

## 가시화법을 이용한 디젤 인젝터의 액적과 soot의 측정 기술

### Measurement technique for particle and soot of diesel injection by using a visualization method

정재우\*, 박현종\*\*, 이기형, 이창식\*\*\*  
J. W. Chung, H. J. Park, K. H. Lee, C. S. Lee

#### ABSTRACT

Recently, many researches have been performed to improve the combustion and emission in a D.I. Diesel engine. Especially reduction of the soot formation in the combustion chamber is the essential to acquire the improvement of the emission performance. This emission of the diesel combustion is effected by the characteristics of air-fuel mixing.

Therefore, the optical measurement technique such as LII and LIS were established in order to visualize the distribution of the soot and analyze the particle including spray in the combustion chamber.

In this study, we developed the algorithm for calculating relative diameter and density of particle and applied this method to measure simultaneously the distribution of soot and spray in a D.I. diesel engine. From this experiment, we found that the soot is existed in the rich region of spray and generated caused by incapable air fuel mixture.

주요기술용어 : Spray(분무), LII(Laser Induced Incandescence)법, LIS(Laser Induced Scattering)법, D.I. diesel engine(직분식 디젤 엔진)

#### 1. 서론

최근의 배기 저감 및 연비 향상을 포함한 디젤 엔진의 구체적 개발 방향은 직분식 디젤 엔진의 전자제어화, 소형, 경량화와 출력의 증가를 위한 고속화에 있으며, 엔진의 경량화는 직분식 디젤 엔진의 소형 승용 차량의 탑재 가능성의 확보면에서 뿐만 아니라, 디젤 엔진의 연비 향상에도 크게 기여할 것으로 기대되어 진다.

그러나 소형화와 고속화에 따른 연료와 공기의 혼합시간의 저감은 연료 공기 혼합의 중요성을 더욱 증대시키고 있으며, 특히 디젤 엔진

내의 국부적인 불균일 혼합은 soot 등의 입자상 배기 물질의 생성을 유발할 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 배기 생성물질의 저감기술은 디젤 엔진의 성능향상을 위하여는 필수적인 핵심과제이므로 디젤 엔진내의 soot 및 액적의 분포를 측정하기 위한 측정방법들에 관한 연구가 많이 수행되고 있다<sup>(1)</sup>.

그 중 특히 LIS(Laser Induced Scattering)법 LII(Laser Induced Incandescence)법은 근래들 그 응용이 활발히 이루어지고 있으나, 이 방법의 적용은 soot 분포 및 액적 분포의 정성적 분포만을 개별적으로 제공하고 있다<sup>(2)</sup>.

따라서 본 연구에서는 한 개의 ICCD-카메라와 LIS 및 LII법을 이용하여 가시화 직분식 단기통 디젤 엔진내의 액적 분포와 soot 분포측정을 동시에 수행하는 방법<sup>(3)</sup>을 구체화하였으며, 실제 엔진내의 분포 결과를 제시하였다.

\* 한양대학교 Post-Doc.

\*\* 한양대학교 대학원

\*\*\* 한양대학교 기계공학과

## 2. LIS와 LII의 원리

### 2.1 LIS(Laser Induced Scattering)

레이저 슈트광이 연료 분무의 soot입자에 조사되었을 때, 탄성산란광(LIS signal, elastic scattered light)을 발산하며, 이는 Rayleigh scattering theory로 대변될 수 있다. 이 이론에서 산란강도  $I_{scat}$ 는 다음식과 같이 나타내어질 수 있다.

$$I_{scat} \propto D^6 N \quad (1)$$

D : particle diameter, N : number density,  $I_{LII}$  : the intensity of LII signal

이러한 soot로부터의 탄성 산란광은 만약 디젤 엔진 연소시의 soot 온도가 2300K부근의 열복사(thermal radiation)보다 충분히 큰 경우에 있어서는 광학 레이저 필터를 통하여 가시화될 수 있다. LIS를 이용한 2차원 신호는 광의 탄성산란으로부터 얻을 수 있으며, LII나 LIF 신호에 비하여 매우 강하다는 특징이 있다. LIS 신호는 narrow-band-pass filter를 이용하여 쉽게 분리할 수 있으며, 화염광 또는 LIF(laser induced fluorescence) 신호는 필터의 매우 짧은 밴드폭(band width, 약 1nm)과 짧은 카메라 셔터시간을 이용하여 억제 할 수 있다.

