

변형된 단일 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달 및 막냉각효율 특성

이동호* · 김병기* · 조형희**

(1998년 9월 9일 접수)

Characteristics of Heat/Mass Transfer and Film Cooling Effectiveness Around a Shaped Film Cooling Hole

Dong Ho Rhee, Byunggi Kim and Hyung-Hee Cho

Key Words : Film Cooling (막냉각), Naphthalene Sublimation Technique (나프탈렌 승화법), Compound Angle Injection (복합분사각도), Shaped Film Cooling Hole (변형 막냉각홀)

Abstract

Two problems with jet injection through the cylindrical film cooling hole are 1) penetration of jet into mainstream rather than covering the surface at high blowing rates and 2) nonuniformity of the film cooling effectiveness in the lateral direction. Compound angle injection is employed to reduce those two problems. Compound angle injection increases the film cooling effectiveness and spreads more widely. However, there is still lift off at high blowing rates. Shaped film cooling hole is a possible means to reduce those two problems. Film cooling with the shaped hole is investigated in this study experimentally. Film cooling hole used in present study is a shaped hole with conically enlarged exit and inlet-to-exit area ratio is 2.55. Naphthalene sublimation method has been employed to study the local heat/mass transfer coefficient and film cooling effectiveness for compound injection angles and various blowing rates around the shaped film cooling hole. Enlarged hole exit area reduces the momentum of the jet at the hole exit and prevents the penetration of injected jet into the mainstream effectively. Hence, higher and more uniform film cooling effectiveness values are obtained even at relatively high blowing rates and the film cooling jet spreads more widely with the shaped film cooling hole. And the injected jet protects the surface effectively at low blowing rates and spreads more widely with the compound angle injections than the axial injection.

기호설명

d : 분사홀의 내경
 D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌의 물질확산계수
 h_m : 식(1)에서 정의된 국소 물질전달계수
 $L.E.$: 막냉각홀의 전연(leading edge) (Fig. 3)
 M : 분사율(blowing rate), $M = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty$

\dot{m} : 질량유속
 Sh : Sherwood 수, $Sh = h_m d / D_{naph}$
 Sh_0 : 평판유동에서의 Sherwood 수
 Sh_1' : 나프탈렌 포화공기를 분사했을 때의 Sherwood 수
 $T.E.$: 막냉각홀의 후연(trailing edge) (Fig. 3)
 T_2 : 분사유체 온도
 T_w : 벽면 온도
 T_∞ : 주유동 온도
 U_2 : 분사유체 속도

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

U_{∞} : 주유동 속도

x : 주유동 방향 좌표 (Fig. 2)

dy : 나프탈렌의 승화 두께

z : 횡방향 좌표 (Fig. 2)

그리스문자

α : 분사제트의 바닥 면에 대한 상대각
(Fig. 2)

β : 분사제트의 주유동 방향에 대한 상대각
(Fig. 2)

$d\tau$: 나프탈렌 표면의 유동장 노출 시간

η_{iw} : 비투과 벽면효율,

$$\eta_{iw} = (\rho_{v,iw} - \rho_{v,\infty}) / (\rho_{v,2} - \rho_{v,\infty})$$

ν : 동점성 계수

ρ_2 : 분사유체 밀도

ρ_{∞} : 주유동유체 밀도

ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도

$\rho_{v,iw}$: 비투과 표면에서 나프탈렌 증기밀도

$\rho_{v,w}$: 나프탈렌 표면에서 나프탈렌 증기밀도

$\rho_{v,\infty}$: 주유동에서의 나프탈렌 증기밀도

$$(\rho_{v,\infty} = 0)$$

하첨자

0 : 분사유체가 없는 경우

2 : 분사유체

∞ : 주유동유체

m : 물질전달

1. 서 론

현재 사용되고 있는 가스터빈 엔진에서는 연소실과 터빈요소에서 재질의 용융점보다 높은 온도의 유체가 통과하기 때문에 연소실과 터빈요소의 냉각을 위해 여러 가지 냉각방법이 사용되고 있으며, 그중 대표적인 방법이 막냉각방법이다. 막냉각은 연소기 벽면 혹은 터빈블레이드 표면의

작은 구멍들을 통해서 압축기의 공기를 분사하여 표면에 고온의 유체와 일종의 단열벽을 형성하는 냉각방법으로써, 지금까지는 단면적이 일정한 막냉각홀이 주된 연구대상이었다. 축방향으로 냉각유체를 분사하는 경우, 제트가 주유동을 두과하거나 횡방향으로 불균일한 효율분포가 나타나기 때문에 열용량 발생으로 인한 재료의 파손 등의 문제가 나타난다. 이를 보완하기 위해서 복합각도분사가 도입되었으며 현재 복합각도로 분사되는 냉각유체의 유동 및 열전달특성에 대한 연구가 활발히 진행중이다. Honami 등⁽¹⁾은 90°의 횡방향각도로 분사되는 경우 막냉각제트의 유동장 및 온도장의 측정을 통하여 제트와 주유동간의 상호작용에 기인한 대규모의 와동이 제트의 한쪽 측면에 존재함을 보여 주었다. Cho 등^(2,3)은 주유동에 수직으로 분사되는 막냉각홀의 경우에 대해서 홀 내부와 홀 하류에서의 열/물질전달특성에 대해서 연구하였고, 그 결과 막냉각을 하는 경우 막냉각을 하지 않은 평판에 비해서 열/물질전달이 현저히 증가함을 보였다. Lee 등⁽⁴⁾은 축방향으로 분사되는 막냉각제트의 유동특성을 슬리렌 광학계를 이용한 유동가시화와 5공프로브를 이용하여 측정, 연구하였다. 그 결과 한 쌍의 와류가 막냉각홀 하류에 형성되며, 이 와류의 강도는 제트와 주유동의 속도비가 커질수록 증가함을 보였다. Kim 등⁽⁵⁾은 단일 막냉각홀 주변에서의 유동 및 열전달 특성을 원형돌출봉의 경우와 비교, 분석하였으며, 이동호 등⁽⁶⁾은 복합각도로 분사되는 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달 및 막냉각효율특성을 나프탈렌승화법을 이용하여 연구하여 횡방향 분사각도가 증가하는 경우 보다 균일하고 높은 막냉각효율분포를 나타냄을 보여 주었다.

