

레이저 탄성산란법, 여기적열법, 자발광을 이용한 직분식 디젤엔진의 피스톤 형상에 따른 2차원 soot 분포 측정

노승민* · 원영호** · 박정규*** · 최인용**** · 전광민*****

Measurments of 2-D Image Soot Distribution for Different Piston-Shapes of a DI Diesel Engine Using Elastic Scattering, Laser-Induced Incandescence and Flame Luminosity

S. M. Noh, Y. H. Won, J. G. Park, I. Y. Choi, K. M. Chun

Key Words: LIS(레이저 탄성 산란법), LIS(레이저 여기 적열법)

Abstract

Soot formation and oxidation is closely related to the combustion phenomena inside a diesel engine. Laser-based diagnostics provide a means for improving our understanding of diesel combustion, because they have highly temporal and spatial ability. To understand the soot behavior we did preliminary study by taking flame luminosity photographs and 2-D images of soot distribution using Laser Elastic Scattering(LIS) and Laser-Induced Incandescence(LII). From the data we found that soot concentration was high in the bowl and disappeared from the central region in the late combustion stage and that soot exists in the flame using luminosity, LIS and LII.

1. 서 론

*연세대학교 대학원
**울산대학교
***건국대학교
****연세대학교 박사
*****연세대학교

디젤엔진은 열효율이 가솔린에 비해 우수하기 때문에 현재와 같은 고유가 시대에 많은 관심을 끌고 있다. 그러나 디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 압축비가 높고 연소특성상 유해물인 NOx와 soot을 더 많이 배출시킨다. 이러한 배출물을 줄이기 위해서는 연소실형상의 개선, 고압연료분사, 연소의 개선, 후처리등이 강구되어 왔다. 특히 연소의 개선을 위해서는 연소현상을 정확히 측정하는 것

이 필요하다. 레이저 진단기술은 시간적, 공간적 분해능이 높기 때문에 비정상, 비균질의 디젤엔진의 연소현상을 측정하는데 적합하다.

본 연구에서는 레이저 탄성 산란법(LIS)와 레이저 여기적열법(LII)을 통해 디젤 후기연소 시 피스톤 형상에 따른 soot의 분포를 2차원적으로 측정하였으며, 아울러 고속 디지털 카메라를 통해 화염의 자발광을 촬영하고 그 분포를 레이저 측정법의 분포와 비교 분석하여 soot의 생성과 소멸에 대한 이해를 증진시키는데 목적을 두었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 레이저 탄성산란법과 여기적열법

탄성산란법은 레이저광이 입자에 입사되면 입자에 의하여 레이저광이 반사 혹은 굴절에 의하여 광로가 변경되는 현상, 즉 산란현상을 이용하여 입자를 가시화하는 방법이다. 하지만 입자의 구별이 곤란하여 특정 입자만을 선별하여 가시화하기가 어렵다는 단점이 있다. 일반적인 탄화수소계의 연소에서 중간 생성물인 C_1 , C_2 , C_3 는 기체상태로 농도는 고체탄소입자(soot 입자)의 $1/10^9$ 정도로 아주 작다. 또한 soot 입자를 포함해서 기체분자의 산란광 강도는 입자 직경의 6제곱에 비례하므로, 크기가 soot 입자에 비해 아주 작은 C_1 , C_2 , C_3 는 산란광 강도가 soot 입자의 산란광에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 이러한 원소들의 산란광의 신호는 어느 정도 무시될 수 있다.

또한 John Dec.⁽⁴⁾ 등의 논문을 인용하면, 탄화수소계의 화염에서는 화학적자발광과 soot 자발광이 있는데 화학적자

발광에서 C_2 는 청록색을 띠고 있어서 탄성산란법 신호에서 약간의 에러가 있을 것이다. 하지만 이 화학적자발광은 soot 자발광에 비해 미약하기 때문에 무시되어도 무방하다.⁽⁴⁾

여기적열법은 강력한 레이저광으로 광흡수율이 높은 입자를 가열하여, 고온이 된 입자로부터 복사광을 검출하여 가시화하는 방법이다. 화염 중 soot입자는 주성분이 탄소이기 때문에 레이저 펄스광이 입사되면 펄스 기간 중에 soot입자 온도가 4000K정도까지 가열되어 적열광이 나오며 이때 특정파장을 필터를 통해서 데이터를 취득하는 방법이다. Fig. 1은 레이저에 의해 4500K로 가열된 soot 입자와 화염온도인 2300K의 soot입자로부터 복사광 강도를 파장변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 점선으로 나타낸 복사광 강도 비는 예를 들어 400nm의 파장에서 1000정도 되는 것을 알 수 있다. 따라서 단파장 통과 필터를 사용하여 파장 400nm이하의 광만을 검출하면 레이저에 의하여 가열된 매연입자만을 선별적으로 가시화하는 하는 것이 가능하다. 여기적열법의 장점은 분무와 화염이 동일 측정장에 혼재하는 디젤화염에서 검출 가능한 적열광을 발하는 입자는 soot입자 뿐이므로 soot입자만을 선택적으로 가시화 하는 것이 가능하다. 레이저 여기 적열광 강도 I_{LII} 는 동일 측정장치에서 다음 식으로 나타낸다.

