

# 코헤런트 라만 분광기 제작 및 성능검사 Construction and performance test of a coherent anti-Stokes Raman spectrometer

한재원, 박승남, 이은성, 이충희  
한국표준연구소 온도연구실

연소기체의 진단연구에 응용하기 위한 코헤런트 라만분광기를 설계·제작하여 성능을 조사하였다. 광원으로는 단일 종모드로 발진하는 Nd:YAG 레이저의 이차고조파와 섹스 레이저를 이용하였다. Collinear 방법으로 상온의 질소기체 압력을 변화시키면서 분광 신호를 측정하였으며, 제작된 분광기 성능에 대하여 논의하였다.

## 1. 서론

내연기관, 제트엔진, 로켓트 엔진 등 열기관과 고온로, 가스터빈 등의 연소기체나 고온기체를 이용하는 경우 온도의 측정은 그 효율을 결정하는 것으로 매우 중요한 일이다. 또한 최근들어 이러한 연소상태에서 배출되는 유독기체들에 의한 대기오염이 심각한 문제로 대두되고 있다. 이러한 점에서 최근들어 에너지 절약을 위한 고효율 열기관 및 대기오염을 줄일수 있는 깨끗한 연소 문제가 중요한 사회문제로 부각되고 있다.

연소상태의 고온기체의 온도를 측정하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 immersion 식 온도계를 사용하는 것은 낮은 온도영역을 제외하고는 거의 불가능하며, 온도를 측정한다고 하더라도 부정확할 경우가 많다. 이런 종류의 온도계를 기체 내에 두게 되면 기체의 유동에 영향을 미쳐서 어떤 위치의 온도를 정확히 측정하기 힘들며, 1500 °C 이상의 고온에서는 사용이 아주 어렵다. 따라서 고온의 기체온도를 측정하기 위해서는 비접촉방식을 사용해야 한다.

연소기체의 온도를 측정하기 위해서 오래전 부터 분광학적인 방법을 이용한 기술이 연구되어 왔다. 연소기체의 온도나 성분을 분석하는 방법 중 가장 오래된 것이 흡수분광법(absorption spectroscopy)과 발광분광법(emission spectroscopy)이다. 그러나 이 두가지 기술은 검지도와

공간분해능이 낮고 실험에서 구한 기초 결과로부터 기체 전체의 온도분포를 환산하기가 어려우며, 온도분해능도 매우 낮아서 부정확한 단점을 가지고 있다.

레이저가 발명된 후 레이저를 이용한 연소진단 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 특히 최근 개발된 레이저 라만 분광기술인 CARS(coherent anti-Stokes Raman spectroscopy) 기법과<sup>[1]</sup> 레이저 유도 형광법(LIF: laser induced fluorescence)이<sup>[2]</sup> 연소 진단 연구에 도입되어 온도 측정의 정확도, 공간적인 온도분포 측정의 분해능 및 성분 분석능력이 획기적으로 향상되었으며, 연소기체를 응용하는 여러분야에서 이러한 기술을 이용하여 새로운 고효율 열기관 개발과 깨끗한 연소기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 CARS 기법이 사용되면서 종전에는 상상도 하기 힘들었던 여러종류의 연소상태에 대한 진단이 가능하게 되었다.

레이저를 이용하여 연소상태를 진단하는 기술로는 여러가지가 있으나 본 연구에서는 연소 상태의 기체 진단연구를 위한 CARS 분광기를 제작하고 그 성능을 조사하였다. 본 논문은 CARS의 일반적인 이론을 간략히 소개하고 제작된 분광기를 상세히 기술하였다. 그리고 여러가지 압력에서 상온의 질소기체 CARS 분광신호를 검출하였으며, 분광기의 성능에 대하여 논의하였다.

