

# 회전하는 사각덕트 유로에서 벽면 유출홀에 따른 열전달 특성변화( I )

— 회전수 변화에 따른 영향 —

김 상 인, 김 경 민, 이 동 현, 전 윤 흥, 조 형 희<sup>†\*</sup>

연세대학교 기계공학부 대학원, \*연세대학교 기계공학부

## Change of Heat Transfer Characteristics in a Rotating Channel of Square Duct at Wall with Bleed Holes ( I )

— Effects of Rotation Speed —

Sang In Kim, Kyung Min Kim, Dong-Hyun Lee, Yun Heung Jeon, Hyung Hee Cho<sup>†\*</sup>

Graduate School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>\*</sup>School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received March 2, 2005; revision received August 9, 2005)

**ABSTRACT:** The present study has been conducted to investigate convective heat/mass transfer in the cooling passage with bleed holes. The rotating square channel has 40.0 mm hydraulic diameter and the bleed holes on the leading surface of the channel. The hole diameter of bleed hole is 4.5 mm and its spacing is ( $p/d=4.9$ ) about five times of hole diameter. Exit mass flow rate through bleed holes is 10% of the main mass flow rate and rotation number is changed form 0.0 to 0.4. A naphthalene sublimation technique is employed to determine the detailed local heat transfer coefficients using the heat and mass transfer analogy. The cooling performance is influenced by exit mass flow rate through bleed holes and Coriolis force of rotating channel for fixed Reynolds number. The heat transfer on the leading surface is decreased due to Coriolis force. However the total heat transfer is enhanced around holes on the leading surface because of trapping flow by bleeding.

**Key words:** Bleed hole(유출홀), Coriolis force(코리올리력), Naphthalene sublimation technique(나프탈렌승화법), Rotating duct(회전덕트)

### 기 호 설 명

$BR$  : 유출유량비,  $\dot{m}_{exit} / \dot{m}_{inlet}$   
 $d$  : 유출홀 직경  
 $D_h$  : 유로 수력 직경

$D_{naph}$  : 물질확산계수(나프탈렌-공기)  
 $H$  : 덕트 높이  
 $h_m$  : 물질전달계수  
 $\dot{m}_{exit}$  : 유출유량  
 $\dot{m}_{inlet}$  : 유입유량  
 $p$  : 유출홀간 거리  
 $R$  : 유로 최대 반경  
 $Re$  : 수력 직경 기준 Reynolds 수,  $D_h u_b / \nu$   
 $Ro$  : Rotation 수,  $D_h \Omega / u_b$

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

Sc	: Schmidt 수, $\nu/D$
Sh	: Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$
$\overline{Sh}_0$	: 요철이 없는 원형관에서의 Sh 수
$\overline{Sh}_L$	: 횡방향(y) 선 평균 Sherwood 수
$\overline{Sh}_p$	: 유로 내 피치 평균 Sherwood 수
$u_b$	: 평균 속도
W	: 유로의 폭 넓이
x	: 주유동방향 거리
y	: 덕트 중심으로부터 횡방향 거리
z	: 덕트 바닥면으로부터의 높이

### 그리스 문자

$\mu$	: 점성계수
$\nu$	: 동점성계수, $\mu/\rho$
$\rho$	: 밀도
$\Omega$	: 회전각속도

## 1. 서 론

가스터빈의 효율을 향상시키기 위하여 터빈입구온도(Turbine Entry Temperature, TET)의 증대는 필수적이다. 최근 가스터빈 엔진의 TET는 1,500°C 이상으로, 금속의 허용한계온도를 상회하는 수준이다. 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드를 보호하기 위하여 각종 냉각기법에 대한 연구가 오랜 기간에 걸쳐 이루어져 왔다. 그 결과 충돌제트냉각(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.

기존 연구의 대부분은 충돌제트냉각, 막냉각, 내부관냉각에 대하여 개별적으로 이루어졌다. 그러나 실제 가스터빈에서는 내부관냉각과 막냉각이 동시에 일어나기 때문에 이에 대한 복합적인 열전달 특성을 이해할 필요가 있다. 따라서 최근에 내부관냉각과 막냉각을 함께 고려한 연구가 이루어지고 있다. Douglas et al.<sup>(1)</sup>은 정지한 1차 유로에 요철과 유출홀을 설치하였고 유출홀 후단부에 유출홀마다 각각 질량유량계를 통해 유출유량

