

〈논 문〉

## 2차원 난류 벽부착제트의 대류열전달 특성

윤순현\* · 이대희\*\* · 송홍복\*\*\* · 김대성\*\*\*\*

(1996년 1월 8일 접수)

### Convective Heat Transfer Characteristics of a Two-Dimensional Turbulent Wall Attaching Offset Jet

Soon Hyun Yoon, Dae Hee Lee, Heung Bog Song and Dae Seong Kim

**Key Words :** Liquid Crystal(액정), Convective Heat Transfer(대류열 전달), Wall Attaching Offset Jet(벽부착제트), Nusselt Number(Nusselt 수), Gold Coated Film(금박막), Color Image Processing System(컬러 영상처리장치)

#### Abstract

An experimental study on the convective heat transfer characteristics was performed for a two-dimensional wall attaching offset jet (WAOJ). Thermochromic liquid crystal was used to measure the plate wall temperature. The Nusselt number was measured for Reynolds numbers from 6,500 to 39,000, and the offset ratios from 0.5 to 15. The maximum Nusselt number point coincides with the time-averaged reattachment point and Nusselt number decreases monotonically after the jet reattaches on the wall. In the recirculation region Nusselt number minimize near the upstream corner and then increases as X/D decreases to vanishes. This suggests the existence of secondary vortices, causing an additional mixing of the flow in the corner. The correlations between the local Nusselt number and Reynolds number, Re, offset ratio, H/D, and streamwise distance, X/D are presented.

---

#### 기호설명

---

$A$	: 금박막의 면적	$P(x)$	: 대기압
$D$	: 노즐의 폭( $D=20\text{mm}$ )	$Re$	: Reynolds수
$E$	: 브리지 출력 전압	$Sh$	: 물질전달계수( Sherwood수 )
$f$	: 금박막 도금의 균일도	$T_a$	: 실험시의 외기 온도
$H$	: 벽높이(노즐의 벽방향 끝에서 벽까지의 거리)	$T_j$	: 노즐출구 제트온도
$h$	: 대류열전달 계수	$T_w$	: 벽면상의 국소온도
$I$	: 금박막에 가해지는 전류	$V$	: 금박막에 가해지는 전압
$Nu$	: 국소 Nusselt수	$X$	: 노즐출구에서 유동 방향으로의 좌표
		$X_{\max}$	: 국소 $Nu$ 가 최대인 지점의 $X$ 값
		$X_{\min}$	: 국소 $Nu$ 가 최소인 지점의 $X$ 값
		$X_R$	: 시간평균 벽부착 길이
		$X^+$	: 최대국소 $Nu$ 의 위치로 무차원화한 좌표, $X^+ = (X - X_{\max}) / X_{\max}$
		$Y$	: 벽면에서 노즐 쪽으로 향하는 $X$ 축에 수직

\*회원, 부산대학교 기계설계공학과, 기계기술연구소

\*\*회원, 인제대학교 기계공학과

\*\*\*회원, 부산대학교 대학원

\*\*\*\*회원, 부산대학교 기계기술연구소

## 인 좌표

## 그리스문자

$\gamma_w$  :  $Y=0.5\text{mm}$ 에서 측정되는 순방향 흐름비  
(forward flow fraction)

$\epsilon$  : 액정표면의 방사율(emissivity)

## I. 서 론

노즐로부터 분사되는 제트는 국부적으로 열 및 물질전달 효과를 증진시킬 수 있어서 각종 열시스템의 냉각, 종이와 필름의 건조, 박막액정표시장치(TFT-LCD)의 제조, 용융물질의 담금질 등 여러 산업공정상에서 널리 사용되고 있다. 따라서 오래 전부터 다양한 형태의 제트에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이러한 제트의 한 예로서 Fig. 1에서와 같이 평면제트가 2차원 노즐로부터 정지된 유체 속의 단이 진 벽면에 평행하게 분사될 때 형성되는 벽부착제트(WAOJ; Wall Attaching Offset Jet)를 들 수 있다. 이때 분사된 제트는 제트 주류 양쪽에서의 유입(entrainment)의 불균형으로 인하여 벽 쪽으로 휘게 되며, 휘어진 제트는 벽면에 부착하면서 충돌영역(impingement region)을 형성하고 상하류 방향으로 각각 재순환 영역(recirculation region)과 벽제트 영역(wall jet region)을 형성하게 된다.

WAOJ는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 자유제트와 벽제트가 함께 존재하고 있을뿐 아니라 노즐 끝에서의 바리, 벽으로의 재부착, 급격한 압력변화와 재순환 및 재발달 현상 등 다양한 유동현상을 관찰 실험하기 위한 좋은 모델일뿐만 아니라, 가스 터빈의 연소실 벽면의 막냉각, 공기순환 제어를 위한

에어 디플렉터(air deflector), 자동차 창유리의 성에 제거를 위한 더미스터(demistor), 제트형태로 배출되는 배기ガ스에 관한 환경문제 등 다양한 실재적인 공학문제에 적용될 수 있다.

