

〈 논문 〉

고속카메라를 이용한 디젤엔진내의 화염 가시화, 화염의 온도 및 매연 측정에 관한 연구

한 용 택* · 이 기 형*

(2006년 7월 14일 접수, 2006년 12월 16일 심사완료)

A Study on the Measurement of Flame Visualization, Temperature and Soot for Diffusion Flame in a Diesel Engine Using High-Speed Camera

Yong-taik Han and Ki-hyung Lee

Key Words: Two-color Method(이색법), Visualized Diesel Engine(가시화 디젤 엔진), Temperature(온도), Soot(매연), Flame Visualization(화염가시화), Swirl Head(스월형 헤드), Non-swirl head(비스월형 헤드)

Abstract

The temperature and soot of the visualized diesel engine's turbulent flow of the flame was measured qualitatively. In the combustion chamber, in order to judge the affect that the swirl current has on the current ratio, two heads with different ratios were used. Using a high speed camera, the results were analyzed using flame visualization. In order to measure the temperature and soot of the turbulent flames like diesel flames, two color methods were used to acquire temperature and the soot of the flames according to the conditions through analyzing the two wavelengths of the flames. It was possible to measure the highest temperature of the non-swirl head visualized engine, which is approximately 2400K, and that swirl head engine managed up to 2100K. With respect to the visualized diesel engine soot, we got the grasp of the *KL* factor which bears the qualitative information of the soot. This study is dedicated to suggesting the possibility of measuring not only the temperature but also soot of the diffusion flame of the diesel engine turbulent flames.

기호설명

- I_λ : 복사 강도
- ϵ_λ : 파장에 따른 방사율
- λ : 파장
- c_1 : 제1복사 계수
- c_2 : 제2복사 계수
- K_{ext} : 소멸 계수
- KL : 매연 농도 인자

1. 서론

디젤엔진은 높은 열효율과 경제성, 다양한 연료를 사용하는 이점으로 널리 사용되어 왔지만, 입자상 물질이나 질소산화물(NOx) 등 오염 물질을 배출시켜 환경오염에 많은 영향을 주므로 이러한 문제를 야기하는 단점도 가지고 있다. 이와 같은 입자상물질과 질소산화물의 배출은 화염의 온도와 매우 밀접한 관계를 가지고 있어 화염온도와 soot농도의 측정은 디젤엔진의 유해배기가스를 줄이는 연소개선에 필수적이다.

이와 같은 연소현상의 계측에 있어 주요한 측정대상은 속도, 온도 및 화학종의 농도이며, 최근

† 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
E-mail : rthan102@hanmail.net
TEL : (017)706-0360 FAX : (031)706-0365

* 회원, 한양대학교 기계공학과

에는 측정 장치와 방법의 다변화로 관찰영역을 넓혀가고 있는데 특히 분광학의 응용은 대표적이다 하겠다. 종래의 분광학적 방법으로 불휘염이나 압축가스를 대상으로 할 경우 흡수·발광법(emission absorption method)이나 발광법(radiance method)등이 있고 휘염을 대상으로 할 경우 이색법(two-color method)을 사용한다. 흡수·발광법이나 발광법은 OH, C₂, CH 등의 라미칼이 각각 고유의 스펙트럼 파장에 있어서 광을 흡수·발광하는 성질을 이용한 것이다. 레이저의 발달로 레이저 분광학 영역이 생기고 레이저·라만 산란법(laser Raman scattering method), 레일리산란법(Reyleigh scattering method), 카스법(coherent anti-strikes Ramanscattering method:CARS) 등이 개발되었다. 레이저·라만 산란법, 레일리 산란법은 레이저 광을 조사하였을 경우 분자의 산란 스펙트럼을 파라미터로 하여 온도를 구하는 것인데 산란광의 광도 부족과 미산란과의 영향으로 휘염에의 적용이 불가능하다. 카스법은 산란광의 광도가 라만 산란광에 비하여 매우 크고 산란광의 지향성이 강하기 때문에 압축 점화기관의 휘염 온도 측정에 이용하고 있다.⁽¹⁾

이와 같은 계측법의 측정오차가 고도로 정밀해지고 측정영역 또한 넓어지고 있지만 고가의 장비와 응용기술의 한계로 사실상 현실화 되기가 어려운 실정이다. 종래에 사용된 휘염을 대상으로 하는 측정기술인 이색법은 휘염에 대한 두 파장의 온도를 알아내는 것으로서 진온도를 구하는 방법인데 타 측정장비에 비하여 저렴한 투자로 다분히 응용범위를 확장할 수 있는 장점이 있다.