2. CARS(coherent anti-Stokes Raman spectroscopy)

CARS의 신호는 1965년 미국 포드 자동차 회사 연구소에 근무하던 P.D. Maker와 R.W.Terhune가 발견하였다(3). 그후 8년이 지난 1973년 프랑스의 J.P.E.Taran 등(1)이 불꽃속의 수소 기체농도를 CARS를 이용하여 측정할수 있음을 보이고 난후, 연소상태(4), 저밀도 플라즈마(5), 불꽃(6)등의 여러 분야에서 CARS의 응용연구가 활발하게 진행되어 왔다.

CARS는 라만편이의 파장 차이를 가진 두가지 레이저 광을 렌즈로 집사시켰을때 두 레이저 광이 만나는 렌즈의 초점에서 신호가 발생되므로 뛰어난 공간 분해능을 가지고 있으며, 온도측정의 정확도도 매우 높다. 현재 까지 연구된 결과에 의하면 공간분해능은 약 1 mm 이내로 연소기체의 공간적인 온도분포를 측정할수 있다. 그리고 온도측정의 정확도는 4000 °C 정도의 고온 기체에서 5 % 이내이다. 밀도 측정의 경우 다른 기체와 섞여 있을때 그 농도가 0.1 % 이상이면 측정이 가능하며, 절대 압력으로는 0.1 Torr 정도의 압력에 있는 기체의 검출이 가능하다(7).

CARS는 주로 펄스레이저를 사용하고 있으며, probe 레이저를 선풍이 넓은 색스레이저를 사용하면 10-7 초 이내의 빠른시간 동안에 기체의 온도 및 밀도를 측정할수 있으므로 동온(dynamic temperature) 및 동압(dynamic pressure)의 측정에도 응용할수 있다. 최근에는 미국, 일본, 호주 등의 국가표준기관에서도 동온 및 동압의 정밀측정기술로 CARS 연구를 활발히 진행하고 있다(8). CARS의 대상기체는 주로 N<sub>2</sub>, CO, NO, CO<sub>2</sub>, 등 연소에서 발생하는 대부분의 기체를 측정할수 있다. 또한 SiH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 등 고집적 반도체칩의 제작에 사용되는 기체를 측정할수 있어서 플라즈마 상태에 있는 위의 기체들의 상태진단에도 응용되고 있다. 실제로 폭발연소 상태의 기체의 온도나 밀도 등의 시간 변화를 측정하는 경우 대부분이 코히런트 라만 분광 기술을 사용하고 있으며, 그 중에서도 특히 CARS 기법이 가장 많이 사용되고 있다.

Fig.1은 CARS 분광의 에너지 준위를 그린 것이다. 그림에서 보면  $h\omega_1$ 이 펌핑광이고  $h\omega_2$ 가 스톱스광으로 측정하고자 하는 매질에 입사되면 신호  $h\omega_3$ 가 발생된다. 여기서 주목할 점은 신호광의 주파수  $\omega_3$ 가 펌핑광  $\omega_1$ 이나 스톱스광  $\omega_2$  및 펌핑광에 의해 자연적으로 발생하는 스톱스 라만 광의 주파수 ( 입사되는 스톱스광의 주파수와 같음)와 다르다는 점이다. 따라서 CARS 실험에서 CARS 신호의 주파수 부근에서 신호를 검출하면 일반적인 분광실험에서 문제가 되고 있는 배경복사를 줄일수 있는 장점을 가지고 있다. 실험에서 입사되는 펌프광과 스톱스광의 세기

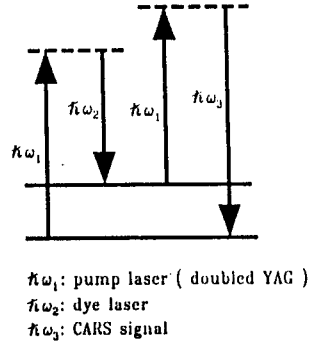


Fig.1. Energy diagram of coherent anti-Stoke Raman spectroscopy.

