

직분식 디젤기관 전자분사계의 광검출기 적용에 관한 연구

라 진 홍* · 안 수 길**
(99년 7월 16일 접수)

A Study on Application of the Photo Detector for Electromagnetic Fuel Injection System of DI Diesel Engine

Jin-Hong Ra* · Soo-Kil Ahn**

Key Words : DI Diesel Engine(직분식 디젤기관), Diesel Combustion(디젤연소), Optical Signal(광신호), Combustion Flame(연소화염), Diffused Combustion(확산연소), Luminous Flame(휘염)

Abstract

Increasing stringent emissions legislation and requirement of more effective energy used for diesel engine demand the fine control of the fuel injection system. Recently, the electromagnetic fuel injection control system for diesel engine is tried to realize the optimum diesel combustion by the feed back sensing as optical signal of combustion flame.

The photo detectors were made for the feed back signal of electromagnetic fuel injection control for small DI diesel engine. Their abilities to detect defining combustion events were examined. By evaluating test results, it was shown that the wider acceptable optical range design of optical probe window face, and selection of installation position and installation method of detector were important point for improving sensing ability. The detector was shown to detect start and end of diffused combustion and maximum point of flame intensity impossible for pressure sensor, and also shown that the maximum point of flame intensity was 75% of accumulated heat release point within the experimental conditions.

1. 서 론

최근 에너지 절약과 공해물질 배출 저감을 위한 디젤기관의 연구가 다방면으로 진행되고 있다. 소

형 디젤기관의 경우, 공해물질 배출 규제가 더욱 엄격해짐에 따라, 보다 정교한 연료분사 및 연소제어가 요구되는 가운데, 이의 제어를 위한 전자 분사계의 개발^{1,2)}과 광검출기의 적용이 시도되고있다.^{3,4)}

* 정회원, 부경대학교 수산과학대학 실습선

** 정회원, 부경대학교 공과대학 제어기계공학과

전자 분사계는 적절한 피드 백 센스를 이용하여 closed loop control을 함으로써 최적 연소를 위한 분사제어의 실현이 가능하다. Closed loop timing control을 위한 감지 방법으로는 연료 분사시기 감지가 편리하지만 운전조건과 연료성상에 따라 착화지연이 바뀔 때는 이의 대응이 곤란하다. 그러나 광검출기로 실린더 속의 연소현상을 감지할 경우, 연소 시작점과 끝점뿐만 아니라 연소화염의 강도를 직접 검출하기 때문에, 신호를 제어용으로 프로세싱하기 위한 계산부하를 줄일 수 있고, 신호 감지가 용이하며, 빠른 감도와 높은 전기적 신호를 얻을 수 있다.

디젤분무의 연소는 예혼합연소와 확산연소로 나뉘어진다. 연소 초기의 예혼합연소는 청색의 가시 영역과 자외선 영역의 특정 화학종들이 내는 불연속 파장들로 복사강도가 약한 반면, 주 연소인 확산연소는 그을음 성분인 카본의 연소로 흑체 방사와 유사한 연속 스펙트럼의 강한 방사에너지를 갖는 휘염(輝炎)이다⁵⁾. 디젤기관의 최적 연소 실현을 위한 광의 감지는 열효율과 그을음 생성에 직접 관련하는 디젤기관의 주 연소인, 확산연소기간의 휘염의 방사강도를 감지하는 것이 중요하며, 이를 통해 확산연소의 시작과 끝을 알아내고 열발생 상황을 판단할 수 있다면, 이들 정보를 이용한 전자분사계의 제어를 통해 디젤기관의 최적 연소화에 접근할 수 있다.

광검출기의 연소화염의 검출 방법은 내열성이면서 광 전달특성이 양호한 관찰용 프루브를 설치하고 프루브를 입사한 연소화염광을 광섬유를 통해 광검출기로 유도한 후, 이의 강도를 전기적 신호로 변경하는 방식이 주로 이용되어 왔다^{6,7,8)}. 광검출기로 광을 검출할 때, 최대 문제는 연소실 내부의 분무화염 전체를 감지할 수 있는 관찰면의 형상 설계와 설치 위치의 선정 및 관찰면에 연소물질인 그을음의 부착을 최소화할 수 있는 설치 방법과 그을음 부착에 의한 광 강도 감쇄현상의 해결이다.

