

# 이색법을 이용한 직접 분사식 디젤엔진 실린더내의 화염 온도 및 Soot 분포 측정에 관한 연구

## A Study on In-Cylinder Measurement of Flame Temperature and Soot Distribution in D.I. Diesel Engine Using Two-Color Method

박정규\*, 정수훈\*\*, 원영호\*\*\*  
Jungkyu Park, Suhoon Chung, Youngho Won

### ABSTRACT

Two dimensional flame temperature and KL value distribution from the luminous flames containing soot in a DI diesel engine were measured by the two-color method using two different wavelengths of the flame image. The combustion chamber of a DI diesel engine was visualized by elongating the piston and cylinder and the flame in the combustion chamber was photographed on a nega-color film using a high speed camera. In this study, color CCD camera was used to digitize the three color density of the film exposed to the flame and standard lamp. The accuracy of the measuring method depends on the calibration line of film made from a high temperature standard tungsten lamp. The formation and oxidization of soot in the diesel engine were studied by observing measured time history of KL factor and flame temperature. Also, effects of various shapes of combustion chamber and fuel injection on flame temperature and KL value distribution were examined.

주요기술용어: Diesel combustion(디젤연소) Two-color method(이색법) KL factor(KL 지수) Flame temperature(화염온도) Soot(매연입자)

### Nomenclature

I : radiation intensity  
 $\lambda$  : wavelength,  $\mu\text{m}$   
T : true temperature, K  
 $T_a$  : brightness temperature, K

$\alpha$  : constant within a specific range of wavelength  
 $\epsilon$  : emissivity  
 $C_1$  : Plank's first constant,  $\text{W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$   
 $C_2$  : Plank's second constant,  $\mu\text{m} \cdot \text{K}$   
KL : soot index  
 $D_\lambda$  : color density  
 $\gamma_\lambda$  : film constant  
Ex : magnitude of exposure  
t : exposure time, sec

\* 정희원, 건국대학교 기계공학부  
\*\* 건국대학교 대학원  
\*\*\* 정희원, 울산대학교 기계자동차공학부

$\beta$  : constant

## Subscripts

1, 2 : Number

## 1. 서론

디젤엔진은 열효율이 높고 내구성이 우수한 장점이 있으나, 입자상물질과 NOx의 배출로 심각한 사회적 문제를 야기하고 있으므로 이에 대한 규제가 강화되고 있는 실정이다. 디젤 엔진의 배출물 제어를 위해서는 실린더내 연소과정을 이해하는 것이 매우 중요하며, 이를 위해 엔진 가시화, 고속사진법 및 화상처리기술을 통해 화염온도와 soot농도를 측정하는 여러 방법들이 시도되어 왔다. 1980년대 초부터 가시화 기술을 이용해서 디젤엔진 내에서의 연소현상의 질적(qualitative) 데이터들이 수집되기 시작했으나<sup>1)</sup> 초기에는 점(point)측정으로 한정된 정보만 제공했기 때문에 주변영역과의 관계를 추론하기 어려웠다.<sup>2)</sup> 그 후 점분해능(point resolved) 데이터를 보충하기 위해 쉐리렌(schlieren)이나 웨도우 그래프(shadowgraph) 화상이 사용되어 왔다.<sup>3),4)</sup> 또한 고속사진촬영방법은 고도의 공간 해상도(spatial resolution)의 이점 때문에 긴 현상시간의 결점이 있기는 하지만 현재도 사용되고 있다.<sup>5),6)</sup> 한편 최근 급속하게 발전한 마이크로프로세서와 컴퓨터, 영상기술 등을 응용한 고속화상처리의 개발이 한창이다.<sup>7)</sup>

종래의 대표적인 soot 입자의 광학적인 측정법은 이색법이 있다. 이 방법은 화염내의 soot 복사광을 2가지 파장대로 분광시켜 두 파장대의 복사강도비로 soot온도, 즉 화염온도를 산출하고, soot입자의 방사율로부터 soot 농도를 계산한다. 이 방법도 일점 측정 및 고속도 화염사진의 화상처리를 이용한 2차원 측정기술이 개발되었고, 최근에는 고속도 비디오투를 이용한 실시간 측정법도 개발되고 있다. 이 방법의 디젤엔진에의 적용은 1970년대말 Matsui<sup>8)~10)</sup> 등이 가시영역의 파장을

이용하여 실시된 이래, 적외선 파장에서도 이루어졌고<sup>11)</sup>, 최근에도 이색법을 이용한 고압분사<sup>12)</sup> 및 EGR의 디젤엔진 연소에 끼치는 영향고찰<sup>7)</sup> 및 타당성 검토<sup>13)</sup>를 실시한 연구들이 있다. 또한 해석의 한계를 넓히기 위하여 사색등의 다색법을 이용하는 연구가 진행되고 있다.<sup>14),15)</sup>

본 연구에서는 단기통 직접분사식 디젤엔진을 가시화하여 실린더내의 연소현상을 고속 촬영하고 화염필름의 화상처리 기법을 이용해서 2차원적인 화염온도와 soot농도 분포를 측정하는 기술을 개발한다. 이 기술을 이용하여 연소실 형상과 분사압력과 같은 중요 엔진 파라미터가 실린더내의 soot 생성 및 소멸에 끼치는 영향을 시간적, 공간적으로 고찰한다.

