

단순변형을 조건 하의 회전하는 가변단면 90° 곡덕트 내 내향 난류유동 측정

김동철*, 최영돈**

Measurement of Inward Turbulent Flows Subject to Plane Rate of Strain in a Rotating 90 Deg. Curved Duct of Variable Cross-Section

Dong Chul Kim*, Young Don Choi,**

Key Words: Turbulent Flow(난류유동), Rotation(회전), Plane Rate of Strain(단순변형율), Curved Duct(곡덕트), Variable Cross-Section(가변단면), Hot-wire Anemometer(열선유속계).

Abstract

Hot-wire measurements are reported on the developing turbulent flows subject to plane rate of strain in a rotating 90° deg bend. The cross-section of the bend varies from 100mm×50mm rectangular shape at the bend inlet gradually to the 50mm×100mm shape at the bend outlet with remaining a constant area. Data signals from the rotating test section are transmitted through a slip ring to the personal computer which is located at the outside of the rotating disc. 3-dimensional velocity and 6 Reynolds stress components were calculated from the equations which correlate the fluctuating and mean voltage values measured with rotating a slant type hot-wire into 6 orientations. The effects of Coriolis and centrifugal forces on the mean motions and turbulence structures are investigated with respect to rotational speed.

기호설명

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

1. 서론

펌프, 압축기, 터빈과 같은 터보기계의 설계는 그 유로 현상이 복잡하기 때문에 유사차원 설계가 주로 되어 왔다. 그리고 실제의 유체기계내의 유로는 곡률 만 존재하는 것이 아니라 터보기계 내의 냉각수 통로와 회전으로 인한 코리올리 힘 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 이들 모두가 동시에 작용하는 경우도 존재한다. 그러므로 최근 터보기계 내의 3차원 난류 유동을 전산해석 하는 기술의 발전에 따라 터보기계 유로 현상을 전산 해석적으로 최

* 고려대학교 대학원
** 고려대학교

적설계하는 연구에 큰 관심이 모아지고 있다. 최적설계를 위해서는 해의 정확성이 요구되며 이를 위해 적합한 난류모형의 적용이 가장 중요하다. 그러나 난류모형은 2차원이나, 정지한 3차원에서는 검증되었으나 회전하는 3차원 유동의 적정성 여부는 알려져 있지 않다. 그러기에 난류 모형들을 터보기계 내의 유동해석에 적용하려면 회전하는 곡덕트의 유동에서의 검증이 필요하다. 회전하는 곡덕트 난류유동 특성의 측정이나 해석은 설계적 측면이나 학문적 측면에서 대단히 중요함에도 불구하고 실험상의 어려움 등으로 많이 진척되고 있지 않아 그 기초가 부족하다. 이⁽¹⁾는 90° 곡관의 회전실험과 전산해석을 통해 난류 모형에 따른 결과와 실험결과를 비교하였으며 김⁽²⁾은 가변 사각단면 180° 곡덕트에서의 난류유동 특성 측정 및 해석을 했으며 안⁽²⁾과 정⁽³⁾, 권⁽⁶⁾은 회전하는 가변단면 90° 곡관의 전산해석과 실험을 수행하였다. 본 연구는 난류모형에 적합성 평가가 어려워 이를 극복하고자 물리적 의미를 얻기 위해 회전하는 곡덕트를 형상화하였으며 이는 단순변형율의 90° 곡관으로 면적은 일정하며 유동방향으로 변형이 가해지지 않고 단면 방향으로만 변형이 가해져 축방향에 따른 난류 특성 변화 경향이 명확하여 난류모형 검증에 적합하다. 본 실험을 위해 열선유속계로 3차원 유동을 측정하였으며 정지상태와 회전상태 일때에 난류 유동의 특성을 측정하고 분석 하고자한다.

