

< 논문 >

다공성 세라믹 매트를 이용한 복사버너에서의 연소라디칼 특성과 배기배출물에 관한 연구

김영수[†] · 조승완^{*} · 김규보^{*} · 장영준^{**} · 전충환^{**}

(2007년 2월 2일 접수, 2007년 5월 16일 심사완료)

A Study of Characteristics of Combustion Radical and Exhausted Emissions in a Radiant Burner with Porous Ceramic Mat

Young Su Kim, Seung Wan Cho,
Gyu Bo Kim, Young June Chang and Chung Hwan Jeon

Key Words: Radiant Burner(복사버너), Porous Ceramic Mat(다공성 세라믹 매트), Chemiluminescence (자발광), EINO_x(질소산화물 배기배출지수)

Abstract

An experimental study was performed to investigate the characteristics of chemiluminescence in a radiant burner, varying the excess air ratio from 0.91 to 1.67 at firing rate 80.5 to 134.2 kW/m² on OH^{*}, CH^{*}, C₂^{*} in LNG-Air premixed flames. The signals from electronically excited states of OH^{*}, CH^{*}, C₂^{*} were detected using a Intensified Couple Charged Detector (ICCD) camera. The measurements of exhausted emission were made to investigate the correlation between chemiluminescence and emissions. The chemiluminescence intensity was increased with increase of firing rate like characteristics of NO_x emission. NO_x also increased with increase of firing rate and excess air ratio. It is found that effect of firing rate is more dominant excess air ratio NO_x emission. The maximum chemiluminescence intensity occurs near the stoichiometric excess air ratio or lean conditions in case of high firing rate and the maximum intensity occurs rather than rich conditions in case of relatively low firing rate. Amount of NO_x emission is maximum at near stoichiometric excess air ratio, which is chemiluminescence intensity is maximum.

1. 서론

최근에 가스연료의 사용이 증가함에 따라 높은 열효율과 저공해 연소시스템이 크게 요구되고 있다. 기존의 가스버너는 방사되는 복사 에너지와 열대류에 의한 외부 에너지 손실이 크며 화염과의 직접적인 접촉에 의해 연소효율의 감소를 초래한다. 복사버너(radiant burner)는 기존의 가스버너와 달리 연료와 공기를 미리 혼합시킨 예 혼합기(pre-mixture)를 연소실에 공급하여 연소시키는 예 혼합 연소(premixed combustion) 방식이며, 최근 예 혼합 방식에 의한 실용적인 연소기의 개발에 대한 관심이 높아지고 있으며 이러한 연소시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 현재로서는 NO_x나 CO등의 배기 배출 문

기호설명

- λ : 공기과잉률
- X_{NO} : NO의 몰 분율
- X_{fuel} : 초기 연료 몰 분율
- M_{fuel} : 연료의 몰 질량
- M_{NO2} : NO₂의 몰 질량
- EI_i : 화학종 i의 배출지수

[†] 책임저자, 회원, LG전자 DAC 연구소
E-mail : ys4877@lge.com
TEL : (055)260-3833 FAX : (055)268-4702
^{*} 회원, 부산대학교 기계공학과
^{**} 회원, 부산대학교 기계공학과, 기계기술연구소

제는 만족할 만한 수준에 도달하지 못하고 있어서 이를 해결하기 위해 다양한 형태의 복사버너들이 이상적인 연소 시스템으로 부각되면서 최근에 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

복사버너에서의 연소는 물리적, 화학적으로 매우 복잡하며, 열용량, 공기 과잉률, 노즐의 형상, 버너의 기하학적 형상 등과 같은 여러 가지 요인에 강하게 지배 받고 있으며, 또한 이들 요인들이 복잡하게 상호 간섭하고 있으므로 각각의 요인에 따른 연소특성을 파악하기는 쉽지 않다. 연소반응은 혼합기체가 분해되면서 발생하는 중간생성물, 즉 라디칼(radical)에 의해 지배된다. 반응영역이나 반응 기구를 효과적으로 규명하기 위해 OH^* , CH^* 와 C_2^* 와 같은 라디칼 발광강도를 측정하면 편리하다. 탄화수소 화염으로부터 방출되는 가시광과 자외선 영역의 화학발광은 주로 OH^* , CH^* , C_2^* 와 CO_2^* 로부터 방출되는 강한 라디칼과 HCO^* , CO^* 와 CH_2O^* 로부터 방출되는 약한 라디칼의 결과이다.⁽⁷⁾ 여기서 *는 전기적으로 여기된 상태를 나타낸다. 이들 라디칼 정보는 연소 구조와 강도 해석,⁽⁸⁾ 연소 불안정 제어,⁽⁹⁾ 성능 최적화⁽¹⁰⁾와 같은 다양한 목적으로 사용되고 있으며, 연소 모델링에 있어서도 중요한 역할을 하고 있다.^(11,12)

