

# 가솔린엔진의 광응용 연소계측 기술

이기형 · 이창식

## Optical Diagnostics for Combustion Phenomena in a Gasoline Engine

Ki-Hyung Lee, Chang-Sik Lee



- 이기형 (한양대 기계공학과)
- 1960년생
- 엔진내의 가스유동해석을 전공하였으며, 회박연소와 저공해(LEV)엔진에 최적화한 연소시스템 개발 및 광응용 연소계측에 관심을 가지고 있다.



- 이창식 (한양대 기계공학과)
- 1946년생
- 열공학을 전공하였으며, 연소열역학, 연료의 증발 및 연소특성 연소기관 내의 디젤기관의 연소, 과급기관의 연소 등에 관심을 가지고 있다.

### 1. 머리말

**최** 근 지구 환경문제 특히 CO<sub>2</sub>의 배출억제에 대한 관심이 높아지고, 이에 따른 배기가스의 규제강화와 연비향상에 대한 사회적인 요구가 한층 강화되고 있다.<sup>(1)</sup> 따라서 자동차용 엔진에 있어서도 환경에 대응하는 보다 효율적인 엔진의 개발에 대한 필요성이 부각되고 있으며, 이를 위하여 엔진 내부현상의 명확한 파악에 따른 최적 설계의 중요성은 더욱 증가되고 있다.

그러나 엔진내의 현상은 유속의 변화가 급격한 과도현상이며, 또한 고온 고압의 밀폐 용기내의 현상이라는 이유 등으로 적용가능한 계측방법은 극히 한정되어 왔다. 현재 가장 보편화된 엔진의 배기량은 1.5~2.0l 정도로서, 1기통당의 배기량은 400~500 cc 정도에 불과하며, 특히 연소기간중의 용적은 100 cc 이하이므로 이와 같은 측정 대상의 크기를 고려해 볼 때 높은 응답성과 공간 분해능이 우수한 계측방법이 아니면 내부현상

의 측정이 불가능하다. 이러한 측정상의 어려움에도 불구하고 최근 보급이 확대되고 있는 레이저와 고감도 CCD카메라 등 각종 광학장치의 진보와 이들을 이용한 데이터 처리 장치의 비약적인 발전에 힘입어 엔진 특유의 공간적으로 불균일한 과도 연소 현상이 다차원적인 공간개념으로 해석되어지고 있다.

지금까지 엔진내의 연소현상에 관한 많은 문헌들이 보고되고 있으나,<sup>(2-5)</sup> 주로 계측기술에 관한 전반적인 소개 내용이 많으며, 실제 엔진에 대한 적용 현황과 적용시 발생하는 문제점 및 해결책 등에 대한 보고는 많지 않은 실정이다. 이 글에서는 필자가 경험한 계측과 가시화 기술을 중심으로 엔진내의 연소현상 해석에 적용되는 최근의 광응용 계측 기술 및 개발 동향을 소개하고자 한다.

### 2. 가솔린 엔진의 연소에 관련된 각종 인자

가솔린 엔진의 연소에 관여하는 각종 현상들은 그림 1과 같이 서로 밀접한 관계를 맺

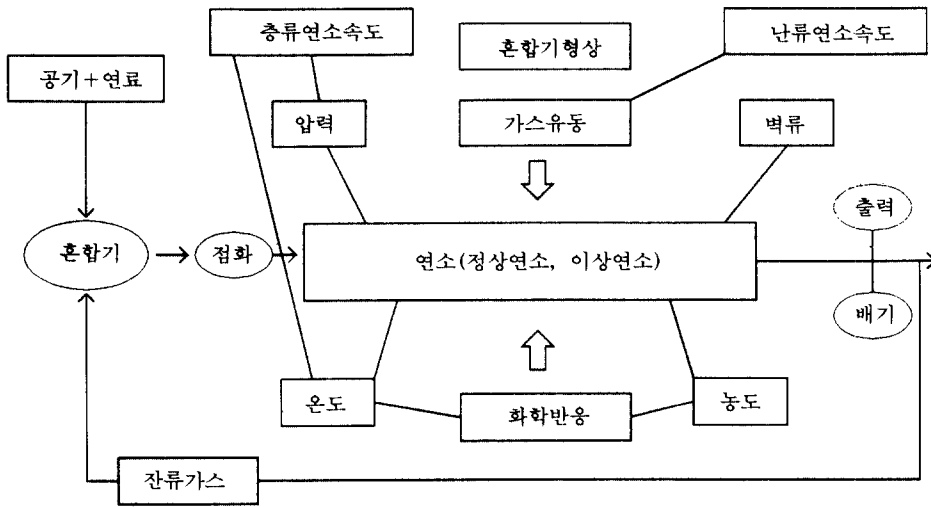


그림 1 연소에 관여하는 각종 요인들

고 있으며, 상호간에 인과관계를 가지고 있다는 사실을 알 수 있다.

따라서 원하는 엔진성능을 얻기 위하여는 각 과정에 대한 정확한 분석이 요구되고 있으며, 특히 연소에 관한 충분한 해석이 이루어져야 한다. 그러나 엔진이 개발된지 100년이 지난 현재까지 연소현상 그 자체가 명백하게 규명되지 못하고 있는 것은 그림 2와 같은 복잡한 여러가지 인자들이 연소에 관여하고 있기 때문이다. 따라서 각 인자들의 정확한 분석을 통한 최적 제어기술을 확립하기 위하여 다양한 광용용 계측수법들이 개발되어 연소에 관련된 현상 규명에 적용되고 있

는 실정이다. 이러한 광학적인 계측수법을 엔진내의 연소해석에 적용하기 위하여는 가시화 엔진의 준비가 필요하며, 현재 주로 사용되고 있는 방법에 대하여는 이미 보고한 바가 있으므로,<sup>(6)</sup> 여기서는 생략하기로 한다.

