

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0044

레이저시트광을 이용한 가시화 디젤엔진에서의 Soot 계측 (제2보: Soot 입경분포 및 수밀도 계측)

Soot Measurement in an Optically Accessible Diesel Engine Using Laser Sheet (2nd report: The Measurement for diameter and number density of Soot)

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

ABSTRACT

The technique of laser sheet beam has been applied to optically accessible diesel engine for the quantitative measurement of soot. The results provide the information for us for reduction of soot in diesel engine. We used both LIS and LII techniques simultaneously in this study. LIS and LII images show the quantitative distribution of the soot concentration in an optically accessible diesel engine. In this study, several results were obtained by the simultaneous measurement of LIS and LII technique. The diameter and number density of soot in combustion chamber of the test engine were obtained from ATDC 20° to 110°. The increase rate of soot diameter was about 40% between ATDC 20° and 110°. And the number density of soot decreased significantly between ATDC 20° and 40°.

주요기술용어 : Laser Sheet(레이저시트광), Quantitative Measurement(정량적 계측), LIS(레이저여기산란법), LII(레이저여기적열법), Optically Accessible Diesel Engine(가시화디젤엔진), Number Density(수밀도)

1. 서 론

최근에 레이저 시트광을 광원으로 이용한 2차원 연소 진단법들이 활발히 이루어지고 있다. 특히, 유해한 배출물질의 농도와 이에 영향을 미

치는 화학종의 농도 등에 관한 연구도 활발하다. 레이저 연소 계측법에 대한 개발은 많이 진전되어 있는 상황이지만, 계측 대상에 대한 정보나 기구 등에 대해서는 명확하게 제시되지 못하고 있다. 디젤엔진에서 생성되는 soot의 경우에 있어서도 레이저를 이용한 계측법의 개발은 어느 정도 확립되어 있으나 그의 생성 및 산화기구를 밝히기 위해서는 soot의 농도에 관한 정확한 정보를 도출해 낼 필요가 있다고 생각된다. 그러므로 실제 디젤 엔진 내에서 생성되는 soot의 정량적인 값을 계측

* 회원, 동아대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한국대학교 기계공학과

해야 하며, 연소실 내에서 급속하게 일어나는 연소현상에 대응할 만한 계측법이 필요하다.

따라서 광계측용 가시화 디젤엔진에 레이저 시트광을 입사하여 카메라로 촬영하고, 그 때 얻어진 soot 농도 분포에 대한 화상을 통해 soot에 관한 정량적인 정보를 도출하는 것이 본 연구의 목적이다. 구체적으로는 soot이 레이저에 조사된 후 발생하는 산란광 신호와 적열광 신호를 동시에 계측하여 이론적 배경에 근거한 상호 관련성을 통해 상대적인 soot의 수밀도와 상대적인 soot 직경의 정보를 구하여 정량화의 기초를 마련하고자 한다.

2. 산란법과 적열법을 이용한 정량화 방법

LII(Laser Induced Incandescence) 광강도는, $I_{LII} \propto D^\alpha \times N$ 의 형식으로 표현된다.¹⁾ 여기서, 지수 α 는 레이저 시트빔의 두께, 레이저의 조사시간, soot의 초기입경 등의 함수이며, 연구자¹⁻⁴⁾에 따라 3, 3.3, 3.5 등의 값으로 보고되고 있다. Melton이 행한 수치해석에 의하면,²⁾ 입사광 에너지가 어떤 임계치를 넘으면 soot입자군의 에너지 손실이 soot의 증발에 의해 지배되기 때문에 이 입사광 파장이 532 nm의 경우에는 soot입자로부터 방사되는 LII 광강도인 I_{LII} 는 soot 입경의 3.3승과 soot 수밀도의 곱에 비례한다. 본 연구에서는 soot농도 분포를 나타내는 I_{LII} 는 soot체적농도에 거의 비례하는 것으로 가정하여 α 값을 3으로 가정하였다. 즉, soot 입경을 D , soot 입자 수밀도를 N 라고 할 때, 다음 식과 같다.

$$I_{LII} \propto f(D^3 \times N) \quad (1)$$

그러나, 식 (1)에서 나타나는 LII의 강도는 구체적인 soot의 입경과 수밀도의 값으로 산출된 것이 아니기 때문에 정성적인 정보일 수밖에 없다. 단지, 알 수 있는 LII 강도가 soot 입경과 수밀도의 상관관계로 이루어져 있다는 정보만을 제공한다. 본 연구에서는 soot 입경분포의 정성적인 경향을 조사하는 것을 목적으로 하고, Rayleigh 산란 근사를 가정하였다. 즉, LIS(Laser Induced

