

<論 文>

급확대 - 축소 연결부 주변의 원관 난류유동에 관한 실험적 연구

박 병 서* · 성 형 진** · 정 명 균*

(1989년 4월 7일 접수)

Experimental Study on the Turbulent Flow Field in a Sudden Expansion-Contraction Pipe Joint

Byung Suh Park, Hyung Jin Sung and Myung Kyoon Chung

Key Words: Sudden Expansion-Contraction Joint(급확대 · 축소 연결부), Flow Separation and Reattachment(유동박리 및 재부착), Cavity Flow Structure(공동유동구조), Backward Facing Step Flow(후방계단유동)

Abstract

The flow structure in a sudden expansion-contraction joint in a pipe is experimentally investigated. The turbulent velocity field is measured by using a single channel LDV system. Mathematical relations between forward-scattered signals from incident beams at three different angles permit measurements of Reynolds stress components, $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$ and \overline{uv} . The static wall pressure distribution in the streamwise direction is also measured by tapping a number of small pressure holes in the expansion-joint wall. The expansion-joint length(L) to step height(H) ratios were $L/H=5.45, 10.9$ and 16.4 . For the cases, $L/H=5.45$ and 10.9 , the flows turn out to have cavity-like flow structure, whereas in the last case, $L/H=16.4$, the mean flow reattaches at about the distance 10.5 times the difference in radii of two pipes from the sudden expansion, and shortly later re-separates again to reach the exit of the expansion-joint. The profiles of the Reynolds normal stresses, $\overline{u^2}$ and $\overline{v^2}$, and the shear stress, $-\overline{uv}$, are discussed in details in comparison with those of other axisymmetric sudden expansion flows.

기 호 설 명

<p>C_p : 압력계수, $C_p = (P - P_{ref}) / \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$</p> <p>$C_L$: 압력손실계수, $C_L = (P_{ref} - P_{ds}) / \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$</p> <p>$D$: 입구관 직경, $D=110\text{mm}$</p> <p>H : 턱 높이, 입구관의 반경과 연결관의 반경 차이, $H=55\text{mm}$</p>	<p>L : 연결부의 길이, $L=300\text{mm}$(CASE I), 600mm(CASE II), 900mm(CASE III)</p> <p>P : 연결부의 벽면압력</p> <p>P_{ds} : 급축소점으로부터 75mm 하류의 벽면압력</p> <p>r : 반경방향 좌표, 연결부 중심선으로부터의 거리</p> <p>R : 연결부의 반경, $R=110\text{mm}$</p> <p>U^* : 마찰속도</p> <p>U : 주유동방향의 평균속도</p>
--	--

*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

**정회원, 한국과학기술대학 기계재료공학부

- U_{ref} : 기준속도, 급확대점으로부터 70mm 상류의 중심속도
 U^+ : 주유동방향의 무차원 평균속도, U/U^*
 u', v', w' : 주유동방향, 반경방향, 원주방향의 요동속도
 uv : Reynolds 전단응력
 X : 주유동방향좌표, 급확대점으로부터의 거리
 Φ : 유동함수
 y^+ : 원관벽으로부터의 무차원 거리
 $y^+ = U^*y/\nu$
 y : 원관벽으로부터의 거리, $y=R-r$
 ν : 공기의 동점성계수
 ρ : 공기의 밀도

하첨자

- d : 분리유선
 ds : 급축소점으로부터 75mm 하류
 L : 압력손실 (pressure loss)
 ref : 기준점, 급확대점으로부터 70mm 상류

1. 서 론

본 논문은 급확대·급축소되는 원관내의 난류유동에 대해서 박리 및 재부착현상에 관한 실험적 연구를 나타낸다. 이에 관련된 연구로서는 유동단면이 급확대되는 관유동이나 평면 2차원 관유동을 중심으로 이루어져 왔으며, 유동장에 수직벽(fence)이나 장애물(bluff body)이 설치되어 있는 경우에 대한 연구도 진행되고 있다. 유동단면이 급축소되는 경우에 대한 연구로는 전방계단에서의 초음속유동이나 아음속인 경우의 층류 급축소 관내유동에 대해서 소수의 연구가 이루어져 있는 상태다. 한편 본 논문에서 다루고자하는 유동단면이 급확대된 후 다시 급축소되는 경우에 대한 연구는 Durst⁽¹⁾의 이중수직벽(double fence) 주변의 난류 유동에 대한 실험결과가 있을 뿐, 거의 연구가 이루어져 있지 않다.

급확대 유동에 관한 기존 연구 결과를 살펴보면, 박리 및 재부착유동에서 가장 중요한 매개변수는 재부착 길이라고 알려졌다⁽²⁾, Back과 Roschke⁽³⁾는 재부착 길이가 Reynolds 수에 따라 층류에서는 Reynolds 수에 비례하고 천이영역에서는 급격하게 반비례하며 난류영역에서는 거의 일정하다고 보고하고 있다. 한편 Kuehn⁽⁴⁾은 재부착길이가 유동방

향의 압력구배에 비례한다고 보고하고 있다. Bradshaw와 Wong⁽⁵⁾은 재부착영역을 지나 하류로 가면서 전단응력의 최대치가 급격하게 감소하고, 각단면의 평균속도분포가 대수법칙(logarithmic law)에서 벗어나는 현상을 보여 주었으며, 따라서 이 영역에서는 국소평형이 성립하지 않으며, 재부착점으로부터 이영역의 전단층두께의 약 30배 하류까지는 기존의 대수법칙을 적용할 수 없다고 발표했다. Chandrsuda와 Bradshaw⁽⁶⁾은 2차 및 3차 속도상관관계를 열선(hot wire)으로 측정하여 재부착영역하류에서 반경방향으로의 전단응력 및 3차 속도상관관계가 줄어든다고 발표했다. Armaly와 Durst⁽⁷⁾ 등은 후방계단유동에서 LDV를 이용하여 기존에 알려진 재순환영역외에 크기가 상대적으로 매우 작은 두개의 재순환흐름이 존재함을 찾아내고 유동장을 vortex dynamics를 이용하여 설명했다. Westphal과 Johnston⁽⁸⁾은 2 차원 후방계단난류유동에서 계단 높이와 입구조건변화에 따른 재부착영역 근처의 압력, 표면마찰 및 전방유량비(forward flow ratio) 등의 일반성을 찾아냈다.

유동단면이 급축소되는 유동에 대한 연구를 살펴보면 Durst 등^(9,10)은 급축소 관내층류유동에서 급축소점 앞의 재순환영역의 유동방향 길이가 Reynolds 수에 비례함을 찾아냈다. Fraser와 Siddig⁽¹¹⁾은 수직벽(fence) 하류의 난류유동에서 LDV를 이용하여 재부착길이가 벽높이의 11배가 됨을 찾아내었으며 Tropea와 Gackstatter⁽¹²⁾는 낮은 Reynolds 수에서 2차원 장애물(obstacle)에 대하여 재부착길이가 Reynolds 수에 따라 층류에서는 비례하고, 천이영역에서는 급격하게 반비례하며, 난류영역에서는 일정함을 실험적으로 찾아냈다.

