

〈논 문〉

## 단이 진 경사벽면에 부착되는 2차원 평면제트의 열전달 효과에 관한 연구

윤순현\* · 이대희\*\* · 송흥복\*\*\* · 심재경\*\*\*

(1997년 1월 25일 접수)

### An Investigation on Heat Transfer Effects of Two Dimensional Plane Jet Attaching Offseted Obliqued Wall

Soon Hyun Yoon, Dae Hee Lee, Heung Bog Song and Jae Kyung Sim

**Key Words :** Liquid Crystal(액정), Convective Heat Transfer (대류열전달), Inclined Wall Attaching Offset Jet (벽부착제트), Nusselt Number (Nu 수), Gold Coated Film (금박막), Color Image Processing System (칼라영상처리장치)

#### Abstract

Experiments have been conducted to determine the flow and heat transfer characteristics for a two-dimensional turbulent wall attaching offset jet at different oblique angles to a flat surface. The distributions of the wall static pressure coefficient and time-averaged reattachment position for various offset ratios and oblique angles have been measured. The local Nusselt number distributions on the plate surface were also measured using liquid crystal as a temperature indicator. The new hue-capturing technique utilizing a true color image processing system was used to accurately determine the temperature of the liquid crystal. The experiments were carried out at Reynolds number,  $Re$  (based on  $D$ ) of from 7300 to 21,300 with offset ratio,  $H/D$  from 2.5 to 10, and oblique angle,  $\alpha$  from  $0^\circ$  to  $40^\circ$

기호설명	의 거리)
$A$ : 금박막의 면적	$h$ : 대류열전달 계수
$C_{pw}$ : 벽면정압계수	$I$ : 금박막에 가해지는 전류
$C_{pwmax}$ : 최대 벽면정압계수	$Nu$ : 국소 Nusselt 수
$C_{pwmin}$ : 최소 벽면정압계수	$P_w$ : 벽면정압
$D$ : 노즐의 폭 ( $D=10$ mm)	$P_\infty$ : 대기압
$f$ : 금박막의 도금 균일성	$Re$ : 레이놀즈수
$H$ : 벽높이(노즐의 벽방향 끝에서 벽까지	$T_i, T_e$ : 실험시의 공기온도
	$T_w$ : 벽면상의 국소온도
	$U$ : $X^a$ 방향 평균 속도
	$U_j$ : 노즐 출구 평균 속도
	$U_m$ : $X^a$ 방향 최대 평균 속도
	$V$ : 금박막에 가해지는 전압

\*회원, 부산대학교 기계공학부

\*\*회원, 인제대학교 기계자동차공학부

\*\*\*부산대학교 대학원

- $X$  : 노즐 출구에서 유동 방향으로의 좌표
- $X^a$  : 경사벽면상의 기준좌표
- $X_p^a$  : 시간 평균 벽부착 길이
- $Y$  : X축에 수직인 좌표
- $Y^a$  : 경사벽면에 대해 수직방향인 좌표
- $Y_{1em}$  : 상부 제트 반폭 (upper jet spread)

그리스문자

- $\alpha$  : 벽판의 경사각
- $\gamma$  : 순방향 흐름비 (forward flow fraction)
- $\epsilon$  : 액정 표면의 방사율 (emmissivity)

1. 서 론

경사진 벽부착 제트(Inclined Wall Attaching Offset Jet ; 이하 IWAJOJ)란 Fig. 1과 같이 벽면이 노즐 출구에 경사져 있는 제트를 말하며, 유동이 기하학적으로 단순하지만, 만곡된 유동장, 재부착 (reattachment), 재순환(recirculation) 및 벽제트 (wall jet) 등의 여러 가지 국소유동장을 관찰할 수 있는 복합 난류 전단류 (complex turbulent shear flow)이다. 산업현장에서는 가스터빈 연소실의 막냉각, 공기 순환계에서 에어 디플렉터 (air deflector), 자동차 상에 제거를 위한 디미스터 (demister), 제트 형태로 배출되는 배기에 관한 환경문제 등 여러 곳에 적용할 수 있다.

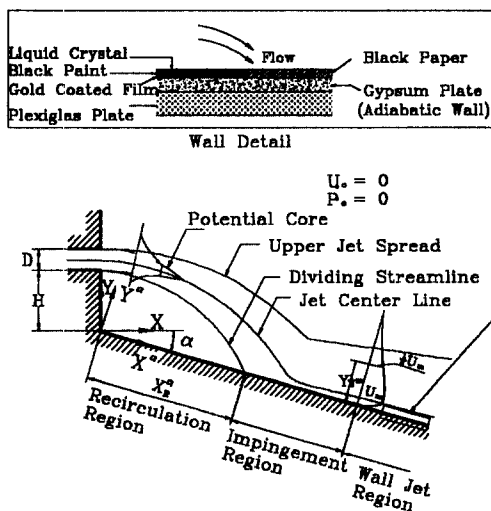


Fig. 1 Schematic diagram of the inclined wall attaching offset jet flow field

Borque와 Newman,<sup>(1)</sup> Sawyer,<sup>(2)</sup> Rajaratnam과 Subramanya,<sup>(3)</sup> Perry,<sup>(4)</sup> Pelfray,<sup>(5)</sup> Nozaki 등,<sup>(6,7)</sup> Yoon 등<sup>(8,9)</sup> 등은 벽면이 노즐 출구와 나란하게 설치된 벽부착 제트 (Wall Attaching Offset Jet ; 이하 WAOJ) 에서 압력 분포, 부착 길이, 평균속도분포, 난류량 분포 등을 연구 했다. WAOJ에서 열 전달 효과에 관한 연구 사례는 극히 드물며 Kumada 등<sup>(10)</sup>은 나프탈렌 승화법을 이용하여 벽면의 물질 전달률을 조사하였고, Hoch & Jiji<sup>(11)</sup>는 가열된 벽부착제트(WAOJ)의 열특성치를 실험과 이론 해석을 통하여 조사하였다. Holland & Liburdy<sup>(12)</sup>는 벽부착제트 유동장을 재순환, 충돌, 재발달 벽제트의 세 구간으로 나누어 각 영역별로 온도 분포를 구하고 벽제트의 경우와 비교하였다. IWAJOJ에서 열전대와 같은 접촉점 (point sensing) 으로는 유동장 교란으로 인한 오차를 발생할 것이 우려되며, 또한 가열된 제트를 분사하여 유동장 내 온도 분포를 파악하는 방법에서도 유입되는 외기 조건이 야기하는 변화를 모두 보정하기 힘든 문제점들이 있고, 벽면에 특별한 열역학적 경계 조건을 설정하기가 쉽지 않다는 어려움이 있다. 본 연구에서는 IWAJOJ에서 벽면 정압과 유동장을 측정하였고 그리고 유동장에 교란을 줄 우려가 거의 없는 최근에 활발히 연구되고 있는 액정 (liquid crystal) 과 금박막 (gold coated film)을 사용하여 등열유속 경계 조건에서 벽면 대류 열전달 계수를 측정하였으며 벽단비, 경사각, Reynolds 수의 변화에 따른 최대 벽면정압계수, 열전달 효과의 각종 상관관계 를 조사 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 풍동과 시험부