Scattering) 광강도를 $I_{LIS} \propto D^6 \times N$ 으로 가정했다. 이상의 가정에서 양쪽의 광강도에 의해 이하의 식을 이용한 상대 soot농도, 상대 soot 평균입경, 상대 soot 수밀도를 산출하는 것이 가능하다. 한편, LIS 광의 강도는 다음과 같다.⁴⁾

$$I_{LIS} \propto f(D^6 \times N) \quad (2)$$

(1), (2)식으로부터 (3), (4)식으로 나타낼 수 있다.

$$D \propto (I_{LIS}/I_{LII})^{1/3} \quad (3)$$

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

따라서, LII와 LIS광을 측정함으로써, 식(3), (4)로 부터 정량화 된 상대입경, 상대수밀도를 구할 수 있으며, 이러한 값들을 연소경과시간에 대하여 측정하는 것은 디젤 soot의 생성과 산화의 이력에 관한 정보로 이용될 수 있을 것이다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구를 위해 이미 개조된 가시화 디젤엔진의 연소실 내로 레이저 시트광을 입사하고, soot 입자군으로부터의 LIS광과 LII광의 동시에 촬영했다. 촬영을 위한 광계측시스템은 Fig.1에 나타내었다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저의 제2

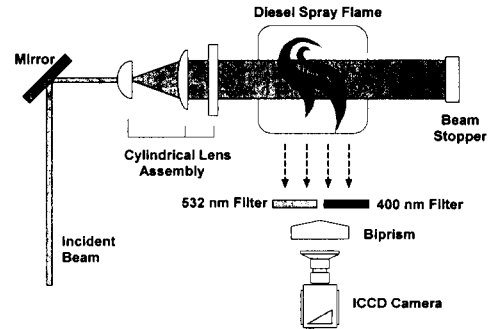


Fig. 1 The diagram for simultaneous measurement of LIS and LII signal

고조파 (파장 532 nm)를 이용하였으며 이 파장에서의 출력에너지는 254 mJ/pulse, 펄스의 폭은 5~7 ns 이다. 직경이 6 mm인 레이저 빔은 3개

의 실린더형 렌즈를 지나면서 높이 40 mm, 두께 0.25 mm의 시트광으로 성형된 후, 전반사 거울에 의해 반사되어 가시화 디젤엔진의 연소실 내로 입사된다. 입사된 후 촬영되는 영역은 Fig.2에 나타난 것과 같다.

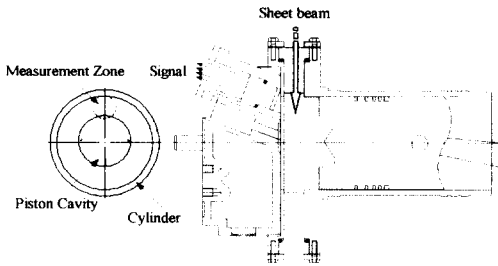


Fig. 2 The diagram of measurement zone

본 실험을 하기에 앞서 연소실에 입사되는 시트광의 강도분포를 알아보기 위해 시트광의 강도를 측정해 보았다. 그 결과, Fig.3에 나타난 것처럼 레이저 시트광 내의 에너지 강도의 분포는 거의 균일한 것을 보이며, 매 발진마다 출력변동 또한 거의 일정하므로 화상에 대한 입사광 강도분포의 보정은 행하지 않았으며, 본 연구에서는 강도가 일정한 중앙부분을 연소실 내에 입사시켰다.

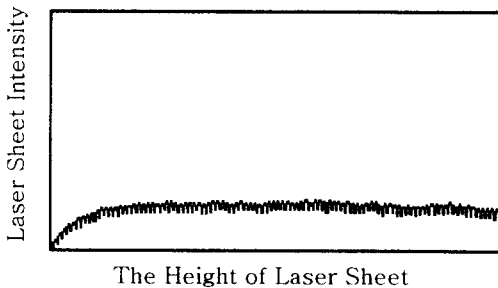


Fig. 3 Intensity distribution of laser sheet

LII광 화상과 LIS광 화상을 bi-prism과 2개의 밴드패스필터로 분리하고, 양쪽화상을 고속셔터 및 광증폭 기능이 내장된 ICCD 카메라로 촬영했다. 각각의 화상에 이용된 필터의 특성은 LIS광용으로 중심파장이 532 nm(반치폭 3 nm), LII 광용은 중심파장 400 nm(반치폭 40 nm)이다. 이 때, ICCD의 셔터 시간 폭은 300 ns로 설정했다.

