

# 음파 가진을 이용한 확산 화염의 연소 배기와 화염 내부의 국소 NO 농도 변화 특성에 대한 실험적 연구

배상훈\* · 오상현\*\*

## Experimental study of the combustion emission of diffusion flame and local NO concentration change characteristics in the flame by acoustic excitation

Sang-hun Bae\* and Sang-heon Oh\*\*

**Key Words :** acoustic excitation(음향 가진), NO(질소 산화물), local NO(국소 질소 산화물), diffusion flame(확산화염)

### Abstract

The effects of acoustic excitation with various frequencies for combustion air as well as fuel on the combustion emission and local NO concentration in diffusion flame were investigated experimentally. It was studied to investigate the effects of combination between four frequencies for the fuel and various frequencies for the combustion air. The better characteristic for NO emission was revealed by acoustic exciting with frequencies for the air and the fuel excited at 0Hz and 120Hz and the generation of CO was decreased at low frequency for fuel and the excited combustion air. The amount of combustion emission could be controlled by acoustic exciting of the combustion air. And when both fuel and air are excited by some frequencies, the diffusion flame was affected by frequency which excited fuel in the middle of the flame and by air-exciting frequency at both sides of the flame. The local NO in the flame was generated much less at the condition that fuel was excited by frequencies than the condition was not.

### 1. 서론

연소의 결과로서 연소 생성물에 의한 대기오염, 더욱이 동식물체의 영향이 현재 전세계적으로 가장 큰 문제점으로 대두되었다. 적은 유해 가스 배기를 위하여 다양한 연소 제어법이 개발되고 제안되어 왔으나 이런 제어가 용이한 외부의 유동과 연소장에 인위적인 음파 가진에 대한 연구는 연소 배출 성능 향상과 관련하여 초기 단계로 아직도 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 상용되는 대부분의 연소기들은 비예혼합 분류, 즉 확산 화염 연소 구조이므로 이런 연소장을 모사하는 유동장에서 연구가 행해져야 한다. 확산 화염에서의 음파 가진은 난류 강도와 주위 유동장의 변화를 주어 화염에서 시간적 그리고 공간적으로 교란이 발생된다. 공간적인 변동은 유동장의 진동에 의해서

연료와 산화제와의 혼합이 촉진되어서 예혼합적 성질이 유도됨으로써 유해 배기가스, 특히 질소 산화물 배출 억제에 유리해 질 수 있다. 확산 화염에 음파를 가진하게 되면 여러 가지 변화를 쉽게 관찰할 수 있다. 형상면에서 화염의 형태가 얇아지고 길이가 수축되며 어느 특정 주파수에서는 부상하기도 한다. 최근 확산 화염에서 유동에 음향 가진을 준 결과 화염 밀면이 희박한 예혼합기를 형성하여 음파 가진법이 효과적인 저질소산화물 연소법으로 보고하고 있다. 현 연구의 목적은 기존의 연료에만 음파 가진을 하여 연구한 것에 비해 주위 연소 공기에 직접 유동장 진동을 위하여 음파를 가진함으로써 기존의 연구들과 비교를 하기 위함이다. 그리고 연료와 연소 공기에 동시에 음파를 가진하여 그 주파수가 화염의 구조와 그 배출물에 어떠한 영향을 주는가를 밝히기 위함이다.

