

레이저 유도 격자 분광장치 제작 및 C_3H_8 화염에서 열 격자 측정

박철웅 · 한재원[†]

한국표준과학연구원 레이저계측 그룹

④ 305-600 대전시 유성구 유성우체국 사서함 102호

이종재 · 이영우

목원대학교 전자공학과

④ 302-729 대전시 서구 도안동 800번지

고동섭

목원대학교 광전자물리학과

④ 302-729 대전시 서구 도안동 800번지

(2001년 5월 24일 받음, 2001년 10월 9일 수정본 받음)

레이저 유도 격자 분광장을 제작하여, C_3H_8 충류 확산화염에서 생성된 열 격자 신호를 측정하였다. 열 격자를 생성시키기 위한 여기광은 파장이 532 nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하였고, 검침광은 488 nm의 CW Ar⁺ 레이저를 이용하였다. 검침광의 세기를 변화시켜 장치의 회절효율과 신호 특성을 측정하였다. 측정된 열 격자 신호의 세기를 분석하여 화염내의 매연의 농도 분포를 정성적으로 측정하였고, 신호의 주파수 변화를 측정하여 온도 분포를 구하였다.

분류코드 : SM.030, SP.010, NL.010, LO.050.

I. 서 론

레이저 유도 격자 분광학(laser induced grating spectroscopy, LIGS)은 두 빔이 여기광을 임의의 각도로 매질 내에 입사했을 때 발생하는 간섭현상으로 형성되는 격자를 검침광으로 측정하여 분석하여 매질의 물리량을 측정하는 계측방법이다. LIGS는 분자나 원자의 구조뿐만 아니라 유동체의 에너지 전이특성, 매질내의 음속, 온도와 극 미량 화학 종의 농도를 측정할 수 있는 아주 유용한 시 분해 측정 광 계측 기술이며 공명주파수의 광원뿐만 아니라 비 공명주파수의 광원에서도 신호를 얻을 수 있다. 여기 광원이 매질의 공명주파수라면 광 에너지가 매질에 흡수되고, 비 탄성 충돌에 의해 주위의 다른 분자나 원자에 열 에너지를 전달하게 된다. 따라서 매질 내에 열 에너지 전달에 의한 온도 구배로 인해 열 격자가 생성된다. 또한 여기 광원이 매질의 비 공명주파수를 갖는다면 전기장의 유도 분극에 의해 생성된 퍼텐셜 기울기에 가속되거나 감속된 분자에 의하여 electrostrictive 격자가 생성된다.^[1]

이러한 LIGS를 이용하여, Cummings와 Stampanoni-Pariello 등이 electrostrictive 격자를 이용하여 가스의 음속과 음향 감쇄 등을 측정하여 가스의 특성을 연구하였고,^[2,3] Williams 등에 의해 H_2/O_2 화염을 대상으로 열 격자 신호의 시간 및 공간적 특성 연구와 Brown 등에 의해 화염의 온도를 측정하였

다.^[4-6] 또한 최근에는 Schlampp 등에 의해 유동속도 측정에도 사용되고 있다.^[7] 또한 Cummings 등은 매질의 열 확산도(thermal diffusivity) 측정과 극 미량 화학 종의 특성 측정에 대해 연구하였으며,^[8] Cummings에 의해 펜토그램 NO₂ 가스의 감수율을 측정하였고, 매질의 농도와 신호 세기의 관계에 대해서도 연구되었다.^[1] 위와같이 LIGS는 가스뿐만 아니라 유동체, 화염 측정 등에 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 532 nm의 파장을 가진 여기광과 488 nm의 검침광을 사용하여 LIG(laser induced grating) 분광 장치를 구성하였다. 또한 이 장치를 이용하여 C_3H_8 충류 확산 화염(laminar diffusion flame)에서 발생하는 매연(soot)에서 발생하는 열 격자 신호를 측정하였다. 검침광의 세기를 변화시켜 장치의 회절효율과 신호 특성을 측정하였다. 측정된 열 격자 신호의 세기를 분석하여 화염내의 매연의 농도 분포를 정성적으로 측정하였고, 신호의 주파수 변화를 측정하여 온도 분포를 구하였다.

