

레이저 시트빔을 이용한 디젤엔진의 Soot 농도 계측

Soot Concentration Measurement in Diesel Engine Using Laser Sheet Beam

이 중 순*

J. S. Lee

ABSTRACT

Recently the laser sheet technique has been developed to improve our limited understanding of the in-cylinder diesel combustion. The technique is capable of high temporal and spatial resolution, so that it is proved to be an adequate combustion diagnostics to find out exhaust emission formation. The optical signals of LIS(Laser Induced Scattering) and LII(Laser Induced Incandescence) images show informations for soot concentration within the optically accessible diesel engine. The LIS and LII signal images of soot concentration provide new insight into where and when soot occurs in a diesel engine.

주요기술용어 : Diesel combustion(디젤연소), LIS(레이저 탄성산란법), LII(레이저 여기적열법),
Optically accessible diesel engine(가시화 디젤엔진)

1. 서론

디젤기관에서 생성되는 soot를 저감시키기 위한 많은 연구가 수행되어 이에 관련된 구체적인 정보가 많이 보고되고 있으나, 대부분의 연구에서 취하는 실험 방법들은 실기관을 실험의 대상으로 하여 운전조건들이나 외적인 부하를 변화시켜 가면서 실험을 한 경우, 연료의 종류를 변화시킨 경우, 연소 기체 내부의 연료 농도 분포 및 미립자의 농도 분포 등 제한된 양을 측정하는 1차원적 채취법(sampling probe method) 등의 방법으로 연구를 시도해 왔다.

또, 기관 연소실에서의 연소를 개선하는 방법이 아닌, 최종 배출되는 soot를 채취하였다가 후처리 장치로써 soot를 재연소시키는 방법의 연구도 수행되어 왔다. 그러나, 근본적으로 연소개선을 통한 soot의 저감책 확립으로 연구의 방향을 정하는 것이 바람직한 방법이라고 생각되어진다.

최근에는 레이저를 광원으로 한 연소 진단법에 의해 새로운 정보들이 발견되고 있다.^{(1)~(3)} 레이저 측정법의 초기에는 주로 광로 전체의 평균치나 일점 측정이 사용되었으나, 엔진연소와 같이 비정상, 비균질의 복잡한 현상을 파악하기 위해서는 보다 시간적, 공간적으로 분해능이 높은 측정법이 요구되는게 현실이다. 즉 측정대상의 일정단면의 전 영역의 현상을 고속으로 측정하는 것이 바람직하고 이에 가장 적

* 정회원, 동명대학

합한 방법이 레이저 시트광을 이용한 측정방법이다.⁽⁴⁾

따라서, 본 연구에서는 soot의 생성과 산화기구를 구명하기 위해서 디젤기관을 개조하고, Nd:YAG 레이저의 제2고조파(파장 532nm)를 이용하여 레이저 빔을 시트화하여 이 시트광을 연소실 내에 조사(照射)함으로써 방출복사강도가 매연입자농도에 비례한다는 레이저여기적열법, 그리고 soot입자로부터 산란되는 광을 취득하는 탄성산란법을 동시에 사용하여 soot의 2차원 가시화를 행하였다. 이러한 결과들을 통해 다음으로 진행될 soot의 생성 및 산화기구에 관한 정보를 제공할 수 있도록 디젤엔진 연소실 내의 soot 농도분포를 관찰하고 이에 영향을 미치는 요인들에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 레이저 탄성산란법과 여기적열법

일반적으로 측정장에 존재하는 입자에 의한 레이저 광의 탄성산란을 이용하는 방법 (Laser Induced Scattering ; 이하 LIS)을 가장 간단한 방법으로 들 수 있는데, 이 탄성산란법은 실험장치가 간단하다는 장점은 있으나 입자의 구별이 곤란하여 특정 입자만을 선별하여 가시화하기가 어렵다는 단점이 있다. 반면에, 레이저여기적열법(Laser Induced Incandescence ; 이하 LII)은 측정 대상부의 매연 입자군에 고 에너지 밀도의 펄스레이저 광이 수ns 정도의 짧은 시간 동안 조사 될 때, 4000K 이상의 고온으로 가열되는 매연입자들이 가열과정과 이후의 식는 과정을 통해 방출하는 LII 신호를 측정하는 방법이다. 고온의 매연 입자로부터 방출되는 흑체복사의 강도를 나타내는 이 LII 신호가 매

