

분무발달 측정법에 대한 연구경향 및 전망

방 승 환[†]

Research Trends and Prospects on the Measurement of Spray Development

Seung Hwan Bang

Key Words: Background oriented schlieren(BOS, 배경이미지 슈리렌), Light-field(LF), Spray measurement(분무 측정법)

Abstract

This article gives an overview of spray measurement technique were reviewed and suggestions. Spray formation mechanism is the most intellectually challenging and practically important topics in fluid mechanics. Methods for analysis of existing spray development have been developed in various ways, but if there is no support for relatively sufficient equipment, there are limitations to analysis. The newly measured and analyzed method may exceed the threshold for preparation of analysis and, as the results of two-dimensional individual analysis are aggregated and analyzed in three dimensions by a combination of analysis methods, the method is considered a relatively accurate analysis method that analysis.

기호설명

- f : 초점거리
- n : 굴절율
- ρ : 매질 밀도
- ε : 광원굴절각도
- λ : 파장
- Δy : 영상변위

1. 서론

분무의 적용사례는 세척, 화학물질반응, 의료치료, 냉각, 코팅, 연소, 건조 등 다양한 곳에서 사용되고 있다. 농업, 제약 등에서는 액체 분무는 원하는 장소까지 충분

한 액체 공급이 이루어져야 하며 공기 중의 기화도 최소화 되어야 한다.

반면, 자동차나 항공기의 엔진에 사용되는 연료의 액체는 분무의 크기, 속도, 분포도, 기화 등이 산화제와 혼합이 잘 되어야 한다는 요구조건이 있다. 연소실내 표면에 침착 되거나 미연소가스로 존재하면 유해배기가스의 배출이 증가하게 된다. 또한, 다양한 산업 분야에서 각각의 특성에 응용하기 위하여 입자의 크기, 속도, 공간 분포, 분사각 및 분무 밀도 등의 분무 특성을 특정하게 요구되고 있다.

액체 분무의 응용 연구가 활발하게 이루어지고있는 분야는 내연기관의 연료공급 및 미립화 연구분야이다. 공급된 연료는 좁은 노즐을 통해 연소실로 분사되는데, 난류와 액적의 불안정성을 통해 단일 액적으로 미립화되면서 증발을 통해 산화제와의 반응을 함으로써 연소과정으로 진행될 수 있는 조건을 형성하게 된다. 이 과정의 원활한 진행은 내연기관의 성능과 배기가스의 생성에 주요한 영향을 미치게 된다. 엔진 내에 연료 분사시 입자의 분포 및 미립화는 연소시 유해배출물의 생성에 주요 영향 인자로 작용된다. 따라서, 문제점을 제

(Received: 18 May 2019, Received in revised form: 14 Jun 2019, Accepted: 24 Jun 2019)

[†]방승환, 회원, 신한대학교 기계자동차융합공학과
E-mail : swanbang@shinhan.ac.kr
Tel : (031)870-3691 Fax : (031)870-3689

거하고 최적의 분무 발달 특성을 구성하기 위한 방법들이 모색되고 있으며, 그 결과물의 신뢰성을 확보하기 위한 방법으로 분무 발달특성을 분석하는 측정법들이 연구되어 왔다^(1,4). 분무발달특성 측정법들은 과학적으로 분석하기 위한 장비로 사용되는 다양한 광학 장비의 발달로 인해 여러가지 분석법이 적용되고 있으며, 특히 레이저의 도입으로 보다 정확한 분석을 할 수 있는 방향으로 발전하였다⁽⁵⁻⁷⁾.

레이저를 이용한 신뢰성 높은 분석법은 많은 정밀한 광학적 측정 장비와 고가의 레이저 장비의 도입을 통한 분석이 가능하여 실험장비의 구성에 많은 노력을 요구하고 있다.

본 연구에서는 분무의 발달과정 분석법인 광계측법에 대해 전반적인 고찰을 통해 분무발달특성 분석을 위한 기본 방향성을 제시하고, 다른 측정분야에서 적용되고 있는 계측법 중 분무발달 측정에 적용하여 보다 용이하게 분무발달을 분석하는 모색하고자 한다.

2. 분무발달 측정기술

분무발달측정에 대한 연구 방향은 거시적 분무의 발달 측정^(2,4,8,9), 분무 입자에 대한 정량적·분포적 측정, 단일 및 다분포지점에 대한 측정, 분무 노즐의 내부유동에 대한 측정^(10,11) 등으로 나뉘어 분석되고 있다.

