대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 D pp. 878~883 KSME 01S690

비예혼합 화염에서 음향 가진이 연소 배출 특성에 미치는 영향

이기만*· 박 정**· 조한창***

Effects of acoustic excitation on the combustion emission characteristics of a non-premixed flame

Kee-Man Lee, Jeong Park and Han Chang Cho

Key Words: acoustic excitation(음향가진), NO_x emission(NO_x 배출물), lifted flame(부상화염)

Abstract

The effects of external excitation with various frequencies and amplitudes on the flame behavior and pollution emission characteristics from a laminar jet flame are experimentally investigated. Measurements of NOx emission indices($EINOx$), performed in unconfined and vertical lifted flame at resonance frequency by strong excitation, have been conducted experimentally. It was also conducted to investigate the effects of excited frequency on NOx emissions with a various frequency ranged 0Hz to 2kHz. From the vertical lifted flame like turbulent of the excited jet with resonance frequency was shown that the dependence of NOx emission could be categorized into three groups : Group 1 of intermediate flame length and relative narrow flame volume yielding low NOx emission, Group 2 of short flame length but large flame volume yielding high NOx emission and Group 3 of long flame length with low temperature contours yielding high NOx emission.

1. 서 론

저 NO_x 연소기법은 안정적으로 연소될 수 있는 희박 상태의 예혼합 연소와 신속한 혼합 촉진형 연소 기술이 효과적인 것으로 알려져 있다. 이와 관련하여 다양한 연소 제어법이 개발되고 제안되어 왔으나 혼합과 연소 제어가 손쉬운 외부의 유동 진동(가진) 연구는 특히 배출 성능 향상과 관련한 아직 초기 단계로 많은 연구들이 요구되어 왔다. 그런데 실용성 있게 NO_x 배출을 억제하려면 현재 상용 연소기의 대부분이 비예혼합 분류 연소 구조이므로 이런 연소장을 모사 할 수 있는 유동장에서 NO_x 생성의 이해를 도모하여야만 할 것이다. 공기역학적으로 유동 진동은 분류의 자유 전단층에서 자연적으로 발생되는 주기적인 거대 와류 구조이거나 외부적인 가진에 의해 올 수 있다. 비예혼합 분류 화염에서 가진은 난류 강도에 변화를 주어 화염에서 시·공간적 교란이 발생된다. 공간적 변동은 진동에 의해 연료와 산화제와의 혼합이 촉진되어 예혼합적 성질이 유도됨으로써 NO_x 배출 억제에 유리해지는 개념이다. 비예혼합 분류 화염에 부상(lift-off) 이상의 가진을 하면 거대 와동에 의해 연료가 분사 노즐로부터 화염 밑면에 도달하는 동안 주위 산화제와 빠르게 유입과 혼합이 이루어져 화염 기저(flame base)가 예혼합적 특성을 보이면서 효과적으로 NO_x를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 부상에 따른 화염 안정화에도 도움을 주는 것으로 보고되고 있다. 특히 최근에 Chao 등[1]은 비예혼합 부상 화염 연구에서 유동에 음향가진을 준 결과 부상된 화염 밑면이 희박한 예혼합기로 형성되어 음향 가진법이 효과적인 저 NO_x 연소법으로 보고하고 있다.

한편 시간적 교란과 관련하여 Fric[4]은 오히려 NO_x, CO 등의 연소 배출물이 증가되는 것으로 보고하는 등 NO_x 배출과 관련하여 부정적 영향도 있어 비예혼합 분류 화염에서 가진 연소에 관한 연구는 계속 진행되어야 할 것이다.

