

CARS를 이용한 DOHC 스파크 점화 기관의 말단 가스 온도 측정

End-Gas Temperature Measurements in a DOHC Spark-Ignition Engine Using CARS

최인용*, 전광민**, 박철웅***, 한재원***
Inyong Choi, Kwang Min Chun, Chul-Woung Park, Jae-Won Hahn

ABSTRACT

CARS(Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy) temperature measurement under engine-like condition was validated by measuring unburned gas temperatures for premixed propane-air flame in a constant volume combustion chamber. The measured temperatures were compared with predictions of 2 zone flame propagation model. End-gas temperatures were measured by CARS technique in a conventional 4 cylinder DOHC spark-ignition engine fueled with PRF 80. Cylinder pressure was measured simultaneously with CARS signal and used as a parameter on fitting CARS spectrum to library of theoretical spectra. There was a good agreement between the measured temperature and adiabatic core temperature calculated from measured cylinder pressure. Significant heating by pre-flame reaction in the end gas was observed in the late part of compression stroke

주요기술용어 : CARS(코헤런트 반 스톡스 라만 분광법), SI engine(스파크 점화 기관), End-gas temperature(말단 가스 온도)

1. 서론

스파크 점화 기관에서 화염 전단부의 연료와 공기, 잔류 가스의 혼합물인 말단 가스는 피스톤

의 상승 작용과 연소시의 기연 가스의 팽창에 의하여 압축되어 온도가 상승한다. 이러한 온도 상승으로 인하여 말단 가스의 한 점 또는 여러 점에서 자발화가 일어나 노킹을 유발하게 된다. 노킹이 발생하면 급격한 압력 상승과 함께 압력 진동이 발생하며 이는 높은 열손실과 진동, 소음을 야기시킨다. 이와 같이 말단 가스의 온도와 노킹 사이에는 밀접한 상관 관계가 있으므로 연소실 내 말단 가스의 온도 측정은 노킹의 발생 메커니

* 연세대학교 대학원

** 정회원, 연세대학교 기계공학과

*** 한국표준과학연구원 고온광계측실

증을 규명하고 노킹 발생 억제 기술을 개발하는 연구에 있어서 매우 중요한 기술이다.

온도와 압력이 급격하게 변하는 내연 기관에서는 열전대 등과 같은 접촉식 방법으로는 유동과 연소에 영향을 주지 않고 온도를 측정하는 것이 불가능하다. 비접촉식 온도 측정 기술로는 흡수 분광법(absorption spectroscopy)과 발광 분광법(emission spectroscopy)등이 있으나 이러한 기술은 실험을 위하여 엔진을 많이 개조하여야 할뿐만 아니라 공간 분해능이 낮고 측정 결과의 신뢰도도 매우 낮다. 이에 비해 CARS(coherent anti-Stokes Raman spectroscopy) 기술은 수 mm 직경의 창만 있으면 측정이 가능하여 실험을 위하여 엔진의 형상을 거의 변화시킬 필요가 없고, 시간 공간 분해능도 매우 높을 뿐 아니라 유동이나 연소에 영향을 미치지 않고 온도의 측정이 가능하다. 또, CARS 신호는 레이저광과 같이 직진성을 가지고 있으므로 측정점으로부터 먼 곳에서 신호를 측정할 수 있다. 이러한 장점에 때문에 CARS는 내연기관의 연소실 온도 측정 기술로서 널리 사용되어져 왔다.

Stenhouse et al.^[1]이 최초로 엔진의 연소실 내부에서 CARS 스펙트럼을 측정한 이후 이 기술을 엔진에 적용시키기 위한 많은 연구^{[2]~[4]}가 수행되었다. 최근에는 내연 기관의 연소실 내 미연 가스의 온도를 측정하여 미연 가스 온도와 노킹과의 관계를 규명하기 위한 많은 연구^{[5]~[9]}들이 수행되어졌는데, 이러한 연구들에서 자연 발화 직전의 연료의 급격한 열 방출로 인한 미연 가스의 온도 변화를 측정하기 위하여 신호의 세기가 크고 시간 공간 분해능이 높은 CARS 기술이 사용되었다. 또, 국내에서도 CARS 측정 기술과 이를 화염 또는 내연 기관 등에 적용시킨 연구^{[10]~[13]}가 활발히 수행되고 있다.

