

<論 文>

막냉각되는 평판에서의 열전달특성에 관한 실험적 연구
— 분사각도와 분사율의 영향 —

이상우* · 신세현* · 이택식** · 이준식**
(1988년 8월 25일 접수)

Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics
on a Film-Cooled Flat Plate
— Effect of Injection Angle and Blowing Rate —

Sang Woo Lee, Se Hyun Shin, Taik Sik Lee and Joon Sik Lee

Key Words : Film Cooling(막냉각), Heat-Mass Transfer Analogy(열전달과 물질전달의 상사), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌 승화법), Injection angle(분사각도), Film Cooling Effectiveness(막냉각효율), Blowing Rate(분사율)

Abstract

The effect of injection angle and blowing rate on a film-cooled flat plate has been investigated experimentally. Three cases of 90° injection, 35° streamwise injection and 35° spanwise injection are employed. The naphthalene sublimation technique is used to obtain local mass transfer coefficients. Thus heat transfer coefficients are evaluated using heat-mass transfer analogy. Schlieren photographs are taken to visualize the trajectory of injection fluid by introducing carbon dioxide gas through injection tubes. The experiments indicate that due to the injection the heat transfer coefficients increase significantly in the neighborhood of the injection holes, so the design of film cooled component must be based on the heat transfer coefficient with injection as well as film cooling effectiveness.

기 호 설 명

D : 분사홀의 내경
 D_{ij} : 공기에서 나프탈렌 증기의 물질확산계수
 h : 식 (3)에서 정의된 국소열전달계수
 h_f : 식 (1)에서 정의된 국소열전달계수
 h_m : 국소물질전달계수
 h_0 : 막냉각이 없는 경우의 국소열전달계수
 \bar{h} : 평균열전달계수, $\bar{h}=1/sf_0^s h dz$
 M : 분사율 (blowing rate), $M=\rho_2 u_2/\rho_\infty u_\infty$

\dot{m} : 질량유속
 Nu : 국소 Nusselt 수, $Nu=hD/k$
 Pr : Prandtl 수, $Pr=\nu/a$
 q_f : 막냉각이 있는 경우의 국소열유속
 q_0 : 막냉각이 없는 경우의 국소열유속
 Re_D : Reynolds 수, $Re_D=u_\infty D/\nu$
 s : 분사홀의 중심사이의 거리 (span)
 Sc : Schmidt 수, $Sc=\nu/D_{ij}$
 Sh : Sherwood 수, $Sh=h_m D/D_{ij}$
 T_{aw} : 단열벽면온도 (adiabatic wall temperature)
 T_w : 벽면온도
 T_r : 주유동 회복온도 (mainstream recovery tem-

* 정회원, 서울대학교 대학원

**정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

perature)

T_2 : 막냉각 유체의 분사온도 (injection temperature).

Δt : 나프탈렌의 유동장 노출시간

u : x 방향 속도

u_{∞} : 주유동 속도

u_2 : 분사유체의 평균 분사속도

x : 주유동 방향 좌표 (Fig. 1)

y : 평판에 수직방향 좌표 (Fig. 1)

Δy : 나프탈렌의 승화된 길이

z : 주유동의 직각방향 좌표 (Fig. 1)

회랍문자

α : 열확산계수

δ^* : 경계층의 배제두께

η_{ad} : 막냉각효율, $\eta_{ad} = (T_{aw} - T_r) / (T_2 - T_r)$

Θ : 무차원 온도, $\Theta = (T_2 - T_r) / (T_w - T_r)$

ν : 동점성계수

ρ_s : 고체 나프탈렌의 밀도

$\rho_{v,w}$: 나프탈렌 표면에서 나프탈렌 증기의 농도

$\rho_{v,\infty}$: 주유동에서의 나프탈렌 증기의 농도

ρ_2 : 분사유체의 밀도

ρ_{∞} : 주유동 유체의 밀도

하첨자

aw : 단열벽면

f : 막냉각이 있는 경우

m : 물질전달

s : 고체 나프탈렌

v : 나프탈렌 증기

w : 벽면

0 : 막냉각이 없는 경우

2 : 분사유체

1. 서 론

가스터빈 엔진의 효율을 향상시키기 위해서는 연소실로부터 터빈으로 들어가는 연소가스의 온도를 높여야 한다. 최근에 개발되고 있는 고성능엔진의 경우 이 연소가스의 온도가 1500K를 넘고 있으므로 엔진의 정상적인 작동을 위해서는 터빈 블레이드를 적절한 온도 이하로 유지시키는 냉각시스템이 필요하다. 터빈 블레이드의 냉각에는 블레이드의 내부에서의 내부대류냉각(internal con-

vection cooling)과 제트충돌냉각(jet impingement cooling)이 사용되고 이와 더불어 블레이드의 표면에서는 막냉각(film cooling)이 널리 사용되고 있다. 막냉각은 고온의 가스유동으로부터 고체표면을 보호할 목적으로 사용되고 있는 방법으로 고체표면에서 분사된 냉각유체는 고체표면과 고온의 가스 사이에 단열막을 형성하여 고체로의 열전달을 억제하며, 아울러 고온의 가스유동과의 혼합에 의하여 고체면 근처에서 고온가스 유동의 온도를 저하시키는 역할도 한다.

일반적으로 막냉각이 있는 경우의 열전달계수 h_f 는 다음과 같이 정의된다⁽¹⁾.

$$q_f = h_f (T_w - T_{aw}) \tag{1}$$

여기서 q_f 는 막냉각되는 벽면에서의 열유속, T_w 는 벽면온도, 그리고 T_{aw} 는 냉각면이 단열일때의 벽면온도 즉 단열벽면온도이다. 이 단열벽면온도를 다음과 같이 무차원화하여 막냉각효율(film cooling effectiveness) η_{ad} 를 정의한다.

$$\eta_{ad} = \frac{T_{aw} - T_r}{T_2 - T_r} \tag{2}$$

여기서 T_r 은 주유동회복온도(main stream recovery temperature)이고 T_2 는 막냉각 유체의 분사온도를 나타낸다. 이와는 달리 막냉각의 효과가 열전달계수에 의해서만 고려되도록 다음과 같이 기준 온도차를 달리하여 막냉각 면에서의 열전달계수 h 를 정의할 수 있다.

$$q_f = h (T_w - T_r) \tag{3}$$

식 (3)에서는 막냉각 유체의 분사온도가 기준 온도차에 고려되고 있지 않으므로 막냉각에 의한 벽면에서의 열전달량의 변화는 전적으로 열전달계수 h 의 값에 반영된다. 식 (3)에서 막냉각이 없는 경우의 열유속 q_0 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_0 = h_0 (T_w - T_r) \tag{4}$$

위의 식들을 이용하여 q_f 와 q_0 의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{q_f}{q_0} = \frac{h}{h_0} = \frac{h_f}{h_0} (1 - \eta_{ad}\Theta) \tag{5}$$

여기서 무차원온도 Θ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Theta = \frac{T_2 - T_r}{T_w - T_r} \tag{6}$$

초기의 막냉각에 관한 연구들⁽²⁾은 연속적인 슬롯이나 다공성물질이 존재하는 2차원 유동에 대해 이루어졌다. 그러나 실제로 막냉각이 응용되고 있는 항공기용 제트엔진이나 산업용 가스터빈의 터

