

실시간 연소제어를 위한 화염 내 라디칼 계측기법 연구

권승진* · 김세원** · 신명철** · 류태우** · 김용모***

An Experimental Study on the Measurement of Radicals in Flame for Real Time Combustion Control

Seung Jin Kwon, Se Won Kim and Myung Chul Shin and Tae U Ryu and Yong Mo Kim

ABSTRACT

This study is measurement of radicals in gas & light oil diffusion flame focused on burner exit. The goal of this study is to analyse the relationship between flame chemiluminescence(OH^{*}, CH^{*}, C₂^{*}) intensities and flame conditions. The investigation performed turbulent diffusion flame of commercial burner in varying the excess air ratio from 1.0 to 1.8. The optical emissions were measured by photomultiplier(PMT) using optical band pass filter and spectrometer system. The effects of excess air ratio and NO_x emission characteristics on the radical emission intensities were investigated experimentally.

Key Words : Flame Chemiluminescence(화염 화학발광), Turbulent Flame(난류화염), NO_x(질소산화물), Excess Air Ratio (과잉공기비), Combustion Control(연소제어)

기 호 설 명

λ : Excess air ratio
V : voltage
C₂^{*} : C₂ Radical

OH^{*} : OH Radical
CH^{*} : CH Radical

1. 서 론

최근 산업용 다소비 에너지 시스템에서 에너지 자원의 부족과 배기가스 배출규정 강화에 따라 시스템의 효율증가와 배기가스 저감을 동시에 구현할 수 있는 기술에 대한 관심이 높아졌다. 이러한 연구의 한 방향으로 화염을 실시간 계측하여 당량비와 부하를 조절하는 연소제어(Combustion control)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 기존의 산소 트리밍(O₂ trimming)의 방식과 같은 계측기를 이용하여 연소제어를 수행하는 것은 계측기의 응답성이 빠르

지 못하다는 단점이 있다. 이러한 필요조건을 만족시키기 위해 응답속도가 빠르고 화염의 유동에 영향을 미치지 않는 비접촉식 계측으로서 레이저 유도 형광법(LIF), 파장 가변형 다이오드 레이저 분광학(TDLAS)등의 광학적 계측방법이 대두되었다. 이러한 광학적 계측 방법의 한가지로 연소 반응의 화학적 메커니즘에 따라 생성되는 특정 화학종의 화학적 발광(Chemiluminescence) 신호를 계측하는 방법은 광학소자기술의 발전에 힘입어 최근 활발히 연구되고 있다.

Higgins^{[1],[2]} 등은 층류 예혼합화염에서 당량비와 압력변화에 따른 OH^{*}와 CH^{*}의 강도가 당량비에 비례관계를 밝히고 이를 온도와 압력의 함수로 나타내었다. 또한 Kojima^[3], Ikeda^[4] 등은 층류 예혼합화염에서의 당량비와 자발광 강도비의 선형적 관계가 난류 예혼합 및 확산화염에서도 적용됨을 밝혔고, 이를 화염면의 국소지점의 구조를 파악하는데 활용하였다.

* 한양대학교

† Email : sikwon78@kitech.re.kr

Tel : 041-589-8533 Fax : 041-589-8548

** 한국생산기술연구원

*** 한양대학교

Morrell^[5], Muruganandam^[6] 등은 당량비와 특정화학종간의 화염발광 신호비에 대한 선형적 관계를 도출하여 한계회박연소 근처에서 가스터빈 연소기의 운전제어를 위한 가능성을 제시하였고, Shahla^[7], Carlos^[8] 등은 순 산소 유리용해로 시스템에서 화염 자발광 계측에 의한 멀티버너(Multi Burner)시스템의 효율향상에 관한 연구를 수행하였다.