일반적으로 분사장치를 이용하여 다분사 및 균질한 미립화 결과물을 만들고자 한다. 광학적 측정법은 측정 영역이 낮은 밀도일수록 만족스러운 분석결과를 얻을 수 있다. 그러나, 분무의 중심영역은 상대적 고밀도 영역으로 인해 광원의 침투성이 눈에 띄게 감소한다. 이런 조건에서 광학적 기법을 사용하면 광 산란 매체가 있는 영역에서는 내부의 데이터를 취득하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 이런 환경에서는 입사광의 반사, 산란, 회

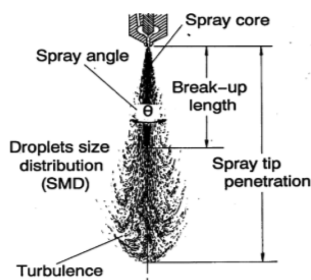


Fig. 1 Diesel spray structure⁽¹²⁾

절된 광원의 신호들은 상당 부분 감쇄된다.

일반적으로 분무의 거시적 분석 방법들은 분무발달과정을 영상화 하였고, 영상들의 분석을 통하여 분무도달거리, 분무각, 분사속도, 분사율, 분사형상, 질량 분포도 등을 측정하였다^(13,14). 이런 분무의 발달 촬영법으로 Shadowgraphic, Schlieren 등 방법이 사용되었다^(15,16).

2.1 레이저 광계측법

강력한 펄스 레이저(Nd:YAG)의 등장으로 인해 2D 분무 시각화를 위해 레이저 시트를 생성하여 평면 Mie-산란 현상을 이용한 분무 측정법이 많이 적용 되어 왔고^(9,17), 레이저 유도 형광(LIF)⁽¹⁸⁾과 결합된 평면형 단층 촬영 또는 평면 레이저 Mie산란을 사용하는 광학적 패턴 시스템⁽⁹⁾ 여전히 분석법으로 사용되고 있다.

Planar Laser imaging (PLI) 분석법은 광학적으로 분할된 영상을 생성하기 때문에 영상은 2차원적 부분의 결과값으로 해석되게 된다. 광학계의 조합으로 원통형 레이저 광원을 얇은 레이저 시트광원으로 변화시켜 분무의 특정 위치에 통과시켜 산란광을 영상으로 취득하는 방식이다. 레이저 시트 이미징은 분무 연구를 위한 가장 간단한 구현 방법 중의 하나이다. 분무의 구조와 관련된 정보를 수집하는데 사용되며 2차원 영상의 정보를 얻게 된다.

Mie 산란측정법에 의해 액상 분무의 발달과정이 측정이 이루어지나 분무는 액상과 기상이 공존하여 실제적 분무의 발달 측정에 대한 한계가 있어 Schlieren법을 통해 액상 및 기상 발달과정을 취득함을 통해 2상에 대한 영향을 분석 할 수 있다^(19,20). 또한, 레이저 흡수 및 산란(Laser Absorbing and Scattering, LAS)기법⁽²¹⁾은 두 개의 레이저 파장의 흡수에 의해 에너지 준위가 바뀔 때 따른 발광의 이미지를 사용 분석하여 액체 분무의 발달에서 동시에 액체 및 증기 분포를 측정하고, 광의 파장을 광필터를 통해 특정 영역대 파장의 광원만을 취득함으로써 기체와 액체상태의 분무를 각기 분리 분석할 수도

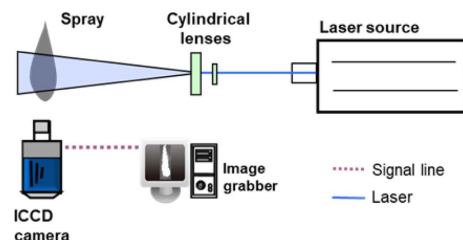


Fig. 2 PLI system schematic

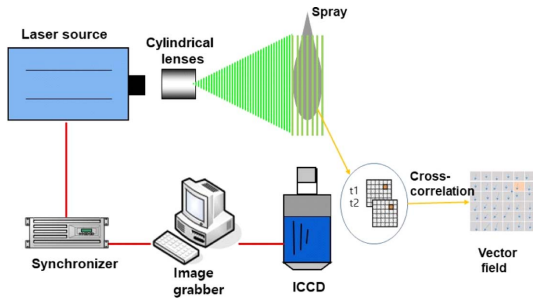


Fig. 3 PIV system schematic

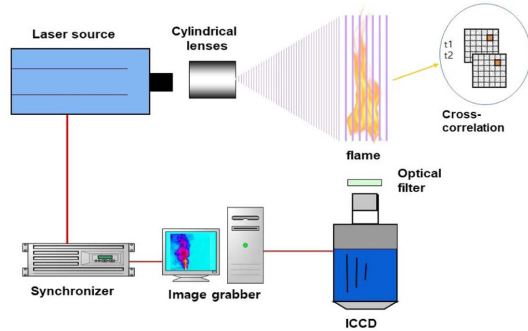


Fig. 4 PLIF system schematic

있다.