빈 블레이드의 냉각에는 제작상의 난점이나 구조적인 문제 때문에 2차원 슬롯보다는 일정한 간격으로 배열되어 있는 분사홀(injection hole)이 널리 이용되고 있다. 이 경우는 유동현상이 매우 복잡한 3차원이므로 해석과 실험에 많은 난점이 있다. 막냉각에 대한 많은 연구에서 막냉각효율의 측정을 연구 대상으로 하였다^(2,3). 그 이유는 막냉각효율이 열전달계수에 비해 넓은 영역에 걸쳐서 크게 변화하며 냉각유체의 분사온도의 영향을 포함하고 있기 때문이다. 초기에는 막냉각되는 고체면에서의 열전달계수가 막냉각이 없는 면에서의 그 값과 일치한다고 가정하였다. 그러나 이 가정은 분사홀로부터 멀리 떨어진 구역이나, 냉각유체의 분사율(blowing rate) M 이 매우 작을 경우에만 유효하다. Leiss⁽⁴⁾, Eriksen과 Goldstein⁽⁵⁾ 등은 분사홀 근처의 열전달계수의 측정을 통하여 분사율이 낮을 경우에는 국소열전달계수가 분사홀이 없는 경우와 같은 값을 갖지만, 분사율이 커지면 국소열전달계수의 값이 증가함을 보였다. Goldstein과 Taylor⁽⁶⁾는 물질전달과 열전달의 상사를 이용하여, 나프탈렌으로 이루어진 평판에서의 물질전달계수를 측정하였으며, 이와같은 실험방법이 분사홀 근처에서의 국소열전달계수의 정확한 측정에 적합한 방법임을 보여 주었다. 그들은 유동방향으로 35° 경사진 분사홀에 대해 분사율이 0.2에서 1.97인 범위에서 실험을 수행하여 분사홀 근처에서의 국소열전달계수가 막냉각이 없는 경우에 비하여 최대 4배까지 크게 증가함을 보였다. Hay등^(7,8)도 열전달계수의 측정에 열전달과 물질전달의 상사를 도입하여, 고분자(swollen polymer)로 코팅된 평판과 홀로그래픽 간섭계를 이용한 실험을 하였다. 그들은 유동방향으로의 35° 경사분사와 수직분사 두 경우에 대해서 비교적 분사홀에서 멀리 떨어진 곳에서의 열전달계수를 측정하였으며, 유동방향으로의 압력구배가 열전달계수에 미치는 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 막냉각되고 있는 수평평판에서 분사각도와 분사율의 변화가 열전달계수에 미치는 영향을 주 연구대상으로 하였다. 열전달계수의 측정을 위하여 나프탈렌 승화법을 이용하였고, 열전달계수에 가장 큰 영향을 미치는 유동장에 대한 이해를 위해 솔리덴 광학계를 이용한 유동의 가시화 실험을 수행하였다. 분사각도는 Fig. 1에서와 같이 y 축 방향으로의 수직분사(case 1), 유동방향(x 축방향)에 대해 35° 경사진 분사(case 2), 그리고 유동

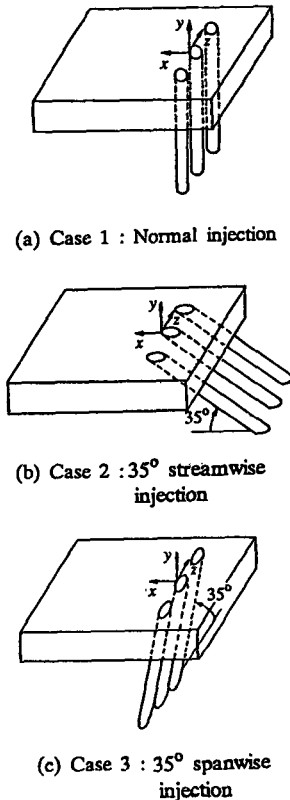


Fig. 1 Three experimental cases (main flow direction: x)

의 직각방향(z 축)에 대해 35° 경사진 분사(case 3) 등 3가지의 경우에 대해 실험하였고, 분사율은 0.5, 1.0, 1.8로 변화시켰다.

2. 실험방법

막냉각의 연구에 있어서 열전달과 물질전달의 상사를 이용한 실험방법이 널리 이용되고 있다. 나프탈렌 승화법은 그 중 한 방법으로 나프탈렌을 원하는 기하학적 형상으로 주조하여 유동장에 노출시킨 뒤, 일정한 시간 동안 승화된 나프탈렌의 양을 측정하여, 그 시간 동안 평균된 물질전달계수를 구한다. 물질전달계에서 나프탈렌 평판의 표면온도가 등온으로 유지된다면, 그곳에서의 나프탈렌의 증기압이 일정하므로 나프탈렌의 농도가 일정하다. 그러므로 이 경계조건은 열전달계에서는 등온 조건을 나타낸다. 일반적으로 물질전달계수 h_m 은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{m} = h_m(\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}) \quad (7)$$

식 (7)은 열전달계의 식 (3)과 대응이 된다. 그런데 주유동에서의 나프탈렌의 농도 $\rho_{v,\infty}$ 가 0이므로, 물질전달계수는 다음과 같이 된다.

$$\dot{m} = h_m \rho_{v,w} \quad (8)$$

나프탈렌의 질량유속 (mass flux) \dot{m} 는 실험중 승화된 나프탈렌의 길이 Δy 를 측정함으로써 얻어진다.

$$\dot{m} = \rho_s \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (9)$$

따라서 식 (8), 식 (9)로부터 물질전달계수는 다음과 같이 주어진다.

$$h_m = \frac{\rho_s}{\rho_{v,w}} \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (10)$$

일반적으로 Prandtl 수, Pr 과 Schmidt 수, Sc 가 서로 같고, 난류 Prandtl 수와 난류 Schmidt 수가 서로 같으며, 열전달계와 물질전달계에서 경계조건이 서로 상사한다면, 열전달계와 물질전달계의 지배방정식이 서로 상사하게 된다⁽⁶⁾. 따라서 이 경우에는 열전달계수와 물질전달계수가 정확히 대응이 된다. 그러나 공기중에서 확산되는 나프탈렌에 대한 Schmidt 수와 공기의 Prandtl 수가 서로 같은 값을 갖지 않으므로, Sherwood 수, Sh 와 Nusselt 수, Nu 는 다음과 같은 관계식으로 주어진다.

$$\frac{Sh}{Nu} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^n \quad (11)$$

여기서 상수 n 은 대략 0.4 정도의 값을 갖는다. 실제 실험에서 주유동유체와 분사유체는 나프탈렌의 농도가 모두 0인 공기이므로, 이와같은 물질전달계에 대응되는 열전달계에 있어서, 주유동온도 T_r 과 분사유체 온도 T_2 는 서로 같다. 따라서 식 (6)으로부터 무차원온도 θ 가 0으로 되며, 식 (5)로부터 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$h = h_f \quad (12)$$

이것은 Hay등⁽⁷⁾에 의해 실험적으로 입증되었다. 본 연구에서는 나프탈렌의 승화된 양을 측정하여 식 (10)으로 주어지는 물질전달계수 h_m 을 구하고 식 (11)의 관계를 이용하여 열전달계수 h 를 얻었다. 이 h 는 식 (1)에서 주어진 h_f 와 동일한 값이다.