## 2. 엔진가시화 및 실험방법

Table 1 Test engine properties

bore×stroke	95×95
combustion chamber volume	39.6cc
cooling water temperature	80℃
intake air temperature	69~71℃
compression ratio	18
intake open	BTDC 20°
intake close	ABDC 44°
exhaust open	BBDC 44°
exhaust close	ATDC 20°
connecting rod (mm)	170
injection time	BTDC 19°
valve clearance (mm)	0.35
injection open pressure	220kg/cm <sup>2</sup>
seat angle	45°
elongated piston material	AC8B-T6 aluminum alloy

본 연구에서는 Table 1과 같은 직접분사식 단기통 디젤 엔진(ND-130DI)의 연소실을 가시화하였다. 엔진의 가시화를 위해서 Fig. 1과 같이 행정길이와 관찰부의 길이 등을 고려하여 실린더와 피스톤, 그리고 푸쉬로드와 노즐 파이프를 연장하고 연장된 피스톤 사이에 광학경을 놓아 화염의 상이 엔진 밖으로 반사되도록 하였다. 피스톤을 연장부, 관찰창, 관찰창 덮개, 그리고 피스톤 링으로 구성하여 분해 조립이 가능하도록 하였다. 연장 실린더의 기존 엔진쪽 플랜지는 모든 냉각수와 윤활유의 통로를 밀폐시키고, 실린더 헤드쪽에는 가열된 냉각수를 공급하여 실린더 헤드가 일정한 온도를 유지할 수 있도록 설계·제작하였다. 실제엔진의 피스톤 크라운은 W형의 연소실이 가공되어 있으나, 가시화엔진의 관찰창은 가공상의 문제와 연소화염의 굴절을 막기 위해서 동일한 체적의 단순한 원통형의 보울(bowl)을 갖는 형상으로 제작되었다.

이색법을 적용할 때 기준온도가 필요하므로 흑체와 같은 역할을 하는 표준램프로서 할로겐 램프를 사용하였다. 넓은 범위의 기준온도를 얻기 위하여 각각 다른 투과율을 가지는 10개의 ND필터를 원형으로 배치하였으며 모터에 의해서 약 200rpm의 속도로 회전시켜 화염과 함께 촬영되도록 설치하였다. 또한, 크랭크 각도를 알기 위해서 플라이휠에 종이테이프를 감고 그 위에 TDC를 기준으로 눈금을 매기고 250W정도의 조명을 비추는 후 각도 지시침과 눈금이 반사 광학거울을 통해 화염과 동시에 촬영할 수 있도록 하였다.

가시화엔진은 윤활과 관찰창의 오염문제로 오랜 시간 발화운전을 할 수 없으므로 냉각수와 흡입공기를 가열하여 정상상태에 가까운 조건을 만들어준다. 따라서 연장실린더의 헤드쪽에는 냉각수 출구온도가 80℃로 일정하게 온도를 유지하도록 냉각수를 공급하였다. 흡기온도는 전기 니크롬 열선을 이용하여 실제엔진의 정상 운전시와 점화지연이 비슷하게 되도록 약 70℃로 가열하여 공급하였다. 20마력 가변 AC모터를 이용하여 엔진을 1000rpm으로 유지하면 실험이 시작된다.

동기 프로그램에서 연산된 신호는 A/D변환기를 통하여 솔레노이드를 구동시켜 노즐로부터 연료 분사를 유도하며 엔진내에 연료를 공급하여 연소시킨다. 크랭크 축에는 크랭크 각도와 동기화(synchronization)를 위하여 로터리 엔코더를 연결 설치하였다.

고속카메라는 회전서터와 회전프리즘방식으로 구동하는 NAC 16HD로서 원격스위치에 의해 작동되고 촬영속도는 3000fps(frame per sec)로 크랭크 각도는 약 2도마다 필름 1프레임이 촬영된다. 본 실험에 사용된 필름은 KODAK 7298 ASA500T color negative 필름이다

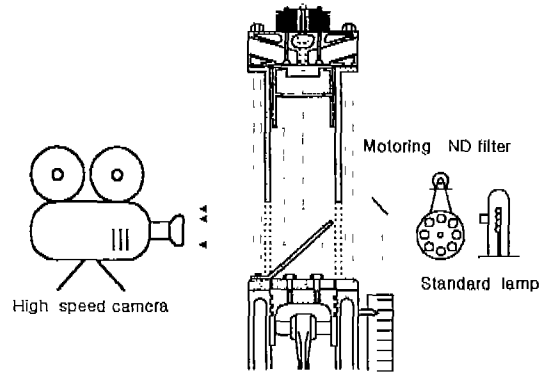


Fig. 1 Engine visualization and optical arrangement

### 3. 이색법의 원리 및 화상처리 방법

#### 3.1 이색법의 기본식

화염으로부터 방출된 복사강도(radiation intensity)  $I_\lambda$ 는 Plank 법칙으로부터 다음의 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned}
 K(\lambda, T) &= \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \\
 &= C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T_a}\right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

식에서 T는 화염온도이며,  $T_a$ 는 파장  $\lambda$ 에서의 상응 흑체온도,  $C_1$ 과  $C_2$ 는 프랭크 상수이다. 화염의 방사율(emittance)는 Lambert Beer법칙

과 Hottel 식으로부터 아래와 같이 주어진다.<sup>16)</sup>

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^{\alpha}}\right) \quad (2)$$

여기서 K는 soot입자의 밀도와 관계된 값을 나타내는 흡수계수이며 L은 관찰된 화염 축방향의 기하학적인 두께이므로 KL이 근사적인 입자 수 밀도와 화염 두께를 나타내는 soot 지수이다.  $\alpha$ 는 상수로 디젤화염의 가시영역에서는 1.38이다. 식(1)을 식(2)에 대입하고 서로 다른 두 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 에 대해 KL에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$KL = -\lambda_1^{\alpha} \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1}\left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \quad (3)$$

$$KL = -\lambda_2^{\alpha} \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2}\left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \quad (4)$$

Soot 지수인 KL은 파장에 관계없이 일정하며 식(3)과 (4)를 같게 놓으면 화염온도 T를 계산하는 이색법의 기본식이 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \lambda_1^{\alpha} \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1}\left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \\ = \lambda_2^{\alpha} \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2}\left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 이색법에 적용하는 두 파장  $\lambda_1, \lambda_2$  과 측정된  $T_{a1}, T_{a2}$ 를 대입하면 화염의 진온도 T를 구하고 이 값을 다시 식(3)이나 식(4)에 대입하면 KL도 구할 수 있다.<sup>9)</sup>

