

# 곡관덕트에서 난류맥동유동의 축방향 속도분포와 2차유동분포에 관한 연구

이홍구(동아인재대학)\*, 손현철(순천제일대학)\*\*, 이행남, 박길문(조선대 기계공학과)\*\*\*

## A Study on the Axial Velocity and Secondary Flow Distributions of Turbulent Pulsating Flow in a Curved Duct

H. G. Lee (Dong-A College)\*, H. C. Son (Sun Chun First College)\*\*,  
H. N. Lee, G. M. Park (Chosun Univ.)\*\*\*

ABSTRACT : In the present study, flow characteristics of turbulent pulsating flow in a square-sectional 180° curved duct are investigated experimentally. In order to measure axial velocity and secondary flow distributions, experimental studies for air flow are conducted in a square-sectional 180° curved duct by using the LDV system with the data acquisition and the processing system of the Rotating Machinery Resolver (RMR) and the PHASE software. The experiment is conducted on seven sections from the inlet ( $\phi=0^\circ$ ) to the outlet ( $\phi=180^\circ$ ) at 30° intervals of the duct.

The results obtained from the experimentation are summarized as follows :

In the axial velocity distributions of turbulent pulsating flow, when the ratio of velocity amplitude ( $A_1$ ) is less than one, there is hardly any velocity change in the section except near the wall, and any change in axial velocity distribution along the phase.

The secondary flow of turbulent pulsating flow has a positive value at the bend angle of 150° without regard to the ratio of velocity amplitude. The dimensionless value of secondary flow becomes gradually weak and approaches zero in the region of bend angle 180° without regard to the ratio of velocity amplitude.

Key Words : Turbulent pulsating flow(난류맥동유동), Square-sectional 180° curved duct(정사각 단면 180° 곡관덕트), Secondary flow distribution(2차유동 분포), LDV(레이저 도플러 유속계)

### 1. 서 론

곡관덕트내에서 난류맥동유동에 관한 연구는 각종 플랜트의 배관계통 및 대형건축물의 공조장치, 원심펌프나 터빈의 날개통로, 화학반응장치, 유류수송라인, 열교환기, 유압회로의 설계 등 2차 산업관련 뿐만 아니라 방송국의 음향설비 등 모든 산업분야에 이용되고 있다. 최근에 이르러서는 심장, 혈관계의 흐름을 취급하는 의료용기와 밀접한 관련이 있고 폐·기도의 좁은 부분에서의 2차유동의 효과는 혈액의 중요한 기능인 산소, 탄산가스등의 수송이나 폐의 내부

에서의 대류확산에 의한 가스교환 등의 작용을 촉진시키는 것으로 이러한 문제에 관계되는 생체공학분야까지 관련이 되어 있다.

곡관로에 대한 과거 연구동향을 살펴보면, 곡관로내의 유동이 유체공학상으로 제기된 것은 19세기 말이지만 본격적으로 유체공학적인 연구가 시작된 것은 1920년대로 주로 이론적인 연구가 행해졌고, 초기의 이론해석은 급힘의 영향이 적은 유동에 대한 해석이었다.

1940년대에 들어서는 소형 강제분류보일러나 화학반응장치, 1950년대의 원자로 냉각기 등의 각종 열교환기나 공업관련장치에서의 열전달

문제와도 관계되는 급힘의 영향이 큰 유동(높은 Dean 수)에 대한 연구가 진행되었다.

1960년대에는 곡관로내의 유동현상과 저항에 관한 연구가 활발하였고, 1970년대 이후에는 컴퓨터의 급격한 발달과 수치계산법의 진보, 유동의 계측, 실험기술의 발전에 따라 곡관내 유동의 연구는 급속도로 진전되었고, 해석법이나 실험방법의 진전과 더불어 비정상유동에 관한 연구가 진행되었다.

1980년대에는 전자계산기의 대용량화 및 고속화에 따라 비정상유동에 관한 연구가 활발하게 이루어졌고 Navier-Stokes 방정식의 비선형성도 검토되기 시작되었다.

