

정적 연소실에서 성층화된 혼합기 조건하의 점화 전극 사이 당량비 측정과 연소 특성에 미치는 영향

배상수* · 이기철* · 민경덕†

(2000년 12월 1일 접수, 2001년 8월 14일 심사완료)

Measurements of Equivalence Ratio in the Spark Plug Gap and Its Effects on Combustion Under Stratified Mixture Conditions in a Constant Volume Chamber

Sangsoo Pae, Kichul Lee and Kyoungdoug Min

Key Words: Laser Raman Scattering(레이저 라만 산란), Single-Shot Measurement(단발 측정),
KrF Excimer Laser(KrF 엑시머 레이저), Local Equivalence Ratio(국소 당량비),
Spark Plug(점화 전극), Stratified Mixture(성층화 혼합기)

Abstract

To investigate only the effects of the stratified mixture distribution on initial flame propagation and combustion characteristics, the instantaneous equivalence ratio in the spark plug gap and combustion pressure were measured simultaneously in a constant volume chamber. To induce the stratified propane-air mixture distribution near the spark plug, counter-flow typed mixture injection system was used under the constant mean equivalence ratio $\phi_{mean} = 1.0$. The instantaneous equivalence ratio was measured by a single-shot Raman scattering with narrow-band KrF excimer laser. The measuring error was within the limit of $\pm 3.5\%$ provided that the proposed method was applied to the measured Raman signals. Judging from mass fraction burned derived from the measured pressure, the optimum combustion characteristics were shown under the condition that the local equivalence ratio in the spark plug was near 1.28 ± 0.04 , and these characteristics were more remarkable at the initial stage of combustion.

1. 서론

가솔린 엔진에서 혼합기 형성 과정은 화염핵의 형성 및 발달과 연소 효율에 영향을 주기 때문에, 엔진 성능 및 배출물과 관련하여 중요한 요인 중의 하나이다. 특히 점화 전극 주위의 당량비는 난류 강도와 더불어 사이클 변동과 밀접한 관계가 있다.^(1~3) 이러한 점화 전극 주위의 성층화된 당량비 분포는 최근 이산화탄소 배출의 규

제가 강화됨에 따라 활발한 연구가 진행중인 희박 연소나 직접 분사식 가솔린 엔진 뿐만 아니라,⁽⁴⁾ 일반적인 포트 분사형 가솔린 엔진에서도 최적의 성층화 조건의 결정과 사이클 변동의 최소화라는 관점에서 연소 특성간의 관계를 파악하는 것은 매우 중요하다.^(4,5)

일반적으로 이러한 성층화 혼합기 분포는 난류 강도 등과 같은 유동 특성에 의하여 결정되기 때문에,⁽²⁾ 당량비와 유동 특성이 연소 특성에 미치는 영향을 개별적으로 분리하여 고찰하는 것이 요구된다.⁽⁵⁾ 특히 점화시의 당량비, 다시 말하여 점화 전극 간극에서의 당량비는 이후 연소 과정을 지배하는 주된 인자이기 때문에,^(1~3,5) 성층화 혼합기 분포를 형성하는 과정을 이해하기 위한 대표값으로 사용하여 왔다. 이를 측정하기 위한

* 회원, 현대·기아연구 개발본부 디젤엔진시험팀
† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
Email : kadmin@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1661 FAX : (02)883-0179

방법은 크게 가스 채취법⁽⁶⁾과 레이저 진단법으로 분류될 수 있고, 후자는 주로 레이저 유도 형광법^(7,8)이나 라만 산란법^(5,9~12)이 주로 이용되고 있다. 이 중 라만 산란법은 한번의 레이저 입사로 여러 분자들의 농도를 동시에 측정할 수 있으므로,⁽¹³⁾ 잔류 가스의 측정도 가능하다는 특징을 지닌다.^(10,11) 그러나 기존의 연구들은 대부분 당량비 측정을 위한 새로운 방법이라는 관점에 초점을 맞추어, 측정된 당량비를 최적의 성층화 분포나 최소 사이클 변동과 관련시킨 연구는 상대적으로 부진한 실정이다. 특히 성층화 조건에서의 화염 전파 특성은 균일한 경우와 연소 특성이 다르기 때문에⁽⁵⁾ 최적의 점화 전극에서의 당량비 조건은 단순히 균일한 경우의 최대 층류화염속도를 가지는 당량비와는 차이가 있다고 알려져 있다.

