⊙ 研究論文

단이 진 경사벽면에 부착되는 2차원 제트유동에 관한 연구

송홍복* · 심재경** · 윤순현***

An Investigation on Flow Characteristics of Two Dimensional Inclined Wall Attaching Offset Jet

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

Key words : Inclined Wall Attaching Offset Jet (경사진 벽부착제트),Upper Jet Spread(상부 제트 확산거리), Forward-Flow Fraction(순방향 흐름비), Wall Attaching Region(벽부착 영역), Recirculation(재순환유동) Wall Static Pressure Coefficient(벽면정압계수), Similarity(상사성)

Abstract

An experimental study on the flow characteristics was performed for a two-dimensional turbulent wall attaching offset jet at different oblique angles to a surface. The flow characteristics were investigated by using a split film probe with the modified Stock' s calibration method. The jet mean velocity, turbulent intensity, wall static pressure coefficient profiles, and time-averaged reattachment point were measured at the Reynolds number Re (based on the nozzle width, D) ranging from 17700 to 53200, the offset ratio H/D from 2.5 to 10, and the inclined angle α from 0° to 40°. The Correlations between the maximum pressure position, minimum pressure position, and reattachment point and offset ratios, and inclined angles are presented.

기호설명(Nomenclature)

C_{PW} : 벽면정압계수
C_{PWmax} : 최대 벽면정압계수
C_{PWmin} : 최소 벽면정압계수
D : 노즐의 폭 (D=25mm)
H : 벽높이 (노즐의 벽방향 끝에서 벽까지의 거리)
P_w : 벽면정압
P_∞ : 대기압
Re : 레이놀즈 수
U : X^α방향 평균 속도
U_J : 노즐 출구 평균 속도
U_m : X^α방향 국소 최대 평균 속도

* 한국전력공사 부산화력 발전처 (원고접수 : 97년 2월)
** 부산대학교 대학원
*** 부산대학교 기계설계공학과

u,v : X^{α},Y^{α}방향 난류속도 성분
u′,v′ : u,v의 r.m.s
X : 노즐 출구에서 유동 방향으로의 좌표
X^{α} : 경사벽면상의 기준좌표
X_R^{α} : 시간 평균 벽부착 길이
X^{*} : 시간평균 벽부착 길이로 무차원화한 좌표($(X^{\alpha}-X_R^{\alpha})/X_R^{\alpha}$)
X^{α}_{Pmax} : 경사벽면 최대 정압 위치
X^{α}_{Pmin} : 경사벽면 최소 정압 위치
Y : X축에 수직인 좌표
Y^{α} : 경사벽면에 대해 수직방향인 좌표
$Y^{\alpha}_{1/2m}$: 상부 제트 확산거리(upper jet spread)

그리스 문자

α : 벽판의 경사각
γ : 순방향 흐름비(forward flow fraction)
γ_w : Y^{α}=1mm에서 측정된 순방향 흐름비(forward flow fraction)

1. 서 론

벽부착 제트는 2차원 노즐로부터 정지된 유체 속으로 분출 될 때 노즐에 나란하게 설치된 벽의 존재로 인하여 제트류와 벽사이의 자유 경계층을 통한 유입의 제한을 받게 되어 벽면 쪽에 생기는 부압으로 유동이 벽면 경계층쪽으로 휘게 되는 코안다(coanda) 효과가 나타나는 제트를 말한다. 경사진 벽부착 제트(Inclined Wall Attaching Offset Jet ; 이하 IWAOJ)란 Fig. 1과 같이 벽면이 노즐 출구에 경사져 있는 제트를 말한다. IWAOJ는 유동 현상이 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. 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.

IWAOJ는 이러한 비중에도 불구하고 실제적인

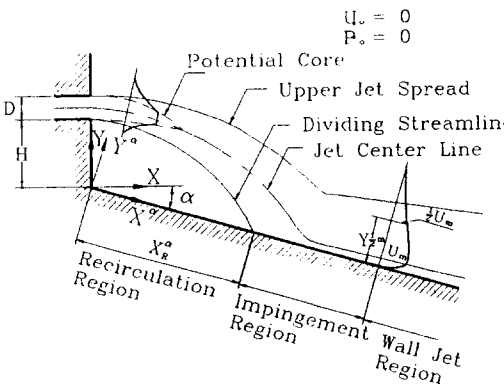

Fig. 1 Schematic diagram of the inclined wall attaching offset jet flow field

연구 사례는 그리 많지 않다. Borque와 Newman[1], Sawyer[2], Rajaratnam과 Subramanya[3], Perry[4] ,Pelfray[5] ,Nozaki 등[6,7], 그리고 Yoon 등[8,9] 등은 벽면이 노즐 출구와 나란하게 설치된 벽부착 제트(Wall Attaching Offset Jet : 이하 WAOJ) 에서 압력 분포, 벽부착 길이, 평균속도분포, 난류량 분포 등을 연구했다. 그러나 벽면의 경사각 변화에 따른 벽면정압분포 및 유동 장 특성에 관한 연구는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 벽면 경사각의 변화에 따른 벽부착 길이(wall reattachment length), 재순환 유동장과 벽면정압분포 및 평균 유동장과 난류 강도의 변화를 조사하였다.

2 실험 장치 및 방법

2. 1 풍동과 시험부

실험에 사용된 풍동은 Yoon 등[8,9]이 사용한 풍동과 유사한 개방형 송출식 풍동이며 송풍기(blower), 확대부(diffuser), 정류실(plenum chamber), 축소 노즐(contracting nozzle)로 구성되었다. 노즐 출구 속도는 5~35m/s범위에서 조절 가능하며, 확대부 와 정류실에 스크린을 설치하여 흐름의 균일성을 유지하였다. 축소 노즐은 운동량 손실을 막고 균일한 출구 속도를 얻기 위하여 Morel[10]이 제안한 3차곡선으로 설계되었고, 출구 노즐폭 D는 25mm, 높이는 300mm로 형상비는 12, 단면 축소

비는 12이다. 노즐 출구 평균 속도의 균일성은 경계층 부분을 제외하고는 평균속도 변동분이 노즐 폭방향으로 1.0%, 높이방향으로 2.0% 이내의 좋은 균일성을 보였다. 노즐 출구 주류 난류 강도는 출구 속도의 0.1%이하로 유지되었다. 제트가 부착되는 경사벽판은 투명아크릴(plexiglas)로 제작하여 벽단비 H/D는 0~15, 경사각 α는 $-30^\circ \sim 45^\circ$의 범위에서 이송이 가능하도록 장착하였다. 벽판의 크기는 300×1800mm이며, 벽면 정압을 측정하기 위하여 경사벽면에 150개의 압력공(직경 1mm)을 재순환 영역까지는 5mm, 벽제트 영역에서는 10mm 간격으로 설치하였으며 인접한 정압공 사이의 상호 간섭을 배제하기 위하여 상하 20mm 엇갈리게 배치하였다. 압력의 측정은 디지탈 마이크로 마노미터(Furness사 model MCD-FC004)를 사용하여 측정하였다.

2.2. 속도 센서의 교정

유속 측정 센서는 TSI사 model 1288 스플릿 필름(split film probe ; 이하 SFP) 을사용 하였다. SFP은 그 출력 전압이 유체의 속도뿐만 아니라 유입각에도 지배되므로 순간 유입각이 큰 흐름의 측정에 있어서 열선에 비하여 신뢰성 높은 자료를 얻을 수 있다. 교정 실험은 Stock[11]의 법칙을 수정하여 선정된 각각의 속도 구간에 대한 무차원 함수를 따로 정의하는 방법을 택한 김경천 등[12]의 방법으로 속도 구간을 1.5 m/s에서 35 m/s까지 14구간으로 나누고 피치각은 $-90^\circ \sim +90^\circ$까지 중에서 17군데를 정하였다.

