◎ 논 문

90도 요철이 설치된 회전덕트에서 유출이 열/물질전달에 미치는 영향

박석환* · 전윤흥* · 김경민* · 이동현* · 조형희**

Effects of Bleeding on Heat/Mass Transfer in a Rotating Channel with Transverse Ribs

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 investigates the effects of bleed flow on heat/mass transfer and pressure drop in a rotating channel with transverse rib turbulators. The hydraulic diameter (D_h) of the square channel is 40.0 mm. The bleed holes are located between the rib turbulators on leading surface and the hole diameter (d) is 4.5 mm. The square rib turbulators are installed on both leading and trailing surfaces. The rib-to-rib pitch is 10.0 times of the rib height (e) and the rib height-to-hydraulic diameter ratio (e/D_h) is 0.055. The tests were conducted at various rotation numbers (0, 0.2, 0.4), while the Reynolds number and the rate of bleed flow to main flow (BR) were fixed at 10,000 and 10%, respectively. The results suggest that the heat/mass transfer characteristics in the internal cooling passage are influenced by rib turbulators, bleed flow and the Coriolis force induced by rotation. For the rotating ribbed passage with bleed flow, the heat/mass transfer on the leading surface is hardly affected by bleed flow, but that on the trailing surface decreases due to the diminution of main flow. The results also show that the friction factor decreases with the bleed flow.

1. 서 론

효율적인 냉각 시스템 설계는 높은 성능을 가진 가스터빈엔진 개발에 더욱 더 중요하게 되었다. 터빈 입구 온도 (TIT: Turbine Inlet Temperature)는 터빈 엔진의 열효율을 향상시키기 위하여 꾸준히 증가하였고, 이는 터빈 블레이드에 높은 열부하를 발생시키게 되었다. 블레이드 재질의 최대 허용온도 초과로부터 보호하기 위해 다양한 냉각 방법이 연구되었다. 그 중 내부관 냉각기술은 압축기로부터 냉각유체를 블레이드 내부 유로로 유입하여 강제대류 냉각을 일으켜 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하는 방법이다. 막냉각은 내부유로 내 냉각 유체를 블레이드 표면의 유출홀로 배출시켜 외부 뜨거운 가스와의 접촉을 차단해 블레이드를 보호하는 방법이다. 실제 가스터빈에서

* 연세대학교 대학원 기계공학부
** 연세대학교 기계공학부
책임저자 E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

는 이러한 내부관 냉각과 막냉각이 동시에 쓰이기 때문에 이와 같은 복합적인 열전달 특성을 이해 할 필요가 있다.

따라서 최근에 내부관 냉각과 막냉각을 함께 고려한 연구가 이루어지고 있으며, Douglas 및 Philip[1]은 정지한 1차 유로에 요철과 유출홀을 설치하여 유출홀 후단부의 질량유량계를 통해 유출 유량을 변화시켜가며 열전달 특성을 고찰하였다. Ekkad 등[2]은 정지한 2차 유로에서 TLC(Thermochronic Liquid Crystal)를 이용하여 유출홀과 요철의 다양한 형상에 따른 열전달 특성을 고찰하였고, 또한 가시화를 통해 유동 특성에 대한 이해를 높였다. Rigby 등[3]과 Stephens 등[4]은 수치해석을 통해 유출홀과 요철이 설치된 유로에서 열전달 특성에 대하여 고찰하였으며, 유출홀 출구부분에서 복잡한 유동구조를 밝혀내었다. Taslim 등[5]은 경사진 덕트에서 요철과 유출홀의 영향에 대하여 요철의 크기를 바꾸어가며 고찰하였다. Ireland 등[6]은 유출홀 입구에서 열전달 특성에 대하여 실험과 수치해석을 병행하였고, Byerley 등[7]은 충돌각 90도인 요철과 요철 중간에 엇갈린 배열의 유출홀이 설치된 유로에서의 열전달 특성에 대하여 고찰하였다.