이에 본 연구에서는 정적 연소실에서 프로판을 연료로, 라만 산란법에 의한 점화 전극 사이에서의 당량비와 연소실 압력을 동시에 측정함으로써, 성층화 조건에서 최적의 점화 전극 사이에서의 당량비를 고찰하여, 성층화 연소 방식의 엔진 설계시 최적의 혼합기 분포 제어를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다. 이를 위하여 통상적인 포트 분사형 엔진이나 회박 연소 혹은 직접 분사식 가솔린 엔진의 고부하 운전 조건⁽⁴⁾인 평균 당량비 $\phi_{mean} = 1.0$ 으로 일정하게 유지하면서 대향식 분사 장치로 농후한 혼합기와 공기를 동시에 분사함으로써, 성층화 혼합기를 유도하였다.

2. 라만 산란법에 의한 당량비 측정

2.1 라만 산란 신호의 구성

라만 산란은 Fig. 1에서 보듯이 혼합기에 존재하는 분자들에 따라 입사된 레이저의 파장과 다른 파장으로 산란되는 비탄성 산란이다.⁽¹³⁾

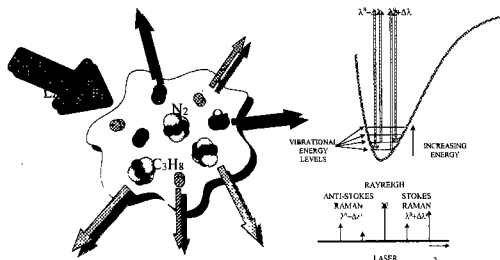


Fig. 1 Schematic diagram of Raman scattering process

이러한 비탄성 산란 특성은 Fig. 1에서 보듯이 혼합기에 존재하는 분자들의 회전 및 진동 에너지 분포 양상의 차이에 기인하는 것으로, 한번의 레이저 입사에 의하여 여러 가지 분자들의 농도를 동시에 측정할 수 있다. 이 때 측정하려는 i -분자의 라만 산란 신호 강도 I_i 는 입사된 레이저 광의 세기 I_0 와 측정하려는 i -분자의 수밀도 (number density) n_i 및 산란 단면적 $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_i$ 에 대해서 식 (1)과 같은 관계가 있다.^(5,13)

$$I_i \propto I_0 n_i \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_i \quad (1)$$

2.2 정량화된 당량비 측정

본 연구에서는 질소와 프로판의 라만 신호만을 이용하여 당량비를 측정하였는데, 산소 분자의 라만 신호는 다른 분자에 의한 간섭에 의한 영향이 크기 때문이다.⁽⁵⁾ 따라서, 식 (2)와 같이 프로판과 질소의 라만 신호비와 산란 단면적비를 이용하여 당량비를 입사된 레이저의 강도 변화와 무관하게 측정할 수 있다. 또한 온도 범위가 제한적(300~700K)이라면, 산란 단면적의 온도에 의한 변화도 무시될 수 있다. 결국 정확한 당량비의 측정을 위해서는 적절한 라만 신호의 처리 방법과 산란단면적의 결정이 필요하다. 특히 Table 1에서 보듯이 프로판의 산란단면적은 연구자들에 따른 편차가 크다.

$$\phi = 18.865 \times \left(\frac{I_p}{I_{N_2}} \right) \cdot \frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{N_2}}{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_p} \quad (2)$$

Table 1 Normalized Raman scattering cross sections for various molecules excited by 248nm laser

Species	Raman Shift (cm ⁻¹)	Normalized Raman Scattering Cross Sections				
		1	1	1	1	1
N ₂	2331	1	1	1	1	1
O ₂	1556	1.28	1.04	1.17	2.53	1.31
CO ₂	1388	1.16	1.09	1.25	1.21	-
	1285	0.85	0.70	0.92	1.89	-
H ₂ O	3657	2.37	3.20	2.58	-	-
	2890	6.78	5.26	27.17	-	-
C ₃ H ₈	1465	2.72	-	-	-	-
	857	1.60	-	-	-	-
Reference		14	15	16	17	13

