

< 논문 >

회전하는 매끈한 정삼각 유로 내 열/물질전달 분포 측정

김경민* · 이동현* · 조형희†

(2007년 3월 6일 접수, 2007년 6월 14일 심사완료)

Detailed Measurement of Heat/Mass Transfer in a Rotating Equilateral Triangular Channel with Smooth Walls

Kyung Min Kim, Dong Hyun Lee and Hyung Hee Cho

Key Words: Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법), Rotating Channel(회전유로), Triangular Channel(삼각유로)

Abstract

The present study investigated the heat/mass transfer characteristics in an equilateral triangular channel simulating the leading edge cooling passage in gas turbine blade. Using naphthalene sublimation method and pressure measurement experiments, local mass (heat) transfer and pressure coefficients were obtained. The experiments were conducted with three rotating numbers between 0.0 and 0.1; two channel orientations of 0° (model A) and 30° (model B); the fixed Reynolds number of 10,000. The results showed that the channel rotation caused the heat transfer discrepancy between suction and pressure sides. Due to the secondary flow induced by Coriolis force, the high heat transfer appeared on the pressure side. When the channel orientation was 30° (model B), the secondary flow caused the more uniform heat transfer distribution among leading edge and inner wall on pressure side than that of the model A.

기호설명

D_h : 수력직경
 D_{naph} : 물질 확산계수(나프탈렌-공기)
 f : 마찰계수
 f_0 : 요철이 없는 원형관에서의 f
 h_m : 물질 전달계수
 R : 유로 최대 반경
 Re : Reynolds 수, $D_h u_b / \nu$
 Ro : Rotation 수, $D_h \Omega / u_b$

Sc : Schmidt 수, ν/D
 Sh : Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$
 \overline{Sh} : 일정 구간에 대하여 평균한 Sh
 $\overline{\overline{Sh}}$: 유로 열전달면 전체를 평균한 Sh
 Sh_0 : 요철이 없는 원형관에서의 Sh
 u_b : 평균 속도
 x : 주유동방향 거리
 y : 덕트 중심으로부터 횡방향 거리
 z : 덕트 바닥면으로부터의 높이

그리스문자

β : 덕트 회전 각도
 ΔL : 기준압력탭과 국소압력탭 사이의 거리
 ΔP : 기준압력과 국소압력의 차
 n : 열/물질 성능계수

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

- μ : 점성계수
 ν : 동점성계수
 ρ : 밀도
 Ω : 회전각속도

1. 서론

가스터빈의 내부유로 냉각기술은 압축공기를 Fig. 1과 같이 터빈 블레이드 내부에 만들어진 유로에 공급하여 강제 대류 시켜 고온의 환경으로부터 보호하는 방법이다. 초기의 내부 냉각 유로는 원형관으로 가공하여 가스터빈 블레이드를 보호하였으나, 터빈입구온도가 꾸준히 증가함에 따라 보다 블레이드 형상에 비슷한 모양인 삼각 및 사각 유로관으로 구조하여 사용하고 있다. 이 중 가스터빈 블레이드 선단 내부 유로는 단면이 삼각형에 가깝다. 또한 이 부분은 고온의 연소가스가 가장 먼저 접하는 부분으로 다른 표면들 보다 높은 열부하가 나타난다. 특히, 실제 가스터빈 블레이드는 회전을 하기 때문에 내부유로 내에서는 코리올리력이 작용하게 되고 각 면에 다른 냉각 특성이 나타나게 된다. 따라서 가스터빈 블레이드 선단을 설계하기 위해서는 단면이 삼각형일 때의 내부유로에서의 냉각 특성 및 회전에 따른 유동 및 열전달 특성을 밝혀내는 것이 중요하기 때문에, 내부 유로가 삼각형일 때의 내부 유동 및 열전달 특성에 관한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다.

