

이색법에 의한 바이오 디젤화염의 그을음과 온도 측정 Measurement of Soot and Temperature on Bio Diesel Flame by Two-Color Method

김명수* · 강희영*†

M. S. Kim* and H. Y. Kang*†

(접수일 : 2011년 02월 14일, 수정일 : 2011년 12월 30일, 채택확정 : 2012년 07월 11일)

Key Words : BDF(바이오디젤유), Two-Color Method(이색법), Flame Temperature(화염온도), Visible Wavelength Radiation(가시역 파장 복사), Soot Concentration(그을음 농도)

Abstract : There were some papers for diesel engine performance tests using BDF, but few article deals with the temperature and soot concentration of Bio diesel flame. Since the flame temperature of diesel engines is so high and change rapidly, an optical method for measurement of flame temperature is known as the most effective one. The two-color method regarding the visible wavelength radiation for the soot particles in flame was applied on Bio diesel flame in order to measure flame temperature and soot concentration in a diesel engine. Photo detecting device was newly designed and employed TSL250R, photo-diode, to pick-up the light information emitted from the combustion flame. As a result, real flame temperature T, as a flame brightness temperature, through Ta1, Ta2, were obtained and finally the characteristics of KL value as a soot concentration reveal the difference of combustion information between diesel fuel, blending oil and Bio diesel fuel oil.

1. 서 론

디젤엔진의 연소실 내부의 크랭크 각도 변화에 대한 화염온도 측정은 soot의 생성과정 파악과 저감을 위한 기초정보를 얻기 위해 매우 중요하다.^{1,2)}

연소실 내의 상태가 비정상류 일 때 내연기관의 화염온도 측정은 연소실 내의 온도측정법³⁾으로 열전대를 이용하는 방법, 음의 전파에 의한 방법, 압력과 밀도를 이용하는 방법, 광을 이용하는 방법^{4,5)} 등이 있다. 디젤화염이 휘염이고, soot 입자로부터 발생하는 강한 연속 복사 스펙트럼을 이용하는 이색법(two-color method)은 휘염 온도와 KL값을 동시에 측정할 수 있는 매우 유효한 방법이다. 이색법^{6,7)}의 장점은 연소실 형상의 큰 변경 없이 압력 센서를 장착할 수 있는 정도의 공간만 있으면 되므로 설치가 매우 간단하다.

본 연구에서는 기존의 고가의 상용 장비가 아닌 저렴한 가격으로 설계 제작한 계측 장비의 적합성을 검증하고, 여기에 이색법을 바이오 디젤화염에 적용하여 엔진 회전수와 부하 변동에 따른 화염온도와 soot 생성의 정보를 알 수 있는 KL값(광로 중의 그을음 농도)을 구함으로써 그을음 배출 경향 등 바이오 디젤유에 관한 기초 정보를 제공한다.

2. 이색법의 기본 이론

화염의 절대 온도 T, 임의 파장 λ에 있어 흑체의 복사 휘도(radiation brightness) Eb(λ, T)는 가시역의 파장에서는 Wien(Wilhelm Otto Fritz Franz Wien 1864~1928)⁸⁾의 식 (1)과 근사할 수 있다.

$$Eb(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \tag{1}$$

**† 강희영(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : odinkhan@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-7373

*김명수 : 부경대학교 기계시스템공학과 내연기관연구실

**† H. Y. Kang(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
E-mail : odinkhan@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-7373

*M. S. Kim : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

여기서 C_1 , C_2 는 Planck의 정수로 $C_1=3.743 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$, $C_2=1.4387 \times 10^8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 이다.

Wien의 식은 흑체 (복사율 : $\epsilon=1$)일 때이므로 비흑체($\epsilon < 1$)일 경우의 $E(\lambda, T)$ 는

$$\begin{aligned} E(\lambda, T) &= \epsilon_\lambda E_b(\lambda, T) \\ &= \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \\ &= E_b(\lambda, T_a) \\ &= C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T_a) \end{aligned} \quad (2)$$

단, T_a 는 비흑체로 간주했을 때의 화염의 휘도온도이다.

식 (2)를 ϵ 에 관해 정리하면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_\lambda = \exp\left[\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \quad (3)$$

한편, 디젤화염의 soot 단색복사율은 Hottel-Broughton에 의해 식 (4)로 정의된다.

