

가스터빈 연소기에서 CO₂* 배경 강도가 OH* 및 CH* 화학 발광 강도에 미치는 영향

김대식** · 이종근**

CO₂* Background Effect on OH* and CH* Chemiluminescence Intensities in a Gas Turbine Combustor

Daesik Kim and Jong Guen Lee

ABSTRACT

The measurement of heat release rate is of great importance in the study of thermo-acoustic instability occurring in lean premixed combustion and the chemiluminescence emission has been used as an indicator of heat release in combustion instability studies primarily for its relative simplicity. This paper presents results of experimental study of flame chemiluminescence from an atmospheric, swirl-stabilized, turbulent lean premixed flame with a main emphasis on the effect of CO₂* background level in the CH* and OH* band. The test results show that the effect of CO₂* level in the CH* band is greater than that in the OH* band. Also, the background to peak ratio for both CH* and OH* bands can be expressed as a function of equivalence ratio, almost regardless of a change in the inlet velocity.

Key Words : Chemiluminescence measurement, CO₂* background, Lean premixed combustor, Three-way PMT system

기 호 설 명

Alphabets

V : Mixture velocity in the nozzle

Greeks

ϕ : Equivalence ratio

Subscripts

in : Inlet

1. 서론

화염으로부터 화학 반응에 수반하여 발생하는 발광 현상인 화학 발광(chemiluminescence) 측정은 지난 수십여년간 기초 화염으로부터 가스터빈과 같은 복잡한 구조의 연소기에서의 난류 화염까지 다양한 형태의 연소 계측 및 제어의 한 수단으로 폭넓게 사용되고 있다. 화학 발광을 이용한 연소 계측으로는 화학종에 따른 특정 광필터(optical filter)를 이용하여 PMT(photomultiplier tube) 등을 통하여 화염으로부터 열방생율을 정량화하는 방법과 ICCD(intensified charge coupled device) 등에 특수 필터 및 렌즈 등의

조합을 통하여 화염의 구조를 가시화하는 방법 등 그 적용 분야도 매우 다양하다. 특히, Balanchandran 등[1]은 화학 발광에 의한 열방생율의 계측값을 레이저 계측 기법의 한 종류인 PLIF(planar laser induced fluorescence) 화염 촬영 기법을 통한 화염 면적으로부터의 열방생 계산과 국부 반응율(local reaction rates)의 직접적인 측정을 통한 계측 결과와 비교 실험한 연구 내용을 발표하였다. 이들의 결과로부터, 전체 화염면을 통한 화학 발광의 측정은 레이저 계측 기법을 통한 측정 방법들에 비교하여 계측을 하기 위한 측정비용과 시간이 매우 적음에도 불구하고, 상대적으로 매우 정확한 열방생율이 구해지는 것으로 발표하였고, 또한 기술적 측면에서도, 화학 발광 측정은 다른 레이저 계측 기술 대비 매우 용이한 화염 측정 수단이라고 발표하였다. 또한, Nori 등[2]은

* 강원도립대학 자동차과

** Dept. of Mechcal Eng., Pennsylvania State University

† 연락저자, dskim@gw.ac.kr

화학 발광법이 천연 가스, 항공용 액체 연료 및 IGCC (intergrated gasfication combined cycle)에 사용되는 합성 연료(Syngas)와 수소 연소와 같이 다양한 연료의 화염의 열발생 계측에도 효과적으로 적용 가능하다고 보고하였다.

최근, 화학 발광법은 상기한 열발생율의 측정 및 가시화 이외에도 서로 다른 두 화학종의 발광 강도의 비율로부터 화염면에서 직접적으로 당량비를 계산하는 분야로도 확대 적용되고 있는 중이다. Kojima 등[3]은 층류 메탄 화염의 화학 발광 측정으로부터 OH^* 와 CH^* 의 비율은 입구 속도 및 다른 조건의 변화와 관계없이 단지 당량비만의 함수로 표현될 수 있다는 실험 및 계산을 통한 결과로부터, 화염면에서의 실시간 당량비 측정 방법을 제시하였다.

