

경사진 벽부착 제트의 열전달 특성에 대한 연구

송홍복*, 심재경**, 윤순현***

An Investigation on Heat Transfer Characteristics of Inclined Wall Attaching Offset jet

H. B. Song*, J. K. Sim**, S. H. Yoon***

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 heat transfer characteristics for a two-dimensional turbulent wall attaching offset jet at different oblique angles to a flat surface. The local Nusselt number distributions were measured using liquid crystal as a temperature sensor. Wall static pressure coefficient profiles were measured at the Reynolds number Re , 53200 (based on the nozzle width, D), the offset ratio H/D from 2.5 to 10, and the oblique angle α from 0° to 40° . It is observed that the maximum Nusselt number point occurs slightly upstream of time-averaged reattachment point for all oblique angles. The correlations between the maximum Nusselt number and Reynolds number, offset ratio, and oblique angle are presented.

기호설명 (Nomenclature)

A	: 금박막의 면적	H	: 벽높이 (노즐의 벽방향 끝에서 벽까지의 거리)
C_{pw}	: 벽면정압계수	h	: 대류열전달 계수
C_{pmax}	: 최대 벽면정압계수	I	: 금박막에 가해지는 전류
D	: 노즐의 폭 ($D = 25 \text{ mm}$)	Nu	: 국소 Nusselt 수
f	: 금박막의 도금 균일성	P_w	: 벽면정압
		P_∞	: 대기압

* 한국전력공사 (원고접수일 : 97년 5월)

** 부산대학교 대학원

*** 부산대학교 기계공학부

- Re : 레이놀즈 수
- T_a : 실험실내 주위 온도
- T_j : 제트 출구의 온도
- T_w : 벽면상의 국소온도
- U_j : 노즐 출구 평균 속도
- V : 금박막에 가해지는 전압
- X : 노즐 출구에서 유동 방향으로의 좌표
- X° : 경사벽면상의 기준좌표
- X_R° : 시간 평균 벽부착 길이
- X_{Cpmax}° : 최대 벽면 정압 위치
- X_{Numax}° : 최대 열전달 위치
- Y : X축에 수직인 좌표
- Y° : 경사벽면에 대해 수직방향인 좌표
- SFP : Split film probe

그리스 문자

- α : 벽판의 경사각
- γ : 순방향 흐름비(forward flow fraction)
- ϵ : 액정 표면의 방사율(emmissivity)

1. 서 론

경사진 벽부착 제트(Inclined Wall Attaching Offset Jet ; 이하 IWAJOJ)란 Fig. 1과 같이 벽면이

노즐 출구에 경사져있는 제트를 말하며, IWAJOJ의 유동장은 기하학적으로 단순하지만, 만곡된 유동장, 재부착(reattachment), 재순환(recirculation) 및 벽제트(wall jet) 등의 여러 가지 국소유동장을 관찰할 수 있는 복합난류전단류(complex turbulent shear flow)이다. 이러한 IWAJOJ 유동은 산업 현장에서는 가스터빈 연소실의 막냉각, 공기 순환계에서 에어 디플렉터(air deflector), 자동차 성에 제거를 위한 디미스터(demister), 제트 형태로 배출되는 배기에 관한 환경문제 등 여러 곳에 적용할 수 있다.

벽면이 노즐 출구에 나란히 설치된 벽부착 제트(Wall Attaching Offset Jet ; 이하 WAOJ)의 유동장 연구사례는 제법 있지만 WAOJ에서 열전달 효과에 관한 연구 사례는 극히 드물다. Kumada 등¹⁾은 나프탈렌 승화법을 이용하여 벽면의 물질전달률을 조사하였고, Hoch & Jiji²⁾는 가열된 벽부착 제트(WAOJ)의 열특성치를 실험과 이론 해석을 통하여 조사하였다. Holland & Liburdy³⁾는 벽부착 제트 유동장을 재순환, 충돌, 재발달 벽제트의 세 구간으로 나누어 각 영역별로 온도 분포를 구하고 벽제트의 경우와 비교하였다. 최근에는 윤순현 등⁴⁾은 벽면 등열유속 경계조건에서 온도 지시계로 액정(liquid crystal)을 사용하여 벽면 대류열전달을