Kojima, Ikeda 등^(13,14)은 증류와 난류화염에서 국소지점과 전체 화염의 자발광(chemiluminescence) 배출특성과, 자발광비와 당량비와의 관계에 대하여 연구하였다. 이의 결과로 OH^* , CH^* , C_2^* 등이

대기압-상온의 메탄 연소조건에서 이론공연비 부근에서 최고 강도값을 가지며, C_2^*/CH^* , C_2^*/OH^* 그리고 CH^*/OH^* 등의 자발광비가 $\phi=0.8\sim 1.5$ 의 영역에서 선형적으로 증가함을 밝혀냈다.

자발광의 정성적인 연구와 함께 라디칼에 대한 정량적인 측정도 병행되고 있다. OH^* 와 CH^* 는 반응영역(reaction zone)과 열 방출(heat release)의 지표로 그리고 최고 강도점은 화염면(flame sheet) 부근에 위치하므로 화염의 구조와 국소적인 연료의 산화과정을 설명하는데 쓰이고 있으며,^(15,16) 또한 국내에서도 LIF 기법을 이용한 화염내 OH 농도분포측정에 관한 연구가 수행되고 있다.⁽¹⁷⁾

Higgins 등^(18,19)에 따르면 자발광은 온도와 압력의 함수로서, 메탄 연소에서 온도와 당량비가 증가 할수록($\phi=0.66\sim 0.86$) 그리고 압력은 감소할수록($P=0.5\sim 2.5MPa$) 자발광 신호의 강도는 커짐을 실험과 수치해석으로 연구하였는데 이러한 온도와의 상관관계는 열적 NO 생성 메카니즘(thermal NO mechanism)이 온도에 관계하므로 배기배출물에 대한 연구⁽²⁰⁾와 중간생성물에 대한 연구⁽²¹⁾로도 이어진다.

따라서 본 연구에서는 다공성 세라믹 매트를 이용한 복사버너(radiant burner)에서 다양한 열용량(firing rate)과 공기과잉률 변화에 따른 OH^* , CH^* 그리고 C_2^* 라디칼 측정으로 복사버너에 대한 화염구조 분석과 배기배출물 분석을 통한 버너 및 세라믹 매트(Mat)의 성능 평가방법에 필요한 기초 자료 제시 및 다양한 형태의 복사버너와 보다 나은 복사효율과 친 환경적인 복사버너 설계 시 기초 자료를 제시하고자 한다.

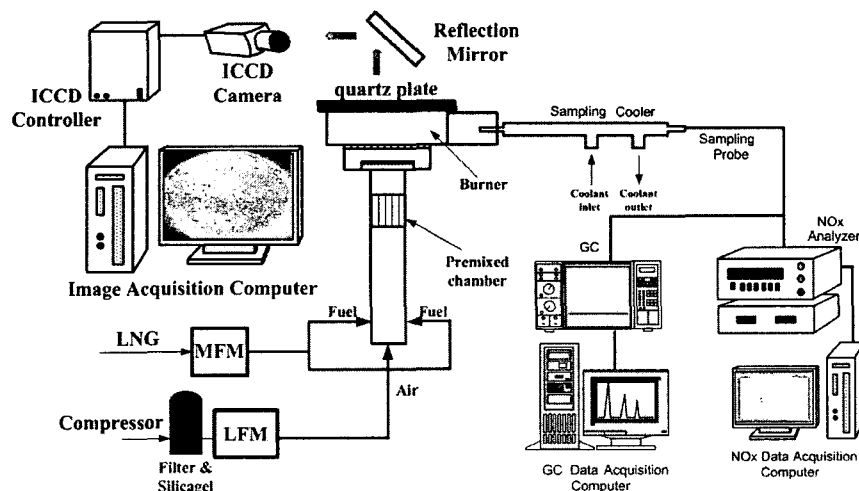


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

2. 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 복사 버너부, 라디칼 측정 시스템부, 데이터 및 배출가스 취득부로 구성된다.

