

## 유동장 자극이 화염의 질소산화물 배출에 미치는 영향 Effects of Flow Excitation on the Nitrogen Oxide Emission of a Non-Premixed Flame

이 기 만<sup>†</sup>

Kee-Man Lee<sup>†</sup>

전남도립남도대학 기계자동차과  
(2004. 4. 1. 접수/2004. 6. 1. 채택)

### 요 약

층류 비예혼합 분류 화염에서 다양한 주파수와 강도로 외부에서 유동장에 자극을 주었을 때 화염의 배출특성과 거동에 대해서 실험적으로 조사하였다. 먼저 일정한 관 공명 주파수에서 가진 강도를 가변시켜 난류화염 된 부상화염에서 질소산화물 배출 지수(EINO<sub>x</sub>)를 측정하였다. 또한, 가진 강도가 일정한 상태에서 주파수를 0 Hz에서 높은 주파수인 2 kHz까지 다양한 주파수 조건으로 가진을 한 경우에도 질소산화물의 배출지수를 측정하였다. 큰 가진 강도의 관공명 주파수로 가진된 경우 부상된 난류화염에서 NO<sub>x</sub> 배출 특성은 다음과 같이 크게 세 가지 형태의 특성을 보였다. Group I의 화염에서는 공간적인 섭동이 크며 비교적 화염길이가 길고 높은 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 보였으며 Group II에서는 상대적으로 짧은 길이와 좁은 폭의 화염거동에 낮은 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 보였다. Group III에서는 약간 긴 화염길이에 매우 큰 화염체적으로 상당한 높이까지 시·공간적으로 섭동이 큰 운동양태로 부상되는 거동과 가장 높은 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 보였다.

### ABSTRACT

The effects of external flow excitation with various frequencies and amplitudes on the flame behavior and pollution emission characteristics from a laminar jet flame are experimentally investigated. Measurements of NO<sub>x</sub> emission indices (EINO<sub>x</sub>), performed in vertical lifted flame like turbulent with various exciting amplitude at a constant resonance frequency, have been conducted. It was also conducted to investigate the effects of excited frequency at a constant exciting amplitude on NO<sub>x</sub> emissions with a various frequency ranged 0 Hz to 2 kHz. From the vertical lifted turbulent flame of the excited jet with resonance frequency by strong excitation was shown that the dependence of NO<sub>x</sub> emission could be categorized into three groups : Group I of long flame length with high disturbances yielding high NO<sub>x</sub> emission, Group II of intermediate flame length and relative narrow flame volume with low disturbance yielding low NO<sub>x</sub> emission and Group III of long flame length and large flame volume with high time & space disturbances behaviour yielding high NO<sub>x</sub> emission.

**Keywords :** Flow excitation, EINO<sub>x</sub>, Resonance frequency, Excited amplitude, Lifted flame

### 1. 서 론

가연 물질의 화염에서 발생하는 유해 배출물 중 인체에 치명적인 질소산화물(NO<sub>x</sub>)을 줄이기 위한 저 NO<sub>x</sub> 연소기법은 안정적으로 연소될 수 있는 희박 상태의 예혼합 연소와 신속한 혼합 추진형 연소 기술이 효과

적인 것으로 알려져 있다. 이와 관련하여 다양한 연소 제어법이 개발되고 제안되어 왔으나 그 중 한 방법인 유동장 교란을 통한 진동연소 연구는 NO<sub>x</sub> 배출물이 오히려 증가된다는 보고<sup>4)</sup>도 있어 화염의 유해 배출물 특성과 관련해 논란의 여지가 남아있다.

한편 실용성 있게 NO<sub>x</sub> 배출을 억제하려면 현재 상용 연소기의 대부분이 비예혼합 분류 연소 구조이므로 이런 연소장을 모사할 수 있는 유동장에서 NO<sub>x</sub> 생성

<sup>†</sup> E-mail: kmlee@namdo.ac.kr

의 이해를 도모하여야만 할 것이다. 공기역학적으로 유동 교란은 분류의 자유 전단층에서 자연적으로 발생되는 주기적인 거대 와류 구조이거나 외부적인 진동(가진)에 의해 올 수 있다. 비예혼합 분류 화염에서 가진은 난류 강도에 변화를 주어 화염에서 시·공간적 교란이 발생된다.

