

수직분사각도를 갖는 직사각 막냉각홀 내부에서의 유동 및 열/물질전달 특성

홍성국*·이동호*·강승구**·조형희†
(2003년 10월 27일 접수, 2004년 3월 5일 심사완료)

Flow and Heat Transfer Within a Rectangular Film Cooling Hole of Normal Injection Angle

Sung Kook Hong, Dong Ho Rhee, Seung Goo Kang and Hyung Hee Cho

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Film Cooling(막냉각), Rectangular Hole(직사각홀), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌승화법)

Abstract

An experimental study has been conducted to investigate the flow and heat/mass transfer characteristics within a rectangular film cooling hole of normal injection angle for various blowing ratios and Reynolds numbers. The results are compared with those for the square hole. The experiments have been performed using a naphthalene sublimation method and the flow field has been analyzed by numerical calculation using a commercial code (FLUENT). The heat/mass transfer around the hole entrance region is enhanced considerably due to the reattachment of separated flow and the vortices generated within the hole. At the hole exit region, the heat/mass transfer increases because the main flow induces a secondary vortex. It is observed that the overall heat/mass transfer characteristics are similar to those for the square hole. However, the different heat/mass transfer patterns come out due to increased aspect ratio. Unlike the square hole, the heat/mass transfer on the trailing edge side of hole entrance region has two peak regions due to split flow reattachment, and heat/mass transfer on the hole exit region is less sensitive to the blowing ratios than the square hole.

기호설명

- | | |
|--|--|
| D_h : 사각 막냉각홀의 수력직경 | Re_{D_h} : 막냉각홀 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈 수, $U_2 D_h / \nu$ |
| D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌의 물질확산계수 | Sc : Schmidt 수 |
| h_m : 국소 물질전달계수 | Sh : Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$ |
| L : 막냉각홀 길이 | \overline{Sh} : x/D_h 방향으로의 평균 Sh 수 |
| L.E.S. : 막냉각홀 전연면 | T.E.S. : 막냉각홀 후연면 |
| M : 분사비, $\rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty$ | T.I. : 주유동의 난류강도 |
| Nu : Nusselt 수, $h D_h / k$ | U_∞ : 주유동 속도 |
| Pr : Prandtl 수, $\mu C_p / k$ | U_2 : 냉각유체의 분사속도 |
| | x : 홀 둘레 좌표, Fig. 2 |
| | y : 원점으로부터의 수직좌표, Fig. 2 |

* 회원, 연세대학교 대학원
 ** (주)삼성전자
 † 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
 E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr
 TEL:(02)2123-2828 FAX:(02)312-2159

그리스문자

- ρ_2 : 이차유동의 밀도
 ρ_∞ : 주유동의 밀도

1. 서 론

최근 고효율의 가스터빈엔진의 개발과 함께 고온의 가스터빈요소 냉각기술에 대한 중요성이 증가하고 있다. 1,400~1,500°C를 상회하는 터빈입구온도로 인하여 가스터빈엔진의 효율과 성능은 증가되는 반면 내열도가 높은 소재의 사용과 함께 고효율의 냉각기술이 요구되고 있다. 따라서 가스터빈요소에 대한 내부대류냉각, 충돌제트냉각과 더불어 막냉각기법의 복합적인 응용은 필수적이다. 막냉각은 요소표면의 구멍이나 슬롯을 통하여 저온의 유체를 고체표면에 분사하여 고온가스로부터 일종의 단열막을 형성함으로써 표면을 고온가스로부터 보호하는 냉각기법이다. 강도와 제작상의 문제로 인해 일열 이상의 이산된 원형 내지 변형된 원형의 막냉각홀이 주로 사용되고 있으나 연속적인 슬롯을 통해 냉각유체를 분사하는 것이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해 최근 연속적인 슬롯에 가까운 형태로서 일열 이상의 이산된 사각 내지는 변형된 사각형태의 막냉각홀이 사용되고 있다.

지금까지의 막냉각에 관한 연구는 분사홀 주위보다 홀 하류영역에 대한 실험을 중심으로 이루어져왔다. 최근 관심이 높아지고 있는 전면막냉각(total coverage cooling)과 터빈블레이드 전연(shower-head)영역에서의 막냉각의 경우 전영역이 분사홀로 구성됨으로써 일반적인 막냉각에서 고려되는 인자들, 즉 횡방향분사각도, 분사비, 막냉각홀의 형상 등에 대한 연구와 더불어 분사홀 인접영역 및 홀 내부에서의 유동 및 열전달에 대한 이해가 필요하다. 따라서 고온가스에 직간접적인 영향을 받게 되는 막냉각홀 내부면에 대한 많은 연구가 최근 들어 이루어지고 있다.^(1~5)

이러한 많은 연구에도 불구하고 대부분 연구는 막냉각홀의 단면이 원형인 경우에 국한되어 있으며 단면이 사각형상인 막냉각홀에 대해 막냉각성능이나 홀 내부유동, 열전달에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. Muldoon 과 Acharya,⁽⁶⁾ Licu 등⁽⁷⁾이 단면이 정사각형이고 주유동에 대해 수직 또는 30°의 분사각도를 가지는 막냉각홀에 대해 각각 수치해석적, 실험적 연구를 수행하였지만, 관심영역이 홀 외부의 유동과 하류의 막냉각 특성에 국한되어 있다. 다만 최근에 강승구⁽⁸⁾와 이

동호 등⁽⁹⁾이 정사각 막냉각홀에 대해 각각 대칭과 비대칭 입구유동조건을 고려한 연구를 수행하여 정사각 막냉각홀 내부의 열전달 특성에 대한 결과를 발표한 바 있다. 하지만 변형된 사각 막냉각홀의 적용시, 다양한 사각홀 형상이 요구되므로 기존의 정사각 막냉각홀에 대한 연구이외에도 종횡비가 다른 사각홀의 경우에 대한 실험 및 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 수치해석과 나프탈렌 승화법을 이용하여 수직분사각도를 갖는 직사각 막냉각홀 내부에서의 유동 및 열/물질전달특성을 고찰하였다. 또한 기존의 정사각 단면 막냉각홀에서의 유동 및 열/물질전달특성과 비교, 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

