

주유동에 수직으로 분사되는 원형 충돌제트의 3차원 유동특성

이 상 우* · 정 철 희**
(1998년 4월 28일 접수)

Three-Dimensional Flow Characteristics of a Circular Impinging Jet Normally Oriented to Crossflow

Sang Woo Lee and Chul Hee Jeong

Key Words : Impinging Jet(충돌제트), Crossflow(주유동), Blowing Ratio(분사율), Scarf Vortex(스카프와류), Three-Dimensional Flow(3차원 유동), Total Pressure Loss(압력손실)

Abstract

Oil-film surface flow visualizations and three-dimensional flow measurements using a straight five-hole probe have been conducted for a circular impinging jet which is normally oriented to the crossflow in a channel. Throughout the experiments, the ratio of channel height to injection hole diameter, H/D , is fixed to be 1.0, and blowing ratio is varied to be 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0. From the surface flow visualizations for both top wall(target plate) and bottom wall, impinging jet region on the target plate can be clearly identified, and for the small value of $H/D = 1.0$, presence of the bottom wall changes the near-hole flow structure, significantly. The three-dimensional flow measurements show that in the downstream region of the injection hole, there exist a pair of counter-rotating vortices, called "scarf vortices", and the strength of the vortices strongly depends on the blowing ratio. In addition, a new flow model in the flow symmetry plane has been proposed for $H/D = 1.0$.

기 호 설 명

C_{pt} : 압력손실계수, 식 (1)
 D : 충돌제트 분사구멍의 직경
 H : 제트충돌채널의 높이
 J : 운동량유속비(momentum flux ratio)
 $= \rho_j V_j^2 / \rho_\infty U_\infty^2$
 L : 충돌제트 분사구멍의 길이
 M : 분사율(blowing ratio)
 $= \rho_j V_j / \rho_\infty U_\infty$
 P_t : 전압력
 $P_{t,\infty}$: 주유동의 자유유동 전압력
 Re_{∞} : Reynolds 수 = $U_j D / \nu_j$

U : x -축방향속도
 U_∞ : 채널입구 주유동의 자유유동속도
 V : y -축방향속도
 V_j : 분사구멍의 단면적에 걸쳐 평균된 분사속도
 W : z -축방향속도
 x : 주유동방향 좌표, Fig.3
 y : 채널의 높이방향 좌표, Fig.3
 z : 채널의 폭방향 좌표, Fig.3

그리스 문자

ν_j : 분사공기의 동점성계수
 ρ_j : 분사공기의 밀도
 ρ_∞ : 주유동의 밀도

1. 서 론

충돌제트(impinging jet)를 이용한 냉각은 다른

* 회원, 국립금오공과대학교 기계공학부

** 회원, 국립금오공과대학교 대학원 기계공학부

대류열전달에 의한 냉각보다 훨씬 큰 열전달계수를 얻을 수 있기 때문에 산업 전반에 널리 응용되고 있다. 이 냉각방식은 냉각대상 위치를 효과적으로 조절할 수 있고, 필요한 부분에 집중적으로 냉각을 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 최근 들어 가스터빈의 고온부품, 전자부품 등의 냉각에 광범위하게 적용되는 추세이다. 여러 열의 충돌제트가 동시에 분사되는 터빈 블레이드의 중간부(mid-chord)와 연소기 라이너의 경우, 특정한 열에서 분사되는 충돌제트는 그 상류 열에서 분사된 냉각공기에 의하여 그 유동특성이 크게 달라질 수 있다. Fig.1에서 각 분사구멍으로부터 나오는 평균 분사유량이 일정하다고 가정해도, 하류에 존재하는 분사구멍으로부터 나오는 충돌제트의 분사율(blowing ratio) $M (= \rho_j V_j / \rho_\infty U_\infty)$ 이 상류에서 분사되는 충돌제트의 분사율보다 더 작게 된다. 또한 블레이드 선단 충돌냉각에 사용된 냉각공기도 블레이드 중간부 충돌냉각제트의 거동에 영향을 미친다.

주유동(crossflow)에 분사되는 충돌제트의 유동은 크게 충돌냉각제트 유동과 수직단거리이착륙기(V/STOL)의 지면근처 유동으로 대별된다. 가스터빈 엔진 등에 응용되는 충돌냉각제트는 주로 분사구멍의 직경에 대한 제트충돌채널 높이의 비 H/D 가 비교적 작은 채널 내부로 분사되는 반면에(Fig.1), 수직단거리이착륙기(V/STOL)의 유동은 지면에 의해서만 둘러싸여 있다. 그리고 수직단거리이착륙기의 분사율이 충돌냉각 제트에 비하여 훨씬 더 크다. 주유동이 존재하는 채널로 분사되는 제트충돌냉각에 대한 연구는 주로 열전달 연구에 집중되어 있다.⁽¹⁻⁶⁾ 반면에 그 유동특성에 대한 연구는 주로 수직단거리이착륙기의 유동에 대하여 이루어졌다. Barata 등⁽⁷⁾과 Barata⁽⁸⁻⁹⁾에서는 수직단거리이착륙기 항공기의 이륙 및 착륙시에 발생하는 충돌제트의 유동특성에 대하여 연구하였다. 이 수직단거리이착륙기가 지면근처에 있을 때 바람이 불거나 비행기가 벽면과 평행한 방향으로 움직이면, 이 대기의 흐름과 벽면제트가 그 상류쪽에서 충돌하여 Fig.2와 같은 스카프 와류(scarf vortex)가 형성된다. 이와같은 복잡한 유동현상이 충돌냉각채널 유동에서도 똑같이 발생할 것으로 예상된다. 그러나 제트충돌냉각의 경우 수직단거리이착륙기의 유동보다 분사율이 비교적 작고, H/D 가 작은 제트충돌채널(Fig.1)의 상하벽에 의해 이 스카프와류의 유동이 제한되므로

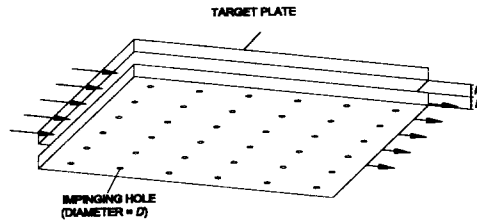


Fig.1 Typical impingement cooling.