이색법을 사용한 과거 연구를 살펴보면 Matsui⁽²⁾ 등이 가시영역의 파장을 이용하여 디젤 엔진내 온도분포와 soot분포 측정을 위해 이색법을 적용한 이래 적외선 파장으로 측정온도 범위를 넓히고, Kobayashi⁽³⁾ 등이 고압분사에서의 화염온도를 측정 한 사례가 있으며, 이원남⁽⁴⁾ 등은 ratio parameter방법을 이용하여 층류 확산화염에서의 온도를 파악하였다. 또한 정상상태의 확산 화염에서 매연체적분률과 온도 측정을 하여 매연의 양이 많이 생성되는 지역에서 온도 및 매연체적분률을 측정 한 결과를 레이저로 측정 한 매연체적분률의 양과 온도를 비교하여 검증 한 바 있으며, 하중률⁽⁵⁾ 등은 디젤엔진의 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 연구배경을 토대로 매연의 시간적, 공간적 변화를 관찰함으로써 디젤 엔진의 연소과정을 이해하고 soot생성요인을 고찰하여 배기가스 저감을 위한 자료를 제공할 뿐만 아니라 연소실 내에서의 온도와 soot농도 분포 측정기술의 하나인 이색법의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 디젤 확산화염에서의 이색법의 응용

soot입자의 복사를 이용하는 이색법은 서로 다른 두 파장의 복사를 검출하고, 화염 방사율에서 미지수를 소거하는 방법으로 화염온도를 구한다. 단파장 흑체 방사율 $I(\lambda, T)$ 는 3000K이하의 온도일 때 Wien의 식에 의해 가시파장 영역 내에서 정확도 1% 내에서 식 (1)과 같이 주어진다.⁽⁶⁾

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

식에서 λ 는 파장이고, T는 절대온도이며, c_1 과 c_2 는 프랭크 상수이며 $c_1 = 3.742 \times 10^8 w \cdot \mu m^4 / m^2$ 이고, $c_2 = 1.439 \times 10^8 \mu m \cdot K$ 이다. ϵ_{λ} 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_{λ} 는 soot의 크기가 작으므로 산란율은 무시되고 흡수율로 간주된 계수이다. Hottel과 Broughton⁽⁷⁾의 실험식을 디젤화염내의 soot입자를 단파장 방사율에 적용하면, $a_{\lambda} = \frac{K}{\lambda^a} = K_{\lambda}$ 가 된다. 여기에서 K 는 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 축방향의 기하학적인 두께이다. KL이 근사적인 입자수 밀도와 화염 두께를 나타내고, λ^a 는 파장의

영향을 근사적으로 나타내기 때문에 지수 a 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 λ_1, λ_2 와 측정된 T_{a1}, T_{a2} 를 대입하면 KL 도 구할 수 있다. 기본적으로 디젤화염은 발광화염이며, soot 입자부터의 광복사는 강한 연속 스펙트럼을 발산하므로 soot는 다른 가스의 복사를 차단한다고 가정한다.⁽⁸⁾ 또 이색법을 사용하는 파장에 따라 측정값에 차이를 보이는데 처음에는 가시파장역을 사용하여 온도분석을 하였지만, 이색법이 점점 발전하면서 적외선 영역을 포함하여 보다 넓은 온도범위에서 가능하게 가스성분들의 스펙트럼을 측정하여 이색법이나 기타 해석법으로 온도와 농도의 공간분포의 정량해석을 되었다.

2.2 가시화 디젤 엔진 및 실험 조건

직분식 가시화 디젤 엔진의 경우에는 광학적 접근이 가능한 단기통 가시화 엔진을 사용하였다. Fig. 1과 Fig. 2에는 본 연구에 사용된 시스템의 개략도를 나타내었으며 Table 1에는 엔진의 주요사항을 정리하였다.

