

## 광계측 기법을 이용한 직분식 디젤 가시화 엔진내의 온도 및 매연 측정에 관한 연구

한 용택<sup>1)</sup> · 이 기 형<sup>2)</sup>

한양대학교 대학원<sup>1)</sup> · 한양대학교 기계공학과<sup>2)</sup>

### A Study on the Measurement of Temperature and Soot in a Visualized D.I. Diesel Engine Using the Laser Diagnostics

Yong-taek Han<sup>1)</sup> · Ki-hyung Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

(Received 14 November 2006 / Accepted 26 February 2007)

**Abstract** : Based upon temperature calibration using the diffusion flame, the temperature and soot concentration of the turbulent flame in a visualized Diesel engine's turbulent flow of flame was qualitatively measured. Two different heads were used to judge the effect of swirl ratio within the combustion chamber. It was possible to measure the highest temperature of the non-swirl head visualized engine which is approximately 2400K, and that the swirl head engine managed up to 2100K. Also, the more the pressure of the spray increases the more the temperature increases due to the improved combustion situation with respect to the visualized diesel engine soot. This experiment also revealed that the *KL* factor was high where the fuel collided with the walls of the combustion chamber. Moreover the *KL* factor was high on parts of the chamber where the temperature dropped rapidly.

**Key words** : Two-color method(이색법), Visualized diesel engine(가시화 디젤엔진), Temperature(온도), Soot(매연), Swirl head(스윙형 헤드), Non-swirl head(비스윙형 헤드)

#### Nomenclature

- $I_\lambda$  : intensity at wavelength  $\lambda(w/m^2 \cdot \mu m)$
- $\epsilon_\lambda$  : emissivity at wavelength
- $\lambda$  : wavelength
- $c_1$  : first radiation coefficient
- $c_2$  : second radiation coefficient
- $K_{ext}$  : extinction coefficient
- $KL$  : soot concentration factor

#### 1. 서론

soot의 산화 및 발생 특성은 1950년대 이후 현재 까지 많은 연구가 수행되어오고 있다. 특히 예혼합 화염 및 확산화염을 이용한 실험적 연구의 결과들은 매연 생성 및 산화에 미치는 온도,<sup>1-3)</sup> 연료구조,<sup>4)</sup> 회석<sup>5,6)</sup> 그리고 압력<sup>7,8)</sup>의 중요성을 보여주고 있다. 현재까지 알려진 바로는 Fig. 1과 같이 연료는 열분해에 의해 화염의 초기 단계에서 매연의 선행물질로 알려진 다중 고리 방향족 탄화수소(polycyclicaromatic hydrocarbon:PAH)를 형성하고, 발단(inception)되어 표면 성장(surface growth)과 응집(coagula-

<sup>\*</sup>Corresponding author, E-mail: rthan102@hanmail.net

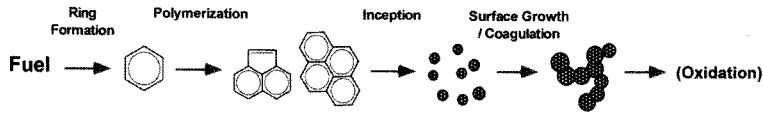


Fig. 1 Soot formation in a diffusion flame

tion)과정을 통하여 성장하고 화염의 끝 부근에서 산화과정을 거쳐 소멸하게 된다.

이와 같은 확산화염의 연소방식을 사용하는 디젤 엔진은 높은 열효율과 우수한 연비성능 및 내구성 등의 장점을 가지고 있어서 차량 및 산업 분야에서 광범위하게 이용되고 있다. 하지만 직접 분사식 디젤엔진의 경우 실린더 내로 연료가 직접 분사 되므로 분사된 연료 분무 주위에는 공간적으로 불균일한 공연비 분포가 발생되어 농후영역에서는 연소측면에서 soot이라 할 수 있는 입자상 물질(particulate matter: P.M.)이 생성되며, 이온 공연비 영역에서는 질소산화물(NOx)의 배출이 증가하는 현상이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 이와 같은 디젤 엔진 내에서의 매연계측 측면에서 과거의 연구를 살펴보면, Matsui<sup>9)</sup> 등이 가시영역의 파장을 이용하여 디젤 엔진내 온도분포와 soot 분포 측정을 위해 이색법을 적용한 이래 적외선 파장으로 측정온도 범위를 넓히고, Kobayashi<sup>10)</sup> 등이 고압분사에서의 화염온도를 측정할 사례가 있으며, 이원남등은 ratio parameter 방법을 이용하여 층류확산화염에서의 온도를 파악하였다.<sup>11)</sup> 또한 정상상태의 확산화염에서 매연체적분률과 온도 측정을 하여 매연의 양이 생성되는 지역에서 온도 및 매연체적분률을 측정할 결과를 레이저로 측정할 매연체적분률의 양과 온도를 비교하여 검증한 바 있으며, 하중률<sup>12)</sup> 등은 디젤 엔진의 헤드에 광화이버를 이용한 점계측 이색법의 방법으로 엔진회전수, 부하, 분사시기 및 피스톤 캐비티 형상 변화에 따른 화염온도와 KL치를 이용하여 soot의 생성과 소멸에 미치는 영향을 밝힌 바 있다. 이와 같은 난류연소에서의 온도와 매연 계측 기술의 개발을 본 연구에서의 최종 목표로 두고 있으며, 비정상상태의 확산화염인 디젤화염에서는 현재까지의 연구로서는 정량적인 값을 구하기에는 한계가 따르므로 겉보기 온도에 따른 화염내부의 온도 분포와 정상적인 매연의 값을 측정함으로써 다양한 확산화염 조건에 따른 온도와 매연의 분포계측의

