

부분적 예혼합 LPG/공기 화염에서 음향가진이 NOx 배출에 미치는 영향

Effects of Acoustic Excitation on NOx Emission in Partially Premixed LPG/Air Flames

장준영*, 박성호**, 김태권***
Jun Young Jang, Sung Ho Park, Tae Kwon Kim

ABSTRACT

Measurements of NO and NOx emission of laminar partially premixed LPG/air flames with and without acoustic excitation are reported. The NOx emission at the tailpipe of a combustion chamber is determined by chemiluminescent analyser. The NOx measurements are taken in flames with several different center tube equivalence ratio (ϕ_c), and overall equivalence ratio (ϕ_o) for a fixed fuel flowrate. The NOx emission decrease to reach a minimum value at an optimum $\phi_c \approx 2$. The $\phi_c \approx 2$ flame gives a compromise of thermal NO and prompt NO mechanism. In the case of excitation, the visual shape of the flame is changed from laminar flame to turbulent-like flame. With increasing levels of excitation amplitude, an optimum value of the NO and NOx emission exists. A shorter flame caused by the enhanced upstream mixing due to acoustic excitation results in the reduction of NO and NOx emission in the present flames. The reduction of flame length affects the shorter residence time of center tube mixture, and significantly influences the NOx reduction.

주요기술용어 : NOx emission(질소산화물 배출), Partially premixed flame(부분적 예혼합화염), Acoustic excitation(음향 가진), Excitation frequency(가진 주파수), Flame control(화염 제어)

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 각종 연소기 등에서 발생하는 공해물질들은 지구의 온난화, 광화학 스모그, 오존층 및 생태계 파괴등 심각한 환경문제를 일으키고 있다. 유해 배출물 중 질소산화물은 광화학적 스모그, 산성비 등과 밀접하게 연관되어지고 있어 이에 대한 생성 및 저감 연구는 점차

중요시되고 있다. 특히 화학 예혼합연소는 가스터빈 연소기 등으로부터 발생되는 NOx 배출을 줄이기 위해 대형의 연료·공기 혼합실이 필요하며 화염의 불안정 및 역화의 위험이 존재하게 된다. 이러한 면에서 볼 때 부분적 예혼합화염(partially premixed flames)은 초화학 예혼합화염보다 안정하고, 비예혼합화염보다 화염의 길이가 적어진다. 따라서 부분적 예혼합방식이 화염의 안정성을 촉진시키면서 동시에 NOx 배출도 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 부분적 예혼합화염은 이와 같은 장점을 갖고 있지만, 이 화염에 관한

* 회원, 계명대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 경일대학교 기계공학부
*** 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

실험적 연구결과는 상당히 부족한 편이다.

최근, 부분적 예혼합화염에서 NOx생성에 관한 몇몇 연구가 수행되었다. Gore와 Zhan¹⁾의 메탄/공기의 부분적 예혼합화염 연구에서는 연료관 당량비 1.5부근에서 최소 NOx발생이 계측되었으며, 탄화수소계의 중간생성물의 변화가 NO 생성과 연관되어 있을 것으로 추측하였다. Driscoll 등²⁾은 난류 수소 공기 화염에서 NOx 배출은 체류시간(residence time)을 줄인 부분적 예혼합화염을 촉진시킴에 따라, 현저히 줄어들게 됨을 보였다. Turns 등³⁾은 C₃H₈, C₂H₄, CH₄를 연소시키는 난류 제트화염에서 생성되는 NOx 발생을 연구하였다. 일정한 열발생률 조건에서 부분적 예혼합화염은 NOx 발생을 증가시키기도 하고 억제시키기도 한다는 것이 알려졌다. 그것은 복사열 손실 및 체류시간(residence time)과 연관되어진 것으로 볼 수 있다. 이들의 연구는 연소실의 하류 배출구에서의 EINOx(NOx emission index)를 제시하고 있다. Nishioka 등⁴⁾은 층류 대향류 부분적 예혼합화염에서의 정량적인 NO 배출특성에 관한 수치적 연구를 수행하였다. 단순한 예혼합화염 및 비예혼합화염과의 비교를 통하여 부분적 예혼합화염의 이중화염(dual-flame)구조는 당량비와 local strain rate에 따라 NO 생성에 영향을 주게됨을 밝혔다.

