

비정상 비대칭 기체 유동의 3차원 밀도 분포 분석을 위한 디지털 스펙클 토모그래피 기법의 신호 처리 기술 개발

Development of Signal Processing Technique of Digital Speckle Tomography for Analysis of Three-Dimensional Density Distributions of Unsteady and Asymmetric Gas Flow

백승환*, 김용재*, 고한서*[†]

Seung Hwan Back* , Yong-Jae Kim* and Han Seo Ko*[†]

초 록 3차원 디지털 스펙클 토모그래피를 개발하여 레이저 영상 신호로부터 비정상, 비대칭 부탄 유동의 밀도 분포를 분석하였다. 이러한 유동 해석을 위해 3가지 각도에서 CCD 영상으로부터 스펙클의 이동 신호를 획득하여 유동이 없을 때와 있을 때의 스펙클 변화를 상호 상관법에 의해 계산하였다. 이 때 스펙클의 이동 신호는 유동의 밀도 구배에 따라 굴절각으로 변환될 수 있다. 그 굴절각을 적분하여 광선의 주름 변이를 얻고 이로부터 실시간 곱셈산술재건법(MART)을 이용하여 부탄의 3차원 밀도장 재건을 수행하였다.

주요용어: 디지털 스펙클 토모그래피, 상호상관법, 곱셈산술재건법(MART), 부탄 유동

Abstract Transient and asymmetric density distributions of butane flow have been investigated from laser image signals by developed three-dimensional digital speckle tomography. Moved signals of speckles have been captured by multiple CCD images in three angles of view simultaneously because the flows were asymmetric and transient. The signals of speckle movements between no flow and downward butane flow from a circular half opening 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. The three-dimensional density fields have been reconstructed from the fringe shift signal which is integrated from the deflection angle by a real-time multiplicative algebraic reconstruction technique (MART).

Keywords: Digital Speckle Tomography, Cross-Correlation, Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique, Butane Flow

1. 서 론

레이저 스펙클 토모그래피(laser speckle tomography)는 레이저 빔(laser beam)이 측정 영역을 투과할 때 밀도의 차이로 인한 굴절각의 변화 신호를 이용하여 측정 영역의 온도 및 밀도장을 비침투적

으로 측정하는 기술이다[1]. 토모그래피(tomography) 계산법은 지난 수년간 개발되어 왔다. 처음에는 의학적으로 이미지 합성에 적용하기 위해 역과역투사기법(filtered back projection technique)과 같은 수학적인 전환법[2]이 개발되었고 그 후 다양한 전환 기법과 그와 관계된 여과 함수(filtered

function)[3]가 개발되었다. Santoro 등[4]은 Fourier 영역법과 역투사기법을 메탄 제트의 농도(concentration)를 구하기 위해 사용하였다. Fourier 영역법은 단면의 토모그래피(tomography) 방법으로 비교적 효과적이나 Fourier 변환을 위해 상당히 많은 수의 투사 광선과 각도를 필요로 하며[5] 따라서 실제 실험을 해야 되는 실용적인 측면에서 정확한 결과를 얻기가 어려운 경우가 있다. 이 어려움을 극복하기 위해 제한된 각도에서의 토모그래피(tomography) 방법이 개발되어 왔고 그 중에서 가장 많이 쓰이는 방법이 산술재건법(ART)[6]이다.

레이저 빔이 유동장을 투과할 때 유동의 투사 신호는 디지털 스펙클 시스템(digital speckle system) [7]을 이용하면 스펙클 이미지로 얻어질 수 있다. 유동이 있을 때와 없을 때 이미지 상의 스펙클들을 상호상관법(Cross-correlation method)으로 처리하면 스펙클의 이동 거리를 계산할 수 있고, 그 이동량으로부터 레이저 빔의 굴절각을 얻을 수 있다. 얻어진 굴절각은 입사 광선에 대한 수직 방향의 굴절률이 입사 광선 방향으로 적분된 것으로 표현된다. Gladston-Dale 관계식[8]을 이용하면 굴절각 α 를 밀도장 구배의 광선 방향 적분으로 얻을 수 있다.