3. 실험장치 및 실험과정

실험장치는 Fig. 2에서 주어진 바와같이 베크라이트로 제작된 수평평판에 나프탈렌 주형을 설치할

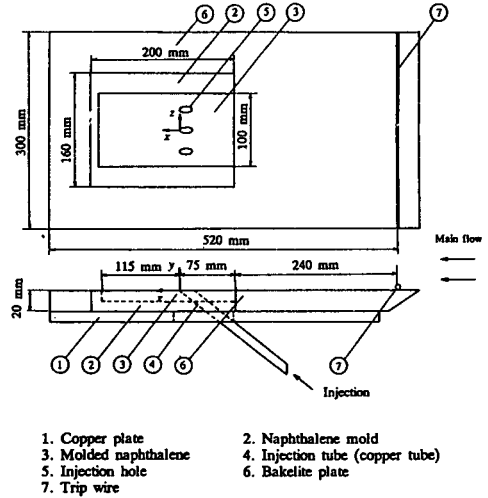


Fig. 2 Schematic diagram of test flat plate

수 있도록 되어 있다. 실험에 사용된 풍동은 최대 풍속 23m/s이고 난류강도가 1% 이내인 교정용 정밀 풍동으로 Kanomax사 제품이다. 실험시에 주유동속도는 10m/s로 유지하였다. Fig. 2에서와 같이 주조된 나프탈렌으로부터 0.24m 상류위치에 직경 1mm의 trip wire를 설치하여 난류유동이 되도록 하였다.

Fig. 3은 평판의 중심선을 따라서 난류경계층의 속도분포를 직경 0.6mm의 피토판으로 측정한 것이다. Trip wire로부터 0.2m, 0.3m, 0.4m 떨어진 곳에서의 속도분포가 1/7근 법칙의 속도분포와 잘 일치하고 있음을 보여준다. 이것으로부터 경계층유동이 완전히 발달된 난류유동임을 확인하였고 z 가 +0.1m, -0.1m인 곳에서의 속도분포 측정을 통해 유동이 2차원임을 확인하였다. Trip wire로

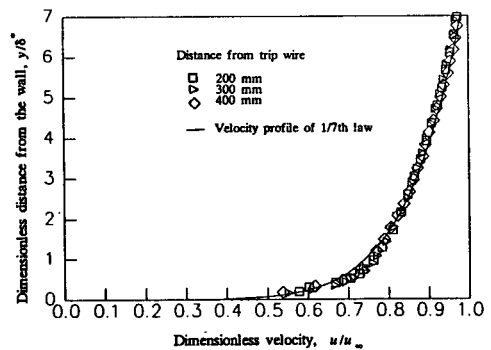


Fig. 3 Boundary layer velocity profiles along centerline of test plate without injection

부터 하류방향으로 0.3m 떨어진 곳에서의 난류경계층의 배제두께(displacement thickness)는 2.05 mm였으며, 배제두께를 외삽법으로 구한 난류 경계층의 가상원점은 trip wire로부터 0.336m 상류에 위치하였다.

분사홀은 내경(D)이 8.0mm, 외경이 10mm인 동관으로 되어 있으며 분사홀 사이의 간격 s는 분사홀의 중심위치를 기준으로 3.6D이며 주유동이 없을 때, 분사홀의 출구에서 완전히 발달한 유동이 되도록 충분히 길게 제작하였다. 주유동 속도를 특성속도로, 분사홀의 내경을 특성길이로 하는 Reynolds 수는 4.74×10^3 이다. Fig. 4에서와 같이 서지탱크(surge tank)를 통과한 분사공기는 3개의 유로로 나누어져 정밀하게 교정된 유량계를 지나 분사되며, 각 유로마다 니들 밸브가 설치되어 있어서 유량의 독립적인 제어가 가능하다. 주유동의 온도와 분사공기의 온도를 동일하게 유지하고, 나프탈렌의 표면온도를 균일하게 하기 위하여 송풍기(blower)를 통과한 공기는 온도조절이 가능한 항온조에 설치되어 있는 열교환기를 지나도록 설계하였다.

나프탈렌을 주조하는데 사용되는 주형은 Fig. 2에서와 같이 가로, 세로, 높이가 각각 200mm, 160mm, 20mm인 황동평판에 10mm 깊이의 홈을 낸 것으로 그 위에 정밀하게 연마가공된 덮개를 설치하고 그 사이의 공간에 용융된 나프탈렌을 주입하였다. 주조하기 전에 미리 분사관을 황동 주형에 부착하고, 주조용 덮개를 나프탈렌의 용융온도인

80°C 정도까지 예열을 한다. 그 뒤 용융된 나프탈렌을 주형에 붓고 서서히 냉각시켜 굳힌다. 주형의 온도가 상온으로 되었을 때 망치를 이용하여 덮개에 충격을 주면 덮개가 분리되면서 매끈한 나프탈렌 표면을 얻을 수 있다. 실험에 사용된 나프탈렌의 화학식은 $C_{10}H_8$ 이며, 용융점 온도는 79.5°C이고, 순도 99.9%의 시약용 나프탈렌을 사용하였다. 나프탈렌 표면의 온도를 측정하기 위해서 주조할 때 copper-constantan 열전대를 부착하였으며 실험도중 주유동의 온도, 분사유체의 온도, 나프탈렌 표면의 온도를 일정시간 간격으로 측정하였다. 식 (8)에서 주어진 나프탈렌 표면에서의 농도 $\rho_{0,z}$ 는 온도에 따라 크게 변화하므로 본 실험에서는 주유동 온도와 분사유체의 온도를 최대 0.3°C 이내로 유지하였다. 나프탈렌 표면의 승화된 깊이를 측정하기 위해서 표면조도측정기(일본 Kosaka Laboratory Ltd. 제품, 모델 SE-3A)의 표면형상 기록기능을 이용하였다. 이 장치의 측정범위는 0.05 μ m에서 400 μ m이며 측정 센서는 0.4g에 불과하므로 나프탈렌 표면에 거의 영향을 주지 않았다. 측정에 앞서 표준시편을 이용하여 표면조도측정기를 교정하였고, 측정된 결과는 chart recorder로 기록하였다. 나프탈렌 표면형상을 x, z축방향으로 측정하기 위해서 스텝모터에 의해 구동되는 직선운동 가이드를 이용하여 정밀이송장치를 제작하였으며, 표면조도측정기의 정밀한 이송을 위하여 마이크로 컴퓨터로 스텝모터를 제어하였다.

주조된 나프탈렌은 유동장에서 2시간동안 노출하였다. 이때 승화된 나프탈렌의 깊이는 온도와 분사율에 따라 다르지만 대체로 0.04mm에서 0.2mm 정도였다. 측정된 나프탈렌 표면의 온도를 측정시간에 따라 평균하여 얻은 값을 근거로 하여 나프탈렌평판의 표면에서 나프탈렌의 증기압과 농도를 구하고, 측정된 나프탈렌의 깊이와 노출시간을 이용하면 식 (10), 식 (11)로부터 열전달계수 h를 구할 수 있다. 분사홀이 없는 경우의 물질전달계의 실험조건은 열전달계에서 가열되지 않은 초기길이(unheated starting length)를 가지는 평판에서의 난류 열전달⁽¹⁰⁾과 상사하므로, 실험의 오차를 산출하기 위해 분사관을 제거한 채 실험을 하여 두 결과를 비교하였다. 나프탈렌 승화법으로 얻은 실험결과가 4% 정도 더 큰 값을 나타냈지만, 하류방향으로 열전달계수의 변화 경향은 서로 일치하였다. 이와같은 차이는 온도측정에서의 오차와 난류경계층의 가

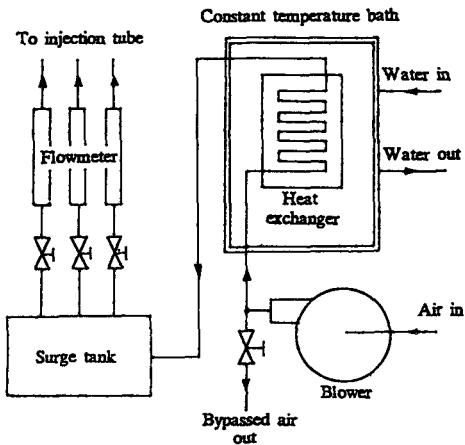


Fig. 4 Schematic diagram of injection air feeding system

상원점을 구할 때의 오차 때문일 것으로 추측된다.

