

곡관에서 Laser유속계를 이용한 비정상유동 계측에 대한 연구

조 병 기*

A Study on Unsteady Flow measurement using Laser Doppler
Velocimeter in Curved Duct

B. K. Cho

Key words : Unsteady Flow(비정상유동), Oscillatory Flow(진동유동), Pulsation Flow(맥동유동), Transient Flow(과도유동)

Abstract

In the present study, the unsteady in a square-sectional 180° curved duct are experimentally investigated.

The experimental study using air in a square-sectional 180° curved duct is carried out to measure axial velocity distributions with data acquisition and processing system. In this system, Rotating Machinery Resolver (RMR) and PHASE Software are used to obtain the results of unsteady flows.

In conclusion, the exact measurement of unsteady flow using LDV system depends upon uniformity of duct metreials, duct thickness, and scattered particles.

기호설명

A_1 : 속도진폭 $\left(= \frac{l\bar{u}_{m,os}, ll}{\bar{u}_m, ta} \right)$
 a : Duct half-width (mm)
 b : Duct half-height (mm)
 R : Radius of curvature
 R_c : Curvature ratio $\left(= \frac{a}{R} = \frac{D_h}{2R} \right)$
 $Reta$: 시간평균 레이놀즈 수 $\left(= \frac{D_h \bar{u}_m, ta}{\nu} \right)$
 u, v, w : Velocity components in x, y and z -

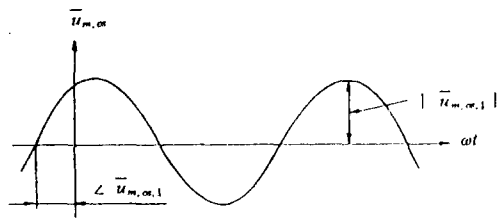
axis, respectively
 $\bar{u}_{m,os}$: Cross-sectional mean velocity of oscillatory flow
 $\bar{u}_{m,ta}$: Time-averaged cross-sectional mean velocity of pulsating flow
 ϕ : Deflection angle of duct
 ω^* : Dimensionless angular frequency $\left(= \frac{D_h}{2} \sqrt{\omega/\nu} \right)$
 $-$: Mean value
 $|$: Amplitude of oscillatory velocity
 \angle : Phase angle of oscillatory velocity

* 정회원, 조선대학교 병설 공업전문대학

1. 서 론

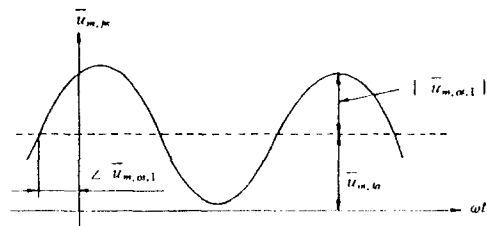
비정상유동이란 임의의 위치에서 유동상태가 시간에 따라 변화하는 유동으로 유동 상태가 짧은 시간에 급하게 변하는 과도유동(Transient Flow)과 유동이 임의의 가속도 및 감가속도를 갖고 변화하는 유동인 가속 및 감가속유동(Accelerating and Decelerating Flow), 유속의 변화가 주기적으로 반복되는 유동인 진동유동(Oscillatory Flow)과 맥동유동(Pulsating Flow)등으로 구별할 수 있다.

이들 비정상유동중에서도 특히 진동 및 맥동유동(Oscillatory and Pulsating Flow)은 유동장에서 유속의 변화가 주기적으로 반복되는 유동으로 정의되고 진동유동은 시간평균 성분이 없는 정현파나 여현파의 형태로 주어진 교번유동이며 유압관로에서 방향제어밸브의 작동에 의한 유동을 예로 들 수 있으며 Fig. 1(a)와 같은 속도곡선을 갖고, 맥동유동은 정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 유동이며 맥동제트 유동 및 맥동연소와 혈액순환계의 유동 등을 예로 들 수 있으며 Fig.



$$\bar{u}_{m,\alpha} = |\bar{u}_{m,\alpha,1}| \cos(\omega t + \angle \bar{u}_{m,\alpha,1})$$

(a) Oscillatory velocity waveform



$$\bar{u}_{m,\beta} = \bar{u}_{m,\beta} + |\bar{u}_{m,\alpha,1}| \cos(\omega t + \angle \bar{u}_{m,\alpha,1})$$

(b) Pulsating velocity waveform

Fig. 1 Velocity curves of oscillatory and pulsating flow

1(b)와 같은 속도곡선을 갖는다.

곡관덕트내의 비정상유동(Unsteady Flow)에 대한 해석은 유체기계의 설계에 기초 자료가 될 뿐 아니라 공조덕트설비, 열교환기, 가스터빈, 압축기, 제트엔진 및 로케트의 맥동연소와 맥동제트, 박용기관의 배기관에서의 에너지 손실 등에 대한 관점에서 아주 중요하게 응용될 수 있기 때문에 이에 대한 유동해석이 절실하게 요구되고 있다.

이러한 비정상유동에 대한 연구는 이론해석적^{1~5)}인 방법으로서 수치해석과 실험적인 방법^{6~12)}으로서 피토판이나 열선풍속계를 이용한 종래의 연구들을 볼 수 있는데 최근에 많이 사용되고 있는 LDV를 이용한 유동특성에 대한 연구^{7~9)}는 진동류의 위상에 따른 유동특성을 아는데에 난점이 있어 거의 이루어 지지 않고 있는 실정이었다.

본 연구에서는 정4각단면을 갖는 180° 곡관덕트의 단면이 40mm×40mm×4000mm의 직관덕트에 곡률반경이 400mm이고 단면크기가 직관덕트와 같은 곡관덕트를 연결한 다음 곡관덕트내에 비정상유동을 발생케하여 입구유동영역에서 축방향의 위치변화에 따라 LDV유속계, 이송장치 및 회전각 분해기(Rotating Machinery Resolver : RMR)와 PHASE의 자료획득 및 처리 프로그램을 이용하여 각 유동의 실험조건에 따라 비정상 유동의 속도분포를 측정하는데 있어서의 측정방법에 대한 상세와 측정과정에서의 문제점 및 대책, 측정의 결과에 대한 신뢰도를 검토하여 LDV를 이용하여 관내 비정상 유동의 유동특성을 규명하고자 하는 연구자에게 정확한 측정을 할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

2. 실 험

2.1 실험장치

정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트 내에서 비정상유동인 층류 진동유동 및 층류 맥동 유동에 대하여 LDV 유속계를 이용하여 속도분포를 측정하기 위하여 설치된 실험장치의 개략도를 Fig. 2-1에 도시하였고, 곡관덕트의 좌표계는 Fig. 2-2에 도시하였다.

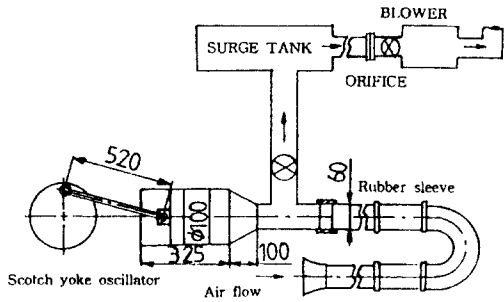


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

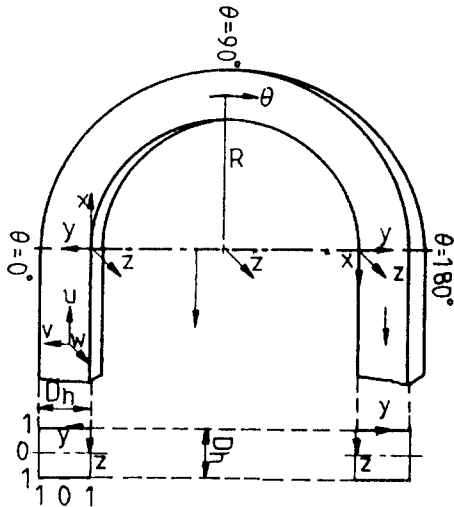


Fig. 3. Coordinate system of the curved duct

본 실험장치의 주요부는 180° 곡관덕트, 스코치-요크(scotch-yoke)형 가진기, 정류상자 및 송풍기 등으로 구성되어 있고, 작동유체인 공기는 송풍기에 의해 흡입되며 흡입되는 공기는 시험덕트 입구측 직관부(3800mm)로 유입되어 곡률 반경이 400mm인 곡관부를 지나며 출구측 직관부(3800mm)를 지나 정류상자 및 관로를 통하여 송풍기를 거쳐 송출된다. 시험덕트에서 속도분포를 측정하기 위하여 LDV 시스템을 적재하여 이동시킬 수 있는 3차원 이송장치가 설치되어 있고, 스코치-요크형 가진기의 회전축에 엔코더를 설치하여 진동유동과 맥동유동의 속도에 대한 위상을 360° 이내에서 지정된 수 만큼 퍼스널컴퓨터에 전송케 하여 PHASE 프로그램에서 처리할 수 있도록 하였다.

하였다.

본실험에 사용한 레이저는 알곤-이온(Ar-Ion) 레이저이고, 광학계의 배치는 二重 빔 모드(Dual beam mode)이며 2색 3빔 방식의 후방산란형(Back scattered type)이기 때문에 최대출력 2W의 고출력이 얻어지는 알곤-이온레이저를 사용하므로써 산란광의 강도를 높이고 있다.

