

회전하는 정사각단면 90° 곡덕트 내 내향 난류유동 측정

김동철* · 전건호* · 최영돈**

Measurement of Inward Turbulent Flows in a Rotating with Square Cross-Section 90° Duct

Dong Chul Kim, Kun Ho Chun, Young Don Choi

Key Words: Turbulent Flow(난류유동), Rotation(회전), Curved Duct(곡덕트), Square Cross-Section(사각단면), Hot-wire Anemometer(열선유속계).

Abstract

Developing turbulent flows in a rotating 90 degree bend with square cross-section were measured by a hot-wire anemometer. The six orientation hot-wire technique was applied to measured the distributions of 3 mean velocities and 6 Reynolds stress components. Effects of Coriolis and centrifugal forces caused by the curvature and rotation of bend on the mean motion and turbulence structures were experimentally investigated. Productive addition of Coriolis and centrifugal forces to the outward radial direction in the entrance region of bend increases the secondary flow intensity according to the rotational speeds. However, after 45 degree of bend, centrifugal force due to the rotation of bend may promote the break down of counter rotating vortex pair into multi-cellular pattern, thereby decreasing the production rate of turbulence energy and Reynolds stresses.

기호설명

- k_1 : 요(Yaw) 계수
- k_2 : 피치(Pitch) 계수
- θ : 프로브 회전각도 (probe rotating angle)
- α : 프로브 각도(probe angle)
- γ_{zz} : 열선 사이의 상관계수(covariance)
- A_2 : 2차 불변항

1. 서 론

회전하는 펌프, 압축기, 터빈과 같은 터보기계

의 설계는 유로 현상이 복잡하기 때문에 그 유사차원 설계가 주로 되어 왔다. 그러나 터보기계 내의 3차원 난류유동을 전산해석 하는 기술의 발전에 따라 터보기계 유로형상의 최적설계를 위해서 전산 해의 정확성증진과 이를 위한 적합한 난류 모형의 개발이 가장 중요하게 되었다. 그러나 새로 개발된 난류모형들이 2차원유동이나, 정지한 3차원에서는 검증되었다. 실제의 유체기계내의 유로는 곡률만 존재하는 것이 아니라 냉각수 통로와 회전으로 인한 코리올리힘 또는 기관의 흡기부와 같이 단면 형상에 변화가 있거나 터보기계의 날개 유로와 같이 유로의 곡률 뿐 만 아니라 회전으로 인한 효과, 날개 통로의 단면적 변화 등 이를 동시에 작용하는 경우도 존재하여 3차원 유동에서의 난류모형 적정성 여부는 알려

* 고려대 대학원 기계공학과
 ** 고려대 기계공학과

져 있지 않다. 이에 회전하는 곡덕트 내의 해석이나 측정은 학문적인 측면에서 매우 중요함에도 불구하고 시험상의 어려움으로 인해 기초가 미비하다. 이⁽¹⁾는 90° 곡관의 회전실험과 전산해석을 통해 난류 모형에 따른 결과와 실험결과를 비교하였으며 안과 김⁽⁵⁾은 회전하는 가변단면 90° 곡관의 전산해석과 실험을 수행하였다. 그러나 이들의 실험에서 평균유동장은 비교적 정확히 측정했으나 레이놀즈 응력의 측정법에 많은 오차를 보여주고 있다. 본 연구에서 정사각 단면을 갖는 90° 곡관이 일정한 각속도로 회전하는 경우 덕트내 난류유동의 평균속도와 레이놀즈 응력을 정확히 측정하기 위한 연구를 수행하였다. S형 열선유속계를 6방향으로 돌리는 방법으로 비교적 정확한 레이놀즈 응력을 측정할 수 있었다.

2. 코리올리 힘이 난류 구조에 미치는 영향 고찰

Fig.1은 90° 회전하는 정사각 곡덕트의 형상과 크기를 나타낸다. 본 연구에서는 회전하는 정사각 단면 90° 곡덕트 내항유동에서 회전속도 변화와 레이놀즈응력의 변화를 측정하기 위한 실험을 수행하였다.

