

# 디젤엔진에서 연소실 형상이 화염온도 및 KL치에 미치는 영향

## Combustion Chamber Shape Effects on Flame Temperature and KL Value in a Diesel Engine

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

### ABSTRACT

The present study deals with the effect of combustion chamber shape on in-cylinder soot oxidation characteristics of a D. I. diesel engine. The analysed combustion chambers were a toroidal and a reentrant, a reentrant with a projection(Complex).

The two-color method was used to measure in-cylinder flame temperature and KL value which is approximately proportional to the soot amount along the optical path. In addition, heat release rate was calculated from the in-cylinder pressure data.

From these investigations, the soot oxidation of the reentrant and the complex which were strengthen squish flows went worse in late combustion period under heavy-load operation compared to that of the toroidal at retarded fuel injection timing. It might be the cause of the flame holding that squish lip depress the outflow of flame from the bowl to the entire combustion space.

주요기술용어 : D. I. Diesel Engine(직접분사 디젤엔진), Combustion Chamber Shape(연소실 형상), Two-Color Method(이색법), Flame Temperature(화염온도), KL Value(KL치)

### 1. 서 론

뛰어난 연료경제성과 높은 열효율을 가진 디젤 엔진은 여러 용도의 동력원으로 광범위하게 사용되어 오고 있으며 향후 전 세계적으로 증가할 전

망이다. 그러나 상대적으로 높은 NO<sub>x</sub>와 PM의 배출이 문제가 되어 두 유해물질에 대한 규제가 엄격해지고 있다.

그러나 soot와 NO<sub>x</sub>의 배출특성은 서로 상반 관계이며 두 물질의 동시 저감을 위해서는 상대 물질의 생성에 영향을 주지 않으면서 줄이는 방법이 요구되며 이중 연소실내의 연소개선을 통한 soot 저감이야말로 가장 근본적인 방법으로 생각된다. 연소개선을 통한 NO<sub>x</sub>와 soot의 동시저감을 위해서는 예혼합연소시의 연소온도를 낮추어

\* 정회원, 동아대학원

\*\* 정회원, 창원전문대학

\*\*\* 정회원, 동아대학원

NOx와 soot의 생성을 억제시키고 후연소기간에 공기가용률 증가 및 화염온도를 올려 soot의 산화를 촉진하는 것이 바람직하다(1).

본 연구에서는 분사시기를 지연시켜 연소온도를 저하(2)시킨 조건에서 스퀴시부의 공기유동을 고려한 연소실 형상 변경에 따른 연소압력과 연소실내의 화염온도를 측정하였다. 연소압력으로부터는 초기연소특성, 화염온도로부터는 soot의 농도에 정성적으로 비례하는 값인 KL치의 정보를 비교 분석한 후 대표적인 연소실 형상변화를 통하여 연소실내 유동을 변화시킨 경우의 soot 산화에 관한 기초정보를 제공한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 이색법 원리

Soot의 연속복사에 주목한 이색법은 서로 다른 2 파장에 있어서 복사광을 검출하여 화염온도를 구한다. Diesel 화염에 관해서 soot 미립자만의 단색복사율은 다음의 Hottel-Broughton(3)의 식으로 나타낼 수 있다.

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

K는 흡수계수, L은 측정광축방향의 기하학적인 화염두께로서 KL은 화염중의 soot미립자 농도에 거의 비례하는 값이다.  $\alpha$ 는 파장범위에 의해서 정해지는 정수로서, 가시파장 영역에서는  $\alpha = 1.38$ 이다. 화염온도 T와 KL은 두 파장의 복사광으로부터 화염의 휘도온도를 측정하여 수치적으로 구해지게 된다. 이 두 휘도온도는 각 파장의 포토 센서 앰프의 출력전압으로 계산되므로 휘도온도와 출력전압과의 관계를 검증하기 위하여 흑연관 흑체로(한국표준과학 연구원, Graphite Extension Tube Type Blackbody)를 사용하였다(4).

