

# 반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 막냉각 특성 : 분사비의 영향

안준\* · 정인성\*\* · 이준식\*\*\*

## Film Cooling from Two Rows of Holes with Opposite Orientation Angles: Blowing Ratio Effects

J. Ahn, I. S. Jung and J. S. Lee

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

### Abstract

Experimental results describing the effects of blowing ratio on film cooling from two rows of holes with opposite orientation angles are presented. The inclination angle was fixed at 35°, and the orientation angles were set to be 45° for downstream row, and -45° for upstream row. The studied blowing ratios were 0.5, 1.0 and 2.0. The boundary layer temperature distributions were measured using thermocouple at two downstream locations. Detailed adiabatic film cooling effectiveness and heat transfer coefficient distributions were 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 was calculated with the adiabatic film cooling effectiveness and heat transfer coefficient data.

	기호설명	$\alpha$	경사각
		$\beta$	방향각
$D$	분사홀의 지름	$\delta$	경계층 두께
$h$	열전달계수	$\eta$	단열막냉각효율
$L$	분사홀의 길이	$\Theta$	무차원 온도
$M$	분사비( $= \rho_c U_c / \rho_\infty U_\infty$ )	$\Gamma$	온도비
$q$	열유속	$\Psi$	전체 막냉각효율
Re	레이놀즈 수		
$T$	온도		
$x, y, z$	주유동방향, 수직방향, 폭방향 좌표		

그리스 문자

\* 정회원, 서울대학교 대학원  
 \*\* 서울대학교 터보·동력기계 연구소  
 \*\*\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

### 1. 서론

터빈 입구 온도를 높임으로써 가스터빈의 효율을 향상시킬 수 있다. 그러나, 재료의 내열한계로 온도를 높이기 위해서는 효율적인 냉각방법이 필요하다. 이중 막냉각은 냉각 효과가 커서 지금까지 집중적으로 연구된 분야이다. 막냉각은 냉각하려는 면에 구멍을 뚫어 냉각 유체를 분사하여 냉각 유체가 표면을 따라가면서 고온의 주유동으

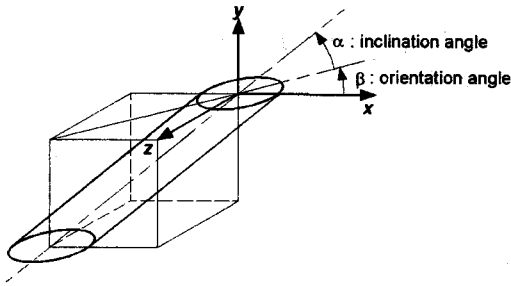


Fig. 1 Hole configuration

로부터 표면을 분리하는 단열막을 형성하고 주유동과 혼합되면서 열을 흡수하는 역할을 한다. 이러한 막냉각에는 블레이드 형상, 분사 형상, 분사비, 주유동과 막냉각 유체의 온도비 등이 영향을 준다고 알려져왔고 이에 대해 많은 연구가 진행되었다.

복합분사각을 채택한 막냉각 홀은 Fig. 1과 같이 경사각과 방향각을 표현되는 두가지 특성각을 갖는다. 방향각을 갖는 경우 냉각유체가 횡방향의 속도성분을 갖게 되고 횡방향으로 보다 균일한 막냉각효과를 보이게 된다. 복합분사각을 채택하면 단순분사각과 다른 유동구조를 갖게되고 특유의 막냉각 특성을 보이게 된다.<sup>(1)-(2)</sup>

실제 가스터빈 블레이드의 경우 한 열에서 다섯 열까지의 분사홀 열이 단열막을 형성하도록 분사홀을 배열한다.<sup>(3)</sup> 따라서 2열분사에 대한 연구가 이루어졌고 1열분사 결과만으로는 예측할 수 없는 몇가지 특징들을 발견할 수 있었다. 기존의 2열 분사구조에 대한 연구는 상류홀과 하류홀의 방향을 갖게하고 엇갈린 배열을 채택했다. 그러나 복합분사각을 채택한 경우 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 것을 관찰했다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 상류 홀과 하류 홀의 방향각이 각각  $-45^\circ$ 와  $45^\circ$ 인 2열 분사구조로 분사비 1.0에서 가장 좋은 막냉각 성능을 보였던 정열배열에서 분사비에 따른 막냉각특성을 관찰했다. 제트를 가열하고 경계층 온도장을 측정하여 막냉각유체의 거동을 파악하였다. 또한 감온성 액정을 이

