

## 반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 막냉각 특성 (II)

- 분사비의 영향 -

안 준<sup>†</sup> · 정인성\* · 이준식\*\*

(2001년 3월 2일 접수, 2001년 6월 15일 심사완료)

## Film Cooling from Two Rows of Holes with Opposite Orientation Angles (II)

- Blowing Ratio Effect -

Joon Ahn, In Sung Jung and Joon Sik Lee

**Key Words:** Film Cooling(막냉각), Compound Angle(복합분사각), Boundary Layer Temperature(경계층 온도장), Adiabatic Film Cooling Effectiveness(단열막냉각효율), Heat Transfer Coefficient Ratio(열전달계수비), Heat Flux Ratio(열유속비)

### Abstract

Experimental results are presented, which describe the effect of blowing ratio on film cooling from two rows of holes with opposite orientation angles. The inclination angle is fixed at 35°, and the orientation angles are set to be 45° for the downstream row, and -45° for the upstream row. The studied blowing ratios are 0.5, 1.0 and 2.0. The boundary layer temperature distributions are measured using thermocouple at two downstream locations. Detailed adiabatic film cooling effectiveness and heat transfer coefficient distributions are measured with TLC(Thermochromic Liquid Crystal). The adiabatic film cooling effectiveness and heat transfer coefficient distributions are discussed in connection with the injectant behaviors inferred from the boundary layer temperature distributions. Film cooling performance, represented by heat flux is evaluated from the adiabatic film cooling effectiveness and heat transfer coefficient data. The results show that the investigated geometry provides improved film cooling performance at the high blowing ratios of 1.0 and 2.0.

### 기호설명

$D$  : 분사홀의 지름  
 $h$  : 열전달계수  
 $H$  : 형상계수 ( $= \delta^*/\theta$ )  
 $L$  : 분사홀의 길이  
 $M$  : 분사비 ( $= \rho_c U_c / \rho_\infty U_\infty$ )

$Re_D$  : Reynolds 수 ( $= \frac{U_\infty D}{\nu}$ )

$q$  : 열유속

$T$  : 온도

$x, y, z$  : 주유동방향, 수직방향, 폭방향 좌표

### 그리스문자

$\alpha$  : 경사각

$\beta$  : 방향각

$\delta$  : 경계층 두께 ( $0.99U_\infty$  기준)

$\delta^*$  : 배체두께

$\eta$  : 단열막냉각효율 ( $= \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_c - T_\infty}$ )

$\theta$  : 운동량두께

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원

E-mail : pajarol@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7123 FAX : (02)883-0179

\* 서울대학교 터보 동력기계연구소

\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

$\Gamma$  : 온도비  $\left( = \frac{T - T_{\infty}}{T_w - T_{\infty}} \right)$   
 $\Theta$  : 무차원 온도  $\left( = \frac{T - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \right)$   
 $\Psi$  : 전체막냉각효율  $\left( = \frac{T_w - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \right)$

하첨자

- 0 : 막냉각이 없는 경우
- $\infty$  : 주유동
- aw : 단열 벽면
- c : 막냉각 유체
- f : 막냉각이 있는 경우
- w : 벽면

1. 서 론

터빈 입구 온도를 낮춤으로써 가스터빈의 효율을 향상시킬 수 있다. 그러나 재료의 내열한계로 온도를 높이기 위해서는 효율적인 냉각 방법이 필요하다. 여러 가지 냉각 방법 중에서 막냉각은 냉각 효과가 커서 지금까지 집중적으로 연구되고 있는 분야이다. 막냉각은 냉각하려는 면에 구멍을 뚫어 냉각 유체를 분사하여 단열막을 형성하게 함으로써 고온의 주유동으로부터 표면을 보호하는 냉각방법이다. 이러한 막냉각에는 블레이드 형상, 분사 형상, 분사비, 주유동과 막냉각유체의 온도비 등이 영향을 준다고 알려져 왔고 이에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

분사각은 Fig. 1과 같이 경사각( $\alpha$ )과 방향각( $\beta$ )의 두 가지 특성각으로 정의할 수 있다. 방향각을 갖는 경우 복합분사각이라고 하고 냉각유체가 횡방향의 속도성분을 갖게 되어 횡방향으로 보다 균일한 막냉각효과를 보이게 된다. 또한 방향각이 0°인 단순분사각의 경우와는 다른 유동구조를 갖게 되어 막냉각 효율이 높아지고 열전달계수가 증가하게 된다.<sup>(1,2)</sup>

실제 가스터빈 블레이드의 경우 한 개에서 다섯 개까지의 분사 홀 열이 단열막을 형성하도록 분사홀을 배열한다.<sup>(3)</sup> 따라서 2열 분사에 대한 연구가 이루어져 왔고 1열 분사의 결과만으로 예측할 수 없는 몇 가지 특징들을 발견할 수 있었다. 기존의 복잡각도를 채택한 2열 분사구조에 대한