$$I_{LII} \propto D_s^{3.5} \cdot N^{(8)}$$

여기서 D_s 는 soot 입자의 직경을, N 은 입자의 수밀도를 나타낸다. 위 결과는 적열광 강도가 산란광 강도에 비하여 soot 입자의 분포농도에 보다 가까운 것을 보여주고 있다.

단점은 탄성산란법에 비해 soot 입자만을 선별적으로 가시화가 가능하지만 적

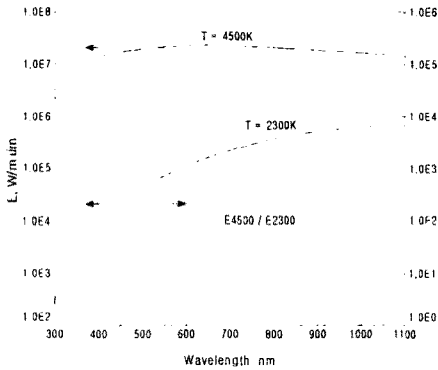


Fig. 1 Comparison of radiant wave intensities between natural luminosity and LII of soot⁽⁸⁾

열광 측정을 위해서는 높은 레이저의 출력이 요구되고 광의 강도가 이론적으로 1/100정도로 미약하다. 따라서 높은 화상 데이터를 얻기 위해서는 노출시간이 레이저 펄스기간 중에 맞출 수 있는 고속 셔터 카메라가 필요하다.⁽⁸⁾

2.2 실험장치

2.2.1 가시화 엔진

본 연구에서 대동공업의 10마력 단기통 디젤엔진(ND-130DI)을 가시화를 위해 개조한 엔진을 사용하였다. 그 체원은 Table 1에 있다.

Fig. 2는 가시화 엔진의 단면도이며, 레이저 시트가 입사 연장판을 통해 연소실 내에 입사되면 산란된 빛은 피스톤 관찰창을 통해 광학경에 입사되어 화상데이터를 취득할 수 있다.

레이저시트광이 연소실내에 투입되게 하기 위해서 Fig. 3과 같이 레이저시트 입사 연장판을 실린더헤드와 연장실린더 라이너 사이에 놓고 조립하였고, 피스톤

Table 1 Specification of test engine

Bore×Stroke	95×95
Cooling Water Temp.	80℃
Intake Air Temp.	70~80℃
Compression Ratio	18
Intake Open	BTDC20°
Intake Close	ATDC44°
Exhaust Open	BTDC44°
Exhaust Close	ATDC20°
Injection Time	BTDC19°
Injection Open Pressure	225kg/cm ²

도 그 길이만큼 연장하였다. 피스톤은 화염과 soot의 분포를 관찰할 수 있도록 아크릴로 Fig. 4와 같이 제작하였고, 가공 후 연마를 하여 화상의 굴절율을 감소 시켰다.

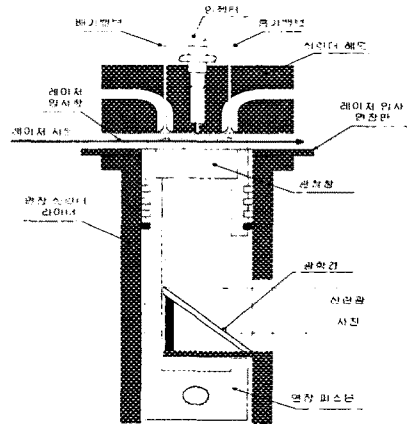


Fig. 2 A cross section diagram of optically accessible diesel engine

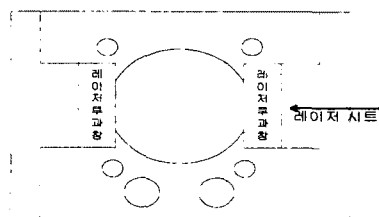


Fig. 3 Plates to pass laser sheet

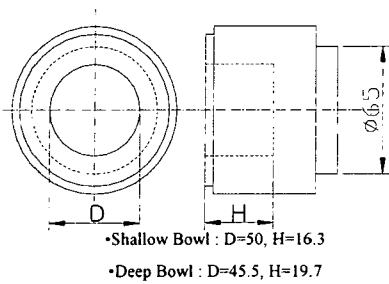


Fig. 4 Acryl Piston

2.2.2 광학장치

soot의 가시화를 위해서는 에너지 밀도가 높은 펄스레이저를 이용해야 하며, 레이저 시트는 cylindrical lens와 spherical lens의 조합을 이용하여 레이저빔을 2차원 평면 시트로 만들기 위해 Fig. 5와 같이 구성하여 38mm의 폭과 300 μ m의 두께를 가지는 레이저 시트를 만든다. 좀더 균일한 레이저시트를 위해서 iris로 가장자리를 자르고 가운데 50%만을 사용하였다.

