

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

— 유출유량 변화에 따른 영향 —

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

연세대학교 기계공학부 대학원, <sup>\*</sup>연세대학교 기계공학부

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

— Effects of Exit Mass Flow Rate —

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 July 27, 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 40.0mm hydraulic diameter and the bleed holes on the leading surface of the channel. The hole diameter of bleed hole is 4.5mm and its spacing is ( $p/d=4.9$ ) about five times of hole diameter. Exit mass flow rate through bleed holes is 0%, 10% and 20% of the main mass flow rate respectively. rotation number is fixed 0.2. 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  
 $u_b$  : 평균 속도  
 $W$  : 유로의 폭 넓이  
 $x$  : 주유동방향 거리  
 $y$  : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리  
 $z$  : 덕트 바닥면으로부터의 높이

## 1. 서 론

가스터빈의 효율을 향상시키기 위하여 터빈입구 온도(Turbine Entry Temperature, TET)는 1,500 °C 이상으로, 금속의 허용한계온도를 상회하는 수준이다. 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드를 보호하기 위하여 각종 냉각기법들(충돌제트냉각, 막냉각, 내부관냉각)이 개발되었다.

기존 대부분의 연구는 이러한 냉각기법들에 대한 연구가 개별적으로 이루어졌다. 그러나 실제 가스터빈에서는 이러한 냉각기법들이 동시에 일어나기 때문에 이에 대한 복합적인 열전달 특성을 이해할 필요가 있다. 특히 본 연구의 대상인 블레이드 냉각을 위해 최근에는 내부관냉각과 막냉각을 함께 고려한 연구가 이루어지고 있다. 정지한 내부관을 통한 유출실험은 Douglas et al.<sup>(1)</sup>에 의해 1차 유로에 요철과 유출홀을 설치하여 유출홀 후단부에 유출홀마다 각각 질량유량계를 통해 유출유량을 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 압력감하에 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 유출유량에 따른 국소 열/물질전달계수의 분포를 알 수 있는 자료가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 유출홀이 설치된 덕트에 대해서 모든 유출홀의 유출유량을 동일하게 조절한 상태에서 일정한 회전수에서 유출유량을 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 하기 위하여 중심축을 통해 송풍이 되도록 하였고, 중심축 외부로 유동을 흡입할 수 있는 2차 축을 설치하였다. 따라서 동심축을 바탕으로 안쪽에는 주유동 바깥쪽은 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 종횡비를 갖는 정사각형이고, 유출홀이 설치된 1차 유로로 되어 있으며 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

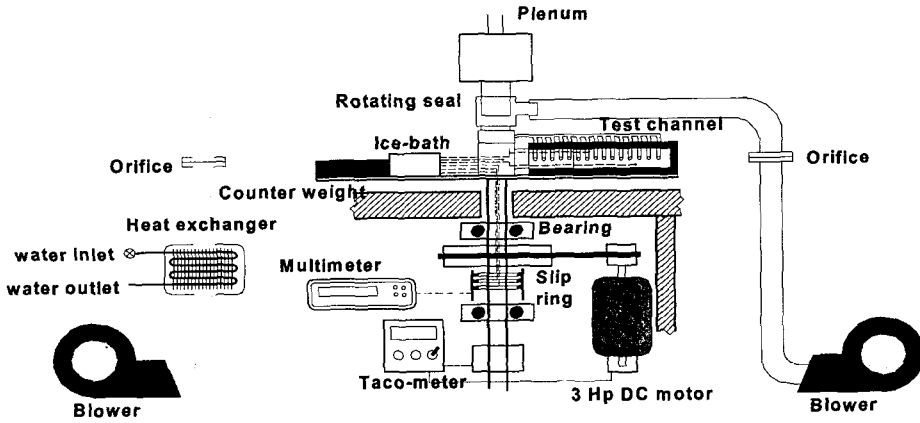


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

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, 전연면에만 유출홀이 있는 플레이트를 설치하고, 후연면은 매끈한 플레이트를 설치하였다. 전, 후연면에 설치된 테스트 플레이트에는 나프탈렌이 캐스팅되어 있고, 이는 열전달에서의 등온가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작 지점까지 거리는 약  $6 D_h$ 이며, 유출홀을 일정간격으로 설치하였다.

