0$ 근처까지 지속되며, 2차유로를 따라 진행하면서 이차유동의 강도가 서서히 약화되면서 열전달계수 또한 점차 감소한다.

덕트가 회전함에 따라 전연면과 후연면의 열전달 특성이 변화된다. 먼저, 1차유로에서는 코리올리력 효과로 주유동이 후연면쪽으로 치우쳐 전연면에서는 열/물질전달 계수가 낮아지고 후연면은 열/물질전달 계수가 높아진다. 따라서 회전수가 높아질수록 전·후연면의 차가 커진다. 곡관부에서는 후연면쪽으로 치우친 유동이 곡관부를 지날 때의 원심력을 받기 때문에 Fig. 4(c)에 제시된 것과 같이 비대칭적인 와류가 형성되며, 곡관부의 전연면과 후연면에서의 국소적인 열/물질전달 분포가 다르게 나타난다. 이 와류에 의해 전연면 외벽 부근에서 후연면 보다 높은 열전달을 갖는 영역이 생기게 되어, 곡관부 내에서는 전연면이 전체적으로 높은 열/물질전달 계수를 갖는다. 2차유로에서의 국소적으로 열/물질전달계수를 보면, 전연면 $1.0 \leq x/D_h \leq 7.0$ 의 지점 외벽에서 열전달이 높고, 후연면에서는 외벽의 열전달이 높은 후 유동이 진행할수록 내벽의 열전달이 높게 일어나는 것을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 이차유동과 박리에 의한 것이다. $x/D_h=7.0$ 지점 이후에서는 이차유동의 강도는 약화되어, 주유동 방향으로 진행됨에 따라 전연면과 후연면이 비슷한 평균 열/물질전달 계수를 갖는다.

회전수 변화에 따른 영향을 살펴보면, 전체적인 열/물질전달 분포는 회전수에 관계없이 유사하다. 하지만, 회전수가 증가함에 따라 1차유로에서는 전연면과 후연면 사이의 열/물질전달 계수의 차이가 증가한다. 곡관부에서의 열/물질전달계수는 회전수에 관계없이 유사한 것으로 나타났으며, 이는 곡관부에서 발생하는 비대칭와류의 영향이 지배적이며 그 와류의 강도가 회전수에 따른 변화가 거의 없기 때문인 것으로 생각된다. 2차유로의 입구영역($x/D_h \leq 7.0$)에서의 열/물질전달 분포를 살펴보면, 곡관부에서 생성된 비대칭 와류의 영향으로 인해 전연면에서는 회전수에 관계없이 외벽에서의 열/물질전달 계수는 비슷하게 나타났지만, 내벽에서의 열/물질전달 계수는 회전수가 증가할수록 축소 영역이 축소되었다. 후연면에서는 회전수가 증가할수록 외벽쪽의 열/물질

전달 계수는 감소하였지만, 내벽쪽의 열/물질전달 계수는 증가하였다. 이는 회전수가 증가할수록 1차유로와 곡관부를 지나온 유동이 후연면으로 편향되는 정도가 커지게 되어 2차유로의 이차유동의 와류중심이 후연면쪽으로 이동해 전연면에 주는 영향이 상대적으로 작아지기 때문이다. 이로 인해 전체적으로 전연면은 회전수가 증가할수록 열전달이 감소하였으나, 후연면은 회전수 변화의 영향을 크게 받지 않아 열전달은 비슷하게 나타났다.

Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 전연면 1차유로에 해당하는 영역은 회전수가 증가함에 따라 열/물질전달 값이 낮아진다. 곡관부에서는 곡관부와 회전에 의해 생성된 와류에 의해 곡관부 입구를 지난 다음 영역에서 높은 열전달 값이 나타났으나, 회전수변화에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 2차유로에서는 회전수가 높아질수록 열/물질전달계수가 약 $x/D_h=7.0$ 지점까지 낮아진다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 회전수가 증가함에 따라 전연면 내벽에서의 높은 열전달 영역이 감소하기 때문이다. 이 지점 이후 2차유동의 강도가 약해져 열/물질전달 계수가 비슷해진다. 또한 Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 후연면 1차유로는 회전수 증가에 따라 코리올리력 효과가 커지기 때문에 열/물질전달계수가 점차 증가하고, 2차유로에서의 회전수에 따른 열/물질전달 계수는 전연면과 달리 전 영역에서 거의 동일하게 나타난다.

