

분사구멍의 길이가 수직 분사구멍 내부에서의 3차원 유동에 미치는 영향

이 상 우* · 주 성 국**

(1997년 12월 10일 접수)

Effects of Length-to-Diameter Ratio on the Three-Dimensional Flow Within an Injection Hole Normally Oriented to the Mainflow

Sang Woo Lee and Seong Kuk Joo

Key Words : Injection Hole(분사구멍), Length-to-Diameter Ratio(직경에 대한 길이의 비), Three-Dimensional Flow(3차원 유동), Total Pressure Loss(압력손실)

Abstract

Effects of a length-to-diameter ratio, L/D , on the three-dimensional flow and aerodynamic loss within an injection hole, which is normally oriented to the mainflow, have been investigated by using a straight five-hole probe. The length-to-diameter ratio of the injection hole is varied to be 0.5 and 2.0 for blowing ratios of 0.5, 1.0 and 2.0. Regardless of the blowing ratio, flows within the hole and at the jet exit are strongly affected by the length-to-diameter ratio. In the case of $L/D=0.5$, the inside flow is considerably influenced by the mainflow, and the exit flow variation is found to be the greatest. The aerodynamic loss in this case is usually attributed to jet-mainflow interactions. In the case of $L/D=2.0$, the flow separation and reattachment in the inlet region are completely separated from the complicated exit flow, and the aerodynamic-loss production is mainly due to the inlet flow separation.

기 호 설 명

C_{pt} : 압력손실계수, 식 (1)	Re_D : Reynolds 수 = $U_j D / \nu_j$
D : 분사구멍 직경	Re_{δ_2} : Reynolds 수 = $U_\infty \delta_2 / \nu_\infty$
J : 운동량 유속 비 (momentum flux ratio) = $\rho_j U_j^2 / \rho_\infty U_\infty^2$	U : x -축방향속도
L : 분사구멍의 길이	U_∞ : 주유동의 자유유동속도
M : 분사율 (blowing ratio) = $\rho_j U_j / \rho_\infty U_\infty$	V : y -축방향속도
P_t : 전압	V_j : 분사구멍의 단면적에 걸쳐 평균된 분사속도
$P_{t,j}$: 분사구멍 입구에서 상류쪽으로 $1.0D$ 만큼 떨어진 곳에서 측정된 플레넘 전압	\vec{V} : 주유동이 존재할 때 측정된 속도벡터
r : 반경방향 좌표, Fig. 2	\vec{V}_{no} : 주유동이 없을 때 측정된 속도벡터
	W : z -축방향속도
	x : 주유동방향 좌표, Fig. 1
	y : 높이방향 좌표, Fig. 1
	z : 폭방향 좌표, Fig. 2

* 회원, 국립금오공과대학교 기계공학부

** 국립금오공과대학교 대학원 기계공학과

그리스문자

- δ_2 : 운동량두께
 ν_j : 분사공기의 동점성계수
 ν_∞ : 주유동의 동점성계수
 ρ_j : 분사공기의 밀도
 ρ_∞ : 주유동의 밀도
 θ : 원통좌표계의 원주방향 각도, Fig. 2

1. 서 론

주유동에 수직으로 분사되는 제트유동은 공학적으로 널리 쓰이고 있는데, 특히 가스터어빈에서 광범위하게 응용되고 있다. 그 중에서 막냉각(film cooling)은 고성능 가스터어빈의 고온 부품을 냉각하는데 사용되는 냉각방식중 하나로, 연소기의 라이너, 터어빈 블레이드, 애프터버너 등의 냉각에 성공적으로 적용되고 있다. 이와함께 가스터어빈의 연소기 내부에서 화염을 안정화시키거나, 연료를 희석시키는 역할을 하는 희석제트(dilution jet)도 그 대표적인 응용 예이다. 또한 제트충돌냉각(jet-impingement cooling)의 유동에서도 어느 정도의 주유동이 존재하므로 이 경우에 해당될 수 있다. 그런데 이들 분사구멍들의 직경에 대한 길이의 비율 즉 L/D 는 분사제트의 유형에 따라 크게 달라진다. 예를들면, 일반적으로 희석공기가 분사되는 분사구멍이나 연소기와 애프터버너에 적용되는 막냉각구멍에서는 분사구멍의 길이가 비교적 작은 경우가($L/D < 1.0$) 많은 반면에, 터어빈 블레이드 등의 막냉각구멍에서는 일반적으로 분사구멍의 길이가 그 직경보다 더 크다($L/D > 1.0$).

분사구멍 내부에서의 유동은 분사구멍 통과후의 제트의 거동에 큰 영향을 미치므로, 이 분사구멍 내부의 유동특성에 대한 이해는 매우 중요하다. 1982년 Andreopoulos⁽¹⁾는 L/D 가 비교적 크고 contoured inlet을 갖는 분사관을 통해 주유동에 수직으로 분사되는 제트유동에 대하여 분사관 내부 및 주유동 영역의 대칭면에서 난류유동을 측정하였다. 그 결과 그는 주유동이 분사관 내부로 깊숙히 영향을 줌을 밝혔고, 분사율이 작을 때 분사관 내부에서의 정상적인 유동모델을 제시하였다. Carrotte와 Stevens⁽²⁾는 L/D 가 매우 작은 가스터어빈 연소기의 희석구멍(dilution hole)의 입구형상이 분사구멍 출구의 제트유동에 미치는 영향에 대하여

연구하였다. Leylek과 Zerkle⁽³⁾ 및 Walters와 Leylek⁽⁴⁾은 막냉각구멍 내부에서의 3차원유동에 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 유동현상이 발생하며, 막냉각면에 존재하는 1쌍의 바운드와류(bound vortex)와 비슷한 와류가 분사구멍 내부에도 존재함을 밝혔다. 1997년 이상우와 주성국⁽⁵⁾은 L/D 가 1.0인 수직분사 막냉각구멍 내부에서의 3차원 유동특성에 대하여 연구하였다. 그 결과 그들은 분사구멍 내부의 2차유동 크기와 방향은 분사구멍 입구영역에서의 박리 및 재부착현상과 주유동 사이의 상대적인 영향력에 따라 결정되었고, 막냉각구멍 내부에서의 압력손실은 주로 그 입구에서의 유동의 박리에 의해 발생함을 밝혔다. 그렇지만 수직분사의 경우, 경사진 분사구멍의 내부에서 발생하는 "jetting effect" 등의 복잡한 유동은 발견되지 않았다. 그리고 지금까지 국내에서 막냉각 구멍을 빠져 나온 뒤의 제트유동에 대하여 많은 연구^(6~8)가 수행된 바 있다.

