

## 디젤엔진에서 Cavity 내 · 외측의 화염온도와 KL치에 관한 연구

### A Study on the Flame Temperature and KL Value in Inner and Outer Cavity in a D.I. Diesel Engine

이 태 원\*, 윤 수 한\*\*, 정 성 식\*\*\*, 하 종 료\*\*\*  
T. W. Lee, S. H. Yun, S. S. Jung, J. Y. Ha

#### ABSTRACT

Flame behavior in inner and outer the cavity and flame temperature have an important influence on the formation and oxidation of NOx and soot. Therefore, in this study, the combustion chamber of toroidal and reentrant that have different flow characteristics of inside and outside the cavity and load, and so forth are determined as parameters of experimental conditions. An attempt has been made to obtain the effect of flame temperature and KL value in inner and outer cavity on the formation and oxidation of soot using the two-color method.

주요기술용어 : D.I. diesel engine, Two-color method, KL value, Flame temperature, Cavity shapes

#### 1. 서 론

디젤엔진에서 연소실 형상은 초기 예혼합기 형성과 확산연소에 많은 영향을 미치며, NOx와 soot의 생성과 산화에도 밀접한 관련을 가진다. 또한 연소초기에 reverse squish에 의해 연료-공기 혼합기가 피스톤 틈새부로 과도하게 유입되면 불완전 연소를 일으켜 soot의 배출이 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 그러나 이러한 연구결과들은 cavity 형상에 따른 수치해석이나 혹은 배기관에서 배출되는 스모크 계측을 통한 결과들을 가지고 유추해석을 한 자료들이 대부분이다.<sup>2)</sup>

본 연구에서는 연소실 형상에 따른 cavity 내 · 외측의 화염거동과 cavity 밖으로의 화염 유출유무 정도, 화염이 cavity 내에 갇히게 되는 flames holding의 유무 그리고 예혼합연소와 확산연소의 비율 변화 등이 화염온도와 soot의 생성 · 산화에 미치는 영향을 이색법을 통하여 분석하고, 이때의 THC, NOx 배출농도를 함께 측정하여 연소실 형상과 배기특성과의 상관관계를 규명하고자 한다.

#### 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 시험엔진부와 연소압력 측정장치, 이색법 화염온도 측정장치 그리고 배기가스 측정장치로 구성된다. 실험에 사용한 엔진은 단

\* 회원, 창원전문대학 자동차과

\*\* 회원, 동명정보대학 로봇시스템공학과

\*\*\* 회원, 동아대학교 기계공학과

기통 직접분사 디젤엔진으로(대동 ND80DI : 631 cc) 압축비 19, 분사압력은 21MPa(4hole×0.3mm)이다.

엔진의 부하조절은 와전류식 동력계(HE-130 kW, Hwan-woong)를 사용하였으며, 연소압력과 화염온도의 측정을 위하여 엔진 헤드에 압력 변환기와 이색법 프로브를 장착할 수 있는 어댑터를 부착하였다. 배기가스 분석기(MEXA-1500, HORIBA)를 사용하여 CO<sub>2</sub>, THC 그리고 NO<sub>x</sub>의 배기가스의 농도를 측정하였다.

Fig. 1에 연소실내의 연소압력과 화염온도와 soot를 측정하기 위한 이색법 장치를 나타낸다.

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

연소실에서 발생하는 연소화염의 복사광은 엔진헤드에 직접 장착할 수 있는 광 프로브에 의해 채취되며, 광을 채취하는 광학창은 투과 특성이 좋고 연소실 내의 고온 · 고압에서도 견딜 수 있는 직경 6mm, 길이 17mm의 석영유리를 사용하였다.

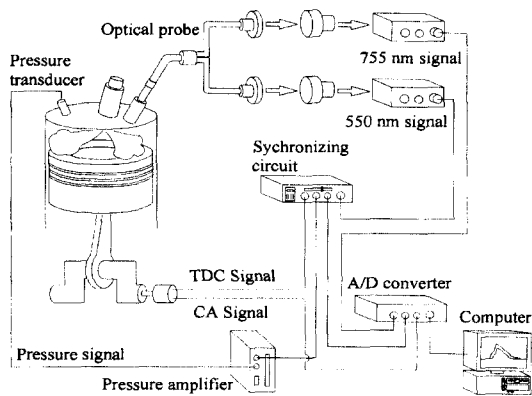


Fig. 1 Schematic drawing for measuring cylinder pressure and flame temperature

광 프로브를 통과하는 광은 광 화이버에 의해 정확히 양분되어 밴드 패스 필터(band pass filter, S2281)를 거치면서 550nm, 755nm의 2파장만으로 되어 포토 다이오드(HamamatsuS2281-01)에 의해 전기적 신호로 변환되고 포토 센서 앰프(Hamamatsu C2719)에 의해 증폭된다.<sup>3)</sup>

화염의 진온도 T는 2파장의 휘도온도에 의해 구해지며 이때 이 두 휘도온도는 각 파장의 포토 센서 앰프의 출력전압으로 나타난다. 휘도온도와 출력전압과의 관계를 검정하기 위하여 흑연관흑체로(2 dia black body IV, Thermogage, Inc)에 이색법프로브를 설치한 후 흑체로의 온도를 1200K부터 100K씩 증가시켜 가면서 검정하였으며 검정곡선과 검정식을 Fig. 2에 나타낸다. 검정곡선과 검정식은 각각 98% 이상 일치함을 보였다.

