

정사각 막냉각홀 내부에서의 열/물질전달 및 유동 특성 (I)

- 분사비 및 레이놀즈 수 효과 -

강승구* · 이동호** · 조형희†
 (2001년 8월 30일 접수, 2002년 5월 6일 심사완료)

Heat/Mass Transfer and Flow Characteristics Within a Film Cooling Hole of Square Cross Sections (I)

- Effects of Blowing Ratio and Reynolds Number -

Seung Goo Kang, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Film Cooling(막냉각), Square Cross Section Hole(정사각단면
 홀), Heat/mass Transfer(열/물질전달), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌승화법)

Abstract

An experimental study has been conducted to investigate the heat/mass transfer characteristics within a film cooling hole of square cross-section for various blowing ratios and Reynolds numbers. The experiments have been performed using a naphthalene sublimation method and the flow field has been analyzed by numerical calculation using a commercial code. A duct flow enters into a film cooling hole in a cross-direction. For the film cooling hole with square cross-section, it is observed that the reattachment of separated flow and the vortices within the hole enhance considerably the heat/mass transfer around the hole entrance region. The heat/mass transfer on the leading edge side of hole exit region increases as the blowing ratios decrease because the main flow induces a secondary vortex. Heat/mass transfer patterns within the square film cooling hole are changed little with the various Reynolds numbers.

기호설명

dy : 나프탈렌 승화길이
 D_h : 사각 막냉각홀의 수력직경
 D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌의 물질확산계수
 h_{m1} : 하소 물질전달계수, 식 (1)
 L : 막냉각홀 길이
 L.E.S. : 막냉각홀 전연면
 \dot{m} : 단위면적당 나프탈렌 질량유속
 M : 분사비, $\rho_2 U_2 / \rho_1 U_1$
 Nu : Nusselt 수, hD_h / k

Pr : Prandtl 수, $\mu C_p / k$
 Re_{Dh} : 막냉각홀 수력직경을 기준으로 한 레이놀즈 수, $U_2 D_h / \nu$
 Sc : Schmidt 수
 Sh : Sherwood 수, $h_m D_h / D_{naph}$
 \bar{Sh} : x/D_h 방향으로의 평균 Sh 수
 T.E.S. : 막냉각홀 후연면
 TL : 주유동의 난류강도
 U_w : 주유동 속도
 U_2 : 냉각유체의 분사속도
 U_{duct} : 플레널 챔버 내부의 유동속도
 x : 홀 둘레 좌표, Fig. 2
 y : 원점으로 부터의 수직좌표, Fig. 2

* (주)삼성전자 종합기술원

** 회원, 연세대학교 대학원

† 객원저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

TEL:(02)1213-2828 FAX:(02)312-2159

그리스문자

ρ_2 : 이차유동의 밀도

- ρ_{air} : 고체나프탈렌의 밀도
 ρ_{film} : 나프탈렌표면에서의 나프탈렌 증기밀도
 ρ_{jet} : 분사제트의 나프탈렌 증기밀도
 ρ_{air} : 주유동의 밀도
 $d\tau$: 나프탈렌 표면의 유동장 노출시간

1. 서론

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 고체표면상에 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 전 영역이 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 필요하며 최근 들어 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^[1-4]

이러한 많은 연구에도 불구하고 대부분 연구는 막냉각홀의 단면이 원형인 경우에 국한되어 있으며 단면이 사각형상인 막냉각홀에 대해 막냉각 성능이나 홀 내부유동, 열전달에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. Muldoon 과 Acharya^[5], Licu

등^[6]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.

따라서, 본 연구에서는 나프탈렌승화법을 이용하여 정사각 형상의 단면을 갖는 막냉각홀 내부에서의 열/물질전달특성을 고찰하고, 상용코드인 FLUENT를 이용하여 정사각 막냉각홀 내부에서의 유동특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

사각막냉각홀 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. 시험단면의 크기는 300×400 mm이고, 길이는 1200 mm이며, 수축부의 면적 축소비는 9:1이다. 본 실험에서 사용한 주유동의 유속은 10~26 m/s이고, 난류강도는 약 0.5%이다. 이때 막냉각홀이 설치된 위치에서의 경계층 두께는 약 15 mm($\delta/D_h=0.3$, 유속 20 m/s기준)이다. 주유동은 실내공기를 풍동입구(contraction section entrance)로부터 흡입하여 시험부, 디퓨저, 송풍기를 거쳐 실외로 방출된다. 한편 사용된 공기는 나프탈렌을 포함하고 있기 때문에 다시 풍동입구로 유입되지 않도록 하였다.

2차유동 분사장치는 송풍기, 열교환기, 오리피스 유량계(orifice flowmeter), 플레넘챔버(plenum chamber) 등으로 구성되어 있다. 2차유동 분사장치에 항온조(constant temperature reservoir system) 및 열교환기를 설치하여 실험 중 주유동과 분사제트의 온도가 일치하도록 유지하였으며 실험중 주유동과 2차유동의 온도를 정확하게 측정하기 위해 각각의 유로에서 막냉각홀 부근에 J-type(iron-constantan) 열전대를 부착하였다. 플레넘챔버는 냉각공기가 주유동과 같은 방향으로 진행하다가 사각막냉각홀에 유입되고 막냉각홀을 통해 주유동에 수직방향으로 분사되는 경우를 모사하기 위한 형태로 제작되었다.

