

평면 이미지 기법에서 감쇠로 인한 측정 오차에 대한 연구

Study on Measurement Errors due to Attenuation in Planar Image technique

전재영* · 김동준* · 고현석* · 윤영빈**

J. Y. Jeon, D. J. Kim, H.S. Koh, Y.B. Yoon

Abstract

In the analysis of the mass distribution and SMD(Sauter Mean Diameter), planar laser imaging technique is a convenient and useful one when compared to the mechanical patternator or PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer). But recorded signals at cameras and intensity of laser are distorted by attenuation. Using experimental datum and assumptions, we study measurement errors due to attenuation in planar image technique.

주요기술용어(Key Words): Attenuation(감쇠), Spray(분무), Planar Imaging Technique(평면 이미지 기법), Mass Distribution(질량분포)

기호설명

G	카메라에 기록되는 신호 강도
I	레이저 및 신호의 강도
c	비례상수
γ	감쇠계수
L	감쇠거리
θ	분무 반각
R	분사 축으로부터 카메라까지의 거리
β	카메라 시선 각도

하첨자

f	형광
s	산란

1. 서론

수송의 편리함, 저장의 용이함, 액체 상태에서 의 이용 가능성 때문에, 가솔린, 디젤 등의 자동차 엔진, 가스터빈, 산업용 로 등 현재의 에너지 수요 중 많은 부분이 연소실 내로 분무의 형태로 주입된 액체 연료의 연소로 이루어지고 있다. 뿐만 아니라, 액체 분무는 농업, 의학, 기상학 등 여러 응용 분야에 광범위하게 적용되고 있어 그 중요성이 커지고 있다. 따라서, 분무의 분포를 정량적으로 측정하는 것은 노즐의 설계와 개발을 위해서 뿐만 아니라 실제 적용에서의 성능 제어를 위해서 필요하다.

그러나 측정방식의 한계로 얻을 수 있는 정보는 한정되어 있었다. 대표적인 삽입식 측정방식인 mechanical patternator의 경우 많은 수의 수집관이나 구역들로 이루어진 구조로 낮은 해상도를 가질 뿐만아니라 유동의 흐름을 교란시킬 수 있기 때문에 복잡한 재순환 영역이나 화학 반응이 있는 유동에서의 적용이 어렵다. 이런 삽입식의 단점을 극복하기 위하여 레이저를 이용한 측정방식이 개발되었고 대표적인 기기로는 LDV와

* 서울대학교 대학교

** 서울대학교 기계항공공학부

PDPA가 있다. 그러나 이 기기들은 고가의 장비임에도 불구하고 점 측정 방식이라는 한계를 가지고 있어 3차원 현상을 측정하기 위해서는 매우 많은 시간을 필요로 한다.

이에 반하여 optical patternator는 평면을 측정할 수 있으므로 빠른 시간 내에 분무를 측정할 수 있으며 레이저를 사용한 다른 측정방식과 마찬가지로 비삽입식이라는 장점을 가지고 있다. 게다가 질량 분포뿐만 아니라 탄성 산란 신호의 이미지를 처리하여 2차원 단면에 대한 액적의 크기 분포 등을 동시에 얻을 수 있다. 따라서 이 기법을 이용하여 분무를 해석할 경우 액체 로켓, 가스 터빈, 디젤 엔진 등의 인젝터 설계나 전체 분무 시스템의 최적화 과정에서 신속한 정보를 얻는 것이 가능할 수 있다.

평면 이미지 기법의 이러한 장점들과 잠재적 가능성에도 불구하고 형광 신호와 산란 신호의 비율만으로는 절대적인 액적의 크기를 얻을 수 없고, 상대적인 액적 크기 분포만을 구할 수 있기 때문에 절대적인 값을 얻기 위해서는 적절한 보정 상수를 구해야만 하는데, 이는 이미 직경을 알고 있는 액적들을 만들어 주는 액적발생기를 이용하거나 PDPA로 측정해서 구할 수 있다. 그러나 이렇게 한 점을 기준으로 보정하는 경우 optical patternator로 구한 상대적인 값이 정확하다는 가정이 있어야 한다. 본 연구에서는 이러한 평면 이미지 기법을 이용하여 분무를 측정할 때 나타나는 문제점 중 이차 산란에 의한 감쇠 현상에 대해 초점을 맞추어 감쇠에 의한 오차를 살펴보고 한 점을 이용한 보정법의 한계를 알아보았다.

