

# PIV와 수치해석을 이용한 분지관내 맥동유동의 가시화

노형운\*·서상호\*\*·유상신\*\*\*

## Flow Visualization of Pulsatile Flow in a Branching Tube using the PIV System and Numerical Analysis

Hyung-Woon Roh, Sang-Ho Suh, and Sang-Sin Yoo

Key Words: Flow Visualization(유동가시화), Pulsatile Flow(맥동유동), Branch Tube(원형분지관), 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. The cross-correlation method in combination with the moving searching area algorithm was applied for the image processing of the flow visualization. The pulsatile flow fields were visualized effectively by the PIV system in conjunction with the applied algorithm. 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

왕복식 펌프 또는 송풍기가 설치된 산업용 배관장치내의 유동과 인체혈관내 혈액유동에서는 주기적인 맥동유동이 나타난다. 산업용 배관장치와 인체혈관내 정상유동에 관한 연구<sup>(1-3)</sup>는 많이 발표되어 있으나, 맥동유동에 관한 연구는 별로

발표된 바 없다. 맥동유동현상에 관한 연구는 실제 유동현상을 이해하는데 중요하지만 실험을 수행하는데 많은 제약이 따르기 때문에 극히 제한된 연구결과들만 발표되어 있다. 현재까지 발표된 대부분의 PIV 연구<sup>(4-7)</sup>는 원관과 사각 채널내 정상유동에 관한 연구이므로, 분지관내 맥동유동에 관한 연구가 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 맥동유동현상을 실험적으로 측정하고 가시화하기 위해 입자영상유속계를 이용하였다. 입자영상유속계를 이용하여 맥동유동실험을 수행할 때 맥동유동의 가속과 감속에 따른 속도변화 때문에 AOM(Acoustic Optic Modulator)

\* 숭실대학교 기계공학과 연구원  
\*\* 숭실대학교 기계공학과 교수  
\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수

이나 고속도카메라를 이용하여야 한다. 그러나, AOM이나 고속도카메라를 이용한 PIV실험은 많은 실험비용이 소요되고 자료처리하는데도 많은 시간이 걸린다<sup>(8, 9)</sup>.

본 연구에서는 AOM을 사용하지 않고 맥동유동을 가시화할 수 있도록 개발된 탐색영역이동 계조치상호상관법<sup>(10)</sup>을 적용하여 분지관내 뉴턴유체의 맥동유동특성을 해석하고 가시화하였다.

## 2. PIV 실험

뉴턴유체 및 비뉴턴유체의 맥동유동특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 유동순환장치와 PIV장치로 구성되어 있다. 시험부는 상류주관과 하류분지관의 내경과 두께가 각각 20 mm와 5 mm인 투명 아크릴관으로 가공하였고 하류분지관의 분지각은 60°이다. 맥동유동에서 가시화영상을 획득하기 위한 광원으로는 출력 5W의 아르곤-이온 레이저를 사용하였다. 출력 5W의 아르곤-이온 레이저로부터 투사되는 점광원의 확산을 방지하고, 강도를 증가시

키기 위하여 초점렌즈를 사용하였다. 평면경을 통한 점광원은 원통형 렌즈를 통과하면서 분지관의 중심축 단면을 가로지르는 시트빔을 만들 수 있다. 이 시트빔을 분지관 측면으로 조사해서 입자들의 산란광을 CCD카메라를 이용해서 촬영한다. 원심펌프를 이용해서 저수조에서 고수조로 작동유체를 공급하고, 맥동펌프 (Harvard Apparatus사, 1423 pulsatile pump)를 이용하여 맥동과형을 만들었다. 맥동펌프의 행정체적은 최대 100ml이고 가속과 감속비는 조절할 수 있도록 설계되어 있다<sup>(11)</sup>.

PIV를 이용한 유동가시화실험에서 영상을 얻기 위해 유동장에 투입되는 추종입자의 밀도는 작동유체의 성질과 비슷한 입자를 사용하여야 한다. 따라서 유동을 잘 추종할 수 있는 입자로서 선행연구<sup>(4)</sup>의 결과에 따라 천연상태의 송화가루 (conifer powder)를 채택하였다. 본 연구에서는 미소 시간간격을 주고 이 시간간격 사이에서 두 장의 영상을 획득하여 영상을 분석하는 2-frame법을 이용하였다. 일반적으로 영상분석은 추종입자와 배경으로 이분화된 영상으로부터 두개의 프레임간의 미소시간동안 각 입자들이 이동한 변위를 계산하여 속도를 계산하게 된다. 계조치상호상관법 (grey level cross correlation method)을 이용하여 유동장내의 속도벡터를 구하였다.

