

〈論 文〉

박리전단층이 축대칭 하향단흐름에 미치는 영향

부정숙* · 김경천** · 양종필***

(1994년 10월 22일 접수)

Effect of the Separating Shear Layer on the Flow Over an Axisymmetric Backward-Facing Step

Jung Sook Boo, Kyung Chun Kim and Jong Pil Yang

Key Words : Axisymmetric Backward-Facing Step(축대칭 하향단), LDV Measurement(레이저 유속계 측정), Separating Shear Layer(박리전단층), Boundary Layer Thickness(경계층두께), Recirculating Zone(재순환영역)

Abstract

An experimental study on the flow over the axisymmetric backward-facing step was carried out. The purpose of the present study is to investigate the effect of the boundary layer thickness at the separation point on the reattachment length and to understand the structure of the recirculating flows. Local mean and fluctuating velocity components were measured in the separating and reattaching axisymmetric turbulent boundary layer over the wall of convex cylinder placed in a water tunnel by using 2-color 4-beam fiber optics laser Doppler velocimetry. The study demonstrated that the reattachment length increases with increasing boundary layer thickness. It was also observed that the reverse flow velocity and turbulent kinetic energy decrease with an increase in the momentum thickness at the separation point. The measured velocity field suggests that the boundary layer thickness at the separation can affect definitely on the formation of corner eddy.

기 호 설 명

D	: 반원뿔의 직경	U_0	: 자유흐름속도
d	: 후미원주의 직경	ΔU	: 속도차
H	: 하향단의 높이 (= $(D-d)/2$)	U, V	: X, Y 방향으로의 평균속도
r	: 후미원주 중심에서 반경방향으로의 거리	u', v'	: X, Y 방향으로의 변동속도의 r.m.s
Re_H	: H 를 기준으로 한 레이놀즈수 ($Re_H = U_0 H / \nu$)	$\frac{u'^2, v'^2}{2}$: X, Y 방향으로의 난류운동에너지
Re_θ	: θ 를 기준으로 한 레이놀즈수 ($Re_\theta = U_0 \theta / \nu$)	X	: 하향단에서 흐름방향으로의 거리
T_0	: 자유흐름온도	X_r	: 재부착점
		Y	: 후미원주 표면에서 흐름의 수직방향으로의 거리
		Y'	: 반원뿔 끝단표면에서 흐름의 수직방향으로의 거리
		Y_{max}	: 후미원주 표면에서 최대 난류운동에너지 발생위치까지의 수직거리

*정회원, 부산대학교 기계공학과

**정회원, 부산대학교 생산기계공학과

***부산대학교 대학원

- u_τ : 벽면 전단속도 $(\tau_w/\rho)^{1/2}$
- u^+ : u/u_τ
- y^+ : $\frac{y u_\tau}{\nu}$
- δ_o : 박리점 경계층의 두께
- θ : 운동량두께
- ν : 동점성계수
- τ_w : 벽면 전단응력

1. 서 론

난류 경계층유동의 박리 및 재부착현상은 실제적인 외부 및 내부유동에서 자주 관찰되는 현상으로 공학적으로 대단히 중요한 문제이다. 지금까지 박리 및 재부착유동은 주로 하향단(backward-facing step)이나 수직벽(normal fence) 등 2차원 흐름에 대해 많은 연구가 수행되어 왔지만,^(1~4) 축대칭 하향단(axisymmetric backward-facing step) 흐름에 관해서는 아직까지도 그 중요성에 비하여 상대적으로 인식정도가 부족하고 연구가 미진한 상태이다. 또한 축대칭 경계층흐름에 대한 연구 역시 2차원 경계층흐름에 대한 연구에 비해 그 예가 다소 적은 편이나 반경방향 요곡률(transverse convex curvature, 이하 TVC) 효과가 열 및 운동량 전달에 중요한 영향을 미치고 있음을 밝힌 바 있다.^(5~9)

축대칭 하향단의 경우 박리후 유선의 곡률(streamline curvature)효과 외에 축대칭 경계층 두께가 벽면물체의 곡률반경보다 더 두꺼워지므로 TVC 효과가 생기게 됨은 물론 박리 및 재부착과 같은 복잡한 유동장이 형성되므로 2차원 하향단의 연구결과를 곧 바로 적용할 수 없다. 그 예로 Kim 등^(10,11)은 축대칭 하향단의 경우 TVC의 영향으로 2차원 경우에 비하여 재부착길이가 항상 줄어드는 등 2차원 하향단의 경우와는 다른 결과를 보이고 있음을 이미 실험적으로 규명한 바가 있다. 그러나 하향단과 같은 박리 및 재부착흐름은 가장 간단한 형상임에도 불구하고 유동의 형태가 매우 복잡하기 때문에 어떠한 인자들이 재부착현상에 영향을 미치는지를 규명하는 것이 대단히 중요하며, 이는 축대칭 하향단의 경우에도 마찬가지이다.

Eaton과 Johnston⁽²⁾은 지금까지의 박리 및 재부착흐름에 대한 연구결과를 토대로 다음과 같은 물리적 인자들이 2차원 하향단 유동의 지배적인 원인일 것으로 추측하였다. 첫째로 초기경계층의 두께,

둘째로 층류, 천이, 난류와 같이 초기경계층의 흐름상태, 셋째로 자유흐름의 난류강도, 넷째로 흐름방향으로의 압력구배, 그리고 마지막으로 종횡비(aspect ratio, $AR=W/h$) 등 다섯가지의 인자들을 제시하였다. 특히 이와 같은 흐름에서 재부착길이와 와류 유출주파수 등은 열전달문제와 관련하여 공학적으로 매우 중요한 문제이므로 이들 인자들을 고려한 보다 정확한 예측은 실제적인 응용측면에서도 중요한 문제이다.

그 중에서 특히 Bradshaw와 Wong⁽¹²⁾은 초기 경계층두께(δ_o)와 단의 높이(H)의 비(H/δ_o)를 중요한 인자로 제시하였는데, 많은 실험에서 δ_o 에 따라 흐름의 형태에 큰 영향을 보였다. 즉 재부착길이는 초기 경계층이 층류상태에서 천이 됨에 따라 커지다가 흐름이 완전히 난류가 되면 다시 감소하여 단의 높이의 6~7배 정도로 거의 일정해지는 것으로 밝혀졌다. 이들이 중요한 인자로 제시한 H/δ_o 의 비가 1.0보다 큰 압도적인 섭동(overwhelming perturbation)이 있는 경우에는 박리한 경계층이 혼합층(mixing layer)으로 되었다가 이 혼합층이 다시 경계층으로 회복되는 2가지의 압도적인 섭동이 일어난다고 알려져 있다. 압도적인 섭동이 있는 경우 강한 섭동(strong perturbation, $H/\delta_o \approx 1$)의 경우보다 흐름의 형태에서 변화정도가 크지만 초기경계층의 변화에는 비교적 덜 영향을 받는다는 이점으로 많은 실험이나 계산에 있어서 다른 형태에 비하여 하향단의 흐름 형태를 많이 이용하고 있는 것을 볼 수가 있다. 그러나 종래의 연구에서 알 수 있듯이 이에 대한 명확한 이론이나 실험치의 검증이 실제로 제시된 것이 부족하며, 또한 그 대부분의 정보 역시 2차원 형상의 약한 섭동(weak perturbation)의 결과가 대부분으로써 본 연구에서와 같이 두가지의 복합적인 곡률효과가 작용하는 축대칭 하향단의 경우에 대해서는 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 유선의 곡률효과와 TVC 효과가 동시에 작용하고 있는 경우 유동특성 변화를 조사하는 것은 상당히 많은 유용한 정보를 동시에 얻을 수가 있으며, 여기서의 결과를 토대로 축대칭 하향단과 같은 복잡한 흐름에서 가장 지배적인 물리적 인자를 도출해 내는 것 역시 공학적인 면에서도 중요한 의미가 있다고 보여진다. 특히 종래의 연구결과, 2차원 박리 재부착흐름에 영향을 미치는 것으로 드러난 기존의 다섯가지의 인자들에 대해서 정량적으