곡관덕트내의 유동에 관한 기존연구들을 살펴보면 연구의 초기에 대부분의 연구자들은 단면이 원형인 형태의 연구를 진행하였다. 19세기 말 곡관로에서 유체유동이 공학적으로 연구되기 시작하여 1910년에 Eustice<sup>1)</sup>는 곡관로내의 유동은 직관로에 비하여 압력손실이 크며 또한, 나선형 유동을 한다는 것을 지적하였으며, 1927년에 Dean<sup>2)</sup>은 단면이 원형인 곡관내에서 관측방향으로 나선형 운동을 하는 유체의 유동을 관측방향의 주류와 관측에 수직한 단면내의 2차유동으로 구별하고 곡관유동을 지배하는 특성 파라메타로 Dean 수 ( $Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{D_w/2R}$ )에 의존한다는 것을 발표하였다.

난류맥동유동에 관한 연구로 Smith<sup>3)</sup>는 대칭인 임의의 단면형상의 곡관내에서 관측방향으로  $-\partial p/\partial z = \rho \omega \omega_0 \cos \omega t + G$ 로 된 맥동압력구배가 가해진 유동을 이론해석적으로 연구했다. Sumida<sup>4)</sup>등은 LDV로  $Rc = 1/9 \sim 1/33$ , 무차원 각진동수 ( $\omega^+$ ) = 2~28,  $De = 30 \sim 300$ , 속도진폭비 ( $A_1$ ) = 0.5, 1의 범위에서 축방향 속도분포를 측정하였다.

Zalosh<sup>5)</sup>등은 이론해석으로 2차유동은 정상성분과 진동성분으로 구성되어 있으며, 이들성분들은 무차원 각진동수( $\omega^+$ )의 증가에 따라 크기가 급격히 감소하며 무차원 각진동수가 2보다 적을 때, 유선과 입자궤도는 낮은 Dean수의 정상유동의 형태와 같다고 발표하였다.

본 연구에서는 정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트에서 유동영역을 분류하여 난류맥동유동의 유동영역에서 LDV를 이용하여 축방향 및 횡방향의 위치변화에 따라 축방향 속도분포와 2차 유동 속도분포를 규명 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

실험장치의 주요 구성은 축방향 및 횡방향 속도분포 측정을 위한 180° 곡관덕트, 정상유동 발생을 위한 흡입형 송풍기, 비정상유동 발생을 위한 Scotch-yoke형 가진기 및 변속모터 등으로 구성되어 있고 시험덕트에서 속도분포를 측정하기 위하여 최대출력 2W인 Ar-Ion Laser로 2색 3빔 방식의 후방산란형 LDV와 LDV System을 적재하여 이동시킬 수 있는 3차원 이송기구로 구성되어 있다. 실험에서 사용된 주요 측정기는 LDV에서 신호를 받아 처리하는 신호처리기(Signal Processor), PC, 오실로스코프가 있고 맥동유동의 Data 처리를 위해 PHASE software를 사용하였다.

실험에 이용된 시험덕트는 정사각 단면을 갖는 180° 곡관덕트로서 입구측의 직관덕트는  $2a \times 2b = 40 \times 40$  (mm)인 덕트로서 길이가 4000 (mm)이며 덕트입구에는 무풍상태를 유지한 정류상자 및 벨마우스형 유입관(inlet bell mouth)을 설치하였으며 곡관의 출구측 직관덕트도 입구부의 직관 덕트와 동일한 규격이며 곡관부 덕트 또한 직관부와 동일한 단면이고 곡관반경이 400 mm인 곡관덕트로서 U자형을 형성하고 있다.

시험덕트의 대칭벽 사이의 거리는  $40 \pm 0.5$  (mm)가 유지되도록 하였고 벽의 인접각은  $90^\circ \pm 0.4^\circ$ 가 되도록 하였으며, 밀면은 전길이에 걸쳐  $\pm 0.5$  (mm) 이내에서 수평이 되도록 하였다. 또한, 정확한 실험을 위하여 LDV를 적재한 Traverse는 수평기를 이용하여 수평상태를 유지하였다.

이들 실험장치의 개략도와 곡관덕트의 좌표계를 각각 Fig 1과 Fig 2에 나타냈다.

