

<논 문>

## 수직분사 막냉각구멍 내부에서의 3차원 유동특성

이 상 우\* · 주 성 국\*\*

(1997년 1월 16일 접수)

### Three-Dimensional Flow Within a Film-Cooling Hole Normally Oriented to the Mainflow

Sang Woo Lee and Seong Kuk Joo

**Key Words :** Gas Turbine(가스터빈), Film-Cooling Hole(막냉각구멍), Total Pressure Loss(압력손실), Three-Dimensional Flow(3차원 유동)

#### Abstract

Three-dimensional flow within a film-cooling hole, which is normally oriented to the mainflow, has been measured by using a straight five-hole probe for the blowing ratios of 1.0 and 2.0. The length-to-diameter ratio of the injection hole is fixed to be 1.0 throughout the whole experiments. The result shows that the secondary flow within the hole is strongly affected by the mainflow and flow separation at the hole inlet. The higher blowing ratio provides less influence of the mainflow on the injectant flow. The three-dimensional flow at the hole exit is considerably altered due to the strong interaction between the injectant and mainflow. The aerodynamic loss produced inside the injection hole is mainly attributed to the inlet flow separation.

#### 기 호 설 명

$C_{ps}$  : 정압계수, 식 (1)

$C_{pt}$  : 압력손실계수, 식 (2)

$D$  : 분사구멍 직경

$C$  : 운동량유속비 (momentum flux ratio) =  $\rho_j U_j^2 / \rho_\infty U_\infty^2$

$L$  : 분사구멍의 길이

$M$  : 분사율 (blowing ratio) 또는 질량유속비 (mass flux ratio) =  $\rho_j V_j / \rho_\infty U_\infty$

$P_s$  : 정압

$P_{s,j}$  :  $y/D$ 가 -2.0인 위치에서 측정된 플래넵 정압

$P_t$  : 전압

$P_{t,j}$  :  $y/D$ 가 -2.0인 위치에서 측정된 플래넵 전압

$r$  : 반경방향 좌표, Fig. 2

$Re_D$  : Reynolds 수 =  $U_j D / V_j$

$Re_{\delta_2}$  : Reynolds 수 =  $U_\infty \delta_2 / V_\infty$

$U$  : x-축방향속도

$U_\infty$  : 주유동의 자유유동속도

$V$  : y-축방향속도

$V_j$  : 분사구멍의 단면적에 걸쳐 평균된 분사속도

$W$  : z-축방향속도

$x$  : 주유동방향 좌표, Fig. 1

$y$  : 높이방향 좌표, Fig. 1

$z$  : 폭방향 좌표, Fig. 2

#### 그리스문자

$\delta_2$  : 운동량두께

$V_j$  : 분사 유체의 동점성계수

$V_\infty$  : 주유동 유체의 동점성계수

$\rho_j$  : 분사공기의 밀도

$\rho_\infty$  : 주유동의 밀도

$\theta$  : 원통좌표계의 원주방향 각도, Fig. 2

\*회원, 금오공과대학교 기계공학과

\*\*회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

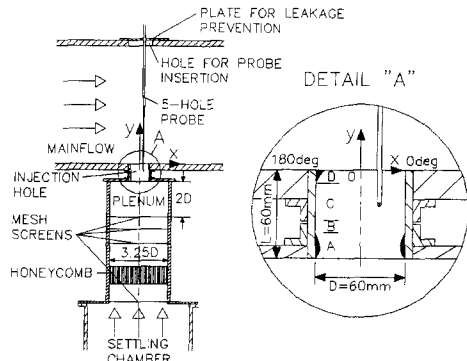


Fig. 1 Experimental apparatus

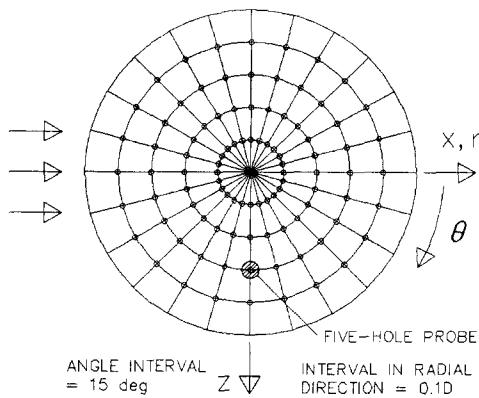


Fig. 2 Measurement locations in x-z plane

## 1. 서론

고성능 항공기용 엔진이나 산업용 가스터빈의 연소기 내벽 또는 터빈 고온 부품들은 여러 형태로 냉각이 이루어지고 있다. 일반적으로 막냉각(film cooling)이 이루어지는 연소기 또는 터빈에서는 냉각으로 인한 열응력의 집중이 주된 파손의 원인이 된다. 특히 막냉각 분사구멍 근처에는 매우 큰 온도구배가 존재한다. 실제로 파손된 블레이드를 점검해 보면, 많은 경우 이 냉각구멍으로부터 크랙이 시작되고 있음을 확인할 수 있다. 특히 막냉각면에서 열전달계수가 가장 큰 곳이 냉각구멍의 내면이므로, 이 분사구멍 내부에서의 유동특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 또한 막냉각구멍 내부에서의 유동이 분사구멍 통과후의 막냉각 제트의 거동에 큰 영향을 미치므로, 이 분사구멍 내부의 유동특성에 대한 이해가 선행되어야 할 것이다.

1982년 Andreopoulos<sup>(1)</sup>는 분사구멍의 직경에 대한 분사구멍 길이의 비, 즉  $L/D$ 가 비교적 큰 긴 분사관을 통해 주유동에 수직으로 분사되는 제트유동에 대하여 분사관 내부 및 주유동 영역의 대칭면에서 난류유동을 측정하였다. 그 결과 그는 주유동의 영향이 분사관 내부로  $3.0D$  정도까지 영향을 줌을 밝혔고, 분사율이 작을 때 분사관 내부에서의 정상적인 유동모델을 제시하였다. Carrotte와 Stevens<sup>(2)</sup>는  $L/D$ 가 매우 작은 가스터빈 연소기의 희석구멍(dilution hole)의 입구 형상이 제트유동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Leylek과 Zerkle<sup>(3)</sup>은 최초로 막냉각구멍 내부에서의 3차원 유동에 대하여 연구하였다. 그들은 수치해석적 방법으로 35도로 경사진 막냉각구멍 내부 및 막냉각면에서의 유동 및 열전달 특성을 연구하였다. 그 결과 경사진 분사구멍 내부에는 "jetting effect" 등의 매우 복잡한 유동 현상이 발생하며, 막냉각면에 존재하는 1쌍의 바운드와류(bound vortex)와 비슷한 와류가 분사구멍 내부에도 존재함을 밝혔다.