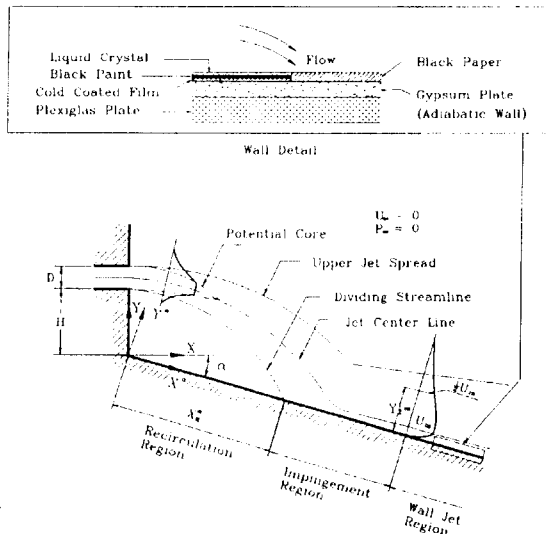


Fig. 1 Schematic diagram of the inclined wall attaching offset jet flow field

측정했다. IWAOJ에서 열전대와 같은 점측정(point sensing)으로는 유동장 교란으로 인한 오차를 발생할 것이 우려된다. 가열된 제트를 분사하여 유동장 내 온도 분포를 파악하는 방법에서도 유입되는 외기 조건이 야기하는 변화를 모두 보정하기 힘든 문제점들이 있고, 벽면에 특별한 열역학적 경계조건을 설정하기가 쉽지 않다는 어려움이 있다.

본 연구는 유동장에 교란을 줄 우려가 거의 없는 최근에 활발히 연구되고 있는 액정(liquid crystal)과 금박막(gold coated film)을 사용하여 등열유속 경계조건하에서 IWAOJ의 벽면대류 열전달계수를 측정하였다. 벽단비(offset ratio), 경사각(oblique angle), Reynolds 수의 변화에 따른 최대 벽면정압계수, 열전달 효과의 각종 상관관계를 조사하였다.

2 실험 장치 및 방법

2.1 풍동과 시험부

실험에 사용된 풍동은 개방형 송출식 풍동이며 송풍기(blower), 확대부(diffuser), 정류실(plenum chamber), 축소노즐(contracting nozzle)로 구성되었다. 노즐 출구속도는 주파수 변환기를 사용 5~35 m/s범위에서 조절 가능하며, 확대부 와 정류실에 총 7개의 스크린을 설치하여 흐름의 균일성을 유지하였다. 축소 노즐은 운동량 손실을 막고 균일한 출구 속도를 얻기 위하여 Morel[®]이 제안한 3차곡선으로 설계되었고, 출구 노즐폭 D는 25 mm, 높이는 300 mm로 형상비는 12, 단면 축소비는 12이다. 노즐 출구 평균속도의 균일도가 경계층 부분을 제외하고는 폭 방향과 길이 방향으로 속도 변동 분이 1.0~2.0 %로 양호하였고 초기 출구 주류 난류강도는 출구속도의 0.1%이하로 유지되었다. 제트가 부착되는 경사벽판은 투명아크릴(plexiglas)로 제작하여 벽단비 H/D는 0~15, 경사각은 0°~45°의 범위에서 이동이 가능하도록 장착하였다. 벽판의 크기는 300×1800 mm이며 벽면 전도를 막기 위해 전면에 단열재를 부착하였다. 벽면 정압을 측정하기 위하여 경사벽면에 압력공(직경 1 mm)을 5 mm 간격으로 천공하였으며 인접한 정압공 사이의 상호간섭을 배제하기 위하여

대각선 방향으로 엇갈리게 배치하였다. 압력의 측정은 디지털 마이크로 마노미터(Furness사 model MCD-FC004)를 사용하여 측정하였다.

2.2 온도 센서의 교정

열전달 특성 실험에서 벽면의 온도 측정에 사용된 액정은 Fig. 2의 교정장치 개념도와 같이 황동각주의 전면에 흑색도료(black paint)와 액정을 도포하고 나머지 면에는 단열재를 부착한 후 막대형 열원과 항온수조의 온도를 적절히 설정하면, 황동각주 중간부에 거의 1차원적인 열전달이 발생하여 아주 선형적인 온도 구배가 얻어진다. 사용된 액정은 "R35C3W" 모델이므로 황동각주의 온도가 약 35°C에서 적색으로 나타나기 시작하여 38°C에서 청색으로 나타난다. 황동각주의 온도값을 측정하기 위해서 각주의 후면에서 전면의 표면까지 세로로 총 10 군데에 미세한 구멍을 뚫고 T형 열전대를 심었다. 열전대는 NAMAS(National Measurement Accreditation Service)에서 -70°C ~ 420°C 구간을 교정하여 ±0.01°C의 불확실성을 가지는 교정식을 구하여 놓은 SDL Co. T25/30 모델의 Pt100Ω 백금저항온도계(platinum resistance thermometer)와 항온수조를 이용하여 교정하였다. 온도자료는 범용 측정기(Fluke Co., Hydra)와 인터페이스된 IBM 호환기종의 개인용 컴퓨터에 디지털화하여 저장시켰다.