* 전남도립담양대학 기계자동차공학부
** 순천대학교 기계자동차공학부
*** 포항산업과학연구원

2. 실험장치 및 방법

2.1 버너 및 가진계

버너는 축대칭 비예혼합 화염을 얻기 위해 가운데 파이프 형태의 분류관이 있고 주위류가 흐르는 일반적인 동축류 버너이다. 분류관은 투명한 파이렉스 관으로 분출경이 5.5mm 노즐형이며 연료는 상용 프로판(C_3H_8)을 사용하였다. 주위류는 압축공기로 균일한 속도장 생성을 위해 허니컴과 화인메쉬를 이용한 풍동형으로 제작되었다. 음향진동의 가진은 함수발생기(HP 9400), 증폭기(Inkel AX 5400)를 거쳐 내경 200mm, 높이 160mm의 원형 아크릴 통 중앙에 설치된 음향 스피커(Sammi co., 6", 100Watt)로 주게 된다. 가진 상태를 정확히 하기 위하여 가진 입력 값들은 오실로스코프로 측정하면서 결정하였다.

2.2 연소배출물 샘플링과 분석계

Fig. 1 는 본 실험에 사용된 장치 및 가스 샘플링과 분석계의 개략도를 나타낸 것이다. 본 연구는 화염에서 배출되는 전체적인 배출성능 파악이 주목적이므로 먼저 연소후 생성된 연소 배출물 채취에 편리한 배기덕트가 필요하게 되었다. 이 배기관은 가진된 화염이 주위 교란 등으로 떨리는 현상을 막아 주고 주위 산화제가 자연 유입되는 개방형 연소 시스템을 유지하도록 고안되었다. 이를 위해 화염 길이 1/2 정도를 화인 메쉬로 처리, 보호하였으며 나머지는 알루미늄 박판을 원통형으로 제작하고 상부에서는 연소 배출 가스의 균일한 분포도를 얻고자 ϕ40mm 관으로 교축하였다. 연소물의 채취는 이 관 안에서 이루어지는데 채취관의 위치는 *NOx* 측정시 요구되는 화염 높이의 두 배 이상이 되는 위치로 연소가 종료된 평균 농도를 채취할 수 있도록 하였다.

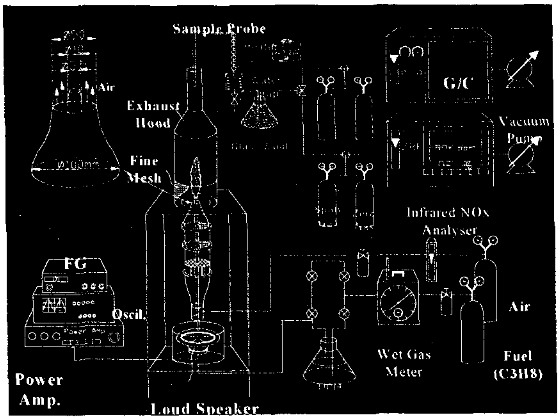


Fig. 1 Schematic of experimental setup

연소물 배출가스는 내경 ϕ5mm 파이렉스 관 한쪽 끝을 ϕ0.8mm로 교축한 채취관에서 채취되어 수분 제거기와 필터를 거쳐 가스 크로마토그래피와 질소산화물 분석기로 유입되어 분석된다. *NOx* 분석은 Non dispersive Infrared type의 *NOx*분석기(Fuji Electric co., ZRF)로 20과 300ppm의 *NO* span가스로 교정하여 사용하였다. 연소 배출물 중 O_2, CO, CO_2 는 가스 크로마토그래피(HP 5890)의 열전도 검출(TCD)기로 측정하여 다음과 같이 정의되는 *NOx* 배출 지수인 $EINO_x$ 로 환산하는데 사용하였다. $EINO_x$는 연료 1kg을 태웠을 때 발생하는 *NOx* 발생량(gram)으로 연소 후 영역에서 *NOx*와 CO, CO_2의 동시 측정으로 다음과 같은 식으로 정의된다.