Borque와 Newmann<sup>(1)</sup> 아래로 WAOJ에 관한 유체역학적인 물리량의 측정 및 전산해석에 관한 다수의 연구가 있었으나, 열전달 연구 사례는 그리 많지 않다. Kumada 등<sup>(2)</sup>은 나프탈렌 승화법을 이용한 WAOJ에서의 벽면 물질전달률 실험을 통해 벽단비  $H/D=6.5$ 를 전후하여 재순환 베블의 형태가 변화하는 것을 발견하였으며 국소 물질전달계수와 벽단비의 관계를 조사하였다. 또한, 부착후 재발달되는 벽제트를 가상노즐 모델을 이용하여 재구성하고 이와 평면벽제트를 비교하여 국소 물질전달계수의 분포를 조사하였다. Hoch와 Jiji<sup>(3)</sup>는 가열된 WAOJ의 열특성치를 실험과 이론해석을 통해 조사하였다. 부착점 근방에서의 온도분포는 정규분포를 보이고 재순환 영역내의 온도는 균일하며, 외기의 자유흐름은 국소 최고온도의 분포에는 큰 영향을 주지 않는 것을 밝혔다. 한편, Holland와 Liburdy<sup>(4)</sup>는 가열된 공기를 분사시키고 경계면에 단열조건을 설정하여 유동장내의 온도구배를 조사하고 등가온도로 나타내었다. 이를 통하여 부착후의 재발달 영역이나 재순환 영역에서의 에너지 분포와 제트로부터의 열에너지가 감소하는 경향을 조사한 결과, 제트온도에 무관하게 재부착점이 동일하게 나타나므로 부력의 영향은 무시할 수 있으며 재순환 영역에서의 열분포는 벽단비의 영향을 크게 받음을 밝혔다. 한편 WAOJ와 유동형태상 유사성이 있는 충돌제트(impinging jet)에 의한 열전달 연구결과를 Martin,<sup>(5)</sup> Downs와 James,<sup>(6)</sup> Jam-bunathan,<sup>(7)</sup> Viskanta,<sup>(8)</sup> Lee 등<sup>(9,10)</sup> 외에도 많은 연구자가 발표하였다.

본 연구에서는 금 박 도금 필름(gold coated film), 액정(liquid crystal) 및 컬러 영상처리장치(color image processing system)를 사용하여 2차원 WAOJ에 의한 충돌벽면에서의 대류열전달 계수를 측정하였으며 벽단비와 Reynolds수의 변화에 따른 전열특성의 각종 상관관계를 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

## 2.1 풍동

본 연구에서는 Yoon 등<sup>(11,12)</sup>의 연구에 사용된 풍

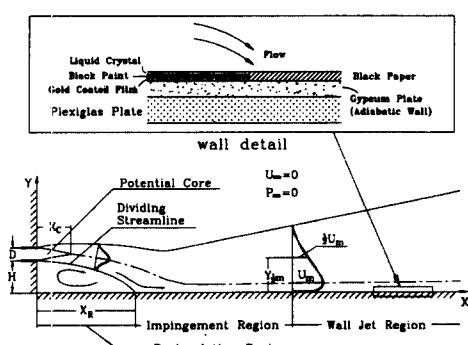


Fig. 1 Schematic diagram of the wall attaching offset jet experiment

동 및 시험구간(test section)을 개조하여 사용하였는데 풍동은 개회로 저속풍동으로 전체 길이는 시험구간을 포함하여 약 8m이고 폭은 0.6m이며 높이는 0.8m이다. 2차원 난류평면제트는 5마력 삼상 교류전동기로 구동되는 원심형 송풍기로부터 화대부와 정류실(plenum chamber) 및 축소노즐을 통하여 시험구간으로 분사된다. 노즐 출구속도는 전원주파수 변환기(금성사, SV-037GS-2 5마력)를 사용하여 0~30m/s 범위내에서 조절하였다. 노즐의 출구폭 D는 20mm이고 길이 W는 800mm로서 형상비 W/D는 40이며 정류실의 폭이 500mm이므로 면적 축소비는 25이다. 시험구간에서 수직으로 설치되어 제트흐름이 부착하게 될 벽면은 20mm 두께의 아크릴판과 15mm 두께의 단열판을 사용하여 제작하였고, 수동 이송장치를 이용하여 벽단비 H/D를 0.5에서 15까지 변화할 수 있도록 하였다.