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp(-KL/\lambda^a) \quad (4)$$

K 는 흡수율 계수, L 은 관찰된 화염 축방향의 기하학적 화염 두께이고 a 는 한정된 파장의 정수로 가시역의 파장에서는 $a=13.8$ 로 정해진 상수이다. 위의 식 (3)과 식 (4)로부터 KL 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$KL = -\lambda^a \ln\left[1 - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a}\right)\right)\right] \quad (5)$$

여기서, KL 은 미립자의 농도에 비례하는 정성적인 값이다. 이 식을 이색법을 적용하는 두 파장의 식으로 나누어 쓰면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_1^{a1} \ln\left[1 - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a1}}\right)\right)\right] \\ = \lambda_2^{a2} \ln\left[1 - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{a2}}\right)\right)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 T_{a1} , T_{a2} 는 실험을 통해 얻어지는 값이므로, 화염의 진온도 T 를 구할 수 있다. 구해진 진온도 T 를 식 (5)에 대입하면 KL 값을 구할 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 광 검출 장치

Fig. 1은 광 검출 장치개략도이다. 검출기의 구성은 엔진 헤드에 장착된 석영 관찰창($\varnothing 3\text{mm}$, 길이 57mm)에 광화이버를 연결한 광 프로브와 하프미러

(half mirror), 2 파장대(530, 735nm)의 간섭필터, 포토다이오드(TSL250R)를 사용한 증폭회로 순서이다. 연소실 내부를 관찰하는 광 프로브 수광부는, 실린더 내 유동장을 교란하지 않고, 외부에 장착된 밸브기구 및 분사노즐 등의 위치를 변경하지 않는다면, 그 직경이 작을수록 유리하나, 연소실 속의 연소화염의 수광율을 높이려면 클수록 좋다.

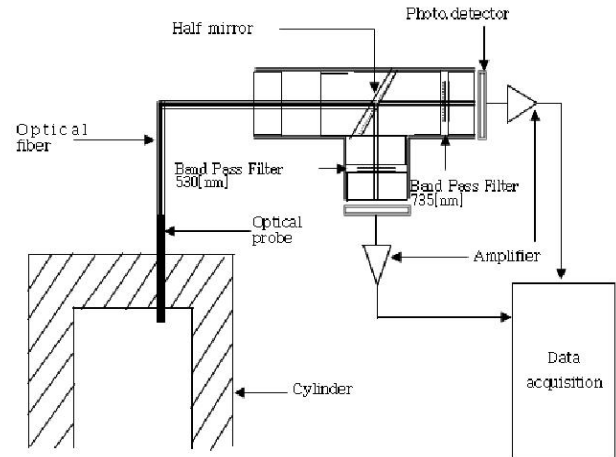


Fig. 1 Schematic of optical detection system

Fig. 2에는 이들을 고려하여 설계 제작한 광 프로브를 나타내었다. 프로브의 몸체는 M5나사로 실린더 헤드 면에 고정되며, 프로브 몸체 속에 $\varnothing 3\text{mm}$, 길이 57mm의 석영봉 관찰창을 심었다. 석영봉의 양면을 평면으로 가공하고 광 전달을 양호하게 하기 위하여 정밀 연마하여 마무리를 하였다.

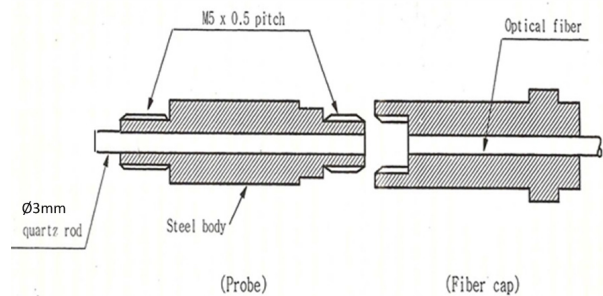


Fig. 2 Detail drawing of probe for in-cylinder sensing

Fig. 3에는 연소실 내 석영봉의 삽입 형상을 나타내었다. 예비실험을 한 다음, 석영봉에 부착된 soot의 상태를 비교하였다. 그 결과 (a)의 경우가 가장 양호하였다. 본 실험에서는 석영봉이 연소실 내에 2mm 돌출되게 설치하여 관찰면이 화염면에 노출되도록 함으로써 그늘음 부착을 최소화 할 수 있었다. 이는 콕(1999년)⁹⁾의 실험 결과와 동일함을 확인하였다.