가능성의 제시함을 본 연구의 목표로 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 확산화염에 대한 이색법의 적용

Soot입자의 복사를 이용하는 이색법은 서로 다른 두 파장의 복사를 검출하고, 화염 방사율에서 미지수를 소거하는 방법으로 화염온도를 구한다. 단파장 흑체 방사율  $I(\lambda, T)$ 는 3000K 이하의 온도일 때 Wien의 식에 의해 가시파장 영역 내에서 정확도 1% 내에서 식 (1)과 같이 주어진다.<sup>13)</sup>

$$I(\lambda, T) = \epsilon_{\lambda} c_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (1)$$

식에서  $\lambda$ 는 파장이고, T는 절대온도이며,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 프랭크 상수이며  $c_1 = 3.742 \times 10^8 w \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$ 이고,  $c_2 = 1.439 \times 10^8 \mu\text{m} \cdot K$ 이다.  $\epsilon_{\lambda}$ 는 화염의 단파장 방사율이다. 또한, soot의 방사율을 측정하여 soot의 온도를 파악하기 위해 다음과 같은 Lambert Beer's의 법칙을 적용한다.

$$\epsilon_{\lambda} = 1 - e^{-K_{\lambda} L} \quad (2)$$

식에서  $K_{\lambda}$ 는 soot의 크기가 작으므로 산란율은 무시되고 흡수율로 간주된 계수이다. Hottel과 Broughton<sup>14)</sup>의 실험식을 디젤화염내의 soot입자를 단파장 방사율에 적용하면,  $a_{\lambda} = \frac{K}{\lambda^a} = K_{\lambda}$ 가 된다.

여기에서 K는 soot입자의 밀도와 관계된 값을 나타내는 흡수계수이며, a는 특정파장과 관련된 상수이다. 식 (2)와  $a_{\lambda} = \frac{K}{\lambda^a} = K_{\lambda}$ 에서

$$\epsilon_{\lambda} = 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^a}\right) \quad (3)$$

식 (3)은 작은 입자의 산란이론에서 얻어진 엄격한 해의 근사적인 값이며, L은 관찰된 화염 측방향의 기하학적인 두께이다. KL이 근사적인 입자수 밀

도와 화염 두께를 나타내고,  $\lambda^a$ 는 파장의 영향을 근사적으로 나타내기 때문에 지수  $\alpha$ 는 입자 직경의 함수이고, soot의 굴절 지수이다. 이것은 화염의 구조와 연료의 종류에 의해서 결정된다.

식 (1)과 (2)에서 soot의 밀도의 지표인  $KL$  값은 다음 식으로 표시된다.

$$KL = -\lambda^a \ln [1 - \exp(-\frac{c_2}{\lambda} (\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T}))] \quad (4)$$

이 식을 이색법을 적용하는 두 파장의 식으로 나누어 쓰면 식 (5)와 식 (6)과 같다.

$$KL = -\lambda_1^a \ln [1 - \exp(-\frac{c_2}{\lambda_1} (\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}))] \quad (5)$$

$$KL = -\lambda_2^a \ln [1 - \exp(-\frac{c_2}{\lambda_2} (\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}))] \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서  $KL$ 을 소거하면

$$\begin{aligned} \lambda_1^a [1 - \exp(-\frac{c_2}{\lambda_1} (\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}))] \\ = \lambda_2^a [1 - \exp(-\frac{c_2}{\lambda_2} (\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}))] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 이색법에 적용하는 두 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 와 측정된  $T_{a1}, T_{a2}$ 를 대입하면  $KL$ 도 구할 수 있다.

기본적으로 디젤화염은 발광화염이며, soot입자로부터의 광복사는 강한 연속 스펙트럼을 발산하므로 soot는 입자로부터의 광복사는 강한 연속 스펙트럼을 발산하므로 soot는 입자로부터의 광복사는 강한 연속 스펙트럼을 발산하므로 soot는 입자로부터의 광복사는 강한 연속 스펙트럼을 발산하므로 soot는 다른 가스의 복사를 차단한다고 가정한다.<sup>15)</sup>

### 2.2 직분식 디젤 엔진 및 실험 조건

직분식 가시화 디젤 엔진의 경우에는 광학적 접근이 가능한 단기통 가시화엔진을 사용하였다. Fig. 2에는 본 연구에 사용된 엔진의 개략도를 나타내었으며 Table 1에는 엔진의 주요사항을 정리하였다. 구동 장치는 정출력 방식의 DC모터가 이용되었으며, 엔진 작동시의 축토크를 억제하여 사용하였다.

한편, 관측영역이 되는 연소실은 직경 50mm의 Bowl-in-piston형식으로 피스톤 크라운 해당하는 부

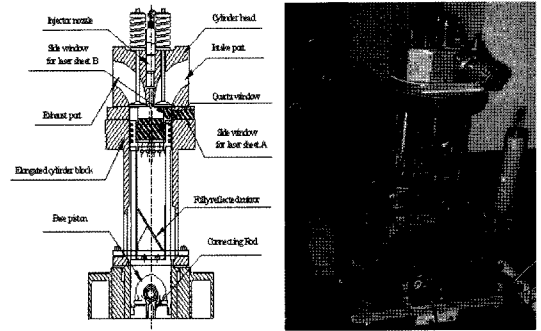


Fig. 2 Cross-section of the visualization engine and photograph

Table 1 Engine specification

Bore × Stroke	95 × 95
Compression ratio	17
Displacement volume	675cc

분에 관측창을 부착하였으며, 피스톤 캐비티 부분에 연소시 고온과 압력에 견딜 수 있는 석영유리로 만들어진 관측창을 부착하였으며, 연장 피스톤의 하부에 45°각도의 광학용 미러를 사용하여 화염 및 유동장의 상태를 고속카메라와 ICCD 카메라를 이용하여 직접 관측할 수 있도록 하였다. 그리고 관측창의 청결도를 유지하기 위하여 무연활 방식을 사용하였고, 내마모성이 우수한 테프론링을 부착하였다.