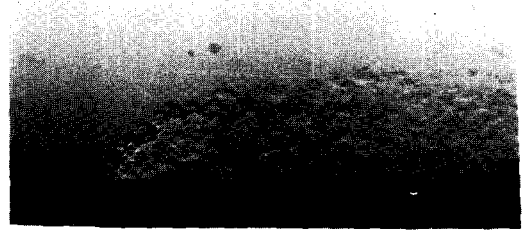
분사유체는 속도가 큰 난류유동이므로 분사유체의 유동형태를 가시화하는 것은 매우 어려운 일이다. 드라이아이스를 이용하여 분사유체의 궤적을 가시화한 예⁽¹¹⁾도 있지만, 여기서는 솔리렌 광학계를 이용하였다. 솔리렌사진은 밀도의 1차 구배를 명암으로 표시해 주는 것이므로, 분사유체를 공기 대신 공기보다 밀도가 큰 이산화탄소로 하였다. 분사유체의 거동을 정확히 관찰하기 위하여 $2\mu\text{s}$ 동안 점등하는 스파크 광원을 이용하였다. 이 스파크 광원은 두 전극 사이에 매우 높은 직류전압을 걸어 방전을 시킴으로써 순간적으로 밝은 빛을 발생시킨다. 본 실험에서는 전극사이의 전압을 10kV 정도로 유지하였다. 솔리렌 광학계는 Z형식의 광로를 택하였고 광로는 z축에 평행하도록 배치하였다.

4. 결과 및 검토

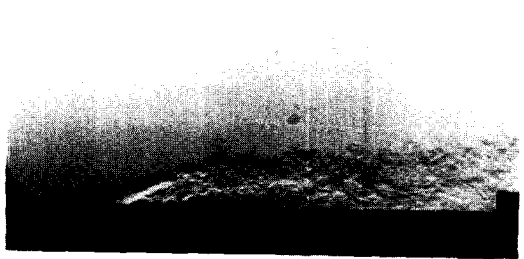
4.1 유동의 가시화

막냉각되는 고체면에서의 열전달특성은 유동장에 의해서 크게 좌우되며 분사유체가 주유동에 의해 어떻게 변화하는지를 이해하는 것은 매우 중요하다. 특히 분사홀 근처에서의 열전달계수는 평균속도 뿐만 아니라 난류강도에 의해 큰 영향을 받는다. 분사홀로부터 나온 분사유체는 주유동과 작용하여 주유동 방향으로 휘면서 하류방향으로 이동한다. 이 분사제트의 궤적은 크게 세 부분으로 나눌 수 있는데 첫번째 부분은 포텐셜코어 부분으로 분사제트가 주유동의 영향을 받아 경로는 조금 휘고 있지만, 분사이전의 유동상태를 그대로 유지하고 있는 곳을 말하며, 두번째는 제트가 주유동에 의해 크게 휘면서 난류유동으로 천이되는 구역이고, 세번째 구역은 제트의 궤적이 점근적으로 주유동 방향과 일치하는 영역이다.

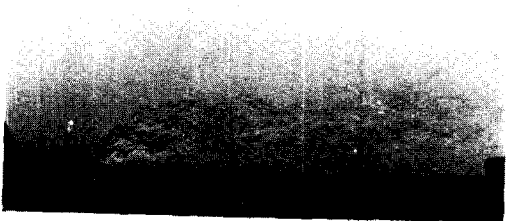
Fig. 5는 분사유체의 유동을 약 $2\mu\text{s}$ 의 노출시간으로 촬영한 솔리렌 사진의 예로서 주유동속도는 10m/s로 고정하였다. 솔리렌 광학계의 광로가 z축과 평행하도록 배치하였으므로 사진에 보이는 제트의 궤적은 제트의 측면사진이다. 특히 case 2의 사진을 보면 포텐셜코어 영역이 다른 경우에 비해 명확히 나타나고 있으며, 제트의 영향이 하류방향으로 멀리 지속되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 3가지 경우에 대하여 솔리렌 사진으로부터 얻은 분사율 M 의 변화에 따른 분사제트의 궤적을 보여주



(a) Case 1 ($M = 0.6$)



(b) Case 2 ($M = 1.2$)



(c) Case 3 ($M = 2.4$)

Fig. 5 Typical schlieren photographs(exposure time : $2\mu\text{s}$)

고 있다. case 1의 경우를 살펴보면 M 에 따른 분사유체의 궤적이 현저하게 변화하고, 제트의 범위가 상대적으로 넓으며, 분사홀을 빠져나온 직후부터 주유동과 강하게 작용하여 유동이 난류로 되어 버리므로 포텐셜코어 영역이 극히 좁은 범위로 제한된다. case 2에서는 제트의 높이가 수직분사에 비해 절반 밖에 되지 않으며, 분사제트가 주유동과 별로 혼합되지 않은 채 하류방향으로 멀리 지속된다. 그리고 분사율의 변화에 따른 분사제트의 궤적의 변화가 그리 심하지 않으며 M 이 2.4인 경우에는 포텐셜코어의 영역이 x/D 가 2 근처까지 유지된다. 따라서 분사홀 근처에서의 난류강도는 다른 경우에 비해 현저히 작을 것으로 생각된다. case 3은 z축방향으로 35° 경사지게 분사되는 관제로 현상

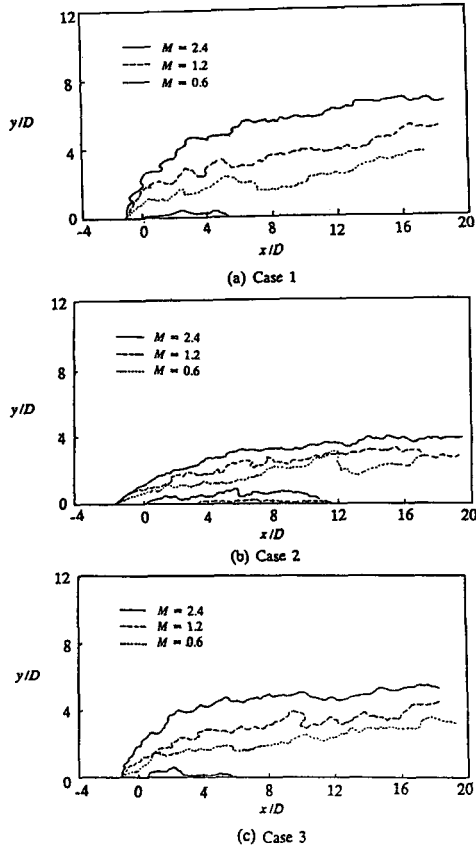


Fig. 6 Trajectories of injection fluid from short-exposure schlieren photograph(exposure time : $2\mu s$)

을 설명하는데 어려움이 있지만, 제트의 범위는 case 1과 case 2의 중간정도의 높이를 가지며 전체적인 궤적의 특성은 case 1과 더 가까움을 알 수 있다. 분사제트의 궤적이 수평평판과 분리되는 영역은 case 1과 case 3의 경우에는 분사율이 2.4일 때만 존재하였지만, case 2에서는 분사율이 1.2일 경우에도 조금 존재하였고, 분사율이 2.4일 경우 다른 경우에 비해 2배 이상 길게 나타난다. 이와같이 분사제트가 수평평판과 분리되는 것은 주유동이 분사제트의 양 측면에서 분사제트를 감싸면서 분사제트 궤적의 중심으로 이동하기 때문이다.