구동장치는 정출력 방식의 DC모터를 사용하였으며 엔진 작동시의 축토크를 억제하여 일정한 회전수를 유지할 수 있도록 4상한 제어방식을 사용하였다. 한편, 관측영역이 되는 연소실은 직경 50mm의 Bowl-in-piston형식으로 피스톤 크라운 부분에 해당하는 관측창을 부착하였으며, 피스톤

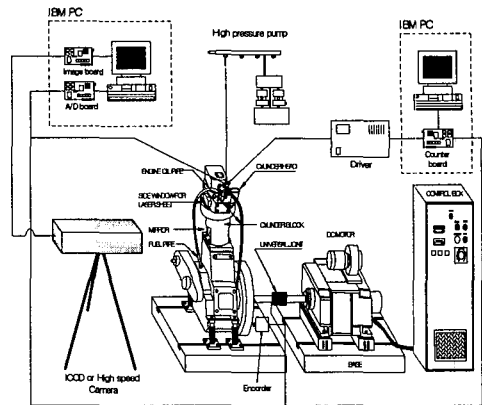


Fig. 1 Schematic of experimental rig for combustion visualization

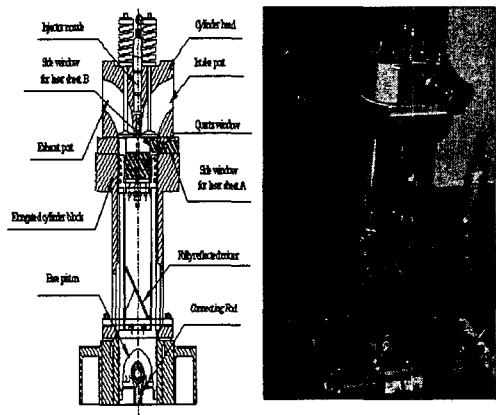


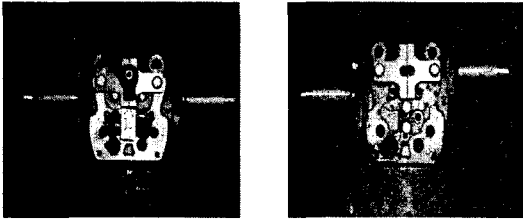
Fig. 2 Cross-section of the visualization engine and photography

Table 1 Engine specification

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

캐비티 부분에 연소시 고온과 압력에 견딜 수 있는 석영유리로 만들어진 관측창을 부착하였으며, 연장 피스톤의 하부에 장착된 45° 각도의 광학용 미러를 사용하여 화염 및 유동장의 상태를 고속 카메라와 ICCD카메라를 이용하여 직접 관측할 수 있도록 하였다. 그리고 관측창의 청결도를 유지하기 위하여 무윤활 방식을 사용하였고, 내마모성이 우수한 테프론링을 피스톤에 부착하였다.

또한, 본 실험에서는 연소실내의 스웰 유동이 유동장에 미치는 영향을 평가하기 위하여 각각의



(a) Non-swirl type head (b) Swirl type head

Fig. 3 Two types of cylinder heads

스웰비를 달리하는 두 종류의 헤드를 사용하였다. 또한, 본 실험에 쓰인 두 종류의 실린더 헤드는 유량 확보 면에서는 유리하나 스웰 유동이 발생하지 않을 것이라 예상되는 형식의 직립형 헤드(Non-swirl head)와 유량 확보면에서는 불리하나 실린더내에 강력한 스웰 유동을 형성할 수 있을 것이라 기대되는 스웰 형식의 헤드(Swirl head)를 제작하여 사용하였으며, 두 가지 헤드의 형상은 Fig. 3과 같다.

가시화 엔진을 이용한 연소실험에서는 고압의 분사압력과 정밀한 분사시기의 제어를 얻기 위하여 전자제어 및 고압화가 가능한 커먼레일식 연료 분사 장치를 제작하여 사용하였다.

시스템의 구성은 송출압력을 얻기 위한 고압펌프부와 인젝터로 전류를 흘려 작동시키는 전용의 인젝터 드라이버(TDH-3200H, Tems社)와 데이터와 화상을 얻을 수 있는 PC로 실험시스템의 구성이 이루어져 있다.