2개의 파장을 이용하므로써 속도의 수평성분과 수직성분을 측정할 수가 있는데 레이저 빔의 파장은 488.0nm(청색 빔)와 514.5nm(녹색 빔)이며, 수직성분의 측정에는 488.0nm(청색 빔)을, 수평성분의 측정에는 514.5nm(녹색 빔)을 이용하고 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 LDV에 의한 속도계측

레이저 본체에서 발진된 레이저 빔은 콜리메이터(Collimator)에 의하여 평행광선으로 되고 빔분리기에 의해 강도가 같은, beam 간격 50mm의 2개의 빔으로 분리되며, 브레그셀(Bragg cell)을 사용하여 주파수 편이를 행하며 2색분리기에 의하여 청색 빔과 녹색 빔으로 분리된다.

더욱이 고유속 측정시의 드플러주파수에 대한 신호처리를 용이하게 하기 위하여 빔의 간격을 50mm에서 빔스피어(beam spacer)에 의하여 22mm로 축소하여 빔의 교차각을 작게하고 있다.

알곤-이온레이저에서 얻을 수 있는 청·녹 혼합빔, 청색 빔, 녹색 빔의 3빔을 얻고, 이들이 초점을 형성한 곳을 프린지(fringe)라고 하며 이곳이 측정체적, 즉 측정점 이 되는 곳이며 LDV 측정에는 측정체적의 크기가 중요하다.

측정체적에 대해서는 레이저 빔은 가우스 분포를 하고 있다는 가정하에서 구할 수 있는 공식을 이용하여 측정 체적에 대한 각종 치수를 계산하였다.

Table 1은 본 실험을 수행하는데 있어서 측정체적에 대한 각각의 계산결과를 나타 내고 있다.

이 측정체적을 이용하여 유속을 측정하는데 있어서 관벽에 가까운 부근의 유속을 정확히 측정하기 위해서는 Laser beam 의 교차각을 가능한 크게하여 측정체적이 최소로 되는 것이 좋다.

Table 1. Detailed contents of measuring volume

Item	Green Beam	Blue Beam
Fringe Spacing [d_f]	3.8 μ m	3.61 μ m
Measuring Volume Distance [d_m]	50.02 μ m	47.44 μ m
Length of measuring Volume [l_m]	0.73mm	0.70mm
Number of Fringe [N_{FR}]	13.13	13.14

실험에 사용한 렌즈는 초점거리 120mm, 260mm, 600mm의 렌즈중에서 120mm의 렌즈를 주로 사용하였다. 이 렌즈의 빔 교차각은 빔간격이 50mm 일 경우에는 5.48°이며 빔간격이 35.36mm 일 경우에는 3.87°이다.

집광렌즈에 의해서 모아진 산란광은 빔 확대기를 역으로 이용하여 입사빔의 직경이 축소된다. 이 산란광은 필드스톱(field stop)을 거치면서 산란광 이외의 잡광이 제거되고 색분리기에 의해 488.0nm와 514.5nm의 2개파장의 산란광으로 분리된다.

이경우 514.5nm의 투과율은 92%, 488nm의 반사율은 88%이다. 분리된 산란광은 각각 후방산란광 수광기(Color separator for scattered lighter)에 의하여 모아지고 칼리필터(color filter)를 투과한후 광전관(photo Multiplier)에서 光電 변환된다.

光電 변환된 신호는 주파수 변이계에서 주파수 변이를 행하는데 여기서, 주파수변이란 측정체적에서의 프린지에 움직임을 주는 것을 말하며 프린지의 이동방향은 변이선 빔에서 변이되지 않은 빔으로 이동하게 된다.

주파수를 변이 하는 목적은

- 1) 역류나 유동방향의 식별을 위하여,
- 2) 측정가능한 저, 고속 영역을 확장하기 위하여,
- 3) 주파수의 최적화를 위하여,
- 4) 폐세스탈 신호의 제기를 위하여 사용한다.

본실험은 비정상유동으로서 진동유동이나 맥동 유동을 그 대상으로 하고 있기 때문에 주파수를 변이 할 수 있는 다운믹서(down mixer)가 설치되어 있다.

본 시스템에서는 브레그셀을 이용하여 2개의 평행빔중의 한쪽을 40MHz로 변이시키고 있으므로 광전변환기에서 나오는 주파수는 항상 40MHz \pm 도플러 주파수의 값을 갖는다.

광전변환기에서 나오는 40MHz 도플러 주파수는 다운믹서에 입력 되어 변이주파수를 2kHz~10MHz 내에서 재조정되어 신호처리에 입력된다.

40MHz 도플러 주파수를 다운믹서에서 낮추는 이유는 도플러 주파수가 낮은 주파수일 경우 40MHz 변이주파수에 대한 도플러주파수의 분해능이 상대적으로 떨어지므로 이를 보상하기 위함이다.

이와 같이 주파수의 변이를 행한 데이터는 신호처리에 의해서 저주파수통과 필터 및 고주파수통과 필터를 거쳐 통과되는 도플러 신호를 오실로스코프에서 직접 확인할 수 있는데 신호처리는 1990C 및 1980B 카운터펄스 처리기로서 이 장치의 특징은 주어진 주기에 대하여 시간을 측정한다는 점이다.

1990C는 1ns, 1980B는 2ns라는 분해능을 가지고 있으며 주파수의 범위는 1990C에서는 1KHz~200MHz까지인데 1990C를 기준으로 할때 측정가능 속도는 6mm/s에서 900m/s의 넓은 범위의 측정이 가능하다.

다음에 신호처리기를 통과한 신호는 정상유동에서는 FIND 프로그램에 의해 퍼스날컴퓨터에서 계산, 처리되며 비정상유동에 있어서는 가진기의 구동축에 부착된 엔코더에서의 위상각에 대한 신호를 회전각분해기(RMR)를 통하여 신호처리에 보내지는데 회전각 분해기란 회전하고 있는 기계의 회전속도 또는 진동 및 맥동유동의 유체 유동속도를 LDV에 의한 측정이 가능하도록 하는 시스템이다.

즉 신호처리기가 유체유동에서 한 유동입자로부터 속도 데이터를 기록할 경우에 한 신호는 분해기로 보내지는데 그것은 동일한 순간에 회전장치의 각(角)위치를 잡도록 한다. 이 위치 정보는 인터페이스 모듈을 거쳐서 속도 데이터와 함께 컴퓨터로 전송된다.

LDV를 이용한 유동계측시 중요한 고려사항의

하나는 코인스턴스윈도우(coincidence window) 폭 및 전체 샘플수를 적당하게 결정하는 것이다.

코인스턴스윈도우란 Fig. 2-3와 같이 두개의 카운터(청색빔 처리, 녹색빔 처리)에서 받아들이는 순간 속도값들 중에서 어느 주어진 미소시간 동안에 동시에 얻어진 자료만을 취급하기 위하여 정의된 시간간격으로 이의 최적값은 유동의 특성, 유속 및 측정부의 공간분해능 등에 따라 변하게 된다. 예를들어 유속이 4.8m/s인 유동장에 LDV의 공간분해능이 $d=0.08\text{mm}$ 인 청색광이 사용될 때 측정부위를 통과하는 산란입자의 통과시간은 $t=d/v=16.7\mu\text{s}$ 가 되므로, 같은 산란입자로부터 얻어진 신호가 두 채널에서 동시에 계측됨을 보장하기

위하여 코인스턴스 윈도우의 간격은 $10\sim 20\mu\text{m}$ 를 취하여야 한다. 만일 이 값이 지나치게 크면 Reynold응력 $u_i v_i$ 의 두 순간 속도값 사이의 상관관계가 제대로 이루어지지 못하여 대부분의 경우 실제보다 작은 값을 얻게 된다. 한편 윈도우의 폭이 너무 좁을 경우 취득 가능한 데이터가 급격히 감소하게 된다.

다음에는 2차유동을 수반한 복잡한 3차원 운동을 한 곡관내 맥동유동의 관측방향속도 u 를 LDV를 이용하여 덕트 횡단면위치와 종단면위치를 변화시켜 가면서 급힘각이 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 위치에 대하여 측정함으로써 유동특성을 파악하고 또한 측정의 신뢰도를 검토하였다.

LDV 시스템을 이용한 비정상유동에 대한 자료 획득 및 처리계통도는 Fig. 5에 나타내었다.

또한, 자료획득 장치는 PC/AT 480을 사용하며 2개의 속도성분을 측정하여야 하므로 2대의 카운터를 연결하여 1대의 퍼스널컴퓨터에 자료를 전달할 수 있도록 M1-990 인터페이스(Interface)가 설치되어 있다.

