

삼각형 멀티 탭을 이용한 충돌제트 열전달 향상 연구

이 정 욱* · 이 상 준†

(2003년 12월 24일 접수, 2004년 7월 30일 심사완료)

Enhancement of Impinging Jet Heat Transfer Using Triangular Multi-Tabs

Jeong-Wook Lee and Sang-Joon Lee

Key Words : Impinging Jet(충돌제트), Heat Transfer Control(열전달 제어), Tab(탭)

Abstract

The effect of triangular tabs attached at the perimeter of jet nozzle on heat transfer enhancement was investigated experimentally. The modified flow structure was visualized using a smoke-wire method. Four different types of jet nozzle having 0,4,6 and 8 tabs were tested at jet Reynolds number $Re=15,000$ to investigate the effect of tabs on the variation of heat transfer rate. The local and average Nusselt numbers are increased with increasing the number of tabs. At nozzle-to-plate distance of $L/D=4$, the average Nusselt number was increased about 9.9 % at $Re=15,000$ in the impingement region for the case of 8 tabs attachment. As the nozzle-to-plate distance increases, however, the heat transfer enhancement effect of triangular tabs is reduced. For the case of 4 tabs, the heat transfer enhancement is not so distinctive at $L/D=8$. As the protrusion depth of tabs into the jet flow increases, the heat transfer rate is also enhanced when the nozzle-to-plate distance is smaller than $L/D=6$.

기호설명

- A : 금박막의 표면적
- D : 노즐 출구직경
- f : 금박막의 균일성
- H : 노즐에서 탭이 돌출한 길이
- h : 국소 열전달계수, 식 (1)
- I : 금박막을 통과하는 전류
- k : 열전도계수
- L : 노즐과 평판사이의 거리
- Nu : 국소 Nusselt 수, 식 (2)
- \overline{Nu} : 평균 Nusselt 수, 식 (4)
- q_c : 전도 열유속
- q_r : 복사 열유속
- q_v : 대류 열유속, 식 (3)

- R : 정체점에서 반경방향으로의 거리
- Re : 레이놀즈 수, UD/ν
- T_a : 주위 온도
- T_j : 제트 온도
- T_w : 가열된 평판의 국소 벽면 온도
- ΔT : 평균 온도차이, 식 (5)
- V : 금박막을 통과하는 전압

그리스문자

- ϵ : 방사율(emissivity)
- σ : Stefan-Boltzmann 상수

1. 서론

유체흐름의 유동구조를 효과적으로 제어함으로써 여러가지 분야에서 이득을 얻을수 있다. 특히 난류 혼합의 향상은 산업체 현장의 열유체 문제해결에 있어서 매우 중요하다. 제트 노즐 끝에 설치되어 와동을 발생시키는 탭(tab)들은 제트와 주위 유체사이의 혼합을 활발하게 하는 것으로 알려져

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

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

있으며 소음 감소 목적으로도 사용되고 있다. 이러한 특징 때문에 탭이 설치된 제트 유동은 그동안 많은 연구자들의 관심을 끌어오고 있다.

Bradbury and Khadem⁽¹⁾은 원형 제트 전방에 설치한 사각형 단면의 탭 부착이 유동의 혼합특성에 미치는 영향을 연구하였다. Zaman 등⁽²⁾은 탭 설치에 따라 반대방향으로 회전하는 와류쌍이 형성되고, 이로 인해 나선 형태의 속도분포를 가지며 삼각형 탭이 최적의 형상임을 밝혔다. Reeder and Samimy⁽³⁾는 탭설치에 기인한 주위 유체의 유입과 혼합에 관한 연구를 수행하였는데, 사각형이나 타원형의 노즐 출구에 탭을 설치한 경우보다 원형 노즐에 탭을 설치하는 것이 보다 효과적이라고 하였다.

Zaman and Foss⁽⁴⁾와 Zaman 등⁽⁵⁾은 델타 형상의 탭을 이용하여 유동구조 제어에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 노즐 출구에 탭을 설치한 후 탭의 설치 각도를 변화시키면서 유동 형태의 변화를 관찰 하였는데, 탭이 아래방향을 향할수록 제트가 측면으로 보다 많이 퍼져나감을 관찰하였다. 그리고 탭은 아음속 유동뿐만 아니라 초음속 유동에서도 비슷한 효과를 나타냄을 보여주었다.

Foss and Zamman⁽⁶⁾은 2개의 층류유동의 혼합을 촉진하는 방법으로 탭을 사용하였다. Mi and Nathan⁽⁷⁾은 탭이 유동의 흐름을 심하게 왜곡시키고 이로 인하여 유동의 혼합특성이 크게 변화함을 밝혀내었다. 이들은 약간 가열된 제트(heated jet)의 온도변화를 측정할 결과, 탭을 지난 유동이 혼합을 증대시킴에 따라 온도가 급격히 떨어졌다. 또한 2개의 탭을 180° 간격으로 설치한 경우가 4개의 탭을 90° 간격으로 설치한 경우보다 유동구조가 심하게 변화함을 보여줬다. Chua and Yu⁽⁸⁾은 탭이 부착된 사각 제트의 유동구조를 LIF(laser induced fluorescence)기법으로 가시화하였다.

