

< 논문 >

삼각형 멀티 탭이 부착된 난류제트에 대한 SPIV 유동해석 연구

장 영 길* · 이 상 준†

(2004년 10월 21일 접수, 2005년 3월 30일 심사완료)

SPIV Flow Analysis of Turbulent Jet with Triangular Multi-Tabs

Young-Gil Jang and Sang-Joon Lee

Key Words : Stereoscopic PIV(스테레오스코픽 PIV), Jet(제트), Flow Control(유동제어), Tab(탭)

Abstract

The effect of triangular multi-tabs attached at the perimeter of jet nozzle on flow structure in the near field was investigated experimentally. A stereoscopic PIV(SPIV) system was employed to measure three orthogonal velocity components of the 3-D turbulent jet. In this study, two different types of sharp-edged jet nozzle having 4, 8 tabs were tested at the Reynolds number of $Re=10,000$. SPIV measurements were carried out at 5 cross-sectional planes. Six hundred instantaneous velocity fields were measured for each experimental condition and they were ensemble averaged to get spatial distributions of turbulent statistics such as mean velocity and turbulence intensity. Entrainment rate of surrounding fluid into the tabbed jets was estimated using the measured 3-D velocity field data. The strong vortex structure was induced for the jet flow with 4 tabs, increasing entrainment rate.

기호설명

- D : 노즐 출구직경
- H : 노즐에서 탭이 돌출한 길이
- L : 노즐과 평판사이의 거리
- R : 정체점에서 반경방향으로의 거리
- Re : 레이놀즈 수, UD/ν

1. 서론

유체흐름을 효과적으로 제어함으로써 여러가지 이득을 얻을수 있다. 특히 난류 혼합의 향상은 산업체 현장에서 발생하는 열유체 문제 해결에 있어서 매우 중요하다. 제트 노즐 끝에 설치되어 와동을 발생시키는 탭(tab)들은 제트유동과 주위 유체 사이의 혼합을 활발하게 하며, 소음을 감소시킬

목적으로도 사용되기도 한다. 이러한 특성 때문에 탭이 설치된 제트 유동은 그 동안 연구자들의 관심을 끌어오고 있다.

Bradbury and Khadem⁽¹⁾은 제트 노즐 전방에 사각형 단면의 탭을 부착하고 이것이 제트유동의 혼합 특성에 미치는 영향을 연구하였다. Zaman 등⁽²⁾은 탭 주위에 서로 반대방향으로 회전하는 와류쌍이 형성되며, 나선 형태의 유동구조를 가지고 삼각형 탭이 최적의 형상임을 밝혔다. Reeder and Samimy⁽³⁾는 탭 설치에 기인한 주위 유체의 유입과 혼합에 관한 연구를 수행하였는데, 사각형이나 타원형 노즐 출구에 탭을 설치한 경우보다 원형 노즐에 탭을 설치하는 것이 보다 효과적이라고 하였다.

Zaman and Foss⁽⁴⁾ 와 Zaman 등⁽⁵⁾은 삼각형 탭을 이용한 유동제어 연구를 수행하였다. 이들은 노즐 출구에 설치한 탭의 각도를 변화시키면서 유동 형태의 변화를 관찰하였는데, 탭이 아래방향을 향할 수록 제트가 측면으로 보다 많이 퍼져나가며, 아음속 유동뿐만 아니라 초음속 유동에서도 탭이 비슷한 효과를 나타냄을 밝혔다.

Foss and Zaman⁽⁶⁾은 층류유동의 혼합을 촉진하는 방법으로 탭을 사용하였다. Mi and Nathan⁽⁷⁾는 탭이

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

Tel : (054)279-2169 Fax : (054)279-3199

유동의 흐름을 크게 왜곡시키고 이로 인하여 혼합 특성이 변화함을 밝혀내었다. 이들은 약간 가열된 제트(heated jet)의 온도변화를 측정 한 결과, 탭을 지난 유동의 경우 혼합이 증대되어 온도가 급격히 감소하였다. 또한 2개의 탭을 180°간격으로 설치한 경우가 4개의 탭을 90°간격으로 설치한 경우에 비해 유동구조가 보다 크게 변화함을 보여주었다. Hui and Kobayashi 등⁽⁸⁾은 유동방향으로 45° 꺾여진 2개의 탭을 부착한 제트유동을 PIV 와 LIF 기법을 사용하여 가시화하였다. 이들은 탭에 의해 2차 불안정성(secondary instability)이 증가하고 탭 후방에 생성된 유동방향의 와들이 상호작용하여 외부 유동의 유입이 증가된다고 하였다.