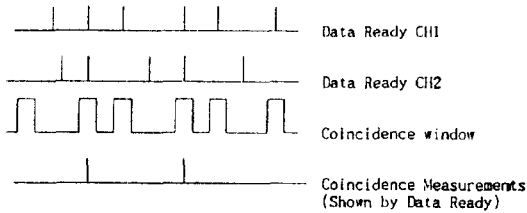


Fig. 4 Coincidence window

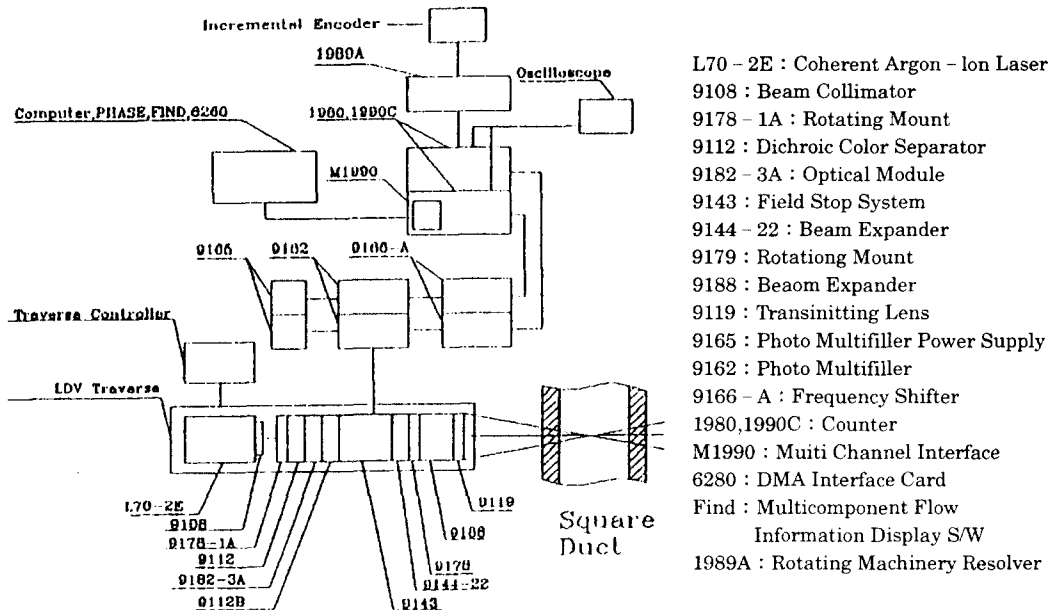


Fig. 5 Schematic diagram of LDV system and associated data acquisition/processing equipment

3. 결과 및 고찰

LDV를 사용하는데는 유체중에 산란입자가 절대적으로 필요하며 입자는 유동에 완전하게 추종하여야 한다. 통상의 실내공기에는 산란입자가 충분하지 않기 때문에 유동에 추종하는 입자를 별도로 제공하여야 한다.

기체유동의 측정에 사용되는 산란입자로서는 산화마그네슘(MgO), 담배연기, 모기향 연기, 실리콘오일, 석유를 무화한 것 등의 입자가 사용되고 있다. 기체유동이라 할지라도 속도가 그다지 크지 않은 층류상태의 유동에서는 산화마그네슘과 같은 분입체상태의 산란입자는 유동에 추종하지 못하는 경향이 있어 적합하지 않았다.

또한 석유를 무화한 것은 화재의 위험과 인체에 유해하여 사용을 권장할 만한 것이 되지 못한다. 한편, 담배연기의 입자 직경은 측정방법에 의해서 약간 다르지만 대체적으로 0.1~1.3 μm 정도로 알려져 있으며, 모기향 연기의 입자직경 역시 0.1~1.3 μm 로서 유동에 충분히 추종할 수 있으며, 측정체적의 프린지간격의 크기가 녹색빔의 경우 1.8 μm , 청색빔의 경우에는 1.7 μm 이므로 크기면에서도 적당하고 담배연기와 비교하여 계속적으로 일정량의 연기를 발생시킬 수 있는 장점이 있어 본 실험에서는 모기향을 사용하였다. 이 모기향 연기를 사용하는 경우의 단점으로는 Tar에 의해서 측정부위를 오염시켜 신호를 약하게 하므로 그라스울에 통과시켜 이를 제거하여 사용하였다.

2차유동을 수반한 복잡한 3차원 운동을 한 곡관내 유동의 관측방 향속도 u 를 LDV를 이용하여 측정하기 위하여 본 실험에서는 180° 곡관덕트를 사용하였는데 재질은 두께가 10mm인 아크릴로써 제작하였다. 곡관부에서 단면을 기준으로 하여 상, 하면은 아크릴의 판재를 변형없이 사용하여 제작하였기 때문에 재질상 균일한 상태로 되어 있지만 좌, 우면은 아크릴 판재를 외력을 가하여 180°의 굽힘을 주었기 때문에 재질이 균일하지 않았다.

실제 측정시 우측면에 해당하는 곡관부 외측벽에서는 레이저빔광을 투사하였을 때 데이터를 받고 있는 중에도 아크릴이 열에 견디지 못하고 균열이 발생하므로써 측정이 불가능하게 되었다. 따라

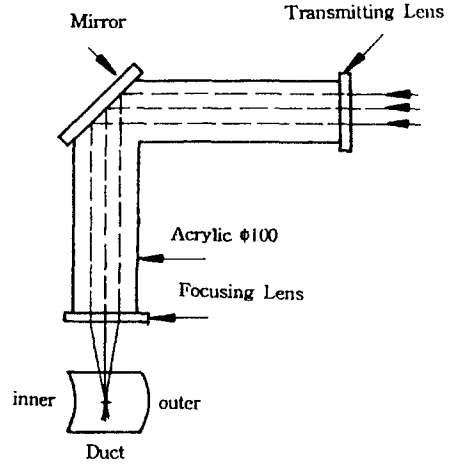


Fig. 6 90° bend of mirror for solving the problem in heterogeneous property of materials

서, 본 실험에서는 재질이 균일한 상부면에 레이저 빔광을 통과 시키므로써 이러한 애로점을 해결하였는데 그 방법으로서 Fig. 6에 나타난 것처럼 레이저 빔광을 90° 굴절시키기 위하여 빔 확대기와 초점렌즈 사이를 아크릴체 원관을 사용하여 90° 벤드를 제작하고 90° 각부위에 균일면을 갖는 거울을 부착시켜 사용 하므로써 재질의 불균일성 때문에 발생하는 애로점을 해결하였다.

곡관덕트내 유동에 대한 LDV측정에는 곡관덕트의 굽힘의 영향을 고려하여야 한다. 본 실험을 수행하는데 있어서 레이저 본체가 굽힘의 외벽측에 위치하게 되므로 곡관덕트내에서의 빔의 교차각은 개방된 공기중에서 보다 작고 그 정도는 외벽측에서 크게 된다. 또, 이송기구에 의한 레이저 본체의 이동량도 곡관덕트내에 있는 교차부의 이동량에 비하여 작게 된다. 따라서, 이송장치를 이용하여 측정점을 측정부위에 정확히 옮기기 위해서는 레이저 빔의 굴절각을 고려하여야 한다.

층류비정상유동인 진동유동의 경우 덕트의 굽힘각도가 90° 이후인 유동이 완전 발달되었다고 사료되는 180° 부근에서 LDV 시스템을 이용하여 얻은 속도값을 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 LDV 시스템에 회전각 분해기와 PHASE프로그램을 이용하여 얻은 데이터는 열선 풍속계를 이용하여 데이터를 얻었던 방법과는 달

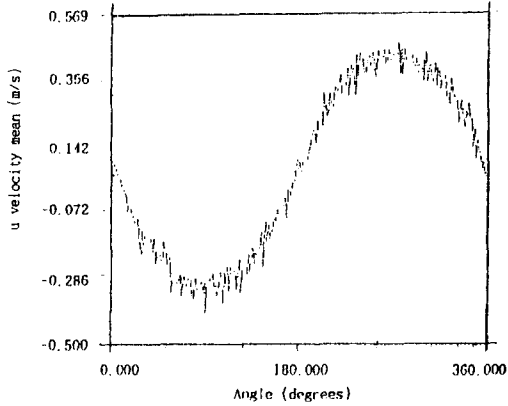


Fig. 7 LDV measurement of velocities of laminar oscillatory flow in a curved duct

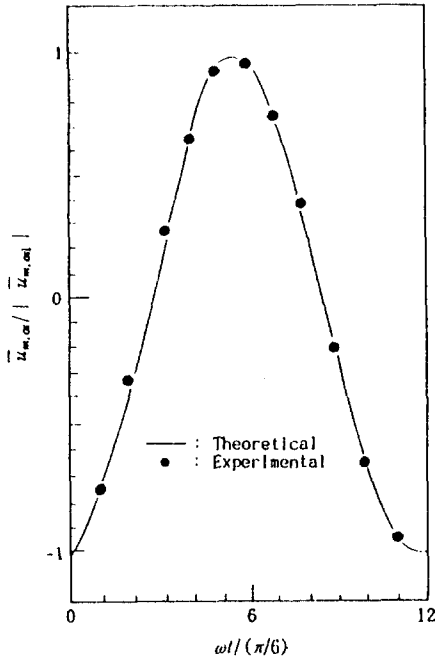


Fig. 8 Fundamental velocity wave of finite Fourier expansion for a period of u_m for oscillatory flow in a straight duct with LDV system

리 360°의 모든 위상에서 얻고자 하는 데이터를 원하는 만큼 세밀하게 그리고 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.

