

〈論 文〉

## 축대칭 하향단 흐름에 대한 실험적 연구

김경천\* · 부정숙\*\* · 양종필\*\*\*

(1994년 3월 18일 접수)

### Experimental Study on the Flow Behind an Axisymmetric Backward-Facing Step

K. C. Kim, J. S. Boo and J. P. Yang

**Key Words :** Axisymmetric Backward-Facing Step(축대칭 하향단), LDV Measurement(레이저 유속계 측정), Transverse Convex Curvature Effect(반경방향 요곡률효과), Recirculating Zone(재순환 영역), Corner Eddy(모서리와)

#### Abstract

Local mean fluctuating velocity components were measured in the separating and reattaching axisymmetric region of turbulent boundary layer over the wall of convex cylinders placed in a water tunnel by using 2-color 4-beam fiber optics laser Doppler velocimetry. Measurements were made with three different diameters of cylinders with four different diameters of cylinders with four different diameter of the obstructions. The range of Reynolds number based on step height was between 5,000 to 25,200. The study demonstrates that the reattachment length decreases with decreasing cylinder radius and is always shorter than that for the two-dimensional backward-facing step flow at the condition of the same step height. It was also observed that the turbulent kinetic energy in the recirculating region increases with an increase in the radius of convex curvature. The measured velocity field suggests that the transverse curvature can affect definitely the formation of corner eddy.

#### 기 호 설 명

$A_d$  : 후미원주 면적  $\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2$   
 $A_D$  : 반원뿔 면적  $\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2$   
 $D$  : 반원뿔의 직경  
 $d$  : 후미원주의 직경  
 $H$  : 하향단의 높이 (=  $(D-d)/2$ )  
 $r$  : 후미원주중심에서 반경방향으로의 거리  
 $Re_H$  :  $H$ 를 기준으로 한 레이놀즈수( $Re_H = U_0 H/\nu$ )

#### $H/\nu$

$U_0$  : 자유흐름 속도  
 $\Delta U$  : 속도차  
 $U, V$  :  $X, Y$  방향으로의 평균속도  
 $u', v'$  :  $X, Y$  방향으로의 변동속도의 r.m.s  
 $-\overline{uv}$  : 레이놀즈 전단응력  
 $\overline{u^2}, \overline{v^2}$  :  $X, Y$  방향으로의 난류 운동에너지  
 $X$  : 하향단에서 흐름방향으로의 거리  
 $X_r$  : 재부착점  
 $Y$  : 후미원주표면에서 흐름의 수직방향으로의 거리  
 $u_*$  : wall shear velocity( $\tau_w/\rho$ )<sup>1/2</sup>  
 $u^+$  :  $u/u_*$

\*정회원, 부산대학교 생산기계공학과  
 \*\*정회원, 부산대학교 기계공학과  
 \*\*\*정회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

$$y^+ = \frac{y u_*}{\nu}$$

$\nu$  : 동점계수  
 $\tau_w$  : wall shear stress

## 1. 서 론

최근 국내외적으로 난류유동의 실험은 점점 더 복잡한 난류유동장으로 관심이 옮겨지고 있으며, 그 중에서도 난류 경계층유동의 박리 및 재부착 현상은 실제적인 외부 및 내부 유동에서 자주 관찰되는 현상으로 공학적으로 중요한 문제라 할 수 있다. 이와 같은 박리 및 재부착 경계층유동은 재순환 영역을 동반하고 있으며, 이 현상은 익형, 터빈 브레이드, 확대기, 열교환기, 연소기 등의 성능에 큰 영향을 미친다. 또한 박리유동은 구조물 등의 항력 및 주위 대기유동에 지배적인 성질을 보이고 있다. 따라서 많은 연구자들은 이러한 성질을 포함하는 유동모델을 단순화시켜, 2차원 모델에서 이와 같은 유동특성을 연구 해왔다.

먼저 재부착 흐름에 관한 유동특성 연구로는 대부분이 외부유동에서는 평판 하향단과 내부유동에서는 급작 확대관에서 수행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> Bergeles and Athanassiadis<sup>(4)</sup>는 2차원 장애물의 후미에 생기는 재순환 영역의 길이를 장애물의 높이와 폭의 함수로 나타내었으며, Tropea and Gackstatter<sup>(5)</sup>는 수직벽 주위의 유동특성을 레이놀즈수, 폐쇄비 그리고 변장비의 함수에 대하여 조사하여 재순환 영역의 크기와 위치 그리고 평균 흐름방향의 속도성분의 profile을 하향단 흐름의 경우와 비교하였다. Pronchick<sup>(6)</sup>는 하향단 주위흐름의 물리적 구조를 관찰하기 위하여 수동에서 유동의 가시화를 실시하였고, LDV를 사용하여 기본 난류량을 측정하였다. 이상의 실험결과로부터 난류경계층 유동에서도 2차원 평판인 경우와 유선의 곡률(streamwise curvature)이 있을 경우의 경계층 속도분포는 상당히 다른 양상을 보이며, 이는 경계층의 곡률(curvature) 효과가 속도분포에 영향을 미침을 알 수 있다.

한편, 축대칭 경계층유동은 흐름이 축대칭 물체 주위를 둘러싸는 경향이 나타남으로 인한 소위 반경방향 요곡률(transverse convex curvature, 이하 'TVC')의 영향으로 2차원 경우와는 또 다른 결과를 보이고 있다. 이 현상은 경계층 두께가 실린더

의 직경에 비하여 매우 큰 경우에서 크게 나타나므로 대부분의 연구는 매우 두꺼운 축대칭 경계층에서 진행되어 왔다. 따라서 이 조건을 만족시키기 위하여는 실린더의 직경이 수 mm 이하이어야 하고, 측정지점은 경계층이 충분히 성장한 먼 후류이다. Richard et al.<sup>(7)</sup>은 이와 같은 조건에서 평균 속도장을 측정된 결과로 극소 경계층 두께와 실린더 직경의 비 그리고 벽좌표계를 사용하여 "log-law of the wall"에 대한 mixed scaling을 제시하였다. 또한 Luxton et al.,<sup>(8)</sup> Denli and Lanweber 등<sup>(9)</sup>은 원형실린더의 축대칭 흐름에서 TVC효과에 대하여 실험을 한 바 있으며, Kim et al.<sup>(10)</sup>과 Lee and Kim<sup>(11)</sup> 등은 trip wire에 의해 성장된 난류축대칭 경계층에서의 TVC효과에 의한 벽면마찰계수 및 열전달 증가를 실험적 및 이론적 연구로 밝힌 바 있다.

현재까지 국내에 발표된 관련 연구자료를 종합해 볼때 박리 및 재부착 유동특성이나 축대칭 경계층에서의 TVC효과에 대해 별개의 연구는 진행되어 왔으나, 본 연구에서 시도한 두가지 곡률효과, 즉 유선곡률효과 및 TVC효과가 동시에 고려된 난류유동 특성에 대한 연구는 거의 없다. 즉, 축대칭 하향단의 경우 박리후 축대칭 경계층 두께가 벽면 물체의 곡률반경보다 더 두꺼워지므로 TVC효과가 생기게 됨은 물론 박리 및 재부착과 같은 복잡한 유동장이 형성되므로 2차원 하향단의 연구결과를 곧바로 적용할 수 없다. 그 예로 Kim et al.<sup>(12)</sup>은 축대칭 하향단 흐름의 열전달 측정으로부터 벽면극소 열전달계수가 2차원 하향단의 경우와는 다르게 나타나며 TVC효과가 뚜렷이 관찰됨을 보인 바 있으나, 이 연구에서는 유동장의 측정 데이터가 없어서 유동특성과 열전달 분포와의 관계를 일관되게 설명하지 않았다.

