

PIV를 이용한 분지관모델내 3차원 맥동유동의 가시화

성순경* · 조민태** · 노형운*** · 서상호***

Three-Dimensional Flow Visualization of Pulsatile Flow in a Branching Model using the PIV System

Sun-Kyung Sung*, Min-Tae Cho**, Hyung-Woon Roh***, and Sang-Ho Suh***

Key Words: Three-Dimensional Flow(3차원유동), Flow Visualization(유동가시화), Pulsatile Flow(맥동유동), Branch Model(분지관 모델), Particle Imaging Velocimetry(입자영상유속계, PIV), Numerical Analysis(수치해석)

Abstract

The objective of the present study is to visualize the pulsatile flow fields by using three-dimensional computer simulation and the PIV system. A closed flow loop system was built for the steady and unsteady experiments. The Harvard pulsatile pump was used to generate the pulsatile pressure and velocity waveforms. Conifer powder as the tracing particles was added to water to visualize the flow field. Two consecutive particle images were captured by a CCD camera for the image processing at several cross section. The range validation and the area interpolation methods were used to obtain the final velocity vectors with high accuracy. The finite volume predictions were used to analyze three-dimensional flow patterns in the bifurcation model. The results of the PIV experiment and the computer simulation are in good agreement and the results show the recirculation zones and formation of the paired secondary flow distal to the apex of the bifurcated model. The results also show that the branch flow is pushed strongly to the inner wall due to the inertial force effect and helical motions are generated as the flow proceeds toward the outer wall.

1. 서론

인체에서 혈액을 이송하는데 사용되는 혈관이 나 산업용유체를 이송하는 배관은 직관만을 사용할 수 없고 반드시 곡관, 이형관 및 분지관을 사용하여야 한다. 또한, 혈관이나 산업용배관에서의 유동현상은 심장이나 펌프에 의해서 주기적인 맥

동유동을 나타내기도 한다. 분지관이나 곡관을 이루는 부분에서 종종 혈액유동이 원활하지 못하거나, 유체가 원활하게 흐르지 못하는 막힘 현상이 일어난다. 이런 막힘 현상을 인체혈관유동에서는 동맥경화증(acherosclerosis)라하고, 산업용 배관에서는 스케일(scale)이라 하는데 이런 현상의 원인은 복잡한 3차원 유동현상 때문에 발생하는 결과로 알려져 있다. 특히, 인체혈관에서 발생하는 동맥경화증의 원인은 여러 가지 가설이 있지만, 최근 타당성 있게 인정되는 가설은 분지관이나 곡관부분에서 나타나는 헬리컬유동이나 박리현상으로 인한 최대와 최소전단응력이 반복으로

* 경원전문대 건축설비과
 ** 숭실대학교 대학원 기계공학과
 *** 숭실대학교 기계공학과

작용하여(반복하중 및 피로하중) 발생된다는 것이다. 이러한 유동을 정확히 파악하기 위하여 분지관내 맥동유동 현상을 3차원으로 연구하여야 한다. 대부분의 연구를 살펴보면 3차원적인 연구는 수치해석결과로 많이 발표되고 있으나, 여러 가지 제약으로 인하여 실험적인 연구는 별로 발표된 바 없다. 맥동유동현상에 관한 연구는 실제 유동현상을 이해하는데 중요하지만 실험을 수행하는데 많은 제약이 따르기 때문에 극히 제한된 연구결과들만 발표되어 있다^(1,2). 따라서, 본 연구에서 분지관내 맥동유동을 3차원으로 여러 단면을 촬영하여 이에 대한 유동현상을 파악하고 이를 컴퓨터시뮬레이션결과와 비교·검토하였다.

