

Laser Raman Scattering을 이용한 가스 분무내 당량비 계측에 관한 연구

Equivalence Ratio Measurements in Gas Spray Using Laser Raman Scattering

진 성 호*, 박 경 식**, 송 재 익***, 김 경 수****

S. H. Jin, K. S. Park, J. I. Song and G. S. Kim

ABSTRACT

Laser Raman scattering method has been applied to measure equivalence ratio of methane/air mixture in injected spray. We used high power KrF excimer laser ($\lambda=248\text{nm}$) and a high gain ICCD camera to capture low intensity signal. Raman shifts and Raman scattering cross-sections of H_2 , O_2 , N_2 , CO_2 , CH_4 and C_3H_8 are measured precisely. Our results show an excellent agreement with those of other groups. Mole fraction measurement of O_2 and N_2 from air shows that $\text{O}_2 : \text{N}_2 = 0.206 : 0.794$.

We used gas injector which was operated at 1 bar. Methane is used as a fuel. Spray region is $10\text{mm} \times 37\text{mm}$ and this region is divided into 80 points. 100 Raman signals are obtained and ensemble averaged for each point. 3-d and contour plot of distribution of equivalence ratio is presented. Our measured results show that the equivalence ratio of methane/air mixture in methane-rich region is reasonable. However, more study is necessary for methane-lean region because background noise level is almost same as Raman intensity of methane.

주요기술용어 : Laser Raman Scattering(라만 산란법), Equivalence Ratio(당량비),

Raman Scattering Cross-section(라만 산란 단면적), Mole Fraction(몰분율)

1. 서론

엔진 실린더 내의 공연비는 연료와 공기의 혼합 정도와 실린더의 구조, 형태 등에 따라 다른 값을 가질 수 있고 연소시 점화플러그 주변의 공연비에 따라 발화 등 연소 현상에 지대한 영향을 미치므로 연소 전 실린더 내의 공연

비 분포 측정이 필요함을 알 수 있다. 그러나, 연소실 내에 있어서 연료와 공기의 혼합기 형성 과정은 다수의 인자에 의해 지배되고 매우 복잡하다. 이러한 이유 때문에 연소실 내의 혼합기 형성 과정에 관한 상세한 측정 결과가 적고 특히, 연소실 내에 존재하는 연료 증기와 공기의 공연비 분포 및 당량비 분포에 관해서는 Gas Chromatography에 의한 샘플의 조성을 알아내는 방법이 주로 많이 사용되었으나, 이 방법은 측정장에 혼란을 주고, 또, 시간적,

* 경희대학교대학원

** 정회원, 경희대학교 기계공학과

*** 정회원, 기아기술센터

**** 생산기술연구원

공간적인 분해능도 한정되어 있기 때문에 현상에 관한 심도있는 이해가 불가능한 실정이다.

GC를 이용한 공연비 측정 방법은 난류 등 복잡한 유동 과정에 의해 그 측정치가 많은 오차를 발생할 수 있으므로 이를 대신하는 Laser Induced Fluorescence⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ 및 Laser Rayleigh Scattering⁽⁵⁾ 기술이 공연비 측정을 위해 사용되어 왔으며, 최근, 미국의 National Sandia Laboratory와 독일의 몇몇 대학에서 Laser Raman Scattering⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾을 이용하여 연소실내 연소 가스의 물분율을 측정하는데 성공하였다. 그러나, 아직까지 미연 혼합기의 정량적인 공연비를 측정할 연구는 많지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 연소실 내의 공연비 측정 기법 개발에 주안점을 두고 시간적, 공간적으로 높은 분해능을 갖는 Laser Raman Scattering을 이용하여 가스 분무내 연료와 공기의 공연비를 측정하기 위한 이론적, 실험적 기반을 확립하였다.

