

동축류 버너에서 생성된 부분 예혼합 화염을 이용한 화염 온도 측정 검정원 연구

박철웅*, 한재원*, 신현동**

Study on the Partially Premixed Flames Produced by a Coflow Burner as Temperature Calibration Source

Chul Woung Park*, Jae Won Hahn*, Hyun Dong Shin**

Key Words : 검정원(Calibration source), 코헤런트 반 스톡스-라만 분광법 (CARS ; Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy), 연소(Combustion), 온도 측정(Temperature measurement)

Abstract

We investigated a uniform temperature zone, produced by double flame structure of a coflow CH₄/air partially premixed flame, to be used as a temperature calibration source for laser diagnostics. A broadband N₂ CARS(coherent anti-Stokes Raman spectroscopy) system with a modeless laser was used for temperature measurement. When the stoichiometric ratio was 1.5, we found the uniform temperature zone in radial direction of the flame of which the averaged temperature was 2110 K with standard deviation 24 K. In the stoichiometric ratio range between 2.0 and 2.5, we found very stable temperature-varying zones in vertical direction at the center of the flame. The size of the zone was approximately 15 mm and it covered a temperature range from 300 K to 1900 K. We also suggest that this zone can be used as a calibration source for 2-D PLIF(planar laser induced fluorescence) temperature measurement.

1. 서 론

고효율 및 저공해 연소를 위하여 화염 구조 측정 등 연소과정의 특성을 이해하

려는 많은 연구가 진행중이다. 화염에서는 발열화학반응에 의하여 열 및 물질전달이 1mm 정도의 매우 좁은 영역에서 발생하기 때문에 화염구조의 측정을 위해서는 고해상도를 가진 측정 기술이 필요하다. 최근 레이저 응용 측정기술은 온도와 화염생성 물질의 농도가 급격하게 변하는 영역을 비접촉, 고해상도로 측정할 수 있어서 연소에 관한 많은 측

* 한국표준과학연구원 양자연구부

** 한국과학기술원 기계공학과

정결과를 얻는데 기여하였다⁽¹⁾. 레이저 응용 측정기술은 레이저와 반사용 거울, 분광기등 여러 광학 부품으로 구성되어 장치 구성 후 장치의 안정도 및 정확도의 유지를 위하여 화염의 온도나 화학종의 농도가 안정적으로 발생하는 검정원을 이용하여 장치특성을 측정전 후에 주기적으로 확인하는 것이 필요하다.

최근에는 상용 평면화염 버너(Meckenna Burner, Hencken Burner)를 이용하여 레이저응용 측정 장비의 검정원으로 사용하려는 연구가 있었다⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾. 메케나 버너를 이용한 결과를 살펴보면 이 버너는 다공성 표면에서 발생하는 평면화염을 이용하므로 화염 후류의 영역에서 균일한 온도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이 버너는 가동시 화염면이 넓어서 많은 연료와 냉각수가 필요하다. 또한 화염면이 다공성 표면 근처에서 발생하므로 화염 생성이전의 온도나 농도 등은 측정 할 수 없고, 화염온도가 공급 냉각수의 온도 및 양에 영향을 받는다⁽⁵⁾. 현재 이 버너는 최초 생산회사에서는 더 이상 생산되지 않고 있다. 헨켄 버너도 메케너 버너와 유사하게 다공성 버너 표면에 평면화염을 이용하여, 검정원의 가능성을 N₂ CARS와 H₂ CARS 기술로 확인하였다. 이 버너는 냉각수를 사용하지 않는 대신에 공급연료와 산화제의 유량을 증대시켜 화염에 도달하기 전에 예비가열을 막아서 생성화염 온도를 단열화염온도와 같게 하여 온도를 측정하고, 단열화염온도 계산결과와 비교 할 수 있는 장점이 있다. 두 버너의 측정결과를 살펴보면 모두 화염 후류의 온도가 균일한 지역을 이용하고 있는 공통점이 있다. 따라서 다른 버너로 화염온도가 균일한 지역을 만들 수 있고, 쉽게 측정 조건과 위치를 고정 할 수 있다면 이 화

