

CARS 측정 기술을 이용한 스파크 점화 기관에서의 화염 전 화학 반응에 의한 온도 변화에 관한 연구

A Study of the Temperature Elevation Due to the Pre-flame Reaction in a Spark-Ignition Engine Using CARS Technique

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

ABSTRACT

End-gas temperatures were measured using CARS technique in a conventional DOHC spark-ignition engine fueled with PRF80. The measured pressure data were analyzed using band pass filter method. The measured CARS temperatures were compared with adiabatic core temperatures calculated from measured pressures. Significant heating by pre-flame reaction in the end gas zone was observed in the late part of compression stroke under both knocking and non-knocking conditions. CARS temperatures measured at 10 crank angle degree before knock occurrence was higher than adiabatic core temperatures. These results indicate that there exist some exothermic reactions in low pressure and temperature region. CARS temperatures began to be higher than the adiabatic core temperature when the end-gas temperatures reached 700K. The temperature elevation due to the pre-flame reaction correlated better with CARS temperature than with cylinder pressure.

주요기술용어 : Knocking(노킹), Autoignition(자발화), CARS(코헤런트 반 스톱스 라만 분광법), End-gas temperature(말단 가스 온도), Pre-flame reaction(화염 전 화학 반응)

1. 서론

노킹의 원인이 되는 자발화는 외부의 점화가 없이 이루어지는 급격한 연소 반응으로 정의된다.¹⁾ 연소실 내에서 화염이 전파되면, 말단 가스의 온도와 압력이 점차 증가하여 화염 전 화학 반응(pre-flame chemistry)이 일어나 연료의

산화이 시작된다. 화학 반응률(rate of reaction)은 온도에 지수적으로 비례하는데, 외부로의 열 손실이 열 방출보다 작아지면 반응은 결국 자기 가속(self accelerating)에 의해 점점 빨리 일어나게 되어 결국 자발화가 일어나게 된다. 많은 연구자들은, 말단 가스가 정상적인 화염이나 자발화에 의해 연소되기 이전에 화염 전 화학 반응(pre-flame chemistry)에 의해 상당량의 연료가 산화되어 열을 방출한다고 보고하였다. 일반적으로 엔진 내에서의 자발화는 말단 가

* 회원, University of Michigan

** 회원, 연세대학교 기계공학과

*** 회원, 한국표준과학연구원

스 내의 고온 열점(hot spot)에서 발생한다고 알려져 있으므로, 말단 가스 온도 변화는 화염 전 화학 반응과 자발화에 매우 결정적인 영향을 미친다고 볼 수 있다. 그러므로, 연소실 내 말단 가스의 온도 측정은 노킹의 발생 메커니즘을 규명하고 노킹 발생 억제 기술을 개발하는 연구에 있어서 매우 중요한 기술이다.

최근에 개발된 CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy) 측정 기술은 여러 가지 장점으로 인하여 그 응용범위가 급속히 넓어져 이제는 고온기체의 온도 및 밀도를 측정하는 고전적인 기본기술의 하나로 확립되었으며,²⁾ 이 기술이 연소진단에 사용되면서 온도 측정의 정확도, 공간적인 온도 분포 측정의 분해능 및 성분 분석능력이 획기적으로 향상되었다.³⁾

Stenhouse et al.⁴⁾이 최초로 엔진의 연소실 내부에서 CARS 스펙트럼을 측정한 이후 이 기술을 엔진에 적용시키기 위한 많은 연구가 수행되었다. Klick et al.⁵⁾은 엔진에서 처음으로 광대역(broadband) CARS 신호를 측정하였고 Rahn et al.⁶⁾, Lucht et al.⁷⁾, Greenhalgh et al.⁸⁾ 등의 연구자들은 광대역 CARS를 이용하여 연소실내 온도를 측정하는 연구를 수행하였다. 온도 측정 이외에 CARS를 이용하여 연소실내 이산화탄소(CO₂)의 농도를 측정하는 연구 또한 이루어졌으며,^{9,10)} 최근에는 DBR CARS(Dual Broadband Rotational CARS) 기술을 엔진에 적용한 연구 결과도 발표되었다.¹¹⁾ 내연 기관의 연소실 내 미연 가스의 온도를 측정하여 미연 가스 온도와 노킹과의 관계를 규명하기 위한 많은 연구들이 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.¹²⁻¹⁷⁾

