

〈논 문〉 SAE NO. 97370040

## 디젤엔진에서 국소 순간 화염온도와 Soot 생성 및 산화에 관한 연구

### A Study on the Local Instantaneous Flame Temperature and Soot Formation and Oxidation in a Diesel Engine

이 선 봉\*, 이 태 원\*, 하 중 룰\*\*  
S. B. Lee, T. W. Lee, J. Y. Ha

#### ABSTRACT

The instantaneous flame temperature and soot formation and oxidation in a D. I. diesel engine are measured by using a two-color method. The proposed method based on the continuous spectral radiation from the soot particles in flames is applicable to industrial diesel engines without major modifications of their main characteristics. Measurements are performed at one location inside the combustion chamber of a D. I. diesel engine. Effects of different engine speeds and loads on flame temperature and KL factor which is an index of soot concentrations were examined. A little temperature change were observed with increasing engine speed, while increased with loads. The higher the flame temperature is, the lower the KL factor is.

주요기술용어 : Two-Color Method(이색법), D.I.Diesel Engine(직접분사 디젤엔진), KL Factor(KL치), Flame Temperature(화염온도), Soot(그을음)

#### 1. 서 론

디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 낮은 연비와 높은 열효율을 지니는 장점을 가지나, 연료분사에 따른 혼합비 불균일에 의해 부분적으로 과농후한 부분과 희박한 부분이 연소실 내에 시간적 및 공

간적으로 분포하는 특징이 있다. 특히 유해배출 가스 측면에서는 NOx와 soot의 생성이 사회적 문제점으로 되고 있다.

최근, 이들 유해배출가스 저감을 위해 EGR, 분사시기 지각 등의 방법을 통해 연소실 내의 화염온도를 저하시켜 NOx를 저감하는 방법을 시도하고는 있으나 출력, 경제성의 저하와 HC, soot 등 배출물 증가의 문제점이 있어, 현재로서 이들의 동시 저감은 힘든 실정이다.

따라서 근본적인 연소개선을 통한 NOx, soot

\* 동아대학교 대학원

\*\* 정희원, 동아대학교 대학원

\*\*\* 정희원, 동아대학교 기계공학과

의 저감을 위해 이들의 생성과 소멸에 밀접한 영향을 미치는 화염온도 계측을 위하여 많은 연구가 수행되고 있다.<sup>1)~3)</sup>

연소실 내의 화염온도 계측을 위한 여러 방법 중 이색법(Two color method)은 화염온도와 화염 내의 soot 농도에 관한 정보인 KL치가 동시에 얻어지기 때문에 soot의 생성과 산화 과정을 조사하기 위한 유효한 방법이다.<sup>4)~5)</sup> 또한 광화이버를 이용한 점계측 이색법의 경우엔 압력센서의 설치 공간이면, 충분히 이색법 프로브를 설치할 수 있어서 기존 연소실 형상의 커다란 변경이 없이도 설치가 간단하며, 정도 높은 계측이 가능하다.

본 연구에서는 연소실 내의 화염온도와 soot 생성과 산화 과정의 파악을 위해 광화이버를 이용한 이색법을 사용하였다. 초기 조건으로 분사 시기를 정상분사시기인 BTDC 19° 보다 다소 지각된 BTDC 13°에서 회전수, 토크 등을 변화시켰을 때 연소실 내 크랭크 각도에 따른 화염온도, 연소압력, 연소기간 등의 계측을 통해 화염온도가 soot의 생성과 소멸에 미치는 영향에 대하여 밝혔다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 이색법 원리

화염의 절대온도를 T, 임의파장  $\lambda$ 에 있어 흑체의 복사휘도(radiation brightness)  $N_b(\lambda, T)$ 는 가시역의 파장에서 Wien의 식을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} N(\lambda, T) &= \epsilon_\lambda N_b(\lambda, T) \\ &= \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \\ &= N_b(\lambda, T_s) = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T_s) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $C_1, C_2$ 는 Plank의 정수이며,  $T_s, \epsilon_\lambda$ 는 각각 비흑체로 간주했을 때의 화염의 휘도 온도와 화염의 단색 복사율이다. diesel 화염에서 soot의 단색복사율은 Hottel-Broughton에 의해 식 (2)로 정의된다.

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp(-KL/\lambda^\alpha) \quad (2)$$

K는 흡수계수, L은 측정 광축방향의 화염두께이고,  $\alpha$ 는 한정된 파장의 정수로 가시역의 파장에서는  $\alpha=1.38$ 로 정해진 상수이다. 위의 식 (1)과 식 (2)로부터 KL에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_1^{\alpha} \ln [1 - \exp(\frac{C_2}{\lambda_1} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{s1}}))] \\ = \lambda_2^{\alpha} \ln [1 - \exp(\frac{C_2}{\lambda_2} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{s2}}))] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 두 휘도온도인  $T_{s1}, T_{s2}$ 는 실험을 통해 파악되는 값이므로, 화염의 진온도 T를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 진온도 T를 식 (3)에 대입하면 KL치 까지도 구할 수 있다.