Metzger와 Vedular⁽¹⁾는 정지된 정삼각 유로에서 세가지 다른 요철의 배열에 따른 열전달 분포 및 압력강하를 국소적으로 측정하여, 각 경우의 열전달 특성이 어떻게 바뀌는지 찾아내었다. 이들은 특히 각도요철이 설치된 경우 더욱 높은 열전달이 나타난다는 것을 밝혀내었다. Zhang 등⁽²⁾은 직각 삼각형의 단면을 가지는 유로에 요철이 세면 전체에 설치된 경우와 부분적으로 설치된 경우에 열전달 계수와 압력강하를 측정하였다. 이들은 이 연구로부터 고온의 연소가스가 접하는 면에 부분적으로 요철이 설치된 경우에 높은 열성능이 나타난다는 것을 밝혀내었다. 그리고 Ahn과 Son⁽³⁾은 한 면에만 요철이 설치된 삼각 유로에서의 열전달 및 압력강하 특성을 연구하였으며, 요철의 설치에 따른 유동의 속도분포 변화를

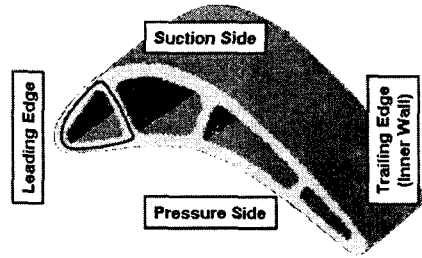


Fig. 1 Schematic of gas turbine blade

연구하였다.

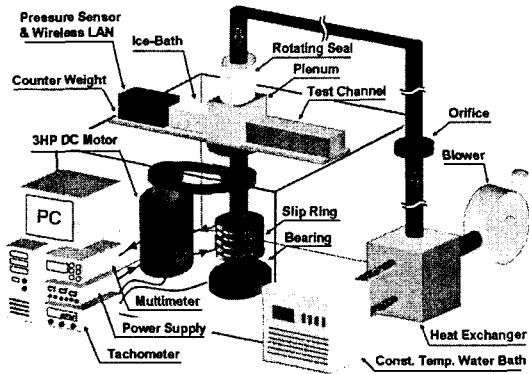
회전하는 삼각유로에서의 열전달 특성을 밝혀내기 위해 Dutta 등⁽⁴⁻⁶⁾은 요철이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 회전에 의한 열전달 변화를 연구하여, 회전이 코리올리력을 발생시키고 이는 내부 유동과 열전달을 변하게 한다는 것을 밝혀내었다. 이처럼 삼각형 형상의 유로에 대한 연구가 이뤄졌지만, 국소적인 열전달 데이터와 회전하는 환경에서의 압력강하에 대한 연구가 아직도 부족한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 회전하는 정삼각형 단면의 유로에서의 Ro 수 변화 및 회전방향 변화에 따른 국소적인 열전달 특성 및 압력강하를 파악하였다.

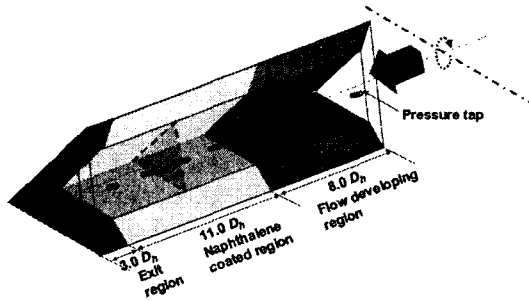
2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig. 2는 실험장치와 실험유로의 개략도를 나타내고 있다. 실험장치는 크게 송풍부와 회전부 그리고 측정부의 3가지로 나누어지며, 실험장치의 자세한 구성은 Kim 등⁽⁷⁾에 제시되어 있다. 본 연구에서 사용된 덕트는 Fig. 1의 가스터빈 블레이드 선단부와 같은 단면이 삼각형인 덕트를 Fig. 2(b)와 같이 모사하였다. 실험에 사용된 덕트의 단면은 정삼각형이며, 수력직경(D_h)은 19.05 mm이다. 수력직경대비 최대회전반경(R/D_h)은 26.7의 값을 가지며, 실험덕트는 중심축으로부터 $4.7 D_h$ 떨어진 지점에 설치되어 있다. 실험덕트는 Fig. 2(b)와 같이 크게 유동발달영역, 열전달영역, 출구영역으로 이와 같이 3개 구간으로 나뉘며, 각 영역의 길이는 $8.0 D_h$, $11.0 D_h$, $3.0 D_h$ 이다. 이 중 열전달 영역의 압력면(Pressure surface) 및 부압면



(a) Experimental rig



(b) Test channel

Fig. 2 Schematics of experimental apparatus

(suction surface)의 유로 바닥에는 나프탈렌이 코팅되어 있으며, 이는 열전달에서의 가열면에 상사된다. 또한 마찰계수를 측정하기 위해 옆벽에 Fig. 2(b)와 같이 0.8mm의 압력탭(Pressure tap) 8개를 일정 간격으로 설치하였다.

