

직접분사식 디젤기관의 화염 속에서 생성되는 그을음의 특성에 관한 연구

라 진 홍* · 안 수 길**
(96년 10월 28일 접수)

A Study on the Characteristics of Soots Formation in Spray Flame for DI Diesel Engine

Jin-Hong Ra* · Soo-Kil Ahn**

Key Words : Spray flame (분무화염), DI Diesel engine (직접분사식 디젤기관), Schlieren method (슈리렌법), Light extinction method (투과광감쇄법), Soot image (그을음 화상), Soot concentration (그을음 농도)

Abstract

To analyze a formation process of the soots in spray flame in the combustion chamber, an optically accessible DI Diesel engine was used for visualization.

The images of the flames and soots were visualized with high speed camera by Schlieren method and Light extinction method. The spray flame and soot images on the films were analyzed at the various engine operating conditions.

Soot distributed widely in spray flame and its concentration was about $100\text{g}/\text{m}^3$ at the position close by nozzle tip of spray flame region, however it decreased below $20\text{g}/\text{m}^3$ at the corner of combustion chamber due to soot oxidation.

1. 서론

직접분사식 디젤기관은 다른 디젤기관에 비해 열효율이 높고 연료 소비율이 낮은 장점을 가지고 있다. 이 때문에 대부분의 선박용 기관에서는 직접분사식 디젤기관을 사용하고 있다. 그러나 직접분사식 디젤기관은 가속이나 고부하 운전시, 최고압

력이 높아 소음이나 진동을 야기시킬 뿐만아니라 그을음의 배출량이 많은 단점을 가지고 있다. 특히 그을음의 배출은 육상에서는 물론, 해상 및 항만에서도 대기오염의 주원인이 되고 있다.

직접분사식 디젤기관의 그을음 배출은 기관 연소실 내로 분사된 연료의 불완전 연소에 의한 것으로 생각되나, 이의 원인을 규명하기 위해서는 연소

* 부경대학교 탐양호 기관장

** 부경대학교 공과대학 제어기계공학과 교수

실 내에서의 연소 과정과 분무화염 내에서의 그을음 생성 및 산화 과정을 보다 정확히 해석할 필요가 있다.

지금까지 디젤분무화염과 그을음 생성에 관한 연구의 한 방법으로 정적연소기¹⁾ 또는 급속압축장치²⁾ 등을 이용한 가시적 방법이 많이 시도되어져 왔다. 그러나 분위기의 온도와 압력이 연속적으로 변하는 실용기관의 경우, 연소실 내에서의 그을음 생성 및 산화에 대해서는 아직까지 명확한 해석이 이루어지지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 실용기관의 운전 상황에서 일어나는 화염 속의 그을음 생성 및 산화 과정을 보다 사실적으로 해석하기 위해, 연소실의 온도와 압력 특성이 실용기관과 유사한 가시용 기관³⁾을 이용하여 가시화 방법에 의한 화염의 거동과 화염 속의 농도분포를 조사하고자 한다.

가시화 방법으로, 화염의 거동은 슈리렌법을 적용하고, 화염 속의 그을음 농도분포는 투과광감쇄법을 적용하여 고속 촬영함으로써 연소실내 분무화염과 화염 속의 그을음을 가시화하고, 화상해석에 의해 화염의 거동과 그을음 농도분포를 분석하였다.

2. 화염과 그을음의 가시화 및 그을음의 농도 측정법

2.1 화염과 그을음의 가시화

평행입사광을 배경광으로 한 슈리렌 촬영법^{4,5)}은 측정장의 1차미분에 비례하는 광의 강도 분포가 구해진다. 이를 실린더 내에 연소하는 분무화염에 적용했을 경우, 주위 공기와 밀도구배를 갖는 연료증기의 경계층과 연소가스의 경계층 및 휘염을 발하는 화염상을 촬영할 수 있다.

투과광감쇄법⁶⁾은 평행입사광의 감쇄강도를 이용하는 것으로서, 그을음 미립자들이 존재하는 측정장에 평행입사광을 주사하였을 때, 투과광 강도는 그을음 미립자의 수밀도에 의해 감쇄되어 그 강도가 감쇄하게 된다. 이 원리를 그을음 촬영에 적용시키기 위하여, 그을음의 입자만에 의해 감쇄된 분무화염을 촬영하면 화염 속의 그을음 농도분포를

가시화할 수 있다.

2.2 투과광감쇄법에 의한 그을음의 농도 측정 원리^{6,7)}

입자의 직경 D, 수밀도 N(개/단위체적)의 입자군(粒子群)을 평행광이 통과할 때, 통과된 투과광의 감쇄는 Bouguer - Lambert - Beer의 법칙에 의해 다음과 같다.

$$\frac{I_{\lambda}}{I_{0,\lambda}} = \tau = \exp(-Q_{ext} \cdot \pi D^2 NL/4) \quad (1)$$

여기서, $I_{0,\lambda}$ 는 입사광 강도, I_{λ} 는 투과광 강도, Q_{ext} 는 입자 한 개당 감쇄계수, L은 입자군 층의 두께이고, τ_{λ} 는 투과율이다. 상기 식은 입자 수밀도가 크지 않고, 다중 산란의 영향을 무시할 수 있을 경우 입자의 구성 물질이나 크기에 관계없이 성립한다. 화염 내부의 그을음의 입자는 입자경이 20~50 μ m의 소구체(小求體)로서 가시파장 λ 에 비해 작고, 입경 파라미터 $\alpha(=\frac{\pi D}{\lambda})$ 가 0.1~0.3정도이다. $\alpha \ll 1$ 인 경우는 Mie 산란 이론에서 Rayleigh식을 적용할 수 있고, 또 그을음, 탄소, 금속 등의 유전체 물질(誘電體 物質)의 경우 산란에 의한 감쇄는 흡수에 의한 감쇄에 비해 아주 작으므로 감쇄계수 (Q_{ext}) \approx 흡수계수(Q_{abs})라 할 수 있다.

그을음의 복소굴절율을 $m=n-ki$ 라 할 때, Rayleigh식에 의한 감쇄계수는 아래와 같다.

$$Q_{ext} = \frac{24\pi D}{\lambda} f(n, k) \quad (2)$$

단, $f(n, k) = \frac{nk}{(n^2+k^2)^2 + 4\{1+(n^2-k^2)\}}$ 이다. 그을음의 밀도를 ρ_s 라 할 때, 질량농도는 $C_s = \rho_s \cdot \pi D^3 N/6$ 이므로, 이에 (1)식과 (2)식을 대입하여 정리하면 C_s 는

$$C_s = -\lambda \cdot \frac{\rho_s}{36\pi L f(n, k)} \cdot \ln \tau_{\lambda} \quad (3)$$

이 된다.