2.1.1 입자속도분석법

입자속도분석법(Particle Image Velocimetry, PIV)은 분무 내의 액적의 속도변화를 평면 속도장의 영역으로 측정하는 방법이다^(22,23). 근접한 시간대의 동일한 영역에서 2개의 영상을 기록하고, 두 영상에서 작은 입자로 나타나는 영역의 속도장을 나타내는 방법이다. 평면의 얇은 레이저 광원을 이용해 연속된 영상을 취득하여 입자와 영상의 상관관계를 분석한다. 두개의 연속 노출된 영상 사이에 있는 분석영역에서의 입자 그룹의 변위와 이에 따른 속도 분포를 산출한다. 속도벡터분석용 프로그램에 의해 정확성과 오류를 수정한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 최근의 PIV기법은 3차원 속도 성분^(24,25)을 측정하기 위해 stereo이미지의 사용으로 확장되어 보다 구체적인 분무의 발달을 분석하고 있다.

2.1.2 레이저형광측정법

평면 레이저 유도 형광(Planar Laser Induce Fluorescence, PLIF)은 분무 및 화염의 시각화와 정량적인 측정을 위해 매우 강력하고 널리 사용되는 측정법이다^(18,26,27). 레이저로부터 고준위 에너지를 흡수한 입자는 형광을 방출한다. 이때, 형광 방출 입자로서 트레이서의 역할은 분무용 액체에 첨가되어 비슷한 영역대의 분무의 변화를 다른 에너지 준위의 형광을 발산하게 되는데, 이때의 영상을 취득하게 된다. 형광은 형광 입자수와 액적의 부피에 비례하므로 액체 부피 또는 질량 분포의 정량적 측정이 가능하게 된다. 정량적 LIF 측정은 보정 뿐만 아니라 레이저 시트 불균일성, 레이저 펄스 에너지의 변화 그리고 비균일 카메라 반응^(18,28,29)에 대한 보정을 통해 정확한 정량적 측정이 가능하다. 자연 발생 및 추적 LIF tracer중은 일반적으로 광범위한 흡수 및 방출 스펙트럼으로 고정 파장을 사용할 수 있지만, 흡수 및 방출 스펙

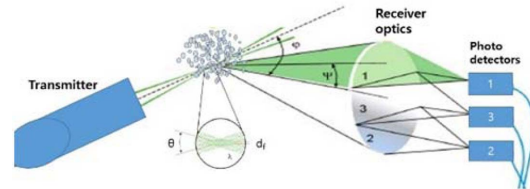


Fig. 5 PDI system schematic

트럼은 온도에 따라 다르게 나타난다 두 개의 다른 파장에서 LIF 이미지 비율과 관련하여 액체 또는 기체를 측정하게 되고 이에 대한 기초 정보를 획득할 수 있다. 특히, 연소과정의 분석에서 액적의 증기 단계의 농도 또는 질량 분포에 대한 정보는 매우 중요한 정보를 내포하고 있다.

2.1.3 입자분석법

위상 도플러 간섭계(Phase Doppler interferometry, PDI)는 분무의 크기 및 분포의 정량적 측정법으로 입자의 크기와 속도를 동시에 측정하기 위해 개발되었다^(30,31). 레이저 도플러 속도측정(Laser Doppler Velocimetry, LDV)처럼 PDI는 두 개의 교차하는 일관된 레이저 빔에서 산란된 빛에 의존한다. 산란된 빛은 세 개의 검출기에서 측정이 이루어지며 이동 속도에 비례하여 액적의 직경과 Mie 산란에 의해 도플러 버스트 신호를 생성한다.

PDI는 초당 최대 수만 개의 측정 속도로 액적 크기, 속도 및 체적 등에 대해 접촉성 기법⁽³²⁾을 도입하여 상업용 계측기로 사용되고 있다.

3. BOS 측정법

3.1 BOS 측정법

Background Oriented Schlieren(BOS) 최근 수십 년 동

안 밀도 구배를 정량적으로 측정하기 위한 기술로 발전하였다⁽³³⁻³⁶⁾. Schlieren, Shadowtron 또는 interferometry와 같은 전통적인 광학 방법과 비교하여 BOS는 상대적으로 단순한 광학적 조합과 설정으로 높은 동적 범위와 큰 시야의 굴절률 영역에서 정량적 측정을 할 수 있다.

지난 10년 동안 BOS법은 소음, 초음속, 2차원 및 3차원 흐름을 포함할 수 많은 실험에서 밀도 또는 온도장을 분석하는데 효율적인 방법으로 제시 되었다^(37,41).

전통적인 BOS는 배경 이미지에 인쇄된 패턴의 변위를 평가하기 위해 컴퓨터 기반 이미지 분석 알고리즘을 사용한다. 배경패턴은 무작위 점들로 구성되며, PIV분석법에서 널리 적용되는 교차 상관 알고리즘을 변위 평가에 적용하여 분석할 수 있다. 교차 상관 알고리즘은 카메라와 배경 사이에 위치한 점 패턴에 대해 연속적으로 기록된 두 영상의 비교로 분석된다. 관심영역을 지나면서 굴절률이 변경되고 패턴 변화가 발생하는 경우 빛의 굴절로 나타나고. 영상의 교차 상관 알고리즘을 적용하여 정량적으로 분석할 수 있다.