연소실 형상과 직경비 변화에 따른 cavity 내 · 외측의 화염온도를 계측하기 위해 직분식 디젤엔진에서 널리 사용되고 있는 Toroidal 연소실과 연소실 벽면의 reflex부에 의하여 Toroidal보다는 초기 연료 · 공기의 혼합이 활발하고, 증가된 squish 면적에 의해 유동 특성이 강화된 Reentrant 연소실 그리고 Reentrant의 cavity 바닥면에 부착된 projection으로 인해 Reentrant 연소실보다 유동특성이 뛰어난 것으로, 형상적으로는 Toroidal과 Reentrant의 복합적인 형태인 Complex 연소실을 설계 · 제작하였고 그 형상을 Fig. 3에 나타낸다.

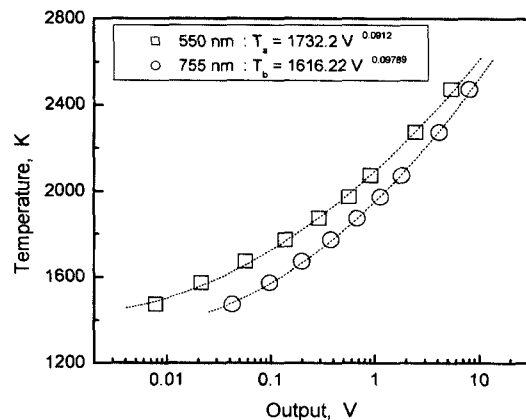


Fig. 2 Calculation results of two color method

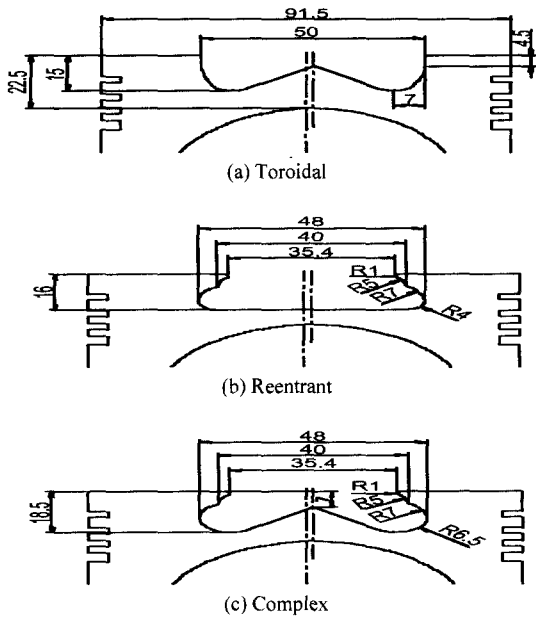


Fig. 3 Three shapes of combustion chamber

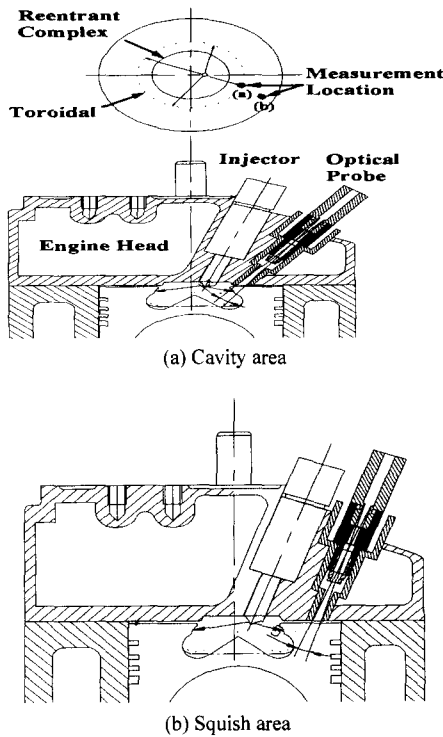


Fig. 4 Optical path relative position to the combustion chamber and location of the observation on the engine head

Cavity 영역과 Squish 영역의 화염온도를 측정하기 위한 두 곳의 광프로브 장착위치를 Fig. 4에 나타낸다. 엔진 내 복사광의 검출 광 경로(optical path)는 4공의 분부 중 한 분부에 대하여 측정하며, 측정위치는 분공으로부터의 거리 13.8mm 지점의 분부표면상이며, 직경 3mm 원에서 광화이버에 입사된 광량으로 광 검출시야각도는 5°이다.