### 2.2 실험 장치 및 방법

이색법에서의 파장선택은 측정 조건에 따라 가시역, 적외역의 파장을 선택할 수 있으나, 본 실험에서는 가시파장역인 550nm와 상대적으로 넓은 온도범위 측정을 위해 적외역에 근접한 755nm를 사용하였다. 이들 두 파장대는 1400K~2500K 범위 내에서 온도에 따른 단색복사강도 변화의 기울기가 크며, 또한 화학발광이나 라디칼발광의 영향이 적은 영역이다.

광 프로브의 위치는 분무축상에서 스윙의 방향과 실린더 헤드의 구조적 제한이 실린더 헤드 상부 노즐의 간섭 등을 고려하여 설치하였다. Fig. 1은 본 실험장치인 연소실 내의 화염으로부터 복사광을 받아들이는 광 프로브의 설치 위치를 나타낸다.

측정 화염은 4공으로부터의 네 분무중 한 분무의 측정부에서 측정되며, 측정 위치는 분공으로부터의 거리 13.8mm 지점의 분무 표면상이며 직경 3mm 원에서 광화이버에 입사된 광량으로 계측한다. 계측시야 각도는 5°로서 임의의 크랭크 각도에서 측정된 화염온도는 계측시야 내의 평균온도에 해당되며, 피스톤이 팽창할수록 계측되는 시야면적은 증가하게 된다.

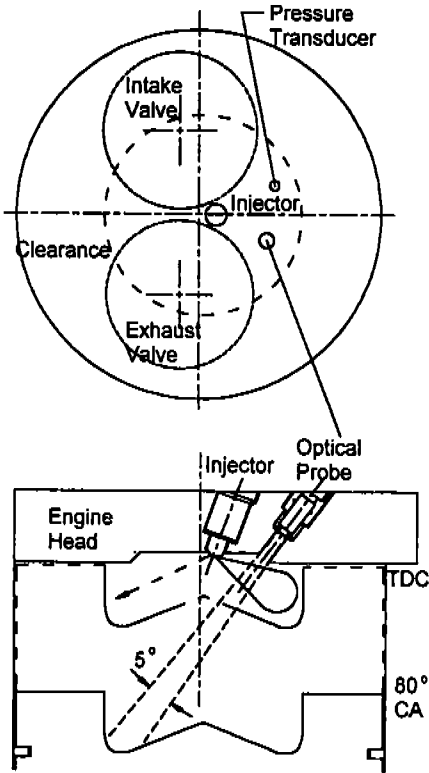


Fig.1 Optical window relative position to the combustion chamber and location of the observation

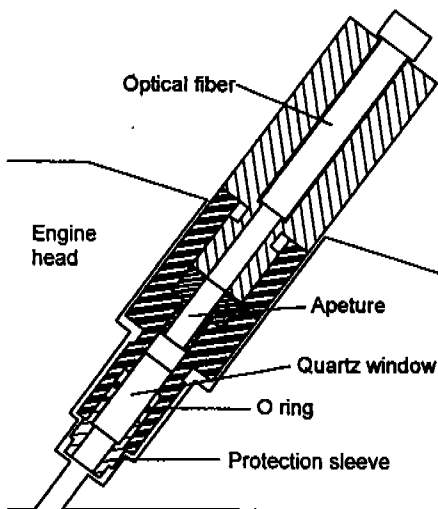
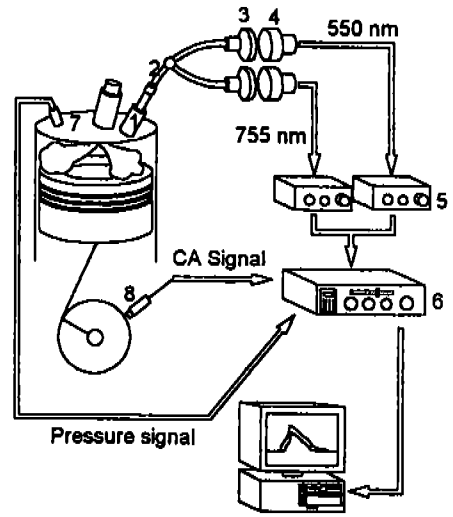


Fig.2 Schematic drawing of the optical probe apparatus



- 1. Optical probe
- 2. Optical fiber
- 3. Band pass filter
- 4. Photo diode
- 5. Photo sensor amp.
- 6. Synchronizing system
- 7. Pressure transducer
- 8. Encoder

Fig.3 Schematic drawing of the two-color measuring apparatus

실험에 사용된 광프로브는 직접 설계·제작을 하였으며 Fig.2에 광 프로브의 단면도를 나타낸다. 광 프로브 내의 광을 채취하는 채취창은 투과 특성이 좋으며, 연소실 내의 고온과 고압에도 견딜 수 있는 직경 6mm, 길이 17mm의 석영유리를 사용하였으며, 오링을 사용하여 연소실 내의 기밀을 유지하였다.

실 엔진을 구동시 soot에 의한 창 의 오염으로 인해 광 신호가 저하되는 문제점이 발생한다. 예비실험에서 광 신호강도가 정상적인 조건과 거의 변화가 없음을 확인한 시간대가 20분정도이다. 따라서 본 실험에서는 엔진을 구동후 20분 마다 광프로브 내의 창 의 오염을 제거해 가며 실험하였다.