연입자의 농도에 비례한다⁽⁵⁾는 물리적인 현상을 이용하여 매연입자의 농도를 측정하는 것이다. 이 때 입자는 광흡수율이 커야하고 증발온도가 높은 것이 바람직한데, 이러한 특성을 가진 입자로서 디젤연소에 존재하는 것이 바로 매연입자(Soot)다. 이 LII법의 장점으로는 여러 종류의 입자가 존재하는 측정장에서 매연입자만을 선별적으로 가시화가 가능하지만 적열광 측정을 위해서는 레이저 출력이 10⁷ W/cm² 이상이 요구되고⁽⁶⁾, 광신호의 강도가 산란광 강도에 비하여 1/100 정도로 미약하다는 단점이 있다.⁽⁴⁾

2.2 실험장치

2.2.1 디젤 가시화 엔진

본 연구에서 실험용으로 개조한 엔진은 직접 분사식 단기통 디젤엔진((주)대동공업, ND130 DI)으로, Table 1에 기존의 엔진과 가시화 엔진의 제원을 비교 설명한다.

Table 1. The specification of a test diesel engine

Item	Conventional Engine	Optically Accessible Engine
Engine Type	DI Diesel Engine, Single Cylinder	←
Bore×Stroke (mm)	95 × 95	←
Compression Ratio	19	17.2
Piston Cavity	Toroidal	←
Fuel Injector	Conventional Injector, 4-Holes	←
Injection timing	BTDC 17°	←

또, Fig.1은 실린더 헤드를 개조하여 광신호를 계측할 수 있도록 관측창이 설치된 그림이다. 이 때 가시화된 창은 직경 23mm이며, 이는 전체면적의 약 6%에 해당한다.

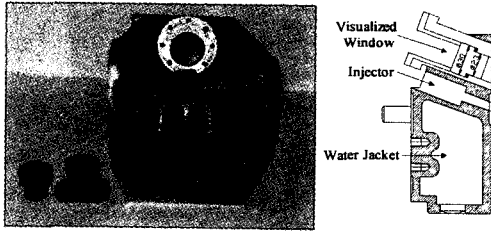


Fig.1 The diagram of the optically accessible cylinder head

Fig.2는 레이저 시트광을 연소실에 조사하기 위하여 상·하면에 입사창 및 투과창이 설치된 실린더 라이너의 개략도를 나타낸 것이다. 개조된 실린더 라이너는 가시창을 설치하기 위해 필요한 최소한의 길이만큼만 연장하였는데, 레이저광 입사창의 크기는 가로 24mm이며, 세로는 20mm로서 크랭크 각도로 TDC로부터 약 50°에 해당된다. 이것은 화염의 단면을 피스톤의 운동 방향에 따라 이동하면서 계측함으로써 연소실 체적의 증가에 따라 soot에 미치는 공기유입의 영향과 시간경과에 따른 정보를 얻고자 함이다. 또한 피스톤도 실린더의 연장 길이만큼 같이 연장함으로써 기존의 엔진에 가까운 압축비를 가진 운전상태를 실현할 수 있게 되었다.

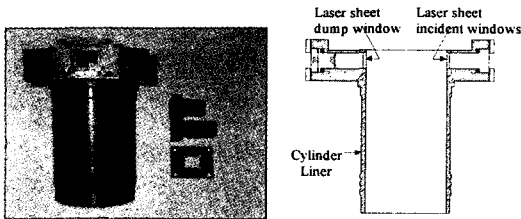


Fig.2 The diagram of optically accessible cylinder liner

또, Fig.3의 그림에서 보는 바와 같이 직분석 노즐의 분무 중 한 줄기를 관찰할 수 있도록 실린더 라이너와 인젝터의 상부 쪽에 원형의

설치된 관측창을 통해 레이저시트광의 입사 및 광신호의 취득 등을 보여주는 그림이다. 디젤 엔진의 분무는 대부분이 피스톤의 캐비티 내에 분사되므로 피스톤헤드에 가시화창을 설치해서 피스톤과 실린더를 연장하는 후방 가시화법의 경우 관측창이 쉽게 오염되어 광신호를 받기가 곤란하며, 보다 실엔진에 상응하는 운전조건을 실현하기 위해 본 연구에서는 실엔진의 구조와 거의 동일한 조건을 가지면서 실린더헤드 쪽을 가시화하는 방법을 선택하였다.

