

입자영상유속계와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 분기관내 유동해석

서상호* · 최 율** · 노형운** · 도덕희***
(1998년 8월 27일 접수)

Flow Analyses in the Bifurcated Duct with PIV System and Computer Simulation

Sang-Ho Suh, Yul Choi, Hyung-Woon Roh and Deog-Hee Doh

Key Words : Particle Imaging Velocimetry(PIV:입자영상유속계), Gray Level Cross Correlation Method(계조치 상호상관법), Bifurcated Duct(분기관), Flow Phenomena(유동현상), Helical Flow(헬리컬 유동)

Abstract

The objective of the current study is to understand steady 3-dimensional flow phenomena in a bifurcated duct experimentally. A bifurcation model is fabricated with transparent acrylic resin to visualize the whole flow field with the PIV system. The gray level cross-correlation method is applied to the image processing algorithm. The subpixel and the area interpolation methods are used to obtain the final velocity vectors. The finite volume predictions are used to analyze the flow patterns in the bifurcation model. The results of the computer simulation and the PIV experiment for three-dimensional flow show the recirculation zone and the formation of the paired secondary flow distal to the apex of the bifurcation model. The results obtained with the two methods also show that the branch flow strongly strikes the inner wall due to the inertial effect and accompanied helical motion as it flows toward the outer wall.

기호설명

- C_{fg} : 최대상관계수
- f : 제 1 프레임의 임의 점의 계조치
- \bar{f} : 제 1 프레임의 평균 계조치
- g : 제 2 프레임의 임의 점의 계조치
- \bar{g} : 제 2 프레임의 평균 계조치
- i : 제 1 프레임상의 임의 pixel의 x값 위치
- j : 제 1 프레임상의 임의 pixel의 y값 위치
- p : 압력 [Pa]
- s : 제 2 프레임상의 임의 pixel의 x값 위치
- S_i : 국소면적

- t : 제 2 프레임상의 임의 pixel의 y값 위치
- u_i : 속도벡터 [m/s]
- U : 보간속도
- U_i : 국소속도
- x : 유동방향
- μ : 점성계수 [centipoise]
- ρ : 밀도 [kg/m³]

1. 서 론

많은 동력기계에서 물질전달과 유체수송의 통로가 되는 배관장치는 많은 분기관과 곡관으로 구성되어 있다. 특히 인체내 혈관의 대부분은 이들 곡관과 분기관으로 되어 있다. 이러한 혈관내에 발생하는 협착(stenosis)현상은 혈관의 단면과 형상이 급격히 변하는 지점 특히, 관이 분기

- * 회원, 숭실대학교 기계공학과
- ** 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과
- *** 회원, 한국해양대 기계·냉동·자동차 공학부

되는 지점과 같이 유동박리에 의해 재순환영역이 발생하는 곳에서 주로 형성되는 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 분기관 유동은 분기관의 직경비, 분기각, 레이놀즈수, 그리고 작동유체의 유변학적 성질 (rheological properties)에 따라 유동특성이 크게 달라진다⁽²⁾. 분기관내 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 정상 및 비정상 유동을 컴퓨터 시뮬레이션으로 해석하여 유동속도, 압력분포, 전단응력분포 등을 구하기 위한 연구가 다양한 방법으로 수행되고 있으며, 실험적 연구에서는 주로 관내 압력손실 및 속도분포를 측정하여 분기관내의 유동현상을 이해하고 있다.

분기관 유동현상에 대한 가장 믿을 수 있는 정보는 실험적인 물리량의 측정을 통하여 얻을 수 있지만 실험장치의 제약과 측정상의 어려움, 그리고 실험에 따른 많은 비용부담 등으로 인하여 실험은 제한된 경우에 한하여 수행하고 있다. 또한 수치해석으로 유동문제를 해석하는 방법은 실제현상을 수학적으로 모델화한 지배방정식을 풀이하는 것이므로, 유동현상을 관찰하는 실험적 연구와 비교하여 타당성과 정확성이 검증될 때 해석결과의 유용성을 인정받게 된다.