이에 따라 본 연구에서는 이러한 계측 기법을 버너시스템의 연소제어에 적용하기 위해 상용버너의 가스화염 및 경유화염에서 과잉공기비에 따른 라디칼(Radical)의 특성변화를 실험적으로 규명하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 연소 시스템

본 연구에 사용된 버너는 소 용량 상용버너로서 공기량 조절이 가능하도록 공기공급부를 개조하여 사용하였다. 정격 열용량은 40,000kcal/h이며 경유버너의 경우 60°로 분사되는 압력식 단공 노즐을 사용하였다.

연소로는 800(W) × 800(H) × 1200(L)mm³의 사각로(Rectangular Furnace)를 사용하였고 내부에 단열재를 사용하여 단열하였다. 또한 광학적 접근이 용이하도록 후면부와 측면부에 석영관측창을 설치하였다.

연소공기와 경유의 공급은 열식 유량계와 공압식 밸브를 이용하여 실시간 비례적분제어를 통해 일정한 유량이 공급되도록 하였다. 이때 경유의 공급압력은 12Kg/cm²이다.

가스는 상용 액화프로판가스를 사용하고 유량계는 로타메타를 사용하였다. 정확한 유량계측을 위해 유량계 전단에 압력조절기를 설치하였고 정밀한 유량조절을 위해 니들밸브를 설치하였으며 일정한 압력의 연료공급을 위해 밸브 전단에 압력조절기를 장치하였다. 가스 연료의 공급압력은 1000mmAq이다.

또한 배기가스계측을 위해 배기단에 가스분석기를 설치하였으며 NO_x, CO, CO₂, O₂농도와 배기가스 온도를 실시간으로 계측하였다.

2.1.2 계측시스템

본 연구의 계측 시스템은 배기가스 계측기와 화염 내 자발광 계측기의 두 가지로 나뉜다.

배기가스 계측기는 Fig. 1과 같이 연소시스템의 배기단에 설치가 되었고, 라디칼 계측과 동시

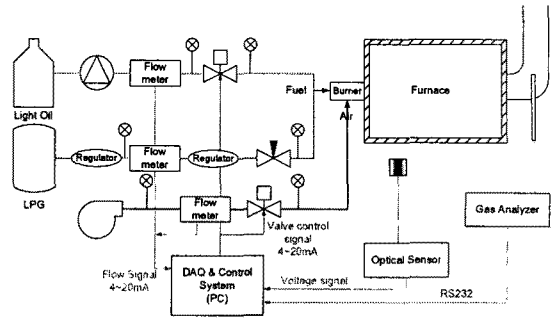


Fig. 1 Schematic of Combustion system & Sensor system

에 계측했다. 배기가스의 계측 주기는 1Hz이고 계측 데이터는 실시간으로 저장했다.

화염 내 자발광 계측기는 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 분광기(Spectrometer)를 이용한 시스템과 광전증배관(PMT)과 간섭필터(Band pass filter)를 이용한 시스템으로 구성되어 있다. Fig. 2와 3에서 알 수 있듯이 화염자발광은 양 구면 렌즈(Bi-convex lens)로 이루어진 수광부(Optical head)를 통해 집광되어 광섬유(Optical fiber)를 통해 각각 분광기와 광전증배관으로 빛을 전달한다.

분광계측 시스템에서는 250nm ~ 550nm까지 0.3nm의 분해능으로 파장별 계측하였고, 각각 5회 계측의 평균값을 나타냈다. 광섬유를 지나 시준기(collimator)로 집광되어 분광기로 들어온 광신호는 분광거울(Grating)을 통해 분광되어 광전증배관을 통해 전기적 신호로 계측된다.