Cavity영역 계측은 연소초기부터 연소종료시까지 계측이 가능하며, Squish영역 계측은 cavity 내부의 화염이 reverse squish에 의해 squish부로 유출되는 시점과 종점을 확인할 수 있다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 Toroidal type의 Cavity 내·외측 화염온도와 KL

Cavity 내부의 계측은 연소초기부터 연소종료시까지 연소 전구간의 관측이 가능하다. 따라서 초기 예혼합연소부터 확산연소구간에 이르기까지 cavity 내부의 화염거동과 화염온도, soot의 생성과 산화 그리고 확산연소시 화염이 cavity 내에 갇히게 되는 화염홀딩(flames holding) 등의 현상을 분석하는데 있어 매우 유용할 것이다. 또한 cavity의 바깥부분, 즉 실린더 벽면근처의 계측값은 reverse squish에 의한 화염거동이 화염온도와 soot의 산화에 미치는 영향을 분석하는데 활용하였다. Cavity 내부 계측을 cavity 영역(cavity area)으로, 그리고 cavity 외측, 즉 벽면 계측을 squish 영역(squish area)로 정의하였다.

분사시기 BTDC 17°, 엔진 회전수 1300rpm, 29.4 N·m 부하조건에서 임의의 사이클 5회분을 선정하여 cavity 내·외측에 대한 화염온도와 KL치를 Fig. 5, 6에 나타낸다.

화염이 처음 계측되는 시기는 cavity영역과 squish영역 모두 ATDC 4°부터 6° 부근으로 거의 유사하게 시작된다. 이로 미루어 cavity 내에 분사된 연료가 착화지연기간을 지나는 동안 squish부까지 유출되어 짧은 시간에 예혼합 화염을 형성하는 것으로 생각된다. 그러나 화염계측 종료

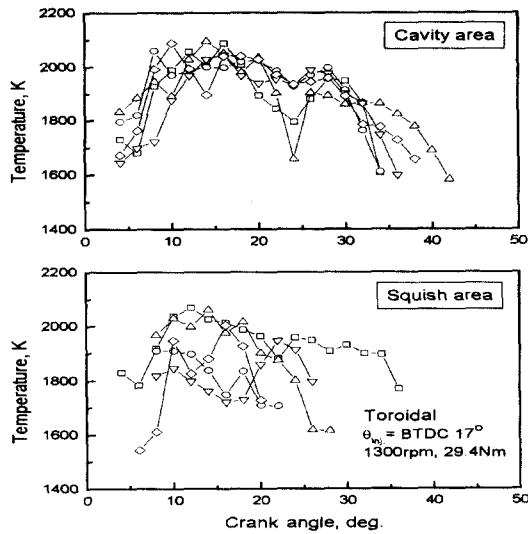


Fig. 5 Flame temperature for cavity and squish area(Toroidal type,  $\theta_{inj}$  : BTDC 17°, 1300rpm, 29.4N·m)

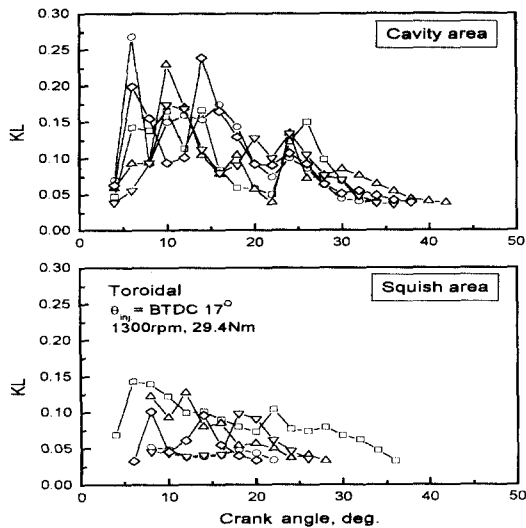


Fig. 6 KL value for cavity and squish area(Toridal type,  $\theta_{inj}$  : BTDC 17°, 1700rpm, 29.4N·m)

시점은 cavity 영역이 35°~42°임에 비하여 squish 영역은 대부분이 20°~30° 이내로 cavity 영역이 다소 오래 동안 화염이 관측되는 결과를 보인다. 전체적인 화염거동은 cavity 영역과 squish 영역이 거의 유사한 경향을 보이지만 1800K 이상의 고온부는 cavity 영역이 다소 많이 계속되는 현상

을 보인다. 위의 결과로부터 Toroidal 연소실은 연소초기부터 cavity 밖으로 분무가 유출되어 예혼합기를 형성하는 특징과 연소초기부터 분무가 squish부로 유출됨에도 불구하고 연소후반까지 화염이 계속 cavity 내에 갇히게 되는 것을 알 수 있다.

TDC부터 ATDC 15° 구간의 화염온도 변동을 보면 엔진회전수에 관계없이 cavity 내측은 각 사이클에 대해 변동폭이 적은 반면에 squish 영역은 화염온도의 변동이 크다. 이것은 피스톤이 팽창할 때 reverse squish에 의한 유동이 화염거동에 많은 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

따라서 연소초기에 cavity 영역의 조건은 squish 영역에 비하여 화염온도가 높고, 공기이용률의 저하를 초래하여 soot의 산화보다는 생성에 더 많은 영향을 미칠 것으로 예측된다. 이러한 예측은 cavity영역과 squish영역의 KL치 비교에서 명확해진다. Cavity 영역의 KL치는 초기에 증가한 후 약 20° 이후부터 급속히 감소하는 경향을 보이고, squish영역의 KL치는 초기에 약간 증가한 후 거의 0.05~0.1 사이의 낮은 값으로 감소하는 현상을 보인다. Soot의 생성은 squish 영역보다는 cavity 내부의 영역에서 약 70% 정도 높게 나타나는 결과를 보였다.