내항유동은 유동이 시험부를 통해서 회전 축에 위치한 중앙 홀을 쪽으로 흡입되는 유동이다.

회전하는 곡덕트 내에 작용하는 힘들이 난류 구조에 직접 미치는 영향은 레이놀즈응력 생성을 향 (P_{ij})와 압력변형을 향 (ϕ_{ij})이며 레이놀즈응력 방정식 내에서의 이들 항에 대한 고찰을 해보면 레이놀즈응력 변화의 경향을 파악할 수 있을 것이다. 압력변형을 향의 모형에 대해서 선형 등방성 회귀(Linear return to isotropy) 모형과 IP(isotropization of production rate) 모형을 사용하고 주유동 방향 속도와 레이놀즈응력이 단면 상에서 일정하다는 1차원 유동 가정을 도입하면 레이놀즈응력 방정식을 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$W \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial \theta} = -\frac{\epsilon}{k} (C_1 (\overline{u^2} - \frac{2}{3} k) + \frac{2}{3} \overline{u^2}) \quad ①$$

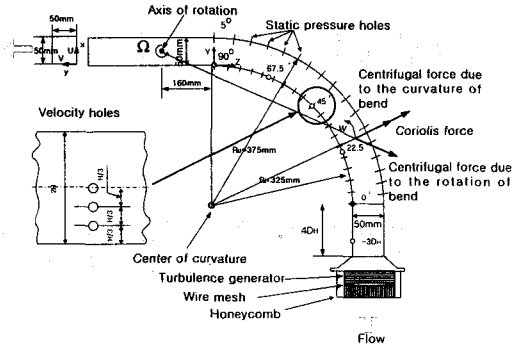


Fig. 1 Schematic diagram of test section showing the bend and tangents, the two coordinates systems and the three velocity component

$$+ \frac{2}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad ②$$

$$W \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial \theta} = -\frac{\epsilon}{k} (C_1 (\overline{v^2} - \frac{2}{3} k) + \frac{2}{3} \overline{v^2}) \quad ①$$

$$- \frac{4}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad ②$$

$$- 4 \Omega \overline{vw} \quad ③$$

$$W \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial \theta} = -\frac{\epsilon}{k} (C_1 (\overline{w^2} - \frac{2}{3} k) + \frac{2}{3} \overline{w^2}) \quad ①$$

$$+ \frac{2}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad ②$$

$$+ 4 \Omega \overline{vw} \quad ③$$

여기서 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, $\overline{w^2}$ 은 각각 수직방향, 반경방향, 유동방향 레이놀즈 응력을 나타낸다. 위의 방정식들은 일정한 면적을 가진 회전 곡덕트 내에 Reynolds stresses의 주유동 방향의 변화는 ① 등방성 회귀항, ②덕트의 곡률항과 ③코리올리힘의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

Fig.2는 회전원판의 평면도 이고 Fig.3은 회전

곡덕트 실험장치의 정면도이다. 시험부는 단면적의 변화가 없는 정사각 단면의 90° 곡관으로 되어 있다. 유동 단면적 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 으로 일정하다. 실험 장치 위에 놓여진 회전 원판의 지름은 1.95m 이며 유동은 외경 쪽에서 원판의 중심 쪽으로 이동하여 중심축에 설치된 구멍으로 유입된다. 유동은 송풍기에 의해서 흡입되며 유동이 오리피스를 지날 때의 압력차를 디지털 마노미터로 측정해 유량을 측정한다. 원판의 회전은 가변속 모터에 의해 구동되며 웜기어감속기를 통해서 감속된다. 회전하는 원판 위에 설치된 덕트부는 중심축으로부터 공기흡입부, 정류상자 (settling chamber), 교축부, 입구 직관부, 곡관부, 출구 직관부로 구성 되어 있다. 입구 직관부는 중공 회전축과 연결되어 있으며 회전축 내부를 지난 유체는 유출 원관을 통하여 송풍기와 연결되어 있다. 원판 위에는 난류 특성을 측정하기 위한 열선유속계 프로브(probe)가 올려져 있고 이를 이송시키기 위한 자동이송장치와 이송장치를 구동하는 제어장치(control panel)가 설치되어 함께 회전하게 된다.