이색법을 이용한 화염온도 측정시 파장의 선정은 신뢰성 있는 측정을 위해서 아주 중요하며 일반적으로 이색법용으로 가시광선과 적외선 파장 영역대가 사용되고 있다. 본 연구에서는 가시광

선영역의 550nm와 755nm를 선정하였으며 이 파장대에서는 온도에 대한 단색복사광 강도의 변화가 크기 때문에 측정온도의 오차를 줄일 수 있다. 또한 적외역에 근접한 755nm를 선정함으로써 비교적 낮은 온도범위까지 측정이 가능하게 하였다. 이들 두 파장은 각 종의 밴드 스펙트럼의 영향 (5~7)을 피한 파장대이다.

### 2.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 엔진은 단기통 직접분사 디젤엔진으로 행정체적 631cc, 압축비 19, 4 hole nozzle(4×0.3mm)이며 분사압력 21MPa이다. 엔진의 부하조절은 와전류식 동력계를 사용하였으며, 연소압력과 화염온도의 측정을 위하여 엔진 헤드에 압력 변환기와 광 프로브를 장착할 수 있는 어댑터를 부착하였다.

연소실내 화염으로부터의 복사광을 채취할 때 복사광의 검출 광 경로(Optical Path)가 분무의 중심축을 향하게 설치하였으며 Fig. 1에 나타낸다. 이 때의 광 경로는 광 검출시야가 Cone Angle 5° 로써 전체화염온도 측정기간동안 피스톤의 Cavity 내부를 관통한다.

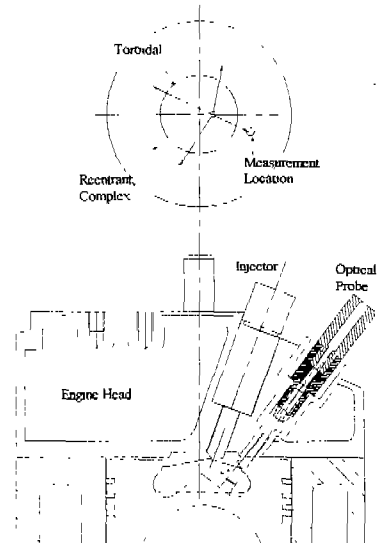


Fig. 1 Optical Path Relative Position to the Combustion Chamber and Location of the Observation on the Engine Head

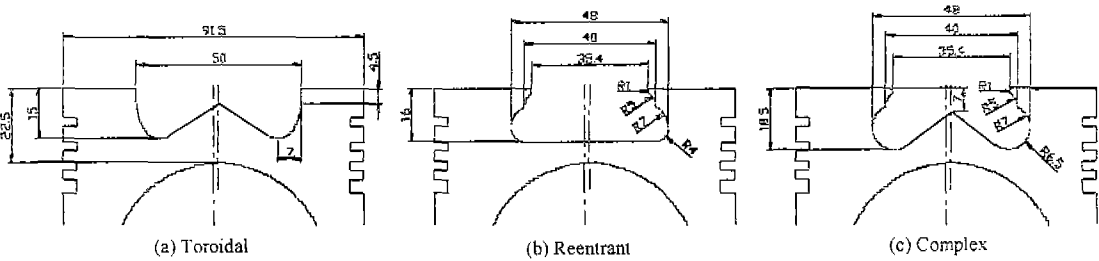


Fig. 2 Combustion Chamber Shapes

Table-1에 본 실험의 변수를 나타낸다. 엔진 회전수의 변화는 유동특성 변화의 영향, 토크의 변화는 평균당량비 변화에 따른 영향, 연소실 내의 연료-공기혼합특성과 유동특성이 다른 Toroidal, Reentrant, Complex의 연소실을 사용하여 연소실 형상에 따른 영향을 살펴보고자 하였다. 각각의 실험변수에 따라서 연소압력과 화염온도를 측정하였으며, 연소압력으로부터는 초기 연료-공기혼합특성을 해석하는 자료로 화염온도로부터는 Soot 농도에 정성적으로 비례하는 KL치를 계산하여 Soot 산화특성을 조사하는 자료로 사용하였다. 본 실험에서 사용된 엔진의 연료분사시기는 BTDC 17°이지만 NOx 저감을 위해 정상 분사시기보다 지연된 BTDC 10°로 설정하여 실험을 행하였다.

