

< 논문 >

곡관부를 가지는 내부 냉각유로에서 회전수 변화에 따른  
열전달 및 유동 특성 (II)  
- 평행한 요철배열 덕트 -

김경민\* · 김윤영\*\* · 이동현\*\* · 조형희†  
(2005년 1월 27일 접수, 2005년 7월 11일 심사완료)

Effects of Rotation Speed on Heat Transfer and Flow in a Coolant  
Passage with Turning Region (II)  
- Parallel Ribbed Duct -

Kyung Min Kim, Yun Young Kim, Dong Hyun Lee and Hyung Hee Cho

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

Abstract

The present study investigates heat/mass transfer and flow characteristics in a ribbed rotating passage with turning region. 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 in the parallel arrangement on the leading and trailing surfaces of the passage. 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 rotation number ranges from 0.0 to 0.20 while the Reynolds number is constant at 10,000. To verify the heat/mass transfer augmentation, internal flow structures are calculated for the same conditions using a commercial code FLUENT 6.1. The results show that a pair of vortex cells are generated due to the symmetric geometry of the rib arrangement, and heat/mass transfer is augmented up to  $Sh/Sh_0=2.9$  averagely, which is higher than that of the cross-ribbed case presented in the previous study for the stationary case. With the passage rotation, the main flow in the first-pass deflects toward the trailing surface and the heat transfer is enhanced on the trailing surface. In the second-pass, the flow enlarges the vortex cell close to the leading surface, and the small vortex cell on the trailing surface side contracts to disappear as the passage rotates faster. At the highest rotation number ( $Ro=0.20$ ), the turn-induced single vortex cell becomes identical regardless of the rib configuration so that similar local heat/mass transfer distributions are observed in the turning region for the cross- and parallel-ribbed case.

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,  $\nu / D$   
 $Sh$  : Sherwood 수,  $h_m D_h / D_{naph}$   
 $Sh_0$  : 요철이 없는 원형관에서의  $Sh$  수

\* 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

- $\overline{Sh}_p$  : 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

그리스문자

- $\mu$  : 점성계수
- $\nu$  : 동점성계수
- $\Omega$  : 회전각속도

1. 서론

난류촉진제인 요철의 설치는 사각 덕트 내에서 열전달을 크게 향상시키기 때문에 가스터빈 블레이드의 냉각에 지속적으로 채용되어져 왔다. 내부관 냉각의 최적 조건을 찾기 위한 연구로 요철의 높이, 충돌각, 요철 사이의 간격과 배열 등 다양한 요철의 설계 변수에 관한 연구들이 Gee와 Webb,<sup>(1)</sup> Han 등<sup>(2)</sup> 및 Taslim 등<sup>(3)</sup>과 같은 많은 연구자들에 의해 수행되었으며, Han 등<sup>(4)</sup>은 정지된 덕트 내 요철배열에 따른 열전달 및 마찰손실에 영향을 대한 연구도 진행하였다. 하지만, 기존 연구들은 평균적인 열전달 향상과 마찰손실에 중점을 두었기 때문에, 국소적인 열/유동 특성에 대한 현상적인 이해 및 균일성 향상을 위한 설계에 한계가 있다. 또한 실제 블레이드는 두께 이상의 유로로 구성되어 있으며 회전하는 환경으로 인해 복잡한 유동구조 및 열전달 특성을 갖게 된다. 따라서 보다 높은 성능을 갖는 터빈 블레이드 냉각유로의 설계를 위하여 요철배열에 의한 영향, 다중 유로의 영향, 회전이 미치는 영향들을 이해하는 것이 필수적이다.

이러한 복합적인 유동 및 열전달 특성에 대한 기초연구로 정지된 덕트 내 요철의 영향 및 다중 유로에 대한 연구가 여러 가지 조건에 대해서 이루어져 왔다. Wu 등<sup>(5)</sup>은 덕트 내 요철의 각도를 변화시켜가며 열전달 및 마찰손실을 구하여 최적의 각도를 찾아내었으며, Lau 등<sup>(6)</sup>은 이차유로 덕트에서의 요철의 배열에 따른 국소적인 열전달

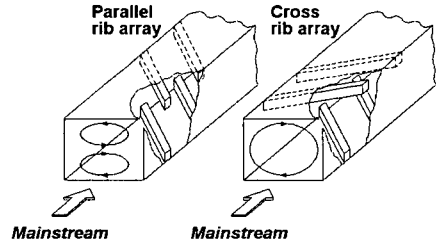


Fig. 1 Schematic flow patterns by angled ribs [Wu 등<sup>(8)</sup>]

특성을 고찰하였다. Won과 Ligrani<sup>(7)</sup>는 덕트 내 요철배열에 따른 유동을 관측하여 국소적인 열전달과 비교하였으며, Wu 등<sup>(8)</sup>은 Fig. 1과 같은 요철배열 및 요철 단락에 따른 열전달 특성을 밝혀냈다. 또한 Schabacker 등<sup>(9)</sup>은 PIV(particle image velocimetry)를 이용하여 이차유로 내 45°의 각도 요철의 배열에 따른 유동 현상을 관측하였고 곡관부 이후에 원심력에 의해 생성되는 دن와류의 영향도 관측하였다.