실험에 사용된 풍동은 개방형 송출식 풍동이며 송풍기 (blower), 확대부 (diffuser), 정류실 (plenum chamber), 축소 노즐 (contracting nozzle)로 구성되었다. 노즐 출구 속도는 5~35 m/s 범위에서 조절 가능하며, 확대부의 전 후에 스크린을 설치하여 흐름의 균일성을 유지하였다. 축소 노즐은 운동량 손실을 막고 균일한 출구 속도를 얻기 위하여 Morel<sup>(13)</sup>이 제안한 3차곡선으로 설계되었고, 출구 노즐폭 D는 10 mm, 높이는 350 mm로 형상비는 35, 단면 축소비는 12이다. 노즐 출구 평균 속도의 균일도가 경계층 부분을 제외하고는 폭 방향과 길

이 방향으로 속도 변동 분이 1.0~2.0 %로 양호하였고 초기 출구 주류 난류 강도는 출구 속도의 0.1%이하로 유지되었다. 제트가 부착되는 경사벽 판은 투명아크릴(plexiglas)로 제작하여 벽단비 H/D는 0~15, 경사각은 0°~45°의 범위에서 이송이 가능하도록 장착하였다. 벽판의 크기는 350×1200 mm이며 벽면 전도를 막기 위해 전면에 단열재를 부착하였다. 벽면 정압을 측정하기 위하여 경사벽면에 86개의 압력공(직경 1 mm)을 10 mm 간격으로 설치하였으며 인접한 정압공 사이의 상호간섭을 배제하기 위하여 대각선 방향으로 엇갈리게 배치하였다. 압력의 측정은 디지털 마이크로 마노미터(Furness 사 model MCD-FC004)를 사용하여 측정하였다.

## 2.2 속도 및 온도 센서의 교정

유속 측정 센서는 TSI사 model 1288 스플릿 필름(split film probe; 이하 SFP)을 Stock<sup>(14)</sup>의 법칙을 수정하여 선정된 각각의 속도 구간에 대한 무차원 함수를 따로 정의하는 방법을 택한 김경천 등<sup>(23)</sup>의 방법으로 교정하였고, 열전달 특성 실험에서 벽면의 온도 측정에 사용된 액정은 윤순현 등<sup>(24)</sup>과 동일한 장비를 사용하여 같은 방법으로 R35C3W 액정(약 35 °C에서 적색이 나타나기 시작하여 38 °C에서 청색을 나타냄)을 교정하였다. 교정 실험으로 얻어진 영상을 분석하면 온도에 따른 빛깔(hue), 맑기(saturation), 밝기(intensity)의 분포를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이 세 가지 색상특성 중 특정 온도구간에서 선형성이 좋은 빛깔과 온도간의 상관관계를 Camci 등<sup>(15)</sup>의 방법에 따라 칼라영상처리 기법으로 조사하여 온도 측정에 적용하였다. 교정결과 식은 (1)로 표현되며 교정 실험을 통해 측

정된 액정의 빛깔-온도 분포의 교정 결과가 Fig. 2에 나타나있다

$$T_w = 34.85 + 0.447H + 0.614H^2 - 0.586H^3 + 0.159H^4 \quad (1)$$

## 2.3 실험 방법 및 해석

유동장 실험은 센서로부터 검출된 속도 성분들의 신호를 정온 열선풍속계(constant temperature anemometer)인 TSI 사 IFA-300으로 SFP를 작동시켰으며, IFA-300내의 5 khz 저역통과 필터를 통해 유속 신호의 교류성분 Aliasing 현상을 억제하였다. C. T. A에서 출력된 신호는 A/D 변환기에서 디지털 신호로 변환되며, 디지털화된 신호는 개인용 컴퓨터에 온라인으로 저장된다. 유속의 측정 추출간격(sampling interval)은 100  $\mu$ s이고 한 위치에서 4096개의 자료를 10회 측정하였다. 측정된 자료의 분석 시 평균을 취하는 방법으로 Westphal과 Mehta<sup>(16)</sup>가 추천한 진행평균기법(running averaging method)을 이용하였다. 열전달 연구에서는 0.13 mm 두께의 폴리에스테르 필름에 약 20 Å 정도의 두께로 금을 입힌 금박막(gold coated film)을 사용하여 등열유속 경계 조건을 설정하였다. 금박막에 흑색도료와 액정은 공기층을 이용하여 두께가 일정하도록 여러 번 도포하였다. 유동에 의한 표면 열전달량에 따라 달리 형성되는 국소 온도 분포가 그 온도에 해당하는 액정의 색상으로 나타나게 된다. Fig. 1의 벽면 상세도는 등열유속 경계조건으로 설정된 실험 벽판이다. 금박막의 뒷부분에는 단열재를 사용하여 벽면 뒤로의 전도 열 전달을 최대한 차단시켰고, 빛의 벽판에 대한 반사로 인해 발생하는 오차를 줄이기 위해 흑지를 금박막의 가장자리에 붙였다. 열전달 실험장치는 단열재위에 접착제로 금박막을 부착시킨 다음 양 쪽 끝을 순동때로 붙여 도선으로 사용하였다. 그리고 금박막과 순동때 사이에는 완전한 통전을 위하여 전도성 수지 재료를 바르고 전력 공급선을 연결하였다. 공급되는 DC 전력은 Fluke 사의 hydra와 shunt register를 이용하여 측정된 전압과 전류로써 계산해 낼 수 있었고 열전달 계수의 계산을 위하여 노즐 출구, 실험실내 외기 온도는 교정된 열전대와 hydra를 이용하여 개인용 컴퓨터로 자료를 받았다.

양자화된 빛깔 값은 교정식을 통해 각 위치에서의 온도값으로 환산되고, 이로부터 국소 열전달 계

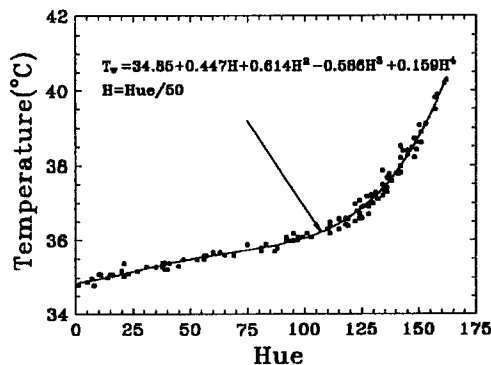


Fig. 2 Liquid crystal hue vs temperature calibration

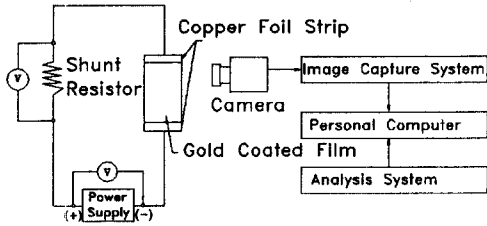


Fig. 3 Experimental apparatus and block diagram of experimental setup

수는 널리 알려진 대로 다음 식으로 계산된다.