본 연구에서는 정적 연소실 내의 연소 과정중 말단 가스 온도를 측정함으로써 온도와 압력이 급격히 변하는 환경에서 CARS 기술을 이용하여 측정된 온도의 정확성을 검증하였고, 상용 4기통 DOHC 스파크 점화 기관에서 압력과 동시에

CARS 스펙트럼을 측정하고 이를 이론값과 곡선 맞춤하여 온도를 구하였다.

2. 정적 연소실내 말단 가스 온도 측정

본 연구에서는 온도와 압력이 급격히 변하는 환경에서 CARS 기술을 이용하여 측정된 온도의 정확성을 검증하기 위하여, 엔진의 연소실을 단순화 시켜 실험 변수를 줄이고, 온도와 압력의 반복성이 우수한 정적 연소실 내의 프로판 공기 혼합기의 말단 가스 영역에서 CARS 스펙트럼을 측정하고 이를 이론 스펙트럼과 곡선 맞춤 하여 온도를 구하여, 이 온도를 2 영역(2-zone) 시뮬레이션 모델로 계산된 온도와 비교하였다.

2.1 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험 장치는 정적 연소기, 진공 펌프, 압력 센서(Kistler 6011), 전하 증폭기(Kistler 5011), 자료 취득용 PC, 점화 회로, 온도 제어 장치, CARS 장치 등으로 구성되어 있으며 그 개략적인 구성은 Fig. 1과 같다.

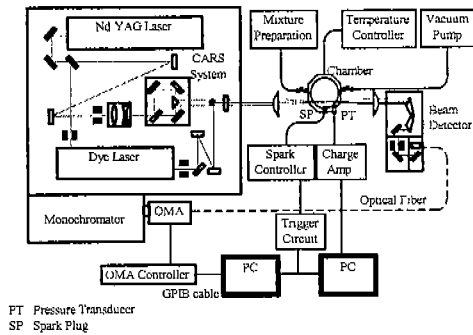


Fig. 1 Schematic diagram of constant volume combustion chamber experimental setup

정적 연소기는 내경 100 mm, 폭 40 mm의 원통형이며 그 형태는 Fig. 2와 같다. 연소기의 재질은 두랄루민이며, 아래쪽의 좌우로 CARS 측정을 위한 창이 있고 스파크 플러그는 상단에 있다. 연소실 외벽에는 온도 조절을 위한 판 히터 3

개가 부착되어 있고, 점화 초기의 온도는 아래쪽에 설치된 K형 열전대로 측정하여 조절하였다.

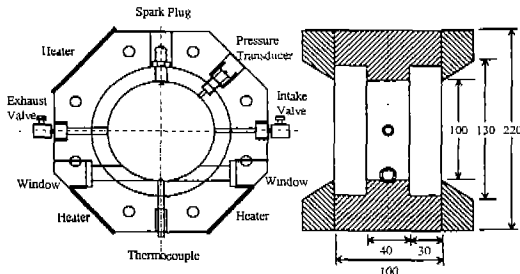


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume combustion chamber

측정 위치에 화염이 도달하였는지를 판단하기 위하여 CARS 측정 창으로 헬륨 네온 레이저를 통과시키고 그 반대편에서 포토 다이오드로 레이저 광을 측정하였는데, 화염이 레이저광에 도달하면 화염면 전과 후의 밀도 차에 의해 빛이 굴절되어 포토 다이오드의 출력이 변화하게 된다. 화염 도달 측정 실험과 동시에 연소실 내 압력을 측정하여 CARS 신호의 곡선 맞춤 시에 파라미터로 사용하였다.

실험에 사용한 광대역 CARS장치는 이동이 편리하게 개발된 이동형 CARS 연소 진단 장치로, Nd:YAG 레이저, 색소 레이저, 수광부, 데이터 처리 장치로 구성되어 있다. 펌프광으로 선풍이 0.1 cm^{-1} , 7~8 ns 인 Q-스위치된 Nd:YAG 레이저(Continuum Surlite II)의 2차 고조파(second harmonic)를 400 mJ/pulse, 10 Hz, 다중 모드에서 발진시켰다. 스톱스광인 색소 레이저는 메탄올을 용매로 한 KR620 용액 700 cc와 R640용액 40 cc를 혼합하여 염료로 사용하였고 중심 파장은 607 nm, 펄스당 에너지는 6~7 mJ이다. 파장이 532 nm인 Nd:YAG 레이저의 2차 고조파 에너지의 80 %는 색소 레이저를 광 펌핑하고 20 %는 두 개로 분리시켰다. 분리된 펌프광은 색소 레이저와 함께 초점 거리 20 mm의 렌즈를 통하여 측정 점에 접혀진(folded) BOXCARS 위상 접합 조건을 만족하도록 모았

다. 여기서 발생된 신호는 두 개의 펠린-브로카(Pellin Broca) 프리즘으로 1차 분광한 후 광섬유를 통하여 단색기(monochromator)에 설치된 다채널 광증폭 분석기(OMA, RG & G 1420)를 통해 PC에 저장하였다. 다채널 광 검출기는 1024개의 화소(pixel)로 이루어져 있고 화소 사이의 주파수 간격은 0.094 cm^{-1} 이다.

