

입자영상유속계를 이용한 분기관내 유동가시화

노형운·서상호·유상신*

충실대학교 기계공학과, *한국항공대학 기계설계학과
(1998년 8월 29일 접수, 1999년 1월 16일 채택)

Flow Visualization in the Branching Duct by Using Particle Imaging Velocimetry

H.W. Roh, S.H. Suh, S.S. Yoo*

Dept. of Mech. Eng., Soongsil University

*Dept. of Mech. Eng. and Design, Hankuk Aviation University

(Received August 29, 1998, Accepted January 16, 1999)

요 약 : 본 연구의 목적은 PIV 시스템을 이용하여 분기관내 유동현상을 가시화하여 분기부 영역의 유동특성을 분석하는데 있다. PIV 시스템으로 유동장을 가시화하기 위해서 분기관 모델은 투명 아크릴판으로 제작하였고 작동유체와 추적입자는 각각 물과 송화가루를 사용하였다. 유동장에서 획득된 영상으로부터 속도벡터를 얻기 위해서 입자추적방법의 1-프레임 법과 2-프레임 법, 상호상관 PIV법인 2-프레임법을 사용하였다. PIV 시스템으로 측정된 실험결과의 신뢰성을 확보하기 위해서 표면구동 캐비티 유동의 속도분포를 4-프레임법으로 얻어진 기준 실험 데이터와 비교하였다. 분기관에서 뉴턴유체의 유동현상을 효과적으로 가시화하는데 필요한 상호상관 PIV방법의 2-프레임법을 적용하는 알고리즘을 개발하였고, sub-pixel과 면적보간을 사용하여 오벡터를 제거후 최종속도벡터를 얻었다. PIV를 이용한 분기관내 유동가시화 실험결과를 신뢰할 수 있는 수치해석 결과를 이용하여 검증한 결과 PIV 실험으로 얻어진 속도벡터는 수치해석의 결과와 잘 일치하였다. PIV 실험과 수치해석 결과로부터 분기관모델의 분기점 원위부에 재순환영역이 형성됨이 확인되었고 두 다른 방법을 이용한 재순환영역의 길이와 높이는 거의 동일하였다.

Abstract : The objective of this study is to analyse the flow field in the branching duct by visualizing the flow phenomena using the PIV system. A bifurcation model is fabricated with transparent acrylic resin to visualize the whole flow field with the PIV system. Water was used as the working fluid and the conifer powder as the tracer particles. The single-frame and two-frame methods of the PIV system and 2-frame of the grey level correlation method are applied to obtain the velocity vectors from the images captured in the flow filed. The velocity distributions in a lid-driven cavity flow are compared with the so-called standard experimental data, which was obtained from by 4-frame method in order to validate experimental results of the PIV measurements. The flow patterns of a Newtonian fluid in a branching duct were successfully visualized by using the PIV system and the sub-pixel and the area interpolation method were used to obtain the final velocity vectors. The velocity vectors obtained from the PIV system are in good agreement with the numerical results of the 3-dimensional branch flow. The results of numerical analyses and the PIV experiments for the three-dimensional flows in the branching duct show the recirculation zone distal to the branching point and the sizes of the recirculation length and height of the two different methods are in good agreement.

Key words : Branching Duct, Steady Flow, PIV System, Flow Visualization, Grey Level Correlation Method

서 론

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME96-B-05)와 충실대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음.
통신처자 : 노형운, (156-743) 서울시 동작구 상도동 1-1,
Tel. (02)820-0658, Fax. (02)821-6758

동맥경화는 서구사회에서 중요한 사망원인중 하나이며 국내에
서도 동맥경화로 인한 유병율이 급속히 증가하는 추세에 있다

[1]. 동맥경화증의 발생빈도가 높은 곳은 대체로 동맥의 분지부나 ostium 그리고 만곡 부위이며, 이 질환발생의 해부학적 특징은 이 부위의 혈관내부를 지나가는 혈액유동특성을 변화시켜 동맥경화성 죽종 침착을 타 부위보다 더 심하게 그리고 더 높은 빈도로 발현시키는 것으로 알려져 있다. 초기에 동맥경화증은 modified response-to-injury 가설에 따른 light density lipoprotein의 침착에 인해 생긴다는 단순한 등비례 개념으로 많이 설명하여 왔다. 그러나 최근에는 이러한 단순한 원인보다는 여러 복합적 요소로 발생된다고 인식되고 있다.