그리고, 투과광감쇄법으로 그을음을 고속 촬영하였을 때, 광의 강도와 필름에 나타난 화상농도와의 관계는 다음과 같다.

$$D_{\lambda} = \gamma \log_{10} I_{\lambda} + \text{const} \quad (4)$$

이를, $I_{x\lambda}$ 로 정리하면

$$I_{x\lambda} = 10^{\frac{D_{\lambda}}{\gamma}} \quad (5)$$

이 된다. 여기서, $D_{x\lambda}$ 는 필름의 감광농도, $I_{x\lambda}$ 는 필름에 입사하는 노광량, γ 는 필름 정수이다.

투과광 I_{λ} 에 해당하는 필름의 농도를 D_{λ} , 입사광 $I_{o\lambda}$ 에 해당하는 필름 농도를 $D_{o\lambda}$ 라면, 투과율 τ_{λ} 는

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{I_{o\lambda}} = \frac{10^{\frac{D_{\lambda}}{\gamma}}}{10^{\frac{D_{o\lambda}}{\gamma}}} = 10^{\frac{1}{\gamma}(D_{\lambda}-D_{o\lambda})}$$

가 되므로

$$\ln \tau_{\lambda} = \ln 10 \cdot \frac{1}{\gamma} (D_{\lambda} - D_{o\lambda}) = 2.3026 \cdot \frac{1}{\gamma} (D_{\lambda} - D_{o\lambda}) \quad (6)$$

이다. (6)식을 (3)식에 대입하면, 그을음의 질량 농도는 다음과 같이 나타내어진다.

$$C_s = \frac{-2.3026}{36\pi} \cdot \frac{\rho_s \cdot \lambda}{\gamma \cdot L \cdot f(n, k)} \cdot (D_{\lambda} - D_{o\lambda}) \quad (7)$$

(7)식에서, 그을음의 물성치인 복소굴절률 m 과 밀도 ρ , 그리고 필름정수 γ 와 필름의 감광농도 D_{λ} 및 광로장 L 을 구하면, 단위 체적당 그을음 입자의 질량 농도를 구할 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

3.1.1 계측용 기관

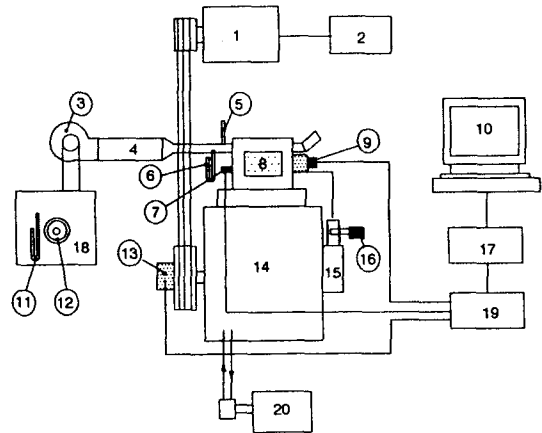
본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 크게 기관 구동계, 흡기계, 분사계, 및 데이터 수집계로 나누어진다.

사용된 기관은 Fig. 2의 연소실 형상을 갖는 가시용 계측기관으로서 관찰창의 크기는 80×40mm이고, 피스톤이 상사점에 왔을 때 80×40×26mm의 직육면체의 연소실 용적을 갖는 직접분

사식 4사이클 기관이다. 주요 사양은 Table1과 같다.

Table 1 Test engine specifications

Type : 4 stroke, 1 cylinder, DI diesel engine with rectangular combustion chamber	
Bore × stroke	: 120 × 168mm
Combustion chamber size at TDC	: 80 × 40 × 26 mm
Displacement volume	: 1900cm ³
Sight glass size	: 80 × 40 mm
Suction valve close	: 155°BTDC
Exhaust valve open	: 162°ATDC
Injection pressure	: 20MPa
Injection nozzle	
No. of orifice	: 1
Orifice diameter	: 0.2mm
l/d	: 4



- | | |
|-----------------------------|-------------------|
| 1. Running motor | 11. Manometer |
| 2. Speed controller | 12. Orifice |
| 3. Air suction fan | 13. Encoder |
| 4. Air heater | 14. Test engine |
| 5. Air temp. indicator | 15. Injection cam |
| 6. Air press. indicator | 16. Fuel rack |
| 7. Pressure transducer | 17. A/D converter |
| 8. Combustion chamber | 18. Surge tank |
| 9. Fuel valve lift sensor | 19. Amplifier |
| 10. PC for data acquisition | 20. LO pump |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

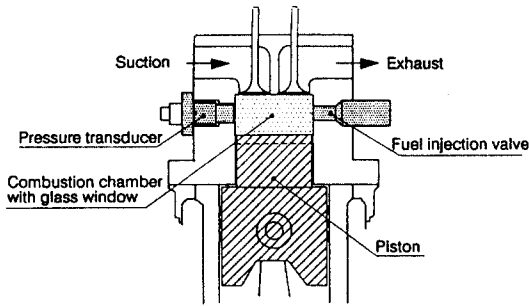


Fig. 2 Sectional view of cylinder head

기관 구동계는 ①의 구동모터와 이를 제어하는 제어기 ②로 이루어져 있고, 흡기계는 가압팬 ③과 흡기가열기 ④로 흡기의 온도와 압력을 조절한다. 분사계는 ⑤의 가변캠으로 분사시기를 임의로 조절할 수 있고, ⑥의 연료분사랙크로 분사량을 조절함과 동시에 외부 신호에 의한 원격 제어로 연료가 분사되도록 되어 있다. 연소실의 압력을 ⑦의 압력변환기로, 분사시기 및 분사기간을 밸브리프트센서 ⑧로 감지하여 A/D변환기를 거쳐 ⑩의 컴퓨터로 수집한다.