직사각 막냉각홀 내부에서의 열전달 특성에 관한 연구를 위해 Fig. 1에 개략도로 제시된 실험장치를 사용하였다. 풍동은 개방흡입형(open suction type)으로 송풍기를 사용하여 주유동을 만들고, 2차유동 분사장치를 이용하여 막냉각홀을 통해 공기를 분사시키도록 되어 있다. 주유동은 실내공기를 풍동입구로부터 흡입하여 시험부, 디퓨저, 송풍기를 거쳐 실외로 방출된다. 사용된 공기는 나프탈렌을 포함하고 있기 때문에 다시 풍동입구로 유입되지 않도록 하였다. 시험단면의 크기는 300×400 mm이고, 길이는 1200 mm이며, 수축부의 면적 축소비는 9:1이다. 본 실험에서 사용한 주유동의 유속은 분사비에 따라 10~26 m/s까지 변화시켜가면서 실험을 수행하였고, 이때 난류강도는 약 0.5%이다. 열선 유속계(IFA-300)를 이용하여 막냉각홀이 설치된 위치에서의 경계층 두께를 측정된 결과, 유속 20 m/s기준인 경우에 약 15 mm($\delta/D_h=0.3$)로 나타났다.

2차유동 분사장치는 송풍기, 열교환기, 오리피스 유량계(orifice flowmeter), 플레넘챔버(plenum chamber) 등으로 구성되어 있다. 2차유동 분사장치에 항온조 및 열교환기를 설치하여 실험 중 주유동과 분사체트의 온도가 일치하도록 유지하였으며 실험 중 주유동과 2차유동의 온도를 정확하게 측정하기 위해 각각의 유로에서 막냉각홀 부근에 J-type 열전대를 부착하였다.

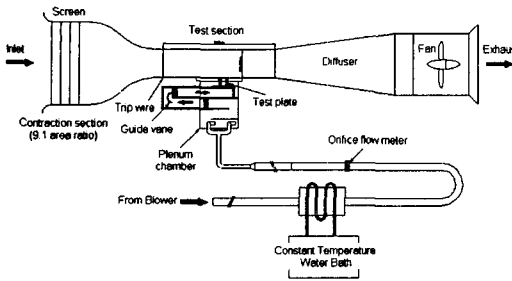


Fig. 1 Schematic view of wind tunnel and test section

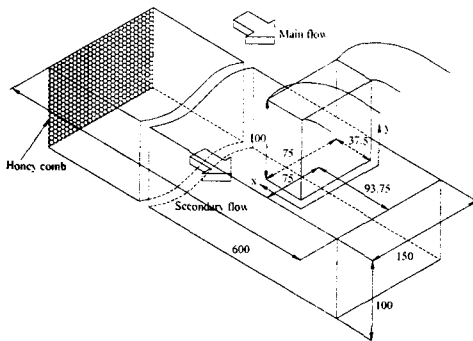


Fig. 2 Schematic view of injection hole and duct

플레넘챔버는 냉각공기가 주유동과 같은 방향으로 진행하다가 사각막냉각홀에 유입되고 막냉각홀을 통해 주유동에 수직방향으로 분사되는 경우를 모사하기 위한 형태로 제작되었다. 플레넘 챔버에 유입된 공기는 유입되는 과정에서 발생할 수 있는 유동의 불균일성을 최대한 억제하고 충분히 혼합시키기 위해 3차례 방향을 전환한 후 막냉각홀 입구유로에 유입되게 된다.

Fig. 2는 시험부에 직사각 막냉각홀이 설치된 경우에 대한 개략적인 그림이다. 이때 막냉각홀의 단면은 종횡비가 2가 되는 75×37.5 mm로서 수력직경(D_h)은 50 mm이며, 이후 제시되는 길이는 모두 수력직경 D_h 로 무차원화하였다. 홀의 길이(L)는 $2D_h$ (100 mm)로서 홀 입구에서 박리된 유동이 홀 내부면에 충분히 재부착하도록 하여 분사유동과 주유동의 상호작용에 입구영역의 영향을 최소화하도록 설계하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 막냉각홀 입구유로의 좌우 폭은 배열막냉각의 경우에 적용하는 홀간 간격(pitch)을 모사하기 위하여 대칭조건에 근접하도록 홀 중심으로부터 $1.5D_h$ (75 mm) 떨어진 곳에 벽면을 설치하였다.

2.2 승화깊이 측정장치

열/물질전달계수를 계산하기 위해서 시험시편의 나프탈렌 층의 표면형상을 실험전후에 측정하여 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정한다. 이를 위한 측정장치는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer; LBB-375TA-020) 및 2차원 자동이송장치로 구성된다. 측정장치의 자세한 사양은 이동호 등⁽¹¹⁾과 동일하다.

2.3 열/물질전달계수

본 연구에서 얻어진 물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽¹²⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였으며 국소 물질전달계수(h_m)의 수식은 이동호 등⁽¹¹⁾에서 제시된 바와 같다.

앞에서 계산된 물질전달계수는 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며,⁽¹³⁾ 본 실험이 수행된 온도인 상온 25℃의 경우에 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4}, Nu=0.624Sh \tag{2}$$

실험결과와 오차해석은 Kline과 McClintock⁽¹⁴⁾이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 전체적으로 ±7.1% 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

2.4 수치계산

직사각 막냉각홀 내부의 유동특성을 고찰하기 위해 본 연구에서는 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT(ver. 6.0)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 격자수와 계산시간을 줄이기 위해 중심면에 대칭조건을 이용하였다. 관심영역인 직사각 막냉각홀 내부는 격자수가 계산 결과에 영향을 미치지 않는 30×30×100개의 정렬격자계를 주었으며 y/D_h 단면에 해당하는 30×30개의 격자는 벽면 부근에서 격자밀도가 높고 중심부에서 낮도록 조정하였다. 전체 계산영역의 셀(cell)수는 주유동 덕트와 2차유동 유입덕트까지 포함하여 약 18만개를 사용하였다. 수치해석 모델은 3차원 비

압축성 유동의 정상상태로 가정하고, RNG $k-\epsilon$ 난류 모델과 standard wall function을 사용하였다.