관찰면의 형상은 그을음 부착이 적고 수광 범위가 넓은 형일수록 적합하며, 반구형을 비롯하여 여러 형상들에 대한 수광 특성을 보고한 예가 있다⁶⁾. 그을음 부착에 의한 광의 감쇄는 외삽법으로 연소 시작점을 보상하여 광 감쇄에 의한 연소시작점의

편차를 줄이는 방법이 보고되고 있다⁴⁾. 그러나, 디젤기관의 경우 기관의 형식과 크기 등에 따라 여러 가지 형태의 연소실 모양을 하고 있으므로, 특정 기종에 대한 그 적용의 타당성이 의문시됨과 동시에 적합성의 여부를 다시 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 연소실 형상이 복잡한 성형(star shape)의 바울형상(bowl type)을 한 직분식 소형 고속 디젤기관을 대상으로 하여, 전자분사계의 피드 백 센스용 감지기로써의 광검출기의 적용에 대한 적합성과 효율성 여부를 판단하기 위해, 적절한 광검출기를 설계 제작하여 설치한 후, 광검출기의 수광특성을 분석하고, 그을음 부착에 대한 보정과 연소시작점 및 끝점의 평가, 그리고 광 강도 이력과 열발생과의 관계 등을 분석하였다.

2. 광 검출 장치

디젤기관 전자분사계의 제어를 위한 광검출기의 선택은 검출 방식이 단순하고, 설계 구조가 간단하며, 제작비가 적게 드는 가운데, 연소실 속의 화염을 직접 검출할 수 있다는데 있다. 본 연구에서 설계 제작한 광 검출장치는 크게 연소실의 연소화염을 외부에서 관찰 가능하게 하는 광프루브, 광프루브를 통과한 광을 외부 검출기로 유도하기 위한 광섬유, 광 강도를 전기적 신호로 변환하는 광검출기 그리고 전기적 신호를 증폭하는 증폭기로 구성되어 있다.

Fig. 1은 광 검출 장치도이다. 관찰창은 석영봉으로 하였으며 관찰면 형상에 따른 수광 범위를 확인하기 위하여, He-Ne Laser(파장 628nm) 광원으로 관찰면에 평행광을 주사하고, 광의 주사 방향에 따른 관찰면의 수광강도를 조사하였다. 그 결과가 Fig. 2이다. 평면형인 (I)의 경우, 프루브 중심축으로부터 4° 이내에서는 중심축의 최대강도와 유사한 수광강도를 나타내었으나, 4° 범위를 벗어나면 급격히 저하하는 특성을 나타내었다. 반구형인 (II)의 경우, 중심 축으로부터 대략 10° 에서 반치폭을 가지며, 수광 가능한 각도는 약 60° 이다.

광검출기는 감지 파장 영역이 480~1000nm이고, 최고감도파장이 800nm인 Photo Tr.사의 ST-7(ϕ 3.3) 포토 다이오드이다.

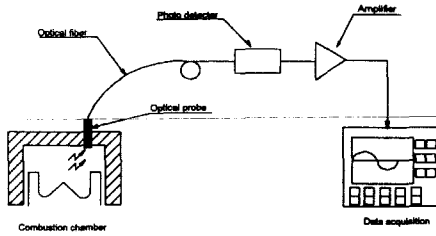


Fig. 1 Schematic of optical detection system

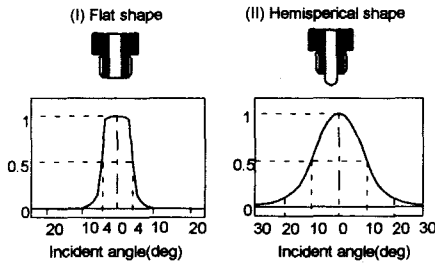


Fig. 2 Optical acceptance characteristics on incident angle according to the probe face shape

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

직분식 소형 고속 디젤기관의 전자 분사계에 필요한 피드 백용 광 감지기로서 광 검출 장치의 적합성을 판단하기 위하여 실험 장치를 구성하였다.

실험 대상 기관은 연소실 내부의 형상이 복잡한 성형의 깊은 접시형 직분식 디젤기관이며, 그 제원은 Table 1과 같다. 그리고 실린더 헤드 및 피스톤 형상은 Fig. 3과 같으며, 5공의 노즐 구멍에서 분사된다. 피스톤에 파인 바울의 단면 형상은 분사 방향으로 홈이 파인 성형(star shape)이다. 그리고 노즐의 위치는 피스톤 중심으로부터 4mm 오프셋(off-set)되어 있으며, 깊이 방향으로 분사되는 분사각은 실린더 헤드면으로부터 하방 15°이다. 연소화염 검출을 위한 광프루브의 설치 위치는 바울(bowl)속의 휘염을 수광할 수 있는 위치이며, 노즐 중심으로부터 22.5mm의 거리에, 그리고 분무 중심으로부터 11.2mm 떨어진 곳이다. 착화가 분무 줄기의 외주부에서 일어나므로⁹⁾,

이 위치는 착화 순간의 휘염 광을 직접 포착할 수 있는 위치이다. 그리고 연소실 내 압력을 계측하기 위해 Kistler 6025A의 피에조 압력계를 설치하였다.

