

유출홀이 설치된 회전하는 정사각 유로에서의 열/물질전달 특성

김상인[†]·김경민*·이동현*·이동호*·조형희**

Heat/Mass Transfer Characteristics on Rotating Square Channel with Bleed Holes

Sang-In Kim, Kyung-Min Kim, Dong-Hyun Lee, Dong-Ho Rhee, Hyung Hee Cho

Key Words: Rotating Duct(회전덕트), Bleed hole(유출홀), Coriolis Force(코리올리력), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법)

Abstract

The present study has been conducted to investigate convective heat/mass transfer inside the cooling passage with bleed holes. The rotating square channel has 40.0 mm hydraulic diameter and the bleed holes on the leading surface of the channel. The hole diameter of bleed hole is 4.5 mm and its spacing ($P/d=4.9$) is about five times of hole diameter. Mass flow rate through bleed holes is 10% of the main flow rate and rotation number is changed form 0.0 to 0.4. A naphthalene sublimation technique is employed to determine the detailed local heat transfer coefficients using the heat and mass transfer analogy. The cooling performance is influenced by mass flow rate through bleed holes and Coriolis force of rotating channel for fixed reynolds number. The heat transfer is enhanced around holes on the leading surface because of trapping flow by bleeding. However heat transfer on the leading surface is decreased due to Coriolis force.

기호설명

d	: 유출홀 직경	Sc	: Schmidt 수 [ν/D]
D_h	: 유로수력직경	Sh	: Sherwood 수 [$h_m D_h / D_{naph}$]
D_{naph}	: 물질확산계수(나프탈렌-공기)	Sh_0	: 요철이 없는 원형관에서의 Sh 수
H	: 덕트 높이	\overline{Sh}_L	: 횡방향(y) 라인 평균 Sherwood 수
h_m	: 물질전달계수	u_b	: 평균 속도
P	: 유출홀간 거리	W	: 유로의 폭 넓이
R	: 유로 최대 반경	x	: 주유동방향 거리
Re	: 수력직경기준 Reynolds 수 [$D_h u_b / \nu$]	y	: 덕트 중심으로부터 횡방향 거리
Ro	: Rotation 수 [$D_h \Omega / u_b$]	z	: 덕트 바닥면으로부터의 높이

† 연세대학교 대학원 기계공학과
E-mail : sikim@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과

그리스 문자

μ	: 점성계수
ν	: 동점성계수 [μ/ρ]
ρ	: 밀도
Ω	: 회전각속도

1. 서 론

가스터빈의 효율을 향상시키기 위하여 터빈입구온도(TET; Turbine Entry Temperature)의 증대는 필수적이다. 최근 가스터빈 엔진의 TET는 1500℃ 이상으로, 금속의 허용한계온도를 상회하는 수준이다. 이러한 고온의 연소가스로부터 블레이드를 보호하기 위하여 각종 냉각기법에 대한 연구가 오랜 기간에 걸쳐 이루어져왔다. 그 결과, 충돌제트냉각(impingement cooling), 막냉각(film cooling), 내부관냉각(internal passage cooling) 등과 같은 다양한 기술들이 개발 및 발전되어 블레이드 냉각에 응용되고 있다. 그 중, 내부관 냉각기술은 터빈의 압축기로부터 나오는 냉각유체를 블레이드 내부의 유로에 주입하여 강제대류가 일어나게 함으로써 고온의 환경으로부터 블레이드를 보호하는 방법이다.

