

CARS를 이용한 화염내부 온도분포 측정연구*

한재원 · 박승남 · 이은성 · 이충희

한국표준과학연구원, 플라즈마연구실

강경태 · 정석호

서울대학교, 기계공학과

(1992년 10월 12일 받음)

화염내부의 온도분포를 측정하기 위하여 코헤런트 라만분광 기술을 연구하였다. 측정의 공간분해능을 높이기 위하여 상자형 위상정합 방법을 사용하여 CARS 신호를 측정하였다. 측정된 CARS 신호를 이용하여 화염의 온도를 계산하는 프로그램을 연구하였다. 섭동이론을 이용하여 에너지 간격법칙으로 기술되는 질소 분자의 라만 Q-가지 분광선의 선평확대 효과를 온도계산 프로그램에 삽입하였다. 에너지 간격법칙을 이용하여 계산된 화염내부의 온도 분포가 열전대로 측정된 온도와 계산에 의해 구해진 단일 화염 온도와 적절히 일치함을 확인하였다.

I. 서 론

레이저가 발명된 후 이를 이용한 연소진단 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 특히 최근 개발된 레이저 라만 분광기술인 CARS (coherent anti-Stokes Raman spectroscopy) 기법^[1,2]과 레이저 유도 형광법^[3](LIF: laser induced fluorescence)이 연소 진단 연구에 도입되어 온도 측정의 정확도, 온도분포 측정의 공간분해능 및 성분 분석능력이 획기적으로 향상되었으며, 연소기체를 응용하는 여러분야에서 이러한 기술을 이용하여 새로운 고효율 열기관 개발과 깨끗한 연소기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 레이저를 이용하여 연소상태를 진단하는 기술로는 여러가지가 있는데, 그 중 대표적으로 CARS, 레이저 유도 형광법 두 가지가 기술적으로 상호 보완적인 관계를 가지면서 널리 활용되고 있다.

연소진단에 CARS 기법이 사용되면서 종전에는 힘들었던 여러 종류의 연소상태에 대한 비접촉식 진단이 가능하게 되었다. CARS는 매질의 라만편이의 파장 차이를 가진 두 가지 레이저 광을 렌즈로 집사시켰을 때 두 레이저 광이 만나는 렌즈의 초점에서 신호가 발생되므로 뛰어난 공간 분해능을 가지고 있으며, 온도측정의

정확도도 매우 높다. 현재까지 연구된 결과에 의하면 약 1 mm 이내의 공간분해능으로 연소기체의 공간적인 온도분포를 측정할 수 있다. 그리고 온도측정의 정확도는 4000°C 정도의 고온 기체에서 5% 이내이다. 밀도 측정의 경우 다른 기체와 섞여 있을 때 그 농도가 0.1% 이상이면 측정이 가능하며, 절대 압력이 0.1 Torr 정도인 기체의 검출이 가능하다.

본 논문에서는 최근 완성한 CARS 분광기^[4,6]를 이용하여 연소 상태의 불꽃의 온도를 측정한 연구 결과를 기술하고자 한다. 측정된 CARS 스펙트럼으로부터 온도를 계산하기 위하여 최근 연구된 에너지 간격법칙^[7]을 이용하여 계산된 라만 Q-가지 분광의 선평확대효과를 포함시킨 온도계산 알고리즘을 연구하였다. 그리고 여러가지 방법으로 구한 화염내부의 온도 분포를 비교하였다.