이와 같은 연구들은 대부분 정지한 덕트에서 유출홀이 열전달 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하여, 회전익과 같은 회전상태에서의 유출홀의 영향에 따른 열전달 특성뿐만 아니라 국소 열/물질전달계수의 분포를 알 수 있는 자료는 부족한 상황이다. 따라서 Kim 등[8),(9)]은 요철이 없고 전연면에 유출홀이 설치된 회전하는 사각덕트 유로에서 회전수와 유출유량 변화에 따른 열전달 특성에 대하여 고찰 하였다. 하지만, 요철을 설치하면 열전달이 향상되기 때문에 본 연구에서는 90도 요철이 설치된 회전하는 유로에서 유출유동과 회전수에 따른 열/물질전달 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 유출 회전장치의 개략도를 나타내며, 자세한 구성은 Cho 등[10] 및 Kim 등[8),(9)]에 제시되어 있다.

Fig. 2는 실험에 사용되는 덕트의 형상을 나타내고 있다. 덕트는 1:1의 종횡비를 갖는 정사각형이고, 전

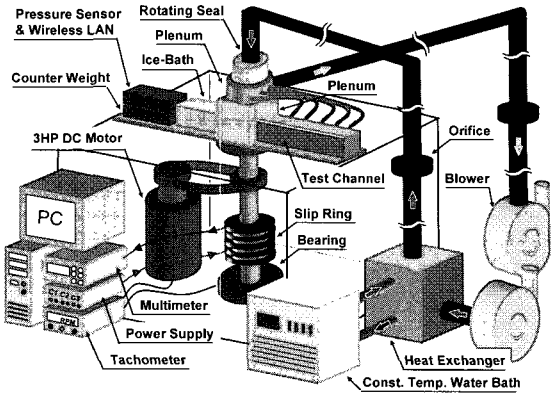

Fig. 1 Experimental apparatus.

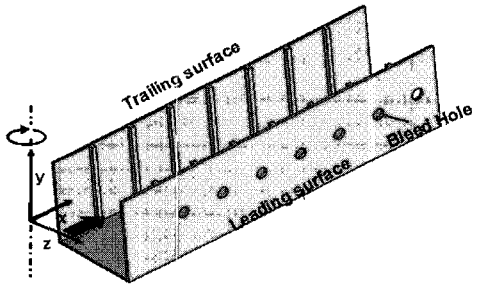

Fig. 2 Geometry of the test channel

연면에만 유출홀이 설치된 1차유로로 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 mm이고, 유출홀 간격 대 유출홀 직경비 (p/d)는 4.9이다. 사각 요철은 전연면과 후연면에 설치되어 있고, 요철 높이 대 수력직경비 (e/D_h)는 0.055이며, 요철과 요철의 간격은 요철 높이의 10배이다. 회전 중심축으로부터 8.45 D_h 떨어진 위치에 나프탈렌 표면이 시작되며, 나프탈렌 표면이 시작되는 지점에서 횡 방향 중심을 원점으로 설정하였다. 나프탈렌 측정영역은 주 유동 방향 (x)으로는 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 지점까지 $8.45 \le x/D_h \le 13.8$이며, 횡 방향 (y)으로는 유로의 외벽부터 반대편 외벽까지 $-0.5 \le y/D_h \le 0.5$에 해당된다. Fig. 3과 같이 전연면 측정부의 길이는 5.35 D_h이며, 유출홀은 요철의 중심에 위치하였고, 각각의 좌표를 나타내고 있다. 전 · 후연면에 설치된 측정부에는 나프탈렌이 캐스팅되어 있고, 이는 열전달에서의 등온 가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작지점까지 거리는 약 8.45 D_h

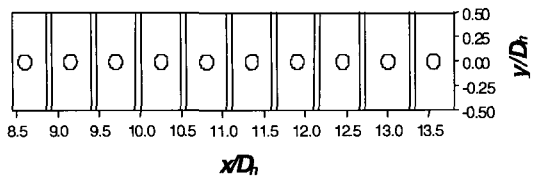

Fig. 3 Coordinate system of leading surface with bleed holes

이며, 유출홀을 일정간격으로 설치하였다. 유출홀의 유출량 차이는 챔버와 시험부의 차압을 크게 하여 약 2.3%로 동일하게 하였다.