복합각도분사의 경우 제트가 표면에서 분리되는 현상이나 횡방향 효율분포의 불균일성이 어느 정도는 감소하지만, 분사율이 높은 경우에는 축방향분사의 경우와 유사한 유동현상을 나타낸다. 따라서 표면의 효과적인 냉각을 위해, 복합각도분사와 더불어 위에서 언급한 문제점에 대한 해결책으로 출구가 확대되는 변형된 형상의 분사홀을 이용하는 방법이 있다. 분사홀 출구면적을 넓혀줌으로써 동일한 입구 속도비로도 출구에서의 분사속도를 감소시켜서 냉각유체의 표면이탈을 방지하고, 횡방향으로 균일하게 확산되는 효과를

가져온다. 이러한 변형된 막냉각홀 주변에서의 유동 및 열전달 특성에 대한 연구는 최근에 와서야 이루어지고 있는 실정이다. Goldstein 등⁽⁷⁾은 출구에서 10°로 확대되는 원뿔 형상을 가진 막냉각홀을 이용하여 열전달 및 유동가시화 실험을 수행하였고, 그 결과 분사제트가 표면에 더 잘 부착하며 막냉각효율이 현저히 향상됨을 보여주었다. Hay 등⁽⁸⁾은 원뿔형 홀과 변형홀의 유출계수(discharge coefficient)를 실험적으로 구하여, 변형홀의 경우가 송출계수가 더 높고, 출구에서의 분사제트의 운동량감소로 인하여 막냉각성능을 향상시킬 수 있음을 보여주었다. Hyams 등⁽⁹⁾과 Brittingham 등⁽¹⁰⁾은 각각 4종류, 2종류의 변형홀을 이용하여 축방향과 복각각도 분사의 경우를 수치 해석을 통하여 연구하여 막냉각홀 하류에서 형성되는 와류가 막냉각에 좋지 않은 영향을 끼치며 변형홀을 통해 이 와류의 강도를 조절, 막냉각 성능을 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

본 연구에서는 물질전달 실험방법인 나프탈렌 승화법을 이용하여, 분사각도 및 분사율 변화시의 변형홀 인접영역에서의 국소적인 열/물질전달 계수 및 막냉각효율을 측정하고, 원뿔형 홀과 비교, 분석함으로써 그 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 물질전달실험방법인 나프탈렌 승화법을 이용하였다. 물질전달 실험방법은 열전달 실험방법에서 발생하는 전도 및 복사오차를 없앨 수 있으며, 이와 같은 방법으로 얻어진 결과는 열전달과 물질전달의 상사성에 의하여 열전달계수로 전환시킬 수 있다.

2.1 풍동 및 2차분사장치

실험장치의 구성도는 Fig. 1에 나타나 있다. 실험장치는 크게 (1)풍동, (2)2차유동 분사장치, (3)시험시편 등 3부분으로 구성된다. 실험장치 (1), (2)의 상세한 사양과 실험조건은 이동호 등⁽⁶⁾과 동일하며, 여기서는 막냉각홀 시험시편에 대해서만 언급하기로 한다.

2.2 시험시편

시험시편은 원형으로 설계하여 15° 간격으로 횡방향각도를 변경시킬 수 있도록 제작하였다.

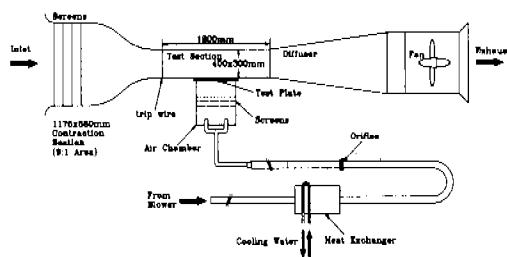


Fig. 1 Wind tunnel and injection flow supply system.

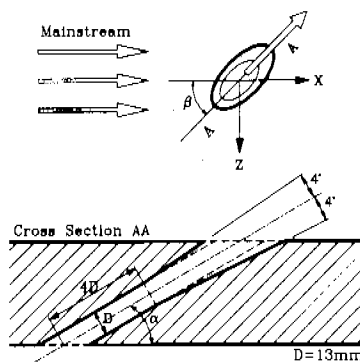


Fig. 2 Geometry of film cooling hole.