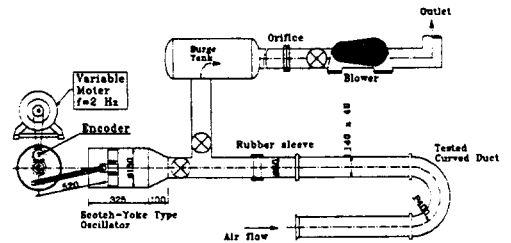


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

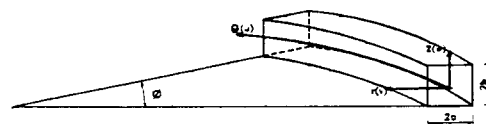


Fig.2 Coordinate system and velocity component in the curved duct

## 2.2 실험방법

맥동유동은 정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 유동으로 정상유동은 송풍기에 의하여 시험덕트에 유입하였고 진동유동은 Scotch-yoke형 가진기에 의하여 발생시켰다. 정상유동의 유속조절은 Blower를 구동하는 변속모터의 회전수나 유량제어밸브로 조절하였고, 진동유동은 Scotch-yoke형 가진기에 부착된 크랭크판의 위치 조절에 의해 피스톤 진폭을 조절하여 실험하였다.

작동유체로서 모기향(산란입자의 크기: 0.1~0.3 $\mu$ m)을 연소시킨 공기를 흡입형 송풍기에 의해 덕트내로 흡입시켰다.

본 실험에서는 덕트의 중앙에 삽입한 열선으로부터의 신호를 열선유속계를 통하여 광기록계에 기록하여 난류맥동유동영역을 구분하였다. 각진동수( $f$ )를 2.0Hz, 피스톤 진폭( $A_p$ )은 80mm, 진동Dean수를 4470으로 하고 시간평균 Dean수( $De_{\alpha}$ )는 3350과 7380으로 변화시켰을 때, 속도진폭비( $A_1$ )는 1.3, 0.6이었다.

난류맥동유동의 유동특성에 대한 유동형태를 고찰하기 위해서 무차원 각진동수( $\omega^+$ )를 18.5로 고정하고 시간평균 Dean수를 3350과 7380으로 변화시키면서 곡관덕트의 측정부를 30°씩 등 간격으로 하여 측정하였다. 곡관덕트내에서 유체유동은 원심력이 작용하게 되어 덕트의 안쪽과 바깥쪽에 압력차가 존재하기 때문에 측방향에 수직인 단면내에는 2차유동이 발생하므로 새로운 유동현상으로 변화되고, 특히 직관부에서 곡관부로 변하는 유동영역에서 비정상유동은 아주 복잡한 현상을 나타내므로 덕트 중심으로부터  $z^*$  방향으로 7분할하여 각 지점에서 난류맥동유동의 순간속도를 측정하였고, 특히 곡관덕트에서는  $r^*$ 의 위치에 따른 속도분포가 심한 변화를 보일 것으로 생각되어 측정부위를 덕트 중심에서 양쪽 관벽쪽을 15분할하여 조밀한 간격으로 실험을 하였다.

난류맥동유동의 시간평균 레이놀드수는  $Re_u$

$$= \frac{u_{m,u} \cdot D_h}{\nu}$$

으로 계산하여  $De_{\alpha} = 3350$ 과  $7380$ 으로

하였고 무차원 각진동수( $\omega^+$ )는  $\omega^+ = \frac{D_h}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ ,

속도진폭비는  $A_1 = \frac{|\bar{u}_{m,\alpha}|}{\bar{u}_{m,u}}$ 로부터 계산하였다.

이들의 난류맥동유동에 대한 측정값은 LDV를 통하여 얻은 실험값을 Rotating Machinery Resolver와 Scotch-yoke형 가진기의 회전축에 부착시킨 Encoder의 신호에 의해서 1회전당 360°의 전 위상에서 신호를 받아들여 PHASE

software에서 처리한 다음 Origin Graphic Software에서 Plotting하였다.

