

직접샘플링에 의한 비대칭 분무의 토모그래피 재구성

Tomographic reconstruction of Asymmetric Spray by Direct Sampling Method

이충훈* · 원종천**
C. H. Lee, J. C. Won

Abstract

Convolution Fourier transformation tomographically reconstructs the spatially resolved spray injection rate from direct measuring cells. Asymmetric sprays generated from a twin-hole air shroud injector are tested with 12 equiangular projections of measurements. For each projection angle, line of sight integrated injection rate was measured at 35 positions with equal spacing measuring cells of 3 mm in width, 100 mm in length, 55 mm in depth and 0.5 mm thickness of separating wall. Interpolated data between the projection angles effectively increase the number of projections, which significantly enhances the signal-to-noise level in the reconstructed data. This modified convolution Fourier transformation scheme predicts well the structure of asymmetric sprays. Comparative study has been made between sprays with and without air shrouding. Tomographic reconstruction of injection rate from direct measuring cells obtained can be used to estimate the accuracy of volume fraction of spray from the LDPA tomographic reconstruction.

주요기술용어(Key Words): tomographic reconstruction (토모그래피 재구성), asymmetric spray (비대칭분무), direct sampling (직접샘플링), interpolation (내삽).

1. 서 론

산업용으로 사용하는 분무는 많은 경우 다공(multi-hole) 노즐로 구성되어 있어 비대칭 분무 구조를 가진다. 비대칭분무의 경로적분된 데이터로부터 분사율의 국소분포를 파악하기 위해서는 다각주사법(multi-angular scanning)에 의한 측정을 수행하여야 한다. 비대칭 토모그래피에 관한 연구는 의료 진단 분야에서 처음으로 시작되었으며 x-선을 인체에 투사하여 컴퓨터 토모그래피(computerized

axial tomography)⁽¹⁾를 구하는 것을 주목적으로 하였다. Cormack⁽²⁾이 최초로 이와 관련된 연구를 시작했고, Rammachandran⁽³⁾ 등은 x선에 의한 새도우 그래프(shadow graphs)로부터 주어진 물체의 토모그래피를 컨벌루션 알고리즘을 적용해서 구한 바 있다. 의학 분야로부터 발전된 토모그래피 기법은 최근에는 연소 분야에 적용되어 Santro 등⁽⁴⁾이 메탄-공기 혼합 유동장에서 메탄 농도장의 토모그래피를 구한 바 있고, Goulard 등⁽⁵⁾은 다각 흡수(multi-angular absorption) 측정 데이터로부터 토모그래피 재구성을 통하여 연소 현상을 진단하는 기법을 연구한 바 있다. 한편 이러한 토모그래피 기법을 비대칭 분무에 적용하여 분무 구조를 파악하는 연구는 미미하며 최근에는 비대칭분무에 대한 토

* 서울산업대학교 자동차공학과

** 서울산업대학교 산업대학원

모그래피재구성에 관한 연구가 Lee 등⁽⁶⁾에 의해 수행된 바 있다.

현재 상용화 되어 있는 LDPA⁽⁷⁾에서 제공하는 경로적분 분사율(체적비)계산에는 반드시 빔산란 길이 (beam scattering length)를 알아야 하며 이런 이유로 표준 빔산란 길이를 제공하는 장치가 필요하다. 이러한 과정을 통하여 경로적분분사율을 구하는 것은 매우 복잡하며 또한 데이터가 국소 정보를 제공하지 못하고 경로적분된 정보만을 제공하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 LDPA 경로적분데이터를 이용하여 토모그래피를 재구성함으로써 공간상의 임의의 국소점 (local point)에서의 분사율 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 분무 분사율의 경로적분값을 직접 얻기 위하여 측정셀을 제작하여 측정하였으며, 비대칭 토모그래피 재구성 방법으로 직접측정된 경로적분된 분무분사율로부터 국소점에서의 분사율을 구하였다. 이 결과는 LDPA에 의한 분무 측정에서의 광소멸법에 의한 체적비의 정확성을 검증하는 기준데이터로 사용할 수 있다..