공압을 사용하는 고압펌프(Haskel)를 사용하여 연료 탱크에 저장된 연료를 고압으로 송출할 수 있도록 하였으며, 레일체적 보다 큰 보조탱크를 부착하여 연료 분사시에도 커먼레일 내부의 압력이 급격히 변화하지 않도록 하였다. 한편, 레일 내부의 압력은 공압 펌프로 유입되는 공기의 양을 조절하여 250bar부터 1500bar까지 조절할 수 있도록 하였으며 압력게이지를 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 최종적으로는 디젤 엔진화염의 온도와 매연 측정에 목적을 두고 있으므로 엔진의 회전수를 250rpm, 500rpm 및 750rpm에 대해서 각각의 분사압력을 300bar, 600bar, 900bar 및 1200bar로 조절하였고, 공연비를 40대 1로 맞추어서 연료를 공급하였다. 또한, 분사 시기는 각 조건에 따라서

Table 2 Experimental conditions

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



(a) 550nm (b) 750nm (c) 180scc/m

Fig. 4 Photography of raw image acquired by 550nm, 750nm narrow band-pass filters

단일분사로 BTDC10°에서 동일하게 분사하였으며, 냉각계통을 실제엔진의 냉각수 온도와 유사한 조건이 되도록 헤드의 온도가 약 85°C에서 90°C 사이를 유지하도록 설계하여 엔진을 운전하였다. 각각의 연소실험에 사용한 조건들은 Table 2에 정리하였다.

3. 실험결과

3.1 동축류 버너를 이용한 이색법의 검증

실제 디젤 가시화엔진에서의 이색법을 적용하기 전에 동축류 버너에서의 열전대를 이용한 온도측정 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 3cm 위치에서의 열전대를 이용한 화염온도의 비교하였다. 실제 엔진에서의 적용과 차이점은 동축류 화염에서는 화염의 광학거리를 Abel변환을 이용하여 동축류 화염에서의 온도를 계산할 수 있었다. Fig. 4는 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. 5의 그림에서 확인할 수 있다.

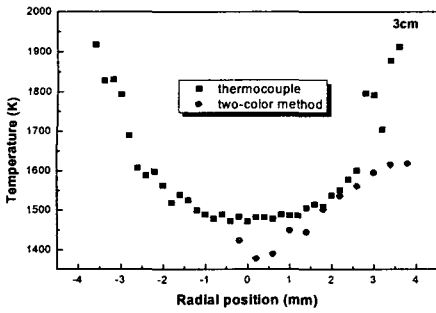
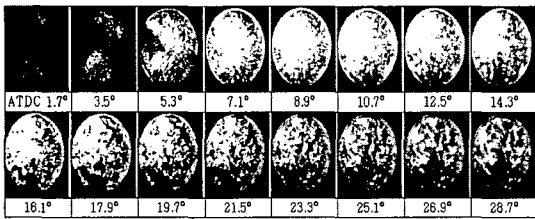
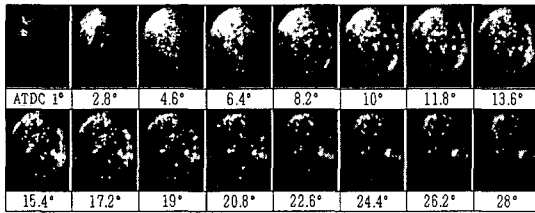


Fig. 5 Comparison of temperature obtained from thermocouple with two-color method



(a) Non-swirl head (500rpm, 900bar)



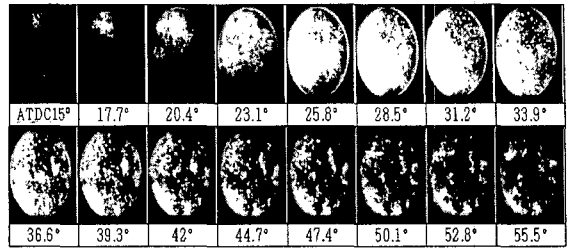
(b) Swirl head (500rpm, 900bar)

Fig. 6 Flame visualization between two types of cylinder head

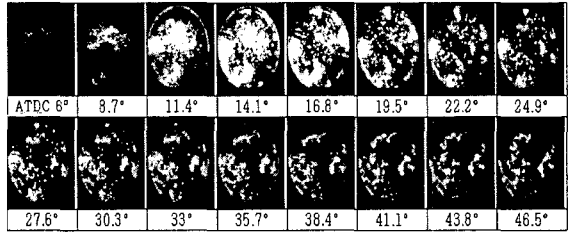
3.2 디젤 가시화 엔진에서의 화염전파 특성

Table 2와 같은 조건에서 고속카메라를 이용하여 화염 가시화 실험을 수행하였다. 모든 조건에서 동일하게 초당 5000frame으로 촬영한 결과이며, 이와 같은 엔진에서의 연소상태를 이색법을 이용하여 분석하기 이전에 화염의 정성적인 상태를 파악하기 위하여 가시화 실험을 수행하였다.