먼저 단발(single-shot) 측정시의 라만 신호의 처리를 위해서는 신호 특성상 Q-가지에서의 최대 신호 외에도 S-가지나 O-가지에 의한 신호 성분도 포함하여 적분하는 것^(9~11)이 유리하며, 그 적분구간은 산란단면적의 결정과 관련된다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 적분 구간 및 산란 단면적비는 당량비 추정 오차가 최소가 되도록 선정하였다.⁽⁵⁾ 이 때 적분 구간 폭은 Table 1에 나타난 Q-가지 라만 이동을 중심으로 질소는 230cm^{-1} , 프로판은 102cm^{-1} 이고, 산란 단면적비는 $27.17^{(16)}$ 이며, 당량비 추정 오차는 $\pm 3.5\%$ 이다.⁽⁵⁾

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

직경 80mm, 길이 110mm인 정적 연소실에 KrF 엑시머 레이저의 입사장은 MgF_2 로, 관측창은 석영으로 제작하여 장착하였다. 또한 점화 전극 주위에 성층화된 혼합기를 유도하기 위하여 솔레노이드 밸브로 구동되는 대향식 분사 장치를 설치하여, 농후한 혼합기 혹은 공기를 분사시킬 수 있도록 하였다. 이 때 분사 장치는 점화 전극에 대하여 대략 45° 로 마주 보도록 설치하였다.^(5,12) 이 분사 장치를 이용하여 점화 전극 주위의 당량비 분포는 일정하면서, 그 사이의 당량비만 변화시키는 것이 가능하였다. 한편 Fig. 2에 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도를 표시하였다.

3.2 실험방법

먼저 Fig. 2의 혼합실과 부혼합실에 각각

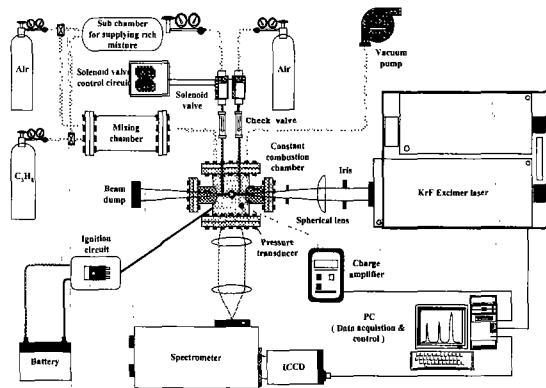


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

$\phi=1.0$ 과 $\phi=2.1$ 인 혼합기를 제조한 뒤, 정적 연소실에 $\phi=1.0$ 인 혼합기를 0.3MPa 로 충전한다. 이후 대향식 분사장치로 $\phi=2.1$ 인 혼합기와 공기를 분사하여 성층화 혼합기 분포를 유도한 뒤, 점화 직전 KrF 엑시머 레이저를 점화 전극 사이에 입사시켜 발생되는 라만 산란 신호를 분광기를 이용하여 측정하였다. 이 때 당량비는 Fig. 3에서 보듯이 점화 전극을 중심으로 레이저 입사 방향으로 0.03mm , 수직 방향으로는 분광기의 슬릿 폭인 4mm 인 영역에서 측정된다. 이후 점화 신호를 인가하여 점화시킨 뒤 연소 압력을 측정하였다. 한편 유동의 영향을 최소화하고, 안정된 점화를 위하여 적절한 점화 시기의 선정이 필요한데,⁽⁵⁾ 본 연구에서는 분사 종료 후 18ms 로 하였다. 실험을 위한 레이저, ICCD 카메라 및 압력 등의 모든 장치와 측정 작업은 2대의 지연 신호 발생기(delay generator)에 의하여 점화 신호에 동기시켰다.⁽⁵⁾

