

열선 유속계에 의한 정사각형 단면의 270도 곡관에서의 난류유동 특성에 관한 연구

조석휴* · 최영돈** · 이건휘***

Measurement of Turbulent Flows in a Square Sectioned 270° Bend

Sok Hyu Cho, Kun Ho Chun, Gun Hye Lee

Key Words: Turbulent Flow(난류유동), Curved Duct(곡관), Secondary Flow(2차유동), Hot-wire Anemometer(열선유속계).

Abstract

Most of the past experimental or analytical studies were performed for the curved bend with a square cross-section. Velocity profiles and Reynolds stresses of the turbulence flow in the 270 degree bend with circular cross-section were measured by a hot-wire anemometer. The mean velocity of primary flowing direction effected by the downstream of bend in the entry region of the bend. The flow in the inner part of the bend slowed the distribution velocity relatively large and unsymmetric phenomenon. In the strong secondary flow occurred when the flow passed in the region of 45 degree to 90 degree . The secondary flow appeared very large value in the neighbor region of inner wall.

1. 서 론

기호설명

- W : z 방향 속도, 주방향 속도
- V : y 방향 속도, 반경방향 속도
- U : x 방향 속도, 원주방향 속도
- w : z 방향 요동속도, 주방향 요동 속도
- v : y 방향 요동속도, 반경방향 요동속도
- u : x 방향 요동속도, 원주방향 요동속도

곡관 유동은 많은 연구가 진행되고 있으며, 그에 따른 여러 단면에 대한 측정도 진행되고 있다. 열·유체 기계의 곡관내 유동은 주유동방향의 변화와 그로 인한 유선 곡률로 인하여 직관내의 유동과는 다른 복잡한 3차원 유동현상을 보인다. 이러한 곡관 내의 유체유동은 직관 내의 유동에서 검토할 수 있는 유동특성 외에 곡관 내의 곡률에 의한 원심력효과에 의해 2차유동이 발생한다. 따라서 열·유체 기계 작동효율 증대를 위한 곡관 내의 유동특성을 이해하기 위해서는 2차유동 및 난류유동을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 그러나 이와 같이 실제유동을 대상으로한 실험 및 수치적 연구는 그 특성을 규명하는 것은

* 원광대 대학원 기계공학과
 ** 고려대 기계공학과
 *** 원광대 기계공학과

실험적인 면에서 대단히 어려움이 많았다. 그래서 이와 유사한 유동으로 정사각 단면을 갖는 90° 또는 180° 곡관 내의 유동으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 국내외적으로 곡관에서의 복잡한 난류유동 측정에는 열선유속계가 주를 이루고 있으며, 열선유속계를 이용한 곡관내유동 실험은 Anwer, So와 Lai⁽¹⁾들이 원형단면 180° 곡관에서 3차원 성분 모두에 대해서 측정한바 있다. 국내에서도 곡관내의 유동계측 실험은 아직 열선유속계를 이용한 것이 주가 되고 있다. 문 등⁽²⁾과 유 등⁽³⁾은 경사형 열선을 조합하여 정사각 단면을 갖는 180° 곡관 내의 3차원 유동을 측정하였다. Chang 등⁽⁴⁾은 곡률 반경이 수력직경의 3.375배되는 정사각단면의 180° 곡관유동의 속도분포와 레이놀즈응력을 LDV로 상세히 측정하였다. 이⁽⁵⁾는 회전하는 정사각형 단면의 곡관내 유동을 계측한 바 있다. 본 연구에서는 정사각 단면(88.9mm×88.9mm)을 갖는 270° 곡관 내에서 프로브 포울 간섭에 의한 오차가 비교적 작은 1개 채널로만 측정이 가능한 경사형 열선 유속계를 사용한다. 또한 평균 및 요동속도를 측정하기 위해 열선 회전측정법이 사용하였다.

2. 속도 및 레이놀즈 응력 측정 이론

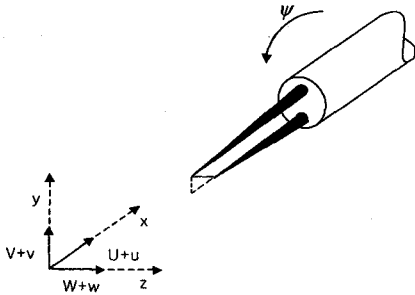


Fig. 1 Slant hot-wire and inertial and wire-oriented coordinate system.