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학과

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 연소기 및 음파 가진계

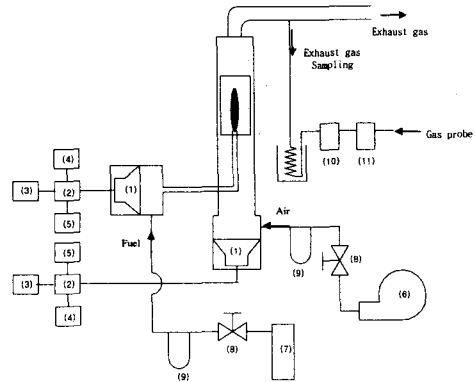
본 실험에 사용된 연소기는 축 대칭 확산 화염을 얻기 위해 가운데 파이프 형태의 원형 분류관이 있고 주위 연소 공기의 음파 가진 영향을 실험하기 위하여 밀폐시킨 일반적인 동축류 연소기로 제작하였다. 연료 분류관은 총길이 1390 mm, 외경 13.8 mm, 내경 10.5 mm인 스테인레스 파이프를 사용하였다. 화염의 가시화를 위해서 가시부는 양편 모두 두께가 5 mm인 강화 유리를 사용하였다. 연료의 균일한 속도장과 화염의 역화 방지를 위하여 적당한 길이의 하나킴을 통해 정류 시킨 후 분출구를 통해서 연료를 분출 시켰다. 그리고 연소시 화염의 안정을 목적으로 다공 보염기를 분류관 상단에 부착하였다. 연료는 상용 프로판( $C_3H_8$ )을 사용하였으며 연료와 공기의 유량은 각각 가스 유량계와 층류 유량계(LEF-2—LM)로 보정된 오리피스에 의한 마노메타 눈금 조절로 사용하였다. 그리고 주위 연소 공기는 1 마력의 브로워에 의해서 공급하였다.

음파의 주기적인 여기를 발생시키기 위하여 사용된 스피커는 최대 출력이 100W, 저항은  $8\Omega$ 이고, 직경은 220 mm이다. 음파에 의한 주기적 여기는 함수 발생기(FG-1881)에서 만들어진 삼각함수 파형을 스피커로 입력시켜 얻었으며, 이때 함수 발생기에서 만들어진 삼각함수 파형의 출력은 본 실험에 적용하기에 약하기 때문에 필요 출력을 얻기 위해서 증폭기(Megatone, Model KC-60M)를 사용하였고, 증폭기를 거친 신호가 정확하게 스피커로 보내지는 것을 확인하기 위하여 디지털 멀티미터(EDM-4750)로 진폭을 제어하고 오실로스코프를 통하여 그 파형과 진폭 및 주파수를 체크 하였다. 평균 온도는 직경 0.3 mm, 재질 Pt/Pt-Rh 13%의 R형 수냉식 열전대를 사용하여 축 중심에서 반경 방향으로 2 mm씩 이동시켜 측정하였다. 열전대에서 발생한 기전력의 신호는 온도 측정기를 통하여 수치로 즉시 확인하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

### 2.2 연소 배기가스 및 화염 내부의 국소 NO 농도 측정계

연소기에서 발생하는 배기가스의 농도 측정을 위하여 연소기의 상단부에 연결된 배기관으로부터 배기가스를 추출하여 1 차적으로 배기가스 내의 수분을 제거, 2 차적으로 필터를 통한 후 가스 분석기(COSA 6000)로 보내어 지도록 하였다. 그리고 화염내의 NO 농도를 측정하기 위해 프루브의 과열

을 막기 위해 물로서 냉각하는 수냉식 스테인레스 샘플링 프루브를 사용하였다. 화염 내부에서 채취된 가스 중에는 Soot, 수분, 그리고 다 타지 않은 연료들이 함께 존재하고 있다. 따라서 이러한 것들을 와이어거즈, 솜유리를 통하여 일차적으로 제거하고 필터를 통하여 순차적으로 제거 후 가스 분석기(Nova Model 312B)로 보내어 지도록 하였다.