4.2 열전달계수

실제 터빈 블레이드의 설계 측면에 있어서 열전달계수는 매우 중요한 의미를 갖는다. 분사홀을 통해 냉각유체를 분사함으로써 고온의 가스과 고체

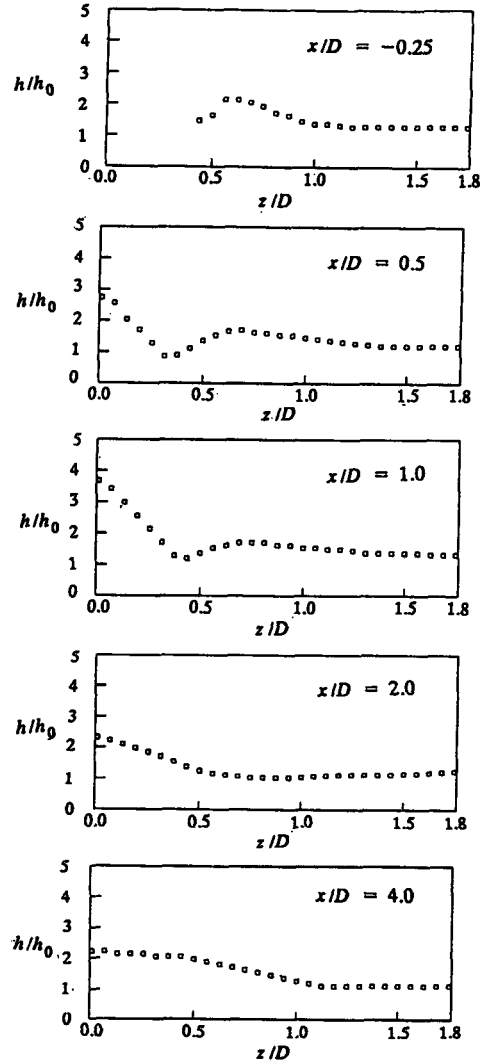


Fig. 7 Distribution of local heat transfer coefficient ratio h/h_0 for case 1(normal injection), $M=0.5$

면 사이에 냉각유체의 막을 형성하여 고체면을 보호할 수 있지만, 냉각유체의 분사로 인해 분사홀 근처에서 열전달계수가 분사홀이 없는 경우에 비해 달라지는 현상이 발생한다. 따라서 막냉각면에서의 열전달특성을 이해하려면 식 (2)에서 정의된 막냉각 효율 뿐만 아니라 열전달계수의 측정이 필수적이다.

(1) 국소열전달계수

막냉각에 의한 열전달계수의 변화를 나타내기 위하여 막냉각이 되고 있는 경우의 국소열전달계수와

막냉각이 없을 경우의 국소열전달계수의 비 h/h_0 를 도입하였다. Fig. 7은 수직분사 분사율 M 이 0.5일 때 국소열전달계수의 비 h/h_0 의 분포를 보여주고 있다. 전체적인 경향을 보면 분사홀에서 z 축방향으로 멀어질수록 h/h_0 는 1로 접근하며, 하류방향으로 이동하면 h/h_0 는 점차적으로 감소한다. 그리고 분사율 M 이 증가할수록 h/h_0 가 증가하고 있다. M 이 0.5일 경우 h/h_0 의 최대값은 z/D 가 0인 위치에서 생기며 하류방향으로 이동하여

도 이 경향은 바뀌지 않는다. x/D 가 1.0 이하인 경우 z/D 가 증가함에 따라 h/h_0 가 감소하다가 다시 증가하는 현상이 생긴다. 그리고 x/D 가 -0.25인 위치에서도 h/h_0 가 최대 2까지 증가하고 있다. M 이 0.5일 때에는 주유동과 분사유체가 만나는 분사제트의 가장자리 부분에서 열전달계수의 비가 큰 값을 갖는다. 그러나 분사율이 이보다 커지면(Fig. 10), z/D 가 0에서 h/h_0 가 최대값을 가지며 그 절대값도 크게 증가한다. 그 이유는 분사율이 증가할수록 주유동과 분사유체 사이의 상호작용이 심해져서 난류성분이 크게 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 M 이 0.5이고 유동방향으로의 35°분사의 경우(case 2)로서 수직분사와 마찬가지로 분사홀에서 z 축방향으로 멀어질수록 h/h_0 는 1로 접근하며, 하류방향으로 이동하면 h/h_0 의 값이 1로 접근한다. 그리고 국소열전달계수가 증가하는 위치도

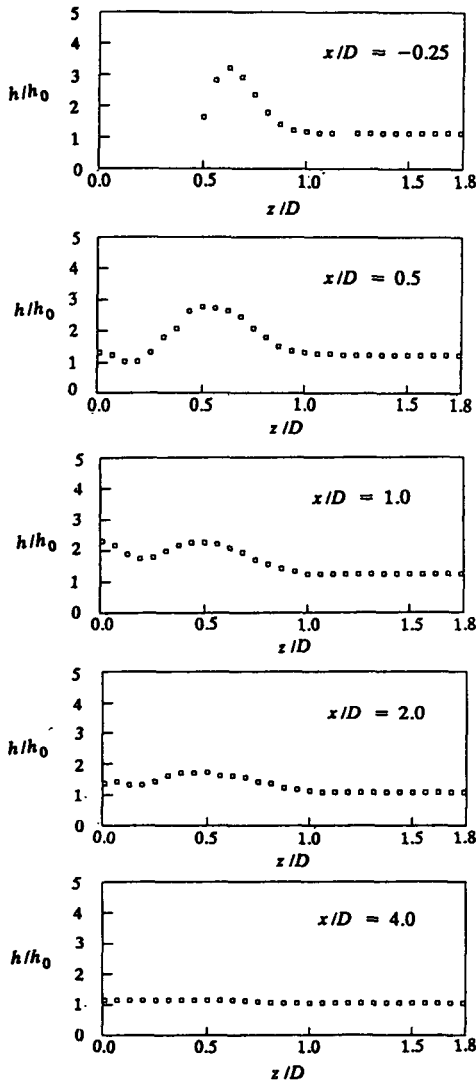


Fig. 8 Distribution of local heat transfer coefficient ratio h/h_0 for case 2(35° streamwise injection), $M=0.5$