본 연구에서는 수력직경기준 Re 는 10,000으로 고정시키고, 회전수 Ro 는 0.0, 0.05, 0.1($\approx 420rpm$)에서, 회전방향(β)은 Fig. 3과 같이 0° (Model A)와 30° (Model B)에 대해서 실험을 수행하였다. 좌표계는 Fig. 4에 나타난 것과 같으며, 측정 영역은 주유동 방향으로 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 곳까지 $-12.7 \leq x/D_h \leq 23.7$ 이며, 횡방향으로는 압력면 $-1.73 \leq y/D_h \leq 0.0$ 과 부압면 $0.0 \leq y/D_h \leq 1.73$ 에 해당된다.

2.2. 실험결과 처리

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리 과정은 Kim 등⁽⁷⁾에

제시되어 있다.

나프탈렌이 코팅되어있는 면의 높이를 송풍 전후로 측정하여 국소 물질전달 계수를 구하고, 이로부터 무차원 물질전달 계수인 Sherwood 수를 구할 수 있다.

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

이 때, D_{naph} 는 공기중에서의 나프탈렌 확산계수이다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽⁸⁾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⁽⁹⁾에 의해 제시된 원형관에서의 완전 발달 열전달계수는 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 값들을 해당 면적에 대하여 평균한 결과를 \overline{Sh} 과 열/물질전달 상사면 전체에 대하여 평균한 결과를 \overline{Sh}_0 로 나타내었다.

마찰계수 구하기 위해, 덕트 입구 벽면의 정압(P_{ref})과 각 지점의 벽면의 정압과의 차(ΔP)를 측정하였다. 이 데이터를 1차식으로 선형화하여 평균 차압을 계산하였고, 이로부터 구해진 차압을 다음 식에 대입하여 마찰계수를 구하였다.

$$f = \Delta P / [4(\Delta L/D_h)(1/2)\rho v_0^2] \quad (3)$$

덕트를 통과하는 공기의 질량유량과 Reynolds 수의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽⁸⁾의 기술방법에 의해 95%의 신뢰수준에서 각각 1.0%와 1.4%이며, 국소적인 압력강하와 각 구간에서의 마찰계수의 불확실성은 각각 4.7%와 4.9%이다. 마찰계수는 Petukhov⁽¹⁰⁾에 의해 제시된 매끈한 파이프에서의 완전 발달한 난류 유동장에서의 마찰계수, $f_0 = (2(2.236 \ln Re - 4.639))^{-2}$ 와의 비, f/f_0 의 형태로 제시하였다. 또한 각 유로에서의 열/물질전달 성능계수를 다음 식과 같이 정의하였다.

