

회전하는 덕트내 설치된 70° 경사요철의 열전달 특성

최 청* · 이세영* · 원정호* · 조형희** · 박병규***

Heat Transfer in Rotating Duct with 70° Angled Ribs

Chung Choi*, Sei Young Lee*, Jung Ho Won*, Hyung Hee Cho**, Byung kyu Park***

Key Words: Rotating Duct(회전 덕트), Rib Turbulator(요철), Coriolis Force(코리올리 힘), Dean Type Vortex(딘 와류)

ABSTRACT

The present study investigates convective heat/mass transfer and flow characteristics inside a cooling passage of rotating gas-turbine blades. The rotating duct has staggered ribs with 70° attack angle, which are attached on leading and trailing surfaces. Naphthalene sublimation technique is employed to determine detailed local heat transfer coefficients using the heat and mass transfer analogy. Additional numerical calculations are conducted to analyze the flow patterns in the cooling passage. The present experiments employ two-surface heating conditions in the rotating duct because the exposed surfaces to hot gas stream are pressure and suction side surfaces in the middle passages of an actual gas-turbine blade. Secondary flows are generated by Coriolis and centrifugal forces in the spanwise and streamwise directions. The ribs attached on the walls disturb the mainflow resulting in recirculation and secondary flows near the ribbed wall. The local heat transfer and flow patterns in the passage are changed significantly according to rib configurations and duct rotation speeds. Therefore, the geometry and arrangement of the ribs are important for the advantageous cooling performance. The experimental results show that the ribs enhance the heat transfer more than 70% from that of the smooth duct. The duct rotation generates the heat transfer discrepancy between the leading and trailing walls due to the secondary flows induced by the Coriolis force. The overall heat transfer pattern on the leading and trailing walls for the first and second passes are depended on the rotating speed, but the local heat transfer trend is affected mainly by the rib arrangements.

1. 서 론

가스터빈 엔진의 열효율과 추력의 향상을 위하여 압축기의 압력비와 연소가스의 터빈입구온도(TIT; Turbine inlet temperature)의 향상은 필수적이다. 그러나 이는

터빈 블레이드(blade)의 열부하를 가중시키고 이로 인해 부품의 수명을 단축시키게 된다. 최근 고성능 가스터빈 엔진의 TIT는 금속 허용온도를 크게 상회하는 1400~1500°C 이상이며, 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드(blade)를 보호하고 적정수명을 유지하기 위하여 냉각이 필수적이다. 여러 냉각 방법과 병행하여 내부관 대류냉각(internal channel convective cooling)방법이 많이 사용되고 있다.

Han 등⁽¹⁾은 60°의 경사 요철이 설치된 덕트가 회전

* 연세대학교 대학원
** 연세대학교 기계공학과
*** 한국기계연구원
E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

방향에 대한 경사각도(channel orientation)를 가질 때 Rotation 수 0.0~0.352, Reynolds 수 2,500~25,000의 범위에 대하여 유로 내벽의 평균열전달 계수의 분포를 연구하였다. Kuo and Hwang⁽²⁾은 회전반경방향 유입 혹은 유출 유동을 갖는 단일 유로에 대하여 열전달 특성을 연구하였으며, Shih 등⁽³⁾, Boelcs 등⁽⁴⁾, Choi 등⁽⁵⁾, Chen 등⁽⁶⁾ 등에 의해서 회전 덕트내의 유동 및 열전달에 관한 연구가 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구가 평균 열전달 계수를 측정하였다.