이러한 결과로부터 squish영역의 경우가 cavity영역에 비해 reverse squish에 의한 공기이용률의 증대로 soot의 산화촉진이 양호한 것으로 나타났으며, 연소초기부터 cavity 영역보다는 squish 영역으로의 활발한 화염유출이 soot의 생성을 억제하는데 유효한 방안으로 생각된다.

본 논문에서는 나타내지는 못했지만 연소압력으로부터 열발생률을 구한 후 이를 바탕으로 예혼합연소와 확산연소 구간(ATDC 15°)으로 구분하여 Cavity영역과 squish영역에 대해 예혼합/확산연소구간의 평균화염온도와 평균 KL치를 Fig. 7에 나타낸다.

예혼합 화염에서 cavity 영역이 squish 영역보다 화염온도가 60K 정도 높고, KL치는 70% 이상 높게 나타났는데, 이러한 결과로부터 화염온도

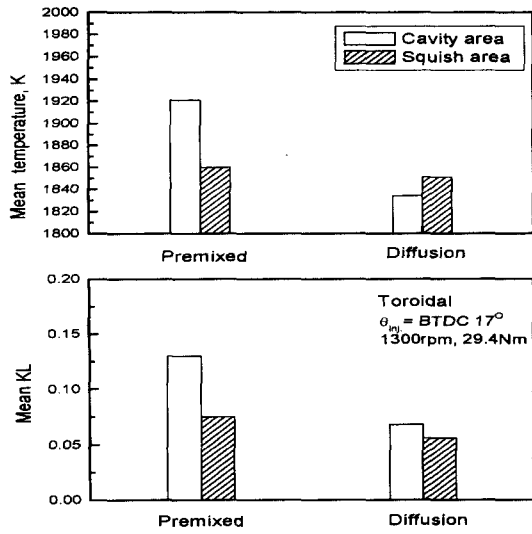


Fig. 7 Mean flame temperature and KL value for pre-mixed and diffusion combustion(Toroidal type,  $\theta_{inj}$ : BTDC 17°, 1300rpm, 29.4N·m)

는 거의 유사한데 비하여 soot의 생성에는 많은 차이가 있음을 다시 한번 더 확인할 수 있다. 확산연소구간의 KL치도 cavity 부근이 17% 정도 높게 나타나며, 산화율은 cavity 영역이 48%, squish 부가 25%로 나타났다. 산화율에서 cavity 영역이 squish부 보다 높은 것은 squish부가 상대적으로 초기 soot 생성량이 적기 때문이다.

### 3.2 Reentrant type의 Cavity 내·외측 화염온도와 KL

Cavity 내·외부로의 화염거동이 soot의 생성과 산화에 밀접한 관련성이 있음을 위의 결과에서 확인하고 Torodial보다는 초기 연료·공기의 혼합이 활발하고, 증가된 squish 면적에 의해 squish 유동특성이 강화된 Reentrant 연소실의 cavity 내·외측 면에서 화염온도와 KL치를 검토하였다.

정상분사시기보다 다소 지각된 BTDC 12°, 엔진 회전수 1700rpm, 부하 29.4 N·m인 조건에서 Reentrant 연소실의 cavity영역과 squish영역의 화염온도와 KL치를 Fig. 8, 9에 나타낸다.

Reentrant 연소실은 Torodial 연소실과 큰 차이를 보이는데, 연소초기의 화염온도는 ATDC 7°

에서 20°에 걸쳐서 서서히 상승하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 본 논문에서는 제시하지 못했지만 분사시기 BTDC 12°인 Torodial의 cavity 영역 계측 결과와 비교하면 화염 계측시기가 상대적으로 약 2~3° 선행되어 계측되며, 연소압력에서도 약 2~3° 빠르게 상승하는 결과를 보인다. 이는 Reentrant 연소실의 립부에 충돌 분무된 연료의 예혼합이 Torodial 보다 양호하여 착화가 연 혼합기를 형성하는데 유리함에 따라 착화 지연의 단축을 가져오는 것으로 생각된다.<sup>4)</sup>

Squish영역의 화염은 15°부터 관측되고 30~40° 사이에서 관측이 끝나는 반면에 cavity 영역은 ATDC 10°부터 80°까지 관측이 된다. 화염온도의 경우 cavity 내부는 1800K~200K의 고온임에 반하여 squish영역은 1500K~1900K의 다소 낮은 온도 분포를 보이고 있다.