Fig. 8에는 직관덕트의 완전 발달되었다고 사료되는 지점의 덕트 중심에서 LDV 시스템을 이용하여 얻은 진동유동의 무차원 단면평균속도를 위상

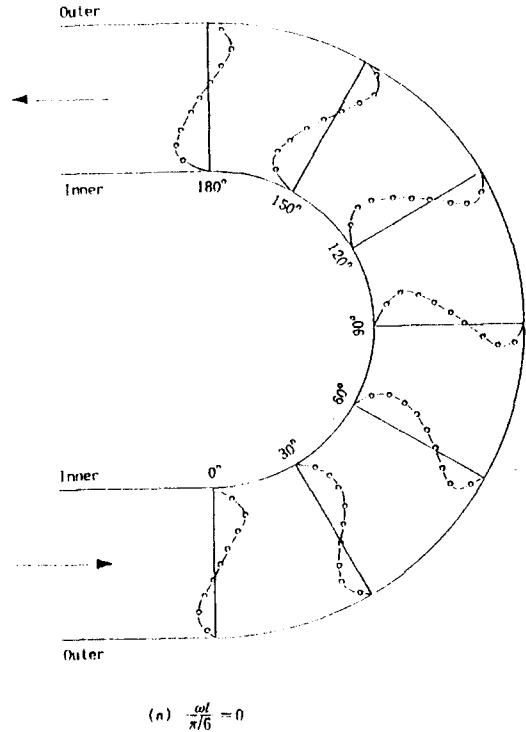


Fig. 9 Variation of axial velocity distribution for laminar oscillatory flow in a curved duct at $\omega^* = 5.15$

각에 따라 나타내었는데 예상되는 이론값과 실험이 잘 일치한 속도분포 곡선을 나타내었다.

Fig. 9에는 Fig. 7의 데이터를 정리하여, 위상각의 변화에 따라 곡관덕트의 전체에 대한 속도분포를 나타내고 있는데, 위상각 $\omega t / (\pi/6)$ 이 0~3, 9~11은 가속영역을 의미하며 3~9는 감속영역을 의미하고 있다. Fig. 9(a)는 유동의 가속기에 해당하는데 전체적으로 내측벽부터 유체가 가속되고 있는데 이는 앞의 위상인 감속종료기 유동이 외벽측에서 큰 속도분포형을 이루고 있는 Fig. 9(d)를 보아 가진기에 의하여 속도값이 반대로 되면서 일어나는 현상으로 사료된다.

또한 Fig. 9(b)에 위상각 $\omega t / (\pi/6)$ 이 3인 가속종료기에는 직관에서 곡관으로 유입한 유체는 강력한 원심력을 받아 유속의 최대값이 외측벽에 위치하는 속도분포형을 보여주고 있다.

Fig. 9(c)는 위상각 $\omega t / (\pi/6)$ 이 6인 감속중반기인

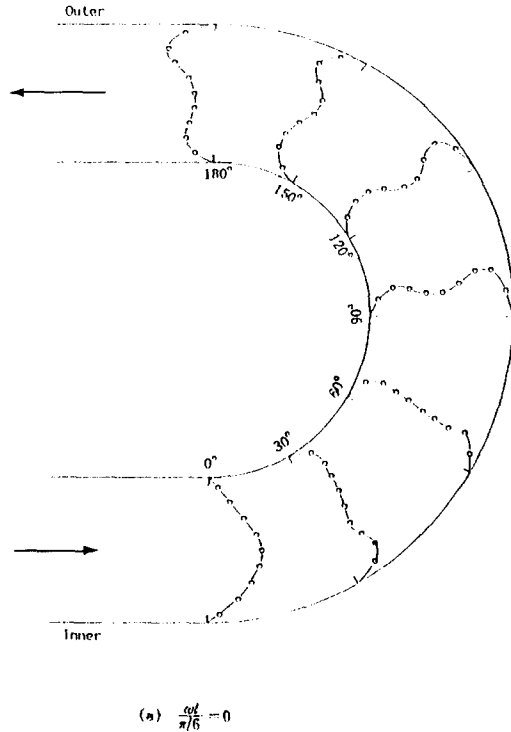


Fig. 10 Variation of axial velocity distribution for laminar pulsating flow in a curved duct at $\omega^+ = 5.15$

경우로서 가속후기의 외측영역에 있던 운동량이 큰 유체가 2차유동에 의하여 상하벽을 따라 덕트 내측영역으로 운반되고 다시 관로 중앙부로 운반되기 때문에 덕트의 중앙부에서 내벽측으로 속도 값이 큰 형상이 되고 있으며 Fig. 9(d)는 위상각 $\omega t/(\pi/6)$ 이 9인 감속종료기로서 곡관내 유동은 외벽측의 압력구배에 더하여진 2차유동의 운반효과에 의해 외측벽에서 빠르고 내벽측에서 느린 속도 분포를 보이고 있다.

Fig. 10에는 층류맥동유동에 있어서 위상각의 변화에 따라 곡관덕트의 전체에 대한 속도분포를 나타내고 있는데 이들 분포는 층류정상유동의 분포와 유사한 분포를 보이고 있으며 유동의 비정상성에 기인한 관성력이 약해지고 점성력이 상대적으로 커지기 때문으로 사료된다. 또한 곡관내의 최고 속도부가 덕트 중앙부분으로부터 외측벽쪽으로 정상유동에서처럼 이동하는 것을 볼 수 있으며 속도구배는 내측벽에서는 완만하고 외측벽에서

크게 된다. 또한 이 경우는 비교적 주기가 긴 유동이 준정상적이므로 가속중기, 위상각 $\omega t/(\pi/6)$ 이 0의 경우 축방향 속도분포에는 2차유동의 운반효과가 거의 나타나지 않고 축방향 속도분포는 각 위상에 있어서 전반적으로 평행한 상태를 나타내고 있으며 특이한 현상은 나타나지 않고 유량비가 작은 경우에는 정상유동과 유사한 속도분포를 이룬다¹¹⁾는 이론에도 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

곡관에서 레이저 유속계를 이용한 비정상유동 측정에 대한 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 곡관덕트의 덕트벽의 재질이 균일하지 못한 경우는 측정이 불가능하므로 레이저빔을 재질이 균일한 곳으로 투사시켜야 하며 유속을 측정하는 경우에 덕트벽의 재질과 두께에 따라 레이저빔의 굴절을 고려하여 프린지 위치를 결정하여야 한다.

2. 작동유체가 기체인 경우, 알곤-이온 레이저 시스템에서의 산란입자는 모기향 연기가 가장 양호한 신호를 발생하였다.

3. 곡관덕트내의 비정상유동을 LDV, 이송장치 및 회전각 분해기(Rotating Machinery Resolver : RMR)와 PHASE의 자료획득 및 처리 프로그램을 이용하여 속도분포를 측정하는 시스템의 측정 결과는 충분히 신뢰할 수 있다.

4. 층류진동유동에서는 무차원각진동수가 작은 경우 가속종료기와 감속종료기에 외측 벽쪽으로 속도가 큰 분포형을 이루고 층류맥동유동에서는 무차원 각진동수가 낮고 속도진폭비가 0.5보다 적은 경우에는 거의 정상유동과 같은 속도분포형을 이룬다.

후 기

이 논문은 1994년도 전문대학 교원 국비해외파견 연구사업에 의하여 연구되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 近江宗一, 井口 學, 前川和則 : "U 字管内液體の自由振動流れの 解析", 日本機械學會論文集(B編), 48 券 425號, pp. 50-58, 1982.
- 2) Sumida, M., and Sudou, K. : "Pulsating Flow Curved Pipes (3rd Report, Axial Velocity Profile)", Bul. of the JSME, Vol. 29, No. 256, pp. 3334 - 3339, 1986.
- 3) Komai, Y., and Tanishita, K. : "Fully Developed Intermittent Flow in a Curved Tube", Bull. of the JSME, Vol. 58, No. 552, pp. 2398 - 2406, 1992.
- 4) Muraoka, M., and Kumagai, T. : "On the Motion of a Tracer Particle in Unsteady Flows (1st Report, Numerical analysis of the Motion of a Spherical Particle in Oscillatory Flows at Low Reynolds Numbers)", Bull. of the JSME, Vol. 59, No. 559, pp. 713 - 720, 1993.
- 5) Sugiyama, S., Yamamoto, M., Nishikawa, H., and Oda, Y. : "Numerical investigations on Fully - Developed and Unsteady Flows in a Curved Duct". Bull. of the JSME, Vol. 57, No. 533, pp. 18 - 24, 1991.
- 6) Yokota, S., and Nakano, K. : "Oscillatory Flow in the Inlet Region of Circular Tube (the 2nd Report, An Approximate Solution and the Unsteady Viscous Friction Coefficient)", J. Hydraulics and Pneumatics, Vol. 11, No. 2, pp. 107 - 114.
- 7) Arnold F, B., and Leif K, T. : "An experimental investigation of oscillatory flow in pipe bends", J. Fluid Mech, Vol. 118, pp. 269 - 284, 1982.
- 8) Sugiyama, S., Yamamoto, M., and Hayashi, T. : "Flows in a Curved Rectangular Channel(2rd Report)", Bull. of the JSME, Vol. 53, No. 487, pp. 751 - 755, 1987.
- 9) 角田 勝, 須藤浩三, 和田秀之 : "曲り管内脈動流に関する研究(第4報, 二次流動)", 日本機械學會論文集(B編), 54券 505號, pp. 2375 - 2381, 1988.
- 10) Chandran, K. B., and Yearwood, T. L. : "Experimental study of physiological pulsatile flow in a curved tube", J. Fluid Mech, Vol. 111, pp. 59 - 85, 1981.
- 11) Park, G. M. : "Flow Characteristics of Developing Laminar Unsteady Flow in a Square Duct", Ph. D. thesis, Korea Univ., 1987.
- 12) 안종우, 현범수, 이창용 : "LDV를 이용한 프로펠러 유효반류 측정 및 난류 계측시스템 개발", 한국기계연구소 부설 해사기술연구소 UCE 470 - 1397 · D, 1990.