CARS 신호는 점화 이후 측정 점에 화염이 도달하기 전 다섯 가지 시간에서 측정하였는데, 각 시간에서 각각 10회를 측정하였다. 실험은 이론 공연비, 점화 이전의 초기 압력 4 bar, 초기 온도 423 K의 조건에서 실시하였으며, 유동과 온도의 불균일성의 영향을 배제하기 위해 흡입 밸브가 닫히고 3분 후에 점화를 하였다

2.2 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 실험 결과를 2영역 시뮬레이션 결과와 비교하였는데 모델에 사용된 가정은 다음과 같다.

- 화염은 점화 플러그를 중심으로 구형으로 전파된다.
- 연소실 내의 가스는 화염면을 경계로 기연과 미연 가스의 두 영역으로 나누어진다.
- 두 영역에서의 압력은 동일하다.
- 두 영역은 각각 이상 기체식을 만족시키는 균일한 혼합물이다.
- 기체와 벽면 사이의 열전달만을 고려하며 화염면을 경계로 한 열전달은 무시한다.

화염은 층류 화염 속도로 전파된다고 가정하였으며 그 속도는 Metghalchi와 Keck^[14]이 제안한 값을 사용하였다.

2.3 실험 결과

Fig. 3은 측정된 미연 가스 온도와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 온도 측정은 각각의 점에 대해 10회 실시하였으며 그림의 각 점은 10회 측정값을 평균하여 나타낸 것이다. 그림에서 측정 점에 화염이 도달하는 시간을 점선으로 나타내었

으며 세로 막대는 10회 측정의 표준 편차를 나타낸 것이다.

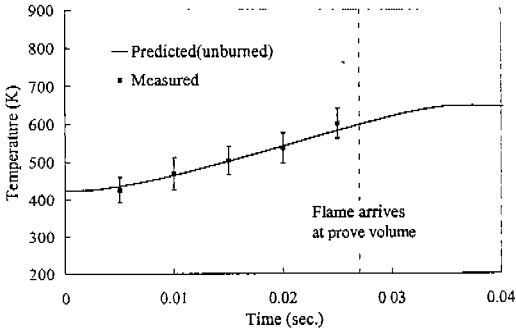


Fig. 3 Measured and predicted unburned gas temperature
(Stoichiometric A/F ratio, Initial Pressure : 4 bar, Initial Temperature : 423 K)

실험 결과 말단 가스 영역의 미연 가스의 온도 가 기연 가스의 팽창으로 인한 압축 때문에 상승하는 것을 볼 수 있었으며 측정된 온도는 계산 결과에 거의 근접하였고, 10회 측정의 표준 편차는 $\pm 30 \sim 50$ K의 결과를 보였다. 이 편차는 각 레이저 펄스마다 얻은 각각의 스펙트럼을 곡선 맞춤하는 데서 온 CARS의 측정 편차로 볼 수 있다. 실험 결과 본 실험에 사용된 이동형 CARS 장치의 온도의 정밀도는 400~600 K 영역에서 약 ± 40 K 임을 알 수 있었다.

3. 4기통 스파크 점화 기관의 말단 가스 온도 측정

본 연구에서는 상용 4기통 DOHC 스파크 점화 기관의 1번 실린더 내 말단 가스 영역에서 CARS 스펙트럼을 측정하고 이를 이론 스펙트럼과 곡선 맞춤하여 말단 가스 온도를 측정하였다.

3.1 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험 장치는 엔진, 동력계, 압력센서(Kistler 6053), 전하 증폭기(Kistler 5011), 자료 취득 장치, CARS 장치 등으로 구성되어 있으며 그 개략적인 구성은 Fig. 4와 같다.