II. CARS 분광을 이용한 온도계산 이론

1. 이원자 분자의 회전 및 진동 에너지 준위

자연상태의 이원자 분자는 회전운동과 진동운동을 동시에 하고 있으며, 이 두 가지 운동의 상태가 변하면서 분광을 방출하게 된다. 따라서 분자의 분광을 계산하기 위해서는 이러한 운동의 결합에 의하여 생기는 분자의

* 본 연구는 과학기술처 연구비 지원으로 수행된 것임

에너지 준위를 계산해야 한다. 본-오펜하이머(Born-Oppenheimer) 근사를 이용하여 회전준위 J 와 진동준위 v 에 있는 이원자 분자의 에너지 상태를 기술하면 다음과 같다.¹⁸⁾

$$E(v, J) = h\nu [B_v J(J+1) - D_v J^2(J+1)^2 + H_v J^3(J+1)^3 + \dots + \omega_e \{1 - \chi_e(v + \frac{1}{2})\}(v + \frac{1}{2})] \quad (1)$$

윗 식에서 첫번째 줄 오른쪽 세개 항은 주로 회전운동에 의해 정해지는 에너지 양이며, 다음 줄의 항들은 진동운동에 의해 정해지는 에너지 양을 나타낸다. 이 때 계수 B_v, D_v, H_v 는 아래 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} B_v &= B_e - \alpha(v + \frac{1}{2}) + \gamma(v + \frac{1}{2})^2 + \delta(v + \frac{1}{2})^3, \\ D_v &= D_e + \beta(v + \frac{1}{2}) - \Delta(v + \frac{1}{2})^2, \\ H_v &= H_e + H_e(v + \frac{1}{2}). \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $(v + \frac{1}{2})$ 의 다항식 항은 분자의 진동운동에 의한 본-오펜하이머 근사의 보정항이다. 질소 기체에 대하여 (1)과 (2) 식에서 언급한 여러가지 분자상수들이 표 1에 정리되어 있다.

2. 맥스웰-볼츠만 분포

일반적으로 열평형상태에 있는 계의 에너지 준위에 대한 밀도 분포 $P(v, J)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P(v, J) = \frac{g_J(2J+1)}{Q} \exp\{-E(v, J)/kT\}. \quad (3)$$

여기서 Q 는 분배함수이고 g_J 는 축퇴도, k 는 볼츠만상수이고, T 는 계의 온도를 나타낸다. 이 식의 양변에 자연대수를 취하면

$$\ln\left\{\frac{QP(v, J)}{g_J(2J+1)}\right\} = -\frac{1}{kT}E(v, J) \quad (4)$$

표 1. Molecular constants of nitrogen.^[9]

parameter	coefficient
ω_e	2358.57
χ_e	14.324
B_e	1.99824
α	0.017318
γ	-3.0×10^{-5}
δ	0.0
D_e	5.76×10^{-6}
β	0.0
Δ	1.805×10^{-10}
H_e	0.0
H_e	0.0

가 된다. 따라서 에너지와 밀도의 자연대수 값은 온도에 역수에 비례하며, 비례 상수로부터 온도를 구할 수 있다.

3. 에너지 준위에 대한 밀도 계산

분자의 진동준위 1에서 0으로 천이하여 생기는 분광선의 군을 차가운 띠(cold band)라고 부르고 진동준위 2이상에서 아래로 천이하여 생기는 분광선의 군을 뜨거운 띠(hot band)라고 부른다. CARS 분광을 이용하여 온도를 계산하는 경우, 1500 K 이하의 온도 영역에서는 진동준위 2 이상의 에너지 준위에는 밀도 분포가 거의 없기 때문에 진동준위 1에서 0으로 천이하고 $\Delta J=0$ 인 Q-가지 분광선을 주로 이용한다. 따라서 차가운 띠에 있는 Q-가지 각각에 해당하는 밀도 분포를 CARS 분광선으로부터 구해야 한다. 일반적으로 CARS 분광의 세기를 $I(v)$ 라고 하면,

$$I(v) \propto |\chi^{(3)}(v)|^2 = |\sum_J P(0, J) f_J(v)|^2 \quad (5)$$

가 된다. 이 때 $\chi^{(3)}$ 는 CARS 신호 발생에 관계하는 3차 비선형 감수율이고, $f_J(v)$ 는 분광선의 모양 함수^[6]로 분광선의 선폭에 대한 정보가 포함되어 있다. 여기서 이웃하는 두 분광선의 간격이 분광선의 반치폭 $\Gamma(0, J)$ 에 비하여 충분히 크면, 각 분광선에 해당하는 밀도 분포는 CARS 분광선의 각 꼭지점 Peak $(0, J)$ 에 대하여

