

# 단순변형률 조건 하의 회전하는 가변단면 90° 곡덕트내 외향 난류유동 측정

오 창 민\* · 최 영 돈\*\*  
(1999년 2월 25일 접수)

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

Chang Min Oh and Young Don Choi

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

### Abstract

Hot-wire measurements were carried out on the developing turbulent flows subject to plane rate of strain in a rotating curved duct. The cross-section of the curved duct varies from 100mm×50mm rectangular shape at the bend inlet gradually to the 50mm×100mm rectangular shape at the bend outlet. Experimental setup consists of the test section of 90° curved duct, rotating disc of 1.95m diameter, Ag-Ni precision slip ring, automatic traversing mechanism, variable speed motor, centrifugal blower, orifice flowmeter and hot-wire anemometer. Data signals from the rotating curved duct are transmitted through the slip ring to the computer which is located at the outside of the rotating disc. 3-dimensional velocity and 6 Reynold stresses components were obtained from the fluctuating and mean voltage measured by the slant type hot-wire probe rotating into 6 orientations. We investigate the effects of Coriolis and centrifugal forces on the turbulence structure.

기호설명

$A_2$  : 2차 불변항

$k_1$  : 요(Yaw) 계수

$k_2$  : 피치(Pitch) 계수

$\alpha$  : 프로브 각도(probe angle)

$\theta$  : 프로브 회전각도 (probe rotating angle)

$\gamma_{zz}$  : 열선 사이의 상관계수(Covariance)

### 1. 서론

최근 터보기계 내의 3차원 난류유동을 전산해석하는 기술의 발전에 따라 터보기계 유로 형상을 전산해석적으로 최적설계하는 연구에 큰 관심이 모아지고 있다. 전산유체역학에 의한 터보기계 유로 형상의 최적설계에서 가장 중요한 것인 해의 정확성을 확보하는 것이며 이를 위해서는 적합한 난류모형의 적용이 가장 중요하다. 최근 이와 같은 복잡한 3차원 난류유동을 해석할 수

\* 고려대학교 대학원

\*\* 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : ydchoi@kucnx.korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3355 FAX : (02)926-9290

있는 비선형 2차모멘트 난류모형이 많이 개발되고 있다. 그러나 이러한 난류모형들은 주로 2차원 유동이나 정지한 3차원 유동에서 검증되었기 때문에 회전하는 3차원 유동해석에서의 적정성 여부는 알려져 있지 않다. 그러나 이와 같은 난류모형들을 터보기계 내의 유동해석에 적용하려면 회전하는 곡덕트 유동에서의 검증이 필요하다. 회전하는 곡덕트 난류유동 특성의 측정이나 해석은 설계적 측면이나 학문적 측면에서 대단히 중요함에도 불구하고 실험 상의 어려움 등으로 많이 진척되고 있지 않아 그 기초가 부족하다. 이<sup>(1)</sup>는 90° 곡관의 회전실험과 전산해석을 통해 난류 모형에 따른 결과와 실험결과를 비교하였다. 안<sup>(2)</sup>과 정<sup>(3)</sup>은 회전하는 가변단면 90°곡관의 전산해석과 실험을 수행하였다.

단순변형률(plane rate of strain) 유동은 유동 방향으로 변형이 가해지지 않고 단면 방향으로만 변형이 가해져 축방향에 따른 난류 특성 변화 경향이 명확하여 난류모형 검증에 적합하다.

본 실험에서는 단면적이 일정하고 단면의 종횡비가 변화하는 회전 곡덕트 내의 3차원 유동을 열선유속계로 측정하였으며 정지상태와 회전 상태의 난류유동 특성을 측정하여 단순변형률조건 하에 회전하는 곡관내 2차 모멘트 난류모형의 검증에 필요한 BenchMark 자료를 제공하고자 한다.

### 2. 단순변형률 조건 하에서의 레이놀즈응력 변화의 고찰

회전하는 곡덕트 내에 작용하는 힘들이 난류 구조에 직접 미치는 영향은 레이놀즈응력 생성률 항 ( $P_{ij}$ )와 압력변형률항( $\phi_{ij}$ )다.

$$P_{ij} = - \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \overline{u_j u_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\phi_{ij} = \frac{p}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

따라서 레이놀즈응력 방정식 내에서의 이들 항에 대한 고찰을 해보면 레이놀즈응력 변화의 경향을 파악할 수 있을 것이다. 압력변형률 항의 모형에 대해서 저속항에 대해서는 Rotta모형(1950)

$$\phi_{ij} = -C_1 \frac{\epsilon}{k} \left( \overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) \quad (3)$$

을 사용하고 고속항은 IP(Isotropization of Production Rate) 모형 (Rodi and Launder(5)(1975))

$$\phi_{ij} = -C_2 \left( P_{ij} + F_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) \quad (4)$$

을 사용하며 레이놀즈응력의 소멸률  $\epsilon_{ij}$ 에 대해서는 Hanjalic과 Launder<sup>(6)</sup>(1976)가 제안한

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\overline{u_i u_j}}{k} \quad (5)$$

를 사용하기로 한다.