### 3.2 검정곡선 및 화상처리과정

본 연구에서는 화염으로부터 복사강도를 검출하는데 네가-칼라 필름을 사용하였다. 필름에 이색법을 적용하기 위해서는 필름 화상 농도  $D_{\lambda}$ 와 밝기온도  $T_a$ 의 관계를 알아내는 것이 필수적이다. 유효노출범위에서 필름 색농도( $D_{\lambda}$ )와 노

출량( $E_x$ ) 사이의 관계는 다음과 같다.

$$D_{\lambda} = \gamma_{\lambda} \log E_x + \text{const.} \quad (6)$$

여기서  $\gamma_{\lambda}$ 는 필름의 필름 상수이다. 식(6)속의 노출량  $E_x$ 를 상수  $\beta$ 를 갖고 온도  $T_a$ 에 상응하는 흑체 복사강도와 노출시간의 곱으로 표현해서 다시 정리하면, 다음과 같은  $D_{\lambda}$ 와  $T_a$ 의 관계식이 표현된다.

$$\begin{aligned} D_{\lambda} &= \gamma_{\lambda} \log\left[\beta t \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T_a}\right)\right] + \text{const.} \\ &= -\frac{C_2}{2.3026} \frac{\gamma_{\lambda}}{\lambda} \cdot \frac{1}{T_a} + \text{const.} \end{aligned} \quad (7)$$

두 개의 서로 다른 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에 대해 식(7)과 같은 두 개의 서로 다른 관계식을 만들어야 한다. 본 연구에서 필름의 유효파장은 Ahn 등<sup>10)</sup>의 방법으로 결정된다. 측정된 흑체에 상당하는 표준램프의 온도  $T_a$ ( $T_{a1}=T_{a2}$ )에서 흑체의 필름 색농도  $D_{\lambda}$ 는 CCD카메라의 파장값  $\lambda_1$ 에 해당하는 청색필터와 파장값  $\lambda_2$ 에 해당하는 적색필터에 의해 디지털화된 값이다. 이렇게 해서 두 파장의 주어진 밝기온도  $T_a$ ( $T_{a1}=T_{a2}$ )에서의 필름 색농도( $D_{\lambda 1}, D_{\lambda 2}$ )를 알 수 있다. 이 데이터는 각각의 관계식의 한 점에 해당하는 데이터가 된다. 또한 필름상수  $\gamma_{\lambda}$ 는 필름의 현상상태에 따라 수시로 바뀌므로 필름상수를 매번 측정해야 한다. 투과율이 다른 10개의 ND필터와 흑체로 가장된 표준램프의 ND필터를 통과한 이미지의 색농도와 투과율에 의해서 결정되는 상대적인 노출량의 관계가 Fig. 2와 같이 선형적으로 비례하면 필름이 유효노출 범위에 놓인 것이며, 두 파장에 대한 측정된 필름상수  $\gamma_{\lambda 1}, \gamma_{\lambda 2}$ 는 직선식의 기울기에 해당한다. 결과적으로 한점과 필름상수에 대한 정보를 얻는 이런 과정을 통해 Fig. 3과 같은 두 파장에 대한 관계식(7)이 완성된다.

본 연구에서는 직접분사식디젤엔진의 화염을 고속카메라에 의해 16mm 네가-칼라 필름에 감

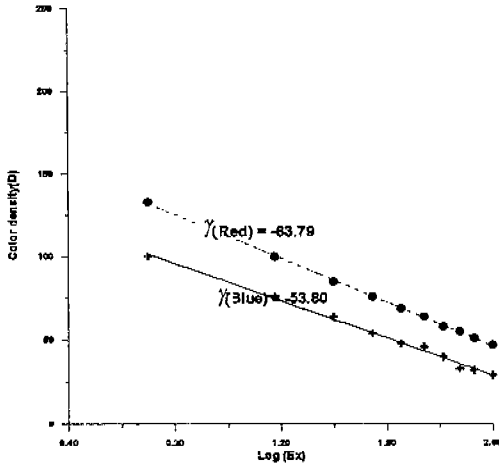


Fig. 2 Relation between relative exposure Ex and color density D

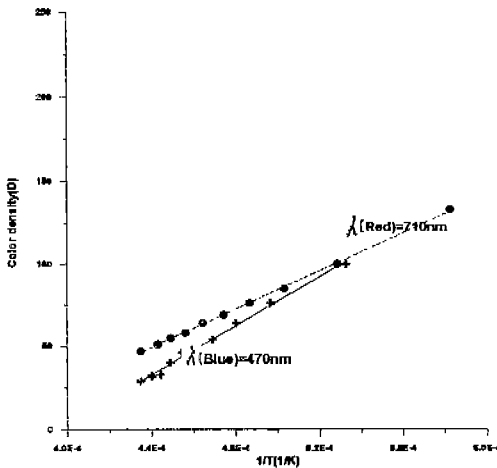


Fig. 3 Relation between temperature T of black body and color density D of image

광하여, Fig. 4에 보여진 바와 같이 화상처리를 실시하여 2차원적인 화염의 온도분포와 KL분포를 측정한다. 필름을 현상하면 네가티브의 성질을 가지므로 화염의 형상은 보이나 일반 사진과 같은 효과를 보지 못한다. 화상처리는 더 이상의 인위적 처리를 하지 않은 현상필름의 상태로 실행된다. 우선 필름상의 아날로그이미지가 칼라

CCD카메라를 통해 디지털 이미지로 변환되어 컴퓨터에 입력된다. 디지털 이미지는 검정곡선을 기준으로 작성된 이색법 프로그램을 통해 화염온도와 KL값에 대한 이미지로 바뀌게 된다.

