

부분적 예혼합화염제어에 의한 연소 라디칼 및 NOx 배출물 특성

장 준 영* · 김 태 권†

(2001년 7월 31일 접수, 2002년 1월 31일 심사완료)

Combustion Radicals and NOx Emissions Characteristics by Control of Partially Premixed Flames

Jun Young Jang, Tae Kwon Kim

Key Words: Radicals(라디칼), NOx Emissions(질소산화물 배출물), Flame Control(화염 제어)
Partially Premixed Flame(부분적 예혼합화염), Acoustic Excitation(음향 가진)
Excitation Frequency(가진 주파수)

Abstract

This paper presents an investigation on C₂, CH, OH radicals and NO_x emissions in partially premixed flames with acoustic excitation. The radicals are visualized by the digital image technique with optical filters and ICCD camera while NO_x emissions are determined by a chemiluminescent detection(NO_x analyser). The measurements are made in flames with an overall equivalence ratio(ϕ_o) 0.5 and a center tube equivalence ratio(ϕ_c) varying from 1.1 to 5.0 for a constant fuel flow rate. In the case of excitation, the visual shape of the flame is changed from laminar to turbulent-like flames. Images of C₂, CH, and OH radicals resemble those of the flame appearances as the excitation phase is varied, and the radicals generated at the upstream are convected toward the downstream. It is inferred that the flame characteristics is affected by the flow characteristics of air-fuel mixture. In the case of acoustic excitation, OH radicals are much increased relative to unexcitation. From the radicals and flame visualization under acoustic excitation, the reduction of flame length affects the shorter residence time of center tube mixture, and significantly influences the NO_x reduction.

1. 서 론

유해배출물 중 질소산화물은 광화학적 스모그, 산성비 등과 밀접하게 연관되어지고 있어 질소산화물의 발생과 저감에 대하여 많은 연구가 시도되고 있다. 특히 희박 예혼합연소는 가스터빈 연소기 등으로부터 발생되는 NO_x 배출물을 줄이기 위해 최근 활발히 연구되어지는 분야로서 이를

위해서는 대형의 연료·공기 혼합실이 필요하며 화염의 불안정 및 역화의 위험이 존재하게 된다. 이러한 측면에서 부분적 예혼합화염(partially premixed flames)은 화염의 안정성을 유지하면서 동시에 NO_x 배출물도 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 부분적 예혼합화염은 이와 같은 장점을 갖고 있지만, 이 화염에 관한 실험적 연구결과는 상당히 부족한 편이다.

최근에 부분적 예혼합화염에서 NO_x 생성에 관한 몇몇 연구가 수행되었다.^(1~3) Turns 등⁽³⁾은 C₃H₈, C₂H₄, CH₄를 연소시키는 난류 제트화염에서 생성되는 NO_x 발생을 연구하였다. Nishioka 등⁽⁵⁾은 층류 대향류 부분적 예혼합화염에서의 정량적인 NO 배출특성에 관한 수치적 연구를 수행

* 계명대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

E-mail : tkkim@kmu.ac.kr

TEL : (053)580-5551 FAX : (053)580-5165

하였고, 오창보⁽⁶⁾ 등은 축대칭 2차원 CH_4 확산화염을 대상으로 NO_x 반응 기구와 생성특성에 대한 수치해석 연구를 보고하였다.

한편 연소실로 유입되는 예혼합기의 당량비에 따른 연소조건은 연소 중간생성물의 생성에 직접적으로 영향을 미치게 되며, 이와 연관되어 유해배출가스의 생성을 유발시키게 된다. 특히 효율적인 연소기의 설계를 위해서는 연료 및 공기의 유동특성, 혼합과정 등의 상호관계 규명이 중요한 연구과제인 것이다. 주기적으로 반복되는 연소기구를 갖는 유동장의 특성을 파악하는 연구는 유체역학적인 측면에서는 유동장의 안정성(stability) 및 와유동(vortex motion)과 관련하여 수행되어 왔고, 연소공학적인 측면에서는 화염특성 및 유해배출물 저감의 측면에서 다수의 연구가 진행되어 왔다.⁽⁷⁾ Kim 등⁽⁷⁾은 주기적인 압력변동이 있는 연소실을 모사하여, 관내의 연료유동에 주기적인 압력변동을 유발시켜서, 이에 따른 와동과 화염특성과의 상호관계를 규명하였다. 가진 효과(excitation effect)가 연료와 공기의 혼합을 촉진하고 화염길이를 축소하고 있음을 보였다. 그러나 연소생성물의 특성에 관한 결과는 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 부분적 예혼합화염의 제어에 의하여 연소 중간생성물 및 NO_x 배출물 특성을 제시하고자 한다. 중심부 연료관의 공기예혼합도에 따라 연소 중간생성물을 가시화하고, 특히 음파에 의해 주기적인 압력변동이 유발된 화염을 구성하여 가진 위상 및 진폭에 따른 화염형상 및 C_2 , CH , OH 라디칼의 특성을 관찰함으로써 중간생성물의 변화와 질소산화물의 생성과의 관계를 정성적으로 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 연료공급시스템, 가진시스템, NO_x 분석시스템, 영상처리시스템으로 구성되어 있다. 연료는 상용 LPG를 사용하였으며, 산화제로는 질소 79%, 산소 2%로 혼합되어진 고순도 공기(순도 99.999%)를 사용하였으며, 혼합기의 수분제거를 위해 실리카겔을 통과시켰다. 가진실(exciting plenum, 부피 5.5 l)은 투명아크릴로 내경 24 cm, 높이 29 cm의 중간부분에