II. LIGS 이론 및 시 분해 신호 특성

레이저 유도 격자 분광학에서는 파장이 서로 다른 두 개의 레이저를 사용한다. 하나는 매질 내에 공간적 부피격자를 생성시키기 위한 여기광으로, 다른 하나는 부피격자를 검출하는 검침광으로 사용한다. 파장이 λ_1 인 여기광이 매질에서 각도 θ 로 교차하게 되면 격자 간격이 다음과 같은 부피격자가 생성된다.^[9]

[†]E-mail: jwhahn@kriss.re.kr

$$\Lambda = \frac{\lambda_1}{2 \sin(\theta/2)} \quad (1)$$

한편 부피격자로 파장이 λ_2 인 검침광을 다음과 같은 각도로 입사시키는데, 이를 Bragg 입사 조건이라고 하며, 이 입사 조건에서 신호의 크기가 극대화된다.

$$\phi = 2 \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_2}{2\Lambda} \right) \quad (2)$$

검침광의 Bragg 회절 효율 η 는 다음과 같다.^[9]

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{I_s}{I_2} \\ &= \left(\frac{d\Delta\alpha}{4} \right)^2 + (A_n + 2B_n\rho)^2 \left(\frac{\pi d\Delta\rho}{\lambda_2} \right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 I_2 는 검침광의 세기, I_s 는 신호세기, d 는 생성된 부피격자의 길이, $\Delta\alpha$ 는 흡수계수의 변화, $\Delta\rho$ 는 밀도의 변화량이다. A_n 과 B_n 은 실험적으로 결정할 매질 상수이다. 부피격자의 길이 d 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d \equiv 2\omega_0 / (\sqrt{2}) / \sin(\theta/2) = \sqrt{2}\Lambda(2\omega_0/\lambda_1) \gg \Lambda \quad (4)$$

여기서 ω_0 은 여기광의 반경이다.^[11]

한편 Cummings 등에 의하면, 펄스광을 사용하여 부피격자를 생성시키는 경우에 매질의 흡수계수 변화는 무시할 수 있어서 오직 밀도의 변화에 의해서 신호광의 세기가 결정된다. 여기광이 입사한 후, 시간에 따른 매질의 국소적인 밀도 변화는 매질의 열 및 음향학적 특성에 의해서 결정되며, 그 결과 신호의 시간적 변화는 다음 식으로 표현된다.^[2]

$$\begin{aligned} I_s(t) &\propto [\Delta\rho(t)]^2 \\ &= [Ae^{-D_T q^2 t} + Be^{-\Gamma q^2 t} \cos(c_s q t + \phi)]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} q &= 2\pi/\Lambda \\ \Gamma &= \frac{1}{2} \left[(\gamma - 1) + \frac{4\gamma}{(9\gamma - 5)} \right] D_T \end{aligned}$$

이며, c_s 는 음파의 속도, D_T 는 열 확산도(thermal diffusivity)이며, q 는 격자의 파수벡터, Γ 는 밀도 정상파의 감쇄계수(acoustic damping coefficient)라고 한다. A 와 B 는 상수이다. 식 (5)에서 신호의 세기는 밀도 변화의 제곱에 비례하고, 밀도는 매질의 농도 c_n 과 비례하기 때문에 다음 식이 성립한다.

$$c_n \propto \sqrt{I(t)} \quad (6)$$

또한 매질의 탄성적 반응 특성에 의해 생성된 밀도 정상파의 주파수와 주기는, 열 격자인 경우에

$$f_p = \frac{c_s}{\Lambda}, \tau_p = \frac{\Lambda}{c_s} \quad (7)$$

로 주어진다. 측정된 주파수가 Brillouin 주파수, $\omega_B = 2\pi f_p = c_s q$ 와 같다면 열 격자, 두 배라면 electrostrictive 격자로 정

의된다. 또한 밀도정상파의 속도 c_s 는

$$c_s = \sqrt{\frac{TR\gamma}{M}} \quad (8)$$

으로 표현되며, 여기서 T 는 매질의 온도, R 은 이상기체상수, M 은 가스의 몰 질량, $\gamma = c_p/c_v$ 이다. 여기서 c_p 는 정압비열, c_v 는 정적비열이다.^[5] 신호의 시간적 변화를 계측하고 곡선 마춤을 통하여 신호의 진폭에서는 특정 입자의 농도에 대한 정보를, 신호의 주파수에서는 매질의 온도 및 열 확산도, 그리고 매질 내에서의 밀도 정상파의 속도 등의 정보를 얻을 수 있다.