## 2.2 액정의 교정

열전달 효과를 실험적으로 연구하기 위해서는 무엇보다도 각 위치별로 온도값을 정확히 측정할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 설치가 어렵고 유동장에 교란을 줄 수 있는 열전대(thermocouple)나 서미스터(thermistor) 등의 점센서(point sensor) 대신 정확하고 측정면 전체에 걸친 온도측정이 가능한 액정(liquid crystal)을 사용하였다. 액정의 색상 변화는 정확하게 같은 온도에서 같은 색상이 재현되는 특성을 보이므로 이를 온도측정에 적용하기 위해서는 매우 엄정한 교정을 선행하여야 한다. 교정실험에서는 먼저 항온조와 막대형 열원으로 길이 40cm의 황동 각주에 1차원적인 온도구배를 형성시키고 황동각주의 표면에 실제 실험시와 꼭같은 방식으로 미세 캡슐형태의 액정(TLC; Hallcrest Co. R35C1W)을 도포한 뒤 온도에 따른 색상 변화를 컬러 영상처리장치로 분석하였다. 액정의 교정 실험에 사용된 온도센서는 미국의 NAMAS(national measurement accreditation service)에서  $-70^{\circ}\text{C} \sim 420^{\circ}\text{C}$  구간을 교정하여 교정결과의 불확실성이  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$  이내에 드는 교정식을 구하여 놓은 Pt100Ω 백금저항온도계(SDL Co. T25/30)였다. 광원의 각도, 거리와 촬영기의 각도, 거리에 따라 온도-액정 색상의 상관관계가 달라지므로 교정시의 광원과 촬영기의 위치, 각도는 실험시에도 꼭같이 유지하여야 한다. 본 연구에서는 촬영거리 2m, 촬영각도  $90^{\circ}$ , 광원거리 50cm,

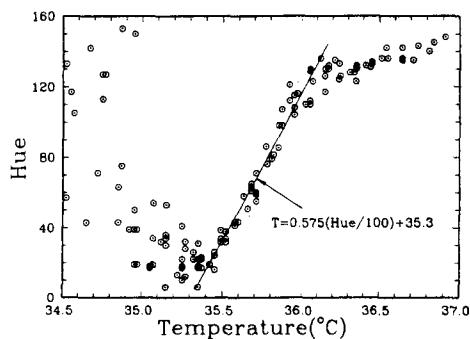


Fig. 2 Liquid crystal hue vs. temperature calibration

광원각도  $60^{\circ}$ 로 설정하였다. 광원은 발열량이 거의 전무하고 전파장의 빛이 고루 분포되는 백색광원인 광섬유조명(fiber optic illuminator; 한라광학 GLS-V100C)을 사용하였다. 교정실험을 통해 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>(13)</sup>의 방법에 따라 컬러 영상처리기법(true color image processing technique)으로 조사하고 온도측정에 적용하였다. 교정실험을 통해 측정된 액정의 빛깔-온도 분포의 교정결과가 Fig. 2에 나타나 있다.

## 2.3 실험 방법 및 해석

본 연구에서는 0.13mm 두께의 폴리에스텔 필름에 약 20 Å 정도의 두께로 금을 입힌 금박막(gold coated film)을 사용하여 등열유속 경계조건을 설정하였다. 일종의 전열선인 금박막에 흑색도료와 액정을 에어브러쉬(air brush)를 이용하여 두께가 일정하게 도포하고 DC 전력을 공급하면 도금된 금박의 저항으로 인하여 열이 발생하여 공급된 전력의 양에 따라 전면적에 걸쳐 일정한 열유속이 발생하게 된다. 유동에 의한 표면 열전달량에 따라 달리 형성되는 국소 온도분포가 그 온도에 해당하는 액정의 색상으로 나타나게 된다. 이때 Fig. 1과 같이 금박막의 뒷부분에는 단열재를 사용하여 벽면 뒤쪽 방향의 전도 열전달을 최대한 차단시켰고, 빛의 반사로 인한 오차를 막기 위해 흑지를 금박막의 가장자리에 설치하였다. 열전달계수의 환산에 사용되는 원심송풍기의 흡입구, 노즐 출구 및 실험실내 정지 외기 중에서의 온도는 각각 교정된 백금온도

센서를 사용하여 측정하였다.

공급전력을 조절하여 벽면의 열유속의 크기를 변화시키면서 표면의 열전달량에 따라 온도가 달리 분포되어 나타나는 액정의 색상을 활용한 후 영상 처리시스템을 이용하여 빛깔을 디지털 값으로 변환한다. 양자화된 빛깔 값은 교정식을 통해 각 위치에서의 온도값으로 환산되고, 이로부터 국소 대류 열전달 계수는 다음 식에서 계산된다.

$$h = \frac{q''_{\text{conv}}}{(T_w - T_j)} \quad (1)$$

이때  $T_w$ 은 액정의 교정식을 이용하여 계산된 벽면 상에서의 온도를,  $T_j$ 는 백금온도센서로 측정된 노출출구에서의 제트온도를 의미한다. 또,  $q''_{\text{conv}}$ 는 금박막을 통한 전체 열유속에서 열손실을 뺀 정미 대류 열유속이다. 즉,

$$q''_{\text{conv}} = \frac{f(I \cdot V)}{A} - \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_a^4) - q''_{\text{cond}} \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 국부 전기 가열과 평균 가열의 비로서 금박막의 도금 균일도를 나타낸다. Baughn 등<sup>(14)</sup>과 Lee 등<sup>(10)</sup>은 금박막의 크기를 작게 하고 비교적 균일하게 도금되는 금박막 률의 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 계산에