한편 실제 연소시스템에서 효율적인 연소기의 설계를 위해서는 연료 및 공기의 혼합과정 등의 상호관계 규명이 중요한 연구과제인 것이다. 특히 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. Kim 등⁵⁾은 주기적인 압력변동이 있는 연소실을 모사하여, 스피커(loudspeaker)에 의해 음파를 발생시켜 상류의 관내유동에 주기적인 압력변동을 유발시켜서, 이에 따른 와동과 화염특성과의 상호관계를 규명하였다. 가진효과가 연료와 공

기의 혼합을 촉진하고 화염길이를 축소하고 있음을 보였다. 그러나 연소생성물의 특성에 관한 결과는 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 부분적 예혼합화염에서 NOx의 정량적 계측을 수행하고, 일정한 연료관 유량 조건에서 연료관의 공기 예혼합도가 NOx 생성에 미치는 영향을 실험적으로 제시하고자 한다. 특히 스피커에 의해 발생된 주기적인 압력변동이 부분적 예혼합화염의 NOx 발생에 미치는 영향을 검토함으로서 혼합특성과 NOx 발생과의 연관성을 실험적으로 관찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 연료공급시스템, 가진시스템, NOx분석시스템, 영상처리시스템으로 구성되어 있다. 연료로는 LPG를 사용하였으며 산화제로는 질소 79% 산소 21%로 혼합되어진 고순도 공기를 사용하였다. 혼합기의 수분제거를 위해 실리카겔을 통과시켰으며 유량조절을 위해 버블메터(bubble meter)로 측정되어 교정 후 유량계(Matheson 602, 603)를 통과하여 혼합되어서 가진실로 공급된다. 가진실(exciting plenum, 부피 5.5 l)은 투명아크릴로 내경 24 cm, 높이 29 cm의 중간부분에 스피커(LG 60 watt, 8 inch)를 부착하여 신호발생기(function generator, MS-9160)에서 정현파 신호를 발생시켜 증폭기(amplifier)를

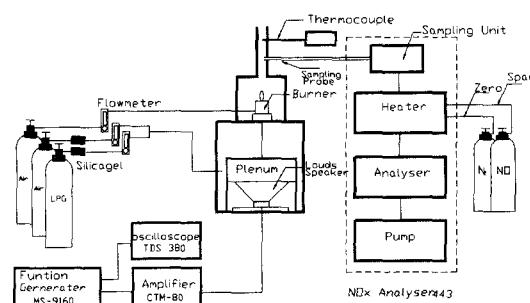


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

거쳐 출력시킨다. 가진실로 들어온 연료와 공기는 스피커에서 나오는 주기적인 압력 변동을 받아 연료파이프를 거쳐 연료분출노즐로 공급된다. 정상상태의 화염을 얻기 위해서 3개의 동심 스테인레스관으로 구성된 연료분출노즐을 사용하였으며 내경 4.1mm의 가운데 관의 주위는 1인치 관으로 싸여 전체당량비(ϕ_o)를 유지하기 위하여 공기가 나오게 된다. 가운데 관을 제외한 주위 관들은 철망, 유리구슬, 세라믹 하니콤 등으로 내부가 채워져 있다. 본 연구에서는 예혼합화염에서 발생되는 화염의 역화방지를 위해 유리구슬을 연료공급노즐 하단에 설치하였다. 질소산화물을 측정하기 위해 밀폐 용기 내에 연료분출노즐을 설치하였고 상단의 배기관을 통해 배출시키며 배기관의 10cm 상단에 샘플링 프로브(sampling probe)를 설치하여 NOx 분석기(Rotork Analysis, model 443)를 연결하였다.

2.2 실험방법

가운데 관에서 연료와 공기를 혼합하여 부분적 예혼합 화염을 형성하고 주위관에 공기를 흘려주어 전체당량비(overall equivalence ratio, ϕ_o)를 조절하고 있다. 따라서 본 실험에서는 가운데 관의 당량비(center tube equivalence ratio, ϕ_c)를 다음과 같이 정의하였다.

$$\phi_c \equiv \frac{\left(\frac{m_{fuel,c}}{m_{air,c}}\right)_{act}}{\left(\frac{m_{fuel,c}}{m_{air,c}}\right)_{sto}}$$

여기서, $m_{fuel,c}$ 과 $m_{air,c}$ 는 가운데 관에서 흐르는 연료 및 공기유량이다. 또한 전체당량비(ϕ_o)는 다음 식과 같이 정의하였다.