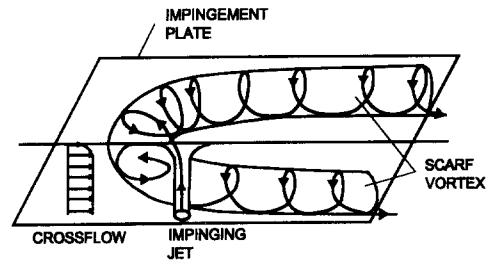


Fig.2 Three-dimensional sketch of a scarf vortex formed around an impinging jet in an external crossflow (Barata⁽⁹⁾).

앞의 결과들이 그대로 적용될 수 없다. 최근 국내에서도 터빈 블레이드 선단에 분사되는 충돌제트의 유동과 열전달특성에 대한 연구⁽¹⁰⁻¹²⁾가 수행된 바 있다. 그러나 주유동이 제트충돌채널로 분사되는 충돌제트의 3차원 유동특성에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 주유동이 존재하는 제트충돌채널 내부로 수직 분사되는 원형 충돌제트의 3차원 유동특성에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 벽면유동의 가시화연구와 3차원 유동장 측정 실험을 수행하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 Fig.3에서와 같이 크게 풍동, 제트충돌채널, 분사구멍, 충돌제트 분사장치, 프로우브 이송장치 등으로 구성되어 있다. 풍동의 출구속도는 최대 40m/s까지 연속적인 조절이 가능하며, 난류강도는 대략 0.5% 이내이다. 제트충돌채널은 두께 20mm의 아크릴 판으로 제작되었고, 그 크기는 폭 및 높이가 각각 600mm

와 60mm, 길이는 1600mm이다. 분사구멍의 상류 채널 상하벽에 직경이 1.80mm인 트립와이어(trip wire)가 설치되어 있으므로, 풍동으로부터 유입된 균일한 유동은 상하벽에서 난류경계층 유동으로 발달된다. 충돌제트의 분사는 제트충돌채널 아래벽에 설치된 분사장치를 통하여 이루어진다. 이 분사장치는 송풍기, 오리피스(orifice) 유량계, 압력조정실(settling chamber), 원통형 플레넘(plenum), 분사구멍 등으로 구분된다. 송풍기로부터 오리피스를 거쳐 유입된 공기는 압력조정실로 들어 오고, 이것은 내경이 195mm인 원통형 플레넘으로 공급된다. 이 플레넘에는 입구 메쉬스크린(mesh screen), 허니콤(honeycomb), 3개의 메쉬스크린 등이 하류방향으로 각각 설치되어 있다. 여기서 가장 하류에 설치된 메쉬스크린과 분사구멍 입구까지의 거리는 분사구멍 내경의 2배이다. 충돌제트 분사구멍의 내경 D 는 60mm이며, 이 분사구멍의 중심과 원통형 플레넘의 중심선은 서로 잘 일치되도록 제작하였다. 분사공기 공급용 송풍기의 정압은 400mmAq이고, 풍량은 0.058m³/s이다. 분사공기 유량을 측정하기 위해 사용된 오리피스는 국제 표준규격인 ISO 5167(13)에 의거하여 제작하였는데, 코너태핑(corner tapping) 형의 오리피스를 채택하였다. 본 실험에서는 분사율에 관계없이, 분사공기의 유량을 정확히 측정하기 위해 직경이 서로 다른 4개의 오리피스 판을 제작하여, 측정유량에 따라 적절히 사용하였다. 일반적으로 오리피스 판의 유량계수(discharge coefficient)는 Reynolds 수에 의존하므로, 반복계산으로 최종값을 구하였다.

본 연구에서는 충돌제트 분사구멍 출구의 중심을 좌표계의 원점으로 설정하였고, 하류방향을 x -축, 높이방향을 y -축, 그리고 채널의 폭방향을 z -축으로 설정하였다. 프로우브의 정밀한 이송을 위해 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 이 장치는 세 축방향으로 컴퓨터에 의해 자동이송되는데, 각 이송축은 볼나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유닛, 스테핑모터 및 스테핑모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. 이 3차원 이송장치는 수평조절이 가능한 지지대에 탑재되어 있고, 채널 하류쪽에 위치한다.

본 연구에서의 압력측정은 IBM PC AT-386으로 전체 측정시스템을 온라인화하였으며, 컴퓨터에는 GPIB 및 다기능입출력보드(National

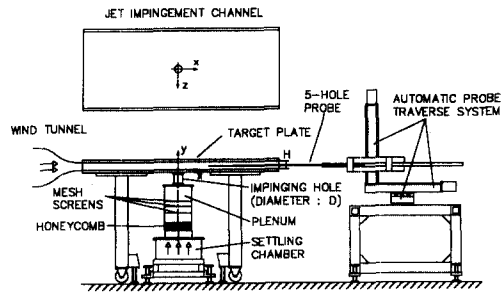


Fig.3 Experimental apparatus.

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 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. 본 연구에서는 분사구멍 하류에서의 3차원유동 및 압력의 손실을 측정하기 위해 지지대 형태가 직선인 원추형 5공프로우브를 사용하였다. 이 5공프로우브는 미국 United Sensors 사에서 특별한 사양으로 주문, 제작되었다. 이 5공프로우브의 선단 직경은 3.2mm(0.125인치)이고, 프로우브 지지대는 6.4mm(0.25인치)로 보강되어 있다. 프로우브의 총 길이는 1.12m(44인치)이며, 이중 보강되지 않은 부분의 길이는 프로우브 선단에서 0.254m(10인치) 정도이다. 본 연구에서는 Fig.3과 같이 이 직선형 5공프로우브를 채널 벽면과 평행하게 배치하여 충돌제트 하류에서의 3차원유동 및 압력손실을 측정하였다. 본 실험에서는 프로우브보정법(non-nulling method)을 적용하여 5공프로우브를 보정하였다.^(14, 16) 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 압

렉스캐너도 다기능입출력보드를 이용하여 제어하였다.

2.2 실험조건 및 측정오차

본 연구의 실험장치는 실제 터빈 블레이드 충돌냉각의 대표적인 실험조건과 동일하도록 제작되었다. 모든 실험에서 채널의 폭은 600mm로 고정하였고, 충돌제트 분사구멍의 내경(D), 채널의 높이(H), 분사구멍 길이(L) 등을 모두 60mm로 일정하게 유지하였다. 따라서 분사구멍의 직경에 대한 분사구멍 길이의 비 L/D 와 분사구멍의 직경에 대한 채널 높이의 비 H/D 가 모두 1.0이 된다. 채널 입구의 자유유동속도(U_∞)와 자유유동 난류강도는 10m/s와 0.5%로 각각 일정하게 유지하였다. 트립와이어를 지나 발달되는 입구 경계층유동의 특성을 알기 위해 분사구멍 근처에서 평균속도 및 난류성분을 측정하였다. 그 결과 경계층유동의 z -축방향 균일성을 확인하였고, 경계층두께는 좌표계의 원점에서 약 15.0mm이었다.