유체유동을 가시화하기 위한 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션 연구가 최근 각광받고 있는 가운데, 유체유동속도를 실험적으로 측정하기 위한 장치로써 기존의 열선유속계(HWA)와 레이저도플러 유속계(LDV) 이후 등장한 것이 입자영상유속계(PIV: Particle Imaging Velocimetry)^(3,4)이다. 입자영상유속계를 이용한 유동가시화 기법은 3차원 측정 및 컬러 영상처리가 가능하도록 기술들이 개발되고 있으며, 최근에는 정도 및 해상도를 향상시켜 입자영상유속계를 이용할 수 있는 응용범위^(5,6)를 확대하고 있다.

분기관 유동에 관한 연구는 분기관의 기하학적 형상이 복잡하고 실험을 수행하는데 많은 제약이 따르기 때문에 수치해석으로 현상을 예측한 뒤, 실험자료를 통해 수치해석결과를 검증하는 추세에 있다⁽⁷⁾. 수치해석의 타당성을 검증하기 위한 분기관 유동에 대한 실험자료가 필요하지만 분기관 유동에 관한 실험자료는 많이 발표된 바 없다. 따라서, 분기관 유동에 대한 실험자료를 확보하기 위한 연구는 중요한 과제이다.

본 연구에서는 혈관질환의 발생빈도가 가장 높은 분기관에서 유동의 특성을 파악하고자 하였으

며, 실험적인 방법으로 생체내(in vivo) 실험의 어려움과 제약상으로 생체외(in vitro) 실험을 수행하였다. 또한, 분기관 유동에 대한 실험자료의 축적 뿐만 아니라 혈착현상이 발생하는 혈류역학적 기전을 규명하는 연구를 하고자 하였다. 분기관 유동을 실험적으로 연구하기 위해 투명한 아크릴로 분기각이 60°인 분기형 덕트를 제작하였다. 입자영상유속계를 이용하여 속도벡터를 획득하는데 2 frame법을 적용하였고 계조치상관법에서 최대상관계수의 위치를 산정하는데 있어서 정도 높은 가중상관 sub-pixel보간을 수행하였다. 실험에서 발생하는 오류벡터를 제거하는 알고리즘을 적용하였고 최종벡터를 획득하기 위해 면적보간방법을 적용하였다. 그리고, 속도분포에 관한 실험결과와 타당성을 입증하기 위하여 3차원 수치해석을 통한 전체 유동장의 유동특성을 파악하고 PIV실험을 통한 결과와 비교·검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

입자영상유속계를 이용한 분기관내 뉴턴유체의 유동특성을 실험하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

저수조에서 고수조로 원심펌프를 이용해서 물을 공급하고 고수조에 격판을 설치해서 고수조에서 일정한 수위를 넘는 유량은 저수조로 순환되도록 하였다. 분기관내의 입구 레이놀즈수는 게이

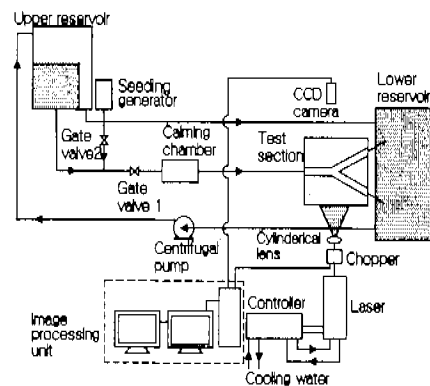


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup with the PIV system.

트랩트 1을 이용해서 조정하였다. 분기부로 유체가 유입되기 전에 유동이 안정되도록 하기 위해서 정체실을 설치하였고, 분기부에 도달하기 전에 유동이 완전히 발달된 유동상태가 되도록 하기 위해서 정체실로부터 분기부까지의 길이를 수력지름의 65배가 되도록 하였다.