Chua and Yu⁽⁹⁾은 탭이 부착된 사각 제트의 유동 구조를 LIF(laser induced fluorescence)기법으로 가시화하였다. 최근들어 Gao 등⁽¹⁰⁾은 적외선 카메라를 이용하여 탭이 충돌제트 열전달에 미치는 영향을 연구하였는데, 탭 부착 제트가 열전달 향상에 효과적이며 충돌영역에서 국소 열전달계수가 최대 25%까지 증가함을 보여주었다. Lee and Lee⁽¹¹⁾는 탭의 개수가 충돌제트 열전달에 미치는 효과를 분석하였는데, 8개 탭이 부착된 경우 탭이 4개인 경우와 없는 경우에 비해 열전달 향상효과가 크며, 탭의 크기가 $H/D=0.2$ 일 때 보다 크게 나타난다고 밝혔다.

이처럼 탭이 부착된 제트의 혼합증대나 열전달 향상에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 왔으나, 탭 설치에 기인하여 형성된 3차원 유동구조에 대한 해석 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 탭 제트 유동의 3차원 유동특성들을 알아보고 탭 설치가 유동구조에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 제트 실험장치와 실험조건

원형 제트 노즐에 삼각형 탭을 부착하여 수행한 본 연구의 실험장치 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 작동유체로는 압축공기를 사용하였는데 유량 조절밸브를 지나 내경이 $D=52.3\text{mm}$ 이고, 길이가 250cm인 PVC 파이프로 연결되며, 이것은 다시 유연한 튜브(flexible tub)를 거쳐 같은 직경을 가진 3m 길이의 PVC 파이프에 연결되며 끝부분에 있는 노즐을 통해 제트가 분사된다. 그림에서 분무장치(jet atomizer)는 올리브 오일을 이용하여 PIV용 추적 입자들을 생성시키는 장치이다. 유량은 PVC 파이프에 설치된 오리피스 유량계를 이용하여 측정하였다.

Fig. 2는 PVC 파이프 끝부분에 부착된 45°의

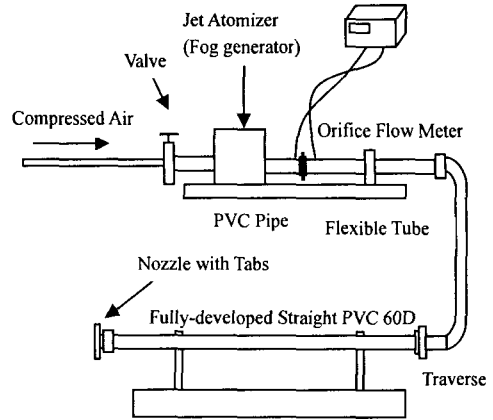


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

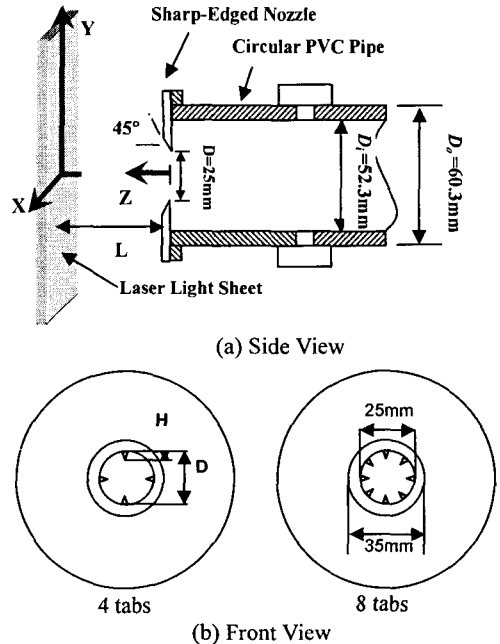


Fig. 2 Configuration of jet nozzle with tabs and coordinate system

날카로운 모서리(sharpe-edged)를 가진 노즐의 형상과 좌표계를 나타낸 것이다. 여기서 노즐과 측정면 사이의 거리를 L로 표시하였다. 본 연구에서는 90° 간격으로 4개의 탭이 부착된 노즐, 그리고 45° 간격으로 8개의 탭이 설치된 노즐 등 2가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 4개의 탭이 부착된 경우 탭의 형상은 가로 세로의 길이 비가 2 : 3인 이등변 삼각형이며, 8개 탭의 경우 가로 세로의 비가 1 : 3인 이등변 삼각형 형상을 가지도록 하였다. 이것은 탭의 개수가 달라지더라도 제트 노즐의 출구 단면적을 같게하기 위해서이다. 그리고

탭이 노즐 모서리로부터 제트 중심방향으로 튀어나온 돌출 길이(protrusion depth)를 H 로 표시하고, 노즐의 중심과 탭 정점을 이은 선을 탭 라인(tab line)이라고 정의하였다.