염을 레이저응용 측정 장비의 온도 검정원으로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

동축류 버너는 버너의 중심에서 연료와 산화제를 공급하고, 주위에는 공기를 다량 공급하여, 중심에서 생겨난 화염의 움직임을 고정하여 위치에 따른 화염 측정이 가능하다. 이 버너는 Santoro등에 의해 처음 제작되어 화염에서 soot 생성 및 소멸과 화염구조와의 관계연구에 사용되었고⁽⁶⁾, 최근에는 LII(Laser Induced Incandescence)의 soot 농도 측정 검정원으로 사용되고 있다⁽⁷⁾. 동축류 버너는 이미 여러 실험실에서 보유하고 있는 장치로 제작이 간단하고, 냉각수의 공급이 필요 없다. 이 버너를 이용하면 비예혼합, 부분예혼합, 예혼합화염의 발생이 가능하고, 버너크기가 작아서 설치가 간단하며 화염 길이가 2-3 cm 정도로 짧게 발생시킬 수 있어서 2차원으로 가시화하기에도 편리하다. 특히 이 버너를 이용하여 생성된 부분 예혼합 화염은 내부의 예혼합 화염과 외부의 비예혼합 화염의 이중구조(double structure)를 갖기 때문에 두 화염면 사이에 온도 기울기가 작은 지역이 발생한다. 또한 당량비의 조절을 통하여 화염면이 쉽게 육안으로 관찰되는 조건에서 측정위치(예를 들면 화염끝에서 수mm 위)를 고정 할 수 있다. 이런 이중구조(double structure)를 갖는 부분 예혼합 화염은 가정용 버너의 대부분을 차지하고 있어서, 연소의 효율성이나 청정성을 위한 연구가 활발하다⁽⁸⁾⁽⁹⁾. 특히 이 화염에서 NO 생성 과정을 이해하려는 목적으로 여러 가지 연구가 시도되고 있는데, 이 화염을 검정원으로 사용하여 여러 조건에서 온도 및 농도 측정결과를 축적하면 화염구조를 이해하는데 도움을 줄 수도 있다. 본 연구에서는 CARS 기술은 이용하여 동축류 버너를

부분예혼합 화염의 온도를 측정하여 연소 온도 측정 검정원의 가능성을 탐색하였다.

2. 실험 장치

2.1. coflow 버너

동축류 버너는 Santoro 등에 의해 처음 제작되어 화염에서 soot 생성 및 소멸과 화염구조와의 관계연구에 사용되었다. 장치의 자세한 설명은 다른 논문에도 나와 있다⁽¹⁰⁾. 이 장치는 국내에서도 여러 연구실에서 제작 사용되고 있다. 버너의 자세한 구조는 Fig. 1에 있다. 버너는 내경이 8mm 외경 9.5 mm인 황동관에서 연료 또는 연료 산화제 혼합기를 공급한다. 황동관의 바깥에는 직경 94 mm 인 허니컴이 설치되어 있고, 허니컴은 1.2mm x 1.2 mm의 정사각형 세라믹 구조의 집합체로 되어 있으며 두께는 25 mm이다. 허니컴에서 황동관의 높이는 12 mm 이다. 허니컴으로 공급되는 공기는 직경 2mm 유리구슬을 통과하여 공급되어 출구 속도가 균일하게 하였다. 버너에 공급되는 연료(CH₄ 순도 99.9) 및

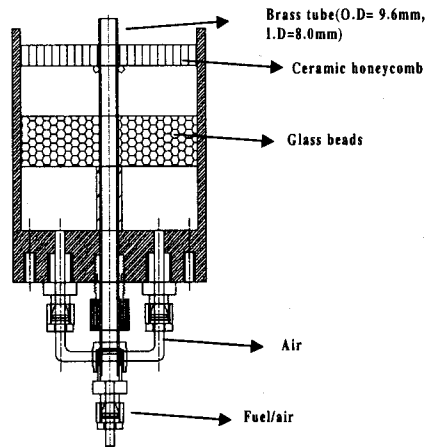


Fig. 1 Schematic diagram of coflow burner.

공기는 질량유량계(MKS 사)를 이용하여 조절하였으며, 실험에 사용되는 유량계는 표준 습식 가스메타로 교정하여 사용하였다. 주위 공기는 발생화염이 고정될 수 있도록 분당 10 리터 정도를 흘렸다.