이와 같이 준비된 교정장치를 사용하여 액정을 교정시 Kim[®]에 의하면 광원의 각도, 거리와 촬영기의 각도 거리에 따라 온도 빛깔의 상관관계가

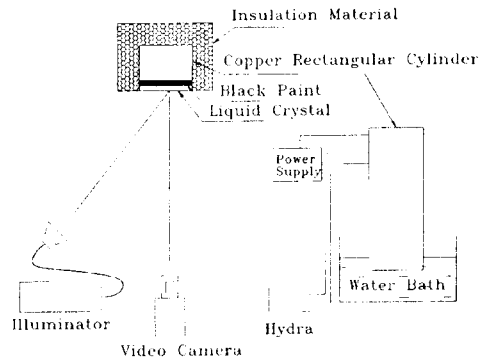


Fig.2 Block diagram of the liquid crystal calibration system

약간씩 차이가 난다. 교정시의 광원각도는 30°, 촬영기의 각도는 90° 광원의 거리는 300 mm, 촬영기의 거리는 1000 mm로 고정하였으며, 이 조건은 실험 시에도 동일하게 유지 했다.

교정 실험으로 얻어진 영상을 분석하면 온도에 따른 빛깔(hue), 맑기(saturation), 밝기(intensity)의 분포를 얻을 수 있다. 이 세 가지 색상 특성 중 특정 온도구간에서 선형성이 좋은 빛깔과 온도간의 상관관계를 Camci 등의 방법에 따라 칼라영상처리 기법(color image processing system)으로 조사하여 온도 측정에 적용하였다. 교정결과는 (1)식으로 표현되며 교정 실험을 통해 측정된 액정의 빛깔-온도 분포의 교정 결과가 Fig. 3에 나타나있다.

$$T_w = 34.25 + 0.053H + 0.0017H^2 + 0.00003H^3 - 1.732H^4 + 4.285H^5 \quad (1)$$

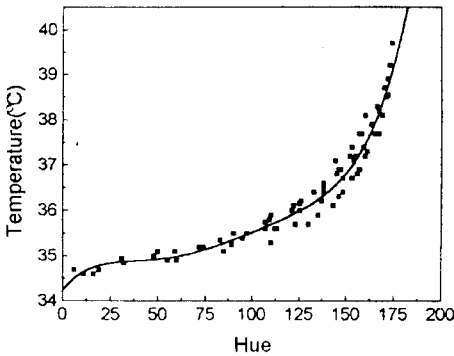


Fig. 3 Liquid crystal hue vs temperature calibration

2. 3. 실험 방법 및 해석

벽면대류 열전달 측정을 위해 0.13mm 두께의 폴리에스테르 필름에 약 20A 정도의 두께로 금을 입힌 금박막(gold coated film)을 사용하여 등열유속 경계조건을 설정하였다. 금박막에 흑색도료와 액정은 공기총을 사용하여 두께가 일정하도록 여러 번 도포 하였다. 유동에 의한 표면 열전달량에 따라 달리 형성되는 국소 온도분포가 그 온도에 해당하는 액정의 색상으로 나타나게 된다. Fig.1의 벽면 상세도는 등열유속 경계조건으로 설정된 실험용 벽판이다. 금박막의 뒷부분에는 단열재를 사

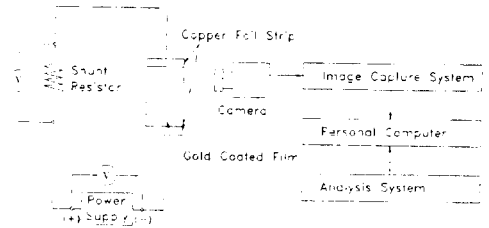


Fig. 4 Experimental apparatus and block diagram of experimental setup

용하여 벽면 뒤로의 전도 열전달을 최대한 차단시켰고, 빛의 벽판에 대한 반사로 인해 발생하는 오차를 줄이기 위해 흑지를 금박막의 가장자리에 붙였다. 열전달 실험장치는 Fig. 4와 같이 단열재위에 접착제로 금박막을 부착시킨 다음 양쪽 끝을 순동띠로 붙여 도선으로 사용하였다. 그리고 금박막과 순동띠 사이에는 완전한 통전을 위하여 전도성 수지 재료를 바르고 전력 공급 선을 연결하였다. 공급되는 DC 전력은 Fluke 사의 Hydra와 shunt register를 이용하여 측정된 전압과 전류로써 계산해 낼 수 있었고 열전달계수의 계산을 위하여 노즐출구, 실험실내 외기 온도는 교정된 열전대와 Hydra를 이용하여 개인용 컴퓨터로 자료를 받았다.