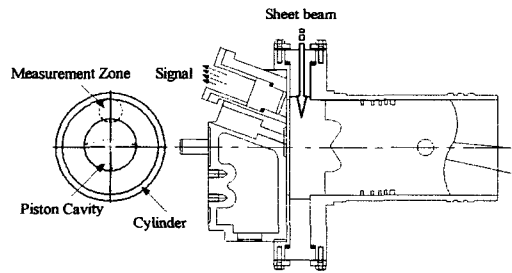


Fig. 3 The diagram of incident and measurement zone

한편, 연소실 압력은 Piezo type 압력센서(6051B, Kistler Instrumental Co.)로 측정하며, 증폭기(5011, Kistler Instrumental Co.)를 거쳐 디지털 오실로스코프에 입력, 저장하였다.

2.2.2 레이저 및 광학장치

Fig.4는 본 실험에서 사용하는 광학 장치의 개략도를 나타내며 광원인 Nd:YAG 펄스레이저를 포함하는 광학장치부, 그리고 산란신호와 적열신호를 동시에 검출하는 수광부, 그리고 엔진의 크랭크각에 동기되어 들어온 신호를 받아 레이저와 ICCD를 제어·작동시키고 받은 화상을 저장하고 해석하는 PC 제어부로 크게 나누어진다. 레이저 광을 조사하는 부분의 광학계에는 전반사 거울과 레이저 광을 시트화시키는 실린더형 렌즈의 조합 등으로 구성되어

있다.

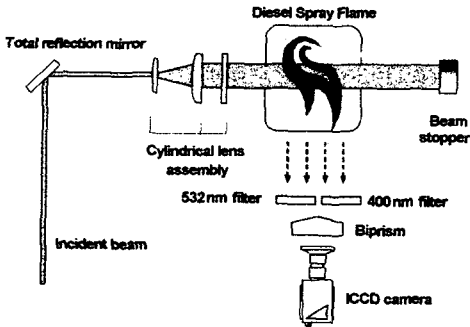
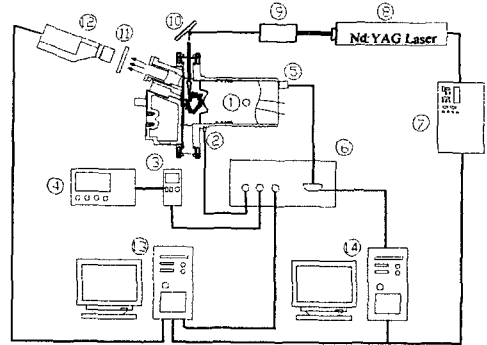


Fig.4 The diagram of simultaneous measurement of LIS and LII signal

그리고 수광부는 최대 고속 gating time이 100ns인 ICCD 카메라(V-TEK, Single Frame Camera)를 사용하여 광신호를 수광하며, ICCD 카메라 외에 2개의 band pass filter를 사용하고 LIS광용으로는 중심파장 532nm (FWHM:3nm), LII광용은 중심파장 400nm (FWHM:40nm)와 하나의 화상을 2개로 분리시켜 주는 bi-prism 등으로 구성되어 있다.

2.3 실험방법

Fig.5는 본 연구에서 수행하는 장치 전반의 개략도를 나타낸 것이다. 엔진의 크랭크축에 엔코더를 설치하여 크랭크각(이하 CA) 1° 당 1개의 펄스를 발생시켜 동기화 회로에 입력한다. 이때, 동기화 회로는 엔코더로부터의 TDC와 CA 신호를 CA카운트 컴퓨터로 입력하고, CA카운트 컴퓨터는 입력된 신호를 연산하여 레이저의 발진시기를 결정한 후 1개의 펄스를 다시 동기화 회로로 입력한다. 이 펄스는 동기화 회로의 트리거 출력단자를 통해 레이저 및 ICCD카메라의 구동에 필요한 펄스로서 제어 컴퓨터로 입력되고, 제어 컴퓨터는 설정된 값에 의해 동기화 된 펄스를 각각 레이저와 ICCD 카메라로 보내어 작동시킨다.