이처럼 탭을 이용한 제트의 유동구조 변화나 혼합증대에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 왔으나, 탭을 충돌제트에 적용하여 전열특성을 향상시키고자 하는 연구는 거의 이루어지지 않았다. 2003년 Gao 등⁽⁹⁾이 적외선 카메라를 이용하여 탭이 충돌제트 열전달에 미치는 영향을 연구하였는데, 탭을 부착한 제트가 열전달 향상에 효과적이며 충돌영역에서 국소 열전달 계수가 최대 25%까지 증가함을 보여주었다.

탭부착 제트에 관한 기존 연구들을 통해 탭부착 제트의 유동특성들이 밝혀졌다. 그러나 산업 현장에 많이 사용되고 있는 파이프 노즐제트의 출구에 탭을 부착하여 충돌평판에서의 전열특성을 향상시키고자 하는 응용 연구는 거의 수행되지 않았다.

이에 따라 본 연구에서는 제트 노즐 출구에 삼각형 단면의 탭을 설치하고 이것이 충돌면에서의 전열 특성 변화에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

원형 제트노즐에 탭을 부착하여 수행한 충돌제트 실험장치의 전체적인 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에서는 압축공기(compressed air)를 사용하였는데 유량을 조절하는 밸브를 지나 내경이 $D=52.3$ mm, 두께 4 mm, 길이가 250 cm 인 PVC 파이프에 연결된다. 중간에 위치한 제트 분무장치(jet atomizer)는 올리브 오일을 이용하여 연기를 발생시키는 장치로써 유동가시화 실험시 이용되며 연선법(smoke-wire)을 이용한 유동가시화 실험에는 사용되지 않는다. 유량은 PVC 파이프에 연결된 오리피스 유량계를 이용하여 측정하였다. 이것은 다시 유연한 튜브(flexible tub)를 거쳐 같은 직경을 가진 3m 길이의 PVC 파이프에 연결되며 끝부분에 있는 노즐을 통해 제트가 분사된다.

Fig. 2는 PVC 파이프 끝부분에 부착된 45°의 날카로운 모서리(sharpe-edged)를 가진 노즐을 나타낸다. 이때 탭과 탭 사이 구간에서 열전달계수를 측정하기 위하여 노즐 장착 부분을 360°회전이 가능하도록 제작하였다. 노즐과 충돌판 사이의 거리는 L로 표시하고 충돌판 중심에서 반경방향으로의 거리는 R로 정의하였다.

본 실험에서 테스트한 탭부착 노즐들의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 노즐에 부착된 탭들은 모두 가로 세로의 길이의 비가 2:3인 이등변 삼각형 형상을 가졌다. 본 연구에서는 탭이 없는 노즐, 90° 간격으로 4개의 탭이 부착된 노즐, 60° 간격으로 6개의 탭이 설치된 노즐, 그리고 45° 간격으로 8개의 탭이 설치된 노즐 등 4가지 노즐을 대상으로 실험을 수행하였다. 그리고 탭이 제트 노즐 모서리로부터 제트 중심방향으로 튀어나온 길이(protrusion depth)를 H로 표시하였으며, 노즐의 중심과 탭 정점을 이은 선을 탭라인(tab line)이라고 하였다.

공기 제트의 온도를 측정하기 위해서 직경 0.20 mm의 보정된 T형 열전대를 노즐 출구로부터 170 mm 상류 위치에 유동에 방해가 되지 않도록 부착하였다. 주변공기의 온도를 측정하기 위해서 제트 바깥 영역에도 동일한 열전대를 설치하였다. 이 열전대들을 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 측정 오차를 갖는 HP3852A 데이터 취득장치에 연결하여 온도를 측정하였다. 노즐과 충돌판 사이의 거리(L/D)는 충돌

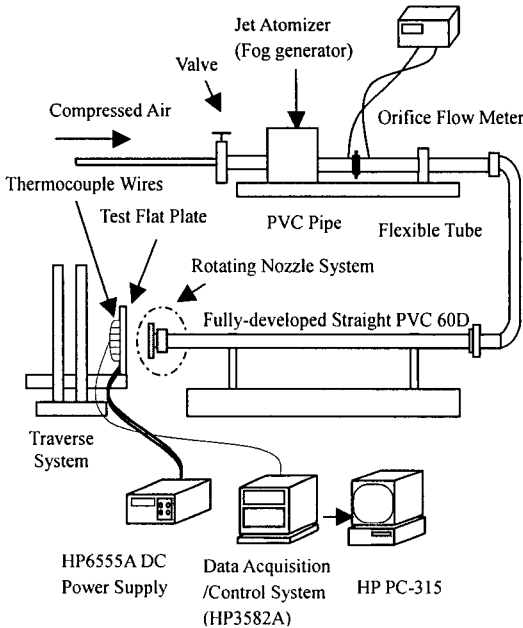


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

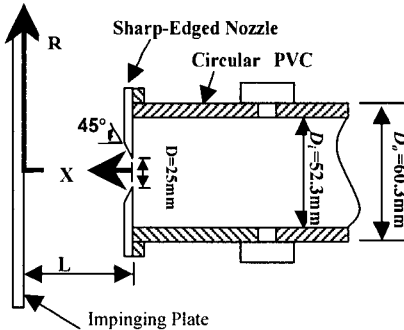


Fig. 2 Configuration of jet nozzle with tabs and coordinate system

판을 2축 이송장치에 설치하여 조절 하였다.

