

곡관덕트에서 난류진동유동의 전단응력분포와 압력분포

이흥구* · 손현철** · 이행남 · 박길문***

Wall shear stress and Pressure Distributions of Developing Turbulent Oscillatory Flows in a Square sectional Curved Duct

H-G Lee, H-C Son, H-N Lee and G-M Park

Key Words: Turbulent Oscillatory Flow(난류진동유동), Wall Shear Stress and Pressure Distributions (벽면전단응력과 압력분포), Bend Angle(굽힘각), Phase Angle(위상각)

Abstract

In the present study, flow characteristics of turbulent oscillatory flow in a square-sectional 180° curved duct are investigated experimentally. In order to measure wall shear stress and pressure 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. The wall shear stress measuring point bend angle of the 150° and pressure distribution of the inlet ($\phi=0^\circ$) to the outlet ($\phi=180^\circ$) at 10° intervals of the duct.

The results obtained from the experimentation are summarized as follows :

A wall shear stress value in an inner wall is larger than that in an outer wall, except for the phase angle ($\omega t/\pi/6$) of 3, because of the intensity of secondary flow. The pressure distributions are the largest in accelerating and decelerating regions at the bend angle(ϕ) of 90° and pressure difference of inner and outer walls is the largest before and after the $\phi = 90^\circ$.

1. 서론

곡관덕트내에서 난류진동유동에 관한 연구는 각종 플랜트의 배관계통 및 대형건축물의 공조장치, 원심펌프나 터빈의 날개통로, 화학반응장치, 유류수송라인, 열교환기, 유압회로의 설계 등 2차 산업관련 뿐만 아니라 비행기의 흡입, 방송국의 음향설비 등 모든 산업분야에 이용되고 있다. 비정상유동인 난류진동유동의 해석은 유체기계 설계에 기초자료가 될 뿐만 아니라 공조덕트

설비, 가스터빈, 압축기, 제트엔진등의 유체기계 내부의 유동을 해석하는데 중요하게 응용될 수 있기 때문에 이에 대한 유동해석이 절실하게 요구되고 있다. 또한, 의용생체공학 분야인 혈액순환계내의 혈관계도 많은 곡관부를 가지고 있기 때문에 혈액유동에 대한 특성을 규명하는데 있어서도 공학적인 해석방법을 도입한 비정상유동의 응용해석에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있는 실정이다.

곡관로에 대한 과거 연구동향을 살펴보면, 곡관로내의 유동이 유체공학상으로 제기된 것은 19세기 말 이지만 본격적으로 유체공학적 연구가 시작된 것은 1920년대로 주로 이론적인 연구가 행해졌고, 초기의 이론해석은 굽힘의 영향이 적

* 동아인재대학 컴퓨터응용설계과

** 순천제일대학 건축설비과

*** 조선대학교 기계공학과

은 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 주로 수치해석적 연구와 열선유속계에 의한 실험적 연구가 이루어졌다.

1990년대 이후에는 Laser 계측기술의 발달로 LDV(Laser Doppler Velocimetry)와 PIV(Particle Image Velocimetry)의 실험적 연구가 주로 진행되었다.

곡관덕트내의 유동에 관한 기존연구들을 살펴보면 19세기 말 곡관로에서 유체유동이 공학적으로 연구되기 시작하여 1910년에 Eustice⁽¹⁾는 곡관로내의 유동은 직관로에 비하여 압력손실이 크며 또한, 나선형 유동을 한다는 것을 지적하였으며, 1927년에 Dean⁽²⁾은 단면이 원형인 곡관내에서 관측방향으로 나선형 운동을 하는 유체의 유동을 관측방향의 주류와 관측에 수직한 단면내의 2차유동으로 구별하고 곡관유동을 지배하는 특성 파라메타로 Dean 수 ($Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{D_n/2R}$)에 의존한다는 것을 발표하였다. 곡관내의 비정상유동에 관한 연구는 대부분 1970년대부터 시작되었고 그중 진동유동에 관한 연구는 Lyne⁽³⁾이 곡률반경비(Rc)가 충분히 큰 원형곡관내에서 축방향으로 $-\partial p / \partial z = \rho \omega \omega_0 \cos \omega t$ 되는 정현파의 압력구배가 가해지는 이론적인 연구를 하여, 정상유동에서 볼수 있는 2차유동이외에 관로 중앙부의 외벽측에서 내벽측으로 향하는 2차유동이 유기되는 것을 발견하였는데, 이것을 후에 Lyne의 2차유동이라 부른다.