지금까지 국내외에서 막냉각 구멍을 빠져 나온 뒤의 제트유동에 대하여 많은 연구<sup>(4,5)</sup>가 수행되었다. 그러나 수직분사 막냉각구멍 내부에서의 3차원 유동특성에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 수직분사 막냉각구멍 내부에서의 3차원 유동특성과 압력손실 분포에 대하여 체계적으로 연구하고자 한다. 이를 위하여 단순화된 수직분사 막냉각구멍을 제작하고, 그 내부에서 직선형 5공프로우브를 이용한 3차원유동 측정을 수행하였다. 본 연구의 결과는 충돌제트 분사구멍과 연소기의 희석공기 분사구멍의 유동에도 적용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 크게 풍동, 시험부, 출구 확산부, 분사장치, 프로우브 이송장치 등으로 구성되어 있다. 풍동은 개방형으로, 시험단면의 크기는  $600\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 이며 면적축속비는 약 9.0이다. 풍동의 출구속도는 최대  $40\text{ m/s}$ 까지 연속적인 조절이 가능하며, 난류강도는 대략 0.5% 이내이다. 시험부는 두께 20 mm의 아크릴 판으로 제작하였고, 그 크기는 폭 및 높이가 각각 600 mm와 400 mm, 길이는 1600 mm이다. 풍동의 수축부를 빠져

나온 공기는 이 시험부를 지난 뒤, 그 하류에 연결되어 있는 출구확산부를 지나 외기로 방출된다. 분사구멍의 중심으로부터 740 mm 떨어진 상류에 직경이 1.80 mm인 트립와이어(trip wire)가 설치되어 있으므로, 풍동으로부터 유입된 균일한 유동은 시험부 이랫벽에서 난류경계층 유동으로 발달된다. Fig. 1은 분사장치 및 분사구멍의 자세한 모습을 보여 주고 있다. 세트의 분사는 시험부 아랫벽에 설치된 분사장치를 통하여 이루어진다. 이 분사장치는 크게 송풍기, 오리피스유량계, 압력조정실(settling chamber), 플레넘(plenum), 막냉각구멍 등으로 구분된다. 송풍기로부터 오리피스를 거쳐 유입된 공기는 압력조정실로 들어 오고, 이것은 내경이 195 mm인 원통형 플레넘으로 공급된다. 이 플레넘에는 입구 메쉬스크린, 허니콤(honeycomb), 3개의 메쉬스크린(mesh screen) 등이 하류방향으로 각각 설치되어 있다. 여기서 가장 하류에 설치된 메쉬스크린과 분사구멍 입구까지의 거리는 분사구멍 내경의 2배이다. 분사구멍의 내경  $D$ 는 60 mm이며, 이 분사구멍의 중심과 원통형 플레넘의 중심선은 서로 잘 일치되도록 제작하였다. 분사공기 공급용 송풍기의 정압은 400 mmAq이고, 풍량은  $0.058 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 분사공기 유량을 측정하기 위해 사용된 오리피스는 국제 표준규격인 ISO 5167<sup>(6)</sup>에 의거하여 제작하였는데, 본 연구에서는 코너타핑(corner tapping) 형의 오리피스를 채택하였다. 본 실험에서는 분사유에 관계 없이, 분사공기의 유량을 정확히 측정하기 위해 직경이 다른 4개의 오리피스 판을 제작하여, 측정유량에 따라 적절히 사용하였다. 일반적으로 오리피스 판의 유량계수는 Reynolds 수에 의존하므로, 반복계산으로 최종값을 구하였다.

본 연구에서는 분사구멍 출구의 중심을 좌표계의 원점으로 설정하였고, 하류방향을  $x$ -축, 높이방향을  $y$ -축, 그리고 시험부의 폭방향을  $z$ -축으로 설정하였다. 프로우브의 정밀한 이송을 위해 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 이 장치는 세 축방향으로 컴퓨터에 의해 자동이송되는데, 각 이송축은 불나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유닛, 스테핑모터 및 스테핑모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. 이 3차원 이송장치는 수평조절이 가능한 지지대에 탑재되어 있고, 시험부 지지대 상단에 위치한다. 3차원속도 측정용 5공프로우브(5-hole probe)를 유동장 내부에 위치시키고, 그것을 이송

장치로 자동이송하기 위해 Fig. 1과 같이 시험부 윗벽에 프로우브 삽입용 구멍을 가공하였다. 이것의 직경은 80 mm인 원형 구멍인데, 5공프로우브는 이 구멍을 통하여 풍동 시험부를 지나 분사구멍에 위치하게 된다. 이때 이 원형 구멍을 통하여 풍동 외부로부터 공기가 시험부 내로 들어가는 것을 막기 위해 이 이송구멍에 상단에 직경이 200 mm이고 두께가 1 mm인 누설방지용 아크릴 판을 설치하였다. 이 원형 누설방지판의 중심에는 직경 8 mm의 프로우브 삽입용 구멍이 뚫려 있어서, 이 구멍을 통해 프로우브 지지대가 상하로( $y$ -축방향) 이동하게 되며,  $x$ - $z$  평면에서 프로우브가 이송될 경우에는 프로우브와 이 누설방지판이 일체가 되어 이동하게 된다. 이와같은 설계를 통하여 5공프로우브를 이용한 유속측정시 외부 공기의 유입을 최소화할 수 있었다.

본 연구에서의 압력측정은 IBM PC AT-386으로 전체 측정시스템을 온라인화하였으며, 컴퓨터에는 GPIB 및 다기능입출력보드(National Instruments, AT-MIO-16D-H-9)가 내장되어 있다. 5공프로우브로부터의 압력신호는 압력변환기(MKS, Type 120AD-00010RAB)에 의해 전압으로 변환된다. 본 연구에서 사용한 압력변환기는 내부에 히터가 내장되어 있어서 주위온도 변화에 관계없이 센서의 온도를 일정하게 유지시켜 준다. 이 압력변환기의 DC 출력은 디지털전압계에 의해 모니터되고, 또한 이 전압은 다기능입출력보드의 12 비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 프로우브의 이송은 앞에서 언급한 3차원 자동이송장치에 의해 이루어졌다. 스테핑모터는 전용 드라이버의 펄스입력을 통해서 제어된다. 이 디지털 펄스는 다기능입출력보드로부터 공급된다. 분사구멍 내부에서의 3차원 유동 및 전압력의 손실을 측정하기 위해 지지대 형태가 직선인 원추형 5공프로우브를 사용하였다. 이 5공프로우브는 미국 United Sensors 사에서 특별한 사양으로 주문, 제작되었다. 이 5공프로우브의 선단 직경은 3.2 mm(0.125인치)이고, 프로우브 지지대는 6.4 mm(0.25인치)로 보강되어 있다. 프로우브의 총 길이는 1.12m(44인치)이며, 이중 보강되지 않은 부분의 길이는 프로우브 선단에서 25.4 mm(10인치) 정도이다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 이 직선형 5공프로우브를 분사구멍과 평행하게 배치하여 분사구멍 내부에서의 3차원 유동 및 압력 손실을 측정하였다. 본 실험에서는 프로우브 고정밀

(non-nulling method)을 적용하여 5공프로우브를 보정하였고, 보정프로그램은 Treaster와 Yocum<sup>(7)</sup>의 방법을 기본으로 C-언어로 작성하였다. 5공프로우브의 보정에는 각도분해능이 0.2도인 2축회전장치를 사용하였고, 피치각(pitch angle)과 요각(yaw angle)의 보정범위는 각각 -40도에서 40도 사이이며 5도 간격으로 보정실험이 이루어졌다. 5공프로우브의 5개의 압력을 순차적으로 측정하기 위하여 압력스캐너(Furness Controls, FC091-6)를 사용하였고, 이 압력스캐너도 다기능입출력보드를 이용하여 제어하였다.

