

< 논문 >

# 유출유동 및 각도진 요철이 회전하는 사각덕트 내 열전달분포에 미치는 영향

박석환\* · 전윤흥\* · 김경민\* · 이동현\* · 조형희†  
(2006년 9월 7일 접수, 2006년 11월 10일 심사완료)

## Effects of Bleed Flow and Angled Ribs on Heat Transfer Distributions in a Rotating 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 square channel with 45° rib turbulators. 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 bleed 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, decrement of main flow rate, secondary flow by angled ribs and bleed hole location. As the bleed ratio (BR) increased, the heat/mass transfer decreased on both surfaces due to the reduction of main flow rate. With increment of the rotation number, heat/mass transfer also decreased and almost the same because the reattachment of the secondary flow induced by angled ribs was weakened on the leading surface and the secondary flow was disturbed on the trailing surface by the Coriolis force.

#### 기호설명

BR : 유출비,  $\dot{m}_{bleed}/\dot{m}_{inlet}$   
 $d$  : 유출홀 직경  
 $D_h$  : 유로수력직경  
 $D_{naph}$  : 물질확산계수  
 $H$  : 덕트 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,  $D_h u_b / \nu$   
Ro : Rotation 수,  $D_h \Omega / u_b$   
Sc : Schmidt 수,  $\nu_{air} / D_{naph}$   
Sh : Sherwood 수,  $h_m D_h / D_{naph}$   
 $Sh_o$  : 요철이 없는 원형관에서의 Sh 수  
 $\overline{Sh}_R$  : 구간 평균 Sherwood 수  
 $u_b$  : 주유동 평균속도  
W : 유로의 폭 넓이

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

- $x$  : 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 연소가스의 터빈 입구 온도는 꾸준히 상승하여 현재는 1500℃ 이상으로 고온 금속의 허용 온도를 크게 상회하여 운전되고 있다. 이러한 고온의 환경으로부터 베인과 블레이드를 보호하기 위해, 압축기에서 고압 유체를 추출하여 막냉각, 층돌제트냉각, 내부관 대류냉각 등의 냉각 기법을 이용하여 내부 및 외부 표면을 보호하는 방법들이 사용되고 있다. 이 중, 회전하는 블레이드를 냉각하기 위하여 내부유로 내 요철을 설치한 냉각 방법이 주로 사용되고 있지만, 이 방법 하나만으로는 높은 입구온도에서 블레이드를 보호하기는 힘들다. 따라서 최근에는 Fig. 1과 같이 내부유로냉각과 막냉각 방법을 동시에 사용하여 더 좋은 성능을 이끌어 내고 있으며, 많은 연구자들에 의해 연구되어져 왔다.<sup>(1-7)</sup>

이 들은 유로 내에서 유출유량 및 유출홀의 위치, 요철배열 및 형상 등의 영향을 연구하였으며, 각 각의 인자가 유동 및 열전달에 어떠한 영향을 미치는지 중점적으로 연구하였다. 하지만, 이들은 대부분 정지한 유로를 대상으로 연구하여 실제 블레이드와 같이 회전하는 환경 하에서의 내부유로 내의 열전달 특성을 알 수 있는 자료가 부족하였다.

따라서 본 연구에 앞서, Kim 등<sup>(8,9)</sup>은 전연면에 유출홀이 설치된 유로 내 유출유량 및 유로의 회전이 유동 및 국소적인 열전달 분포에 어떠한 영향을 미치는지 밝혀내었다. 또한, 이 들은 유출홀로 미쳐 빠져나가지 못한 유동(Tripping flow)에 의해 유출홀 직후에서 높은 열전달이 일어나며, 유로의 회전으로 인해 코리올리력이 작용하여 전·후연면에 다른 열전달 분포가 나타난다는 것을 밝혀내었다. 그리고 Park 등<sup>(10)</sup>은 90도 요철과 유

