

레이저 Rayleigh 산란을 이용한 연료농도의 계측

권순태[†], 김형식, 이재원, 박찬준*, 엄인용*
서울산업대학교 에너지환경 대학원, *서울산업대학교 기계공학과

Fuel Concentration Measurements by Laser Rayleigh Scattering

Soontae Kwon[†], Hyeongsig Kim, Jaewon Lee, Chanjun Park*, Inyoung Ohm*
Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea
**Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, Korea*

요약

본 연구는 정상 상태의 유동에서 Rayleigh 산란을 이용하여 연료의 농도를 측정하는 방법에 대해 것이다. 실험 장치는 연료의 농도 변화를 시간적, 공간적으로 측정함과 동시에 정확한 농도 측정을 위한 보정도 가능하도록 구성하였다. 실험 장치를 우선 보정 용기에 적용하여 프로판, 부탄, 아세틸렌, 프레온 가스의 산란단면적을 구하였다. 이후 내연기관을 상사한 실린더 헤드, 인젝터, 흡기매니폴드, 투명 실린더로 구성된 정상유동 장치를 구성하여 분사된 연료의 시간적, 공간적 농도 변화를 측정하였다. Mie산란의 간섭을 제거하기 위하여, 산란 신호의 상승 기간과 증배관-앰프의 시정수에 바탕을 둔 소프트웨어 필터를 개발하여 적용하였다. 실험 결과 LRS는 연료 농도 계측에 매우 유용하게 이용될 수 있고 소프트웨어 필터는 Mie 간섭을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

주요어 : LRS, Mie산란, 연료농도, 소프트웨어 필터

Abstract—In this study, a system to measure continuously the fuel concentration in a steady flow rig on the basis of Rayleigh scattering is presented. The system can be employed to measure both the temporal and the spatial distribution. Also, it is possible to calibrate the system for the measurement of accurate absolute concentration. Firstly, the system was tested at a calibration chamber for the determination of scattering cross section from propane, butane, acetylene, Freon-12 and Genetron 143a. After this, the system was adapted to a steady flow rig to measure the temporal and spatial fuel concentration. The rig is composed of cylinder head, intake manifold, injector, and transparent cylinder which can simulate internal combustion engine. To cope with the problem of Mie scattering interference, a software filter was developed, which is based on the rise time and the time constant of the photomultiplier-amplifier system. The results show that LRS can provide useful informations about concentration field and the software filter is very effective method to remove Mie interference.

Key words : LRS(Laser Rayleigh Scattering), Mie scattering, Fuel concentration, Software filter

1. 서론

최근 레이저의 발달과 보급에 힘입어 이를 응용한

비접촉 측정 기술은 온도, 농도의 계측¹⁾ 등 그 적용 범위를 넓혀가고 있다. 특히 혼합기의 농도를 측정하기 위해 Raman 산란¹⁻³⁾, Rayleigh 산란⁴⁻⁹⁾, Mie 산란

1) stkwon@snut.ac.kr

¹⁰⁾ 및 레이저 유도 형광법(LIF : Laser Induced Fluorescence)¹¹⁾ 등이 시도되고 있다. 이중 Rayleigh 산란은 분자수준의 산란임에도 불구하고 비교적 큰 산란 단면적 (scattering cross section)을 가지고 있어 낮은 출력의 레이저로도 측정이 가능하고 별도의 첨가제 등을 넣을 필요가 없으며 광학계의 구성도 간단하다는 장점이 있다. 특히, 연료의 농도분포를 연속적으로 측정하는 것이 요구되는 경우 연속광을 발생하는 아르곤이온 레이저를 이용하여 측정하는 것도 가능하다.

그러나 Rayleigh 산란은 큰 산란 단면적에도 불구하고 동일한 산란 메커니즘을 지닌 Mie 산란의 간섭이 심하고 기타 잡음의 신호 수준도 실제 신호의 강도와 비교하여 무시할 수 없는 값을 지니기 때문에, 실제 적용에 있어 이러한 잡음을 제거하고 정확히 Rayleigh 산란 신호만 얻어내는 것은 대단히 어려운 문제이다.