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

여기서 Ψ_{SP} 는 디지털 스펙클 분석법의 투사 신호, 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 투사 신호인 Ψ_{IF} 는 측정 유동장을 통과하지 않는 기준 광선과 통과하는 변형 광선 사이의 길이의 차이에 의해 결정된다. 기준 광선으로부터의 기준 fringe와 교란된 fringe의 차이는 밀도장의 광선 방향 적분으로 표현된다[9].

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

여기서 λ 와 n 은 레이저의 파장 길이와 굴절률을 나타낸다. 따라서, Mach-Zehnder 간섭계는 움직인 fringe가 밀도 자체의 적분에 의해 결정되고, 반면에 디지털 스펙클 시스템의 굴절각은 밀도 구배의 광선 방향 적분에 의해 표현된다는 차이가 있다. 식 (1)과 (2)를 결합하면 디지털 스펙클

시스템과 간섭계 사이의 관계를 알 수 있다[10].

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

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

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

식 (4)는 디지털 스펙클에서 s방향으로의 광선 굴절각 Ψ_{SP} 의 적분은 간섭계의 fringe 이동량 Ψ_{IF} 와 같음을 보여준다. 식 (1)의 투사 신호와 밀도장과의 관계는 대수적이지 않기 때문에 비대수적인 디지털 스펙클 데이터들은 식 (4)에 의해 대수적인 간섭계 데이터로 변환되어서 토모그래피 방법 중의 하나인 곱셈산술재건법에 의해 계산될 수 있도록 투사면에서 수치적으로 적분되어야 한다. 본 연구에서는 디지털 스펙클 신호로부터 제한된 각도에서 부탄의 3차원 밀도장을 재건하기 위한 3차원 실시간 토모그래피 방법을 개발하였다.

2. 디지털 스펙클그램 분석

근접한 레이저 빛이 ground glass와 같은 임의의 회절격자를 통과할 때 광선들은 모든 방향으로 회절된다. 이는 육안으로 확인할 수 있으며, 레이저 스펙클(laser speckle)이라 불리는 밝고 어두운 점들로 나타난다. 빛의 광선이 측정부의 굴절을 변화에 따라 원래 경로에서 약간 구부러지기 때문에 투과된 광선은 약간 다른 각도로 스크린에 비추지게 되고 스펙클은 원래 위치에서 이동하게 된다 Fig. 1에서 보이는 것처럼 노즐로부터 스크린까지의 거리 l 을 알고 있으므로 스펙클의 이동거리 δ 로부터 굴절각 α 를 $\alpha \cong \tan \alpha = \delta/l$ 에 의해 계산할 수 있다. 일반적인 스펙클 촬영기술이 이중 노출을 이용하여 이동된 스펙클에 원래의 스펙클을 겹쳐서 스펙클 이동을 측정하는데 반해서, 디지털 스펙클은 CCD 카메라를 이용해서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 원래의 스펙클과 이동된 스펙클의 영상을 각각 얻어낸 뒤, 입자 영상 속도계(PIV)의 입자추적이론과 같은 방법을 사용해서 스펙클의 이동량을 측정한다.

상호상관법(Cross-correlation method)은 스펙클의 이동량을 측정하는데 사용되며 Fig. 3에서 보는 바와 같이 계산된 대부분의 스펙클이 수평방향으로 이동하기 때문에 여기에서는 정사각형 조사 면적 대신 직사각형 형태의 조사 면적을 사용하였다. Fig. 3에서 보이는 선의 길이는 빛의 회절로 인한 스펙클의 이동량을 나타내고, 화살표는 스펙클이

이동한 방향을 나타내며 점부분은 스펙클의 이동이 없었다는 것을 의미한다. 이러한 스펙클의 이동량으로부터 레이저 빔의 굴절 신호를 Fig. 4 (a)에 보이는 것처럼 계산할 수 있고, 이 투사 신호를 적분하여 Fig. 4 (b)와 같은 간섭계 투사 신호를 얻을 수 있다. 이와 같이 계산된 다양한 각도에서의 투사 신호로부터 개발된 3차원 토모그래피 기법을 이용하여 실제 밀도장을 재건한다.