KL치는 cavity 영역의 경우 초기에 0.15까지 상승한 후 후반부로 완만히 감소하는 결과를 보인 반면에 squish부는 거의 일정하게 0.05 이하의 낮은 값을 보여 Torodial보다 분사시기가 5° 지각된 조건임에도 ATDC 10°~20° 사이에서 Torodial

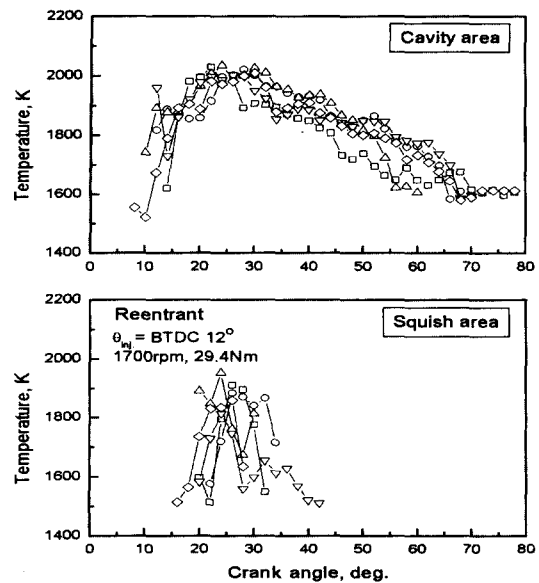


Fig. 8 Flame temperature for cavity and squish area(Reentrant type,  $\theta_{inj}$ : BTDC12°, 1700rpm, 29.4N·m)

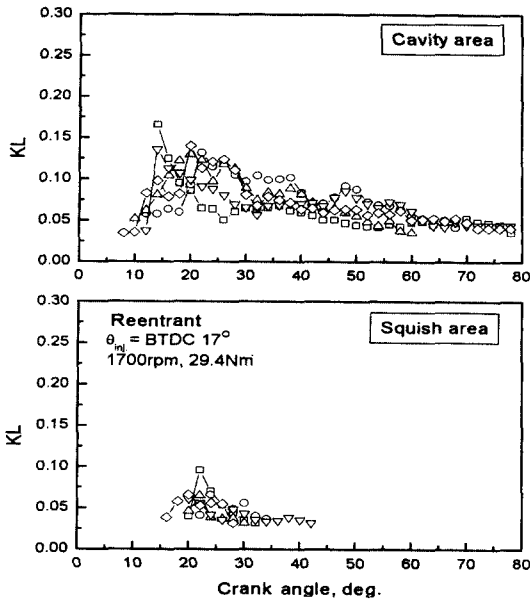


Fig. 9 KL value for cavity and squish area(Reentranttype,  $\theta_{inj}$  : BTDC 12°, 1700rpm, 29.4N·m)

과 현저한 차이를 볼 수 있다. 이러한 결과들은 Reentrant 연소실의 squish 면적이 Toroidal에 비해 상대적으로 넓기 때문에 초기 예혼합량을 주도하는 즉, cavity내로 유입되는 squish의 강도 증가에 따른 cavity 내 공기이용률의 향상에 기인하여 ATDC 10°~20° 사이의 KL치가 감소한 것으로 판단된다. 그러나 후연소기간부터는 cavity 외부로 유출되는 기간이 전체의 50% 정도인 것으로 미루어 cavity 내의 bowl부에 연소가스가 갇히게 되는 화염홀딩의 영향이 큰 것으로 생각할 수 있다.

화염온도와 KL치 평균값을 1300, 1700rpm에 대하여 Fig. 10에 나타낸다.

1300rpm보다 1700rpm의 경우가 화염온도와 KL치 모두 높게 나타나는 결과를 보이며, cavity영역을 기준으로 squish영역을 비교해보면, 평균화염온도는 1300rpm에서는 약 80K, 1700rpm은 120K의 감소를, KL치는 1300rpm에서는 27%의 감소를, 그리고 1700rpm은 35%의 감소를 보인다.

위의 결과로부터 엔진회전수가 증가할수록 압축말기에 cavity 내로 유입하는 squish 강도가

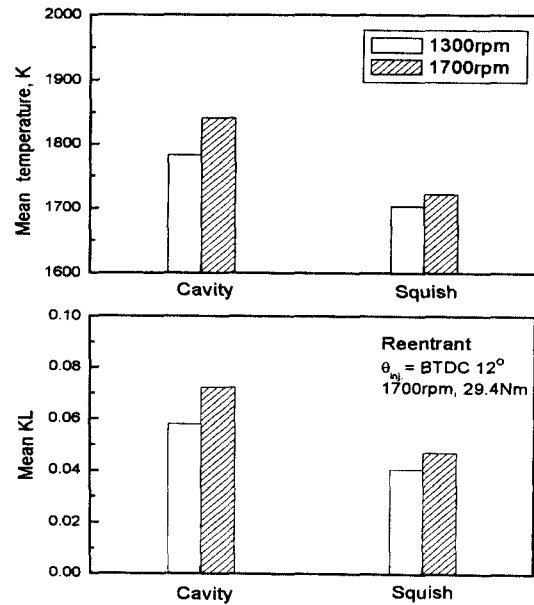


Fig. 10 Mean flame temperature and KL value for pre-mixed and diffusion combustion(Reentranttype,  $\theta_{inj}$  : BTDC12°, 1300rpm, 29.4N·m)

증가하여 cavity 내에 예혼합이 양호할지라도 한정된 공간 내에서 주연소가 일어나기 때문에 화염온도와 KL치 모두 높게 나타나며, 피스톤 팽창시 squish영역으로 유출되는 화염도 상대적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 Complex 연소실의 연소특성

Toroidal과 Reentrant 연소실의 복합적인 형태를 취함으로써 연소초기에는 Reentrant의 장점을 그리고 확산연소시에는 Toroidal 연소실의 장점을 얻을 목적으로 Complex 연소실을 제작하여 연소실험을 수행하였다. 1700rpm, 부하 29.4N·m, 분사시기 BTDC 17°의 조건에서 Complex 연소실의 크랭크각도에 따른 cavity영역의 화염온도와 KL치를 Fig. 11에 나타낸다.

