

< 논 문 >

연소진단 검정원으로써 평면화염 버너의 연소특성 연구

길용석* · 정석호** · 이병준*** · 한재원***

(1996년 4월 22일 접수)

The Study on the Combustion Characteristics of a Planar Flame Burner as a Calibration Source of Laser Diagnostics

Yong-Suhk Gil, Suk-Ho Chung, Byeong-Jun Lee and Jae-Won Hahn

Key Words : Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy(코헤런트 반-스톡스 라만 산란법), Laser Induced Fluorescence Spectroscopy(레이저 형광 유도법), Calibration Source(검정원)

Abstract

To provide standard data of temperature and species concentration in a flame for calibrating the laser based combustion diagnostics, we investigated combustion characteristics of a flat flame burner(Mckennar Product). For various stoichiometric ratios we measured temperature and concentration of OH in the premixed methane/air flame with Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy and laser induced fluorescence technique, respectively. Assuming the chemical equilibrium condition at the measured temperature, the mole fraction of the OH radical in the flame was obtained and compared with numerical analysis.

1. 서 론

최근에 자원의 효율적 이용과 환경문제의 해결을 위한 청정연소 및 고효율 연소기의 개발에 대한 관심이 고조됨에 따라 연소과정에 관련된 일련의 연구가 활발히 진행되고 있다.

연소현상은 열전달, 물질전달, 유동현상을 수반하는 복잡한 화학반응과정이므로 이를 해석하기 위해서는 고해상도의 계측기법이 필수적으로 요구된다. 접촉식 계측방법의 경우 계측기가 화염면과 유동장을 왜곡시켜 실험의 정확성을 저하시킨다. 특히, 연소장과 같이 좁은 영역에서 온도 및 농도가 급격히 변하는 영역에서는 그 적용에 한계가 있다.

최근에 레이저를 이용한 비접촉식 계측방법이 연소 연구에 응용되기 시작함에 따라 고해상도의 정보를 얻을 수 있게 되었다. 그러나 이러한 계측방법은 대부분 복잡한 광학 부품들로 이루어져 있어 광 정렬에 많은 시간이 소모되며 그 정확도에 대한 검정원이 존재하지 않아서 시스템의 구성 및 운영에 많은 어려움이 수반된다. 따라서, 온도 및 화학종 농도 등의 연소인자가 시간적, 공간적으로 안정되게 유지되는 검정 및 표준용 연소기가 있다면 레이저 진단법을 적용한 실험결과와 신뢰도와 정확도를 향상시킬 수 있으므로, 새로운 계측기술의 개발에 앞서 검정 및 표준용 연소기의 선정 및 특성평가가 중요하다. 이러한 검정의 표준으로 사용되는 버너는 보수, 유지 및 해석이 용이하고 공간적, 시간적으로 안정성을 유지해야 한다. 최근 이러한 목적으로 상용의 매케나 버너(Mckenna burner)에 관한 연구가 유럽을 중심으로 진행되고 있다. 이 버너는

*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**회원, 서울대학교 기계공학과

***한국표준과학연구원 양자연구부

화염이 다공성 표면에서 평면화염을 형성하므로 화염후류의 넓은 영역에 걸쳐 비교적 균일한 온도가 유지된다. Prucker⁽¹⁾ 등은 수소 연료를 사용하여 여러 가지 당량비에서 CARS 기법을 이용하여 온도를 측정하였다.

본 연구에서는 상대적으로 위험성이 작고 일반적인 화염연구에 널리 활용되고 있는 메탄을 연료로 사용하여 메켄나 버너의 연소특성을 조사하였다. 여러 가지 당량비 조건에서 온도와 OH 몰농도를 CARS 및 레이저 형광 유도법을 각각 이용하여 측정하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 코헤런트 반-스톡스 라만 산란법(CARS)

코헤런트 반-스톡스 라만 산란법에는 주사형(scanning) CARS와 광대역(broadband) CARS가 있다. 주사형 CARS는 좁은 선폭의 스톡스광의 파장을 변화시켜 CARS 신호를 획득하는 방식이고, 후자는 넓은 선폭의 스톡스광을 이용한다. 본 실험에서는 한번에 넓은 범위의 스펙트럼을 얻을 수 있는 광대역 CARS 방법을 채택하였다.

