

# 회전하는 정사각 단면 90°곡덕트 내의 발달하는 난류유동의 측정

김동철\* · 전건호\* · 최영돈\*\*

## Measurement of Developing Turbulent Flows in a Rotating 90 Degree Bend with Square Cross-Section

Dong Chul Kim, Kun Ho Chun and Young Don Choi

**Key Words :** Specific Coriolis force (비 코리올리힘), Coriolis force (코리올리힘), 곡률원심력 (Centrifugal force due to curvature of bend)

### Abstract

Mean velocity and Reynolds stress components of the developing turbulent flows in a rotating 90 degree bend with square cross-section were measured by a hot-wire anemometer. Effects of the centrifugal and Coriolis forces generated by the curvature and rotation of bend on the mean motion and turbulence structures are investigated experimentally. Results show that the Coriolis force associated with the rotation of the bend may act both through the mean motion and turbulent structures, thereby changing the pressure fields, mean and turbulent velocities distributions.

#### 기호설명

- $R_o$  : 로스비수 (Rossby number)
- $R_C$  : 비 코리올리힘 (Specific coriolis force)
- $\bar{F}_R$  : 회전원심력 (Centrifugal force due to bend rotating)
- $\bar{F}_{c,c}$  : 곡률원심력 (Centrifugal force due to curvature of bend)
- $\bar{F}_c$  : 코리올리힘 (Coriolis force)

### 1. 서 론

회전하는 곡덕트 내의 난류유동에 관한 정보는 터보기계의 설계와 같은 공학적 응용에 있어서 커다란 중요성을 가진다. 이와 같은 유동에서는 곡덕트의 곡률과, 회전에 의한 코리올리힘과 원심력이 주유동과 난류구조 모두에 영향을 미친다. 결과적으로 주유동에 작용하는 힘들은 유동이 진

행함에 따라 방향과 크기에 빠른 변화를 일으킨다. 코리올리힘과 원심력이 상승적으로 합쳐지면 그 합력은 2 차유동의 발생을 촉진시키는 반면 그 힘들이 상쇄적으로 합쳐지면 2 차유동을 감소시킨다. 곡덕트의 난류구조를 연구하기 위해서는 주유동과 난류구조에 작용하는 코리올리힘과 원심력의 효과를 분리해서 분석해 볼 필요가 있다. 그러나 실제적 회전기계에서는 그 힘들의 영향을 분리해 내기가 쉽지 않다.

회전하는 평판채널유동에서 코리올리힘과 원심력의 효과에 대해서는 광범위한 연구가 진행되어 왔다. Kim[1983] and Tafti & Vanka[1991]등은 LES 를 이용한 연구를 수행하였으며 Koyama and Ohuchi[1985]등은 실험적 연구를 수행하였고, Kristofferson and Andersson[1990] 은 DNS 를 이용한 수치해석을 수행하였으며, Launder 등[1987], Launder 과 Tselepidakis[1994] 등은 2 차모멘트 닫힘(second-moment closures)을 이용한 유동해석 방법을 적용하였다. 그러나 회전하는 곡덕트에서의 난류유동에 대한 연구는 많은 관심이 모아지지 않았다.

\* 고려대학교 대학원 기계공학과

\*\* 고려대학교 기계공학과

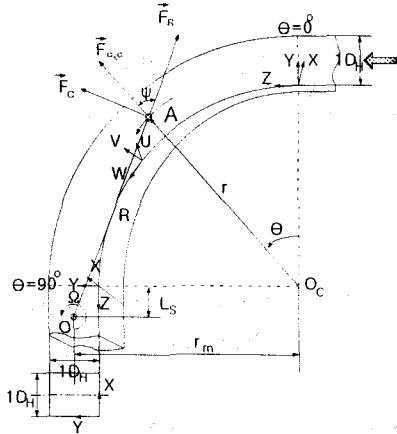


Fig. 1 Schematic diagram showing the rotating bend and tangents, the two coordinates systems and the three velocity components

정사각 단면을 가진 회전하는 90° 곡덕트의 난류유동은 2 차모멘트 난류단힘모델 개발하기 위한 벤치마크 유동으로 적합하다. 왜냐하면 이러한 유동에서는 평균유동과 난류구조에 작용하는 코리올리힘과 원심력의 효과를 쉽게 분리 시킬 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 정사각 단면의 회전하는 90° 곡덕트에서 발달하는 난류유동의 주유동속도와 레이놀즈응력의 성분들을 레이놀즈수와 덕트의 회전수를 변화시키며 열선유속계를 사용하여 측정하였다. 내벽과 외벽의 압력계수는 압력변환기에 의해서 측정하였다. Fig.1 은 정사각 단면을 가진 회전하는 90° 곡덕트의 단면도를 나타낸 그림이며 좌표계와 기호를 정의해 놓았다. X와 Y 축은 정사각 단면의 각 방향을 나타내며  $\theta$  는 곡덕트에서 진행방향 좌표를 나타낸다.

