

〈논 문〉

디젤엔진에서 이색법을 이용한 화염온도와 Soot의 계측기술에 관한 연구

이태원* · 이선봉* · 하종률**

(1996년 3월 15일 접수)

A Study on a Technique of the Measurement of Flame Temperature and Soot Using the Two-Color Method in Diesel Engines

Tae-won Lee, Sun-Bong Lee and Jong-Yul Ha

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

Abstract

The instantaneous flame temperature and soot formation and oxidation in a D. I. diesel engine are measured using a two-color method. The proposed method based on the continuous spectral radiation from the soot particles in the flame 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. Little temperature change were observed with increasing rpm, while increased with loads. The higher the flame temperature is, the lower the KL factor is.

1. 서 론

디젤엔진의 연소개선을 통한 유해배출가스의 저감을 위해 NO_x 및 soot의 발생, 산화, 소멸에 영향을 미치는 여러 인자인 국부 공연비, 화염온도, 연료분사시기, 분사압력 및 유동의 형태 등을 정확히 파악할 필요가 있다. 이들 인자들 중에서 크랭크각도 변화에 따른 연소실내의 NO_x와 특히 입자상 배출물인 soot의 생성과 산화에 밀접한 관련이 있는 농도와 화염온도의 계측에 급속샘플링법과 광학측정법 등의 많은 연구가 수행되고 있다.⁽¹⁻³⁾

기존의 연소실 내부의 순간적인 soot 측정방법인

급속샘플링법⁽⁴⁾은 연소실내의 soot 농도 측정시 유익한 정보를 제공하지만 샘플링프로브에 의한 유동장의 교란, TDC 주위를 제외한 위치에서의 피스톤 표면 주위의 농도측정의 어려움, 다소 긴 밸브 열림기간에 관한 빈약한 시간 분해능 등의 단점이 있다. 광학측정법인 광소멸법(light extinction method)⁽⁵⁾과 광산란법(light scattering method)⁽⁶⁾들은 보조광원이 필요하고, 복잡한 광경로가 연소실내부로 입사되기 위해, 연소실 형상의 변경이 필요하기 때문에 실험은 단순한 연소실 형상과 낮은 압축비 하에서 수행되어 왔다. 또한 디젤화염이 휘염이고, 매연입자로부터 강한 연속복사 스펙트럼으로 인해 레이저 계측의 응용은 곤란한 실정이다.

그러나 화염내의 soot 입자로부터의 강력한 연속복사 스펙트럼에 주목한 이색법(two-color

* 동아대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 동아대학교 기계공학과

method)은 화염온도와 화염내의 soot 농도에 관한 정보인 KL치가 동시에 측정되기 때문에 soot의 생성과 산화과정을 조사하기 위한 유효한 방법이다. 또한, 이색법의 큰 장점은 압력센서의 설치공간이 면, 충분히 이색법 프로브를 설치할 수 있어서 기존 연소실 형상의 커다란 변경이 없이도 설치가 간단하다. 국외에서는 이색법을 직접, 간접적으로 이용한 응용연구⁽⁷⁻¹⁰⁾가 정착되고 있는 반면에 국내에서는 아직 미흡한 실정에 있다.

따라서 본 연구에서는 광화이버를 이용한 이색법의 계측기술 확립과 디젤화염에서 화염온도와 KL치 측정을 통한 soot의 생성과 소멸에 관하여 토치를 사용한 정지화염과 엔진의 부하와 회전수를 변화시킨 경우의 영향을 밝혀 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 이색법의 기본이론

화염의 절대온도를 T , 임의 파장 λ 에 있어 흑체의 복사휘도(radiation brightness) $N_b(\lambda, T)$ 는 가시역의 파장에서는 Wien의 식 (1)과 근사할 수 있다.

$$N_b(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (1)$$

여기서, C_1, C_2 는 Planck의 정수이다.

Wien의 식은 흑체(복사율: $\epsilon=1$)일 때이므로 비흑체($\epsilon < 1$)일 경우의 $N(\lambda, T)$ 는

$$\begin{aligned} N(\lambda, T) &= \epsilon_\lambda N_b(\lambda, T) \\ &= \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \\ &= N_b(\lambda, T_a) \\ &= C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T_a) \end{aligned} \quad (2)$$

단, T_a 는 비흑체를 흑체로 간주했을 때의 화염의 휘도온도이다.