공간적 교란은 유동장 섭동에 의해 연료와 산화제의 혼합이 촉진되어 예혼합적 성질이 유도됨으로써 NO<sub>x</sub> 배출억제에 유리해지는 개념이다. 분류 화염이 부상(lift-off)되도록 가진 강도(excited amplitude)를 증가시키면 거대 와동에 의해 연료가 분사 노즐로부터 화염 밑면에 도달하는 동안 주위 산화제와 빠르게 유입과 혼합이 이루어져 화염 기저(flame base)가 예혼합적 특성을 보이면서 NO<sub>x</sub>를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 부상에 따른 화염 안정화에도 도움을 주는 것으로 보고되고 있다. 특히 최근에 Chao 등<sup>1)</sup>은 비예혼합 부상 화염 연구에서 유동에 음향가진(acoustic excitation)을 준 결과 부상된 화염 밑면이 희박한 예혼합기로 형성되어 음향 가진법이 저 NO<sub>x</sub> 연소법으로 가능성을 보여주었다. 한편 가진에 의한 시간적 교란과 관련하여 Fric<sup>4)</sup>은 NO<sub>x</sub>, CO 등의 연소 배출물이 오히려 증가되는 것으로 보고하고 있어 NO<sub>x</sub> 배출에 영향을 미치는 가진 인자에 대한 조사가 요구되고 있다.

본 연구는 일반 분류화염에서 유동장 자극이 연소 배출물, 특히 NO<sub>x</sub> 배출에 미치는 영향을 파악하고자 가진 주 변수인 가진 강도와 주파수에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 실험적으로 조사하고자 한다.

## 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 5.5 mm 노즐형이며 연료는 상용 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)을 사용하였다. 주위류는 압축 공기로 균일한 속도장 생성을 위해 허니컴과 화인메쉬를 이용한 풍동형으로 제작되었다. 유동장 교란의 가진은 함수발생기(HP 9400), 증폭기(Inkel AX 5400)를 거쳐 내경 200 mm, 높이 160 mm의 원형 아크릴 통 중앙에 설치된 음향 스피커로 주게 된다.

### 2.2 연소배출물 샘플링과 분석계

Fig. 1은 본 실험에 사용된 장치 및 가스 샘플링과 분석계의 개략도를 나타낸 것이다. 본 연구는 화염에

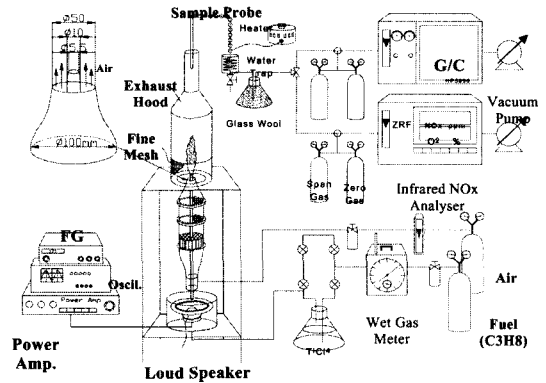


Fig. 1. Schematic of the experimental setup.

서 배출되는 전체적인 배출성능 파악이 주목적이므로 먼저 연소후 생성된 연소 배출물 채취에 편리한 배기덕트가 필요하다. 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  $\phi 40$  mm 관으로 교축하였다.

연소물의 채취는 이 관 안에서 이루어지는데 채취관의 위치는 NO<sub>x</sub> 측정시 요구되는 화염 높이의 두 배 이상이 되는 위치로 연소가 종료된 평균 농도를 측정할 수 있었으며  $\pm 5\%$  오차 범위의 값을 측정값으로 인정하였다.

연소물 배출가스는 채취관을 통해 채취되어 수분 제거기와 필터를 거쳐 가스 크로마토그래피와 질소산화물 분석기로 유입되어 분석된다. NO<sub>x</sub> 분석은 Non dispersive infrared type의 NO<sub>x</sub> 분석기(Fuji Electric Co., ZRF)로 20과 300 ppm의 NO span 가스로 교정하여 사용하였다. 연소 배출물 중 O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>는 가스 크로마토그래피(HP 5890)의 열전도 검출(TCD)기로 측정하여 다음과 같이 정의되는 NO<sub>x</sub> 배출 지수인 EINO<sub>x</sub>로 환산하는데 사용하였다. EINO<sub>x</sub>는 연료 1 kg을 태웠을 때 발생하는 NO<sub>x</sub> 발생량(gram)으로 연소 후 영역에서 NO<sub>x</sub>와 CO, CO<sub>2</sub>의 동시 측정으로 다음과 같은 식으로 정의된다.

