

## 비대칭분류의 노즐출구영역에서의 난류유동장 해석

### The Near Field Structure of Initially Asymmetric Jets

김경훈\* , 신정관\*\* , 이한영\*\*\*  
K. H. Kim , J. K. Shin , H. Y. Lee

#### ABSTRACT

The near field structure of round turbulent jets with initially asymmetric velocity distribution is investigated experimentally. Experiments were carried out using a constant temperature hot-wire anemometry system to measure streamwise velocity in the jets. The measurements were undertaken across the jet at various streamwise stations in a range starting from the jet exit plane and up to a downstream location of twelve diameters. The experimental results include the distribution of mean and instantaneous velocities, vorticity field, turbulence intensity, and the Reynolds shear stress. The asymmetry of the jet exit plane was obtained by using circular cross-section pipes with a bend at the upstream of the exit. Three pipes were used for this study: A straight pipe, 90 and 160 degree-bended pipes. Therefore, at the upstream of the pipe exit, the secondary flow through the bend and the mean streamwise velocity distribution could be controlled by changing the curvature of pipes.

Key words : Asymmetric nozzle flow(비대칭 노즐유동), Reynolds shear stress(레이놀드 전단응력)  
Turbulence(난류), Jets(분류), Hot-wire(열선),

#### NOMENCLATURE

<p><math>D</math> : pipe diameter</p> <p><math>K</math> : Dean number = <math>(R/R_c)^{0.5}Re</math></p> <p><math>R</math> : pipe radius</p> <p><math>R_c</math> : radius of curvature of pipe bend</p> <p><math>Re</math> : Reynolds number = <math>(U_b D) / \nu</math></p> <p><math>U</math> : axial coordinate mean velocity</p> <p><math>U_b</math> : mean bulk velocity at exit</p> <p><math>U_m</math> : maximum of <math>U</math></p> <p><math>U_o</math> : Jet exit maximum velocity</p> <p><math>u'</math> : rms of fluctuating streamwise velocity</p> <p><math>V</math> : lateral coordinate mean velocity</p>	<p><math>v'</math> : rms of fluctuating cross-stream velocity</p> <p><math>\overline{u'v'}</math> : Reynolds shear stress</p> <p><math>u'_{cl}</math> : <math>u'</math> on the center-line</p> <p><math>v'_{cl}</math> : <math>v'</math> on the center-line</p> <p><math>x</math> : axial coordinate measured from pipe exit</p> <p><math>y</math> : lateral coordinate on jet symmetry plane</p> <p><math>z</math> : coordinate normal to the jet symmetry plane</p> <p><math>\Omega_z</math> : vorticity component normal to jet symmetry plane</p> <p><math>\mu_t</math> : turbulent viscosity</p>
--	---

\*정회원, 경희대학교 기계·산업시스템 공학부, 레이저공학 연구소

\*\*경희대학교 대학원 기계공학과 박사과정, (주)센추리 중앙연구소

\*\*\*오산대학 기계공학과

### 1. 서론

지난 10여년간 3차원적인 초기속도 분포를 지닌 난류분류에 대한 많은 실험적 연구들이 이루어져 왔으나 대개의 경우 초기속도분포가 대칭인 경우에 집중된 결과 비대칭적 초기속도분포를 지닌 난류분류에 대하여는 발표된 연구실적이 거의 없다.<sup>(1)~(3)</sup> 그러나 비대칭적인 초기속도 분포를 지닌 분류유동장은 고압가스 수송관의 균열부위를 통한 분류유동 등 우리의 주위에서 많이 관찰된다. 이와 같은 비대칭 분류는 축대칭 등의 속도분포를 갖는 분류와는 달리 출구 근처의 초기 유동장 발달영역에서 상이한 거동 특성을 지닌다.<sup>(4)~(8)</sup> 비대칭의 경우, 이 영역에서의 평균 전단응력 분포는 난류유동장의 발달에 큰 영향을 미친다. 따라서 비대칭분류가 주 유동방향에 수직한 방향으로의 난류유동 특성 발달에 미치는 영향이 정량적 또는 정성적으로 규명된다면 이는 운동량 등의 유동특성의 발달 과정을 조절하여 궁극적으로는 전체 유동장의 제어에 활용될 수 있을 것이다.