먼저 복사 버너부에서 버너 하우징은 화염이 발생되어 배기되어지는 부분이며, 버너 포트는 다공성 세라믹 매트(Mat)에 예 혼합기가 균일하게 공급되도록 분배장치(distribution manifold)를 포함한 부분이다. 버너 하우징의 직경은 220mm, 높이는 40mm 이며 포트의 직경은 200mm, 높이는 25mm이다. 세라믹 매트(Ceramic mat)는 실리콘카바이드재질로 단위면적당 홀수는 15ppc이며 홀 직경은 1.4mm이다. 그리고 버너 하우징과 포트 사이에 끼워지고 누설을 방지하기 위해서 고온 개스킷(gasket)을 사용하였다. 다공성 세라믹 매트 (porous ceramic mat)의 두께는 4mm, 다공성 (porosity)은 약 95%이다. 포트 내에는 혼합기가 보다 균일하게 매트에 공급되기 위해 직경 3mm의 구멍(hole)을 측면에 50개 뚫은 분배장치를 설치하였다. 그리고 예 혼합 챔버에서는 공기와 가스의 혼합이 보다 잘 이루어지게 하기위해서 가스를 양쪽으로 공급하고 공기를 챔버의 접선방향으로 공급하였으며, 챔버 안에 허니콤(Honeycomb)을 설치하여 예 혼합을 안정한 상태로 유지하였다. 공기의 유량을 조절하기 위해서 층류유량계(LFM, COMOS co. DF 2800)를 사용하였고, 가스의 유량을 조절하기 위해서는 질량유량계(MFM, MILLIPORE co. FM-3911V)를 사용하였다. 사용연료는 일반 가정에 200^{±50}/₁₀₀mmH₂O로 공급되어지는 도시가스를 사용하였다.

라디칼의 평균강도 측정을 위해 사용된 반사거울(Reflection mirror, TFAN-150C20-4)은 Pyrex에 Al 코팅을 한 것으로서 직경150mm, 두께 20mm, Flatness λ/4 이며, 파장 200 ~ 1600(nm)에서 90% 이상의 투과율의 특성을 가진다. 그리고 OH*(0,0), CH*(0,0) 및 C₂* (0,0) 밴드의 자발광을 취득하기 위하여 각각 307.1±1.5nm, 430.7±2nm, 514.6±2nm의 간섭필터(interference filter)를 사용하였다.^(13,14)

그리고 NO_x와 CO₂ 등의 배기배출물 측정을 위

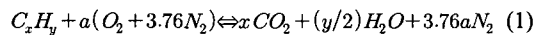
Table 1 Experimental conditions

Parameter		Range
λ		0.91 ~ 1.67
Firing rate [kW/m ²]		80.5 ~ 134.2
Emissions	NO _x Analyzer(ppm)	NO _x
	GC(%)	CH ₄ , CO ₂ , CO, N ₂ , O ₂
Radical		OH*, CH*, C ₂ *

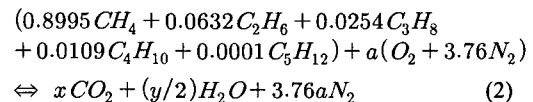
하여 NO_x 분석기와(Teledyne instruments Inc., M-200AH), GC(Gas-Chromatograph; Hewlett-Packard, HP5890 II)를 사용하였다. 배기가스 취득 시 프로브(acquisition probe, D=2mm, L=450mm)의 끝단에서 NO의 산화를 막기 위하여(quenching) 상온의 냉각수를 사용하였다.

2.2 실험조건

Table 1은 본 연구에서 수행한 실험조건을 나타내었다. 연소현상의 중요한 기준인 공기과잉률과 당량비와의 관계에서⁽²²⁾ 먼저 당량비를 결정하는 이론 화학 평형식과 원자량, 온도에 따른 밀도, 점성계수의 변화 등을 살펴 적절한 당량비를 구한다. 탄화 수소계 연료의 이론 화학 평형식은 다음의 식 (1)과 같다.



여기서, a는 a = x + y/4와 같은 관계를 가진다. 본 연구에 사용되어진 가스는 도시가스로 그 대표적인 조성은 CH₄ 89.95%, C₂H₆ 6.32%, C₃H₈ 2.54%, C₄H₁₀ 1.09%, C₅H₁₂ 0.01%고 구성되어 있고 고위발열량은 10,600 kcal/Nm³이다. 위의 관계식 (1)에 따라 도시가스의 화학 평형식은 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.



위의 관계로 a와 x, y는 x=1.1462, y=4.2906, a=2.2189임을 알 수 있다. 또한 공기는 평균적으로 산소 1몰과 질소 3.76몰로 이루어져 있기 때문에 도시가스 1몰에 대한 공기의 필요 몰수는 2.2189 × 4.76인 10.56으로 나타낼 수 있다.