유동가시화를 위하여 분기관 모델에 투입한 입자의 밀도는 거의 물과 비슷한 송화가루(conifer powder)를 사용하였다. 전자현미경을 이용해서 송화가루의 입자크기와 homogeneity를 측정 한 결과 입자크기가 대략 50 μm였으며 완전한 구형은 아니지만 거의 구형을 이루고 있었다. 추종입자의 주입은 입자주입기(particle seeding generator)를 제작해서 영기거나 침전되는 경우를 방지하기 위하여 입자분말을 장시간 물에 띄워 침전된 입자들이 없게 한 후에 게이트트랩트 2를 이용해서 주입하였다. 본 연구에서 채택한 분기관 모델은 Fig. 2와 같이 두께 5 mm의 투명 아크릴판으로 가공하였고 상류주관은 20×20 mm인 정사각형 단면이며 하류분기관의 분기각은 60°이고, 분기관외 단면은 20×20 mm인 정사각형의 단면이다. 주관과 두 분기관의 단면 크기는 동일하며 곡률반경은 r₁=2.35 mm와, r₂=4 mm로 제작하였다.

출력이 5W인 아르곤-이온 레이저로부터 투사되는 점광원의 확산을 방지하고, 강도(intensity)를 증가시키기 위하여 초점렌즈를 사용하였다. 평면경을 통한 점광원은 원뿔형 렌즈를 통과하면서 분기형 덕트의 중심축 단면을 가로지르는 시트빔을 만들 수 있다. 이 시트빔을 분기관 측면으로 조사해서 입자들의 산란광을 CCD카메라를 이용해서 촬영한다. 미소 시간간격을 주고 이 시간간격 사이에서 두 장의 영상을 획득하여 영상을 분석하는 2-frame법을 이용하였다. 일반적으로 영상분석은 추종입자와 배경으로 이분화된 영상으로

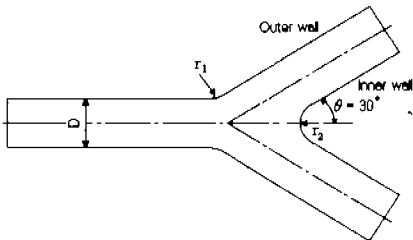


Fig. 2 Geometric configuration of the model.

부터 두개의 프레임간의 미소시간동안 각 입자들이 이동한 변위를 계산하여 속도를 계산하게 된다. 본 연구에서는 계조치상호상관법을 이용하여 유동장내의 속도벡터를 구하였다.

3. 수치해석

사각 분기형 덕트내 뉴턴유체의 유동특성을 해석하기 위해 적용한 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

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

식 (1)과 (2)에서 u_i, ρ, p, μ는 각각 속도벡터, 밀도, 압력, 그리고 절대점성계수이다. 수치해석에 사용된 분기관의 기하학적 형상은 실험에 사용된 분기형 덕트의 모형과 동일하게 하였다. 분기관 유동에 사용된 유체는 뉴턴유체인 물이며, 입구에서 완전히 발달된 층류유동조건을 부여하였다. 이때 입구 레이놀즈수는 400으로 실험의 입구조건과 동일하게 하였다. 운동량방정식의 대류항처리는 상류차분도식(upwind differencing scheme)를 사용하였고, SIMPLE-C 알고리즘을 적용하여 압력수정에 관한 근사 이산화방정식을 압

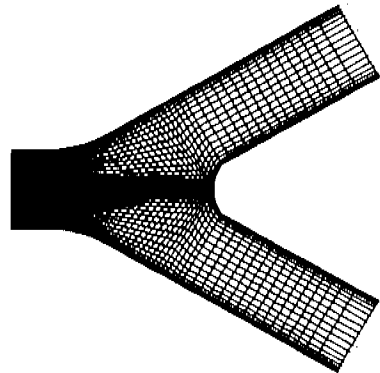


Fig. 3 Geometry and mesh of the three-dimensional branching duct for experiment and computer simulation.