## 2.2 실험조건 및 측정오차

모든 실험에서 분사구멍의 내경(D)은 60 mm로 일정하게 유지하였고, 분사구멍 길이(L)도 내경과 동일한 60 mm로 고정하였다. 따라서 분사구멍의 직경에 대한 분사구멍 길이의 비  $L/D$ 는 1.0이 된다. 본 실험에서의 자유유동속도( $U_\infty$ )와 자유유동 난류강도는 15 m/s와 0.5%로 각각 일정하게 유지하였다. 트립와이어를 지나 발달되는 입구 경계층 유동의 특성을 알기 위해 분사구멍 근처에서 평균 속도 및 난류성분을 측정하였다. 그 결과 경계층 유동의  $z$ -축방향 균일성을 확인하였고, 경계층두께는 좌표계의 원점에서 약 17.5 mm이었다. 경계층속도 측정결과로부터 계산된 배제두께(displacement thickness)와 운동량두께(momentum thickness)는 각각 2.29 mm와 1.81 mm이었다. 분사율  $M(= \rho_j U_j / \rho_\infty U_\infty)$ 을 변화시키기 위하여 분사구멍에서의 평균분사속도를 15 m/s와 30 m/s로 변화시켰다. 따라서 본 연구에서의 분사율은 1.0과 2.0으로 변화되고, 이에 해당되는 운동량유속비(momentum flux ratio)는 각각 1.0과 4.0이다. 본 연구에서 자유유동속도와 운동량두께<sup>(2)</sup>에 근거한 Reynolds 수,  $Re_{d_2}$ 는  $1.7 \times 10^3$ 이고, 분사율이 1.0일 때 평균분사속도( $U_j$ )와 분사구멍의 내경(D)에 근거한 Reynolds 수,  $Re_D$ 는  $5.7 \times 10^4$ 이다. 실제 5공프로우브를 이용한 3차원속도의 측정은  $y/D$ 가 -1.0인 분사구멍 입구와  $y/D$ 가 0.0인 분사구멍 출구 사이를 10등분하여 총 11개의  $x$ - $z$  평면에서 이루어졌다. 각  $x$ - $z$  평면에서 측정 위치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 원통좌표계의  $r/D$ 가 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 등인 곳에서  $\theta$ 를 15도 간격으로 0도에서 360도 까지 변화시키면서 측정이 이루어졌다. 이와같이 분사구멍의 벽면으로부터 적어도 6 mm 이상 떨어진

진 곳에서 5공프로우브를 이용한 측정이 이루어진 이유는 벽면 근접에 의한 오차를 방지하기 위해서이다. (이상우와 윤대진<sup>(8)</sup>)

본 연구에 사용한 풍동은 실험조건인 15 m/s에서 유동의 균일성이 1% 이내이며, 난류강도는 0.5% 이내이다. 5공프로우브의 이송오차는  $\pm 0.05$  mm 이내이다. 분사공기 유량측정에 사용한 오리피스측의 측정오차는 ISO 5167<sup>(6)</sup>에서 제시된 오차해석 방법으로 계산하였다. 그 결과 측정유량의 오차는 각 측정 유량상태에서 총 유량의  $\pm 0.5\%$  이내로 주어졌다. 5공프로우브의 설치에 의한 분사구멍에서의 blockage ratio는 대략 0.3%로 나타났다. Abernethy 등<sup>(9)</sup>의 방법을 적용한 오차해석(uncertainty analysis) 결과, 압력측정의 오차는 자유유동 동압의  $\pm 0.7\%$ , 흐름각의 오차범위는  $\pm 1.2$ 도, 속도의 크기의 오차범위는  $\pm 1.6\%$ 로 나타났다. 실제 본 연구에서 측정된 유동측정의 정확도를 확인하기 위해 대표적인 실험결과에 대하여 질량보존 여부를 검사하였다. 분사구멍 출구에서 5공프로우브로 측정된 결과를 바탕으로 계산한 단위 시간당 질량유출량을 오리피스로 측정된 유량과 비교한 결과 그 차이가 질량유출량의 1.4% 이내로 나타났다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 수직 분사구멍 내부에서의 일반적인 유동특성

Fig. 1의 우측 그림에 개략적으로 나타낸 바와 같이 주유동에 수직으로 분사되는 분사구멍 내부에서의 벽 근처 유동은 크게 4개의 유동영역으로 구분할 수 있다.<sup>(10)</sup> 일반적으로 막냉각구멍 또는 충돌냉각구멍은 날카로운 직각 입구면을 가지고 있기 때문에 그 입구에서 유동의 박리가 반드시 발생한다. Fig. 1의 영역 A가 바로 이 박리영역에 해당하며, 영역 B는 이 박리영역 하류에서 발생하는 재부착영역에 해당한다. 재부착된 벽 근처 유동은 다시 경계층유동으로 발달하게 되는데 이 경계층 발달 영역은 영역 C로 분류된다. 그런데 분사구멍의 출구에 가까워지면 주유동의 영향이 증가하여 분사구멍의 내부에까지 영향을 미친다. 특히 이러한 주유동의 영향은 분사율이 1.0보다 작을 경우 두드러지고, 이것은 주로 분사구멍의 하류 영역에서만 국한되어 발생한다. 본 연구에서는 이 곳을 영역 D로 분류하였다. 일반적으로 분사율이 1.0보다 작을

경우에는 주유동이 분사구멍 깊숙히 영향을 미치지  
만 분사율이 충분히 크면 주유동의 영향이 작아질  
것이다. 특히 분사율이 0.5 정도로 작을 경우 분사  
구멍 상류의 출구영역에는 매우 복잡한 역류와 주  
기적인 비정상유동이 발생하는 것으로 알려져 있  
다.<sup>(1)</sup> 본 연구의 예비실험 결과 분사율이 작을 때,  
이 영역에서 5공브로우브의 측정 범위를 벗어남이  
확인되었다.

3.2 3차원속도

주유동 경계층에 수직으로 분사되는 제트유동은  
 $z/D$ 가 0인  $x-y$  평면에 대해서 대칭이 된다. 분사  
구멍 내부에서의 3차원 유동장을 검토하기 앞서 이  
대칭면에서의 유동특성을 먼저 제시하고자 한다.  
Fig. 3은 이 대칭면에서의 유속측정 결과를 평균분  
사속도  $V_j$ 로 무차원화된 벡터 형태로 나타낸 것이  
다. 분사율에 관계없이 분사구멍 입구에서의 유동  
은 분사구멍의 중심을 향하는 속도성분을 가지고  
있다. 그런데 이곳에서 하류로 이동하여  $y/D$ 가  
 $-0.75$ 인 곳에 이르르면, 대부분의 속도벡터 방향이  
분사구멍의 벽면과 거의 평행하게 된다. 이때 속도  
의 크기는  $x/D$ 가 0일 때 가장 작고 벽면으로 갈수  
록 조금씩 증가하여 벽면에서 가장 가까운 측정 위  
치에서 최대가 된다. 이러한 현상은 벽면에서의 박  
리 때문이며, 유동의 박리는 유동이 지나는 유로를  
좁게하는 효과를 가져와 상대적으로 유동이 지날  
수 있는 영역이 좁아지기 때문에 속도의 증가를 가  
져온다. 이곳에서 하류로 이동하면 유속은 분사구

멍의 중심선 근처에서 최대가 되며, 벽 근처의 유  
동은 분사구멍의 입구( $y/D=-1.0$ )와는 달리 벽으  
로 접근하는 속도성분을 가지게 된다. 이와같은 유  
동특성은 분사구멍의 출구에 가까워지면 주유동의  
영향으로 크게 달라진다. 분사구멍 출구에서는 속  
도벡터가 현저하게 좌우 대칭으로부터 벗어나고 있  
다. 즉 주유동의 상류방향, 다시말해  $-x$ -축 쪽에  
서의 유속은 주유동의 영향으로 크게 감소하는 반  
면에 주유동이 흘러가는 방향, 즉 주유동 하류 방  
향 쪽에서는 유속의 크기는 더 증가하는 경향을 보  
인다. 이러한 현상은 분사율이 2.0인 경우보다 분  
사율이 1.0일 경우에 두드러진다. 그러나 분사구멍  
입구에서의 유동은 이 두 경우 모두 주유동의 영향  
을 거의 받지 않고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 유동 대칭면에서의 무차원  
 $x$ -축방향속도  $U/V_j$ 와  $y$ -축방향속도  $V/V_j$ 의 분포  
를 그린 것이다. 여기서 각 무차원속도는 평균분사  
속도  $V_j$ 로 무차원화되어 있다. 따라서 각 등속도  
선 사이의 실제 속도 차이는 분사율이 1.0일 때에  
는 1.5 m/s이고, 분사율이 2.0일 경우에는 3.0 m/  
s가 된다. 두 무차원속도 모두 분사구멍의 입구영  
역에서는 분사율의 영향을 거의 받지 않으나 하류  
로 이동할수록 그 영향이 증가하고 있다. 먼저  $U/  
V_j$ 의 분포(Fig. 4)를 살펴 보면 분사구멍 입구에서  
는 분사구멍 중심으로 향하는 비교적 큰 유동이 존  
재함을 알 수 있다. 그러나 주유동의 영향으로 입  
구 유동이 완벽하게 대칭이 되지 않는 못하고 있다.  
그런데 분사율이 1.0에서 2.0으로 변화해도 입구의

