

# 연료에 따른 종류 예혼합화염의 CH\* Chemiluminescence 신호특성 변화

이원남\* · 강석민\*\*

## The Dependency of CH\* Chemiluminescence of a Laminar Premixed Flame on Fuel Types

Wonnam Lee, Sukmin Kang

### ABSTRACT

The CH\* chemiluminescence of premixed flames and their dependency on fuel types has been experimentally investigated on laminar methane and propane premixed flames. The measured chemiluminescence intensities are observed linearly proportional to the fuel flow rate, which could be interpreted as the CH\* chemiluminescence signal is linearly proportional to the heat release rate under fuel lean conditions. The effect of equivalence ratio could be expressed by an exponential function as  $I_{CH^*} \propto a_1 \exp(b_1 \Phi)$ , where  $a_1 = 0.00054$  and  $b_1 = 4.60$  for methane and  $a_1 = 0.0056$  and  $b_1 = 5.02$  for propane. Oscillating flames showed the temporal fluctuation of chemiluminescence intensity: however, the time averaged values are virtually identical to those of quiescent flames under the same fuel flow rate and equivalence ratio conditions. This observation suggests that there is no significant flame stretch effect on chemiluminescence intensity, in average values.

**Key Words** : Premixed flame, CH\* chemiluminescence, Heat release rate, Flame oscillation

### 기 호 설 명

$\dot{m}_{fuel}$	Fuel flow rate (sccm or slpm)	$I_{430nm}$	Chemiluminescence intensity at 430nm
$\dot{m}_{air}$	Air flow rate (sccm or slpm)	$I_{470nm}$	Chemiluminescence intensity at 470nm
sccm	Standard cubic centimeter per minute	$I_{CH^*}$	CH* chemiluminescence intensity at 430nm
slpm	Standard liter per minute	$\Phi$	Equivalence ratio

## 1. 서 론

화염의 화학발광(chemiluminescence) 신호를 측정하고 해석하는 방법은 엔진과 가스터빈 등의 연소특성 연구에 널리 사용되고 있다. 최근

에는 CH\* 화학발광 신호를 측정하여 연소과정의 열방출률과 당량비를 실시간으로 알아내려는 연구들이 진행되고 있다[1-3]. 화학발광 신호는 연소 과정의 화학반응과 밀접하게 연관되어 있으므로 이를 이용한 연소계측은 기존의 방법으로 확인할 수 없었던 화염에 대한 많은 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 이러한 화학발광 신호를 이용한 연소특성에 대한 연구는 대부분 연료 과농 조건에서 메탄/공기

\* 단국대학교 기계공학과

\*\* 단국대학교 기계공학과 대학원

† 연락저자, wlee@dku.edu

혼합기 또는 실용 연료를 사용하여 수행되었다. 화학발광 신호를 다양한 연소과정의 해석에 적용하려면 화학발광 신호에 영향을 주는 인자들에 대한 충분한 자료와 이해가 필요하다. 그러나 이에 대한 연구결과는 많지 않은 실정이다. 특히 CH\* 화학발광 신호로 연소과정의 열방출율과 당량비를 실시간으로 알아내려면 연료에 따른 CH\* 화학발광 신호 특성의 차이에 관한 자료가 필요하지만 이에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 또한 화염의 당량비와 불안정한 화염 또는 난류 화염에서의 화염 스트레칭 등이 CH\* 화학발광 신호 변화에 미치는 영향도 아직 잘 알려져 있지 않다.

본 연구에서는 CH\* 화학발광 신호 특성이 연료에 따라 어떻게 변하는가를 실험적으로 알아보았다. 슬롯 버너를 이용하여 이차원 화염을 구성하고 당량비가 0.5에서 0.9사이의 희박한 조건에서 메탄/공기 및 프로판/공기 예혼합화염의 CH\* 화학발광 신호를 측정하였다. 동일한 조건의 화염에 대해 CH\* 필터를 이용하여 얻어진 영상을 분석하고 이를 이용하여 측정된 CH\* 화학발광 신호 변화 특성을 검증하였다. 또한 일부 유속이 빠른 진동하는 화염에서의 측정 결과로부터 화염 스트레칭이 CH\* 화학발광 신호에 미치는 영향을 평가할 수 있었다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

예혼합화염에 대한 CH\* 화학발광 신호의 측정에는 슬롯버너가 사용되었다. 폭 1 mm 길이 50 mm의 8개 슬롯 중 가운데 4개의 슬롯으로 예혼합화염을 형성하였다. 화염의 바깥쪽에는 각각 슬롯 1개를 이용하여 외부화염을 형성하여 실험에 사용된 내부화염을 안정시켰다. 제일 바깥쪽의 슬롯에는 공기를 흘려보내 외부로부터의 교란을 차단하였다. 연료로는 순도 99.9 %의

프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)과 메탄(CH<sub>4</sub>)을 사용하였으며, 산화제와 주위공기는 제습기와 필터를 통과한 압축공기를 사용하였다.