실제 터빈 블레이드 충돌냉각에서의 대표적인 실험조건⁽⁶⁾과 같이, Fig.1의 H/D 를 1.0으로, 각 제트충돌 분사구멍 사이의 폭을 $8D$ 로 하자. 그리고, 이때 채널단면에서의 속도가 균일하고 각 분사구멍으로부터 나오는 유량이 일정하다고 가정하자. 여기서 블레이드 선단으로부터 들어오는 냉각공기에 의한 영향을 무시하고 충돌제트 분사구멍의 제 1 열에서 제 10 열까지의 평균 분사율을 계산해 보면 $\infty, 10.19, 5.10, 3.40, 2.55, 2.04, 1.70, 1.46, 1.27, 1.13$ 등이 된다. 그런데 실제로는 블레이드 중간부 상류에서 분사된 충돌냉각공기 뿐만 아니라 선단 냉각공기까지 분사율에 영향을 주므로 실제 분사율은 이 값들보다 더 작아질 것이다. 본 연구에서는 분사율을 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 등으로 변화시켰다. 이에 해당되는 운동량유속비(momentum flux ratio) $J(= \rho_j V_j^2 / \rho_\infty U_\infty^2)$ 는 각각 1.0, 4.0, 9.0, 16.0 등이다. 본 연구에서는 제트 충돌채널의 입구 자유유동속도를 10m/s로 유지하였으므로 충돌냉각 구멍에서 실제로 분사되는 평균분사속도는 각각 10m/s, 20m/s, 30m/s, 40m/s 등이 된다. 분사율이 1.0일 때 평균분사속도(V_j)와 분사구멍의 내경(D)에 근거한 Reynolds 수, Re_D 는 3.83×10^4 이다.

실제 5공프로우브를 이용한 3차원속도의 측정

은 x/L 이 4.0과 8.0인 $y-z$ 평면에서 이루어졌다. y -축방향으로는 6mm 간격으로 측정이 이루어졌고, z -축방향으로는 전체 채널 단면 중 z 가 음인 곳에서 12mm 간격으로 실험이 진행되었다. 특히 채널 모서리에서 발생하는 와류를 자세히 알기 위해, 제트충돌채널의 측벽으로부터 6mm 떨어진 곳에서도 측정이 이루어졌다. 따라서 5공프로우브는 각 $y-z$ 평면에서 y -축방향으로 9 측정점으로 이송되고, z -축방향으로는 26 측정점으로 이송되었다. 따라서 총 측정점의 수는 234 개이다. 이와같이 제트충돌채널의 벽면으로부터 적어도 6mm 이상 떨어진 곳에서 5공프로우브를 이용한 측정이 이루어진 이유는 벽면근접에 의한 오차를 방지하기 위해서이다⁽¹⁶⁾.

본 연구에 사용된 풍동은 실험조건인 10m/s에서 유동의 균일성이 1% 이내이며, 5공프로우브의 이송오차는 ± 0.05 mm 이내이다. 분사공기 유량 측정에 사용된 오리피스 측정오차는 ISO 5167⁽¹³⁾에서 제시된 오차해석 방법으로 계산하였다. 그 결과 측정유량의 오차는 각 측정 유량상태에서 총 유량의 $\pm 0.5\%$ 이내로 주어졌다. Abernethy 등⁽¹⁷⁾의 방법을 적용한 오차해석(uncertainty analysis) 결과, 압력측정의 오차는 자유유동 동압의 $\pm 0.7\%$, 흐름각의 오차범위는 $\pm 1.2^\circ$ 도, 속도의 크기의 오차범위는 $\pm 1.6\%$ 로 나타났다.

3. 결과 및 검토

3.1 주유동이 존재하는 채널에 수직으로 분사되는 충돌제트의 일반적인 유동특성

Fig.2는 Barata⁽⁹⁾가 제시한 스카프와류의 개략도이다. 이 유동은 수직단거리이착륙기가 벽면 근처에 있을 때 발생하는 것이다. 따라서 본 연구와 같이 제트충돌채널로 분사되는 충돌제트의 유동에 그대로 적용될 수는 없지만, 스카프와류의 특성을 이해하는데는 큰 도움이 된다. 만약 주유동이 존재하지 않는다면 충돌제트는 360도 모든 방향으로 벽면제트의 형태로 퍼져 나갈 것이다. 그러나 주유동이 존재하면 주유동 상류쪽 벽면제트는 주유동과 충돌하여 벽면으로부터 분리되면서 스카프 형태의 큰 와류를 생성한다. 이 와류는 충돌제트를 둘러싸는 형태로 하류쪽으로 변형되어 와류 중심의 연장선이 주유동과 거의 평행하게 된다. 이 스카프와류의 전체적인 형상은 장애물이 있는 경계층유동에서 발생하는 말굽

와류(horseshoe vortex)와 비슷하나 그 생성원인은 서로 다르다. 특히 이 두 와류의 회전방향은 서로 반대이고, 스카프와류가 그 강도 면에서 훨씬 크다. Barata의 결과는 분사율이 제트충돌냉각과는 달리 외부유동(external flow)이고, 분사율이 본 연구의 경우보다 훨씬 크므로 충돌냉각제트 유동과의 정량적인 비교가 불가능하다.