Fig. 1은 유동장에 놓여진 경사형 열선 유속계와, 관성 좌표축 x, y, z 와 이에 대응하는 평균속도 성분 U, V, W 와 요동속도 성분 u, v, w 를 보여주는 그림이다. Fig. 1과 같은 좌표축과 속도 성분을 기준으로 경사각 α 인 경사형 열선을 임의의 각도 ψ 로 회전시켜 얻어지는 결과를

King⁽⁶⁾의 냉각법칙에 적용하여 관계식을 구하면 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$\begin{aligned} \frac{E(\psi, \alpha)}{S} = & [\{ (U+u) \cos \alpha + [(V+v) \cos \psi \\ & - (W+w) \sin \psi] \sin \alpha \}^2 \\ & + k^2 \{ -(U+u) \sin \alpha + [(V+v) \cos \psi \\ & - (W+w) \sin \psi] \cos \alpha \}^2 \\ & + h^2 [(V+v) \sin \psi + (W+w) \cos \psi]^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

이 식에서 E 는 열선 유속계에서 얻어지는 전압이며, S 는 열선의 보상시 얻어지는 보상 곡선 기울기이다. 본 연구에서는 경사형 열선을 6방향으로 회전시켜 얻어진 결과는 조합하여 평균 속도장을 계산하였다.

Dvorak 등⁽⁸⁾과 King⁽⁶⁾등은 I형 열선을 6방향으로 회전시켜 얻어진 결과를 이용하여, 레이놀즈 응력을 계산하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 평균 속도 측정 시 얻어진 출력 전압을 이용하여 레이놀즈 응력을 계산하기 위하여 이들의 제안 식을 수정하였다. 출력 전압과 출력 요동 전압의 관계식으로부터 얻어진 결과를 Taylor 정리에 의해 전개하면 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} U(\bar{Z}_i + z_i) = & U_f(\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \dots, \bar{Z}_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial U_i}{\partial Z_i} \Big|_{\bar{z}} z_i \\ & + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 U_i}{\partial Z_i^2} \Big|_{\bar{z}} z_i^2 + \sum_{i,j} \frac{\partial^2 U_i}{\partial Z_i \partial Z_j} \Big|_{\bar{z}} z_i z_j + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

이 식을 평균한 식과 제곱하여 평균한 식으로부터 다음과 같은 레이놀즈 응력을 구하는 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \overline{u_i u_m} = & \overline{U_i U_m} - \overline{U_i U_m} \\ = & \sum_{i=1}^n \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial Z_i} \frac{\partial \overline{U_m}}{\partial Z_i} \overline{z_i^2} + \sum_{i \neq j} \sum_{i=1}^n \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial Z_i} \frac{\partial \overline{U_m}}{\partial Z_j} K_{z, z_i} \\ & - \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial Z_i^2} \overline{z_i^2} + \sum_{i \neq j} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial Z_i \partial Z_j} K_{z, z_i} \right] \\ & \times \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 \overline{U_m}}{\partial Z_i^2} \overline{z_i^2} + \sum_{i \neq j} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 \overline{U_m}}{\partial Z_i \partial Z_j} K_{z, z_i} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

이 식에서 K_{z_i, z_j} 는 Z_i 와 Z_j 의 상관 관계항으로 열선의 각도와 열선의 회전 각도에 대해 다음과 같은 관계식이 구해진다.

$$K_{z_i, z_j} = \gamma_{z_i, z_j} \left[\frac{z_i z_j}{z_i^2 z_j^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

