

직분식 디젤엔진에서 CAVITY 형상에 따른 Soot의 농도와 운전조건과의 관계 연구

이상석*, 이태원**, 하종률***

The Relationship between Soot Concentration and Operating Condition regarding Cavity Shapes in a D. I. Diesel Engine

Lee sang suk*, Lee tae won**, Ha jong yul***

Key word : Diesel engine, Two color method, Cavity, Soot, Flame temperature

Abstract

The local instantaneous flame temperature and soot concentration in a D. I. diesel engine were 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 because of simplicity and relative ease of application. Measurements were performed at two locations inside the combustion chamber of a D. I. diesel engine. Effects of different engine speeds and loads, fuel injection timings, combustion chamber shapes on flame temperature and KL factor, which is qualitatively proportional to soot concentrations, were examined. Flame temperature change were observed with increasing engine speed and load. The higher the flame temperature is, the lower the KL factor is.

1. 서 론

디젤엔진은 연료경제성과 높은 열효율로 산업 사회에 큰 공헌을 하고 있으나 NOx, 입자상배출물(이하 soot) 등의 유해배출가스 생성이 사회적 문제점으로 되고 있다.^(1~3) 최근, 이들 유해배출가스 저감을 위해 분사시기지연, EGR 등의 방법을 통해 연소실 내의 화염온도를 저하시켜 NOx를 저감하는 방법을 시도하고 있으나 출력, 경제

성의 저하와 HC, soot 등의 배출물 증가의 문제점이 있어, 현재로서 이들의 동시 저감은 힘든 실정이다.^(4~7) 따라서 근본적인 연소개선을 통한 NOx, soot의 저감을 위해서는 이들의 생성과 소멸에 밀접한 영향을 미치는 화염온도의 계측은 필수적이며, 또한 연소실 내에서의 화염온도분포 측정은 엔진연소 연구분야에서 가장 큰 관심사로서 지금까지 이를 위해 많은 연구가 수행되고 있다.

기존의 연소실내 화염온도 계측방법들은 레이저를 이용한 레이리 산란법, 라만산란법, CARS법, LIF법 등이 있으나 이들 방법들은 보조광원이 필요하고, 또한 복잡한 광 경로가 연소실 내부

*정회원, 부산정보대학 기계산업계열

** 창원전문대학 자동차과

*** 정회원, 동아대학교 기계공학과

로 입사되기 위해, 연소실 형상의 변경이 필요하기 때문에 실험은 단순한 연소실 형상과 낮은 압축비 하에서 수행되어져 왔다. 또한 디젤화염이 휘염이고 매연입자로부터 강한 연속복사 스펙트럼으로 인해 레이저 계측의 응용은 곤란한 실정이어서 가솔린엔진과 같은 예혼합화염의 온도계측에 주로 응용되어 왔다.

그러나 화염 내의 soot 입자로 부터의 강력한 연속스펙트럼 방사에 주목한 이색법은 화염온도와 화염내의 soot 농도에 관한 정보인 KL치가 동시에 측정되기 때문에 soot의 생성과 산화과정을 조사하기 위한 유효한 방법이다. 또한, 이색법의 큰 장점은 압력센서의 설치공간이면, 충분히 이색법 프로브를 설치할 수 있어서 기존 연소실 형상의 커다란 변경이 없이도 설치가 간단하다.

국외에서는 이색법을 직접, 간접적으로 이용한 응용연구가 정착되고 있으나 화염온도의 계측범위가 1600K~1800K 이상의 고온 측정범위로 인해 연소후반부의 다소 낮은 화염온도측정은 아직 미흡한 실정이다.^(8~10)

따라서 본 연구에서는 디젤엔진의 연소개선을 통한 저연비 실현과 soot의 저감 기술에 대한 기초자료를 제공하기 위한 연구의 일환으로 연소실내에서 크랭크각도에 따른 화염온도 및 soot의 생성과 소멸과정을 밝히기 위한 수단으로 실엔진에 간편하게 적용할수 있는 Optical fiber를 이용한 점계측 이색법의 계측방법을 확립하고자 한다.