을 나타내고 있다. 고압공기는 Settling Chamber를 통해 제어밸브(Control Valve)와 레귤레이터(Regulator)를 거쳐 공급되며, 챔버내에서의 압력은 가변저항압력조절기(Valdyne DP7)에 의해 조절된다. 일정한 공기유량을 유지하기 위하여 챔버내의 압력은  $22 \pm 0.25 \text{ mm H}_2\text{O}$ 로 유지된다. 챔버의 한쪽 끝단에는 직경 25.4mm의 철제 파이프를 연결하여 분류유동장을 발생시키며 파이프 입구단에서의 속도분포가 축대칭을 이룰 수 있도록 하기 위하여 파이프를 챔버내부로 약

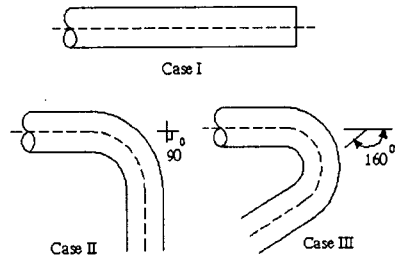


Fig.2 Nozzle configuration of Case I,II,III

### 2. 실험

#### 2.1 실험 장비

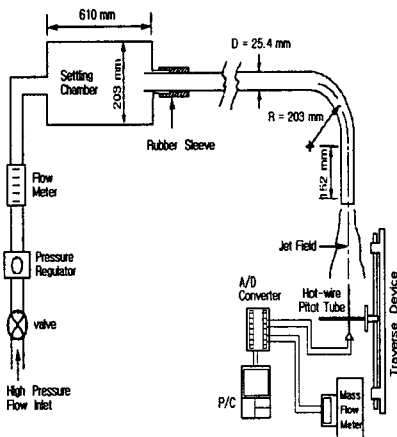


Fig.1 Schematic of experimental set up

Fig. 1은 개략적인 실험장치의 구성 기호 설명

50mm 정도 삽입시켰다. 본 실험에는 총 3개의 파이프가 사용되어졌다. 첫 번째는 굽힘이 없는 직선형태의 파이프를 축대칭 분류유동을 발생시키기 위하여 사용되어졌으며, 이에 대한 실험을 "Case I"이라 칭한다. 이외에도 비대칭 초기속도분포를 지니는 분류유동장의 생성을 위해 2개의 서로 다른 굽힘도를 갖는 철제 파이프가 제작되었다. 이들 파이프는 출구단 근처에서의 굽힘부가 평균곡률반경 203mm를 갖도록 제작되었으며  $Re=13,400$ 을 갖는다. 초기속도분포의 비대칭 정도는 파이프의 굽힘각에 의해서 제어되며, 출구단에서의 최대속도의 편심도는 굽힘각이 증가할수록 파이프 중심으로부터 더욱 편심되어진다. 본 연구에서는  $90^\circ$  및  $160^\circ$ 의 굽힘각을 갖는 두 개의 파이프가 사용되어졌으며, 전자에 대한 경우를 "Case II", 후자에 대한 경우를 "Case III"라 칭한다.(Fig. 2) 본 실험의 측정에는 TSI사 모델 1050 정온열선유속계가 사용되었으며, 열선의 직경 및 길이는 각각  $5 \mu\text{m}$  및 1.2mm이다. 열선유속계를 통해 측정된 유속

정보는 MetraByte사의 DAS-16F 12bit A/D 변환기를 사용하여 디지털화 된다. 유속측정은 200 sampling/sec의 주기로 20초 동안 계속되며, 측정된 유속으로부터 평균속도, 난류강도 및 레이놀즈 전단응력이 계산된다. 측정은 x, y, z 방향을 따라 이루어지며 x축 방향으로의 위치오차는 최대 0.4mm, y축 및 z축 방향으로의 위치오차는 0.01mm 이내이다.