주변 공기의 온도를 제트온도와 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지하기 위해 실험실 내부 온도를 실험전에 에어 킨를 이용하여 제어하였다. 충돌면의 열전계수 측정에 사용되어진 평판은 가로 26cm, 세로 26cm, 두께 1.27cm 인 강화 폴리에스테르 판(Plexiglas plate)과 금박막(gold-coated film), 그리고 33 개의 열전대로 구성되어있다. 이 충돌평판의 표면에는 세로 4cm, 가로 12cm, 두께 130 μm 의 금박막을 스프레이 접착제를 이용하여 접착시켰다. 이 금박막에 전류를 가해줌으로써 균일 열유속 (uniform heat flux) 경계조건을 만들 수 있다. 전극으로 얇은 구리 테이프를 금박막 양쪽끝에 붙였고, 전극과 금박막 사이에서의 전류 손실을 막기위해

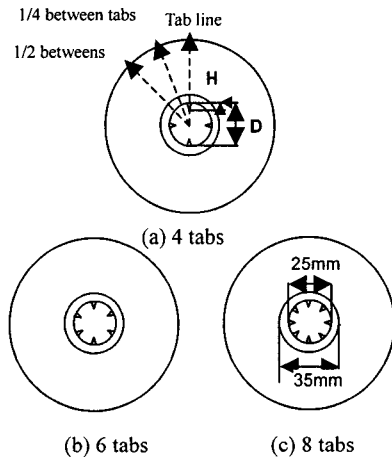


Fig. 3 Configuration of jet nozzle exits attached with triangular tabs

은(silver) 페인트를 칠하였다. 구리전극은 50mV, 5A 용량의 차단 저항기(shunt register)와 직류 전원공급기(HP6555A)에 연결되어 있고, 두 대의 전압계(Fluke 8840A)로 금박막 사이의 전압강하와 여기에 가해지는 전류량을 측정하였다. 그리고, 국소 열전달계수는 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$h = \frac{q_v}{(T_w - T_j)}, \quad Nu = \frac{hD}{k} \quad (1)$$

$$q_v = \frac{f IV}{A} - q_r - q_c = \frac{f IV}{A} - \epsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) - q_c \quad (2)$$

여기서 h 는 국소 대류열전달 계수, T_w 는 충돌면 온도, T_j 는 제트온도, 그리고 T_a 는 주변 공기의 온도를 나타낸다. 대류 열유속(convection heat flux, q_v)은 전원공급기로 공급된 열유속에서 벽면으로의 전도 열유속(conduction heat flux, q_c)과 Stefan-Boltzmann 식으로부터 계산되어지는 복사 열유속(radiation heat flux, q_r)을 빼 준 값이다. 일반적으로 전도와 복사에 의한 열손실은 전체 열유속의 3~7% 정도이다. 위 식에서, f 는 평균 가열량에 대한 국부 전기 가열량의 비율을 나타내는데, 보통 금박막의 불균일도라 한다. Baughn[1989]등은 본 실험에서 사용되어진 금속막의 경우 96% 이상의 균일도를 가진다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 열유속 계산시 $f = 1$ 로 가정하였다. 이 가정에 기인한 전체 Nusselt 수의 측정 불확실성은 대략 1.5%미만이었다. 평균 열전달계수 (\overline{Nu})는 국소 온도분포 결과를 다음과 같이 적분하여 구하였다.

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}D}{k} = \frac{D}{k} \int_A h \frac{(T_w - T_j)}{A\Delta T} dA \quad (3)$$

$$\overline{\Delta T} = \overline{(T_w - T_j)} = \int_A \frac{(T_w - T_j)}{A} dA \quad (4)$$

주어진 균일 열유속 조건에 대하여 총돌면에서 $T_w - T_j$ 는 일정하며 축대칭 제트이므로 위의 식은 다음과 같이 단순화 시킬 수 있다.

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}D}{k} = \frac{2}{R^2} \int_0^R Nu(r) r dr \quad (5)$$

본 실험에서는 제트와 주위 유체의 온도차이를 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내로 유지하여 온도차에 기인한 열유입 (thermal entrainment) 효과를 무시할 수 있도록 하였다.