주어진 온도에서 분자의 라만 편이(Raman shift), 진동준위와 회전준위의 분포를 결정하여 CARS의 선택법칙(selection rule)을 만족하는 모든 에너지의 천이를 고려한 분자의 3차 비선형 감수율(third-order nonlinear susceptibility)을 계산하였다. 이렇게 구해진 감수율과 슬릿함수 선폭(slit function line width), 펌프광의 선폭 등을 고려하여 스펙트럼을 만들었다. 스펙트럼 생성시 펌프와 스톡스광의 선폭을 고려한 Kataoka-Teets 콘볼루션 적분을 이용하였고 라만 분광선의 선폭을 고려하기 위해서는 수정된 에너지 간격(modified energy gap) 모델을 이용하였다.⁽²⁾ 또한 분광기의 슬릿 함수와 수광부 광학장치의 특성을 반영하는 슬릿함수의 모양을 가우스 함수분포로 가정하여 측정된 온도가 상온과 일치할 때의 값으로 반치 폭(full width of half minimum)을 결정하였다.⁽³⁾ 이렇게 미리 계산된 스펙트럼과 측정된 스펙트럼을 비교하여 온도를 측정하였다.

광대역 CARS 장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 Nd:YAG 레이저, 색소 레이저, 수광부, 데이터 처리장치로 구성되어 있다.

펌프광은 Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저(Contin-

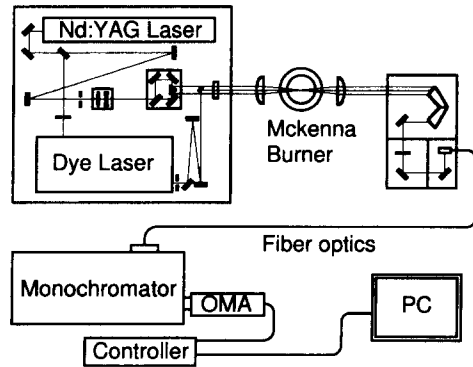


Fig. 1 CARS experimental setup

uum Surlite II)의 2차 고조파(second harmonic, 선폭 0.1cm^{-1} , $7\sim 8\text{ns}$, 400mJ/pulse , 10Hz , 다중모드)를 사용하였다. 색소 레이저의 모드 잡음(mode noise)을 줄이기 위하여 레이저의 공진기 대신 거울을 증폭기 뒤에 위치시켜 ASE(amplified spontaneous emission, 중심파장 607nm , 선폭 100cm^{-1} , $6\sim 7\text{mJ/pulse}$)를 스톡스 광으로 사용하였다. Nd:YAG 레이저의 20%는 색소 레이저를 광 펌핑하는데 사용되고, 80%는 두 개로 분리하여 펌프광으로 사용하였다. 색소 레이저에는 KR620 용액(7.5×10^{-5} 몰농도, 용매:메탄올) 700cc에 R640 용액(5×10^{-5} 몰농도, 용매:메탄올) 40 cc를 혼합한 염료를 사용하였다. 두 개의 펌프광과 색소 레이저를 초점거리 250mm 인 렌즈를 통하여 측정부위에 접혀진(folded) BOXCARS 위상 정합조건을 만족하도록 집속시켜 CARS 신호를 발생시켰다. 이 신호는 두 개의 펠린-브로카(Pellin-Broca) 프리즘으로 1차 분광된 후, 광섬유를 통하여 자체 제작한 단색기(monochromator)에 설치된 다채널 광증폭 분석기(intensified optical multichannel analyser, EG & G 1420)에 의해 측정되었다. 다채널 광검출기는 1024 개의 화소(pixel)로 이루어져 있고 화소 사이의 주파수 간격은 0.094cm^{-1} 이다.