3.2 BOS 측정원리

BOS법은 Gladstone-Dale⁽⁴²⁾방정식으로 단순화할 수 있는 액체의 굴절률과 밀도 사이의 관계에 기초한다.

Gladstone-Dale관계에 의해 밀도의 영향을 받아 배경 이미지패턴은 변화(Fig. 6, Δy)의 원인이 되고, 그 변화는 인자들에 의해 변환의 값으로 나타난다.

n은 굴절율, ρ는 밀도, G(λ) Gladstone-Dale 상수를 나타내며, 가스의 특성에 따라 달라지며, 공기의 상수 값은 0.23 × 10⁻³m³/kg으로, λ는 파장(m)을 나타낸다.

$$\frac{n-1}{\rho} = G(\lambda)$$

$$G(\lambda) = 2.2244 \times \left\{ 1 + \left(\frac{6.7132 \times 10^{-8}}{\lambda} \right)^2 \right\}$$

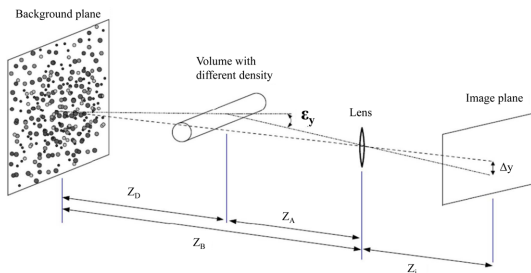


Fig. 6 BOS imaging configuration⁽³⁶⁾

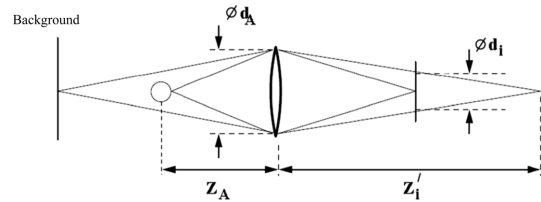


Fig. 7 BOS focusing position and image blur⁽³⁶⁾

또한, 패턴변화는 상관 알고리즘의 도움으로 측정 이미지를 기존 참조 이미지와 비교평가 할 수 있으며, 이들은 흐름을 통해 빛의 광선의 편향 각도가 식에 의해 기하학적 비율을 사용하여 계산된다.

$$\Delta y = z_D M \epsilon$$

M = Z_A/Z_B로 확대상수, Z_D는 배경패턴으로부터 밀도장과과의 거리를 나타내며,

$$\Delta y = f \left(\frac{Z_D}{Z_D + Z_A - f} \right) \epsilon$$

Z_A는 밀도장과 렌즈와의 거리를 나타내며, f는 렌즈의 초점거리를 나타내며, 초점거리는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{Z_i} + \frac{1}{Z_B}$$

Z_D → ∞가 되면 Δy = fε로 정의될 수 있다.

밀도 변화가 없을 시 배경패턴은 초점렌즈에 의해 CCD의 이미지셀에 나타난다. 만일, 배경과 초점렌즈 사이에 분무가 형성되면 밀도장의 변화로 인해 패턴은 광선 진행에서 각도 ε만큼의 이탈이 발생하고, 이것들은 밀도변화전과 다른 위치로 변위이동을 나타내게 된다. 두 이미지 사이의 발생한 이동거리 Δy는 밀도 기울기로 인해 원위치에서 다른 지점으로 이동이 이뤄진 것이다.

Figure 8의 좌측 영상은 밀도 변화 발생하지 않은 배

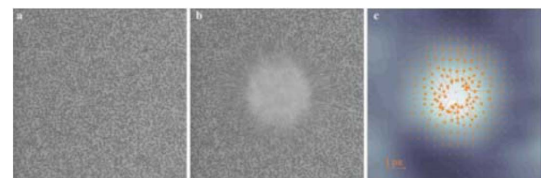


Fig. 8 Background pattern recording (L) before and (C) shortly after a density variation (R) vector plot of the displacement correlation⁽⁴³⁾

경패턴 영상이고, 중간은 분무에 의해 밀도 변화로 배경 패턴이 각각 이동된 것이다. 우측 그림은 동일한 배경 및 광원을 따라 밀도 구배와 비례하는 결과를 영상변위 값으로 벡터장 표현으로 나타낸 것이다. 기본 배경인 무작위 배경점은 각 위치의 방사형 변위 성분으로 나타나고 있으며, 이러한 적용에서 발생할 수 있는 대표적인 영향은 강한 밀도 구배로 인한 이미지 흐릿함과 이미지 대비 감소 및 변위 변화의 값으로 나타난다.