동맥혈관에서 동맥경화현상, 특히 심근경색(myocardial infarction)의 원인이 되는 관상동맥(coronary artery) 협착현상에 큰 의미를 가지는 혈류역학적 기전에 대해서는, 압력관련가설(pressure-related hypothesis), 고전단용력과의 연관설(high wall shear dependent hypothesis), 저전단용력과의 연관설(low wall shear dependent hypothesis), 난류와 관련한 가설(turbulence related hypothesis)과 같이 많은 가설이 있다. 최근에는 높은 전단용력에 의해 상처입은 내피세포는 낮은 전단용력에 의하여 협착이 강화(reinforcement)된다는 혼합가설들이 대두되고 있으나 아직 어느 것도 완전하게 동맥경화의 발생, 성장이나 파열의 기전을 설명하지 못하고 있다. 동맥경화증에 기인한 여러 가지 순환기계 질병의 생성, 진행 그리고 나아가 최종적으로 폐색과정의 변화를 이해하고 적절한 치료대책을 제시하기 위하여 혈관내의 혈류역학적 이해가 필요하다[2-5]. 분기관내 혈액유동에 관한 연구는 혈액의 유변학적 특성과 다양한 분기관의 기하학적 형상으로 인하여 실험을 수행하는데 많은 제약이 따르고 있다. 이러한 난관을 극복하기 위하여 혈액유동현상을 수치해석으로 시뮬레이션하고, 실험자료를 이용하여 시뮬레이션 결과를 검증하는 방향으로 많은 연구가 진행되고 있다. 수치시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해서는 혈액 또는 혈액대용유체를 이용한 분기관내 유동에 대한 실험자료가 필요한데, 아직 분기관내 유동에 관한 신뢰할 수 있는 실험자료는 발표된 바 없다. 따라서, 분기관내 유동에 대한 실험자료의 확보는 시급한 과제 중의 하나이다.

분기관내 유동장의 특성을 파악하기 위해서는 재순환영역의 형성, 2차유동 현상의 발생등에 관한 실험자료가 필요하므로 국소유동속도를 측정할 수 있는 실험장치가 필요하다. 유동장에서 국소 유동속도를 계측하는 장치로서 LDA(Laser Doppler Anemometer)와 열선유속계(Hot Wire Anemometer), 그리고 입자영상유속계(PIV : Particle Imaging Velocimetry)가 많이 이용되고 있다[6]. 특히, 입자영상유속계는 유동장(flow field)의 속도분포를 계측할 수 있고, 속도벡터의 재현성이 우수하며, 3차원, 비정상 유동장의 유동속도를 계측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 입자영상유속계를 이용한 유동가시화기법은 색채영상처리가 가능한 기술이며 최근에는 1000fps로 영상을 획득할 수 있는 고속 카메라와 실시간(30fps)으로 $4K \times 4K$ 픽셀까지의 영상을 획득할 수 있는 카메라의 개발로 인하여 PIV의 정도와 시·공간

해상도가 향상되어 입자영상유속계의 응용범위가 더욱 확대되고 있다.

입자영상유속계(PIV)를 이용한 분기관내 유동가시화 실험의 궁극적인 목표는 혈관을 모사할 수 있는 분기관에 비뉴턴유체인 혈액대용유체를 사용하여 유동을 가시화하는데 있다. 이 목표를 향한 첫 단계로서 본 연구에서는 뉴턴유체인 물의 분기관내 유동을 가시화하였다. 본 연구에서는 입자영상유속계를 이용하여 분기관내 유동장의 속도벡터를 가시화하고 정량적으로 계측하였으며 분기관내 유동 실험결과는 신뢰할 수 있는 수치해석방법으로 구한 결과를 이용하여 검증하였다.

관련이론

입자영상유속계를 이용한 유동가시화의 기본원리는 유동장에 투입된 입자들의 운동을 추적하여 이들 입자들의 순시적인 위치를 미소시간 간격을 두고 영상입력하여 경계탐색 및 영상이분화 작업 등을 수행한 후에 각각의 입자의 변위를 계산하여 전체 유동장내의 속도벡터를 구하는 것이다.

영상처리를 이용한 유동가시화기법을 추종입자에 따라 분류하면 CIV(Concentration Imaging Velocimetry)와 PTV(Particle Tracking Velocimetry)로 구분할 수 있다[6-9].

PTV는 연속된 영상으로부터 각 입자들의 운동을 추적하고, 입자들의 도심을 구한 뒤 그 입자들의 미소시간동안의 변위로부터 속도를 계산하는 방법으로 입자의 영상밀도가 비교적 낮은 경우에 적용되므로 흔히 저영상밀도(low image density) 입자 영상유속계라고 불리운다. 추종입자를 영상의 밝기농도로서 식별하며 속도를 계산하는 CIV에서 입자분포 상관 PIV는 순간입자영상을 개별 화상저장매체에 저장하고 상관영역내 계조치 분포사이의 상호상관함수를 직접 혹은 FFT 연산을 이용하여 계산한 후 가장 큰 상호상관계수를 갖는 위치를 펄스광 사이의 시간 간격 Δt 로 나누어 줌으로써 상관영역내 평균속도벡터를 구하는 방법이다. 일반적으로 입자분포 상관 PIV는 입자밀도가 매우 크므로 고영상밀도(high image density) 입자영상유속계로 불리운다.

일반적으로 PIV실험에서 입자들의 순시적인 위치를 미소시간 간격을 두고 영상을 획득하기 위해서는 시간을 조절하여야만 한다. 이러한 방법에는 셔터타임(shutter time)을 조절하기 위한 방법으로 고속도 카메라를 이용하는 방법과 광단속을 이용하는 방법이 있다. 광단속을 이용하는 방법은 음향광의 회절원리를 이용한 AOM(Acoustic Optic Modulator)를 이용한 방법과 회전판상에 일정한 간격을 가지는 Mechanical Chopper을 이용하는 방법이 있는데 본 실험은 Mechanical Chopper로 레이저의 연속광을 펄스코딩하여 비디오의 동기신호와 연계시키는 방법을 사용하였다.