기존 연구의 대부분은 충돌제트냉각, 막냉각, 내부관냉각에 대하여 개별적으로 이루어졌다. 그러나 실제 가스터빈에서는 내부관냉각과 막냉각이 동시에 일어나기 때문에 이에 대한 복합적인 열전달 특성을 이해할 필요가 있다. 따라서 최근에 내부관냉각과 막냉각을 함께 고려한 연구가 이루어지고 있다. Douglas 등⁽¹⁾은 1차 유로에 유출홀을 설치하였고 유출홀 후단부에 각각 질량유량계를 통해 유출 유량을 일정하게 또는 많아지고 적어지는 조건에 대하여 열전달 특성을 고찰하였으며, 유출홀을 통한 유출유량이 존재하는 내부관이 유출홀이 없는 내부관의 열전달률보다 높다는 결과를 얻었다. Ekkad 등⁽²⁾은 정지한 2차 유로에서 TLC(Thermochronic Liquid Crystal)를 이용하여 유출홀의 영향과 요철의 형상을 다양하게 변화시켜 가며 열전달 특성을 고찰 하였고, 가시화를 통해 유동 특성에 대한 이해를 높였다. Rigby 등⁽³⁾과 Stephens 등⁽⁴⁾은 수치해석을 통해 유출홀과 요철이 설치된 유로에서의 열전달 특성에 대하여 고찰하였다. Taslim 등⁽⁵⁾은 경사진 덕트에서 유출홀의 영향에 대하여 고찰 하였다. Ireland 등⁽⁶⁾은 유출홀 입구에서 열전달 특성에 대하여 실험과 수치해석을 병행하였다. Byerley 등⁽⁷⁾은 유출홀과 요철이 설치된 유로에서의 열전달 특성에 대하여 고찰 하였다. 기존의 연구들은 정지한 덕트에서 유출홀이 열전달 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 그러나 회전시에 나타나는

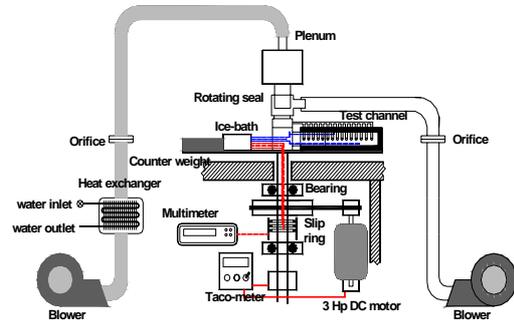


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

유출홀에서의 열전달 특성뿐만 아니라 국소 열/물질전달계수의 분포를 알 수 있는 자료는 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 유출홀이 설치된 덕트에 대해서 회전수를 변화시켜가며 유로 내부의 국소 열/물질전달 특성에 대해서 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 유출 회전장치의 개략도를 나타낸다. 크게 송풍부와 회전부, 그리고 측정부로 이루어져 있으며 송풍부는 주유동 공급부와 유출유량을 제어하는 흡입부로 다시 나누어져 있다. 이는 이중막으로 된 동심 회전축을 통해 송풍과 흡입을 가능하게 하였다. 송풍과 흡입은 원심블로워를 인버터를 통해 제어할 수 있도록 하였다. 또한 회전 중심축에서 송풍 및 흡입이 가능하도록 하기 위하여 중심축을 통해 송풍이 되도록 하였고, 중심축 외부로 유동을 흡입할 수 있는 2차축을 설치하였다. 각 축에서 회전시에 송풍이 가능하도록 각각 로테이팅실을 사용하였다. 기타 장치에 대한 자세한 구성은 Lee 등⁽⁸⁾ 및 Cho 등⁽⁹⁾에 제시되어 있다.

Fig. 2는 실험에 사용되는 덕트의 형상을 나타내며, Fig. 3은 좌표계를 나타내고 있다. 덕트는 1:1의 중형비를 갖는 정사각형 이고, 유출홀이 설치된 1차유로로 되어 있으며 옆벽은 아크릴로 제작되었다. 덕트의 수력직경(D_h)은 40.0 mm 이고, 수력직경대비 최대회전반경(RD_h)은 14.43이다. 유출홀의 직경(d)은 4.5 mm이고, 유출홀간 간격(P)은 22.0 mm로 유출홀간격 대 유출홀직경비(P/d)는 4.9이다. Fig. 3의 그림과 같이 테스트 플레이

