

충돌 제트 분석을 위한 3 차원 토모그래피 기법 개발

고한서[†] · 김용재^{*} · 안성수^{*}

Development of Three-dimensional Tomography Technique for Analysis of Impinging Jet

Han Seo Ko[†], Yong-Jae Kim^{*} and Seong Soo Ahn^{*}

Abstract

Three dimensional density distributions of impinging and eccentric flames have been investigated by digital speckle tomography. The flames have been ignited by a mixture of butane and air from a circular nozzle and impinged against a plate located at the upper side of the burner exit. For comparison with experimental data, computer synthesized phantoms of impinging and eccentric flames have been reconstructed by a developed three-dimensional multiplicative algebraic reconstruction technique (MART). The advanced reconstruction in the stagnation flow region involved the sharp change of the flow direction and pressure gradient has been developed using a cross-correlation method and new scanning technique for the speckle displacement.

Key Words : digital speckle tomography(디지털 반점 단층 촬영 기법), MART(곱셈 산술 재건법)
computer synthesized phantoms(컴퓨터 합성 영상장)

1. 서론

벽면 충돌 제트(impinging jet) 유동은 노즐로부터 분사된 제트를 벽면에 직접 충돌시키는 형태의 유동으로서 열 및 물질 전달에 의한 물체의 가열, 냉각 및 건조 등에 사용되고 있으며, 동력 소비가 비교적 적고 충돌 제트의 유량 제어를 통하여 열전달 및 물질 전달의 제어를 정밀하게 할 수 있다는 장점이 있다.

토모그래피(tomography) 방법은 레이저를 이용하여 열 유동을 비침투적으로 측정하고 그 투사 데이터를 이용하여 정량적으로 온도나 밀도를 계산할 때 쓰이는 효과적인 도구이다. 본 연구에서는 MART 방법을 선택하여 충돌 제트 형상의 밀도 분포 분석에 이용하였다.

2. 토모그래피 재건 알고리즘

3 차원 밀도장은 계산된 변수들에 의해서 기초 함수의 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.

$$\hat{f}(x, y, z) = \sum_{j=1}^{JKL} O_j b(x - x_j, y - y_j, z - z_j) \quad (1)$$

여기서 \hat{f} 는 재건될 장을 나타내는 함수이고, b 는 고정된 위치인 (x_j, y_j, z_j) 에 위치한 기초함수의 일반형이며 O_j 는 (x_j, y_j, z_j) 에 중심을 둔 j 번째 기초함수의 높이 상수이다. (x_j, y_j, z_j) 는 x 방향으로 같은 간격을 갖는 J 개의 점들과 y 방향의 K 개의 점들, 그리고 z 방향의 L 개의 점들을 포함하는 3 차원 육면체 배열을 형성한다. 그러므로, 재건 알고리즘에 의해서 구해질 수 있는 상수들의 총수는 $J \times K \times L$ 개이다.

3. 컴퓨터 합성 기준 영상

3.1 실험

충돌 제트의 대략적인 형상을 얻기 위해 Bunsen Burner 를 이용하여 간단한 벽면 충돌 실험을 하였다.

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail: hanseoko@yurim.skku.ac.kr

^{*} 성균관대학교 대학원 기계설계학과

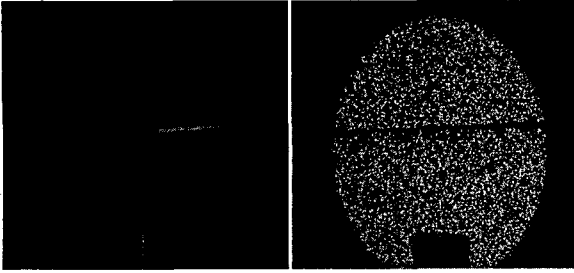


Fig. 1 불꽃 충돌 실험 및 레이저 촬영

3.2 컴퓨터 합성 영상 제작

실험으로부터 얻은 형상을 토대로 $25 \times 25 \times 25$ 정육면체 배열을 가지는 편심 벽면 충돌 화염의 밀도 분포를 형상화 하였다. Cubic B-spline 함수와 같은 부드러운 기초함수를 사용하면 보다 적은 수의 미지상수를 가지고도 상대적으로 부드럽고 정확한 재건을 할 수 있다.