또한, 본 실험에서는 연소실내의 스월 유동의 유동장에 미치는 영향을 평가하기 위하여 유량 확보면에서는 유리하나 스월 유동이 발생하지 않을 것이라 예상되는 형식의 직립형 헤드(Non-swirl head)와 유량 확보면에서는 불리하나 실린더내에 강력한 스월 유동을 형성할 수 있을 것이라 기대되는 스월 형식의 헤드(Swirl head)를 제작하여 사용하였다.

한편, 커먼 레일내부의 압력은 고압펌프로 유입되는 공기의 양을 조절하여 250bar부터 1500bar까지 조절할 수 있도록 하였으며 압력계지를 부착하여 레일 내부의 압력을 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다. 그리고 실험에 사용된 인젝터는 보쉬(Bosch社)의 제품으로 153°의 분사각도를 가지는 5공 노즐을 사용하였다.

또한, 분사시기는 각 조건에 따라서 단일분사로 BTDC 10°에서 동일하게 분사하였으며, 냉각 계통

을 실제 엔진의 냉각수 온도와 유사한 조건이 되도록 헤드 온도 가 약 85°C에서 90°C 사이를 유지하도록 설계하여 엔진을 운전하였다. 각각의 연소 실험에 사용한 조건들은 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Experimental conditions

Air-Fuel ratio	40 : 1
Cylinder head type	swirl head, non-swirl head
Injection pressure	300, 600, 900, 1200 bar
Engine speed	250, 500, 750

### 2.3 온도 calibration 방법과 결과

이색법을 이용하여 온도와 매연의 정도를 측정하기 위해서는 실제 측정하려고 하는 확산화염의 필터를 이용한 측정 전에 온도에 따른 보정(calibration)작업이 필요하다. 이때 온도 값의 기준을 정할 표준램프가 필요한데 본 연구에서는 한국 표준 연구원의 검증으로 보정된 고안정 텡스텐 램프를 사용하여 온도에 따른 카메라의 휘도를 측정하였으며, 이때 텡스텐램프와 카메라의 거리는 실제 가시화 디젤엔진에서의 측정거리와 동일한 110cm 거리에서의 휘도를 측정하였고, 셀이 512×512 픽셀의 카메라에서 8bit의 TIF의 파일로 휘도를 저장한 뒤 보정식을 구하였으며, 본 연구에서 쓰인 파장은 550nm(FWHM:10nm)와 750nm(FWHM:10nm)의 협대역 필터를 사용하여 두 개의 파장에서의 휘도 값을 구하였다. 텡스텐램프의 온도 값은 1000, 1200, 1400, 1600, 1800°C의 온도에서 본 엔진의 이색법에 적용된 흑백 고속 카메라를 이용하였고, 또한 카메라 렌즈의 f-넘버는 제품에 반비례하고, 셔터 스피드에 따라 비례하고, 개인(gain)값 역시 증가하는 것을 간단히 측정하여 보정식을 얻을 수 있었으며, 그 식은 Fig. 3과 같으며 실제 측정시에는 보정식에서 선형식을 얻어서 그 때의 강도를 통해 온도 값을 계산할 수 있었다.

실제 화염의 촬영에 사용된 카메라는 1초에 1000fps의 촬영속도를 갖도록 하였으며, 이때 크랭크 각도 당 초점 깊이가 같지 않을 수 있으므로 카메라의 초점을 피스톤의 상단면에 맞추었으며 위 아래로 10mm정도의 초점 깊이에 무리가 없는 것을 확인한 뒤 촬영을 하였고, 관측창의 오염의 정도가 촬

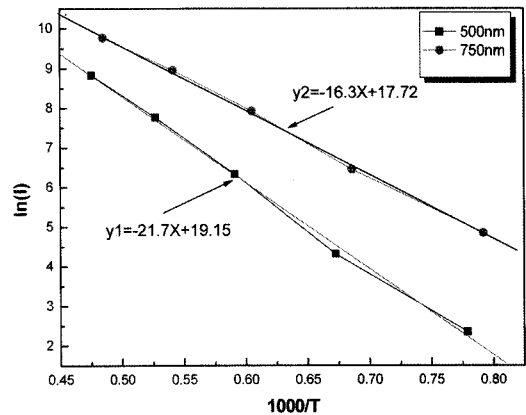


Fig. 3 High speed camera calibration curve

영에 무리가 있다고 확인하면 바로 다시 정비를 하여 관측창에 오염으로 인한 휘도의 왜곡현상이 없도록 하였다.

또한, 직분식 디젤엔진의 화염은 고속카메라에 의해서 PC로 저장되며, Visual C로 작성된 프로그램은 저장된 화염의 데이터를 읽고 계산하며, 온도 분포와 매연농도를 계산하여 출력하게 된다. Fig. 4는 본 연구에서 디젤 가시화 엔진에서의 온도와 매연을 측정하여 구하는 순서도를 나타내는 그림이다.

