

CARS를 이용한 연소진단 연구

한재원 · 박승남 · 강경태 · 정석호

Study on the Flame Diagnostics with CARS

Jae-Won Hahn, Seung-Nam Park, Kyung-Tae Kang, Suk-Ho Chung



- 한재원 (한국표준과학연구원 양자연구부)
- 1958년생
- 레이저 광학을 전공하였으며, 레이저 응용연소진단, 복사온도측정 등 고온 측정에 관심을 가지고 있다.



- 강경태 (서울대학교 기계공학과)
- 1965년생
- 연소공학을 전공하고 있으며, 레이저를 이용한 연소진단연구에 관심을 가지고 있다.



- 박승남 (한국표준과학연구원 양자연구부)
- 1961년생
- 레이저 분광학을 전공하고 있으며, 고온측정에 관심을 가지고 있다.



- 정석호 (서울대학교, 기계공학과)
- 1954년생
- 연소공학을 전공하였으며, 화염의 구조, 레이저 응용연소진단, 연소기기 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

코헤런트 라만 분광기술인 CARS (coherent anti-Stokes Raman spectroscopy)는 일반적인 접촉식 장치로 진단할 수 없는 고온 기체나 불꽃의 온도 및 기체농도를 측정하는데 널리 사용되고 있다. 이 기술은 프랑스의 Taran 등⁽¹⁾이 농도 측정에 응용하고 난 후 그 응용범위가 급속히 넓어져 이제는 고온기체의 온도 및 밀도를 측정하는 기본기술로 확립되었다.⁽²⁻⁷⁾ 레이저를 이용한 연소진단 기술이 연소 진단 연구에 도입되어 온도 측정의 정확도, 온도분포 측정의 공간 분해능 및 성분 분석능력이 획기적으로 향상되었으며, 연소기체를 응용하는 여러분야에서 이러한 기술을 이용하여 새로운 고효율 열기관 개발과 깨끗한 연소기술의 개발이 활

발히 이루어지고 있다. 레이저를 이용하여 연소상태를 진단하는 기술로는 여러가지가 있는데, 그 중 대표적으로 CARS와 레이저 유도 형광법⁽⁸⁾(LIF: laser induced fluorescence) 두 가지가 기술적으로 상호 보완적인 관계를 가지면서 널리 활용되고 있다.

코헤런트 라만 분광학에 관련된 세부 이론이나 관련 기술은 지속인 발전을 거듭하여 현재는 비교적 잘 확립되어 있다. 이론 분야에서는 측정된 CARS 분광으로부터 온도나 밀도를 정확하게 계산하기 위하여 분광의 모양에 관한 연구가⁽⁹⁾ 주로 이루어져 왔는데 상온~1500°C 온도영역에 대한 연구가 완결된 상태이다. 장치나 세부기술에 관련된 연구로는 순간적인 측정을 위한 광대역 분광기,⁽³⁾ 공간분해능을 높이기 위한 상자형 위상정합 방식,⁽¹⁰⁾ 비공명항에 의한 분광선 모양의 변형을 막기 위하여 편광CARS 기술들

이⁽¹¹⁾ 연구되어 왔다.

CARS 분광기는 사용하는 스톡스레이저의 선폭에 따라 두 종류로 나눌 수 있다. CARS 분광기는 선폭이 좁은 스톡스(Stokes)레이저의 파장을 주사하여 CARS분광을 측정하는 주사형과 측정하고자 하는 CARS 선폭에 비해 선폭이 넓은 스톡스레이저를 사용하여 펄스마다 전체 스펙트럼을 측정하는 광대역분광기로 나눌 수 있다. 주사형 CARS분광기는 선폭이 좁은 스톡스레이저를 광원으로 사용하여 분광선을 자세히 측정할 수 있으므로 기체분자의 충돌, 온도의 변화, 완충가스의 종류, 펄스폭화의 정도에 의한 분광선의 선폭변화^(6~8)나 선폭이 등과 같은 기체의 물성연구에 주로 사용되지만 긴 주사 시간이 소요되므로 정상상태에 있는 기체의 온도와 밀도측정에 응용이 제한되어 있다.^(9~11) 그러나 레이저 펄스마다 전체의 스펙트럼을 얻을 수 있는 광대역 CARS는 측정의 시간분해능을 높일 수 있으므로 난류연소처럼 온도가 급격히 변하는 연소상태의 진단에 유용하게 사용되고 있다. 최근에는 펄스마다 측정된 온도의 확률분포함수를 측정하여 난류연소를 진단하는 기술⁽¹²⁾이 개발되어 CARS 기술의 응용분야를 넓혀가고 있다.