Table 1 Nusselt number uncertainty analysis

$x_i$	Unit	Value	$\delta x_i$	$\frac{\delta x_i \delta \text{Nu}}{\text{Nu} \delta x_i} (\%)$
$f$		1.0	0.02	1.91
$A$	$\text{m}^2$	$2.5 \times 10^{-3}$	$4.98 \times 10^{-5}$	1.90
$T_w$	$^{\circ}\text{C}$	35.6	0.22	1.56
$V$	$\text{V}$	11.291	0.125	1.06
$I$	$\text{A}$	0.45	0.005	1.06
$T_j$	$^{\circ}\text{C}$	21.4	0.14	0.99
$T_a$	$^{\circ}\text{C}$	21.2	0.14	0.93
$D$	$\text{m}$	0.02	$5 \times 10^{-5}$	0.23
$\varepsilon$		0.9	0.05	0.21
Total Nu uncertainty : $\frac{\delta \text{Nu}}{\text{Nu}} = 3.72\%$				

서 고려해 주기 위하여 식 (2)에 그대로 포함시켰다. 한편 전도에 의한 열손실은 뒷면의 단열재 열전도 계수가  $0.1 \text{W/mK}$  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 흑색도료의 방사율(emissivity), Stefan-Boltzmann 상수 및 대기의 온도이다.

불확실도를 해석하기 위하여 Kline과 McKlin-tock<sup>(15)</sup>의 방법을 사용하였다. Table 1에 의하면  $\text{Re}=39,000$ 과  $H/D=5.0$ ,  $X/D=12$ 에 대한 Nusselt수 Nu의 불확실도는 3.72%이다. 이때 금박막 도금의 균일도  $f$ 의 불확실도가 가장 크게 나타났고, 금박막의 표면적이 그 다음으로 중요한 불확실도 발생원인으로 나타났다.

### 3. 실험 결과

Fig. 3은  $H/D=0.5 \sim 10$ 까지의 8개의 벽단비와  $\text{Re}=39,000$ 일 때 벽면을 따른 유동 방향의 Nu분포를 보여주고 있다. 일반적으로 모든  $H/D$ 에서 부착영역 근방에서 휘어진 제트의 충돌로 인하여 Nu가 극대화되었다가 벽제트로 발전해 감에 따라 Nu는 감소하고 있다. 이때 Nu의 감소정도는 벽제트의 상사가 이루어지기 직전까지 매우 급격하다가 그 이후로는 하류방향으로 서서히 정체한다. 제트의 부착이전 영역에서는 재순환 영역으로 역류하는 유동으로 인하여 대류열전달이 발생하지만 역류의 속도가 주류에 비해 매우 낮은데다 재순환 버블의 안쪽으로 들어올수록 속도의 크기가 줄기 때문에 국소 Nu은 재순환 영역의 안쪽으로 가면서 감소하

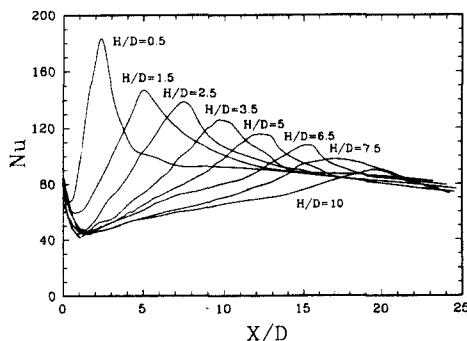


Fig. 3 The variation of the local Nu for various  $H/D$  at  $\text{Re}=39,000$

게 된다. 그러나 노즐 지지벽에 인접한 구석 부분에서  $Nu$ 는 다시 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 2차 모서리 와동(secondary corner eddy)으로 인한 추가적인 유동혼합에 의한 운동량의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.  $H/D=0.5$ 에서 2.5에 이르기까지 재순환 유동장내  $Nu$ 의 최저점  $X_{min}$ 의 경향을 살펴보면 벽단비의 증가에 따라  $X_{min}$ 은 증가하지만  $Nu$  자체는 약간씩 감소하고 있다. 그러다가  $H/D=2.5$  이후부터는  $X_{min}$ 과  $Nu_{min}$ 이 각각  $X_{min}/D \approx 1.5$ ,  $Nu_{min} \approx 45$ 로 거의 일정해진다. 이것은 벽단비에 따라 재순환 버블을 형성하는 압력구동 역흐름(pressure-driven backflow)의 운동량이 변하기 때문이다. 재순환이 수반되는 여러 가지 유동모델에 대한 많은 선행연구들은 전단층에서의 재유입량과 압력구동 역흐름량이 균형을 이루는 상황에서 재부착과 재순환이 결정되는 것으로 제안하고 있다. 따라서 재유입과 압력구동 역흐름의 유량 및 운동량이 재순환 유동장의 상태에 큰 영향을 미치게 된다. 본 실험의 경우 벽단비에 따라 약간씩 차이는 있지만 일반적으로 알려진 바와 같이 평면제트의 초기 발달이 대략  $X/D = 4.5 \sim 6$  근방에서 완료된다고 볼 때  $H/D = 1.5$ 까지는 완전히 발달되지 않은 제트가 바로 벽면에 충돌하는 것으로 판단할 수 있다. 그로 인하여 큰 운동량을 지닌 대규모의 와구조가 깨어지면서 재순환 영역으로 진입하므로 완전히 발달된 제트가 부착하게 되는  $H/D \geq 2.5$ 의 경우보다 재순환 버블내의 혼합이 상대적으로 활발하게 일어난다. 따라서 열전달률도 증가하며 재순환 영역 깊숙이 전파된 운동량으로 인하여  $X_{min}$ 값도 작게 된다. 다시 말하자면 벽단비가 0.5에서 2.5까지 커지면 압력구동 역흐름의 운동량이 점차 약