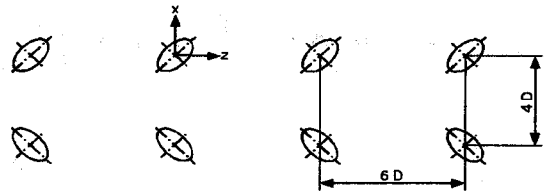


Fig. 2 Injection hole geometry

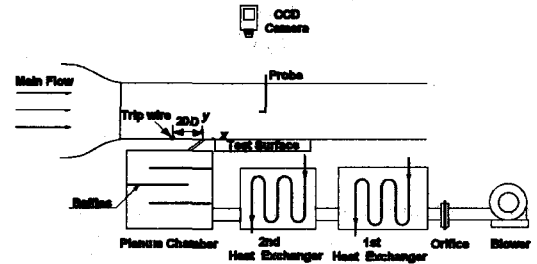


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

용하여 막냉각 면의 막냉각효율과 열전달계수의 분포를 높은 해상도를 얻을 수 있었고 이를 막냉각제트의 거동과 연관지어 해석했다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치 및 조건

실험장치는 Fig. 3과 같이 막냉각이 이루어지는 상황을 모사하고 막냉각성능을 측정할 수 있도록 구성했다. 이를 위해서 먼저 풍동을 이용하여 주유동을 형성하고, 정체실에서 분사홀을 통해 막냉각 유체를 분사하고, 분사홀 하류의 막냉각되는 면에 측정판을 설치하였다. 풍동은 6.25:1 수축비의 개방형 아음속이고 출구는 길이 3.0 m, 너비 0.4 m, 높이 0.28 m의 덕트로 이어진다. 분사홀에서 20 D 상류 위치에 지름 1.8 mm의 트립 와이어를 설치하여 난류경계층을 형성하도록 했다.

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 측정하여 얻을 수 있다. 막냉각유체가 주유동보다

높은 온도가 되도록 가열하고 y-z평면에서 온도장을 측정하면 측정 면에서 막냉각유체의 분포를 구할 수 있다. 이와 같은 연구를 보다 체계적으로 수행하기 위해 경계층 온도를 아래와 같이 무차원화하였다.

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

위와 같이 정의하면, 경계층에서 무차원 온도  $\Theta$ 는 0에서 1사이의 값을 갖는다. 무차원 온도  $\Theta$ 가 0이면 경계층 온도가 주유동과 같다는 뜻이고 따라서 그 위치에서 막냉각 유체가 존재하지 않는 것을 의미한다. 반면에  $\Theta$ 가 1이면 경계층 온도가 정체실에서 측정된 막냉각 유체의 온도와 같아야하고 이는 주유동과 혼합되지 않은 막냉각 유체만이 있다는 의미가 된다. 즉, 무차원 온도  $\Theta$ 는 경계층 내에서 막냉각유체의 농도를 의미한다.

주유동은 막냉각유체보다 20°C 높게 가열했고 온도장은 상대오차가 0.1%이내인 백금저항온도계로 교정한 T형 열전대를 이용하여 측정했다.

### 2.3 단열막냉각효율

막냉각제트가 벽면을 얼마나 잘 보호해주는지는 막냉각 제트를 가열하고 벽면온도의 분포를 보면 알 수 있다. 이때, 무차원 벽면 온도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

여기서  $T_{aw}$ 는 단열벽면온도이고  $\eta$ 는 단열막냉각 효율이라고 한다. 이렇게 정의한  $\eta$ 는 0에서 1사이의 값을 갖는다.