- | | |
|----------------------|------------------------|
| 1. Test engine | 2. Pressure transducer |
| 3. Pressure amp. | 4. Oscilloscope |
| 5. Encoder | 6. Sync. circuit |
| 7. PCU | 8. Nd:YAG laser |
| 9. Cylindrical lens | 10. Laser mirror |
| 11. Band pass filter | 12. ICCD camera |
| 13. Control computer | 14. CA count computer |

Fig.5 The diagram of the experimental apparatus

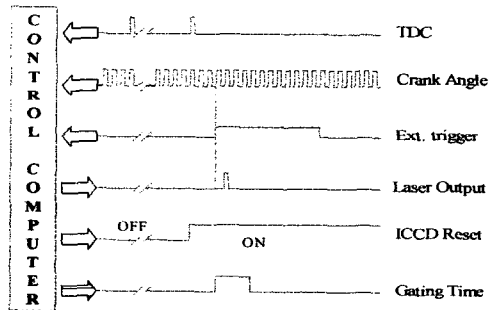


Fig.6 Schematic diagram of input/output signals

Fig.6은 동기화 회로에 입력되는 신호와 실제 레이저 발진시기와와의 관계를 나타낸 것인데, TDC 이후 CA카운트 컴퓨터에서 설정한 레이저 발진시기(Ext. trigger)와 실제 빔의 발진시기(Laser Output)는 CA 1° 정도의 지연을 나타내었으며, 실시간 측정을 위해 보정된 값을 입력값으로 사용한다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.7은 디젤 가시화엔진의 연소실 내에 레이저 시트광을 입사시켰을 때 LIS와 LII의 광신호를 동시에 촬영한 화상들이다. 이 때 디젤엔진의 운전조건은 연료분사가 BTDC 17°이며 기관회전수 1000 RPM, 무부하이다. 각 화상은 ATDC 20° 부터 ATDC 110° 까지 10° 간격으로 촬영한 것이며, 왼쪽의 이미지는 LIS 신호, 오른쪽은 LII 신호에 해당한다. 이 이미지들은 화염의 자발광이 잡히지 않도록 ICCD를 설정한 후에 실험을 행했다.

전체적으로 LIS의 광강도는 예상대로 LII의 광강도보다 강하게 나타났으며, 특히 LII 신호가 잘 나타나지 않는 측정조건의 후반에서도 잘 나타나고 있으므로 이들 신호는 soot에 관한 정보의 구체성을 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나, 이들 광강도의 분포를 크랭크 각도에 따라 비교해 보면, 2개의 화상의 광강도는 ATDC 50° 이후에서 일치하는 경향을 보이고 있지만, 이전의 광신호는 광강도가 서로 상반된 듯한 분포를 나타내고 있다.

레이저여기적열법의 계측원리와 선행연구자들에 의하면, LII 광신호는 soot 만이 나타내는 정보로 생각하여도 무방하다. 이에 LII의 광신호는 미약하나 soot만의 정보로 판단할 수가 있다. 따라서, LIS 광강도가 LII 광강도와 다르게 나온 결과에 대해 다음과 같이 생각해 볼 수가 있다. 첫 번째로는 연소실 내에 soot 입자 외에 다른 입자의 영향, 즉 연료의 액적이나 연소가스 중의 다른 부유 물질이 LIS 광신호를 발생할 수 있다는 것이다. 그러나, 액적의 영향을 조사하기 위해 분사시간을 계측해 본 결과, 본 시험엔진은 1000RPM, 무부하조건에서 분사가 BTDC 17° 에서 시작되어 상사점 이전에 분사가 종료됨을 확인하였다. 또 화염 자발광을 촬영한 결과에서도 상사점에서 이미 착화한

것을 확인하였기 때문에 착화 이후의 분무가스는 급속히 진행되어 액적은 존재하지 않을 것으로 생각된다.⁽⁹⁾ 또, 연소실 내의 다른 부유 물질의 영향에 대해서도 고려해 볼 수 있으나, 동일 조건 15회 이상의 실험에서 취득한 화상의 일관성을 고려하면 이의 영향은 없는 것으로 생각된다.