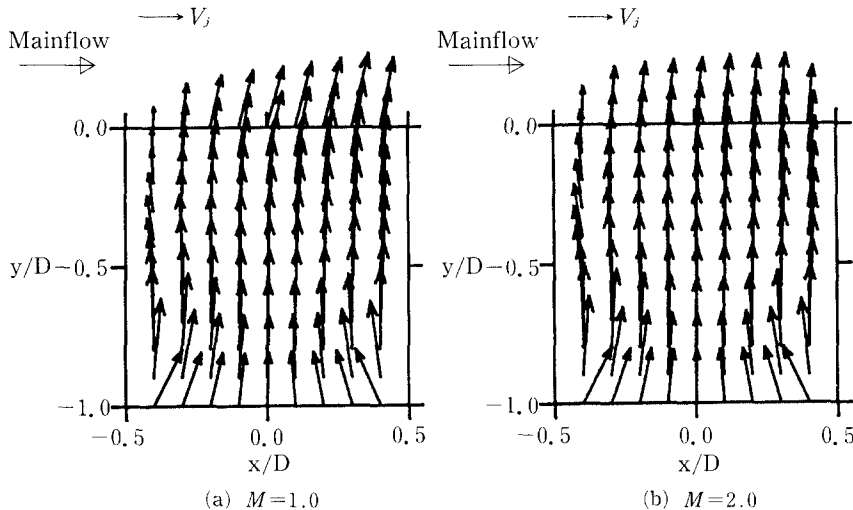


Fig. 3 Projection of velocity vectors on  $x-y$  plane at  $z/D=0.0$

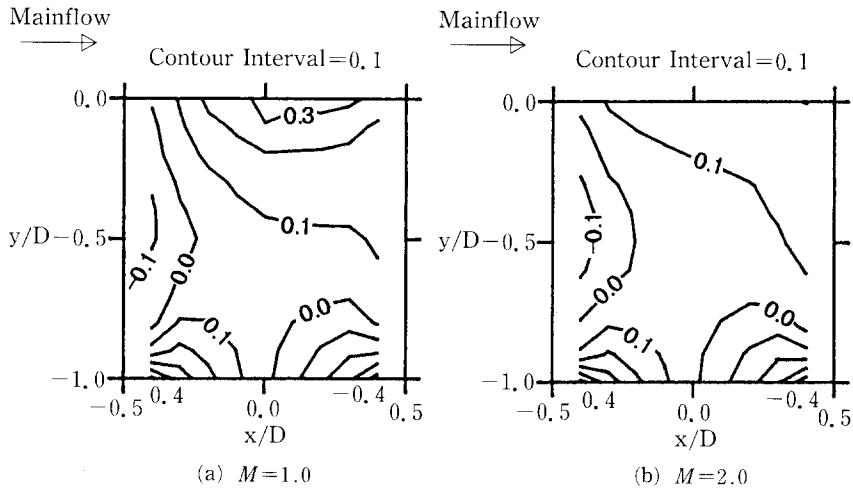


Fig. 4 Contours of x-directional velocity,  $U/V_j$ , in  $x$ - $y$  plane at  $z/D=0.0$

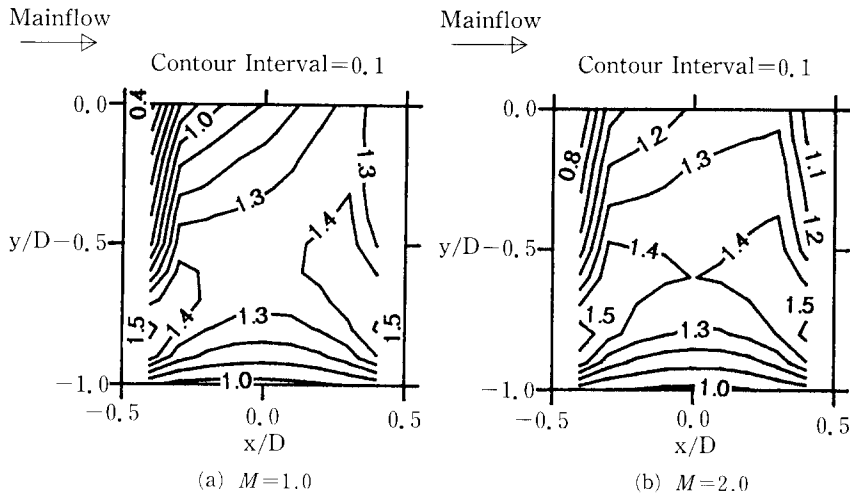


Fig. 5 Contours of y-directional velocity,  $V/V_j$ , in  $x$ - $y$  plane at  $z/D=0.0$

유동은 거의 변화하지 않는다. 전체적으로 볼 때, 분사율이 2.0일 경우  $U/V_j$ 의 구배가 분사율이 1.0인 경우보다 더 작았다. 분사구멍 내부에서의 무차원  $y$ -축방향속도  $V/V_j$ 의 분포를 살펴 보면 (Fig. 5)  $V/V_j$ 의 가장 중요한 특징은 분사구멍 중심선 근처에서 분사구멍 입구에서 하류로 이동할 때, 먼저  $y/D$ 가  $-1.0$ 에서  $-0.75$  근처까지는  $V/V_j$ 이 급격히 증가하면서 가속되고,  $y/D$ 가  $-0.5$  근처에서 0 즉 분사구멍 출구 사이에서는 유속이 대체로 완만하게 감소하는 것이다. 이와같이 입구 영역에서 유동의 급격한 가속과 뒤이은 완만한 감속이 차례로 발생하는 주된 원인은, 벽 근처에서

일어나는 유동의 박리 때문에 분사공기가 이동할 수 있는 유로의 면적이 좁아지고 (Fig. 1의 영역 A), 박리영역으로부터 하류로 이동하면 유로의 면적이 다시 확장되기 때문이다. 분사구멍 출구 근처에서 주유동이  $V/V_j$ 의 분포에 큰 영향을 주고 있다. 주유동은 분사구멍 출구의 주유동 상류방향 쪽에서 분사공기의 유출을 강하게 방해하며, 그 결과 분사공기가 분사구멍으로부터 쉽게 벗어날 수 있는 유로의 면적이 주유동의 하류 쪽 영역으로 제한된다. 따라서 이 분사구멍 출구의 주유동 상류에서는  $V/V_j$ 가 급격히 감소되는 반면, 주유동 하류 쪽에서는  $V/V_j$ 가 비교적 큰 값을 갖는다. 이와같은

현상은 분사율이 작을수록 심하게 나타남을 알 수 있다. 특히 분사율에 관계없이  $y/D$ 가  $-0.8$  일 때, 벽 근처에서는  $V/V_j$ 가 1.5 정도로 매우 큰 값을 갖는데, 이곳은 Fig. 1의 우측 그림에서 영역 A로 분류된 곳 중 박리영역의 범위가 가장 확대되는 구역으로 생각된다.

