

<論 文>

메탄/공기 예혼합화염에서 CARS를 이용한 CO 농도 및 온도측정과 수치해석 결과의 비교

강경태* · 정석호** · 한재원*** · 박승남***

(1994년 10월 31일 접수)

Comparison of CARS CO and Temperature Measurements with Numerical Calculation for Methane/Air Premixed Flames

K. T. Kang, S. H. Chung, J. W. Hahn and S. N. Park

Key Words : Coherent Anti-Stokes Raman Scattering(코히런트 반-Stokes Raman 산란 : CARS), Counterflow Premixed Flames(대향류 예혼합화염), Detailed Chemistry(상세 화학반응), Modulation Dip(모듈레이션 딥)

Abstract

Recently developed technique of measuring minor species concentration by using the modulation dip in broadband CARS has been applied to the flame structure study of methane/air premixed flames in a counterflow. This method used the modulation dip from the cold band CO Q-branch resonant signal superimposed on the nonresonant background. The measured CO concentration profile in a symmetric and unsymmetric methane/air premixed flames together with the velocity and temperature by using LDV and CARS have been compared with the numerical results adopting detailed chemistry modeling. The results show that there is a satisfactory agreement between the experimental data and numerical results for velocities, temperatures and CO concentrations. And the modulation dip technique of measuring minor species, such as CO is a viable tool for a quantitative measurement in a flame.

1. 서 론

레이저를 이용한 연소진단은 비접촉식 측정방법이라는 장점으로 인해 기본적인 측정방법의 하나로 자리잡아가고 있다. 그 중에서 코히런트 반-Stokes Raman 산란법(coherent anti-Stokes Raman scattering : CARS)은 화염의 온도를 측정하는데 널리 사용되고 있는 비교적 잘 정립되어 있

는 측정기법이다.⁽¹⁻⁵⁾

CARS를 이용한 농도측정에는 스펙트럼 적분법과 스펙트럼 곡선맞춤법(spectral curve fitting)이 사용되어 왔다. 측정할 화학종의 농도가 높을 경우에는 위의 두 방법 중에서 스펙트럼 적분법이 농도측정 방법으로 용이하나, 화학종의 농도가 수 퍼센트 이하가 되면, 비공명 배경신호(nonresonant background)의 크기가 공명신호(resonant signal)의 크기와 비슷하게 되어 스펙트럼 적분법은 농도계산에 큰 오차를 발생시킨다. 이 경우에는 스펙트럼 곡선맞춤법이 사용되는데, 미소화학종 측정을 위한 스펙트럼 곡선맞춤법은 광대역(broadband) CARS신

*정회원, 서울대학교 터보동력기계연구센터

**정회원, 서울대학교 기계공학과

***한국표준과학연구원

호의 넓은 스펙트럼 범위때문에 많은 시간이 소요된다. 최근에 이러한 CARS 미소화학종 농도측정 문제점의 해결방법으로 전체 CARS 스펙트럼을 이용하는 대신에 비공명 배경신호에 중첩된(superimposed) 공명화학종의 모듈레이션 딥(modulation dip) 부분만을 이용하여 미소화학종 농도를 측정할 수 있음을 정성적으로 보이는 연구가 있었다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 대항류 예혼합화염에서 이 방법을 이용한 CO 농도측정의 정확도에 대한 정량적 실험을 수행하였다.

대항류 유동장은 유동장의 단순성으로 인하여 이론적, 수치해석적 연구에 널리 이용되고 있으며 실험으로 구현하기도 용이하다. 또한 대항류화염은 난류화염의 층류소화염(laminar flamelets)모델^(7,8)의 국부적인 층류소화염 모델로서 층류화염전파속도,⁽⁹⁾ 스트레치(stretch)를 받는 화염구조⁽¹⁰⁾ 그리고 연료농도가 비대칭인 화염간의 상호작용^(11,12) 등 예혼합화염의 기본 연구에 널리 적용되고 있다.