## 2.2 실험 방법

실험은 예비실험과 본실험의 2단계로 이루어졌다. 예비실험의 목적은 속도측정을 위한 데이터 취득률(Sampling Rate)의 결과와 각각의 Case에 대해 동일한 유동조건을 유지하기 위한 것이다. 레이놀즈 넘버는 y-z 평면상에서 측정된 속도분포로부터 계산되며 각각의 Case에 대하여 컨트롤 밸브를 사용하여 동일한 값을 유지하였다. 단넘버  $[K = (R/R_c)^{0.5} Re]$ 는 레이놀즈 넘버로부터 계산되며 본 실험에서는 3,350으로 일정하게 유지시켰다. 파이프 출구에서의 압력 분포는 피토투브를 사용하여 측정하였으며, 체적유동속도는 출구단에서의 평균속도를 적분하여 획득하였다.

비대칭 초기속도분포를 지닌 분류유동특성의 해석을 위한 기준을 확립하기 위하여 굽힘이 없는 직선파이프를 통과하는 축대칭 속도분포를 지니는 분류에 대한 유동측정이 먼저 수행되었다 (Case I). 측정은 각각의 x축 지점에서 y 및 z 방향으로 센서를 이동시키면서 이루어졌다. 이를 통하여 초기속도분포가 축대칭임을 검증할 수 있었다. Case II 및 Case III의 경우는 파이프의 굽힘부로 인하여 속도분포가 편심되므로써 파이프내부에서의 운동량 분포가 불안정해진다. 세 가지 Case에 대하여 평균유동속도는 8.5m/sec이다. 속도분포와 난류강도에 대한 측정은 x-y 평면상에서 이루어졌으며 해당 좌표계의 예가 Fig. 3에 도시되었다.

여기서 y와 z는 파이프의 횡단면을 이루는 좌표축이며, x는 파이프의 축방향과 일치하는 좌표축이다. 측정된 속도분포로부터 난류강도 및 레이놀즈 전단응력 등의 자료가 Fortran Code를

사용하여 계산되며, 획득한 속도자료는 평균체적유동속도  $U_b$ 에 의해 무차원화된다. 각각의 Case에 대하여 속도분포는 출구단으로부터 12D (D는 파이프의 직경) 까지의 지점까지 계속되었다. 축방향 최대 및 최소 평균속도는 모든 Case에 대해 y축상에서 발생하며, 이는 동일 축상에서 평균전단응력의 최대 및 최소값이 발생함을 의미한다.

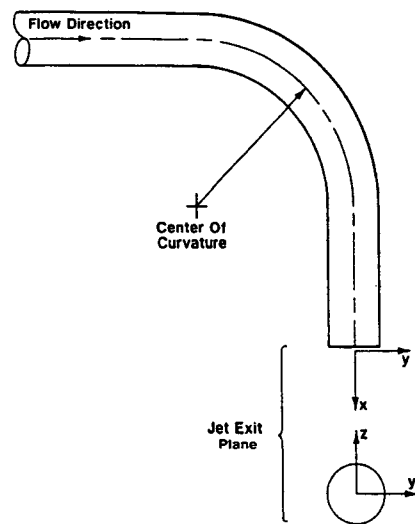


Fig.3 Coordinate system for flow

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 평균속도

Fig. 4는 Case I, Case II 및 Case III의 경우에 대한 z-y 평면에서의 속도분포로서 Case I의 경우는 속도분포의 편심이 없는 축대칭임을 알 수 있다. 한편 Case II와 III는 두 경우 모두 분류 출구단에서의 속도분포가 비대칭이고, 최고 속도는 중심으로부터 편심되어 있으며, 파이프의 굽힘이 증가할 수록 편심도는 증가한다. 이는 굽힘부에서의 압력분포 및 원심력의 영향 때문이다. x방향 최대속도는 Case II의 경우  $y/D=0.61$ , Case III의 경우에는  $y/D=0.67$  지점에서 발생하며, Case I, II 및 III의 무차원 최대속도값은 각각 1.1763, 1.2034 및 1.2622이다.