Fig. 4는 실험 장치의 계략도를 나타낸다. 실험 기관①에 부하를 가하기 위하여 와류식 동력계②가 설치되어 있으며, 부하와 함께 기관회전수를 조절한다. 실험기관에는 연소의 강도를 감지하는 광프루브③과 연소실 압력을 계측하기 위한 압력계④가 설치되어 있으며, 분사시작과 끝을 알 수 있는 밸브리프트 센스⑤와 TDC와 크랭크 각을 감지하는 엔코더⑥가 함께 설치되어 있다. 이들 각 센스부터 출력된 신호는 디지털 오실로스코프⑦로 수집된다.

Table 1 Test engine specification

Type	4 Stroke naturally-aspirated DI diesel engine, water cooled
Combustion chamber	Star shape deep bowl type
Number of cylinder	3
Bore × stroke	100mm×110mm
Compression ratio	17.6
Injection nozzle	∅0.26mm, 5 Hole
Injection pressure	30MPa

3.2 실험방법

기관의 여러 운전조건에서 광 검출 장치의 성능을 시험하기 위하여 Table 2와 같은 조건으로 기관을 운전하였다. 그리고 광프루브의 형상과 설치 방법에 따른 수광 특성을 시험하기 위해, Fig. 5와 같이 수광 영역이 좁은 평면형 광프루브(b)와 수광 영역이 넓은 반구형의 광프루브 중 끝단이 실린더 헤드면에 돌출시켰을 때(a)와 돌출하지 않도록 했을 때(c)를 비교 실험을 하였다. 또한 광프루브가 바울 외곽에 위치해 있을 때의 수광 특성을 파악하기 위하여, 압력센스(바울 외곽에 위치, Fig. 3 b참조)와 광검출기를 서로 교체 설치하여 실험하였다. 실험운전을 할 때는 광 강도 신호뿐만 아니라, 연

소실 압력, 연료소비율, 흡기온도, 냉각수 온도, 배기가스 온도 등을 동시에 측정하였다. 또한, 측정한 연소실 압력을 열발생을 프로그램¹⁰⁾을 이용하여 열발생을 및 누적열발생 곡선을 구한 후, 광 강도 이력선과 비교 분석하였다.