$$P(0, J) = \Gamma(0, J) \sqrt{Peak(0, J)} \quad (6)$$

의 관계를 가지게 된다. 즉 밀도 분포는 실험에서 측정된 CARS 분광선의 꼭지점을 구한 후 그 분광선의 선폭으로 보정하여 얻을 수 있다.

4. Q-가지 라만 분광선의 선폭

측정된 라만 분광을 분석하여 온도, 밀도 등의 정보를 구하고자 할 경우 각 분광선에 대한 선폭의 크기 대한 정보가 필요하다. 그런데 (6) 식의 라만 분광의 선폭 $\Gamma(0, J)$ 는 진동 및 회전 에너지 준위에 따라 변할 뿐만 아니라 온도 변화에 대해서도 변하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 에너지 준위와 온도 변화에 대하여 일관된 함수로 라만분광의 선폭을 표현하는 연구가 오래전부터 활발히 진행되어 왔다. 최근 에너지 간격법칙으로 각 분광선의 에너지 준위들 간의 이완행렬을 표현하여 선폭을 구하는 연구가 발표되었다.^[7] 이 경우 Q-가지 라만 분광의 생성에 기여하는 에너지 준위인 진동모드와 회전모드 간의 에너지 준위의 차이와 온도의 함수로 이완행렬의 인자(element) γ_{ij} 를 기술하면 다음과 같다.

$$\gamma_{jl} = P\alpha_j(T) \left\{ \frac{1 + AE(l)/kT\Delta_l}{1 + AE(j)/kT} \right\}^2 \exp(-\beta_l |\Delta E_{jl}|/kT). \quad (7)$$

여기서 j 와 l 은 각각 들뜬 진동모드와 바닥진동모드에서의 회전에너지 준위를 나타내고, A 는 충돌시간에 대한 계수로서 질소가 1.5, 일산화탄소가 2.0의 값을 가진다. 위 식에서 α , β , Δ_l 가 마춤 계수로서 실험에서 얻어진 여러 개의 분광결과를 이용하여 α , β , Δ_l 를 구한다. 이때 β 와 Δ_l 는 온도 의존성이 전혀 없으며, α 의 온도 의존성은 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha_l(T) = \alpha_l(T_0) \frac{1 - \exp(-m)}{1 - \exp(-mT/T_0)} (T_0/T)^{0.5} \quad (8)$$

위 식에서 질소의 경우 $\alpha_l(T_0) = 0.0231 \text{ cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$, $m = 0.1487$ 값을 가지며, T_0 는 295 K이다. 이 수정된 에너지 간격 법칙은 지금까지 나온 법칙 중 가장 실험과 잘 맞는 것으로 알려져 있으며 질소와 일산화탄소에 대해 계수들의 값이 실험적으로 구해져 있다. 여기서, 차가운 띠의 Q -가지 라만분광선의 선폭은 위의 (7) 식의 비대각선 항의 합으로부터 쉽게 구할 수 있으며, 식으로 나타내면 다음과 같다.^[10]

$$\Gamma(0, J) = \sum_{j \neq l} \gamma_{jl}. \quad (9)$$

5. 온도 계산 과정

온도의 계산과정의 흐름을 도식적으로 나타낸 것이 그림 1이다. 처음에 CARS 분광선의 각 꼭지점을 이용하여 온도 T_1 을 계산한 다음 그 값을 이용하여 분광선의 선폭을 계산한다. 이렇게 계산된 분광선의 선폭으로 밀도 분포를 보정하여 온도 T_2 를 다시 계산하고, 다시 이 온도를 이용하여 선폭을 계산하고 밀도분포를 보정하여 그에 해당되는 온도를 또 계산하는 하는 일련의 작업을 계속한다. 이 때 선폭을 고려하여 새로 계산되는 온도의 보정값이 온도 크기의 0.1% 이내에 들면 계산을 중지시킨다. 본 실험에서 측정된 데이터로 계산하였을 때 대략 5번 이내의 계산에서 온도가 구해지며, 선폭에 의해 보정되는 온도 값은 약 10% 정도로 선폭의 고려가 매우 중요함을 확인하였다.