광전증배관과 간섭필터를 이용한 시스템은 1개 코어(core)에서 3개의 코어로 나누어지는 광섬유

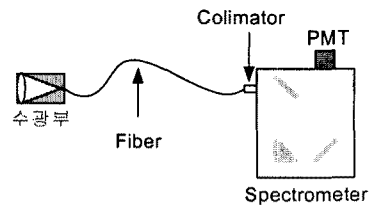


Fig. 2 Spectrometer System

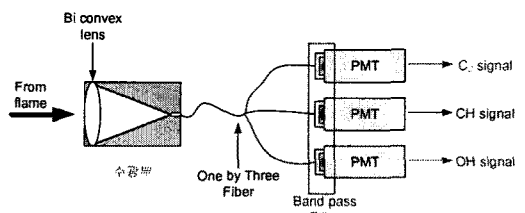


Fig. 3 PMT System

Table 1 Experimental Condition

Fuel	LPG Light-oil	
Heat Input	40,000 Kcal/h	
Excess Air Ratio	1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8	
Fuel Pressure	1000mmAq, 12Kg/cm ²	
Gas Analyzer Data Rate	1Hz	
PMT System Data Rate	100Hz	
Filter Transmission	308.7±10nm	17%
	432.21±11nm	50%
	511.32±9nm	40%

를 사용하여 각각의 광전증배관으로 광신호를 전달하도록 설치하였으며 광전증배관으로 광신호가 입력되기 직전에 간섭필터를 사용하여 각각의 파장대의 광 강도를 측정하도록 하였다. 간섭필터는 각각 OH*(308.7±10nm), CH*(432.21±11nm), C₂(511.32±9nm) 라디칼의 파장의 광신호만 통과시킨다.

2.2 실험방법

2.2.1 연소조건

Table 1에서 보는바와 같이 버너의 열 부하 조건은 40,000Kcal/h이며 상용 액화 프로판 가스와 상용 경유를 사용하였다. 일반 상용버너의 운전 조건 영역을 대상으로 하여 과잉공기비 1.0이상의 화염을 측정하였으며, 가스와 경유의 공급 압력은 레귤레이터를 이용하여 각각 1000mmAq와 12Kg/cm²로 일정하게 공급하였다.

2.2.2 광측 측정 조건

관측위치를 정하기 위한 예비실험을 통해 관측 위치는 Fig. 4와 같이 후면부로 선정하였고, 후면부의 관측창을 통해 전달되는 화염의 자발광을 집광하여 광섬유로 전달하는 수광부는 Fig. 4와 같이 관측창을 통해 반대편의 버너 출구 끝단을 향해 초점을 맞추었다.

수광부의 정렬은 광섬유에서 빛을 주입시켜 수광부를 통해 비치는 상을 이용하여 정렬하였다. 수광부를 통해 광전증배관 시스템으로 전달된 신호는 100Hz의 속도로 저장되고 1분 동안 실시간 누적 평균을 6000개의 데이터를 평균하여 저장하였다.

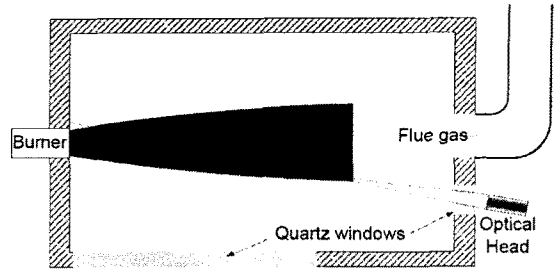


Fig. 4 Location & Focus of Optical Head

3. 실험 결과

3.1 과잉공기비별 분광 계측 분석

Fig. 5는 각각 과잉공기비 1.7에서의 가스화염 및 경유화염을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 가스화염의 경우 버너 출구부터 청염이 형성되고 이후에 화염길이의 중간부터 적염이 관찰되는 것에 반해 경유화염은 전체적으로 적염만 관찰됨을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 분광계측 시스템을 이용하여 화염의 자발광을 분광기를 통해 각각 가스화염과 경유화염에서의 과잉공기비별 파장에 따른 광 강도를 보여준다.

가스화염과 경유화염의 모두 계측 대상인 OH*, CH*, C₂* 라디칼의 강도가 각각 308nm, 431nm, 515nm 근처에서 뚜렷하게 나타난다.

