

PIV 계측에 의한 180°곡관 출구에 연결된 직관에서 층류정상유동의 운동에너지

이종구*, 이흥구**, 손현철***, 이행남***, 박길문***

Kinetic energy of Laminar Steady flows in the Exit Region Connected to the straight Square-sectionnal 180°curved Duct by using PIV

J.G.Lee*, H.G.Lee**, H.C.Sohn***, H.N.Lee and G.M.Park***

Key Words : Kinetic energy(운동에너지), Particle Image Velocimetry(입자영상속도계측), Fully Developed Flow(완전발달유동).

Abstract

In the present study, kinetic energy of laminar steady flow in the exit region connected to the square-sectionnal 180°curved duct was investigated experimentally.

The experimental study for air flows was conducted to measure kinetic energy distributions by using the Particle Image Velocimetry(PIV) system with the data acquisition and processing system of Cactus 2000 software.

The results obtained from experimental studies are summarized as follows :

- (1) The critical Reynolds number for a change from laminar steady flow to transitional steady flow was about 1910, in the 50 region of dimensionless axial position (x/Dh) which was considered as a fully developed flow region.
- (2) Maximum kinetic energy of laminar steady flow was gradually increased as the Reynolds number increased.

1. 서론

산업이 발달함에 따라 기계공학 뿐 만 아니라 건축 및 산업 플랜트 등의 유체기계장치에 관련된 각종 덕트 시스템이 대형화 및 복잡화됨에 따라 덕트 내부 시스템의 유동형태가 효율과 안정성에 밀접한 관계를 갖고 복잡한 양상이 나타나고 덕트 시스템의 효율과 안정성에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 덕트 시스템 내부 유동특성을 파악하는 일은 산업 플랜트의 유체기계, 공기조화 덕트시스템 등에는 필수적으로 연결된, 이들 덕트 시스템의 설계는 실제유체 유동의 구조는 대단히 복잡하여 이를 해석하기 위해서는 많은 연구가 요구된다. 덕트 시스템에 대한 유체공학적 연구가 시작된 것은 1920년대로 주로 이론적인 연구가 행하여졌고, 이후 최근에는 컴퓨터의 대용량화 및 고속화에 따라 Navier-Stokes 방정식의 비선형성이 검토되기 시작하였다. 1990년대 이후 각종측정기기의 고정밀화 및 대용량화된 열선풍속계, LDV유속계, PIV유속계와 같은 측정기기의 고감도 및 성능향상으로 인하여 정확한 실험해석 결과를 얻을 수 있게 되었다.

곡관덕트 내부의 유동에 관한 연구로 Eustice^[1]는 곡관 내부의 유동특성을 파악하였으며, Dean은 단면이 원형인 곡관내에서 관측방향으로 나선형 운동을 하는 유체의 유동을 관측에 수직인 단면내의 2차유동으로 구분하고 특성 파라메타로 Dean^[2]수에 의존한다는 것을 발표하였다. Sumida^[3]등은 곡관 내부의 진동 유동에 대해서 연구하였다. Lee^[4]등은 사각덕트내의 유동에 대해서 PIV로 계측하여 유동특성을 연구하였다.

곡관 덕트내의 유체유동은 원심력이 작용하게 되어 곡관에 연결된 직관덕트의 안쪽과 바깥쪽에 압력차가 존재하게 된다.^[5]

이 원인으로 인하여 곡관 덕트에 연결된 직관덕트의 유동은 새로운 유동현상으로 변화되고, 특히, 곡관부에서 직관부로 변하는 유동영역에 있어서의 층류정상유동은 아주 복잡한 현상을 나타내고 있으며, 이 유동에서의 유동특성은 연구가 활발하게 이루어지지 않는 실정에 있다.

