

<논 문>

박리 유선의 곡률 변화가 축대칭 후향계단 흐름에 미치는 영향

김경천* · 부정숙** · 양종필*** · 정지용****

(1995년 11월 15일 접수)

Effect of the Separating Streamline Curvature on the Axisymmetric Backward-Facing Step Flow

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

Key Words : Axisymmetric Backward-Facing Step(축대칭 후향계단), LDV Measurement(레이저 유속계 측정), Separating Streamline Curvature(박리유선 곡률), Reattachment Length(재부착 길이), Recirculating Zone(재순환 영역)

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 separating streamline curvature on the reattachment length and to understand the structure of recirculating flows. Local mean and fluctuating velocity components were measured in the separating and reattaching axisymmetric region of turbulent boundary layer on the wall of convex cylinder placed in a water tunnel by using 2-color 4-beam fiber optics laser Doppler velocimetry. The study demonstrates that the reattachment length increases with increasing separating streamline curvature. It is also observed that the reverse flow velocity and turbulent kinetic energy increase with an increase in the separating streamline curvature. In addition, the behavior of maximum turbulent stresses show that the effect of separating streamline curvature is larger in the region of recirculating zone($X/H < 2$) than in the region of reattachment point.

기 호 설 명

- | | | | |
|---|----------------------------|--------------|---|
| D | : 반원 뿔의 수직 방향 직경 | Re_H | : H를 기준으로한 레이놀즈수 ($Re_H = U_0 H / \nu$) |
| d | : 후미원주의 직경 | Re | : θ 를 기준으로한 레이놀즈수 ($Re_\theta = U_0 \theta / \nu$) |
| H | : 후향계단의 높이 [$= (D-d)/2$] | U_0 | : 자유 흐름 속도 |
| L | : 타원형 반원 뿔의 흐름 방향으로의 타원 반경 | U, V | : X, Y 방향으로의 평균속도 |
| r | : 후미원주 중심에서 횡방향으로의 거리 | u', v' | : X, Y 방향으로의 변동속도의 r. m. s |
| | | $-u'v'$ | : 레이놀즈 전단응력 |
| | | u'^2, v'^2 | : X, Y 방향으로의 난류운동에너지 |
| | | X | : 후향계단에서 흐름 방향으로의 거리 |
| | | X_r | : 재부착점 |
| | | X^* | : 재부착 길이로 무차원화한 흐름 방향 길이, $(X - X_r)/X_r$ |
| | | Y | : 후미 원주표면에서 흐름의 수직방향으로의 |

*회원, 부산대학교 생산기계공학과, 부산대학교 기계기술연구소

**회원, 부산대학교 기계공학과, 부산대학교 기계기술연구소

***회원, 부산대학교 기계기술연구소 전임연구원

****LG전자(주)

- 거리
- Y' : 반원 뿔 끝단표면에서 흐름의 수직방향으로의 거리
- Y_{max} : 후미 원주표면에서 최대 난류운동에너지까지의 수직거리
- δ_0 : 반원 뿔 끝단표면에서의 경계층 두께
- θ : 운동량 두께
- ν : 동점성계수

1. 서 론

종래 축대칭 경계층 흐름에 대한 연구는 2차원 경계층 흐름에 대한 연구에 비해 그 예가 다소 적은 편이나 축대칭 물체의 길이(longitudinal) 방향에 대하여 수직한 단면의 중심에서 횡방향으로 볼록한 곡률(Transverse Convex Curvature, 이하 'TVCC')의 효과가 열 및 운동량 전달에 중요한 영향을 미치고 있음이 이미 밝혀진 바 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 또한 축대칭 후향계단의 경우 TVCC의 영향으로 2차원 경우에 비하여 재부착 길이가 항상 줄어들며, 유동 특성이 선단 반원 뿔과 후미 원주와의 직경비와 강한 상관관계가 있는 것으로 나타났다.⁽⁶⁻⁸⁾ 따라서 축대칭 후향계단(axisymmetric backward-facing step) 물체는 유동의 박리, 재부착 및 재발달 현상과 같은 복잡한 유동장을 동반할뿐 아니라 유동특성도 2차원 후향계단과도 뚜렷이 차이가 나타나므로 공학적으로 대단히 중요한 현상으로 간주된다.⁽⁹⁻¹¹⁾ 특히 재부착 길이에 큰 영향을 미치는 것으로 나타난 몇 가지 인자들에 대한 체계적인 연구는 유동의 박리 및 제어의 관점에서 매우 중요한 문제를 제시해 주고 있다.⁽¹²⁾

한편 유선의 곡률(streamline curvature)로 인하여 경계층 속도분포는 2차원 평판 흐름과는 다르게 되며, 경계층의 곡률효과(curvature effect)가 속도분포에 영향을 미친다. 따라서 종래 많은 연구자들이 난류 재순환 유동을 예측하기 위하여 난류모델들을 이와 같은 형상에 적용시켜 상당히 좋은 결과들을 발표하고 있다. 특히 단순 구배 확산 모델에 비하여 3차 상관관계 모델이 유선의 곡률 영향을 더욱 잘 평가 한 것으로 입증된 바 있으나,⁽¹³⁾ 아직도 유동장내의 위치에 따라서 평균속도 예측의 정확도가 많은 차이를 보이고 있다. 이는 적절한 난류모델의 개발이 중요할뿐만 아니라 실험자료에