2. 측정 이론

Raman Scattering은 레이저 빛 내의 광자와 가스 분자간에 발생된 비탄성 충돌의 결과로 나타나는 임의적 산란으로 광자와 분자간의 에너지 교환에 따라 Stokes Raman Scattering과 Anti-Stokes Raman Scattering으로 구분할 수 있다. Stokes Raman Scattering은 분자가 광자로부터 에너지를 받아 분자 자체의 에너지는 상승하고 산란되는 빛의 주기는 작게 되는 현상이고, Anti-Stokes Raman Scattering은 이와는 반대로 분자가 에너지를 잃어버려 산란되는 빛의 주기를 크게 하는 현상이다. 분자가 에너지를 방출하기 위해서는 충돌 전의 에너지가 들뜬 상태에 있어야만 가능하므로 Anti-Stokes Raman Scattering은 분자의 온도가 어느 정도 높은 상태일 경우만 가능하다. Fig. 1에 Raman Scattering의 기본적인 개략도를 표시하였다.

임의의 가스 분자에 대한 Raman Scattering Intensity는 다음과 같다.

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

여기서, I_i : 라만 산란 강도

C : 광학 정수

I_o : 레이저 강도

n_i : 임의의 가스 분자의 물분율

σ_{ri} : 임의의 가스 분자의 산란 단면적

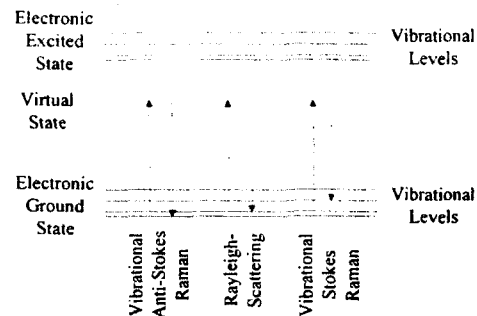


Fig.1 Schematic diagram of Raman scattering

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 순수한 가스 분자의 라만 산란 강도는 입사 레이저광의 세기, 가스 분자의 농도 및 라만 산란 단면적에 비례하고 있음을 알 수 있다.

비연소장 내의 혼합 가스의 공연비는 공기와 연료 가스 2성분만의 물분율로 표시할 수 있고 물분율은 이 성분들 각각의 첨자를 α, f 로 표시하여 그 라만 산란 강도의 비를 계산하면 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\frac{n_\alpha}{n_f} = \left(\frac{I_\alpha}{I_f} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{rf}}{\sigma_{ra}} \right) \quad (2)$$

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

3. 실험장치 및 방법

Fig. 2에 본 연구에 사용한 실험장치의 개략도를 표시한다. 레이저는 248nm의 발진 파장과 450mJ의 펄스 에너지 및 20ns의 펄스 폭을 갖는 KrF 엑시머 레이저(Lambda Physik, COMPEX-205)로서 발진된 레이저 빔은 불록