를  $I_1, I_2$  라고 하고 두 레이저 광이 평면파이며, 매질 내에서 레이저 광의 소모(depletion)를 무시할수 있을 정도로 작다고 가정할때 발생하는 CARS 신호의 크기  $I_3$ 는 다음 식으로 기술된다.

$$I_3 = \left( \frac{4\pi^2\omega_3}{c^2n_3} \right)^2 |I_1 I_2| 3\chi^{(3)}|^2 \ell^2 \left[ \frac{\sin(\Delta k\ell/2)}{\Delta k\ell/2} \right]^2 \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 광속도,  $n_3$ 는  $\omega_3$ 에 대한 매질의 굴절율,  $\ell$ 은 작용매질의 길이이다. 마지막 항의  $\Delta k$ 는 위상정합조건 (phase matching condition)을 나타낸다.

기체 매질에서 CARS의 위상정합조건은 여러가지가 있는데 가장 간단한 것이 collinear한 것으로 펌프광과 스톱스 광을 같은 경로로 진행시키는 것이다. 이 경우 신호도 두 광원과 같은 방향으로 나오게 된다. 다른 방법으로는 두 광원을 일정한 거리를 두고 평행하게 렌즈로 입사시키면 렌즈의 초점에서 두 광이 만나게 된다. 이 경우 신호는 두 광원이 만나는 점에서 위상정합조건을 만족하는 방향으로 나오게 되며, BOXCARS라고 부른다. 일반적으로 colliner 방식으로 실험할때 큰 신호를 얻을수 있으나, 공간분해능이 1 cm 이상 - 경우에 따라서는 훨씬 큼-으로 매우 떨어진다. 이에 반해 BOXCARS는 실험장치를 만들고 정렬하기가 어렵고 신호가 매우 작으나, 공간분해능은 1 mm 이하로 아주 우수한 것으로 알려져 있다.

3. CARS 분광기 제작

3-1. CARS 광학계에 사용된 레이저 광원

앞 절에서 논의된 바와 같이 CARS 분광기에는 2 가지 레이저 광이 사용된다. 먼저 분광기의 성능을 결정하는 분해능은 사용하는 레이저 광의 선풍에 관계되며, 신호의

크기 및 안정도 등은 레이저 광의 출력에너지 및 광의 질 (beam quality)에 영향을 받게된다.

가. 펌프광

CARS 신호는 펌프광의 세기의 제곱에 비례하므로 큰 신호를 얻기위해서 일반적으로 순간 출력이 높은 펄스로 동작하는 펌프광원을 사용한다. 그런데 레이저를 펄스로 동작시키게 되면 레이저 공진기에서 발진되는 모드 (mode)의 수가 많아져서 출력되는 레이저 광의 선평이 매우 큰 값을 갖는다. 이러한 펄스 레이저의 선평을 줄이기 위해서 단일 종모드로 발진하는 연속 발진 레이저광을 펄스 레이저의 공진기 속에 주사(injection)시켜서 펄스 레이저를 같은 주파수의 단일 종모드로 발진시키는 기술을 사용하며 이것을 injection seeding 방법(이)이라고 부른다. 이 경우 injection seeding 이 완전히 되었을 경우 펄스 광원의 주파수 대역폭은 펄스의 시간폭에 대한 Fourier 변환의 한계치 ( $\Delta \nu = 1/\Delta t$ )와 거의 일치한다.

본 연구에서 사용한 펌프광은 2차 고조파 Nd:YAG 레이저 (Quantel YG661-10)이며, injection seeder(Quantel S-100)는 레이저 다이오드로 광펌핑 되는 연속발진 Nd:YAG 레이저이다. 레이저는 Q-스윗칭 모드로 동작되며 주요 사양이 Table 1에 정리되어 있다. 출력에너지 중 90 % 정도는 스푸스광인 색소 레이저의 광펌핑에 사용되고 그 나머지 중 약 1 mJ 내외가 실제 펌핑광으로 사용된다. Fig.2는 펌프광으로 사용된 레이저의 발진선평을 Fabry-Perot 간섭계의 간격을 변화시키면서 측정한 결과를 x-y plotter로 그린 것이다. 그림에서 큰 피크의 간격은 10 GHz이므로 측정된 레이저의 선평은 약 250 - 300 MHz 정도로 실제 레이저 펄스폭으로 구한 선평보다 50 % 정도 크다.