기존의 연구결과들^(7,9)을 종합하고 본 연구의 유동의 가시화 결과 및 3차원 측정 데이터를 근거로 하여, Fig.4와 같은 제트충돌냉각의 새로운 대칭면 유동모델을 제시하였다. 이것은 본 연구의 실험조건과 같이 H/D 와 L/D 가 모두 1.0인 경우에 해당된다. 충돌제트는 분사구멍의 입구로 들어오면, 직각 입구면 때문에 분사구멍의 내부 벽면에서 유동의 박리가 발생하고, 분사구멍의 내부에서부터 주유동의 영향으로 충돌제트의 변형이 시작된다.⁽¹⁸⁾ 분사구멍을 벗어난 충돌제트는 주유동 하류방향으로 휘어짐에 따라, S_1 로 표시된 충돌점(impingement point)은 분사구멍의 중심보다 조금 하류에 위치하게 된다. 채널 윗벽면과 충돌한 충돌제트는 360도 전 방향으로 벽면제트(wall jet) 형태로 밀려 나간다. 그러나 주유동 상류쪽, 즉 $-x$ -축방향으로 이동한 충돌 벽면제트는 분사구멍 직경의 몇 배 정도 상류로 이동한 뒤, S_2 로 표시된 박리점(separation point)에서 벽면으로부터 박리된다. 이렇게 박리된 충돌제트 유동은 주유동과의 상호작용으로 그 방향이 급격히 전환되어 아래쪽 벽면으로 향한다. 아래쪽 벽면 근처에서 하류로 이동하던 충돌제트 유동의 일부는 윗면 벽면제트로 빨려 들어가(entrain) 다시 상류로 향하고 나머지는 대칭면을 벗어나 복잡한 나선운동을 하며 하류로 이동한다. 이와같이 분사구멍 상

류에서 주유동과 상류쪽 벽면제트의 상호작용으로 생성되는 큰 와류가 바로 스카프와류이다. 이 스카프와류 상류에서는 주유동이 윗벽면과 분리된 뒤 아래벽면 쪽으로 가속되면서 아래벽면 근처 대칭면에서 제트유동과 함께 하류로 이동하거나, 대칭면의 좌우로 분리되어 하류로 이동한다. 주유동이 윗벽면으로부터 박리되는 위치인 S_1 은 최대침투점(maximum penetration point)으로 불리는데, 이것은 분사된 유체가 상류방향으로 거슬러 이동할 수 있는 최대 위치를 나타낸다. 따라서 이 위치는 스모크 등을 이용한 충돌제트 가시화로 쉽게 관찰된다.⁽⁹⁾ 반면에 충돌면 상류의 박리점 S_2 는 벽면 유적가시화에서 선명하게 확인된다. 이 최대침투점 S_1 과 박리점 S_2 사이의 윗벽면 근처에서는 유속이 거의 0에 가깝다. 스카프와류의 중심 아래에서 하류로 이동하는 유동은 충돌제트 분사구멍의 상류 S_3 에서 다시 박리된다. 실제로 S_1 , S_2 , S_3 등에서는 유동이 벽면으로부터 박리될 뿐만 아니라, 각 점을 중심으로 폭방향으로도 나누어진다. 따라서 이들 세 점 모두 안장점(saddle point)이라고 할 수 있다. 특히 S_3 는 충돌제트 분사 위치에 제트가 아닌 원형실린더가 있는 경우에 발생하는 안장점과 거의 유사하다.

3.2 유동의 가시화 연구

벽면에서의 유선을 가시화하는 기법에는 유적법(oil-dot method), 유막법(oil-film method) 등이 있는데, 이것들은 사용하는 기름 및 껍적 표시용 분말의 종류에 따라 다시 여러가지 종류로 구분된다. 본 연구에서는 흑연분말(carbon black)과 등유(kerosene)의 혼합물을 이용한 유막법을 적용하였다. 등유는 적당한 증발성을 가지고 있으므로 실험이 끝난 뒤 윤활유와 같이 흘러 내리지 않으면서 흑연가루의 껍적을 잘 나타내 준다. 흑연분말과 등유의 혼합비는 실험할 유동조건에 따라 크게 달라지므로 그 비율을 잘 결정해야 한다. 실험 전에 제트충돌채널의 상하벽에 흰색 접착지(contact paper)를 부착하고, 이 표면에 적당히 배합된 흑연분말과 등유의 혼합물을 부드러운 붓을 이용하여 균일하게 바른다. 그뒤 풍동 및 송풍기를 동시에 가동시키면 흑연가루가 유동을 따라 벽면 위를 이동하고, 이 과정에서 등유가 서서히 증발한다. 등유가 완전히 증발한 뒤 조심스럽게 접착지를 벽면으로부터 분리하여 두터운 흰색 종이에 붙이고, 아크릴스프레이(Krylon, 1303)로 코팅하면 가시화 실험이 완료된다. 이렇

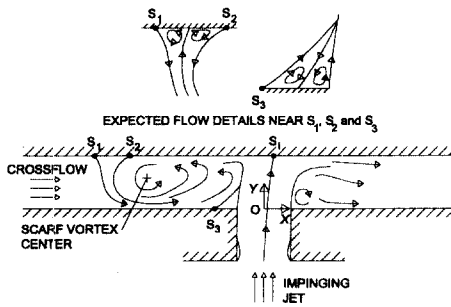


Fig.4 Symmetry-plane flow structure of an impinging jet in a channel crossflow.

게 처리된 가시화 궤적은 접촉에 의해 훼손되지 않고 영구보존이 가능하며, 사진을 찍지 않고 칼라복사만으로 바로 재생할 수 있다.

Fig.5와 Fig.6은 각각 분사율이 2.0과 4.0일 경우의 벽면가시화 결과이다. Fig.5(a)와 Fig.6(a)에서 흰선으로 표시된 원은 아랫벽면의 분사구멍 위치를 윗벽면에 그대로 옮겨 놓은 것이고, Fig.5(b)와 Fig.6(b)의 흰색 포물선은 윗벽면(충돌면)의 충돌제트 박리선(곡선 A-S₂-B)을 아랫벽면에 똑같이 그린 것이다. 본 연구에서는 z/D 가 (-)인 곳에서의 가시화 결과를 제시하였다. 따라서 Fig.5(a)와 Fig.6(a)에서 각 가시화 사진의 하단은 z/D 가 -5.0인 곳, 즉 제트충돌채널의 측벽이 존재하는 곳이고, Fig.5(b)와 Fig.6(b)에서는 각 가시화 사진 상단이 측벽이 위치하는 곳 ($z/D=-5.0$)과 일치한다.

먼저 채널 윗벽면의 결과(Fig.5(a), Fig.6(a))를 살펴보면, 전체 벽면은 말굽모양의 박리선(곡선 A-S₂-B)에 의해 주유농 영역과 분사제트가 흐르는 영역으로 명확하게 구분된다. 이 박리선 상류의 유적은 주유농의 흐름을 나타내고, 그 하류의 유적은 충돌제트의 흐름을 표시해 준다. 이 충돌제트 영역은 분사율이 클수록 상류방향과 폭방향으로 크게 확대되며, 분사된 공기는 충돌점을 중심으로 방사선 형태로 움직이고 있다. 분사 충돌유농의 박리점인 S₂는 분사율이 2.0일 때 분사구멍의 중심으로부터 상류로 대략 0.9D 정도 밖에 떨어져 있지 않지만, 분사율이 4.0일 경우에는 분사구멍 중심과의 거리가 대략 2.4D로 확대된다. 분사율이 2.0일 경우(Fig.5(a)) 주유농의 박리점인 최대침투점 S₁이 명확하게 확인된다. 그러나 분사율이 4.0일 경우에는 그 위치가 본 연구의 가시화 범위를 벗어났다.