실험에 사용된 시험부 단면이 원형이기 때문에 벽 부근에서 빛의 굴절로 인한 영상왜곡현상이 발생한다. 본 연구에서는 빛의 굴절로 인한 영상 왜곡현상을 억제하기 위하여 아크릴로 굴절방지 상자를 만들어 시험부 전체를 둘러싸고 상자 안쪽과 원형관의 바깥쪽 공간에 실험유체와 동일한 유체를 채웠다. 그러나, 굴절방지상자를 사용하더라도 어느 정도의 굴절은 피할 수 없을 것으로 생각하였다. 이에 따라 본 연구에서는 CCD 카메라로 들어오는 빛의 경로를 Ray Tracing Method<sup>(11)</sup>로 추적하여 실제 측정평면에서의 좌표값과 카메라의 영상 좌표값 사이에 발생하는 오

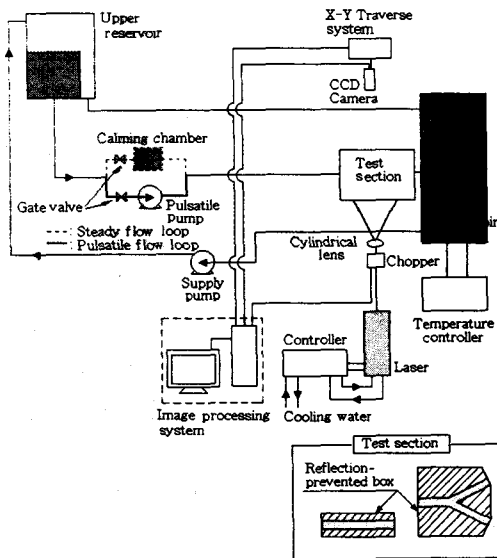


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

### 3. 결과 및 검토

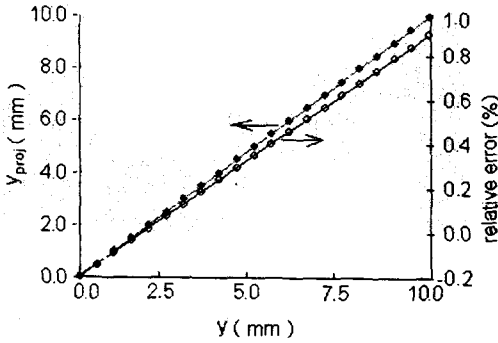


Fig. 2 Relationship between  $y$  and  $y_{proj}$

차를 계산하였다. 실제 측정평면에서의 좌표값  $y$ 와 CCD 카메라의 영상좌표값  $y_{proj}$ 는 식 (1)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$y = 0.9989y_{proj} + 0.001912 \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 구한  $y$ 와  $y_{proj}$ 의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 원형관의 중심부근에서는 굴절의 영향이 거의 없고 벽면에 가까운 부분에서  $y$ 값과  $y_{proj}$ 값의 차이가 있으나 그림의 오른쪽 축상에 표시된 것과 같이 상대오차값이 1% 범위내에 있으므로 본 연구에서 채택한 굴절방지상자를 이용하면 굴절률의 보정없이 영상처리를 할 수 있음을 확인하였다.

PIV실험에서 다양한 유체의 굴절률에 관해 보고된 문헌이 없기 때문에 본 연구에서는 실험적으로 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 굴절률을 측정하였다. 작동유체의 굴절률을 측정하여 본 결과, 물인 경우는 1.33으로 Budwig<sup>(13)</sup>의 결과와 동일하게 측정되었고, Separan 500 wppm 수용액과 1000 wppm 수용액의 굴절률은 각각 1.338과 1.336으로서 물의 굴절률과 거의 유사하게 나타났다. 따라서 비뉴턴유체의 PIV 실험시에는 뉴턴유체의 경우와 같이 굴절률에 의한 영향을 배제할 수 있음을 확인하였다.

분지관내 맥동유동의 특성을 정량적으로 가시화하기 위하여 PIV 실험을 수행하였다. 이때 분지관 입구에서 한주기당 15 ml 유량을 맥동펌프로 가하여 주었다. 분지관내 압력파형은 분지점으로부터 입구쪽으로 20 cm 상류지점과 하류방향으로 30 cm만큼 떨어진 지점에서 압력트랜스듀서(Validyne DP15TL)을 이용하여 측정하였다. 이때 두 지점에서 측정된 압력파형은 Fig. 3과 같다. 측정된 두 파형주기는 동일하지만 두 파형의 진폭은 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 측정된 압력파형은 Fourier sine급수로 표시될 수 있으며 이를 수치해석의 경계조건으로 적용하였다.