2.2 Stereoscopic PIV

Fig. 3은 SPIV 속도장 측정시스템을 나타낸 것으로 Nd:YAG 레이저, 두 대의 1K×1K CCD 카메라, 프레임 그래버, 동기장치(delay generator), PC 등으로 구성되어 있다. 본 실험에서 사용된 펄스형 Nd:YAG 레이저는 노출시간이 7ns이고 강도가 25mJ인 이중 헤드(2-head) 방식이다.

실험시 Nd:YAG 레이저와 두 대의 CCD 카메라를 동기하여 프레임 노출시간 중 원하는 순간에 레이저 평면광을 조사할 수 있도록 동기장치로 동기시켜 깨끗한 입자영상을 얻을 수 있도록 하였다. 올리브 오일에 압축공기를 가해 생성된 입자를 추적입자로 사용하였다.

그리고 본 연구에서는 tilting과 shifting기능을 가지고 있는 특수 렌즈를 사용하였는데, 이 렌즈는 수차를 줄이는 등 우수한 광학 성능을 가지고 있다. 또한 발생하는 영상왜곡과 수차를 보상하기 위해 Soloff and Adrian⁽¹²⁾가 제안한 보정방법을 사용하였다. 3차원 물체의 체적과 카메라로부터 얻은 2차원 영상 사이의 관계는 다음과 같이 표현되어진다.

$$X = F(-x) \quad (1)$$

여기서 $X = (X_1, Y_1, X_2, Y_2)$ 는 기록된 영상 위의 좌표이며 $x = (x, y, z)$ 는 실제 입자들의 공간위치를 나타낸다. Soloff and Adrian⁽¹²⁾은 매핑(mapping)함수 F 를 다음과 같은 다항식으로 표현하였다.

$$\begin{aligned} F(x) = & a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5xy + a_6xz \\ & + a_7y^2 + a_8yz + a_9z^2 + a_{10}x^3 + a_{11}x^2y \\ & + a_{12}x^2z + a_{13}xy^2 + a_{14}xyz + a_{15}xz^2 \\ & + a_{16}y^3 + a_{17}y^2z + a_{18}z^3 \end{aligned} \quad (2)$$

입자들의 변위는 $\nabla F(x) \cdot \Delta x$ 으로 표현되며 보정판을 Z방향으로 이동시키면서 보정판의 영상을 구하는 보정과정을 통해서 $\nabla F(x)$ 상수들을 얻게 된다. 얻어진 보정 상수들을 이용하여 두 카메라로부터 취득한 입자영상으로부터 3차원 속도성분을 얻게 된다.

본 SPIV시스템 구축 시 angular configuration방법을 사용하였다. 각 CCD카메라는 각도를 변경할 수 있는 스테이지 위에 장착하고 제트의 중심축에 대해서 약 30°의 각도를 가지도록 설치하였다. 이

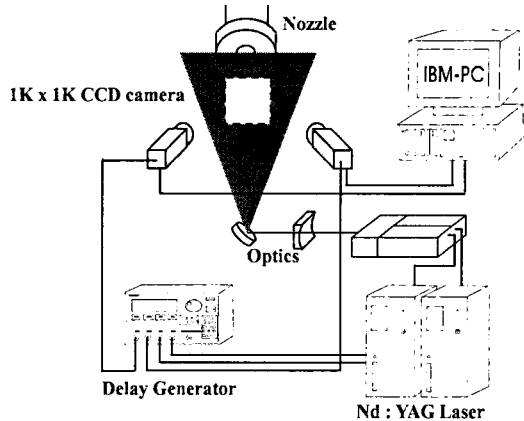


Fig. 3 Schematic diagram of Stereoscopic PIV system with angular configuration

때 효율적인 실험을 위해 레이저와 CCD카메라의 위치를 고정시킨 후 제트 실험장치를 정확히 이송시켜 노즐과 측정면 사이의 거리를 조절하였다.

속도장은 주유동 방향에 수직인 5개의 횡단면에서 측정하였고, 각 측정단면의 크기는 약 $6 \times 6 \text{ cm}^2$ 이었다. PIV 속도벡터 추정 시 미소조사구간의 크기를 $32 \times 32 \text{ pixels}$ 로 하고, 50% 중첩하였다.