액과 속도의 상관관계를 고려한 연속방정식의 이산화방정식으로부터 구하여 운동량방정식의 압력항을 처리하였다. 수치해석에 사용된 프로그램은 범용코드인 CFD-ACE와 CFX4.1을 사용하였고, 수렴조건은 속도에 대한 상대오차가 1×10^{-7} 이 되도록 하였다. 수치해석에 사용된 분기관의 형상과 격자계를 Fig. 3에 나타내었다. 계산에 사용된 격자수는 $20 \times 20 \times 80$ 이며, 계산시간 단축을 위해 상류주관의 최대칭선 윗쪽 부분만 계산하였다.

PIV 실험에서 시트빔이 부과된 중앙단면의 속도벡터와 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한 중앙단면의 결과를 비교하였으며, 3차원 유동특성을 관찰하였다.

4. 결과 및 검토

분기관 덕트내에 추적입자들을 주입하여 미소 시간간격을 가지는 두 프레임의 영상을 획득하였다. 일반적으로 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 chopper를 이용하는 방법이 있는데 본 실험은 mechanical chopper로 레이저의 연속광을 펄스코딩하여 비디오의 동기신호와 연계시키는 방법을 사용하였다. Fig. 4에서 $f(x, y)$ 의 원점이 제 1프레임상에서 속도벡터를 구하기 위한 벡터의 시점을 나타낸다. 이 점과 제 2프레임상에서 탐색영역(M)내의 모든 픽셀에서의 상관영역(J×K)의 $g(x-s, y-t)$ 에 대한 최대상관계수를 아래의 식에 의해서 계산하였다

$$C_{ij} = \frac{\sum_j \sum_i [f(x_i, y_j) - \bar{f}] [g(x_i - s, y_j - t) - \bar{g}]}{\left(\sum_j \sum_i [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \sum_j \sum_i [g(x_i - s, y_j - t) - \bar{g}]^2 \right)^{1/2}} \quad (3)$$

여기서, \bar{f} 와 \bar{g} 는 각각 제 1프레임과 제 2프레임의 평균 계조치를 의미한다. 이 값들을 이용하여 최대치의 위치를 찾으면 이것이 바로 속도벡터의 중심이 되는 것이다. 계조치상호상관법을 적용하기 위한 격자수는 40×40 이며, 탐색영역반경(searching area radius), 즉 M은 추적입자가

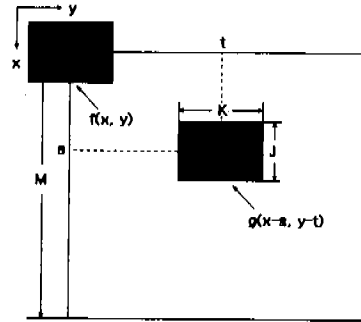
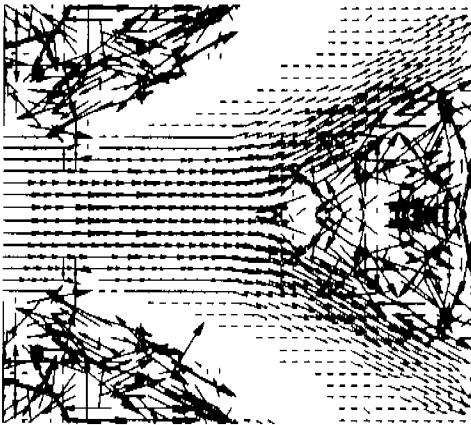


Fig. 4 Schematic domain of cross correlation coefficients.