을 변화시켜 가며 열전달 특성을 고찰하였다. 각 홀마다 유출유량이 같은 경우의 열전달률은 유출홀이 없는 내부관의 열전달률보다 높다는 결과를 얻었고, 하류로 갈수록 유출홀의 유출유량이 점차 증가하는 경우와 점차 감소하는 경우의 결과는 균일한 유출유량일 때보다 전체 평균이 낮게 나타났다. Ekkad et al.<sup>(2)</sup>은 정지한 2차 유로에서 TLC(Thermochronic Liquid Crystal)를 이용하여 유출홀의 영향과 요철의 형상을 다양하게 변화시켜 가며 열전달 특성을 고찰하였고, 송풍압력을 일정하게 조절하여 하류로 갈수록 압력강하에 따른 유출유량이 감소하는 조건에서 실험하였다. 또한 가시화를 통해 유동 특성에 대한 이해를 높였다. Rigby et al.<sup>(3)</sup>과 Stephens et al.<sup>(4)</sup>은 수치해석을 통해 유출홀과 요철이 설치된 유로에서 열전달 특성에 대하여 고찰하였다. Taslim et al.<sup>(5)</sup>은 경사진 덕트에서 요철과 유출홀의 영향에 대하여 요철의 크기 변화해 가며 고찰하였다. Ireland et al.<sup>(6)</sup>은 유출홀 입구에서 열전달 특성에 대하여 실험과 수치해석을 병행하였다. Byerley et al.<sup>(7)</sup>은 유출홀과 요철이 설치된 유로에서의 열전달 특성에 대하여 고찰하였다.

기존의 연구들은 정지한 덕트에서 유출홀에 의한 평균적인 열전달 특성을 고찰하여, 덕트의 회전으로 인한 유출홀을 가진 덕트에서의 열전달 특성뿐만 아니라 국소 열/물질전달계수의 분포를 알 수 있는 자료는 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 유출홀이 설치된 덕트에 대해서 모든 유출홀의 유출유량을 동일하게 조절한 상태에서 회전수를 변화시켜 가며 유로 내부의 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 유출 회전장치의 개략도를 나타낸다. 크게 송풍부와 회전부, 그리고 측정부로 이루어져 있으며 송풍부는 주유동 공급부와 유출유량을 제어하는 흡입부로 다시 나누어져 있다. 이는 이중막으로 된 동심 회전축을 통해 송풍과 흡입을 가능하게 하였다. 송풍과 흡입은 원심 블로워를 인버터를 통해 제어할 수 있도록 하였다. 또한 회전 중심축에서 송풍 및 흡입이 가능하도록 하

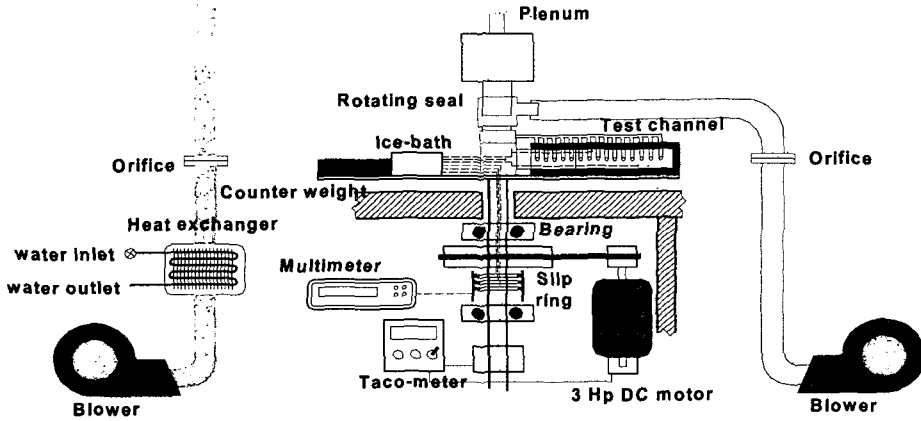


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

기 위하여 중심축을 통해 송풍이 되도록 하였고, 중심축 외부로 유동을 흡입할 수 있는 2차 축을 설치하였다. 따라서 동심축을 바탕으로 안쪽으로는 덕트의 송풍을, 바깥쪽은 덕트 내 유출홀을 통해 흡입된 유동이 흐를 수 있도록 하였다. 이는 회전시에 송풍이 가능한 장치를 두 곳에 설치하여 가능하게 하였다. 기타 회전부와 측정부에 대한 자세한 구성은 Lee et al.<sup>(8)</sup> 및 Cho et al.<sup>(9)</sup> 그리고 Kim et al.<sup>(11)</sup>에 제시되어 있다.

Fig. 2는 실험에 사용되는 덕트의 형상을 나타내고 있다. 덕트는 1 : 1의 중횡비를 갖는 정사각형이고, 유출홀이 설치된 1차 유로로 되어 있으며,

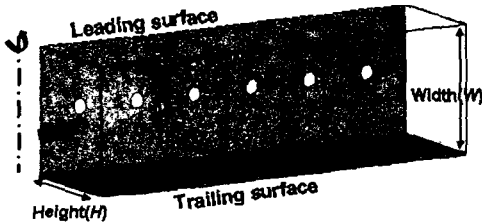


Fig. 2 Hole arrangement and geometry of ducts.