2. 비대칭 토모그래피재구성

비대칭 단면에서의 국소점 정보를 얻기 위해서는 한 단면에 대하여 여러 각도에서 얻은 경로적분데이터를 필요로 하며 주사각도의 수 및 하나의 주사각도(θ)에서의 r-방향 측정회수에 비례하여 토모그래피재구성의 정확도가 향상된다(Fig. 1참조). 특히, 주사각도의 수가 토모그래피재구성 정밀도 향상에 보다 더 큰 영향을 미친다.

Fig. 1은 토모그래피재구성의 개념도를 나타낸 것으로 경로적분데이터 V(r,θ)로부터 국소점 정보 V(x,y)를 구하는 개념도를 나타낸 것이며 계산과정은 다음과 같다..

$$V(r, \theta) = \frac{1}{L_b} \int_{-\infty}^{\infty} V(x, y) ds \tag{1}$$

V(r,θ)를 Fourier 변환을 하면 다음과 같다.

$$\hat{V}(\omega, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega r} V(r, \theta) dr \tag{2}$$

구하려는 국소분포 V(x,y)에 대한 2차 Fourier 변환을 하면 다음과 같이 표현된다.

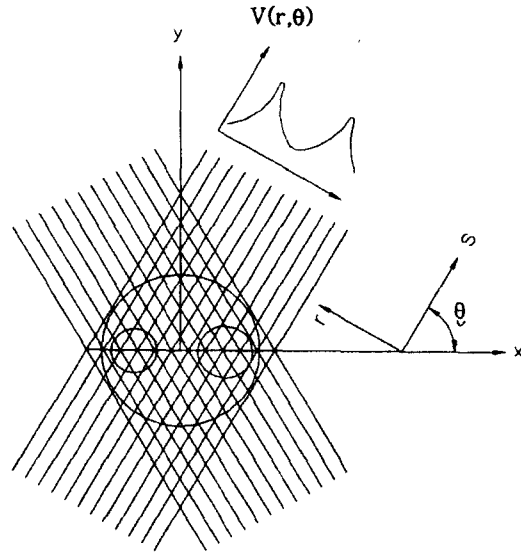


Fig. 1 Schematic showing multi-angular scanning measurement and coordinate system

$$\hat{F}_V(\omega, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(x, y) \exp(-i\omega(x\cos\theta + y\sin\theta)) dx dy \tag{3}$$

Fourier 변환의 중앙단면정리 (central slice theorem) 를 적용하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$\hat{V}(\omega, \theta) = \hat{F}_V(\omega, \theta) \tag{4}$$

식(4)를 식(3)에 대입하고 Fourier 역변환을 취하면 국소 체적비를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^{\infty} \hat{V}(\omega, \theta) \exp[i\omega(x\cos\theta + y\sin\theta)] |\omega| d\omega \tag{5}$$

$P(r, \theta)$ 를 내부적분으로 정의하고 다음의 관계식을 만족하는 ϕ 를 다음과 같이 정의하면

$$\hat{\phi} = |\omega| \tag{6}$$

$$\phi(0) = \frac{M^2}{\pi} \tag{10}$$

$$\phi(r_k) = -\frac{M^2}{\pi} (4k^2 - 1)^{-k}, k=1,2,3 \tag{11}$$

컨벌루션 관계로부터

$$P(r, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{V}(\omega, \theta) \hat{\phi}(\omega) e^{i\omega r} d\omega$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} V(\tau, \theta) \phi(r - \tau) d\tau \tag{7}$$

$$V(x, y) =$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} V(\tau, \theta) \phi(x \cos \theta + y \sin \theta - \tau) d\tau \tag{9}$$

$V(r, \theta)$ 는 실험을 통해 구하는 경로적분데이터로 국소점 정보 $V(x, y)$ 를 $V(r, \theta)$ 의 이산함의 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V(x, y) =$$

$$\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M V(r_k, \theta_j) \phi(x \cos \theta_j + y \sin \theta_j - r_k)$$