대한 신뢰성 확보가 무엇보다 중요한 문제로서 곡률의 영향에 대한 정확한 평가가 반드시 실험적으로 규명되어야 할 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 축대칭 후향계단 주위의 유동특성에 관한 계속적인 연구로서 박리유선의 곡률(separating streamline curvature) 변화가 축대칭 후향계단 흐름에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2성분 레이저 유속계(FLV, Fiber optics Laser Doppler Velocimetry)로 수동(water tunnel)에서 엄밀히 측정하였다. 이때 다른 실험 조건들은 모두 일정하게 유지시키고 단지 박리유선의 곡률만 변화시킴으로써 박리유선의 곡률변화에 따른 난류구조가 어떻게 변하는가를 일부 가시화 실험을 병행하여 실험적으로 자세히 규명하였다. 그러므로 본 연구에서 엄밀하게 측정된 자료는 곧바로 축대칭 후향계단에서 유선곡률 효과를 보다 잘 예측하기 위한 난류 모델 개발의 입력자료로 적절하게 이용되리라 본다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 대상이 될 실험 모델의 형상이 Fig. 1에 나타나 있다. 모델 선단부분의 반원 뿔은 테프론(teflon) 재질을 사용하였으며, 후미 원주는 스테인리스 봉을 사용하였다. 단의 높이(H)는 38.1 mm, 후미 원주의 직경(d)은 25.4mm, 흐름에 수직 방향으로의 반원 뿔 직경(D)은 101.6mm으로 모두 일정하다(Table 1 참조). 그러나 흐름 방향으로의 반원 뿔 반경(L)은 각각 50.8, 101.6 및 203.2mm의 세 가지 경우로 변화시켰는데, 이때 L/D는 각각 0.5, 1.0 그리고 2.0이다. 따라서 Eaton과 Johnston⁽¹¹⁾이 제시한 여러 인자들의 영향은 모두 일정하게 유지하였으므로 본 연구에서 고려한 중요한 물리적 인자는 L/D의 변화이다. 모델은 축대칭 형상으로서 측정체적부의 상류에서

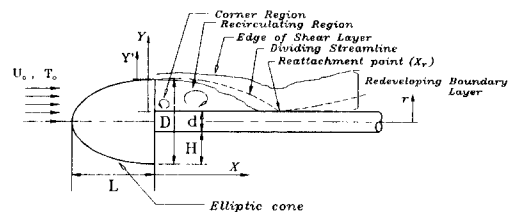


Fig. 1 Flow configuration

Table 1 Specification of the axisymmetric backward-facing step

Case	L (mm)	D (mm)	d (mm)	H (mm)	L/D
1	50.8 (D/2)	101.6	25.4	38.1	0.5
2	101.6 (D)				1.0
3	203.2 (2D)				2.0

$$\text{case 1: } [X^2/(D/2)^2] + [r^2/(D/2)^2] = 1$$

$$\text{case 2: } [X^2/(D)^2] + [r^2/(D/2)^2] = 1$$

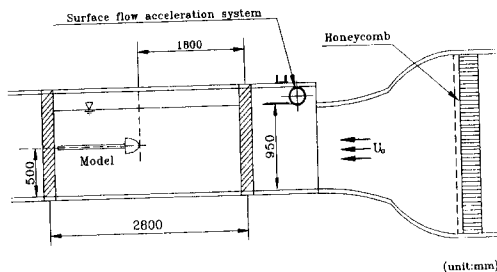
$$\text{case 3: } [X^2/(2D)^2] + [r^2/(D/2)^2] = 1$$

Table 2 The estimated uncertainties of measured quantities

Measured Quantity	Uncertainty Estimate	Remarks
U, V	± 0.02	F-LDV measurements (Refinement bounds $\pm 3\sigma$ for statistical analysis)
$U_{\max, \text{reverse velocity}}$	± 0.022	
$u'^2, v'^2, u'v'$	± 0.03	
X, Y	$\pm 0.01\text{mm}$	
X_r/H	± 0.1	

1,800mm 떨어진 곳에서 측방향이 유동방향과 일치되게 장착된다. (Fig. 2 참조)

실험에 사용한 수동은 총 저수 용량 40톤 규모의 수직 순환형 회류수조로 시험부의 크기는 2,800(L)×1,200(H)×1,800(W)mm³이다. 그리고 속도측정을 위하여 2 color 4 beam의 4 Watt Ar-Ion 레이저와 신호분석기 (IFA 550, TSI)를 사용하였으며, 산란입자로는 평균입자 지름이 1.62 μm 인 TiO₂를 적절하게 이용하였다. 그 외 사용된 실험장치 및 실험방법은 이전의 연구와 동일하다.^(7,8) 본 실험동안 자유 흐름 속도(U₀)는 0.53m/s로 고정하였으며, 단의 높이를 기준으로 한 레이놀즈수 (Re_h)는 약 20,000이다. 한편, 본 실험을 통하여 획득된 자료에 대하여 각각 추정된 불확실성 (estimated uncertainties)은 Table 2와 같다.

**Fig. 2** Experimental setup

3. 결과 및 고찰

3.1 자유 흐름 및 초기 경계층의 상태

모델을 장착하지 않은 상태에서 자유 흐름 속도 (U₀)를 0.53m/s로 고정시키고 측정체적부의 상류에서 1,800mm 떨어진 곳에서 흐름의 수직방향으로의 속도분포를 측정하였다. 그 결과 수직방향으로 300×700mm 내에서 흐름 방향의 속도는 약 $\pm 1.2\%$ 의 균일도를 가지고 있으며, 난류강도 분포는 약 3.5% 정도로 나타났다. Fig. 3은 반원 뿔의 계단, 즉 박리점(X/H=0)에서 경계층(이하 '초기 경계층')의 평균속도 분포를 나타내고 있다. 그 결과 초기 경계층의 두께(δ_0)는 case 1, case 2 및 case 3의 경우 각각 2.8mm, 2.2mm 그리고 1.8mm로 L/D의 비가 커짐에 따라서 초기 경계층 두께가 작아지는 현상을 보였다. 특히 case 1의 경우 표면에서 약 1mm 높이까지 역류가 나타났는데, 이는 구의 층류 박리 지점인 80° 부근을 지나 역시 박리가 반원 뿔의 계단 이전 지점에서 먼저 일어났음을 나타내는 것이다. 이 사실은 형광 염료를 사용하여 관찰한 가시화 실험 결과를 나타낸 Fig. 4를 통해서도 확인할 수 있었다. 이로부터 L/D의 비의 감소는 박리유선의 곡률 증가로 나타났으며, 이와 같은 곡률변화는 박리전단층의 구조 및 재발