연료에 포함되어 있는 모든 탄소가 CO<sub>2</sub>로 바뀐다고 가정하면

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

로 구할 수 있는데 여기서 MW는 분자량이며 괄호 안은 가스의 몰분율을, 3은 연료인 프로판에 탄소가 3개 들어 있는 것으로 프로판 1몰을 태우면 3몰의 CO<sub>2</sub>가 생성됨을 의미한다. 이러한 개념의 배출지수는 공기로 인한 희석 효과와 무관하게 되며 연소후 영역에서는 축 방향과 반경 방향 모두에서 일정한 값을 나타내는 장점이 있다.<sup>5)</sup>

한편 가진된 층류화염은 가진 강도가 어느 일정 이상에서는 부상되어 난류 화염화 되는데 이 영역에서 대표적인 화염들을 대상으로 NO<sub>x</sub>와 상관관계를 파악하고자 온도 특성을 파악해 보았다. 온도는 선경 25.4 μm의 R-type 열전대를 2차원 이송대에 장착하여 축 방향으로 5 mm, 반경방향으로 2 mm씩 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 720의 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 171 Hz로 고정하고 가진 강도를 서서히 증가시킴으로써 부착 화염에서 부상 화염을 거쳐 화염 날림이 발생하기까지 가변하였다. 또한 주파수 별 배출 특성을 파악하기 위해 가진 강도는 10 V<sub>P-P</sub>로 고정하고 주파수는 0~2 kHz까지 가변 하면서 측정하였다. 이상의 실험 조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental condition

Experimental variable	Amplitude	Frequency
Jet Reynolds No.	720	720
Jet Velocity, m/s	0.55	0.55
Co-flowing Vel. m/s	0.1	0.1
Excited Frequency, Hz	171(fix)	0~2 kHz
Excited Amplitude, V <sub>P-P</sub>	0~20	10(fix)
Measuring of Com. Concentration	NO <sub>x</sub> , CO CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub> , CO CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 안정화 선도

Fig. 2는 가진된 화염장에서 관찰된 서로 다른 부상 화염 경로를 갖는 2가지(A, B형) 유형의 화염 안정화

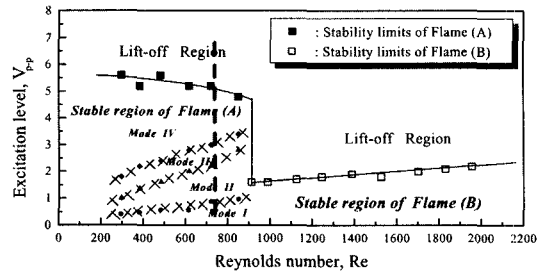


Fig. 2. Two kinds stability curve on lift-flame.

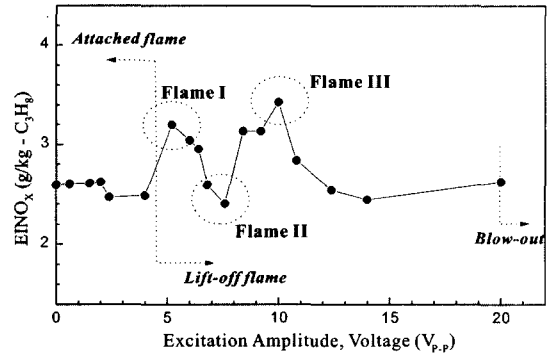


Fig. 3. Characteristics of NO<sub>x</sub> emission indices according to forcing amplitude.

선도를 나타낸 것이다. 보여진 “A”형 화염이 부상 전에 다양한 형태의 화염 거동을 보이다가 부상과 동시에 단염화 되어 전형적인 난류 화염의 부상 경로를 갖는 화염형태로 Reynolds 값이 720 분류(파선표시)가 본 연구의 주 대상 화염이다.