이 글에서는 그림 2에 나타난 각종 인자들 중 특히 연소에 영향이 크다고 여겨지는 4가지의 인자들, 즉 화염 및 연소 생성물의 계측법, 가스유동의 계측법, 연료거동 및 혼합기 분포 계측법, 노킹의 계측법에 관하여 언급하고자 한다.

### 3. 화염 및 연소 생성물의 계측

#### 3.1 화염 전파 속도의 계측

연소의 안정화를 통한 성능 향상을 도모하기 위하여는 연소기간의 단축과 사이클간의 변동을 억제할 필요가 있으므로 화염의 전파 속도에 대한 계측이 요구되고 있다. 화염 전파의 가시화 수법으로는 이미 보고한 바<sup>(6)</sup>와 같은 신장 피스톤을 사용한 가시화 엔진이

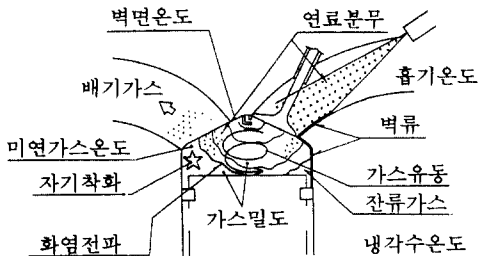


그림 2 연소에 영향을 미치는 각종 인자들

효율적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 가스 유동장의 형태에 따른 연소기간의 차이를 파악하기 위하여 DOHC엔진의 흡기포트 내부에 설치한 흡입유동 제어밸브에 의하여 3종류의 유동장(standard, swirl, tumble)을 형성한 후, 직접 촬영 방법인 고속도 카메라(일본 Nac사 제품, E10)를 이용하여 동일 시기(1° BTDC)에서의 화염의 전파 상태를 촬영하였다. 서로 다른 공연비에서의 촬영 결과를 그림 3에 나타낸다. 이론 공연비 부근(A/F=14.8)에서는 화염의 전파속도가 비슷한 양상을 보이고 있으나, 희박 영역(A/F=20.8)에서는 텀블류(tumble)를 강화한 경우의 화염 전파속도가 빠름을 나타내고 있다. 따라서 연소기간의 단축에는 텀블류의 효과가 크다는 사실을 추정할 수가 있다.

이와 같이 직접촬영법은 화염 전파과정의 상대적인 비교 분석에는 충분한 이용가치가 있지만, 촬영 속도에 제한이 있으므로 계산 모델의 검증 등을 위한 상세한 화염의 구조 해석에는 부적합하다. 또 다른 화염 전파의 측정 방법으로 Witze는<sup>(7)</sup> 그림 4에서 나타내는 바와 같이 측방 전극 부분에 8개의 광파이버를 삽입한 점화플러그를 제작하여 초기 화염의 이동 속도를 2차원으로 측정하고 있다. 이 방법은 연소실에 어떠한 가공을 하지 않더라도 적용이 가능하다는 장점이 있다.

### 3.2 점화 초기 화염핵의 계측

가솔린 엔진의 연소는 점화(spark)에 의하여 형성된 화염핵의 전파 과정에 따라 진행되므로 화염핵의 구조해석은 중요하다고 할 수 있다. 그림 5는 점화직후에 있어서의 화염핵의 성장과정을 매초 8000프레임의 촬영 속도로 간접 촬영 방법인 고속 새도우 그래프법(shadow graph)에 의하여 가시화한 결과를 나타낸다. 점화 직후의 층류 화염이 서서히 주름(wrinkle)을 증가시키면서 난류 화염으로 보여지는 3차원 구조의 추상 화염으로 천이되고 있는 과정이 명백하게 관찰되

SCV A/F	일반상태	스윙강화	텀블강화
14.8			
20.8			

그림 3 가스 유동장에 따른 화염 전파 과정의 비교(3000 fps, 1400 rpm, MBT)

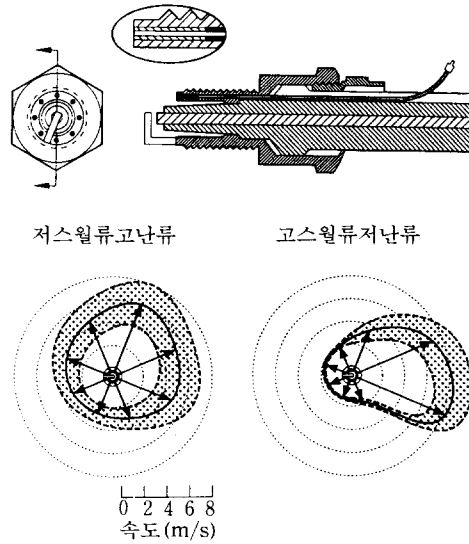


그림 4 광파이버 부착 점화 플러그의 형상 및 화염의 전파속도 측정 결과

고 있다. 운전조건은 기관 회전수 1200 rpm, 충전효율 40%, 당량비 1.0, 점화시기 36° BTDC로 하였다.