로 분석하기 위해서는 무엇보다도 각각의 인자만의 영향을 독립적, 체계적으로 연구하는 것이 중요하다. 이러한 연구를 통하여 재부착과정의 물리적 메카니즘에 대한 보다 명확한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 따라서 본 연구와 같이 축대칭 하향단 흐름에 대해서도 역시 이와같은 인자들의 역할을 규명해 보는 것도 상당히 의미가 있다고 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 박리점 경계층(이하 '초기경계층')의 두께를 변화시켜 축대칭 하향단 유동장을 엄밀히 측정함으로써 유선의 곡률효과와 TVC 효과가 동시에 존재하는 경우에 초기 경계층의 두께에 따른 난류구조의 물리적 변화가 어떻게 발생하는가를 실험적으로 자세히 규명하고자 한다. 이를 위해 박리, 재부착 및 재순환, 그리고 재발전 유동장에 대한 평균 속도장과 난류특성 등을 2성분 레이저유속계(LDV)로 수동(water tunnel)에서 엄밀히 측정한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 대상이 될 실험모델의 형상이 Fig. 1(a)에 나타나 있으며, Table 1은 그 재원을 나타내고 있다. 모델의 재질은 테프론으로서 설계시 적용된 형상인 반원뿔의 정밀가공을 위하여 CNC 선반을 사용하여 가공을 하였으며, 반원뿔 후미의 원주는 스테인레스 봉을 사용하였다. 모델은 축대칭

형상으로써 축방향이 유동방향과 일치되게 장착된다. 접근흐름은 균일 유동장이며 타원형 반원뿔에서 경계층이 형성되고 축대칭 하향단에서 경계층은 박리된다. 박리된 축대칭 경계층은 연속되는 원주에 재부착하게 되며, 재부착후 경계층은 다시 축대칭 난류 경계층으로 재발전하게 된다. 본 연구에서 관심을 두고 연구할 물리적 인자는 단 높이(H)를 기준으로 한 초기경계층의 두께(δ_0)의 변화이며, 그 외에도 앞에서 언급한 나머지 중요한 인자들도 박리전단층 및 재부착길이 등에 영향을 미칠 것으로 생각되나, 본 연구에서는 다른 인자들의 변화는 억제하고 초기경계층의 두께변화에 따른 재순환 영역 및 재발전영역까지를 포함한 유동장의 특성고찰에 그 범위를 한정한다. 따라서 이와 같은 조건을 만들기 위하여 Fig. 1(b)에서 보듯이 직경 2mm의 가는 동근 링(ring)을 반원뿔의 하향단에서 전방으로 링 직경의 약 30배되는 지점에 각각 1~3개씩 부착하여 링이 없는 경우와 서로 비교하였다. 또한 본 실험에서 자유흐름속도(U_0)는 0.52 m/s로 고정하였으며, 이때 단의 높이를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_H)는 10, 100이다. 그리고 본 실험 시작전 자유흐름의 온도(T_0)는 약 12°C 정도이며, 실험 종료까지의 온도차는 약 4°C 정도로 나타났는데, 이는 대기의 온도상승에 따른 영향이 주가 되므로 자유흐름에 의한 온도영향은 무시하였다.

유동실험에 사용될 폐회로 저속수동은 총 저수용량 40톤 규모의 수직 순환형 회류수조이며, 시험

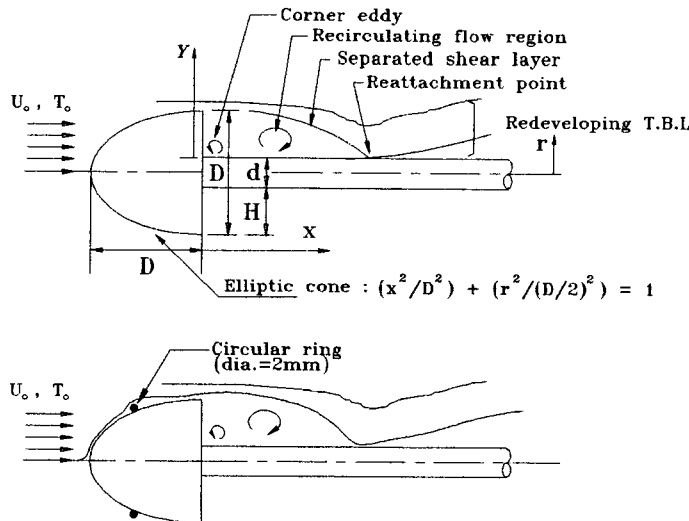


Fig. 1 Flow configuration

Table 1 Specification of the axisymmetric backward-facing step

D, mm	d, mm	H, mm	D/d
101.6	50.8	25.4	2.0

부의 크기는 2,800(L)×1,200(H)×1,800(W)mm³이다. 유속은 구동부와 표면류 가속장치의 모터의 회전수를 전기적으로 제어하여 0.1m/s~2.0m/s의 범위내에서 적절히 조절이 가능하며, 또한 회류수조의 좌,우측에 각각 1개씩의 구동용 모터외에 별도의 표면류 가속용 모터가 설치되어 있어 접근흐름의 균일성 조절이 상당히 양호한 이점이 있다. 이와같이 하여 수조내 시험구간에서 모델을 장착하지 않은 상태에서 균일유동을 측정한 결과 흐름의 수직방향으로 200~600mm 내에서 흐름방향의 속도 U 는 1.0% 이내의 균일도를 가지고 있으며, 난류강도는 2.5% 정도로 나타났다.

속도측정에 사용한 LDV는 2 color 4 beam의 4 watt Ar-Ion 레이저로서 후향 산란방식이며, 별도의 측정용 fiber optics 프로브를 가지고 있다. 따라서 기존의 LDV와는 달리 측정점의 이동문제가 비교적 편리한 이점이 있으며, 측정거리도 416 mm 정도로 비교적 길기 때문에 시험구간내의 벽

면간섭을 거의 받지 않는다. 본 LDV 시스템의 측정체적부의 실질적인 크기는 0.11×0.11×1.61mm이며, 사용한 신호분석기(IFA 550)는 auto-correlation 방식으로 종래의 카운터방식에 비해 처리속도가 매우 빠르고 고분해능처리(high resolution processing)가 가능한 장점이 있다. 그리고 시간분해능은 2ns이며, 주파수 범위는 1 kHz~15 MHz이다. 또한 신호분석기에는 PC와의 연결이 가능한 multichannel interface card(MI 550)과 별도의 아날로그보드를 설치하고, 또한 PC에는 DMA interface card(Model 6260)을 설치하여 신호의 획득 및 분석과정이 모두 PC로 온-라인(on-line)이 되도록 전체 시스템을 구성하였다.

