

## UV Laser Raman Scattering을 이용한 정적 연소기내 분사된 연료의 정량적 당량비 측정에 관한 연구

### A Study on Quantitative Measurements of Equivalence Ratio in Constant Volume Chamber Using UV Laser Raman Scattering

진성호\*, 허형석\*, 김경수\*\*, 박경석\*\*\*

S. H. Jin, H. S. Heo, G. S. Kim and K. S. Park

#### ABSTRACT

Laser Raman scattering method has been applied to measure equivalence ratio of methane/air and propane/air mixture in constant volume combustion chamber. We used high power KrF excimer laser ( $\lambda=248\text{nm}$ ) and a high gain ICCD camera to capture low intensity Raman signal. Raman shifts and Raman cross-sections of  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{C}_3\text{H}_8$  were measured precisely. Our results showed an excellent agreement with other groups. Mole fraction measurement of  $\text{O}_2$  and  $\text{N}_2$  from air showed that  $\text{O}_2 : \text{N}_2 = 0.206 : 0.794$ .

We used constant volume combustion chamber and gas injector which is operated at 5~10barg. Methane and propane are used as a fuel. 50 Raman signal are obtained and ensemble averaged for measurement of equivalence ratio. Our measured results showed that the equivalence ratio of fuel/air mixture is reasonable at  $\pm 5\%$  error range.

주요기술용어 : Raman Scattering(라만 산란), Equivalence Ratio(당량비), Mole Fraction(몰분율)

#### 1. 서론

환경 오염 문제가 전세계적으로 대두되면서 보일러, 발전 설비, 엔진(가솔린, 디젤) 등으로 부터의 대기 오염 물질의 방출은 심각한 사회 문제를 야기시키게 되었다. 연소 관련 설비가 대기 오염의 주원인임을 실감하면서 연소 관련 설비의 최적 설계는 연료의 고 효율화와 더불어 배기 가스의 최소화라는 상반된 명제를 해결해야 하는 시점에 이르게 되었다.

배기 가스의 최소화를 위해서는 촉매 장치물 이용한  $\text{NO}_x$  및  $\text{SO}_x$ 의 제거 기술이 후처리 기술로 계속적인 연구 개발 상태에 있으며, 전처리 기술로 엔진 실린더 내의 연소 과정 규명에 의한 원천적 배기 가스 저감을 위해 레이저를 이용한 연소 진단 기술이 선을 보이기 시작했다. 이러한 일련의 과정 중에 미국을 위시한 선진국에서는 배기 가스의 규제를 시행하게 되었으며, 전세계적으로 배기 가스의 최소화와 고 효율화를 달성하기 위해 초 회박 엔진의 개발 등을 경쟁적으로 진행하고 있는 실정이다.

미국, 독일 등에서는 Laser Induced Fluorescence 및 Laser Rayleigh Scattering을 이용하여 공연비를 측정하는 연구를 수행하였다<sup>(1)-(5)</sup>. Laser Raman Scattering을 이용한 공연비 측정 연구는 최근, 미국 Sandia

\* 경희대학교 대학원

\*\* 한국생산기술연구원

\*\*\* 정희원, 경희대학교 기계·산업 시스템  
공학부

Laboratory의 P. Miles<sup>(6)</sup> 등이 Nd:YAG 레이저(532nm)를 이용하여 단기봉 가시화 엔진내 연소 가스의 물분율을 측정하였다. 독일 Bielefeld 대학의 P. Andresen<sup>(7)</sup> 등은 narrowband KrF 엑시머 레이저(248nm)를 이용하여 가시화 엔진내 미연 혼합기의 물분율을 측정하였고 RWTH Aachen의 Heinze<sup>(8)</sup> 등은 XeCl 엑시머 레이저(308nm)를 사용하여 정적 용기내 분사된 디젤 분무의 당량비를 측정하는데 성공하였다. 그러나, 국내에서 지금까지 미연 혼합기의 정량적인 공연비를 측정하는 연구<sup>(12)~(14)</sup>는 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 연소실 내의 공연비 측정 기법 개발에 주안점을 두고 시간적 공간적으로 높은 분해능을 갖는 레이저 Raman 산란을 이용하여 연소실내의 공연비 측정을 위한 이론적 또는 실험적 기반을 확립하였다. 또한, 순수 가스, 공기 및 엔진 연소실을 모사한 정적 연소기를 이용하여 정량적인 공연비 측정 기술을 수립하였다.

