

## 횡방향으로 회전하는 90도 정사각 단면 곡덕트에서 발달하는 난류유동의 측정

김동철\*, 최영돈†, 이건휘\*\*

(2002년 7월 31일 접수, 2002년 12월 26일 심사완료)

### Measurement of Developing Turbulent Flows in a 90-Degree Square Bend with Spanwise Rotation

Dong Chul Kim, Young Don Choi and Kun Hee Lee

**Key Words :** Coriolis Force(코리올리힘), 90 Degree Bend(90° 곡덕트), Turbulent Flow(난류유동) Rotation Number(로테이션수)

#### Abstract

Mean flow and turbulence properties of developing turbulent flows in a 90 degree square bend with spanwise rotation were measured by a hot-wire anemometer. A slanted wire is rotated into 6 orientations and the voltage outputs from them are combined to obtain the mean velocity and Reynolds stress components. The combinative effects of the centrifugal and Coriolis forces due to the curvature and the rotation of bend on the mean motion and turbulence structures are investigated experimentally. Results show that the two body forces can either enhance or counteract each other depending on the flow direction in the bend.

기호설명	
$C_P$ : 압력계수	$k$ : 난류운동에너지
$\overline{C_P}$ : 평균압력계수	$P$ : 압력
$D$ : 관경	$R$ : 회전축 반경 벡터
$D_H$ : 수력직경	$R$ : 회전축 반경
$D_n$ : Dean 수 ( $= \text{Re}(D_H/R_C)^{1/2}$ )	$R_C$ : 덕트 곡률 반경
$F_C$ : 코리올리힘	$R_{ot}$ : Rotation 수 ( $\equiv \Omega r_m/W_B$ )
$F_{C,C}$ : 곡관의 곡률에 의한 원심력 벡터	$\text{Re}$ : 레이놀즈수 ( $\equiv W_B D_H/\nu$ )
$F_r$ : 합력	$R_o$ : 로스비수 ( $\equiv \Omega D_H/W_B$ )
$F_r$ : 합력벡터	$r_m$ : 곡덕트의 평균반경
$F_R$ : 곡관의 회전에 따른 원심력 벡터	$U$ : 수직방향 평균속도
	$\overline{u_i u_j}$ : 레이놀즈응력 텐서
	$V$ : 반경방향 평균속도
	$v$ : 반경방향 요동속도
	$W$ : 주유동 방향 속도
	$W_B$ : 주유동 방향 총관속도
	$w$ : 주유동 방향 요동속도
	$X$ : 수직 방향 좌표
	$Y$ : 반경 방향 좌표
	$Z$ : 주유동 방향 좌표
	$\nu$ : 동점성계수
	$\rho$ : 밀도

\* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : ydchoi@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3355 FAX : (02)986-1067

\*\* 회원, 원광대학교 기계공학과

$\Omega$  : 각속도  
 $\phi$  : 코리올리힘과 회전 원심력 사이의 각도

하첨자

$l, m$  : 1~3의 값을 갖는 하첨자

### 1. 서론

회전하는 곡덕트 난류유동에 대한 정보는 터빈, 펌프, 압축기와 같은 회전기계의 설계에서 매우 중요하다. 그와 같은 유동에서는, 덕트의 회전과 곡률에 의해 야기된 원심력과 코리올리힘이 평균 유동과 난류구조에 동시에 영향을 미친다. 결과적으로 평균유동에 작용하는 힘은 유동이 덕트를 따라 진행함과 함께 그 방향과 크기에 급격한 변화를 일으킨다. 만약 두 체적력이 같은 방향으로 작용하면 두 힘이 합쳐져 2차유동의 발생을 증대시키고 두 힘이 반대 방향으로 작용하면 두 힘이 상쇄되어 2차유동은 감소시킨다. 이와 같은 유동에서 평균유동과 난류구조에 작용하는 체적력의 영향을 분리시키는 것은 매우 바람직하다. 그러나 실제적으로 회전하는 곡덕트 유동에서 그들의 힘을 분리시켜가는 것은 쉽지 않다.

회전하는 평판채널유동에서 코리올리힘과 원심력의 영향에 대해서는 광범위한 연구가 진행되어 왔다. Kim,<sup>(1)</sup> 과 Tafti 와 Vanka<sup>(2)</sup> 등은 대형와모사법 (LES)을 이용한 연구를 수행하였다. Koyama 와 Ohuchi<sup>(3)</sup> 등은 실험적 연구를 수행하였으며, Kristofferson 과 Anderson<sup>(4)</sup>은 직접수치모사 (DNS)를 이용한 수치해석을 수행하였으며, Launder 등,<sup>(5)</sup> Launder 와 Tselepidakis<sup>(6)</sup> 등은 2차모멘트 닫힘(second-moment closures)을 이용한 유동해석 방법을 적용하였다.

덕트의 곡률과 회전은 어떤 구역에서는 유동을 불안정화 시키고 또 어떤 구역에서는 안정화 시킨다. 불안정화 현상과 안정화 현상에 대한 구조는 Johnston,<sup>(7)</sup> Launder 등,<sup>(5)</sup> Launder 와 Tselepidakis,<sup>(6)</sup> Kristoffersen 과 Anderson,<sup>(8)</sup> Anderson 과 Kristofferson<sup>(9)</sup>, 그리고 Patterson 과 Anderson<sup>(10)</sup> 등에 의해서 회전하는 평판 채널 유동에 관해서 광범위하게 연구되었다. Morris,<sup>(11)</sup> Kajishima 등,<sup>(12)</sup> Murata 와 Mochizuki<sup>(13)</sup>는 회전하는 평판채널에서 코리올리힘이 난류열전달에 미치는 영향을 알아보기 위해서 LES 를 이용한 수치해석을 수행하였다. Bo 등,<sup>(14)</sup> Younis<sup>(15)</sup>은 덕트 유동 방향에 수직인 축 방향으로 회전하는 사각 덕트 유동에 난류 열전달을 예측하기 위하여 2차모멘트 닫힘(second

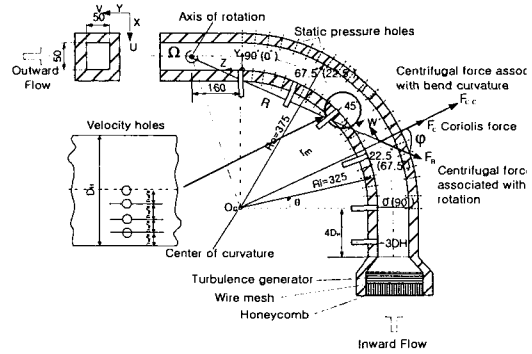


Fig.1 Schematic diagram showing the bend and tangents, the two coordinate systems and the three velocity components.

moment closures)을 이용하였다.