본 연구는 설계 시 필요한 국소 열전달 계수 측정을 목적으로 물질전달실험을 수행하였으며 이는 열전달 실험에서 발생하는 전도, 복사의 오차를 제거할 수 있다. 덕트 내 국소 열전달계수 분포에 영향을 미치는 변수들 중 실험장치의 평균 회전반경(\bar{R}/Dh)과 주유동의 Reynolds 수는 각각 23.17과 12,500, 25,000을 사용하였다. 본 실험에서 주된 변수는 요철이 없는 회전 덕트의 경우 Rotation 수의 변화와 곡관의 형상 변화가 되며, 주유동에 대하여 70°의 충돌각(attack angle)을 갖는 단면비 7 : 4의 요철이 설치된 회전 덕트의 경우 Rotation 수의 변화가 된다. 또한, 회전 덕트와 곡관부에 의한 유동현상을 이해하기 위하여 상용 열·유동 해석프로그램인 Fluent를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

2. 수치해석과 실험 장치 및 방법

2.1 수치해석 방법

수치해석 방법으로는 상용 열·유동해석 프로그램인 Fluent를 사용하여 정지된 덕트($Ro=0.0$)와 회전하는 덕트($Ro=0.07$)내부의 유동 계산을 수행하였다. 수치해석에 사용된 기본 형상은 실험에 사용된 덕트와 동일하게 모델링 하였고, 회전축 중심의 덕트입구 유동의 Reynolds수는 25,000이다. 계산조건은 3차원 비압축성 유동을 정상상태로 가정하였고, 덕트의 회전과 곡관부에 의한 순환 이차유동과 박리 난류유동을 비교적 잘 예측하는 RNG $k-\epsilon$ (Renormalization group $k-\epsilon$) 난류모델을 적용하였다. 회전덕트에서의 경계층의 두께는 이차유동의 충돌이 일어나는 불안정면에서 $\delta_1(=4\sqrt{v/\omega})$ 이고 반대 면인 안정면에서 $\delta_2(=8\sqrt{v/\omega})$ 로 표현되며, 벽근처의 점성저층(viscous sublayer)내에 10개의 조밀 격자를 구성하고 two-layer zonal model을 적용하였다. 계산영역 내 격자수는 x, y, z 방향으로 215×40×45이다. 수치해석을 통한 정성적 덕트 내부 유동구조의 파악은

덕트 내부의 국소 열전달계수의 해석과 함께 실제 가스터빈 블레이드 냉각유로 내부유동을 예측 할 수 있다.

2.2 실험 장치

송풍기로 유입된 공기는 열교환기를 지나 오리피스 유량계와 플레넘 챔버를 통하여 회전 덕트로 유입된다. 회전덕트와 플레넘에 각각 설치된 3개의 J-type 열전대에서 측정되어진 열전대 출력전압은 내부관과 함께 회전하는 전기적 냉접점온도 보상장치에 연결되어 증폭, 선형화된 후 슬립링을 통하여 외부의 진압측정기에서 측정된다. Fig. 1은 회전덕트의 개략도와 곡관부 형상을 보여주고 있다. 실험 덕트의 유로는 2 : 1의 단면비를 가지며 직각과 반원형 곡관부의 벽두께는 0.375이다. 덕트 내부에 설치된 요철은 주유동과 70°의 충돌각을 가지며 전연과 후연에 엇갈리게(staggered arrangement) 설치되어 있다. 요철의 단면비는 7 : 4이며, 요철과 요철사이의 피치는 요철높이의 7배이다. 본 연구에서는 곡관부 형상에 따른 유동 및 열전달 특성을 알아보고자 Fig. 1의 (b), (c)와 같은 두가지 형상의 곡관부를 갖는 유로에 대한 수치 해석 및 열/물질전달 특성을 측정하였다. Fig. 1(b)는 직각 모서리형상의 덕트를 나타내고 Fig. 1(c)는 반원형 형상 덕트를 나타낸다. 곡관부 외벽으로부터 분리벽까지는 $1D_h$ (수력직경 : 26.67 mm)만큼 떨어져 있으며 반원형 모서리의 경우 반경은 분리벽 두께의 절반인 5mm이다.

2.3 결과 처리

나프탈렌 표면의 국소 승화량으로부터 계산되는 h_m (물질전달계수)은 다음과 같다.