3.2 가진강도에 따른 배출특성

Fig. 3은 앞서 설명한 “A”형 화염으로 실험 조건은 Table 1의 좌측 항으로 가진 주파수를 분류관 공명 주파수인 171 Hz로 고정하고 가진 강도를 0 Volt에서 화염날림이 발생하기 전인 입력 신호 20 Volt까지로 증가시킨 경우의 NO<sub>x</sub> 농도를 배출 지수인 EINO<sub>x</sub>로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 부착 화염 구간에서는 부상되기 전 약간의 감소가 있으나 전반적으로 배출량 차이가 작음을 알 수 있다. 그런데 노출에 부착된 화염은 일정 가진 강도 이상에서 부상하여 난류화 되는데 부상하자마자 NO<sub>x</sub>가 급격히 증가됨을 알 수 있다(Flame I). 이렇게 증가된 값을 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 전까

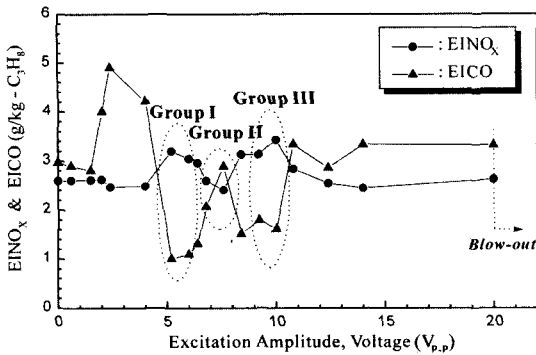


Fig. 4. Flame regime according to NO<sub>x</sub> indices.

지 감소하는 경향을 보이고 있다. 보이는 바와 같이 NO<sub>x</sub> 배출 경향이 부상 화염 영역과 부착 화염 영역에서 많은 차이를 보이고 있으며 비가진 화염보다 가진을 하면 대부분의 구간에서 NO<sub>x</sub>가 증가하고 있음을 알았다.

이러한 현상은 가진을 하면 주위류의 유입과 혼합이 증대되고 부상에 의해 화염 기저가 희박한 예혼합 상태가 되어 NO<sub>x</sub> 배출에 유리하게 된다는 기존의 연구와 차이를 보이는 현상이다.

Fig. 4는 동일한 조건에서 측정된 미연 생성물인 CO와 NO<sub>x</sub>를 동시에 나타낸 그림이다. 일반적으로 NO<sub>x</sub>는 다른 연소 배출물과 반대 성향의 배출 속성을 보이는데 본 그림에서도 NO<sub>x</sub>와 CO의 증가·감소 경향은 서로 반비례하고 있음을 알 수 있다. 한편 CO 배출량이 부착 화염 영역에서 최대값을 보이는데 이러한 현상은 이전 연구<sup>6)</sup>에서 설명한 화염 신장과 In-burning 화염 영역에서 나타나는 현상으로 이전 연구자들의 보고<sup>7)</sup>인 층류 화염에서 가진에 의한 불안정 상태에서 soot 증가 현상과 관련되어 보여진다. 이러한 원인에 대해서는 연구가 진행될 줄 않은 관계로 계속 진행하여 보고

하기로 한다.

이상, 가진된 층류 비예혼합 화염의 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 영역화 하면 NO<sub>x</sub> 배출 차이가 미약한 부착 화염 영역과 화염 날림 가까이로 반응률이 낮아 NO<sub>x</sub>가 감소되는 영역을 제외하면 부상화염 영역 안에서 크게 세 가지 영역인 Group I, II, III로 나눌 수 있었다.