본 연구에서는 상용 4기통 DOHC 스파크 점화 기관에서 CARS를 이용하여 연소실 내 말단 가스 온도 연소실 압력과 동시에 측정하였다. 취득한 압력 자료로부터 구간 통과 필터 해석

법¹⁸⁾을 이용하여 노킹 특성을 해석하였다. 그리고, CARS를 이용하여 측정된 온도를 측정 압력으로부터 계산된 단열 압축 온도(adiabatic core temperature)와 비교하여, 온도와 압력 및 노킹 특성의 상호 관계를 고찰하였다.

2. 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. 1과 같다.

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

엔진에 부착된 엔코더의 신호를 받아서 점화 시기, 레이저 발진, 압력 및 CARS 자료 취득 시기 등을 제어하는데 이용하였다.

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

CARS 측정을 위한 창을 내기 위해 실린더

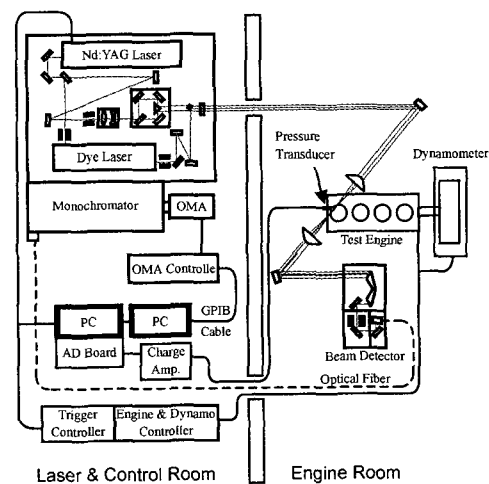


Fig. 1 Schematic diagram of CARS measurement for engine diagnostics

Table 1 Specification of the test engine

Engine type	4 Cylinder, 4 Stroke
Combustion chamber	Pentroof
Fuel delivery	MPI
Displacement volume	1498cc
Bore × Stroke	76.5 × 81.5
Compression ratio	9.5 (8.3)
Maximum torque	137.3 N / 3400 rpm
Maximum power	80.9 kW / 6200 rpm

블록과 헤드 사이에 두께 20mm의 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. 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 온도 측정 점은 1번 흡기 밸브 아래의 말단 가스 영역인데, 본 연구와 동일한 엔진을 사용한 이전의 연구 결과¹⁹⁾에 의하면, 이 부근에서 노킹이 가장 빈번하게 발생하였다. 본 실험에 사용된 CARS 시스템의 공간 분해능은 1mm 이하이다.

연료로서 옥탄가 80의 PRF(Primary Reference Fuel)를 사용하였고, 엔진을 1200rpm, WOT(Wide Open Throttle) 조건에서 운전하였으며 점화 시

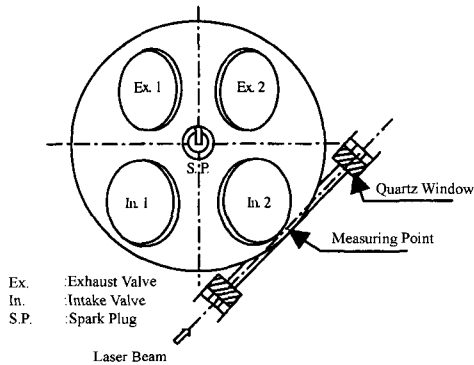


Fig. 2 Engine combustion chamber configuration and CARS measurement location

기는 BTDC 15°~35°로 변화시켰다. 실험시 냉각수의 출구 온도를 88°C로 고정하였다.