Fig. 1은 슬롯버너로 형성한 화염으로 (a) 전체적으로 안정된 이차원 화염, (b) 슬롯의 길이 방향에서 본 화염 및 (c) 슬롯과 수직인 방향에서 본 화염 형상을 보여주고 있다. 형성된 화염은 슬롯 방향에 대한 이차원 화염으로, 슬롯버너에서 이차원 화염의 길이방향으로 화염의 발광이 중첩되어 신호가 좁은 영역에서 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 외부의 작은 화염은 내부화염을 안정시키기 위한 당량비 1.0의 예혼합화염이다. 화염 전체에서 방출하는 화학발광 신호는 슬롯의 길이 방향에서 측정되었다. 이때 외부의 작은 화염에서 발생하는 화염발광 신호는 공간 필터를 사용하여 제거하였다. 따라서 측정된 화학발광 신호는 단지 측정대상인 가운데에 형성된 예혼합화염의 신호이며, 내부화염의 당량비와 연료유량에 따라 결정된다.

화염의 화학발광 신호 스펙트럼은 모노크로메이터(Jobin Yvon: HR250)를 사용하여 확인하였다. 화염에서 방출되는 신호는 대물렌즈(f=50 mm, D=25 mm), 광섬유(optical fiber) 및 입구 슬릿(inlet slit)을 거쳐서 모노크로메이터로 들어간다. 이 신호는 190 nm부터 1200 nm까지 측정 가능한 1200 gr/mm 등급의 회절격자에 의해서 파장이 분리된다. 각각의 파장으로 분리된 화염의 발광 신호는 출구 슬릿을 통하여 400 nm에서 500 nm의 범위에서 1.0 nm 간격으로 PMT(Hamamatsu : H7712-02)로 측정되었다. 이때 DAQ 장치(National instrument, PCI-6221)와 Labview로 작성된 프로그램이 사용되었다. 전원공급장치(Hamamatsu : C7169)를 이용하여 PMT의 전압을 조절하고 안정적인 파위를 공급하였다. Fig. 2는 모노크로메이터를 이용한 화학발광 신호 측정 장치를 보여주고 있다.

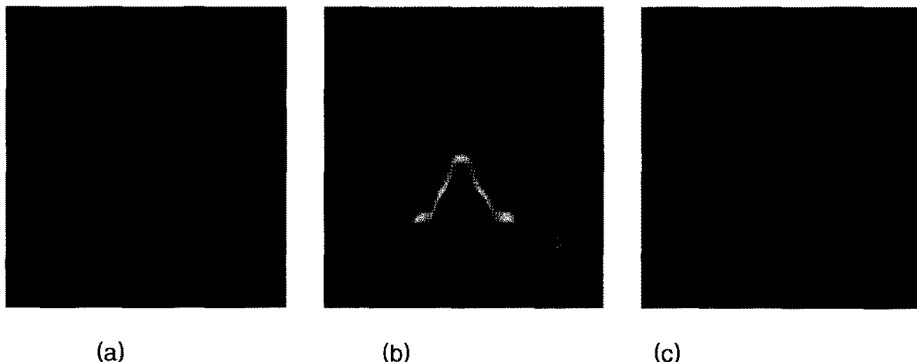


Fig. 1 (a) 2-D premixed flame on a slot burner, (b) front view, (c) side view

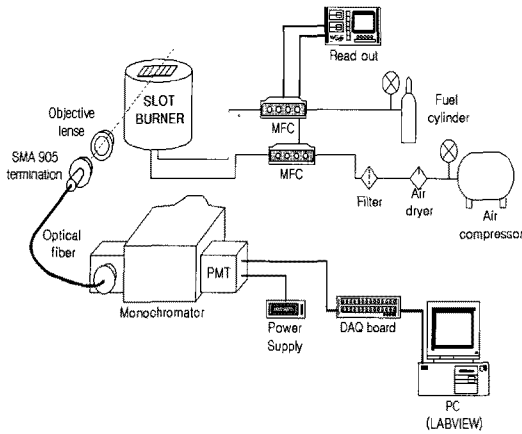


Fig. 2 Schematic of monochromator system

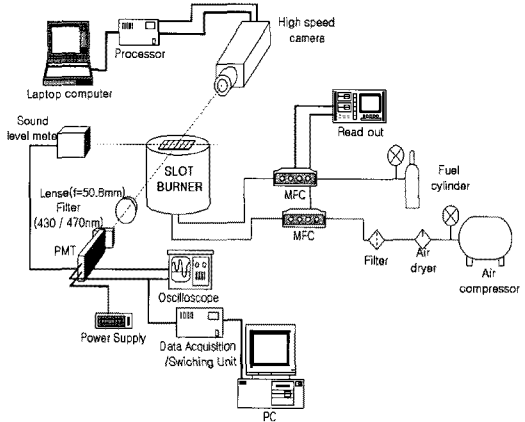


Fig. 3 Schematic of experimental setup

화염의 CH\* 화학발광 신호 측정에는 PMT와 협대역 통과(narrow-band pass, FWHM=10 nm)필터가 사용되었다. PMT로 들어오는 신호는 화염중심으로부터 375 mm 거리에 위치한 직경 25mm의 볼록 렌즈(f=50.8 mm)를 이용하여 상의 크기를 축소한 후 430 nm(CH\*, LAMDA Optics F10-25.4 mm) 또는 470 nm(CO<sub>2</sub>\*, ANDOVER F10-25 mm) 필터를 통과시켰다. PMT로 들어온 신호는 데이터 수집 및 스위칭 장치(Agilent : HP34970a)를 이용하여 처리하였다. 화염의 당량비와 연료 유량에 따른 화학발광 신호의 변화와 화염 형상과의 상관관계를 알아 보기위하여 CCD 카메라(SONY : XC-HR50)와 고속카메라(PHOTRON : Fastcam-Ultima APX i2)를 이용하여 화염의 이미지를 획득하였다. CCD 카메라와 상용 렌즈(lens, Nikon f 50 mm lens) 그리고 이미지 처리장치(National Instrument : IMAQ PCI-1409)를 이용하여 조건별 화염의 이미지를 획득하였으며, 고속카메라와 상용 UV 렌즈(Nikkor f 105 mm UV lens)를 이용하여 진동하는 화염을 촬영하고 고속카메라 전용 프로그램(Photron Fastcam Viewer ver. 2.4)을 이용하여 화염이 방출하는 신호의 변화를 해석하였다. Fig. 3은 화학발광 신호 측정 장치들의 구성도를 나타내고 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 예혼합화염의 Chemiluminescence