2. 실험 방법 및 장치

2.1 실험장치

전체 실험 장치는 연료 공급 장치로 고압의 공기를 이용해서 가압이 가능한 연료 탱크와 광원 장치인 레이저, 그리고 평면광을 만들어 내는 거울, 렌즈 등 일련의 광학 장치 및 분무가 이루어지는 시험부 마지막으로 신호를 검출하여 저장하는 측정부로 이루어져있으며 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

본 실험에서 사용된 분무 노즐은 solid cone 형상의 분무 패턴을 나타내는 인젝터로서, 단면 방

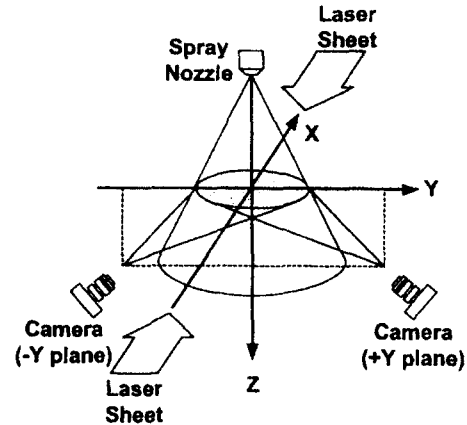


Fig. 1 Schematics of experimental setup and definition of coordinate system.

향으로 균일한 유량분포를 보인다. 분무는 상온, 대기압 하에서 분사하였으며 분사 압력, ΔP 가 5 bar 일 때, 유량은 10 g/sec로 공급된다. 시험 유체로는 물과 메탄올을 4 : 1로 혼합한 용액에 레이저에 의한 형광이 일어나도록 fluorescein (Aldrich F245-6, $C_{20}H_{12}O_5$)을 30mg/l의 비율로 용해시켰다.

광원으로는 아르곤 이온 레이저(Lexel 95-3)를 사용했으며, 렌즈를 사용하여 평행한 평면광으로 만들어 분무 방향에 수직이 되도록 조사하였다. 신호의 검출을 위해서는 칼라 디지털 카메라(Canon EOS D30, 2160×1440)를 이용하여, 형광과 Mie 산란의 이미지를 얻었다. 또한 이 두 신호를 적절히 분리해내기 위해서 형광 신호에 대해서는 550nm high-pass 필터를, Mie 산란 신호는 레이저 파장 대에 해당하는 514.5nm의 band-pass 필터를 각각 사용하였다.

분무 측정을 위해서 Fig.1과 같이 레이저의 조사 방향을 X 축으로 잡았으며, 조사 방향에 수직이 되도록 Y 평면 내에 카메라를 위치시켰다. 그리고 분무의 분사방향인 증류방향을 Z 축으로 놓았다. 카메라는 분무의 범위에서 벗어나기 위해 기울여서 측정하였다. 이 경우 측정면과의 거리가 달라지게 되므로 Affine 변환 행렬을 구하여 이미지를 보정하였다.

2.2 평면이미지 기법을 이용한 측정 원리

Lorenz-Mie 이론에 따르면 임의의 지점에서 구

형 입자에 의한 탄성 산란의 세기는 액적의 지름, 산란 각도, 액적의 굴절률, 편광, 입사광의 파장 등의 복잡한 함수로 나타내어진다. 그러나 Sankar 등[1]은 액적에 의한 약한 흡수가 산란과 함께 일어나는 경우, 일반적인 분무에서 만들어지는 액적 분포에 대해 Mie 산란 강도가 지름의 제곱에 비례하는 관계로 근사할 수 있다는 사실을 계산을 통해서 구하였다. 그러므로, 좌표 (x, y) 로 정의되는 카메라의 화소에서 측정되어지는 Mie 산란 신호 강도, G_s 와 액적 지름, d 의 관계는 입사광의 강도가 I_0 일 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_s(x, y) = I_0(x, y) c_s \sum N_i(x, y) d_i^2(x, y) \quad (1)$$

여기서 N_i 는 지름이 d 인 액적의 개수이다.