1. Loudspeaker 2. Amplifier 3. Function generator  
4. Oscilloscope 5. Digital multimeter  
6. Blower 7. Fuel tank 8. Valve 9. Manometer  
10. Vacuum pump 11. Flow meter

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

### 2.3 실험 조건

본 연구에 사용된 연료와 주위 연소 공기의 속도는 각각 0.8m/s, 0.2m/s 이고 연료에는 음파를 가진하지 않은 경우와 우세한 특성을 나타내는 3 가지 주파수로 가진을 하였으며 주위 연소 공기에는 280Hz 까지의 주파수로 가진하였다. 그리고 연료에는 가진 강도 6Volt, 공기에는 7Volt 로 각각 가진을 하였다. 이상의 실험 조건을 표 1 에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Flames		A	B	C	D
Frequency (Hz)	Fuel (6 Volt)	0	40	120	180
	Air (7 Volt)	0 ~ 280			

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 가진 주파수에 따른 NO와 CO 배출 특성

Fig. 2은 본 화염에 연료와 주위 연소 공기에 음파를 가진하여 이에 따른 NO의 배기량을 주파수를 가진 하지 않았을 때의 배기량에 대하여 무차원수로 나타낸 것이다. 연료에는 주파수를 가진

하지 않은 조건 A 와 120Hz 를 가진을 시켜 두고 주위 공기에 주파수를 변화시킨 조건 C 는 서로 비슷한 경향을 보여 주고 있다. 전체 NO 배기량은 주위 공기에 가진된 주파수 50Hz 에서 감소하다 다시 상승하고 100Hz 에서 200Hz 사이에서 다시 감소하여 이 구간에서는 NO 가 연료와 공기 어디에도 가진하지 않은 경우보다 NO 가 적게 배출되고 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 200Hz 이상에서는 NO 배기량이 증가되고 있음을 알 수 있다. 하지만 연료에 주파수 40 Hz 와 180 Hz 로 가진 시키고 주위 공기 유동에 음파를 가진한 조건 B 와 D 에서는 100 Hz 이하에서는 NO 가 적게 배출되지만 그 이상의 주파수에는 가진하지 않은 화염보다 더 많은 NO 를 배출하는 경향을 보여 준다. 이러한 현상은 조건 A 와 조건 C 는 전체적으로 연료에 주위 공기가 다른 조건보다 유입과 혼합이 증대되어 NO 배출에 유리하게 되는 것으로 사려 된다.

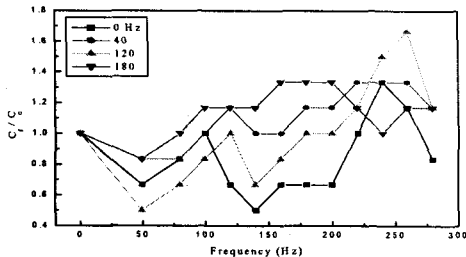


Fig. 2 NO emission with various frequencies exciting fuel and air

Fig. 3 는 동일한 조건에서 측정한 CO 배출 특성을 나타낸 그림이다. CO 의 경우에는 조건 D 를 제외하고는 50Hz 와 250Hz 주위에서 전체 CO 배기량이 적게 나타나고 있다. 그리고 조건 A 와 조건 B, 즉 가진 하지 않은 경우와 얇고 안정해진 화염에서는 그림에서 보는 바와 같이 전체 경향이 삼각함수 모양의 서로 비슷한 경향을 보여 주고 있다. 수치적으로 볼 경우 연료에 주파수를 가진 하지 않은 경우가 주파수를 가진했을 경우보다 CO 의 배출은 전체적으로 적게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 조건 D 의 부상 화염에서는 주위 연소 공기 유동에 음파를 변화가진 시켰을 경우에는 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 일반적으로 질소 산화물 생성물은 CO 연소 배출물과 반대 성향의 특성을 보이는데 Fig. 2 과 Fig. 3 에서와 같이 NO 와 CO 의 증가 감소 경향은 서로 반대되고 있음을 알 수 있다.