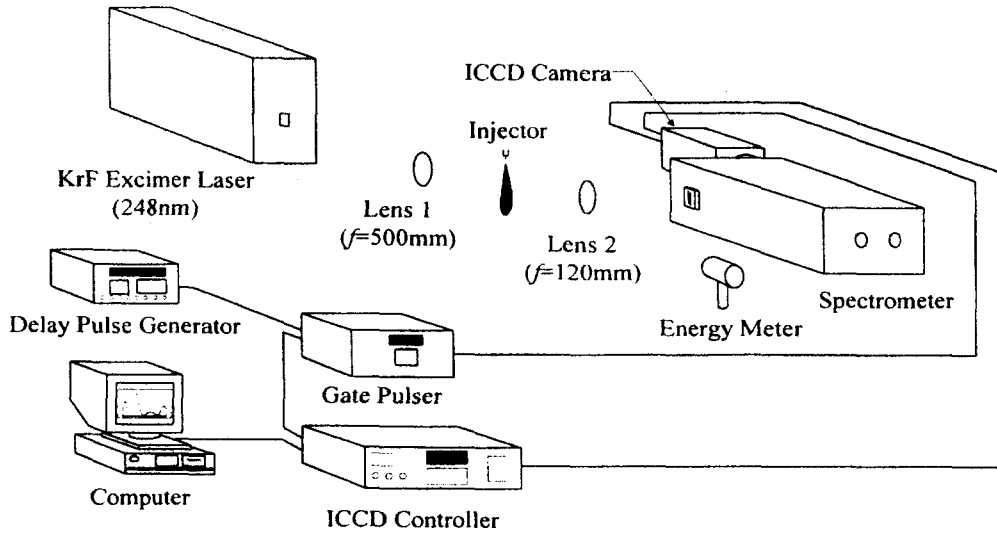


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

렌즈(초점거리=500mm) 및 공간 필터에 의해 집속된 후, 분무에 입사되게 하였다. 입사 레이저 광에서 기인하는 미광과 잡음을 제거하기 위하여 레이저 광의 입구측에 슬릿을 설치하였고 분무를 통과한 레이저 광은 에너지 측정기로 펄스 에너지를 측정하여 이에 대한 보정을 행하였다. 또한 레이저 빔을 분무내에 입사시킬 때, 광 집속이 이루어지는 부분에 있어서 air breakdown에 의해 라만 산란 신호가 영향을 받는 것을 방지하기 위하여 초점 거리에서 5cm 떨어진 부분에 분사 노즐을 위치시켰다. 측정 부분으로부터의 라만 산란 신호는 레이저 광과 수직으로 설치된 렌즈($f/\#=2$)에 의해 영상 분광기(Acton, SpectraPro-500)의 입구 슬릿(10 μm)에 집광하고 intensified CCD 카메라(Princeton Instruments, ICCD 576G/RB-E)로 감지하여 스펙트럼 분석을 행하였다.

분무내에서의 라만 산란 신호 측정시 주위의 광에 의한 잡신호를 제거하기 위하여 MCP의 gate width를 100ns, CCD의 노출 시간을 1sec로 설정하여 계속하였다. Fig. 2에 표시한 바와 같이 지연 펄스 발생기(Stanford Research System, DG-535)에서 발생하는 TTL 펄스 신호를 계측 시스템 전체의 동기 제어의 기준으로 했다. 지연 펄스 발생기의 1번 채널의 펄스

신호는 MCP gate pulser(Princeton Instruments, PG-200)에 입력하여 ICCD 카메라의 제어용으로 사용했고 2번 채널의 펄스 신호는 레이저 트리거용으로 사용했으며 3번 및 4번 채널의 출력 펄스는 분무 시기와 분무 시간을 제어하는데 사용했다. 측정기기 각각의 작동 지연 등을 고려하여 각 채널들의 동작 시간값을 설정한 후, 각 기기의 컨트롤러를 조정했다. 이상의 동기 제어에 의해 KrF 엑시머 레이저로부터 발진된 빔을 측정 분무에 조사하면 그 직전에 MCP의 gate가 열리고 영상 분광기를 통하여 측정부의 라만 산란 신호를 포착하고 이미 대기 상태로 있는 ICCD 카메라에서 스펙트럼을 기록하도록 하였다.

본 실험에 사용된 인젝터는 SI 엔진용 가스 인젝터로서 핀틀 형태이다. 연료로는 메탄(CH_4)을 사용하였고 분사 압력은 1bar로 하였다. 또한, 분사 시간은 5ms로 하였고 측정 시점은 분사 후, 2ms 경과 후이다. 이 상태에서 대기중에 분사된 연료 가스를 Fig. 3에서 보는 바와 같이 노즐 선단으로부터 측 방향으로는 10mm 떨어진 부분에서 47.5mm까지 2.5mm 간격으로, 반경 방향으로는 0mm에서 10mm까지 2.5mm 간격으로 변화시키면서 80개 위치의 라만 산란 신호를 측정하였다. 각 측정 위치에서

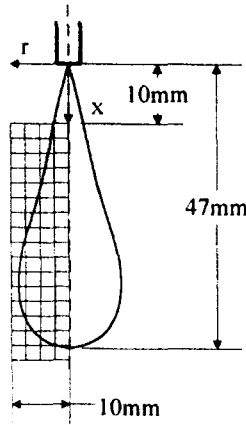


Fig.3 Measurement locations

의 라만 산란 신호는 100개를 합산하고 앙상블 평균한 것을 취하였고 또한 측정 기기의 압전류에 의한 자체 노이즈 성분을 제거하여 순수한 라만 산란 신호만을 측정하도록 하였다.