여기서 $r_k = -1 + 2k/M$, $j = (j-1)\pi/N$ 이고, M 과 N 은 각각 주사 회수와 주사 각도 갯수를 나타낸다. 식 (10) 의 Fourier 역변환을 하면 필터 함수 ϕ 를 구할 수 있다. ℓ 을 경로 적분 데이터의 위치 (r_k, θ_j) 와 국소점 (x, y) 사이의 거리로 정의하면, 식 (13) 에서의 $\phi(\ell)$ 의 값은 $V(r_k, \theta_j)$ 가 $V(x, y)$ 에 미치는 영향의 정도를 나타내는 척도 즉, $V(r_k, \theta_j)$ 에 곱하여 주는 가중 계수이다. 데이터의 분포가 Gauss 함수의 형태를 나타내면 Shepp and Logan⁽⁶⁾ 필터 함수를 많이 사용하며 다음과 같이 쓸 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 분무 인젝터, 및 에어슈라우드 공급계통, 측정부로 구성되어 있으며 측정부는 샘플링 셀, 주사각 조절장치, 가시화 장치 등으로 구성되어 있는데 Fig. 2에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

실험에 사용한 노즐은 2공-에어슈라우드(2 hole air shrouded gasoline injector) 가솔린 인젝터 (Bosch Gmbh)이며 에어 슈라우드에 압축 공기를 공급할 경우 분무의 미립화를 촉진하여 가솔린 엔진의 배출 가스 성분 중 탄화수소를 저감하는 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 분무각은 22° 이고 분공경은 0.3 mm 이다. 공기는 에어슈라우드를 통하여 노즐 중심축 방향으로 흐르며 2 개의 분공에서 분사되는 액체 제트와 충돌하여 미립화가 촉진된다. 에어 슈라우드를 이용한 경우 압축 공기 공급 압력은 0.3 atm 으로 하였다. 실험에 사용된 액체는 물이며, 공급 압력은 4.4 atm (계기압력)으로 분무는 대기 중으로 분사하였고, 이 분사 조건에서 분사량은 240 ml/min이다.

측정 격자셀은 60 개의 격자로 이루어져 있으며 각 격자는 폭이 3 mm, 길이가 100 mm, 깊이가 55 mm 이고 두께 0.5 mm 의 판으로 분리되어 있다. 격자셀은 두랄루민 불럭을 와이어컷트 방전 가공기(wire cut electro-discharge machine)로 가공하였다.

하나의 주사 각도에 대해 수평 방향으로 35개의 측정셀에서 분무된 액적을 수집하여 직접샘플링을 하였고, 15° 간격으로 인젝터를 회전시키면서 12 방향에 대해서 동일한 방법으로 측정하였다. 분무 샘플링 주사 각도 조절은 인젝터 마운트를 회전함으로써 가능하다. 인젝터를 처음 시작하는 주사각도를 0° 로 하여 측정을 시작하였다. 하나의 주사각도에 대하여 물을 일정 시간 동안 분사하고 측정셀에 수집된 물의 체적을 측정하였다. 측정셀에서의 물의 체적과 수집시간을 이용하여 각 셀에서

의 분사율을 계산하였다.

서터 조건으로 촬영하였다.