2.2 실험결과 처리 방법

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리 과정은 Cho 등[10]에 제시되어 있다. 나프탈렌이 코팅되어 있는 면의 높이를 실험 전후로 측정하여 국소 물질전달 계수를 구하고, 이로부터 무차원 물질전달 계수인 Sherwood 수를 구할 수 있다.

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

이 때, D_{naph}는 공기 중에서의 나프탈렌 확산계수이며, 물성치는 Goldstein과 Cho[11]에 의하여 제시된 값을 이용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 Kline과 McClintock[12]의 방법에 의하여 95% 신뢰수준에서 7.76%의 값을 갖는다.

본 연구에서는 물질전달 실험결과를 무차원 물질전달 계수의 비 (Sh/Sh$_0$)로 나타내었다. 이때 Sh$_0$는 McAdams[13]에 의해 제시된 매끈한 원형관 내의 완전발달 난류 유동장에서의 물질전달계수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\mathrm{Sh}_0 = 0.023\mathrm{Re}^{0.8}\mathrm{Sc}^{0.4} \tag{2}$$

또한, 한 피치 내의 각 지점에서 얻어진 Sh값들을 해당 횡 방향 (y) 평균한 결과를 $\overline{\mathrm{Sh}_L}$, $\overline{\mathrm{Sh}_R}$로 나타내었다.

마찰계수는 평균 압력강하로부터 구할 수 있다.

$$f=\triangle P/[4(\triangle L/D_h)(1/2)\rho u^2] \tag{3}$$

본 연구에서는 마찰계수 실험결과를 무차원 마찰계수의 비 (f/f_0)로 나타내었다. 이때 f_0는 완전 발달 원형관에서의 마찰계수로 Petukhov[14]가 제안한 Karman-Nikuradse 방정식을 사용하였다.

$$f_0=2(2.236\ln Re-4.369)^{-2} \tag{4}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 국소 열/물질전달 특성

3.1.1 유출 유동이 없는 경우

Fig. 4는 유출이 없는 요철이 설치된 덕트에서 국소 물질전달계수비를 나타내며, 국소 물질전달계수비 분포는 완전 발달된 패턴을 보이고 있다. Fig. 5는 횡 방향 선 평균한 물질전달계수비를 나타내며, 회전수 (Ro) 0.0에서 요철사이 영역에서 열/물질전달 계수는 2개의 최대값을 갖게 된다. 첫 번째 최대값은 주 유동의 재부착으로 요철 사이 중간 상류 부분에 나타나고, 두 번째 최대값은 와류 때문에 요철 전에서 나타나게 된다. 이것은 유동의 재부착과 박리로 요

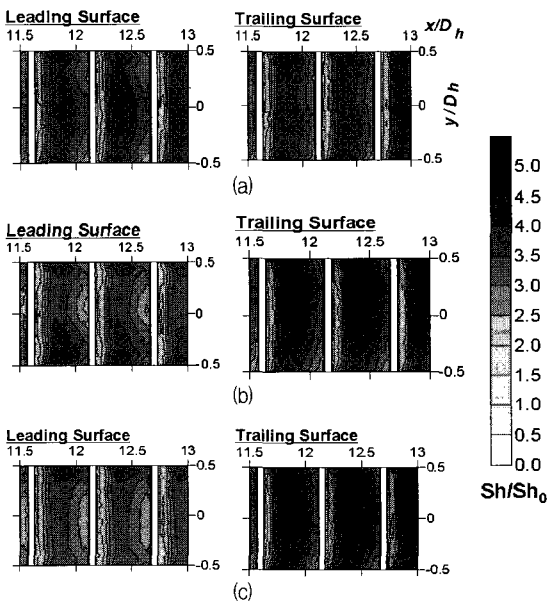

Fig. 4 Sh ratio distributions in the ribbed channel without bleed holes : (a) Ro=0.0, (b) Ro=0.2 and (c) Ro=0.4