일반적으로 탄화수소 계열의 화염의 경우, CH^* , OH^* 및 CO_2^* 의 화학 발광이 가장 강한 것으로 알려져 왔다. 특히, 넓은 범위의 주파수 영역에서 발생하는 CO_2^* 에 비하여, CH^* 와 OH^* 는 각각 431 nm와 309 nm 근처의 좁은 파장 영역에서 검출되므로 상대적으로 연소 계측시 더욱 선호되고 있다. 그러나, 이러한 CH^* 와 OH^* 화학발광 신호의 발생 영역은 CO_2^* 화학발광 신호의 파장 영역과 겹치므로, CH^* 및 OH^* 측정시 CO_2^* 에 의한 영향을 어떻게 효과적으로 제거할 수 있는지는 아직도 남겨진 숙제로 여겨지고 있다[4].

본 연구에서는 가스터빈 연소기에서 천연가스를 연료로 하는 화염으로부터, 다양한 입구 속도 및 당량비 조건에서 화학 발광을 측정하여 상기한 CO_2^* 화학발광 신호 강도가 OH^* 및 CH^* 화학발광 신호 강도에 미치는 영향을 고찰하고, 또한, OH^* , CH^* 및 CO_2^* 를 실시간으로 계측 가능한 3중 PMT(3-way PMT) 시스템을 개발하여 측정을 통한 결과를 제시하고자 한다.

2. 실험 절차 및 방법

2.1. 실험 장치

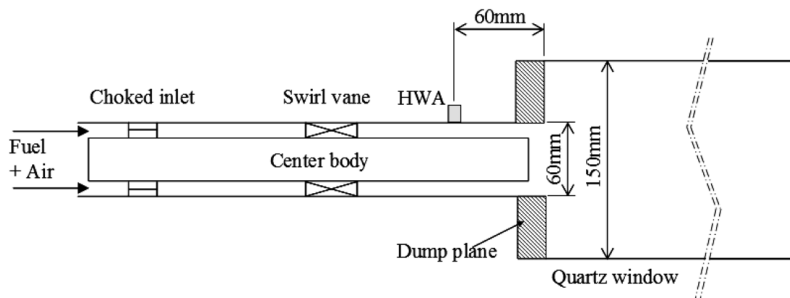


Fig. 1. Schematic drawing of combustor and nozzle assembly.

본 연구에 사용된 실험 장치는 산업용 가스 터빈에 적용되는 노즐을 사용하여, 연료와 공기의 혼합이 이루어지는 혼합실(내경 : 125 mm, 길이 500 mm)이 연소기의 상류에 설치되고, 연소기는 화염 구조 및 열발생율의 계측이 가능하도록 하기 위하여 150 mm의 내경과 300 mm의 길이를 갖는 석영 재질의 연소기가 제작되었다. 또한 연료와 공기의 완전한 혼합을 위한 충분한 시간을 보장하기 위하여, 바이패스 밸브 상류의 튜브를 기준으로 20배 이상의 길이를 갖는 예혼합 튜브가 설치된다. 실험 장치와 관련된 세부 사항에 대하여는 저자들의 이전 논문[5]을 참고하기 바란다.

Fig. 1은 연소기 및 노즐의 개략도를 보여준다. 그림에서와 같이 연료는 노즐 입구에서 연료와 충분히 예혼합되어 공급되고, 또한 노즐 내에서의 압력 변동이 연료 공급에 미치는 영향을 제거하기 위하여 혼합기 공급 위치 이후가 초킹(choking)될 수 있도록 제작하였다. 또한 그림에서와 같이 스윙러가 내부에 삽입되었고, 속도 측정을 위한 열선 유속계(Hot wire anemometry, TSI model 1210)는 덤프 플레인(dump plane)으로부터 상류 60 mm에 설치되었다.