각 카메라부터 얻어진 600장의 순간 속도장 결과로부터 SPIV계산과정을 통하여 3차원 속도성분을 계산하였다. 그리고 구해진 속도장 결과들을 시간평균하여 평균 속도장을 구하였다. 또한, 순간 속도장과 평균 속도장의 차이로부터 얻어진 변동 속도성분의 통계처리를 통해 난류 통계치의 공간 변화도 살펴보았다. 본 연구에 적용한 SPIV기법의 원리와 측정오차 등에 대한 내용은 Yoon and Lee^(13, 14)에 자세하게 설명되어 있다.

제트속도와 노즐 직경에 기초한 레이놀즈수는 약 10^4 으로 난류유동에 해당하며, 실험시 배순환 유동의 영향을 줄이기 위해 제트 주변에 따로 챔버를 설치하지 않았다. 또한 실험시작 전에 실험실 내부를 oil 입자들로 가득 채워 제트 내부로 유입되는 유동측정에 문제가 없도록 하였으며, 유동이 정상상태에 이른 후에 실험을 시작하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평균 유동장

Fig. 4는 각 측정단면에서의 축방향 평균속도 분포를 보여주고 있다. 제트의 폭이 하류로 나갈수록 축에 대칭적으로 확장되며 제트 중심에서의 최고 속도가 노즐로부터 멀어질수록 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4(a)-(d)는 4개의 탭이 설치된 경우의 실험 결과를 나타내며, (e)-(h)는 8개 탭을 설치한 제트

유동의 축방향 평균속도 분포를 보여주고 있다. 두 경우 모두 원형 제트의 기본적인 유동형태를 유지하고 있다. 노즐에 가까운 $L/D=0.5$ 위치 단면에서 축방향 속도성분이 다른 경우에 비해 가장 크게 나타나며 무차원화된 속도값이 1을 갖는 제트 코어 부분이 넓게 분포하고 있다. 또한 탭의 설치에 기인하여 탭 주변영역에서 유동이 가속되어 속도가 상대적으로 크게 증가하였다. 두 경우 모두 주유동 속도성분이 증가하지만 탭이 8개 달린 경우가 4개인 경우에 비해 속도 증가가 일어나는 부분이 넓으며, 속도 증가 효과가 약 1.5% 정도 큰 것으로 나타났다. $L/D=0.5$ 위치의 횡단면에서 측정된 결과(Fig. 5)에서도 유사한 차이를 확인할 수 있다.

$L/D=1$ 위치단면에서는 두 경우 모두 탭에 의해 가속된 속도성분들이 유지되고 있다. 탭이 4개 설치된 경우, 제트 중심 부분이 마름모꼴 형상을 보여주고 있는데, 이것은 탭의 영향을 받지 않는 부분에서는 유동이 하류로 나아감에 따라 속도가 감소하지만, 탭의 존재에 기인하여 가속된 부분에서는 빠른 속도로 가속되기 때문으로 보인다. 전반적으로 탭라인 부근에서 속도가 다른 부분에 비해 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 탭이 8개인 경우에는 빠른 속도 값을 갖는 영역이 탭이 4개인 경우보다 약 3~6% 정도 감소하나 $0.3\sim 0.7U_0$ 의 중간속도영역이 상대적으로 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

$L/D = 2$ 조건에서는 탭이 4개인 제트는 빠른 속도 구간이 많이 감소하였으나 여전히 탭에 기인한 유동의 가속 특성을 보여주고 있다. 그러나 주위 유동의 유입이 활발해져 제트 중심속도가 감소하고 제트 중심영역에서 속도분포의 기울기가 많이 완만해졌다. 8개의 탭을 가진 제트 유동의 경우, 탭 설치에 기인한 유동특성 변화가 많이 줄어든 것을 볼 수 있으며, 전반적으로 원형에 가까운 속도분포 컨투어를 보여주고 있다.

$L/D=4$ 위치단면에 이르러 두 경우 모두 원형에 가까운 유동형태를 보여주고 있으나 탭이 4개인 경우 아직은 탭라인 부근의 속도가 다른 영역보다 약간 높은 값을 가지며 중심속도는 8개 탭을 가진 제트 유동에 비해 작은 값을 가졌다.

$L/D=8$ 하류 위치단면에서는 두 경우 모두 주위 유동과의 혼합에 의해 탭 설치에 의한 영향이 거의 사라지고 완만한 기울기의 속도분포를 가지게 된다.