2. 이 론

2.1 CARS 신호 발생이론

CARS 신호의 발생의 에너지 준위를 그린 것이 그림 1이다. 그림에서 보듯이 ω_1 진동수의 펌프레이저 광 두 개와 ω_2 진동수의 스톡스광을 시료에 입사시키면 ω_3 진동수의 CARS 신호가 발생된다. CARS 신호가 발생하는 원리와 신호의 세기를 계산하면 다음과 같다.

일반적으로 3개의 광이 분자에 입사되어 유도되는 분극을 식으로 기술하면 다음과 같다.

$$P_a^{(3)} = \frac{6}{n!} \chi_{\alpha\beta\gamma\delta}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$$

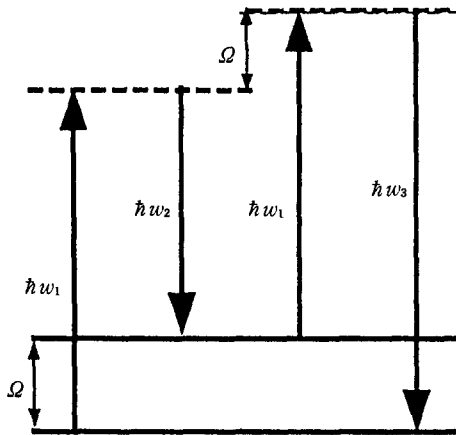


그림 1 CARS의 에너지 준위
 $h\omega_1$: 야그레이저(이차고조파), $h\omega_2$: 스톡스광, $h\omega_3$: CARS신호, Ω : 분자의 진동에너지

$$\times E_p(1) E_r(2) E_s(3) \quad (1)$$

윗 식에서 $\chi_{\alpha\beta\gamma\delta}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 은 유도된 분극의 크기에 관계하는 계수로 3차 비선형 감수율이라 부르며, $n!$ 은 사용한 전장의 주파수 ω 가 서로 같은 값을 가질 경우 구별되지 않은 조합에 대한 보정항이다. 여기서 CARS 실험에서 사용한 펌프광을 E(1), 스톡스광을 E(2)라고 두면, 펌프광으로 사용된 2개의 레이저 광의 주파수가 같으므로 $n! = 2$ 가되어 식 (2)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \vec{P}_{cars} = & \{6\chi_{i122}^{(3)}(\omega_1, \omega_1 - \omega_2) \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2\} \\ & + 3\chi_{i221}^{(3)}(\omega_1, \omega_1 - \omega_2)\} \\ & \times E^2(1) E^*(2) \\ & \times \exp\{i(2\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r}\} \quad (2) \end{aligned}$$

윗 식에서 $\exp\{i(2\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r}\}$ 는 위상정합조건을 나타낸다. 여기서, 펌프광과 탐사광의 편광이 같으면 식 (2)의 CARS의 3차 비선형 감수율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \chi_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(3)} = & 6\chi_{i122}^{(3)} + 3\chi_{i221}^{(3)} \\ = & 3\chi_{i111}^{(3)} \quad (3) \end{aligned}$$

식 (2)로 표현된 3차 비선형 감수율에 의

해 발생하는 CARS 신호의 전장 E(3)는 전자파의 파동방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \vec{E}(3) - \left(\frac{\omega_3}{c}\right)^2 \vec{E}(3) \\ = 4\pi \left(\frac{\omega_3}{c}\right)^2 \vec{P}_{CARS} \end{aligned} \quad (4)$$

이때 c는 광속도이다. 여기서 CARS 신호가 z축을 따라 진행하는 평면파라고 가정하면 위의 식은 식 (5)로 표현되며, CARS 신호의 전장이 비선형 분극방향과 같으므로 신호 전장의 해를 다음과 같이 두고 식 (5)를 풀면 식 (6)과 식 (7)이 되며 Δk는 식 (2)에서 기술한 위상정합 조건으로 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \vec{E}(3)}{\partial z^2} + \left(\frac{\omega^2}{c}\right)^2 \vec{E}(3) \\ = -4\pi \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \vec{P}_{cars} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\vec{E}(3) = \vec{e}_{cars} E(3) \exp(ik_3 z) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E(3)}{\partial z^2} + 2ik_3 \frac{\partial E(3)}{\partial z} \\ = -4\pi \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \chi_{cars}^{(3)} E^2(1) E^*(2) \\ \times \exp(i\Delta k z) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta k = |2\vec{k}_1 - \vec{k}_2 - \vec{k}_3| \quad (8)$$