실제의 경우, 가스터빈 블레이드는 회전하는 환경에 놓여있기 때문에 회전에 의한 열전달 및 유동 특성에 대해 연구도 많이 진행되었다. Kim 등<sup>(10,11)</sup>은 매끈한 덕트와 90°의 충돌각을 갖는 이차 냉각 유로에서 회전수 및 덕트 종횡비 변화에 따른 열전달 특성에 관해서 연구하였다. Servouze와 Sturgis<sup>(12)</sup> 및 Iacovides 등<sup>(13)</sup>은 회전하는 덕트 내 곡관부로 인한 하나의 비대칭적인 이차유동이 형성되는 것을 밝혀내었다. Jang 등<sup>(14)</sup> 및 Murata와 Mochizuki<sup>(15)</sup>는 수치해석을 통해 회전하는 덕트 내에서의 각도요철과 곡관부, 회전에 의한 덕트 내에서의 유동구조와 열전달을 해석하였다.

본 연구에서는 회전수 변화 및 요철 배열에 따른 특성을 고찰하기 위한 실험을 수행하기 위해, 요철의 충돌각은 Han 등<sup>(2)</sup> 및 Wu 등<sup>(5)</sup>의 연구결과에서 60°~75°에서 열전달이 최대로 알려져 있어 70°로 선택하였다. 요철은 Fig. 1과 같이 마주보는 양쪽 벽면에 배열로 설치되며, 각 면의 요철이 평행한 배열(parallel rib array)의 경우에 대해 실험하여, 본 연구보다 앞서 진행된 엇갈린 배열(cross rib array)의 결과<sup>(16)</sup>와 비교하였다. 경사지게 설치된 요철의 경우 요철을 따라 유도되어 회전하는 이차유동이 생성되는데, Fig. 1에서 예로서 나타나 있듯이 요철배열 변화에 따라서 다른 이차유동 양상을 보이게 된다. 이러한 차이는 열전달과 마찰손실에 영향을 미치게 된

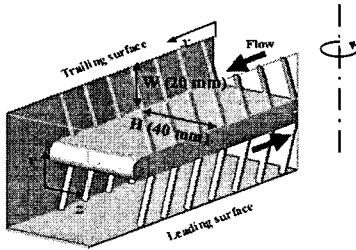


Fig. 2 Rib arrangement and geometry of ducts

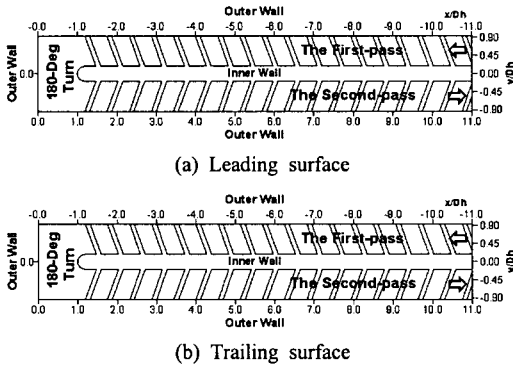


Fig. 3 The coordinate system

다. 더욱이 다중유로의 곡관부 및 덕트의 회전은 이러한 이차유동의 변화를 가져오게 되므로 이를 고찰하기 위해서 회전수를 변화시켜가며, 나프탈렌 승화법을 통해 국소적인 열/물질전달 계수 분포를 고찰하고 수치해석을 통해 내부의 유동구조를 밝혀내었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

회전덕트 실험장치는 크게 송풍부와 회전부 그리고 측정부의 3가지로 나누어지며, 실험장치의 자세한 구성은 Kim 등<sup>(11)</sup>에 제시되어 있다. Fig. 2는 실험에 사용되는 덕트의 형상을 나타낸다. 180°의 곡관부로 연결된 2중의 유로로 되어있으며, 덕트의 단면은 20 mm(W) × 40 mm(H)로 0.5의 종횡비(aspect ratio, W/H)를 갖는 직사각형 형태이고, 아크릴로 제작되었다. 덕트의 수력직경(D<sub>h</sub>)은 26.67 mm이며, 수력직경대비 최대회전반경(R/D<sub>h</sub>)은 21.63의 값을 갖는다. 분리벽의 두께는 0.375D<sub>h</sub>이며, 분리벽의 끝단(tip)은 반원형으로 제작되었다. 곡관부의 90°꺾어진 부분에서 분리벽의 끝과 곡관부 외벽과의 간격(W)은 1D<sub>h</sub>가 되도록

하였다. 요철이 설치된 덕트의 경우 곡관부를 제외한 유로의 내부에 요철을 설치하였으며, 이 때 요철의 단면은 2 mm(e) × 3 mm(w)의 직사각형이다. 요철높이 대 수력직경 비(e/D<sub>h</sub>)는 0.075, 요철사이거리 대 요철 높이 비(p/e)는 7.5이며, 요철의 충돌각은 70°로 하였다. 요철 배열은 Fig. 2에 나타난 것처럼 전·후연면에 서로 평행하게 설치되어 있다. 덕트의 요철면 바닥에는 나프탈렌이 코팅되어 있으며, 이는 열전달에서의 가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작지점까지 거리는 약 6D<sub>h</sub> 정도로 여유를 두어, 요철에 의한 이차유동과 함께 완전 발달한 난류유동이 형성되도록 하였다.

본 연구에서는 수력직경기준 Re는 10,000으로 고정시키고, 회전수 Ro를 0.0에서 0.20까지 0.05씩 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 좌표계는 Fig. 3에 나타난 것과 같으며, 측정 영역은 주유동 방향으로 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 곳까지 -11.0 ≤ x/D<sub>h</sub> ≤ 11.0이며, 횡방향으로는 1차유로의 외벽부터 2차유로의 외벽까지 거리인 -0.94 ≤ y/D<sub>h</sub> ≤ 0.94에 해당된다.

### 2.2 실험결과 처리

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리 과정은 Wu 등<sup>(5)</sup>에 제시되어 있다.