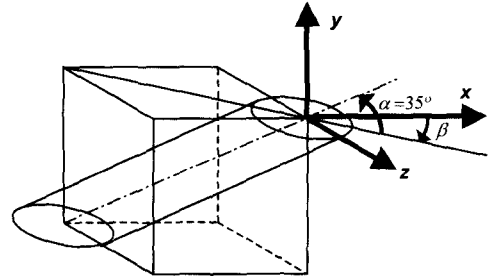


Fig. 1 Hole configuration

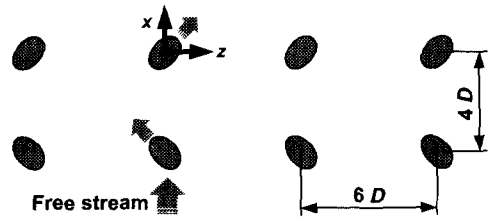


Fig. 2 Injection hole geometry

연구는 대부분 상류 홀과 하류 홀의 방향각을 같게 했고 엇갈린 배열을 채택하였다. 그러나 복합분사각을 채택하면 막냉각유체가 횡방향의 운동량을 갖게되어 하류로 진행하면서 궤적이 횡방향으로 이동하게 된다. 따라서 엇갈린 배열이 최적의 배열이 아닐 수 있고 상류 홀과 하류 홀의 상대적 위치가 중요해진다. 또한 상류 홀과 하류 홀의 방향각을 반대로 하면 와류의 상호작용에 의해 분사비가 1.0인 경우 상대적 배열에 따라 막냉각성능이 크게 달라지는 것이 관찰되었다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 (1)부에서 가장 좋은 막냉각 성능을 보였던<sup>(4)</sup> 정열배열(Fig. 2)에서 분사비에 따른 막냉각특성을 집중적으로 고찰하였다. 또한 (1)부에서 관찰한 네 가지 배열을 포함한 열유속비 결과를 제시하여 분사홀의 배치와 분사비가 반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 막냉각 특성에 미치는 영향을 정리하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 조건

실험장치는 Fig. 3과 같이 막냉각이 이루어지는 상황을 모사하고 막냉각성능을 측정할 수 있도록 구성하였다. 이를 위해서 먼저 풍동을 이용해서

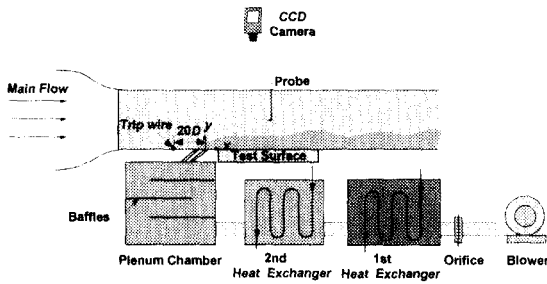


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

주유동을 형성하고, 정체실에서 분사홀을 통해 막냉각 유체를 분사하고, 분사홀 하류의 막냉각이 이루어지는 면에 측정판을 설치하였다. 풍동의 사양은 (I)부와 같으며 실험조건은 Table 1에 제시하였다.

막냉각 유체는 인버터로 제어되는 송풍기를 이용해서 공급하였다. 열교환기는 측정하는 변수에 따라 분사유체를 주위 공기온도보다 높게 가열하거나 주위의 공기와 같은 온도로 제어하는 역할을 한다.

2.2 경계층 온도장 측정

막냉각성능은 막냉각유체와 벽면의 상대적 위치와 막냉각유체가 에너지를 흡수하는 정도에 의해 결정된다. 이러한 정보는 경계층 온도장을 측정해서 얻을 수 있다. 막냉각유체가 주유동 온도보다 높은 온도가 되도록 가열하고 벽면을 단열시킨 상태에서 주유동에 수직인 면에서의 온도장을 측정하면 측정 면에서 막냉각유체의 분포를 구할 수 있다. 이와 같은 연구를 보다 체계적으로 진행하기 위해 경계층 온도를 다음과 같이 무차원화하였다.

$$\Theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \quad (1)$$

위와 같이 정의하면, 막냉각 유체가 유일한 열원이 되어 경계층에서 무차원 온도  $\Theta$ 는 0에서 1 사이의 값을 갖는다. 무차원 온도  $\Theta$ 가 0이면 경계층 온도가 주유동과 같다는 뜻이고 따라서 그 위치에 막냉각 유체가 존재하지 않는 것을 의미한다. 반면에  $\Theta$ 가 1이면 경계층 온도가 정체실에서 측정된 막냉각 유체의 온도와 같고 이는 주

Table 1 Experimental conditions

$U_{\infty}$	10 m/s
$D$	10 mm
$\delta / D$	1.5
$H (= \delta^* / \theta)$	1.36
$L/D$	4.0
$M$	0.5, 1.0, 2.0
$Re_D (= U_{\infty} D / \nu)$	6570

유동과 혼합되지 않은 막냉각유체만이 있다는 의미가 된다. 즉, 무차원 온도  $\Theta$ 는 경계층 내에서 막냉각유체의 농도를 의미한다.