즉, 실엔진에서 초기조건인 엔진회전수, 부하, 분사시기, 피스톤형상 변화에 대해 크랭크각도 경과에 따른 화염온도와 soot의 정성적인 값인 KL치를 구함으로써 연소개선을 위한 기초자료를 제공하고 화염온도가 soot의 생성과 소멸에 미치는 영향을 밝히는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 이색법 원리

화염의 절대온도를 T, 임의파장 λ 에 있어 흑체의 복사휘도(radiation brightness) $N_b(\lambda, T)$ 는

가시역의 파장에서 Wien의 식을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 C_1, C_2 는 Planck의 정수이며, T_a, ϵ_λ 는 각각 비흑체를 흑체로 간주했을 때의 화염의 휘도온도와 화염의 단색복사율이다. 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 화염두께로서 KL은 soot의 농도에 정성적으로 비례하는 값이다. α 는 한정된 파장의 정수로 가시역의 파장에서는 $\alpha = 1.38$ 로 정해진 상수이다. 위의 식 (1)과 식 (2)로부터 KL에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} KL &= \lambda_1^{\alpha_1} \ln [1 - \exp(\frac{C_2}{\lambda_1} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a1}}))] \\ &= \lambda_2^{\alpha_2} \ln [1 - \exp(\frac{C_2}{\lambda_2} (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a2}}))] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 T_{a1}, T_{a2} 는 실험을 통해 얻어지는 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

화염의 진온도 T와 KL치를 얻기 위해서 측정해야하는 화염의 두 휘도 온도는 임의의 두 파장에서의 온도이다. 이색법의 적용에 있어서 파장선택은 측정 조건에 따라 가시역, 적외역의 파장을 선택할 수 있으나, 본 실험에서는 가시파장역인 550nm와 적외역에 근접한 755nm를 사용하였다. 이로 인해서 상대적으로 넓은 온도범위

까지 측정이 가능하였다. 이들 두 파장대는 1400K~2500K 범위 내에서 파장과 온도에 따른 단색복사강도 변화의 기울기가 크며, 또한 화학 발광이나 라디칼발광의 영향이 적은 영역이다.

화염으로부터의 복사광은 엔진헤드에 설치된 Optical window에 입사된다. Optical window는 분무축상에서 스윙의 방향과 실린더 헤드의 구조적 제한인 실린더 헤드 상부 노즐의 간섭 등을 고려하여 설치하였다. Fig.1은 본 실험에서 사용된 optical window의 설치위치를 나타낸다.

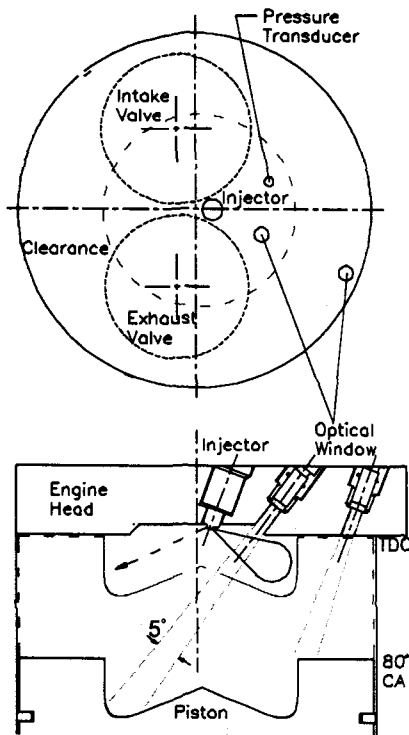


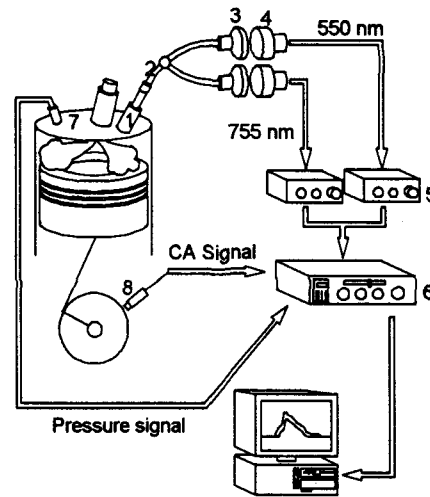
Fig. 1 Optical window relative position to the combustion chamber

Optical window의 계측광 경로는 Fig. 1에서 점선으로 나타난 것과 같고 캐비티의 내부를 가로지르는 중앙경로와 실린더 벽면부근을 가로지르는 벽면경로에서의 화염광을 계측하도록 하였다. 두 경로 모두 계측시각각도는 5°이다. 연소실 중앙부분을 계측하기 위한 설치위치는 인젝터의 넷분무중 하나의 분무에 집중하여 측정되며, 측정위치는 분공으로부터의 거리 13.8 mm 지점의 분무 표면상이며 직경 3mm 원에서 광화이버에

입사된 광량으로 계측하고, 연소실벽면을 계측하기 위한 설치위치는 분공으로부터 거리 30 mm 지점이다.

본 실험에서 실 엔진을 사용한 화염온도 및 KL치를 얻기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다.

