

에코PIV기법의 개발과 In vitro 검증 연구

김형범*, J. Hertzberg**, R. Shandas***

1. 서론

초음파 기법은 인체 내부의 장기(organ) 가시화나 혈류유동(blood flow)과 같은 불투명한 유동에서의 속도측정 등에 많이 사용되고 있다. 초음파를 이용한 대부분의 속도측정방법은 반사된 초음파 신호의 도플러 천이(Doppler shift)를 이용해 초음파 진행방향 성분의 속도를 측정한다.⁽¹⁾ 그러나, 도플러 천이를 이용한 속도측정법은 초음파 진행방향과 유동방향이 다르면 측정오차가 발생한다. 기존 연구로부터 작은 각도 차이도 측정값에 큰 오차를 포함시킨다는 것이 알려졌다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 초음파 조영제를 사용한 초음파 입자영상에 속도벡터 추출을 위해 현재 실험 유체역학분야에서 많이 사용되는 PIV(particle image velocimetry)⁽²⁾를 적용한 새로운 속도장측정기법을 개발하였다. 유동의 추종 입자로서의 초음파 조영제의 영상을 초음파 B(brightness)-스캔모드를 이용해 획득하고, 이렇게 획득한 초음파 조영제 영상에 PIV 기법을 적용해 2차원 속도장을 계산한다. 이와 같은 속도장측정기법은 혈류유동과 같은 불투명 유동의 측정에 매우 유용하리라고 생각한다.

2. 에코PIV기법의 개발

초음파영상은 빔이 대상에 방사되면 대상에 있는 산란체들은 에코신호를 만들고 이 신호의 강도가 초음파 영상의 강도를 결정한다. 그리고 초음파 신호의 방사로부터 에코신호를 받기까지의 시간으로부터 초음파 빔의 진행방향에서의 산란체의 위치를 알 수 있다. 이와 같은 과정을 측정구간에서 반복적으로 스위치하면서 2D 스캔영상이 만들어진다.

속도측정을 위한 추적입자로 사용한 산란입자는 초음파 조영제(ultrasound contrast agent)이다. 초음파 조영제는 혈류유동에서 초음파의 에코신호 강도를 증가시키기 위해 개발되었고 현재 임상에서 많이 사용되고 있는 물질이다.⁽³⁾ 본 연구에서는 초음파 조영제로 Optison®을 사용하였다. 이 조영제의 평균 직경은 2~4.5 μ m이고 조영제의 90%가 직경이 10 μ m이

하다. 에코 PIV에 최적화된 초음파 조영제의 투여량(dose)을 결정하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 회전유동내부에 각각 다른 량의 Optison®을 투입한 후 획득한 초음파 영상의 평균 강도(gray intensity)분포를 측정하였다. 본 연구에서는 GE/Vingmed사의 VividFive 초음파 기기를 사용하였다. 이때의 프레임율은 35frames/sec이다. 빔강도(MI)는 0.4이고, 중앙주파수가 3.5MHz의 초음파 프로브를 사용하였다. 3회 반복실험을 통해 총 210장의 초음파 영상으로부터 평균강도분포를 구하였다. 이때 투입한 Optison®의 초기 부피는 각각 0.06ml, 0.04ml, 0.02ml, 0.01ml와 0.005ml이다. 이 초음파 조영제의 부피는 임상에서 일반적으로 혈관가시화 목적으로 사용되는 부피의 약 1/1000 이하이다.

Fig. 1은 시간에 따라 획득된 초음파 영상의 평균 강도의 변화를 나타낸다. 초음파 조영제를 작동유체에 주입하면서 평균 강도는 증가하게 되고 이 값이 최대값을 가질 때를 시간 t=0로 설정하고 그 후 시간이 흐르면서 변하는 평균 강도값을 그래프에 표시하였다. Fig. 1로부터 투입된 초음파 조영제의 양에 상관없이 평균강도는 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 2장의 입자영상을 사용하는 상호상관관계 PIV 알고리즘을 적용할 경우, 이와 같은 평균 강도의 감소는 입자 쌍(pair)의 손실을 의미하고 이는 상호상관관계값의 S/N비를 낮추는 역할을 하기 때문에 이와 같은 마이크로 기포의 파괴를 최소화하는 것은 매우 중요하다.