분사홀은 표면에 대해서 30°의 경사를 이루고 있다. 본 연구에서는 출구확대형 막냉각홀을 시편으로 사용하였으며, 홀 형상의 개략도 및 실험에 사용된 좌표계가 Fig. 2에 나타나 있다.

홀직경은 13 mm이고, 입구로부터 4d (52 mm)까지는 단면적이 일정한 직관형으로 되어있고 그 이후 전 방향으로 4°의 각도로 확대되는 원뿔형상(conical enlargement)을 하고 있다. 이처럼 막냉각 입구로부터 4d까지 직관부를 유지함으로써 막냉각홀 입구에서의 박리후 유동이 재부착하도록 하여⁽⁸⁾ 막냉각홀 형상변화시의 유동에 영향을 주지 않도록 하였다. 또한 막냉각홀의 급격한 단면적변화를 주지 않음으로써 막냉각홀 내부에서 형상변화시 냉각유체가 박리를 일으키지 않고 단면을 모두 채울 수 있도록 하였다. 변형홀의 출구는 장축이 41.7 mm, 단축이 20.5 mm의 타원형상을 나타내며, 입구 대 출구 면적비는 2.55

이다. 실험중 시편의 나프탈렌 표면온도를 측정
을 위해서 시편에 J-Type 열전대를 부착하였다.

2.3 승화 깊이 측정장치

열/물질전달계수를 계산하기 위해서 시험시편
의 나프탈렌층의 표면형상을 실험전후에 측정하
여 실험중 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정한다.
이를 위한 측정장치는 LVDT(linear variable
differential transformer; Lucas ultra-precision
LBB-375TA-020) 및 2차원 자동이송장치로 구성
된다. 측정장치와 상세한 사양은 이동호 등⁽⁶⁾과
동일하다.

3. 물질전달계수 및 막냉각효율의 계산

국소 열/물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

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

본 연구에서 주유동은 나프탈렌을 포함하고 있
지 않으므로 $\rho_{v,\infty} = 0$ 이다. 이와 같이 나프탈렌의
승화량(dy), 실험시간(dτ), 고체나프탈렌의 밀도
(ρ_s)와 표면에서의 나프탈렌의 증기밀도(ρ_{v,w})로
부터 열/물질전달계수를 구할 수 있다. 벽면에서
의 나프탈렌의 증기밀도, ρ_{v,w}는 Ambrose 등⁽¹¹⁾이
제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증
기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구한다.

물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood수는
다음과 같이 표현된다.

$$Sh = \frac{h_m d}{D_{naph}} \quad (2)$$

D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽¹²⁾가 제시한 나프탈렌의
물성치에 근거하였다. 단열막냉각효율(adiabatic
film cooling effectiveness)을 얻기 위하여 두 가지
의 실험을 수행하였다. 먼저 순수한 공기를 냉
각유체로 사용하였으며 두 번째로 나프탈렌으로
포화된 공기를 냉각유체로 분사시켰는데, 이 두
가지 경우는 각각 열전달계에 있어서 $T_2 = T_w$ 인
경우와 $T_2 = T_w$ 에 상응하는 것이다. 따라서, 단열

막냉각효율에 대응하는 물질전달의 비투과벽면효
율(impermeable wall effectiveness, η_{iw})은 아래와
같이 구할 수 있다.

$$\eta_{iw} = 1 - \frac{(\delta y / \delta \tau)_1}{(\delta y / \delta \tau)_0} = 1 - \frac{Sh_1'}{Sh_0'} \quad (3)$$

여기서 Sh_0' 와 Sh_1' 는 각각 $T_2 = T_w$ 인 경우와
 $T_2 = T_w$ 인 경우에 대한 Sherwood수를 나타내며, 이
후 Sh_0' 은 Sh로 간단히 표기하였다. 자세한 유도
과정은 Goldstein과 Cho⁽¹²⁾에 제시되어 있다.
Kline과 McClintock⁽¹³⁾이 제시한 방법으로 계산한
Sherwood수의 불확실성은 95% 신뢰수준에서 전
측정범위에 대하여 7.0% 이내로 주어졌다.

4. 실험결과 및 고찰

국소 열/물질전달계수는 막냉각을 하지 않은
평판에서 얻어진 Sherwood수(Sh_0 로 표시)에 대
한 상대적인 비로 제시하였다. 이와 같은 과정
을 통하여 나프탈렌의 불확실한 물성치에 기인한
오차를 제거할 수 있을 뿐 아니라, 열전달상황
($Nu/Nu_0 = Sh/Sh_0$)에 직접 적용할 수 있는 이
점이 있다.

4.1 분사각도의 변화

4.1.1 국소 열/물질전달계수

Fig. 3은 복합각도로 분사하는 경우 원통형 막
냉각효과와 변형된 막냉각효과 인접하류지역에서의
열전달 영역을 구분해 놓은 그림이다. 원통형
분사홀의 경우 제트의 높은 운동향으로 인하여
제트의 궤적이 한쪽으로 편향되고, 이로 인하여
제트에 의해 열전달이 촉진되는 영역 I이 편향되
어서 분포한다. 막냉각효율의 전연의 하류부근에
서는 주유동과 분사제트의 상호작용에 의해 형성
된 하나의 큰 와류가 형성되고, 이 와류로 의해
열전달이 촉진되는 영역 II가 형성된다. 영역 II
에서의 열전달은 다른 영역에 비해서 열전달 촉
진이 작게 나타난다. 그리고 와류로 인하여 주유
동이 유입되면서, 주유동과 제트의 혼합이 활발

히 일어나는 영역Ⅲ이 영역Ⅰ과 영역Ⅱ사이에 형성된다. 이 영역에서는 영역Ⅱ에 비해 열전달이 크게 일어난다.