시험엔진은 631cc 단기통 직접분사식 4 사이클 디젤엔진(대동, ND80DI)이며, 수동력계를 사용하여 부하를 조절하였다. 실린더 헤드 윗면에는 3개의 구멍을 뚫어 압력과 광(중앙, 벽면계측)을 계측할 수 있는 어댑터를 설치하였다. Table 1에 시험엔진의 제원을 나타낸다.



- 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. 2 Schematic drawing of the two-color measuring apparatus

Optical window를 투과한 복사광은 광화이버에 의해 광량이 정확히 양분되어 각각의 밴드패스 필터(band pass filter)를 거치면서 550nm, 755nm의 2 파장만으로 되어 포토 다이오드(Hamamatsu S2281-01)에 의해 전류로 변환되며, 포토센서 앰프(Hamamatsu C2719)에서 전압으로 증폭된다. 포토센서 앰프의 아날로그 출력 전압을 A/D 변환기를 통해 71μs 간격으로 디지털 신호로 변화시켜 컴퓨터에 입력되도록 하였

Table 1 Specification of test engine

Description	Specification
Type	4 cycle water cooled D.I. diesel engine
No. of cylinder	1
Piston displacement	631
Bore×Stroke	92×95
Compression ratio	19
Injection timing	BTDC 17° CA
Injection nozzle	Hole nozzle(4- ϕ 0.28m m)
Fuel injection pressure	22MPa

으며 이때 입력된 각각의 전압으로 두 휘도는 도가 얻어지며 이 두 휘도온도로서 진온도와 KL 치를 계산하였다.

550nm, 755nm의 두 휘도온도와 출력전압과의 관계를 검정하기 위해 흑연관 흑체로(2" dia blackbody type IV, thermogage, Inc.)를 사용하였다. 이 관계의 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 검정 곡선과 검정데이터와는 각각 98.0%, 98.5%의 정도로 일치했다.

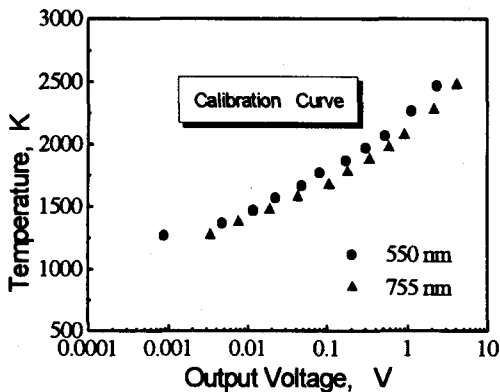


Fig. 3 Calibration curve

본 실험에서 사용된 시험조건을 Table 2에 보인다.

Fig. 4은 시험에 사용된 피스톤 캐비티 형상을 나타낸다.

회전수, 토크 변화는 공급되는 연료량에 관계되어

Table 2 Experimental conditions

Parameter	Condition
Engine speed	1300, 1700 rpm
Torque	0.3, 12.0 Nm
Injection timing	BTDC 17, 12 deg. CA
Optical path	Center, Wall
Piston type	Toroidal, Reentrant

연소실 내의 평균당량비 변화에 따른 영향을 보기 위해서이며, 분사시기는 정상과 지연된 조건을 통해 예혼합 연소량 변화에 대한 영향을, 계측위치는 벽면에서 화염의 소멸에 의한 soot 생성 관계를,

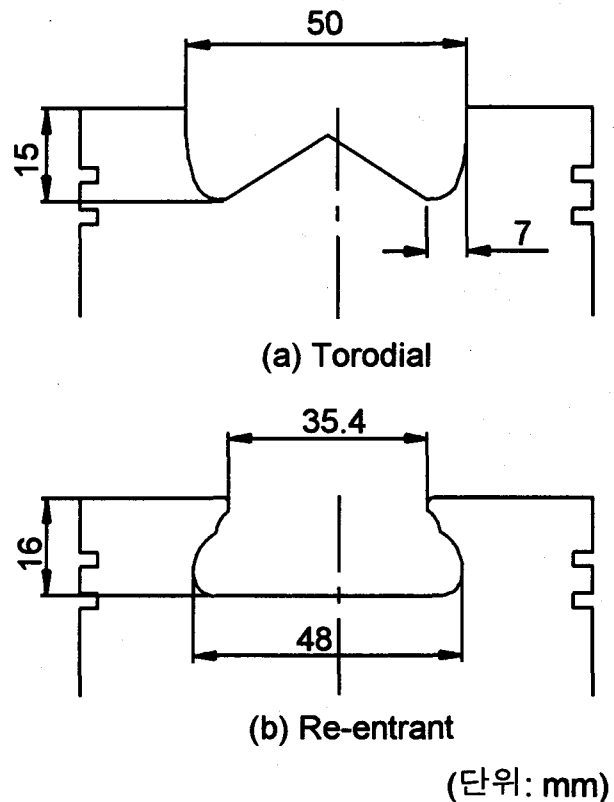


Fig. 4 Piston cavity shapes

피스톤 형상변화는 연소실 내의 유동변화 및 분무된 연료의 혼합상태에 따른 영향 등을 알아보기 위해 이들 시험변수를 변화시켜 가며 연소압력, 화염온도 및 KL치를 계측하였다.