해지면서 모서리 와동이 좀더 커지고  $X_{min}$ 도 증가 하지만  $H/D \geq 3.5$ 부터는 Nozaki 등<sup>(19)</sup>의 압력분포 결과에서도 예측되었듯이 완전발달된 평면제트의 충돌로 모서리 와동이 성장을 멈추는 것으로 관찰된다.

Fig. 4는  $Re = 39,000$ 에서 벽단비에 따른 최대 및 최소  $Nu$  위치  $X_{max}$ 과  $X_{min}$ 의 변화를 보여주고 있다. Fig. 4에서 시간평균 벽부착길이  $X_R$ 은 Yoon 등<sup>(12)</sup>의 기법으로 스플릿 필름 프로브를 사용하여 측정한 순방향 흐름비(forward flow fraction)로부터 구하였으며 최대  $Nu$ 의 위치  $X_{max}$ 와 거의 일치함을 알 수 있다. 한편 각 벽단비에 대한  $X_{max}/D$ ,  $X_{min}/D$ 의 분포로부터 다음의 관계식을 유도해 낼 수 있다.

$$\frac{X_{max}}{D} = 3.93(H/D)^{0.72} \quad (4)$$

$$\frac{X_{min}}{D} = 0.63(H/D)^{0.45}$$

또한 시간평균 벽부착거리  $X_R$ 에 대해서도 같은 방식으로 관계식을 구하면 Fig. 4와 같이  $X_{max}$ 의 경우와 계수 및 지수가 매우 유사하게 나타난다. 이는 Vogel과 Eaton<sup>(16)</sup>의 후향단 흐름 및 Baughn 등<sup>(17)</sup>의 돌연팽창 원관유동에 대하여 알려진 결과와 대체로 일치하는 현상인데 이는 WAOJ와 이들 유동이 재부착 흐름을 동반하는 유사 유동구조를 갖고 있기 때문으로 생각된다.

충돌제트의 경우  $Nu_{max}$ 은 벽과 노즐 사이의 거리가 충분히 멀어지기 전까지는 벽과 노즐간의 거리에 크게 영향을 받지 않는 것으로 조사되었으나,<sup>(10,18)</sup> Fig. 3에서처럼 WAOJ에서는  $Nu_{max}$ 에 대한 벽단비  $H/D$ 의 영향이 매우 크다. 본 연구에서는  $Nu_{max}$ 과  $Re$  및  $H/D$ 의 상관관계를 알아보기 위하여 우선  $H/D = 5$ 인 경우에 대하여  $Nu_{max}$ 와  $Re$ 의 분포를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 그 결과  $Nu_{max}$ 는 다음과 같이  $Re^{0.49}$ 에 비례하는 것으로 나타났다.

$$Nu_{max} = 0.636 Re^{0.49} \quad (5)$$

충돌제트의 경우  $Nu_{max}$ 에 대한  $Re$ 의 지수는 대략 0.5~0.67의 값을 갖는 것으로 조사되고 있다.<sup>(10)</sup> WAOJ의 경우 제트가 경사진 상황에서 충돌이 일어나므로 유동이 수직으로 벽면에 부딪히는 충돌제트에 비해 열전달 효과가 약할 것으로 추측되고 이에 따라서  $Re$ 의 지수가 약간 작은 값으로 산출

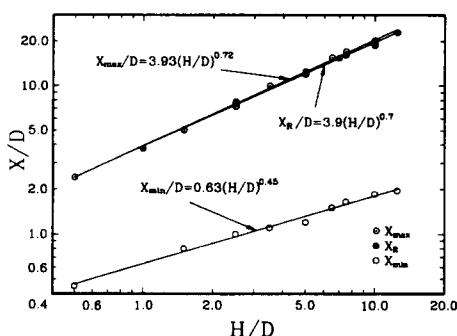
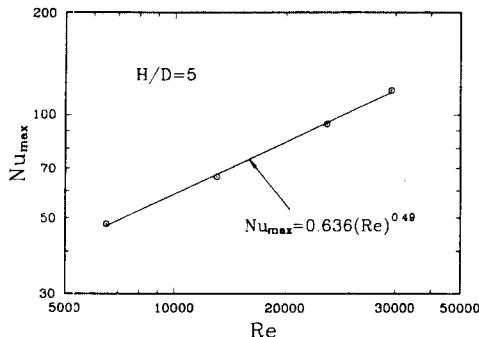
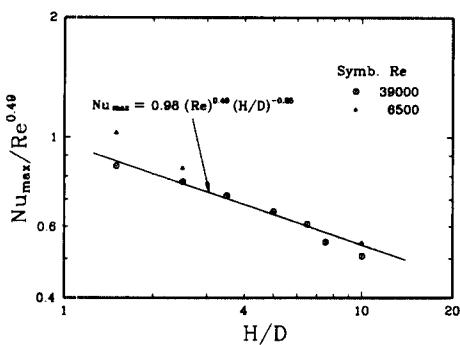