전자파의 진폭 변화율은 전파상수 k에 비해 매우 작으므로 이차 미분항을 무시하고 전장을 구하면 식 (9)가 되며, CARS 신호의 세기는 식 (10)이 된다.

$$\begin{aligned} E(3) = \left(\frac{2\pi\omega_3}{nc}\right) \chi_{cars}^{(3)} E^2(1) E^*(2) \\ \times \frac{\{\exp(i\Delta kl) - 1\}}{\Delta k} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_3 = \frac{256\pi^4 \omega_3^2}{c^4 n_1^2 n_2 n_3} |\chi_{cars}^{(3)}|^2 \\ \times I_1^2 I_2^2 l^2 \left[\frac{\sin(\Delta kl/2)}{\Delta kl/2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, c는 광속도, n₁, n₂, n₃는 각각 ω₁, ω₂, ω₃에 대한 매질의 굴절률, l은 작용

매질의 길이이다.

위 식에서 보듯이 CARS 신호는 3차 비선형 감수율 χ⁽³⁾의 제곱에 비례하며 이것은 일반적으로 실수항, 허수항, 비공명항의 합으로 기술할 수 있으며, 식 (1)에 보이는 CARS 신호를 발생시키는데 기여하는 3차 비선형 감수율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} |\chi_{cars}^{(3)}|^2 &= \left| \sum_j (\chi' + i\chi'')_j + \chi_{NR} \right|^2 \\ &= (\sum_j \chi'_j)^2 + (\sum_j \chi''_j)^2 \\ &\quad + 2\chi_{NR} \sum_j \chi'_j + \chi_{NR}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, j는 CARS분광에 기여하는 천이선을 나타내고, χ'와 χ''는 각각 3차 비선형 감수율의 실수부와 허수부를 나타내고, χ_{NR}는 비공명부분에 의한 기여항을 나타낸다. 이때 측정하고자 하는 기체의 농도가 크면 CARS 신호에 관계하는 비선형 감수율은 식 (12)와 같으며 농도가 낮으면, 주변기체의 비공명항에 의하여 CARS 신호가 발생되며 비공명 감수율은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$|\chi_{cars}^{(3)}|^2 = (\sum_j \chi'_j)^2 + (\sum_j \chi''_j)^2 \quad (12)$$

$$|\chi_{cars}^{(3)}|^2 = 2\chi_{NR} \sum_j \chi'_j + \chi_{NR}^2 \quad (13)$$

2.2 위상정합조건

식 (10)에서 기술하였듯이 CARS 신호의 크기는 펌프광과 스톱스광의 진행벡터(propagation vector)에 의해 기술되는 위상정합 조건에 관련되어 있으며, 이것을 식으로 표현하면 식 (14)가 되며, 그림으로 나타낸 것

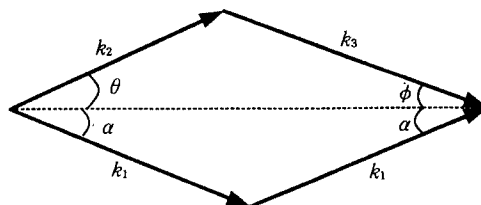


그림 2 CARS의 위상정합조건

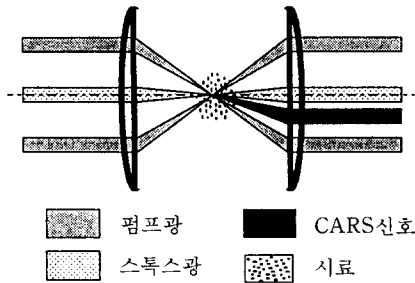


그림 3 CARS 실험에서 레이저 광의 진행과 신호발생

이 그림 2이다.

$$2k_1 = k_2 + k_3 \quad (14)$$

이때 각도 α, θ, φ 들의 관계식은 다음과 같다.

$$2|k_1|\cos\alpha = |k_2|\cos\theta + |k_3|\cos\varphi \quad (15)$$

$$|k_2|\sin\theta = |k_3|\sin\varphi \quad (16)$$

(1) 동일선 CARS

기체와 같이 색분산이 없는 매질에서는, 그림 2의 세 각도 α, θ, φ 모두가 동시에 0 일 경우에도 위상정합조건을 만족한다. 이때 공간분해능은 수 cm로 상당히 낮으나, 펌프 광과 스톱스광이 서로 상호작용하는 길이가 길므로 신호가 매우 큰 것이 장점이다.