경계층 온도장과 단열막냉각효율을 측정할 때 주유동은 20°C, 막냉각유체는 40°C로 각각 유지하였고 경계층 온도장은 상대오차가 0.1%이내인 백급저항온도계로 교정한 T형 열전대를 이용하여 측정하였다.

2.3 단열막냉각효율

막냉각 제트가 벽면을 얼마나 잘 보호해주는지는 막냉각 제트를 가열하여 분사하고 벽면온도의 분포를 보면 알 수 있다. 이때, 무차원 벽면온도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}} \quad (2)$$

여기서,  $T_{aw}$ 는 단열벽면온도이고  $\eta$ 는 단열막냉각효율이라고 한다. 이렇게 정의한  $\eta$ 는 0에서 1사이의 값을 갖는다. 단열막냉각효율  $\eta$ 가 1.0이라는 것은 벽면의 온도가 막냉각유체의 온도와 같다는 것이고 이는 벽면이 막냉각 제트에 의해 완벽하게 보호되고 있음을 의미한다. 반면에 단열막냉각효율이 0.0이라는 것은 벽면이 막냉각유체에 의해 전혀 보호받지 못하고 있음을 뜻한다.

이러한 막냉각효율을 구하기 위해서는 막냉각유체를 주유동보다 높게 가열하고 단열벽면온도, 주유동 온도, 막냉각 제트 온도의 세 가지 온도를 측정해야 한다. 주유동 온도와 막냉각 제트의 온도는 항온조에서 백급저항온도계를 기준으로 교정한 T형 열전대를 이용하여 측정하였고 단열벽면온도는 (I)부와 같이 액정판을 이용하여 측정하였다.

## 2.4 열전달계수

막냉각에서는 벽면 온도, 주유동 온도, 막냉각 유체 온도의 세 가지 특성 온도가 있다. 따라서 열전달계수의 정의도 이들 중 어떤 온도를 기준으로 하는가에 따라 달라지게 된다. Eckert<sup>(5)</sup>는 열전달계수  $h_f$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$q_f = h_f (T_{aw} - T_w) \quad (3)$$

여기서  $T_{aw}$ ,  $T_w$ ,  $q_f$ 는 각각 단열벽면온도, 벽면 온도, 열유속을 의미한다. 이렇게 정의하면 단열벽면온도와 벽면 온도가 같아질 때 열유속이 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 단열벽면온도는 분사 형상, 주유동 온도, 막냉각유체의 온도 등에 관계된다. 이러한 의존성을 없애기 위해서는 식 (2)에서 정의한 단열막냉각효율의 형태로 무차원화해야 한다. 한편, 열전달계수는 주유동과 벽면 온도를 기준으로 다음과 같은 형태로 다시 정의할 수 있다.

$$q_f = h (T_\infty - T_w) \quad (4)$$

식 (4)을 식 (3)으로 나누고 정리하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{h}{h_f} = 1 - \eta \Gamma \quad (5)$$

여기서,  $\Gamma$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma = \frac{T_c - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (6)$$

만약 분사 유체의 온도  $T_c$ 와 주유동 온도  $T_\infty$ 가 같다면  $\Gamma$ 는 0이 되고 식 (5)에서  $h_f$ 와  $h$ 는 같은 값을 갖게 된다. 본 연구에서는 막냉각유체의 온도와 주유동의 온도를 같게 하고 벽면에 일정한 열유속을 가하여 열전달계수  $h$ 를 측정하였고 이는 식 (5)로부터  $h_f$ 와 동일하다.

## 2.5 열유속비 분포의 계산

막냉각을 할 경우 단열막을 형성하여 열부하를 줄여주지만 막냉각 세트가 유동을 교란하여 열전달계수를 높일 수 있다. 따라서 막냉각 성능을

평가하기 위해서는 막냉각이 있을 때와 없을 때의 열유속비를 계산해야 한다.

막냉각이 없을 때 표면에 가해지는 열부하는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_0 = h_0 (T_\infty - T_w) \quad (7)$$

막냉각이 있을 때의 열부하는 식 (3)과 같이 정의할 수 있고 식 (7)과 식 (3)으로부터 열유속비를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{q_f}{q_0} = \frac{h_f}{h_0} \left(1 - \frac{\eta}{\psi}\right) \quad (8)$$

여기서,  $\psi$ 는 다음과 같이 정의되는 전체 막냉각 효율이다.