3.2.2 요철이 설치된 경우

Fig. 7은 회전수 변화에 따른 충돌각이 90°인 요철을 설치한 경우의 국소적인 열/물질전달 계수 분포를 나타내는 그림이다. 전체적인 열/물질전달 분포는 요철이 설치되지 않은 경우와 비슷하며, Fig. 5와 Fig. 7에서 보듯이 요철에 의하여 형성되는 재부착 유동으로 인하여 요철이 없는 경우보다 전반적으로 2~3배 높은 열/물질전달 계수를 갖는 것을 알 수 있다. 정지한 경우의 결과 [Fig. 7(a)]에서 볼 수 있듯이, 90°요철에 의해 박리된 유동의 재부착 현상으로 높은 열/물질전달 분포가 요철 사이 중앙 영역에서 관찰되고, 요철의 하류면에서는 재순환 유동에 의해 상대적으로 낮은 열/물질전달 분포를 볼 수 있다. 곡관부 입구 부분($x/D_h=-1.281$)에서는 주유동의 유동구조로

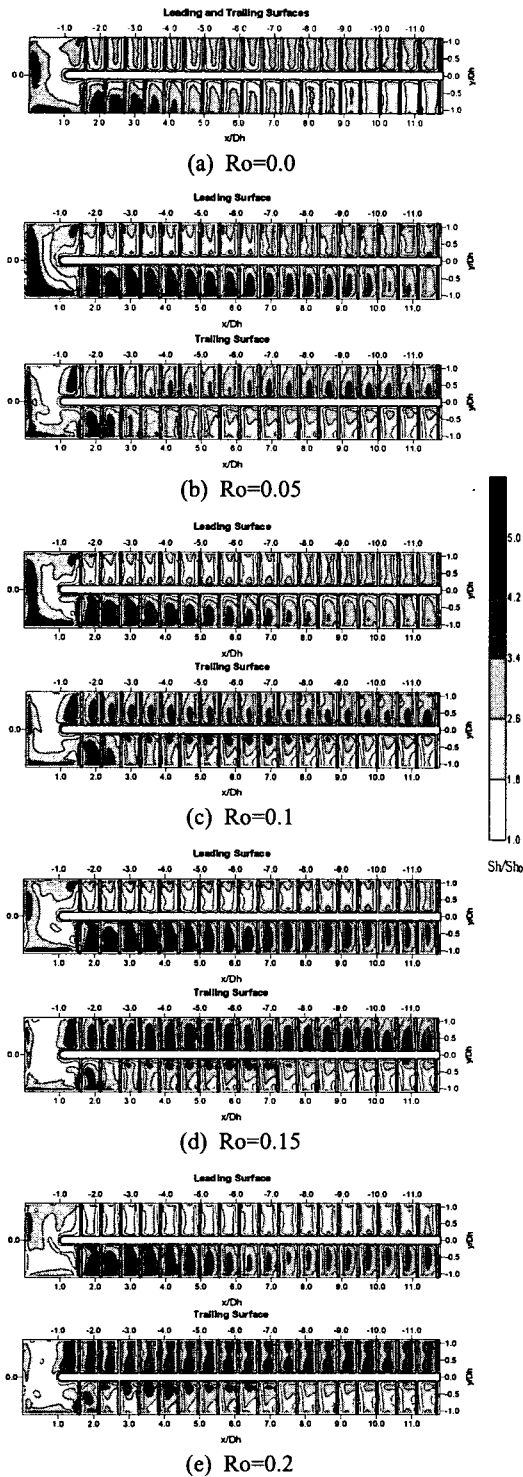


Fig. 7 Contour plots of local sherwood number ratio (Sh/Sh_0) for the 90°ribbed duct