본 실험에서 데이터 획득은 유속평균 및 레이놀즈 응력치들을 얻기 위하여 coincidence mode로 처리하였으며, 산란입자는 평균 입자지름이 1.62 μ m인 Titanium dioxide(TiO₂)를 사용하였다. 그리고 표본 개수는 대략 2000~4000개 정도로 하였으며, 통계처리과정에서 속도편의수정(velocity bias correction)을 위하여 통과시간보상(transit time weighting) 방법을 사용하였다. 또한, 데이터를 분석할 때에는 표준편차(σ)를 구하여 3 σ 이상의 데이터는 버리고 통계처리를 하였다. 측정구간은 각 모델의 단의 높이(H)에 대하여 흐름방향과 수직방향으로 각각 $0 < X/H < 30$, $0 < Y/H < 2.5$ 구간내

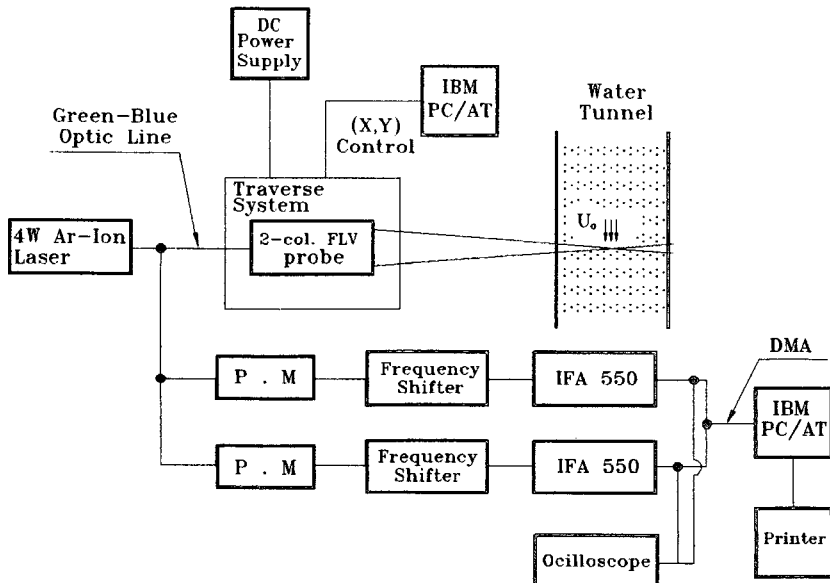


Fig. 2 Schematic diagram of 2-D LDV measurement system

에서 2차원 자동 이송장치를 사용하여 실험을 수행 하였으며, Fig.2는 이상의 측정시스템의 개략도를 나타내고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초기경계층의 특성변화

먼저 하향단에서 박리되는 초기경계층의 자유흐름 속도(U_0) 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 박리점인 $X/H=0$ 의 위치에서 구한 평균속도와 각 경계층의 두께로 무차원화한 평균 속도분포를 Fig.3에 같이 나타내었다. 자유흐름속도가 클수록 경계층 두께는 점차 줄어드는 형태를 보이고 있으나, 그림에서 보듯이 초기경계층은 전형적인 층류

박리 형태를 보이고 있으며, 각각의 속도차에 따른 경계층 구간내 기울기는 자유흐름속도 변화에 큰 영향을 받지 않음을 볼 수가 있다. Fig.4(a), (b)는 초기경계층의 두께비(δ_0/H)에 대한 재부착길이와 단의 높이(H)를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_H)에 대한 재부착길이를 각각 나타내고 있다. 그 결과 본 실험구간에서 볼 때 자유흐름의 속도변화는 다른 인자들에 비해 재부착길이에 영향을 미치는 주요 인자로는 볼 수 없으나, 초기경계층의 두께 변화는 박리전단층에 직접적으로 영향을 미침으로 인하여 재부착길이에 큰 변화를 보이고 있다.

한편 2차원 하향단의 경우와 비교하여 본 연구의 실험구간을 나타내 보면(Fig.5), δ_0/H 와 Re_H 와 Re_H 의 관계로 볼때 축대칭 하향단에서 박리하는

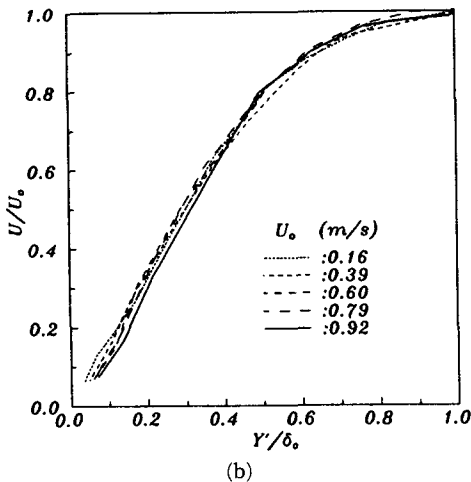
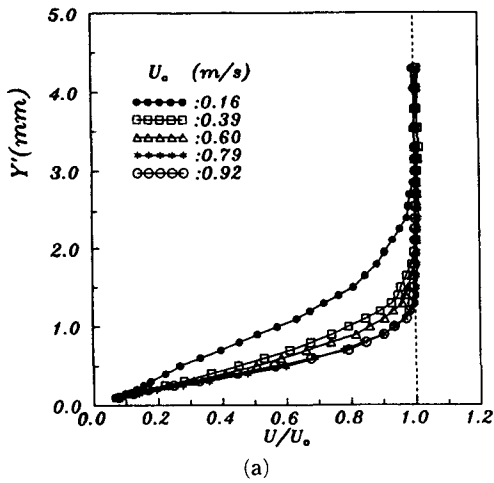
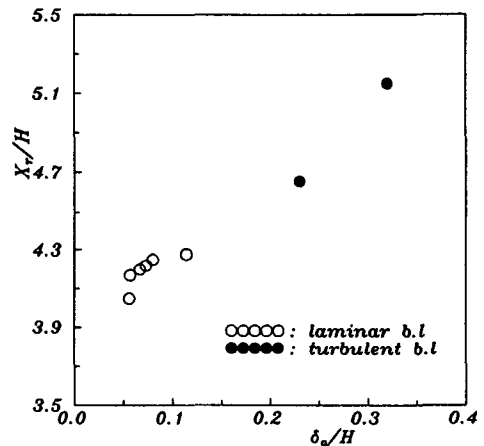
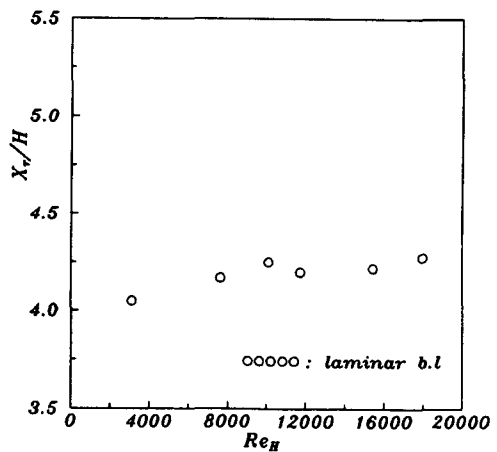


Fig. 3 Mean velocity profiles with free stream velocity U_0 at $X/H=0$



(a) As a function of boundary layer thickness



(b) As a function of Reynolds number (Re_H)

Fig. 4 Nondimensional reattachment length

전단층은 층류로 박리하여 난류상태로 재부착하는 경우와 난류로 박리하여 난류상태로 재부착하는 범위에 드는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에서는