전체적인 화염거동을 보면 Complex와 Reentrant 연소실은 연소초기부터 연소종료시까지 유사한 형태를 보이는 반면에 Toroidal은 연소초기부터 전혀 다른 형태를 보인다. Complex와 Reentrant 연소실에서 ATDC 0°~10° 사이의 화염형태

는 예혼합연소에 의한 급격한 화염의 증가를 보이며 이러한 경향은 Reentrant보다 Complex가 다소 높게 나오는 것으로 보아 Complex가 연소초기의 예혼합 형성이 양호한 것으로 생각된다.

초기의 연소화염 계측시기는 Complex, Reentrant, Toroidal순으로 나타나며, 최고온도 역시 Complex가 약 2200K으로 가장 높게 나타난다.

위의 결과로부터 연소초기에는 Reentrant 특성을 그리고 연소후기에는 Toroidal 특성을 가질 것으로 예상했던 Complex 연소실은 화염거동과 soot 생성특성을 보면 연소초기에는 Toroidal과 Reentrant 연소실의 중간특성을 나타내고, 연소후반에는 Reentrant 연소실보다 KL치는 적지만 역시, 화염이 cavity 내에 갇히게 되는 flames holding 특성이 나타나므로 인해 cavity내에서 생성된 soot의 산화가 Toroidal보다는 다소 불량한 것을 알 수 있다.

예혼합영역과 확산연소영역에서 화염온도와 KL치를 해석하기 위하여 평균화염온도와 평균 KL치를 이들 두 구간으로 나누어 Fig. 12에 나타

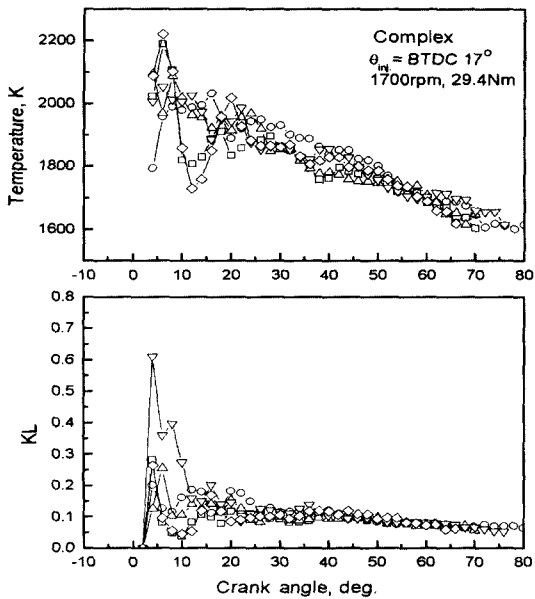


Fig. 11 Flame temperature and KL value with crank angle(Complex type,  $\theta_{inj}$  : BTDC17°, 1700rpm, 29.4 N·m)

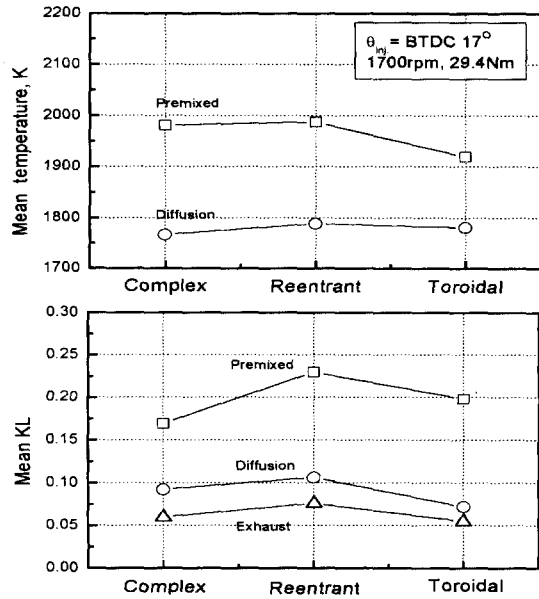


Fig. 12 Mean flame temperature and KL value for cavity shapes( $\theta_{inj}$  : BTDC17°, 1700rpm, 29.4N·m)

낸다.

예혼합연소와 확산연소영역의 평균화염온도 차는 Complex 연소실이 214K으로 가장 많고 다음이 Reentrant, Toroidal 순으로 199K, 139K 순으로 나타났다.

Toroidal 연소실이 예혼합연소와 확산연소의 평균화염온도차가 다른 연소실에 비하여 상대적으로 적은 것은 연소초기에 squish부로의 화염 유출이 두 연소실에 비해 상대적으로 많기 때문으로 해석된다. 그러나 Complex가 Reentrant보다 평균화염온도 차가 큰 것은 Complex 연소실이 Reentrant보다 예혼합화염의 활성화로 인해 확산 화염온도가 낮아졌기 때문이다.