양자화된 빛깔 값은 교정식을 통해 각 위치에서의 온도값으로 환산되고, 이로부터 국소 열전달 계수는 널리 알려진 대로 다음식으로 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. q''_{conv} 는 금박막을 통한 전체 열유속에서 복사와 전도에 의한 열손실을 뺀 정미 대류열유속이다. 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 등¹¹와 Lee 등¹²에 의하면 금박막의 크기를 작게 하고 비교적 균일하게 도금되는 금박막 롤의 중간부분을 취할 경우 균일도가 0.98이상일 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,

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

σ 는 스테판-볼츠만상수(Stefan-Boltzmann 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 열전도계수가 0.1W/mK 정도로 낮으므로 총발열량의 1%로 간주하였다. 변수 $I, V, A, \epsilon, \sigma$ 및 T_a 는 각각 금박막을 통과하는 전류, 전압강하, 금박막의 표면적, 액정 및 흑색 도료의 방사율, 스테판-볼츠만상수 및 대기의 온도이다. 불확실도를 해석하기 위하여 Kline과 Mckclintock¹⁰⁾의 방법을 사용하였다. Table. 1에 의하면 $Re = 53,200$ 과 $H/D = 5.0$, $X/D = 11.5$ 에 대한 Nusselt 수의 불확실도는 4.74%이다.

Table.1 Nusselt Number uncertainty analysis

X_i	Unit	Value	dx_i	$\frac{\delta x_i}{Nu} \frac{\partial Nu}{\partial x_i}$ (i)
f		1.0	0.02	1.95
T_w	°C	35.05	0.68	2.44
A	m ²	0.12	4.55×10^{-4}	0.37
e		0.9	0.05	0.26
I	A	0.968	0.0016	0.16
T_a	°C	28.9	0.14	0.08
V	V	89.41	0.034	0.04
Total Nu uncertainty : $\frac{\partial Nu}{Nu} =$				4.74%

3. 시험 결과

3.1. 벽면 정압 계수 분포

벽면을 따른 벽면 정압 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 벽면 정압 계수 C_{pw} 는 측정된 벽면정압을 이

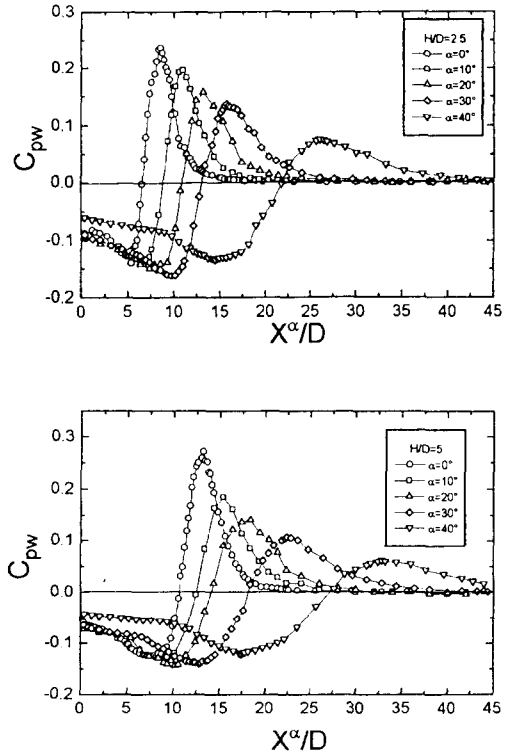


Fig. 5 Wall static pressure coefficient distributions

용하여 다음 식으로 계산했다.

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

벽면 정압분포는 벽의 존재로 인하여 발생하는 coanda effect로 인하여 압력이 감소하다가 충돌 영역에서 급격히 증가한 후 벽제트로 재발달 하면서 대기압으로 회복된다. 재순환 영역내에서 벽면 경사각이 0°에서 40°로 증가함에 따라 최대 벽면 정압위치가 하류로 이동하고 최대 벽면정압계수는 감소하고 있다. 한편 최소 벽면정압위치 또한 하류로 이동하지만 그 계수 값은 거의 일정하게 유지되고 있다.