열선프로브가 곡덕트 내에 삽입되어 유동의 속도를 측정하게 되는 위치는 Fig. 1 에 도시된 바와 같이 곡관부 입구로부터 $-3 D_H$, $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90.0^\circ$ 인 지점이다. 측정된 신호와 이송장치를 구동시키는 신호는 제어장치에 전원을 공급하는 선과 함께, 브러시와 슬립링 (slip ring)을 통해서 전달된다.

곡관의 수력직경에 대한 곡률반경의 비 (R_C/D_H)는 7이고, 일반적으로 회전의 크기가 유동에 미치는 영향을 나타내기 위한 무차원 수로는 비코리올리힘 ($R_o = r_m \Omega / W_B$) 이고 여기서 r_m 은 곡덕트의 평균반지름, Ω 은 회전속도, W_B 는 유동의 평균속도이다. 본 실험에서 비코리올리힘 R_o 는 0.25로 하였다. 각 각도 단면에 측정된 구멍의 위치는 $2X/D_H = 0.28, 0.64, 1.0$ 으로 Fig.1에 나타나 있다.

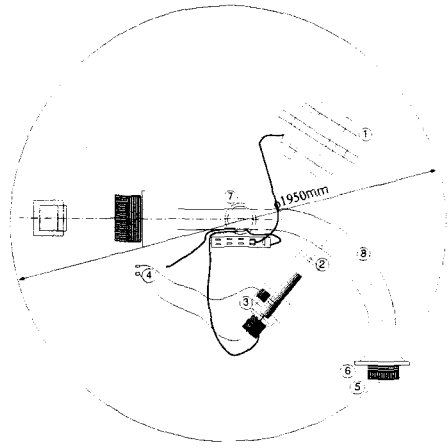


Fig.2 Upper view of the rotating disc

- 1 : Controlling Computer
- 2 : Rotating probe
- 3 : Automatic traversing mechanism
- 4 : Control box
- 5 : Setting chamber
- 6 : Turbulence generator
- 7 : Slip ring
- 8 : Test section

원판 회전에 따른 난류 특성의 변화를 보기 위해 R_o 를 0과 0.25 변화시키며 실험하였다. 열선유속계에 의한 3차원 속도 분포 측정과 난류 특성 측정은 경사형(S-type) 프로브로 측정하여 그 자료를 종합하여 난류 특성을 계산하게 된다.

4. 측정이론

열선유속계를 이용한 유동장의 측정에서 얻어지는 자료는 평균전압과 요동전압으로 나타내게 되며 이것을 속도성분과 난류요동 성분으로 변화하는 이론이 필요하다. 따라서 출력전압과 속도와 의 관계는 King⁽⁶⁾의 법칙과 Jorgensen⁽⁷⁾의 냉각이론과 같은 경험적 도식이 주로 사용하였다. 순시전압과 등가냉각속도와 의 관계는 일반적으로 다음의 King의 법칙을 사용하며 열선유속계에서의 출력을 선형화기기를 통해 얻는 경우에는 다음과 같은 간단한 선형식으로 나타낼 수 있다.