Bertelsen⁽⁴⁾은 AI분말법에 의한 가시화실험으

로 Lyne의 2차유동과 비교한 연구를 하였다.

Mullin⁽⁵⁾등은 곡관내에서 발달하고 있는 진동유동일 때 Laser 유속계를 이용하여 속도분포를 실험적으로 구했는데 유동의 발달은 주파수 변화와 진동진폭에 의존함을 알았다.

Komai⁽⁶⁾등은 유한차분법과 SAMPLER법을 이용하여 곡관내 진동유동에서 무차원 각진동수(ω^+) = 18, De = 370, Rc = 1/2, 1/3, 1/7인 조건에서 각진동수가 비교적 큰 유동의 축방향 속도분포가 곡률비가 증가함에 따른 2차유동이 강해짐을 수치해석적으로 연구하였다.

Takami⁽⁷⁾등은 수치해석적으로 속도분포, 2차유동의 유선, 벽면전단응력 분포, 압력구배 파형등의 유동의 내부구조를 규명하였다.

Sumida⁽⁸⁾등은 정사각단면에서 수치해석으로 축방향속도, 2차유동의 유선 및 전단응력의 분포를 명확히 하였다.

본 연구에서는 정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트에서 유동영역을 분류하고 LDV를 이용하여 난류진동유동의 벽면전단응력 분포와 압력분포를 규명하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

실험장치의 주요 구성은 축방향 및 횡방향 속도분포 측정을 위한 180° 곡관덕트, 정상유동 측정을 위한 흡입형 송풍기, 비정상유동 측정을 위한 Scotch-yoke형 가진기 및 변속모터 등으로 구성되어 있고 시험덕트에서 속도분포를 측정하기 위하여 최대출력 2W인 Ar-Ion Laser로 2색 3빔방식의 후방 산란형 LDV와 LDV System을 적재하여 이동시킬 수 있는 3차원 이송기구로 구성되어 있다.

실험에서 사용된 주요 측정기는 LDV에서 신호를 받아 처리하는 신호처리기(Signal Processor), Personal Computer, 오실로스코프가 있고 비정상유동인 진동유동의 Data 처리를 위해 PHASE software를 사용하였다.

실험에 이용된 시험덕트는 정사각 단면을 갖는 180o 곡관덕트로서 입구측의 직관덕트는 2a × 2b

= 40×40 (mm)인 덕트로서 길이가 4000 (mm) 이며 덕트입구에는 무풍상태를 유지한 정류상자 및 벨 마우스형 유입관(inlet bell mouth)을 설치하였으며 곡관의 출구측 직관덕트도 입구부의 직관덕트와 동일한 규격이며 곡관부 덕트 또한 직관부와 동일단면이고 곡률반경이 400 mm인 곡관덕트로서 U자형을 형성하고 있다.

시험덕트의 대칭벽 사이의 거리는 40 ± 0.5 (mm)가 유지되도록 하였고 벽의 인접각은 $90^\circ \pm 0.4^\circ$ 가 되도록 하였으며, 밀면은 전길이에 걸쳐 ± 0.5 (mm) 이내에서 수평이 되도록 하였다. 또한, 정확한 실험을 위하여 LDV를 적재한 Traverse는 수평기를 이용하여 수평상태를 유지하였다. 작동유체로서 모기향(산란입자의 크기: $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$)을 연소시킨 공기를 흡입형 송풍기에 의해 덕트내로 흡입시켰다.

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

천이유동영역으로 규정하고 천이유동영역을 넘어선 영역에서 실험을 하였다.

실험방법은 무단변속모터에 의해서 진동주파수를 조절하였고, 회전원판의 위치에 의한 피스톤의 진폭을 조절하여 진동유동의 Dean 수와 진폭을 변화하였다.

각진동수(f)를 2.0Hz에 고정하고 진동 Dean 수를 4470과 6700으로 조절하여 곡관덕트의 각 측정위치에 따라 속도분포를 획득하였다. 측정위치는 180° 곡관덕트를 0° 에서부터 180° 까지 30°