회전하는 곡덕트 유동에 적용할 수 있는 난류 모형의 개발은 필요한 평균속도와 레이놀즈수력 분포에 대한 실험적 자료의 부족으로 인해 어려움을 겪고있다. 사각단면을 가진 회전하는 90° 곡덕트 내에서의 난류유동은 2차모멘트 난류모형을 개발하기 위해 필요한 시험유동으로 적합한 몇몇의 성질을 가지고 있다. 90° 곡덕트 유동에서는 그 유로 형상의 단순성 때문에 코리올리힘과 원심력이 평균유동과 난류구조에 미치는 영향이 쉽게 분해 될 수 있다.

본 연구에서 관심을 갖는 유동 형태는 사각단면의 회전하는 90° 덕트유동이다. 본 연구의 목적은 회전하는 90° 곡덕트와 입구·출구부에서 발달하는 난류 유동을 열선유속계를 이용해서 정밀하게 측정을 하여 평균유동과 난류구조에 덕트의 회전과 곡률이 어떻게 영향 주는가를 조사하는데 있다. Fig. 1은 회전하는 90° 덕트의 단면도를 나타낸 그림이며 좌표계와 기호의 정의를 보여준다. 덕트의 수력직경에 대한 곡률반경 ( $R_C/D_H$ )의 비는 7이며 덕트각은 90°이다. X 와 Y 축은 정사각 단면의 각 방향을 나타내며  $\theta$ 는 덕트에서 진행 방향 좌표를 나타낸다. 회전하는 덕트 유동내에는 3개의 체적력이 평균유동과 난류구조의 영향을 통한 유체 입자의 활동에 영향이 미치게 된다. 곡덕트의 곡률에 따른 원심력 벡터는

$$F_{C.C} = \rho \frac{W^2}{r} e_r \tag{1}$$

곡덕트의 회전에 따른 원심력 벡터는

$$F_R = -\rho R \times \Omega \times \Omega \quad (2)$$

곡덕트의 회전에 따른 코리올리 힘 벡터는

$$F_C = -2\rho\Omega \times V \quad (3)$$

이다. 유동이 균질해서  $W = W_B$  라 가정한 후 덕트의 대칭면에서 위의 3 개 체적력의 합벡터를  $\rho W_B^2 / r_m$  으로 무차원화한 후 반경 방향 합력 성분을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{F \cdot e_r}{\rho W_B^2 / r_m} = \frac{F_r}{\rho W_B^2 / r_m} = 1 + 2R_{ot} + \frac{R \cos \phi}{r_m} R_C^2 \quad (4)$$

여기서  $R_{ot}$  는 Rotation 수로  $\frac{\Omega r_m}{W_B}$  로 정의된다.

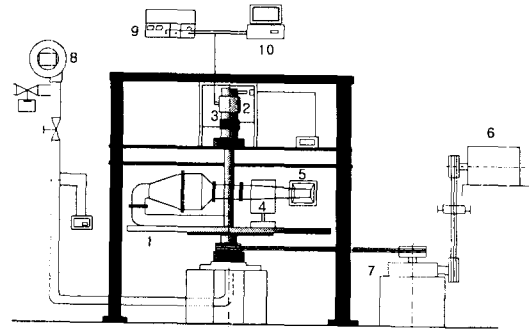
식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 Rotation 수  $R_{ot}$  는 회전하는 곡덕트 유동에서 그 유동 특성을 결정하는 중요한 인자이다. 회전하는 평판채널유동에서는 로스비수 ( $R_o = \Omega D_H / W_B$ )가 유동 특성을 묘사하는 중요한 매개변수이었다<sup>(7)</sup>. 그러나 회전하는 정사각 단면 덕트 유동에서는 코리올리 힘과 원심력의 비인 Rotation 수 ( $R_{ot} = \Omega r_m / W_B (= R_o r_m / D_H)$ ) 로 대체되어야 한다. 여기서  $r_m$  은 덕트의 평균곡률반경이다. Dean 수란  $D_n$  으로 표기하며  $D_n = Re(D_H / R_C)^{1/2}$  로 정의되어진다. 곡덕트에서 블록면은 내벽 오목면은 외벽으로 기술하기로 한다.

두 가지의 유동 형태가 실험적으로 연구되었다. 하나는 회전 중심에서 나온 유체가 곡덕트를 지나 외부로 송출 되는 유동이며 이를 외향유동이라 한다. 외향유동에서 코리올리 힘과 원심력의 조합이 상쇄되어 2 차유동의 강도를 감소시킨다. 반면에 유체가 곡덕트를 지난 후 회전 중심으로 흡입되는 유동을 내향유동이라 하며 이 유동에서는 코리올리 힘과 원심력이 합해져서 2 차유동강도를 증가시킨다. 본 연구의 실험에서 얻어진 자료는 광범위한 3 차원 난류모형 개발과 시험을 위해서 널리 사용될 것이다.