앞에서 언급한 바와 같이, 분사구멍 내부에서의 유동에 대하여 몇가지 연구들이 이루어졌지만, L/D 가 수직 분사구멍 내부에서의 3차원 유동특성에 미치는 영향에 대한 연구는 그 중요성과 많은 응용범위에도 불구하고 아직 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 이 L/D 가 0.5와 2.0일 때, 그 분사구멍 내부에서의 3차원 유동특성과 압력손실 분포를 측정하고, L/D 가 1.0인 경우의 결과⁽⁵⁾와 비교하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 분사구멍의 길이가 달라지는 것을 제외하면 이상우와 주성국⁽⁵⁾의 그것과 동일하다. 실험장치는 크게 풍동, 시험부, 출구확산부, 분사장치, 프로우브 이송장치 등으로 구성되어 있다. 풍동은 개방형으로, 시험단면의 크기는 600 mm×400 mm이며 면적축소비는 약 9.0이다. 풍동의 출구속도는 최대 40 m/s까지 연속적인 조절이 가능하며, 난류강도는 대략 0.5% 이내이다. 시험부는 두께 20mm의 아크릴 판으로 제작되었고, 그 크기는 폭 및 높이가 각각 600 mm와 400 mm, 길

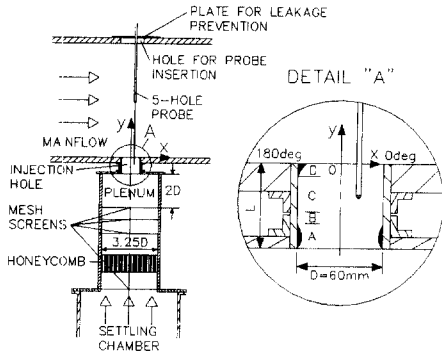


Fig. 1 Experimental apparatus.

이는 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 아랫 벽에서 난류경계층 유동으로 발달된다. Fig. 1은 분사장치 및 분사구멍의 자세한 모습을 보여 주고 있다. 제트의 분사는 시험부 아랫 벽에 설치된 분사장치를 통하여 이루어진다. 이 분사장치는 크게 송풍기, 오리피스유량계, 압력조정실(settling chamber), 플레넘(plenum), 분사구멍 등으로 구분된다. 송풍기로부터 오리피스를 거쳐 유입된 공기는 압력조정실로 들어 오고, 이것은 내경이 195 mm인 원통형 플레넘으로 공급된다. 이 플레넘에는 입구 메쉬스크린(mesh screen), 허니컴(honeycomb), 3개의 메쉬스크린 등이 하류방향으로 각각 설치되어 있다. 여기서 가장 하류에 설치된 메쉬스크린과 분사구멍 입구까지의 거리는 분사구멍 내경의 2배로 분사구멍의 길이에 관계없이 일정하게 유지된다. 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⁽⁹⁾에 의거하여 제작하였는데, 본 연구에서는 코너타핑(corner tapping) 형의 오리피스를 채택하였다. 본 실험에서는 분사율에 관계없이, 분사공기의 유량을 정확히 측정하기 위해 내경이 서로 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 볼나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유니트, 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 이송장치로 자동이송하기 위해 Fig. 1과 같이 시험부 윗 벽에 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 공기가 풍동 외부로부터 시험부 내로 들어 오는 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 모니터링되고, 또한 이 전압은 다기능입출력보드의 12 비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 프로우브의 이송은 앞에서 언급한 3차원 자동이송장치에 의해 이루어졌다. 스테핑모터는 전용 드라이버의 펄스입력을 통

해서 제어된다. 이 디지털 펄스는 다기능입출력보드로부터 공급된다. 분사구멍 내부에서의 3차원 유동 및 압력의 손실을 측정하기 위해 지지대 형태가 직선인 원추형 5공프로우브를 사용하였다. 이 5공프로우브는 미국 United Sensors사에서 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 1.12 m (44인치)이며, 이중 보강되지 않은 부분의 길이는 프로우브 선단에서 254 mm (10인치) 정도이다 (Fig. 1). 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 이 직선형 5공프로우브를 분사구멍과 평행하게 배치하여 분사구멍 내부에서의 3차원 유동 및 압력 손실을 측정하였다. 본 실험에서는 프로우브보정법 (non-nulling method)을 적용하여 5공프로우브를 보정하였다.^(10,11) 5공프로우브의 보정에는 분해능 (resolution)이 0.2도인 2축회전장치를 사용하였고, 피치각과 요각의 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)은 30 mm와 120 mm 두 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 따라서 분사구멍의 직경에 대한 분사구멍 길이의 비 L/D 는 각각 0.5와 2.0이 된다. 본 실험에서의 자유유동속도 (U_∞)와 자유유동 난류강도는 15 m/s와 0.5%로 각각 일정하게 유지하였다. 트림와이어를 지나 발달되는 입구 경계층유동의 특성을 알기 위해 분사구멍 근처에서 평균속도 및 난류성분을 측정하였다. 그 결과 경계층유동의 z -축방향 균일성을 확인하였고, 경계층두께는 좌표계의 원점에서 약 17.5 mm이었다. 경계층속도 측정결과로부터 계산된 배제두께 (displacement thickness)와 운동량 두께 (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 7.5 m/s, 15 m/s, 30 m/s 등으로 변화시켰다. 따라서 본 연구에서의 분사율은 0.5, 1.0, 2.0 등으로 변화되고, 이에 해당되는 운동량유속비 (momentum flux