### 3.3 화염의 발광 강도 및 연소 생성물의 계측

엔진의 연소과정에 있어서 반응 중간 생성물의 거동 해석은 연소과정의 현상규명은 물론이고 연소시에 생성되는 유해 배출물의 생성과정을 해명하기 위해서도 중요하다. 중간

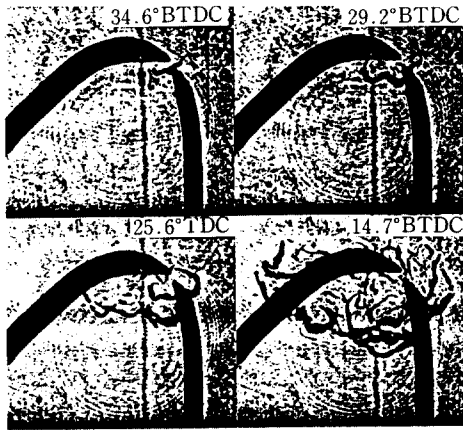


그림 5 화염핵 성장과정의 가시화 결과  
 $n: 1200 \text{ rpm}$ ,  $\phi=1$  Ig T =  $36^\circ \text{ BTDC}$ ,  
 $8000 \text{ FPS}$

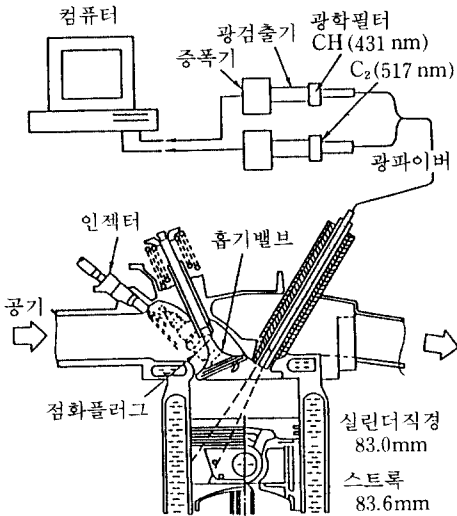


그림 6 엔진 내의 화염 발광 강도 측정장치  
 $*n: 1200 \text{ rpm}$ ,  $P_i: 350 \text{ kPa}$ ,  $kPa$ ,  
 $A/F: 12.0$ , Ig. T.:  $20^\circ \text{ BTDC}$

생성물인  $C_2$ , CH 래디컬(radical)의 발광강도를 측정하기 위한 실험장치와 실험결과를 그림 6과 그림 7에 나타낸다. 측정방법은 그림 6과 같이 광파이버(optical fiber)를 통하여 포착한 화염성분중 특정과장만을 통과시

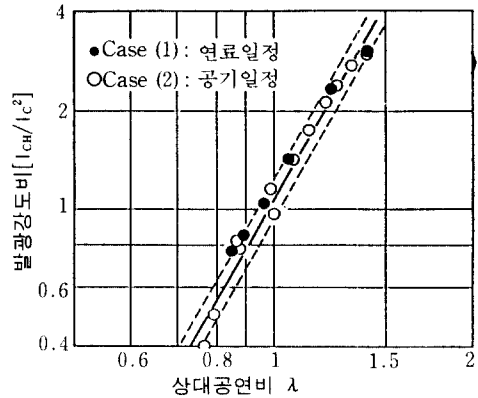


그림 7 공연비와 래디컬 발광 강도비의 관계

키는 필터를 이용하여  $C_2$ 와 CH의 발광강도를 측정하는 방법이다. 또한 이 실험결과로부터 두 래디컬 성분의 강도비는 공연비와 비례관계에 있다는 사실을 알 수가 있고 이러한 관계를 이용하여 화염의 발광강도로부터 공연비를 산출하려고 하는 연구가 진행 중에 있다.<sup>(8)</sup>

이 외에도 중간 생성물에 대한 공간적인 분포계측법으로 LIF법(laser induced fluorescence)이 유효하지만, 고압의 상태에서 Quenching의 문제가 발생하므로 연소실내의 정량적인 측정은 곤란한 상태이다. 그러나 최근 정량적인 2차원 계측법인 LIPF법(laser induced predissociative fluorescence)이 개발되어 이미 엔진내의 OH,  $O_2$ 에 대한 분포 측정의 가능성이 실증되고 있으며, 가까운 시일내에 엔진에의 적용 기술이 확립되어질 것이라고 여겨진다.

#### 4. 가스 유동과 난류강도의 계측

엔진내의 가스유동은 연소속도와 혼합기 형성에 중요한 영향을 미치는 인자이므로, 엔진의 성능향상을 위하여는 유동 특성을 명백히 파악할 필요가 있다. 엔진내의 가스유동은 측정대상이 극히 복잡한 난류유동장일

뿐만 아니라 고속현상이므로 비접촉식 유속 측정법인 LDV (laser doppler velocimeter) 를 이용한 계측이 범용적으로 실시되고 있다. 이와같은 LDV에 의한 계측결과는 유동장의 파악과 계산결과의 검증 등에 널리 이용되고 있지만,<sup>(9~11)</sup> 신호처리의 난이도와 광학계 자체의 측정 오차 등의 문제로 인하여 연소 속도와 밀접한 관계에 있는 난류강도 (turbulence intensity)의 해석에는 많은 어려움이 따르고 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 필자들은 회절 격자식의 LDV광학계의 개발과 저 SN비 (signal noise ratio)에 강한 신호처리장치 (BSA)를 사용함으로써 양호한 SN비와 20 KHz 이상의 높은 샘플 레이트 (sample rate)를 확보하게 됨에 따라 크랭크각도 1°당 1개 이상의 유속 데이터를 얻게 되었다.<sup>(12)</sup> 또한 최근에는 연소실뿐만 아니라 엔진룸과 차체 주위의 유동장 해석 등 다양한 장소에서의 LDV측정에 대한 요구가 높아지고 있다. 따라서 측정장소에 따라 이동이 용이한 소형화된 광파이버 LDV시스템 (FLDV)이 개발되고 있으며,<sup>(13)</sup> 일부 광학 메이커

에서 시판하고 있다. 필자는 시판용 FLDV보다 측정 체적이 크고, 광파이버에 대한 전송손실 (transmission efficiency)을 극소화한 그림 8과 같은 FLDV를 개발하여,<sup>(14)</sup> 2스트로크 엔진의 소기공내의 유속측정에 이용하였다.