$$b(d_{i,j}) = \frac{(2\Delta_x - d_{i,j})^3 - 4(\Delta_x - d_{i,j})^3}{4\Delta_x^3}, \quad d_{i,j} < \Delta_x$$

$$= \frac{(2\Delta_x - d_{i,j})^3}{4\Delta_x^3}, \quad \Delta_x \leq d_{i,j} \leq 2\Delta_x \quad (2)$$

$$= 0, \quad d_{i,j} > 2\Delta_x$$

여기서 $d_{i,j} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2}$

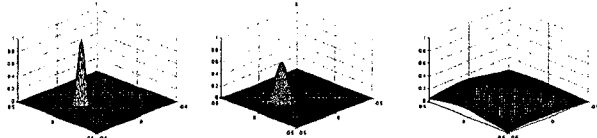


Fig. 2 노즐로부터 입구 높이에 따른 밀도변화

3.3 재건 오차

본 연구에서는 정확도 검증에 위해 오차를 계산하였다. 평균 오차는 기준 영상 함수 \hat{f} 와 재건되는 결과 함수 f 에 의해 결정된다.

$$\Phi_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^{JKL} |f(x_j, y_j, z_j) - \hat{f}(x_j, y_j, z_j)|}{JKL}$$

여기서 JKL 결과 함수를 재건하기 위해 사용되는 기초함수의 총 수이다.

Table 1 Reconstruction errors using MART for three-dimensional density distributions

Iteration Number	$\Psi_{avg}(\%)$	$\Psi_{rms}(\%)$	$\Psi_{abs}(\%)$
11	0.004	0.001	1.1
101	0.00	0.00	0.2
151	0.00	0.00	0.00

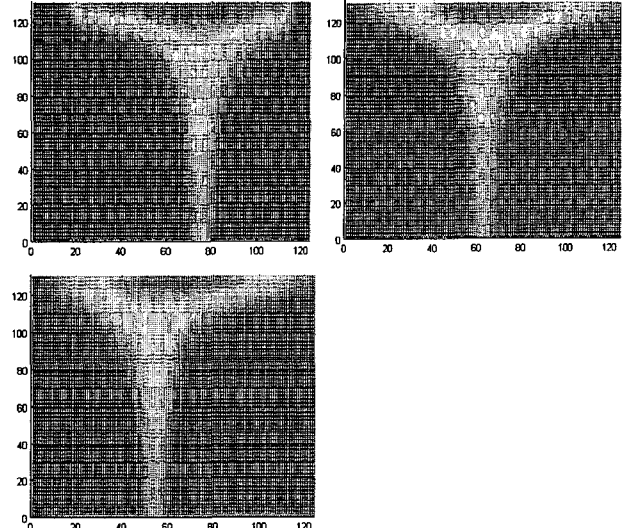


Fig. 3 입사각에 따른 투영데이터 0, 60, 120°

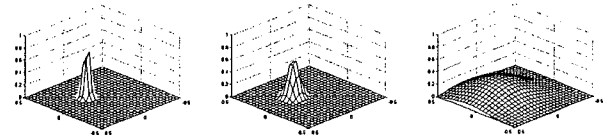


Fig. 4 재건된 모델의 높이에 따른 밀도변화

4. 결 론

실험을 통한 impinging jet flow의 추이를 컴퓨터 영상장으로 제작하여 실제 재건을 해보았다. 수직 방향으로의 유동뿐 아니라 유동의 방향이 급격히 변하는 정체점 유동 영역, 완전히 수평방향으로 흘러가는 벽면 제트 유동 영역에서도 투영데이터의 재건은 0.01%이하의 오차로 거의 완벽하게 재건되었다. 따라서, 실제 실험에서는 수직 및 수평 방향의 모든 유동 변화로부터 speckles의 변위를 얼마나 정확하게 투영 데이터로 바꾸는가가 중요한 문제가 된다. 기존의 수직유동의 가로 방향 speckles의 투영 데이터화가 아닌 가로 및 세로 양방향으로의 새로운 scanning 및 더 나아가 새로운 3차원 tomography 기법의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- 1) Kihm, K. D., Kim, J. H. and Fletcher, L. S., Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Converging Channel Flows Using a Specklegram Technique, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, 140-148, 1993.
- 2) Gordon, R., A Tutorial on ART, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. NS-21, pp. 78-92, 1974.
- 3) Verhoeven, D., Limited-data Computed Tomography Algorithms for the Physical Sciences, *Appl. Opt.*, Vol. 32, No. 20, pp. 3736-3754, 1993.