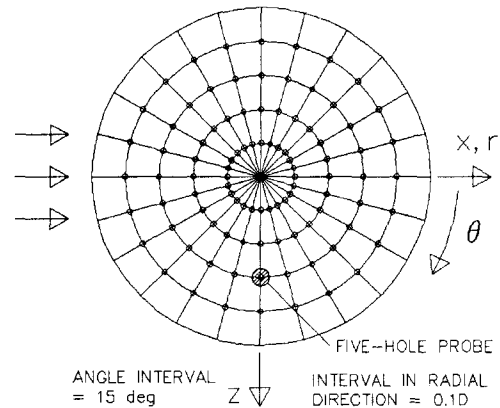


Fig. 2 Measurement locations in $x-z$ plane.

ratio)는 각각 0.25, 1.0, 4.0 등이다. 본 연구에서 자유유동속도와 운동량두께 (δ_2)에 근거한 Reynolds 수, Re_{δ_2} 는 1.7×10^3 이고, 분사율이 1.0일 때 평균분사속도 (V_j)와 분사구멍의 내경 (D)에 근거한 Reynolds 수, Re_D 는 5.7×10^4 이다. 실제 5공프로우브를 이용한 3차원속도의 측정은 y/L 이 -1.0인 분사구멍 입구, y/L 이 0.0인 분사구멍 출구, z 가 0.0인 분사구멍 대칭면 ($x-y$ 평면) 등에서 이루어졌다. 분사구멍 입구와 출구 즉 $x-z$ 평면에서의 측정 위치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 원통좌표계의 r/D 가 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 등인 곳에서, θ 를 15도 간격으로 0도에서 360도까지 변화시키면서 측정이 이루어졌다. 이와같이 분사구멍의 벽면으로부터 적어도 6 mm 이상 떨어진 곳에서 5공프로우브를 이용한 측정이 이루어진 이유는 벽면 근접에 의한 오차를 방지하기 위해서이다 (이상우와 윤태진⁽¹²⁾).

본 연구에 사용된 풍동은 실험조건인 15 m/s에서 유동의 균일성이 1% 이내이며, 5공프로우브의 이송오차는 ± 0.05 mm 이내이다. 분사공기 유량측정에 사용된 오리피스 측정오차는 ISO 5167⁽⁹⁾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⁽¹³⁾의 방법을 적용한 오차해석 (uncertainty analysis) 결과, 압력측정의 오차는 자유유동 동압의 $\pm 0.7\%$, 흐름각의 오차범위는 ± 1.2 도, 속도의 크기의 오차범위는 $\pm 1.6\%$ 로 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. 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 재부착 영역에 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 상류 영역에서만 국한되어 발생한다. 본 연구에서는 이 곳을 영역 D로 분류하였다. 일반적으로 분사율이 1.0보다 작을 경우에는 주유동이 분사구멍 깊숙히 영향을 미치지만 분사율이 충분히 크면 주유동의 영향이 작아진다.⁽⁵⁾ 특히 분사율이 0.5 정도로 작을 경우 분사구멍 상류의 출구영역에는 매우 복잡한 역류와 주기적인 비정상유동이 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 본 연구의 측정 결과, 분사율이 0.5일 때 분사구멍 출구에서 주유동 상류영역에서 5공프로우브의 측정범위를 벗어남이 확인되었다.

3.2 분사구멍 대칭면에서의 유동

주유동 경계층에 수직으로 분사되는 제트유동은 z/D 가 0인 $x-y$ 평면에 대해서 대칭이 된다. 분사구멍 입구와 출구에서의 3차원 유동장을 검토하기 앞서 이 대칭면에서의 유동특성을 먼저 제시하고자 한다. 본 연구에서 제시된 L/D 가 1.0일 경우의 결과는 이상우와 주성국⁽⁶⁾에서 인용한 것들이다. Fig. 3은 이 대칭면에서 평균 분사속도가 15 m/s이고, 주유동이 존재하지 않을 때 측정한 결과를 벡터 형태로 나타낸 것이다. 이 분사속도는 분사율이 1.0일 때의 평균 분사속도와 동일하다. 그림에서 알 수 있듯이 분사구멍의 길이에 상관없이 분사구멍의 입구에서는 항상 분사구멍의 중심을 향하는 속도성분을 가지고 있다. 그런데 이곳에서 어느 정

도 하류로 이동하면, 대부분의 속도벡터 방향이 분사구멍의 벽면과 거의 평행하게 된다. 분사구멍 입구에서 하류로 0.25D 정도 이동한 곳에서는 속도의 크기가 x/D 가 0일 때 가장 작고 벽면으로 갈수록 증가하여 벽면에서 가장 가까운 측정 위치에서 최대가 된다. 그 이유는 벽 근처에서 발생하는 유

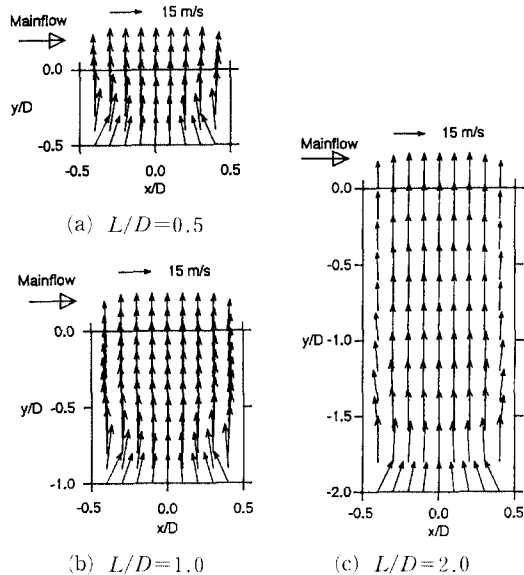


Fig. 3 Projection of velocity vectors on $x-y$ plane at $z/D=0.0$ for $U_j=15\text{m/s}$ without mainflow.