$$\psi = \frac{1}{\Gamma} = \frac{T_w - T_\infty}{T_c - T_\infty} \quad (9)$$

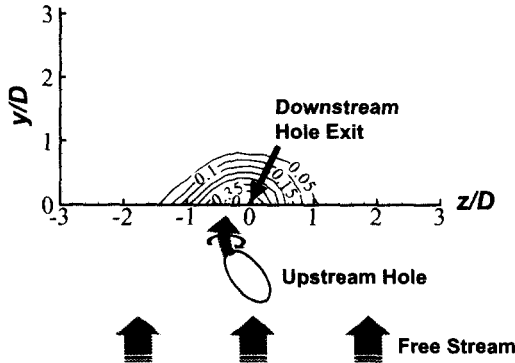
막냉각을 적용한 가스터빈 블레이드의 경우  $\psi$ 는 0.5에서 0.7 정도의 값을 갖는다.<sup>(6)</sup> 본 연구에서는  $\psi$ 를 실제 가스터빈의 전형적인 값인 0.6으로 두고 계산하였다. 열유속비의 정의로부터 열유속비가 1보다 작은 경우에만 막냉각에 의해 열부하가 감소한 것이고 열유속비가 1보다 큰 경우는 가스터빈의 열부하가 증가했음을 의미한다.

측정한 변수들의 불확실성은 Kline과 McClintock<sup>(7)</sup>이 제안한 단일표본실험법에 의해 95%의 신뢰수준으로 평가했다. 무차원 온도  $\theta$ 와 단열막냉각효율  $\eta$ 의 경우 전형적인 값인 0.2일 때 각각 5.7%, 6.8%로 산정되었다. 한편, 열전달계수비의 경우  $h_f/h_0 = 1.2$ 일 때 9.5%로 평가되었다. 열유속비는  $\eta = 0.2$ ,  $h_f/h_0 = 1.2$ 인 경우를 기준으로 10.1%의 불확실성을 갖는다.

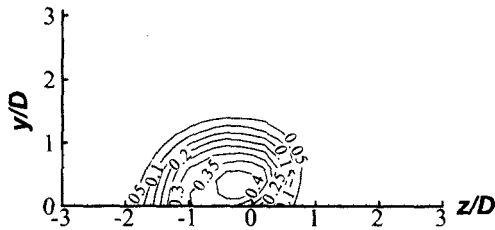
## 3. 결과 및 토의

### 3.1 경계층 온도장 특성

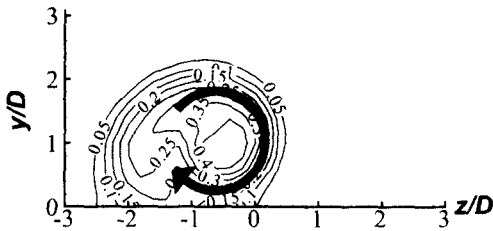
2열 분사구조에서 온도장을 측정하기에 앞서 하류 홀 출구에서의 유동 조건을 파악하기 위해 하류 홀을 막고 하류 홀 위치에서 상류 홀에서 분사된 막냉각 세트의 온도분포를 측정하여 결과



(a)  $M = 0.5$



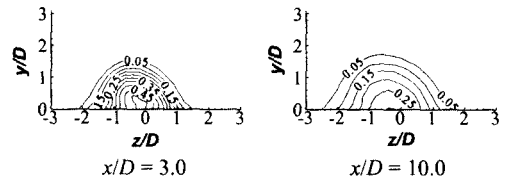
(b)  $M = 1.0$



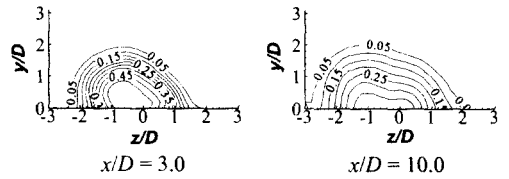
(c)  $M = 2.0$

Fig. 4 Temperature distributions at downstream hole exit

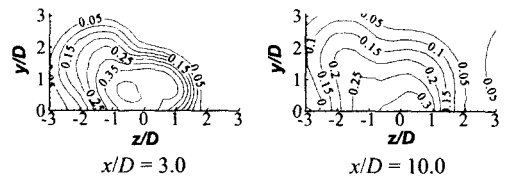
를 Fig. 4에 제시하였다. 상류 홀은 방향각이  $-45^\circ$  이므로 상류 홀에서 분사된 제트는 하류로 진행 하면서  $-z$  방향으로 이동하고 시계방향의 와류가 생기게 된다. 이러한 경향은 분사비가 커질수록 명확해진다. 분사비 2.0의 경우(Fig. 4(c)), 막냉각 제트의 중심이  $z/D = -0.5$ 까지 이동한 것을 볼 수 있고 제트의 중심 왼쪽 아래 부분에 주유동이 유입되어 온도가 낮아진 영역이 존재하는 것으로부터 시계방향의 와류가 강하게 존재하는 것을 유추할 수 있다. 분사비 1.0과 2.0의 경우 하류 홀