곡관에서 Laser유속계를 이용한 비정상유동 측정에 대한 연구

조 병 기*

A Study on Unsteady Flow measurement using Laser Doppler
Velocimeter in Curved Duct

B. K. Cho

Key words : Unsteady Flow(비정상유동), Oscillatory Flow(진동유동), Pulsation Flow(맥동유동), Transient Flow(과도유동)

Abstract

In the present study, the unsteady in a square-sectional 180° curved duct are experimentally investigated.

The experimental study using air in a square-sectional 180° curved duct is carried out to measure axial velocity distributions with data acquisition and processing system. In this system, Rotating Machinery Resolver (RMR) and PHASE Software are used to obtain the results of unsteady flows.

In conclusion, the exact measurement of unsteady flow using LDV system depends upon uniformity of duct materials, duct thickness, and scattered particles.

기호설명

A_1 : 속도진폭 $\left(= \frac{l\bar{u}_{m,os}, ll}{\bar{u}_m, ta} \right)$
 a : Duct half-width (mm)
 b : Duct half-height (mm)
 R : Radius of curvature
 R_c : Curvature ratio $\left(= \frac{a}{R} = \frac{D_h}{2R} \right)$
 $Reta$: 시간평균 레이놀즈 수 $\left(= \frac{D_h \bar{u}_m, ta}{\nu} \right)$
 u, v, w : Velocity components in x, y and z -

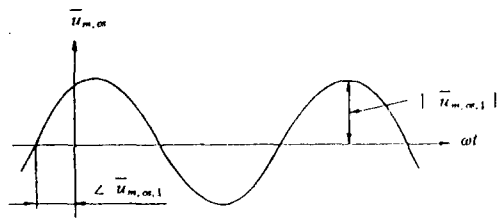
axis, respectively
 $\bar{u}_{m,os}$: Cross-sectional mean velocity of oscillatory flow
 $\bar{u}_{m,ta}$: Time-averaged cross-sectional mean velocity of pulsating flow
 ϕ : Deflection angle of duct
 ω^* : Dimensionless angular frequency $\left(= \frac{D_h}{2} \sqrt{\omega/\nu} \right)$
 $-$: Mean value
 $|$: Amplitude of oscillatory velocity
 \angle : Phase angle of oscillatory velocity

* 정회원, 조선대학교 병설 공업전문대학

1. 서 론

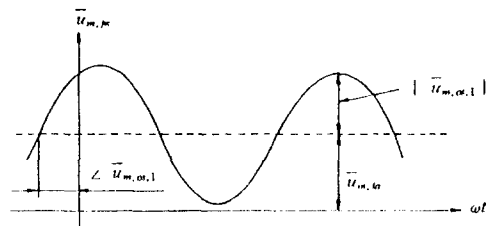
비정상유동이란 임의의 위치에서 유동상태가 시간에 따라 변화하는 유동으로 유동 상태가 짧은 시간에 급하게 변하는 과도유동(Transient Flow)과 유동이 임의의 가속도 및 감가속도를 갖고 변화하는 유동인 가속 및 감가속유동(Accelerating and Decelerating Flow), 유속의 변화가 주기적으로 반복되는 유동인 진동유동(Oscillatory Flow)과 맥동유동(Pulsating Flow)등으로 구별할 수 있다.

이들 비정상유동중에서도 특히 진동 및 맥동유동(Oscillatory and Pulsating Flow)은 유동장에서 유속의 변화가 주기적으로 반복되는 유동으로 정의되고 진동유동은 시간평균 성분이 없는 정현파나 여현파의 형태로 주어진 교번유동이며 유압관로에서 방향제어밸브의 작동에 의한 유동을 예로 들 수 있으며 Fig. 1(a)와 같은 속도곡선을 갖고, 맥동유동은 정상유동과 진동유동이 합성되어 이루어진 유동이며 맥동제트 유동 및 맥동연소와 혈액순환계의 유동 등을 예로 들 수 있으며 Fig.



$$\bar{u}_{m,\alpha} = |u_{m,\alpha,1}| \cos(\omega t + \angle u_{m,\alpha,1})$$

(a) Oscillatory velocity waveform



$$\bar{u}_{m,\beta} = \bar{u}_{m,\beta} + |u_{m,\alpha,1}| \cos(\omega t + \angle u_{m,\alpha,1})$$

(b) Pulsating velocity waveform

Fig. 1 Velocity curves of oscillatory and pulsating flow

1(b)와 같은 속도곡선을 갖는다.

곡관덕트내의 비정상유동(Unsteady Flow)에 대한 해석은 유체기계의 설계에 기초 자료가 될 뿐 아니라 공조덕트설비, 열교환기, 가스터빈, 압축기, 제트엔진 및 로케트의 맥동연소와 맥동제트, 박용기관의 배기관에서의 에너지 손실 등에 대한 관점에서 아주 중요하게 응용될 수 있기 때문에 이에 대한 유동해석이 절실하게 요구되고 있다.

이러한 비정상유동에 대한 연구는 이론해석적^{1~5)}인 방법으로서 수치해석과 실험적인 방법^{6~12)}으로서 피토판이나 열선풍속계를 이용한 종래의 연구들을 볼 수 있는데 최근에 많이 사용되고 있는 LDV를 이용한 유동특성에 대한 연구^{7~9)}는 진동류의 위상에 따른 유동특성을 아는데에 난점이 있어 거의 이루어 지지 않고 있는 실정이었다.

본 연구에서는 정4각단면을 갖는 180° 곡관덕트의 단면이 40mm×40mm×4000mm의 직관덕트에 곡률반경이 400mm이고 단면크기가 직관덕트와 같은 곡관덕트를 연결한 다음 곡관덕트내에 비정상유동을 발생케하여 입구유동영역에서 축방향의 위치변화에 따라 LDV유속계, 이송장치 및 회전각 분해기(Rotating Machinery Resolver : RMR)와 PHASE의 자료획득 및 처리 프로그램을 이용하여 각 유동의 실험조건에 따라 비정상 유동의 속도분포를 측정하는데 있어서의 측정방법에 대한 상세와 측정과정에서의 문제점 및 대책, 측정의 결과에 대한 신뢰도를 검토하여 LDV를 이용하여 관내 비정상 유동의 유동특성을 규명하고자 하는 연구자에게 정확한 측정을 할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

2. 실 험

2.1 실험장치

정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트 내에서 비정상유동인 층류 진동유동 및 층류 맥동 유동에 대하여 LDV 유속계를 이용하여 속도분포를 측정하기 위하여 설치된 실험장치의 개략도를 Fig. 2-1에 도시하였고, 곡관덕트의 좌표계는 Fig. 2-2에 도시하였다.

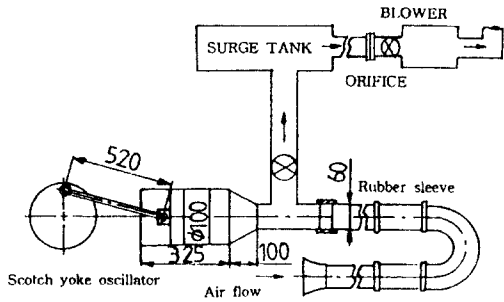


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

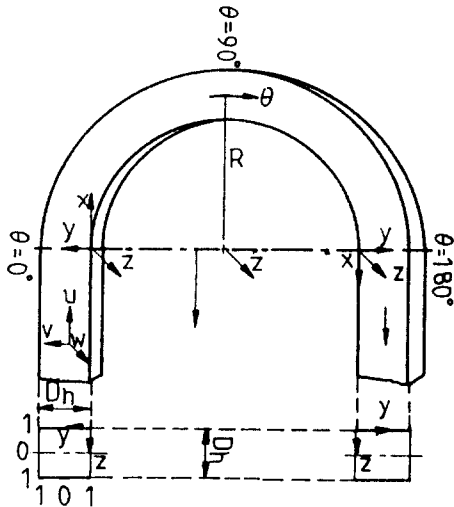


Fig. 3. Coordinate system of the curved duct

본 실험장치의 주요부는 180° 곡관덕트, 스코치-요크(scotch-yoke)형 가진기, 정류상자 및 송풍기 등으로 구성되어 있고, 작동유체인 공기는 송풍기에 의해 흡입되며 흡입되는 공기는 시험덕트 입구측 직관부(3800mm)로 유입되어 곡률 반경이 400mm인 곡관부를 지나며 출구측 직관부(3800mm)를 지나 정류상자 및 관로를 통하여 송풍기를 거쳐 송출된다. 시험덕트에서 속도분포를 측정하기 위하여 LDV 시스템을 적재하여 이동시킬 수 있는 3차원 이송장치가 설치되어 있고, 스코치-요크형 가진기의 회전축에 엔코더를 설치하여 진동유동과 맥동유동의 속도에 대한 위상을 360° 이내에서 지정된 수 만큼 퍼스널컴퓨터에 전송케 하여 PHASE 프로그램에서 처리할 수 있도록 하였다.

하였다.

본실험에 사용한 레이저는 알곤-이온(Ar-Ion) 레이저이고, 광학계의 배치는 二重 빔 모드(Dual beam mode)이며 2색 3빔 방식의 후방산란형(Back scattered type)이기 때문에 최대출력 2W의 고출력이 얻어지는 알곤-이온레이저를 사용하므로써 산란광의 강도를 높이고 있다.