4. Light Field 측정법

4.1 Light Field 측정

Light Field (LF) 측정법에 적용되는 LF라는 용어는 A. Gershun⁽⁴⁴⁾에 의해 3차원 공간의 빛의 방사선적 특성에 관한 고전 논문에 제시 되었다.

한 점을 통과하는 빛의 정보는 3차원 위치정보와 빛의 방향, 색상, 파장, 시간 등의 정보를 가지고 있으며 plenoptic function⁽⁴⁵⁾에 의해 표현된다.

$$p = P(\theta, \phi, \lambda, V_x, V_y, V_z, t)$$

빛의 파장은 λ , 빛의 방향은 θ, ϕ 로 빛의 위치정보는 V_x, V_y, V_z 및 빛의 세기의 시간적인 변화로 Plenoptic 함수, $P(\theta, \phi, \lambda, V_x, V_y, V_z, t)$ 로 표현되고 이들 정보로부터 특정 3차원 공간에 대한 모든 LF 정보로 얻을 수 있다.

그러나, A. Gershun의 연구결과를 당시에 실현하기에 영상저장기술이 부족하였고, 추후 다수의 카메라의 조합 배열방법⁽⁴⁶⁾과 마이크로 렌즈어레이를 설치한 촬영법⁽⁴⁷⁾으로 구현되어 Lytro카메라⁽⁴⁸⁾, Focused카메라⁽⁴⁹⁾, Multi-focus Plenoptic카메라⁽⁵⁰⁾, Raytrix카메라⁽⁵¹⁾ 등으로 상용화 되었다.

4.2 Light Field 원리

기본적 측정은 주 초점렌즈의 뒤쪽에 여러 개의 마이크로 렌즈를 수평, 수직적으로 설치하고, 이미지 센서는 마이크로 렌즈 보다 약간 뒤쪽에 설치를 해 이미지들의 각각 초점이 마이크로 렌즈를 지나 각각 다르게 맞춰진 영상들을 저장하는 방식이다.

이 다중초점영상정보를 가지고 있는 한 프레임의 영상을 서로 다른 심도를 적용하여 개별 분석하고 재영상화 방법으로 각기 심도값이 다른 작은 영상들은 후처리와 재조합 소프트웨어를 통해 개별 하나의 이미지로 만들어 개별 심도값이 있는 영상을 재생성하게 된다. LF

법으로 촬영 된 영상 이미지는 초점면이나 심도의 변화를 주어 LF 이미지를 사용해 전경에 초점을 정할 수도 중간이나 후경에 있는 물체에 초점을 맞출 수도 있다. 즉, 한 영상안에 다초점의 영상이 기록됨에 따라 각 초점별로 영상을 구성하면 3차원의 영상 결과물로 표현이 가능하다는 것이다.

그러나, 최종 영상물의 해상도는 전체 영상물로부터 받은 각종 영상데이터가 분할 된 각 이미지 셀로 저장되는 결과로 인해 개별 영상의 해상도는 상대적으로 낮아진 상태에서 저장이 이루어진다는 한계를 가지고 있다. 1개의 마이크로 렌즈가 1개의 초점의 빛을 잡아내므로 마이크로 렌즈의 수가 증가 할수록 이미지 픽셀의 수가 많아져야 상대적으로 해상도의 변화의 손실을 보완 할 수 있다. 결국, 영상물의 심도는 마이크로 렌즈의 수에 의해 결정이 되며, 해상도는 마이크로 렌즈의 개별 픽셀의 수에 의해 정해져 센서에 마이크로 렌즈의 수를 늘리면 해상도는 상대적으로 떨어진 심도의 영상을 만들게 되는 것이다.

모든 이미지 픽셀의 영상은 각각이 다른 초점의 심도를 저장하게 되는데 이것은 광선의 배열에 있는 상응하는 물체의 위치가 약간씩 다르기 때문에 영상의 심도는 바뀌어 저장되는 것이다.

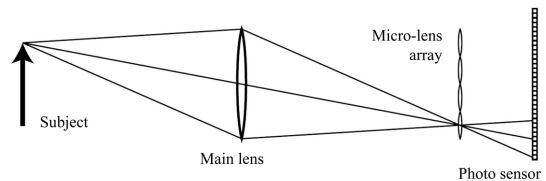


Fig. 9 Conceptual schematic of LF camera system⁽⁴⁸⁾

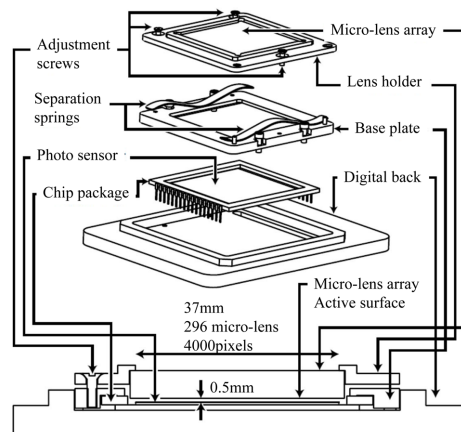


Fig. 10 View of assembly for attaching the micro-lens array & Cross-section through assembled parts⁽⁴⁸⁾