그러나, LIS 신호는 입자지름의 6승에 비례하며, LII신호는 입자지름의 3승에 비례하므로, LII신호에 비하여 좀 더 강한 신호를 획득할 수 있으나, 액적에 의한 신호까지도 취득되게 된다. 결과적으로 LIS 신호는 큰 soot입자의 존재 영역을 확인할 수 있게 하며 또한 LII법과 결부되었을 때(동시 측정되었을 경우)액적의 존재 영역을 확인할 수 있게 하여 준다.

### 2.2 LII(Laser Induced Incandescence)

레이저 슈트 빔에 의하여 조사된 soot입자는 LIS 신호 즉, 탄성산란의 신호이외에도 조사된 레이저 광의 에너지를 흡수하여 자신의 온도를

높이는데 이용한다. LII 신호는 레이저 슈트에 의하여 가열된 soot입자의 thermal radiation이 모아져 얻어진다. LII신호의 취득시 자외선 광학 필터(ultraviolet optical filter)로서 SWP(short wave pass)필터나 밴드패스(band pass) 필터등을 사용하며, 이를 통하여 LII 이외의 광신호는 제거된다. LII신호의 강도  $I_{LII}$ 는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$I_{LII} \propto D^3 N \quad (2)$$

입사된 레이저 슈트빔은 soot입자를 가열하는데 주로 사용되며, 주위 가스로의 전달이나 열복사는 그에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다고 볼 수 있다. 따라서 입사된 레이저 슈트빔에 의한 부가 에너지는 soot입자의 증발에너지와 평형을 이룬 직후 증발온도까지 급격히 증가하게 된다.

soot온도 상승의 시간스케일(time scale)은 레이저의 온도와 형태에 영향을 받으며, 이것은 Nd:YAG레이저의 8-10ns의 레이저 펄스의 상승시간(rising time)과 유사하다. 레이저 펄스의 강도와 기간에 따라 soot입자는 부분적으로 또는 완전하게 기화되지만, 기화직전에 꽤 큰 열방출이 일어난다. 이렇게 온도가 상승된 soot 입자로부터의 열복사의 스펙트럼은 좀 더 짧은 파장대로 전이되며, 그 최고 강도는 자외선 파장에서 soot 온도 2300K에서의 열복사강도에 비하여 상대적으로  $10^3$ 배까지 증가된다.

### 2.3 LII실험시의 노이즈 제거방법<sup>(4)</sup>

#### - 배경광의 제거

LII법을 이용한 측정에서 배경광의 제거는 기본적으로 슈트 단면에서 가열된 soot 입자 신호와 슈트 단면외부에 존재하여 레이저 빔에 의하여 가열되지 않은 soot입자 신호의 온도차를 이용한다.

일반적인 디젤 엔진에서 레이저에 의하여 가열되지 않은 soot입자의 온도는 약 2200K정도이다. soot가 흑체로서 복사열을 방출한다고 가

정할 때, 레이저에 의하여 가열된 soot입자는 좀더 짧은 파장에서 훨씬 높은 배출특성을 가지며, 이러한 원리를 이용하여 배경광을 제거한다. 적절한 단파장패스필터(short-wave-pass filter)의 사용으로 레이저 슈트내의 soot입자의 열복사를 획득할 수 있다. 신호의 비가  $10^3$ 배 이상이 되는 파장(약 450nm)보다 짧은 파장대의 신호는 LII 신호로 간주하며, 이에 반하여 그 이상의 파장은 노이즈로 간주한다. 따라서 짧은 파장의 취득은 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있게 하나, cutoff wave의 저감은 동시에 광량의 저하를 초래한다. 따라서 약 400에서 450nm정도의 단파장패스필터(short-wave-pass filter)를 사용하는 것이 일반적이라 할 수 있다. 배경광에 대한 LII 신호의 비율 얻기 위해서는 카메라의 노출시간은 soot 입자가 레이저에 의하여 가열되는 시간으로 제한되어야 한다. 레이저 펄스 이후의 기화 되지 못한 가열된 입자는 온도가 저감되어, 그것의 단파장 열복사는 감소하게 된다.