Fig. 4는 에어 슈라우드의 유무에 따른 가시화

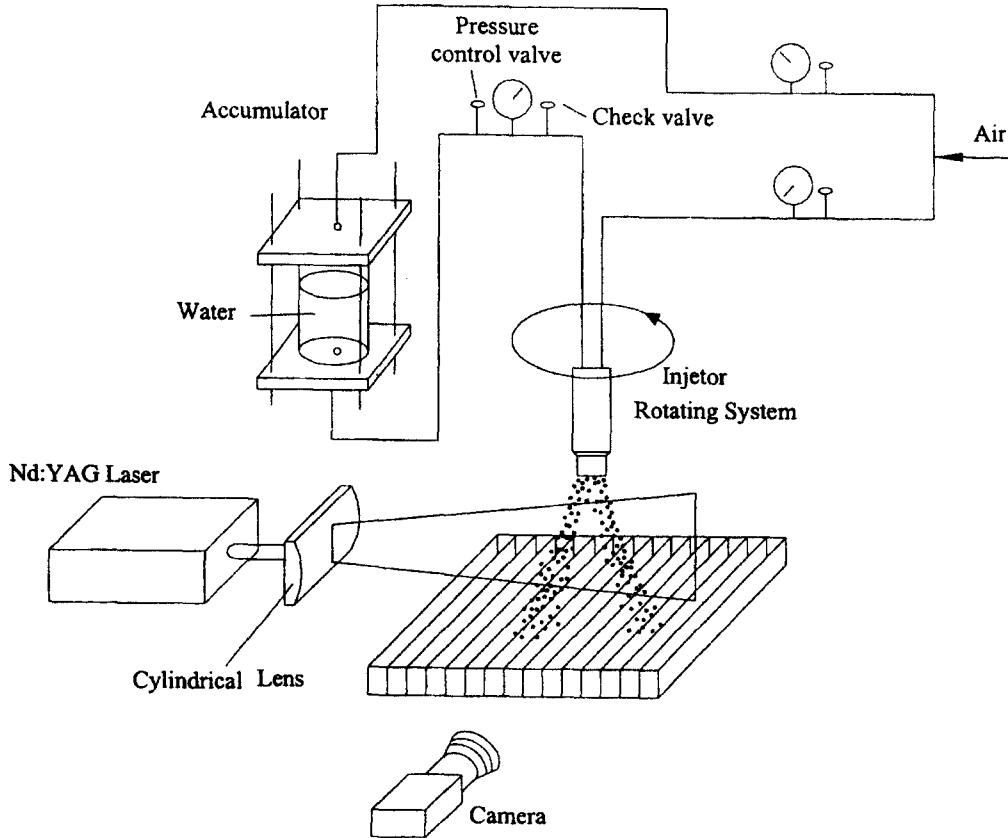


Fig.2 Experimental setup

4. 분무 가시화

가시화를 위한 광원은 Nd-YAG 레이저를 사용하였으며, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실린더 렌즈(cylindrical lens)를 사용하여 쉬트빔을 만들었다. 쉬트빔은 분무실의 측면을 통과하여 빔스탑(beam stop)에 도달하도록 하였다. Nikon FM2 카메라와 200mm 망원렌즈, 벨로우즈 등을 사용하여 분무를 가시화 하였다. 광원의 지속 시간은 약 10 나노초(ns)로 매우 짧으므로, 주위의 광원을 차단하고 B

결과를 나타낸 것이다. 에어 슈라우드를 하지 않은 경우에는 두 개의 제트가 분무각 방향으로 완전히 분리된 상태로 분사되는 것을 볼 수 있다. 에어 슈라우드 조건에서는 공기 제트가 반경 방향의 내부쪽으로 분사되며 연료 제트와 충돌하여 연료를 미립화 시킨다. 에어 슈라우드를 통해 압축 공기를 공급하여 액체 제트와의 충돌을 통해서 미립화를 촉진시킴으로써 탄화 수소의 배출물을 저감하는 것이 에어 슈라우드 인젝터를 적용하는 목적

이다. 압축 공기 제트와 액체 제트의 충돌로 인해 액체의 미립화가 촉진됨과 동시에 공기 제트의 영향을 받아서 액적이 공간적으로 폭넓게 분포하는 결과를 얻었다. 특히 에어 슈라우드에 압축 공기를 공급하지 않은 경우에 비해, 두 개의 분공에서 분무되는 액체 제트 중심선 사이의 공간에 미립화된 액적이 폭 넓게 분포함을 확인하였으며 액적의 증발과 관련한 중요한 인자의 하나인 전체 액적 표면적 밀도가 크게 증가한다는 것을 알 수 있다.