하지만 변형된 분사홀의 경우 출구에서의 제트의 운동량 감소로 인하여 복합각도분사임에도 불구하고

구하고 제트가 편향되지 않고 축방향분사의 경우와 유사한 궤적을 나타낸다. 주유동과 제트간의 상호작용에 의해 발생하는 와류의 강도가 약해서 분사율이 높은 경우를 제외하고 영역Ⅱ에서의 열전달촉진은 거의 관찰되지 않는다. 원통형 막냉각홀의 경우에 관찰되던 영역Ⅲ은 제트가 표면에 깔리고 와류의 강도가 약하기 때문에 거의 나타나지 않았다.

Fig. 4는 Sh 와 Sh_1' 의 횡방향분포를 유동방향으로 4개의 지점($x/d=2.2, 3.0, 4.6, 6.0$)에서 보여준다. 분사율은 입구면적용 기준으로 계산하였으므로, 변형홀의 경우 출구면적의 확장에 따라 실질적인 출구에서의 분사율은 1.0보다 감소하게 된다. 원통형 분사홀을 이용한 막냉각의 경우에는 입구에서의 운동량이 출구에서 거의 보존되어 횡방향각도를 증가시킴에 따라 높은 물질전달계수를 나타내는 영역이 제트의 궤적에 따라 $-z$ 측에 형성되지만, 변형홀을 이용한 막냉각의 경우에는 출구의 확대에 따라 막냉각제트의 운동량이 감소하므로, $\beta=45^\circ, 90^\circ$ 의 횡방향각도를 갖는 복합각도분사의 경우에도 높은 열/물질전달계수가 나타나는 영역이 분사홀 하류에 유동방향과

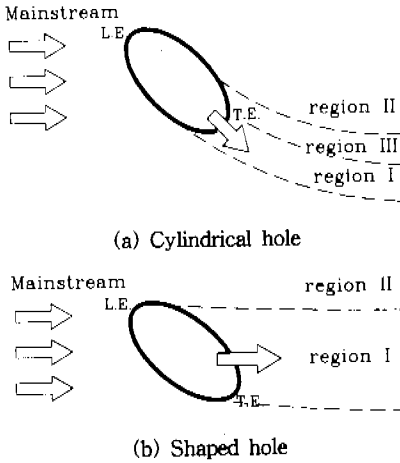


Fig. 3 Divided heat transfer regions when jet injected with compound angle orientations.

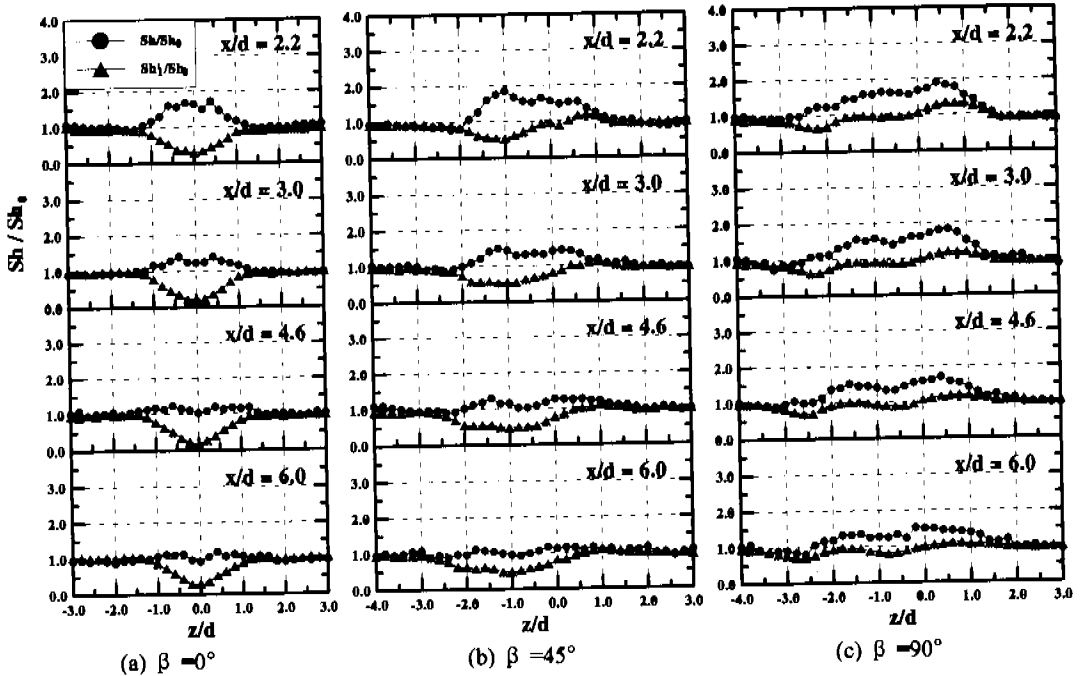


Fig. 4 Lateral distributions of Sh/Sh_0 downstream of the shaped hole for $M=1.0$.

