

가진 펌프에 연결된 곡관덕트에서 난류진동유동의 전단응력분포와 압력분포

손현철* · 이홍구** · 이행남 · 박길문***

Wall Shear Stress and Pressure Distributions of Developing Turbulent Oscillatory Flows in an Oscillator Connected to Curved Duct

Hyun-Chull Sohn*, Hong-Gu Lee**, Haeng-Nam Lee***, Gil-Moon 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 an oscillator connected to square-sectional 180° curved duct are investigated experimentally. In order to investigate wall shear stress and pressure distributions, the experimental studies for air flows are conducted in a square-sectional 180° curved duct by using the LDV system with the data acquisitions and the processing system. The wall shear stress at bend angle of the 150° and pressure distribution of the inlet ($\phi=0^\circ$) to the outlet ($\phi=180^\circ$) by 10° intervals of the duct are measured. The results obtained from the experiment are summarized as follows : wall shear stress values in the inner wall are larger than those 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. 서 론

산업에 사용되는 대부분의 관로망 설비는 직관과 곡관으로 이루어져 있으며 곡관 내부에서의 흐름은 직관과 달리 원심력이 작용한다. 따라서 곡관내의 유동

은 직관에서 찾아볼 수 없는 복잡한 유동의 현상을 동반한다. 또한 관로망이 형성되어있는 덕트내의 유동은 대부분 비정상유동으로 시스템의 가동 및 정지시 비정상성은 더욱 뚜렷이 나타나는데 이런 현상은 유동입자와 고체입자의 충돌로 수격 현상이 나타나며 건축물 배관계 및 플랜트의 수명을 단축시킬 뿐 만 아니라 소음과 진동을 유발하여 생산성을 저하시키기도 한다. 곡관덕트내에서 나타나는 비정상적 유동의 한 형태인 난류진동유동의 현상은 각종 플랜트의 배관계통 및 대형건축물의 공조설비장치, 원심펌프나 터빈의 날개 통

* 순천제일대학 건축설비환경과

** 동아인재대학 컴퓨터응용설계과

*** 조선대학교 기계공학부

E-mail : farmersohn@hanmail.net

로, 화학반응장치, 압축성 유체의 수송라인, 열교환기 등 설비산업에서 많이 찾아볼 수 있으며 진동유동에 대한 연구는 유압회로 설계, 비행기의 흡입통로, 가스 터빈 등 모든 산업분야에 적용되고 있으며 최근, 의용 생체공학 분야인 혈액순환계의 혈관계 유동에서도 곡관부에 대한 특성을 규명하는데 해석방법을 도입하는 등 난류진동유동에 바탕을 둔 유동의 응용해석에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있는 실정이다.

곡관로내의 유동이 유체공학상으로 제기된 것은 19세기 말이지만 본격적으로 유체공학적인 연구가 시작된 것은 1920년대로 대부분 단순한 이론적인 연구가 행해졌고, 초기의 이론해석은 굽힘의 영향이 적은 유동에 대한 해석이었다. 1940년대에 들어서는 소형 강제분류보일러 등 원시적으로 산업에 적용하였으며, 1950년대 이후부터 비로소 본격적으로 산업에 응용되어 각종 열교환기나 공업관련장치에서의 열전달 문제에서도 굽힘의 영향이 큰 유동에 대한 연구로부터 곡관로내의 유동현상과 저항에 관한 연구가 활발히 이루어졌다. 1970년대 이후에는 컴퓨터의 발달과 수치계산법의 진보, 유동의 예측, 실험기술의 발전되고 이후 전자계산기의 대용량화 및 고속화에 따라 곡관로내의 비정상유동에 관한 활발한 연구가 실험과 수치해석적 기법으로 연구가 이루어졌다. 1990년대 이후에는 Laser 계측기술의 발달로 LDV(Laser Doppler Velocimetry)와 PIV(Particle Image Velocimetry)의 실험적 연구가 주로 진행되었다.

곡관내의 유동은 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 관축방향으로 나선형 운동을 하는 유체의 유동을 관축방향의 주류와 관축에 수직인 단면내의 2차유동으로 구별하고 곡관유동을 지배하는 특성 파라메타로 Dean 수($Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{D_h/2R}$)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 볼 수 있는 2차 유동이외에 관로 중앙부의 외벽측에서 내벽측으로 향하는 2차 유동이 유기되는 것을 발견하였는데, 이것을 후에 Lyne

의 2차 유동이라 부른다.