2.2. 실험 방법

혼합기 유동의 속도 측정을 위하여 열선 유속계가 사용되고, 화학 발광 측정은 PMT(Hamamatsu model 928A)를 사용하여 전체 화염으로부터 측정되고, 이를 위하여 각 화학종에 적합한 필터가 사용되었다. 열선 유속계와 PMT의 디지털 데이터 취득 장치를 통하여 16,384 Hz의 샘플링 속도로 저장되며, 각 실험 조건에서 16,384개의 데이터를 취득하였다. 측정시 실험 조건 및 측정 결과의 정확성을 위하여 매 조건 세팅시 운전 조건이 충분히 안정된 이후 측정이 시작되었다. 또한, 화염으로부터의 전체적인 화학 발광 스펙트럼을 얻기 위하여 스펙트럼 분석기(Oriel, MS125)가 ICCD 카메라(Princeton Instruments model 576G)와 함께 사용되었다. 스펙트럼 측정시 해상도는 1 nm 이내였다.

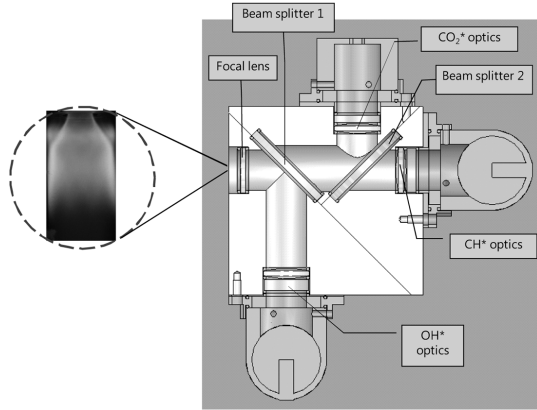


Fig. 2. Schematic drawing of 3-way PMT system.

Table 1. Operating conditions

Inlet velocity (V_{in})	25~35 m/s
Equivalence ratio (ϕ)	0.65~0.775
Inlet temperature	20 °C
Combustor pressure	~atmospheric
Flame	Stable
Mixture	Premixed

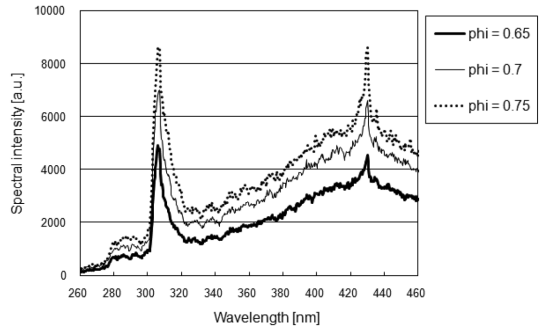
Fig. 2는 3가지 이상 라디칼의 화학 발광을 동시에 측정하기 위하여 개발된 3중 PMT 시스템의 개략도를 보여준다. 그림에서 보이듯이, 시스템은 각각의 라디칼에 부합한 필터 장치류(307±5 nm for OH*, 365±5 nm for CO₂*, 430±5 nm for CH*)들과 빔 스플리터(beam splitter)등으로 구성되었다. 본 시스템을 통하여 CH* 및 OH* 강도 측정값들로부터 동시에 측정된 특정 파장의 CO₂* 측정값을 이용하여 상호간의 화학 발광 강도의 영향들이 고려될 수 있다.

본 실험을 위한 연료로는 메탄 96% 함유의 천연 가스가 사용되었으며, Table 1은 본 실험이 이루어진 실험 조건이다. 실험은 대기압 및 상온 조건에서 수행되었다.

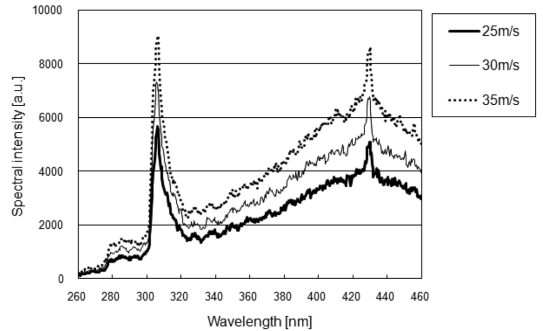
3. 결과 및 검토

3.1. 화학 발광 스펙트럼 측정

Fig. 3은 운전 조건에 따른 정상 화염(steady flame)의 화학 발광 스펙트럼을 보여 준다. 측정된 전체 조건에서 두 개의 피크 강도(307 nm for OH*, 430 nm for CH*)가 측정되었다. 한편, CO₂*는 350~600 nm의 넓은 파장 영역에서 발견되는 것으로 알려졌다 [1,4]. 본 그림에서도 나타나듯이 현재 실험시의 스펙트럼 측정 영역인 250~500 nm 전체에 걸쳐 넓은 발광 분포를 보이는 CO₂*의 특성이 그대로 계측되었다. 본 결과로부터, 피크 강도 대비 배경값(즉, 해