(2) 상자 CARS

앞서 언급하였듯이 동일선 CARS의 공간 분해능이 수 cm로 낮은데, 실제적인 응용분야에서 자동차의 내연기관 내부의 온도나 밀도 분포 등을 측정하기 위해서는 더욱 미세한 공간분해능이 필요하다. 그림 3이 상자 CARS의 실험에서 광의 진행상을 보여주고 있다. 이러한 경우 공간분해능은 1mm 이내로 줄일 수 있게 되며, 이러한 방법으로 위상정합조건을 만족하게 하는것을 상자 CARS라고 부른다.

2.3 온도 및 농도 측정

발생된 CARS 신호와 시료에 입사된 펌프

광과 스톱스광은 서로 파장이 시료의 라만편이만큼 씩 다르므로 분리가 용이하고, 발생된 CARS 신호는 유도증폭(stimulated amplification)되어 레이저와 같은 성질을 가지고 있으므로 측정장치를 시료와 먼곳에 둘 수 있어서 시료에서 발생하는 배경잡음의 영향을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

자연상태의 분자는 회전운동과 진동운동을 동시에 하고 있으며, 이 두 가지 운동의 상태에 따라 측정되는 식 (10)으로 기술되는 CARS 신호의 모양이 변하게 된다. 2000 K에서 질소 CARS 분광의 모양이 그림 4에 그려져 있다. 이러한 CARS 분광은 그림에서 기술된 분자운동의 각 에너지 준위에 분포하는 분자수의 제공에 비례한다. 따라서 CARS 분광의 모양으로부터 분자의 회전 및 진동운동의 상태를 알 수 있으며, 이로부터 온도를 구할 수 있다.

기체의 농도측정은 CARS 신호의 세기나 분광의 모양으로부터 측정이 가능한데, 신호의 세기는 일반적으로 CARS 신호가 분자의 개수의 제공에 비례하므로 신호의 세기를 적분하여 농도를 측정할 수 있다. 그러나 농도가 낮아지면 앞서 식 (13)에서 기술한 것과 같이 CARS 신호가 공명항에 의하여 그 모

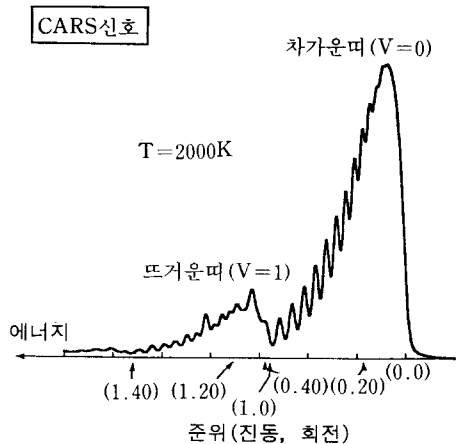


그림 4 2000K 질소의 CARS 분광

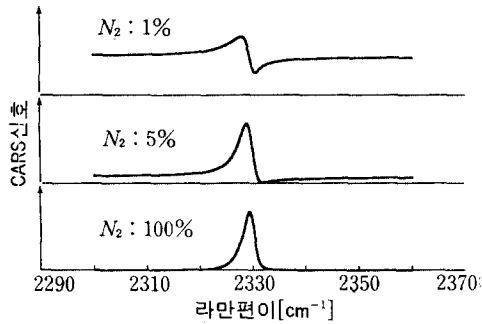


그림 5 질소의 농도변화에 따른 분광의 변화

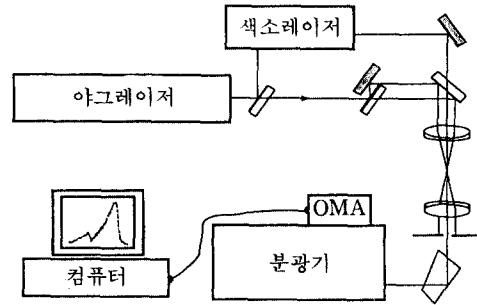


그림 6 CARS 실험장치도

양이 바뀌게 된다. 질소의 농도를 바꾸어 가면서 CARS 신호의 모양을 계산한 것이 그림 5이다. 그림에서 보면 측정 분자의 농도가 바뀌에 따라 신호의 모양이 바뀌고 있으며, 수 % 이하의 낮은 농도에서는 신호가 전반적으로 떠 있는 가운데 작은 변조 신호가 실려 있다. 이러한 변조 신호의 쪽으로부터 미량기체의 농도를 계산하는 방법이 연구되었으며, 본 연구에서 화염 속의 CO 농도 측정에서도 이 방법을 사용하였다.