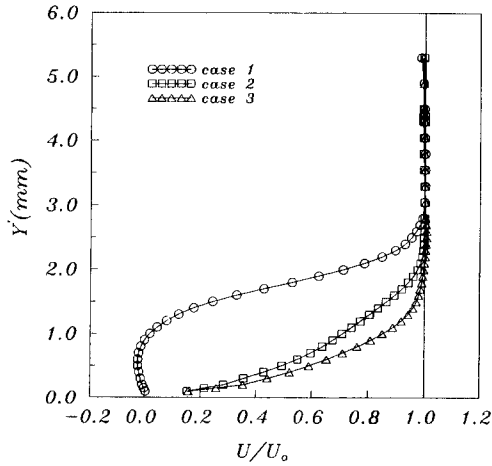
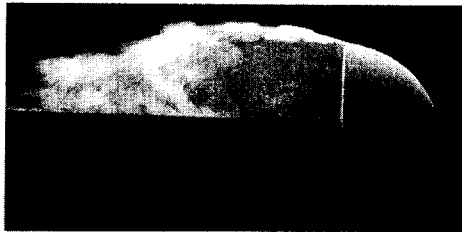


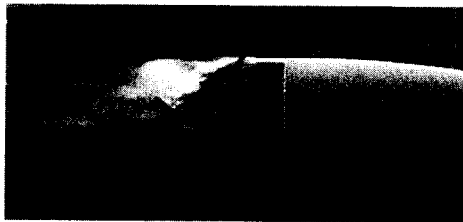
Fig. 3 Mean velocity profiles at $X/H=0$



(a) Case 1



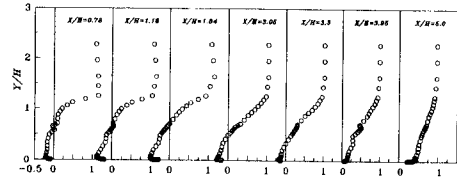
(b) Case 2



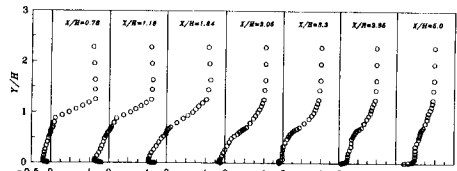
(c) Case 3

Fig. 4 Flow visualization behind axisymmetric backward-facing step using fluorescent dye

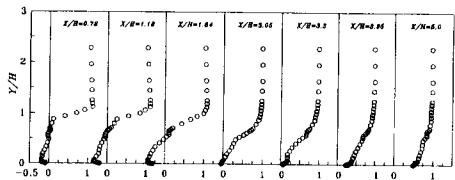
날 경계층의 구조에도 크게 영향을 미치리라 예상된다. 그러나 각 경우 모두 초기 경계층의 상태는 Bradshaw와 Wong⁽¹²⁾이 제시한 $H/\delta_0 > 1$ 의 압도적인 섭동이 있는 경우에 해당되는 것으로 나타났다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 5 Mean velocity profiles, U/U_0

3.2 평균 속도분포

Fig. 5는 자유 흐름 속도(U_0)를 0.53m/s로 고정하고 흐름 방향의 각 지점에서 구한 평균 속도를 자유 흐름 속도와 단의 높이로 무차원한 분포이다. 그 결과 L/D 의 비가 작아짐에 따라, 즉 박리유선의 곡률이 커짐에 따라 재순환 영역내에서의 역흐름이 크게 나타났다. 그리고 역흐름이 없어지는 위치도 각 경우에 따라서 차이가 나타났는데, $X/H = 3.3$ 지점에서 살펴보면, L/D 의 비가 가장 큰 case 3의 경우는 이미 재순환 영역을 벗어났으나 나머지 경우는 아직 역흐름이 존재하고 있는 것을 볼 수가 있다. 이 사실로부터 L/D 의 변화는 박리유선의 곡률 변화로 나타났으며, 그 결과 재부착 길이의 변화에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수가 있다.

한편, 반원뿔 단 높이(H)를 기준으로 하여 $0 < X/H < 6.5$, $0 < Y/H < 2.5$ 구간내에서 평균 속도벡터를 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 또한, 흐름 방향의 각 단면상에서 한계분할유선(dividing streamline, Fig. 6의 실선 부분)을 구하여 같이 표시하였다. 여기서 한계분할유선은 흐름 방향의 각 단면상에서 속도분포의 수치 적분을 통해 구하

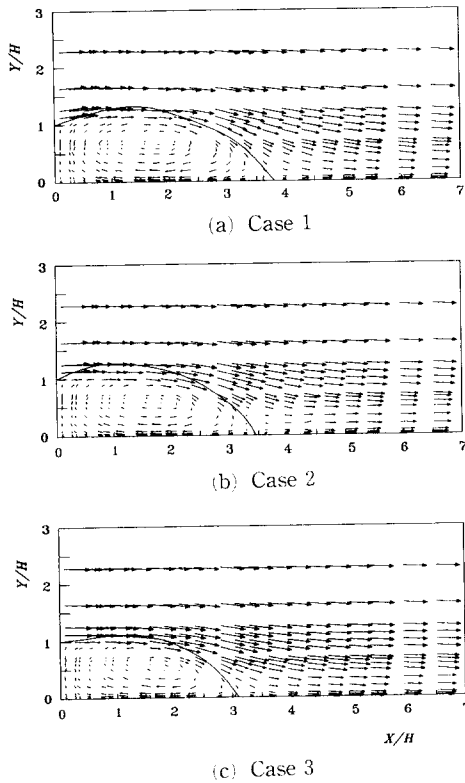


Fig. 6 Velocity vector (-----, Dividing streamline)