3. 결과 및 토론

각 시험조건에서 화염온도와 KL치는 측정된

30회 사이클을 검토, 분석하여 임의의 3회 사이클에 대하여 시험결과를 함께 나타내었다. 이는 연소실내에서 발생하는 사이클 변동과 유동에 의해 측정광경로를 soot cloud가 이동함에 의해서 광신호의 불규칙적인 변동과 같은 비정상적인 조건에서 화염온도와 KL치의 관계를 확인하기 위해서이다.

3.1 엔진회전수, 토크 및 계측위치의 영향

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

엔진회전수 1300rpm에서 토크 0.3, 12Nm와 1700rpm 토크 12Nm인 시험조건에서 크랭크각도에 따른 연소압력과 열발생률을 Fig. 5에 나타낸다. 캐비티는 토로이달 형상이며 연료분사시기는 정상분사시기인 BTDC 17° 이다.

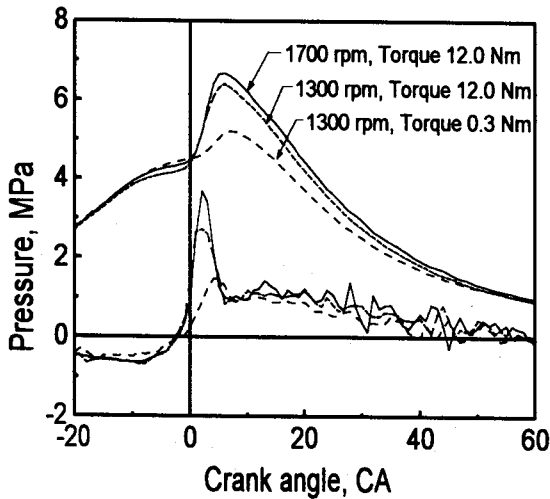


Fig. 5 Cylinder pressure and heat release rate with crank angle at different engine speeds and torques

1300rpm에서 토크가 0.3에서 12Nm로 증가함에 따라 연소최고압력은 5MPa에서 6.4MPa로 증가하며 급격연소구간의 기울기 구배는 더욱 커진다. 토크 12Nm에서 엔진회전수가 1300에서 1700rpm으로 증가함에 따라 연소최고압력은 다소 증가하는 경향을 보인다. 열발생률의 경우 엔

진회전수 및 토크가 증가함에 따라 예혼합연소량이 급격히 증가함을 보이나 확산연소량은 거의 일정한 경향을 보인다.

Fig. 5인 엔진회전수 및 토크의 조건에서 연소실 중양을 계측한 경우의 화염온도와 KL치를 Fig. 6에 나타낸다. 화염온도의 경우 엔진회전수, 토크가 증가함에 따라 화염최고온도는 2000K에서 2200K으로 증가하며, 1800K이상의 고온유지기간도 증가하는 경향을 보인다. soot의 정성적인 값에 비례하는 KL치의 경우, 확산연소 초기에 급격히 생성된후 후연소기간에서 급격히 산화하는 경향을 보인다. ATDC 5~10° 사이에 KL치가 최대로 되

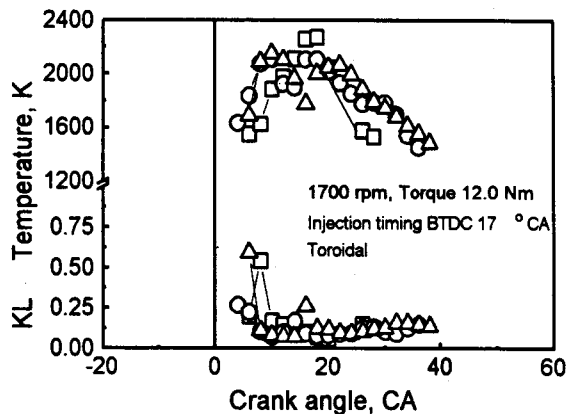
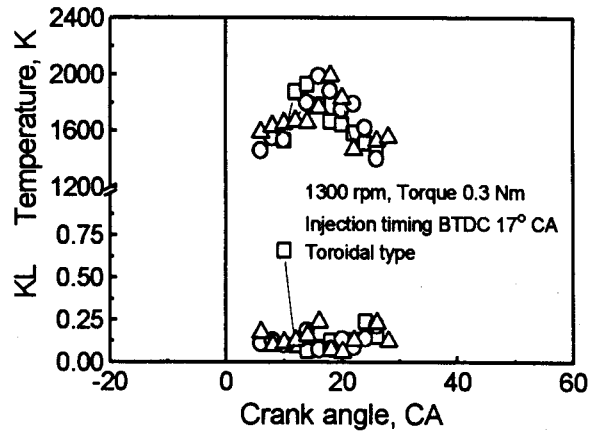