본 실험에서 실 엔진을 사용한 화염온도 및 KL치를 얻기 위한 실험장치의 개략도를 Fig.3에 나타내었다.

시험엔진은 단기통 직접분사식 4 사이클 디젤 엔진으로 피스톤은 토로이달 형상(toroidal type)이며, 수동력계를 사용하여 부하를 조절하였다.

실린더 헤드 윗면에는 2개의 구멍을 뚫어 압력과 광을 채취할 수 있는 어댑터를 설치하였다.

광프로브에 의해 채취된 광은 광화이버에 의해 광량이 정확히 양분되어 각각 밴드패스필터(band pass filter)를 거치면서 550nm, 755nm의 2 파장만으로 되어 포토 다이오드(Hamamatsu S2281-01)에 의해 전류로 변환되며, 포토센서 앰프(Hamamatsu C2719)에서 증폭된다. 포토센서 앰프의 아날로그 출력 전압을 A/D 변환기를 통해 71 $\mu$ s간격으로 디지털 신호로 변화시켜 컴퓨터에 입력되도록 하였으며 이때 입력된 각각의 전압을 진온도와 KL 치를 계산하였다.

연소기간 계측 시에는 광량의 증가를 위해 광화이버를 통한 광을 밴드패스필터를 통하지 않고 바로 포토 다이오드로 전송한 후 포토센서 앰프에서 증폭하여 계측하였다.

550nm, 755nm인 두 휘도온도와 출력 전압과의 관계를 검정하기 위해서 흑연관 흑체로(黑鉛管 黑體爐; 2" dia blackbody type IV, thermogage, Inc.)를 사용했으며 검정곡선과 검정데이터와는 각각 98.0%, 98.0%의 정도로 일치했다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig.4는 엔진의 회전수 2000rpm, 토크 7.3N·m에서 이색법으로 측정된  $T_a$ ,  $T_b$  그리고 진온도

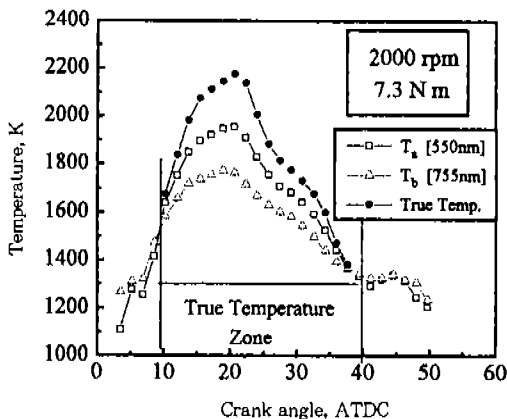


Fig.4 Relationship between true temperature and brightness flame temperature

T를 크랭크 각도에 대하여 나타낸 것이다.

화염이 관찰된 영역은 ATDC 3°~50°이나, ATDC 3°~10°까지의 초기 화염부분과 40° 이후인 후연소말기 기간에서  $T_a < T_b$ 인 경우가 발생하여 진온도 측정이 불가능하였다. 이는 화염에서 soot 성분 외에 연료가 열분해한 탄화수소 및 적외활성기체의 밴드 등과 피스톤 표면과 연소실 벽면반사의 영향 등이 적외역에 근접한  $T_b$  (755nm)에 영향을 미치며, 매연 입자가 클수록, 그리고 파장이 짧을수록 산란의 영향도 커지므로 상대적으로 단파장인  $T_a$  (550nm)에서 산란의 영향인 것으로 생각된다.<sup>6)</sup>

Fig.5는 엔진 회전수 1300rpm, 분사시기는 정상분사시기보다 다소 지각된 BTDC 13°이며, 토크 [(a) 0.3, (b) 7.3 (c) 12N·m] 변화에 따라 연소압력, 열발생률, 화염온도 및 KL치를 크랭크 각도에 대하여 함께 나타낸 것이다.

각 시험조건에서 화염온도와 KL치는 측정된 30회 사이클중 임의의 각 2회, 3회 사이클에 대한 시험결과를 함께 나타내었다. 이는 연소실 내에서 발생하는 사이클변동과 유동형태에 따른 화염형태의 변동 등에 따른 비정상적인 조건에서 화염온도와 KL치의 관계를 확인하기 위해서이다.

측정된 연소압력은 30회 앙상블 평균한 값으로 나타내었으며, 열발생률은 연소압력을 3차 5점 최소자승법을 이용하여 평탄화한 값으로 구했다.

무부하에 해당하는 토크 0.3N·m인 (a)에서 연소최고압력은 분사시기 지연으로 인해 ATDC 15° 부근에서 최고 압력을 보이며, 대체로 원만함 압력구배를 보인다. 열발생률의 경우 TDC 부근부터 열발생은 시작되며 ATDC 12° 부근에서 최대치를 보인 후 ATDC 60° 부근에서 연소가 종료된 것으로 판단된다.