계산영역의 치수는 실험을 실시한 실험장치와 동일하게 설정하였다. 주유동의 평균유속과 난류강도는 각각 20 m/s, 0.5%이며, 2차유로 입구에서의 평균유속과 난류강도를 1.45 m/s, 2.0%로 설정하여 계산하였다. 이때 홀 내부 평균유속은 7.8 m/s로써, Reynolds 수는 $Re_{Dh}=25,000$ 이며, 분사비 $M=0.39$ 에 해당한다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 직사각 단면을 갖는 막냉각홀에 대하여 분사비 및 홀 내부 Reynolds 수 변화에 따른 홀 내부에서의 유동/열전달특성을 고찰하였으며, 이에 대한 조건은 표 1에 제시되어 있다. 이러한 유동조건은 수력직경기준으로 기존의 연구결과인 정사각 막냉각홀과 동일하도록 하여 서로 다른 종횡비의 사각 내부의 열/물질전달 계수를 비교할 수 있도록 하였다.

3.1 직사각 막냉각홀 내부에서의 유동특성

Fig. 3은 직사각 막냉각홀 내부유동에 대한 수치계산된 결과를 벡터선도로 표시한 것으로서 꼭지점에 표시한 숫자는 x/D_h 좌표를 뜻한다. 그림에서와 같이 2.25-3.75면($2.25 \leq x/D_h \leq 3.75$)은 전연면(L.E.S., leading edge side), 0-1.5면($0 \leq x/D_h \leq 1.5$)은 후연면(T.E.S., trailing edge side)에 해당되며 1.5-2.25면($1.5 \leq x/D_h \leq 2.25$)과 3.75-0면($3.75 \leq x/D_h \leq 0$)은 측면을 의미한다.

Fig. 3(a)는 막냉각홀 입구인 $y/D_h=0.0$ 에서의 유동분포를 나타낸 것으로 각 입구모서리, 특히 각 꼭지점에서 중심을 향해 유동이 박리되는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 입구유동이 홀 내부의 유동방향에 대해 수직으로 접근함으로써 홀 입구 4개의 모서리에 대해 서로 다른 박리조건을 형성하고 각 입구모서리에 기하학적으로 압력장을 공유하지 못하기 때문이다. 또한 횡방향으로 접근하는 입구유동에 의해 전연 모서리($x/D_h=2.25, 3.75$)에 박리되는 유동이 후연 모서리($x/D_h=0, 1.5$)에서 박리되는 유동보다 운동량이 더 크므로 입구유동의 중심은 하류방향인 후연면에 치우쳐 형성되고 있음을 볼 수 있다.

Table 1 Experimental conditions

Hydraulic diameter	Film cooling flow		Main flow	Blowing ratio
	U_2 (m/s)	Re_{Dh}	U_∞ (m/s)	M
50	4.8	15,000	12.3	0.39
	7.8	25,000	0	free jet
			10	0.78
			20	0.39*
10.2	32,000	26	0.39	

(* : numerical simulation is also performed)

$y/D_h=0.2$ 인 경우[Fig. 3(b)], 4개의 모서리에서 박리된 유동에 의해 복잡한 유동이 발생되고 있음을 알 수 있다. 전연면의 모서리부근에서는 횡방향 운동량에 의해 유동이 크게 후연면으로 편향되고 있으며 후연면에서는 이미 2차와류가 생성되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 2차와류에 의해 후연면의 $x/D_h=0.375(A)$ 와 1.125(B) 지점부근에서 유동의 가속이 이루어지고 있으며 측면에서는 양쪽 모서리에서 박리된 유동의 일부가 충돌되고 있음을 관찰할 수 있다.

이후, 유동은 y/D_h 방향으로 진행하면서 점차 입구영향을 벗어나 홀 내부의 모든 모서리에 2차와류가 형성되면서 점차 발달된 사각덕트 유동에 가까워지고 있으나 여전히 전연면(L.E.S.)에서 후연면(T.E.S.)방향으로 유동이 이동하는 것을 알 수 있으며, 이와 함께 모서리 와류 역시 그 중심이 점차 이동하고 변형되어 가고 있음을 볼 수 있다. $y/D_h=0.6$ 인 경우[Fig. 3(c)], 모든 모서리부근에서 2차와류가 생성되고 있으며 전연면 쪽의 와류규모가 후연면 쪽보다 크게 나타나고 있다. 2차와류의 구조는 기존의 정사각 막냉각홀 모서리 부근에서 관찰되는 2차와류 구조와는 다소 차이가 있다. 종횡비 1인 정사각 막냉각홀⁽⁸⁾에서는 각각 모서리에서 서로 반대로 회전하는 한 쌍의 2차와류 특성이 관찰되나 종횡비가 2인 직사각형 홀의 경우에는 측면(1.5-2.25면, 3.75-0면)에 가깝게 발생하는 2차와류가 작거나 거의 발생되지 않는 것으로 나타난다. 이는 종횡비가 커질수록 상대적으로 전/후연면간의 거리가 감소되면서 2차와류의 상호작용이 증가되어 측면부의 2차와류는 사라지고 하나의 모서리 와류만이 생기기 때문인 것으로 판단된다.