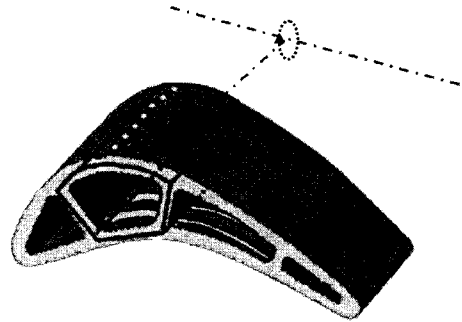


Fig. 1 Schematic of gas turbine blade

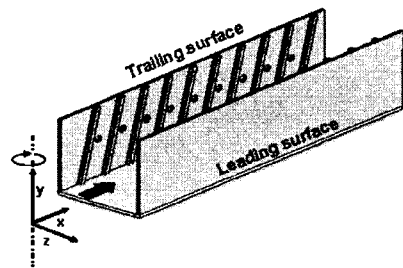


Fig. 2 Geometry of the test channel

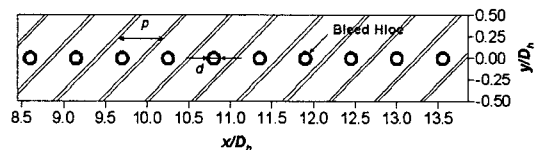


Fig. 3 Coordinate system of surface with bleed holes

로회전 및 유출유동이 국소적인 열전달 분포에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였다.

본 연구에서는 각도진 요철로 인한 이차유동이 회전하는 유출홀이 설치된 유로 내 물질전달 분포에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하기 위해, 45도 요철이 설치된 유로 내 유출홀을 전연면 혹은 후연면에 위치시켜 유출유량 및 Ro 수 변화에 따른 열/물질전달 특성을 연구하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 실험 장치

유출 회전장치에 대한 자세한 구성은 Kim 등<sup>(8,9)</sup> 및 Park 등<sup>(10)</sup>에 제시되어 있으며, Fig. 2는 실험

에 사용되는 덕트의 형상을 Fig. 3은 시편의 좌표계를 나타내고 있다. 덕트는 1:1의 중형비를 갖는 정사각형이고, Fig. 1과 같은 블레이드에 흡입면 및 압력면에 설치된 유출홀을 모사하기 위해 1차 유로로 된 유로를 제작하였다. 여기서, 흡입면은 유로의 전연면에 해당하며, 압력면은 후연면에 해당한다. 실험에 사용된 유로의 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. 경사 요철은 전연면과 후연면에 설치되어있고, 요철 높이 대 수력직경비( $e/D_h$ )는 0.055이며, 요철과 요철의 간격은 요철 높이의 10배이다. 회전 중심축으로부터  $8.45 D_h$  떨어진 위치에 나프탈렌표면이 시작되며, 나프탈렌표면이 시작되는 지점에서 횡방향 중심을 원점으로 설정하였다. 나프탈렌 측정영역은 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 케이스 별로 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 발달 구간에 설치되었다.

## 2.2 실험결과 처리 방법

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리 과정은 Kim 등<sup>(8)</sup>에 제시되어 있다. 나프탈렌이 코팅되어있는 면의 높이를 실험 전후로 측정하여 국소 물질전달 계수를 구하고, 이로부터 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수를 구할 수 있다.

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

이 때,  $D_{naph}$ 는 공기중에서의 나프탈렌 확산계수이며, 물성치는 Goldstein과 Cho<sup>(11)</sup>에 의하여 제시된 값을 이용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 Kline과 McClintock<sup>(12)</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 물질전달계수비( $Sh/Sh_0$ )로 나타내었다. 이때  $Sh_0$ 는 McAdams<sup>(13)</sup>에 의해 제시된 정지된 매끈한 원형관의 완전발달 난류 유동장에서의 물질전달계수로서 다음과 같이 표현된다.