이 버너를 이용하여 생성된 CH₄/공기 예혼합 화염 직접사진이 Fig. 2에 있다. 화염은 메탄을 분당 0.21 리터로 고정하고 공기유량을 분당 2리터에서 0.8리터로 조정하여 혼합기의 당량비를 1에서 2.5

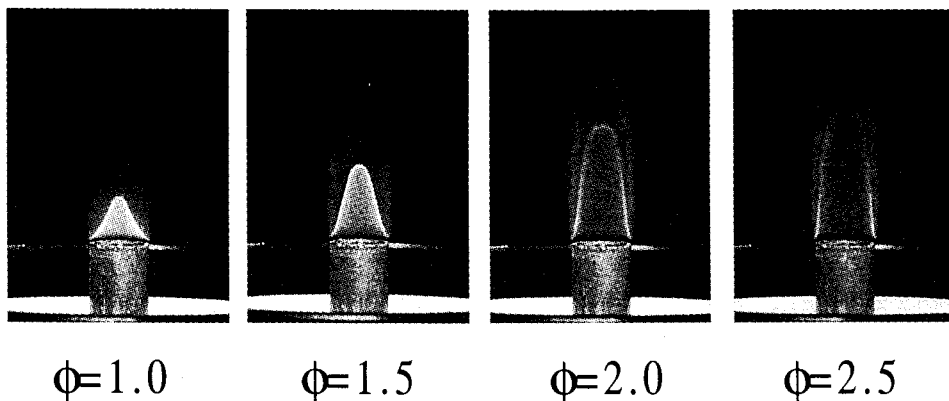


Fig. 2 Direct photograph of methane/air partially premixed coflow flame(Φ : fuel-air equivalence ratio)

로 증가시켜서 측정하였다. 황동관으로 공급되는 전체유속은 당량비가 1.5인 경우에 51.3 cm/s 이고 당량비가 2.5로 증가하면 유속은 33.6 cm/s 로 감소하였다. Fig. 2에서 보면 당량비 1.5의 화염 경우에서 CH 라디칼에 의한 밝은 화염면을 육안으로 확인 할 수 있어서 측정 위치를 정하는데 편리하였다. 당량비가 증가하면 처음에는 예혼합 화염면의 길이가 당량비 2.0 근처까지는 증가하게 된다. 당량비가 2.0 이상에서는 화염위쪽부터 예혼합 화염면이 혼합기의 가열에 의해 사라지면서 비 예혼합화염 부분이 증가하게 되어 내부예혼합 화염면의 길이가 감소하고, 중심에서는 내부예혼합 화염과 외부 비예혼합 화염을 구분할 수 없다. 화염온도의 측정위치는 두 화염면 사이에 온도 기울기가 작은 지역이 발생할 수 있는 1.5에서 2.5 사이의 화염을 선택하여 측정하였다.

2.2. 광대역 CARS 장치

광대역 CARS 장치는 레이저 펄스가 지속되는 수 ns 동안에 발생하는 신호를 측정하므로 온도가 순간적으로 변하는 연소상태를 측정할 수 있다. 본 실험에 사용된 광대역 CARS장치에 관한 설명과 정확도 측정 결과는 다른 논문에 있다.⁽¹¹⁾ CARS 장치의 온도 측정 정확도는 정확도 0.25 % 이내의 표준 복사 온도계와 1000 K에서 2500 K 까지 비교 교정한 결과 최대 2 %이내의 온도측정 오차가 있었다. 본 논문에서는 간단한 장치구성에 대하여 언급하려고 한다.

광대역 이동형 CARS 장치의 펌프레이저로 사용하는 Nd-YAG 레이저(Continuum, Surelite)의 이차 고조파는 펄스당 에너지가 최대 300 mJ이고, 펄스폭은 7-8 ns이며, 반복도는 10 Hz이다.

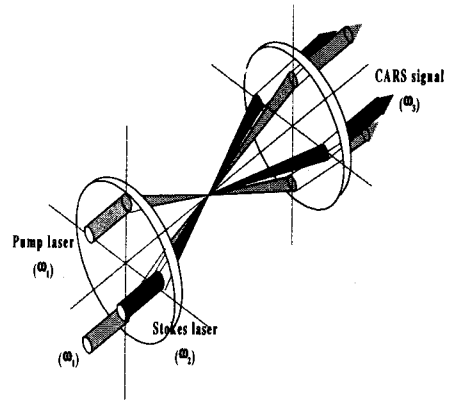


Fig. 3 Laser beam geometry for folded BOXCARS.