먼저 단순변형률 조건 하의 곡덕트 유동에서는 주유동 방향으로 변형률을 받지 않으며 외향 유동의 경우 반경 방향의 변형률을 S 라 하면 수직 방향 변형률은 -S가 되어서 다음 식이 성립된다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{\partial V}{\partial r} r = Sr \\ U &= \frac{\partial U}{\partial x} = -Sx \end{aligned} \quad (6)$$

식 (1~2)에 식 (3)~(6)을 가정하고 주유동 방향 속도와 레이놀즈응력이 단면 상에서 일정하다는 1차원 유동 가정을 도입하면 레이놀즈 응력 방정식을 다음과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} w \frac{\partial \overline{w^2}}{r \partial \theta} &= -S \left( -2\overline{w^2} + \frac{2}{3} C_2 (2\overline{w^2} + \overline{v^2} + \overline{u^2}) \right) \quad ① \\ &\quad - \frac{\epsilon}{k} \left( C_1 \left( \overline{w^2} - \frac{2}{3} k \right) + \frac{2}{3} \overline{w^2} \right) \quad ② \\ &\quad + \frac{2}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad ③ \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} w \frac{\partial \overline{v^2}}{r \partial \theta} &= -S \left( 2\overline{v^2} - \frac{2}{3} C_2 (2\overline{v^2} + \overline{w^2} - \overline{u^2}) \right) \quad ① \\ &\quad - \frac{\epsilon}{k} \left( C_1 \left( \overline{v^2} - \frac{2}{3} k \right) + \frac{2}{3} \overline{v^2} \right) \quad ② \\ &\quad - \frac{4}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad ③ \\ &\quad - 4\Omega \overline{vw} \quad ④ \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} w \frac{\partial \overline{w^2}}{r \partial \theta} &= -S \left( 2\overline{w^2} - \frac{2}{3} C_2 (2\overline{w^2} + \overline{u^2} - \overline{v^2}) \right) \quad ① \\ &\quad - \frac{\epsilon}{k} \left( C_1 \left( \overline{w^2} - \frac{2}{3} k \right) + \frac{2}{3} \overline{w^2} \right) \quad ② \\ &\quad + \frac{2}{3} C_2 \overline{vw} \frac{W}{r} \quad ③ \\ &\quad + 4\Omega \overline{vw} \quad ④ \end{aligned} \quad (9)$$

일정 단면적을 갖는 회전 곡덕트 내의 유동의 레이놀즈 응력의 주유동 방향 변화는 ①단순변형률(plane rate of strain), ②등방성회귀성(return to isotropy), ③덕트의 곡률과 ④코리올리힘의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

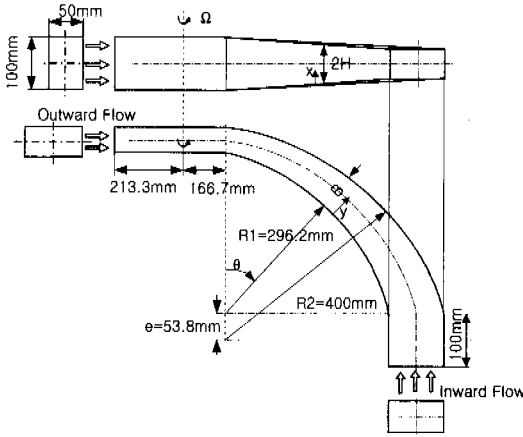


Fig. 1 Schematic showing the shape of test section

시험 곡덕트로 등방성 난류( $\overline{u^2} = \overline{v^2} = \overline{w^2}$ )가 유입되었다고 가정하고  $C_2=0.6$  (Rodi and Launder (1995))을 가정하면 단순변형률 조건에 의한 레이놀즈응력은 다음과 같다.

$$\overline{u^2} : -s(-2\overline{u^2} + \frac{2}{3} C_2 \overline{u^2}) = 0.4 \overline{u^2} S > 0 \quad (10)$$

$$\overline{v^2} : -s(2\overline{v^2} - \frac{2}{3} C_2 2\overline{u^2}) = -1.2 \overline{u^2} S < 0 \quad (11)$$

$$\overline{w^2} : -s(2\overline{w^2} - \frac{2}{3} C_2 2\overline{u^2}) = -1.2 \overline{u^2} S < 0 \quad (12)$$

따라서 외향 유동에서는 단순변형률 조건에 의해서 유동 방향에 따라  $\overline{u^2}$ 의 생성률은 양의 값이고  $\overline{v^2}$ 의 생성률은 음의 값을 갖는다. 식 (18)에서  $\overline{w^2}$ 의 생성률이  $\overline{v^2}$ 의 생성률과 같게 된 것은 곡덕트에서의 덕트 곡률의 영향이며 유동의 덕트 곡률이 단순변형률 조건과 복합되어  $\overline{v^2}$ 에서와 같은 생성률을 갖으나 이 항은 단순변형률 조건 하의 직관에서는 존재하지 않는다.