그러므로 본 연구에서는 축대칭 하향단 유동장을 엄밀히 측정함으로써 유선의 곡률효과와 TVC효과가 동시에 존재하는 경우에 난류구조의 물리적 변화가 어떻게 발생하는가를 실험적으로 자세히 규명하기 위하여 박리 재부착 및 재순환 유동장에 대한 평균 속도장과 난류특성 등을 2성분 레이저유속계로 수동(water tunnel)에서 엄밀히 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 대상이 될 실험모델의 형상이 Fig. 1에

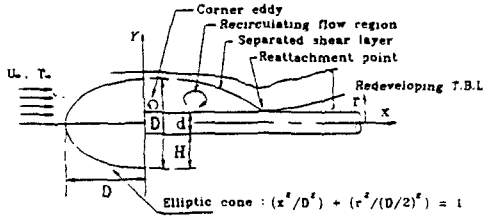


Fig. 1 Flow configuration

나타나 있다. 모델의 재질은 테프론으로서 설계시 적용된 형상인 반원뿔의 정밀가공을 위하여 CNC 선반을 사용하여 가공을 하였으며, 반원뿔 후미의 원주는 스테인레스를 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 난류경계층으로 재발전하게 된다. 본 연구에서 관심을 두고 연구할 물리적인자는 단높이(H)를 기준으로 한 레이놀즈수(UH/ν)와 TVC효과를 내포하는 반원뿔의 Transverse 직경 D와 후미원주의 직경 d의 비(D/d)이다. 그 밖에 박리할 때의 경계층 특성도 재부착길이 등에 미소한 영향을 미칠 수 있으나 본 연구에서는 레이놀즈수와 직경비에 관해서, 그리고 재부착을 포함한 재순환 영역내의 물리적 특성고찰에 연구의 범위를 한정한다. Table 1은 실험모델의 제원을 설명하고 있다.

유동실험에 사용될 폐회로 저속수동은 총 저수

Table 1 Specification of the axisymmetric backward-facing step

Case	D, mm	d, mm	H, mm	D/d
1	101.6	50.8	25.4	2.0
2	50.8	25.4	12.7	2.0
3	76.2	25.4	25.4	3.0
4	101.6	25.4	38.1	4.0
5	63.5	12.7	25.4	5.0

용량 40톤 규모의 수직 순환형 회류수조이며, 시험부의 크기는 2800(L)×1200(H)×1800(W) mm<sup>3</sup>이다. 유속은 구동부와 표면류 가속장치의 모터 회전수를 전기적으로 제어하여 0.1 m/s~2.0 m/s의 범위내에서 적절히 조정이 가능하며, 또한 회류수조의 좌, 우측에 각각 1개씩의 구동용 모터외에 별도의 표면류 가속용 모터가 설치되어 있어 접근흐름의 균일성 조절이 상당히 양호한 이점이 있다. 이와 같이하여 수조내 시험구간에서 모델을 장착하지 않은 상태에서 균일유동을 측정할 결과 흐름의 수직방향으로 200~600 mm 내에서 흐름방향의 평균속도는 1.0% 이내의 균일도를 가지고 있으며, 난류강도는 2.5% 정도로 나타났다. 약 2.5%의 난류강도는 일반적인 풍동에서 이 값이 0.5% 내외인 점을 감안하면 작은 값은 아니지만 본 수동과 유사한 회류수조 등에서 얻어지는 난류강도가 대략 이 범위로 알려져 있으므로 타당한 결과로 여겨진다.

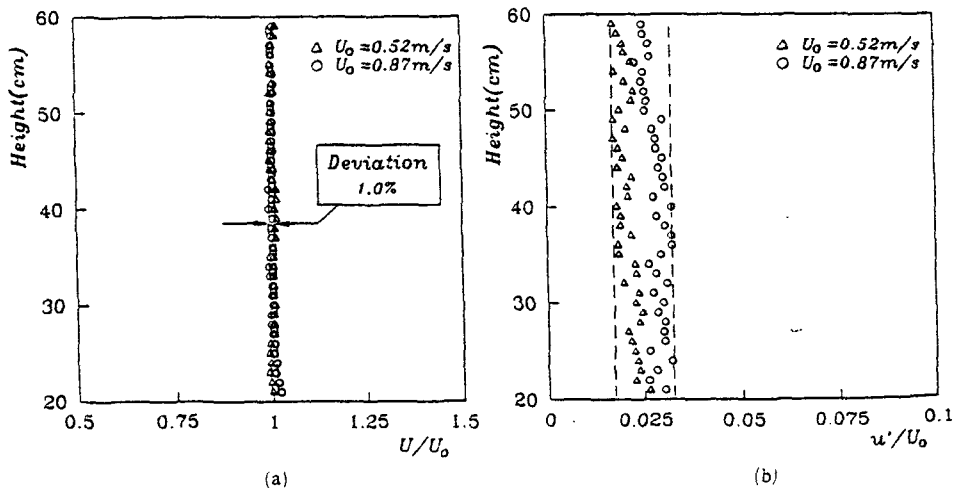


Fig. 2 Mean velocity and turbulent intensity of uniform flow

Fig. 2는 이때의 균일류 평균속도와 난류강도 분포를 나타내고 있다.

속도측정에 사용한 LDV는 2 color 4 beam의 4 Watt Argon-Ion 레이저로서 후향 산란방식이며, 별도의 측정용 fiber optics probe를 가지고 있다. 따라서 기존의 LDV와는 달리 측정점의 이동문제가 비교적 편리한 이점이 있으며, 초점거리도 416 mm 정도로 비교적 길기 때문에 시험구간내의 벽연간섭을 거의 받지 않는다. Fig. 3은 본 FLV probe의 개략도와 측정점의 제원을 나타내고 있다. 한편, 본 실험에서 사용한 신호분석기(IFA 550)는 autocorrelation 방식으로 종래의 counter 방식에 비해 처리속도가 매우 빠르며, high resolution processing이 가능한 장점이 있다. 그리고 time resolution은 2 ns이며, frequency range는 1 kHz~15 MHz이다. 신호분석기에는 PC와의 연결이 가능한 Multichannel interface card(MI 550)와 별도의 analog board를 설치하고, 또한 PC에는 DMA interface card(Model 6260)를 설치하여 신호의 획득 및 분석과정이 모두 PC로 on-line이 되도록 전체 시스템을 구성하였다.

본 실험에서 데이터 획득은 유속평균 및 Reynolds 응력치들을 얻기 위하여 coincidence mode로 처리하였으며, 산란입자는 평균 입자지름

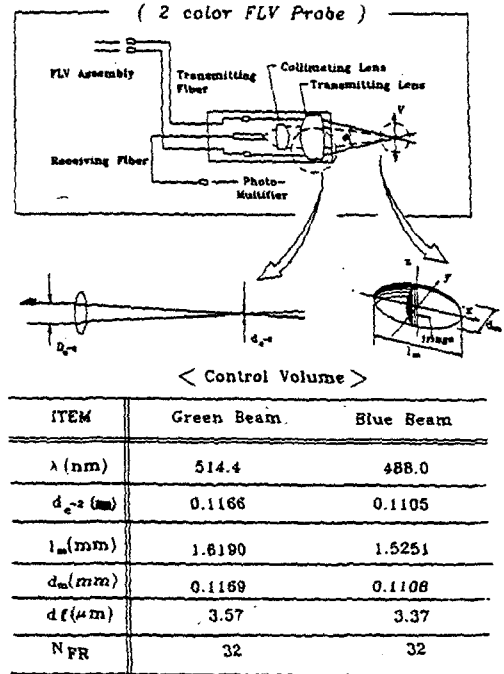


Fig. 3 Schematic diagram of FLV probe

이 0.22  $\mu$ m인 Titanium dioxide를 사용하였다. LDV 실험에서 가장 중요한 산란입자량의 조절을 위하여 실험시작전 약 3cc 정도 수조에 주입하여