예혼합화염 구조 연구에서 속도와 온도분포의 측정은 중요한 과제이다. 그러나, 온도측정에 널리 사용되고 있는 열전대는 복사열전달, 촉매효과 그리고 유동장 교란과 같은 문제점들을 가지고 있기 때문에, 정확한 온도측정 데이터는 부족한 실정이다. 또한 접촉식 측정방법에 의한 화염에서의 속도장 측정도 많은 오차를 야기하므로, 정확한 속도 측정 결과도 미흡하여 이론 또는 수치해석적 연구 결과와 비교할 실험결과가 미미한 실정이다. 최근에는 이러한 문제점을 해결한 레이저 진단기법을 이용하여 속도 및 온도측정을 수행하고, 이 결과를 수치해석 결과와 비교하는 연구들⁽¹³⁻¹⁵⁾이 수행되고 있다.

본 논문에서는 이미 정확도가 확인된 측정기술인 레이저 도플러 유속계와 CARS 온도측정법 결과를 이용하여 상세 화학반응을 고려한 경계층근사 지배방정식^(14,16)의 수치해석에 필요한 화학반응메카니즘이나 유동조건을 확인하였다. 확인된 메카니즘과 유동 조건을 이용하여 수치해석에서 계산한 CO 농도 결과를 모듈레이션 딥방법의 결과와 비교하였다.

2. 실험

실험장치는 대항류버너, 속도 측정장치 및 CARS 시스템으로 구성되어 있다. 버너와 속도측

정장치는 강 등⁽¹⁷⁾과 일치한다. 본 실험의 버너 노즐직경은 7 mm이고 노즐간격은 7.1 mm이다. 사용된 연료는 C.P. 등급의 메탄(>99%)이고, 유량계는 수은밀봉 피스톤프루버(mercury sealed piston prover, Brooks serial no. 1050BILI)를 사용하여 교정하였다. 예혼합기의 메탄농도는 가스 크로마토그래프(gas chromatograph, HP 5890-II)를 사용하여 확인하였다. 속도측정시 0.3 μm 직경의 산화알루미늄(Al_2O_3 , Buehler micropolish II)을 산란입자로 사용하는데 데이터율은 100~500 Hz이고 데이터는 100번 측정값의 평균이다.

사용된 CARS 시스템의 개략도는 Fig. 1에 나타내었는데 펌프광으로는 532 nm로 이파장된(frequency doubled) Q 스위치 Nd:YAG 레이저(Quantel, YG660-10)를 사용하였으며 펄스당 에너지는 150 mJ, 펄스시간은 7~8 ns이고 반복도는 10 Hz이다. Stokes광인 색소레이저의 모드잡음을 최소화하기 위해 두 개의 색소셀(dye cell)뒤에 거울이나 회절 발(diffraction grating, 1800 grooves/mm)을 위치시키는 증폭 자발광(amplified spontaneous emission: ASE)방법⁽⁵⁾을 사용하였다. Stokes광은 온도측정에 이용된 질소 CARS의 경우에는 거울을 이용하여 선폭이 100 cm^{-1} 이고, CO CARS의 경우에는 회절발을 이용하여 30 cm^{-1} 이다. 위상 정합(phase matching)은 상자형(box-CARS)를 이용하였으며 광대역(broadband) CARS 기법을 적용하였다.

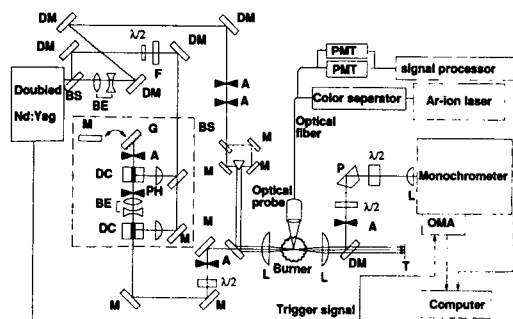


Fig. 1 Diagram of broadband CARS system and LDV system(A, aperture; ASE, amplified stimulated emission; BS, beam splitter; BE, beam expander; DC, dye cell; DM, dielectric mirror; F, filter; G, grating; L, lens; M, mirror; OMA, optical multichannel analyzer; P, Pellin Broca prism; PH, pin hole; PMT, photomultiplier tube; T, trap; $\lambda/2$, half-wave plate)