$$n = (\overline{Sh}/Sh_0) / (f/f_0)^{1/3} \quad (4)$$

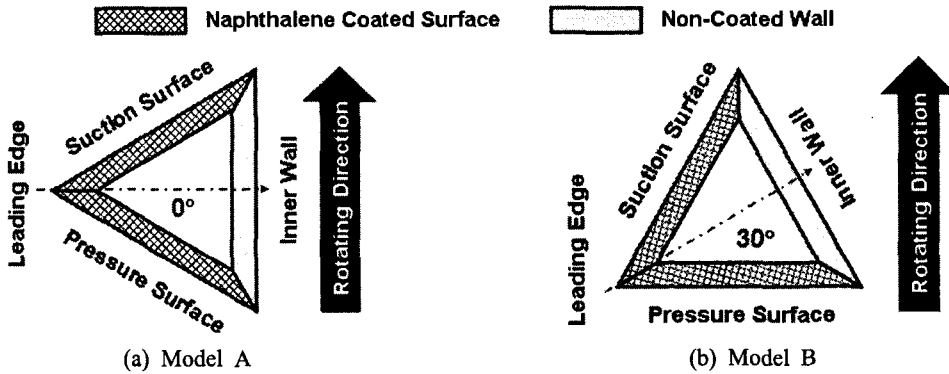


Fig. 3 Cross-section and orientation of two models

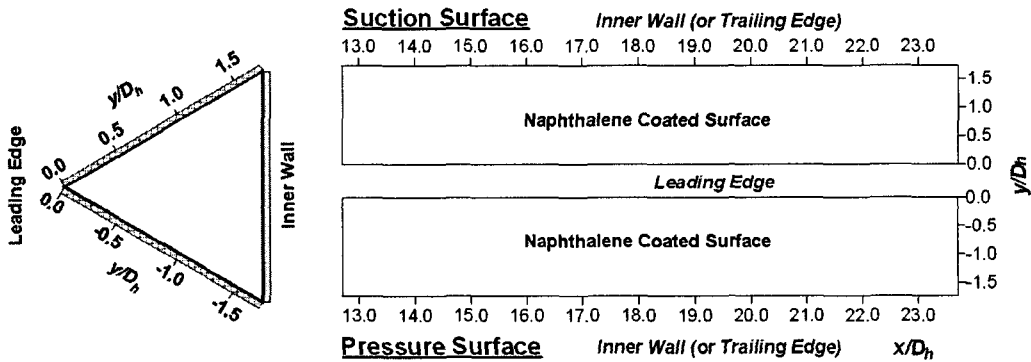


Fig. 4 Coordinate system

3. 결과 및 고찰

3.1 내부 유동 특성

Fig. 5는 회전방향 각도에 따른 매끈한 삼각덕트 내 유동구조를 개략적으로 나타낸 그림이다. Model A[Fig. 5(a)]와 같이 유동이 반경방향으로 빠져나갈 때 회전방향 및 회전방향 각도가 0°일 때 코리올리력에 의해 대부분의 유동이 압력면으로 치우치게 되고, 압력면에서 상대적으로 압력이 낮은 덕트 선단(Leading Edge)으로 유동이 흐르면서 덕트 선단쪽의 작지만 강한 이차유동이 발생하게 되며, 내벽(Inner Wall)쪽은 크지만 약한 대항류(Counter-rotating vortex)가 생성된다. 이 이차유동은 부압면 덕트 선단쪽의 충돌 후 부압면을 따라 흐른 후, 코리올리력에 의해 압력면으로 이동하는 구조로 되어 있다. Model B[Fig. 5(b)]와 같이 회전방향 각도가 30°일 때는 모든 면이 매

끈하기 때문에 압력면을 기준으로 좌우가 대칭적인 이차유동 구조가 나타난다. 즉, 코리올리력으로 인해 유동이 압력면으로 치우치면서 압력면 증앙을 기준으로 대칭적인 한 쌍의 이차유동이 발생하게 된다. 이 유동은 압력면 증앙에 비해 상대적으로 압력이 낮은 꼭지점 부근으로 회전하며, 부압면과 내벽(Inner Wall)을 따라 이동하는 이차유동 구조로 나타난다.

3.2 열/물질전달 분포

Fig. 6은 덕트가 정지하였을 경우에 압력면과 부압면에서의 국소적인 열/물질전달 분포를 나타낸 그림이다. 덕트가 정지하였을 경우, 압력면과 부압면의 열/물질전달 분포는 유사하게 나타났다. 즉, 입구에서 높은 물질전달이 나타난 후, 발달되어감에 따라 물질전달이 점차 감소하였으며, 덕트 선단부(-0.5 ≤ y/D_h ≤ 0.5)에서 내벽근처(y/D_h ≥ 1.5