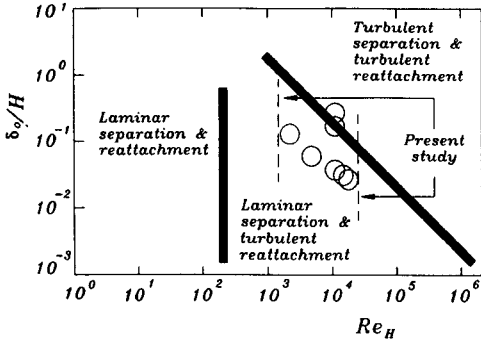
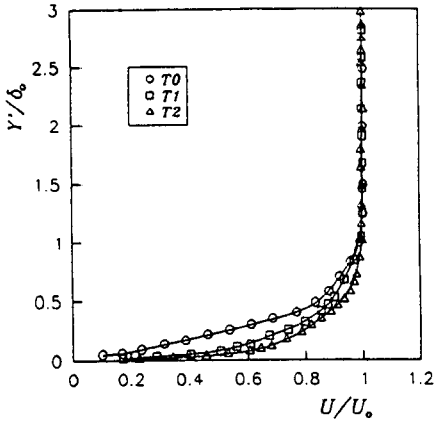
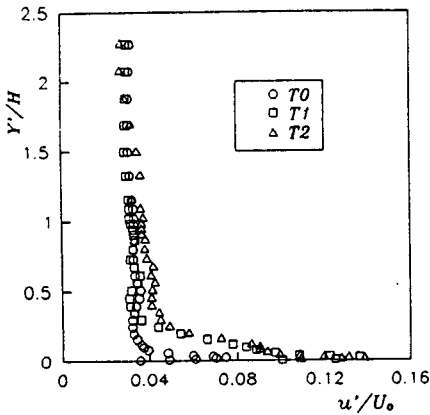


Fig. 5 The location of transition regions for 2-dimensional backward-facing step in the parameter space of Re_H and δ_0/H



(a) U/U_0



(b) u'/U_0

Fig. 6 Mean velocity and turbulent intensity profiles at $X/H=0$

박리 전단층에 보다 영향을 적게 주는 Re_H 의 변화는 고정하고 초기경계층의 두께에 변화를 주면서 박리전단층의 상태에 영향을 주는 방법을 택하여 구한 실험결과를 분석하고자 한다.

Fig. 6은 박리점에서 초기경계층의 평균속도와 난류강도분포를 나타내고 있다. 그 결과 초기경계층 두께는 링이 없는 경우(T0), 한개인 경우(T1) 그리고 3개인 경우(T2)에 대해서 각각 0.08H, 0.23H, 0.32H로 나타났으며 (Table 2 참조), 이는 Bradshaw와 Wong⁽¹²⁾이 중요한 인자로 제시한 $H/\delta_0 > 1$ 의 압도적인 섭동이 있는 경우에 해당된다. 한편 각 경우의 난류강도분포는 벽면 근처를 제외하고는 거의 3% 정도로 일정하게 나타났으며, 따라서 본 실험에서의 중요한 인자는 오직 초기경계층 두께의 변화로 볼 수 있다. Fig. 7은 이때의 각 실험조건에 대한 초기경계층의 평균 속도분포를 무차원화하여 평판의 경우와 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 벽면 전단응력(τ_w)은 실험으로 부터 직접 구하지 않고 “cross plot” 방법을 사용하여 구하였다. 그 결과 측정된 속도분포는 T0에서 T2로 감에 따라, 즉 경계층두께가 커질수록 대수구간과 후류형 외부구간을 가진 전형적인 난류경계층의 특성으로 옮겨감을 볼 수 있다. 따라서 운동량두께를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_θ)로 판단해 볼 때 본 실험구간에서 초기경계층의 상태는 층류상태와 천이과정의 혼합임을 나타내고 있다.

3.2 평균 속도분포

Fig. 8은 자유흐름속도(U_0)를 0.52 m/s로 고정하고 흐름방향의 각 지점에서 구한 평균속도를 자유흐름속도와 단의 높이로 무차원화한 분포이다.

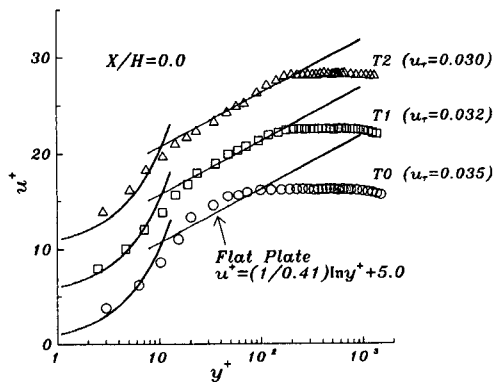


Fig. 7 Mean velocity profiles (u^+ versus y^+) at $X/H=0$

그 결과 초기경계층의 두께가 클수록 재순환영역내에서의 역흐름이 크게 나타났으며, 초기경계층의 두께의 영향은 재부착 부근을 지나 약 $X/H=9$ 지

점까지 계속적으로 유지되는 것으로 나타났다. 또한 역흐름이 없어지는 위치도 각 경우에 따라서 차이를 보이고 있는데 $X/H=4.5$ 지점에서 살펴보면,

Table 2 Summary of previous studies and present study compared in the initial boundary layer

	Bradshaw & Wong (1972)	Pronchick (1983)	Present study		
			T0	T1	T2
U_o (m/s)	25	0.18		0.52(all)	
H(mm)	25	76.2		25.4(all)	
Re_H	41400	14000		10100(all)	
δ_o (mm)	3.25	51.5	2.05	6.01	8.12
θ (mm)	0.66		0.27	0.65	0.79
Re_θ	1100		140	340	406
X_R/H	6	6.5	4.25	4.65	5.15
u_r (m/s)			0.035	0.032	0.030
Upstream boundary layer state	Laminar	Turbulent	Laminar & transition		
Geometry	Backward-facing step		Axisymmetric		
			Backward-facing step		