식 (2)를 ϵ 에 관해 정리하면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_\lambda = \exp\left[\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \quad (3)$$

한편 디젤화염의 soot의 단색복사율은 Hottel-Broughton에 의해 식 (4)로 정의된다.

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp(-KL/\lambda^\alpha) \quad (4)$$

K 는 흡수계수, L 은 측정 광축방향의 화염두께이고, α 는 한정된 파장의 정수로 가시역의 파장에

서는 $\alpha=1.38$ 로 정해진 상수이다. 위의 식 (3)과 식 (4)로부터 KL에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$KL = -\lambda^\alpha \ln \left[1 - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a}\right)\right) \right] \quad (5)$$

여기서, KL 은 미립자의 농도에 비례하는 정성적인 값이다.

가시영역인 두 개의 파장에 대하여 각각 $\lambda_1, \alpha_1, T_{a1}$ 과 $\lambda_2, \alpha_2, T_{a2}$ 라 두면

$$KL = -\lambda_1^{\alpha_1} \ln \left[1 - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a1}}\right)\right) \right] \quad (5a)$$

$$KL = -\lambda_2^{\alpha_2} \ln \left[1 - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a2}}\right)\right) \right] \quad (5b)$$

위의 두 식 (5a)과 (5b)의 우변으로부터 아래 식 (6)이 된다.

$$\begin{aligned} \lambda_1^{\alpha_1} \ln \left[1 - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a1}}\right)\right) \right] \\ = \lambda_2^{\alpha_2} \ln \left[1 - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a2}}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 T_{a1}, T_{a2} 는 실험을 통해 파악되는 값이므로, 화염의 진온도 T 를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 진온도 T 를 식 (5a)에 대입하면 KL치까지도 구할 수 있다.

2.2 파장의 선택

이색법에서의 파장선택은 측정조건에 따라 가시역, 적외역의 파장을 선택할 수 있다. 그러나 연소실내의 디젤화염 계측시, 적외역은 넓은 온도범위, 특히 저온영역의 측정이 가능한 반면에 많은 적외활성기체의 밴드 및 연료가 열분해한 탄화수소 등의 복사와 벽면반사의 영향 등이 그을음의 복사에 겹친다. 따라서 그을음만을 중점으로 할 경우 가시영역이 적외역보다 온도범위는 좁으나 온도에 의한 복사휘도 변화의 비율이 크며 정도 높은 측정이 가능한 가시이색법이 적당하다.⁽¹¹⁾

연소실내 화염은 광프로브에서 받아들여지지만 그때의 정도를 높이기 위하여 파장의 변화에 대한 단색복사휘도의 변화가 큰 곳의 파장을 선택하여야 한다. 파장과 단색복사휘도의 관계를 Fig. 1에 나타낸다.

본 실험에서 채택한 가시파장역은 550 nm와 상대적으로 넓은 온도범위 측정을 위해 적외역에 근접한 755 nm이며, 이들 두 파장대는 1500~2500 K 범위 내에서 온도에 따른 단색복사강도 변화의 기

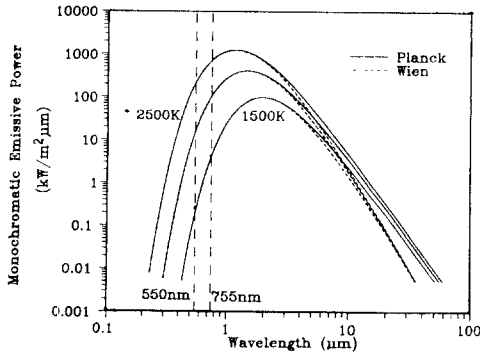


Fig. 1 Blackbody emissive power as a function of wavelength and temperature

울기가 크며, 또한 화학발광이나 라디칼발광의 영향이 적은 영역이다.

2.3 광측정 위치의 선택

연소실내의 화염계측을 위해서는 광프로브가 분무화염의 중심축을 향하게 설치되지 않을 때는 검출되는 광량이 작게 되므로 그 설치위치 및 검출방향은 대단히 중요하며, 따라서 계측시 화염의 중심축상에 프로브를 설치하는 것이 가장 좋은 방법이다.