진온도 계측 가능각도는 ATDC 12°부터 32°사이이며 최고화염온도는 1800K 부근이다. KL치는 열발생률 최대치 이후 다소 증가하다가 19° 이후부터 연소종료시까지 거의 일정한 0.25 이하의 값을 보인다. 크랭크각 19°~30° 구간에서는 두 사이클 모두 화염온도가 1500K~1800K까지 변할지라도 KL치는 0.25이하로 거의 일정한 경향을 보인다.

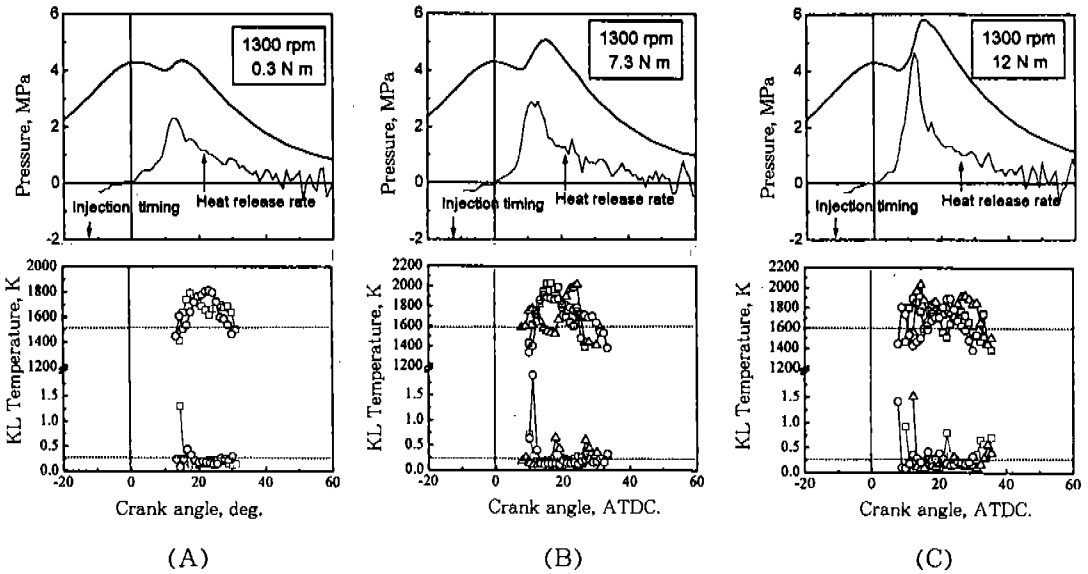


Fig.5 Cylinder pressure, heat release rate, flame temperature and KL's at different loads at 1300rpm

본 실험 조건에서 KL치가 가장 낮은 경향을 보인 1300rpm, 토크 0.3N·m의 KL치가 일정치 이하로 떨어지는 경계점인 0.25를 기준값으로 정하여, 각 시험조건에서 KL치 해석을 위한 기준치로 사용하였다.

2/4부하에 해당하는 토크 7.3N·m인 (b)는 3회의 사이클 모두 화염온도의 구배가 다른 형태를 보이며, 진온도 계측 가능각도는 ATDC 7°부터 33°이고, 최고화염온도는 2020K 부근이다. 계측초기부분인 7°~12° 구간에서 KL치가 증가한 후 13°~33° 구간에서는 3회의 사이클이 화염온도가 1560K~2020K의 큰폭으로 변할 지라도 KL치는 0.25이하로 거의 일정한 경향을 보인다.

3/4부하에 해당하는 토크 12N·m인 (c)에서 진온도 계측 가능각도는 ATDC 6°부터 38°이며, 화염최고온도는 2030K 부근이다. 13°~30° 구간에서 3회 사이클의 화염온도가 1600K~2030K의 온도범위 내에서 KL치가 0.25이하로 거의 일정한 경향을 보이나, 연소후반부인 ATDC 30° 이후부터는 토크 0.3, 7.3N·m의 연소후반부와는 다르게 KL치가 다시 증가하는 경향을 보였다.

토크가 0.3N·m에서 12N·m으로 증가함에 따라 분사되는 연료량의 증가로 인하여 연소기간 및 1700K 이상인 고온의 화염온도 지속기간은 증가하며, 최고화염온도 역시 1800K~2030K까지 증가하는 경향을 보였다.

연소실 내의 화염온도에 비해 상대적으로 온도가 낮은 연소실 표면적이 화염온도와 KL치에 미치는 영향을 확인하기 위하여 전 연소실 체적에 대한 해당 크랭크각도에서의 체적에 대한 비를 체적비라 정의하였다. 토크에 관계없이 체적비가 5.5%~12.3%(ATDC 13°~30°) 범위의 경우에 KL치가 일정치 이하로 낮아지는 것으로 미루어 연소실 체적증가에 따른 주위 공기 유입에 의해 soot의 산화가 활발히 진행되며, 크랭크 각 30° 이내의 [체적비 : 12.3%] 경우에 연소실 표면적이 KL치에 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다.