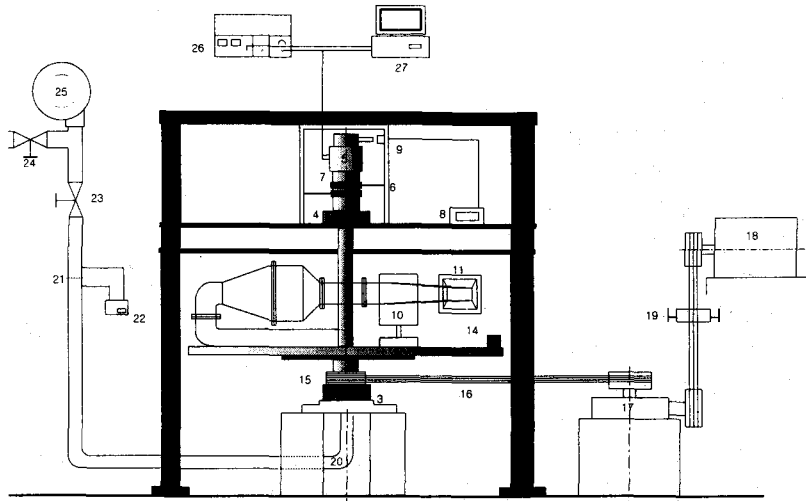


Fig.3 Schematic of the experimental apparatus the a rotating curved duct flow.

- 1 : Rotating shaft
- 2 : Rotating disc
- 3 : Lower bearing
- 4 : Upper bearing
- 5 : Slip-ring for hot-wire anemometer and traversing mechanism
- 6 : Brush for AC power
- 7 : Slip-ring for AC power
- 8 : Tachometer
- 9 : Contact sensor
- 10 : Traversing mechanism
- 11 : 90° curved duct of variable cross section (test section)
- 12 : power supply
- 13 : Step motor and scanning box driver
- 14 : Counter balance
- 15 : V-belt pulley
- 16 : V-belt
- 17 : Speed reducer
- 18 : Variable motor
- 19 : Roller for V-belt
- 20 : Stationary pipe
- 21 : Orifice
- 22 : Digital-manometer
- 23 : Flow rate control valve
- 24 : By-pass valve
- 25 : Blower
- 26 : Hot-wire anemometer
- 27 : AD converter
- 28 : Personal computer

계는 일반적으로 Jorgensen⁽⁷⁾에 의해 제안된 다음과 같은 식이 사용된다.

$$U_e = [u_N^2 + k_1^2 u_T^2 + k_2^2 u_B^2]^{1/2} \quad (2)$$

여기서 k_1, k_2 는 각각 yaw factor와 pitch factor를 나타낸다. u_B, u_T, u_N 는 열선의 방향을 따르는 좌표계상에서의 순시속도성분으로 Fig.4에 그 정의를 나타내었다.

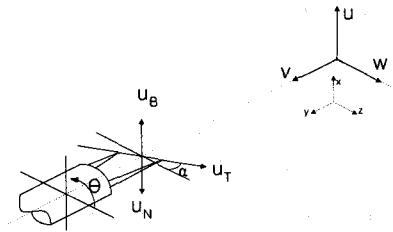


Fig. 4 Coordinate system

Fig. 4은 측정하고자 하는 유동장 내에 열선을 위치시켰을 때 절대 좌표계에서의 유동 속도 성분과 열선상에 위치하는 열선좌표계 상의 속도 성분간의 관계를 나타낸 그림이다.

$$\begin{bmatrix} u_B \\ u_N \\ u_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E = A + B \cdot U_e^n = h \cdot U_e \quad (1)$$

여기서 h 는 비례상수이며 이 값은 본 실험전에 보정 과정을 통해서 얻어지는 값이다. 여기서 등가냉각속도는 실제의 속도가 아니며 이 등가냉각속도와 실제 유동속도와와의 관계에 대한 정보가 필요하게 된다.

또한 실제의 속도와 등가냉각속도에 대한 관

Fig.1에서 보는 바와 같이 절대좌표 속도성분을 U, V, W 라고 하며, 열선좌표계상의 속도성분을 u_B, u_T, u_N 이라고 할 때, 유동이 열선과 열선의 지지대 등에 의한 영향을 전혀 받지 않는다고 가정하면 단순한 좌표변환관계에 의하여 다음과 같은 절대속도성분과 열선좌표계 속도성분간의 관계가 성립한다. 본 연구에서는 사용한 경사형 열선의 회전각은 $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 240^\circ, 270^\circ, 300^\circ, 330^\circ$ 로 실험에 앞서 각 6방향 별로 보정하여 구하여진 비례상수값을 이용, 얻어진 전압값을 사용하여 실험하였다.