그 외의 원인에 대해 고려해 보면, LIS 광강도와 LII 광강도가 계측원리에 의해 서로 나타내는 부분이 다를 수 있다는 것을 생각해 볼 수가 있다. 즉, 아래 식에 나타낸 바와 같은 계측원리에 의하면, LIS 광강도는 soot 직경의 6승에 비례하고 LII 광강도는 soot 직경의 3승에 비례한다. 또, 직경이 작아질수록 직경의 영향보다는 수밀도의 영향이 상대적으로 커지게 되므로 LIS 광강도와 LII 광강도에는 soot 직경의 영향이 크게 되는 영역, 그리고 수밀도의 영향이 크게 나타나는 영역이 서로 다를 수 있다는 가능성을 생각해 볼 수 있다.

$$I_{LIS} \propto f(D^6 \times N) \quad \text{-----}(1)$$

$$I_{LII} \propto f(D^3 \times N) \quad \text{-----}(2)$$

위의 식에서 입자직경의 크기에 많은 영향을 받는 것은 LIS 광강도이다. 따라서, LIS 화상에서 농도가 실린더 벽면쪽에서 크게 나타나는 것은 실린더 벽면쪽의 온도가 상대적으로 낮은 영역이기 때문에 soot 입자의 응집이 활발해 직경이 크게 되어 작용하는 것으로 생각된다.

계측된 화상의 LII 광신호에서는 ATDC 20° 에서 ATDC 40° 까지는 주로 캐비티 부근에서 강하게 나타나고 있다. 이로써, soot의 생성은 주로 화염내부에서 생성이 되어짐을 확인할 수가 있다. 그러나, ATDC 20° 이후부터 광강도가 점점 약해지는 것으로 보아 soot이 소멸되어 감을 알 수 있다. 또, LII 광강도는 약해서 후연소기간으로 갈수록 판별하기가 어려웠다. Soot의 농도분포에 관한 정확한 정보를 제공하기 위해서는 이를 차츰 보완 할 필요가 있으며, LIS 광강도와 LII 광강도의 상호 관계