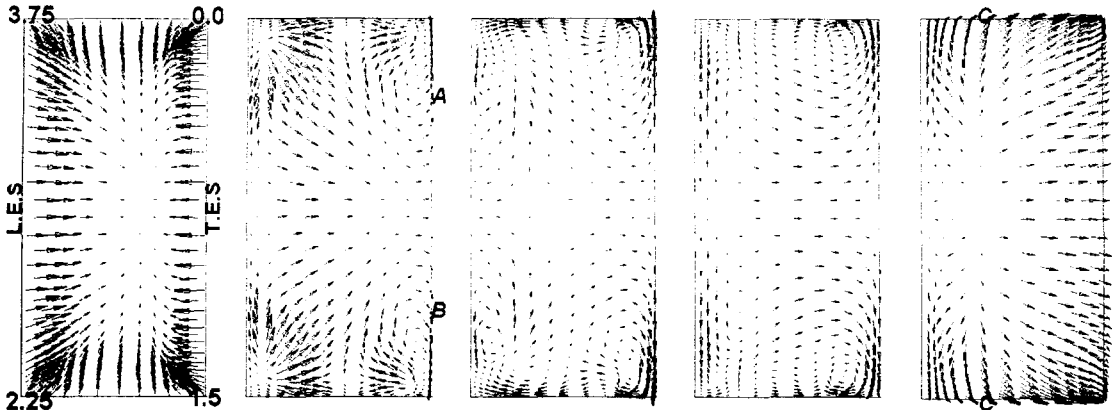


Fig. 3 Velocity vector plots in rectangular film cooling hole

$y/D_h=0.6$ 에서 나타나는 유동특성은 하류로 진행되면서 주유동에 의한 영향으로 인해 발달된 사각덕트 유동과는 상당히 달라짐을 볼 수 있다. $y/D_h=1.4$ 지점[Fig. 3(d)]의 유동구조를 살펴보면 전연면 쪽의 내부 모서리에 존재하던 2차와류는 사라지고 후연면의 모서리에서만 유지된 채, 측면 근처에서도 유동이 후연면으로 이동됨으로써 주유동에 의한 영향이 홀 내부유동에 미치고 있음을 알 수 있다. 이후에는 주유동에 의한 영향이 더욱 커지면서 후연면의 모서리에 형성되던 2차와류도 소멸되면서 횡방향 유동만이 나타나게 되며, 막냉각홀 출구인 $y/D_h=2.0$ [Fig. 3(e)]에 이르러 분사되는 유동은 주유동 방향으로 상당히 편향됨으로써 그 가장자리가 전연면과 약 $0.2D_h(C)$ 이상 떨어져 지어 주유동과의 상호작용이 강하게 일어나는 영역이 형성된다. 따라서 이 영역에서는 주유동 쪽에서 형성된 말굽와류(horseshoe vortex)와는 반대로 회전하는 와류가 형성되며, 주유동과 반대방향의 유동이 나타남을 관찰할 수 있다.⁽¹⁾

본 연구에서 관찰되는 직사각 막냉각홀에 대한 유동은 정사각 막냉각홀의 경우와 전체적으로 유사한 유동특성을 보이고 있으나 앞서 언급된 바와 같이 막냉각홀의 종횡비가 커지면서 모서리 부근에 형성되는 2차와류의 구조 및 강도에서 차이가 발생되고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 4는 각각 홀의 중심면과 홀의 내부표면 근접부에서의 수치계산된 유동결과를 나타낸 것으로 상단에 위치하는 \odot (T.E.S.), \ominus (L.E.S.), \blacktriangleright (중심면, 측면), 등의 기호는 각 면을 내부에서 바라보았을 때 주유동의 방향을 표시하며 이러한 표시법은 이후 열/물질전달 결과에서도 사용된다. 직사각홀 중심면(Fig. 4(a))에서의 경우, 유동이

입구영역에서 박리되며, 재부착한 이후 발달하게 된다. 또한 전연부 쪽에서 재순환 영역이 더 크게 나타나고 있으며 출구 인접부에서는 전연부에서 주유동의 영향으로 인하여 반시계방향으로 회전하는 와류가 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 전반적인 유동특성은 원형홀^(3,5)이나 정사각형홀⁽⁸⁾ 경우들과 매우 유사한 것을 알 수 있다.

전연면[Fig. 4(b)]부근의 유동을 살펴보면 먼저 박리된 입구유동의 재부착 길이가 약 $y/D_h=0.6\sim 0.7$ 에서 나타나고 있는데 이는 입구유동이 홀 내부에 대해 횡방향으로 유입되면서 후면에 해당하는 2.5-3.75면(L.E.S.)에 저압영역이 형성되어 재부착이 지연되었기 때문으로 판단된다. 이러한 영향은 재부착 이후에도 나타나 모서리 영역에서 상당한 하향류가 발생하는 것을 관찰할 수 있으며 재순환영역은 중심선을 기준으로 두 영역으로 분리되고 있다. 이와 함께 $y/D_h=1.6(D)$ 에 이르러서는 분사유동이 주유동 방향으로 편향되면서 표면부근에서 유동의 박리현상이 나타나며, 이 영역은 앞서 설명된 말굽와류에 의해 유도된 와류에 의해 반시계 방향의 하향류가 발생하고 있음을 쉽게 관찰할 수 있다.

측면[Fig. 4(c)]부근에서는 입구유동 방향에 나란히 놓여 상당히 복잡한 입구부근 유동을 형성하며 출구부근에서는 분사유동이 주유동 방향으로의 편향되는 것을 볼 수 있다.

후연면 근접부[Fig. 4(d)]에서의 유동을 살펴보면 입구모서리에서 박리된 유동이 대략 $y/D_h=0.2(E)$ 에서 재부착하고 있음을 볼 수 있으며, 이러한 재부착한 유동은 $x/D_h=0$, $x/D_h=1.5$ 의 모서리를 향해 퍼져나가며 출구로 흐르게 됨을 볼 수 있다.

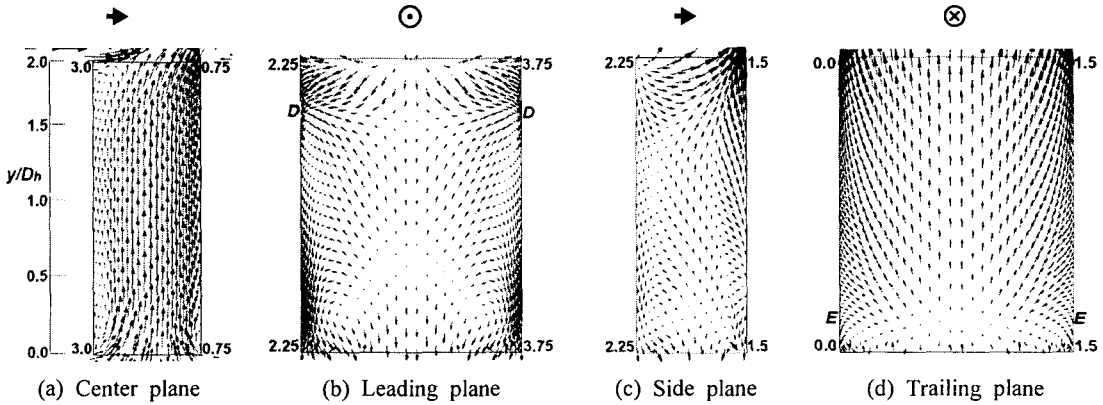


Fig. 4 Velocity vector plots in rectangular film cooling hole

홀 내부 벽면부근에서의 유동에서도 정사각형의 경우와 대부분 유사한 특성을 보이고 있으나 종횡비 증가로 인해 양쪽 측면에 의한 영향이 상대적으로 감소함을 알 수 있으며 특히, 전연면의 경우에는 주유동 영향의 감소로 말굽와류에 의해 발생하는 하향류가 정사각 막냉각홀⁽⁸⁾ 경우에 비해 내부홀로 알게 파고들고 있음을 관찰할 수 있다.