Fig. 6의 결과는 동일한 엔진 스피드, 동일한 분사압력의 화염 가시화 결과로서 non-swirl head에서의 정성적인 화염의 모습은 연소실 캐비티 전체의 넓은 면적에서 일정한 방향 없이 동시 다발적으로 화염의 성장이 일어남을 알 수 있으며 연료분사 후 약 20° 이후에 최대화염이 발생하였으며 확산화염의 영향을 많이 받아서 swirl head보다 휘염의 밝기가 밝은 것을 볼 수 있다. 반면



(a) Non-swirl head (750rpm, 300bar)



(b) Non-swirl head (750rpm, 1200bar)

Fig. 7 Flame visualization with injection pressure

swirl head에서는 스월의 영향으로 화염이 일정한 방향으로 휘면서 성장이 이루어지는 것을 알 수 있다. 최대화염은 연료 분사 후 약 17° 이후에 발생되고 있음을 알 수 있으며 스월에 의해 연료와 공기의 혼합이 촉진되어 non-swirl head에 비해서 휘염의 세기가 약한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7의 결과는 non-swirl head에서 분사압력의 차이에 따른 화염의 가시화 결과를 나타내고 있다. 분사압력이 높아질수록 연소기간은 줄어들고 있고, 최대화염은 TDC근방으로 옮겨감을 알 수 있으며 이러한 이유는 고압분사 일수록 난류의 증가로 인한 공기와의 혼합이 증가하여 예혼합의 생성이 빨리 발생하는 것으로 판단 할 수 있으며, 이러한 혼합 및 연소 증진효과는 착화 지연 및 예혼합 연소구간의 열발생률 증가를 동시에 일으키는 것을 알 수 있다. 또한 분사압력이 증가할수록 예혼합의 증가로 인하여 휘염의 세기가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8의 가시화 결과는 non-swirl head에서 엔진스피드에 따른 화염 가시화 결과이다. 엔진회전수가 증가함에 따라 초기 공기과 연료의 혼합시간이 부족하게 되므로 화염의 발생시기가 지각되는 것을 볼 수 있으나, 연소실내의 유동장은 강화되므로 주 연소 과정은 빠르게 형성되고 있으며 화염의 후염과정은 빨리 끝나고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 공기의 흡입량도 엔진스피드에 따라 증가하므로 연소 현상도 그만큼 촉진되는 것을 예상할 수 있으며, 휘염의 세기는 엔

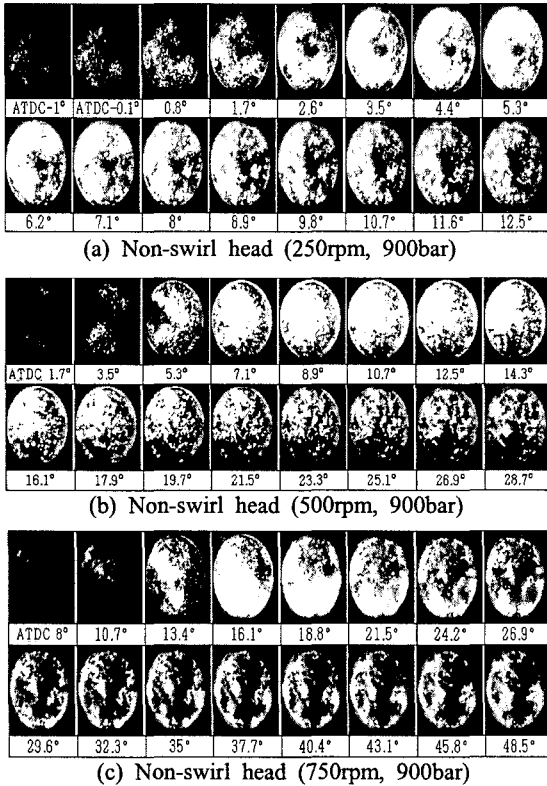


Fig. 8 Comparison of flame visualization with engine speed

진 스피드에 따라서는 엄밀하게 정성적인 차이를 느끼기에는 어려운 화염의 가시화 결과를 나타내었다.