#### - 액적 신호의 제거

LII의 가장 주된 장점중의 하나는 레이저 슈트내에 존재하는 액적 신호가 영향을 미치지 못하는 데에 있으며, 그 주된 이유는 다음과 같다.

① LII는 특별한 레이저의 파장영역을 요구하지 않기 때문에, 레이저의 파장은 필터에서 약 450nm 정도의 cutoff 보다 긴 것으로 선택하여 사용할 수 있다. 이러한 방법으로 elastic scattering, red-shifted laser-induced fluorescence와 red-shifted Raman scattering 등은 쉽게 제거된다.

② 연료 액적에서의 열방출은 그리 크지 않다. 연료입자는 레이저 빔을 거의 통과시키므로 가열은 매우 작다고 볼 수 있다. 게다가 연료의 끓는점(boiling point)은 soot의 증발 온도에 비하여 매우 낮으므로, 실형 레이저 슈트 빔내에 연료입자가 존재한다고 하더라도 열복사가 심각하게 이루어지기 전에 증발하게 된다.

#### 2.4 상대수밀도와 상대입경 계산

LII와 LIS의 동시 측정 실험은 거시적인 soot의 분포이외에도 soot의 상대입경(relative soot diameter) 및 상대수밀도(relative soot number density)등을 계산할 수 있게 하여 준다.

LII 신호의 강도,  $I_{LII}$  및 LIS 신호의 강도,  $I_{Sca}$ 는 soot 지름에 대하여 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I_{Sca} \propto D^6 N \quad (3)$$

$$N \propto I_{LII}^2 / I_{Sca} \quad (4)$$

$$I_{LII} \propto D^3 N \quad (5)$$

soot의 상대입경과 상대수밀도는 위의 두 식으로부터 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$Dr = (I_{Sca} / I_{LII})^{1/3} \quad (6)$$

$$Nr = (I_{LII})^2 / I_{Sca} \quad (7)$$

위와 같은 계산식을 LII 및 LIS의 화상의 pixel에 적용하여 상대입경 및 상대수밀도를 계산하지만, LIS신호에는 연료액적의 신호도 존재하므로 LII와 LIS 두 신호가 모두 존재하는 영역에서만 계산을 수행하여, 액적신호에 대한 영향은 제거한다.

이러한 액적신호 외에도 광 신호의 사이클 변동이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 이러한 영향을 제거하기 위하여 상대광도(relative luminance)를 이용하여 (8)과 (9)식에 적용한다. 다음에 상대광도의 계산식을 제시하였다.

$$\overline{I_{Sca}} = \frac{\sum [I_{Sca}(i) \cdot A_{Sca}(i)]}{\sum A_{Sca}(i)} \quad (8)$$

$$\overline{I_{LII}} = \frac{\sum [I_{LII}(i) \cdot A_{LII}(i)]}{\sum A_{LII}(i)} \quad (9)$$

여기서,  $I_{LII}(i)$ 와  $I_{Sca}(i)$ 는 각 화상에서의 계산목표영역의 광도(luminance,  $i=0 \sim 256$ )이며,

$A_{LII}(i)$ 와  $A_{SCA}(i)$ 는 각 신호가 존재하는 pixel의 수이다. Fig. 1는 위의 모든 계산 과정을 순서대로 나타낸 것이다.