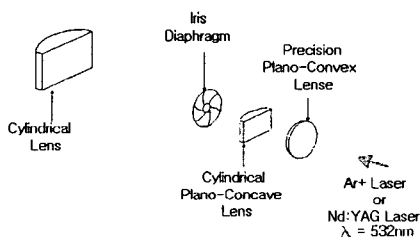


Fig. 5 The apparatus of optics

2.2.3 레이저와 카메라

LII를 실험하기 위해서는 광의 강도가 강한 펄스 레이저를 사용하여야 하며, 그 펄스 시간에 동기화 시킬 수 있는 카메라 필요하다. Table 2는 레이저와 카메라의 제원이다.

Table 2 The specification of Apparatuses

Nd:YAG Laser	
Name	SL803G
Company	Spectron Laser System
Wavelength	532nm
Pulse Duration	5~7ns
ICCD camera	
Name	ICCD Single Frame Camera
Company	V-Tek
Gate Time	≥100ns
Flame/Sec	1
Hi-speed camera	
Name	Model 4540mx
Company	Sycron
Gate Time	≥1/13200s
Flame/Sec	≤13200

고속 디지털 카메라는 자발광을 찍을 목적으로 사용하였으며 레이저 진단방법이 아니므로 레이저와 광학장비는 사용하지 않았다.

컨트롤 박스에서 나온 신호를 DG535(Digital Delay Pulse Generator)가 받아 카메라와 레이저를 동기화 시킨다.

Fig. 6은 LIS와 LII의 실험장치에 대한 개략도이다. Deep Bowl은 각각 따로 촬영하였으며, Shallow Bowl은 동시에 촬영하였다.

레이저광이 나와서 광학장치를 거쳐 시트빔을 만들게 되어 연소실 내부의 화염을 지나가게 된다. 이때 ICCD 카메라가 그 광원을 촬영한다. 노출시간 300ns에서 초당 1프레임을 촬영하였으며 한번 실험 시 20프레임의 영상을 획득하였다. 그 데이터들은 640×480화소의 파일로 컴퓨터에 저장된다. Deep Bowl에서는

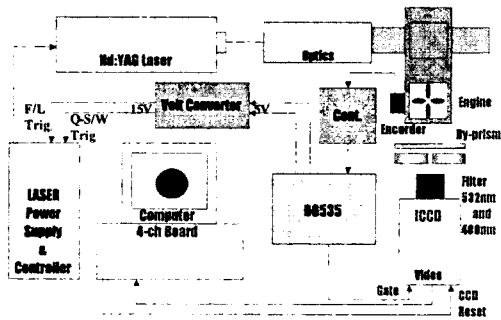


Fig. 6 The diagram of the experimental apparatus to LIS and LII

LIS와 LII를 따로 촬영하였으며 Shallow Bowl에서는 동시에 촬영하였다. LIS는 532nm(반치폭 3nm), LII는 400nm(반치폭 50nm)의 밴드패스 필터를 사용하여 특정파장을 잡았다.

Fig. 7은 ICCD와 레이저를 동기 시키기 위한 동기신호를 간략하게 나타낸 것이다.

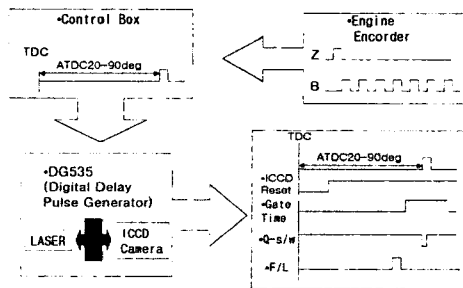


Fig. 7 Schematic diagram of TTL signals to synchronize

고속 디지털 카메라를 이용하여 자발광을 촬영하였으며, 노출시간은 1/9000s이며 초당 9000프레임을 촬영하였으며 데이터는 256×128 화소의 파일로 컴퓨터에 저장된다.

Fig. 8은 자발광 촬영에 대한 실험장치의 개략도이다.