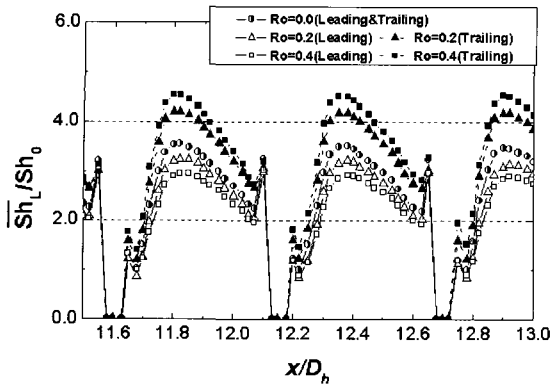

Fig. 5 Line averaged Sh ratio distributions in the ribbed channel at BR=0.0

철이 설치된 표면의 열/물질전달 분포의 전형적인 패턴이고, 이 패턴은 Kukrej 등,[15] Aliaga 등[16] 그리고 Acharya 등[17]의 기존 연구들의 결과와 잘 일치한다. 회전수 0.2로 회전 할 때 전연면의 평균 열/물질전달은 감소하고 후연면은 증가하였다. 전연면의 경우, 중심 (y/D_h = 0.0)의 넓은 영역에 국소적으로 낮은 열전달분포가 나타나는데 이는 후연면으로 향하는 이차유동으로 인해 재부착이 약화되었기 때문이나, 바깥쪽 (y/D_h = ±0.5)의 좁은 영역에서의 높은 열전달분포는 후연면으로 부터 돌아오는 이차유동의 충돌 때문이다. 후연면의 열/물질전달계수는 전체 영역에서 재부착이 코리올리력에 의해 강해지기 때문에 높게 나타나게 된다. 또한, 회전수가 증가할수록 전연면의 평균 열/물질전달은 더욱더 감소하지만, 후연면의 열/물질전달은 증가한다.

3.1.2 유출유동이 있는 경우

선행 연구된 매끈한 회전유로에서 유출유동이 있는 경우 발생되는 이차유동 등의 패턴은 Kim 등[8]에 잘 나타나 있다.

Fig. 6은 유출홀과 요철을 가진 유로에서 국소 열/물질전달계수비 분포를 나타내며, Fig. 7은 횡 방향선 평균한 물질전달계수비를 나타내고 있다. 각각의 경우 Fig. 4에서와 같이 유출 유동이 없는 경우와 비슷한 열/물질전달 분포가 나타난다. 회전수 0.0에서 전연면의 열/물질전달은 유출 유동이 없는 경우보다 더 높다. 그 이유는 유동의 재부착이 유출 유동으로 인해 강해졌기 때문이다. 하지만, 후연면의 열/물질전달은 유출 유동으로 인한 주유동의 감소로 유출이 없

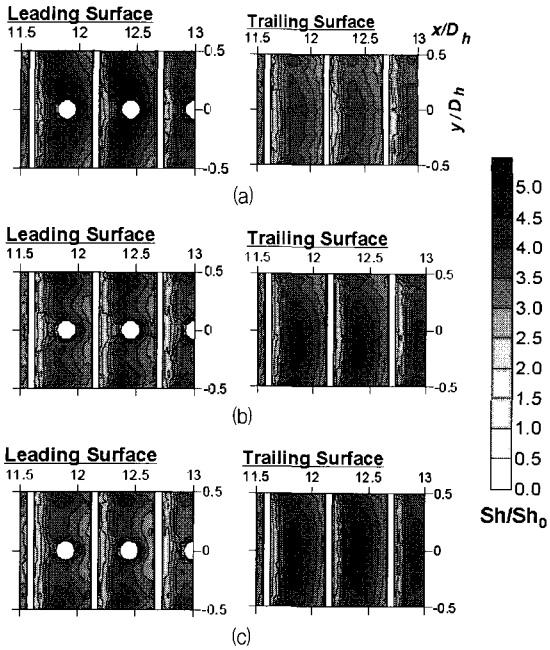

Fig. 6 Sh ratio distributions in the ribbed channel without bleed holes : (a) Ro=0.0, (b) Ro=0.2 and (c) Ro=0.4

는 경우보다 낮게 나타난다. 회전수가 증가함에 따라 전연면은 유출이 없는 경우와 동일하게 열/물질전달은 감소하고, 후연면의 열/물질전달은 증가하였다.