2개의 파장을 이용하므로써 속도의 수평성분과 수직성분을 측정할 수가 있는데 레이저 빔의 파장은 488.0nm(청색 빔)와 514.5nm(녹색 빔)이며, 수직성분의 측정에는 488.0nm(청색 빔)을, 수평성분의 측정에는 514.5nm(녹색 빔)을 이용하고 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 LDV에 의한 속도계측

레이저 본체에서 발진된 레이저 빔은 콜리메이터(Collimator)에 의하여 평행광선으로 되고 빔분리기에 의해 강도가 같은, beam 간격 50mm의 2개의 빔으로 분리되며, 브래그셀(Bragg cell)을 사용하여 주파수 편이를 행하며 2색분리기에 의하여 청색 빔과 녹색 빔으로 분리된다.

더욱이 고유속 측정시의 드플러주파수에 대한 신호처리를 용이하게 하기 위하여 빔의 간격을 50mm에서 빔스피어(beam spacer)에 의하여 22mm로 축소하여 빔의 교차각을 작게하고 있다.

알곤-이온레이저에서 얻을 수 있는 청·녹 혼합빔, 청색 빔, 녹색 빔의 3빔을 얻고, 이들이 초점을 형성한 곳을 프린지(fringe)라고 하며 이곳이 측정체적, 즉 측정점 이 되는 곳이며 LDV 측정에는 측정체적의 크기가 중요하다.

측정체적에 대해서는 레이저 빔은 가우스 분포를 하고 있다는 가정하에서 구할 수 있는 공식을 이용하여 측정 체적에 대한 각종 치수를 계산하였다.

Table 1은 본 실험을 수행하는데 있어서 측정체적에 대한 각각의 계산결과를 나타 내고 있다.

이 측정체적을 이용하여 유속을 측정하는데 있어서 관벽에 가까운 부근의 유속을 정확히 측정하기 위해서는 Laser beam 의 교차각을 가능한 크게하여 측정체적이 최소로 되는 것이 좋다.

Table 1. Detailed contents of measuring volume

Item	Green Beam	Blue Beam
Fringe Spacing [d_f]	3.8 μ m	3.61 μ m
Measuring Volume Distance [d_m]	50.02 μ m	47.44 μ m
Length of measuring Volume [l_m]	0.73mm	0.70mm
Number of Fringe [N_{FR}]	13.13	13.14

실험에 사용한 렌즈는 초점거리 120mm, 260mm, 600mm의 렌즈중에서 120mm의 렌즈를 주로 사용하였다. 이 렌즈의 빔 교차각은 빔간격이 50mm 일 경우에는 5.48°이며 빔간격이 35.36mm 일 경우에는 3.87°이다.

집광렌즈에 의해서 모아진 산란광은 빔 확대기를 역으로 이용하여 입사빔의 직경이 축소된다. 이 산란광은 필드스톱(field stop)을 거치면서 산란광 이외의 잡광이 제거되고 색분리기에 의해 488.0nm와 514.5nm의 2개 파장의 산란광으로 분리된다.

이 경우 514.5nm의 투과율은 92%, 488nm의 반사율은 88%이다. 분리된 산란광은 각각 후방산란광 수광기(Color separator for scattered lighter)에 의하여 모아지고 칼리필터(color filter)를 투과한 후 광전관(photo Multiplier)에서 光電 변환된 다.

光電 변환된 신호는 주파수 변이계에서 주파수 변이를 행하는데 여기서, 주파수변이란 측정체적에서의 프린지에 움직임을 주는 것을 말하며 프린지의 이동방향은 변이선 빔에서 변이되지 않은 빔으로 이동하게 된다.

주파수를 변이 하는 목적은

- 1) 역류나 유동방향의 식별을 위하여,
- 2) 측정가능한 저, 고속 영역을 확장하기 위하여,
- 3) 주파수의 최적화를 위하여,
- 4) 페세스탈 신호의 제거를 위하여 사용한다.

본 실험은 비정상유동으로서 진동유동이나 맥동 유동을 그 대상으로 하고 있기 때문에 주파수를 변이 할 수 있는 다운믹서(down mixer)가 설치되어 있다.

본 시스템에서는 브레그셀을 이용하여 2개의 평행빔중의 한쪽을 40MHz로 변이시키고 있으므로 광전변환기에서 나오는 주파수는 항상 40MHz ±도플러 주파수의 값을 갖는다.

광전변환기에서 나오는 40MHz 도플러 주파수는 다운믹서에 입력 되어 변이주파수를 2kHz~10MHz 내에서 재조정되어 신호처리에 입력된다.

40MHz 도플러 주파수를 다운믹서에서 낮추는 이유는 도플러 주파수가 낮은 주파수일 경우 40MHz 변이주파수에 대한 도플러주파수의 분해능이 상대적으로 떨어지므로 이를 보상하기 위함이다.

이와 같이 주파수의 변이를 행한 데이터는 신호처리에 의해서 저주파수통과 필터 및 고주파수통과 필터를 거쳐 통과되는 도플러 신호를 오실로스코프에서 직접 확인할 수 있는데 신호처리는 1990C 및 1980B 카운터펄스 처리기로서 이 장치의 특징은 주어진 주기에 대하여 시간을 측정한다는 점이다.

1990C는 1ns, 1980B는 2ns라는 분해능을 가지고 있으며 주파수의 범위는 1990C에서는 1kHz~200MHz까지인데 1990C를 기준으로 할 때 측정가능 속도는 6mm/s에서 900m/s의 넓은 범위의 측정이 가능하다.

다음에 신호처리기를 통과한 신호는 정상유동에서는 FIND 프로그램에 의해 퍼스날컴퓨터에서 계산, 처리되며 비정상유동에 있어서는 가진기의 구동축에 부착된 엔코더에서의 위상각에 대한 신호를 회전각분해기(RMR)를 통하여 신호처리에 보내지는데 회전각 분해기란 회전하고 있는 기계의 회전속도 또는 진동 및 맥동유동의 유체 유동속도를 LDV에 의한 측정이 가능하도록 하는 시스템이다.

즉 신호처리기가 유체유동에서 한 유동입자로부터 속도 데이터를 기록할 경우에 한 신호는 분해기로 보내지는데 그것은 동일한 순간에 회전장치의 각(角)위치를 잡도록 한다. 이 위치 정보는 인터페이스 모듈을 거쳐서 속도 데이터와 함께 컴퓨터로 전송된다.

LDV를 이용한 유동계측시 중요한 고려사항의

하나는 코인스턴스윈도우(coincidence window) 폭 및 전체 샘플수를 적당하게 결정하는 것이다.

코인스턴스윈도우란 Fig. 2-3와 같이 두개의 카운터(청색빔 처리, 녹색빔 처리)에서 받아들이는 순간 속도값들 중에서 어느 주어진 미소시간 동안에 동시에 얻어진 자료만을 취급하기 위하여 정의된 시간간격으로 이의 최적값은 유동의 특성, 유속 및 측정부의 공간분해능 등에 따라 변하게 된다. 예를들어 유속이 4.8m/s인 유동장에 LDV의 공간분해능이 $d=0.08\text{mm}$ 인 청색광이 사용될 때 측정부위를 통과하는 산란입자의 통과시간은 $t=d/v=16.7\mu\text{s}$ 가 되므로, 같은 산란입자로부터 얻어진 신호가 두 채널에서 동시에 계측됨을 보장하기

위하여 코인스턴스 윈도우의 간격은 $10\sim 20\mu\text{m}$ 를 취하여야 한다. 만일 이 값이 지나치게 크면 Reynold응력 $u_i v_i$ 의 두 순간 속도값 사이의 상관관계가 제대로 이루어지지 못하여 대부분의 경우 실제보다 작은 값을 얻게 된다. 한편 윈도우의 폭이 너무 좁을 경우 취득 가능한 데이터가 급격히 감소하게 된다.

다음에는 2차유동을 수반한 복잡한 3차원 운동을 한 곡관내 맥동유동의 관측방향속도 u 를 LDV를 이용하여 덕트 횡단면위치와 종단면위치를 변화시켜 가면서 급힘각이 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 위치에 대하여 측정함으로써 유동특성을 파악하고 또한 측정의 신뢰도를 검토하였다.

LDV 시스템을 이용한 비정상유동에 대한 자료 획득 및 처리계통도는 Fig. 5에 나타내었다.

또한, 자료획득 장치는 PC/AT 480을 사용하며 2개의 속도성분을 측정하여야 하므로 2대의 카운터를 연결하여 1대의 퍼스널컴퓨터에 자료를 전달할 수 있도록 M1-990 인터페이스(Interface)가 설치되어 있다.