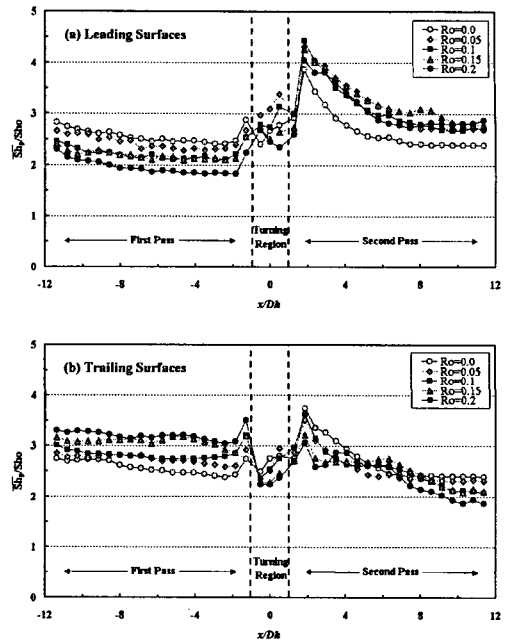


Fig. 8 Pitch-averaged sherwood number ratios (\overline{Sh}_p/Sh_0) for the 90°ribbed duct

인해 곡관부 입구 요철의 외벽에서 열전달이 높은 부분이 나타나며, 곡관부를 지나면서 요철이 없는 경우와 같이 외벽쪽으로 향하는 단와류로 인해 곡관부 외벽 $x/D_h=0$ 의 근처에서 높은 열/물질전달 분포를 가진다. 유동이 2차유로에 유입되면서 곡관부에서 발생한 와류로 인하여 요철 설치에 따른 유동의 재부착 현상이 강화되며, 이로 인해 외벽 부분에 매우 높은 열전달 영역이 형성되는 것을 알 수 있다. 요철이 없는 경우와 비교해 볼 때, 내벽근처에서는 상대적으로 높은 열전달 영역이 나타나지 않았는데, 이는 대항류에 의한 효과보다는 요철에 의한 열전달 촉진 효과가 크기 때문인 것으로 사료된다.

덕트가 회전함에 따라, 요철이 설치되어 있지 않은 경우와 마찬가지로 1차유로의 전연면에서는 낮은 열/물질전달 계수를 가지며 후연면에서는 열/물질전달 계수가 증가한다. 요철과 요철사이 열/물질전달 분포를 보면 전연면은 외벽과 내벽 근처에 높은 분포가 나타나고, 후연면은 중앙에서 높은 분포가 나타난다. 이는 코리올리력에 의해 후연면의 중앙으로 유동이 치우치게 되고 압력차로 약한 이차유동이 발생하여 전연면의 외벽

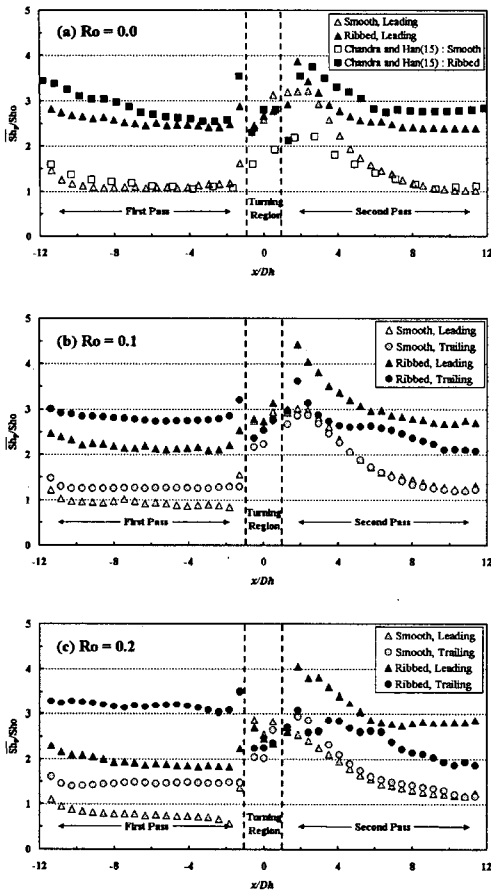


Fig. 9 Pitch-averaged sherwood number ratios ($\overline{Sh}_p/\overline{Sh}_0$) at various rotation numbers for smooth and ribbed duct