2.3. 실험 방법 및 해석

유동장 실험은 Fig. 2와 같이 센서로부터 검출된 속도성분들의 신호를 정온 열선풍속계(constant temperature anemometer)인 TSI사 IFA-300으로 SFP을 작동시켰으며, IFA-300내의 5 khz 저역통과 필터를 통해 유속 신호의 교류 성분 Aliasing 현상을 억제하였다. C.T.A에서 출력된 신호는 A/D 변환기에서 디지탈 신호로 변환되며, 디지탈화된 신호는 개인용 컴퓨터에 온라인으로 저장된다. 유속의 측정을 위한 추출시간간격(sampling time)은 100μs이고 한 위치에서 4096개의 자료를

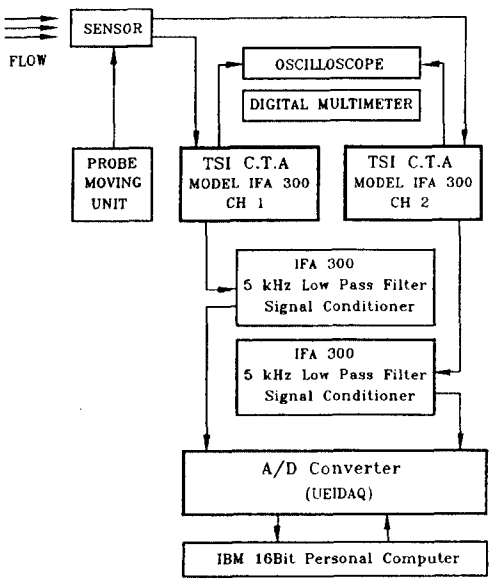

Fig. 2 Block diagram of the measuring and the data processing system

10회 측정하였다. 측정된 자료의 분석 시 평균을 취하는 방법으로 Westphal과 Mehta[13]가 추천한 진행평균기법(running averaging method)을 이용하였다.

3. 실험 결과

3.1. 벽면 정압 계수 분포

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

$$C_{PW}=\frac{(Pw-P\infty)}{\frac{1}{2}\rho U_J^2} \quad (1)$$

Reynolds 수가 유동 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 벽단비 H/D=5, 경사각 $\alpha = -30^\circ, -15^\circ, 15^\circ, 30^\circ$, Re=17700, 35500, 53200에서의 벽면 압력계수의 분포를 조사하여 Fig. 3에 보였다. 경사 벽면에서 벽면 정압 분포는 Borque와 Newman1) 에 의하면 Re가 6000이상에서 재부착 점의 위치나 제트 주류 유동장은 Re에는 무관하다고 하였다.

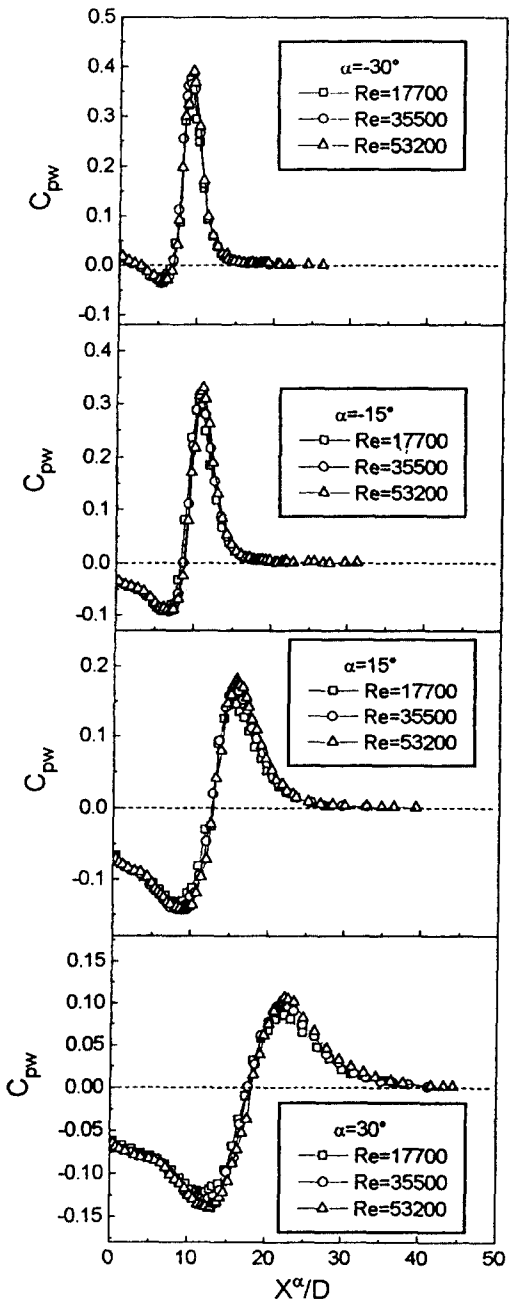

Fig. 3 Wall static pressure coefficient distributions with various Re, and α for H/D=5

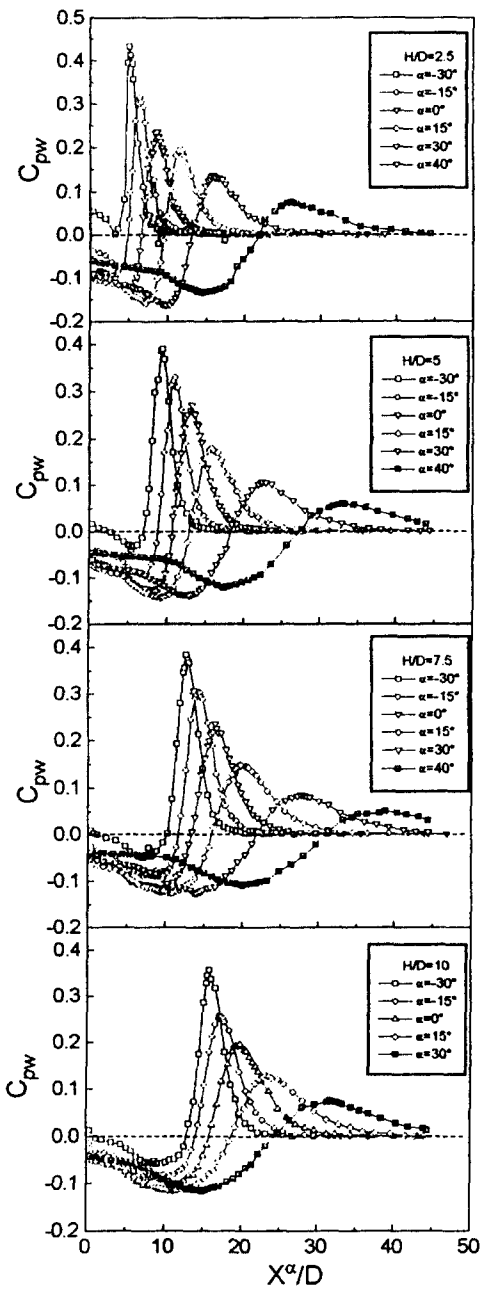

Fig. 4 Wall static pressure coefficient distributions with various H/D, and α for Re=53200

본 실험에서도 압력공의 위치 오차를 감안하면 실험한 Re 범위에서 재부착 점의 위치나 제트 주류 유동장은 Re 수에는 무관하다고 판단된다. 하지만 재순환 영역의 재순환 버블은 벽면의 경사각이 클수록 Re 수의 영향이 조금 나타나고 있다. 또한 경사각 $\alpha = -30°$ 인 경우 노즐 출구쪽 선단 벽면에서

벽면 정압계수가 양압을 보이는 것은 경사 충돌제트와 유사한 정체영역을 형성하는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 Re=53200에서 벽단비와 경사각의 변화에 따른 벽면 압력 계수의 분포를 보인 것이다. 벽면 정압계수 분포는 대체적으로 초기 노즐 위치의 음압이 서서히 줄어서 최소 값에 도달후 급격히 상승하여 최대 값을 이루고 그후 벽제트로 발달하면서 대기압과 같아진다.