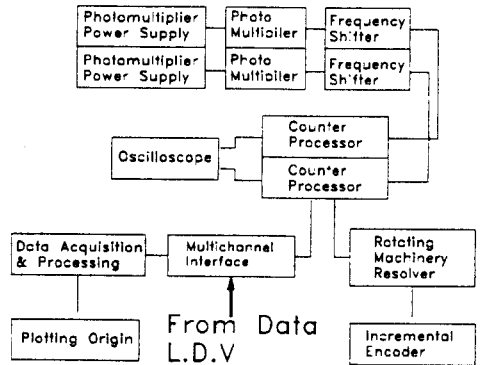


Fig. 3 Data acquisition and processing system

Fig 3은 실험자료 획득 및 처리과정을 나타낸 것이고 Table 1은 난류맥동유동의 실험조건을 나타낸 것이다.

Table 1 Experimental condition of turbulent pulsating flow

Angle	f(Hz)	$\omega^+$	$A_p$ (mm)	$De_{\alpha}$	$De_{\alpha}$	$A_1$	$R_c$ (mm)
0°	2.0	18.5	80	4470	3350	1.3	400
					7380	0.6	
30°	2.0	18.5	80	4470	3350	1.3	
					7380	0.6	
60°	2.0	18.5	80	4470	3350	1.3	
					7380	0.6	
90°	2.0	18.5	80	4470	3350	1.3	
					7380	0.6	
120°	2.0	18.5	80	4470	3350	1.3	
					7380	0.6	
150°	2.0	18.5	80	4470	3350	1.3	
					7380	0.6	
180°	2.0	18.5	80	4470	3350	1.3	
					7380	0.6	

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 유동영역의 분류

180° 곡관의 완전 발달된 영역인 굽힘각  $\phi = 150^\circ$ 의 덕트 중앙에서 진동 Dean수를 고정하고 시간평균 레이놀드수를 변화시키면, 유동은 층류맥동유동으로부터 천이맥동유동, 난류맥동유동으로 변화시켜 Fig 4와 같이 속도파형을 열선신호로부터 획득하여 광기록계에 기록하여 그 파형을 분석하여 난류맥동유동의 범위를 결

정하였다. 곡관덕트의 입구부에서 하류쪽으로 진행할수록, 덕트의 중심에서 벽면쪽으로 갈수록 감속위상에 난류성분이 많이 나타나게 됨을 알 수 있다. 또한, 시간평균 Dean수가 증가함으로써 전위상에 난류성분이 나타나게 됨을 알 수 있다.

정사각단면 덕트내에서 완전한 난류성분이 나타나기 시작한 임계 맥동유동의 시간평균 Dean 수를 결정하기 위해 다음 식을 이용하였다.

$$De_{u,cr} = \left( \frac{u_{m,u} \cdot D_h}{\nu} \right) \sqrt{D_h/2R}$$

본 실험에서는 진동유동의 Dean 수를 4470으로 고정하였을 때, 시간평균 Dean 수가 3350이상의 난류유동영역 상태에 있음을 확인하였다.

맥동유동의 유동특성은 시간평균 Dean수와 정상유동의 Dean수가 일대일로 비례함을 알 수 있다.

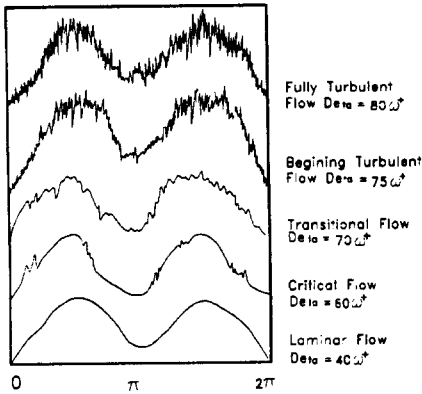


Fig. 4 Waveforms of pulsating flow in a curved duct by hot-wire anemometer

### 3.2 축방향 속도분포

정사각단면을 갖는 곡관덕트내의 맥동유동의 유동특성에서 곡률반경은 유동에 큰 영향을 미치지 않으므로 주로 시간평균 Dean 수와 속도진폭비에 의해 지배된다.