이론 공연비(Stoichiometric air-fuel ratio)의 정의는 이론적으로 모두 연소할 수 있는 공기와 연료

의 질량비로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(A/F)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{stoic} = \frac{4.76\alpha}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (3)$$

여기서 공기와 연료의 질량은 각각 몰수와 분자량(MW: Molecular Weight)의 곱으로 나타낼 수 있다. 공기과잉률이란, 당량비의 역수로 정의되며, 아래의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)_{act}} = \frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{stoic}} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1}{\phi} \quad (4)$$

실험범위의 설정은 열용량과 공기과잉률에 따라 세라믹 매트 표면에 안정화된 복사화염이 형성되는 범위로 수행하였으며 공기과잉률 $\lambda=1.67$ 이상의 조건에서는 공기량의 증가와 연료량의 상대적 감소로 인한 연소불안정(flame instability)으로 소염(blow-off)되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 매트 분포 및 자발광 강도특성

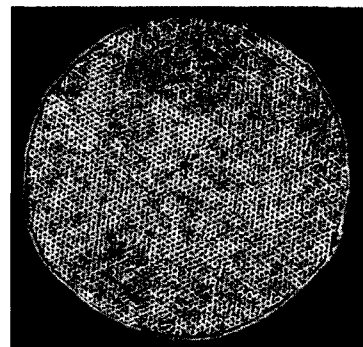
Fig. 2(a)는 화염이 안정화 되는 조건에서 취득한 세라믹 매트 표면 화염의 직접사진이며, Fig. 2(b)는 동일 조건에서 고온 영역에서 넓게 분포하여 비교적 신호의 세기가 높은 OH^* 자발광(Chemiluminescence)을 취득한 이미지이다. 직접사진에서는 매트 표면에 화염이 균일하게 분포하는 것처럼 보였지만, ICCD를 통해 취득된 OH^* 라디칼 자발광의 이미지를 살펴보면 부분적으로 실제 화염이 거의 존재하지 않는 부분이 있다는 것을 확인할 수 있었다. 즉 직접사진이나 유관으로 볼 때 균일하게 분포하는 것처럼 보이는 것은 매트 표면에서 인접한 화염에 둘러싸여 있기 때문인 것으로 사료된다. 반사거울(Reflection mirror)을 사용했기 때문에 자발광을 취득한 이미지는 직접사진과 좌, 우의 변화는 없지만 상, 하위 위치가 바뀌어져 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 열 부하를 $134.2\text{kw}/\text{m}^2$ 으로 고정시킨 후 공기 과잉률의 변화에 따른 OH^* , CH^* , C_2^* 라디칼의 강도를 나타낸 그래프이다. 최고 강도는 이론 공기 과잉률인 1.0에서 모두 나타났으며, 온도 분포와 마찬가지로 이론 공기 과잉률을 기준으로 희박하거나 농후해 질수록 라디칼 강도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 그리고 고온영역에 넓게 분포하는 OH^* 에 비해 주로 반응영역에서

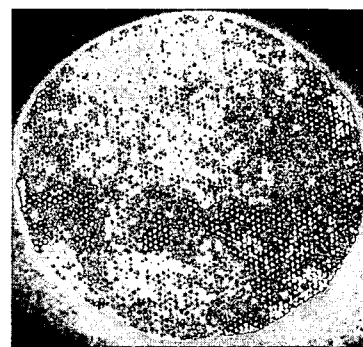
존재하는 CH^* , C_2^* 라디칼 강도의 감소 기울기가 더 빨리 진행됨을 확인 할 수 있었다. Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 공기 과잉률의 변화에 따른 매트 표면 화염의 직접사진과 ICCD를 통해 취득한 라디칼의 이미지 나타내고 있다. Fig. 3의 결과와 마찬가지로 공기 과잉률 1.0에서 화염이 가장 많이 균일하게 분포하고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 OH^* , CH^* , 그리고 C_2^* 라디칼의 상세정보

Fig. 5(a)는 다양한 열 부하 조건에서 공기과잉률의 변화에 따른 OH^* 라디칼의 자발광 강도를 나타낸 그래프이다. 열 부하가 높을수록 강도가 높게 나타남을 확인할 수 있다. 그리고 열 부하가 큰 조건에서는 최고 강도가 이론 공기과잉률인 1.0에서 나타나지만 열 부하가 작은 조건에서는 조금 더 농후한 0.91의 조건에서 최고 강도가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이 경향은 CH^* , C_2^* 라디칼의 결과에서도 동일하게 나타났다.



(a) visible image



(b) OH^* chemiluminescence image

Fig. 2 Typical implementation for radiant burner radical analysis

이것으로 라디칼의 강도는 매트 화염의 분포와 밀접한 상관관계가 있다는 것을 예측할 수 있었다. Fig. 5(b)는 OH^* 라디칼의 자발광을 취득한 이미지로서 열 부하와 공기 과잉률의 변화에 따른 매트 표면에 화염의 분포와 변화 과정을 정확히 파악할 수 있었다. Fig. 6은 다양한 열 부하 조건에서 공기 과잉률의 변화에 따른 CH^* 라디칼의 자발광 강도를 나타낸 그래프이며, 동일한 조건에서 CH^* 라디칼의 자발광 이미지를 취득한 결과 OH^* 라디칼과는 달리 CH^* , C_2^* 라디칼은 주로 반응영역에 많이 존재하기 때문에 안정된 화염이 균일하게 분포하는 조건에서 주로 나타나고 화염이 부상하거나 불안정한 영역에서는 잘 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있다.