Group I의 화염들은 일정 강도 이상으로 가진을 하면 부착화염에서 공간적으로 부상되어 난류화 된 화염으로 높은 NO<sub>x</sub> 배출과 낮은 CO 배출 특성을 보이고 있다. 특징으로 부상 높이는 짧으나 노즐에서 화염기저까지의 부상 공간에서 공간적으로 섭동이 크며 화염기저 약간의 청염을 제외하면 대부분이 휘염이며 가진에도 불구하고 부상화염에서 상대적으로 화염길이가 긴 거동을 하고 있다. Group II 화염은 비가진 화염보다 낮은 NO<sub>x</sub> 배출구간으로 CO 배출 성능에서도 별 차이를 보이지 않아 배출 성능이 양호한 영역이다. 그런데 이 경우의 화염은 Group I 화염보다 조금 더 부상되나 전체 화염 길이와 폭은 다른 두 영역(Group I, II)에 비해 짧고 좁은 형태를 취하고 있으며 비록 부상되었으나 상대적으로 공간적 섭동이 적어 부상소음(lift-noise)도 작은 특성을 보이고 있었다. Group III 화염들은 공간적으로 상당히 높은 곳까지 부상이 되며 시(時)·공간(空間)적으로 큰 섭동으로 인해 화염 기저에 청백색 화염이 상당히 넓게 분포하고 있어 부상소음도 가장 크며 화염 길이 뿐만 아니라 체적도 큰 화염 형태를 취하고 있다. 세 영역의 대표적인 화염들의 직접 사진을 Fig. 5에 나타내었다.

NO<sub>x</sub> 배출과 온도와의 상관관계를 알아보기 위해 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 1800 K 이하의 비교적 낮은 온도 분포를 하고 있다.

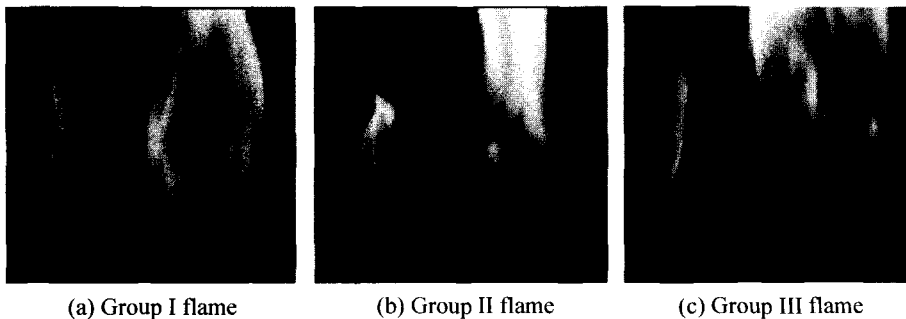


Fig. 5. Representative flame shapes with various flame regimes (left image : flame behaviour, right image : flame base).

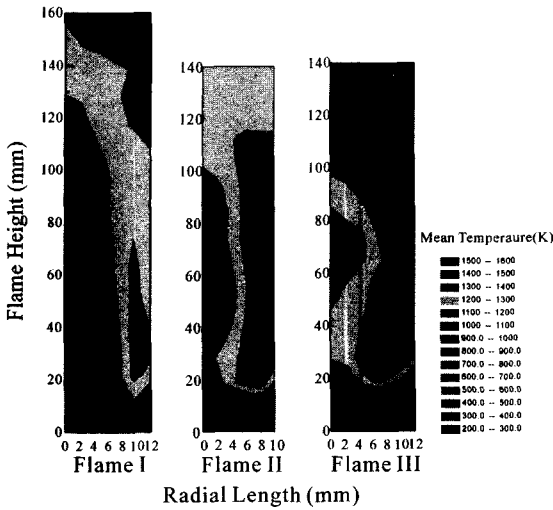


Fig. 6. Temperature contour of regimes.

일반적으로 분류 화염에서 배출되는 NO<sub>x</sub>는 대부분이 NO로 NO 생성 기구는 다음과 같이 네 가지로 알려져 있다. 즉, 1) 열적 NO 2) O나 OH로 인한 초과 평형기구 3) precursor로서 HCN 매체 기구 4) N<sub>2</sub>O 매체를 통한 3중체 결합 기구로 구분되며 열적 NO를 제외한 나머지 기구를 Prompt NO 기구라 한다. 이 중 열적 NO 기구는 온도에 지수 그리고 체제 시간과는 선형적인 함수 관계 등 온도와 체류 시간에 많은 영향을 받고 있다. 그런데 최대 화염 온도가 2000 K를 넘지 않으면 이러한 열적 NO 생성은 매우 느린 것으로 알려져 있다.<sup>8)</sup> 그 외 NO<sub>x</sub> 생성에 영향을 미치는 인자로는 화염 체적(길이)과 화염 스트레인 그리고 화염복사가 있다. 따라서 Fig. 6에서 나타난 온도 분포에서 대부분이 1800 K 이하의 분포를 하고 있어 생성된 NO<sub>x</sub>

