

수평원통 관에서 선회유동의 공기동 발생에 관한 실험적 연구

장 태 현†

(원고접수일 : 2004년 2월 2일, 심사완료일 : 2004년 7월 1일)

An Experimental Study on the Generation of Air-core with Swirl Flow in a Horizontal Circular Tube

Tae-Hyun Chang†

Abstract : An experimental investigation was performed to study on the generation of air bubble and air core with swirling flow in a horizontal circular tube. To determine some characteristics of the flow, 2D PIV technique is employed for velocity measurement in water. The experimental rig is manufactured from an acryl tube. The test tube diameter of 80mm, and a length of 3000mm. The used algorithm is the gray level cross-correlation method(Kimura et al. 1986). An Ar-ion laser is used and the light from the laser(500mW) passes through a probe to make two-dimensional light sheet. In order to make coded images of the tracer particles on one frame, an AOM(Acoustic-Optical Modulator) is used.

The maximum axial velocities showed near the test tube wall at $y/D = 0.1$ and $y/D = 0.9$ along the test tube. The higher Reynolds number increase, the lower axial velocities are showed in the center of the test tube.

The air bubbles are generated from $Re = 10,000$ and developed into air core from the recirculating water pump rpm equal 30Hz. The pressure and temperature are measured across the test tube at $X/D=3.33$.

Key words : Swirl flow, Swirl intensity, Air core, Particle Image Velocimetry

Nomenclature

A : Cross-sectional area of the test tube.
 D : The diameter of the test tube.
 L : The length of the test tube.
 \dot{m} : Mass flow rate.

ΔP : Pressure drop.

r : Local radius

R : Radius of the test tube

Re : Reynolds number.

U : Local axial velocity.

\bar{U} : Mean axial velocity.

† 책임저자(경남대학교 기계자동차공학부), E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr, Tel : 055-249-2613

v : Radial velocity.
 X : Axial length.
 X/D : Non-dimensional length.
 y : Radial distance from the tube wall.
 τ : Shear stress.

1. 서 론

선회유동은 접선방향속도가 관벽에 작용하여 관마찰이 증가하고 열전달계수가 증가하는 관계로 기술적으로나 학술적으로 아주 중요하기 때문에 지난 50여년동안 이 유동에 대하여 많은 관심과 연구가 수행되어 왔다. 선회유동에 대한 초기 연구로는 Nuttall¹⁾은 $Re = 30,000 \sim 40,000$ 에서 축방향속도가 역류됨을 관찰하였고, Talbot (1954)²⁾는 층류선회유동에서 선회방정식을 유도하였다.

Binne 등³⁾ 과 Robert⁴⁾는 공기와 물에 색소를 주입하여 테스트 튜브 중앙부에서 축방향속도가 역류됨을 관찰하였다. 특히 Binne 등³⁾은 깔때기 (funnel) 형 투명한 수직의 테스트 튜브 내에서 물이 흘러내릴 때 관중심부에 공기동 (air core)이 발생함을 관찰하고 축방향속도가 역류됨을 발표하였다.

Nissan 등⁵⁾은 2인치의 수직관내에서 $Re = 5000 \sim 25,000$ 에서 물의 선회유동과 시험관 중심부에서 Reynolds 수가 증가함에 따라 기포층 (stationary bubble)이 증가함을 관찰하였다.

공기를 유체로 하는 경우는 공기동의 발생에 관한 연구는 드물었다. Hay 등⁶⁾은 수평원통관에서 공기를 유체로 할 경우 재순환 영역의 크기가 $0.4R$ 임을 발표하였고, 저자 등⁷⁾은 열선풍속계와 가시화 기법으로 재순환 영역이 $0.4R \sim 0.45R$ 임을 발표한바있다.

1960년대부터 열선풍속계를 선회유동의 측정에 사용하여, Rose⁸⁾, Robert⁹⁾, Wolf 등¹⁰⁾ 그리고 Medwell 등¹¹⁾은 공기와 물에서 축방향 속도와 접선 방향 속도를 측정하였다. 그러나 이와 같은 연구는 테스트 튜브내에서 한 영역의 점측정에 국한되었다. 근래에 와서 PIV (Particle Image

Velocimetry) 기법을 유체유동의 측정에 활용하였고, 저자 등(2001)¹²⁾은 수평원통관에서 2차원 PIV 기법을 이용하여 선회유동의 속도 및 난류강도등을 측정하였다.