Fig. 4 Effect  $H/D$  on  $X_{max}$ ,  $X_{min}$ , and  $X_R$  for  $Re=39,000$

Fig. 5 Effect of Re on Numax for  $H/D=5.0$ Fig. 6 Correlation of Numax with Re and  $H/D$ 

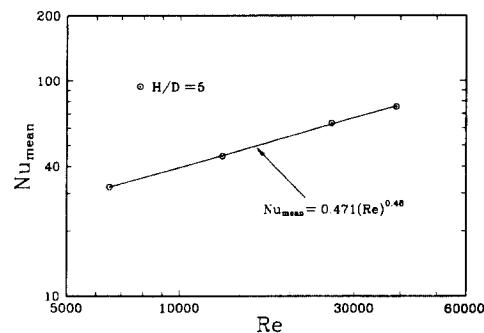
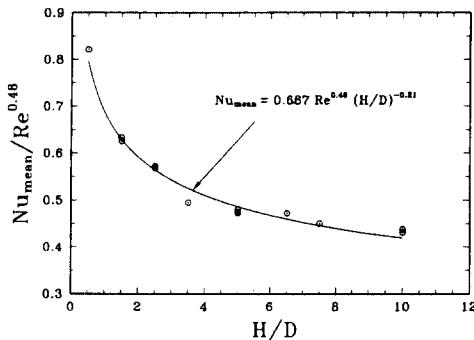
된 것으로 판단된다.

식 (5)의 상관관계를 토대로  $Nu_{max}/Re^{0.49}$ 를 각 벽단비에 대하여 적용하여 나타내면 Fig. 6에서처럼 관계식

$$Nu_{max} = 0.98 Re^{0.49} (H/D)^{-0.25} \quad (6)$$

을 유도할 수 있다. Kumada 등<sup>(2)</sup>이 수행한 유사 연구에서 벽단비가 2.5에서 24.5까지 변할 경우에 최대 물질전달계수  $Sh_{max}$ 가  $Re^{-0.58}$ 에 비례하는 것으로 밝혔다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이  $H/D \leq 2.5$ 에서  $Re = 6500$ 인 경우에 실험결과가 식 (6)과 약간의 오차를 보이는데 Borque와 Newman<sup>(1)</sup>의 결과를 유추할 때  $H/D < 3$ 이고  $Re < 10,000$ 일 때 유동이  $Re$ 에 매우 민감함으로 인해 이와 같은 오차가 발생한 것이다.

재순환 영역에서의 열전달계수 분포는 재순환 버블의 여러 가지 조건에 관련이 있다. 따라서 재순환 영역내에서의 총괄적인 열전달 경향을 알기 위해 재순환 영역내의 평균 Nusselt 수  $Nu_{mean}$ 을 다음과 같이 정의하였다.

Fig. 7 Effect of Re on Numax in the recirculation region for  $H/D=5.0$ Fig. 8 Correlation of Numean in the recirculation region with Re and  $H/D$ .

$$Nu_{mean} = \frac{1}{X_{max}} \int_0^{X_{max}} Nu dx \quad (7)$$

$H/D=5$ 인 경우의  $Re$ 에 대한  $Nu_{mean}$ 의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그 결과 다음과 같이  $Nu_{mean}$ 은  $Re$ 의 0.48승에 비례하는 것으로 나타났다.

$$Nu_{mean} = 0.223 Re^{0.48} \quad (8)$$

이와 같이 재순환 버블내의 열전달이  $Re^{0.48}$ 에 비례하는 것은 재트 주류의 속도가 증가함에 따라 재순환 유동장을 형성하는 구동 역흐름의 운동량이 강해지므로 전체 재순환 버블내의 열전달이 촉진되어야지 때문이다.

Fig. 8에는 여러 가지 벽단비에 대한  $Nu_{mean}/Re^{0.48}$ 의 분포를 나타내었는데 이로부터

$$Nu_{mean} = 0.687 Re^{0.48} (H/D)^{-0.21} \quad (9)$$

이며 벽단비가 증가할수록 재순환 버블의 크기가 커지면서 대류열전달을 결정하는 벽면인접유속이 전체적으로 낮아지므로 재순환 유동장내의  $Nu_{mean}$

이 작아짐을 알 수 있다.