## 2. 측정 이론

Raman 산란광은 레이저 빛내의 광자와 분자간에 발생된 비탄성 충돌의 결과로 나타나는 임의적 산란으로 광자와 분자간의 에너지 교환에 따라 Stokes Raman 산란과 Anti-Stokes Raman 산란으로 구분할 수 있다. Stokes Raman 산란은 분자가 광자로부터 에너지를 받아 분자 자체의 에너지는 상승하고 산란되는 빛의 파장은 크게 되는 현상이고, Anti-Stokes Raman 산란은 이와는 반대로 분자가 에너지를 잃어버려 산란되는 빛의 파장이 작게 나타나는 현상이다. 분자가 에너지를 방출하기 위해서는 충돌 전의 분자의 에너지가 들뜬 상태에 있어야만 가능하므로 Anti-Stokes Raman 산란은 분자의 온도가 어느 정도 높은 상태일 때만 가능하다. Fig. 1에 Raman 산란의 기본적인 개략도를 표시하였다.

임의의 가스 분자에 대한 Raman 산란 강도는 다음과 같다.

$$S_i = C \cdot I_o \cdot n_i \cdot \sigma_{ri} \quad (1)$$

여기서,  $S_i$ 는 Raman 산란 강도,  $C$ 는 광학 상수,  $I_o$ 는 레이저 세기,  $n_i$ 는 물분율이고  $\sigma_{ri}$ 는 임의의 가스 분자의 Raman 산란 단면적이다. 비연소 및 연소 가스의 공연비는 공기와 연료 2 성분만의 물분율로 표시할 수 있고, 물분율은 이 성분들 각각의 첨자를  $a, f$ 로 표시하여 그 Raman 산란 강도비를 계산하면 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\frac{n_a}{n_f} = \left( \frac{S_a}{S_f} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_{rf}}{\sigma_{ra}} \right) \quad (2)$$

식 (2)에 표시한 바와 같이 각각의 가스 분자들의 Raman 산란 강도비에 Raman 산란 단면적을 곱하여 물분율을 구할 수 있고 이를 통하여 가스 분자들의 질량비 또는 공연비를 계산할 수 있다.

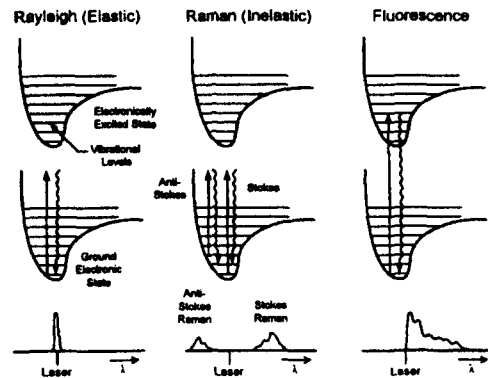


Fig. 1 Schematic diagram of light scattering process and spectra

## 3. 실험 장치 및 방법

Fig. 2에 본 연구에 이용한 실험장치의 개략도를 표시하였다. 레이저는 248nm의 발진 파장과 450mJ의 펄스 에너지 및 20ns의 펄스 폭을 갖는 KrF 엑시머 레이저(Lambda Physik, COMPex-205)로서 발진된 레이저빔은 볼록 렌즈(초점거리:500mm) 및 공간 필터에 의해 집중된 후, 정적 연소기내에 입사되게 하였다. 입사 레이저광에 기인하는 미광과 잡음을 제거하기