과 내벽 인접영역으로 유동이 치우치는 현상이 발생하기 때문이다. 곡관부에서는 요철이 없는 경우와 비슷한 분포를 보이지만, 회전수가 증가함에 따라 후연면의 곡관부 입구 근처에서 높은 열전달을 보이는데, 이는 요철을 지난 뒤 유동의 재부착 현상이 강화되었기 때문이다. 2차유로에서의 국소 열/물질전달 계수 분포는 요철이 없는 경우와 유사하게 전연면의 외벽에서 높고 후연면에서는 내벽에서 높지만, 전체적으로 전연면에서의 열/물질전달 계수가 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 2차유로의 입구영역과 출구 인접부에서 두드러지게 나타났다. 2차유로 입구영역에서는 곡관부를 지나며 발생한 비대칭 와류가 전연면 외벽에서의 유동 재부착 현상을 강화시켜

열/물질전달을 증가시키는 반면, 후연면에서는 곡관부 끝단의 박리유동으로 인해 와류에 의한 효과가 감소되기 때문이다. 하류영역에서는 코리올리력에 의해 유동이 전연면으로 편향되기 때문에 위에 설명한 것과 같은 전·후연면 간의 열/물질전달 차가 발생하게 된다. 2차유로 후연면의 내벽 쪽에서의 국소적인 열/물질전달 분포를 보면 2차유로 입구영역에서는 낮은 열/물질전달 분포를 보이다가 유동이 진행할수록 높은 열/물질전달 분포를 가지게 된다.

Fig. 8은 90°요철이 설치된 덕트 내 각 x/D_h 지점에 해당하는 피치 한 구간의 영역에서 면적 평균한 값을 전연면[Fig. 8(a)]과 후연면[Fig. 8(b)]에 대해서 나타낸 그림이다. Fig. 8(a)의 전연면의 경우, 1차유로에 해당하는 영역은 회전수가 증가함에 따라 코리올리력으로 인해 후연면으로 유동이 편향되어 열전달은 낮아지고, 2차유로에서는 정지했을 경우보다 회전하였을 경우가 열전달은 증가하나, 회전수 증가에 따른 영향을 거의 나타나지 않는다. 이는 곡관부와 회전에 의해 발생한 이차유동의 강도와 전연면에서의 재부착 정도가 회전수에 큰 영향을 받지 않기 때문이다. Fig. 8(b)의 후연면의 경우, 1차유로에서는 회전수 증가에 따라 코리올리력 효과가 커지기 때문에 열전달은 점차 증가하고, 2차유로 $x/D_h=6.0$ 이전에서는 회전수가 증가하면서 열전달은 감소한다. $x/D_h=6.0$ 지점 근처에서 곡관부의 영향이 소멸되어 모든 회전수에 대해 열전달은 비슷하나, $x/D_h=6.0$ 이후는 코리올리력에 의한 영향이 커져 회전수가 증가할수록 열전달이 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 매끈한 덕트와 요철이 설치된 덕트 내 각 x/D_h 지점에 해당하는 피치 한 구간의 영역에서 면적 평균한 값을 각각의 회전수에 대해서 나타낸 그림이다. 덕트가 회전하지 않는 경우에 대해서는 Chandra와 Han⁽¹⁵⁾의 결과와 비교하여 나타냈다. Chandra와 Han⁽¹⁵⁾의 경우 분리벽의 두께는 $0.25D_h$, 요철의 크기는 $e/D_h=0.063$ 이며, $Re=30,000$ 에서 실험을 하였기 때문에 약간의 값의 차이는 있지만 전체적으로 본 연구의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 9에서 보듯이, 요철에 의해서 요철이 없는 경우보다 1차유로와 2차유로 모두 열/물질전달 계수가 2~3배가 증가한다. 덕트가 회전함에 따라, 전연면과 후연면은 차이를 가지게 된다. 1차유로에서는 회전수가 증가함에 따라