색소는 메탄올에 용해시킨 로다민(rhodamine) 640과 키튼레드(kiton red) 620의 혼합물이고, ASE의 중심파장은 로다민 640의 농도를 조절하여 CO 농도측정과 온도측정시 각각 600.6 nm 및 607 nm로 하였다. CARS 스펙트럼신호는 Pellin-Broca 프리즘과 이중회절발 모노크로메이터(double diffraction grating monochromator, Jovin-Yvon U1000)를 통과시켜 광다채널분석기(optical multichannel analyzer: OMA, princeton instrument EIRY 1024)를 이용하여 분석하였다.

펌프광 간의 간격은 5 mm이고 25 mm의 초점거리 렌즈를 사용하였는데 공간분해능은 레이저 진행 방향으로 3 mm이고 레이저 진행 수직방향으로 0.1 mm 이다.

3. CARS 온도 및 CO 농도측정

CARS 스펙트럼으로부터 온도를 계산하는 방법은 다음과 같다. 첫째로 Stokes광의 파장분포에 무관한 스펙트럼을 얻기위해서 정압 셀(static cell)에 1.5 atm의 프로판을 충전하여 비공명 CARS 스펙트럼으로 질소 CARS 스펙트럼을 규격화(normalize)한다. 둘째로 CARS 스펙트럼에서 계산된 온도는 수광부 정렬과 모노크로메이터의 슬릿 폭에 관련되는 슬릿함수 slit function의 영향을 받으므로 가우스함수로 가정한 슬릿함수의 선폭은 상온에서의 실험을 통해 정한다. 셋째로 위의 슬릿함수를 적용하고, CARSFIT 프로그램⁽¹⁸⁾을 사용하여 50 K 간격으로 CARS 스펙트럼 라이브러리(library)를 생성하였는데 이 때 이용된 펌프광의 선폭은 실험적으로 측정된 1 cm이고, Kataoka-Teets 선회적분^(19,20)이 사용되었다. 또한 스펙트럼선의 확대를 고려하기 위해서 수정된 에너지 차(modified energy gap)모델이 사용되었다. 최종적으로 급속접합(quick-fitting) FTCARS 프로그램⁽²¹⁾을 사용하여, 100번 측정하여 평균한 CARS 스펙트럼으로부터 온도를 구하였다. 전기로에서 확인한 온도의 정확도는 최대 1200K 범위 안에서 ±30 K이다.

CARS 신호로부터 농도를 구하는 경우, 신호의 강도는 일반적으로 분자의 수밀도(number density)의 제곱에 비례하므로 주로 스펙트럼 적분법^(1,22)이나 스펙트럼 곡선맞춤법⁽¹⁾이 이용된다. 측정하려는 화학종의 농도가 낮아지는 경우에는 비공명신호가 공명항보다 더 커지게 된다. 이 때 CARS 신호분

석과 연관된 삼차 비선형 감수율 $\kappa_{Ars}^{(3)}$ 은 다음과 같아지며

$$|\kappa_{Ars}^{(3)}| \cong 2 \sum_j \kappa'_j + \kappa_{nr}^2 \quad (1)$$

여기서, κ_{nr} 는 비선형 감수율, κ'_j 는 공명 감수율의 실수부이다. 화학종의 농도가 수 퍼센트이하의 경우에는 스펙트럼의 큰 배경 비공명신호 속에 공명신호의 모듈레이션 덩이 나타난다.

이와 같은 모듈레이션 덩을 이용한 미소화학종 농도측정법이 최근에 제안된 바 있는데⁽⁶⁾ 이를 요약하면 다음과 같다. CO 농도가 작은 경우, 냉대역(cold band)의 CO Q-가지 스펙트럼의 공명신호가 비공명항에 중첩되면 모듈레이션 덩이 만들어진다. 이 때 CARS 스펙트럼을 순수한 비공명신호로 규준화하면, 비공명신호 I_{nr} 에 대한 공명신호 I_r 의 비는 Fig. 2와 같은 전형적인 모듈레이션 덩을 보인다. 모듈레이션 덩 I_M 은 대체로 공명 분자의 밀도에 비례하나 온도, 사용된 레이저의 선폭, 수광부의 슬릿함수 등 다양한 요소들의 영향을 받는다. 실제로 기준 강도 I_B 에 대한 I_M 의 비는 온도와 공명 화학종의 농도의 고유한 함수이다.