유동의 대칭면에서 벗어나 분사구멍의  $x-z$  단면에서의 3차원 유동특성에 대한 Fig. 6은 분사율이 1.0일 때  $x-z$  평면에서의  $V/V_j$ 의 분포를 보여 준다. 분사구멍 입구에 해당하는  $y/D$ 가  $-1.0$ 인 곳에서는 (Fig. 6(a))  $y$ -축방향속도 구배는 매우 작지만, 그 등속도선이 주유동의 영향으로 동심원 형상은 되지 못하고 있다. 이 입구에서 하류로 이동하여  $y/D$ 가  $-0.8$ 로 되면 (Fig. 6(b)) 등속도선은 거의 동심원 꼴로 변화되고, 그 구배도 증가한다.  $y/D$ 가  $-0.8$ 일 곳에서 등속도선이 거의 동심원이 되는 이유는 벽면에서의 박리현상 때문이라고 생각된다. 특히 이곳에서는  $V/V_j$ 의 값이 크게 증가하여 최대 1.5에 이르고, 그 위치도 중심이 아닌 벽 근처에서 존재한다. 본 연구에서는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 벽에 가장 근접한 측정 위치가 벽면으로부터  $0.1D$ , 즉 6mm만큼 떨어져 있으므로 불행히도 벽에 더 가까운 곳에서의 유속은 알 수 없다. 그러나 Fig. 3과 Fig. 5에서 논의한 바와 같이  $y/D$ 가  $-0.8$ 에서 벽 근처에서의 유동의 박리영역이 가장 확대되는 곳이므로  $V/V_j$ 가 가장 크게 증가한다. 만약 이 곳에서 유동의 박리영역의 경계가 벽

면으로부터 5mm 정도 떨어진 곳까지 확대된다고 가정하면, 분사공기가 흐를 수 있는 유로의 단면은 직경이 50mm인 원이 될 것이다. 이때 간단한 질량보존을 고려하면, 이 좁혀진 유로에서의 평균속도는  $1.44V_j$ 로 계산된다. 이곳에서 하류로 이동하면  $V/V_j$ 의 최대치는 서서히 감소하고 그 분포도 주유동의 영향을 많이 받아 더 이상 동심원 형태로 남지 않는다. 전체적으로 볼 때  $y/D$ 가  $-0.4$ 인 곳에서 분사구멍의 하류 쪽으로 이동하게 되면 주유동의 영향으로 각  $x-z$  단면에서 주유동 상류쪽 영역에서의 속도구배가 매우 커지는 반면에, 주유동 하류 쪽 속도구배는 비교적 완만해진다. 특히  $x/D$ 가  $-0.4$  근처 대칭면에서는 분사구멍의 하류로 이동할수록  $V/V_j$ 가 급격하게 감소하여, 분사구멍의 출구( $y/D=0.0$ )에 도달하면 그 값이 0.4 정도로 크게 작아진다. Fig. 7은 분사율이 2.0일 때 각  $x-z$  평면에서의  $V/V_j$ 의 분포를 보여 준다. 전체적으로 볼 때, 각  $x-z$  단면에서의  $V/V_j$ 는 분사율이 1.0의 경우와 정성적으로 유사한 변화를 보여 준다. 그러나 대체로  $y/D$ 가 같은 경우 분사율이 2.0일 때의 속도분포가 더 평탄하고, 주유동의 영향을 덜 받아 더 동심원 꼴에 가까움을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 분사율이 1.0일 때 각  $x-z$  단면에서의 2차유동 분포를 벡터형태로 나타낸 것이다. 분사구멍의 입구에 해당하는 Fig. 8(f)의 유동특성은 분사구멍의 중심을 향한 매우 강한 2차유동의 발생으

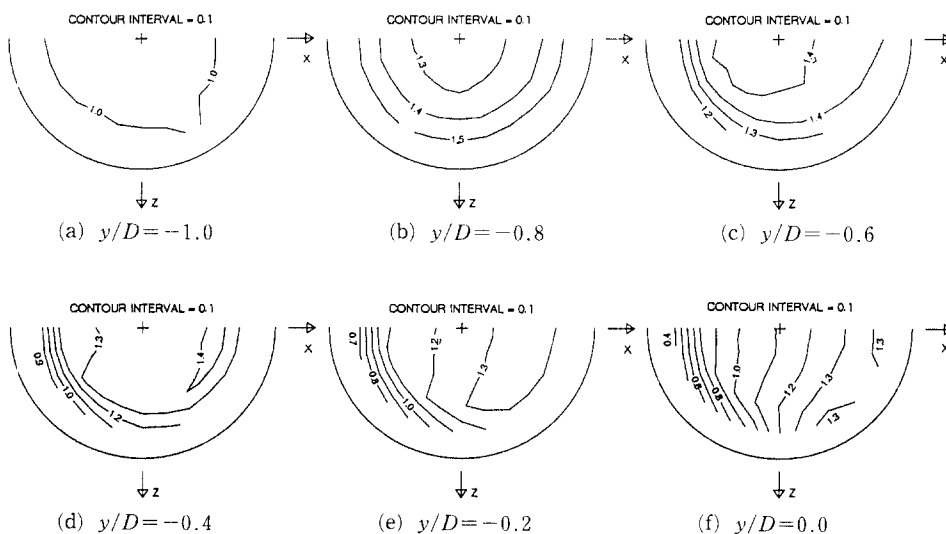


Fig. 6 Contours of  $y$ -directional velocity,  $V/V_j$ , in  $x-z$  plane for  $R=1.0$

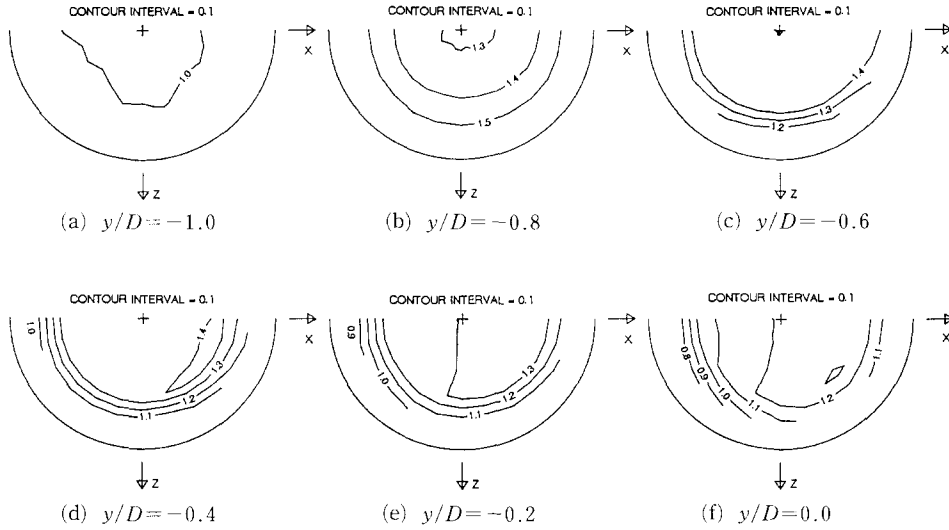


Fig. 7 Contours of y-directional velocity,  $V/V_j$ , in  $x-z$  plane for  $R=2.0$