또한 대향식 분사 장치에 의한 난류의 영향을 고찰하기 위하여, 정적 연소실에 미리 충전시킨 혼합기와 동일한 당량비의 혼합기를 분사시키고, 분사 완료 후 점화 시간의 변화에 따른 압력을 측정하여, 그 결과를 최적의 당량비 결정시 난류의 영향을 보정하는 데 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 점화 시기의 선정 및 난류의 영향

적절한 점화 시기의 선정은 안정된 점화 및 유도된 난류 강도 영향의 최소화 뿐만 아니라 성층화 혼합기 분포의 형성이라는 측면에서 매우 중

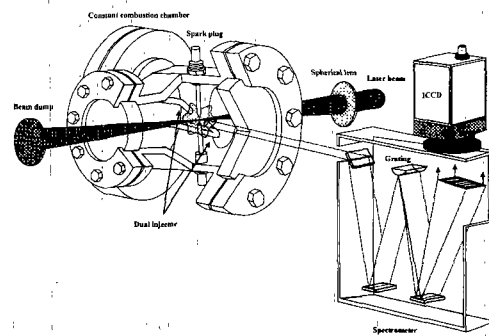


Fig. 3 Schematic diagram of measuring position and spectrometer

요하다. 특히 난류 강도의 영향은 분사 후 동일한 시점에서 점화하면 그 영향은 거의 일정하다. 또한 본 연구에서 추구하는 유동의 영향을 배제하고 당량비만의 영향을 고찰하거나 일정한 성층화 혼합기 분포 조건에서 점화 전극 사이의 당량비만 변화될 수 있도록 대향식 분사 장치에 의한 분사 종료 후 적절한 점화 시기를 선정하는 것이 필요하다.

먼저 일정한 당량비의 혼합기를 충전한 뒤, 이와 동일한 당량비의 혼합기를 분사시켜 점화시기의 변화에 따른 유동의 영향을 고찰하였는데, 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4는 $\phi = 1.2$ 로 균일한 혼합기를 정적 연소실에 충전한 뒤, 대향식 분사 장치를 이용하여 동일한 당량비의 혼합기를 분사한 경우와 분사하지 않은 경우에 대하여 점화 후 8ms에서의 CH 라디칼의 화학 발광 신호로부터 얻어진 화염 사진과 압력을 비교한 것이다. 특히 전자의 경우는 분사 종료 후 점화 시기를 각각 6ms(case 1), 12ms, 18ms(case 2)와 24ms(case 3)로 변화시키면서 그 영향을 고찰하였다. 분사 후 점화 시기가 빠를수록 대향식 분사 장치에 의하여 유입된 난류

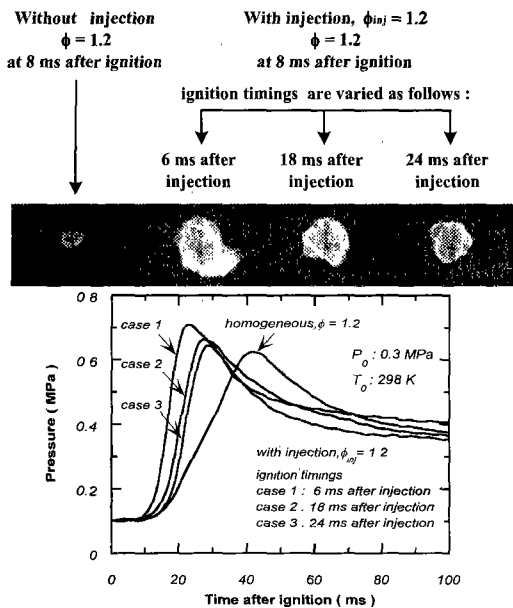


Fig. 4 Comparison of pressure-time histories and images of flames between homogeneous and heterogeneous conditions induced by injecting the same ϕ as that of the initially-charged mixture as the spark timings are varied after injection

의 영향으로, 분사 장치를 이용하지 않은 경우에 비하여 화염면의 찌그러짐(wrinkle) 및 초기 압력 상승률도 증가한다. 그러나 분사 후 24ms 이후에는 이러한 현상이 감소할 뿐만 아니라, 분사 장치에 의하여 성층화된 혼합기의 분포가 거의 형성되지 않는다.⁽⁵⁾