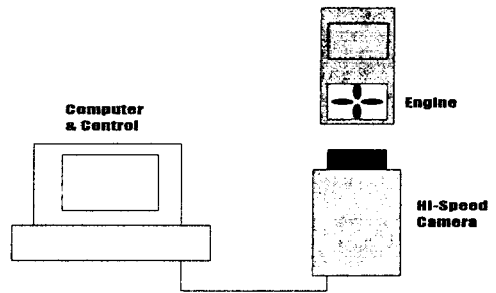


Fig. 8 The diagram of experimental apparatus for flame luminosity measurement

3. 실험결과

Fig. 9는 가시화엔진의 데이터 취득영역의 개략도이다. 노즐은 중심에서 약 1cm정도 편심되어 있으며 LIS와 LII의 데이터 취득영역은 레이저시트광이 지나가는 영역과 아크릴 피스톤의 관찰창 부분의 겹쳐진 영역이다. 그리고 자발광의 데이터 취득영역은 관찰창 전체의 영역이다. 피스톤 중심영역은 보울이며, 보울의 경계면 바깥영역은 스퀴시영역이다.

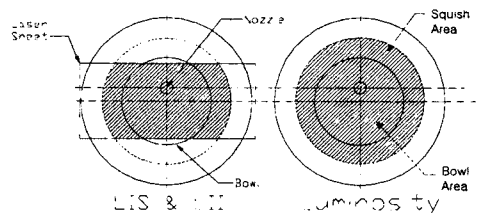


Fig. 9 The diagram of measurement area

Fig. 10은 고속 디지털 카메라를 통하여 화염의 자발광을 촬영한 것이다. 위는 Deep 보울, 아래는 Shallow 보울이

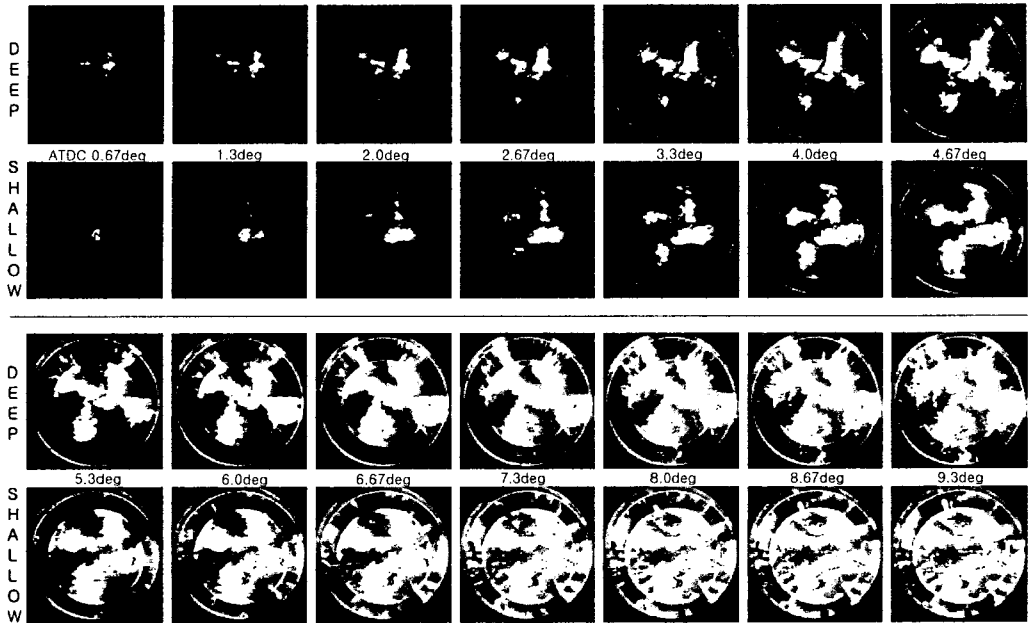


Fig. 10(a) Images of flame luminosity using Hi-Speed Camera
(ATDC 0.69 ° to 9.3 °)

며, ATDC 0.67 °부터 20 °까지는 0.67 °단위로 세밀하게 나열하였고, 20 °부터 100 °까지는 LIS와 LII의 비교를 위해서 10 °간격으로 나열하였다.

Fig. 10에서 스월의 유동이 있음을 볼 수 있으며, 4개의 노즐구멍에서 나온 연료가 분무되어 보울벽에 부딪치게 되고 화염이 발생된다. 초기 연소현상에서 볼 수 있듯이 화염은 보울 중심 부분부터 발생하는 것을 관찰 할 수 있었으며 보울의 정 중앙부분이 아닌 노즐주변부터 화염이 발생하는 것을 관찰 하였다. 초기 ATDC 0.67 °에서 ATDC 3.3 °에서 본다면 노즐주위에서 보울벽 주벽으로 화염이 퍼져나가는 것을 볼 수 있으며, 화염이 퍼져나간 후 보울벽에 부딪치게 되고 이것은 스퀴쉬 영역까지 퍼져 나가는 것을 볼 수 있다. 또한 액적이 분무된 지역에만 편재해 있던 화염이 ATDC

8 °부터는 보울 전 영역과 시퀴쉬 영역으로 퍼져 나가는 것을 볼 수 있다.