각 점화 시기에서 CARS 신호는 10~15개의 일정한 크랭크 각도에서 연속된 150사이클 동안 취득하였는데, 이 중 약 10~15%의 CARS 스펙트럼은 신호의 강도가 너무 낮아서 이론 스펙트럼과 곡선 맞춤하여 온도 값을 찾을 수 없었다. 사이클 후반부에 취득한 스펙트럼 중 상당수는 화염이 측정 점을 지나간 후 기연(burned) 가스 영역에서 발생한 것이었는데, 기연 가스 영역에서 발생한 CARS 스펙트럼의 세기(intensity)는 미연 가스 영역에서 발생한 스펙트럼 세기의 1/10 이하로 매우 작다. 이러한 차이점을 이용하여 취득한 스펙트럼 중, 기연 가스 영역에서 발생한 것으로 판단되는 것은 모두 제외하였다. 즉, 본 논문에 사용한 온도 값은 모두 미연(unburned) 가스의 온도 값이다.

CARS신호와 동시에 연소실 내의 압력을 취득하였다. 취득한 압력 자료로부터 CARS 신호를 측정된 크랭크 각도의 압력값을 읽어서 온도를 곡선 맞춤 할 때 파라메타로 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 노킹 특성 해석 결과

실험 자료의 노킹 특성은 5~10kHz의 구간 통과 필터 해석법¹⁸⁾을 이용하여 해석하였는데, 이러한 노킹 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

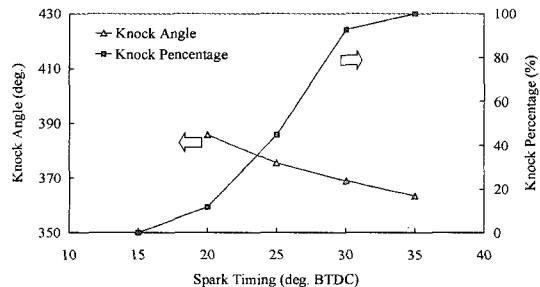


Fig. 3 Knock occurrence probability and average knock occurrence as a function of spark timing location(1200rpm, WOT)

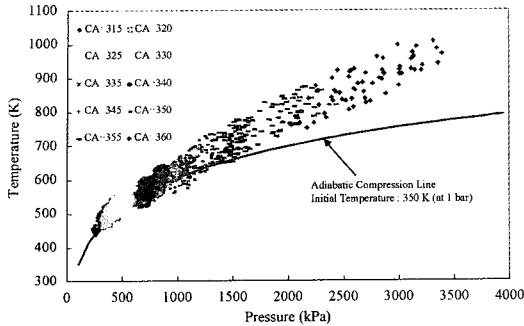


Fig. 4 Measured CARS temperature as a function of simultaneously measured pressure(1200rpm, WOT, S/T:30° BDTC, CA:Crank Angle)

주어진 운전 조건에서 엔진의 점화 시기가 진각됨에 따라, 노킹이 점차 빨리 일어나기 시작했으며, 노킹 발생 확률은 0~100%로 전형적인 S자형 곡선을 그리며 증가하였다.

3.2 말단 미연 가스 온도 측정 결과

Fig. 4는 CARS로 측정된 미연 가스 온도를 동시에 측정된 연소실 압력의 함수로 나타낸 것이다.

위 그림에서 단열 압축선(adiabatic compression line)을 실선으로 나타냈는데, 이는 350K, 1 bar의 연료·공기 혼합기가 단열 압축 될 때 거치는 과정이다.

Fig. 4는 평균 노킹 발생 확률이 91%인 점화 시기 BTDC 30°의 결과인데, 크랭크각 355(이후에서 측정된 온도의 경우 대부분이 단열 압축선 보다 100K 이상 온도가 높았다. 이전의 연구 결과¹⁷⁾에 의하면 엔진의 연소실과 같은 조건에서 CARS로 측정한 온도의 불확실성(uncertainty)은 ±40K 내외이므로, 이 차이는 실제의 높은 온도 증가를 반영한다고 볼 수 있다. 이러한 온도의 상승은 압축 과정 말기에 발열 화염 전 반응(exothermic pre-flame reaction)의 가열 효과(heating effect)에 의한 것으로 볼 수 있는데, 이러한 효과는 연소실 압력이 약 1500kPa 내외가 될 때 나타나기 시작하였다.