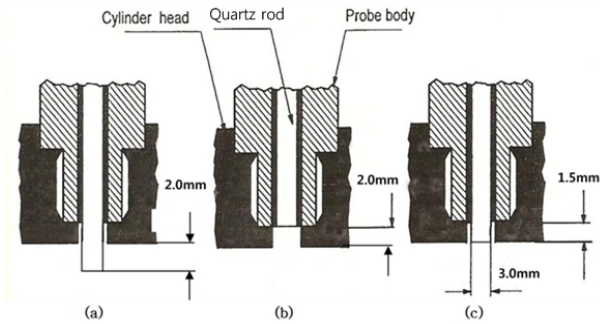


Fig. 3 Detail drawing of optical probe

Fig. 4에 예비실험 후의 석영봉의 상태를 아래쪽에서 레이저 빔을 비추어 그을음 부착의 정도를 사진으로 촬영 비교하여 나타내었다.

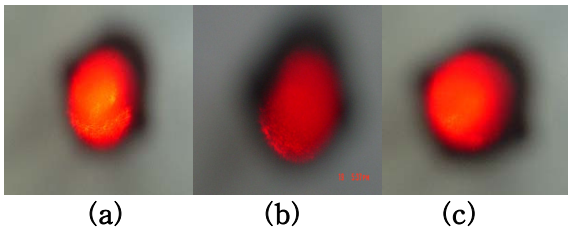


Fig. 4 Comparison of optical probe after engine test

광섬유는 관찰석영 창에서 받아들인 화염광을 광검출기로 전송하는 것으로, $\phi 3\text{mm}$ 의 플라스틱계의 광화이버 케이블(optical fiber cable, OFC)을 사용하였으며, 양 끝단은 폴리싱하여 마무리 하였다. 광검출 센서는 TAOS사의 OP Amp가 내장된 포토다이오드(TSL250R)를 사용하였다. Fig. 5에 Functional block을 나타내었다.

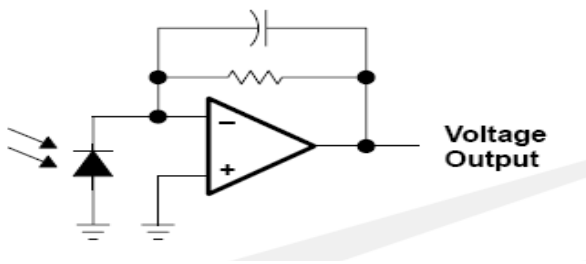


Fig. 5 Functional block diagram

Fig. 6에 이 센서의 반응 파장영역에 대한 반응을 나타내었다. 본 실험에 사용될 파장대의 반응율이 약 0.7과 0.9로 우수하므로 적합하다고 판단하였다. Fig. 7에는 이 센서의 반응시간(switching times)을 나타내었다. Rise & fall time이 $250\mu\text{s}$ 이내에 존재하

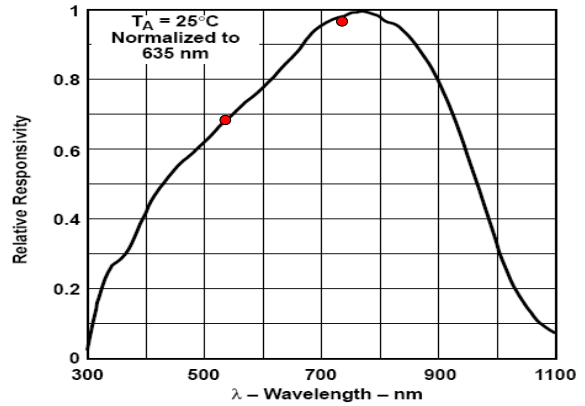


Fig. 6 Photodiode spectral responsivity

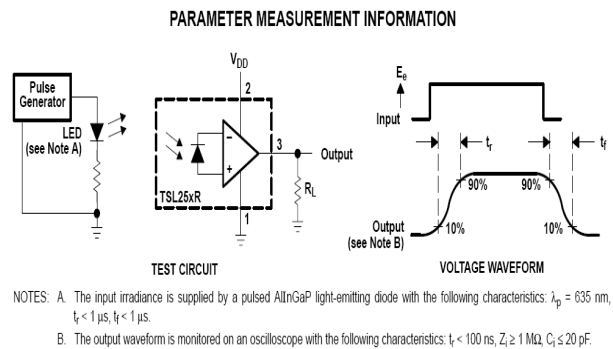


Fig. 7 Switching times

므로 본 실험에 적합함을 입증하였다.

Fig. 8에는 포토다이오드에서 검출된 광 신호를 증폭하는 OP Amp를 이용한 비반전 증폭 회로를 나타내었다. 오실로스코프와 LabVIEW로 코딩한 오실로스코프 프로그램으로 검증 곡선을 구하였을 때 두 경우 모두 노이즈의 최대 진폭이 2 mV로 나타났으므로 이 회로는 신뢰성이 있음을 확인하였다.