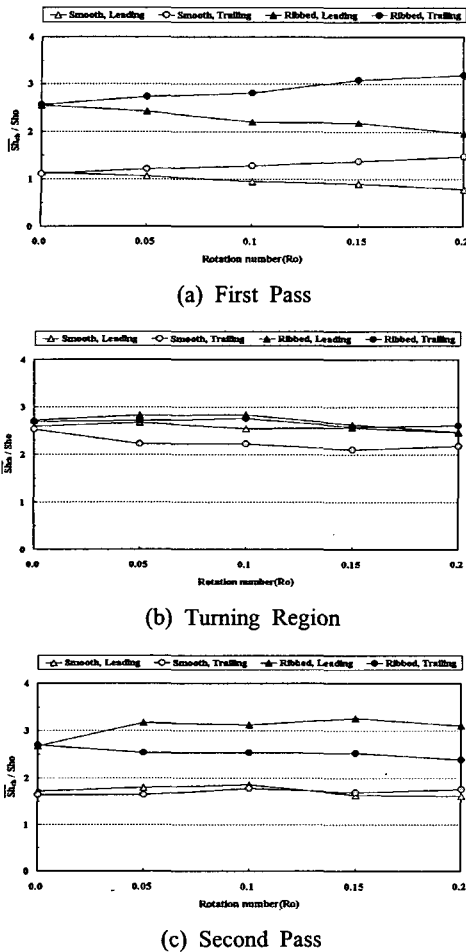


Fig. 10 Channel-averaged sherwood number ratios (\overline{Sh}_{ch}/Sh_0) at various rotation numbers for smooth and ribbed duct

라 요철이 있는 경우와 없는 경우 모두 차이가 증가하고, 전·후연면의 차가 커진다. 요철이 없는 경우는 곡관부를 지난 직후 2차유로에서는 회전수가 증가하여도 전·후연면의 차가 거의 없으나, 요철이 설치된 경우는 1차유로의 경우보다 작으나 전·후연면의 열전달 차이가 나고 전연면의 열전달이 더 높게 나타났으며 회전수가 증가하였을 때 전·후연면의 차이가 더 커졌다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 $x/D_h=6.0$ 이전 영역에서는 곡관부에서 발생한 비대칭 유동에 의해 전연면에서는 재부착 현상이 강화되어 열전달이 높아지나, 후연면은 곡관부 끝단에서의 박리유동으로 인해 상대적으로 열전달이 낮아지며, 이러한 현상이 회

전수가 증가할수록 심화되기 때문이다. $x/D_h=6.0$ 이후로는 코리올리력으로 인해 전·후연면의 열전달 차이가 나타난다.

Fig. 10은 회전수가 변화에 따른 덕트 내 각 유로에서 면적 평균한 열/물질전달 값을 각각의 유로에 대해서 나타낸 그림이다. 1차 유로의 경우, 요철이 없는 경우와 있는 경우 모두 회전수가 증가함에 따라 전연면과 후연면 사이의 열/물질전달 계수 차가 커지는 것으로 나타났다. 이때, 요철이 설치된 경우가 절대적인 평균값의 차이가 더 크지만, 정지한 경우에 대한 상대적인 증감율은 비슷한 것으로 나타났다. 이로부터 1차유로에서는 회전에 따른 코리올리력이 지배적인 것을 알 수 있다. 곡관부의 경우, 요철이 없는 경우는 전연면의 평균 열/물질전달 계수가 약간 더 크지만, 요철이 설치된 경우는 전연면과 후연면 사이의 차가 거의 나타나지 않는다. 2차유로에서는 요철이 설치되지 않은 경우는 전·후연면 간의 평균값 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나, 요철이 설치된 경우는 덕트가 회전할 때 곡관부를 지난 후 형성된 이차유동이 요철에 의해 전·후연면의 재부착 되는 강도와 분포에 미치는 영향이 다르기 때문에 전연면의 열/물질전달 값이 높고 후연면의 열/물질전달 계수는 낮게 나타났다. 하지만, 회전수 변화에 따른 전·후연면의 차는 나타나지 않았는데, 이는 2차유로 내에서의 평균 열/물질전달 계수에 대해 곡관부에 의한 영향이 지배적이고 회전수 변화에 따른 효과가 거의 없는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 요철설치 및 회전수 변화에 따른 덕트내에서의 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 국소 물질전달계수 분포와 평균 물질전달 계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 이차유로를 가진 덕트에서 유동에 가장 큰 영향을 주는 요인으로는 유체가 곡관부를 지난 후 원심력을 받게 되어 생성되는 دن와류와 덕트가 회전할 때 유동의 편향을 일으키는 코리올리력, 그리고 요철에 의한 박리와 재부착 등이 있다. 이러한 이차유동이 복합적으로 작용하여 1차유로와 곡관부, 2차유로에서 다른 열전달 특성을 갖게 한다.