이제까지의 연구결과를 전체적으로 살펴보면 박리 및 재부착에 관한 연구는 급확대유동에 대해서는 많은 결과들이 발표됐으나 급축소유동에 대한 연구는 최근에 이르러 층류를 대상으로 소수의 연구가 이뤄졌음을 알 수 있다. 급축소관내 난류유동에 대한 연구결과가 미미한 이유는 전방계단유동(forward facing step flow)에서 발생하는 재순환영역의 크기가 후방계단유동(backward facing step flow)에서 발생하는 재순환영역의 크기에 비해 매우 작을 뿐 아니라 난류유동인 경우에는 층류유동에 비해 재순환영역의 크기가 더욱 작아서 유동특성의 측정상에 난점이 있기 때문으로 생각된다. Fig. 1은 급축소점과 급확대점 사이의 길이

(Fig.1 (b)에서 L)에 대한 입구의 턱 높이(Fig. 1(b)에서 H)의 비에 따라서 관내의 일반적인 유동특성을 보여준다.

즉 급축소점과 급확대점 사이의 길이 L 이 입구의 턱높이 H 에 비해 어떤 값보다 짧으면 공동유동(Fig. 1(a))의 형태를 갖게되고, L 이 H 에 비해 길면 박리 및 재부착유동(Fig. 1(b))이 되어 급확대영역에 재순환영역이 형성되고, 재부착이후 급축소영역에서 급확대영역의 재순환영역에 비해 매우 작은 또하나의 재순환영역이 존재하게 된다. 본 연구에서는 H 를 고정하고 L 을 변화시켜가며 내부의 유동구조가 어떻게 변하는가를 살펴보고, 특히 재부착이 일어나는 경우에는 급확대 부분만 존재하는 기존 실험결과와 비교분석하여 하류의 급축소부분이 전체 유동구조에 어떤 영향을 미치는가를 살펴보고자 한다. 실험에서 사용된 작동유체는 공기이며, 입구관 직경은 110mm, 급확대점과 급축소점사이의 연결부 직경은 220mm, 연결부의 길이는 $L=300, 600$ 그리고 900 mm의 3가지를 선택하였으며 기준속도는 입구관의 중심속도로 9.71 m/s이다. 입구직경(110mm)을 기준으로 한 Reynolds 수는 $Re=73,000$ 이고 입구관반경과 연결부반경의 차이인 계단높이($H=55$ mm)를 기준으로 하면 $Re=36,500$ 이다. 연결부의 급확대부분에서 입구관반경을 기준으로 한 반경확대비는 2이고 급축소부분의 반경축소비는 1/2이다. 측정항목은 유동방향의 벽

면압력분포, 유동방향의 평균속도분포및 난류강도 등이며, $L=900$ mm인 경우는 반경방향과 원주방향의 난류강도, Reynolds 전단응력도 측정되었다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

풍동은 LDV사용시에 필수적인 산란입자의 용이한 공급, 균일한 입자분포, 그리고 재순환영역에서 입자의 농도를 높이기 위해 Fig. 2와 같이 순환형으로 구성하였다.

송풍기(3.0HP, 풍량 $4.5\text{m}^3/\text{min}$)는 진동이 전달되지 않도록 하기 위해 흡입측과 토출측에 비닐관을 사용하여 순환관과 연결하였으며 측정부(test section)는 송풍기의 흡입측에 가깝게 설치했다. 송풍기의 토출측에서 허니컴(Honey-comb)까지는 직경이 200mm인 PVC 관을 연결하고 허니컴부터 측정부 입구까지는 직경이 110mm, 길이 4m인 아크릴 원관으로 연결했다. 측정부인 급확대-축소점 사이의 연결부의 길이는 실험조건에 따라 $L=300$ mm, $L=600$ mm 그리고 $L=900$ mm로 교체조립할 수 있도록 하였다. 급축소연결부에서는 다시 직경 110mm의 원관으로 송풍기의 흡입측에 연결했다. 측정부입구의 속도를 반경방향에 대해 대칭으로 얻기 위해 순환형의 원관이 굽은 후에 발생하는 비대칭 속도분포를 급축소된 유로를 사용하여 파괴한 후, 정류실(settling chamber)을 거쳐 허니컴을 통과시킨 후 철망(screen)을 통과시켰다.

Fig. 3은 속도측정시 레이저광의 경로와 측정부의 단면을 나타냈다. 측정부의 단면은 Moon⁽¹³⁾ 등의 측정부의 단면과 같이 관의 길이방향으로 일부

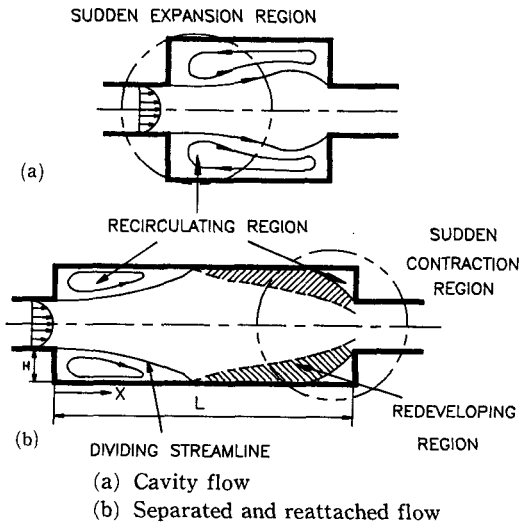


Fig. 1 Flow regimes in the present experiments

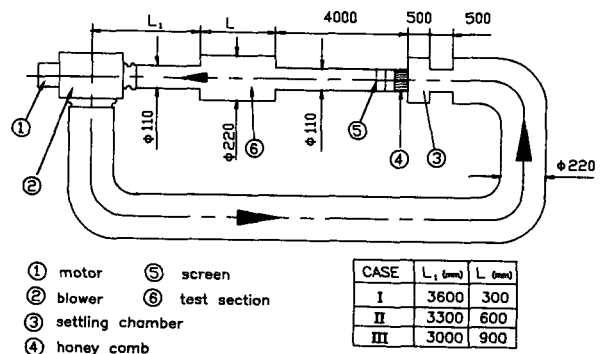


Fig. 2 Schematic diagram of a wind tunnel

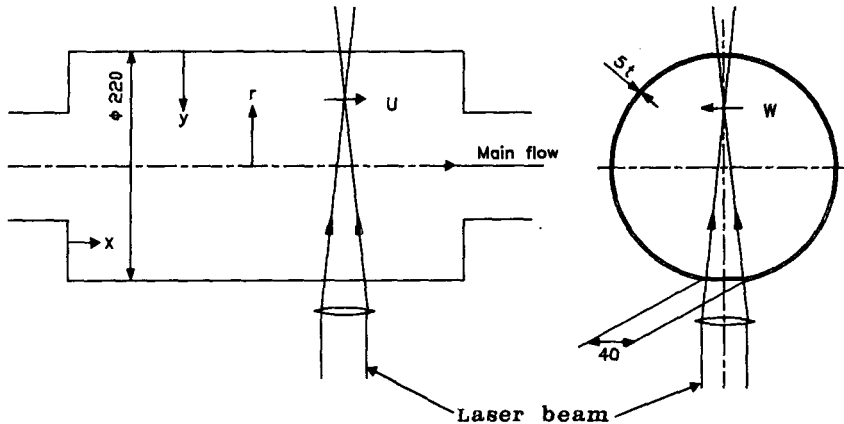


Fig. 3 Arrangement of laser beams of a single channel LDV and a flat narrow window fabricated into the test section wall and the coordinate system

를 절단한 후에 폭 40mm, 두께 5mm의 아크릴평판을 부착하였다. 이것은 곡면인 연결관벽을 통과하면서 레이저광의 굴절에 의한 측정점의 위치변화를 정확히 알기 위한 것이며, 실제 측정은 아크릴평판을 부착한 반대쪽에서 실시하였다.