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

$$Sh = h_m D_h / D_{naph} \quad (1)$$

이 때, D<sub>naph</sub>는 공기중에서의 나프탈렌 확산계수이다. 물성치는 Goldstein과 Cho<sup>(17)</sup>에 의하여 제시된 값을 이용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 Kline과 McClintock<sup>(18)</sup>의 방법에 의하여 95% 신뢰수준에서 7.76%의 값을 갖는다.

본 연구에서는 물질전달 실험결과를 무차원 물질전달 계수의 비(Sh/Sh<sub>0</sub>)로 나타내었다. 이때 Sh<sub>0</sub>는 McAdams<sup>(19)</sup>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.

### 2.3 수치계산

곡관부를 가진 회전하는 덕트 내에서의 유동특성을 정성적으로 고찰하기 위해 FLUENT 6.1을 이용하여 평행하게 배열된 요철을 가진 덕트 내부의 유동구조를 계산을 수행하였다. 수치해석에 사용된 기본 형상은 실험에 사용된 덕트와 동일한 것으로 회전축의 중심에서 덕트 입구유동은 균일한 속도분포를 갖도록 적용하였다. 또한 벽면가열 조건을 생략하고 운동량 방정식의 계산만을 수행하여 덕트의 회전과 곡관부의 영향에 의한 유동장의 해석을 수행하였다. 계산모델은 3차원 비압축성 유동의 정상상태로 가정하였고, 덕트의 회전과 곡관부에 의한 순환 이차유동과 박리 난류유동을 비교적 잘 예측하는 RNG k-ε 난류모델(re-normalization group k-ε)을 적용하였으며, 벽면에서는 non-equilibrium wall function을 적용하였다. 전체 격자의 수는 약 1,500,000개로 격자수가 수치해석 결과에 영향을 주지 않도록 선택하였으며 벽 및 요철 근처에 조밀하게 주었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 평행한 요철 배열에 따른 유동구조

곡관부를 갖는 이중유로 내에서 발생하는 이차유동은 크게 꺾여진 곡관부를 지나가면서 유체가 받는 원심력으로 인한 دن와류, 덕트의 회전에 의하여 발생하는 코리올리력으로 인한 이차유동과 요철에 의한 재순환과 재부착 유동 및 이차유동을 꼽을 수 있으며, 각각에 의해 발생하는 이차유동 형태는 Fig. 4에 제시되어 있다. 이러한 이차유동이 복합적으로 작용하여 회전하는 덕트 내에서는 복잡한 이차유동이 발생한다.

Fig. 5는 회전수가 증가함에 따라 평행한 요철 배열에 따른 이중유로 내에서의 유동을 수치해석한 결과이다. 이 결과는 곡관부 입구( $x/D_h=1.225$ ), 곡관부 중앙( $y/D_h=0.0$ ), 2차유로 입구( $x/D_h=1.225$ ), 2차유로 상류( $x/D_h=1.787$ ) 그리고 2차유로 하류

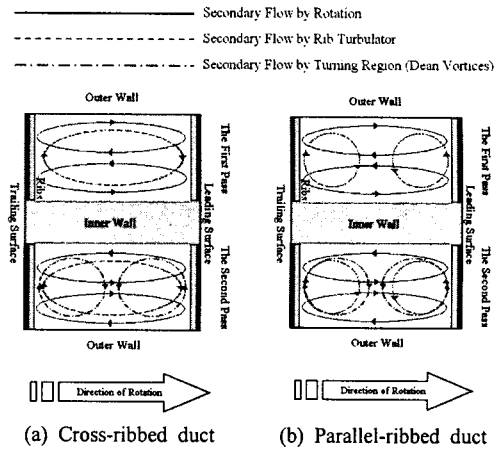


Fig. 4 Schematic diagram of secondary flow pattern in a two-pass duct

( $x/D_h=10.775$ )에서 발생하는 이차유동의 구조를 나타내고 있다.

정지 덕트의 경우[Fig. 5(a)], 1차유로에서는 Han 등<sup>(4)</sup> 및 Won과 Ligrani<sup>(7)</sup>에 의해 밝혀졌듯이 엇갈린 요철에서는 Fig. 4(a)의 점선과 같이 하나의 요철을 따라 유동이 진행하면서 큰 이차유동이 형성되었으나, 평행한 요철은 Fig. 4(b)의 점선과 같이 한 쌍의 큰 이차유동을 형성하였다. 평행한 요철에 의한 한 쌍의 대칭적인 이차유동은 곡관부로 인한 دن와류와 같은 회전방향을 가지므로 곡관부에서의 이차유동은 강화된다. 곡관부를 지나온 이차유동은 역시 2차유로에서의 평행한 요철배열로 인한 유동의 방향과 같아 점차 강화되면서, 1차유로와 같은 한 쌍의 큰 이차유동을 형성한다.

덕트가 회전하는 경우[Fig. 5(b), (c)], 1차유로 내 유동은 코리올리력으로 인해 후연면으로 치우치는 유동을 형성한다. 이로 인해 곡관부로 유입되는 이차유동은 정지한 경우와 다르게 후연면 부근으로 편향된다. 따라서 곡관부 중앙에서 정지하였을 때 대칭적이었던 이차유동의 구조는 회전수가 증가할수록 후연면 부근의 와류는 점차 작아지고, 압력이 상대적으로 낮은 전연면 부근의 와류는 점차 커지게 된다. 코리올리력이 가장 큰 회전수 0.20일 때는 2차유로 입구에서 하나의 큰 이차유동이 형성되었다. 2차유로에서는 이와 같은 비대칭적인 이차유동이 어느 정도 유지된 후 평행한 요철배열에 의한 이차유동이 후연면 부근에서 나타나기 시작한다. 그러나 회전수가