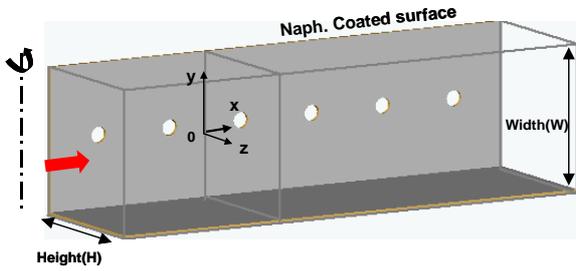
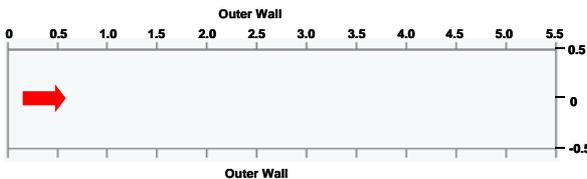
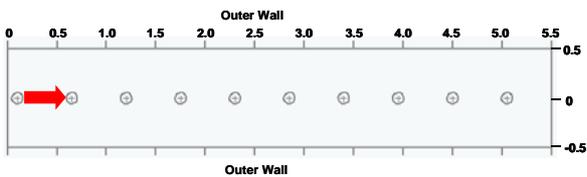


Fig. 2 Hole arrangement and geometry of ducts



(a) Smooth duct



(b) Duct with bleed holes
Fig. 3 The coordinate system

트의 길이는 $6.6D_h$ 이며, 전연면에만 유출홀이 있는 플레이트를 설치하고, 후연면은 매끈한 플레이트를 설치하였다. 전, 후연면에 설치된 테스트 플레이트에는 나프탈렌이 캐스팅되어 있고, 이는 열전달에서의 등온가열면에 상사된다. 덕트의 입구로부터 나프탈렌면의 시작지점까지 거리는 약 $6D_h$ 이며, 유출홀을 일정간격으로 설치하였다.

본 연구에서는 수력직경기준 Re 는 10,000으로 고정시키고, Ro 를 0.0, 0.2, 0.4로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 또한 유출홀을 통해 빠져나가는 유량은 덕트에 공급되는 주유동 유량에 10%가 되도록 조절하였다. 이는 송풍장치를 인버터를 통해 조절하여 홀을 통해 빠져나가는 유량이 일정하게 조절 하였다. 좌표계는 Fig. 2에 나타난 것과 같으며, 회전 중심축으로부터 313 mm 떨어진 위치에 나프탈렌표면이 시작되며, 나프탈렌표면이 시작되는 지점에서 너비방향 중심을 원점으로 설정하였다. 나프탈렌 측정영역은 주유동 방향(x)으로는 가열면이 시작되는 지점부터 끝나는 지점까지 $0 \leq x/D_h \leq 5.5$ 이며, 횡방향(y)으로는 유로의 외벽부터 반대편 외벽까지 $-0.5 \leq x/D_h \leq 0.5$ 에 해당된다.

2.2 실험결과 처리

본 연구에서는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 실험을 수행하였으며, 자세한 실험결과 처리 과정은 Lee 등⁽⁸⁾ 및 Cho 등⁽⁹⁾에 제시되어 있다.

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

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

이 때, D_{naph} 는 공기중에서의 나프탈렌 확산계수이다. 물성치는 Goldstein과 Cho⁽¹⁰⁾에 의하여 제시된 값을 이용하였다. 본 실험에서 Sh 수의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽¹¹⁾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⁽¹²⁾에 의해 제시된 매끈한 원형관내의 완전발달 난류 유동장에서의 물질전달계수는 열전달과 물질전달의 상사성에 의해 다음과 같이 표현된다.

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

또한, 한 피치 내의 각 지점에서 얻어진 Sh 값들을 해당 횡방향(y) 평균한 결과를 \overline{Sh}_L 로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유출홀이 없는 경우

Fig. 4는 유출홀을 설치하지 않은 매끈한 덕트에서의 실험결과를 횡방향 평균한 값을 x 방향을 따라 나타낸 그래프이다. x/D_h 가 0.0인 부분은 나프탈렌표면이 시작되는 부분이기 때문에 \overline{Sh}_L/Sh_0 값이 높은 특성을 보이나 주유동 방향을 따라 진행하면서 평균 열/물질전달계수가 전연면과 후연면 모두 점차 매끈한 원형관내의 완전발달 난류 유동장에서의 열전달계수 Sh_0 에 수렴함을 알 수 있다.