4. 실험결과

라만 산란 신호를 이용하여 당량비 측정을 하기 위한 사전 준비 작업으로서, ICCD 카메라의 동일 증폭율에서 가스 압력에 따른 라만 산란 신호의 세기에 대한 선형성을 측정하여

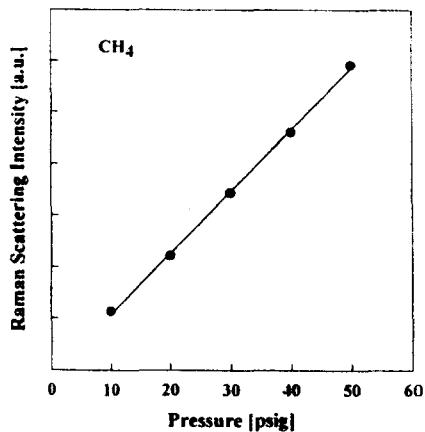


Fig.4 Raman intensity at different pressure

Fig. 4에 표시하였다. 정적 용기내에 순수한 메탄 가스(99.99%)를 충전시킨 후, 압력을 10psig에서 50psig까지 10psig씩 변화시키면서 라만 산란 강도를 측정 한 결과, 충전 압력이 선형적으로 증가하면 가스의 밀도 또한 선형적으로 증가하고 식 (1)에 표시한 바와 같이 가스 밀도에 비례하여 라만 산란 강도도 거의 선형적으로 증가하고 있음을 나타내고 있다. 따라서 본 측정 시스템은 동일 증폭율에서의 광세기에 대한 선형성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 정적 용기내에 순수한 질소, 산소, 메탄 및 공기를 각각 50psig로 충전시킨 경우의 라만 산란스펙트럼을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 산소 분자는 258nm 영역에서, 질소 분자는 264nm 영역에서 그리고 메탄 분자는 268nm 영역대에서 라만 신호가 선명하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 앞에서도 언급한 바와 같이 순수한 가스 분자의 라만 산란 강도는 레이저의 세기, 가스의 농도 및 라만 산란 단면적에 비례하기 때문에 동일한 조건(레이저의 세기, 온도 및 압력)에서 이들 각각의 가스 분자들의 라만 산란 강도를 측정 한 후, 질소 가스 분자의 라만 산란 강도로 나누면 가스 분자들의 표준화된 라만 산란 단면적을 구할 수 있고 이것을 보정 데이터로 하면 식 (2)에서 보는 바와 같이 미지의 상태로 섞여있는 연료와 공기 혼합 가스의 물분율 및 공연비를 각각의 라만 산란 강도와 라만 산란 단면적으로 측정할 수 있다. Fig. 5의 (d)에서 보듯이 순수한 건공기의 라만 스펙트럼을 측정 한 경우, 강도비는 O₂ : N₂ = 16.0 : 25.6으로 실제의 물분율(O₂ : N₂ = 0.21 : 0.79)과는 상당한 차이를 보여 주고 있지만, Fig. 5의 (a)와 (b)로부터 구한 질소 분자에 대하여 표준화된 산소 분자의 라만 산란 단면적을 고려하면, 측정된 순수 공기의 물분율은 O₂ : N₂ = 0.206 : 0.794로 실제 공기의 물분율과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

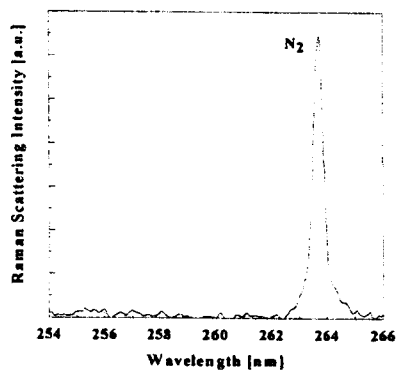
Table 1에 본 실험에서 측정된 여러 가스 분자들의 라만 shift와 질소 분자에 대하여 표준화된 라만 산란 단면적과 다른 연구자들^{(9),(10)}에 의하여 이론적으로 계산된 것을 비교하여