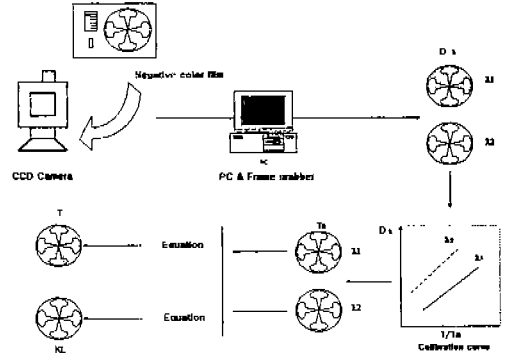


Fig. 4 Image processing diagram

## 4. 결과 및 토론

### 4.1 화염온도와 KL의 공간적 분포 및 시간적 변화

Fig. 5와 Fig. 6은 세가지(General, Deep, Shallow) 연소실 형상과 General bowl형상에서 분사개시압력을 조금 변화시킨 경우의 2차원적인 화염온도와 KL분포를 보여준다. 도시한 크랭크 각도는 10, 30, 50, 70, 90 %의 연소된 분율에 해당하는 시기이다. Fig. 5를 통해 볼 수 있는 온도의 공간적 분포는 화염이 연소실 전체로 확장하여 최대로 발달한 후에는 연소실 외주부보다 중심부쪽이 높다. 이것은 연소실 외주부에서는 화염이 연소실 벽에 접촉하고 냉각되기 때문으로 생각된다. 그 후 연소실 벽면에서부터 화염의 온도가 낮아지면서 화염이 서서히 소멸하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6을 통해 볼 수 있는 KL의 공간적 분포는 분무코어의 당량비가 큰 과농영역에서 화염이 발달하면서 KL이 크게 증가하고 연료분사가 중단되면 당량비가 낮아지고 soot는 급속히 산화하는 경향을 보인다. 또한, 연료분무의 충돌부분인 피스톤 보울 외주부에서 KL의 공간적 불균일성