또한 Fig. 4에서 측정된 압력으로부터 계산된 특정 질량 연소율까지 도달 시간을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 앞서 언급하였듯이 대향식 분사 장치를 이용할지라도 당량비는 $\phi = 1.2$ 로 동일하므로, 대향식 분사 장치에 의해 유입된 난류의 영향만을 비교할 수 있다. 특히 이러한 영향은 초기 연소 속도보다는 연소 중반이나 후반으로 갈수록 지배적이므로,^(1,2) 분사 장치를 이용하지 않은 경우와 비교할 때 질량 연소율이 50%와 90%까지의 도달시간의 감소가 10%까지의 도달시간 감소보다 더 크다. 따라서 성층화 연소시 초기 연소는 당량비로, 중반과 후반의 연소는 적절한 유동 조건에 의하여 최적화될 수 있음을 알 수 있다. 또한 질량 연소율이 10%에 도달할 때까지의 시간을 보면, 점화 시기가 24ms에서는 대향식 분사 장치를 이용하지 않은 경우와 큰 차이가 없기 때문에, 성층화된 혼합기 분포도 유도하기 어렵게 된다.

따라서 점화 시기는 대향식 분사 장치에 의한 분사 종료 후 18ms로 선정하는 것은 타당하며, 이 때 분사 장치에 의하여 유입된 난류에 의한 연소 속도의 증가는 질량 연소율이 10%, 50% 및 90%이 되는 시간으로부터 알 수 있으며, 분사 장치를 사용하지 않은 경우에 비하여 각각 15%,

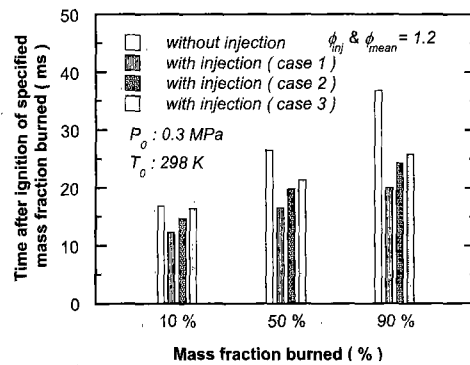


Fig. 5 Comparison of times after ignition at the specified mass fraction burned as the spark timings are varied after injection

25% 및 31% 이다. 한편 정적 연소실에 충전 및 분사한 혼합기의 당량비를 $\phi = 0.9, 1.0, 1.1$ 로 변화시키면서 동일한 방법으로 그 영향을 고찰하였는데, 대향식 분사 장치에 의하여 유입된 난류에 의한 연소 속도의 증가에 미치는 영향은 거의 동일하였다. 따라서, 이후 점화 전극 사이의 측정된 당량비와 특정 질량 연소율에 도달하는 시간을 비교시 앞서 언급한 분사 장치에 의하여 증가한 비율만큼 고려함으로써, 분사 장치를 사용하지 않은 경우에 난류의 영향을 포함시켜 비교하는 것은 타당하다고 사료된다.

4.2 시·공간적인 당량비 변동의 영향

점화 전극 사이에서의 당량비는 점화 직전 약 1ms 이전에 측정되므로,⁽⁵⁾ 측정된 당량비와 실제 점화된 혼합기의 당량비간에 차이가 생길 수 있다. 이는 앞서 언급한 성층화된 혼합기 분포가 일정하더라도 점화 전극 사이에서의 당량비만을 변화시킬 수 있는 점화 시기의 선정과도 관련된다. 이러한 특성을 고찰하기 위하여 대향식 분사 장치에 의한 분사 후 시간의 경과에 따라 레일리 산란법(Rayleigh scattering)에 의하여 2차원 당량비 분포를 측정⁽¹⁴⁾한 뒤 점화 전극을 중심으로 각 방향으로 -10mm~+10mm 영역의 평균값을 측정하여 Fig. 6에 그 결과를 나타내었다. 이 때 시간별 10개 이미지 평균으로 당량비를 구하였다.