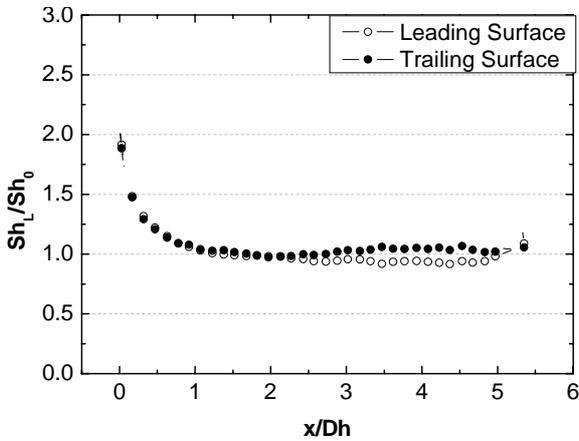


Fig. 4 Local average Sherwood number ratio ($\overline{Sh}_L/\overline{Sh}_0$) for the smooth duct

3.2 유출홀이 설치된 경우

Fig. 5는 유출홀을 설치한 전연면에서의 회전수에 따른 국소 열/물질전달분포를 나타내며, $2.4 \leq x/D_h \leq 5.0$ 에 해당되는 영역을 제시하였다. 유출유량은 주유동 유량에 10%가 유출홀을 통해 빠져나가며, 각 홀을 통해 빠져나가는 유량은 일정하다. Fig. 5(a)는 $Ro=0.0$ 인 정지덕트에서의 유출홀이 있는 경우에 대한 국소 열/물질전달분포를 나타낸다. 전체적인 열/물질전달분포는 매끈한 덕트의 실험결과와 다르지 않으나, 유출홀의 압력이 낮기 때문에 유동이 유출홀로 끌려 들어가게 되고, 미처 빠져나가지 못한 유동은 유출홀 하단부에 부딪히며 높은 열/물질전달분포를 보인다. 이렇게 부딪힌 유동은 하류로 갈수록 점차 발달함을 알 수 있다.

Fig. 6은 유출이 없는 매끈한 덕트와 유출홀이 설치된 덕트에서 $Ro=0.0$ 에서의 실험 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)에서와 같은 유출홀의 특성으로 인해 유출홀을 설치한 실험결과는 매끈한 정지덕트의 실험결과와 비교하여 전체 평균 열/물질전달계수가 약 40% 증가하였음을 확인 하였다. 또한 유출홀의 특성은 다음 유출홀 전까지만 영향을 미치며 모든 유출홀 구간에서 같은 국소 열/물질전달분포의 경향을 보인다. Fig. 5(b)는 $Ro=0.2$ 로 회전하는 경우의 국소 열/물질전달분포를 나타낸다. 유출홀의 영향은 Fig. 5(a)의 경우와 다르지 않지만 회전영향으로 코리올리력이 후연면쪽으로 작용하기 때문에 정지된 경우와 달리 전연면 쪽의 유동이 압력이 낮은 유출홀로 빨려들어 가는 강도가 약해져 유출홀 후단부에 약하게 부딪히