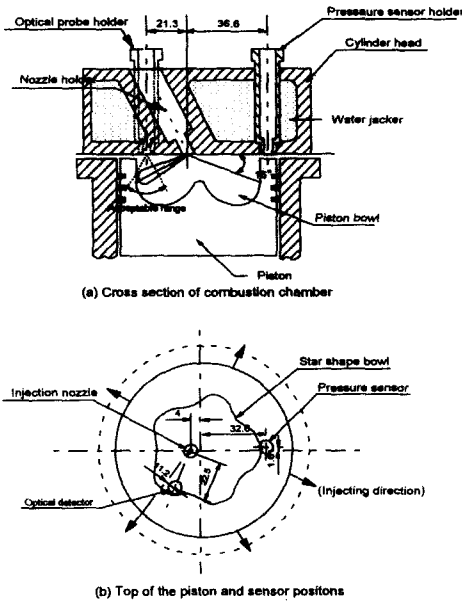


Fig. 3 Combustion chamber shape and sensor positions for test engine

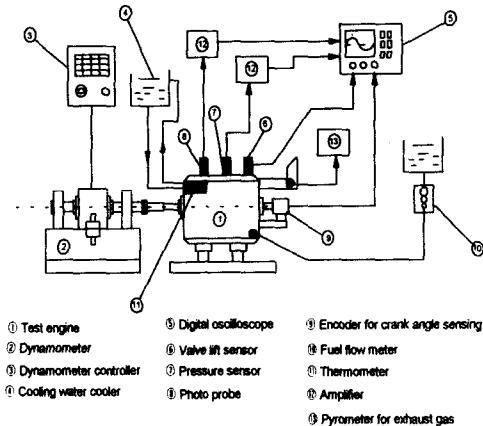


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Experimental condition

rpm	Load(kg · m)
Idle(1275)	no load, 5, 10
1600	
2000	
2400	
2800	

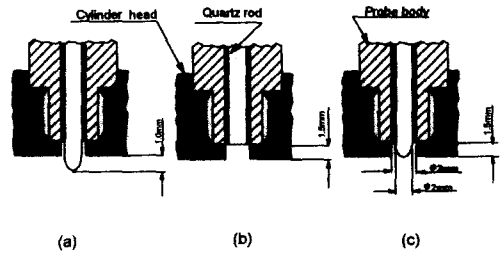


Fig. 5 Detail drawing of optical probe

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 광 프루브 관찰면 형상과 위치에 따른 수광 특성

Fig. 6은 광프루브의 관찰면 형상과 위치에 따른 수광 특성을 나타낸 그림이다. Fig.중 Fig. 6(a)는 Fig. 5(a)와 같은 돌출반구형의 광프루브를 피스톤 바울의 직상부에 위치한 경우의 실험 결과이며, 기관 회전수 2000rpm, 부하 5kgf · m의 경우이다. 연료분사는 10° BTDC에서 시작하여 1° BTDC에서 종료되었으며, 연료 분사 종료와 비슷한 시기에 착화가 일어났음을 압력선도로 확인할 수 있다. 그리고 광검출기 신호로부터는 연소시작이 3° ATDC 이고 연소 종료가 26° ATDC이다. 이로써 압력상승에 의한 착화점이 광검출기 신호에 의한 연소 시작점보다, 약 3° CA정도 앞서고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 광검출에 의한 감지가 늦은 것은 광검출기에 의해 수광되는 광은 파장이 480nm~1000nm의 대역이므로, 착화 시 광 강도가 낮고 감지 대역을 벗어난 예혼합 연소화염에서 생성되는 연소 중간 생성물의 화학종인 C₂(230

~360nm), CH(310~500nm), OH(280~350nm), HCO(230~410nm) 등은 감지되지 않고, 확산연소 시작 시 생기는 강도가 강한 화염이 감지되었기 때문이다.

광검출기의 수광 강도는 확산연소의 진행과 더불어 급격히 상승한 후 감소하며, 최고발광강도점은 압력선도의 최고압력점보다 늦게 나타났다. 이로써, 광 검출 신호는 압력 신호로는 감지할 수 없는 주 연소 과정의 확산연소의 시작과 최고발광강도 및 연소끝의 순간을 직접 확인시켜 주고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 주 연소 과정의 정보는 확산연소기의 열발생과 그을음 생성 및 산화 과정을 제어하기 위한 중요한 인자들로서, 전자분사계의 제어용 신호를 직접 제공할 수 있는 정보들이다.

Fig. 6(b)는 상기와 동일한 운전 조건에서 광프루브의 단면이 평면형인 것을 Fig. 5(b)와 같이 설치한 경우의 실험 결과이다. 착화, 확산연소 시작 및 연소 종료는 0.5° BTDC, 3° ATDC 및 32° ATDC이고 Fig. 6(a)와 유사한 시점이었다. 그러나, 광검출기의 신호출력 형태는 포화역까지 급상승한 후 하강하고 그 뒤 다시 상승한 후 0의 값으로 감소하는 모습을 보이고 있다. 신호가 포화된 후 하강하고 다시 상승하는 등의 형태는 경우에 따라서 두 번 이상 되풀이되는 예도 있었다. Fig. 5(a)와 동일한 계인임에도 불구하고, 이와 같이 순식간에 포화에 이르는 것은 평면형의 광프루브의 경우, 수광각 8° 이내에서 수광 중심축과 유사한

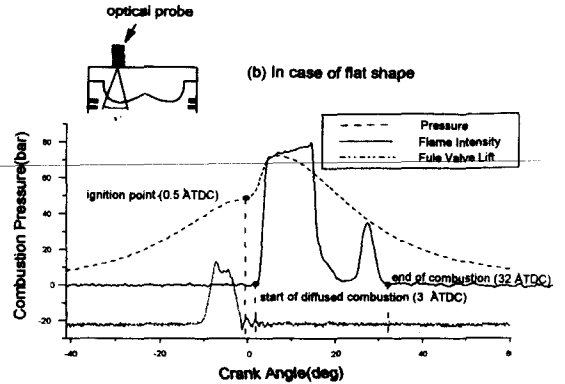


Fig. 6(b) Characteristics of optical detector signals with respect to the shape of probe window bar face and installation position in case of 2000rpm, 5kgf · m

세기의 감도로 수광하는 특성을 가지고 있기 때문에 좁은 수광 영역에 화염피가 통과할 때는 상대적으로 많은 양의 방사 에너지를 동시에 수광하여 급상승하는 반면, 화염피가 이러한 좁은 수광 영역을 벗어나면 수광이 불가능하게 되어 급강하하는 것이라 판단된다. 상승과 하강을 되풀이하는 등의 현상은 5공의 노즐구멍으로부터 나온 분무에서 동시에 연소가 이루어질 때, 분무 줄기의 화염피와 분무 줄기사이의 화염의 방사강도가 공간적으로 불규칙한 상태에서, 연소실 속의 전체 화염이 와류에 의해 요동하기 때문에 이러한 불규칙한 강도 변화를 나타내는 것이라 추측된다.

이상에서 반구형의 프루브와 평면형의 프루브를 비교해 볼 때, 가솔린 기관과는 달리 디젤기관과 같은 비균질 연소의 경우, 특히 직분식 디젤기관과 같이 다공노즐에 의해 연료가 분사될 경우 수광 범위에 따라 신호 출력 특성은 현저히 다르므로, 제어를 위한 광프루브는 가능한 한 연소실 전체를 수광할 수 있는 수광면의 기하학적 설계가 매우 중요하다 하는 것을 말해주고 있다.