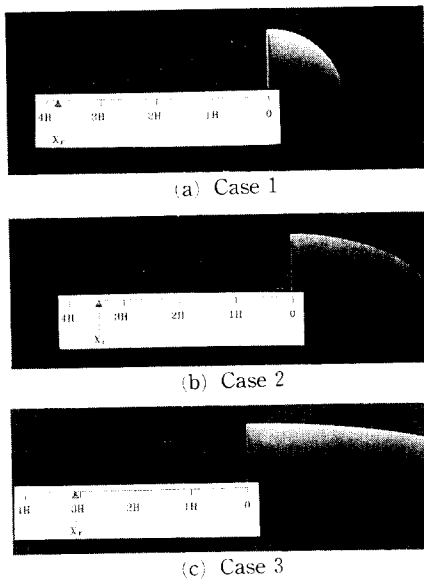


Fig. 7 Comparison of flow pattern visualized behind axisymmetric backward-facing step using Polyvinyl Chloride

였으며, 이때의 적분은 후미 원주의 표면상에서 수직 한 면을 따라서 질량 유입(mass flux)이 영(zero)이 될 때까지 수행하였다. 한계분할유선은 평균적인 의미에서 재순환 영역과 원입구 유동(primary inlet flow)의 분리면으로 간주된다.

본 실험의 모델과 같이 축대칭 후향계단의 경우 2차원 후향계단과는 달리 TVCC 효과가 존재하게

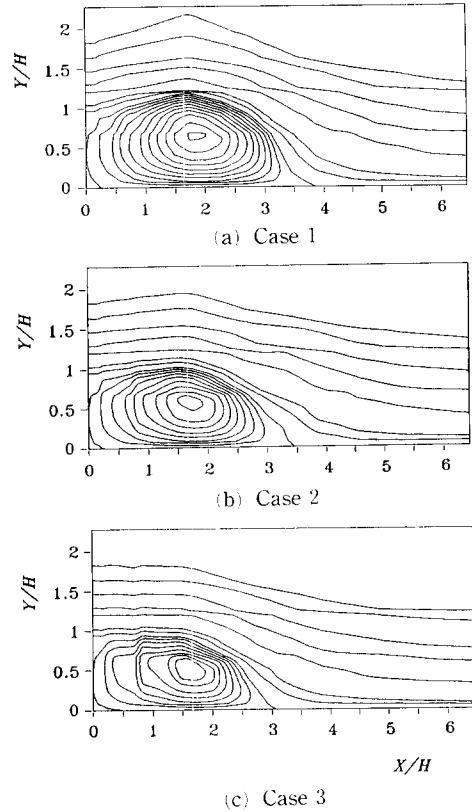


Fig. 8 Streamline pattern

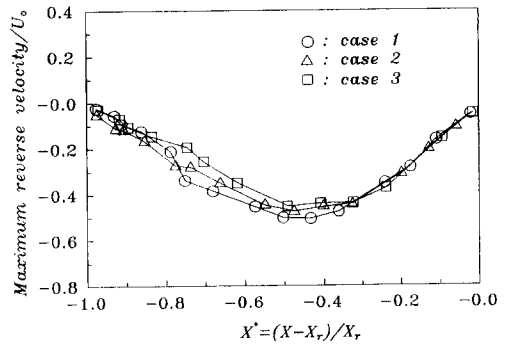


Fig. 9 Distribution of maximum reverse-flow velocity in the recirculating region

되고 동시에 L/D의 영향으로 인한 박리유선의 곡률 변화의 효과가 동시에 작용하게 됨으로써 각 경우 한계분할유선의 곡률에 변화가 발생하였다. 그 결과 재부착 길이는 L/D의 비가 작아짐에 따라 단의 높이 H에 대해 각각 3.1, 3.45, 3.8배로 점차 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 L/D의 비가 가

장 작은 case 1의 경우 case 3에 비하여 약 18.5% 정도 늘어난 것이다. 이와 같은 사실은 H가 일정하고 TVCC 효과가 일정한 경우, L/D의 감소는 우선 초기 경계층의 두께 증가로 나타나고, 이에 따라 재순환 영역내의 정(+)방향 흐름의 확산을 보다 지연시켜 재부착 길이의 증가를 가져온 것으로 생각된다. 한편, Fig. 7은 각 경우에 대하여 평균입자 지름이 $100 \times 200 \mu\text{m}$ 정도인 폴리비닐 입자 (Polyvinyl Chloride)를 사용하여 관찰한 가시화 결과를 보여주고 있다. 전단층과 재순환 영역 사이 상호 유입량의 불균형 등으로 인하여 박리전단층이 매우 불안정한 거동을 함을 확인해 볼 수 있었다. 또한 유속측정을 통한 재부착위치를 보다 가시적으로 관찰함으로써 재부착 과정의 물리적 구조를 보다 쉽게 판단할 수 있었다.

Fig. 8은 유선 함수(stream function, Ψ)를 나타내었다. 이때 Ψ 는 다음과 같은 방법으로 구하였다.