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

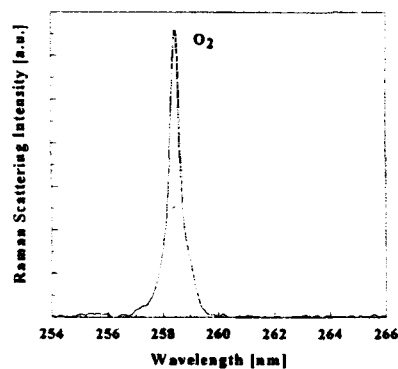
Molecules	Raman Shift(cm^{-1})	Theoretical Raman Cross-section (σ_{iN})	Experimental Raman Cross-section (σ_{iN})
H ₂	4160	3.14 ^a	3.11
O ₂	1556	2.53 ^a	2.36
N ₂	2331	1.00 ^a	1.00
CO ₂	1285	1.21 ^b	1.11
	1388	1.89 ^b	1.83
H ₂ O	3657	3.14 ^a	
CH ₄	2915		10.22
	3017		3.22
C ₃ H ₈	≈ 3000		24.36

a : Ref.9

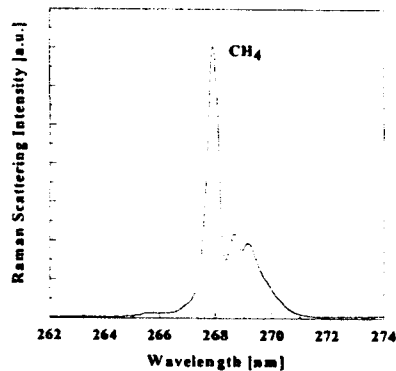
b : Ref.10



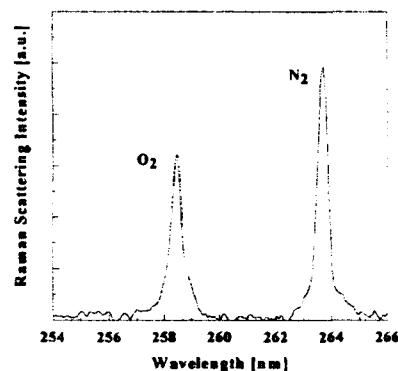
(a) Raman spectrum of N₂



(b) Raman spectrum of O₂



(c) Raman spectrum of CH₄



(d) Raman spectrum of dry air

Fig.5 Raman spectra of N₂, O₂, CH₄ and dry air at 248nm

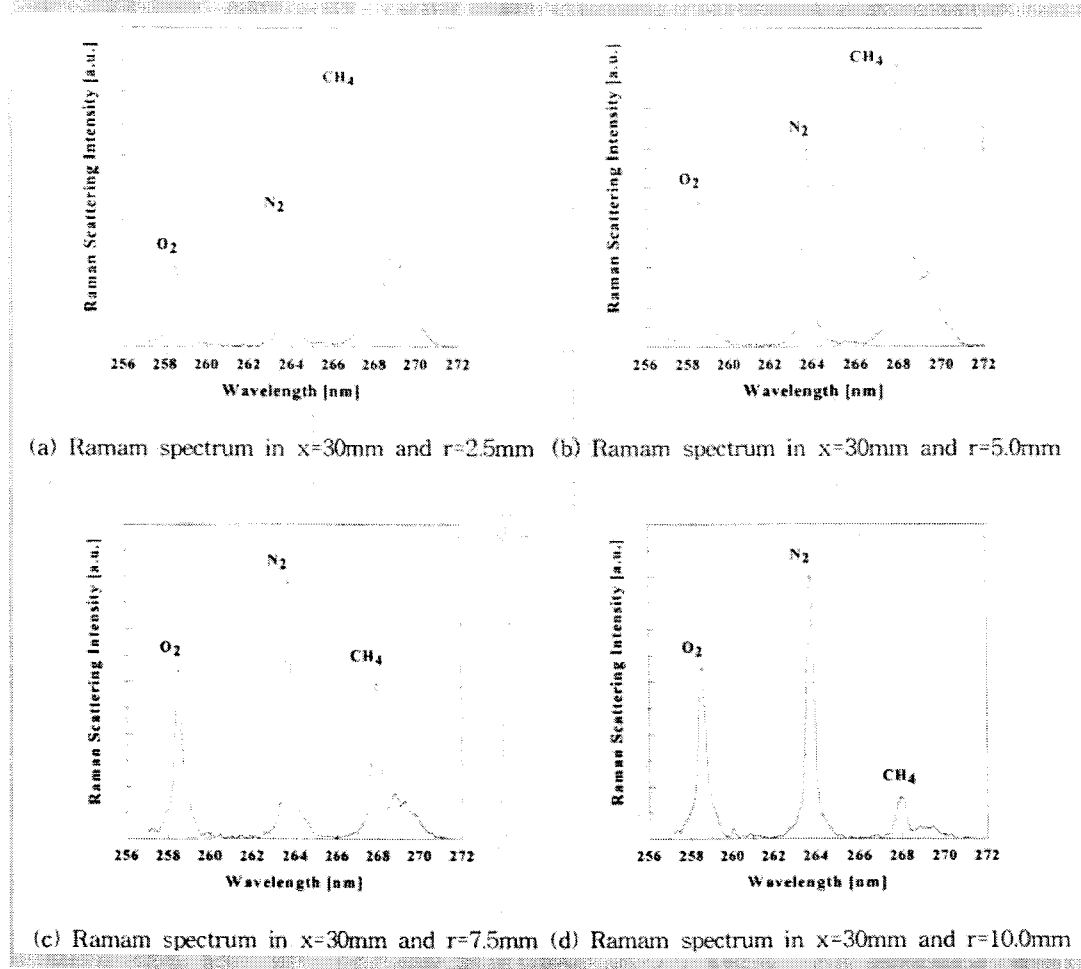


Fig.6 Raman spectra of methane spray at different radial position

나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 이론값과 측정값이 5% 범위내에서 잘 일치하고 있어 본 측정 시스템이 신뢰성을 갖고 있음을 알 수 있다.