Gupta 등¹³⁾은 강선회유동의 범위를 선회강도 (swirl intensity)를 0.6이상으로, 이 이하를 약 선회유동으로 규정하였다. 강 선회유동인 경우는 유동의 중심부에서 음의 축방향속도를 나타내고 이 현상이 증가하면 물에서는 공기동이 생성됨을 지금까지 발표된 결과이다.

Binne 등³⁾, Nissan 등⁵⁾의 연구가 공기동의 발생에 대한 최초의 연구인 것으로 생각된다. 그러나 그들은 공기동의 발생에서 물의 압력과 온도에 관해서는 연구하지 않았다.

본 연구에서는 수평원통관에서 2차원 PIV 기법 (Thinks's EYES)을 이용하여 Reynolds 수 $10,000 \sim 20,000$ 의 유동장에서 속도성분을 측정하고, 이 범위 이상 ($34\text{Hz} \sim 38\text{Hz}$)에서 공기방울 및 공기동의 생성과 그 발달 현상을 관찰하고, 공기동과 물의 압력과 온도를 계속하여 이들 관계를 연구하여 각종 열교환기의 설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장치이다. 테스트 튜브는 직경 $\phi 90\text{mm}$ 로 전체 길이는 $3,000\text{mm}$ 이고 두께 5mm 의 아크릴 관으로 제작하였다. PIV시스템을 사용할 경우 원관의 테스트 튜브 외면에서 발생할 수 있는 유체의 밀도 차로 인한 굴절에 의한 측정 오차를 줄이기 위하여 테스트 튜브 외면에 $300\text{mm} \times 600\text{mm} \times 200\text{mm}$ 의 수조를 만들었다.

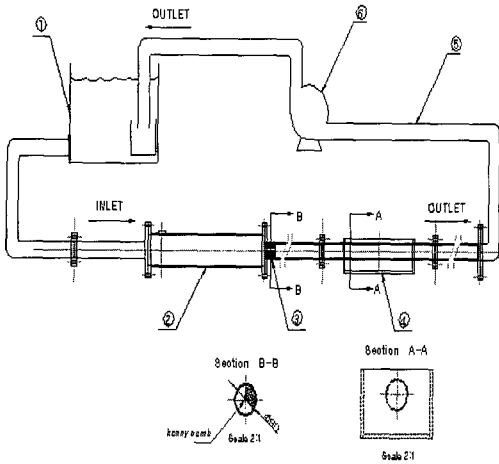
작업유체는 물을 사용하고, 물탱크로부터 물은 펌프의 흡입에 의하여 선회를 발생시키는 와류실, 테스트 튜브 그리고 3.75kW 물 펌프를 거쳐서 다시 물탱크로 돌아 갈수록 제작하였다. 테스트 튜브 내에서 Re 수를 조절하기 위하여 펌프의 회전수 조절기를 사용하였다. 선회유동을 발생시키기 위하여 와류실 및 선회발생기를 설치하고, 비선회인 경우는 균일 유속을 만들기 위하여 정류장

치(honey comb)를 테스트 튜브 입구에 설치하였다.

3. 실험방법

유동 형태의 가시화를 위해 사용된 입자는 물과 비슷한 나일론 12 입자를 사용했다. 나일론 12의 비중은 1.02 이고, 크기는 $120\mu\text{m}$ 정도이다. 유동장내의 정전기로 인한 산란입자의 부착을 방지하고, 입자와 물이 잘 섞일 수 있도록 하기 위해 소량의 계면활성제를 물에 첨가하였다.

실험조건은 Reynolds 수 10,000~20,000 그리고 물환수 펌프의 회전수(rpm)는 34Hz~38Hz의 난류유동에서 그 특성을 비교 고찰하였다. Reynolds 수를 변경하기 위하여 회전속도 조절기를 사용하여 유량을 조정한 후 테스트 영역에서 샘플링 데이터를 획득하여 대표속도를 구하였다. 광원은 공냉식 500mW Ar-ion 레이저를 사용했다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 LLSP(laser light sheet probe)를 사용했다. 또한 이 LLSP는 레이저 층의 두께를 약 1mm 정도 조절 할 수도 있다. 광케이블의 길이는 약 10m이다. 펄스화된 광원을 얻기 위해서 AOM (acoustic optical modulator)를 사용했다. 유동장의 데이트 획득을 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 Panasonic 사의 CCD (charge couple device) 카메라 WV3P310를 사용했다. 영상의 기록을 위해 디지털 레코더가 사용되었다. 그리고 획득된 이미지를 컴퓨터로 0에서 255단계의 gray 레벨로 전송하는 DT3155(640×480 pixel) 보드를 사용했다. 실험에 사용된 입자는 나일론 12($120\mu\text{m}$)이다. 작업유체는 구하기 쉬운 증유수를 사용했고, 사용된 비디오 방식의 영상기록장치에서 NTSC(national television system committee)방식의 TV주사에서 1초간의 영상은 30프레임의 연속화면으로 구성되어 있고, 1프레임은 1/60초의 시간간격을 갖는 짝수 필드와 홀수 필드의 화면으로 구성되어 있다. 필드 축적에 의해서 설정된 펄스간격 동안에 AOM에 의해서 단속된 조명으로 CCD카메라에 촬영된 영상은 1/60초의 시간간격을 갖는 홀수 필드와 짝수 필드에 각각 입력된다.