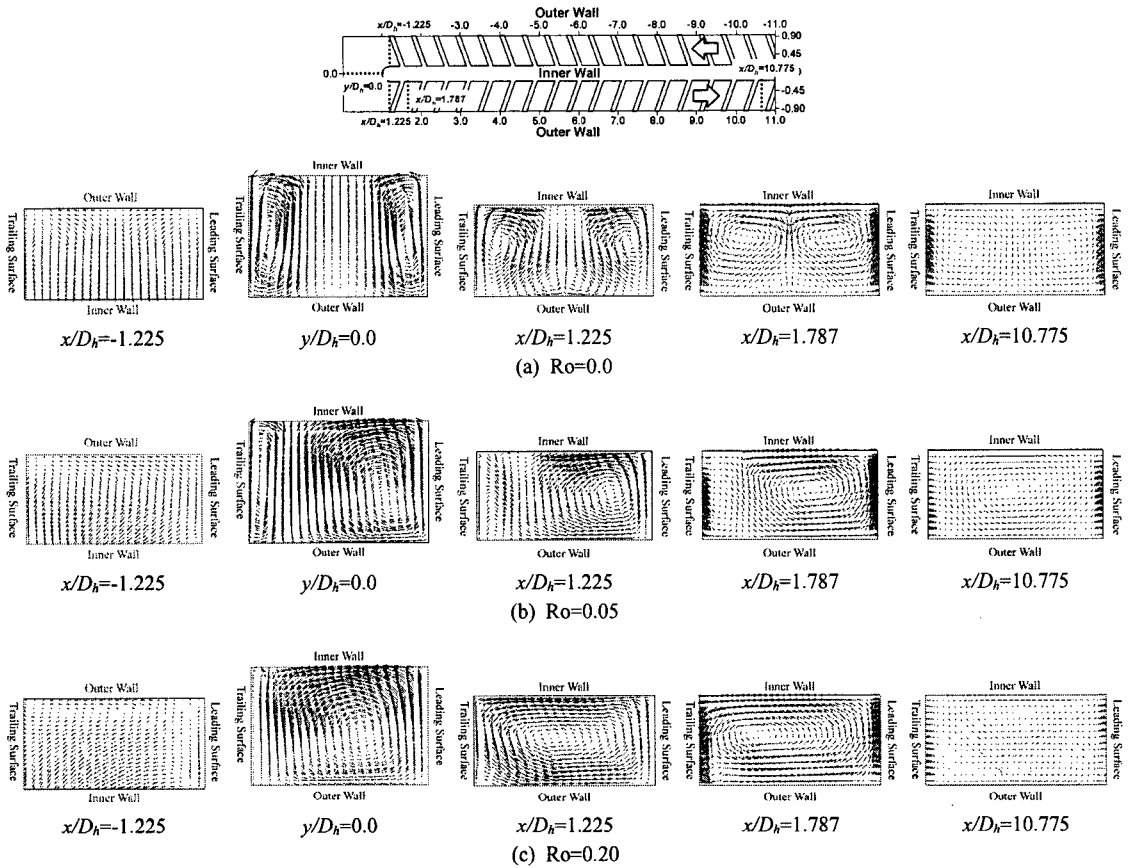


Fig. 5 Secondary flow pattern in the parallel-ribbed duct

증가할수록 곡관부에서 발생한 이차유동의 회전 방향은 후연면의 요철로 인한 이차유동의 회전방향과 반대로 작용하여, 유동의 강도는 점차 약해진다.

3.2 평행한 요철 배열에 따른 열/물질전달 특성

Fig. 6과 7은 다양한 회전수에 대하여 평행한 요철 덕트 내부의 전연면과 후연면에서의 국소적인 열/물질전달 분포를 나타내는 그림이다.

정지된 덕트의 경우(Ro=0.0), 유동구조[Fig. 4(b), 5(a)]로부터 알 수 있듯이, 1차유로에서는 평행한 요철로 인해 Fig. 4(b)의 점선과 같은 한 쌍의 큰 이차유동이 형성되어 1차유로 전·후연면의 내벽에서 높은 열전달분포가 나타난다. 평행한 요철배열에 의한 이차유동과 곡관부에서의 이차유동은 단와류의 회전방향과 같아 벽면 근처에서 이차유동의 강도가 강해지고, 이로 인해 외벽에서 열전달이 높게 나타난다. 이 유동은 2차유로 상류에

서도 대칭적으로 전·후연면의 외벽의 열전달을 높인다. 이 유동은 2차유로 하류의 평행한 배열요철에 의한 이차유동과 같은 회전방향이기 때문에, 1차유로와 같이 한 쌍의 큰 와류를 형성하면서 전·후연면의 외벽에서의 높은 열전달이 유지된다.

덕트가 회전할 경우, 1차유로에서는 코리올리력이 후연면으로 작용하여 유동은 후연면쪽으로 치우친다. 이로 인해 전연면의 열전달은 감소하고 후연면의 열전달은 증가한다. 곡관부 입구에서도 회전수가 증가할수록 전연면의 열전달은 감소하며 후연면의 열전달은 증가하게 된다. 이는 회전수가 증가할수록 Fig. 6의  $x/D_h = 1.225$ 의 유동과 같이 유동이 후연면으로 치우치기 때문이다. 하지만, 곡관부 외벽에서의 열전달은 1차유로와 반대로 회전수가 증가할수록 전연면은 열전달이 증가하고, 후연면은 열전달이 감소하게 되는데, 이는 회전수가 증가할수록 1차유로 후연면 부근