플레넘챔버에 유입된 공기는 유입되는 과정에서

Table 1 Experimental conditions

Hydraulic diameter D_h	Secondary flow U_{inlet} (m/s)	Film cooling flow U_2 (m/s) Re_{Dh}		Main flow U_{co} (m/s)	Blowing ratio M
50	0.8	4.8	15,000	12.3	0.39
				0	free jet
	1.3	7.8	25,000	10	0.78
				12.6	0.62
				20	0.39*
	1.7	10.2	32,000	26	0.39

(* : numerical simulation is also performed)

위해 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 관심영역인 정사각막냉각홀 내부는 격자수가 결과에 거의 영향을 주지 않는 $40 \times 40 \times 80$ 개의 정렬격자계를 주었으며 y/D_h 단면에 해당하는 40×40 개의 격자는 벽면 부근에서 격자밀도가 높고 중심부에서 낮도록 조정하였다. 이로써 얻은 계산영역의 셀(cell) 수는 약 30만개이다. 수치해석 모델은 3차원 비압축성 유동의 정상상태로 가정하고, RNG $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다.

계산영역의 치수는 실험을 실시한 실험장치와 동일하게 설정하였다. 주유동의 평균유속과 난류강도는 각각 20 m/s, 0.5%이며, 2차유로 입구에서의 평균유속과 난류강도는 1.3 m/s, 2.0%로 설정하였다. 이때 홀 내부 평균유속은 7.8 m/s로써, Reynolds 수는 $Re_{Dh}=25,000$ 이며, 분사비 $M=0.39$ 에 해당한다.

3. 실험결과 및 토의

본 연구에서는 정사각 단면을 갖는 막냉각홀에 대하여 분사비 및 홀 내부 Reynolds 수 변화에 따른 홀 내부에서의 유동/열전달특성을 고찰하였으며, 이에 대한 조건은 Table 1에 제시되어 있다.

3.1 정사각 막냉각홀 내부에서의 유동특성

본 연구에서는 정사각 막냉각홀 내부에서의 유동특성을 정성적으로 파악하기 위해 수치해석적 연구를 수행하였다. 입구유동은 홀내부의 유동방향에 대해 수직으로 접근함으로써 홀입구 4개의 모서리에 대해 서로 다른 박리조건을 형성하고 각 입구모서리에 기하학적으로 압력장을 공유하지 못하고 여러 개의 박리영역을 형성됨으로써

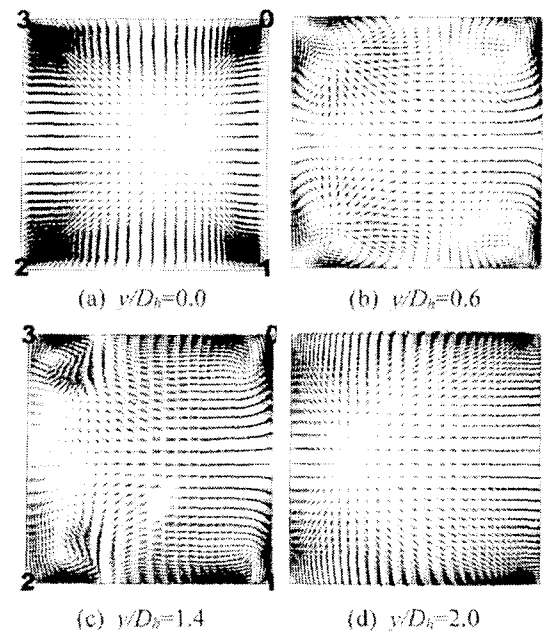


Fig. 3 Velocity vector plots in square film cooling hole (not in scale)

홀 내부에서는 상당히 복잡한 유동이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 수치해석을 통해 도출된 결과로부터 정성적인 유동 특성을 고찰하였다.

Fig. 3은 정사각막냉각홀 내부유동에 대한 결과를 벡터선도로 표시한 것으로서 꼭지점에 표시한 숫자는 x/D_h 좌표를 뜻한다.