2.2 레이저 형광 유도법(LIFS)

연소장에서 생성된 OH 라디칼은 자외선 영역의 레이저광을 흡수하여 상위 에너지 준위로 천이된 후, 다시 하위의 여러 에너지 준위로 천이되면서 OH 농도에 비례하는 자발광(spontaneous emission)을 방출한다. 이러한 천이과정 중에서 OH 라디칼의 농도 계측에 많이 이용되는 에너지 준위는

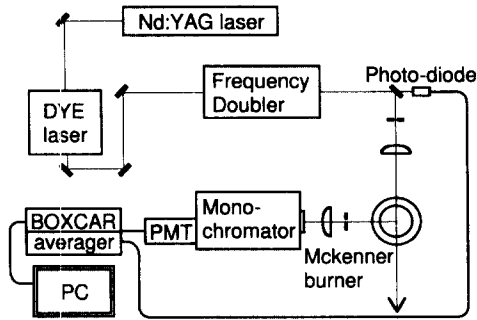


Fig. 2 LIF experimental setup

기저상태인 $X^2\Pi$ 와 첫번째 들뜬 상태인 $A^2\Sigma^+$ 이다.⁽⁴⁾ $X^2\Pi$ 에서 레이저 광을 흡수하여 $A^2\Sigma^+$ 로 여기된 분자는 충돌, 소광 등에 의하여 주위의 다른 여러 회전진동 에너지 레벨로 천이된 후, 두 에너지 준위 사이에서 천이에 대한 선택법칙(selection rule)을 만족하는 낮은 에너지 준위로 천이되면서 자발방출을 일으킨다.

실험장치는 자외선 레이저 생성부, 수광부, 데이터 처리부로 구성되어 있다. 장치의 구성이 Fig. 2에 그려져 있다.

Q-스위치된 Nd:YAG 레이저(Quantel 660-10)의 2차 고조파(선폭 0.05cm^{-1} , $7\sim 8\text{ns}$, 75mJ/pulse)는 메탄올에 $R590(2 \times 10^{-4}\text{몰농도})$ 을 용해시킨 염료를 사용한 색소 레이저(Lumonics Hyper Dye SLM)의 공진기와 증폭기에 의하여 증폭된 후, 주파수 배가기(Lumonics Hyper Track 1000)에서 자외선 레이저($277.5\sim 285\text{nm}$, 25mJ/pulse)로 생성된다. 초점거리 200 mm인 렌즈를 사용하여 버너의 중심축에 자외선 레이저를 집광시키면 LIF 신호가 방출된다. 이 신호를 초점거리 125 mm의 렌즈로 단색기(분해능 0.1nm , 슬릿 폭 20mm, $f/3.9$, 1200 groove/mm, CVI DK240)에 입사시킨다. 단색기에서 파장선택된 LIF 신호는 출구에 설치된 광 증배관(photo-multiplier, Hamamatsu R955)에서 증폭되고 전류-전압 변환기와 BOXCAR 평균기(BOX-CAR averager, Stanford Research SR280)에서 A/D 변환된다.

3. 메케나 버너

Fig. 3에서 보는 바와 같이 상용 메케나 버너(Kaskan Type, McKenna Products)는 외경 120 mm, 높이 60mm이다. 안쪽에는 직경 60mm의 구

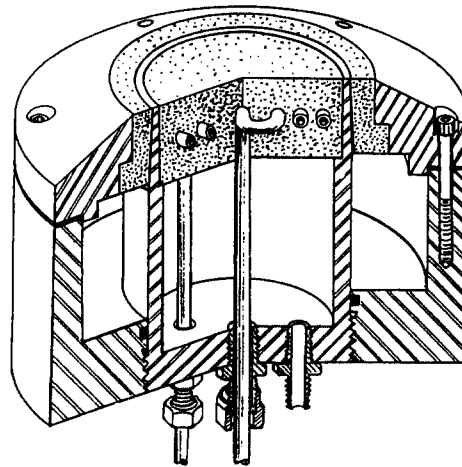


Fig. 3 Sectional view of the McKenna burner

리 입자(95% 구리, 5% 주석)를 소결(sintering)시킨 다공성 원판과 이를 둘러싸고 있는 직경 100 mm의 동일한 재료로 이루어진 다공성판으로 구성되어 있다.