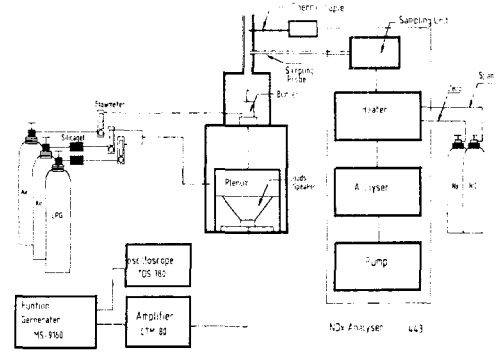


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

스피커(LG 60 watt, 8 inch)를 부착하여 신호발생기(function generator, MS-9160)에서 정현파 신호를 발생시켜 증폭기(amplifier)를 거쳐 출력시킨다. 정상상태의 화염을 얻기 위해서 2개의 동심 스테인레스 관으로 구성된 연료분출노즐을 사용하였으며 중심부 관의 내경은 4.1 mm이며 그 주위는 내경 25.4 mm 관으로 싸여 전체당량비(ϕ)를 유지하기 위하여 공기가 나오게 된다. 중심부 관을 제외한 주위관은 철망, 유리구슬, 세라믹 하니콤 등으로 내부가 채워져 있다. 질소산화물을 측정하기 위해 밀폐 용기 내에 연료분출노즐을 설치하였고 상단의 굴뚝을 통해 배출시키며 굴뚝의 10 cm 상단에 샘플링 프로브(sampling probe)를 설치하여 NO_x 분석기(Rotork analysis, model 443)와 연결하였다.

화염의 연소과정 중 발생하는 중간생성물인 라디칼(radical)을 관찰하기 위하여 MCP(micro channel plate)가 내장된 ICCD(intensified charged coupled device) 카메라를 이용한 계측 방법을 이용하였다. C_xH_y (탄화수소)계열의 화염이 포함된 연소장에서 주요 관심 대상이 되는 중간생성물로는 고온영역에 두루 분포하는 OH 라디칼과 주로 반응대(reaction zone) 근처에만 존재하는 C_2 , CH 라디칼 등이 있는데 이들은 자발형광을 방출하기 때문에 이 형광을 계측하여 화염대의 구조와 공간적 분포를 얻을 수 있다.

Fig. 2는 C_2 , CH , OH 라디칼이 발광하는 형광을 계측하기 위한 시스템 구성도이다. 각 라디칼들의 파장대만을 통과시키는 협대역 통과필터와 UV - NIKKOR 렌즈(F4.5, $f = 105$ mm)를 사용하

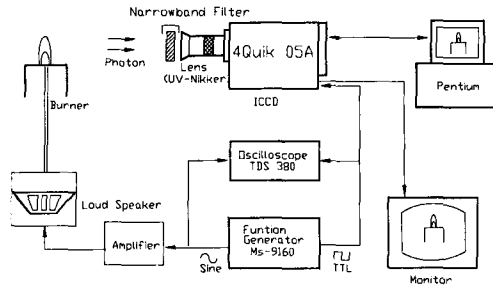


Fig. 2 Image processing system

여 연소과정 중 발생한 라디칼의 강도(intensity)를 ICCD카메라에 입력시킨다. 한편 신호발생기로부터 발생하여 스피커를 가진시키는 정현파 신호와 같은 주기의 TTL 신호를 ICCD 카메라에 입력동기신호로 사용하였으며, ICCD 카메라의 지연시간(delay timing)을 조절하여 정현파 신호에 대한 각각의 위상에서 화염의 화상을 출력시킬 수 있도록 하였다. 당량비에 따른 각 라디칼의 농도분포를 상대적으로 비교하기 위하여 MCP 증폭 계인(gain)을 950 및 노출시간을 0.001 ms로 설정하였다. 본 실험에서는 위상 45° 간격으로 화상을 기록하였다. 라디칼 계측의 실험적 오차를 줄이기 위해서 10회의 화상을 위상에 따라 위상평균(phase averaging)하여 특정위상에서의 대표적 화상으로 나타내었다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 일정한 연료량(70 cc/min)에 대하여 중심부 관의 공기량과 동심외관의 공기량의 증감에 따라 중심부 관의 당량비(center tube equivalence ratio, ϕ_c)와 전체당량비(overall equivalence ratio, ϕ_o)를 변화시켜 실험을 수행하였다. 가진 조건은 신호발생기에서의 정현파 신호를 스피커에 입력시켰을 때 가진실 및 연료분출노즐의 공명 주파수 253 Hz를 가진 주파수(excitation frequency)로 고정하였으며, 증폭기의 출력을 증가시켰을 때 화염꺼짐(blowoff)이 없는 조건으로서 $\phi_c = 1.5$ 이상에는 가진 진폭(excitation amplitude)을 22 volts로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소라디칼 계측