위하여 레이저광의 입구측에 슬릿을 설치하였고, 정적 연소기를 통과한 레이저광은 에너지 측정기로 펄스 에너지를 측정하여 이에 대한 보정을 행하였다. 또한, 레이저 빔을 정적 연소기내에 입사시킬 때, 광 집속이 이루어지는 부분에 있어서의 air breakdown에 의해 Raman 산란 신호가 영향을 받는 것을 방지하기 위하여 초점 거리에서 5cm 떨어진 부분에 정적 연소기를 위치시켰다. 측정 부분으로부터의 Raman 산란 신호는 레이저광과 수직으로 설치된 렌즈( $f/\#=2$ )에 의해 영상 분광기(Acton, SpectraPro-500)의 입구 슬릿(100 $\mu\text{m}$ )에 집광하고 intensified CCD 카메라(Princeton Instruments, ICCD 576G/RB-E)로 감지하여 스펙트럼 분석을 행하였다.

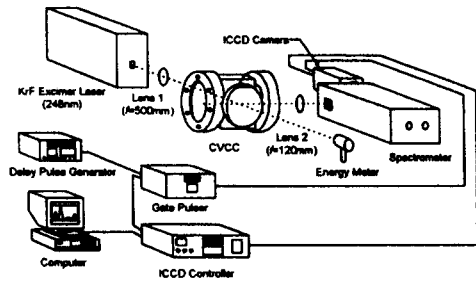


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

산란광 측정시 주위의 광에 의한 잡신호를 제거하기 위하여 ICCD 카메라의 gate width를 100ns, CCD의 노출 시간을 1초로 설정하여 계측하였다. Fig. 2에 표시한 바와 같이 지연 펄스 발생기(Stanford Research Systems, DG-535)에서 발생하는 TTL 펄스 신호를 계측 시스템 전체의 동기 제어의 기준으로 했다. 지연 펄스 발생기의 1번 채널의 펄스 신호는 MCP gate pulser에 입력하여 ICCD의 제어용으로 사용했고 2번 채널의 출력 펄스는 레이저의 제어용으로 사용했으며 3번 및 4번 채널의 출력 펄스는 정적 연소기내 분무 시기와 분무 기간을 제어하는데 사용했다. 측정 기기 각각의 작동 지연 등을 고려하여 각 채널들의 동작

시간값을 설정한 후, 각 기기의 컨트롤러를 조정했다. 이상의 동기 제어에 의해 KrF 엑시머 레이저로부터 발진된 빔을 정적 연소기 내에 조사하면, 그 직전에 MCP의 gate가 열려 Raman 신호를 포착하고 이미 대기 상태로 있는 CCD 카메라 및 영상 분광기에서 스펙트럼을 기록하도록 하였다.

본 실험에 사용된 정적 연소기는 연료 가스를 포함한 여러 가지 가스 분자들의 Raman 산란 단면적, 기지 농도의 혼합기 및 미지 농도로 섞여있는 혼합기의 당량비를 측정하기 위하여 사용되었다. 레이저 빔의 입·출구측에 직경 2"의 석영 창이 2개 그리고 ICCD 카메라 및 영상 분광기로 산란 신호를 측정하기 위한 부분에 직경 4"의 석영 창이 2개 부착되었으며 전체 체적은 594cc이다.

정적 연소기내 공연비를 측정하기 위해 사용된 인젝터는 상용 가스 분사 솔레노이드 밸브 형태이다. 연료로는 순수한 메탄( $\text{CH}_4$ ) 및 프로판( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) 가스를 사용하였고 분사 압력은 5~10barg까지 2.5barg 단위로 변화시켰으며, 분사 기간은 15~30ms까지 5ms 단위로 변화시키면서 분사시켰다. 이 상태에서 정적 연소기내에 분사된 연료 가스를 공기와 완전하게 혼합이 되도록 교반시킨 후, 혼합기의 Raman 산란 신호는 50개를 합산하고 산술 평균한 값을 취득하였고 또한, 측정 기기의 암전류에 의한 자체 노이즈 성분을 제거하여 순수한 Raman 산란 신호만을 측정하도록 하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