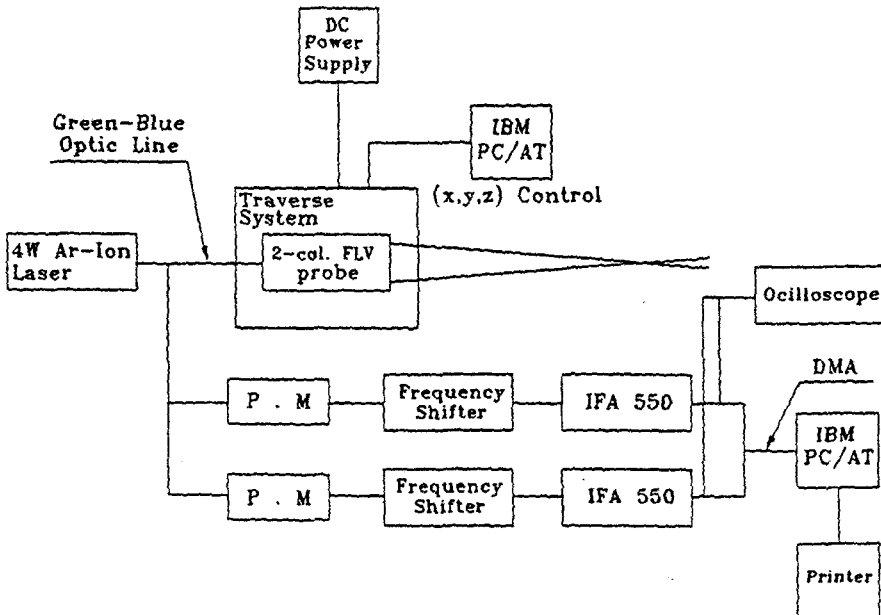


Fig. 4 Schematic diagram of 2-D LDV measurement system

data rate와 Doppler 신호를 관찰하면서 최적의 조건이 될때까지 미량을 조금씩 첨가하는 방법으로 하여 최종적으로 약 6 cc 정도를 주입하였을 경우 적당한 것으로 나타났다. 이는 총용수량이 40톤임을 감안할 때 대략 10톤에 1.5 cc 정도이며, 그 이상을 주입할 경우는 용수를 혼탁하게 하여 오히려 산란광의 신호를 약화시키는 결과를 가져왔다. 그리고 본 실험에서의 sample 개수는 대략 1000~2000개 정도로 하였으며, 통계처리과정에서 속도편의수정(velocity bias correction)을 위하여 transit time weighting 방법을 사용하였다. 또한, 데이터를 분석할 때에는 표준편차( $\sigma$ )를 구하여 3 $\sigma$  이상의 데이터는 버리고 통계처리를 하였다. 측정 구간은 각 모델의 단의 높이( $H$ )로 무차원하여 흐름방향과 수직방향으로 각각  $0 < X/H < 6.5$ ,  $0 < Y/H < 2.5$  구간내에서 모델당 300개~600개 정도의 측정점이 되도록 하여 3차원 자동 이송장치를 사용하여 실험을 수행하였으며, Fig. 4는 이상의 측정시스템의 개략도를 나타내고 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 재순환 영역내에서의 평균속도

속도 측정 실험은 자유흐름속도( $U_0$ )를 각각 0.52, 0.87 m/s로 하였으며, 이때 레이놀즈수( $Re_H$ )는 10100, 16800이다. 실험모델의 반원뿔단 높이( $H$ )를 기준으로 하여  $0 < X/H < 6.5$ ,  $0 < Y/H < 2.5$  구간내에서 단의 높이( $H$ )를 일정하게 한 후, 즉  $H=25.4$  mm, 반원뿔의 직경( $D$ )과 후미원주의 직경( $d$ )을 변화시켜 가면서 구한 평균속도를 측정 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, case 1, case 3, case 5의 각 경우  $D/d$ 의 비는 각각 2.0, 3.0, 5.0이다. 그 결과 중요한 현상은 자유흐름속도로 무차원하여 구한 속도벡터장에서 알 수 있듯이  $H$ 가 일정하더라도  $D/d$ 의 비가 클수록 재부착 길이는 단의 높이  $H$ 에 대해 각각 4.25, 3.8, 3.3 배로 점차 짧아진다는 것이다.  $D/d$ 의 비가 가장 큰 case 5의 경우는 case 1에 비하여 재부착 길이는 최대 22%까지 줄어들었으며, 이 값은 단의 높이 정도에 해당되는 길이이다. 이와 같은 사실은  $H$ 가 일정하더라도  $D/d$  비가 증가함에 따라서 TVC 효과는 크게 나타남을 의미하며, TVC 효과가 커질수록 재순환 영역내의 정방향 흐름을 보다 빨리 확산시켜 재순환 영역으로 연유입되는 유동량을 감소시

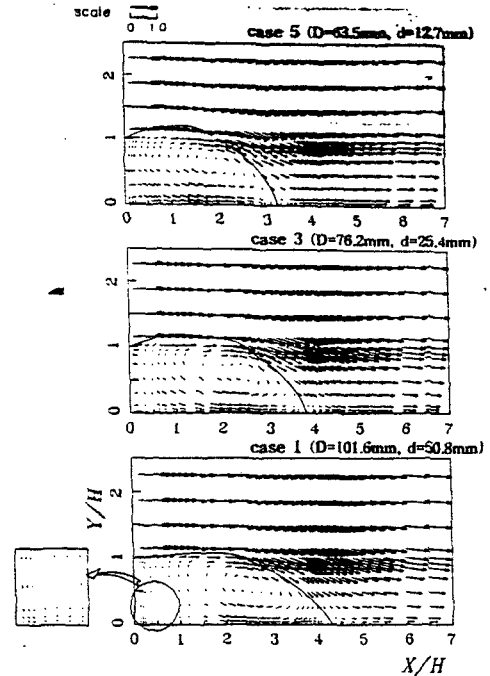
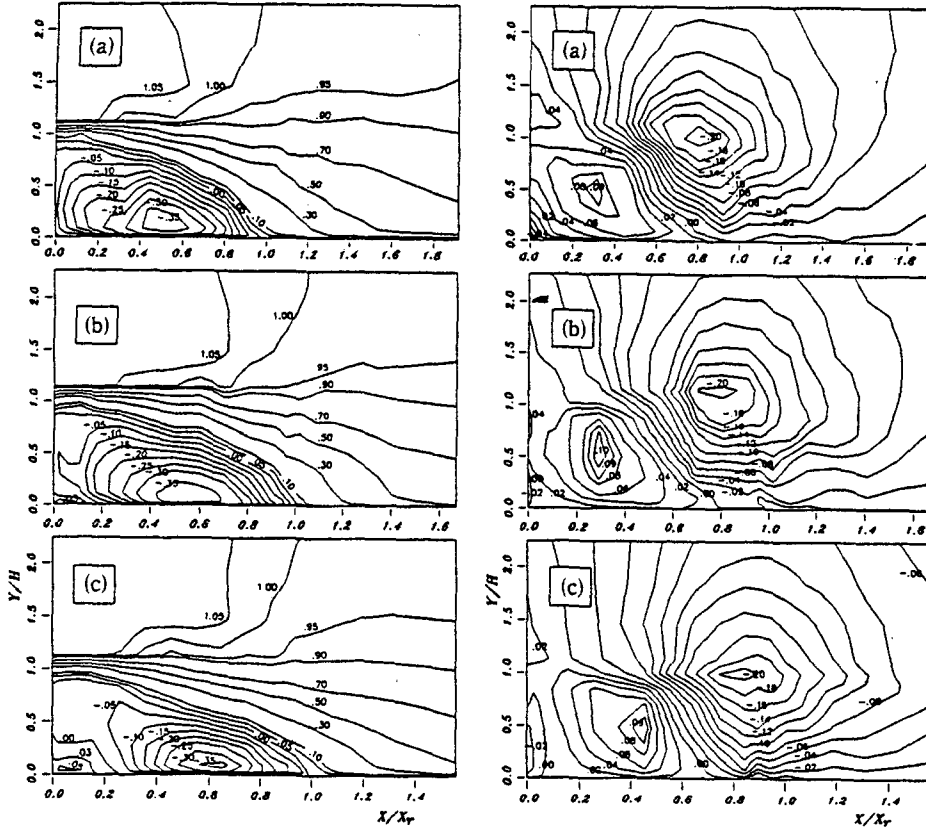