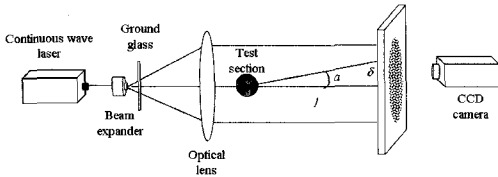


Fig. 1 Schematic diagram of digital speckle system

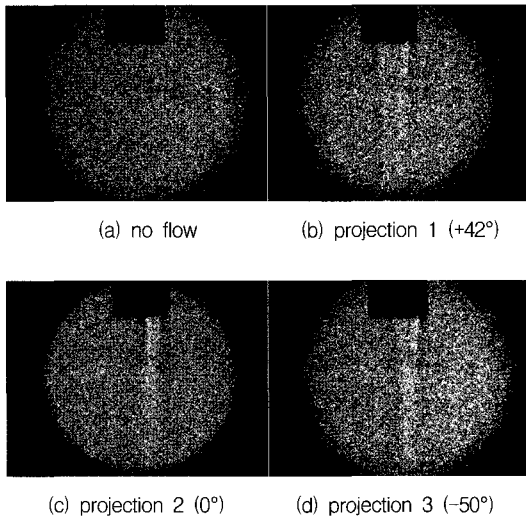
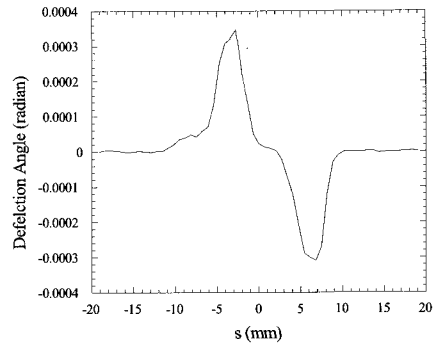
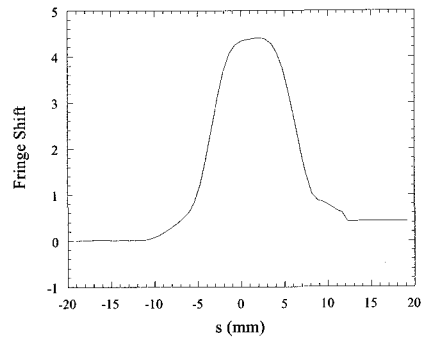


Fig. 2 Digital speckle images of downward butane flow for three projection angles of view ($Q=0.33$ l/min)



(a) Deflection angle



(b) Fringe shift

Fig. 4 Projection signals from digital speckle system for downward butane flow

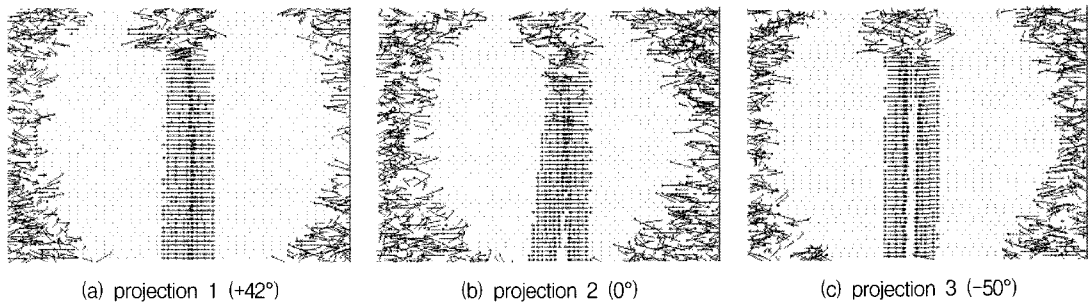


Fig. 3 Speckle displacements by cross-correlation method for downward butane flow