## 2 실험

### 2.1 실험장치

Fig.2 은 실험장치의 개략도이며 Fig. 3 은 시험부 회전원판의 평면도 이다. 실험 장치는 회전원판과 가변 모터와 기어감속장치, 송풍기, 오리피스, 열선유속계 등으로 구성되어 있다. 회전원판은 지름이 1.95m 인 원판 위에 정사각 단면의 90° 곡덕트의 실험부가 놓여져 있다. 측정된 신호와 이송장치를 위한 전원공급은 슬립링을 통해서 전달된다. 시험부는 8mm 두께의 폴리스테르판으로 제작되어 있다. 허니콤과 메쉬는 흡입유동에 포함된 2 차 유동과 난류를 제거하기 위하여 시험부 앞에

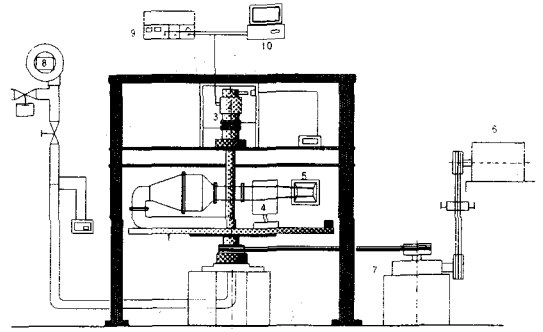


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

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

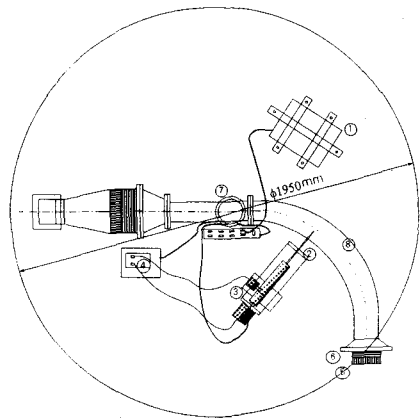


Fig. 3 Plan view of rotating disc

- 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

설치하였다. 난류발생기는 피치가 10.4mm 에 5mm 직경의 실린더 로드로 만들어 졌으며 등방성 난류를 발생시키기 위해서 설치하였다. 회전원판의 속도는 가변 변속기와 기어 감속장치에 의해서 조절된다. 열선프로브는 회전원판에 설치된 자동이송장치에 의해서 이송된다. 자동이송장치의 이송 범

위 한도는 1/200mm 이며 회전 범위는 0.5° 이다. 시험부를 통한 공기유동은 풍동기에 의해서 공급되며 유량은  $D-1/2D$  인 오리피스식의 압력차를 디지털 마노미터를 측정하여 계산한다.