가시화 디젤엔진의 크랭크축에 엔코더를 설치하여 상사점 신호와 크랭크각 신호를 동기화 회로에 입력한다. 이 두 신호는 동기화 회로에서 다시 크랭크각을 카운트하는 컴퓨터로 입력된다. 크랭크각 카운트 컴퓨터는 본 연구를 위해 제작된 프로그램을 통해 레이저 발진시기를 결정해서 입력하면 상사점 신호와 크랭크각 신호를 계산 후 다시 동기화 회로로 내어준다. 동기화 회로에서는 출력단자를 통해 레이저 및 ICCD카메라의 구동에 필요한 신호를 제어컴퓨터로 입력하고, 제어컴퓨터는 이러한 신호를 작동 트리거로서 인식하고 설정된 값에 의해 동기된 펄스를 각각 레이저와 ICCD로 보내 작동시킨다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 디젤 가시화엔진의 연소실 내에 레이저 시트광을 입사시켜 레이저 시트광에 조사된 soot가 발생하는 LIS 광신호와 LII 광신호를 동시에 촬영하였다. 이 때 시험엔진에서의 운전조건으로는 기관회전수가 1000 RPM, 연료분사는 BTDC 17° 에서 시작되었으며, 부하는 주지 않은 상태이다. ICCD 카메라를 통해 soot의 농도분포를 계측하기 위해 범위는 ATDC 20° 부터 ATDC 110° 까지 10° 간격으로 촬영하였다. 계측된 각 원시화상은 화염 자발광의 영향을 배제하기 위해 ICCD 카메라를 설정한 후에 실험을 행했다. 그러나, 본 실험에서 상사점과 ATDC 10° 사이에서도 soot 농도분포를 계측하고자 하였으나, 시험엔진의 설계와 광학장치의 여건상, 계측이 곤란하여 수행하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 ATDC 20° 에서부터 계측된 화상으로써 고찰하고자 한다.

본 연구에서는 레이저 계측을 수행하기 전 먼저 연소실 내의 화염자발광을 ICCD 카메라를 이용해 촬영하였다. 이것을 Fig.4에 크랭크각도에 따라 나타내었다. 이 그림은 레이저 시트광을 입사시키지 않고 가시창을 통해 나오는 화염의 자발광을 TDC부터 연소가 거의 종료되는 시점까지 촬