Nd-YAG 레이저 이차 고조파의 에너지의 대부분($\leq 80\%$)은 스톡스(Stokes)광을 만드는 무모드(modeless) 레이저의 펌핑에 사용된다. 나머지는 광 분할기와 반사 거울을 거쳐 두개의 펌프광으로 분리되어 무모드 스톡스광과 함께 Fig. 3과 같이 접혀진 상자형 위상 정합(folded BOXCARS phase matching)을 하게 된다. 신호 발생에 사용된 상자형 위상 정합에서 두 펌프광 사이의 간격은 6 mm이며, 볼록 렌즈를 거친 펌프광과 Stokes광은 화염에 집중된다. CARS 신호는 스톡스 레이저의 반대 위치에서 발생한다. 접혀진 상자형 위상 정합에서 공간적으로 분리된 CARS 신호는 광 분할기, 펄린 브로커 프리즘을 거쳐서 직경 200 μm 의 광 섬유관을 통해 자체 제작한 단색기(1200 grooves/mm)로 분광하여 다채널 광분할기(optical multichannel analyzer, EG&G 1461)로 측정된다. CARS 신호의 세기를 감지하는 다채널 분광기의 광소자는 강한 빛에 노출되었을 경우 다음 스캐닝(scanning)은 바로 초기 상태로 복귀하지 못한다. 따라서 매 펄스마다 다채널 광분할기의 다이오드를 여러번 스캐닝하여 초기 상태로 유지해야만 저화

한 분광선을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 4회 스캐닝 한 후 50번 평균하여 CARS 신호를 측정하였다.

3. 측정결과 및 논의

CARS 측정 크기(probing volume)는 보통 직경이 200-300 μm 이고 길이는 집속 렌즈의 초점거리에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 CARS 측정 시 측정대상 화염의 크기와 온도 기울기 정도 등을 고려하여 집속렌즈를 설치하고 측정크기를 고려하여 측정하여야 한다. CARS 측정시 측정크기 안에 고온부분과 저온부분이 존재하면 측정결과가 저온부분에 치우쳐서 측정되기 때문에 측정대상 화염면의 크기와 기울기 방향을 고려하여 가능한 초점거리가 짧은 렌즈를 사용하는 것이 유리하다. Fig. 4는 비공명 상수가 큰 두께 150 μm 의 슬라이드 글라스를 스캔하여 측정한 CARS 신호세기를 나타낸 결과이다. 측정결과는 신호세기의 최고 값으로 규격화하였다. 이 결과를 가우시안 맞춤하여 얻은 CARS 장치의 측정 크기의 길이는 초점거리가 100 mm의 경우에는 0.87 mm 이고, 200 mm의 경우에는 2.79 mm 이다. 따라서 실제 동축류 버너 측정에는 초점거리가 100 mm 인 렌즈를 사용하였으며 화염면에 측정 크기가 수직하게 통과하도록 측정하였다.

동축류 버너로 CH_4 /공기 부분 예혼합 화염을 만들 경우 당량비 1.5 근처에서 안정적인 이중화염구조가 발생하는 것으로 알려져 있다⁽⁷⁾⁽⁸⁾. 당량비 1.5의 경우 높이가 13-14 mm 정도의 내부 예혼합 화염이 관찰된다. 이 화염에서 형성된 이중화염 사이의 화염 온도의 균일성을 확인하기 위하여 버너 튜브의 끝에서 6

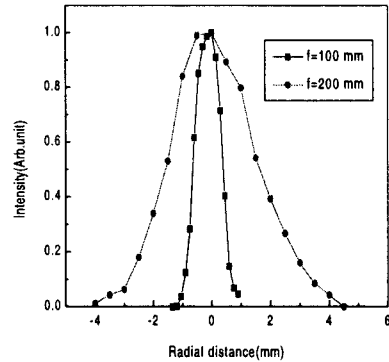


Fig. 4 Measured length of probing volume of CARS with focusing lens.