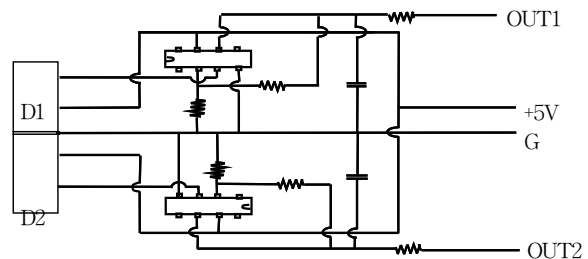
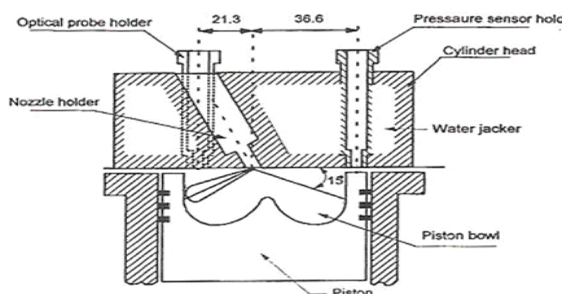


Fig. 8 Amplifier circuit diagram

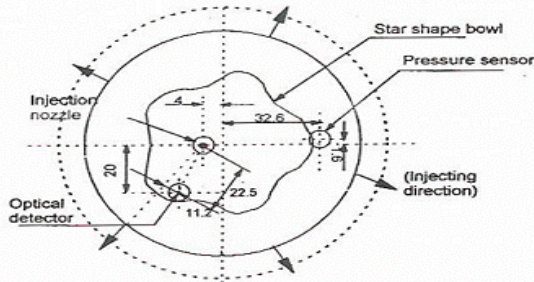
3.2 광 검출기의 설치

실험에 사용된 기관의 연소실 내부 구조형상이 복잡한 성형의 깊은 접시형 직분식 디젤기관이며, 실린

더 헤드 및 피스톤 형상은 Fig. 9과 같다. 피스톤 크라운의 단면형상은 연료분사 방향으로 홈이 파인 성형(star shape)이다. 노즐은 피스톤 중심으로부터 4mm 오프셋(off-set)되어있다. 연료 분사각은 실린더 헤드면으로부터 하방 15°이다. 연소 화염을 검출하기 위한 광 프로브 장착은 bowl 속의 화염을 수광할 수 있는 위치이며, 노즐 중심으로부터 22.5mm, 그리고 분무 중심으로부터 11.2mm 떨어진 곳이다. 착화 순간의 휘염광을 직접 포착할 수 있는 위치이다.



(a) Cross section of combustion chamber



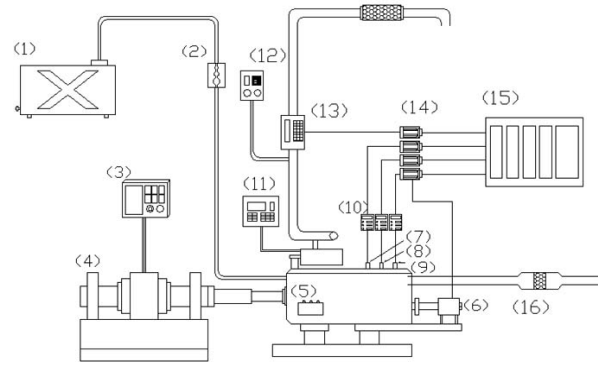
(b) Top of the piston and sensor positions

Fig. 9 Combustion chamber shape and sensor positions for the test engine

3.3 실험장치

Fig. 10은 실험장치 개략도이다. 기관 회전수와 부하 제어는 와전류식 전기동력계를 사용하였다. 트리거 신호와 데이터는, 크랭크축 폴리에 장착된 엔코더(720 ppr)로, 크랭크 각 0.5°마다 데이터를 취득하였다. 광 검출 장치를 통과한 광 정보는 터미널 블록을 통해 PXI에 내장된 DAQ 보드와 컨트롤러에 의해 처리되었고, LabVIEW로 코딩한 프로그램에 의해 휘염 온도와 KL값을 취득하였다.

실험에 사용된 기관은 3기통 수냉식 4행정 직접분사식 디젤기관(국제 트랙터 3D 100-AT)으로 기관 사양을 Table 1에 나타내었다.