은 크게 관측부, 신장 피스톤부, 실린더 헤드부, 구동 시스템부 등으로 구성된 엔진부와 전자 제어식 연료펌프 시스템과 연료분사 노즐로 이루어진 연료 공급부로 구성되어 있다. Table 1은 이 엔진의 제원을 나타내고 있다

### 3. 실험장치

#### 3.1 직분식 디젤 가시화 엔진 시스템



1. visualization engine
2. Driving motor
3. Amplifiers for signal
4. Injection Controller
5. Injection Pump

Fig. 2 Photograph of D.I. Diesel Engine

본 연구에서는 엔진 내의 확산화염을 직접 관찰할 수 있도록 광학적 접근이 가능한 Fig. 2와 같은 단기통 직분식 디젤 가시화 엔진을 사용하였다. 실험에서 사용된 가시화 엔진 시스템

Table. 1 Specification of D.I. Diesel Engine

Engine Type	Two Valve Type Single Cylinder, N.A.
Injection type	Direct injection
Compression ratio	17.0
Displacement volume	673[cc]
Bore × Stroke	95×95[mm]

#### 3.2 LIS와 LII 동시촬영 광학계

본 연구에서는 LIS와 LII를 동시에 촬영하기 위한 새로운 광학계 배치를 개발하였다. 일반적으로 LIS와 LII를 동시에 촬영하기 위해서는 두 개의 카메라를 사용하지만<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 한 개의 ICCD-카메라(V-tek, MXIII-10N)를 이용하여 동시에 LIS와 LII 신호를 취득하였다. LIS광학계로는 확산화염의 신호로부터 산란신호를 분리하기 위한 532nm full mirror와 532nm narrow-band-pass filter가 사용되었고, LII 광학계로는 Full mirror와 450nm

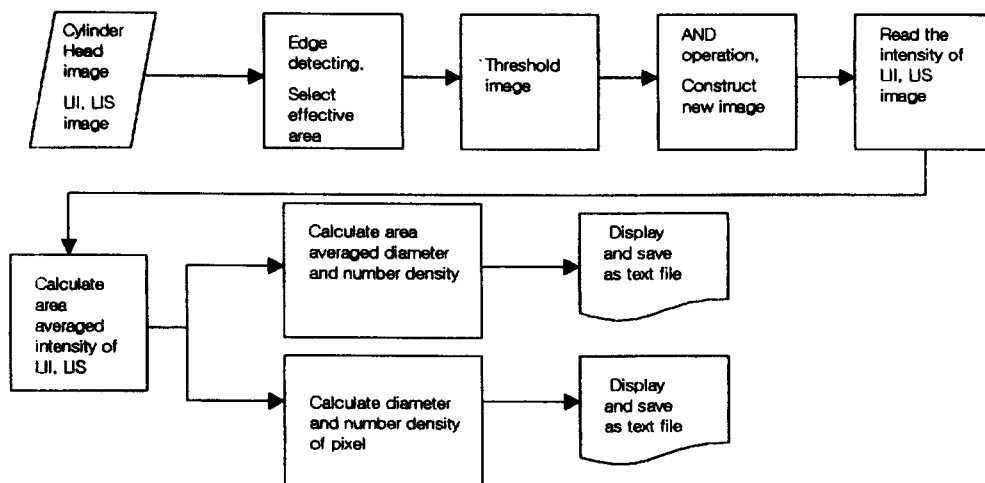


Fig. 1 Calculation of relative diameter and density

short-wave-pass filter가 사용되었다. Fig. 3는 LIS와 LII 동시촬영을 위한 광학계의 구성을 보여주고 있다.