3. 실험장치

3.1 CARS 분광기

CARS 분광기에 관한 설명은 이미 여러 논문^(13,14)에 발표된 바 있으므로 여기에서는 실험에 사용된 장치의 작동조건 등을 간략히 기술하겠다. 본 실험에 사용한 광대역 CARS 분광기의 전체 모습을 그린 것이 그림 6이다. 에너지가 약 150 mJ, 펄스 폭이 7~8 ns인 Q-스위칭모드로 작동되는 Nd:YAG 레이저(Quantel YG660-10)의 2차 고조파를 이용하여 스톡스광으로 사용된 색소레이저를 동작시켰으며, 그 중 일부(에너지 수 mJ 정도)를 펌프광으로 사용하였다. 두 펌프광의 중심간의 거리는 5~6 mm이고, CARS의 공간분해능은 2~3 mm였다. CARS 신호는 二重회절발분광기(Jovin-

Yvon, U1000, $f=1\text{ m}$)에 설치된 다채널 광분석기(optical multichannel analyzer, Princeton Instrum. EIRY1024)를 이용하여 측정하였다.

3.2 버너

본 실험에서 사용한 분젠버너(Bunsen burner)는 예혼합화염과 확산화염이 동시에 존재하는데, 화염이 비교적 안정되어 있고 만들기 쉬운 장점이 있다. 분젠버너는 연료와 산화제 혼합물을 긴 튜브(내경 4.9 mm, 길이 약 35 cm)를 지나게 하여 유동이 충분히 발달되도록 한 후 튜브 끝에 화염을 형성시켰다. 분젠버너의 특징은 예혼합화염이 정상상태(steady) 화염이기 때문에 계측시간이 긴 경우에도 사용이 가능하다. 본 연구에서 사용한 분젠 버너와 화염의 모양을 간단히 그린 것이 그림 7이다. 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/min이었다. 연료와 산화제의 비율은 완전연소하는 경우에 비교하여 연료가 35% 정도 많다. 따라서 화염의 모양은 그림에서 보는 바와 같이 원추형의 화염면을 형성하고 그 바깥에 확산화염이 존재하는 형태가 된다. CARS 실험은 화염면의 모양인 원추 중단을 가로 지르면서

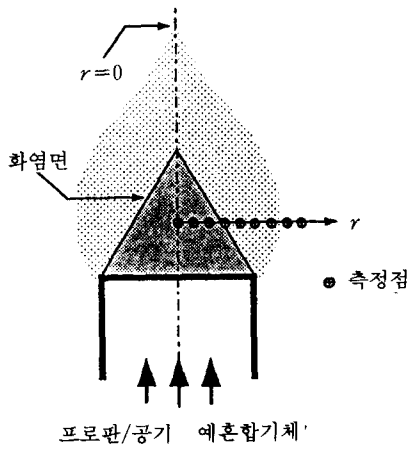


그림 7 분첸버너

바깥 쪽으로 온도 측정 실험을 하였다.

본 연구에서 실제 화염진단에 응용하기 위하여 대향류 버너를 제작하였다. 대향류 버너(counterflow burner)는 화염구조가 간단하기 때문에 스트레치를 받는 화염구조의 이론적, 실험적 연구에 널리 사용되고 있다.⁽¹⁵⁾ 버너의 구조와 기능을 이미 언급한 바 있다.⁽¹⁶⁾ 실험에 사용한 버너의 출구 노즐직경은 14.2 mm이고 두 대향노즐 사이의 간격은 14 mm이다. 노즐에서 혼합기체의 평균 출구 속도는 1.25 m/s, 연료당량비는 0.608이다. CARS 제측은 버너를 수직방향으로 이송시키면서 대향류 버너의 축상에서 행하였다.

4. 실험결과 및 분석

실험에서 구해진 CARS 분광에서 온도는 CARSFIT 프로그램(PC version 03-30-92, Sandia National Lab., USA)을 사용하였다. 먼저 200K에서부터 2100K까지 50K 간격으로 계산된 분광선을 모은 라이브러리(library)를 만들고 이것을 FTCARS 프로그램(PC version, Sandia National Lab., USA)를 사용하여 실험에서 얻은 스펙트럼과 곡선마춤하여 온도를 결정하였다. FTCARS는 중

간 온도의 스펙트럼을 라이브러리로부터 보간법으로 계산한다.

