

< 논문 >

## 채널회전 및 유출유동이 90도 요철이 설치된 사각채널 내 열/물질전달 특성에 미치는 영향

박석환\* · 전윤흥\* · 김경민\* · 이동현\* · 조형희†  
(2006년 9월 7일 접수, 2006년 10월 28일 심사완료)

### Effects of Channel Rotation and Bleed Flow on Heat/Mass Transfer Characteristics in a 90° Ribbed Square Channel

Suk Hwan Park, Yun Heung Jeon, Kyung Min Kim, Dong Hyun Lee and Hyung Hee Cho

**Key Words:** Bleed Hole(유출홀), Coriolis Force(코리올리력), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌승화법), Rotating Channel(회전 채널)

#### Abstract

The present study investigated the effects of channel rotation and bleed flow on heat/mass transfer in a 90° ribbed square channel. The bleed holes were located between the rib turbulators on the leading surface and those on the trailing surface case by case. The tests were conducted under the conditions of various bleeding ratios (0.0, 0.2, 0.4) and rotation numbers (0.0, 0.2, 0.4) at Re=10,000. The results suggested that heat/mass transfer characteristics were influenced by the Coriolis force, bleed flow and bleed hole location. The heat/mass transfer on the surface with bleed flow was more increased than that without bleed flow, but that on the opposition surface was decreased. Those were due to the effects of the tripping flow and the diminution of main flow rate respectively. The results also showed that the heat/mass transfer characteristics were different according to bleed hole location and channel rotation.

#### 기호설명

BR : 유출비,  $\dot{m}_{bleed}/\dot{m}_{inlet}$   
 $d$  : 유출홀 직경  
 $D_h$  : 유로수력직경  
 $D_{naph}$  : 물질확산계수  
 $H$  : 유로 높이  
 $h_m$  : 물질전달계수

$\dot{m}_{bleed}$  : 유출유량  
 $\dot{m}_{inlet}$  : 유입유량  
 Nu : Nusselt 수  
 $p$  : 유출홀 간 간격  
 $R$  : 유로 최대 반경  
 Re : 수력직경기준 Reynold 수,  $D_h \rho u_b / \mu$   
 Ro : Rotation 수,  $D_h \Omega / u_b$   
 Sc : Schmidt 수,  $\nu_{air} / D_{naph}$   
 Sh : Sherwood 수,  $h_m D_h / D_{naph}$   
 $Sh_0$  : 요철이 없는 원형관에서의 Sh 수  
 $\overline{Sh}_L$  : 횡방향(y) 평균 Sherwood 수  
 $\overline{Sh}_R$  : 구간 평균 Sherwood 수  
 $u_b$  : 주유동 평균속도

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

- $W$  : 유로 너비  
 $x$  : 주유동 방향 거리  
 $y$  : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리  
 $z$  : 덕트 바닥면으로부터의 높이

#### 그리스 문자

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

## 1. 서론

가스터빈 연소기의 연소가스로 인한 높은 열부하로부터 블레이드를 보호하기 위해 다양한 냉각 방법이 꾸준히 연구되어 왔다. 그 중 내부유로냉각에 관한 연구는 가스터빈 블레이드 냉각기술개발 초기부터 많은 연구자들에 의해 꾸준히 연구되고 있다.<sup>(1-4)</sup> 이들은 주로 유로 내 난류촉진체, 다중유로, 유로회전에 의한 영향들을 알아보기 위해 유로 내 요철 및 덩플 등을 설치하여 곡관부동 회전하는 환경에서 여러 위치에서의 열/유동 및 열전달을 측정하였다.