$$\phi_o \equiv \frac{\left(\frac{m_{fuel,c}}{m_{air,c} + m_{air,A}}\right)_{act}}{\left(\frac{m_{fuel,c}}{m_{air,c}}\right)_{sto}}$$

여기서 $m_{air,A}$ 는 동심외관(annulus tube)의 공기유량을 나타낸다. 본 실험에서는 일정한 연료량에 대하여 가운데 관의 공기량과 동심외관의 공기

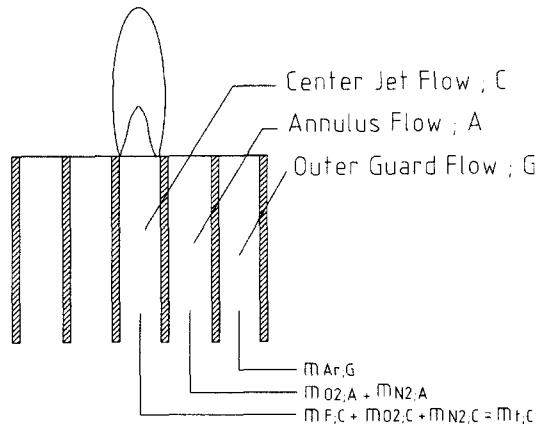


Fig. 2 Notation of flowrate for overall equivalence ratio and center tube equivalence ratio

량의 증감에 따라 가운데 관의 당량비(ϕ_c)와 전체당량비(ϕ_o)를 변화시켜 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 전체당량비(ϕ_o)와 가운데 관의 당량비(ϕ_c)를 위한 유량표시를 나타낸 것이다.

가진 조건은 신호발생기에서의 정현파 신호를 스피커에 입력시켰을 때 가진실 및 연료분출노즐의 공명주파수 253 Hz를 가진 주파수(excitation frequency)로 고정하였으며, 앰프의 출력을 증가시켰을 때 화염날림(blowout)이 없는 조건으로서 가진 진폭(excitation amplitude)을 22volts로

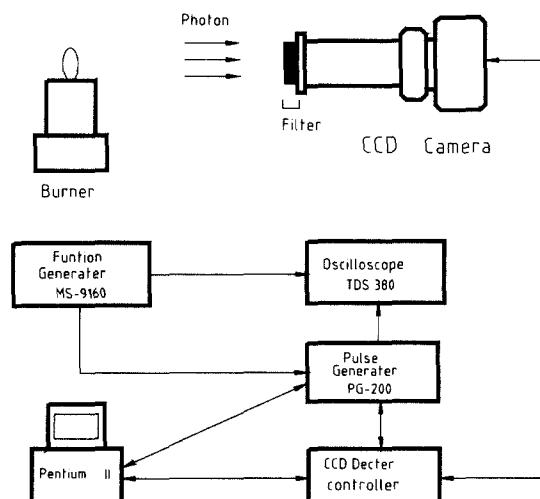


Fig. 3 Image processing system

하였다. 화염의 연소과정 중 발생되는 중간생성 물질인 라디칼(radical)을 관찰하기 위하여 각 라디칼들의 파장대 만을 통과시키는 협대역 통과필터와 UV-NIKKOR 렌즈($f=105\text{mm}$)를 사용하여 연소과정 중 발생된 라디칼의 강도(intensity)를 CCD(charged coupled device) 카메라에 입력시킨다. 한편 신호발생기로부터 발생된 정현파 신호와 동시에 CCD 카메라의 지연시간(delay timing)을 조절하여 정현파 신호의 각각의 위상에서의 화염의 화상을 출력시킬 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 위상 45° 간격으로 화상을 기록하였으며, 화염의 형상관찰에만 활용하였다.

3. 결과 및 토의

본 실험에서는 연료 유량을 70cc/min 으로 고정시켰으며 가운데 관의 공기량과 동심외관의 공기량을 변화시켜 전체당량비(ϕ_o) 및 가운데 관의 당량비(ϕ_c)를 조절하였다.