최근에는 LDV의 점계측이란 결점을 보완하기 위하여 연소실 내의 유동장을 2차원적인 공간개념으로 측정할 수 있는 PIV법 (particle imaging velocimetry)이 각광을 받기 시작하고 있으며,<sup>(15,16)</sup> 엔진내의 유동장 해석에도 적용되고 있으나 아직 해결해야 할 몇가지의 과제를 남기고 있다. 이상과 같은 엔진내의 유동장 해석 기술에 관하여는 다른 기회에 이미 소개한 바<sup>(17)</sup>가 있으므로 자세한 내용에 대하여는 생략하기로 한다.

### 5. 분무형상과 혼합기 분포의 계측

가솔린 엔진의 연소를 개선시키기 위하여는 균일한 혼합기의 형성이 중요한 인자이며, 이러한 혼합기 형성의 중요성은 최근 증가하고 있는 전자 제어식 연료 분사 시스템에 있어서 특히 현저하게 대두되고 있다. EGI의 경우 기화기식 엔진에 비하여 흡기 포트내에 분사된 연료가 기화할 수 있는 시간적인 여유가 적을 뿐만 아니라 공기와의 혼합에 필요한 시간도 부족하기 때문에 균일한 혼합기의 형성이 어려운 실정이다. 따라서 분무형상과 혼합기 분포의 계측을 통하여 연료의 거동을 정확히 파악함으로써 최적한 연료 분사 시스템에 관한 기초 지식을 확립할 필요가 있다고 하겠다.

#### 5.1 분무 형상의 계측

현재 분무 형상의 계측법으로는 PDPA (phase doppler particle analyzer)를 사용한 정량적인 입경 측정법과 레이저 유도 형광법 (LIF법)에 의한 정성적인 가시화 수법이 널리 이용되고 있다. 3개의 광검출기 (photo

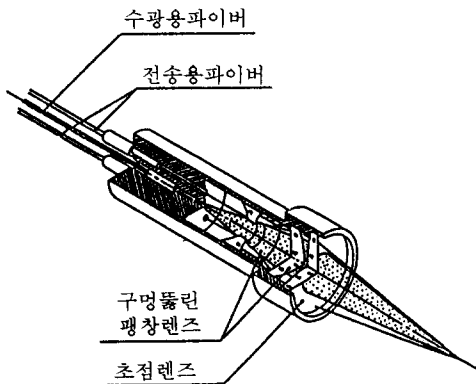


그림 8 개발한 광파이버 LDV의 프로브 형상

\* 프로브 직경 :  $\phi 18$ , 초점거리 : 50mm, 측정체적 : 폭 (71.2 $\mu$ m), 높이 (71.7 $\mu$ m), 길이 (0.62mm), 플린지 간격 : 2.77 $\mu$ m, 플린지수 : 25, SNR매수 :  $6.32 \times 10^{-6}$

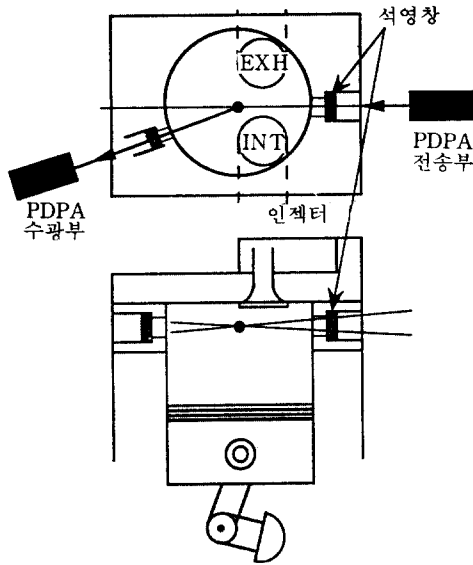


그림 9 PDPA에 의한 입경 측정 시스템

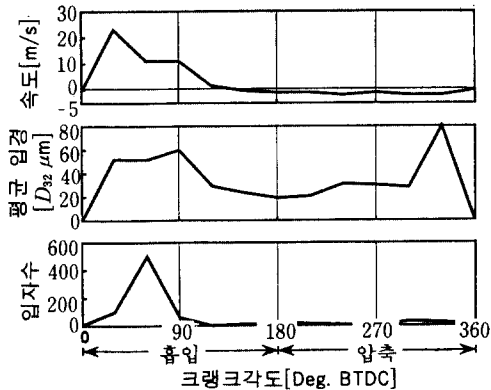


그림 10 PDPA를 이용한 측정결과

multiplier)에 의하여 얻어진 연료 입자로부터의 Burst 신호간의 위상차를 이용하여 입경을 구하는 PDPA의 측정시스템과 연소실 내의 한 점에서의 측정결과를 그림 9와 그림 10에 나타낸다.