3.1.2 그을음의 가시화 장치

분무화염의 거동을 고속 촬영하기 위한 슈리렌

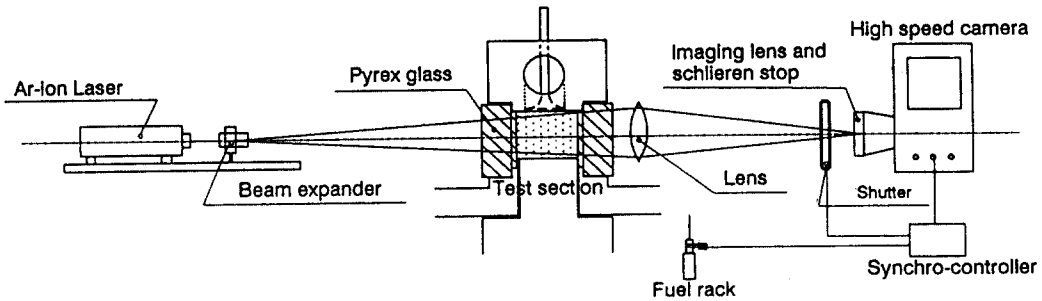


Fig. 3 Optical arrangement for Schlieren method

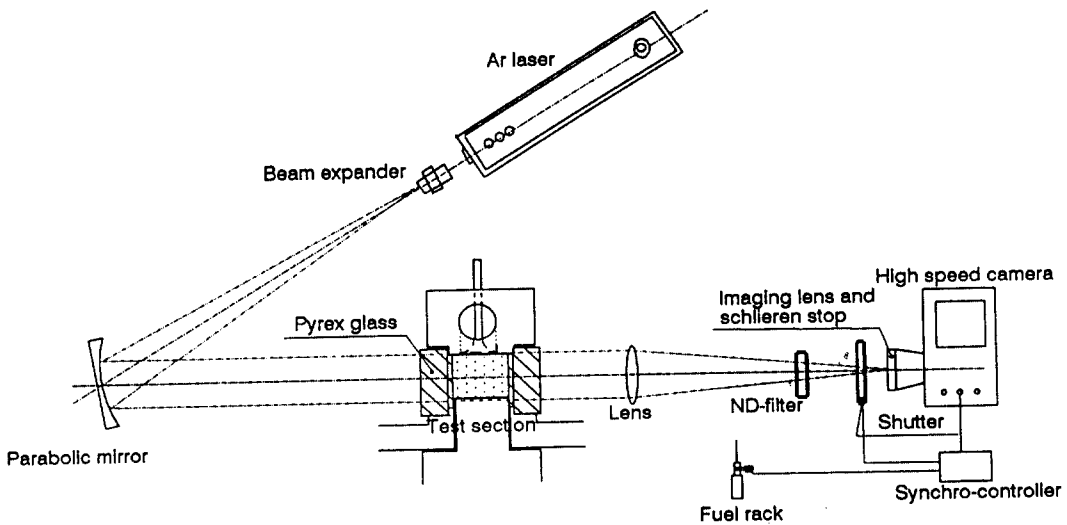


Fig. 4 Optical arrangement for Light extinction method

법의 광학 배열이 Fig. 3에 주어져 있다. 카메라는 PHOTEC의 Rotating prism 16mm용 고속카메라를 사용하였으며, 카메라 반대측에 500 mW Ar이온 레이저(파장 : 514.5nm)광을 빔 확장기로 확장하여 만든 준 평행광을 f=68mm의 렌즈로 집광하고 집광한 초점 위치에 카메라의 내장 조리개를 knife edge로 하여 촬영하였다. 고속카메라의 렌즈 앞에 설치한 셔터는 필름의 전반과 후반을 나누어 촬영할 수 있도록 한 것으로, 촬영시 고속카메라 작동 후 필름이 1/2정도 달렸을 때, 카메라에 내장된 마이크로 릴레이의 동작으로 연료레크가 투입되어, 연소실에 연료를 공급함과 동시에 셔터를 열리게 하여 필름 후반부에 분무와 화염을 촬영하고, 미촬영의 전반부 필름은 다음 촬영시에 사용하도록 하였다.

Fig. 4는 투과광감쇄법을 적용한 그을음 가시화 광학 배열을 나타낸다. 광원은 분무화염 촬영시와 동일한 Ar이온 레이저이며, 레이저로부터 나온 빔 확장기를 통해 확장된 후 오목거울(f=2000mm)에서 평행광이 되어 측정장에 주사된다. 측정장을 통과한 평행광은 집광렌즈(f=680mm)에 의해 집광되며, 카메라는 집광된 초점 위치에 설치되어 있다. 그리고 집광렌즈와 카메라 사이에 간섭필터(중심 파장 514.5nm, 반치폭2nm)가 설치되어 있으며, 이 필터는 촬영시 화염으로부터 사출(射出)되는 광역밴드의 휘염 복사광은 차단하고 측정장에서 그을음을 투과한 레이저 광원의 평행광 만을 카메라에 입사시킨다. 고속카메라 작동은 슈리렌법과 동일한 방법으로 하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 분무화염 및 그을음의 고속 촬영

Table 2는 실험조건을 나타낸다. 실험조건에 따라 기관을 운전하면서 고속 촬영을 하였다. 촬영에 사용한 필름은 분무화염의 경우 고속영화 촬영용 칼라필름을 사용하였고, 그을음의 경우 흑백의 판크로메틱 RAR2498을 사용하였다. 촬영할 때에는 두 경우 모두 셔터정수 1/10, 촬영속도 7000fps로 촬영하였으며 필름의 이송 속도를 검정하기 위해 필름 가장자리에 1KHz의 타임마크를

기록하였다.

Table 2 Experimental conditions

Engine speed : 500rpm	Injection time	Suction air temp.
Injection quantity : 44mg	17°BTDC	300K
	8°BTDC	353K
Injection pressure : 20MPa	2°ATDC	418K

3.2.2 촬영된 그을음 화상의 농도 계측

투과광감쇄법으로 화염 속의 그을음을 가시화 하였을 때, 촬영된 화상에는 화염에서 방사되는 휘염광 중에서 레이저 광원의 파장과 동일한 성분의 파장도 함께 존재하리라 추측되므로 그을음에 의한 투과광만의 화상이라고 할 수는 없다. 이에 대해, Bäcker와 Wiartalla⁸⁾의 포토다이오드를 이용한 그을음의 감쇄강도 실험에서 레이저(He-Ne)파장 632.8nm, 간섭필터 반치폭 1.0nm, 측정장과 계측장의 거리 300mm로 했을 경우, 간섭필터를 통과한 휘염광에 의한 강도비는 레이저 투과광 강도의 0.1%미만임이 확인되었다. 따라서 본 실험의 경우, 휘염광의 주 스펙트럼 영역인 적색 대역을 벗어난 중심파장 514.5nm, 반치폭 2.0nm의 간섭필터를 사용하여, 측정장과 계측장의 거리 2300mm인 원거리에서 촬영하였으므로, 화상에 존재하는 휘염광의 강도성분은 무시해도 무방하리라 판단된다.