하지만, 터빈입구온도가 증가함에 따라 열부하가 증가되었고, 내부유로 냉각만으로는 더 이상 블레이드를 보호하기 힘들어졌다. 따라서 현재 대부분의 가스터빈 블레이드는 높은 열 부하로부터의 보호를 위해 내부유로냉각과 막냉각을 동시에 적용하고 있다. 그러나 이와 같은 복합적인 냉각 방법은 블레이드 막냉각홀 주위에서 열응력을 발생시키고 있다. 이와 같은 복합적인 냉각방법으로 인한 파손을 줄이고 성능개선을 위해서는 막냉각을 사용하는 블레이드 내 열/유동 현상 및 국소적인 열전달분포 특성을 이해 할 필요가 있다.

따라서 최근에 내부관 냉각과 막냉각을 함께 고려한 연구가 이루어지고 있는데, 그 중 Douglas 및 Philip<sup>(5)</sup>은 정지한 1차 유로에 요철과 유출홀을 설치하여 유출홀 후단부의 질량유량계를 통해 유출 유량을 변화시켜가며 열전달 특성을 고찰하였다. Ekkad 등<sup>(6)</sup>은 정지한 2차유로를 가진 덕트에 ThermoChronic Liquid Crystal를 이용하여 유출홀과 요철의 형상을 변화시켜가며 열전달 특성을 고찰하였고, 이들은 또한 가시화를 통해 유동 특성에 대한 이해를 높였다. Rigby 등<sup>(7)</sup>과 Stephens 등<sup>(8)</sup>은

수치해석을 통해 유출홀과 요철이 설치된 유로에서 열전달 특성에 대하여 고찰 하였으며, 유출홀 출구부분에서 복잡한 유동구조를 밝혀내었다. Taslim 등<sup>(9)</sup>은 경사진 덕트에서 요철과 유출홀의 영향에 대하여 요철의 크기를 바꾸어가며 고찰하였다. Byerley 등<sup>(10)</sup>은 유출홀 입구에서 열전달 특성에 대하여 실험과 수치해석을 병행하였고, Shen 등<sup>(11)</sup>은 충돌각 90도인 요철과 요철 중간에 엇갈린 배열의 유출홀이 설치된 유로에서의 열전달 특성에 대하여 고찰 하였다.

하지만, 이와 같은 연구들은 대부분 정지한 유로에서 유출유동이 열전달 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하여, 회전익과 같은 회전상태에서의 유출유동의 영향에 따른 열전달 특성뿐만 아니라 국소 열/물질전달계수의 분포를 알 수 있는 자료는 부족한 상황이다. 따라서 Kim 등<sup>(12,13)</sup>은 요철이 없는 매끈한 유로 내 전연면에 유출홀이 설치된 회전하는 사각 유로에서 회전수와 유출유량 변화에 따른 유동 및 열전달 특성에 대하여 고찰 하였다.

그리고 본 연구에서는 열전달을 더욱 향상시키기 위해 90도 요철을 설치한 회전유로 내 유출홀 위치(전연면 혹은 후연면) 및 유출유량, Ro 수 변화에 따른 열/물질전달 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 유출 회전장치에 대한 개략도를 나타내며, 자세한 구성은 Cho 등<sup>(4)</sup> 및 Kim 등<sup>(12)</sup>에 제시되어 있다.

Fig. 2는 실험에 사용되는 덕트의 형상을 나타내고 있다. 덕트는 1:1의 중횡비를 갖는 정사각형이고, 전연면 또는 후연면에 유출홀이 설치된 1차 유로로 되어 있다. 덕트의 수력직경( $D_h$ )은 40.0 mm이고, 수력직경 대비 최대회전반경( $R/D_h$ )은 14.43이다. 유출홀의 직경( $d$ )은 4.5 mm이고, 유출홀 간격 대 유출홀 직경비( $p/d$ )는 4.9이다. 정사각 요철은 전연면과 후연면에 설치되어있고, 요철 높이 대 수력직경비( $e/D_h$ )는 0.055이며, 요철과 요철의 간격은 요철 높이의 10.0배이다. 회전 중심축으로부터 8.45  $D_h$  떨어진 위치에 나프탈렌표면이 시작되며, 나프탈렌표면이 시작되는 지점에서 횡방향 중심을 원점으로 설정하였다. 나프탈렌 측정