옆벽은 아크릴로 제작되었다. 덕트의 수력직경 ( $D_h$ )은 40.0 mm이고, 수력직경 대비 최대회전반경 ( $R/D_h$ )은 14.43이다. 유출홀의 직경( $d$ )은 4.5 mm이고, 유출홀간 간격( $p$ )은 22.0 mm로 유출홀 간격 대 유출홀 직경비( $p/d$ )는 4.9이다. Fig. 3과 같이 테스트 플레이트의 길이는  $5.5 D_h$ 이며, 전면에만 유출홀이 있는 플레이트를 설치하고, 후연면은 매끈한 플레이트를 설치하였다. 전·후연면에 설치된 테스트 플레이트에는 나프탈렌이 코팅되어 있고, 이는 열전달에서의 등온가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작점까지 거리는 약  $6 D_h$ 이며, 유출홀을 일정간격으로 설치하였다.

본 연구에서는 수력직경기준 Re 수는 10,000으로 고정시키고, Ro를 0.0, 0.2, 0.4로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 또한 유출홀을 통해 빠져나가는 유량은 덕트에 공급되는 주유동의 유량에 10%가 되도록 조절하였다. 이는 송풍장치를 인버터를 통해 조절하여 홀을 통해 빠져나가는 유량이 일정하게 조절하였다. 좌표계는 Fig. 3에 나타난 것과 같으며, 회전 중심축으로부터 313 mm 떨

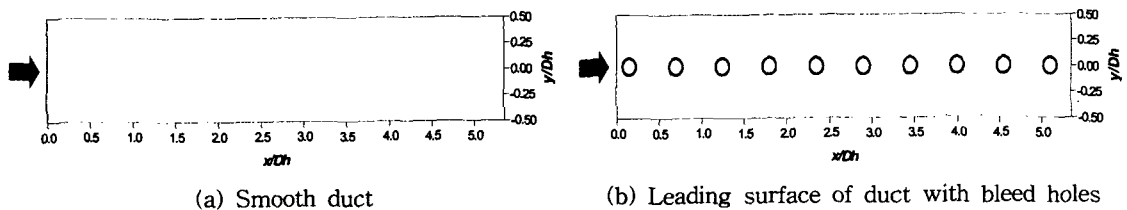


Fig. 3 The coordinate system.

어진 위치에 나프탈렌 표면이 시작되며, 나프탈렌 표면이 시작되는 지점에서 너비방향 중심을 원점으로 설정하였다. 나프탈렌 측정영역은 주유동 방향( $x$ )으로는 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 지점까지  $0.0 \leq x/D_h \leq 5.5$ 이며, 횡방향( $y$ )으로는 유로의 외벽부터 반대편 외벽까지  $-0.5 \leq y/D_h \leq 0.5$ 에 해당된다.

## 2.2 실험결과 처리방법

본 연구에서는 열전달과 물질전달 간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리과정은 Lee et al.<sup>(8)</sup> 및 Cho et al.<sup>(9)</sup>에 제시되어 있다.

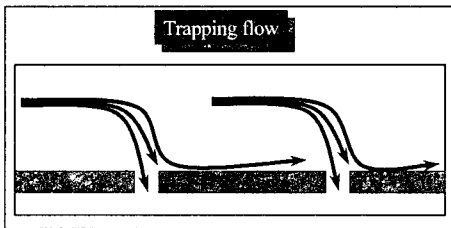
나프탈렌이 코팅되어있는 면의 높이를 실험 전후로 측정하여 국소 물질전달계수를 구하고, 이로부터 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수를 구할 수 있다.

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

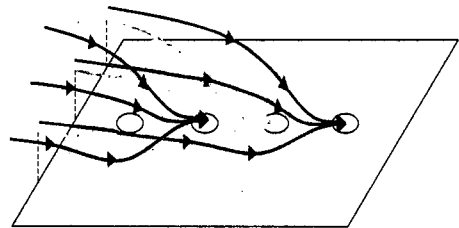
이때,  $D_{naph}$ 는 공기 중에서의 나프탈렌 확산계수이다. 물성치는 Goldstein and Cho<sup>(10)</sup>에 의하여 제시된 값을 이용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 Kline and McClintock<sup>(12)</sup>의 방법에 의하여 95% 신뢰수준에서 7.76%의 값을 갖는다.