(a)  $M = 0.5$



(b)  $M = 1.0$

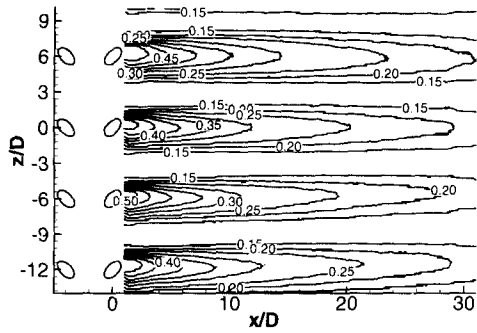


(c)  $M = 2.0$

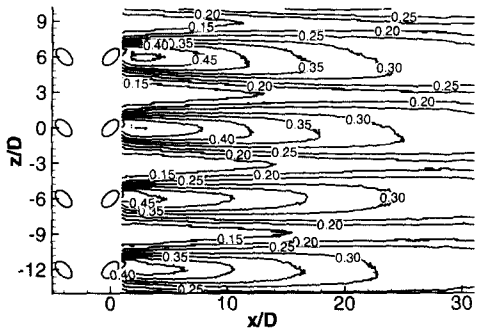
Fig. 5 Temperature distributions at  $x/D = 3.0, 10.0$

출구 위치인  $z/D = 0$  위치에 하향류가 형성되는 것을 알 수 있다. 이에 따라 상류 홀이 없는 경우<sup>(2)</sup>와 달리 높은 분사비에서도 막냉각 유체가 벽면에서 분리되는 것을 막아주어 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 막냉각 제트의 중심이 벽면 가까이 위치하는 것을 볼 수 있다. 하류 위치인  $x/D = 10.0$ 에서도 전체적인 경향은  $x/D = 3.0$ 에서와 유사하며 주유동과 혼합되면서 중심부의 온도가 낮아지고 등온선 간격이 넓어지는 것을 관찰할 수 있다.

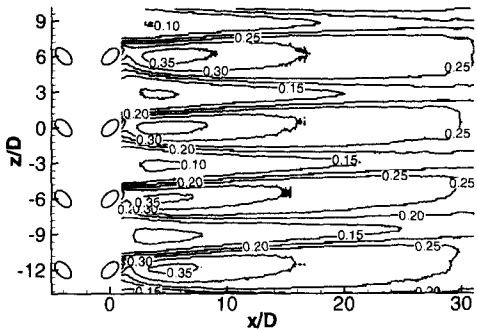
막냉각효율에 직결되는 등온선이 벽면과 만나는 위치를 살펴보면, 분사비가 0.5일 때, 막냉각 유체의 중심이라고 할 수 있는  $\theta = 0.5$ 인 등온선은  $-3.0 \leq z/D \leq 0.0$ 의 좁은 영역에서 만나지만 분사비가 1.0이 되면,  $\theta = 0.5$  등온선이  $-1.0 \leq z/D \leq 0.2$ 에 걸친 넓은 영역을 포함하는 것을 볼 수 있다. 분사비가 2.0이 되면(Fig. 5(c)) 막냉각 유체의  $y$ 방향 운동량이 증가하여 막냉각 유체의 중심이 벽면에서 분리되어  $x/D = 3.0$  위치에서 벽면과 만나는 가장 높은 무차원 온도( $\theta$ )가 0.35로 낮아지는 것을 관찰할 수 있다.



(a)  $M = 0.5$



(b)  $M = 1.0$

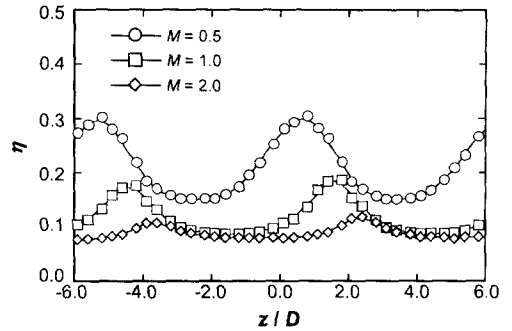


(c)  $M = 2.0$

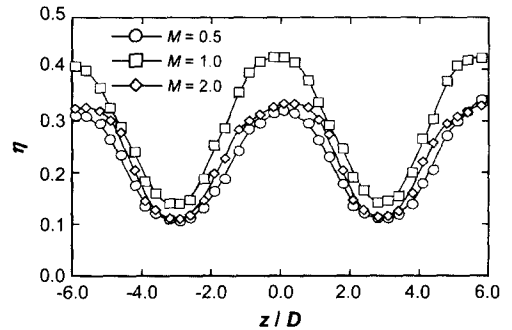
Fig. 6 Adiabatic film cooling effectiveness distributions

3.2 단열막냉각효율

복합분사각을 채택한 경우, 막냉각 제트가 횡방향의 운동량을 갖기 때문에 하류로 진행하면서 z방향으로 굴절된다.<sup>(2)</sup> 그러나 방향각이 반대인 상류홀이 존재하는 경우 Fig. 6와 같이 z방향의 운동량이 상쇄되어 제트의 궤적이 z방향으로 굴절되지 않는 것을 알 수 있다. 경사각이 35°인 1