최대 벽면정압 위치, 재부착점, 최대 열전달 위치를 경사각 0°~40°, 그리고 $Re = 53200$ 에서 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 재부착점은 WAOJ의 유동특성에서 중요한 인자이다. 유동이 벽면에 재부착하는 메카니즘에 대해서 Adams와

Johnston¹¹⁾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. 재부착 위치는 Westphal과 Johnston¹²⁾의 연구에서 발표한 표면 마찰계수가 영인 비정상 벽부착 흐름의 시간평균 벽부착점과 시간평균 박리점은 벽면에서의 순방향 흐름비가 50%가 되는 점이라는 것을 이용하여 SFP를 벽면에 수직으로 최대한 접근시켜 순방향 흐름비 (forward flow fraction)를 측정하여 재부착점을 결정하였다. 여기서 순방향 흐름비 γ 는 총 측정 시간에서 하류 방향 흐름이 차지하는 비로 정의된다. 그림에서 재부착 길이는 벽단비(offset ratio ; H/D)와 경사각(oblique angle ; α)이 증가함에 따라 증가하고 있으며, 경사각 0° 인 경우 Borque 와 Newmann¹³⁾과 Hoch 와 Jiji¹⁴⁾의 재부착 길이와 잘 일치 있으며, 최대 열전달 발생 위치는 시간 평균 재부착점과 거의 일치하면서 최대 열전달 위치가 약간 상류에 나타나고 있다. 이 결과는 Vogel 과 Eaton¹⁵⁾ 그리고 Baughn 등⁶⁾의 실험 결과와도 잘 일치한다. 또한 Fig. 5, 6에서 경사각 $\alpha < 20^\circ$ 까지는 재부착점의 위치는 최대 벽면 정압 위치와 거의 일치하지만 경사각이 증가하면 재부착점의 위치는 벽면 정압계수가 음에서 양으로 부호가 변화하는 위치와 거의 일치하고 있다.

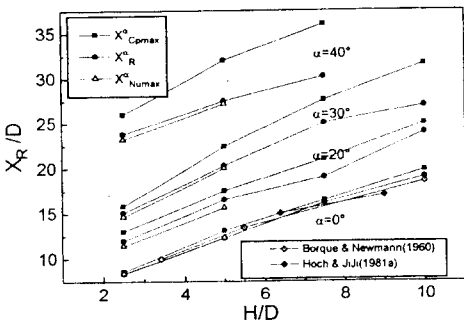


Fig. 6 Variations of the reattachment length, Numax position, and Cpmax position with offset ratio for $\alpha=0$ to 40°

3.2. 벽면 열전달 분포

Reynolds 수 변화와 경사각 변화에 따른 경사벽판에서의 열전달 분포를 Fig. 7에 보였다. Borque 와 Newmann¹³⁾의 실험에 의하면 $Re=10000$ 이상이면 WAOJ 유동장 구조는 Re 의 영향을 받지 않음을 밝혔고, 이 결과는 Fig. 7의 열전달 실험에서도 간접적으로 확인 할 수 있다. 일반적으로 최대 열전달 위치와 크기는 경사각과 벽단비의 영향을 받는다.

Fig. 8에서 경사각과 벽단비가 증가하면 재순환 영역이 하류로 확대됨을 알 수 있다. 재순환 영역 내에서 국소 Nusselt 수는 재순환 버블에 의한 난류혼합(turbulent mixing)으로 증가하다가 제트 유동이 부착되는 점에서 최대값을 나타낸다. 재발달 벽제트 영역에서의 국소 Nusselt 수는 재부착점의 최대값에서 점차적으로 감소하기 시작한다. 하지만 경사각 $\alpha=40^\circ$ 에서는 그 경향이 약간 벗어나고 있다. 이것은 벽면 정압분포에서도 비슷한 양상을 보이며, 경사각 증가로 인하여 벽면 쪽의 유입유량이 늘어나기 때문으로 판단된다. Fig. 8에서 최소 Nusselt 수는 실험된 경사각과 벽단비에서 $X^*/D \approx 1.0$ 과 $X^*/D \approx 4.0$ 사이에서 발생함을 알 수 있다. 이것은 2차 모서리 유동(secondary corner eddy)의 성장 정체점에 의존한다. 그러나 노즐 지지역에 인접한 구석부분에서 Nusselt 수가 다시 약간 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 2차 모서리 유동으로 인한 추가적인 유동 혼합에 의한 운동량의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

Reynolds 수와 벽면 경사각이 최대 Nusselt 수 (Nu_{max})에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 9와 같이 각각의 벽면 경사각에 대한 Reynolds 수와 최대 Nusselt 수의 상관관계를 각 벽단비 별로 나타내었다. 최대 Nusselt 수는 $H/D=2.5$ 와 $H/D=5.0$ 에 대하여 각각 $Nu_{max} \propto (Re)^{0.52-0.56}$ 과 $Nu_{max} \propto (Re)^{0.52-0.65}$ 에 비례하여 변화하였다. Fig. 6에서 보면 최대 열전달 위치는 재부착점의 위치와 거의 일치하고 있으며 이 점은 충돌제트에서의 정체점으로 고려될 수 있다. Lee 등¹⁶⁾과 Hollworth 와 Gero¹⁷⁾는 충돌제트 실험에서 최대 열전달계수는 Reynolds 수의 0.5에서 0.67승에 비례하여 변화한