Fig. 5는 측정된 연소실 압력과 미연 가스 온

도, 그리고 압력으로부터 계산된 단열 중심 온도를 크랭크 각도의 함수로 나타낸 것인데, 여기에서 화염 전 반응에 의한 온도 상승을 보다 명확히 볼 수 있다. CARS로 측정된 온도를 나타내는 각 점은 유효한 스펙트럼의 온도 결과를 평균한 것이고 세로 막대는 그 표준 편차이다. 표시된 연소실 압력은 각 사이클에서 측정된 압력을 평균한 것이다. 단열 중심 온도(adiabatic core temperature)는 압축 과정을 열전달이 없는 단열 압축 과정으로 가정하고, 측정된 압력으로부터 계산한 온도인데, 이를 계산할 때 비열비(specific heat ratio)는 모터링의 경우 공기의 값을 사용하였고 엔진을 점화시키는 경우에는 연료/공기 혼합물의 값을 사용하였다. 단열 중심 온도는 BTDC 90°부터 계산하였는데, 이 때의 초기 온도 값으로는 이 시점에서 CARS를 사용하여 측정된 온도 값을 평균하여 사용하였다.

Fig. 5(a)는 엔진에 연료를 넣지 않고 1200 rpm으로 모터링(motoring) 운전하면서 실험한 결과를 보여준다. CARS로 측정된 온도의 평균 값은 압력으로부터 계산된 단열 중심 온도와 거의 일치하였다.

Fig. 5(b)는 노킹이 발생하지 않은 경우인 점화 시기 BTDC 15°의 결과인데, 크랭크각 365°까지는 단열 중심 온도와 CARS로 측정된 온도 결과가 거의 일치하지만 370°에 측정된 온도의 평균값은 단열 중심 온도보다 53.3K 높게 나타났다. 이를 볼 때 화염 전 화학 반응에 의한 미연 가스의 온도 상승은 노킹의 발생 유무에 상관없이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 5(c)는 점화 시기 BTDC 20° 조건의 결과인데, 크랭크각 370°에 측정된 온도의 평균값은 단열 중심 온도보다 77.7K 높게 나타났으며, 365°에 측정된 온도의 평균값도 단열 중심 온도보다 29.9K 높게 나타났다. 점화 시기 BTDC 25° 조건에서 측정된 온도가 단열 중심 온도와 차이가 가장 컸는데, Fig. 5(d)에서 보는 바와 같이 크랭크각 365°에서 측정된 온도의 평균값