- (1)Fuel tank
- (2)Fuel flow meter
- (3)Dynamometer controller
- (4)Dynamometer
- (5)Test engine
- (6)Rotary encoder
- (7)Cylinder Pressure sensor
- (8)Optical probe
- (9)Needle lift(gab-sensor)
- (10)Amplifier
- (11)Exhaust gas analyzer
- (12)Bosh smoke-meter
- (13)PM concentration measurement
- (14)Terminal block
- (15)Personal computer
- (16)Laminar air flow meter

Fig. 10 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of the test engine

Engine model	F455DN-K
Bore × stroke(mm)	100×110
Displacement(cm ³)	2591
Number of the cylinder	3
Type	4-stroke D.I. diesel engine
Injection pressure(MPa)	18.62
Compression ratio	17.6 : 1
Combustion chamber	Star shape deep bowl type

3.4 실험방법

실험에 사용된 연료는 폐식용유(WVO)와 경유(DF)를 30wt%로 혼합한 혼합유(BO), 폐식용유를 에스테르화한 TVO(trans-esterified vegetables oil) 및 시판되는 경유를 사용하였다. 회전속도는 1500, 2000, 2500 rpm, 부하는 0, 20, 40, 60(Nm)로 하였다. 데이터 취득은 위에 열거한 각 운전 조건에서 Fig. 11과 같이 LabVIEW로 코딩한 프로그램을 이용하여, 온라인으로 100사이클씩 평균한 계측전압을 Fig. 12의 Front panel에 표시되도록 하였다.

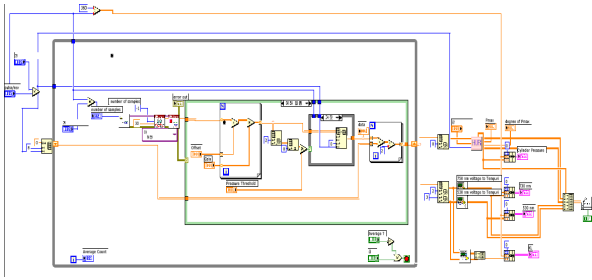


Fig. 11 Block diagram in a LabVIEW for simultaneous 8-board data acquisition

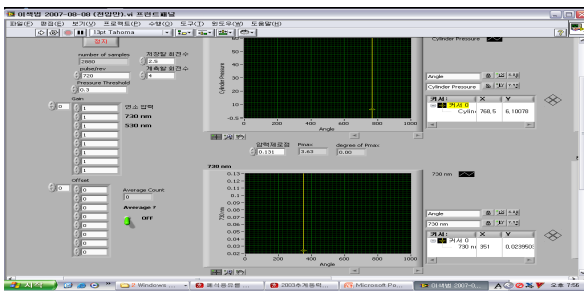


Fig. 12 Front panel in a LabVIEW for simultaneous 8-board data acquisition

4. 결과 및 고찰

4.1 검정곡선 및 진온도와 KL 계산

장치의 검정곡선은 복사율 0.98의 흑체를 이용하여 구하였다. 구해진 검정곡선을 오리진 프로그램을 이용하여 곡선식을 구하고 이를 이용하여 실험에서 얻어진 전압으로 파장에 따른 화염의 휘도온도 $T_a 1$ 과 $T_a 2$ 를 구하였다. 파장에 따른 화염의 휘도온도 $T_a 1$ 과 $T_a 2$ 를 LabVIEW로 코딩한 프로그램을 이용하여 화염의 진온도를 구하였다.

Fig. 13에 화염 진온도와 KL치를 구하기 위한 블록 다이어그램을 나타내었다.

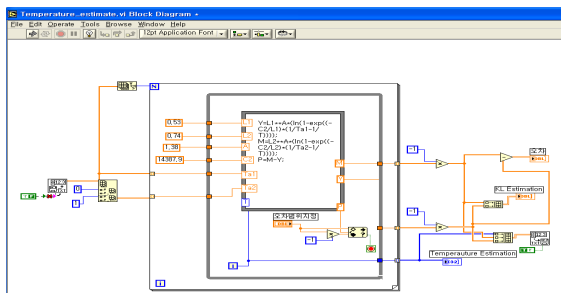


Fig. 13 Block diagram in a LabVIEW for temperature data acquisition and KL

4.2 화염온도 및 KL치

각 실험조건에서 측정된 100회 사이클의 평균치를 크랭크 각도에 따라 화염온도와 KL치를 나타내었다.

Fig. 14~16에 부하 60Nm인 경우의 연료별, 회전수별 화염온도와 KL치를 나타내었다.