## 2. 실험

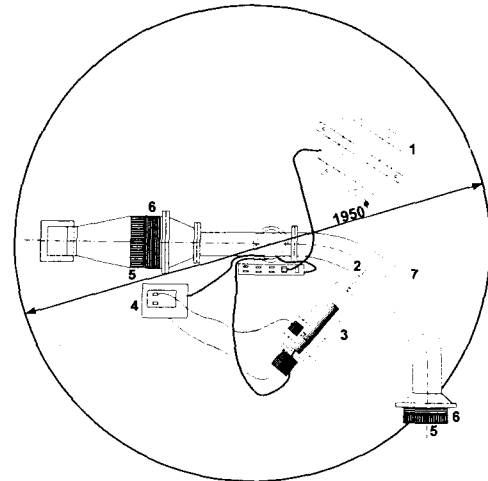
### 2.1 실험장치

Fig. 2, Fig. 3 은 실험장치의 개략도이다. 시험부는 지름이 1.95m 인 회전판 위에 50mm 정사각 단면을 가진 90° 덕트가 설치되어 있으며, 정밀 Ag-Ni 슬립링은 회전하는 시험부로부터 정지된 풍속계로 신호를 전달하고 자동이송장치를 위해



- |  |                         |
|--|-------------------------|
| 1 : Rotating disc  | 6 : Variable motor      |
| 2 : Slip-ring for hot-wire anemometer and traversing mechanism | 7 : Speed reducer       |
| 3 : Slip-ring for AC power                                     | 8 : Blower              |
| 4 : Traversing mechanism                                       | 9 : Hot-wire anemometer |
| 5 : Test section   | 10 : Personal computer  |

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus



- |                                    |                          |
|------------------------------------|--------------------------|
| 1 : Controlling computer           | 5 : Setting chamber      |
| 2 : Rotating probe                 | 6 : Turbulence generator |
| 3 : Automatic traversing mechanism | 7 : Test section         |
| 4 : Control box                    |                          |

Fig. 3 Plan of rotating disc

전력공급을 하기 위한 것이다.

실험장치는 가변속모터, 기어감속장치, 송풍기, 오리피스 유량계, 열선유속계로 구성되어 있다. 덕트의 입구와 출구 길이는 각각 수력직경의 4 와 7.6 배 이다. 시험부는 8mm 두께의 투명한 벽을 가진 아크릴판으로 만들어져 있다. 허니콤 (honey comb)과 메쉬(mesh)는 흡입유동에서 포함된 2 차 유동과 난류를 제거하기 위하여 시험부 상류부에 설치하였다. 피치가 5.4mm, 봉의 직경이 5mm 인 난류발생기는 균일 난류유동을 발생시키기 위하여 설치하였다. 회전판의 속도는 가변속모터와 베벨 기어로 조절할 수 있다. 자동이송장치에 의해서

이송되는 열선 프로브는 회전 원판에 설치되어 있다. 자동이송장치의 이송 범위 한도는 1/200mm이며 회전 범위는 0.5°이다. 시험부를 통한 공기 유동은 송풍기에 의해서 공급되며 유량은  $D - \frac{1}{2}D$ 인 오리피스를 이용하여 측정한다. 실험부에 흡입하는 공기온도는 송풍기에서 발생하는 열에 의해서 천천히 상승하며 송풍기 작동 후 약 1시간 후에 정상상태에 도달한다. Fig. 1에서 보여진 바와 같이 정압력 구멍은 4.5°마다 상자 대칭 평면을 따라서 내벽과 외벽에 설치되어져 있다. 압력 구멍은 압력 스케닝 상자를 통해서 비닐 튜브를 통해서 압력변환기와 연결되어 있다. 속도구멍은 외벽에  $-3D_H$ , 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°의 위치에 설치되어 있다. 각 위치에서 4개의 속도 구멍을  $\frac{2X}{D_H} = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 의 위치에 설치하였다. 여기서의 속도구멍은 내향유동에 대한 속도 위치이며 괄호 안의 표기는 외향유동의 속도구멍 위치를 표시한 것이다. 외향유동인 경우  $-3D_H$ 인 위치부분은 측정하지 않았다. 3차원 속도와 6개의 레이놀즈응력은 S형과 I형 열선 프로브에 의해서 측정된 평균전압과 요동전압의 관계에 의해서 계산된다.<sup>(19)-(21)</sup>

2.2 실험영역

회전하는 평판채널유동에서 로스비수 ( $R_o = \Omega D_H / W_B$ )는 유동 특성을 묘사하는 중요한 매개변수이다<sup>(7)</sup>. 그러나 회전하는 정사각 단면 덕트 유동에서 덕트의 중심선을 따라 코리올리힘과 원심력의 비인 Rotation 수  $R_{ot} \equiv \Omega r_m / W_B (= R_o r_m / D_H)$ 로 대체 되어야 한다.

여기서  $r_m$ 은 덕트의 평균곡률반경이다. 본 연구에서 실험을 수행한 다양한 조건은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Various combinations of experimental parameters

Reynolds Number	Rotating speed(rpm)	Rosby number	Rotation number
8,500	0	0.0	0.0
17,000	0	0.0	0.0
20,000	0	0.0	0.0
8,500	30	0.06	0.42
17,000	30	0.03	0.21
20,000	60	0.1282	0.561
8,500	-30	-0.06	-0.42
17,000	-30	-0.03	-0.21