실제 디젤 가시화엔진에서의 이색법을 적용하기 전에 동축류 버너에서의 열전대를 이용한 온도 측정 결과와 비교함으로써 이색법의 타당성 및 절차를 검증하였다. 이를 위하여 동축류 버너에서의 화염을 실제 엔진에 쓰일 동일한 광학필터를 사용하여 동축류 버너의 화염 180scc/m에서의 연료량에 대하여 3cm위치에서의 열전대를 이용한 화염 온도의 비교하였다. 실제 엔진에서의 적용과 차이점은 동축류 화염에서는 화염의 광학거리를 Abel 변환을 이용하여 동축류 화염에서의 온도를 계산할 수 있었다. Fig. 5는 화염높이 3cm에서 열전대를 사용하여 나온 결과와 이색법의 절차를 통하여 나온 결과를 비교한 그림으로서, 화염의 형태가 비교적 안정적인 3cm 높이에서의 열전대를 이용한 화염온도의 결과와 이색법을 사용하여 확보한 같은 높이에서의 온도결과가 비교할 수 있을 정도로 근접하고 있다는 것을 Fig. 6의 그림에서 확인할 수 있다.

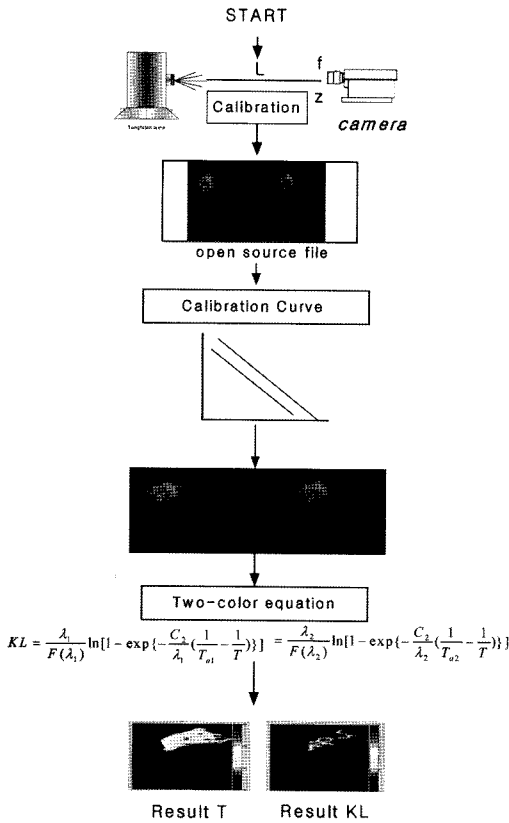


Fig. 4 Flow chart of image processing

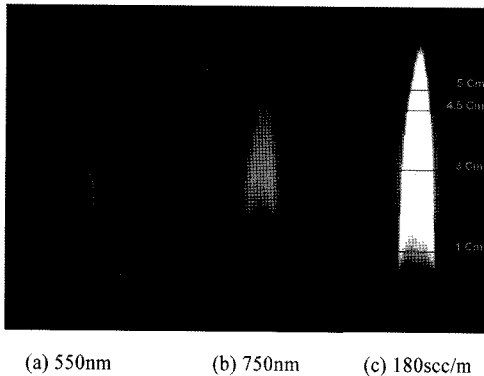


Fig. 5 Photography of raw image acquired by 550nm, 750nm narrow band-pass filters

### 3. 실험결과

#### 3.1 디젤엔진의 화염 온도 특성

Fig. 7의 그림은 non-swirl head와 swirl head를 이용하여 500rpm과 900bar 조건에 대하여 화염을 구한 결과이다. 이 그림 중 (a)와 (b)는 550과 750nm를

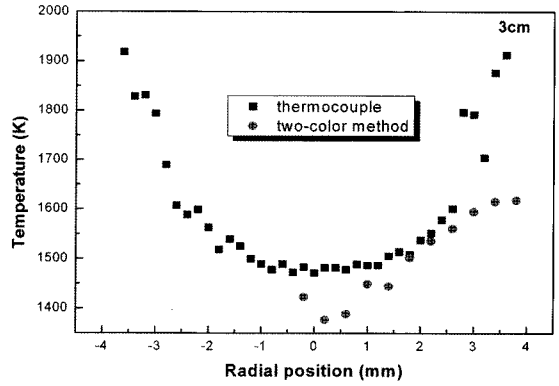


Fig. 6 Comparison of temperature obtained from thermocouple with two-color method

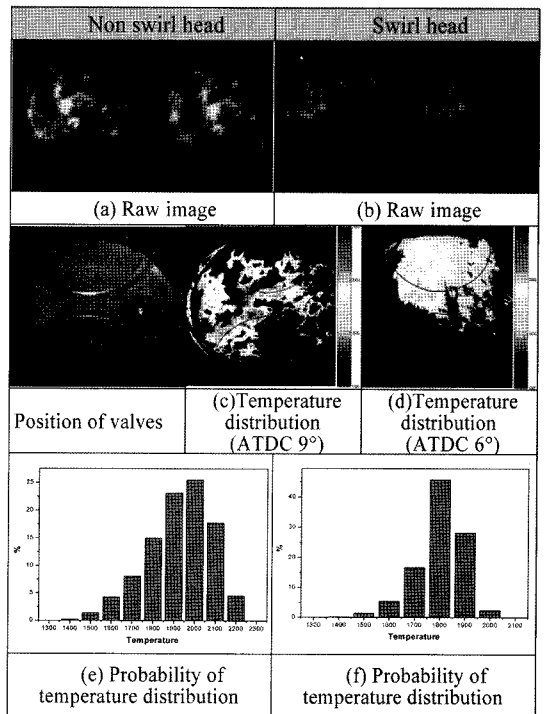
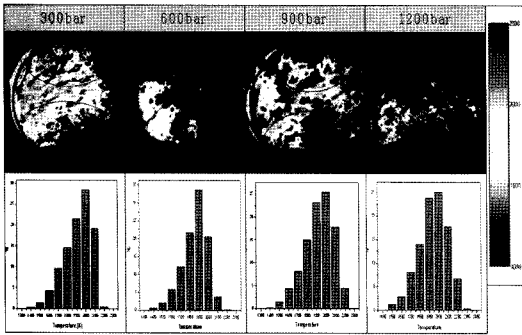
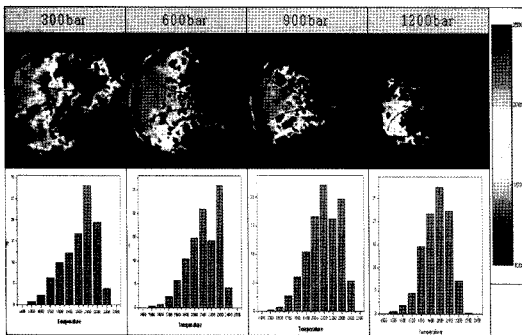