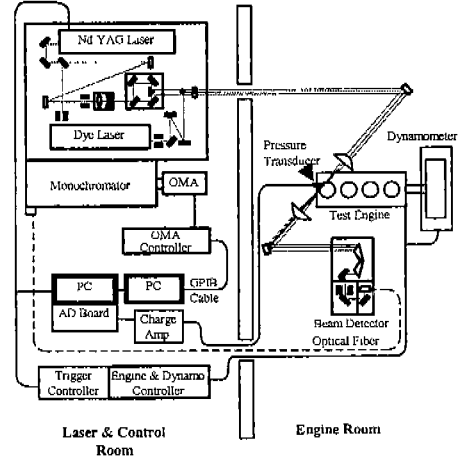


Fig. 4 Schematic diagram of engine experimental setup

그림과 같이 실험 장치는 레이저 및 각종 제어 장치, 그리고 엔진이 각각 두 개의 공간에 나뉘어서 배치되어 엔진에서 나오는 진동으로 인한 잡음(noise)에 의한 영향을 최소화하였다.

실험에 사용된 기관은 배기량 1498 cc, 수냉식, 4기통 DOHC 스파크 점화 기관이며 그 제원은 Table 1과 같다. CARS 측정을 위한 창을 설치하면서 엔진의 9.5였던 엔진의 압축비가 8.3으로 변화하였다.

Table 1 Specification of the test engine

Combustion Chamber	Pentroof
Fuel Delivery	MPI
Displacement Volume	1498 cc
Bore×Stroke	76.5×81.5
Compression Ratio	9.5 (8.3)
Maximum Torque	137.3 N
Maximum Power	80.9 kW

엔진에 부착된 엔코더의 신호를 이용하여 점화 시기, 레이저 발진, 압력 및 CARS 자료 취득 시기 등을 제어하였다. CARS 측정을 위한 창을 내기 위해 실린더 블록과 헤드 사이에 두께 20 mm의 스페이서를 장착하였는데 이로 인한 압축비 변화를 없애기 위하여 피스톤을 그만큼 연장하여 주었다. 실험 엔진의 1번 실린더에 CARS

신호 측정을 위한 창(window)을 설치하였는데 창과 밸브, 스파크 플러그 등의 위치는 Fig. 5에 나타나있다. 온도 측정 점은 피스톤이 TDC에 왔을 때 피스톤 상부로부터 약 5mm 지점이다.

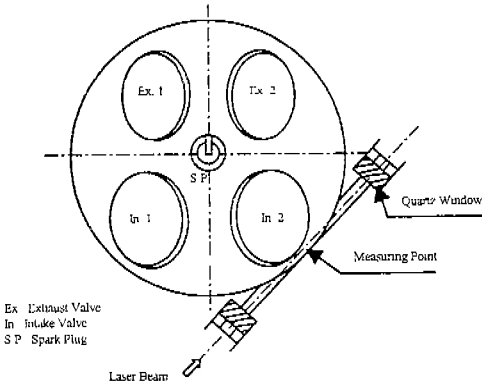


Fig. 5 Engine combustion chamber configuration and CARS measurement location

엔진의 압축비가 상용 엔진에 비하여 낮아져서, 노킹을 유발하기 위하여 상용 가솔린보다 옥탄가가 낮은 옥탄가 80의 PRF(primary reference fuel)를 연료로 사용하였다. 엔진을 1200 rpm, WOT 조건에서 운전하였으며 점화 시기는 BTDC 20° 로 하였다. 이 조건에서 온도 측정과 동시에 크랭크각 0.1° 간격으로 측정된 압력 자료를 통과 필터(band pass filter)에 통과시킨 후 이로부터 노킹 발생 여부를 판단한 결과, 전체 사이클의 약 25% 에서 노킹이 일어났다. CARS 신호는 100 사이클 동안 23 개의 일정한 크랭크 각도에서 취득하였다. 취득한 압력 자료로부터 CARS 신호를 측정할 크랭크 각도의 압력값을 읽어서 온도를 곡선 맞춤할 때 파라메타로 사용하였다.

3.2 실험 결과

Fig. 6은 크랭크각 370° 에서 측정된 하나의 CARS 스펙트럼을 이론 스펙트럼에 곡선 맞춤한 결과이다. 곡선 맞춤 결과 892.3 K의 온도를 얻었다. 그림에서 보면 대부분의 구간에서 두 스펙트럼이 잘 일치하고 있다.

그림의 아래쪽에 측정값에서 이론값을 뺀 차이를 표시하였다.