반면 가스화염의 경우 광영역 라디칼의 영향이 매우 미약하지만 경유화염의 경우 광영역의 라디칼 중 검댕(soot)의 영향으로 광영역대의 광 강도가 파장에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 영향으로 가스화염에서는 CH*라디칼의 강도와 C₂*라디칼의 강도가 서로 비슷하지만 경유화염에서는 CH*라디칼의 강도보다 C₂*라디칼의 강도가 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 수광부가 버너출구에 대해 초점이 맞추어져 있기 때문에 화염초기에 청염을 형성하고 있는 가스화염은 광영역 라디칼의 영향이 적지만 화염 전체

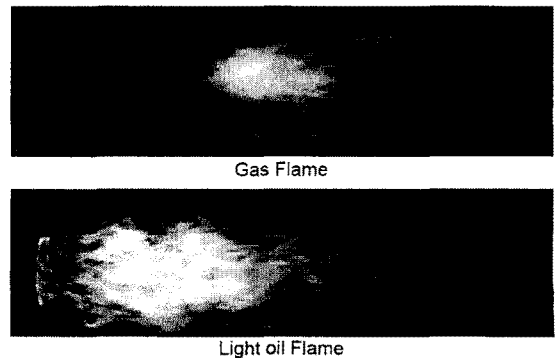


Fig. 5 Picture of Gas & Light oil Flames

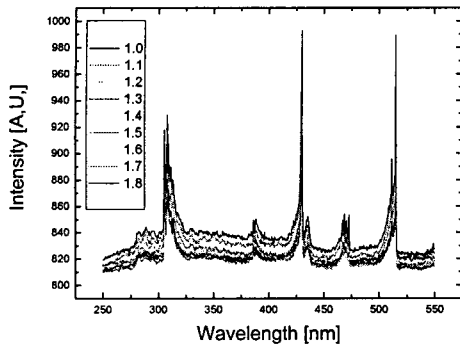


Fig. 6 Gas flame spectra at different excess air ratio

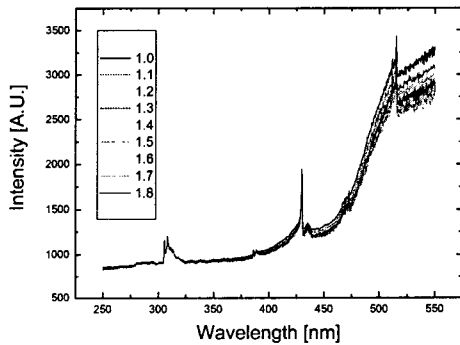


Fig. 7 Oil flame spectra at different excess air ratio

가 적염인 경유화염의 경우 광영역 라디칼의 영향이 매우 크기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 광전증배관 시스템 계측 분석

3.2.1 과잉공기비별 광전증배관 계측 분석

Fig. 8부터 Fig. 10은 광전증배관 시스템을 이용하여 가스 및 경유화염에서 과잉공기비에 따른 OH^* , CH^* , C_2^* 의 개별 라디칼 강도를 나타낸다.

Fig. 8의 OH^* 라디칼은 가스, 경유화염 모두 과잉공기비의 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그러나 Fig. 9와 Fig. 10을 보면 CH^* , C_2^* 은 가스화염의 경우 과잉공기비의 증가에 따라 각 라디칼이 감소하지만 경유화염에서는 증가하는 경향을 보인다. 이는 가스화염에서 과잉공기비의 증가에 따라 화염의 길이가 짧아지고 적염의 영역이 작아지는 현상에 기인한 것으로 과잉공기비가 작을 때에는 계측 영역 내에 적염이 포함되지

만 과잉공기비의 증가에 따라 적염의 영향이 작아짐으로 광영역대 라디칼의 강도가 감소하기 때문에 발생하는 현상으로 사료된다..

적염에서 발생하는 광영역대의 라디칼(CO_2 , Soot)은 검댕(Soot)의 방사로 인해 플랑크 곡선의 형상을 따르기 때문에 장파장대인 CH^* 와 C_2^* 라디칼에 영향을 크게 미치지만 단파장대인 OH^* 은 그 영향이 미약함을 알 수 있다. 이는 플랑크 곡선의 특징으로 단파장대에는 온도별 크기의 차이가 매우 작고, 그 강도역시 미약하지만 파장이 길어질수록 온도에 대한 영향이 커지고, 강도가 매우 커지기 때문이다.