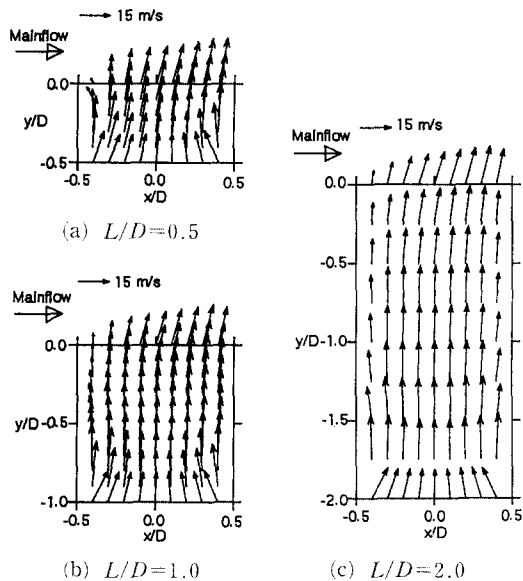


Fig. 4 Projection of velocity vectors on $x-y$ plane at $z/D=0.0$ for $M=1.0$.

동의 박리(Fig. 1의 영역 A)로 인하여 유로가 좁아져서, 영역 A와 가까운 벽 근처에서 유동이 가속되기 때문이다. 이 사실은 확인하기 위하여 본 연구에서는 유동의 가시화 실험을 수행해 보았다. 그 결과, 이 위치에서 박리영역이 최대로 확대되었으며, 그 거리는 대략 벽면으로부터 4 mm 정도였다. 이곳에서 하류로 이동하면 유속은 분사구멍의 중심선 근처에서 최대가 되며, 벽 근처의 유속은 분사구멍의 입구와는 달리 벽으로 향하는 속도성분을 갖는다. 하류방향으로 계속 이동하면 대부분의 속도벡터는 벽면과 거의 평행해진다. 일반적으로 분사구멍의 길이가 길수록 벽면과의 마찰에 의해 벽 근처에서의 속도가 더 많이 감소하므로 분사구멍 출구에서의 속도분포는 L/D 에 따라 달라진다. 그러나 주유동이 없으므로 속도분포는 항상 분사구멍의 중심선에 대해 대칭을 유지하고 있다. Fig. 4는 분사율이 1.0일 때 L/D 에 따른 대칭면 속도벡터를 나타낸다. 주유동이 있을 경우에도 분사구멍의 길이에 관계없이 분사구멍 입구에서는 분사구멍의 중심을 향하는 유동이 존재하고, 대체로 유동의 대칭성이 유지되고 있다. 이와같은 유동특성은 분사구멍의 출구에 가까워지면 주유동의 영향으로 크게 달라진다. 분사구멍 출구에서는 속도벡터가 현저하게 좌우 대칭으로부터 벗어나 있다. 즉 주유동의 상류방향, 다시말해 $-x$ -축 쪽에서의 유속은 주유동의 영향으로 크게 감소하는 반면에 주유동이 흘러가는 방향 즉 주유동 하류방향쪽에서는 유속의 크기는 더 증가하는 경향을 보인다. 특히 분사구멍의 길이가 가장 짧은 경우(Fig. 4(a)), 이러한 현상이 가장 두드러진다. L/D 가 0.5일 경우, 주유동이 없다면 분사구멍 출구의 벽 근처 유동은 재부착영역(Fig. 1의 영역 B)으로 분류되므로, 이 때 분사구멍 출구에서 주유동 상류쪽에서의 유동은 주유동과 반대방향 속도성분을 갖게 된다(Fig. 3(a)). 따라서 분사구멍의 길이가 0.5일 때 주유동과의 충돌이 가장 심해지므로, 이곳에서의 유속은 가장 작게 된다. 반면에 L/D 가 1.0과 2.0일 때에는, 주유동이 없을 경우 분사구멍 출구의 유동이 모두 경계층발달영역(Fig. 1의 영역 C)으로 분류되므로, 분사구멍 출구 상류영역의 유속의 크기와 방향이 서로 비슷하게 나타난다. 주유동의 영향을 좀더 구체적으로 파악하기 위해서, 주유동이 존재할 때 측정된 각 속도벡터 \vec{V} (Fig. 4)를 주유동이 없는 경우의 속도벡터 \vec{V}_{no} (Fig. 3)로 뺀 결과 $(\vec{V} - \vec{V}_{no})$

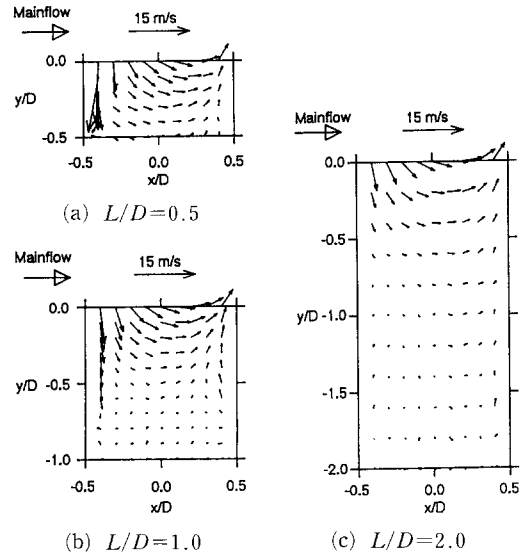


Fig. 5 Projection of velocity vectors, $(\vec{V} - \vec{V}_{no})$, on $x-y$ plane at $z/D=0.0$ for $M=1.0$.

를 Fig. 5에 나타내었다. 따라서 Fig. 5는 순수하게 주유동에 의해 변형된 유동을 잘 나타내 준다. 일반적으로 분사구멍의 출구영역에서 주유동 상류쪽에서는 주유동이 분사구멍으로 분사되는 공기의 유출을 억제하는 방향으로 작용하는데, 그 크기는 x/D 가 -0.5 에 가까울수록 증가하였다. 반면에 주유동의 존재는 분사구멍 출구 주유동 하류쪽에서 분사공기의 유출을 촉진하는 작용을 하였고, x/D 가 0.5 근처에서 그 정도가 가장 심하게 나타났다. 그렇지만 전체적으로 볼 때 주유동이 분사공기의 유출을 촉진시키기보다는 억제하는 작용을 더 많이 하므로, 주유동이 존재하면 분사구멍의 유량계수(discharge coefficient)는 감소할 것으로 생각된다. 여기서 언급한 주유동의 영향은 분사구멍의 길이가 짧을수록 심화되어, L/D 가 0.5일 때에는 분사구멍의 입구에서도 그 영향이 뚜렷이 나타난다.