따라서 본 연구에서는 정상 상태의 유동에 연료가 공급될 때 Rayleigh 산란을 이용하여, 효과적으로 잡음을 제거하면서 투입된 연료의 농도를 연속적으로 측정하는 방법에 대해 논의하고자 한다. 이를 위하여 기본적인 Rayleigh 산란 특성을 점검할 수 있는 보정 장치를 구성하여 산란의 기본 특성을 파악하였고 실제 이를 정상 유동 장치에 적용하여 연료 농도의 변화를 시간적, 공간적으로 측정하여 방법의 유용성을 검증하였다.

2. 측정 방법과 결과

2.1 보정 장치 및 방법

LRS를 이용한 농도 측정방법의 타당성과 신호 측정을 위한 광학계 구성을 검증하기 위하여 보정 장치를 Fig. 1.과 같이 구성하였다. 이 보정 시스템에서는 정상유동실험 장치에서 사용되는 실린더와 동일

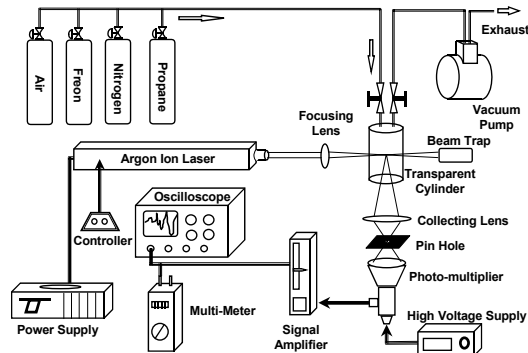


Fig. 1 Schematics of experimental system

Table 1. Rayleigh scattering cross section ratio of typical gases

Species	ratio $r = \sigma_{gas} / \sigma_{N_2}$
Nitrogen(N_2)	1
Propane(C_3H_8)	13.19±0.08
Butane(C_5H_{10})	19.17±0.09
Genetron 134a(F_3CCH_2F)	7.02±0.08
Freon-12(CCl_2F_2)	14.69±0.14
Acetylene(C_2H_2)	4.26±0.07

한 석영관으로 농도측정 보정용 용기를 제작하여 이용하였다. Rayleigh 산란의 강도는 입사광의 강도 및 파장의 4승 즉 $1/\lambda^4$ 에 비례하므로 아르곤 이온레이저 (Spectra Physics, Stabilite 2017, 4W)의 여러 광중 출력이 큰 녹색광(514.5nm)과 청색광(488nm) 중에서 파장이 짧은 청색광을 선택하여 이용하였다. 레이저 광을 측정부에 조사하고 측정점에서의 Rayleigh 산란을 광전자 증배관(Dantec, 9055X 0084)을 이용하여 측정하였다.

보정은 다음과 같은 방법으로 하였다. 먼저 석영관내의 공기를 진공펌프로 모두 배출시킨 후 보정용 가스를 서서히 주입하고 산란량을 측정한다. 보정에 이용한 가스는 질소, 공기, 프로판, 프레온으로 모든 가스의 산란단면적은 질소의 산란단면적을 기준으로 하여 다음의 식과 같이 질소의 산란단면적의 배율로서 구하였다.

$$r = \frac{\sigma_{gas}}{\sigma_{N_2}} = \frac{I_{gas} - I_{vacuum}}{I_{N_2} - I_{vacuum}} \quad (1)$$

Table 1.은 488nm인 입사광에 대한 여러 가스의 산란단면적을 측정한 것이다. 측정의 결과는 Zhao⁴⁾의 측정결과와 매우 잘 일치하였다.

2.2 잡음 원과 그 대책

Rayleigh 산란법은 광전자증배관과 같은 광감 장치에 도달하는 같은 파장 또는 여러 다른 파장의 빛의 영향에 매우 민감하다. 스칼라 양으로서 Rayleigh 신호는 Mie 신호, 바탕잡음신호, 화염으로부터의 복사(연소가 있을 경우), 시스템의 응답성 등에 영향을 받기 때문에⁴⁻¹⁰⁾ 강도를 직접 해석하는 것은 매우 어렵다. 따라서 Rayleigh 산란을 스칼라 양 측정에 사용하기 위해서는 이들 잡음원의 영향을 분석하고 제거해야 하는데, 본 논문에서는 이를 Mie 간섭, 바탕잡음, 기타의 잡음으로 나누어 각각에 대한 대책을 강구하였다.