WAOJ에서는 벽에 부착된 유동이 나뉘어져서, 일부는 재순환 영역으로 역류해 가고 나머지 일부는 벽제트 영역으로 재발달해 간다. 따라서 이 두 영역에서의 유동구조가 매우 다르게 나타나므로 벽면에서의 열전달 현상은 벽부착점을 기준으로 분리하여 고찰할 필요가 있다. 이때, 각 실험조건의 최대 Nu의 위치가 상이하게 나타날 소지가 있고 그럴 경우 관계식을 유도하기 어려우므로 본 연구에서는 다음과 같이 무차원 길이  $X^+$ 를 정의하여 하나의 좌표로 삼았다.

$$X^+ = (X - X_{\max}) / X_{\max} \quad (10)$$

$H/D=5$ 에 대하여  $X^+ < 0$ 일 경우, 즉 재순환 영역에서의 국소 Nu 분포로부터 Fig. 9와 같이 Re와  $X^+$ 와의 상관관계를 나타낼 수 있다.

$$Nu = 0.691 Re^{0.49} \exp(1.114X^+) \quad (11)$$

아래 Fig. 9에서 모서리 와동으로 인한 부가적인 열전달 측진이 관찰되는  $-1.0 \sim -0.9$  사이의  $X^+$ 에 대해서는 식 (11)이 적용되지 않는다.

Borque와 Newman<sup>(1)</sup>의 결과를 유추해 볼 때, 본 연구에서 다룬 Re수의 범위내에서는  $H/D \geq 3.0$ 인 경우에 Re가 유동구조에 크게 영향을 주지 않는다고 판단된다. 이에 따라  $H/D \geq 3.5$ 에서의 재순환 영역내의 국소 Nu수의 분포를  $X^+$ 에 대하여 정리하면 Fig. 10과 같이

$$Nu = 0.847 Re^{0.49} (H/D)^{-0.16} \exp(1.019X^+) \quad (12)$$

의 관계식을 얻을 수 있는데, 식 (12)는 식 (11)과 마찬가지로 모서리 와동의 영향이 나타나는  $X^+ = -1.0 \sim -0.9$ 에서는 적용되지 않는다.

또한, Fig. 11은  $H/D=5.0$ 에서  $X^+ > 0$ 일 때 즉, 재발달 영역에서의 Nu와 Re 및  $X^+$ 의 관계를 보여주며

$$Nu = 0.201 Re^{0.56} (X^+)^{-0.135} \quad (13)$$

의 관계식을 얻는다.

한편 벽제트 재발달 영역내에서 Nu가 어떻게 Re, 벽단비  $H/B$  및 무차원 좌표  $X^+$ 에 의하여 영향을 받는지를 Fig. 12에 나타내었으며 또한

$$Nu = 0.305 Re^{0.56} (H/D)^{-0.25} (X^+)^{-0.145} \quad (14)$$

의 관계식을 얻을 수 있다.

식 (11) ~ (14)로부터 각각 재발달 영역에서 Nu

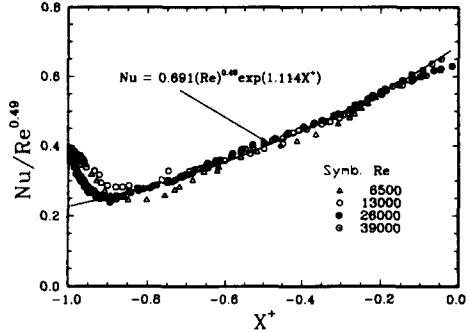


Fig. 9 Correlation of the local Nu in the recirculation region with Re and  $X^+$  for  $H/D=5.0$

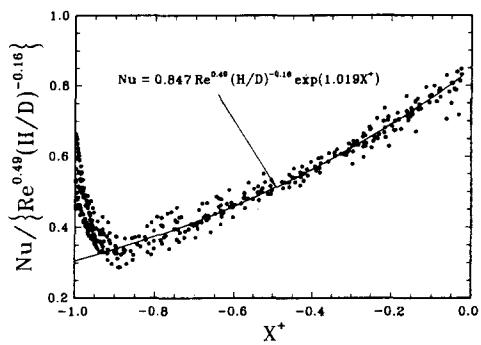


Fig. 10 Correlation of the local Nu in the recirculation region with Re,  $X^+$ , and  $H/D$  for  $H/D \geq 3.0$

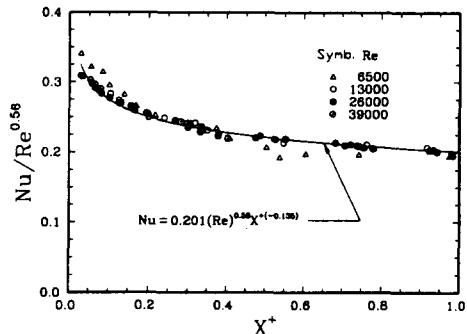


Fig. 11 Correlation of the local Nu in the redevelopment region with Re and  $X^+$  for  $H/D=5.0$

의 Re에 대한 의존도가 재순환 영역에서 Nu의 Re에 대한 의존도보다 높은 것을 알 수 있다. 이것은 재발달 영역에서는 벽면 인접 유동이 외부로부터 유입되는 차가운 유체와 계속 혼합되며 발전하는 반면 재순환 영역에서는 Hoch와 Jiji<sup>(3)</sup> 및 Holland과 Liburdy<sup>(4)</sup>에 의해 제시되었듯이 국소온도가 비