5. 측정 결과 및 분석

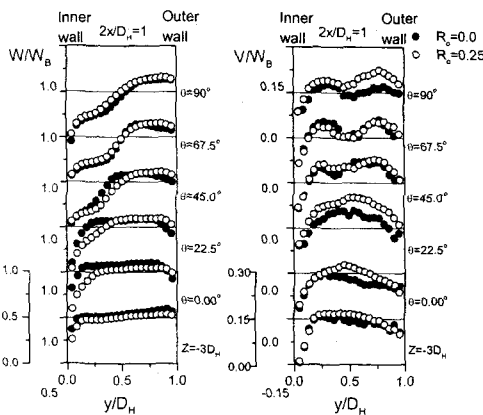


Fig.5 Logitudinal variation of normalized mean streamwise velocity (W/W_B) and mean radial velocity (V/W_B) along the center symmetry plane.

Fig. 5은 정지곡덕트와 회전곡덕트에서의 주유동 속도 W 와 반경방향 속도 V 의 $-3D_H$ 부터 90° 까지 중앙 단면에 따른 변화를 나타낸다. 곡덕트 회전 효과를 나타내는 비코리올리힘은 0.25이다. 유동이 곡관을 따라 진행함에 따라 주유동 속도 W 의 최대 위치가 정지상태와 회전상태 일 때 모두 외벽면쪽으로 치우치게 됨을 알 수 있다. 내향유동에서 코리올리힘과 곡관에 기인하는 원심력은 2차유동 강도가 증가되기 위하

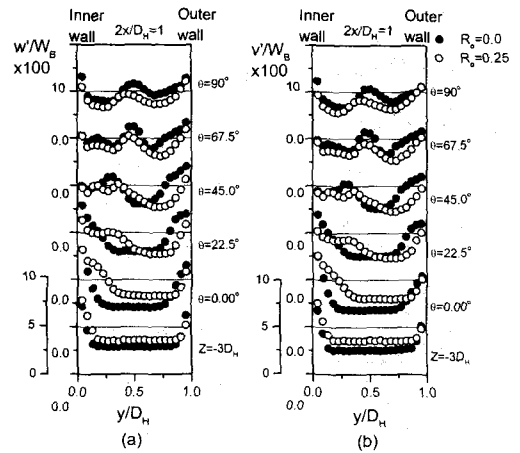


Fig. 6-(a) Longitudinal variation of turbulence intensity along the center symmetry plane
6-(b) Cross-sectional distribution of turbulence intensity at $\theta = 67.5^\circ$ station

여 반경 외벽 방향 쪽으로 향이 추가된다. 그러므로 주유동 최대 속도의 위치의 이동을 촉진한다. 그러나 $\theta = 45^\circ$ 이후에 곡관 회전에 기인하는 곡률원심력은 회전하는 와 쌍들의 부서짐을 촉진하여 외벽 쪽으로 최대속도의 이동을 막는다. 곡관의 회전에 기인한 원심력과 외벽 반경 사이에 비스듬한 경사각은 2차 유동의 곡률을 증가시키고 반대의 회전 와 쌍의 부서짐을 촉진시킨다. Fig.6 ~ Fig.7은 난류에너지와 rms 요동 속도에 대한 곡관의 회전효과를 보여준다. 그러나 \overline{vw} 에 코리올리 생성항 $-2(\overline{w^2} - \overline{v^2})\Omega$ 는 흡입 표면 근처에 \overline{vw} 의 양의 값을 감소시킨다. 그래서 난류에너지와 레이놀즈 수직 응력의 생성율이 감소로 된다. 압력면에 대해 레이놀즈응력의 코리올리 생성율은 $\theta = 0^\circ$ 에서 난류에너지와 레이놀즈응력을 함께 증가시킨다. 그러나 곡관으로 들어가는 유동에서 곡관의 회전은 흡입면 근처에 난류에너지와 레이놀즈응력의 감소를 초래한다.