본 연구에서 사용된 레이저의 선폭과 수광부의 슬릿함수를 고려하면서 CARSFIT 프로그램을 사용하여 I_M/I_B 을 계산하였다. 이 비에 대한 온도의 효과는 계산에 의하면 지수함수이므로, 생성된 데이터는 아래와 같은 함수의 형태로 맞추어질 수 있다.

$$I_M/I_B = a(\gamma + b\gamma^2) \exp(cT) \quad (2)$$

여기서, I_M/I_B 에 대한 공명화학종 농도의 효과는 주화학종에 대한 미소화학종의 농도 비의 이차함수

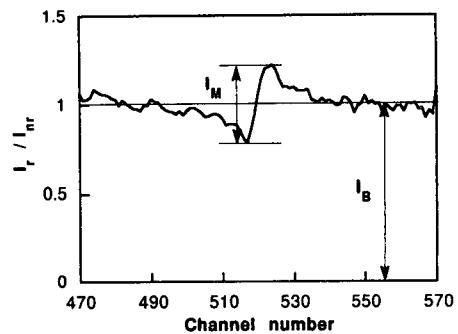


Fig. 2 Modulation dip of normalized CARS spectrum in CO 0.7% in 1 atm Ar static cell

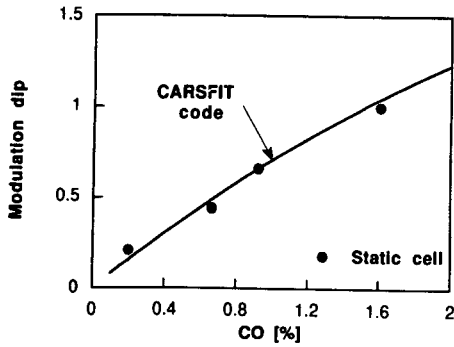


Fig. 3 CO CARS modulation with CO concentration in 1 atm Ar static cell

로 표현되는 것으로 가정하였다. 이때 CO의 몰분율을 X_{CO} 로 할때 γ 는 $X_{CO}/(1-X_{CO})$ 에 비례하는 값이다. 화염속에서 상대적인 비공명 감수율은 반응물에서 생성물로 변하므로, 상대적인 감수율의 증가에 따라서 그 비가 감소한다. 이것을 고려하기 위해서 γ 를 다음과 같이 보완하여 정의하였다.

$$\gamma = X_{CO}/(1-X_{CO})(1+\Delta) \quad (3)$$

여기서, Δ 는 비공명 감수율의 변화량이다. 이러한 인자에 따르면 식(2)에서 a , b 와 c 는 각각 102.89, 0.837와 $0.8038 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 이다.

이 방법을 이용하여 Ar 셀 속의 CO 농도를 표준상태의 정압 셀에서 시험하였다. 결과는 Fig. 3에 나타내었는데, 만족스럽게 일치하였다.

CARS를 이용한 농도측정의 경우 오차의 원인은 CARS신호의 잡음으로, CO 농도가 낮아지면 모듈레이션 띠의 크기가 작아져서 모듈레이션 띠 방법의 오차도 커질 수 있지만 Fig. 3에서 보인 것과 같이 0.2% 정도까지의 오차는 크지 않다. 메탄/공기 혼합기의 비공명 감수율은 $9.59 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{erg-amagat}$ 이고 Ar의 비공명 감수율은 $9.60 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{erg-amagat}$ 이므로 Ar 셀의 식과 계수를 이용하였다. 미연에서 기연지역으로 변함에 따라 비공명 감수율이 14% 정도 증가하므로, ^(1,23) 온도에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하였다.