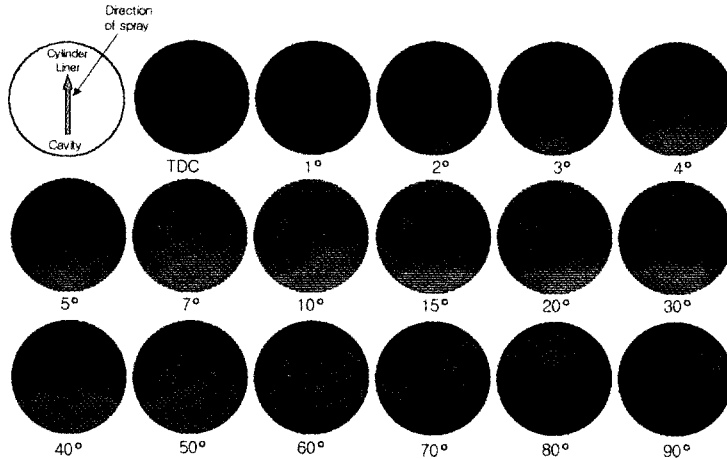


Fig. 4 Flame images in diesel engine with crank angle

영한 것이다. 그림에서 하부쪽은 인젝터가 위치한 곳으로서, 분사된 4개의 분무중 한 줄기가 시작되는 곳이며, 상부쪽은 실린더 라이너 쪽으로서 분무의 방향은 아래에서 상부쪽으로 진행하게 된다. 본 그림에서 보는 바와 같이, TDC에서 이미 착화하여 화염을 볼 수가 있으며, 시간이 지남에 따라 점점 화염의 크기가 캐비티 쪽인 아래로부터 성장해 나옴을 나타내고 있다. 본 연구의 계측범위에선 ATDC 10° 에서 화염의 면적이 크고 가장 밝게 보이고 있으며, ATDC 40° 부터는 휘염으로 보기 어려운 붉은 기운의 화염으로 되어 서서히 연소가 종료되어 가고 있음을 알 수 있다. 분사된 연료는 거의 캐비티 내에서 착화하여 피스톤이 하강하면 역스퀴시 유동에 의해 화염이 캐비티 밖으로 빠져 나와 연소가 서서히 종료되는 것을 나타내고 있다. 연소의 재연성을 확인하기 위해 제1보에서는 연소실 내의 압력을 채취하여 사이클 변동이 없음을 확인하였으며, 본 연구에서는 화염의 자발광 사진으로 확인하였다. 각 크랭크 각도마다 20회 이상의 촬영을 행하여 화염의 모양이 거의 일정한 것을 확인하였으며, 이미지에서 보이는 자발광강도의 값을 평균해 본 결과 거의 유사한 값을 얻을 수가 있었다.

본 연구를 통해 연소실 내 soot의 농도분포를

LIS법과 LII법으로 동시 계측한 원시화상들은 육안으로 soot의 농도분포를 구체적으로 확인하기가 곤란하다. 따라서 계측된 화상을 이미지 프로세싱하여 원시화상에서 광강도의 값을 추출한 후 같은 수치끼리 연결한 등치선도와 함께 표현하여 쉽게 해석할 수 있도록 나타내었다.

Fig.5와 Fig.6에서 보이는 그림은 ATDC 20°에서 ATDC 110° 까지 10° 간격으로 계측한 것을 나타내었으며, 각 화상은 다수의 사이클을 운전하는 동안 설정한 각 크랭크각도에서 15회씩 측정하였다. 계측하기 전, 기관회전수가 일정할 때까지 약 30회 정도의 사이클을 덤프시킨 후 계측을 행했다. 계측된 각각의 원시화상은 비록 다른 사이클에서 계측된 것일지라도 거의 일정한 모양을 나타내었으며, 화염 자발광을 다회수 촬영한 결과에서도 역시 동일한 화상이 나타났음을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 가시화 창오염 정도가 약하다고 판단되는 초기 계측된 화상을 선정하여 이미지 해석을 하였다.

Fig.5는 이미 계측된 LIS의 원시화상으로부터 광강도의 값을 추출하여 등치선도로 나타낸 것이며, Fig.6은 LIS와 동시에 계측된 LII의 원시화상으로부터 광강도의 값을 등치선도로 나타낸 것이다. 각 이미지에서 보여주는 수치는 soot의 특정

한 양을 나타내는 값이 아니며 상대적인 비교가 가능한 정성적인 값을 말한다. 제1보의 원시화상에서 보여주는 것과 마찬가지로 LIS의 광강도가 LII의 값보다 크고, 분포면적도 넓은 것을 보여주고 있다. 이는 LIS의 광신호가 LII의 광신호보다 상대적으로 강하게 나오는 것을 말해 주고 있으며, 특히 측정조건의 후반에서는 LII 신호가 약해서 잘 나타나지 않는 반면에 LIS 광신호는 강해 화상 해석에 있어서 유리하게 작용한다.

LIS 광신호를 나타내는 Fig.5에서, ATDC 20° ~60°까지는 감소, ATDC 70°에서 증가하였다가 다시 ATDC 90°까지 감소하는 등 일관성을 나타내지 못하는 것 같이 보인다. 그러나, 이러한 각각의 광신호가 이루고 있는 분포면적만으로 판단하기엔 부족한 부분이 있으며, 이후에 다루어질 soot 입경과 수밀도로써 판단함이 좋을 것으로 생각된다.

또, LII 광신호를 나타내는 그림과 광강도의 분포를 크랭크각도에 따라 비교해 보면, 제1보에서 나타낸 2개의 화상의 광강도는 ATDC 50° 이후에서 일치하는 경향을 보이고 있지만, ATDC 20°에서 ATDC 40° 사이의 그림은 광강도가 서로 상반된 듯한 화상을 나타내고 있다. 이는 1보에서 설명한 것과 같이 soot의 수밀도와 직경의 크기가 영향을 미치는 영역이 상이함에서 오는 결과라고 생각된다.