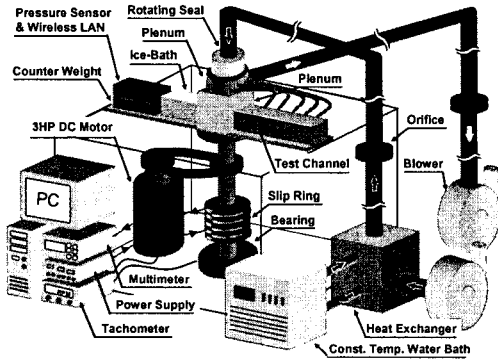


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

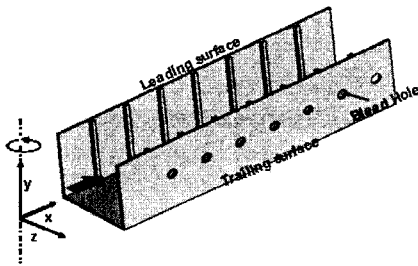


Fig. 2 Geometry of the test channel

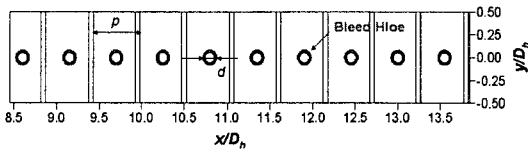


Fig. 3 Coordinate system of the surface with bleed holes

영역은 주유동 방향(x)으로는 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 지점까지  $8.45 \leq x/D_h \leq 13.8$ 이며, 횡방향(y)으로는 유로의 외벽부터 반대편 외벽까지  $-0.5 \leq y/D_h \leq 0.5$ 에 해당된다. Fig. 3과 같이 유출면 시편의 길이는  $5.35 D_h$ 이며, 실험 케이스별로 전연면 혹은 후연면에만 유출홀을 설치하였다. 전·후연면에 설치된 시편에는 나프탈렌이 캐스팅되어 있고, 이는 열전달에서의 등온가열면에 상사되며, 유출홀은 총 20개로써 10개는 나프탈렌 시편에 설치되었고, 나머지는 유동의 발달구간에 설치되었다.

2.2 실험결과 처리 방법

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였

으며, 자세한 실험결과 처리 과정은 Cho 등<sup>(4)</sup>에 제시되어 있다. 나프탈렌이 코팅되어있는 면의 높이를 실험 전과 후에 측정하여 높이차로부터 국소 물질전달계수를 구하고, 이로부터 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수를 구할 수 있다.

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

이 때,  $D_{naph}$ 는 공기중에서의 나프탈렌 확산계수이며, 물성치는 Goldstein과 Cho<sup>(14)</sup>에 의하여 제시된 값을 이용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 Kline과 McClintock<sup>(15)</sup>의 방법에 의하여 95% 신뢰수준에서 7.76%의 값을 갖는다. Nusselt 수는 열전달과 물질전달의 상사성 관계식 [난류유동장에서  $Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4}$ ]에 의해 계산될 수 있다.

본 연구에서는 물질전달 실험결과를 무차원 물질전달 계수의 비( $Sh/Sh_0$ )로 나타내었다. 이때  $Sh_0$ 는 McAdams<sup>(16)</sup>에 의해 제시된 정지한 매끈한 원형관내의 완전발달 난류 유동장에서의 물질전달 계수로서 다음과 같이 표현된다.