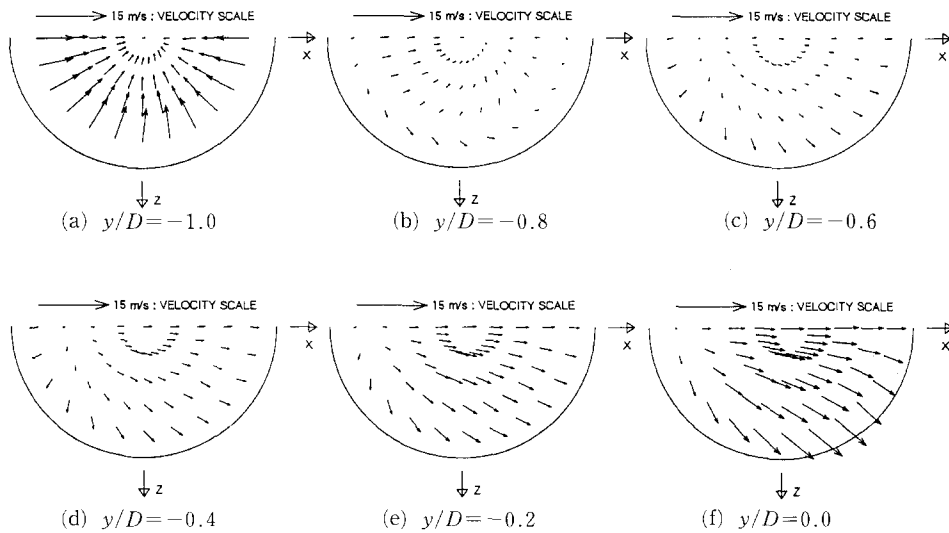


Fig. 8 Projection of velocity vectors on  $x-z$  plane for  $R=1.0$

로 요약된다. 이 2차유동의 크기는 중심을 향해 접근할수록 급격히 감소하여 분사구멍 중심에서는 2차유동속도가 거의 0이 된다. 그러나 이 입구에서의 2차유동은 주유동의 영향으로 그 변화 정도는 비교적 작지만 원주방향으로도 변화하고 있다. 이와같은 원주방향으로의 2차유동 패턴의 변화는  $x$ 가 양인 영역에서는 2차유동의  $x$ -축방향 성분이 주유동의 흐름방향과 반대이므로 이 영역에서  $-x$ -축방향의 속도성분은 감소하는 반면에,  $x$ 가 음인 영역에서는  $+x$ -축방향의 속도성분이 증가하기

때문이다. Fig. 8(d)에서 나타나는 벽으로부터 멀어지는 방사선 형태의 강력한 2차유동은 날카로운 모서리를 가진 원형관 입구에서 발생하는 전형적인 유동특성이다. 이 강력한 중심방향 2차유동은 분사구멍 내부로 진입함에 따라 급격히 약화된다.  $y/D$ 가  $-0.8$ 인 곳에서는 분사구멍의 중심 근처에서는 아직 방사형 유동이 남아 있지만, 벽 근처에서는 ( $r/D=0.4$ ) 매우 불규칙한 2차유동이 관찰된다.  $y/D$ 가  $-0.6$ 인 위치에서는(Fig. 8(c)) 2차유동의 방향이 완전히 역전되는데, 전체적으로 벽 쪽을 향



하는 방사선형 유동과 주유동 방향 유동이 중첩된 형태이다. 이곳에서는 주유동의 영향이 분사구멍 입구와는 정반대로 작용하여  $x$ 가 양인 영역에서는 2차유동의  $x$ -축방향 성분은 강화되는 반면에,  $x$ 가 음인 영역에서는  $+x$ -축방향의 속도성분은 감소된다. 이와같이 중심으로부터 멀어지는 2차유동은 유동박리 영역을 통과한 뒤 유로가 확장되면서 유동이 벽 쪽으로 이동하기 때문에 발생한다. 이곳에서 하류로 이동하여  $y/D$ 가  $-0.2$ 인 곳에 이르면 거의 모든 측정 위치에서의 2차유동이 주유동과 평행하게 되고, 이러한 현상은 분사구멍의 출구까지 지속된다(Fig. 8(a)).  $y/D$ 가  $-0.6$ 인 곳에서  $-0.2$ 인 곳까지 2차유동의 크기는 비교적 완만하게 증가하지만, 분사구멍의 출구에 이르면 그 변화 폭이 비교적 크게 나타난다. 이 출구에서의 2차유동은  $y/D$ 가  $-0.2$ 인 곳에서의 2차유동과 정성적으로는 흡사한 양상이지만, 그 속도의 크기는 대략 2배 정도로 큼을 알 수 있다. 특히  $z/D$ 가 0인 대칭면 근처에서는 2차유동이 주유동과 거의 평행한 양상을 보이나,  $z/D$ 가 증가할수록 2차유동의  $z$ -축방향 속도 성분이 크게 증가한다. Fig. 9는 분사율이 2.0일 때 각 측정  $x$ - $z$  단면에서의 2차유동 분포를 벡터 형태로 나타낸 것이다. 분사율이 2.0일 경우의 2차유동은 정성적으로 분사율이 1.0일 경우와 거의 같았다. 그러나 분사율이 2.0일 경우 평균분사속도가 30 m/s이므로 분사구멍 입구에서 발생하는 중심방향 방사선형 유동과 박리영역 통과 후에 벽면으로

향하는 방사선형 유동의 크기가 분사율이 1.0일 경우보다 더 크므로 Fig. 9의 2차유동의 세기가 Fig. 8의 그것들보다 더 크다. 그러나 주유동의 영향이 가장 강해지는 분사구멍 출구에서는 분사율의 차이에 의한 영향이 비교적 작았다. 왜냐하면 이 두 경우에 주유동의 자유유동속도는 15m/s로 일정하게 유지되기 때문이다.

Fig. 10과 Fig. 11은 분사율이 1.0과 2.0일 때 분사구멍 출구에서 측정된  $U/V_j$ 와  $W/V_j$ 의 분포를 그린 것들이다. 주유동방향 속도성분인  $U/V_j$ 는  $x/D$ 가  $-0.5$  근처 대칭면에서 비교적 작은 반면, 분사구멍의 중심 근처에서 가장 크게 나타났다. 특히  $x/D$ 가 0이고,  $z/D$ 가 0.4인 곳에서  $U/V_j$ 가 가장 크게 나타났는데, 그 이유는 주유동의 전단력이 이곳에서 가장 효과적으로 작용할 수 있기 때문이다.  $W/V_j$ 는 대칭면에서 대체로 0에 가까웠고, 이 등속도선은  $x$ -축과 거의 평행하였다. 이때  $W/V_j$ 는  $z$ -축방향으로 증가할수록 그 값이 증가하는 경향을 보여 주었다. 본 연구의 결과에서 알 수 있듯이 분사구멍 내부의 유동은 주유동과의 상호작용에 의해 그 특성이 결정된다. 특히 분사구멍 출구에서의 3차원속도 분포를 보면, 주유동의 영향이 지배함을 확인할 수 있다. 따라서 막냉각에 대한 수치해석을 수행하거나 수학적인 모델링을 할 때, 분사구멍 출구의 속도 경계조건을 균일하게 가정하거나 또는 완전히 발달된 파이프 유동으로 보는 것은 매우 큰 오차를 수반할 수 있다.