2. PIV 실험

분지관내 맥동유동특성을 파악하기 위한 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 유동 순환장치와 PIV장치로 구성되어 있다. 아크릴 각관은 Fig. 2와 같이 두께 5mm의 투명 아크릴판으로 가공하였고 상류주관은 20×20 mm인 정사각형 단면이며 하류분기관의 분기각은 60° 이고, 분기관의 단면은 상류주관과 동일하게 20×20

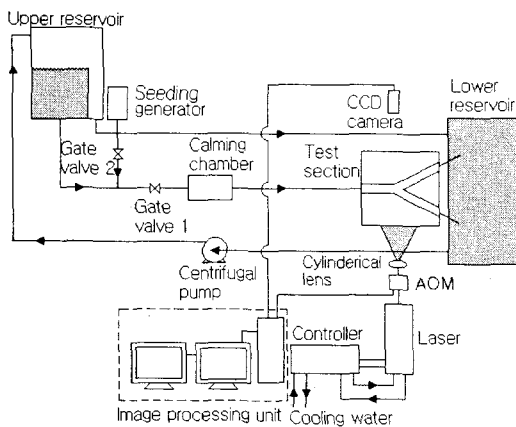


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup with the PIV system

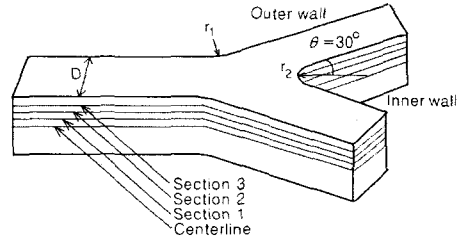


Fig. 2 Geometric configuration of the branching model

mm인 정사각형의 단면이다. 주관과 두 분기관의 단면 크기는 동일하며 곡률반경은 $r_1=2.35$ mm와, $r_2=4$ mm로 제작하였다. 그리고 3차원유동현상을 파악하기 위하여 Fig. 2에서 보는 것과 같이 중심선로부터 2 mm 간격으로 여러 단면을 나누어 측정하였다.

맥동유동에서 가시화영상을 획득하기 위한 광원으로는 출력 5W의 아르곤-이온 레이저를 사용하였다. 출력 5W의 아르곤-이온 레이저로부터 투사되는 점광원의 확산을 방지하고, 강도를 증가시키기 위하여 초점렌즈를 사용하였다. 평면경을 통한 점광원은 원통형 렌즈를 통과하면서 분기관의 중심축 단면을 가로지르는 시트빔을 만들 수 있다. 이 시트빔을 분기관 측면으로 조사해서 입자들의 산란광을 CCD카메라를 이용해서 촬영한다. 원심펌프를 이용해서 저수조에서 고수조로 작동유체를 공급하고, 맥동펌프(Harvard Apparatus 사, 1423 pulsatile pump)를 이용하여 맥동파형을 만들었다.

PIV를 이용한 유동가시화실험에서 영상을 얻기 위해 유동장에 투입되는 추종입자의 밀도는 작동 유체의 성질과 비슷한 입자를 사용하여야 한다. 따라서 유동을 잘 추종할 수 있는 입자로서 선행 연구⁽¹⁾의 결과에 따라 천연상태의 송화가루 (conifer powder)를 채택하였다. 속도벡터를 구하는데 미소 시간간격을 주고 이 시간간격 사이에서 두 장의 영상을 획득하여 영상을 분석하는 2-frame법을 이용하였다. 일반적으로 영상분석은

추종입자와 배경으로 이분화된 영상으로부터 두 개의 프레임간의 미소시간동안 각 입자들이 이동한 변위를 계산하여 속도를 계산하게 된다. 본 연구에서는 계조치상호상관법(grey level cross correlation method)을 이용하여 유동장내의 속도벡터를 구하였다.