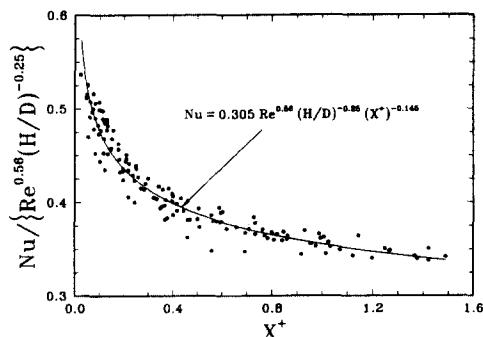


Fig. 12 Correlation of the local Nu in the reattachment region with Re,  $X^+$ , and  $H/D$  for  $H/D \leq 3.0$

교적 균일하게 유지되며 자유흐름의 유입이 크게 억제되기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 액정과 금박막을 사용하여 등열유속 경계조건하에서의 2차원 벽부착제트의 벽면 대류열전달 현상을 조사하였다. 벽면온도의 관별을 위하여 빛깔(hue)과 온도 관계를 이용하는 교정기법을 사용하였다. 노즐출구의 Reynolds수를 6,500~39,000으로 변화시키며 벽단비  $H/D$  및 흐름 방향 길이  $X/D$ 에 대한 Nu의 분포양상의 변화를 관찰하였으며 필요한 관계식을 유도하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 벽단비가 5.0인 경우 WAOJ의 최대 Nu수는  $Re$ 수의 0.49승에 비례하였다.

(2) WAOJ의 최대 Nu수가 관찰되는 지점은 시간 평균 벽부착점과 거의 일치하는 것을 확인하였고  $Re=39,000$ 일 때, 최대 Nu 위치는 벽단비의 약 0.7승에 비례한다.

(3) 재순환 영역에서는 역류 방향으로 갈수록 열전달 효과가 감소하다가 모서리 와동 근방에서 다시 Nu는 상승하였다. 이것은 2차 모서리 와동으로 인한 추가적인 유동 혼합에 의한 운동량 증가에 기인한다. 한편,  $H/D < 3.5$ 인 경우 제트의 발달이 완료되지 않은 상황에서 충돌이 발생하여 재순환 영역내의 열전달 효과가  $H/D \leq 3.5$ 인 경우보다 높게 나타난다.

(4) 부착후 재발달 영역에서는 Nu가 급속히 감소하다가 벽제트로 상사됨에 따라 서서히 감소하는

경향을 보였다.

(5)  $H/D \geq 3$ 인 경우에 대하여 재순환 영역과 재발달 영역에서의 Nu에 대한  $Re$ 와 벽단비 및 무차원 좌표  $X^+$ 간의 상관관계를 제시하였다. 이때 벽면 인접 유동의 온도조건이 상이함에 따라 재발달영역에서의 Nu의  $Re$ 에 대한 의존도가 재순환 영역에서의 Nu의  $Re$ 에 대한 의존도보다 높은 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) Borque, C. and Newmann, G., 1960, "Reattachment of a Two-Dimensional, Incompressible Jet to an Adjacent Flat Plate," *Aerion Quart.*, Vol. 11, pp. 201~232.
- (2) 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 JSME*, Vol. 16, No.101, pp. 1712~1722.
- (3) Hoch, J. and Jiji, M., 1981, "Theoretical and Experimental Temperature Distribution in Two Dimensional Turbulent Jet Boundary Interaction," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 331~336.
- (4) 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.
- (5) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," *Adv. Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1~60.
- (6) Downs, S. J. and James, E. H., 1987, "Jet Impinging Heat Transfer - A Literature Survey," *ASME Paper*, 87-H-35.
- (7) Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. A. and Button, B. L., 1992, "A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 13, pp. 106~115.
- (8) Viskanta, R., 1993, "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets," *Expt. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 6, pp. 111~134.
- (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) 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. of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 772~776
- (11) Yoon, S. H., Kim, K. C., Kim, D. S. and Chung, M. K., 1993, "Comparative Study of a Turbulent Wall-Attaching Offset Jet and a Plane Wall Jet," *KSME Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 101~112.
- (12) Yoon, S. H., Kim, K. C., Kim, D. S. and Chung, M. K., 1995, "Effect of Surface Roughness on a Turbulent Wall-Attaching Offset Jet," *Experiments in Fluids*, Vol. 19, pp. 38~42.
- (13) Camci, C., Kim, K., Hippensteele, S. A. and Poinsatte, 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.
- (14) Baughn, J. W. and Shimizu, S., 1989, "Heat Transfer Measurements from a Surface with Uniform Heat Flux and an Impinging Jet," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 1096~1098.
- (15) Kline, S. J. and McKlinton, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mech. Eng.*, Vol. 5, pp. 3~8.
- (16) 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.
- (17) Baughn, J. W., Hoffman, M. A., Launder, B. E., Lee, D. H. and Yap, C., 1989, "Heat Transfer, Temperature, and Velocity Measurements Downstream of an Abrupt Expansion in a Circular Tube at a Uniform Wall Temperature," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 870~876.
- (18) 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.