레이저의 연속광을 펄스코딩하여 획득된 두 장의 영상으로부터 이동된 입자의 종점을 찾는 방법은 식 (1)을 이용하여 최대

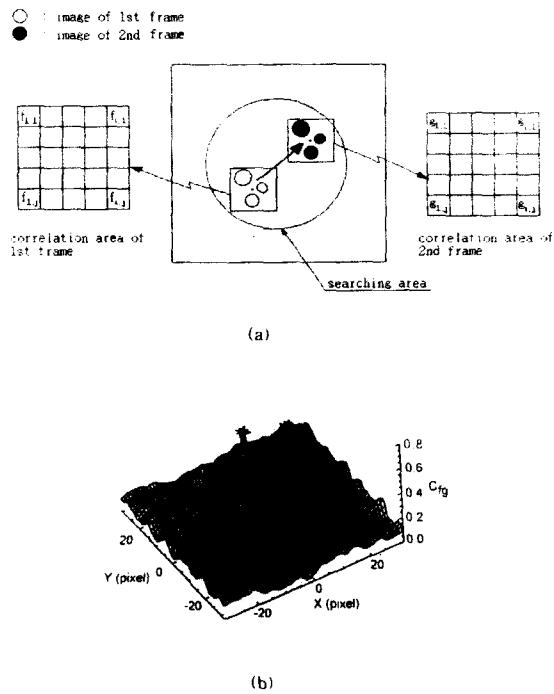


그림 1. 계조치 상호상관 PIV의 원리 : (a) 상호상관계수의 개념, (b) 최대상호상관치를 나타내는 위치점

Fig. 1. Principle of grey level cross correlation : (a) schematic of cross correlation coefficients, (b) location with maximum cross correlation coefficient

상호상관치(\$C_{fg}\$)를 나타내는 위치를 찾는 것이다. Fig. 1은 계조치 상호상관계수의 개념을 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 1(a)에서 \$f(i, j)\$의 원점은 제 1-프레임상의 속도벡터를 구하기 위한 벡터의 시점을 나타내고, 이 점과 제 2-프레임상에서 탐색영역내의 모든 픽셀에서의 상관영역 \$g(i, j)\$에 대한 최대상관계수를 식 (1)에 의해서 계산한다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [f(i, j) - \bar{f}] [g(i, j) - \bar{g}]}{\left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [f(i, j) - \bar{f}]^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [g(i, j) - \bar{g}]^2 \right\}} \quad (1)$$

윗 식에서, 상관영역내 \$\bar{f}\$ 와 \$\bar{g}\$ 는 각각 제 1-프레임과 제 2-프레임의 평균 계조값을 의미하며 \$f\$ 와 \$g\$는 각각 제 1-프레임과 제 2-프레임의 계조값을 의미한다. 그리고 \$i\$ 와 \$j\$의 크기는 각각 제 1-프레임과 제 2-프레임의 상관영역을 나타낸다. 다음으로 이 값들 중에서 Fig. 1(b)와 같이 상관계수의 최대치의 위치를 찾으면 이점이 바로 속도벡터의 종점이 되는 것이다. 이때 상관영역(correlation area)은 제 1-과 제 2-프레임에서 각 픽셀의 계조치를 비교하기 위한 탐색영역내 동일한 크기의 면적을 의미한다. 즉, Fig. 1(a)의 x와 y축에 나타낸 픽셀값을 의미한

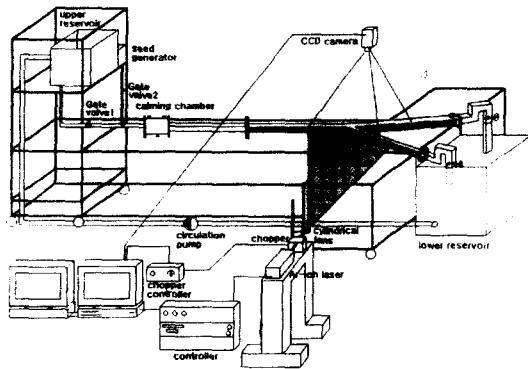


그림 2. PIV 시스템을 이용한 유동실험장치의 개략도

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental flow loop with the PIV system

다. 또한, 탐색영역(searching area)은 제 1-프레임상의 시작점에서 제 2-프레임상의 최종점의 허용할 수 있는 최대거리를 의미한다. 만약, 탐색영역을 너무 크게 설정하면, 계산시간이 오래 걸리며, 오류벡터가 발생될 수 있다.

실험장치 및 실험방법

분기관내 유동특성을 가시화하기 위한 실험장치는 시험부, 영상 입·출력장치, 영상처리장치 및 주변기기, 그리고 광학장치로 구성되어 있으며 개략도는 Fig. 2와 같고 유동가시화에 관련된 실험장치의 제원은 Table 1과 같다. 저수조에서 고수조로 원심펌프를 이용해서 물을 공급하고 고수조에 격판을 설치해서 고수조에서 일정한 수위를 넘는 유량은 저수조로 순환되도록 하였다. 분기관내의 입구 유량은 시험부 상류에 있는 게이트밸브를 이용해서 조절하였다. 유체가 시험부로 유입되기 전에 유동이 안정되도록 하기 위해서 밸브하류에 정체실을 설치하였고, 유동이 분기부에 도달하기 전에 완전히 발달된 유동상태가 되도록 하기 위해서 정체실로부터 분기부까지의 길이를 수력지름의 65배가 되도록 하였다.