본 연구에서는 수력직경기준  $Re$ 는 10,000으로 고정시키고,  $Ro$ 를 0.2로 고정하여 실험을 수행하

였다. 또한 유출홀을 통해 빠져나가는 유량은 덕트에 공급되는 주유동 유량에 0%, 10%, 20%로 변화시켜 가며 실험하였다. 이는 송풍장치를 인버터를 통해 조절하여 홀을 통해 빠져나가는 유량이 조건에 맞도록 조절하였다. 좌표계는 Fig. 3에 나타난 것과 같으며, 회전 중심축으로부터 313 mm 떨어진 위치에 나프탈렌 표면이 시작되며, 나프탈렌 표면이 시작되는 지점에서 너비방향 중심을 원점으로 설정하였다. 나프탈렌 측정영역은 주유동방향( $x$ )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.

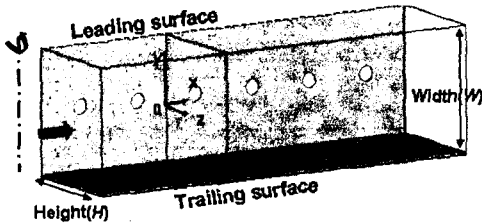


Fig. 2 Hole arrangement and geometry of ducts.

2.2 실험결과 처리방법

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

나프탈렌이 코팅되어 있는 면의 높이를 실험

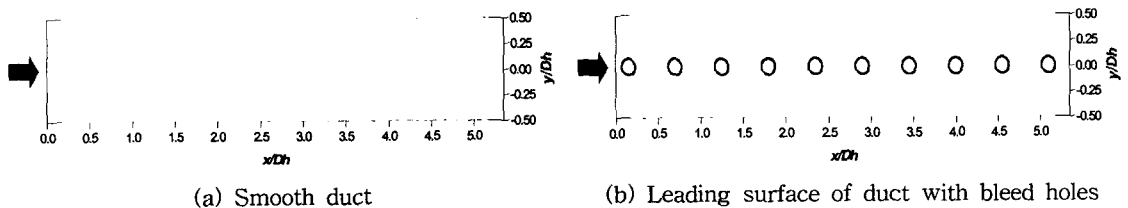


Fig. 3 The coordinate system.

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 난류유동장에서의 물질전달계수는 열전달과 물질전달의 상사성에 의해 다음과 같이 표현된다.

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

또한, 한 피치 내의 각 지점에서 얻어진 Sh 값을 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 유출유량에 따른 유동구조

Fig. 4는 유출홀을 가진 유로 내부에서 유출홀을 통한 유출유량의 변화에 따른 유동구조를 Fluent 6.1을 통하여 수치해석한 결과를 유출홀과 유출홀 사이,  $x/D_h=3.75$ 인 지점에서 회전수 0.2로 덕트가 회전할 때 상대속도 벡터로 나타낸 그림이다.

Fig. 4(a)는 유출홀을 통한 유출이 없는 경우의 수치해석 결과이다. 덕트 회전에 의한 코리올리력(Coriolis force)이 작용하여 전연면에서 후연면으로 유동이 편향되게 되어 후연면에 압력이 상대적으로 높아지게 되고 그에 따라서 유동은 바깥면을 타고 전연면으로 향하게 된다. 이로 인해 전연면의 모서리 부분에 충돌한 유동의 영향으로 높은 열전달 영역이 발생하는 원인이 된다. 충돌한 유동은 다시 코리올리력의 작용으로 후연면으로 향하는 구조를 가지고 있다. Fig. 4(b)는 유출유량이 공급되는 주유동의 유출유량비가 10%인 경우의 수치해석 결과이다. 회전의 영향으로 역시 코리올리력이 작용하여 유출유량 0%인 경우와 같은 2차 유동이 발생한다. 그러나 압력이 낮은 유출홀을 통하여 10%의 유출유량이 빠져나가기 때문에 복잡한 유동구조를 갖게 된다. 즉, 코리올리력으로 전연면과 후연면의 압력차이가 발생하여 후연면으로 편향된 유동은 옆벽면을 타고 전연면에 충돌한 후에 일부는 유출홀을 통해 빠져나가게 되고 일부는 다시 후연면으로 향하는 구조를 가지고 있다. 그러나 전연면에 설치된 압력이 낮은 유출홀의 영향으로 전연면의 벽면 근처에 충돌하는 영역이 넓게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 유출유량 20%인 경우의 결과이며, Fig. 4(b)와 거의 유사한 유동구조를 보이지만 유출홀을 통해 빠져나가는 유량이 증가하였기 때문에 전연면 부근의 속도가 유출유량 10%인 경우보다 전체적으로 빨라지게 되어 열전달률이 상승하는 원인이 된다.