Fig. 6(c)는 피스톤 바울 외곽지역의 피스톤 상부에 Fig. 5(a)와 같은 돌출반구형의 광프루브를 설치한 경우의 실험 결과이다. 착화는 TDC부근에서 일어났으나, 광검출기에 의한 신호 출력은 이보다 약 1ms뒤인 12° ATDC에서 나타나기 시작하여 21° ATDC에서 0으로 감소하였다. 이는 피스톤 바울 속에서 착화가 먼저 일어났으나 화염이 역스퀴

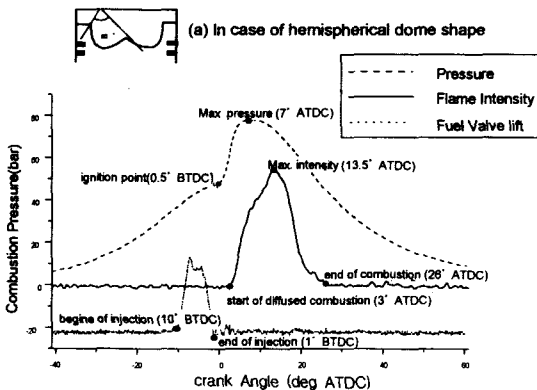


Fig. 6(a) Characteristics of optical detector signals with respect to the shape of probe window bar face and installation position in case of 2000rpm, 5kgf · m

쉬에 의해 피스톤과 실린더 헤드의 사이로 유입된 뒤야 비로소 광검출기가 인식하였기 때문으로 판단된다. 광 검출 출력의 끝점은 21° ATDC이며, 검출 지속 시간은 10° CA(약 0.9ms)였다.

따라서, 본 시험기관과 같이 성형 바울 형상의 연소실을 갖는 직분식 디젤기관의 경우, 연소는 대부분이 바울 속에서 이루어지고, 화염 팽창에 의해 일부 화염이 피스톤과 실린더 헤드의 틈 사이로 유입되고 있음을 짐작할 수 있다. 아울러, 광프루브를 설치할 때, 바울 외곽 지역의 피스톤 상부는 부적합하며, 이와 같은 경우, 제어를 위한 광 검출 장치의 역할을 할 수 없다는 것을 알 수 있다.

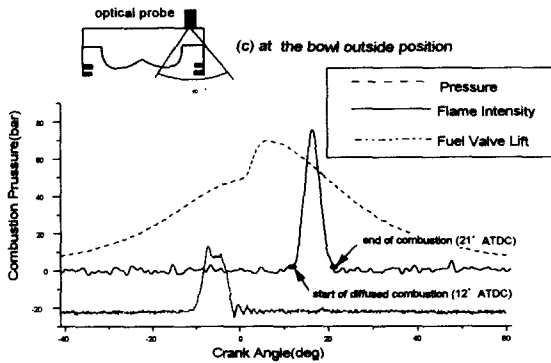


Fig. 6(c) Characteristics of optical detector signals with respect to the shape of probe window bar face and installation position in case of 2000rpm, 5kgf·m

4. 2 그을음 부착의 보정과 기관 운전에 따른 확산연소 현상

연소실에 설치한 광프루브를 통해 연소화염광을 감지할 때, 프루브 표면에 그을음이 부착되어 있으면 광의 감도가 둔화되며, 부착량이 과대하면 수광이 불가능하게 된다.

프루브의 끝단을 실린더 헤드 면보다 1mm 돌출한 Fig. 5(a)의 경우는 기관 운전 초기 냉운전 상태 일 때는 그을음 부착에 의한 신호의 감소가 어느정도 있었으나, 정상 운전 상태가 되었을 때는 더 이상 신호의 감도 둔화없이 일정한 출력상태를 나타내었다. 이는 프루브의 끝단이 화염 중에 노출되어 있기 때문에, 시동 초기에는 프루브가 냉각되어 있으나 냉운전 상태가 지나면 연소 화염에 의해 프루

브가 가열되어 냉운전 시 부착된 카본은 타버리며, 탄 카본은 연소 유동에 의해 불려 날아 가버릴 뿐만 아니라, 프루브가 가열되면 카본이 부착되지 않기 때문이다. 반면에 Fig. 5(c)와 같이 반구형 프루브의 끝단을 실린더 헤드와 일치시켰을 경우, 그을음이 다량 부착하여 운전시간 경과와 더불어 신호가 현저히 저하하였다. 이 경우와 같이 프루브의 끝이 돌출되어 있지 않으면, 카본 부착이 많은 이유는 연소화염이 접근하여도 프루브가 화염에 직접 노출되지 않아 실린더 헤드 표면부와 유사한 저온도로 유지되므로, 프루브면의 저온도로 인한 화염 냉각(flame quenching)으로, 오히려 카본이 부착하기 쉬운 분위기가 조성되기 때문으로 판단된다.