거의 나란하게 형성된다. Fig. 4에서 Sh의 분포를 보면, 출구에서의 속도가 낮으므로 제트로 인한 물질전달계수의 상승 정도가 약하고, 앞에서 언급한 바와 같이 영역 II는 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. Sh_1' 의 분포를 보면, 제트가 붕파하는 영역에서는 물질전달계수가 평판에서의 경우보다 낮게 나타나는데 이는 제트가 효과적으로 표면에 깔리는 것을 나타낸다.

Fig. 5는 복합각도로 분사하는 막냉각홀 하류에서의 물질전달계수 $-4.0 < z/d < 3.0$ 의 범위에 걸쳐 평균하여, 유동방향분포를 나타낸 그림이다. 원통형 막냉각홀에서의 평균물질전달계수값은 이

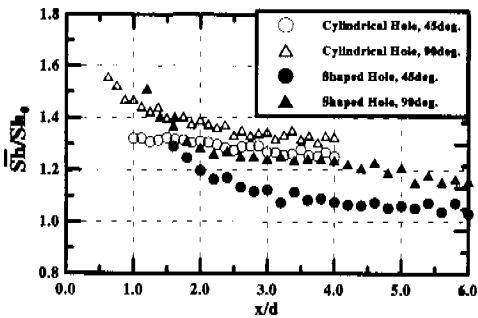


Fig. 5 Streamwise distributions of spanwise averaged normalized Sherwood number, \overline{Sh}/Sh_0 for $M=1.0$.

동호 등⁽⁶⁾의 결과를 인용하였다. 원통형 홀의 경우 냉각유체의 높은 운동량으로 인하여 주유동에 대한 교란의 정도가 변형홀의 경우에 비해 크기 때문에 보다 높은 물질전달계수의 분포를 보이고 있다. 횡방향 분사각도가 증가하면서 원통형 홀과 변형홀 두 경우 모두 주유동에 대한 교란의 정도가 심화되므로 물질전달계수가 증가되는 것을 관찰할 수 있다.

4.1.2 막냉각효율

Fig. 6은 변형홀의 동막냉각효율선도를, Fig. 7은 막냉각효율을 $x/d=2.2, 3.0, 4.6, 6.0$ 에서의 횡방향 분포형태로 제시하고 있다. 변형홀을 통하여 막냉각을 했을 때의 열/물질전달계수의 상승은 크지 않았으나, 막냉각효율이 높은 면적이 원통형 홀의 경우에 비하여 현저히 확장되었다. $\beta = 0^\circ$ 인 경우를 보면, Fig. 7(a)에서 보듯이 변형홀의 경우 $\eta_{iw} > 0.2$ 인 영역의 폭이 분사홀 직경(입구기준)의 약 2배에 달한다. 횡방향각도의 증가에 따라 효율이 높은 영역은 더욱 확대되어 Fig. 7(c)에서와 같이 $\beta = 90^\circ$ 의 경우 분사홀 입구 직경의 4배까지 넓어지고, 효율의 분포가 매우 균일해 지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 $\beta = 0^\circ, M=1.0$ 일 때 원통형 홀과 변형홀 경우 홀 중심선에서의 막냉각효율을 종방향으로 나타내는 그림이다. 그림에서 보면 알 수

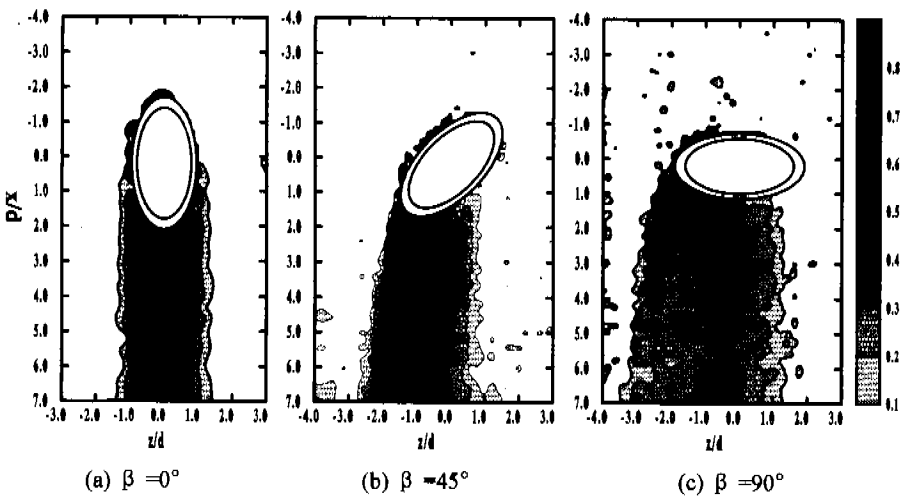


Fig. 6 Contours of normalized Sherwood number, Sh/Sh_0 around the shaped film cooling hole for $M=1.0$.