Fig. 7 Flame temperature and temperature distribution acquired by the flame image at 500rpm, 900bar

사용하여 좌우의 이미지를 동시에 획득하였고, 디젤엔진의 연소 과정 중 고속카메라를 이용하여 화염의 휘도가 가장 강한 이미지를 나타내며, (c)와 (d)는 Fig. 4의 이색법의 절차를 이용하여 온도분포를 구한 결과이며 (c)의 이미지는 non-swirl head에서 약 ATDC 9°의 순간이고 (d)의 이미지는 swirl head에서 약 ATDC 6°의 가장 큰 휘염의 정도를 갖는 시간을



(a) Engine speed (500rpm)

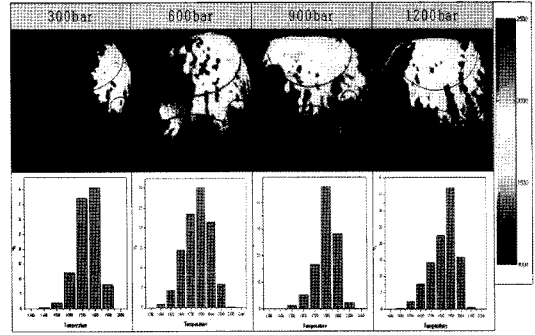


(b) Engine speed (750rpm)

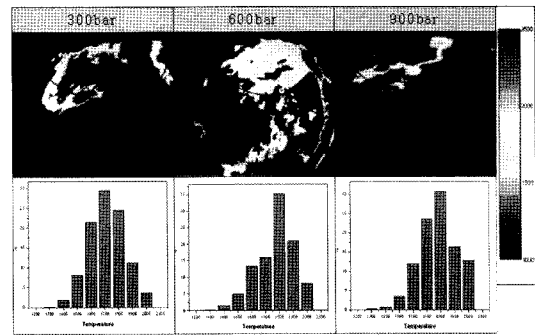
Fig. 8 Maximum temperature distribution and probability of temperature for non-swirl head at 500rpm, 750rpm

나타내며, (e)와 (f)는 이미지에서의 온도의 분포를 %로 나타낸 그림이다.

Fig. 8의 결과그림은 non-swirl head에서의 연료 분사압력이 300, 600, 900, 1200bar에서 최대회도를 갖는 화염의 온도분석결과를 보여주고 있다. 500rpm에서 300bar로 분사 시 최고온도는 2100K에서 최대를 보이고 있는 반면 분사압력이 1200bar에서는 2300K에서 온도의 최대값을 보이고 있다. 이는 분사압력이 증가할수록 공기와의 예혼합 비율이 증가하므로 휘염의 강도가 감소하게 되므로 실제의 온도는 2300K보다 더 높은 값을 갖는다는 것을 예측할 수 있다. 750rpm일 경우에는 300bar로 분사 시 2300K에서 최대온도 값을 나타내고 분사압력이 증가할수록 2400K의 값까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 실험결과를 통해서 분사압력이 증가할수록 연료의 미립화의 효과로 연소실내의 공기와의 혼합률이 증가하게 되어 연소의 강도도 증가하게 되는 것을 알 수 있으며 엔진회전수가 증가할수



(a) Engine speed (500rpm)



(b) Engine speed (750rpm)

Fig. 9 Maximum temperature distribution and probability of temperature for swirl head at 500rpm, 750rpm

록 디젤엔진의 연소온도도 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에서는 swirl head에서 온도분포의 결과를 보여주고 있다. 화염이 스월의 영향으로 인하여 동시 다발적으로 발생하지 않고 한쪽으로 몰린 상태에서 화염의 생성과 성장 및 소멸 하는 것을 전체적인 사진을 통해 볼 수 있으며, 온도의 분포도 화염의 중앙 부위에서는 최고의 온도를 보이고 화염의 끝에서 온도의 하강이 일어나는 현상을 볼 수 있다. non-swirl head와 동일하게 벽면에 충돌하는 화염의 온도가 낮게 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, swirl head보다 non-swirl head에서 연소실내의 온도가 200~300K정도 높은 것을 확인할 수 있으며, 이는 동일한 공연비에서 공기흡입량이 적기 때문이며, swirl head에서는 최고 온도가 약 2100K정도로 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 10의 그림은 non-swirl head에 대한 500rpm, 600bar조건에서의 화염의 생성과 성장 및 소멸하는