안쪽의 다공성 원판의 내부에는 냉각수가 코일 형태의 튜브를 통해 흐르게 되어 있어 다공성 판이 가열되는 것을 방지하였고, 이 판을 통하여 공기와 메탄의 예혼합기를 공급하였다. 바깥쪽의 다공성 판에는 주변공기의 영향을 막기 위하여 질소 또는 공기를 흐르게 하나, 기존의 실험에 의하면 이러한 영향이 미미하다고 알려져 있으므로 본 실험에서도 사용하지 않았다. 다공성 물질에 의하여 버너의 표면 바로 위(약 2mm)에 평면화염이 형성되었다. 메탄의 유량은 질량유량계(mass flowmeter, MKS)를 이용하여 조절하였으며, 공기는 자체 제작한 소닉유량계(sonic flowmeter)로 조절하였다. 실험에 사용된 모든 유량계는 습가스 테스트기(wet-gas test meter)로 교정되었다.

4. 실험결과

4.1 온도측정

광대역 CARS에 사용되는 스톡스광은 선폭이 넓어서 파장에 따라 강도가 다르다. 이러한 특성이 신호에 미치는 영향을 제거하기 위하여 프로판 가스를 셀에 1 기압으로 주입하고 비공명 CARS 신호를 측정하여 스톡스광의 주파수 분포에 무관하도록 규격화된 스펙트럼을 만든 후, FTCARS code

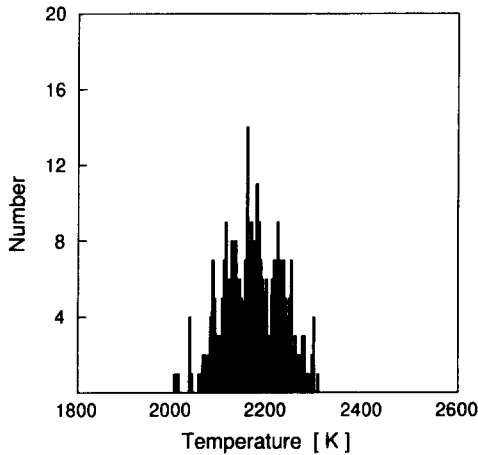


Fig. 4 Histogram of temperature at 50 mm above burner surface

를 이용하여 이론적으로 계산한 스펙트럼과 곡선맞춤하여 온도를 측정하였다.⁽²⁾

시간에 따른 버너의 안정성을 측정하기 위하여 각 펄스마다 CARS 신호를 분석하였다. Nd:YAG 레이저는 10Hz로 작동하지만 신호처리에 걸리는 시간으로 인하여 실제 측정은 3Hz로 이루어졌다. 연소조건은 버너의 표면에서 평균유속 24.6cm/sec, 당량비 1.0이며, 버너 표면으로부터 50mm 지점에서 300번 측정하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 평균온도는 2170.2K, 표준편차 65.7K로 시간적으로 매우 안정적이었다. 이 값은 본 CARS 장비의 표준 전기로에서 검정한 에러와 동일하므로 버너의 불안정성에 기인한 것이 아니라 CARS 장비의 고유에러라 생각되며, 고분해능의 단색기를 이용하면 측정오차를 감소시킬 수 있다.

Table 1 Experimental conditions of premixed methane/air flame.