2.2 압력측정방법

측정부의 벽면압력은 연결관벽에 직경 1mm의 압력공(pressure tap)을 가공하여 scanni-valve(JS48 Scanni Co.)와 연결하고, manometer(Furness Inc. FC-012)를 사용하여 측정했으며, 이 압력값을 마이크로 컴퓨터(IBM-XT)에 전송하여 처리했다. 급속소부가 없는 급확대유동(sudden expansion flow)과 압력분포를 비교하기 위해 연결부의 급속소부를 제거한 상태에서도 벽면압력을 측정하였다. 압력값의 처리는 한점에 대해 500개의 압력값을 한조로 하여 시간평균값을 구하고, 연결관의 길이가 $L=300\text{mm}$ 인 경우에는 10조, $L=600\text{mm}$ 와 $L=900\text{mm}$ 인 경우는 각각 5조에 대한 평균값을 최종결과로 삼았다. 이 때, 벽면압력계수, C_p 는 다음과 같이 정의하였다.

$$C_p = (P - P_{ref}) / \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$$

또한 급확대점로부터 $X=-70\text{mm}$ 상류지점과 급속소점에서부터 하류 75mm되는 지점 사이의 벽면압력값을 이용하여 이들 두지점 사이의 압력강하를 나타내는 압력손실계수 C_L 을 다음과 같이 정의하였다.

$$C_L = (P_{ref} - P_{as}) / \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2$$

여기서 기준압력(P_{ref})과 기준속도(U_{ref})는 측정부입구인 급확대점으로부터 $x=-70\text{mm}$ 인 상류지점의 벽면정압력(wall static pressure)과 중심속도(center-line mean velocity)이다. 또한 P_{as} 는 급속소점에서부터 하류방향으로 75mm에서 측정된 벽면압력이다.

2.3 속도측정방법

속도측정은 LDV(TSI 9100-3, 1 component)를 사용하여 이중광선 방식(dual beam mode)으로 Doppler 신호를 발생시킨 후 전방산란광(forward scattering beam)을 감지하여 Counter(TSI 1990 c)에서 신호처리를 하였다. 또한 역방향유동을 측정하기 위해 주파수편이기(TSI 9180)를 이용하였다. 속도값의 처리는 측정점에서 발생한 Doppler 신호를 Counter에서 속도에 해당하는 전압신호로 바꾼 후 마이크로 컴퓨터(IBM-XT)로 전송하여 처리했다. 산란입자는 크기가 평균 $2 \mu\text{m}$ 인 MgO 가루를 사용했다. 속도측정은 연결관벽으로부터 약 3mm떨어진 지점까지 수행되었다. 이것은 벽면 근처에서 산란입자의 농도가 낮고 레이저광이 관벽에서 산란을 일으켜 측정체적(measuring volume)에서 발생한 산란광의 강도가 상대적으로 약해져 Doppler 신호가 감지되지 않기 때문이다. 속도값의 감지 신호율(signal validation rate)은 벽과 벽 근처 15mm 사이에서는 100 Hz정도였으며 그 밖

의 지역에서는 최고 10 kHz에 이르렀다. 각점에서 평균속도 및 요동속도(velocity fluctuation)의 값은 1024개의 데이터를 한조로 하여 시간평균을 취하였으며, 다시 이러한 시간평균값의 4조를 평균하여 연결부의 길이가 900mm인 경우는 5번을 반복하고 그이외의 경우는 3번을 반복하여 결정했다. 측정위치는 반경방향으로 5mm간격이고, 주유동방향으로는 55mm 간격이다. 재부착영역의 벽면근처에서는 재부착위치를 정확하게 찾기위해 주유동방향을 따라 10mm간격으로 측정하였고, 급축소영역에서는 급축소점으로부터 25mm 상류까지 측정하였다.

Reynolds 전단응력을 측정하기 위해 Logan⁽⁶⁾의 방법을 이용하여, 측정점을 중심으로 LDV를 회전시켜 서로 다른 세 각도에서 속도를 측정하였다. Logan의 방법은 한점에 대해 서로 다른 세각도에서 속도값(평균속도 및 요동속도값)을 측정하여 전단응력을 계산해 내는 방법이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4(a)에는 측정부 입구로부터 $X = -70\text{mm}$ 상류에서 유동방향의 무차원 평균속도분포를 보여주고 있다. Fig. 4(a)로부터 입구에서 반경방향으로 속도분포가 거의 축대칭을 이루고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(b)는 측정부입구직전 $X = -70$

mm에서 X 방향의 난류강도를 보여주고 있다. 벽에 매우 가까운 부분에서는 약 8%의 난류강도를 가지며 중심선상에서는 약 4%정도로서 일반 관유동에 비하여 높은 강도를 갖고 있다.

3.1 압력분포

연결부의 길이가 300mm, 600mm 그리고 900mm (이 후에는 각각 CASE I, CASE II 그리고 CASE III라 부른다.)인 경우의 벽면압력분포와 급축소부분이 없는 급확대유동에서 측정한 벽면압력분포를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보듯이 CASE I의 경우는 공동유동(cavity flow)의 전형적인 압력분포를 보이고 있다. 즉, 급확대점($X/H=0$)으로 부터 X/H 가 증가하면서 벽면압력계수는 완만히 감소하다가 $X/H=2.5$ 부근부터 다시 완만히 증가하여 급축소점 직전($X/H=5$)에 압력계수는 급상승한다. 이러한 압력분포는 급확대만 있는 유동에서 재부착점이 급확대점으로부터 $X/H=6-9$ (난류영역에서는 거의 7-8)에서 발생하는데 $L=300\text{mm}$ (즉, $L/H=5.5$ 에 해당함)는 이에 못 미치기 때문에 재부착이 일어나지 않고 따라서 유동형태가 공동유동형태를 갖기 때문이다. CASE II와 CASE III인 경우는 벽면압력이 $X/H=4$ 부근까지는 감소하고 다시 회복되어 증가하다가 급축소점으로부터 약 0.5 H 상류에서 급축소벽에 의한 유동방해로 유체가 압축을

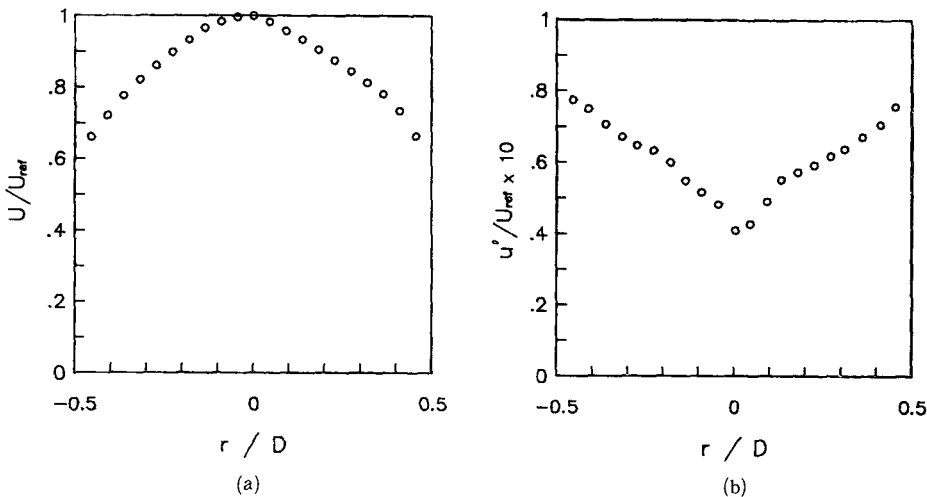


Fig. 4 (a) Inlet profiles of mean velocity in the streamwise direction at $X = -70\text{mm}$
 (b) Inlet profiles of the turbulent component intensity in the streamwise direction at $X = -70\text{mm}$