3. 결과

3.1 결과 및 고찰

Fig. 4는 내향유동에서 정지 상태와 회전 상태의 덕트 내에 주유동 속도와 반경 방향 속도 분포를 비교한 그림이다. 여기서  $W$ 는 중심면에서의 속도 값이며  $W_B$ 는 전단면에서의 속도 평균값이다. 따라서  $W/W_B$ 는 중심면에서의 속도 값을 전단면의 평균값으로 무차원화한 것이다. 속이 빈 기호는 정지 덕트 내의 평균속도 성분을 나타낸 그림이며 속이 찬 기호는 회전시 덕트에 흐르는 평균속도 성분을 나타낸 그림이다. 덕트를 따라 유동이 지나감에 따라 정지 상태와 회전 상태 모두 주방향 속도의 최고점이 외벽 쪽으로 이동한다. 내향 유동에서 덕트의 회전은 코리올리힘과 원심력이 반경 방향 바깥 쪽으로 합쳐져 2차유동의 강도를 증가시킨다. 그로 인하여 덕트의 입구 영역에서는 주방향 속도 최고점의 위치가 외벽 쪽으로 이동한다. 그러나 회전하는 덕트 유동에서 덕트 내에 45°를 지난 후 최고 속도의 위치점의 이동은 멈추게 된다. 일반적으로 덕트의 입구 영역에서는 반대 방향으로 회전하는 Eckman 와가 나타나고 성장하며  $\theta = 90^\circ$ 까지 증가한다. 그러나  $\theta = 90^\circ$  이후에 Eckman 와 쌍은 다중셀 형태로 부서지며 Dean 와가 외벽 부분에서 나타난다. Choi 등<sup>(19)</sup>은 2차모멘트 난류모형을 이용하여 코일형 정사각 단면 덕트에서 발달하는 난류유동을 수치해석

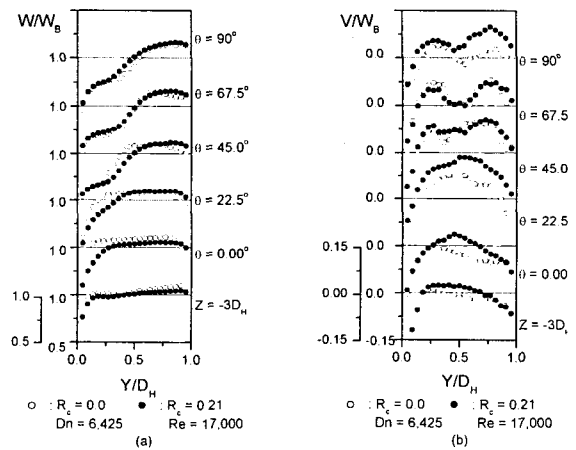


Fig. 4 Longitudinal variation of measured normalized mean streamwise velocity ( $W/W_B$ ) and radial velocity ( $V/W_B$ ) along the center symmetry plane in the inward flow mode for higher Dean number and lower rotation number

하였다. 수치해석의 결과로 덕트의  $\theta = 180^\circ$  지점 부근에서 영역에서 세 쌍의 Dean 와가 외벽 영역에서 발생한다는 것을 알 수 있었다. 그러나 회전 덕트유동에서 덕트의 회전으로 코리올리힘과 원심력은 합쳐져 난류구조에 영향을 미치므로써 Dean 와 쌍의 발생이  $\theta = 45^\circ$  부근까지 영향을 미치는 것으로 생각된다<sup>(16)</sup>. 이 Dean 와의 발생이 주유동 속도 최고점이 외벽 쪽으로 이동하는 것을 억제시킨 것으로 판단된다. Fig.4 에 나타난 반경 방향의 속도 분포의 경우 입구영역  $Z = -3D_H$  의 내벽근처에서 반경방향 속도가 음의 방향으로 나타나게 되는데 그 이유는  $Z = -3D_H$  부분은 직덕트 부분이므로 곡률 원심력이 작용하지 않고 코리올리힘만 작용하는 영역이다. 이곳에서 이미 2 차 유동이 크게 발생함을 알 수 있다. 그리고 하단 중심면 부근에 반대방향의 와가 발생하였고 상벽 부 중심면에도 반대 방향의 와가 발생하였기 때문이다.

Fig. 5 는 Fig. 4 에서 보다 상대적으로 Rotation 수는 크지만 Dean 수가 작은 큰 대칭면을 따라 평균 주유동 속도와 반경 방향 속도의 발달 형태를 보여준 그림이다. Dean 수의 감소 효과는 덕트 내에서 반경 평균 속도를 억제한다. 그러나 곡률 효과가 없는 입구부에서 Rotation 수 효과에 의해서 2 차유동강도의 큰 증가를 야기한다.

Fig. 6 은 정지 시 덕트 내의 유동과 비교하여 상대적으로 Rotation 수와 Dean 수가 큰 회전 덕트 유동에서의 주유동 속도의 변화를 나타낸 것이다. Dean 수가 높은 유동에서는 유동이 곡덕트 입구부에 들어감에 따라 큰 곡률원심력에 의해서 내벽

쪽 압력이 낮아져 내벽면에서 급격한 유동 방향 순압력 구배가 생긴다. 반면에 외벽에서는 유동 방향의 역압력 구배가 생긴다. 덕트의 입구의 내벽영역과 외벽 영역에 생기는 순압력 구배와 역압력 구배는 내벽 영역에 유동을 가속시키고 외벽 영역에서는 유동을 감속 시킨다. 그러나 덕트를 따라 유동이 진행함에 따라서 체적력과 압력구배의 불균형에 기인하는 2 차유동은 정지 상태와 회전 상태에서 모두 평균주유동속도의 최고점은 외벽 쪽으로 이동한다.  $\theta = 45^\circ$  이전에는 덕트의 회전은 평균주유동속도의 최고점을 외벽 쪽으로 이동시키는 것을 촉진한다. 그러나  $\theta = 45^\circ$  이후에는 회전하는 덕트 유동의 최고점의 위치는 정지 상태시 덕트 유동에 비해서 빨리 멈추게 된다. Lee<sup>(16)</sup>는 Fig. 6 와 같은 조건 하에 회전하는 정사각 단면  $90^\circ$  덕트의 연구 결과에서 덕트의 회전은 큰 Dean 와 쌍의 발생이 앞당긴다는 것을 발견하였다  $\theta = 45^\circ$  이후에 대칭 평면과 외벽 사이 구석에 나타나는 Dean 와 쌍은 외벽 영역의 주유동의 감소를 초래하기 때문에 주유동 속도의 최고점의 위치가 외벽 쪽으로 이동하는 것을 막게 된다.  $W_B$  와  $W_B^2$  로 무차원화한 주유동 속도와 평균 반경 방향 난류운동에너지, 그리고 레이놀즈전단응력 값의 감소는 Fig. 7 에서 회전하는 덕트 유동 내에서 흡입면 근처에서 찾을 수 있다.