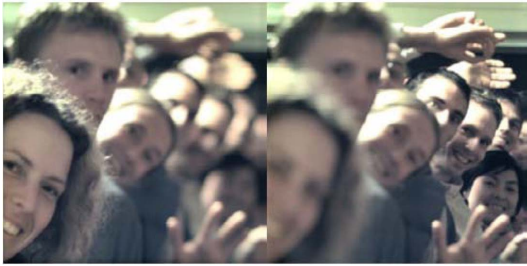


Fig. 11 Refocusing after a single exposure of the LF camera⁽⁴⁸⁾

LF측정법은 이미지의 어떤 부분이 초점이거나 초점 밖에 있는지 정의하고, 필드의 깊이를 정의하거나, 모든 부분의 초점을 전환하거나, 모든 부분을 이동할 수 있다. 이런 시차 데이터를 사용하여 단일 LF에서 3차원의 사진을 생성할 수 있어서. 현재는 3차원 영상의 재현을 위한 기술로 적용을 하고 있다.

LF촬영 방식을 분무의 발달측정에 적용 시키면 1장의 영상에 2차원 영상정보를 얻던 방식에서 3차원 정보 저장함에 따라 평면분석이 부피에 대한 간접분석으로 전환이 가능하다고 할 수 있다.

5. 토 의

이상 제안한 영상분석법들은 복잡한 광학계의 사용없이 상대적으로 단순한 광학계와 광원 및 배경 패턴이미지로 밀도장의 변화를 측정할 수 있는 BOS방법과 다중 초점을 한 영상에 정렬하여 촬영하는 LF측정방법이다.

각 영상 촬영법을 통한 영상분석방법으로도 다양한 영상의 이미지를 충분히 분석할 수 있는 방법으로 충분하나, 연속적인 분무의 영상을 분석하고자 할 경우 두 가지 방법의 조합을 통한 영상의 취득이 이루어진다면 더욱 요긴한 분석 방법 할 것이다.

더욱이 분무의 발달은 액상과 기상이 한 공간에서 나타나기 때문에 중첩된 2차원적인 영상을 밀도장의 분리를 통해 실제에 근접한 결과값을 산출하게 될 것이다.

이에 Fig. 12과 같이 BOS법에 의한 광원의 구성과 micro-lens array를 이용한 LF장치를 구성하게 된다면 영상을 취득 후 2차원의 영상물에서 3차원의 결과값을 분석하는 결과물을 비교적 간단한 구성에 의해 얻을 것이다.

다만, BOS법은 촬영 대상의 뒷편에 적절한 배경 이미지를 설치 및 적절한 광원의 선택이 요구 되어, LF법의

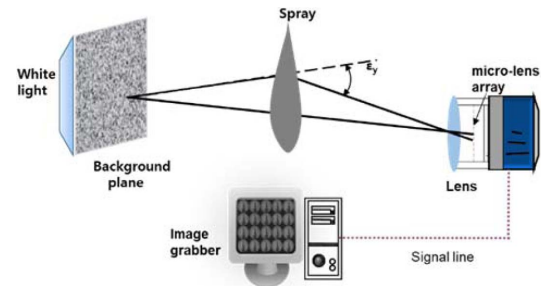


Fig. 12 BOS & LF system schematic

영상은 한정된 이미지센서를 각 영상이 낮은 픽셀수로 분할 해 사용하는 한계로 인해 고해상도의 CCD, CMOS 이미지 센서를 요구하게 된다.

6. 결 언

지금까지 분무의 거시적 측정법에 대한 전반적 점검과 새로이 측정에 사용되고 있는 기법에 대해 설명하였다. 새로이 제시된 BOS 및 LF 영상법을 조합하여 촬영하며 분석 준비를 위한 한계점을 넘을 수 있고, 이들 분석법의 조합에 의해 2차원적 개별 분석에 의한 결과물을 3차원적으로 분석함에 따라 상대적으로 정확한 분석법이 되리라 판단된다.