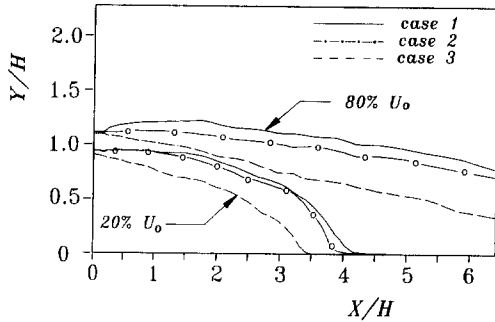
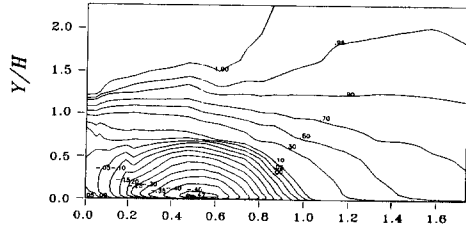
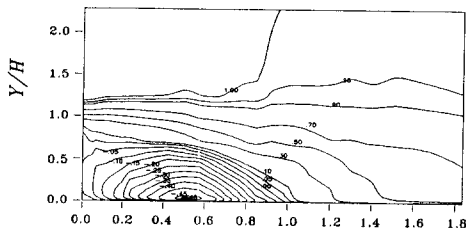


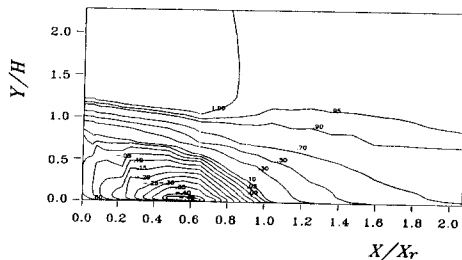
Fig. 10 Locus of points of 20% and 80% free stream velocity



(a) Case 1

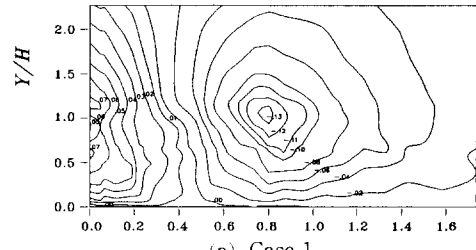


(b) Case 2

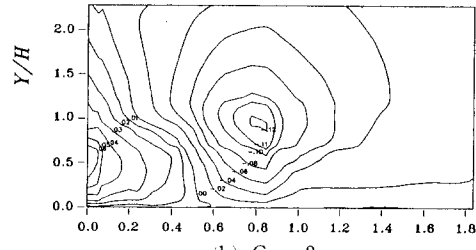


(c) Case 3

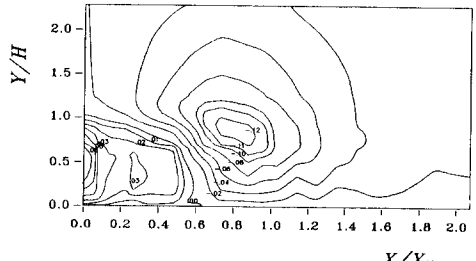
Fig. 11 Streamwise mean velocity contour profiles



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 12 Vertical mean velocity contour profiles

$$\psi = \int_0^y \left(\frac{u}{U_0} \right) dy \quad (1)$$

여기서 나타난 결과는 앞서 살펴본 평균 속도의 벡터 분포의 결과와 잘 일치하고 있으며, L/D의 비가 작을수록 위쪽으로 많이 불룩한 형태로 나타나고 있다. 즉, L/D의 감소는 박리유선의 곡률증가를 의미한다.

Fig. 9는 재순환 영역내의 최대 역류속도(reverse-flow velocity) 크기를 무차원 재부착 길이, $X^* = (X - X_r)/X_r$ 에 대하여 나타낸 것이다. 최

대 역류속도 크기는 $X^* = -0.4 \sim -0.55$ 범위내에서 L/D 비의 감소에 따라 증가하면서 그 정점은 재부착 영역 전방으로 옮겨 나타났다. 또한 재부착 영역으로 접근함에 따라 크기는 급격히 줄어들었으며, 전체적으로 L/D의 변화에 따른 박리유선의 곡률 변화는 재순환 영역내($-0.4 < X^*$) 평균 속도장의 유동 형태보다는 회복 구역에서 상대적으로 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