No	Apparatus	Material	No	Apparatus	Material
1	Water tank	Plastic	2	Swirl Chamber	Acrylic
3	Honey comb	Polycarbonate	4	Test tube & Water Box	Acrylic
5	Flexible hose	Rubber	6	Water Pump (220V > 3.7kW)	Stainless Steel

Fig. 1 Experimental apparatus.

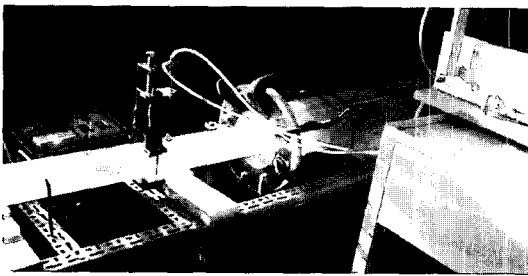


Fig. 2 Photograph of experimental apparatus.

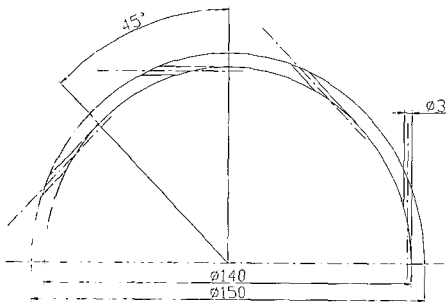


Fig. 3 Cross section views through the swirl generator.

각 레이놀즈 수와 계측영역에 따라 AOM 펄스 간격을 다르게 설정하였다. 입구 쪽은 간격이 짧고 출구 쪽으로 갈수록 길게 하였다. 또한 동일 레이놀즈 수에서도 관의 입구 쪽은 시간 간격을 더 짧게 했다. 그 이유는 관으로 유체가 유입되는 부분과 Reynolds 수가 클 경우 선회각이 크기 때문에 그만큼 레이저 층에 입자가 머무는 시간이 줄어들기 때문이다. 본 실험에서는 샘플링 데이터에 의해 구해진 속도를 이용하여 미소시간동안 입자가 이동한 거리를 평균 2 ~ 4 pixel 전후가 되도록 AOM 펄스간격을 조절했다.

본 연구에 사용된 알고리즘은 Kimura 등¹⁴⁾ 및 Utami 등¹⁵⁾이 사용한 계수 값이 최대인 좌표 값들을 벡터의 중점으로 두는 식(1)과 같은 개조치 상호상관기법을 사용하였다.

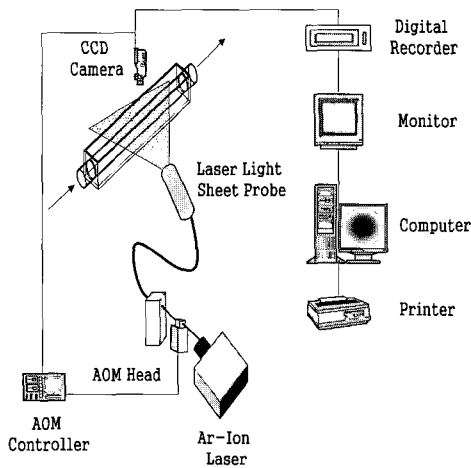


Fig. 4 Schematic arrangement of the PIV system.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$

식 (1)의 C_{fg} 는 상관계수를 f_i , g_i 는 상관영역 내의 각 픽셀(pixel)의 계조치를 의미하며 “-”는 평균을 뜻한다.

Fig. 4는 이 실험에 사용된 PIV 시스템의 구성도를 나타낸다.