후 기

본 논문은 2018년도 신한대학교 학술연구비 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- (1) W. Bosch, "The fuel rate indicator: a new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection", 1966. No. 660749.
- (2) Rolf D. Reitz and R. Diwakar, Structure of high-pressure fuel sprays, 1987.
- (3) M. Hoff, R. E. Mickle and R. A. Froude, "A Rapid Acquisition Lidar System for Aerial Spray Diagnostics", Transactions of the ASAE, Vol. 32, No. 5, 1989, pp. 1523-1528.
- (4) Hiro Hiroyasu and Arai Masataka, "Structures of fuel

- sprays in diesel engines”, SAE transactions, 1990, pp. 1050-1061.
- (5) Todd D. Fansler, Donald, T. French and Michael C. Drake, “Fuel distributions in a firing direct-injection spark-ignition engine using laser-induced fluorescence imaging”, SAE transactions, 1995, pp. 323-338.
- (6) Dennis L. Siebers, Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays, 1998.
- (7) Brian S. Higgins, Charles J. Mueller and Dennis L. Siebers, “Measurements of Fuel Effects on Liquid-Phase Penetration in DI Sprays”, SAE, 1999, pp. 1999-01-0519.
- (8) Caroline L. Genzale, Lyle M. Pickett and Sanghoon Kook, “Liquid penetration of diesel and biodiesel sprays at late-cycle post-injection conditions”, SAE International Journal of Engines, Vol. 3, No. 1, 2010, pp. 479-495.
- (9) William Bachalo, “Spray Diagnostics for the twenty-first century”, Vol. 10, No. 3-5, 2000, pp. 439-474.
- (10) R. Payri, F. j. Salvador, J. Gimeno and L. d. Zapata, “Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions”, Fuel, Vol. 87, No. 7, 2008, pp. 1165-1176.
- (11) Yujie Wang, Xin Liu, Kyoung-Su Im, Wah-Keat Lee, Jin Wang, Kamel Fezzaa, David Ls Hung and James R. Winkelman, “Ultrafast X-ray study of dense-liquid-jet flow dynamics using structure-tracking velocimetry”, Nature Physics, Vol. 4, No. 4, 2008, p. 305.
- (12) Arai Masataka, “Diesel spray characteristics and its combustion”, 2005, pp. 68-82.
- (13) Norman Chigier, William Bachalo, Rolf D. Bellan Reitz and Marcus Josette Herrmann, “Spray control for maximizing energy efficiency and reducing emission in combustion engines”, Atomization and Sprays, Vol. 21, No. 7, 2011.
- (14) Mark Linne, “Imaging in the optically dense regions of a spray: A review of developing techniques”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 39, No. 5, 2013, pp. 403-440.
- (15) Gary S. Settles, “Historical Background”, Springer, 2001, pp. 1-24.
- (16) Klein-Douwel, Rjh Frijters, Pjm Somers, Lmt De Boer, and Wa Baert Rsg, “Macroscopic diesel fuel spray shadowgraphy using high speed digital imaging in a high pressure cell”, Fuel, Vol. 86, No. 12-13, 2007, pp. 1994-2007.
- (17) Pickett, L. M., Genzale, C. L., Manin, J., Malbec, L., and Hermant, L., “Measurement uncertainty of liquid penetration in evaporating diesel sprays”, Proc. ILASS Americas, Vol. 23rd Annual Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, 2011.
- (18) Christof Schulz and Volker Sick, “Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 31, No. 1, 2005, pp. 75-121.
- (19) Jian Gao, Deming Jiang and Zuohua Huang, “Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of ethanol-gasoline blends and gasoline”, Fuel, Vol. 86, No. 10-11, 2007, pp. 1645-1650.
- (20) Scott E. Parrish and R. J. Zink, “Development and Application of Imaging System to Evaluate Liquid and Vapor Envelopes of Multi-Hole Gasoline Fuel Injector Sprays under Engine-Like Conditions”, Atomization and Sprays, Vol. 22, No. 8, 2012, pp. 647-661.
- (21) Yu-Yin Zhang, Takuo Yoshizaki and Keiya Nishida, “Imaging of droplets and vapor distributions in a Diesel fuel spray by means of a laser absorption-scattering technique”, Applied Optics, Vol. 39, No. 33, 2000, pp. 6221-6229.
- (22) Markus Raffel, Christian E. Willert, Fulvio Scarano, Christian J. Kähler, Steve T. Wereley, and Jürgen Kompenhans, “Particle image velocimetry: a practical guide”, Springer, 2018.
- (23) Ronald J. Adrian and Jerry Westerweel, “Particle image velocimetry”, Cambridge University Press, 2011.
- (24) R. Palero Virginia and Ikeda Yuji, “Droplet-size-classified stereoscopic PIV for spray characterization”, Measurement Science and Technology, Vol. 13, No. 7, 2002, p. 1050.
- (25) Angarita-Jaimes, Diego Towers, Catherine Elizabeth Towers and David Peter, “Three-component multi-phase velocimetry measurements on a GDI spray using optically efficient fluorescent tracers”, Experiments in Fluids, Vol. 52, No. 4, 2012, pp. 949-962.
- (26) V. G. McDonnell and G. S. Samuelsen, “Measurement of fuel mixing and transport processes in gas turbine combustion”, Measurement Science and Technology, Vol. 11, No. 7, 2000, p. 870.
- (27) Cameron Tropea, “Optical Particle Characterization in Flows”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 43, No. 1, 2011, pp. 399-426.
- (28) Rainer Hain, Christian J. Kähler and Cam Tropea,