Fig. 4는 화학발광 신호의 스펙트럼을 보여준다. 신호는 당량비 1.0, 연료유량 600 sccm의 프로판 화염으로 측정되었다. 파장 400-500 nm 영역의 신호는 주로 CH\*와 C<sub>2</sub>\* 화학발광 신호

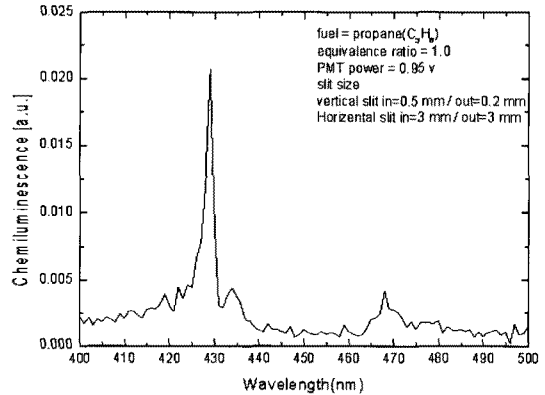


Fig. 4. Chemiluminescence spectrum for a slot burner

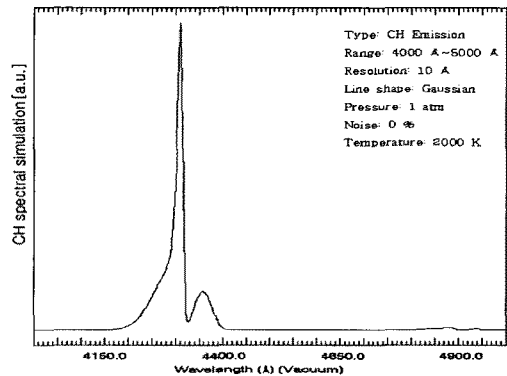


Fig. 5. Simulation of CH(A-X) spectrum

로 나타난다. Fig. 5는 상용화 되어있는 스펙트럼 모사 프로그램인 LIFBASE[4]를 이용하여 CH\* emission을 400 nm(4000 Å)부터 500

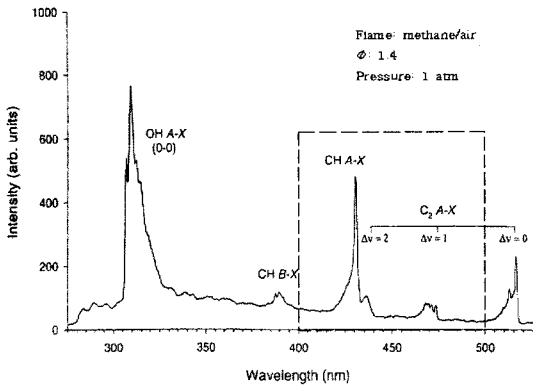


Fig. 6. An emission spectrum of a premixed, measured by Sandrowitz et al[5].

nm(5000 Å)까지 1 nm(10 Å)의 해상도로 모사한 결과를 나타낸다. 가상 제한 조건은 1기압, 2000 K의 화염 온도, 주위 잡음 0%로 설정하고 계산되었다. 실험에서 얻은 결과와 비교하면 430 nm 주위에 나타나는 CH\* 신호의 경향이 매우 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6은 Sandrowitz 등[5]이 당량비 1.4의 메탄 예혼합 화염을 spectrometer를 이용하여 파장에 따른 화학발광 세기를 측정된 결과다. 이 결과와 비교하면 측정된 화염의 스펙트럼은 430 nm 영역에서 CH\*를 470 nm 영역에서 C<sub>2</sub>\*를 의미한다고 할 수 있다. 그러나 여기서 나타나는 스펙트럼은 그 배경에 CO<sub>2</sub>\*신호를 포함하고 있다[6-8]. 따라서 화염의 CH\* 화학발광의 영향을 알아보기 위해서는 CO<sub>2</sub>\* 화학발광의 영향을 알 수 있어야 한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 당량비 1.2와 0.9 두 조건에서 프로판과 메탄 화염에 대해 측정된 화학발광을 비교한 결과이다. 두 연료에 대해 당량비 0.9 화염에서는 당량비 1.2 화염에서와는 달리 470 nm 영역에서는 C<sub>2</sub>\* 화학발광의 영향이 나타나지 않는 것을 공통적으로 확인할 수 있었다. 메탄의 경우 프로판에 비해 전체적인 신호의 세기가 약하기 때문에 프로판 화염에서 보여주는 결과보다 상대적으로 해상도가 떨어지는 것을 볼 수 있었으나 전체적인 경향은 유사하기 때문에 메탄 화염에서도 당량비 0.9 이하의 희박한 조건에서는 430 nm에서 CO<sub>2</sub>\* 화학발광의 영향을 제외한 CH\* 화학발광의 영향을 추정할 수 있었다. 본 연구에서는 프로판과 메탄 화염의 희박조건에서 CH\* 화학발광 신호의 특성을 알아보고자 당량비가 1.0보다 작은 0.5-0.9 사이의 조건에서 화학발광 신호를 측정하였다.