Mullin⁽⁴⁾은 곡관내에서 발달하고 있는 진동유동일 때 Laser 유속계를 이용하여 속도분포를 실험적으로 구했는데 유동의 발달은 주파수 변화와 진동진폭에 의존한다고 발표하였으며 Komai⁽⁵⁾은 유한차분법과 SIMPLER법을 이용하여 곡관내 진동유동에서 무차원 각진동수 및 곡률반경비를 여러 조건으로 변화하여 실험한 결과 각진동수가 큰 유동에서 축방향 속도분포는 곡률비가 증가함에 따라 2차유동이 강해짐을 수치해석적으로 연구하였다. Takami⁽⁶⁾은 수치해석적으로 속도분포, 2차유동의 유선, 벽면전단응력 분포, 압력구배 파형 등의 유동의 내부구조를 규명하였다.

Sumida⁽⁷⁾은 정사각단면에서 수치해석으로 축방향속도, 2차유동의 유선 및 전단응력의 분포를 명확히 하였다.

본 연구에서는 정사각단면을 갖는 덕트 끝 부분에 가진기를 설치하고 180° 곡관덕트에서 유동영역을 분류하고 LDV를 이용하여 난류진동유동의 벽면전단응력 분포와 압력분포의 유동특성을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

실험장치의 주요 구성은 축방향 및 횡방향 속도분포 측정을 위한 180° 곡관덕트, 진동유동 발생을 위한 Scotch-yoke형 가진기 및 변속모터 등으로 구성하였고, 압력측정을 위해 곡관덕트의 내외벽에 설치된 압력공을 이용하여 자기회전 압력계를 부착하였다. 시험 덕트 내부의 속도 측정은 최대출력 2W인 Ar-Ion Laser로 2색 3빔 방식의 후방 산란형 LDV와 System을 적재하여 이동시킬 수 있는 3차원 이송기구로 구성되어 있다. 작동유체는 산란입자가 0.1~0.3 μm인 모기향 스모크를 흡입 송풍기에 의해 덕트내로 흡입시켰다.

실험에 이용된 시험덕트는 정사각 단면인 180° 곡관덕트로서 입구측의 직관 덕트는 40×40 (mm)로 길이가 4000 (mm)이며 덕트 입구에는 무풍상태를 유지한 정류상자 및 벨마우스형 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. 이들 실험장치의 개략도와 곡관덕트의 좌표계를 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타냈다.

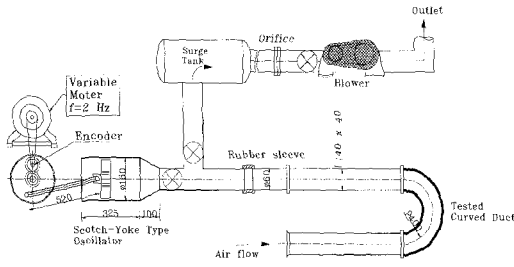


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

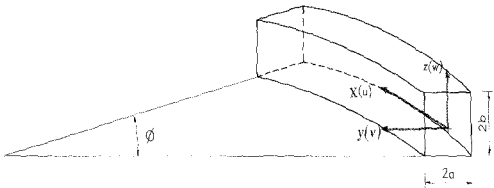


Fig. 2 Coordinate system and velocity component in a curved duct

압력의 측정은 고감도 압력변환기를 이용하여 측정할 수 있도록 정압공(93-φ1 Drill)을 뚫었으며 곡관덕트에는 30° 등간격으로 열선지시대 삽입구를 만들었고, 10° 등간격으로 정압공을 뚫었다.

곡관부에서는 동일한 단면내에서도 내측과 외측벽 사이에 상당한 압력차가 생기게 되므로 압력차를 구하는 경우를 대비하여 차압변환기를 설치할 수 있도록 측압공을 설치하였다. 이들 실험덕트에 대한 세부적인 치수와 압력측정용 정압공의 위치를 표시 한 시험덕트를 Fig. 3에 나타내었다.

실험에서 사용된 주요 측정기는 자기회전 압력계, 속도분포에 따른 전단응력분포를 계산하기 위해서 LDV에서 신호를 받아 처리하는 신호처리기(Signal Processor), 컴퓨터, 오실로스코프가 있고 비정상유동인 진동유동의 Data 처리를 위해 PHASE software를 사용하였다.