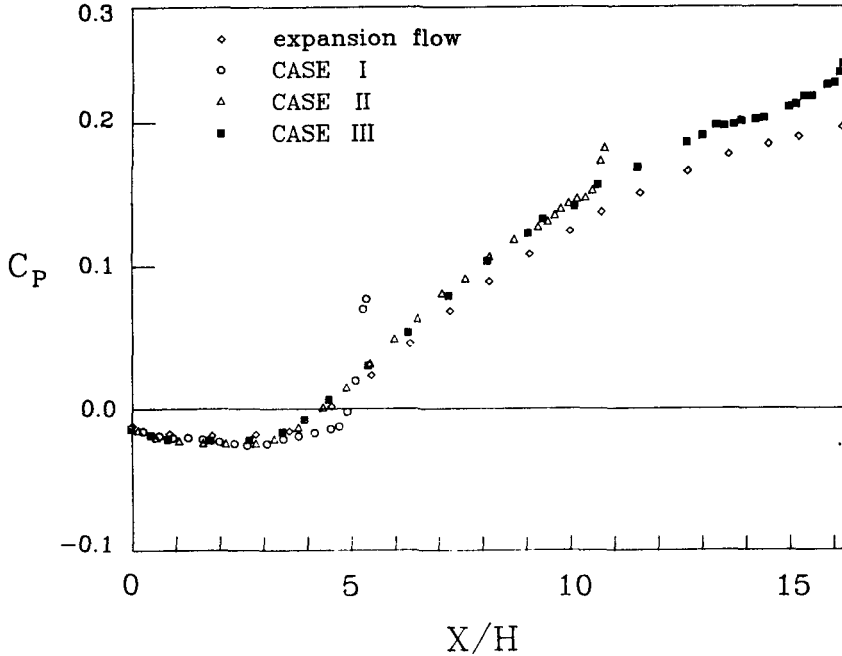


Fig. 5 Comparison of distribution of static wall pressure coefficients in three cases (experimental uncertainty, ± 0.004 for maximum readings)

받아 벽면압력이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5에서 CASE II, CASE III인 경우와 동일확대비의 급확대관의 벽면압력 분포를 비교해보면 압력계수값이 0이 되는 지점($X/H=4.5$)을 지나 하류에서는 CASE II와 CASE III의 벽면압력계수가 보다 크게 나타나며, 이는 유동방향의 압력구배(dp/dx)가 크다는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 서론에서 언급한 바와 같이 재부착길이는 압력구배에 비례한다는 Kuehn⁽⁴⁾의 결과를 고려하면 CASE II와 CASE III의 경우가 기존 연구결과에서 밝혀진 급확대유동보다는 재부착길이가 다소 클것으로 예측할 수 있다. 또한 압력손실계수는 연결부의 길이가 CASE I, CASE II, 그리고 CASE III 일 때 각각 $C_L=0.305, 0.524$ 그리고 0.651 이었다. 이는 연결부의 길이가 길어지면 확대 축소 연결부 전후의 압력손실은 증가한다는 것을 말해 주는 것이다.

3.2 평균속도분포

측정된 평균속도를 검증하기위해 각 단면에서 연속(overall continuity)조건을 적용하였다. 측정된 속도를 한단면에서 적분한 것과 입구유량과의 오차

는 5% 정도이었으며 절사오차(truncation error)를 고려한다면 측정속도값은 신뢰할만하였다. CASE III인 경우의 원주방향속도는 기준속도의 5%미만이었다. 재부착점은 벽면으로부터 3mm 떨어진 지점에서 주유동방향의 속도부호가 항상 양(positive)이 되는 지점과 항상 음(negative)이 되는 지점사이에서 내삽법으로 구했다. 재순환영역과 주유동영역의 경계유선인 분리유선(dividing streamline)의 위치는 연결부 벽면으로부터 주유동방향 평균속도분포를 적분하여 유동함수(Φ ; stream function)값이 0이 되는 위치로 하였다.

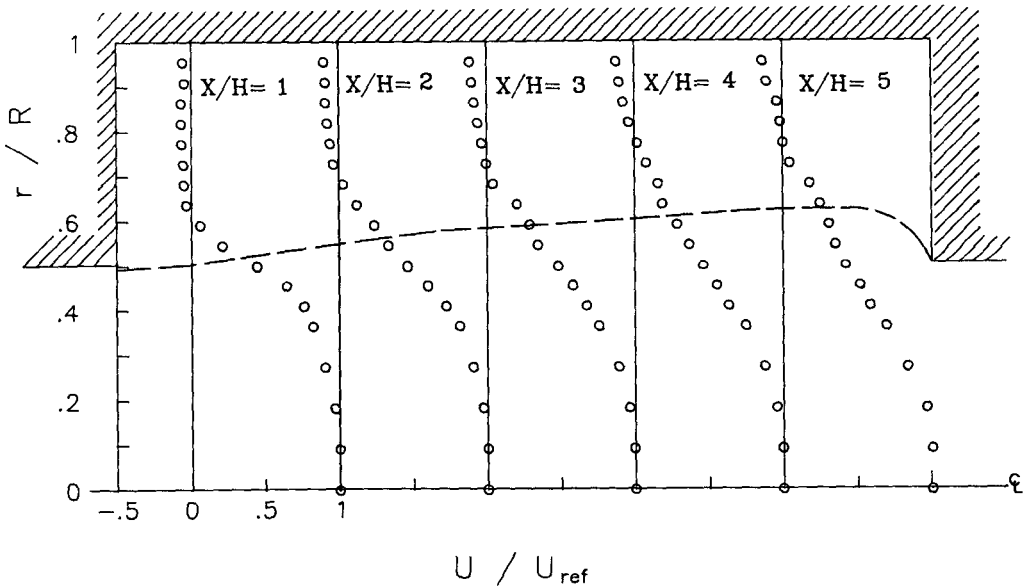
$$\Phi = \int_R^{rd} 2\pi(R-r') U dr'$$

Fig. 6(a), (b), (c)에는 각각 CASE I, CASE II 그리고 CASE III에 대한 측정된 평균속도분포를 나타냈다. 그림에서 점선은 분리유선을 나타낸다.

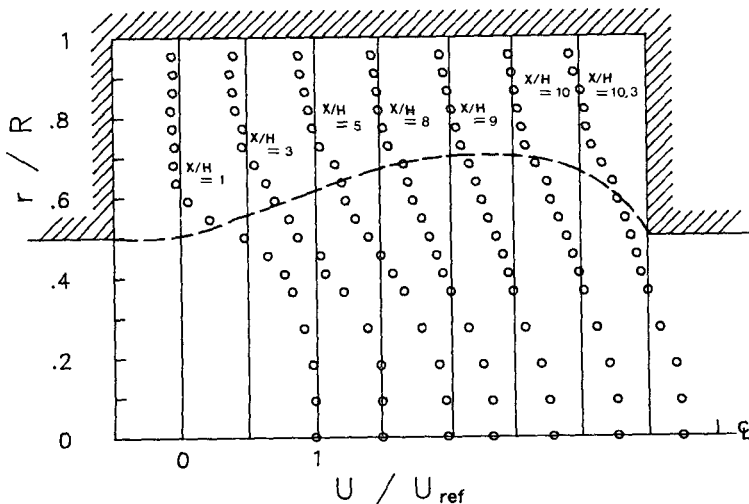
CASE I과 CASE II인 경우는 Fig. 6(a), (b)와 같이 연결관벽 근처에서의 주유동방향의 속도가 항상 음으로 나타나 재부착이 일어나지 않았고, Fig.6(c)에 나타낸 바와 같이 CASE III인 경우는 $10 < X/H < 11$ 지역에서 재부착이 일어나고 있음을 볼 수 있다. CASE III에서 측정된 재부착길이를

는 단지 급확대유동에 대해 기존에 알려져있는, $X/H=7-8$ 보다 길게 나타났다. 이것은 하류부분의 급축소로 인해 유동방향의 벽면압력구배(dp/dx)가 동일 확대비를 갖는 급확대유동보다 크게 나타나기 때문이다. 또 CASE III에서 급축소영역에 나타나는 재순환영역의 주유동방향 길이는 계단 높이의 반이하로 급확대영역의 재순환영역의 길이보다 매우작게 나타났다. 따라서 이지역의 속도는 본 실험에서 사용한 LDV로는 측정할 수 없었다.