Fig. 5는 주유동 방향의 속도 컨투어(contour)와 in-plane 속도벡터들을 나타낸 것이다. $L/D=0.5$ 위치단면에서는 제트 중심에서 빠른 속도로 움직이며 탭의 위치에 따라 국부적인 가속이 일어나고 있다. 그리고 탭이 4개인 경우 탭 후방에 비교적 강하게 회전하면서 유입되는 유동현상이 관찰되었다. 탭이 8개인 경우에도 탭 주위에서 유동의 가

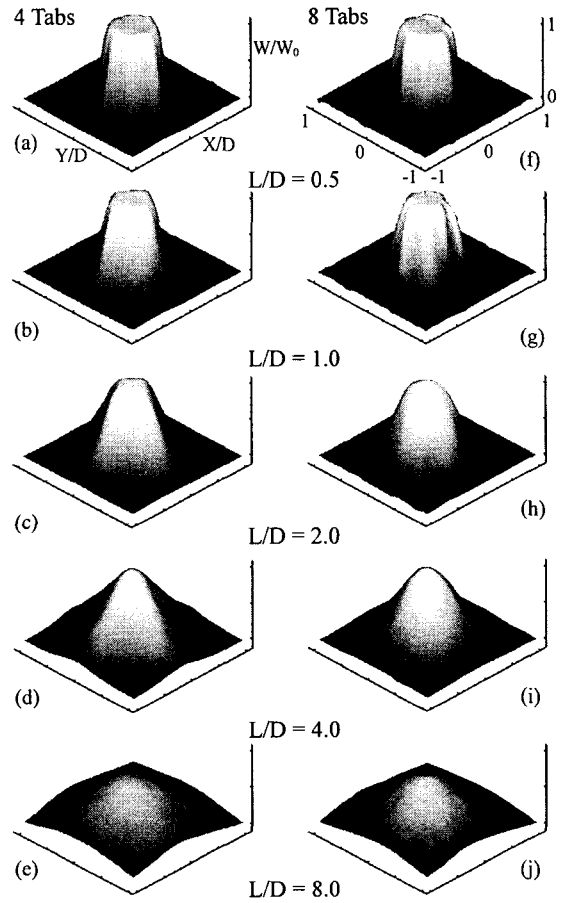


Fig. 4 The mean axial velocity contours

속이 일어나고 탭 주위에 유입현상이 집중되고 있으며, 탭이 4개인 경우에 비해서 유입되는 유동이 노즐 주위에 골고루 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

$L/D=2$ 위치단면에서 탭이 4개인 경우에는 탭 설치로 가속된 유동이 확산되면서 탭과 탭 사이 영역에서 균일하게 주유동방향 속도성분이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이에 따라 탭 사이를 잇는 직선 형태의 속도 분포를 가지게 된다. 탭이 8개인 경우에는 비교적 균일한 유체유입이 제트 주위에서 일어나 8각형 형태에서 동심원 형태로 변환되는 컨투어를 보여주고 있다. 이것은 탭에 의해서 형성된 와가 하류로 나아가면서 고르게 확산되게 되는데 비해, 탭이 4개인 경우는 와들 사이의 간격이 상대적으로 커져 탭으로부터 형성된 와 구조가 어느 정도 유지되기 때문이다. 그러나 탭이 8개인 경우에는 탭과 탭사이 간격이 좁아서 탭에서 생성된 와들이 독립적으로 성장하지 못하고 이웃한 와와 상호작용하게 된다.