최고 연소 온도는 1500, 2000 rpm의 경우 DF, BO, TVO 순으로 나타났다. KL치는 모든 연료에서 DF, BO, TVO 순으로 높게 나타났다. 이는 연료에 포함된 함산소의 영향에 따른 것으로 사료된다.

모든 시료유에서 회전수가 증가할수록 화염온도는 낮아지는 경향을 보인다. 이는 회전수 증가할 경우, 크랭크 각도에 따른 착화시기 지연 기간이 변화하여 팽창 행정 시의 연소가 개선되는 것으로 사료된다.

한편, 회전수가 빠를수록 연료에 따른 온도 변화는 거의 없었고 KL치는 거의 나타나지 않았다. 이는 보쉬식 펌프의 고회전 영역에서 양호한 무화과 예혼합 연소에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 17~19에 부하 60Nm인 경우의 연료별, 회전수별 화염온도와 KL치를 나타내었다. 무부하의 경우에 비해 화염온도는 DF의 경우 2600°K 가까이 상승하는 것도 있다. 연료별, 회전수별 변화는 크지 않았으나 TVO와 BO는 약간 낮은 경향을 나타내었다.

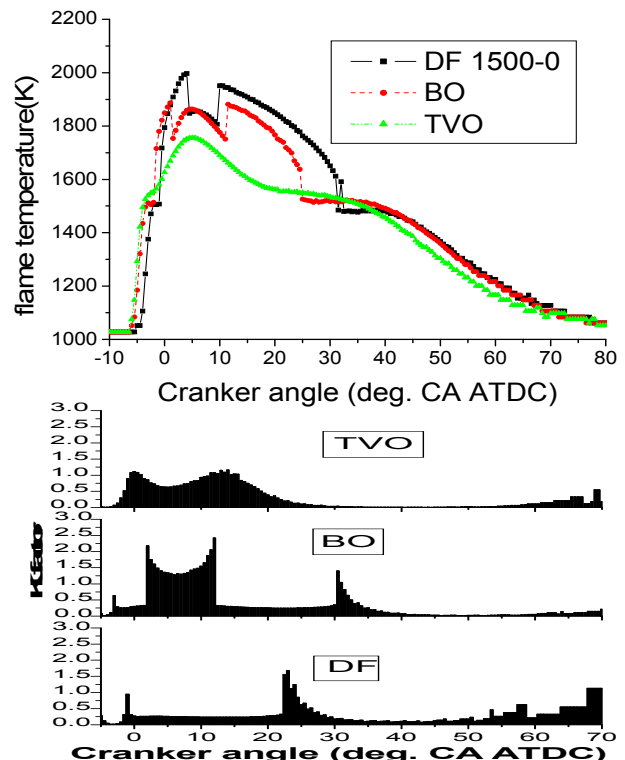


Fig. 14 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 1500 rpm

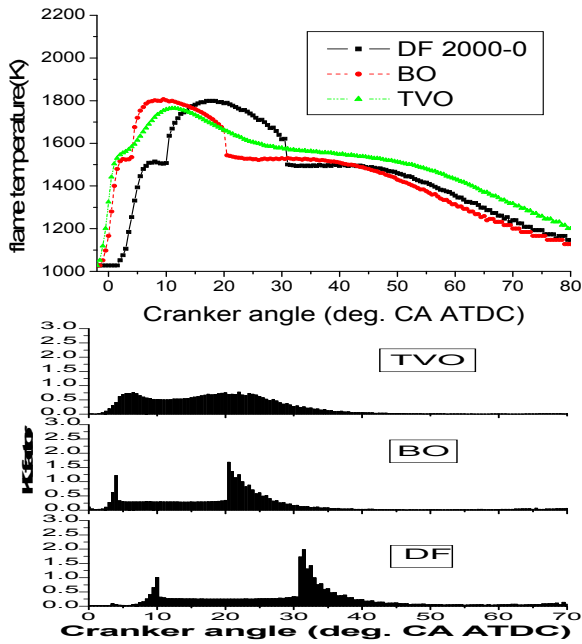


Fig. 15 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 2000 rpm