### 3.2 화염의 CH\* chemiluminescence 특성

프로판과 메탄 예혼합화염에서 발생하는 CH\* 화학발광을 측정하기 위하여 각각의 화염에 대해 430 nm 필터와 470 nm 필터를 이용하여 당량비 별로 연료 유량을 증가시켰을 때 발생하는 화학발광 신호의 변화를 선택적으로 측정하였다. 430 nm에서 측정된 신호는 CH\*와 CO<sub>2</sub>\*를 포함한 화학발광이며 I<sub>430nm</sub>로 나타내고, 470 nm에서 측정된 신호는 C<sub>2</sub>\*와 CO<sub>2</sub>\*를 포함한 화학발광 신호로 I<sub>470nm</sub>라 표현하였다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 희박 화염에서는 470 nm 영역에서 C<sub>2</sub>\* 화학발광이 거의 나타나지 않으므로 이 결과를 CO<sub>2</sub>\* 화학발광의 영향

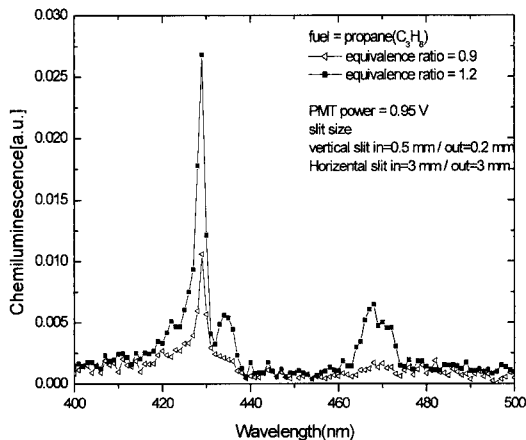


Fig. 7 Chemiluminescence spectrum from the propane premixed flame for a slot burner

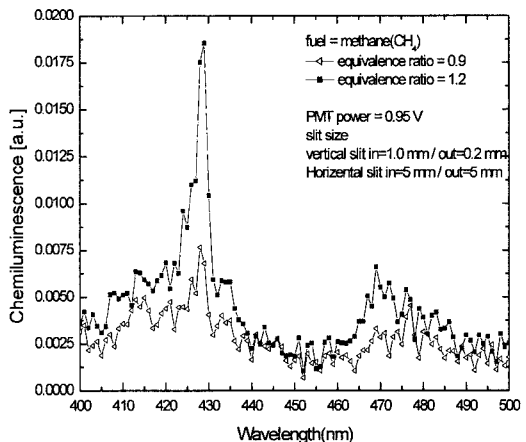


Fig. 8 Chemiluminescence spectrum from the methane premixed flame for a slot burner

으로 가정하였다. 두 영역에서 CO<sub>2</sub>\*의 영향이 거의 동일하게 나타나므로[7] I<sub>430nm</sub>와 I<sub>470nm</sub>의 차이를 식(1)에서처럼 I<sub>CH\*</sub>라고 정의하고 메탄 화염의 I<sub>CH\*</sub>는 Fig. 9에, 프로판 화염의 I<sub>CH\*</sub>는 Fig. 10에 각각 나타내었다. 여기에서 하첨자 'vib'와 'tube'는 각각 진동하는 화염과 진동조건에서 세라믹튜브를 이용하여 안정화 시킨 화염을 의미한다.

$$I_{430nm} - I_{470nm} = I_{CH^*} \quad (1)$$

CH\* 화학발광은 유량의 증가에 따라 모든 당량비에 대하여 모두 선형적으로 증가하였다. 따라서 메탄과 프로판 예혼합 화염의 CH\* 화학발광 신호는 화염의 열방출률에 선형적으로 비례한다고 할 수 있다.