그을음의 농도는 (7)식에 필름의 화상농도, 필름정수, 광로장 및 그을음의 물성치를 대입하여 계산할 수 있다. 필름의 화상농도의 계측은 화상해석장치(브이텍, IMAGE PRO II)를 이용하였다. 화상농도의 계측에 있어서는 먼저 계측하고자 하는 필름의 그을음 화상과 그을음 촬영전의 필름을 CCD카메라를 통해 입력하여 그을음 촬영 필름에서 그을음 촬영전의 필름 농도를 제거한 후 그을음만의 화상농도를 계측하였다. 필름정수 γ 는 노출관용도의 범위가 비교적 넓은 RAR 2498 판크로메틱 필름을 사용하여, 촬영 필름의 최고농도에서의 투과량과 최저농도에서의 투과량의 차로써 구하였다. 광로장 L는 촬영된 화상의 2차원 평면상에서 분무 축방향

에 수직인 방향의 길이로 하였으며, 그을음의 밀도 ρ_s 는 $1.8 \times 10^6 \text{g/m}^3$, 복소 굴절율은 chippet 등⁹⁾이 구한 $m=1.9-0.35i$ 의 값을 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 계측용 기관의 성능 특성

Fig. 5는 기관회전수 500rpm, 흡기온도 353K, 분사시기 8 °BTDC로 실험했을 때 수집된 데이터를 나타낸 것이다.

그래프 하부의 실선은 니들리프트 센서로부터 수집된 곡선로서 분사시기와 분사기간을 나타내는데, 그래프가 상승하기 시작하는 점이 분사 시작점이고, 일정한 값을 가진 후 하강하여 다시 "0"에 이르는 점이 분사 끝점이다.

그래프 중앙부의 일점쇄선은 압력변환기로부터 수집된 연소실내의 압력이며, 점선은 압력센서로부터 계산된 압력상승률 곡선이다. 실린더 내 피스톤이 TDC로 향함에 따라 압축력에 의해 압력이 상승하며, 분사 시작 후 일정 기간 경과 뒤 착화가 일어나면 압력이 급격히 상승하여 최고치에 이르

게 되고, 이후 다시 감소한다.

압력상승률 곡선에서 압력상승률이 증가하기 시작하는 점을 착화점, 압력상승률이 "0"인 점을 최고압력점이라 정의하면, 분사시작점으로부터 착화점까지의 기간을 착화지연이라 할 수 있다.

Fig. 6은 흡입공기 온도와 분사시기를 변경했을 때 착화지연, 착화 후 최고압력점에 도달하는 시간 및 최고압력값을 도표로 나타낸 것이다. 동일 분사시기에서 흡입공기온도가 높을 수록 착화지연은 짧아지는 반면, 착화 후 최고압력에 이르는 시간은 길어지고 최고압력값은 낮게 나타나고 있다. 이는 흡입공기온도가 높을 수록 예혼합기의 양이 적기 때문인 것으로 판단된다. 한편 착화 후 최고압력에 이르는 시간과 최고압력값에 대해 착화지연이 비슷한 17 °BTDC와 2 °ATDC의 경우를 비교하면, 17 °BTDC의 경우가 2 °ATDC 경우보다 아주 크게 나타났다. 이러한 경향들은 연료분사 시작시의 분위기 조건이 다름에 따라, 착화에 이르기까지의 연료의 증발현상과 연소실 공간 내 공기와 혼합 과정이 상이하고, 또한 착화 후 연소과정이 이에 상당한 영향을 받기 때문이다¹⁰⁾.

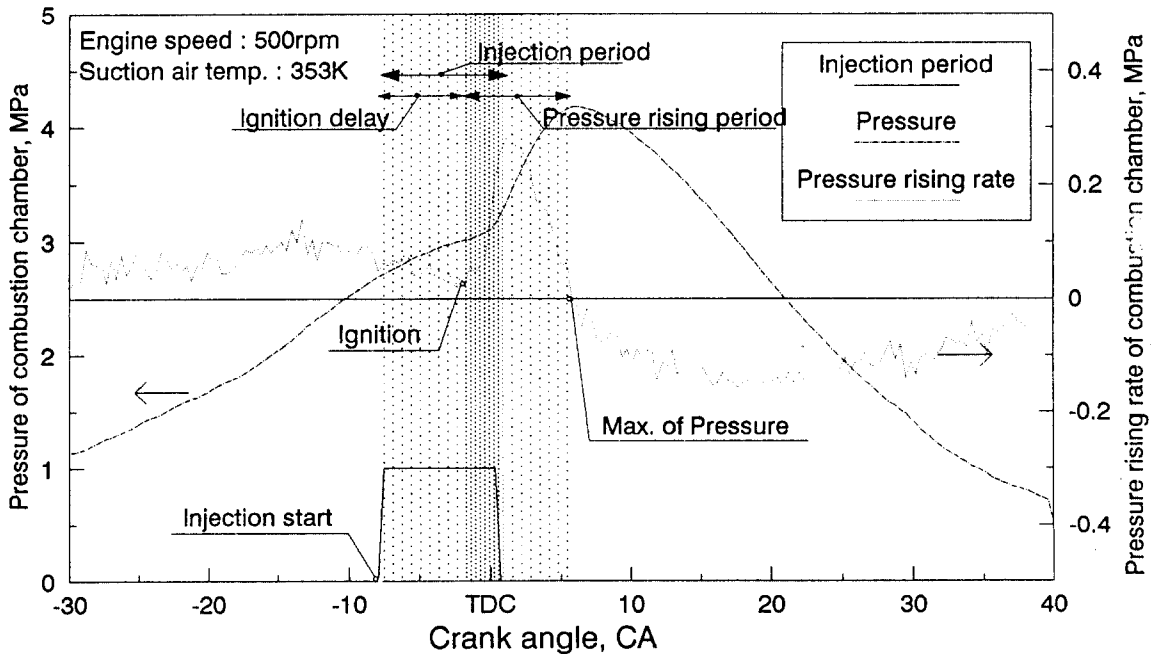
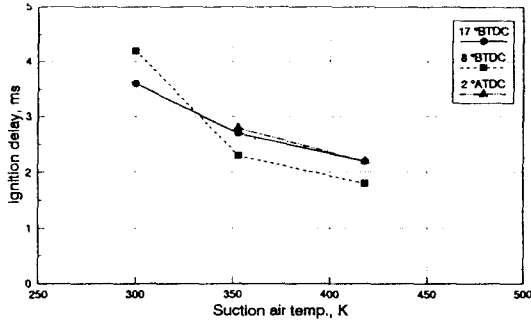
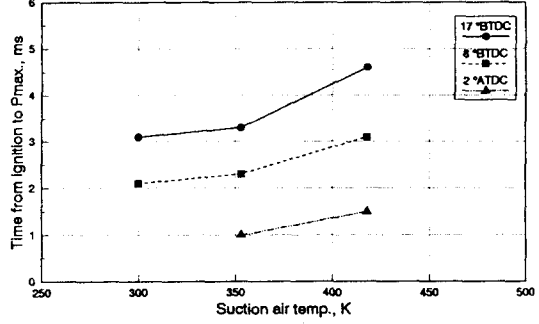