2.2 유동가시화 실험

탭설치에 따른 총돌제트의 유동구조 변화를 관찰하기 위하여 연선법으로 유동을 가시화하였다. Fig. 4는 여기에 사용된 가시화 실험장치를 보여준다. 직경 $150\mu\text{m}$ 의 가느다란 니크롬선을 연선으로 사용하였으며, 연선을 노즐 출구로부터 1mm 떨어진 곳에 위치시켰다. 이 연선에 충분한 장력을 주기 위해 아래부분에 무거운 추를 매달았다. 오일 (Safex fog fluid)을 균일하게 연선에 칠하고 여기에 전류를 가해주게 되면 오일이 연소하면서 연기를 발생시킨다. 연소되어 발생한 연기는 유적선

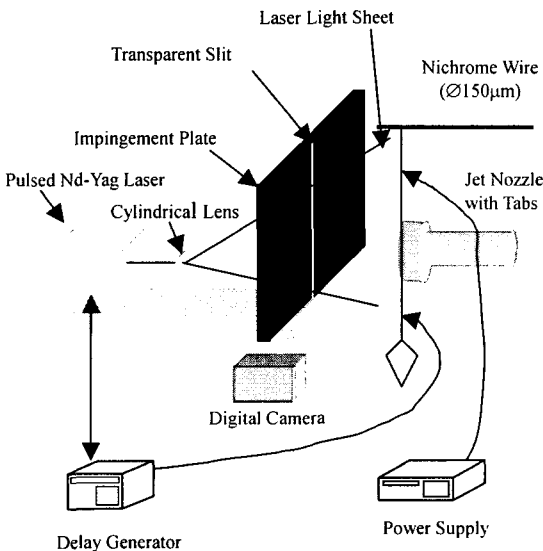


Fig. 4 Schematic diagram of smoke-wire flow visualization

(streakline)을 형성하고 정성적인 유동구조를 보여 주게 된다. 이때 Nd-Yag 레이저에서 나온 펄스형 레이저빔을 원통형 렌즈 (cylindrical lens)를 지나게 하여 레이저 평면광을 형성하고 이를 가시화하고자 하는 영역을 조명하게 한다. 이때 카메라 셔터를 열어서 조명되어진 유동영상을 획득하게 된다. 원하는 순간의 가시화 영상을 획득하기 위해서 레이저와 전원공급기를 동기시켰으며, 선명한 영상을 기록하기 위해서 600만 화소의 디지털 카메라를 사용하였다.

제트의 횡단면 가시화에는 연선법을 사용하는 것이 불가능하므로 PVC pipe 에 직접 연기를 주입시켜 연관(smoke tube)방식으로 유동을 가시화 하였다. 제트 분무 발생장치에 올리브 기름을 넣어 연기를 발생시키고, 이를 파이프에 주입하여 노즐을 거쳐서 나오게 하였다. 그리고 측정하고자 하는 횡단면을 레이저 평면광으로 조명하고 카메라 셔터를 열어서 원하는 영상을 디지털 카메라로 획득하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 유동가시화

총돌제트의 유동구조를 관찰하기 위하여 연선법으로 유동을 가시화하였다. Fig. 5는 노즐과 총돌면 사이의 거리가 $L/D=2$ 이고 레이놀즈수가 15,000인 조건에서 탭이 없는 경우와 탭이 4개와 6개인 경우의 총돌제트 유동을 가시화한 것이다. 이때 탭은 반경방향으로 $H/D=0.2$ 만큼 유체 내부로 삽입하였다. 탭이 설치된 경우에는 탭라인과 탭과 탭 사이의 중간 단면인 1/2선상 2개의 단면에서 유동을 가시화하였다. 가시화 결과를 살펴보면 탭이 없는 경우에는 와류들이 제트 중심선을 기준으로 거의 대칭적으로 나타나고 있다.

탭이 없는 경우에 비하여 탭이 있는 경우에는 제트 유동이 탭설치에 기인하여 큰 규모의 와가 작은 크기로 깨어지고 주위 유체와 활발하게 혼합하는 유동형태를 보여주고 있다. 탭선상을 따라 가시화한 Fig. 5(b),(d)를 보면 활발한 혼합현상에 기인하여 제트유동이 하류로 나아감에 따라 옆으로 많이 확장되고 있는데, 탭이 4개인 경우가 이런 현상을 보다 뚜렷하게 보여주고 있다. 탭라인 사이의 중간단면[Fig. 5 (c),(e)]에서는 탭라인 단면에 비해 제트 폭이 거의 확장되지 않고 있는데, 이것은 탭설치에 따른 유동교란 효과가 $L/D=2$ 의 짧은 거리에서는 중앙단까지 미치지 못하기 때문으로 생각되어 진다. 이 가시화 결과로부터 탭설치의 영향으로 제트전단층이 교란되고 주위 공기

와 보다 활발하게 혼합하여 난류강도를 증가시키고, 궁극적으로 충돌평면에서의 열전달을 증가시킬 수 있음을 가시적으로 확인할 수 있다.

Fig. 6은 노즐 출구로부터 $L/D=2$ 만큼 떨어진 위치의 횡단면에서 유동을 가시화 한 결과이다. 탭

이 부착되지 않은 경우에는 유동이 원형에 가까운 형태로 퍼져나가고 있음을 보여주고 있다. 이에 비해 4개의 탭이 부착된 경우에는 크게 4개의 영역으로 나뉘어 진다. 이것으로부터 탭의 효과가 근접 제트 영역에서는 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 그리고 탭라인 단면에서 연기가 많이 퍼지고 있는데, 이것은 종단면 가시화 결과 [Fig. 5(b),(c)]와 잘 일치한다.