그 이유는 Fig. 6과 같이 후연면으로 향하는 코리올리력 때문에 전연면 내부의 넓은 영역에서 재부착이 약해지고, 바깥쪽의 좁은 영역에서는 재부착이 강해지기 때문이다. 후연면의 경우, 열/물질전달은 코리올리력에 의한 이차유동 때문에 높아지게 된다.

또한, Fig. 7에서와 같이 회전수 0.2로 증가함에 따라 전연면의 열/물질전달은 크게 감소하고, 후연면의 열/물질전달은 크게 증가하였다. 그 이유는 전연면은 회전에 의한 코리올리력으로 인해 재부착이 약해지지만, 후연면은 이차유동에 의한 혼합된 유동이 강하게 충돌하기 때문이다. 하지만 회전수 0.2와 0.4에서 보듯이 회전수가 증가함에 따라 열전달의 증 · 감비가 작다. 이는 회전에 의한 이차유동의 혼합된 유동이 회전수 증가에 따른 강도는 큰 변화가 없기 때문이다.

Fig. 8은 각각의 경우에 구간 평균된 물질전달계수비를 나타내고 있다. 유출유동이 있고 요철이 설치된 유로에서 정지한 경우, 전연면의 열/물질전달은 유출이 없는 경우 보다 유출유동에 의한 영향으로 인해 약 11% 정도 높게 나타났지만, 후연면은 주유동의 감소

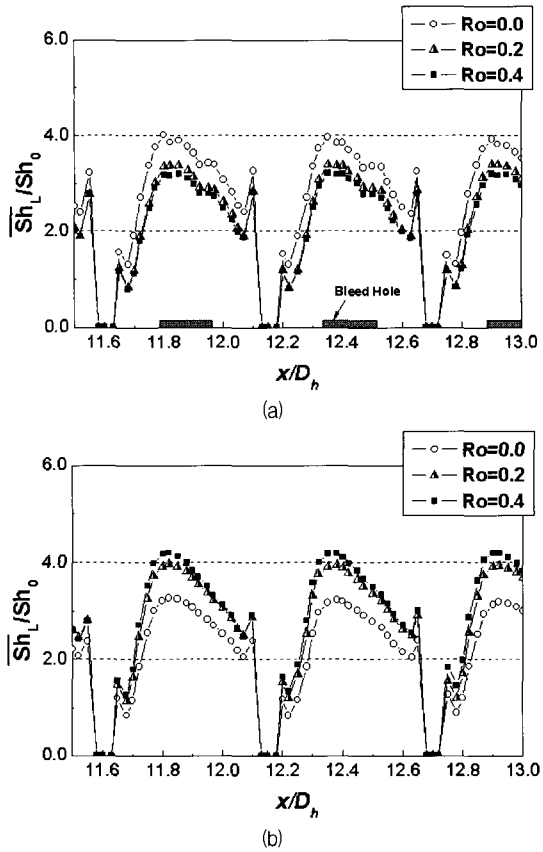

Fig. 7 Line averaged Sh ratio distribution in the rib channel at BR=0.1 ; (a) leading surface and (b) trailing surface

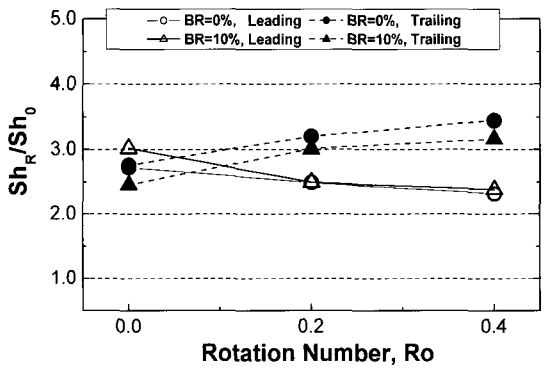

Fig. 8 Regional averaged Sherwood number ratios ($10.5 \leq x/D_h \leq 13.25$).