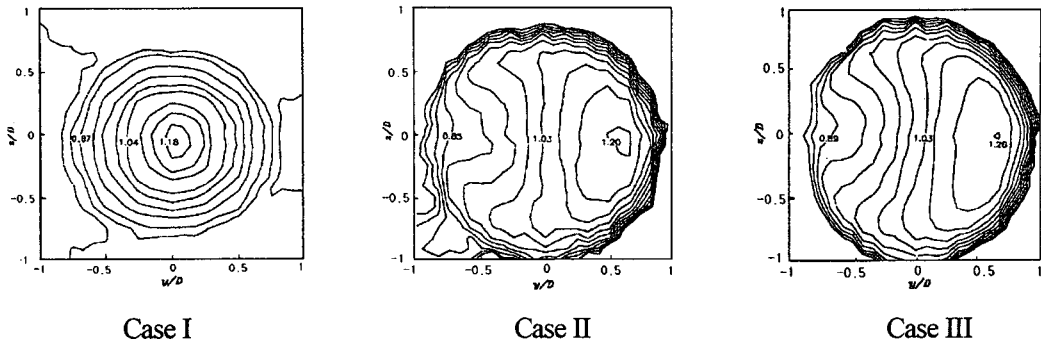


Fig. 4 Constant velocity contours at the jet exit for Case I, II, III

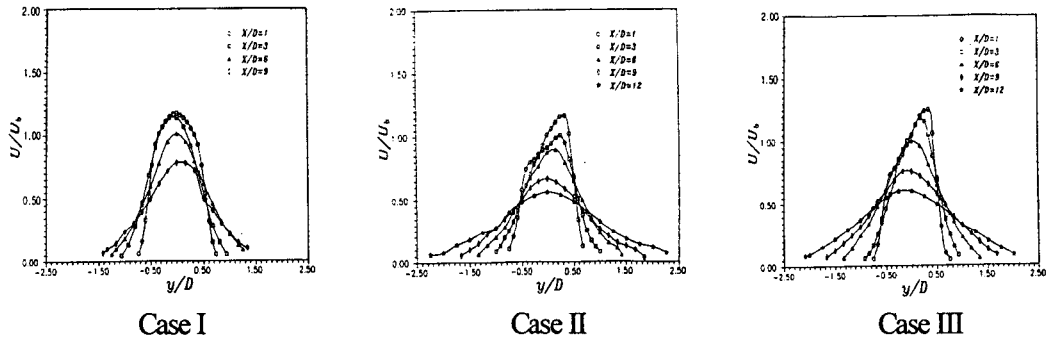


Fig. 5 Mean streamwise velocity profiles for Case I, II, III

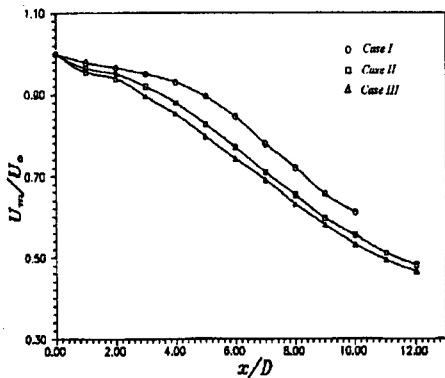


Fig. 6 Axial distribution of maximum mean streamwise velocity

Fig. 5의 Case I 은 분류유동 하류에서의 속도 분포도이며 Case II와 Case III는 축방향 속도성분의 편심을 보여주고 있다. Case I 과의 비교 결과는 비대칭 초기속도분포를 갖는 경우가 축

대칭일 경우보다 최고속도의 감소율이 더욱 큰을 보여준다.(Fig. 6) 이는 축방향 속도성분이 편심되어 비대칭의 경우가 최고속도에 더욱 빨리 도달할 수 있음을 나타내는 것이다. z 방향 속도성분의 경우는 본 연구에서는 포함되지 않았다. 이는 열선의 축방향에 대한 초기정렬이 정밀하게 이루어진 경우일지라도 y 방향 속도성분이 미량인 관계로 여전히 허용한계를 벗어난 정도의 오차가 존재하기 때문이다.