이러한 막냉각효율을 구하기 위해서는 막냉각 유체를 가열하고 단열벽면온도, 주유동 온도, 막냉각 제트 온도의 세가지 온도를 측정해야 한다. 막냉각유체는 주유동보다 20°C 높게 가열했고, 주유동 온도와 막냉각 제트의 온도는 항온조에서 백금저항온도계를 기준으로 교정한 T형 열전대를 이용하여 측정했다. 단열벽면온도는 TLC(감온성 액정, Thermochromic Liquid Crystal)를 이용해 측정했다.

### 2.4 열전달계수

막냉각에서는 벽면 온도, 주유동 온도, 막냉각 유체 온도의 세 가지 특성온도가 있다. 따라서 Eckert<sup>(5)</sup>는 열전달계수를 다음과 같이 정의했다.

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

여기서  $T_{aw}$ ,  $T_w$ ,  $q_f$ 는 각각 단열벽면온도, 벽면온도, 열유속을 의미한다. 이렇게 정의하면 단열벽면온도와 벽면 온도가 같아질 때 열유속이 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 단열벽면온도는 분사형상, 주유동 온도, 막냉각유체의 온도 등에 의존하고 이러한 의존성을 제거하기 위해서는 단열막냉각 효율의 형태로 무차원화해야 한다. 한편, 열전달계수는 다음과 같은 형태로 다시 정의할 수 있다.

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

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

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

여기서,  $\Gamma$ 는 다음과 같이 정의된다.

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

분사유체와 주유동의 온도가 같은 경우  $\Gamma$ 는 0이 되고 식 (5)에서  $h$ 와  $h_f$ 는 같은 값을 갖게 된다. 본 연구에서는 막냉각유체의 온도와 주유동 온도를 갖게 하고 벽면에 일정열유속을 가하여 열전달계수를 측정했다.

### 2.5 열유속비 분포의 계산

막냉각이 없을 때 블레이드에 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 있으므로 식 (7)과 (3)으로부터 열유속비