$y/D_h=0.0$ 의 경우(Fig. 3(a)), 각 입구모서리, 특히 각 꼭지점에서 중심을 향해 유동이 박리되는 것을 관찰할 수 있다. 또한 횡방향으로 접근하는 입구유동에 의해 전면 모서리($x/D_h=2, 3$)에 박리되는 유동이 후면 모서리($x/D_h=0, 1$)에서 박리되는 유동보다 운동량이 더 크며 입구유동의 중심은 약간 하류방향, 즉 $0-1$ 면($0 \leq x/D_h \leq 1$) 쪽으로 치우쳐 있음을 볼 수 있다. 박리된 유동은

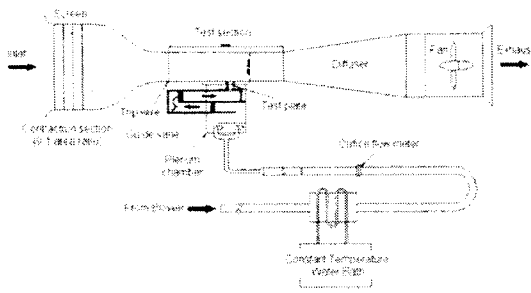


Fig. 1 Schematic view of wind tunnel and test section

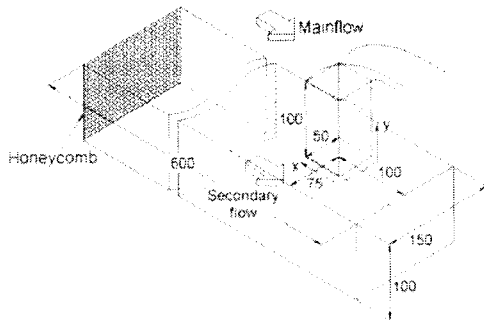


Fig. 2 Schematic view of injection hole and duct

발생할 수 있는 유동의 불균일성을 최대한 억제하고 충분히 혼합시키기 위해 3차래 방향을 전환한 후 막냉각홀 입구유로에 유입되게 된다.

Fig. 2는 시험부에 정사각 막냉각홀이 설치된 경우에 대한 개략적인 그림이다. 이때 막냉각홀의 단면이 50×50 mm로서 수력직경(D_h , hydraulic diameter)은 50 mm이며, 이후 제시되는 길이는 모두 수력직경 D_h 로 무차원화하였다. 홀의 길이, L 은 $2D_h$ (100 mm)로서 홀입구에서 박리된 유동이 홀 내부면에 충분히 재부착하도록 하여 분자유동과 주유동의 상호작용에 입구영역의 영향을 최소화하도록 설계하였다.^[7] 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^[8]과 동일하다.

2.3 열/물질전달계수

국소 물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy/d\tau)}{\rho_{t,w}} \quad (1)$$

본 연구에서는 주유동에 나프탈렌이 포함되어 있지 않으므로 $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 따라서 물질전달계수는 나프탈렌 승화량(dy), 실험시간($d\tau$), 고체 나프탈렌 밀도(ρ_s), 표면에서의 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,w}$)를 통해서 구할 수 있다. 표면에서의 나프탈렌 증기밀도는 Ambrose 등^[9]이 제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구한다.

물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = h_m D_h / D_{naph} \quad (2)$$

여기서, D_{naph} 는 Goldstein과 Cho^[10]가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

앞에서 계산된 물질전달계수는 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며,^[11] 그 식은 다음과 같다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4} \quad (3)$$

실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock^[12]이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 전체적으로 7.1% 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

이와 같은 불확실성은 대부분 나프탈렌의 물성치의 불확실성에 기인하는 것으로, 나프탈렌 포화증기압의 경우는 3.8%, 나프탈렌 물질확산계수의 경우 5.1%의 불확실성을 갖는다. 하지만 나프탈렌 승화깊이의 불확실성은 0.7%으로 매우 작으며, 표면온도, 고체 나프탈렌의 밀도, 물질전달계수의 불확실성은 각각 0.2%, 1.1%, 4.9%로 나타났다.

2.4 수치계산

정사각 막냉각홀 내부의 유동특성을 고찰하기

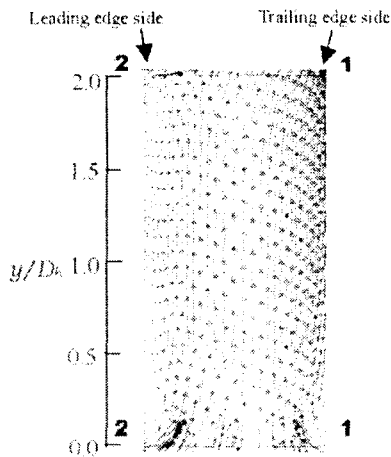
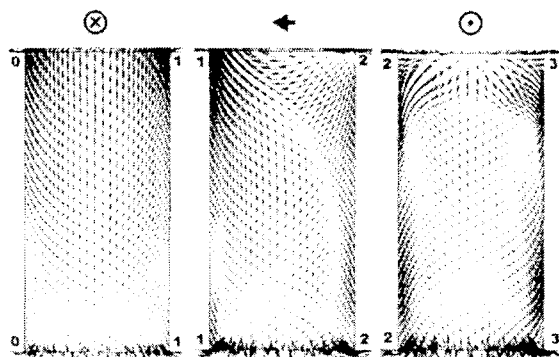