III. 실험 장치

1. CARS 분광기

본 연구에서 사용한 CARS 분광기의 상세한 내용은

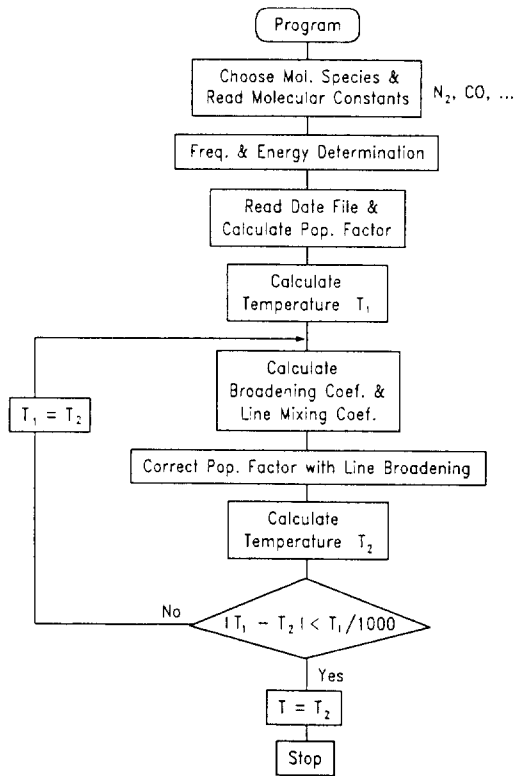


그림 1. Flow chart of the program routine for calculating temperature from the measured CARS spectrum.

이미 여러 차례 발표된 논문^[46]에서 논의된 바 있다. 본 논문에서는 사용한 장치들과 실험에 필요한 몇 가지 실험조건들에 대하여 간략히 기술한다. 먼저 분광기에서 사용한 펌프광은 2차 고조파 Nd:YAG 레이저 (Quantel YG661-10, cw injection seeder laser 사용 단일 종모드 발진, 선폭 60 MHz)이며 에너지는 약 10 mJ 이내이며, 스톡스광은 단일 종모드로 동작하는 색소레이저(Lumonics Hyper Dye-Slm, 선폭 500 MHz)로 에너지는 약 2 mJ 이내이다. 레이저 광의 직경은 모으는 렌즈 바로 앞에서 약 3~4 mm이다. 공간분해능을 높이기 위하여 상자형 위상정합조건으로 실험하였으며 두 펌프광의 중심간의 거리는 약 5 mm 내외이고, 촛점거리 10 cm인 렌즈를 사용하였다. 실험적으로 확인된 공간 분해능은 레이저 진행방향에서 볼 때 약 1.0 mm 정도였으며, 레이저 진행과 수직인 방향으로의 분해능은 0.1 mm 이내로 추정된다.

시료에서 발생된 CARS 분광신호는 Pellin Broca 프

리즘으로 1차 분광시킨 후 다시 단색기(Jovin-Ivon HR-320)로 입사시켜서 광증배관(Hamamatsu R955)을 이용하여 검출하였다. 펄프광과 스톡스광의 세기는 실리콘 광다이오드로 검출하였다. 이 세 가지 전기신호는 Boxcar 평균기(Stanford Research SR280)를 이용하여 그 값을 읽었으며, 컴퓨터와 연결하여 측정결과를 수집하였다. 분광신호는 색소레이저의 파장을 주사하면서 각 파장에서의 CARS 신호를 10~30회씩 평균하여 취하였다.