토크 0.3N·m에서는 화염온도가 1500K 이상, 7.3N·m 토크에서는 1560K 이상, 그리고 12N·m 토크에서 1600K 이상의 범위에서는 1600K~2030K의 넓은 온도범위까지 변화할지라도 KL치는 거의 일정한 0.25이하의 값을 보였다. 이와 같은 결과로부터 일정체적, 일정온도 이상

의 범위에서는 soot의 산화에 화염온도가 미치는 영향은 적으며, 토크 증가에 따른 평균 당량비가 증가할수록 더욱 높은 산화온도가 필요함을 알 수 있다.

초기 화염이 관측되는 ATDC 6°~12° 구간에서 KL치가 높은 값을 보이며 변동이 심한데, 이와 같은 현상은 체적비가 4.2%~5.2% 범위인 좁은 공간상에 캐비티면에 충돌 분류된 농후한 확산화염으로 인한 soot 생성이 증가하여 KL치가 높게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 화염검출 시야각도가 5°인 본 실험장치에서 좁은 공간 체적을 검출하기 때문에 변동이 심하게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig.6은 화염온도가 soot에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig.5의 크랭크각 경과에 따른 화염온도와 KL치 데이터를 화염온도와 Log(KL) 관계로서 토크 [(a) 0.3, (b) 7.3 (c) 12N·m] 변화에 따라 나타낸 것이다.

토크의 크기에 무관하게 화염온도가 증가할수록 Log(KL)는 선형적으로 반비례하는 특성을 보이며, 토크의 증가에 따라 화염온도와 Log(KL) 그래프의 기울기가 더욱 증가하는 경향을 보였다. 이 같은 경향은 1800K 이상의 고온에서는 Log(KL)값이 토크에 관계없이 거의 같은 기울기 값을 보이나 온도가 상대적으로 낮은 1400K~1600K의 범위에서는 토크가 증가함에 따라 상대적으로 Log(KL)값이 높게 나타나기 때문인데, 이는 분사량 증가에 따른 평균 당량비가 상대적으로 높아지며, 후연소기간에서 1400K~1600K인 상대적으로 낮은 온도가 soot의 산화에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 soot의 저감을 위해서는 후연소말기의 화염온도를 1600K 이상의 온도범위에서 연소가 종료되도록 하는 것이 유리한 것으로 생각된다.

1300rpm에서 토크 변화에 따른 화염온도와 soot와의 상관 관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

- (a)  $KL=11.11 \cdot \text{EXP}[-0.00244 \cdot T]$
- (b)  $KL=13.40 \cdot \text{EXP}[-0.00250 \cdot T]$
- (c)  $KL=41.23 \cdot \text{EXP}[-0.00310 \cdot T]$

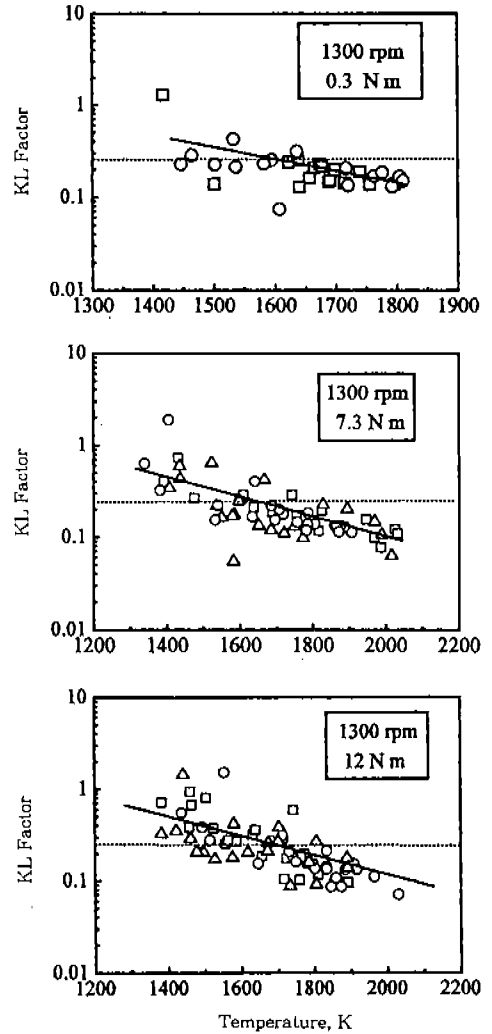


Fig.6 Relationship between temperature and KL factor at 1300 rpm

즉, soot는 화염온도와 반비례관계를 보이며 토크가 증가할수록 그 기울기 구배는 11.11에서 41.23으로 약 3배정도 증가함을 알 수 있다.

Fig.7은 엔진 회전수 1700rpm, 분사시기 BTDC 15°이며, 토크 변화에 따른 연소압력, 열발생률, 화염온도 및 KL치를 크랭크 각도에 대하여 함께 나타낸 것이다.