채널 아랫벽면의 유동패턴은 윗벽면보다 훨씬 복잡하다. 분사구멍 직경에 대한 제트충돌채널의 높이의 비 H/D 가 충분히 크다면 스카프와류의 영향이 아랫벽면까지 미치지 못하는 것일 것이다. 그러나 본 연구처럼 H/D 가 1.0인 경우에는 아랫면 근처의 유동이 충돌제트 유동에 의해 직접적으로 영향을 받는다. 특히 분사율이 클 때 그 영향은 지대하다. Fig.5(b)와 Fig.6(b)는 아랫벽면에서의 유동의 가시화 결과이다. 전체적으로 볼 때, 분사율이 2.0일 경우에는 벽면에서의 유적 분포가 비교적 균일하지만, 분사율이 4.0일 때에는 분

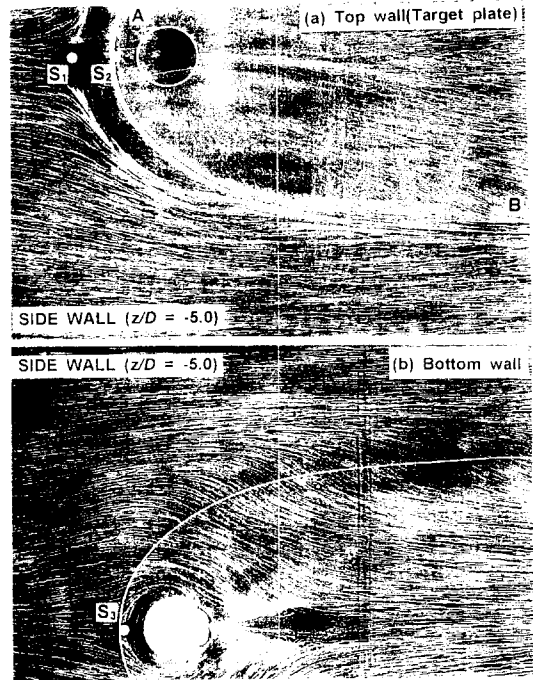


Fig.5 Oil-film surface flow visualizations for $M = 2.0$.

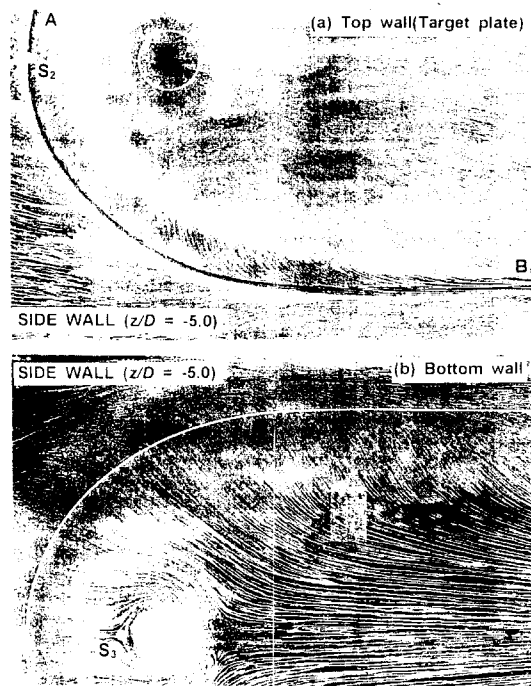


Fig.6 Oil-film surface flow visualizations for $M = 4.0$.

사구멍 하류에서의 유적은 매우 굵고 진한 반면에 분사구멍의 상류와 이로부터 하류로 U-자 모양을 한 영역에서는 유적이 매우 가늘고 얇음을 확인할 수 있다. 일반적으로 분사율이 클수록 스카프와류가 크게 강화되고 이에 따라 다가오는 주유동의 변화도 심화된다. 분사율이 4.0으로 클 때 유적의 불균일이 심한 이유는 윗벽면과 충돌한 분사제트가 스카프와류의 형태로 아랫면으로 이동하면서 U-자 모양의 영역에서 유적을 강하게 밀어내기 때문이다. 특히 분사구멍 하류에서의 유적이 상대적으로 굵고 진한 것은 다른 곳에 비하여 그 곳에서의 유속이 매우 작기 때문이다. 이것은 유동측정 결과로부터 확인되었다. 분사구멍 근처에서의 아랫벽면 유선들을 분석해 보면, 분사율에 관계없이 박리점 S_3 와 분사구멍 하류에서의 역류(reverse flow)가 명확히 관찰되었다. 분사율이 클수록 S_3 와 분사구멍 사이의 박리영역이 더 좁았고, 분사구멍을 휘돌아 그 하류 중심부로 향하는 유동이 훨씬 강하였다. 이것은 분사율이 클수록 분사구멍 하류에서 발생하는 후류(wake)에서의 압력강하가 훨씬 커짐을 의미한다. 분사율이 2.0일 때 분사구멍 하류의 역류 영역은 분사율이 4.0인 경우에 비하여 그 폭은 더 좁았지만 길이는 훨씬 길게 나타났다.

3.3 제트충돌채널 하류에서의 3차원유동 및 압력손실계수

Fig.7과 Fig.8은 분사구멍 하류의 대칭면에서 분사율을 변화시키면서 측정된 실험결과이다. Fig.7(a)는 x/D 가 4.0에서 측정된 무차원 x -축방향 속도 U/U_∞ 의 분포이다. 분사율이 3.0 이상일 경우에는 분사제트가 주유동을 뚫고 채널 윗벽면과 강하게 충돌하므로, 그 하류에서는 벽면제트 형태의 유동이 존재한다. 따라서 분사율이 클수록 윗벽면과 아랫벽면 근처의 유속 차이가 매우 커진다. 특히 분사율이 4.0일 때 아랫벽면 근처에서 U/U_∞ 가 0.5 정도로 매우 작았다. 이곳은 Fig.6(b)에서 나타나는 분사구멍 하류의 유적이 비교적 진한 영역과 일치하는데, 충돌제트의 분사로 분사구멍을 중심으로 발생하는 강력한 U-자형 스카프와류가 주유동을 효과적으로 차단하기 때문이다. 반면에 분사율이 1.0과 2.0에서는 U/U_∞ 의 최대치가 아랫벽면 근처에서 발생

하였다. 분사율이 2.0보다 작을 경우에도 분사구멍 하류 아랫벽면 근처에서는 후류 영역이 여전히 존재한다. 이 후류영역에서의 압력강하로 인하여 주유동이 제트 대칭면으로 유입되며, 이에 따라 아랫벽면 근처에서 벽면제트 형태의 유동이 발생하게 된다.⁽¹⁹⁾ x/D 가 8.0에서는(Fig.7(b)) x/D 가 4.0일 때의 경향이 그대로 유지되었지만 U/U_∞ 의 구배가 현저히 줄어들었다.