신호의 곡선 맞춤과정을 간단히 설명하면 다음과 같다. 여기 광의 빔 profile이 δ 함수로 표현되고 계측기에 의한 신호의 왜곡이 없는 경우, 실험적으로 측정한 신호와 실제 신호와는 완전히 일치하게 된다. 그러나 일반적으로 여기광은 일정한 형태의 profile을 가지고 있고, 계측기의 측정 대역폭이 한계가 있기 때문에 계측되는 신호 $f(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$f(t) = \int_0^t P(t') I(t-t') dt' \quad (9)$$

여기서 $P(t)$ 는 여기광에 대한 계측기의 응답함수(response function)이며, $I(t)$ 는 LIGS 신호 곡선이다. 따라서 실제 LIGS 곡선을 구하기 위해서 deconvolution에 의한 비선형 최소제곱법을 이용하였다. 최소제곱법을 통하여 $I(t)$ 를 구했으며, Reduced chi square χ^2 의 최소가 되는 조건을 찾음으로써 식 (5)의 매개 변수 A, D_T, B, Γ, c_s 를 구하였다.^[11]

III. 실험장치

Fig. 1은 LIGS 실험 장치도이다. 본 연구에서 LIGS 신호를 측정하기 위한 대상 매질인 매연은 흑체와 같은 특성을 가지고 있기 때문에 열 격자를 발생시키기 위한 여기광원으로 파장은 532 nm이며, 펄스 반복률은 10 Hz, 광 펄스폭은 약 9 ns인 Nd:YAG 레이저(Quantel, YG-681)를 사용하였다. 여기광은 50/50 선속 분할기를 이용하여 같은 에너지의 두 개의 광으로 나눈 후, 거울을 이용하여 같은 수직선상으로 평행하게 진행하도록 정렬하였다. 평행하게 진행된 두 빔은 초점거리가 750 mm인 볼록렌즈를 통과하여 화염 내에서 위상정합 조건에

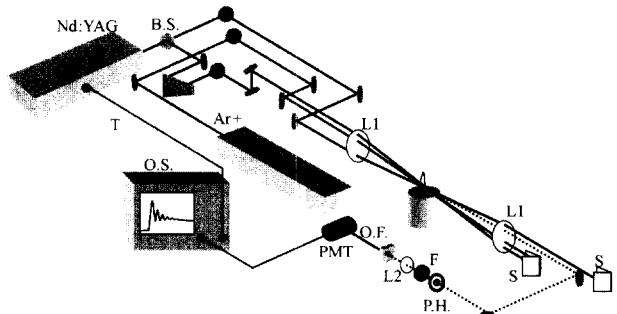


Fig. 1. The experimental setup for LIGS. B.S., Beam Splitter; L1, $f = 750$ mm Lens; S, Beam Stop; P.H., Pin Hole; F, Interference Filter; L2, $f = 150$ mm Lens; O.F, Optical Fiber; T, Trigger line; O.S, Oscilloscope.

맞춰서 교차시켰다. 두 여기광이 어떤 지점에서 같은 시간에 교차할 때, 강도 대비가 가장 명확한 격자가 생성된다. 따라서 이 조건을 용이하게 설정할 수 있도록 하기 위해서, 한 쪽 경로에 거울과 프리즘으로 구성된 광경로 자연장치를 설치하였다. 검침광으로는 파장이 488 nm인 Ar^+ 레이저(Coherent, Innova 300)를 사용하였다. 여기광과 같은 수직선상의 동일 평면에서 나란하게 진행시켰으며, 볼록 렌즈를 통과하여 열 격자의 Bragg 조건에 맞도록 입사시켰다. 이때 세 빔이 동일 지점에서 초점이 맞는지 확인을 위해서 초점위치에 직경이 500 μm 인 펀홀을 설치하고 세 빔이 정확히 통과하는지 확인하였다.

격자 간격과 신호주기의 상관관계를 확인하기 위하여 두 여기광의 간격은 약 0.7~2.0 cm로 변화시키면서 측정하였고 이 때 발생된 격자 간격은 약 20~56 μm 이고 검침광과 신호광은 0.6~1.9 cm의 간격으로 발생한다. 신호광과 여기광의 간격이 불과 1 mm 이내의 차이로 같은 경로상을 진행하기 때문에 두 광을 분리하는 것이 중요하다. 두 광을 분리하기 위하여 488 nm 투과필터를 이용하여 원하지 않는 532 nm의 여기광을 제거하였고, 초점거리가 150 mm인 볼록렌즈를 이용하여 직경이 200 μm 인 광섬유로 입사시켰다. 이 광섬유는 광전증배관(Hamamatsu, R955)의 광음극으로 연결되어 있다. 광전증배관의 광전자 신호는 디지털 오실로스코프(HP, Infinium54845A)를 사용하여 수집하였다. 이때 광전증배관의 인가 전압은 모든 실험에서 -600 V로 유지하였다.

