

# 부상된 수소난류확산화염에서 동축공기의 음향가진에 의한 NOx 저감

허필원\* · 오정석\* · 윤영빈\*\*†

## NOx Reduction by Acoustic Excitation on Coaxial Air Stream in Lifted Turbulent Hydrogen Non-Premixed Flame

Pilwon Heo, Jeongseog Oh, and Youngbin Yoon

### ABSTRACT

The effects of acoustic excitation of coaxial air on mixing enhancement and reduction of nitrogen oxides (NOx) emission were investigated. A compression driver was attached to the coaxial air supply tube to impose excitation. Measurements of NOx emission with frequency sweeping were performed to observe the trend of NOx emission according to the fuel and air flow conditions and to inquire about the effective excitation frequency for reducing NOx. Then, Schlieren photographs were taken to visualize the flow field and to study the effect of excitation. In addition, phase-locked particle image velocimetry (PIV) was performed to acquire velocity field for each case and to investigate the effect of vortices more clearly. Direct photographs and OH chemiluminescence photographs were taken to study the variation of flame length and reaction zone. It was found that acoustic forcing frequencies close to the resonance frequencies of coaxial air supply tube could reduce NOx emission. This NOx reduction was influenced by mixing enhancement due to large-scale vortices formed by fluctuation of coaxial air jet velocity.

**Key Words** : NOx emission, acoustic excitation, hydrogen lifted flame

### 기 호 설 명

Alphabets		Subscripts	
$c$	Speed of sound	F	Fuel
$f_R$	Resonance frequency	A	Coaxial air
$l$	Length of air column	$\infty$	Coflow air
NOx	Nitrogen oxides	$n$	Resonance mode number
$u$	Velocity at nozzle exit		

### 1. 서 론

확산화염은 예혼합화염에 비해 비교적 안전하기 때문에 널리 사용된다. 그러나 확산화염의 경

우 국소당량비의 공간 분포가 균일하지 않아서, 이론당량비에 근접한 지역에서의 높은 연소 온도로 인해 질소산화물(NOx)이 다량 발생할 수 있다.

그러나 강화되고 있는 NOx 배출량 규제에 따라 연소 기술이 발전되어 왔으며, 여러 연구자들에 의해 지속적으로 연구가 이루어지고 있다.

한편, 외부에서의 가진에 의한 연소 향상에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔는데, Chao와

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처, ybyoon@snu.ac.kr

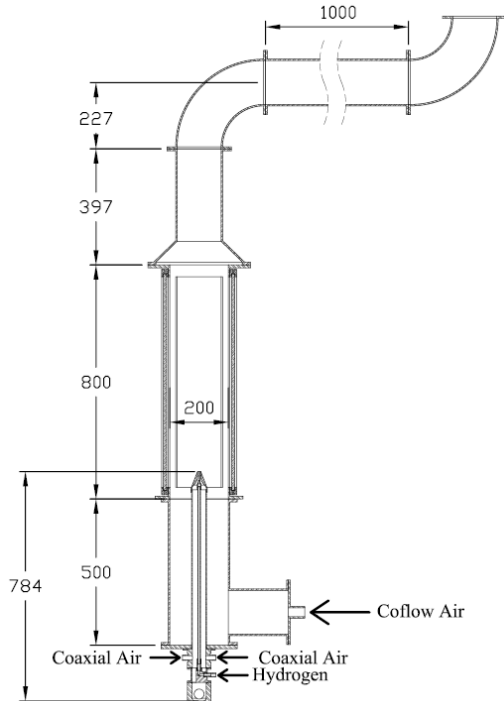


Fig. 1 연소기 형상

Jeng [1] 은 부상화염에 음향 가진을 줌으로써 와류 형성에 의해 화염의 부상 높이가 낮아지는 현상을 관찰하였고, Chao 등 [2] 은 부분 예혼합 화염을 사용하여 화염의 부상과 음향 가진에 의해 NO<sub>x</sub> 발생량을 크게 감소시킬 수 있음을 밝혔다. Poppe 등 [3] 도 적절한 음향 가진으로 NO<sub>x</sub> 발생을 억제할 수 있음을 보인 바 있으며, Chao 등 [4] 은 이전 연구에 이어서 확산화염과 부분 예혼합 화염을 이용하여 음향 가진과 동축공기의 사용에 의한 효과를 연구하였다.