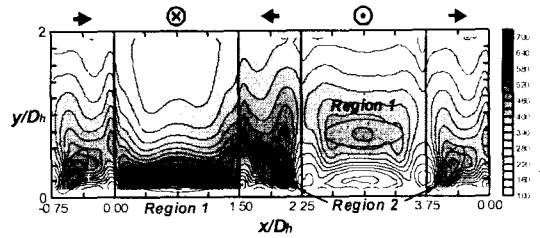
3.2 직사각 막냉각홀 내부의 열/물질전달특성

3.2.1 주유동이 없는 경우의 열/물질전달특성

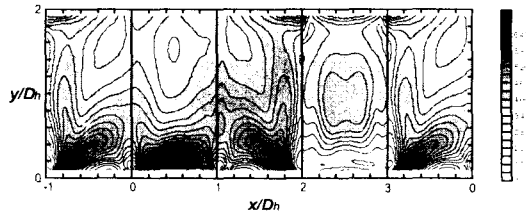
막냉각홀 내부에서의 $Re_{Dh}=25,000$ 을 기준으로 하여 직사각형 막냉각홀 내부에서의 열/물질전달 특성변화에 대한 열/물질전달 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 주유동이 없는 경우 직사각홀 내부 표면에서의 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 앞에서와 마찬가지로, 그림의 상단에 표시된 \otimes (0-1.5면, T.E.S.), \odot (2.25-3.75면, L.E.S.), \blacktriangleright (3.75-0면), \blacktriangleleft (1.5-2.25면) 등의 기호는 각 면을 내부에서 바라보았을 때 주유동의 방향을 표시하며, 편의상 주유동이 없는 경우에 대해서도 동일하게 사용하였다. 또한 $-0.75 \leq x/D_h \leq 0$ 면은 $3.75 \leq x/D_h \leq 0$ 면에 대한 동일한 결과로서 각 면에 대한 대칭성을 확인하기 위해 추가로 도시하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 $y/D_h \leq 1$ 인 영역에서 높은 열/물질전달특성을 보이는 영역은 Fig. 5(a)에 표시된 바와 같이 홀 내부 유동특성에 따라 크게 두 영역으로 나뉘게 된다. 영역 1은 후연면(0-1.5면) 또는 전연면(2.25-3.75면)에서 크게



(a) Rectangular hole



(b) Square hole⁽⁸⁾

Fig. 5 Contour plots of Sherwood number for rectangular injection hole at $Re_{Dh}=25,000$ without main stream

나타나며, 이 영역은 홀의 입구모서리에서 박리된 유동이 홀 내부면에 재부착하면서 나타나는 높은 열/물질전달계수 영역이다. 영역 2는 나머지 두 측면인 1.5-2.25면 및 3.75-0면에서 나타나는데, 홀 내부유로 모서리 와류의 충돌과 이동에 의해 열/물질전달이 증가하는 영역이다.

0-1.5면(T.E.S.)의 경우, 재부착이 일어나는 $y/D_h=0.2$ 부근에서 열/물질전달계수가 높게 나타나는 영역 1이 두 영역으로 분리되어 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 영역 1의 중심은

$x/D_h=0.375$ 와 1.125 부근에서 나타나고 있는데 이는 종횡비 증가로 인해 재부착 유동이 분리되고 2차와류에 의한 유동이 가속되었기 때문으로 사료된다. 재부착 이후, 표면에서 경계층유동과 같이 발달하게 되는데 측면으로 향해 가속되면서 모서리영역에서 상대적으로 높은 열/물질전달계수 분포를 보이고 있다.

측면에 해당하는 $1.5-2.25$ 면의 경우, $x/D_h=2.25$ 모서리 입구에서 시작된 높은 열/물질전달 영역은 점차 면의 중심으로 향하고 있다. 이와 같은 높은 열/물질전달 영역은 대략 $y/D_h=0.4$ 부근에 나타나는데 이 지점을 측면에 형성되는 평균적인 재부착지점으로 생각할 수 있을 것이다. 또한 $x/D_h=0, 1.5, 2.25, 3.75$ 지점인 모서리 영역을 살펴보면 후연면 모서리($x/D_h=0, 1.5$)영역에서 전연면 모서리($x/D_h=2.25, 3.75$)영역 보다 높은 열/물질전달 분포가 나타나고 있는데 이는 유동특성에서 관찰되었듯이 후연면 모서리영역에서 더 강한 2차와류가 발생되었기 때문이다.

$2.25 \leq x/D_h \leq 3.75$ 인 영역에 해당되는 전연면의 경우, $y/D_h=0.8$ 부근에서 재부착지점이 형성되어 중심부근에서 가장 높은 열/물질전달 계수값이 나타나고 재순환 영역의 $y/D_h=0.2$ 부근에서는 가장 낮은 열/물질전달 계수값을 나타나고 있다.

정사각 막냉각홀의 경우(Fig. 5(b))와 비교해보면 전체적으로 유사한 것을 알 수 있으며 특히, 입구유동과 나란히 놓인 측면($1.5 \leq x/D_h \leq 2.25, 3.75 \leq x/D_h \leq 0$)에서 정사각 막냉각홀과 그 경향이 거의 동일하게 나타나고 있다. 하지만 후연면($0 \leq x/D_h \leq 1.5$)의 경우, 박리된 유동의 재부착으로 나타나는 영역 1이 정사각 막냉각홀에서는 하나의 영역으로 나타나지만 직사각 막냉각홀에서는 종횡비 증가로 인해 두 영역으로 분리되어 나타남을 볼 수 있다. 또한 정사각 막냉각홀의 경우에는 높은 열/물질전달 영역 이후, 유동이 모서리 영역으로 가속되면서 후연면의 중심부에서는 낮은 열/물질전달 분포를 보이는 반면에 직사각 막냉각홀의 중심부에서는 상대적으로 높은 열/물질전달 분포를 형성하고 있음을 볼 수 있다. 이는 $x/D_h=0.375$ 와 1.125 의 두 지점을 중심으로 재발달하면서 양쪽으로 가속된 유동이 후연면의 중심부에서 합쳐지기 때문으로 사료된다.