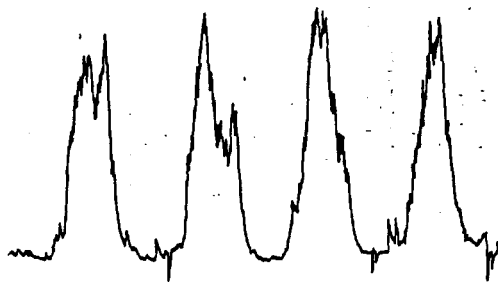


Fig.2. Spectral profile of the doubled YAG laser measured by a scanning Fabry-Perot interferometer. Free spectral range of the interferometer is 1 GHz.

나. 스푸스광

스푸스광으로는 펄스로 동작하는 파장 가변형 색소레이저를 사용한다. 본연구에서 사용한 색소레이저는 M.Littman이(10) 개발하여 최근에 Lumonics사에서 상품화한 것 (Lumonics Hyper Dye-SLM)이다. 이 레이저는 일반적으로 파장가변 색소 레이저에서 선평을 줄이기 위해서 많이 사용하는 에탈론을 사용하지 않고 회절격자(grating)에 레이저 광을 비스듬히 입사시키고 공진기의 길이를 최소로 줄이는 방법으로 공진기 내에서 발진되는 종모드 수를 하나로 줄였다. 따라서 발진선평이 500 MHz이하가 되고 넓은 파장영역에서 발진이 가능하다. 또한 일반적인 펄스 색소 레이저가 횡펌핑을 하는데 반해 이 레이저는 종펌핑을 하여서 증폭자발 방출(amplified spontaneous emission)을 줄이고 발진되는 레이저 광의 성질이 매우 우수하다. 색소 레이저의 주요 사양이 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. Specifications of the lasers

descriptions	specifications	
	doubled Nd:YAG	dye
energy	300 mJ @ 532 nm	~ 20 mJ @ 600 nm
rep. rate	10 Hz	10 Hz
pulse width	7 - 8 ns	2 ns
mode	SLM (cw injection)	SLM (grazing incident)
bandwidth	250 MHz	500 MHz

SLM(single longitudinal mode)

3-2. CARS 광학계의 구성

가. 레이저 광의 전달부

레이저에서 나와서 측정할 대상인 시료 전 까지의 레이저 광 전달부를 그린 것이 Fig.3 이다. 먼저 Nd:YAG 레이저의 2차 고조파로 파장이 532 nm인 펌핑광이 90 % 반사거울에서 켜여서 색소레이저를 광펌핑하고 나머지 약 10 % 정도가 펌프광으로 남아서 색소레이저와 Nd:YAG 레이저 사이에 있는 3.2 m 광로 지연기를 거쳐서 색소레이저와 합쳐지는 유전체 힐트 박막거울 - 파장 532 nm인 2차 고조파 Nd:YAG 레이저는 반사하고 파장이 600 nm 근처인 색소레이저는 투과시키는 - 로 입사된다. 그런데 Nd:YAG 레이저의