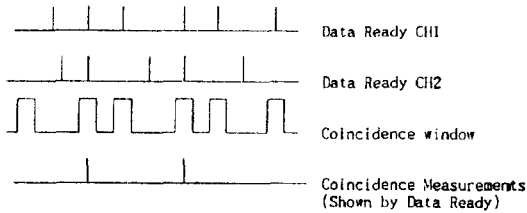


Fig. 4 Coincidence window

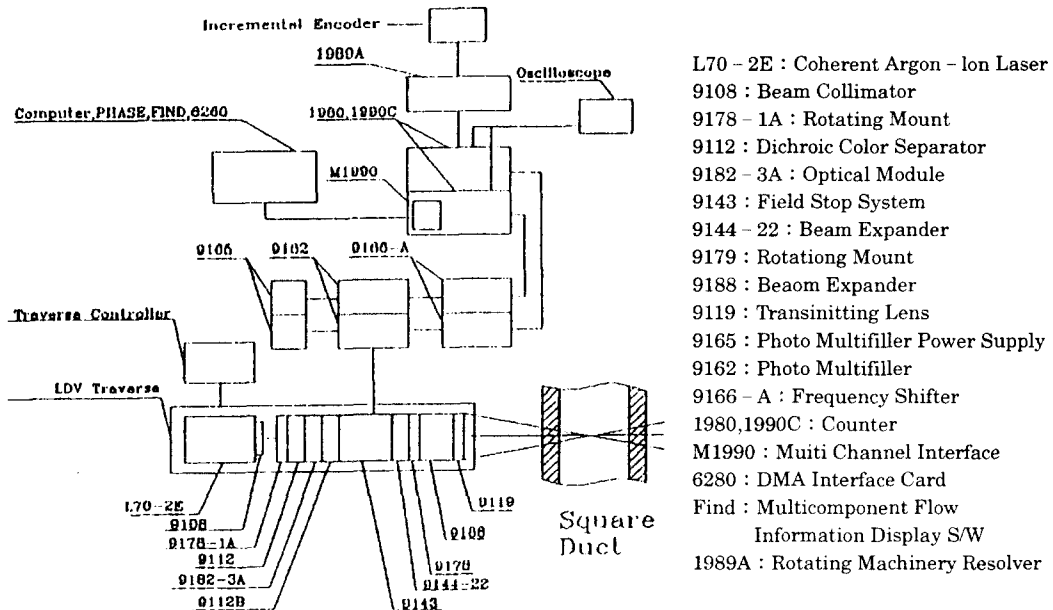


Fig. 5 Schematic diagram of LDV system and associated data acquisition/processing equipment

3. 결과 및 고찰

LDV를 사용하는데는 유체중에 산란입자가 절대적으로 필요하며 입자는 유동에 완전하게 추종하여야 한다. 통상의 실내공기에는 산란입자가 충분하지 않기 때문에 유동에 추종하는 입자를 별도로 제공하여야 한다.

기체유동의 측정에 사용되는 산란입자로서는 산화마그네슘(MgO), 담배연기, 모기향 연기, 실리콘오일, 석유를 무화한 것 등의 입자가 사용되고 있다. 기체유동이라 할지라도 속도가 그다지 크지 않은 층류상태의 유동에서는 산화마그네슘과 같은 분입체상태의 산란입자는 유동에 추종하지 못하는 경향이 있어 적합하지 않았다.

또한 석유를 무화한 것은 화재의 위험과 인체에 유해하여 사용을 권장할 만한 것이 되지 못한다. 한편, 담배연기의 입자 직경은 측정방법에 의해서 약간 다르지만 대체적으로 0.1~1.3 μm 정도로 알려져 있으며, 모기향 연기의 입자직경 역시 0.1~1.3 μm 로서 유동에 충분히 추종할 수 있으며, 측정체적의 프린지간격의 크기가 녹색빔의 경우 1.8 μm , 청색빔의 경우에는 1.7 μm 이므로 크기면에서도 적당하고 담배연기와 비교하여 계속적으로 일정량의 연기를 발생시킬 수 있는 장점이 있어 본 실험에서는 모기향을 사용하였다. 이 모기향 연기를 사용하는 경우의 단점으로는 Tar에 의해서 측정부위를 오염시켜 신호를 약하게 하므로 그라스울에 통과시켜 이를 제거하여 사용하였다.

2차유동을 수반한 복잡한 3차원 운동을 한 곡관내 유동의 관측방 향속도 u 를 LDV를 이용하여 측정하기 위하여 본 실험에서는 180° 곡관덕트를 사용하였는데 재질은 두께가 10mm인 아크릴로써 제작하였다. 곡관부에서 단면을 기준으로 하여 상, 하면은 아크릴의 판재를 변형없이 사용하여 제작하였기 때문에 재질상 균일한 상태로 되어 있지만 좌, 우면은 아크릴 판재를 외력을 가하여 180°의 굽힘을 주었기 때문에 재질이 균일하지 않았다.

실제 측정시 우측면에 해당하는 곡관부 외측벽에서는 레이저빔광을 투사하였을 때 데이터를 받고 있는 중에도 아크릴이 열에 견디지 못하고 균열이 발생하므로써 측정이 불가능하게 되었다. 따라

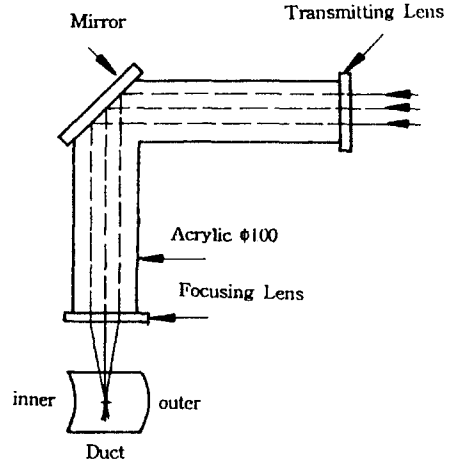


Fig. 6 90° bend of mirror for solving the problem in heterogeneous property of materials

서, 본 실험에서는 재질이 균일한 상부면에 레이저 빔광을 통과 시키므로써 이러한 애로점을 해결하였는데 그 방법으로서 Fig. 6에 나타난 것처럼 레이저 빔광을 90° 굴절시키기 위하여 빔 확대기와 초점렌즈 사이를 아크릴체 원관을 사용하여 90° 벤드를 제작하고 90° 각부위에 균일면을 갖는 거울을 부착시켜 사용 하므로써 재질의 불균일성 때문에 발생하는 애로점을 해결하였다.

곡관덕트내 유동에 대한 LDV측정에는 곡관덕트의 굽힘의 영향을 고려하여야 한다. 본 실험을 수행하는데 있어서 레이저 본체가 굽힘의 외벽측에 위치하게 되므로 곡관덕트내에서의 빔의 교차각은 개방된 공기중에서 보다 작고 그 정도는 외벽측에서 크게 된다. 또, 이송기구에 의한 레이저 본체의 이동량도 곡관덕트내에 있는 교차부의 이동량에 비하여 작게 된다. 따라서, 이송장치를 이용하여 측정점을 측정부위에 정확히 옮기기 위해서는 레이저 빔의 굴절각을 고려하여야 한다.

층류비정상유동인 진동유동의 경우 덕트의 굽힘각도가 90° 이후인 유동이 완전 발달되었다고 사료되는 180° 부근에서 LDV 시스템을 이용하여 얻은 속도값을 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 LDV 시스템에 회전각 분해기와 PHASE프로그램을 이용하여 얻은 데이터는 열선 풍속계를 이용하여 데이터를 얻었던 방법과는 달

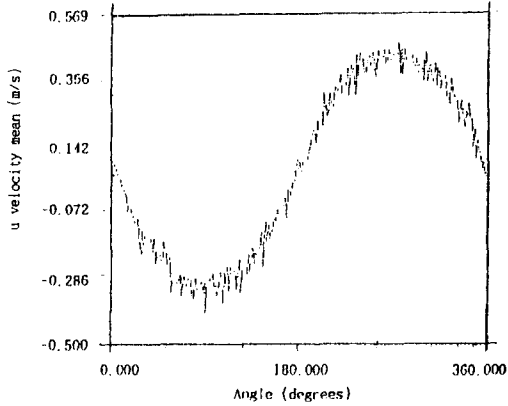


Fig. 7 LDV measurement of velocities of laminar oscillatory flow in a curved duct

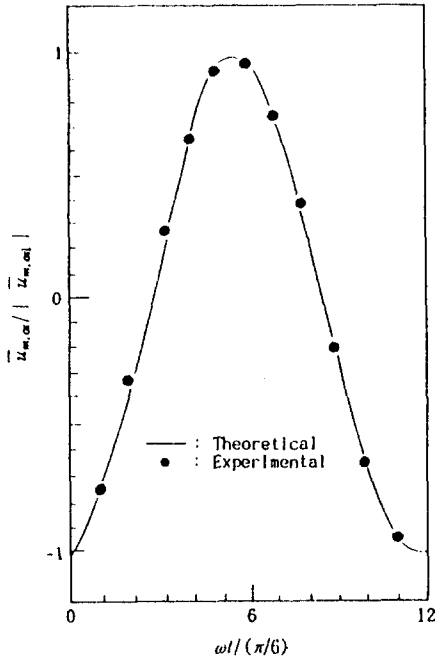


Fig. 8 Fundamental velocity wave of finite Fourier expansion for a period of u_m for oscillatory flow in a straight duct with LDV system

리 360°의 모든 위상에서 얻고자 하는 데이터를 원하는 만큼 세밀하게 그리고 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다.