Fig. 5는 벽단비와 벽면 경사각의 변화에 따른 최대 최소의 벽면 정압계수 분포를 나타낸 것이다. H/D=2.5 경사각 $-30°$, $-15°$, $0°$에서 최대 벽면 정압계수가 H/D=2.5 경사각 $15°$ 이상에서의 경우와는 약간 다른 양상을 볼 수가 있는데, 이는 노즐 출구 제트가 완전 발달된 유동 상태로 큰 곡률로 휘어져 벽부착이 일어나는 경우와의 차이로 판단된다. 최소 벽면 정압계수는 경사각 $-15°$를 기준으로 벽단비 따른 상대적인 값이 서로 역전되고 경사각이 클수록 최대, 최소 벽면정압계수 값의 차가 작아지는 것과 동일한 경사각의 경우 벽단비가 커질수록 최대, 최소 벽면정압계수 값의 차가 감소하는 것은 제트 주류와 경사벽면 사이의 공간이 커지면서 유입 유량이 더 많이 공급될 수 있어 압력구동 역흐름(pressure-driven backflow)이 약해지며 또한 벽면이 기울어져 있으므로 제트의 속도가 더 감소한 상황에서 이에 따른 재순환 버블의 세기가 약해지기 때문이다. Fig. 6은 여러 가지 경사각에 대한 $(X^{\alpha}/D)/(H/D)^{0.56}$, $(X^{\alpha}/D)/(H/D)^{0.34}$의 분포를 나타내었는데 이로부터 최대 최소 벽면 정압계수 위치를 각각 다음과 같은 상관 관계식을 유도해 낼 수 있다. 그림에서 보면 경사각 $-30°$, $40°$에서 실험치와 근사식사이에 25%의 오차를 보이지만 나머지 구간에서는 근사 관계식이 최대 최소 벽면 정압 위치의 벽단비와 경사각의 상관 관계식으로 약 10% 이내의 오차범위내에 있다.

$$(X^{\alpha}_{Pmax}/D)=5.25(H/D)^{0.56}(1-\sin(\alpha))^{0.86} \quad (2)$$

$$(X^{\alpha}_{Pmin}/D)=4.41(H/D)^{0.34}(1-\sin(\alpha))^{0.76} \quad (3)$$

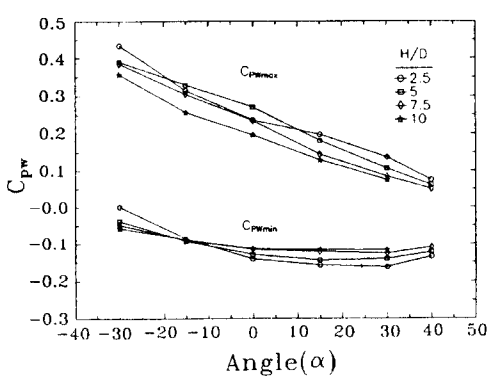

Fig. 5 The maximum and minimum wall pressure coefficient with variance of H/D and α

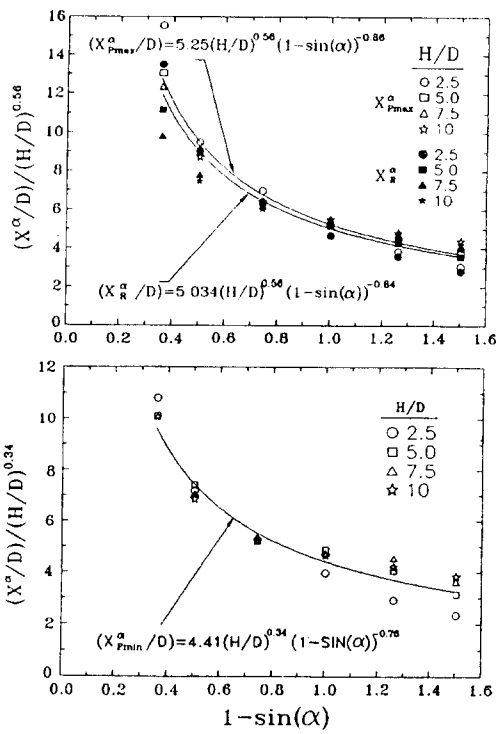

Fig. 6 Correlation of maximum and minimum wall pressure point with variance of H/D and α

3.2 재부착 현상

WAOJ 유동 연구에서 벽부착 길이는 주된 관심의 대상이었다. 재부착점은 노즐 출구로부터 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 재

부착하는 메커니즘에 대해서 Adams와 Johnston[14]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. IWAOJ에서 재부착 현상은 간헐적인 유입현상 등에 기인한 비정상 현상으로 재부착 위치는 실제로 벽면을 따라 약간씩 상. 하류로 움직이면서 재부착 영역을 형성하게 된다. Westphal과 Johnston[15]의 연구에 의하면 표면 마찰계수가 0인 비정상 벽부착 흐름의 시간평균 벽부착점 혹은 시간평균 박리점은 벽면에서의 순방향 흐름비(forward flow fraction) γ가 50%가 되는 점이다. 여기서 순방향 흐름비 γ는 전체 신호 측정시간에서 하류 방향 흐름이 신호가 차지하는 시간의 비로 정의한다. 본 연구에서 순방향 흐름비는 SFP를 이용하여 측정하였다. SFP를 벽면에 수직으로 근접시키면 SFP의 특성상 분리면을 기준으로 상. 하류 방향의 흐름 정도가 두 반원막에서의 출력에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이런 성질을 이용하여 실험 시작시 C.T.A의 초기 브릿지 출력을 같이하여 흐름의 방향에 따라 두 브릿지 출력의 대소가 결정되며 이 대소 관계로부터 순방향 흐름비를 얻을 수 있으며, 본 실험에서는 100Hz의 절단주파수를 가진 저역통과 필터를 사용하여 총 100여 초 동안의 신호를 5ms의 추출 간격으로 A/D변환하여 분석하였다. Fig. 7(a)은 벽단비에 대하여 시간 평균 벽부착위치를 벽면경사각도와의 관계로 나타낸 것이다. 각도의 증가에 따라 재부착 길이가 증가하는 것을 볼 수가 있고 각도가 약 15°까지는 재부착 길이의 증가비가 작지만 30° 이상에서는 보다 큰 각도 의존성을 보인다. Fig. 7(b)은 각도에 대하여 벽단비와 벽부착길이의 관계를 나타낸 것으로 그림에서 최대 벽면정압계수의 위치가 시간평균 부착점보다 약간 뒤쪽에 나타남을 알 수가 있는데 이것은 Borque와 Newman[1], Kumada[16]의 실험결과와 일치하다. 이같은 현상은 유동이 벽면에 수직으로 충돌 할 경우에는 재부착 위치와 벽면 최대 정압위치가 일치하지만 벽면에 부착하는 유동이 경사져서 충돌하기 때문인 것으로 판단된다.