	Stoichiometric ratio	Average velocity (cm/sec)
Case 1	0.9	24.6
Case 2	1.0	24.6
Case 3	1.1	24.6
Case 4	0.9	34.7
Case 5	1.1	34.7

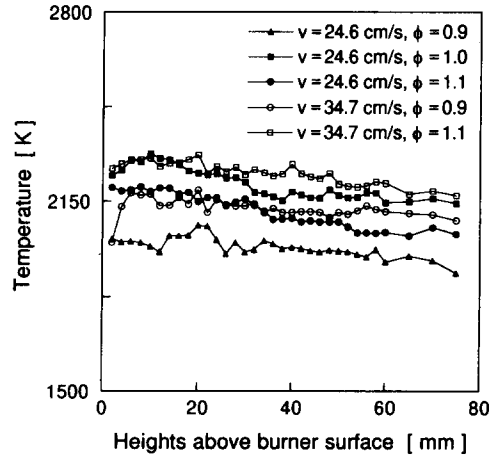


Fig. 5 Temperature profiles for different flow rates and stoichiometric ratios

메케나 버너의 공간적인 온도분포를 측정하기 위하여 주어진 위치에서 100개의 스펙트럼을 평균하여 온도를 측정하였다. Table 1과 같이 평균유속 24.6cm/sec, 당량비 0.9, 1.0, 1.1과 평균유속 34.7 cm/sec, 당량비 0.9, 1.1의 연소조건에서 온도를 측정하였다.

Fig. 5는 유속과 당량비 및 위치에 따른 온도 분포를 보여준다. 버너 직경인 약 60 mm까지는 비교적 균일한 온도분포를 유지하였으나 후류($x=80$ mm)의 온도는 버너 표면근처에 비하여 50K 정도 감소하였다. 버너 표면근처에서는 당량비가 0.9인 경우에 화염이 버너 표면에서 완전한 평면을 유지하지 못하였기 때문에 상대적으로 균일한 온도분포를 유지하지 못하였으며, 상온에서 화염면까지 온도가 올라가는 영역($x=0\sim 2$ mm)에서는 CARS 장비의 광정렬상의 문제로 온도를 측정할 수 없었다.

4.2 OH 농도 측정

실험의 정확도를 높이기 위하여 농도 계측에 적합한 자발광으로는 LIF 신호에 대한 온도 의존성이 작아야 하고 다른 분광선과 충분히 분리될 수 있어야 한다. 여러 자발광 중에서 $Q_1(6)$ 과 $Q_1(8)$ 라인이 이러한 조건을 만족한다. 본 실험에서는 $Q_1(6)$ 라인을 채택하였다. 자외선레이저의 출력변동에 의한 LIF 신호의 변동을 제거하기 위하여 45°의 거울에서 반사되지 못하고 투과되는 약 1%의 광을 이용하여 레이저 펄스의 에너지에 대한

OH 신호를 규격화하였다.

온도측정 조건과 동일한 연소조건에서 OH 신호를 측정하였다. Fig. 6은 주어진 메탄농도와 유속 및 위치에서 100개의 LIF 신호를 측정하여 평균한 뒤 입사 레이저 강도로 규격화한 값을 나타낸다. 이러한 값은 라디칼의 농도에 선형적으로 비례하는 양이므로 한 지점의 농도의 절대값을 안다면 이 값을 기준으로 삼아 다른 위치에서 측정된 LIF 신호에 상응하는 농도를 추정할 수 있다.