Fig. 6 Flame temperature and KL factor with crank angle at different engine speeds, torques and measurement sights

는 것은 캐비티벽면에 충돌한 분무화염이 캐비티면을 따라 성장하는 확산화염이며 국소 당량비가 상대적으로 높은 영역을 계측광경로가 통과하기 때문으로 생각된다. ATDC 10° 이 후에 KL치가

급격히 산화하여 일정한 경향을 보이는 것은 피스톤 팽창에 의한 연소실 체적 증대에 기인하여 국부적으로 농후한 연료·공기의 혼합이 양호해지고 또한 화염온도가 높게 유지되어 soot의 산화가 촉진되어 KL치가 낮은 값을 나타내는 것으로 생각된다.

엔진회전수, 토크가 증가함에 따라 공급된 연료량의 증가에 의해 평균당량비가 증가함에도 불구하고 연소후반부의 KL치는 유사한 경향을 보인다. 이는 열발생률에서 알 수 있듯이 엔진회전수와 토크가 증가할수록 예혼합연소량이 급격히 증가한 반면 확산연소량은 엔진회전수와 토크에 관계없이 유사한 경향을 나타내기 때문이다.

Fig. 7은 화염온도가 soot에 미치는 영향을 알아보기 위하여 크랭크각도 경과에 따른 화염온도와 KL치 데이터를 화염온도와 Log(KL) 관계로서 나타낸 것이다.

엔진회전수와 토크에 관계없이 화염온도와 Log(KL)은 서로 반비례 관계를 가지며 1300rpm에서 토크가 증가할수록 1400~1700K 화염온도 범위에서 KL치는 높은 값을 보인다. 이러한 현상으로 미루어 평균당량비가 증가할수록 동일 화염온도에서의 soot 생성은 증가하는 경향을 알 수 있다. 또한 엔진회전수가 증가할수록 다른 조건의 동일 온도범위에서 KL치의 절대치는 높음을 알 수 있다. 이는 엔진회전수 증가에 따른