3.3 디젤엔진의 화염 온도 및 soot 분포 특성

본 연구에서는 흑백전용의 고속카메라를 이용하여 1000fps, 또는 2000fps의 촬영속도와 550nm (FWHM:10nm), 750(FWHM:10nm)의 광학필터를 사용하여 화염에 따라서 1/1000초 또는 1/2000초의 노출시간으로 화염의 이미지를 획득하여 분석하였다.

3.3.1 디젤엔진의 화염 온도 특성

Fig. 9와 Fig. 10의 결과그림은 non-swirl head 및 swirl head에서의 연료 분사압력이 300, 600, 900, 1200bar에서 최대회도를 갖는 화염의 온도분석결과를 보여주고 있다. Fig. 9에서 500rpm에서 300bar로 분사시 최고온도는 2100K에서 최대를 보이고 있는 반면 분사압력이 1200bar에서는 2300K에서 온도의 최대값을 보이고 있다. 이는

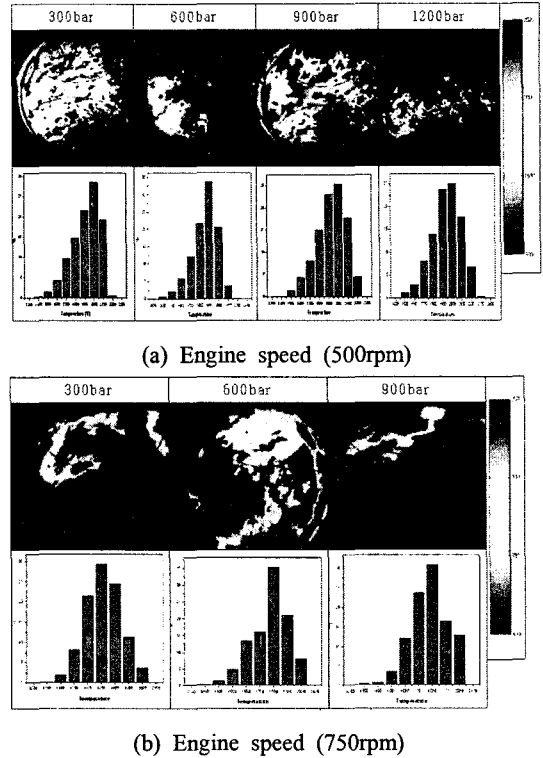
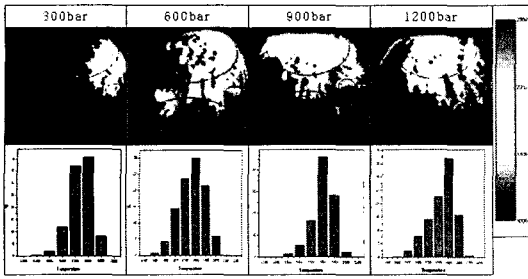


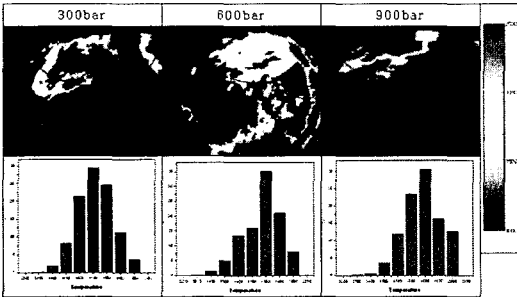
Fig. 9 Maximum temperature distribution and probability of temperature for non-swirl head at 500rpm, 750rpm

분사압력이 증가할수록 공기와의 예혼합 비율이 증가하므로 휘염의 강도가 감소하게 되므로 실제의 온도는 2300K보다 더 높은 값을 갖는다는 것을 예측할 수 있다. 750rpm일 경우에는 300bar로 분사시 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 증가할수록 디젤엔진의 연소온도도 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10에서는 swirl head에서 온도분포의 결과를 보여주고 있다. 화염이 스월의 영향으로 인하여 동시 다발적으로 발생하지 않고 한쪽으로 몰린 상태에서 화염의 생성과 성장 및 소멸하는 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

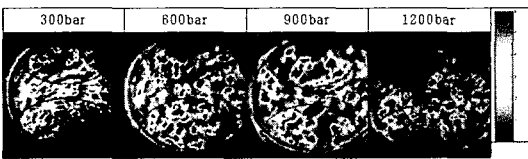


(a) Engine speed (500rpm)