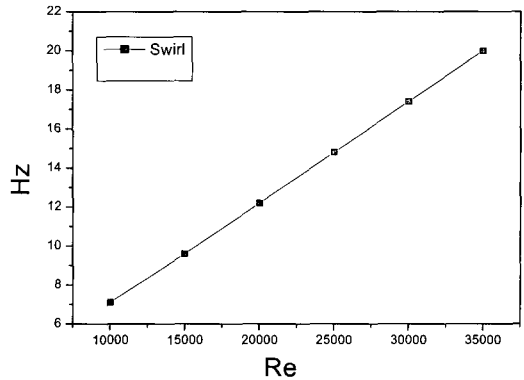


Fig. 5 Reynolds number and water pump motor Hz for swirling flow.

Fig. 5는 실험에 사용된 물순환 펌프의 rpm 제어시의 Hz 수와 Re수의 관계를 나타낸 그림이다. 본 실험에서는 속도분포 계측은 $Re = 10,000 \sim 20,000$ 에서 $X/D = 14.5 \sim 16.5$ 에서 계측하고, 공기방울과 공기동발생은 $X/D = 3.33$ 및 물순환 펌프의 rpm 30Hz ~ 38Hz에서 촬영하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 속도 벡터

Fig. 6 ~ Fig. 8는 $Re = 10,000 \sim 20,000$ 에서 속도벡터를 $X/D = 14.5 \sim 16.5$ 에서 나타내고, 테스트 튜브 중심부에 음의 속도벡터를 나타내고 있다. 강 선회유동의 결과로 관을 따라 음의 속도벡터가 계속되고 있다. 그러나 관벽근처의 $y/D = 0.3$ 과 0.7 에서는 속도벡터가 부의 값을

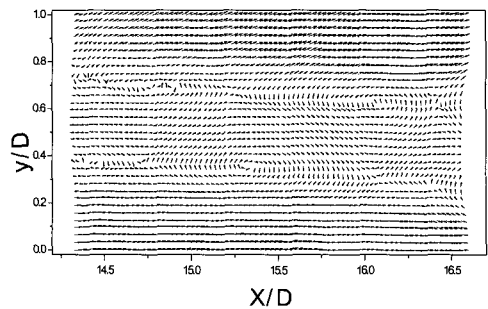


Fig. 6 Velocity vector distributions along the test tube for $Re=10,000$.

보여주고 있다. 이 것은 강한 접선방향속도의 영향으로 관벽근처에서 최대의 축방향속도를 나타내고 있다. 테스트 튜브 중심부의 음의 영역은 $y/D = 0.3 \sim 0.7$ 정도이나 테스트 튜브를 따라가면서 점차 선회가 소멸되어 그 범위가 좁아지는 것을 알 수 있다.

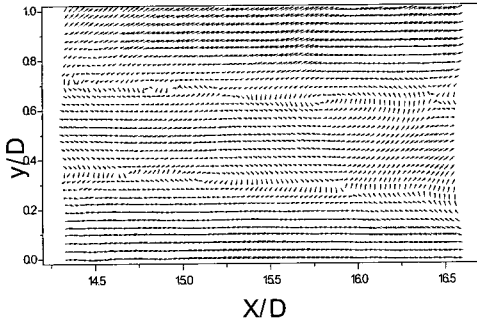


Fig. 7 Velocity vector distributions along the test tube for $Re=15,000$.

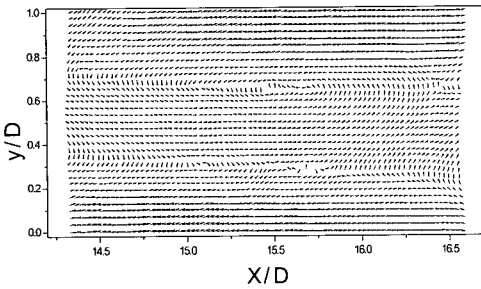


Fig. 8 Velocity vector distributions along the test tube for $Re=20,000$.

4.2 국소속도

Fig. 9 ~ Fig. 11은 $Re = 10,000 \sim 20,000$ 에서 축방향속도를 $X/D = 14.5 \sim 16.5$ 에서 측정 한 결과를 나타내고 있다. 선회발생기 뒷부분 ($X/D = 0 \sim 3.33$)에서 $Re = 10,000$ 에서부터 공기방울(air bubble)이 발생하여 속도를 측정할 수 없어 $X/D = 15$ (테스터 튜브 중심 부근)에서 측정하였다.