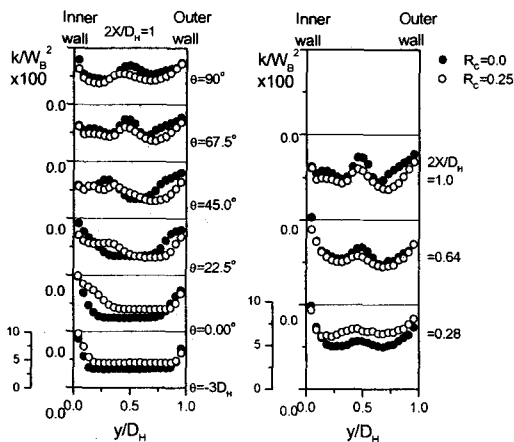


Fig. 7 Longitudinal variation of measured rms streamwise (w / W_B) radial and normal (u / W_B) turbulence velocities

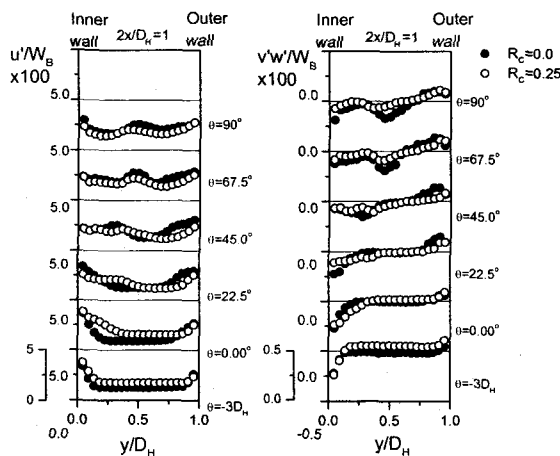


Fig. 8 Longitudinal variation of measured shear stress distribution along the center symmetry plane along the center symmetry plane.

6. 결론

- (1) 곡률 원심력과 코리올리힘의 반경 방향으로의 합은 곡관 입구지역에 2차 유동 강도를 증가시킨다.
- (2) 곡관의 $\theta = 45^\circ$ 이후에 곡관 회전에 기인하는 원심력은 상반된 와 쌍이 다중 와류 셀로부터 서점을 촉진한다.

(3) 회전하는 90° 곡관 유동에서 전단응력 \overline{vw} 방정식의 코리올리 생성항은 흡입면 근처에 레이놀즈 전단응력과 rms요동속도를 함께 감소시키는 반면에 내측 압력면 지역에서는 빠른 와의 성장에 기인하여 레이놀즈응력이 증가하지 못하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 지원하에(KOSEF 961-1005-044-2)진행 되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) 이건휘, 1992, "회전하는정사각단면의 90° 곡관 내 난류유동특성에관한 연구",고려대학교 기계공학과 박사학위 논문.
- (2) Y. D. Choi, J. S. An and W.K. Kim, 1998 "Numerical analysis of turbulent flow in a rotating 90° rectangular bend of variable coss section" Advances in Turbulence Research-. 1998,pp.103~119.
- (3) B.E. Launder, G.J. Reece and W. Rodi, 1975, "Progress in the Development of a Reynolds stress turbulence closure", J. Fluid Mech., Vol, 18, part 3, pp.537~566.
- (4) Y. D. Choi & C.H.Oh,1999, "Measurement of developing turbulent flows subject to plane rate of strain in a rotating curved duct of variable cross-section", Turbulence and shear flow-1 first international symposium, pp. 793~798.
- (5) 김동철 & 최영돈, 2000, "단순변형을 조건하에 회전하는 가변 단면 90° 곡덕트 내 내향 난류유동 측정", 2000, 춘계학술대회논문집 B, pp. 765~770.
- (6) King, L. V., 1914, "On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid, With Applications to Hot-Wire Anemometry ", Philos. Trans. Roy. Soc London, Vol.214, No.14, p. 373.
- (7) Jorgensen, F.E., 1971" Directional Sensitivity of Wire and Hot-Film probes", DISA INFO. NO.11.