#### 3.2 유출유량 변화에 따른 열전달 실험결과

Fig. 5는 덕트가 회전수 0.2로 회전할 때 유출홀을 설치한 전연면에서의 유출유량에 따른 국소

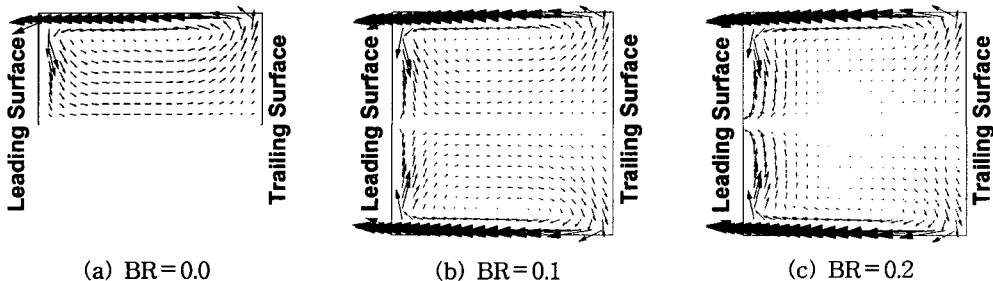


Fig. 4 Secondary flow field for  $Ro=0.2$  at  $x/D_h=3.75$ .

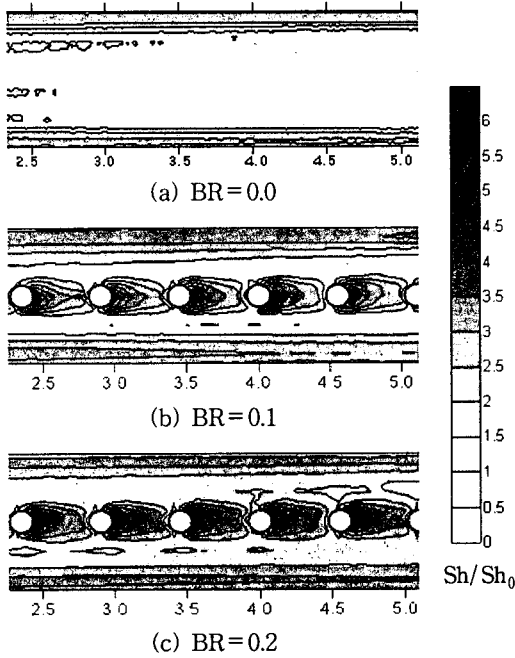


Fig. 5 Contour plots of  $Sh/Sh_0$  on the leading surface for bleed flow rate at  $Ro=0.2$ .

열/물질전달 분포를 나타내며,  $2.3 \leq x/D_h \leq 5.1$ 에 해당되는 영역을 제시하였다. 유출유량은 주유동 유량에 각각 0%, 10%, 20% 을 통해 빠져나가며, 각 홀을 통해 빠져나가는 유량은 일정하다.