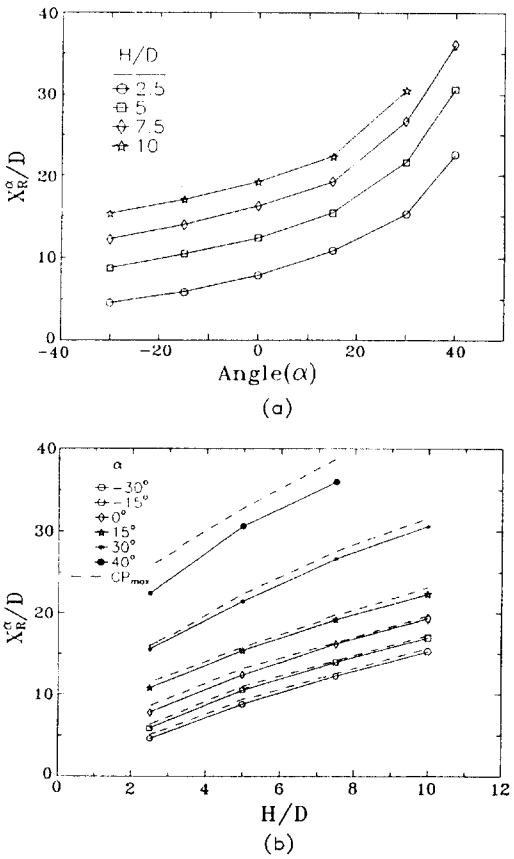

Fig. 7 The length of wall-attaching point with variance of H/D and α

시간평균 벽부착 길이 X_R^α를 이용하여 무차원 벽부착 영역 X*를 다음과 같이 정의하였다.

$$X^* = \frac{(X^\alpha - X_R^\alpha)}{X_R^\alpha} \tag{4}$$

Fig. 8은 SFP를 최대한 벽면에 근접시켜 X^α축을 따라 후방으로 이송하면서 벽면 순방향 흐름비 γ_w를 측정하여 γ_w가 1%보다 커지기 시작하는 지점을 벽부착 영역의 시작점으로, γ_w가 99%되는 지점을 벽부착 영역의 마침점으로 나타낸 그림이다. 모든 벽단비에서 경사각이 증가함에 따라 시간평균 재부착점의 위치가 증가한 것과 같이 무차원 벽부착 영역도 증가하고 있다. 결과적으로 경사각이 증가할수록 벽면 충돌 영역이 넓어지고 있다. Fig. 6에서 여러 가지 경사각에 대한 $(X^\alpha/D)/(H/D)^{0.56}$의 분포를

나타내었는데 이로부터 벽면 재부착 위치를 다음과 같은 상관 관계식으로 유도해 낼 수 있다.

$$(X_R^{\alpha}/D)=5.034(H/D)^{0.56}(1-\sin(\alpha))^{0.84} \quad (5)$$

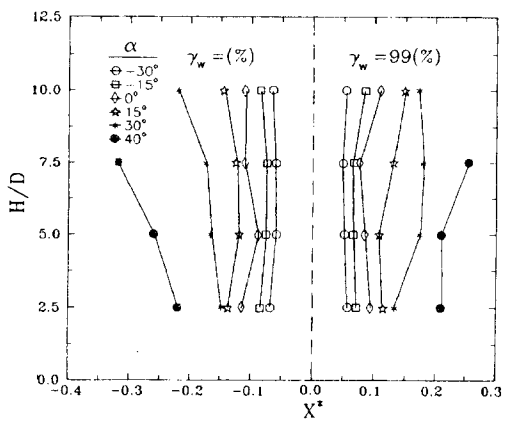

Fig. 8 Variation of the width of wall attaching region with various offset ratios

3.3. 평균 속도 분포

유동장 측정은 벽단비를 H/D=5로 고정하고 벽면 경사각 α=0° ,10° , 20° , 30° , 40° 에서 측정하였다. Fig. 9는 벽면 경사각 α=10° 인 경우에 대하여 스플릿 필름 프로브로 측정한 평균속도분포를 속도벡터로 나타낸 것이다.

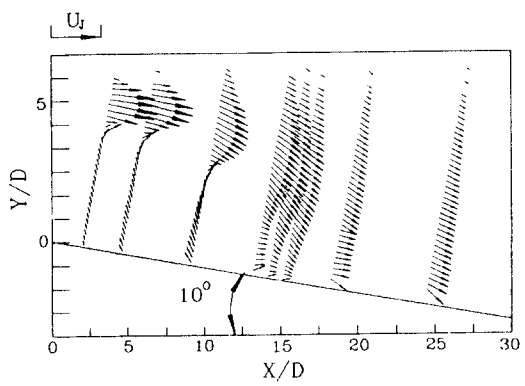

Fig. 9 Distribution of the velocity vector for H/D= 5 and α=10°

그림에서 벽에 충돌되는 일부 영역에서는 유속센서 자체의 교란으로 인하여 정확한 유동 각도가 나타나지 않았지만 전체적으로 제트 주류가 벽쪽으로 휘어지는 것을 잘 관찰할 수 있다. 이 때 재순환 영역에서의 최대 역흐름 속도는 노즐 출구유속의 약 20% 정도로 Pelfray 등[5]의 선행연구에 비하면 작은데 이것은 벽면이 경사져 압력 구동 역흐름의 세기가 약하기 때문이다. Fig. 10은 노즐 출구에서 충돌영역까지 IWAOJ가 벽면을 따른 흐름방향(streamwise direction) 속도성분을 표시한 것이다. 경사각이 증가하면서 제트의 폭이 넓어지고 흐름방향 최대 속도는 감소하고 역흐름의 세기는 약해지고 있다. Fig. 11은 벽단비 H/D=5에서 벽면 경사각에 따른 흐름 방향 국소 최대속도 감소 경향을 노즐 출구 속도로 무차원화시켜 나타낸 것이다. 벽면 경사각이 0°일 때는 노즐 폭의 약 5배까지 포텐셜 코어의 영향으로 최대 속도가 거의 노즐 출구 속도와 비슷하다. 제트가 노즐 출구에서 멀어지면서 주류의 곡률이 급해지면서 제트의 발달이 가속되어 흐름 방향 국소 최대 속도는 급격히 감소하며 충돌영역을 지나면서 일시 회복되는 경향을 보이고 있다. 그러나 벽면이 조금씩 경사지면서 경사 벽을 따른 흐름 방향 속도성분이 줄어들고 벽면 경사각이 30°를 넘으면서 경사 벽면을 따른 흐름 방향 제트 속도가 매우 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 경사짐에 따라 벽면 과 제트 주류 사이의 공간이 넓어져 벽면 쪽에서의 재유입 유량이 증가하여 Fig. 10과 같이 제트 주류의 폭이 넓어지고, 또한 재부착 영역이 확대되면서 재트 주류의 흐름 방향 U 속도 성분이 상대적으로 많이 감소 한 상태로 벽부착 하기 때문이다.

제트 중심선을 기준으로 상부에서의 외기와의 혼합에 의해 제트가 확산되는데 확산률을 조사하기 위해 상부 제트 확산 거리(upper jet spread) $Y^{\alpha}_{1/2m}$을 Fig 12.에 나타내었다. 상부 제트 확산 거리는 흐름방향 평균 속도의 최대값 Um의 반이 되는 지점의 Y^{α}값을 의미한다. 그림에서 경사각이 증가하면서 상부 제트 확산 거리가 커진다. 이것은 또한 벽면이 경사짐에 따라 벽면 과 제트 주류 사이의 공간이 넓어져 벽면 쪽에서의 재유입 유량이 증가하여 제트 주류의 폭이 넓게 확산되면서 흐름 방향 속도 분포가 Y^{α}방향으로 완만하게 넓게 분포함을 의미한다. 특히 경사각 40°에는 상부 제트의