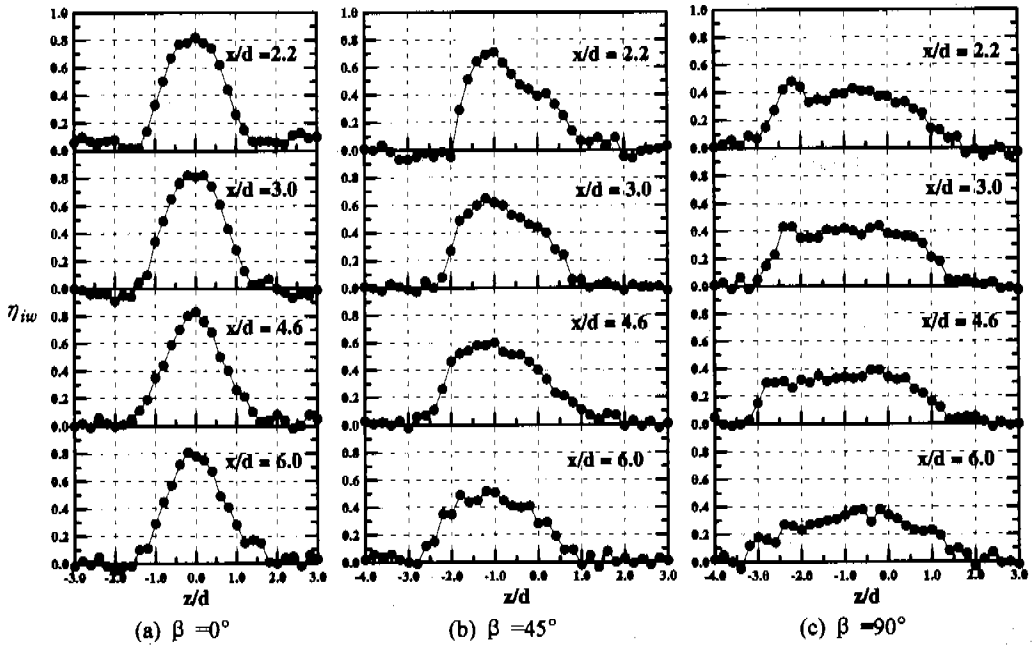


Fig. 7 Lateral distributions of film cooling effectiveness, η_{iw} around the shaped hole for $M=1.0$.

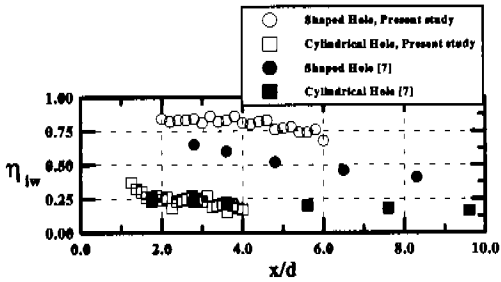


Fig. 8 Comparison of center-line effectiveness for $\beta = 0^\circ$.

있듯이 원통형 홀의 경우에 비해 변형홀의 경우가 하류로 가면서 효율이 감소하는 정도가 완만하다. 또한 변형홀의 경우 원통형 홀의 경우보다 막냉각효율이 최대 4배까지 높게 나타났다. 원통형 막냉각홀의 경우 상대적으로 운동량이 큰 전연부근에서는 제트가 표면으로부터 이탈하고, 후연부근의 제트만이 표면을 보호하지만, 변형홀의 경우 운동량의 감소로 인하여 막냉각홀에서 나오는 제트의 대부분이 표면을 덮기 때문에 효율이 높게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 $M=1.0$, $\beta=45^\circ$ 와 $M=1.0$, $\beta=90^\circ$ 일 때의 원통형 홀과 변형홀 경우의 평균 막냉각효율을 종방향으로 나타낸 그림이다. 복합각도분사의 경우 평균 막냉각효율은 두 경우

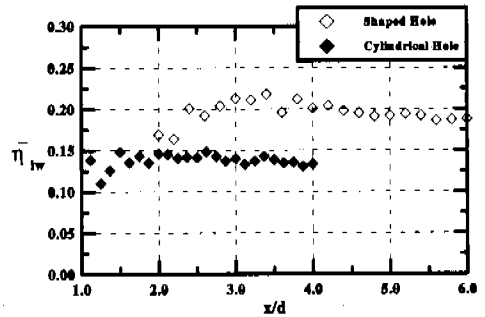


Fig. 9 Streamwise distributions of spanwise averaged film cooling effectiveness, $\bar{\eta}_{iw}$ for $M=1.0$, $\beta=45^\circ$.

모두 종방향으로 균일한 분포를 보이지만, 변형홀의 경우가 원통형 홀보다 약 2배정도 높게 나타났다. 또한 원통형 분사홀의 경우 $\beta=45^\circ$ 의 경우가 $\beta=90^\circ$ 인 경우보다 효율이 좀더 높게 나타났다지만, 변형홀의 경우 홀 인접영역을 제외하고는 평균 막냉각효율은 횡방향 분사각도의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

4.2 분사율의 변화

4.2.1 국소 열/물질전달계수

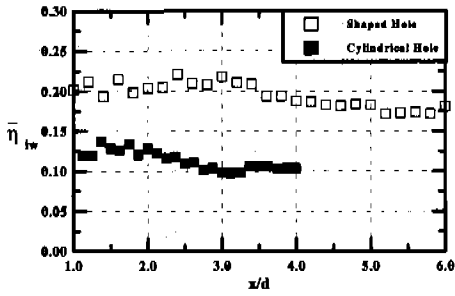


Fig. 10 Streamwise distribution of laterally averaged film cooling effectiveness, η_{iw} for $M=1.0$, $\beta=90^\circ$.