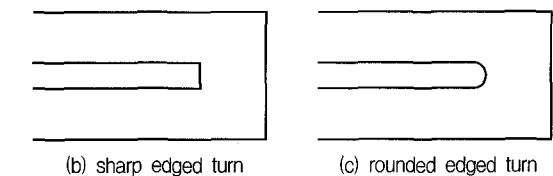
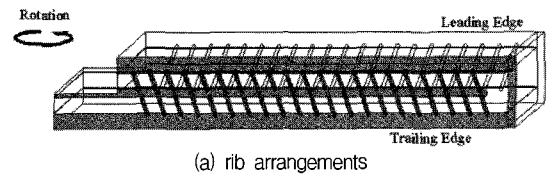


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} = \frac{\rho_s(dy/dt)}{\rho_{v,w} - \rho_{v,b}} \quad (1)$$

여기서 \dot{m} (나프탈렌 승화량, [kg/(m²·s)])는 나프탈렌 표면 단위면적당 국소 물질전달율이며, $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 표면에서의 증기밀도, $\rho_{v,b}$ 는 혼합평균 나프탈렌 증기밀도이다. \dot{m} 은 고체나프탈렌의 밀도($\rho_s=1162.0\text{kg/m}^3$), 유동장 노출시간(dt), 나프탈렌 표면 승화깊이(dy)로부터 계산된다. 본 실험에서의 Sherwood 수는 Kline과 McClintock⁽⁸⁾의 방법에 의해 95% 신뢰수준에서 7.6%의 불확실도(uncertainty)을 가지며, 나프탈렌의 물성치인 증기밀도와 확산계수에 대한 불확실성이 각각 4.7%와 5.1%로 가장 큰 부분을 차지한다. 덕트 내부의 열/물질전달을 효과적으로 고찰하기 위하여, 물질전달계수의 무차원수(Sh)를 요철이 없는 경우 완전발달 난류영역 물질전달계수의 무차원수(Sh₀)에 대한 비로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과

Fig. 2는 회전하지 않는 직각모서리 형상의 덕트와 반원형 형상의 덕트 단면에 발생하는 이차유동의 구조를 1차유로 기준 주유동방향(x) 7.81D_h, 10.9D_h와 곡관부의 90° 지점인 x/D_h=11.1에서 보여주고 있다. Fig. 2에서 직각모서리를 갖는 경우보다 반원형의 모서리를 갖는 경우가 곡관부 이후 더 강한 이차유동(Dean type 와류)을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 직각모서리를 갖는 경우 날카로운 모서리에서 유동박리에 의한 압력 강하가 심하게 일어나게 되고, 따라서 곡관부에 의해서 발생하는 이차유동구조는 반원형의 곡관부 형상을 갖는 경우 보다 더 약해지게 되기 때문인 것으로 생각된다. 모서리에서의 유동박리와 원심력 때문에 발생하는 이차유동구조에 의하여 곡관부를 지나며 발생하는 압력 강하량은 반원형 곡관부를 갖는 덕트에서 보다 직각 곡관부를 갖는 경우가 더욱 큰 값을 나타낸다. x/D_h=10.9지점의 2차 유로는 곡관부의 출구 직후를 의미하고, 이 단면에서의 이차유동구조는 반원형과 직각 곡관부에서 유동박리 이후 발생하는 재순환 영역의 차로 인하여 서로 다른 형상을 나타낸다. 직각 곡관부의 경우 유동박리에 기인하여 곡관부 출구부분 내벽에 원심력에 의한 이차유동 구조에 대하여 반대로 회전하는