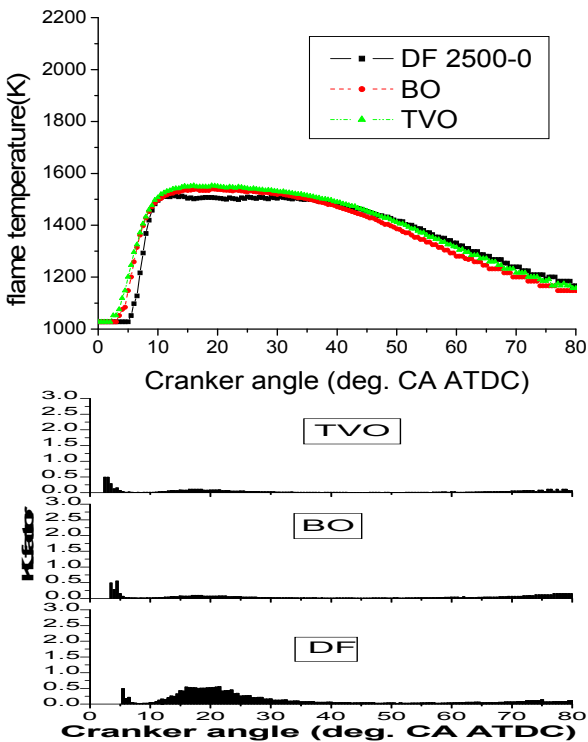


Fig. 16 Flame temperature and KL value for torque 0Nm at 2500 rpm

이는 본기관의 정격 운전에 가까운 운전조건으로 운전될 때는 분위기 조건 즉, 온도와 압력이 디젤연소에 충분하기 때문이라 생각한다.

화염온도가 크랭크 각에 따라 일정한 변화를 보이지 않는 것은 광 프로브의 설치 위치가 Fig. 9에서

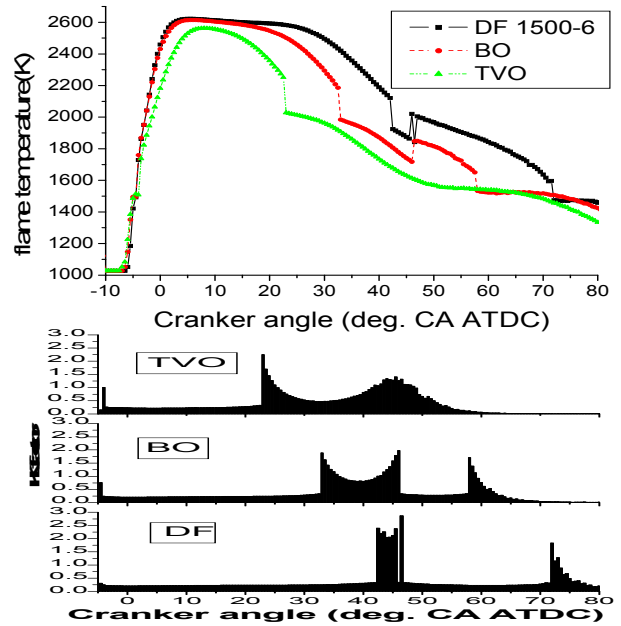


Fig. 17 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 1500 rpm

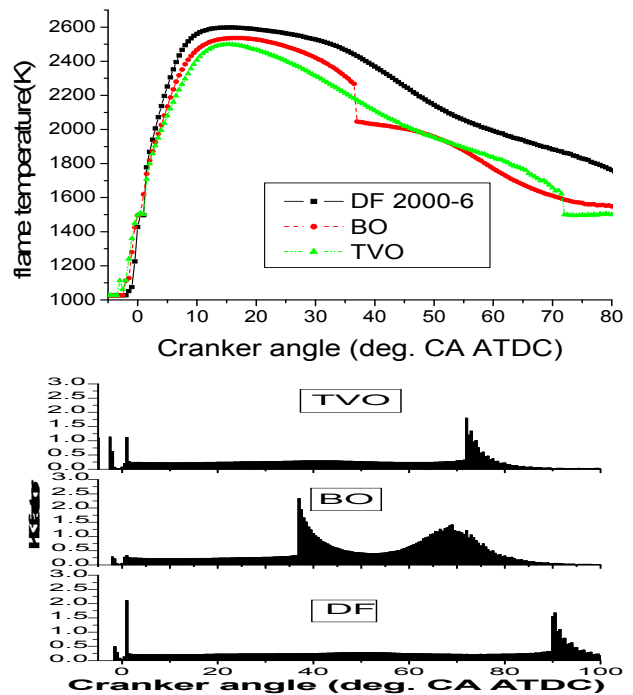


Fig. 18 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 2000 rpm

보는 것처럼 실린더 중심에서 벽면 쪽에 가까우므로 화염의 스윙현상과 퀘칭에 기인한 것으로 사료된다. 그러나, KL치의 경우 다른 연구에 따르면 예혼합 연소에 다량 생성된 soot가 확산 연소시에 재연소하여 산화하므로 KL치가 점차 감소하는 경향을 보인다고 한다. 그러나 본 연구에서는 cavity 내의 화염

유동이 활발하여 KL치의 변화가 심하며 연료별, 회전수별 특이점이 보이지 않고 있다. 이는 실험조건에서 soot의 생성량이 많지 않은 것에 기인하는 것으로 생각되어진다.