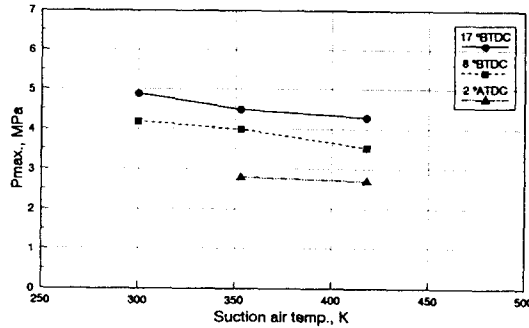
Fig. 5 Typical covers of the acquired data for test engine



(A) Ignition delay



(B) Time from ignition to Pmax.



(C) Pmax.

Fig. 6 Values of ignition delay(A), time from ignition to Pmax.(B), and Pmax.(C) on suction air temperature and injection time

4.2 분무화염의 거동

Photo. 1은 슈리렌법으로 칼라 촬영한 예이다. 기관회전수 500rpm, 분사시기 17 °BTDC, 흡기온도 353K인 경우이다. 연료가 분사된 후 착화에 의한 화염이 출현할 때까지는 분무의 그림자가 촬영되었고, 분사 후 약 1.5ms에서 분무선단이 연소실 벽면 가까이 접근하고 있다. 2.91ms에서 착화에 의한 화염이 최초로 출현한다. 이 사진에서, 휘염광 주변에 넓은 범위의 짙은 그림자 윤곽이 존재하는 것으로 보아 연료 증기가 그곳까지 분포하고 있음을 추정할 수 있다. 즉, 슈리렌법으로 촬영한 투영 사진은 분무액적의 그림자, 그리고 연료증기와 공기와의 혼합 경계층에서의 밀도구배 등에 의해 나타나는 투영상이므로, 착화시 휘염광 주변에 넓게 분포하고 있는 짙은 그림자 윤곽은 증발된 혼합기가 존재하는 영역임과 동시에 착화시의 예혼합연소 영역임을 알 수 있다.

착화 후 휘염광은 분무제트를 감싸면서 팽창하여 분무 하류로 확대해가고 있으며 시간 경과와 더불어 짙은 황색에서 밝은 백색으로 바뀌어간다. 여기서 짙은 황색은 연료 과농 상태에서 연소될 때 생성된 그을음이 발하는 휘염광이며, 이것이 연소 진행과 더불어 산화하면서 밝은 백색염으로 된다¹¹⁾. 그리고 화염은 착화후 8ms이후인 연소 말기까지 진행되어도 피스톤헤드부에 짙은 황색이 부분적으로 존재하고 있다. 이것은 화염이 상대적으로 낮은 온도의 피스톤에 의해 냉각되어 연소가 지연되기 때문이며 그을음 성분이 더 이상 산화하지 못하고 동결(Freezing)되어 가는 상태로써, 이것이 연소 완료하지 못할 때 배기 과정에서 그을음 상태로 기관밖으로 배출되는 것이라 판단된다.