Fig 5는 무차원 각진동수 ( $\omega^+$ )가 18.5이고,  $De_a$ 가 3350, 속도진폭비( $A_1$ )가 1.3인 경우인데, 난류맥동유동의 거의 대부분이 정상유동의 발달과정과 비슷한 형태를 이루고 있음을 알 수 있다. 또한, 곡관의 속도가 큰 부분이 이들의 분포에서 덕트 중앙부분으로부터 외벽측으로 정상유동에서와 같이 이동하는 것을 볼 수 있으며 속도구배는 내벽측에서는 완만하고 외벽측에서는 크게 된다.

무차원 각진동수가 18.5정도의 유동에서는 관

로의 굽힘의 영향에 대하여 무차원 각진동수의 증가에 의한 비정상성의 영향이 현저하게 나타나기 때문에 유동은 아주 복잡한 거동을 나타낸다. 속도간 위상의 벗어남이 크게 됨에 따라 축방향 속도분포는 점차적으로 관로 중앙부에서 오목형으로 되는 현상이 나타나기 시작한다.

위상이 진전하여 가속이 시작되면( $\omega t/\pi/6 \approx 9-0$ ), 내벽측의 유체는 강한 순압력구배에 의해 가속되고 유동은 급속하게 반전하여 순방향으로 변한다. 그래서, 축방향 속도의 최대값은 외벽측에 생긴다.

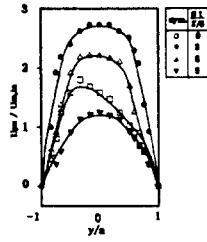
속도진폭비가 1.3인 유동에서, 축방향 속도분포는 곡관의 입구측인  $\phi=0^\circ$ 에서는 거의 좌우가 대칭인 속도분포를 나타내다가  $\phi=30^\circ$ 와  $\phi=90^\circ$ 에서는 원심력에 의해 가장 큰 속도가 외벽측으로 이동하여 내벽과 외벽과의 속도차가 크게 나타나고, 평균속도가 양의 값임에도 불구하고  $\omega t/\pi/6=9$ 에서 내벽측에서 역류하고,  $\phi=60^\circ$ 되는 지점에서는 주유동과 2차유동의 속도에너지가 거의 평형을 이루어 2차유동의 영향으로 주유동의 속도가 상쇄되어 진폭이 작은 형태로 나타나며,  $\phi=150^\circ$ 되는 지점부터는 점차적으로 안정된 유동을 보이고 있다.

Fig 6는 무차원 각진동수 ( $\omega^+$ )가 18.5이고,  $De_a$ 가 7380, 속도진폭비( $A_1$ )가 0.6인 경우인데, 역시 정상성분의 영향으로 축방향 속도분포는 정상유동과 비슷한 속도분포형을 보이고 있다. 축방향 속도의 관로 중앙부에 있어서 오목한 현상은 Dean수가 더욱 크게 되면, 원심력의 극대값은 내벽측과 외벽측의 2개소에서 생기게 된다. 그러나 위상의 진전과 관로 중앙부의 유체는 가속되어서 축방향 속도의 분포가 평탄하게 되므로 부가적인 와는 소멸된다. 시간평균 Dean수가 증가하면 중앙부의 볼록한 부분이 대칭에 가까운 분포형으로 된다.

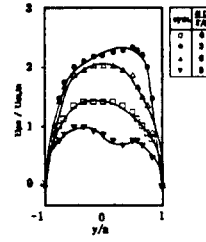
Fig 5와 비교하여 시간평균 Dean수가 높아져 속도진폭비가 낮아지기 때문에 벽면의 점성력에 비하여 관성력이 상대적으로 증가하여 곡관내 내측과 외측의 속도구배는 비교적 완만하고 속도의 변화가 작아지는 것을 관찰할 수 있다.

전 위상에 걸쳐 굽힘각이  $30^\circ$ 인 지점을 지나면서 축방향의 완만한 속도분포가 형성되며,  $90^\circ$  부근에서는 annular분포가 나타난다.