Fig. 7에는 CASE II와 CASE III의 중심선상에서 측정된 평균속도(center-line mean velocity)를 보여주고 있다. CASE I인 경우는 Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 각 측정단면의 $r/R=0$ 에서 $U/U_{ref}=1$ 로 속도 변화가 거의 없었다. CASE II와 CASE III에서 $X/H=6$ 까지는 완만하게 감소하다가 그보다 하류에서는 비교적 빨리 감소하는 경향을 보여주었다. 그리고 CASE II인 경우는 $X/H=8$ 이후에 평탄해지는데, 이때 중심선에서 속도는



(a) $L/H=5.45(L=300\text{mm})$



(b) $L/H=10.9(L=600\text{mm})$

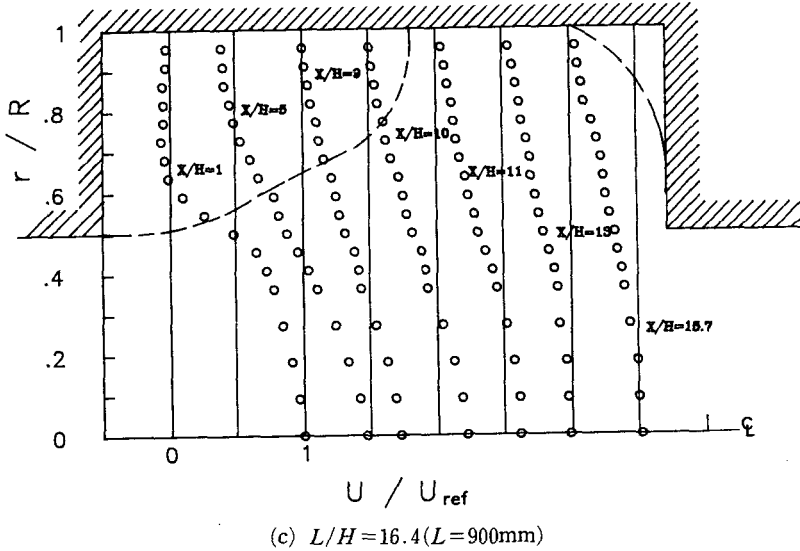


Fig. 6 Distributions of streamwise mean velocity profiles (experimental uncertainty, ± 0.01 for maximum readings, ... ; Dividing streamline)

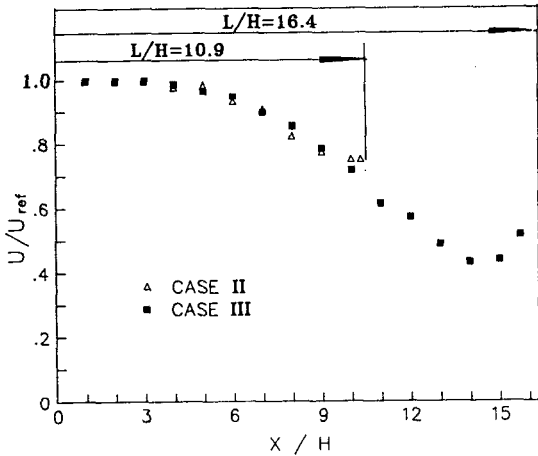


Fig. 7 Decays of center line streamwise mean velocities

입구중앙속도의 약 75% 정도에 이르고, CASE III 인 경우는 $X/H=14$ 까지 계속 감소하여 입구속도의 약 40%에 이른 후 다시 증가하기 시작한다. 이와 같이 중심선의 속도가 다시 증가하는 것은 급축소의 영향때문에 급축소영역에서 벽근처의 속도가 감소하므로 연속조건을 만족하기 위해서는 중심지역의 속도가 증가해야 하기 때문이다.

Fig. 8에 재순환영역(recirculation flow region) 과 주유동(main flow)의 경계유선인 분리유선

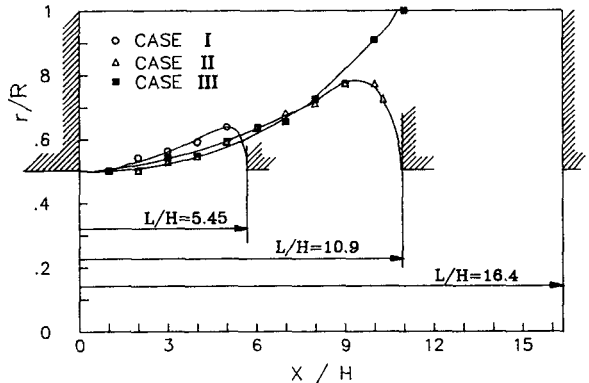


Fig. 8 Sketch of approximate dividing streamlines

(dividing streamline)의 위치를 나타냈다(CASE III의 급축소영역에 또 하나의 재순환영역이 있으므로 급축소영역에도 분리유선이 존재할 것이나 본 실험에서는 측정할 수 없었다). 그 경향을 보면 $X/H=2$ 보다 하류에서는 분리유선은 연결부벽($r/R=1$)쪽으로 완만하게 향하고 $X/H=8$ 이후에는 곡률이 커져서 CASE III인 경우는 $X/H \cong 10.5$ 에서 벽에 부착된다. CASE II인 경우는 $X/H \cong 9$ 에서 분리유선은 다시 관중앙($r/R=0$)으로 향하게 되는데 이때의 분리유선의 위치는 $r/R \cong 0.77$ 로 벽에 가장 가까이 접근하는데 Fig. 7에 나타나 있듯이 이 지점($X/H \cong 9$)에서 중앙속도가

증가하기 시작하는 현상과 일치되는 결과이다. CASE II의 연결부의 길이($L=600\text{mm}$)는 계단높이($H=55\text{mm}$)의 약 11배로 CASE III의 재부착 길이($10.5 H$)보다 길지만 재부착이 일어나지 않았다. 이것은 재부착이 일어날 수 있는 영역($10 < X/H < 10.9$)에 해당하는 지역에서 분리유선이 벽 가까이 접근하지만 급축소의 영향때문에 급축소영역의 급격한 압력증가로 인해 분리유선은 다시 벽에서 멀어지기 때문이다. CASE I 인 경우를 보면 $X/H \cong 5$ 까지는 분리유선이 벽쪽을 향하고 $X/H \cong 5$ 에서 분리유선의 위치는 $r/R \cong 0.64$ 인데 이 분리유선은 급축소점 하류의 축소된 관벽에 연결되어야 하므로 급축소영역의 유선곡률은 매우 클 것이다. 이러한 현상은 압력분포에서 살펴봤듯이 급축소영역의 압력이 급격히 증가하는 결과로부터 뒷받침될 수 있다.