### 3.2 난류강도

Fig. 7은 Case I, II 및 III의 경우에 대한 축방향 난류속도의 분포를 나타내고 있으며, Fig. 8은 Case I, II 및 III의 경우에 대한 y축 방향의 난류속도성분의 분포이다. 각 난류속도성분은 출구단에서의 평균 체적유동속도  $U_b$ 에 의해 무차원화되었다. 직선관의 경우  $u'$  및  $v'$ 는 축방향에 대해 대칭이며,  $x/D=6$  이후에서는 거의

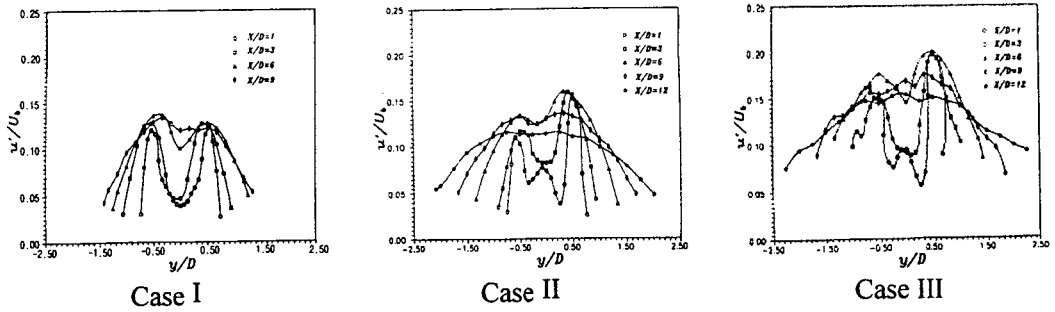


Fig. 7 u' profiles for Case I, II, III

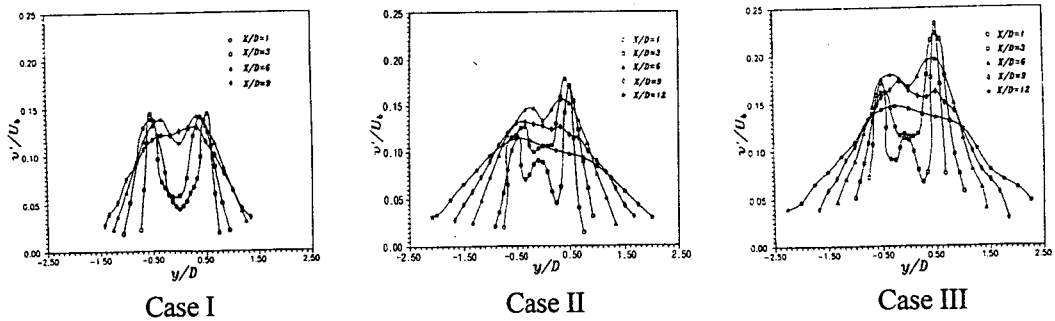


Fig. 8 v' profiles for Case I, II, III

동일한 분포를 보이고 있다. 이는 난류분류유동에서의 근등방성을 보고한 Corrsin<sup>(1)</sup>과 Gibson<sup>(2)</sup>의 실험결과와 일치한다. 전반적으로 출구단 근처에서의 경우에는 v'값이 u'값보다 조금 크게 나타나며 유동하류로 진행함에 따라 u'가 v'보다 더 빨리 확산된다.

Case II의 경우 비대칭적인 초기속도분포로 인

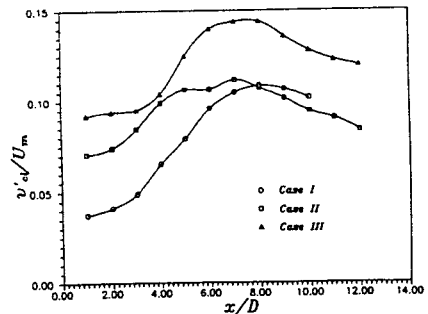


Fig. 10 Axial distribution of v' along the center-line of jet

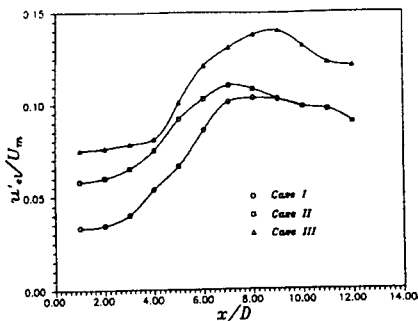


Fig. 9 Axial distribution of u' along the center-line of jet

하여 u' 및 v' 역시 비대칭적인 분포를 지닌다. 출구단에서의 무차원화된 u' 및 v' 값은 y/D=0.3339에서 각각 0.047과 0.053이며 유동하류로 갈수록 그 값이 증가한다. 직선 파이프의 경우와 비교하면 Case II의 경우가 u' 및 v' 값이 약 23% 정도 증가한 경향을 보이고 있으며 유동하류로 진행함에 따라 그 차이가 감소한다. Case III에서의 u' 및 v'의 최대값은 다른 두 경우보다 증