연료에 포함되어 있는 모든 탄소가 CO_2 로 바뀐다고 가정하면

$$EINO_x = \frac{3[NO_x]\ MW_{NO_2}\ 1000}{[CO_2]\ MW_{C_3H_8}} \tag{1}$$

로 구할 수 있는데 여기서 MW는 분자량이며 괄호 안은 가스의 몰분율을, 3은 연료인 프로판에 탄소가 3개 들어 있는 것으로 프로판 1몰을 태우면 3몰의 CO_2가 생성됨을 의미한다. 이러한 개념의 배출지수는 공기로 인한 희석 효과와 무관하게 되며 연소후 영역에서는 축 방향과 반경 방향 모두에서 일정한 값을 나타내는 장점이 있다.[5)]

한편 가진된 층류 비예혼합 화염은 가진강도가 어느 일정 이상에서는 부상되어 난류 화염화 되는데 이 영역에서 대표적인 화염들을 대상으로 *NOx*와 상관관계를 파악하고자 온도 특성을 파악해 보았다. 온도는 선경 25.4㎛의 R-type 열전대를 2차원 이송대에 장착하여 축방향으로 5mm, 반경방향으로 2mm씩 이송하면서 측정하였다. 측정은 A/D Board를 이용하여 한 점 당 8192개의 변동 신호값을 받아 그 평균값을 구하였다.

2.3 실험조건

유동 조건으로 연료는 분출 관경 기준 Re 720로

층류 완전 발달류며 주위류는 화염 안정화 이외에 연소에 영향을 주질 않도록 0.1 m/s의 저속으로 하였다. 가진 강도별 배출 특성 실험은 분류 관경과 길이로 계산된 공명 주파수 171Hz로 고정하고 가진 강도를 서서히 증가시킴으로써 부착 화염에서 부상 화염을 거쳐 화염 날림이 발생하기까지 가변 하였다. 또한 주파수 별 배출 특성을 파악하기 위해 가진 강도는 10 V_{P-P}로 고정하고 주파수는 0 ~ 2 kHz까지 가변 하면서 측정하였다. 이상의 실험 조건을 표 1에 나타내었다.

화염 형태	A형 화염	A형 화염
분류Reynolds수	720	720
분류 유속, m/s	0.55	0.55
주위류 유속, m/s	0.1	0.1
가진 주파수, Hz	171(고정)	0 ~2kHz
가진 강도, V_{P-P}	0 ~ 20	10(고정)
연소 배출물 측정	NO_x, CO CO_2, O_2	좌동

Table 1 Experimental conditions of a forced flame

3. 3 결과 및 고찰

3.1 화염 안정화 선도

Fig. 2는 본 연구의 가진된 화염장에서 관찰된 서로 다른 부상 화염 경로를 갖는 2가지 유형의 화염 안정화 선도를 나타낸 것이다. 선도에서 보여지는 "A"형 화염이 부상 전에 다양한 형태의 화염 거동을 보이다가 부상과 동시에 단염화되어 전형적인 난류 화염 형태의 부상 경로를 갖는 화염으로 본 연구의 주 대상 화염이다.