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에서 쓰인 90° 곡덕트의 형상과 크기를 나타낸다. 유동이 들어가는 입구의 단면은 50mm×100mm이며 출구 단면은 100mm×50mm로 변화가 된다. 단면의 면적은 일정하여 유동은 덕트 내에서 반경방향과 수직 방향의 변형만을 받고 축 방향으로의 변형을 받지 않는 단순변형률 조건이 된다.

Fig. 2는 원판 위에 놓인 실험장치의 개략도이

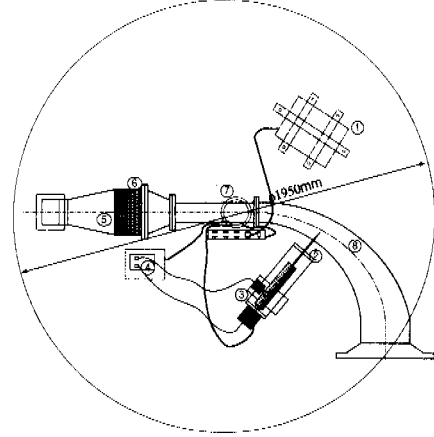


Fig. 2 Upper view of the rotating disc

- 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

다. Fig. 3은 실험장치의 정면도이다. 실험장치는 1980mm 직경의 회전 원판 위에 놓여지며 유동은 원판의 중심에 위치한 구멍으로부터 외경 쪽으로 유출된다. 유동은 송풍기에 의해서 발생되며 오리피스로 유량을 측정한다. 원판의 회전은 가변속 모터에 의해 구동되며 워기어 감속기를 통해서 감속된다.

회전하는 원판 위에 설치된 덕트부는 중심축으로부터 공기흡입부, 정류상자(settling chamber), 교축부, 입구직관부, 곡관부, 출구직관부로 구성되어 있다. 입구 직관부는 중공 회전축과 연결되어 있으며 회전축 내부를 지난 유체는 유출 원판을 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)이 설치되어 함께 회전하게 된다.

열선 프로브가 곡덕트 내에 삽입되어 유동의 속도를 측정하게 되는 위치는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 곡관부 입구로부터  $\theta=0^\circ, 22.5^\circ, 45.0^\circ, 67.5^\circ, 90.0^\circ$  인 지점이다. 압력 구멍은

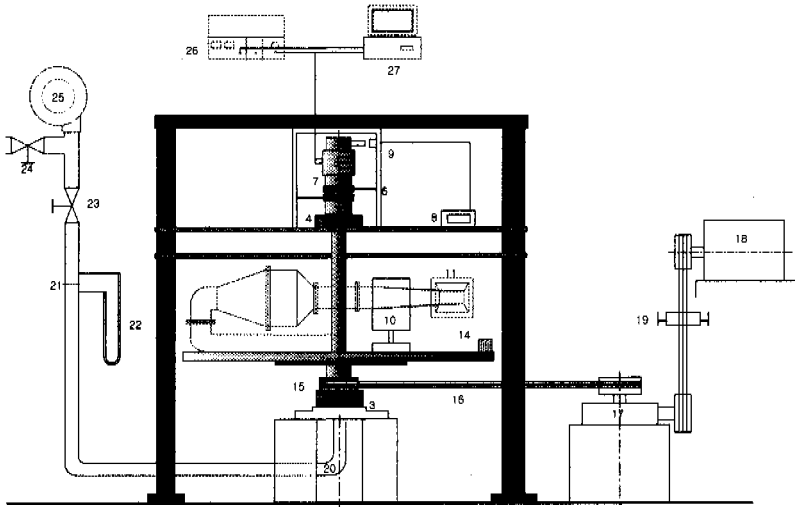


Fig. 3 Schematic of the experimental apparatus for the rotating curved duct flow

- |  |                           |   |                        |
|--|---------------------------|---|------------------------|
| 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 : U-manometer          | 23 : Flow rate control valve                                  | 24 : By-pass valve     |
| 25 : Blower  | 26 : Hot-wire anemometer  | 27 : AD converter   | 28 : Personal computer |

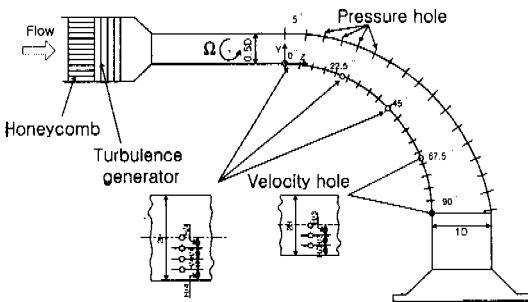


Fig. 4 Location of velocities, Reynolds stresses and pressure measurement

내벽면에 있어서는 내벽면의 곡률을 따라 5° 간격으로 90° 까지 직경 1mm의 구멍 19개가 뚫여 있으며, 외벽면에 있어서는 5° 간격으로 80° 까지 직경 1mm의 구멍 17개가 뚫여 있다.