3. 수치해석

사각 분기형 덕트내 맥동유동특성을 해석하기 위해 적용한 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 u_i , ρ , p , μ 는 각각 속도 벡터, 밀도, 압력, 그리고 절대점성계수이다. 수치해석에 사용된 분지관의 기하학적 형상은 실험에 사용된 분기형 덕트의 모형과 동일하게 하였다. 분지관 유동에 사용된 유체는 뉴턴유체인 물이며, 입구에서 완전히 발달된 유동조건을 부여하였다. 이때 입구 레이놀즈수는 400으로 실험의 입구조건과 동일하게 하였다. 운동량방정식의 대류항처리는 상류차분도식(Upwind differencing scheme)을 사용하였고, SIMPLE-C 알고리즘을 적용하여 압력수정에 관한 근사 이산화방정식을 압력과 속도의 상관관계를 고려한 연속방정식의 이산화방정식으로부터 구하여 운동량방정식의 압력항을 처리하였다. 수치해석에 사용된 프로그램은 범용코드인 CFX를 사용하였고 계산시간을 줄이기 위해 분지관 유동문제는 상류주관의 축대칭선 윗쪽 부분만 수치계산하였고, 수렴조건은 속도에 대한 상대오차가 1×10^{-7} 이 되도록 하였다. 수치해석에 사용된 분지관의 형상과 격자계를

Fig. 3에 나타내었다. 계산에 사용된 격자수는 $10 \times 10 \times 105$ 이다.

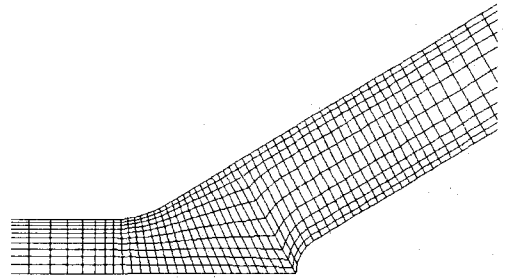


Fig. 3 Mesh of the three-dimensional for the branching duct model

4. 결과 및 검토

4.1 정상유동

분지관내 유동현상을 정확히 파악하기 위하여 Re=400일 때 분지관내 정상유동의 유동현상을 Fig. 4와 Fig. 5와 같이 먼저 PIV실험과 수치해석으로 고찰하였다.

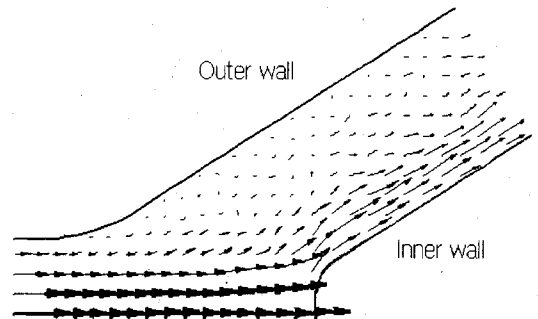


Fig. 4 Velocity vectors obtained by PIV system

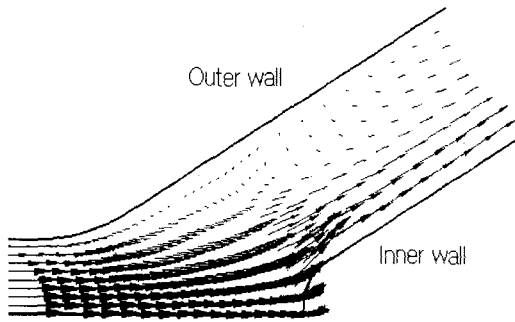
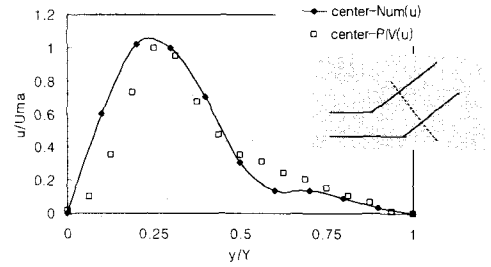