본 연구에서는 물질전달 실험결과를 무차원 물질전달계수의 비( $Sh/Sh_0$ )로 나타내었다. 이때  $Sh_0$ 는 McAdams<sup>(13)</sup>에 의해 제시된 매끈한 원형관내의 완전발달 난류 유동장에서의 물질전달계수는 열전달과 물질전달의 상사성에 의해 다음과 같이 표현된다.

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



(a) Side view



(b) View of three dimensions

Fig. 4 Schematic view of channel flow with bleed holes.

또한, 한 피치 내의 각 지점에서 얻어진  $Sh$ 값들을 해당 횡방향( $y$ ) 평균한 결과를  $\overline{Sh}_L$ 로 나타내었고, 홀과 홀 사이 영역에서의 평균값을  $\overline{Sh}_p$ 로 나타내었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 내부유로의 유동구조

유출홀을 설치한 유로 내의 2차 유동은 유출홀의 영향으로 인한 2차 유동과 회전시에 발생하는 코리올리력(Coriolis force)으로 인한 2차 유동이 발생한다. Fig. 4는 유출홀이 설치된 유로 내부의 전체적인 유동형태를 Fluent 6.1을 통하여 수치해석한 결과를 바탕으로 해석하여 전연면에서의 상대유속 벡터를 나타낸 개략도이다. 유출유량이 10%인 경우에 압력이 낮은 유출홀 쪽으로 유동이 편향되어 유출홀 주위의 유동이 유출홀을 향하는 것을 알 수 있다. 유출홀을 통하여 미처 빠져나가지 못한 유동은 유출홀 하단부에 강하게 충돌하여 높은 열전달이 발생하게 된다. 이렇게 유출홀 하단부에 충돌한 유동은 하류로 진행하게 되고 다음 유출홀로 향하는 구조를 가지고 있으며 매 유출홀마다 반복적인 유동구조를 보인다. 덕트의 회전에 따른 코리올리력의 작용으로 인한 2차 유동은 유출홀의 영향에 따른 2차 유동과 복합적으로 작용하여 유로 내의 유동은 덕트의 옆벽면에서 유출홀 방향으로 향하는 유동이 커진다. 따라서 유출홀 하단부에 충돌하는 유동의 강도가 증가하여 정지한 경우보다 열전달이 높아진다.

Fig. 5는 유로의 하류에 해당하는 영역인  $x/D_h = 3.75$  지점, 즉 홀과 홀 사이에서의 수치해석 결과를 상대유속 벡터로 제시하였다. Fig. 5(a)는 회전수 0.0인 경우에 대한 결과이다. 유동의 방향은

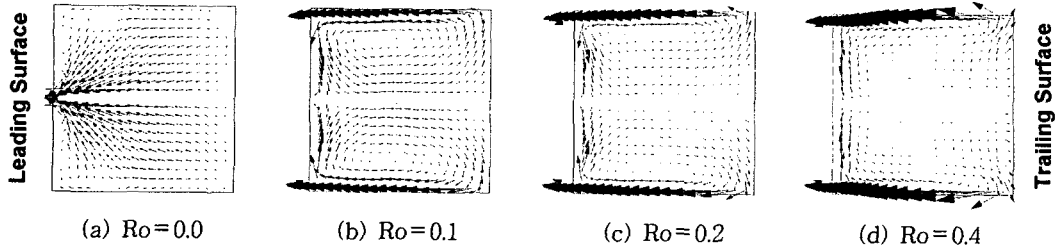


Fig. 5 Flow pattern of channel with bleed holes for BR=0.1 at  $x/D_h=3.75$ .