그러나 화염은 분사위치, 분사속도에 따른 스윙과 스쿼시의 영향 등으로 인해 어댑터를 정확한 화염의 중심축상에 설치한다는 것은 불가능하다. 이상과 같은 이유로 광프로브의 위치는 분무축상에서 스윙의 방향과 실린더 헤드 구조적 제한인 실린더 헤드 상부 노즐의 간섭 등을 고려하여 설치하였다. Fig. 2는 본 실험장치인 연소실내의 광프로브의 설치위치를 나타낸다.

측정화염은 4광으로부터의 분사중 한 분사의 측정부에서 측정되며, 측정위치는 분공으로부터 거리 13.8 mm 지점의 분무표면상이며 직경 3 mm, 계측시야각도가 5°인 광화이버에 입사된 광량으로 계측된다. 광프로브내의 광을 채취하는 채취창은 투과특성이 좋으며, 연소실내의 고온과 고압에도 견딜 수 있는 직경 6 mm, 길이 17 mm의 석영유리를 사용하였으며, 오링을 사용하여 연소실내의 기밀을 유지하였다.

2.4 실험장치

본 실험에서 실 엔진을 사용한 온도 및 KL치 측정 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다.

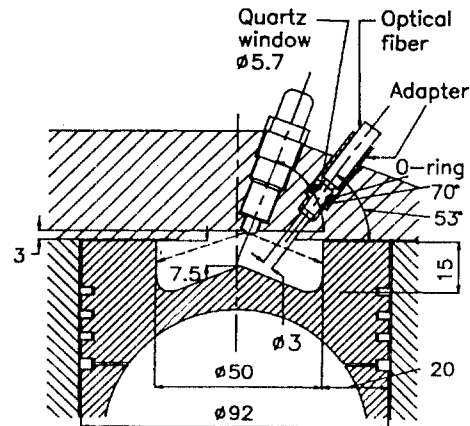
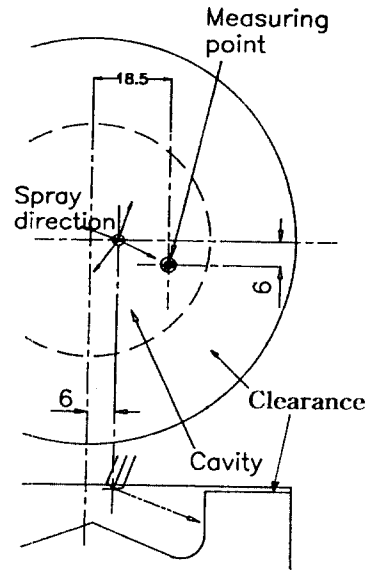


Fig. 2 Optical window relative position to the combustion chamber and location of the observation

시험엔진은 탕기통 직접분사식 4사이클 디젤엔진이며, 수동력계를 사용하여 부하를 조절하였다. 실린더헤드 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 550 nm, 755 nm의 2파장 단으로 되어 포토 다이오드 (Hamamatsu S2281-01)에 의해 전류로 변환되며, 포토센서앰프 (Hamamatsu C2719)에서 증폭된다. 포토센서앰프의 아날로그 출력전압을 A/D 변환기를 통해 71 μs

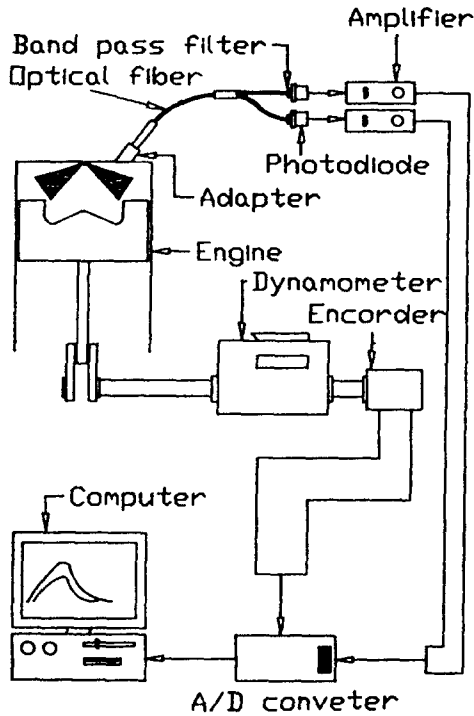


Fig. 3 Schematic drawing of the two-color measuring apparatus

Table 1 Specification of band pass filter

λ (nm)	τ_{\max} (%)	$\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)
550	74	4.3
755	79	5.3

