

3차원 디지털 스펙클 토모그래피를 이용한 비정상 비대칭 유동의 밀도 분포 재건

백승환[†] · 김용재* · 고한서**

Reconstruction of Density Distribution for Unsteady and Asymmetric Flow Using Three-dimensional Digital Speckle Tomography

Seung Hwan Baek, Yong-Jae Kim, and Han Seo Ko

Abstract

Transient and asymmetric density distributions have been investigated by a digital speckle tomography with a novel integration method. Multiple CCD images captured movements of speckles in three angles of view simultaneously because the flows were asymmetric and unsteady. The speckle movements which have been formed by a ground glass between no flow and downward butane flow from an elliptical nozzle have been calculated by a cross-correlation tracking method so that those distances can be transferred to deflection angles of laser rays for density gradients. A novel integration method has been developed to obtain projection data from the deflection angles for the speckle tomography. The unsteady density fields have been reconstructed from the accurate projection values by the digital speckle tomography method using the developed integration method.

Key Words : Digital speckle tomography(디지털 스펙클 토모그래피), Unsteady and asymmetric flow(비정상 비대칭 유동), Reconstruction(재건), Butane flow(부탄 유동), Integration(적분)

1. 서 론

레이저 스펙클 토모그래피는 레이저 빔이 측정 영역을 통과할 때 밀도 차이에 의해 발생하는 굴절각의 변화를 측정하여 유동장의 온도 및 밀도장을 비침투적으로 측정하는 기술이다[1]. 레이저 빔이 유동장을 통과할 때 투사된 유동의 이미지는 디지털 스펙클 시스템을 이용하여 스펙클 이미지로 얻어질 수 있으며 상호상관법을 이용하여 유동이 없을 때와 있을 때의 영상을 분석하면

스펙클의 이동 거리를 계산할 수 있다. 이로부터 레이저 빔의 굴절각을 얻을 수 있으며 Gladston-Dale 관계식을 이용하면 굴절각 α 는 밀도장 구배의 광선 방향 적분으로 표현된다[2].

$$\Psi_{SP}(s, \theta) \cong \alpha = G \int \frac{\partial \rho}{\partial s} dt \quad (1)$$

여기서 Ψ_{SP} 는 디지털 스펙클 분석법의 투사데이터, α 는 입사 광선의 굴절각, ρ 는 밀도장, s 는 입사 광선에 수직, t 는 입사 광선에 평행한 축이고 G 는 Gladston-Dale 상수이다.

Mach-Zehnder 간섭계의 투사데이터 Ψ_{IF} 는 유동장을 통과하지 않는 광선과 통과하는 광선 사이의 길이의 차이에 의해 결정되며 기준 광선으로부터의 fringe와 교란된 fringe의 차이는 밀도장의 광선 방향 적분으로 표현된다.

† 책임저자, 성균관대학교 기계공학과 대학원
E-mail : bbaekgun@skku.edu

* 성균관대학교 기계공학과 대학원

** 성균관대학교 기계공학부

$$\Psi_{IF} = \frac{1}{\lambda} \int (n - n_{ref}) dt = \frac{G}{\lambda} \int (\rho - \rho_{ref}) dt \quad (2)$$

여기서 λ 와 n 은 레이저의 파장 길이와 굴절률을 나타낸다. 따라서 Mach-Zehnder 간섭계는 움직인 fringe가 밀도 자체의 적분에 의해 결정되며 디지털 스펙클 시스템의 굴절각은 밀도 구배의 광선 방향 적분에 의해 표현된다. 식 (1)과 (2)를 정리하면 디지털 스펙클 시스템과 간섭계 사이의 관계를 알 수 있다.

$$\frac{\partial \Psi_{IF}}{\partial s} = \frac{G}{\lambda} \frac{\partial}{\partial s} \int (\rho - \rho_{ref}) dt = \frac{G}{\lambda} \int \frac{\partial \rho}{\partial s} dt = \frac{1}{\lambda} \Psi_{SP} \quad (3)$$

식 (3)을 투사 평면에서 s 축 방향으로 적분하면 디지털 스펙클의 투사 신호로부터 간섭계의 투사 신호를 얻을 수 있다.

$$\Psi_{IF} = \frac{1}{\lambda} \int \Psi_{SP} ds \quad (4)$$

식 (4)로부터 디지털 스펙클 시스템에서 s 방향으로의 투사데이터 Ψ_{SP} 의 적분값은 간섭계의 fringe 이동량 Ψ_{IF} 와 같음을 알 수 있다. 본 연구에서는 기존의 식 (4)에 의한 적분값이 많은 적분 에러를 발생시켜 이를 개선하는 새로운 적분법을 제안하고 그 결과를 비교하여 정확도를 검증하였다. 또한 개발된 적분법을 이용하여 제한된 각도에서 부탄의 3차원 밀도장을 재건하였다.