카본 부착에 의한 광검출기 출력신호의 감소는 광 강도의 절대치 감지를 불가능하게 하며, 연소시작점과 연소끝점의 오차를 유발시킨다. Fig. 7은 Fig. 5(c)같이 반구형 프루브를 설치하였을 때, 카본 부착에 의한 출력 신호가 감소한 경우의 예를 보여주고 있다. 카본이 부착하게 되면 동일한 부하와 회전수에도 불구하고 절대치의 현저한 감소뿐만 아니라, 연소시작점과 연소끝점의 오차가 커지게 되며, 부착이 심하게 되면 계인을 높혀 증폭하여도 노이즈로 인해 정확한 시작점과 끝점을 판단하기 힘들다. 광검출기의 출력 신호는 확산연소가 시작되는 연소 초기에는 카본의 부착 유무에 관계없이 직선적인 증가구간이 존재하며, 이 구간에 주목할 필요가 있다.

그을음 부착으로 인한 오차를 줄이기 위하여 Eric Day³⁾ 등은 Fig. 7(A)와 같이 수광된 광신호에서 보상회로를 통해 보상용의 강한 신호와 약한 신호를 분리하고, 이 두 신호로부터 초기 직선적 비례구간을 연장하여 만나는 점을 외삽하여 연소시작점으로 정의하였다. 이렇게 할 경우 정의된 연소시작점의 정도(精度)만큼 신호 분리를 위한 회로 및 신호 비교를 위한 프로세스의 증가가 따르며, 카본 부착이 증대할 경우 감쇄된 신호를 다시 보상용으로 분리하기 때문에 상대적인 노이즈의 레벨이 높아져 오히려 정도가 떨어질 우려가 있다. 이에 대해 Fig. 7(B)와 같이 카본 부착 여부에 관계없이 각각의 수광 신호에 대해, 직선 범위 내에 있는 최고광강도의 5%와 10%점을 외삽의 점으로 잡고 이들을 지나는 직선을 연장하여 수광강도 0와

만나는 점 s 와 s' 를 연소시작점으로 정의할 경우 감쇄되지 않았던 광신호와 감쇄된 광신호와의 오차는 $|s'-s|$ 가 되지만, 수광된 신호값을 가공하지 않고도 연소시작점을 쉽게 구할 수 있는 이점이 있다. 즉 Fig. 7(B)와 같이 비례구간에 외삽을 위한 설정값을 최고광강도의 5%, 10%로 할 경우, 0%, 5%, 10%사이의 간극은 등간극이 되며 크랭크 각도상 $b'-a'=a'-s$ (또는 $d'-c'=c'-s'$)가 되어 $b'-a'$ 값만큼(또는 $c'-d'$ 만큼) a' 로부터(또는 c' 로부터) 좌측으로 이동한 값이 정의하는 연소시작점으로 되기 때문에, 즉시 연소시작점을 구할 수 있다. 그리고, 이러한 방법을 적용할 경우, 카본에 의한 감쇄가 심하여 상대적으로 높은 노이즈 레벨인 경우에도 신호를 분리할 필요가 없으므로 직선적 비례구간을 이용해서 쉽게 연소시작점을 구할 수 있는 이점이 있다. 또한 Fig. 7(B)의 방법으로 연소시작점을 정의했을 때 발생하는 오차 $|s'-s|$ 는 기관의 사이클 변화에 따른 편차를 고려할 때 수용할 수 있는 오차의 범위라 판단된다. 한편, 연소끝점은 신호의 노이즈 레벨을 고려하여 최고광강도 3%점을 연소끝점으로 정의하였다.