Fig. 4는 전체당량비(ϕ_o) 0.5~1.2 사이에서의 가운데관의 당량비(ϕ_c)로 1.1, 1.6, 2.2, 3.0, 5.0에서의 NOx 발생을 나타내고 있다. 실선으로 나타난 것이 NOx의 발생 농도이며 점선부분이 NO의 발생 농도이다. NOx는 NO를 포함하고 있으며 NO의 농도가 NOx의 약 80% 정도 차지하고 있다. 본 실험에서는 NOx 농도를 측정하기 위해서 충분히 시간을 유지하며 NOx 농도가 시간에 따라 일정한 경우에 계측하였다. 그림에서 보면 ϕ_o 가 0.5~0.8부근에서 일정한 값을 나타낸 후 점차 NOx 배출이 급격히 줄어들고 있다. 본 실험에서는 부분적 예혼합화염을 형성하기 위해 주위 관에 다량의 공기가 공급되고 NOx 배출이 일정한 값을 나타내는 $\phi_o=0.5$ 에서 수행하였다.

한편 가진 효과에 의한 화염의 연소특성을 파악하기 위해 가진(excited)의 경우와 비가진(unexcited)의 경우에 대해 화염형상과 NOx 발생을 관찰하였다.

Fig. 5는 $\phi_o=0.5$ 및 $\phi_c=1.1, 2.2, 3$ 에서 가진 위상(phase angle of excitation)에 따른 화염의 형상

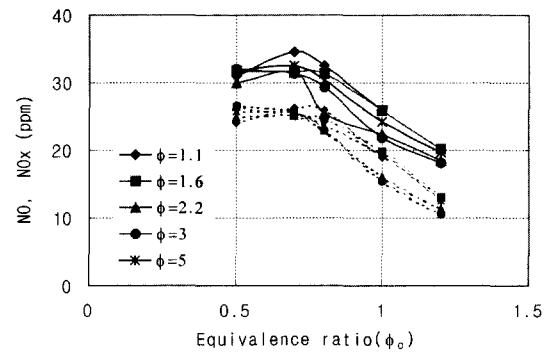


Fig. 4 NO and NOx with overall equivalence ratio

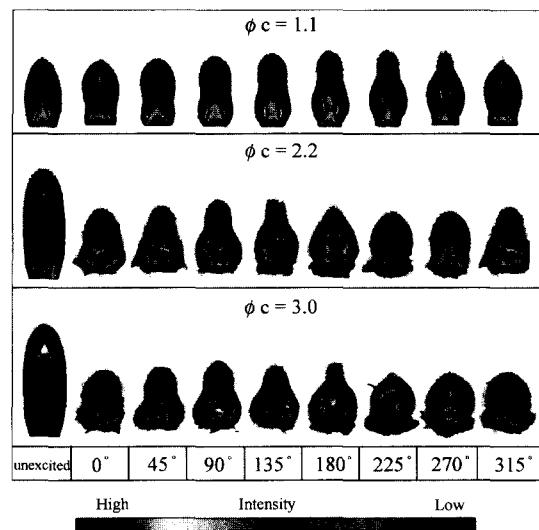


Fig. 5 Flame images as a function of phase angle of excitation at resonant frequency

을 나타내고 있다. 화상에서의 명암은 CCD 카메라에서 검출된 화염의 발광강도(intensity)를 나타내며, 강도에 따라 적절히 표시하였다. 강도가 붉은색을 나타낼수록 세기가 강해진다. 비가진 화염을 관찰해보면 $\phi_c=1.1$ 화염은 연료분출노즐에서 원뿔형 모습을 이루며 청염을 띠고 있다. ϕ_c 의 증가에 따라 예혼합화염의 모습에서 비예혼합화염의 모습으로 변화되어지는 것을 알 수 있다. 이것은 Kim 등⁵⁾의 연구에서 확인되었다. $\phi_c=2.2$ 화염은 내부의 예혼합화염의 영역과 외부의 비예혼합화염의 이중구조를 보여주고 있