2. 적분법 개선

식 (2)를 개선한 새로운 적분법은 다음과 같다. Ψ_{IF} 를 얻기 위하여 Ψ_{SP} 가 식 (5)와 같이 수정되었다. 수정된 Ψ_{SP}' 는 부정확한 적분값을 줄여 주는 역할을 한다. 식(4)와 같은 적분은 물리적으로 유동이 없는 적분의 시작점과 끝점에서 균형이 맞지 않아 토모그래피 기법을 이용한 유동의 밀도 재건을 할 경우 실제 밀도장과 다른 결과를 보여준다. 이러한 대부분의 이상 결과는 적분에서 발생한다.

$$\Psi_{SP}' = \Psi_{SP}(i) - \sum_{i=1}^n \Psi_{SP}(i) \times \frac{|\Psi_{SP}(i)|}{\sum_{i=1}^n |\Psi_{SP}(i)|} \quad (5)$$

Fig. 1에서 식 (4)와 (5)의 적분을 비교한 결과를 볼 수 있다. 유동장이 형성되는 중심부 이외의 범위에는 스펙클이 이동하지 않았으므로 식(5)를 이용한 적분 결과가 적절함을 알 수 있다. 정확도를 검증하기 위해서 s 방향으로의 적분을 왼쪽과 오른쪽에서 각각 수행하였을 때 왼쪽에서의 적분결과는 식(4)를 이용하였을 때보다 퍼크값이 4.3% 상승하였고 오른쪽에서의 적분결과는 4.2% 감소하였다. 따라서 새로운 적분법은 기존의 부정확한 결과값에 비해 비교적 정확한 결과값과 실험 데이터에 적합한 균형잡힌 결과를 보여줌을 알 수 있다.

3. 토모그래피 재건 알고리즘

3차원 밀도장은 계산된 변수들에 의해서 기초함수의 연속으로 표시 될 수 있으며, 토모그래피는 각각의 기초함수가 하나의 변수에 정의되는 선형적인 경우에 결과를 구하기 위한 최적화 작업을 수행한다. 각각의 기초 함수의 위치는 식 (6)과 같다.

$$\hat{f}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{JKL} O_i b(x - x_i, y - y_i, z - z_i) \quad (6)$$

여기서 \hat{f} 는 재건될 장을 나타내고, b 는 고정된 위치인 (x_i, y_i, z_i) 에 위치한 기초함수의 일반형이며 O_i 는 (x_i, y_i, z_i) 에 중심을 둔 i 번째 기초함수의 높이 상수이다. (x_i, y_i, z_i) 는 x, y, z 방향으로 같은 간격을 갖는 J, K, L 개의 점들을 포함하는 육면체 배열을 형성하며 이 때 기초함수는 cubic B-spline의 사용이 제안되었다[3].

4. 실험 및 결과

비정상 비대칭 부탄 유동의 밀도 재건을 위해 514.5nm의 파장을 가지는 Ar-Ion 레이저를 사용하였으며 비대칭의 형상을 가지는 노즐의 끝단에서 17mm 거리에 있는 평면을 재건하였다 (Fig. 2). 밀도장의 재건을 위하여 서로 다른 3개의 각도에서 초당 30프레임의 CCD 카메라를 이용하여 영상 데이터를 확보하였다.