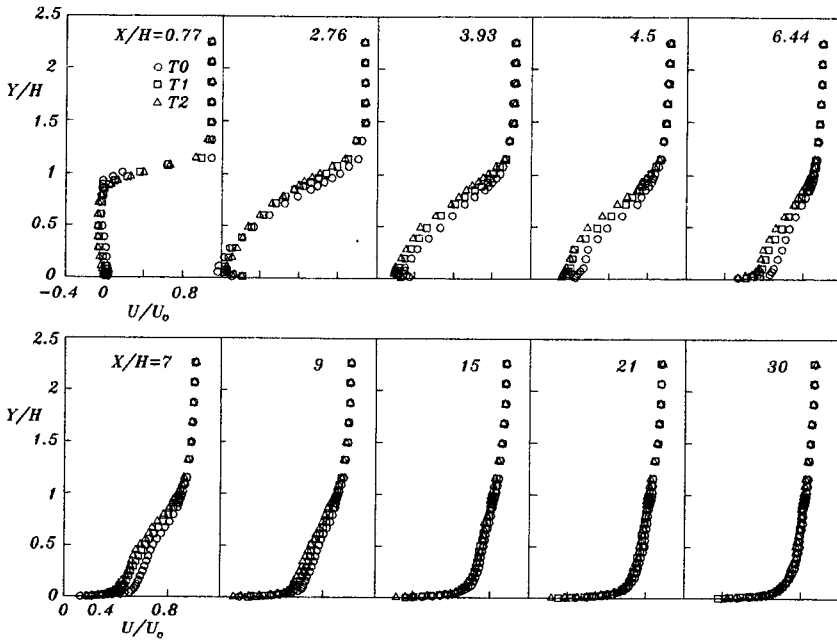


Fig. 8 Streamwise mean velocity profiles

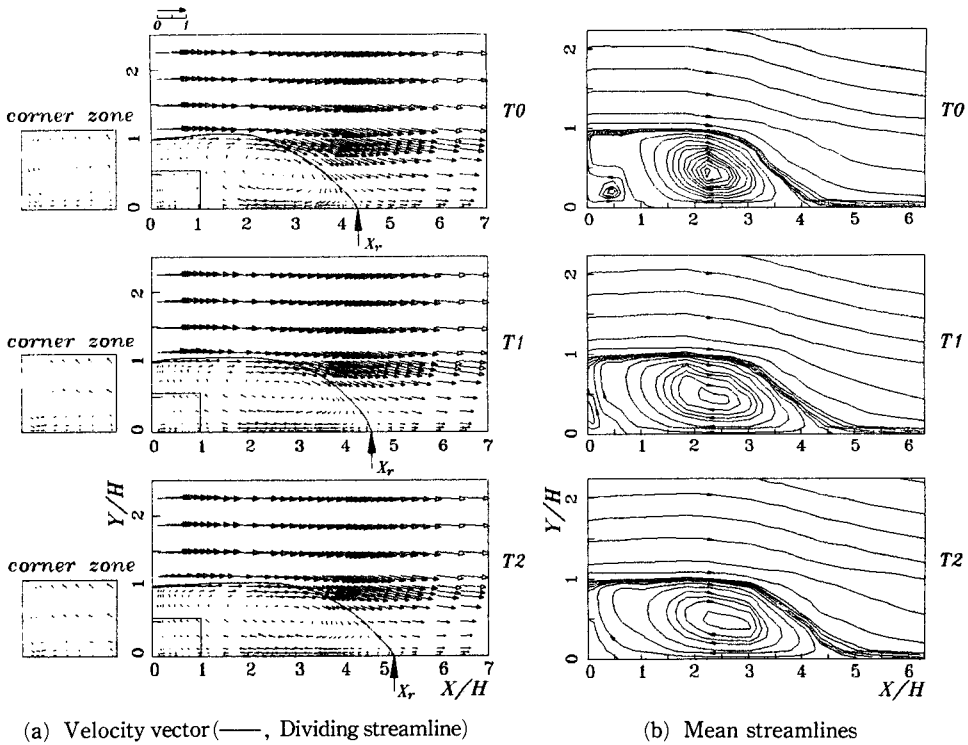


Fig. 9 Distribution of mean velocity in recirculating zone

초기경계층 두께가 가장 작은 T0의 경우 이미 재순환영역을 벗어났으나 나머지 경우는 아직 역흐름이 존재하고 있는 것을 볼 수가 있다. 또한 재부착 지점을 지나 재발달영역인 약 $X/H=15$ 를 지나서부터는 거의 영향을 받지 않은 전형적인 난류 경계층의 형태로 변해감을 보이고 있다.

Fig. 9(a), (b)는 $0 < X/H < 7$, $0 < Y/H < 2.5$ 구간내에서 구한 평균속도의 벡터와 유선분포를 나타내고 있다. 먼저 각 경우에 대한 분할유선(dividing streamline, 그림의 실선부분)을 살펴보면 유선의 곡률효과와 동시에 TVC 효과가 작용하여 분할유선의 곡률은 종래 2차원 하향단의 경우에 비하여 훨씬 크게 나타났으며, 초기경계층의 두께가 증가할수록 그 곡률은 점차 작아지는 경향을 보이고 있다. 따라서 재부착길이는 각각 $4.25H$, $4.65H$, $5.15H$ 로 점차 증가하였는데, 이는 재부착길이가 약 21%정도 증가한 값으로서 단의 높이에 해당되는 길이이다. 한편, 유선의 분포형태에서 보면 초기경계층의 두께가 증가함에 따라 재순환영역내 유선의 간격이 점차 넓어지면서 재순환영역내의 유동형태도 흐름방향으로 길게 늘어나는 경향을

보이는 것으로 나타났다. 또한 δ_o/H 의 비가 커질수록 모서리와(corner eddy)의 생성구역은 반대로 점차 줄어들고 있으며, 전체적으로 재순환영역내 평균속도장의 유동형태에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이에 대한 원인을 살펴보기 위하여 유동의 확산비를 구하여 Fig. 10에 나타내었다. 초기경계층의 두께가 커질수록 전단층의 확산정도가 점차 하류측으로 보다 지연되고 있음을 볼 수 있다. 즉 난류혼합에 의한 전단층의 확산이 훨씬 더디게 일어남으로서 재부착길어도 흐름방향으로 점차 후퇴된 것으로 판단된다. 이는 H 가 일정하더라도 δ_o/H 비가 증가함에 따라서 재순환영역내의 정(+)방향 흐름의 확산을 보다 지연시켜 재순환영역으로 역유입되는 유동량을 증가시킴으로써 재부착길이가 증가하게 된 결과로 생각된다. 즉 재부착영역에서 역류되는 유체들을 빨리 전단층이 유입하지 못함으로써 그만큼 재부착길이가 늘어나게 된 것으로 판단된다. 따라서 축대칭 하향단의 경우 박리점 경계층의 두께변화는 바로 전단층에 영향을 미침으로 인하여 재부착과정에서 전단층의 확산에 큰 변화를 주는

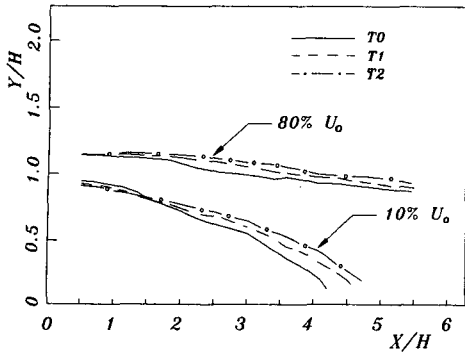


Fig. 10 Locus of points of 10% and 80% free stream velocity

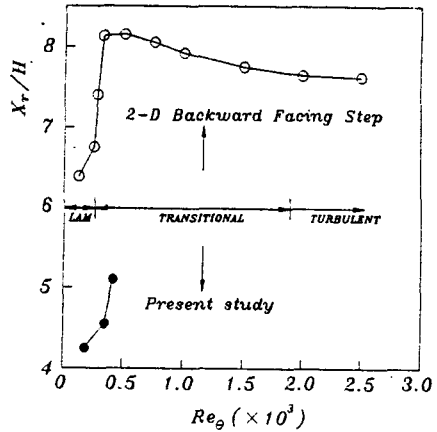


Fig. 11 Nondimensional reattachment length as a function of Reynolds number (Re_θ)

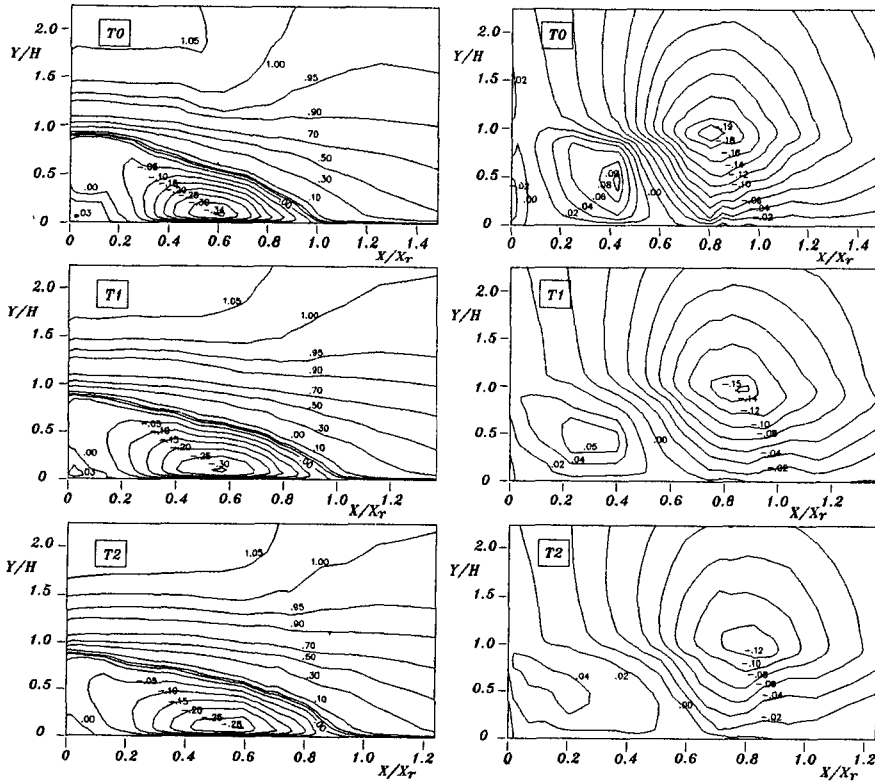


Fig. 12 Mean velocity contour profiles (Left: U/U_0 , Right: V/U_0)