토크 0.3N·m인 (a)는 진온도 계측 기능각도가 ATDC 12°부터 40°까지이며 최고화염

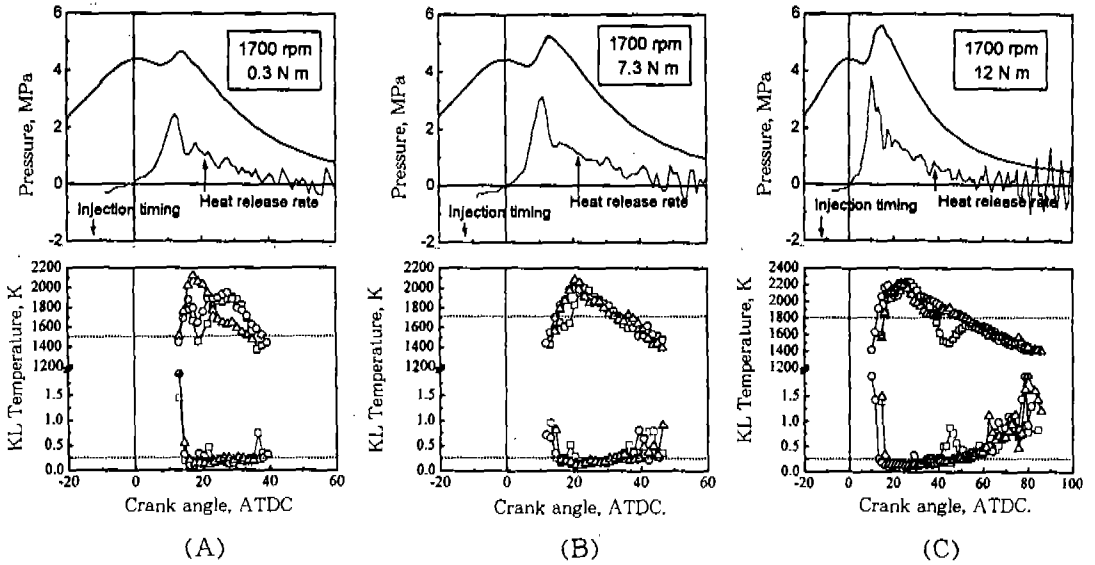


Fig.7 Cylinder pressure, heat release rate, flame temperature and KL's at different loads at 1700rpm

온도는 2100K 부근이다. ATDC 15° 이후부터 화염온도 계측 종료시까지 3회 사이클 모두 각기 다른 화염온도 특성을 보인다. 그러나 공통적으로 1500K 이상의 범위에서는 KL치가 0.25이하로 1300rpm에서와 같은 동일한 경향을 보인다.

토크 7.3N·m인 (b)에서 진온도 계측 가능 각도는 ATDC 11°부터 47°까지이며 3회 사이클 모두 유사한 화염온도 구배를 보이고 최고화염온도는 2100K 부근이다. 17°~34° 구간에서는 화염온도가 1700K~2100K의 범위에서 KL치는 0.25이하로 거의 일정한 경향을 보이며, 35°~47° 구간에서는 [체적비: 15.2%~23.5%] 화염온도가 1600K~1400K까지 떨어지면서 후연소말기 부근의 KL치가 증가하는 경향을 보인다.

토크 12N·m인 (c)는 진온도 계측 가능 각도가 ATDC 10°부터 85°까지이며 화염최고온도는 2240K 부근이다. 17°~52° 구간에서 화염온도가 1800K~2240K의 온도범위에서는 KL치가 0.25이하로 거의 일정한 경향을 보이며, 3회 사이클 모두 후연소 중반 이후인 52° 이후 구간에서는 화염온도가 1800K

~1400K까지 떨어지면서 급격히 KL치가 증가하는 경향을 보인다.

토크가 0.3N·m에서 12N·m으로 증가함에 따라 최고화염온도는 2100K~2240K까지 증가하는 경향을 보이며, 진온도가 계측되는 초기는 ATDC 10°~12° 사이로 거의 유사한 경향을 보이나, 토크 증가에 따른 평균 당량비 증가로 인해 계측 종료시기는 ATDC 40° [체적비: 18.4%]에서 85° [체적비: 56.3%]까지 증가하며 후연소말기의 KL치가 급격히 증가하는 경향을 보인다.

체적비가 6.3% [ATDC 17°]보다 증가하면 토크 0.3N·m에서는 화염온도가 1500K 이상, 7.3N·m 토크에서는 1700K 이상, 그리고 12N·m 토크에서는 1800 이상의 값에서는 넓은 온도범위까지 변화할지라도 KL치는 거의 일정한 0.25이하의 값을 보인다. 이러한 결과는 1300rpm의 경우와 같이 일정체적, 일정온도 이상의 범위에서 soot의 산화에 화염온도가 크게 영향을 미치지 않는 온도범위를 한번 더 확인할 수 있다. 그러나 화염온도가 1500K~1700K인 고온의 연소후반부에서도 KL치가 더욱 높아지는 특징은 1300rpm과는 상이한

현상을 보이며 이는 후연소 기간의 증가에 따른 상대적인 표면적의 증가에 기인하는 것으로 생각된다.