Fig.8은 x/D 가 4.0과 8.0일 때 유동 대칭면에서의 무차원 y -축방향 속도 V/U_∞ 의 분포를 그린 것이다. 분사율이 1.0일 경우에는 V/U_∞ 의 값이 항상 양의 값을 갖는다. 이것은 분사된 제트가 윗벽면의 영향을 거의 받지 않고, 하류에서도 그 수직분사 모멘텀이 비교적 크게 유지되고 있기 때문이다. 그러나 분사율이 증가할수록 윗벽면과의 충돌이 증가하여 대체로 y -축방향속도가 점점 감소한다. 특히 분사율이 4.0으로 증가하면 윗벽면 근처에서의 y -축방향속도는 음의 값을 갖는데, 이것은 윗벽면 근처에서 윗벽면에서 아랫벽면 쪽으로 이동하는 속도성분이 존재함을 의미한다. 일반적으로 분사율이 크면 충돌제트가 주유동을 효과적으로 차단하므로 분사제트 제적 하류 후류영역에서의 압력강하가 커진다. 분사율이 4.0일 때 V/U_∞ 가 음인 속도성분이 존재하는 이유는 이 후류영역에서의 압력강하가 윗벽면 근처에서 하류방향으로 이동하는 벽면제트를 후류영역 쪽으로 흡인하기 때문이다. x/D 가 8.0일 때에는 V/U_∞ 의 값이 현저히 줄어들었지만, 정성적으로 상류에서의 유동형태가 크게 변화하지는 않았다.

Fig.9는 분사율이 3.0일 때 $y-z$ 평면에서 2차유동벡터의 하류방향 변화를 측정된 결과이다. x/D 가 4.0일 때, z/D 가 -2.0과 -4.0 사이에서는 강력한 시계방향의 와류가 존재하였다. 이 와류가 바로 앞에서 언급한 바 있는 스카프와류이다. 이 와류의 중심은 z/D 가 대략 -3.0인 곳에 존재하였고, 하류로 이동할수록(Fig.9(b)) 이 중심이 채널의 대칭면 쪽으로 이동하였다. x/D 에 관계없이 2차유동의 크기는 제트충돌채널의 폭방향 중심부($x/D = 0.0$)와 측벽 근처에서는 매우 작았고, z/D 가 -3.0 근처에서 가장 크게 나타났다.

그리고 측벽 모서리에도 시계방향의 와류가 발생하였는데, 이것은 스카프와류와는 달리 하류로 이동할수록 그 강도가 점점 커졌다. 이 와류는 일반적으로 덕트 또는 채널의 모서리에서 발견되는 모서리와류(corner vortex)이다.

Fig.10과 Fig.9(b)를 비교하면, 분사율이 1.0에서 4.0으로 변화할 때 x/D 가 8.0인 $y-z$ 평면에서 2차유동벡터의 변화 경향을 파악할 수 있다. 분사율이 1.0일 때(Fig.10(a)), 충돌제트 분사의 영향이 조금 남아 있기는 하지만 단면 전체에 걸쳐 2차유동이 매우 작은 반면, 측벽 근처 모서리와류 영역에서는 2차유동이 비교적 크게 나타나고 있다. 분사율이 2.0보다 커지면 스카프와류가 뚜렷하게 관찰되고, 분사율의 증가가 스카프와류 영

역의 확장으로 이어진다. 이와같은 스카프와류 영역의 확대로 인하여 채널 측벽 근처에서 발생하는 모서리와류의 영역이 크게 축소되고 그 위치도 아랫벽면 근처에서 윗벽면쪽 모서리로 이동한다. 특히 분사율이 4.0일 경우에는 모서리와류의 명확한 관찰이 불가능하였다. 앞에서 언급한 바와같이 분사율의 증가가 스카프와류 영역의 확장은 가져왔지만, 이것이 반드시 스카프와류에 의한 2차유동의 강화로 이어지는 않았다. 분사율이 3.0에서 4.0으로 증가할 경우, 분사모멘텀의 증가가 오히려 대칭면 및 측벽 근처에서 2차유동의 감소를 초래하였다.

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

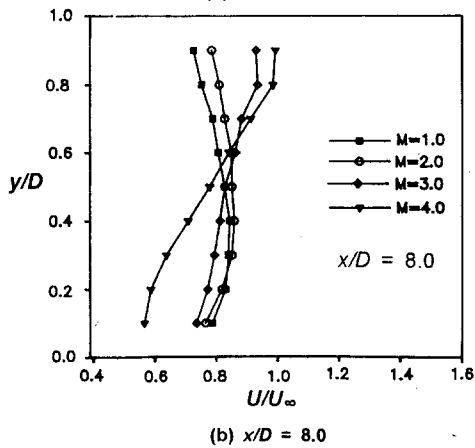
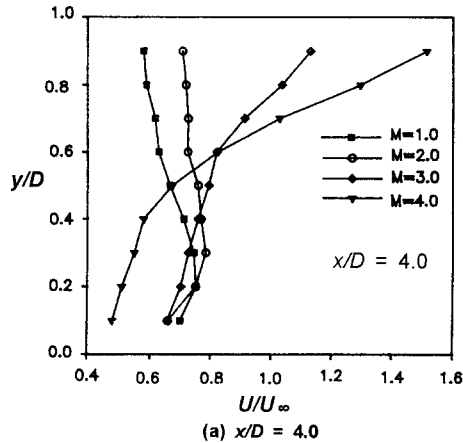


Fig.7 Profiles of x -directional velocity, U/U_∞ , in x - y plane at $z/D = 0.0$.