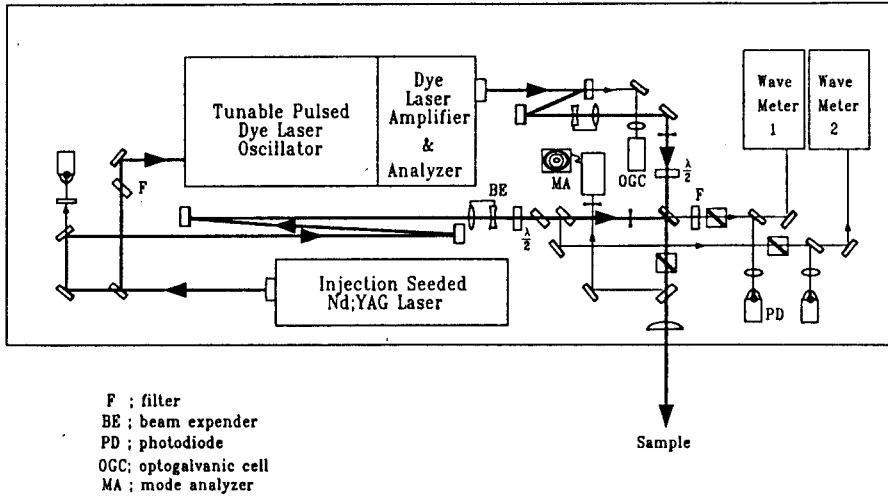


Fig. 3. Diagram of CARS system.

2차 고조파에는 2차 고조파로 바뀌기 전 파장의 적외선 광인 본래의 Nd:YAG 레이저 광이 상당히 포함되어 있다. 이것은 특히 색소레이저를 광펌핑할때 색소의 용매에 흡수되어 열을 발생시키고 이에 따라 레이저의 효율이 떨어지게 한다. 이러한 현상을 줄이기 위하여 532 nm의 광은 잘 투과하고 적외선에서 흡수율이 매우 높은 광필터(CVI KG3)를 그림에서 보는 바와 같이 색소레이저 앞과 펌프광의 광도에 삽입하였다. 이때 반사에 의한 손실을 줄이기 위하여 필터를 광도에 대하여 Brewster 각도로 설치하였다.

두대의 레이저에서 발진되는 레이저 광의 편광이 광학대에서 불대 수직인 방향인데 필터 박막거울에서 수평편광이 되게 하기 위해 - 필터 박막효율은 수평편광일때 훨씬 우수함 - 반파장기를 광로정 상에 삽입하였다. 펌프광과 스톱스광의 빔 크기를 시료 앞에서 약 5 mm가 되게 하기 위하여 먼저 펌프광의 광 발산도를 실험적으로 측정하였다. 측정된 수평방향과 수직방향의 발산도가 서로 다를 수 있음이 있었지만, 둘의 평균을 취해보면 약 2 mrad 정도가 된다. 그런데 펌프광은 광로 지연기를 지나게 됨으로 시료까지 가는 동안 6 m 이상의 거리를 진행하게 되며, 이때 광속의 직경이 10 mm 이상이 되게 된다. 따라서 1대 2 배율의 갈릴리안 광속확대기를 역으로 설치하여 광속의 퍼짐을 막고 광의 직경이 집사렌즈의 위치에서 약 5 mm 정도가 되게 하였다. 그리고 색소레이저는 증폭자발 방출에 의한 배경복사의 양을 줄이기 위하여 색소레이저 내부의 1

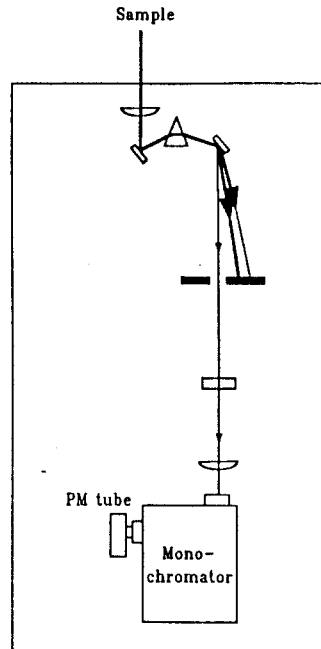


Fig. 4. Detection part of CARS system.

