

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0030

레이저시트광을 이용한 가시화 디젤엔진에서의 Soot 계측 제1보: 가시화 디젤엔진의 제작 및 레이저를 이용한 Soot의 2D 화상촬영

**Soot Measurement in an Optically Accessible Diesel Engine Using Laser Sheet
1st report : The Development of Optically Accessible Diesel Engine
and Photography of 2D Soot Images Using Laser Sheet**

이명준*, 박태기*, 하종률**, 정성식**
Myungjun Lee, Taegi Park, Jongyul Ha, Sungsik Chung

ABSTRACT

In order to clarify the characteristics of soot formation and oxidation in-cylinder of diesel engine, it is necessary to diagnose accurately for combustion of in-cylinder. The past techniques for soot measurement have limitations in providing the characteristics of soot in a diesel engine, whereas, laser-based 2D imaging diagnostics have the potential to provide better temporally and spatially resolved measurements of the soot distribution.

We rebuilt an optically accessible diesel engine which is similar to the conditions of a conventional engine and tried to measure soot distribution in a cylinder of the diesel engine using laser induced scattering(LIS) and laser induced incandescence(LII).

Some results were acquired in this study. LIS and LII signal that show soot distribution of a in-cylinder were taken by ICCD properly. The signal of LIS was intenser than that of LII. Although they have some differences of signal intensity in early combustion period, both of signals show that they are generally similar in late combustion period, after ATDC 50 degree.

주요기술용어 : Optically Accessible Diesel Engine(가시화 디젤엔진), Laser Induced Scattering (레이저여기산란법), Laser Induced Incandescence(레이저여기적열법), Late Combustion Period(후연소기간)

* 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 동아대학교 기계공학과

1. 서론

디젤엔진에서 배출되는 soot과 NOx를 저감시
키기 위하여 연소실형상의 개선, 초고압분사, 연

료의 개선, 후처리방법 등이 제안되어져 왔지만 두 물질의 생성원인은 일반적으로 상반관계에 있다. 따라서, 어느 한쪽을 줄이는 과정에서 다른 한쪽의 생성을 증가시키므로, NOx의 증가와는 무관하게 soot를 줄이는 효과적인 방법을 강구하기 위해서는 엔진의 운전조건에 따른 연소실내에서 soot 생성과 산화에 관한 보다 명확한 정보가 필요하다. 그러나 soot에 관한 정보를 얻기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔지만 soot를 순시적이면서 정밀하게 측정하기가 어렵고 측정된 정보의 신뢰성도 부족하여 아직은 그 기구에 관해 해명되어야 할 부분이 많다.

그러나 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 적합한 방법이 레이저 시트광을 이용한 측정방법이다.⁴⁾

따라서 본 연구에서는 디젤엔진 연소실 내의 soot를 계측하기 위해 가시화 디젤엔진을 제작하였으며, 가시화엔진과 레이저, ICCD 카메라를 동기화해서 실험을 수행하였다. 본 연구에서 광원으로 사용하는 Nd:YAG 펄스레이저의 제2고조파인 532 nm의 시트광을 엔진의 크랭크각에 따라 연소실 내에 입사시킬 때 나오는 레이저여기산란(LIS)신호와 레이저여기 적열(LII)신호를 동시에 계측함으로써 디젤엔진의 soot 분포를 가시화하고, 레이저 시트광을 이용한 soot 계측법을 확립하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 레이저여기산란법과 여기적열법