Fig. 5 Distribution of the velocity vector  
—, Dividing streamline  
( $H$ =constant, 25.4 mm,  $U_0=0.52$  m/s)

킴으로써 재부착 길이가 짧아지게 된다. 이와 같은 현상이 일어나는 가장 큰 이유는 반원뿔에서 박리한 전단층이 흐름방향으로의 강한 역압력구배에 의하여 마치 반원뿔 선단쪽으로 suction pressure가 작용하는 결과로 해석되며, 그 정도는  $D/d$ 의 비가 커질수록 크게 나타나고 있다. 즉, 후미원주가 차지하는 면적이 줄어드는 만큼에 해당되는 더 큰 suction pressure가 작용함으로 인하여 점차 재부착 길이가 하향단 쪽으로 당겨진 것으로 판단된다. 그 결과 본 실험의 경우 재부착 길이는 2차원 하향단의 경우  $H$ 의 4.9~8.2배 정도인 것과 비교하여 훨씬 짧으며, 또한 자유흐름속도가 큰 경우,  $U_0=0.87$  m/s)에도 박리할 때의 경계층 두께의 감소로 인해 재부착과정으로의 확산이 보다 빨리 일어남으로써 각 경우에 대하여 재부착 길이는 모두 줄어드는 같은 경향을 나타내었다.

또한, 흐름방향의 각 단면상에서 분할유선(dividing streamline, 그림의 실선부분)을 구하여 같이 표시하였다. 여기서, 분할유선은 하류방향의 각 단면상에서 속도분포의 수치적분을 통해 구하였으며, 이때의 직분은 후미원주의 표면상에서 수직



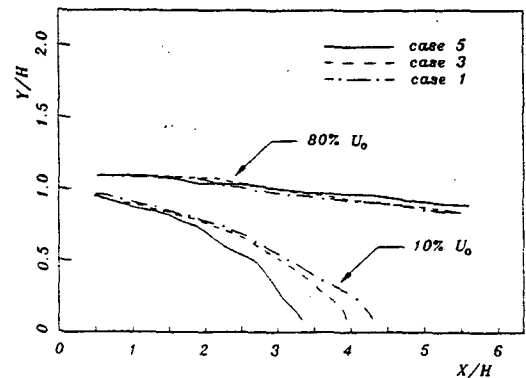
(a) Case 5 (b) Case 3 (c) Case 1

**Fig. 6** Mean velocity contour profiles  
( $H = \text{constant}$ ,  $U_0 = 0.52 \text{ m/s}$ )  
(Left : Longitudinal, Right : Transverse)

한 편을 따라서 질량플럭스(mass flux)가 영(zero)이 될때까지 수행하였다. 그리고 분할유선은 평균적인 의미에서 재순환 영역과 원입구유동(primary inlet flow)의 분리면으로 간주되며, 본 실험결과 유선의 곡률효과와 동시에 TVC효과가 작용하여 분할유선곡률은  $D/d$ 의 증가에 따라 커지는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 6은 평균속도의 등고선 분포를 나타내고 있다. 먼저 재순환 영역내에서 최대 역류속도(reverse-flow velocity)는 안정한 역류영역( $X/X_r = 0.4 \sim 0.7$ )에서 자유흐름속도의 약 30~35%까지 측정되었는데 2차원 하향단의 경우 20~25%인 점을 감안할 때 훨씬 크게 나타나고 있으며,  $D/d$ 비의 증가에 따라 그 영역도 선단으로 점차 접근하는 형태를 보이고 있다. 여기서 각 경우에서 유동의 확산비를 비교해 보면 Fig. 7에서 보듯이 역시  $D/d$

$d$  비의 증가에 따라 평균유동의 확산비가 재부착 길이를 감소시키는 주원인으로 생각되며, 이처럼 확산비가 증가하는 것은 재부착과정에서 TVC 효과



**Fig. 7** Locus of points of 10% and 80% free stream velocity( $H = \text{constant}$ ,  $U_0 = 0.52 \text{ m/s}$ )

과가 2차원 하향단 흐름에서 마치 음의 순압력구배 (favorable negative pressure gradient) 효과<sup>(13)</sup>를 받는 것과 유사한 현상으로 볼 수 있으며, 그 효과로 인하여 강한 역압력구배가 상대적으로 감소하여  $D/d$ 의 비가 증가함에 따라 압력회복이 빨리 됨으로써 반원뿔 선단으로 작용하는 suction pressure가 더욱 커지기 때문으로 해석된다. 그리고 단에 인접한 영역 ( $X, X_r=0.2\sim 1.0$ ) 부근에서의 흐름은 원주의 표면에서 불규칙적으로 박리하여 단의 구석 영역에서 또 하나의 eddy와 생성을 볼 수 있으며, 회전방향은 재순환 영역에서의 회전방향과는 반대로 나타났다. 그 경향은 Fig. 6에서와 같이 TVC 효과가 크게 나타날수록 재순환 영역으로 부터 2차역유입되는 유동량이 감소하는 이유로 점차 소멸되고 있다는 것을 알 수 있다. 본 실험조건에서 불매 TVC 효과가 가장 적게 작용하는 경우에 있어서 모서리와 (corner eddy)의 최대속도는 주류방향으로 자유흐름속도의 약 5%까지 나타났다. 따라서 단의 높이와 자유흐름속도가 같은 조건하에서 TVC 효과의 증가는 모서리와 의 구역을 감소시킨다.