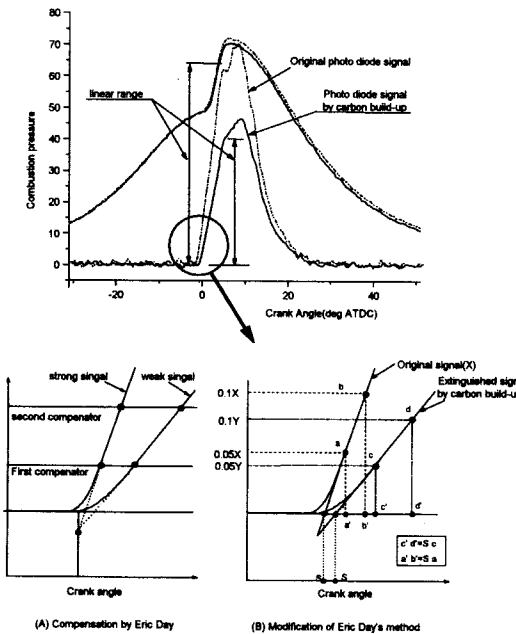


Fig. 7 Definition of combustion start point by compensation method

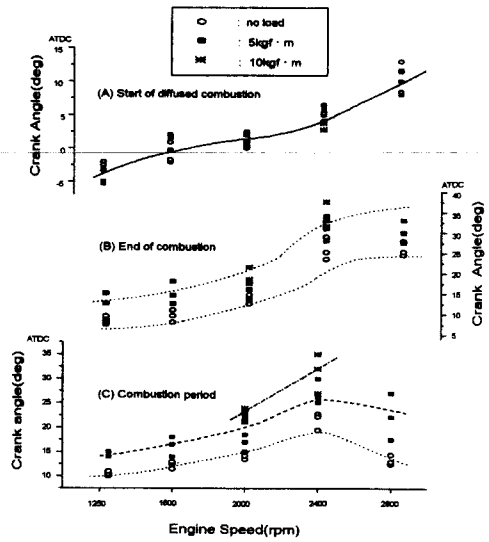


Fig. 8 Start, end, and period of combustion detected by photo detector

상기 방법으로 연소시작점과 끝점을 정의한 후 구한 실험 결과가 Fig. 8이다. 확산연소의 시작점은 회전수 증가에 따라 늦어지며, 부하 변동에 따른 특이점은 발견할 수가 없다. 기관을 2000rpm으로 운전하였을 경우, 연소시작점은 TDC부근이며, 부하 및 사이클 변화에 따른 변동폭이 비교적 작다는 것을 알 수 있다. 연소 끝의 경우, 기관 회전수 증가에 따른 값의 변화의 경향은 연소시작점과 유사하나, 동일 회전수에서 편차의 범위가 비교적 크게 나타났으며, 이런 결과로 연소 기간도 편차의 범위가 크다. 이와 같이 연소 끝과 연소기간의 편차가 큰 것은 디젤연소의 특성인 난류확산연소에 비롯된 것이라 판단되지만, 기계식 분사계의 가공정도(加工精度)로 인해 분사시기와 분사기간 그리고 분사량의 사이클 당 편차량이 크기 때문으로도 판단된다. 만약 전자 분사계를 갖는 기관에 광검출기 신호를 이용한 연소의 시작과 끝의 정보를 피드백하여 이들을 정확하게 제어할 수 있다면 이러한 연소의 사이클 편차는 상당히 줄일 수 있으리라 사료된다.

4.3 방사강도와 열발생과의 관계

광검출기로부터 나오는 출력신호는 연소시작점

과 끝점뿐만 아니라, 최고강도를 나타내는 순간도 중요한 정보 중의 하나이다. 이에 대한 열발생과 광 강도와와의 상관관계를 파악하기 위해, 압력선도로부터 열발생율과 누적열발생선도를 구하여 광강도와 비교 분석하였다. Fig. 9는 회전수 2000rpm, 부하 10kgf·m으로 했을 때의 한 예로서, 연료분사노즐의 개폐시기, 실린더 압력, 광강도, 열발생율 및 누적열 발생선도를 동시에 나타내었다.

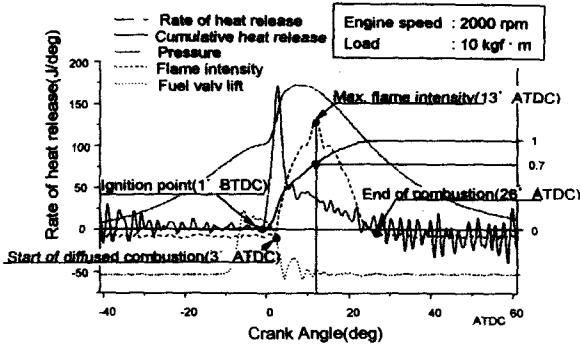


Fig. 9 Relation between flame intensity and heat release

약 10° BTDC에서 분사가 시작되어 분사 종료 전인 약 1° BTDC 근방에서 착화에 의한 열발생이 시작되고 약 3° ATDC에서 예혼합 연소에 의한 최대의 열발생율이 나타남과 동시에 확산연소에 의한 열발생이 시작되었으며, 26° ATDC에서 연소가 종료되었다. 분사 개시로부터 착화까지는 9° CA(0.75ms), 확산연소 개시 때까지는 13° CA(1.1 ms)의 시간이 걸리며, 확산연소 개시점은 예혼합 연소에 의한 최대열발생점과 대체로 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 연소의 종료는 열발생율과 누적열발생 및 광검출기 신호로부터 확인할 수 있으나 그 중에서도 광검출 신호가 가장 명확하다는 것을 알 수 있다. 그리고 최고압력값을 나타내는 점은 누적열발생율 50%부근인 8° ATDC이고 최고광강도값은 누적열발생 75%부근인 13° ATDC였다.