Fig. 4에는 분지관내 유동현상을 정성적 및 정량적으로 확인하기 위하여 맥동주기의 한주기 동안 획득한 영상들을 나타내었다. Fig. 4는 분지관내 맥동유동특성을 살펴보기 위하여 초퍼를 이용하지 않은 상태에서 카메라의 조리개를 완전히 연 상태에서 측정한 것이다. 분지관내 입자의 궤적은 맥동유동 그 자체 특성 때문에 시간에 따라 변하고 있음을 알 수 있다. 이러한 유동현상은 정상상태의 연구결과와 다르게 나타난다.

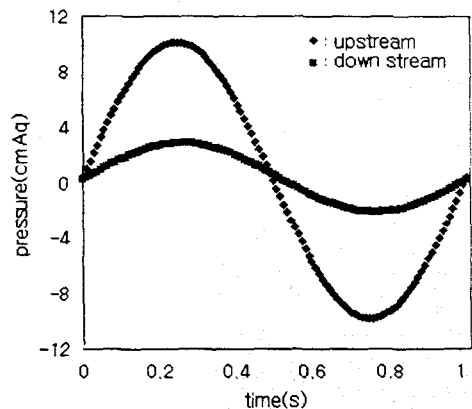


Fig. 3 Pressure waveforms at upstream and downstream locations of the bifurcation tube