Fig. 4 Velocity vector at symmetry plane



(a) $0 \leq x/D_h \leq 1$ (b) $1 \leq x/D_h \leq 2$ (c) $2 \leq x/D_h \leq 3$
 Fig. 5 Velocity vector plots in square film cooling hole (not in scale)

y/D_h 방향으로 진행하면서 홀내부모서리에 각각 한 쌍의 2차와류가 형성되는 등 점차 발달된 사각덕트유동에 가까워지고 있으나 2-3면($2 \leq x/D_h \leq 3$) 즉 전연면(L.E.S., leading edge side)에서 0-1면($0 \leq x/D_h \leq 1$) 즉 후연면(T.E.S., trailing edge side)방향으로 유동이 이동하는 것을 알 수 있으며, 이와 함께 모서리 와류 역시 그 중심을 점차 이동하고 변형되어 가고있음을 볼 수 있다. $y/D_h=0.6$ 인 경우, 전연면쪽의 와류규모가 후연면 쪽보다 크며, 1-2면($1 \leq x/D_h \leq 2$)에서 $x/D_h=2$ 모서리 쪽의 와류가 1-2면 중심 부근에서 출몰하는 것을 볼 수 있다.

$y/D_h=1.0$ 이상 범위인 경우, 홀내부 유동이 발달된 사각덕트유동과 상당히 달라져 있음을 볼 수 있다. 특히 $y/D_h=1.4$ 인 경우를 보면(Fig. 3(c)), 홀 내부 모서리에 존재하던 한 쌍의 와류는 사라

지고 각각 하나씩의 와류만 존재함으로써 이미 주유동의 영향이 홀 내부유동에 미치고 있음을 알 수 있다. 이러한 모서리와류는 점차 하류로 진행하면서 주유동의 영향이 강해져서 콩팥모양 와류(kidney-type vortex)로 발달하게 된다. 또한 분사제트가 주유동의 영향으로 인하여 주유동 방향으로 상당히 편향됨으로써 편향된 분사유동은 출구($y/D_h=2.0$)에 이르러 그 가장자리가 2-3면($2 \leq x/D_h \leq 3$, L.E.S.)과 약 $0.2D_h$ 이상 벌어지게 되어 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⁾

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 홀의 중심면과 홀내부 표면 근접부에서의 유동을 나타내고 있다. Fig. 5의 상단에 위치하는 ⊗(0-1면, T.E.S.), ⊙(2-3면, L.E.S.), →(3-0면), ←(1-2면), 등의 기호는 각 면을 내부에서 바라보았을 때 주유동의 방향을 표시하며 이러한 표시법은 이후 열/물질전달 결과에서도 사용된다. 사각홀 중심면에서의 경우, 유동이 입구영역에서 박리되며, 재부착한 이후 발달한다. 출구 인접부에서는 전연부에서 주유동의 영향으로 인하여 반시계방향으로 회전하는 작은 와류가 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 전반적인 유동특성은 원형홀의 경우와 매우 유사한 것을 알 수 있다.

하지만, 각 면 근접부에서는 서로 다른 유동특성을 갖는 것으로 나타났다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이, 0-1면(T.E.S.)의 경우 입구모서리에서 박리된 유동이 대략 $y/D_h=0.2$ 에서 재부착하고 있음을 볼 수 있으며 재부착한 유동은 $x/D_h=0$, $x/D_h=1$ 의 모서리를 향해 퍼져나가며 출구로 흐르게 된다.

2-3면(L.E.S.)의 경우 박리된 입구유동의 재부착 길이가 0-1면(T.E.S.)과 달리 약 $y/D_h=0.4$ 까지 길어지고 있는데 이는 입구유동이 홀내부에 대해 횡방향으로 유입되면서 후면에 해당하는 2-3면(L.E.S.)에 저압영역이 형성되어 재부착이 지연되었기 때문으로 생각된다. 이러한 영향은 재부착이후에도 나타나서 0-1면(T.E.S.)과 달리 상당한 하향류가 발생하는 것을 관찰할 수 있으며 세순환영역은 중심선을 기준으로 두 영역으로 분리되고 있다. 이와 함께 2-3면(L.E.S.)에서는

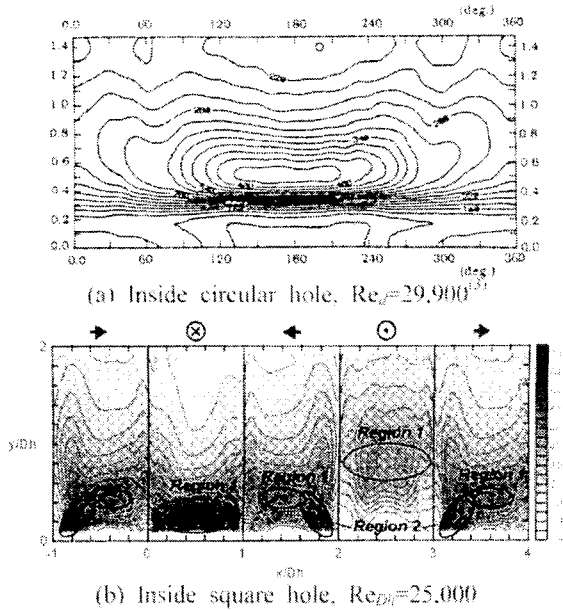


Fig. 6 Contour plots of Sh for the inside hole surface without mainstream

분사유동이 주유동 방향으로 편향되면서 $y/D_h=1.6$ 에 이르러서는 표면부근에서 유동의 박리현상이 나타나며, 이 영역은 앞서 설명된 광유 와류에 의해 유도된 와류에 의해 채워지려 할 가능성이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다. 1-2면은 입구유동 방향에 나란히 놓여 상당히 복잡한 입구부근 유동이 존재함을 알 수 있다. 이와 더불어 출구부근에서는 분사유동이 주유동 방향으로 편향되며, 출구부분에서 와류가 형성되는 것을 알 수 있다.