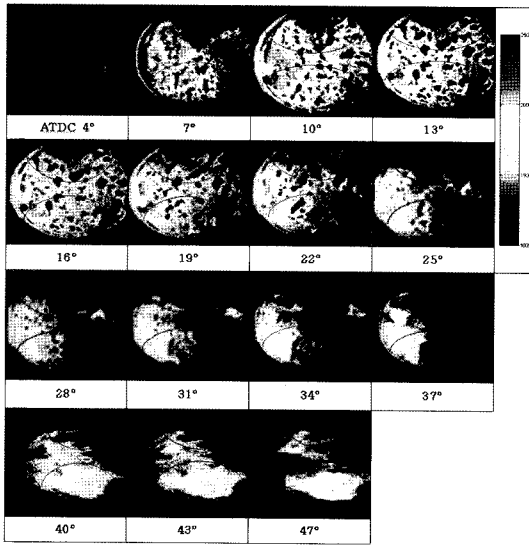


Fig. 10 Flame temperature distribution for non-swirl head at 500rpm, 600bar

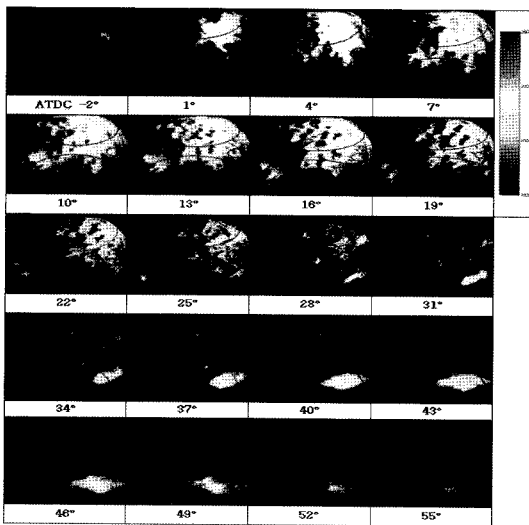


Fig. 11 Flame temperature distribution for swirl head at 500rpm, 600bar

과정의 온도분포를 나타내는 그림으로서 연소실의 전체에서 연소 온도가 감지되며, 온도가 높은 곳에서 점차로 온도가 감소하면서 화염의 소멸하는 과정을 보여주고 있으며, 크랭크 각도는 화염 가시화 사진의 결과를 토대로 나타내었다.

Fig. 11의 결과 그림은 swirl-head에 대하여 500rpm, 600bar조건에서의 화염의 생성과 성장 및 소멸하는 과정의 온도분포이며, non-swirl head 보다 화염온도

가 낮고 스웰의 영향으로 인하여 화염이 한쪽으로 편중되어 있는 모습을 보여주고 있으며, 화염의 중앙부분에서 화염의 온도가 높고 화염의 중앙부위에서 멀어질수록 화염의 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 디젤엔진의 soot분포 특성

Fig. 12는 non-swirl head(c)와 swirl head(d)에 대하여 500rpm, 900bar로 연료를 분사한 싸이클의 화염 중 가장 강한 휘염을 이색법의 절차를 이용하여 구한 soot의 정성적인 분포를 나타낸 결과이며, KL치수를 이용하여 정성적으로 디젤 화염의 soot 분포를 표시한 그림이다. Fig. 7과 비교를 통하여 온도와 KL치수는 서로상반 분포를 나타내었다. 즉, 온도가 높은 부분에서는 KL 치수가 낮고 즉, 매연의 정도가 낮은 것을 알 수 있으며 반대로 온도가 낮은 부분에서는 KL치수가 높은 것을 알 수 있다. 즉, 화염온도가 높은 부분에서는 확산화염에서 발생한 매연을 급격하게 산화시켜 농도를 줄이는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 13의 결과 그림은 non-swirl head에 대하여 500rpm과 750rpm의 두개의 회전 수 조건과 연료의 분사압력은 300bar, 600bar, 900bar, 1200bar에서 분사 될 때의 연소현상 중 최대 휘염을 가지는 화염을 분석한 결과 그림으로서, non-swirl head에서는

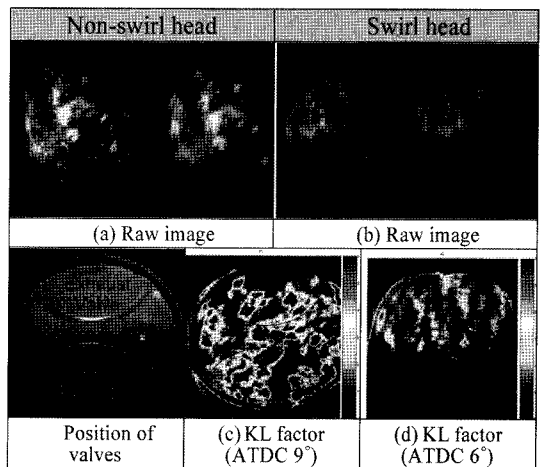
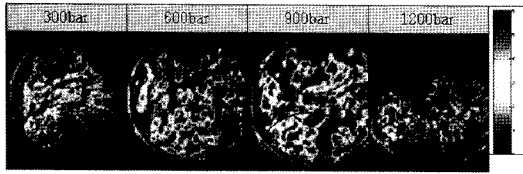
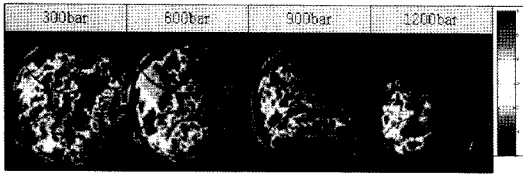


Fig. 12 Flame comparison of soot distribution and KL factor between two types of cylinder head at 500rpm, 900bar



(a) Engine speed (500rpm)