먼저 농후 혼합기와 공기의 분사에 의하여 측 방향인 Z 방향을 제외하면 분사 후 18ms 이후의 시간에 따른 당량비의 변동은 거의 없기 때문에

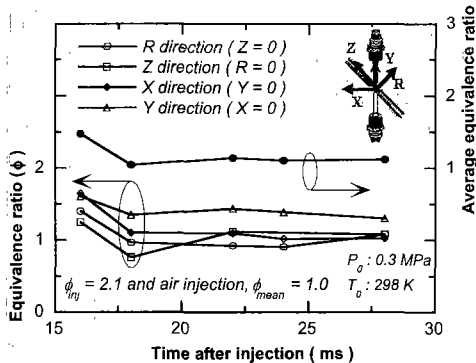


Fig. 6 Characteristics of time-varying ϕ averaged in constant region near spark plug gap to each direction

점화 전극 사이에서 측정된 당량비는 점화 시의 당량비를 대표한다고 말할 수 있다. 또한 성층화된 혼합기 분포도 18ms 이후에는 분사된 농후 혼합기와 공기와의 충돌에 의하여 당량비의 변화가 큰 Z 방향을 제외하고는 거의 일정함을 알 수 있다.⁽⁵⁾

따라서 본 연구에서 수행한 라만 산란에 의한 점화 전극 사이에서의 측정된 당량비는 시·공간적으로 성층화된 혼합기 분포하에서 점화 직전의 당량비라고 간주하는 것은 타당하며, 이 때 성층화된 혼합기의 분포는 거의 동일한 조건에서 측정된다고 판단된다.

4.3 단발 측정에 의한 영향

점화 전극 사이에서의 당량비 측정시 그 신뢰성을 검토하기 위하여, $\phi = 1.0$ 으로 일정하게 충전한 뒤, 연속적인 단발로 50회 측정하였는데, 그 결과의 히스토그램을 Fig. 7에 나타내었다.

연속적인 단발 측정에 의하여 측정 후반부로 갈수록 레이저에 의한 혼합기의 온도가 상승되므로 오차가 커지기 때문에, 농후하게 측정된 결과도 보이고 있다.⁽¹²⁾ 그러나 평균값 및 표준 편차로 판단하건대, 96%의 신뢰구간에서 측정시 오차는 대략 $\pm 3.5\%$ 로, 앞서 결정된 신호 처리시의 오차 범위와 거의 일치한다. 이러한 결과로 판단하건대 본 연구에서 사용한 단발 및 당량비 측정법은 타당하다고 사료된다.

4.4 순간 당량비와 연소 특성

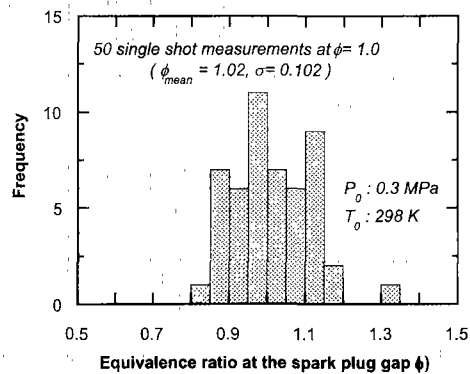


Fig. 7 Histogram of the estimated ϕ between the spark plug gaps derived by 50 single-shot Raman scattering method under $\phi = 1.0$

Fig. 8은 라만 산란법으로 측정된 점화 전극 사이에서의 당량비와 측정된 연소실 압력으로부터 계산된 10%, 50% 및 90%의 질량 연소율까지 도달 시간을 비교한 것이다. 앞서 언급하였듯이 분사 장치에 의한 난류의 영향을 보정한 균일한 혼합기 조건과 비교할 때, 초기 화염 전파 속도와 관련된 10% 질량 연소율에서의 연소 속도 상승이 50%나 90%에 비하여 더 크며, 90%까지의 질량 연소율은 성층화된 혼합기와 균일한 혼합기간의 차이가 거의 없다. 이는 성층화 혼합기의 형성은 사이클 변동과 관련된 초기 화염 발달에 주로 영향을 주며, 이후에는 성층화 조건보다 유동에 의하여 지배된다는 사실을 의미한다.^(1,2,5) 또한 동일한 질량 연소율에 대하여 성층화된 혼합기하에서 점화 전극 사이의 당량비가 $\phi=0.7$ 이하의 희박한 경우에는 연소 초기에서도 성층화된 혼합기에 의한 영향이 거의 없어서 균일한 혼합기 조건과 질량연소율에 있어 큰 차이가 없으나, 점차로 점화 전극 사이의 당량비가 농후해짐에 따라 성층화로 인한 연소 속도의 상승 효과가 나타난다.