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

또한, 각각의 피치 내에서 얻어진 Sh값들을 일정구간에 대하여 평균한 결과를  $\overline{Sh}_R$ 로 나타내었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 유출유동이 없는 유로 내 물질전달분포

Fig. 4는 유출유동이 없는 경우에 대하여 Ro 수 변화에 따른 전·후연면의 국소적인 물질전달 계수 분포를 나타내고 있다. 유로가 정지한 경우 [Fig. 4(a)], 전·후연면의 물질전달 분포는 정지하였기 때문에 같게 나타났다. 국소적인 물질전달 분포는 각도진 요철로 인해 한 쌍의 이차유동이 발생하여, 이 이차유동의 하향류 지점( $y/D_h \leq 0.0$ )에서 높은 물질전달이 일어났으나, 상향류 지점( $y/D_h \geq 0.0$ )에서는 낮은 물질전달 분포가 나타났다.

유로가 회전하는 경우 [Fig. 4(b)], 유로 내 코리올리력이 작용하게 되고, 이로 인해 전·후연면에 물질전달 차가 발생하게 된다. 즉, 회전하는 축에서 바깥으로 빠지는 유동의 경우에 코리올리력은 후연면으로 작용하게 되고 전연면에서 각도진 요철로 인한 이차유동의 재부착을 약하게 만든다. 따라서 전연면의 물질전달은 감소하게 된다. 후연면의 경우 물질전달은 증가하지 않고 정지한 경우와 비슷하게 나타났는데, 이는 회전에 의한 영향보다 후연면에서의 각도진 요철에 의한 이차유동이 더욱 지배적이기 때문이다.

Ro 수가 더욱 증가할 경우 [Fig. 4(c)], 전연면의 물질전달은 더욱 감소하였으나, 후연면의 물질전달은 변화가 나타나지 않았다. 즉, 주유동의 치우침으로 전연면의 재부착이 약해져 물질전달은 감소하였지만, 각도진 요철의 강한 이차유동으로