$$h = \frac{q''_{conv}}{(T_w - T_j)} \quad (2)$$

$T_w$ 는 액정의 교정식을 이용하여 계산된 벽면상의 온도를,  $T_j$ 는 열전대로 측정된 노즐 출구에서의 제트 온도를 의미한다. 또  $q''_{conv}$ 는 금박막을 통한 전체 열유속에서 복사와 전도에 의한 열손실을 뺀 정미 대류 열유속이다. 즉,

$$q''_{conv} = \frac{f(I \cdot V)}{A} - q''_{rad} - q''_{cond} \quad (3)$$

여기서  $f$ 는 국부 전기 가열과 평균 가열의 비이며 금박막의 도금 균일도를 나타낸다. Baughn 등<sup>(17)</sup>와 Lee 등<sup>(18)</sup>에 의하면 금박막의 크기를 작게 하고 비교적 균일하게 도금되는 금박막 물의 중간 부분을 취할 경우 균일도가 0.98 이상이 됨을 보였다. 따라서 본 실험의 경우  $f \approx 1$ 이라고 가정하지만 그 값이 전체 불확실도에 기여하므로 추후 불확실도 계산에서 고려해 주기 위하여 식 (3)에 그대로 포함시켰다. 복사에 대한 열유속 손실은 벽면과 외기의 온도에 대한 스테판-볼츠만 관계식을 적용하여 계산하였는데,

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma [(T_j + 273.15)^4 - (T_a + 273.15)^4] \quad (4)$$

$\sigma$ 는 스테판-볼츠만 상수(Stefan-Boltzman constant;  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )이고  $T_a$ 는 외기의 온도이다. 방사율은 위의 실험조건에서 0.9의 값을 가지는 것으로 조사 되었다. 한편 전도에 의한 열손실은 뒷면의 단열재 열전도 계수가 0.1 W/mK 정도로 낮으므로 총발열량의 1%로 간주하였다. 변수  $I, V, A, \varepsilon, \sigma$  및  $T_a$ 는 각각 금박막을 통과하는 전류, 전압강하, 금박막의 표면적, 액정 및 흑색 도료의 방사율, 스테판-볼츠만 상수 및 대기의 온도이다. 불확실도를 해석하기 위하여 Kline과

Table 1 Nusselt Number uncertainty analysis

$x_i$	Unit	Value	$\delta x_i$	$\frac{\delta x_i}{x_i} \frac{\partial Nu}{\partial x_i} (\%)$
$f$		1.0	0.02	2.04
$T_w$	°C	35.2	0.2	1.86
$T_j$	°C	24.9	0.14	1.33
$A$	m <sup>2</sup>	0.036	$2.45 \times 10^{-4}$	0.69
$D$	m	0.01	$5.0 \times 10^{-5}$	0.49
$\varepsilon$	A	0.9	0.05	0.22
$I$		0.822	0.021	0.15
$T_a$	°C	24.71	0.14	0.05
$V$	V	66.87	0.035	0.05

$$\text{Total Nu uncertainty} : \frac{\delta Nu}{Nu} = 3.19 \%$$

McKlintock<sup>(19)</sup>의 방법을 사용하였다. Table 1에 의하면  $Re=19,000$ 과  $H/D=5.0, X/D=11.5$ 에 대한 Nusselt 수  $Nu$ 의 불확실도는 3.19%이다. 이때 금박막 도금의 균일도  $f$ 의 불확실도가 가장 크게 나타났고, 액정의 교정오차가 그 다음으로 중요한 불확실도 발생원인으로 나타났다.

### 3. 시험 결과

#### 3.1 벽면 정압 계수 분포

벽면 정압 계수  $C_{pw}$ 는 측정된 벽면정압을 다음 식으로 계산했다.

$$C_{pw} = \frac{(P_w - P_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_j^2} \quad (5)$$

Reynolds 수가 유동 특성에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 벽단비  $H/D=4.5, \alpha=30^\circ$ 에서  $Re, 21300, 14900, 7300$ 의 벽면 압력 계수의 분포를 조사하여 Fig. 4(a)에 보였다. 경사 벽면에서 벽면 정압 분포는 Borque와 Newman<sup>(1)</sup>의 결과와 같이 압력 공위치의 오차를 감안하면 6000 이상에서 재부착 점의 위치나 제트 주류 유동장은  $Re$  수에는 무관하다고 판단된다. 하지만 재순환 영역의 평균 압력장은 벽면의 경사각이 클수록  $Re$  수의 영향을 받는 것으로 판단이 된다.

Fig. 4(b)는 일반적인 벽면 정압분포 예로서  $\alpha=30^\circ$ 에서 벽단비의 변화에 따른 벽면 압력 계수의 분포를 보인 것이다. 벽단비가 커질수록 최대 및

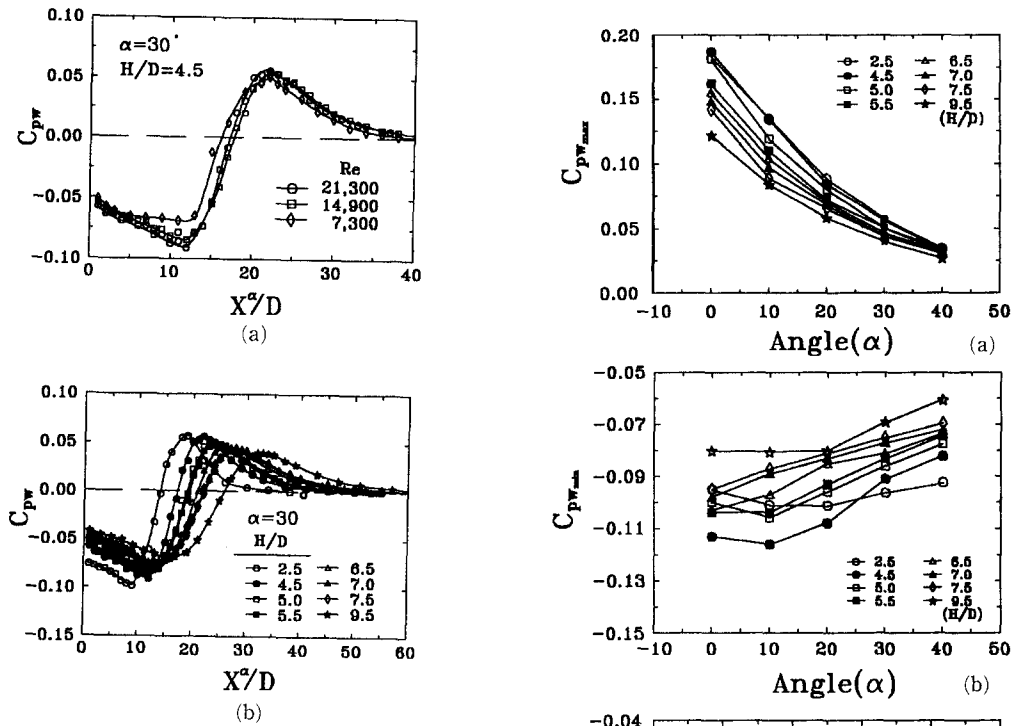


Fig. 4 Wall static pressure coefficient distributions

최소 벽면 정압 위치는 증가하는 한편 최대 벽면 압력계수 값은 감소하는 것을 알 수 있다. 벽면 경사각이 벽면 압력계수의 분포에 미치는 영향을 자세히 알아보기 위하여 Fig. 5(a), (b)에 각 벽단비에 대하여 벽면 경사각에 따른 최대, 최소 벽면 압력계수 값을 나타내었다. 벽면 경사각이 클수록 최대 벽면 압력계수 값은 작아지며 벽단비 간의 차이도 현격하게 줄어들고 있다. 이는 벽면 경사각이 클수록 제트 주류와 경사벽면 사이의 공간이 커지고 이에 따라 유입유량이 더 많이 공급될 수 있어 압력구동 역흐름이 약해지며 또한 벽면이 기울어져 있으므로 제트의 속도가 더 감소한 상황에서 벽부착이 발생하기 때문이다.