3.2 정사각 막냉각홀 내부의 열/물질전달특성

3.2.1 분사비 변화효과

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

Fig. 6은 주유동이 없는 경우 원형홀과 정사각홀 내부 표면에서의 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 앞에서와 마찬가지로, 사각홀의 경우 그림의 상단에 표시된 ⊗(0-1면, T.E.S.), ⊙(2-3면, L.E.S.), →(3-0면), ←(1-2면) 등의 기호는 각 면을 내부에서 바라보았을 때 주유동의 방향을 표시하며, 편의상 주유동이 없는 경우에

대해서도 동일하게 사용하였다. 또한 $3 \leq x/D_h \leq 4$ 면과 $-1 \leq x/D_h \leq 0$ 면은 3-0면에 대한 동일한 결과로서 각 면에 대한 대칭성을 확인하기 위해 추가로 도식하였다.

원형홀의 경우(Fig. 6(a)), 홀 입구영역에서 최대 Sh수가 후연지점(180°)에서 나타나며 전연부(0°)로 갈수록 감소하는 분포를 나타낸다. 냉각유체가 홀 내부에 횡방향으로 유입되기 때문에, 후연부에서 충돌효과(impingement effect)로 인한 최대값이 나타난다. 또한 이러한 유동의 충돌효과로 인하여 후연부에 상대적으로 높은 압력상이 형성되며, 이로 인하여 홀 내부에 2차유동이 형성된다. 이러한 2차유동의 영향으로 인하여 하류로 진행하면서($y/d > 0.9$) 열/물질전달계수 분포가 균일해지는 것을 알 수 있다.

하지만 사각 막냉각홀의 경우 원형홀의 경우와는 다른 열/물질전달 특성이 관찰된다. Fig. 6(b)는 자유제트로 분사되는 정사각막냉각홀 내부에서의 열/물질전달계수선도이다. $y/D_h \leq 1$ 인 영역에서 높은 열/물질전달특성을 보이는 영역은 Fig. 6(b)에 표시된 바와 같이 홀 내부 유동특성에 따라 크게 2영역으로 나뉘게 된다. 영역 1은 후연면(0-1면, T.E.S.) 또는 전연면(2-3면, L.E.S.)에서 크게 나타나며, 이 영역은 홀의 입구 모서리에서 박리된 유동이 홀 내부면에 재부착하면서 나타나는 높은 열/물질전달계수 영역이다. 영역 2는 나머지 두 측면, 즉 입구유동 방향과 나란히 놓인 1-2면 및 3-0면에서 나타나는데, 홀 내부유로 모서리와류의 충돌과 이동에 의해 열/물질전달이 증가하는 영역이다.

0-1면(T.E.S.)의 경우 재부착이 일어나는 $y/D_h=0.2$ 부근에서 높은 열/물질전달계수를 갖는 것으로 나타났다. 재부착 이후, 표면에서 경계층 유동과 같이 발달하게 되는데 $x/D_h=1.2$ 쪽 모서리를 향해 가속되고 모서리에 가까운 영역에 중심보다 높은 전달계수 분포를 보이고 있다. $2 \leq x/D_h \leq 3$ 면의 경우 $y/D_h=0.8$ 부근에서 재부착점이 형성되며, 중심선을 기준으로 재순환하는 하향류에 의해 두 영역으로 분리되는 특성이 나타난다. 1-2면의 경우 $x/D_h=2$ 모서리 입구에서 시작된 높은 열/물질전달 영역은 점차 면의 중심으로 향하고 있다. $x/D_h=1$ 모서리 입구에서도 비슷한 경향을 보이지만 $x/D_h=2, 3$ 입구모서리에서 박리되는 유동이 $x/D_h=0, 1$ 입구모서리에서