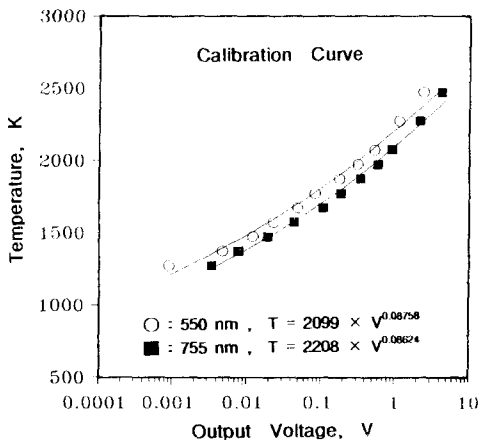


Fig. 4 Calibration results: temperature versus output voltage

간격으로 디지털신호로 변화시켜 컴퓨터에 입력되도록 하였으며 이때 입력된 각각의 전압으로 진온도와 KL치를 계산하였다.

Table 1은 밴드패스필터의 투과 특성을 나타낸다.

두 휘도온도 T_{a1} , T_{a2} 와 출력전압 V_{a1} , V_{a2} 와의 관계를 검정하기 위해서 흑연관 흑체로(黑鉛管黑體爐; 2" Dia blackbody type IV, thermogage, Inc.)를 사용했다. 이 관계를 나타낸 검정곡선과 검정식을 Fig. 4에 나타낸다. 이 때 검정곡선과 검정데이터와는 각각 98.0%, 98.5% 정도로 일치했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가시색법의 특징

화염의 복사휘도는 화염온도와 soot 농도의 함수로서 표현된다. 이색법은 이 복사휘도를 두 파장에 대하여 측정해서 화염온도와 화염중의 soot 입자 밀도수에 거의 비례하는 흡수계수 K 와 soot 영역의 광학적 두께 L 의 곱으로 광로상에 존재하는 soot의 총 입자수를 나타내는 KL치를 구하는 방법이다.

이색법에서 측정된 휘도온도인 $T_a(550\text{ nm})$, $T_b(755\text{ nm})$ 를 통한 진온도 T 와 soot 농도인 KL 치를 식 (6)에서 구한다. 그러나 실험에서 측정된 T_a , T_b 로부터 해를 구하지 못하는 경우가 발생한다. 적외역에서 이색법의 특성해석을 연구한 정 등⁽¹²⁾의 특성을 요약하면 다음과 같다.

특성 1) : 진온도 T 는 항상 두 파장 대에서 측정 한 휘도온도 T_a , T_b 보다 크거나 같다.

특성 2) : T 가 해를 갖기 위해서는 항상 $T_a > T_b$ 이어야 한다.

특성 3) : T_a 가 일정할 경우, T_b 가 증가하면 T 는 작아진다. 또한 T_b 가 일정할 경우, T_a 가 증가하면 T 도 커진다.

Fig. 5는 식 (5a), (5b)에서 본 실험에서 사용된 550 nm, 755 nm의 휘도온도를 1500~2000 K로 변화시켰을 경우 화염온도와 KL치와의 관계를 나타낸 것이다. 점선의 경우는 T_a 의 휘도온도이고, 실선은 T_b 의 휘도온도를 나타낸다.

가시역 파장의 이론적 해석에서도 T_a 가 T_b 보다 클 때만 교차점(식 (6)의 해)이 있음을 알 수 있어 상기의 참고문헌⁽¹²⁾과 잘 일치하며, 또한 두 휘도온도의 차가 증가할수록 진온도 T 는 증가하고,

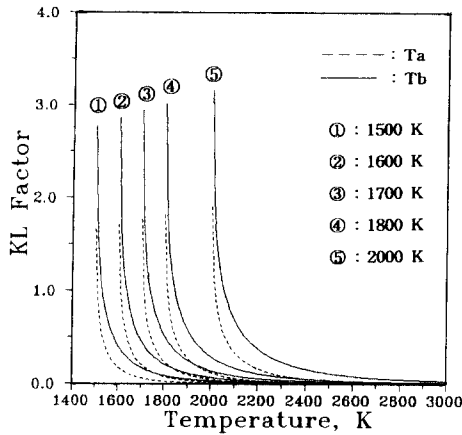


Fig. 5 KL and true temperature as functions of luminous temperatures drawn theoretically

KL치는 감소하는 이론적 특성이 있다. 진온도 T 는 두 휘도온도의 교차점에서 이루어지나, 실제 계산에 있어 두점의 차는 0.03에서 진온도를 산출하였다.