case 4(유속 34.7cm/sec, 당량비 0.9)를 제외하고는 $x=30\sim 60$ mm 에서 신호의 강도가 대체로 일정하고 측정된 온도가 비교적 균일하므로, 이 영역에서 주어진 신호 크기에 대응하는 농도값을 결정하는 것이 보정오차를 감소시킬 수 있다. 여러 연소조건 중에서 case 1(당량비 0.9, 평균유속 24.6 cm/sec)의 경우, $x=30\sim 50$ mm 에서 다른 조건에 비하여 LIF 신호의 크기와 CARS로 측정된 온도가 비교적 일정하게 유지되고 있었다. 이 연소조건에서 전영역($x=0\sim 100$ mm)에 걸쳐 OH 라디칼이 화학평형(chemical equilibrium)에 있다는 가정하에서 CARS로 측정된 온도를 이용하여 CEC 코드로부터 농도를 계산하였다. 화학평형에서는 몰농도가 온도만의 함수이므로, 정확한 온도가 주어지면 OH 라디칼 농도를 알 수 있다. 따라서 주어진 연소조건에서 화학평형상태가 유지되는 지점을 알 수 있다면 그 지점을 교정의 기준으로 삼아 다른 위치에서의 농도를 추정할 수 있다. 메케나 버너의 경우, 버너 표면근처에서는 화염에서 화학반응에 의

하여 생성된 OH 라디칼로 인하여 주어진 온도에서 평형상태로 유지될 수 있는 농도 이상의 라디칼이 지속적으로 공급되기 때문에 실제의 농도가 화학평형 가정에 근거한 값보다 높게 된다. 후류로 갈수록 주변 유동장의 교란, 열손실 및 확산 등의 영향으로 인하여 주어진 온도에서 화학평형 상태를 유지할 수 없으므로 실제의 농도보다 화학평형 가정에 근거한 농도가 더 크게 된다. 따라서, 이러한 두 영역 사이에서는 주어진 온도에서 화학평형을 유지할 수 있는 영역이 존재하게 된다. case 1의

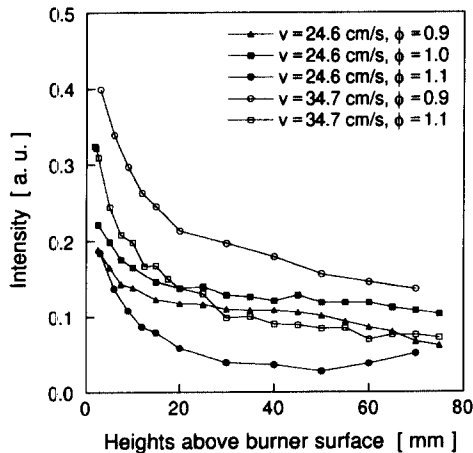


Fig. 6 Intensities of LIF signal normalized by varying input laser intensity

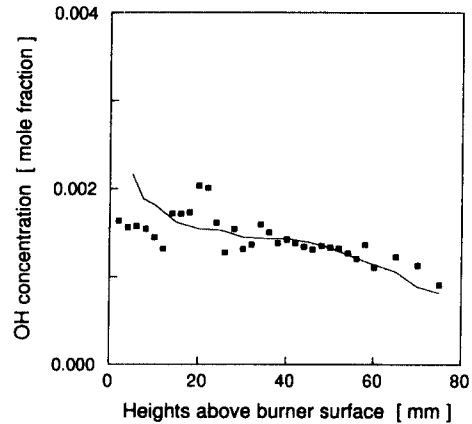


Fig. 7 Comparison of deduced OH concentration from LIF signal and calculated one using CEC cord (symbol: CEC, line: experiment).

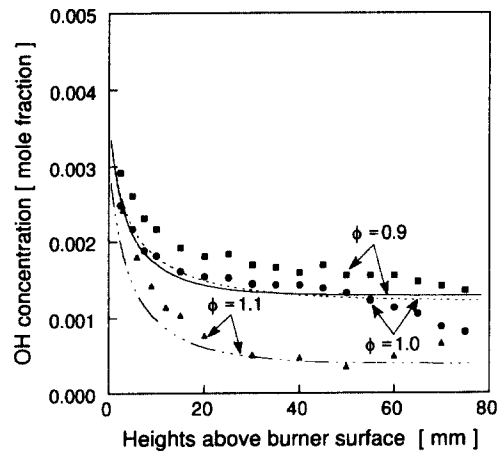


Fig. 8 Comparison of experimental results and numerical calculation at average velocity 25.6 cm/sec (symbol: experiment, line: calculation).