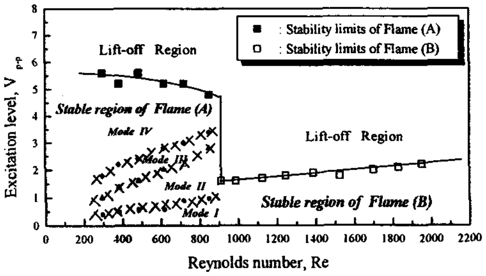


Fig. 2 Typical 2 kinds of stability domain according to the lift-off pattern

3.2 가진강도에 따른 *NOx* 배출특성

Fig. 3는 앞서 설명한 "A"형 화염에서 가진 강도에 따른 *NOx* 배출량을 배출 지수인 *EINOx*로 나타낸 것이다. 실험 조건은 표 1의 좌측 항으로 분류 Reynolds 720, 주위류 0.1m/s의 유동 조건에서 가진 주파수를 분류관 공명 주파수인 171Hz로 고정하고 가진 강도를 0 Volt에서 화염날림이 발생하기 전인 입력 신호 20Volt까지로 증가시킨 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 부착 화염 구간에서는 부상되기 전 신장 화염과 In-burning화염 모드에서 약간의 감소가 있으나 전반적으로 배출량 차이가 작음을 알 수 있다. 그런데 노즐에 부착된 화염은 일정 가진 강도 이상에서 부상하여 난류화되는데 부상하자마자 *NOx* 가 급격히 증가됨을 알 수 있다(Flame I). 이렇게 증가된 값은 가진 강도 7~8 Volt 구간에서 최저치를 보이다가(Flame II) 다시 증가하여 10 Volt 근방에서 최대 값을 보이며(Flame III) 이후 반응율이 낮아지면서 작아져 화염 날림이 발생하기 전까지 감소하는 경향을 보이고 있다. 이렇듯 *NOx* 배출 경향이 부상 화염 영역과 부착 화염 영역에서 많은 차이를 보이고 있으며 비가진 화염보다 가진을 하면 대부분의 구간에서 *NOx* 가 증가하고 있음을 알았다.

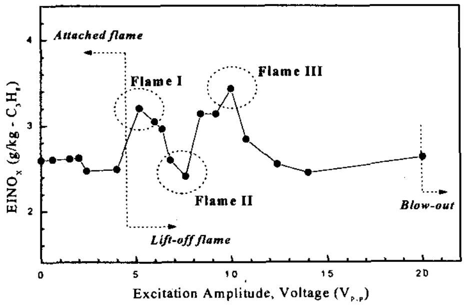


Fig. 3 *NOx* emission with exciting amplitude

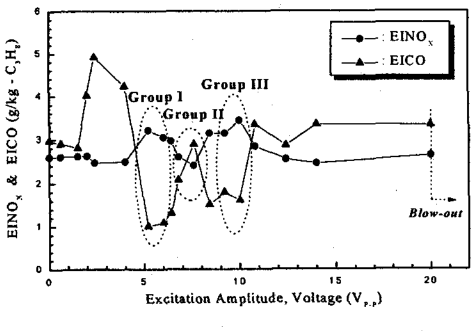


Fig. 4 Classification of the emission indices on the liftable region

(a) Group I flame　　(b) Group II flame　　(c) Group III flame

Fig 5. Representative flame shapes on the liftable region (left : flame shape, right : flame basis)

이러한 현상은 가진을 하면 주위류의 유입과 혼합이 증대되고 부상에 의해 화염 기저가 희박한 예혼합 상태가 되어 *NOx* 배출에 유리하게 된다는 기존의 연구들과 다소 차이를 보이는 현상이다.

Fig. 4은 동일한 조건에서 측정한 미연 생성물인 *CO* 와 NO_x를 동시에 나타낸 그림이다. 일반적으로 NO_x는 다른 연소 배출물과 반대 성향의 배출 특성을 보이는데 본 그림에서도 NO_x와 *CO*의 증가 · 감소 경향은 서로 반비례하고 있음을 알 수 있다. 그런데 *CO* 배출량이 부착 화염 영역에서 최대 값을 보이는데 이러한 현상은 이전의 본 연구에서 설명한 화염 신장과 In-burning화염 영역에서 나타나는 현상으로 이전 연구자들의 보고[6]인 층류 화염에서 가진에 의한 불안정 상태에서 soot 증가 현상과 관련 되여 보여진다. 이러한 원인에 대해서는 연구가 진행되질 않은 관계로 계속 진행하여 보고하기로 한다.

이상에서 조사된 가진된 층류 비예혼합 연소의 배출 성능을 NO_x 배출 차이가 미비한 부착 화염 영역과 화염 날림 가까이 반응률 저하로 인한 NO_x 감소 영역을 제외하면 부상 화염 영역 안에서 크게 3 Group으로 나눌 수 있다. 즉, Group I에서 나타나는 화염들은 부상하자마자 높은 NO_x 배출과 낮은 *CO* 배출 특성을 보이면서 부상 높이가 짧아 화염 기저에 약간의 청염을 제외하면 대부분이 휘염이며 화염 길이가 긴 경우이다. Group II는 본 연구에서 측정된 비가진 화염 보다 낮은 NO_x 배출구간으로 *CO* 배출 성능에서도 별 차이를 보이질 않은 배출 성능이 양호한 영역이다. 부상 높이는 중간 정도 높이나 화염 길이와 폭은 다른 영역에 비해 짧고 좁은 형태의 화염으로 거동하고 있다. Group III 화염들은 공간적으로 상당히 부상된 상태에서 시 · 공간적인 섭동으로 인해 화염 기저에 청백색 화염이 상당히 넓게 분포하고 있으며 화염 길이뿐만 아니라 큰 체적의 화염 형태를 취하고 있다. 세 영역의 대표적인 화염들의 직접 사진을 Fig. 5에 나타내었다.