이 측정 결과는 크랭크 각도에 따른 유속과 입경, 수밀도 등의 변화를 명백히 나타내고 있다. 또 하나의 다른 계측법인 펄스 YAG 레이저의 제3고주파를 주사하여 가솔

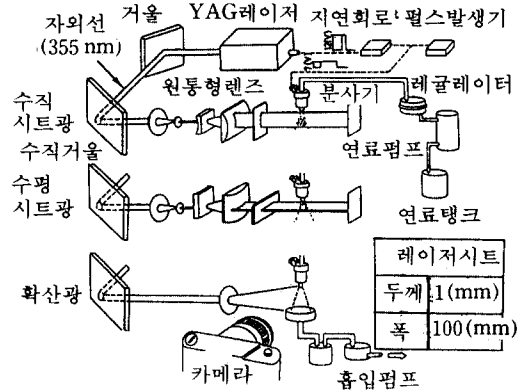


그림 11 LIF의 광학계

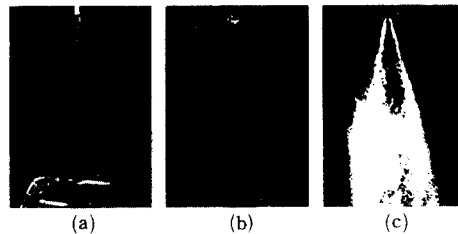


그림 12 LIF에 의한 가시화 결과  
(a) Pintle Nozzle(1 hole)  
(b) Plate Nozzle(2 hole)  
(c) Assist Air Nozzle

린 연료로부터의 형광을 카메라에 의하여 촬영하는 LIF의 광학구성과 가시화 결과를 그림 11과 그림 12에 나타낸다. 이 방법은 YAG 레이저 대신 자외선 스트로보(strobo) 광원을 이용하여도 측정이 가능하리라 생각된다. 이와 같은 LIF법을 이용하면 분무 각도, 분무 도달거리, 미립화 정도 등 분무 형상에 관한 정확한 정보를 얻을 수가 있으므로 연료 공급 장치의 개발에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 5.2 혼합기 분포의 계측

가솔린 엔진내의 혼합기 분포 측정을 위하여, 자외선 레이저 광을 실린더 내에 입사하여 연료 또는 연료에 첨가한 형광 물질의 발광량으로부터 혼합기 농도를 정량적으로 측

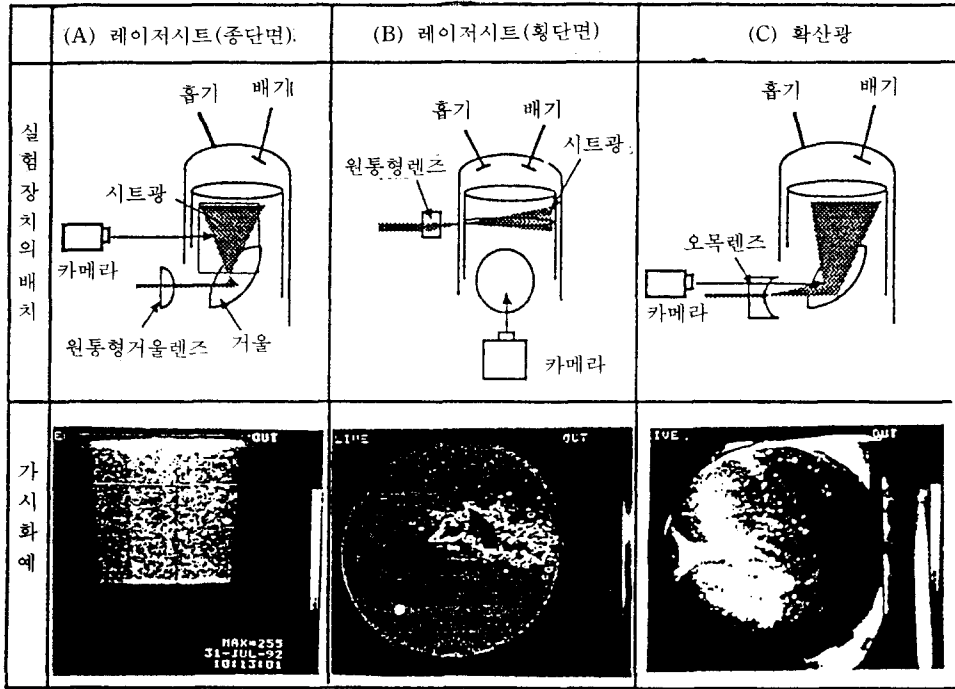


그림 13 연소실내의 혼합기 분포 측정결과

정한 예가 최근 보고되기 시작하고 있다.<sup>(18,19)</sup>

이러한 레이저 광에 의하여 여기(勵起)된 물질 분자로부터의 형광을 측정하는 LIF를 이용하여 연소실 내의 혼합기 분포를 측정한 결과를 그림 13에 나타낸다. 이 측정 결과는 상사점(TDC)전 60° 크랭크 각도에서의 혼합기 분포 상태이며, 그 이후의 크랭크 각도에서는 연료가 기화하여 기체 상태로 변화하기 때문에 측정할 수가 없었다.

LIF의 이러한 결점을 보완하기 위하여, 레이저광으로부터의 광자 에너지를 흡수하여 특정분자가 여기상태에서 착체(錯體)를 형성한 후, 형광과는 다른 파장의 발광을 나타내는 Exciplex라고 부르는 형광체를 이용하여 액상 연료와 기상 연료를 분리하여 촬영하는 LIEF 법(laser-induced exciplex fluorescence)을 개발하였다.