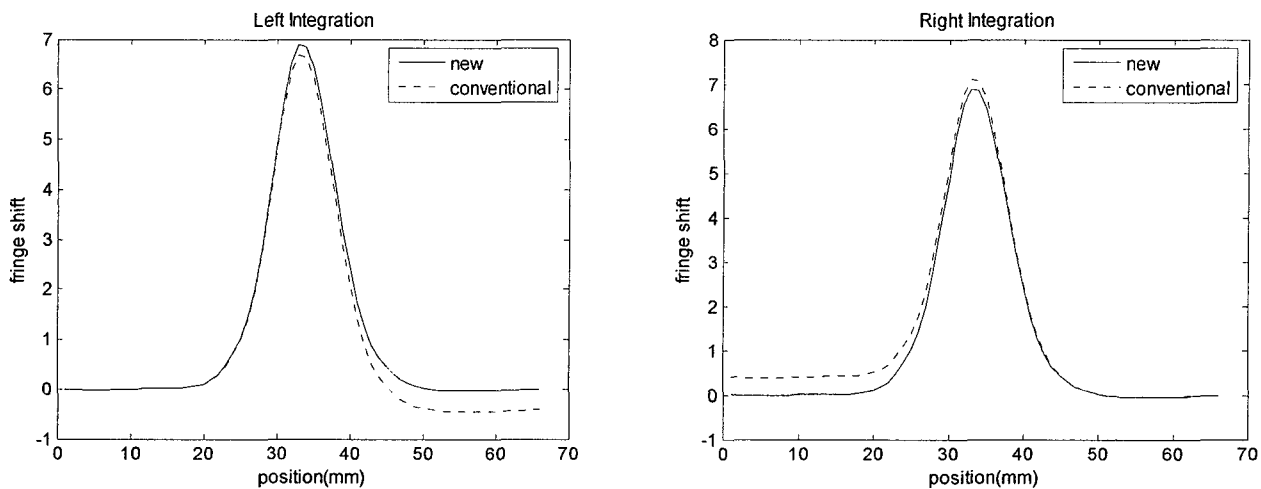


Fig. 1 Comparison between conventional and new integration method for projection data