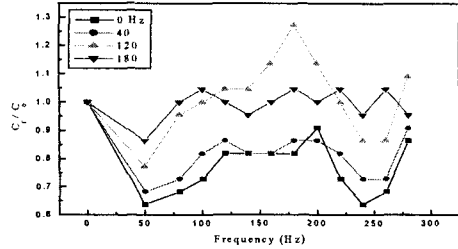


Fig. 3 CO emission with various frequencies exciting fuel and air

### 3.2 화염 내부의 국소 NO 생성 특성

#### 3.2.1 평균 온도와 국소 NO 생성과의 관계

Fig. 4 과 Fig. 5 는 각각 조건 C 에서의 주위 연소 공기에 가진된 주파수별 반경방향의 평균온도 분포와 화염 내부의 국소 NO 생성량을 그림으로 나타낸 것이다. 질소 산화물 NO 는 열적 생성 기구, Prompt 생성기구, 그밖에 여러 가지 생성 기구에 의해서 생성된다고 알려져 있다. 두 그림에서 거의 모든 가진된 주파수에서 축 중심에서 반경방향 4 mm에서 평균온도 뿐만 아니라 NO 도 가장 높게 나타나고 전체적인 경향이 비슷하다. 이것은 화염 내에서 생성된 NO 는 열적 생성 기구를 따르고 있음을 짐작할 수 있다. 하지만 가진된 주파수에 의한 영향을 볼 때 온도가 높다고 해서 NO 가 많이 생성되고 있지는 않다. 예를 들어 50Hz 의 경우 평균 온도는 반경 방향으로 낮게 분포되어 있는 반면에 NO 는 다른 가진 주파수들보다 아주 높게 나타나고 있다. 그리고 240Hz 에서는 50Hz 경우와는 반대로 평균 온도는 높은 반면에 NO 농도는 낮은 경향을 보이고 있다. 이는 모든 주파수에서 질소 산화물 열적 생성 기구를 따르는 것이 아니라 열적 생성 기구 외에 다른 생성 기구에 의함이란 것을 알 수 있다. 조건 C 와 마찬가지로 다른 조건들에서도 앞에서 설명한 것과 유사한 경향을 보였다.

#### 3.2.2 가진 주파수 변화에 따른 화염 내부의 국소 NO 생성 특성

Fig. 6 은 화염의 축 방향 50 mm 단면에서의 국소 NO 농도를 반경 방향에 따라 주파수 가진시 NO 의 농도 변화를 나타낸 것이다. 연료에 주파수를 가진하지 않고 주위 유동 공기에만 가진한 조건 A 는 축 중심 방향에서 반경 방향으로 멀어 질수록 국소 NO 가 적게 나타나고 있다. 주위 연소 공기에 가진된 주파수에 따라서 NO 의 발생량을 나타낸 그래프가 삼각함수의 형태를 나타내고 있다.

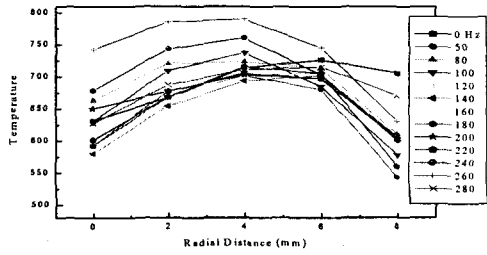


Fig. 4 Radial distribution of mean temperature for the flame with 120Hz exciting fuel

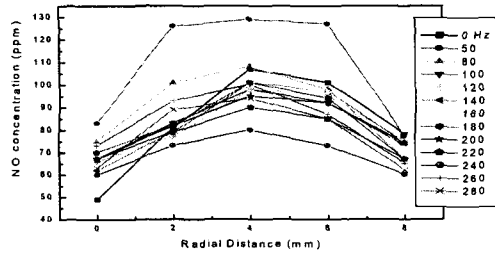
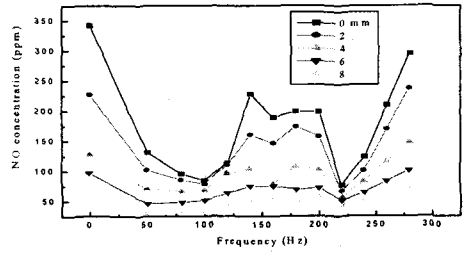
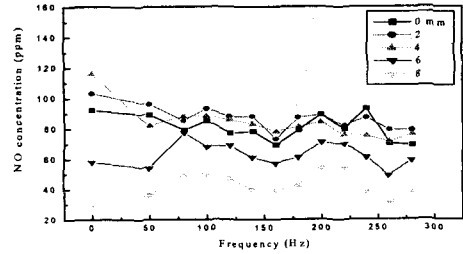