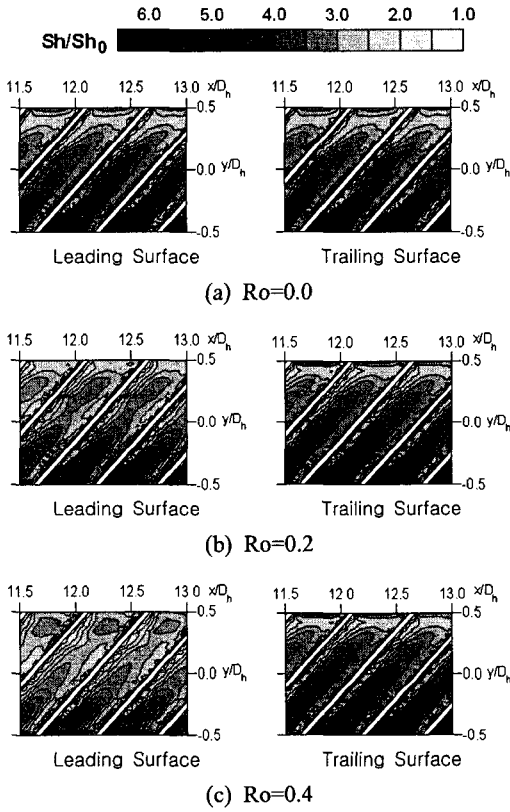


Fig. 4 Sh ratio distributions in the channel without bleed flow

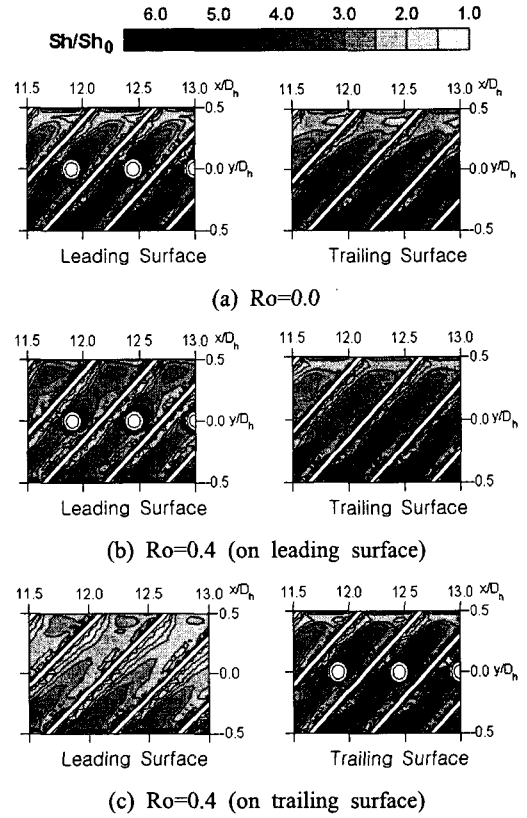


Fig. 5 Sh ratio distributions in the channel with bleed flow (BR=0.2)

인해 후연면의 물질전달은 정지한 경우와 비슷하였다.

### 3.2 유출유동이 있는 유로 내 물질전달분포

Fig. 5는 유출유량비(BR)가 0.2인 경우에 대하여 정지한 경우, 유출홀이 전연면에 설치되어 회전하는 경우, 유출홀이 후연면에 설치되어 회전하는 경우에 국소적인  $Sh/Sh_0$  분포를 나타낸 그림이다.

유로가 정지한 경우[Fig. 5(a)]의 물질전달 분포는 전체적으로는 유출유동이 없는 경우와 비슷한 분포를 가졌다. 하지만, 유출홀이 설치된 면의 경우 홀 근처에서 이차유동의 진행방향과 같은 방향으로 높은 물질전달계수 분포가 나타났는데, 이는 유출홀로 미처 흡입되지 못한 유동이 유출홀 주위에 충돌하여 높은 물질전달이 일어난 것이다.

전연면에 유출홀이 설치된 유로가 회전하는 경우[Fig. 5(b)]는 코리올리력으로 인해 유동이 후연면으로 작용하여, 전연면의 물질전달 계수는 전체적으로 감소하였으며, 유출유동으로 인한 높은 물질전달 분포 또한 감소하였다. 그리고 후연면 역시 정지한 경우보다 물질전달이 감소하였는데, 이는 요철에 의한 이차유동의 강도가 코리올리력에 의해 주유동이 후연면쪽으로 치우치면서 약해졌기 때문이다.

후연면에 유출홀이 설치된 유로가 회전하는 경우[Fig. 5(c)]도 역시 회전과 유량감소로 인해 전연면의 물질전달이 크게 감소하였다. 유출홀이 설치된 후연면의 물질전달은, 정지한 경우의 유출홀이 설치된 면[Fig. 5(a)]과 비슷한 물질전달계수 분포가 나타났다. 이는 회전에 의한 치우친 유동이 각도진 요철에 의한 이차유동을 방해하지만, 유출유동으로 인해 물질전달이 상승하였기

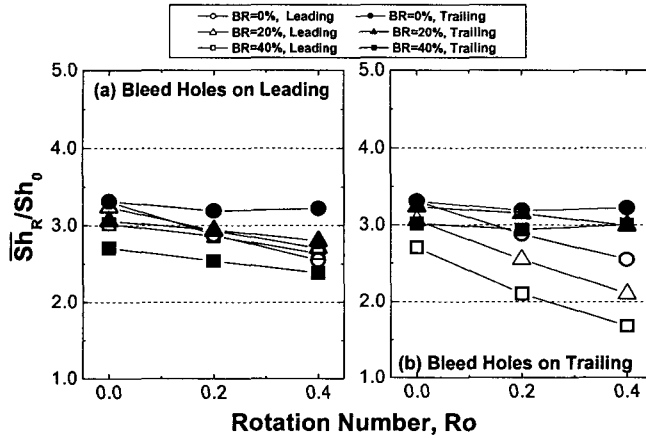


Fig. 6 Regional averaged  $Sh/Sh_0$  ( $10.25 \leq x/D_h \leq 13.5$ ) for all tests in the 45-deg. ribs