로 인하여 더 낮게 나타났다. 유로가 회전 할 때, 회전수가 증가할수록 후연면은 열/물질전달이 높게 나타났지만, 같은 회전수에서 전연면의 열/물질전달은 유출 유동이 있는 경우와 없는 경우 모두 같게 나타났

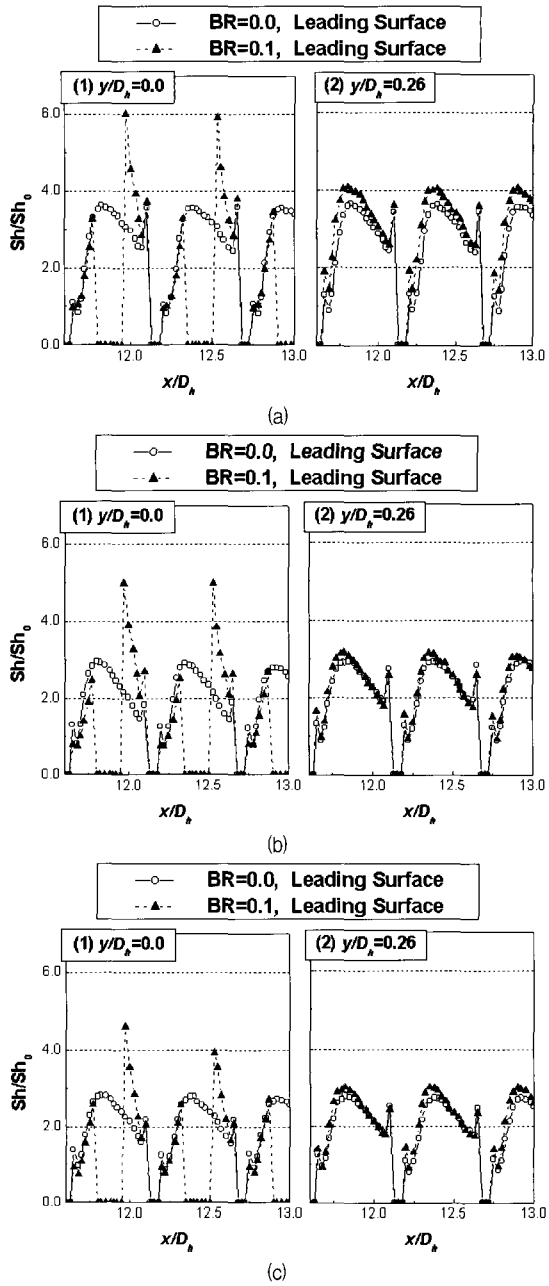

Fig. 9 Sh ratio distributions on the leading surface in the ribbed channel : (a) Ro=0.0, (b) Ro=0.2 and (c) Ro=0.4

다. 한 예로, Fig. 9에서와 같이 전연면 (y/D_h=0.0, 0.26)에서 높은 회전수에서 유출이 있는 경우에 전연면에서 물질전달계수비가 유출이 없는 경우와 유출홀 후단부분 (y/D_h=0.0)을 제외하고는 유사함을 알 수 있다. 그 이유는 요철이 설치된 경우 회전에 의한 영

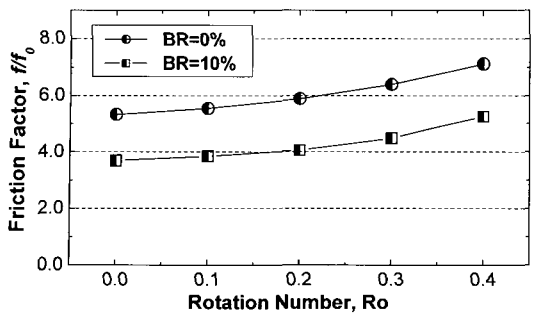

Fig. 10 Friction factor ratios for bleed ratios.