난류운동에너지 방정식에는 코리올리힘 항이 없다. Launder and Tsepidakis<sup>(6)</sup>는 회전하는 평판 유동에서 2 차모멘트 단함을 적용하여 해석적으로  $\overline{w'w'}$  방정식의 코리올리 생성항이 간접적으로 난류운동에너지의 생성에 영향을 미침을 증명하였다. 각속도

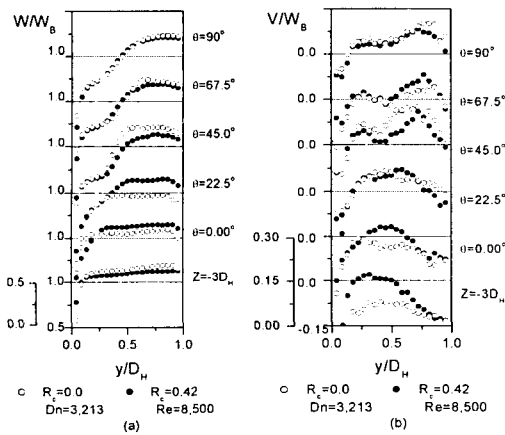


Fig. 5 Longitudinal variation of measured normalized mean streamwise and radial velocities along the center symmetry plane in the inward flow mode for lower Dean number and higher rotation number

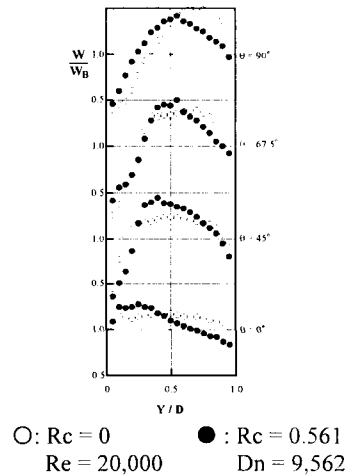


Fig. 6 Longitudinal variation of measured normalized mean streamwise velocity profiles along the symmetry plane in the inward flow mode for higher Dean and rotation numbers

$\Omega$  로 회전하는 원통 극좌표계 내에서 평균 제곱한 주방향 속도와 반경 방향 난류속도의 일반항 ( $\overline{w^2}$ ,  $\overline{v^2}$ )과 그리고 레이놀즈전단응력( $\overline{vw}$ )은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{w^2} = \underbrace{-2\overline{uw}\frac{\partial W}{\partial x} - 2\overline{vw}\frac{\partial W}{\partial y} - 2\overline{w^2}\frac{\partial W}{\partial z}}_{\text{Shear Generation}} + \underbrace{-2\frac{V}{r}\overline{w^2} - 2\frac{W}{r}\overline{vw} - 2\overline{w^2}\frac{\partial W}{\partial z}}_{\text{Curvature Generation}} + \underbrace{4\overline{vw}\Omega}_{\text{Coriolis Generation}} \quad (5)$$

$$P_{v^2} = \underbrace{-2\overline{uv}\frac{\partial V}{\partial x} - 2\overline{v^2}\frac{\partial V}{\partial y} - 2\overline{vw}\frac{\partial V}{\partial z}}_{\text{Shear Generation}} + \underbrace{4\frac{W}{r}\overline{VW}}_{\text{Curvature Generation}} - \underbrace{4\overline{vw}\Omega}_{\text{Coriolis Generation}} \quad (6)$$

$$P_{vw} = \underbrace{-\overline{uw}\frac{\partial V}{\partial x} - \overline{vw}\frac{\partial V}{\partial y} - \overline{w^2}\frac{\partial V}{\partial z} - \overline{uv}\frac{\partial W}{\partial x} - \overline{v^2}\frac{\partial W}{\partial y} - \overline{vw}\frac{\partial W}{\partial z}}_{\text{Shear Generation}} - \underbrace{\frac{V}{r}\overline{vw} + \frac{W}{r}\overline{u^2} + 2\frac{W}{r}\overline{(w^2 - v^2)}}_{\text{Curvature Generation}} - \underbrace{2\overline{(w^2 - v^2)}\Omega}_{\text{Coriolis Generation}} \quad (7)$$

여기서  $\Omega$  는 외향유동에서 양의 값을 갖고 내향 유동에서 음의 값을 갖는다. 곡률항과 코리올리힘의 합은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{w^2}(\text{Curvature} + \text{Coriolis}) = -2\frac{V}{r}\overline{w^2} - 2\frac{W}{r}\overline{vw}(1 - \frac{\Omega r}{W}) \quad (8)$$

$$P_{v^2}(\text{Curvature} + \text{Coriolis}) = 4\frac{W}{r}\overline{vw}(1 - \frac{\Omega r}{W}) \quad (9)$$

$$P_{vw}(\text{Curvature} + \text{Coriolis}) = -\frac{V}{r}\overline{vw} + \frac{W}{r}\overline{u^2} + \frac{2W}{r}\overline{(w^2 - v^2)}(1 - \frac{\Omega r}{W}) \quad (10)$$

여기서  $\frac{\Omega r}{W}$  는 곡부 Rotation 수이다.