Fig. 5(c), (d)는 벽단비의 영향을 보기 위하여 각 경사각에 대하여 벽단비의 변화에 따른 최대, 최소 벽면 압력계수의 분포를 보인 것이다. 벽단비가 증가할수록 최대 벽면정압계수는 대체적으로 감소하는데 벽단비가 5에서 감소 양상이 변화함을 알 수 있다. Kumada 등<sup>(10)</sup>은 평행 벽부착제트에서 벽단비에 따른 벽면압력분포가 벽단비  $H/D \approx 6.5$  근방까지 일정하게 유지되다가 그 직후 변화하여 재순환 버블에 미치는 특성이 변화한다고 주장했으

Fig. 5 The maximum and minimum wall pressure coefficient with variance of offset ratio and inclined angle

며, 벽면 경사각이 영일 때  $H/D \approx 5.5$  근방에서 최대 벽면 압력계수 값의 변화가 나타남을 알 수 있

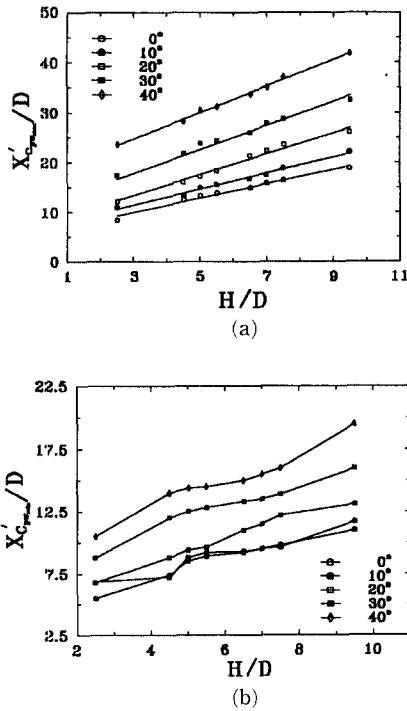


Fig. 6 The maximum and minimum wall pressure location

다. 이 특징은 벽면 경사각이 30° 이상에서는 뚜렷하게 관찰되지 않으므로  $\alpha \geq 30^\circ$ 에서는 벽단비가 재순환 유동장의 특성에 미치는 영향이 크게 줄어든 것으로 판단된다. 최대 최소 벽면 압력계수 위치는 Fig. 6(a), (b)와 같다. 벽면 경사각에 무관하게 벽단비가 증가함에 따라 최대 최소 벽면 압력계수 위치는 증가하며, 이것은 벽단비가 증가함에 따라 재순환 버블의 크기가 커지면서 유입 유량이 많아져서 이에 따른 재순환 버블의 세기가 약해지기 때문이다. 벽단비와 벽면 경사각 모두가 큰 경우 부착되는 제트 흐름의 세기가 현격하게 약해지므로 압력 구동 역흐름이 매우 불균일하게 일어나는 것으로 판단된다.

벽단비와 경사각이 벽면정압에 미치는 영향에 대하여 각각의 경우에 대한 상관관계는 제시된 바가 있으나 이들 두 가지 유동인자를 동시에 고려하여 나타낸 경우는 찾아보기 힘들다. 본 연구에서는 이 두인자를 동시에 고려할 수 있는 상관관계식을 찾을 수 있었으며 식 (6)과 같다.

$$X_{cp,max} = 13.39 \exp(-1.314 \cos(45 + \alpha)) \cdot (H/D)^{0.55} \quad (6)$$

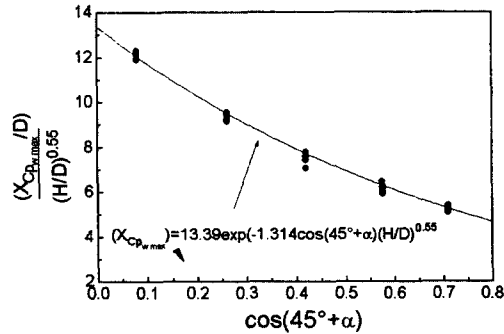


Fig. 7 Variation of the maximum wall pressure position correlated by H/D with inclined angle  $\alpha$ .

Fig. 7은 실험결과와 상관관계식을 비교 한 것으로 이들 실험치들이 상관관계식과 매우 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 재부착 현상

WAOJ 유동 연구에서 벽부착 길이는 주된 관심의 대상이었다. 재부착점은 노즐출구로부터 분사된 제트의 분리 유선(dividing streamline)이 휘어져서 벽면에 부착되는 위치를 말하며 분리 유선이 휘어지는 정도는 재순환 영역의 압력이나 구부러진 제트 좌우의 유입(entrainment)상황에 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다. 유동이 벽면에 재부착하는 메커니즘에 대해서 Adams와 Johnston<sup>(20)</sup>은 제트 주류로부터 재순환 버블로 향하는 압력구동 역방향 흐름(pressure-driven backflow)과 재순환 영역으로부터 전단층으로 재유입하는 흐름의 유량이 균형을 이루는 상황에서 재부착이 일어난다고 하였다. 본 연구에서 재부착 위치는 Westphal과 Johnston<sup>(21)</sup>의 연구에서 발표한 표면 마찰계수가 영인 비정상 벽부착 흐름의 시간평균 벽부착점과 시간평균 박리점은 벽면에서의 순방향 흐름비가 50%가 되는 점이 라는 것을 이용하여 SFP를 벽면에 수직으로 최대한 접근시켜 순방향 흐름비(forward flow fraction)를 측정하여 재부착 점을 결정하였다. 여기서 순방향 흐름비  $\gamma$ 는 총 측정 시간에서 하류 방향 흐름이 차지하는 비로 정의된다. 본 실험에서는 100 Hz의 절단주파수를 가진 저역통과 필터를 사용하여 총 100여 초 동안의 신호를 5 ms의 추출간격으로 A/D 변환하여 분석하였다.