전연면의 경우, 정사각 막냉각홀에서는 면의 중심선을 기준으로 재부착지점 부근에서 유동이

두 영역으로 분리되는 것이 확실했던 반면 직사각 막냉각홀에서는 오히려 경계가 모호해지면서 중심에서 가장 높은 열/물질전달 영역이 나타나고 있다.

3.2.2 분사비의 변화

분사비 변화에 따른 직사각 막냉각홀 내부에서의 열/물질전달계수 분포를 보면(Fig. 6), 주유동이 없는 앞선 경우(Fig. 5(a))와 비교했을 때 대략 $y/D_h=1$ 이하의 영역에서는 전체적으로 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 하지만 $y/D_h=1$ 을 지나 출구부근에 이르러서는 주유동의 영향에 의해 차이를 보이게 되는데 특히 $x/D_h=2.25$ 와 3.75 모서리의 출구 부근에서 나타나고 있다.

$M=0.39$ 의 경우[Fig. 6(a)], $y/D_h=1.6$ 부근에서 유동의 박리로 인하여 $2.25-3.75$ 면에서 열/물질전달이 감소하는 영역이 형성되며, 그 이후 출구부분에서의 와류로 인하여 열/물질전달 촉진영역이

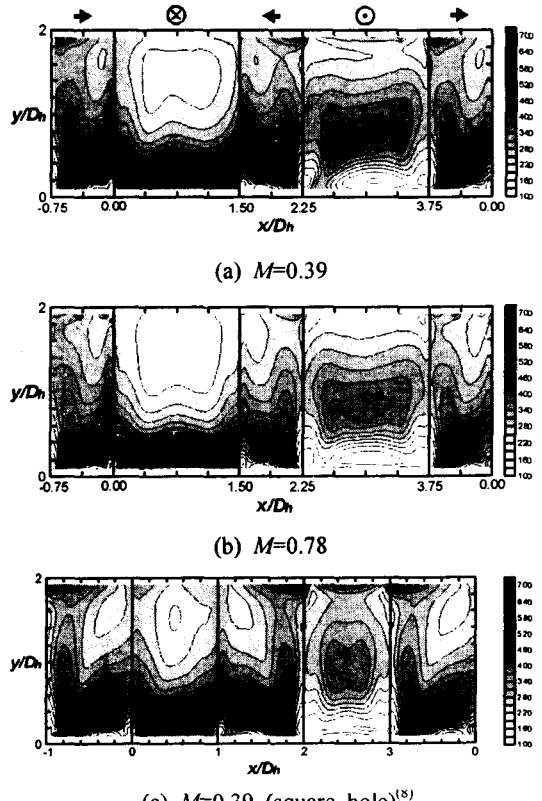


Fig. 6 Contour plots of Sherwood number for rectangular injection hole at $Re_{Dh}=25,000$

전연면과 측면 영역에 걸쳐 나타난다. 앞에서 언급하였듯이, 이 와류는 주유동에 의해 형성되는 말굽와류와 반대방향으로 회전하며, 2.25-3.75면(L.E.S.)의 중심부에 충돌하고 재차 측면의 모서리부에 충돌하므로, 이 부분에서 높은 열/물질 전달계수 분포가 관찰된다. 또한 후연면에서도 주유동이 없는 경우에 비해 높은 열/물질전달 분포를 형성하는데 이는 주유동에 의해 분사유동이 편향되어 분사되는 유동의 출구면적 감소로 인해 유동이 가속되었기 때문으로 판단된다.

분사비 $M=0.78$ 인 경우[Fig 6(b)], $M=0.39$ 와 비교하면 전반적인 열/물질전달계수의 분포에는 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만, 분사비가 증가할수록 홀 출구부근에서 발생하는 와류의 영향이 줄어드는 것을 알 수 있으며, 이는 분사비가 높아질수록 홀 출구영역에서 분사유동이 주유동 방향으로 편향되는 각도가 줄어들고 말굽와류가 주유동의 상류 부근으로 밀리면서 홀 내부에 미치는 영향이 줄어들기 때문으로 사료된다. 후연면에서도 분사유동에 대한 주유동 영향의 감소로 후연면의 출구부근에서 $M=0.39$ 에 비해 다소 낮은 열/물질전달분포를 갖게 된다.

분사비 $M=0.39$ 인 정사각 막냉각홀[Fig 6(c)]과 비교하면 앞서 주유동이 없는 경우에 대해 언급한 바와 같이 주유동의 영향을 받지 않는 $y/D_h=1.0$ 이하 영역에서의 차이점들은 동일하게 나타나고 있다. 출구영역을 살펴보면 입구유동과 나란히 놓인 측면에서는 정사각 막냉각홀과 거의 같은 수준으로 주유동의 영향을 받고 있으나 $2.25 \leq x/D_h \leq 3.75$ 면(L.E.S.)에서는 주유동의 영향이 상대적으로 매우 적게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 홀의 종횡비가 커지면서 말굽와류에 의해 유도된 와류의 전연면에 대한 충돌이 상대적으로 약화되었기 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 분사비 변화에 따른 막냉각홀 내부에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 홀 입구영역에서는 분사비에 관계없이 거의 동일한 분포를 나타내며, 홀 출구부근에서만 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.