NO_x 배출과 온도와의 상관관계를 알아보기 위하여 세 영역의 대표적인 화염들을 대상으로 화염 기저에서 섭동으로 온도 편차가 심한 구간을 제외한 영역까지의 측정된 온도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 전반적인 온도 분포로는 최고 온도가 1800K 이하의 비교적 낮은 온도 분포를 하고 있고 있으며 상대적으로 Group I인 경우가 좀 더 낮은 온도 특성을 보이고 있다.

일반적으로 분류 화염에서 배출되는 NO_x는 대부

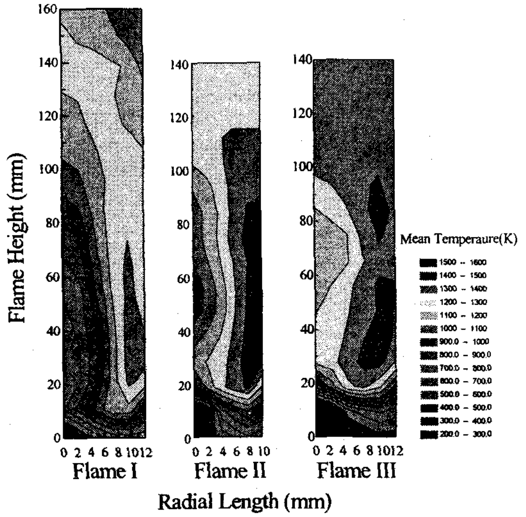


Fig. 6 Temperature contours of classification flames

분이 NO로 NO생성 기구는 다음과 같이 네 가지로 알려져 있다. 즉, 1) 열적 NO 2) O 나 OH로 인한 초과 평형기구 3) precursor로서 HCN 매체 기구 4) N_2O 매체를 통한 3중 체 결합 기구로 구분되며 열적 NO를 제외한 나머지 기구를 Prompt NO 기구라 한다. 이 중 열적 NO기구는 온도에 지수 그리고 체제 시간과는 선형적인 함수 관계 등 온도와 체류 시간에 많은 영향을 받고 있다. 그런데 최대 화염 온도가 2000K를 넘지 않으면 이러한 열적 NO 생성은 매우 느린 것으로 알려져 있다.[7] 그 외 NO_x 생성에 영향을 미치는 인자로는 화염 체적(길이)과 화염 스트레인 그리고 화염복사가 있다. 따라서 Fig. 6에서 나타난 온도 분포에서 대부분이 1800K 이하의 분포를 하고 있어 생성된 NO_x의 대부분이 온도에 의존하는 열적 NO 생성 기구라기보다 그 외 다른 기구로 배출됨을 유추해 볼 수 있다. 다만 화염의 크기(체적)만의 영향으로 보면 Fig. 5의 직접 사진에서 볼 수 있듯이 Group II의 화염이 다른 화염보다 길이와 폭이 적은 등 화염 체적에 비례해서 NO_x 배출 지수도 적음을 알 수 있다. 특히 Group III의 화염은 온도 분포도에서도 알 수 있다시피 가진 강도 증가에 따른 혼합과 유입이 증가해 상당히 난류화 되어 화염 기저 대부분이 당량비 근처의 활발한 반응 상태를 유지함으로써 다량의 NO_x 가 발생하는 것으로 사료된다. 이상의 결과를 분석해 보면 가진에 의해 층류 비예혼합 화염장에서 배출 성능을 향상시키기 위해서는 적정한 가진 조건이 있음을 알 수 있다.