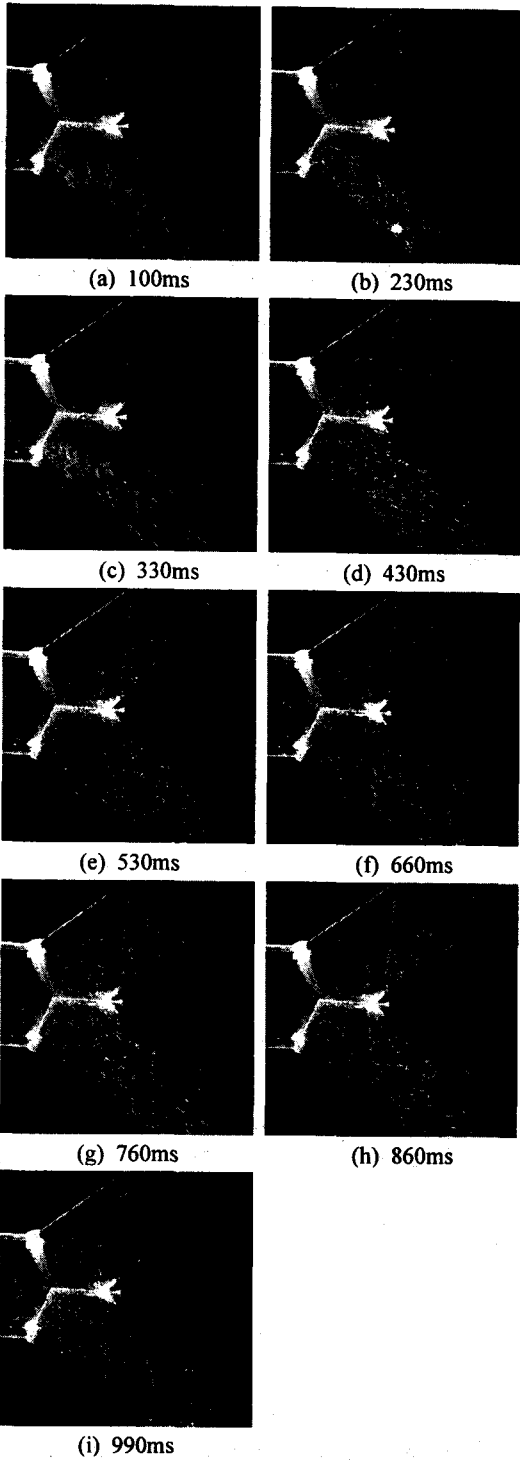


Fig. 4 Pictures showing pathlines during the cycle of the pulsatile flow

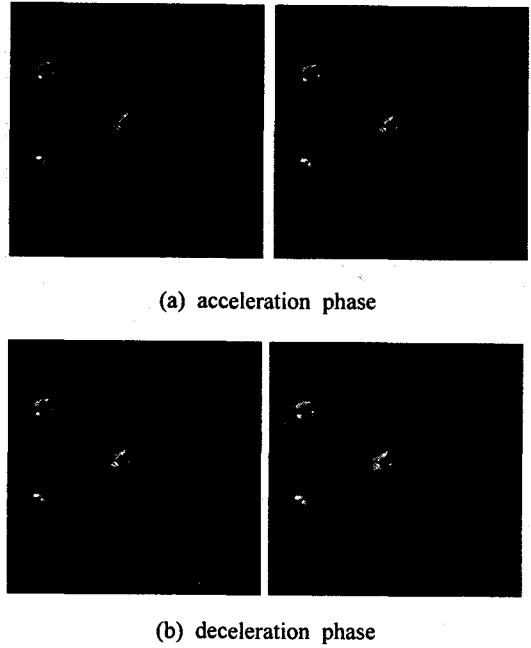


Fig. 5 Respective pairs of raw images during acceleration and deceleration phases using mechanical chopper

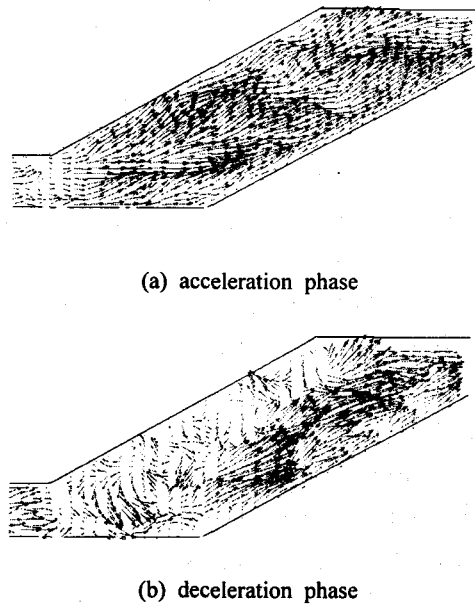


Fig. 6 Velocity vector maps during acceleration and deceleration phases in the bifurcated tube

가속시의 유동은 분지부의 영향에 상관없이 관성력에 의하여 유동장 전체에 걸쳐 평탄하게 진행된다. 그러나, 감속시에는 분지부 외벽쪽에 재순환영역이 형성되고 이 재순환영역의 크기는 맥동파형의 변화에 따라 변하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 계조치 상호상관 PIV 방법으로 속도벡터를 획득하기 위하여 미캐니컬 초퍼를 이용하였고 가속시와 감속시에 획득된 각각 한 쌍의 영상을 Fig. 5에 나타내었다. 해석영역은 CCD 카메라 초점거리의 제약으로 인하여 분지관 영역으로 한정하였다. 계조치 상호상관 방법을 적용하기 위하여 격자의 크기는  $40 \times 40$ 으로 하였고, 상관영역의 크기는 임의시간에서 입자의 최대 이동거리와 동일하게 정하여 주었다. 즉 가속시와 감속시의 탐색영역과 상관영역의 크기는 파형의 기울기에 따라 다르게 정하여 주었다. 입자의 이동거리가 70~200픽셀 이상이 되는 영상은 맥동 유동의 속도획득을 위하여 탐색영역이동 알고리즘<sup>(10)</sup>을 적용하였다. Fig. 6에는 가속시와 감속시에 획득한 속도벡터를 각각 나타내었다. 속도벡터를 살펴보면 가속시에는 재순환영역이 관찰되지 않으면서 전반적으로 하류방향으로 유동이 강하게 진행되는 속도분포를 나타내었다. 즉 반경 방향으로 파상형태의 공간 속도벡터가 나타남을 알 수 있다. 그러나, 감속시에는 분지부 근처 외벽에서 재순환영역이 형성되면서 유동장 전체가 불규칙함을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 벽면에 근접한 입자가 재순환영역 근처에서 재순환 운동을 하면서 동시에 하류로 움직이면서 헬리컬 유동을 하기 때문이다. 감속시 동안의 유동형태를 가시화하기 위하여 타당한 영상해석 기법이 필요하다.