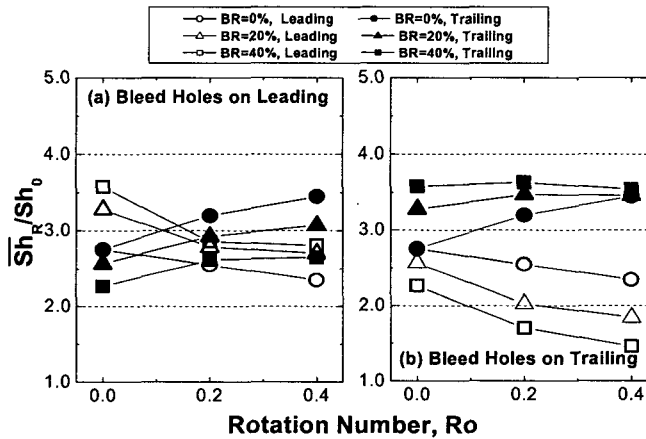


Fig. 7 Heat/mass transfer results by Park et al.<sup>(10)</sup> in the 90-deg. ribbed channel

때문이다.

Fig. 6은 각 유출유량 및  $Ro$  수에서 유출홀이 전연면에 설치된 경우와 후연면에 설치된 경우의 구간 평균된 물질전달계수비를 나타내고 있다. 유출이 없고 정지한 경우는 원형관 내 완전발달된 영역에서의 난류 열전달 계수보다 3.3배 이상 열전달이 향상되었다. 덕트가 회전하는 경우, 주유동이 후연면을 치우치게 되어 전연면의 물질전달은 감소하였고, 후연면은 요철에 의한 강한 이차유동으로 인해 회전으로 인한 영향이 미치지 못해 물질전달이 약간 감소하였다.

전연면에 유출홀이 설치되어 있는 경우[Fig. 6(a)], 유출이 없는 경우와 같이 평균 물질전달계

수는  $Ro$  수가 증가함에 따라 감소하거나 비슷하였다. 또한 유출유량비가 증가함에 따라 전연면의 물질전달은 차이가 크지 않았지만, 후연면의 물질전달은  $BR$ 이 20%일 때 유출이 없을 때보다 10% 감소하였으며,  $BR$ 이 40%일 때는 20% 정도로 크게 감소하였다. 이는 유출유동으로 인해 유출홀 근처에서는 물질전달이 증가하였을지라도, 후연면의 주유동 감소로 인해 물질전달이 크게 감소하기 때문이다.

후연면에 유출홀이 설치되어 있는 경우[Fig. 6(b)], 전연면의 물질전달계수는  $Ro$  수가 증가함에 따라 코리올리력으로 인해 이차유동의 재부착이 약해져 크게 감소하였고, 후연면의 물질전달

계수는 각도진 요철에 의한 강한 이차유동과 유출유동으로 인해 물질전달이 약간 증가하거나 일정하게 나타났다. 또한 유출유량비가 증가함에 따라 전연면의 물질전달은 BR이 20%일 때 10% 정도, BR이 40%일 때 20% 정도로 크게 감소하고, 후연면의 물질전달은 전연면에 비해 각각 5%와 10% 정도로 약간 감소하였는데, 이는 주유동의 감소 때문에 전·후연면 모두 물질전달은 크게 감소하였지만, 후연면의 물질전달은 유출유동에 의해 홀 근처에서 물질전달이 증가하였기 때문이다.