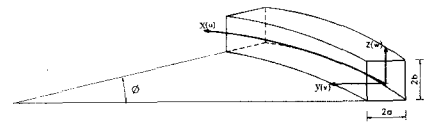


Fig. 2 Coordinate system and velocity component in a curved duct

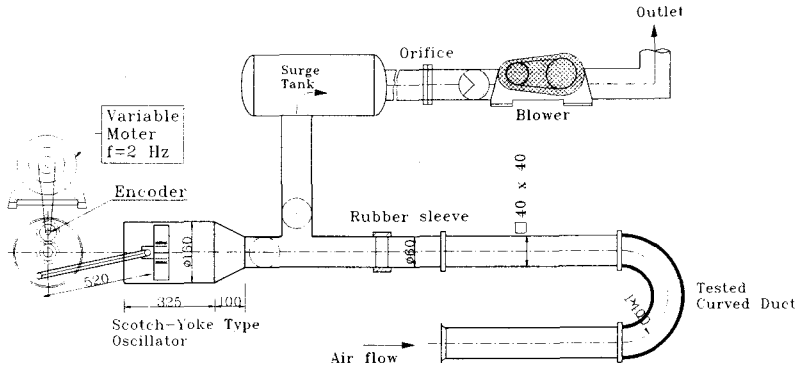


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험 방법

Fig.1에서 보면 무단변속기가 연결된 Scotch-yoke형 가진기판을 작동시켜 난류진동유동을 발생시켰다.

실험범위는 덕트 중심에서 열선으로 나오는 신호가 열선유속계를 지나 광기록계에 기록된 속도 파형을 고찰하여 최초의 난류버스트가 발생하는 곳에서부터 완전한 난류가 형성되는 부근까지를

등간격으로 측정하고 z 축은 덕트단면에 대하여 0부터 0.95로 난류정상유동의 측정범위와 같게 하였다. 진동유동의 단면 평균속도 $|u_{m,o,1}|$ 는 $(A_p/2)\omega \times (A_{piston}/A_{duct})$ 하여 피스톤진폭으로부터 계산하였고, 진동유동의 속도를 유입유동과 유출유동으로 나누어 Fourier급수에 의하여 6차의 고주파 성분까지의 진폭과 위상각을 계산하였

다.

진동유동의 Dean 수와 무차원 각진동수는

$$\left\{ De_{\omega} = Re_{\omega} \sqrt{\frac{D_h}{2R}} = \frac{\sqrt{\frac{D_h}{2R}} (D_h \cdot |u_{m,0s,1}|)}{\nu} \right\} \text{ 과}$$

$\omega^+ = (Dh/2)\sqrt{\omega/\nu}$ 로부터 계산하였고 18.5로 고정하여 실험하였다.

난류진동유동에 대한 측정값은 LDV를 통해 얻은 실험값을 R.M.R과 Scotch-yoke형 가진기의 회전축에 부착시킨 Encoder의 신호에 의해서 1회전당 360°의 전 위상에서 신호를 받아들여 PHASE software에서 처리할 수 있으나 그런 경우 Data의 Sampling 시간이 필요이상으로 길어지고 또한, Personal Computer에서의 Data 처리시간이 길어지며 저장용량도 문제가 되므로 본 실험에서는 위상간격을 30°로 하여 계산 처리할 수 있도록 하였다. Fig.3은 자료 획득 및 처리 과정을 나타낸 그림이다.

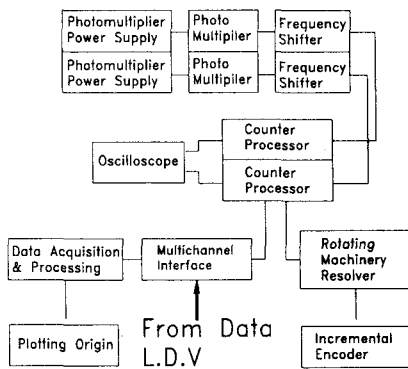


Fig. 3 Data acquisition and processing system

3. 결과 및 고찰

3.1 벽면전단응력 분포

완전 발달되었다고 생각된 곡관덕트의 굽힘각 150° 지점에서 위상각에 따라 측정된 난류진동유동의 벽면 전단응력을 무차원화하기 위하여 임의의 벽면 전단응력(τ_w)을 벽면 전단응력의 최대값($\tau_{w,max}$)으로 나누어 무차원화한 분포를 Fig. 4에 나타내었다.

그림의 종축은 1주기중의 벽면 전단응력(τ_w)의 값을 최대값($\tau_{w,max}$)으로 나눈값($\tau_w/\tau_{w,max}$)을 나타내고 횡축은 y의 위치를 나타내었는데 좌측은 관의 내측을 우측은 관의 외측을 나타내었다.

Fig. 4에서와 같이 난류진동유동의 경우 축방향 속도의 변동이 내·외벽측 단면내에서 어느 정도의 위상차를 수반하므로 벽면전단응력은 유입유동시 외벽상에서, 유출유동시 내벽상에서 큰 값을 나타낸다. 또한, 외벽측에서 변동이 심하고 내벽측에서는 위상각에 관계없이 거의 일정한 값을 갖는다. 위상각($\omega t/\pi/6$)이 3인 경우를 제외하고 내벽측에서 외벽측보다 벽면 전단응력은 최대값이 되었다.