일반적으로 측정장에 존재하는 입자에 의한 레이저 광의 탄성산란을 이용하는 방법 (Laser

Induced Scattering ; 이하 LIS)을 가장 간단한 방법으로 들 수 있는데, 이 레이저여기산란법은 실험장치가 간단하다는 장점은 있으나, 입자의 구별이 곤란하여 특정 입자만을 선별하여 가시화하기가 어렵다는 단점이 있다. 반면에, 레이저여기적열법(Laser Induced Incandescence; 이하 LII)은 측정 대상부의 soot 입자군에 고 에너지 밀도의 펄스레이저 광이 수 ns 정도의 짧은 시간 동안 조사 될 때, 4000 K 이상의 고온으로 가열되는 soot 입자들이 가열과정과 이후에 냉각되는 과정을 통해 방출하는 LII 신호를 측정하는 방법이다. 고온의 soot 입자로부터 방출되는 흑체복사의 강도를 나타내는 이 LII 신호가 soot 입자의 농도에 비례한다⁵⁾는 물리적인 현상을 이용하여 soot 입자의 농도를 측정하는 것이다. 이 때 입자는 광흡수율이 커야하고 증발온도가 높은 것이 바람직한데, 이러한 특성을 가진 입자로서 디젤연소에 존재하는 것이 바로 soot이다. 이 LII법의 장점으로는 여러 종류의 입자가 존재하는 측정장에서 soot 입자만을 선별적으로 가시화가 가능하지만 적열광 측정을 위해서는 레이저 출력이 10^7 W/cm^2 이상이 요구되고⁶⁾, 광의 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 직접분사식 단기통 디젤엔진((주)대동공업, ND130 DI)으로, Table 1에 기존의 엔진과 가시화 엔진의 제원을 비교 설명한다.

Fig.1은 실린더 헤드에 설치된 관측창의 개략도를 나타낸 것이다. 직분식 노즐의 분무 중 한 줄기를 관찰할 수 있도록 인젝터의 상부 쪽에 원형의 관측창을 설치하였다. 디젤엔진의 분무는 대부분이 피스톤의 캐비티 내에 분사되므로 피스톤헤드에 가시화창을 설치해서 피스톤과 실린더를 연장하는 후방 가시화법의 경우 관측창이 쉽

Table 1 The specification of a test diesel engine

Spec.	Conventional Engine	Test Engine
Engine Type	DI Diesel Engine, Single Cylinder	←
Bore × Stroke(mm)	95 × 95	←
Compression Ratio	19	17.2
Piston Length(mm)	90	126
Piston Cavity	Toroidal	←
Fuel Injector	Conventional Injector, 4-Holes	←
Injection timing	BTDC 17°	←

게 오염되어 광신호를 받기가 곤란하며, 보다 실엔진에 상응하는 운전조건을 실현하기 위해 본 연구에서는 실엔진의 구조와 거의 동일한 조건을 가지면서 실린더헤드 쪽을 가시화하는 방법을 선택하였다.

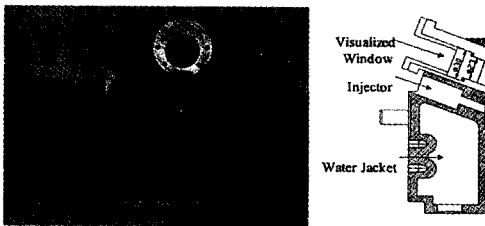


Fig.1 The cylinder head of optically accessible diesel engine

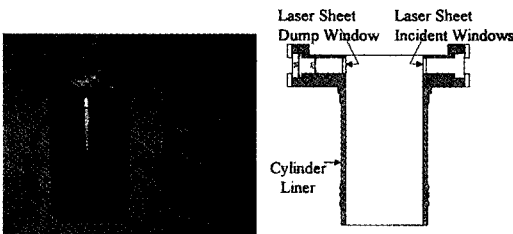


Fig.2 The cylinder liner of optically accessible diesel engine

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, 레이저 광 입사창의 크기는 24 mm×20 mm로서, 세로 길이 20 mm는 크랭크 각도로 TDC로부터 약 50°에 해당된다. 이것은 화염의 단면을 피스톤의 운동 방향에 따라 이동하면서 체적함으로써 연소실 체적의 증가에 따라 soot에 미치는 공기 유입의 영향과 시간경과에 따른 정보를 얻고자 함이다. 또한 피스톤도 실린더의 연장된 길이만큼 같이 연장함으로써 기존의 엔진과 압축비가 유사하도록 개조하였다.