축방향속도 분포는 지금까지 발표된 연구결과와 같이 관벽근처, $y/D = 0.1, 0.9$ 에서 최고값을 나타내고 관중심에서 최소값을 나타내었다.

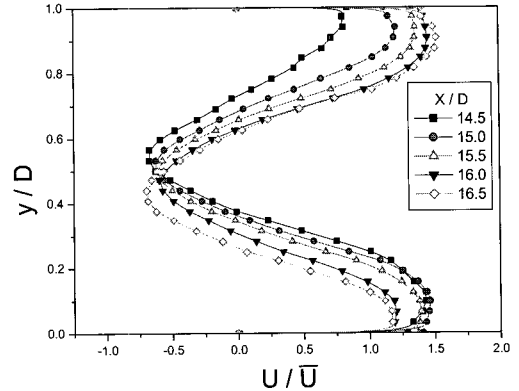


Fig. 9 Local velocity profile distribution for $Re=10,000$.

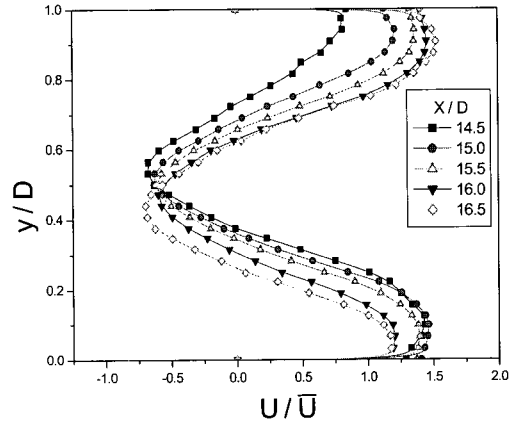


Fig. 10 Local velocity profile distribution for $Re=15,000$.

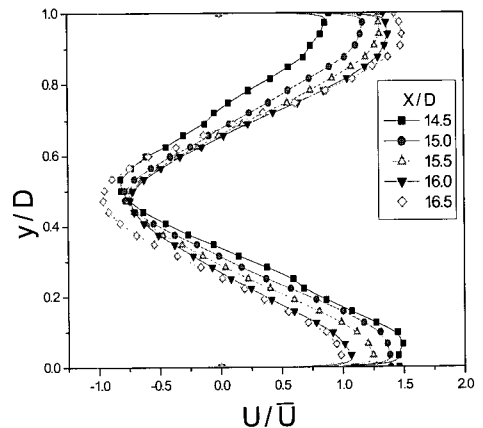


Fig. 11 Local velocity profile distribution for $Re=20,000$.

이 현상은 Re수가 증가할수록 관중심부근에서 최소 값이 증가하여 $Re = 20,000$ 에서 $U/\bar{U} = -0.75$ 의 값을 나타내었고, 유동은 전체적으로 2-cell 현상을 나타내었다. 이와 같은 현상은 지금까지 발표된 연구결과와 일치하고, 강 선회유동의 현상을 보여주는 결과이다.

4.3 공기동의 생성

Fig. 12 ~ Fig. 21은 테스트 튜브내에서 공기방울 및 공기동의 생성과 그 발달 과정을 촬영한 결과이다.



Fig. 12 Photograph of air bubble with swirl in the test tube for $Re = 10,000$ at $X/D = 3.33$.



Fig. 13 Photograph of air bubble with swirl in the test tube for $Re = 12,500$ at $X/D = 3.33$.

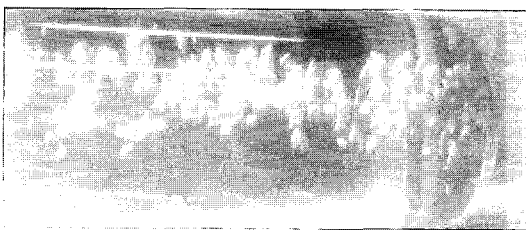


Fig. 14 Photograph of air bubble with swirl in the test tube at for $Re = 15,000$ at $X/D = 3.33$.

Fig. 12는 $Re = 10,000$ 에서 테스트 튜브 앞 ($X/D = 0$)부근에서 미세한 공기동이 발생하였

다. Fig. 13은 $Re = 15,000$ 에서 공기방울이 다소 증가하는 현상을 나타내고 있다.