Fig. 9에 CASE III인 경우에 재부착점을 지나서 재전개(redeveloping)되는 영역에서 주유동방향의 무차원속도분포를 대수척도(log scale)로 나타냈다. 이 때의 마찰속도(friction velocity)는 Kim등⁽¹⁴⁾의 방법을 이용하여 구했다. 그 경향을 보면 원관에서의 대수법칙(logarithmic law)보다 동일한 y^+ 에서 U^+ 는 훨씬 크게 나타난다. 즉 이 영역의 속도분포는 비보존적(non self-preserving)이며 국소 평형(local equilibrium)이 성립하지 않음을 알 수 있다. 하류로 진행하면서 속도분포는 원관의 대수법칙에 접근하고 있으며 $X/H \cong 15$ 를 지나 급격히 다시 멀어지고 있다. 즉 $X/H \cong 15$ 에서 벽면마찰은 최대가 된다. Fig. 7에 나타난 중심속도의 경향과 비교하면 중심속도는 약 $X/H \cong 14$ 에서 최소

값을 나타내지만 벽면마찰은 약 $X/H \cong 15$ 에서 최대가 되는데 이것은 중심지역의 운동량이 벽 근처까지 전달되는데는 적분시간척도(integral time scale)에 해당하는 시간이 소요되기 때문이다. 따라서 $X/H=15.7$ 지점에서는 그상류보다 중심속도는 증가하고 벽면마찰은 감소하여 속도분포는 대수법칙에서 멀어진다.

3.3 난류특성

Fig. 10(a), (b), (c)에는 각 CASE에 대한 주유동방향 난류강도(u'/U_{ref})의 반경방향분포를 나타냈다. 그림에서 점선은 분리유선을 나타낸다. 각 경우 모두 급확대 직후의 측정단면에서 중심지역(core region, $r/R < 0.5$)의 난류강도는 입구의 난류강도와 비슷한 5~7%이나 혼합층(mixing layer)이 생성되는 $r/R \cong 0.5$ 부근에서 최대 15% 내외의 값을 가지며 이값을 정점으로 하여 벽쪽($r/R < 0.5$)으로 접근하면서 다시 감소하여 7~8%의 값을 가진다. Fig. 10(a)에서 보듯이 CASE I인 경우 전체적인 난류강도의 분포는 각 측정단면에서 혼합층을 기준으로하여 대칭을 이루는 반면, CASE II인 경우(Fig. 10(b))에는 $X/H \cong 8$, CASE III인 경우(Fig. 10(c))는 $X/H \cong 9$ 부근에서 중심지역의 난류강도가 재순환영역보다 크게 나타나며 하류로 더 진행하면 측정단면 전체에 걸쳐 난류강도의 반경방향의 변화율은 감소한다. 급확대영역의 재순환영역에서는 반경방향 평균속도변화율이 매우 작음을 고려하면 이영역의 새 전단층(new shear layer)의 크기는 매우 작음을 알 수 있다. 또한 Stevenson⁽¹⁶⁾등의 결과를 보면 축대칭 급확대유동에서는 중심지역의 난류강도가 2차원 급확대유동의 자유유동보다 빠르게 증가하는데, 본 실험의 CASE III인 경우 중심지역의 난류강도는 Stevenson 등의 축대칭 급확대 유동실험결과보다도 더 빠르게 증가한다.

Fig. 11에는 각 CASE에 대하여 각 측정단면에서의 유동방향의 최대 난류강도를 유동방향을 따라서 나타냈다. CASE II와 CASE III인 경우 최대 난류강도를 살펴보면 $X/H \cong 7$ 부근에서 18~20%에 이르는 최대값을 가지며 전체적으로는 CASE II인 경우가 CASE III인 경우보다 다소 높은 난류강도를 보여주고 있다.

Fig. 12에는 Logan의 방법을 이용하여 구한 반경방향의 난류강도(v'/U_{ref})를 나타냈다. 이를 살

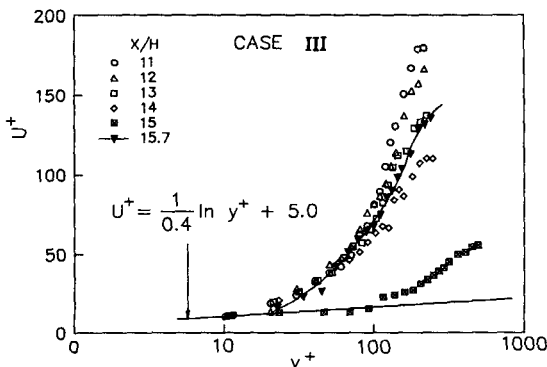
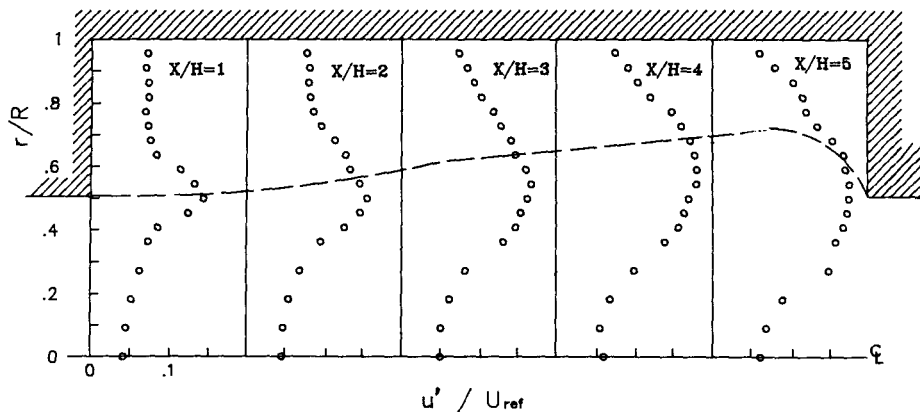
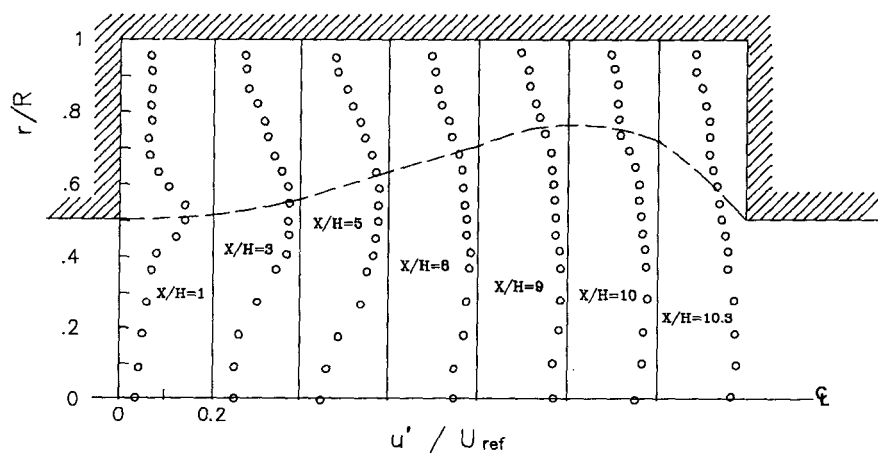