우리는 위 방정식으로부터  $\overline{vw}$ ,  $\frac{\Omega r}{W}$  와  $\overline{(w^2 - v^2)}$  의 부호와 크기가 회전하는 덕트 유동에서 난류구조에 주요한 영향을 미치는 변수임을 알수 있다. 만약 각각의 난류속도의 제곱평균에 대한 생성항 방정식의 하나를 고려해보면 식 (5)  $P_{w^2}$  에서  $4\overline{vw}\Omega$  은 원천(source)항인데 식 (6)  $P_{v^2}$  방정식에서

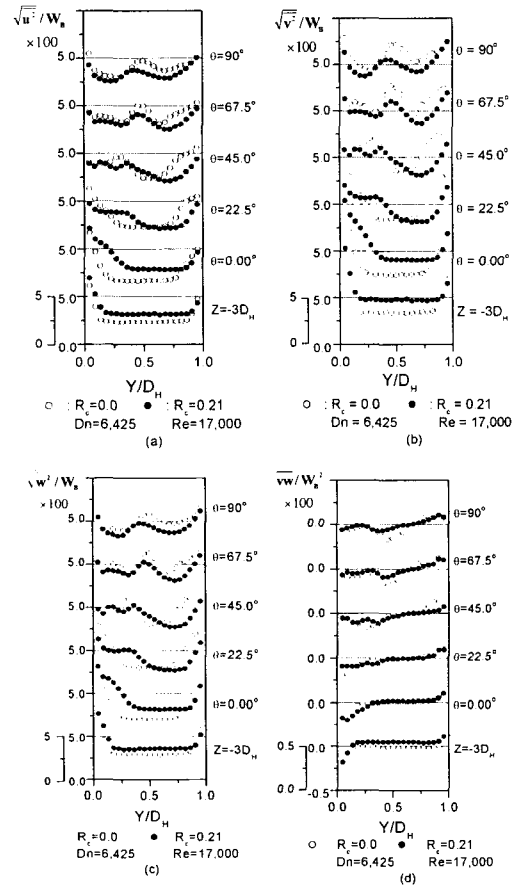


Fig. 7 Longitudinal variation of measured rms turbulent velocities ( $\sqrt{u^2}/W_B$ ,  $\sqrt{v^2}/W_B$ ,  $\sqrt{w^2}/W_B$ ) and Reynolds shear stress ( $\overline{vw}/W_B^2$ ) normalized by  $W_B$  and  $W_B^2$  in the inward flow mode for higher Dean number and lower rotation number

는 똑같은 크기의 원천항이 반대부호를 갖고 있다  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리생성항  $-2\overline{(w^2 - v^2)}\Omega$  은  $\overline{vw}$  와  $\Omega$  의 부호에 의존하는 흡입(sink)항 혹은 원천항의 역할을 한다. 양의 값  $\overline{vw}$  영역에서  $-2\overline{(w^2 - v^2)}\Omega$  의 양의 값은 원천항으로서 활동하는 반면에 음의 값  $\overline{vw}$  영역에서 흡입항의 역할을 한다.

회전하는 직덕트 채널유동에서  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리 생성항  $-2\overline{(w^2 - v^2)}\Omega$  는 Fig. 7(d)에서 보여주는 바와 같이 흡입면 부근에서는  $\overline{vw}$  의 값을 감소시켜 결과적으로 흡입면 영역의 난류유동에너지와 주유동 방향 레이놀즈응력을 감소시킨다. 반면에 압력면 (덕트 회전으로 인해 압력이 높아지는

쪽의 벽면) 부근에서는 반대의 경향이 발생한다. Fig. 7(d)에서  $z = -3D_H$ 의 위치에서  $\theta = 22.5^\circ$  위치까지는 덕트의 회전에 따라  $\overline{vw}$ 의 값이 감소됨을 알 수 있다. 그러나 덕트 회전과 함께 합해진  $\overline{vw}$  값의 감소는  $\theta = 45^\circ$  이후 영역까지 유동의 진행과 함께 사라진다. 정사각 단면의 회전하는 덕트의 입구 부분에서  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리 생성항은 난류운동에너지 값에 영향을 준다는 사실을 명확하게 밝혀주고 있다.

그러나  $\theta = 45^\circ$  이후에  $\overline{vw}$  방정식에서 코리올리 생성항의 영향은 점차적으로 사라진다.

꼭덕트 어떤 구역에서는 반경 방향 난류속도의 제곱평균은 주유동 방향 난류속도의 제곱평균보다 증대되어  $\overline{vw}$  방정식에서  $-2(\overline{w^2} - \overline{v^2})\Omega$ 의 부호는 반대가 된다. 그러므로 회전하는 덕트 유동에서  $\theta = 45^\circ$  이후에  $\overline{vw}$  형태의 변화에서 일관된 경향을 찾을 수 없었다. 덕트 주위에 유동이 진행함에 따라 흡입면 근처에 난류속도의 감소는 덕트 출구까지 계속된다. 그러나 압력면 유동이 덕트 주위를 진행함에 따라서 흡입면 근처에 난류운동에너지의 감소는 덕트 출구까지 남아 있다.

그러나 압력면 근처에서 회전하는 꼭덕트 유동에서의 난류에너지 값은 정지 상태의 덕트 유동에서의 값보다 낮다. 내향유동에서 코리올리힘은 원심력 항과 반경 방향으로 더해져 2차유동 강도를 증가시킨다. Fig. 4(b)과 Fig. 5(b)에서 보여진 바와 같이 2차유동강도의 증가는 회전하는 2차유동의

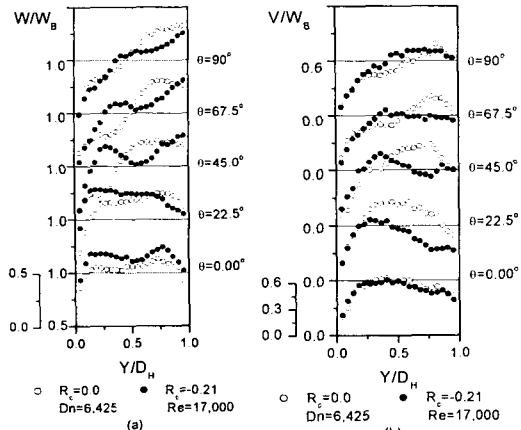


Fig. 8 Longitudinal variation of measured normalized mean streamwise velocity ( $W/W_B$ ) and mean radial velocity ( $V/W_B$ ) along the center symmetry plane in the outward flow mode for higher Dean number and lower rotation number