3.2 이색법의 예비실험

이색법을 실 엔진에 적용하기 이전에, 이색법의 온도계측과 KL치의 타당성 확인을 위하여 예비실험 장치인 경유를 사용한 등심 연소형태의 버너와 화염온도가 버너에 비해 다소 높은 분무연소형태의 토치화염에서 thermometer (K Type, TM-1300)를 사용한 각 측정위치에서의 화염온도 계측결과와 이색법을 이용한 화염온도 계측결과를 Fig. 6에 나타낸다.

연소형태가 다른 버너와 토치화염에서 열전대를 이용하여 화염표면으로부터 5 mm 길이의 화염을 계측하였으며, 각 측정지점에서 온도는 1023~1343 K의 범위를 보였다. 이색법 측정의 경우, 화염표면으로부터 1 mm 떨어진 위치에서 계측을 수행하였다. 550 nm 휘도온도의 경우에, 연소형태가 다른 버너와 토치화염에서, 각 측정지점에서의 연소형태 및 연소생성물 성분의 변동이 있더라도 온도 증가에 따라 거의 선형성을 보이는데 반해, 적외역에 근접해 있는 755 nm의 휘도온도는 연소형태 및 낮은 온도범위에서 550 nm의 휘도온도보다 더 높게 나타나는 경우가 발생하여 진온도를 구하지 못하는 경우도 발생하였다. 이는 수증기, 일산화탄소, 이산화탄소 등의 연소생성물과 연료증기 및 연료가 분해한 탄화수소 등의 적외활성기체의 밴드폭

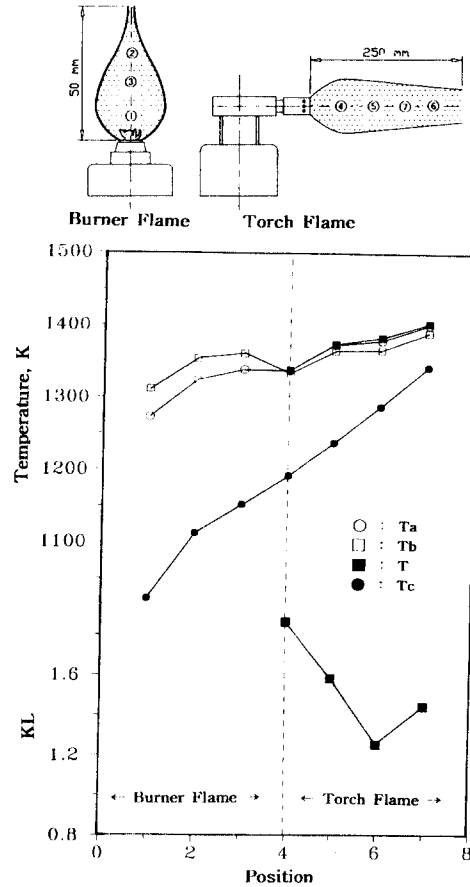


Fig. 6 Measurement position and comparison of temperatures using burner and torch

사가 그늘음의 연속복사에 중첩하여 755 nm의 검출강도가 높게 나타난 것으로 생각된다.

그러나 상대적으로 온도가 높은 토치화염에서는 진온도를 측정할 수 있었다. 측정위치에 따른 화염온도분포와 KL치의 경향들은 버너분무화염의 구조에 관해 연구한 小沼 등⁽¹³⁾의 연구결과와 측정지점에 대하여 정성적으로 일치하는 경향을 보였다.

열전대로 계측한 온도가 1343 K인 경우 이색법으로 측정된 온도는 1403 K를 보여 60 K의 오차를 보였다. 이는 열전대 계측은 측정점에서의 표면온도만을 측정한 것이지만, 이색법의 경우에는 수평방향 광로상의 화염의 평균온도를 측정하기 때문으로 생각된다. 그리고 열전대 측정시 측정점에서의 대류나 복사에 의한 측정오차를 보정하지 않은 조건에서 표면온도를 측정하였기 때문에 실제 화염온도는 열전대 측정온도보다는 높으리라 생각된다.