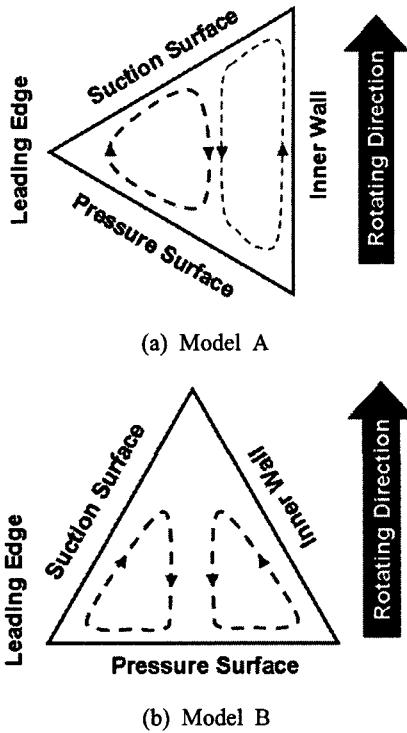


Fig. 5 Flow patterns in the rotating channel

및 $y/D_h \leq -1.5$ 보다 낮은 물질전달 분포가 나타났다. 이는 덕트 선단부의 압력면과 부압면이 가깝기 때문에, 모서리에서 유동의 나프탈렌 포화밀도가 증가하여 물질전달이 잘 일어나지 않았기 때문이다. 즉, 이는 열전달에서 공기의 온도가 증가하여 열전달이 감소하는 것과 일치한다.

Fig. 7은 덕트가 Ro 수 0.1로 회전하는 경우에 압력면과 부압면에서의 국소적인 열/물질전달 분포를 나타낸 그림이며, 회전방향에 따라 Model A와 Model B로 나타내었다. 우선, Fig. 7(a)과 (b)에 나타난 것과 같이 덕트의 회전에 의해 코리올리력이 발생하게 되어, 압력면이 부압면보다 높은 열/물질전달 분포가 나타난다. 즉, 유로 바깥쪽으로 송풍되는 유동의 경우, 코리올리력에 의해 압력면쪽으로 유동이 치우치게 되어 압력면에서 보다 높은 열전달이 나타나는 것이다.

회전방향에 따른 영향으로는 Fig. 7(a)과 같이 회전방향이 0° (Model A)일 때, Fig. 5(a)와 같은 이차유동이 발생하게 된다. 이와 같은 이차유동이 충돌하게 되는 압력면의 내벽쪽($-0.7 \leq y/D_h \leq -1.5$)과 부압면의 선단쪽($-0.1 \leq y/D_h \leq -0.6$)에서 높

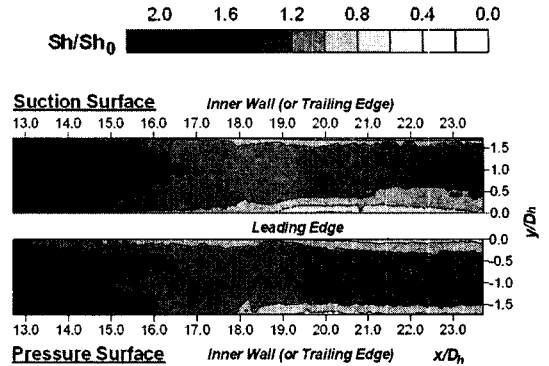


Fig. 6 Local Sherwood number ratio distributions in the stationary channel ($Ro=0.0$)

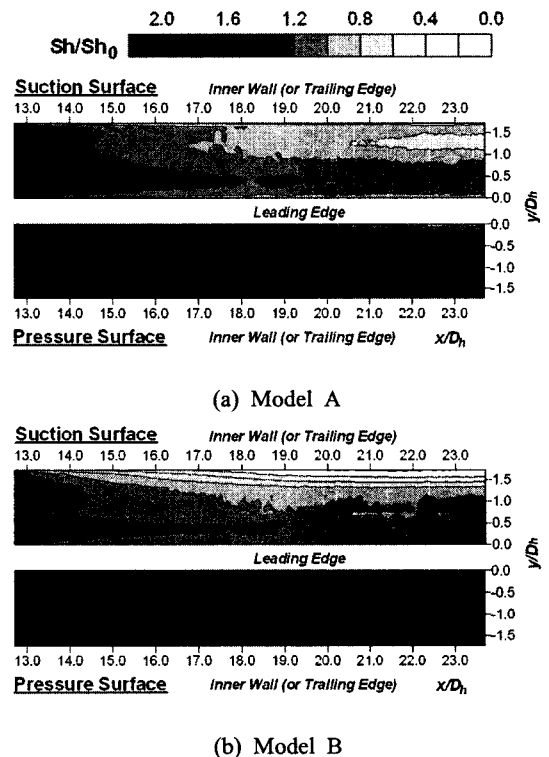


Fig. 7 Local Sherwood number ratio distributions in the rotating channel ($Ro=0.1$)