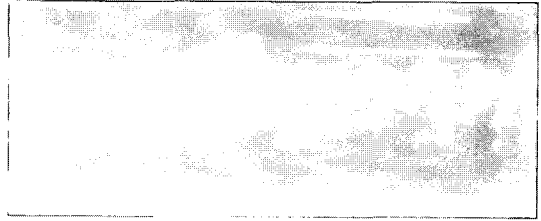


Fig. 15 Photograph of air bubble with swirl in the test tube for $Re = 20,000$.



Fig. 16 Photograph of air bubble with swirl in the test tube for $Re = 25,000$ at $X/D = 3.33$.

Fig. 14와 Fig. 15는 $Re = 15,000 \sim 20,000$ 에서 공기방울(air bubble)이 점차 증가하여 테스트 튜브의 하류쪽으로 이동하였다. 그러나 Fig. 16에서 $Re = 25,000$ 인 경우 공기방울은 선회발생기 쪽으로 이동하고 있다. 즉, 선회발생기 내의 선회강도가 증가하면서 부의 압력이 증가하여 공기방울이 이동하는 것으로 생각된다. 이 공기방울은 Fig. 17과 같이 공기방울이 결집하여 공기동으로 변하고 있다. 이와 같은 현상은 점차증가하여 Fig. 18~Fig. 21과 같이 공기동이 성장되어 다시 하류로 이동하였다. 또한, 이 현상은 원심펌프 내에서 발생하는 케비테이션(cavitation)과 유사한 현상을 보였다.

이와 같은 공기동의 생성은 Fig. 6 ~ Fig. 8의 음의 속도 벡터와 Fig. 9~Fig. 11에서 음의 축방향속도의 영향으로 관중심부에서 낮은 압력영역이 존재하므로 물속에 용존하고 있는 산소나 탄산가스 등이 저압영역에서 탈기되는 현상으로 생각된다. 이와 같은 공기동은 선회발생기 내에서 발생하기 시작하여 점차 발달하여 테스트 튜브를 따라 그 성장이 발달하고 있는 것을 볼 수 있다. 공기동 부근에

서 속도벡터를 촬영하였으나 계측장비의 성능관계로 입자를 추적 할 수가 없었다. 이 분야의 연구는 장비를 보완하여 계속 연구할 과제라고 생각된다.

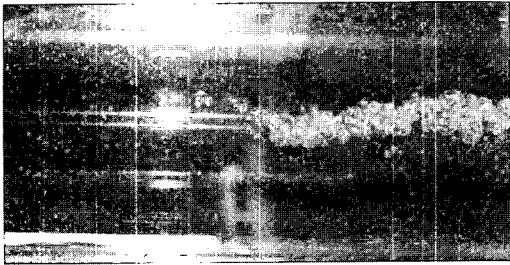


Fig. 17 Photograph showing the air bubbles with swirl in the test tube at 30 Hz.

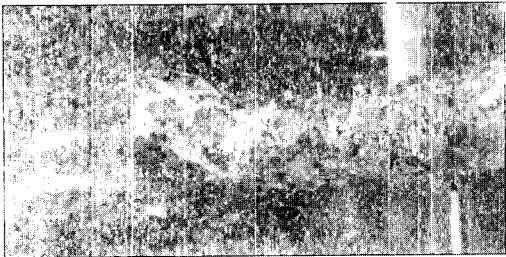


Fig. 18 Photograph showing the air core with swirl in the test tube at 32 Hz.

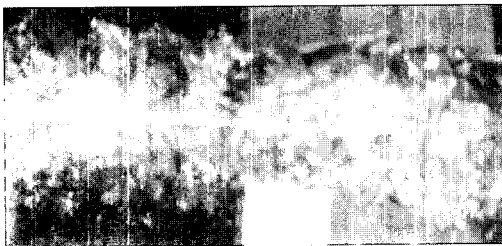


Fig. 19 Photograph showing the air core with swirl in the test tube at 34 Hz.



Fig. 20 Photograph showing the air core with swirl in the test tube at 36 Hz.



Fig. 21 Photograph showing the air core with swirl in the test tube at 38 Hz.

4.4 공기동의 압력과 온도분포

테스트 튜브 내에서 물과 공기동의 압력측정은 Fig. 2에서와 같이 피토투브와 경사마노미터 (airflow type 4)를 사용하였다.