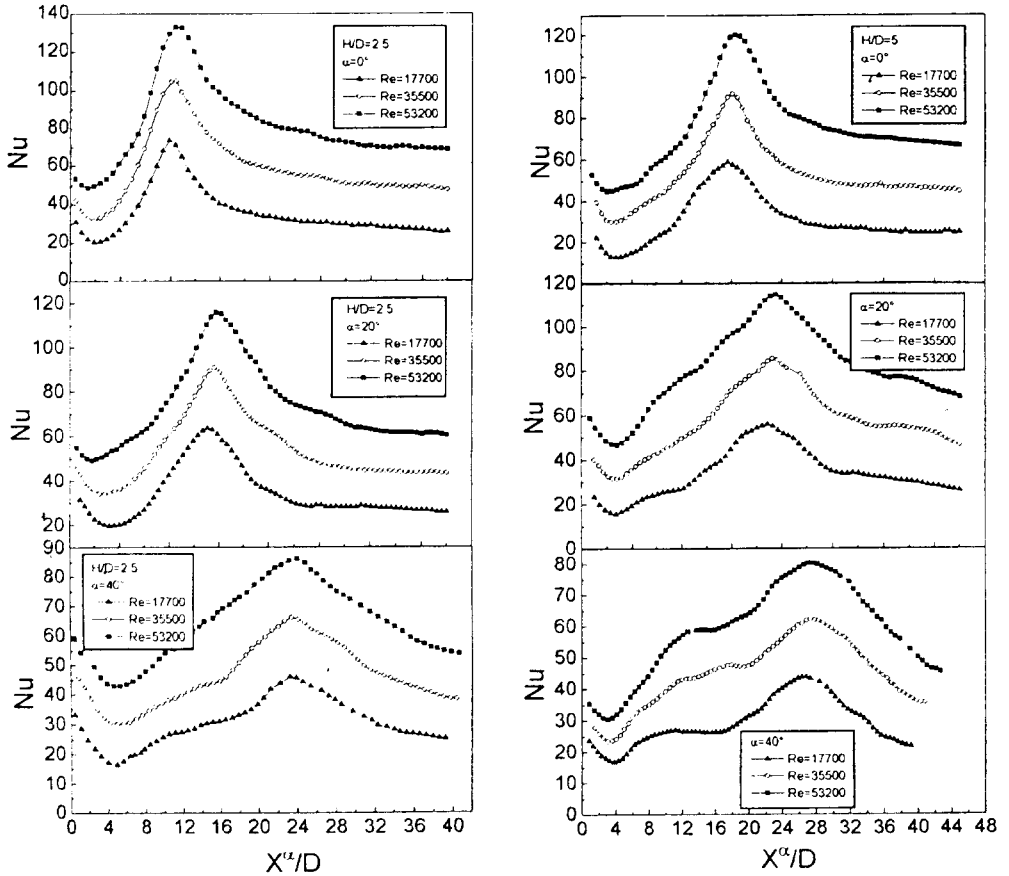


Fig. 7 Streamwise variation of the local Nusselt with inclined angle and Re for H/D=2.5, 5.0

다고 하였으며 본 실험의 결과와 좋은 비교가 된다. 일반적으로 충돌 제트에서 최대 열전달 계수 $Nu_{max} \propto (Re)^n$ 에서 지수 n은 노즐과 충돌 면과의 거리에 따른 제트 유동의 발달 정도와 난류섭동에 의존한다고 알려져 있다. Kumada¹⁴등이 수행한 WAOJ에 관한 유사 연구에서 벽단비가 2.5에서 24.5까지 변하는 경우 최대 물질전달 계수 Sh_{max} 가 Re의 0.58승에 비례하는 것으로 조사된 바 있다. IWAOJ에서 벽단비 2.5 보다 5.0에서 최대 열전달 계수의 Reynolds 수와의 상관관계에서 지수 값이 크게 나타나는 것은 벽단비가 증가하면 제트 주류(jet trajectory)가 발달된 상태로 벽면에 부착되면서 주위 공기와의 보다 활발한 운동량 교환으로 난류량이 증가한 것에 기인한다고 볼 수 있다.