## 2.2 실험내용

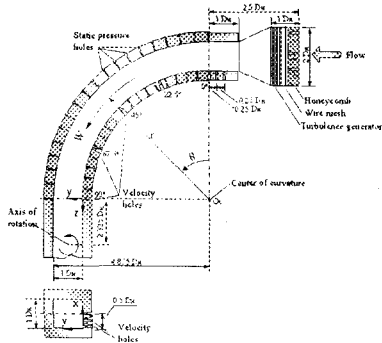


Fig. 4 Schematic diagram of test section A

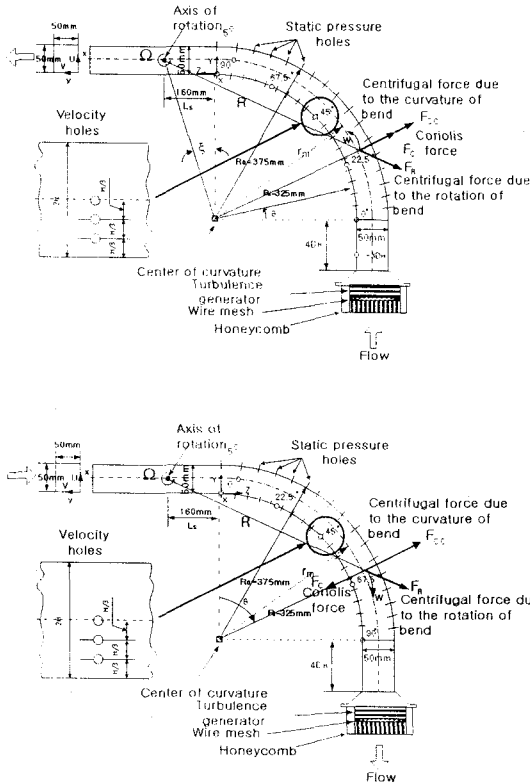


Fig. 5 Schematic diagram of test section B

두 종류의 시험부가 본 실험에서 사용되었다. 시험부 A 는 Fig.4 에 보여지고 있으며 수력직경이 80mm 인 정사각 90° 꼭덕트로 구성되어 있다. 꼭덕트의 내부와 외부의 접선길이는 각각 시험부 단면 수력직경의 1 과 2.325 배이다. 시험부 A 에서 내벽과 외벽의 정압력계수와 내향유동의 평균속도 성분은 회전수의 변화에 의해서 측정된다. 실험부 A 에 실험 계획은 Table 1 에 나타나 있다. Fig.4 에 나타난 압력측정 구멍은 5° 마다 꼭덕트의 대칭면을 따라 내벽과 외벽에 설치되어 있으며 속도측정 구멍은 외벽 -0.5  $D_H$ , -0.25  $D_H$ , 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90° 의 7 개 위치에 설치되었고 각 위치에서 4 개의 속도 구멍이  $2X/D_H=0.25, 0.5, 0.75, 1.0$  의 위치에 설치되어 있다.

Fig.5 에 보여진 실험부 B 는 수력직경이 50mm 인 정사각 단면 90° 꼭덕트로 구성되어 있다. 속도 구멍은 -3  $D_H$ , 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90° 인 6 개 위치에 설치되어 있다. 3 개의 속도구멍은 각 위치마다  $2X/D_H=0.28, 0.64$  과 1.0 에 위치되어 있다. 실험부 B 에서는 내향유동과 외향유동 각각에 대해서 평균속도와 레이놀즈응력 성분은 회전수 변화와 레이놀즈수 변화에 따라 측정하였다.

Table 1 Experimental program for the test section A

Reynolds number	Rotating speed(rpm)	Rossby number	Rotation number	Dean number
20,000	0	0	0	9,562
40,000	0	0	0	19,124
40,000	45	0.048	0.210	19,124
40,000	60	0.064	0.280	19,124
20,000	60	0.128	0.561	9,562
20,000	60	-0.128	-0.561	9,562
20,000	75	-0.160	-0.701	9,562

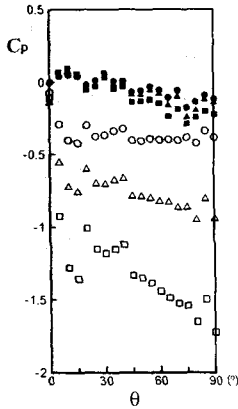
Table 2 Experimental program for the test section B

Reynolds number	Rotation speed(rpm)	Rossby number	Rotation number	Dean number
17,000	0	0	0	6,425
8,500	0	0	0	3,213
17,000	20	0.03	0.21	6,425
8,500	20	0.06	0.42	3,213
17,000	20	-0.03	-0.06	6,425
8,500	20	-0.06	-0.42	3,213

Table 2 는 실험부 B 의 실험 계획을 보여주고 있다. 열선유속계의 측정은 평균속도와 레이놀즈응력 성분의 측정에 적용되었다.

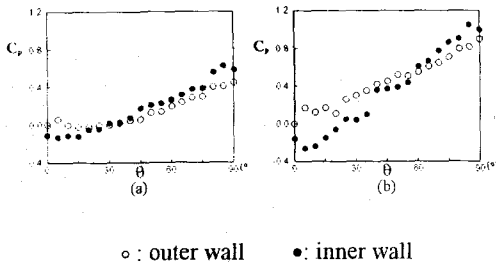
### 3장 실험결과 및 고찰

내벽과 외벽에 압력계수 분포는 회전수 변화와 함께 Fig.6 에 비교되어 있다.