Fig. 5 Radial distribution of NO for the flame with 120Hz exciting fuel

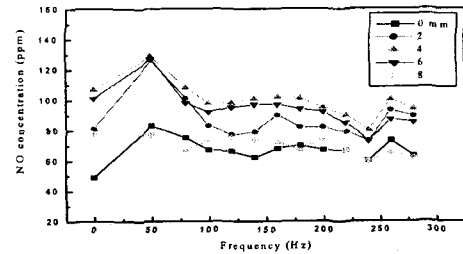
이것으로 주위 연소 공기에 가진되는 주파수에 따라서 화염 내부의 연소 생성물을 조절할 수가 있다. 비가진시에 비해 주파수 40, 120, 180Hz 를 연료에 가진한 조건들에는 축 중심에서 4 그리고 6 mm로 갈수록 더 많은 NO 가 생성되고 있다. 이것은 앞에서도 언급했듯이 연료에 주파수를 가진을 함으로써 화염의 형상을 변화를 시켰다. 그로 인하여 연료와 공기가 혼합이 되어 반응이 가장 활발한 화염대의 위치가 바뀌었고 질소 산화물의 생성은 온도에 영향을 받기 때문에 이러한 경향이 나타난 것으로 사려된다. 그리고 연료에 주파수를 가진하는 경우들에서 40Hz 가진한 화염에는 축 중심 근처에서는 연료에 가진된 주파수에 영향을 받아 NO 가 발생하고 있으며 바깥쪽으로 갈수록 연료에 가진된 주파수보다는 주위 연소 공기에 가진된 주파수에 많은 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 하지만 120Hz 와 180Hz 를 연료에 가진해 준 경우에는 그 주파수의 영향이 아주 미세하여 주위 공기에 가진된 주파수의 영향은 많지 않은 것으로 나타나 있다. 또 두 조건 모두에서 공기에 가진된 주파수 50Hz 에서 NO 의 수치가 가장 높게 나타나고 있다. 그리고 조건 D 에서는 다른 조건과는 달리 반경방향 10 mm에서도 측정을 하였다. 이것은 연료에 음파 가진시 조건 D 에서는 화염의 폭이 다른 조건의 화염보다 넓어졌기 때문이다.



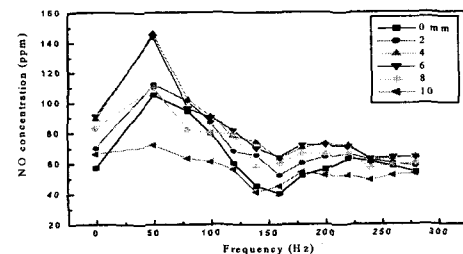
(a) Condition A



(b) Condition B



(c) Condition C



(d) Condition D

Fig. 6 Local NO concentration in the flame

Fig. 7 는 연료에 주파수를 가진 하지 않은 경우에 대한 주파수를 가진한 경우를 무차원수로 나타내어 각 조건의 국소 NO 의 생성량을 비교한 그림이다. 모든 조건에서 음파를 가진하지 않은 조건 A 보다 NO 가 적게 생성되었다. 이것으로 단순