mm 위에서 반경 방향으로 0.5 mm 간격으로 3번 측정 한 결과가 Fig. 5에 있다. 온도가 균일한 지역이 내부예혼합 화염과 외부 비예혼합 화염사이에서 형성됨을 알 수 있다. 버너 튜브의 끝에서 2 mm 위의 중심으로부터 위쪽으로 30 mm를 1 mm 간격으로 3번 측정 한 결과가 Fig. 6에 있다. 화염의 온도는 약 8 mm 정도부터 상승하여 15 mm 정도까지 최대치에 근접하여 매우 균일하다가 서서히 감소하는 결과를 보인다. 이중화염의 내부 균일한 영역의 온도를 측정하기 위해 예혼합 화염끝에서 2 mm 위에서 반경방향으로 측정 한 결과가 Fig. 7에 있다. 측정결과에서 보면 반경 방향으로 약 5 mm 까지 매우 균일한 온도를 얻을 수 있다. 이 지역의 온도 측정결과는 평균 2110K 에 표준편차가 20 K 였다. 이 균일한 지역의 온도는 Fig. 5에서 측정된 균일한 지역의 온도보다 50 K 정도 높았는데, 이것은 공급 혼합기의 일부분이 예혼합 화염전에 가열되기 때문으로 판단된다. 이 결과로 보면 화염의 위쪽과 옆쪽의 두곳에 이중화염에 의한 균일 온

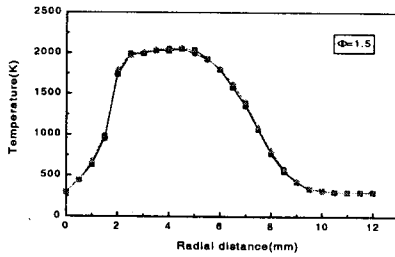


Fig. 5 The radial temperature profile for $\Phi = 1.5$ at a height of 6 mm above the burner tube.

도영역이 존재함을 알 수 있으며, 따라서 균일한 지역이 넓은 위쪽 지역을 화염온도 측정의 검정원으로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

당량비의 변화에 따른 화염온도 변화를 알아보기 위하여, 화염의 온도를 버너 튜브의 끝에서 2 mm 위의 중심으로부터 위쪽으로 30 mm를 1 mm 간격으로 측정 한 결과가 Fig. 8에 있다. 당량비의 증가에 따라 이중화염 사이 균일한 지역의 최고온도는 2180 K에서 2000 K로 천천히 감소함을 알 수 있다. 당량비의 증가에도 불구하고 최고온도의 감소량이 적은 것은 당량비가 증가할수록 공급혼합기의 유속이 감소하여 화염면에도달하기 전에 가열되는 양이 증가하기 때문이다. CH_4 /공기 당량비 2-2.5의 경우에 공급기체의 유속이 감소하여 화염면 안쪽의 혼합기의 온도가 화염면으로 접근하면서 가열되면서 서서히 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이 부분은 온도 기울기가 낮고 300 K에서 2000 K 정도의 고온이 15 mm 정도 영역에서 존재하고 있어 여러 가지 온도 측정기술을 낮은 온도와 높은 온도에서 시험/비교할 수 있는 영역으로 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 특히 이 영역은 공급 혼합기

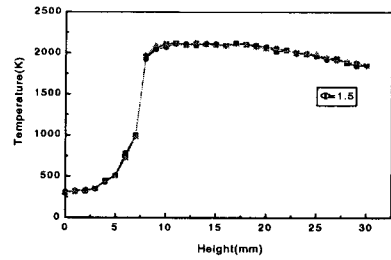


Fig. 6 The vertical temperature profile for $\Phi = 1.5$ from 2 mm above the burner tip.

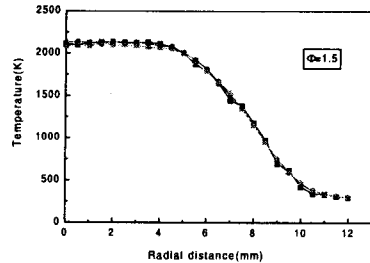


Fig. 7 The radial temperature profile for $\Phi = 1.5$ at a height of 2 mm above the premixed flame tip.

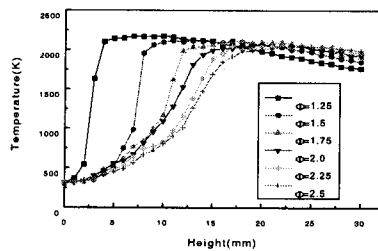


Fig. 8 The vertical temperature profile for $\Phi = 1.5 - 2.5$ from a height of 2 mm above the burner tip.