Fig. 8에는 직관덕트의 완전 발달되었다고 사료되는 지점의 덕트 중심에서 LDV 시스템을 이용하여 얻은 진동유동의 무차원 단면평균속도를 위상

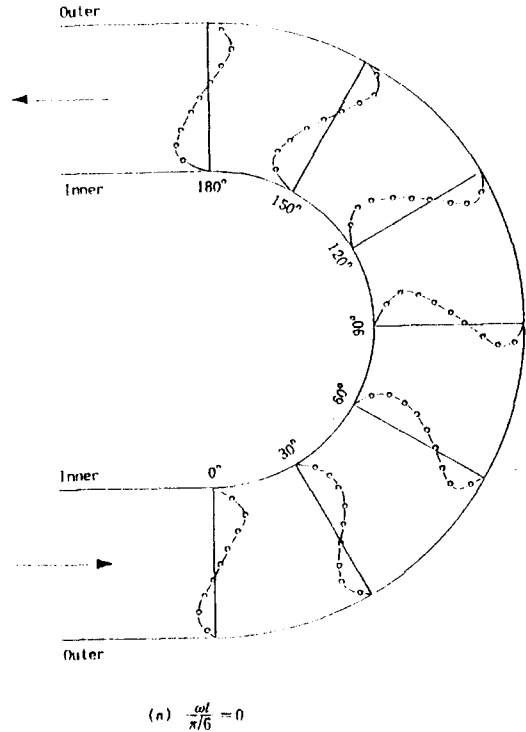


Fig. 9 Variation of axial velocity distribution for laminar oscillatory flow in a curved duct at $\omega^* = 5.15$

각에 따라 나타내었는데 예상되는 이론값과 실험이 잘 일치한 속도분포 곡선을 나타내었다.

Fig. 9에는 Fig. 7의 데이터를 정리하여, 위상각의 변화에 따라 곡관덕트의 전체에 대한 속도분포를 나타내고 있는데, 위상각 $\omega t / (\pi/6)$ 이 0~3, 9~11은 가속영역을 의미하며 3~9는 감속영역을 의미하고 있다. Fig. 9(a)는 유동의 가속기에 해당하는데 전체적으로 내측벽부터 유체가 가속되고 있는데 이는 앞의 위상인 감속종료기 유동이 외벽측에서 큰 속도분포형을 이루고 있는 Fig. 9(d)를 보아 가진기에 의하여 속도값이 반대로 되면서 일어나는 현상으로 사료된다.

또한 Fig. 9(b)에 위상각 $\omega t / (\pi/6)$ 이 3인 가속종료기에는 직관에서 곡관으로 유입한 유체는 강력한 원심력을 받아 유속의 최대값이 외측벽에 위치하는 속도분포형을 보여주고 있다.

Fig. 9(c)는 위상각 $\omega t / (\pi/6)$ 이 6인 감속중반기인

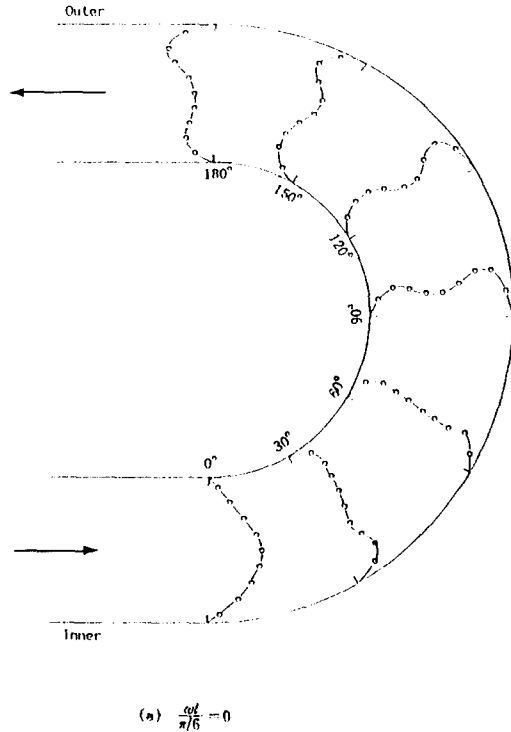


Fig. 10 Variation of axial velocity distribution for laminar pulsating flow in a curved duct at $\omega^+ = 5.15$

경우로서 가속후기의 외측영역에 있던 운동량이 큰 유체가 2차유동에 의하여 상하벽을 따라 덕트 내측영역으로 운반되고 다시 관로 중앙부로 운반되기 때문에 덕트의 중앙부에서 내벽측으로 속도 값이 큰 형상이 되고 있으며 Fig. 9(d)는 위상각 $\omega t/(\pi/6)$ 이 9인 감속종료기로서 곡관내 유동은 외벽측의 압력구배에 더하여진 2차유동의 운반효과에 의해 외측벽에서 빠르고 내벽측에서 느린 속도 분포를 보이고 있다.

Fig. 10에는 층류맥동유동에 있어서 위상각의 변화에 따라 곡관덕트의 전체에 대한 속도분포를 나타내고 있는데 이들 분포는 층류정상유동의 분포와 유사한 분포를 보이고 있으며 유동의 비정상성에 기인한 관성력이 약해지고 점성력이 상대적으로 커지기 때문으로 사료된다. 또한 곡관내의 최고 속도부가 덕트 중앙부분으로부터 외측벽쪽으로 정상유동에서처럼 이동하는 것을 볼 수 있으며 속도구배는 내측벽에서는 완만하고 외측벽에서

크게 된다. 또한 이 경우는 비교적 주기가 긴 유동이 준정상적이므로 가속중기, 위상각 $\omega t/(\pi/6)$ 이 0의 경우 축방향 속도분포에는 2차유동의 운반효과가 거의 나타나지 않고 축방향 속도분포는 각 위상에 있어서 전반적으로 평행한 상태를 나타내고 있으며 특이한 현상은 나타나지 않고 유량비가 작은 경우에는 정상유동과 유사한 속도분포를 이룬다¹¹⁾는 이론에도 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

곡관에서 레이저 유속계를 이용한 비정상유동 측정에 대한 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 곡관덕트의 덕트벽의 재질이 균일하지 못한 경우는 측정이 불가능하므로 레이저빔을 재질이 균일한 곳으로 투사시켜야 하며 유속을 측정하는 경우에 덕트벽의 재질과 두께에 따라 레이저빔의 굴절을 고려하여 프린지 위치를 결정하여야 한다.

2. 작동유체가 기체인 경우, 알곤-이온 레이저 시스템에서의 산란입자는 모기향 연기가 가장 양호한 신호를 발생하였다.

3. 곡관덕트내의 비정상유동을 LDV, 이송장치 및 회전각 분해기(Rotating Machinery Resolver : RMR)와 PHASE의 자료획득 및 처리 프로그램을 이용하여 속도분포를 측정하는 시스템의 측정 결과는 충분히 신뢰할 수 있다.

4. 층류진동유동에서는 무차원각진동수가 작은 경우 가속종료기와 감속종료기에 외측 벽쪽으로 속도가 큰 분포형을 이루고 층류맥동유동에서는 무차원 각진동수가 낮고 속도진폭비가 0.5보다 적은 경우에는 거의 정상유동과 같은 속도분포형을 이룬다.

후 기

이 논문은 1994년도 전문대학 교원 국비해외파견 연구사업에 의하여 연구되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 近江宗一, 井口 學, 前川和則 : "U 字管内液體の自由振動流れの 解析", 日本機械學會論文集(B編), 48 券 425號, pp. 50-58, 1982.
- 2) Sumida, M., and Sudou, K. : "Pulsating Flow Curved Pipes (3rd Report, Axial Velocity Profile)", Bul. of the JSME, Vol. 29, No. 256, pp. 3334 - 3339, 1986.
- 3) Komai, Y., and Tanishita, K. : "Fully Developed Intermittent Flow in a Curved Tube", Bull. of the JSME, Vol. 58, No. 552, pp. 2398 - 2406, 1992.
- 4) Muraoka, M., and Kumagai, T. : "On the Motion of a Tracer Particle in Unsteady Flows (1st Report, Numerical analysis of the Motion of a Spherical Particle in Oscillatory Flows at Low Reynolds Numbers)", Bull. of the JSME, Vol. 59, No. 559, pp. 713 - 720, 1993.
- 5) Sugiyama, S., Yamamoto, M., Nishikawa, H., and Oda, Y. : "Numerical investigations on Fully - Developed and Unsteady Flows in a Curved Duct". Bull. of the JSME, Vol. 57, No. 533, pp. 18 - 24, 1991.
- 6) Yokota, S., and Nakano, K. : "Oscillatory Flow in the Inlet Region of Circular Tube (the 2nd Report, An Approximate Solution and the Unsteady Viscous Friction Coefficient)", J. Hydraulics and Pneumatics, Vol. 11, No. 2, pp. 107 - 114.
- 7) Arnold F, B., and Leif K, T. : "An experimental investigation of oscillatory flow in pipe bends", J. Fluid Mech, Vol. 118, pp. 269 - 284, 1982.
- 8) Sugiyama, S., Yamamoto, M., and Hayashi, T. : "Flows in a Curved Rectangular Channel(2rd Report)", Bull. of the JSME, Vol. 53, No. 487, pp. 751 - 755, 1987.
- 9) 角田 勝, 須藤浩三, 和田秀之 : "曲り管内脈動流に関する研究(第4報, 二次流動)", 日本機械學會論文集(B編), 54券 505號, pp. 2375 - 2381, 1988.
- 10) Chandran, K. B., and Yearwood, T. L. : "Experimental study of physiological pulsatile flow in a curved tube", J. Fluid Mech, Vol. 111, pp. 59 - 85, 1981.
- 11) Park, G. M. : "Flow Characteristics of Developing Laminar Unsteady Flow in a Square Duct", Ph. D. thesis, Korea Univ., 1987.
- 12) 안종우, 현범수, 이창용 : "LDV를 이용한 프로펠러 유효반류 측정 및 난류 계측시스템 개발", 한국기계연구소 부설 해사기술연구소 UCE 470 - 1397 · D, 1990.