두 보울을 비교해보면 Deep 보울보다는 Shallow 보울이 연소 초기에서는 화염의 확산이 더 잘되지만, Fig.10(c)에서 볼 수 있듯이 ATDC30 °이후부터 말단까지는 화염의 소멸이 Shallow 보울이 더 빠르다. 이것은 Shallow 보울이 Deep 보울보다 직경이 커서 화염이 존재할 수 있는 면적이 크기 때문이며, 그리고 노즐에서 분무된 연료 액적의 확산이 더 크기 때문이다. 또한 스퀴쉬 영역에서 화염이 Shallow 보울이 확산이 더 잘된다. 이것은 보울의 깊이가 달라서 깊이가 얇은 보울은 화염의 확산이 더 빠르기 때문이다.

화염의 모습을 비교해 본다면 Deep 보울에서는 초기부터 ATDC 10 °까지 어느 정도 대칭적이라는 것을 볼 수 있

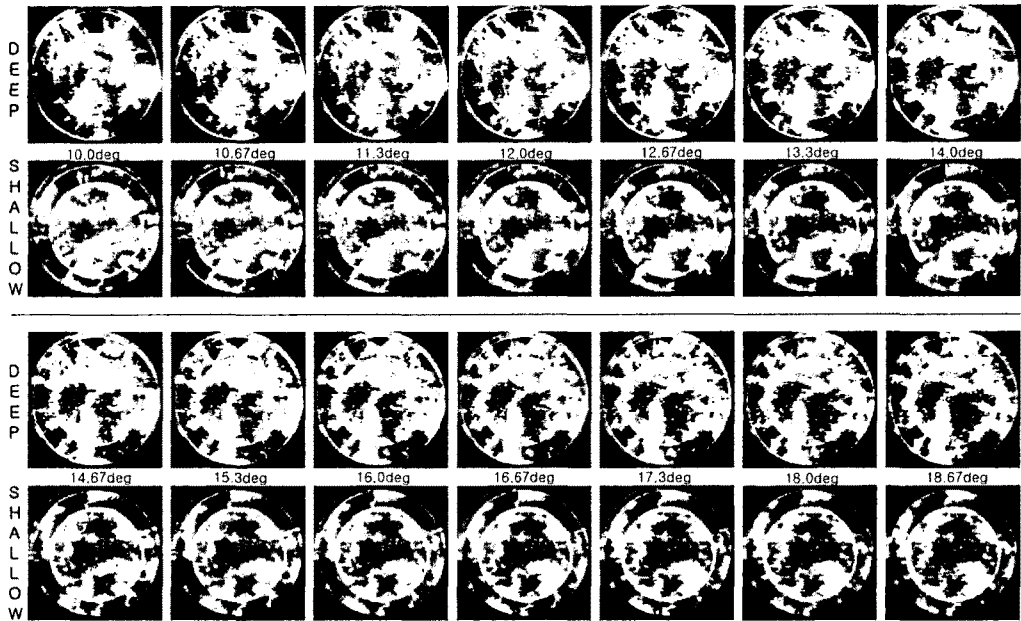


Fig. 10(b) Images of flame luminosity using Hi-Speed Camera
(ATDC 10.0 ° to 18.67 °)

는데, 이것은 Shallow 보울보다 보울의 깊이가 깊어서 분무된 액적들의 확산이 Shallow 보울보다는 잘 되지 못해서 나온 결과라고 할 수 있다. 따라서 ATDC 50 °까지 화염이 보울 주변에서 계속해서 존재하고 있고, 스퀴쉬 영역에서도 활발하게 진행하고 있다.

Fig. 11은 LIS와 LII를 통해서 측정된 soot의 2차원 분포도이다. ATDC 20~90 °사이에서 10 ° 간격으로 촬영하였으며, 각 각도 당 20회의 영상을 취득하였고, 광신호가 있는 환한 지역이 soot이 존재하는 지역이다.

Deep 보울과 Shallow 보울과의 해상도의 차이가 있는데 그 이유는 Deep 보울은 각각 따로 촬영하였고 Shallow보울은 동시에 촬영하였기 때문이며 따라서 해상도가 1/4정도로 떨어졌다.