3. 토모그래피 재건 알고리즘

3차원 밀도장은 계산된 변수들에 의해서 기초함수의 연속으로 표시될 수 있으며, 토모그래피는 각각의 기초함수가 하나의 변수 (통상 고정된 간격에 대한 높이)에 의해 정의되는 선형적인 경우에 결과를 구하기 위한 최적화 작업을 수행한다. 각각의 기초함수의 위치는 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{f}(x, y, z) = \sum_{i=1}^{JKL} O_i b(x-x_i, y-y_i, z-z_i) \quad (5)$$

여기서 \hat{f} 는 재건될 장을 나타내는 함수이고, 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 방향으로 같은 간격을 갖는 J 개의 점들과 y 방향의 K 개의 점들, 그리고 z 방향의 L 개의 점들을 포함하는 3차원 육면체 배열을 형성한다. Fig. 5는 2차원 cubic B-spline 함수를 보여주고 있는데, cubic B-spline 함수와 같은 부드러운 기초 함수를 사용하면 square-pixel 기초 함수보다 적은 수의 미지상수를 가지고도 상대적으로 부드럽고 정확한 재건을 할 수 있다. 이들 미지상수들의 최적화된 해는 계산 중간 과정의 목표함수 \hat{f} 의 가상 투사 신호 $\hat{\Psi}$ 와 실제장 f 의 투사 신호 Ψ 의 편차를 최소화함으로써 구해야 한다.

기초함수의 선택에 대한 비교 연구[11]는 x 변수에 대해 다음과 같이 표현되는 cubic B-spline의 사용을 제안하고 있다.

$$b_x(x-x_i) = \begin{cases} \frac{(2\Delta_x - |x-x_i|)^3 - 4(\Delta_x - |x-x_i|)^3}{4\Delta_x^3} & \text{for } |x-x_i| < \Delta_x \\ \frac{(2\Delta_x - |x-x_i|)^3}{4\Delta_x^3} & \text{for } \Delta_x \leq |x-x_i| < 2\Delta_x \\ 0 & \text{for } |x-x_i| \geq 2\Delta_x \end{cases} \quad (6)$$

여기서 Δ 는 격자 간격이다. b_x 는 $x = x_i$ 일 때 1, $x = x_i \pm \Delta x$ 일 때 0.25, 그리고 $x = x_i \pm 2\Delta x$

와 그 이후에는 0이다. y 와 z 방향 변수도 이와 같고, 따라서 3차원 기초 함수는 이 조합의 곱, 즉 $b(x-x_i, y-y_i, z-z_i) = b_x(x-x_i) \times b_y(y-y_i) \times b_z(z-z_i)$ 이다.

투영된 신호 Ψ_{PZR} 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Psi_{PZR} = \sum_{j=1}^{JKL} O_j \int b(x-x_i, y-y_i, z-z_i) dt \quad (7)$$

여기서 $PZR = 1, 2, 3, \dots$, PZR 은 한 평면에서 투사 신호의 각도수가 P , z 방향 평면의 수가 Z , 그리고 한 각도에서 광선의 수가 R 일 때 전체 광선의 총수이다. 식 (7)은 다음과 같은 행렬 형태로 표현될 수 있다.

$$\Psi = WO \quad (8)$$

여기서 Ψ 는 측정된 투사 신호이고 W 는 투사 행렬이며 O 는 재건될 벡터이다. PZR 개의 선형 방정식 (각 방정식당 한 개의 측정된 투사 광선)을 계산하는 것이 JKL 개의 미지수에 대한 산술재건법 (ART)과 같은 3차원 급수 전개 기법의 목표이다. 2차원 평면에 대해 계산하는 기존의 토모그래피 방법과 달리 본 연구에서는 식 (5)에 주어진 것과 같은 3차원 밀도장을 재건하기 위해 PZR 로 구성된 3차원 투사 신호를 한번에 계산하는 3차원 토모그래피 방법이 개발되었다.