차 증폭기와 2차 증폭기 사이에 직경 0.41 mm의 개구가 설치되어 있는데, 이 점을 광속의 출발점으로 가정하고 광속의 발산도를 계산하면 0.94 mrad 이 되고 약 2 m 앞에

1:2 비율의 갈릴리안 광속확대기를 설치하면 렌즈 앞에서 시료로 입사되는 색소레이저 광의 직경을 5 mm 정도로 만들 수 있다.

앞의 절의 (1)식에 기술된 CARS 신호 크기를 보면 그 크기는 펌프광의 제곱과 스톱스광의 곱에 비례한다. 따라서 측정되는 CARS 신호는 펌프광과 스톱스광의 세기 변화에 따라서 민감하게 변하게 되며, 이러한 영향을 줄이기 위해서는 두 레이저 광의 세기 변화를 펄스 마다 측정하여 광원의 변화 향으로 CARS 신호를 보정해주어야 한다. 본 장치에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 펌프광의 세기 - 실제로 펄스의 폭이 일정하다고 가정하고 에너지를 측정하고 있음 - 는 펌프광의 광로 상에 광분할기 (1 × 이내)를 삽입하여 나온 광을 렌즈로 광검출기(photodiode Hamamatsu)에 집사시켜서 측정하고 있다. 그리고 색소레이저의 세기는 필터 박막거울에서 반사되는 광을 570 nm 이상의 광만 투과시키는 광필터(CVI OG-570)를 통과시켜서 펌프광 성분을 제거하여 렌즈로 광검출기에 집사시켜서 측정하고 있다. 색소레이저의 파장에 대한 정확한 교정을 위하여 우라늄 opto-galvanic 펌프를 사용하였다. 그림에서 보이는 모드 분석기(mode analyzer)는 펌프 레이저와 색소 레이저가 단일 종모드로 동작되는가를 확인할 수 있는 장치로 실험전에 두 레이저의 발진상태를 점검하는데 사용한다.

#### 나. CARS 신호 검출부

펌프광과 스톱스광을 함께 렌즈로 시료에 집사시키면 집사된 부분에서 CARS 신호가 발생되게 되며, 이 신호는 입사된 레이저 광과 함께 같은 경로를 따라 진행하게 된다. 따라서 펌프광 및 스톱스광과 함께 진행되는 CARS 신호를 분리하기 위해서는 색을 분산시켜야 하며, 이를 위하여 본 실험에서는 분산용 프리즘을 사용하였다. Fig. 4에 신호 검출을 하기 위한 광학계가 그려져 있다. 시료에서 나온 레이저 광을 거울로 반사시켜서 프리즘에 입사시키고 분리된 광 중 CARS 신호 부분만을 통과시키는 개구를 통과하게 한 뒤 CARS 신호와 섞여서 나오는 펌프광과 스톱스광을 제거하기 위하여 500 nm 이하의 파장만 투과시키는 광학필터(CVI SWP-500)를 광로상에 두었다. 마지막으로 단색기(Jovin Yvon HR-320)의 파장을 CARS 신호 파장에 맞추어 두고 신호를 측정하였다.

#### 4. N<sub>2</sub> CARS 신호 측정 및 분광기 특성조사

본 연구에서 제작한 CARS 분광기의 분해능은 2차 고조파 Nd:YAG 레이저의 선폭이 Fig. 2에서 본 바와 같이 250 - 300 MHz로 측정되었고, 색소레이저의 발진선폭을 500 MHz