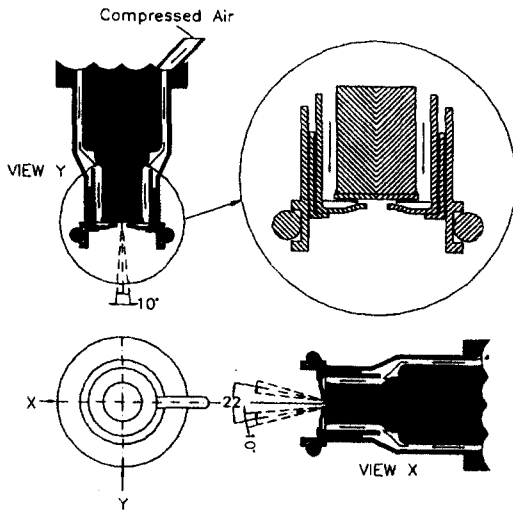


Fig. 3 Drawing of air-assisted injector

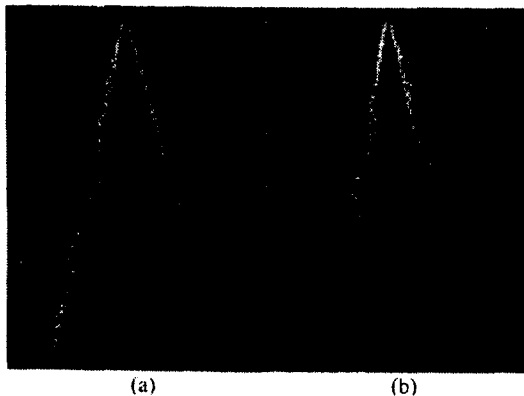


Fig. 4 Photographs showing spray structure from twin hole injector with injection pressure of 0.44 MPa gauge, (a) without and (b) with air shroud (air

pressure 0.03 MPa gauge)

이로부터 에어 슈라우드 인젝터의 탄화 수소 저감 효과는 미립화 촉진을 통한 액적 증발 속도의 증가에 의한 것으로 판단할 수 있으며 제트의 중심축 사이의 공간에 미립화된 액적이 널리 분포됨을 알 수 있다.

4. 결과 및 검토

Fig. 5는 $N=12$, $M=35$ 의 주사 방향과 주사수에 대해 분무의 단위시간당 수집된 경로적분 분사량을 나타낸 것이다.

노즐 출구 하방 $z=90$ mm의 측정 단면에서 에어 슈라우드를 하지 않은 조건에서 측정된 것이다. 12 방향 각각에 대해서 35개의 위치에서 측정된 단위시간당의 경로적분 분사량을 나타내고 있으며 주사 방향이 0° 일 때는 두 개의 제트가 이루는 평면에 수직인 방향으로 측정하며 이에 따라 단위시간당 수집된 경로적분 분사량이 최대값을 나타내는 두개의 측정셀 사이의 거리가 가장 멀리 떨어지게 된다. 주사 방향이 90° 일 때는 두 개의 제트와 일직선 방향으로 측정을 하므로 경로적분 분사량 최대값이 하나만 나타나게 된다. 따라서 Fig. 5를 위에서 보면 경로적분 분사량 최대값의 궤적이 X-자 모양으로 나타난다.

Fig. 6은 토모그래피 재구성의 해상도를 높이기 위해 Lee⁽⁶⁾ 등이 사용한 방법을 이용하여 2차원 내삽을 한 결과를 나타낸 것으로 특히 Fig.5의 측정결과(12개의 주사각, 35개의 측정셀 위치; 12×35 의 경로적분 샘플링데이터)를 입력데이터로 사용하여 2차원 내삽의 결과(48×69)를 나타낸 것이다.