(a) Effect of equivalence ratio ($V_{in} = 30$ m/s)



(b) Effect of inlet mixture velocity ($\phi = 0.7$)

Fig. 3. Effect of equivalence ratio and inlet velocity on the chemiluminescence spectral intensity.

당 파장 영역에서의 CO₂* 강도)의 영향은 OH* 보다 CH*가 훨씬 크다는 것을 유추할 수 있고, 또한, 연료의 유량이 증가할수록(당량비와 입구 유동 속도가 증가할수록) CO₂* 배경값은 더욱 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 4는 이러한 CO₂* 발생 특성을 좀 더 정량적으로 평가하기 위하여 특정 파장대(365 nm)에서 측정된 스펙트럼 강도를 보여 준다. 그림에서 보여지듯이 CO₂*의 신호 강도는 모든 당량비에서 입구 속도의 증가(즉, 연료의 질량 유량 증가)와 더불어 선형적으로 증가한다. 여기서 365 nm의 파장은 OH* 및 CH*의 영향을 받지 않고 오로지 CO₂* 발광에만

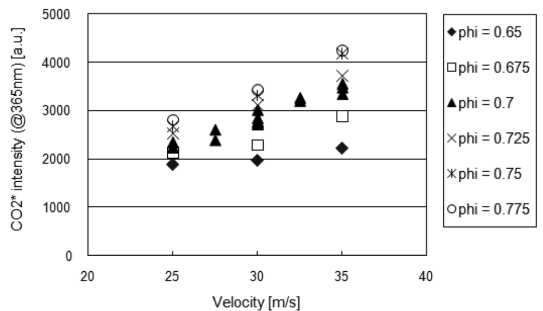


Fig. 4. Effect of equivalence ratio and inlet velocity on CO₂* spectral intensities(at 365 nm).

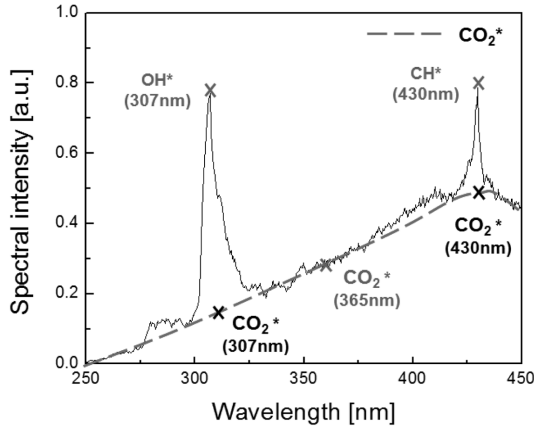


Fig. 5. Spectral intensity showing OH*, CH*, and CO₂* emissions.

의존하므로 선택되었다. Fig. 5는 OH*와 CH*의 각 피크 강도 발생 파장 및 365 nm에서의 CO₂* 측정 위치에 대한 개략도이다. 그림에서 점선은 넓은 파장 범위에 걸쳐서 측정되는 CO₂* 발광 신호를 위한 추세선으로서, 실제 본 연구에서 사용된 각 파장대에서의 CO₂* 배경 강도를 위한 값은 4차 다항식 보간법(4th polynomial curve fit)에 의하여 정의되었다.