Fig. 8(a)는 벽단비에 대하여 시간 평균 벽부착 위치와 최대 열전달 위치를 벽면설치각도와와의 관계

로 나타낸 것이다. 각도의 증가에 따라 재부착 길이가 증가하는 것을 볼 수가 있고 각도가 약 30°까지는 재부착 길이의 증가비가 작지만 40°에서는 보다 큰 각도 의존성을 보인다. 이것은 벽면 정압구조 분포에서와 같은 양상이며, 최대 열전달 위치는 시간 평균 재부착 위치보다 약간 앞 쪽에 나타나며 두 위치간의 간격은 각도가 증가할수록 커지고 있다. Fig. 8(b)는 각도에 대하여 벽단비와 재부착길이의 관계를 나타낸 것으로 그림에서 최대 벽면정압계수의 위치가 시간평균 재부착점보다 약간 뒤쪽에 나타남을 알 수가 있는데 이것은 Borque와 Newman,<sup>(1)</sup> Kumada<sup>(10)</sup>의 실험과 일치하고 유동이 벽면에 수직으로 충돌하지 않고 경사져서 충돌하기 때문인 것으로 판단된다. 벽단비와 경사각도에 관계없이 최대 열전달 위치는 시간 평균 재부착점보다 앞 쪽에 나타나는 것을 알 수 있고, 벽면 최대 정압의 위치가 시간 평균 재부착점 위치보다 약간 먼 곳에 위치하였다. 이같은 현상은 최대 정압의 위치는 벽면에 수직 방향 유동의 최대값이 정체되는 점으로 생각되고 시간 평균 재부착 점은 수평방향 흐름이 주요인자로 작용하는 시간평균 순방

향 흐름이 50%인 지점을 나타내며 최대 열전달 위치는 벽면근처의 수평 수직 방향 평균유동장 과 난류성분 등 유동의 모든 성분이 복합적으로 작용하여 발생한다고 볼 수 있다.

3.3 평균 유동장

Fig. 9는 벽단비 H/D=4.5이고 벽면 경사각  $\alpha = 10^\circ$ 인 경우에 대하여 스플릿 필름 프로브로 측정 한 평균속도분포를 속도벡터로 나타낸 것이다.

그림에서 벽에 충돌되는 일부 영역에서는 유속센서 자체의 교란으로 인하여 정확한 유동 각도가 나타나지 않았지만 전체적으로 제트 주류가 벽 쪽으로 휘어지는 것을 잘 관찰할 수 있다. 이때 재순환 영역에서의 최대 역흐름 속도는 노즐 출구유속의 약 20% 정도로 Pelfray 등<sup>(6)</sup>의 선행연구에 비하면 작는데 이것은 벽면이 경사져 압력 구동 역흐름의 세기가 약하기 때문이다. Fig. 10은 벽단비 H/D=4.5일 때 각 벽면 경사각도별 최대속도 감소 경향을 무차원화시켜 나타낸 것이다. 벽면 경사각이 0° 일 때는 노즐 폭의 약 5배까지 포텐셜 코어의 영향으로 최대 속도가 거의 노즐 출구 속도와 비슷하다. 제트 주류의 곡률이 급해지면서 제트의 발달이 가속되어 국소 최대속도는 급격히 감소하며 충돌영역을 지나면서 일시 회복되는 경향을 보이고 있다. 그러나 벽면이 조금씩 경사지면서 경사 벽면 방향 속도 성분이 줄어들고 벽면 경사각이 30°를 넘으면서 경사 벽면 방향 제트 속도가 매우 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 벽면이 경사짐에 따라 유동이 벽쪽으로 더욱 휘게 되어 제트 주류의 상당 부분이 Y<sup>a</sup> 방향의 속도를 가지게 되어 흐름 방향 U 속도 성분이 대폭 줄기 때문이다.

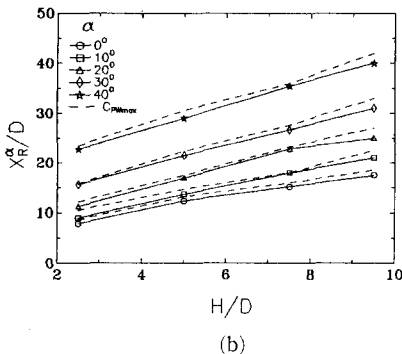
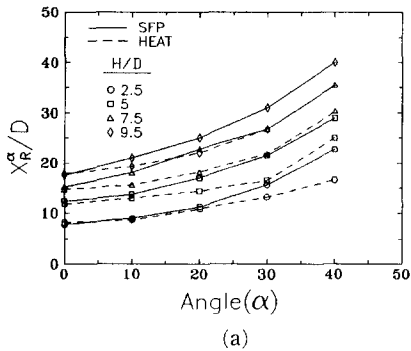


Fig. 8 The length of wall-attaching point

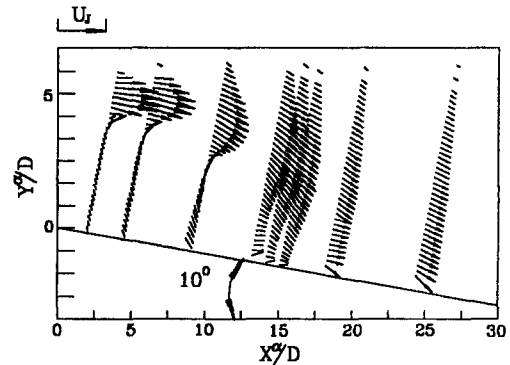


Fig. 9 Distribution of the velocity vector for offset ratio 4.5 and  $\alpha=10^\circ$

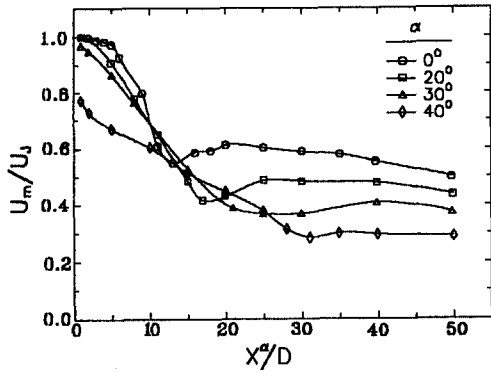


Fig. 10 The maximum axial velocity decay with various inclined angle(H/D=4.5)

3.4 열전달 특성

Fig. 11(a)는 H/D=5에서 Re와 경사각도 변화에 따른 열전달 특성을 나타내었다. 부착영역에서 휘어진 제트의 충돌로 인하여 열전달이 극대화되었다가 벽제트로 발달해 감에 따라 열전달이 감소하고 있다. 벽부착 영역 이후 벽제트 영역에서 제트 유동장이 상사성을 이루면서 열전달도 서서히 정체한다. 제트의 재순환 영역에서는 압력구동 역흐름으로 인하여 열전달이 일어나지만 역류의 속도가 주류속도에 비해서 작고 제트 출구쪽으로 접근하면서 재순환 버블의 폭이 넓어지면서 열전달량은 최저점에 달한다. 그러나 노즐 지지벽에 인접한 구석 부분에서 Nu가 다시 약간 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 2차 모서리 유동 (secondary corner eddy)으로 인한 추가적인 유동 혼합에 의한 운동량의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 재순환 유동장내 Nu의 최저점의 위치는 벽단비의 증가에 따라 약간씩 증가하지만 Nu의 절대값은 감소하고 있다. 최소점의 위치는 2차 모서리 유동의 성장 정체점에 의존하고 Nu는 재순환 버블의 세기와 관련이 있는 것 같다. Fig. 11(b)는 Re=6300에서 경사각 0°에서 벽단비 H/D=2.5에서 보다 H/D=5에서 최대 열전달계수가 크게 나타났다. 이는 벽단비가 2.5일 때 노즐에서 분출된 제트가 완전히 발달되지 못하고 포텐셜코어(potential core)의 영향이 많이 남아 있는 균일한 유동이 벽면에 충돌하기 때문에 완전 발달된 유동이 충돌하는 벽단비 5에서 보다 최대 Nu가 작은것 같다. 이러한 현상은 벽면이 경사져 재부착 위치가 길어지면 역전될 것이고 본 실험에서는 경사각 10°에서부터 이런 현상이 사라졌다. 경사각  $\alpha=40^\circ$ 에서는 열전달 현상이 경사각  $\alpha$