의 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<sub>x</sub> 배출 지수도 적음을 알 수 있다. 특히 Group III의 화염은 온도 분포도에서도 알 수 있듯이 가진 강도 증가에 따른 혼합과 유입이 증가해 상당히 난류화되어 화염 기저 대부분이 당량비 근처의 활발한 반응 상태를 유지함으로써 다량의 NO<sub>x</sub>가 발생하는 것으로 사료된다. 이상의 결과를 분석해 보면 가진에 의한 종류 비에 혼합 화염장에서 배출 성능을 향상시키기 위해서는 적절한 가진 조건이 있음을 알 수 있다.

3.3 주파수에 따른 화염거동과 NO<sub>x</sub> 배출특성

Fig. 7은 가진 강도 10 Volt로 고정한 상태에서 주파수 변화에 따른 거시적인 화염 거동을 1/1000초 노출로 촬영한 직접 사진들로 Table 1의 우측 항에 해당되는 실험 조건이다.

먼저 저주파로 가진을 하면(~30 Hz) 화염은 가진된 주파수와 동일한 신호로 진동함을 열전대 신호의 FFT 주파수 분석으로 알았다. 또한 비가진 화염인 경우 부력에 의한 자연 진동수가 16 Hz로 측정되어  $f \approx 1.5/D_0^{1/2}$ 인 알려진 식에 본 실험에 사용된 분류 관경  $\phi 5.5$  mm로 계산한 20 Hz와 약간의 차이를 보였다. 관 공명 가진 특성인 171 Hz의 공명 주파수와 조화 주파수인 340, 510 Hz에서는 큰 폭의 가진 강도로 인해 화염이 부상(Fig. 8 참조, 3차 조화 주파수에서는 부차 화염이나 화염 내부의 와동 구조가 특이함)되었으며 나머지 화염들은 부상됨이 없이 노출에 부착된 상태이다. 특히 3차 조화 주파수 이후에서는 비가진 화염과 유사한 화

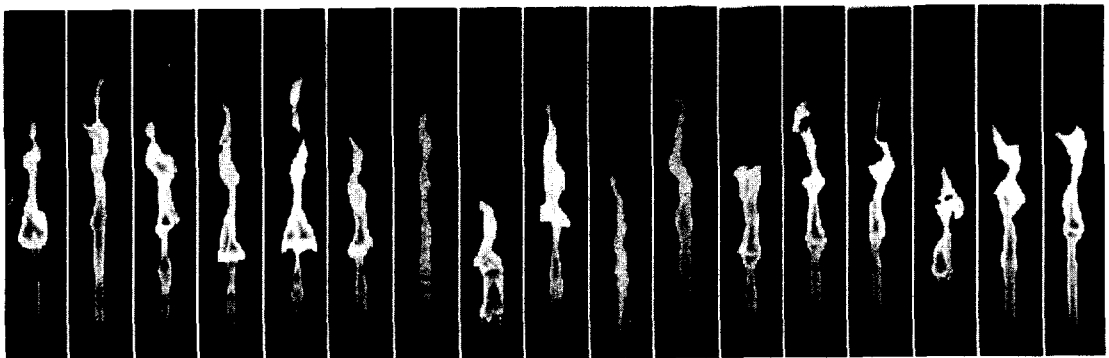


Fig. 7. Flame shapes according to forcing frequency increase at 10 volt amplitude (from left side, 0, 20, 30, 80, 110, 140, 160, 171, 200, 340, 400, 510, 700 Hz, 1, 1.42, 1.7, 2 kHz).

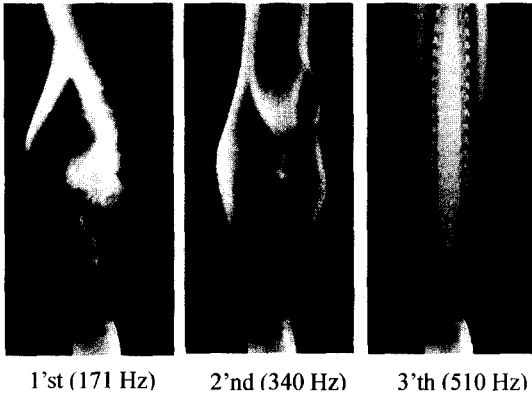


Fig. 8. Flame cross-cut images of a tube resonating frequency at 10 Voltage.