Fig. 11부터 Fig. 13은 앞서 계측한 개별라디칼을 기초로 하여 OH^*/CH^* , C_2^*/CH^* , C_2^*/OH^* 의 라디칼 비를 나타내었다.

라디칼 비는 자발광 계측 시에 로내 압력, 온도 및 관측창의 오염 등의 외란에 대한 영향을 줄여주기 위해서 도입된 변수이다. Higgins^[11,2] 등의 연구결과에 따르면 개별라디칼은 온도와 압력의 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 관측창의 오염은 전체적인 광신호의 강도가 줄어드는 현상이 발생한다. 그러나 이러한 외란은 파장에 따라 다르게 영향을 미치기보다 전 영역에 걸쳐 영향을 미치기 때문에 라디칼 비를 적용하면 각 라디칼의 파장이 다르더라도 분자 분모에 동일한 영향이 미치므로 서로 상쇄되게 된다.

Fig. 12를 보면 C_2^*/CH^* 의 경우 가스와 경유화염 모두 과잉공기비에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 11과 Fig. 13에서의 OH^*/CH^* , C_2^*/OH^* 는 가스와 경유화염에서의 라디칼비의 경향이 서로 반대로 나타났다. 이는 개별라디칼의 광영역대 라디칼의 영향으로 사료되는데 C_2^*/CH^* 는 광영역대의 영향을 받는 C_2^* 와 CH^* 가 분자분모에 위치함으로써 광영역대의 영향이 사라지지만 OH^*/CH^* , C_2^*/OH^* 는 광영역대의 영향을 받는 인자가 분자분모에 하나씩 존재하기 때문에 광영역대의 영향이 작은 가스화염과 영향이 큰 경유화염에서 서로 반대 영향을 나타내는 것으로 판단된다.

따라서 C_2^*/CH^* 는 가스와 경유화염에서 과잉공기비의 증가에 따라 감소하는 동일한 경향을 보임으로서 과잉공기비의 정성적 인자로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

또한 경유화염에서의 OH^*/CH^* , C_2^*/OH^* 는 열적 질소산화물(Thermal NO_x)의 변수인 온도의 영향과 중간생성물인 OH 의 영향을 포함하고 연료 질소산화물(Fuel NO_x)과 급속생성 질소산화물(Prompt NO_x)의 중간생성물인 OH 및 CH 와 C_2 의 농도 영향을 포함하고 있어 화염의 질소산화물의 배출 농도를 예측하는 인자로 사용할 수 있는 가능성을 제시 할 수 있다.

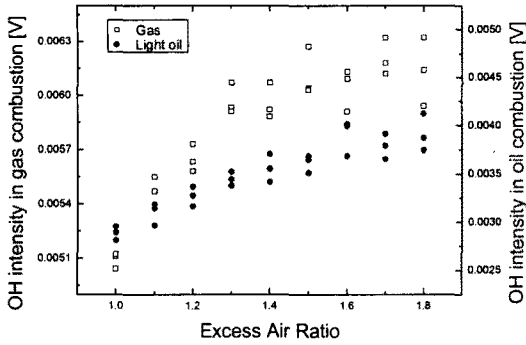


Fig. 8 OH' Emission Intensity to Excess Air Ratio for a Different Fuel

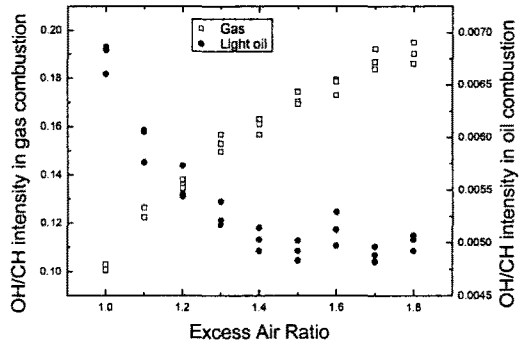


Fig. 11 OH'/CH' Emission Intensity ratio to Excess Air Ratio for a Different Fuel