본 연구에서는 분사율의 영향을 알아보기 위해 분사율이 0.5, 1.0, 2.0 등인 경우에 대해 실험을 수행하였다. 그러나 분사율이 0.5일 경우, 분사구멍 출구의 주유동 상류쪽 영역에서 5공프로우브의 측정범위를 벗어나는 곳이 존재하였다. 따라서 여기서는 분사율이 2.0일 때의 결과만을 제시하고자 한다. Fig. 6은 분사율이 2.0일 때 L/D 에 따른 대칭면에서의 속도벡터를 나타낸다. 이 결과를 Fig. 4의 결과와 비교해 볼 때, 전체적인 경향은 매우 흡사하지만 분사율이 증가하면 출구의 속도분포가

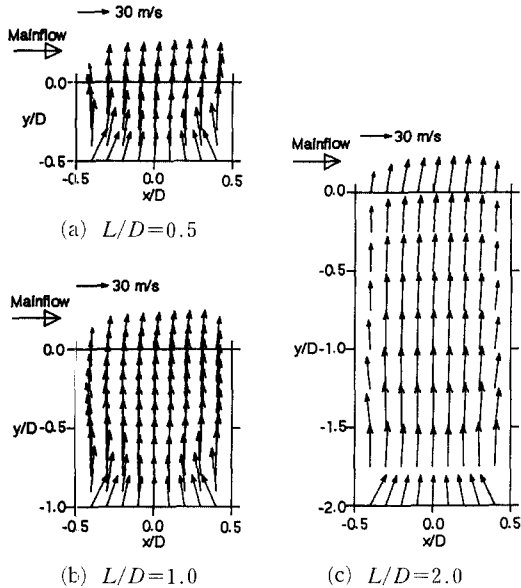


Fig. 6 Projection of velocity vectors on $x-y$ plane at $z/D=0.0$ for $M=2.0$.

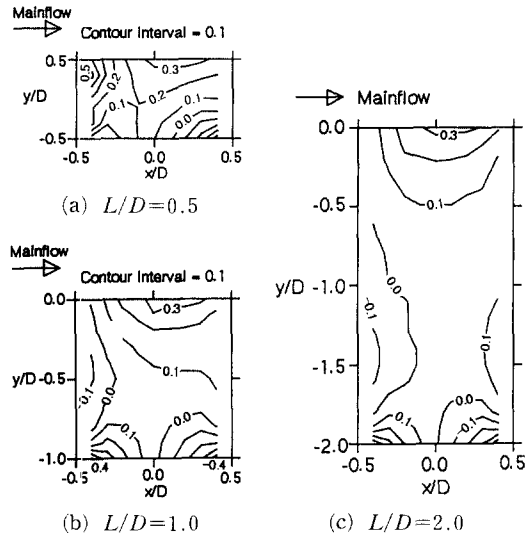


Fig. 7 Contours of x -directional velocity, U/V_j , in $x-y$ plane at $z/D=0.0$ for $M=1.0$.

더 평탄해지고, 전반적으로 주유동의 영향이 더 작아짐을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 분사율이 1.0일 때, 분사구멍 길이의 변화에 따라 유동 대칭면에서의 무차원 x -축방향속도 U/V_j 와 무차원 y -축방향속도 V/V_j 의 분포를 그린 것이다. 이 속도들은 평균분사속도 V_j 로 무차원화되어 있으므로, 이 경우 등속도선

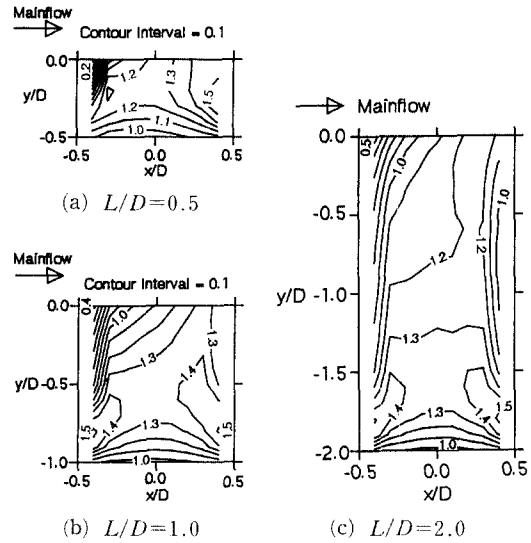


Fig. 8 Contours of y -directional velocity, V/V_j , in $x-y$ plane at $z/D=0.0$ for $M=1.0$.

사이의 실제 속도 차이는 1.5 m/s이다. 먼저 U/V_j 의 분포(Fig. 7)를 살펴 보면, 분사구멍의 길이에 관계없이 분사구멍 입구에서는 분사구멍 중심으로 향하는 속도성분이 존재하고, 출구에서는 주유동방향의 유동이 존재하고 있다. 그러나 주유동의 영향으로 입구 유동이 완벽하게 대칭이 되지 못하고 있으며, 이러한 경향은 분사구멍의 길이가 짧을수록 두드러진다. L/D 가 2.0일 경우에는 입구에서의 중심방향 유동과 출구의 $+x$ -축방향 유동이 완전히 분리됨을 확인할 수 있다(Fig. 7(c)). 분사구멍 내부에서의 무차원 y -축방향속도 V/V_j 의 분포를 살펴 보면(Fig. 8), 분사구멍 중심선을 따라 분사구멍 입구에서 하류로 이동할 때, 분사구멍 입구 근처에서는 V/V_j 가 급격히 증가하면서 가속되고 그 하류에서는 유속이 대체로 완만하게 감소한다. 이와같이 입구영역에서 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. 그러나 L/D 가 0.5일 경우에는 분사구멍의 출구 근처에서 이러한 현상이 명확하게 나타나지 않는다. 일반적으로 L/D 에 관계없이 분사구멍의 출구 근처에서는 주유동이 V/V_j 의 분포에 큰 영향을 주고 있다. 주유동은 분사구멍 출구의 주유동 상류방