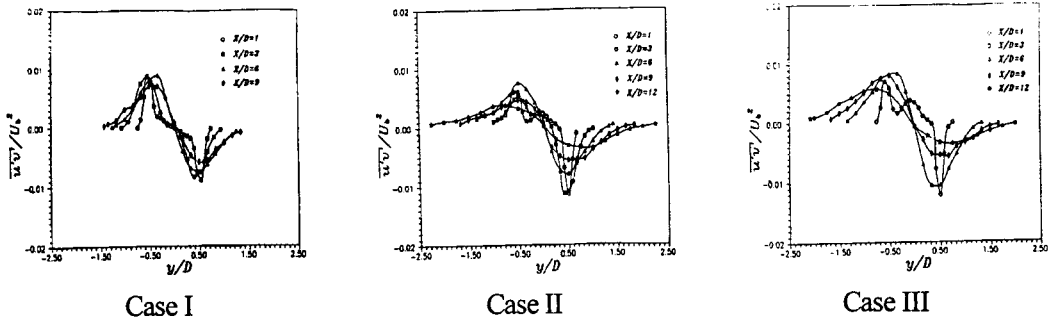


Fig. 11 Reynolds shear stress profiles for Case I,II,III

가함을 알 수 있으며 동시에 최대값이 발생하는 지점 역시 더욱 편심됨을 알 수 있다. 전단응력의 분포는 편심된 속도분포의 영향으로 인해 유동장의 내측보다는 외측에서 더 큰 경향을 보인다.

Fig. 9와 10은 x축상에서의  $u'$  및  $v'$ 의 분포를 나타내고 있으며 CaseIII의 경우가 CaseII의 분포보다 약 30% 정도 증가하였다. CaseII에서는  $u'$  및  $v'$ 가  $x/D=7$ 까지는 급격한 증가를 보이다가 그 이후부터는 완만하게 감소하나, Case III의 경우에는  $x/D=8$ 까지 급격하게 증가한다.

출구근처에서의 난류강도는 Entrainment에 의해 증가하나 유동하류로 갈수록 분류의 확산 및 주위 대기와의 에너지교환에 의해 그 영향이 감소한다.<sup>(3)</sup> 이러한 경향은 Case I, II 및 III의 경우 모두  $x/D=7$  이후  $u'$  및  $v'$ 가 감소한다는 사실로부터 확인할 수 있다.

### 3.3. 레이놀즈 전단응력

Fig. 11에 예증되는 바와 같이 레이놀즈전단응력  $\overline{u'v'}$ 의 절대값 외형은 Case I에서 x축을 따라서 대칭이다. 출구에서 정상화된 전단응력의 최대값은  $y/D=0.2671$ 에서 0.009이고 하류로의 거리와 더불어 감소한다. 그러나 예상대로  $y/D=0$ 에서 전단응력 값은  $\overline{u'v'}$ 의 유동측정에서 항상 거의 0의 주어진 신뢰도를 보여주고 있다. Fig. 11의 CaseII는  $x/D=1, 3, 6, 9, 12$ 에서 90° 굽힘관의 레이놀즈 전단응력분포를 보여준

다. 그 분포는 평균속도분포의 경사로 인해 더 이상은 x축을 따라 대칭이 아니다. 평균전단의 높은 영역에서  $\overline{u'v'}$ 의 더 큰 값들이 발생한다. 이것은

$$-\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{\partial U}{\partial y} \quad (1)$$

와 같은 난류 운동량 구배수송을 나타낸다. 그것은 또한 난류 발달의 높은 단계와 일반적으로 대규모 조직화된 구조에 의해 가동되어지는 강한 에너지산물의 부족으로 인한 “근접평형”을 가리킨다. 물론, 이 점은 현재로서는 입증될 수 없고, 한층 더한 연구가 유동의 조직화된 구조분야에서 필요로 하고 있다. 최대전단응력 값의 위치는 분류의 외곽영역으로 이동된다.  $x/D=1$ 에서 전단응력의 최대 양의 값은  $y/D=-0.6678$ 에서 0.0115이고 최대 음의 값은  $y/D=0.5008$ 에서 -0.0059이다.