가진 효과(excitation effect)에 의한 화염의 연소 특성을 파악하기 위해 가진(excited)의 경우와 비가진(unexcited)의 경우에 대해 화염의 형상과 라디칼을 계측하였다. Fig. 3은 가진 진폭 변화에 따라서, Fig. 4~9는 가진 위상(phase angle of excitation) 변화에 따라서 화염의 형상과 C₂, CH, OH 라디칼의 분포를 보여주고 있다.

가진과 비가진의 화염 형상은 전혀 다른 구조를 보이고 있다. 비공명 주파수에서의 가진을 받는 경우에는 스피커에서의 발생된 음파가 연료분출노즐의 출구에서의 양과 음의 압력구배가 생겨나 주기적인 변동을 시작한다. 그러나 공명 주파수에 의한 가진의 경우 상당히 큰 압력구배로 인해 강력한 와동이 생겨난다. Kim 등의 연구⁽⁷⁾에서 보았듯이, 양의 압력구배에 의해 유입되어진 외부유동은 순간적으로 정체상태를 유지한 후, 음의 압력구배의 영향으로 노즐벽면근처의 국부 가속이 나타나서 벽면근방을 따라서 도너츠형의 강력한 와동이 생성되면서 연료분출노즐의 출구 근방에서 충돌이 일어나게 된다. 이로 인하여 분출된 연료와 유입된 주위공기는 혼합되어져 난류화된 화염의 모습을 가지면서 노즐출구 근방에서 화염대의 폭이 넓어지고 아울러 청염(blue flame)의 영역이 넓게 존재하게 된다. 뿐만 아니라 가진 효과에 의해 화염의 길이도 축소된다.

Fig. 3은 전체당량비(ϕ_o) 0.5, 중심부 관의 당량비(ϕ_c) 2.2 연소조건에서 스피커에 공급되는 가진 진폭의 세기를 0, 5, 10, 15, 20, 22 volts로 변화하였다. Fig. 3(a)는 필터링을 하지 않은 화염의 형상이다. 비가진의 경우 $\phi_c = 2.2$ 화염은 내부의 예혼합화염의 영역과 외부의 비예혼합화염의 이중구조를 보여주고 있다. 연료과잉의 내부화염 영역에서 생성된 혼합기는 외부의 비예혼합화염에서 여분의 산소와 반응하여 내부화염의 선단에 휘염의 그을음(soot)이 발생되고 있으며 바깥 화염에 의해 둘러싸여 있다. 가진 진폭의 세기를 증가시키면 화염은 점차 난류화된 모습을 가지며 화염대의 폭이 넓어지며 화염의 길이가 점차 감소된다. 가진 진폭 22 volts의 경우 비가진의 경우보다 약 1.7배정도 화염길이가 축소된다.

Fig. 3(b), (c), (d)는 C₂, CH, OH 라디칼을 계측한 화상이다. 라디칼의 강도가 붉은색을 나타낼수록 크다. 비가진시에는 혼합기와 산화제가 만

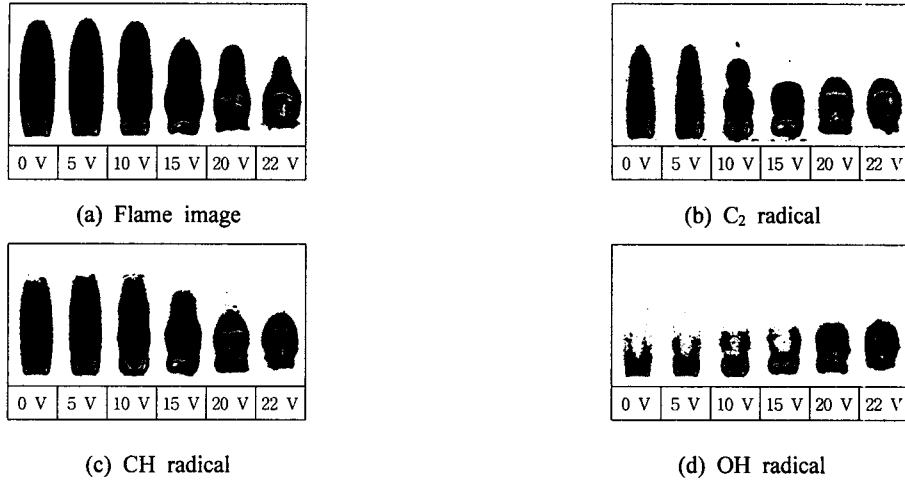


Fig. 3 Flame image and C₂, CH, OH radical as a function of excitation amplitude ($\phi_c = 2.2$)