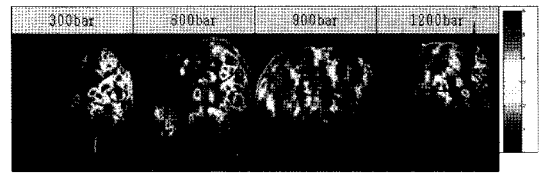
(b) Engine speed (750rpm)

Fig. 13 Soot distribution and KL factor for non-swirl head at 500rpm, 600bar

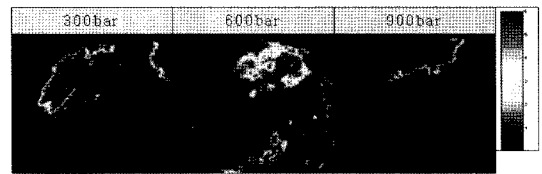
전체적으로 매연의 분포가 넓은 면적을 가지는 것을 볼 수 있고, 1200bar로 분사하였을 경우에는 연료의 미립화가 촉진되기 때문에 상대적으로 적은 면적에서의 매연의 분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이색법을 이용한 온도의 분포와 비교해보면 온도가 상대적으로 높은 면적에서는 매연의 분포가 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있고, 온도가 낮은 부분에서는 매연의 분포가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 swirl head에 대한 매연의 분포를 측정된 결과로서 non-swirl head에 비해 상대적으로 스월의 영향으로 좁은 면적에서 매연의 분포가 발생하는 것을 알 수 있으며, 정성적인 양도 non-swirl head에 비해서 적게 발생하는 것을 알 수 있는데 이러한 사실로부터 스월의 강화로 인해서 매연의 발생이 적게 나타남을 예측할 수 있다. 또한 스월이 시계방향으로 발생하는 것을 화염의 가시화를 통해 확인할 수 있는데 일단 화염이 발생하여 성장하는 과정에서 화염과 공기가 만나는 면에서 매연의 발생이 활발하게 일어남을 알 수 있다. 이는 분사된 연료가 연소실 벽면에서 만나 급격한 온도의 변화로 인해 매연의 발생이 증가하는 것과 동일하게 화염의 중앙부위에서는 화염의 온도가 높은 반면 공기와 혼합되는 부분에서 상대적으로 온도의 급격한 변화로 인해서 매연의 발생이 증가하게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 15의 결과는 non-swirl head에서 500rpm, 600bar



(a) Engine speed (500rpm)



(b) Engine speed (750rpm)

Fig. 14 Soot distribution and KL factor for swirl head at 500rpm, 750rpm

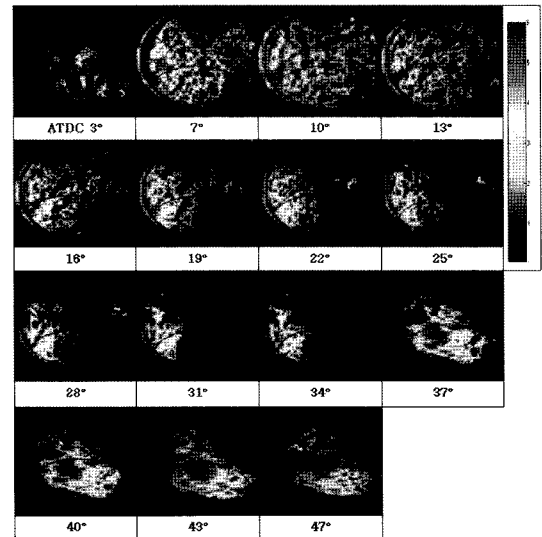


Fig. 15 Soot distribution and KL factor for non-swirl head at 500rpm, 600bar

로 분사 하였을 경우의 화염의 생성, 성장, 소멸 하는 과정으로서 앞에서 분석한 것과 같이 연소실의 전 영역에서 화염의 생성 및 매연의 정도가 나오는 것을 볼 수 있으며, 화염의 끝단에서 매연의 발생, 연소실 벽면에서 매연의 발생, 또는 분사된 연료가 연소실의 벽에 부딪친 후 연소실의 바닥 면으로 흐르면서 연소가 되는 부분에서 매연의 발생이 많은 것을 알 수 있다.

반면, Fig. 16의 결과는 swirl head에서 500rpm, 600bar로 분사하였을 경우의 매연에 대한 측정결과



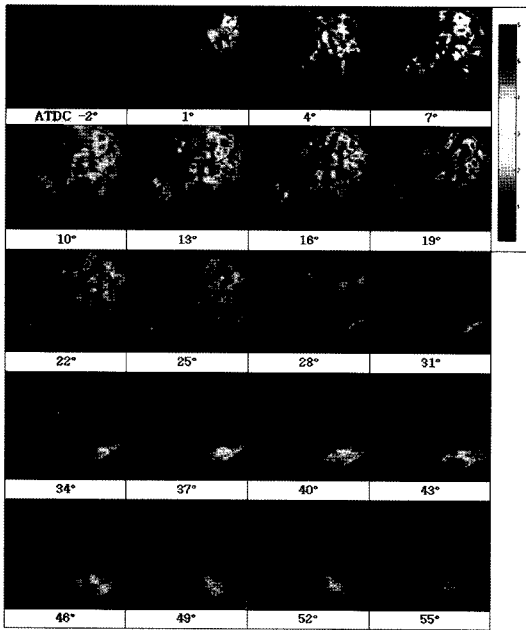


Fig. 16 Soot distribution and KL factor for swirl head at 500rpm, 600bar

로서 non-swirl head에 비해서 상대적으로 좁은 면적에서 매연의 정보를 얻을 수 있으며 매연이 발생하는 전체적인 부분도 상당히 줄어들어 줄 수 있는 반면, 화염이 시계방향으로 회전하면서 연소하게 되는데 역시 공기와 만나기 시작하는 부분에서 매연의 발생이 증가하게 되는 경향을 본 조건에서 도 볼 수 있다.