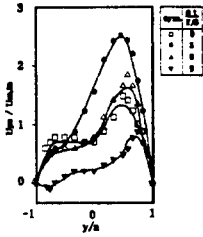
1주기중 작용하는 원심력의 크기가 같으므로 외벽측에서 축방향속도가 큰 형태로 되며 발달한 곡관내 유동으로 된다.



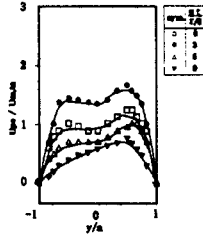
(a)  $\phi = 0^\circ$



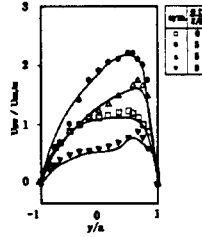
(a)  $\phi = 0^\circ$



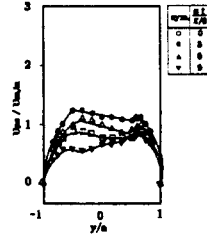
(b)  $\phi = 30^\circ$



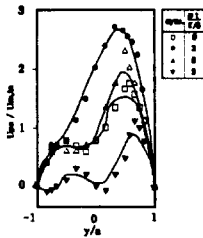
(c)  $\phi = 60^\circ$



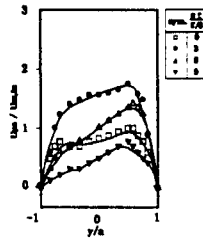
(b)  $\phi = 30^\circ$



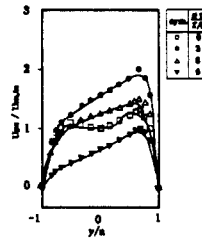
(c)  $\phi = 60^\circ$



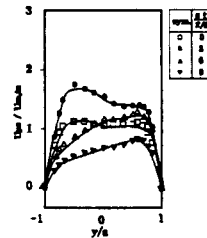
(d)  $\phi = 90^\circ$



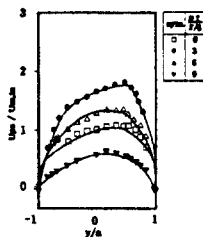
(e)  $\phi = 120^\circ$



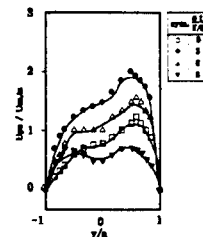
(d)  $\phi = 90^\circ$



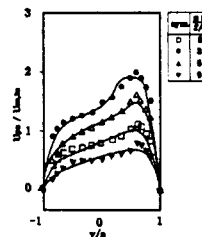
(e)  $\phi = 120^\circ$



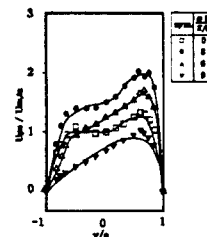
(f)  $\phi = 150^\circ$



(g)  $\phi = 180^\circ$



(f)  $\phi = 150^\circ$



(g)  $\phi = 180^\circ$

Fig. 5 Axial velocity distributions of the turbulent pulsating flow at the  $De_n=3350$ ,  $\omega^*=18.5$ ,  $A_1=1.3$

Fig. 6 Axial velocity distributions of the turbulent pulsating flow at the  $De_n=7380$ ,  $\omega^*=18.5$ ,  $A_1=0.6$

### 3.3 2차유동 속도분포

2차유동의 속도분포는 곡관덕트 입구측에서는 상대적으로 복잡한 양상을 보인다. 난류맥동유동의 2차유동에 관한 결과를 덕트의 중앙에서  $z'$ 의 변화에 따라 Fig 7과 Fig 8에 나타내었다.

무차원 각진동수 ( $\omega^*$ )가 18.5정도의 유동에서는 관로의 굽힘의 영향에 따른 시간평균 Dean 수의 증대에 의해서 비정상성의 영향이 현저하게 나타나기 때문에 2차유동은 아주 복잡한 거동을 나타낸다.

Fig 7 ( $De_a=3350$ ,  $A_1=1.3$ )에 나타난 유동은 곡관덕트의 입구영역에서 덕트 상하면부근의 2차유동의 거동이 복잡하여  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  되는 지점의 중심부에서는 2차유동이 강해지는 것을 관찰할 수 있었다.