본 연구에서 사용되는 디젤 가시화엔진의 개조 후 연소특성을 알아보기 위해, 무부하 상태에서 기관회전수를 변화시켜 가며 실린더 내의 연소압력을 취득해 보았다. 공회전시부터 2000 RPM까지 임의의 각 회전수당 10개의 사이클을 취득한 후 동시에 나타내었을 때, 사이클 변동이 거의 없음을 확인하였으며, 그 결과를 Fig.3에 나타내었다. 한편, 연소실 압력은 Piezo형 압력 센서(6051B, Kistler Instrumental Co.)로 측정하며, 증폭기(5011, Kistler Instrumental Co.)를 거쳐 디지털 오실로스코프에 입력, 저장하였다.

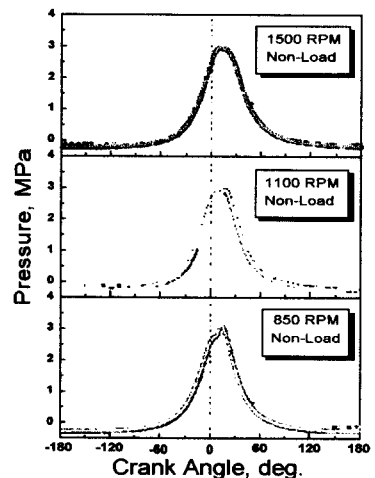
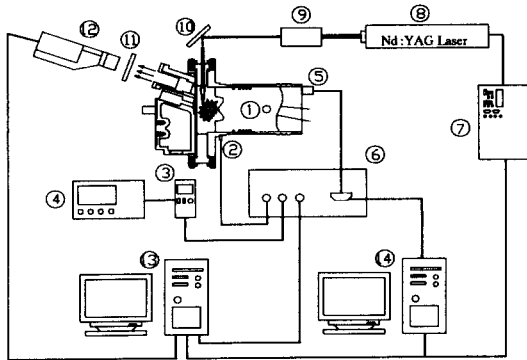


Fig. 3 The indicator diagram of the test engine

2.2.2 촬영장치

본 연구에서 사용하는 광계측 시스템은 Nd:YAG 펄스레이저를 포함한 레이저 광을 조사하는 광학장치부, 그리고 산란신호와 적열신호를 동시에 검출하는 계측부, 그리고 엔진의 크랭크각에 동기되어 들어온 신호를 받아 레이저와 ICCD를 제어·작동시키고 받은 화상을 저장하는 제어부로 크게 나누어진다. 광학장치부에는 전반사 거울과 레이저 광을 시트화시키는 실린더형 렌즈의 조합 등으로 구성되어 있다. 직경 6mm의 레이저빔은 실린더형 렌즈 어셈블리를 통과하면 폭 0.25 mm 높이 40 mm의 시트빔으로 만들어진다. 이 때, 최대 고속 셔터시간이 100 ns인 ICCD 카메라(V-TEK, Single Frame Camera)를 사용하여 광신호를 계측하며, 이 때 ICCD의 노출시간은 300 ns로 설정하였다. 연소실에서 나오는 산란광과 적열광은 bi-prism과 중심파장이 서로 다른 2개의 밴드패스필터로 분리하여 촬영하였다. 사용된 필터는 LIS광용으로 중심파장이 532 nm(반치폭: 3 nm)인 필터를, LII광용으로는 중심파장이 400 nm(반치폭:40 nm)인 필터를 사용하였다.



- 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. 4 The diagram of the experimental apparatus

2.3 실험방법

Fig.4는 본 연구에서 수행하는 장치 전반의 개략도를 나타낸 것이다. 엔진의 크랭크축에 엔코더를 설치하여 크랭크각 1° 당 1개의 펄스를 발생시켜 동기화 회로에 입력한다. 이때, 동기화 회로는 엔진의 크랭크축에 연결된 엔코더로부터의 TDC와 크랭크각(이하 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 제어컴퓨터로 입력되고, 제어 컴퓨터는 설정된 값에 의해 동기화 된 펄스를 각각 레이저와 ICCD 카메라로 보내어 작동시킨다.