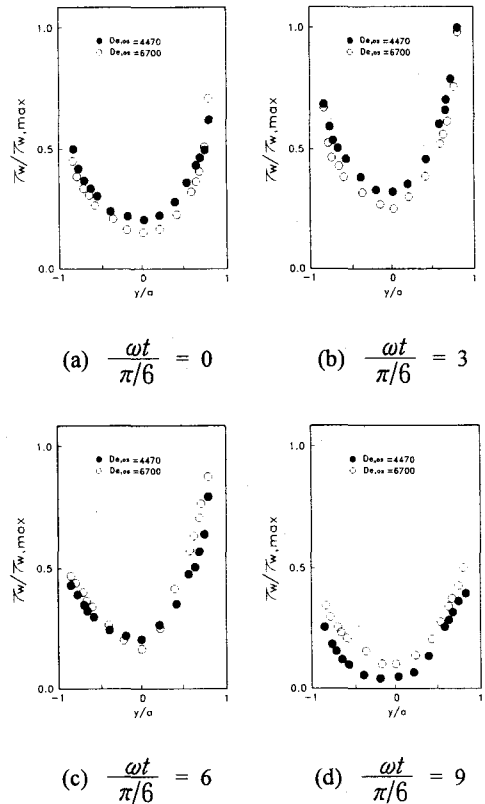


Fig. 4 Wall shear stress distributions of turbulent oscillatory flow in a curved duct at the $\omega^+ = 18.5$, $De_{\omega} = 4470$ and 6770

진동 Dean 수가 증가함에 따라 유동의 관성력이 관 중심부에서 지배적이고 축방향 속도분포는 annular형으로, 또 최대 속도의 위치는 내벽측으로 이동한다. 그것에 따라 벽면 전단응력의 값은 내벽측에서 큰 값을 갖고 관주위에서 대체로 일정한 값을 갖게 된다.

Deos가 높은 난류유동에서는 굽힘의 효과가 Bong⁽⁹⁾의 실험과 비교하여 무차원 각진동수의 증가에 따라 복잡하게 나타나고 벽면전단응력은 주방향으로의 의존성이 현저한 분포형을 나타낸다.

진동 Dean 수가 증가하면 관성효과는 외측단면에서 점차 내측단면에 미치게 되므로 벽면 전단응력의 값은 위상각에 의한 차이는 작게되고, 낮은 Deos의 경우와 같은 분포형을 나타내게 된다.

이처럼 벽면 전단응력은 내벽상에서 복잡한 분포형을 나타내고 관벽상의 얇은 층내의 유동이 무차원 각진동수와 Deos에 크게 좌우되고 있다는 것을 알 수 있었다.

3.2 압력 분포

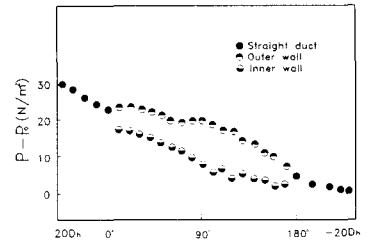
곡관덕트의 입구역에서 난류진동유동에 대한 압력구배 ($\Delta p/l$)와 단면평균속도 사이의 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

압력은 정사각단면 곡관덕트 입구 -20Dh에서 20Dh까지 단면의 내측벽과 외측벽에서 동시에 측정하였고 출구 20Dh지점을 기준압력으로하여 이 압력과의 차이를 나타내었다.

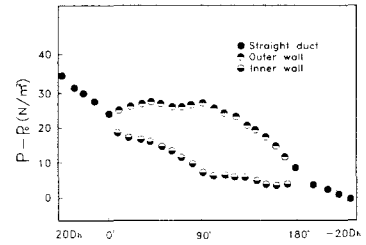
그림에서 '●'를 내벽의 압력으로 '○'를 외벽의 압력으로 나타내었다.

난류진동유동의 진동 Dean 수가 충분히 크게 되면 감속영역에서의 말기위상과 가속영역에서의 초기위상을 제외하고 거의 전 위상에서 난류 준정상유동이 성립하는 것을 고찰할 수 있었다.