4.1 CARS 온도 측정의 정확도 확인

제작한 분광기의 온도측정 정확도는 측정된 온도의 반복도와 열전대로 측정된 온도의 차이로 평가하였다. 사용한 전기로는 나트륨을 작동매질로 쓰는 열관(heat pipe)를 사용하여 중심부의 온도구배를 최소로 줄일 수 있도록 설계된 것으로 양쪽이 뿔려 있어, 레이저를 관 내부로 통과시켜 관의 중심부에 있는 질소기체의 CARS 분광을 측정하였다. 전기로 가열부의 중심에 R형(Pt-Rh13%/Pt) 열전대의 접점이 오도록 설치하여 전기로 속 공기의 온도를 측정하였다. 열전대로 측정하는 기온의 불확정도는 전기로의 안정도, 전기로 내부의 온도구배, 열전대의 온도측정 불확정도를 고려하면 실온에서 0.5% 이내이며, 1300 K에서 0.3% 이내이다. 전기로의 온도를 실온에서 1300 K까지 약 100 K 간격으로 올리면서 질소의 CARS 스펙트럼을 측정하였으며, 각 온도에서 50회 누적한 스펙트럼(측정의 시정수는 5초)을 10개 측정하여 각각의 온도를 계산하고 평균과 표준편차를 계산하였다. 표준편차를 반복도로 보고, 평균을 열전대의 온도와 비교하여 정확도를 확인하였다.

그림 8은 1272 K에서 10회 반복측정하여

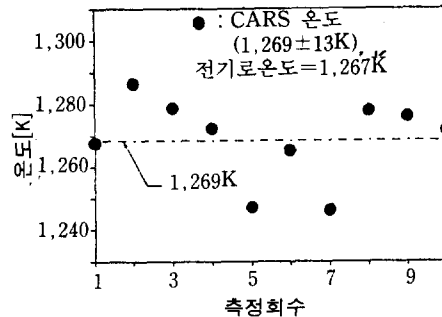


그림 8 CARS 온도 측정의 반복도

계산한 온도를 보인 것으로 표준편차는 13 K로 평균온도 1269 K와 표준편차 이내에서 일치하는 결과를 보이고 있다. 그림 9는 CARS와 열전대로 측정된 온도의 차이를 보인 것이다. 데이터 점의 오차표시선은 표준편차를 그린 것으로 두 온도의 차이는 CARS로 측정된 온도의 표준편차 이내에서 잘 일치하고 있다. 즉, CARS와 열전대로 측정된 온도의 차이는 300 K에서 800 K까지의 온도영역에서 1.5%, 800 K에서 1300 K까지는 1% 이내이다. 열전대로 측정된 기존의 불확정도는 최대 0.5% 이내이므로 1-1.5% 이상의 온도차이는 CARS 측정에서 기인한 것으로 볼 수 있다. 스펙트럼을 곡선 맞춤하여 온도를 계산할 때 맞춤변수의 초기 값을 달리하면 온도가 다르게 계산되는데 이것을 계산에서 발생하는 오차로 볼 수 있는데 계산 오차는 측정된 온도영역에서 2K 이내이다. 그림 9에서 볼 수 있는 것처럼 CARS와 열전대로 측정된 온도의 차이는 온도에 따라 어떤 특별한 경향을 보이지 않고 있으며 측정의 표준편차 이내이다. 따라서 이 온도오차는 우연오차(random error)로 볼 수 있다.

이 우연오차의 원인은 광자단속잡음, 스톱스레이저의 분광분포 변화, 레이저광의 세기나 분광의 공간분포변화와 두 레이저광의 시공간분포 변화에 따른 잡음 등을 들 수 있다.