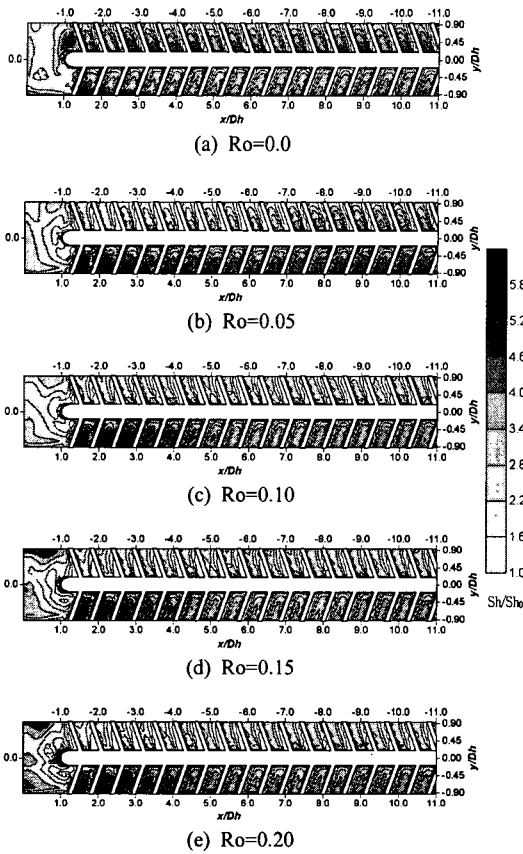


Fig. 6 Contour plots of local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) on the leading surface

으로 유동이 많이 편향되어, 곡관부를 지나면서 압력이 비교적 낮은 전연면으로 관성력이 작용하여 Fig. 5(b), (c)의  $y/D_h=0.0$ 과 같은 유동을 형성하기 때문이다. 이 유동으로 2차유로 상류의 전연면은 중앙 또는 외벽 가까이에서 높은 열전달 분포가 나타났으나, 후연면에서는 낮은 회전수 ( $Ro=0.05$ )에서는 외벽에서, 높은 회전수( $Ro=0.20$ )에서는 내벽에서 열전달이 높았다. 이는 곡관부를 지나온 유동의 영향으로 Fig. 5에서 제시된 바와 같이 2차유로 입구에서 낮은 회전수에서는 한쌍의 이차유동을 형성하나, 회전수가 증가할수록 하나의 큰 이차유동을 형성하기 때문이다. 이와 같은 이차유동의 회전방향은 2차유로 후연면에서의 평행한 요철배열에 의한 회전방향과 반대로 작용하여 하류로 갈수록 전체적인 강도가 약화된다. 하지만, Fig. 4(b)의 2차유로의 점선과 같은 요철에 의한 이차유동이 점차 형성되어, 전·후

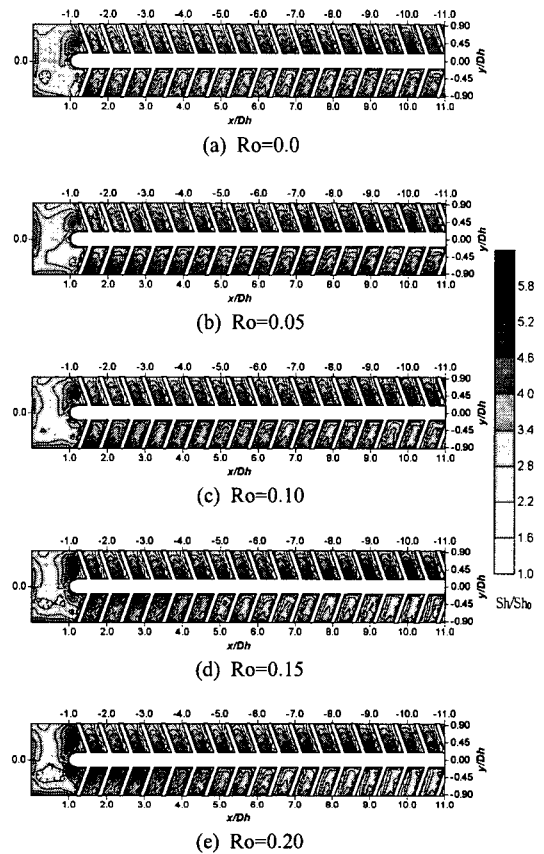


Fig. 7 Contour plots of local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) on the trailing surface

연면 외벽에서 열/물질전달 분포가 높게 나타난다. 또한 회전수가 증가할수록 2차유로에서 코리올리력은 전연면으로 작용하므로 전·후연면의 열전달 차이가 커지게 된다.

Fig. 8은 열전달계수 비를 유로 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)에 나타난 바와 같이 회전수가 증가함에 따라 코리올리력이 커지게 되어 전연면 1차유로에 해당하는 영역에서의 열/물질전달 계수는 점차 작아진다. 곡관부에서는 곡관부와 회전에 의해 생성된 이차유동에 의해 곡관부 입구를 지난 다음 영역에서 높은 열/물질전달 계수가 나타났으나, 회전수 변화에 따른 영향은 거의 나타나지 않았다. 2차유로에서는 정지한 경우보다 회전하는 경우에 열전달이 크게 증가하였으나, 회전