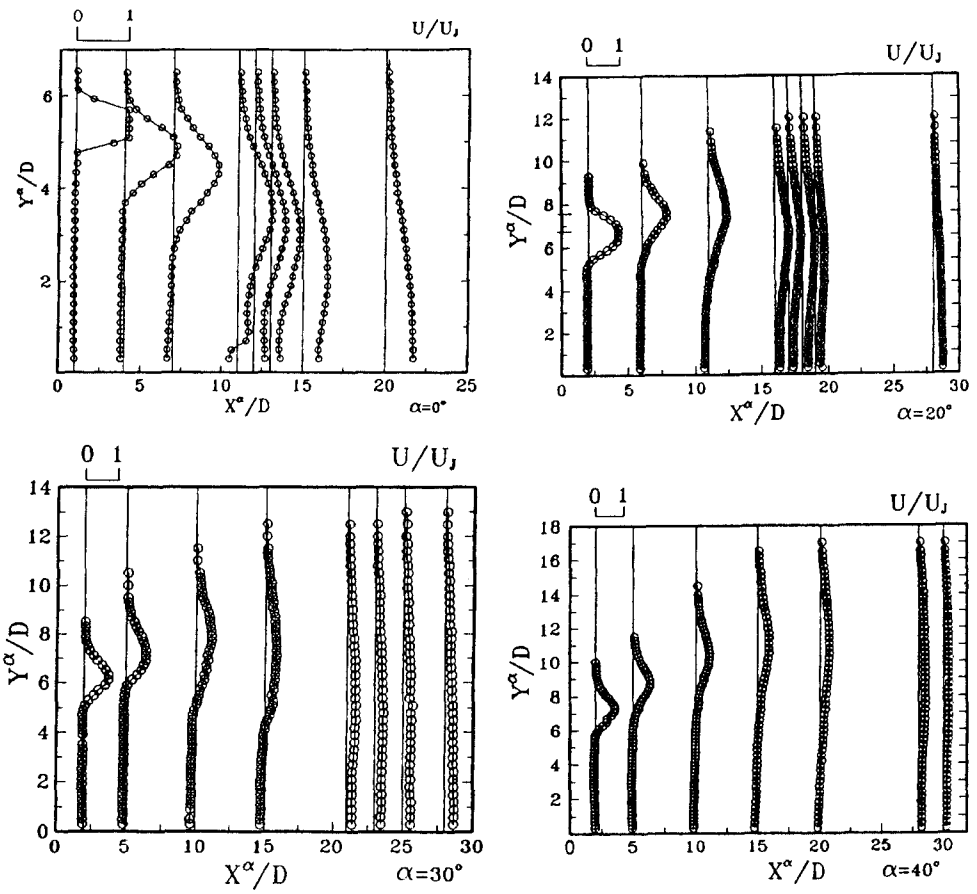

Fig. 10 Mean velocity profiles along streamwise direction for H/D=5, Re=53200, and α=0° to 40°

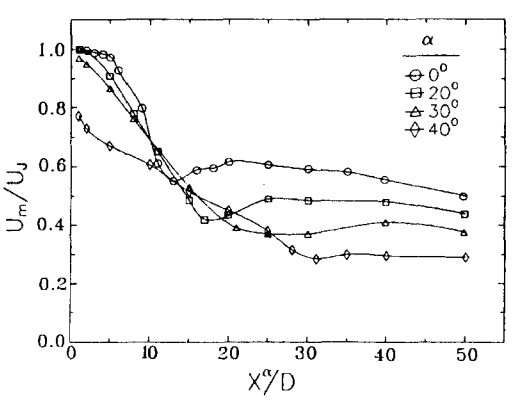

Fig.11 The maximum axial velocity decay for H/D=5, Re=53200, and α=0° to 40°

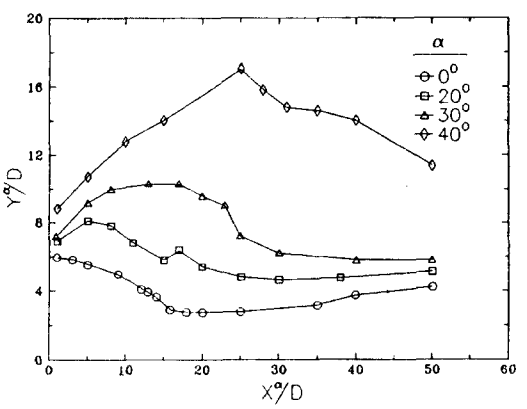

Fig.12 Upper jet spread of the wall attaching offset jets for H/D=5, Re=53200, and α=0° to 40°

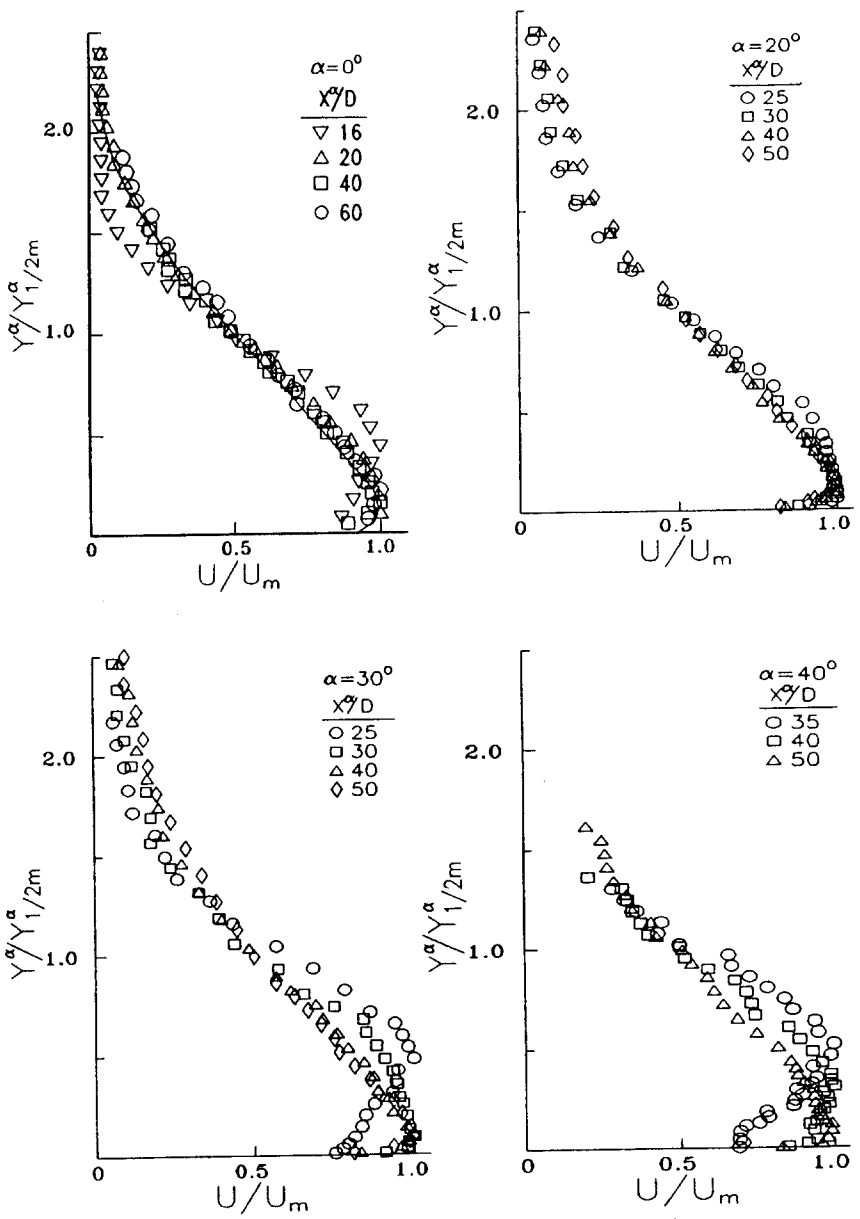

Fig. 13 Non-dimensional mean velocity distributions for H/D=5, Re=53200, and α=0° to 40°

확산거리가 경사각 30° 이내와는 확연히 차이가 남을 알 수 있는데 이것은 벽면 정압계수 분포에서도 비슷한 경향을 보이며 벽단비 H/D=5의 IWAOJ에서 경사각 30°를 후로 그 전체적인 유동구조가 상당히 변화가 일어나는 어떤 특정 경사각이 존재함을 암시한다. 즉 경사각 증가는 벽면과 제트주류와의 유입 유량을 증가시켜서 벽부착 제트의 성질이 약해지고 있다. Borque와 Newman1)에 의하면 각각의 벽단비에서 IWAOJ가 벽면에 재부착이 일어나지 않고 자유 제트로 바로 발달하는 임계 경사각이 존재한다고 하였다. 벽단비 H/D=5에서 본 실험에 의하면 경사각 α=52° 부근이 임

계 재부착 경사각으로 조사되었다.