2.2.1 Mie 산란

Rayleigh 산란은 주파수 변이가 일어나지 않는 탄

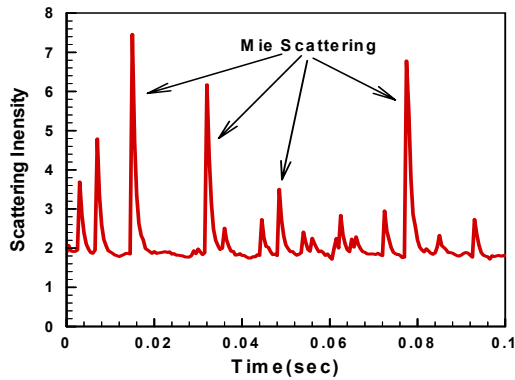


Fig. 2 Scattered light Intensity (100% Air) 성 산란이므로 같은 탄성산란인 Mie 신호의 영향을 가장 크게 받는다. 일반적으로 Mie 산란 단면적은 (입자 지름에 따라 $10^{-27} \sim 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sr}$) Rayleigh 산란 단면적($10^{-27} \text{cm}^2/\text{sr}$)에 비해 훨씬 커서, 지름이 1 μm 인 입자일지라도 그 산란 단면적은 질소 분자의 산란 단면적에 비해 10^{20} 정도의 크기를 갖는다.⁵⁾ 그리고 입자의 영향은 복잡적이고 매우 불규칙하며 시스템에 의존하기 때문에 Rayleigh 신호에 미치는 영향을 정량적으로 추정하여 제거하기는 불가능하다. 특히 탄화수소입자(Soot)의 경우는 입사광을 산란할 뿐만 아니라 흡수하기도 한다. 따라서 입자의 존재는 Rayleigh 산란의 측정 자체를 불가능하게 할 수도 있다.⁸⁾

입자의 영향을 줄일 수 있는 방법에는 두 가지가 있는데, 이는 하드웨어 필터법과 소프트웨어 필터 법이다.⁹⁾ 우선 하드웨어 필터 법은 시스템 내에 존재하는 입자의 수를 줄이기 위한 방법이다. 본 연구에서는 공기 흡입부에 실리카겔을 이용하여 공기 중의 수분을 제거하고 일반적인 공기 필터로 비교적 큰 입자를 제거한 후 0.01 μm 공기 필터를 설치하여 부유하는 입자들을 제거하였다.

하드웨어 필터로는 필터의 크기보다 작은 입자의 제거가 불가능하며 입자가 너무 많은 경우 다중산란의 효과가 나타나는데 다중산란의 영향을 피하기 위해서는 입자의 수밀도가 $N\sigma l \ll 1$ (N 은 입자의 수밀도, l 은 수광부에 투영된 레이저 광의 길이)을 만족하여야 한다.⁷⁾ 본 측정 시스템에서는 하드웨어 필터를 거친 경우 이 값은 2.16×10^{-5} 이며 이 값은 다중 산란을 무시할 수 있을 정도로 충분히 작다.

부유 입자를 제거하기 위한 상기의 방법에도 불구하고 입자의 완전한 제거는 불가능하고, 따라서 어떠한 경로를 통해서든 유입된 입자로 인해 Rayleigh 산란보다 매우 강한 Mie 산란신호가 발생하는데 이

의 발생을 원천적으로 막는 것은 거의 불가능하다. Fig. 2는 하드웨어 필터를 거친 공기로부터 산란된 신호의 강도를 나타낸 것으로 Mie 신호의 특징적 형태를 보여준다. 하드웨어 필터를 거치지 않은 경우에는 측정이 거의 불가능 할 정도의 심한 Mie 간섭이 관측되었다. 그림에도 나타나 있듯이 하드웨어 필터를 거켰더라도 Mie 신호 간섭의 제거는 불가능하며, 그 신호 특징은 공기로부터 평균적으로 나타나는 Rayleigh 신호에 비해 산란강도가 훨씬 크고 기울기가 급격하다. 이러한 Mie산란에 의한 잡음신호의 특징을 이용하여 다음과 같이 소프트웨어 필터가 가능하였다.¹⁰⁾