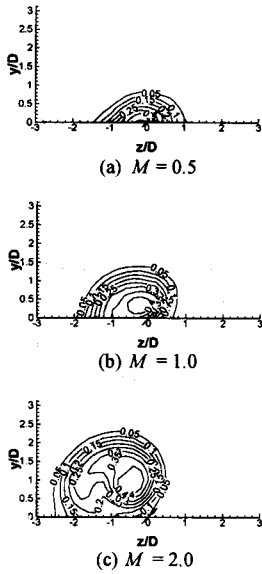


Fig. 4 Temperature distributions at downstream hole exit

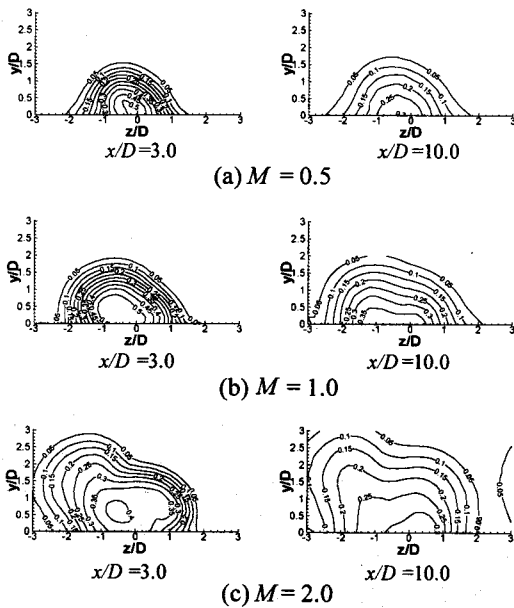


Fig. 5 Temperature distributions with two rows of holes

를 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

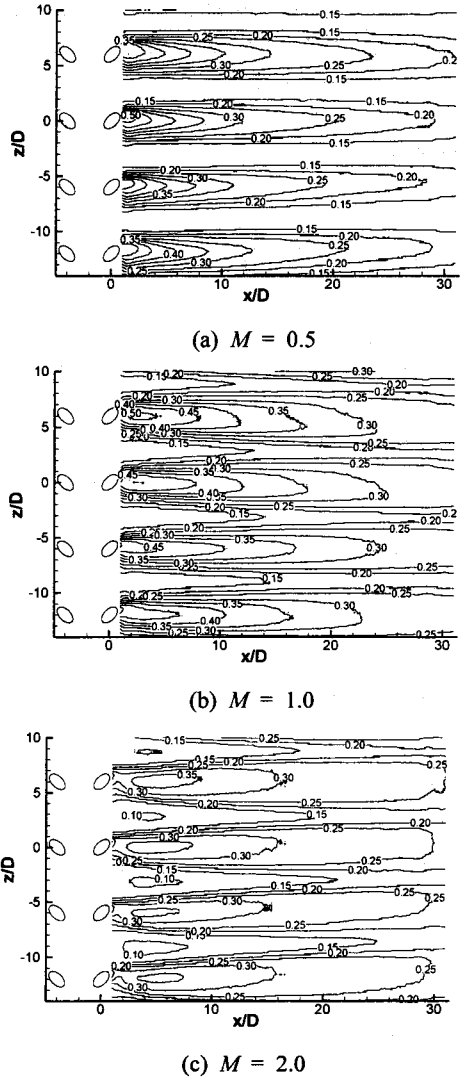


Fig. 6 Adiabatic film cooling effectiveness distributions with two rows of holes

여기서  $\psi$ 는 다음과 같이 정의되는 전체 막냉각 효율이다. 본 연구에서는  $\psi$ 를 실제 가스터빈의 전형적인 값인 0.6으로 계산했다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 경계층 온도장 특성

상류 홀의 방향각은  $-45^\circ$ 이므로 상류 홀에서 분사된 제트는 하류로 진행하면서  $-z$ 방향으로 이동하고 Fig. 4에서 시계방향의 와류가 생성된다. 와

류는 분사비가 증가할수록 강해지며 분사비 1.0과 2.0의 경우 하류 홀 출구 위치인  $z/D = 0$  위치에 하향류가 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 이에 따라 상류 홀이 없는 경우<sup>(2)</sup>와 달리 높은 분사비에서도 제트의 중심이 벽면 가까이 위치하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5). 하류 위치인  $x/D = 10.0$  에서도 전체적인 경향은  $x/D = 3.0$ 에서와 유사하며 주유동과 혼합되면서 등온선 간격이 넓어지는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 단열막냉각효율

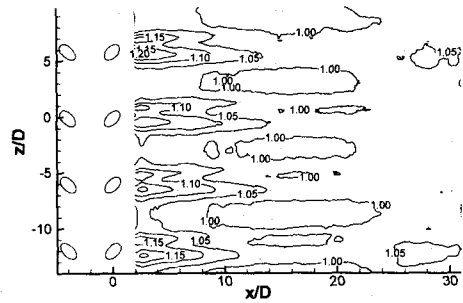
하류 홀 출구에 형성된 하향류의 영향으로 높은 분사비에서도 막냉각 제트가 벽면 가까이 위치하게 되어 상류홀이 없는 경우<sup>(2)</sup>에 비해 막냉각 효율이 크게 향상된 것을 볼 수 있다(Fig. 6). 특히 분사비 1.0의 경우의 막냉각효율이 분사비 0.5인 경우보다 높은 것을 볼 수 있다. 한편 분사비 2.0에서 상류 홀이 없는 경우<sup>(2)</sup> 막냉각 효율 분포에서 막냉각 제트의 재부착점을 찾기 어렵지만 2열 분사의 경우  $\theta = 0.35$  등온선으로부터  $x/D = 3.0$  부근에서 막냉각 제트가 재부착되는 것을 관찰할 수 있다.