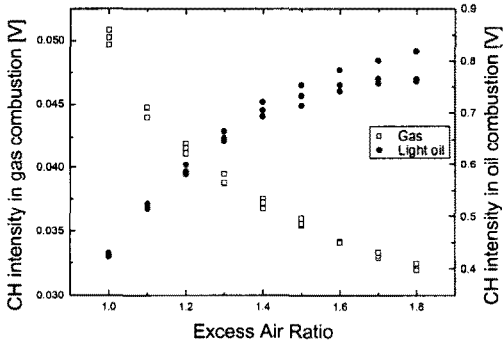


Fig. 9 CH' Emission Intensity to Excess Air Ratio for a Different Fuel

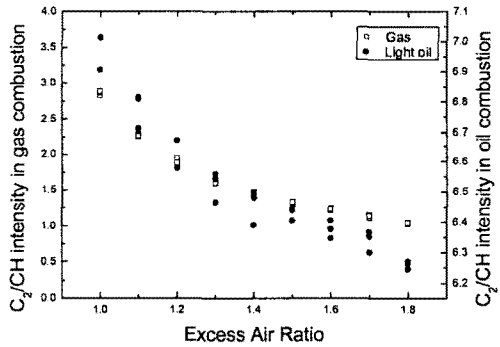


Fig. 12 C₂'/CH' Emission Intensity ratio to Excess Air Ratio for a Different Fuel

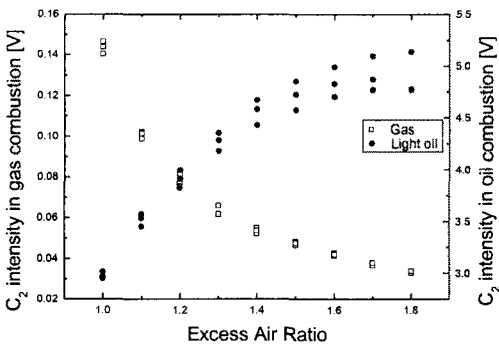


Fig. 10 C₂' Emission Intensity to Excess Air Ratio for a Different Fuel

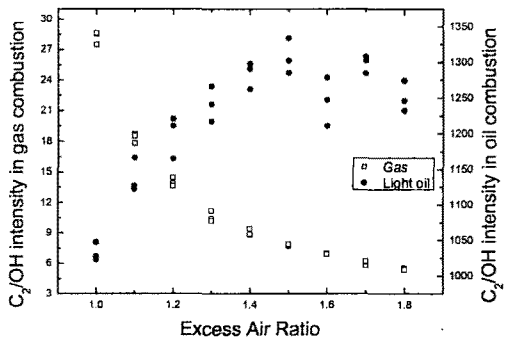


Fig. 13 C₂'/OH' Emission Intensity ratio to Excess Air Ratio for a Different Fuel