4.3 그을음의 생성과 산화 특성

Photo. 2는 흡기온도를 353K로 하고 분사시기를

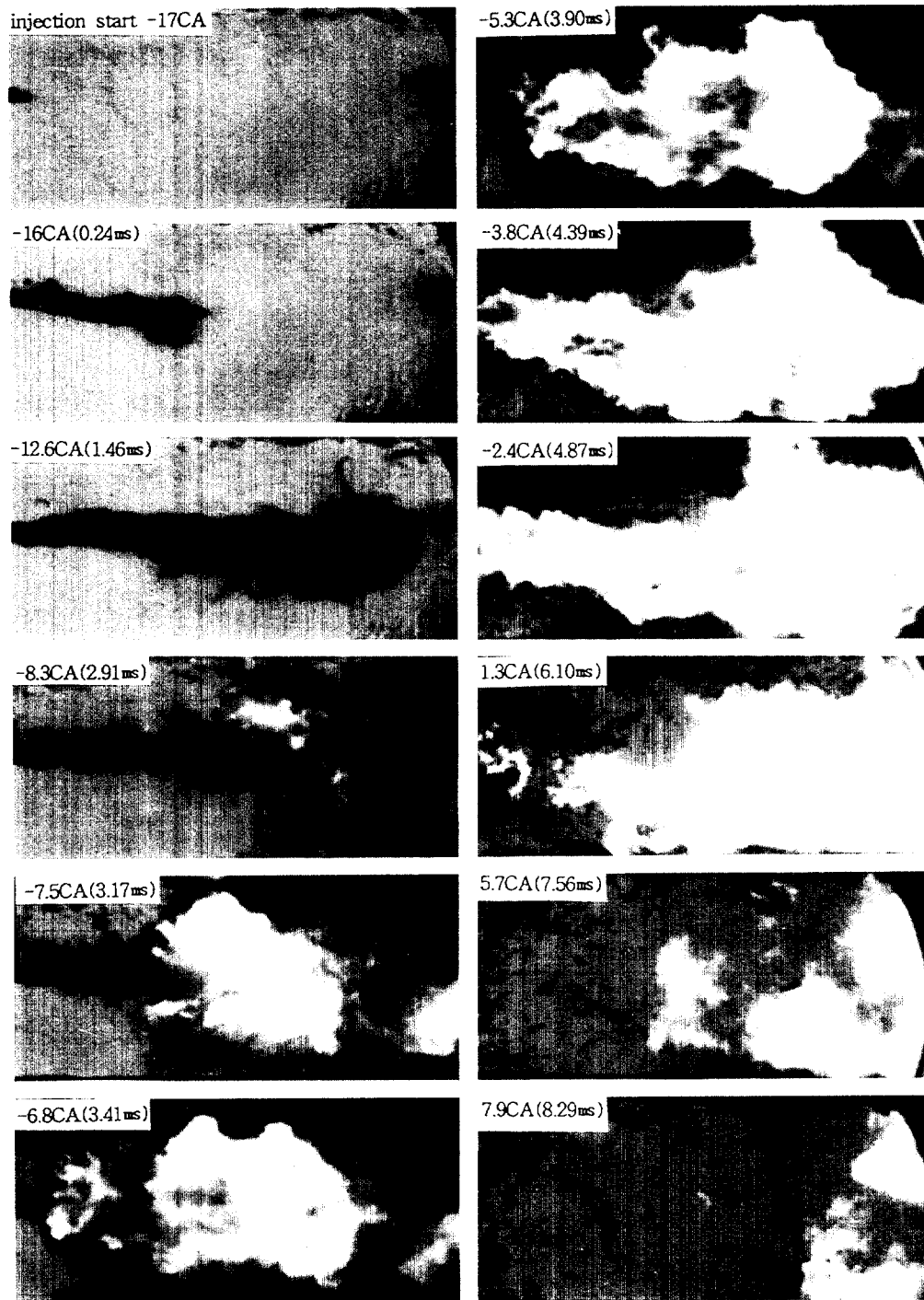


Photo. 1 Photographs of evaporating sprays and flames by schlieren method(injection time 17°BTDC, suction air temp. 353K)

17 °BTDC로 한 경우의 투과광감쇄법으로 촬영한 사진이다. 이때의 착화지연은 약 2.8ms였다. 따라서, 좌측 상단 2개의 사진은 분무에 의한 그림자 화상이고 -8.2CA(2.93ms)이후의 사진이 화염 속의 그을음 미립자 및 그때까지 증발완료하지 못한 분무의 그림자 화상이라 할 수 있다.

착화 직후의 화상을 Photo. 1의 화염사진과 비교해 볼 때, Photo. 1에서는 강력한 휘염을 발하는 화염 화상이고 Photo. 2에서는 중앙부에 그을음의 그림자 화상이 존재하므로, 휘염을 발하는 화염내부에서 그을음이 생성되고 있음을 알 수 있다. 이로써, 그을음은 화염막에 의해 주위 공기와 차단된 화염 내부의 연료 과농 혼합기내에서 생성된다는 것을 사실적으로 보여주고 있다. 그리고 분사시의 관성력에 의해 연료 과농 혼합 영역이 분무 화염의 하류 방향으로 이동해 감에 따라 그을음 덩이도 함께 이동하면서 산화되어 가고 있다. 이 그을음 덩이가 분무 하류로 이동해 가면서 상대적으로 온도가 낮은 연소실 벽면에 부딪히면 화염의 온도 저하로 그을음의 연소가 지연되는데, 마지막 화상인 1.54CA(6.18ms)의 그을음 그림자 사진이 이후의 화상에서도 면적 감소없이 지속된 것으로 보아(촬영한 필름으로 확인) 연소실 벽면의 온도 영향으로 화염이 소멸상태에 이르러 그을음의 산화가 더 이상 진행되지 못하고 중지되어 배기 상태의 그을음으로 남게 된다는 사실도 함께 보여주고 있다

4.4 화상에 의한 그을음 분포 해석

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10은 운전 조건에 따른 그을음의 화상농도를 화상해석장치로 계측하여 등농도분포도를 작성한 결과이다. 각 그림에서 상부의 그림은 확산연소 초기의 화염 내부의 그을음 농도로서, 분사 완료 후 1ms 이상 경과한 화상에서 계측한 값이다. 가운데 그림은 연소 중기인 착화 후 5ms 전후의 것이며, 하부의 것은 연소 후기에 해당하는 8ms 이후의 것이다. 그림에서 외곽선이 연소실 관찰창의 크기에 해당하고, 하부 수평면이 피스톤헤드부이며, 좌측 외곽선 중앙에 노즐이 위치하고 있다.

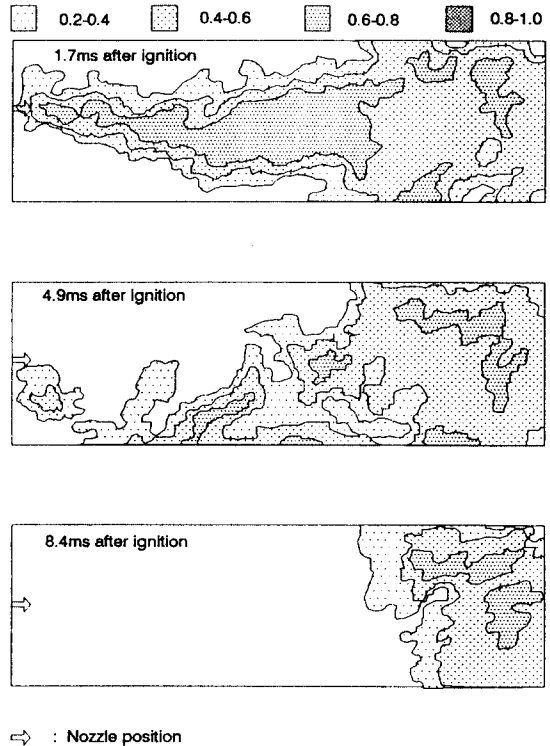


Fig. 7 Soot image densities of film at suction air temperature 418K(injection time 17°BTDC)

Fig. 7은 흡기온도 418K, 분사시기 17 °BTDC로 했을 때의 그을음 화상의 농도분포도이다. 여기서, 표시된 수치는 “0”인 경우가 입사광이 감쇄없이 모두 투과된 상태를 나타내고 “1”인 경우가 그을음에 의해 입사광이 모두 감쇄되어 투과광이 없는 상태를 나타낸다.

착화 후 1.7ms 경과했을 때, 분무의 상류역에는 0.6이상의 농도영역이 비교적 넓게 분포하고, 하류역에는 0.6이하의 농도분포영역이 대부분이며, 부분적으로 0.6이상의 농도역이 존재한다. 4.9ms 경과한 후에는 0.6이상의 농도영역이 부분적으로 존재하고 대부분이 0.6이하의 농도를 나타내고 있다. 연소 후기인 8.4ms 경과한 후에는 그을음 전체가 분무 하류 연소실 벽면 부근에 분포해 있고 0.6이하의 농도역이 대부분이며 부분적으로 0.6이상의 농도역이 존재하고 있다.