전반적으로 압력이 낮은 유출홀이 설치된 전연면으로 향하고 있으며 전연면의 모서리 부분에서 와류가 발생하는 것을 알 수 있고 유출홀에 가까워질수록 유속이 빨라지는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 5(b)는 회전수 0.1에 대한 결과이며 회전으로 인한 코리올리력이 작용하여 한 쌍의 2차 유동이 발생하게 된다. 따라서 유동은 전연면에서 후연면 쪽으로 향하여 후연면의 압력이 높아지게 된다. 이 2차 유동은 다시 옆 벽면을 따라 후연면에서 전연면으로 이동하는 구조를 보여준다. 이때 압력이 낮은 유출홀의 영향으로 옆 벽면을 따라 전연면으로 향하는 유동은 가속화된 후 충돌하여 정지시보다 전연면에 높은 열전달영역이 나타난다. 이렇게 전연면에 충돌한 유동의 일부는 압력이 낮은 유출홀 쪽으로 이동하며 그 밖의 유동은 다시 후연면으로 향하는 것을 알 수 있다. 또한 한 쌍의 2차 유동의 중심부가 존재하게 되고 중심부를 기준으로 안쪽의 유동은 전연면에서 후연면 쪽으로 향하며 중심부 바깥쪽의 유동은 후연면에서 전연면으로 향하는 구조를 가지게 된다. Fig. 5(c), (d)는 각각 회전수 0.2와 0.4에 대한 결과를 나타내고 있으며, Fig. 5(b)와 더불어 회전수가 증가함에 따른 유동구조의 변화 과정을 확인할 수 있다. 회전수 증가에 따라 코리올리력은 점차 커지게 되고 후연면으로 편향되는 유동의 강도가 더 커지게 되어 상대적으로 커진 압력차이로 옆 벽면을 타고 후연면에서 전연면으로 향하는 유동의 강도 역시 증가하며 2차 유동의 중심이 옆 벽면으로 붙음에 따라 전연면에 충돌하는 영역은 좁아지는 반면, 충돌 강도는 더 커져 높은 열전달 영역이 나타나는 것을 알 수 있다. 기본적으로 코리올리력의 증가는 전연면의 낮은 열전달값을 갖게 하기 때문에 회전수 증가에 따라 전연면의 열전달계수는 낮아지는 것이 보통이나 유출홀이 있는 경우에는 유출홀의

영향이 전연면의 열전달을 향상시키는 작용을 하여 전연면의 열전달을 방해하는 코리올리력과 균형을 이루어 회전수 0.2인 경우에 가장 높은 열전달계수를 갖는 유동구조를 형성하며 회전수 증가할수록 유출홀의 영향보다 코리올리력의 영향을 크게 받아 점차 낮은 열전달분포를 보이게 된다.

### 3.2 유출홀이 없는 경우

Fig. 6은 유출홀을 설치하지 않은 매끈한 덕트에서의 열/물질전달 실험결과를 바탕으로 유로의 횡방향 평균한 값을  $x$  방향을 따라 나타낸 그래프이다.  $x/D_h$ 가 0.0인 부분은 나프탈렌 표면이 시작되는 부분이기 때문에 공기 중의 나프탈렌 밀도가 낮아 많은 양의 나프탈렌이 승화되어  $Sh_L/Sh_0$  값이 높은 특성을 보이나 주유동 방향을 따라 진행하면서 평균 열/물질전달계수가 전연면과 후연면 모두 점차 낮아져 1.0에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 정지한 매끈한 원형관 내의 완전발달 난류유동장에서의 열전달계수  $Sh_0$ 에 수렴함을 나타낸다. 또한 덕트가 회전하는 경우( $Ro=0.4$ ), 회

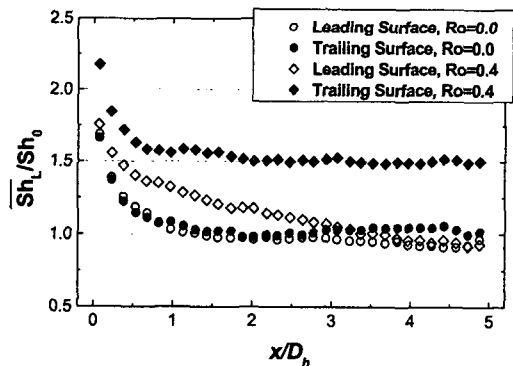


Fig. 6 Local average Sherwood number ratio ( $Sh_L/Sh_0$ ) for the smooth duct.

전에 의한 코리올리력으로 인해 전·후연면의 열/물질전달계수 비의 차이가 커지는데, 이는 코리올리력으로 인해 유동의 밀도가 후연면에 높아지고, 전연면은 점차 낮아지기 때문에 나타나는 현상이다.

### 3.3 유출홀이 설치된 경우

Fig. 7은 유출이 없는 매끈한 덕트와 유출홀이 설치된 덕트를  $Ro=0.0$ 에서 실험한 결과를 전연면에 대하여 횡방향으로 평균한  $\overline{Sh}_L/Sh_0$ 을 나타내었고, Fig. 8은 유출홀이 설치된 덕트에서의 회전수 변화에 따른 국소적인 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다.