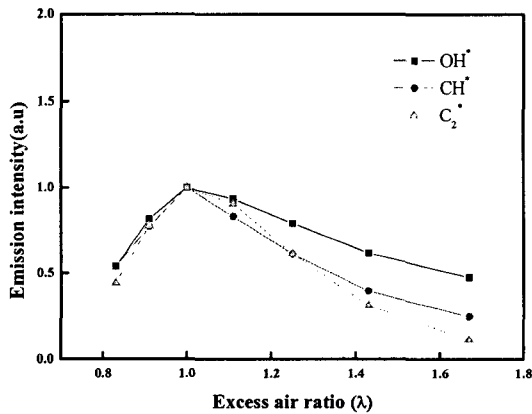


Fig. 3 Chemiluminescence intensity for various excess air ratio

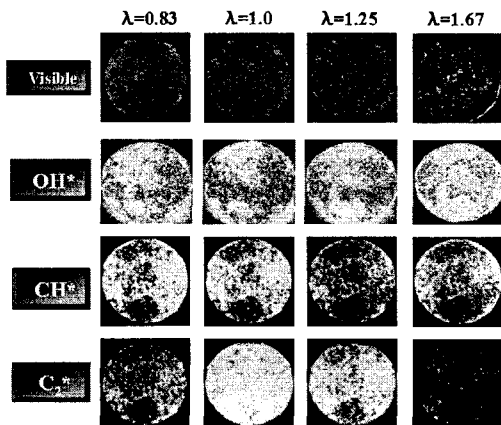
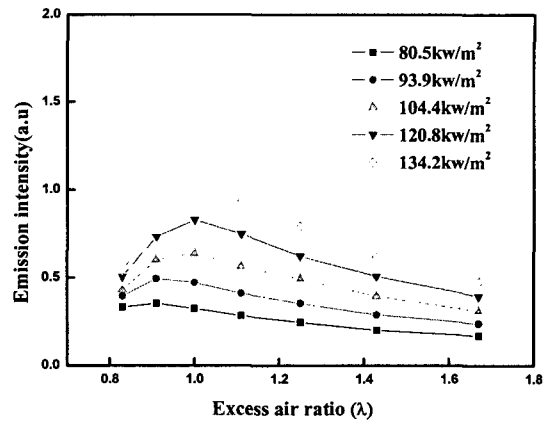
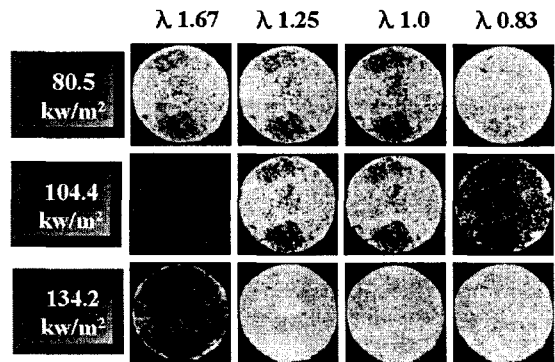


Fig. 4 Visible and chemiluminescence image for various excess air ratio



(a) Chemiluminescence intensity



(b) Chemiluminescence image

Fig. 5 OH^* Chemiluminescence intensity and image for various excess air ratio at various firing rate