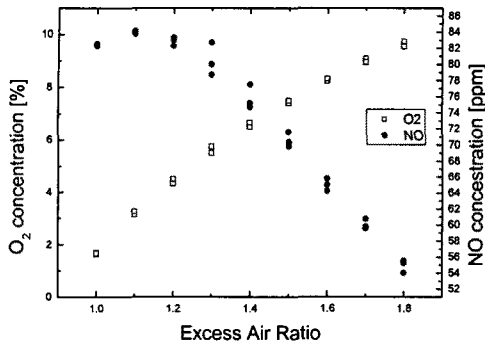


Fig. 14 O₂ & NO Emissions at various Excess Air Ratios of Gas flame

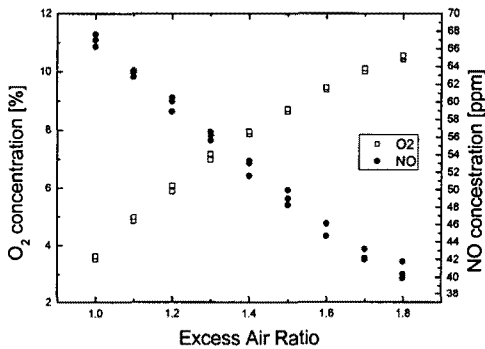


Fig. 15 O₂ & NO Emissions at various Excess Air Ratios of Oil flame

Fig. 14와 Fig. 15는 각각 가스화염과 경유화염에서의 배기가스 내 산소와 NO의 농도를 나타낸다.

3.2.2 연소제어 적용

Fig. 16과 같이 본 연구결과를 연소제어에 적용하면 라디칼을 이용하여 예측한 과잉공기비와 질소산화물의 예측 농도로 현재 화염상태를 함수로 표현하여 수치화하고 이를 최적화 기법인 직접 탐색법 (Direct Set Method)에 적용하여 유량계 및 밸브를 조절함으로써 버너의 최적 운전조건을 찾아내어 버너를 운전하도록 한다.

이는 기존의 수동적인 제어 방식과 다르게 화염의 상태를 실시간으로 파악함으로써 버너의 운전 중 외란에 의해 버너의 운전상태가 변하더라도 능동적으로 버너 운전조건을 조절하여 최적의 연소조건을 유지할 수 있는 장점이 있다.

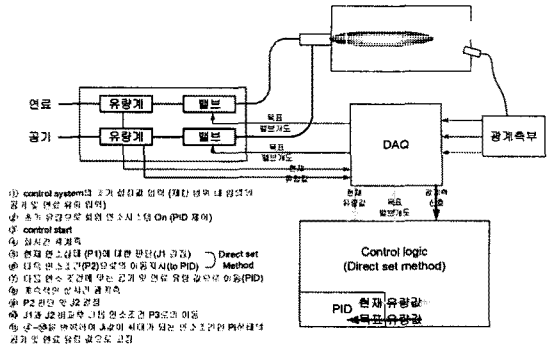


Fig. 16 Schematic diagram of Combustion Control

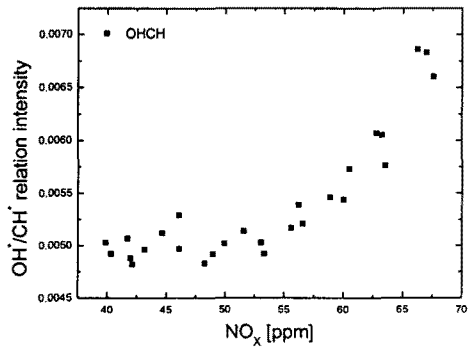


Fig. 17 OH*/CH* Radical Intensity ratio to NO_x Emission of Oil flame

4. 결론

가스 및 경유연료의 난류화산화염에서의 과잉공기비에 따른 라디칼 자발광 강도를 실험적으로 예측하고 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 개별 라디칼의 자발광 강도는 경유화염의 경우 모든 라디칼이 증가하는 경향을 보이고, 가스화염의 경우 OH*는 증가하고, CH*, C₂*는 감소하는 경향을 보인다.

(2) 라디칼비의 경우 C₂*/CH* 라디칼이 가스, 경유화염에서 동일한 경향을 보이고, OH*/CH*와 C₂*/OH*는 증가하거나 감소하는 경향을 보여준다.