본 실험에서 여기광(Nd-YAG의 2차 고조파)의 입사 에너지는 15 mJ/pulse(15 MW)이며, 검침광(Ar^+ 레이저)은 500 mW, 사용한 연료는 C_3H_8 (순도 99.5%)이며, 열 격자를 발생시키는 매연이 충분히 발생시키기 위하여 별도의 산화제를 첨가하지 않았다. 연료는 기체 질량 흐름 조정기(MKS 사)를 사용하여 유량이 0.12 l/min이 되도록 유지하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

Fig. 2는 검침광의 세기변화에 따른 측정된 신호의 세기에 대한 결과이다. 측정결과에서 보면 측정신호의 세기는 검침광의 세기가 0.5 W 이전과 이후에서 다른 기울기로 증가하여 포

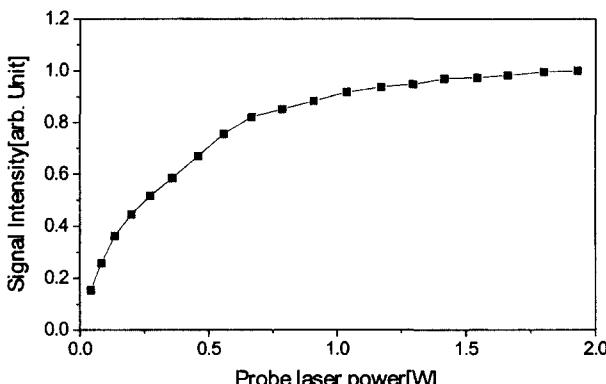


Fig. 2. Measured diffraction efficiency of LIGS.

화되는 결과를 보인다. 본 연구에 사용한 광전증배관의 경우에는 인가전압 -600 V에서 변환율(g)은 3.0×10^5 , 파장 488 nm에서 반응도는 0.062 A/W이다. 신호광의 세기가 1.0×10^{-7} W라면 50Ω 저항에서 측정되는 신호의 크기는 93 mV이다. 이 관계를 이용하여 측정된 신호의 크기에서 신호광의 세기를 산출하고, 식 (3)에 대입하여 회절효율 η 을 계산할 수 있다. 회절효율 η 은 비 포화 영역으로 예상되는 검침광의 세기가 0.5 W 이전의 구간에서는 7.0×10^{-9} , 포화영역으로 예상되는 구간에서는 2.0×10^{-9} 의 효율이 측정되었다. Fig. 2의 비 포화 영역으로 예상되는 구간에서 검침광의 세기가 아주 작은 경우에는 신호를 측정 할 수 없었는데, 이것은 측정 대상인 매연이 흑체와 같은 특성을 가지고 있기 때문에 입사된 검침광의 일부를 흡수하여 발생한 현상으로 판단된다. 검침광의 세기 증가에 따라 측정 신호의 세기가 포화되는 현상은 구체적인 원인을 규명하지 못하였으나, 강한 여기 레이저광에 의해 매연 입자에서 열 격자가 만들어지고, 다시 검침광이 입사해서 매연 입자들의 기체화를 가속시켜 매연의 농도가 감소하는 방향으로 반응이 촉진되는 것이 원인의 하나로 판단된다.^[15] 검침광의 세기를 0.5 W로 고정하고, 여기광의 세기 20 mJ/pulse로 이상으로 증가시키면 신호세기가 포화되는 것을 관찰 할 수 있었는데, 이 현상도 인가 레이저에 의해 매연입자가 기체화하는 것으로 이해 할 수 있다. 따라서 이후의 온도 및 농도 측정을 위한 실험에서는 검침광과 여기광의 세기를 비포화영역의 세기로 고정하고 실험하였다.