○: outer wall    ●: inner wall    for Rc = 0  
 △: outer wall    ▲: inner wall    for Rc = 0.210  
 □: outer wall    ■: inner wall    for Rc = 0.280

Fig. 6 Comparison of measured pressure coefficients in the inward flow mode for Re=40,000



○: outer wall    ●: inner wall

Fig. 7 Comparison of measured pressure coefficients in the outward flow mode for Re=20,000 and (a) Rc=-0.561, (b) Rc=-0.701

압력계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{P - P_r}{\frac{1}{2} \rho W_B^2} \quad (1)$$

여기서  $W_B$  는 덕트의 단면평균속도이며  $P$  는 국부평균압력,  $P_r$  는 기준압력이다. 입구부 곡덕트에 외벽 쪽의 압력을 기준압력  $P_r$  로 채택되었다. 유동이 곡덕트에 들어오에 따라 외벽 쪽에 압력계수는 급격히 상승되는 반면에 내벽 쪽의 압력은 급격히 하강한다. 그러나 입구부를 지나면 내벽과 외벽 압력이 함께 다시 서서히 떨어진다. 그러나

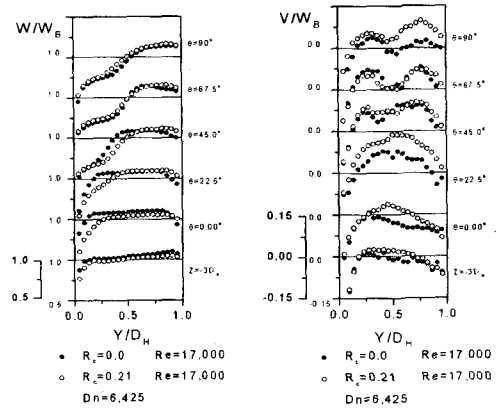


Fig. 8 Longitudinal variation of measured normalized mean streamwise velocity ( $W/W_B$ ) and mean radial velocity ( $V/W_B$ ) along the center symmetry plane for the inward flow mode

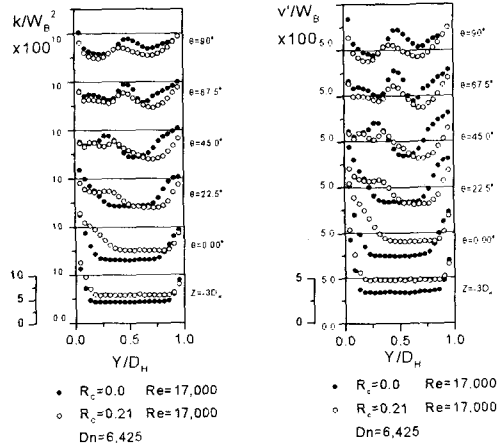


Fig. 9 Longitudinal variation of measured turbulence energy ( $k/W_B^2$ ) and normalized rms radial turbulence velocity for the inward flow mode

곡덕트의 회전수가 증가함에 따라 내벽과 외벽 사이에 압력계수의 차이는 증가한다. 내향유동에서는 코리올리힘이 곡률원심력과 반경 방향으로 상승적으로 합쳐진다. 그 결과는 내벽과 외벽 사이의 압력계수의 차이를 증가시킨다. 내벽의 압력계수는 외벽의 압력계수보다 회전수의 증가와 함께 더욱더 민감하게 변화됨을 알 수 있다.

Fig.7 에서는 회전수가 음의 값을 가진 외향유동에서 측정된 압력계수를 비교한 것이다. 외향유동에서는 코리올리힘이 곡률원심력과 상쇄적으로 더해진다. 곡덕트의 입구 부분에서 코리올리힘이 곡률원심력보다 크기 때문에 외벽의 압력계수보다

내벽의 압력계수가 크다. 그러나 곡덕트를 따라 유동이 진행함에 따라 경향이 바뀌게 된다.  $R_c = -0.561$  일 때  $\theta=30^\circ$  인 접부에서 압력계수가 역전되는 반면에  $R_c=-0.701$  인 경우 역전되는 점이  $\theta=55^\circ$  으로 이동한다. Fig.8은 내향유동에서 정지 상태와 회전 상태의 곡덕트에 흐르는 유동의 주유동 속도와 반경 방향 속도 분포를 비교한 그림이다. 유동이 곡덕트를 따라 진행함에 따라 주유동 속도의 최대속도점 정지 상태일 때 보다 회전 상태 일 때 외벽 쪽으로 이동하게 된다. 내향유동에서 곡덕트의 회전은 2 차 유동 강도를 증가시키므로 최대속도 점은 외벽 방향으로 이동된다. 그러나  $\theta=45^\circ$  이후에 곡덕트 회전에 기인하는 원심력은 회전하는 와 쌍들의 부서짐을 촉진하여 외벽 쪽으로 최대속도의 이동을 막는다. 곡덕트의 회전에 기인한 원심력과 외벽 반경 사이에 비스듬한 경사각은 2 차유동의 곡률을 증가시키고 반대의 회전 와 쌍의 부서짐을 촉진시킨다.