CCD 카메라로 촬영된 화염의 구조로부터 메탄과 프로판 화염에서 공통적으로 동일한 당량

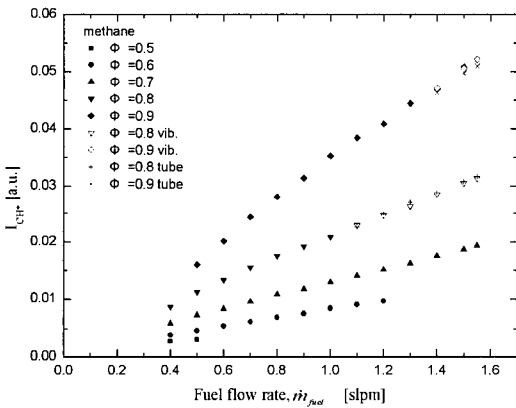


Fig. 9 CH\* intensities of methane flames

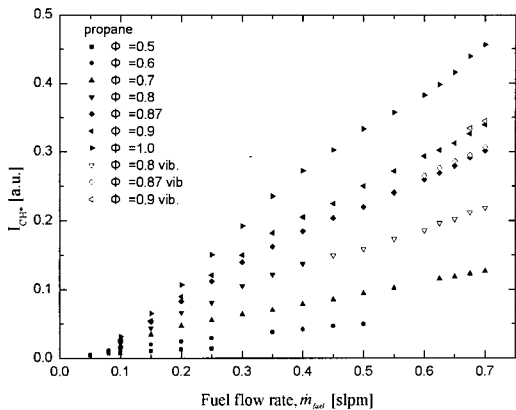


Fig. 10 CH\* intensities of propane flames

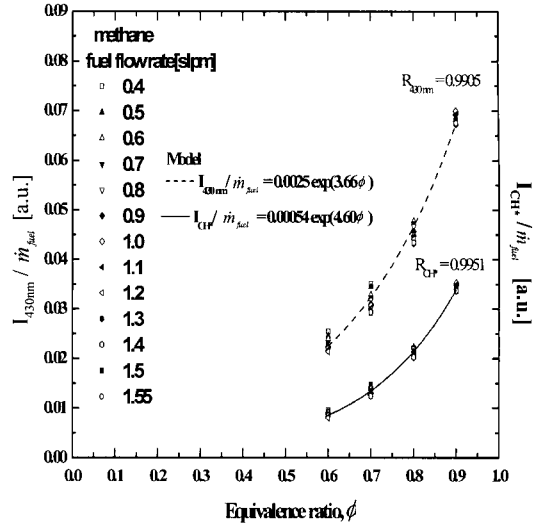


Fig. 11 Normalized Chemiluminescence intensity at 430 nm exponential functions of the equivalence ratio

비 조건에서 연료 유량이 작을수록 화염의 크기가 작아지고 노즐의 출구 부분에 부착되는 영역이 발생한다는 사실을 확인할 수 있었다. 이 조건에서는 노즐표면으로의 열손실이 화염의 CH\* 화학발광 신호에 영향을 준다고 판단되었다. 따라서 화염이 노즐의 출구에 부착되는 경우를 제외하고 결과를 분석하였다.

화염의 430 nm 파장의 화학발광 신호와 CH\* 화학발광 신호를 각각 공급된 연료 유량으로 나누어 표준화(normalized) 한 후 당량비에 대한 관계식을 구하였다. Dandy 등[9]은 당량비 0.65-0.9 사이의 메탄 예혼합화염에 대한 OH\* 화학발광 측정 실험 결과를 지수함수 형태로 표현하였다. Higgins 등[10]은 당량비 0.66-0.86에 대해 0.5-2.5 MPa의 압력조건으로 측정한 메탄 예혼합화염의 CH\* 화학발광 신호를 당량비와 압력에 대한 멱함수의 형태로 나타내었다. 본 연구에서 얻어진 실험 결과에서도 Fig. 11과 Fig. 12에서 보여주는 것처럼 CH\* 화학발광 측정 결과가 당량비에 대하여 비선형적으로 나타난다는 것을 알 수 있다. Fig. 11의 점선은 430nm 파장의 화학발광 신호와 당량비의 관계를, 실선은 CH\* 화학발광 신호와 당량비의 관계를 각각 식 (2)와 (3)의 지수함수로 보여주고 있다.

$$I_{430nm}/m_{fuel} = 0.0025 e^{3.66\phi} \quad (2)$$

$$I_{CH^*}/m_{fuel} = 0.00054 e^{4.60\phi} \quad (3)$$

Fig. 12는 실험값과 관계식을 비교하고 있다. 430nm에서 측정된 화학발광 신호는 점선으로 CH\* 화학발광 신호는 실선으로 각각 식 (4)와 (5)의 멱함수 형태의 관계식을 보여주고 있다. 식 (4)에서 당량비에 대한 지수 2.70은 메탄/공기 화염에서 얻어진 Higgins 등[10]이 제시한 멱함수 형태의 실험적 관계식의 지수 값 2.72와 매우 유사하였다.

$$I_{430nm} / \dot{m}_{fuel} = 0.0858 \Phi^{2.70} \quad (4)$$

$$I_{CH^*} / \dot{m}_{fuel} = 0.0466 \Phi^{3.40} \quad (5)$$

그러므로 당량비 0.6-0.9 범위의 희박연소 조건에서 메탄화염의 CH\* 화학발광 신호는 당량비와 연료유량과 다음 관계를 갖는다.

$$I_{CH^*} = 0.00054 \dot{m}_{fuel} e^{4.60\Phi} \quad (6)$$

$$I_{CH^*} = 0.0466 \dot{m}_{fuel} \Phi^{3.40} \quad (7)$$

Fig. 13 과 Fig. 14는 각각 식 (6)과 (7)을 사용하여 예측된 CH\* 화학발광 신호와 측정된 값을 보여주고 있다. 당량비가 0.6-0.9 사이의 희박 조건에서 메탄 화염의 CH\* 화학발광 신호는 연료의 질량유량, 즉 열방출률에 선형적으로 비례하며, 당량비에 대한 지수함수 또는 멱함수로 표현이 가능하다는 것을 알 수 있다. 메탄 예혼합화염에 대해서는 지수함수 관계식이 멱함수

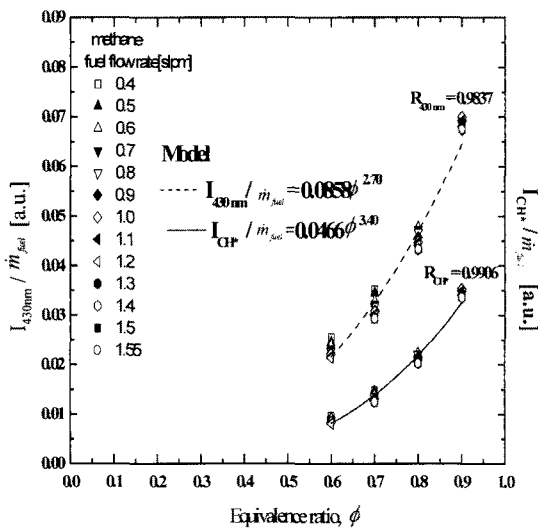


Fig. 12 Normalized Chemiluminescence intensity at 430 nm power functions of the equivalence ratio