계측 가능한 영역에서 온도가 증가할수록 이색법 측정온도와 열전대 측정온도가 근접함을 알 수 있다. 따라서 실 엔진에서 화염온도는 1500 K 이상의 고온이며, 본 이색법을 이용한 화염온도 계측장치에서의 측정오차는 더 줄어들 것으로 생각된다.

3.3 실엔진에서 이색법의 적용

Fig. 7은 엔진의 회전수 2000 rpm, 토크 0.74 kgf·m에서 이색법으로 측정된 T_a , T_b 그리고 진온도 T 를 크랭크각도에 대하여 나타낸 것이다.

초기 화염이 관찰된 영역은 ATDC 3°에서 10°까지의 초기화염부분과 40°이후인 후연소말기 기간에서는 예비실험에서와 같이 $T_a < T_b$ 인 경우가 발생하여 진온도 측정이 불가능하였다. 이는 화염에서 soot 성분 외에 연료가 열분해한 탄화수소 및 적외활성기체의 밴드 등과 피스톤 표면과 연소실 벽면 반사의 영향 등이 적외역에 근접한 T_b (755 nm)에 영향을 미치며, 배연입자가 클수록, 그리고 파장이 짧을수록 산란의 영향도 커지므로 상대적으로 단파장인 T_a (550 nm)에서 산란의 영향도 있을 것으로 생각된다.

Figs. 8, 9는 엔진의 회전수를 1300, 2000 rpm으로 일정하게 한 후 토크를 0.03, 0.74 및 1.64 kgf·m로 변화시켰을 때 연소압력, 화염온도 및 KL치를 크랭크각도에 대하여 나타낸 것이다.

각 시험조건에서의 화염온도와 KL치는 15~20회 사이클을 검토, 분석하여 대표적인 1 사이클에 대해서 시험결과를 나타내었다. 이는 사이클변동, 검출시의 유동형태에 따라 화염의 형태가 변하기

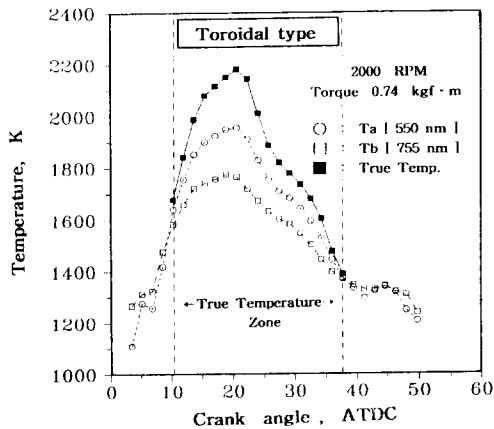


Fig. 7 Relationship between true temperature and brightness flame temperature

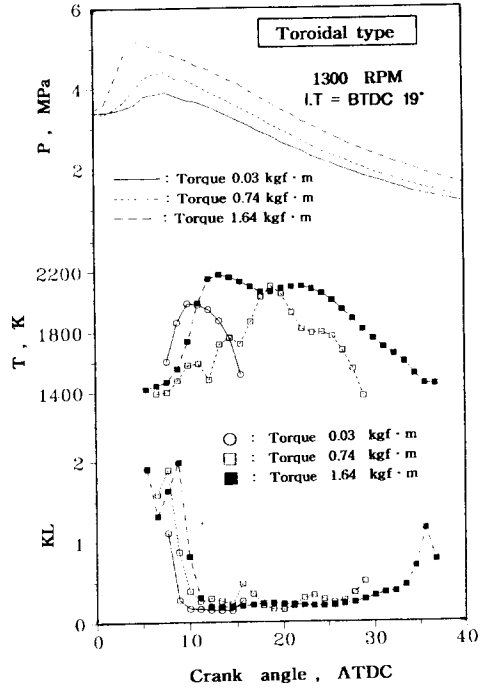


Fig. 8 Cylinder pressures, flame temperatures and KL's at different loads at 1300 rpm