Nu_{max} 에 미치는 Re의 영향이외에도 벽면 경사

각이 각각 Nu_{max} 의 분포에 어떠한 상관관계를 보이는가를 고찰하였다. 이를 위하여 Nu_{max} 와 Re간의 관계를 수치근사하여 최소 오차조건을 조사한 결과 벽단비 H/D=2.5 와 5.0에 대하여 각각 Nu_{max} 가 $Re^{0.54}$, $Re^{0.60}$ 에 비례하는 것으로 나타났다. 이것을 토대로 Nu_{max}/Re^n 을 벽면 경사각에 적용하여 나타내면 Fig. 10에 볼 수 있듯이 다음과 같이 근사되는 상관관계를 얻을 수 있다.

$$Nu_{max} = 0.367(Re)^{0.54} \cos(\alpha)^{1.17} \quad H/D=2.5 \quad (6)$$

$$Nu_{max} = 0.176(Re)^{0.60} \cos(\alpha)^{1.30} \quad H/D=5.0 \quad (7)$$

이 상관관계식에서 Nu_{max} 의 벽면 경사각 의존성이 벽단비 H/D=5.0 보다 H/D=2.5에서 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 앞에서 제시한 것

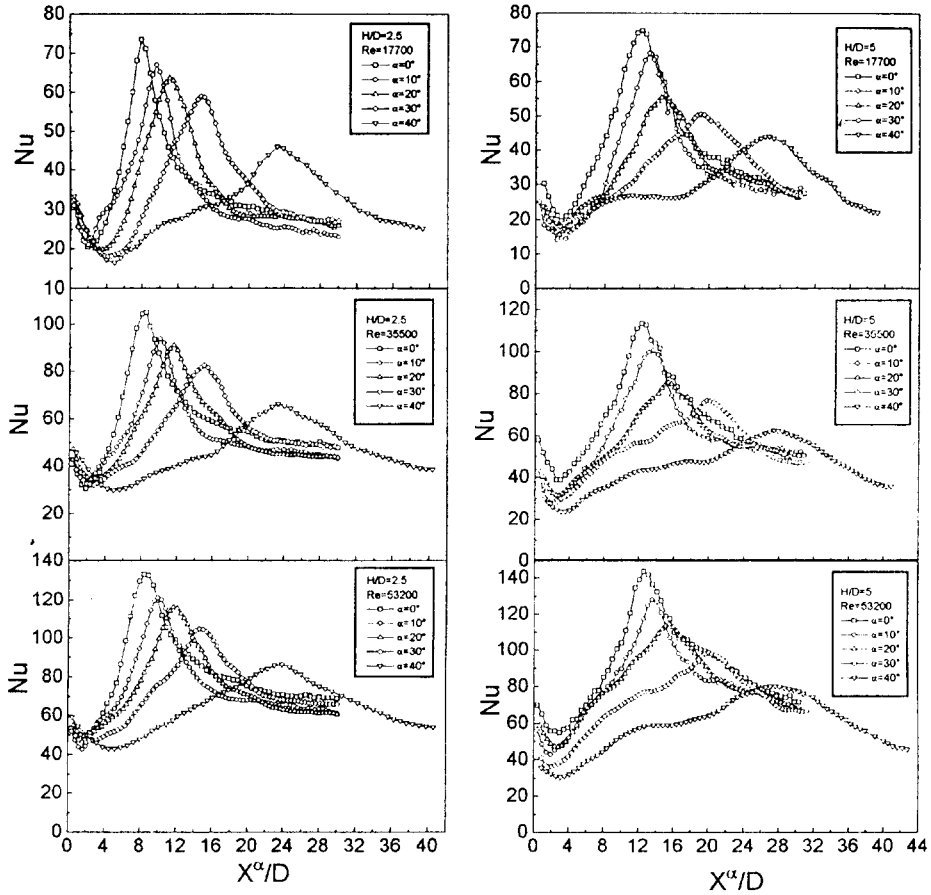


Fig. 8 Streamwise variation of the local Nusselt with inclined angle for various Re

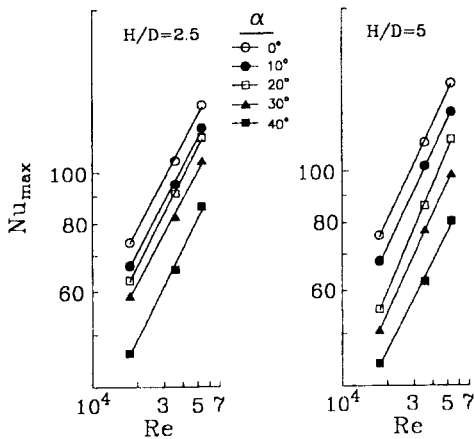


Fig. 9 Effect of Reynolds number and inclined angle on the maximum Nusselt number for H/D=2.5 and 5.0

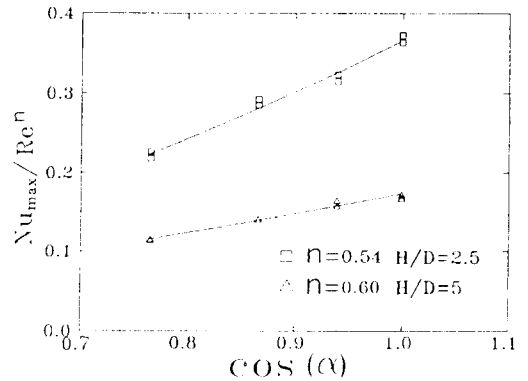


Fig. 10 Variation of the maximum Nusselt number with inclined angle and Reynolds number for H/D=2.5 and 5.0

과 같이 제트 주류의 곡률과 노즐에서 분사된 제트의 발달정도의 영향으로 판단된다.