음향 가진 외에 다른 방식의 가진을 주는 방법을 사용한 연구도 이루어졌다. Kurimoto 등 [5] 은 마이크로 액추에이터를 동축공기 노즐 안쪽에 부착하여 가진을 주는 연구를 수행한 바 있다.

본 연구의 목적은 부상된 확산화염의 NO<sub>x</sub> 발생량을 감소시키는 적절한 동축공기 가진 주파수 조건을 찾고 이러한 효과에 영향을 미치는 와류의 영향을 규명하는 것이다.

이를 위해 몇 가지의 유동 조건을 선정하여 음향 가진 주파수의 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 발생량을 측정하였다. 그리고 특정 주파수의 가진이 이루어질 때 나타나는 현상을 Schlieren 촬영 기법과 phase-locked PIV, 직접 사진 촬영 및 OH 자발광 측정 등의 다양한 방법으로 관찰하여 NO<sub>x</sub> 발생량을 감소시키는 작용을 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 음향 가진 실험 장치

본 연구에 사용된 연소기의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 연소가 이루어지는 공간은 한 변의 길이가 200 mm인 정방형 단면에 높이가 800 mm인 육면체이다. 한편, 전체적인 당량비를 0.5로 유지하기 위해 공급해주는 주위류( $u_{\infty}$ , coflow air)는 유리구슬과 허니컴 판을 통과하면서 균일화되도록 하였다.

노즐은 동축공기가 노즐 출구에서 수소와 평행한 유동을 이루도록 제작하였으며, 중앙의 수소 노즐은 내경 3.62 mm, 외경 4.10 mm이고 외측의 동축공기 노즐의 내경은 14.7 mm이었다.

음향 가진을 줄 수 있도록 동축공기 공급관 하단에 스피커 (삼미스피커, SU-100EF)를 부착하였으며, 질소산화물 발생 수준 측정에는 NO<sub>x</sub> 분석기 (Horiba, MEXA-720NO<sub>x</sub>)를 사용하였다.

가진신호는 컨트롤러 (National Instruments, cRIO-9014)에서 구동되는 LabVIEW 프로그램에서 발생하여 오디오용 증폭기 (Alesis, RA-150)를 통해 스피커에 공급되었다.

#### 2.1.2 Schlieren 촬영 장치

부상화염 밑단 부근에서의 유동 관찰을 위해 Schlieren 촬영 기법을 사용하였다. 제논 램프 광원과 함께 직경 300 mm, 초점거리 3000 mm의 오목거울 2개를 사용하였으며, 고속 카메라 (Photron, FASTCAM-APX 120KC)를 이용하여 촬영하였다.

#### 2.1.3 Phase-Locked PIV 측정 장치

컨트롤러에서 스피커의 가진 신호 위상에 동기화되어 출력되는 트리거 신호는 delay generator (Stanford Research systems, DG535)에서 적절한 시간 지연이 추가되어 2 대의 Nd-YAG 레이저 (Spectra-Physics, GCR-170; Continuum, Surelite I)와 CCD 카메라 (Kodak, Megaplug ES 1.0)에 공급되었다. 또한 동축공기에 이산화규소 입자가 균일하게 섞이도록 입자 공급기를 사용하였다.