$y/D_h=0.4$ 에서의 분포를 보면[Fig. 7(a)], 후연면(T.E.S.)에서는 유입유동의 재부착 및 충돌효과로 인해 높은 열/물질전달계수가 나타난다. 또한 측

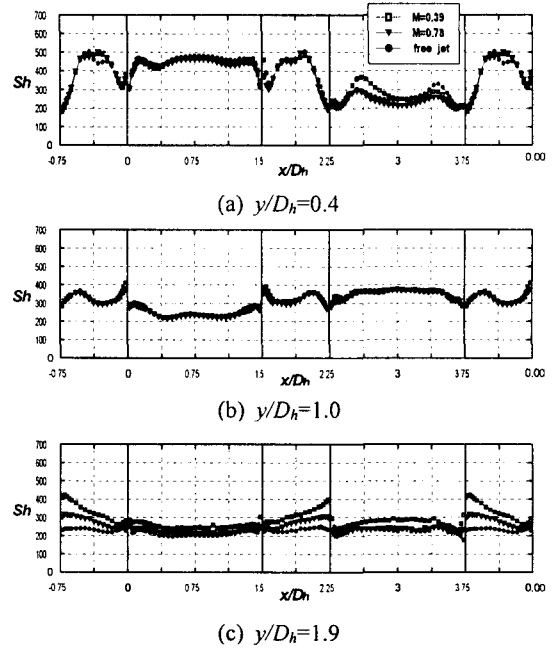


Fig. 7 Local plots of Sherwood number for rectangular hole with $Re_{Dh}=25,000$

면에서도 모서리와류로 인하여 국소적으로 열 전달계수가 매우 높은 영역이 형성된다. 이후 유동이 진행하면서 발달하기 때문에 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 막냉각홀의 중간영역($y/D_h=1.0$)에서는 열/물질전달계수의 분포가 균일하게 나타난다.

하지만 다시 막냉각홀 출구영역($y/D_h=1.9$)에서는 주유동의 영향으로 인하여 열/물질전달계수 분포가 분사비에 따라 달라지고 주유동이 있는 경우, 측면에서 전연면의 모서리($x/D_h=2.25, 3.75$)로 가까워짐에 따라 열/물질전달 계수가 크게 증가하게 됨을 알 수 있다. 앞에서 언급했던 바와 같이 분사비가 낮은 경우 주유동에 의하여 유도되는 와류로 인하여 전연면에서 열/물질전달이 촉진되며, 분사비가 증가할수록 와류의 강도가 약화되기 때문에 열/물질전달계수가 감소하게 된다. 또한 후연면에서도 분사비가 증가함에 따라 전연면과 동일하게 주유동 영향이 적어지므로 열/물질전달계수가 감소한다.

Fig. 8은 x/D_h 방향으로 평균한 열/물질전달계수의 분포를 분사비 변화에 따라 나타낸 그림이다. $y/D_h < 1.6$ 에 해당되는 영역에서는 분사비에

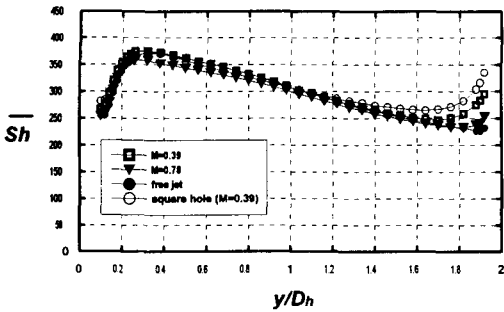


Fig. 8 Average Sherwood number distributions in rectangular injection hole with various blowing ratios at $Re_{Dh}=25,000$

관계없이 박리 및 재부착유동에서 볼 수 있는 열/물질전달 분포의 특성을 보이고 있다. $y/D_h=0.3$ 부근에서 극대값을 갖는데, 이는 각 면에서 유동의 재부착 위치는 다르지만, 후연면 및 측면에서의 영향이 크게 미치기 때문에 판단된다. 내부홀에 대한 주유동의 영향이 커지는 영역으로 볼 수 있는 $y/D_h=1.6$ 이후의 영역부터는 분사비가 감소할수록 열/물질전달 계수가 상승하게 된다. 이는 막냉각 출구부분에서 분사비가 작을수록 주유동의 영향으로 말굽와류에 의해 유도되는 와류의 강도와 분사유동의 편향이 상대적으로 커지기 때문이다.

$M=0.39$ 의 동일한 분사비를 갖는 정사각 막냉각홀과 비교하면 직사각 막냉각홀의 경우 출구영역부근에서의 낮은 열/물질전달 계수값을 관찰할 수 있다. 이는 앞서 설명된 바와 같이 홀의 종횡비가 커지면서 분사유동의 편향으로 생긴 벽면과의 사이 영역에서 발생한 와류가 상대적으로 약해 열/물질전달이 촉진되는 영역이 홀 출구로부터 매우 앞게 나타났기 때문에 판단된다.

3.2.3 Reynolds 수에 따른 열/물질전달 특성변화

Reynolds 수에 따른 열/물질전달 특성을 파악하고자 분사비를 0.39로 고정시키고 홀 Reynolds 수를 각각 15,000과 32,000인 경우에 실험을 수행하였다. Fig. 9는 $Re_{Dh}=15,000$, $Re_{Dh}=32,000$ 경우에 대한 열/물질전달계수 분포를 나타낸 그림이다. 앞서 도시한 $Re_{Dh}=25,000$ 인 경우[Fig. 6(a)]와 비교하면 Reynolds 수의 증가에 따라 열/물질전달계수의 값도 일정하게 증가되면서 전반적으로 동일한 분포를 갖는 것으로 나타났다. 이러

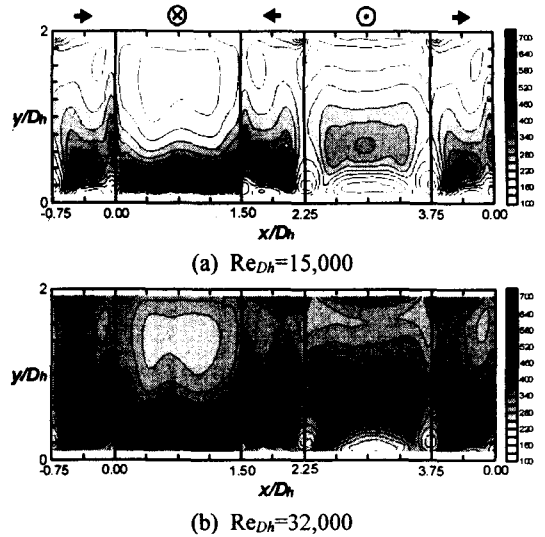


Fig. 9 Contour plots of Sherwood number for rectangular injection hole at $M=0.39$