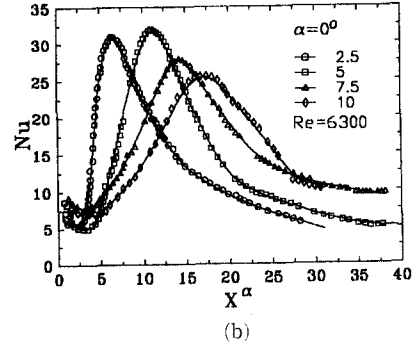
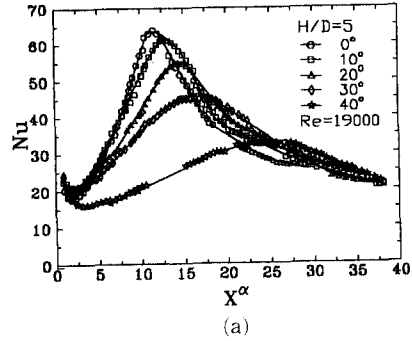


Fig. 11 Nusselt number distribution along the wall for various inclined angle

$=30^\circ$  이내의 경우와는 크게 다르며  $Nu_{max}$ 도  $\alpha=40^\circ$ 에서 특히 낮은 값을 갖는다. 이것은 재순환 유동장의 형성에 영향을 미치는 유입량과 벽면 경사각의 상관관계 때문으로 판단된다. 즉, 벽면 경사각이 증가함에 따라 확대된 공간을 통하여 재순환 버블로 유입되는 공급량이 늘어나게 되어 결국 압력구동 역흐름의 세기를 약화시키므로 벽부착 거리가 점점 멀어지기 때문이다. 그런데 H/D=2.5인 경우에는 각각의 Re 수에서 경사각이 0°일 때보다 10°일 때 최대 누셀트수의 크기가 크게 나타났다. 이는 앞서서도 언급했듯이 충분히 발달하지 못한 제트 유동이 벽면에 부착하였기 때문에 활발한 열전달 효과를 일으키지 못한 것이라고 판단되며 경사각도가 10°로 커지면서 벽면으로의 부착까지 제트가 완전히 발달할 수 있는 여유가 생겨 이 각도 이후부터는 이런 현상이 사라지게 된다. 충돌 제트의 경우 최대 누셀트수  $Nu_{max}$ 은 Lee 등<sup>(22)</sup>에 의하면 충돌 벽과 노즐 사이의 거리가 충분히 멀어지기 전까지는 벽과 노즐간의 거리에 크게 영향을 받지 않는 것으로 조사되었으나 벽부착 제트에서는



$Nu_{max}$ 에 대한 벽단비의 영향이 매우 크게 나타나고 있다. Fig. 12은 Re에 따른 국소 Nu가 어떻게 분포하지를 알아보기 위하여  $H/D=5.0$ , 경사각  $\alpha=0^\circ, 20^\circ$ ,  $Re=6300, 12600, 19000$ 에서 열전달 분포이다. 국소 최대 Nu의 위치를 살펴보면 각 경사각에서 Re 수에 무관함을 알 수 있으며, 그런데 국소 최소 Nu의 위치는 Re가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 노즐 출구속도의 변화에 따른 재순환 버블내로의 유입량이 변화로 인해 최소 Nu의 위치가 이동하는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 벽면정압계수 분포의 결과와 일치하고 있다.

Fig. 13(a)에는 각각의 벽면 경사각에 대한 레이놀즈수와 최대 누셀트수의 상관관계를 각 벽단비 별로 나타내었다. 그림에서 각각의 벽면 경사각에 대하여 모든 벽단비에서도 근사곡선의 기울기가 유사하게 나타나고 있다. 즉,  $Nu_{max}$ 는 레이놀즈수가 커질수록 레이놀즈수의 약 0.61~0.63승에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다. 또 Fig. 13(b)에서는  $H/D=5$ 와 10인 경우에 대하여 각 벽면 경사각 별로  $Nu_{max}$ 와 Re와 관계를 나타내었는데 Fig. 13(a)와 마찬가지로  $Nu_{max}$ 는 Re의 약 0.59~6.5승에 비례하는 분포를 보이고 있다. 이와 같이 Fig. 13의 경우를 비롯한 본 실험의 모든 조건에 대하여  $Nu_{max}$ 는 Re의 약 0.56~0.65승에 비례하는 것으로 조사되었는데 이것은 충돌제트의 경우  $Nu_{max}$ 에 대한 Re의 지수가 대략 0.5~0.67의 값을 갖는다는 선행논문 연구 결과와 좋은 비교가 된다. Kumada 등<sup>(10)</sup>이 수행한 WAOJ에 관한 유사 연구에서 벽단비가 2.5에서 24.5까지 변하는 경우 최대 물질전달

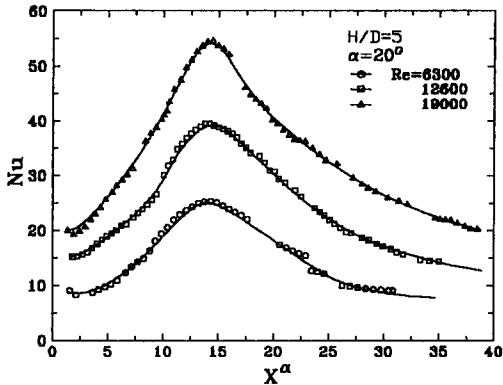


Fig. 12 Nusselt number distribution along the wall for various Reynold number

계수  $Sh_{max}$ 가  $Re^{0.58}$ 에 비례하는 것으로 조사된 바 있다.