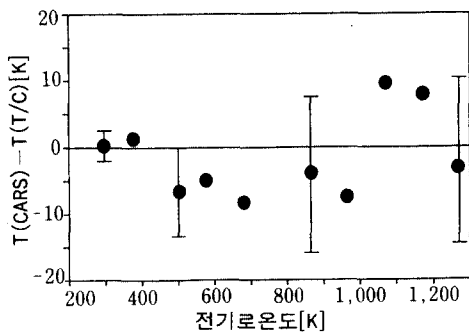


그림 9 CARS 온도의 정확도 측정

(17,18) 이 장치의 정확도는 CARS 온도측정의 정확도 분석을 주로 다룬 Pealat⁽¹⁷⁾의 1985년도 연구결과보다 향상된 것이고 최근 까지 가장 정확도가 높은 것으로 발표한 Snell⁽¹⁹⁾의 연구결과와 거의 일치하는 좋은 결과를 보이고 있다. 이 장치의 정확도가 기존의 연구결과에 비해 약간 향상된 것으로 측정되었는데 이것은 증폭자발방출광을 스톱스레이저로 사용할 경우 광대역레이저보다 CARS 스펙트럼의 잡음이 줄어드는 연구결과와 깊은 관련이 있는 것으로 생각된다.⁽²⁰⁾

4.2 연소진단

CARS 방법과 열전대를 이용하여 분젠 버너 화염의 온도를 측정된 결과가 그림 10에 나타나 있다. 그림에서 보면 반경 1mm 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 1mm 이내로 매우 얇은 것으로 판단된다. 열전대(Pt/Pt-Rh 10%, 직경 0.1 mm)로 측정된 온도는 CARS로 측정된 온도보다 낮게 나왔는데 이는 열전대로 측정된 온도가 전도손실이나 복사손실에 대한 보정을 하지 않은 것이므로 실제보다 낮게 나온 것으로 추측된다. 그림 10에 열전대로 반경 1.75 mm까지 온도를 측

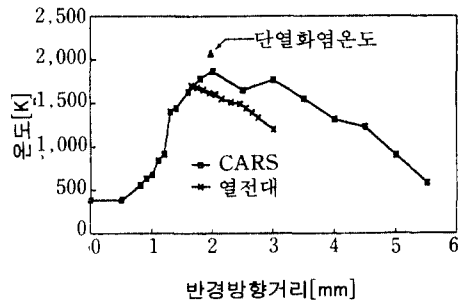


그림 10 분젠버너 화염내부의 온도분포 측정

정한 값을 표시하였는데 그보다 작은 반경속(연료와 산화제가 타지 않은 상태로 온도가 낮음)에 열전대 접점을 넣었을 때 열전대로 사용한 금속 소선을 통한 열전달 때문에 열전대의 접점이 위치한 곳은 온도가 낮아 열전대가 뜨거운 화염 면을 지나고 있으므로 온도가 실제보다 높게 측정되어 정확한 측정을 할 수 없다. 즉 열전대로는 온도의 변화가 심한 경우 열전대가 지나는 부위와 접점이 위치한 온도 측정부위 간의 온도차가 클 경우 온도의 정확한 측정이 불가능하다.

대향류 버너의 메탄/공기 예혼합 불꽃 내부 CO 농도 분포를 CARS 신호의 변조 폭을 이용하여 측정한 결과가 그림 11에 그려져 있다. CO 농도를 측정하기 앞서 불꽃 내부의 온도 분포를 질소의 CARS 분광으로부터 구하였으며, 그 결과가 그림 11에 함께 그려져 있다. 메탄과 산소가 반응하여 온도가 올라가는 영역에서 CO가 발생할 것으로 보고 이 부분에서 CO 농도를 측정하였다. 그림에서 윗버너에서의 거리가 5.5~5.9mm 영역에서 측정된 CO 농도는 이 방법의 측정 한계 이내에 있는 것으로 판단된다. 측정된 CO 농도의 정성적인 모습과 최대치~2%는 수치적인 모델로 계산한 것과 잘 일치하고

있다.⁽²¹⁾

5. 맺음말

Nd:Yag 레이저의 제2고조파와 광대역 모드 없는 레이저를 광원으로 사용하고 이중회절분광기에 설치된 다채널광검출기로 분광된 CARS 스펙트럼을 레이저 펄스마다 측정할 수 있는 광대역 CARS 분광기를 제작하였다. CARS 온도측정 불확정도는 300K에서 1300K까지는 1.5% 이내였다. CARS 기술을 이용하여 분젠버너의 화염면에서의 온도 분포를 측정하였으며, 대향류 버너의 화염내부의 온도 분포 및 CO 농도분포를 측정하였다. 이러한 CARS 기술은 정상상태의 연소진단에 응용할 수 있을 뿐만 아니라 레이저 펄스마다 측정되는 온도의 분포함수를 조사하면 앞으로 난류연소의 진단에도 응용이 가능하며, 내연기관 등과 같이 연속폭발 연소 상태의 기체의 온도나 농도 측정이 가능하다. 본 연구에서 연구된 CARS 기술의 온도 측정정확도는 약 2% 이내이고 농도 측정은 측정기체의 농도가 상온에서는 약 0.1% 이상, 1500K 이상의 고온에서는 0.3% 이상이면 가능하다.