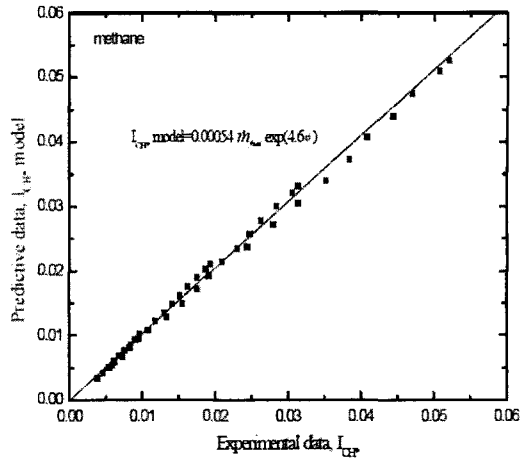


Fig. 13 Comparison between predictive data and experimental data, predictive data applied to exponential function

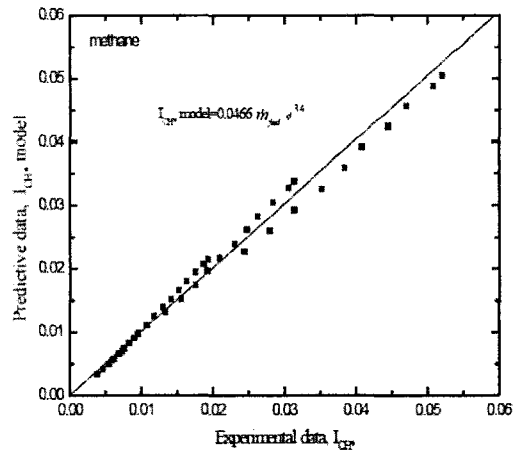


Fig. 14 Comparison between predictive data and experimental data, predictive data applied to power function

관계식보다 실험결과를 좀 더 잘 예측하는 것으로 나타났다.

프로판 화염에 대해서도 메탄 화염의 경우와 유사하게 430nm에서 측정된 화학발광 신호와 CH\* 화학발광을 연료 유량에 대해 표준화하여 다음과 같은 지수함수로 나타낼 수 있다.

$$I_{430nm} / \dot{m}_{fuel} = 0.0124 e^{4.49\Phi} \quad (8)$$

$$I_{CH^*} / \dot{m}_{fuel} = 0.0056 e^{5.02\Phi} \quad (9)$$

Fig. 15는 이 관계식들과 측정된 값들을 비교하고 있다. 여기에서 점선과 실선은 각각 430 nm 파장의 화학발광 신호와 CH\* 화학발광 신호에 대한 지수함수 관계식을 나타낸다.

Fig. 16은 동일한 결과를 멱함수를 이용하여 표현한 결과이다. 점선은 430nm에서 측정된 화학발광 신호를 연료유량에 대해 표준화한 식 (10), 실선은 CH\* 화학발광을 식 (11)을 나타낸 것이다.

$$I_{430nm} / \dot{m}_{fuel} = 0.9313 \Phi^{3.14} \quad (10)$$

$$I_{CH^*} / \dot{m}_{fuel} = 0.7068 \Phi^{3.53} \quad (11)$$

프로판 화염의 두 결과 모두 실험에 의한 측정값과 두 함수로 예측한 값들이 유사하게 나타났다. 메탄과 달리 CO<sub>2</sub>\* 화학발광의 영향을 고려한 실험 결과와 고려하지 않은 결과 모두 지수함수나 멱함수에 잘 부합됨을 알 수 있었다. 메탄화염의 결과와 비교하여 프로판화염에서는 당량비 0.5-0.9 사이의 조건에서 CO<sub>2</sub>\* 화학발광과 CH\* 화학발광세기의 크기가 약 2:5정도로 나타났다. 따라서 당량비에 따른 CH\* 화학발광 신호의 변화에 대한 CO<sub>2</sub>\* 화학발광 신호의 영향이 메탄의 경우에 비해 상대적으로 적게 나타나는 것으로 생각된다. 프로판 화염에 대해서도 실험에서 얻은 측정값과 당량비와 연료 유량에 대한 실험관계식으로 예측한 값을 비교하였다. CH\* 화학발광을 알아보기 위해 CO<sub>2</sub>\* 화학발광의 영향을 제외한 결과를 예측하여 비교하였다.