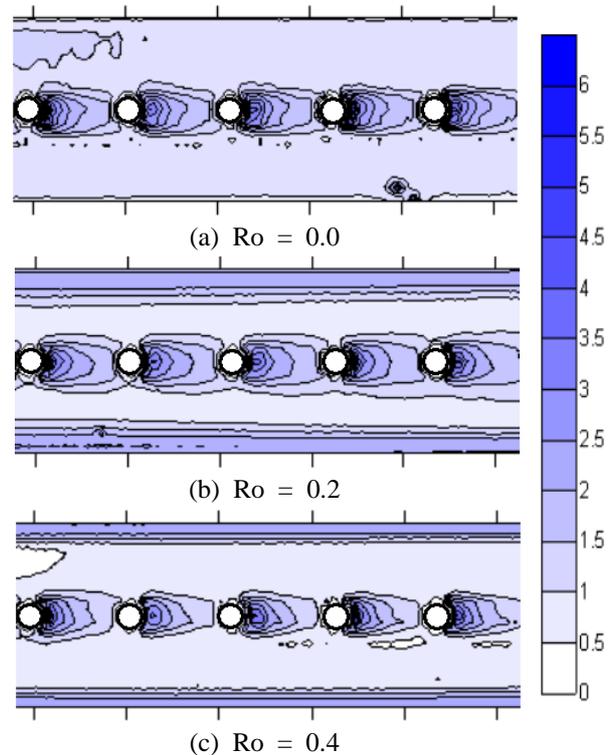


Fig. 5 Contour plots of $\overline{Sh}_L/\overline{Sh}_0$ on the leading surface for rotation numbers

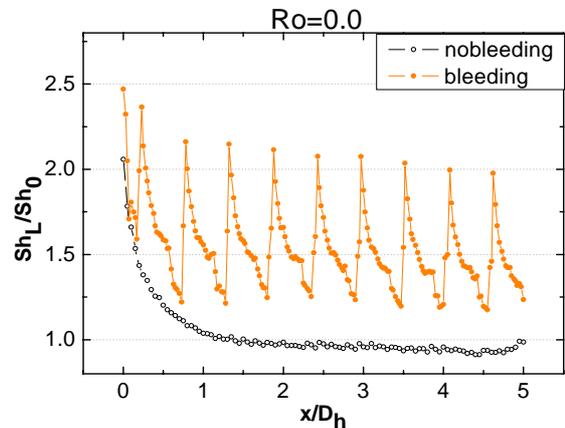


Fig. 6 Local average Sherwood number ratio ($\overline{Sh}_L/\overline{Sh}_0$) for the nobleeding and the bleeding

고, 부딪힌 유동 또한 전연면에서 빨리 떨어지기 때문에 $Ro=0.0$ 보다 상대적으로 낮은 열/물질전달분포를 보인다. 또한 코리올리력의 작용으로 유출홀과 외벽사이에서도 $Ro=0.0$ 보다 낮은 열/물질전달분포를 보이는 부분을 관측할 수 있다. Fig. 5(c)는 $Ro=0.4$ 로 회전하는 경우의 국소 열/물질전달분포를 나타낸다. Fig. 5(b)의 경우와 크게 다르지 않으며, 회전수의 증가로 코리올리력이 후연면에 더 크게 작용하여 전반적으로 낮은 열/

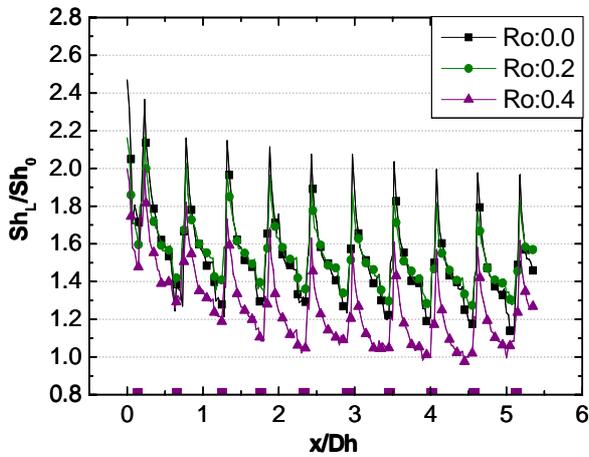


Fig. 7 Line-averaged \overline{Sh}_l/Sh_0 on the leading surface for rotation number