본 연구에서는 180°곡관덕트 출구영역에 연결된 직관덕트에서 층류 정상유동을 PIV계측에 의한 운동에너지 및 전단응력등의 유동특성을 해석하여 각종 산업설비를 포함한 공조 설비 및 플랜트설비에서 널리 활용될 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

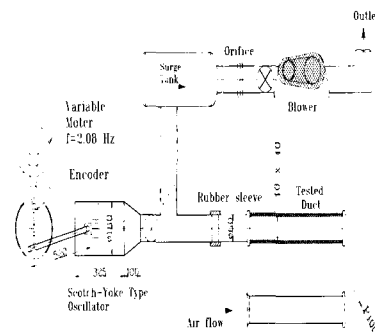


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

* 조선대학교 대학원 기계공학과, jglee@intizen.com

** 동아인제대학 컴퓨터응용기계과, Zhong9@dreamx.net

*** 조선대학교 기계공학과, farmershon@hanmail.net

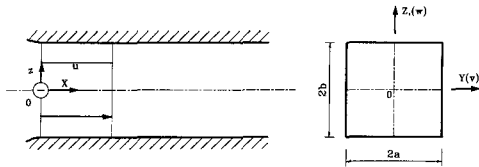


Fig.2 Coordinate system and velocity component in a straight duct

본 실험장치의 구성은 정류상자 180°정사각단면 곡관덕트와 흡입형 송풍기로 구성되었다. 실험에 사용한 작동 유체는 모기향을 연소시킨 공기를 사용하였다. Fig.1 과 Fig.2에 실험장치의 개략도와 좌표계를 나타내었다. 작동유체는 흡입형 송풍기에 의해 흡입되며 흡입된 작동유체는 시험덕트 입구측에 설치된 정류상자를 통과한 후 직관부(4000mm)로 유입되어 곡률반경이 400mm인 180°곡관부를 지나 계속해서 출구측 직관부(4000mm)의 관로, 서지탱크 및 오리피스를 통과하여 대기중에 방출된다.

본 연구에서는 180°곡관부에 연결된 출구측 직관부를 시험부로 하여 정상유동을 발생시켜 축방향 속도분포 및 운동에너지를 측정하였다. 실험에 사용된 덕트는 매끄러운 아크릴로 제작된 40 mm × 40 mm인 덕트로 길이가 4,000 mm이며 벨마우스형 유입관(inlet bell mouth)을 설치하였으며 곡관의 출구측 직관덕트도 입구부의 직관 덕트와 동일한 규격이며 곡관부 덕트, 직관부와 동일단면이고 곡률반경이 400 mm인 곡관덕트로서 U자형을 형성하고 있다. 시험덕트의 대칭벽 사이의 거리는 40 mm ± 0.5 mm가 유지되도록 하였고 벽의 인접각은 90° ± 0.4°가 되도록 하였으며, 밑면은 전길이에 걸쳐 ± 0.5 mm 이내에서 수평이 되도록 하였고 곡관덕트에는 30°등간격으로 열선지지대 삽입구를 만들었고, 10°등간격으로 정압공을 뚫었다. 곡관부에서는 동일한 단면내에서도 내측벽과 외측벽 사이에 상당한 압력차가 생기게 되므로 동일한 단면내의 외측벽과 내측 벽에서 압력차를 구하는 경우를 대비하여 차압변환기를 설치할 수 있도록 측압공을 설치하였다. 또한 정상유동 발생을 위한 가변 흡입형 송풍기 등으로 구성되어 있고 실험덕트에서 운동에너지 측정하기 위한 LEXEL사의 최대 7W 입자영상유속계(PIV)가 설치되어 있다.

2.2 PIV에 의한 계측실험

아르곤 가시광 레이저 (LEXEL, Maximum 7W)를 입구측 유량 및 Re수에 따라 유동을 가시화하기 위해 4~5W정도의 가시광으로 시험덕트(Tested Duct)에 비추게 하여 고속카메라를 가시광 레이저와 수직방향으로 frame 속도를 30pps로 설정하고 촬영하였다. 고속 카메라 Controls의 자체메모리에 44MB에서 이미지 파일을 임시저장되어있는 유동장의 연속영상을 이미지보드인 DT-3152Board가 장착한 PC에 고속카메라를 연결하여 2진 원시 파일로 변환후 Cactus2000 software를 이용하여 유동특성을 해석하였다. 가시광 레이저는 두께 1.5mm의 빔이 fiber optic cable 및 cylindrical lens를 통하여 2mm정도의 시트로 형성하여 유동장을 가시화하였으며 정전기로 인한 산란입자의 부착을 방지하기 위해 완전히 발달된 유동장을 형성하였다. 본 실험은 고속카메라를 사용하여 유동을 촬영했지만, 유량변화량 값들이 그다지 크지 않기 때문에 일반 CCD카메라와 같은 분석을 위해서 Field Selection에서 1st Frame에 Odd와 Even를 선택하여 입자의 최대 이동거리와 계조치 상호상관법(grey-level cross

correlation algorithm)을 적용하였다. 계측영역 순간속도분포를 얻는데 Host-Computer(펜티엄III-450, RAM256MB)처리시간은 약 20초 전후였다. Fig. 3은 PIV system 개략도이며 Fig. 4는 실험자료 처리과정을 나타내고 있다 Table. 1은 유동가시화 실험조건을 보여주고 있다.