이 식에서 γ_{z_i, z_j} 는 다른 회전각에서 얻어지는 출력전압 간의 상관계수이다. 본 연구에서는 이들을 이용하여 레이놀즈 응력을 계산하였다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 아크릴로 제작된 단면적이 일정한 직관에, 곡률 반경의 비(R_c/D_H)는 0.357이고 단면의 크기($D_H = 88.9\text{mm} \times 88.9\text{mm}$)가 같은 270° 곡관을 연결하였다. 정사각단면을 갖는 270° 곡관에서의 속도 분포를 측정하기 위해 열선유속계로 실험을 수행하였는데, 작동유체로는 공기를 사용하였으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 2에 나타나있고, 270° 곡관은 Fig. 3에 나타나 있다. 송풍기에 의해 흡입된 공기는 사각곡관을 지나면서 완전히 확립된 속도분포를 가지고 곡관에 유입된다. 유량을 측정하기 위해서 ASME의 1-1/2D tap 오리피스를 사용하여 송풍기에서 유입된 공기가 오리피스를 지날 때의 압력차를 디지털 마노미터로 측정하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 정압 측정 구멍을 통하여 압력을 측정하였다. 평균유동과 난류특성을 측정하기 위해 S-type 프로브를 자동이송장치로 이송시키면서 측정하였다. 실험에 사용한 각각의 열선의 특성을 이해하기 위해 속도-전압보상 실험을 하여 선형화 보정곡선을 구하고, 열선의 비대칭성, 최대치의 편이, 회전각도와 방향에 따른 출력전압의 변화 등을 관찰하였다. 270° 곡관의 측정 위치는 Fig. 3에서와 같고, 측정은 자동 이송장치를 이용하여 열선 프로브를 일정한 간격으로 삽입을 하며, 각 각도 단면에 있는 4개의 구멍에 대해 $\phi=0^\circ$ 에서 $\phi=270^\circ$ 까지 측정하였다. 6개의 레이놀즈응력을 구하기 위하여 하나의 측정점에 대하여 6개 방향에 대하여 6개의 평균전압과 6개

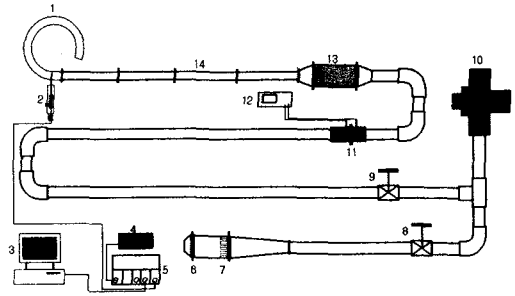


Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus the a curved duct flow

- 1 : 270 degree bend with circular cross-section (test section)
- 2 : Automatics traversing mechanism
- 3 : AD converter
- 4 : Oscilloscope
- 5 : Hot-wire anemometer
- 6 : Wire mesh
- 7 : Honeycomb
- 8 : By-pass valve
- 9 : Flow rate control valve
- 10 : Blower
- 11 : Orifice
- 12 : Digital-manometer
- 13 : Settling chamber
- 14 : Straight pipe