향이 유출홀에 의한 영향보다 크기 때문이다.

3.2 마찰손실

Fig. 10은 마찰계수비의 형태로 마찰 손실 결과를 나타낸다. 회전수 증가에 따라, 마찰계수는 모든 경우에 점차 증가하게 나타났다. 높은 회전수 (Ro>0.2)에서 마찰계수비의 증가 비는 낮은 회전수 (Ro<0.2)에서 보다 높게 나타났다. 그 이유는 난류강도가 더욱더 강해지고, 강한 이차유동이 높은 회전수에서 발생하기 때문이다. 유출이 있는 경우, 없는 경우보다 마찰계수가 감소하게 된다. 그 이유는 유출홀로 인한 유동의 접촉 면적의 감소와 유출 유동으로 인한 주 유동의 감소로 인한 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 수력직경 40 mm인 90도 요철이 설치된 회전하는 사각유로에서 전연면에 설치된 유출홀을 통한 회전수 변화에 따른 전/후연면에서의 열/물질전달특성을 고찰하였으며, 국소 열/물질전달계수의 분포와 평균 열/물질전달계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 유출 유동이 없는 회전하는 요철이 설치된 유로에서, 회전수가 증가함에 따라, 코리올리력이 크게 발생하여 전연면의 열/물질전달은 점점 감소하고, 후연면은 강한 이차유동으로 인해 점점 높아지는 결과를 얻었다.

(2) 유출 유동이 있는 정지한 요철이 설치된 유로에서, 전연면의 열/물질전달은 유출 유동이 없는 경우보다 높게 나타났다. 그 이유는 재부착이 유출유동에 의해 강해졌기 때문이다. 또한, 후연면의 열/물질전달은 주유동의 감소로 때문에 낮게 나타났다. 회전수가 증가함에 따라, 회전에 의한 코리올리력에 의해 전연면의 열/물질전달은 점점 감소하고, 후연면은 점점 높아지는 결과를 얻었다.

(3) 유출 유동이 있는 회전하는 유로에서, 전연면에서 열/물질전달은 같은 회전수에서 유출이 없는 경우와 거의 같게 나타나는 결과를 얻었다. 그 이유는 유출유동은 열/물질전달에 거의 영향을 미치지 못하고, 요철이 설치된 회전유로에서 요철에 의한 재부착과 회전에 의한 이차유동의 영향이 주요인으로 작용하기 때문이다.

(4) 회전수 증가에 따라, 이차유동에 의한 난류 강도의 증가로 인해 마찰계수는 모든 경우에 점차 증가하게 나타났다. 유출이 있는 경우 없는 경우보다 마찰계수가 감소하게 된다. 그 이유는 유출홀로 인한 유동의 접촉 면적의 감소와 유출 유동으로 인한 주 유동의 감소로 인한 것이다.

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., 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 Passges 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 Turbomachinary, Vol. 118, pp. 428~434.

(8) Kim, S. I., Kim, K. M., L, D. H., Jeon, Y. H., Cho, H. H., 2005, "Change of Heat Transfer Characteristics in a Rotating Channel of Square Duct at Wall with Bleed Holes(I)," Proceeding of the SAREK Vol. 17, pp. 898~906.

(9) Kim, S. I., Kim, K. M., L, D. H., Jeon, Y. H., Cho, H. H., 2005, "Change of Heat Transfer Characteristics in a Rotating Channel of Square Duct at Wall with Bleed Holes(II)," Proceeding of the SAREK Vol. 17, pp. 907~913.

(10) 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.

(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.

(14) Petukhov, B. S., 1970, Advances in Heat Transfer, 6, pp. 503~504, Academic Press, New York.

(15) 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. Heat Mass Transfer, 36, pp. 2013~2020.

(16) Agliga, D. A., 1994, "Convective Heat Transfer Distributions over Plates with Square Ribs from Infrared Thermography Measurements," Int. J. of Heat Mass Transfer, 36(3), pp. 363~374.

(17) 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 Mass Transfer, 40, pp. 461~479.