Table.1 Experimental Condition of flow visualization

	Item	Specification
Visualization Equipment	Image Board	DT3152 640×480 pixel
	Light Source	7W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	LLS probe
Measuring Condition	Working Fluid	Air
	Temperature	26 °C ± 1
	Particle	모기향 (0.1~0.3µm)
	Time Resolution	1 / 60 sec
Image Processing	Host Computer	Pentium III PC (CPU 450MHz RAM128M)
	Calculation Time	30 frames/sec
	Identification	Cactus'2000(grey-level cross correlation algorithm)
	Number of data for time-mean	135frames

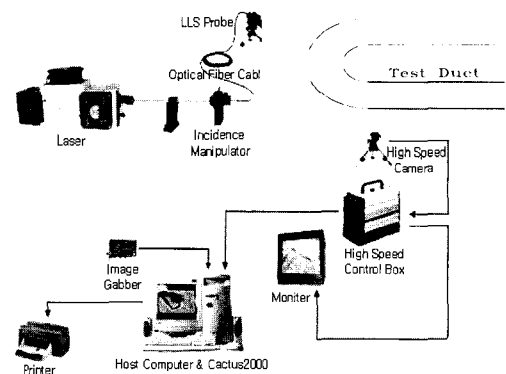


Fig.3 Schematic diagram of PIV system

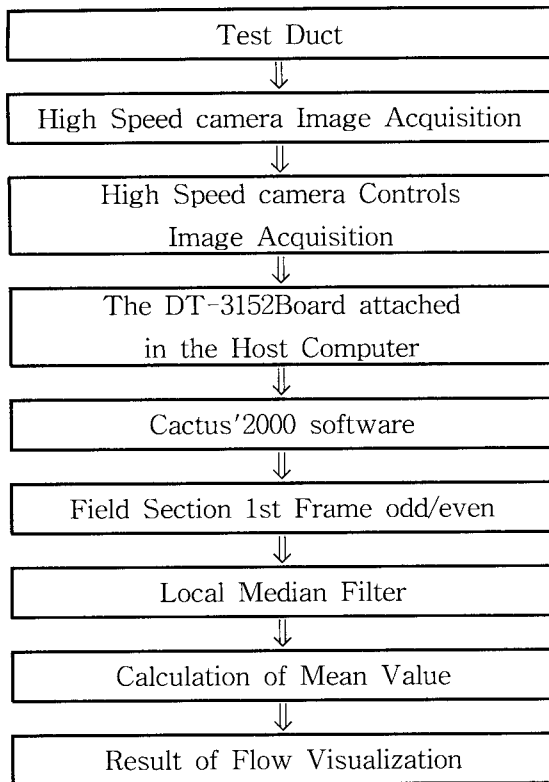


Fig.4 Flow chart of PIV processing

2.3 층류정상유동의 발생 및 유동의 분류

층류정상유동은 송풍기에 의하여 모기향을 연소시킨 작동유체를 흡입하여 실험덕트내로 유입하도록 하였고 실험덕트의 유속 조절은 송풍기를 구동하는 변속모터의 회전수를 조절함하여 유속을 변화시켰다. 작동유체인 모기향의 산란입자의 크기는 0.1~0.3 μm 로 고속도카메라로 촬영하는데 적합하였다.

정상유동의 유동특성은 정상유동의 Reynolds수와 덕트 입구영역에서 덕트 축방향의 위치 (x/D_h)에 따라 속도분포가 변화되므로 층류정상유동의 발달과정을 고찰하기 위하여 정상유동의 Reynolds수(Re_{st})를 1560, 1720 및 1910으로 변화시키면서 덕트 입구로부터 덕트 축방향의 위치 (x/D_h)를 0~5에서 시작하여 90되는 부분까지 10 간격의 위치에서 측정하여 덕트의 중심에서 축방향의 속도변화가 99.9% 지점까지 측정하였다.