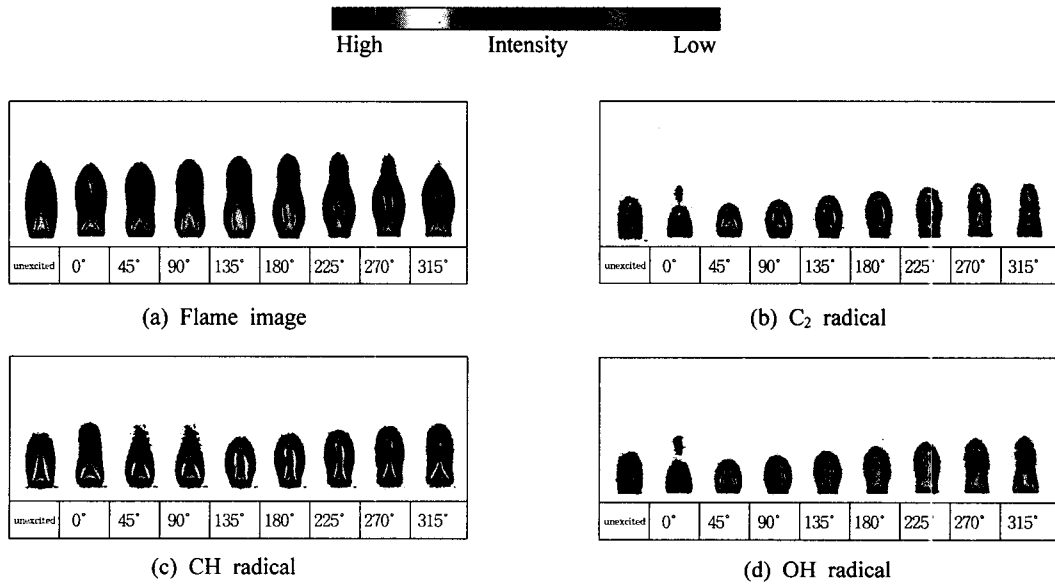


Fig. 4 Flame image and C₂, CH, OH radical as a function of phase angle of excitation ($\phi_c = 1.1$)

나는 연료분출노즐 출구 가장자리 근처에서 높게 나타나지만, 가진 진폭을 증가시키면 각 라디칼의 분포가 연료분출노즐 출구부분과 내부 및 외부 화염면에서 점차 화염의 중앙부분으로 이동되는 것을 알 수 있다.

이는 가진이 있는 경우에 스피커에 의한 압력 구배로 인해 주위공기의 유입으로 공기와의 혼합이 활발해져 연료분출노즐 중심부분에서 라디칼의 강도가 강해진다.

Fig. 4, 5, 6은 $\phi_o = 0.5$, $\phi_c = 1.1, 2.2, 3$ 인 연소조건에서 가진 위상 변화에 따라 화염의 형상, C₂, CH, OH 라디칼의 모습을 보여주고 있다. 비가진 경우 중심부 관의 당량비(ϕ_c)가 증가할수록 화염 및 라디칼의 전체적 발광범위가 커진다. 또한 ϕ_c 의 증가에 따라 예혼합화염의 모습에서 비예혼합화염의 모습으로 변화되어지는 것을 알 수 있다. 이것은 Kim 등의 연구결과⁽³⁾와 일치하고 있다. Fig. 4(a)의 화염형상을 살펴보면 ϕ_c

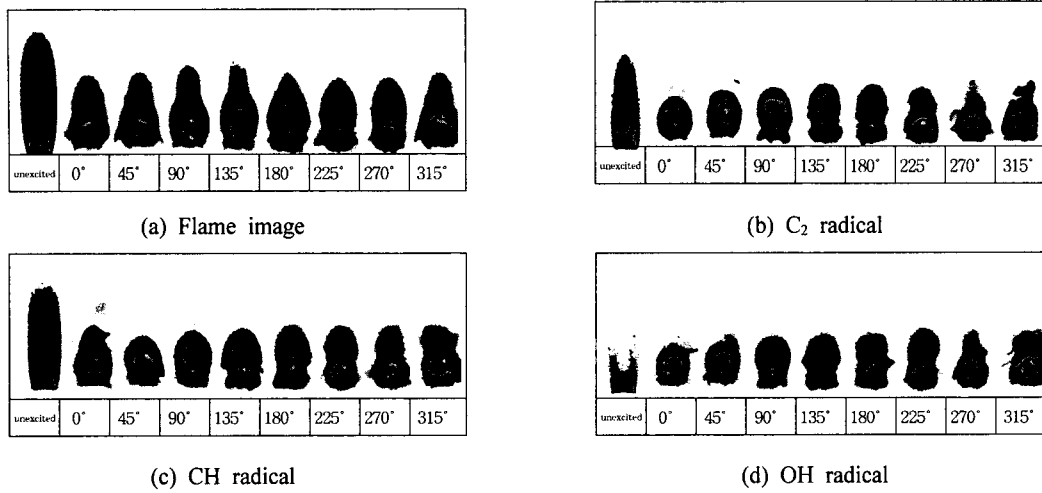


Fig. 5 Flame image and C₂, CH, OH radical as a function of phase angle of excitation ($\phi_c = 2.2$)