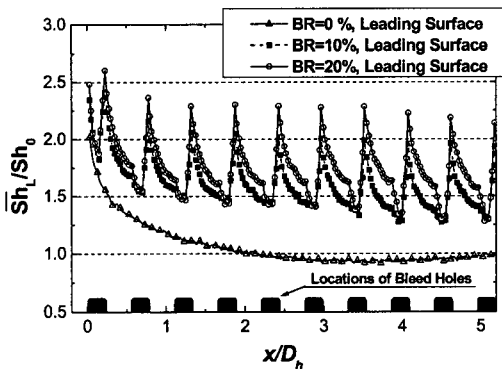
Fig. 5(a)는 유출유량 0%인 경우에 대한 실험 결과를 나타낸 그림이다. Fig. 4(a)에서 설명한 유동구조에 따라서 전연면에서 후연면으로 편향된

유동으로 전연면의 모서리 부분을 제외한 부분에서 낮은 열전달 분포를 확인할 수 있다. 전연면 모서리부분의 열/물질전달 분포는 후연면으로 편향된 유동이 옆벽을 타고 충돌하는 2차 유동에 의해 높게 나타난다.

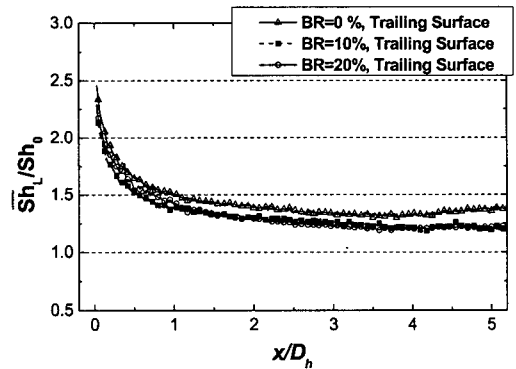
Fig. 5(b)는 유출유량 10%의 실험결과를 나타낸 그림이며, 유출유량이 0%인 경우와 열전달 분포는 유사하게 나타나지만 압력이 낮은 유출홀의 영향으로 유동이 옆벽을 타고 전연면에 충돌하는 영역이 넓어진 것을 알 수 있고 유출홀로 유입되지 못한 유동이 유출홀 하류에 충돌하여 높은 열/물질전달 분포를 보이고 점차 발달하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5(c)는 유출유량 20%에 대한 실험결과를 나타낸 그림이다. 유출유량 10%와 같은 열/물질전달 분포를 보이고 있다. 그러나 유출유량의 증가는 옆벽 부분에 높은 열/물질전달 영역이 10%인 경우보다 작게 나타나지만 빠른 유속 및 전연면 전체에 고르게 충돌하기 때문에 전체적으로는 더 높은 열/물질전달 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다. 유출홀 하류에서도 10%의 경우보다 높고 넓은 영역에서 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a)은 전연면의 횡방향 평균 열/물질전달 분포를 실험구간 전체에 걸쳐 유출유량의 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 열/물질전달 실험 특성으로 유출유량 0%, 10%, 20% 모두 첫 부분 크게 감소하는 것을 알 수 있으며, 유출유량 10%, 20%인 경우에 유출유량이 0%와는 크게 다른 특성을 보이고 있다. 이는 압력이 상대적으로 낮은



(a) Leading surface



(b) Trailing surface

Fig. 6 Line-averaged  $\overline{Sh}_L/Sh_0$  for the change of exit mass flow rate at  $Ro=0.2$ .

유출홀을 통한 유동의 유입현상 때문이며 미쳐 유출홀을 통해 빠져나가지 못한 유체의 충돌로 인해 유출홀 하단부에 높은 열/물질전달계수를 형성시킨다. 또한 코리올리력의 작용으로 유동이 옆벽을 타고 전연면에 충돌하는 영역의 확대가 전체  $Sh_L/Sh_0$  값을 높이는 결과를 낳고 있다. 또한 유출홀 하단부에 피크를 형성한 후에 큰 폭으로 감소하는 이유는 유출홀과 유출홀 사이에서 유동이 다시 발달해 가기 때문이다. 하류로 진행하면서 평균적인 열/물질전달 비가 점차 작아지는데, 이는 유동이 하류로 진행하면서 유출홀을 통해 유동의 절대량이 감소하기 때문으로 사료된다. 또한 유출유량이 증가하면서 넓은 영역에 높은 열/물질전달계수가 분포하기 때문에 전체적인 평균도 유출량이 증가할수록 커지게 되었다. 또한 후연면에서의 열전달 분포를 나타내는 Fig. 6 (b)을 보면 유출이 없는 경우와는 다르게 유출이 있는 경우에 열/물질전달계수비가 감소하였다. 이는 전연면의 유출홀을 통한 주유동의 감소로 전체적으로 감소한 것으로 보이며, 하류로 갈수록 유출홀이 없는 경우와의 차이가 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 덕트가 회전수 0.2로 회전할 때 구간  $2.6 \leq x/D_h \leq 4.4$ 에서의 중앙선 ( $y/D_h = 0.0$ )에서의 국소적인 열/물질전달계수를 나타낸 그림이다. 유출유량이 0%인 경우에는 코리올리력의 영향으로  $Sh/Sh_0$  값이 1.0 미만이며 유출유량 10%, 20%인 경우에는 홀 다음 영역에서 큰 폭으로 상승한 후 유동이 발달해 가며 감소한다. 여기서 나타났