LIS신호는 보울 안에서 soot의 신호가

ATDC 20 °부터 ATDC 50 °사이에서 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. LIS 신호는 화염 내부의 soot뿐만 아니라 액적이나 혹은 연소시 다른 이물질에 의해서 광신호가 나올 수 있다. 하지만 분무는 TDC가 이르기 전에 끝나기 때문에 액적일 가능성은 희박하다. 또한 이물질의 영향은 20회 이상의 영상을 비교해 볼 때 배제될 수 있다.⁽⁹⁾

Fig. 11은 연소의 후기 기간이기 때문에 soot의 분포와 농도는 점차적으로 소멸하고 있으며, ATDC 70 °에서는 거의 사라져 가는 것을 볼 수 있다.

LIS신호와 LII신호를 비교해 보면 soot의 분포는 보울의 중심에서부터 보울벽 쪽으로 사라져 가는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 보울벽의 온도가 보울 중심부분의 온도보다 상대적으로 낮아서 화염이 보울벽에 부딪치면서 불완전 연소로

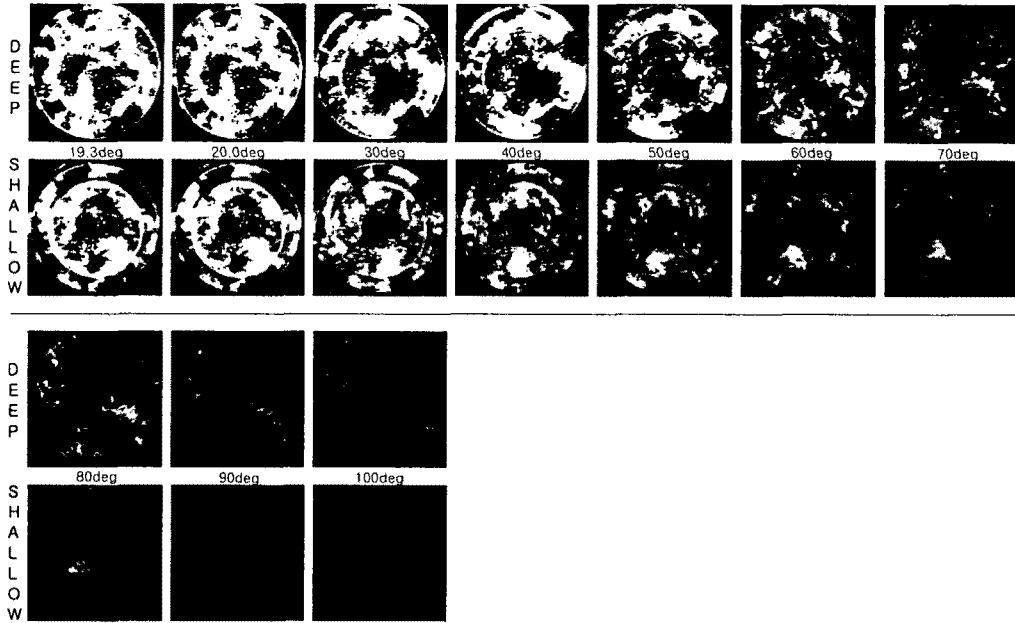


Fig. 10(a) Images of flame luminosity using Hi-Speed Camera
(ATDC 19.3 ° to 100 °)

인한 soot의 생성율이 커져서 생겨난 것이라고 할 수 있다. ATDC 60 °이후부터는 soot의 분포는 벽쪽에서부터 사라져가는 것을 확인 할 수 있으며 90 °이후로는 거의 찾아 볼 수 없다. 또한 스퀘어 영역에서 본다면 LIS신호와 LII신호 두 영역 모두 비균일성을 띠고 있는데 이 영역은 실린더 헤드와 실린더 벽과의 거리가 가깝기 때문이며 온도가 상대적으로 낮기 때문에 soot의 생성과 소멸은 보울보다 균일하지 못하다. 또한 분무된 액적연료는 대부분 보울안에 분사되기 때문에 soot의 생성과 소멸의 시간은 보울영역보다는 짧다고 할 수 있다.

Deep 보울과 Shallow 보울을 비교해볼 때 화염의 모습에서는 Deep 보울이 Shallow 보울보다 대칭적이며, Shallow 보울은 불균일성을 띠고 있다. 또한

Shallow 보울의 soot의 소멸은 Deep 보울보다 더 빠르게 진행되고 있음을 볼 수 있으며, Fig. 10에서 볼 수 있듯이 자발광 화염의 모습도 soot의 분포 경향과 같은 특성을 나타내고 있다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10(c)와 Fig. 11에서 ATDC 20 °부터 90 °까지의 경향을 살펴보면 알 수 있다. 따라서 soot의 분포 경향은 화염이 존재하고 있는 부분에서 계속해서 생성되고 있다고 추측된다.

아울러 초기 연소에서 불 때 보울 중심 부분에서 발생한 화염에서부터 soot이 발생할 수도 있으며 연소 후기에서도 약간의 화염을 볼 수 있는데 그때에도 soot은 여전히 존재하고 있다는 것을 추측할 수 있다.