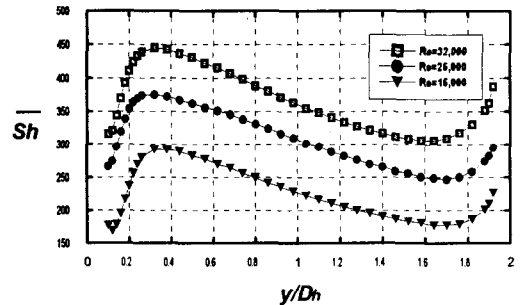


Fig. 10 Average Sherwood number distributions in rectangular injection hole with various Reynolds number at $M=0.39$

한 경향은 x/D_h 방향으로 평균한 열/물질전달계수의 분포를 도시한 Fig. 10에서도 잘 나타나고 있다. 즉, Reynolds 수 증가에 따라 증가하는 열/물질전달계수의 경향이외엔 별다른 특징이 나타나지 않고 있다. 따라서 직사각 막냉각홀에서도 Reynolds 수에 비해 입구유로의 형상과 홀과의 상대적 위치 등 형상의 영향이 홀 내부의 전반적인 유동 및 열/물질전달 특성에 지배적임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수직분사각도를 갖는 직사각 막냉각홀 내부에서의 유동 및 국소 열/물질전달특

성을 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 홀 입구에서 박리된 유동은 홀 내부면의 각기 다른 위치에 재부착 후, 재발달하면서 홀 모서리에서 2차와류를 형성하였으며 홀 출구영역의 전연부에서는 주유동에 유도된 와류가 나타났다. 이러한 유동특성은 정사각 막냉각홀의 경우와 유사하나 종횡비 증가로 인해 홀 내부모서리의 2차와류 특성이 달라졌으며 특히, 출구영역의 전연부에 발생하는 와류강도가 약해지는 것으로 나타났다.

(2) 열/물질전달계수 분포에서 $y/D_h=1$ 이하의 영역에서는 박리유동의 재부착과 와류의 벽면충돌 및 이동으로 열/물질전달이 증가된 영역을 확인할 수 있었다. 또한, $y/D_h=1.6$ 이후의 영역에서는 주유동에 유도된 와류로 인해 열/물질전달이 높게 나타났다. 전체적으로는 정사각 막냉각홀과 유사한 열/물질전달 분포가 형성되었으나 종횡비 증가로 재부착 유동이 분리되어 후연면의 $y/D_h=0.2$ 에서 높은 열/물질전달영역이 두 영역으로 나누어지고 홀 출구부근에서는 말굽와류에 유도된 와류의 약화로 인해 정사각 막냉각홀에 비해 낮은 열/물질전달 분포가 나타났다.

(3) 홀 입구영역에서의 열/물질전달계수 분포는 분사비(M)에 대한 영향이 나타나지 않았다. 홀 출구영역($y/D_h>1.6$)에서는 분사비가 낮을수록 주유동의 영향이 증가되었으나 이러한 분사비에 대한 영향은 정사각 막냉각홀에 비해 적은 것으로 나타났다.

(4) Reynolds 수 변화에 의해 홀 내부에서 열/물질전달특성은 변화하지 않았다. 이로부터 홀 내부의 전반적인 유동 및 열/물질전달 특성은 입구유로의 형상 및 홀과의 상대적 위치 등 형상의 영향이 지배적인 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업의 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Andreopoulos, J., 1982, "Measurements in a Jet-Pipe Flow Issuing Perpendicularly into a Cross Stream," *J. of Fluids Engineering*, Vol. 104, pp. 493~499.
- (2) Leylek, J. H. and Zerkle, R. D., 1994, "Discrete-Jet Film Cooling: A Comparison of Computational Results with Experiments," *J. of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 358~368.
- (3) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1995, "Heat(Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness with Injection Through Discrete Holes: Part I -Within Holes and on the Back Surface," *J. of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 440~450.
- (4) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1995, "Heat(Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness with Injection Through Discrete Holes: Part II -on the Exposed Surface," *J. of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 451~460.
- (5) Lee, S. W., Park, S. W. and Lee, J. S., 2000, "Flow Characteristics Inside Circular Injection Holes Normally Oriented to a Crossflow : Part I-Flow Visualization and Flow Data in the Symmetry Plane," *ASME Paper No. 2000-GT-256*.
- (6) Muldoon, F. and Acharya, S., 1999, "Numerical Investigation of the Dynamical Behavior of a Row of Square Jets in Crossflow over a Surface," *ASME Paper No. 99-GT-127*.
- (7) Licu, D. N., Findlay, M. J., Gartshore, I. S. and Salcudean, M., 1999, "Measurements of Heat Transfer Characteristics for Film Cooling Applications," *ASME Paper No. 99-GT-167*.
- (8) Seung Goo Kang, Dong ho Rhee, Hyung Hee Cho, 2002, "Heat/Mass Transfer and Flow Characteristics Within a Film Cooling Hole of Square Cross Section(I) - Effects of Blowing Ratio and Reynolds Number," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 7, pp. 927~936.
- (9) Dong Ho Rhee, Seung Goo Kang, Hyung Hee Cho, 2002, "Heat/Mass Transfer and Flow Characteristics Within a Film Cooling Hole of Square Cross Section(II) - Effects of Asymmetric Inlet Flow Condition," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 7, pp. 937~944.
- (10) Hay, N. and Lampard, D., 1995, "The Discharge coefficient of Flared Film Cooling Holes," *ASME Paper No. 95-GT-15*.

(1) Andreopoulos, J., 1982, "Measurements in a Jet-Pipe Flow Issuing Perpendicularly into a Cross

- (11) Dong Ho Rhee, Byunggi Kim, Hyung Hee Cho, 1998, "Characteristics of Heat/Mass Transfer and Film Cooling Effectiveness Around a Single Film Cooling Hole with Compound Injection Angles," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 10, pp. 1434~1445.
- (12) 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.
- (13) Eckert, E. R. G., 1976, "Analogies to Heat Transfer Processes," in *Measurements in Heat Transfer*, ed. Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., pp. 397~423, Hemisphere Pub., New York.
- (14) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.