Fig. 7과 같이 유출홀의 특성으로 인하여 유출홀 하단부에 높은 열전달 영역이 발생하여 매끈한 정지덕트의 실험결과에 비해 전체 평균 열/물질전달계수가 약 40% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8(a)에서 보는 것과 같이 정지한 경우에 국소적인 열/물질전달 분포는 매끈한 덕트의 실험결과와 다르지 않으나, 유출홀의 압력이 낮기 때문에 유동이 유출홀로 끌려 들어가게 되고, 미처 빠져나가지 못한 유동은 유출홀 하단부에 충돌하여 높은 열/물질전달 분포를 보인다. 이렇게 충돌한 유동은 다음 홀로 진행할수록 점차 유동경계층이 발달하게 되어 열/물질전달 분포는 점차 낮아지게 된다. 이러한 경향은 매 유출홀마다 반복적으로 나타난다. 유로 하류로 갈수록 주유동 유량의 감소로 인해 유출홀에 의한 영향이 커져 홀 바로 다음 지

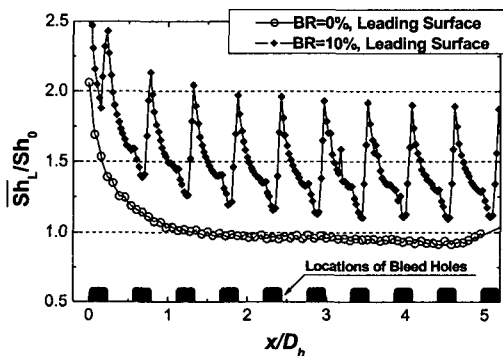


Fig. 7 Line average Sherwood number ratio ( $\overline{Sh}_L/Sh_0$ ) for bleeding ratio at  $Ro=0.0$ .

점에서의 열전달계수가 국소적으로 커지는 것을 알 수 있다. 하지만, 전체적인 유량의 감소로 인해 Fig. 7과 같이 전체적인 열/물질전달계수는 감소하게 된다.

Fig. 8(b)은  $Ro=0.1$ 로 회전하는 경우의 국소 열/물질전달 분포를 나타낸다. 유출홀의 영향은 Fig. 8(a)의 경우와 크게 다르지 않지만 회전영향으로 코리올리력이 작용하여 한 쌍의 2차 유동이 발생하게 되어 덕트의 중심에서는 주유동은 후연면 쪽으로 편향되게 된다. 이로 인해 유출홀 하

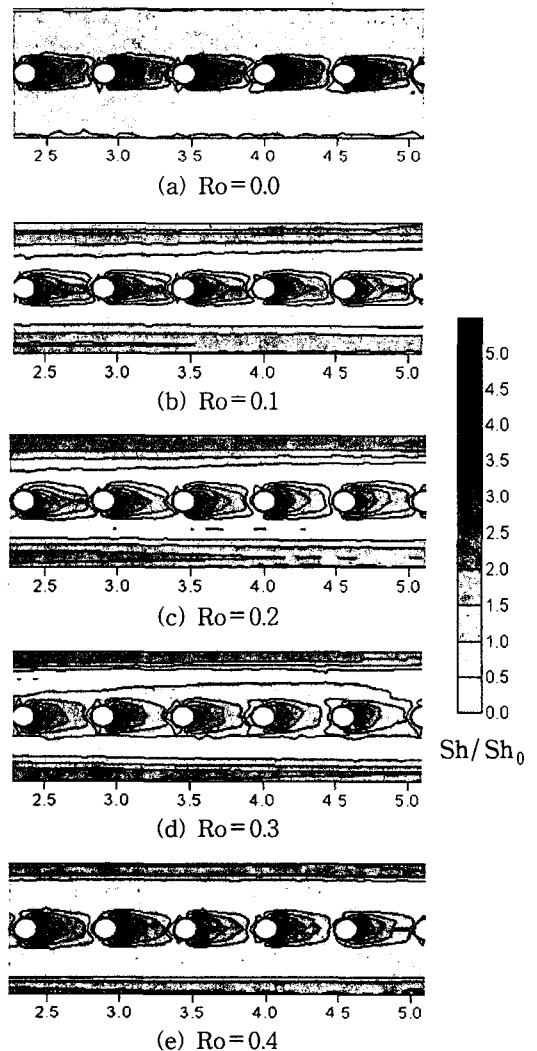


Fig. 8 Contour plots of local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) for the leading surface.