분기관 모델은 Fig. 3과 같이 두께 0.5 mm의 투명 아크릴판을 사용하여 가로와 세로가 40 mm × 40 mm인 정사각형 단면을 갖도록 제작하였고 상류주관과 하류분기관의 분기각은 60°이다.

유동가시화를 위하여 분기관 모델에 투입된 입자는 각각 밀도가 920~940 kg/m³이고, 평균지름이 50 μm인 송화가루(conifer powder)를 사용하였다. 분기관유동 가시화를 위하여 사용된 송화가루는 정지된 상태에서는 물보다 밀도가 작아서 물위에 뜨지만, 물속에서는 균일하게 분포되며, 알루미늄분말과 같은 입자들과 달리 실험시 침전(settling)이 발생하지 않고 추종성(traceability)이 상당히 우수한 입자로 발표되어 있다[10].

아르곤-이온 레이저로부터 투사되는 점광원의 확산을 방지하

표 1. PIV 실험장치의 사양

Table 1. Specification of experimental equipments

Equipment	Specification	Details
Light source	5 W Argon-Ion laser	Beam diameter : 1.6 mm Beam divergence : 0.5 mRAD Power stability : $\pm 0.5\%$ Optical noise : 0.2 RMS Power(208VAC) : 50A, 3 phase
Light sheet	Beam steering device	Angular sensitivity : 5arc-sec Mirror reflectivity : 99.5 %
Optical system	Cylindrical lens assembly	Slit width : 1~5 mm Light intensity : 4 mW/mm Beam angle : 50°
Image input device	CCD camera	Sensing area : $6.55 \times 4.87 \text{ mm}^2$ Active pixel : $682 \times 492 \text{ pixels}$ Minimum sensitivity : 0.3 Lux S/N ratio : 50 dB
Synchronizer	Chopper	Stable image high speed motion analysis
Frame grabber (monochrome)	DT-2853	$512 \times 480 \times 8$ bit image capture Memory : 2 frames on board

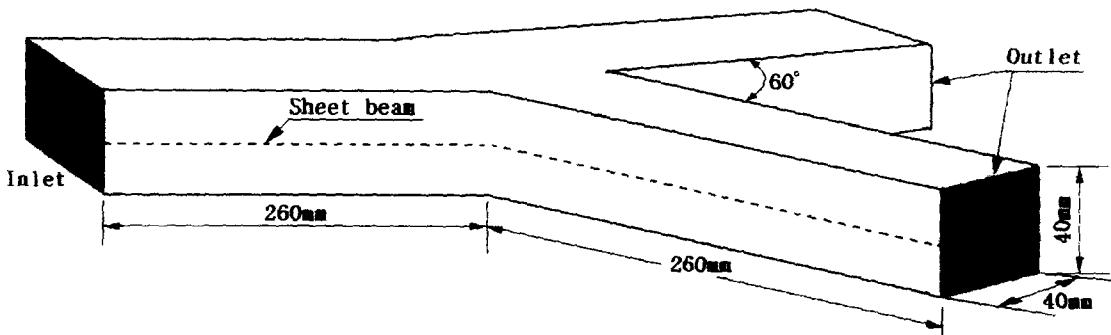


그림 3. 분기관의 기하학적 형상

Fig. 3. Geometric configuration of the transparent branching duct

고, 강도(intensity)를 증가시키기 위하여 초점렌즈를 사용하였다. 평면경을 통한 점광원은 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 통하여면서 분기형 덕트의 중심축 단면을 가로지르는 두께 2mm인 시트빔(sheet beam)을 만들었다. 원통형 렌즈를 통과한 광은 분기부의 축단면에 평면광으로 입사되어 유동장을 가시화시킨다.

수치해석

정사각형 단면을 갖는 분기관내 뉴턴유체의 정상유동을 수치적으로 해석하기 위한 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

여기서 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 속도성분이고, ρ, p, μ 는 각각 밀도, 압력, 그리고 절대점성계수이다.

표 2. 본 연구와 Lee 등[12]의 연구의 실험조건 비교

Table 2. Comparison of experimental conditions

Exp. Conditions	Present Study	Exp. by Lee et al.[12]
Tracking algorithm	1 & 2-Frame Method	4-Frame Method
Reynolds number	3000	3200
Seeded particle	Conifer powder	Nylon 12
No. of particle	2500(approximately)	1200(approximately)

분기관내 뉴턴유체의 3차원, 정상유동에 대한 지배방정식을 Galerkin 방법으로 이산화하였고, 운동량방정식의 대류형은 상류차분법(upwind differencing scheme)을 사용하여 선형화하였으며, 운동량방정식의 압력항은 penalty function 방법을 사용하였다. 계산에 사용된 컴퓨터의 기종은 SUN SPARCstation 20이고, 수렴조건은 속도에 대한 상대오차가 0.001이 되도록 하였다.