2. 분젠 버너

대부분의 실용적인 화염은 확산화염과 예혼합화염 두 가지로 나눌 수 있다.^[11,12] 확산화염은 연료와 산화제가 화염속에서 혼합되면서 화염을 형성하므로 화염내부의 연료와 산화제의 확산이 화염을 지배하게 된다. 일반적으로 확산화염은 확산속도가 연소가 되는 화학반응에 비해 느리고, 화염의 위치가 연료제와 산화제의 분포의 변화에 따라 변하므로 화염이 불안정하다. 산불 등의 자연화재, 장작불, 양초불, 석탄연소 등 인간이 오래 사용해온 화염으로부터 액세스프레이 연소, 디젤엔진, 제트엔진, 등이 여기에 속한다. 예혼합화염은 연료와 산화제를 미리 혼합하여 화염을 형성시키는 경우로 연료와 연소제의 화학반응이 연소현상을 지배하며, 화염이 안정하다. 예혼합화염의 예로는 가솔린엔진과 가스버너 등이 있다. 본 실험에서 사용한 분젠화염(Bunsen flame)은 예혼합화염과 확산화염이 동시에 존재하는데, 화염이 비교적 안정되어 있고 만들기가 쉬운 장점이 있다. 분젠버너는 연료와 산화제 혼합물을 긴 튜브(직경 4.9 mm, 길이 약 35 cm)를 지나게하여 유동이 충분히 발달되도록

한 후 튜브 끝에 화염을 형성시켰다. 분젠버너의 특징은 예혼합화염이 정상상태(steady) 화염이기 때문에 측시간이 긴 경우에도 사용이 가능하다. 본 연구에서 사용한 분젠 버너와 화염의 모양을 간단히 그린 것이 그림 2이다. 사용한 튜브는 구리 관으로 외경이 6.25 mm이고 내경이 4.9 mm이다.

IV. 실험 및 결과

분젠버너는 프로판(대한특수기체, 순도 99.5%)과 공기(표준연구원, 질소 79.5%, 산소 20.5%)의 혼합기체를 사용하였다. 이 때 프로판과 공기의 유량은 각각 39.3 cc/min., 690 cc/min.이었다. 연료와 산화제의 비율은 완전 연소하는 경우에 비교하여 연료가 35% 정도 많다. 따라서 화염의 모양은 그림 2에서와 같이 원추형의 화염면을 형성하고 그 바깥에 확산화염이 존재하는 형태가 된다. 그림 2에 CARS 신호를 측정할 점의 방향이 표시되어 있다. 화염면의 꼭지점에서 바깥쪽으로 그리고 화염면의 모양인 원추 중간을 가로 지르면서 바깥쪽으로 온도 측정 실험을 하였다.

1. 화염 꼭지점에서 바깥 쪽으로의 온도 분포

화염면의 꼭지점 근처와 전체화염의 바깥 면에서 구한 CARS 분광선을 그린 것이 그림 3이다. 이 그림은 화염에서 온도가 가장 높은 부위($r=0$ mm)와 온도가 낮은 화염의 바깥 부위($r=4.5$ mm)에서 측정된 CARS 분광으로서 모양이 다른 것을 쉽게 확인할 수 있다. 앞의 II-3에서 언급한 바 있는 CARS 분광의 뜨거운 띠는 Eckbreth 등의 계산결과^[2]를 보면 라만편이 2300 cm^{-1} 이하 영역에서 온도 1500 K 이상일 때 관측되는데, 온도가 2000 K 정도인 CARS 분광에서는 상당히 강한 뜨거운