굽힘각이  $30^\circ$  되는 지점의 위상각 ( $\omega t/\pi/6$ )이 0, 6에서 외벽으로부터 내벽으로 강한 2차유동이 발생하고 굽힘각이  $60^\circ$  되는 지점에서는 2차유동의 강도는 작아지나 복잡한 현상을 나타낸다. 굽힘각  $90^\circ$  되는 지점에 이르러서는 최소 유속시에만 외벽으로부터 내벽으로 강한 유동이 발생하였다.  $\phi=150^\circ$  되는 지점에서는  $z'$  방향의 전영역에서 내벽측에서 외벽측으로 강한 2차유동이 발생하다가 출구측인  $180^\circ$  되는 지점에서는 2차유동이 점점 약해져 0에 가까워졌다.

Fig 8 ( $De_a=7380$ ,  $A_1=0.6$ )에서는  $A_1$ 이 상대적으로 감소하여 덕트의 외측방향에서 관성력에 비해 점성력이 증가하고 Fig 7에 비해 2차유동의 진폭이 작은 형태를 나타내고 있다. 이는 진동유동의 성분에 비하여 정상유동의 성분이 강해져서 정상유동의 형태와 더욱 유사해지는 것으로 생각된다.

난류맥동유동은 전체적으로  $30^\circ$  와  $150^\circ$  지점에서 강한 2차유동이 발생하였고 출구인  $180^\circ$  지점에서는 두 조건이 모두 0에 근접하였다.

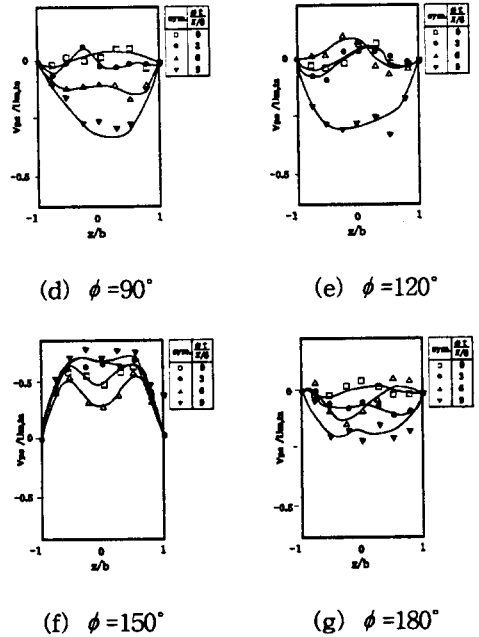
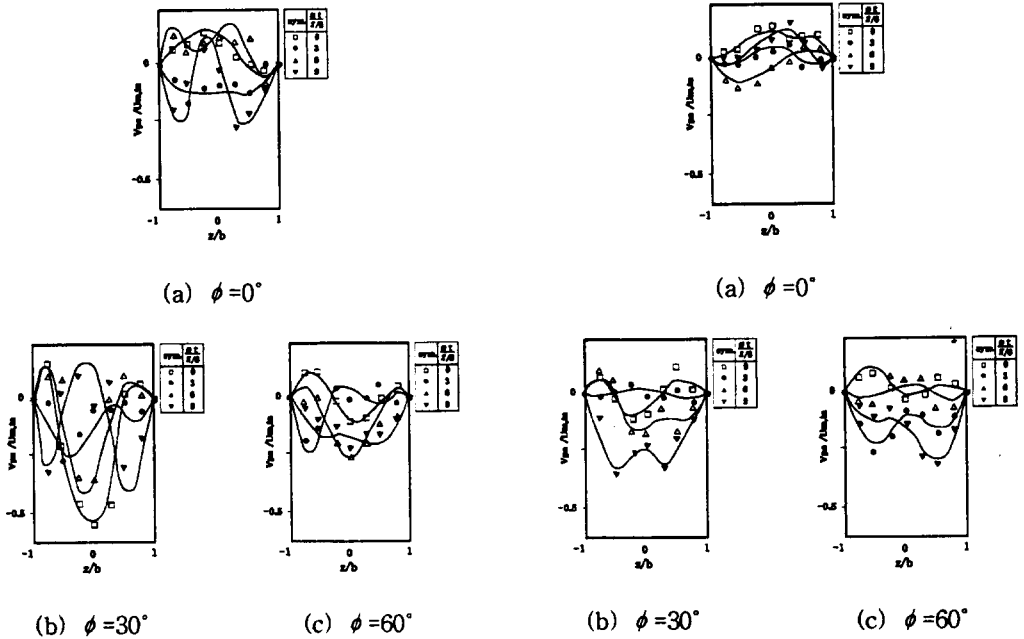