이론식에서 볼 수 있는 것처럼 순수한 가스 성분의 Raman 신호는 입사되는 레이저의 강도와 가스의 농도 그리고 각각의 Raman 산란 단면적에 비례한다. 따라서 동일한 조건(레이저의 강도, 온도, 압력)에서는 가스마다 이 산란 단면적이 다르기 때문에 신호의 강도도 다르다. 본 연구에서는 여러 가지 가스의 Raman 산란 신호 강도를 측정하여  $\text{N}_2$  가스에 대한 각 가스의 표준화된 산란 단면적 비를 계산하였다. 또한, 기존의 이론적 결과 및 다른 연구자<sup>(9)-(11)</sup>

들의 실험 결과와 비교하여 본 연구에 사용된 측정 시스템의 신뢰도를 검증하고, Raman 산란을 이용한 비연소장 및 연소장의 농도, 온도 및 공연비 측정의 기초 자료로 사용하였다.

실험은 먼저 정적 연소기내에 순수한 가스를 5barg 상태로 놓고 ICCD 카메라의 증폭을 및 gating 시간(100ns)을 일정하게 유지시킨 후, 레이저광을 조사시켜 Raman 산란 스펙트럼을 취득하였다. 측정된 가스는 순수한 H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 이다. Table 1은 본 연구에서 측정된 여러 가스의 Raman 산란 단면적과 Raman shift를 나타낸다. 본 실험 결과와 타 연구자들의 연구 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Normalized Raman scattering cross-sections  $\sigma_{N} \equiv \sigma_i / \sigma_{N_2}$  for various molecules *i* at 248nm

Gas	Absolute Value(m <sup>2</sup> )	Normalized Value		Raman Shift (cm <sup>-1</sup> )
	Raman Cross Section	Raman Cross Section	Raman Cross Section	
H <sub>2</sub>	4.83 × 10 <sup>-29</sup>	3.14	3.11	4160
N <sub>2</sub>	1.54 × 10 <sup>-29</sup>	1.00	1.00	2331
O <sub>2</sub>	-	2.53	2.36	1556
H <sub>2</sub> O	4.84 × 10 <sup>-29</sup>	3.14	-	3657
CO <sub>2</sub>	-	1.21	1.11	1388
		1.89	1.83	1285
CH <sub>4</sub>	-	-	10.44	2915
			3.22	3017
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-	-	22.75	≈ 3000
비교	P.Andresen	T.Kobayashi	Our Result	Eckbreth

Raman 산란 신호에 의해 공연비 측정을 하기 위한 사전 준비 작업으로서 ICCD 카메라의 동일 증폭율에서 광세기에 대한 선형성을 측정하여 Fig. 3에 표시하였다. 정적 연소기 내에 순수한 메탄 가스를 충전시킨 후, 압력을 1barg에서 5barg까지 변화시키면서 Raman 산란 강도를 측정된 결과, 동일 조건에서 충전 압력이 선형적으로 증가하면 이상 기체 상태방정식에 의해 가스의 농도 또한 선형적으로 증가하고 식 (1)에 표시한 바와 같이 가스 농도에 비례하여 Raman 산란 강도도 거의 선형적으로 증가하고 있음을 나타내고 있다. 따라서, 본 실험에 사용된 측정 시스템은 동일 증폭율

에서 광 세기에 대한 선형성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 정적 용기내에 순수한 공기와 메탄 가스 및 공기와 프로판 가스를 당량비가 1.0이 되도록 충전시킨 경우의 Raman 산란 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 산소 분자는 259nm 영역에서, 질소 분자는 264nm 영역에서 그리고 메탄과 프로판 분자는 268nm 영역대에서 Raman 신호가 선명하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