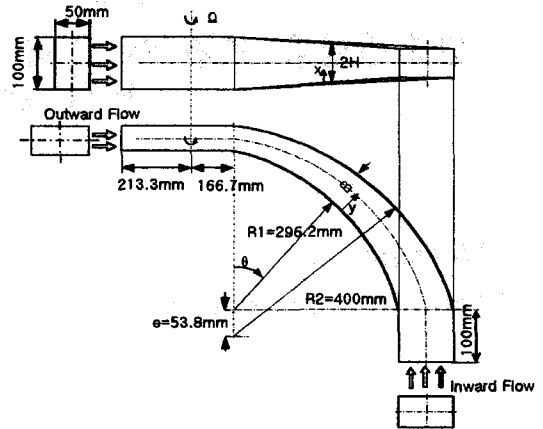


Fig.1 Schematic showing the shape of test section

회전하는 곡덕트 내에 작용하는 힘들이 난류 구조에 직접 미치는 영향은 레이놀즈응력 생성을 향 (P_{ij})와 압력변형율향(ϕ_{ij})이며 레이놀즈응력 방정식 내에서의 이들 항에 대한 고찰을 해보면 레이놀즈응력 변화의 경향을 파악할 수 있을 것이다. 압력변형율 향의 모형에 대해서 선형 등방성회귀성(linear return to isotropy) 과 IP(Isotropization of Production Rate) 모형을 사용하고 주유동 방향 속도와 레이놀즈응력이 단면 상에서 일정하다는 1차원 유동 가정을 도입하면 레이놀즈응력 방정식을 다음과 같이 단순화 시킬 수 있다.

2. 단순변형을 조건 하에서의 레이놀즈응력 변화의 고찰

Fig.1은 90° 회전하는 가변단면 곡덕트의 형상과 크기를 나타낸다. 본 연구에서는 내향유동에서 회전속도 변화에 따라 레이놀즈응력 변화를 알고자 실험을 수행하였다.

내향유동은 회전 홀 축에 위치한 중앙 홀을 쪽으로 실험 구역을 통해서 흡입하는 유동이다.

단순변형을 조건하의 곡덕트 유동에서는 주유동 방향으로만 변형율을 받지 않는다. 내향 유동의 경우 반경 방향의 변형율을 S 라 하면 수직 방향 변형율은 -S가 되어서 다음식이 성립된다.

$$V = \frac{\partial V}{\partial r} r = Sr \quad U = \frac{\partial U}{\partial x} = -Sx \quad (1)$$

$$\begin{aligned} w \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial \theta} &= -S \left(-2\overline{u^2} + \frac{2}{3} C_2 (2\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \right) \quad (1) \\ &\quad - \frac{\epsilon}{k} \left(C_1 \left(\overline{u^2} - \frac{2}{3} k \right) + \frac{2}{3} \overline{u^2} \right) \quad (2) \\ &\quad + \frac{2}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad (3) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} w \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial \theta} &= -S \left(2\overline{v^2} - \frac{2}{3} C_2 (2\overline{v^2} + \overline{u^2} - \overline{w^2}) \right) \quad (1) \\ &\quad - \frac{\epsilon}{k} \left(C_1 \left(\overline{v^2} - \frac{2}{3} k \right) + \frac{2}{3} \overline{v^2} \right) \quad (2) \\ &\quad - \frac{4}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad (3) \\ &\quad - 4Q \overline{vw} \quad (4) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} w \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial \theta} &= -S \left(2\overline{w^2} - \frac{2}{3} C_2 (2\overline{w^2} + \overline{u^2} - \overline{v^2}) \right) \quad (1) \\ &\quad - \frac{\epsilon}{k} \left(C_1 \left(\overline{w^2} - \frac{2}{3} k \right) + \frac{2}{3} \overline{w^2} \right) \quad (2) \\ &\quad + \frac{2}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad (3) \\ &\quad + 4Q \overline{vw} \quad (4) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, $\overline{w^2}$ 은 각각 수직방향, 반경방향, 유동방향을 나타낸다. 위의 방정식들은 일정한

면적을 가진 회전 곡덕트 내에 Reynolds stresses의 주유동 방향의 변화는 ①단순변형율(plane rate of strain), ②등방성 회귀성향, ③덕트의 곡률과 ④코리올리힘의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 곡덕트 내에 등방성 난류유동이 있다고 가정하면 단순 변형율에 의한 Reynolds stresses의 생성율항

$$\overline{u^2} : -s(-2\overline{u^2} + \frac{2}{3} C_2 A \overline{u^2}) = 0.4 \overline{u^2} S < 0 \quad (5)$$

$$\overline{v^2} : -s(2\overline{v^2} - \frac{2}{3} C_2 2\overline{u^2}) = -1.2 \overline{u^2} S > 0 \quad (6)$$

$$\overline{w^2} : -s(2\overline{w^2} - \frac{2}{3} C_2 2\overline{u^2}) = -1.2 \overline{u^2} S > 0 \quad (7)$$

은 내향 유동에서는 다음과 같이 된다.