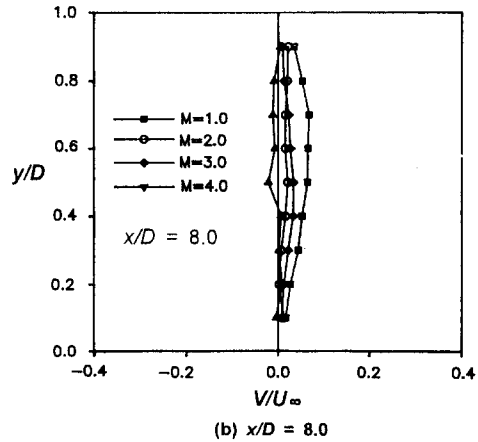
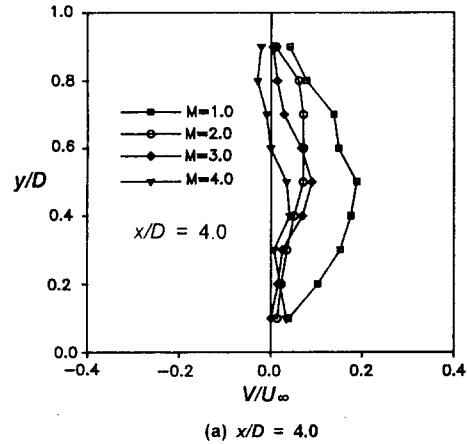


Fig.8 Profiles of y -directional velocity, V/U_∞ , in x - y plane at $z/D = 0.0$.

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

여기서 $P_{t,\infty}$ 는 제트총돌체널 상류에서 측정된 전압(total pressure)이고, P_t 는 각 측정위치에서 5공프로우브로 측정된 전압이다. 일반적으로 주유동이 흐르는 채널 내부에 유동의 장애물이 존재한다면 항상 압력손실이 발생할 것이다. 그러나 장애물 대신 총돌체트가 분사되면 분사 운동량에 의하여 전압력의 증가를 초래할 수도 있을 것이다. 실제로 Lee 등⁽²⁰⁾은 경사진 막냉각 제트가 주

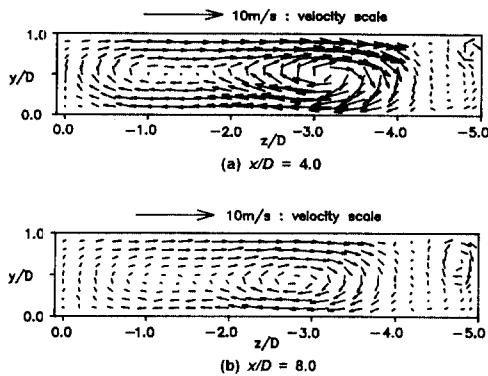


Fig.9 Projection of velocity vectors on y - z plane for $M = 3.0$.

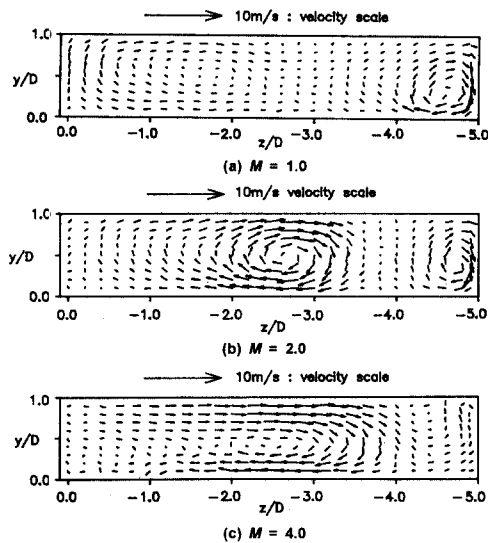


Fig.10 Projection of velocity vectors on y - z plane at $x/D = 8.0$.

유동과 같은 방향으로 분사되면, 전압력이 증가하여 압력손실계수가 음의 값을 가짐을 밝힌 바 있다. 그렇지만 본 연구와 같이 주유동에 수직으로 분사되는 총돌체트의 경우(Fig.11, Fig.12), 압력손실계수는 분사술에 관계없이 항상 양의 값으로 나타났다. 이것은 수직 총돌체트가 분사될 경우에도 항상 압력손실이 발생하고 있음을 의미한다.

Fig.11은 분사술이 3.0일 때 y - z 평면에서 압력손실계수 분포의 하류방향 변화를 보여준다. 압력손실계수는 스킨프와류와 모서리와류의 중심 근처에서 큰 값을 갖는 반면에, z/D 가 0.0과 -2.0 사이의 윗벽면 근처와 두 와류의 사이에서 작은 값을 갖는다. 대칭면 근처 윗벽면에서는 총

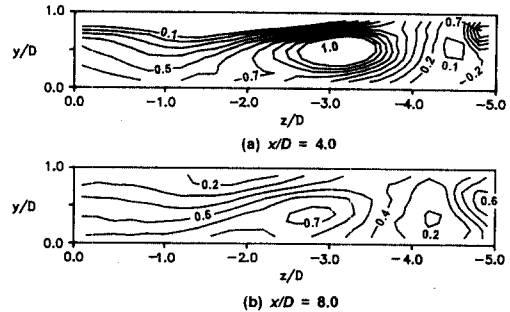


Fig. 11 Contours of total-pressure loss coefficient, C_{pt} , in y - z plane for $M = 3.0$.

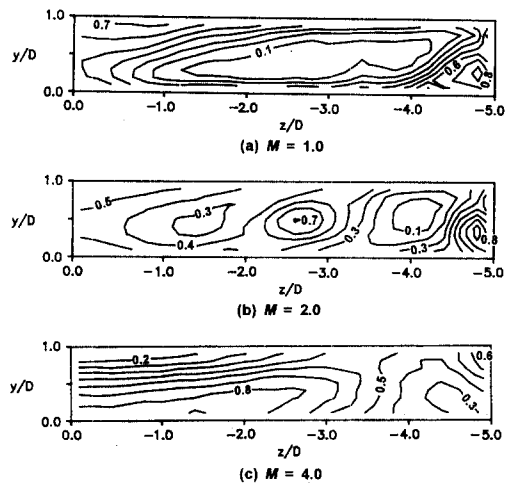


Fig. 12 Contours of total-pressure loss coefficient, C_{pt} , in y - z plane at $x/D = 8.0$.