### 3.3 열전달계수

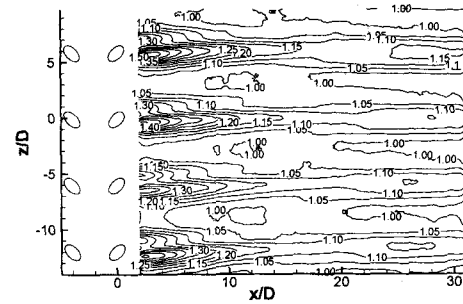
분사비가 0.5인 경우(Fig. 7(a)), 막냉각 제트의 중심이 벽면 근처에 위치하고 따라서 막냉각 제트에 의해 생긴 2차유동이 열전달에 주로 영향을 주게 된다. 상류 홀에서 분사된 제트의 하향류가 하류 홀 출구에서  $z/D = 0.5$  부근에 위치하고(Fig. 4) 그 위치에 열전달계수의 극대점이 나타난다. 그리고  $z/D = -0.5$  부근에 하류 홀에서 분사된 제트의 하향류에 의해 열전달계수가 높아진 부분이 보인다. 분사비가 1.0이나 2.0의 경우 상류 홀이 없는 경우<sup>(2)</sup>와 달리 막냉각 제트가 벽면 가까이 위치하고 와류가 상류 위치에서부터 열전달에 큰 영향을 준다. 특히 분사비 2.0의 경우 홀 근처 하류에 열전달계수가 크게 증가한 것을 볼 수 있다.

### 3.4 열유속비

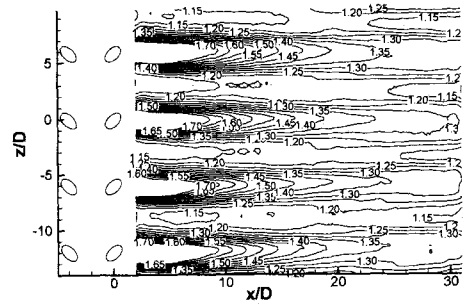
막냉각의 궁극적인 목적은 냉각면의 열부하를 줄여주는 것이다. 막냉각에 의해 열부하가 감소하면 막냉각이 있을 때와 없을 때의 열유속비( $q/q_0$ )가 1보다 작게 되고 열유속비가 작을수록 막냉각이 효율적으로 이루어지고 있다고 할 수 있다. 앞에서 제시한 결과로부터 반대방향의 방향각을 갖는 정열배열의 2열 분사구조의 경우 하



(a)  $M = 0.5$



(b)  $M = 1.0$



(c)  $M = 2.0$

Fig. 7 Heat transfer coefficient ratio distributions with two rows of holes

류 홀 출구에 하향류가 형성되어 막냉각 제트가 벽면 가까이 위치하여 분사비 1.0이상인 경우에도 높은 막냉각 효율을 보이는 것을 볼 수 있었다. 그러나 와류가 상류 영역부터 열전달계수에 크게 영향을 주어 분사비 2.0의 경우 열전달계수가 크게 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

열유속비를 계산한 결과 분사비 1.0에서는 막냉각 효율이 크게 증가하여 상류 홀이 없는 경우에 비해 열유속비가 크게 줄어든 것을 볼 수 있

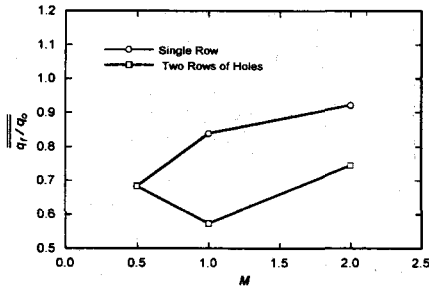


Fig. 8 Space averaged heat flux ratio

었다. 분사비 2.0인 경우에도 상류 홀이 없는 경우에 비해 열유속비는 크게 감소한 것을 볼 수 있지만 열전달계수가 증가하여 감소한 정도가 분사비 1.0인 경우에 비해 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

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

- (1) 반대방향의 방향각을 갖는 정열배열의 2열 분사구조는 분사비 1.0이상의 높은 분사비에서도 막냉각 제트가 벽면 가까이 위치하여 높은 막냉각 효율을 보였다.
- (2) 본 연구에서 관찰한 분사구조의 경우, 높은

분사비에서 와류가 상류 위치에서도 벽면 열전달계수에 큰 영향을 주었다.

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

#### 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, 1999, "반대방향의 방향각을 갖는 2열 분사구조의 막냉각 특성: 배열의 영향," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 211~216
- (5) Eckert, E. G., 1984, "Analysis of Film Cooling and Full-Coverage Film Cooling of Turbine Blades," *ASME J. Eng. for Gas Turbine and Power*, Vol. 110, pp. 66~72