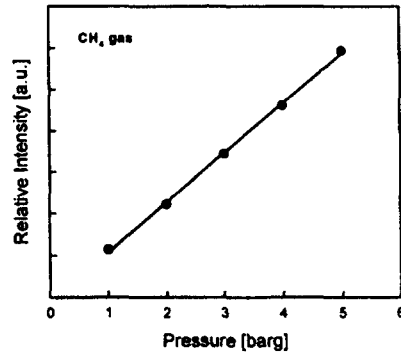
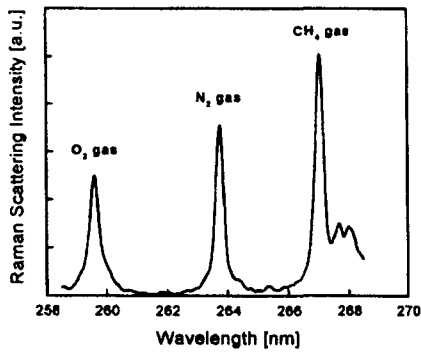


Fig. 3 Raman intensity of CH<sub>4</sub>

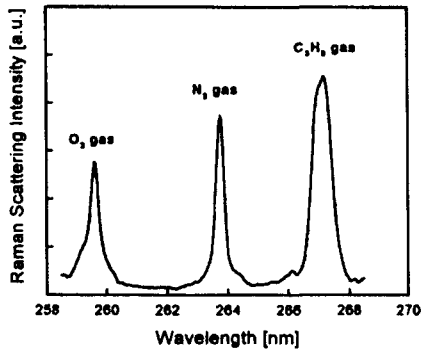
앞에서도 언급한 바와 같이 순수한 가스 분자의 Raman 산란 강도는 레이저의 강도, 가스의 농도 및 Raman 산란 단면적에 비례하기 때문에 동일한 조건(레이저의 강도, 온도 및 압력)에서 이들 각각의 가스 분자들의 Raman 산란 강도를 측정된 후, 질소 가스 분자의 Raman 산란 강도로 나누면 각 가스 분자들의 표준화된 Raman 산란 단면적을 구할 수 있다. 또한, 이것을 보정 데이터로 하면 식 (2)에서 보는 바와 같이 미지의 상태로 섞여있는 연료와 공기 혼합 가스의 물분율 및 공연비를 각각의 Raman 산란 강도와 Raman 산란 단면적만으로 측정할 수 있다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 순수한 건공기의 Raman 스펙트럼을 비교한 경우, 강도비는 O<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> = 0.41 : 0.59로 실제의 물분율(O<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> = 0.21 : 0.79)과는 상당한 차이를 보여 주고 있

다. 그러나, 질소 분자에 대하여 표준화된 산소 분자의 Raman 산란 단면적을 고려하여 계산하면, 순수 건공기의 물분율은  $O_2 : N_2 = 0.206 : 0.794$ 로 실제 공기의 물분율과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) Raman spectrum of  $CH_4$ /air mixture ( $\phi=1.0$ )

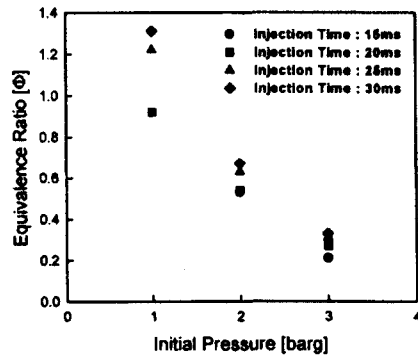


(b) Raman spectrum of  $C_3H_8$ /air mixture ( $\phi=1.0$ )

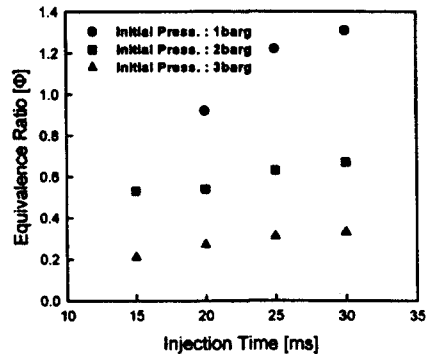
Fig. 4 Raman spectra of  $CH_4$ /air and  $C_3H_8$ /air mixture in equivalence ratio  $\phi=1.0$