$Nu_{max}$ 에 미치는 Re의 영향 이외에도 벽단비와 벽면 경사각에 대한 상관관계를 고찰하기 위하여,  $Nu_{max}$ 와 Re간의 관계를 수치근사하여 최소 오차 조건을 조사한 결과 같이  $Nu_{max}$ 가  $Re^{0.63}$ 에 비례하는 것으로 나타났다.

$$Nu_{max} \propto Re^{0.63} \quad (7)$$

식 (7)을 토대로  $Nu_{max} Re^{0.63}$ 을 각 벽단비와 벽면 경사각에 대하여 적용하여 나타내면 Fig. 14에 볼 수 있듯이 다음과 같이 근사되는 상관관계를 얻을 수 있다.

$$Nu_{max} = 0.18 (Re)^{0.63} (H/D)^{-0.27} (\cos \alpha)^{2.4} \quad (8)$$

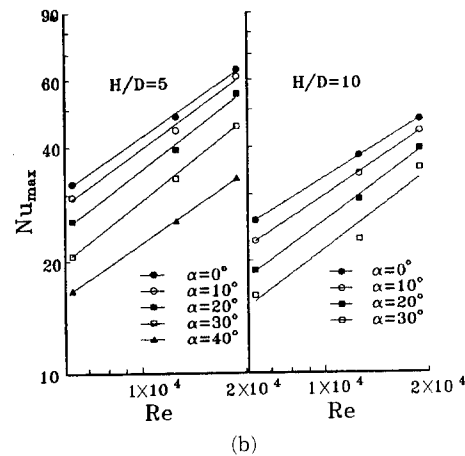
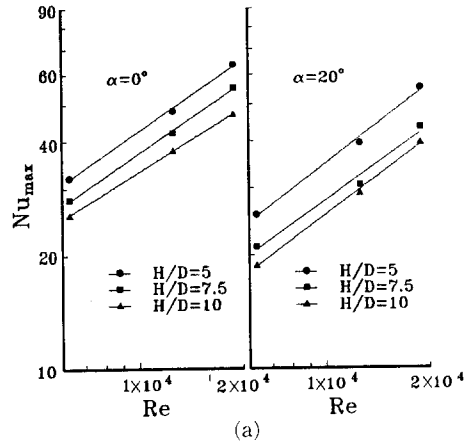


Fig. 13 Effect of Reynolds number on the maximum Nusselt number with variance of offset ratio and inclined angle

여기서 벽면 경사각에 대하여 코사인을 취한 것은 본 실험 범위에서  $\alpha=0^\circ$ 가 포함되어 있으므로 지수승으로 수치근사하기 용이하도록 하기 위한 것이다.

Fig. 14에서  $H/D=2.5$ 에서 근사 정도가 좋지 못한 것은 Borque와 Newmann<sup>(1)</sup>이 밝혔듯이  $H/d < 3$ 이고  $Re < 10000$ 일 때와 같이 작은 벽단비에 대하여 레이놀즈수가 크지 못한 경우 유동이  $Re$ 에 지배되는 경향이 매우 달리 나타나기 때문이다. 즉, 식 (8)이 취하였던  $Re^{0.63}$ 과의 비례관계가  $H/D=2.5$ 이고,  $Re < 10000$ 인 경우에 적용될 경우가 다른 경우에 비하여 오차가 크게 나타난다. 식 (8)을 실험자료로 역대입하여  $Nu_{max}$ 의 측정치간의 오차를 계산한 결과 벽단비가 2.5인 경우에 대하여 15%의 절대오차가 나타났으며 그 외에는 오차가 9% 이내에 들었다. 벽면 경사각이  $0^\circ$ 인 경우에 대하여 세 가지 레이놀즈수에서의 최대 벽면 열전달 계수가 발생하는 위치를 벽단비의 변화에 따라 조사하였다. 그 결과  $X_{max}$ 는  $\alpha=0^\circ$ 에서 각 벽단비에 대하여 다음과 같은 상관관계식을 갖는 것으로 나타났다.

$$\frac{X_{max}}{D} = 3.7(H/D)^{0.69} \quad (9)$$

벽단비 및 벽면의 경사각과 최대 국소 열전달 위치간의 상관관계를 Fig. 15에 보였으며,  $H/D$ 와  $\alpha$ 와  $X_{max}$ 에 대한 상관관계식은 다음과 같다.

$$\frac{X_{max}}{D} = \frac{3.8(H/D)^{0.69}}{(\cos \alpha)^{2.68}} \quad (10)$$

Fig. 16는  $Re$ 가 19000인 경우 각각의 벽단비와 경사각에 대하여 벽판 전체의  $Nu$  수를 더한 값을

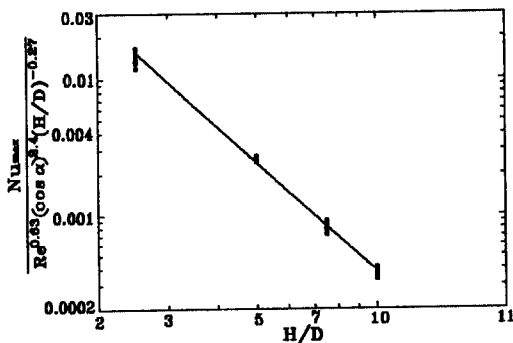


Fig. 14 Variation of the maximum Nusselt number correlated by  $Re$ ,  $\alpha$ , and  $H/D$  with offset ratio

나타낸 것이다. 최고  $Nu$ 의 크기 및 위치 외에도 각 경우에서의 전체 열전달 효과의 영향도 매우 중요한 변수가 될 수 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 벽단비가 2.5인 경우 완전히 발달되지 못한 제트의 충돌로 인하여 벽단비가 5인 경우보다 전체적으로 낮은 Total Nusselt number를 가지고 있으며 각도의 변화에 따른 Total Nusselt number의 크기도 거의 일정함을 알 수 있다. 벽단비가 5일 경우 총 누셀수의 크기는 최대를 보이며 경사 각도  $10^\circ$ 에서 완전히 발달된 제트가 벽판에 충돌함으로써 열전달 효과가 가장 극대화되었다가 경사각이 커질수록 점차 적어지고 있다. 벽단비가 7.5 이상이 되면 경사각이 증가함에 따라 비교적 선형적인  $Nu$ 의 감소를 볼 수 있다.

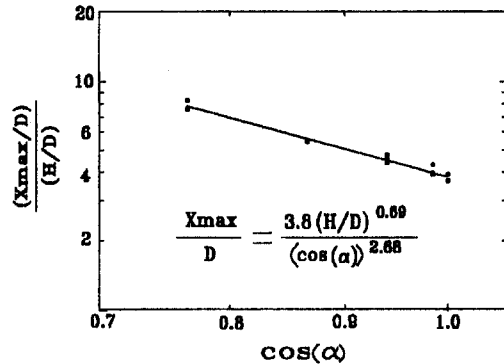


Fig. 15 Variation of the maximum  $Nu$  position correlated by offset ratio and inclined angle with  $\cos \alpha$

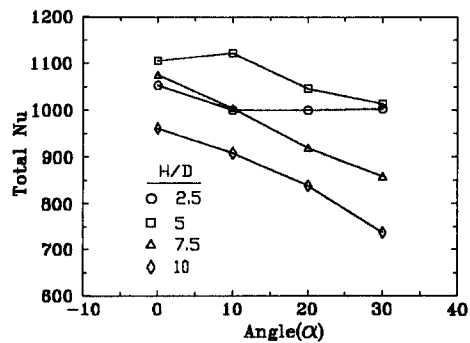


Fig. 16 Total Nusselt number for various inclined angle and offset ratios

## 4. 결 론

## 참고문헌

경사진 벽부착 제트에서 유동장은 노즐 폭 기준 Reynolds 수 21,300에서 실험하고, 열전달 특성은 Reynold 수 6300~19000 범위에서 벽면 경사각과 벽단비에 따른 Nu의 분포 양상의 변화를 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 최대벽면정압력계수의 위치는 벽단비와 경사각도에 관계가 있으며 다음과 같은 관계식을 구하였다.

$$X_{C_{pwmax}} = 13.39 \exp(-1.314 \cos(45 + \alpha)) (H/D)^{0.55}$$

(2) 경사진 벽제트에서 Reynolds 수는 제트주류의 유동장에 독립인자라고 말할 수 있지만, 재순환 비블에서는 유동장에 영향을 미친다.