산술재건법(ART) 알고리즘은 재건될 벡터 O 를 얻기 위한 해법으로서 측정된 투사 신호와 계산된 가상의 투사 신호간의 편차를 대수적으로 갱신하여 반복적으로 최적화한다.

$$O^{q+1} = O^q + \frac{\Psi_i - \langle w_i, O^q \rangle}{\left(\sum_{j=1}^{JKL} w_{i,j} \right)^2} w_i, \quad \sum_{j=1}^{JKL} w_{i,j} \neq 0 \quad (9)$$

여기서 q 는 반복횟수를 가리키며 w_i 는 투사 행렬의 i 번째 열을, $w_{i,j}$ 는 투사 행렬의 i 번째 열과 j 번째 행 요소를, 그리고 Ψ_i 는 그에 해당하는 측정된 광선의 투사 신호를 나타낸다. 만약 $\sum_{j=1}^{JKL} w_{i,j} = 0$ 이면

O 는 변하지 않는다. 이 알고리즘은 수렴에 도달할 때까지 각각의 광선에 기초한 반복을 수행한다.

곱셈산술재건법(MART)은 가상 투사 신호 $\hat{\Psi}$ 와 측정된 투사 신호 Ψ 의 편차가 결과 상수들에 분배되는 방법에 있어서만 산술재건법(ART)과 다르다. 곱셈산술재건법(MART)은 다음과 같이 곱셈 수정 벡터 C 의 요소 C_i 를 사용한다.

$$O_i^{q+1} = C_i^q O_i^q$$

$$C_i^q = \begin{cases} 1 - 0.5 W_i^q \left(1 - \frac{\Psi_i}{\hat{\Psi}_i} \right) & \text{for } \hat{\Psi}_i \neq 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

여기서 q 는 q 번째 반복을 그리고 W_i 는 가중요소를 나타낸다. MART를 사용하는 장점중의 하나는 음수가 아닌 스칼라를 재건하는 데 있어서 음수가 아닌 결과 데이터를 보장한다는 것이다.

이 알고리즘들의 갱신은 원칙적으로 간섭계와 같이 필드의 값들을 직접 적분해서 투사 신호를 얻는 대수적인 투사 신호 값들에 대해서만 가능하다. 따라서 디지털 스펙클과 같이 장의 기울기를 적분한 투사 신호 Ψ_{SP} 는 식 (4)에 의해 간섭계의 투사 신호 Ψ_{IF} 로 변환한 후 ART나 MART와 같은 토모그래피 방법을 사용하면 밀도나 온도장과 같은 결과를 재건할 수 있다. 본 연구에서는 선행 연구[10]에서 밀도 분포 분석에 대한 정확도가 검증된 MART를 이용하여 실험에서 얻어진 신호로부터 부탄 유동의 3차원 밀도장을 재건하였다.

4. 실험 장치와 실험 방법

반을 막은 원형 노즐로부터 아래 방향으로의 부탄 유동을 35mW He-Ne 레이저를 이용하여 개발된 3차원 디지털 스펙클 토모그래피 방법으로 측정하였다. 노즐의 재질은 구리이고 내부 직경은 10mm이다. Fig. 6에서 보여 지는 것과 같이 레이저 빔은 5x 규격의 확장 렌즈를 통해 확장되며, ground glass를 통해 광학렌즈로 보내어진다. 부탄 가스가 흐르는 측정부가 비대칭을 이루기 때문에

측정부를 통과하는 레이저 빔은 빔스플리터와 광학 거울을 이용하여 각각 다른 3방향(+42°, 0°, -50°)으로 만들었으며 3대의 CCD 카메라를 이용해서 3개의 스크린으로부터 투사 신호를 측정하였다. 투사 각도 간격이 균일한 경우 대칭적인 투사 신호값을 얻게 되어 정확도가 떨어지므로 투사 각도 간격에 변화를 주었다.