Fig. 8은 분사시기가 Fig. 7과 같으나 흡기온도

가 이보다 낮은 353K인 경우의 화상농도분포도이다. 연소 초기에는 분무화염의 상류에 0.8이상의 높은 농도역이 분포하고 있으나, 중기와 후기에는 Fig. 7에 나타난 결과와 유사하며, 그늘음이 존재하는 크기와 위치도 비슷하다. 따라서, 이 경우에는 흡기온도가 어느 정도 변화여도 중, 후기의 그늘을 생성에는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

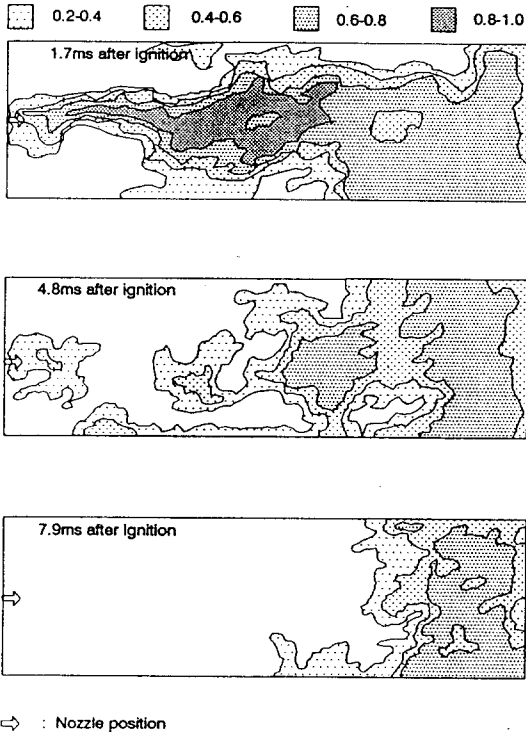


Fig. 8 Soot image densities of film at suction air temperature 353K(injection time 17°BTDC)

Fig. 9는 흡기온도 418K, 분사시기 8°BTDC로 한 경우의 그늘음 화상의 농도분포도이다. 연소 초기인 1.5ms에서는 화상의 농도분포가 동일 흡기온도에서 분사시기 17°BTDC로 한 경우와 유사한 화상농도 분포를 나타내고 있다. 반면에 연소 중기인 5.0ms에서는 분무 하류에서의 그늘음 분포영역이 17°BTDC의 경우보다 넓게 분포하고 있다. 그리고 연소 후기인 8.1ms에서는 분무 하류에서 농도

분포가 17°BTDC의 경우보다 더 넓은 영역에 걸쳐 분포하면서 0.6이상의 농도값을 갖는 영역도 넓게 존재하고 있다.

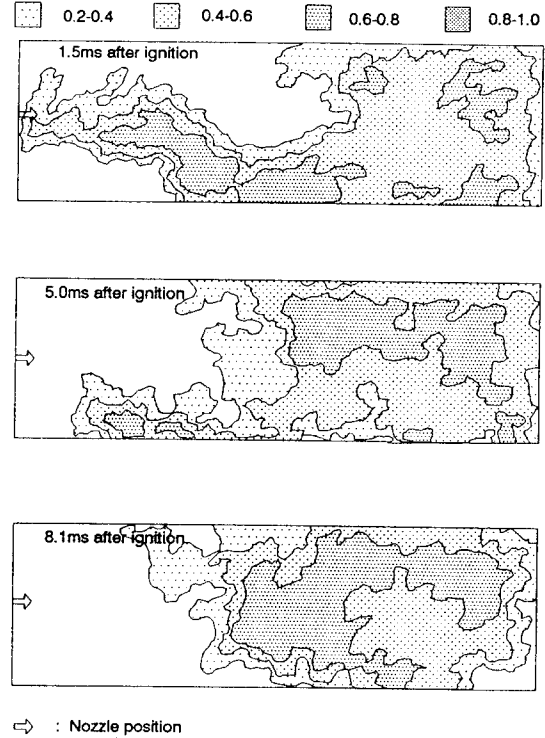


Fig. 9 Soot image densities of film at suction air temperature 418K(injection time 8°BTDC)

Fig. 10은 흡기온도 418K, 분사시기 2°ATDC로 한 경우의 그늘음의 화상농도분포도이다. 연소 후기에 연소실 면적의 %에 걸쳐 그늘음이 분포하고 있고, 0.8이상의 화상농도영역도 존재한다.

이상의 계측 결과에서 동일 흡기온도에서 분사시기를 변경했을 경우, 연소 후기의 그늘음 화상농도분포가 크게 변한다는 것을 알 수 있는데, 그 이유는 분사시기를 변경했을 경우 연소기간 중의 분위기 상황이 크게 변화했기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 17°BTDC에서 분사한 경우에는 연소가 피스톤이 압축행정 중인 상태이거나 TDC에 가까운 위치 즉 고온 고압의 분위기 속에서 이루어지는 반면, 분사시기를 늦게 하여 TDC이후에 분사가

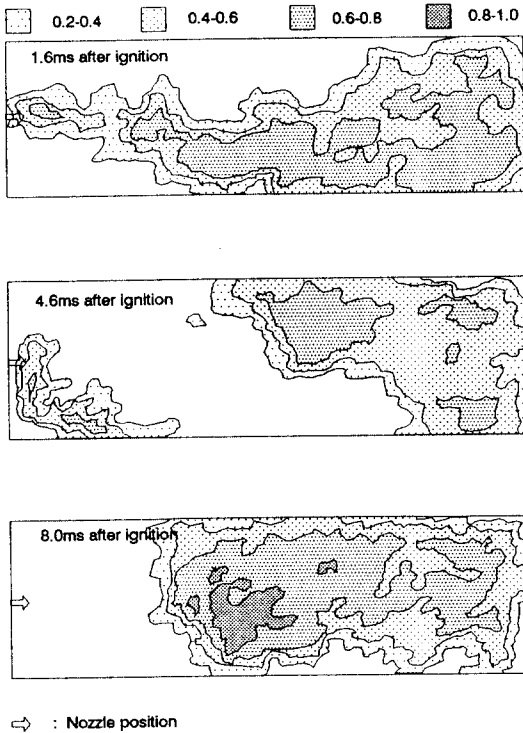


Fig. 10 Soot image densities of film at suction air temperature 418K(injection time 2°ATDC)

이루어졌을 경우에는, 연소가 TDC를 지난 팽창행 정 중에 이루어지므로, 연소기간 중의 분위기 온도가 낮아지는 등의 연소 분위기가 변하기 때문이라 판단된다.

이상과 같이 그을음의 화상농도 분포도에 의해 분사시기를 변경함에 따라 분무화염 속의 그을음 농도분포에 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 이들의 실제 그을음 농도를 정량적으로 비교해 보기 위해 분사시기 17°BTDC와 2°ATDC에서의 그을음 농도를 계산하여 그 농도분포도를 작성하였다. Fig. 11, Fig. 12는 이를 나타낸다.