Fig. 6은 각각의 다른 입구 속도에 대하여 CO₂* 배경값에 대한 피크 강도의 비를 당량비의 함수로 나타낸 결과이다. 측정 결과, 강도 비율은 입구 속도의 영향은 거의 받지 않는 것으로 나타났으나, 당량비의 변화에는 크게 의존하는 것으로 계속되었다. 당량비가 증가함에 따라 측정된 CH* 피크값에 대한 배경값(동일 파장에서의 CO₂* 강도)은 거의 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히 본 연구의 실험 조건에서 가장 희박한 조건인 당량비 0.65의 경우, 전체 피크값의 약 75%가 CO₂*에 의한 것(즉, 측정된 값 중 25%만이 CH* 자체에 의한 강도)으로 측정되었다. 또한, 실험 조건 중 가장 농후한 당량비 0.775에서도 전체 CH* 강도의 약 60%가 CO₂*에 의한 것으로 나타났다.

한편, OH*(307 nm)의 경우 CH*보다는 작으나, 이 역시도 CO₂* 배경값이 운전조건에 따라 약 17~45% 정도를 차지하는 것으로 측정되었다. 본 결과로부터, 측정된 CH* 및 OH* 화학 발광으로부터 더욱 정량적인 열발생율을 정의하기 위해서는 각 파장대에 해당하는 CO₂* 배경값의 고려는 필수적인 인자일 수 밖에 없다.

그런데, 여기서 한가지 흥미로운 점은, CH*의 배경 및 피크 강도 비율은 속도 변화에는 거의 영향을 받지 않고, 단지 당량비 함수만의 거동을 보인다는 사실이다. 이는 OH* 경우도 동일한 경향을 보였다. 이러한 결과는, 만약 당량비가 고정되었고(완

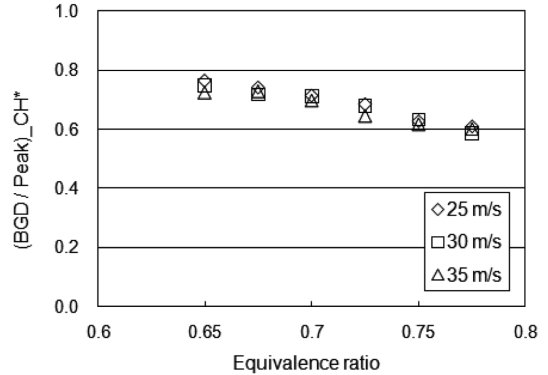


Fig. 6. CO₂* background ratio to CH* peak intensity(at 430 nm).

전한 예혼합 화염의 경우) 입구 속도를 정확히 측정한다면, 미리 정해진 피크/배경 강도 비율로부터 측정된 CH* 및 OH* 피크값으로부터 용이하게 CO₂* 배경 강도의 영향을 고려할 수 있는 가능성을 제시한다. 이에 대한 향후 추가적인 실험 및 검증과 비정상 화염을 통한 좀 더 정량적인 연구가 진행될 필요가 있다. 다음 절에서는 실제 PMT를 통한 CO₂* 강도 측정으로부터 스펙트럼 결과와의 비교 실험 내용을 소개한다.

3.2. 3중 PMT 시스템을 통한 화학 발광 강도 측정

스펙트럼 분석기를 통한 전체 관심 파장 영역에서의 화염으로부터 발생하는 화학 발광 스펙트럼의 측정은 각 라디칼의 피크 강도 및 배경 강도를 직접 확인할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이러한 스펙트럼 분석을 통한 측정은 실험과 후처리 시간 및 비용 측면에서 어려움이 존재하고, 또한 화염의 강제 진동 및 불안정 연소 상태와 같은 비정상 화염의 계측의 경우 제한이 불가피하다. 따라서, 이에 따른 대안은 PMT를 통한 열발생율의 계측이 가장 보편적이고 용이한 수단으로 여겨지고 있다. 이를 위하여 3중 PMT 시스템을 통하여 동시에 측정된 결과값의 해석 및 계측 방법이 본 절에서 소개된다.

3중 PMT에는 CH*, OH*, CO₂*의 측정을 위하여 각각 430±5 nm, 307±5 nm, 365±5 nm의 광학 필터가 장착된다. CH* 및 OH* 피크 강도가 나타나는 파장대에서 배경 강도를 PMT를 통하여 직접 측정할 수 없으므로, 앞 절에서 측정된 다양한 조건에서의 스펙트럼 결과를 통하여, (CO₂*)_{365 nm}와 (CO₂*)_{307 nm} 또는 (CO₂*)_{430 nm} 사이의 관계를 도출하고, 이 관계로부터 PMT를 통하여 직접 측정된 (CO₂*)_{365 nm}의 값으로부터, 307 nm 및 430 nm에서의 CO₂* 강도 값이 환산되게 된다.