평균 KL치를 보면 예혼합영역에서 Complex가 0.17로 가장 낮은 값을 보이고 다음이 Toroidal, Reentrant 순으로 0.2, 0.23을 나타낸다. 그러나 확산연소구간에서는 Toroidal 연소실이 가장 soot의 산화율이 높아 0.07을 그리고 Complex, Reentrant 순으로 0.09, 0.11로 나타난다.

위의 결과를 정리하면 초기 예혼합 형성이 가장 활발한 Complex 연소실이 soot의 생성이 가장

적은 반면에 확산연소로 갈수록 cavity 밖으로 화염유출이 활발한 Toroidal이 soot의 산화가 가장 활발함을 알 수 있다.

배기로 배출되는 KL치는 Complex와 Toroidal이 유사한 반면에 Reentrant 연소실이 이들 두 연소실에 비해 20~30% 높은 KL치를 나타냈다.

### 3.4 연소실 형상에 따른 THC 배출농도

Toroidal과 Complex 연소실에서 엔진회전수 1300rpm, 분사시기 BTDC 10°, 17° 변화에 따른 THC와 CO<sub>2</sub> 배출농도를 부하변화에 따라 Fig. 13에 나타낸다.

부하가 9.8N·m에서 29.4N·m로 증가함에 따라 THC도 선형적으로 비례하여 증가하는 결과를 보이며, 분사시기 BTDC 10°, 17° 모두 Toroidal 연소실이 Complex보다 부하조건에 따라 1.5배~2배 정도 많이 배출된다. 이는 Toroidal 연소실이 연소초기 피스톤 틈새부로 예혼합화염의 유출이 활발하여 유출된 화염이 냉각작용과 약한 공기이용률로 인해 HC 생성이 증가하기 때문이며, 이러한 결과는 선행연구자의 결과와 잘 일치

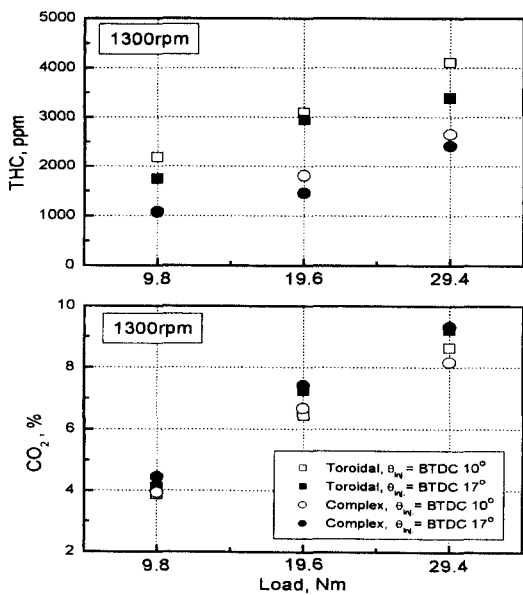


Fig. 13 Concentration of exhaust of THC and CO<sub>2</sub> for rpm, load and injection timing

함을 확인할 수 있다.<sup>1,2)</sup>

분사시기가 BTDC 10°에서 17°로 진각될수록 Toroidal, Complex 모두 THC가 약 10~20% 감소하는 경향을 보이는데, Complex보다는 Toroidal이 진각에 따른 감소량이 4% 정도 크다. 이것은 분사시기가 지각될수록 예혼합연소량의 감소 및 공기이용률 저하에 따라 HC 발생이 많은 것으로 생각되지만 Complex는 분사시기가 지각됨에도 불구하고 공기이용률의 증가로 인해 HC의 저감폭이 Toroidal에 비해 상대적으로 적은 것으로 생각된다.

Toroidal 연소실의 경우에서, 분사시기 지각에 따른 공기이용률의 저하로 인한 HC 생성량은 10~20% 증가한 반면에 초기 예혼합화염이 cavity외부로 유출됨에 따라 HC의 생성량의 증가는 1.5배~2배 정도인 것으로 보아 초기 예혼합화염의 cavity 밖으로의 유출이 HC 생성에 더 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

부하가 9.8N·m에서 29.4N·m로 증가할수록 Toroidal, Complex 모두 연료공급량의 증가로 인해 CO<sub>2</sub> 배출량은 약 2배 정도 증가하는 결과를 보이고, 분사시기를 BTDC 10°에서 17°로 진각할수록 Toroidal 연소실은 6~12% CO<sub>2</sub> 증가를, Complex는 11~14% CO<sub>2</sub> 증가를 보였고, 이때 증가폭은 Toroidal이 Complex에 비해 약 5% 정도 크음을 확인할 수 있다.

### 3.5 연소실 형상에 따른 NOx 배출농도

Toroidal과 Complex 연소실에서 엔진회전수 1300rpm, 1700rpm 분사시기 BTDC 10°와 17° 변화에 따른 NOx 배출농도를 부하의 변화에 따라 Fig. 14에 나타낸다.