측정된 신호와 이송장치를 구동시키는 신호는 제어장치에 전원을 공급하는 선과 함께, 브러시

와 슬립링(slip ring)을 통해서 전달된다.

본 실험은 곡관입구부의 수력직경 ( $D_h$ )과 동점성계수 ( $\nu$ )를 기준으로 레이놀즈수 10,000에서 수행했으며, 유동은 회전중심부에서 회전반경 방향으로 흐르게 되어 있다. 회전 효과를 0rpm, 30rpm과 45rpm 세 가지 경우로 측정하였다. 열선 유속계에 의한 3차원 속도분포 측정과 난류 특성 측정은 경사형 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<sup>(7)</sup>의 법칙과 Jorgensen<sup>(8)</sup>의 냉각이론과 같은 경험적 도식이 주로 사용하였다.

### 3.1 속도측정이론

순시전압과 등가냉각속도와의 관계는 일반적으로 다음의 King의 법칙을 사용하며 열선유속계

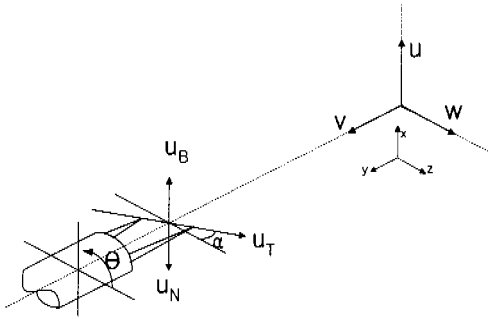


Fig. 5 Coordinate system

에서의 출력을 선형화기기를 통해 얻는 경우에는 다음과 같은 간단한 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$E = A + B \cdot U_e^n = h \cdot U_e \quad (13)$$

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

또한 실제의 속도와 등가냉각속도에 대한 관계는 일반적으로 Jorgensen(1971)에 의해 제안된 다음과 같은 식이 사용된다.

$$U_e = [u_N^2 + k_1^2 u_T^2 + k_2^2 u_B^2]^{1/2} \quad (14)$$

여기서  $k_1, k_2$ 는 각각 yaw factor와 pitch factor를 나타낸다. 식 (2)와 식 (4)로부터 평균전압과 순시 속도성분과의 관계를 구할 수 있다. 여기서  $u_B, u_T, u_N$ 는 열선의 방향을 따르는 좌표계상에 Fig. 5는 측정하고자 하는 유동장 내에 열선을 위치시켰을 때 절대좌표계에서의 유동 속도 성분과 열선상에 위치하는 열선좌표계 상의 속도 성분 간의 관계를 나타낸 그림이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 절대좌표 속도성분을  $U, V, W$ 라고 하며, 열선좌표계 상의 속도성분을  $u_B, u_T, u_N$ 이라고 할 때, 유동이 열선과 열선의 지지대 등에 의한 영향을 전혀 받지 않는다고 가정하면 단순한 좌표변환 관계에 의하여 다음과 같은 절대속도 성분과 열선좌표계 속도 성분 간의 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} u_B \\ u_N \\ u_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$U_e = [A_1 U^2 + A_2 V^2 + A_3 W^2 + A_4 UV + A_5 VW + A_6 UW]^{1/2} \quad (16)$$

$$A_1 = \sin^2 \theta \sin^2 \alpha + k_1^2 \sin^2 \theta \cos^2 \alpha + k_2^2 \cos^2 \theta$$

$$A_2 = \cos^2 \alpha + k_1^2 \sin^2 \alpha$$

$$A_3 = \sin^2 \alpha \cos^2 \theta + k_1^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + k_2^2 \sin^2 \theta$$

$$A_4 = (1 - k_1^2) \sin 2\alpha \sin \theta$$

$$A_5 = (1 - k_1^2) \sin 2\alpha \cos \theta$$

$$A_6 = (\sin^2 \alpha + k_1^2 \cos^2 \alpha - k_2^2) \sin 2\theta$$

본 연구에서는 경사형 열선의 프로브를  $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 240^\circ, 270^\circ, 300^\circ, 330^\circ$  회전시키며 평균전압과 요동전압을 측정하여 이로부터 평균 속도 성분과 레이놀즈응력 성분을 계산하였다.