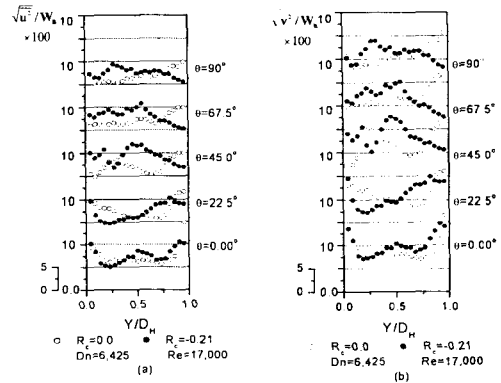


Fig. 10 Longitudinal variation of measured rms turbulent velocities ( $\sqrt{u^2}/W_B$ ,  $\sqrt{v^2}/W_B$ ,  $\sqrt{w^2}/W_B$ ) and Reynolds shear stress ( $\overline{vw}/W_B^2$ ) normalized by  $W_B$  and  $W_B^2$  in the outward flow mode for higher Dean and lower rotation numbers

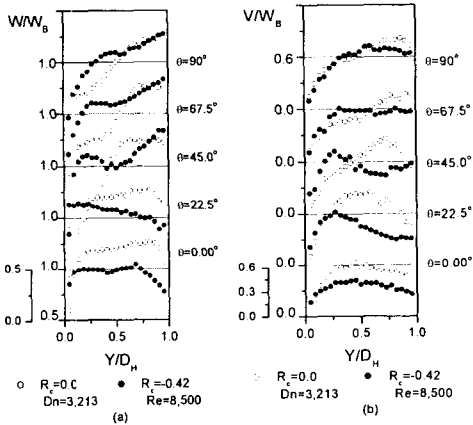


Fig. 9 Longitudinal variation of measured mean streamwise velocity ( $W/W_B$ ) and mean radial velocity ( $V/W_B$ ) normalized by  $W_B$  along the center symmetry plane in the outward flow mode for lower Dean number and higher rotation number

와를 다중 셀 형태로 부서짐을 촉진하며 압력면 근처에 난류운동에너지의 증가를 막는다. 외향유동에 대해 회전 상태와 정지 상태에 주유동 속도와 반경 방향 속도 분포의 비교는 Fig. 8 와 Fig.9 에 나타나 있다. 외향유동에서 입구영역에서 코리올리힘은 원심력이 소멸함에 곡률과 합해져 2 차유동 강도를 감소시킨다. 덕트의 회전은주유동 속도 분포 형태를 평평하게 하고 최고속도의 위치를 외벽 쪽으로 천천히 이동시킨다. 2 차유동 강도의 현저한 감소는 또한 덕트의 입구 영역에서 찾을 수 있다. Fig. 8 과 Fig. 9 의 비교에서 음의 방향 회전수로 인해서  $w/W_B$  유동 형태는  $\theta = 45^\circ$  이후 영역에서 더욱더 편평해 진다. 반면에 입구영역에서 2 차유동 강도는 감소한다.

Fig. 10 에서 비교된 외향유동에 대한 변화량  $\sqrt{u^2}/W_B$ ,  $\sqrt{v^2}/W_B$  와  $\sqrt{w^2}/W_B$  는 Fig.7 에서 보여진 내향유동의 것들과 정반대의 경향은 보여주고 있다. 덕트의 입구영역에서  $W_B$  로 무차원화된 반경방향과 주방향 난류속도는 내벽에서 감소하고 외벽에서 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 반경 방향 난류속도 분포에서 더욱더 명백하게 찾을 수 있는 반대 경향은  $\theta = 45^\circ$  이후에 유동의 진행과 함께 발생한다. 비교하면 덕트의 회전이 레이놀즈응력값의 변화에 영향을 준다는 것을 더욱 명백히 보여주고 있다. 외향유동에서 코리올리힘과 곡률원심력이 서로 간의 간섭으로 인한 2 차유동의 감소와  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리 생성항  $-2(\overline{w^2} - \overline{v^2})\Omega$  의 영향은 난류에너지와 레이놀즈수 직응력에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.  $\overline{v^2}$  와  $\overline{w^2}$  방정식에서 생성율항  $\overline{vw}W/r$ ,  $4\Omega\overline{vw}$  의 반대 부호는 흡입면 근처에서  $\overline{v^2}$  와  $\overline{w^2}$  의 형상 변화를 다르게 하는 원인이 된다. 입구 영역에서 벽 부근의  $\sqrt{v^2}/W_B$  의 값은 중심 부근의 값보다 더 크다. 그러나  $\theta = 45^\circ$  이후에 중심 부분의  $\sqrt{v^2}/W_B$  의 값이 벽 부근의 값보다 크게 된다. 이것은 Fig. 10 에서 보여준 바와 같이  $\overline{v^2}$  이  $\overline{w^2}$  이상으로 증가하여  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리 생성항  $-2(\overline{w^2} - \overline{v^2})\Omega$  에 부호의 변화가 일어나는데 기인한다.

### 3.2 실험오차의 해석

불확실성 분석은 ASME 에서 수행한 Test Codes(1987)에서 제안한 방법을 근거로 하여 수행하였다. 장치는 정확하게 만들어지고 고정오차가 제거되기 위하여 선형화 되었다고 가정한다. 이와 같이 현재 실험에서 측정된 값의 불확실성은 정규 분포와 함께 랜덤하다고 가정한다. 레이놀즈수와 디지털 마노미터의 불확실성은 각각 0.94%와

0.2%로 추정된다. 그리고 평균속도와 섭동속도에 대한 열선 유속계의 불확실성은 4.4%와 2.9%로 추정된다. 그러므로 압력 계수의 조합된 불확실성과 평균속도 섭동속도는 각각 0.96%, 4.5% 그리고 3.0%로 추정된다.