다. $\phi_c=2.2$ 화염은 내부화염의 선단에 휘염의 그을음(soot)이 발생되고 있으며 바깥 화염에 의해 둘러싸여 있다. 연료과잉의 내부화염영역에서 생성된 혼합기는 외부의 비예혼합영역에서 여분의 산소와 반응하게 되는 것이다. $\phi_c=3$ 화염은 화염선단이 더욱 휘염으로 변화되고 있다. 가진(excited)과 비가진(unexcited)의 화염의 형상은 전혀 다른 구조를 이룬다. 비공명 주파수에서의 가진을 받는 경우에는 스피커에서의 발생된 음파가 연료분출노즐의 출구에서의 양과 음의 압력구배가 생겨나 주기적인 변동을 시작한다. 그러나 공명주파수에 의한 가진(excited)의 경우 상당히 큰 압력구배로 인해 강력한 와동이 생겨난다. Kim 등⁶⁾의 연구에서 보았듯이, 양의 압력구배에 의해 유입되어진 외부유동은 순간적으로 정체상태를 유지한 후, 음의 압력구배의 영향으로 노즐벽면근처의 국부가속이 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. 결국 화염길이의 축소는 체류시간(residence time)의 감소를 가져와서 NOx 배출이 저감되어질 것으로 생각된다. Fig. 5의 가진 위상에 따른 화염모습을 살펴보면 비가진 화염에 비해 노즐출구에서의 며칠 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 $\phi_c=1.7, 2.2, 4.0$ 에서의 가진 진폭(excitation amplitude)에 따른 NOx 발생농도를 보여주고 있다. $\phi_o=0.5$ 로 고정시켰다. 가진주파수 253 Hz에서 가진 진폭을 서서히 증가시켰을 때 NOx 발생이 증가하다가 화염이 급격히 혼들리는 20 ~ 22volts부터 서서히 감소하여 가진 진폭 24volts에서는 NOx 발생이 비가진(unexcited)의 경우와 비교하여 10ppm 정도 감소함을 알 수 있다. 가진 진폭을 더 증가시키면 화염은 날림으로 인해 꺼

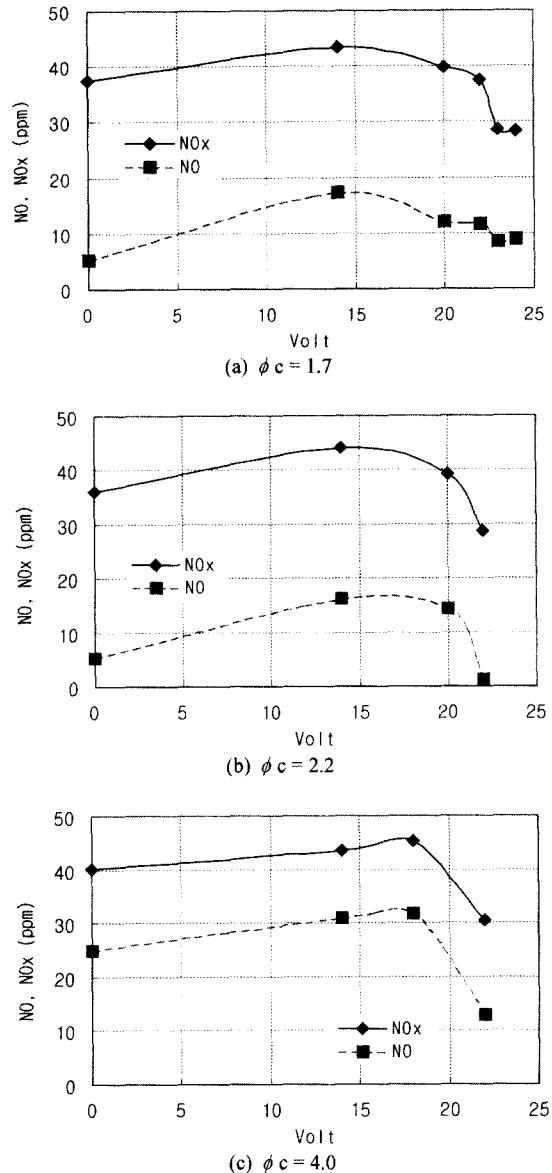
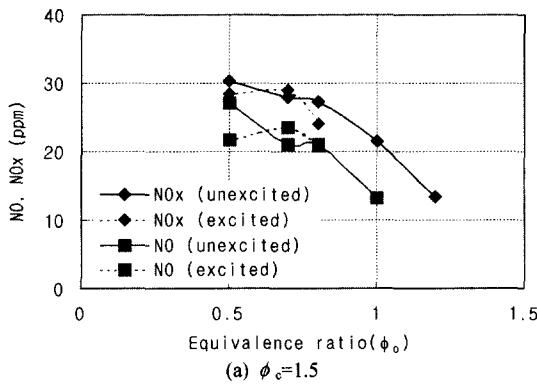
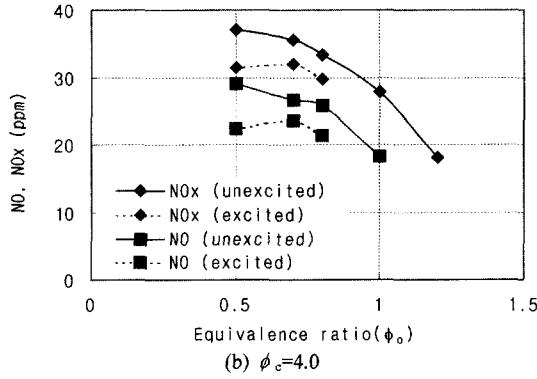