- “Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras”, *Experiments in Fluids*, Vol. 42, No. 3, 2007, pp. 403-411.
- (29) V. Weber, J. Brübach, R. L. Gordon and A. Dreizler, “Pixel-based characterisation of CMOS high-speed camera systems”, *Applied Physics B*, Vol. 103, No. 2, 2011, pp. 421-433.
- (30) P. Buchave, M. Saffmann and H. Tager, “Simultaneous measurement of size, concentration and velocity of spherical particles by a laser Doppler method”, 1984.
- (31) W. D. Bachalo, “Method for measuring the size and velocity of spheres by dual-beam light-scatter interferometry”, *Appl. Opt.*, Vol. 19, 1980, pp. 363-70.
- (32) H.-E., Albrecht, N. Damaschke, M. Borys and C. Tropea, “Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques”, Springer, 2002.
- (33) Hugues Richard and Markus Raffel, “Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, No. 9, 2001, p. 1576.
- (34) Gea Meier, “Computerized background-oriented schlieren”, *Experiments in Fluids*, Vol. 33, No. 1, 2002, pp. 181-187.
- (35) Sb Hughes Dalziel, Graham O Sutherland, Bruce R, “Whole-field density measurements by ‘synthetic schlieren’”, *Experiments in Fluids*, Vol. 28, No. 4, 2000, pp. 322-335.
- (36) Markus Raffel, “Background-oriented schlieren (BOS) techniques”, *Experiments in Fluids*, Vol. 56, No. 3, 2015, p. 60.
- (37) L. Venkatakrishnan and Gea Meier, “Density measurements using the background oriented schlieren technique”, *Experiments in Fluids*, Vol. 37, No. 2, 2004, pp. 237-247.
- (38) M. Raffel, C. Tung, H. Richard, Y. Yu and Gea Meier, “Background oriented stereoscopic schlieren (BOS) for full scale helicopter vortex characterization”, 2000, pp. 23-24.
- (39) Bradley Atcheson, Wolfgang Heidrich and Ivo Ihrke, “An evaluation of optical flow algorithms for background oriented schlieren imaging”, *Experiments in Fluids*, Vol. 46, No. 3, 2009, pp. 467-476.
- (40) Ryonosuke, W., Ozawa, Tristian J. Cox and Kareem Ahmed, “Three-dimensional Measurements of Supersonic Flow Using Tomographic Background Oriented Schlieren”, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- (41) Markus Weilenmann, Yuan Xiong, Mirko Bothien and Nicolas Noiray, “Background Oriented Schlieren of Fuel Jet Flapping Under Thermoacoustic Oscillations in a Sequential Combustor”, 51050, 2018, pp. V04AT04A034.
- (42) J. F. Gladstone and T. P. Dale, “Researches on the refraction, dispersion, and sensitiveness of liquids”, *Philos. Trans. R. Soc. Lond*, Vol. 153, 1863.
- (43) Markus Raffel, Hernandez-Rivera, Ricardo Heine, Benjamin Schröder, and Andreas Mulleners Karen, “Density tagging velocimetry”, *Experiments in Fluids*, Vol. 51, No. 2, 2011, pp. 573-578.
- (44) A. Gershun, “The Light Field”, Moscow, 1936, trans. by P.Moon and G. Timoshenko, J., *Math. and Physics*, Vol. 18, 1939, pp. 51-151.
- (45) Edward H. Adelson and James R. Bergen, “The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision”, *Computational Models of Visual Processing*, 1991, pp. 3-20.
- (46) Bennett Wilburn, Neel Joshi, Vaibhav Vaish, Eino-Ville Talvala, Emilio Antunez, Adam Barth, Andrew Adams, Mark Horowitz, and Marc Levoy, “High performance imaging using large camera arrays”, *ACM*, 2005, pp. 765-776.
- (47) J. Y. A. Wang and E. H. Adelson, “Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, Vol. 14, 1992, pp. 99-106.
- (48) Ren Ng, Marc Levoy, Mathieu Brédif, Gene Duval, Mark Horowitz, and Pat Hanrahan, “Light field photography with a hand-held plenoptic camera”, *Computer Science Technical Report CSTR*, Vol. 2, No. 11, 2005, pp. 1-11.
- (49) A. Lumsdaine and T. Georgiev, “The focused plenoptic camera”, 2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 2009, pp. 1-8.
- (50) Todor Georgiev and Andrew Lumsdaine, “The multi-focus plenoptic camera”. *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, Vol. 8299, SPIE, 2012.
- (51) Christian Perwaß and Lennart Wietzke, “Single lens 3D-camera with extended depth-of-field”, *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, Vol. 8291: SPIE, 2012.