따라서 내향유동에서 단순 변형율에 의한 생성율의 부호는 유동의 방향에 따라 $\overline{u^2}$ 의 생성율은 음의 값이고 $\overline{v^2}$ 의 생성율은 양의 값을 갖는다.

식 (7)에서 $\overline{w^2}$ 의 생성율이 $\overline{v^2}$ 의 생성율과 같게 된 것은 곡덕트에서의 덕트 곡률의 영향이며 유동의 덕트 곡률이 단순 변형율 조건과 복합되어 $\overline{v^2}$ 에서와 같은 생성율을 갖으나 이 항은 단순 변형율 조건하의 직관에서는 존재하지 않는다.

3. 실험장치 및 방법

Fig.2는 회전 원판을 위에서 본 것이고 Fig.3은 회전 곡덕트 내의 실험 설계도이다. 면적의 변화 없이 가변단면의 90° 곡관으로 되어있다. 단면의 면적은 일정하여 유동은 덕트 내에서 반경 방향과 수직 방향의 변형만을 받고 축방향으로는 변형을 받지 않는 단순변형을 조건이 된다. 유동이 들어가는 입구의 단면은 100mm × 50mm이며 출구 단면은 50mm × 100mm로 변화된다. 실험장치 위에 놓여진 회전원판의 지름은 1.95m이며 유동은 외경 쪽에서 원판의 중심에 위치한 구멍으로 유입된다. 유동은 송풍기에 의해서 발생되며 유동이 오리피스를 지날 때의 압력차를 디지털 마노미터를 이용해 유량을 측정한다. 원판의 회전은 가변속 모터에 의해 구동되며 워기어 감속기를 통해서 감속된다. 회전하는 원판 위에 설치된 덕트부는 중심축으로 부터 공기흡입부, 정류상자(settling chamber), 교축부, 입구 직

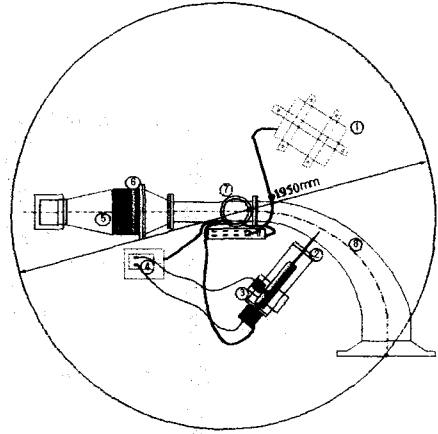


Fig.2 Upper view of the rotating disc

- 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

관부, 곡관부, 출구직관부로 구성되어 있다. 입구 직관부는 중공 회전축과 연결되어 있으며 회전축 내부를 지난 유체는 유출 원판을 통하여 송풍기와 연결되어 있다. 원판 위에는 난류특성을 측정하기 위한 열선유속계 프로브(probe)가 올려져 있고 이를 이송시키기 위한 자동이송장치와 이송장치를 구동하는 제어장치(control panel)이 설치되어 함께 회전하게 된다.

열선 프로브가 곡덕트 내에 삽입되어 유동의 속도를 측정하게 되는 위치는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 곡관부 입구로부터 $\theta=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90.0^\circ$ 인 지점이다. 측정된 신호와 이송장치를 구동시키는 신호는 제어장치에 전원을 공급하는 선과 함께, 브러시와 슬립링(slip ring)을 통해서 전달된다.

본 실험은 곡관입구부의 수력직경(D_h)은 0.0667m이며 수력직경을 기준으로 레이놀즈 수 10,000에서 수행했으며 유체는 상온의 공기이다. 유동은 회전중심부에서 회전반경 방향으로 흐르게 되어 있다. 회전 효과를 0rpm, 30rpm 두가지 경우로 측정하였다. 열선 유속계에 의한 3차원 속도분포 측정과 난류 특성 측정은 경사형