Fig. 7은 Park 등<sup>(10)</sup>에 의해 연구된 90도 요철이 설치된 유로에서의 유출유량 및 Ro 수에 따른 구간 평균된 물질전달계수비를 나타내고 있다. 90도 요철과 45도 요철 설치에 따른 공통점은 유출홀이 설치되지 않은 면의 물질전달이 유출유량비가 증가할수록 감소한다는 것이며, 차이점은 회전으로 인한 코리올리력이 45도 요철에 의해 발생된 이차유동을 방해하여, 후연면의 물질전달이 회전수가 증가함에 따라 증가하지 않는다는 것이다. 또한, 유출홀이 설치된 면 위에서의 물질전달 계수는 45도 요철이 설치된 경우, 유출유량비가 증가함에 따라 점차 감소하였으나, 90도 요철이 설치된 경우는 회전으로 인한 이차유동으로 인해 오히려 물질전달 계수가 증가하였다. 이처럼 유출을 가진 덕트 내 벽면 근처에 열전달 분포에 가장 지배적인 영향을 미치는 변수는 각도진 요철에 의한 이차유동이며, 유출유동으로 인한 열전달 향상이 크지 않은 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 45도 요철이 설치된 회전하는 사각유로에서 전연면 또는 후연면에 설치된 유출홀을 통한 유출유량과 Ro 수 변화가 전·후연면의 열/물질전달 특성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 국소 물질전달계수의 분포와 평균 물질전달계수로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유출 유동이 없는 요철이 설치된 유로에서, 정지한 경우 요철에 의해 한 쌍의 이차유동의 발생하여 상향류가 일어나는 영역에서 낮은 열전달 분포가 나타났고 하향류 영역에서는 높은 열전달 분포가 국소적으로 나타났으며, 원형관에서의 열전달보다 3.3배 이상 증가하였다. 회전하는 경우,

코리올리력으로 인한 후연면으로 치우친 유동으로 전연면에서 물질전달이 감소되었으며, 후연면에서는 각도진 요철에 의한 강한 이차유동으로 물질전달이 모든 Ro 수에서 비슷하게 나타났다.

(2) 전연면에 유출홀이 있는 경우에는 유출이 없는 후연면을 제외한 모든 경우에서 Ro 수가 증가함에 따라 코리올리력으로 인해 평균 물질전달 계수는 감소하였고, 유출유량비가 증가함에 따라 유출유동의 영향으로 전연면의 물질전달은 차이가 크지 않았지만, 후연면에서는 유량감소로 인해 물질전달은 BR이 20%일 때 열전달이 10% 정도 감소하고 BR이 40%일 때 20% 정도 감소하였다.

(3) 후연면에 유출홀이 있는 경우에는 전연면의 물질전달계수는 Ro 수가 증가함에 따라 코리올리력으로 인해 크게 감소하였고, 후연면의 물질전달계수는 거의 일정하였다. 또한 유출유량비가 증가함에 따라 유량 감소로 인해 전연면의 BR이 20%와 40%일 때 각각 10%와 20%씩 물질전달은 크게 감소하였지만, 후연면의 물질전달은 유출유동으로 인한 물질전달 향상으로 BR이 20%와 40%일 때 각각 5%와 10% 정도 감소하였다.

#### 후 기

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

#### 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., Steinhilsson, 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," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 428~434.
- (8) Kim, S. I., Kim, K. M., L, D. H., Jeon, Y. H. and 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.
- (9) Kim, S. I., Kim, K. M., L, D. H., Jeon, Y. H. and 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.
- (10) Park, S. H., Jeon, Y. H., Kim, K. M., Lee, D. H. and Cho, H. H., 2007, "Effects of Channel Rotation and Bleed Flow on Heat/Mass Transfer in a 90° Ribbed Square Channel," *Transaction of the KSME(B)*, Vol. 31, No. 1, pp. 83~90.
- (11) 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.
- (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 Edition," McGraw-Hill, New York.