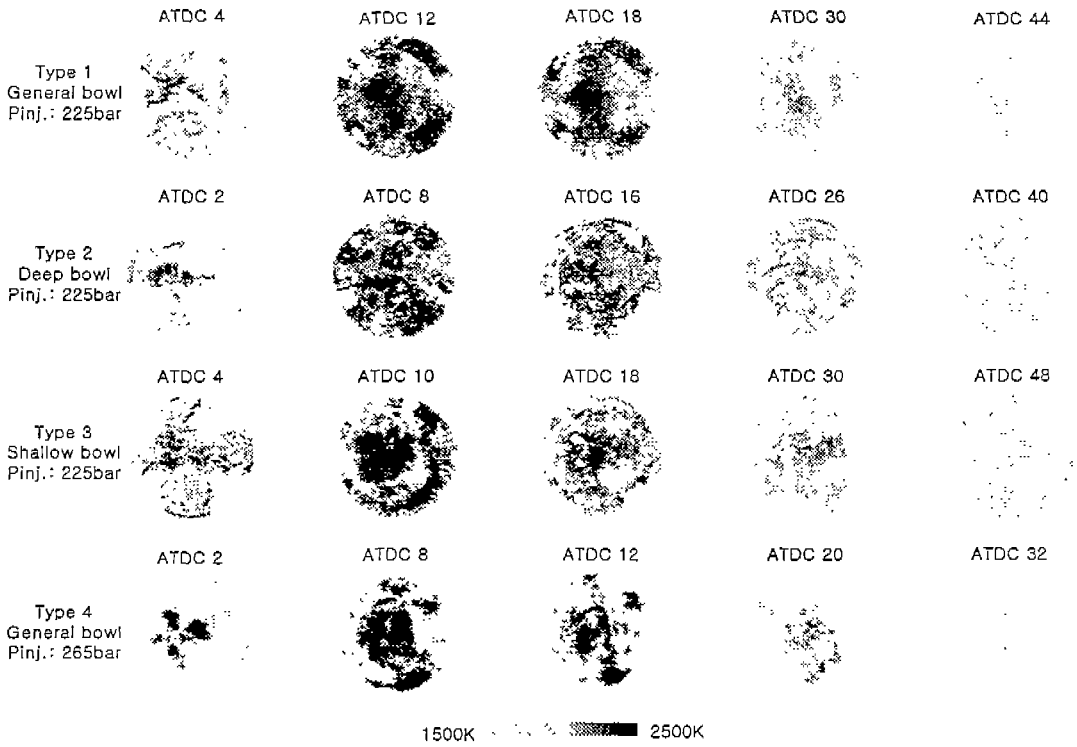


Fig. 5 Flame temperature distribution by the image processing

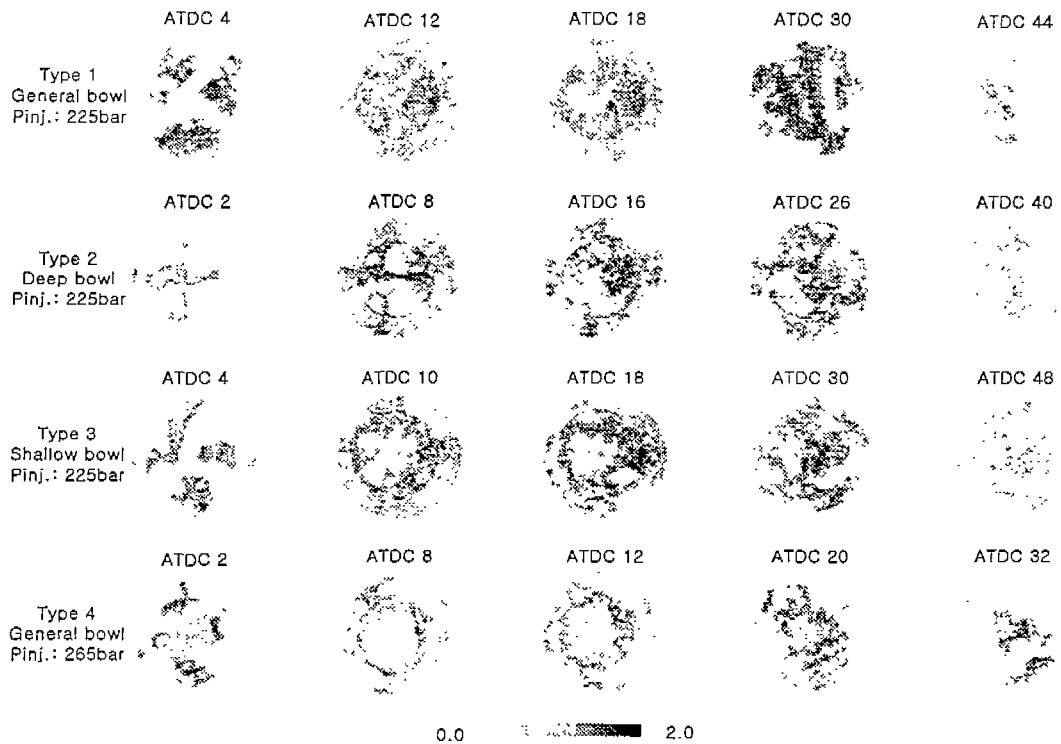


Fig. 6 KL distribution by the image processing

이 크고, soot도 화염 끝(tip) 부근에서 많이 생성되는 것으로 보인다, 연소가 진행됨에 따라 화염의 끝(tip)은 연소실 외주부에 의해서 바운드되면서 KL 값이 큰 영역은 전체 연소실로 퍼지고, 그 후 soot는 서서히 산화해서 KL은 연소실의 전영역에 걸쳐 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나, 열발생이 끝이 난 각도(90% burned)에도 연소실 내의 KL분포가 불균일하고 큰 KL 값의 soot 운이 존재한다. 이와 같은 부분은 연소후에도 사라지지 않고 남아서 대기로 배출되는 디젤매연의 원인이 된다.

화염온도와 KL분포 형상의 시간변화는 실험 조건에 의존하지 않고 유사한 형태로 나타난다. Fig. 7과 Fig. 8은 정량적 평가를 위해서 화소수의 빈도로 나타낸 Type 1의 경우의 화염온도와 KL의 범위별 분포를 보여준다. 연소초기에는 온도는 아직 낮지만 KL은 높은 쪽의 값이 나타난다. 연소의 진행에 따라 온도분포는 고온영역에서 저온영역으로 옮겨가는 것을 볼 수 있고 KL은 높은 수치의 KL영역이 생긴 후 사라져 가다가 다시 높은 영역이 생겼다가 감소한다. 전체 화소수에서 각 단계별 차이가 나는 것은 화염의 면적이 시간에 따라 수시로 변하여 관찰하는 온도 범위에 있는 화소수가 줄어들기 때문이다.

#### 4.2 연소실 형상의 영향

연소실 형상이 화염온도와 KL 분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 분사개시압력은 일정하게 하고 Fig. 9에서와 같이 다른 세가지 연소실에 대해 실험을 실시했다. Fig. 10은 각 연소실에서 발생한 압력과 실린더 압력분석에 의해서 얻은 열발생 비율 곡선을 보여준다. 압력변화를 보면 general bowl형은 ATDC 12°, deep bowl형은 ATDC 8°, shallow bowl형은 ATDC 10°에서 압력의 피크치를 나타내고 있다. 이것은 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 화염이 최대로 발달된 시기, 즉 화염온도가 최고값을 보이는 시기와 일치한다. 열발생 비율 곡선을 보면 deep bowl형

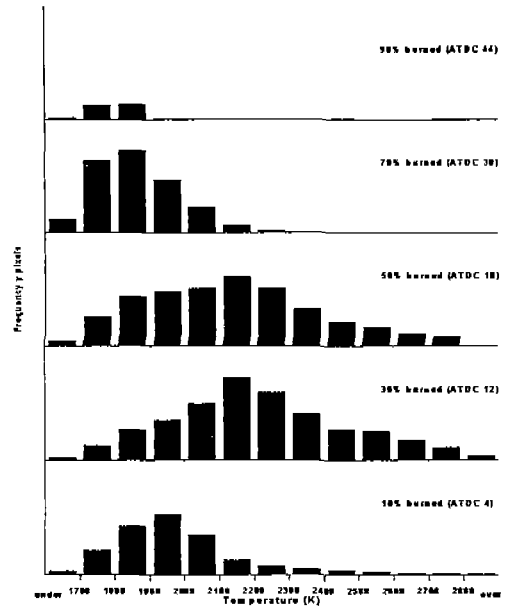


Fig. 7 Time history of flame temperature distribution (General bowl, Pinj.=225bar)

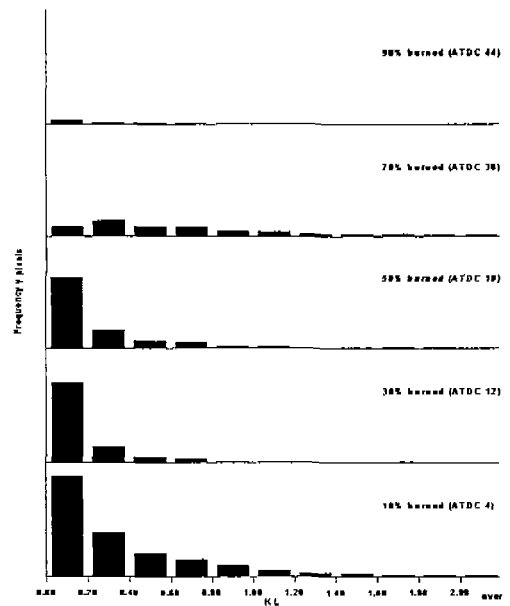
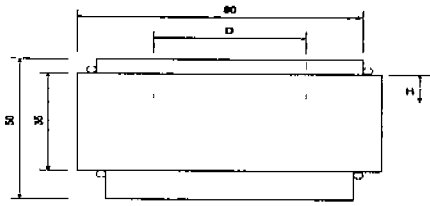


Fig. 8 Time history KL distribution (General bowl, Pinj.=225bar)