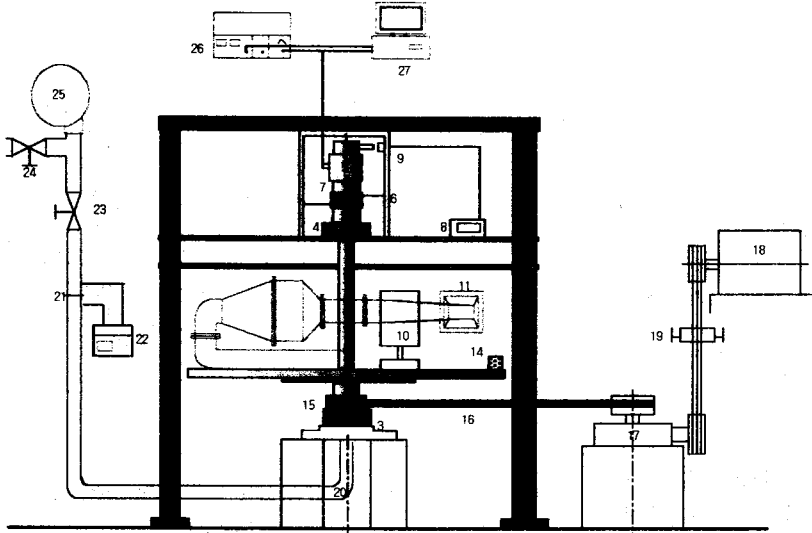


Fig.3 Schematic of the experimental apparatus the a rotating curved duct flow

- 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

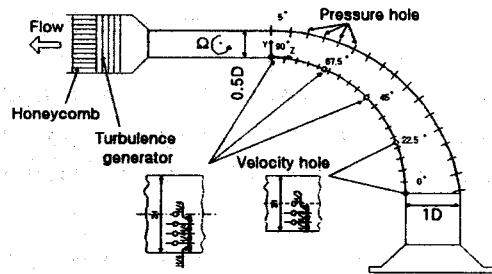


Fig.4. Location of the velocity and pressure holes

(S-type) 프로브로 측정하여 그 자료를 종합하여 난류 특성을 계산하게 된다.

열선유속계를 이용한 유동장의 측정에서 얻어지는 자료는 평균 전압과 요동전압으로 나타나게 되며 이것을 속도성분과 난류요동 성분으로 변화하는 이론이 필요하다. 따라서 출력전압과 속도와의 관계는 King⁽⁷⁾의 법칙과 Jorgensen⁽⁸⁾의 냉각이론과 같은 경험적 도식이 주로 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig 5.은 곡관의 대칭면에서 진행 방향에 따른 주유동 속도의 발달 과정을 각 단면별로 0rpm과 30rpm에 대해 비교한 그림이다. 정지 상태일 경우 곡관의 입구 단면인 $\theta=0^\circ$ 의 위치에서 주유동 속도 분포는 약간 외벽으로 치우쳐 있으나 전체적으로 평평한 형태이지만, 회전이 있는 경우 코리올리 힘이 곡률원심력과 중첩되면서 입구에서의 외벽과 내벽 사이의 압력 차이를 더욱 크게 발생하므로 순압력 구배가 커지는 내벽면 쪽의 속도는 증가하고, 역압력 구배가 커지는 외벽면쪽의 속도는 감소하는 경향이 뚜렷히 나타난다. 그리고 유동이 덕트 내로 유입되는 입구 길이가 100mm 정도 밖에 되지 않아 발달이 덜된 유동이 유입되므로 평편한 속도 분포를 보이는