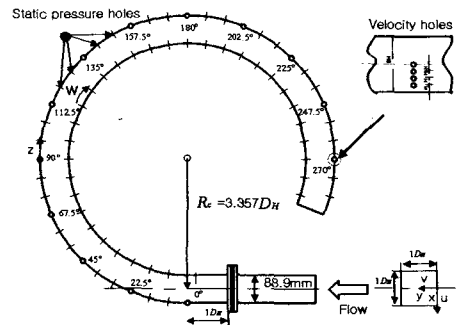


Fig. 3 Schematic showing the bend and the velocity components of the flow

의 요동전압의 제곱치와 요동전압의 3제곱의 평균치, 요동전압의 4제곱의 평균치를 측정하였다. 단면에 속도측정 할 때 AD변환기와 전산기를 이용하여 프로브 이송과 자료 샘플링을 번갈아 실행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 270도 곡관에서 곡관의 입구($\theta=0^\circ$)부터 곡관의 출구($\theta=270^\circ$)까지, 여러 단면에서 측정된 주유동 방향의 속도(W)와 반경방향 속도(V)를 주유동 방향 평균속도로 무차원화 하여 도시한 그림들이다. 또한 이 속도들은 단면의 중심을 따라 반경방향으로 곡관의 내벽($Y/D=0$)에서 외벽($Y/D=1.0$)을 따라 측정된 결과들이다. 곡관의 입구부($\theta=0^\circ$)에서의 주유동 방향 속도(W)는 하류인 곡관의 영향을 받아 단면의 내측부에서 속도가 상대적으로 크게 발달하는 비대칭 형상을 보여주고 있으며, 반경방향 속도(V)는 거의 0의 값을 가지고 있으나, 단면의 내외측 부근에서는 다소 값을 가지고 있다. 이 역시 하류 곡관의 영향으로 인해 유동이 교란되는 것으로 파악된다. 유동이 $\theta=45^\circ$ 인 지점에 도달하면, 이 위치보다 상류인 곡관의 입구부에 비해 외측면 부근의 주유동 속도가 감소하며, $\theta=67.5^\circ$ 인 지점에 도달하면 내측 부근에서의 속도가 급격히 감소한다. 다음 측정 위치인 $\theta=90^\circ$ 에서는 이러한 경향이 보다 강화되어, 그림에서 볼 수 있듯이 2중 극대의 형상이 두드러지게 나타난다. 반경방향 속도는 $\theta=22.5^\circ$ 에서부터 성장하기 시작하여 $\theta=67.5^\circ$ 인 지점부터는 매우 강력하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 $\theta=90^\circ$ 인 지점에서는 반경방향의 속도가 주유동 방향 속도의 최대 23%에 달하는 것을 볼 수 있다. 이는 곡관내로 유동이 흐르면 곡관의 곡률에 의해 원심력이 발생하며, 이 원심력은 다시 반경 방향의 압력분포에 불균형을 조장하여 강력한 2차유동이 발생하는 것으로 알려져 있다. 상하벽면의 저속유체는 오목한 내벽면을 따라 움직이고, 횡단면의 대칭 평면에서는 유동이 불룩한 외벽면을 따라 움직이도록 반경방향 압력구배가 발달하기 때문이다. 유동은 $\theta=90^\circ$ 인 지점을 지나면서 2차유동이 급격히 감소하기 시작함에 따라 주유동 방향 속도는 점차 안정되어 간다. 그러나 유동이 $\theta=180^\circ$ 인 지점을 통과하면서 다시 반경 방향 속도가 발달하기 시작한다. $\theta=180^\circ$ 인 지점의 하류에서 발생하는 2차유동의 크기는 곡관의 상류인 $\theta=67.5^\circ$ 인 지점에서 발달하

는 2차유동에 비해 작고, 보다 덜 교란적이기는 하지만 곡관의 출구까지 계속해서 지속적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 주유동 방향 속도 역시 완전히 발달하지 않고 비대칭인 형상을 계속해서 보여 주고 있다.

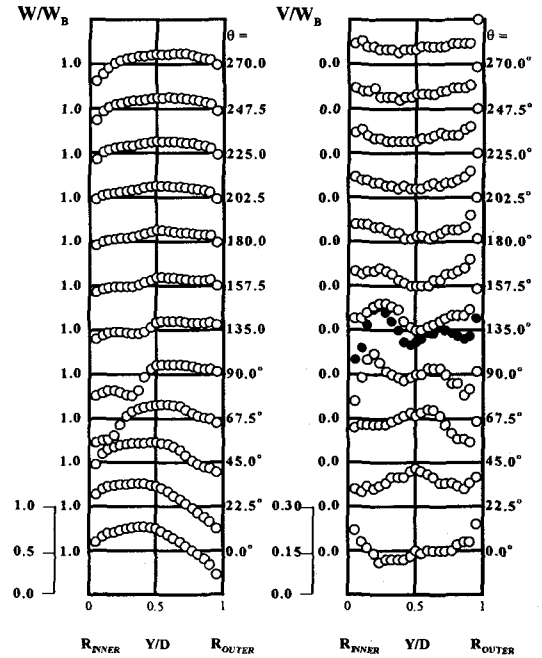


Fig.4 Logitudinal variation of normalized mean streamwise velocity(W/W_B) and mean radial velocity(V/W_B) along the center symmetry plane.

Fig. 5는 횡단면의 대칭선상을 따라 측정된 주유동 방향과 반경방향의 난류강도(w' , v')를 각각 보여주는 그림들이다. 곡관의 입구부인 $\theta=0^\circ$ 에서 이들 난류 강도는 양벽면 측에서의 값이 상대적으로 큰 U자형 형상을 보여주고 있으며, 두 난류 강도 모두 외측면 근처에서의 값이 내측면 근처에서의 값에 비해 다소 큰 경향을 보이고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 유동이 $\theta=45^\circ$ 인 지점을 지나면서 유동이 교란됨에 따라 이들 난류 강도 역시 급격한 변화를 보여주고 있다. $\theta=67.5^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 인 지점에서 볼 수 있는 주유동 방향 속도의 2중 극대 형상과 마찬가지로 이들 난류 강도 역시 2개의 정점을 갖는 매우 교란된 분포

가 형성됨을 볼 수 있다. 이 지역에서 발생하는 난류 강도의 변화는 발생한 2차유동에 의해 초래하며, 강화된 난류 강도에 의해 다시 평균 속도가 교란되는 것으로 추정된다. $\theta=90^\circ$ 인 지점을 지나면서 난류 강도는 점차 완화되는 경향을 보이며, $\theta=180^\circ$ 인 지점 이후 난류 강도는 외벽면 부근에서는 유동이 안정해짐에 따라 완전 확립된 직관에서의 난류강도를 보이나, 내벽면 측은 안정되지 않고 유로 중앙에서의 값과 비슷한 값을 보여 주고 있다.