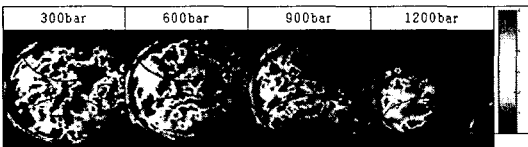


(b) Engine speed (750rpm)

Fig. 10 Maximum temperature distribution and probability of temperature for swirl head at 500rpm, 750rpm



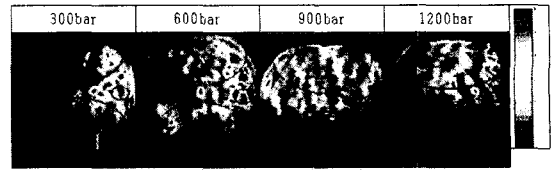
(a) Engine speed (500rpm)



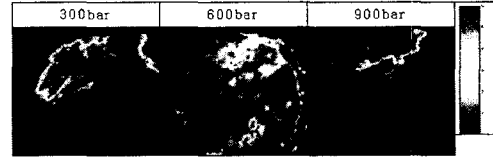
(b) Engine speed (750rpm)

Fig. 11 Soot distribution and KL factor for non-swirl head at 500rpm, 600bar

벽면에 충돌하는 화염의 온도가 낮게 분포하고 있음을 확인 할 수 있으며, non-swirl head에 비해 온도의 분포가 낮게 형성되고 있는데 이는 동일한 공연비에서 공기흡입량이 적기 때문이며, swirl head보다 non-swirl head에서 연소실내의 온도가 200~300K 정도 높은 것을 확인할 수 있으며 swirl head에서는 최고 온도가 약 2100K 정도로 나타남을 알 수 있다.



(a) Engine speed (500rpm)



(b) Engine speed (750rpm)

Fig. 12 Soot distribution and KL factor for swirl head at 500rpm, 600bar

3.3.2 디젤엔진에서의 soot농도 분포특성

Fig. 11의 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 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. 12는 swirl head에 대한 매연의 분포를 측정 한 결과로서 non-swirl head에 비해 상대적으로 스월의 영향으로 좁은 면적에서 매연의 분포가 발생하는 것을 알 수 있으며, 또한 스월이 시계 방향으로 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 차이로 인해 매연의 발생이 증가하는 것과 동일하게 화염의 중앙부위에서는 화염의 온도가 높은 반면 공기와 혼합되는 부분에서 상대적으로 온도의 급격한 차이로 인해서 매연의 발생이 증가하게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 13의 결과는 non-swirl head에서 500rpm, 600bar로 분사 하였을 경우의 화염의 생성, 성장,