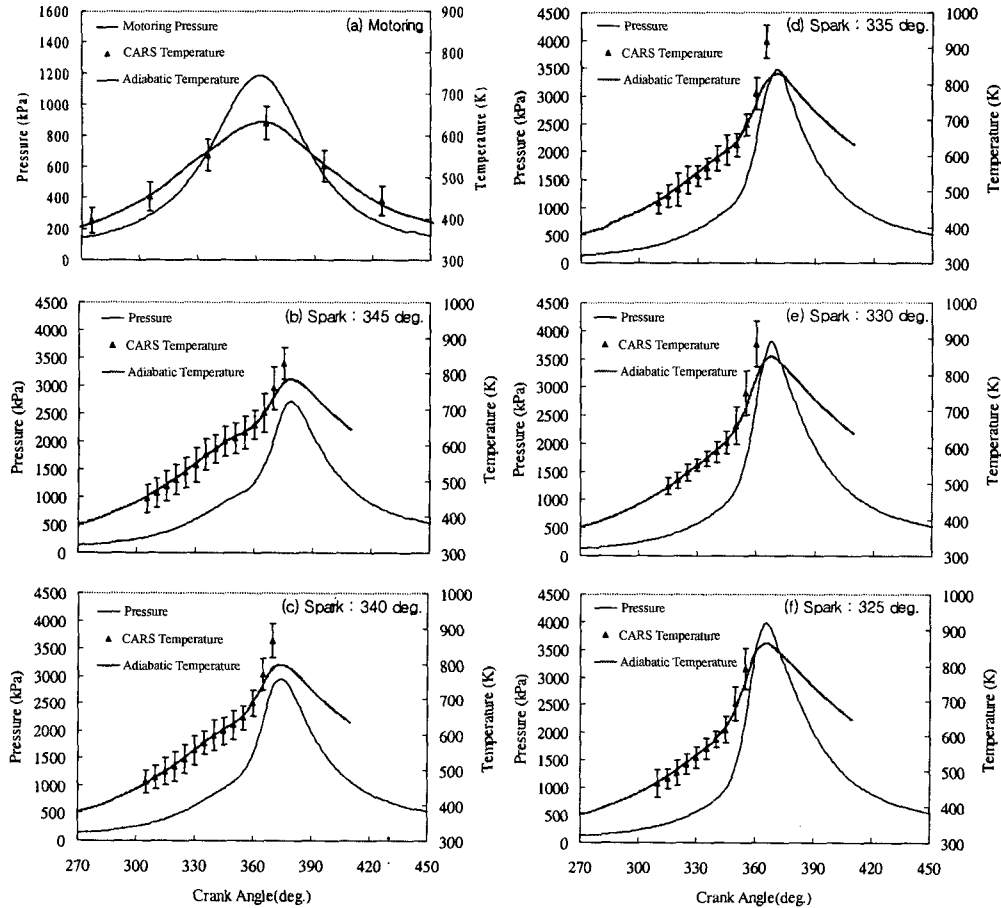


Fig. 5. Cylinder pressure and unburned gas temperature as a function of crank angle at 1200 rpm, WOT with the test engine motoring and firing (a) Motoring (b) Spark at 15°BDTC (c) Spark at 20°BDTC (d) Spark at 25°BDTC (e) Spark at 30°BDTC (f) Spark at 35°BDTC

은 단열 중심 온도보다 무려 112.8K나 높았다. 점화 시기 BTDC 30° 조건인 Fig. 5(e)에서도 비슷한 경향을 보였다. 점화 시기 BTDC 35° 조건인 Fig. 5(f)에서는 다른 점화 시기 조건에 비해 두 온도의 차이가 작았는데, 이는 온도 측정 시점의 연소실 압력이 낮기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 6에 각 점화 시기 조건에서 CARS를 이용하여 측정된 온도의 평균값과 단열 중심 온도와의 차이를 크랭크 각의 함수로 나타내었는데, 노킹 발생 시점보다 약 10° 이른 크랭크 각도에서부터 측정된 온도의 평균값이 단열 중심

온도보다 높아지기 시작함을 볼 수 있다. Fig. 3과 Fig. 6으로부터 화염 전 발열 화학 반응은 노킹이 일어나는 시점으로부터 크랭크각 약 10° 정도 이전부터 나타남을 알 수 있다. 점화 시기를 진각시킬수록 화염 전 반응에 의한 가열 효과가 빨리 시작하여 온도 차이가 이른 크랭크 각도에서 나타났다.

Fig. 7과 Fig. 8은 Fig. 6에서 보여진 온도의 차이를 온도 측정 시점의 연소실 압력과 온도의 함수로 각각 나타낸 것이며 그림에서 추세선은 온도의 차이가 나타나기 시작하는 시점 이후의 데이터들만을 가지고 선형 최소 자승법

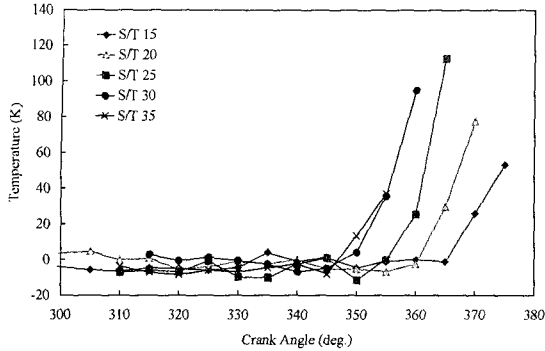


Fig. 6 Difference between measured CARS temperature and adiabatic core temperature as a function of crank angle(S/T:Spark timing, °BDTC)

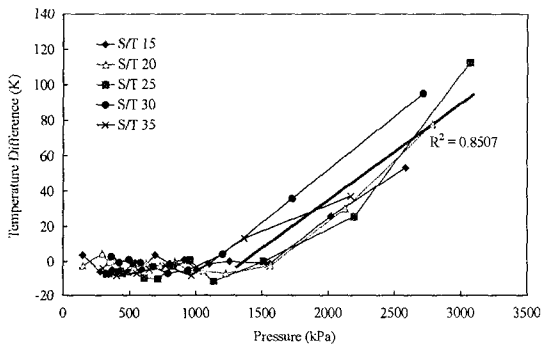


Fig. 7 Difference between measured CARS temperature and adiabatic core temperature as a function of measured pressure(S/T:Spark timing, °BDTC)