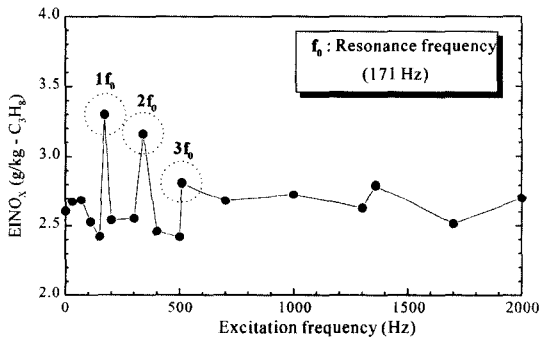


Fig. 9. Characteristics of NO<sub>x</sub> emission indices with various frequencies.

염이 2 kHz까지 보였으나 1.42 kHz에서는 노즐 하단으로 화염 선단이 내려앉을 정도로 화염 내부에 와동의 변화가 있으나 Mie 산란광 단면 가시화의 순간 노출 사진(1/4000초)에도 포착되지 않았다.

Fig. 9는 주파수 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 나타낸 그림이다. 앞에서 설명한 바와 같이 가진 주파수 증가에 따라 관 공명 주파수와 조화주파수로 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub>가 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. 3에

서도 관찰된 부상 전의 화염 신장 형상과 유사한 상태로 거동하고 있음이 조사되었다.

#### 4. 결 론

가진된 층류 비예혼합 분류 화염의 연소물 배출 성능과 관련하여 가진 변수인 주파수와 강도에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 특성이 다음과 같이 분석되었다.

1) 동일한 주파수에서 가진 강도에 따른 성능은 관 공명 특성상 일정 강도 이상에서는 큰 폭의 진동 발생으로 부상되어 난류 화염이 되므로 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 강도 조건이 존재함을 알 수가 있었다.

2) 가진 주파수에 따른 성능에서도 큰 폭의 가진 강도를 갖는 공명 및 조화 주파수에서 다른 화염보다 높은 NO<sub>x</sub> 배출 값을 보였다. 이는 화염 부상으로 증가된 혼합 성능 때문에 화염 기체가 당량비 근처의 활발한 반응 상태를 보임에 따라 높은 NO<sub>x</sub> 배출 지수로 나타난 것으로 이해되었다.

#### 참고문헌

1. Y. C. Chao, T. Yuan, and C. S. Tseng, "Effects of Flame Lifting and Acoustic Excitation on the Reduction of NO<sub>x</sub> Emissions", *Combustion Science and Technology*, Vol. 113-114, pp.49-65(1996).
2. Ph. Meunier, M. Costa, and M. G. Carvlho, "On NO<sub>x</sub> Emission from Turbulent Propane Diffusion Flame", *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp.221-230(1998).
3. O. Delabroy, "A Study of NO<sub>x</sub> Reduction by Acoustic Excitation in a Liquid Fueled Burner", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 119, pp.397-408(1996).
4. T. F. Fric, "Effects of Fuel-air Unmixedness on NO<sub>x</sub> Emissions", *J. of Prop. and Power*, Vol. 9, pp.708-713(1993).
5. S. R. Turns and J. A. Lovett, "Measurements of Oxides of Nitrogen Emissions from Turbulent Propane Jet Diffusion Flames", *Combustion Science and Technology*, Vol. 66, pp.233-249(1989).
6. K. M. Lee, S. K. Oh, and J. Park, "A Visual Investigation of Coherent Structure Behaviour under Tone-excited Laminar Non-premixed Jet Flame", *KSME(B)*, Vol. 27, No. 3, pp.275-285(2003).
7. K. C. Smyth, J. E. Harrington, and W. M. Pitts,

“Greatly Enhanced Soot Scattering in Flickering CH<sub>4</sub>/air Diffusion Flames”, Combustion and Science, Vol. 95, pp.229-239(1993).

8. C. T. Bowman, “Control of Combustion Generated

Nitrogen Oxide Emissions : Technology Driven by Regulation”, 24th Sym. (Int.) on Combustion, pp.859-878(1992).