Fig. 22는 순환수 펌프의 구동모터의 회전수가 34Hz~38Hz에서 물의 압력을 X/D=3.3에서 측정한 결과이다. 테스트 튜브 벽근처, r/R = 0.01에서 3kPa~3.3kPa 정도로 최대 값을 나타내다 r/R = 0.07~0.008 근처에까지 급격하게 감소하였다. 다시 r/R = 0.2~0.4에서 물의 압력은 0.25kPa~0.4kPa까지 증가하였다.

또한, 강선회유동인 경우 관벽근처(r/R=0.01)에서 강한 축방향 및 접선방향속도를 나타내는 결과로 생각되며, 이 경우 Fig. 9~Fig.11에서와 같이 축방향 속도는 양의 속도에서 음의 속도로 변하는 위치가 존재한다. 즉, r/R = 0.42 부근에서 공기동이 형성되는 공기동의 경계인 것으로 생각된다. r/R = 0.4 부터는 공기동의 내로 공기동의 압력은 "0" kPa 정도로 최저 압력을 나타내었다.

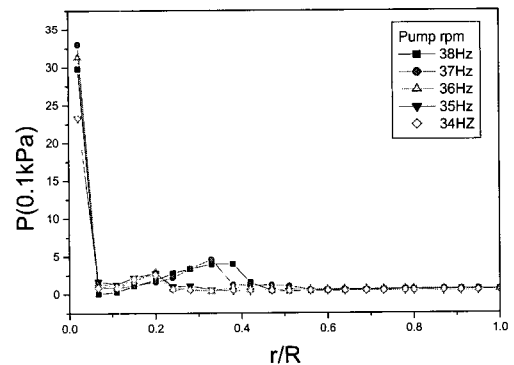


Fig. 22 Pressure distributions across the test tube for pump rpm from 34Hz to 38Hz at X/D = 3.33.

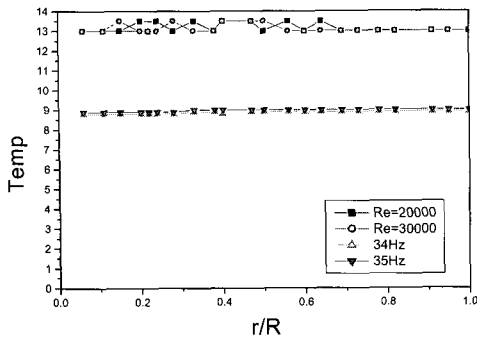


Fig. 23 Temperature distributions across the test tube for $Re = 20000, 30000$ and pump rpm equal 34Hz and 35Hz .

물과 공기동의 온도 계측용으로는 k 형 열전대와 Comark 사의 온도 기록계를 사용하였다.

Fig. 23은 $Re = 20,000, 30,000$ 그리고 펌프 구동모터의 rpm이 $34\text{Hz} \sim 35\text{Hz}$ 에서 물과 공기동의 온도를 측정된 결과이다. $Re = 20,000, 30,000$ 에서 물의 온도는 $13^\circ\text{C} \sim 13.3^\circ\text{C}$ 의 변화를 나타내고, 순환수 펌프 구동모터의 rpm이 $34\text{Hz} \sim 35\text{Hz}$ 에서는 $8.8^\circ\text{C} \sim 9.0^\circ\text{C}$ 의 온도분포를 나타내었다(측정 일자가 각각 다름). 즉, 테스트 튜브 내의 물의 온도와 공기동에서 온도의 차이는 $0.01^\circ\text{C} \sim 0.03^\circ\text{C}$ 정도의 실험오차 범위내에서 차이를 나타내었다. 즉, Fig. 22에서 공기동의 압력이 $0\text{kPa} \sim 0.1\text{kPa}$ 인 경우 온도는 각각 8.9°C 와 13.3°C 이다.

이 경우 압력이 $0\text{kPa} \sim 0.1\text{kPa}$ 이면 물의 절대 압력은 포준대기압인 101.325kPa 에 가깝다. 이 압력에 대한 포화온도는 100°C 이므로 위의 물과 공기동의 온도 $8.9^\circ\text{C}, 13.3^\circ\text{C}$ 와는 크게 차이가 나므로 이 현상은 캐비테이션(cavitation)은 아닌 것으로 생각된다.