Combustion Chamber volume : 21.7cc	D=47mm, H=12.50mm	Deep bowl
	D=51mm, H=10.62mm	General bowl
	D=55mm, H=9.13mm	Shallow dish

Fig. 9 Combustion chamber window and size

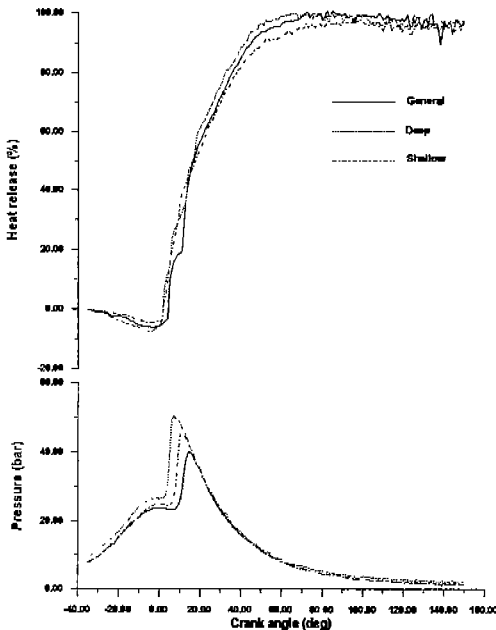


Fig. 10 Pressure and heat release in each combustion chamber (Pinj.=225bar)

은 general bowl형 보다 열발생이 빠르고 shallow bowl형의 경우는 초기에는 general bowl형 보다 빠르나 후기에는 느리다. 이 사실은 Fig. 5에서의 다른 세 연소실 형상에서 연소된 비율에 해당하는 크랭크 각도를 보면 일치한다.

Fig. 11과 Fig. 12는 type 1, 2, 3의 연소시스템에서 화염온도와 KL의 범위별 분포를 보여준다. Fig. 11의 온도별 분포를 보면 연소비율 10%에서 shallow bowl 형 연소실이 연소가 일찍 일어나는 것을 볼 수 있고 전반적으로 나타나는 화소수가 적다. 화염이 최대로 발달한 것으로 판단되는 연소비율 30%에서 화염온도는 1800 - 2800 K 사이에 걸쳐 있고 가장 자주 나타나는 온도 범위는 2000 - 2400 K 이다. Deep 형상과 Shallow형상이 General형상보다 높은 온도쪽 (2500 K 이상)에서의 화소수가 많음을 볼 수 있다. 이것은 연소실 형상에 따라 유동과 분부거동에 따른 당량비 분포가 달라지기 때문이다. 연소비율 50%이후로는 세 가지 형상 모두 화염온도의 분포가 저온영역으로 옮겨가고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12의 KL별 분포에서는 연소비율 50%까지 Deep과 Shallow 형상의 높은 수치의 KL영역이 General 형상에 비해 높게 나타나다가 연소비율 70%이후로는 General 형상이 높게 나타나며 Deep 형상에서는 KL분포가 거의 사라진 것을 볼 수 있다. 이것으로부터 general bowl 형에 산화되지 않은 soot가 더 많은 것으로 추정된다.

Fig. 13은 평균화염온도와 KL값을 크랭크각도변화에 따라 나타낸 결과로 온도의 경향은 ATDC 10° 근처에서 최고값을 보이는데 Deep 형상이 가장 높게 나타나고 있다. KL값은 연소시작 후 피크를 보이다가 최고온도가 나타나는 ATDC 10° 근처에서 감소하다가 점차적으로 증가하여 25° 전후에서 최고를 이루는데 General 형상이 다른 두 형상에 비해 ATDC 5° 정도 더 진행 후 최고값을 보인다.



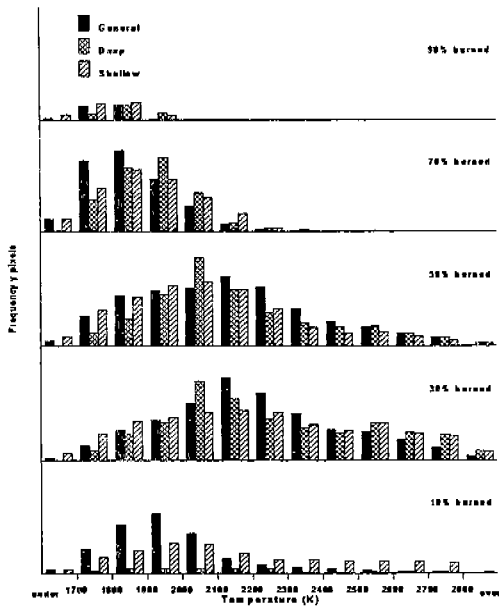


Fig. 11 Effect of combustion chamber shape on flame temperature distribution( $P_{inj}=225\text{bar}$ )

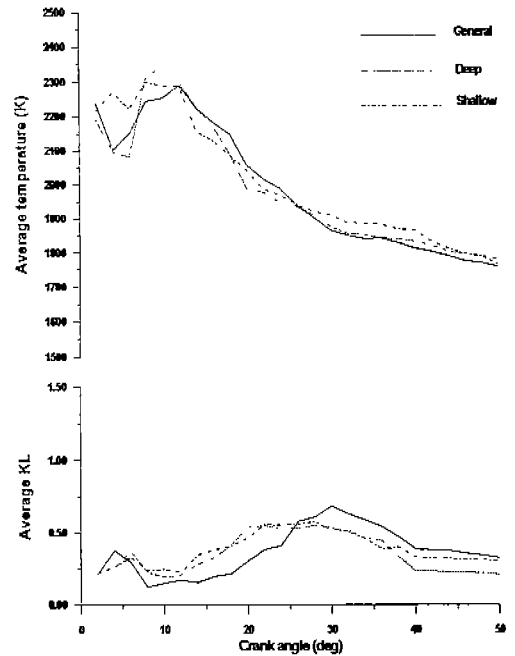


Fig. 13 Relation between average temperature and KL value as crank angle in each combustion chamber ( $P_{inj}=225\text{bar}$ )