우선 연료분사 개시 후 일정시간(100 msec) 동안 2048(n)개의 신호를 받아들여 다음과 같이 평균기울기를 구하였다.

$$\Delta s = \sum_{i=1}^{n-1} |X_{i+1} - X_i| / n \quad (2)$$

여기서 변수 ϵ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \Delta s \quad (3)$$

이때 ϵ_0 로 필터의 특성을 결정하는데 본 실험의 경우 약 2.5~10 이다. ϵ_0 의 값은 신호측정 시에 실시간으로 변화가 가능하도록 하였다. 필터링 방법은 먼저 변수 ϵ 보다 양의 기울기가 큰 모든 기울기를 Mie 신호에 대한 응답으로 간주하여 표시하여 둔다. 또한 Mie 산란신호의 감쇠는 Fig. 3과 같이 광전자 증배관과 앰프의 시정수에 의해서만 지배된다. 이러한 신호감쇠특성을 이용하여 Mie 산란신호의 감쇠시간을 찾아내고 측정 데이터 중 Mie 산란신호를 판별해 낸다. 입력신호가 너무 커서 적절히 A/D 변환되지 않은 신호 또한 Mie 신호에 의한 피크로 표시된다. 각 피크의 최대값과 감쇠시간은 다음에 의해 정해진다.

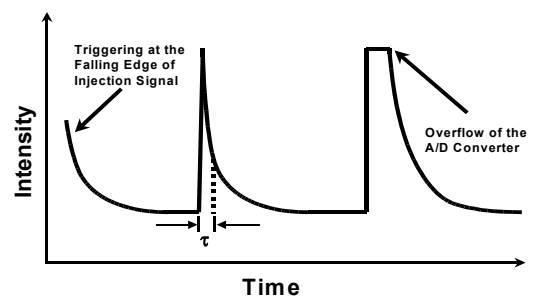


Fig. 3 Typical peak due to Mie scattering in sampled data

$$t_{fall} = \ln \left(\frac{f \cdot \min}{\min \cdot \max} \right) \cdot \tau \quad (4)$$

여기서

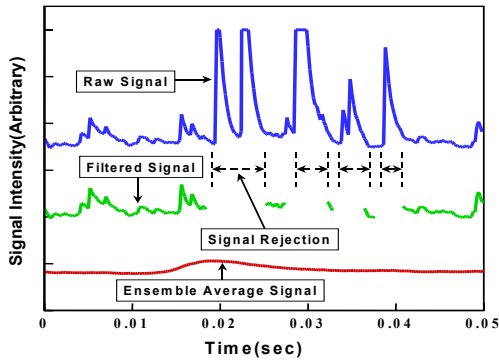


Fig. 4 Process of software filtering

min : 피크가 상승하기 시작할 때의 샘플 값
 max : 피크가 감소하기 시작할 때의 샘플 값
 f : 이론적인 무한대로 나타내지는 것에 따른 허용오차

τ : 광학시스템의 시정수

피크의 상승으로부터 t_{fall} 로 나타내지는 시간까지의 값들은 버려진다. 데이터 획득 개시시간과 Mie 산란 피크의 감쇠가 일치하는 경우에는 데이터 취득의 시작점으로 간주한다. Fig. 4는 필터 없이 얻어진 신호와 상기 소프트웨어 필터를 과정을 거쳐 포집된 신호 그리고 이렇게 필터를 거친 300개 이상의 신호를 앙상블 평균하는 과정을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 이러한 소프트 필터는 Mie 산란 신호를 감지하고 제거하는데 매우 신뢰할 수 있는 방법임이 판명되었다.

2.2.2 바탕 잡음 신호

Rayleigh 산란은 탄성 산란이므로 주변광, 광학 기구나 고체 표면, 석영 실린더로부터의 산란광, 화염 복사(연소가 있는 경우) 등의 바탕 잡음 신호가 포함되어 있다.⁵⁾ 기체로부터의 산란광만이 의미 있는 신호이므로 바탕잡음신호는 Rayleigh 산란법의 가장 큰 제한 중의 하나이다. 바탕잡음의 제거를 위해 일차적으로 수광부인 광전자증배관의 입구부분에 핀홀($50\mu m$)을 설치하여 벽면에서의 반사나 주변광의 유입 등으로 인한 잡음신호가 최소화 되도록 하였다. 그리고 투명 석영관을 통과한 레이저 광이 벽면 등에 반사되어 잡음을 일으키는 것을 방지하기 위해 입사광의 반대편에 빔 트랩(beam trap)을 설치하였다.