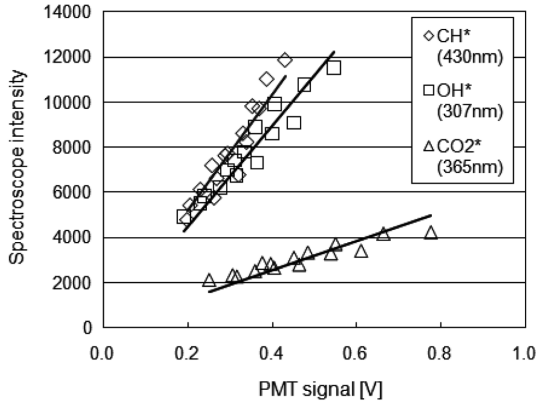
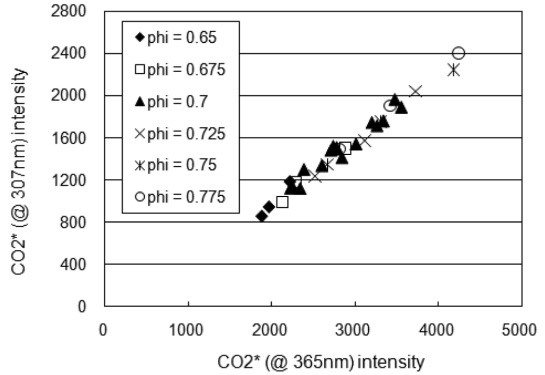


Fig. 7. Spectral intensity showing OH*, CH*, and CO₂* emissions.

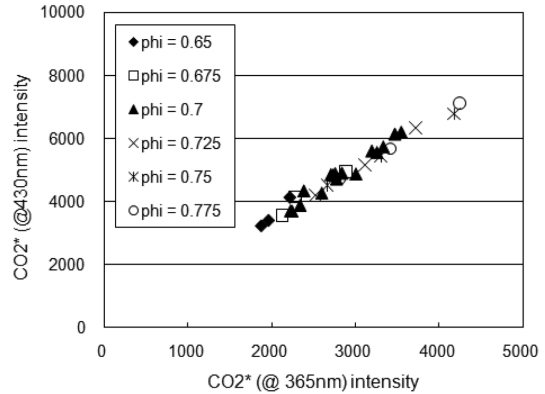
일단 이를 위한 전제 조건이 동일 파장에 대하여 PMT로 측정된 결과와 스펙트럼 강도 사이의 선형 관계를 확인하는 것이다. Fig. 7은 이를 위하여 Table 1상에서 명시된 다양한 운전 조건에서의 측정값을 비교한 것이다. 그림에서 보이다시피 각 특정 파장 대에서의 PMT 강도와 스펙트럼 상의 강도는 각 화학종에 따라 각각의 기울기를 가지고 선형적인 관계에 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 스펙트럼 상에서의 365 nm에서의 CO₂* 강도와 각각 307 nm(OH* 피크 파장)와 430 nm(CH* 피크 파장)에서의 CO₂* 강도 사이의 선형 관계를 보여주는 그림이다. 그림에서 발견되듯이, 본 실험의 운전 조건 내에서($V_{in} = 25\sim 35$ m/s, $\Phi = 0.65\sim 0.775$) 365 nm에서 측정된 CO₂* 강도는 307 nm와 430 nm에서의 CO₂* 관계와 거의 선형적인 관계에 있음을 확인할 수 있다. 이로부터, 본 결과에서와 같이 사전 실험을 통하여 측정된 각 파장대의 CO₂* 사이의 선형 관계식으로부터, 어느 한 파장 (본 연구에서는 365 nm)에서의 CO₂* 강도를 측정한다면, 효과적으로 다른 화학종의 피크 강도가 존재하는 파장대에서 CO₂* 발광에 의한 배경값의 영향을 구할 수 있게 된다.