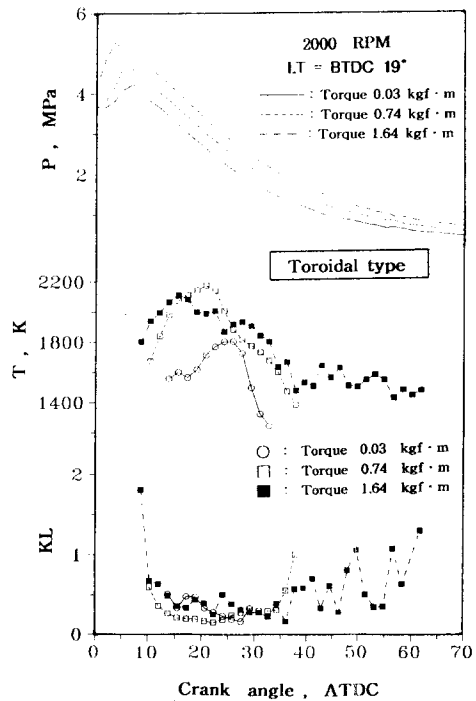


Fig. 9 Cylinder pressures, flame temperatures and KL's at different loads at 2000 rpm

때문에 앙상블 평균에 의한 데이터는 화염온도와 KL치의 명확한 상관관계를 규명하기에는 어렵기 때문이다.

1300 rpm의 경우 토크 0.03 kgf·m에서 최대화염온도는 1900 K 부근이며, 0.74 kgf·m에서는 2180 K, 1.64 kgf·m에서는 2200 K의 최대화염온도의 분포를 보였다. 토크가 0.03에서 1.64 kgf·m로 증가함에 따라 분사되는 연료량의 증가로 인하여 연소기간은 증가하며 또한 1800 K 이상인 고온의 화염온도 지속기간이 증가하는 경향을 보이며, 화염온도의 상승 및 하강 구배는 토크가 증가할수록 온도구배가 감소하는 경향을 보였다.

화염온도 검출시기와 연소압력과의 비교에서 토크가 증가함에 따라 연소압력의 경향과 같이 화염온도 검출시기도 ATDC 약 8°에서 5°정도로 앞당겨지며, 연소 최고압력 이후부터 화염온도가 검출되는 것은 BTDC 15°에서 연료가 분사되어 착화지연기간을 지난 후 착화하여 검출 가능한 광량에서 온도로 표시되기 때문이라 생각된다.

2000 rpm의 경우 토크 0.03 kgf·m에서 최대화염온도는 1800 K 부근이며, 0.74 kgf·m에서는 2200 K, 1.64 kgf·m에서도 2200 K의 최대화염온도 분포를 보였다. 토크가 0.03에서 1.64 kgf·m로 증가함에 따라 역시 연소기간은 증가하며 또한 1800 K 이상인 고온의 화염온도 지속기간이 증가하는 경향을 보인다.

급격한 온도 상승구간을 지나 최고온도에 도달한 후에 온도는 점차 낮아지는 경향을 보이나 0.03 kgf·m의 토크에서는 ATDC 25° 부근에서 급격히 온도가 감소하는 현상을 보이고, 1.64 kgf·m의 토크에서는 ATDC 25°부근에서 온도가 감소하다가 다시 상승하는데 이것은 노즐의 분공이 4개이고 또 화염이 스윙에 의해 특정방향으로 회전하고 있기 때문에 화염의 단체가 광프로브의 입구 앞을 통과할 때의 불균일성 때문으로 생각된다.

엔진회전수가 1300에서 2000 rpm으로 증가할수록 연소기간은 부하에 관계없이 약 2배로 증가하는 경향을 보였다. 회전수와 부하에 관계없이 대체적으로 초기의 화염온도가 높은 것은 초기에 발생하는 착화지연기간 후의 예혼합화염의 영향으로 판단된다.

KL치는 회전수와 부하에 관계없이 검출 후 급격히 상승하여 ATDC 약 5에서 10° 부근, 즉 예혼합연소후, 확산연소 초기에 다량의 soot가 생성된 후

확산연소 시에 급속히 산화하며, 후연소기간 말기에서 온도가 1800 K 이하로 떨어지면 KL치가 다시 상승하는 경향을 보였다. 토크에 따라서는 토크의 크기가 증가하는, 즉 평균당량비가 증가함으로써 KL치도 높아짐을 알 수 있다. 특히, 고부하에서 회전수가 1300에서 2000 rpm으로 증가할수록 KL치의 최대값은 거의 비슷한 값을 나타내는 현상을 보이는 반면에 후연소기간 말기에서 KL치가 다시 증가하는 경향을 보였다. 또한 회전수, 토크의 증가에도 불구하고 화염온도가 1800 K 이상의 범위에서는 KL치가 급격히 감소하는 경향을 보였다. 대체적으로 KL치는 화염온도와 반비례하는 관계를 보여 선행연구자들^(1,2,10)의 연구결과와 정성적으로 일치하는 경향을 보였다.