토크 12N·m의 조건에서 1300rpm과 비교하면 체적비 17.1% 이내의 범위에서는 1700rpm의 경우가 1800k 이상의 고온 화염온도 영향으로 KL치는 상대적으로 낮은 값을 보이거나, 체적비 17.1% 이후인 연소후반부의 KL치는 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 연료분사와 연소의 관점에서 1300rpm보다 다소 고속인 1700rpm의 경우가 연료입자와 공기와 만나는 시간이 더욱 짧아지기 때문에 혼합의 불균일에 의한 후연소기간의 증가로 인해 체적비가 15.2%에서 56.3%로 3.7배로 증가하여, 상대적으로 화염온도보다 낮은 온도분포를 가지는 연소실 표면적 증대가 KL칭 더욱 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

Fig.8은 1700rpm에서 화염온도가 soot에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig.7의 크랭크각 경과에 따른 화염온도와 KL치 데이터를 화염온도와 Log(KL) 관계로서 토크 [(a) 0.3, (b) 7.3 (c) 12N·m] 변화에 따라 나타낸 것이다.

1300rpm 조건과 같이 토크의 크기에 무관하게 화염온도가 증가할수록 Log(KL)값은 선형적으로 반비례하는 특성을 보이거나, 토크의 증가에 따른 화염온도와 Log(KL) 그래프의 기울기 구배는 1300rpm 조건과는 달리 더욱 커지는 경향을 보인다. 이 같은 경향은 1800K 이상의 고온에서는 Log(KL) 값이 토크 증가에 따라 거의 같은 기울기 값을 보이거나 화염온도가 1400K~1800K 범위에서는 토크가 증가함에 따라 Log(KL) 값이 높게 나타나기 때문이다. 이는 토크 증가에 따른 평균 당량비가 상대적으로 높고 또한 엔진회전수 증가에 따른 연료·공기 혼합시간이 짧아져 soot의 산화가 더욱 불량해지며 또한 후연소기간의 증가에 따른 상대적인 표면적의 증가에 기인하는 것으로 생각된다.

1700rpm에서 토크 변화에 따른 화염온도와 soot와의 상관 관계식은 다음과 같이 표

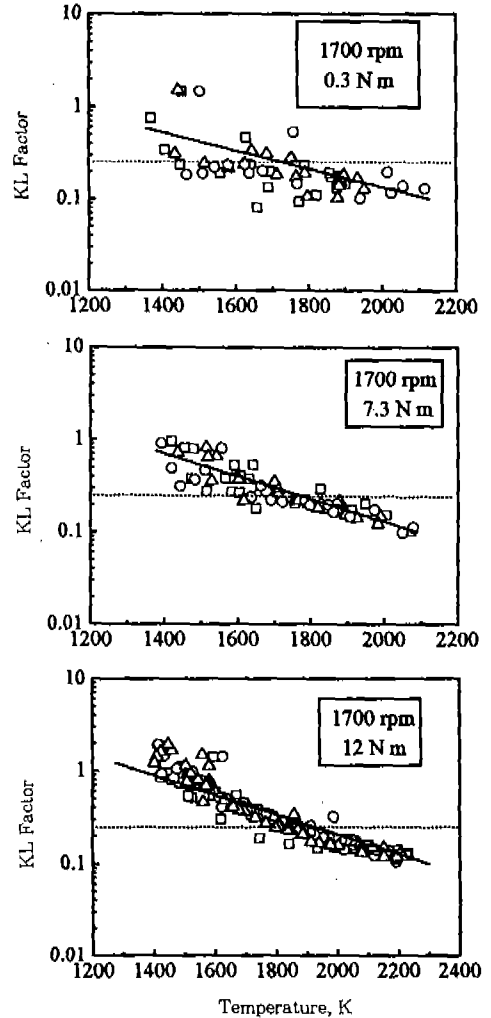


Fig.8 Relationship between temperature and KL factor at 1700 rpm

현될 수 있다.

(a)  $KL = 9.94 \cdot \text{EXP}[-0.00233 \cdot T]$

(b)  $KL = 27.71 \cdot \text{EXP}[-0.00270 \cdot T]$

(c)  $KL = 85.20 \cdot \text{EXP}[-0.00308 \cdot T]$

soot는 화염온도와 반비례관계를 보이며 토크가 증가할수록 그 기울기 구배는 9.94에서 85.20으로 약 8배정도 증가함을 보이며 엔진회전수가 증가할수록 2배정도의 기울기



증가를 보인다.

엔진 회전수와 토크에 무관하게, 후연소기간에 KL치가 일정치 이하로 낮아지다 ATDC 35°~40° 이후부터 KL치가 다시 증가하는 것으로 미루어 체적비 15.2%~18.4% 이후부터 화염온도보다 상대적으로 온도가 낮은 연소실 표면적이 soot의 산화에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 회전수 및 토크가 증가할수록 더욱 높은 산화온도가 필요함을 알 수 있다.

Fig.9는 광계측을 통해 측정된 30회 평균한 연소기간을 엔진속도 1300, 1700rpm인 조건에서 토크 변화에 따라 크랭크각도 및 시간으로 나타낸 것이다.