앞으로 대향류 버너 화염을 진단한 상세한 연구결과가 발표될 예정이며, 국내에서도 CARS 기술을 이용한 화염진단 연구가 활발히 진행될 것으로 기대된다.

후 기

저자는 본 연구를 위하여 최근에 개발된 PC용 CARSFIT 프로그램을 무상으로 보내준 미국 샌디아 국립연구소의 L. A. Rahn과 R. L. Farrow에게 깊은 감사를 드린다.

이 연구는 과기처 첨단요소과제 지원으로 수행된 것이며, 저자 중 강과 정은 터보동력기계 연구센터로부터 연구비 지원을 받았다.

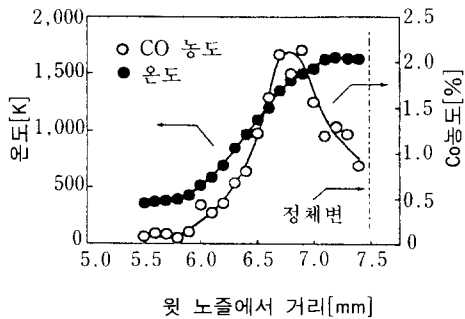


그림 11 대향류 버너 화염내부의 온도 및 일산화탄소 농도분포 측정

참고문헌

- (1) Regnier, R. E. and Taran, J. P. E., 1973, *Appl. Phys. Lett.* 23, p. 240.
- (2) Stenhouse, A., Williams, D. R., Cole, J. B. and Swords, M. D., 1979, *Appl. Opt.* 22, p. 3819.
- (3) Switzer, G. L., Roquemore, W. M., Bradley, R. B., Schreiber, P. W., and Rho, W. B., 1979, *Appl. Opt.* 18, p. 2343.
- (4) Hall, R. J. and Eckbreth, A. C., 1984, "CARS Application to Combustion Diagnostics," in *Laser Applications*, Ready, J. F. and Erf, R. K.(eds), Academic Press, Orlando, Vol 5, p. 213.
- (5) Yueh, F. Y. and Beiting, E. J., 1988, *Appl. Opt.* 27, p. 3233.
- (6) Hancock, D., Hedman, P. O. and Kramer, S. K., 1991, *Combustion & Flame* 87, p. 77.
- (7) Alden, M. and Wendt, W., 1988, *Appl. Spectro.* 42, p. 1421.
- (8) Bechtel, J. H., 1971, *Appl. Opt.* 18, p. 2100.
- (9) Kozykowski, M. L., Farrow R, L. and Palmer, R. E., 1985, *Opt. Lett.* 10, p. 478.
- (10) Echbreth, A. C., 1978, *Appl. Phys. Lett.* 32, p. 421.
- (11) Rahn, L. A., Zych, L. J. and Marttern, P. L., 1979, *Opt. Commun.* 30, p. 249.
- (12) Bradley, D., et al., 1992, "Measurement of Temperature PDF in Turbulent Flames by CARS Technique," 24th Symposium on Combustion, in Brisbane, Australia.
- (13) 한재원, 박승남, 이용성, 이충희, 1991, *응용물리* Vol. 4, p. 314.
- (14) 박승남, 한재원 이충희, 1993, *광학회지* Vol. 4 출판예정.
- (15) Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., 1979, *Flames(Their Structure, Radiation and Temperature)*, 4th Ed., Chapman and Hall, London, pp. 162~165.
- (16) 정석호, 한재원, 1993, *대한기계학회지* 33, p. 811.
- (17) Pealat, M., Bouchardy, P., Lefebvre, M., Taran, J. P., 1985, *Appl. Opt.* 24, p. 1012.
- (18) Snelling, D. R., Sawchuk, R. A. and Mueller, R. E., 1985, *Appl. Opt.* 24, p. 2771.
- (19) Snelling, D. R., Smallwood, G. J. and Parameswaran, T., 1989, *Appl. Opt.* 28, p. 3233.
- (20) Ewart, P., 1985, *Opt. Commun.*, 55, p. 124.
- (21) Lee, S. D., 1993, "Numerical Study on the Interaction Lean Metane Flames," MS Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea. 