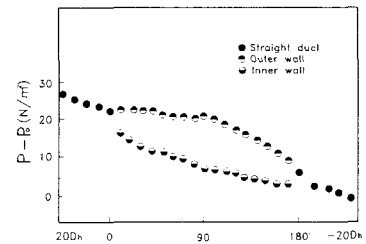
난류진동유동의 압력구배는 진동 Dean 수가 증가할수록 내·외벽의 압력차가 충분히 크게됨을 알 수 있었다. 또한, 가속영역인 경우 $\varnothing = 90^\circ$ 를 넘어선 지점에서 최대압력차를 나타내었으며, 감속영역에서는 $\varnothing = 90^\circ$ 이전 지점에서 최대압력차가 발생함을 알 수 있다. 이는 진동 Dean 수가 높은 경우 높은 관성력에 의해서 나타난다고 생각된다.



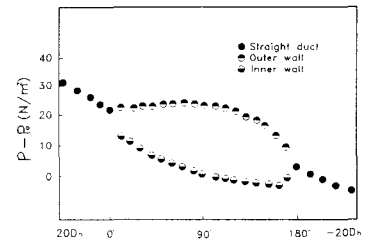
(a) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 0$



(b) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 3$



(c) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 6$



(d) $\frac{\omega t}{\pi/6} = 9$

Fig. 5 Pressure distributions of turbulent oscillatory flow in a curved duct at the Deos=4470, $\omega^+ = 18.5$

가속구간의 중기에는 $\theta = 90^\circ$ 이전까지는 양벽 면사이의 압력차가 적다가 $\theta = 90^\circ$ 이후부터 급격히 커지는 현상을 볼 수 있다.

이는 압력구배의 위상과 덕트 횡단면 평균속도의 위상에 대한 차는 진동유동의 Dean 수가 증가하고, 덕트의 무차원 축방향 위치가 $\theta = 90^\circ$ 를 전후하여 감소하였으며 진동 Dean 수가 감소함에 따라 덕트의 축방향 위치가 상류쪽으로 갈수록 증가함을 알 수 있다. 이는 난류진동유동의 Dean 수는 특성함수에 대한 점성의 영향이 적어지기 때문이다.

4. 결 론

정사각단면 180° 곡관덕트에서 난류진동유동의 벽면전단응력 분포와 압력분포에 관한 연구를 규명하기 위해 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 진동 Dean 수가 낮은 경우 난류진동유동의 벽면전단응력 분포는 외벽측에서 심한 변동을 나타내고 내벽측에서는 위상각에 관계없이 거의 일정한 값을 갖는다. 2차유동의 강도는 벽면전단응력에 영향을 주기 때문에 위상각($\omega t/\pi/6$)이 3인 경우를 제외하고는 내벽측의 벽면전단응력 값이 외벽측보다 더 크다.

(2) 난류진동유동의 압력분포는 가속 및 감속 구간에서 가장 크고 내·외벽의 압력차는 굽힘각 $\theta = 90^\circ$ 를 전후하여 가장 크다.

참고문헌

- (1) Eustice, J., 1910, "Flow of Water in curved pipe," Proc. R. Soc, Ser. A. 84-568., pp. 107~118.
- (2) Dean, W. R., 1927, "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe," Phil. Mag. S. Vol. 4, NO. 20, pp. 208~223.
- (3) Lyne, W. H., 1970, "Unsteady Viscous Flow in a Curved Pipe," J. Fluid Mech, Vol. 45, part. 1, pp. 13~31.
- (4) Bertelsen, A. F., 1975, "An Experimental Investigation of Low Reynolds number Secondary Streaming Effects associated with an Oscillating

Viscous Flow in a Curved Pipe," J. Fluid Mech, Vol. 70, part. 3, pp. 519~527.

- (5) Mullin, T., and Gerated, C. A., 1980, "Oscillatory Flow in Curved Pipes. Part 1. The developing case," J. Fluid Mech, Vol. 98, part. 2, pp. 383~395.
- (6) Komai, Y., and Tanishita, K., 1992, "Fully Developed Oscillatory Flow in a Curved Tube (The Effect of the Curvature Ratio)," Journal of JSME (B), Vol. 58, No. 546, pp. 343~348.
- (7) Takami, T., and Sudou, K., 1984, "Flow through Curved with Elliptic Cross section," Bul. of the JSME, Vol. 27, No. 228, pp. 1176~1181.
- (8) Sumida, M., and Sudou, K., 1994, "Oscillatory Flow in Curved Pipes(4th Report, Velocity Distribution in Entrance Region)," Journal of JSME(B), Vol. 60, No. 569, pp. 63~70.
- (9) Bong, T. G., 1996, "A Study on the Flow Characteristics of Developing Transitional Steady, Transitional Oscillatory and Transitional Pulsating Flows in a entrance Region of a Curved Duct," Ph.D Thesis., Chosun Univ. pp.121~122.