Fig. 6 NO and NOx with exciting amplitude

져버린다. 가진 진폭이 낮을 경우에는 유동장이 비공명 주파수의 경우처럼 주기적인 반복유동을 보이지만 가진 진폭이 높아지면 난류화된 모습을 보이면서 화염길이의 축소를 가져와 NOx의 농도를 감소시킨다. 이와 같이 화염에서의 난류화된 유동이 NOx발생을 감소시킴을 알 수 있다.

Fig. 7은 $\phi_c=1.5, 4$ 에서의 전체당량비(ϕ_o) 변

(a) $\phi_c = 1.5$ (b) $\phi_c = 4.0$ Fig. 7 NO and NOx with ϕ_e .

화에 따른 NOx 발생특성을 보여주고 있다. 가진 주파수는 253Hz이며 가진 진폭은 22volts이다. 비가진(unexcited)의 경우에는 Fig. 4와 동일한 유형을 보인다. 전체당량비(ϕ_e) 0.5에서는 가진 효과에 의해 NOx 발생이 줄어들고 전체당량비(ϕ_e) 0.7에서는 NOx 발생이 늘어났다가 $\phi_e=0.8$ 에서 다시 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 $\phi_c=4$ 에서의 전체당량비 변화에 따른 NOx 발생이다. 가진 전압 22volts에서 전체당량비(ϕ_e) 0.5~0.8까지의 변화를 보면 약 10~0% 정도의 NOx 발생이 감소됨을 알 수 있다. 이것은 가진에 의해 연료와 공기의 혼합이 촉진되어져서 화염길이의 감소를 가져오고 결국 체류시간(residence time)이 축소되어 NOx의 발생이 감소되어진 것이다.

Fig. 8은 전체당량비(ϕ_e) 0.5, 가진 전압 22volts에서의 가운데 관의 당량비(ϕ_e) 변화에 따른 NOx 발생을 보여주고 있다. 실선으로 나타낸 부분이

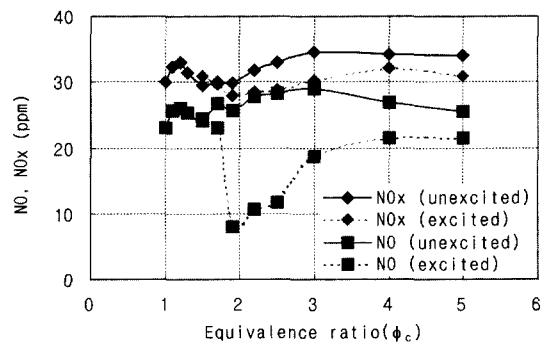


Fig. 8 NOx with and without excitation

비가진(unexcited)의 NO와 NOx이며, 점선으로 나타낸 부분이 가진(excited)의 NO와 NOx이다. 가진 전압 22volts에서 화염이 존재하는 $\phi_c=1.5$ 부터 5 사이의 변화에서 NOx 발생이 비가진(unexcited)의 경우와 비교할 때 괄목하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 비가진시의 NOx 생성을 살펴보면 $\phi_c \approx 2$ 부근에서 NOx 발생이 최소를 보이고 ϕ_c 가 증가함에 따라 증가성향을 보이고 있으며 $\phi_c \approx 3$ 이후에서는 일정한 값을 나타내고 있다. 이것은 앞절의 화염가시화 토의에서 언급한 바와 같이 Fig. 5의 $\phi_c=1.1, 2.2, 3$ 의 비가진(unexcited)의 경우에는 $\phi_c=1.1$ 의 예혼합모습에서 $\phi_c=3$ 의 비예혼합화염의 모습으로 변화되어지는 것을 보여주는 것으로서 특히, $\phi_c=2.2$ 화염은 두 가지의 화염특성이 교차하여 하이브리드(hybrid) 형태의⁵⁾ 화염구조를 보이고 있는 것이다. 이런 화염형상과 Fig. 8의 NOx 발생영역을 크게 세 가지로 구분하여 비교해 볼 수 있다. NOx 발생이 최소값을 보이는 $\phi_c=2$ 를 기준으로 $\phi_c \leq 2$, $\phi_c \approx 2$, $\phi_c \geq 2$ 으로 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_i, 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.⁵⁾ 따라서 $\phi_c \approx 2$ 에서 화염구조가 예혼합과 확산화염의 하이브리드(hybrid)형태로 나타나 NOx 발생이 Zeldovich 기구와 prompt NO 기구의 상호 절충(compromise)에 의하여 NOx 발생이 최소화되는 것으로 생각된다. 가진(excited)의 경우에는, 가진 효과를 보이는 $\phi_c > 1.7$ 에서 NOx 발생이 줄어들고 있다. $\phi_c = 2.2, 3$ 화염은 화염길이가 비가진보다 약 1.7~2배 정도 축소하였다. 이는 가진(excited)에 의해서 $\phi_c \geq 2$ 에서는 가운데 관의 유동이 보다 난류화되어 외부공기와 잘 혼합이 되었고, 따라서 화염의 길이 축소 및 폐침을 가져오게 되었고 이로 인해 체류시간(residence time)의 감소로 NOx 저감효과가 나타나게 된 것으로 생각된다.