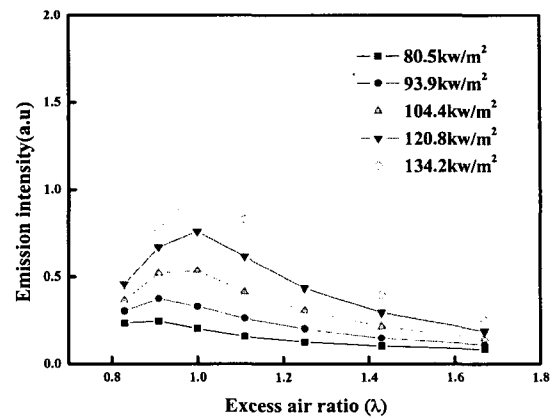
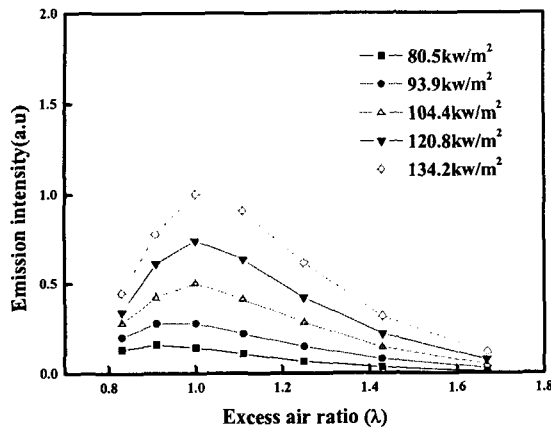
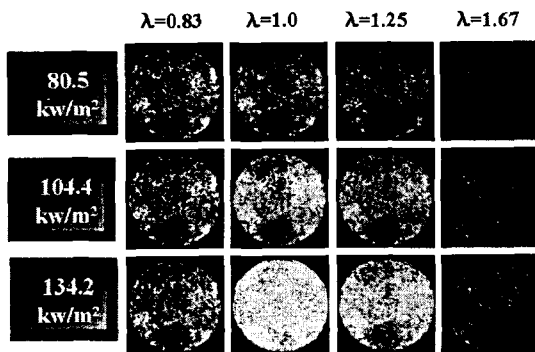


Fig. 6 CH^* Chemiluminescence intensity and image for various excess air ratio at various firing rate



(a) Chemiluminescence intensity



(b) Chemiluminescence image

Fig. 7 C₂^{*} Chemiluminescence intensity and image for various excess air ratio at various firing rate

Fig. 7(a)는 다양한 열 부하 조건에서 공기과잉률의 변화에 따른 C₂^{*} 라디칼의 자발광 강도를 나타낸 그래프이며, (b)는 동일한 조건에서 C₂^{*} 라디칼의 자발광 이미지를 취득한 결과이다. C₂^{*} 라디칼은 점화에 앞서 연료의 냉, 흑염에서 생기는 초기 분해 과정에서도 발생이 된다. 따라서 반응영역에서 주로 많이 존재함과 동시에 공기과잉률이 비교적 과농한 영역에서 많이 발생하게 된다. 따라서 Fig. 7(b)의 획득된 C₂^{*} 라디칼의 이미지에서 확인 할 수가 있었다.

3.4 배기 배출물 특성

Fig. 8은 각각의 열용량에서의 공기 과잉률 증가에 따른 NO_x 배출지수(EINO_x)를 나타낸 것이다. 화학종 *i*의 배출지수(emission index)는 연소과

정에 의해 연소된 연료의 질량에 대한 화학종 *i*의 질량비로 나타낼 수 있다.⁽²²⁾

$$EI_i = \frac{m_{i,emitted}}{m_{F,burned}} \quad (5)$$

원칙적으로 배출지수는 Reynolds 수나 다른 무차원 그룹과 같이 무차원 양이다. 배출지수는 연소 과정의 효율, 배기의 희석 등에 관계없이 연료의 단위 질량당 생성되는 오염물질의 양을 명백하게 표기하는 데 특히 유용하다. EINO_x는 선행연구⁽²³⁾를 참고하여 아래의 식 (6)으로서 산출하였다.

$$EINO_x (g/kg) = \frac{X_{NO} + X_{NO_2}}{X_{fuel,i}} \cdot \frac{M_{NO_2}}{M_{fuel}} \cdot 1000 \quad (6)$$

여기서 X_{NO}는 NO의 몰분율(mole fraction)이고, X_{NO₂}는 NO₂의 몰분율이다. 그리고 X_{fuel,i}는 초기의 연료 몰분율이다. M_{NO₂}는 NO₂의 몰 질량으로 46g/mol이고 M_{fuel}는 연료의 몰 질량이며, 본 실험에서 사용된 연료인 도시가스의 몰 질량은 18.12g/mol 이다.

NO_x 배출지수(emission index)는 Fig. 3과 선행연구 논문⁽²⁴⁾에서의 결과를 통해 예측할 수 있듯이 온도 및 자발광 강도가 최대가 되는 이론 공기과잉률 근처에서 EINO_x도 역시 최대값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 열 용량이 증가할수록 EINO_x도 증가하는 경향을 보인다. 그것은 일반적으로 반응영역의 온도가 증가함에 따라 자발광 강도와 함께 NO_x가 증가하는 영향도 있겠지만 본 연구에서는 Fig. 3에서 공기 과잉률에 따른 자발광 강도의 증가는 미비하지만 Fig. 8에서 EINO_x는 급격한 증가를 보이고 있으므로 열적(thermal) NO_x보다는 급속(prompt) NO_x의 영향이 크기 때문이 것으로 사료된다. 이는 최근의 연구⁽²⁵⁾에서 메탄/공기 연소에서 NO_x 배출에 있어 상당부분 Prompt NO_x에 기인된다는 연구결과와 일치한다.