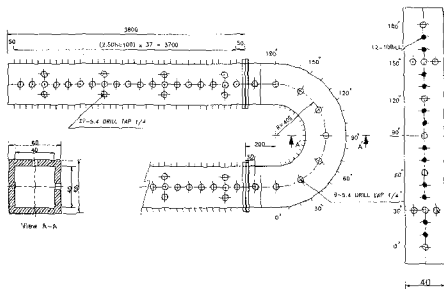


Fig. 3 The positions of pressure measurements in a straight and curved duct

2.2 실험 방법

난류진동운동은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 무단변속기가 연결된 Scotch-yoke형 가진기 만을 작동시켜 발생시켰다.

실험범위는 유동이 완전히 발달되었다고 생각된 급협각 150°에서 열선을 삽입하고 덕트 중심에서 열선으로 나오는 신호가 열선유속계를 지나 광기록계에 기록된 파형을 고찰하여 최초의 난류버스트가 발생하는 곳에서부터 완전한 난류가 형성되는 부근까지를 천이유동영역으로 규정하고 천이유동영역을 넘어선 영역에서 실험을 하였다.

실험방법은 무단변속모터에 의해서 진동주파수를 조절하였고, Disk의 위치에 의한 피스톤의 진폭을 조절하여 진동운동의 Dean 수와 진폭을 변화하였다.

본 실험에서는 각진동수(f)를 2.0 Hz에 고정하고 진동 Dean수를 각각 4,470과 6,700으로 조절하여 곡관덕트의 각 측정위치에 따라 속도분포를 획득하였다.

측정위치는 180° 곡관덕트의 0°에서부터 180°까지 30° 등간격으로 측정하였고 z축 방향은 덕트 단면의 중앙(0)으로부터 벽면(0.95)까지 측정하였다.

진동운동의 단면 평균속도는 피스톤 진폭으로부터 식 (1)과 같이 계산하였고, 진동운동의 속도를 유입운동과 유출운동으로 나누어 Fourier급수에 의하여 6차의 고주파 성분까지의 진폭과 위상각을 계산하였다.

$$|u_{m,os}| = \left(\frac{A_p}{2}\right)\omega \times \left(\frac{A_{piston}}{A_{duct}}\right) \quad (1)$$

진동운동의 Dean 수와 무차원 각진동수는

$$De_{os} = Re_{os} \sqrt{\frac{D_h}{2R}} = \frac{\sqrt{\frac{D_h}{2R}} (D_k \cdot |u_{m,os}|)}{\nu} \quad (2)$$

$$\omega^+ = (Dh/2) \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (3)$$

로부터 계산하여 18.5로 고정하여 실험하였다.

진동운동의 압력분포는 각진동수를 같은 조건으로 하고 진동 단수(Deos)를 4,470으로 하여 진동 운동의 속도를 고정하고 곡관덕트의 각각의 위치에 따른 압력분포를 측정하였다. 실험은 0°부터 180°까지 10° 등간격으로 하여 19지점을 측정하였다.

난류진동유동에 대한 측정값의 자료 획득 및 처리는 LDV를 통해 얻은 실험값을 RMR과 Scotch-yoke형 가진기의 회전축에 부착시킨 Encoder의 신호에 의해서 1회전당 360°의 전 위상에서 신호를 받아들여 PHASE software에서 처리할 수 있으나 그런 경우 데이터의 Sampling 시간이 필요 이상으로 길어지고 또한, 컴퓨터에서의 데이터 처리시간이 길어지며 저장용량도 문제가 되므로 본 실험에서는 위상간격을 최대흡입, 최대유출 및 2회의 중간단계 등 90°로 하여 계산 처리하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 벽면전단응력 분포

완전히 발달되었다고 생각된⁽⁸⁾ 곡관 덕트의 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.

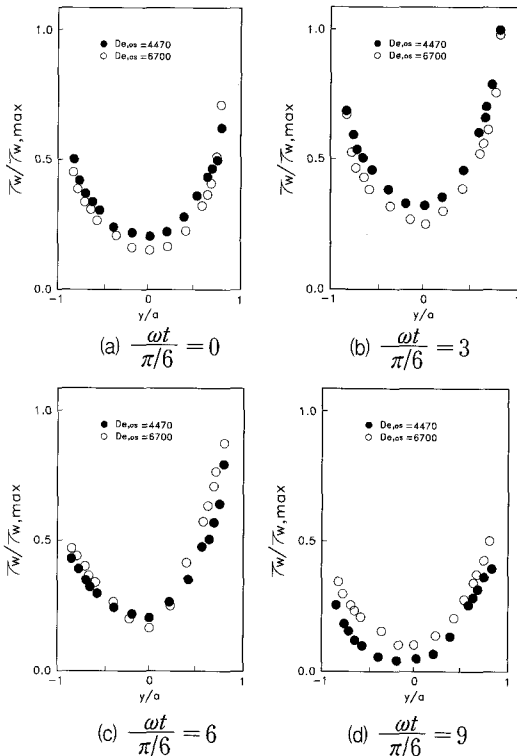


Fig. 4 Wall shear stress distributions of turbulent oscillatory flow in a curved duct at the $\omega^+ = 18.5$, $De_{os} = 4470$ and 6700