가스 인젝터로부터 메탄 가스를 1 bar의 공급 압력으로 연직하향 분사시킨 경우, 동일한 축방향($x=30\text{mm}$)에서 있어서 반경 방향에 따른 분무내 라만 산란 스펙트럼을 Fig. 6에 표시하였다. 반경 방향에 따라 공기 성분인 질소와 산소 분자간의 라만 산란 강도비는 변화가 없으나 메탄 분자의 라만 산란 강도는 질소 및 산소 분자의 라만 산란 강도에 비하여 상대적으로 감소하고 있다. 따라서 물분울 또한 감소하는 경향을 띠고 있으며 질소 가스에 대한 메

탄 가스의 물분울로부터 $r=2.5\text{mm}$, 5.0mm , 7.5mm and 10.0mm 일 때, 당량비는 1.78, 1.11, 0.47 및 0.13으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 여기서 특히 주목해야할 점은 당량비가 낮은 경우 즉 메탄 가스의 물분울이 상대적으로 낮은 경우의 오차 범위이다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 질소 가스에 대한 메탄 가스의 물분울은

$$\frac{n_{CH_4}}{n_{N_2}} = \left(\frac{I_{CH_4}}{I_{N_2}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{N_2}}{\sigma_{CH_4}} \right) \quad (3)$$

으로 표시될 수 있고 메탄 가스와 질소 가스의 라만 산란 강도비에 비례하고 있음을 알 수 있다. 본 실험의 전체 측정 영역에 있어서 질소 가스의 라만 산란 강도는 약 1000(a.u.)인 반면