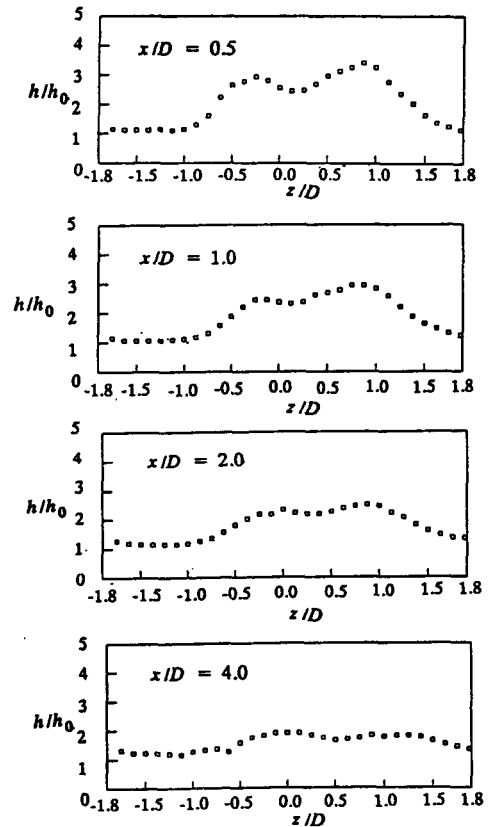
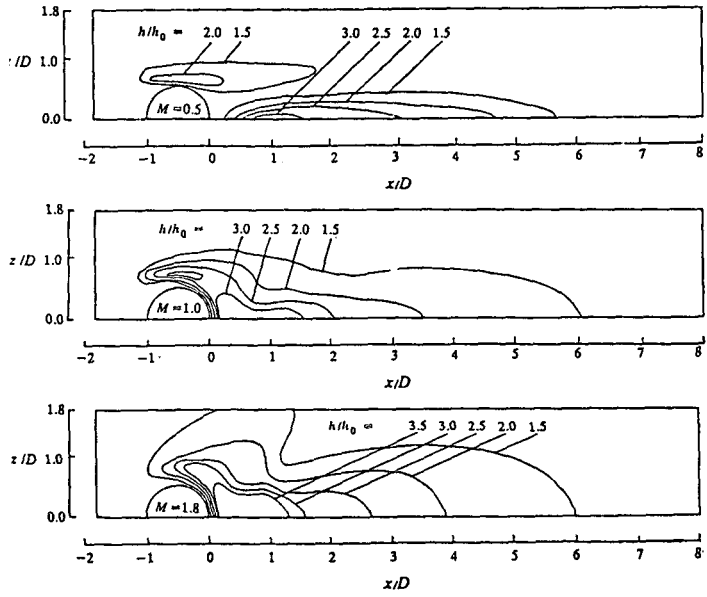
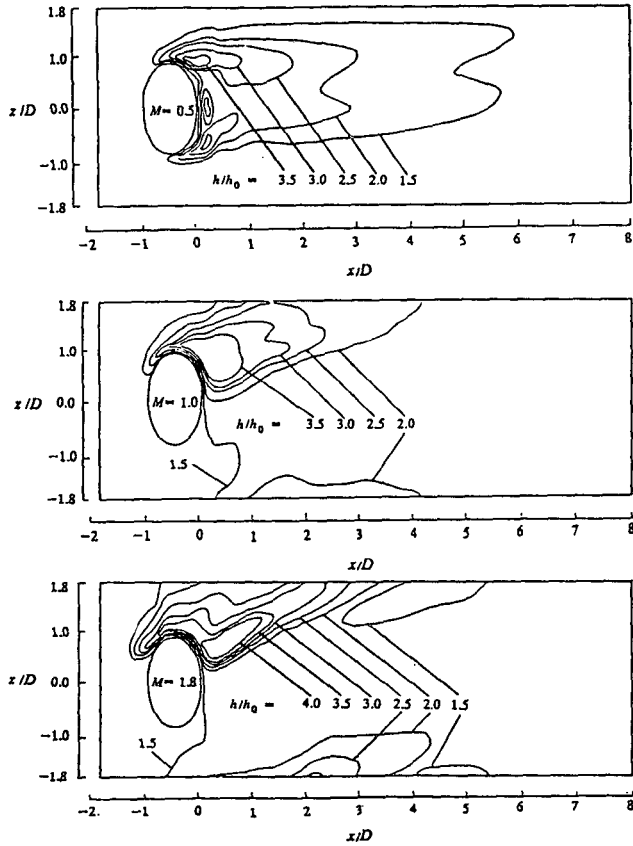


Fig. 9 Distribution of local heat transfer coefficient ratio h/h_0 for case 3(35° spanwise injection), $M=0.5$



(a) Normal injection(case 1)



(b) 35° lateral injection(case 3)

Fig. 10 Contours of constant h/h_0 with the change of blowing rate M

수직분사와 같이 분사홀 근처로 제한된다. 그렇지만 전체적으로 수직분사보다 h/h_0 의 값이 더 작은 값을 가진다. h/h_0 의 최대값은 수직분사와는 달리 z/D 가 0.5 근처에서 생기며, z/D 가 0일 때의 h/h_0 도 수직분사에 비해 매우 작은 값을 갖는다. 이것은 수직분사의 경우에는 주유동과 분사유체가 분사홀 근처에서 크게 상호작용을 일으켜 난류강도가 커지는 반면, 35° 분사에서는 주유동과 분사제트의 방향이 비슷하므로 두 유동이 접촉하는 부분 즉 z/D 가 0.5 근처인 혼합층(mixing layer)에서 난류강도가 커지기 때문이다.

Fig. 9는 M 이 0.5이고 유동의 직각방향(z 축방향)으로 35° 경사지게 분사하는 경우(case 3)이다. 이 경우는 z/D 가 0에 대해 대칭이 되지 않으므로 z/D 가 -1.8에서 1.8까지 결과를 표시하였다. h/h_0 는 z/D 가 1.0 근처에서 최대값을 가지며 하류방향으로 이동함에 따라 전체의 경향이 변하지 않은채 그 크기가 감소되어 간다. 분사방향이 $+z$ 축 방향으로 35° 경사졌기 때문에 h/h_0 가 분사홀의 중심에 대해 대칭이 되지 않으나 분사율이 비교적 작으므로 분사방향에 그다지 크게 영향을 받지 않는다. 이때의 전체적인 h/h_0 의 분포는 case 2, $M=0.5$ 인 경우와 대체적으로 흡사한 것이 특이하다.

Fig. 10은 분사홀 근처에서의 열전달계수의 분포를 나타내는 등국소열전달계수선을 보여 준다. 각 경우에 대하여 대략 500개의 데이터를 컴퓨터에 입력하여 이와같은 등국소열전달계수선을 얻었다. (a)는 수직분사의 결과인데 일반적으로 분사율이 증가하면 h/h_0 가 일정한 값을 갖는 범위는 넓어진다. 특히 분사율이 1.8일 때에는 h/h_0 가 1.5인 등열전달계수선이 인접 분사홀 영역과 만날 정도로 열전달계수가 큰 범위가 확대됨을 알 수 있다. 그리고 열전달계수는 분사홀 바로 하류부분 뿐만 아니라 분사홀 양 측면 즉 분사홀에서 폭 방향으로 조금 떨어진 곳에서도 크게 증가한다. 분사율이 비교적 작은 0.5일 경우에는 열전달계수가 극값을 갖는 위치는 분사홀 하류부분과 분사홀의 양 측면에 각각 존재하지만 분사율이 1.8이 되면 분사홀 하류에서만 최대값이 존재한다. 이 수직분사의 결과를 Goldstein과 Taylor⁽⁶⁾의 35° 경사분사의 결과와 비교하면 수직분사가 35° 경사분사에 비하여 폭방향으로 훨씬 넓게 분포하고 35° 경사분사의 경우에는 폭은 좁지만 비교적 하류방향으로 멀리까지 뻗어나

가고 있다. 그리고 두 경우 모두 분사홀의 양 측면에서 열전달계수가 크게 증가한다. (b)는 주유동의 직각방향(z 축 방향)으로의 35° 경사분사의 결과이다. 이 경우에 있어서는 case 1과 case 2에 비해 등열전달계수선의 분포가 매우 다르게 나타나고 있다. 먼저 분사율이 0.5일 경우를 살펴보면 열전달계수가 큰 구역은 z/D 가 대략 +1, -1인 곳 즉 분사홀의 z 축방향 가장자리와 일치한다. 그러나 $+z$ 축 방향으로 분사유체가 분사되므로 h/h_0 는 중심선($z=0$)에 대해 비대칭이며, z/D 가 +1일 때 그 값이 조금 더 크다. 그런데 M 이 증가하여 1.0이 되면 그 양상은 매우 달라진다. 이 경우에는 분사유체의 속도의 증가에 따른 운동량의 증가로 인하여 국소열전달계수가 큰 영역은 z 가 양의 값을 갖는 곳으로 집중된다. 이 영역은 분사제트가 통과하는 곳으로 분사율이 1.8이 되면 이 경향은 더욱 심화된다.