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

또한, 각 지점에서 얻어진 Sh값들을 해당 횡방향(y) 평균한 결과를  $\overline{Sh}_L$ 과 구간 평균한 결과를  $\overline{Sh}_R$ 로 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유출유동이 없는 유로 내 열/물질전달

Fig. 4는 유출유동이 없는 경우에 대하여 Ro 수의 변화에 따른  $Sh/Sh_0$  분포를 나타내고 있다. 여기서 정지한 경우[Fig. 4(a)], 국소적인 물질전달계수비 분포는 완전 발달된 형상을 보이고 있으며, 전연면과 후연면에 거의 동일한 물질전달 분포가 나타났다. 유로가 회전하는 경우[Fig. 4(b)]는 회전에 의해 코리올리력(Coriolis force)이 발생하여 후연면 중앙의 열/물질전달이 크게 상승하였다. 또한 전연면의 경우 회전에 의한 이차유동으로 인해 벽면에서 열/물질전달은 다소 상승하였지만, 전체적인 열/물질전달은 감소하였다.

Fig. 5는 Ro 수에 따른 전·후연면에서의 유로 횡방향으로의 평균 물질전달계수비를 나타낸다. 유동방향으로의 물질전달 분포에서 유동의 재부

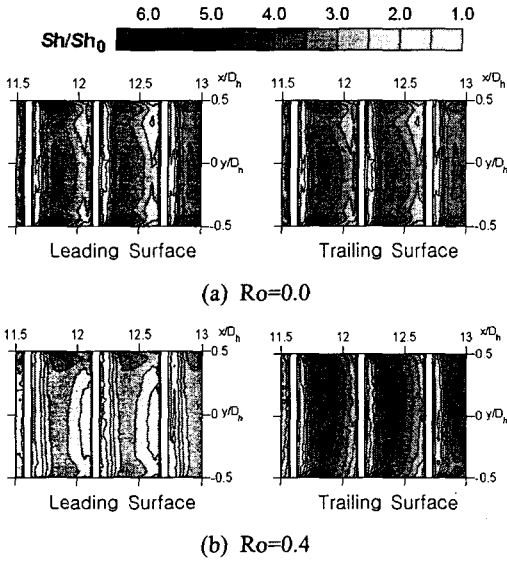


Fig. 4  $Sh/Sh_0$  distributions in the channel without bleed flow

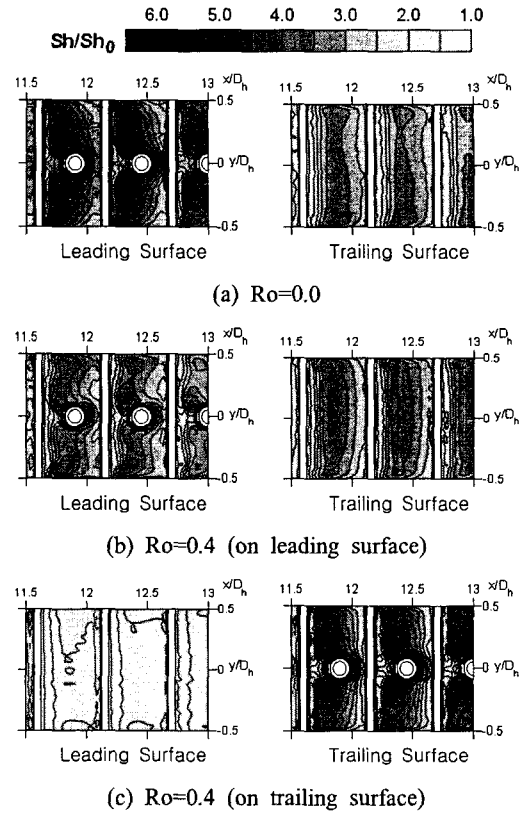


Fig. 6  $Sh/Sh_0$  distributions in the channel with bleed flow ( $BR=0.4$ )