Fig. 3은 격자간격 $\Lambda=28.76 \mu\text{m}$ 에서 측정한 신호와 곡선 맞춤신호, 곡선 맞춤에서 사용한 레이저 펄스모양신호를 나타낸 그림이다. 이때 여기광의 세기는 15 mJ/pulse, 검침광의 세기는 500 mW이며, C_3H_8 화염에서 매연이 가장 많이 분포되어 있는 부분인 버너의 노즐 끝에서 42 mm 부근에서 64번 평균한 결과이다. 여기광의 직경은 567 μm 이며, 생성된 격자의 길이 d 는 식 (4)에 의해 약 7.8 mm로 계산되었다. 측정된 신호의 주파수가 Brillouin 주파수와 같으므로 electrostrictive 격자의 특성은 보이지 않고, 열 격자에 대한 특성만을 가지고 있다. 이것은 화염내의 매연이 흑체와 같은 흡수체이므로,

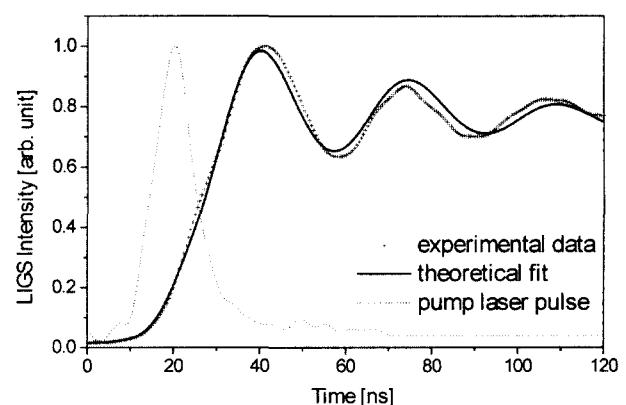


Fig. 3. Time-resolved recorded LIGS signal from C_3H_8 flame at atmospheric pressure and $\Lambda = 28.76 \mu\text{m}$. Crosses denote experimental data and the solid line is a theoretical fit. Dotted line denotes excitation beam.

electrostriction 과정보다 thermalization 과정이 효과적으로 매질의 공간적 밀도 변화에 기여했기 때문이다. Fig. 3에서 세 개의 진동을 명확하게 확인할 수 있으며, 이 세 개의 진동에식 (5)를 이용하여 곡선마춤을 하면 매질에 대한 음도, 음속 등의 정보를 구할 수 있다. 곡선마춤을 이용하여 계산된 밀도 정상파 즉 음파의 속도 c_s 는 832.15 m/s로 나왔으며, 음속 c_s 와 격자 간격 Λ 를 식 (7)에 대입시켜 계산된 신호 주파수 f_p 는 28.94 MHz가 나왔다. 곡선맞춤시 신호의 주기 τ_p 를 구하고, 음속 c_s 를 알아내게 되는데 곡선 맞춤의 신호주기 측정오차는 2.5%였다. 측정에 사용된 매질이 화염에서 발생하는 매연이므로 주위의 다른 매연 입자나 가스로 열 확산이 빠르게 전달될 것으로 예상된다. Fig. 3에서 측정된 열 확산도 D_T 는 42.79 m²/s, 밀도정상파의 음향감쇄계수 Γ 는 3.98 m²/s이 나왔다.

Fig. 4는 Fig. 3의 실험에서 격자 간격 Λ 만 변화시켰으며 다른 조건은 모두 같은 환경에서 측정하였다. 측정된 결과는 음파의 속도 c_s 는 831.59 m/s이고, f_p 는 15.03 MHz, 열 확산도 D_T 는 42.65 m²/s, 밀도정상파의 음향감쇄계수 Γ 는 3.90 m²/s이 나왔다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 실험결과에서 D_T 와

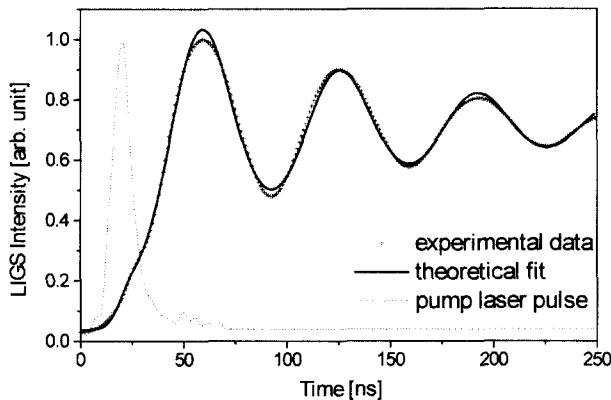


Fig. 4. Time-resolved recorded LIGS signal from C_3H_8 flame at atmospheric pressure and $\Lambda = 55.43 \mu\text{m}$. Crosses denote experimental data and the solid line is a theoretical fit. Dotted line denotes excitation beam.