인자로 볼 수가 있다. 그리고 Kim 등⁽¹²⁾의 실험 결과에서도 나타났듯이 축대칭 하향단의 경우(H 의 3.2~4.3배 정도) TVC 효과로 인하여 재부착길이는 2차원 하향단의 경우(H 의 6.2~8.2배 정도)와 비교하여 훨씬 짧게 나타났는데, 본 실험구간에서도 재부착길이는 같은 결과를 보이고 있다. 따라서

운동량두께(θ)를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_θ)에 대한 재부착길어도 Fig. 11에서 처럼 2차원 하향단의 경우에 비해 역시 짧게 나타났으나 그 경향은 점차 증가하는, 즉 2차원 하향단의 경우와 유사하게 나타났다.

Fig. 12는 평균속도의 흐름방향과 수직방향으로

의 등속도선 분포를 각각 나타내고 있다. 재순환영역 내에서 최대 역류속도(reverse-flow velocity)는 안정한 역류영역에서 자유흐름속도의 약 30~35% 까지 2차원 하향단의 경우(약 20~25%)에 비하여 훨씬 큰 값을 보이고 있으며, δ_0/H 의 비의 증가에 따라서 점차 감소하는 경향으로 나타났다. 그리고 단에 인접한 영역($X/X_r=0.1\sim 0.3$ 부근)에서 흐름이 후미원주의 표면에서 불규칙적으로 박리하여 단의 구석영역에서 모서리와의 생성을 볼 수 있으며, 그 크기는 자유흐름속도의 약 5%미만으로서 재순환영역에서의 회전 방향과는 반대로 나타났다. 그 경향은 δ_0/H 비가 크게 나타날수록 점차 그 영역이 축소되며, 이는 Fig. 9(a), (b)에서의 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다. 한편, 흐름의 수직방향으로의 분포형태는 크게 모서리와 영역, 재순환영역 그리고 전단층의 외부영역의 세부분으로 전형적인 하향단의 특징을 잘 나타나고 있다. 그중에서 전단층의 외부영역인 $X/X_r=0.7\sim 0.9$ 부근에서 그 크기가 가장 큰 값을 나타내고 있으며, δ_0/H 의 비가 클수록 재순환영역내에서 크기와의 차도 점차 줄어들어는 경향을 보이고 있다. 이처럼 초기경계층의 두께변화는 재부착과정에서 수직방향으로의 속도크기에 직접적으로 영향을 미치게 되며, 수직방향으로 속도감소의 효과는 바로 흐름방향으로의 확산을 보다 지연시킨 결과를 초래한 것으로 볼 수 있다. 결과적으로 재순환영역에서 역류되는 유체들이 빨리 전단층으로 유입되지 못함으로 인하여 그에 해당되는 만큼 재순환영역으로 역유입되는 유동량이 증가되기 때문에 재부착길이가 점차 늘어나게 된 것으로 판단된다. 앞에서 언급한 전단층의 확산비에 직접적인 영향을 미친 것도 바로 이와같은 원인으로 인한 것으로 생각된다.

한편, Fig. 13은 재순환영역내에서 흐름방향을 각 경우의 재부착길이로 적절하게 표준화시켜 나타낸 그림이다. δ_0/H 의 비의 증가에 따라 최대 역류위치는 재부착길이를 단위길이로 하였을 때 재부착지점 상류쪽으로 약 0.35배에서 0.45배까지 점차 증가하며, 그 최대 역류속도는 조금씩 감소를 하는 것으로 나타났다.

3.3 난류유동 특성

일반적으로 박리 및 재부착흐름에서 나타나는 재순환영역은 흐름의 속도크기는 작지만 큰 비정상 난류떨림이 존재하며 난류강도가 매우 크고 역흐름

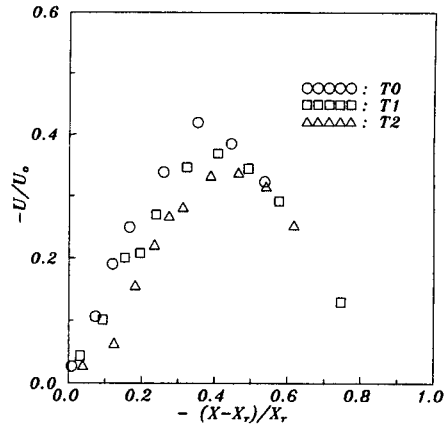


Fig. 13 Distribution of maximum reverse-flow velocity in the recirculation region

이 빈번하기 때문에 측정에 상당한 엄밀함이 요구된다 하겠다. 먼저, Fig. 14(a), (b)는 흐름방향의 각 단면상에서 구한 시간평균에 의한 난류변동의 흐름방향과 수직방향으로의 난류운동에너지를 재순환영역에서 먼 재발달영역인 $X/H=30$ 까지 나타내었다. 전체적으로 각 방향으로의 난류운동에너지는 재순환영역 내에서는 그 형태가 뾰족한 형태이지만 재부착지점으로 갈수록 전단층이 발달함에 따라 난류운동에너지의 큰 구간이 점차 넓게 퍼지며, 재부착지점을 지나면서 그 형태가 비교적 완만한 경사형태로 변하는 것으로 나타났다.

최대 난류운동에너지를 가지는 지점의 후미원주 벽면으로부터 흐름의 수직방향으로의 거리(Y_{max})는 재부착지점으로 갈수록 줄어들다가 재부착지점을 지난 후 다시 증가하는 전형적인 하향단의 특징을 보이고 있다. 그러나 δ_0/H 의 차이로 인하여 재순환영역 내에서 Y_{max} 는 각 지점에 따라 상당한 차이를 나타내고 있으며, 각 방향으로 난류운동에너지의 크기는 δ_0/H 의 비가 클수록 비교적 낮은 값의 분포를 보이고 있는 것으로 나타났다. 또한 재부착지점 부근에서 Y_{max} 는 흐름방향 성분보다 수직방향으로의 성분이 훨씬 벽면쪽으로 접근하고 있는 것을 볼 수가 있다. 그리고 재부착과정에서 벽면과의 강한 상호간섭과 불룩한 유선곡률 그리고 강한 역압력구배 등으로 인하여 난류에너지는 급격히 감소하였으며, 그 값은 벽면에서 멀어 질수록 비교적 크게 변화하는 것으로 나타났다. 또한 흐름의 수직방향의 경우가 흐름방향의 경우에 비해 훨씬 더 급격하게 변하는 것으로 나타났는데, 이 사