6개의 탭을 노즐에 부착한 경우의 가시화 결과인 Fig. 6(c)를 보면 전체적으로 원형에 가깝고 Fig. 6(b)에 비하여 탭의 영향이 뚜렷하지는 않지만, 탭라인 쪽이 중간단면에 비해 약간 넓게 퍼짐을 알 수 있다. 이것으로부터 탭의 개수가 적을 때는 탭의 개수만큼의 유동영역 이 나뉘어 지나 탭의 개수가 많아지게 되면 주위 유체와의 혼합이 보다 활발해져 유동영역의 구분이 뚜렷하지 않음을 알 수 있다.

3.2 열전달 특성

Fig. 7은 제트의 레이놀즈 수 $Re=15,000$ 조건에서 노즐 출구에 4개, 6개 및 8개의 탭을 부착하였을 때, 충돌면에서 측정된 국소 열전달계수의 변화를 나타내고 있다. 이때 탭의 반경방향으로 들어간 침투깊이는 $H/D=0.2$ 이다. 충돌평면의 전 열계수 측정은 탭라인과 탭과 탭사이의 중앙단면, 그리고 탭과 탭 사이의 1/4 단면의 3가지 단면 [Fig. 3(a)]에서 수행하고 탭이 설치 되지 않은 경

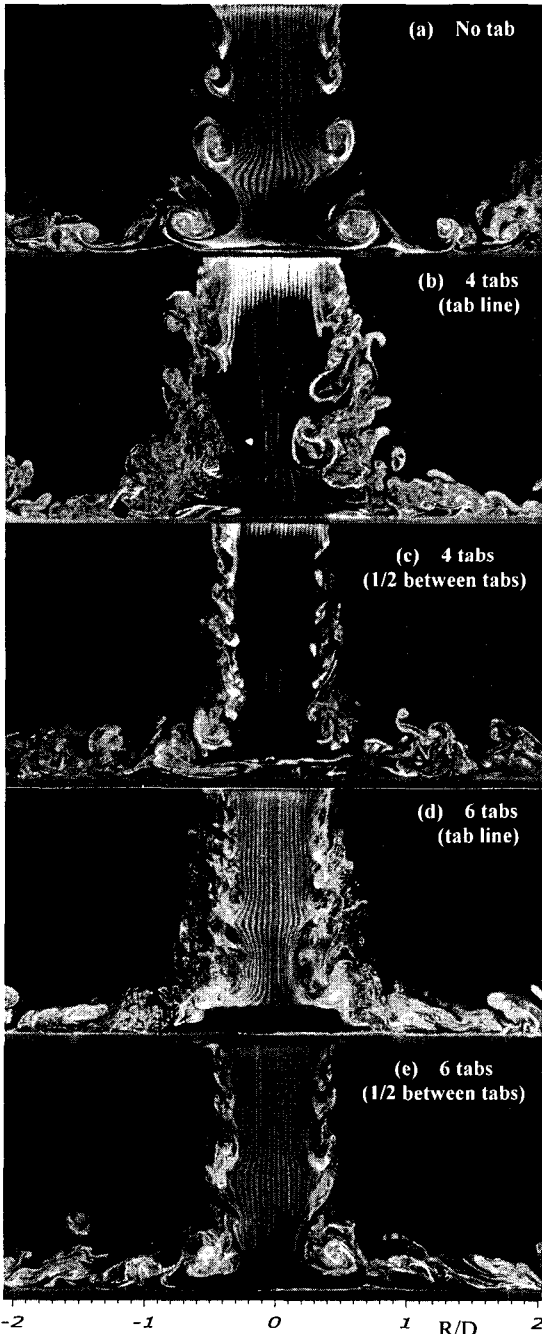


Fig. 5 Visualized flow of an impinging jet using smoke-wire technique at $L/D=2$ ($H/D=0.2$, $Re=15,000$)

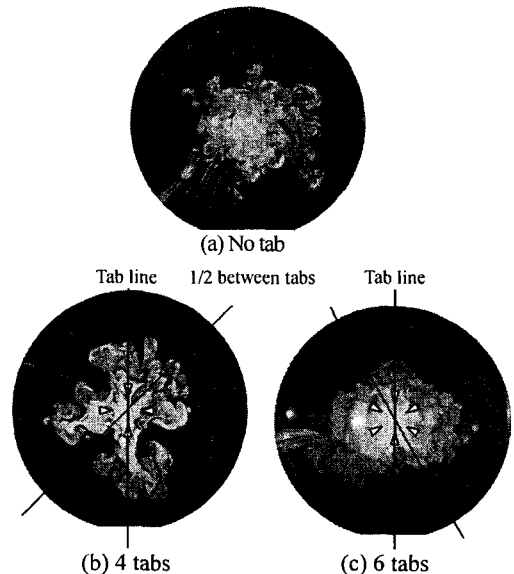


Fig. 6 Sagittal flow images in cross section of impinging jet with smoke-tube method at $L/D=2$

우의 결과와 비교하였다.