형광 신호의 강도는 약한 흡수가 일어날 경우 형광 분자의 농도에 비례한다. 따라서, 형광 염료가 시험 유체 내에 균질하게 존재하고 증발 등의 효과로 액적 내의 성분의 변화가 없다면, 형광 신호의 강도는 유체의 체적, 즉 질량에 비례한다. 따라서, 좌표 (x, y) 로 정의되는 카메라의 화소에서 측정되어지는 형광 신호 강도와 액적 지름의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_f(x, y) = I_0(x, y) c_f \sum N_i(x, y) d_i^3(x, y) \quad (2)$$

이 값은 측정 체적을 지나는 유체의 체적에 비례하므로, 유체의 밀도가 일정하다면 형광 신호의 강도는 입사광의 강도와 측정 체적을 지나는 총 질량 δm 에 비례하는 값을 나타내게 된다.

$$G_f = C_f I_0(x, y) \delta m = C_f I_0(x, y) \rho \quad (3)$$

이 때 입사되는 평면광이 전체 산란면에 대해서 균일한 강도 분포를 가지고, 분무를 지나면서 감쇠가 일어나지 않는다면 카메라에 기록되는 신호의 강도는 오로지 연료의 질량 밀도 ρ 에만 비례한다. 레이저 평면광의 강도는 광학장치의 정밀도의 오차에 따라 비균일한 강도를 나타낼 수 있다. 이러한 경우에는 질량 분포(mass distribution) 정확화를 위해서 형광 염료를 담은 quartz

calibration cell을 사용하여 균일한 염료 농도에 대한 레이저 평면광의 강도 분포를 구하고 보정을 해야 한다.

그리고 정상 상태의 분무일 경우, 증발이 일어나지 않고 재순환되는 분무의 양이 무시할 수 있다는 조건 하에서, 각 단면을 지나는 질량 플럭스는 일정하고, 시간에 따라 변하지도 않는다. 따라서, 분무장 전체 영역에서 발생하는 레이저 유도 형광신호를 검출할 수 있다면, 전체 단면에서 형광 신호의 합은 연료 노즐의 질량 플럭스에 비례하는 값을 나타내며 정상상태에서는 각 단면마다 일정한 값을 가진다. 따라서, 단위 시간 당 단위 면적을 지나는 연료의 질량 플럭스, $\dot{m}''(x, y)$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{m}''(x, y) = \frac{G_f(x, y)}{S(z)} \frac{\dot{m}_{nozzle}}{A} \quad [\text{kg/m}^2\text{sec}] \quad (4)$$

여기서, $G_f(x, y)$ 는 측정된 형광 신호의 강도, $S(z)$ 는 그 단면에서의 형광 신호의 강도합, \dot{m}_{nozzle} 은 노즐의 질량 유량, A 는 한 화소가 나타내는 영역의 면적이다.

평면 이미지 기법을 이용하여 액적의 크기를 측정하는 방법의 기본 원리는 레이저 평면광에 의해 생성되는 평면에 존재하는 액적들의 형광과 Mie 산란의 이미지를 함께 얻는 것이다. 유동이나 분무의 특성이 시간에 따라 변화하지 않는다고 가정할 수 있는 정상 상태의 분무의 경우, 하나의 카메라를 사용하여 형광과 Mie 산란의 이미지를 순차적으로 기록하는 방법이 가능하다. SMD를 구하는 경우에 있어서는 Mie 산란 신호와 형광 신호 사이의 비율로 나누어 지면서 각 지점에서의 입사광의 강도에 의한 영향이 제거되므로 quartz cell을 통한 보정이 필요하지 않다.