Fig. 8은 원주의 직경( $d$ )를 일정하게 고정시키고

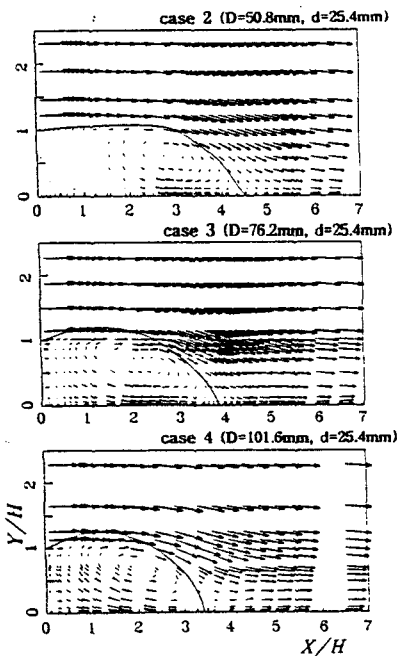
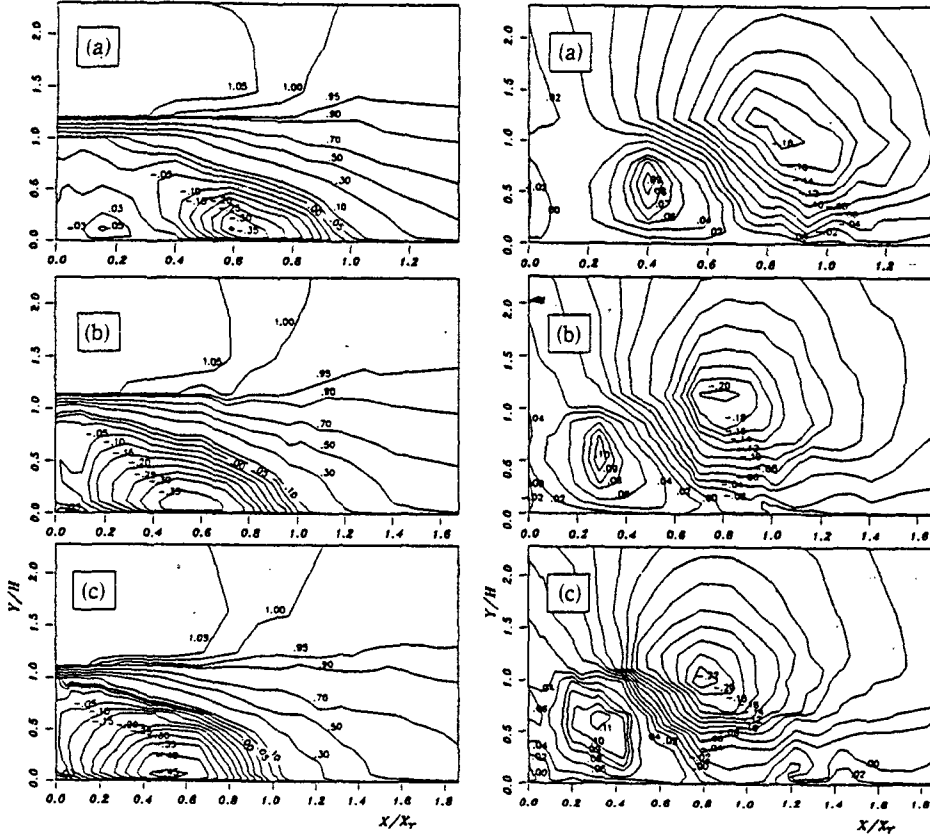


Fig. 8 Distribution of the velocity vector  
 —, Dividing streamline  
 ( $d$ =constant, 25.4 mm.  $U_0=0.52$  m. s)

반원뿔의 직경( $D$ )를 변화시켜 가면서 구한 경우를 나타내고 있다. 경우를 나타내고 있다. 여기서,  $H$ 는 각각 12.7, 25.4, 38.1 mm이고 이때의  $D/d$  비는 2.0, 3.0, 4.0이다.  $U_0=0.52$  m/s의 경우  $D/d$ 의 비가 증가할수록 재부착길이는  $H$ 에 대해 각각 4.55, 3.8, 3.45배로 점차 짧아지는 결과를 얻었다. 이는  $H$ 가 가장 작은 case 2를 기준으로 할 경우  $D/d$  비가 100% 증가에 대해 최대 24% 정도가 감소한 것이 된다. 여기서, 이 결과는 앞에서 언급한  $D/d$  비가 150% 정도 증가했을 경우 재부착길이가 최대 22% 감소한 case 1, 3, 5의 경우에 비해 재부착길이에 더 큰 영향을 미친 것으로 나타났다. 즉, 직경비에 의한 TVC 효과에 단의 높이 변화에 따른 수직방향으로의 압력구배 ( $du/dy$ )가 서로 상승작용을 함으로써 그 결과 전단층의 곡률이 증가하여 재부착길이가 훨씬 짧아진 것으로 보여진다.

한편, 각 경우에 대하여 흐름방향을 재부착길이에 무차원하여 구한 평균속도의 등고선 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 먼저 최대 역류속도를 나타내는 영역 역시  $D/d$ 의 증가에 따라 선단으로 점차 접근하며, 그 최대값의 크기도  $U, V$ 방향 모두 약간씩 증가하는 것으로 나타났다. 이 사실은 단의 높이가 일정하고 단지  $D/d$ 의 비만 변하는 앞의 경우와는 달리 단의 높이도 변함으로써 유선의 곡률 효과에 의한 특성도 보다 크게 작용하여 두 가지 효과가 서로 상승작용을 하기 때문에 나타난 결과로 생각된다. 특히 재부착과정 전후에서 수직방향으로의 속도가  $D/d$ 의 비의 증가에 따라 점차 후미원주 벽면을 향하는 쪽으로 증가하며, 그 최대 영역의 위치도 벽면으로 접근해 가는 사실은 이와 같은 결과를 말해주고 있다고 본다. 즉,  $D/d$ 의 비가 증가함에 따라 축대칭 경계층 속도분포를 2차원의 경우에 비해 벽면쪽으로 눌러주는 효과가 크게 작용하는 것이 큰 특징으로 나타났다. 또한  $D/d$ 의 비가 증가함에 따라 역시 suction pressure가 증가하는 효과로 나타남으로써 재순환 영역내에서의 역류속도가 증가하고, 아울러 모서리와 의 영역도 점차 감소되고 있다. 그리고 case 1과 2와 같이  $D/d$ 의 비가 같은 경우라도 각각의  $H$ 에 대하여 재부착길이는 case 1의 경우가 약간 작게 나타남을 볼 수 있으며, 이상의 결과는  $U_0=0.87$  m/s에서도 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 10(a), (b), (c)는 속도분포로부터 구한 각



(a) Case 2 (b) Case 3 (c) Case 4

Fig. 9 Mean velocity contour profiles  
( $d = \text{constant}$ ,  $U_0 = 0.52 \text{ m/s}$ )  
(Left : Longitudinal, Right : Transverse)

경우의 재부착길이를 단의 높이로 무차원 ( $X_r/H$ ) 하여 표시하였다.  $H$ 가 일정한 경우,  $d$ 의 증가는 바로 후미원주의 반경방향으로의 곡률감소를 의미 하며, 결국 2차원 하향단을 극한의 경우라고 볼때 ( $H$ 의 4.9~8.2배), 후미원주 직경에 대한  $X_r/H$  증가폭은 어느정도 크기의 후미원주 직경을 지나서 부터는 줄어 들 것이라는 사실은 충분히 예측 가능하다. 그리고  $d$ 가 일정한 경우 무차원 재부착길이는  $H$ 가 증가하면서 전단층 곡률의 증가로 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이때의 결과를 보다 일괄성있게 나타내기 위하여 축방향으로 투영된 반원뿔의 면적 ( $A_D$ )에 대하여 후미원주의 면적 ( $A_d$ )이 차지하는 비 ( $A_d/A_D$ )를 계산하여 나타내 보면, 앞의 두 유형의 실험에 대하여 모두 면적비가 감소함에 따라서, 즉 TVC효과의 증가에 따라서 하향단 선단쪽으로 suction pressure의 작용이 점차 커

짐으로써 단의 높이에 대한 재부착길어도 점차 감소하는 결과를 얻을 수가 있었다. 따라서 본 실험 결과, 축대칭 하향단의 경우 2차원 경우와는 상당한 차이점이 나타났으며, 이와 같은 물체의 유체역학적인 설계시 유선의 곡률효과뿐만 아니라 TVC효과에 의한 영향도 반드시 고려에 포함하는 것이 타당할 것으로 본다.