Table 2 Experimental Parameters

| Parameters          | Conditions                   |
|---------------------|------------------------------|
| Engine speeds       | 1300, 1700 [rpm]             |
| Torques             | 9.8, 19.6, 29.4 [N · m]      |
| Combustion Chambers | Toroidal, Reentrant, Complex |
| Injection Timing    | BTDC 17° CA<br>→BTDC 12° CA  |

직접분사 디젤엔진에서 연소실 형상은 복잡하며 또한 그 형상에 따라서 연료분무의 분포와 연료-공기의 혼합상태, 공기의 유동특성은 크게 달라진다. 본 연구에서는 선행연구자들에 의해 밝혀진 연구결과(8~10)를 고려하였으며 실험엔진에 장착되어 일반적으로 사용되고 있는 toroidal

연소실의 형상을 변경하여 초기 예혼합이 뛰어난 것으로 알려져 있고 squish 유동이 강화된 기본 형태의 reentrant, reentrant의 cavity 바닥면에 projection이 부착된 복합적인 형상의 complex 연소실을 제작하여 실험하였다. 피스톤 직경 B, cavity 입구직경 D일 때 squish 유동의 강도를 좌우하는 직경비 D/B는 toroidal이 0.5, reentrant와 complex 연소실은 squish 유동이 강화된 0.38이다. Fig. 2에 실험에 사용된 연소실 형상을 나타낸다.

### 3. 결과 및 토론

본 연구에서는 연소해석과 soot의 산화과정을 분석하기 위하여 분사시기부터 연소압력곡선의 최초 상승시기까지를 착화지연기간[ $\tau_m$ ], 착화시기부터 연소최고압력 지점까지를 예혼합연소기간[ $\tau_{PC}$ ]으로 설정하였으며, 이후 화염온도 계측 마지막 지점까지를 후연소기간으로 설정하였다. 후연소기간에서는 soot의 산화가 이루어지고 후연소가 활발하게 일어나는 연소최고압력 이후부터 ATDC 30° 구간을 후연소중시기간[ $\tau_{MC}$ ], 이후부터 화염온도 계측이 종료되는 시점까지를 후연소말시기간[ $\tau_{LC}$ ]로 각각 구분하여 연소해석을 수행하였다.

#### 3.1 화염온도와 KL 특성

각 시험조건에서 측정된 30회 사이클을 검토, 분석하여 임의의 3회 사이클에 대하여 크랭크각도에 따른 화염온도와 KL치를 나타내었다. 이는

연소실내에서 발생하는 유동의 사이클변동 때문에 측정 광 경로상의 soot cloud 이동이 불규칙하여 각 사이클마다의 광신호가 큰 폭으로 변동하는 조건에서 화염온도와 KL치의 관계를 확인하기 위해서이며, 또한 측정된 광신호의 변동은 유동에 의한 것이므로, 화염온도의 변동을 통해 각 cavity의 유동특성과 유동에 의한 soot의 산화특성도 함께 관찰할 수 있다.