또 다른 한 쌍의 와류 구조(vortex structure)가 크게 형성되고 와류간의 상호 작용에 의하여 하류에서 이차유동(Dean type 와류)이 쉽게 약해짐을 알 수 있다. 반원형 곡관부의 경우 이차와류가 내벽 근처에 약하게 형성되어 이차유동(Dean type 와류)이 하류까지 강하게 유지됨으로써 하류에서도 높은 열전달 계수를 가질 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 3는 Ro=0.07(로테이션 수, D_hω/U=Re_Ω/Re)인 회전 덕트 내부 단면에서의 이차 유동을 나타낸다. 앞서 정지된 경우에서는 곡관부의 형상에 따른 영향이 곡관부 직후 이차유동의 구조 및 강도를 결정하는데 많은 영향을 주었으나, 회전하는 경우 회전의 효과가 중요해 지면서 곡관부 형상에 관계없이 거의 유사한 유동구조를 형성함을 알 수 있다. 곡관부에 진입하기 이전에는 Coriolis 힘에 의해서 덕트 단면의 중앙 부근에서 후연쪽으로 향하는 이차유동구조가 보인다. 곡관부 이후에서는 곡관부를 지나면서 발생하는 이차유동과 회전에 의한 이차유동의 혼합에 의해서 매우 복잡한 이차유동 구조가 나타나게 된다. 정지되어 있는 덕트 내부의 이차유동 구조에서 보였던 이차유동(Dean type 와류)은 회전에 의해서 편향된 주유동의 영향으로 후연부의 것이 전연부의 것보다 훨씬 작은 구조를 갖게 되는 것을 알 수 있다. 곡관부 이후에서는 이러한 이차유동구조가 지속되다가 x/D_h=5.0이후에서는 이러한 유동 패턴이 거의 소멸되는 것을 볼 수 있었다.

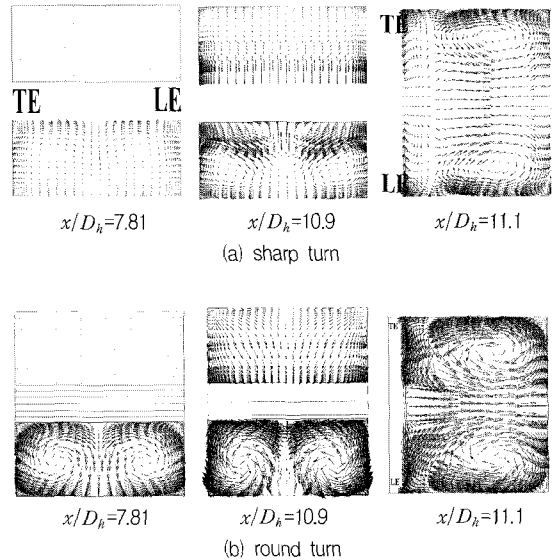


Fig. 2 Calculated secondary flows in the stationary channel

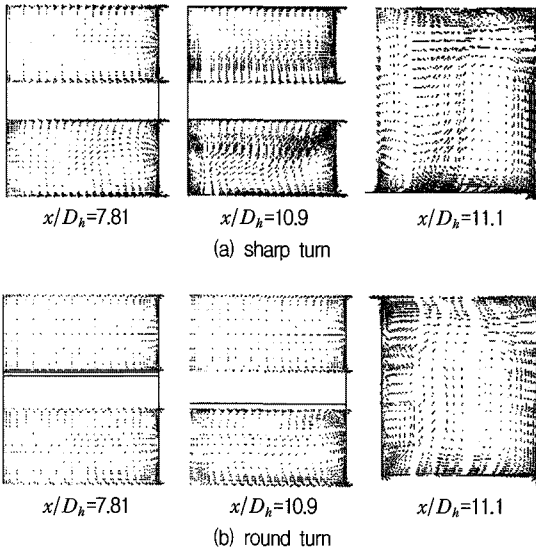


Fig. 3 Calculated secondary flows in the Rotating channel($Ro = 0.07$)