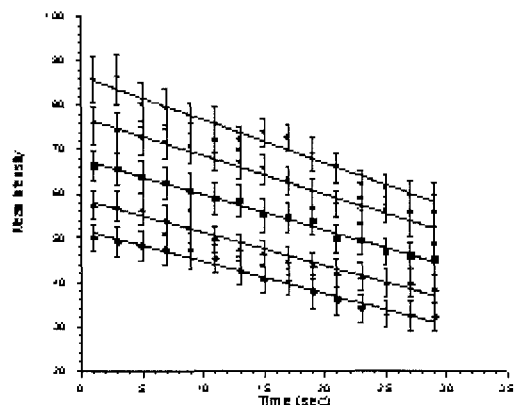


Fig. 1 Mean image intensity as a function of elapsed time (●:0.06ml, ○:0.04ml, ■:0.02ml, ▲:0.01ml, □:0.005ml initial dosages)

* 경상대학교 기계항공공학부

** Mech. Eng., Univ. of Colorado, Boulder

*** Cardiology, Univ. of Colorado Health Sci. Center

본 연구에서는 초음파 빔으로부터 직접 A/D 변환된 RF-포맷의 초음파 입자영상으로부터 속도벡터를 추출하고 그 속도 벡터를 좌표계 변환하는 방법을 사용하였다. 즉, 극좌표계를 갖는 RF포맷의 영상으로부터 속도벡터를 구한 후, 그 결과를 실제 직각 좌표계상으로 변환한다. 또한, 에코PIV의 공간해상도를 향상시키기 위해 재귀기법(iterative recursive scheme) 과 조사구간 이동(window offsetting)⁽⁴⁾을 사용하였다.

3. 에코PIV 모사실험 결과

개발된 에코PIV의 성능을 검증하기 위해 완전히 발달된 층류관유동을 에코PIV와 광학PIV로 측정하고 이 결과를 이론식 결과와 비교하였다.

Fig. 2는 에코PIV결과와 해석값간의 평균속도비교 결과이다. 조사구간의 크기가 클 경우(24×24), 해석값과 비교해 에코PIV결과가 보다 작게 나옴을 알 수 있다. 이는 속도구배가 큰 구간에서의 PIV의 저속편향성을 나타낸다. 또한 PIV의 특성인 조사구간 내의 평균속도측정에 의해 이러한 현상이 나타난다. 그러나 재귀기법과 조사구간 이동을 사용하여 구간의 크기를 10×10픽셀로 줄였을 경우, 공간해상도는 약 5.7배정도 향상된다. 이 경우 에코PIV결과는 해석값과 비교해 최대 차이는 7.7%이하이다.

경계에서의 오차의 증가는 조사구간내에 관벽면이 포함되어 발생하는 문제로 생각된다.

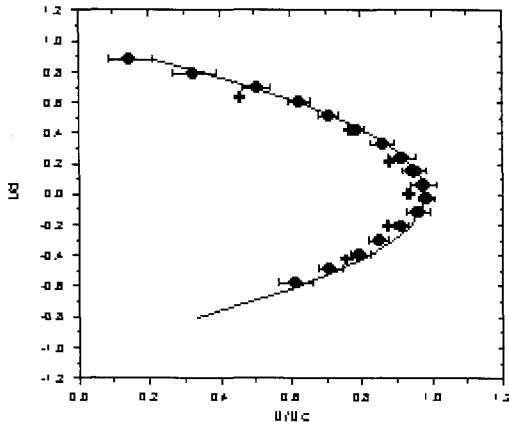


Fig. 2 Comparison of echo PIV and analytic solution (10×10 (●), 24×24 (+) : echo PIV, — : From analytic solution)

4. 결론

에코PIV는 초음파와 조영제를 사용한 연속적인 초음파 영상에 광학PIV기법을 결합한 새로운 속도장 측정기법으로 에코PIV의 성능을 향상시키기 위한 다양한 최적화 연구가 수행되었다. 에코PIV측정에 최적화된 초음파 조영제의 영향연구 및 조사구간 이동과 재귀기법과 같은 PIV성능향상알고리즘을 적용하여 공간해상도를 향상시킬 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Atkinson, P. and Woodcock, J.P., 1982, Doppler ultrasound and its use in clinical measurement, New York, Academic Press.
- (2) Kim, H.B. and Lee, S.J., 2000, "Performance Improvement of 2-Frame PTV Method Using an Adaptive Hybrid Scheme," Trans. of the KSME (B), Vol. 24, No. 3, pp. 443~449
- (3) Uhlendorf, V., Scholle, F. and Reinhardt, M., 2000, "Acoustic Behavior of Current Ultrasound Contrast Agents," Ultrasonics, Vol. 38, pp. 81~86.
- (4) Westerweel, J., Dabiri, D. and Gharib, M., 1997, "The Effect of a Discrete Window Offset on the Accuracy of Cross-correlation Analysis of Digital PIV Recordings," Exp. Fluids, Vol. 23, pp. 20~28