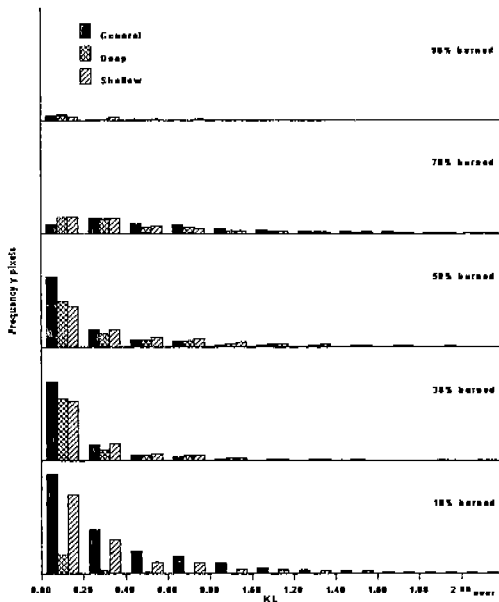


Fig. 12 Effect of combustion chamber shape on KL distribution ( $P_{inj}=225\text{bar}$ )

#### 4.3 분사개시 압력의 영향

분사개시 압력이 연소에 미치는 영향을 알아보기 위해 General Bowl에서 분사개시 압력을 225bar에서 265bar로 변화시켜 비교해 보았다. Fig. 14와 Fig. 15는 Type 4의 화염온도와 KL의 범위별 분포를 보여준다. Fig. 14(265 bar)의 온도별 분포와 Fig. 7(225 bar)의 경우를 비교해 보면 연소 초기에는 분사압력이 화염온도에 끼치는 영향이 그리 크지 않다. 화염발달이 최대로 발달하는 시기의 고온의 화소수 분포가 Fig. 7의 온도별 분포에 비해 많은 것을 볼 수 있다. 즉, 연소가 진행되면서 분사개시압력이 높으면 화염온도를 높게 된다. 연소후기에는 분사압력이 화염온도에 끼치는 영향이 다시 작게 되고 연소 말기의 화염온도는 거의 같게 된다. 전 영역에서 화소수가 급격히 감소하는 시기를 보면 Fig. 7에서는 ATDC 30° 인 것에 비해 Fig. 14에서는 ATDC 20° 로 화염이 소멸되어 가는 시기에서

도 분사개시압력이 높은 경우 빨리 소멸하는 것을 알 수 있다. 분사압력을 높이면 분무속으로의 공기도입(air entrainment)를 증가시키고 혼합을 증가시켜서 화염온도를 높이고 연소속도를 증가시킨다.

Fig. 15의 KL별 분포에서는 전체적으로 분사개시압력이 높은 경우가 연소진행 과정에서 전 영역에 걸쳐 화소수가 적게 나타나는데 이것은 결국 분사개시 압력의 증가는 soot의 생성을 줄이고 soot의 산화도 가속시키는 것으로 보인다.

Fig. 16은 평균화염온도와 KL값을 크랭크각도 변화에 따라 나타낸 결과로 온도의 최고치는 265bar가 크랭크각도상 앞선 곳에서 나타나고 평균온도도 높다. KL의 경우도 265bar가 크랭크각도상 앞선 곳에서 KL값의 최고치가 나타나고 KL값도 전체적으로 작은 것을 볼 수 있다.

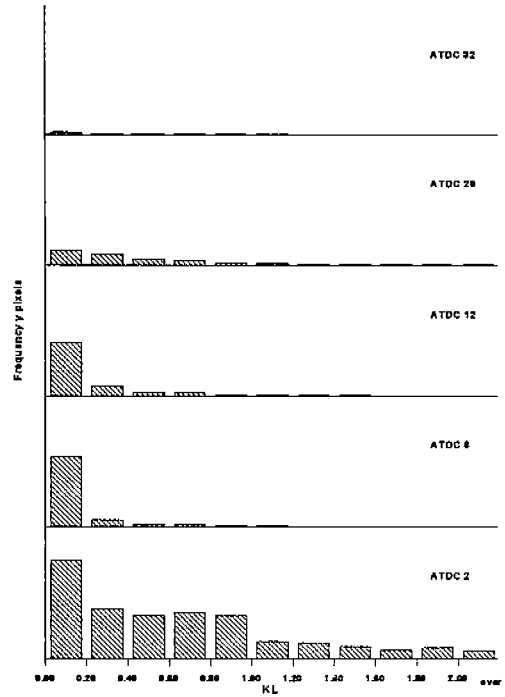


Fig. 15 Effect of injection open pressure on KL distribution (Generalbowl, Pinj.=265bar)

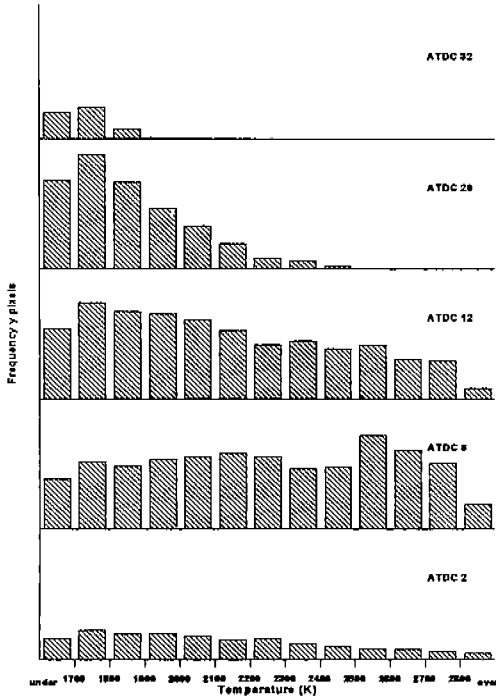


Fig. 14 Effect of injection open pressure on flame temperature distribution (General bowl, Pinj.=265bar)