(3) 벽면 최대 열전달 지점, 시간 평균 재부착 지점, 그리고 벽면 최대 정압 지점의 위치는 동일한 실험조건에서 각각 노즐 출구에 가까운 지점 순서로 나타났다.

(4) 일반적으로 벽단비와 경사각이 커지면 최대 Nu가 점차 작아진다. 그러나 임의의 기준값 이하의 벽단비(H/D=2.5)에서는 완전 발달되지 않는 유동의 재부착으로 인하여 역전 현상이 일어난다.

(5) 최대 Nu에 대한 Re, 벽단비(H/D) 및 벽면 경사각( $\alpha$ )에 대한 상관관계식을  $Nu_{max} = 0.18(Re)^{0.63}(H/D)^{-0.27}(\cos\alpha)^{2.4}$ 로 제시하였다.

(6) IWAQJ의 최대 Nu가 관찰되는 지점은 벽단비의 0.69승에 비례하고 벽면 경사각의 2.68승에 비례하는 다음 식으로 제시하였다.  $\frac{X_{max}}{D} = 3.8(H/D)^{0.69}(\cos\alpha)^{2.68}$

(7) 벽면 전체의 열전달 효과는 벽단비가 5, 경사각이 10°일 경우 가장 크게 나타났으며 벽단비가 7.5 이상에서는 경사각이 증가할수록 열전달 효과는 선형적으로 감소하였다.

## 후 기

본 연구는 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며 재단의 연구비 지원에 감사 드립니다.

- (1) Borque, C. and Newmann, G., 1960, "Reattachment of a Two-Dimensional, Incompressible Jet to an Adjacent Flat Plate," *Aerion Quar.*, Vol. 11, pp. 201~232.
- (2) Sawyer, R. A., 1963, "Two-Dimensional Reattachment Jet Flows Including the Effect of Curvature on Entrainment," *J. Fluid Mech.*, Vol. 17, pp. 481~498.
- (3) Rajaratnam, N. and Subramanya, N., 1968, "Plane Turbulent Reattached Wall Jet," *ASCE J. Hydraulic Div.*, Vol. 94, pp. 95~112.
- (4) Perry, C., 1967, "Two-Dimensional Jet Attachment," *Advances in Fluidics*, ed. by F. T. Brown, New Youk, pp. 205~217.
- (5) Pelfray, J. R. R. and Liburdy, J. A., 1986, "Effect of Curvature on the Turbulence of a Two-Dimensional Offset Jet," *ASME J. Fluids Engr.*, Vol. 4, pp. 143~149.
- (6) Nozaki, T., Hatta, K., Nakashima, M. and Matsumura, H., 1979, "Reattachment Flow Issuing from a Finite Width Nozzle," *Bulletin of the JSME*, Vol. 22, No. 165, pp. 340~347.
- (7) Nozaki, T., Hatta, K. and Nakashima, M., 1982, "Reattachment Flow Issuing from a Finite Width Nozzle," *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 200, pp. 196~203.
- (8) Yoon, S. H., 1990, Investigation on the Turbulence Structure of a Wall-Attaching Offset Jet, Ph. D Thesis, KAIST, Dept. Mechanical Engineering.
- (9) Yoon, S. H., Kim, D. S., Song, H. B., Park, S. C., 1995, "An Investigation of Roughness Effects on 2-Dimensional Wall Attaching Offset Jet Flow," *Bulletine of the KSME*, Vol. 19, No. 1, pp. 219~230.
- (10) Kumada, M., Mabuchi, I. and Oyakawa, K., 1973, "Studies in Heat Transfer to Turbulent Jets with Adjacent Boundaries (3rd report Mass Transfer to Plane Turbulent Jet Reattachment on an offset Parallel Plate)," *Bulletine of the JSME*, Vol. 16, No. 101, pp. 1712~1722.

- (11) Hoch, J. and Jiji, M., 1981b, "Theoretical and Experimental Temperature Distribution in Two-Dimensional Turbulent Jet-Boundary Interaction," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 331~336.
- (12) Holland, J. T. and Liburdy, J. A., 1990, "Measurements of the Thermal Characteristics of Heated Offset Jet," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 1, pp. 69~78.
- (13) Morel, T., 1977, "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contraction," *ASME J. Fluid Engr.*, Vol. 99, pp. 371~378.
- (14) Stock, D. E. and Jaballa, T. M., 1985, "Turbulence Measurements using Split-Film Anemometry," *Proc. Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulent Measuremenst*, pp. H15-1-H15-10.
- (15) Camci, C., Kim, K., Hippensteele, S. A. and Poinatte, P. E., 1993, "Evaluation of a Hue Capturing based Transient Liquid Crystal Method for High-Resolution Mapping of Convective Heat Transfer on Curved Surfaces," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 311~318.
- (16) Westphal, R. V. and Mehta, R. D., 1984, *Crossed Hot-Wire Data Acquisition and Reduction System*, NASA Report, IA-85871, pp. 1~37.
- (17) Baughn, J. W. and Shimizu, S., 1989b, "Heat Transfer Measurements from a Surface with Uniform Heat Flux and an Impinging Jet," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 1096~1098.
- (18) Lee, S. J., Lee, J. H. and Lee, D. H., 1994, "Heat Transfer Measurements using Liquid Crystal with an Elliptic Jet Impinging upon the Flat Surface," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 967~976.
- (19) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mech. Engr.*, Vol. 5, pp. 3~8.
- (20) Adams, E. W. and Johnston, J. R., 1988, "Effects of the Separating Shear Layer on the Reattachment Flow Structure Part 1: Pressure and Turbulence Quantities," *Experiments in Fluids*, Vol. 6, No. 6, pp. 400~408.
- (21) Westphal, R. V. and Johnston, J. P., 1984, "Effect of Initial conditions on Turbulent Reattachment Downstream of a Backward Facing Step," *AIAA J.*, Vol. 22, No. 12, pp. 1727~1732..
- (22) Lee, D. H. and Lim, K. B., 1995, "Heat transfer from a Convex Hemispherical Plate to a Round Impinging Jet," *Advances in Turbulence Research*, pp. 81-100.
- (23) 김정천, 윤순현, 김대성, 신영호, 1994, "컴퓨터 원용 열선 및 열필름 프로브의 교정방법 개선에 대한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제1호, pp. 219~230.
- (24) 윤순현, 이대회, 송홍복, 김대성, 1996, "2차원 난류 벽부착제트의 대류열전달 특성," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제10호, pp. 3304~3312.