측정된 투사 신호로부터 상호상관법을 이용하여 스펙클의 이동량을 구한 후에 식 (4)에 의해서 fringe shift 신호로 변환하였다. 마지막으로 3방향의 fringe shift 신호를 개발된 3차원 MART를 이용하여 시간에 따른 3차원 밀도장으로 재건하였다. 부탄가스는 노즐로부터 수직 하향으로 흘러보였고, 유량은 0.33 l/min이며 부탄가스의 유동이 정상상태에 도달한 후 밸브를 닫아서 가스의 양이 서서히 줄어들기까지의 영상을 CCD 카메라를 이용해서 3초간 촬영하였다.

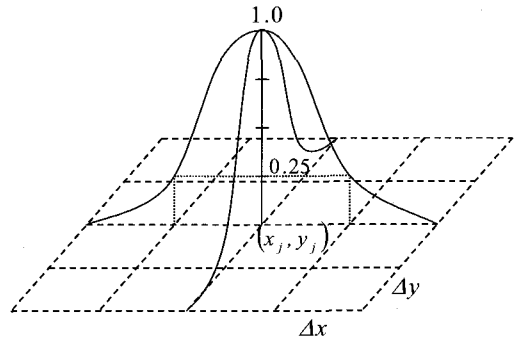


Fig. 5 Cubic B-spline basis function

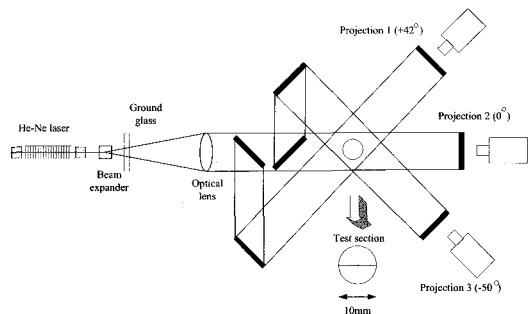


Fig. 6 Schematic diagram of digital speckle system for downward butane flow using three projection angles simultaneously

5. 결과 및 고찰

노즐의 끝부분에서 11mm로부터 21mm까지의 구간에서 상호 상관 이론을 이용해 스펙클의 이동 신호를 측정하여 fringe shift 신호로 변환한 후 개발된 3차원 MART에 의해 시간에 따른 3차원 밀도장을 재건하였다. 3차원 재건이므로 측정부의 모든 높이에서 밀도장의 재건이 가능하지만 3차원 재건을 한번에 보여줄 수 없는 지면상의 한계로 인하여 노즐의 끝단으로부터 아래 방향으로 11, 16, 21mm의 위치에서 밀도장을 1초 간격으로 재건한 데이터를 도시하여 개발된 토모그래피 방법을 검증하였다. 부탄가스의 흐름이 활발한 1초 부분의 Fig. 7 (a), (b), (c)에서는 유체가 흐르는 부분에서 많은 부분이 부탄가스의 100% 밀도 (2.4kg/m³)에 근접하고 있음을 알 수 있고, 그로 인해 3차원 곱셈산술재건법(MART)이 검증될 수 있다. 또한, 유체가 흐르고 있는 부분에서는 공기와의 혼합이 상대적으로 적게 발생하기 때문에 노이즈의 발생도 적은 편이다. 측정부 주위에서 발생하는 노이즈는 3개의 각도에서 측정된 후 토모

그래피를 수행하였기 때문에 생기는 것으로 투사각을 늘리면 노이즈가 줄어들 것으로 예상된다.