3.2 요철이 설치된 회전 덕트에서의 열전달 분포

덕트 내에 경사요철을 설치하는 경우 유동의 박리, 재부착, 경사요철에 의해 생성되는 이차유동, 덕트 벽면 근처에 생성되는 모서리 와류 등으로 인하여 벽면에서 열전달을 크게 향상시킬 수 있다. 정지된 덕트에서 발생하는 요철에 의한 이러한 열전달 특성은 회전할 경우 발생하는 이차유동구조와 곡관부의 존재에 의한 와류발생 등과 함께 실제 회전하는 가스터빈 블레이드 내에서 매우 복잡한 열전달 특성을 나타내게 된다. 본 실험에서는 주유동에 대하여 70° 의 충돌각을 갖고, 덕트의 전·후연에 엇갈리게 배열된 요철이 설치되어있는 반원형 곡관부를 갖는 회전덕트에 대하여 열/물질전달 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 요철이 설치된 회전덕트에서 $0 \leq Ro \leq 0.24$ 의 경우 국소 열/물질전달계수분포를 나타낸다. $Ro=0.24$ 에서의 주유동의 Reynolds 수는 12,500이며 이외의 경우에서의 주유동 Reynolds 수는 25,000이다. 주유동에 대하여 70° 의 충돌각으로 엇갈리게 배열된 요철에 의하여 덕트의 단면에서는 1개의 이차유동 셀(cell)이 형성된다. Fig. 4에서 곡관부를 제외한 영역에서 경사요철에 의해 형성된 와류가 충돌을 일으키는 1차, 2차 유로의 전연부 내벽부분과 후연부 외벽부분에서 국소적으로 높은 열/물질전달계수의 분포를 보인다. 곡관부의 외벽에 주유동의 충돌로 인한 국소적 열/물질 전달 계수의 극대점이 요철이 없는 경우⁽¹²⁾와 유사하게 발생함을

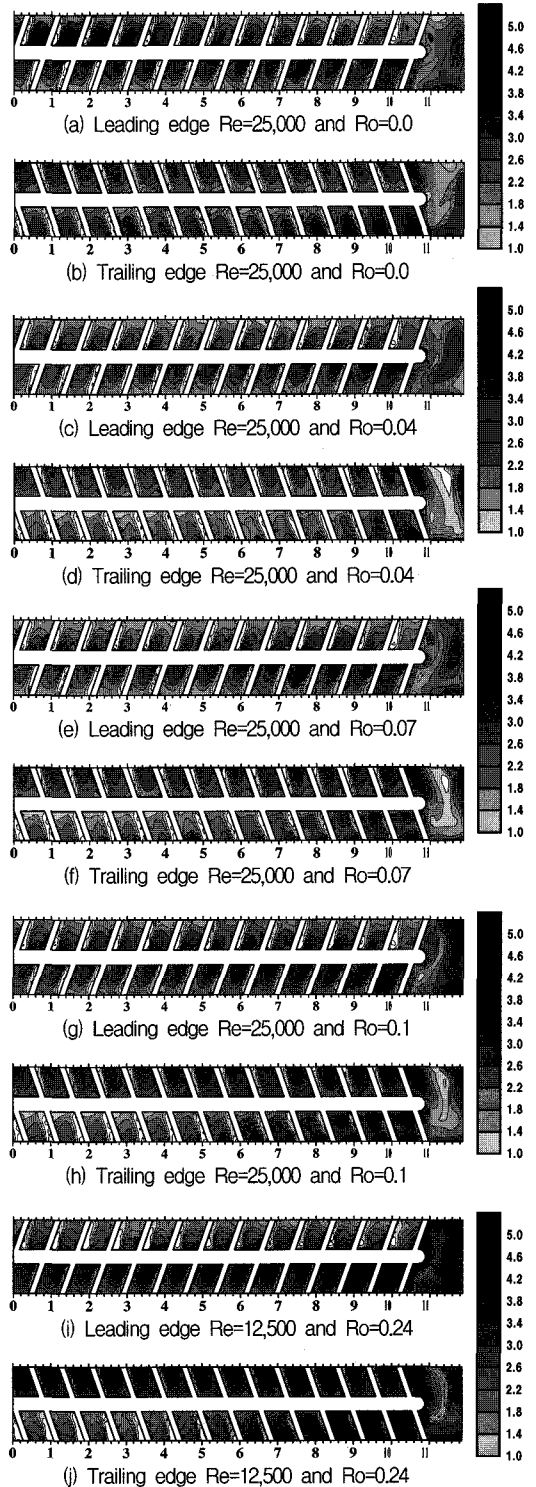
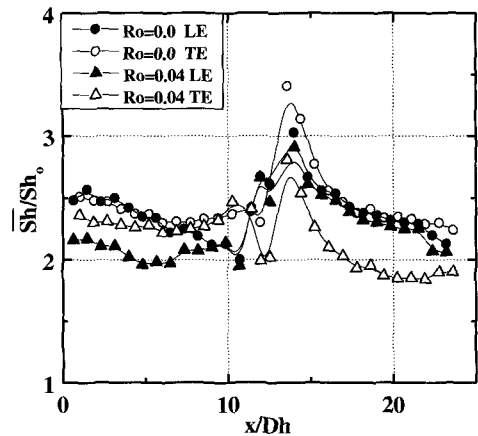