Fig. 7은 내삽된 경로적분 데이터를 입력 데이터로 사용하여 식 (9)로부터 토모그래피 재구성을 통하여 국소 분사율을 구한 것이며 R은 측정 영역의 반경을 나타낸다. 재구성 결과를 살펴보면 국소 분사율의 최대값 근처로부터 멀어질수록 잡음(noise)이 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 에어 슈라우드에 압축공기를 공급하여 분사된 액체 제트를 미립화한 경우로, 이 때의 압축 공기 공급 압력은 0.3 atm으로 하였다. 에어 슈라우드를 하지 않았을 때와 비교하여 측정셀에 수집된 최대경로적분 분사량이 상대적으로 작았으며, 이는 에어 슈라우드에 의해 분무가 폭넓게 분포하

였기 때문이다. Fig. 9는 Fig.8의 결과 (12개의 주사 각, 35개의 측정셀위치; 12×35의 경로적분샘

without air shroud from effective 48 equiangular projections using interpolation.

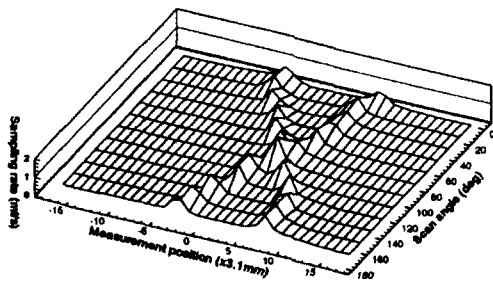


Fig. 9 Profiles of line-of-sight integrated injection rate without air shroud from effective 12 equiangular projections.

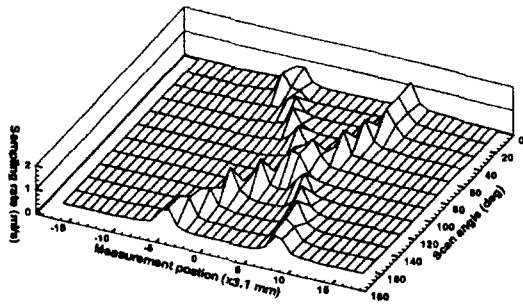


Fig. 12 Profiles of line-of-sight integrated injection rate with air shroud from effective 48 equiangular projections using interpolation.

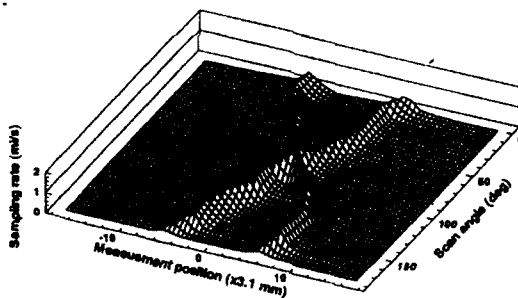


Fig. 10 Profiles of line-of-sight integrated injection rate without air shroud from effective 48 equiangular projections using interpolation.

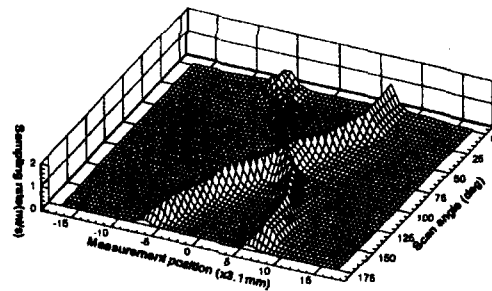


Fig. 13 Profiles of line-of-sight integrated injection rate with air shroud from effective 48 equiangular projections using interpolation.