앞에서 구했던 식 (2)를 식 (1)로 나누어 비율 구하면,

$$\frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} = \frac{c_f}{c_s} \left[\frac{\sum N_i(x, y) d_i^3(x, y)}{\sum N_i(x, y) d_i^2(x, y)} \right] \quad (5)$$

와 같으며 SMD의 정의로부터 위의 식은 다음과 같이 나타내어질 수 있다[2][3]

$$D_{32}(x, y) = \frac{1}{K} \left[\frac{G_f(x, y)}{G_s(x, y)} \right] \quad (6)$$

여기서 $D_{32}(x, y)$ 는 좌표 (x, y) 에서의 SMD이고, K 는 보정 상수이다. 형광 신호를 이용해서 상대적인 질량 플럭스 분포를 구할 수 있으며 적절한 보정 상수 K 를 구한다면 평면에 대한 절대적인 질량 플럭스 분포를 구할 수 있다.

3. 실험 결과 및 분석

다중 산란(multiple scattering)을 무시할 수 있는 경우, 발생한 신호의 초기 강도 I_0 는 특정한 매체를 거리 L 만큼 통과하는 동안 산란, 흡수에 의해서 지수적으로 줄어들며 이 때의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$I = I_0 \exp[-\gamma L] \quad (7)$$

입사광의 감쇠를 보정하기 위해서 Fig. 1에서와 같이 x 축을 따라 양쪽으로 레이저광을 조사하는 대신 노즐을 180° 를 돌려 얻은 이미지를 기하평균하는 방식을 채택하고, 두 대의 카메라를 y 축을 따라 분사축에 대칭이 되도록 장치를 구성하였다. 그리고 측정 단면을 따라 거의 균일한 유량 분포를 나타내는 solid cone 분무에 대하여 측정을 수행하였다. 이 분무는 유동장과 분무 특성의 변화가 시간에 따라 크지 않으므로 레이저 조사 방향과 신호 측정 위치를 차례대로 바꾸어 가면서 측정하는 것이 가능하였다.

한편 감쇠 계수 γ 는 단위 체적 당 액적의 수, 흡수 및 산란 단면의 함수로 주어진다[4]. 따라서 신호의 감쇠량은 액적 수밀도, 크기 분포, 형광 혹은 산란 신호의 파장에 영향을 받게 된다.

3.1 분무장 내 액적에 의한 레이저 세기 감쇠의 영향

solid cone 분무에서 입사광으로 레이저를 조사하게 되면 분무에 의한 액적에 의해서 감쇠가 일어나게 되어 측정 단면에서의 광원의 강도가 균일하지 않게 된다. 반경방향의 감쇠계수의 변화가 작다면 감쇠에 대한 감쇠거리의 영향이 커지게 되고 따라서 감쇠거리를 같게 해주는 것으로 감쇠를 균일하게 할 수 있다. 이것은 측정 라인과 분무 단면과의 교점의 길이를 $2d$ 라고 하면,

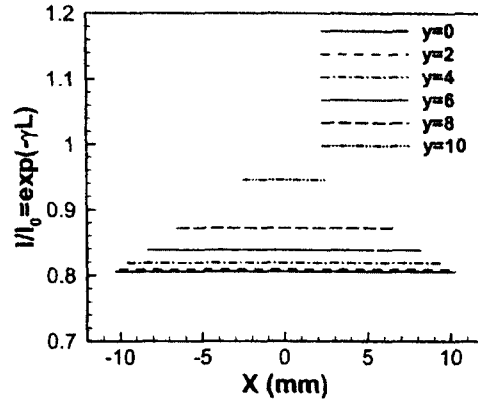


Fig. 2 Intensity of laser in the solid cone spray ($z=25$ mm)

x 축을 따라 양쪽에서 레이저를 조사하여 측정한 두 신호 강도의 기하 평균을 취하는 것으로 가능하나 이번 실험에서는 입사광의 경우 노즐을 180° 돌려 얻은 이미지를 기하평균해서 양쪽에서 레이저를 조사한 것과 같은 효과를 얻었다.