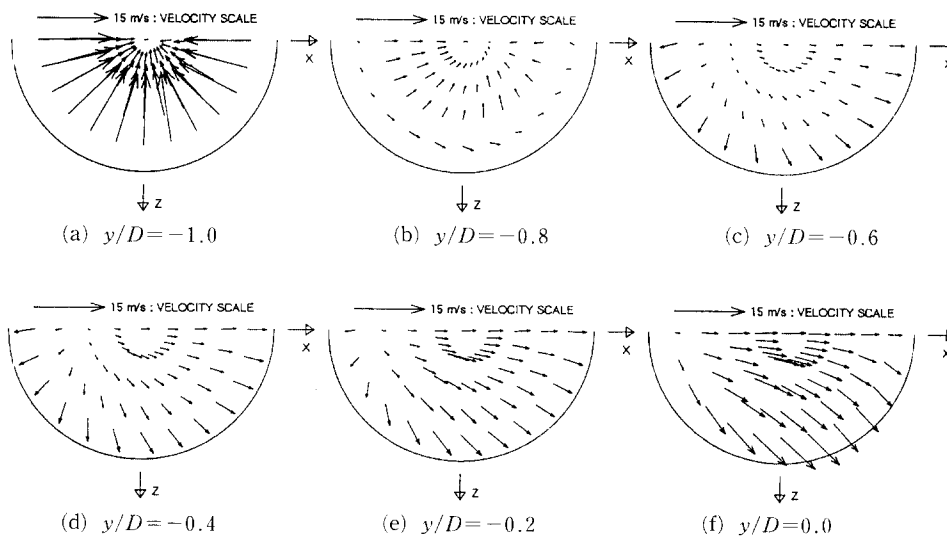


Fig. 9 Projection of velocity vectors on  $x$ - $z$  plane for  $R=2.0$

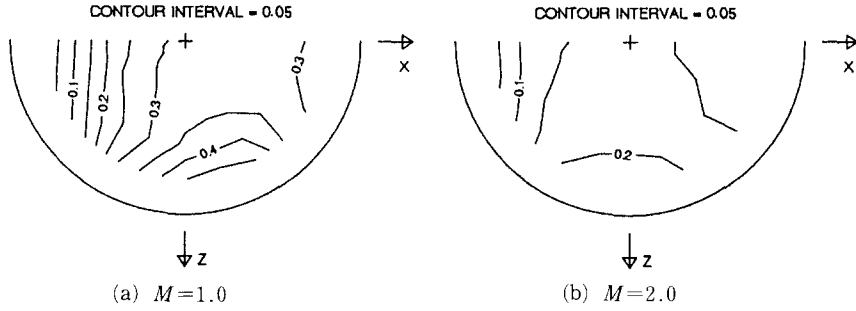


Fig. 10 Contours of x-directional velocity,  $U/V_j$ , in  $x$ - $z$  plane at  $y/D=0.0$

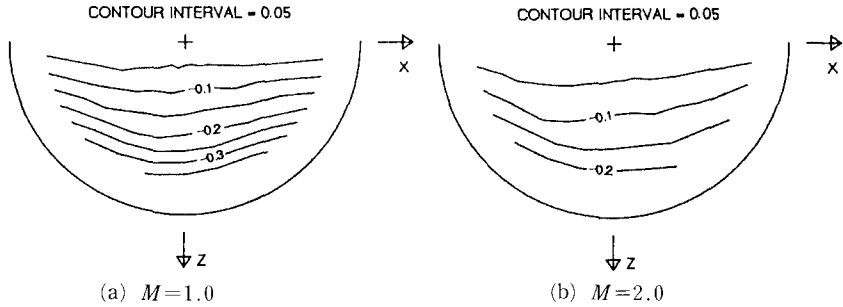


Fig. 11 Contours of z-directional velocity,  $W/V_j$ , in  $x$ - $z$  plane at  $y/D=0.0$

### 3.3 정압계수 및 압력손실계수

본 연구에서는 정압을 다음과 같이 무차원하여 정압계수 (static-pressure coefficient) 로 정의하였다.

$$C_{ps} = \frac{P_s - P_{s,j}}{1/2\rho V_j^2} \quad (1)$$

여기서  $P_{s,j}$ 는 분사구멍 입구로부터 상류방향으로  $1.0D$  만큼 떨어진 곳에서 측정된 정압이고,  $P_s$ 는 분사구멍 내부에서 5공프로우브로 측정된 정압이다. 일반적으로 압력손실의 크기는 다음과 같이 압력손실계수 (total pressure loss coefficient) 로 정의된다.

$$C_{pl} = \frac{P_{t,j} - P_t}{1/2\rho V_j^2} \quad (2)$$

여기서  $P_{t,j}$ 는 분사구멍 입구로부터  $1.0D$  만큼 떨어진 상류에서 측정된 전압이고,  $P_t$ 는 분사구멍 내부에서 5공프로우브로 측정된 전압이다. 식 (1) 과 식 (2)에서 알 수 있듯이, 정압계수와 전압손실계수 모두 분사유동의 평균 동압으로 무차원화되어 있다. 본 연구에서는 주유동의 속도는 일정하게 유지하고 평균분사속도로 분사유동을 변화시켰으므로, 분사율이 다른 경우에는 정압계수 또는 전압손실계

수가 같더라도  $(P_s - P_{s,j})$  또는  $(P_{t,j} - P_t)$ 은 다른 값을 갖게 된다.

Fig. 12는 대칭면 즉  $z/D$ 가 0일 때,  $x$ - $y$  평면에서의 정압계수 분포를 보여 준다. 정압계수가 음의 값을 갖는 것은  $P_s$ 가  $P_{s,j}$ 보다 항상 작은 값을 갖기 때문이다. 정압계수가 증가하는 것은  $P_{s,j}$ 는 항상 일정하므로  $P_s$ 의 증가를 의미한다. 대체로 분사율에 관계없이 분사구멍 입구에서  $y/D$ 가  $-0.6$  근처까지는 정압계수가 급격히 감소하는 반면에 그 이후부터는 정압계수가 완만히 증가하는 경향을 보여 준다. 정압계수의 감소는 정압의 감소를 의미하므로  $y/D$ 가  $-1.0$ 와  $-0.6$  사이에서 큰 순압력구배가 형성되고  $y/D$ 가  $-0.6$ 보다 큰 하류 위치에서는 완만한 역압력구배가 존재한다. 분사구멍 출구에서 ( $y/D=0.0$ ),  $x/D$ 가  $-0.5$  근처에서 주유동 하류방향으로 이동하면 정압계수는 감소하는 경향을 보여 준다. 따라서 이 곳에서는 항상  $+z$  축방향의 흐름이 존재하게 된다. 분사율이  $1.0$ 일 때, 분사구멍 출구 근처에서  $x$ -축방향 정압구배가 비교적 두드러지게 나타났다. 분사율에 관계없이  $y/D$ 가  $-0.8$  근처 벽 쪽의 정압계수는 매우 작게 나타났다. 이곳에서의 정압은 분사구멍 내부에서 가장 작은 값이다. 이 근처에서 정압이 가장 작은

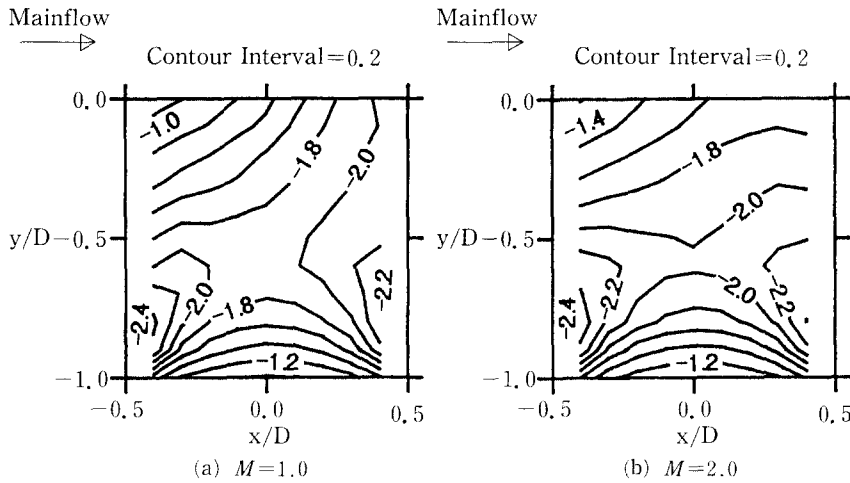


Fig. 12 Contours of static-pressure coefficient, Cps, in  $x$ - $y$  plane at  $z/D=0.0$

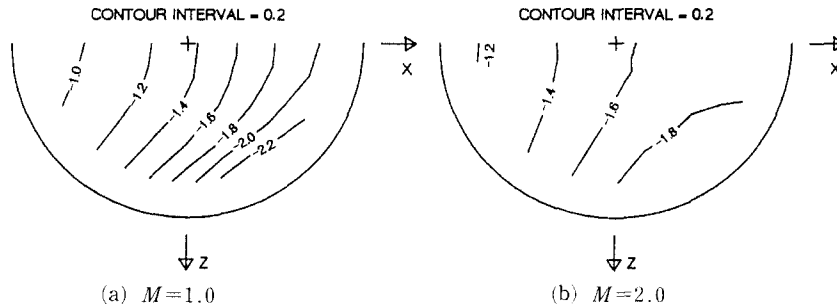


Fig. 13 Contours of static-pressure coefficient, Cps, in  $x$ - $z$  plane at  $y/D=0.0$

이유는 벽 근처에서 발생하는 유동의 박리에 기인한다. Fig. 13은 분사율이 1.0과 2.0일 때, 분사구멍 출구에서의 정압계수 분포를 보여 준다. 분사율에 관계없이 정압계수 분포는 정성적으로 서로 흡사하며, 정압계수의 최대값은  $x/D$ 가  $-0.4$  근처 대칭면에 존재하는 반면 정압의 최소값은 원점에서  $\theta$ 가 대략  $45^\circ$  방향의 벽 근처에서 발생하였다. 이와같은 정압계수 분포는 Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)와 같은 2차유동을 유발시키게 된다.