### 3.2 재순환 영역내에서의 난류특성

일반적으로 박리 재부착 흐름에서 나타나는 재순환 영역은 흐름의 속도크기는 작지만 큰 비정상 난류떨림이 존재하며 난류강도가 매우 크고 역흐름이 빈번하기 때문에 측정에 상당한 엄밀함이 요구된다 하겠다. Fig. 11(a), (b), (c)은 각 단면상에서 단의 높이를 일정하게 한 후 반원뿔의 직경 ( $D$ )과 후미원주의 직경 ( $d$ )을 변화시켜 가면서 구한 각각의



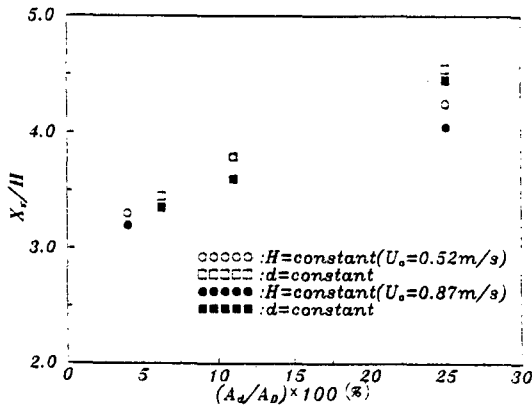
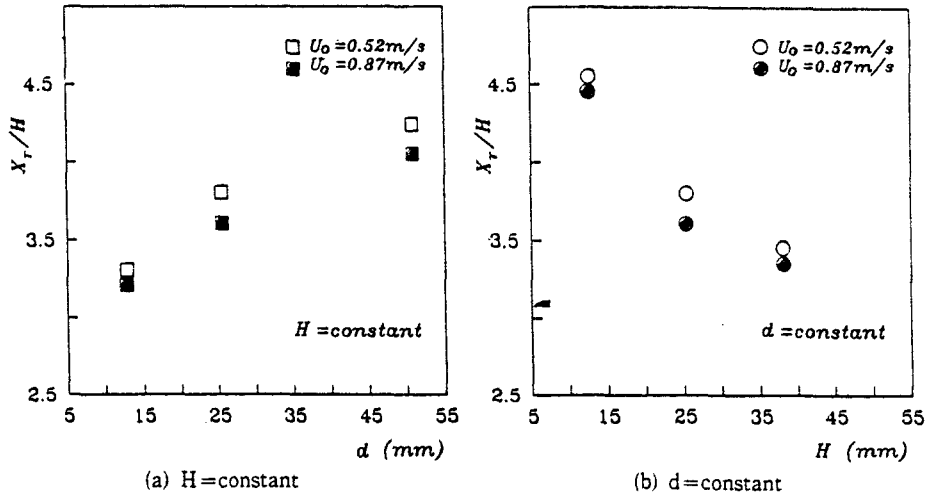


Fig. 10 Nondimensional reattachment length

경우 흐름방향과 수직방향으로의 난류 운동에너지 분포를 나타내었다. 그림에서 보듯이 재부착 구역 내의 큰 난류에너지가 존재하는 것은 Eaton and Johnston<sup>(14)</sup>이 제안한 바에 따르면 재부착 전단흐름이 수직방향으로 매우 느린 주파수의 떨림(flapping) 운동에 의한 영향과 실제 난류에너지 값이 중첩되어 측정되기 때문이라고 설명하였다. 본 실험에서도 이와 같은 유사한 결과를 볼 수가 있었는데, TVC효과가 커질수록 재순환 영역내에서 난류 운동에너지는 증가하는 경향이 나타났으며, 재순환 영역내인  $X=2.36$ 인 곳에서 TVC효과가 적게 나타나는 경우에 비해 약 1.5배 정도나 큰 값을 보였다. 이는  $D/d$ 의 비가 증가함에 따라 하향단 선단쪽으로 작용하는 suction pressure가 더욱 크게 작용하는 효과까지 함께 중첩되어 나타난 것으

로 판단된다. 또한 재부착과정에서 벽면과의 강한 상호간섭과 불룩한 유선곡률 그리고 강한 역압력구배 등으로 인하여 난류에너지는 급격히 감소하게 되며, 최대 난류 운동에너지를 갖는 지점의 원주표면으로부터 거리도 역시 재부착점으로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 재부착과정에서 난류 운동에너지 값은 벽면에서 멀어 질수록 크게 변화하게 되는데, 그 정도는 흐름의 수직방향과 레이놀즈 전단응력이 흐름방향의 경우에 비해 훨씬 더 급격하게 변하는 것으로 나타났는데, 이 사실은 바로 이 영역에서 박리전단층에 의해서 형성된 대규모 와들이 벽면으로 인하여 제한을 받기때문인 것으로 판단된다. 또한, 재부착과정에서 하류로 흘러가면서 벽면에서부터 수직방향으로의 최대 난류 운동에너지를 나타내는 위치까지의 거리는  $D/d$ 의

비가 클수록 흐름방향의 경우보다 훨씬 벽면쪽으로 접근하고 있는 것을 볼 수가 있다. 따라서 재부착 과정에서 재발전 영역으로 감에 따라 TVC효과가 분명히 크게 작용하고 있다고 본다. 한편, 후미원주의 직경이 일정한 경우 및 자유흐름속도가 큰 경우에도 이와 비슷한 결과를 얻었다.

Fig. 12(a), (b)는 case 1과 case 5의 경우에 대하여 흐름방향과 수직방향으로의 난류운동에너지 최대값의 크기를 구하여 각각 하류방향으로 나타내었다. 각 경우 최대점의 위치는  $X/X_r=0.72$  부근으로 2차원 하향단( $X/X_r=0.8\sim 1.0$ )의 경우에 비하여 부착점 상류에서 난류 운동에너지가 최대

로 되는 것은 전단층의 발달을 촉진하는 거대와 (large scale eddy)들의 운동이 재부착점 전의 영역에서 가장 활발해지며, 2차원 하향단에 비해 흐름방향으로의 확산이 훨씬 빨리 일어남으로써 그 위치도 상류로 당겨진 것으로 판단된다. 결과적으로  $D/d$ 의 비가 증가함에 따라서 유선의 곡률효과에 TVC효과가 결합하여 재부착점의 재순환 영역에서 흐름을 불안정시키는 효과가 서로 상승작용을 하여 전단층의 난류구조에서 난류 운동에너지와 레이놀즈 전단응력과 같은 고차항의 양들을 보다 증가시킨 것으로 해석된다.

또한 난류 운동에너지의 최대값 평균은 재순환

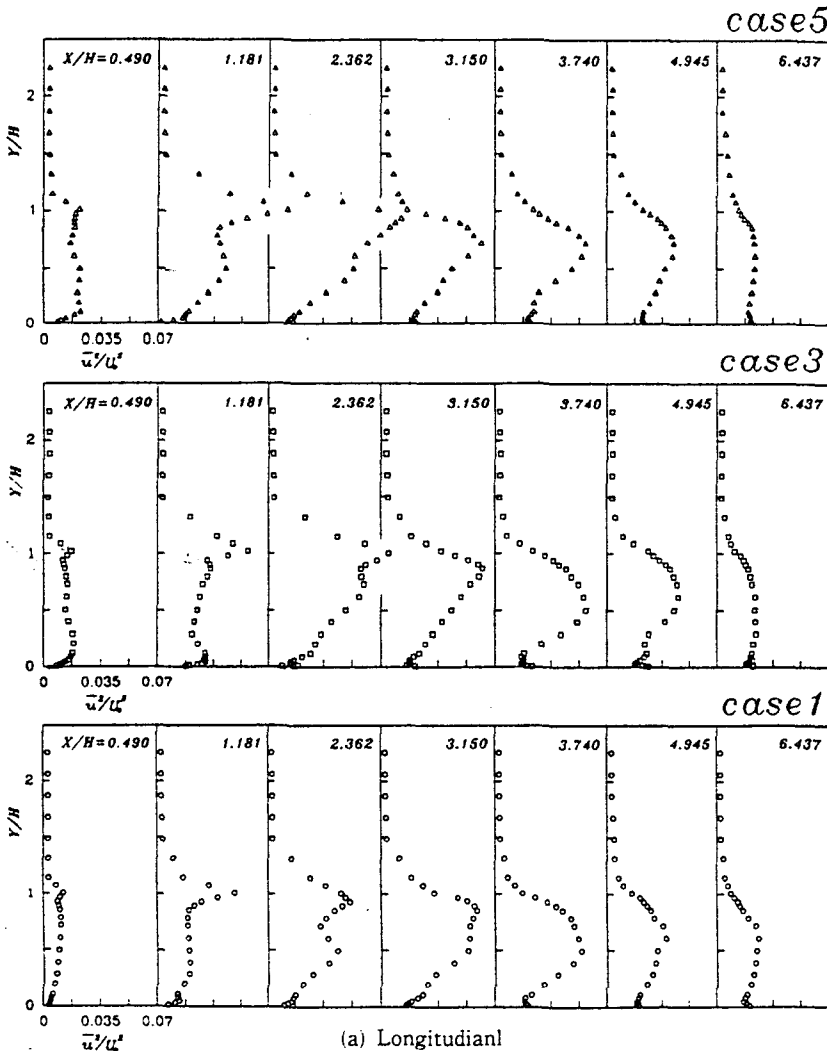


Fig. 11 Turbulent intensity profiles( $H=\text{constant } U_0=0.52 \text{ m/s}$ )