1984년 텍사스대학의 Melton<sup>(20)</sup>이 디젤 연

료용의 여기착체형광제(TMPD+나프탈렌)를 제창한 이래, 많은 연구가들이 디젤엔진 내의 혼합기 형성을 기체와 액체로 분리하여 촬영에 성공하고 있다. 또한 최근에는 LIEF 법을 가솔린 엔진에 적용시키기 위하여 가솔린 연료용의 여기착체 형광제로서 DMA와

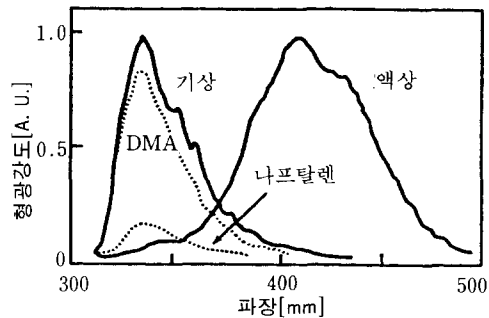


그림 14 가솔린 LIEF법에 의한 형광 스펙트럼

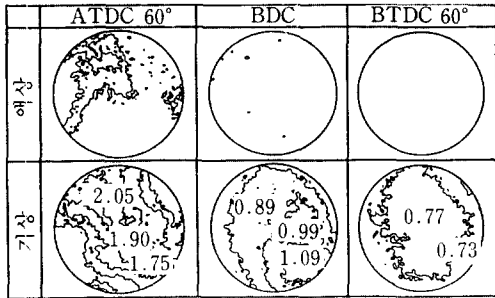


그림 15 LIEF법에 의한 희박 연소 엔진내의 혼합기 분포

나프탈렌의 혼합제를 창출하였다. 그림 14에 이 형광제를 첨가한 연료의 기상과 액상의 형광 스펙트럼을 나타낸다.

DMA분자는 기상상태에서는 고유의 형광 ( $\lambda_{max} = 335 \text{ nm}$ )을 나타내고 있으나, 액상상태에서는 나프탈렌과 여기착체를 형성하여 형광파장이 장파장쪽으로 이동한다( $\lambda_{max} = 410 \text{ nm}$ ). 이러한 형광특성은 간섭필터 등으로 용이하게 분리 관찰이 가능하며, 이 방법을 이용하여 Toyota 자동차에서 수행한 희박 연소(lean burn)엔진의 연소실 내 혼합기 분포의 계측예를 그림 15에 소개한다.<sup>(21)</sup> 그림 중의 숫자는 등농도선간의 평균 당량비를 나타낸다. 희박연소의 경우, 흡기 행정의 후기(BDC) 이후는 액적이 거의 존재하지 않고 있으며, 압축 행정 후반(BTDC 60°)에는 연소실내의 혼합기가 균일화되어 있는 양상이 잘 나타나고 있다.

## 6. 노킹의 계측

### 6.1 노킹의 발생위치 및 강도 계측

가솔린 엔진에 있어서 열효율 향상의 수단인 고압축비화를 도모하기 위하여는 노킹의 제어가 중요한 기술 과제이며, 이와 관련된 많은 연구가 수행되어 왔으나 아직 근본적인 해결책이 강구되지 못하고 있는 실정이다. 노킹현상은 극히 순간적인 현상이므로 화염

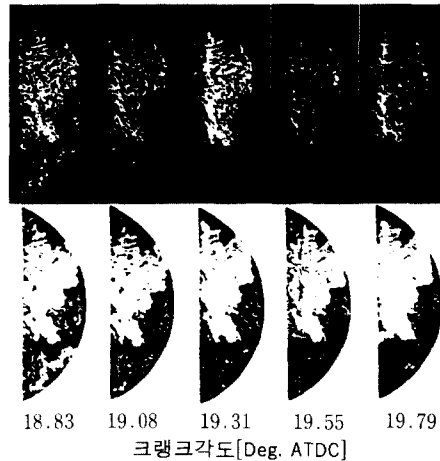


그림 16 자기착화 발생과정 및 발생위치  
n : 1200 rpm,  $\epsilon = 10 : 1$   $\phi : 1.15$  I.  
T. : 16° BTDC

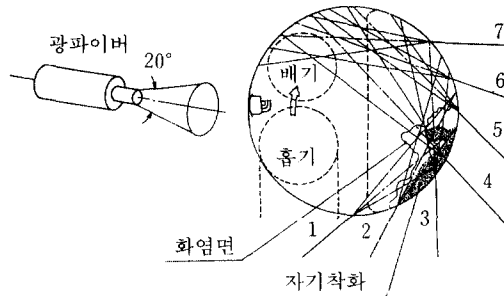


그림 17 광파이버의 부착위치 및 시야각도

의 발광강도만으로는 촬영할 수가 없으므로 새도우 그래프법에 의한 고성능 레이저를 광원으로 하는 간접 촬영 방법을 이용하여 그림 16과 같이 자기 착화(auto ignition)과정과 발생장소를 파악하고 있으나, 번잡한 고속도 촬영장치들이 필요하게 되므로 실용기관에의 적용은 용이하지 못하다.

비교적 간단하게 노킹의 발생위치와 발생강도를 파악하는 방법으로 복수개의 광파이버를 이용한 수법을 채택하고 있다.<sup>(22)</sup> 그림 17은 광파이버의 부착위치와 시야각을 나타낸 그림으로, 사용한 광파이버는 자외선용