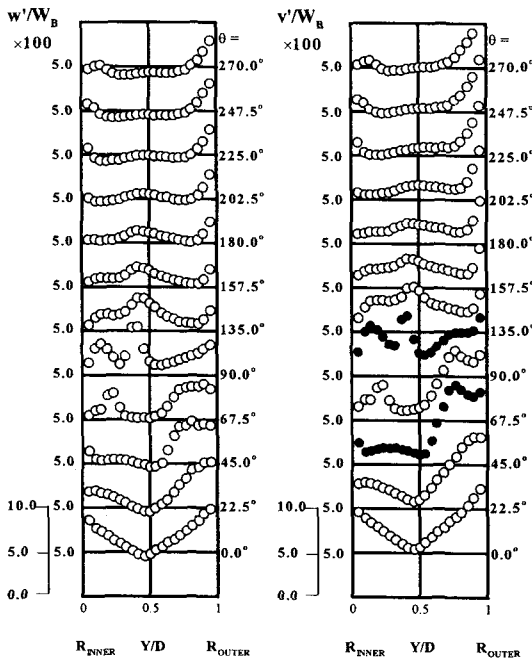


Fig.5 Logitudinal variation of normalized streamwise turbulent velocity(w') and radial turbulent velocity(v') along the center symmetry plane.

Fig. 6은 무차원화된 난류강도 $u'v'$ 와 $v'w'$ 를 표시한 그림들이다. 곡관의 입구부($\theta=0^\circ$)에서 난류강도 $u'v'$ 는 매우 작은 값을 보이나, 곡관의 외벽면 부근에서는 다소 성장된 형상을 볼 수 있다. 난류강도 $u'v'$ 는 유동이 $\theta=45^\circ$ 인 지점을 지나면서 주로 외벽면 부근에서 급격히 성장하며, 이러한 경향은 $\theta=90^\circ$ 인 지점까지 지속되고 이

보다 하류로 유동이 진행함에 따라 점차 완화되는 경향을 볼 수 있다. $\theta=157.5^\circ$ 인 지점부터 곡관의 출구부까지 난류강도 $u'v'$ 는 매우 작은 값을 유지하나, 외벽면에 인접한 지역에서는 작지만 교란된 현상을 보여주고 있다. 곡관의 입구부에서 전단응력을 의미하는 난류 강도 $v'w'$ 는 완전 확립된 직관에서의 전단응력과 비슷한 형상을 보여주고 있다. 즉 내측면에는 음의 값을 외측면에서는 양의 값을 가지며 횡단면 중앙에서는 거의 0의 값을 가지는 형상을 볼 수 있다. 그러나 2차유동이 성장함에 따라 이 난류강도 역시 급격한 변화를 보여 주고 있으며, $\theta=45^\circ$ 인 지점을 지나면서는 주방향 속도 분포와 같이 2중 극대를 보여 주고 있다.

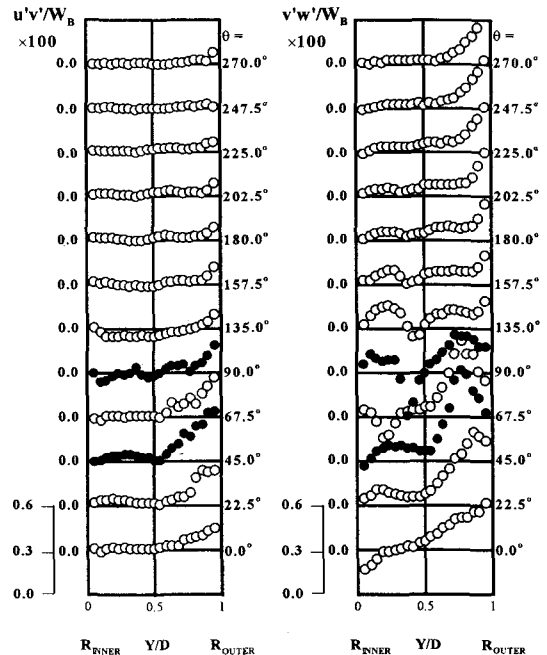


Fig.6 Logitudinal variation of normalized turbulent velocities($u'v'$ and $v'w'$) along the center symmetry plane.