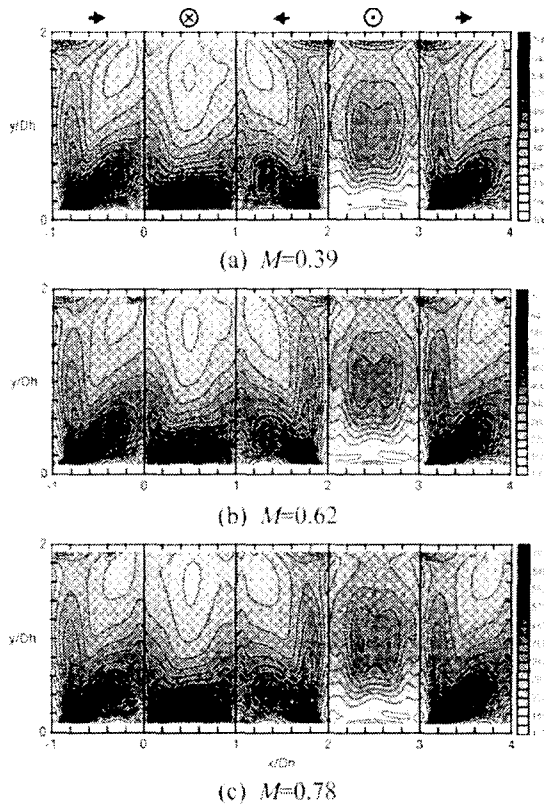


Fig. 7 Contour plots of Sh for various blowing ratios at $Re_{Dh}=25,000$

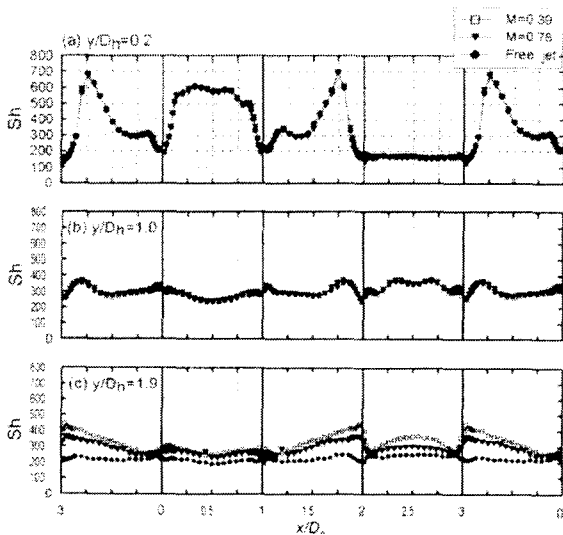


Fig. 8 Local plots of Sh for various blowing ratios at $Re_{Dh}=25,000$

박리되는 유동보다 운동량이 크고, 그에 따라 더 강한 와류의 작용이 있는 것으로 보인다. 이러한 높은 열/물질전달 영역은 대략 $x/D_h=1.4$,

$y/D_h=0.4$ 부근에 수렴하게 되는데 이 지점을 입구 유동과 나란히 놓인 면에 형성되는 평균적인 재부착지점으로 볼 수 있을 것이다.

분사비 변화에 따른 정사각막냉각홀 내부에서의 열/물질전달계수 분포를 보면(Fig. 7), 주유동이 없는 앞선 경우와 비교했을 때 대략 $y/D_h=1$ 이하의 영역에서는 전체적으로 차이를 보이지 않으며, 이로부터 주유동이 막냉각홀 내부 유동 및 열/물질전달특성에 영향을 거의 미치지 않는 것을 알 수 있다.

하지만 $y/D_h=1$ 을 지나 출구부근에 이르러서는 주유동의 영향에 의해 차이를 보이게 되는데 특히 $x/D_h=2$ 와 3 모서리의 출구 부근에서 두드러지게 나타나고 있다. $M=0.39$ 의 경우(Fig. 7(a)), 2-3면(L.E.S.)을 보면 재부착 이후 두 영역으로 분리되어 있던 유동이 $1.4 \leq y/D_h \leq 1.8$ 사이에서 한 곳으로 모이면서 모서리쪽에 낮은 전달계수 영역이 발생하는 것을 볼 수 있다.

또한 $y/D_h=1.6$ 부근에서 유동의 박리로 인하여 2-3면에서 열/물질전달이 감소하는 영역이 형성되며, 그 이후 출구부분에서의 와류로 인하여 열/물질전달 촉진영역이 $1 \leq x/D_h \leq 3$ 영역에 걸쳐 나타난다. 앞에서도 언급하였듯이, 이 와류는 주유동에 의해 형성되는 말굽와류와 반대방향으로 회전하며, 2-3면(L.E.S.)의 중심부에 충돌하고 재차 열면의 모서리부에 충돌하므로, 이 부분에서 높은 열/물질전달계수 분포가 관찰된다.

분사비 $M=0.62$ 와 0.78 인 경우, $M=0.39$ 와 비교했을 때 전반적인 열/물질전달계수의 분포에는 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만, 분사비가 증가할수록 홀 출구부근에서 발생하는 와류의 영향이 줄어들어 가는 것을 알 수 있으며, 이는 분사비가 높아질수록 홀 출구영역에서 분사유동이 주유동 방향으로 편향되는 각도가 줄어들고 말굽와류가 주유동의 상류쪽으로 밀리면서 홀 내부에 미치는 영향이 줄어들기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 분사비 변화에 따른 정사각 막냉각홀 내부에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 앞서 설명한 바와 같이 홀 입구영역에서는 분사비에 관계없이 거의 동일한 분포를 나타내며, 홀 출구부근에서만 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.