그러나 레이저광의 편광축과 수직인 면에서는 석영관이 공동(cavity)처럼 작용하여 레이저광의 다중 반사에 의한 주변광의 영향을 무시할 수 없게 된다. 따라서 본 실험에서는 Rayleigh 산란 단면적은 $\sin^2\theta$

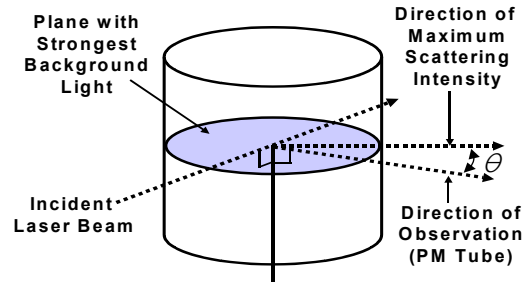


Fig. 5 Background noise reduction by detection angle

에 비례하므로, Fig. 5와 같이 80° 의 각도로 산란광을 포집함으로써, 3%의 신호 손실은 있지만 주변광의 영향을 무시할 수 있는 수준으로 감소시켰다.

바탕 잡음 신호 강도는 Rayleigh 신호로부터 결정할 수 있는데⁵⁾ 그 방법에는 2 가지가 있다. 첫째 방법은 다음과 같다. 이제까지 사용한 신호의 강도에서 바탕 잡음 신호 I_B 를 구별하여 쓰면 다음과 같다.

$$I_t = I_R + I_B \quad (5)$$

여기서,

I_t : 총 신호 강도

I_R : Rayleigh 신호 강도

I_B : 바탕 잡음 신호

(5)식에서 두 개의 다른 기체에 대한 I_t 를 알면 I_B 를 구할 수 있다. 예를 들면 하나는 공기의 산란강도 I_{t1} , 다른 하나는 Rayleigh 산란 단면적이 아주 작은 기체(예를 들면, 헬륨은 공기의 1.65%)의 산란강도 I_{t2} 이다. 두 개의 산란강도를 Rayleigh 산란 단면적에 대한 그래프로 나타낼 때, 그 그래프의 y 절편이 바탕 잡음 신호가 된다. 하지만 이 방법을 위해서는 측정점에 헬륨(He)이 100% 존재하는 조건을 만들어 주어야 하는데 이는 현실적으로 매우 어렵다. 그리고 외삽의 방법을 사용하게 되므로 오차가 커지는 단점이 있다.

둘째 방법은 측정점에서 양쪽으로 조금 떨어진 두 지점의 산란강도를 측정하여 선형적인 분포를 가정하여 바탕 잡음 신호를 구하는 것이다. 하지만 이 방법은 가정에 무리가 있다는 단점 외에 광학 장치의 배열이 흐트러질 수 있다는 단점이 있다.

따라서 본 실험에서는 한 측정점에서 3개의 혼합비가 다른 기체의 산란강도를 측정 후 농도를 계산하는 (6)식을 이용함으로써 바탕 잡음 신호를 직접 구할 필요가 없는 방법을 이용하였다.

$$\frac{X_f}{X_{ff}} = \frac{I_{mix} - I_{air}}{I_{fuel} - I_{air}} \quad (6)$$

2.2.3 기타 잡음 원

상기의 잡음원 외에 Rayleigh 산란의 측정에 영향을 주는 잡음으로는 레이저 출력, 광전자증배관 입력 전압 등의 섭동, 전자 장비의 편차(drifting), 신호의 A/D변환에서 오는 오차, 광전자 증배관의 제한된 응답성, 원인이 불분명한 다크 노이즈(dark noise) 그리고 전기적 샷 노이즈(electronic shot noise) 등이 있다.⁴⁻⁸⁾