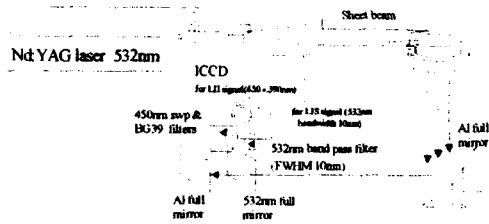
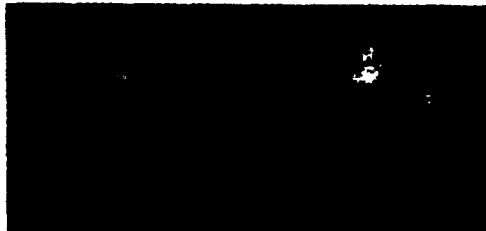


Fig. 3 Schematic diagram of optical setup

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 LIS와 LII신호의 동시촬영을 통하여 실린더내 디젤 확산 화염의 soot의 분포를 조사하였으며 상대적인 soot의 밀도와 입경을 계산하였다.



(a) LIS Image (b) LII Image  
Fig. 4 Original Image(5hole, TDC injection, ATDC 15°촬영)

Fig. 4는 동시촬영되어진 LIS와 LII의 처음 이미지이며, 이미지는 압축행정 직후 촬영되었으며 노즐하부에서 촬영되었다. 최초의 이미지는 LIS신호와 LII 신호가 미약하기 때문에 Thresholding 과정을 거쳐 이미지의 명도를 높였다. Thresholding 과정시 이미지의 그레이 값이 분포가 다양하지 못하였으므로, 그 분리가 상대적으로 수월하였다. LIS이미지는 입경이 큰 soot와 액적신호를 포함하지만 어느 정도는 액적의 분포를 대변한다고 볼 수 있다. 두 이미지를 비교하여 보면 LIS신호가 집중되어 있는 곳에 LII 신호 역시 많이 존재하는 것을 볼 수 있다. LIS와 LII신호가 중복되지 않는

부분에서 LIS신호는 액적의 신호를 대변한다고 할 수 있다. 두 신호 모두다 5공 노즐의 분무 성장 위치에 분포하는 것을 볼 수 있는데 이는 soot가 불완전 연소에 의하여 발생한다는 점을 생각하면 이곳에서 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어지지 않아 LIS와 LII신호가 검출된다고 판단된다. Fig. 4를 내부 신호의 강도를 조사하기 위해 이미지 처리를 하였다. 이미지 처리는 위의 그림에서 일정치 이하의 값을 필터링하여 노이즈를 제거후 이미지의 gray level를 조사하여 이미지를 다시 구성하는 것을 말한다.

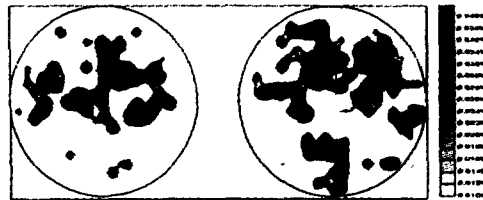


Fig. 5 Modified Image

Fig. 5는 Fig. 4을 이미지 처리한 결과이다. 그림에서 나타나는 수치는 gray level 256을 100%인 기준으로 정하였을 경우 그에 비례하여 각 픽셀의 gray level을 %로 나타낸 것이다. 명도의 분포는 0.01%부터 0.04%까지 분포함을 알 수 있는데 이는 LIS와 LII 신호가 매우 미약함을 의미하고 있다. 위 이미지가 보여주고 있는 바와 같이 명도가 높은 부분은 레이저에 의해 발생하는 LIS와 LII 신호가 많은 부분을 의미한다. 명도가 높은 곳의 분포가 각 이미지의 상 안쪽부분에 위치함을 볼 수 있다. 이는 이 부분에서 액적의 분포가 높고 soot의 밀도가 높다는 것을 보여주는 결과로서 불완전 연소가 일어나고 있다는 것을 의미한다.

분사시기와 촬영시기를 고려해 볼 때 압축행정말 분사된 연료의 바깥부분에서 미립화가 잘되어 공기와 연료의 혼합이 잘 이루어지는 것으로 보인다. 따라서 화염이 분무 바깥쪽에서는 충분히 발달하지만 분무내부에는 충분한 공기가 공급되지 못하기 때문에 불완전 연소가 발생하는 것으로 판단된다. 특히 이미지의 위쪽부분에 각 신호가 집중되어 있는 것을 관찰

할 수 있는데 이는 분무가 피스톤부의 관측창에 충돌하는 부분으로, 이곳에서 불완전 연소가 발생하여 이와 같은 현상이 일어나는 것으로 판단된다. 이러한 충돌에 의한 soot 발생은 분사시기의 특성상 필연적으로 나타나는 현상으로 이를 저감시킬 수 있는 엔진의 운전조건이 필요하다는 것을 의미한다.