Fig. 7 Secondary flow distributions of the turbulent pulsating flow at the  $De_a=3350$ ,  $\omega^*=18.5$ ,  $A_1=1.3$



관계없이 양의 값을 갖고 출구측인  $\phi=180^\circ$  지점에서는 2차유동이 점점 약해져 무차원 값이 0에 가까워졌다.

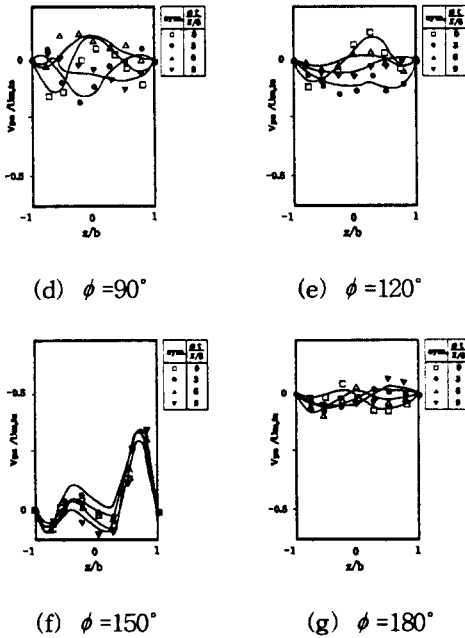


Fig. 8 Secondary flow distributions of the turbulent pulsating flow at the  $De_{ta}=7380, \omega^+=18.5, A_1=0.6$

#### 4. 결론

정사각단면  $180^\circ$  곡관덕트에서 난류맥동유동의 축방향 속도분포와 2차유동 속도분포에 관한 연구를 규명하기 위해 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 천이맥동유동에서 난류맥동유동으로 변화되는 시간평균 임계 Dean수는  $75 \omega^+$  정도이다.
2. 난류맥동유동의 축방향 속도분포는 속도진폭비( $A_1$ )이 1보다 작은 경우 벽부근을 제외한 단면내의 속도변동의 차는 거의 없고 위상에 따른 축방향 속도분포 형상도 거의 변하지 않았다. 속도진폭비가 0.6일 때, 속도변화율은 느렸고 속도분포도 정상유동과 거의 비슷하였다.
3. 난류맥동유동의 2차유동은  $\phi=30^\circ$  와  $\phi=150^\circ$  에서 강한 2차유동이 발생하였고 속도진폭비가 클수록 강해졌다. 2차유동의 모 든 값은  $\phi=150^\circ$  지점에서 속도진폭비와

#### 참고문헌

- 1] Eustice, J.: "Flow of Water in curved pipe" Proc.R.Soc, Ser. A.84-568. pp. 107-118.1910.
- 2] Dean, W.R.: "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe." Phil.Mag.S. Vol.4, N020, pp.208-223, 1927.
- 3] Smith, F. T. : "Fluid Flow into a Curved Pipe", Proc. R. Soc. Ser. A. 351: 71-87, 1976.
- 4] Sumida, M., and Sudou, K. : "Pulsating Flow in Curved Pipes(5th Report, Velocity Distribution in Entrance Region)", Journal of JSME(B), Vol. 61 No. 587: 2442-2449, 1995.
- 5] Zalosh, R. G., et al : "Pulsating Flow in a Curved Tube", J. Fluid Mech, Vol. 59, part 4: 693-705, 1973.