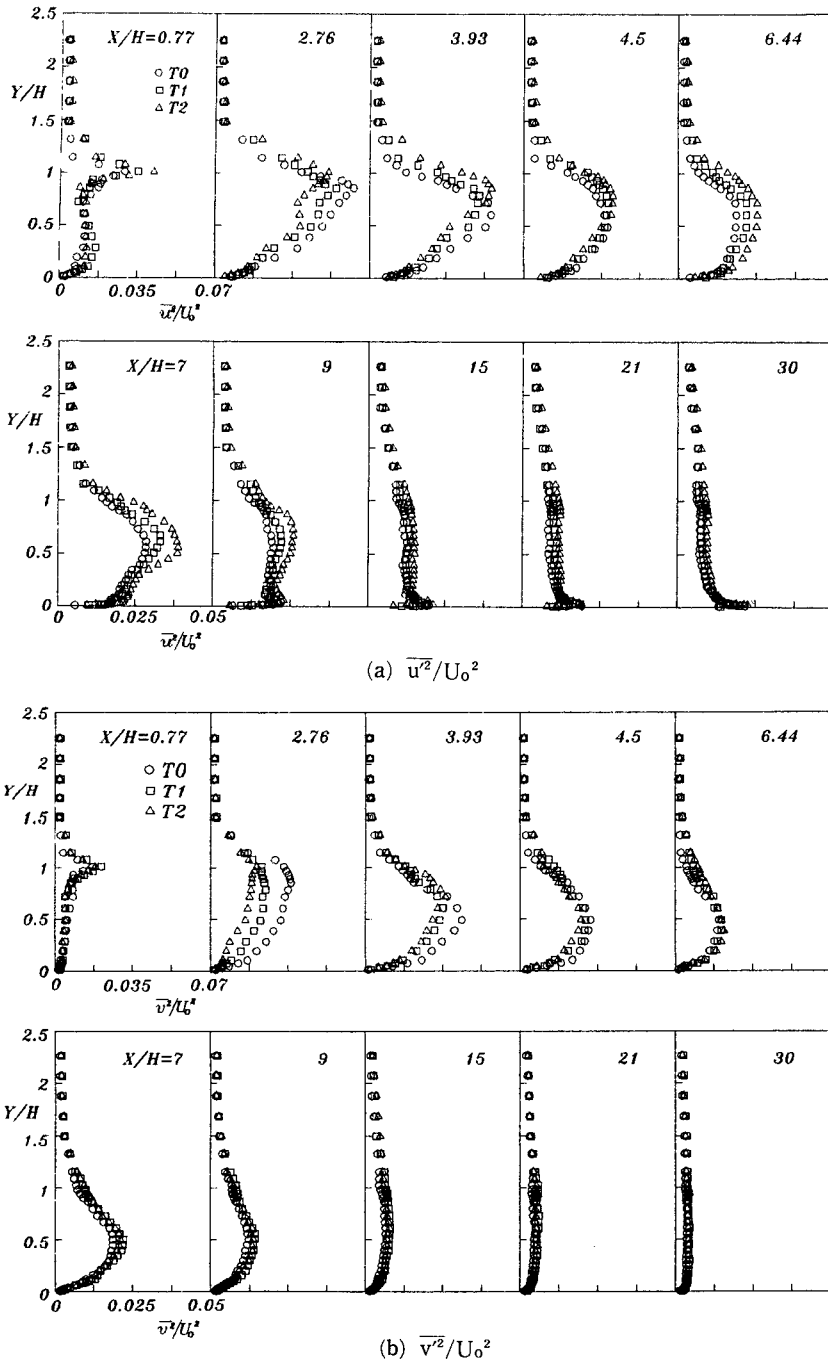


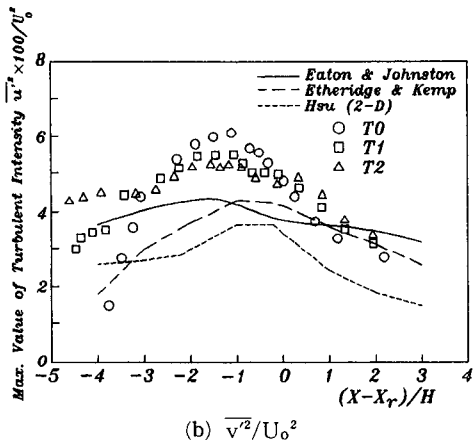
Fig. 14 Turbulent kinetic energy profiles

실은 바로 이 영역에서 박리전단층에 의해서 형성된 대규모와 (large scale eddy) 들이 벽면으로 인하여 제한을 받기 때문인 것으로 판단된다. 이와같은 사실은 증래 2차원 하향단의 결과와도 비교적 잘

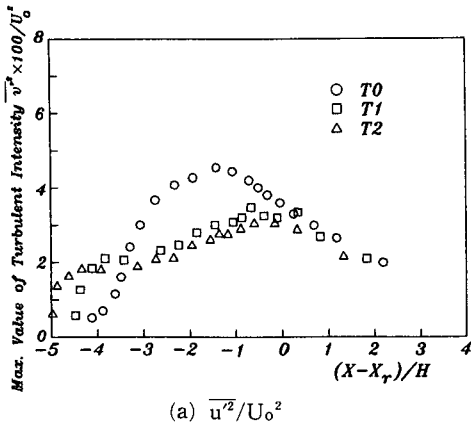
일치한다.⁽¹³⁾ 한편, 재발달영역으로 들어서면서 난류운동에너지는 급격히 감소하게 되고 회복구역으로 들어감에 따라 Y_{max} 는 벽면쪽으로 이동하여 점차 경계층 형태로 접근하는 형태로 나타났다. 그러

나 회복과정(relaxation)은 매우 느려서 본 실험구
간에서 볼때 $X/H \geq 25$ 정도에서 경계층의 난류응
력형태처럼 벽면의 난류응력이 최대로 되었다. 전
체적으로 회복과정에서 흐름방향의 성분의 경우
 δ_o/H 의 비가 클수록 보다 큰 값을 보이면서 점차
회복되어가며, 대체적으로 $X/H \geq 15$ 정도의 위치
에서 초기경계층의 영향이 사라지는 모습을 보이고
있다.

Fig. 15(a), (b)는 흐름과 수직방향으로의 난류
운동에너지 최대값을 흐름방향으로의 각 위치와 각
경우의 재부착길이 차를 단의 높이로 무차원화하여
나타낸 그림으로서 흐름방향의 경우 종래의 2차원
하향단의 결과와 같이 표시하였다. 그림에서 보듯
이 2차원 하향단의 경우 재부착지점에서 상류쪽으
로 약 1.0 H 정도에서 피크(peak)치를 나타내고
있으나 본 실험의 경우 그보다 0.5 H 정도 더 상류



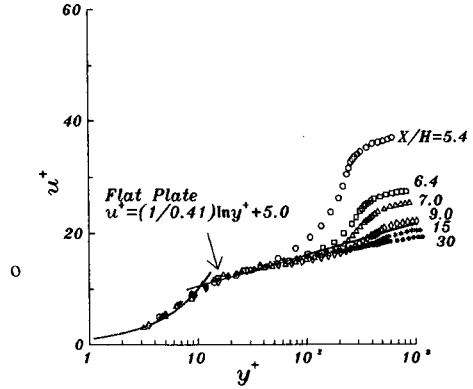
(b) $\overline{v^2}/U_o^2$



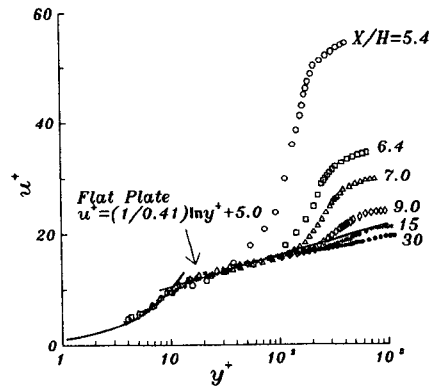
(a) $\overline{u^2}/U_o^2$

Fig. 15 Streamwise variation of maximum turbulent kinetic energy

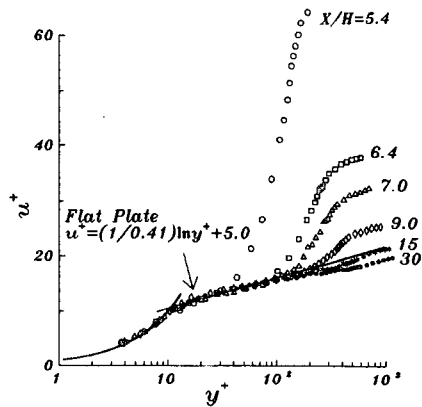
쪽으로 당겨진 것으로 나타났으며, 최대값의 크기
도 훨씬 더 크게 나타났다. 이는 재부착지점 상류
에서 난류운동에너지가 최대로 되는 것은 전단층의
발달을 촉진하는 대규모와들의 운동이 재부착점 전