Fig. 10은 각 경우에 대한 유동의 확산비를 비교해 보았다. L/D의 비가 작아질수록 전단층의 확산

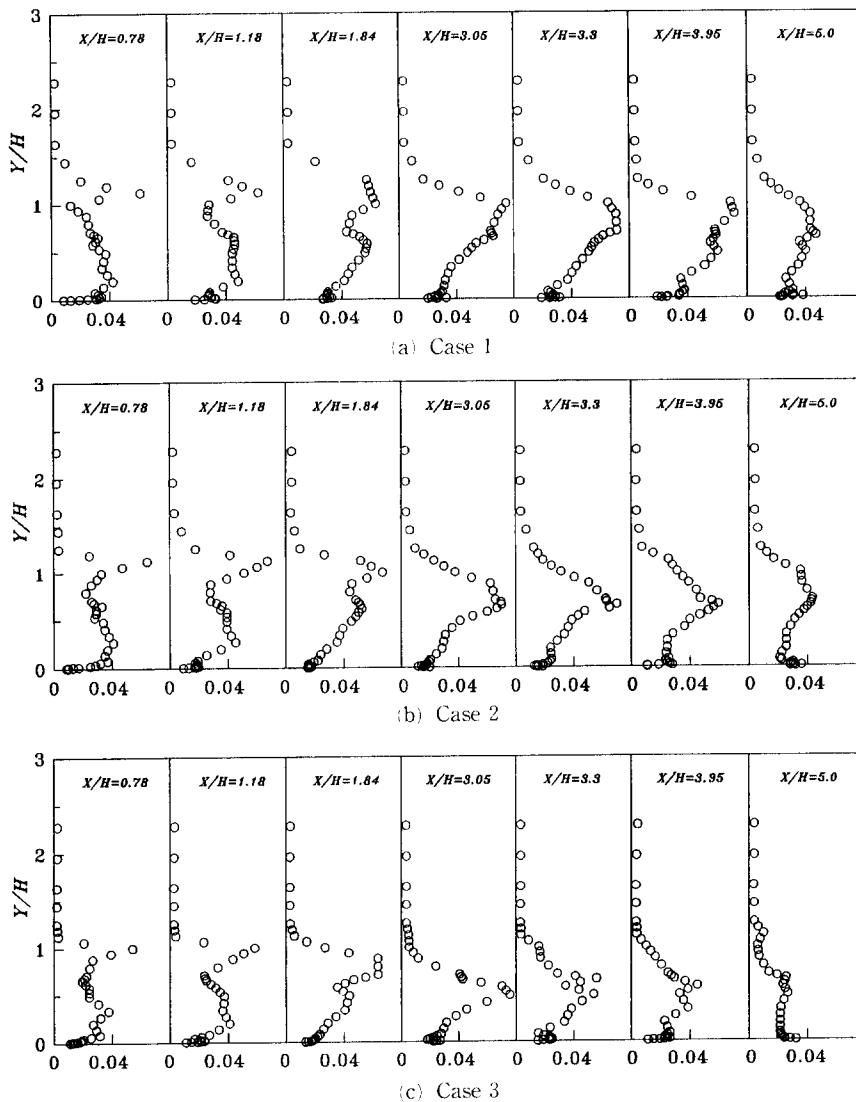


Fig. 13 Streamwise turbulent normal stress profiles

정도가 점차 하류측으로 지연되고 있는 것으로 나타났다. 즉, 박리유선의 곡률이 증가할수록 난류 혼합에 의한 전단층의 확산이 더디게 일어남으로써 재부착 길이를 점차 증가시킨 것으로 생각된다. 이는 반원 뿔의 형상이 다름으로 인하여 생기는 압력 저항의 차이 만큼에 해당하는 효과가 박리 전단층의 확산에 영향을 미친 것으로 볼 수 있다. 즉, 박리유선의 곡률이 큰 경우가 선단 쪽으로 작용하는 흡입압력(suction pressure)도 그 만큼 약화됨으로 인하여 전단층의 확산이 훨씬 더디게 일어나게 되

고, 그 결과 재부착 길이도 흐름 방향으로 점차 후퇴된 것으로 보인다.

Fig. 11와 Fig. 12는 평균 속도 흐름 방향과 수직 방향으로의 등속도선 분포를 각각 표시하고 있다. 재순환 영역내에서의 최대 역류속도는 안정한 역류 영역에서 자유 흐름 속도의 약 42~47%까지 측정되었는데, 이는 2차원 후향계단의 경우 20~25%인 점을 감안할 때 훨씬 큰 값을 보이고 있으며, 이전의 실험결과와도 잘 일치하고 있다.^(7,8) 대체로 L/D의 비가 감소함에 따라 최대 역류 속도를 나타내

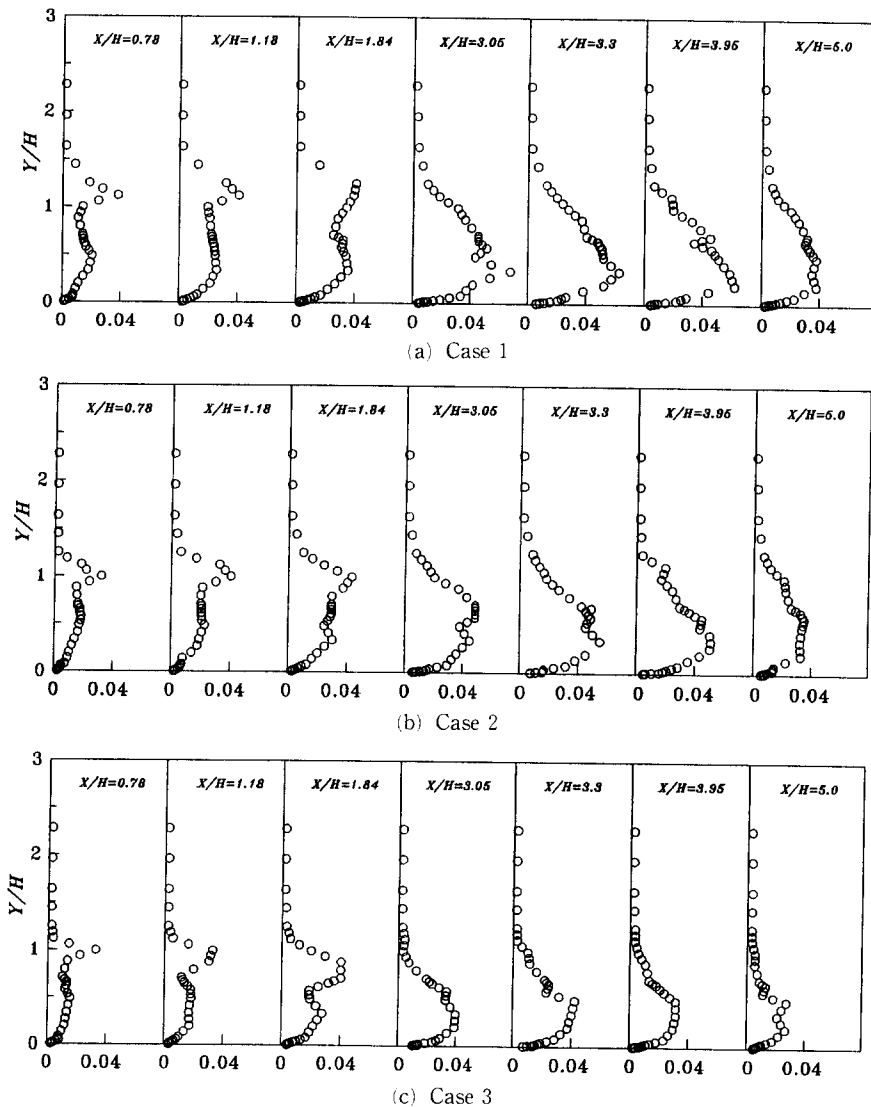


Fig. 14 Vertical turbulent normal stress profiles

는 영역이 후향계단 쪽으로 점차 접근하고 있음을 알 수 있다. 또한, 수직 방향으로도 L/D 의 비가 감소할수록 최소값의 크기는 증가하는 경향으로 나타났다. 위쪽 방향(+)으로의 흐름 구간이 L/D 의 비가 증가함에 따라 점차 쪼그러들면서 감소하고 있음을 보여준다. 즉, 수직 방향의 흐름이 원주표면쪽으로 향하는 경향이 강해짐을 보여주고 있는 것이다.