Fig. 4 Contours of local Sherwood number ratio(Sh/Sh_0) with 70° rib

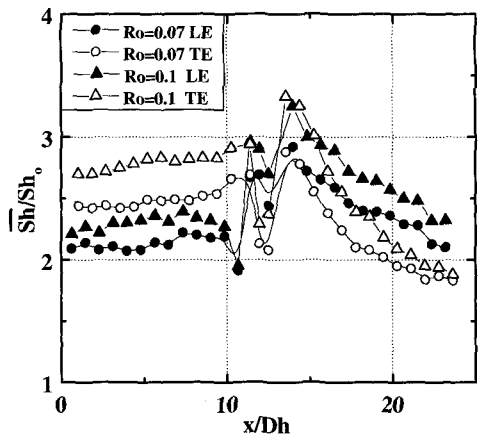
보인다. 고 운동량, 저 농도(저온)의 중심 유동이 원심력에 의하여 곡관부 출구에서 외곽으로 편중됨에 의하여 외벽에서 국소적으로 열전달이 상승됨을 알 수 있다. 곡관의 90° 이후 유동의 가속은 곡관부 출구 2차 유로의 후연 외벽부분의 요철에 의한 이차유동구조를 강화시키고, 곡관부에 의한 이차유동구조와 요철에 의한 이차유동구조가 일치하는 이 영역에서 매우 높은 열전달계수 분포를 형성하게 된다. 또한 곡관부 출구 직후 내벽 역압구배 영역의 단면에 형성되는 와류가 경사요철에 의한 와류유동과 충돌하여 유동의 난류성분을 증가시켜 전연부 내벽의 열전달을 향상시킨다. 내벽부근의 와류에 의한 열전달의 국소적 상승은 요철이 없는 덕트의 경우 전·후연에서 동일하게 발생하나, 본 실험에서 경사요철 충돌각도와 요철 배열에 따라 형성된 이차 유동과의 상호 작용으로 전연부가 더 높은 값을 가지게 된다. 국소적으로 살펴보면 2차 유로 전연의 외벽과 후연의 내벽에는 곡관부 출구이후 형성되는 와류유동구조와 요철에 의한 이차유동의 간섭으로 인한 난류성분의 증가로 열전달의 향상이 발생하고, 2차 유로 전연의 내벽과 후연의 외벽에는 곡관부에 의한 와류구조와 요철에 의한 이차유동구조가 일치하게 되고, 이로 인한 열전달의 향상이 발생하는 것으로 생각된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 앞의 국소값을 횡방향으로 평균한 값으로 $Ro=0.24$ 에서의 주유동의 Reynolds 수는 12,500이며 이외의 경우에서의 주유동 Reynolds 수는 25,000이다. 요철이 설치된 덕트에서 Rotation 수의 증가에 의한 1차 유로내의 전·후연간 열전달의 불균일성은 요철이 설치되지 않은 덕트⁽¹²⁾에서 보다 더 큼을 알 수 있다. 1차 유로의 후연에서 덕트의 회전에 의하여 열/물질전달계수비가 증가하여 최대 3까지 상승하였고, 전연에서 점차로 감소하여 $Rotation=0.24$ 에서는 2 이하로 낮은 값을 나타내었다. 반면에 곡관부 이후 2차 유로에서 Rotation 수에 의한 영향은 상대적으로 미비하며, Rotation 수의 증가에 따라 전연의 하류 영역에서 열전달이 약간 상승함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Rotation 수의 증가($Ro=0.0\sim 0.24$)에 따른 덕트내부의 면적평균 열/물질전달계수 분포를 보여준다. 1차 유로의 전연과 2차 유로의 후연에서 Rotation 수의 증가에 따라 열전달이 감소, 1차 유로의 후연과 2차 유로의 전연에서 Rotation 수의 증가에 따라 열전달이 전반적으로 증가함을 보여 주고 있다. 이는 요철이 없는 회전 덕트의 경우⁽¹⁰⁾와 경향은 유사하나 요철 설치에 따른 곡관부를 제외한 1, 2차 유로에서 약 70%