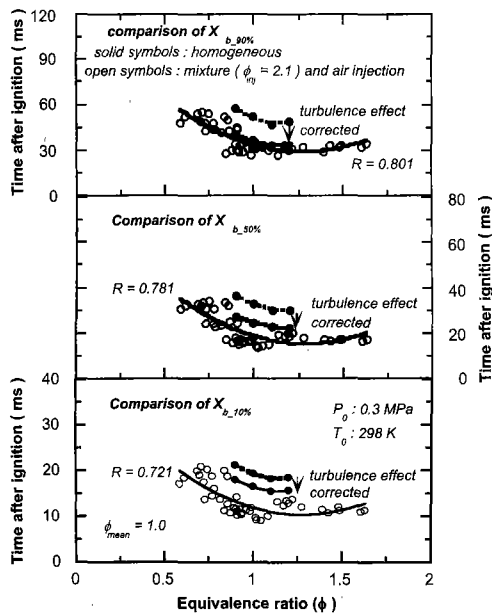


Fig. 8 Relations between time after ignition at the specified mass fraction burned and equivalence ratios measured by single-shot Raman scattering in the spark plug gap

다. 특히 이를 2차 함수로 곡선 맞춤(curve fitting)한 결과 가장 빠른 질량 연소율을 보이는 성층화 혼합기 조건에서 점화 전극 사이의 당량비는 대략 1.28 ± 0.04 로, 프로판을 포함한 다른 파라핀계 연료들의 최대 층류 화염 속도를 가지는 당량비인 1.1 근처보다 약간 더 농후하다. 이는 성층화 시 점화 직후 화염이 가속되어 그 전파 속도가 증가되기 위해서는 점화 전극에서의 당량비가 1.1보다 큰 조건에서 점화되어야 점화 이후 화염이 전파되면서 가속될 수 있기 때문이며, 층류 1차원 화염 전파 특성을 계산한 결과도 평균 당량비가 1.0에서 성층화 시 최대 화염 전파 속도를 가지는 당량비는 1.1~1.3의 범위로, 본 연구에서 측정된 결과와 유사하다.⁽⁵⁾

이로부터 프로판/공기 혼합기의 층류 화염 특성은 이소 옥탄이나 상용 가솔린 등의 특성과 유사하기 때문에, 성층화 방식의 엔진 설계시 평균 당량비가 이론 당량비로 운전될 조건에서 초기 질량 연소율을 향상시키기 위해서는 점화 전극 사이의 당량비가 대략 1.2와 1.3 사이에 존재하도록 혼합기 분포를 제어하는 것이 유효할 것으로 사료된다.

5. 결론

프로판/공기의 성층화 혼합기 분포하에서 최적의 점화 전극 사이의 당량비 조건을 고찰하기 위하여 정적 연소실에서 대향식 분사 장치에 의하여 성층화 혼합기를 유도하여 라만 산란법으로 순간 당량비를 측정하고, 동시에 연소실 압력도 측정하였다. 이 때 라만 산란 신호의 처리는 적분 구간 및 산란 단면적비를 결정하여 적용하였고, 대향식 분사 장치에 의한 난류의 영향을 보정하기 위한 적절한 점화 시기를 선정된 뒤, 측정된 점화 간극 사이에서의 당량비와 질량 연소율간의 관계를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 프로판과 질소의 라만 신호 처리시 적분 구간은 Q-가지 라만 이동에 대해서 각각 102cm^{-1} , 230cm^{-1} , 산란 단면적비는 27.17로 하였을 때 단발 측정시 오차는 $\pm 3.5\%$ 이다.