4. 결 론

경사진 벽부착 제트에서 벽면 대류 열전달을 등 열유속 경계조건에서 벽면 경사각과 벽단비에 따른 Nu의 분포 양상의 변화를 관찰하였다. 벽면 최대정압은 경사각이 증가할수록 감소하면서 그 위치는 하류로 이동하였고, 벽면 최소 압력은 거의 일정하게 유지하였다. 시간평균 재부착점 위치와 최대 열전달 위치는 거의 일치하였지만 최대 열전달 위치가 약간 앞쪽에 나타났다. 경사각 $\alpha < 20^\circ$ 에서 최대 벽면정압 위치와 시간평균 재부착점 그리고 최대 열전달 위치는 큰 차이 없이 상류 쪽부터 최대 열전달점 시간평균 재부착점 그리고 최대 압력점 순서로 나타났고, $\alpha > 20^\circ$ 에서 벽면정압계수의 부호가 음에서 양으로 바뀌는 지점이 시간평균 재부착 위치와 거의 일치하였다. 재순환영역 내에서 국소 Nusselt 수는 재순환 버블에 의한 난류 혼합(turbulent mixing)으로 증가하다가 제트유동이 부착되는 점에서 최대값을 나타낸다. 최대 Nusselt 수는 $H/D=2.5$ 와 $H/D=5.0$ 에 대하여 각각 $Nu_{max} \propto (Re)^{0.52 \sim 0.56}$ 과 $Nu_{max} \propto (Re)^{0.52 \sim 0.65}$ 에 비례하여 변화하였으며, Re에 대한 의존성이 벽단비 $H/D=2.5$ 보다 5.0 에서 더 크게 나타났다. 이것은 노즐 출구의 제트가 발달된 상태로 벽면에 부착되면서 주위 공기와의 보다 활발한 운동량 교환으로 난류량이 증가한 것에 기인한다고 볼 수 있다. 최소 Nusselt 수는 실험된 경사각과 벽단비에서 $X^*/D 1.0$ 과 $X^*/D 4.0$ 사이에서 발생하였고, 이것은 2차 모서리 유동(secondary corner eddy)의 성장 정체점에 의존한다. 노즐 지지벽에 인접한 구석부에서 Nusselt 수가 다시 약간 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 2차 모서리 유동으로 인한 추가적인 유동 혼합에 의한 운동량의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 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)," Bulletin of the JSME, Vol. 16, No.101, pp.1712 - 1722.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 윤순현, 이대희, 송홍복, 김대성, 1996, "2차원 난류 벽부착제트의 대류열전달 특성," 대한기계학회 논문집B, 제 20권, 제10호, pp.3304 - 3312.
- (5) Morel, T., 1977, "Design of Two Dimensional Wind Tunnel Contraction," ASME J. Fluid Engr., Vol.99, pp.371 - 378.
- (6) Kim, K. J., 1991, "A new hue capturing technique for the quantitative interpretation of liquid crystal images used in convective heat transfer studies", Ph. D Thesis, The Pennsylvania State University, PA
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Kline, S. J. and McKlintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," Mech. Engr., Vol.5, pp.3 - 8.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) Hoch, J. and Jiji, M., 1981a, "Two - dimensional turbulent offset jet boundary interaction", *J. Fluids Engng* Vol.103, pp.331 - 336.
- (15) Vogel, J. C and Eaton, J. K., 1985, "Combined Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements Downstream of a Backward - Facing Step," *ASME J. Heat Transfer*, Vol.107, pp.922 - 929.
- (16) Lee, D. H., Grief, R., Lee, S. J., and Lee, J. H., 1995, "Heat Transfer from a Flat Plate to a fully Developed Axisymmetric Impinging Jet," *ASME J. Heat Transfer*, Vol.117, pp.772 - 776.
- (17) Hollworth, B. R., and Gero, L. R., 1985, "Entrainments Effects on Impingement Heat Transfer : Part2 - Local Hear Transfer Measurements," *ASME J. Heat Transfer*, Vol.107 pp.910 - 915.