우선 탭이 4개 설치된 경우[Fig. 7(a)]를 살펴보면, 노즐과 평판 사이의 거리비가 $L/D=2$ 일때 정체점에서 $R/D=0.5$ 부근까지는 측정 단면에 상관없이 탭이 없을 경우에 비하여 큰 열전달계수 값을 가진다. 이것은 탭에 의한 유동 교란과 활발한 외부 유동의 유입으로 일어나는 현상으로 볼 수 있다. 그러나 천이영역($R/D < 2$)에서는 탭라인 단면에서 보다 큰 국소 Nu 값을 가지며 탭과 탭사이의 중간단면으로 나아갈수록, 열전달계수값이 감소하고 있다. 반면에 벽제트 영역($R/D > 2$)에서는 탭라인 단면에서의 열전달계수가 탭이 없는 경우에 비하여 오히려 감소하고 탭라인 사이의 중간 단면에서는 열전달계수가 증가하고 있다. 전반적으로 열전달계수는 총돌 중심에서 최대값을 가지며 반경 방향으로 나아감에 따라 점차 감소하다가 $R/D=0.5$ 부근에서 국부적으로 상승하며 그 이후 영역에서는 단조롭게 감소한다. 이것은 $R/D=0.5$ 부근에서 속도구배가 크고 난류강도가 큰 값을 가지기 때문이다.

노즐과 총돌면 사이의 거리가 $L/D=4$ 로 증가한 경우에도 전반적으로 $L/D=2$ 인 경우와 비슷한 전 열특성을 보이지만, 측정단면 변화에 따른 열전달계수의 차이는, $L/D=2$ 에 비해 감소하고 있다. 이것은 탭 직후 단면에서는 유동 교란이 탭 주위영역에 국한 되지만 하류로 나아감에 따라 활발한 혼합에 기인하여 원주 방향으로 거의 균일한 유동특성을 가지기 때문이다. 이에 따라 노즐과 총돌면 사이의 거리가 $L/D=6$ 로 늘어나면 측정단면에 상관없이 열전달 계수가 거의 비슷한 값을 가지며 열전달계수의 상승효과도 짧은 L/D 에 비해 줄어들고 있다. 그리고 $L/D=8$ 조건에서는 탭설치에 따른 열전달계수의 증가는 거의 나타나지 않고, 측정위치에 따른 변화도 거의 사라지게 된다.

탭을 6개 혹은 8개 설치한 경우에도 4개의 탭을 설치한 경우[Fig. 7(b)]와 유사한 결과를 보여주고 있다. 노즐과 총돌면 사이가 짧은 경우에는 천이 영역까지는 탭라인 단면에서 열전달계수가 큰 값을 가지고 탭라인에서 중간단면으로 나아갈수록 열전달계수의 상승폭이 줄어들며 벽제트 영역에서는 반대 현상이 나타난다.

탭이 4개 혹은 6개 설치된 경우, $L/D=2$ 인 조건에서 벽제트 영역의 탭라인 단면에서는 열전달계수가 탭이 없는 경우보다 작은 값을 가졌다. 그러나 탭의 개수가 8개로 많아진 경우에는 모든 단면에서 탭이 없는 경우보다 큰 Nu 값을 가졌다. 이것은 탭의 개수가 많아질수록 열전달계수가 총돌면에서 고르게 상승하기 때문으로 생각 되어진다.

또한 탭의 개수가 많을 경우 탭에 기인한 열전달계수의 상승효과는 노즐과 총돌면 사이의 거리가 멀어져도 지속되는 경향을 보여주고 있다.

이처럼 노즐에 탭을 설치하게 되면 탭설치에 기인하여 유동이 교란되고 난류강도가 증가하며 이로 인해 열전달계수가 상승하게 된다. 총돌영역 내부에서는 탭라인 단면이 탭과 탭사이의 중간단면에 비해 혼합효과가 활발하여 열전달계수의 상승효과가 상대적으로 크게 나타났다. 그러나 벽제