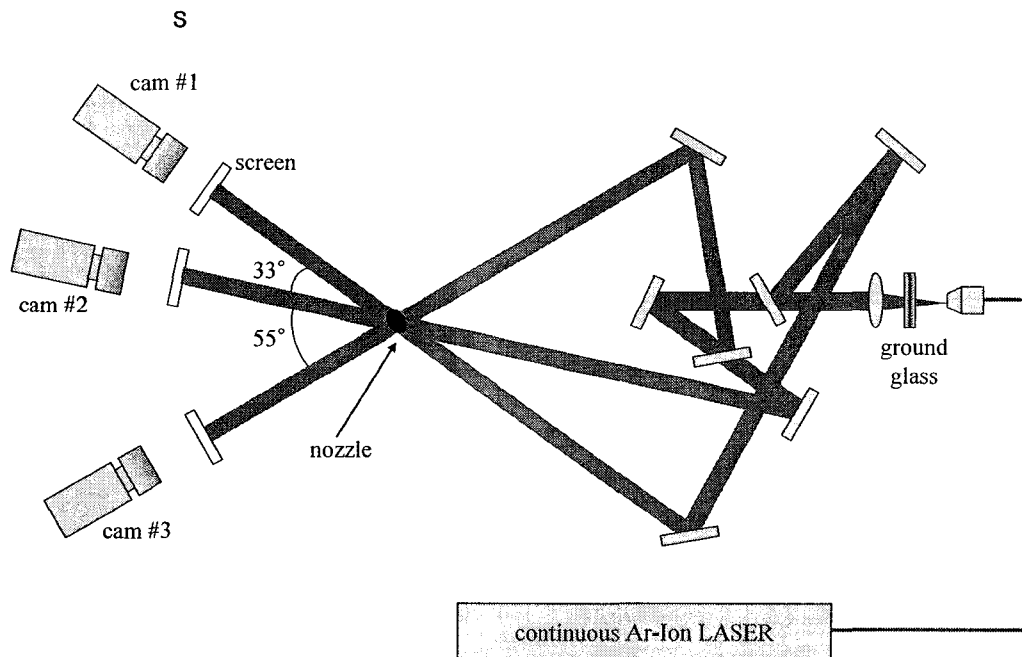


Fig. 2 Schematic diagram of digital speckle system for downward butane flow

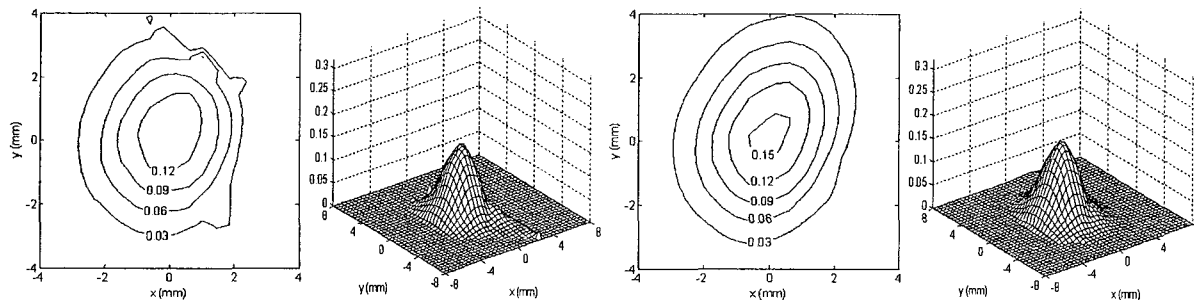


Fig. 3 Comparison of contours of reconstructed density distribution of butane flow for (a) without new integration method and (b) with new integration method (3/30 sec)

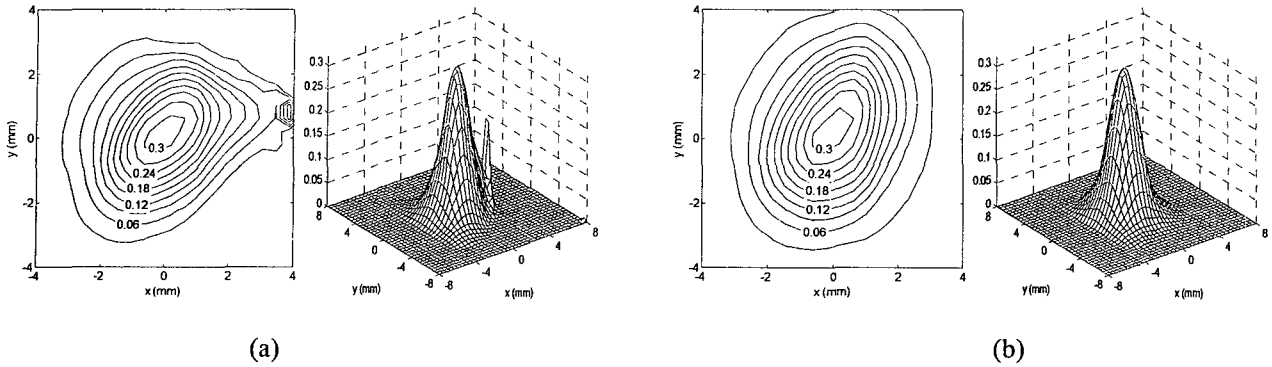


Fig. 4 Comparison of contours of reconstructed density distribution of butane flow for (a) without new integration method and (b) with new integration method (4/30 sec)

전반사 미러와 50% beam splitter를 사용하여 최대 beam path를 동일하게 하였다. 유동은 비정상 비대칭의 형태이며 이를 위해 3개의 각도 +33°, 0°, -55°에서 영상 데이터를 획득하여 밀도 재건을 수행하였다. Fig. 3, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기존의 적분법에 의한 결과는 적분 에러가 계속 쌓여 밀도장을 재건하면 관찰된 결과와는 상이한 부정확한 결과를 보여주며 개발된 적분법에 의한 결과는 실제 밀도장과 유사하게 재건됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 새로운 적분법을 개발하여 디지털 스펙클 토모그래피를 이용한 부탄의 밀도 재건 연구를 수행하였다. 유동이 있을 때와 없을 때 부탄의 스펙클 변화는 상호상관법을 이용하여 얻어졌다. 보다 정확한 인터페로미터리 프로젝션 데이터를 얻기 위하여 새로운 적분법은 스펙클 그림 굴절각 적분을 개선하였다. 이를 기존의 적분법과 결과를 비교하여 정확도를 검증하였으며 토모그래피를 이용한 개선된 비대칭 유동의 밀도 재건 방법을 제시하였다. 이러한 연구는 연료 분사, 터보기계, 충격파의 연구 등에 적용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) Kak, A., Slaney, M., 1987, "Principle of Computerized Tomographic Imaging", pp.49-112
- 2) Partington, J., 1953, "Physico-Chemical Optics", An Advanced Treatise on Physical Chemistry, Vol

IV pp. 27-31

- 3) Hanson, K., and Wecksung, G., 1985, "Local Basis Function Approach to computed Tomography", Applied Optics. Vol. 24, No 23, pp. 4028-4039