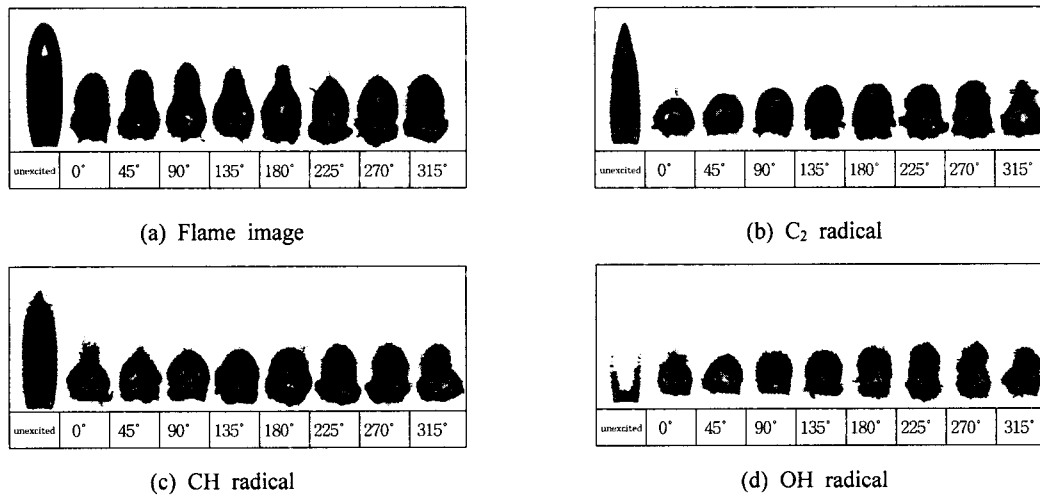
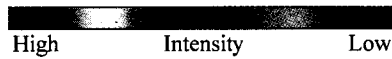


Fig. 6 Flame image and C₂, CH, OH radical as a function of phase angle of excitation ($\phi_c = 3.0$)

= 1.1 화염은 연료분출노즐에서 원뿔형 구조를 이루고 있으며 화염대의 구조가 가진 위상에 따라서 점차 변화되어가고 있음을 알 수 있다.

위상 315° 를 지나서 다시 위상 0° 의 구조로 되돌아가는 것을 볼 수 있다. C₂, CH, OH 라디칼의 모습도 화염대의 구조변화에 따라 유사한 모습으로 변해가고 있으며, 위상의 진행에 따라 상류(upstream)에서 생성된 라디칼이 하류(downstream)

로 이동하고 있다. 결국 가스의 영향에 의해 발생된 가운데 관의 연료 및 공기의 유동특성에 의해 화염대의 구조가 바뀌고 있음을 보여주고 있다.

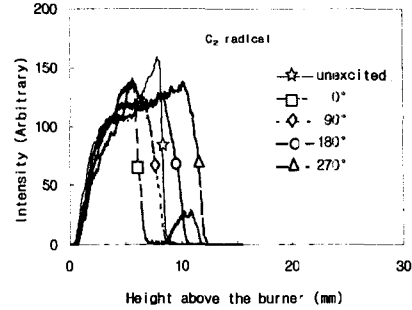
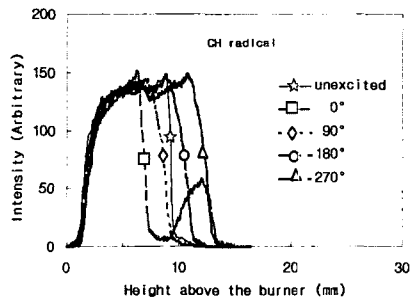
Fig. 5 및 Fig. 6의 $\phi_c = 2.2, 3.0$ 비가진 화염의 경우에는 ϕ_c 가 2.2, 3.0으로 증가함에 따라 화염의 길이가 증가하고 있다. 화염 선단에 희미한 부분은 그을음 발생영역으로서 직접사진에서 확인하였다. ϕ_c 가 증가함에 따라 C₂의 양이 CH

에 비해 증가하는 성향을 비가진의 화염에서 관찰할 수 있다. 이는 C_2 라디칼의 발광강도가 OH 발광 및 CH 발광에 비해서 상대적으로 희박화염에서 약하고 과농화염에서 강한 일반적인 분류화염의 특성을 잘 보여주고 있다. $\phi_c = 2.2$ 화염에 비해 $\phi_c = 3.0$ 화염은 점차 확산되어지는 화염의 하류에서 OH는 상당히 감소하고, C_2 는 증가되고 있음을 볼 수 있다.