(a) Without upstream holes

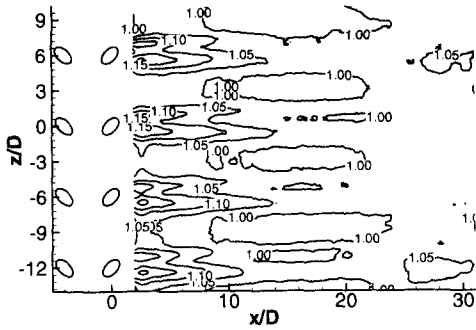


(b) Two rows of holes

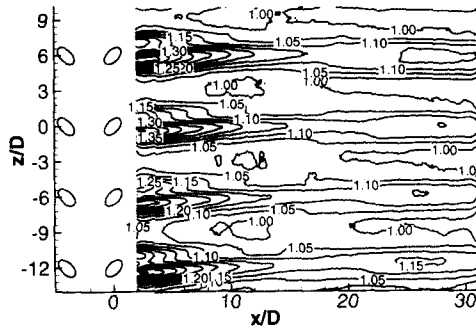
Fig. 7 Spanwise variations of adiabatic film cooling effectiveness with and without upstream holes at  $x/D = 10.0$

열 막냉각의 경우 분사비 0.5에서 막냉각 효율이 가장 높게 나타나는 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup> 그러나 Fig. 6의 (a)와 (b)를 비교해보면 분사비 1.0인 경우가 0.5인 경우보다 막냉각효율이 전반적으로 높은 것을 볼 수 있다. 한편 분사비 2.0에서(Fig. 6(c)) 상류 홀이 없는 경우<sup>(2)</sup> 막냉각효율 분포에서 막냉각 제트의 재부착점을 찾기 어렵지만 2열 분사의 경우  $\eta = 0.35$  등온선으로부터  $x/D = 3.0$  부근에서 막냉각 제트가 재부착되는 것을 관찰할 수 있다.

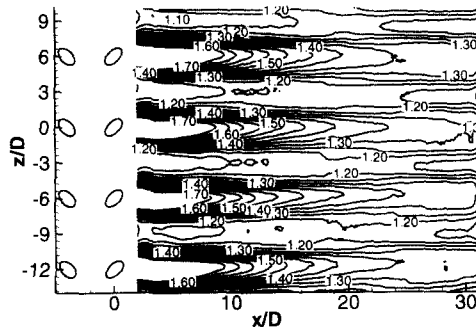
위에서 제시한 경향들은  $x/D = 10.0$  위치에서 상류홀이 있을 때와 없을 때의 막냉각효율의 폭방향 변화(Fig. 7)를 살펴보면 정량적으로 파악할 수 있다. 상류홀이 없는 경우(Fig. 7(a))  $x/D = 10.0$  위치에서 막냉각효율의 극대점은 분사비가 0.5에서 2.0으로 증가함에 따라  $z/D = 0.8$ 에서 2.5 부근으로 이동하는 것을 볼 수 있지만 상류홀이



(a)  $M = 0.5$



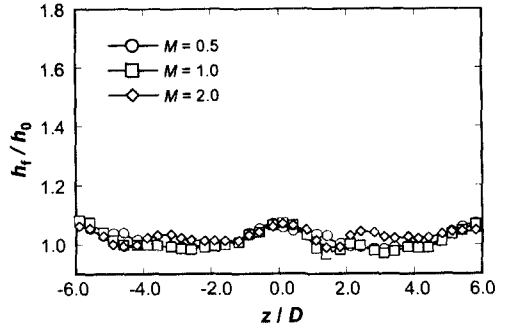
(b)  $M = 1.0$



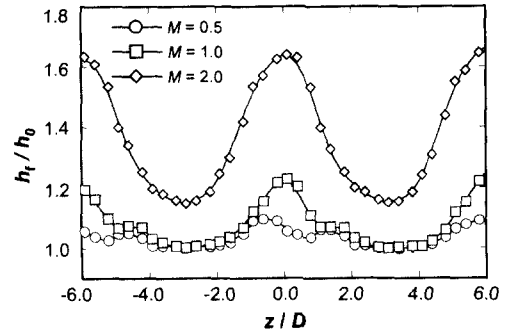
(c)  $M = 2.0$

Fig. 8 Heat transfer coefficient ratio distributions

있는 경우(Fig. 7(b)) 분사비에 관계없이 막냉각효율의 극대값이  $z/D = 0.0$  부근에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 분사비가 0.5인 경우  $x/D = 10.0$  에서 막냉각효율의 최대값은 상류홀이 있을 때와 없을 때 모두 약 0.3이지만 분사비가 1.0으로 증가하면 상류홀이 없는 경우 1.8정도로 분사비 0.5 일 때에 비해 약 30% 정도 감소하지만 상류홀이 있는 경우 반대로 30% 정도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 분사비 2.0의 경우에도 상류홀이 없



(a) Without upstream holes



(b) Two rows of holes

Fig. 9 Spanwise variations of heat transfer coefficient ratio with and without upstream holes at  $x/D = 10.0$

는 경우 분사비 0.5일 때에 비해 막냉각효율이 크게 감소하지만 상류홀이 존재하면 분사비 0.5인 경우와 거의 같은 수준을 보인다.