영역내에서 TVC효과가 크게 나타날수록 흐름방향으로 case 1에 최대 40%, 수직방향으로 최대 26% 정도로 크게 나타났는데, 이 사실로부터 TVC 효과는 재순환 영역내의 난류성분에서 흐름의 수직방향보다는 흐름방향으로 보다 크게 작용한다고 볼 수가 있다. 한편, 본 연구과 같이 재부착 전단층의 경우 속도차( $\Delta U$ )는 후미원주의 벽면근처에서 최대 역류속도가 자유흐름의 약 30% 정도이므로 속도차를 적절하게 표준화시켜 약  $1.3U_0$ 로 가정하더라도, 난류 운동에너지는 전형적인 경면혼합층(plane mixing layer,  $\overline{u^2}/U_0^2=0.028$ ,  $\overline{v^2}/U_0^2=0.016$ )에 비해 TVC효과가 클수록 수직방향으로

큰 증가를 보이고 있다.

한편, Fig. 13(a), (b), (c)는 단의 높이가 같은 경우 재부착점 이후의 재발달 영역에서의 평균속도 분포를 각각 무차원하여 평균의 경우와 비교하여 나타내었다. 이때 벽면 전단응력은 실험으로부터 직접 구하지 않고 "cross plot"방법을 사용하여 구하였다. 그 결과 재부착점을 지나 하류로 흘러감에 따라 속도분포는 전형적인 난류경계층의 속도분포로 회복되어 가고 있음을 볼 수 있다. 특히 경계층의 inner part에서는 일반적인 벽면법칙으로 급격히 회복하지만 outer part에서는 박리전단층에서 형성된 대규모와들의 존재로 인하여 상당히 긴 거

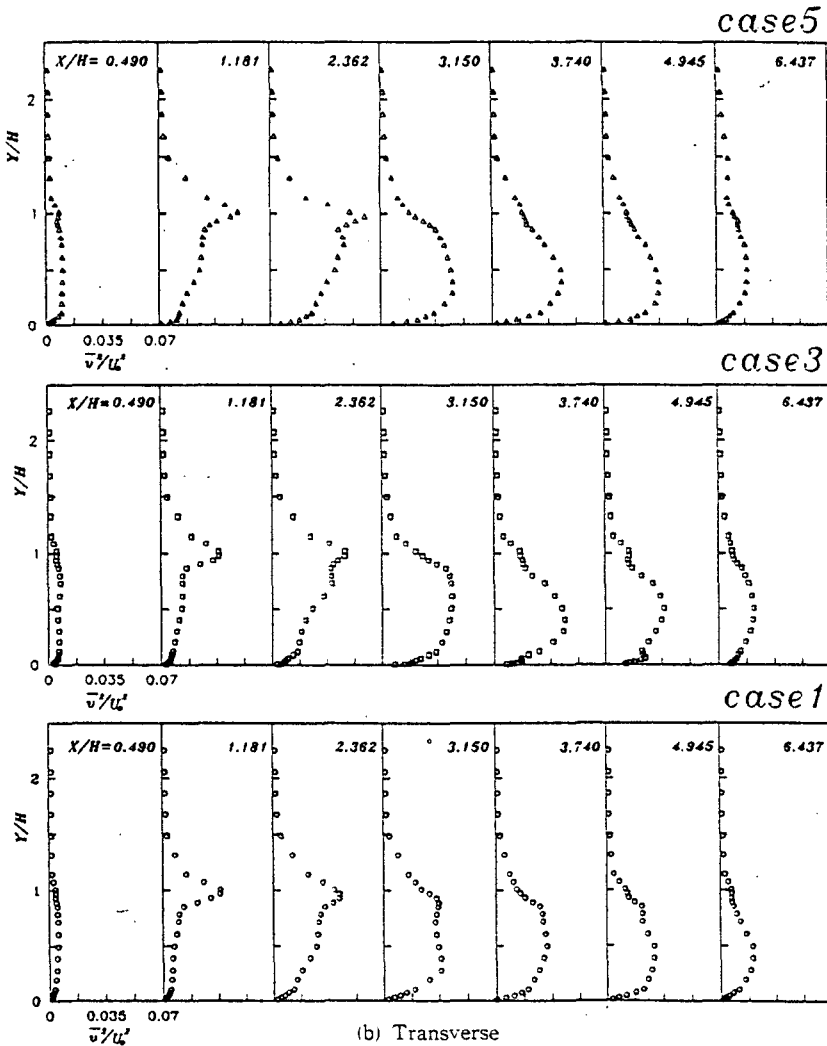
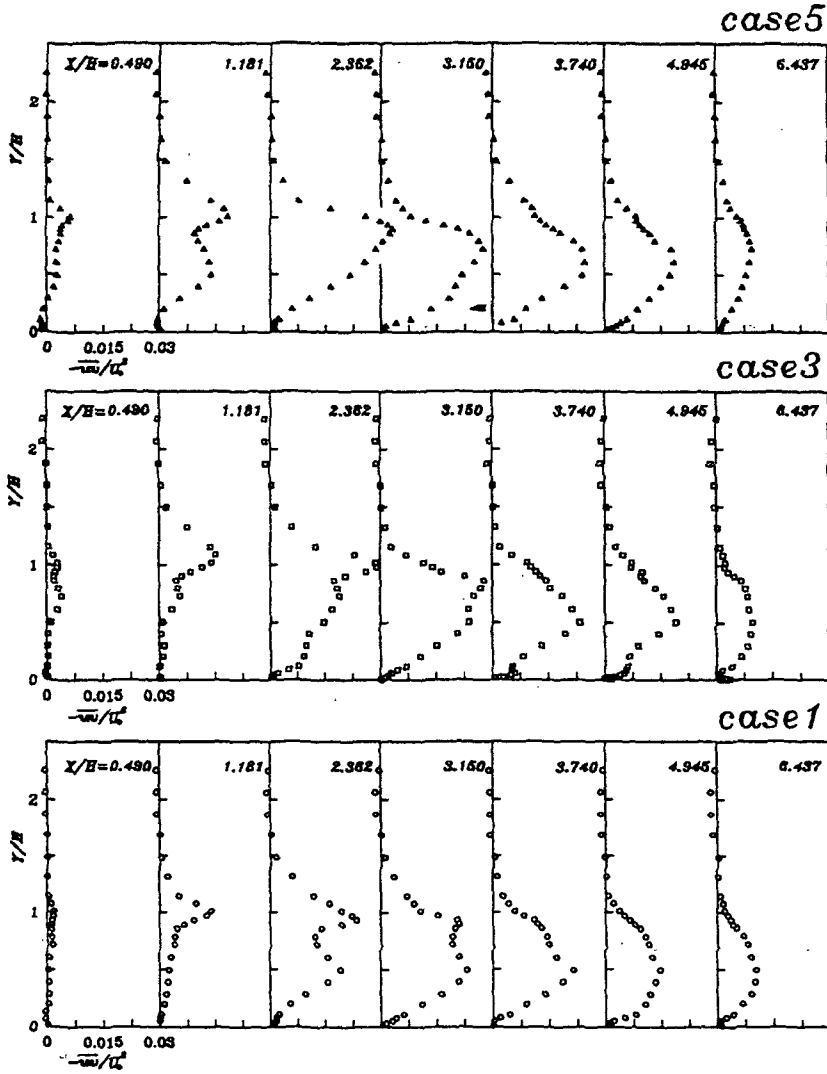