또한, 공기의 대부분을 차지하고 있는 질소와 연료인 메탄 및 프로판 가스의 Raman 스펙트럼을 비교해 보면, 실제적으로 이론 당량비에서 질소와 연료의 물분율은 각각  $N_2 : CH_4 = 0.883 : 0.117$  및  $N_2 : C_3H_8 = 0.950 : 0.050$ 으로 연료에 비해 질소의 물분율이 더 크지만, Raman 산란 강도는 연료가 더 크게 나타나고 있다. 이것은 연료 가스 분자의 Raman 산란 단면적이 질소에 비해 상대적으로 더 크기 때문이며, 이를 통하여 이론 당량비 보다 희박한

혼합비의 경우에 있어서도 연료 가스 분자 및 공기의 Raman 산란 강도를 이용하여 정량적인 당량비를 측정할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Equivalence ratio with different initial pressure



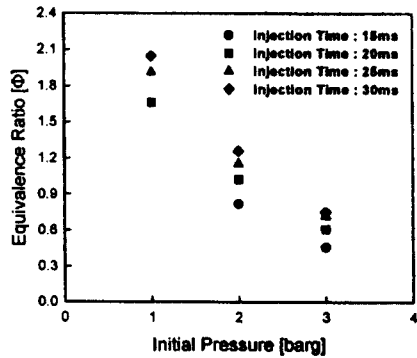
(b) Equivalence ratio with different injection time

Fig. 5 Equivalence ratio with different initial pressure and injection time  $CH_4$ /air mixture

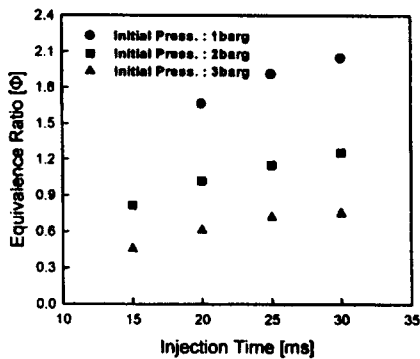
가스 인젝터로부터 메탄 및 프로판 가스를 정적 연소기내에 5barg의 공급 압력으로 연직 하향 분사시키고 공기와 완전히 혼합시킨 후, 동일한 측정 지점에 있어서 초기 압력 및 분사 기간에 따른 당량비를 Fig. 5 및 Fig. 6에 표시 하였다. 초기 압력을 1barg에서 3barg까지 1barg 단위로 변화시키고 분사 기간을 15ms에서 30ms까지 5ms 간격으로 변화시키면서 공기와 연료 가스의 Raman 산란 강도를 측정 한 결과, 공기 성분인 질소와 산소 분자간의 Raman 산란 강도비는 변화가 없으나 메탄 및 프로판 분자의 Raman 산란 강도는 질소 및 산소 분자

의 Raman 산란 강도에 비하여 실험 조건에 따라 상대적으로 변화하고, 이를 통하여 당량비도 변화되고 있음을 알 수 있다.

첫 번째로 동일한 분사 기간에 있어서 정적 연소기내 공기의 초기 압력이 증가할수록 연료와 공기의 당량비는 거의 선형적으로 감소하고 있고, 이것은 초기 압력의 증가에 따라 인젝터에서 분사되는 연료의 양이 감소되기 때문이라고 사료된다.



(a) Equivalence ratio with different initial pressure

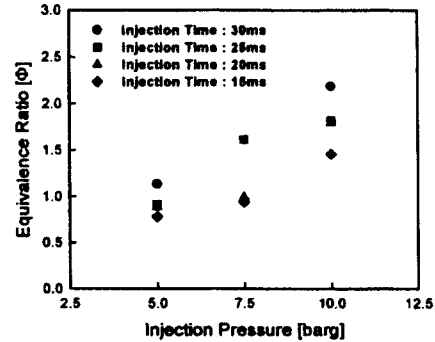


(b) Equivalence ratio with different injection time

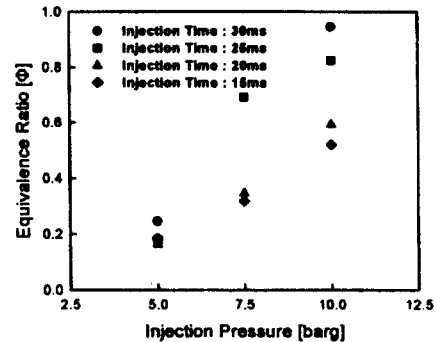
Fig. 6 Equivalence ratio with different initial pressure and injection time C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air mixture