2차원 soot 분포를 가지고 정량적인 soot의 양을 구하는 것은 어렵지만, 화염이 존재하는 부분에서 soot이 존재한다

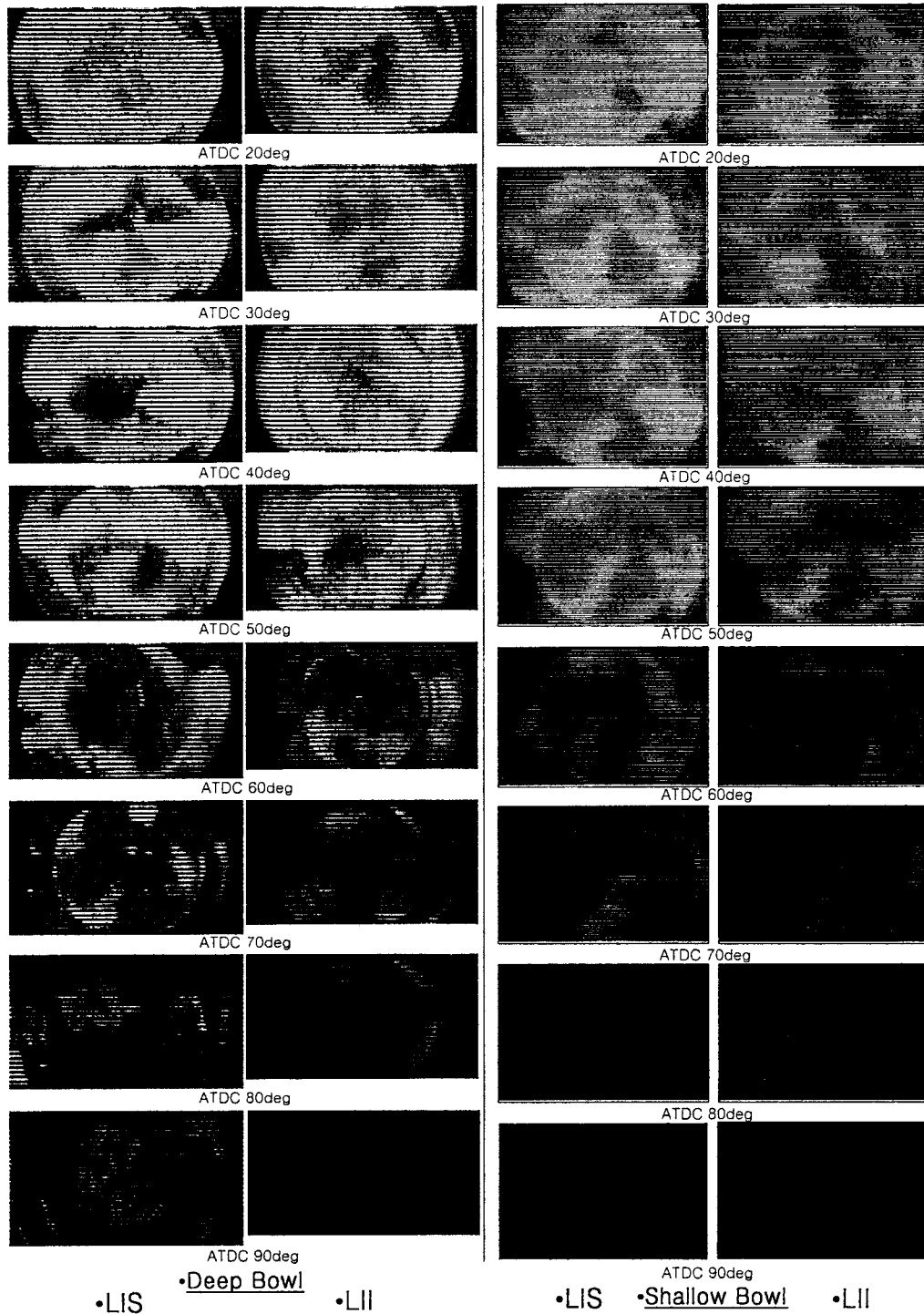


Fig. 11 Images soot distribution by LIS and LII

고 본다면 Shallow 보울보다는 Deep 보울에서 발생하는 soot의 양은 더 많을 것이다. 그 이유는 Fig. 11에서 전체적인 LIS와 LII신호를 본다면 그 면적은 Deep 보울에서 훨씬 많고 또한 후기연소 기간도 길기 때문이다. 하지만 앞서 실험한 이색법을 이용한 결과에서는 Deep 보울이 Shallow 보울보다 더 적게 soot을 발생한다. 그 이유는 연소진행이 빠르고 연소실 내부 압력도 상대적으로 높기 때문이다.⁽⁷⁾