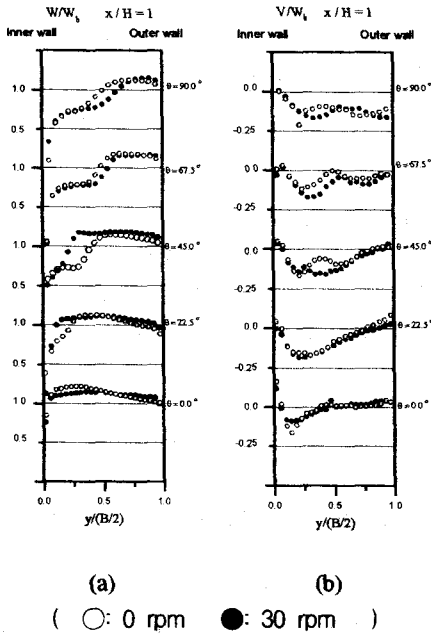


Fig.5 Streamwise and radial velocity profiles along the symmetric plane

것이다. $\theta=45^\circ$ 위치에서의 주유동 속도 분포를 나타낸 그림으로 전반적으로 내벽면 쪽에서부터 주유동 방향 속도 성분의 최대점이 외벽면으로 이동하고 있는 것을 알 수 있으며, 회전시에는 그 치우침이 커지는 것을 확연히 나타내 주고 있다. 곡관의 67.5° 위치에서는 정지시와 회전 시의 속도분포의 차이가 훨씬 줄어들었다. 정지된 상태에서는 곡률 원심력의 영향 때문에 이전 위치(45°)와 비교했을 때보다 외벽쪽으로 쏠려있지만 회전시에는 이전 위치, 즉 45° 지점에서의 주유동 속도분포를 그대로 갖고 있다. 이는 회전시에는 코리올리 힘과 곡률 원심력이 합쳐져 2차유동이 빨리 발생하면서 빨리 발달되어 45° 이후에는 확립된 2차 유동 형태를 유지하기 때문으로 생각된다. 회전이 없을 때는 그 발달 과정이 늦어서 $\theta=67.5^\circ$ 부근에서 확립된 2차 유동 형태를 갖게 되기 때문으로 생각된다. 출구 즉 90° 지점에서는 주유동 방향의 속도분포는 이전 지점들보다 굴곡이 없이 완만해졌다. 이는 이전에 생긴 여러개의 와들이 점차 합쳐지면서 주유동 방향의 속도가 외벽으로만 치우치기 때문이다. 따라서