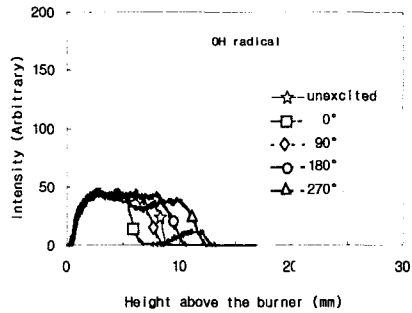
Fig. 4의 $\phi_c = 1.1$ 화염과 Fig. 5, 6의 $\phi_c = 2.2, 3.0$ 화염의 가진 화염모습을 비교하여 보면 $\phi_c = 1.1$ 화염에 비해 $\phi_c = 2.2, 3.0$ 화염이 가진 위상에 따라 변해 가는 모습이 더욱 난류화된 구조를 보이고 있다. 이는 본 실험의 경우 가진 주파수를 253 Hz로 고정하여 실험을 수행하였지만 ϕ_c 의 변화에 따라 중심부 관을 흐르는 연료와 공기의 비가 변화하여 결국 밀도의 변화를 가져오게 된 것에 기인하는 것으로 생각된다. 따라서 같은 주파수로 가진하여도 공명 효과에 따라 가진 효과의 차이가 다르게 나타난 것으로 생각된다. 또한 화염이 난류화된 모습을 보이면서 라디칼의 강도가 강해지고 있다.

Fig. 7, 8, 9는 Fig. 4, 5, 6의 화염중심을 따라 연료분출노즐에서 높이방향으로 라디칼의 강도(intensity)를 나타낸 것이다. $\phi_c = 1.1$ 화염의 경우는 혼합기 내에 적정의 산화제가 혼합되어 있어 가진과 비가진에서의 화염내부 및 화염내에서 라디칼의 강도의 변화가 크지 않다. C_2 에 비해 CH가 높은 강도를 나타내며 상대적으로 OH는 매우 낮은 강도를 나타내고 있다.

Fig. 8 $\phi_c = 2.2$ 비가진 화염에서는 라디칼 강도가 연료분출노즐 중심에서 2 ~ 3 mm 높이에서 최고값을 나타내고 있다. C_2 라디칼은 연료분출노즐 중심으로부터 높은 값을 나타낸 후 서서히 감소하다가 20 mm 근방에서 약간 증가하고 있다. 이는 화염관찰에서의 그늘음 발생영역이다. 가진의 경우에는 연료분출노즐 중심에서 5 ~ 10 mm 높이에서 높게 나타나고 있다. 또한 가진의 경우에는 라디칼이 불규칙적으로 분포함으로써 화염이 난류적인 형상을 보임을 알 수 있다. OH 라디칼은 비가진에 비해 발광강도가 매우 강해짐을 알 수 있다. 이것은 OH 라디칼의 반응속도가 CH 라디칼과 O_2 분자의 농도에 곱에 비례하므로 음향 가진에 의한 주위공기의 유입으로 인해 증가된 것으로 생각된다.

(a) C_2 radical

(b) CH radical

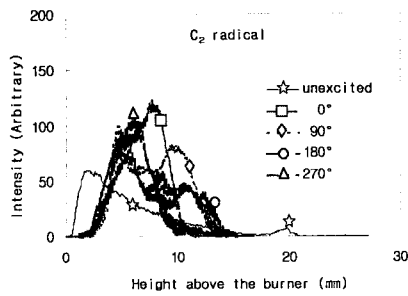


(c) OH radical

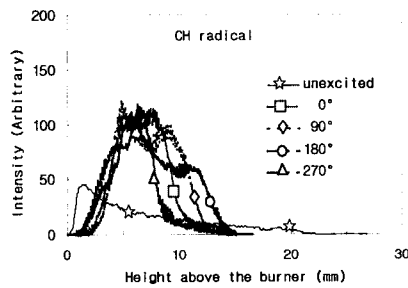
Fig. 7 C_2, CH, OH radical intensity as a function of phase angle of excitation ($\phi_c = 1.1$)

C_2, CH 라디칼 분포에서 보면 가진의 경우에 화염길이가 줄어들었음을 알 수 있다.