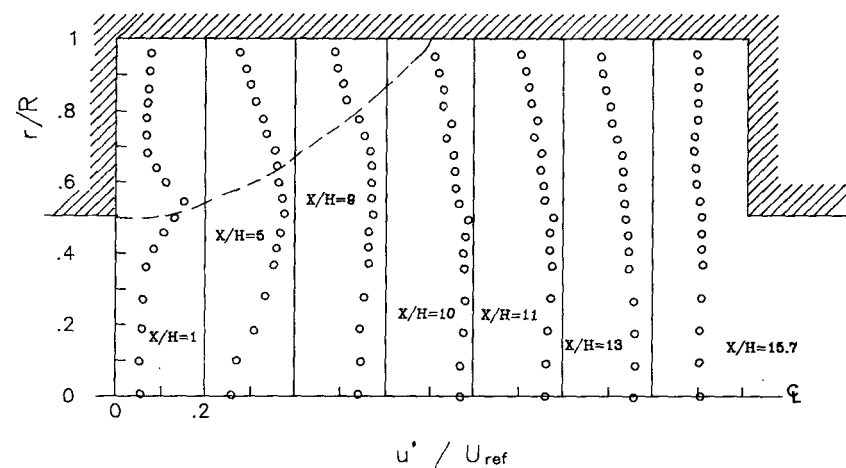
Fig. 9 Streamwise mean velocity profiles in the reattached flow regions



(a) $L/H = 5.45 (L = 300\text{mm})$



(b) $L/H = 10.9 (L = 600\text{mm})$



(c) $L/H = 16.4 (L = 900\text{mm})$

Fig. 10 Distributions of streamwise turbulent component intensities (experimental uncertainty, ± 0.04 for maximum readings, \dots ; dividing streamline)

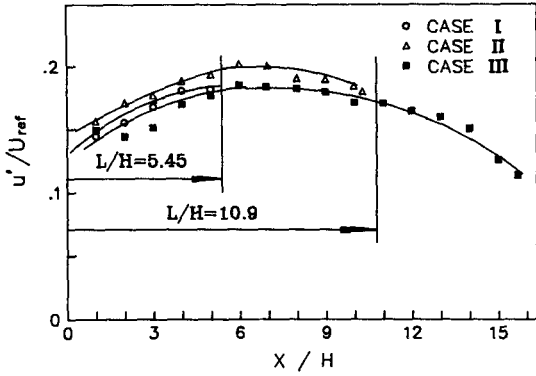


Fig. 11 Developments of maximum streamwise turbulent component intensities with the downstream distance.

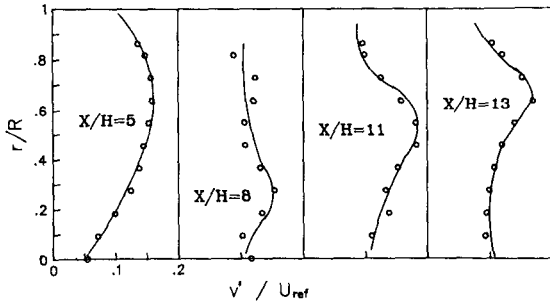


Fig. 12 Distribution of radial turbulent component intensity profiles in CASE III (experimental uncertainty, ± 0.08 for maximum readings, ...; dividing streamline)

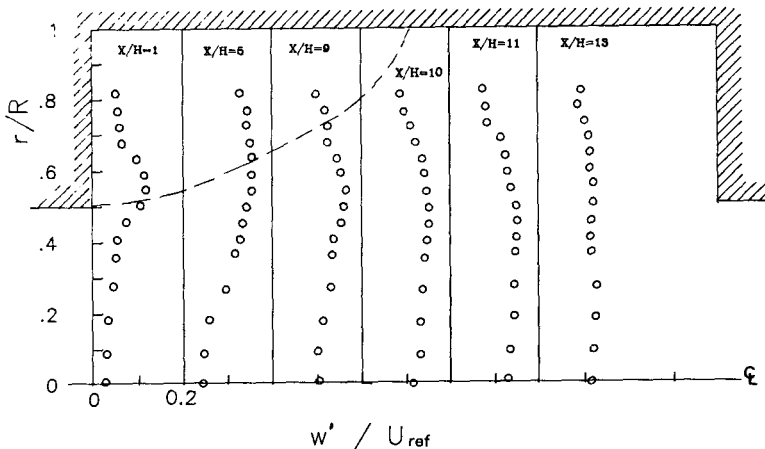


Fig. 13 Distribution of circumferential turbulent component intensity profiles in CASE III (experimental uncertainty, ± 0.04 for maximum readings, ...; dividing streamline)

펴보면 각단면의 최대값이 대체로 최대전단응력을 나타내는 위치보다 벽쪽에 가깝게 나타나며 이 위치로부터 중심유동지역(core region)에서는 주유동 방향 난류강도(u'/U_{ref})보다 작게 나타나고 재순환영역에서는 비슷하게 나타난다. 이러한 결과는 Etheridge등⁽⁷⁾의 평면 2차원 유동의 결과와 유사하다.

Fig. 13에는 CASE III의 원주방향의 난류강도(w'/U_{ref})분포를 나타냈다. 그림에서 점선은 분리유선을 나타낸다. Fig. 10(c)와 비교했을 때 급확대영역에서는 동일한 측정점의 원주방향 난류강도가 주유동방향 난류강도(u'/U_{ref})보다 대체로 20% 정도 낮은 값을 나타냈으며 하류로 갈수록 그 차이는 점차 줄어들었다.

Fig. 14에 Logan의 방법을 사용하여 주유동방향과 반경방향이 이루는 면($x-r$ plane)에서 측정된 Reynolds shear stress 분포를 나타냈다. 그림에서 점선은 분리유선을 나타낸다. 그 결과를 보면 벽면($r/R=1$)과 최대전단응력(maximum Reynolds shear stress)을 나타내는 위치사이의 전단응력의 크기는 대체로 벽으로부터의 거리(y)에 비례하고 있다. Fig. 15는 각 측정단면에서 최대 전단응력을 나타낸 것이다. 최대전단응력은 $X/H \approx 0$ 까지 증가하다가 그 후 하류로 갈수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 박리점에서 발생한 large eddies가 재부착이 일어나기 전까지 성장하여 길이척도(integral length scale)가 커지면서 전단응력이 증가하고, 재부착이 일어나는 부근에서는 벽면의 제

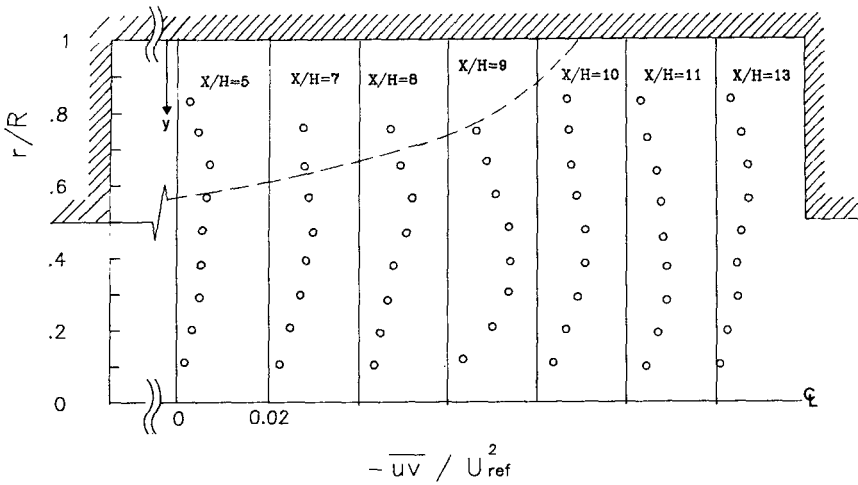


Fig. 14 Distribution of Reynolds shear stress profiles in CASE III (experimental uncertainty, ± 0.008 for maximum readings, ... : dividing streamline)