Fig. 13은 충돌영역이후 벽제트로의 발달하는 과정을 조사하기 위해 흐름방향(streamwise direction) 평균 속도 분포를 국소 최대 평균속도로 무차원화하여 나타내었다. 경사각도가 0°에서는 약 $X^{\alpha}/D=20$에서부터 일반적인 벽제트로의 상사성(similarity)이 나타나며, 20°에서는 $X^{\alpha}/D=30$에서부터 상사성이 나타나고 30°에서는 $X^{\alpha}/D=40$ 이상에서 상사성을 보이며, 40°에서는 $X^{\alpha}/D=50$에서도 완전한 상사성을 판단할 수 없다.

3.4. 속도변동의 2차 상관관계

Fig. 14는 난류 변동속도 성분의 2차 상관관계들을 나타낸 것인데 난류 변동 성분의 r.m.s. 값 u′,v′는 각각 난류 강도로서 제곱하면 난류 운동에너지 성분 $\frac{1}{2}(u')^2$, $\frac{1}{2}(v')^2$이 되므로 이의 분포로 에너지의 분포를 알 수 있다.

Fig. 14에서 보면 노즐 인접 지역에서 매우 날카로운 피크치가 나타나는 노즐에서 분사된 제트가 발달하는 도중에 제트 주위의 공기와 격렬하게 섞이는 현상을 나타내며 제트의 발달이 어느 정도 진행된 거리에서는 피크치가 상당히 완만함을 관찰할 수 있다. 경사각이 증가하면서 피크값이 넓게 분포하고 u′ 값은 경사벽면을 기준으로 제트주류의 외측 경계면에서 그리고 v′ 값은 제트주류의 내측 경계면에서 큰값을 보이며 이것은 외측의 유입과 내측의 경사벽면의 충돌현상에 영향이 큰 것으로 생각된다. Fig. 15, 16은 IWAOJ의 재발달 영역에서 X^{α}방향 및 Y^{α}방향 난류강도를 최대 국소 평균속도와 upper jet spread로 각각 무차원화하여

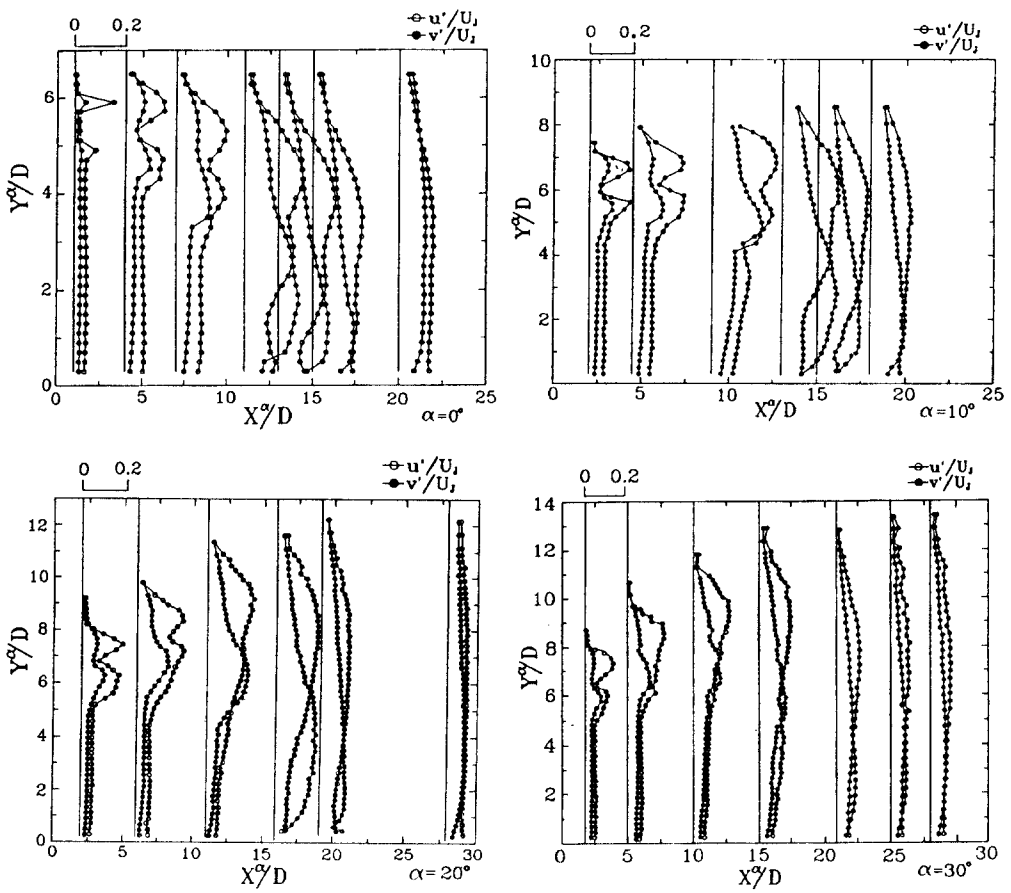

Fig. 14 Turbulence intensity distributions of flow components for H/D=5, Re=53200, and α=0° to 40°