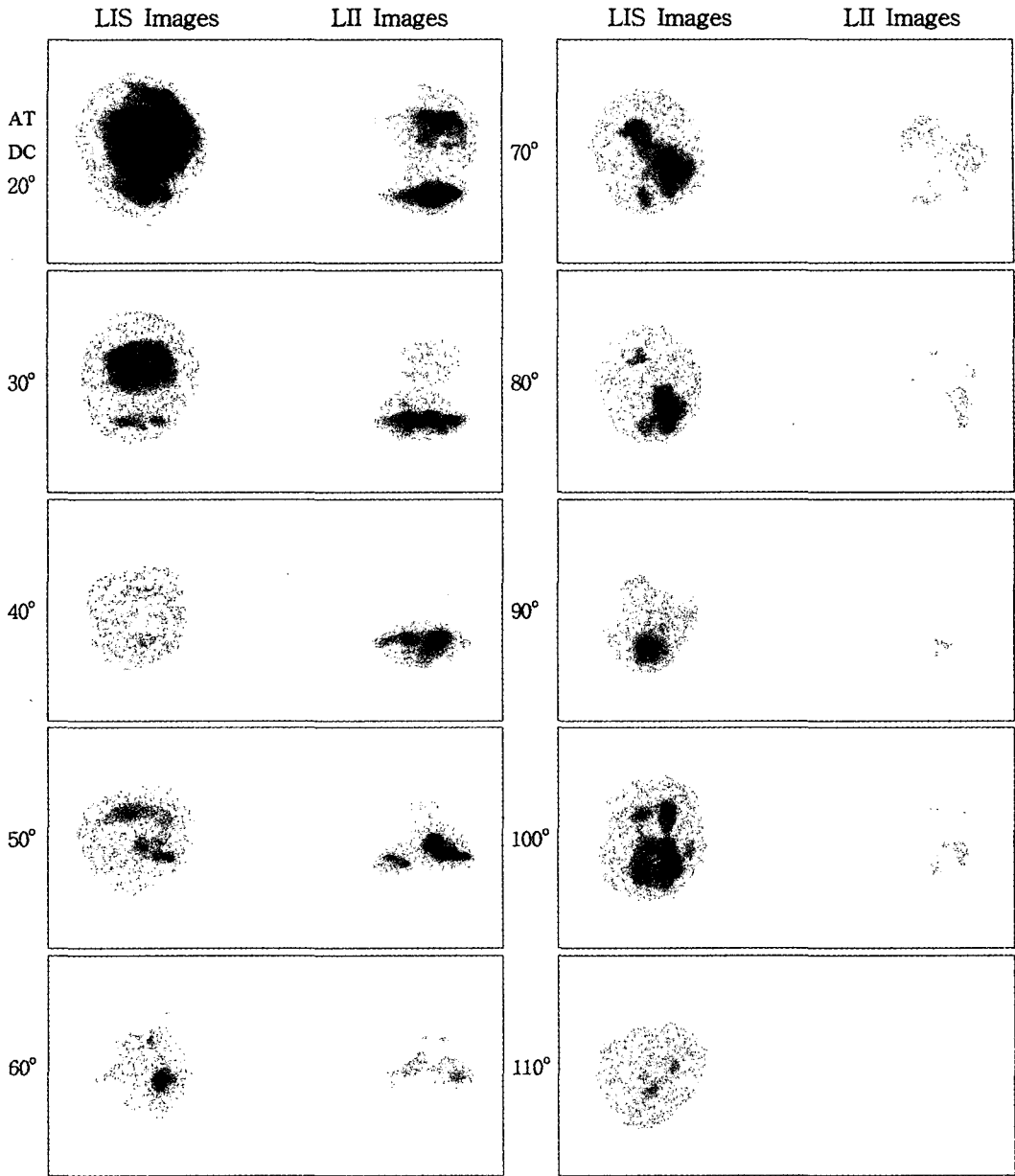


Fig. 7 images of soot concentration by LIS and LII measurement

를 도출해 내어 soot에 관한 정량적인 정보를 획득해야 한다.

4. 결론

(1) 레이저 광을 이용한 디젤엔진 내의 soot 계측을 위해 직분식 디젤엔진을 가시화 하였고 레이저, 그리고 ICCD의 동기화가 잘 이루어지는 것을 확인하였다.

(2) Soot 계측에 레이저 시트광을 이용하여 산란광신호와 적외광신호를 동시에 계측함으로써 순간적인 soot 농도분포의 화상을 얻을 수가 있었다.

(3) Soot의 농도분포를 나타내는 LIS 광신호는 LII 광신호보다 강하게 나타났으며, 동시에 계측한 두 화상은 전체적으로 soot 농도분포를 유사하게 보였다.

후 기

본 연구는 동명대학 학술연구조성비의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. 小酒, "레이저 誘起赤熱・散亂光法による非正常噴霧火炎内のすす生成と酸化に関する研究", 第12回 内燃機關シンポジウム-講演論文集, p. 61-66
2. J.A. Pinson, et al. "Quantitative, Planar Soot Measurements in a D.I. Diesel Engine Using Laser-Induced Incandescence and Light Scattering", SAE Paper 932650, 1993
3. Dec, J. E., zur Loye, A. O., and Siebers,

- D. L., "Soot distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Laser-Induced Incandescence Imaging," SAE Transactions, Vol. 100, Sec. 3, pp. 277-288, paper no. 910224, 1991
4. 원영호, "레이저 시트광을 이용한 엔진 연소 진단 기술", 디젤機關 排氣 排出物 低減對策 技術 WORKSHOP, pp. 33-54, 1997
5. Melton, L.A., "Soot Diagnostics Based on Laser Heating", Applied Optics, Vol. 23, No. 13, pp. 2201-2208, 1984
6. 정종수, "Laser-induced Incandescence법에 의한 매연 농도 측정법", 한국액체미립화학회지, Vol. 1 No. 4, pp. 1-7, 1996
7. 鹽路, 高速度 撮影によるディーゼル機關の燃焼および生成に関する研究, 日本機軸學會論文集 (B), 61-581(1995), pp. 344-350
8. 元永浩, 非正常噴霧火炎におけるすす生成・消滅に関する研究, 東京工業大學 博士論文, 1991
9. M.Shoji, H.Shimakura, K.Yamane, M.Ikegami, "Observation of the Combustion Process in a Direct-Injection Diesel Engine Using a Laser-Light Sheet Method", JSME(B), Vol.60 No.579, pp.381-386