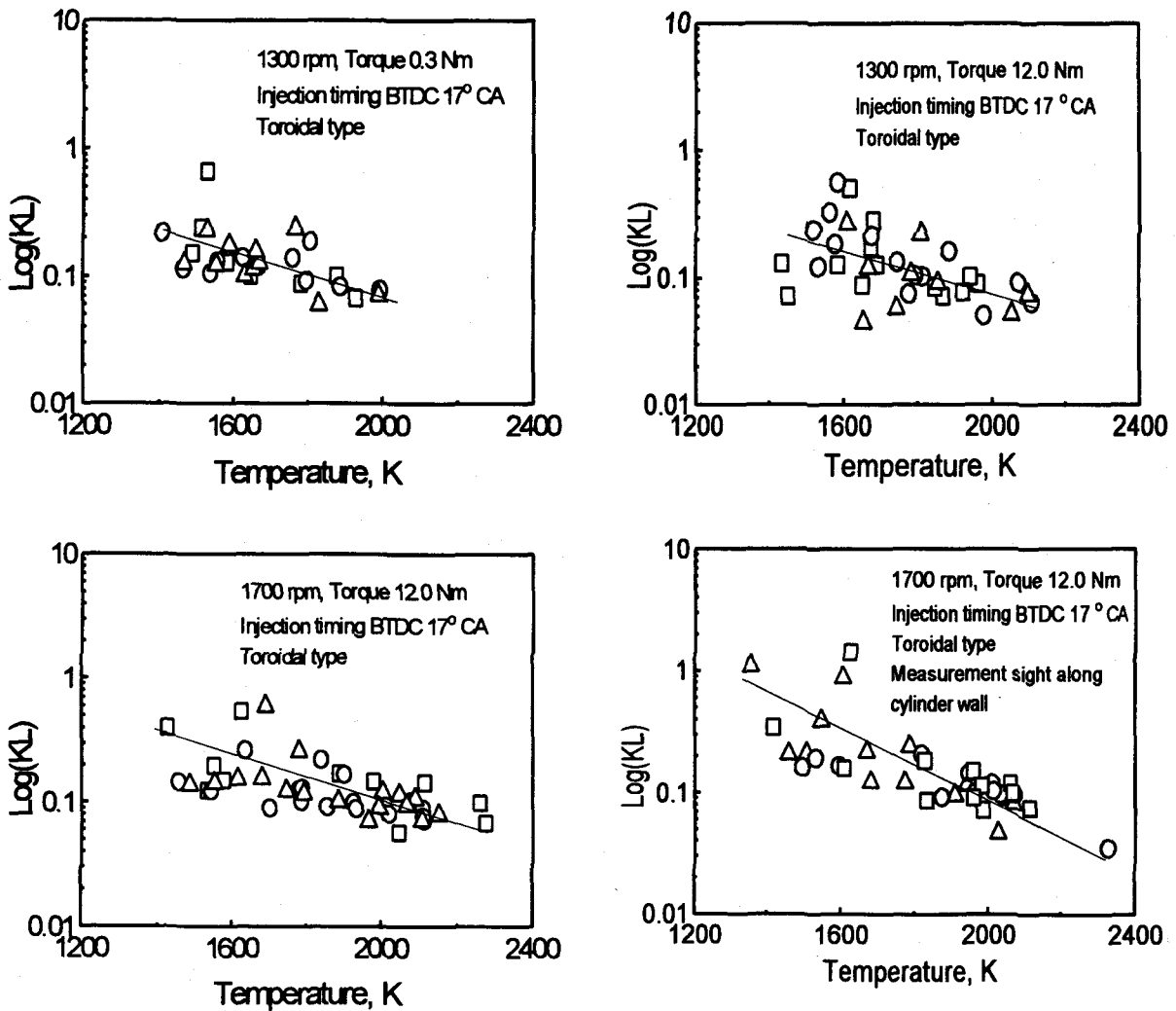


Fig. 7 Flame temperature and Log(KL) factor at different engine speeds, torques and measurement sights

연료·공기 혼합시간이 짧아져 soot의 산화가 불량해지기 때문으로 생각된다.

계측위치의 경우 벽면쪽이 중앙쪽보다 화염온도와 Log(KL)의 구배가 더욱 급격해지며, 특히 1400~1600K인 낮은 온도범위에서 KL치는 더욱 높은 경향을 보인다.

3.2 분사시기 및 캐비티형상의 영향

분사시기 지연에 따른 화염온도변화와 예혼합연소량의 변화가 soot의 생성및 산화에 미치는 영향과 연소실 내의 캐비티 형상변화에 따른 스웰, 스퀴시 등의 난류에 의한 엔트레인먼트(entrainment)의 증대효과에 의해 연료공기의 혼합촉진이 화염온도 및 KL치 특성에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위해서 분사시기를 17° 에서 12° 로 지연시켜 실험을 행하고, 캐비티 형상을 벽면 충돌분류 후에 엔트레인먼트 증대효과가 뛰어난 Reentrant 형에 대하여 제작 실험하였다.

Fig. 8은 엔진회전수 1700rpm, 토크 12.0Nm조건에서 분사시기 BTDC 17° , 12° 인 Toroidal 형 연소실과 분사시기 BTDC 12° 인 Reentrant 형에서의 연소압력과 열발생률을 나타낸다.

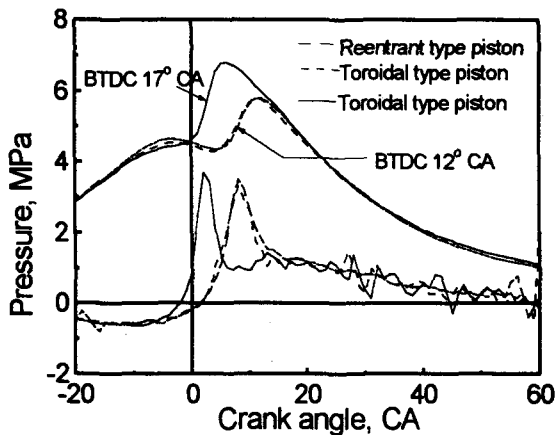


Fig. 8 Cylinder pressure and heat release rate with crank angle at different injection timings and piston cavity shapes

분사시기가 BTDC 17° 에서 12° 로 지연될수록

연소최고압력 발생위치는 ATDC 3° 에서 10° 로 지연되며, 연소최고압력은 7MPa에서 5.5MPa로 떨어진다. 또한 열발생률에서 최고열발생 위치도 지연되며, 착화지연의 단축에 따라 예혼합연소량의 감소 및 확산연소량이 증가하는 경향을 보인다. 피스톤 형상변화에 따른 연소압력과 열발생률은 거의 유사한 경향을 보이거나 Reentrant형의 경우가 열발생률의 최고치와 압력상승곡선의 기울기가 다소 높게 나타나는 경향을 보인다.