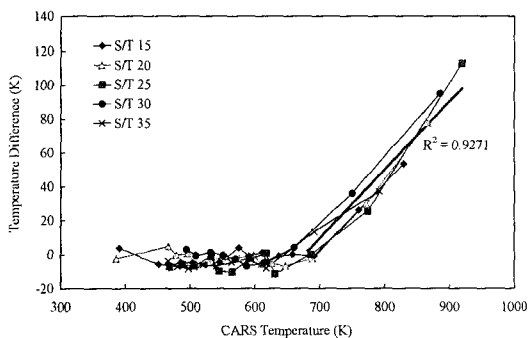


Fig. 8 Difference between measured CARS temperature and adiabatic core temperature as a function of CARS temperature(S/T:Spark timing, °BDTC)

(linear least square fitting)을 사용하여 곡선 맞춤한 것이다.

Fig. 7은 CARS를 이용하여 측정된 온도의 평균값과 단열 중심 온도와의 차이를 연소실 압력의 함수로써 나타낸 것인데, 그림에서 보면 화염 전 화학 반응에 의한 가열 효과가 연소실 압력이 비교적 낮은 범위인 1300~1500kPa일 때부터 나타나기 시작함을 볼 수 있다. 화염 전 화학 반응에 의한 온도 상승이 일어난 이후의 데이터들은 $R^2=0.8507$ 의 상관 관계를 가졌다.

Fig. 8은 두 온도의 차이를 CARS를 이용하여 측정된 온도의 평균값의 함수로 나타낸 것인데, 모든 점화 시기의 운전 조건에서 말단 미연 가스의 온도가 700K 부근에 도달할 때 화염 전 발열 반응으로 인하여 미연 가스의 온도가 상승하기 시작하였다. 발열 반응에 의한 온도 상승이 일어난 이후의 데이터들은 $R^2=0.9271$ 의 높은 상관 관계를 가졌다. 이상의 결과로써 말단 미연 가스의 온도 상승을 유발하는 화염 전 발열 화학 반응은 연소실 압력보다는 온도에 더 큰 상관 관계를 가지며 연소실 온도가 700K에 도달할 때에 그 반응이 시작됨을 알 수 있었다.

스파크 점화 기관의 연소 현상에 대한 정확한 모사(simulation)를 하기 위해서는 화염 전과 과정뿐만 아니라 화염이 도달하지 않은 미연 가스의 저온 화학 반응에 대한 상태 변화를 고려해야 한다. 본 연구의 결과에 의하면, 실제 엔진의 연소실 내에서는 노킹의 발생 유무에 상관없이 온도와 압력이 비교적 낮은 구간에서도 말단 미연 가스의 온도와 상관 관계가 큰 화염 전 발열 화학 반응이 존재한다. 그러므로 보다 정확한 말단 가스 온도 변화를 예측하여 실제 연소실 내부의 상태와 자발화 발생을 우수하게 모사할 수 있는 모델을 개발하기 약 700 K의 온도 영역에서 발생하는 발열 반응에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 이와 더불어서 연소실 내부의 불균일한 조성, 온도장과 같은

국부적인 상태 차이에 의한 열적, 화학적 변화에 관한 모델 또한 필요하다.

4. 결론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 엔진을 모터링 운전하면서 CARS를 이용하여 측정된 연소실 온도는 측정된 압력으로부터 계산된 단열 중심 온도와 잘 일치하였다.
- 2) 압축과정 말기에는 노킹의 발생 유무에 상관 없이 화염 전 화학 반응의 가열 효과에 의하여 연소실 내 말단 미연 가스의 온도가 단열 중심 온도보다 높았다.
- 3) 말단 미연 가스의 온도는 노킹 발생 크랭크 각도 10° 이전부터 단열 중심 온도보다 높아지기 시작하였다. 엔진의 점화 시기를 전각 시킬수록 이 반응에 의한 가열 효과가 빨리 시작하여 두 온도의 차이가 이른 크랭크 각도에서부터 나타났다.
- 4) 말단 가스의 온도가 약 700K에 도달하면 화염 전 화학 반응이 일어나기 시작하여 말단 미연 가스의 온도가 단열 중심 온도보다 높아지기 시작하였다. 이 반응에 의한 온도 상승은 연소실 압력보다는 연소실 내 미연 가스의 온도에 더 높은 상관 관계를 보였다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구수지원비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) R. A. Sterhlow, "Combustion Fundamentals", McGraw Hill, 1985.
- 2) A. C. Eckbreth, "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species", Abacus Press, 1988.
- 3) 레이저 응용 연소진단기술 연구회, "레이저 응용 연소 진단 기술", 1996.
- 4) I. A. Stenhouse, D. R. Williams, J. B. Cole,