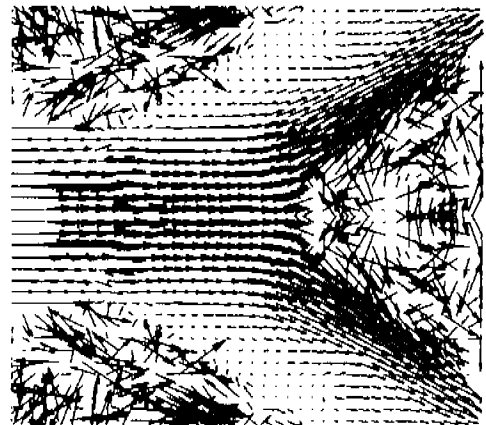
최대로 이동할 수 있는 pixel수로 정하였다. 본 연구에서는 레이놀즈수가 400일 때 탐색영역반경은 12~15 pixel 정도가 타당한 것으로 실험결과 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 탐색영역반경은 15 pixel로 정하였고 레이놀즈수가 400일 때의 상관영역(correlation area)은 16, 24, 32, 42 pixel로 하여 예비실험을 수행한 후 속도벡터값을 상호비교하였다. 상관영역이 32×32 pixel일 경우에 오류벡터의 수가 가장 적게 나타났다. 계조치 상호상관법으로 구한 x방향의 변위성분과 y방향의 변위성분은 실제 유동장내의 크기로 환산해야 한다. 1 pixel의 크기는 실제 유동장내에서 가로×세로 = 0.143×0.115 mm에 해당된다. 환산된 변위성분으로 속도벡터의 크기와 방향을 구한다. 입자영상유속계를 이용한 속도계측에 있어서 잘못된 동일입자 추적 및 입자의 소멸 등으로 인하여 획득된 속도벡터에는 오류벡터가 반드시 존재한다. 이러한 속도벡터를 가지고 후처리를 행하면 오류가 주변으로 전파된다. 따라서 올바른 속도벡터를 얻기 위해서는 오류벡터를 검출하는 알고리즘이 필요해진다. 이 문제의 해결책으로서 현재 유전적 알고리즘(GA) 등의 최적화기법을 도입하여 오류벡터를 검출하는 방법⁽⁸⁾과 주변 속도벡터분포에 주목하여 국소적인 흐름의 연속성에 관한 식을 고차 정도의 차분식의 형태로 고쳐서 오류벡터를 정도 높게 검출할 수 있는 방법⁽⁹⁻¹²⁾ 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, 이때 오류벡터가 존재했던 격자점에서의 속도벡터는 주위의 속도벡터값을 평균하여 대체하는 Moving Average Method를 사용하였다. 한편 계조치상호상관법을 이용하여 구한 속도벡터는 유동장에 불규칙하게 분포하기 때문에 이로부터 물리적인 의미를 부여하기란 쉽지가 않다.

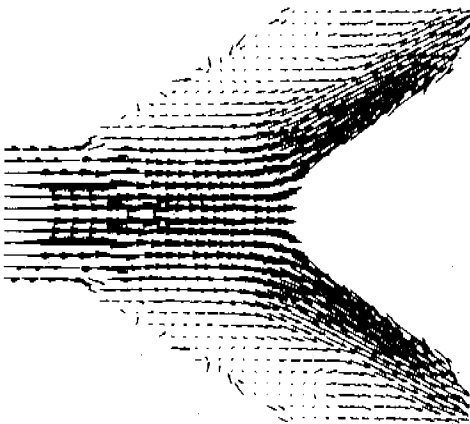
따라서 이들의 속도값으로 유동장의 공간상에 등간적 혹은 부등간적으로 보간을 행함으로써 유동장의 필요한 정보를 얻어야 한다. 또한 계조치상관법에서는 최대상관계수의 위치를 산정하는데 있어서 sub-pixel에서의 해상도 확보가 매우 중요하며 이것은 계측 dynamic range의 확보에 결정적인 역할을 한다. 이 경우에 등고선의 형태로 표현되는 상관계수의 분포도에서 산꼭대기에 해당하는 최대값의 위치를 찾아내기 위해서는 정도 높은 보간방법이 요구된다. 본 연구에서는 서브픽셀보간기법 중 가중상관보간을 이용하여 최대