3.3 주파수에 따른 화염거동과 NOx 배출특성

Fig. 7 은 가진 강도 10Volt로 고정한 상태에서 주파수 변화에 따른 거시적인 화염 거동을 1/1000 초 노출로 촬영한 직접 사진들이다. 저주파로 가진을 하면(~30Hz) 화염은 가진된 주파수와 동일한 신호로 진동함을 열전대 신호의 FFT 주파수 분석으로 알았다. 또한 비가진 화염인 경우 부력에 의한 자연 진동수가 16Hz로 측정되어 $f \cong \frac{1.5}{D_0^{1/2}}$ 인 알려진 식에 본 실험에 사용된 분류 관경 ϕ5.5 mm로 계산한 20Hz와 다소 차이를 보였다. 관 공명 가진 특성인 171Hz의 공명 주파수와 조화 주파수인 340, 510Hz에서는 큰 폭의 가진 강도로 인해 화염이 부상(Fig. 8 참조, 3차 조화 주파수에서는 부착 화염이나 화염 내부의 와동 구조가 특이함)되었으며 나머지 화염들은 부상됨이 없이 노즐에 부착된 상태이다. 특히 3차 조화 주파수 이후에서는 비가진 화염과 유사한 화염이 2kHz까지 보였으나 1.42kHz에서는 노즐 하단으로 화염 선단이 내려앉을 정도로 화염 내부에 와동의 변화가 있으나 Mie 산란광 단면 가시화의 순간 노출 사진(1/4000 초)에도 포착되질 않았다.

Fig. 9는 주파수 변화에 따른 NO_x 배출 특성을 나타낸 그림이다. 앞에서 설명한 바와 같이 가진 주파수 증가에 따라 관 공명 주파수와 조화 주파수로 가진된 경우를 제외하고는 대부분의 화염이 노즐에 부착된 화염들이다. 측정된 결과에서 볼 수 있듯이 큰 가진 강도 효과를 갖는 공명 및 조화 주파수 화염들에서 높은 NO_x 배출 지수 값을 보이고 있는 것을 알 수가 있었다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이 화염 길이는 비롯 다른 화염에 비하여 짧지만 화염의 부피나 특히 부상되어 난류화됨에 따라 반응이 활발해진 결과로 다량의 NO_x가

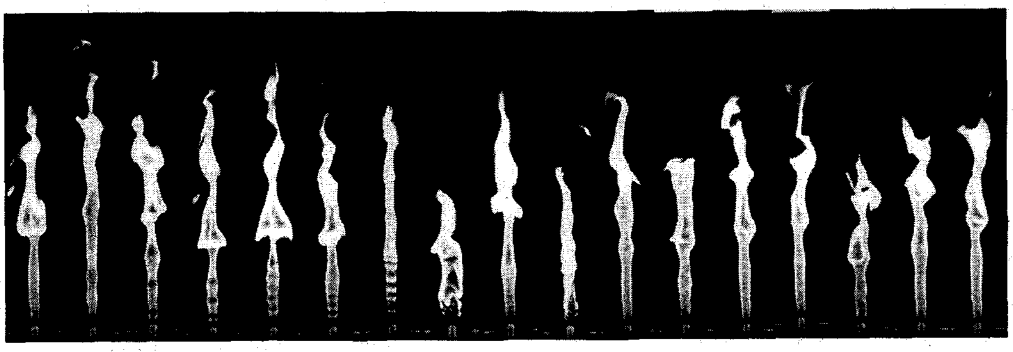
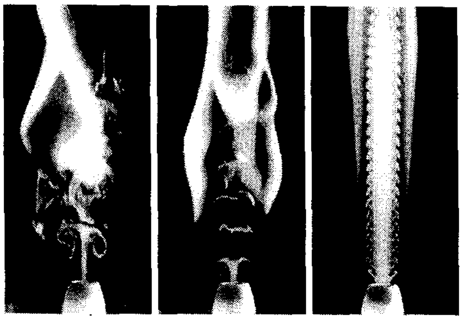


Fig. 7 Effects of acoustic frequency on flame shape at a fixed power of 10 Voltage
From left side is 0, 20, 30, 80, 110, 140, 160, 171, 200, 340, 400, 510, 700, 1kHz, 1.42, 1.7, 2



1차(171Hz)　2차(340Hz)　3차(510Hz)

Fig. 8 Cross-cut images of resonant frequency at a fixed power of 10V.