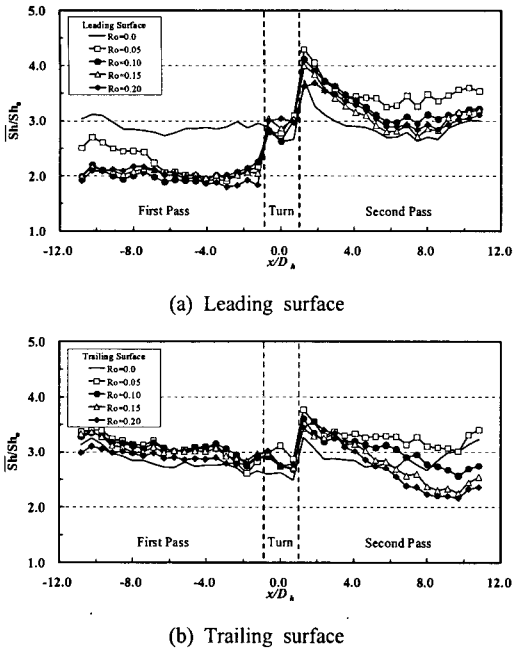


Fig. 8 Pitch-averaged Sherwood number ratios ( $\overline{Sh}_p/Sh_0$ ) in the parallel-ribbed duct

수의 영향이 적은 회전수( $Ro=0.05$ )에서만 열전달이 높았을 뿐, 다른 회전수에서는 열전달 차이가 크지 않았다. 이는 낮은 회전수에서는 한 쌍의 이차유동 중 전연면 부근의 와류로 인해 열전달이 높으나, 다른 회전수에서는 이 이차유동은 하나의 큰 와류를 형성하기 때문이다.

Fig. 8(b)의 후연면 1차유로에서는 회전하였을 때 코리올리력에 의해 열전달이 상승하였다. 곡관부에서는 전연면과 같이 회전하는 경우가 정지한 경우에 비해 열전달이 상승하였다. 이는 코리올리력에 의해 곡관부 입구 및 끝단에서의 열전달이 높아지기 때문이다. 2차유로에서는 곡관부를 지나는 복잡한 이차유동의 강도가 세기 때문에 정지한 경우에 비해 열전달이 증가하였으나,  $x/D_h=6.0$  이후 회전수가 증가할수록 열전달은 크게 감소한다. 이는 곡관부 이후의 후연면 부근의 이차유동의 회전방향과 평행한 요철배열의 이차유동의 회전방향이 반대이므로 이차유동의 강도를 약화시키기 때문이다.

3.3 요철배열에 따른 열전달 및 유동 특성

Fig. 9는 매끈한 덕트, 엇갈린 요철배열 덕트와 평행한 요철배열 덕트에 대해서 정지한 경우

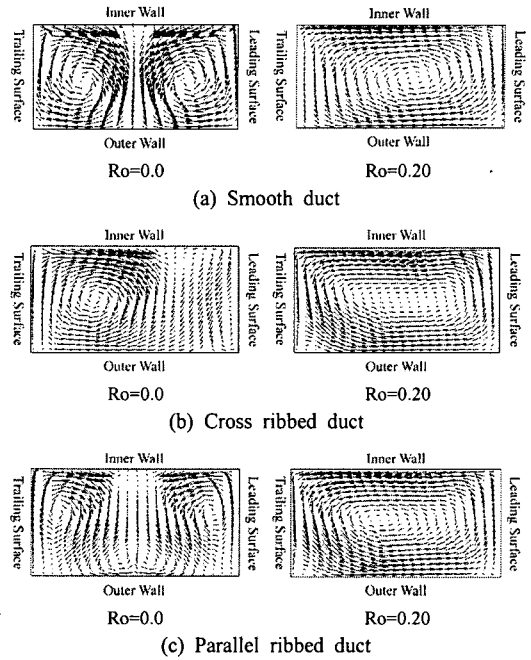


Fig. 9 Comparison of secondary flow patterns in the second-pass ( $x/D_h=1.225$ )

( $Ro=0.0$ )와 회전하는 경우( $Ro=0.20$ )에 대해서 2차유로 입구( $x/D_h=1.225$ )에서의 유동구조를 수치해석한 것이다.<sup>(16)</sup> 정지한 덕트의 경우, 벽면이 매끈할 때는 곡관부에 의해 Fig. 9(a)와 같이 한 쌍의 딥와류가 생성되는 것을 볼 수 있으며, 요철을 배열한 경우에는 요철을 따라 회전하는 이차유동이 형성되기 때문에 곡관부 이후 Fig. 9(b)와 같이 엇갈린 요철이 설치된 덕트는 후연면 부근에 하나의 큰 와류가 생성되었다. 그리고 평행한 요철이 설치된 경우는 Fig. 9(c)와 같이 매끈한 덕트와 같이 한 쌍의 와류가 생성되었으나 요철에 의해 벽면에서의 유동이 강해지면서 벽면 부근에 큰 와류가 생성된다. 이처럼 정지한 경우에는 요철의 배열에 따라 다른 유동이 나타나지만, 덕트가 높은 회전수로 회전하는 경우에는 요철의 배열과 상관없이 곡관부 이후 한 쌍의 큰 이차유동이 생성되었다. 이를 통해 회전하는 덕트의 곡관부 및 2차유로의 이차유동은 요철배열로 인한 이차유동보다는 덕트의 회전에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 10과 11은 매끈한 덕트, 엇갈린 요철덕트와 평행한 요철덕트 내부의 전연면과 후연면에서의 국소적인 열/물질전달 분포를 정지한 경우

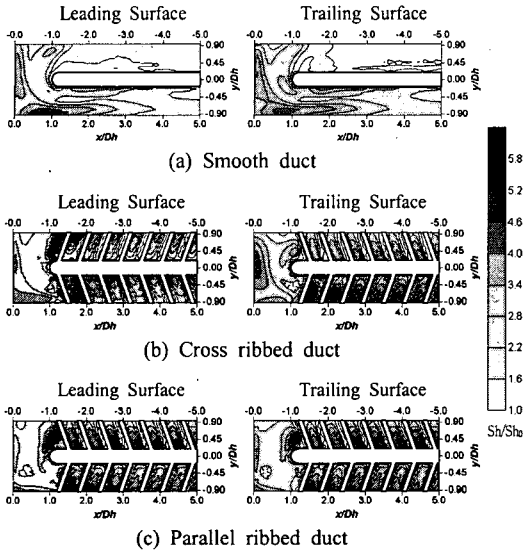


Fig. 10 Comparison of local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) at  $Ro=0.0$