Fig. 8과 동일 조건에서 화염온도와 KL치를 크랭크각도에 대해 Fig. 9에 나타낸다.

화염온도의 경우 분사시기가 지연될수록 화염최고온도는 2200K에서 2000K으로 감소하며, 1800K 이상의 고온 유지기간도 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향으로 볼 때, 기존의 분사시기지연에 의한 화염온도의 저하를 통해 NOx의 저감이 가능함을 확인할 수 있다. 그러나 KL치의 경우 정상 분사시기인 거의 유사한 값을 보이거나 연소후반부에서 2~3배 증가하는 경향을 보인다. 이는 분사시기지연에 예혼합연소량의 감소와 고온의 화염온도 지속기간이 상대적으로 짧아 soot의 산화가 다소 둔화되며, 또한 피스톤 팽창에 따른 연소실내에 화염이 소멸 혹은 냉각되는 표면적이 증가하기 때문으로 생각된다.

피스톤 형상변화에 따른 화염온도는 연소압력이나 열발생률과 같이 최고화염온도 역시 캐비티 형상에 관계없이 2 종류 모두 약 2000K을 나타낸다.

크랭크각도 경과에 따른 화염온도의 경우 Reentrant 형이 ATDC 8° 부근부터 화염온도가 상승하기 시작하며, Torodial 형은 12° 부근부터 상승함을 보여 연소초기에 Reentrant 형이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 이는 Reentrant 형의 경우 상사점부근에서 피스톤 상승과 함께 유속이 가속되어 두 개의 영역으로 회전하는 vortex를 가지며 이 현상들이 스웰의 형태로서 캐비티 내에서 유동함에 의해 엔트레인먼트 증대효과가 다소 뛰어나기 때문으로 생각된다. 그러나 연소후반부에는 BTDC 17° 와 비교하면 연소초기와 중반까지는

Reentrant 형이 Toroidal 형 보다 10° 정도 더 길 게 화염온도가 지속되는 결과를 보인다. 따라서 연소초기에는 Reentrant 형, 연소후반에 갈수록 Toroidal 형이 더욱 유리함을 알 수 있다.

하여 Fig. 9의 크랭크각도 경과에 따른 화염온도와 KL치 데이터를 화염온도와 Log(KL) 관계로 서 나타낸 것이다. 분사시기 및 캐비티 형상에 관계없이 화염온도와 Log(KL)은 반비례 관계를

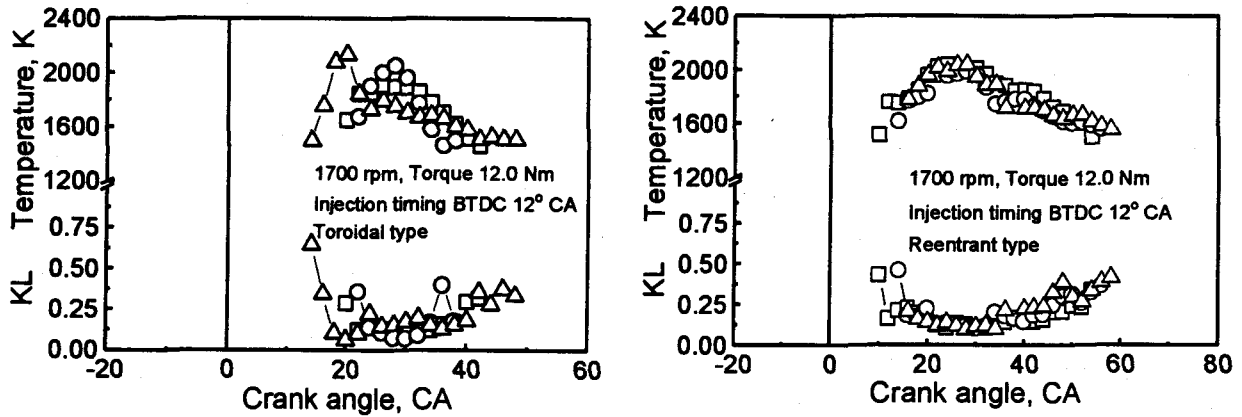


Fig. 9 Flame temperature and KL factor with crank angle at different injection timings and piston cavity shapes