(a) $Ro=0.0$ and 0.04



(b) $Ro=0.07$ and 0.1

Fig. 5 Effect of Ro on \overline{Sh}/Sh_0 , with round-turn at $Re=25,000$

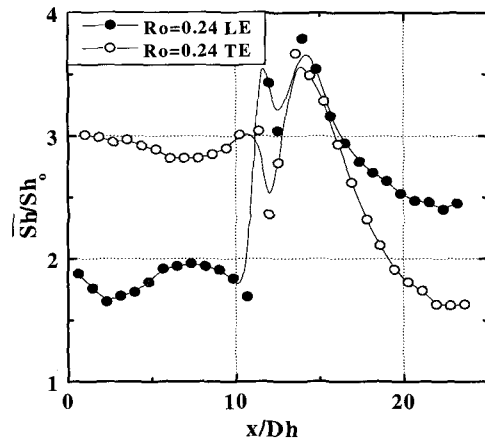


Fig. 6 Effect of Ro on \overline{Sh}/Sh_0 , with round-turn at $Ro=0.24$ and $Re=12,500$

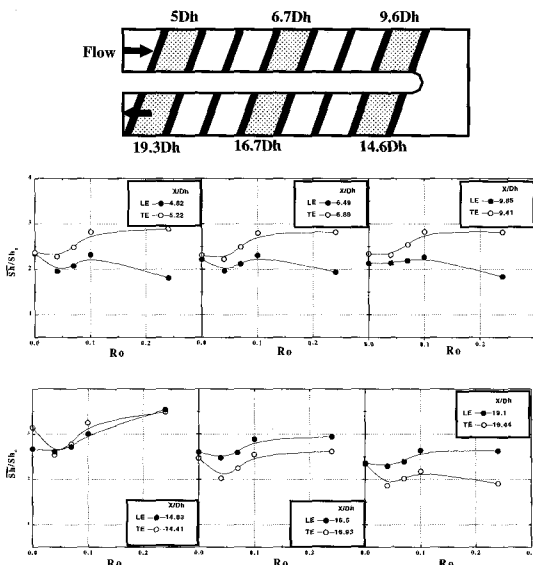


Fig. 7 Effect of rotation number on \overline{Sh}/Sh_0 with rib

정도 증가됨을 알 수 있다. 1차 유로에서 회전수의 증가에 따라 전·후연간의 열전달계수 차이가 증가됨을 알 수 있고, 곡관부 직후 영역에서는 곡관부에서 발생하는 이차유동(Dean type 와류)의 영향이 주도적이기 때문에 값의 차이가 거의 없다. 2차 유로 하류로 진행하면서 곡관부에서 생성되는 와류영향은 소멸되고 회전수에 의해서 생성되는 와류의 영향력이 커지면서 전연부가 후연부보다 높은 값을 가짐을 알 수 있다.