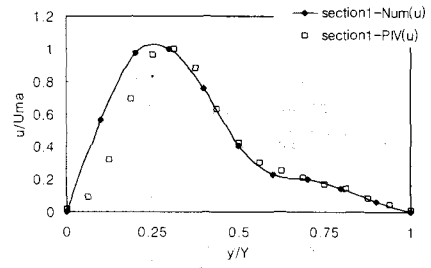
Fig. 5 Velocity vectors obtained from the results of numerical analysis

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 분지관인 대칭인 점을 고려해서 속도벡터는 축대칭선 윗쪽 부분만을 나타내었다. 입구에서 유입된 유동은 분지부를 지나면서 강한 관성력에 의해 내벽쪽으로 유동이 치우치고 있으며 외벽쪽에서는 재순환영역이 형성되고 있다. 재순환영역의 길이는 실험과 컴퓨터 시뮬레이션결과에서 각각 27.2 mm와 27.6 mm로 나타났고 상대오차는 1.5%미만이다. 실험에서 구한 결과는 분지부 외벽쪽 시작부위에서 속도벡터의 소실현상이 나타나는데 이는 재순환영역 형성의 시점에서 유동의 정체로 인해 야기되는 것으로 사료된다. 재순환영역 후방영역에서는 헬리컬 유동이 발생하여 속도벡터의 획득이 쉽지 않았다. 두 결과를 상호 비교하기 위하여 Fig. 6과 같이 분지부 지난 한 단면에서 PIV결과와 수치해석의 반경방향 속도분포를 무차원하여 비교하였다.

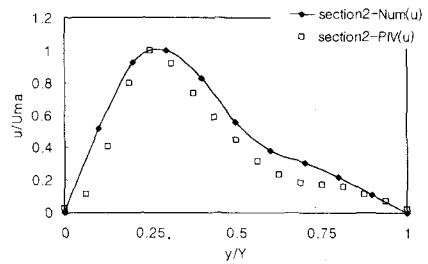
Fig. 6의 (a)는 분지관 모델의 중심인 경우이고 (b)와 (c)의 경우는 중심선에서 각각 2 mm씩 위 단면의 결과이다. Fig. 6 (a)에서 보는 것과 같이 중앙단면의 반경방향속도분포는 Fig. 4와 Fig. 5의 결과와 같이 내벽으로 강한 유동장을 형성하고 외벽에서는 재순환영역으로 인하여 발생하는 유동정체로 인하여 속도분포가 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 이런 경향은 중심부 위쪽



(a) centerline



(b) 1st section



(c) 2nd section

Fig. 6 Comparison of the velocity profiles obtained by PIV experiment and computer simulation

에서도 같은 경향을 보이고 있지만, 내벽에서 치우치는 크기도 작아질 뿐만 아니라 전체적으로 평탄해지려는 경향을 나타내고 있다. Fig. 6에서도 보듯이 전체적으로 PIV의 실험결과 수치해석의 결과는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4.2 맥동유동

분지관내 맥동유동의 3차원유동특성을 파악하기 위하여 PIV 실험과 수치해석을 병행하여 수행하였다. PIV실험시 맥동유동을 형성시켜 주기 위

하여 분지관 입구에서 맥동펌프로 가하여 주었다. 기존의 연구결과⁽²⁾로부터 분지관내 맥동유동 현상은 Fig. 7과 같이 이차유동과 헬리컬 유동 등과 같은 매우 복잡한 3차원유동을 나타낸다고 알려져 있다.