발생되는 것으로 사료된다. 또한 이처럼 높은 배출 특성을 보인 공명이나 조화 주파수 전에 비가진 화염보다 낮은 양호한 배출 성능의 화염 영역들이 존재함을 알았는데 이들 화염들의 대부분은 Fig. 3 에서도 관찰된 부상 전의 화염 신장 형상과 유사한 상태로 거동하고 있음이 조사되었다.

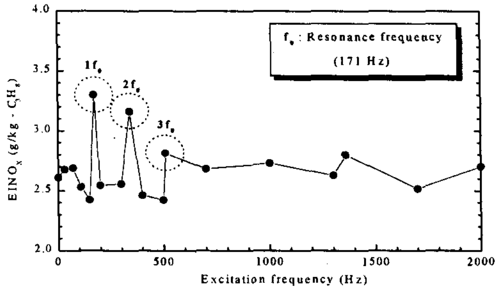


Fig.9 NO_x emission indices with various frequencies

4. 결론

가진된 층류 비예혼합 분류 화염의 연소물 배출 성능과 관련하여 가진 변수인 주파수와 강도에 따른 NO_x 배출 특성이 다음과 같이 분석되었다.

1) 동일한 주파수에서 가진 강도에 따른 성능은 관 공명 특성상 일정 강도 이상에서는 큰 폭의 진동 발생으로 부상되어 난류 화염화에 따라 적정한 가진 조건을 제외한 대부분의 영역에서 부상 이전이나 비가진 화염보다 높은 배출 성능을 보였다. 따라서 분류 화염에서 가진에 의해 배출 성능을 향상시키기 위해서는 적정한 가진 조건이 존재함을 알 수가 있었다.

2) 가진 주파수에 따른 성능에서도 큰 폭의 가진 강도를 갖는 공명 및 조화 주파수에서 다른 화염보다 높은 NO_x 배출 값을 보였다. 이는 화염 부상으로 증가된 혼합 성능 때문에 화염 기저가 당량비 근처의 활발한 반응 상태를 보임에 따라 높은 NO_x 배출 지수로 나타난 것으로 이해되었다.

후기

"이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 신진교수 사업 연구비(KRF-99-E00020-E1103)에 의하여 지원되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다."

참고문헌

(1) Y. C. Chao, T. Yuan and C. S. Tseng, 1996 "Effects of flame lifting and acoustic excitation on the reduction of NOx emissions", Combustion Science and Technology, Vol. 113-114, pp. 49~65

(2) Ph. Meunier, M. Costa and M.G.Carvlho, 1998, "On NOx emission from turbulent propane diffusion flame", Combustion and Flame, Vol.112, pp. 221-230

(3) O. Delabroy 外, 1996, "A study of NOx reduction by acoustic excitation in a liquid fueled burner", Combust. Sci. and Tech., Vol. 119, pp. 397-408

(4) T.F. Fric, 1993, "Effects of fuel-air unmixedness on NOx emissions", J. of Prop. and Power, Vol.9, pp. 708-713

(5) S. R. Turns and J. A. Lovett, 1989, "Measurements of oxides of nitrogen emissions from turbuletnt propane jet diffusion flames", Combustion Science and Technology, Vol. 66, pp. 233~249

(6) Smyth, K.C., Harrington, J.E., Pitts, W.M., 1993, "Greatly enhanced soot scattering in flickering CH_4/air diffusion flames", Combustion and Science, Vol. 95, pp. 229-239

(7) C. T. Bowman, 1992, "Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions : Technology driven by regulation", 24th Sym. (International) on Combustion, pp. 859~878