수치해석에 사용된 분기관모델의 기하학적 형상은 실험에 사용된 분기관 모델과 동일하게 하였다. 유한요소 전용코드인 Fidap 7.52 코드를 이용하여 Fig. 4와 같이 유한요소격자계를 형성하였다[11]. 3차원 수치계산에 사용된 요소수는 12000개이다. 본 연구에 사용된 Fidap 코드는 Banerjee[3]와 본 저자에 의하여 계산 결과값의 신뢰성이 검증된 바 있다. 실험유체인 물의 밀도는 1000 kg/m^3 이고, 입구 레이놀즈수는 가시화 실험의 입구조건과 동일한 값인 400으로 하였다. 실험에 사용된 분기관 모델과 수치해석에 사용된 모델의 기하학적 형상을 일치시키기 위하여 분기부의 곡률반경은 $\kappa_1 = 4.7\text{mm}$ 과 $\kappa_2 = 8\text{mm}$ 가 되도록 곡면처리하였다.

결과 및 검토

1. 캐비티 실험

분기관 유동가시화 실험에 앞서 입자형상유속계로 측정한 결과의 타당성과 적용 알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위하여 단면이 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 인 정방형 캐비티(cavity) 모형을 투명한 아크릴로 만들고, 표면구동(lid-driven) 캐비티 유동현상을 실험하여 기존의 방법과 비교하였다. 본 연구의 실험조건과 발표된 기존연구의 실험조건을 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서 적용한 1- 및 2-프레임법의 실험결과와 이영호[12] 등이 적용한 4-프레임법의 실험결과를 Fig. 5에 제시하였다. 그림에서 실선은 이영호 등[12]이 4-프레임법을 사용한 PIV 실험결과이고, 기호, □와 ●는 본 연구의 알고리즘들을 사용하여 PIV 실험을 수행한 결과이다. 본 연구에서 적용된 1-프레임법과 2-프레임법의 결과는 기존의 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5를 면밀히 검토해 보면 2-프레임법의 벽면근처의 실험결과는 속도구배가 크기 때문에 오류벡터가 많이 발생하여 기존의 실험 결과와 비교할 때 1-프레임법보다는 약간 편향되어 나타남을 알 수 있다. 그러나, 속도구배가 비교적

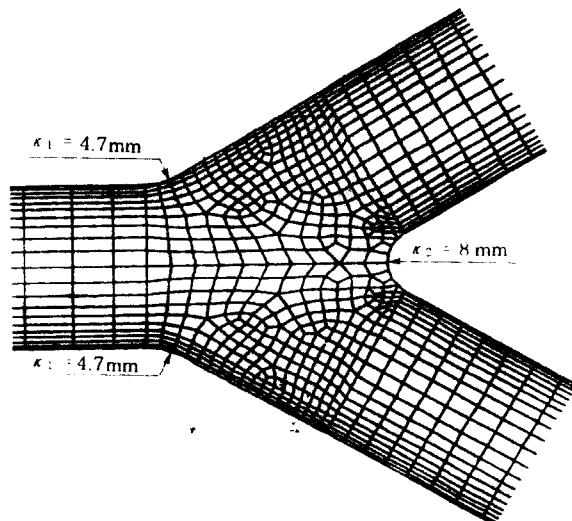


그림 4. 3차원 수치해석을 위한 유한요소격자계
Fig. 4. Finite element meshes for the 3-D numerical analysis

느린 저속유동장인 중앙부분에서는 2-프레임법의 결과가 1-프레임법보다 기존의 실험결과와 더 잘 일치한다. 이런 결과를 분석해 보면 분기관 유동가시화 실험은 1-프레임법보다 2-프레임법을 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한, 최근의 PIV 실험의 경향을 살펴보면 1-프레임을 사용하여 속도벡터를 추출하는 경우에는 입자의 중첩으로 인한 입자선정의 모호성이 발생되고, 입자의 시점과 종점의 구분이 어려운 문제점 등으로 인하여 2-프레임법을 많이 이용하는 추세이다. PTV는 이치화된 도심좌표를 이용함으로서 상관계수의 연산이 용이하여 CPU시간을 단축시키며, 입자의 도심좌표의 계산에 실수연산을 행함으로서 공간해상도를 높일 수 있는 장점이 있으나, 각각의 입자를 인식하여야 하는 전처리과정 즉, 이분법(thresholding), 도심좌표결정, 라벨링 그리고 필터링 등으로 인한 전체 계산시간이 길어지고, 유동장 가시화에 적합한 입자선별이 어려우며, 입자밀도의 제한으로 공간해상도가 낮아짐으로서 속도벡터의 손실이 많아지는 단점이 있으므로 분기관내 유동가시화실험에서는 상호상관 PIV를 적용하였다.