3.3 난류 유동 특성

후향계단 주위의 흐름에 대해서는 지금까지 많은

실험을 수행해 왔지만 비교적 최근까지도 평균 속도와 난류장의 측정이 힘들었다. 왜냐하면 박리 재부착 흐름에서 나타나는 재순환 영역은 흐름의 속도 크기는 작지만 큰 비정상 난류 떨림이 존재하며, 역흐름 또한 빈번하기 때문이다. 또한 종래의 측정 데이터는 이와 같은 고난류장에서의 사용이 부적절한 X-프로브의 결과가 대부분인데, 재부착 전단층의 중심 부근에서 국소 난류 강도가 30%가 넘어설 경우 열선 프로브는 실제 난류값 보다 작은 값을 나타낼 수 있다. 최근에 들어서야 레이저 유속계나 pulsed-wire 유속계 등이 개발되어 이에 대

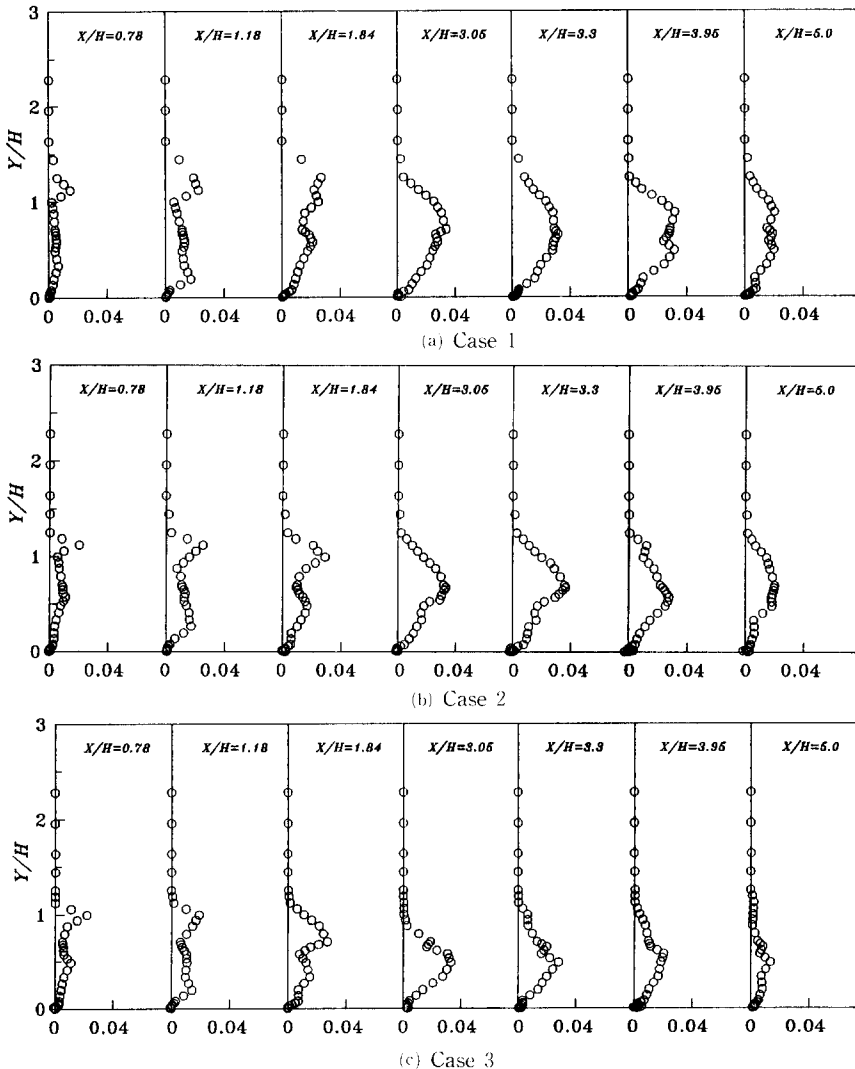


Fig. 15 Turbulent shear stress profiles

한 보다 체계적인 조사가 이루어지고 있으나, 아직도 벽면 부근을 비롯하여 수치 해석을 위한 자료는 전반적으로 미흡한 실정이다.

Fig. 13, Fig. 14 그리고 Fig. 15는 각각 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, $-\overline{u'v'}$ 의 분포를 재부착 지점을 지난 $X/H=5.0$ 지점까지를 나타낸 것이다. 재부착 영역 전방의 재순환 영역내인 $X/H < 2$ 의 영역에서는 $Y/H=1.0$ 부근에서 각 난류 응력의 최대점이 위치하고 있다. 그렇지만 L/D 의 비가 작아질수록 그 최대점의 위치는 위쪽으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 재순환 영역 내에서의 각 난류응력값의 분포 형태는 비교적 각 경우가 비슷한 모습을 보이고 있지만, 재부착 지점에 가까이 갈수록 각 경우가 상당한 차이가 나타남을 알 수가 있다. 여기서 각 난류값의 최대값은 재부착 지점 근처에서 나타나고 있음을 알 수 있고, 재부착 지점 근방에서 각 난류응력값의 크기 또한 현격한 차이가 나타남을 알 수가 있다.