시간이 지날수록 (Fig. 7 (d), (e), (f)) 부탄가스의 유량이 적어져서 공기와의 혼합이 활발히 이루어지기 때문에 유체가 흐르는 부분에서의 부탄 밀도는 상대적으로 작아지며, 그에 따른 노이즈의 발생도 증가하게 된다. 특히 3초가 지난 후의 결과인 Fig. 7 (g), (h), (i)에서 보이는 것처럼 시간이 더욱 흐르면 부탄의 밀도에 비해 상대적으로 노이즈의 값은 더욱 커지게 되는데, 이는 부탄과 공기의 혼합으로 인한 유동의 불안정성이 증대하고, 부탄의 유량 감소로

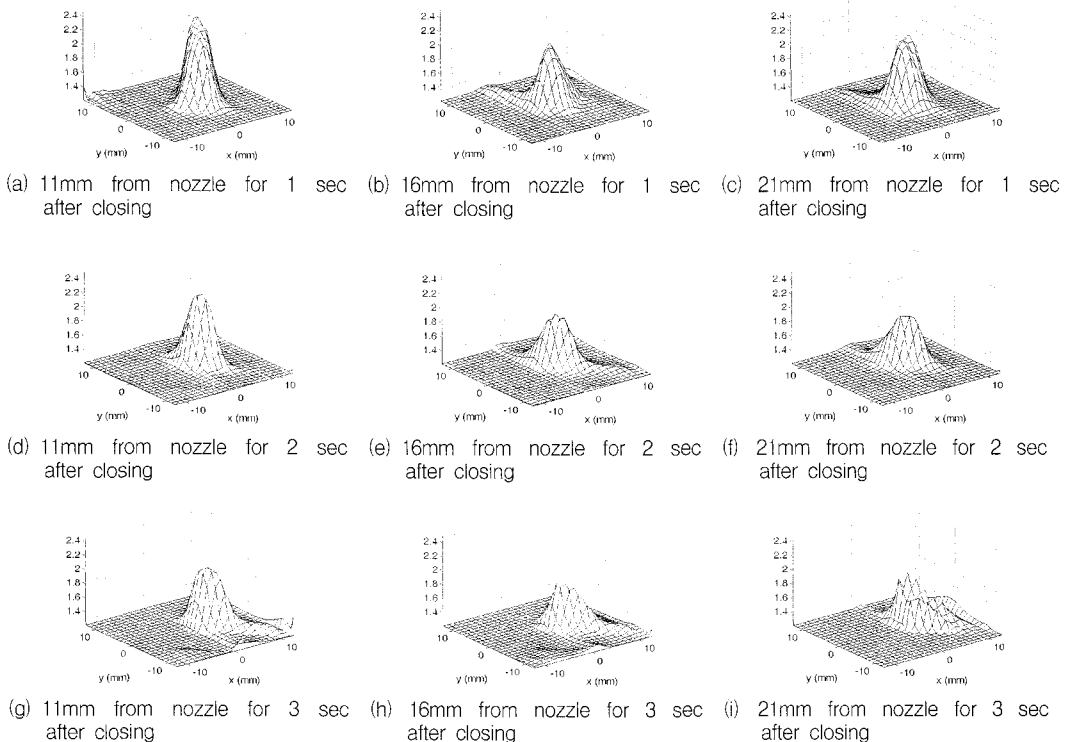
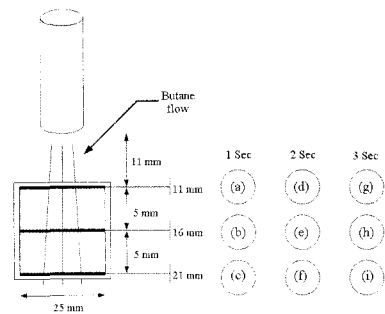


Fig. 7 Reconstructed three-dimensional density distributions of transient butane flow from half-blocked nozzle

인해 주위 공기의 움직임에 부탄 유동이 민감하게 반응하여 흐름에 변화가 생기기 때문이다. 시간에 따른 변화뿐만 아니라 높이에 따라서도 부탄의 밀도 변화가 나타난다. Fig. 7 (a), (d), (g)에 비해 높이가 노즐로부터 5mm 더 떨어진 Fig. 7 (b), (e), (h)의 밀도가 공기와의 혼합에 의해 더 낮아지고 마찬가지로 5mm 더 아래인 Fig. 7 (c), (f), (i)의 밀도가 더 낮아지며 노이즈도 상대적으로 커짐을 알 수 있다.