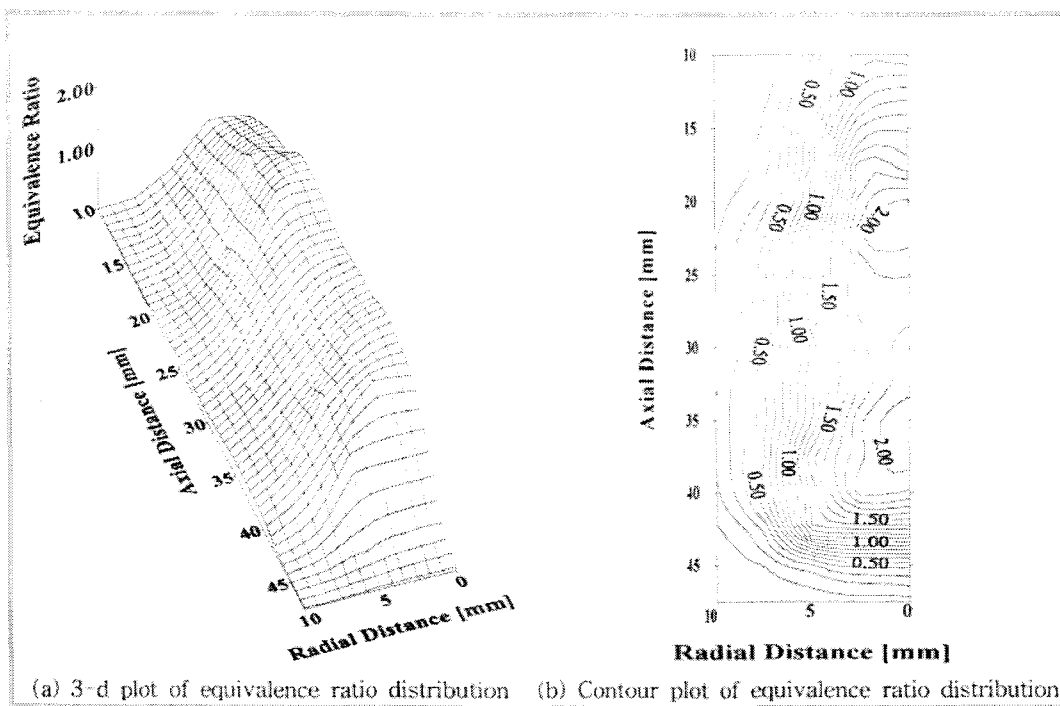


Fig.7 Equivalence ratio distribution of CH₄ gas spray under atmospheric pressure

에 메탄 가스의 라만 산란 강도는 $x=30\text{mm}$, $r=10\text{mm}$ 인 부분에 있어서 그 값이 141(a.u.)이고 배경 잡신호의 변동은 8(a.u.)이기 때문에 오차 범위는 $(8/141)100=6\%$ 이다. 이와 같은 오차 범위는 메탄의 라만 산란 강도, 즉, 물분율 및 당량비가 감소하면 할수록 더욱 커지게 된다. 또한, 공기의 농도가 상당히 희박한 노즐 근처에서도 동일한 문제가 발생한다. 따라서, 오차 범위를 줄이기 위하여 신호 대 잡음비가 높게 되도록 측정 시스템을 구성하고 배경 잡신호에 대한 해석이 필수적이다. Fig. 7은 각각의 라만 산란 신호 측정 위치에 있어서의 당량비를 보간(interpolation)시켜 그 분포를 surface plot과 contour plot으로 2차원화시켜 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가스 분무의 당량비 분포가 성층화를 이루고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고효율 KrF 엑시머 레이저, 영상 분광기 및 ICCD 카메라를 이용하여 여러 가스의 라만 산란 스펙트럼을 측정하였고 이를

바탕으로 각 가스 분자들의 라만 shift와 라만 산란 단면적을 측정하였다. 가스 분자에 대한 라만 산란 단면적 측정 결과, 기존 연구 논문의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었고 일반 공기의 라만 산란 스펙트럼 분석 결과, 산란 단면적을 고려한 경우의 라만 산란 강도 비는 실제 공기의 물분율과 일치함을 확인할 수 있었다.

따라서 라만 산란 단면적을 보정 데이터로서 취득하면 미지의 상태로 섞여 있는 연료 증기와 공기의 혼합 가스의 라만 산란 강도비만으로 비연소장내 물분율을 구할 수 있고 이를 근간으로 당량비 및 공연비를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

분무에 대한 라만 산란 스펙트럼은 한 측정 영역에서 100개의 라만 산란 스펙트럼을 합산하여 앙상블 평균한 값을 취하였다. 스펙트럼 분석 결과 당량비가 낮을 수록 즉 연료 가스의 라만 산란 강도가 낮을 수록 오차 범위가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 낮은 당량비에서 보다 정밀한 해석을 위해서는 신호 대 잡음비의 개선과 배경 잡신호의 해석이 필수적임을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 통상산업부와 과학기술처에서 시행하는 G7 차세대 자동차 기술개발 사업과제 (과제번호 : 96-0-2-0006)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고 문헌

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. 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.
8. 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.
9. A. Kock and P. Andresen, "Planar Imaging of a Laboratory Flame and of Internal Combustion in an Automobile Engine Using UV Rayleigh and Fluorescence Light", Applied Physics, B56, pp.177~184, 1993.
10. K. Inuma, T. Asanuma, T. Ohsawa and S. Taki, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion, Springer-Verlag, Berlin, 1987, pp.133~140.