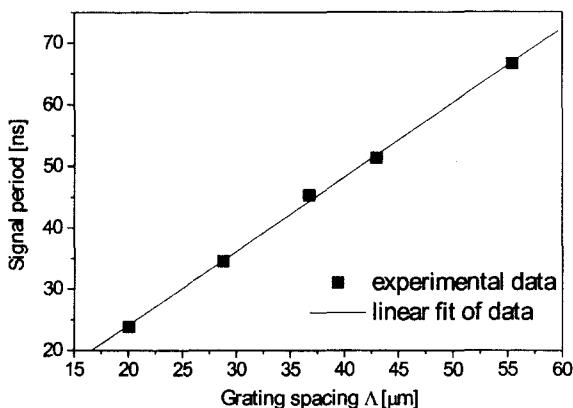


Fig. 5. Measured linearity of LIGS signal periods vs grating spacing.

Γ 값의 변화가 거의 없으며, 측정 시 격자간격의 변화에 의해 신호주기만 바뀜을 알 수 있다. 따라서 측정장치의 신호발생 및 측정과정에 재현성이 있음을 확인 할 수 있다.

위의 두 결과에서 동일 조건에서 격자간격 Λ 가 변할 때 음파의 속도, 열 확산도 등의 변화는 없고 신호의 주기 τ_p 만 변화하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5에서 사각형은 격자간격 Λ 가 약 20~56 μm 일 때 신호의 주기를 보여주고 있다. 이것은 식 (7)의 결과처럼 변조 주기 τ_p 는 격자간격 Λ 에 비례함을 보여주고 있다.

측정위치에 대한 매연 농도의 분포의 측정결과가 Fig. 6에 있다. 이 결과는 버너를 수직이송장치를 이용하여 버너 노즐의 중심을 기준으로 2 mm 간격으로 상하로 이동시키면서 측정하였다. 매연의 농도 분포는 노즐 입구에서 약 40 mm 부근에서 가장 높게 나타났다. LIGS 신호는 식 (3)과 (5)의 관계에 의해 대상 분자의 농도가 높은 곳에서 여기광에 의한 부피 격자 즉 복합굴절률의 강도 대비가 비례하기 때문에 신호의 세기도 증가하게 된다. 따라서 동일조건에서 신호의 세기를 분석해서 대상분자의 농도를 정성적으로 계측 할 수 있다. 매연 분포에 대한 연구는 LII(Laser-induced Incandescence)나 광 소멸법을 이용하여 많이 연구되어졌다.^[12,16] Fig. 6에서는 본 연구와 동일 조건에서 광 소멸법을 이용하여 계측한 매연의 분포 특성^[12]과 LIGS를 이용하여 측정한 분포 특성을 보여주고 있다. 광 소멸법을 이용한 방법의 검침영역은 직경은 수 mm이고, 본 연구에서 사용한 LIGS를 이용한 방법은 567 μm 가 나왔으며, LIGS 방법이 검침영역의 길이도 짧다. 일반적으로 검침영역이 작을 때에는 그래프상의 기울기 변화를 제대로 측정할 수 있다. Fig. 6의 결과를 보면 화염에서 매연이 존재하기 시작하는 20 mm 부근과 화염의 끝인 60 mm 근처를 보면 LIGS 방법에서 측정한 농도의 기울기가 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이결과는 본 연구에서 사용한 LIGS 방법이 상대적으로 검침 영역이 큰 광 소멸법을 이용한 방법보다 화염 위치에 따른 급격한 농도 변화를 측정하는데 적당함을 보여주고 있다. 따라서 위와 같은 조건이 고려된다면 LIGS를 이용한 농도측정 방법이 광 소멸법보다 정확한 결과를 측정할 수 있다고 예상된다.

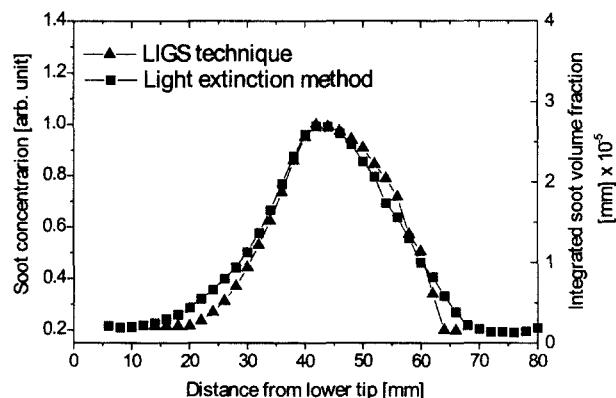


Fig. 6. Comparison of soot concentration profiles measured with LIGS technique (▲) and light extinction method (■).