Fig. 11은 case 3의 결과로 M 의 변화에 따라 국소열전달계수의 최대값의 위치가 어떻게 변화하고 있는지를 보여 준다. M 이 0.5일 경우 h/h_0 가 최대인 위치는 하류방향으로 이동하여도 z/D 가 대략 1.0 근처에서 크게 변화하지 않는다. 그러나 M 이 1이 되면 분사유체의 운동량이 증가하므로 z 축 방향의 위치가 크게 변화하며, M 이 1.8 정도 되면 z 방향의 위치가 상당히 큰 폭으로 변화한다. Fig. 11에서 점선으로 표시된 바와같이 그 궤적을 상류방향으로 연장해 보면 그것이 분사홀의 중심과 정확히 일치한다. 따라서 분사율 M 이 클 경우, 국소열전달계수가 최대인 위치는 분사제트 궤적의 중심선과 대체로 일치함을 알 수 있다. 그러나 분사율이 0.5일 때에는 case 2와 마찬가지로 분사제트와 주유동이 만나는 분사의 가장자리에서 h/h_0

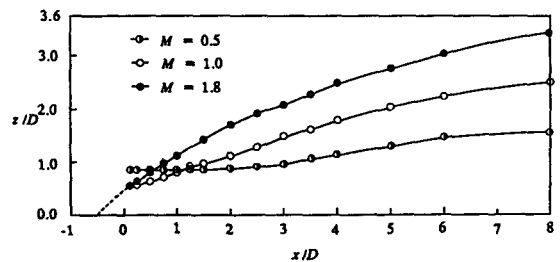


Fig. 11 Variation of the position of maximum local heat transfer coefficient ratio h/h_0 with the change of blowing rate M for case 3(35° spanwise injection)

의 값이 최대로 된다.

(2) 평균열전달계수

국소열전달계수를 x 축 방향으로 평균하여 얻은 평균열전달계수 \bar{h} 는 막냉각면에서 전체적인 열전달 특성을 파악하는데 필요하다. 국소열전달계수의 결과에서 보듯이 냉각홀 근처에서의 열전달계수는 막냉각이 없는 경우에 비해 크게 증가하였다. Fig. 12는 수직분사에 있어서 본 연구의 평균열전달계수를 Hay등⁽⁷⁾의 결과와 비교한 것이다. Hay등의 실험조건은 s/D 가 3.0, Re_D 는 0.38×10^4 이므로 본 실험조건과 조금 차이가 있고 실험범위도 본 연구에 비하여 분사홀로부터 비교적 멀리 떨어진 곳에서 열전달계수의 변화를 측정하였다. 그러나 Fig. 12에 의하면 실험의 범위가 일치하는 곳에서 두 연구의 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 보여 준다.

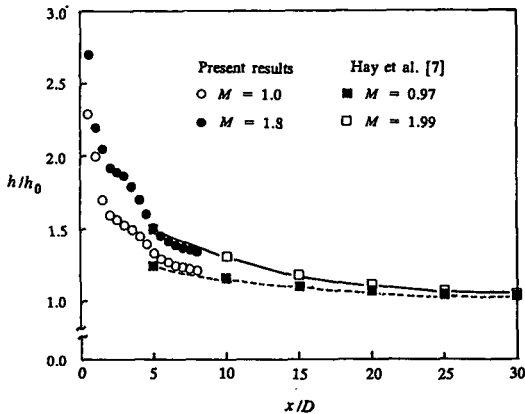


Fig. 12 Comparison of the present results with the results of reference (7) for normal injection

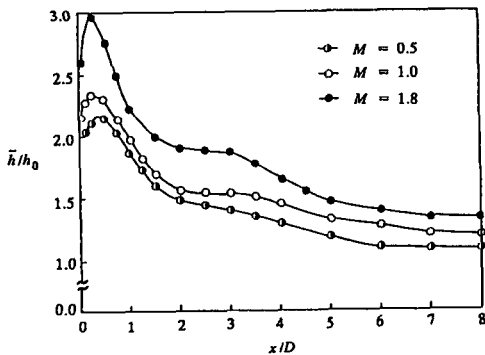


Fig. 13 Average heat transfer coefficient ratio across span \bar{h}/h_0 for case 1(normal injection)

Fig. 13는 수직분사일 경우 분사홀 하류에서의 평균열전달계수의 비 \bar{h}/h_0 의 변화를 보여 준다. 하류방향으로 이동함에 따라 M 에 관계없이 x/D 가 대략 0.25 근처에서 최대값을 가지며 그 이후로는 급격하게 감소한다. M 이 1.8일 경우 그곳에서 더 하류방향으로 이동하면 \bar{h}/h_0 가 거의 변하지 않는 구역이 x/D 가 3까지 지속되다가 다시 감소한다. 이와같은 경향은 M 이 1.0일 때에도 나타난다. Fig. 14는 35°분사의 경우인데 x/D 가 약 0.75 근처에서 완만하게 최대가 되며, 하류방향으로 이동함에 따라 \bar{h}/h_0 는 매우 천천히 감소하고 있다. 동일한 M 에서 \bar{h}/h_0 의 최대값은 수직분사에 비해 현저하게 낮으나 \bar{h}/h_0 의 값이 상당히 하류까지 크게 지속되고 있음을 알 수 있다. Fig. 15는 case 3의 결과로서 전체적인 곡선의 기울기는 case 1보다 완

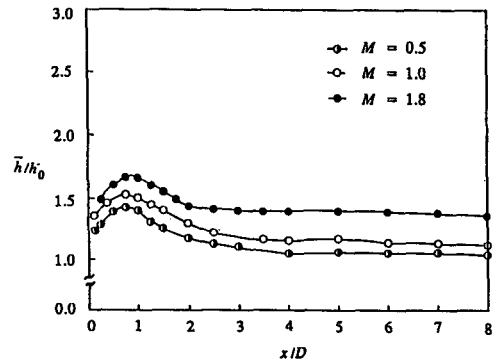


Fig. 14 Average heat transfer coefficient ratio across span \bar{h}/h_0 for case 2(35° streamwise injection)

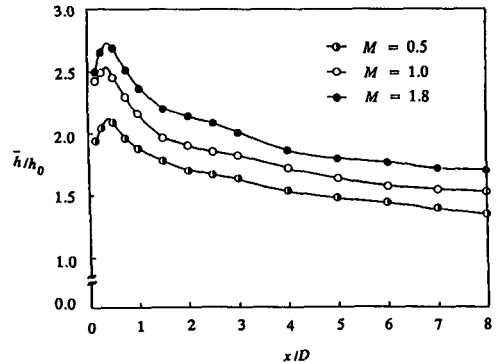


Fig. 15 Average heat transfer coefficient ratio across span \bar{h}/h_0 for case 3(35° spanwise injection)