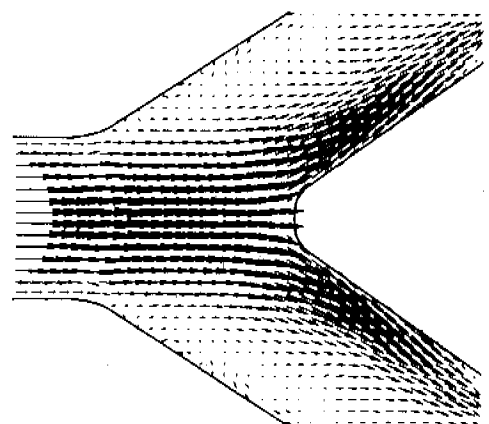
(a) after cross-correlation method



(b) after sub-pixel interpolation



(c) after boundary elimination



(d) after area interpolation

Fig. 5 Velocity vectors obtained by PIV experiment.

상호상관계수의 위치를 구할 때 보다 높은 정확성을 기하도록 하였으며 많은 보간식⁽¹³⁾들 가운데 식 (4)와 같이 면적보간법을 적용하여 최종적인 속도벡터를 구하였다. 식 (4)의 U 는 보간속도를 나타내고, S_i 는 국소면적이며 U_i 는 국소속도이다.

$$U = \frac{\sum S_i U_i}{\sum S_i} \quad (4)$$

Fig. 5는 입자영상유속계를 이용하여 최종속도 벡터를 구하는 단계적인 과정을 나타낸 그림이다. Fig. 5 (a)는 2-frame법으로 구한 원영상에서 구한 속도벡터이고, Fig. (b)는 sub-pixel 보간방법을 이용하여 구한 결과이며, Fig. 5 (c)는 분기관 경계밖에 있는 오류벡터를 제거하고 평균치에서 벗어난 벡터들을 소거시킨 후 획득한 속도벡터이다. Fig. 5 (c)를 식 (4)와 같은 면적보간을 적용하여 구한 최종벡터는 Fig. 5 (d)이다. 그리고 실험에 사용된 분기형 덕트의 형상과 동일하게 만든 유동장내의 속도벡터를 컴퓨터 시뮬레이션으로 구한 결과는 Fig. 6과 같다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 대류항의 처리는 hybrid, central, 1st order upwind, 2nd order upwind, QUICK differencing scheme을 사용하여 속도분포를 비교하여 본 결과 2nd order upwind differencing scheme을 이용하는 경우가 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

입구에서 유입된 유동은 분기부를 지나면서 강한 관성력에 의해 내벽쪽으로 유동이 치우치고 있으며 외벽쪽에서는 재순환영역이 형성되고 있다. 재순환영역의 길이는 실험과 컴퓨터 시뮬레이션에서 각각 27.2 mm와 27.6 mm로 나타났고 상대오차는 1.5 % 미만이다. 실험에서 구한 결과는 분기부 외벽쪽 시작부위에서 속도벡터의 소실 현상이 나타나는데 이는 재순환영역 형성의 초기에 유동의 정체로 인해 야기되는 것으로 사료된다. 실험과 컴퓨터 시뮬레이션으로 구한 분기관내 유동현상을 자세하게 검토하기 위하여 실험과 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 토대로 하여 분기부 영역에서의 유동양상을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7의 단면 A-A'와 B-B'의 결과는 등속도 선을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 분기부를 지나면서 분기관 외벽쪽으로 와동과 2차

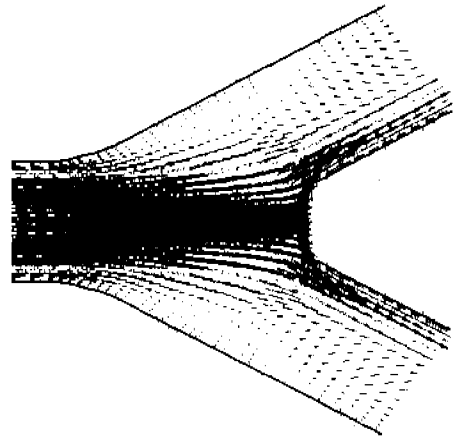


Fig. 6 Velocity vectors obtained by computer simulation.