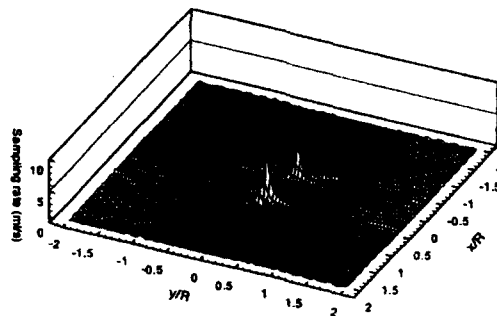


Fig. 11 Profiles of spatially resolved injection rate

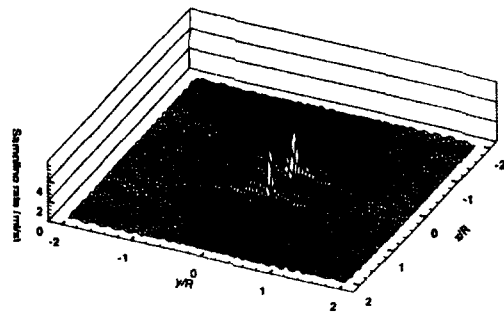


Fig. 14 Profiles of spatially resolved injection rate

with air shroud from effective 48 equiangular projections using interpolation.

링데이터)를 입력 데이터로 사용하여 2차원 내삽을 한 결과 (48×69)를 나타낸 것이다.

Fig. 9의 내삽된 경로적분 데이터를 입력 데이터로 사용하여 식 (9)로부터 토모그래피 재구성을 통하여 국소분사율을 Fig. 10에 나타내었다. 에어슈라우드를 한 경우와 비교하여 국소 분사량의 퍼크값이 크게 줄어든 것을 알 수 있으며 이는 에어 슈라우드에 의해 분무 액적이 공간적으로 넓게 분포하였기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 측정셀에서의 물의 체적과 수집 시간을 이용하여 각 셀에서의 분무분사율을 구하는 실험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 직접샘플링 방법을 사용하여 2-공 에어 슈라우드 노즐로부터 분사되는 액체의 국소 분사율을 토모그래피 재구성을 통해 구하였다. 주사방향 수를 늘리는 효과를 얻기 위해서 측정된 결과를 내삽함으로써 토모그래피 재구성 결과의 정확성을 높일 수 있었고, 결과적으로 측정횟수를 줄이는 효과를 얻을 수 있었다.
2. 직접 샘플링셀을 사용하여 직접경로적분샘플링된 결과를 비대칭토모그래피 재구성 방법으로 국소점에서의 분사율을 구하였으며 이 결과를 이용하여 LDPA에 의한 분무 측정에서의 광소멸법의 정확성을 검증하는데 있어서 필요한 기준데이터로 사용할 수 있다.
3. 에어슈라우드의 유무에 따른 토모그래피 재구성을 적용하여 각각을 계산함으로써 분무의 국소분사율분포를 정량적으로 비교할 수 있는 데이터를 얻었다.

후기

이 논문은 서울산업대학교학술문화연구재단 신입교수 연구정착비 지원에 의하여 연구되었습.

참고문헌

1. S. William and Barrett H. , "Computerized tomography: taking sectional x rays", Physics Today , pp 32-40 , 1977
2. Cormack A.M., "Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications", J. of Applied Physics, Vol.34, No.9, pp.2722-2727, 1963.
3. G.N. Ramachandran and A.V. Lakshminarayanan, "Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs Application of convolutions instead of Fourier transforms", Proc. Nat. Acad. Sci., Vol.68, No.9, pp.2236-2240, 1971.
4. R. J Santro, H.G. Semerjian, P.J. Emmerman, R. Goulard, " Optical tomography for flow field diagnostics", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.24, No.7, pp.1139-1150, 1981.
5. R. Goulard and P.J. Emmerman, " Combustion Diagnostics by multianular scanning", Inverse Scattering Problems in Optics ,Springer Verlag,Berlin, pp 215-235,1980.
6. C.H. Lee, and S.H. Chung, "Tomographic Recnstrf Asymmetric Sprays from a Twin-Hole Air-Shroud Injector," L., Atomization and Sprays, Vol. 7, pp. 183-197, 1997.
7. Malvern Instruments Ltd., Malvern System 2600 Instruction Manual,1991.
8. L. A. Shepp and B. F. Logan, "Reconstructing Interior Head Tissue from X-Ray Transmissions," IEEE Trans., Vol. NS-21, pp. 228-236,1974.