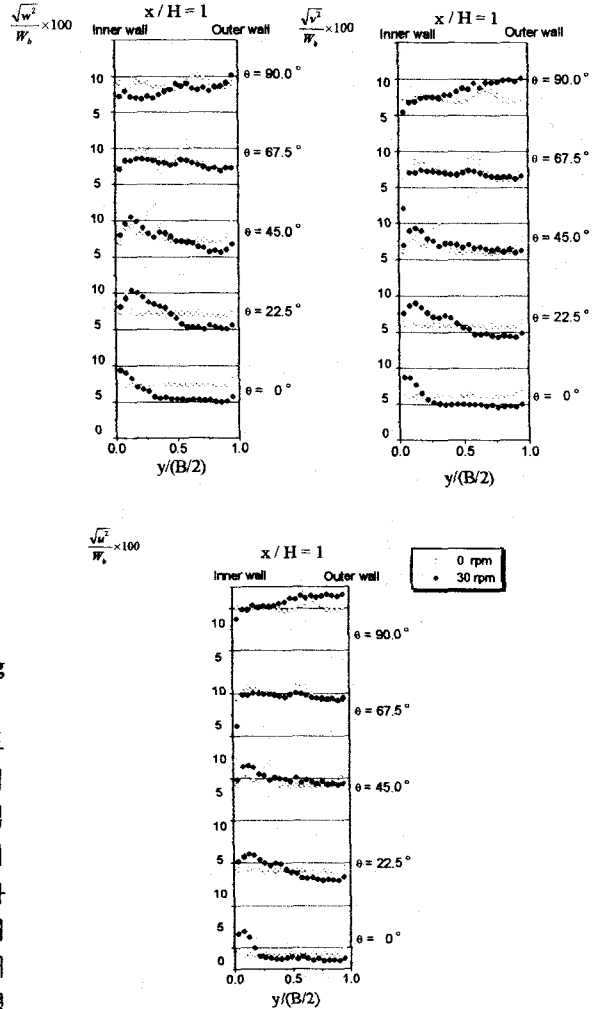


Fig.6 Longitudinal variation of turbulent velocities along the symmetric plane

(\circ : 0 rpm \bullet : 30 rpm)
 2중 극대가 안보이고 있다. 유동이 진행 방향으로 반경 방향으로 덕트의 폭이 줄어들고 수직 방향으로 덕트 높이가 증가하면서 대칭면에서의 주유동 속도평균 값이 줄어들면서 바닥면으로 유동의 많이 이동하였다. 정리하면 입구 부에서의 내벽면에 치우쳐 있던 덜 발달된 속도분포가 유동이 진행되면서 외벽쪽으로 쏠리는 경향을 확실히 보여주고 있다. 그리고 회전수의 증가에 따라 진행 방향으로 주유동 속도 성분의 최대점은 더욱 빨리 외벽으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 6개의 레이놀즈 응력을 모두 측정하였으나 주유동 방향과 반경방향, 회전축방향 수직응력 강도 $\sqrt{u^2}/W_0$, $\sqrt{v^2}/W_0$, $\sqrt{w^2}/W_0$ 의 측정 결과만에 대하여 고찰해 보기로 한다. Fig. 6은 곡덕트의 대칭면에서 유동 진행 방향에 따른 $\sqrt{w^2}/W_0$, $\sqrt{v^2}/W_0$ 의 난류강도를 나타낸 그림이다. 전체적으로 볼 때 $\sqrt{w^2}/W_0$ 이 $\sqrt{v^2}/W_0$ 보다 약간 큰 정도의 크기를 가지고 있으나 $\sqrt{u^2}/W_0$ 은 $\sqrt{w^2}/W_0$ 나 $\sqrt{v^2}/W_0$ 에 비해 20%에서 30% 낮음을 알 수 있었는데 이 크기는 곡덕트 입구부의 난류 생성 조건과 곡덕트의 형상 조건에 의해서 결정된 것이다. 수직응력의 경우 30rpm 회전 시에 내벽면에서는 정지 시보다 0°, 22.5°, 45°에서는 크나 67.5°, 90°에서는 점차 작아지는 경향을 보이고 있으며 외벽면의 경우에는 반대로 0°, 22.5°, 45°에서는 작으나 67.5°, 90°에서는 커지는 경향을 보이고 있어 역전되는 현상을 보이고 있다. 이와 같은 변화는 회전하는 곡덕트의 난류유동에서 코리올리힘과 원심력의 합쳐짐에 따라 분포가 평편해져서 내벽쪽의 속도 구배가 커지고 외벽쪽은 작아졌기 때문이다. 연구의 주목적은 평면 변형을 조건이 회전시 곡덕트 유동에서 난류구조에 미치는 영향을 알아보기 위함인데 레이놀즈 응력분포의 경향을 보면 그 영향이 뚜렷하게 나타나지 않고 있다. 이것은 식(1)에서 S가 너무 작아서 평면 변형을 조건의 영향이 2차 유동의 효과 등에 상쇄되어 나타나지 않기 때문이다.

4. 결론

- (1) 회전 속도가 증가함에 따라 외벽면의 압력은 증가하면서 내외벽면의 압력차이는 커지게 된다.
- (2) 내향 유동의 경우에는 정지 시와 회전 시 주 유동 방향의 최대 속도점은 곡덕트 입구에서는 내벽면 쪽에 위치하지만 유동의 진행하면서 내벽면 쪽의 속도가 급속히 감소되면서 출구부 부근에서는 외벽 쪽으로 치우치게 된다.
- (3) 내향 유동에서는 정지 시나 회전 시 모두 2차 유동의 강도가 증가하다 감소하게 된다. 초기에는 회전 곡덕트에서의 2차 유동의 강도

가 정지 곡덕트 보다 크나 곡덕트의 회전에 의한 코리올리힘이 곡을 원심력과 합쳐져서 2차 유동 와의 강도가 어느 이상 커지면 2차 유동은 다세포 와로 분해되기 때문에 2차 유동의 강도는 커지지 않는다.

- (4) 단면적이 일정할 경우 단순변형율(plane rate of strain)에 의해 확대되는 방향으로 수직응력은 감소하지만 축소되는 방향으로의 수직 응력은 증가하게 된다. 내향 유동의 경우 $\overline{u^2}$ 은 감소하고 $\overline{v^2}$ 은 증가한다.

참고문헌

- (1) 이진휘 1992, "회전하는정사각단면의 90° 곡관내 난류유동특성에 관한 연구", 고려대학교, 기계공학과 기계공학과 박사학위 논문.
- (2) Y. D. Choi, J. S. An and W.K. Kim "Numerical analysis of turbulent flow in a rotating 90° rectangular bend of variable coss section" Advances in Turbulence Research-1998, pp.103-119
- (3) 정근진, 1998, "회전하는 가변단면 90° 곡덕트 내의 난류유동 특성에 관한 실험적 연구" 고려대학교 기계공학과 석사학위논문
- (4) 오창민, 1999, "단순변형을 조건하의 가변단면 90° 곡덕트 내의 발달하는 난류유동 측정" 고려대학교 기계공학과 석사학위논문
- (5) 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
- (6) 권혁중 2000, "평면변형을 조건 하의 회전하는 90° 곡덕트 내 난류유동의 전산해석", 고려대학교 석사 학위 논문
- (7) 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
- (8) 김원갑, 1997, "가변 사각단면 180° 곡덕트에서의 난류유동 특성 측정 및 해석에 관한 연구", 고려대학교 박사 학위 논문