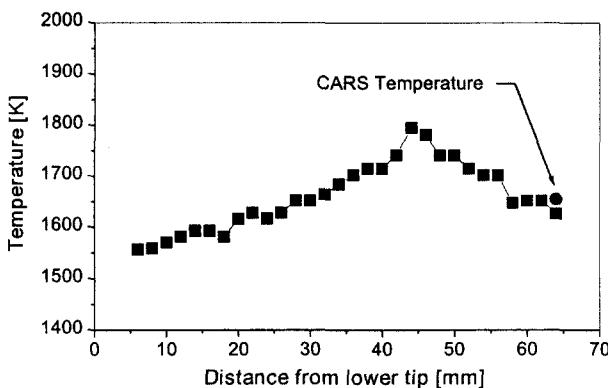


Fig. 7. Temperature profile measured LIGS thermometry.

일반적으로 온도가 높은 곳에서는 음파의 속도가 빠르게 진행한다. 따라서 화염내의 음파의 속도를 측정하고 온도와 밀접한 관련이 있는 γM 을 안다면 화염의 온도를 산출 할 수 있다. 식 (8)을 이용하여 온도 계산을 위해서는 실험적으로 측정 가능한 음파의 속도 c_s , 실험 장치 구성에서 계산되는 격자 간격 Λ , 상수 R 과 M 과 γ 의 비를 알고 있어야 한다. M 은 mole fraction과 관련된 주요 가스 혼합물의 무게에 대응하는 값의 간단한 합으로, γ 는 온도의 의존하는 값으로 몇 가지 화염의 경우에는 Brown 등^[5]의 경우를 보면 계산을 통하여 추정할 수 있다. 이번 실험의 경우에는 완전 확산 화염이기 때문에 M 과 γ 의 값은 계산으로 추정할 수 없어서 다른 실험 방법으로 구한 값을 사용하였다. 화염의 끝에서 R-type 열전대로 구한 온도로부터 예측된 M 과 γ 의 비를 사용하여 LIGS 신호로부터 구한 온도 분포의 결과가 Fig. 7에서 보여주고 있다. 사용된 열전대는 직경이 125 μm 이고, 측정온도 값은 1627 K이었다. 측정시 신호의 주기 τ_p 를 측정오차가 2.5% 정도이므로 LIGS온도 측정오차는 5%정도이다.

화염온도 측정시, 고온의 기체 속에 있는 열전대의 온도는 열전대 비드의 복사에 의한 열손실로 인해 실제 온도보다 낮은 온도로 측정된다. 열전대 비드에 연결된 리드선을 통한 전도 열전달과 열전대의 삽입으로 인한 유동장의 교란으로 인한 영향 등을 무시하면 주위 가스의 대류로 인한 비드로의 열전달이 비드의 복사에 의한 열손실과 같다는 에너지 평형식을 얻을 수 있고, 이 식으로부터 복사열전달 온도를 구할 수 있는데, 이 값은 39 K였다. 측정결과를 확인하기 위하여 질소 CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy)로 온도를 측정 해보았는데, 버너노즐 끝 부분에서 측정한 결과는 1655 K이다. 따라서 CARS 측정결과가 열전대의 측정결과보다 방사에 의한 열손실을 고려하면 좀더 낮게 측정되었음을 알 수 있는데, 화염 측정시 CARS장치의 오차 범위 3%이내에서 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 7의 LIGS 방법으로 측정하여, 계산된 화염위치의 온도 분포를 보면 화염의 온도는 버너 노즐 끝에서 38 mm 부근에서 가장 높게 나타났다. 이것은 화염으로 확산된 산소량에 증가에 의해 온도가 증가 하다가 화염 끝에서는 바깥쪽으로 열전달에 의하여 감소하면서 생긴 결과이다.