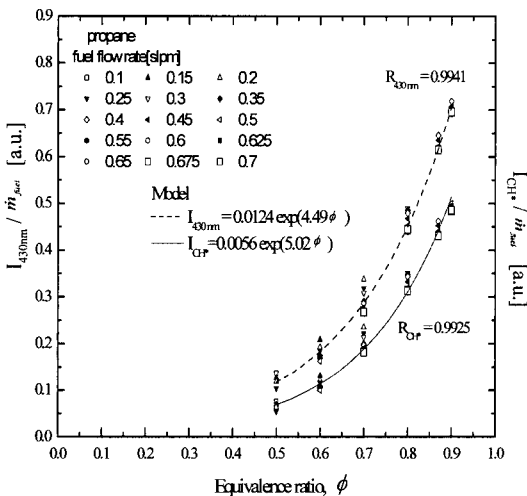


Fig. 15 Normalized Chemiluminescence intensity at 430 nm exponential functions of the equivalence ratio

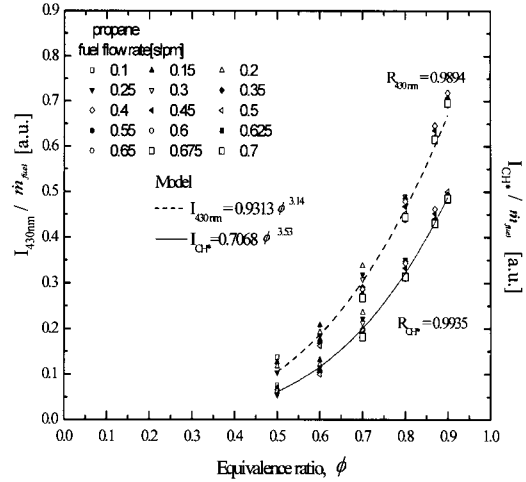


Fig. 16 Normalized CH\* Chemiluminescence intensity at 430 nm functions of the equivalence ratio

Fig. 17은 지수함수를 이용하여 CH\* 화학발광 신호를 예측한 결과를 Fig. 18은 멱함수를 이용하여 예측한 결과를 나타내었다. 두 함수를 이용하여 CH\* 화학발광을 다음과 같은 관계식으로 나타내었다.

$$I_{CH^*} = 0.0056 \dot{m}_{fuel} e^{5.02\Phi} \quad (12)$$

$$I_{CH^*} = 0.7068 \dot{m}_{fuel} \Phi^{3.53} \quad (13)$$

프로판 예혼합화염의 경우에도 당량비 0.5-0.9의

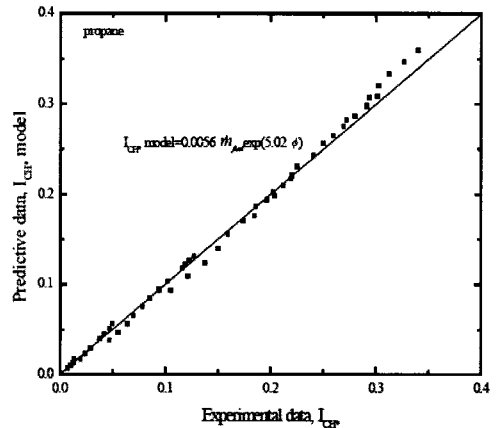


Fig. 17 Comparison between predictive data and experimental data, predictive data applied to exponential function

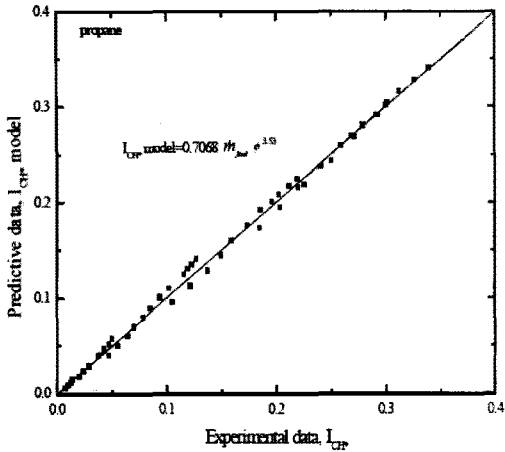


Fig. 18 Comparison between predictive data and experimental data, predictive data applied to power function

희박 조건에서 430 nm에서 발생하는 CH\* 화학발광 신호를 연료유량의 1차함수와 당량비의 지수함수 또는 멱함수로 표현 할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.3 진동하는 화염의 Chemiluminescence

프로판/메탄 화염의 CH\* 화학발광 세기를 측정하는 과정에서 특정 조건의 화염에서 소음과 진동이 발생한다는 사실을 알 수 있었다. 특히 메탄 당량비 0.9인 화염과 프로판 당량비 0.87인 조건의 화염에서는 유량 조절 방법에 따라 진동하는 화염과 안정화 된 화염이 공존함을 보여주었다. 그러므로 이 조건에서 CH\* 화학발광 신호를 진동하는 화염과 안정화된 화염에서 측정하였다. Fig. 19는 당량비가 0.87인 프로판 화염에서 생성되는 3가지 형태의 화염을 보여주고 있다. 4개의 내부 화염 슬롯에서 (a)는 2:2의 비율로 안정되게 분리된 상태의 화염 형상이고 (b)는 1:3의 비율로 분리되어 진동하는 화염 형상이고 (c)는 4개 모두가 1개로 합쳐지며 진동하는 화염의 형상이다. 안정된 상태의 화염은 CH\* 화학발광의 세기가 일정한 모습을 보이고 소음도 변화가 없음을 알 수 있었다. 반면에 진동을 일으키는 화염은 진동발생시 CH\* 화학발광 신호와 소음의 크기가 주기적으로 변하는 것을 알 수 있다. 그러나 진동하는 화염에서의 CH\* 화학발광 신호는 큰 폭으로 변화하지만 일정시간 동안의 평균 세기는 세 화염 모두 차이가 없었다. 이는 진동에서 발생하는 화염의 크기 변화에 의해 나타나는 주기적 특성이며, 진