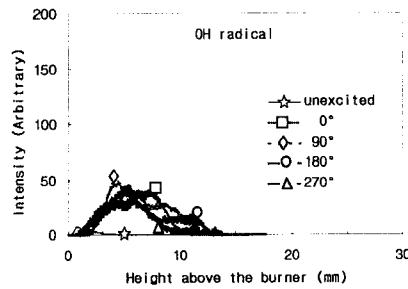
Fig. 9 $\phi_c = 3.0$ 비가진 화염에서는 C_2 라디칼 강도가 연료분출노즐 중심에서 22 mm 높이에서 급격히 증가되었음을 알 수 있다. 고온연소영역에서 공기가 부족한 상태에서 발생하는 그늘음은



(a) C₂ radical



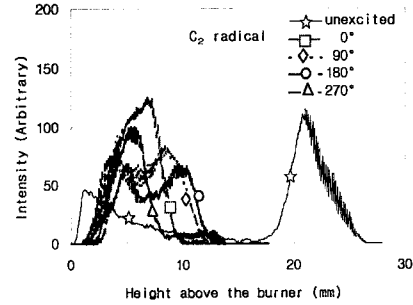
(b) CH radical



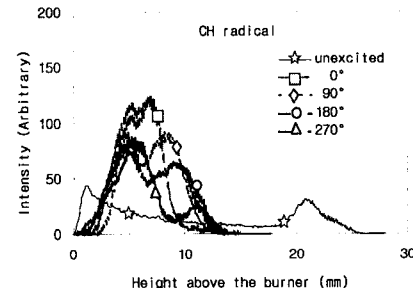
(c) OH radical

Fig. 8 C₂, CH, OH radical intensity as a function of phase angle of excitation ($\phi_c = 2.2$)

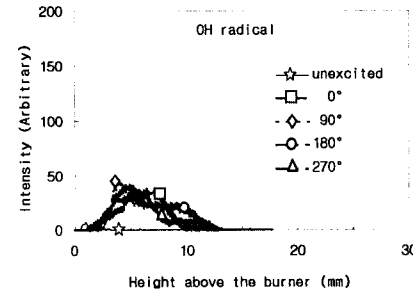
음향 가진으로 인해 주위공기가 유입되어 산소와 OH 라디칼에 의해 산화되어 감소될 것으로 생각된다. 또한 Fig. 9 (c)의 그림에서 OH 라디칼이 비가진에 비해 발광강도가 매우 강해짐을 알 수 있다.



(a) C₂ radical



(b) CH radical



(c) OH radical

Fig. 9 C₂, CH, OH radical intensity as a function of phase angle of excitation ($\phi_c = 3.0$)

3.2 질소산화물 계측

Fig. 10은 $\phi_o = 0.5$, 가진 전압 22 volts에서의 $\phi_c = 1.1 \sim 5$ 변화에 따른 NOx 발생을 굴뚝(stack)에서 계측한 결과를 보여주고 있다. 실선으로 나타낸 부분이 비가진의 NOx 배출물이고 점선으로 나타낸 부분이 가진의 NOx 배출물이다.

NOx 배출물이 비가진의 경우와 비교할 때 괄목하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 비가진시에 있어서는 $\phi_c \approx 2$ 부근에서 NOx 배출물이 최소를 보이고 ϕ_c 가 증가함에 따라 증가성향을 보이고 있으며 $\phi_c \approx 3$ 이후에서는 일정한 값을 나타내고 있다.

Fig. 4(a), 5(a), 6(a)의 $\phi_c = 1.1, 2.2, 3$ 화염 직접사진을 화상처리(image processing)한 그림과 연관지어 볼 수 있다. 이 그림들이 가진 진폭 0 volt는 비가진의 경우로서 $\phi_c = 1.1$ 의 예혼합모습에서 $\phi_c = 3$ 의 비예혼합화염의 모습으로 변화되어지는 것을 보여주는 것으로서 특히, $\phi_c = 2.2$ 화염은 두 가지의 화염특성이 교차하여 하이브리드(hybrid) 형태의⁽³⁾ 화염구조를 보이고 있는 것이다. 이런 화염형상과 Fig. 10의 NOx 발생영역을 크게 세 가지로 구분하여 비교해 볼 수 있다. NOx 발생이 최소값을 보이는 $\phi_c \approx 2$ 를 기준으로 $\phi_c \leq 2$, $\phi_c \approx 2$, $\phi_c \geq 2$ 로 구분한다. 이론당량비 부근인 $\phi_c \leq 2$ 에서는 높은 화염온도로 인해 Zeldovich 기구에 의해서 NOx가 증가하고, 과농당량비인 $\phi_c \geq 2$ 에서는 화염길이 증가와 연료공기비의 증가로 탄화수소에 기인하는 화학종(CH, CH₂, C, C₂)과 N₂의 반응에 의한 질소화합물 라디칼(HCN, NH, N 등)로부터 prompt NO 기구에 의해 생성되는 것으로 생각되어진다. 특히 $\phi_c \geq 2$ 에서는 화염길이 증가로 상류에서 하류로의 체류시간(residence time)의 증가로 인해 NOx 발생이 쉽게 증가하게 된다.⁽³⁾ 따라서 $\phi_c \approx 2$ 에서 화염구조가 예혼합과 비예혼합화염의 하이브리드(hybrid)형태를 보이듯이 NOx 발생이 Zeldovich 기구와 prompt NO 기구의 조합에 의해 NOx 발생이 최소화되는 것으로 생각된다. 가진의 경우에는, 가진 효과를 보이는 $\phi_c > 1.7$ 에서 NOx 발생이 줄어들고 있다. $\phi_c = 2.2, 3$ 화염은 화염길이가 비가진보다 약 1.7 ~ 2배정도 축소하였다. 이는 가진에 의해서 $\phi_c \geq 2$ 에서는 가운데관의 유동이 보다 난류화되어 외부공기와 잘 혼합이 되었고, 따라서 화염의 후류영역 축소 및 퍼짐을 가져오게 되었고 이로 인해 체류시간의 감소로 NOx 저감효과가 나타나게 된 것이다. 참고문헌(8)에서 국소적인 NOx의 발생은 증가하였지만, Fig. 10의 굴뚝에서의 NOx 발생은 감소하고 있다. 결국 음향 가진으로 인해 체류시간이 축소하게 되어 NOx 저감효과가 나타나게 된 것이다.