또한, swirl head에서도 분사된 연료가 연소실의 벽면에 충돌한 후에 매연이 발생됨을 확인할 수 있지만, 그 발생 정도는 non-swirl head 보다 상당히 줄어들어 줄 수 있으며, 연료가 연소실의 벽면에 닿은 후에 바닥면까지 흐르는 부분에서도 non-swirl head 보다는 상당히 줄어드는 매연의 정보를 확인할 수 있다. 이상과 같은 결과를 통해 디젤엔진에서 연료와 공기와의 혼합이 매연의 양을 상당히 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있으며, 매연의 배출면에서 연료와 공기와의 혼합율이 중요하다는 사실을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 직분식 가시화 엔진내의 난류 확산화

염의 온도와 매연의 정보를 이색법을 사용하여 얻은 실험결과로서 주요 결론으로는 다음과 같다.

- 1) non-swirl head에서 연소실의 중심부에서 적색의 픽셀이 많은 것을 볼 수 있는데 이는 화염의 온도가 높다는 것을 나타내는 반면, 화염은 연소실의 벽면에 가까워지면서 낮은 온도를 나타내며, 이는 연소실의 벽면에 충돌한 화염은 충돌지점에서 낮은 온도를 나타내고 있는데 이는 벽면으로의 충돌냉각으로 인한 열전달에 의한 것으로 해석된다.
- 2) 디젤화염의 온도분포는 non-swirl head에서는 연소실내의 유동이 무질서하므로 연소실 영역에 화염이 형성되는 반면, swirl head에서는 스월의 영향으로 인하여 연소의 형태가 한 부분에 편중되어 발생된다.
- 3) Non-swirl head에서는 화염의 최대치가 2400K까지 형성되는 결과를 얻었고, swirl head에서는 2100K까지 최대온도가 형성된다.
- 4) Non-swirl head에서는 화염(매연)이 연소실 전체에서 국부적으로 발생하는 현상을 볼 수 있으며, 연료액적 및 화염이 연소실 벽면에 충돌하는 부위에서 매연의 발생이 증가하는 것을 non-swirl head와 swirl head 두 가지 경우 모두 확인할 수 있었다. 또한, 공기와의 혼합이 원활하지 못한 부위에서 매연의 발생이 증가하는 결과를 얻었다.

#### 후 기

본 연구는 BK21 (Brain Korea) 사업의 지원에 의해 수행된 연구 결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 포함합니다.

#### References

- 1) Ö. L. Gülder, "Soot Formation in Laminar Diffusion Flames at Elaborated Temperature," *Combustion and Flame*, Vol.88, pp.74-82, 1992.
- 2) J. H. Kent and H. G. Wagner, "Temperature and Fuel Effects in Sooting Diffusion Flames," 20th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.1007-1015, 1984.

- 3) C. K. Law, "Dilution and Temperature Effect of Inert Addition on Soot Formation in Counterflow Diffusion Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol.61, pp.51-73, 1988.
- 4) L. Warnatz, "The Structure of Laminar Alkane-, Alkene-, and Acetylene Flames," 18th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p.369, 1981.
- 5) I. Glassman, K. P. Schung, Y. Manheimer-Timnat and P. Yaccarino, "Sooting Behavior of Gaseous Hydrocarbon Diffusion Flames and the Influence of Additives," *Combustion Science and Technology*, Vol.22, pp.235-250, 1980.
- 6) P. A. Bonczyk, "Suppression of Soot in Flame by Alkaline-Earth and Other Metal Additives," *Combustion Science and Technology*, Vol.59, pp.143-163, 1988.
- 7) I. M. Miller and H. G. Machs, "High-Pressure Flame System for Pollution Studies with results for Methane-Air Diffusion Flames," NASA Technical Note, NASA TN D-8407, 1977.
- 8) W. L. Flower and C. T. Bowman, "Soot Production in Axisymmetric Laminar Diffusion Flames at Pressures from One to Ten Atmosphere," 21th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.1115-1124, 1986.
- 9) Y. Matsui, T. Kaminoto and S. Matruoka, "A Study on the Flame Temperature and Soot Concentration in a D. I. Diesel Engine by the Two-Color Method," SAE 790491, 1979.
- 10) 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 901577, 1990.
- 11) Y. W. Nam and W. Lee, "The Measurement of Soot Particle Temperatures Using a Ratio Pyrometry," KOSCO Symposium, 2004.
- 12) T. W. Lee, S. B. Lee and J. R. Ha, "A Study on a Technique of the Measurement of Flame Temperature and Soot Using the Two-Color Method in Diesel Engines," *KSME, Transactions of KSME*, Vol.9, No.20, pp.3007-3014, 1996.
- 13) Y. Matsui, T. Kamimoto and Shin Matsuoka, "A Study on the Time and Space Resolved Measurement of Flame Temperature an Soot Concentration in a D. I. Diesel Engine by the Two-Color Method," SAE 790491, 1979.
- 14) H. Hottel and F. Broughton, "Determination of True Temperature and Total Radiation from Luminous Gas Flames," *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*, Vol.4, pp.166-175, 1932.
- 15) I. Yamaguchi and T. Nakahira, "An Image Analysis of High Speed Combustion Photographs for D. I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection," SAE 901577, 1990.