(2) 성층화 혼합기 분포하에서의 화염 전파 속도는 초기에는 점화 전극 사이의 당량비에 가장 큰 영향을 받고, 이후에는 주로 유동에 지배된다.

(3) 본 연구에서 고찰한 성층화 혼합기 분포하에서 평균 당량비가 이론 당량비일 때 초기 연소 속도가 가장 빠른 점화 전극 사이의 당량비는 1.28 ± 0.04 이다. 이는 점화 후 화염이 당량비가 1.1이 될 때까지 성층화 혼합기하에서 가속될 수 있기 때문이다.

후 기

본 연구를 수행하는 데 많은 도움을 주신 고등기술연구원의 남기중 박사님 이하 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Heywood J.B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, pp. 413~423.
- (2) Johansson B., 1996, "Cycle to Cycle Variations in SI Engines-The Effects of Fluid Flow and Gas Composition in the Vicinity of the Spark Plug on Early Combustion," SAE Paper 960284.
- (3) Ozdor, N. Dulger, M., and Sher, M., 1994, "Cyclic Variability in Spark Ignition Engines A Literature Survey," *SAE Trans.* Vol. 103 Section 3, SAE Paper 940987.
- (4) Zhao, F.Q., Lai, M.C., and Harrington, D.L., 1997, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct Injection Gasoline Engines," *Trans. Journal of Engines*, SAE Paper 970627.
- (5) 배상수, 1999, 정적 연소실에서 프로판/공기 혼합기의 농도 구배가 화염 전파에 미치는 영향, 공학박사학위논문, 서울대학교.
- (6) Cho, H., Lee, J., and Lee, K., 1998, "Measurements of HC Concentration near Spark Plug and Its Effects on Combustion," SAE Paper 981431.
- (7) Johansson, B., Nell, H., Alden, M., and Juhlin, G., 1995, "Investigations of the Influence of Mixture Preparation on Cyclic Variations in a SI-Engine, Using Laser Induced Fluorescence," SAE Paper 950108.
- (8) Ghandhi, J.B., and Bracco, F.V., 1996, "Mixture Preparation Effects on Ignition and Combustion in a Direct-Injection Spark-Ignition Engine," SAE Paper 962013.
- (9) Knapp, M., Luczak, A., Beushausen, V. and Hentschel, W., and Andresen, P., 1997, "In-Cylinder Mixture Formation Analysis with Spontaneous Raman Scattering Applied to a Mass-Production SI Engines," SAE Paper 970827.
- (10) Miles, P.C., and Hinze, P.C., 1998, "Characterization of the Mixing of Fresh Charge with Combustion Residuals Using Laser Raman Scattering with Broadband Detection," SAE Paper 981428.
- (11) Miles, P.C., 1999, "Raman line Imaging for Spatially and Temporally Resolved Mole Fraction Measurements in Internal Combustion Engines," *Applied Optics*, Vol. 38, No. 9, pp. 1714~1732.
- (12) 이기철, 1999, 정적 연소실에서 라만 산란 신호를 이용한 순간적인 국소 공연비 측정, 공학석사학위논문, 서울대학교.
- (13) Eckbreth, A.C., 1996, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, 2nd Edition, Gordon and Breach Publishers.
- (14) Zhao, H., and Ladommatos, N., 1998, "Optical Diagnostics for In-Cylinder Mixture Formation Measurements in IC Engines," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 24, pp. 297~336.
- (15) Masri, A.R., Dibble, R.W., and Barlow, R.S., 1996, "The Structure of Turbulent Nonpremixed Flames Revealed by Raman-Rayleigh-LIF Measurements," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 22, pp. 307~362.
- (16) Rothe, E.W., and Andresen, P., 1997, "Application of Tuneable Excimer Lasers to Combustion Diagnostics: A Review," *Applied Optics*, Vol. 36, No. 18, pp. 3971~4033.
- (17) Iinuma K., Asanuma, T., Ohsawa, T., and Doi, J., 1987, *Laser Diagnostics and Modeling of Combustion*, Springer-Verlag, pp. 136~137.