물질전달분포를 보이는 영역자체가 확대 되며, 유출홀의 영향 역시 약해지는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 각각의 회전수에 따른 횡방향(y) 평균 열/물질전달계수를 x/D_h 에 따라 나타낸 그래프이다. $x/D_h=0$ 에서는 세 경우 모두 높은 횡방향 평균 열/물질전달계수를 보이고, x/D_h 가 증가함에 따라서 점차 낮아지는 경향을 보인다. 이는 유출홀을 통해 빠져나가는 유량으로 인해 하류로 갈수록 절대유량이 줄어드는 것과 열경계층의 발달 때문이다. 가장 높은 열/물질전달계수는 유출홀 직후에 나타나며, 회전수 증가에 따라 피크값의 위치변화는 없고 절대값이 작아지는 것을 알 수 있다. 앞서 Fig. 5에서 확인 할 수 있었던 일정 한 간격으로 피크값을 보이는 것은 압력이 낮은 유출홀로 유입되는 유동의 영향으로 유출홀 직후에서의 횡방향 평균 열/물질전달계수가 높게 나타나기 때문이며, 유출홀 하류로 갈수록 열경계층의 발달로 크게 감소하는 것을 알 수 있고, 유출홀이 설치된 구간에서 가장 낮은 횡방향 평균 열/물질전달계수를 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 회전수가 증가할수록 코리올리력은 커지기 때문에 유동은 후연면으로 크게 쏠리게 되어 전연면의 유출홀 하류에서의 유동 강도가 약해지고, 전체적인 횡방향 평균 열/물질전달계수는 점차 줄어드는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수력직경 40mm인 정사각유로에서 유출홀이 설치된 경우의 열/물질전달 특성을 고찰 하였다. 국소 열/물질전달계수의 분포와 횡방향 평균 열/물질전달계수로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 유출홀을 설치하지 않은 매끈한 덕트에서의 열/물질전달계수는 매끈한 원형관내의 완전발달 난류 유동장에서의 열전달계수 Sh_0 의 값과 일치함을 알 수 있었다. 따라서 유출홀을 설치한 덕트의 열/물질전달계수결과와 비교 할 수 있었다.

(2) 유출홀을 설치한 덕트의 정지실험 결과가 유출홀을 설치하지 않은 매끈한 덕트에서의 정지 실험결과보다 높은 열/물질전달계수를 갖는 것을 확인하였다. 이는 덕트에 설치된 유출홀을 통하여 주유동 유량의 10%가 빠져나가면서 유동을 유출홀 쪽으로 끌어당긴 후 홀을 빠져나가지 못한 유동이 유출홀 하류에 부딪히는 현상 때문인 것으로 나타났다.

(3) 유출홀을 설치한 덕트에서 회전수가 증가할수록 코리올리력이 증가하여 전연면에서 열/물질전달계수가 낮은 영역이 점차 확대되는 것을 확인 하였다. 또한 회전의 영향으로 전연면으로 흐르는 유동이 후연면쪽으로 쏠리게 되어 유출홀 하류에 부딪히는 유동의 강도가 작아져 결국 전연면의 국소평균 열/물질전달계수가 작아지는 것이 관측되었다. 따라서 회전수의 증가할수록 유출홀의 영향이 감소한다.

(4) 유출홀이 설치된 덕트에서 하류로 갈수록 유출홀로 빠져나가는 유량으로 인해 잔존하는 절대유량이 줄어드는 영향과 경계층의 발달로 x/D_h 로 진행함에 따라 횡방향 평균 열/물질전달계수가 낮아지지만 유로내의 평균 열/물질전달계수는 유출홀의 영향으로 증가 하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업지원의 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., Byerley, A. R., 1996, "Heat Transfer Enhancement Within a Combinations of Ribs With Film Cooling Holes," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 428-434.
- (8) Lee, S. Y., Won J. H., Choi, C. and Cho, H. H., 2000, "Heat/Mass Transfer in Rotating Cooling Passage of Turbine Blade," *Proceedings of Energy and Power Division 2000 Fall Annual Meeting*, pp. 46-54.
- (9) 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*.
- (10) 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.
- (11) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
- (12) McAdams, W. H., 1942, "Heat Transmission, 2nd Edition," *McGraw-Hill*, New York.
- (13) Kakac, S., Shah, R. K. and Aung, W., 1987, Handbook of single-Phase convective heat transfer, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, pp.75-83.