Fig. 11은 흡기온도 418K에서 분사시기를 17°BTDC와 2°ATDC로 했을 때, 연소 초기 상태의 화염 속의 그을음 농도분포도이다. 17°BTDC와 2°ATDC 모두 분무화염의 상류측 분무 중심축방향에서 최대치를 나타내고 하류측으로 갈수록 그

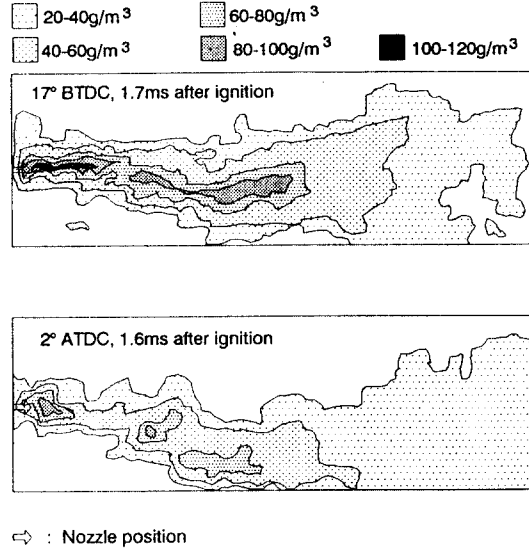


Fig. 11 Soot concentration maps of diesel flames calculated from film image at the early stage of diffused flame with respect to injection time(suction air temp., 418K)

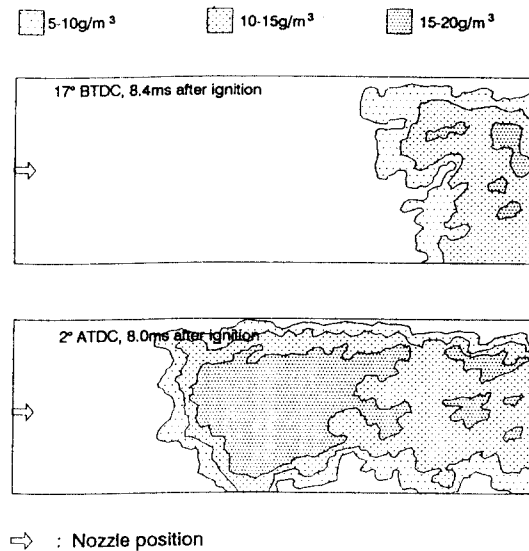


Fig. 12 Soot concentration maps of diesel flames calculated from film image at the end stage of diffused flame with respect to injection time(suction air temp., 418K)

값이 낮게 나타나고 있으며, 분무화염의 상류측에서 17 °BTDC의 경우 최대 100~120g/m³, 2 °ATDC의 경우 80~100g/m³의 농도가 분포하고 있다.

Fig. 12는 연소 후반기의 그을음 농도분포를 나타낸 것으로 그을음은 분무화염의 하류방향에 분포하고 있으며, 이 때의 그을음 농도는 17 °BTDC의 경우 10~15g/m³의 부분이 많고, 2 °ATDC의 경우는 15~20g/m³의 부분이 넓은 영역에 걸쳐 분포하고 있다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 연소 초기에는 연료가 과농 상태인 분무화염의 상류측에서 대체로 100g/m³대의 높은 그을음 농도를 나타내며, 이것이 시간 경과와 더불어 분무화염 하류로 이동하면서 산화되어 연소 후기에 이르러면 분무화염 하류측 연소실 벽면부에 20g/m³미만의 저농도 그을음이 분포하게 되나, 분사시기가 늦은 2 °ATDC의 경우는 피스톤의 하강에 의한 분위기 온도 강하로 그을음의 산화가 지연되어 15~20g/m³대의 농도역이 넓은 영역에 걸쳐 분포하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

가시용 직접분사식 디젤기관에 흡기온도와 분사시기 등을 달리하여 연소실내의 분위기 조건을 변화시켰을 때, 연소실내에서 연소하는 분무화염과 화염 속의 그을음을 슈리렌법 및 투과광감쇄법으로 고속촬영하여 그 거동을 비교 분석하고, 그을음의 시간적 공간적 분포상태를 해석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 화염 내부의 그을음을 가시화할 수 있었고, 이로부터 그을음은 화염막에 의해 주위 공기와 차단된 화염 속의 연료 과농도 혼합기 영역내에서 생성되었다.
- 2) 화염 내부의 그을음은 분무화염의 하류방향으로 이동하여 상대적으로 저온인 연소실 벽면에 닿게 되면 산화가 지연되어 그을음으로 대기중에 배출됨을 확인하였다.
- 3) 화염중의 그을음은 연소 초기에 분무화염의 상류 측에서 100g/m³대의 높은 농도값을 가지나, 시간경과와 더불어 산화되며, 연소 후기에서는

분무화염 하류의 연소실 벽면부에서 20g/m³미만의 저 농도를 나타내었다.

- 4) 동일 흡기온도에서 분사시기가 늦어지면 연소 후기에 피스톤의 하강 운동에 의한 연소실의 분위기 온도 저하로 그을음의 산화가 지연되어 15~20g/m³대의 농도역이 넓은 영역에 걸쳐 분포하였다.

참고문헌

- 1) C. F. Edwards, etc., "A study of the autoignition process of a diesel spray via high speed visualization", SAE 920108, 1992
- 2) 小林 外2人, "急速壓縮装置によるディーゼル燃焼に関する研究", 日機論, 48卷26號, 昭57-2
- 3) Lee, D.B., "On the characteristics of DI Diesel Engine with Rectangular Visualized Combustion Chamber", M. thesis, National Fisheries University of Pusan, 1994
- 4) Wolfgang Merzkirch, "Flow Visualization", Academic Press, pp.115~149
- 5) 流れ可視化學會, "流れの可視化ハンドブック", 朝倉書店, pp.312~318, 1986
- 6) レーザ計測ハンドブック 編集委員會, "レーザ計測ハンドブック", 丸善(株). pp.201~203, 1993
- 7) 安秀吉, "畫像解析法によるディーゼル噴霧・火炎に関する研究", 博士論文, 東京工大, 昭56
- 8) Bäcker H., and Wiartalla A., "Application of Light Extinction Method for the Investigation of Soot Formation during Combustion in a Model Chamber", COMODIA 94, 1994
- 9) S. Chippet and W. A. Gray, "Combustion and Flame", pp.149, 1978
- 10) 라진홍, 이덕보, 안수길, "가시용 직분식 디젤기관의 분무와 화염에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 19권3호, 1995
- 11) 永瀬 外2人, "ストロークカメラを用いたディーゼル火炎分光法とその測定結果", 日機論, 55卷515號, 1989