4. 수치모델

대향류에 대해 경계층근사를 적용한 지배방정식은 다음과 같다. ⁽¹⁶⁾

$$\frac{dV}{dy} + 2apf = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dy} \left(\mu a \frac{df}{dy} \right) - Va \frac{df}{dy} + a^2 [\rho_\infty - \rho(f)^2] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dT}{dy} - \frac{1}{C_p} \frac{d}{dy} \left(\lambda \frac{dT}{dy} \right) + \frac{\rho}{C_p} \sum_{k=1}^K Y_k C_{pk} V_k \frac{dT}{dy} + \frac{1}{C_p} \sum_{k=1}^K h_k \omega_k = 0 \quad (6)$$

$$V \frac{dY_k}{dy} + \frac{d}{dy} (\rho Y_k V_k) - W_k \omega_k = 0 (k=1, \dots, K) \quad (7)$$

여기서, f 는 유동함수(stream function), V 는 축방향 질량유속(mass flux)으로, 각각 다음과 같이 정의된다.

$$u = u_\infty(x)f(x) \quad (8)$$

$$V \equiv \rho v \quad (9)$$

또한 u , v 와 x , y 는 각각 반경방향과 축방향의 속도 및 좌표축이며 T 는 온도, ρ 는 밀도, Y_k , W_k , ω_k , C_{pk} 과 h_k 는 각각 k -번째 화학종의 질량분율, 분자량, 반응열, 비열과 엔탈피이며, C_p 는 혼합물의 비열, V_k 는 Curtiss-Hirschfelder 근사를 이용하여 계산한 k -번째 화학종의 확산속도이고, 열전도율 λ 와 점성계수 μ 는 Wilke의 공식⁽²⁴⁾을 이용하여 구하였다. 열역학적 물성치는 CHEMKIN,⁽²⁵⁾ 이동 물성치는 Transport⁽²⁶⁾를 이용하여 구하였다.

수치계산은 적절한 수정을 거친 Smooke 프로그램^(14,16)을 이용하여 수행하였다. 수정된 Newton-Raphson 방법, Euler 시간적분법 그리고 적응격자(adaptive gridding) 방법을 차분화된 지배방정식에 적용하였다. 계산에 사용된 반응 메카니즘은 Peters⁽²⁷⁾와 Kee 등⁽²⁸⁾에 의해 제안된 메카니즘을 이용하였는데, Peters⁽²⁷⁾에 의해 제안된 메카니즘은 C_3 반응이 포함된 28개 화학종과 74개 반응단계를 포함하고 있으며, Kee 등⁽²⁸⁾에 의해 제안된 메카니즘은 29개 화학종과 134개 반응단계를 포함하고 있다.

경계층 외부 유동장에 대해서는 다른 두 개의 극한, 즉 포텐셜유동가정과 플러그유동가정⁽²⁸⁾이 적용된 지배방정식을 해석하였는데, 포텐셜유동가정에서의 계산영역은 실제 노즐 간격보다 2~3배 크게 하였고, 화염상류의 예열지역 경계의 속도 기류로는 실험에서 측정된 값을 이용하였다. 플러그유동 가정에서는 계산영역을 상하부 버너사이의 실제 거리와 같게 하고 경계에서는 측정된 노즐출구 속도를 사용하였다.

5. 결과 및 검토

본 논문의 실험조건은 노즐 5출구 속도가 80 cm/s이고, 상류조건인 메탄농도가 모두 7%인 대칭 예혼합화염과 각각 7.3%와 4.4%인 비대칭 예혼합화염이다. 대칭 예혼합화염의 속도측정 실험은 -0.4 cm에서 0.4 cm의 전 영역에서 수행하였으나 -0.4~0 cm 지역과 0~0.4 cm 지역의 결과가 대칭이므로 -0.4~0 cm 지역의 속도분포를 Fig. 4에 표시하였는데 Peters⁽²⁷⁾와 Kee 등⁽²⁸⁾의 화학반응 메카니즘을 이용한 계산결과 사이에는 큰 차이가 없다. 대향류 예혼합화염에서 화염전파속도는 속도분포의 국소 최소값으로 정의되는데⁽⁹⁾ Fig. 4에 따르면 플러그유동 계산이 포텐셜유동 계산보다 화염위치와 화염전파속도 예측면에서 실험결과와 더 잘 일치하였다. 계산된 화염전파속도는 대체로 측정값보다 약간 크다.