Fig. 9는 $\phi_c = 1.1, 2.2$ 의 연료분출노즐 중심에서 축방향 위치(x/D)에 따른 NOx 농도와 화염온도를 나타낸 그림이다. x 는 축방향 거리이며 D 는 연료분출노즐인 가운데 관의 내경이다. $\phi_c = 1.1$ 화염은 Fig. 5의 화염구조에서 보았듯이 가진과 비가진 화염이 큰 차이가 없어 국소 NOx와 화염온도가 큰 변화를 보이지 않는다. 그러나 $\phi_c = 2.2$ 화염은 가진의 경우, 화염길이의 축소로 최대 NOx 발생영역이 $x/D = 5$ 에서 $x/D = 3$ 으로 이동되고 있다. 최대 화염온도 발생영역도 NOx와 마찬가지로 연료분출노즐 상류(upstream)로 이동되고 있다. $x/D = 5$ 를 벗어나면서 NOx 발생이 격감하는 것은 화염길이의 축소로 체류시간(residence time)이 감소되어 저감효과가 나타나는 것으로 생각된다.⁷⁾

Fig. 10은 배기관의 상단에 설치된 k-type의 열전대를 통한 배기온도를 나타낸 것이다. 비가진의 경우에는 $\phi_c = 1.5 \sim 2.5$ 사이의 배기온도가 상당히 높아져 있지만 $\phi_c > 3$ 에서는 약간 멀어짐을 볼 수 있다. 이는 $\phi_c = 1.5 \sim 2.5$ 사이에서는 화염길이의 증가가 인해 배기온도가 증가하며 $\phi_c > 3$ 에서는 전체당량비($\phi_o = 0.5$)를 유지하기 위해 동심외관에서의 다양한 공기가 분출되므로 희석으로 인해 온도의 저감이 일어나는 것으로 생

각된다. 가진의 경우에는 배기온도가 약 80°C로서 계측되고 있다. 가진의 경우에 배기관(stack)의 평균온도가 저감되고 있는 것은 음향가진으로 주위공기의 유입(entrailed air)이 발생해 후류