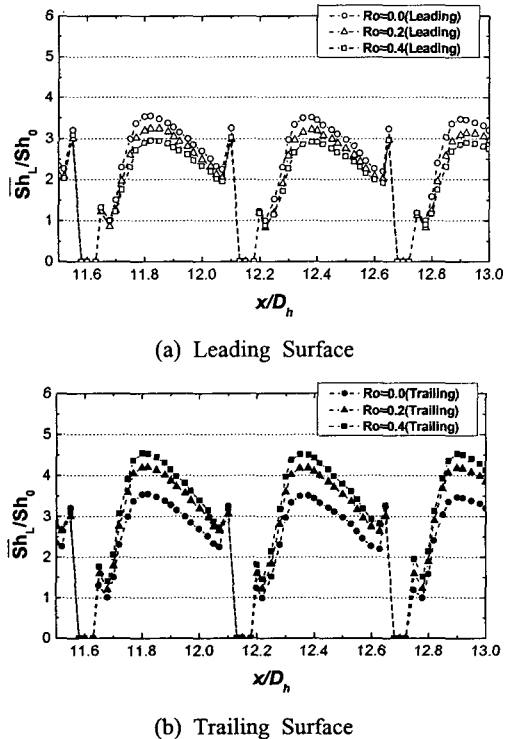
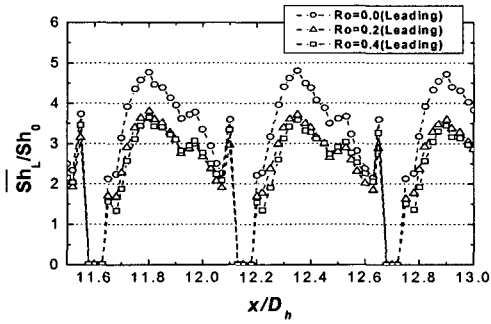


Fig. 5 Spanwise averaged  $Sh/Sh_0$  in the channel without bleed flow

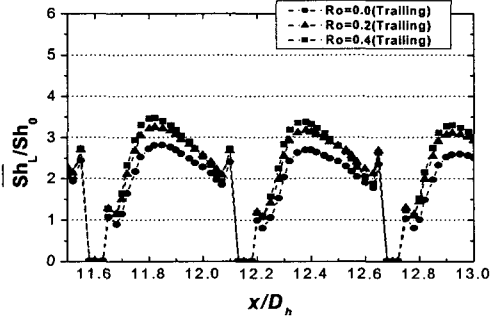
작으로 인해 요철과 요철 1/3지점에서 가장 높은 물질전달 계수가 나타났으며, 유동의 완전발달로 인해 점차 감소한 후 요철 직전에서 유동의 재순환으로 인해 높은 값이 나타나는 경향을 보였다. 또한,  $Ro$  수가 증가함에 따라 후연면으로 주유동이 편향되어 전연면의 물질전달계수 비는 점차 감소하였지만, 후연면은 증가하였다. 여기서, 후연면의 열전달은 다소 크게 상승한 반면에, 전연면의 열전달은 후연면에 비해 그 감소 비율이 낮았는데, 이는 회전으로 인해 이차유동이 생성되어 전연면 벽면근처에서 열전달을 향상시키고 전체적으로 난류강도가 증가하였기 때문이다.

3.2 유출유동이 있는 유로 내 열/물질전달

Fig. 6은 유출홀이 설치된 덕트 내 유출유량비 ( $BR$ )가 0.4일 때 정지한 경우[Fig. 6(a)]와 유출홀이 전연면에 설치되어 회전하는 경우[Fig. 6(b)]



(a) Leading Surface



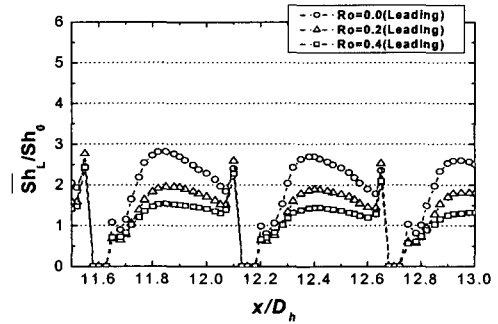
(b) Trailing Surface

Fig. 7 Spanwise averaged  $Sh/Sh_0$  in the channel with bleed flow ( $BR=0.4$ ) through the leading surface