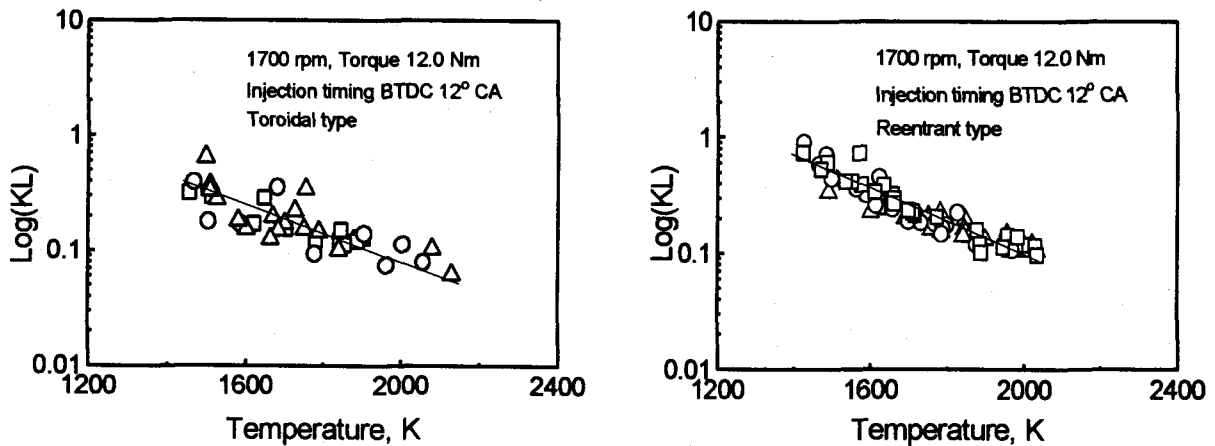


Fig. 10 Flame temperature and Log(KL) at different injection timings and piston cavity shapes

Fig. 10은 분사시기 및 캐비티형상의 영향에서, 화염온도가 soot에 미치는 영향을 알아보기 위

보이고, Fig. 6의 정상분사시기보다 지연될수록 그 구배는 더욱 커진다. 특히 화염온도가 140

0~1700K인 낮은 온도범위에서 KL치는 더욱 높은 값을 보인다. 캐비티 형상에 따른 조건에서 Reentrant 형이 상대적으로 Toroidal 형보다 전 온도범위에서 KL 치는 다소 높은 범위를 보였다.

4. 결 론

(1) 화염온도 계측을 위한 접촉식 이색법은 압력센서와 같이 간편하게 연소해석을 하는데 유용함을 확인하였다.

(2) 이색법 장치로 계측한 디젤엔진의 토크, 분사시기, 캐비티 형상변화에 따라서 크랭크각도에 따른 화염온도, KL치의 특성은 다른 방법으로 계측한 타 연구자의 결과와 정성적으로 잘 일치하여 계측법의 타당성이 확인되었다.

(3) 연소초기에서 Reentrant 형, 연소후반에서는 Toroidal 형이 soot 저감에 유리하다.

(4) 화염온도와 KL치는 반비례하며, soot를 저감시키기 위해서는 연소후반부의 온도를 올리는 것이 soot의 산화에 유리하다.

후기

이 논문은 1997년도 부산정보대학 학술연구소의 지원으로 연구되었으며, 도움을 주신 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 西田 등, 1995, "高壓噴射時の直接ディーゼル機關燃焼室における燃料噴霧の分布と燃焼, 排氣特性", 第12回 内燃機關 シンポジウム, 講演論文集, pp. 211-216

(2) 武田 등, 1994, "高壓噴射によるディーゼル機關の燃焼改善及び排出物の低減," 自動車技術會論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 45 - 50

(3) N. Iida and G. T. Sato, 1988, "Temperature and Mixing Effects on NOx and

Particulate," SAE Paper, 880424.

(4) L. Luo, M. J. Piphoo, J. L. Ambs and D. B. Kittelson, 1989 "Particulate Groth and Oxidation in a Direct-Injection Diesel Engine." SAE Paper 890580.

(5) G. Grevees, J. O. Meehan., 1975, "Measurement of instantaneous soot concentration in a diesel combustion chamber." CIMAC C88175

(6) Iida and Watanabe. 1990, "Surrounding gas condition effect on NOx and particulates", International Symposium COMODIA 90, pp. 625~632

(7) N. Iida, 1993, "Surrounding gas effects on soot formation and extinction - observation of diesel spray combustion using a rapid compression machine. SAE paper 930603

(8) H. Fujimoto, H. Iida, T. Aoyama and J. Senda., 1994, "Analysis of combustion characteristics in diesel flame by means of chemilumin-escence." international Symposium COMODIA 94, pp. 505~ 510

(9) T. Shiozaki, A. Miyashita, Y. Aoyagi and I. 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) K. Nakakita, M. Nagaoka, T. Fujikawa and K. Ohsawa. 1990, "Photographic and three dimensional numerical studies of diesel soot formation process." SAE paper 902081