이 토모그래피 계산은 IBM PC-Pentium 4, CPU 2.0GHz, Memory 1 Gbyte에서 수행하였으며 반복회수는 3번이고 평균 계산 시간은 5분 12초였다. 반복회수가 더 늘어나게 되면 밀도 분포 자체가 너무 거칠어지기 때문에 일반적인 밀도 분포와 흡사한 양상을 보이는 지점에서 반복을 중지했으며, 개발된 3차원 재건이 기존의 2차원 재건[10]에 비해 반복회수가 줄어들었음을 알 수 있다.

6. 결 론

디지털 스펙클 기법에 의해 얻은 신호를 가지고 개발된 MART를 이용하여 실시간으로 부탄 유동의 3차원 밀도장을 계산할 수 있었다. 개발된 3차원 실시간 토모그래피 기법은 실험에 의해 검증되었으며, 투사 신호의 각도 수, 평면 수, 또는 광선 수가 늘어날수록 토모그래피 기법의 정확도가 증가함을 예상할 수 있다. 전체 측정 영역 중에서 유동이 일어나는 관심 영역을 선택하여 밀도장을 재건하였고, 결과에서 보여지는 노이즈는 카메라의 미세한 진동, 주변 공기 움직임의 불안정 등이 원인이 될 수 있으며 이는 시험 조건에 철저한 주의를 기울일 경우보다 줄어들 수 있다. 또한 노이즈는 노즐에서 멀어질수록, 또는 유량이 줄어들수록 커지는 경향을 보였는데, 이는 공기와의 혼합이 증가함에 따라 부탄의 밀도가 줄어들어 밀도 구배 측정이 명확하지 않아지기 때문이다. 이 결과들을 이용하면 실시간, 3차원 기체 유동의 밀도 분포 분석이 가능하며 따라서 원자로 내부와 같이 침투적 방법의 사용이 어려운 경우 가스 누출의 비침투적 측정을 통한 사고 예방 등에 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 2005년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었음 (No. R08-2003-000-10030-0).

참고문헌

- [1] A. C. Kak and M. Slaney, "Principles of computerized tomographic imaging," IEEE Press, New York, pp. 49-112, (1987)
- [2] M. V. Berry and D. F. Gibbs, "The interpretation of optical projections," Proc. R. Soc. Lond., Vol. A-314, pp. 143-152. (1970)
- [3] R. M. Lewitt, "Reconstruction algorithms: transform methods," Proc. IEEE, Vol. 71, No. 3, pp. 390-408, (1983)
- [4] R. J. Santoro, H. G. Semerjian, P. J. Emmerman, and R. Goulard, "Optical tomography for flow field diagnostics," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 24, No. 7, pp. 1139-1150, (1981)
- [5] R. Rangayyan, A. P. Dhawan, and R. Gordon, "Algorithms for limited-view computed tomography: an annotated bibliography and a challenge," Appl. Opt., Vol. 24, No.3, pp. 4000-4012, (1985)
- [6] R. Gordon, "A tutorial on art," IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. NS-21, pp. 78-92, (1974)
- [7] H. S. Ko, K. Okamoto, and H. Madarame, "Reconstruction of transient three-dimensional density distributions using digital speckle tomography," Meas. Sci. Tech., Vol. 12, No. 8, pp. 1219-1226, (2001)
- [8] J. R. Partington, "Physico-chemical optics", Vol. IV, An Advanced Treatise on Physical Chemistry, Longmans Green, London, pp. 27-31, (1953)
- [9] C. M. Vest, "Holographic interferometry," John Wiley & Sons, New York, pp. 64-103, (1979)
- [10] H. S. Ko and K. D. Kihm, "An extended algebraic reconstruction technique (ART) for density-gradient projections: laser speckle photographic tomography," Exper. Fluids, Vol. 27, No. 6, pp. 542-550, (1999)
- [11] K. M. Hanson and G. W. Wecksung, "Local basis function approach to computed tomography," Appl. Opt., Vol. 24, No. 23, pp. 4028-4039, (1985)