V. 결 론

본 연구에서는 레이저 유도 격자 분광장치를 구성하였고, 이 장치를 이용하여 C_3H_8 층류 확산화염에서 발생하는 매연에서 열 격자를 발생시켜 신호를 측정하였다. 흑체와 같은 흡수체인 매연에서 생성된 열 격자의 격자 간격(grating period)과 신호 주기의 관계를 측정하였다. 측정결과를 분석하여 화염내의 측정 분자 즉 매연의 분포, 그리고 화염의 온도 분포를 측정하였으며, 온도는 열전대와 CARS 장치를 이용하여 측정 결과를 확인하였다. 이상의 실험으로 얻은 결과는 실험식과 잘 일치함을 보였고, 매연의 농도분포는 기존의 발표된 결과와 비교해보면 정성적인 분포를 LIGS 장치로 얻을 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] E. B. Cummings, "Laser-induced thermal acoustics," Ph D. thesis, California Institute of Technology, 1995.
- [2] E. B. Cummings, "Laser induced thermal acoustics: simple accurate gas measurements," *Opt. Lett.*, vol. 19, pp. 1361-1363, 1994.
- [3] A. Stampaponi-Panariello, B. Hemmerling and W. Hubschmid, "Electrostrictive generation of nonresonant gratings in the gas phase by multimode lasers," *Phys. Rev. A*, vol. 51, pp. 655-662, 1995.
- [4] S. Williams, L. A. Rahn, P. H. Paul, J. W. Forsman and R. N. Zare, "Laser-induced thermal grating effects in flames," *Opt. Lett.*, vol. 19, pp. 1681-1683, 1994.
- [5] M. S. Brown and W. L. Roberts, "Single-point thermometry in high-pressure, sooting, premixed combustion environments," *J. Prop. & Power*, vol. 15, pp. 119-127, 1999.
- [6] A. Stampaponi-Panariello, B. Hemmerling and W. Hubschmid, "Temperature measurements in gases using laser-induced electrostrictive grating," *Appl. Phys. B*, vol. 67, pp. 125-130, 1998.
- [7] Schlamp S, Hornung HG, Sobota TH, Cummings EB. "Accuracy and uncertainty of single-shot, nonresonant laser-induced thermal acoustics," *Applied Optics*, vol. 39, no. 30, pp. 5477-5481, 2000.
- [8] E. B. Cummings, H. G. Horning, M. S. Brown and P. A. DeBarber, "Measurement of gas-phase sound speed and thermal diffusivity over a broad pressure range using laser-induced thermal acoustics," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1577-1579, 1995.
- [9] H. J. Eichler, P. Gunter and D. W. Pohl, "Laser-induced Dynamic Gratings" (Springer-Verlag, Berlin, 1986).
- [10] D. V. Kozlov, B. Hemmerling, and A. Stampaponi-Panariello, "Measurement of gas jet flow velocities using laser-induced electrostrictive gratings," *Appl. Phys. B*, vol. 71, pp. 585-591, 2000.
- [11] D. V. O'Connor, D. Phillips, "Time-correlated Single Photon Counting" (Academic Press, London, 1984)
- [12] 강희곤 "층류 확산화염의 매연생성에 관한 실험적 연구," 석사학위 논문, 단국대학교, 1997.

- [13] B. Mewes and J. M. Seitzman, "Soot volume fraction and particle size measurements with laser-induced incandescence," *Appl. Phys.*, vol. 36, pp. 709-717, 1997.
- [14] 강경태, 정석호, 한재원, 박승남, "메탄 공기 예혼합화염에
서 CARS를 이용한 CO농도 및 온도 측정과 수치해석 결
과의 비교," *대한기계학회논문집*, vol. 19, pp. 1333-1339,
1995.

Construction of laser induced grating spectrometer and measurement of thermal grating in C₃H₈ flame

Chul Woung Park and Jae Won Hahn[†]

Laser Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejon 305-600, KOREA

[†]E-mail: jwhahn@kriis.re.kr

Joong-Jae Lee and Young-Woo Lee

Department of Electronics and Computer Engineering, Mokwon University, Daejon 302-729, KOREA

Dong-Seob Ko

Department of Optical & Electronic Physics, Mokwon University, Daejon 302-729, KOREA

(Received May 24, 2001 ; revised manuscript received October 9, 2001)

We made a laser induced grating spectrometer(LIGS) and measured the thermal grating signal generated in a C₃H₈ flame. The thermal grating was formed in the C₃H₈ flame with two second-harmonic Nd:YAG pulse laser beams, and an LIGS signal was generated by Bragg scattering of a probe laser beam Ar⁺ laser(488 nm). We found the modulation period of the signal depends linearly on the spacing of the grating set in the flame. We determined flame temperature by fitting the modulated signal and soot concentration with signal strength. Using this technique, we also obtained temperature profile and soot-particle distribution in a C₃H₈ flame.

Classification codes : SM.030, SP.010, NL.010, LO.050.