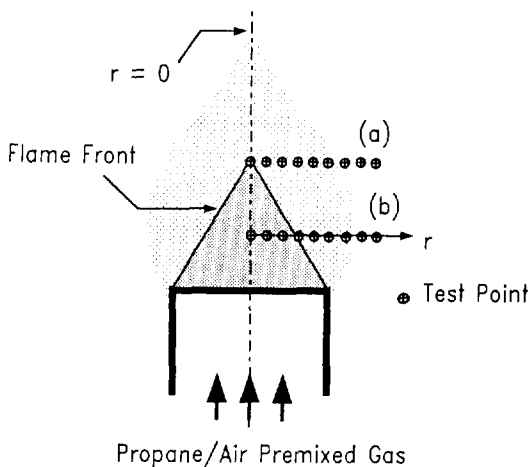


그림 2. Busen burner.

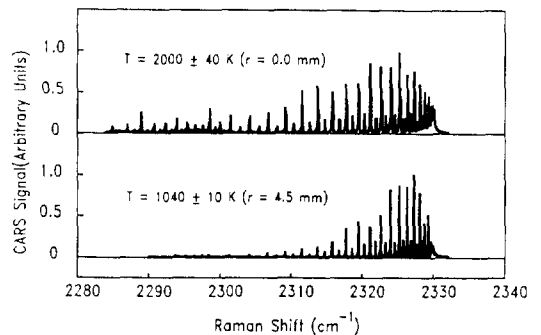


그림 3. Typical CARS spectra of the nitrogen in the propane/air premixed flame of the bunsen burner.

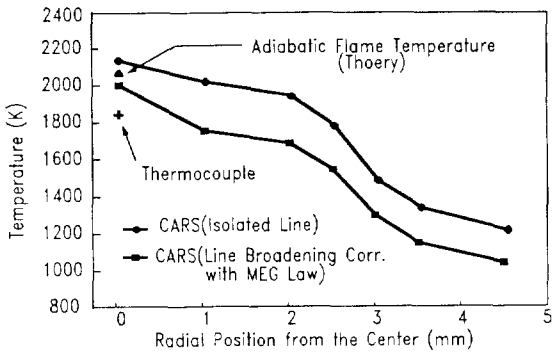


그림 4. Temperature profile measured by changing the radial position in the direction of (a) in Fig. 2. Temperatures are obtained with the several different methods labeled in the figure.

때 분광이 관측되는데 비하여 온도가 1000 K 이하인 분광에서는 거의 보이지 않는다.

그림 2의 (a)에서 보는 바와 같이, 화염의 바깥 쪽으로 온도 분포를 측정할 것이 그림 4이다. 그림에서 위쪽에 있는 곡선은 라만 분광의 선평확대가 회전양자수의 변화에 관계 없이 일정하다고 보고 계산한 것이고, 아래쪽 곡선은 (7)과 (8) 식으로 표현된 수정된 에너지 간격법칙을 이용하여 질소의 회전양자수 변화에 따른 선평확대 효과의 변화를 고려하여 계산한 결과이다.

그림에서 위쪽의 곡선에 나타난 온도분포는 아래에 있는 곡선의 온도분포에 비해 약 10% 이상 높으며, 화염의 꼭지점 값을 비교해 보면 이론적으로 계산한 단열화염온도^[13]-화염에서 이론적으로 가장 높이 도달할 수 있는 온도-보다 높은 값을 가지고 있다. 그러나 아래 곡선에 나타난 온도 중 화염 꼭지에서의 온도를 보면 단열 화염 온도(adiabatic flame temperature) 2070 K 보다는 낮고 열전대(Pt/Pt-Rh 10%, 직경 0.1 mm)로 측정된 값 1843 K 보다 높은 값을 가지고 있다. 여기서 열전대의 측정값이 전도손실이나 복사손실에 대한 보정을 하지 않은 것이므로 실제 보다 낮게 나올 것으로 추측된다. 따라서 에너지 간격법칙을 이용하여 선평확대 효과를 보정하여 계산한 온도가 적절한 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

아래 곡선에 나타난 온도 분포를 보면 측정된 온도는 최고 2000 K에 이르고 바깥 쪽으로 나가면서 서서히 떨어지다가 r=2 mm를 지나면서 급격히 떨어지고 있다. 이는 온도 측정 부위가 화염 내부의 산화제와 바깥의 공기가 만나서 형성하는 확산화염 부위를 지나 찬 대기 쪽으로 나오고 있기 때문인 것으로 판단된다.