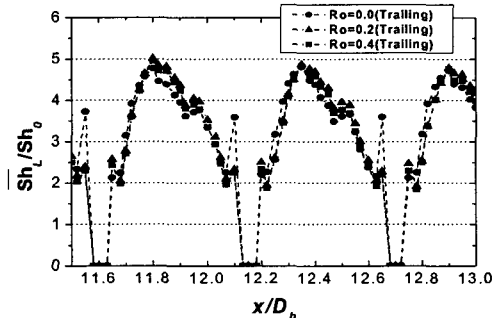
및 후연면에 설치되어 회전하는 경우[Fig. 6(c)]에 대해서 전·후연면에서의 국소적인  $Sh/Sh_0$  분포를 나타내었다.

정지한 유로[Fig. 6(a)]에서와 같이, 유출홀 주위에서 유출유동으로 인해 높은 물질전달 분포가 나타났다. 특히, 유출홀 양 옆에서 유출홀로 강하게 유동이 흡입되면서 높은 물질전달 분포가 보였고, 유출홀 직후에서 미처 유입되지 못한 유동(Tripping flow)의 충들로 인해 높은 물질전달계수를 가졌다. 후연면의 경우에는 Fig. 4(a)와 비교하였을 때 물질전달계수비가 감소하였는데, 이는 전체 주유동의 유량이 감소하였기 때문이다.

전연면에 유출유동이 있고 유로가 회전하는 경우[Fig. 6(b)], 전·후연면의 열/물질전달 분포는 코리올리력으로 인해 발생하는 이차유동과 유출유동으로 인한 영향이 동시에 나타났다. 즉, 회전으로 인해 전연면의 벽면 근처에서 이차유동의 충들로 인해 높은 물질전달계수가 나타났으며, 후연면으로 치우친 유동으로 인해 후연면의 중앙에



(a) Leading Surface



(b) Trailing Surface

Fig. 8 Spanwise averaged  $Sh/Sh_0$  in the channel with bleed flow ( $BR=0.4$ ) through the trailing surface

서 높은 물질전달계수가 나타났다. 또한, 유출유동으로 인해 정지한 경우보다는 그 영역이 좁아졌지만, 유출홀 근처에서 높은 열/물질전달 분포가 나타났다.

후연면에 유출유동이 있고 유로가 회전하는 경우[Fig. 6(c)], 전연면의 열/물질전달 분포는 Fig. 4(b)의 전연면과 같이 유출유동이 없는 회전유로의 전연면과 비슷한 분포를 보였고, 후연면의 열전달 분포는 Fig. 6(a)의 전연면과 같이 유출유동이 있는 정지된 면에서의 분포와 비슷한 경향이 나타났다. 다만, 전연면은 전체적으로 물질전달계수비가 Fig. 4(b)의 전연면 보다 더 낮게 나타났지만, 후연면은 Fig. 6(a)의 전연면과 비슷하거나 약간 높게 나타났다.

Fig. 7은  $BR=0.4$ 로 유출홀이 전연면에 설치된 경우,  $Re$  수에 따른 전·후연면에서의 유로의 횡방향으로 평균한 물질전달 계수비 분포를 나타낸 그림이다.  $Re$  수가 증가함에 따라, 전연면의 물질전달계수는 감소하지만, 후연면의 물질전달계수는