(a) T0



(b) T1



(c) T2

Fig. 16 Mean velocity profiles (u^+ versus y^+) in the redeveloping region

의 영역에서 가장 활발하기 때문에 나타나는 현상으로 축대칭 하향단의 경우 유선의 곡률효과외에 TVC 효과가 서로 상승작용을 하여 흐름을 불안정시키는 효과가 전단층의 난류구조에서 난류운동에너지와 같은 고차항의 양들을 보다 증가시킨 것으로 해석되며,⁽¹¹⁾ 그 위치도 2차원 하향단에 비해 흐름방향으로의 확산이 훨씬 빨리 일어남으로써 상류쪽으로 당겨진 것으로 판단된다. 한편, Fig. 15(a)의 $(X-X_r)/H < -3$ 영역에서 δ_o/H 의 비가 클수록 박리전단층 부근에서의 최대 난류운동에너지의 값도 같이 커지는 것으로 나타났는데, 이는 초기경계층의 난류분포에서도 나타났듯이(Fig. 6(b)) 난류강도가 벽면 근처에서보다 크게 나타난 영향때문으로 생각된다. 전체적으로 최대 난류운동에너지 분포로 판단해 볼때 초기경계층의 두께는 재순환영역내에서 흐름방향의 난류성분보다는 수직방향으로의 난류성분에 훨씬 더 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 본 실험결과 T2의 경우 T0에 비해 최대 45%정도의 감소효과를 보였는데 이는 앞서 Fig. 12의 등속도선 분포에서의 결과와도 잘 일치하고 있다.

Fig. 16(a), (b), (c)는 각각의 경우에 있어서 회복구역내의 재발달경계층의 평균 속도분포를 내부층변수(inner variable)를 사용하여 나타내었다. 전체적으로 벽면에 가까운 부근의 속도분포는 압력구배에 상관없이 매우 빠른 부착경계층의 형태로 회복되어 벽면 대수법칙(law of the wall)과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 경계층의 내부층(inner layer)에서는 일반적인 벽면법칙으로 급격히 회복하지만 외부층(outer layer)에서는 박리전단층에서 형성된 대규모와들의 존재로 인하여 상당히 긴 거리에 걸쳐서 회복되고 있으며, 그 경향은 초기경계층의 두께가 클수록 더 크게 나타나고 있다.

4. 결 론

박리전단층이 축대칭 하향단흐름에 미치는 영향을 조사하기 위하여 초기경계층의 두께를 변화시켜 2차원 LDV를 사용하여 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 본 축대칭 하향단의 경우 2차원 하향단의 경우에 비해 재부착길이는 짧게 나타났으며, 흐름방향으로의 난류운동에너지의 최대 정점위치도 하향단쪽으로 당겨져 있고 아울러 최대 역류속도도 증

가하는 것으로 나타났다.

(2) 초기경계층이 층류에서 천이상태로 박리할 경우 그 두께(δ_o/H)가 클수록 재순환영역은 흐름방향으로 길게 늘어나고, 그 영역도 하향단쪽으로 점차 접근하면서 최대 역류속도값은 감소하며, 무차원 재부착길이(X_r/H)는 증가한다. 또한 모서리와(corner eddy) 영역도 점차 감소되는 것으로 나타났다.

(3) δ_o/H 가 클수록 재순환영역내의 역류속도와 난류운동에너지가 점차 감소되며, 특히 재순환영역내에서 난류운동에너지는 흐름방향으로 보다는 수직방향으로 보다 크게 영향을 받는다.

(4) 경계층의 외부층에서 박리전단층에서 형성된 대규모와들의 존재로 인하여 상당히 긴 거리에 걸쳐서 벽면법칙으로 회복되고 있으며, 그 경향은 초기경계층의 두께가 클수록 더 크게 나타나고 있다.

참고문헌

- (1) Kim, J., Kline, S.J. and Johnston, J.P., 1980, "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step," *Transactions of the ASME*, Vol.102, pp.302~308.
- (2) Eaton, J.K. and Johnston, J.P., 1981, "A Review of Research on the Subsonic Turbulent Flow Reattachment," *AIAA*, Vol. 19, No. 9, pp. 1093~1100.
- (3) Eaton, J.K. and Johnston, J.P., 1980. "Turbulent Flow Reattachment: An Experimental Study of the Flow and Structure Behind a Backward-Facing Step," Rpt. MD-39, Thermosciences Div., Dept. of Mech. Eng., Stanford Univ.
- (4) Pronchick, S.W., 1983, "An Experimental Investigation of the Structure of a Turbulent Reattaching Flow behind a Backward-Facing Step," Ph. D.Thesis, Stanford Univ.
- (5) Richard M. Lueptow, Patrick Leehey and Thomas Stellingner, 1985, "The Thick, Turbulent Boundary Layer on a Cylinder: Mean and Fluctuating Velocities," *Phys. Fluids*, Vol. 28, No. 12, pp. 3495~3505.
- (6) Luxton, R.E., Bull, M.K. and Rajagopalan, S., 1984. "The Thick Turbulent Boundary Layer on a Long Fine Cylinder in Axial Flow," *Aero-*

- nautical J.*, No. 12009/6, pp. 186~189.
- (7) Denli, N. and Landweber, L., 1979, "Thick Axisymmetric Turbulent Boundary Layer on a Circular Cylinder," *J.Hydraulics*, Vol. 13, No.3, pp. 92~104.
- (8) Kim, K.C., Lee, Y. and Ma, E., 1990, "Effect of Transverse Convex Curvature on Turbulent Flow and Heat Transfer," *Proc. 1st Int. Symp. Exp. and Comp. Aerothermodynamics of Internal Flows*, Beijing, pp. 202~207.
- (9) Lee, Y. and Kim, K.C., 1993, "Analysis on Effect of Transverse Convex Curvature on Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer," *Wärme- und Stoff Bertragung*, Vol. 28, pp. 89~95.
- (10) Kim, K.C., Niaki, M. and Lee, Y., 1993, "Convective Heat Transfer From a Heated Convex Cylinder with an Axisymmetric Backward-Facing Step," *The 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering*, Seoul, Korea, Vol.2, pp. 119~124.
- (11) 김경천, 부정숙, 양종필, 1994, "축대칭 하향단흐름에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제9호, pp. 2463~2476.
- (12) Bradshaw, P. and Wong, F.Y.F., 1972, "The Reattachment and Relaxation of a Turbulent Shear Layer," *J.Fluid Mech.*, Vol. 52, Part 1., pp. 113~135.
- (13) 라승호, 1990, "An Experimental Investigation of the Effects of Streamwise Pressure Gradients on a Turbulent Reattaching Flow Downstream of Rearward-Facing Step," Ph.D. Thesis. KAIST.