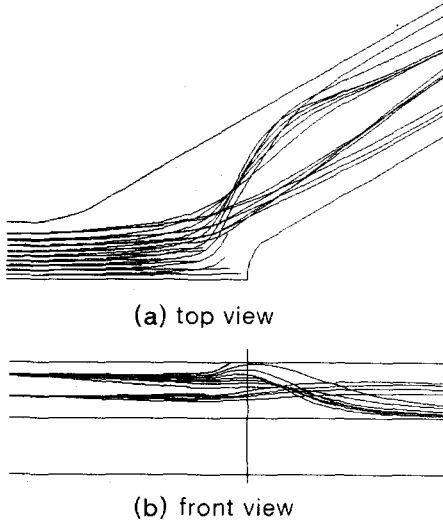


Fig. 7 Particle path along different planes of the branching duct

Fig. 7의 결과는 정상상태의 결과이기 때문에 맥동유동의 3차원 유동현상을 파악하기에는 무리가 있어 Fig. 8과 같이 분지관내 맥동유동에 대하여 입자추적 결과를 각 시간대별로 나타내었다. Fig. 8에서 나타낸 그림사이의 시간간격은 1/30이고 본 연구에서 사용된 주기는 1.1초이다. PIV실험이나 수치해석시 사용된 맥동파형은 가장 정형화된 Sine파 형태이기 때문에 Fig. 8에서 (a)와 (b)는 각각 가속시와 최대속도일때의 입자추적에 대한 결과이고, (c)와 (d)인 경우는 감속이 되어 (f)까지 감소하고 (g)에서 이차 가속이 발생하게 되고 34번째 영상부터 새롭게 한 주기가 시작이 된다.

Fig. 8 (a)와 (b)와 같이 가속시의 유동은 분지부의 영향에 상관없이 관성력에 의하여 유동장 전체에 걸쳐 평탄하게 진행된다. 그러나, 감속시에는(Fig. 8 (d), (e), (f)) 분지부 외벽쪽에 재순환

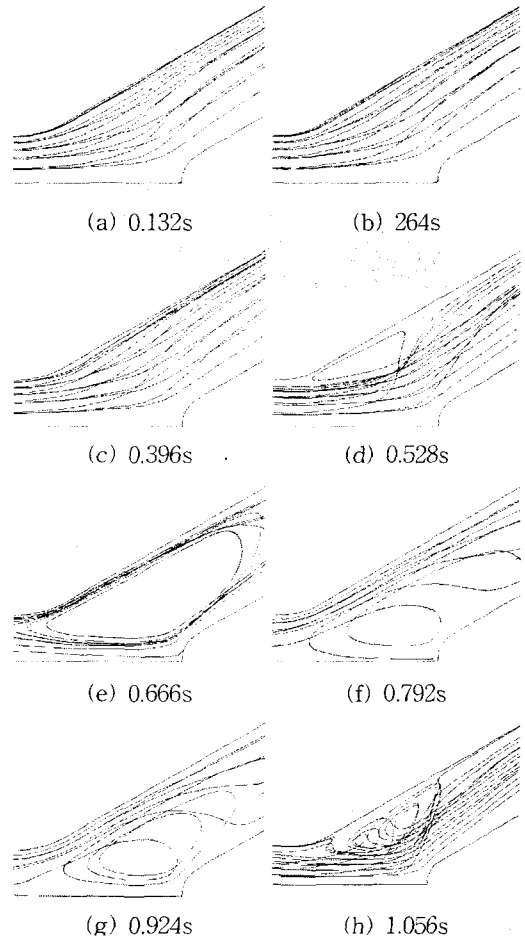
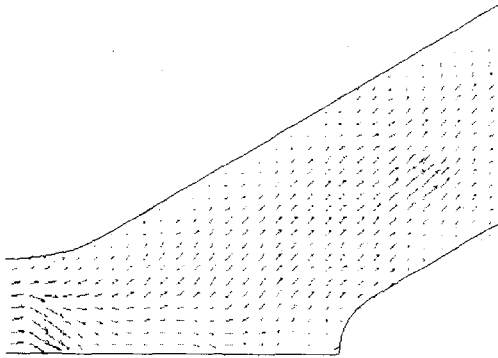


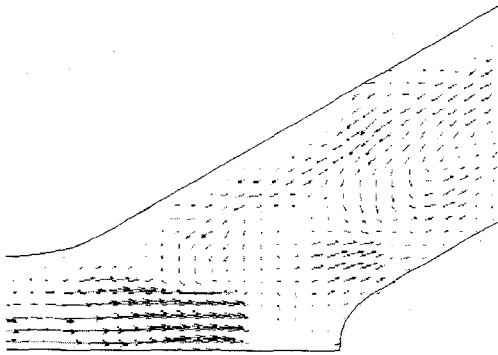
Fig. 8 Pictures showing particle path during the cycle of pulsatile flow