향 쪽에서 분사공기의 유출을 강하게 방해하며, 그 결과 분사공기가 분사구멍으로부터 쉽게 벗어날 수 있는 유로의 면적이 주유동의 하류쪽 영역으로 제한된다. 따라서 이 분사구멍 출구의 주유동 상류쪽에서는 V/V_0 가 급격히 감소되는 반면, 주유동 하류쪽에서는 V/V_0 가 비교적 큰 값을 갖는다. 특히 Fig. 8(a)로 판단해 볼 때, L/D 가 0.5일 때에는 분사구멍의 길이가 짧기 때문에 유동의 박리영역이 주유동에 의해 크게 변형되어 있음을 확인할 수 있다. 여기서 제시하지는 않았지만 분사율이 0.5와 2.0인 경우의 결과들과 분사율이 1.0일 때의 결과 (Fig. 7, Fig. 8)를 종합해 보면, 분사율에 관계없이 분사구멍의 길이가 그 직경의 2배일 경우에는 분사구멍의 입구유동과 분사구멍의 출구에서의 복잡한 유동이 완전히 분리되어 있음을 확인할 수 있었다.

3.3 분사구멍 단면에서의 2차유동

Fig. 9와 Fig. 10은 분사율이 각각 0.5와 2.0일 때, 분사구멍의 입구 즉 y/L 이 -1.0 인 $x-z$ 평면에서의 2차유동 분포를 벡터형태로 나타낸 것이다. 주유동이 없다면, 이곳에서는 분사율과 분사구멍의 길이에 관계없이 분사구멍의 중심을 향한 방사선

형태의 2차유동이 발생할 것이다(Fig. 3). 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. 특히 L/D 가 2.0보다는 0.5일 경우, 이 입구 2차유동의 변화가 두드러졌다 (Fig. 9). 이와같은 원주방향으로의 2차유동의 형태가 변화하는 이유는 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. 9와 Fig. 10에서 공통적으로 나타나는 벽으로부터 멀어지는 방사선 형태의 2차유동은 날카로운 모서리를 가진 원형관 입구에서 발생하는 전형적인 유동특성이다. 분사율이 2.0일 경우 (Fig. 10)의 2차유동은 정성적으로 분사율이 0.5인 경우와 거의 같았다. 그러나 이 경우 평균분사속도가 30m/s이므로, Fig. 10의 2차유동 세기가 Fig. 9의 그것들보다 훨씬 더 강하였다.

Fig. 11은 분사율이 1.0일 때 분사구멍의 출구면 즉 y/L 이 0인 $x-z$ 평면에서의 무차원속도 V/V_0

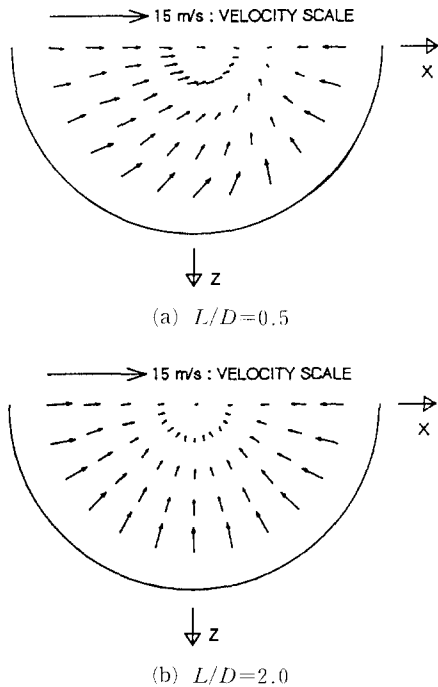


Fig. 9 Projection of velocity vectors on $x-z$ plane at $y/L=-1.0$ for $M=0.5$.

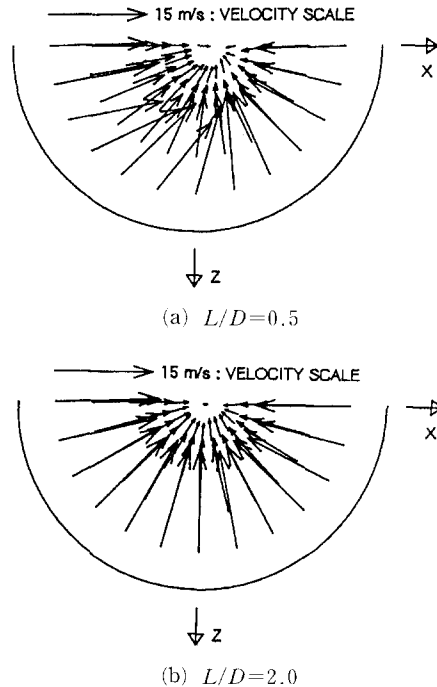


Fig. 10 Projection of velocity vectors on $x-z$ plane at $y/L=-1.0$ for $M=2.0$.

의 분포를 보여 준다. 이 y -축방향 유출속도의 구

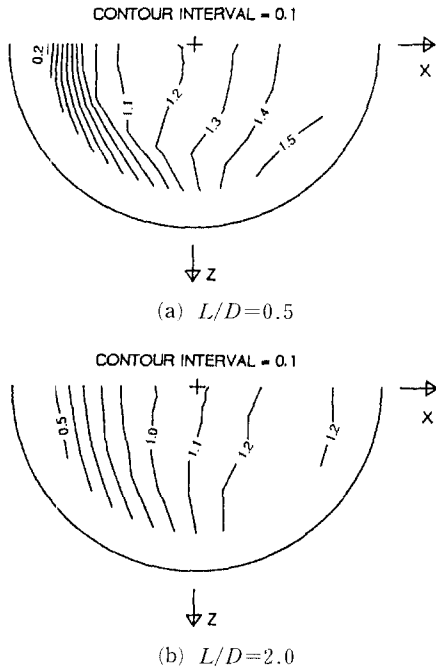


Fig. 11 Contours of y -directional velocity, V/V_j , in $x-z$ plane at $y/L=0.0$ for $M=1.0$.