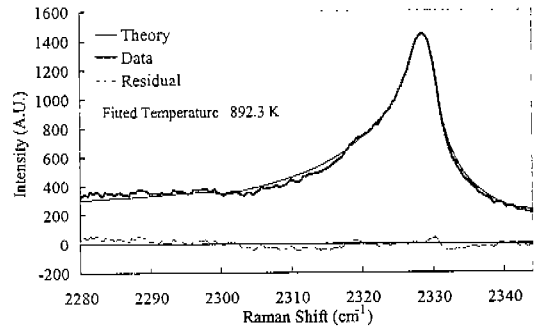


Fig. 6 A typical fitting result of a CARS spectrum

Fig. 7~8은 1200 rpm, WOT의 운전 조건에서 연소실 온도와 압력을 크랭크각의 함수로 나타낸 것이다. 온도값은 100 사이클동안 각각의 레이저 펄스마다 측정된 스펙트럼을 곡선 맞춤하여 얻어진 온도를 평균하여 나타낸 것이다. 이는 연소실 내의 화염이 난류이기 때문인데, 난류의 경우 여러 개의 스펙트럼을 평균하면 저온부와 고온부의 스펙트럼이 서로 합쳐져 타당한 온도값을 얻을 수 없다. 그림에서 세로 막대는 각 점에서 100 사이클동안 측정된 온도의 표준 편차를 상하로 나타낸 것이다.

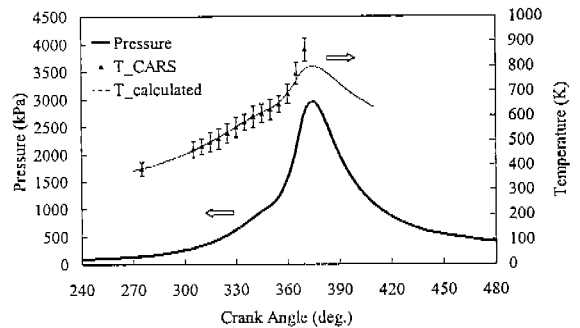


Fig. 7 Cylinder pressure and unburned gas temperature measured as a function of crank angle at 1200 rpm, WOT, S/T:20° BTDC (T_{calculated} : Polytropic temperature calculated from measured pressure)

Fig. 7은 미연 가스 온도 측정 결과이다. 그림에

압축 과정을 가역 단열과정으로 가정하고 압력으로부터 계산된 온도를 측정 온도와 동시에 표시하였다. 측정 결과, 압축 과정동안 연소실 내 미연 가스 온도는 350 K ~ 900 K로 변화하였으며 100 사이클 동안의 미연 가스 온도의 표준 편차는 $\pm 30 \sim 50$ K의 결과를 보였다. 압력의 상승으로 인하여 연소실내 미연 가스가 압축되면서 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 압력으로부터 계산된 온도와 측정 온도를 비교해 보면, 두 온도가 거의 일치하다가 압축 과정 말기에서 측정 온도가 더 높아짐을 볼 수 있는데, 이는 화염이 도달하기 이전의 화학 반응(pre-flame reaction)에 의한 가열(heating) 효과 때문으로 생각된다.

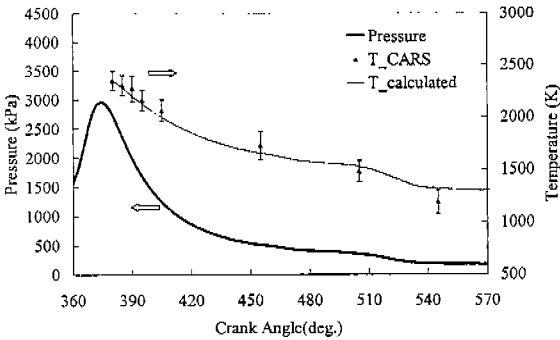


Fig. 8 Cylinder pressure and burned gas temperature measured as a function of crank angle at 1200 rpm, WOT, S/T:20° BTDC
(T_calculated : Polytropic temperature calculated from measured pressure)

Fig. 8은 기연 가스 온도 측정 결과이다. 측정점에 화염이 지나간 이후 기연 가스에서 측정된 CARS 스펙트럼의 크기(intensity)는 미연 가스에서 측정된 스펙트럼의 10 % 내외로 매우 작아진다. 그러므로 측정된 스펙트럼의 크기를 보면 측정된 온도가 미연 가스의 온도인지 기연 가스의 온도인지를 알 수 있다. 기연 가스의 온도 측정 표준 편차는 약 ± 120 K로 미연 가스에 비해 큰데, 이는 연소실내 복잡한 유동과 밀도 구배로 인하여 측정된 스펙트럼에 잡음(noise)이 많이 섞여 있는 것에 기인한다. 마찬가지로 이 그림에서도 연소실 내 가스가 팽창함에 따라 온도가 떨

어지는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 CARS 측정 기술의 정확성을 검증하기 위하여 정적 연소실에서 프로판 공기 예혼합기의 화염 전과 과정 중의 말단 가스의 온도를 CARS를 이용하여 측정하고 이 결과를 2 영역 시뮬레이션 모델로 계산된 온도와 비교하였다. 이 결과 온도와 압력이 급격하게 변하는 환경에서 CARS 기술을 이용하여 10회 측정된 온도는 약 ± 40 K의 표준 편차를 보였다.