로 두고 계산해 보면 약 600 MHz 정도가 된다. 제작된 장치의 성능을 확인하기 위해서 대기중의 질소의 CARS 신호를 레이저광의 발진선폭을 변화시키면서 검출하여 보았다. 그리고, 여러가지 압력 상태에서 실험을 하기 위하여 레이저 광이 진행할 수 있도록 설계된 진공조를 제작하였다. 먼저 질소의 진동 준위에 대한 에너지 간격이 2330 cm<sup>-1</sup> 정도 이므로 532 nm (18789 cm<sup>-1</sup>) 펌프광에 대하여 스톱스광의 파장은 607.6 nm (16459 cm<sup>-1</sup>)가 됨으로 색소레이저의 파장을 이 값에 맞춘다. 그리고 CARS 신호의 파장은 473.5 nm (21119 cm<sup>-1</sup>) 이므로 신호검출부에 있는 단색기의 파장을 이 값에 맞추어 놓고 광증배관(PM tube: Hamamatus R699)으로 출력되는 신호를 boxcar averager (Stanford Research SR-250)로 측정하여 그 값을 컴퓨터에 저장한다.

일반적으로 질소는 동일 원자로 구성된 분자여서 대칭성이 서로 같은 회전준위 간에서만 라만 분광이 관찰되는데 질소 분자의 경우 핵스핀이 있기 때문에 이러한 대칭성 보존의 법칙이 완전히 지켜지지 않고 핵스핀의 축퇴도에 영향을 받아서 회전양자 준위가 락수일때 분광의 세기가 세고 홀수일때 작은 현상을 보인다. 여기서 질소의 핵스핀의 축퇴도는 회전 양자수가 락수일때 6 이고 홀수일때 3 이다.

먼저 실험에서 사용하는 두 레이저의 발진선폭을 변화시키면서 대기 중에 있는 질소의 CARS 분광신호를 관찰하였다. Nd:YAG 레이저를 injection seeding 시키지 않고 다중모드로 동작시키고 동시에 색소레이저도 다중모드로 동작시키면서 신호를 측정할 것이 Fig. 5의 (a)이며, 두 레이저 모두 단일종모드로 발진시키면서 스펙트럼을 측정할 것이 (b)이다. 이 스펙트럼 (a)는 질소의 회전양자수 변화에 대한 분광선을 관찰하기가 매우 힘들다. 스펙트럼 (b)는 질소의 락수와 홀수의 회전양자수에 대한 분광선을 뚜렷이 구별하여 보여주고 있다.

Fig. 6은 100 Torr의 질소를 진공조에 주입한후 CARS 분광을 측정한 결과이다. 실험에서 진공조를 10<sup>-4</sup> Torr 이하의 진공을 만든 다음 질소를 주입하여 발생하는 CARS 신호를 측정하였다. 이 스펙트럼을 보면 질소의 락수와 홀수의 회전양자수에 대한 스펙트럼이 모두 뚜렷하게 구별되어 관찰됨을 볼 수 있으며, 본 연구에서 제작된 분광기의 분해능이 앞서 계산한 값 600 MHz에 이르고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. 위의 실험결과로부터 회전 양자수에 대응되는 밀도와 분광선의 선폭을 구하면 기체나 플라즈마 상태의 미질의 온도와 밀도를 구할 수 있게 된다. x-축의 라만 편이는 optogalvanic 셀을 이용하여 색소레이

저 파장을 고정하여 구한 값인데 이론적으로 계산된 질소의 라만 편이와 비교하면 약  $0.32 \text{ cm}^{-1}$  정도 벗어나 있다.

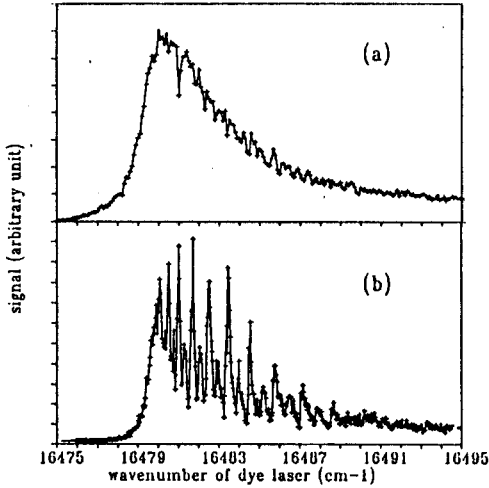


Fig. 5. CARS signal of nitrogen molecules in air. Operating lasers in multimode (a), in a single longitudinal mode (b).