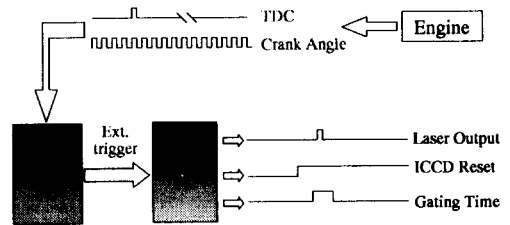


Fig. 5 Schematic diagram of input/output signals

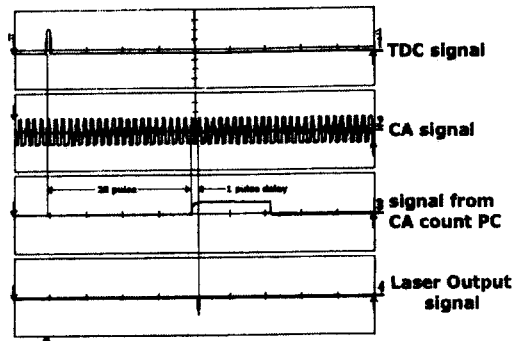


Fig. 6 The diagram of time chart for synchronization between engine and laser

Fig.5는 동기화 회로에 입력되는 신호와 실제 레이저 발진시기와의 관계를 나타낸 것인데, TDC 이후 CA카운터 컴퓨터에서 나오는 레이저

출력신호와 실제 빔의 발전시기 사이에는 CA 1° 정도의 지연을 나타내었으며, Fig.6은 이러한 각 신호의 시간을 차례로 보여주는 그림이다. 따라서, 본 연구에서는 실시간 측정을 위해 보정된 값을 입력하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig.7은 디젤 가시화엔진의 연소실 내에 레이저 시트광을 입사시켰을 때 레이저 시트광에 반응한 soot가 내는 산란광과 적외광 신호를 동시에 촬영한 2차원 화상들을 나타낸다. 이 때 디젤엔진의 운전조건은 연료분사시기가 BTDC 17°이며 기관회전수 1000 RPM, 무부하이다. 각 화상은 Fig.8과 같이 연소실 내 실린더헤드의 바로 아래 지점이면서 피스톤의 스퀴시영역이 된다. 각 화상의 계측 시기는 ATDC 20° 부터 ATDC 110° 까지 10° 간격으로 촬영한 것이다.

각 화상에서 왼쪽의 이미지는 LIS법으로 계측한 soot의 농도분포를 나타내는 광신호의 화상이고, 오른쪽은 LII법으로 계측한 광신호 화상에 해당한다. 이 이미지들은 노이즈로 작용할 수 있는 화염의 자발광이 잡히지 않도록 ICCD 카메라를 설정한 후에 실험을 행했다. 상사점과 ATDC 10° 사이에서도 soot 농도분포의 촬영을 시도하였으나, 시트광을 실린더헤드와 피스톤헤드 사이로 입사시키려면 적어도 ATDC 6° 이후라야 이론상으로 가능하였다. 또, 시트광을 켜는 과정에서 시트광이 약간의 경사를 가지게 되어 레이저 시트광이 피스톤헤드에 충돌함으로 인하여 계측이 곤란하여 결과를 나타내지 못하였다. 현재로는 ATDC 20° 에서부터 계측이 가능하였으므로 이들 데이터로써 고찰하였다.

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. LIS법과 LII법으로 동시에 계측한 두 화상들의

광강도 분포를 크랭크각도에 따라 비교해 보면, 전체적인 soot 농도분포의 영역은 유사하게 나타내고 있으나 ATDC 20° 에서 ATDC 40° 사이의 화상에서는 광강도가 서로 다른 경향을 나타내고 있다. 즉, LIS 광강도의 경우는 실린더 벽면쪽의 신호가 강하게 나오는 반면, LII 신호는 캐비티쪽의 광강도가 강하게 나오고 있다.