$y/D_h=0.2$ 에서의 분포를 보면(Fig. 8(a)), 후연면(0-1면, T.E.S.)에서 유입되는 유동의 재부착 및

충돌효과로 인하여 매우 높은 열/물질전달계수가 나타난다. 또한 일면에서는 모시리와류로 인하여 국소적으로 열전달계수가 매우 높은 영역(영역 II)이 형성된다. 이후 유동이 진행하면서 발달하기 때문에 Fig. 8(b)에서 볼 수 있듯이 박빙각홀의 중간영역($y/D_h=1.0$)에서는 열/물질전달계수의 분포가 균일하게 나타난다.

하지만, 박빙각홀 출구부분에서는 주유동의 영향으로 인하여 열/물질전달계수 분포가 분사비에 따라 달라진다. Fig. 8(c)를 보면, 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.

Fig. 9는 원형 박빙각홀의 경우 홀 출구에서 주유동과 냉각유체에 의해 영향을 받는 영역을 도식적으로 나타낸 그림이다. 여기서 짐으로 표시된 영역은 주유동에 의해 영향받는 영역을 나타낸다. 분사비가 낮아질수록 주유동에 의해 영향을 받는 영역이 증가하며, 이러한 영역이 홀 둘레를 따라가면서 커지는 것을 알 수 있다.

사각 박빙각홀의 경우, 유동계산 결과와 열/물질전달 실험결과로부터 예상되는 홀 출구에서 냉각유체 및 주유동에 의해 영향을 받는 영역을 Fig. 10에 제시하였다. 전반적인 경향은 원형홀의 경우와 유사하다. 분사비가 낮아질수록 홀 출구에서 냉각유체가 차지하는 영역이 감소하며, 주유동에 의해 영향받는 영역이 증가한다. 하지만, 홀 형상의 차이로 인하여 원형홀의 경우와는 다르게 양 옆 벽면은 분사비에 상관없이 주유동에 의해 영향받는 영역이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 11은 x/D_h 방향(원주방향)으로 평균한 열/물질전달계수의 분포를 분사비 변화에 따라 나타낸 그림이다. 홀 내부유동이 주유동의 영향을 받기 이전의 영역($0 < y/D_h < 1.2$)에서는 박리 및 재부착유동에서의 열/물질전달 분포와 같은 특성을 갖는다. 분사비에 관계없이 평균적으로 $y/D_h=0.3$ 부근에서 극대값을 갖는데, 이는 각 면에서 유동의 재부착 위치는 다르지만, 0-1면에서의 영향이 제일 크기 때문인 것으로 생각된다.

주유동이 있는 경우, $y/D_h > 1.4$ 인 영역에서 주유동이 없는 경우와 다른 분포를 나타내며, 이는 박빙각홀 출구부분에서 형성되는 와류와 분사유

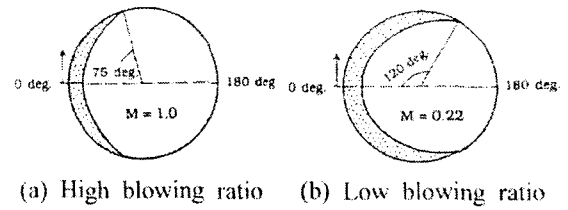


Fig. 9 Affected area of the inside circular hole surface by mainflow⁽³⁾

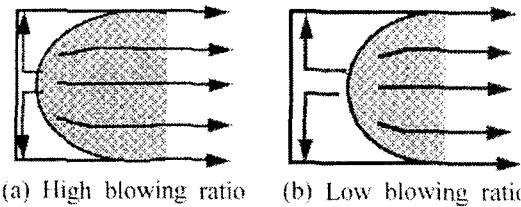


Fig. 10 Affected area of the inside square hole surface by mainflow

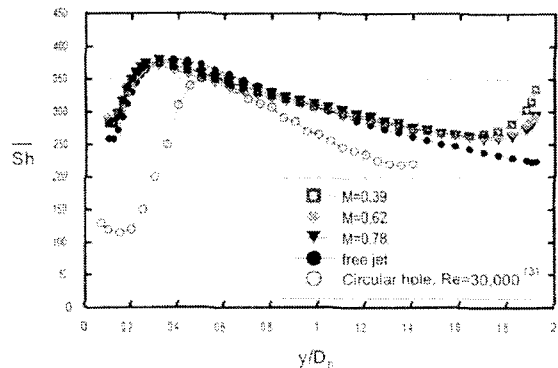


Fig. 11 Streamwise distribution of \overline{Sh} in square film cooling hole with various blowing ratios at $Re_{Dh}=25,000$

동의 편향 등에 의한 영향 때문인 것으로 생각된다. 이러한 주유동의 영향은 분사비가 감소할수록 크게 나타났다.