본 연구의 Rayleigh 산란에 쓰인 아르곤-이온 레이저의 경우 정출력 상태(power mode)에서 최대 출력 이하(본 실험에서는 780mW)에서 사용하면 출력의 섭동은 아주 느리게 일어나고 그 크기($\pm 0.5\%$)도 작으므로 무시할 수 있다. 광전자 증배관의 입력 전압도 충분히 안정된 범위 내에 들어간다($\pm 0.03\%$). 모든 전자 장비는 같은 접지에 연결하였고, 특히 신호 증폭기(amplifier)의 경우는 한 시간마다 영점조정을 함으로써 편차를 줄였다. 이와 같은 방법으로 처음 다섯 가지의 잡음원은 거의 완벽한 제거가 가능하다.

Pitts 등¹¹⁾에 의하면 샷 노이즈에 의한 신호 대 잡음 비(S/N Ratio)는 다음과 같다.

$$[SNR] = \langle \dot{I}_{pe} \Delta t \rangle > \frac{1}{2} \quad (7)$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{cut-off}} \quad (8)$$

여기서 $f_{cut-off}$ 은 Cut-Off 주파수이다. 이때 \dot{I}_{pe} 는 관측된 광전자 방출율로서 그 정의는 레이저의 강도를 [photon /s] 단위로 나타냈을 때의 신호 강도의 크기(\dot{I}_p)에 광전자 증배관의 양자 효율을 곱한 (9)식으로 정의된다.

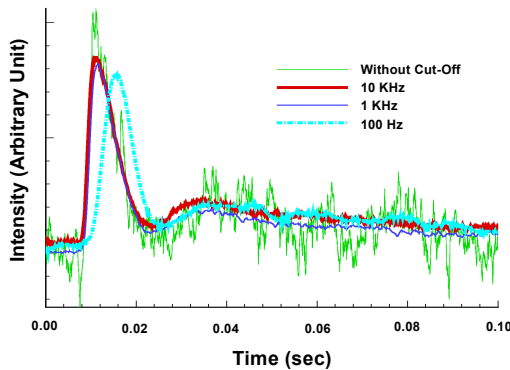


Fig. 6 Effect of cut-off frequency

$$\dot{I}_{pe} = \epsilon \dot{I}_p \quad (9)$$

$$\dot{I}_p = C_0 \dot{I}_0 \Omega I N \sum_{i=1}^M X_i \sigma_i \quad (10)$$

여기서,

ϵ : 광자 효율

\dot{I}_0 : Laser Output [photon/s] =

$PL \cdot \lambda / (h \cdot c)$ (PL : 레이저 출력, λ : 파장, h : 플랑크 상수, c : 광속) 위의 (7), (8)식에 의하면 가능한 한 낮은 컷오프(cut off) 주파수를 사용하면 샷 노이즈를 줄일 수 있게 된다. 따라서 로우 패스 필터(Low-Pass-Filter)를 사용하면 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있다. 그러나 낮은 컷오프 주파수를 사용하면 샷 노이즈의 영향은 줄어드나, 측정의 정확성이 떨어진다는 단점이 있다.^{5,8)} 본 실험에서 컷오프 주파수의 영향을 평가하기 위해 Fig. 6에 나타낸 그림과 같이 컷오프 주파수를 변화시키며 측정을 실시하였다. 그림에 나타나 있듯이 컷오프가 없을 때는 샷 노이즈의 영향으로 거의 측정이 불가능함을 알 수 있다. 10 KHz와 1 KHz의 컷오프는 샷 노이즈를 거의 제거할 수 있었고 신호의 응답성도 컷오프가 없었을 때와 차이가 없다. 100 Hz에서는 샷 노이즈는 발생하지 않으나 시간 응답성이 현저히 증가함을 알 수 있다. 통상 컷오프 주파수는 0.4~10KHz를 사용하는데 본 실험에서는 10KHz를 사용하였으며 그때의 신호 대 잡음 비는 30:1(공기의 경우) ~ 126:1(프레온의 경우)이다.