그림의 종축은 1주기중의 벽면 전단응력(τ_w)의 값을 최대값($\tau_{w,max}$)으로 나눈값($\tau_w / \tau_{w,max}$)을 나타내고 횡축은 y/a 의 위치를 나타내었는데 좌측은 관의 내측을 우측은 관의 외측을 나타내었다. 벽면전단응력값은 난류진동유동에 대한 운동량 방정식으로부터 식 (4)의 형태로 정리하였는데 이들 압력항과 관성항 및 점성항들은 매우 복잡한 변화를 하기 때문에 Fourier 전개식을 이용하여 식 (5)로 정리하였고 본 연구에서 사용한 실험장치에서는 기본과 만을 정리하면 식 (6)과 같이 정리된다.

$$\frac{\Delta p_{os}}{l} = \rho \frac{du_{m,os}}{dt} + \frac{4}{D_h} \tau_{w,os} \quad (4)$$

$$\tau_{w,os} = \sum_{n=1}^{\infty} |\tau_{w,os,n}| \cos(\omega t + \angle(\tau_{w,os,n})) \quad (5)$$

$$\tau_{w,os} = |\tau_{w,os,1}| \cos(\omega t + \angle \tau_{w,os,1}) \quad (6)$$

Fig. 4에서 보는바와 같이 난류진동유동의 경우 축방향 속도의 변동이 내·외벽측 단면내에서 어느 정도의 위상차를 수반하므로 벽면전단응력은 유입유동시 외벽상에서, 유출유동시 다른 위상에 비해 상대적으로 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 전단응력구배가 최대값을 갖게 되었다.

일반적으로 비정상유동인 진동유동은 가진기의 교번에 의한 유동의 관성력이 관중심부에서 지배적이므로 벽면 전단응력의 값은 내벽측에서 큰 값을 갖고 관주위에서 대체로 일정한 값을 갖게 된다.

Fig. 4에서 보는바와 같이 가속말기와 감속초기에는 전단응력의 기울기가 외벽면 쪽에서 크게 나타나는데 이는 가진기의 유출입 교번에 의한 mode lock 현상이 나타남을 알 수 있다. 또한 감속영역구간을 살펴보면 관단면 중앙을 비롯하여 진동 Dean수와 관계없이 전단응력 값이 적어짐을 알 수 있는데 이는 Bong⁽⁸⁾의 실험과 같이 가진기의 순간정지에 의한 유체유동이 정지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 벽면 전단응력은 주류 방향으로의 의존성이 현저함을 알 수 있고 벽면 전단응력은 관벽상의 얇은 층내의 유동이 무차원 각진동수와 De_{os} 에 크게 좌우되고 있는 것을 알 수 있었다.

3.2 압력 분포

가진기의 영향을 받는 곡관덕트 내에서 난류진동운동에 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 기준 압력으로 하여 이 압력과의 차이를 나타내었다.

그림에서 '●'를 내벽의 압력으로 '○'를 외벽의 압력으로 나타내었다. 난류진동운동의 진동 Dean수가 4470, 무차원 각진동수가 18.5일 때 압력분포는 유입유동영역에서의 발기위상과 유출 유동영역에서의 초기위상을 제외하고 거의 전 위상에서 준정상운동이 성립하는 것을 고찰할 수 있으며 난류진동운동의 압력구배는 가진기의 교번 주기에 의한 원심력으로 인하여 내·외벽의 압력차가 크게됨을 알 수 있다.

가속영역인 경우 $\phi=90^\circ$ 를 넘어선 지점에서 최대압력차를 나타내었으며, 감속영역에서는 곡관의 입구부에서부터 일정한 압력을 유지하는데 이는 가진기의 계속된 교번에 의한 영향 및 가진기의 반대편에 설치된 곡관덕트의 입구측 90° 이전 지점까지의 벽면 점성의 영향으로 생각된다. 유출유동영역의 중기에는 $\phi=90^\circ$ 이전까지는 양벽면 사이의 압력차가 적다가 $\phi=90^\circ$ 이후부터 급격히 커지는 현상을 볼 수 있다.