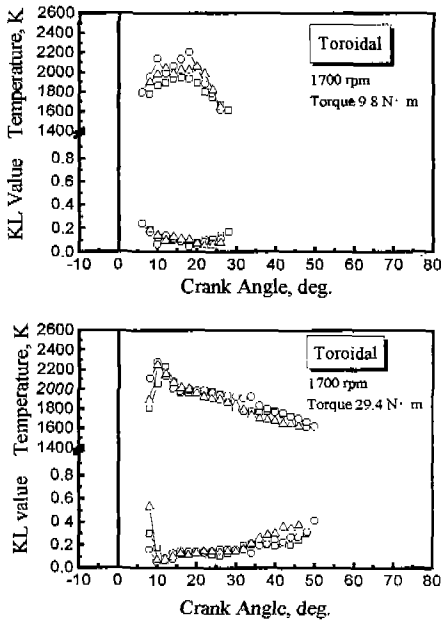


Fig. 3 Temperature and KL Value at Toroidal shape

Toroidal 연소실에서 1700rpm, 토크 9.8N·m와 29.4N·m에 대해 크랭크각도에 따른 화염온도와 KL치를 Fig. 3에 나타낸다

화염온도의 경우 토크가 증가함에 따라 최고 화염온도는 약 2100K에서 2300K로 증가하며, 1800K 이상의 고온유지시간도 증가하는 경향을 보인다. 또한 토크 9.8N·m의 경우 화염온도의 변동이 심하며, 이는 연료분사량이 상대적으로 적어 광 측정 경로 상의 생성된 화염의 크기가 적기 때문으로 생각된다. 본 그림에서 나타내지는 않았지만 10회 분석된 측정결과를 보면 후연소기간중에서 최고압력 발생 이후부터 ATDC

30° 기간동안 가장 활발한 화염온도의 변동을 볼 수 있었다.

Soot의 정성적인 값에 비례하는 KL치는 제어 연소기간에 급격히 생성된 후 후연소기간 초기에 급격히 산화하여 연소후반까지 꾸준히 산화하는 특성을 보인다. 이는 피스톤 팽창에 의한 연소실 체적 증대에 기인하여 국소적으로 농후한 혼합기 부분이 희석되고 또한 화염온도가 높게 유지되는 기간동안 soot의 산화가 촉진되어 KL치가 감소되는 것으로 생각된다.

그러나 토크가 증가한 29.4N·m의 조건에서는 분사된 연료량의 증대로 인해 대략 ATDC 30° 이후부터는 KL치가 다시 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 cavity 형상에 관계없이 연소기간이 증가할수록 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 피스톤이 팽창하면서 연소가스내의 soot와 잔류공기와와의 혼합이 양호해짐에도 불구하고 화염온도가 1800K 이하로 떨어짐에 따라서 soot의 산화가 불량해지는 것으로 판단된다.

Reentrant 연소실에서 1700rpm, 토크 9.8N·m와 29.4N·m에 대해 크랭크각도에 따른 화염온도와 KL치를 Fig. 4에 나타낸다

화염온도의 경우 토크가 증가함에 따라 toroidal과 유사한 경향을 보인다. 그러나 화염온도를 측정할 결과에 의하면 더 오랜 시간동안 화염이 관찰되며, 전체적인 KL치가 상대적으로 높게 나타나고 특히, 토크가 증가한 29.4N·m의 조건에서는 전반적으로 KL치가 0.2 이상의 값을 나타내 toroidal과는 다소 다른 경향을 나타낸다.

이러한 이유는 toroidal 연소실의 경우 연소초기에 피스톤 틈새부로 연료와 화염이 유출되어 적절한 공기이용에 의해 soot의 산화에 영향을 미치는 반면에 reentrant 연소실의 경우에는 연소후반부에 화염이 cavity 내에 갇히게 되어 (Flame Holding 현상) 오랜 시간동안 화염의 계속이 가능한 것으로 생각되며, 이러한 영향이 연소후반의 공기이용률 저하를 통해 cavity내에 생성된 soot의 산화가 불량해지는 것으로 생각된다.

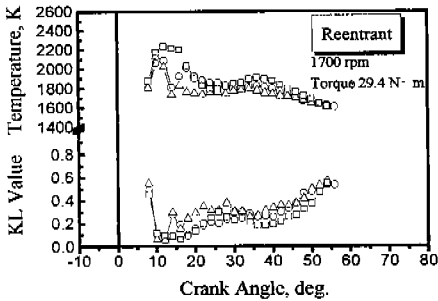
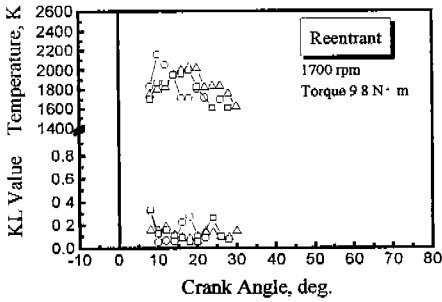