2.3 측정 결과의 검토

이상의 측정 및 필터링 방법을 실험 엔진을 잘 모사한다고 알려진 정상 유동 장치에도 적용이 가능함을 검토하기 위한 실험을 수행하였다. 정상 유동장치에서 Rayleigh 산란신호의 측정을 위한 광학계 구

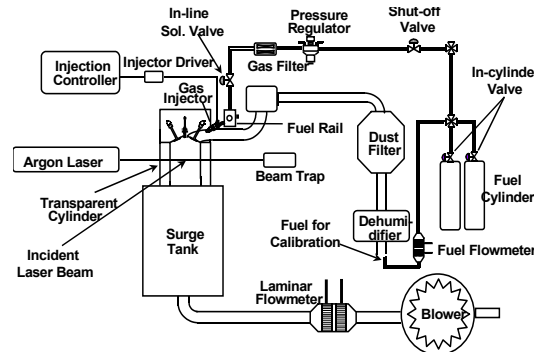


Fig. 7 Schematics of LRS measurement system in steady flow rig.

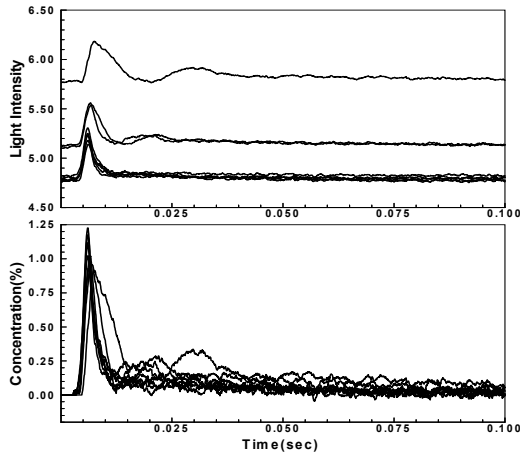


Fig. 8 Scattering light intensity and fuel concentration in steady flow rig.

성은 Fig. 7.과 같다. 측정은 엔진의 공기 흡입관에 인젝터를 설치하고 연료로 프레온을 간헐적으로 분사하며 인젝터의 하류에서 공기와 혼합되는 과정에서 시간의 변화에 따른 농도의 변화를 측정하였다.

위의 장치에서, 디지털 필터로 Mie 산란 잡음신호를 실시간으로 제거하면서 동일한 조건의 신호를 300회 반복하여 획득하고, 이의 앙상블평균을 구한 예를 Fig. 8에 도시하였다.

그림의 산란강도에도 나타나 있듯이 농도측정 시 바탕 잡음 수준의 변화와 측정점을 이동하면서 생기는 미세한 광학적 정렬의 변화로 산란강도에 차이가 발생하므로 측정하기 전과 후에 항상 농도를 알고 있는 예혼합기를 장치에 흐르게 하고 이를 측정하여 기준으로 삼아 농도를 구하였다.

이러한 측정을 전 실린더에 걸쳐 행하고 이를 이용해 실린더 내의 농도 분포를 구한 예를 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 농도 분포는 물리적 현상과 잘 일치하고 있으며 결과적으로 적절한 보정 및 잡음에 대한 대책을 적용함으로써 Rayleigh

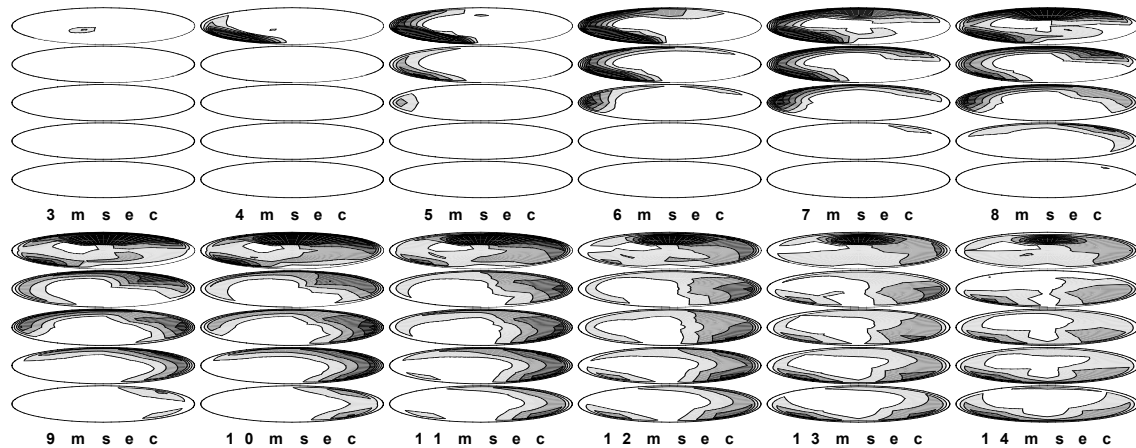


Fig. 9 Concentration Field at 4mm Valve Lift

산란은 유동이 있는 상태에서 연속적 농도 측정에 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있었다.