$L/D=4$ 위치단면에 해당하는 in-plane 속도성분과 평균 주유동방향 속도성분을 보면 탭이 4개 부착

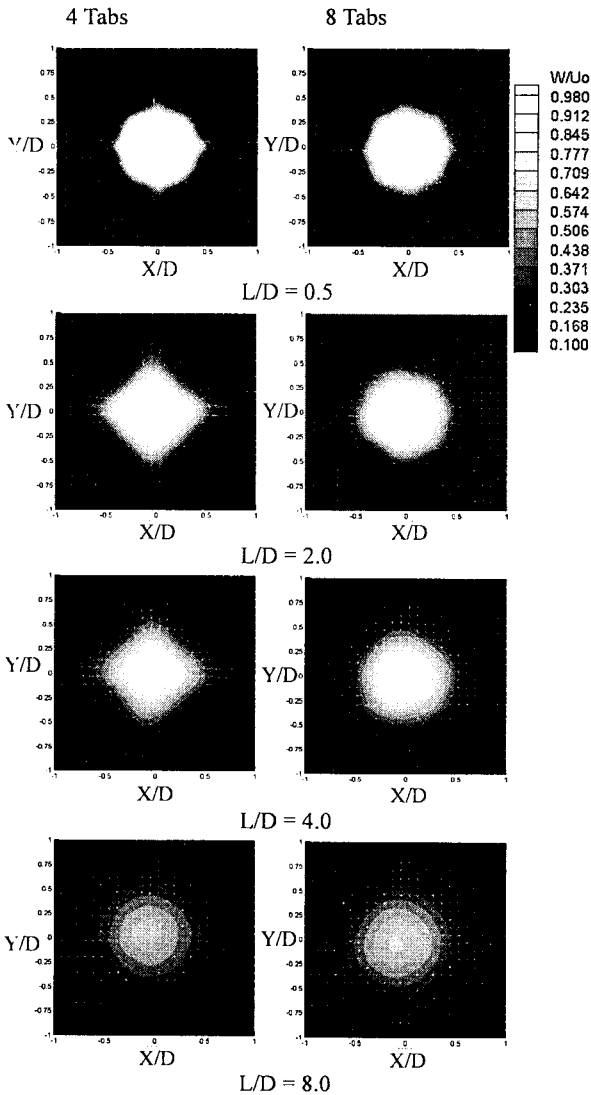


Fig. 5 In-plane mean velocity vectors and contours of mean streamwise velocity

된 제트는 탭의 효과가 여전히 남아 있어서 마름모형상의 속도 분포를 유지하고 있고 제트 중심의 최고 속도 영역이 $L/D=2$ 위치단면에 비해 크게 감소하였다. 반면에 탭이 8개인 경우에는 탭 부착에 따른 유동특성이 거의 사라져 거의 원형에 가까운 속도 분포를 보여주고 있다. 그리고 제트 중심속도의 크기가 다소 줄었으나 4개 탭이 부착된 제트의 경우보다 중심속도가 큰 값을 가졌다.

$L/D=8$ 위치단면에서는 탭이 4개인 제트가 탭이 8개인 제트보다 중심속도의 크기가 작지만 탭의 영향이 감소함에 따라 두 가지 경우 모두 속도 분포가 원형을 유지하고 있다. 이것은 8개의 탭에서 발생한 와들은 독자적으로 성장하는데 필요한 공간이 적어서 이웃한 와들끼리 상호작용을 일으키

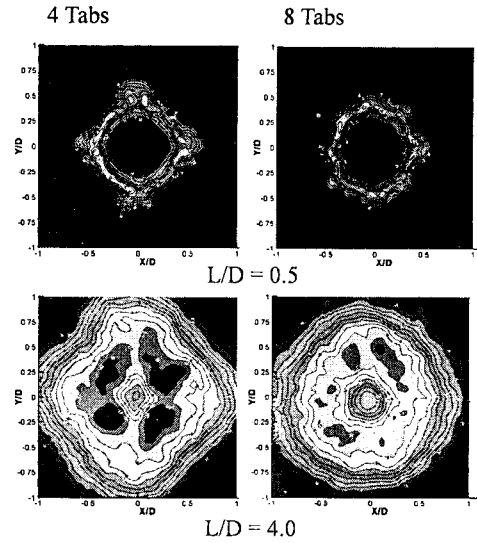


Fig. 6 Contour plots of streamwise turbulence intensity

기 때문에 보인다. 반면에 탭이 4개인 경우에는 어느 정도 하류위치까지 와 구조들이 성장할 공간이 있기 때문에 $L/D=4$ 위치까지 탭에 의한 유동특성이 유지되고 있는 것이다.

3.2 난류구조

Fig. 6은 $L/D=0.5$ 와 $Z/D=4$ 인 위치단면에서 측정한 주유동방향 난류강도 분포를 비교한 것이다.

$L/D=0.5$ 위치단면에서는 탭의 개수에 상관없이 난류강도의 크기가 거의 차이가 나지 않는다. 탭이 4개인 경우 탭 후방 위치에서 국부적으로 집중된 난류강도 분포를 가지고 있어 8개 탭의 경우에 비해 하류영역에서 보다 큰 난류강도 값을 가질 것임을 알 수 있다.

$L/D=4$ 인 하류 위치단면에서의 난류강도 분포를 비교해보면 탭이 4개인 경우, 난류강도 값의 크기가 크고 분포면적도 넓다. 또한, 탭과 탭사이, 즉 탭라인에서 난류강도가 최대값을 가져 탭에 의해 후방에 형성된 와에 기인하여 난류강도가 증대되었음을 알 수 있다. 탭이 8개인 경우에는 상대적으로 난류강도의 크기가 작으며 $L/D=0.5$ 에서 나타났던 탭의 부착위치에 따른 특징적인 분포형태가 거의 사라졌다.

Fig. 7은 탭 후방에 형성되는 주유동방향 와의 분포를 나타낸 것이다.

양측면에서 발생하는 와들이 탭 후방에서 쌍으로 존재하고 있는데, 이것은 삼각형의 탭이 바로 후방에 서로 반대방향으로 회전하는 와를 생성시킴을 나타낸다. 탭의 개수가 4개인 경우 8개 탭인 경우에 비해 와도의 세기는 비슷하나 크기가 크고 비교적 균일하게 분포되어 있다.