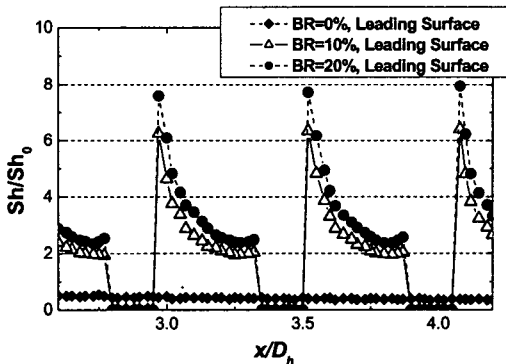


Fig. 7 Local Sherwood number ratio ( $Sh/Sh_0$ ) of the center-line for the change of bleed flow rate at  $Ro=0.2$ .

듯이 유출유량이 증가하면 미쳐 빠져나가지 못한 유동의 충돌 또한 증가하여 열/물질전달계수비가 증가한 것을 볼 수 있다. 중앙선에서의 국소 열/물질전달계수는 앞서 Fig. 6의 선평균된 열/물질전달계수의 경향과는 다르게 하류로 진행할수록 유출홀 직후, 최대값이 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 덕트의 하류로 갈수록 전체 유량은 감소하여 평균적인 열전달은 감소하나, 이와 같은 유량의 감소로 인해 유출홀 근처에서의 흡입력은 강해지게 되어 유출유량의 충돌이 국소적으로 강해지는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수력직경 40 mm인 정사각 유로에서 유출홀이 설치된 경우의 열/물질전달 특성을 유출유량 변화에 대하여 고찰하였다. 국소 열/물질전달계수의 분포와 횡방향 평균 열/물질전달계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 유출유량이 0%인 경우에 회전에 따른 코리올리력의 작용으로 한 쌍의 2차 유동이 발생하여 그 유동 특성에 따른 열/물질전달 분포를 형성하였다. 그러나 유출유량이 10%, 20%인 경우에 코리올리력에 의한 한 쌍의 2차 유동뿐만 아니라 유출홀로 유입되는 유동 또한 발생하고 이러한 유동들이 복합적으로 작용하여 전연면의 열/물질전달계수를 높이는 결과를 얻었다.

(2) 유출홀을 통한 유출유량이 존재할 경우 유출홀 하단부에서 열전달의 최대값을 형성하고 유량의 감소로 인해 덕트 하류로 갈수록 유출홀 근처에서는 국소적으로 열전달계수가 점차 증가하는 특성을 갖는다. 하지만, 덕트 하류로 진행할수록 전체적인 유량이 감소하게 되어 평균적인 열전달은 감소하게 된다.

(3) 유출유량이 10%인 경우보다 20%인 경우에 유출홀 하단부에 충돌하는 유동의 강도가 더 크며 후연면으로 편향된 유동이 전연면에 충돌하는 강도는 약하지만 넓은 영역에 고르게 충돌함에 따라 높은 열/물질전달계수값을 갖는 것을 확인하였다.

(4) 전연면에 설치된 유출홀은 유출되는 유동의 충돌로 인해 열/물질전달계수를 높이는 작용을 하며 회전에 의한 코리올리력은 전연면의 열/물질전달계수값을 낮추는 작용을 하기 때문에 어

는 회전수까지는 전체적으로 평균 열전달이 상승하지만, 회전수가 더욱 증가하면 크게 열전달이 감소하게 된다.

### 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., Steinthorsson, 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.