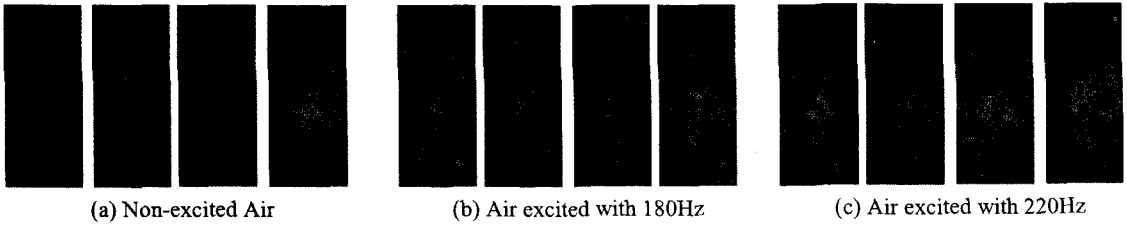


Fig. 9 Schlieren photographs of the flame whose the fuel excited with 0, 40, 120 and 180Hz

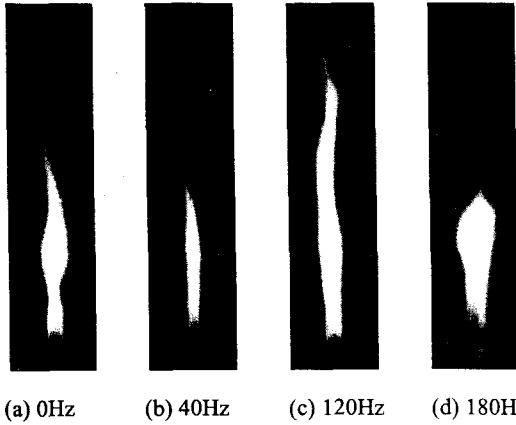


Fig. 8 Direct photographs of the flame with non-excited air

히 주위 연소 공기에만 음파를 가진하는 경우보다는 연료에도 주파수를 가진 하게 되면 화염 내의 NO를 좀더 줄일 수 있다고 사려된다.

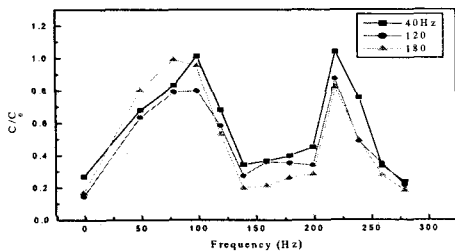


Fig. 7 The comparison of local NO concentration in the flame between non-fuel excited and fuel excited flame

### 3.3 주파수 변화에 따른 화염의 형상 변화

Fig. 8 은 주위 연소 공기에는 음파를 가진하지 않고 연료에만 각각 0, 40, 120 그리고 180Hz 을 가진하여 거시적인 화염의 형상 변화를 스틸 카메라를 이용하여 촬영한 직접 사진이다. 40Hz 를 연료에 가한 경우는 음파를 가진하지 않은 화염보다 화염 길이가 짧아지고 형태가 얇아짐을 볼 수가 있다. 120Hz 를 주었을 경우 (c)는 길이가 더욱 커

지고 굉장한 난류 확산 화염의 형태를 보였다. 반면, 180Hz 를 가진한 경우 (d)는 화염의 형상이 두꺼워졌으며 노즐 선단으로부터 부상되었다.

Fig. 9 는 연료에 음파를 가진하면서 주위 연소 공기에 각각 0, 180, 220Hz 의 음파를 가진한 화염의 슈리렌 사진을 보여주고 있다. 가진하지 않은 화염보다는 180Hz 를 가진한 화염이 더 많은 와를 형성하고 있고, 그리고 그보다는 220Hz 를 가진한 화염의 슈리렌 사진에서는 완전한 난류화염의 형태를 관찰할 수 있다.

## 4. 결론

확산 화염에서 연료와 주위 연소를 위한 공기에 각각 그리고 동시에 삼각함수 형태의 일정 범위 주파수를 가진하여 전체 연소 배출물, 즉 NO 와 CO 의 배출 특성과 화염 내부의 국소 NO 농도 특성이 다음과 같이 분석되었다.