Fig.7과 8은 위의 원시화상으로부터 구한 광강도 값으로 식(3)과 (4)식을 거쳐 각각 크랭크각에 대한 soot 입자의 직경분포 및 수밀도의 분포로 나타낸 그림이다. Soot 입자의 직경의 분포는 LIS 광강도의 분포와 유사한 경향을 보이며, 수밀도에 관한 그림들은 LII의 광강도 분포와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 먼저, Fig.7에서 보면, 크랭크각에 따라 soot 입경의 크기는 계측 범위 내에선 그리 많은 차이를 나타내진 않으며, 단지 점점 그 분포를 이루는 면적이 감소할 뿐이다. 각 크랭크각에 따른 직경의 분포는 주로 중심쪽에 중대형 크기의 입경을 가진 soot이 분포되어 있고, 작은 입경의 soot은 가장자리 쪽에 분포

되어 있다. 이러한 경향은 거의 끝까지 진행되고 있으며, 작은 입경의 soot이 최종적으로 남게 된다.

또한, 화염 이미지와 비교해 볼 때, 대체적으로 화염이 존재하는 곳에서의 soot 직경은 화염이 존재하지 않는 곳에 비해 상대적으로 적은 값을 보이고 있으며, 화염이 없는 곳에서는 직경이 큰 값으로 나타나고 있다. 이는 화염 내부에서 작은 크기의 soot이 생성되었다가 온도가 낮은 영역에서 상호 응집에 의한 soot 직경의 증가를 가져온 것으로 생각된다.

Fig.8에서는 크랭크각에 따른 수밀도의 분포면적과 더불어 수치가 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다. 먼저, 분포면적으로 볼 때 ATDC 20°에서 110°로 갈수록 거의 감소하고 있으며, 수밀도의 값으로 볼 때, ATDC 20°에서 30°까지는 증가하였다가 30°에서 110°까지는 감소하는 것을 나타내고 있다. 이 그림도 역시 화염의 이미지와 비교해 보면, 캐비티 내에 있던 화염이 스퀴시 유동에 의해 나오기 시작하는 기간에 해당하는 ATDC 20° ~40°에서 수밀도가 현저하게 큰 값을 나타내고 있다. 그러다가 ATDC 40° 이후부터 수밀도의 값은 연소가 종료되는 시점까지 계속해서 급격히 감소함을 보이고 있다. 이때부터는 화염의 영역과 유사한 부분이 거의 없음을 보이고 있으며, 화염 내부에서 생성된 다수의 soot이 연소실 체적의 증가와 함께 산화가 이루어져 수밀도가 작아진다고 생각된다. 또, Fig.8은 LII의 광신호를 나타내는 그림 Fig.6과 유사한 윤곽을 나타내고 있어서 식(4)의 결과를 잘 반영하고 있다. 단, 그림 상에서 수밀도가 전혀 보이지 않는 영역은 다른 영역에 비해 상대적으로 값이 작아서 이미지 프로세싱과정에서 필터링되어 제거되었다.

이러한 soot 입자의 직경과 수밀도의 경향들을 크랭크각에 따라 함께 나타내 보면 Fig.9와 같이 나타낼 수 있다. Fig.9는 크랭크각에 따라 계측된 soot의 광강도의 값으로써 이미지 프로세싱을 거친 후 수밀도와 직경의 정보를 나타낸 그림이다.