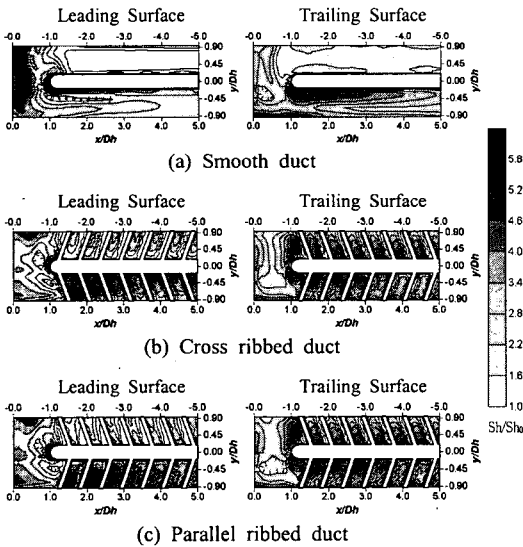


Fig. 11 Comparison of local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) at  $Ro=0.20$

( $Ro=0.0$ )와 회전하는 경우( $Ro=0.20$ )에 대해 나타내고 있다. Fig. 10과 같이 정지된 경우에는 Fig. 9에서 언급한 바와 같이 요철에 의한 이차유동으로 인한 열전달 분포가 잘 나타난다. 요철이 없는 경우에는 단와류로 인해 곡관부와 2차유로의 외벽에서 열전달이 높으며, 엇갈린 요철배열 덕트는 1차유로는 전연면의 외벽에서 후연면은 내벽에서 열전달이 높고 2차유로는 전연면의 내벽

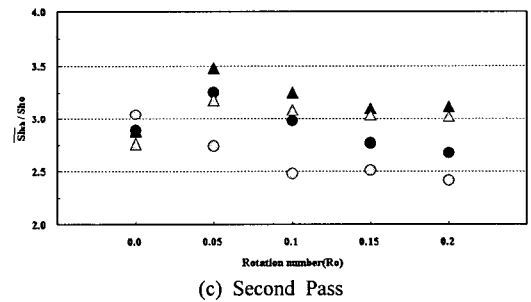
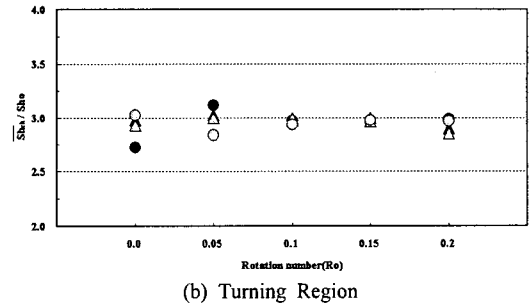
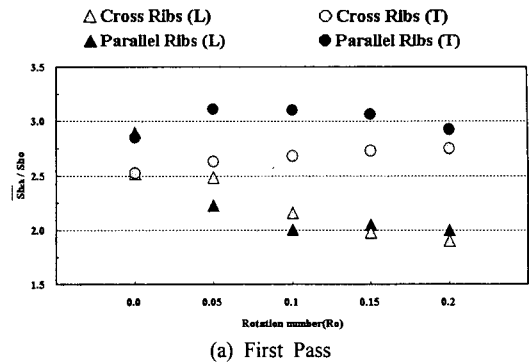


Fig. 12 Channel-averaged Sherwood number ratios ( $\bar{Sh}_{ch}/Sh_0$ ) at various rotation numbers for cross- and parallel-ribbed duct

후연면의 외벽에서 열전달이 높다. 그리고 평행한 요철배열 덕트는 전·후연면 모두 1차유로는 내벽에서 2차유로는 외벽에서 열전달이 높게 나타났다.

Fig. 11과 같이 회전하는 경우에는 1차유로와 2차유로 하류에서 요철에 의해 나타나는 열전달 특성은 정지된 경우와 같으나, 2차유로 상류에서는 요철에 의한 이차유동과 상관없이 Fig. 9의 회전하는 경우의 유동과 같이 하나의 큰 이차유동으로 인해 전연면의 외벽에서 후연면은 내벽에서 높은 열전달 분포를 갖는다.

Fig. 12는 회전수 변화에 따른 덕트 내 각 유로에서 면적 평균한 열/물질전달 값을 각각의 유로



에 대해서 나타낸 그림이다. 1차유로에서는 엇갈린 요철배열 덕트의 경우, 회전수가 증가함에 따라 전연면의 열전달은 감소하고 후연면의 열전달은 증가하였으나, 평행한 요철배열의 경우는 회전수 증가에 따른 후연면의 열전달은 별 차이가 없었다. 이는 회전수가 증가함에 따라 후연면 부근의 요철에 의한 이차유동의 크기와 강도는 줄지만, 요철에 의한 박리와 재부착은 계속되기 때문이다. 곡관부에서는 코리올리력에 의한 편향된 유동에 의해 생성되는 이차유동의 영향이 크기 때문에 회전수 변화에 따른 평균 열/물질전달 값의 차이 거의 없었다. 2차유로의 경우, 엇갈린 요철배열 덕트 및 평행한 요철배열 덕트 모두 회전수가 증가함에 따라 전·후연면의 열전달 차이는 커진다. 1차유로와 곡관부를 지나온 후연면 부근의 이차유동의 강도가 평행한 요철배열 덕트가 엇갈린 요철배열 덕트 보다 강하기 때문에 후연면의 열전달이 높게 나타났다. 하지만, 엇갈린 요철배열 덕트에 비해 평행한 요철배열 덕트의 후연면에서의 열전달 감소가 크게 나타나는데, 이는 후연면 부근에서의 유동의 회전방향과 평행한 요철에 의한 회전 방향이 반대로 작용하기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 엇갈린 요철 설치 및 회전수 변화에 따른 덕트 내에서의 유동 및 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 국소 물질전달계수 분포와 평균 물질전달 계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 평행한 요철 배열을 가진 이차유로 덕트 내 유동에 가장 큰 영향을 주는 요인으로는 평행한 요철에 의한 이차유동과 유체가 곡관부를 지난 후 원심력을 받게 되어 생성되는 دن와류, 그리고 덕트가 회전할 때 유동의 편향을 일으키는 코리올리력 등이 있다. 이러한 이차유동이 복합적으로 작용하여 1차유로와 곡관부, 2차유로에서 다른 열전달 특성을 갖게 한다.