각 조건에서 광계측과 열발생률을 통한 연소기간의 비교에서 연소 초기 시작점의 경우 열발생률의 경우에는 회전수, 토크에 무관하게 TDC 부근에서부터 시작되나, 광계측의 경우 1300rpm은 토크 증가에 따라 ATDC 9°에서 5°로, 1700rpm의 경우엔 5°에서 3°까지 진각되는 경향을 보였다. 연소압력을 통한 열발생률과 광계측에서 3°~9°의 차이를 보이는데 이는 본 실험장치에서 사용된 포토다이오드 광응답성은 3 $\mu$ s~9 $\mu$ s로서 충분한 분해능을 지니나, 주파수 응답특성이 가시광 스펙트럼의 적외선 쪽으로 편이된 것에 의한 지연<sup>7)</sup>, 혹은 검출위치에 따른 시야각도

가 TDC 부근에서는 아주 좁은 부분만의 공간만을 검출하기 때문에 이와 같은 차이점이 생기는 것으로 판단된다.

연소종료시기의 경우 열발생률은 후연소말기 부분이 흔들려 정확한 종점을 판단하기가 힘들어 비교가 곤란하다. 그러나 광계측의 경우 1300rpm에서 토크가 증가함에 따라 크랭크각도 상으로 56°에서 75°로, 1700rpm의 경우엔 45°에서 97°까지 연소기간은 증가하는 경향을 보였다.

크랭크각에 따른 연소기간으로 비교하면 1300rpm의 경우 토크가 0.3에서 12N·m로 증가함에 따라 연소기간은 0.3Nm에 비해 133% 정도 증가하나, 1700rpm은 215.5%까지 급속히 연소기간이 증가한다. 그러나 시간으로 비교하면 1300rpm보다 연소기간은 토크 증가에 따라 2.8~0.1ms 정도 짧아짐을 알 수 있다.

토크 12N·m의 경우 회전수가 1300rpm에서 1700rpm으로 증가함에 따라 연소기간은 0.1ms 정도의 차이가 발생하나 체적비는 52%에서 69%로 증가함에 의해 상대적으로 표면적으로 급격한 증가로 인해 1700rpm에서 연소후반부의 KL치가 급격히 증가하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

연소실 내의 화염온도와 soot 생성과 산화과정의 측정을 위해 광화이버를 이용한 이색법을 사용하여 rpm, 부하등을 변화시켰을 때 연소실 내 크랭크 각도에 따른 화염온도, KL치, 연소압력 및 연소기간의 계측을 통해 화염온도가 soot의 생성과 소멸에 미치는 영향을 다음과 같이 밝혔다.

- 1) 연소실 내의 최대화염온도는 회전수, 토크의 증가에 따라 1800K~2250K 범위를 보였으며, 이때의 체적비는 7%~8% 범위이다.
- 2) 회전수, 토크에 관계없이 화염온도와 Log(KL치)는 선형적인 반비례 관계를

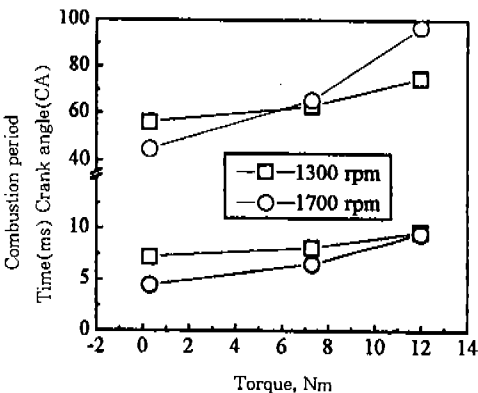


Fig.9 Combustion period at different loads and rpm

- 보이며, 토크와 회전수가 증가할수록, 화염온도와  $\text{Log}(KL)$ 의 기울기 구배는 더욱 커진다.
- 3) 회전수, 토크에 관계없이 1800K 이상의 온도범위에서는 화염온도 변화가 soot의 산화에 미치는 영향은 적다.
  - 4) 회전수, 토크가 증가함에 따라 연소후 반부에  $KL$ 치가 급격히 증가하고, 이때의 체적비는 15.2%~18.4%이며, 이와 같은 경향은 후연소기간의 증가와 체적비 증가에 따른 화염온도의 저하 때문이다.
  - 5) 회전수, 토크가 증가할수록 soot의 산화를 위해서는 더욱 높은 산화온도가 필요하다.

#### 참 고 문 헌

1. N. Iida, et al., 1990, "Surrounding gas effects on soot formation and extinction-Observation of diesel spray combustion using a rapid compression machine. SAE paper 930603, 1993
2. N. Iida and K. Watanabe. 1990, "Surrounding gas condition effect on NOx and particulates", International Symposium COMODIA 90, pp. 625~632
3. L. Zhang, T. Ninami, and K. Yokota, 1993, "An analysis of the combustion of a D. I diesel engine by photograph processing." SAE paper 930594
4. N. Ayachi, I. Franz and M. Brun., 1990, "Soot particulates instantaneous local optical measurement in a diesel combustion chamber." X X II FISITA Congress, Vol. 1, pp. 41~50.
5. T. Nakahira, M. Komori and K. Tsujimura., 1992, "Measurement of flame temperature distribution in D. I diesel engine with high pressure fuel injection." SAE paper 920692
6. 정용일, 이경태., 1993, "디젤엔진 연소해석을 위한 이색법의 특성 해석." 한국자동차공학회 추계학술대회 933890, pp. 96~101.
7. R. Stone, "Internal combustion engines", Macmillan, pp. 351~1992