1300rpm, 1700rpm 두 조건 모두 부하가 9.8N·m에서 19.6N·m로 증가함에 따라 NOx 배출농도는 1.3~1.9배 정도 증가하지만 24.6N·m의 조건에서는 19.6N·m에 비하여 도리어 -9~14%까지 NOx가 감소하거나 혹은 다소 증가하는 경우가 발생하였다. 이는 디젤기관에서 발생하는 NOx는 고부하시 연료분사량 증가에 따라 연소실 온



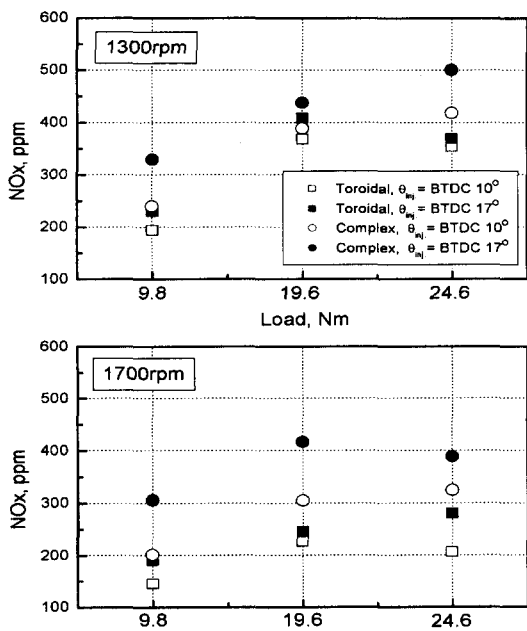


Fig. 14 Concentration of exhaust of NOx for rpm, load and injection timing

도가 높게 되어 증가하지만 연료공급량이 더욱 증가하면 국부적으로 산소부족을 초래하여 NOx 가 도리어 감소하는 것으로 판단된다.

1300rpm과 1700rpm에 대해서 NOx 농도를 부하에 따라 비교해보면 7~20% 정도 높은 것을 알 수 있는데 이것은 Complex 연소실에서 연소 압력을 보면 분사시기 BTDC 17°에서 1300rpm 조건이 1700rpm 조건보다 연소최고압력이 10~15% 정도 높게 나타난다.

연소실 형상에 대해 NOx 농도를 비교하면 Complex가 Toroidal보다 전 시험조건에서 모두 높게 나타나는 경향을 보인다. 1700rpm 분사시기 BTDC 10°의 조건에서 Complex의 결과가 Toroidal보다 약 30~50% 높고, 분사시기 BTDC17° 조건은 40~60% 높게 나타난다. 이는 Complex의 경우 초기 cavity 내에서 연소가 이루어져 연소실내의 온도가 높고 또한 공기이용률의 증가로 인한 활발한 예혼합연소가 이루어지는 반면에 Toroidal은 연소초기부터 squish부로 화염이 유출되어 연소 화염이 연소실 표면에 접하는 면적이 증가하여 화

염의 냉각이 상대적으로 많기 때문으로 추측된다.

이러한 추측은 1700rpm, 24.6N·m의 NOx 수치를 Fig. 12의 연소실 형상에 따른 화염온도와 비교해보면 보다 명확해진다. 일반적으로 NOx 생성은 연소온도가 높고 (1800K 이상) 고온 지속부가 길어지면 많이 생성된다고 알려져 있다. 1800K 이상의 고온 지속부를 비교해 보면 Complex가 ATDC 35°인 반면에 Toroidal은 ATDC 30°이며 예혼합 연소시 최고화염온도가 200K 정도 높고, 평균화염온도 역시 60K 정도 Complex가 높다. 이때 NOx 농도는 Complex가 Toroidal에 비해 38% 정도 증가하는 결과를 보이기 때문이다.

이러한 계측결과로부터 연소실 내의 화염온도와배출가스(NOx)와의 상호관련성이 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

연소실 형상과 cavity 직경비 변화에 따른 cavity 내·외측의 화염온도와 soot 그리고 배기가스 농도 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 확산연소기간에 cavity 외부로의 화염유출이 많을수록 soot의 산화가 양호하며, flames holding 기간이 증가할수록 soot 생성은 증가한다.

2) Toroidal은 연소초기부터 cavity 외부로의 화염유출이 활발하게 나타난 반면에 Reentrant 연소실은 cavity 외부로의 화염유출기간이 전체의 50% 정도밖에 되지 않고 flame holding 현상이 심하게 나타났다.

3) THC 배출농도는 cavity 외부로의 화염유출이 활발할수록 증가하였다.

4) NOx 배출농도는 예혼합화염의 최고온도가 높고 1800K 이상의 고온 지속부가 길수록 증가하는 결과를 보였다.

#### 후 기

본 논문은 동아대학교의 연구비지원(1997년)에 의한 것으로 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

### 참 고 문 헌

- 1) F. Nagao, M. Ikegami., "A Study on combustion in Direct Injection Diesel Engine," 1st and 2nd Report, Bulletin of the JSME, Vol.20.
- 2) 張龍·ほか3名, "ディゼル火炎の舉動に及ぼす燃焼室形状の影響," 日本機械學會論文集 (B編), 62卷 600號, 1996.
- 3) 이선봉, 이태원, 하중률, "디젤엔진에서 연소실 형상이 화염온도 및 KL치에 미치는 영향," 한국자동차공학회논문집, 제7권 제8호, 1999.
- 4) 이상석, "디젤엔진에서 Cavity형상에 따른 분류의 거동과 연소특성에 관한 연구," 동아대학교공학박사학위 논문, 1995.