2. 분기관내 유동실험

분기관 모델의 유동가시화에서는 2-프레임법을 적용하였다. 분기관유동에서 시간간격 0.03초로 제 1 프레임과 제 2 프레임

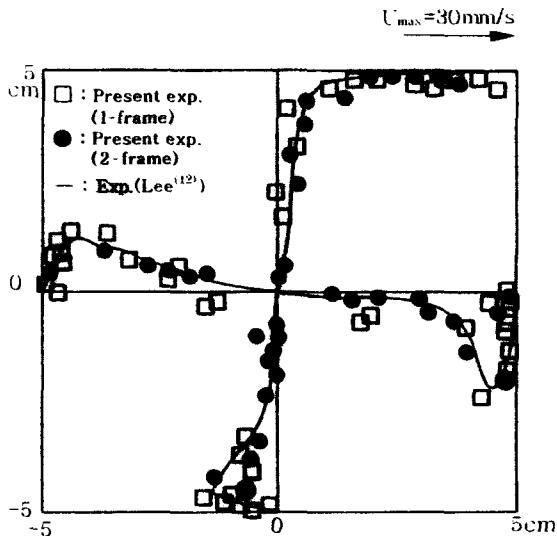


그림 5. 표면구동 캐비티 유동의 실험결과 비교

Fig. 5. Comparison of the experimental results for the lid-driven cavity flows

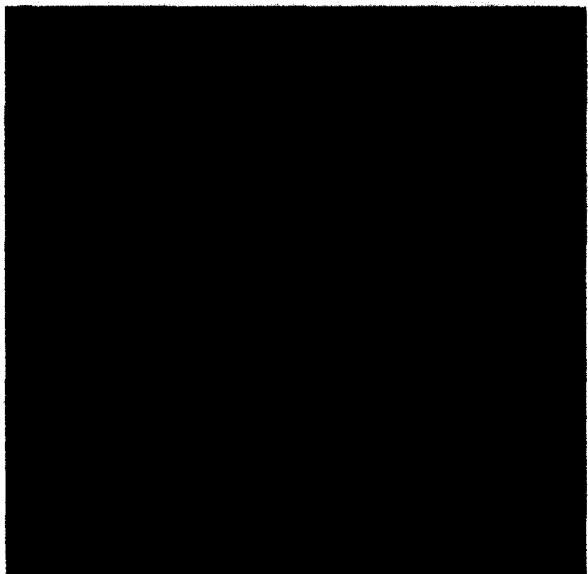


그림 7. CCD 카메라를 사용하여 획득된 제 2 프레임의 원영상

Fig. 7. Raw image captured on the 2nd frame by using CCD the camera

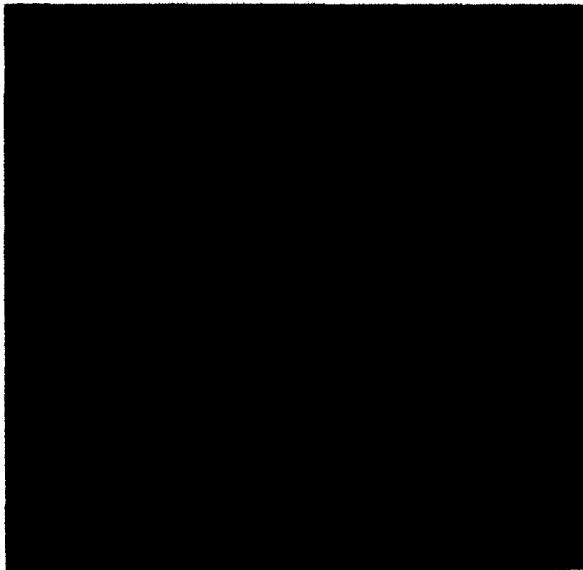


그림 6. CCD 카메라를 사용하여 획득된 제 1 프레임의 원영상

Fig. 6. Raw image captured on the 1st frame by using CCD the camera

의 원영상을 획득하였고, 그 결과를 각각 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다.

계조치 상호상관법을 적용하기 위한 격자수는 40×40 이며, 탐색영역은 추적입자가 최대로 이동할 수 있는 픽셀수로 정하였다. 본 연구에서는 레이놀즈수가 400일 때 탐색영역반경은 입자가 최대 이동한 픽셀수(약 11.5 픽셀)에서 크게 벗어나지 않는 15 픽셀로 정하였고 상관영역은 실험조건에 따라 계산시간, 입자획득량과 오류벡터값이 가장 적은 최적조건을 실험적으로 결

정하였다. 본 실험에서 상관영역은 32×32 픽셀 정도가 타당한 것으로 판단되었다. 계조치 상호상관법으로 구한 x방향의 변위성분과 y방향의 변위성분은 실제 유동장내의 크기로 환산해야 한다. 1 픽셀의 크기는 실제 유동장내에서 가로 \times 세로 = 0.143×0.115 mm에 해당된다. 환산된 변위 성분으로 속도벡터의 크기와 방향을 구한다. 입자영상유속계를 이용한 속도계측에 있어서 잘못된 입자의 추적 및 입자의 소멸 등으로 인하여 획득된 속도벡터에는 오류벡터가 반드시 존재하게 된다. 이러한 속도벡터를 가지고 후처리를 행하면 오류가 주변으로 전파된다. 따라서 올바른 속도벡터를 얻기 위해서는 오류벡터를 검출하는 알고리즘이 필요하다. 이 문제의 해결책으로서 현재 유전적 알고리즘(GA) 등의 최적화기법을 도입하여 오류벡터를 검출하는 방법 [13]과 주변 속도벡터분포에 주목하여 국소적인 흐름의 연속성에 관한식을 고차정도의 차분식의 형태로 고쳐서 오류벡터를 정도 높게 검출할 수 있는 방법[14,15]등이 있는데 이러한 경우는 유동장의 계측범위가 넓어서 주변의 속도벡터가 충분히 있는 경우에 유리하나 본 연구와 같이 실험의 특성상 계측의 범위가 좁아서 주변의 속도벡터를 많이 얻을 수 없는 경우에는 적용하기 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 주위의 속도벡터값을 평균하여 크기와 방향을 비교한 뒤 일정범위를 넘는 속도벡터를 오류벡터로 간주하는 Range Validation Method를 사용하였고, 이 때 오류벡터가 존재했던 격자점에서의 속도벡터는 주위의 속도벡터값을 평균하여 대치하는 Moving Average Method를 사용하였다.