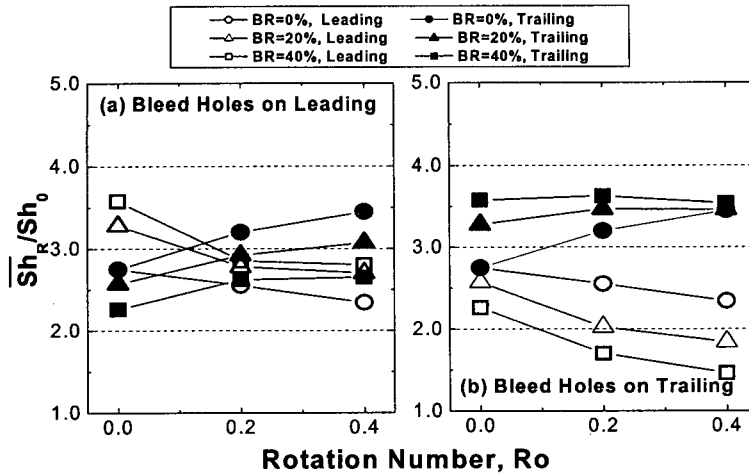


Fig. 9 Regional averaged  $Sh/Sh_0$  ( $10.25 \leq x/D_h \leq 13.5$ ) at various rotation numbers for all tests in the  $90^\circ$ -deg. channel

증가하였다. 이는 유출이 없는 경우와 마찬가지로 회전으로 인해 코리올리력이 작용하여 후연면으로 유동을 치우치게 하여 열/물질전달을 향상시키지만, 전연면의 열/물질전달은 감소시키기 때문이다. 또한,  $Ro$  수가 증가함에 따라, 후연면으로 주 유동이 많이 치우침에도 불구하고  $Ro$  수 0.2 이상에서의 전연면의 물질전달계수 차가 거의 나타나지 않았다. 이는 전체적인 유량은 감소하였지만, 유출홀 근처 열/물질전달 분포는 유출유동에 의해 홀 근처에서 높은 열/물질전달이 일어나기 때문이다.

Fig. 8은  $BR=0.4$ 로 유출홀이 후연면에 설치된 경우,  $Ro$  수에 따른 전·후연면에서의 유로의 횡방향으로 평균한 물질전달 계수비 분포를 나타낸 그림이다.  $Ro$  수가 증가함에 따라, 전연면의 물질전달계수는 Fig. 7에 비해 크게 감소하였지만, 후연면의 물질전달계수는 거의 일정하였다. 이는 벽근처에서 회전에 의해 후연면으로 치우친 유동이 유출홀로 인한 유동보다 그 영향이 작기 때문이다. 즉, 회전에 의해 유동이 후연면으로 많이 치우칠지라도 홀로 흡입되는 유체의 양이 일정하기 때문이다. 여기서, 전연면에서의 물질전달계수의 급격한 감소는 주유동의 유량 감소와 코리올리력에 의한 유동의 치우침 때문이다.

Fig. 9는 유출홀이 위치한 케이스별로  $Ro$  수 및 유출유량의 변화에 따른 구간  $10.25 \leq x/D_h \leq 13.5$ 에서 평균된 물질전달계수비를 나타낸 그림이다.

Fig. 9(a)는 전연면에 유출홀이 있는 경우를 나타낸다. 정지한 경우,  $90^\circ$  요철로 인해 원형관에서의 완전발달계수보다 2.7배 이상 물질전달계수가 향상되었으며, 유출로 인해  $BR$ 이 20%인 경우에는 20%,  $BR$ 이 40%인 경우에는 30%정도 열/물질전달이 향상되었다.  $Ro$  수가 증가함에 따라 코리올리력으로 인해 유동이 후연면으로 치우치면서 전연면은 열/물질전달이 감소하지만, 후연면은 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 유출비가 증가함에 따라 전연면의 열/물질전달은 점차 증가하였지만, 후연면은 감소하였다. 이는 유출에 의해 유출홀 근처에서 열전달이 향상되었기 때문에 전연면의 열/물질전달은 상승하였지만, 전체적인 유량의 감소로 인해 후연면의 열/물질전달은 감소한 것이다.