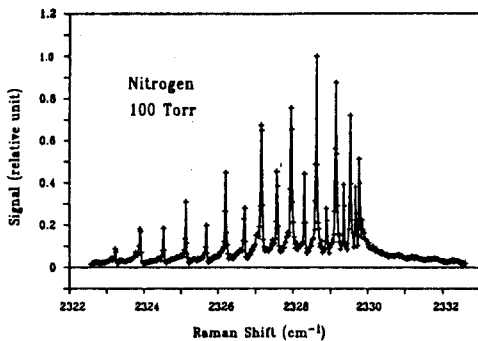


Fig. 6. CARS signal of nitrogen molecules at 100 Torr.

### 5. 결론 및 논의

펄스 동작되는 레이저를 이용한 플라즈마 진단기술 연구에 사용하기 위한 CARS 분광기를 설계 제작하였다. 두대의 레이저로 이루어진 광학계와 여러가지의 광신호를 측정하는 신호검출 장치를 제작하고 조합하여 분광기를 완

성하였다. 제작된 분광기의 성능을 조사하기 위하여 진공조에 있는 순수한 질소와 일반 대기중의 질소기체와 대한 CARS 신호를 측정하였으며 그 결과 분광기의 동작 안정도가 우수함을 확인하였다.

현재 분광기의 성능 향상을 위한 다음 몇가지 일이 추가적으로 진행되고 있다. 첫째, 색소레이저는 단일종모드로 발진하는 확률이  $90 \times$  정도로 알려지고 있어서, 앞으로 본 연구에서는 펄스 레이저의 파장을 측정할수 있는 파장계를 만들어서 개개의 펄스에 대해 파장 및 단일 종모드 인가를 조사하여 data의 신뢰성을 향상시킬 예정이다. 둘째, 이번 실험에서 측정된 신호는 입력 레이저 신호의 크기에 대하여 규격화하지 않았다. 우리는 CARS 신호를 (1) 식을 이용하여 입사되는 레이저광의 세기로 규격화했을때 좋은 변화를 확인할수 없었다. 이는 신호가 매질속에서 stimulated amplification 되기 때문으로 생각되며, 연소기체와 같이 균일하지 않은 기체를 대상으로 하게되면 이러한 문제가 심각한것으로 알려져 있다. 따라서 파장의 무관한 CARS 신호를 발생시킬수 있는 기체의 - 주로 불활성기체 - 셀을 만들어 신호를 규격화하는 장치를 만들 예정이다. 끝으로, CARS 신호를 분석하여 온도나 밀도를 구하는 프로그램을 개발하여 본 장치로 불꽃이나 기타 연소 상태에 있는 기체의 상태를 진단하는 일을 추진해나갈 예정이다.

### References

- [1] P.R.Regnier and J.P.E.Taran, Appl.Phys.Lett. 23, 240(1973).
- [2] J.H.Bechtel, Appl.Opt. 18, 2100(1971).
- [3] P.D.Maker and R.W.Terhune, Phys.Rev. 137, A801 (1965).
- [4] A.C.Eckbreth and J.H.Stufflebeam, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 117, 217(1988).
- [5] M.Kawasaki, et al., JPN. J. Appl. Phys. 26, 1395 (1987).
- [6] V.D.Vedenin, et al., Opt. Lett. 14, 113(1989).
- [7] J.Hall and A.C.Eckbreth, in Laser Applications, J.F.Ready and R.K.Erf eds., Academic Press Inc., Orlando, 1984.
- [8] G.J.Rosasco, et al., J. Res. Nat. Inst. Stand. Tech. 95, 33(1990)
- [9] U.Ganiel, et al., IEEE J. Quant. Electron. QE-12, 704(1976).
- [10] M.Littman, Appl. Opt. 23, 4465(1984).