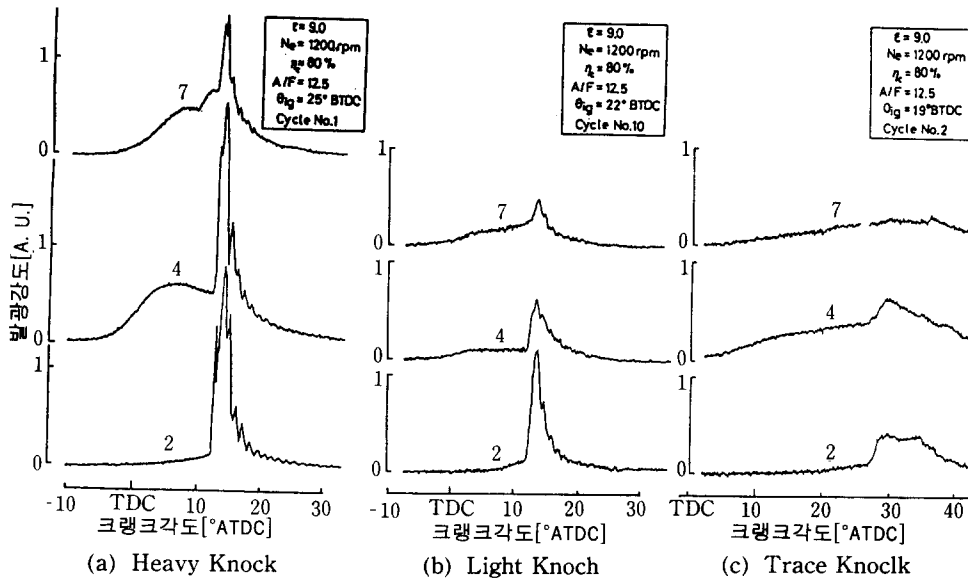


그림 18 광파이버부터의 출력강도 비교

석영제의 코어(core)경과 2차피복(glad)경이 각각 200  $\mu\text{m}$ 와 1 mm 이며, 시야각은 20°이다.

이와 같은 7개의 광파이버를 헤드 개스킷과 실린더 헤드와의 사이에 압입하여 자기착화의 발생위치와 강도를 검출하도록 하였다. 점화시기의 변화에 따른 2번과 4번, 그리고 7번 광파이버로부터의 광 신호를 측정하여 비교한 결과를 그림 18에 나타내었다. 점화시기를 진각시킬수록 노킹의 발생강도가 증가함을 알 수 있으며, 특히 2번 파이버의 시야각 위치에서 노킹의 강도가 크게 발생한다는 사실도 관측되고 있다.

이와 같이 광파이버로부터 검출되는 출력 신호의 변화를 관측함으로써 자기착화의 발생 위치를 파악함은 물론이고 연소 촬영법으로는 판정하기 어려운 자기 착화의 발생강도까지도 검출할 수가 있다.

## 6.2 미연 혼합기 온도의 계측

연소실내의 미연 혼합기 온도를 측정한다는 것은 연료 혼합기의 화학 반응인 자기 착

화의 발생 메카니즘을 명백하게 하며, 또한 자기착화 발생의 억제기술을 창출한다는 면에서도 중요하다. 현재 실용 기관의 미연 가스 온도를 정확하게 측정할 수 있는 수단으로 CARS법(coherent antistokes raman spectroscopy)이 사용되고 있다.<sup>(23)</sup> CARS법의 장점으로는 측정대상을 방해하지 않고, 연소광에 흡수되는 일이 없이 연소실이라는 밀폐된 공간으로부터 효율 좋게 신호를 측정할 수 있다는 점이다. CARS법에 의한 온도 측정은 연소실내에 초점을 맞춘 2개의 다른 파장을 가진 레이저광에 의하여 여기되는 질소분자의 Anti-Stokes측의 라만 산란광이 가지고 있는 온도정보를 이용하는 방법이다. 필자가 사용한 CARS실험장치의 광원으로는 YAG 레이저의 제2고주파(532 nm)와 색소 레이저(중심파장: 607nm, 파장폭: 100 $\text{cm}^{-1}$ )를 사용하였고, 광학계는 연소실에 설치한 관측창의 최대치수의 제약에 따라 YAG 레이저광과 색소 레이저광을 동일한 축상에 일치시키는 Collinear형을 이용하였다. 이와같은 실험장치를 이용하여 노킹의 발생유무에

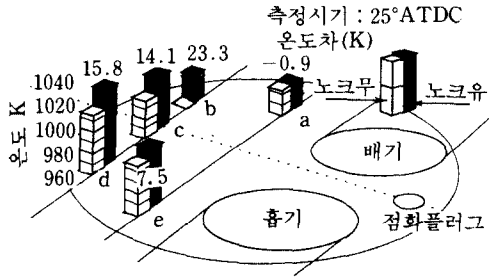


그림 19 노킹의 유무에 따른 미연가스 온도분포의 비교

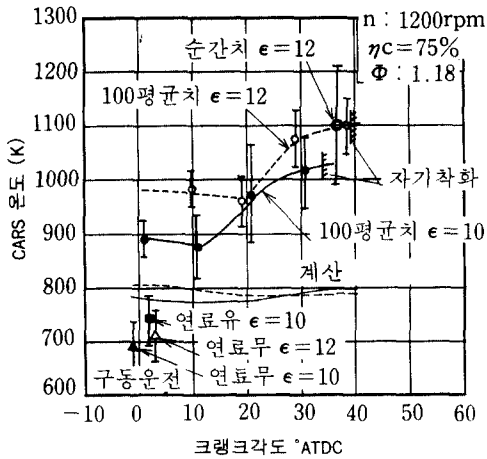


그림 20 압축비의 변화에 따른 미연가스 온도 비교

다른 미연가스의 온도이력과 자기착화 직전의 미연가스 온도차를 파악하였다. 그림 19는 연소실내의 5점에서의 미연 가스온도를 측정하여 노킹의 유무에 대하여 비교한 결과이다. 노킹에 따른 미연 가스 온도의 온도차는 노킹의 발생빈도가 높은 점화 플러그 반대측의 실린더 벽면 부근에서 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 압축비 10과 12의 경우에 있어서 자기 착화 발생까지의 미연가스 온도이력을 측정하여 그림 20에 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 압축비 12의 경우 자기 착화 직전의 미연가스 온도가 높게 나타나고

있으며, 자기 착화 발생시에는 어느 경우의 압축비에서도 약 150 K 정도의 발열반응이 일어나고 있음을 보여주고 있다. 이와 같은 온도에 대한 정량적인 점계측수법 이외에도 적외선 온도계<sup>(24)</sup>와 홀로그래피(holography) 간섭법<sup>(25)</sup> 등에 의한 온도장의 가시화 방법 등도 실험 목적에 따라서는 유용하게 적용되고 있다.