이러한 현상은 $\theta=45^\circ$ 인 지점에서 최대로 발달하며 이후 점차 완화되는 경향을 보여주고 있다. 유동이 $\theta=180^\circ$ 인 지점을 지나면, 내측에서부터 횡단면 중앙까지는 거의 0의 값으로 유지되며 이 경향을 곡관의 출구인 $\theta=270^\circ$ 인 지점까지 계속

유지됨을 볼 수 있다. 다른 난류 강도와 마찬가지로 유동은 내측면 부근에서 안정되지 못하고 계속해서 교란되어 내측면 부근의 난류강도 v'/w' 가 음의 값으로 환원되지 못하고 요동하는 것으로 판단된다.

5. 결론

열선유속계를 사용하여 정사각 단면을 갖는 270도 곡관에서 평균속도와 난류 특성을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주유동 방향 평균속도는 곡관의 입구부에서 하류인 곡관의 영향을 받아 내측 부근이 상대적으로 큰 비대칭 형상의 속도 분포를 보여주었으며, 유동이 $\theta=45^\circ$ 인 지점을 지나면서 곡관의 곡률에 의한 원심력에 의해 2차유동이 강력하게 발생함에 따라 2중 극대 형상의 속도 분포를 보여 주었다. $\theta=90^\circ$ 인 지점 이후에도 유동은 완전히 확립되지 못하고 곡관의 내벽면 부근에서 주유동 방향의 속도가 교란되는 것으로 파악되었다.

(2) 2차유동은 곡관의 입구를 지나면서 발생하기 시작하여, $\theta=90^\circ$ 인 지점에서 주유동 방향 평균속도의 최대 23%에 달하는 크기를 보여주었다. $\theta=180^\circ$ 인 지점 이후에서도 2차유동은 일정한 크기를 유지하였으며, 내벽면에 인접한 지역에서 매우 큰 값을 보여주었다.

(3) 평균 속도장의 변화와 더불어 난류강도 역시 곡관을 지나는 동안 급격히 성장하였으며, $\theta=180^\circ$ 인 지점 이후에 난류강도들은 유동이 외벽면 측에서는 비교적 안정되나, 내벽면 부근에서는 계속해서 교란된 결과를 얻었다.

참고문헌

- (1) M.Anwer, R.M.C. So and Y.G. Lai, "Perturbation by and recovery from bend curvature of a fully developed turbulent pipe flow, Phys. Fluids A1(8), pp 1387~1397, 1989.
- (2) 문찬, 양승효, 최영돈, 유재석, "열선유속계에 의한 180도 곡관을 갖는 정사각단면의 덕트에서의 난류유동특성의 측정". 대한기계학회 논문집, 제12권, 4호, pp.900~1988.

- (3) 유석재, 박호영, 최영돈, 1990, "열선유속계 의한 180도 곡관을 갖는 직사각 단면 덕트에서의 난류유동특성의 측정", 대한기계학회 논문집, 제14권, 3호, pp.734~746.
- (4) Chang, S. M., Humphrey, J. A. C and Modavi, A., 1983, "Turbulent Flow in a Strongly Curved U-Bend and Downstream Tangent of Square Cross Section," PCH Physico Chemical Hydrodynamics, Vol. 4, pp. 243~269.
- (5) 이진휘, 1992, "회전하는정사각단면의90° 곡관내 난류유동특성에관한 연구",고려대학교 기계공학과 박사학위 논문.
- (6) King, C.F., 1978, "Some studies of vortex devices-vertex amplifier performance behavior", Ph.D.Thesis, Univ. College of Wales, Cardiff, Wales.
- (7) Acrivlellis, M., 1977, "Hot-wire measurement in flow of low and high turbulenc intensity", DISA INFO. No.22.
- (8) Dvorak, K., Syred, N., 1972, "The statistical analysis of hot-wire anemometer signals in complex flow fields", DISA Conferemce, Univ. of Leicester.
- (9) Jorgensen, F.E., 1971, "Directional Sensitivity of wire and hot-film probes", DISA INFO. NO.11.