Soot의 레이저 계측 원리에 의하면, LIS 화상은 화염 내에 존재하는 입자에 의해 산란되는 레이저의 파장과 동일한 광신호를 계측하는 것이며, LII는 입자로부터 나오는 적외광을 측정하는 것이다. 그러므로, 측정조건에 따라서 LIS광은 soot 이외에 액적으로부터의 산란광 등을 포함할 수 있으나, 여기에 비하여 LII 화상은 신호가 미약한 것이 단점이지만 soot 만의 정보로 생각하여도 무방하다. 따라서, LIS 광강도가 LII 광강도와 다르게 나온 결과에 대해 몇 가지를 생각해 볼 수가 있다. 첫 번째로는 연소실 내에 soot 입자 외에 다른 입자가 존재하여 산란광신호가 검출될 수 있다는 것이다. 여기에는 디젤분무의 액적이 가장 유력하며, 연소가스 중의 다른 부유 물질을 생각해 볼 수가 있다. 그러나, 액적의 영향을 조사하기 위해 분사시간을 계측해 본 결과, 본 시험엔진은 1000 RPM, 무부하조건에서 분사가 BTDC 17° 에서 시작되어 TDC 이전에 분사가 종료됨을 확인하였다. 또 화염 자발광을 촬영한 결과에서도 상사점에서 이미 착화한 것을 확인하였기 때문에 착화 이후의 분무가스화는 급속히 진행되어 액적은 존재하지 않을 것으로 생각된다.⁹⁾ 또, 연소실 내의 다른 부유물질의 영향에 대해서도 고려해 볼 수 있으나, 동일 조건 15회 이상의 실험에서 취득한 화상의 일관성을 고려하면 이의 영향 또한 배제될 수 있을 것으로 생각된다.

두 번째로는, LIS 광강도와 LII 광강도가 계측 원리에 의해 서로 나타내는 부분이 다를 수 있다는 것을 생각해 볼 수가 있다. 즉, 아래의 식과 같은 계측원리에 의하면, LIS 광강도는 soot 직경의 6승에 비례하고 LII 광강도는 soot 직경의 3승에 비례한다. 또, 직경이 작아질수록 직경의