### 3.2 레이놀즈응력 측정이론

열선유속계로 측정하여 얻은 실험결과로 레이놀즈응력을 계산하기 위해 Ganjua 등은 Dvorak과 Syred,<sup>(9)</sup> King이 제안한 식이 다음과 같이 변형된다고 하였다.

$$\begin{aligned} \overline{u u_m} = & \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\partial \overline{U_i U_m}}{\partial E_i} \right) \overline{\sigma_{E_i}^2} + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1, j \neq i}^6 \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial E_i} \frac{\partial \overline{U_m}}{\partial E_j} K_{E_i E_j} \\ & - \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial E_i^2} \overline{\sigma_{E_i}^2} + \sum_{j=1, j < i}^6 \sum_{i=1}^6 \frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial E_i \partial E_j} K_{E_i E_j} \right] \\ & \times \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \frac{\partial^2 \overline{U_m}}{\partial E_i^2} \overline{\sigma_{E_i}^2} + \sum_{j=1, j < i}^6 \sum_{i=1}^6 \frac{\partial^2 \overline{U_m}}{\partial E_i \partial E_j} K_{E_i E_j} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

여기서  $\overline{\sigma_{E_i}^2}$ 은 프로브를 회전각  $\theta$ 로 놓았을 때  $\overline{e_i^2}$ 을 의미하며 하첨자  $i$ 와  $j$ 는 측정각도 중 하나를 의미하며  $K_{E_i E_j}$ 는  $i$ 열선과  $j$ 열선 사이의 covariance로 다음과 같이 계산된다.

$$K_{E_i E_j} = \gamma_{E_i E_j} [\overline{\sigma_{E_i}^2} \cdot \overline{\sigma_{E_j}^2}]^{1/2} \quad (18)$$

여기서  $\gamma_{E_i E_j}$ 는  $E_i$ 와  $E_j$  사이의 상관계수이며, 여기에서 쓰인 상관계수는 아래와 같다.

$$\gamma_{E_i E_j} = \eta^{n-1} (\cos 30^\circ)^n \quad (19)$$

### 3.3 오차해석

오차해석은 ASME에서 제시한 방법<sup>(10)</sup>에 의해서 행해졌다. 레이놀즈와 디지털 마노미터의 오차는 0.95%와 0.2%이며 평균속도와 난류속도에 대한 오차는 각각 4.4%와 2.9%이었다. 따라서 압력계수 평균속도 난류속도에 대한 복합오차는 각각 0.96%, 4.5%와 3.0%로 추정되었다.

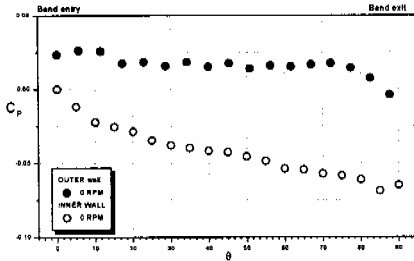
4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5은 정지하고 있는 곡덕트와 회전하고 있는 곡덕트의 내외벽의 압력분포를 압력계수로 표시한 결과이다.

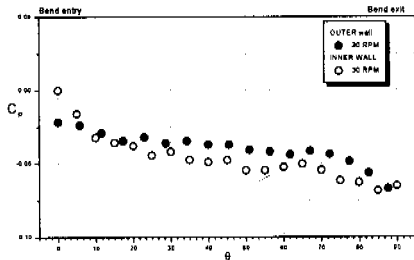
압력계수의 정의는 다음과 같다.

$$C_p = \frac{P - P_r}{\frac{1}{2} \rho W_{B, in}^2} \quad (20)$$

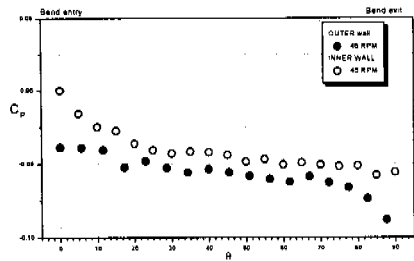
여기서  $P$ 는 국부압력,  $P_r$ 은 기준압력이며 본 연구에서는 유체가 유입되는 곡덕트 입구에서의 내벽면 압력을 기준으로 하였다. 단면평균속도  $W_B$ 는 곡덕트 입구에서의  $Re = 10,000$ 에 해당되는 평균속도로 무차원하였다



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Comparison of the measured pressure coefficient for  $Re=10,000$

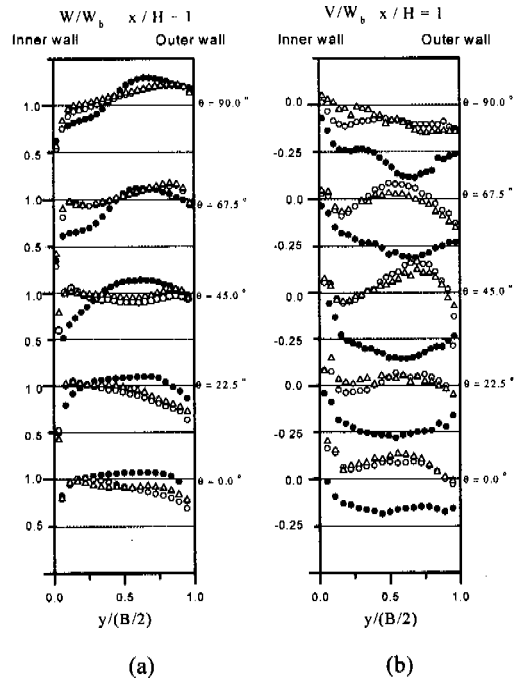


Fig. 7 Longitudinal variation of streamwise and radial velocity profiles  $x/H=1$

정지하고 있는 경우는 곡률에 의한 원심력에 의해 양벽면 간의 압력차가 생겨서 외벽면의 압력계수가 내벽면보다 커진 것을 알 수 있다. 이와 달리 회전하고 있는 경우는 덕트 곡률에 의한 원심력과 회전에 의한 코리올리힘이 서로 반대 방향으로 작용되어 상쇄되기 때문에 양단 간의 압력계수차가 역전되는 현상이 발생하게 된다.