Fig. 9(b)는 후연면에 유출홀이 있는 경우를 나타낸다.  $Ro$  수가 증가함에 따라 각 유출유량에서 전연면의 열/물질전달은 크게 감소하였지만, 후연면은 유출홀이 있을 때 유출유동에 의한 영향이 크기 때문에 평균 물질전달계수는 거의 비슷하게 나타났다. 또한 각  $Ro$  수에서 유출유량이 증가함에 따라 주유동의 감소로 인해 전연면의 평균 열/물질전달계수는 감소하였지만, 후연면은 홀근처에서의 유출유동으로 인해 열/물질전달이 상승하였다. 그러나  $Ro=0.4$ 에서는 각 유출유량에서의 평균 열/물질전달이 비슷하게 나타났는데, 이는 유출유량이 많아져 전체유량이 감소하였기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 90도 요철이 설치된 회전하는 사각유로에서 전연면 혹은 후연면에 설치된 유출홀을 통한 유출유량과 유로의  $Ro$  수 변화에 따른 열/물질전달특성을 고찰하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유출 유동이 없는 요철이 설치된 회전하는 유로에서의 열/물질전달은 원형관에서의 완전발달 계수보다 약 2.7배 높게 나타났으며, 회전수가 증가함에 따라, 회전으로 인한 이차유동이 강해져 전연면의 열/물질전달은 점차 감소하였지만, 후연면에서는 크게 증가하였다.

(2) 전연면에 유출유동이 있는 경우, 유출유동으로 인해  $BR$ 이 20%, 40%일 때 각각 열/물질전달이 20%, 30%씩 증가하였다. 또한,  $Ro$  수가 증가함에 따라 코리올리력으로 인해 전연면은 열/물질전달이 감소하지만, 후연면은 증가하였다. 그리고 유출비가 증가함에 따라 전연면의 열/물질전달은 유출에 의한 열/물질전달이 증가하여 전체적인 열/물질전달 또한 증가하였다.

(3) 후연면에 유출유동이 있는 경우,  $Ro$  수가 증가함에 따라 전연면의 경우 전체적으로 물질전달 계수는 크게 감소하지만, 후연면에서는 유출유동의 지배적인 영향으로 인해 물질전달 계수는 비슷하게 나타났다. 유출유량비가 증가함에 따라, 전연면은 모든  $Ro$  수에서 유량감소로 인해 열/물질전달이 더욱 크게 감소하였고, 후연면의 경우는 유출로 인해 유량이 많이 감소하여  $Ro=0.4$ 에서는 모든 유출비에서 열/물질전달이 비슷하게 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 에너지관리공단 주관 에너지기술학술진흥 사업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Kukreja, R. T., Lau, S. C. and McMillin, R. D., 1993, "Local Heat/Mass Transfer Distribution in a Square Channel with Full and V-shaped Ribs," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp.

2013~2020.

(2) Agliga, D. A., 1994, "Convective Heat Transfer Distributions over Plates with Square Ribs from Infrared Thermography Measurements," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 3, pp. 363~374.

(3) Acharya, S., Myrum, T., Qiu, X. and Sinha, S., 1997, "Developing and Periodically Developed Flow, Temperature and Heat Transfer in a Ribbed Duct," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 461~479.

(4) 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.

(5) 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.

(6) 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.

(7) 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.

(8) 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.

(9) 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 Passges with Tapered Turbulators," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 281~289.

(10) 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.

(11) 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," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 428~434.
- (12) Kim, S. I., Kim, K. M., L, D. H., Jeon, Y. H., Cho, H. H., 2005, "Change of Heat Transfer Characteristics in a Roating Channel of Square Duct at Wall with Bleed Holes(I)," *Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration Eng.*, Vol. 17, pp. 898~906.
- (13) Kim, S. I., Kim, K. M., L, D. H., Jeon, Y. H., Cho, H. H., 2005, "Change of Heat Transfer Characteristics in a Roating Channel of Square Duct at Wall with Bleed Holes(II)," *Korean J. Air-Conditioning and Refrigeration Eng.*, Vol. 17, pp. 907~913.
- (14) 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.
- (15) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (16) McAdams, W. H., 1942, "Heat Transmission, 2nd Edition," McGraw-Hill, New York.