단부에 충돌하는 유동의 강도가 약해지기 때문에 유출홀 다음 영역에서의 열/물질전달계수는 낮아지지만, 2차 유동의 중심을 기준으로 바깥쪽에서는 유동이 옆 벽면을 타고 전연면에 충돌하기 때문에 전연면의 옆 벽면부분에서는 열/물질전달계수가 높아지게 된다. 따라서 유출홀이 유로 중심 부분에 설치되어 있기 때문에 유출홀의 영향으로 높게 나타났던 열/물질전달계수가 회전의 영향으로 다소 낮아지는 결과를 낳게 되는 것이다. 회전수 변화에 따른 영향은 Fig. 8(b), (c), (d), (e)와 같이 회전수가 증가함에 따라 유로 중심부에서 유출홀의 영향이 줄어들어, 유출홀 하단부에 형성되는 높은 열/물질전달 영역이 점차 감소하며, 하류로 갈수록 열/물질전달계수는 더욱 큰 폭으로 감소한다. 또한 덕트 바깥면에 열/물질전달계수 분포는 회전수 0.2까지는 넓게 나타나지만, 회전수가 증가함에 따라 2차 유동이 옆 벽면과 후연면 쪽으로 치우치면서 바깥면 근처의 높은 열/물질전달 분포는 점차 좁아지는 것을 알 수 있다. 따라서 0.2까지는 유출홀의 영향과 옆 벽면에 충돌로 인한 영향이 함께 작용하여 전연면의 열/물질전달계수가 가장 높게 나타나고 0.3부터는 코리올리력이 유출홀의 영향보다 크게 작용하여 전체적인 열/물질전달계수는 감소하게 된다. 회전수 0.4에서는 코리올리력의 영향이 지배적으로 나타나는 것을 확인할 수 있고, 하류로 갈수록 유출홀을 통한 유량이 감소하여 옆 벽면에 충돌하는 영역도 크게 줄어들게 되어 전체적으로 열/물질전달계수가 낮아지게 된다.

Fig. 9는 열/물질전달 실험결과인 Fig. 8을 바탕

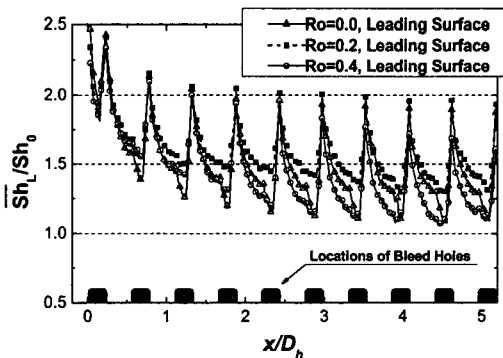


Fig. 9 Line-averaged sherwood number ratio ( $\overline{Sh}_L/Sh_0$ ) for the leading surface.

으로 회전수 0.0, 0.2, 0.4인 경우에 대하여 횡방향 평균 열/물질전달계수를  $x/D_h$ 에 따라 나타낸 그래프이다.  $x/D_h=0.0$ 에서 세 경우 모두 높은 횡방향 평균 열/물질전달계수를 보이는 것은 Fig. 6에서와 같이 공기중에 나프탈렌 밀도가 낮기 때문이다. 또한  $x/D_h$ 가 증가함에 따라, 즉 유동이 하류로 진행함에 따라서 회전수에 관계없이 전체적으로 홀과 홀 사이의 열전달 감소는 홀과 홀 사이에서 열경계층이 발달하기 때문이며, 덕트의 하류로 갈수록 열/물질전달계수가 낮아지는 경향을 보이는 것은 앞선 유출홀들을 통해 많은 유량이 빠져나갔기 때문이다. 가장 높은 열/물질전달계수는 유출홀 직후에 나타나며, 회전수 증가하여도 피크값의 위치변화는 나타나지 않았다. 덕트의 회전수가 증가할수록 코리올리력의 영향이 크게 작용하게 되어, 주유동은 후연면으로 크게 편향되고 전연면의 유출홀 하단부에 충돌하는 유동 강도가 약해지고, 바깥면에 높은 열/물질전달 분포를 보이게 된다. 그러나 회전수가 증가함에 따라 2차 유동의 중심이 바깥면과 후연면으로 이동함에 따라 전체적인 횡방향 평균 열/물질전달계수는 점차 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 유출홀과 유출홀의 중간에서 다음 유출홀과 유출홀의 중간지점을 한 영역으로 하여 영역 평균한 열/물질전달계수를  $x/D_h$ 에 따라 나타낸 그래프이다. 정지한 경우보다 회전수 0.1 및 0.2의 모든 영역에서 높은 피치 평균 열/물질전달계수를 보이고 있다. 이는 앞서 Fig. 9에서 살펴본 바와 같은 이유이며 회전수 0.4에서 가장 낮은 값을 갖는다. 이는 코리올리력이 가장 크게

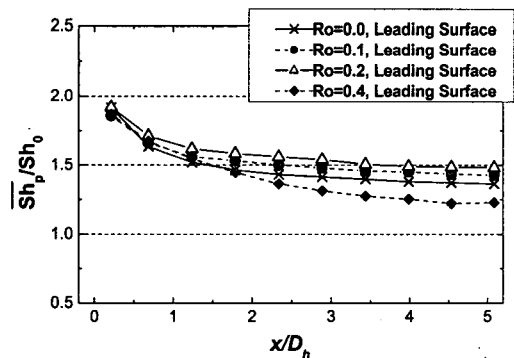


Fig. 10 Pitch-averaged sherwood number ratio ( $\overline{Sh}_p/Sh_0$ ) on the leading surface for rotation number.