Fig.9에서 회전하는 곡덕트 유동의 흡입면에서 난류에너지 값의 감소를 찾을 수 있다. 난류에너지 방정식에는 코리올리 힘 항이 존재하지 않는다. Launder 와 Tselepidakis[1994]는 회전하는 평판채널 유동에 2 차모멘트 모델을 적용하여  $\overline{vw}$  방정식의 코리올리 생성항이 간접적으로 난류에너지의 생성에 영향을 미침을 입증하였다. 회전하는 직덕트 채널유동에서  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리 생성항  $-2(\overline{w^2} - \overline{v^2})\Omega$ 는 흡입 표면 근처에서  $\overline{vw}$  값을 감소시키고 이는 흡입면에서 난류에너지와 주 레이놀즈 응력의 감소를 초래한다. 반면에 압력면 근처에서는 반대의 효과를 발생시킨다.

Fig.9에서 정사각 단면의 회전하는 곡덕트의 직관 입구부 구간과 곡관 입구부 영역에서  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리 생성항의 효과가 난류에너지의 크기에 영향을 줄을 명확하게 보여주고 있다. 그러나 곡덕트 주위를 따라서 유동이 진행함에 따라 흡입면 부근의 난류에너지의 감소는 곡덕트의 출구까지 남아 있다. 반면에 압력면 부근에서 회전하는 곡덕트에서의 난류에너지의 값은 정지 상태 곡덕트에서의 난류에너지 값보다 작아진다. 내향유동에서 코리올리 힘과 곡률원심력이 반경 방향으로 상승적으로 합쳐져 2 차유동 강도를 증가시키고 다중 와 셀 형태로 2 차유동의 와로 부서짐을 촉진한다. 압력면 근처에서 반대로 회전하는 와의 이른 부서짐은 압력면에 난류에너지의 증가를 억제시킨다.

외향유동에서 곡률원심력과 코리올리 힘이 상쇄되어 2 차유동 강도의 감소를 초래한다. Fig.10은

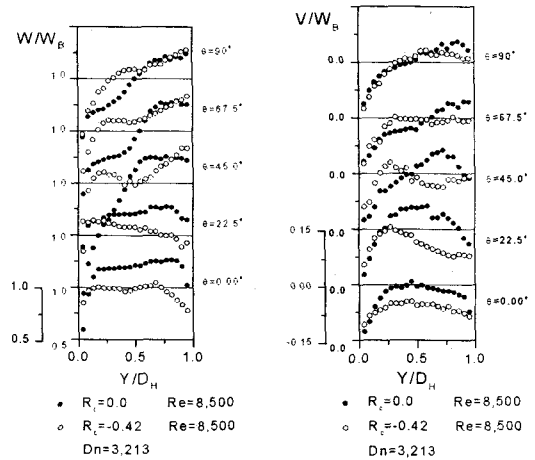


Fig. 10 Longitudinal variation of measured normalized mean streamwise velocity ( $W/W_B$ ) and mean radial velocity ( $V/W_B$ ) along the center symmetry plane for the outward flow mode

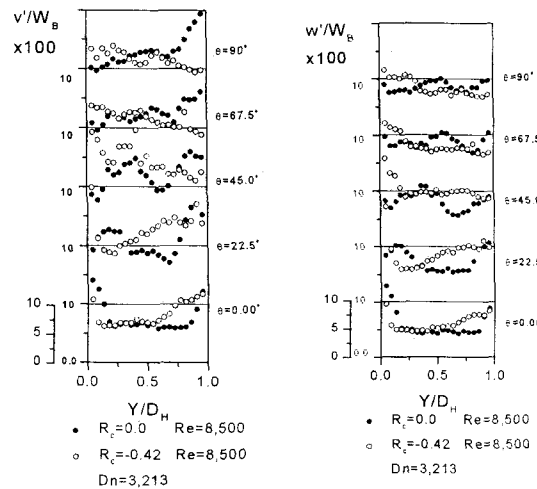


Fig. 11 Longitudinal variation of measured normalized rms streamwise turbulent velocity ( $w'/W_B$ ) and radial turbulence velocity ( $v'/W_B$ ) for the outward flow mode