CARS를 이용하여 4 기통 DOHC 스파크 점화 기관의 1번 실린더 내 말단 가스의 온도를 연소실 압력과 동시에 측정하여 한 사이클동안 연소실 내 온도 변화를 알 수 있었다. 압축 과정동안 연소실 내 온도는 320 K ~ 920 K로 상승하였으며 100 사이클 동안의 미연 가스 온도의 표준 편차는 $\pm 30 \sim 50$ K의 결과를 보였다. 압축 과정 말기에는 화염 전 화학 반응에 의한 가열 효과로 인하여 측정된 온도가 가역 단열 과정으로 가정하고 압력으로부터 계산된 온도보다 높게 나타났다. 팽창 과정의 온도의 표준 편차는 연소실 내 유동과 밀도 구배로 인하여 압축 과정보다 큰 값을 보였다.

후 기

이 연구는 1996~1997년 학술진흥재단 학술연구조성비에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

1. I.A. Stenhouse, D.R. Williams, J.B. Cole, and M.D. Swords, "CARS measurements in an internal combustion engine", *Applied Optics*, Vol.18, No.22, pp3819 ~ 3825, 1979.
2. David Klick, K.A.Marko, and L. Rimai, "Broadband single-pulse CARS spectra in

- a fired internal combustion engine", Applied Optics, Vol.20, No.7, pp1178~1181, 1981.
3. L.A. Rahn, S.C. Johnston, R.L. Farrow, and P.L. Mattern, "CARS thermometry in an internal combustion engine", American Institute of Physics, pp609~613, 1982.
 4. R.P. Lucht, R.E. Teets, R.M. Green, R.E. Palmer, and C.R. Ferguson, "Unburned gas temperature in an internal combustion engine. I:CARS temperature measurements", Combust. Sci. and Tech., Vol.55. pp41~61, 1987.
 5. D.A. Greenhalgh, D.R. Williams, and C.A. Baker, 16th ISATA Conf., Florence, pp 487~508, 1987
 6. T. Nakada, T. Itoh, and Y. Takagi, "Unburnt gas temperature measurement using single shot CARS in a spark ignition engine", COMODIA 90, pp393~398, 1990.
 7. M.J. Cottreau, F. Grisch, and J.J. Marie, "CARS measurements of temperature and species concentrations in an IC engine", Appl. Phys. B 50, pp63~66, 1990.
 8. D. Bradley, G.T. Kalghatgi, C. Morley, P. Snowden and Jinku Yeo, "CARS temperature measurement and the cyclic disoersion of knock in spark ignition engine", 25th Symposium(International) on Combustion, 1994.
 9. G.T. Kalghatgi, P. Snowden, and C.R. McDonald, "Studies of knock in a spark ignition engine with "CARS" temperature measurements and using different fuels", SAE paper 950690, 1995.
 10. 박승남, 한재원, 이은성, 이충희, "광대역 CARS 분광기의 제작과 온도 측정의 정확도 분석", 한국광학회지, 제4권, 제2호, 1993.
 11. 한재원, 박승남, 이은성, 이충희, 강경태, 정석호, "CARS를 이용한 화염내부 온도분포 측정연구", 한국광학회지, 제3권, 제4호, pp266~271, 1992.
 12. 한재원 등, "CARS를 이용한 연소 진단 장비 개발 연구 최종보고서", KRISS-94-145-IR, 한국표준과학연구원, 1994.
 13. 최인용, 전광민, 박철용, 한재원 "CARS를 이용한 단기통 스파크 점화 기관의 미연 가스 온도 측정", 한국자동차공학회 1996 춘계학술대회 논문집, pp76~84, 1996.
 14. Metghalchi, M. and Keck, J. C., "Laminar burning velocity of propane-air mixtures at high temperature and pressure", Combustion and Flame, vol. 48, pp191~210, 1982.