Fig. 4 Temperature and KL Value at Reentrant shape

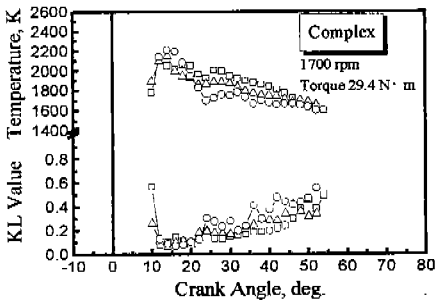
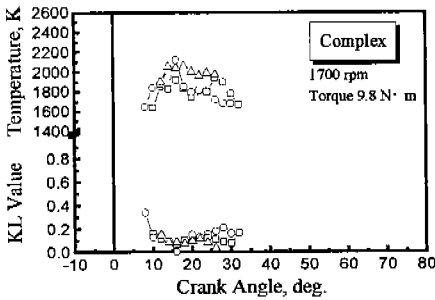


Fig. 5 Temperature and KL Value at Complex shape

토크 9.8과 29.4N·m의 조건에서 complex 연소실의 크랭크각도에 따른 화염온도와 KL치를

Fig. 5에 나타낸다

화염온도의 경우 ATDC 10~30° 구간 그리고 ATDC 30° 이후 구간 모두 reentrant형과 toroidal형의 중간 특성을 지닌다.

연소후반에는 reentrant 연소실의 경우보다는 적지만 역시 화염이 cavity 내에 갇히게 되는 특성이 확인되어 cavity내에서 생성된 soot의 산화가 toroidal 보다는 다소 불량한 것으로 나타났다.

### 3.2 연소실 형상에 따른 예혼합연소 특성

초기 예혼합 연소특성은 연소실 형상에 많은 영향을 받는다. 따라서 연소실 형상이 초기 예혼합연소에 미치는 영향을 알아보기 위하여 예혼합연소기간 동안에 발생한 열발생률을 적산하여 예혼합연소량[THRR : Total Heat Release Rate]을 구하였다.

엔진회전수 1300rpm과 1700rpm, 토크 9.8, 19.6, 29.4N·m에서 연소실 형상에 따른 예혼합연소량을 Fig. 6에 나타낸다.

1300rpm에서 예혼합연소량은 부하에 관계없이 reentrant, complex 그리고 toroidal의 순서이지만 reentrant의 압축비가 약간 높은 것을 고려하면 reentrant와 complex의 예혼합연소량은 동일한 값을 보일 것이다. 토크가 증가할수록 toroidal에 비해 reentrant가 10%에서 13%로 다소 증가하는 경향을 보인다. 이는 reentrant와 complex 연소실의 경우가 toroidal에 비해 cavity 벽면 reflex부로 인해 연료분무의 분포상태가 양호하고 상대적으로 활발한 공기유동으로 인한 연료-공기의 혼합촉진효과에 기인하는 것으로 판단된다.

상대적으로 고회전인 1700 rpm의 경우에는 전 토크 영역에 걸쳐서 reentrant와 complex 형상은 서로 유사하며, 이들 두 형상은 toroidal에 비해 18%~23% 정도 예혼합연소량이 높게 나타나고 있다.

토크 29.4N·m인 조건에서 엔진회전수가 증

가할수록 reentrant와 complex의 예혼합연소량 차이가 3% 정도로 적어지는 것을 알 수 있다. 이는 complex 형상이 reentrant 보다 엔진회전수 증가에 따른 유동강화에 의한 혼합기 형성이 다소 유리한 것으로 생각된다.