최대 전단응력값은 초기경사 평균속도 감소의 영향 때문에 하류쪽으로 갈수록 거리와 함께 감소한다. 또한 영인 전단응력 지점은 x축으로 이동하고 대칭 난류구조에 관해  $x/D=6$  직경을 가리키는 경향 후에  $y/D=0$ 에서 정지한다. 그러나  $\overline{u'v'}$ 의 분포는 이 위치에서 아직 대칭이 아니다.  $x/D=9$ 에서의 분포는 x축에 대해 대칭이고, 이것은 유동이 초기 3차원 섭동으로부터 대칭조건에 도달하는 것을 증명한다. Fig. 11의 CaseIII는 다른 축위치에 관해서 난류구조를 파악할 수 있는 레이놀즈 전단응력의 분포를 예증한다.  $x/D=1$ 에서 양과 음의 최대전단응력 값은 90° 굽힘관의

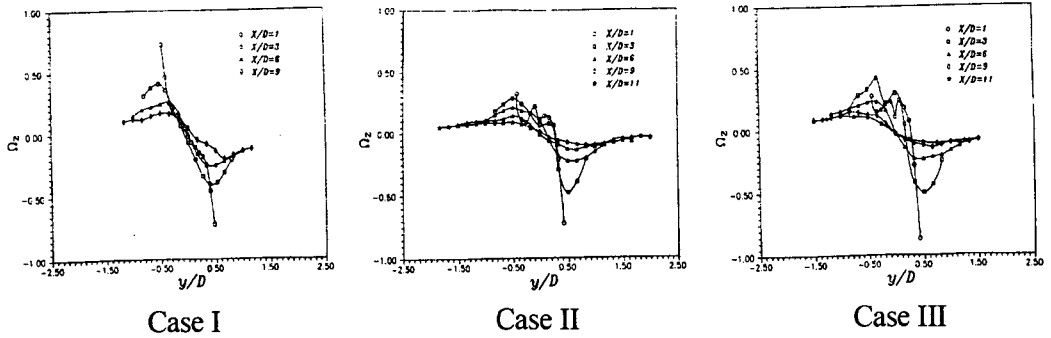


Fig. 12 Vorticity profiles for Case I,II,III

경우와 비교해 볼 때 약간 증가한다. 같은 축위치에서 최대 레이놀즈 전단응력  $\overline{u'v'}$ 의 위치는 90° 굽힘관의 경우에서와 거의 같은  $y/D=0.5008$ 에서 발견된다. 양의 y방향 최대값은  $x/D=4$ 가 될 때까지 증가한다. 한편, 음의 y방향 최대값은 변화하지 않는다.  $x/D=6$  직경후에 음의 최대값은 완만하게 감소하는데 반해 양의 최대 전단응력값은 급격하게 증가된다. 그 분포는 또한 Case III에서  $x/D=9$  직경후에 대칭이다. 그러므로, 초기경사 평균속도의 영향은 분류출구로부터  $x/D=9$  직경 이상에서 없어진다.

3.4 와류

각 데이터 측정지점에서 와류를 계산하기 위하여 측정은 대칭면에서 이루어지고 x와 y방향에서 증가(양)는 일정하다. 측정면에 수직인 와류성분은

$$\Omega_z = \frac{D}{U_b} \left( \frac{V}{x} - \frac{U}{y} \right) \quad (2)$$

로 정의된다.