3. 결론

정상 상태의 유동에 연료가 공급될 때 Rayleigh 산란을 이용하여, 투입된 연료의 농도를 연속적으로 측정하는 방법을 개발하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저출력 연속광 레이저를 이용하여 Rayleigh 산란법에 의한 농도 측정은 연속적 농도 측정에 매우 유용한 방법이다.
2. Rayleigh 산란을 이용한 농도 측정 시 가장 큰 난점은 Mie 산란에 의한 간섭이다.
3. Mie 산란의 영향을 제거하기 위해 우선 하드웨어 필터로 입자의 수 밀도를 측정 가능한 수준으로 감소시켜야 한다.
4. Mie 산란 입자가 충분히 작은 경우 Mie 산란 신호는 소프트웨어 필터를 적용해 효과적으로 제거할 수 있다.
5. 주변광의 간섭은 광학적 배열을 조정함으로써 효과적으로 제거가 가능하다.
6. 샷 노이즈에 의한 잡음은 컷-오프 주파수를 적용하여 제거가 가능하며 본 실험의 경우 이는 10KHz이다.
7. 바탕 잡음은 실험 환경에 따라 수시로 변동하므로 이의 제거를 위해서는 측정 전후 잡음 수준을 측정하여야 한다.
8. 바탕 잡음의 제거를 위해 핀 홀과 빔 트랩의 적용은 매우 효과적이다.

참 고 문 헌

- 1) S. C. Jhonston , "Precombustion Fuel/Air Distribution in a stratified Charge Engine Using Laser Raman Spectroscopy", SAE Paper 790433, 1979
- 2) G. Gr nefeld and V. Beushausen, "Planar Air Density Measurements near Model Surfaces by Ultraviolet Rayleigh/Raman Scattering", AIAA Journal, Vol.32, No. 7, July 1994, pp.1457-1463
- 3) B. Shirinzadeh, M. E. Hillard, A. B. Blair and R. J. Exton, "Study of Cluster Formation and its Effect on Rayleigh and Raman Scattering Measurements in a Mach 6 Wind Tunnel", 22nd AIAA Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference, AIAA 91-1496, Honolulu, Hawaii, July 1991
- 4) F. Q. Zaho, "Laser Rayleigh Scattering Measurement of the Fuel Vapor Concentration in the Combustion Chamber of SI Engine", PhD. thesis, Hiroshima University, 1992
- 5) F. Q. Zaho and H. Hiroyasu, "The Application of Laser Rayleigh Scattering to Combustion Diagnostics", Prog. Energy Combust. Sci., Vol.19, 1993, pp. 447-485
- 6) E. Hecht, Optics, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Co., 1987
- 7) K. H. Lee, "Correlation between Mixture Nonuniformity around Spark Plug Gap, Early Flame Development and Cycly-by-Cycle Variation", PhD. thesis, University of Wisconsin-Madison, 1994
- 8) C. Arcoumanis, "Velocity and Concentration Fields in Reciprocating Model Engines", PhD. thesis, Imperial College of Science and Technology, 1983
- 9) H. G. Green, "Developments in signal analysis for laser Rayleigh scattering", J.Phys.E. : Sci. Instrum. 20, 1987, pp. 670-676
- 10) Y. J. Rho, M. Schlaf, I. Y. Ohm, K. S. Jeong and I. S. Jeung, "Application of Laser Rayleigh Scattering to Fuel Concentration Measurement", 1996 KSAS Autumn Conference, 1996, pp. 320-324
- 11) T. D. Fansler, D. T. French and M. C. Drake, "Fuel Distribution in a Firing Direct-Injection Spark-Ignition Engine Using Laser-Induced Fluorescence Imaging", SAE Paper 950110, 1995