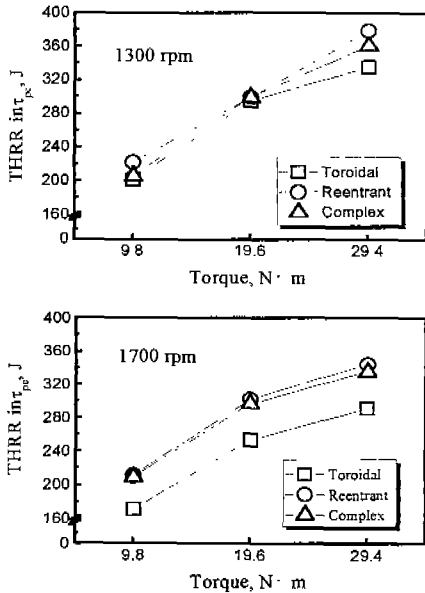


Fig. 6 Total Heat Release Rate for Three Different Combustion Chamber Shapes

### 3.3 연소실 형상에 따른 화염온도와 Soot 산화 특성

엔진회전수 1700rpm, 토크 9.8, 29.4N·m에서 10회 사이클의 화염온도와 KL치를 예혼합연소기간( $\tau_{PC}$ ), 후연소중기기간( $\tau_{MC}$ ), 후연소말기기간( $\tau_{LC}$ )의 각각의 연소구간에 걸쳐서 적산하여 평균하였다. 이들 평균 화염온도와 평균 KL치를 연소실 형상에 따라서 Fig. 7에 나타낸다. 또한 이들 값에 대한 구체적인 soot의 화염온도의존성을 확인하기 위하여  $\tau_{PC}$ ,  $\tau_{MC}$ ,  $\tau_{LC}$ 에 대한 화염온도와 Log(KL)을 Fig. 8과 9에 각각 나타낸다.

토크 9.8N·m의 조건에서 연소구간에 상관없이 3 종류의 연소실 모두 평균 KL치가 0.2 이하의 낮은 값을 보이며, 초기에 생성된 soot는 후연

소 중기기간에서 약 0.1 정도로 대부분 산화하는 것을 알 수 있다.

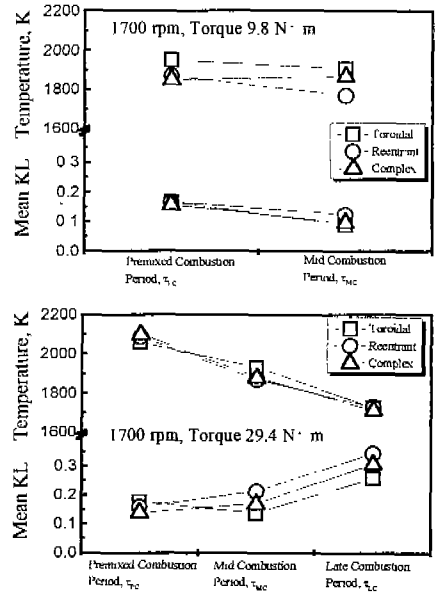


Fig. 7 Mean KL and Mean Temperature for Three Different Combustion Chamber Shapes

예혼합연소기간에서 평균 화염온도는 complex와 reentrant는 유사하고 toroidal이 가장 높은 반면에, 평균 KL치는 3 종류 연소실 모두 거의 동일한 경향을 나타내고 있으며, 후연소 중기기간 역시 평균 화염온도와 평균 KL치 모두 예혼합연소기간과 유사한 특성을 보였다.

이와 같은 특성을 Fig. 8의 화염온도와 Log(KL)과의 관계로서 살펴보면, 예혼합연소기간에서는 KL치가 0.2 이하로 되는 화염온도는 toroidal이 1880K로 가장 높고, complex와 reentrant는 1770K로 유사한 특성을 보이며, 후연소 중반부에서는 3가지 연소실 형상 모두 화염온도에 관계없이 전 영역이 0.2 이하의 값을 보이는 것으로 미루어 토크가 적은 영역에서는 화염온도에 대한 의존성이 적은 것을 알 수 있다.