결 론

PIV기법을 이용하여 수평원형관내의 선회유동의 속도를 $Re = 10,000 \sim 20,000$ 에서 계측하고 물순환 펌프의 rpm이 $34\text{Hz} \sim 38\text{Hz}$ 범위에서 공기방울과 공기동을 촬영하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 축방향속도 분포는 테스트 튜브 벽근처, $y/D = 0.1, 0.9$ 에서 최고 값을 나타내고 테스트 튜브 중심에서 최소 값을 나타내었다. 이 현상은 Re 수가 증가 할 수록 관중심부근에서 최소 값이 증가하여 $Re = 20,000$ 에서 $U/\bar{U} = -0.75$ 의 값을 나타내었고, 유동은 전체적으로 2-cell 현상을 나타내었다.
2. $Re = 10,000 \sim 20,000$ 에서 공기방울(air bubble)이 나타나고 점차 증가하여 테스트 튜브 하류쪽으로 이동하였다. 물순환 펌프의 rpm이 30Hz 부터 공기방울이 결집하여 공기동(air core)으로 변하는 캐비테이션(cavitation)과 유사한 현상을 보였다.
3. 공기방울과 공기동의 발생은 테스트 튜브 중심부에서 강선회의 영향으로 낮은 압력영역이 존재하므로 물속에 용존하고 있는 산소나 탄산가스 등이 저압영역에서 탈기되는 현상으로 캐비테이션(cavitation)은 아닌 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 경남대학교 2004학년도 학술논문 게재 연구비 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

- [1] John B. Nuttall, "Axial Flow in a Vortex", Nature, Vol. 26, pp. 582-583, 1953.
- [2] Talbot L. "laminar Swirling Pipe", J. of Applied mechanics, ASME, Vol. 21, pp. 1 ~ 7, 1954.
- [3] Binne A. M. and Tear J. D., "Experimental Measurement of Flow Swirling Water Through a Pressure Nozzle and Open Trumpet", Proc. of the Royal Society, Vol. 235A, pp. 78 ~ 88, 1955.
- [4] Robert C. Chand, "Observations of Oscillatory Motion in Certain Swirl

- Flows" J. of Fluid Mech. Vol. 21, Part 1, pp. 111 ~ 127, 1965.
- [5] Alfred H. Nissan and V. P. Breson, "Swirling Flow in Cylinders", A. I. Ch. E. Journal Vol. 7, No. 4, pp. 543~547, 1961.
- [6] Hay, H. and West P. D., "Heat Transfer on Free Swirling Flow in a Pipe", J. of Heat Transfer, Vol. 97, pp. 411~416, 1975.
- [7] T-H Chang, "An Experimental Investigation of Swirl Angle in a Horizontal Round Tube by Flow Visualization", J. of the Korea Marine Engineers, Vol. 27, No. 7, pp. 897~886, 2003.
- [8] Rose, G. W., "A Swirling round turbulent jet-mean flow measurements", J. of Appl. Mech., Vol. 29, pp. 615 ~ 625, 1962.
- [9] Robert C. Chand, "Observations of Oscillatory Motion in Certain Swirl Flows" J. of Fluid Mech. Vol. 21, Part 1, pp. 111 ~ 127, 1965.
- [10] Wolf, L. Jr., Lavan, Z. and Fejer, A. A., "Measurement of the Decay of Swirl in Turbulent Flow" J. of AIAA, Vol. 7, No. 7, pp. 971 ~ 973, 1969.
- [11] Medwell, J. O., Chang T. H. and Kwon S. S., "A Study of Swirling Flow in a Cylindrical Tube", J. of SARE, Vol. 4, pp. 265 ~ 275, 1989.
- [12] Chang T. H. and Kim H. Y., "An Investigation of Swirling Flow in a Cylindrical Tube", KSME Int. J. Vo. 15, No. 12, pp. 1892~1899, 2001.
- [13] Gupta A. K., Lilley D. G. and Syred N., Swirl Flow, Tunbridge Wells, Kent & Cambridge, Mass, 1984.
- [14] Kimura I., Takamori T. and Inoue T., "Image Using Processing Instrumentation of Flow", *Flow Visualization*, Vol. 6, No. 22, pp. 105~108, 1986.
- [15] Utami, T., Blackwelder, R., 1991, "A Cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization", *Experiments in Fluids*, Vol.10, pp. 213~223 1991.

저 자 소 개



장태현 (張泰鉉)

1942년 2월생. 1969년 동아대학교 기계공학과 졸업. 1971년 동대학대학원 기계과 졸업(공학석사). 1991년 12월 University of Wales(Swansea, U.K.) 대학원 기계공학과 졸업(Ph.D), 2001년 5월 제6차 ASV'6(Asian Symposium on Visualization) 조직위원장 역임, 공조·냉동기계 기술사, 현재 경남대학교 기계자동화공학부 교수