Fig. 9는 각각의 열 부하에 따른 공기 과잉률 0.7~1.6에서 GC를 사용하여 CO 농도를 측정한 결과이다. 열용량이 80.5kW/m²일 때는 공기 과잉률 0.9 부터 CO가 발생했고, 107.4kW/m² 일 때와 134.2kW/m² 일 때는 공기 과잉률 1.0부터 CO가 발생했다. 즉, 복사화염이 안정화되는 영역에서는 CO가 발생하지 않았지만, 휘염 영역이 발생하는 조건에서 CO가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

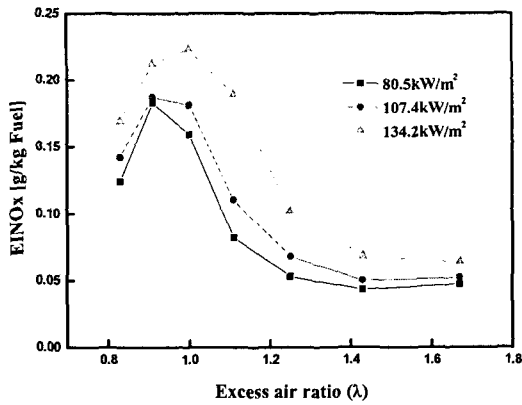


Fig. 8 EINOx to excess air ratio at various firing rate

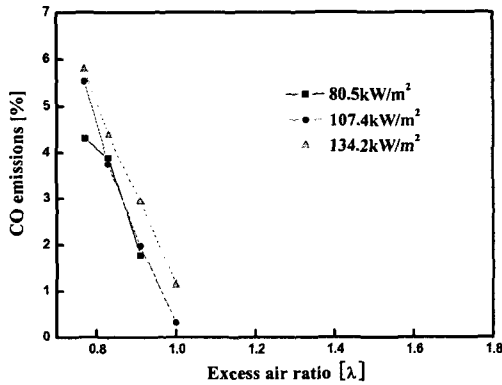


Fig. 9 CO emission to excess air ratio at various firing rate

4. 결론

다공성 세라믹 매트를 이용한 복사버너에서 다양한 열용량(firing rate)과 공기 과잉률 변화에 따른 자발광 배출특성 및 배기배출특성에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자발광 강도는 열용량이 증가할수록 증가하였다.

(2) 높은 열용량에서의 최고의 자발광 강도는 이론 공기 과잉률 또는 약간 희박한 조건에서 나타났으나, 낮은 열용량에서는 약간 농후한 조건에서 나타났다. 그리고 자발광 강도가 최고일 때 배기 배출물 배출 지수도 최고를 나타내었다.

(3) 배기배출물의 특성은 EINOx는 0.05 ~ 1.17g/kg으로써 비교적 낮게 나타났고, 열용량이

증가할수록 EINOx도 증가하였다. CO는 열용량이 80.5kW/m²일 때는 공기 과잉률 0.9에서부터, 열용량이 107.4kW/m², 134.2kW/m²일 때는 공기과잉률 1.0에서 부터 발생하였다.

참고문헌

- (1) Sayangdev Naha and Suresh K. Aggarwal, 2004, "Fuel Effects on NOx Emissions in Partially Premixed Flames," *Combustion and Flame*, Vol 139, pp. 90~105.
- (2) Turbiez, A., El Bakali, A., Pauwels, J. F., Rida, A. and Meunier, P., 2004, "Experimental Study of a Low Pressure Stoichiometric Premixed Methane, Methane/Ethane, Methane/Ethane/Propane and Synthetic Natural Gas Flames," *Fuel*, Vol 83, pp. 933~941.
- (3) Mishra, D.P., 2003, "Effects of Initial Temperature on the Structure of Laminar CH₄-air Premixed Flames," *Fuel*, Vol 82, pp. 1471~1475.
- (4) Li, B.X., Lu, Y.P., Liu, L.H., Kudo, K. and Tan, H.P., 2005, "Analysis of Directional Radiative Behavior and Heating Efficiency for a Gas-Fired Radiant Burner," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 92, pp. 51~59.
- (5) Manish Kumar Tiwari, Achintya Mukhopadhyay and Dipankar Sanyal, 2005, "Process Modeling for Control of a Batch Heat Treatment Furnace with Low NOx Radiant Tube Burner," *Energy Conversion and Management* 46, pp. 2093~2113.
- (6) Qiu, K. and Hayden, A.C.S. 2006, "Premixed Gas Combustion Stabilized in Fiber felt and its Application to a Novel Radiant burner," *Fuel* 85, pp. 1094~1100.
- (7) Najm, H.N., Paul, P.H., Mueller, C.J. and Wyckoff, P.S. 1998, "On the Adequacy of Certain Experimental Observables as Measurements of Flame Burning Rate," *Combustion and Flame*, Vol. 113, pp.312~332.
- (8) Ikeda, Y., Kojima, J. and Hashimoto, H., 2002, "Local Chemiluminescence Spectra Measurements in a High-Pressure Laminar Methane/Air Premixed Flame," *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 1495~1501.