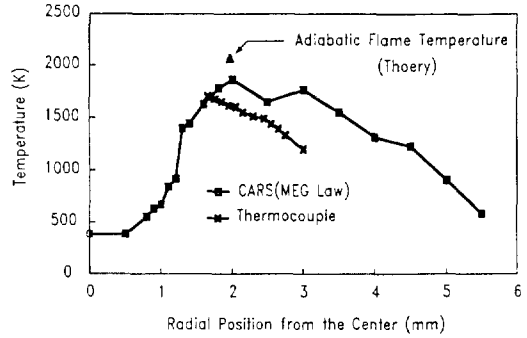


그림 5. Temperature profile measured by changing the radial position in the direction of (b) in Fig. 2. Temperatures are obtained with the several different methods labeled in the figure.

2. 화염면을 가로지르면서 측정된 온도 분포

그림 2의 (b)와 같이 화염면-연료와 산화제가 발열 화학반응을 일으키는 영역으로 그림 2에서 보이는 왼쪽의 표면-을 가로 지르면서 온도 분포를 측정하기 위하여 버너를 이루는 구리관 위 2.4 mm 지점에서 바깥 쪽으로 온도분포를 측정하였다. CARS 방법과 열전대를 이용하여 온도를 측정할 결과가 그림 5에 나타나 있다. 그림에서 보면 반경 1 mm 이내에서는 400 K 정도로 연료와 산화제가 반응하지 않고 함께 존재하고 있어서 온도가 매우 낮지만 반응이 일어나는 화염 면에서 온도가 급격히 상승함을 보여주고 있다. 이 그림에 나타난 화염 면의 두께는 1 mm 이내로 매우 얇은 것으로 판단된다. 열전대로 측정된 온도는 앞서 그림 4의 경우와 같이 CARS로 측정된 온도보다 낮게 나왔다. 여기서 그림 5에 열전대로 반경 1.75 mm까지 온도를 측정할 값을 표시하였는데 그 보다 작은 반경 속(연료와 산화제가 타지 않은 상태로 온도가 낮음)에 열전대 접점을 넣었을 때 열전대로 사용한 금속 소선을 통한 열전달 때문에-열전대의 접점이 위치한 곳은 온도가 낮는데 열전대가 뜨거운 화염 면을 지나고 있으므로-온도가 실제 보다 높게 측정되어 정확한 측정을 할 수 없다. 즉 열전대로는 온도의 변화가 심한 경우-열전대가 지나는 부위와 접점이 위치한 온도 측정 부위 간의 온도차가 클 경우 온도의 정확한 측정이 불가능하다.

2장에서 취급한 이론을 이용하여 온도를 계산하는 과정의 일부인 맥스웰-볼츠만 분포 곡선을 구한 것이 그림 6에 그려져 있다. 반경 방향 r=1.6 mm인 지점에서 구한 CARS 분광선 각각의 꼭지점을 구하고 대수를 취하여 에너지에 대한 함수로 그렸다. 계산에서는 회전양

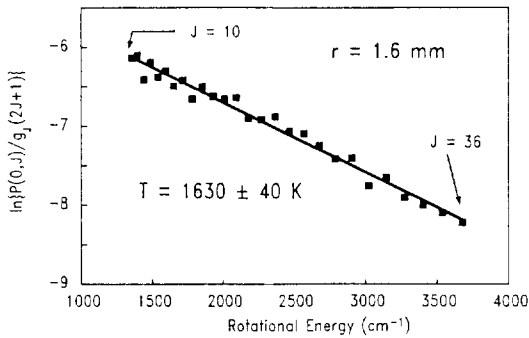


그림 6. A Boltzmann plot of the populations of the rotational Q-branch Raman branches of nitrogen molecules.