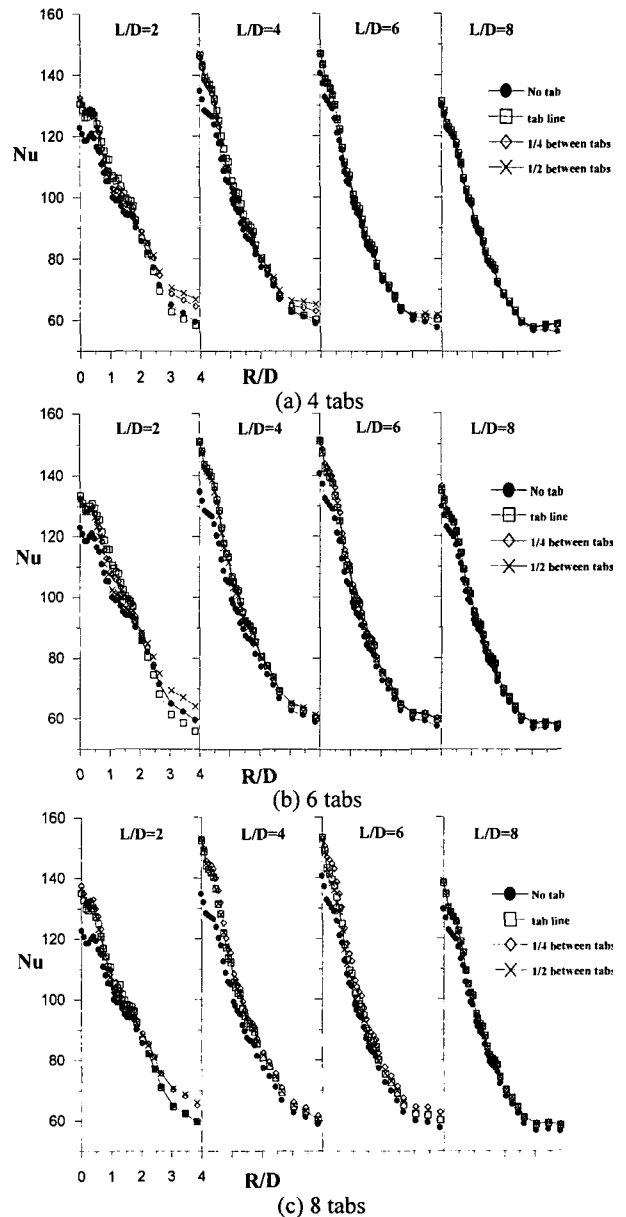


Fig. 7 Local Nusselt number distribution at $Re=15,000$

트 영역에서는 오히려 탭과 탭 사이의 중앙단면에 비하여 탭라인 단면에서 낮은 열전달계수를 가졌다.

Fig. 8 은 노즐과 충돌판 사이의 거리(L/D) 변화에 따른 최대 국소 열전달계수의 변화를 나타낸 것인데, 본 연구에서 다른 모든 실험조건하에서 정체점(R/D=0)에서 최대값을 가졌다.

탭을 설치하지 않은 일반적인 충돌제트의 경우는 Lee 등⁽¹⁰⁾의 결과와 마찬가지로 L/D=6 일 때 최대값을 가진다. 그러나, 탭이 설치된 경우에는 L/D=4 와 L/D=6 에서 거의 비슷한 높은 열전달계수를 가지며, L/D=5 부근에서 최대값을 가졌다. 최대 열전달계수는 포텐셜 코아의 길이와 관련이 있으므로 탭을 설치함으로써 혼합이 활발해지고 포텐셜 코아 길이도 짧아짐을 알 수 있다. 제트의 난류강도를 변화시키기 위하여 메쉬(mesh) 스크린을 노즐에 설치하거나⁽¹¹⁾ 스윙을 추가한 경우⁽¹²⁾의 충돌분류 전열특성 결과도 이와 유사한 경향을 보여주고 있다.

본 연구에서 다른 모든 L/D 조건에서 탭의 개수가 늘어날수록 정체점 열전달계수는 증가하였다. L/D=5 조건에서 그 효과가 가장 크게 나타났다. L/D=5 조건에서 탭을 8개 설치한 경우 탭이 없는 경우에 비해 정체점 열전달계수는 약 14.5% 증가하였으며, 4개의 탭을 설치한 경우 약 9.8% 증가한 것으로 나타났다. 제트 노즐에 탭을 설치하게 되면 유동이 흘러가는 노즐 단면적이 줄어들기 때문에 제트의 유속이 증가하게 된다. 탭이 8개인 경우에 비해 탭이 4개인 경우, 노즐 단면적은 약 5.6% 크며, Pitot 관으로 측정된 제트 중심속도는 탭이 8개인 제트에 비해 약 5% 정도 적었다. 따라서 탭의 유동교란 효과에 더해 이와 같은 속도

증가도 열전달 향상에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 8개 탭을 침투 깊이를 H/D=0.2와 H/D=0.1로 변화시키고 충돌평판을 5°간격으로 회전시켜 가면서 측정된 열전달계수 값을 원주방향으로 평균하여 구한 국소 평균값을 나타낸 것이다. 노즐과 충돌면 사이가 가까운 L/D=2 조건에서는 H/D=0.2인 경우가 H/D=0.1인 경우보다 충돌영역(R/D<0.5)에서 다소 큰 열전달계수 값을 가지나 이 영역을 벗어나면 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 노즐과 충돌판 사이의 거리가 L/D=4로 증가하면 충돌영역과 천이영역에서 탭의 침투깊이가 깊은 경우가 보다 큰 열전달계수 값을 가짐을 보여주고 있다. 정체점에서 국부 열전달계수는 약 8.6% 증가한 것으로 나타났다. 그러나 L/D=6 조건에서 그 차이는 줄어들다가 L/D=8이 되면 탭의 침투깊이에 상관없이 거의 비슷한 열전달계수 분포를 보여주고 있다. 이것으로부터 탭의 침투깊이도 충돌면에서의 전열특성을 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