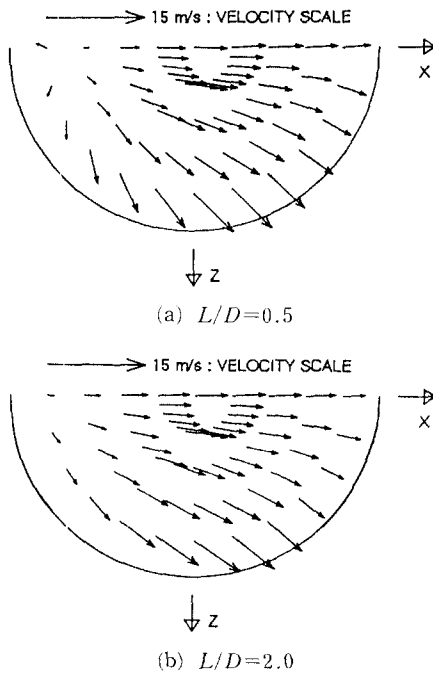


Fig. 12 Projection of velocity vectors on $x-z$ plane at $y/L=0.0$ for $M=1.0$.

배는 주유동 상류쪽에서는 매우 커지는 반면에, 그 하류쪽 속도구배는 비교적 완만해진다. L/D 가 0.5일 경우 x/D 가 -0.4 근처 대칭면에서는 V/V_j 가 0.2에 불과할 정도로 작지만, 분사구멍의 대부분의 영역에서는 V/V_j 의 크기가 1.0보다 커진다. 반면에 L/D 가 2.0일 경우에는 이 V/V_j 의 최소값은 0.5 정도로 증가되고, 속도구배도 L/D 가 0.5인 경우에 비해 훨씬 완만하다. 이 결과로부터 분사구멍의 길이가 분사구멍 출구에서 분사공기의 유출속도 분포에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다. 즉 분사율이 일정하면 분사공기의 총 유출량은 일정하지만, 분사구멍의 길이가 작을 경우 국소적으로 y -축방향 속도의 최대값이 더 커지므로 그 모멘텀에 의해 분사제트가 주유동으로 더 깊숙히 침투할 수 있을 것이다.

Fig. 12는 분사율이 1.0일 때 분사구멍 출구에서의 2차유동 분포를 벡터형태로 나타낸 것이다. 일반적으로 주유동이 없을 경우, 분사구멍의 입구에서 나타나는 벽으로부터 멀어지는 방사선 형태의 강력한 2차유동은 분사구멍 내부로 진입함에 따라 급격히 약화된다(Fig. 3). 이곳에서 하류로 이동하여 입구 박리영역(Fig. 1의 영역 A)을 통과한 뒤, 재부착 영역(Fig. 1의 영역 B)에 이르면 2차유동의 방향이 완전히 역전되어, 전체적으로 벽쪽을 향하는 방사선형 유동이 존재하게 된다. 이 벽쪽으로 향하는 2차유동은 하류로 이동할수록 그 크기는 작아지나 정성적인 경향은 변화하지 않는다. 따라서 분사구멍의 길이가 짧을수록 분사구멍의 출구에서 벽쪽으로 향하는 유동의 세기는 증가한다. 주유동이 존재하게 되면 분사구멍 출구의 유동은 이 벽쪽으로 향하는 반경방향 유동과 주유동이 중첩된 형태로 나타나게 될 것이다. 분사구멍 출구에서는 주유동의 영향이 그 입구와는 정반대로 작용하여 x 가 양인 영역에서는 2차유동의 x -축방향 성분이 강화되는 반면에, x 가 음인 영역에서는 $+x$ -축방향의 속도성분이 감소된다. 일반적으로 주유동의 크기가 분사구멍의 2차유동보다 훨씬 크므로 분사구멍 출구 대칭면에서의 2차유동은 x/D 가 -0.4 근처를 제외하면 대부분의 영역에서 주유동 방향과 일치한다. 그러나 이 대칭면에서 멀어질수록 z -축방향의 속도성분이 증가하였다. 이것은 주유동이 분사공기의 유출을 막은 결과, 분사구멍을 빠져나오는 공기가 폭방향으로도 퍼져 나가기 때문이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이, x/D 가 -0.4 근처

를 제외하면 분사구멍 길이가 변해도, 분사구멍 출구에서 2차유동의 정성적인 유동특성은 거의 같게 나타났다.

3.4 압력손실계수

일반적으로 압력손실의 크기는 다음과 같이 압력손실계수(total-pressure loss coefficient)로 정의된다.

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

여기서 $P_{t,i}$ 는 L/D 에 관계없이 분사구멍 입구에서 상류방향으로 $1.0D$ 만큼 떨어진 곳에서 측정된 전압이고, P_t 는 분사구멍 내부에서 5공프로우브로 측정된 전압이다. 식(1)에서 알 수 있듯이 압력손실계수는 분사유동의 평균 동압으로 무차원화되어 있다.

Fig. 13은 분사율이 1.0일 때 분사구멍 대칭면에서의 압력손실계수 분포를 보여 준다. 분사구멍 내부에서의 압력손실은 주로 벽 근처에서 발생하는데 하류방향으로 갈수록 점차 그 영역이 분사구멍 중심부로 확대되고 있다. L/D 가 2.0일 경우에는 대부분의 영역에서 압력손실 분포가 주유동 상류와 하류 쪽 벽면에서 거의 대칭적으로 나타났지만, 분사구멍의 출구에 가까워질수록 주유동 상류방향의 압력손실이 더 크게 나타났다. 그러나 분사구멍의 길이가 짧아지면 주유동 상류쪽 벽면에서의 압력손

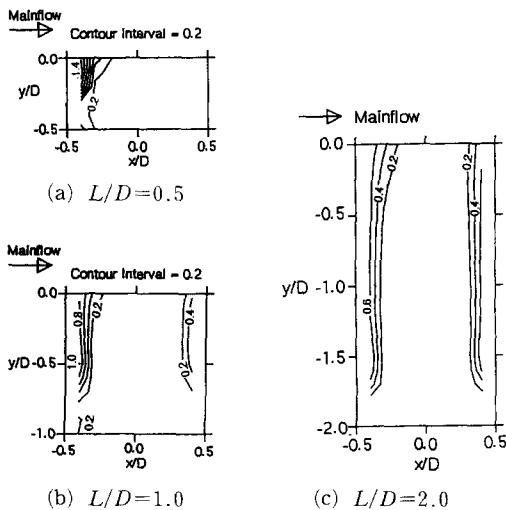


Fig. 13 Contours of total-pressure loss coefficient, C_{pt} , in $x-y$ plane at $z/D=0.0$ for $M=1.0$.