만하지만, case 2보다는 매우 가파르고, \bar{h}/h_0 의 최대값은 x/D 가 0.5 근처에서 대략 case 1과 case 2의 중간정도로 나타나고 있다. 수직분사의 경우 분사홀 바로 하류에서 \bar{h}/h_0 의 값이 매우 크게 나타나고 있는데 그 이유는 유동의 가시화 결과에서 알 수 있듯이, 주유동과 분사제트의 충돌로 인하여 난류강도가 급격히 증가하기 때문이다. 반대로 case 2에서는 주유동과 분사제트의 방향이 서로 비슷하므로 상대적으로 하류방향으로 멀리까지 분사제트의 영향이 균일하게 지속이 된다. 특히 유동의 가시화 실험에서 보듯이 분사홀을 빠져나온 분사제트는 포텐셜코어 상태로 어느정도 지속이 되므로, 수직분사에 비하여 열전달계수가 현저히 낮음을 알 수 있다.

가장 적절한 분사방법을 고려하려면 열전달계수 뿐만 아니라 막냉각효율도 측정하여야 한다. 그러나 열전달계수의 측면에서 생각한다면 수직분사는 어느 특정한 곳에 지나치게 큰 열부하(thermal load)를 받으며, case 2의 경우는 그와같은 열부하의 집중은 없으나 하류방향으로 상당한 거리까지 열전달계수가 막냉각이 없는 경우보다 크게 유지된다. 그러므로 case 2는 수직분사에 비하여 열부하의 분산이라는 측면에서는 유리하다. Case 3의 경우에는 수직분사에 비해서 열부하의 집중이 조금 낮기는 하나 x/D 가 8 근처에서는 오히려 \bar{h}/h_0 가 가장 크게 나타나고 있다. 막냉각 연구의 초기에는 터빈 블레이드의 막냉각 특성을 연구할 때 열전달계수는 막냉각이 없는 경우의 그 값과 동일하다고 가정하였다. 그러나 이와같은 가정하에 터빈 블레이드를 설계할 경우 실제보다 그 수명이 지나치게 크게 설정될 수 있다. 왜냐하면 실제로 막냉각이 이루어지는 경우, 본 연구의 결과와 같이 분사홀 근처에서의 열전달계수가 크게 증가하므로 열전달계수를 고려하지 않은 경우의 설계치보다 더 큰 열부하를 받기 때문이다. 따라서 터빈 블레이드의 설계와 정확한 수명 예측을 위해서는 열전달계수에 대한 많은 설계자료가 요구된다. 본 연구에서 제시하고 있는 열전달계수의 실험결과는 터빈 블레이드의 열응력 해석 및 실제 설계에 매우 유용하리라고 생각된다.

5. 결 론

막냉각되는 수평 평판에서의 열전달 특성을 연구

하기 위해 나프탈렌 승화법을 이용하여 분사홀 근처의 열전달계수를 측정하였고, 솔리덴 광학계를 이용하여 분사제트의 궤적을 가시화하였다. 주유동 방향에 대한 수직분사(case 1), 35° 경사분사(case 2), 그리고 주유동의 직각방향(z 축방향)에 대한 35° 경사분사(case 3) 등 3가지의 실험조건에 대하여 분사율을 변화시켜 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 솔리덴 광학계와 순간점등 스파크 광원을 이용한 가시화 실험이 분사제트를 가시화하는데 매우 효과적인 방법임을 확인하였고 이 방법을 이용하여 분사제트의 유동 특성을 파악할 수 있었다.

(2) 모든 경우에 있어서 막냉각이 있는 경우의 열전달계수가 막냉각이 없는 경우의 그것에 비하여 큰 값을 가지며, 특히 분사홀에 가까울수록 열전달계수가 크게 증가하였다. 따라서 막냉각면에서의 열전달 특성을 연구하기 위해서는 막냉각효율 뿐만 아니라 열전달계수도 고려해야 한다.

(3) 분사율이 작을 때에는 분사제트와 주유동이 혼합되는 분사제트의 가장자리 근처에서 열전달계수가 커지지만, 분사율이 클 경우에는 분사제트 궤적의 중심에서 열전달계수가 최대가 된다.

(4) 수직분사(case 1)의 경우 평균열전달계수는 분사홀 바로 뒤($x/D=0.25$)에서 매우 큰 값을 가지며 하류방향으로 이동함에 따라 급격히 감소한다. 그러나 case 2의 경우에는 평균열전달계수의 최대값이 분사홀 근처($x/D=0.75$)에서도 그다지 높지 않으며, 하류방향으로 완만하게 감소한다. Case 3에 있어서 평균열전달계수는 x/D 가 0.5일 때 최대이며 열전달계수의 하류방향으로의 감소율은 case 2보다는 크지만 case 1보다는 작았다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구비의 지원을 받아 수행중인 '가스터빈 블레이드 냉각성능 향상을 위한 기초연구'의 일부로 이루어진 것이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Goldstein, R.J., 1971, "Film Cooling", in *Advances in Heat Transfer*, edited by T. Irvine and J.P. Hartnett, Vol. 7, Academic Press, New York, pp. 321

- ~379.
- (2) Goldstein, R.J., Eckert, E.R.G. and Ramsey, J.W., 1968, "Film Cooling with Injection Through Holes: Adiabatic Wall Temperatures Downstream of a Circular Hole", ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 89, pp. 384~395.
 - (3) Goldstein, R.J. and Chen, H.P., 1985, "Film Cooling on a Gas Turbine Blade near the End Wall", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 107, pp. 117~122.
 - (4) Leiss, C., 1975, "Experimental Investigation of Film Cooling with Ejection from a Row of Holes for an Application to Gas Turbine Blades", ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 97, pp. 21~27.
 - (5) Eriksen, V.L. and Goldstein, R.J., 1974, "Heat Transfer and Film Cooling Following Injection Through Inclined Circular Holes", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 96, pp. 239~245.
 - (6) Goldstein, R.J. and Taylor, J.R., 1982, "Mass Transfer in the Neighborhood of Jets Entering a Crossflow", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 715~721.
 - (7) Hay, N., Lampard, D. and Saluja, C.L., 1985, "Effects of Cooling Films on the Heat Transfer Coefficient on a Flat Plate with Zero Mainstream Pressure Gradient", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 107, pp. 105~110.
 - (8) Hay, N., Lampard, D. and Saluja, C.L., 1985, "Effects of the Condition of the Approach Boundary Layer and of Mainstream Pressure Gradients on the Heat Transfer Coefficient on Film-Cooled Surfaces", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 107, pp. 99~104.
 - (9) Eckert, E.R.G., 1976, "Analogies to Heat Transfer Processes", in Measurements in Heat Transfer, edited by E.R.G. Eckert and R.J. Goldstein, Hemisphere Publishing, New York, pp. 397~423.
 - (10) Kays, W.M. and Crawford, M., 1980, "Heat Transfer: The Turbulent Boundary Layer", Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 204~235.
 - (11) Goldstein, R.J. and Eckert, E.R.G., 1974, "Effect of Hole Geometry and Density on Three-Dimensional Film Cooling", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 17, pp. 595~607.