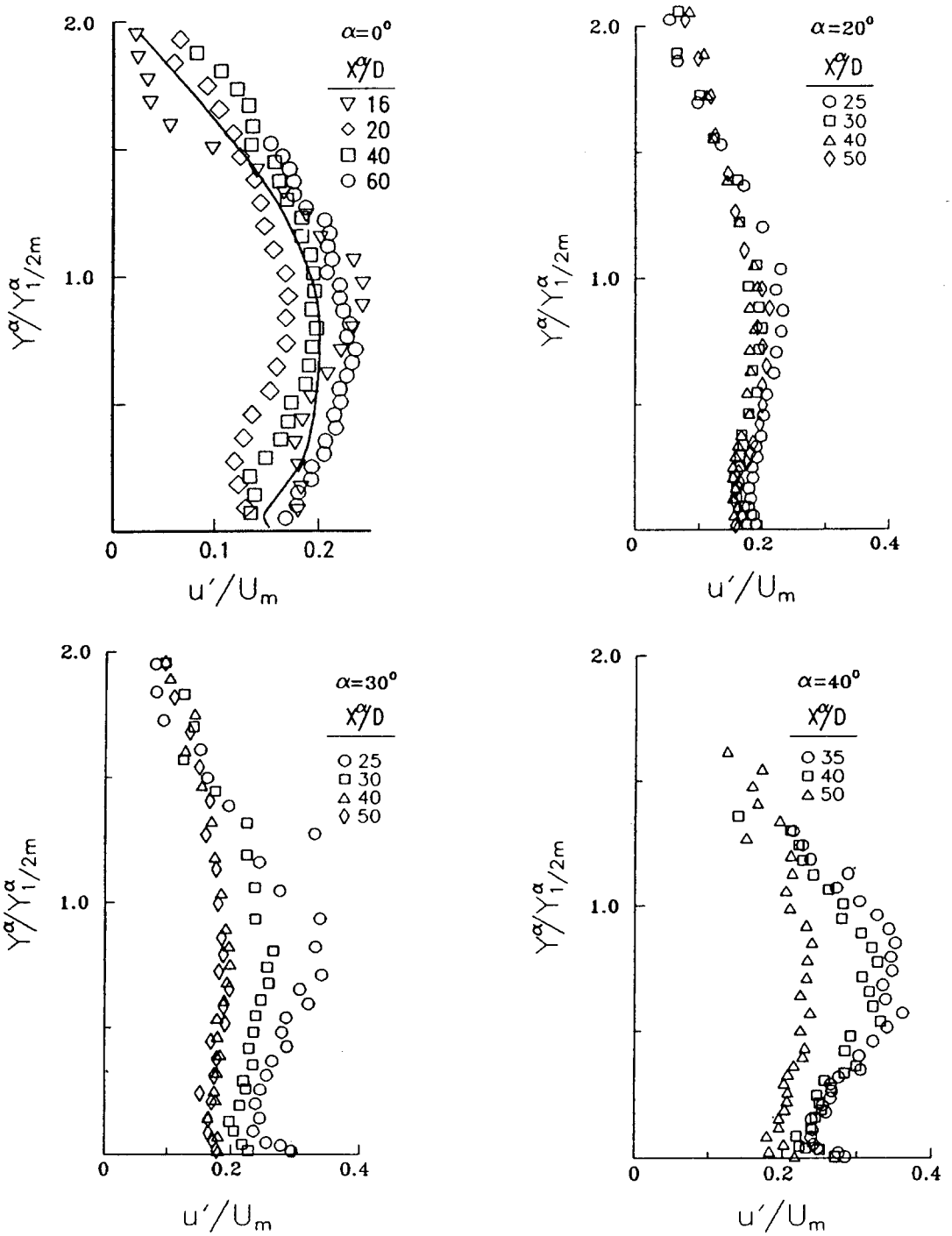

Fig. 15 Non-dimensional axial turbulence intensity distributions for H/D=5, Re=53200, and α=0° to 40°

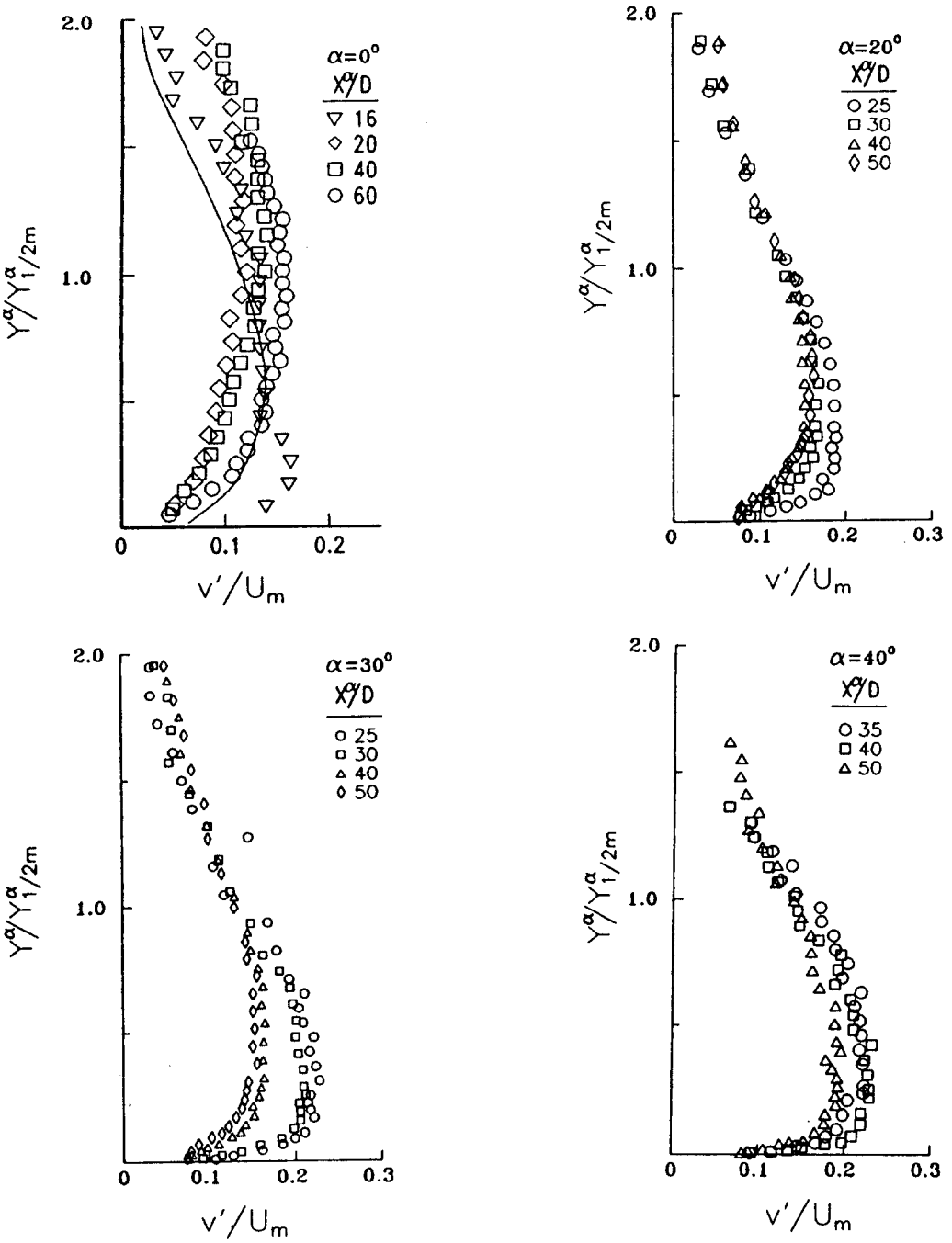

Fig. 16 Non-dimensional normal turbulence intensity distributions for H/D=5, Re=53200, and α=0° to 40°