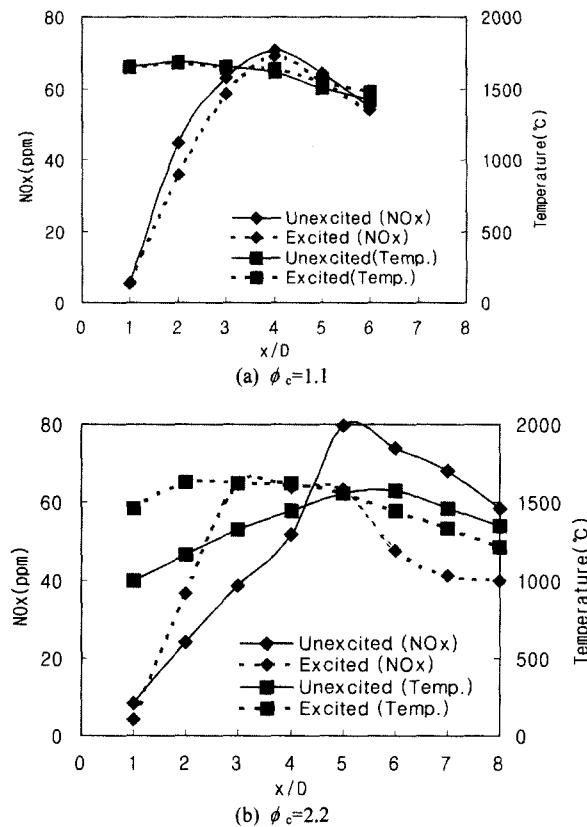


Fig. 9 Local NOx and flame temperature as function of x/D

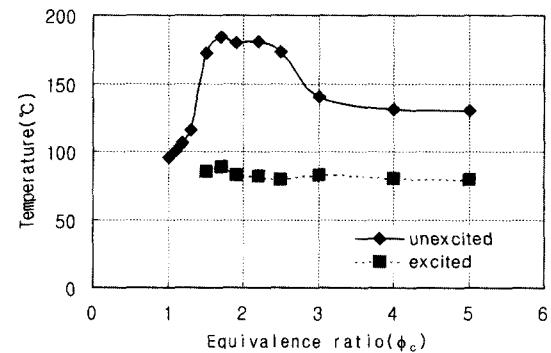


Fig. 10 Exhaust temperature with ϕ_c

영역에서 온도가 저감된다고 생각된다.

4. 결 론

부분적 예혼합화염에서 연료관의 공기 예혼합도가 NO_x생성에 미치는 영향을 검토하고, 음파에 의한 주기적인 압력 변동을 유발함으로써 나타난 화염형상 등이 NO_x발생에 미치는 영향을 실험적으로 관찰하여 다음의 결론을 도출하였다.

1) 가운데 연료관의 당량비가 증가할수록 예혼합화염 형상에서 비예혼합화염 형상으로 변화되어진다. 가진의 경우에는 스피커에서 발생되는 큰 압력구배로 인해 연료분출노즐에서의 연료와 유입된 주위공기가 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.

2) 이론당량비 부근인 $\phi_c \lesssim 2$ 에서는 높은 화염 온도로 인해 Zeldovich 기구에 의해서 NO_x가 증가하고, 과농당량비인 $\phi_c \gtrsim 2$ 에서는 화염길이 증가와 연료공기비의 증가로 탄화수소에 기인하는 화학종(CH, CH₂, C, C₂)과 N₂의 반응에 의한 질소화합물 라디칼(HCN, NH_i, N 등)로부터 prompt NO 기구에 의해 생성되는 것으로 생각되어진다. 따라서 $\phi_c \approx 2$ 에서 화염구조가 예혼합과 확산화염의 하이브리드(hybrid)형태로 나타나 NO_x 발생이 Zeldovich 기구와 prompt NO 기구의 상호절충(compromise)에 의하여 NO_x 발생이 최소화되는 것이다.

3) 가진에 의해 가운데 연료관 출구유동의 난류화로 인해 연료와 주위의 공기의 혼합이 촉진되어지고 화염의 후류영역의 축소 및 화염의 퍼짐은 체류시간(residence time)을 축소하게 되어 NO_x 저감효과가 나타나게 된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 1) J. P. Gore, N. J. Zhan, "NO_x Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-Flow Jet Flames," Combust. Flame, Vol.105, pp.414-427, 1996.
- 2) J. F. Driscoll, R. H. Chen, Y. Yoon, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Residence Time and Damkohler Number," Combust. Flame, Vol.88, p.37, 1992.
- 3) S. R. Turns, F. H. Myhr, R. V. Bandaru, E. R. Maund, "Oxide of Nitrogen Emission from Turbulent Jet Flames : Part II - Fuel Dilution and Partial Premixing Effects," Combust. Flame, Vol.95, p.255, 1993.
- 4) M. Nishioka, S. Nakagawa, Y. Ishikawa, T. Takino, "NO Emission Characteristics of Methane-air Double Flame," Combust. Flame, Vol.98, p.127, 1994.
- 5) T. K. Kim, B. J. Alder, N. M. Laurendeau, J. P. Gore, "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, 1995.
- 6) T. K. Kim, J. Park, H. D. Shin, "Mixing Mechanism near the Nozzle Exit in a Tone Excited Non-Premixed Jet Flame," Combust. Sci. Tech, Vol. 89, pp.83-100, 1993.
- 7) 김태권, 장준영, "예혼합 LPG/공기화염에 서 연소생성물의 국소농도 및 화염온도 특성," 한국자동차공학회논문집, 제9권 제4호, pp.77-84, 2001.