(2) 덕트가 회전하지 않을 경우에는 디와류에 의해 곡관부 직후 가장 큰 영향을 받아, 1차유로의 평균 열/물질전달 계수보다 요철이 없는 경우는 3배 이상의 열/물질전달 계수가 증가하며 요철이 설치된 경우는 1.5배 이상 증가한다. 덕트의 회전은 코리올리력을 발생시켜 1차유로에서는 전·후연면의 열전달 차이를 일으키고, 곡관부에서는 유동의 형태가 달라져 전·후연면에 다른 열전달 분포가 나타나며, 2차유로에서는 곡관부와 회전에 의해 형성된 유동으로 인해 전연면은 외벽에서 후연면은 내벽에서 높은 열전달 영역이 관측된다.

(3) 요철이 없는 덕트의 경우, 회전수가 증가할수록 1차유로에서는 전·후연면의 열전달 차이가 더욱 커지지만, 곡관부는 회전에 큰 영향을 받지 않는다. 그리고 2차유로 입구영역에서는 회전수가 증가할수록 박리유동에 의한 대항류의 전연면 충돌영역이 감소하여, 회전수가 증가할수록 전연면에서의 열전달은 감소한다. 하지만, 2차유로 전·후연면 모두 회전의 영향보다 곡관부에 의한 영향이 크기 때문에 전·후연면의 유로 전체에서의 평균적인 열전달 값은 비슷하게 관측된다.

(4) 요철이 설치된 경우, 요철이 없는 경우보다 1차유로와 2차유로는 열전달이 약 2.5배 증가하였고, 곡관부는 비슷하였다. 회전수가 증가함에 따라 1차유로와 곡관부에서는 요철이 없는 경우와 같은 경향을 보였으나, 2차유로에서는 전체적으로 전연면의 열전달이 높게 관측되며, 회전수에 따른 전·후연면의 유로 평균 열전달 차는 일정하게 나타났다. 이는 곡관부와 덕트의 회전에 의해 형성된 유동이 요철로 인해 재부차이 강화되어 전연면에서의 열전달을 향상시키고 곡관부 이후에서는 회전의 영향보다 곡관부의 영향이 크기 때문이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 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.

(2) Han, J. C., Chandra, P. R. and Lau, S. C., 1988, "Local Heat/Mass Transfer Distributions Around Sharp 180 Deg Turns in Two-Pass Smooth and Rib-Roughened Channels," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 91~98.

(3) Parsons, J. A., Han, J. C. and Zhang, Y. M., 1994, "Wall Heating Effect on Local Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Square Channel with 90° Rib Turbulators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1411~1420.

(4) 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 Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 1823~1838.

(5) 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.

(6) Iacovides, H., Jackson, D. C., Kelemenis, G., Launder, B. E. and Yuan, Y. M., 1999, "Experiments on Local Heat Transfer in a Rotating Square-Ended U-bend," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 302~310.

(7) Iacovides, H., Jackson, D. C., Kelemenis, G., Launder, B. E. and Yuan, Y. M., 2001, "Flow and Heat Transfer in a Rotating U-bend with 45° Ribs," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, pp. 308~314.

(8) Won, J. H., Lee, S. Y. and Cho, H. H., 2001, "Heat/Mass Transfer Characteristics in a Rotating Duct with 180° Turn," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 25, No. 3, pp. 405~413.

(9) Lee, S. Y., Won J. H., Choi, C. and Cho, H. H., 2000, "Heat/Mass Transfer in Rotating Cooling Passage of Turbine Blade," *Proceedings of Energy and Power Division 2000 Fall Annual Meeting*, pp. 46~54.

- (10) Cho, H. H., Lee, S. Y. and Rhee, D. H., 2001, "Heat Transfer Characteristics in a Two-Pass Rotating Rectangular Duct with 70° Attack Angle Ribs," *International Conference on Energy Conversion and Application (ICECA 2001)*, pp. 605~610.
- (11) Cho, H. H., Kim, Y. Y., Kim, K. M. and Rhee, D. H., 2003, "Effects of Rib Arrangements and Rotating Speed on Heat Transfer in a Two-Pass Duct," *ASME Paper No. GT-2003-38609*.
- (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.
- (15) Chandra, P. R. and Han, J. C., 1989, "Pressure Drop and Mass Transfer in Two-Pass Ribbed Channels," *J. Thermophysics*, Vol. 3, No. 3, pp. 315~320.