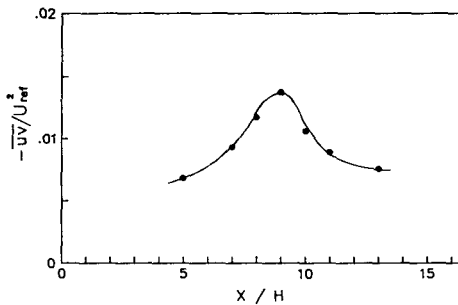


Fig. 15 Variation of maximum Reynolds shear stress with the downstream distance in CASE III

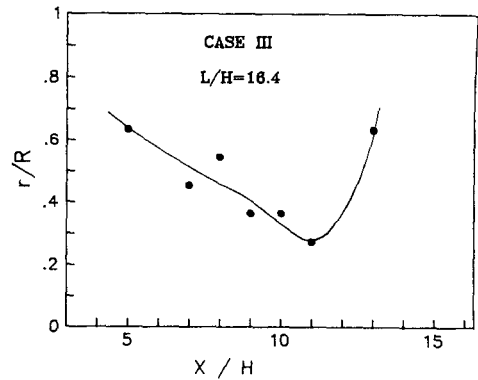


Fig. 16 Radial position of the maximum Reynolds shear stress in CASE III

한으로 인해 길이척도가 감소하여 전단응력이 감소하기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 16에는 각 측정단면의 최대전단응력이 나타나는 위치를 나타냈다. 최대전단응력이 나타나는 위치는, 전체적으로 X/H 가 증가하면서 재부착영역까지는 재순환영역으로부터 중심유동지역으로 이동하고, 급축소영역에서 다시 벽쪽으로 이동한다. 평면 2차원 급확대유동에 대한 Chandrsuda 와 Bradshaw⁽⁶⁾의 결과와 비교하면 평면 2차원 유동의 경우 각단면에서 최대전단응력의 위치는 재부착점까지는 대체로 분리유선의 위치와 비슷하며 재부착하류에서는 일정한 높이를 유지하는데 반해 본 실험의 경우는 재부착영역까지는 중심유동지역으로 계속 이동하고 급축소영역에서는 다시 벽쪽으로 이동한다.

이상의 결과를 종합해보면 재부착이 일어나기전의 대체적인 유동구조는 급축소영역을 제외하고는 급확대유동과 비슷하다. 급축소의 영향때문에 급확대유동에 비해 압력구배가 크게 나타나므로 재순환영역의 역방향속도는 증가하게 된다. 따라서 재부착 길이는 길어진다. 또한 기존의 급확대유동실험에서 재부착 이후 최대전단응력이 나타나는 위치는 일정한데 비해 본 실험에서 재부착이 일어나는 경우(CASE III)에는 최대전단응력이 나타나는 위치는 재부착 이후에도 중심유동지역으로 계속 이동하다가 급축소영역에 이르러 벽쪽으로 이동하는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

작동유체가 공기이고 입구에서의 Reynolds 수가 $Re=73,000$ 인 원관 난류유동에서 확대비가 2로 급확대되고, 축소비가 1/2로 급축소되는 급확대-급축소 연결부에서 연결부의 길이를 변화시켜가며 압력 분포 및 LDV를 이용하여 유동특성을 조사하여 다음의 결론을 얻었다.

연결부의 길이 대 턱높이의 비(L/H)가 10.9이하일 때는 연결부의 벽면에서 재부착이 일어나지 않고 공동유동형태를 나타냈으며, $L/H=16.4$ 일 때는 재부착이 발생하여 박리 및 재부착 유동을 나타냈다. 재부착이 일어나는 경우의 재부착길이는 턱높이의 약 10.5 배로 급축소영역이 없는 급확대 유동에 비해 길게 나타났고, 급축소영역에서 재순환영역의 유동방향 길이는 턱높이(H)의 1/2이하였다. 재부착이 일어날 때, 전체적인 유동구조는 급확대 유동에 비해 재부착영역까지는 비슷하나 그보다 하류에서는 다르게 나타났다. 또한 동일입구 조건에서 연결부의 길이가 증가하면 연결부 전후의 압력손실은 증가했다.

참 고 문 헌

(1) Durst, F., Founti, M. and Obi, S., 1988, "Experimental and Numerical Investigation of the Two-Dimensional Channel Flow Over Two Fences in Tandem", ASME, J. Fluids Eng., Vol. 110, pp. 48~54.

(2) Eaton, J.K and Johnston, J.P., 1981, "A Review of a Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment", AIAA J., Vol. 19, No. 9., pp. 1093~1100.

(3) Back, L.H. and Roschke, E.J., 1972, "Shear Layer Flow Regimes and Wave Instabilities and Reattachment Lengths Downstream of an Abrupt Circular Expansion", ASME, J. Appl. Mech., Vol. 94E, pp. 677~681.

(4) Kuehn, D.M., 1980, "Effects of Adverse Pressure Gradient on the Incompressible Reattaching Flow Over a Rearward-Facing Step", AIAA J., Vol.18, No. 13, pp. 343~344.

(5) Bradshaw, P. and Wong, F.Y.F., 1972, "The

Reattachment and Relaxation of a Turbulent Shear Layer", J. Fluid Mech., Vol. 52, pp.113~135.

(6) Chandrsuda, C. and Bradshaw, P., 1982, "Turbulence Structure of a Reattaching Mixing Layer", J. Fluid Mech., Vol. 110, pp. 171~194.

(7) Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F. and Schonung, B., 1983, "Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow", J. Fluid Mech., Vol. 127, pp. 473~496.

(8) Westphal, R.V. and Johnston, J.P., 1984, "Effects of Initial Conditions on Turbulent Reattachment Downstream of a Backward-Facing Step", AIAA J., Vol. 22, No. 12, pp. 1727~1732.

(9) Durst, F. and Loy, T., 1985, "Investigations of Laminar Flow in a Pipe with Sudden Contraction of Cross Sectional Area", Computers and Fluids, Vol. 13, No. 1, pp. 15~36.

(10) Durst, F., Schierholz, W.F. and Wundelich, A.M., 1987, "Experimental and Numerical Investigations of Plane Duct Flows with Sudden Contraction", ASME, J. Fluids Eng., Vol. 109, pp. 376~383.

(11) Fraser, S.M. and Siddig, M.H. 1980, "Turbulent Flow Over a Plane Normal Wall", J. Mech. Eng. Sci., IMechE, Vol. 22, No. 4, pp. 207~211.

(12) Tropea, C.D. and Gackstatter, R., 1985, "The Flow Over Two-Dimensional Surface-Mounted Obstacles at Low Reynolds Numbers", ASME, J. Fluids, Eng., Vol. 107, pp. 489~494.

(13) Moon, L.F., 1977, "Velocity Distribution in an Abruptly Expanding Circular Duct", ASME, J. Fluids Eng., Vol. 99, pp. 226~230.

(14) Kim, J., Kline, S.J. and Johnston, J.P., 1980, "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step", ASME, J. Fluids Eng., Vol. 102, pp. 302~307.

(15) Logan, S.E. 1972, "A Laser Velocimeter for Reynolds Stress and Other Turbulence Measurements", AIAA J., Vol. 10, No. 7, pp. 933~935.

(16) Stevenson, W.H., Thompson, H.D. and Craig, R. R., 1984, "Laser Velocimeter Measurements in Highly Turbulent Recirculating Flows", ASME, J. Fluids Eng., Vol. 106, pp. 173~180.

(17) Etheridge, D.W. and Kemp, P.H., 1978, "Measurement of Turbulent Flow Downstream of a Rearward-Facing Step", J. Fluid Mech., Vol. 86, pp. 545~566.