탭이 8개인 경우에는 $L/D=4$ 하류 위치단면에서 이미 와들이 거의 소산되어 뚜렷한 와도 분포가

나타나지 않는다. 그러나 탭이 4개인 제트의 경우에는 이 위치에서도 어느 정도 와 구조가 남아있음을 확인할 수 있다. 즉 탭이 4개인 제트유동의 경우, 근접영역에서 보다 뚜렷한 와 구조를 가짐을 알 수 있다. 이것은 탭에서 형성된 와들이 이웃한 와 유동과 활발한 혼합작용을 일으켜 제트유동의 속도를 빠르게 감소시키는 것으로 보인다.

3.3 유입량

제트 노즐에 설치한 탭이 제트유동의 혼합작용에 미치는 영향을 알아보기 위해서 SPIV로 측정된 속도장 결과로부터 유입량(entrainment rate)을 계산하였다. 유입량(m) 계산에 사용된 식은 아래와 같다.

$$m = \int \rho u dA \quad (3)$$

여기서 u 는 제트의 주유동방향 속도성분이며, ρ 는 유체의 밀도, A 는 제트의 수직 단면적을 의미한다.

Fig. 8은 제트 노즐로부터 하류로 나아감에 따른 유입량 변화를 보여주고 있다. $L/D=0.5$ 위치에서는 일시적으로 8개의 탭을 가지는 제트가 상대적으로 높은 유입률을 보여주고 있다. 이것은 초기에 탭 후방에 생성된 작은 와들이 많은 위치에서 나타나고 있기 때문으로 보인다. 반면에 탭이 4개인 제트의 경우, 크고 강력한 와의 형성으로 인해 유입량에 있어서 8개 탭의 경우에 비해 그리 많은 차이를 보이지는 않았다. 그러나 하류로 나아갈수록 탭이 4개인 경우가 8개인 경우에 비해 큰 유입량을 보여주고 있으며 $L/D=4$ 하류위치까지 점차 그 차이가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 $L/D=8$ 위치에서는 탭의 개수 변화에 따른 유입량의 차이가 줄어들고 있다. 유입량 결과로부터 탭이 4개인 경우가 8개 탭의 경우에 비해 제트유동의 난류 혼합을 증진시켜 외부유동의 유입을 보다 증가시킬 수 있다.

4. 결론

SPIV 속도장 측정기법을 이용하여 삼각형 탭이 부착된 제트의 3차원 유동구조와 난류특성 변화를 연구하였다. 탭의 개수가 4개와 8개인 2가지 경우에 대해 실험을 수행하였는데, 탭의 종횡비를 다르게 하여 제트 노즐의 실제 단면적이 같도록 하였다.

속도장 결과로부터 탭이 8개인 경우 4개 탭의 경우에 비해 근접영역에서 탭 설치에 의한 유동 가속이 강하게 일어난다. 이것은 탭이 유동이 흘러가는 유로를 감소시켜 유동이 가속되기 때문이다. 반면에 8개의 탭을 갖는 경우는 유동이 가속되는 영역이 많기 때문에 유동의 가속이 더 크게

나타나는 것처럼 보인다. 또한 탭은 일반적으로 유동의 불안정성을 증가시켜서 난류강도를 증가시키는 것으로 알려져 있다. 탭이 4개인 경우에는 탭의 폭이 비교적 넓기 때문에 양쪽에서 발생한 와선들이 어느 정도 거리까지 독립적으로 성장하여 강한 주유동 방향 와구조를 형성하지만, 탭이 8개인 경우에는 탭의 아랫부분 폭이 상대적으로 좁기 때문에 양쪽에서 발생한 와들이 서로 상호작용하여 큰 와구조로 성장하지 못하고 소멸하게 된다. 이에 따라 8개 탭의 경우 난류강도가 감소하고 유동의 혼합률도 감소하게 된다. 따라서 유동 방향으로 진행함에 따라 탭이 4개인 경우가 보다 크고 넓은 주유동 방향의 난류강도의 분포를 가지며, 어느 정도의 하류위치까지 와구조를 유지함에 따라 주위 유동과의 혼합이 증대되어 제트의 중심 속도의 크기가 상대적으로 빠르게 감소하였다. 이것으로부터 강한 와구조에 의해 외부 유동의 유입이 증가됨을 알 수 있다. 탭이 8개인 제트유동은