두 번째로 동일한 초기 압력에서 정적 연소기내 연료의 분사 기간을 변화시킨 경우, 분사 기간의 증가와 더불어 연료와 공기의 당량비도 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 세 번째로 매탄 가스의 공급 압력을 5barg, 7.5barg 및 10barg로 변화시킨 경우의 정적 연소기내 당량

비를 Fig. 7에 표시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 연료 분사 압력의 증가와 더불어 당량비가 증가되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 레이저 Raman 산란법을 이용하여 여러 가지 실험 조건에 있어서 연료와 공기의 당량비를 정량적으로 측정할 수 있음을 확인할 수 있고, 또한 이 방법을 이용하여 실제 자동차용 엔진 등의 고압 연소실내에서 당량비 분포를 정량적으로 해석할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Equivalence ratio with different injection pressure at initial pressure 1barg



(b) Equivalence ratio with different injection pressure at initial pressure 3barg

Fig. 7 Equivalence ratio of CH<sub>4</sub>/air mixture with different injection pressure at initial pressure 1barg and 3barg

마지막으로, 당량비 측정값에 대한 오차 범위에 대해 생각해보면, 식 (3)에서 보는 바와 같이 질소 가스에 대한 연료 가스의 물분율은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$n_{fuel}/n_{N_2} = (I_{fuel}/I_{N_2}) \cdot (\sigma_{N_2}/\sigma_{fuel}) \quad (3)$$

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 물분율은 연료 가스와 질소 가스의 Raman 산란 강도비에 비례하고 있음을 알 수 있다. 본 실험의 전체 측정 영역에 있어서 질소 가스의 Raman 산란 강도는 약 1000(a.u.)인 반면에 연료인 메탄 및 프로판 가스의 Raman 산란 강도는 당량비가 0.2 이하인 부분에 있어서 그 값이  $\geq 150$ (a.u.)이고 배경 잡음(background noise)의 변동폭은  $\pm 8$ (a.u.)이기 때문에, 오차 범위는  $(\pm 8/150) \times 100 \approx \pm 5\%$ 이다. 이와 같은 오차 범위는 연료 가스의 Raman 산란 강도, 즉 물분율 및 당량비가 감소하면 할수록 더욱 커지게 된다. 따라서, 오차 범위를 줄이기 위하여 S/N ratio가 높게 되도록 측정 시스템을 구성하고 배경 잡음에 대한 해석이 필수적이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고효율 KrF 엑시머 레이저, 영상 분광기 및 ICCD 카메라를 이용하여 여러 가스의 Raman 산란 단면적을 측정하였고, 정적 연소기내 미지 농도로 혼합된 공기와 메탄 가스 및 공기와 프로판 가스 혼합기의 Raman 산란 스펙트럼을 측정하여, 이를 통하여 정량적인 당량비를 구하였다. 실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 여러 가지 가스 분자에 대한 Raman 산란 단면적 측정 결과, 기존 연구 논문의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었고 일반 공기의 Raman 산란 스펙트럼 분석 결과, Raman 산란 단면적을 고려한 경우 각 가스 분자들의 peak intensity 비는 이론적인 공기의 물분율과 일치함을 확인할 수 있었다.
- 2) Raman 산란 단면적을 보정 데이터로 취득하면 미지의 상태로 섞여 있는 연료 증기와 공기의 혼합 가스의 Raman 산란 강도비만으로 비연소장내 물분율을 구할 수

있고 이를 근간으로 당량비 및 공연비를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

- 3) 정적 연소기내 연료 분사에 대한 Raman 산란 스펙트럼은 각각의 실험 조건에 있어서 50개의 스펙트럼을 합산하여 산술 평균한 값을 취하였다. 스펙트럼 분석 결과, 초기 압력의 증가에 따라 당량비가 낮아지고 분사 기간 및 분사 압력의 증가에 따라 당량비가 증가하고 있음을 알 수 있었다.