플러그유동 계산이 화염위치 예측에서 더 낮고, 화학 메카니즘 간의 차이는 작으므로, 이후에 CARS 온도와 CO 농도측정 결과와 비교할 계산 결과는 플러그유동가정과 Peters 메카니즘을 사용하는 계산결과로 한정하였다.

대칭 예혼합화염의 경우에 대하여 광대역 CARS를 이용하여 측정된 온도와 모듈레이션 덮 방법을 이용해 측정된 CO 농도를 Fig. 5에 나타내었다. 온도의 경우 예열지역 및 화염후류지역에서 절대값이나 기울기가 계산결과와 일치하였다. 이 때 1775 K 지점에서 5번 측정된 온도측정의 반복도는 1.5% 이내이다.

CO 물분율도 100번 측정된 결과의 평균을 이용하였는데, 예열지역에서의 CO 농도의 상승, 화염후지역에서의 CO 농도의 하락과 최대 CO 농도값은 계산결과와 만족스럽게 일치하였다. 이상에서 CARS에서 모듈레이션 덮을 사용하여 미소화학종을 측정하는 방법이 화염속에서 CO 농도의 정량적 측정에 유용함을 알 수 있다.

4.8%와 7.3%의 연료의 물분율을 가지는 비대칭 예혼합화염의 온도 및 농도분포를 측정하였다. 4.8% 메탄/공기 예혼합화염은 가연한계 밖이므로 이 화염은 독립적으로 존재할 수 없으나 본 실험의 경우에는 이 화염은 더 강한 7.3% 메탄/공기 예혼합화염의 열에너지를 받음으로써 유지되고 있다. 측정된 온도와 CO 농도는 Fig. 6에 나타내었는데

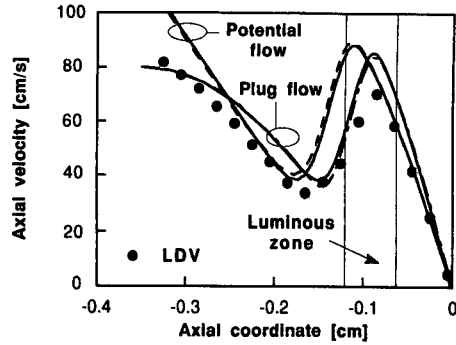


Fig. 4 Comparison of axial velocity profile of LDV measurement and numerical calculation in a symmetric premixed flames(7%~7% methane)(solid line : Peters,⁽²⁷⁾ dotted line : Kee et al.⁽²⁸⁾ mechanisms)

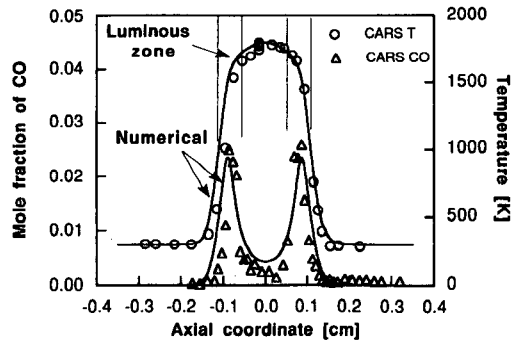


Fig. 5 Temperature and CO mole fraction profile from CARS in symmetric premixed flames(7%~7% methane)(solid line : numerical calculation)

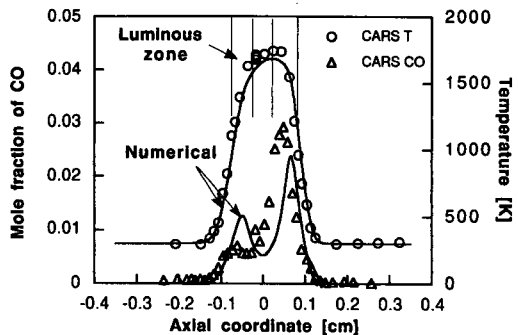


Fig. 6 Temperature and CO mole fraction profile from CARS in asymmetric premixed flames(4.8%~7.3% methane)(solid line : numerical calculation)