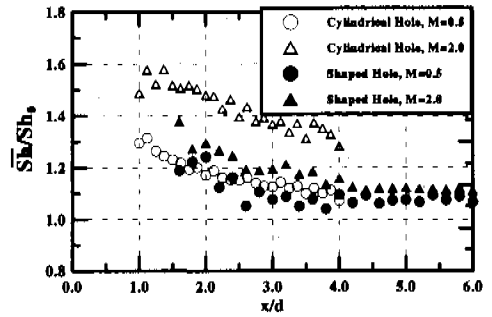


Fig. 12 Streamwise distributions of spanwise averaged Sherwood number, \overline{Sh}/Sh_0 for $\beta=45^\circ$.

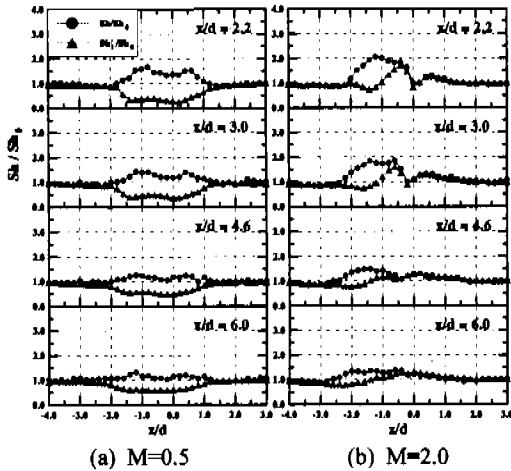


Fig. 11 Lateral distributions of normalized Sherwood number, Sh/Sh_0 around the shaped hole for $\beta=45^\circ$.

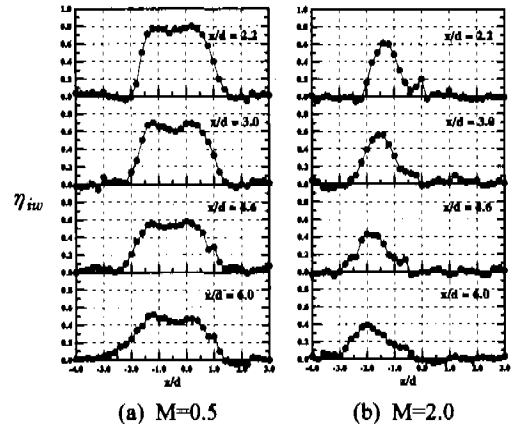


Fig. 13 Lateral distributions of film cooling effectiveness, η_{iw} around the shaped hole for $\beta=45^\circ$.

Fig. 11은 횡방향각도 45° 의 변형홀을 통한 막냉각시 분사율이 0.5, 2.0인 경우의 Sh 와 Sh_1 의 횡방향분포를 보여준다. $M=0.5$ 인 경우 분사제트의 운동량이 워낙 작기 때문에 제트가 표면에 고르게 깔리고 제트가 홀구로 나오면서 운동량이 감소하여 낮은 물질전달계수의 분포가 나타났다. 분사율이 커지게 되면 Sh 와 Sh_1 의 횡방향분포가 점차 원통형 홀 분사의 경우와 유사한 형태로 변화한다. 즉, 분사율 상승으로 인한 막냉각제트의 운동량의 증가에 기인하여 높은 열/물질전달계수를 갖는 영역이 점차로 $-z$ 측으로 이동해 가며, 낮은 분사율에서는 나타나지 않았던 영역 II와 영역III이 형성된 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 원통형 홀과 변형홀의 경우 냉각유체 물 $\beta=45^\circ$ 로 분사하는 경우 분사율 변화에 따른 평균물질전달계수의 분포를 종방향으로 나타낸 그림이다. 분사율이 낮은 경우, 분사유체의 운동량이 작기 때문에 두 경우가 유사한 물질전달계수의 분포를 보이고 있다. 하지만, 분사율이 높은 경우 원통형 홀의 경우 물질전달계수의 급격한 증가를 보이고 있으나, 변형홀의 경우 물질전달계수의 증가가 미약한 것을 관찰할 수 있다.

4.2.2 막냉각효율

Fig. 13은 분사율, $M=0.5, 2.0$ 일 때의 막냉각효율의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 7(b)와 Fig.

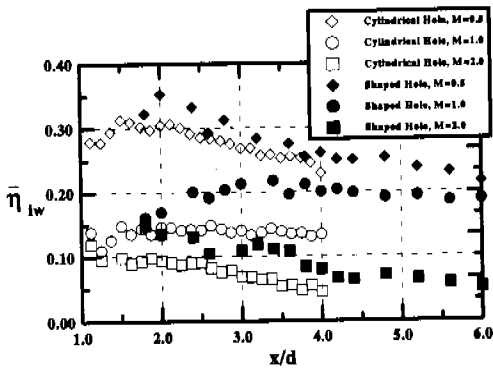


Fig. 14 Streamwise distribution of laterally averaged film cooling effectiveness, $\bar{\eta}_{lw}$ for $\beta = 45^\circ$.