(1) 주위 연소 공기에 음파를 가진시키고, 연료에는 음파를 가진하지 않은 경우와 120Hz 를 가진한 경우 연료와 주위 연소 공기의 유입과 혼합이 촉진되어 NO 배출에 유리한 특성을 보였다. 연료에 40Hz, 180Hz 를 가진시킨 조건에서는 전체적으로 NO 가 더 많이 생성되었다. CO 의 경우 연료에 아주 작은 저주파의 음파를 가진하고 주위 연소 공기에 음파를 가진함으로써 CO 의 생성을 억제할 수가 있다.

(2) 화염 내부의 국소 NO 의 생성은 전체적으로 축 중심에서 반경 방향의 4 mm에서 온도와 마찬가지로 가장 높게 나타나는 경향을 보이고 있고 각각의 주파수별로 볼 때 도 거의 비슷한 특성을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에 사용된 확산 화염에서는 국소 NO 가 열적 생성 기구를 따라 생성되고 있다는 것을 보여 준다.

(3) 주위 연소 공기에 음파를 가진함으로써 화염 내부의 연소 생성물을 조절할 수 있었다. 연료에 음파를 가진함으로써 국소 NO 농도의 최고치

가 비가진시에 비해 축 중심에서 반경방향 4, 6 mm로 옮겨졌다. 이것은 음파 가진에 의해서 화염의 형상이 변화하여 반응이 활발한 화염대도 바뀌었다는 사실과 온도에 영향을 받는 질소 산화물이 화염대에서 많이 발생함을 알 수 있다.

(4) 연료에 저주파를 가진할 경우에는 축 중심에는 연료에 가진된 음파에 영향을 받고 바깥쪽으로 갈수록 주위 연소 공기에 가진된 음파의 영향을 받지만, 좀더 큰 주파수를 가진시켰 경우에는 연료 유동의 난류 강도를 증가하여 주위 공기에 가진된 음파보다는 연료에 직접 가진된 음파의 영향을 많이 받았다.

(5) 연료에 음파를 가진 하지 않은 조건에 비해 가진을 한 모든 조건들에서 화염 내부의 국소 NO가 적게 생성되었다. 연료에 음파를 가진함으로써 화염 내의 질소산화물의 생성을 줄일 수 있다.

### 참고문헌

- (1) Kim, T.K. and Shin, H.D., 1993, "Mixing mechanism near the nozzle exit in a tone excited non-premixed jet flame" *Combust. Sci. and Tech*, Vol. 89, pp.83-100
- (2) H.Yoshida and M.Saito, 2001, "Super-mixing combustion enhanced by resonance between micro-shear and acoustic excitation" *International Journal of Heat and Fluid Flow* 22, pp. 372-379
- (3) C. Poppe, S. Sivasegaram and J. H. Whitelaw, 1998, "Control of NO<sub>x</sub> emissions in confined flames by oscillations", *Combustion and flame* 113, pp. 13-26
- (4) Oh, S. K. and Shin, H. D., 1998, "Visualization study on the effect of forcing amplitude on tone-excited isothermal jets and jet diffusion flames", *International Journal of Energy Research*, 22, pp. 343-354
- (5) O. Delabroy and S. Candel, 1996, "Nitrogen oxides(NO<sub>x</sub>) emission control in al liquid fuel diffusion flame using acoustic excitation", *Rev Gen Therm*, 35, pp. 475-489
- (6) Lee and Oh, 2001, "Effects of acoustic excitation on the combustion emission characteristics of a non-premixed flame" *KSME*, pp. 878-883
- (7) Kinsler, L.E., "Fundamentals of acoustics, 3<sup>rd</sup> ed.", John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 200-224
- (8) Lee, B. H., 1999, "음향학 I", ㈜민음사, pp. 189-193
- (9) Choi, J. W., 1997, "연소공학", 원창출판사, pp. 157-173