영역이 형성됨을 알 수 있고, 재순환영역의 크기는 맥동파형의 변화에 따라 변하고 있음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 8과 같이 입자추적은 3차원유동을 원활히 나타낼 수 있지만, PIV실험에서는 단면을 2차원적으로 촬영하여 단면 속도벡터를 획득하기 때문에 3차원 현상을 판단하기에는 난해하다. 따라서, Fig. 9와 같이 가속시와 감속시 특정시간에 PIV로 측정된 속도벡터로 판단할 수밖에 없다. Fig. 9에는 Fig. 8에서 (a), (d)와 (f)의 시간일 때의 속도벡터를 나타낸 것이다.

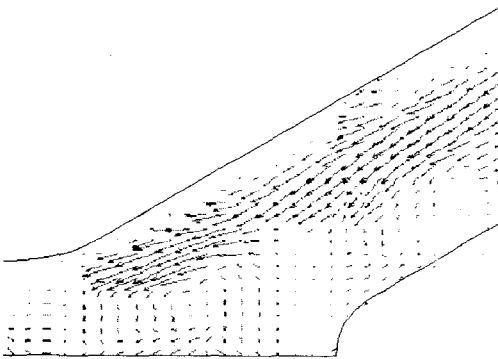
Fig. 9에서 보듯이 Fig. 8와 같은 가속시에는 전



(a) 0.132 s



(b) 0.528 s



(c) 0.792s vector

Fig. 9 Velocity maps during the cycle of pulsatile flow

체적으로 관성력에 의하여 맥동유동이 분지부 하류쪽으로 밀려나가는 현상을 나타내었으며 감속시일 경우에는 분지관 외벽쪽에서 유동을 방해하려는 점성력이 크게 작용하여 유동을 정체시키나 분지부의 영향으로 인하여 Fig. 8과 같이 큰 재순환영역이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이러

한 현상은 인체혈관의 경동맥내 만곡부에서도 나타나고 있는 현상⁽¹⁾으로 매우 복잡한 이차유동과 헬리컬유동이 발생됨을 알 수 있다. 본 실험에서 레이저의 시트빔을 평면을 주사하여 나타내었지만, 분지부 영역에서 발생하는 3차원유동을 정확히 해석하려면 y방향과 Z방향 단면에서 영상을 획득하여 3차원유동 해석이 되어야 한다.

5. 결론

분지관내 맥동유동은 가속시 관성력의 영향으로 인하여 분지관의 내벽쪽으로 치우치고, 감속시 외벽쪽에 재순환 영역이 발생하는 특성을 나타낸다. 맥동유동의 감속시에는 분지부에서 강한 헬리컬 형태의 유동을 나타내며 외벽쪽으로 밀려올라가는 복잡한 현상을 나타낸다. 또한 PIV를 이용한 유동장의 가시화 결과와 유한체적법을 이용한 수치 해석의 결과가 서로 일치하고 있음을 알 수 있다. PIV실험으로 분지관내 3차원 맥동유동현상을 파악하기 위하여는 다른 촬영기술을 도입할 필요가 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-304000-009-2)지원으로 수행되었음

참고문헌

- (1) Roh, H. W., 1999, Pulsatile Flow Analysis of Non-Newtonian Fluids in the Circular and Bifurcated Tubes, Soongsil Univ., Ph. D. Thesis.
- (2) 서상호, 최을, 노형운, 도덕희, 1998, "입자 영상유속계와 컴퓨터시뮬레이션을 이용한 분지관내 유동해석", 대한기계학회 논문집 B권, 제23권, 제 1호, pp. 123-130.