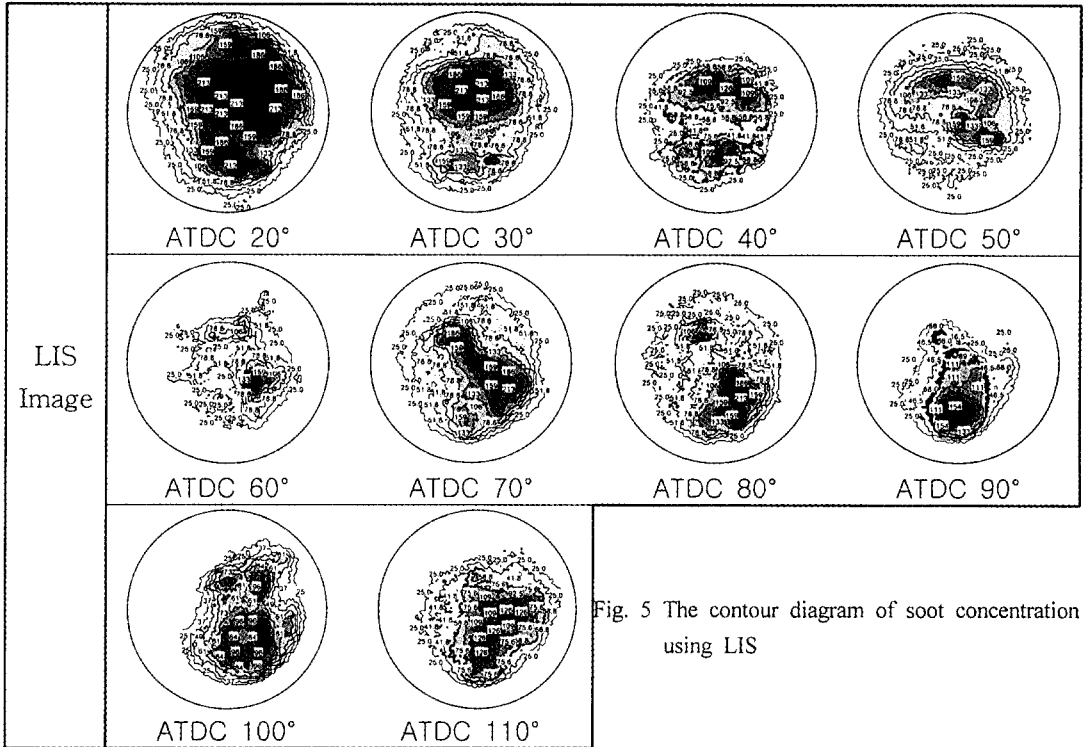


Fig. 5 The contour diagram of soot concentration using LIS

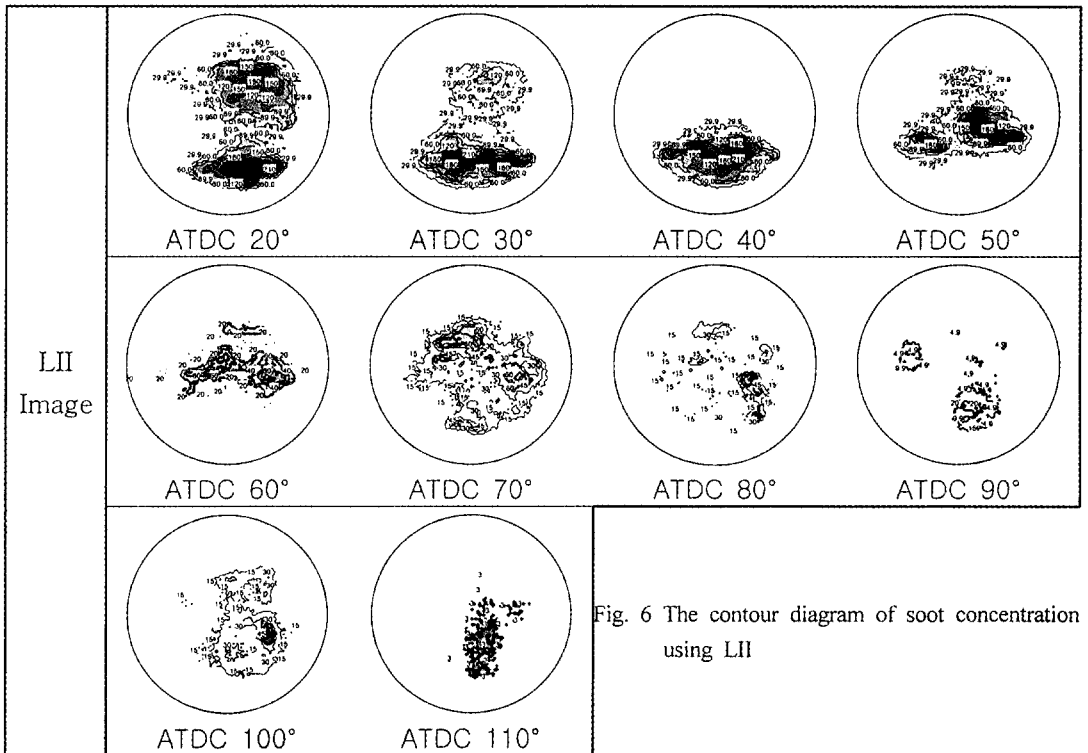


Fig. 6 The contour diagram of soot concentration using LII

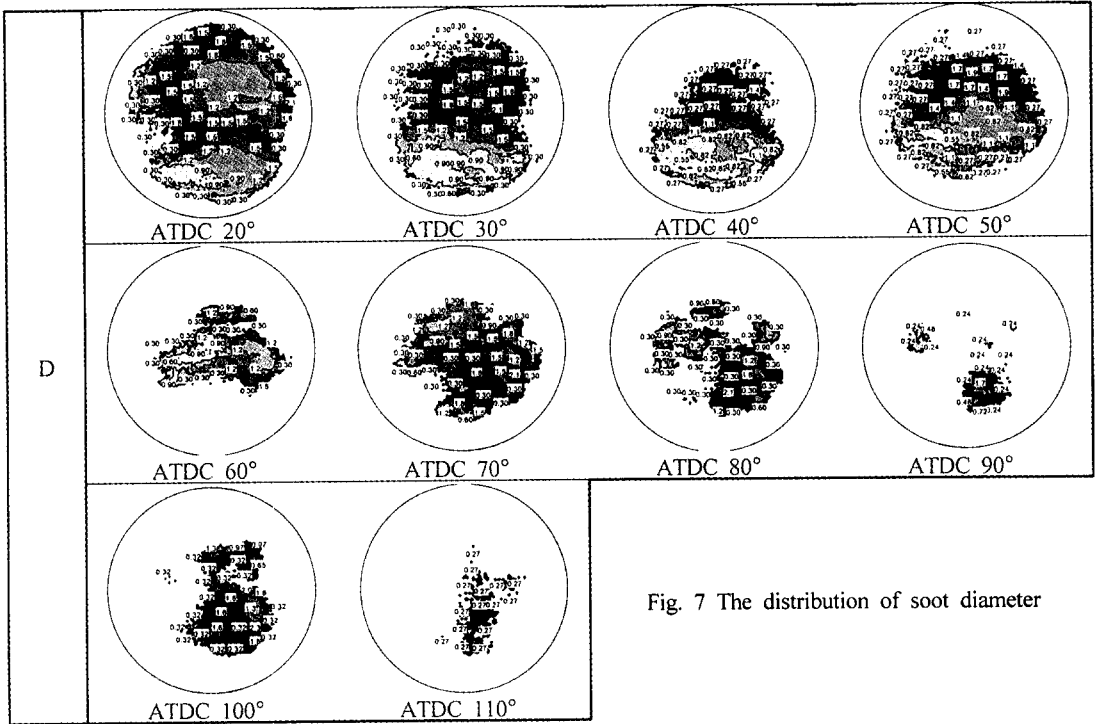


Fig. 7 The distribution of soot diameter

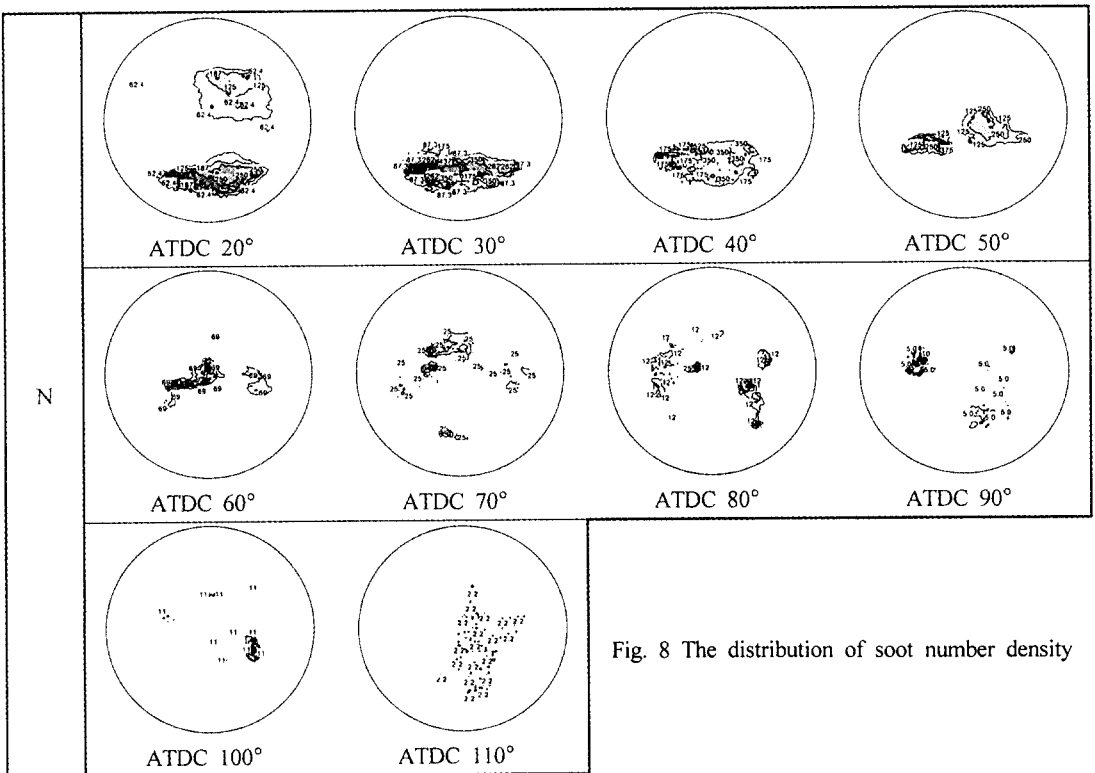


Fig. 8 The distribution of soot number density

크랭크각에 따라 soot의 수밀도는 ATDC 20°에서 40°까지는 아주 큰 값을 보이다가 ATDC 70°까지는 급격하게 감소하고, 다시 110°까지는 완만한 기울기로 감소하는 경향을 보인다. 이때, ATDC 40°에서 70°까지는 거의 75%의 감소율을 나타내고 있다. 또, soot의 직경의 변화를 보면, 전체적으로 완만하게 증가하는 경향을 보이며 ATDC 20°에서 110°까지는 약 40%의 증가율을 보였다. 이는 Fujimoto⁽⁷⁾ 등의 연구와도 일치하는 결과이다. 이로써, 디젤엔진에서 발생하는 soot는 후기연소로 갈수록 직경은 완만하게 증가하고, 수밀도는 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