고부하인 29.4N·m의 조건에서 3 종류의 연소실 모두 연소기간이 길어짐에 따라 평균 화염온도는 선형적으로 감소하고, 평균 KL치는 지수

한수적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 예혼합연소기간에서 3 종류의 연소실 모두 평균 KL치가 0.2 이하의 값을 보이고 있으며, reentrant의 경우를 제외하면 후연소중기기간에서도 역시 이와 같은 경향이 나타나고 있다.

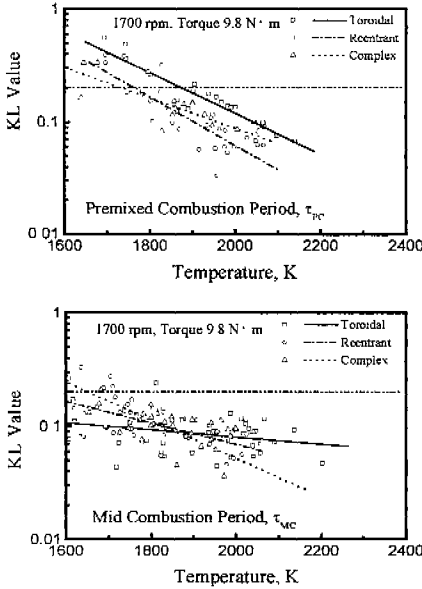


Fig. 8 Log(KL) and Temperature for Three Different Combustion Chamber Shapes

그러나 평균 화염온도가 1800K 이하로 떨어지는 후연소말기기간에서는 3 종류의 연소실 모두 평균 KL치가 0.25 이상의 값을 나타내어 이 연소기간에서 soot의 산화가 불량해짐을 알 수 있다. 또한 이 연소기간에서 reentrant, complex, toroidal 연소실의 순서로서 평균 KL치가 높게 나타나고 있다. 이는 reentrant와 complex 연소실의 경우 cavity 내의 유동이 강화되었음에도 불구하고 cavity내의 bowl부에 연소가스가 갇히게 되는 화염의 홀딩현상에 따른 국소적인 공기 부족과 화염의 냉각에 의해 soot의 산화가 불량해지는 것으로 판단된다.

Fig. 9의 화염온도와 Log(KL)의 관계에서도 이와 같은 경향을 확인할 수 있으며, 특히 예혼합기간 및 후연소기간 모두 전 영역에서 화염온도

와 Log(KL)이 선형적인 반비례 관계를 보이며, KL치가 0.2 이하로 되는 구간에서 예혼합기간은 화염온도가 1930K 이상의 영역이지만 후연소기간에서는 1800K 영역 부근으로 내려가는 경향을 보인다. 또한 화염온도에 대한 soot 산화의 기울기는 예혼합 연소기간의 경우에는 3가지 연소실 모두 동일한 형태를 보인다.

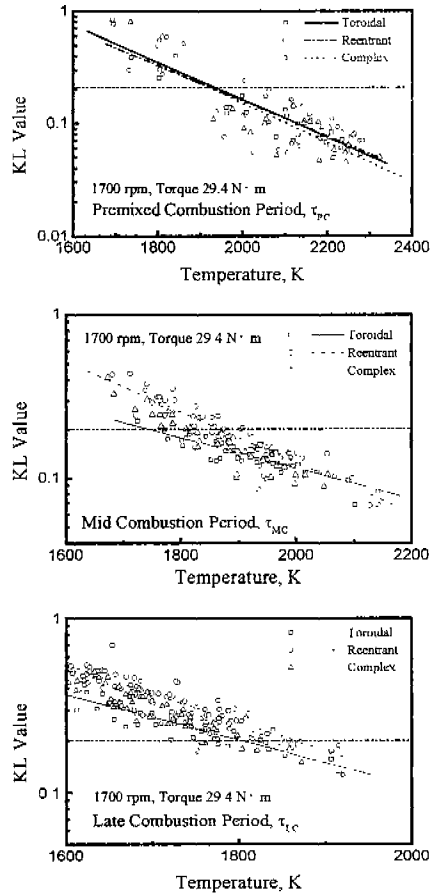


Fig. 9 Log(KL) and Temperature for Three Different Combustion Chamber Shapes

후연소중기구간에서 Log(KL)은 toroidal이 가장 기울기 구배가 낮고 complex와 reentrant는 비슷한 기울기 구배를 보이지만 soot 산화에 대한 화염온도 절편은 reentrant형이 complex에 비해 다소 높은 것을 알 수 있다. 또한 후연소말