실이 크게 증가하는 경향을 보이며, L/D 가 0.5로 되면 주유동 하류쪽 벽면에서는 압력손실이 거의 없었다. L/D 에 관계없이 압력손실계수는 분사구멍의 입구로부터 $0.5D$ 떨어진 벽 근처에서 최대가 되었다. 이것은 분사구멍 입구 근처에 존재하는 유동의 박리영역이 이곳에서 끝나기 때문일 것이다. 그 하류에서의 압력손실은 주로 벽면 경계층에서의 마찰손실과 밀접한 관련이 있다. 특히 L/D 가 0.5일 때 압력손실계수의 최대값은 1.4 정도로 세 경우중 가장 크게 나타났다. 본 연구에서는 벽면으로부터 $0.1D$ 떨어진 곳까지 측정이 이루어졌으므로 벽과 매우 가까운 곳에서의 압력손실계수에 대한 정보는 알 수 없었다. Fig. 14는 분사율이 1.0일 때, 분사구멍 출구에서의 압력손실계수 분포를 보여 준다. L/D 가 0.5일 경우 압력손실은 주로 x 가 음인 영역 즉 주유동 상류쪽에서 발생하고 있고, 하류쪽에서는 압력손실이 거의 발생하지 않고 있다. 이와는 달리 L/D 가 2.0일 경우에는 분사구멍 출구에서의 압력손실이 주로 주유동 상류와 하류의 벽쪽에서 동시에 발생하고, x 가 0인 곳에서의 압력손실이 상대적으로 낮았다. 이와같이 분사구멍 출구에서 압력손실계수가 분사구멍의 길이에 따라 크게 달라지는 이유는 L/D 가 작을 때에는 주유동

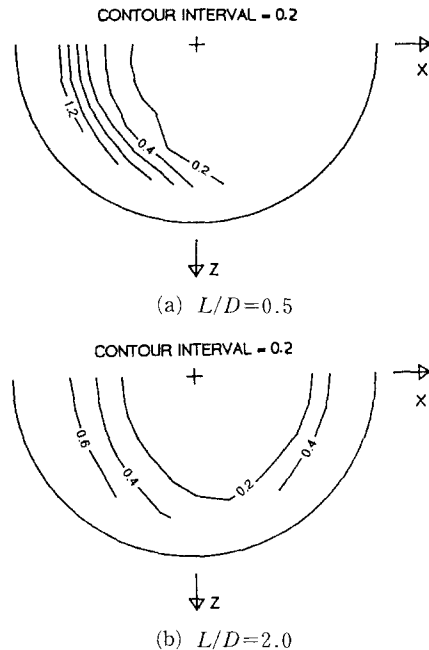


Fig. 14 Contours of total-pressure loss coefficient, C_{pt} , in $x-z$ plane at $y/L=0.0$ for $M=1.0$.

의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 반면에, L/D 가 크면 벽면에서의 마찰손실이 증가하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 분사구멍의 직경에 대한 길이의 비 즉 L/D 가 주유동에 수직으로 분사되는 냉각구멍 내부에서의 3차원유동 및 압력손실에 미치는 영향에 대하여 체계적으로 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분사율에 관계없이 L/D 가 작을수록 주유동이 분사구멍 내부의 유동에 더 큰 영향을 주었다. 특히 L/D 가 0.5일 경우 분사구멍 입구영역에서의 유동도 주유동에 의해 크게 변형되었다. 그 이유는 분사구멍 입구영역에서의 박리 및 재부착현상과 주유동의 영향이 직접적으로 간섭을 일으키기 때문이다.

(2) L/D 가 2.0일 때, 분사구멍 입구의 박리와 재부착 등의 복잡한 유동과 출구영역에서의 주유동에 의한 유동변화가 완전히 분리되어 서로에게 거의 영향을 주지 않았다.

(3) 분사구멍의 길이가 분사구멍 출구에서의 분사공기의 유출속도 분포에 큰 영향을 주었다. 즉 분사구멍의 길이가 짧을수록 분사공기의 유출속도의 불균일이 심화되었다. 따라서 이 경우 그 최대속도의 증가로 인한 국소 유출 모멘텀의 증가로 분사제트가 주유동으로 더 깊숙히 침투할 것으로 예상된다.

(4) L/D 가 2.0일 때, 압력손실은 주로 분사구멍 입구에서의 유동의 박리와 벽면에서의 마찰손실에 의해 발생하였다. 반면에 L/D 가 0.5일 경우의 압력손실은 주로 주유동과 분사유동의 간섭에 의해 발생하였다.

후 기

이 연구는 터보동력기계연구센터의 연구비지원으로 이루어졌습니다. 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) Walters, D. K. and Leylek, J. H., 1997, "A Systematic Computational Methodology Applied to a Three-Dimensional Film-Cooling Flow-field," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 777~785.

(5) 이상우, 주성국, 1997, "수직분사 막냉각구멍 내부에서의 3차원 유동특성," 대한기계학회논문집 (B), 제21권, pp. 1185~1197.

(6) 이상우, 김용범, 1996, "폭방향으로 분사되는 막냉각 제트의 3차원 유동특성 및 압력손실," 대한기계학회논문집 (B), 제20권, pp. 1363~1375.

(7) 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.

(8) 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 Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 310~319.

(9) 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.

(10) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23~34.

(11) 이상우, 윤택진, 1997, "유동변수가 5공프로 우브의 보정에 미치는 영향에 대한 실험적 연

- 구," 대한기계학회논문집 (B), 제21권, pp. 637~649.
- (12) 이상우, 윤태진, 1996, "벽면근접거리가 소형 원추형 5공프로우브의 보정에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 (B), 제20권, pp. 2693~2706.
- (13) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dordell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.