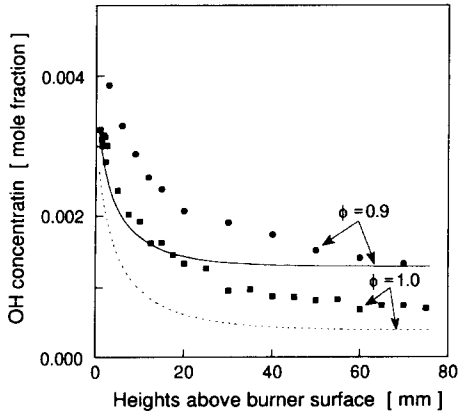


Fig. 9 Comparison of experimental results and numerical calculation at average velocity 34.7 cm/sec (symbol: experiment, line: calculation).

경우, $x=30\sim 50\text{mm}$ 영역에서 OH 농도가 비교적 일정하므로 $x=35\text{mm}$ 지점에서 OH 라디칼이 화학평형상태에 있다고 가정할 수 있다. 따라서 이 지점을 기준으로 선택하여 LIF 신호로부터 농도를 보정하였다. Fig. 7에서 이렇게 보정한 농도와 전 영역에서 화학평형상태에 있다는 가정하에서 계산한 농도를 비교하였다. 상류와 하류에서는 화학평형을 이루지 못하지만 그 사이의 넓은 영역($x=30\sim 60\text{mm}$)에서는 화학평형상태에 있다는 가정이 타당함을 확인하였다.

평균유속 24.6 cm/sec, 당량비 0.9, $x=35\text{mm}$ 의 지점에서 LIF 신호에 대응하는 농도를 교정의 기준으로 삼아 다른 연소조건에 대하여 (Table 1 참조) LIF 신호로부터 농도를 보정하였다. 이렇게 구한 농도와 Smooke 코드를 이용하여 수치적인 계산결과와 비교하였다. Figs. 8, 9에서 보는 바와 같이 화염근처에서는 수치계산과 측정된 농도가 비교적 일치하였으나 후류로 갈수록 두 값의 차이가 현저해졌다. 이는 수치해석의 경우에 후류에서 단열조건을 가정하였기 때문에 온도가 일정하게 유지되고 더 이상의 화학반응이 없기 때문이라 추정된다.

5. 결 론

다양한 당량비의 메탄/공기 평면화염에서 CARS와 LIF 진단장비를 이용하여 온도와 OH 농도분포를 각각 측정하였다. 온도분포가 시간적, 공간적으로 매우 안정적이었고 버너 표면으로부터 30~60 mm 높이에서 OH 라디칼 농도가 비교적 일정하게 유지되었다. 유속 24.6cm/sec, 당량비 0.9, $x=35\text{mm}$ 에서 화학평형의 가정과 CARS로 측정할 온도로부터 LIF 신호에 대응되는 농도를 결정하고, 이 값을 농도교정의 기준으로 삼아 여러 연소조건에서 정량적인 농도를 측정할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Prucker, S., Meier, W. and Stricker, 1994, "A Flat Flame Burner as Calibration Source for Combustion Research: Temperature and Species of Premixed H₂/Air Flames, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 65, No. 9, pp. 2908~2911.
- (2) 한재원, 1988, "코헤런트 라만 분광학 연구", 박사후 연수 보고서, 한국표준연구원.
- (3) 박승남, 한재원, 이은성, 이충희, 1993, 한국광학회지, 제4권, 제2호, pp. 226~231.
- (4) 이병준, 길용석, 한재원, 정석호, 1996, 한국기계학회논문집, 제20권, 제2호, pp. 710~719.
- (5) Gordon, S. and McBride, B. J., 1971, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations", *National Aeronautics and Space Administration*, Washington, D. C..
- (6) Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miler, J. A., 1990, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames", SAND85-8240. UC-401.