자수 J 가 10 이상-회전 양자수가 9 이하인 작은 값 영역에서는 분광선 간의 간격이 너무 좁음-36까지 분광선을 사용하였다. 그림에서 보듯이 꼭지점을 이용하여 구한 맥스웰-볼츠만 분포가 비교적 깨끗한 직선을 보이고 있는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구에서 계산된 온도가 물리적으로 타당한 근거를 가지고 있음을 보여준다. 이 그림에서 보이는 직선의 기울기로부터 구한 온도 값은 1630 K이고 데이터의 산란에 의한 온도 측정오차는 ± 40 K 정도였다.

V. 결 론

분젠버너를 제작하여 안정된 프로판/공기 예혼합 화염을 만들었다. 화염내부의 질소 기체에 대한 CARS 분광신호를 측정하고 그 신호로부터 온도를 구하였다. CARS 분광 신호로부터 온도를 계산하는 방법을 연구

하였으며, 라만 Q-가지 분광선의 선폭변화를 수정된 에너지 간격법칙을 이용하여 계산하고 이를 고려함으로써 약 10% 정도의 온도 보정을 할 수 있었다. CARS 방법으로 화염 내부의 온도 분포를 측정하여 열전대로 측정된 온도와 계산에 의해 구해진 단일 화염 온도를 비교한 결과 CARS 방법의 결과가 적절함을 확인하였으며, 온도차가 심한 화염면의 온도 분포도 측정할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] P.R. Regnier and J.P.E. Taran, *Appl. Phys. Lett.* **23**, 240 (1973).
- [2] J. Hall and A.C. Eckbreth, in *Laser Applications*, J.F. Ready, and R.K. Erf eds. (Academic Press Inc., Orlando, 1984).
- [3] J.H. Bechtel, *Appl. Opt.* **18**, 2100 (1971).
- [4] 한재원, 박승남, 이은성, 이충희, *응용물리* **4**, 314 (1991).
- [5] 한재원, 박승남, 이은성, 이충희, 제 8 회 광학 및 양자전자 워크샵 논문집, 9 (1991)
- [6] 박승남, 한재원, 이충희, *응용물리* **5**, 9 (1992).
- [7] M.L. Koszykowski, *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.* **B3**, 1164 (1986).
- [8] 한재원, 코헤린트 라만 분광학 연구, 박사후 연수 보고서, 한국표준 연구소, 1988.
- [9] NIST program "PFIT", file name MCONT. PAR.
- [10] E.R. Smith, *J. Chem. Phys.* **74**, 6658 (1981).
- [11] A.M. Kannury, *Introduction to Combustion Phenomena* (Gordon and Breach, 1977), pp. 270-283.
- [12] R.M. Fristrom and A.A. Westenberg, *Flame Structure* (McGraw-Hill, 1965), pp. 60-62.
- [13] Reference [12], pp. 373-378.

Study on Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy for Measuring Temperature Profile in a Flame

Jae Won Hahn, Seung Nam Park, Eun Seong Lee, and Chunghi Rhee
*Plasma Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science, P.O. Box 3, Taedok Science Town,
Taejon 305-606, Korea*

Kyung Tae Kang and Suk Ho Chung
Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received: October 12, 1992)

A coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS) technique is applied to measure temperature profile in a flame. The CARS signal is obtained with BOXCARS phase matching to get better spatial resolution. A program routine for calculating temperature of the flame from the measured CARS spectra is studied. The routine includes the line broadening mechanism of the molecules described with a modified energy gap (MEG) law by using the perturbation theory. We have found that the temperature profile obtained with the MEG law is properly fit with the results measured with a thermocouple and calculated with the adiabatic theory.