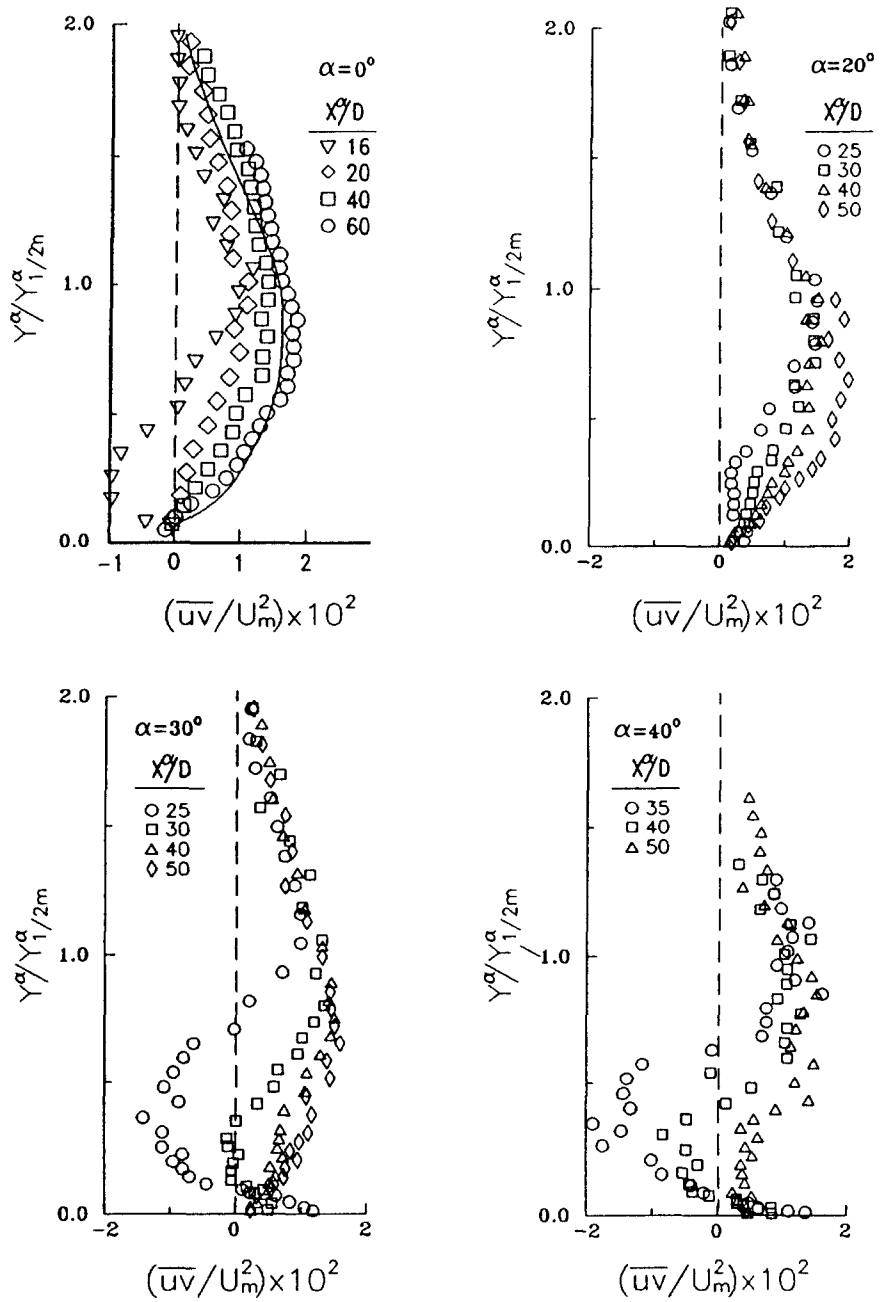

Fig. 17 Non-dimensional Reynolds shear stress distributions for H/D=5, Re=53200, and α=0° to 40°

나타낸 것이다. u′,v′의 상대적인 값은 경사각이 증가할수록 큰 값을 보이고 있으며 이것은 완전 발달된 벽제트로의 발달과 관련이 있는 것으로 판단된다. 벽제트 영역에서 난류 성분의 상사성은 평균 흐름 방향 속도의 상사성보다 먼 거리에서 이루어짐을 알 수 있다. Fig.17은 벽제트 영역에서

의 레이놀즈 전단응력을 나타낸 것으로 그림에서 흐름방향 거리가 $X^{\alpha}/D<50$에서는 모든 경사각도에서 레이놀즈 전단응력이 자기보존상태(self-preserving state)를 보이지 않고 있으며, $X^{\alpha}/D=50$에서는 경사각도에 관계없이 비슷한 값을 나타내고 있다. 레이놀즈 전단응력이 0을 나타내는 위치는 최대 평균속도점보다 약간 벽쪽에 나타남을 알 수 있다. 이것은 벽제트의 평균 속도성분 유동 구조는 자유 제트와 같이 국소 최대 속도점을 기준으로 대칭구조를 이루는 자유 경계층이 아니라 국소 최대 속도점을 기준으로 벽쪽은 내측 경계층(inner layer), 외측은 자유제트와 같은 경계층(outer layer)형태를 가지는 벽제트의 비대칭 유동 구조에 기인한다.

4. 결 론

경사진 벽부착 제트에서 노즐 폭 기준 Reynolds 수 53200에서 벽면 경사각과 벽단비에 변화에 따른 유동장 특성을 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 최대 최소 벽면정압의 위치는 벽단비와 경사각도에 관계가 있으며 다음과 같은 관계식을 구하였다.

$$(X^{\alpha}_{Pmax}/D)=5.25(H/D)^{0.56}(1-\sin(\alpha))^{-0.86}$$

$$(X^{\alpha}_{Pmin}/D)=4.41(H/D)^{0.34}(1-\sin(\alpha))^{-0.76}$$

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

(3) 시간 평균 재부착점 위치는 벽단비와 경사각도에 대해 다음과 같은 상관관계식을 구하였다.

$$(X^{\alpha}_{R}/D)=5.034(H/D)^{0.56}(1-\sin(\alpha))^{-0.84}$$

(4) IWAOJ의 흐름 방향 최대속도 변화는 경사각이 증가하면서 급격히 감소하고 재순환 영역 내의 역흐름의 세기도 줄어든다.

(5) 경사각 증가에 따라 upper jet spread가 증가하면서 제트의 확산 폭이 넓어진다.

(6) 경사각 증가에 따라 벽제트로의 발달이 늦어지고 벽제트에서 난류성분의 상사구조에 도달하는 위치도 멀어진다.

참고문헌

1) Borque, C. and Newmann, G., "Reattachment of a Two-Dimensional, Incompressible Jet to an Adjacent Flat Plate," Aerion Quar., Vol.11, pp.201-232, 1960.

2) Sawyer, R.A., "Two-Dimensional Reattachment Jet Flows Including the Effect of Curvature on Entrainment," J. Fluid Mech., Vol.17, pp.481-498, 1963.

3) Rajaratnam, N. and Subramanya, N., "Plane Turbulent Reattached Wall Jet," ASCE J. Hydraulic Div., Vol.94, pp.95-112, 1968.

4) Perry, C., "Two-Dimensional Jet Attachment," Advances in Fluidics, ed. by F.T. Brown, New Youk, pp.205-217,1967.

5) Pelfray, J.R.R. and Liburdy, J.A., "Effect of Curvature on the Turbulence of a Two-Dimemsional Offset Jet," ASME J. Fluids Engr., Vol.4, pp.143-149, 1986.

6) Nozaki, T., Hatta, K., Nakashima, M., and Matsumura, H., "Reattachment Flow Issuing from a Finite Width Nozzle," Transaction of the JSME, Vol.22, No.165, pp.340-347, 1979.

7) Nozaki, T., Hatta, K., and Nakashima, M., "Reattachment Flow Issuing from a Finite Width Nozzle ," Transaction of the JSME, Vol.25, No.200, pp.196-203, 1982.

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., "An Investigation of Roughness Effects on 2-Dimensional Wall Attaching Offset Jet Flow," Transaction of the KSME, Vol.19, No.1, pp.219-230, 1995.

10) Morel, T., "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contraction," ASME J. Fluid Engr., Vol.99, pp.371-378, 1977.

11) Stock, D.E. and Jaballa, T.M., "Turbulence Measurements using Split-Film Anemometry," Proc. Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulent Measuremenst, pp.H15-1-H15-10, 1985.

12) 김경천, 윤순현, 김대성, 신영호, "컴퓨터 원용 열선 및 열필름 프로브의 교정방법 개선에 대한 연구" 대한기계학회 논문집, 제19권, 제1호, pp.219-230, 1994.

13) Westphal, R.V. and Mehta, R.D., Crossed Hot-Wire Data Acquisition and Reduction System, NASA Report, IA-85871, pp.1-37, 1984.

14) Adams, E.W. and Johnston, J.R., "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, 1988.

15) Westphal, R.V. and Johnston, J.P., "Effect of Initial conditions on Turbulent Reattachment Downstream of a Backward Facing Step", AIAA J., Vol,22, No.12, pp.1727-1732, 1984.

16) Kumada, M., Mabuchi, I., and Oyakawa, K., "Studies in Heat Transfer to Turbulent Jets with Adjacent Boundaries (3rd report Mass Transfer to Plane Turbulent Jet Reattachment on an offset Parallel Plate)," Transaction of the JSME, Vol.16, No.101, pp.1712-1722, 1973.