4. 결 론

- (1) 회전하지 않는 경우에는 경사요철을 설치함으로써 약 70%정도의 열전달 향상 효과를 갖는다.
- (2) Rotation 수의 증가에 따라서 1차유로의 후연, 2차유로의 전연에서의 경계층 두께의 감소로 열전달 향상이 나타난다.
- (3) 횡방향 열/물질전달계수의 비가 1차유로의 후연 부분은 Rotation 수의 증가에 따라 최대 3까지 상승 하였으며 전연에서는 점차 감소하여 $Ro=0.24$ 에서 2 이하를 나타내었다.
- (4) 1차 유로의 후연에서 $Ro=0.1$ 까지 열전달의 향상이 발생하나 이후 역전하여 일정한 값을 보인다. 반면, 전연에서는 Rotation 수의 증가에 따라 감소의 경향을 나타내었다. 2차 유로의 전연과 후연에서는 $Ro=0.1$ 까지 점차로 증가하는 분포를 보인다

가 이후에 일정해지는 경향을 나타내었다. 따라서 본 실험에서 Rotation 수의 최적값은 $Ro=0.1$ 근처에서 주어진다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기체설비요소 기술개발)의 지원에 의한 결과이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Parsons, J. A., Han, J. C., and Zhang, Y., 1995, "Effect of model orientation and wall heating condition on local heat transfer in a rotating two-pass square channel with rib turbulators," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 7, pp. 1151~1159.
- (2) Kuo, C. R., and Hwang, G. J., 1996, "Experimental Studies and Correlations of Radially Outward and Inward Air-Flow Heat Transfer in a Rotating Square Duct," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 23~30.
- (3) Shih, T. I. P., Lin, Y. L., Stephens, M. A. and Chyu, M. K., 1998, "Computation of flow and heat transfer in a ribbed internal coolant passage with and without rotation," *The Eleventh International Symposium on Transport Phenomena*, ISTP-11, Hsinchu, Taiwan, pp. 250~258.
- (4) Boelcs, J. S. and Johnson, B. V., 1999, "PIV investigation of the flow characteristics in an internal coolant passage with 45 deg arrangement," *International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition*, Indianapolis, Indiana, 99-GT-120.
- (5) Choi, Y. D., Iancovides, H. and Launder, B. E., 1989, "Numerical computation of turbulent flow in a square-sectioned 180 deg bend," *J. of Fluids Engineering*, Vol. 111, pp. 59~68.
- (6) Chen, C. C. and Liou, T. M., 2000, "Rotating effect on fluid flow in a smooth duct with a 180-deg sharp turn," *Proceedings of ASME TURBOEXPO 2000*, Munich, Germany, 2000-GT-0228.
- (7) Ambrose, D., Lawrenson, I. J., and Sparke, C. H.

- S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynam.*, 7, pp. 1173~1176.
- (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 ed., McGraw-Hill, New York.
- (10) 원정호, 이세영, 조형희, 2001, "180° 곡관부를 가지는 회전 덕트에서의 열/물질전달 특성," 대한기계학회논문집 B권, 제25권 제3호, pp. 405~413.
- (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) Soong, C. Y., Lin, S. T., and Hwang, G. J., 1991, "An Experimental Study of convective Heat Transfer in Radially Rotating Rectangular Ducts," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 604~611.