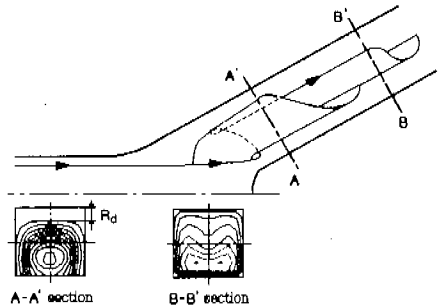


Fig. 7 Flow patterns in the branching duct.

유동현상이 나타난다. 유동이 하류쪽으로 계속 진행함에 따라 다시 한번 와동현상이 나타나는 이중 헬리컬 유동현상을 나타냄을 확인할 수 있다. 단면 A-A'에서 R_d 는 재순환영역의 두께를 나타내며 실험과 수치해의 결과는 각각 6.32 mm와 5.91 mm로써 상대오차는 약 6 %이다. B-B' 단면에서는 2차유동이 형성되고 있다. PIV를 이용하여 구한 속도벡터선도의 신뢰성을 검증하기 위해 주관과 분기관의 임의 단면에서의 속도분포를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 실험값과 수치해석 결과는 A-A' 단면에서는 아주 잘 일치하고 있으며, B-B' 단면에서도 분기관의 외벽쪽 재순환 영역에서 속도벡터값의 미소한 차이를 제외하고는 비교적 잘 일치하고 있다.

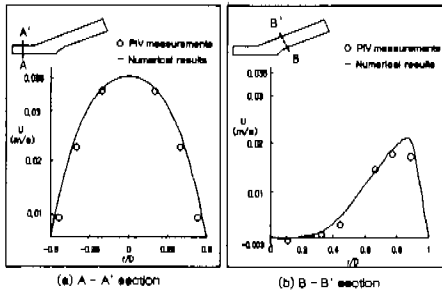


Fig. 8 Comparison of the velocity profiles obtained by experiment and computer simulation.

5. 결론

입자영상유속계와 수치시뮬레이션을 이용한 분기관내 3차원 유동해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다. 분기형 덕트내 뉴턴유체의 유동현상은 입자영상유속계를 이용한 2-frame법을 적용해서 효과적으로 가시화할 수 있다. 입자영상유속계로 관찰한 분기관내 뉴턴유체의 정상유동은 관성력의 영향으로 인하여 분기관의 내벽쪽으로 유동이 치우치고, 외벽쪽에 재순환 영역이 발생하는 특성을 나타내고 있으며 이 특성은 수치해석의 결과와 잘 일치하고 있다. 수치해석적으로 구한 유체입자의 궤적은 분기부에서 헬리컬 형태를 나타내며 외벽쪽으로 말려 올라가는 복잡한 현상을 나타낸다. 헬리컬 유동으로 인한 입자의 상호교란은 입자영상유속계를 이용한 속도벡터 계산시 많은 오류벡터를 발생할 수 있으므로 이에 대한 보완책이 필요함을 확인하였다.

Rodkiewicz 등(14)에 의하면 재순환영역의 두께와 2차유동현상은 분기관의 분기각과 레이놀즈수에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다. 분기관의 외벽을 따른 하류방향으로의 복잡한 유동형태는 PIV실험시에 오류벡터의 원인이 될 수 있다. 헬리컬 유동현상을 보다 면밀히 검토하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 입자의 경로를 추적하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9 (a)와 (b)는 각각 분기관의 평면과 정면에서 바라본 입자들의 유동경로이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 이미 검토한 바와 같이 분기관 상류에서 평행하게 유입되는 입자는 분기부를 지나면서 기하학적 형상변화로 인하여 분기관 하류에서 헬리컬 유동현상을 나타낼 수 있다.