돌제트가 벽면제트 형태로 가속되고, 스카프와류와 모서리와류 사이에서는 주유동이 스카프와류에 떠밀려 측벽쪽으로 밀려나면서 유속이 증가하기 때문에 이 두 곳에서의 압력손실이 비교적 작다. 압력손실계수는 하류로 이동할수록 그 절대값 및 구배는 줄어 들었지만 그 정성적인 분포는 변화하지 않았다.

Fig.12와 Fig.11(b)를 비교하면 x/D 가 8.0인 $y-z$ 평면에서 분사울의 변화에 따른 압력손실계수의 분포를 알 수 있다. 압력손실계수는 분사울에 관계없이 항상 양의 값으로 나타났다. 분사울이 1.0

일 경우 압력손실은 주로 제트가 분사되는 대칭면과 벽면 근처에서 크게 발생하였는데, 특히 채널의 측벽 근처 모서리에서 가장 크게 나타났다. 이와같은 현상은 분사울이 2.0일 때에도 지속되었다. 분사울이 2.0일 때 y/D 가 0.5인 위치에서 폭방향으로 이동함에 따라서, 압력손실계수가 증가 및 감소를 되풀이하고 있는 것이 특이하다. 분사울이 3.0보다 클 경우에는 윗벽에서의 압력손실은 상대적으로 작은 반면, 아랫벽면 근처에서 가장 큰 값을 갖는다. 이것은 분사울이 4.0일 때 아랫벽면에서 발견되는 유적이 매우 굵고 진한 영역의 존재와 관계가 있다(Fig.6(b)). 일반적으로 분사울에 관계없이 채널의 모서리에서는 압력손실이 상대적으로 크게 나타났다. 각 분사울에서 측벽 근처에서 발생하는 압력손실의 크기와 그 발생 위치는 각각 모서리와류의 강도 및 그 위치 변화와 밀접한 관련이 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 주유동이 존재하는 채널 내부로 수직 분사되는 충돌제트의 3차원 유동특성에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 채널의 윗벽면(충돌면)과 아랫벽면에서 유동의 가시화 연구를 수행하였고, 분사구멍 하류에서 3차원유동을 측정하였다. 이때 분사구멍의 직경에 대한 제트충돌 채널의 높이의 비(H/D)는 1.0로 일정하게 유지하였고, 분사울은 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 등으로 변화시켰다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유동의 가시화로부터 주유동과 충돌제트의 상호작용이 자세히 파악될 수 있었다. 특히 충돌면(윗벽면)에서 주유동 영역과 충돌제트 영역이

명확하게 구분되었고, 아랫벽면의 존재로 인해 스카프와류 등을 포함하는 3차원 유동특성이 크게 달라졌다.

2. 3차원유동장 측정결과, 분사구멍 하류에서 스카프와류 유동구조가 확인되었고, 분사울이 클수록 이 스카프와류 영역은 크게 확대되었다.

3. 충돌제트 분사구멍 하류에서는 분사울에 관계없이 항상 압력손실이 발생하였고, 분사울이 클수록 압력손실은 대체로 증가하는 경향을 보여주었다.

4. 본 연구에서는 이와같은 측정결과를 근거로 충돌제트 대칭면에서의 새로운 유동모델을 제시하였다.

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) Sparrow, E. M., Goldstein, R. J. and Rouf, M. A., 1975, "Effect of Nozzle-Surface Separation Distance on Impingement Heat Transfer for a Jet in a Crossflow," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 528 ~ 533.
- (2) Goldstein, R. J. and Behbahani, A. I., 1982, "Impingement of a Circular Jet With and Without Cross Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 1377~1382.
- (3) Florschuetz, L. W., Metzger, D. E. and Su, C. C., 1984, "Heat Transfer Characteristics for Jet Array Impingement With Initial Crossflow," *ASME Journal of Heat transfer*, Vol. 106, pp. 34~41.
- (4) Hollworth, B. R. and Cole, G. H., 1987, "Heat Transfer to Arrays of Impinging Jets in a Crossflow," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 564~571.
- (5) Metzger, D. E. and Korstad, R. J., 1992, "Effects of Cross flow in Impingement Heat

- Transfer," *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 94, pp. 35~41.
- (6) Van Treuren, K.W., Wang, Z., Ireland, P.T. and Jones, T.V., 1994, "Detailed Measurements of Local Heat Transfer Coefficient and Adiabatic Wall Temperature Beneath an Array of Impinging Jets," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 369~374.
- (7) Barata, J.M.M., Durao, D.F.G. and McGuirk, J.J., 1989, "Numerical Study of Single Impinging Jets Through a Crossflow," *Journal of Aircraft*, Vol. 26, pp. 1002~1008.
- (8) Barata, J.M.M., "1993, "Fountain Flows Produced by Multijet Impingement on a Ground Plane," *Journal of Aircraft*, Vol. 30, pp. 50~56.
- (9) Barata, J.M.M., "1996, "Fountain Flows Produced by Multiple Impinging Jets in a Crossflow," *AIAA Journal*, Vol. 34, pp. 2523~2530.
- (10) 이정희, 김신일, 최영기, 유홍선, 1996, 터빈 블레이드의 냉각에서 충돌제트에 의해 변화되는 유동 및 열전달특성에 관한 수치해석적 연구, *대한기계학회논문집(B)*, 제20권, pp. 4013~4026.
- (11) 임경빈, 이대회, 1997, 오목표면곡률이 난류 원형충돌제트의 열전달에 미치는 영향, *대한기계학회논문집(B)*, 제20권, pp. 691~699.
- (12) 유한성, 양영근, 최만수, 이준식, 1996, 제트 충돌냉각되는 반원 오목면에서 열전달 및 유체 유동에 관한 실험적 연구, *대한기계학회논문집(B)*, 제20권, pp. 2991~3006.
- (13) 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.
- (14) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23~34.
- (15) 이상우, 윤태진, 1997, "5공프로우브의 보정에 영향을 주는 유동변수들에 대한 실험적 연구," *대한기계학회논문집(B)*, 제21권, pp. 637~649.
- (16) 이상우, 윤태진, 1996, "벽면근접거리가 소형 원추형 5공프로우브의 보정에 미치는 영향," *대한기계학회논문집(B)*, 제20권, pp. 2693~2706.
- (17) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.
- (18) 이상우, 주성국, 1997, "수직분사 막냉각구멍 내부에서의 3차원 유동특성," *대한기계학회논문집(B)*, 제21권, pp.1185~1197.
- (19) Andreopoulos, J. and Rodi, W., 1984, "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 138, pp. 93~127.
- (20) 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.