은 열/물질전달 분포가 나타났다. 회전방향이 Fig. 7(b)과 같이 30° (Model B)일 때, Fig. 5(b)와 같은 대칭적인 이차유동이 발생하게 되며, 이로 인해 이차유동의 강한 충돌이 일어나는 압력면 중앙($-0.4 \leq y/D_h \leq -1.3$)과 부압면 선단($0.2 \leq y/D_h \leq 0.6$)에

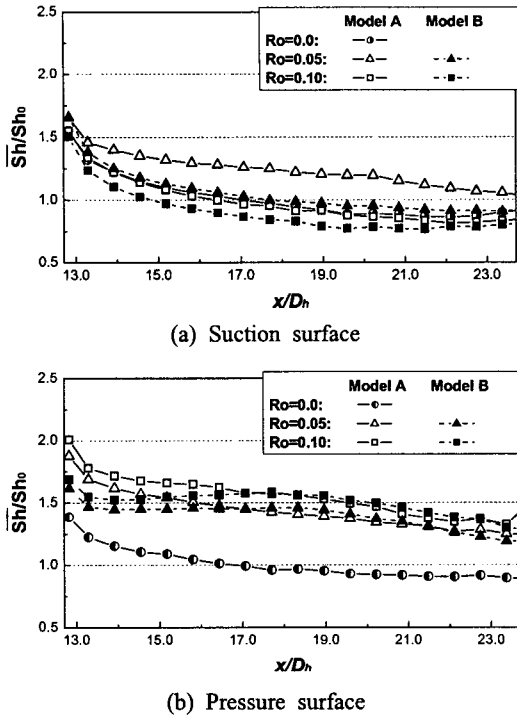


Fig. 8 Regional averaged Sherwood number ratios

서 높은 열/물질전달 분포가 나타나게 된다. 이처럼 회전 방향에 따라 내부 이차유동의 구조가 변하게 되며, 이로 인해 국소적인 열/물질전달 분포도 달라진다.

Fig. 8은 압력면 및 부압면에서의 회전방향 및 Ro 수에 따른 구간 평균 물질전달 계수 비를 나타내며, Fig. 9는 각 면의 유로 평균 물질전달 계수 비와 두면을 평균한 값을 나타내는 그림이다. 부압면(Fig. 8(a))에서 회전방향이 Model A와 같을 때, 회전에 의한 이차유동으로 인해 Ro 수가 낮을 때 물질전달이 약간 상승하게 되었으나, Ro 수가 증가함에 따라 압력면으로 유동이 더욱 치우치게 되어 물질전달은 점차 감소하게 되었다. 또한, 회전방향이 Model B와 같을 때 역시 회전에 의해 물질전달이 약간 증가하였으나, Ro 수가 증가함에 따라 점차 감소하는 것을 볼 수 있었다. 압력면(Fig. 8(b))에서는 코리올리력에 의해 압력면으로 유동이 치우치기 때문에 이차유동이 발생하여, 정지하였을 때 보다 높은 물질전달이 일어났으며, Ro 수가 증가함에 따라 압력면으로 유동이 더욱 치우치게 되어 물질전달이 높아졌다.