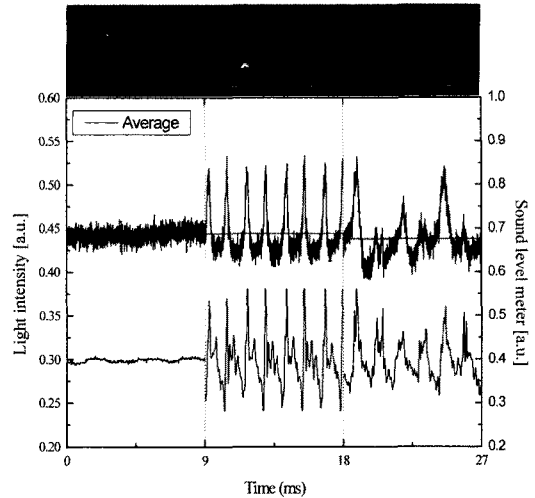


Fig. 19 Pictures of stabilized flame and two shapes oscillation flames, simultaneously measured CH\* Chemiluminescence and sound pressure signal

동하는 화염에서 CH\* 화학발광의 평균 세기는 안정된 화염의 값과 같았다. 따라서 본 연구가 수행된 조건에서는 CH\* 화학발광 신호는 화염의 스트레칭에 의한 영향을 거의 받지 않으며 화염의 열발생률에 선형적이라는 것을 알 수 있었다.

### 4. 결론

메탄 및 프로판 층류 예혼합화염에서 발생하는 CH\* 화학발광(chemiluminescence) 신호 특성을 다양한 연료 유량( $\dot{m}_{fuel}$ )과 당량비( $\Phi$ )에서 실험적으로 알아보았다.

CH\* 화학발광 신호가 그 크기는 다르지만 희박조건의 메탄과 프로판 예혼합화염 모두 (1)당량비에 지수적 또는 멱급수로, (2)연료의 유량에는 선형적으로 증가하였다. 이는 당량비가 일정하면 CH\* 화학발광 신호로부터 열방출률을 측정할 수 있다는 것을 의미한다. CH\* 화학발광은 메탄의 경우 당량비 0.6-0.9의 조건에서 당량비에 대해 지수 4.60을 갖는 지수함수임을 알 수 있었고 프로판의 경우 당량비 0.5-0.9의 조건에서 당량비에 대해 지수 5.02를 갖는 지수함수임을 알 수 있었다. 따라서 CH\* 화학발광 측정 결과의 해석이 연료에 따라 달라진다는 것을 알 수 있었다.

진동하는 화염의 CH\* 화학발광 신호는 안정된 화염의 CH\* 화학발광 신호와 오차범위 이내에서 동일함을 알 수 있었다. 따라서 CH\* 화학발광 신호는 비교적 화염 스트레칭에 영향을 받



지 않으며, 층류화염의 교정 값을 이용하여 난류화염의 당량비 또는 열방출률을 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 2006학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] Hardalupas, Y. and Orain, M., "Local Measurements of The Time-Dependent Heat Release Rate and Equivalence Ratio Using Chemiluminescence Emission From Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 139, pp. 188-207, 2004.
- [2] Lee J. G. and Santavicca, D. A., "Detailed Spectroscopic Measurements of Chemiluminescence from Turbulent Premixed Flames in a Dump Combustion," *한국연소학회지*, Vol. 9, No.3, pp. 19-26, 2004.
- [3] Kojima J., Ikeda Y. and Nakajima T., "Basic Aspects of OH(A), CH(A) and C2(d) Chemiluminescence in The Reaction Zone of Laminar Methane-Air Premixed Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 140, pp. 34-45, 2005.
- [4] Luque, J. and Crosley, D. R. LIFBASE: Database and Spectral Simulation Program (Version 2.0.55), SRI International Report MP 99-009, 2005.
- [5] Sandrowitz, A. K., Cooke and J. M. and Glumac, N. G., "Flame Emission Spectroscopy for Equivalence Ratio Monitoring," *Applied Spectroscopy* Vol. 52, No. 5, pp. 658-662, 1998.
- [6] Samaniego, J. -M., Egolfopoulos, F.N. and Bowman, C. T., "CO<sub>2</sub>\* Chemiluminescence in Premixed Flames," *Combust. Sci. and Tech*, Vol. 109, pp. 183-203, 1995.
- [7] Lee J. G., Gonzalez Z, E, and Santavicca, D., "On the Applicability of Chemiluminescence to the Estimation of Unsteady Heat- Release During Unstable Combustion in Lean Premixed Combustor," 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tucson, Arizona, 2001.
- [8] Najm, H. N. Paul, P. H., Mueller, C. J. and Wyckoff, P. S., "On The Adequacy of Certain Experimental Observables as Measurements of The Flame Burning Rate," *Combustion and Flame*, Vol.113, pp. 312-332, 1998.
- [9] Dandy, D. S. and Vosen, S. R., "Numerical and experimental studies of hydroxyl radical Chemiluminescence in methane-air flames," *Combust. Sci. Tech*. Vol. 82, pp. 131-150, 1992.
- [10] Higgins, B., McQuay, M. Q., Lacas, F., Rolon, J. C., Darahiba, N. and Candel, S., "Systematic Measurements of OH Chemiluminescence for fuel-lean, high-pressure, premixed, laminar flames," *Fuel* 80, pp. 67-74, 2001.