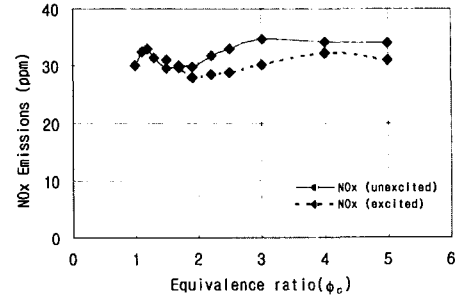


Fig. 10 NOx emissions with and without excitation

4. 결론

중심부 연료관의 공기예혼합도에 따라 연소중간생성물을 관찰하고, 특히 음파에 의해 주기적인 압력변동이 유발된 화염을 구성하여 가진 위상 및 진폭에 따라 화염형상 및 C₂, CH, OH 라디칼의 특성과 NOx 발생을 관찰하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 가진위상에 따라 C₂, CH, OH 라디칼의 모습이 화염대 구조와 유사한 모습으로 변하며, 위상의 진행에 따라 상류에서 생성된 라디칼이 하류로 이동한다. 결국 비정상 화염에서 가진된 중심부 관의 연료 및 공기 유동특성이 화염대의 순간적인 구조를 바꾸고 있다.

(2) NOx의 생성은 이론당량비 부근인 $\phi_c \leq 2$ 에서는 높은 화염온도로 인해 Zeldovich 기구에 의해서 NOx가 증가하고, 과농당량비인 $\phi_c \geq 2$ 에서는 화염길이 증가와 연료공기비의 증가로부터 prompt NO 기구에 의해 생성되는 것으로 보인다. 특히 $\phi_c \geq 2$ 에서는 화염길이 증가로 상류에서 하류로의 체류시간의 증가로 인해 NOx 발생이 쉽게 증가하게 된다. 결국 $\phi_c \approx 2$ 에서 화염구조가 하이브리드형태를 나타내 NOx 발생이 Zeldovich 기구와 prompt NO 기구의 조합에 의해 NOx 발생이 최소화된다.

(3) 음향 가진으로 인해 OH 라디칼의 증가가 두드러졌으며 이것은 주위 공기와의 혼합이 촉진되었음을 보인 것이며 가진에 의한 화염길이의 축소 및 화염의 퍼짐은 체류시간을 축소시켜 NOx저감 효과가 나타난다.

후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Gore J. P. and Zhan N. J., 1996, "NOx Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-Flow Jet Flames," *Combust. Flame*, Vol. 105, pp. 414~427.
- (2) Turns S. R., Myhr F. H., Bandaru R. V., and Maund E. R., 1993, "Oxide of Nitrogen Emission from Turbulent Jet Flames : Part II - Fuel Dilution and Partial Premixing Effects," *Combust. Flame*, Vol. 95, p. 255.
- (3) Kim T. K., Alder B. J., Laurendeau N. M., and Gore, J. P., 1995, "Exhaust and In-Situ Measurements of Nitric Oxide for Laminar Partially Premixed C₂H₆-Air Flames : Effect of Premixing Level at Constant Fuel Flowrate," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 110-111 pp. 361~378.
- (4) Driscoll J. F., Chen R. H., and Yoon Y., 1992, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Residence Time and Damkohler Number," *Combust. Flame*, Vol. 88, p. 37.
- (5) Nishioka M., Nakagawa S., Ishikawa Y., and Takino T., 1994, "NO Emission Characteristics of Methane-air Double Flame," *Combust. Flame*, Vol. 98, p. 127.
- (6) 오창보, 이창언, 1998, "CH₄-공기 분류 확산화염의 NOx 생성특성에 관한 수치해석," 대한기계학회논문집(B), 제22권, 제 2호, pp. 193~204.
- (7) Kim T. K., Park J., and Shin H. D., 1993, "Mixing Mechanism near the Nozzle Exit in a Tone Excited Non-Premixed Jet Flame," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 89, pp. 83~100.
- (8) 김태권, 장준영, 2001, "예혼합 LPG/공기화염에서 연소생성물의 국소농도 및 화염온도특성," 한국자동차공학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 77~84.