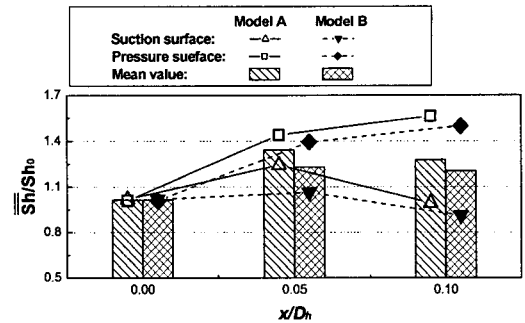


Fig. 9 Channel averaged Sherwood number ratios

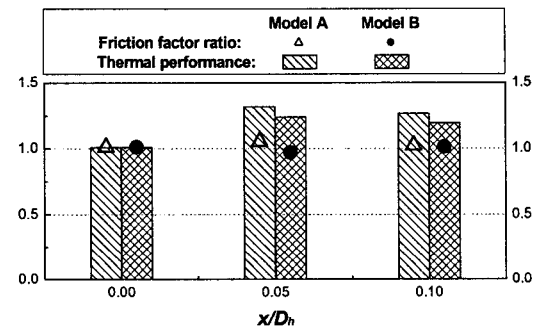


Fig. 10 Friction factors and thermal performance at each rotation number

Fig. 10은 유로 내에서 마찰손실을 완전발달된 난류 유동관의 경우와 비교를 위해 마찰손실 비의 형태로 Ro 수에 따라 나타내었으며, 또한 일정 이송동력 조건 하에서의 열/물질전달 증감을 비교하기 위해 열/물질 성능계수를 나타내었다. 유로전체의 마찰손실은 매끈한 난류 유동관에서의 마찰손실과 거의 같았고 회전에 의해서 마찰계수가 거의 변하지 않았다. 그러나 성능계수는 회전에 의해 약간 상승하였는데, 이는 열/물질전달 분포에서 언급했듯이 회전에 의해 이차유동이 발생하여 물질전달이 향상되었기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 삼각형의 단면을 갖는 덕트 내부에서의 회전 및 회전방향에 따른 유동 및 국소 열/물질전달특성을 고찰하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 덕트가 정지하였을 경우, 압력면과 부압면

의 선단부 근처에서 하류로 갈수록 낮은 열/물질 전달 분포가 나타났는데, 이는 공기의 나프탈렌 포화밀도가 증가하기 때문이다.

(2) 덕트가 Model A와 같은 방향으로 회전할 경우, 비대칭적이며 선단부쪽에 강한 한 쌍의 이차유동이 발생한다. 이 이차유동은 압력면의 내벽쪽과 부압면의 선단쪽에 충돌하여 높은 열/물질 전달 분포를 가지게 한다.

(3) 덕트가 Model B와 같은 방향으로 회전할 경우, 대칭적인 이차유동이 발생하게 되며, 이로 인해 강한 충돌이 일어나는 압력면 중앙과 부압면 선단에서 높은 열/물질 전달 분포가 나타나게 된다.

(4) 덕트의 회전으로 인해 유동이 한 면으로 치우치게 되어 이차유동이 발생되고 압력면 및 부압면의 열/물질 전달을 상승시킨다. 하지만, Ro 수가 증가함에 따라 유동이 압력면쪽으로 더욱 치우치게 되어 압력면의 물질 전달은 증가하지만, 부압면의 물질 전달은 감소하게 된다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업기술개발사업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Metzger, D. E. and Vedula, R. P., 1987, "Heat Transfer in Triangular Channels with Angled Ribs on Two Walls," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 31~44.
- (2) Zhang, Y. M., Gu, W. Z. and Han, J. C., 1994, "Augmented Heat Transfer in Triangular Ducts With Full and Partial Ribbed Walls," *AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 8, No. 3, pp. 574~579.
- (3) Ahn, S. W. and Son, K. P., 2002, "Heat Transfer and Pressure Drop in the Roughened Equilateral Triangular Duct," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 4, pp. 479~488.
- (4) Dutta, S., Han, J. C. and Lee, C. P., 1995, "Experimental Heat Transfer in a Rotating Triangular Duct: Effect of Model Orientation," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 1058~1061.
- (5) Dutta, S., Han, J. C. and Lee, C. P., 1996, "Local Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Ribbed Triangular Duct With Two Model Orientations," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 707~715.
- (6) Dutta, S., Han, J. C., Zhang, Y. and Lee, C. P., 1994, "Local Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Triangular Duct With Smooth Walls," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 435~43.
- (7) Kim, K. M., Kim, Y. Y., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2004, "An Investigation of Duct Aspect Ratio Effects on Heat/Mass Transfer in a Rotating Duct with 90°Ribs," ASME Paper No. GT2004-53533.
- (8) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (9) McAdams, W. H., 1942, "Heat Transmission, 2nd Edition," McGraw-Hill, New York.
- (10) Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 6, pp. 503~564, Academic Press, New York.