3.2.2 Reynolds 수 변화효과

Fig. 12는 각각 분사비 0.39에서 홀 Reynolds 수가 $Re_{Dh}=15,000$ 과 $Re_{Dh}=32,000$ 일 경우에 대한 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. $Re_{Dh}=25,000$ 인 Fig. 5(b)와 함께 비교했을 때 열/물질전달계수가 상대적으로 높고 낮음을 제외하면 전반적인 분포는 거의 동일한 것으로 나타났다. $Re_{Dh}=15,000$ 인 경우, 1-2면에서 앞서 설명된 재부착에 의해 열/물질전달이 증가하는 영역 1이 나머지 두 경우보다 약간 홀 입구에 가깝게 나타

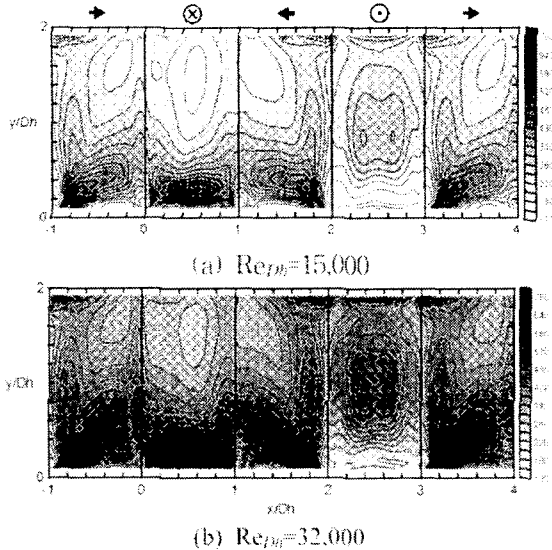


Fig. 12 Contour plots of Sherwood number for square injection hole at $M=0.39$

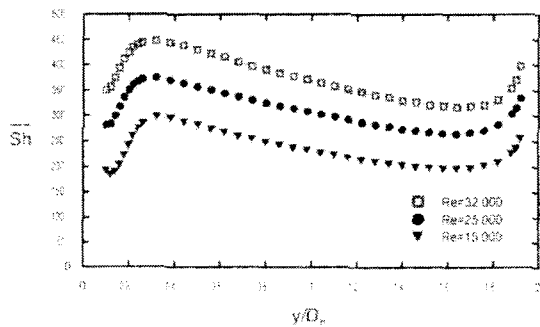


Fig. 13 Streamwise distribution of \overline{Sh} in square injection hole with various Reynolds numbers at $M=0.39$

나고는 있지만, 전반적으로 경향상의 차이는 없으며, 홀 입구영역과 홀 출구영역의 구분 없이 전체적으로 Reynolds 수 증가와 함께 전달계수가 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 입구유동이 정사각홀에 횡방향으로 유입되는 경우 홀내부의 전반적인 유동 및 열전달 특성은 입구유로의 형상과 정사각홀과의 상대적 위치에 의해 결정되며 Reynolds수에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 13은 x/D_h 방향으로 평균한 열/물질전달 계수의 분포를 Reynolds 수 변화에 따라 나타내는 그림이다. 앞에서 언급했듯이, Reynolds 수의 증가와 함께 전체적으로 열/물질전달 계수가 증가하지만, 경향을 동일한 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 정사각 단면형상을 갖는 막냉각홀 내부에서의 유동 및 국소 열/물질전달특성을 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 홀입구에서 박리된 유동은 횡방향으로 접근하는 입구유동의 영향으로 홀내부 각 면의 다른 위치에 재부착하며, 입구모서리 부분에서는 유동의 박리로 인하여 유로 모서리에 와류가 형성되는 것으로 나타났다. 또한 홀출구 부근에서는 2-3번(L.E.S.) 부근에서 발굽와류와의 상호작용에 의해 와류가 발생하는 것으로 나타났다.

(2) 홀 내부에서의 열/물질전달계수 분포의 경우 $y/D_h=1$ 이하의 범위에서는 박리유동의 재부착에 의해 물질전달이 증가하는 영역과 와류의 벽면충돌 및 이동에 의해 물질전달이 증가하는 영역이 나타남을 확인할 수 있었다. 홀출구 부근에 이르러서는 발굽와류에 의해 유도된 와류에 의해 2-3번(L.E.S.) 및 옆면에서 열/물질전달이 촉진되었다.

(3) 홀입구 부근에서의 열/물질전달계수 분포는 분사비의 영향을 받지 않았으며, 홀 출구 부근에서는 분사비가 낮을수록 주유동의 영향이 크게 나타났다.

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

후기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사 드립니다.

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) 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*.
- (6) 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*.
- (7) Hay, N. and Lampard, D., 1995, "The Discharge Coefficient of Flared Film Cooling Holes," *ASME Paper No. 95-GT-15*.
- (8) Rhee, D. H., Kim, B. G. and Cho, H. H., 1999, "Characteristics of Heat/Mass Transfer and Film Cooling Effectiveness Around a Single Film Cooling Hole with Compound Injection Angles," *Transactions of KSME B*, Vol. 22, No. 10, pp. 1434~1445.
- (9) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermo.*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (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) 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
- (12) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.