본 연구에서 채택한 계조치상관법에서는 최대상관계수의 위치를 산정하는데 있어서 sub-pixel에서의 해상도 확보가 매우 중

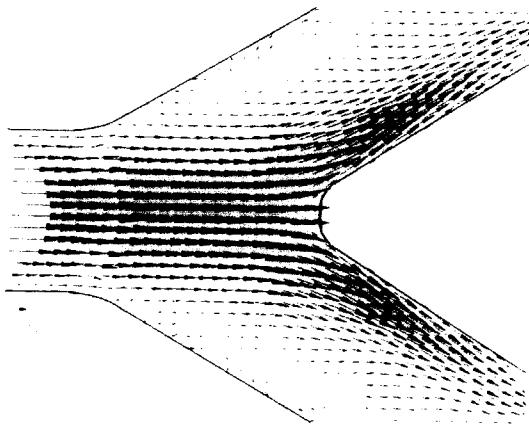


그림 8. PIV 실험으로 획득된 최종속도벡터

Fig. 8. Final velocity vectors obtained from the PIV experiment

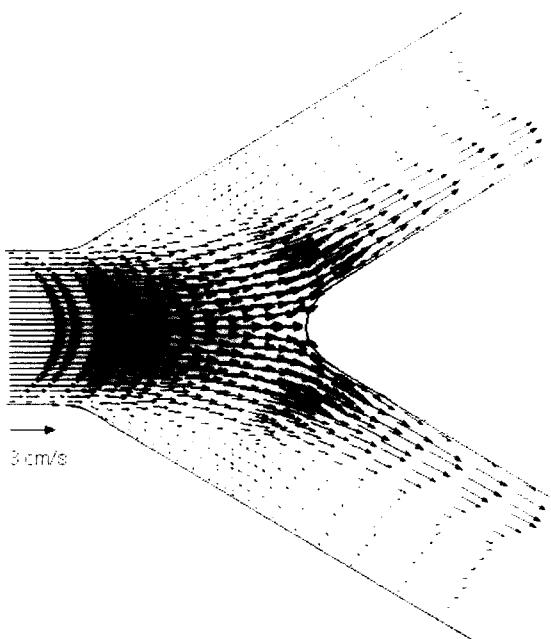


그림 9. 3차원 유동의 수치해석에서 획득된 속도벡터

Fig. 9. Velocity vectors obtained from the numerical analysis of the 3-dimensional flow

요하며 이것은 계측 dynamic range의 확보에 결정적인 역할을 한다. 등고선의 형태로 표현되는 Fig. 1(b)와 같은 상관계수의 분포도에서 산꼭대기에 해당하는 최대값의 위치를 찾아내기 위해서는 정밀한 보간법이 요구된다. 본 연구에서는 많은 보간식들 가운데 사용이 용이하며 오차가 많이 발생하지 않는 면적보간법[16]을 적용하여 최종속도벡터를 구하였다.

PIV 실험으로 획득한 초기벡터에 면적보간법을 적용하여 오벡터(error vector)을 제거한 후 얻어진 최종속도벡터를 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 8로부터 입구에서 유입된 유동은 분기부를

지나면서 강한 관성력에 의해 내벽쪽으로 유동이 치우치고 있으며 외벽쪽에서는 재순환영역이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 가시화 실험결과를 검토해 보면 분기가 시작되는 외벽쪽에서 속도벡터의 소실현상이 나타나는데 이는 재순환영역이 형성되는 시점에서 유동의 정체로 인해 야기되는 것으로 판단된다.

실험에 사용된 분기관과 동일한 형상을 가진 수치해석 모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션한 속도벡터를 Fig. 9에 나타내었다. 컴퓨터 시뮬레이션으로 얻어진 속도벡터는 Fig. 3에서 보듯이 유한요소격자계를 나타내는 격자점(node)에 나타나 있음을 볼 수 있다. PIV 실험과 수치해석 결과를 정량적으로 검토하기 위하여 재순환영역의 길이와 두께를 비교하였다. 분기부 하류에서 형성되는 재순환영역의 길이는 실험결과 27.2mm이고, 수치해석 결과 27.6mm로써 상대오차는 약 1.5% 미만이다. 재순환영역의 두께에 대한 실험결과와 수치해석결과는 각각 6.32mm와 5.91mm로써 상대오차는 6%이내이다.

PIV를 이용하여 분기관내 유동을 가시화하려는 본 연구의 궁극적인 목표는 분기혈관을 모사할 수 있는 분기관에서 혈액대용유체를 사용하여 비정상 유동을 가시화하는데 있다. 이 목표를 향한 첫 단계로서 뉴턴유체인 물을 이용하여 분기관내 유동현상을 PIV장치로 만족스럽게 가시화하였고, 신뢰할 수 있는 수치해석방법으로 구한 결과와 비교하였다. 입자영상유속계를 비뉴턴유체의 비정상 분기관 유동문제에 적용하기 위해서는 국부적으로 급격하게 변하는 비뉴턴유체의 유동특성을 정확하게 측정할 수 있는 기법과 비정상 유동문제를 연속적으로 처리할 수 있는 실험기법이 개발되어야 한다.