4. 결 론

화염의 온도 측정방법을 확립하기 위하여 이색법을 토치화염과 실 엔진에 적용하여 시험엔진의 회전수와 토크변화에 따른 화염온도와 KL치를 측정하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 광화이버를 사용한 가시이색법은 예비실험 및 실 엔진을 통한 화염온도와 KL치의 계측결과가 다른 방법으로 연구한 타 연구자의 결과와 정상적으로 잘 일치하여 계측방법에 타당성이 있음을 확인하였다.

(2) 본 연구에서 사용한 550, 755 nm 파장은 1400 K 온도범위까지 화염온도와 KL치의 측정이 가능하여, 기존 가시이색법의 계측범위 확대 적용이 가능했다.

(3) 두 파장의 휘도온도 차가 증가할수록 진온도 T 는 증가하고, KL치는 감소하는 이론적 특성과 실제 계측과의 관계가 정성적으로 잘 일치하였다.

(4) 이색법에 의한 디젤엔진에서의 화염온도와 KL치의 결과는 모든 조건에서 soot는 확산화염 초기에 급속히 생성된 후, 후연소기간에서 산화하며, 특히 1800 K 이상의 온도범위에서 급속히 산화하는 경향을 보였다.

(5) 화염온도와 soot와는 정성적으로 반비례 관계를 가지는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 동아대학교 생산기술연구소의 지원으

로 수행된 연구로서, 관계자 여러분에게 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- (1) Iida, N. et al., 1990, "Surrounding Gas Effects on Soot Formation and Extinction-Observation of Diesel Spray Combustion Using a Rapid Compression Machine," *SAE Paper 930603*.
- (2) Iida, N. and Watanabe, J. J., 1990, "Surrounding Gas Condition Effect on NOx and Particulates," *International Symposium COMODIA 90*, pp. 625~632.
- (3) Zhang, L., Ninami, T. and Yokota, K., 1993, "An Analysis of the Combustion of a D. I Diesel Engine by Photograph Processing," *SAE Paper 930594*.
- (4) Du, C. J. and Kittelson, D. B., 1983, "Total Cylinder Sampling from a Diesel Engine: Part III-Particle Measurement," *SAE Paper 830243*.
- (5) Kontani, K. and Gotoh, S., 1983, "Measurement of Soot in a Diesel Combustion Chamber by Light Extinction Method and In-Cylinder Observation by High Speed Shadowgraphy," *SAE Paper 831291*.
- (6) Kunugi, M. and Jinno, H., 1967, "Determination of Size and Concentration of Soot Particles in Diffusion Flames by a Light-Scattering Technique," *11TH Symposium on Comb.*, pp. 257~266.
- (7) Ayachi, N., Franz, I. and Brun, M., 1990, "Soot Particulates Instantaneous Local Optical Measurement in a Diesel Combustion Chamber," *XX II FISITA Congress*, Vol. 1, pp. 41~50.
- (8) Nakahira, T., Komori, M. and Tsujimura, K., 1992, "Measurement of Flame Temperature Distribution in D. I Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection," *SAE Paper 920692*.
- (9) Shiozaki, T., Miyashita, A., Aoyagi, Y. and Joko, 1994, "The Analysis of Combustion Flame in a D. I Diesel Engine (Part 2-Hydroxyl Radical Emission Versus Temperature)," *International Symposium COMODIA 94*, pp. 523~528.
- (10) Fujimoto, H., Iida, H., Aoyama, T. and Senda, J., 1994, "Analysis of Combustion Characteristics in Diesel Flame by Means of Chemiluminescence," *International Symposium COMODIA 94*, pp. 505~510.
- (11) Matsui, Y., Kamimoto, T. and Matsuoka, S., 1980, "A Study on the Application of the Two-Color Method to the Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in Diesel Engine," *SAE Paper 800970*.
- (12) 정용일, 이경태, 1993, "디젤엔진 연소해석을 위한 이색법의 특성 해석," 한국자동차공학회 추계학술대회 933890, pp. 96~101.
- (13) 小沼, 小笠原, 1974, "Burner 噴霧火焰の構造に關する 研究," *日本機械學會論文集*, pp. 40~330.