그러므로 LIS와 LII 그리고 자발광을 통해서 정량적 수치를 계산하고 측정하는 것은 무리가 있어 보인다. 게다가 자발광과 레이저 진단신호는 각각 측정된 위치가 다르기 때문에 완전한 관계를 맺기에는 약간의 무리가 있어 보인다. 하지만 레이저 신호와 자발광신호를 비교해보면 둘 사이에서 soot 분포의 특성을 파악할 수 있다.

soot의 분포 중 피스톤 벽쪽의 경향은 구조상 관찰 할 수 없었으며, 관찰창의 재질이 아크릴이기 때문에 높은 온도로 인한 보울의 형상이 열변형을 일으키면서 soot과 같은 이물질이 달라붙기 쉬웠다. 따라서 20장을 연속 촬영시에 후반부로 갈수록 깨끗한 영상을 얻기는 힘들기 때문에 녹지 않고 강도가 센 재질로 보완이 필요하다.

4. 결론

고속 디지털 카메라를 통해 화염의 연속 자발광을 촬영할 수 있었으며, LIS와 LII를 통해 2차원 soot의 분포 영상을 피스톤 보울 형상에 따라 데이터를 취득하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) LIS와 LII를 통해 후기 연소시 2차원 soot의 경향을 알 수 있었으며 후기로 갈수록 보울 중심에서부터 보울벽 주변으로 soot의 양이 줄어드는 것을 알 수 있었다.

2) soot의 경향은 보울에서는 어느 정도 균일성을 가지고 소멸되지만 스퀴쉬영역에서는 비균일적으로 생성되고 소멸됨을 알 수 있었다.

3) soot의 경향은 ATDC 50 °까지 존재하고 있으며, ATDC 60 °이후로는 점차적으로 소멸되어 가는 것을 알 수 있었다.

4) 화염과 LIS와 LII를 통해 soot의 경향을 비교해 본 결과 화염이 존재하는 곳은 soot이 생성되고 존재하고 있다는 것을 어느 정도 추측할 수 있었다.

5) 피스톤 보울형상에 따라 초기 연소에는 Shallow 보울이 착화가 더 빨리 일어나며 후기 연소기간은 Deep 보울이 더 길며, 대칭성과 균일성을 갖고 있으며, soot의 분포도 화염과 비슷한 경향을 보임을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) John E. Dec, Axel O. zur Loye, Dennis L. Siebers, "Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Laser-Induced Incandescence Imaging", SAE paper no. 910224, 1991
- (2) John E. Dec, "Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Imaging of Laser-Induced Incandescence, Elastic Scattering, and Flame Luminosity", SAE paper no. 920115, 1992.
- (3) John E. Dec, Christoph Espey, "Soot and Fuel Distribution in a D.I. Diesel Engine via 2-d Imaging", SAE paper no. 922307, 1992.
- (4) John E. Dec, Christoph Espey, "Ignition and Early Soot Formation in a DI Diesel Engine Using Multiple 2-D Imaging Diagnostics", SAE paper no. 950456, 1995.
- (5) Pinson, J. A., Mitchell, D. L., Santoro, R. J., and Litzinger, T. A., "Quantitative, Planar Soot Measurements in a D.I. Diesel Engine Using Laser-Induced Incandescence and Light Scattering", SAE paper no. 932650, 1993.
- (6) Gregory J. Hampson, Rolf D. Reitz, "Two-Color Imaging of In-Cylinder Soot Concentration and Temperature in a Heavy-Duty DI Engine with Comparison to Multidimensional Modeling for Single and Split Injections", SAE paper no.980524, 1998.
- (7) 조성룡, "이색법을 이용한 직접 분사식 디젤 엔진의 화염온도 및 Soot 농도 분포 측정에 관한 실험적 연구", 건국대학교 석사학위논문, 1997.
- (8) 원영호, "레이저 시트광을 이용한 엔진 연소진단 기술", 디젤기관 배기 배출물 저감대책 기술 WORKSHOP, pp33-54, 1997.
- (9) 이명준, 박태기, 하종률, 정성식, "레이저시트광을 이용한 가시화 디젤엔진에서의 Soot 계측", 한국자동차공학회논문집 제8권 제 2호, pp64-71, 2000
- (10) 노승민, 원영호, 박정규, 최인용, 전광민, "레이저 탄성산란법, 여기적열법, 자발광을 이용한 가시화 디젤엔진의 후기연소의 2차원 soot 분포 측정", 대한기계학회 추계학술대회논문집B, pp162-167, 2000
- (11) 정종수, 이교우, "LII 신호에 대한 입사 레이저 특성의 영향", KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp45-50, 1997