Fig. 12의 Case I은  $x/D=1, 3, 6, 9$ 에서 직선관의 와류분포를 보여준다.  $x/D=1$ 에서 분류 안쪽면의 최대 와류는  $-0.248$ 이고, 대략 같은 절대치의 값인 그것의 바깥쪽면의 값은  $0.252$ 를 갖고 있다. 양과 음의 최대 와류의 위치는 대칭분포를 보인다. Case II의 경우는 경사흐름 방향의

평균속도 때문에  $x/D=1$ 에서 비대칭 와류형태가 보여진다. 그러나, 비대칭분포는  $x/D=7$  이후부터는 대칭으로 된다. 최소 와류 지점은  $x/D > 7$  인데서  $y/D=0$ 에서 머무르는 데, 이것은 레이놀즈 전단응력의 결과와도 일치한다. 이 결과는 유동방향 평균속도의 외형은 대칭으로 되며, 분류는 충분히 발달된 난류상태로 근접한다는 것을 가리킨다.  $x/D=11$ 에서  $0.0897$ 인 양의 최대 와류값은 대략 같은 값의 절대치인  $-0.0916$ 으로 음의 최대 와류값과 거의 같은 크기이다.

Case III의 경우에는 최대 양과 음의 와류 값이 Case II와 비교해 볼 때 더 크다.  $x/D=1$ 에서 음의 최대값은 Case II의 값과 비교해 보면 약 20%가 증가된다. 음의 와류 외형은 양의 와류보다 더 빠른 감소율을 갖고 있다. 그러나 양쪽의 감소율은  $x/D=7$  이후부터는 동일하게 된다.

게다가, Case II와 Case III에서는 두 분포의 크기와 전체 외형이  $x/D=9$  이후에 거의 동일하다.

4. 결론

본 연구를 통해 비대칭, 비압축성 난류분류 유동의 출구단 근처에서의 유동장에 대한 실험적 관찰을 수행하였다. 출구단에서의 유동속도 분포의 비대칭성은 파이프에 곡관부를 도입함으로써 달성될 수 있었으며, 곡관부의 곡률반경은 일정하게 유지되었다.

또한 실험을 통하여 평균속도분포 및 난류강

도를 측정하였다. 비대칭 속도분포를 지닌 분류 유동에 대한 관찰결과를 축대칭 속도분포를 지닌 분류유동의 실험자료와 비교·검토되었으며, 그 결과 출구단에서의 비대칭 속도분포로 인해 난류분류의 유동장이 크게 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 또한 최대평균속도 값은 곡관부의 굽힘도가 증가할수록 증가함을 알 수 있었으며, CaseⅢ의 난류강도가 CaseⅡ 보다 증가하였다.

전반적으로 비대칭 분류의 경우는 축대칭의 경우와 상이한 유동장 구조를 지니고 있음을 알 수 있으며, 곡관부의 굽힘도가 증가함에 따라 전반적으로 유동장의 구조가 크게 변형됨을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 초기속도분포가 비대칭인 난류분류를 이용하여 유동장의 에너지 교환 및 확산 등을 제어할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 현대건설(주)와 오산학원의 과제지원에 의해 이루어진 것의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Corrsin, S. , Natl. Advisory Comm. Aero-naut. Wartime Reports. No. 94, 1943
- (2) Gibson, M.M., "Spectra of Turbulence in a Round Jet", J. Fluid Mech. 15, pp. 161~173, 1963
- (3) Townsend, A.A., "The Mechanism of Entrainment in Free Turbulent Flows", J. Fluid Mech. 26, Part 4, pp.689~715, 1966
- (4) Krothapalli, A., Baganoff, D. and Karamecheti, K., "On the mixing of a Rectangula", J. Fluid Mech. 107, 1981
- (5) Oosthuizen, P.H., "An Experimental Study of Low Reynolds Number Turbulent Circular Jet Flow". ASME paper 83-fe-36, presented at ASME Applied Mechanics, Bioengineering and Fluids Engineering Conference, Houston/TX, USA, June 20-22. 1983
- (6) Shlien, D.J., " Observation of Dispersion of Entrained Fluid in the Self-preserving Region of a Turbulent Jet", J. Fluid Mech. 183, pp. 163-173, 1987
- (7) Papanicolaou, P.N. and List, E.J., "Investigation of Round Vertical Turbulent Buoyant Jets", J. Fluid Mech.195, pp.341~391. 1988
- (8) Hussain, F. and Tso, J., "Organized Motions in A Fully Developed Turbulent Axisymmetric Jet", J. Fluid Mech. 203, pp.425~448, 1989
- (9) Hussain, F. and Husain, H., "Elliptic Jet, Part 1. Characteristics of Unexcited and Excited Jets", J. Fluid Mech. 208, pp. 257~320, 1989