각각의 예열지역의 온도분포는 수치계산값과 잘 일치하고 있으며 대칭인 경우와 달리 화염후류지역에 강한 화염으로부터 약한 화염으로의 열전달에 의한 온도 기울기가 존재하며 화염후류지역에서의 온도 기울기는 수치해석과 실험결과가 일치한다. 화염후류지역의 온도의 절대값은 수치해석 결과보다 실험결과가 약간 더 높다. CARS를 이용하여 측정된 CO 농도는 수치해석 결과와 대체로 일치하였는데 강한 화염측에서는 실험값이 수치해석값보다 더 크고, 약한 화염에서는 더 작다. 그러나 강한 화염의 예열지역의 CO 농도 기울기는 만족할 만한 수준으로 예측된다.

6. 결 론

CARS 신호에서 미소화학종 CO를 측정하는 방법인 모델레이션 딥방법을 대향류 메탄/공기 예혼합화염에 적용하여 CO 농도를 측정하고, 온도와 속도를 질소 CARS와 LDV를 이용해서 측정하였다. 이 결과들은 상세 화학반응을 고려한 수치해석 결과와 비교되었다.

대칭 예혼합화염의 CO 농도와 온도분포에 있어서는 실험결과와 계산결과가 잘 일치하였으며, 상호작용을 하는 비대칭화염에서 온도분포는 잘 일치하나 CO 농도는 실험결과와 비교하면 강한화염에서는 계산결과값에서 더 낮게 예측되고 약한 화염에서는 더 높게 예측되었다. 모델레이션 딥방법을 이용한 미소농도 측정법이 메탄화염에서 발생된 CO의 경우 수 퍼센트 이하의 농도를 가지는 미소화학종을 측정하는데 유용한 방법임을 확인하였다.

후 기

강경태와 정석호는 터보동력기계연구센터(TPMRC)의 지원을 받았으며, 한재원과 박승남은 과기처의 지원을 받았습니다. 컴퓨터 프로그램을 제공한 Yale University의 M. D. Smooke 교수와 Sandia National Laboratories의 L. A. Rahn 박사과 R. L. Farrow 박사에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hall, R. J. and Eckbreth, A. C., 1983, *CARS Applications to Combustion Diagnostics, in Laser Applications* (Ready, J. F. and Erf, R. K. eds.), Academic Press, Vol. 5, pp. 213.
- (2) Farrow, R. L., Mattern, P. L. and Rahn, L. A., 1982, "Comparison Between CARS and Corrected Thermocouple Temperature Measurement in a Diffusion Flame," *Appl. Opt.*, Vol. 21, pp. 3119~3125.
- (3) Kröll, S., Aldén, M., Bengtsson, P.-E. and Löfström, C., 1989, "An Evaluation of Precision and Systematic Errors in Vibrational CARS Thermometry," *Appl. Phys. B*, Vol. 49, pp. 445~453.
- (4) Diebel, E., Dreier, T., Lange, B. and Wolfrum, J., 1990, "Parameter Studies in Practical Nitrogen CARS Thermometry Using Standard and Advanced Fitting Codes," *Appl. Phys. B*, Vol. 50, pp. 39~46.
- (5) Snowdon, P., Skippon, S. M. and Ewart, P., 1991, "Improved Precision of Single Shot Temperature Measurements by Broadband CARS by Use of a Modeless Laser," *Appl. Opt.*, Vol. 30, pp. 1008~1010.
- (6) Hahn, J. W., Park, S. N., Lee, E. S., Rhee, C., Kang, K. T., Chung, S. H., Choi, C. Y. and Huh, Y. D., 1993, "Measuring the Concentration of Minor Species from the Modulation Dip of the Nonresonant Background of Broad-Band CARS Spectra," *Appl. Spectro.*, Vol. 47, pp. 710.
- (7) Peters, N., 1986, "Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion," *Twenty-First Symposium(International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1231.
- (8) Williams, F. A., 1985, *Combustion Theory*, The Benjamin/Cummings Publ. Co. Inc.
- (9) Wu, C. K. and Law, C. K., 1984, "On the Determination of Laminar Flame Speeds from Stretched Flames," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1941.
- (10) Law, C. K., 1988, "Dynamics of Stretched Flames," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1381.
- (11) Sohrab, S. H., Ye, Z. Y. and Law, C. K., 1984,