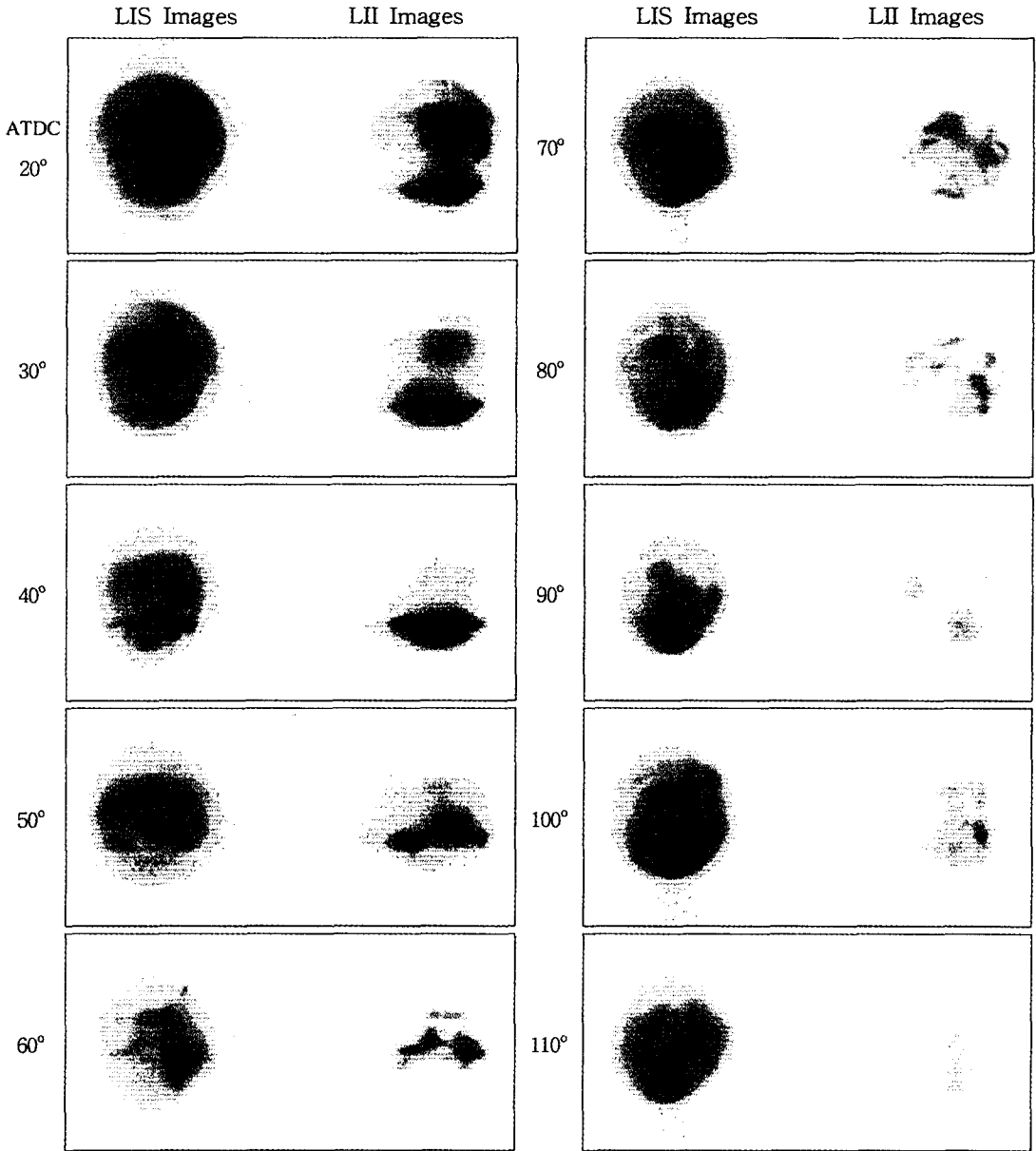


Fig. 7 Images of soot concentration by LIS and LII measurement

영향보다는 수밀도의 영향이 상대적으로 커지게 되므로 LIS 광각도와 LII 광각도에는 soot 직경의 영향이 많은 영역, 그리고 수밀도의 영향이 많이 나타나는 영역이 서로 다를 수 있다는 가능성을 생각해 볼 수 있다. LIS 광각도, LII의 광각도와 soot 입자의 직경과 수밀도의 관계는 다음과

같다.

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

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

위의 식에서 볼 때, 입자직경의 크기에 영향을 많이 받는 것은 LIS 광각도이다. 따라서, LIS 화

상에서 농도가 실린더 벽면쪽에서 크게 나타나는 것은 실린더 벽면쪽의 온도가 상대적으로 낮은 영역이고 거기서 soot 입자의 응집이 활발해 직경이 크게 되어 작용하는 것으로 생각된다. ATDC 20° ~ ATDC 40° 의 시기는 제어연소기간이 지난 후연소기간의 초기로서 이 기간에 soot의 양이 가장 많이 계측되는 구간으로 알려져 있으며, 초기에 생긴 수 nm의 soot 입경이 온도가 상대적으로 낮은 스퀴시부에서 점점 큰 직경으로 합체·응집하여 직경이 커지는 것으로 생각된다. 그러므로, 이의 영향으로 인해 LIS 광신호는 이 기간에 상대적으로 온도가 낮은 실린더 벽면쪽에서 크게 나타나는 것으로 생각된다.