결 론

본 연구에서는 분기관내 뉴턴유체의 3차원, 정상유동현상을 분석하기 위하여 분기형 덕트를 제작하고 입자영상유속계를 이용한 유동가시화 실험을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 입자영상유속계의 영상처리를 위해 개발된 소프트웨어의 신뢰성을 검증하기 위하여 표면구동 캐비티 유동의 속도분포를 구하고 기존의 실험자료와 비교한 결과 표면구동 캐비티 유동의 속도분포는 1-프레임법보다 2-프레임법으로 구한 결과가 기존의 구한 실험결과와 더 잘 일치하고, 혈액유동과 같이 저속유동장에 입자영상유속계를 이용하여 실험하기 위해서는 2-프레임법이 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

2. 분기관내 유동의 가시화를 위해서 상호상관 PIV방법의 2-프레임법을 적용하는 알고리즘을 개발하였고 이 알고리즘을 이용하여 분기관내 유동현상을 효과적으로 가시화 할 수 있었다. 가시화된 분기관내 뉴턴유체의 정상유동패턴은 하류 분기관의 내벽쪽으로 유동이 치우치고, 외벽쪽에 협착발생의 원인이 되는 재순환영역이 발생함을 확인할 수 있었다.

3. 뉴턴유체의 3차원 분기관 유동문제에서 유한요소법을 이용

하여 구한 재순환영역의 길이와 가시화실험으로 구한 재순환영역의 길이는 각각 27.2mm 및 27.6mm로서 상대오차가 1.5% 미만이었고, 재순환영역의 높이는 각각 6.32mm와 5.91mm로써 상대오차는 6%이내이다. 가시화실험으로 구한 분기부의 유동특성은 신뢰성이 확보된 수치해석결과와 잘 일치하고 있다.

참 고 문 헌

1. 김일순, “한국인 5대 사망원인질환의 현황과 추이”, 대한의 학협회지, Vol. 38, pp. 132~145, 1995.
2. R. K. Banerjee, “A Study of Pulsatile Flows with Non-Newtonian Viscosity of Blood in Large Arteries”, Ph. D. Thesis, Drexel University, 1992.
3. J. E. Moore, D. N. Ku, C. K. Zarins, S. Glagov, “Pulsatile Flow Visualization in the Abdominal Aorta Under Differing Physiologic Conditions: Implications for Increased Susceptibility to Atherosclerosis”, J. Biomech. Eng., Vol. 114, pp. 391~397, 1992
4. X. Y. Xu and M. W. Collins, “A Problem Oriented Approach to the Numerical Modeling of Haemodynamic Problems”, Thermo-Fluids Eng. Research Centre, City Univ. London ECIV 0HB, UK, pp. 173~182, 1995.
5. P. E. Hughes and T. V. How, “Flow Structures at the Proximal Side-to-End Anastomosis Influence of Geometry and Flow Division”, J. Biomech. Eng., pp. 224~236, 1995.
6. 이영호, “PIV에서의 동시다점계측의 원리 및 적용”, 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술강연회 강연집, pp. 30~44, 1996.
7. 이상준, “난류유동해석을 위한 PIV 속도장 측정”, 대한기계학회지 : 제20권, 제1호, 1999
8. S. J. Baek and S. J. Lee, “New Algorithm for 2-Frame Particle Tracking Velocimetry”, Proceedings of the Third JSME-KSME Fluids Engineering Conference, Sendai Japan, pp. 347~352, 1994.
9. 최장운, 이영호, “PIV에서의 계조치상호상관법의 개발”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, Vol. II, pp. 396~400, 1995.
10. X. Ni, S. Liu, M. J. Joyce, and P.S. Grewal, “A Study of Velocity Vector Profile and Strain Rate Distribution for Laminar and Oscillatory Flows in a Baffled Tube Using Particle Image Velocimetry”, J. of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 2, pp. 135~147, 1995.
11. Fidap Theoretical Manual, Revision 7.52, Vol. I, Fluid Dynamics International Inc., USA, 1992.
12. 이영호, 조대환, 최장운, “PIV의 개발현황 및 응용” 제 2회 광계측 기술 워크샵 논문집, pp. 117~128, 1993.
13. 木村, 中見, “遺傳的Algorithmによる速度場の過誤Vector判定”, 可視化情報學會, 關西 講演論文集, pp. 107~110, 1993.
14. G. Speeding and E. Rigot, “Performance Analysis and Application of Grid Interpolation Techniques for Fluid Flows”, Exp. in Fluids, Vol. 15, pp. 417~430.
15. N. Malik, T. H. Dracos, and D. Papantoniou, “Particle Tracking Velocimetry (PTV): Technique and Image Processing Algorithms”, Exp. in Fluids, Vol. 15, pp. 279~294, 1993
16. 流れの可視化Handbook, 流れの可視化學會編輯, 朝倉書店, pp. 413.