(3) 개별 라디칼보다는 라디칼비가 외란의 영향이 적기 때문에 과잉공기비의 예측 인자로서는 C₂*/CH*이 적합함을 알 수 있고, Fig. 17과 같이 OH*/CH*와 C₂*/OH*는 질소산화물의 예측인자로서의 가능성이 제시되었고, 향후 그 상관관계를 규명할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지관리공단의 에너지/자원기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] B. Higgins., M. Q. McQuay., F. Lacas., J. C. Rolon., N. Darabiga., S. Candel., 2001, "Systematic Measurements of OH Chemiluminescence for Fuel-lean, High-pressure, Premixed, Laminar Flames," Fuel Vol.80, pp. 67~74.
- [2] B. Higgins., M. Q. McQuay., F. Lacas., S. Candel., 2001, "An Experimental Study on the Effect of Pressure and Strain Rate on CH Chemiluminescence of Premixed Fuel-lean Methan/air Flames," Fuel Vol.80, pp. 1583~1591.
- [3] J. Kohima., Y Ikeda., T. Nakajima., 2000, "Spatially Resolved Measurement of OH*, CH*, and C2* Chemiluminescence in the Reaction Zone of Laminar Methane/air Premixed Flames," Proc. of the Combustion Institute, Vol.28, pp.1757~1764
- [4] Y. Ikeda., J. Kojima., T Nakajima., F Akamatsu., M. Katsuki., 2000, "Measurement of the Local Flamefront Structure of Turbulent Premixed Flames by Local Chemiluminescence," Proc. of the Combustion Institute, Vol.28, pp. 343~350.
- [5] M. R. Morrell., J. M. Seitzman., M. Wilensky, E. Lubarsky., J. Lee., and B Zinn., 2001, "Interpretation of Optical Emissions for Sensors in Liquid Fueled Combustors," Proc. 39th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit,
- [6] T. M. Muruganandam., B. Kim., R. Olsen., M. Patel., B. Roming., J. M. Seizman, 2003, "Chemiluminescence Based Sensor for Turbine Engines", Proc. 39th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit,
- [7] S. Keyvan., R. Rossow., C. Romero., X. Li.. 2004, "Comparison between Visible Near-IR Flame Spectra from Natural Gas Fired Furnace for Blackbody Temperature Measurements," Fuel vol.83 pp. 1175~1181
- [8] C. Romero., X. Li., S. Keyvan., R. Rossow., 2004, "Spectrometer-based Combustion Monitoring for Flame Stoichiometry and Temperature Control," Applied Thermal Engineering Vol. 25 pp. 659~676.
- [9] R. Obertacke., H. Wintrich., F. Wintrich., A. Leipertz., 1996, "A New Sensor System for Industrial Combustion Monitoring and Control using UV Emission Spectroscopy and Tomography," Combust. Sci. and Tech Vol. 121, PP. 133~151.
- [10] Zimmer L., Tachibana S., Yamamoto T., Kurosawa Y., Suzuki K., 2003, "Evaluation of Chemiluminescence as Sensor for Controlling Lean Premixed Combustion," Proc. 4th Symp. on Smart Control of Turbulence
- [11] Ikeda Y., Zimmer L., "Measurement of Combustion Fluctuations in Turbulent Premixed Methane/air Burner and High-pressure Oil Burner," Proceedings of the 3rd Symposium on Smart Control of Turbulence pp. 55~68
- [12] Y. Hardalupas., M. Orain., C. S. Panoutsos, A.M.K.P. Taylor, J. Olofsson, H. Seyfried, M. Richter, J. Hult, M. Alden, F. Hermann, J. Klingmann, 2004, "Chemiluminescence sensor for local equivalence ratio of reacting mixtures of fuel and air (FLAMESEEK)," Applied Thermal Engineering, Vol.24, pp. 1619~1632.
- [13] N. Docquier, S. Candel, 2002, "Combustion control and sensors: a review," Proc. in Energy and Combustion Science, Vol. 28, pp. 107~150
- [14] 한국생산기술연구원, 2005, "초 저공해 연소를 위한 실시간 능동제어 시스템 개발" 에너지·자원기술개발사업 보고서
- [15] 신명철, 김세원, 류태우, 2005, "난류확산화염에서의 라디칼 자발광 계측에 관한 연구", 대한기계학회 2005년도 추계학술대회 논문집
- [16] 한국생산기술연구원, 2006, "초 저공해 연소를 위한 실시간 능동제어 시스템 개발" 에너지·자원기술개발사업 보고서