최고광강도점의 경우, 가솔린에서는 최대열발생율점에 해당하고 50%질량연소 부근이라고 보고하고⁸⁾ 있는데 비해, 직분식 디젤기관에서는 약75% 연소시에 나타났다는 사실에 주목하고자 한다. 이

러한 현상에 대해, 운전조건에 따른 경향을 확인하기 위하여 75% 누적열발생 순간의 크랭크 각도와 최고광강도 순간의 크랭크 각도를 구하여 도시화한 결과가 Fig. 10이다.

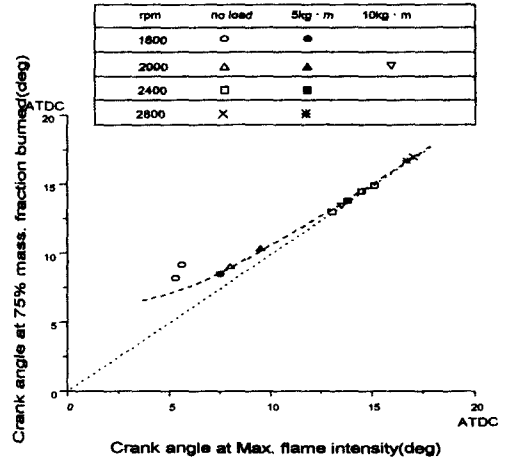


Fig. 10 Correlation between max. flame intensity and 75% heat release

저회전수 저부하에서는 최고광강도점의 크랭크 각이 75% 누적 열발생 각보다 빨리 나타나지만, 고회전수 고부하 영역으로 갈수록 최고광강도 시점과 75% 누적열발생 시점이 일치해 가는 경향을 보이고 있다. 이는 최고광강도 시점을 검출함으로써 75% 질량연소시점을 파악할 수 있다는 것을 의미하며, 3/4연소 이후의 후연소 기간에 일어나는 정보를 간접적으로 제공하고 있음을 말해 준다. 즉, 광검출기는 카본 연소의 상황이 그을음 배출과 깊은 상관관계를 가지는 후연소기간의 정보를 검출함으로써 그을음 배출을 제어하기 위한 피드백 신호로서 적합한 정보를 제공하고 있다고 판단된다.

5. 결 론

직분식 소형 고속 디젤기관의 전자분사계의 광검출 신호를 적용하기 위한 광 검출 장치를 설계 제작하였다. 설계 제작한 광 검출 장치를 기관 연소실에 장착하여 그 수광 특성과 제어용 신호로서의 타당성을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 광검출기는 수광면이 넓을수록 유효하며, 넓은 영역을 수광할 수 있는 기하학적 설계가 중요함을 확인하였고, 관찰면이 화염면에 노출되도록 함으로써 그을음 부착을 최소화 할 수 있었다.
- 2) 광 검출기는 압력 신호로는 검출할 수 없는 확산연소의 시작점과 연소끝점을 직접 검출함으로써 주연소 제어를 위한 정보를 얻을 수 있었다.
- 3) 광검출기로 검출한 최고강도점은 3/4연소점에 해당하며, 이는 그을음 배출과 직접 관련이 있는 후연소 기간 중의 연소 정보임을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Yang, Minggao and Spencer C. Sorenson, "Direct Digital Control of Diesel Engines", SAE 940372, 1994
- 2) Lauvin, Pierre, Alf Löffler, and Alfred Schmitt, et al., "Electronically Controlled High Pressure Unit Injector System for Diesel Engines", SAE 911819, 1991
- 3) Day, Eric, John A. Kimberley, and B. James Mehallick, "Start of Combustion Sensor", SAE 890484, 1989
- 4) Hartman, Peter G. and Steven L. Plee, "Diesel Smoke Measurement and Control using an In-cylinder Optical Sensor", SAE 910723, 1991
- 5) Heywood, John B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, pp.491~558, 1988
- 6) Nutton, David and Robert A. Pinnock, "Closed Loop Ignition and Fueling Control using Optical Combustion Sensors", SAE 900486, 1990
- 7) Sohma, K., T. Yuki take and S. Azuhata, "Application of Rapid Optical Measurement to Detect the Fluctuations of the Air-Fuel Ratio and Temperature of a Spark Ignition Engine", SAE 910499, 1991
- 8) Pendlebury, Michael A. and Christopher O. Nwagbos, "An Optical Sensor for Determination on Combustion Parameters in a Natural Gas Fuelled Spark Ignition Engine", SAE 960856, 1996
- 9) 라진홍, 이덕보, 안수길, "운전조건에 따른 DI 디젤기관의 분무·화염의 특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제3권 6호, 1995
- 10) 왕우경, "퍼스널 컴퓨터를 利用한 燃燒解析裝置 開發과 熱發生率에 관한 研究", 부경대학교 석사학위논문, 1991