## 4. 결론

회전하는 사각 단면을 가지는 90° 곡덕트 유동의 평균속도와 난류속도의 측정으로 코리올리힘과 원심력의 영향이 평균유동과 난류구조에 미치는 효과를 관찰하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 내향유동에서는 곡률에 기인하는 원심력과 코리올리힘이 반경 방향으로 합쳐져 덕트 입구영역에서 2 차유동의 강도를 증가시킨다. 그러나  $\theta = 45^\circ$  이후에는 덕트의 회전에 기인하는 원심력은 상반된 와 쌍을 이루는 다중와 셀로 부서짐을 촉진한다. 그로 인하여 난류운동에너지 생성율은 감소한다.

(2) 정사각 단면을 갖는 회전하는 90° 곡덕트 유동에서  $\overline{vw}$  방정식의 코리올리 생성항은 흡입면 근처에서의 레이놀즈응력과 난류운동에너지를 감소시키는 반면에 압력면 근처에서는 빠른 와의 성장에 기인하여 상반된 와 쌍의 부서짐을 촉진시킨다.

(3) 외향유동에서는 코리올리힘과 원심력의 상호로 인한 2 차유동 강도의 감소로 인하여  $\overline{vw}$  방정식에서 코리올리 생성항이 감소되고 그 결과가 난류운동에너지의 값을 감소시키는 현상을 덕트 입구 영역에서 더욱더 명확히 볼 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Kim, J., 1983, "The Effect of Rotation on the Turbulent Structure," *Proc. of 4th International Symposium on Turbulent Shear Flows*, Karlsruhe, pp. 6~14.
- (2) Taffi, D.K. and Vanka, S.P., 1991, "A Numerical Study of the Effect of Span-wise Rotation on Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids A*, Vol. 3, No. 4, pp. 642~656.
- (3) Koyama, D.K. and Ohuchi, M., 1985, *Proc. of 5th International Symposium of Turbulent Shear Flows*, Cornell, pp. 21~19.
- (4) Kristofferson, R., Nilsen, P.J. and Andersson H. I., 1990, "Validation of Reynolds Stress Closures for Rotating Channel Flows by Means of Direct Numerical Simulations," *Proc. International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements*, Dubrovnik, pp. 55~64.
- (5) Launder, B.E., Tselepidalsis, D.P. and Younis, B.A., 1987, "A Second-Moment Closure Study of Rotating Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 183, pp. 63~75.



- (6) Launder, B.E. and Tselepidalis, D.P., 1994, "Application of a New Second Moment Closure to Turbulent Channel Flow Rotating in Orthogonal Mode," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.15, No.1, pp. 2~10.
- (7) Johnston, J. P., Halleen, R. M., and Lezius, D. K., 1972, "Effects of Spanwise Rotation on the Structure of Two-Dimensional Fully Developed Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.* Vol.56. No.3, pp. 533~557.
- (8) Kristofferson, R., and Andersson H. I., 1993, "Direct Numerical Simulations of Low Reynolds Number Turbulent Flow in a Rotating Channel," *J. Fluid Mech.*, Vol. 256, pp. 163~197.
- (9) Anderson, H. I., and Kristoffersen, R., 1995, "Turbulent Statistics of Rotating Channel Flow," *Turbulent Shear Flow*, Vol. 9, Springer, Berlin, pp. 53~70.
- (10) Patterson, B. A., and Anderson, H. I., 1997, "Near-Wall Reynolds-Stress Modeling in Noninertial Frames of Reference," *Fluid Dynamics Res.*, Vol. 19, pp. 251~276.
- (11) Morris, W. D., 1981, "Heat Transfer and Fluid Flow in Rotating Coolant Channels," *Chichester: John Wiley and Sons*.
- (12) Kajishima, T., Miyake, Y., and Nishimoto, 1991, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in a Square Duct," *Trans. JSME(B)* 57-540, pp. 2530~2537.
- (13) Murata, A., and Mochizuki, S., 1999, "Effect of Cross-Sectional Aspect Ratio on Turbulent Heat Transfer in an Orthogonally Rotating Rectangular Smooth Duct," *International J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3803~3814.
- (14) Bo, T., Iacovides, H., and Launder, B. E., 1995, "Developing Buoyancy-Modified Turbulent Flow in Ducts Rotating in Orthogonal Mode," *Trans. ASME, J. of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 65~95.
- (15) Younis, B. A., 1993, "Prediction of Turbulent Flows in Rotating Rectangular Ducts," *Trans. ASME, J. of Fluids Eng.*, Vol. 115, pp. 646~652.
- (16) Lee, G. H., 1992, "Study on the Characteristics of Turbulent Flow in a Rotating Square Sectioned 90° Bend" Doctoral thesis, Korea Univ.
- (17) Champagne, F. H., Sleicher, C. A., and Wehrmann, O. H., 1967, "Turbulence Measurements with Inclined Hot-Wire," *J. Fluid Mech.*, Vol. 28. part 1, pp. 153~175.
- (18) Choi, Y. D., Shin, J. K., Chun, K. H., and Humphrey, J. A. C., 1997, "Modeling Turbulent Flow in a Curved Duct of Square Cross-Section," *Proc. of 11<sup>th</sup> Symposium on Turbulent Shear Flows*, Grenoble, France, pp. 3.47~3.52.
- (19) Choi, Y. D., Moon, C., and Yang, S. H., S. H., 1990, "Measurement of Turbulent Flow Characteristics of Square Duct with a 180Degree Bend by Hot-Wire Anemometer," *Proc. of the International Symposium on Turbulence Modeling and Experiments*, Dubrovnik, pp. 429~438.
- (20) Jackson, T. W., and Lilly, D. G., 1983, "Single Wire Swirl Flow Turbulence Measurement," *AIAA 83-1202*, Cleveland, Ohio.
- (21) Janjua, S. I., Mclaugh, D. K., Jackson, T. W., and Lilly, D. G., 1982, "Turbulence Measurements in a Confined Jet Using a Six-Orientation Hot-Wire Probe Technique," *AIAA 82-1262*, Cleveland, Ohio.