and M. D. Swords, "CARS Measurements in an Internal Combustion Engine", Appl. Optics, Vol.18, No.22, pp.3819-3825, 1979.

- 5) D. Klick, K. A. Marko and L. Rimai, "Broadband Single-Pulse CARS Spectra in a Fired Internal Combustion Engine", Appl. Optics, Vol.20, No.7, pp.1178-1181, 1981.
- 6) L. A. Rahn, S. C. Johnston, R. L. Farrow, and P. L. Mattern, "CARS Thermometry in an Internal Combustion Engine", American Institute of Physics, pp.609-613, 1982.
- 7) 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, pp.41-61, 1987.
- 8) D. A. Greenhalgh, D. R. Williams and C. A. Baker, 16th ISATA Conf., Florence, pp.487-508, 1987.
- 9) M. J. Cottreau, F. Grisch, J. J. and Marie, "CARS Measurements of Temperature and Species Concentrations in an IC Engine", Appl. Phys. B 50, pp.63-66, 1990.
- 10) M. Lebel and M. J. Cottreau, "Study of the Effect of the Residual Gas Fraction on Combustion in a S. I. Engine Using Simultaneous CARS Measurements of Temperature and CO₂ Concentration", SAE 922388, 1992.
- 11) P. Bengtsson, L. Martinsson, M. Alden, B. Johansson, K. Marforio and G. Lundholm, "Dual Broadband Rotational CARS Measurements in an IC Engine", 25th Symp. (International) on Combustion, pp.1735-1742, 1994.
- 12) T. Nakada, T. Itoh and Y. Takagi, "Application of CARS to Development of High Compression Ratio Spark Ignition Engine", SAE 932644, 1993.
- 13) D. Bradley, G. T. Kalghatgi, C. Morley, P. Snowdon and J. Yeo, "CARS Temperature Measurement and the Cyclic Dispersion of Knock in Spark Ignition Engine", 25th Symp. (International) on Combustion, 1994.
- 14) G. T. Kalghatgi, M. Golombok and P. Snowdon, "Fuel Effects on Knock, Heat Re-

- lease and "CARS" Temperatures in a Spark Ignition Engine", *Combust. Sci. and Tech.*, Vols.110-111, pp.209-228, 1995.
- 15) D. Bradley, G. T. Kalghatgi, M. Golombok, and J. Yeo, "Heat Release Rates Due to Autoignition, and Their Relationship to Knock Intensity in Spark Ignition Engines", 26th Symp. (International) on Combustion, pp.2653-2660, 1996.
- 16) J. Bood, P. Bengtsson, F. Mauss, K. Burgdorf and I. Denbratt, "Knock in Spark-Ignition Engines: End-Gas Temperature Measurements Using Rotational CARS and Detailed Kinetic Calculations of the Autoignition Process", SAE 971669, 1997.
- 17) 최인용, 전광민, 박철웅, 한재원, "CARS를 이용한 DOHC 스파크 점화 기관의 말단 가스 온도 측정", *자동차공학회논문집*, 제7권 제7호, pp.122-128, 1999.
- 18) K. M. Chun and K. W. Kim, "Measurement and Analysis of Knock in a SI Engine Using the Cylinder Pressure and Block Vibration Signals", SAE 940146, 1994.
- 19) 이택현, "흡기중 수증기 함량이 스파크 점화 기관의 연소와 노킹에 미치는 영향", 연세대학교 산업대학원 석사학위논문, 1997.