작용하며 회전반경이 증가함에 따라 코리올리력이 증가하기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수력직경 40 mm인 정사각유로에서 유출홀이 설치된 경우의 열/물질전달 특성을 회전수 변화에 대하여 고찰 하였다. 국소 열/물질전달계수의 분포와 횡방향 평균 열/물질전달계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 유출홀을 설치하지 않은 매끈한 덕트에서의 열/물질전달계수는 매끈한 원형관 내의 완전 발달 난류유동장에서의 열전달계수  $Sh_0$ 의 값과 일치함을 알 수 있었다. 따라서 유출홀을 설치한 덕트의 열/물질전달계수 결과와 비교할 수 있었다.

(2) 유출홀을 설치한 덕트의 정지실험결과가 유출홀을 설치하지 않은 매끈한 덕트에서의 정지실험결과보다 높은 열/물질전달계수를 갖는 것을 확인하였다. 이는 덕트에 설치된 유출홀을 통하여 주유동 유량의 10%가 빠져나가면서 유동을 유출홀 쪽으로 끌어당긴 후 홀을 빠져나가지 못한 유동이 유출홀 하류에 부딪히는 현상 때문인 것으로 나타났다.

(3) 유출홀을 설치한 덕트에서 회전수가 증가할수록 코리올리력이 증가하여 전연면에서 열/물질전달계수가 낮은 영역이 점차 확대되는 것을 확인하였다. 또한 회전의 영향으로 전연면으로 흐르는 유동이 후연면 쪽으로 쏠리게 되어 유출홀 하류에 충돌하는 유동의 강도가 작아져 결국 전연면의 국소 평균 열/물질전달계수가 작아지는 것이 관측되었다. 따라서 회전수가 증가할수록 유출홀의 영향이 감소한다.

(4) 회전수가 증가함에 따라 유출홀의 영향은 감소하지만 회전수 0.2까지는 크게 영향을 받지 않으며, 오히려 전연면에 충돌하는 영역에서 높은 열/물질전달계수를 갖기 때문에 회전수 0.2에서 가장 높은 평균 열/물질전달계수를 갖으며, 그 이상의 회전수에서는 유출홀의 영향이 급격하게 감소하여 평균 열/물질전달계수는 감소하였다.

(5) 유출홀이 설치된 덕트에서 하류로 갈수록 유출홀로 빠져나가는 유량으로 인해 잔존하는 절대 유량이 줄어드는 영향과 열경계층의 발달로  $x/D_h$ 로 진행함에 따라 횡방향 평균 열/물질전달계수가 낮아지며 회전수 0.4에서 회전축에서 멀

어질수록 유출홀의 영향이 급격히 낮아져 가장 낮은 평균 열/물질전달계수를 갖는다.

#### 참고문헌

1. Douglas, T. and Philip, P., 2000, Experimental heat transfer and bulk air temperature measurements for a multipass internal cooling model with ribs and bleed, ASME Paper No. 2000-GT-233.
2. Ekkad, S. V., Huang, Y. and Han, J. C., 1996, Detailed heat transfer distributions in two-pass smooth and turbulated square channels with bleed holes, 1996 National Heat Transfer Conference, Vol. 8, pp. 133-140.
3. Rigby, D. L., Steinhilber, E. and Ameri, A. A., 1997, Numerical prediction of heat transfer in a channel with ribs and bleed, ASME Paper No. 96-GT-431.
4. Stephens, M. A., Shih, T. I. and Civinskas, K. C., 1995, Computation of flow and heat transfer in a rectangular channel with ribs, AIAA Paper No. 95-0180.
5. Taslim, M. E., Li, T. and Spring, S. D., 1995, Experimental study of the effects of bleed holes on heat transfer and pressure drop in trapezoidal passages with tapered turbulators, Journal of Turbomachinery, Vol. 117, pp. 281-289.
6. Byerley, A. R., Jones, T. V. and Ireland, P. T., 1992, Internal cooling passage heat transfer near the entrance to a film cooling hole: Experimental and computational results, ASME Paper No. 92-GT-241.
7. Shen, J. R., Wang, Z., Ireland, P. T., Jones, T. V. and Byerley, A. R., 1996, Heat transfer enhancement within a combinations of ribs with film cooling holes, Journal of Turbomachinery, Vol. 118, pp. 428-434.
8. 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.



9. 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.
10. 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.
11. Kim, S. I., Kim, K. M., Lee, D. H., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2004, Heat and mass transfer characteristics on rotating square duct with bleed holes, *Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers 2004 Fall Annual Meeting*, pp. 1104-1109.
12. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainty in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
13. McAdams, W. H., 1942, *Heat Transmission*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.