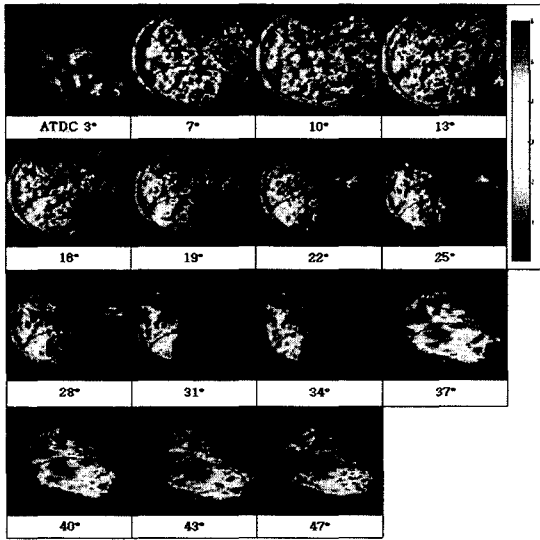


Fig. 13 Soot distribution and KL factor for non-swirl head at 500rpm, 600bar

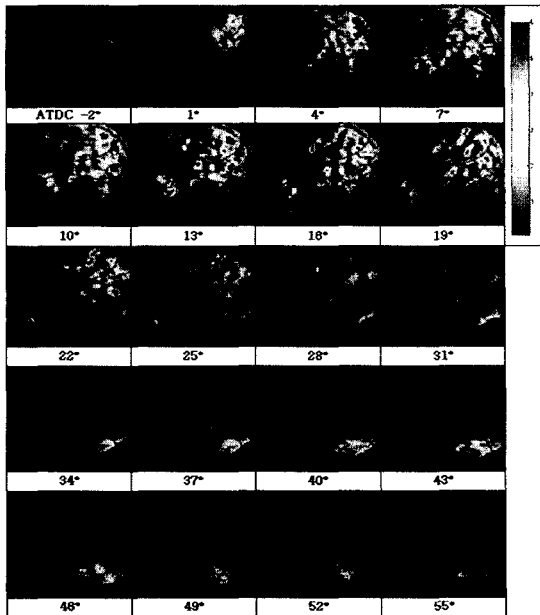


Fig. 14 Soot distribution and KL factor for swirl head at 500rpm, 600bar

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. 14의 결과는 swirl head에서 500rpm, 600bar로 분사하였을 경우의 매연에 대한 측정결과로서 non-swirl head에 비해서 상대적으로 좁은 면적에서 매연의 정보를 얻을 수 있으며 매연이 발생하는 전체적인 부분도 상당히 줄어드는 것을 알 수 있는 반면, 화염이 시계방향으로 회전하면서 연소하게 되는데 역시 공기와 만나기 시작하는 부분에서 매연의 발생이 증가하게 되는 경향을 본 조건에서도 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 직분식 가시화 엔진내의 난류 확산 화염의 온도와 매연의 정보를 이색법을 사용하여 얻은 실험결과로서 주요 결론으로는 다음과 같다.

(1) 화염의 가시화를 통해 디젤확산화연소의 화염을 파악한 결과 분사압력이 높아질수록 확산화염 후염의 기간이 점차 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 이러한 원인은 미립화가 촉진되고 난류의 증가로 분무내로 유입되는 공기량의 증가로 인하여 연료와 공기의 혼합이 촉진되기 때문이다.

(2) 흑백전용의 550nm, 750nm 두 개의 파장을 사용한 이색법을 적용한 결과 디젤화염의 온도분포는 non-swirl head에서는 연소실내의 전체 영역에 화염(온도)이 형성되는 반면, swirl head에서는 스월의 영향으로 인하여 연소의 형태가 한 부분에 편중되어 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

(3) Swirl head에서는 화염의 중앙부위에서 2100K까지 형성되는 최고의 온도를 보여주었고, non-swirl head와 동일하게 화염 끝단에서 낮게 분포하고 있음을 확인하였지만, 온도의 분포는 non-swirl head에 비해서 전체적으로 낮은 온도를 보이는 결과를 얻었다.

(4) 가시화 디젤엔진에서 이색법의 KL치수를 이용하여 난류화염의 정성적인 매연의 분포를 구할 수 있었으며, 온도와 KL치수는 반대의 분포를 나타내었고 온도가 높은 부분에서는 KL치수가 낮은 반면 온도가 낮은 부분에서는 KL치수가 높은 결과를 얻었다.

참고문헌

- (1) Park, J. K., Chung, S. H. and Won, Y. H., 1999, "A Study on In-Cylinder Measurement of Flame Temperature and Soot Distribution in D.I. Diesel Engine Using Two-Color Method," *KSAE*, Vol. 7, No. 7, pp. 42~53.
- (2) Matsui, Y., Kaminoto, T. and Matruoka, S., 1979, "A Study on the Flame Temperature and Soot concentration in a D.I. Diesel Engine by the Two-Color Method," *SAE Paper*, 790491.
- (3) Kobayashi, H., Chang, Y. J., Matsuzawa, K. and Kamimoto, T., 1985, "A Photographic Study of Soot Formation in a Diesel Flame with a Rapid Compression Machine," *Prod. of COMODIA*, pp. 149~157.
- (4) Nam, Y. W. and Lee, W., 2004, "The Measurement of Soot Particle Temperatures Using a Ratio Pyrometry," *KOSCO SYMPOSIUM*.
- (5) Lee, T. W., Lee, S. B. and Ha, J. Y., 1996, "A Study on a Technique of the Measurement of Flame Temperature and Soot Using the Two-Color Method in Diesel Engines," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 20, No. 9, pp. 3007~3014.
- (6) Yukio Matsui, Takeyuki Kamimoto, and Shin Matsuoka, 1979, "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," *SAE Paper*, 790491.
- (7) Hottel, H. and Broughton, F., 1932, "Determination of True Temperature and Total Radiation from Luminous Gas Flames," *Industrial and Engineering Chemistry*, Analytical Edition, Vol. 4, pp. 166~175.
- (8) Ikuo Yamaguchi, and Toshio Nakahira, 1990, "An Image Analysis of High Speed Combustion Photographs for D.I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection," *SAE Paper*, 901577.