마지막으로 Fig. 9는 본 절에서의 3중 PMT를 이용하여 측정된 (CO₂*)365 nm 값으로부터 계산한 OH* 발생 파장대에서의 피크 대비 배경 강도의 결과와 앞 절에서 언급된 스펙트럼 상의 피크 강도비를 통한 계산값의 비교를 보여준다. 약간의 편차가 존재하기는 하나 거의 기울기 1을 갖는 선형 관계를 보여준다. 이상의 결과들로부터, 별도의 CO₂* 측정이 이루어지지 않는다 하더라도, 본 연구가 이루어진 운전 조건 및 실험 환경 내에서 미리 정하여진 스펙트럼 상의 피크 대 배경 강도 비율에 의하여 CO₂* 영향이 제거된 순수 CH* 및 OH* 강도 측정이 가능하다는 것을 의미한다. 그러나, 본 연구는 안정된



(a) (CO₂*)365 nm vs. (CO₂*)307 nm



(b) (CO₂*)365 nm vs. (CO₂*)430 nm

Fig. 8. Relationship between CO₂* background intensities for OH*(307 nm) and CH*(430 nm) and CO₂* intensity at 365 nm.

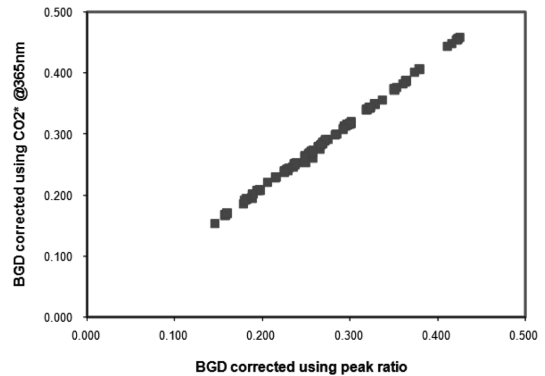


Fig. 9. CO₂* background-corrected OH* intensities using 365 nm PMT measurement vs. pre-defined peak ratio from spectrum.

정상 화염을 통하여 화학 발광 관계식들을 도출하였고, 좀 더 의미있는 결과를 유추하기 위해서는 화염 전달 함수 측정 및 연소 불안정 현상과 같은 비정상 화염에서의 추가적인 실험이 요구된다.

4. 결론

CH*와 OH* 발생 파장대에서의 CO₂* 배경 강도의 영향이 스펙트럼 분석을 통하여 실험적으로 고찰되었다. 또한, 이러한 배경 강도의 동시 측정을 위하여 3중 PMT 시스템이 개발되었고, 이를 이용한 주요 결론은 다음과 같다.

1) PMT 및 화학발광 강도의 스펙트럼 측정으로부터 계측된 CH* 및 OH* 강도는 CO₂* 강도에 의한 배경값에 크게 영향을 받고 있으며, 이러한 결과는 CH* 화학발광 신호 파장대에서 특히 두드러지는 것으로 나타났다.

2) CH* 및 OH*의 피크 강도 대비 배경 강도 비율은 입구 속도 영향은 미미하였으나, 당량비에 크게 의존하는 것으로 나타났다.

3) 365 nm에서의 CO₂* 강도 측정으로부터, OH* 및 CH* 발생 파장에서의 CO₂* 발생에 의한 배경 강도의 제거가 가능하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(2010-0007679).

참고문헌

- [1] Balachandran, R. et al., "Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations", *Combustion and Flame*, Vol. 143, 2005, pp. 37-55
- [2] Venkata N. Nori et al., "Chemiluminescence measurement and modeling in syngas, methane and jet-A fueled combustor", AIAA paper AIAA-2007-0466, 2007.
- [3] Jun Kojima et al., "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, 2005, pp. 34-45
- [4] Lee, J. G. et al., "Experimental diagnostics for the study of combustion instabilities in lean premixed combustors", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, 2003, pp. 735-750
- [5] Kim, D. et al., "Effect of flame structure on the flame transfer function in a premixed gas turbine combustor", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 132, 021502, 2010.

접수일 : 2010. 06. 07
 심사완료일 : 2010. 10. 12