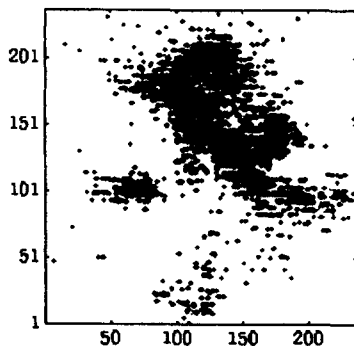


Fig. 6 Relative density distribution of Soot

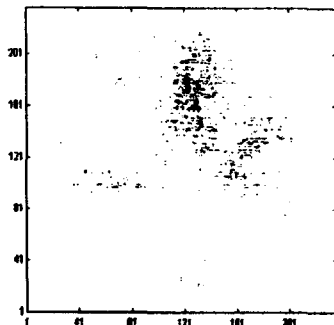


Fig. 7 Relative diameter distribution of Soot

Fig. 6은 Fig. 1과 같은 과정을 통하여 계산되어진 soot의 상대수밀도이다. 액적의 신호는 배제되어 있기 때문에 순수한 soot의 분포라고 할 수 있다. Fig 5의 결과와 마찬가지로 soot의 밀도가 주로 분무내에 집중되어 있는 양상을 보여주고 있으며, 전체적인 분포는 분무형상과 유사한 특성을 보여주고 있다. Fig. 7은 soot의 상대입자직경을 계산한 것을 보여주고 있다. Fig. 6과 비교하여 보면 밀도가 높은 곳의 soot의 입경이 상대적으로 크게 존재한다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 액적과 soot의 분포를 가시화하기 위하여 LIS와 LII를 동시에 촬영할 수 있는 기술을 개발하였으며, 이를 직분식 디젤엔진 내의 확산화염 내부에 적용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) LIS와 LII를 동시촬영한 결과 2차원적인 액적과 soot의 분포를 얻을 수 있었다.

(2) 동시촬영된 두 이미지를 이용하여 soot의 상대 밀도와 상대입자직경을 계산하여 soot의 연소실 내 분포를 확인할 수 있었다.

(3) 직분식 디젤 엔진에서는 분무의 형상과 일치하는 위치에 soot가 발달한다는 사실을 확인할 수 있었다.

(4) 연료의 미립화와 공기와의 혼합이 잘되는 지점에서 soot가 적게 발생하며, 이곳에서 발생하는 soot의 상대입경도 작다는 사실을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. John E Dec. "A Conceptual Model of D.I. Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging" SAE 970873 pp. 223~250
2. Georg wiltafsky, Wolfgang Stoltz, Jürgen Köhler, and Christoph Espey "The Quantification of Laser-Induced Incandescence (LII) for Planar Time Resolved Measurements of the Soot volume Fraction in a Combusting Diesel Jet" SAE 961200 pp. 1~11
3. A. O. zur Loye , D.L. Siebers and J.E. Dec "2-D Soot Imaging in a Direct Injection Diesel Engine Using Laser-Induced Incandescence." International Symposium COMODIA 90 pp. 523~528
4. Hidenori Kosaka, Takahiro Nishigaki, and Takeyuki Kamimoto, "A Study on Soot Formation and Oxidation in an Unsteady

Spray Flame via Laser Induced  
Incandescence and Scattering Technique"  
SAE 952451 pp 11~20

5. John E. Dec and Christoph Espey "  
Ignition and Early Soot Formation in a D.I.  
Diesel Engine Using Multiple 2-D Imaging  
Diagnostics" SAE 950456 pp. 155~175