가 화염면에 접근하면서 가열되어 아직 급격한 화학반응이 발생하지 않아서 혼합기의 농도를 쉽게 고정할 수 있다. 따라서 이 지역은 Seitzman 등에 의해 제안되어 초음속유체 온도 측정에 사용되고 있는 PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence)를 이용하여 온도장을 측정하는 기술⁽¹²⁾의 정량화나 다른 기술과의 정확도 비교 등에 사용가능 할 것으로 판단된다.

4. 결론

레이저 응용 연소 측정장치의 안정도 및 정확도의 유지를 위하여 화염의 온도가 안정적으로 발생하는 검정원이 필요하다. 온도 측정의 검정원으로 동축류 버너를 이용하여 생성된 부분 예혼합 화염의 온도를 광대역 CARS로 측정하였는데, 버너에서 생성된 이중구조(double structure)의 화염면사이의 온도는 매우 균일하였다. 이중화염이 안정적으로 발생하는 조건인 당량비 1.5에서 온도가 균일한 지역의 반경방향 측정결과는 평균 2110 K에 표준편차가 24 K로 안정적이었다. 따라서 온도가 균일한 이 지역을 화염온도 측정의 검정원으로 사용할 수 있다. 당량비를 1.5에서 2.5로 증가시키면 온도가 균일한 지역의 온도는 200K 정도 감소하였다. 당량비 2.5의 경우 중심에서 축방향 위쪽으로 측정된 결과 15 mm 정도의 영역에서 300 K부터 1900 K의 고온이 낮은 기울기로 측정되었다. 이 지역은 PLIF를 이용하여 온도장을 측정하는 기술의 정량화와 다른 온도측정 기술과 비교하는데 사용될 수 있을 것이다. 또한 이와 같은 동축류 버너에서 측정된 메탄공기 부분 예혼합 화염의 온도 측정결과는 이중구조의 부

분 예혼합 화염을 이해하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

후기

저자는 동축류 버너의 제작과 부분 예혼합 화염 발생에 대하여 단국대학교 이원남 교수의 도움을 받았음을 대단히 고맙게 생각합니다.

참고문헌

- (1) Alan C. Eckbreth, "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species" Gordon and Breach Publishers 1996
- (2) S. Prucker, W. Meier, and W. Stricker "A flat flame burner as calibration source for combustion research: Temperature and species concentrations of premixed H₂/air flames" Rev. Sci. Instrum. vol 65 No 9 p2908-2911(1994)
- (3) 길용석, 정석호, 이병준, 한재원, "연소진단 검정원으로 평면화염버너의 연소특성연구" 대한기계학회지 B 제 20권, 제10호 p3355-3360 (1996)
- (4) R. D. Hancock, K. E. Bertagnolli, R. P. Lucht, "Nitrogen and Hydrogen CARS Temperature Measurements in a Hydrogen / Air Flame Using Near-Adiabatic Flat-Flame Burner" Combust. and Flame, vol 109, pp323-331(1997)
- (9) J. A. Eng, D. L. Zhu, and C. K. Law "On the Structure, and Dual Response of Flat-Burner Flames" Combust. and Flame, vol 100, pp645-657(1995)

- (6) private communication in Penn State Univ.
- (7) R. J. Santoro, T. T. Yeh, J. J. Horvath and H. G. Semerjian "The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames" *Combust. Sci. and Tech.*, vol 53 pp89-115(1987)
- (8) J. P. Gore and N.J. Zahn " NOx emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane / Air Co-flow Jet Flames " *Combust. and Flame* vol 105 pp414-427(1996)
- (9) Min Suk Cha, Wonnam Lee, Young-Hun Song, and Suk Ho Chung " An Investigation of the Structure and the NO Formation Characteristics of Partially Premixed Methane Flames Using Planar Laser Induced Fluorescence" *CLEO/Pacific Rim '99/WE1*, pp157-158(1999)
- (10) R. J. Santoro, H. G. Semerjian, R. A. Dobbins " Soot particle measurements in diffusion flames" *Combust. and Flame* vol 51 pp203-218(1983)
- (11) 박철웅, 박승남, 한재원, 이종웅, "연소진단용 이동형 광대역 코헤런트 반 스톡스 라만 분광기에 관한 연구" *한국연소 학회지* 제1권 제2호, pp9-20(1996)
- (12) J. M. Seitzman, G. Kychakoff, and R. K. Hanson, " Instantaneous temperature field measurements using planar laser-induced fluorescence" *Optics Letters*, vol 10, No 9, pp439-441(1985)