- (9) Lubarsky, E. and Levy, Y., 1998, "Experimental Investigation of Flame-Holding System for the Suppression of Ramjet Rumble," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 2033~2037.
- (10) Paschereit, C.O., Gutmark, E. and Weisenstein, W., 1998, "Control of Thermoacoustic Instabilities and Emissions in an Industrial-Type Gas-Turbine Combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 1871~1824.
- (11) Walsh, K.T., Long, M.B., Tanoff, M.A. and Smooke, M.D., 1998, "Experimental and Computational Study of CH, CH*, and OH* in an Axisymmetric Laminar Diffusion Flame," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 615~623.
- (12) Luque, J., Jeffries, J.B., Smith, G.P., Crosley, D.R., Walsh, K.T., Long, M.B. and Smooke, M.D., 2000, "CH (A-X) and OH (A-X) Optical Emission in an Axisymmetric Laminar Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 122, pp. 172~175.
- (13) Kojima, J., Ikeda, Y. and Nakajima, T., 2000, "Spatially Resolved Measurement of OH*, CH*, and C2* Chemiluminescence in the Reaction Zone of Laminar Methane/Air Premixed Flames," *Prog. Combust. Inst.* 28, pp. 1757~1764.
- (14) Ikeda, Y., Kojima, J., Nakajima, T., Akamatsu, F. and Katsuki, M., 2000, "Measurement of the Local Flamefront Structure of Turbulent Premixed Flames by Local Chemiluminescence," *Prog. Combust. Inst.* 28, pp. 343~350.
- (15) Lee, S. Y., Seo, S., Broda, J. C. and Santoro, R. J., 2000, "An Experimental Estimation of Mean Reaction Rate and Flame Structure during Combustion Instability in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Prog. Combust. Inst.* 28, pp. 775~782.
- (16) Heberle, N. H., Smith, G. P., Jeffries, J. B., Crosley, D. R. and Dible, R. W., 2000, "Simultaneous Laser-Induced Fluorescence and Rayleigh Scattering Measurements of Structure in Partially Premixed Flame," *Appl. Phys.*, B 71, pp. 733~740.
- (17) Byeong Jun Lee, Yong Suik Gil, Jae Won Hahn, Suk Ho Chung, 1996, "Hydroxyl Radical Measurements in the Flame LIF," *KSME(B)*, Vol. 20, No. 2, pp. 710~719.
- (18) Higgins, B., McQuary, M. Q., F. Lacas, Rolon, J. C., Darabiha, N. and Candel, S., 2001, "Systemic Measurements of OH Chemiluminescence for Fuel-Lean, High-Pressure, Premixed, Laminar Flames," *Fuel*, Vol. 80, pp. 67~74.
- (19) Higgins, B., McQuary, M. Q., Lacas, F. and Candel, S., 2001, "An Experimental Study on the Effect of Pressure and Strain Rate on CH N/Air Flames," *Fuel*, Vol. 80, pp. 67~74.
- (20) Lyle, K. H., Tseng, L. K., Gore, J. P. and Laurendeau, N. M., 1999, "A Study of Pollutant Emission Characteristics of Partially Premixed Turbulent Jet Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 116, pp. 627~639.
- (21) Gore, J. P. and Zhan, N. J., 1996, "NO_x Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-Flow Jet Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 105, pp. 414~427.
- (22) Turns, S., 1999, "An Introduction to Combustion : Concepts and Applications," McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill.
- (23) Rumminger, M.D., 1996, "Numerical and Experimental Investigation of Heat Transfer and Pollutant Formation in Porous Direct Fired Radiation Burners," Ph.D These, University of California-Berkeley.
- (24) Cho, S. W., Kim, Y. S., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 2005, "An Experimental Study of the Optimization for Ceramic Fiber Radiant Burner," *The 7th Cross Straits Symposium on Materials, Energy, and Environmental Sciences*, Japan Kyushu University pp. 179~180.
- (25) Lim, J. M., Gore, J. and Viskanta, R., 2000, "A study of the Effects of Air Preheat on the Structure of Methane/Air Counter Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 121, pp. 262~274.