Fig. 6은 유동의 진행 방향에 따른 주유동 방향 속도성분과 반경 방향 속도 성분의 정지 시와 회전 시의 곡관내의 발달 과정을 나타낸 그림으로서 정지 시에서는 진행 방향에 따른 원심력의 증가로 인해 반경방향 속도성분( $V$ )은 점차 커지게 되면서 주유동 방향 속도성분의 최대점을 점차 외벽면 쪽으로 이동하게 한다. 그러나 회전 시에는 2차 유동의 속도분포가 정지시보다 더 큰 굴곡을 갖게 된다. 이는 정지시에 발생한 큰 와(vortex)가 다중세포 와(multi-cell vortex)로 나뉘어지고 있음을 나타낸다. 이는 회전의 영향 때문에 2차 유동이 정지 시보다 빨리 발달하며 와의 분해가 빨라짐을 말한다. 그러나 Fig. 7에서 보는 것과 같이 코리올리힘의 방향이 곡률 원심력 방향과 반대가 됨에 따라 2차 유동의 강도가

약해져서 유동 방향에 따른 최대 속도점이 외벽 쪽으로 치우치는 경향이 적고 전체적으로 속도 분포가 평평해졌다.

본 연구의 회전속도 범위에서는 곡률원심력에 대한 코리올리힘의 비  $\gamma(=2\Omega R_c/W_B)$ 가 0.23 이므로 전단면에서 곡률원심력이 코리올리힘 보다 크므로 Fig. 8은  $\theta=45^\circ$  에서는  $y/(B/2)=0.5$  부근에서 오탁한 속도분포를 보이다가 그 후에서

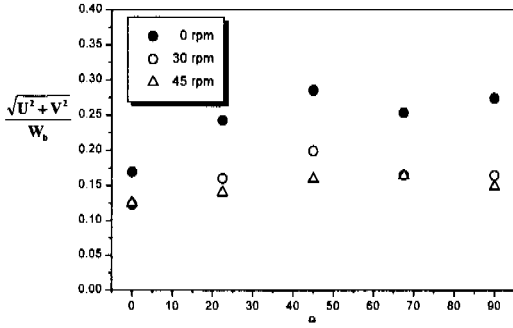


Fig. 8 Dimensionless secondary flow intensity normalized by mean velocity at the inlet for the outward flow

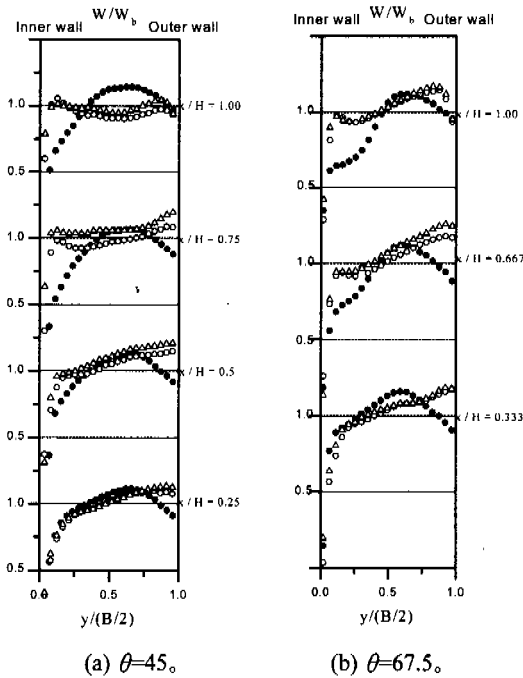


Fig. 9 Streamwise velocity in the cross section of the curved duct

전차 외벽쪽으로 치우침을 알 수 있다. 정지 곡덕트의 최고 속도점은  $\theta=67.5^\circ$  를 지나면서  $y/(B/2)=0.6$ 부근에서 머물며 더 이상 외벽 쪽으로 이동하지 않고 내벽 쪽의 주유동 방향 속도는 회전 곡덕트 유동보다 낮은 속도분포를 보여준다. 이것은 정지 곡덕트에서는 내벽면 쪽에 상당히 큰 Eckmann 와가 형성되어 있음을 나타내나 회전 곡덕트에서는 Eckmann 와의 생성이 약하기 때문으로 생각된다.