이는 높은 진동 Dean 수의 유출입 반복에 의한 높은 관성력에 의한 것이고 압력구배의 위상과 덕트 횡단면 평균속도의 위상에 대한 차는 진동운동의 Dean 수가 증가하고, 덕트의 무차원축방향 위치가 $\phi=90^\circ$ 를 전후하여 감소하였으며 진동 Dean 수가 감소함에 따라 덕트의 축방향 위치가 상류쪽으로 갈수록 증가함을 알 수 있다. 이는 난류진동운동의 Dean 수는 특성함수에 대한 점성의 영향이 적어지기 때문이다.

4. 결론

가진기에 연결된 정사각단면 곡관덕트에서 난류진동운동의 벽면전단응력 분포와 압력분포에 관한 연구를 규명하기 위해 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 진동 Dean수가 낮은 경우 난류진동운동의 벽면전단응력 분포는 외벽측에서 심한 변동을 나타내고 내벽측에서는 위상각에 관계없이 무차원값 0.5 부근에서 거의 일정한 값을 갖는다. 이는 원심력의 작용으로 인한 2차 유동의 강도가 외벽측의 벽면전단응력에 큰 영향을 주기 때문이다.
- 2) 난류진동운동의 압력분포는 유출 및 유입유동영역 구간에서 가장 크고 내·외벽의 압력차는 곱셈각

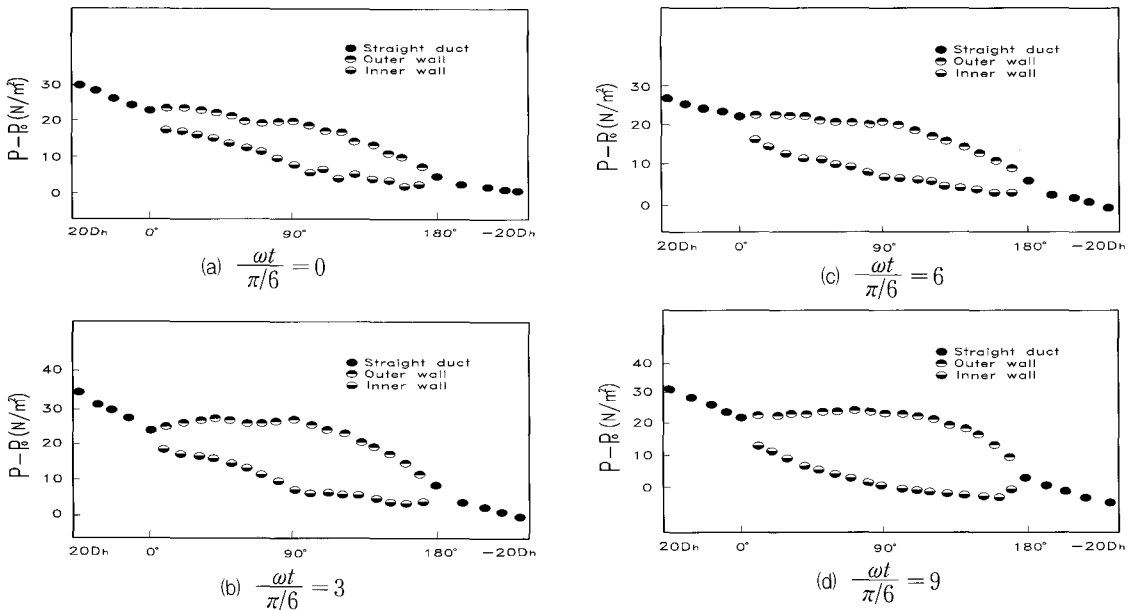


Fig. 5 Pressure distributions of turbulent oscillatory flow in a curved duct at the Deos=4470, $\omega^+=18.5$

$\phi = 90^\circ$ 를 전후하여 가장 크다. 이는 가진의 교번에 의한 관성력의 영향으로 판단되며 중간영역인 곳에서는 정상유동의 압력강하와 유사한 형태를 나타내었다.

후 기

본 연구는 2000년도 조선대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (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) 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. 333~395.
- (5) 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.
- (6) Takami, T. and Sudou, K., 1984, "Flow through Curved with Elliptic Cross section," Bul. of the JSME, Vol. 27, No. 228, pp. 1176~1181.
- (7) 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.
- (8) 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.