분지관내 맥동유동을 정확히 확인하기 위하여 분지관내 맥동유동속도벡터를 수치해석으로 구하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 수치해석시 Fig. 3와 같이 측정된 압력파형을 입구와 출구의 경계조건으로 적용하였다. 수치해석 분지관내 속

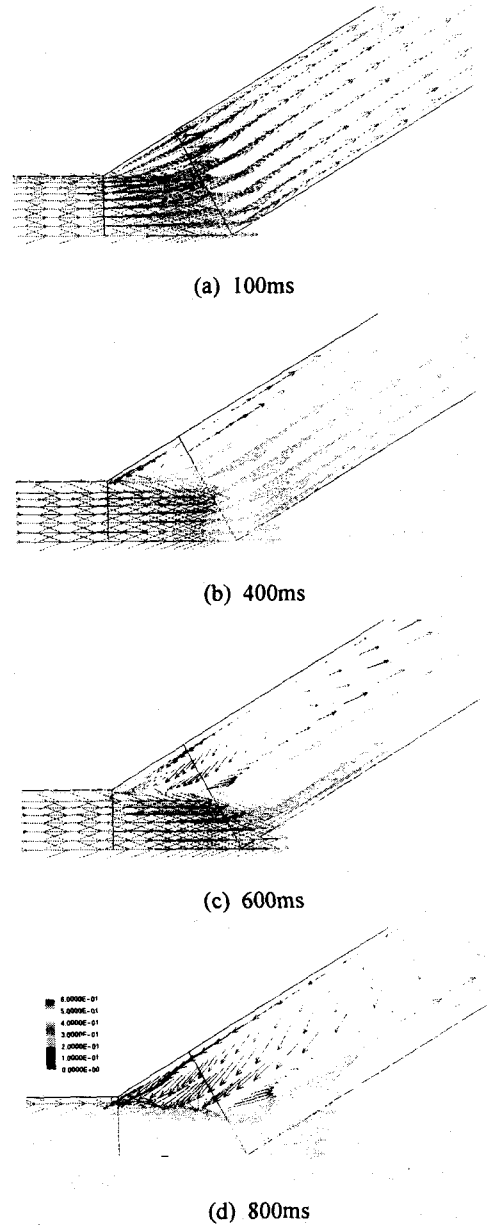


Fig. 7 Computer simulation of the velocity vector maps in the bifurcated tube for pulsatile flow

도벡터의 계산시간간격은 0.01s이고 이 중 대표적인 시간인 가속시, 감속시의 속도벡터를 Fig. 7에 나타내었다. 수치해석으로 구한 Fig. 7의 결과는 PIV 실험으로 얻은 결과와 잘 일치하고 있다. 이

로서 수치해석 기법으로도 분지관내 맥동유동장을 정확히 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다..

#### 4. 결론

탐색영역이동 제조치 상호상관법을 적용한 PIV 실험 결과를 분석해 보면 분지관내 맥동유동은 가속시 관성력의 영향으로 인하여 분지관의 내벽 쪽으로 치우치고, 감속시 외벽쪽에 재순환 영역이 발생하는 특성을 나타낸다. 맥동유동의 감속시에는 분지부에서 강한 헬리컬 형태의 유동을 나타내며 외벽쪽으로 말려 올라가는 복잡한 현상을 나타낸다. 또한 PIV를 이용한 유동장의 가시화 결과와 유한체적법을 이용한 수치 해석의 결과가 서로 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 개발한 탐색영역이동 알고리즘을 이용한 PIV 실험과 수치해석방법을 적용하면 분지관내 맥동유동을 효과적으로 가시화할 수 있다.

#### 후기

이 논문은 1998년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음”(1998-001-E00066)

#### 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., Vol.107,257~267.
- (2) 서상호, 유상신, 노형운, 1994, "뉴턴유체와 비뉴턴유체에 대한 분기관 유동의 수치해석", 대한기계학회 논문집, 제 18권, 제 10호, pp. 2762~2772.
- (3) 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.
- (4) Adrian, R. J., 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, 261.
- (5) 流れの可視化Handbook, 流れの可視化學會編輯, 朝倉書店, pp. 413.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 서상호, 최을, 노형운, 도덕희, 1998, "입자 영상유속계와 컴퓨터시뮬레이션을 이용한 분기관내 유동해석", 대한기계학회 논문집 B권, 제23권, 제 1호, pp. 123-130.
- (9) 도덕희, 1999, "3차원 PIV를 이용한 유동장의 3차원 계측", 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술강연회, pp. 41-49.
- (10) Roh, H. W., 1999, Pulsatile Flow Analysis of Non-Newtonian Fluids in the Circular and Bifurcated Tubes, Soongsil Univ., Ph. D. Thesis.
- (11) 서상호, 노형운, 한명우, 유상신, 1999, "PIV를 이용한 비뉴턴 유체의 원형관내 유동가시화", 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 131-134.
- (10) Lowe, M. L., and Kutt, P. H., 1992, "Refraction through Cylindrical Tubes", Experiments in Fluids, Vol. 13, pp. 315~320.
- (13) Budwig, R., 1994, "Refractive Index Matching Methods for Liquid Flow Investigations", Experiments in Fluids, Vol. 17, pp. 350-355.