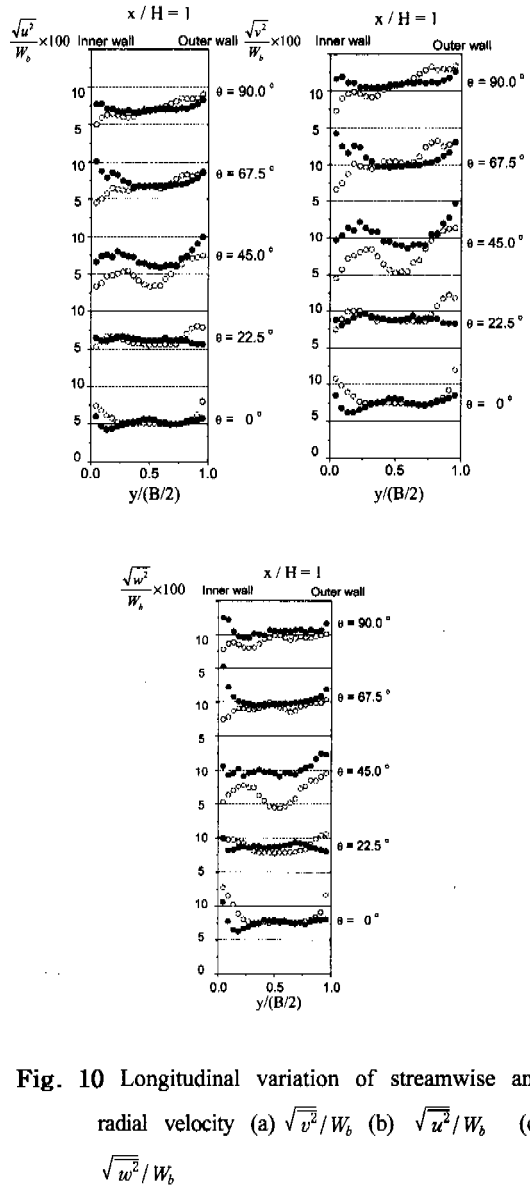
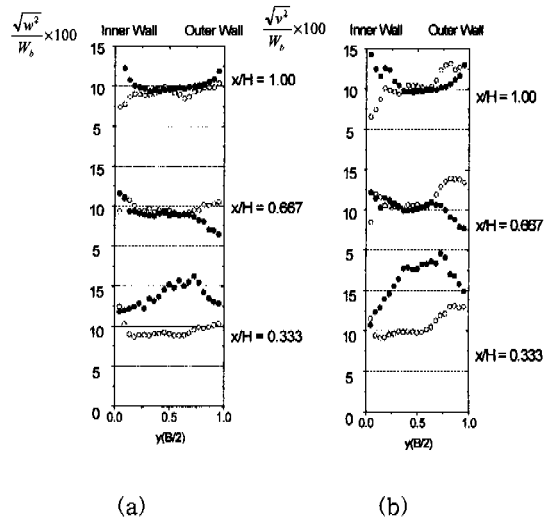


Fig. 10 Longitudinal variation of streamwise and radial velocity (a)  $\sqrt{v^2}/W_b$  (b)  $\sqrt{u^2}/W_b$  (c)  $\sqrt{w^2}/W_b$

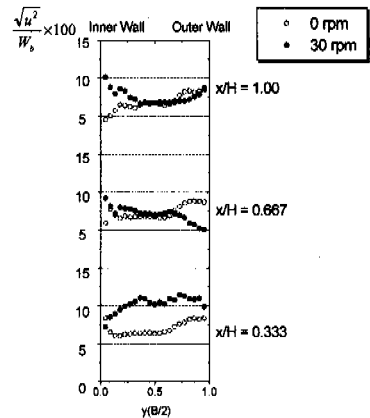
본 연구에서는 6개의 레이놀즈용력을 모두 측정하였다. 그러나 이 논문에서는 주유동 방향과 반경방향과 회전축 방향 수직용력 강도  $\sqrt{u^2}/W_b$ ,  $\sqrt{v^2}/W_b$ ,  $\sqrt{w^2}/W_b$ 의 측정 결과만에 대하여 고찰해 보기로 한다. Fig. 10은 곡덕트의 대칭면에서 유동 진행 방향에 따른  $\sqrt{w^2}/W_b$ ,  $\sqrt{v^2}/W_b$ 와  $\sqrt{u^2}/W_b$ 의 변화를 나타낸 그림이다. 전체적으로 볼 때  $\sqrt{w^2}/W_b$ 와  $\sqrt{v^2}/W_b$ 는 같은 정도의 크기를 가지고 있고  $\sqrt{u^2}/W_b$ 의 크기는  $\sqrt{w^2}/W_b$ 나  $\sqrt{v^2}/W_b$ 에 비해서 20 ~ 30% 낮음을 알 수 있다. 이 크기는 곡덕트 입구부의 난류 생성 조건과 곡덕트의 형성에 의해서 결정된 것이다. 30rpm 회전 시와 수직용력 값들을 비교하면 입구부 내벽 측에서는 회전 시의 모든 수직 용력이 정지 시의 수직용력보다 작으나 유동이 진행할수록 역전되는 것을 알 수 있고 외벽부에서는 반대의 경향을 코리올리힘과 원심력의 상쇄에 따라 보여 준다. 이와 같은 변화는 회전하는 곡덕트의 외향 난류유동에서 2차 유동의 억제에 따라 주유동 속도분포가 평편해져서 내벽쪽의 속도 구배가 커지고 외벽쪽은 작아졌기 때문이다. 본 연구의 주 목적은 단순변형률 조건이 회전 곡덕트 유동에서 난류구조에 미치는 영향을 알아보는데 있다. 그러나 레이놀즈용력 분포에 대한 실험 결과를 보면 그 영향이 뚜렷하게 나타나고 있지는 않다. 이것은 식 (6)에서 S가 너무 작아서 단순 변형률 조건이 미치는 영향이 2차 유동의 효과 등에 상쇄되어 나타나지 않기 때문이다.