(2) 덕트가 회전하지 않을 경우에는 평행한 요철배열 덕트에 의해 한 쌍의 큰 이차유동이 형성되어 1차유로는 전·후연면의 내벽에서 열전달이 높게 일어난다. 곡관부에서의 열/물질전달 분포는 1차유로의 평행한 요철배열과 같은 회전방향으로

작용하여 강한 이차유동이 나타난다. 2차유로에서는 곡관부를 지난 강한 이차유동에 의해 전·후연면 외벽에서 높은 열전달 분포를 보이며, 2차유로 하류까지 같은 열/물질전달 특성이 나타난다.

(3) 덕트의 회전수가 증가함에 따라, 1차유로에서는 코리올리력이 커져 전연면의 열전달은 감소하였으나, 후연면의 열전달은 코리올리력이 커질수록 이차유동의 재부착을 방해하여 증가하였다 점차 감소하였다. 곡관부에서의 유동은 회전수가 증가함에 따라 평행한 요철배열에 의한 후연면 부근의 이차유동이 코리올리력에 의해 점차 감소하며, 전연면 부근의 하나의 큰 와류를 형성한다. 이 이차유동으로 인해 2차유로 상류에서는 전연면의 외벽과 후연면의 내벽에서 높은 열전달 분포를 보이다가 평행한 요철에 의한 이차유동의 영향을 받아 2차유로 하류에서는 전·후연면 모두 외벽에서 열전달이 높게 일어난다.

(4) 덕트가 정지하였을 경우와 회전하였을 경우 1차유로, 곡관부 및 2차유로 하류에서는 요철에 의한 열전달 분포가 일정하게 전·후연면에 나타난다. 하지만, 높은 회전수로 회전하는 경우에는 코리올리력의 영향이 커지면서 후연면 부근의 와류가 점차 소멸되어 하나의 큰 이차유동을 만들게 되고, 이로 인해 2차유로 상류에서의 유동 및 열전달 분포는 요철에 상관없이 유사하게 나타난다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 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," *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," *J. Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 564~570.
- (4) Han, J. C., Zhang, Y. M. and Lee, C. P., 1991, "Augmented Heat Transfer in Square Channels with Parallel, Crossed and V-shaped Angled Ribs," *J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 590~596.
- (5) Wu, S. J., Kim, W. S. and Cho, H. H., 1998, "Augment Heat Transfer in a Rectangular Duct with Angled Ribs," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 1, pp. 149~157.
- (6) Lau, S. C., Kukreja, R. T. and McMillin, R. D., 1991, "Effects of V-shaped Rib Arrays on Turbulent Heat Transfer and Friction of Fully Developed Flow in a Square Channel," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 1605~1616.
- (7) Won, S. Y. and Ligrani, P. M., 2004, "Comparisons of Flow Structure and Local Nusselt Numbers in Channels with Parallel- and Crossed-Rib Turbulators," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1573~1586.
- (8) Wu, S. J., Lee, S. Y., Choi, C. and Cho, H. H., 2002, "Heat/Mass Transfer Augmentation in a Square Duct Roughened with Angled Discrete Ribs Having Narrow Gaps," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 26, No. 1, pp. 150~158.
- (9) Schabaker, J., Boelcs. A. and Johnson, B. V., 1999, "PIV Investigation of the Flow Characteristics in an Internal Coolant Passage with 45deg Rib Arrangement," *ASME Paper No. 99-GT-120*.
- (10) Kim, K. M., Kim, S. I., Kim, Y. Y., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2004, "Detailed Measurement of Heat/Mass Transfer in a Rotating Two-Pass Duct ( I )," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 8, pp. 910~920.
- (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. 2004-GT-53533*.
- (12) Servouze, Y. and Sturgis, J. C., 2003, "Heat Transfer and Flow Field Measurements in a Rib-Roughened Branch of a Rotating Two-Pass Duct," *ASME Paper No. GT2003-38048*.
- (13) 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.
- (14) Jang, Y. J., Chen, H. C. and Han, J. C., 2001, "Computation of Flow and Heat Transfer in Two-Pass Channels with 60 deg Ribs," *J. Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 563~575.
- (15) Murata, A. and Mochizuki, 2004, "Aiding and Opposing Contributions of Centrifugal Buoyancy on Turbulent Heat Transfer in a Two-Pass Transverse- or Angled-Rib-Roughened Channel with Sharp 180° Turns," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3721~3743.
- (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 Turning Region ( I )," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 6, pp. 737~746.
- (17) 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.
- (18) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (19) McAdams, W. H., 1942, "Heat Transmission, 2nd Edition," *McGraw-Hill*, New York.