또한 최대 난류응력값을 가지는 지점의 후미원주 벽면으로부터의 흐름 수직 방향으로의 거리(Y_{max})는 재부착 지점으로 갈수록 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 각 난류응력값의 차이가 가장 심한 경우가 $\overline{u^2}$ 의 경우로 나타났으며, 이 경우 L/D 의 비가 감소할수록 Y_{max} 는 재부착 부근에서 커짐을 알 수가 있다. 그리고 각 난류응력값은 재부착 지점을 지나 급격히 작아지면서 재부착 경계층의 형태로 회복되는 것으로 나타났는데, 대체로 L/D 의 비가 증가할수록 다소 빠르게 나타났다. 전체적으로 L/D 의 변화에 의한 박리유선의 곡률 증가는 재부착 길이의 증가와 더불어 재순환 영역내의 난류응력값의 증가로 나타나고 있음을 볼 수가 있다. 이와 같은 영향은 선행 연구^(7,8)에서 밝혀진 축대칭 후향계단 주위의 유동특성을 지배하는 많은 인자, 즉 TVCC 효과의 변화, 초기 경계층 두께의 변화 그리고 자유흐름 난류강도의 변화에 의한 영향과 함께 박리 재순환 흐름에 영향을 미치는 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

Fig. 16은 흐름 방향과 수직 방향으로의 난류 응력과 레이놀즈 전단응력의 최대값의 크기를 각각 하류 방향에 대하여 나타내었다. 앞서 보았듯이 각 방향으로의 난류 응력은 점차 증가하다가 재부착 영역을 지나면서부터 모두 급격히 감소를 하였다. 전체적으로 각 난류응력값은 L/D 의 비가 감소할수록 증가한 것으로 나타났다. 특히, 재순환 영역내

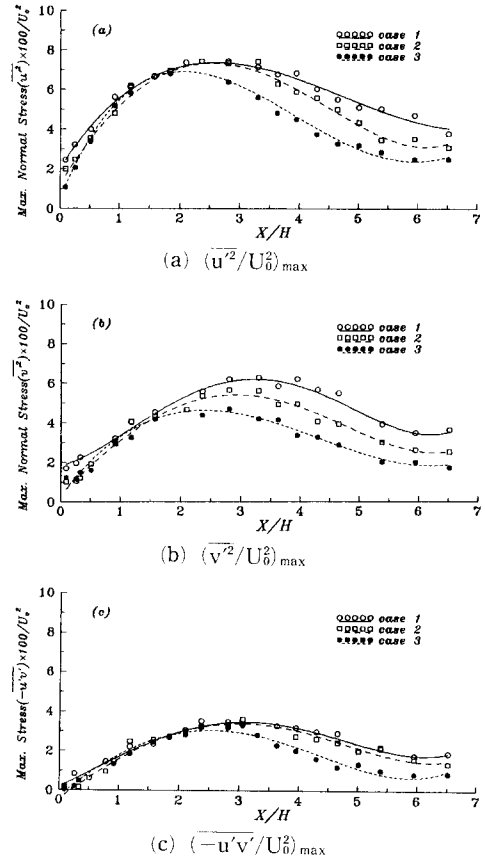


Fig. 16 Behavior of maximum turbulent stresses

인 $X/H < 2$ 인 영역까지는 각 난류 응력값의 최대치가 거의 차이가 없었지만 이 영역을 벗어나서는 상당히 큰 차이가 나타남을 보이고 있다. 이는 전단층의 재부착 과정이 박리유선의 곡률변화로 인하여 크게 영향을 받고 있음을 말해 주고 있다. 전체적으로 그 크기는 흐름 방향, 흐름의 수직 방향, 레이놀즈 전단응력 순으로 난류응력값이 크게 나타난다.

4. 결론

축대칭 후향계단 흐름에 대하여 박리유선의 곡률을 변화시켜 2차원 LDV를 사용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 본 실험의 결과 반원 뿔의 길이(L)와 직경(D)의 비, L/D 의 변화는 박리유선의 곡률에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, L/D 의 비가 감소할

수록 박리유선 곡률이 증가하는 것으로 나타났다.

② 박리유선의 곡률 효과로 L/D 의 비가 작을수록 전단층의 확산 정도가 점차 하류 쪽으로 지연되고 재부착 길이도 늘어나는 것으로 나타났다.

③ 박리유선의 곡률 변화의 영향은 재순환 영역 내에서 재부착 영역인 $-0.4 < X^*$ 에서 보다는 선단 쪽의 평균 속도에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 또한 최대 역류 속도의 크기 또한 L/D 의 비가 작을수록 크게 나타남을 알 수 있었다.

④ L/D 의 비가 작을수록 재순환 영역내의 역류 속도와 난류 운동에너지는 증가하는 것으로 나타났고, 특히 $X/H < 2$ 인 영역 부근까지는 각 난류 운동에너지 차이가 많이 없었지만, 재부착 지점 근방으로 접근함에 따라 상당한 차이가 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Denli, N. and Landweber, L., 1979, "Thick Axisymmetric Turbulent Boundary Layer on a Circular Cylinder," *J. Hydronautics*, Vol. 13, No. 3, pp. 92~104.
- (4) 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.
- (5) Lee, Y. and Kim, K. C., 1993, "Analysis on Effect of Transverse Convex Curvature on Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer," *rme-und Stoff bertragung*, Vol. 28, pp. 89~95.
- (6) 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.
- (7) 김경천, 부정숙, 양종필, 1994, "Experimental Study on the Flow Behind an Axisymmetric Backward-Facing Step," 대한기계학회논문집, 제18권, 제9호, pp. 2463~2476.
- (8) 부정숙, 김경천, 양종필, 1995, "Effect of the Separating Shear Layer on the Flow Over an Axisymmetric Backward-Facing Step," 대한기계학회논문집, 제19권, 제4호, pp. 1102~115.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Eaton, J. K. and Johnston, J. P., 1980, "Turbulent Flow Reattachment: An Experimental Study of the Flow and Structure Behind a Backward-Facing Step," *Report. MD-39, Thermosciences Div., Dept. of Mech. Eng., Stanford Univ.*
- (12) 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.
- (13) 박상우, 1986, "Development of Curvature Dependent Two-Equation Model for Prediction of Two-Dimensional Turbulent Recirculating Flows," Ph.D. Thesis, KAIST.