(1) Hall, R. J. and Eckbreth, A. C., 1983, *CARS Applications to Combustion Diagnostics, in Laser*

- "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speeds," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1957.
- (12) Chung, S. H., 1990, "Interaction of Flames," *Handbook of the Heat and Mass Transfer* (Chermisinoff, N. P. Ed.), Gulf Publ. Co., Vol. 4, pp. 863.
- (13) Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D. and Williams, F. A., 1990, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 503.
- (14) Smooke, M. D., Puri, I. and Seshadri, K., 1986, "A Comparison between Numerical Calculations and Experimental Measurements of the Structure of a Counterflow Diffusion Flame Burning Diluted Methane in Diluted Air," *Twenty-First Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1783.
- (15) Sick, V., Arnold, A., Diebel, E., Dreier, T., Ketterle, W., Lange, B., Wolfrum, J., Hiele, K. U., Behrendt, F. and Warnatz, J., 1990, "Two-Dimensional Laser Diagnostics and Modeling of Counterflow Diffusion Flames," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 495.
- (16) Smooke, M. D., 1982, "Solution of Burner-Stabilized Premixed Laminar Flames by Boundary Value Methods," *J. Computational Phys.*, Vol. 48, pp. 72~105.
- (17) 강재훈, 이병준, 정석호, 1993, "대향류 예혼합화염의 농도장 및 속도장에 관한 실험적 연구," *대한국회학회논문집*, 제17권, 제11호, pp. 2850~2856.
- (18) Clark, G., Palmer, R. E. and Farrow, R. L., 1992, "The CARSFIT Code," PC-Version, 05-06-90, Sandia National Laboratories.
- (19) Kataoka, H., Maeda, S. and Hirose, C., 1982, "Effects of Laser Linewidth on the Coherent Anti-Stokes Raman Scattering Spectroscopy Spectral Profile," *Appl. Spectro.*, Vol. 36, pp. 565.
- (20) Teets, R. E., 1984, "Accurate convolutions of coherent anti-stokes Raman spectra," *Opt. Lett.*, Vol. 9, pp. 226.
- (21) Clark, G., Palmer, R. E. and Farrow, R. L., 1992, "The FTCARS Code," PC-Version, 05-06-90, Sandia National Laboratories.
- (22) Regnier, R. E. and Taran, J. P. E., 1973, "On the Possibility of Measuring Gas Concentrations by Stimulated Anti-Stokes Raman Scattering," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 23, pp. 240.
- (23) Farrow, R. L., Lucht, R. P., Clark, G. L., and Palmer, R. E., 1985, "Species Concentration Measurements Using CARS with Nonresonant Susceptibility Normalization," *Appl. Opt.*, Vol. 24, pp. 2241.
- (24) Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F. and Campbell, D. E., 1953, "The Theory of Flames and Detonation," *J. Phys. Chem.*, Vol. 57, pp. 403.
- (25) Kee, R. J., Ruply, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," Sandia National Laboratories Report, SAND 89-8009.
- (26) Kee, R. J., Warnatz, J. and Miller, J. A., 1983, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Viscosities, Conductivities and Diffusion Coefficients," Sandia National Laboratories Report, SAND 83-8209.
- (27) Peters, N., 1993, "Flame Calculations with Reduced Mechanisms Outline," *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems* (Peters, N., Rogg, B. Eds.), Lecture Notes in Physics Series m15, Springer-Verlag, pp. 8~12.
- (28) Kee, R. J., Miller, J. A., Evans, G. H. and Dixon-Lewis, G., 1988, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flames," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1479~1494.