3.3 열전달계수

벽면에서의 막냉각이 있을 때와 없을 때의 열전달계수비( $= h_f / h_0$ )는 Fig. 8에 나타내었다. 전체적으로 막냉각유체가 유동을 교란하여 열전달계수비가 1보다 높은 분포를 보인다. 그러나 분사비 0.5의 경우 막냉각에 의해 경계층이 두꺼워져서  $10.0 \leq x/D \leq 20.0$ 에 홀과 홀 사이에 열전달계수비가 1.0보다 작은 영역이 존재하는 것을 관찰할 수 있다.

분사비가 0.5인 경우 막냉각 제트의 중심이 벽면 근처에 위치하고 따라서 막냉각 제트에 의해 생긴 2차유동이 열전달에 주로 영향을 주게 된다. 상류 홀에서 분사된 제트의 하향류가 하류

홀 출구 위치에서  $z/D = 0.5$  부근에 위치하고(Fig. 4(a)) 그 위치에서 열전달계수의 극대점이 나타난다. 그리고  $z/D = -0.5$  부근에 하류 홀에서 분사된 제트의 하향류에 의해 열전달계수가 높아진 부분이 보인다.

분사비가 1.0이나 2.0인 경우, 상류 홀이 없을 때는 막냉각 제트가 벽면에서 분리되어 하향류 위치에 생긴 열전달계수비가 높은 영역이 홀 근처에서는 나타나지 않았다.<sup>(2)</sup> 그러나 본 연구에서는 홀 출구에 형성된 하향류의 영향으로 분사비가 높은 경우에도 막냉각 제트가 벽면에 부착되어 홀 근처 하류에도 하향류 위치에서 열전달계수비가 크게 증가한 것을 알 수 있다.

분사비가 0.5인 경우(Fig. 8(a)), 관찰한 전 영역에서 열전달계수비가 1.2이내이고 분사비 1.0이 되어도 대부분의 영역에서 열전달계수비가 1.3보다 작은 것을 볼 수 있다. 그러나, 분사비가 2.0이 되면(Fig. 8(c)) 열전달계수비가 1.7 이상이 되는 영역이 홀 근처에 형성되어  $x/D = 10.0$ 부근까지 존재하는 것을 관찰할 수 있다.

상류홀이 있는 경우와 없는 경우  $x/D = 10.0$  위치에서 열전달계수비의 폭방향 분포를 Fig. 9에 제시하였다. 상류홀이 없는 경우  $x/D = 10.0$ 에서의 열전달계수비가 분사비 2.0에서도 1.1보다 작지만 상류홀이 존재하면 최대값이 1.6까지 증가한다. 막냉각이 있는 경우 열전달계수비는 와류의 하향류 위치에서 경계층이 얇아지면서 증가하지만 주유동이 유입되면서 막냉각효율은 낮아지므로 두 값이 폭방향으로 다른 위치에서 극대값을 갖게 된다.<sup>(9)</sup> 상류홀이 없는 경우 분사비 2.0일 때  $x/D = 10.0$  위치에서 열전달계수비의 극대값은  $z/D = 0.0$ 과 2.5 부근에 존재하고(Fig. 9(a)), 단열막냉각효율의 극대값은  $z/D = 1.7$  부근에서 발생한다(Fig. 7(a)). 그러나 상류홀이 존재하는 경우에는 분사비 2.0일 때, 하류홀 출구에 형성된 하향류가 막냉각 유체가 벽면에서 분리되는 것을 막아주어  $z/D = 0.0$  위치에서 열전달계수비와 단열막냉각효율이 모두 극대값을 갖는다.

### 3.4 열유속비

막냉각의 목표는 열부하를 줄여주는 것이므로 식 (8)로 표시되는 막냉각이 있을 때와 없을 때의 열유속비( $q_f/q_0$ )가 1보다 작을수록 막냉각이 효과적으로 이루어지고 있다고 할 수 있다.