## 7. 맺음말

지금까지 가솔린 엔진의 연소 현상 해석에 도움이 된다고 생각되어지는 광용용 연소 계측의 몇 가지 예를 소개하였다. 최근 엔진에 대한 요구는 더욱 다양화되고 세분화되어지고 있으므로, 이러한 요구에 대응할 수 있는 엔진개발을 위하여는 연소해석의 필요성이 크게 부각되고 있다. 이러한 연소 해석을 위하여 수년전부터 다양한 계측 기술과 새로운 계측기기들이 개발되어 왔으나, 사용 목적에 적합한 계측기술의 개발은 아직도 미흡한 상태이다. 따라서 규명하고자 하는 인자의 특성이 충분히 고려된 새로운 계측 기술의 개발이 필요하며, 이러한 계측기술을 이용하여 엔진 내의 연소 현상에 대한 보다 명확한 분석이 따라야 할 것이다.

앞으로의 엔진내 연소 현상 해석 기술의 방향은 고감도 CCD카메라와 화상 처리 장치에 의한 화염의 구조 해석, PIV법 등에 의한 2차원 난류 해석, LIF법에 의한 혼합기 분포 계측, CARS법과 LDV 등에 의한 노킹 해석 등 정량적인 가시화 수법을 추구하게 될 전망이다. 또한 이와 같은 계측 기술의 개발뿐만 아니라 노킹과 새로운 난류 모델을 포함한 연소 시뮬레이션 모델의 확립에 대한 기대가 크다고 하겠다.

현재 당면하고 있는 엄격한 배기 규제의 대응과 연비 향상을 도모하기 위하여도 엔진 내의 연소 현상 규명을 통한 보다 효율 높은 엔진 개발이 중요하며, 이와 관련하여 현재

의 계측 기술에 만족하지 않고 보다 차원성과 시간 분해성이 우수한 계측법의 개발이 요구되어지고 있다. 따라서 사용 목적에 적합한 연소계측 기술의 개발과 실용 엔진에의 적용 기술을 확립하기 위하여 더욱 많은 노력이 필요시 되고 있다.

참고문헌

- (1) Springer, K. J., 1992, Transaction of the ASME, Vol. 114, pp. 445~458.
- (2) Amann, C. A., 1985, SAE Paper No. 850395.
- (3) Dyer, T. M., 1985, SAE Paper No. 850395.
- (4) Penner, S. W., Wang, C. P. and Bahadori, M. Y., 1984, 20th Symposium on Combustion, Ann Arbor.
- (5) 安東, 三林, 北田, 1990, 內燃機關, Vol. 29, No. 371, pp. 26~33.
- (6) 이기형, 高木, 1993, 대한기계학회지, Vol. 33, No. 3, pp. 260~270.
- (7) Witze, P. O., Hall, M. J. and Wallance, J. S., 1988, SAE Paper No. 881638.
- (8) 伊藤, 井原, 立田, 藤田, 1990, 日本機械學會論文集(B), Vol. 56, No. 531, pp. 3508~3513.
- (9) Lee, K. H., Ohira, T., Nakajima, T. and Matsumoto, R., 1990, JSME International Journal, Vol. 33, No. 1, pp. 163~170.
- (10) Itoh, T., Takagi, Y., Ishida, T. and Ishikawa, T., 1985, International Symposium COMODIA 85, pp. 185~192.
- (11) Henriot, S., Lecoz, J. F. and Pinchon, P., 1989, SAE Paper No. 890843.
- (12) 李, 漆原, 伊東, 高木, 1992, 第10回 內燃機關合同シンポジウム講演論文集, pp. 85~90.
- (13) James, J. D. C., 1987, Int. Conf. on Laser Anemometry Advances and Application, Paper 24, pp. 375~381.
- (14) 李, 池田, 大平, 中島, 松本, 1990, 日本機械學會論文集(B), Vol. 56, No. 521, pp. 247~252.
- (15) 漆原, 高木, Adrian, 1992, 第10回 內燃機關合同シンポジウム講演論文集, pp. 91~96.
- (16) David, L. R., Adrian, R. J., Christopher, C. L. and French, D. T., 1989, SAE Paper. No. 890616.
- (17) 이기형, 이창식, 1993, 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술강연회논문집, pp. 143~167.
- (18) Lawrenz, W., et al, 1992, SAE Paper No. 922320.
- (19) Bardsley, M. E. A., 1988, SAE Paper No. 880521.
- (20) Melton, L. A., 1992, 20th Combustion Symposium on Combustion.
- (21) Shimizu, R., 1992, SAE Paper No. 922356.
- (22) 伊東, 1990, 日本機械學會論文集(B), Vol. 56, No. 528, pp. 2539~2545.
- (23) Nakada, T., Itoh, T. and Takagi, Y., 1990, International Symposium on COMODIA. 90, pp. 393~398.
- (24) 後藤, 1990, 第8回 內燃機關合同シンポジウム講演論文集, pp. 411~416.
- (25) 佐藤, 關西支部 第65期 定時總會講演會講演 概要集, No. 904-2. 