4) Cavity 내의 화염 유동이 활발하여 KL치의 변화가 심하며 연료별, 회전수별 특이점이 보이지 않고 있다.

참고문헌

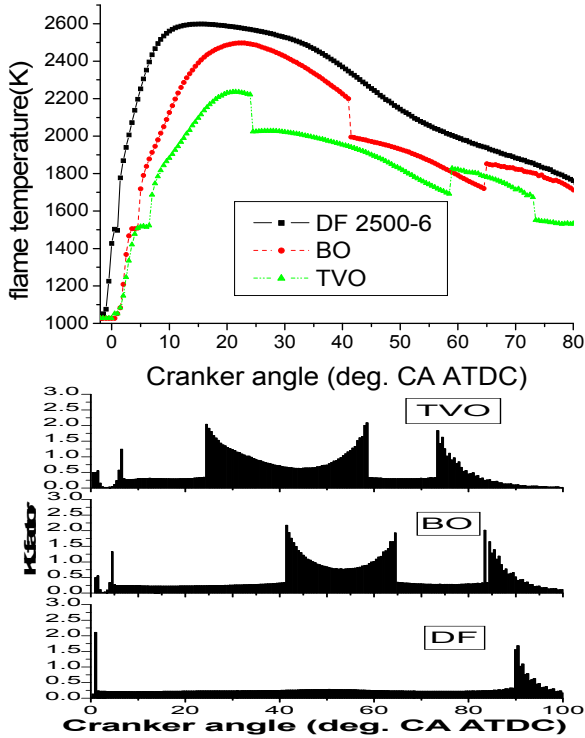


Fig. 19 Flame temperature and KL value for torque 60Nm at 2500 rpm

5. 결 론

폐식용유를 활용한 Bio-diesel fuel을 소형 고속 직분식 디젤기관인, 직접 설계 제작한 실험 장치에 적용하여 이색법으로 화염온도와 KL특성을 살펴보았다. 석영봉의 직경이 충분히 크지 않아서 실린더 내의 화염 전체를 관찰할 수는 없었지만, 특정 부위에 대하여 정성적인 경향을 확인할 수 있었다.

- 1) 종래에 사용하던 고가의 PMT(광증배관) 대신 염가의 포토다이오드를 사용하여 이색법을 적용할 수 있었다.
- 2) 모든 연료에서 회전수가 증가할수록 화염온도는 낮아지는 경향을 보이고 있다.
- 3) 최고 연소 온도는 1500, 2000rpm의 경우 DF, BO, TVO 순으로 나타났으며, KL치는 모든 연료에서 DF, BO, TVO 순으로 높게 나타났다. 이는 연료에 포함된 함산소에 의한 영향으로 생각된다.

1. Cho, G. R., 1986, "A Study on Smoke Control Technology of Diesel Vehicle(1)", Incheon, National Institute of Environmental Research.
2. Cho, G. R., 1987, "A Study on Smoke Control Technology of Diesel Vehicle(2)", Incheon, National Institute of Environmental Research.
3. Zhao, H. and Ladommatos, N., 2001, "Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics", SAE.
4. Matsui, Y., Kamimoto T., and Matsuoka, S., 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 No. 790491,
5. Ahn, S. K., Matsui, Y., Kamimoto, T., and Matsuoka, S., 1981, "Measurement of Flame Temperature Distribution In a Diesel Engine by Means of Image Analysis of Nega-Color Photographs", SAE Paper No. 810183,
6. Ladommatos, N. and Zhao, H., 1994, "A Guide to Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in Diesel Engines Using the Two-Colour Method, Part 2 : Implementation", SAE 941957.
7. Park, J. K., Chung, S. H., 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", Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 7, No. 7, pp. 42-53.
8. Cho, J. H. et al, 2006, "Optics", Seoul, DooYangSa, p. 708.
9. Kwak, S. M., 1999, "A Study of the Photo detector's Usage on Electric Fuel Injection system in DI Diesel Engine" Pusan, Pukyong National University.