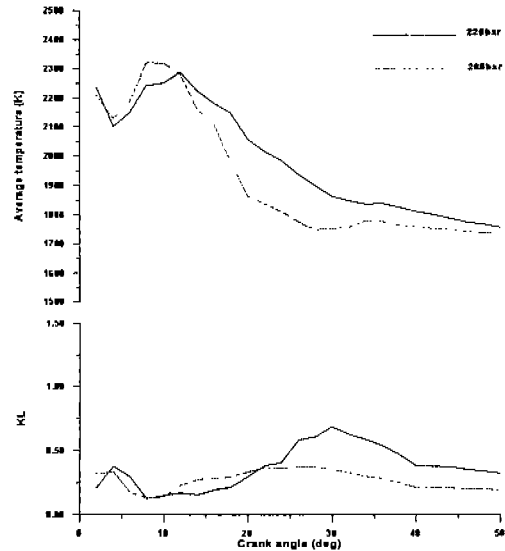


Fig. 16 Relation between average temperature and KL value as crank angle (General bowl, Pinj.=265bar)

## 5. 결 론

디젤엔진내의 soot 생성 및 소멸의 이해를 증진시키기 위해서 이색법을 기초로한 화상처리에 의해 화염온도와 KL분포를 측정하고 연소실 형상과 분사개시 압력이 화염온도와 KL분포에 미치는 영향을 고려해보았다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 디젤화염을 네가-칼라필름으로 고속도 직접 촬영하여 얻어진 화상에 이색법을 적용하여, 화염온도와 soot 농도를 나타내는 KL값을 정량적으로 산출하는 방법을 개발하였다.

2. 화염온도는 압력이 피크치를 보이는 화염이 잘 발달된 시기에 최고치를 보이고, 연소실 외주부보다 중심부쪽이 높다.

3. soot생성의 지표인 KL은 연소초기에 분무의 파동영역에서 증가하고 화염이 벽면에 충돌하는 선단부근에서 큰 값을 보여준다. 그 후 KL값이 큰 영역이 연소실 전체로 퍼지고 산화되어 줄어들는다. 화염내의 KL분포는 불균일하고, 연소 종료시에 있어서도 KL의 덩어리가 존재한다.

4. 연소실 형상의 영향은 본 실험 엔진에서는 일반적으로 사용되는 General 형상보다 형상에 변화를 가한 Deep 형상이 연소진행도 빠르고 soot가 적게 생성된다.

5. 분사개시압력을 높이면 연소진행도 빠르며 화염온도도 높게 되고 soot의 생성이 적고 산화가 활발하다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구과제(94-0200-01-03-3)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드리는 바입니다.

## 참 고 문 헌

1. S.C. Johnston, "Precombustion Fuel/Air Distribution in a Stratified Charge Engine Using Laser Raman Spectroscopy", SAE Paper No.790433, 1979.
2. P.O. Witze and F.R. Vilchis, "Stroboscopic Laser Shadowgraph Study of the Effect of Swirl on Homogeneous Combustion in a Spark-Ignition Engine", SAE Paper No.8102-26, 1981.
3. I. Yamaguchi, T. Nakahira, M. Komori and S. Kobayashi, "An Image Analysis of High Speed Combustion Photographs for D.I Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection", SAE Paper No.901577, 1990.
4. S. Shundoh, T. Kakegawa, K. Tsujimura and S. Kobayashi, "The Effect of Injection Parameters and Swirl on Diesel Combustion with High Pressure Fuel Injection", SAE Paper No.910489, 1991.
5. Duane Abata, B. Stroia, J. Beck and A. Roach, "Diesel Engine Flame Photographs with High Pressure Injection", SAE Paper No. 880298, 1988.
6. E.R. Karimi, "High Speed Photography of Fuel Spray and Combustion Events in a Production Diesel Engine and Combustion Bomb", SAE Paper No.894012, 1989.
7. C. Arcoumanis, C. Bae, A. Nagwaney and J. H. Whitelaw, "Effect of EGR on Combustion Development in a 1.9L DI Diesel Optical Engine", SAE Paper No.950850, 1995.
8. Yukio Matsui, Takeyuki Kamimoto and Shin Matsuoka, "A Study on the Time and Space Resolved Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in a D.I Diesel Engine by the Two-Color Method", S-

- AE Paper No.790491, 1979.
9. Yukio Matsui, Takeyuki Kamimoto and Shin Matsuoka, "A Study on Application of the Two-Color Method to the Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in Diesel Engines", SAE Paper No.800-970, 1980.
  10. Soo Kil Ahn, Y. Matsui, T. Kamimoto and S. Matsuoka, "Measurement of Flame Temperature Distribution in a D.I Diesel Engine by Means of Image Analysis of Nega-Color Photographs", SAE Paper No.810-183, 1981.
  11. Youngil Jeong, "Direct Injection Diesel Engine Combustion Analysis Using a New High-Speed Spectral Infrared Imaging Method and KIVA-II Combustion Code", Ph. D Thesis, Mechanical and Aerospace Engineering Department, The State University of New Jersey, U.S.A, 1993.
  12. Shinji Kobayashi, Takayuki Sakai, Toshio Nakahira, Masanori Komori and Kinji Tsujimura, "Measurement of Flame Temperature Distribution in D.I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection", SAE Paper No.920692, 1992.
  13. Xiaobin Li and James S. Wallace, "In-Cylinder Measurement of Temperature and Soot Concentration Using the Two-Color Method", SAE Paper No.950848, 1995.
  14. T. McComiskey, H. Jiang, Y. Qian and K. T. Rhee, "High-Speed Spectral Infrared Imaging of Spark Ignition Engine Combustion", SAE Paper No.930865, 1993.
  15. H. Jiang, McComiskey and Y. Qian, Y. I. Jeong and K. T. Rhee, "A New High-speed Spectral Infrared Imaging Device Applied for Flame Studies", Combustion Science and Technology, 20:1-16, 1993.
  16. H.G Hottel and F.P Broughton, "Determination of True Temperature and Total Radiation from Luminous Gas Flame", Ind. and Eng. Chem, 1932.