$$\begin{aligned} \sqrt{I_1 I_2} &= I_0 \exp \left[-\frac{\gamma \left(\int_{-d}^{x'} l dx + \int_{x'}^d l dx \right)}{2} \right] \\ &= I_0 K_{laser} \end{aligned} \quad (8)$$

그러나 분무의 단면은 원이기 때문에 모든 측정 단면에서 감쇠거리가 같지는 않다. 분무의 단면은 원이고, 감쇠계수가 일정하다고 가정한다면 다음 계산을 해서 Fig. 2의 결과를 얻었다.

측정라인이 중심을 통과할 때 레이저의 감쇠거리가 가장 길고 중심에서 멀어질 수록 레이저의 감쇠거리가 짧아지게 되어 광원의 세기는 중심부에서 가장자리로 갈수록 크게 됨을 알 수 있다. 하지만 이 경우에도 x 값만 같다면 감쇠거리는 일정하다. 결국 입사광의 세기는 Fig. 2에서와 같이 y 값에 의해서만 변화하게 된다.

3.2 분무장 내 액적에 의한 신호 감쇠의 영향

입사광의 세기가 측정 단면에 걸쳐 일정하더라도 액적에 의해서 산란된 신호나 여기되어 나온 형광신호가 카메라에 도달되는 과정에서 감쇠가 일어나 왜곡된 이미지가 기록된다. 이때의 감쇠는 y - z 평면에서 일어나는 것으로 x - y 평면에서

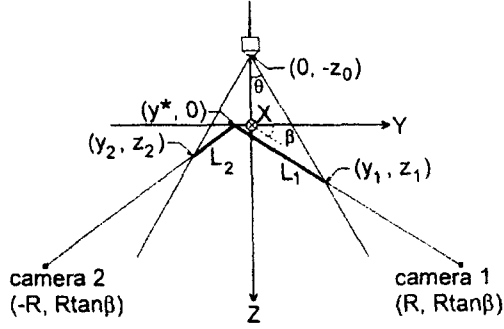


Fig. 3 Geometry of the beam path passing the uniform solid-cone spray, where R is the distance from spray axis (Z -axis) to camera, and β is a viewing angle of camera

일어나는 입사광의 감쇠와는 약간 다른 특성을 보인다. 보정방법은 레이저 감쇠와 비슷하게 서로 다른 방향에서 분무를 통과한 두 이미지를 기하평균하는 방법을 쓰는데 y - z 평면에서의 감쇠이므로 두 대의 카메라를 y 축을 따라 분사축에 대칭이 되도록 장치를 구성해 각각의 이미지를 얻는다.

레이저 평면광이 조사되는 측정 단면 분무의 한 점 $(0, y^*, 0)$ 으로부터 각각의 카메라까지 이르는 감쇠 경로 L_1, L_2 는 Fig. 3에서 계산할 수 있다.

$$L_1^2 = (1 + \tan^2 \beta) \left(\frac{z_0 \tan \theta - y^*}{1 - \tan \beta \tan \theta} \right)^2 \quad (9)$$

$$L_2^2 = (1 + \tan^2 \beta) \left(\frac{z_0 \tan \theta + y^*}{1 - \tan \beta \tan \theta} \right)^2 \quad (10)$$

이 때 감쇠 경로의 합을 구하면, 다음과 같이 y 방향의 위치에 상관없이 같은 값을 가진다[5].

$$L_1 + L_2 = \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \left(\frac{2z_0 \tan \theta}{1 - \tan \beta \tan \theta} \right) = \text{constant} \quad (11)$$

그러나 Fig. 4에서 알 수 있듯이 $x=a(a \neq 0)$ 인 평면으로 잘린 분무 단면의 외곽선은 포물선이 되고 단면의 넓이 역시 작아지게 된다. 카메라의 거리가 충분히 먼 경우 측정각 β 가 일정하다고 가정할 수 있고 측정점과 두 카메라는 같은 평면