기 구간에서는 3가지 모두 기울기 구배는 유사하나 역시 soot 산화에 대한 화염온도 절편은 reentrant, complex, toroidal 순으로 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 미루어 화염온도가 높고 유동이 활발한 후연소중기기간에서 soot의 산화를 촉진하고 후연소말기기간에서는 화염온도를 높게 유지하는 것이 soot의 저감에 바람직할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

엔진운전조건과 연소실 형상이 연소특성과 soot의 산화에 미치는 영향을 밝히기 위하여 연소압력과 화염온도, KL치를 측정하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 엔진 회전수 1300 rpm과 상대적으로 고회전인 1700 rpm에서 전 토크영역에 걸쳐서 reentrant = complex > toroidal의 순서로 예혼합연소량이 많으며 엔진회전수가 증가할 수록 reentrant와 complex의 경우가 toroidal에 비해 예혼합연소량이 약 10% 정도 개선되었다.
2. complex, reentrant, toroidal 연소실 모두 저부하 조건인 경우 후연소중기기간에서 soot가 대부분 산화하였다.
3. 고부하 조건에서 cavity 입구가 상대적으로 좁은 complex와 reentrant 연소실이 후연소말기기간에 화염이 cavity 내에 갇히게 되는 화염홀딩으로 인해서 soot의 산화가 toroidal보다는 불량한 것으로 나타났으며 유동이 가장 활발한 complex는 reentrant와 toroidal의 중간에 해당하는 soot 산화특성을 보였다.
4. 화염온도 및 공기유동이 다소 높은 후연소중기기간에서 soot의 산화를 촉진하는 것이 soot 저감에 바람직하며, 후연소말기기간에서 soot의 산화를 촉진 시키기 위해서는 화염온도를 높게 유지하는 것이 유리하다.

#### 후 기

본 연구는 '98동아대학교 교내학술연구 조성비에 의해 수행되었으며 학교당국에 감사의 뜻을 표합니다

#### 참고 문헌

1. Y. Matsui, S. Matsuoka, et al., "A Gas Sampling Study on the Formation Processes of Soot and NO in a DI Diesel Engines", SAE Paper 800254, 1980.
2. H. C. Hottel, and F. P. Broughton, "Determination of True Temperature and Total Radiation from Luminous Gas Flame," Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition, Vol. 4, 1932.
3. Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill, Inc. New York, 1988.
4. 하중률 외2명, "디젤엔진에서 이색법을 이용한 화염온도와 Soot의 계측기술에 관한 연구", 대한기계학회논문집(B) 제 20 권 제 9호, pp.3007~3014, 1996.
5. Erickson, M. D., Sc. D. Thesis, Chem. Engng., M.I.T., 1961, P.43, 1961.
6. Senfleben, H. and Benedict, E., Ann. Phys., 1919, P.297, 1919.
7. W. T. Lyn, "Diesel Combustion Study by Infrared Emission Spectroscopy." J. Inst. Petrol, 43-398, P.25, 1957.
8. 高本与志久・ほか1名, "ディーゼル燃焼に及ぼすスキッシュの効果", 日本機械学会論文集(B編), 53卷491号, 昭62.
9. K. Satoh, Z. Long, T. Minami, T. Takatsuki and K. Yokota: JSAE Autumn Convention, Japan, No. 924, Vol.3, P. 29, 1992.
10. 이상석, "디젤기관에서 Cavity형상에 따른 분류의 거동과 연소특성에 관한 연구", 동아대학교 대학원 공학박사학위논문, 1995.