Fig.11는  $\theta = 67.5^\circ$  에서  $\sqrt{w^2}/W_b$ ,  $\sqrt{v^2}/W_b$ ,  $\sqrt{u^2}/W_b$ 의 분포를 나타낸 것이다. 벽 인접부인  $x/H=0.25$ 에서는 30rpm으로 회전시 수직 용력들이 정지 시 보다 25% 가량 높음을 알 수 있는데  $x/H=1.0$ 에서는 오히려 회전 시가 정지시보다 더 작음을 알 수 있다. 이는 외향유동의 경우 2차 유동의 감축에 따라 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 주유동 속도의 분포가 평편해져서 벽 인접부의 속도 구배가 커지고 덕트 중심부는 작아졌기 때문이다.



(a)

(b)



(c)

Fig. 11 Turbulent velocities distribution at  $\theta = 67.5^\circ$  (a)  $\sqrt{w^2}/W_b$ , (b)  $\sqrt{v^2}/W_b$ , (c)  $\sqrt{u^2}/W_b$

### 5. 결 론

본 연구에서는 터보기계 내의 3차원 유동 특성을 이해할 목적과 난류모형 개발을 위한 3차원 Bench Mark 유동의 특성 자료를 얻기 위해서 일정 단면적을 갖고 있으며 유동의 진행 방향으로 종횡비가 변하여 단순변형률 조건을 이루는 가변 단면 90° 곡덕트의 회전에 따른 유동 특성 변화를 열선유속계를 이용하여 측정하였다. 3가



시 회전속도에 대하여 속도분포와 레이놀즈응력 강도를 측정하여 그 특성을 연구한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 덕트의 회전은 외벽면의 압력계수를 변화시켜 내외벽면의 압력계수가 역전되는 현상을 보인다.

(2) 곡덕트를 회전시키면 코리올리힘은 곡률의 원심력의 작용 방향과 서로 반대가 됨으로써 2차 유동의 강도를 감소시키며 와의 발달을 빨리 진행시켜 다중 와로 분해시킨다.

(3) 주유동 방향의 속도분포는 회전에 의해 힘의 평형으로 정지시의 속도분포를 편평한 형태로 변화시켰고 이 주유동 방향의 속도 분포는 레이놀즈 수직응력 분포에 큰 영향을 주었다.

## 후 기

이 논문은 KOSEF 961-1005-044-2의 지원하에 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 이건희, 1992, "회전하는정사각단면의90° 곡관 내 난류유동 특성에 관한 연구," 고려대학교, 기계공학과 기계공학과 박사학위 논문.
- (2) Choi, Y. D., An, J. S. and Kim, W. K., 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) 정곤진, 1998, "회전하는 가변단면 90° 곡덕트 내의 난류유동 특성에 관한 실험적 연구," 고려대학교 기계공학과 석사학위논문.
- (4) 오창민, 1999, "단순변형률 조건하의 가변단면 90° 곡덕트 내의 발달하는 난류유동 측정," 고려대학교 기계공학과 석사학위논문.
- (5) Launder, B. E., Reece, G. J., and Rodi, W., 1975, "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure," *J. Fluid Mech.*, Vol. 18, part 3, pp. 537~566.
- (6) Hanjalic, K, and Launder, B. E., 1976, "Contribution Towards a Reynold-Stress Closure for Low-Reynolds-Number Turbulence, *J. Fluid Mech.* Vol. 74, part 4.
- (7) 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, pp. 373.
- (8) Jorgensen, F. E., 1971, "Directional Sensitivity of Wire and Hot-film Probes," *DISA INFO.*, No. 11.
- (9) Dvorak, K. and Syred, N., 1972, "The Statistical Analysis of Hot-wire Anemometer Signals in Complex Flow Fields," *DISA Conference*, Univ. of Leicester.
- (10) ASME Performance Test Codes 1987, "Measurement Test Codes Supervisory Committed of ASME.