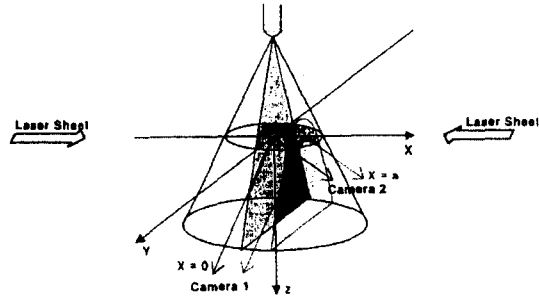


Fig. 4 Geometry of the beam path passing the uniform solid-cone spray

상에 있다고 가정할 수 있다. 이 경우 감쇠거리를 구하기 위해서는 점 $(a, y^*, 0)$ 에서 카메라까지의 감쇠 거리 L_1, L_2 는 $x=a$ 평면으로 분무를 자른 단면의 외곽선을 구한 뒤 이 외곽선과 측정점에서 카메라를 잇는 직선과의 교점을 구해야 한다. 교점의 y 값은 다음과 같다.

$$y_1 = \frac{-k^2 m c_1 - \sqrt{(k^2 m c_1)^2 - d(k^2 c_1^2 - x^2)}}{d} \quad (12)$$

$$y_2 = \frac{k^2 m c_2 + \sqrt{(k^2 m c_2)^2 - d(k^2 c_2^2 - x^2)}}{d} \quad (13)$$

$$c_1 = z_0 - m y^* \quad (14)$$

$$c_2 = z_0 + m y^* \quad (15)$$

$$d = k^2 m^2 - 1 \quad (16)$$

$$k = \tan \theta \quad (17)$$

$$m = \tan \beta \quad (18)$$

위의 y 값을 이용해서 교점의 z 값과 측정점인 $(y^*, 0)$ 과 거리로 일반적인 감쇠거리 L_1 과 L_2 를 구할 수 있다.

$$L_1 = \sqrt{(y_1 - y^*)^2 + z_1^2} \quad (19)$$

$$L_2 = \sqrt{(y_2 - y^*)^2 + z_2^2} \quad (20)$$

그리고 감쇠계수 γ 가 감쇠거리에서 일정하다면 다음과 같은 방법으로 보정할 수 있다.

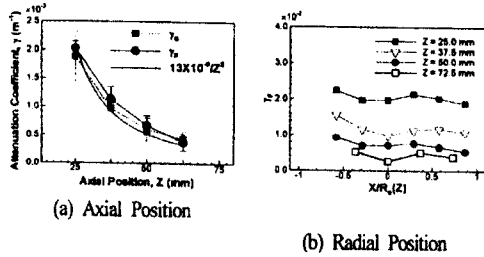


Fig. 5 Attenuation coefficient of the solid cone spray

$$\sqrt{I_1 I_2} = I_0 \exp\left[-\frac{\gamma}{2}(L_1 + L_2)\right] \quad (21)$$

$$\approx K_{ext} I_0$$

하지만 신호의 감쇠는 x-y 평면에서 일어나는 것이 아니라 y-z 평면에서 일어난다. x-y 평면에서는 Fig. 5에서 알 수 있듯이 감쇠계수가 일정하다고 가정할 수 있으나 z 축 방향으로 급격하게 변화한다는 것을 알 수 있다. L_1 과 L_2 의 합은 같다고 하더라도 L_1 과 L_2 의 비는 다르기 때문에 감쇠계수가 큰 부분을 많이 통과하는 경우가 생길 수 있고 이 경우 감쇠거리는 같아도 최종적인 감쇠는 감쇠거리와 감쇠계수의 곱이므로 감쇠계수의 편차에 의해서 감쇠에서도 편차가 발생하게 된다. 감쇠거리가 다를 경우에는 감쇠의 편차가 더욱 커지게 된다.