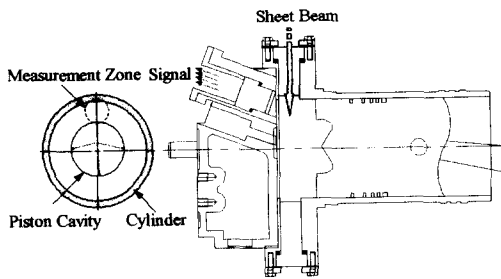


Fig. 8 The diagram of measurement zone

계측된 화상의 LII 광신호에서는 ATDC 20° 에서 ATDC 40° 까지는 주로 캐비티 부근에서 강하게 나타나고 있다. 이는 화염의 자발광을 계측해 본 결과, 착화된 화염이 캐비티 내에 존재하고 있을 때임을 확인하였다. 이로써, soot의 생성은 주로 화염내부에서 생성이 되어짐을 확인할 수가 있다. 이는 연료의 분사가 대부분 캐비티 내에서 이루어지기 때문으로 생각되며 고온이면서 산소가 국부적으로 부족하여 열분해현상이 활발한 것으로 생각된다. 그러나, ATDC 20° 이후부터 광강도가 점점 약해지는 경로 보아 soot이 소멸되어 감을 알 수 있다. 또, LII 광강도는 약해서 후연소기간으로 갈수록 판별하기가 어려웠다. 이러한 결과는 가시광의 오염과 광신호가 ICCD 카메라까지 오는데 있어서의 광신호 소멸이 가장 큰 영향이라고 생각된다. Soot의 농도분포에 관

한 정확한 정보를 제공하기 위해서는 이를 차츰 보완 할 필요가 있으며, LIS 광강도와 LII 광강도의 상호 관계를 도출해 내어 soot에 관한 정량적인 정보를 획득해야 한다.

4. 결 론

디젤엔진의 연소실 내 soot를 계측하기 위해서 운전조건을 충분히 가변시킬 수 있는 가시화 디젤엔진을 설계·제작하여, 연소실 내에 레이저 시트빔을 조사함으로써 soot로부터의 산란광과 적외광 강도를 계측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 레이저를 광원으로 이용한 실시간 광계측을 위해 직분식 디젤엔진을 가시화 하였으며, 실엔진과 거의 동일하게 운전할 수 있었다. 또, 가시화엔진과 레이저, ICCD 카메라의 동기화 시스템을 구축하여 상호 간의 작동이 잘 이루어짐을 확인하였다.

2) 가시화 디젤엔진에 레이저 시트광을 입사하여 순간적인 soot 농도분포를 레이저여기산란법(LIS)과 레이저여기적열법(LII)을 이용하여 동시에 2차원 화상으로 촬영하는 동시계측법을 확립하였으며 연소실 내의 soot 농도분포를 확인하였다.

3) 레이저여기산란법의 광신호는 레이저여기적열법의 광신호보다 전체적으로 강하게 나타났으며, LIS법과 LII법으로 동시에 계측한 두 화상은 ATDC 20° ~ ATDC 40° 에서 서로 광강도가 다른 경향을 보이나, 전체적인 soot 농도분포의 영역은 유사하게 나타내고 있다.

후 기

이 논문은 1997학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) 小酒英範 外3, "レーザー誘起赤熱・散亂光法による非定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, 1995.
- 2) J.A. Pinson, et al."Quantitative, Planar Soot Measurements in a D.I. Diesel Engine Using Laser-Induced Incandescence and Light Scattering", SAE, No.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, No.910224, 1991.
- 4) 원영호, "레이저 시트광을 이용한 엔진 연소진단 기술", 디젤기관 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", 한국액체 미립 화학회지, Vol.1 No.4, pp.1-7, 1996.
- 7) Masahiro SHIOJI, Satoru ITO, Koji YAMANE and Makoto IKEGAMI, "A Study of Diesel Combustion and Soot Foemation as Observed by High-Speed Photography", JSME(B), 61-581, pp. 344-350, 1995.
- 8) 元永浩, "非定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) Masahiro SHIOJI, Hisanori SHIMAKURA, Koji YAMANE and Makoto 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, 1994.