입구 쪽 초기 유량들은 오리피스로 측정하였고 이로부터 단면평균속도를 구하여 Reynolds수(Re_{st})를 계산하였다.

$$\text{유량} : Q = a\epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

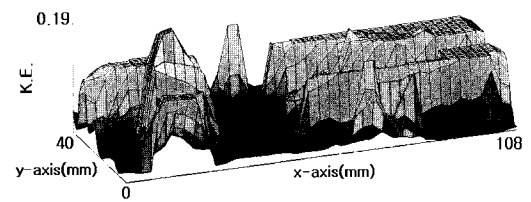
$$\text{단면평균속도} : u_m = 0.0214 \sqrt{\frac{\gamma_{al}}{\gamma_{air}} \Delta H} \quad (2)$$

정상유동의 임계 Reynolds수($Re_{st,cr}$)는 덕트중심에 열선유속계 센서를 삽입시켜 열선으로부터 나오는 신호가 열선유속계를 지나 얻어진 속도파형을 Photo-corder로 출력한 후 최초의 난류 Burst가 발생하는 Reynolds수를 층류정상유동에서 천이정상유동으로 변화하는 임계레이놀즈수로 정한 후 층류영역에서 실험하였다. 층류정상유동에 대한 Data는 PIV를 통하여 얻은 실험값을 고속도카메라를 거쳐 PC에 의하여 속도값으로 처리되어 실험자료를 PC Hard Disk에 보관한다.

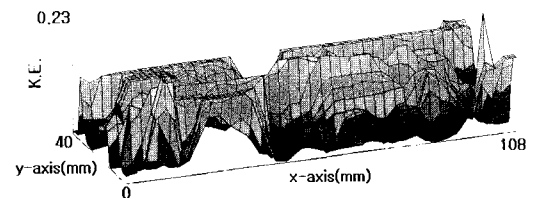
3. 결과 및 고찰

Fig. 5에서 Reynolds수가 1560, 1720, 1910인 경우에 덕트의 무차원 축방향(0~5(x/D_h)) 위치에서 Reynolds 변화시켜 가면서 운동에너지를 나타낸 그림으로 보여주고 있다. 대체적으로 상·하벽면에서 운동에너지가 극히 작음을 알 수 있고 이는 벽면에서 점성의 영향 때문으로 사료된다. 또 레이놀즈수가 증가할수록 최대운동에너지 값은 0.19에서 0.27 증가함을 알 수 있는데 속도벡터분포와 비교해보면 와류가 발생한 부분에서는 운동에너지 값이 작음을 알 수 있고 레이놀즈수에 따라 벽면운동에너지 값이 대체적으로 일정하다.

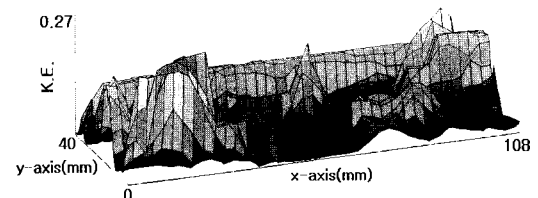
Fig.5 은 덕트의 무차원 축방향(x/D_h) 0~5위치인데 레이놀즈수가 적을수록 상하 대체적으로 운동에너지가 크고 덕트 중앙에



(a) $Re_{st} = 1560$



(b) $Re_{st} = 1720$

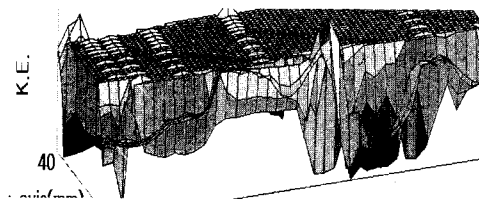


(c) $Re_{st} = 1910$

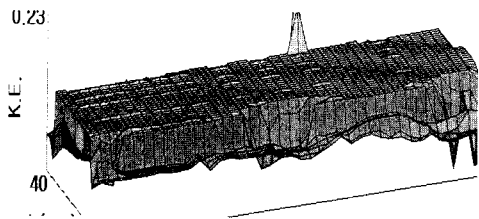
Fig. 5 Kinetic Energy of Developing Laminar Steady