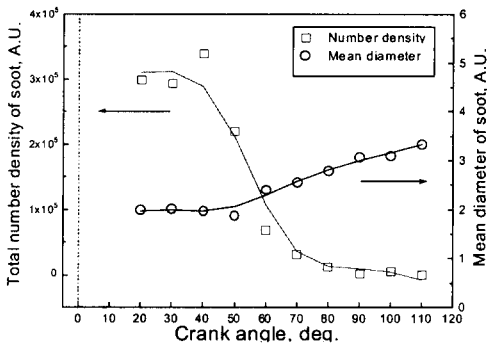


Fig. 9 The number density and diameter of soot with CA

5. 결 론

레이저계측의 원시화상을 이미지 프로세싱을 통해 레이저여기산란법 광신호와 레이저여기적열법 광신호의 값을 추출한 후 상대적인 soot의 직경과 수밀도의 정보로 해석하였다.

1) Soot 입경크기의 분포는 LIS 광강도의 분포와 유사한 경향을 나타내고, 수밀도 크기의 분포는 LII 광강도 분포와 유사한 경향을 보였다.

2) 크랭크각에 따른 Soot 입경크기의 범위는

전체적으로 유사하였으며, ATDC 20°에서 ATDC 110°까지 완만하게 약 40%의 증가율을 보였다.

3) 크랭크각에 따라 soot의 수밀도는 ATDC 20°에서 ATDC 40°까지는 아주 큰 값을 보이다가 ATDC 70°까지는 급격하게 감소하였다. 이때, 약 75%의 감소율을 나타내고 있다. 따라서, 본 연구의 계측조건에서 대부분의 soot은 위의 범위에서 산화되어 소멸한다. 이로써, 디젤엔진에서 발생하는 soot는 후기연소로 갈수록 직경은 완만하게 증가하고, 수밀도는 급격하게 감소하였다.

후 기

이 논문은 1998학년도 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災内のすす生成と酸化に関する研究", 第12回 内燃機関シンポジウム-講演論文集, p.61-66, 1995.
- 2) Melton, L.A., "Soot Diagnostics Based on Laser Heating", Applied Optics, Vol.23, No.13, pp.2201-2208, 1984.
- 3) 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.
- 4) H.Kosaka, T.Nishigaki, T.Kamimoto, and S.Harada, "A Study on Soot Formation and Oxidation in an Unsteady Spray Flame via Laser Induced Incandescence and Scattering Techniques", SAE,

- No.952451, pp.11-20, 1995.
- 5) 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.
- 6) 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, 1990.
- 7) D.Choi, M.Enami, J.Senda, and H. Hujimoto, "Soot Formation and Oxidation Process in a DI Diesel Engine by Use of LII/LIS Technique", The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International), pp.315-320, 1999.