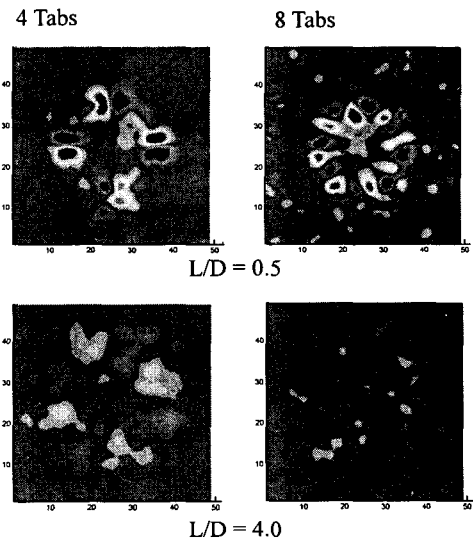


Fig. 7 Streamwise vorticity contours

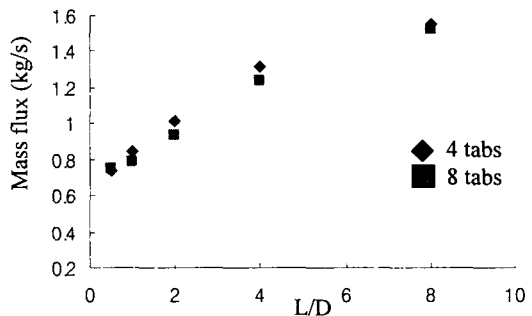


Fig. 8 Comparison of mass flow rate

초기에 상대적으로 많은 개수의 와들이 생성되지만 서로 조밀하게 분포되어 있어서 독립적인 와로 성장하지 못하고 서로 상호작용하여 작은 크기의 와들로 발달하여 에너지를 소산시킴으로서 주위 유동의 유입을 크게 증가시키지 못한 것으로 보인다.

또한 제트 유동의 유입량을 계산한 결과, 4개의 탭을 부착한 제트 유동이 외부 유동의 유입을 증가시킴을 확인하였는데, 이것으로부터 유동혼합이 증가됨을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Bradury, L. and Khadem, A., 1975, "The Distortion of a Jet by Tabs," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 70, pp. 801~815.
- (2) Zaman, K., Reeder, M. and Samimy, M., 1994, "Control of an Axisymmetric Jet Using Vortex Generators," *Physics of Fluids*, Vol. 6, pp. 778~793.
- (3) Reeder, M. and Samimy, M., 1996, "The Evolution of a Jet with Vortex Generating Tabs: Real-Time Flow Visualizations and Quantitative Measurements," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 311, pp. 73~118.
- (4) Zaman, K. and Foss, J., 1997, "The Effect of Vortex Generators on a Jet in a Cross-Flow," *Physics of Fluids*, Vol. 9, pp. 106~114.
- (5) Zaman, K., 1998, "Reduction of Jet Penetration in a Cross-Flow by Using Tabs," *AIAA Journal*, pp. 98~3276.
- (6) Foss, J. and Zaman, K., 1999, "Large and Small scale Vertical Motions in a Shear Layer Perturbed by Tabs," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 382, pp. 307~329.
- (7) Mi, J. and Nathan, G.J., 1999, "Effect of Small Vortex-Generators on Scalar Mixing in the Developing Region of a Turbulent Jet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3919~3926.
- (8) Hui, H., Kobayasi, T., Saga, T., Taniguchi, N. and Segawa, S., 1998, "Investigation of the Tabbed Jet Mixing Flows by Using LIF and PIV," *8th International Symposium on Flow Visualization*, pp. 4.1~4.11.
- (9) Chuna, L.P., Yu, S.C.M. and Wang, X.K., 2003, "Flow Visualization and Measurements of a Square Jet with Mixing Tabs," *Experimental Thermal and The Science*, Vol. 27, pp. 731~744.
- (10) Gao, N., Sun, H. and Ewing, D., 2003, "Heat Transfer to Impinging Round Jets with Triangular Tabs," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2557~2569.
- (11) Lee, J. W. and Lee, S. J., 2004, "Enhancement of Impinging Jet Heat Transfer Using Triangular Multi-Tabs," *Trans. of the KSME B*, Vol. 28, No. 10, pp. 1139~1146.
- (12) Soloff, S.M. and Adrian, R.J., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Measurement and Science Technology*, Vol. 15, pp. 1441~1454.
- (13) Yoon, J.H. and Lee, S.J., 2002, "Direct Comparison of 2-D and 3-D Stereoscopic PIV Measurements," *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, No. 10, pp. 2027~2036.
- (14) Yoon, J.H. and Lee, S.J., 2003, "Investigation of Near-Field Structure of an Elliptic Jet Using a Stereoscopic PIV," *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, No. 12, pp. 2034~2046.