Flow at the $x/D_h = 0 \sim 5$

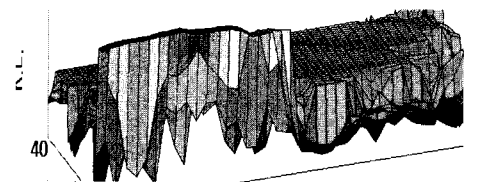
서는 운동에너지가 극히 적음을 알 수 있다. 이는 벽면점성의 영향에 의한 에너지 평형을 유지하기 위한 현상으로 사료된다. 레이놀즈수가 증가할수록 곡관의 원심력에 의한 영향을 많이 받아 상벽에서 운동에너지가 커짐을 알 수 있다. Fig.6과 7은 덕트의 무차원 축방향위치 50과 60으로 $x/D_h=50$ 인 경우 완전 발달된 유동영역으로 운동에너지가 대체적으로 레이놀즈수에 관계없이 균일하게 분포하고 있으며 $x/D_h=60$ 인 경우를 나타내었는데 레이놀즈수가 1560과 1910일 때는 국소와류가 발생하나 곧 소멸하여 안정적이며 1720일 때는 덕트의 상·하벽에서 에너지 평형을 위해 운동에너지의 불균일 분포가 나타나고 있다.



(a) $Re_{st} = 1560$

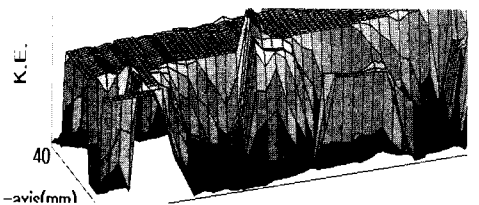


(b) $Re_{st} = 1720$

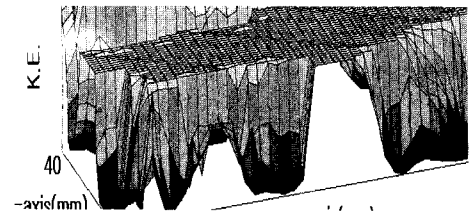


(c) $Re_{st} = 1910$

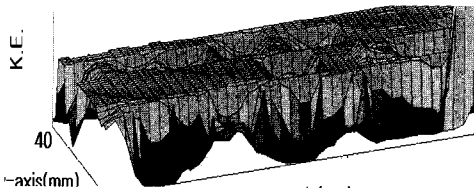
Fig. 6 Kinetic Energy of Developing Laminar Steady Flow at the $x/D_h = 50$



(a) $Re_{st} = 1560$



(b) $Re_{st} = 1720$



(c) $Re_{st} = 1910$

Fig. 7 Kinetic Energy of Developing Laminar Steady Flow at the $x/D_h = 60$

4. 결론

정사각단면 180°곡관덕트에 연결된 출구영역인 직관덕트에서 층류정상유동에 대한 운동에너지 및 입구길이 등의 유동특성에 대한 실험적인 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 유동이 충분히 발달된 지점에서 층류정상유동에서 천이 정상유동으로 변화하는 임계레이놀즈수는 1910정도이며 무차원 축방향 위치 50지점부터 유동이 안정화됨을 알 수 있고 하류로 흐를수록 흡입송풍기의 영향을 받아 덕트의 상하벽 근처에서 국소와류가 발생하였다.
- [2] 레이놀즈수가 증가할수록 최대운동에너지 값은 0.19에서 0.27로 증가하고, 곡관의 원심력에 의한 영향을 많이 받아 상벽에서 운동에너지가 커짐을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Estice, J, "Flow of Water Curved Pipes", Proc. R. Soc, Ser A. 84-568,(1910) pp. 107-118,
- [2] Dean, W. R. : "The Stream-line Motion of Fluid in a Curved Pipe." Phil Mag. S. 7, Vol.5, No. 30: (1928.) pp. 673-695.
- [3] Sumida, M, et al. : " Oscillatory Flow in Curved pipes of Rectangular Cross-Section. (2nd Report, Effect of Aspect Ratio of a pipe)", Journal of JSME(B), Vol.52 (1989): pp 2881-2887
- [4] 이행남, 박길문, 이덕구, "PIV기법을 이용한 분기사각덕트내의 유동특성에 관한 실험적 연구" 한국박용기관학회 논문집, 25권 6호(2001).
- [5] Son.H.C. : "A Study on the Flow Characteristics of Developing Turbulent Steady, Turbulent Oscillatory and Turbulent Pulsating Flows in the entrance Region of a Curved Duct." Ph.D Thesis. Chosun Univ. (2000).