추후, 분사 압력의 변화를 비롯한 여러 가지 조건하에서 실험을 수행하면 보다 더 정량적인 해석 결과를 얻을 수 있으리라 사료되고, 또한 가시화 엔진 연소실내의 당량비 및 공연비도 측정할 수 있으리라 예상된다.

## 후기

본 연구는 산업자원부와 과학기술처에서 시행하는 G7 차세대 자동차 기술개발 사업과제(과제번호 : 97-0-3-0007)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

1. T. A. Baritaud and T. A. Heinze, "Gasoline Distribution Measurements with PLIF in a SI Engine", *SAE Paper*, No.922355, 1992.
2. T. D. Fansler, D. T. French and M. C. Drake, "Fuel Distributions in a Firing Direct-Injection Spark-ignition Engine Using Laser-Induced Fluorescence Imaging", *SAE Paper*, No.950165, 1995.
3. A. Arnold, A. Buschmann, M. Decker and V. Sick, "Simultaneous Imaging of Fuel and Hydroxyl Radicals in an In-Line Four-Cylinder SI Engine", *SAE Paper*, No.932696, 1993.

4. W. Lawrenz, J. Kohler, W. Stolz, W. Bloss and E. Wagner, "Quantitative 2D LIF Measurements of Air/Fuel Ratios During the Intake Stroke in a Transparent SI Engine", *SAE Paper*, No.922320, 1992.
5. F-Q. Zhao, T. Takemoto, K. Nishida and H. Hiroyasu, "Two-Dimensional Measurements of the Fuel Vapor Concentration in the Combustion Chamber of a SI Engine with Laser Rayleigh Scattering", *SAE Paper*, No.922389, 1992.
6. P. Miles and M. Dilligan, "Quantitative In-Cylinder Fluid Composition Measurements Using Broadband Spontaneous Raman Scattering", *SAE Paper*, No.960828, 1996.
7. G. Grunefeld, V. Beushausen and P. Andresen, "A Major Origin of Cyclic Energy Concentration Variations in SI Engine : Cycle-by-Cycle Variations of the Equivalence Ratio and Residual Gas of the Initial Charge", *SAE Paper*, No.941880, 1994.
8. T. Heinze and T. Schmidt, "Fuel-Air Ratios in a Spray, Determined between Injection and Autoignition by Pulsed Spontaneous Raman Spectroscopy", *SAE Paper*, No.892102, 1989.
9. Ecbreth, A.C., *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Abacus Cambridge, MA, 1988.
10. Koch, A., Andresen, P., et. al., "Planar Imaging of a Laboratory Flame and Internal Combustion in an Automobile Engine using UV Rayleigh and Fluorescence Light", *Appl. Phys.* B56, pp. 177-184, 1993.
11. Kobayshi, T., "Application of UV and VUV Excimer Lasers in Combustion Measurements Using Enhanced Raman Scattering", *Laser Diagnostics and Modeling of Combustion*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 133-140, 1987.
12. 진성호, 박경석, 김군홍, 김경수, "Laser Raman Scattering을 이용한 가스 분무내 당량비 계측에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회 '97년도 춘계학술대회논문집 (1), pp. 677-683, 1997.
13. S. H. Jin, K. S. Park and G. S. Kim, "Equivalence Ratio Measurements in Vaporized Fuel Spray Using Laser Raman Scattering", The 7th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Proc. of ICLASS-'97, pp. 665-670, 1997.
14. 진성호, 박경석, 송재익, 김경수, "Laser Raman Scattering을 이용한 가스 분무내 당량비 계측에 관한 연구", 한국액체미립화학회지, 제2권, 제4호, pp. 7-14, 1997.