Fig. 11 Turbulent intensity profiles ( $H=\text{constant}$   $U_0=0.52 \text{ m/s}$ )



(c) Reynolds shear stress

Fig. 11 Turbulent intensity profiles ( $H = \text{constant}$ ,  $U_0 = 0.52 \text{ m/s}$ )

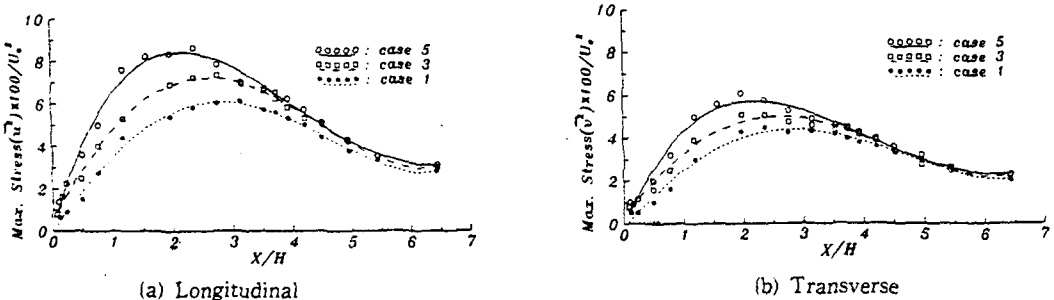


Fig. 12 Streamwise variation of maximum Reynolds stresses ( $H = \text{constant}$ ,  $U_0 = 0.52 \text{ m/s}$ )

리에 걸쳐서 회복되고 있으며, 그 경향은 TVC효과가 클수록 더 크게 나타나고 있다. 또한, Fig. 13(c)에서 보듯이  $X/H=6.4$ 의 같은 위치에서 각 경우의 평균속도는  $D/d$ 의 비가 클수록, 즉 TVC효과가 클수록 log-region의 기울기가 점차 감소하는 결과를 얻었다. 따라서 축대칭 하향단과 같은 형상에서의 흐름은 재순환 영역뿐 아니라 재발전 영역에서도 TVC효과에 따른 영향은 존재함으로, 보다 체계적인 분석을 위하여 이와 같은 영역의 먼 하루까지 실험을 확대할 필요성이 있다고 사료된다.

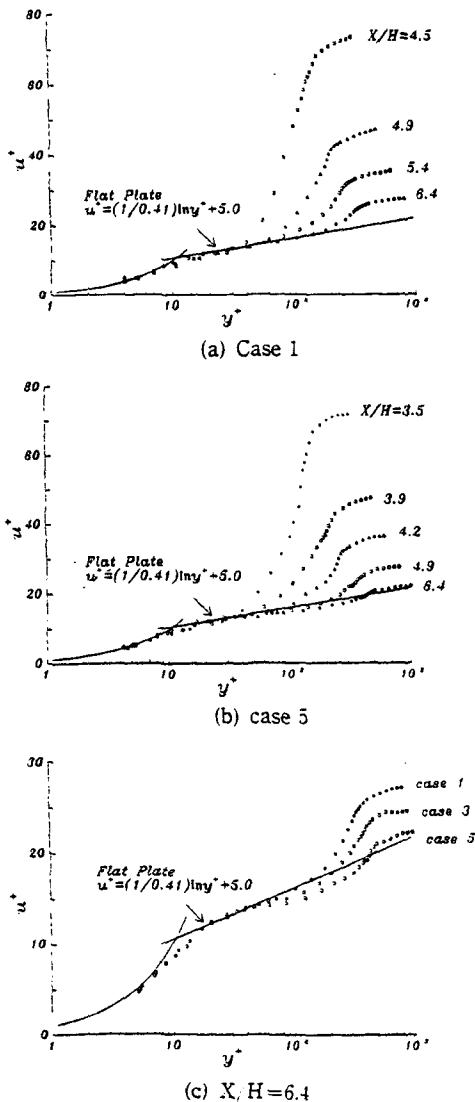


Fig. 13 Mean velocity profiles:  $u^*$  versus  $y^*$  ( $H = \text{constant}$ ,  $U_0 = 0.52 \text{ m/s}$ )

#### 4. 결론

축대칭 하향단 흐름에 대하여 2차원 LDV를 사용하여 실험을 한 결과 기존의 유선의 곡률효과뿐 아니라 반경방향의 요곡률효과도 크게 작용하는 결과를 얻었으므로, 이와 같은 물체의 설계 및 이론 해석에 반듯이 이를 고려해야 한다고 본다.

(1) 본 연구에서의 무차원 재부착길이( $X_r/H$ )는 2차원의 경우에 비하여 짧게 나타나며, 후미원주의 직경이 감소할수록 레이놀즈수가 증가할수록 감소한다. 반면에 후미원주의 직경이 같은 경우 단의 높이가 작을수록 무차원 재부착길이( $X_r/H$ )는 증가한다.

(2) 반경방향의 요곡률이 클 경우 재순환 영역내의 역류속도를 증가시키고 모서리와 구역을 감소시킨다.

(3) 재순환영역내에서 난류에너지는 반경방향의 요곡률효과가 증가함에 따라 커지며, 최대 정점의 위치도 하향단쪽으로 당겨진다.

(4) 반경방향의 요곡률보다는 재순환 영역내에서 난류성분의 수직방향보다는 흐름방향으로 보다 크게 작용한다.

(5) 반경방향의 요곡률이 커질수록 재발달 경계층의 평균속도분포에서 log-region의 기울기가 점차적으로 감소한다.

#### 후 기

본 연구는 '93년도 학술진흥재단 자유공모과제 연구비지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사사를 드린다.

#### 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) Drewry, J. E., 1978, "Fluid Dynamic Characterization of Sudden Expansion Ramjet Combustor Flowfields," *AIAA J.*, Vol. 16, No. 4, pp. 313~319.

- (3) Freeman, A. R., 1978, "Measurements of Velocity and Temperature in the Region Downstream of a Sudden Pipe Expansion," *CEGB Report RD/B/N-4306*.
- (4) Bergeles, G. and Athanassiadis, N., 1983, "The Flow Past a Surface-Mounted Obstacle," *Trans. ASME J. Fluids Eng's*, Vol. 105, pp. 461~473.
- (5) Tropea, C. D. and Gackstatter, N., 1985, "The Flow over Two-Dimensional Surface-Mounted Obstacles at Low Reynolds Numbers," *Trans. of ASME*, Vol. 107, pp. 489~494.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Luxton, R. E., Bull, M. K. and Rajagopalan, S., 1984, "The Thick Turbulent Boundary Layer on a Long Fine Cylinder in Axial Flow," *Aeronautical J.* No. 1200/6, pp. 186~189.
- (9) Denli, N. and Landweber, L., L., 1979, "Thick Axisymmetric Turbulent Boundary Layer on a Circular Cylinder," *J. Hydronautics*, Vol. 13, No. 3, pp. 92~104.
- (10) 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.
- (11) Lee, Y. and Kim, K. C., 1993, "Analysis on Effect of Transvers Convex Curvature on Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer," *Wärme-und Stoffübertragung*, Vol. 28, pp. 89~95.
- (12) 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.
- (13) Ra, S. H., 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.
- (14) 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.