충돌평판에서 R/D<4인 구간에 대해 적분하여 구한 평균 열전달계수의 결과를 Fig. 10에 나타내었

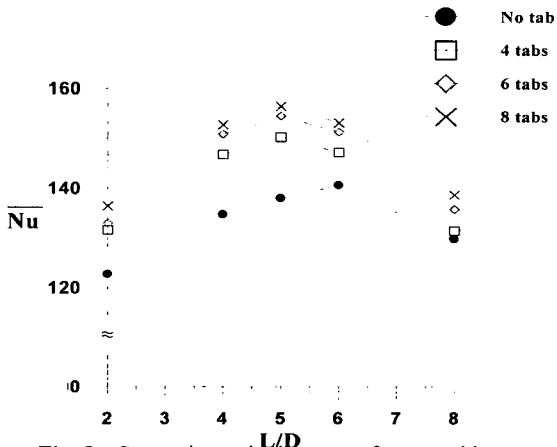


Fig. 8 Stagnation point heat transfer rate with respect to nozzle-to-plate spacing(L/D) at Re=15,000

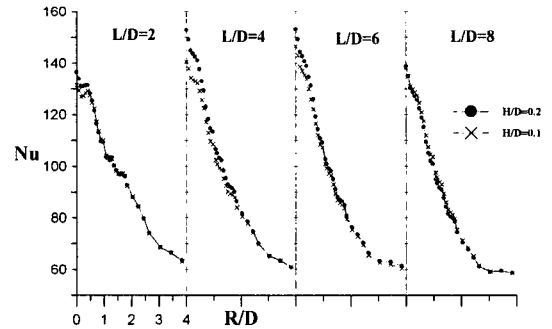


Fig. 9 The effect of protrusion depth of tabs on mean Nusselt number at Re=15,000 for the case of 8 tabs

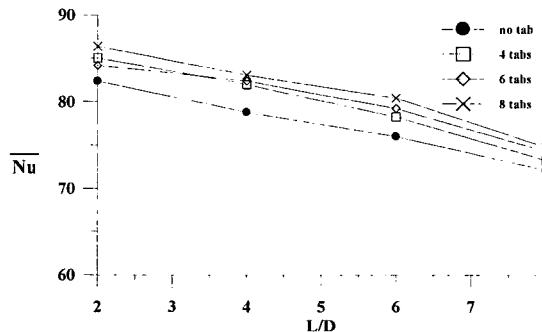


Fig. 10 Variation of average Nusselt number with respect to nozzle-to-plate spacing(L/D) for various number of tabs at H/D=0.2

다. 여기에서 보면 노즐과 충돌판 사이의 거리(L/D)가 증가할수록 평균 열전달계수가 감소하고 있다.

노즐과 충돌면 사이의 거리가 짧은 L/D=2조건에서는 탭이 4개 일때가 6개인 경우보다 큰 평균 열전달계수 값을 가진다. 그러나 L/D가 L/D=4보다 커지게 되면 탭의 개수가 증가함에 따라 평균 열전달계수도 증가하였다. L/D=4 조건에서 탭을 8개 설치한 경우 평균열전달계수 값은 탭이 없는 경우에 비해 약 5.4% 정도 증가하였다.

4. 결 론

제트 노즐 출구에 삼각형의 탭을 부착하고 이들이 충돌제트의 유동구조와 충돌면에서의 전열특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

(1) 노즐과 충돌면 사이의 거리(L/D)가 짧은 경우 탭 후방에서 유동교란이 크게 일어나 충돌면의 측정단면에 따라 열전달계수가 큰 차이를 보여준다. 즉, R/D<2 인 영역에서는 탭라인 단면에서 열전달계수가 큰 값을 가졌다. 그러나 R/D>2 영역에서는 반대로 탭라인 단면에서 상대적으로 작은 열전달계수 값을 가진다. L/D가 커질수록 주위 유체와의 혼합이 증대되어 측정 단면에 따른 차이는 감소하였다.

(2) 탭 개수가 증가함에 따라 정체점 열전달계수와 평균 열전달계수가 증가하였다. 정체점 열전달계는 L/D=5 조건에서 최대값을 가지며, 8개 탭이 설치된 경우에는 설치하지 않은 경우에 비해 약 13.0% 상승하였다. L/D가 5보다 커지면 열전달계수의 상승폭은 감소하였으며, 평균 열전달계수는 8개 탭이 설치된 경우 L/D=4인 충돌영역에서 약 9.9% 상승하였다.

(3) 탭의 침투깊이가 클수록 전달특성 향상에 효과적인 것으로 나타났는데, L/D=4 조건에서의 정체점 열전달계수는 H/D=0.2인 경우가 H/D=0.1인 경우보다 약 8.6% 증가하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지

원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다. 또한 논문 수정작업에 도움을 준 장영길 군에게 고마움을 전합니다.

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 paper 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) 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.
- (9) 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.
- (10) Lee, D., Greif, R., Lee, S.J. and Lee, J., 1995, "Heat Transfer from a Flat Plate to a Fully Developed Axisymmetric Impinging Jet," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 772~776.
- (11) Cho, J.W. and Lee, S.J., 2001, "Control of Impinging Jet Heat Transfer Using Mesh Screen," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 25, No. 5, pp. 722~733.
- (12) Cho, J.W. and Lee, S.J., 2001, "Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Swirling Impinging Jet," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 25, No. 10, pp. 1346~1354.