외향유동에서 정지 상태와 회전 상태일 때 곡덕트 유동에서 측정된 주유동 속도 분포와 반경 방향 속도분포를 비교한 것이다. 곡덕트의 회전은 주유동 속도분포의 형태를 평편하게 하고 최대속도의 위치는 천천히 외벽 쪽으로 이동되고 있다. 2 차유동 강도의 큰 감소는 곡덕트의 입구 부분에서 찾을 수 있다. 그러나 곡덕트의 출구에서는 회전하는 곡덕트의 반경 방향 속도의 크기는 정지 상태 곡덕트의 값의 크기까지 증가한다.

Fig.11에서  $v'/W_B$ 와  $w'/W_B$ 의 비교는 곡덕트의

회전이 레이놀즈응력 값의 변화에 영향을 주는 것을 더욱 명백히 보여주고 있다. 외향유동에서 코리올리힘과 곡률원심력이 서로 간의 간섭으로 인한 2 차유동 강도의 감소와  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리 생성항  $-2\Omega(\overline{w^2}-\overline{v^2})$ 의 영향은 난류에너지와 레이놀즈수직응력에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.  $\overline{v^2}$ 와  $\overline{w^2}$  방정식에서 생성을 향  $\overline{vwW}/r$ ,  $4\Omega\overline{vw}$ 의 반대 부호는 흡입면 근처에서  $\overline{v^2}$ 와  $\overline{w^2}$ 의 형상 변화를 다르게 하는 원인이 된다. 입구 부분에서 벽 근처 부분에  $v/W_b$ 의 값은 중심 부분의 값보다 더 크다. 그러나  $\theta=45^\circ$  이후에 중심 부분의  $v/W_b$ 의 값이 벽 근처 부분의 값보다 크게 된다. 이것은 Fig.11에서 보여진 것과 같이  $\overline{v^2}$ 이  $\overline{w^2}$  이상으로 증가하여  $\overline{vw}$  방정식에 코리올리 생성항  $-2\Omega(\overline{w^2}-\overline{v^2})$ 의 부호의 변화시킨데 기인한다.

#### 4. 결론

회전하는 정사각 단면을 가진  $90^\circ$  곡덕트에서 덕트의 회전과 덕트 곡률이 평균유동과 난류구조에 미치는 효과를 실험적 관찰함으로써 다음의 결론을 얻었다.

1. 내향유동에서는 코리올리힘과 곡률원심력이 반경 방향으로 상승적으로 합쳐져 곡덕트 입구 부분에서 2 차유동의 강도를 증가시킨다. 그러나 곡덕트부  $45^\circ$  이후에는 곡덕트의 회전에 기인하는 원심력은 상반된 와 쌍을 다중와 셀로 부서짐을 촉진시켜 2 차 유동의 강도의 증가를 억제하고 있다.
2. 정사각 단면을 가진 회전하는  $90^\circ$  곡덕트 유동에서, 전단응력  $\overline{vw}$  방정식의 코리올리 생성항은 흡입면 근처에 레이놀즈응력과 난류에너지를 감소시키는 반면에 내측 압력면 근처에서는 빠른 와의 상장에 기인하여 상반된 와 쌍의 부서짐을 촉진시켰다.
3. 외향유동에서 전단응력  $\overline{vw}$  방정식에서 코리올리 생성항의 효과로 인한 난류에너지의 값은 코리올리힘과 원심력의 상쇄적인 합쳐짐으로 인해 2 차유동 강도의 감소를 초래한다.

#### 후 기

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

#### 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) King, C.F., 1978, Ph.D. Thesis, Univ. College of Wales, Cardiff, Wales.
- (3) Kristoffersen, R., Nilsen, P.J. and Andersson, 1990, "Validation of Reynolds stress closures for rotating channel flows by means of direct numerical simulations", Proc. International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Dubrovnik, pp. 55-64.
- (4) Koyama, D.K. and Ohuchi, M., 1985, Proc. of 5th International Symposium of Turbulent Shear Flows, Cornell, pp. 21-19.
- (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 Tselepidalsis, 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) Tafti, D.K. and Vanka, S.P., 1991, "A numerical study of the effect of spanwise rotation on turbulent channel flow", Phys. Fluids A vol.3, no.4, pp. 642-656.