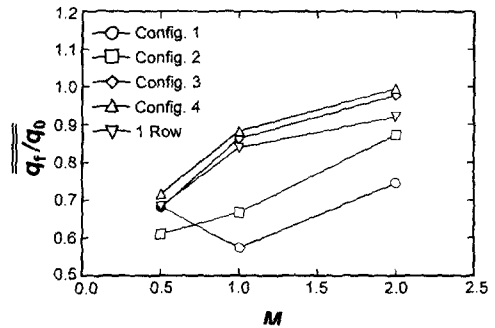


Fig. 10 Space averaged heat flux ratio

상류홀이 없는 경우와 (I)부에서 고찰한 다른 배열들을 포함하여 열유속비를 계산하여 측정면에 대해 평균한 결과를 Fig. 10에 제시하였다. 배열 1이 본 연구에서 고찰한 정열 배열이고 배열 3이 엇갈린 배열, 배열 2와 4은 그 사이에 해당하는 배열이다.<sup>(4)</sup> 분사비 0.5에서는 배열에 관계없이 막냉각유체가 벽면 가까이 위치하므로 가장 균일한 분포를 보인 배열 2가 다른 형상에 비해 열유속을 많이 줄여주는 것을 알 수 있다. 분사비 1.0에서는 정열배열을 채택한 경우에 막냉각효율이 크게 증가하여 상류 홀이 없는 경우에 비해 열유속비가 크게 줄어든 것을 볼 수 있다. 분사비 2.0인 경우에도 정열배열에서 상류 홀이 없는 경우나 다른 배열에 비해 열유속비는 크게 감소했지만 열전달계수가 증가하여 감소한 정도가 분사비 1.0인 경우에 비해 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 배열 2의 경우에도 높은 분사비에서의 경향은 배열 1과 비슷하지만 정열배열만큼 열유속을 줄여주지 못하는 것을 관찰할 수 있다. 배열 3이나 4의 경우에는 분사비가 높을 경우 하류홀 출구에 상향류가 형성되어 막냉각유체를 벽면에서 분리시키므로 상류홀이 없는 경우와 비교해도 열유속을 적게 감소하게 된다.

정열배열의 경우 높은 분사비에서 막냉각성능이 향상되는 것을 관찰할 수 있었으나 분사비가 같은 경우 2열분사의 경우 상류 홀이 없는 경우의 2배에 해당하는 양의 막냉각 유체를 사용하게 된다. 이를 고려하여 같은 양의 막냉각 유체를 사용한 상류홀이 없을 때 분사비 2.0인 경우와 정열배열에서의 분사비 1.0인 경우를 비교해보면, 상류홀이 없을 때는 열유속비가 0.9가 넘어 막냉각이 열부하를 10%도 줄여주지 못하지만 정열배



열의 경우 분사비 1.0에서는 열유속비가 0.6보다도 작아져 열부하를 40%이상 줄여주는 것을 관찰할 수 있다. 상류홀이 없을 때 분사비 1.0인 경우와 정열배열을 채택한 분사비 0.5인 경우를 비교해 보아도, 2열 배열의 경우가 열부하를 더 많이 줄여주는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 반대방향의 방향각을 갖는 정열배열 2열 분사구조의 막냉각에 분사비가 미치는 영향을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 반대방향의 방향각을 갖는 정열배열의 2열 분사구조에서는 분사비가 1.0이상일 때 하류 홀 출구에 하향류가 형성되어 막냉각 제트가 벽면에 잘 부착되는 것을 관찰할 수 있었다.

(2) 본 연구에서 정열배열을 채택한 경우 분사비 0.5에서 가장 높은 막냉각 효율을 보인 기존의 1열분사구조를 채택한 연구들이나 다른 배열들과 달리 분사비 1.0일 때의 막냉각 효율이 분사비 0.5인 경우보다 높게 나타났다.

(3) 본 연구에서 관찰한 분사구조의 경우, 높은 분사비에서 와류가 분사홀에 인접한 영역에서도 벽면 열전달계수에 큰 영향을 주었다.

(4) 열유속비를 계산한 결과 반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조는 높은 분사비에서도 열유속비를 크게 줄여주는 것을 볼 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학기술평가원 국가지정연구실 사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Lee, S. W., Kim, Y. B. and Lee, J. S., 1997,

"Flow Characteristics and Aerodynamic Losses of Film Cooling Jets with Compound Angle Orientations," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 310~319.

(2) 안준, 이준식, 1999, "복합각도로 분사되는 제트의 막냉각 특성," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 606~611.

(3) Muska, J. F., Fish, R. W. and Suo, M., 1976, "The Additive Nature of Film Cooling from Rows of Holes," *ASME J. Eng. for Power*, Vol. 98, pp. 457~464.

(4) 안준, 정인성, 이준식, 2001, "반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 막냉각 특성(I) -배열의 영향-, " 대한기계학회 논문집 심사중.

(5) Eckert, E. G., 1984, "Analysis of Film Cooling and Full-Coverage Film Cooling of Gas Turbine Blades," *ASME J. Eng. for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 206~213.

(6) Mick, W. J. and Mayle, R. E., 1988, "Stagnation Film Cooling and Heat Transfer including its Effects within the Hole Pattern," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 66~72.

(7) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.

(8) Goldstein, R. J., Eckert, E. R. G. and Ramsey, J. W., 1968, "Film Cooling with Injection through Holes: Adiabatic Wall Temperature Downstream of a Circular Holes," *ASME J. Eng. for Power*, Vol. 90, pp. 384~395.

(9) Jung, I. S. and Lee, J. S., 1999, "Effects of Orientation Angles on Film Cooling over a Flat Palte: Heat Transfer Coefficient Ratio and Heat Flux Ratio," *Proc. of Int. Gas Turbine Congress 1999 Kobe*, pp. 841~848.