Fig. 14는 분사구멍 대칭면에서의 압력손실계수 분포를 보여준다. 압력손실은 주로 벽 근처에서 발생하는데 하류방향으로 갈수록 점차 그 영역이 분사구멍 중심부로 확대되고 있다. 전압손실은  $y/D$ 가  $-0.8$ 인 곳부터 발생하기 시작하는데, 그 절대값이  $y/D$ 가  $-0.5$ 인 벽면 근처에서 가장 크게 증가한다. 이것은 유동의 박리영역이  $y/D$ 가  $-0.5$  정도인 곳에서 끝나기 때문일 것이다. 이 위치 하

류에서의 전압손실은 주로 벽면 경계층에서의 마찰손실과 밀접한 관련이 있을 것이다. 본 연구에서는 벽면으로부터  $0.1D$  떨어진 곳까지 측정이 이루어졌으므로 벽과 매우 가까운 곳에서의 손실계수에 대한 정보는 알 수 없었다. 그러나 막냉각구멍에서의 압력손실은 대부분 그 입구 박리영역에서 발생함을 확인할 수 있다. 그리고 특히  $x/D$ 가 음인 곳에서의 압력손실은  $x/D$ 가 양인 영역에서의 압력손실보다 2배 이상 크게 나타났다. Fig. 15는 분사율이 1.0과 2.0일 때, 분사구멍 출구에서의 압력손실계수 분포를 보여준다. 분사율이 1.0일 경우에는 주유동의 영향이 상대적으로 크므로 등압력손실계수의 분포가 동심형태로 되지 못하며, 그 값이 0보다 작은 영역이 존재하였다. 이곳은 2차유동이 큰 곳과 잘 일치하는데, 그 이유는 상대적으로 큰 2차유동이 전압력의 증가에 기여하기 때문이다. 그러나 분사율이 2.0일 경우에는 분사율이 1.0일 경우

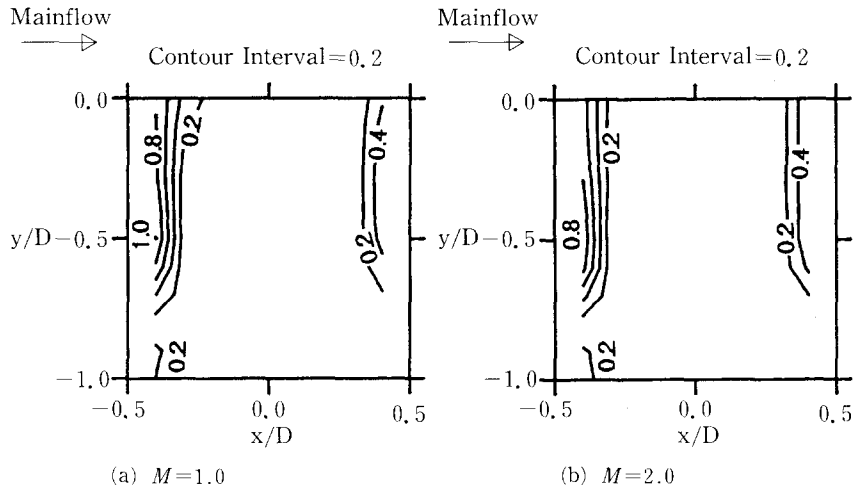


Fig. 14 Contours of total-pressure coefficient,  $C_{pt}$ , in  $x$ - $y$  plane at  $z/D=0.0$

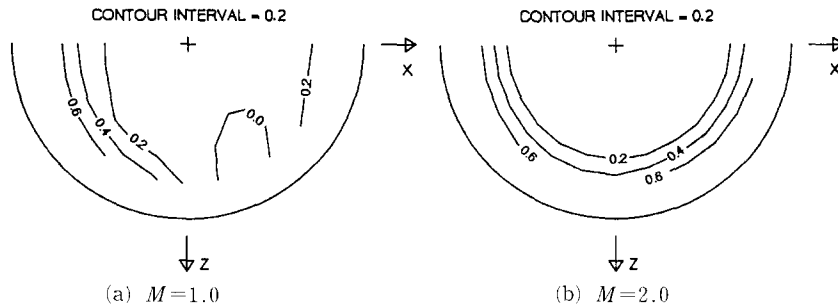


Fig. 15 Contours of total-pressure coefficient,  $C_{pt}$ , in  $x$ - $z$  plane at  $y/D=0.0$

보다 주유동의 영향을 덜 받으므로 등압력손실계수의 형태가 더 동심원에 가깝고, 압력손실계수가 0보다 작아지는 영역은 발견되지 않았다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 직경에 대한 길이의 비가 1.0으로 비교적 짧은 수직분사 막냉각구멍 내부에서 3차원 유동장과 압력손실을 측정하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 분사율이 작을수록 주유동이 분사구멍의 내부유동에 더 큰 영향을 주었다.
- (2) 막냉각구멍 입구영역에서는 벽 근처에서 발생하는 유동의 박리현상이 전체 유동을 좌우하였다.
- (3) 분사구멍 내부의 2차유동 크기와 방향은 분사구멍 입구영역에서의 박리 및 재부착현상과 주유

동 사이의 상대적인 영향력에 따라 결정되었다.

(4) 막냉각구멍 출구의 유동장은 주유동과 분사제트의 상호작용으로 크게 변형되었다. 따라서 막냉각 면에 대하여 수치해석을 수행하거나 모델링을 할 때, 분사구멍 출구의 속도 경계조건을 균일하게 가정하거나 또는 완전히 발달된 파이프 유동으로 보는 것은 매우 큰 오차를 수반할 수 있다.

(5) 막냉각구멍 내부에서의 압력손실은 주로 그 입구에서의 유동의 박리에 의해 발생하였다.

#### 후 기

이 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행된 1995년도 특정기초연구(과제번호 95-0200-12-01-3)의 연구비지원 결과의 일부입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Andreopoulos, J., 1982, "Measurements in a Jet -Pipe Flow Issuing Perpendicularly Into a Cross-stream," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, pp. 493~499.
- (2) Carrotte, J. F. and Stevens, S. J., 1990, "The Influence of Dilution Hole Geometry on Jet Mixing," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 112, pp. 73~93.
- (3) Leylek, J. H. and Zerkle, R. D., 1994, "Discrete -Jet Film Cooling: A Comparison of Computational Results With Experiments," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 358~368.
- (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," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 97~105.
- (5) Lee, S. W., Kim, Y. B. and Lee, J. S., 1995, "Flow Characteristics and Aerodynamic Losses of Film-Cooling Jets with Compound Angle Orientations," to appear in *ASME Journal of Turbomachinery*, ASME paper 95-GT-38.
- (6) ISO 5167-1:1991 (E), 1991, "Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices - Part 1: Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full," International Organization for Standardization.
- (7) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23~34.
- (8) 이상우, 윤택진, 1996, "벽면근접거리가 소형 원추형 5공프로우브의 보정에 미치는 영향," 대한기계학회논문집, 제20권, pp. 2693~2706.
- (9) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.
- (10) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1995, "Heat (Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness With Injection Through Discrete Holes: Part 1 - Within Holes and on the Back Surface," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 440~450.