13에서 보면 알 수 있듯이 M=0.5, 1.0인 경우 $\bar{\eta}_{lw} > 0.2$ 인 영역의 폭이 측정영역 내에서 분사홀 입구직경의 약 2.5~3배정도이다.

이와 같이 막냉각영역이 확장되는 이유는 변형홀을 통하여 분사되는 막냉각제트의 출구에서의 속도가 감소하여 주유동을 부과하는 정도가 감소하였을 뿐 아니라, 직관부 이후에 확대되는 형상으로 인하여 분사직후 넓게 퍼지는 효과가 있기 때문이다. 하지만 변형홀을 통한 분사의 경우에도 분사율을 증가시키에 따라 제트의 운동량 확산이 효과적으로 이루어지지 못해서 막냉각 제트가 표면에서 분리되므로 분사율이 높아질수록 막냉각효과가 점차 감소하는 추세를 보인다.

Fig. 14는 횡방향 분사각도, $\beta = 45^\circ$ 인 경우 분사율 변화시 원통형 홀과 변형홀의 경우의 평균 막냉각효율을 종방향으로 나타낸 그림이다. 원통형 홀과 변형홀의 경우 모두다 분사율이 낮을수록 효율이 증가하는 것으로 나타났다. M=0.5인 경우 제트의 운동량이 작기 때문에 원통형 홀과 변형홀의 효율분포가 유사하게 나타났으나, 분사율이 높은 경우 변형홀에서의 효율이 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. M=1.0인 경우 분사제트의 효과적인 확산에 의해 원통형 홀과 변형홀 사이의 효율차이가 제일 크게 나타난 것으로 생각된다.

5. 결론

나프탈렌승화법을 이용하여 표면과 30° 의 경사각을 가진 막냉각홀의 열/물질전달계수와 막냉각효율을 측정하였다. 출구확대형 변형분사홀의 경우에 대해서 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 의 횡방향각도와 0.5, 1.0, 2.0의 분사율에 대하여 비교, 분석하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 원통형 홀의 경우 열전달 촉진영역은 크게 분사제트에 의한 영역(영역 I)과 주유동의 와류에 의한 영역(영역 II)으로 나뉘어 나타나지만, 변형홀의 경우 분사유체의 낮은 운동량으로 인하여 분사율이 높은 경우를 제외하고는 영역 II와 영역 III는 형성되지 않음을 알 수 있다.
- (2) 변형홀의 경우 원통형 분사홀의 경우와 마찬가지로 분사율이 낮은 경우, 측방향분사보다는 복합각도분사의 경우가 넓은 영역에 대해 고된 막냉각효율분포를 나타냈다.
- (3) 변형홀을 통한 막냉각의 경우, 입구에서의 높은 속도에도 불구하고 확대형 출구형상으로 인하여 출구에서의 속도가 감소할 뿐만 아니라 냉각유체가 확산되므로 비교적 높은 분사율에서도 원통형 분사홀에 비하여 좋은 막냉각효과를 보여주었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(과제번호:95-0200-12-01-3) 및 터보동력기계 연구센터(TPMRC)의 지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Honami, S., Shizawa, T. and Uchiyama, A., 1994, "Behavior of the laterally injected jet in film cooling : Measurements of surface temperature and velocity/temperature field within the jet," J. of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 106~112.

- (2) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1995, "Heat 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.
- (3) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1995, "Heat transfer and film cooling effectiveness with injection through discrete holes Part II : On the Exposed Surface," J. of Turbomachinery, Vol. 117, pp. 451~460.
- (4) Lee, S. W., Lee, J. S. and Ro, S. T., 1994, "Experimental Study on the Flow Characteristics of Streamwise Inclined Jets in Crossflow on Flat Plate," J. of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 97~105
- (5) Kim, B. G., Rhee, D. H., Cho, H. H., 1997, "Heat (Mass) Transfer for Flows around a Film Cooling Jet and a Circular Cylinder with Compound Angle Orientations," 10th Symposium on Transport Phenomena in Thermal Science and Process Engineering, Vol. 1, pp. 203~208
- (6) 이동호, 김병기, 조형희, "분사각도변화에 따른 단일 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달 및 막냉각효율 특성," 1998, 대한기계학회 논문집 (B) 제22권 제10호 pp. 1434~1445.
- (7) Goldstein, R. J., Eckert, E. R. G. and Burggraf, F., 1974, "Effects of hole geometry and density on three-dimensional film cooling," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 17, pp. 595~607.
- (8) Hay, N. and Lampard, D., 1995, "The discharge coefficient of flared film cooling holes," ASME Paper No. 95-GT-15.
- (9) Hyams, D. G. and Lylek, J. H., 1997, "A detailed analysis of film cooling physics Part III : Streamwise injection with shaped holes," ASME Paper No. 97-GT-271.
- (10) Brittingham, R. A. and Lylek, J. H., 1997, "A detailed analysis of film cooling physics Part IV : Compound-angle injection with shaped holes," ASME Paper No. 97-GT-272.
- (11) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The vapor pressure of naphthalene," J. Chem. Thermodynamics, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (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) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing uncertainty in single sample experiments," Mech. Engineering, vol. 75, pp. 3~8.