후기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME96-B-05)에 의하여 연구되었으며, 연구를 수행하는 도중에 레이저가 파손되어 어려움을 겪고 있을 때 고가의 레이저 장비를 대여해 준 한국해양대 이영호 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Cho, Y. I., Back, L. and Crawford, D. W., 1985, "Experimental Investigation of Branch Flow Ratio, Angle and Reynolds Number Effects on the Pressure and Flow Fields in Arterial Branch Models", ASME J. Biomech. Eng., 107, pp. 257~267.
- (2) 서상호, 유상신, 노형운, 1994, "뉴턴유체와 비뉴턴유체에 대한 분기관 유동의 수치해석", 대한기계학회 논문집, 제 18권, 제 10호, pp. 2762~2772.
- (3) Adrian, R. J., 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp.261~304.
- (4) 도덕희, 1996, "이중원판 젯트유동의 PIV 계

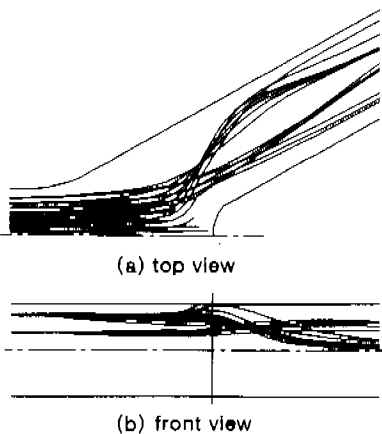


Fig. 9 Particle paths along different planes of the branching duct.

- 측”, 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술대회 논문집, pp. 45~52
- (5) Liou, T. M. and Liao, C. C., 1997, "Flow Fields in Lateral Aneurysm Models Arising from Parent Vessels with Different Curvatures Using PTV", *Exp. in Fluids*, Vol.23, pp. 288~298.
- (6) Tsao, R., Jones, S. A., Giddens, D. P., Zarins, C. K., and Glagov, S., 1995, "An Automated Three-Dimensional Particle Tracking Technique for the Study of Modeled Arterial Flow Fields ", *J. of Biomech. Eng.*, Vol. 117, pp.211~217.
- (7) Yoo, S. S., Suh, S. H., Shim, J. W. and Roh, H. W., 1996, "Flow Visualization in the Bifurcated Tube by PIV System and Numerical Simulation", *The 3rd KSME-JSME Thermal Eng. Conf.*
- (8) 木村, 中見, 1993, 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.
- (9) 北條, 高島, 1995, "PIVにおける異常ベクトルの検出”, *可視化情報*, Vol. 15, Suppl. No. 2, pp. 177~180.
- (10) Augi, J. and Jimenez, J., 1987, "On the Performance of Particle Tracking", *J. Fluid Mech.*, Vol. 185, pp. 447~468.
- (11) Speeding, G. and Rigot, E., 1993, "Performance Analysis and Application of Grid Interpolation Techniques for Fluid Flows", *Exp. in Fluids*, Vol. 15, pp. 417~430.
- (12) Malik, N., Dracos, Th. and Papantoniou, D., 1993, "Particle Tracking Velocimetry (PTV) :Technique and Image Processing Algorithms", *Exp. in Fluids*, Vol. 15, pp. 279~294.
- (13) 流れの可視化Handbook, 流れの可視化學會編輯, 朝倉書店, pp. 413.
- (14) Rodkiewicz, C. M. and Roussel, C. L. 1973, "Fluid Mechanics in a Large Arterial Bifurcation", *ASME J. of Basic Eng.*, Vol. 72, pp. 1~5.