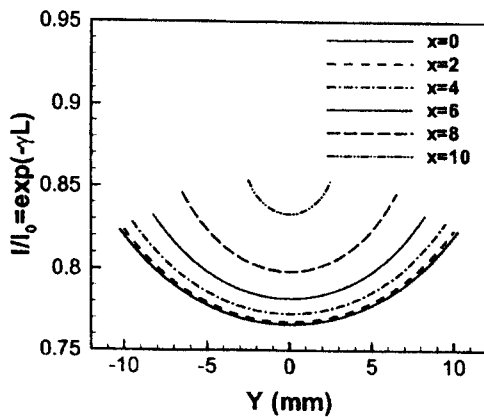


Fig. 6 Intensity of signal in the solid cone spray at uniform source intensity ($z=25$ mm)

Fig.6은 반경 방향의 감쇠계수와 입사광의 세기, 액적의 분포 등은 일정하고, z 축 방향의 감쇠계수가 $13 \times 10^6/z^2$ [m^{-1}]이라고 가정하고 계산한 결과를 나타낸 것이다. 결국 감쇠를 보정할 때 한 점을 기준으로 보정을 한다면 입사광의 감쇠의 편차와 분무에 의한 신호의 감쇠로 왜곡된 이미지를 얻게 되며, 이상적인 solid cone을 찍더라도 편차가 생기게 된다.

4. 결론

optical patternator 측정 시 경로에 따른 이차 산란에 의한 감쇠의 영향을 보정하고 정확도를 높일 수 있는 방안으로 두 대의 카메라를 이용하여 신호를 기하 평균하여 처리하는 방식을 제시하였고, 하나의 기준점을 사용하여 정량화할 때의 문제점을 검토, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) solid cone spray에서 입사광의 감쇠는 x 축의 양쪽에서 레이저를 조사하여 기하평균을 하여 x 축 라인에서는 감쇠의 영향을 제거할 수 있으나 y 값에 따른 편차는 제거할 수 없으므로 측정 단면 내에서 일정한 입사광을 얻을 수는 없다.
- (2) 형광 신호를 이용하여 질량 유량 분포를 얻는 경우 감쇠 경로의 길이 차로 인해 신호의 비대칭을 유발하고 두 대의 카메라를 이용하면 $x=0$ 인 평면에서는 감쇠 거리를 일정하게 만들 수 있었다.
- (3) 감쇠는 감쇠 계수와 감쇠 거리의 곱에 의해서 결정된다. 따라서 연료의 비대칭성 분포에 따라서 감쇠거리가 일정하더라도 감쇠는 차이가 있을 수 있다.
- (4) 분무의 단면을 가장자리까지 정확하게 측정해야 한다면 입사광의 감쇠와 신호의 감쇠를 모두 고려하여 기하 평균한 이미지를 보정해야만 한다. 이 경우 한 점을 기준으로 보정하는 것은 불충분하다.
- (5) 오차는 중심에서 벗어날수록 급격하게 커진다. 따라서 중심부분만이 중요하다면 분무의 양쪽에서 레이저를 조사하고, 두 대의 카메라로 얻은 이미지를 각각 기하 평균 충분한 뒤 한 점에서 보정을 하여도 충분한 정밀도를 얻을 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 국가 지정 연구실 사업 (M1-0104-00-0058)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. V. Sankar, K. E. Maher, D. M. Robert and W. D. Bachalo, Rapid Characterization of Fuel Atomizers Using an Optical Patternator, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, Vol. 121, pp. 409-414, Jul. 1999.
- [2] P. Le Gal, N. Farrugia and D. A. Greenhalgh, Development of Laser Sheet Dropsizing for Spray Characterization, Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow, pp. 113-120, 1998.
- [3] 이경진, 정기훈, 윤영빈, 정경석, 정인석, "평면 이미지 기법을 이용한 분무 특성 해석", 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제1호, pp. 93-101, 2000.
- [4] C. F. Bohren, D. R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley Interscience, 1983.
- [5] 고현석, 김동준, 정기훈, 윤영빈, 양수석, 이대성, "평면이미지 기법의 신호 감쇠 효과에 대한 실험적 연구, 한국항공우주학회지, 제 29권 제7호, pp. 71-77, 2001.