#### 2.1.4 직접사진촬영 및 OH 자발광 측정 장치

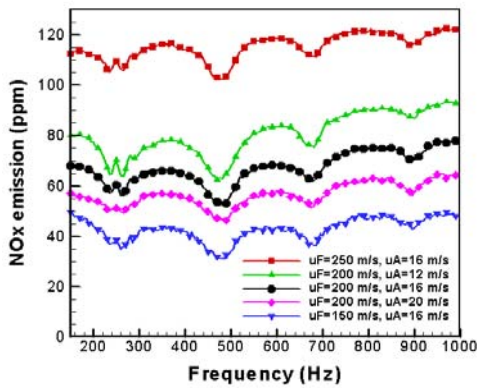


Fig. 2 가진 주파수에 따른 NOx 발생량

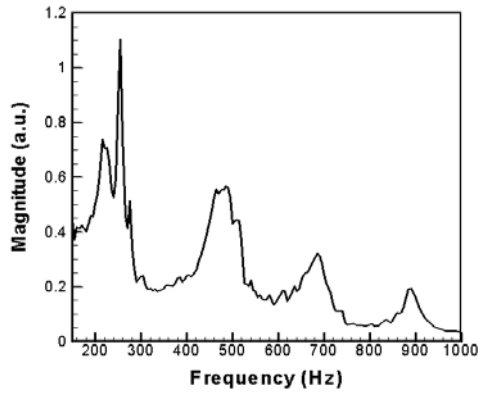


Fig. 3 동축공기 노즐에서의 주파수 응답

화염의 가시광선 사진 촬영을 위해 DSLR 카메라 (Canon, EOS-20D)를 사용하였고, ICCD 카메라 (Princeton Instruments, PI-MAX: 1K)로는 OH 자발광을 측정하였다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 가진 주파수에 따른 NOx 측정

수소와 동축공기의 속도에 따라 구분한 5가지 조건에 대해, 가진 주파수에 따른 NOx 발생량 측정을 수행하였다. 각각의 조건은 모두 음향 가진이 없는 상황에서 화염이 부상된 조건으로, 실험에 적용한 조건을 Table 1에 나타내었다. 기준 유동 조건은  $u_F=200$  m/s,  $u_A=16$  m/s이다.

가진 주파수는 150 Hz부터 1000 Hz까지 5 Hz 단위로 변경하며 실험을 실시하였으며, 주파수를 변경할 때마다 스피커에 공급되는 전압을 조절하여 스피커 자체의 출력이 일정한 particle displacement를 유지하도록 하였다.

Particle displacement는 스피커에 의한 가진이 주어질 때 공기분자가 이동하는 거리를 의미한다. 한편, 스피커에 의해 이동하는 공기 입자의 변위는 주파수가 변하여도 일정하지만, 노즐 출구를 통과할 때에는 공기 공급관의 형상에 따른 공진주파수 특성이 반영되기 때문에 주파수별로

다른 섭동량을 가질 수 있다.

가진 기준 주파수는 150 Hz로 설정하였고, 이때의 스피커 입력 전압은 8 V<sub>rms</sub>이다. 다른 주파수에서의 입력 전압은 기 측정된 스피커의 주파수 응답 자료를 근거로 산출하였다.

### 2.2.2 가진에 의한 효과의 가시화

기준 유동 조건에 대해 3가지 조건의 Schlieren 촬영을 하였다. 이 3가지 조건은 각각 음향 가진이 없을 때, NOx 저감 효과가 큰 주파수로 가진할 때, NOx 저감 효과가 작은 주파수로 가진할 때이다. 각각에 대해 고속카메라로 화염 밀단 부근을 초당 6000 프레임으로 촬영하였다.

그리고 기준 유동 조건에서 phase-locked PIV를 사용하여 가진 주파수의 차이에 따라 다르게 나타나는 속도장과 와류를 비교하였다. 이 때, 한 주기를 4개의 위상으로 분할하여 각각의 위상에 대한 속도장을 구하였다.

또한 Table 1의 5가지 유동 조건에 대해 각각 음향 가진이 없을 때, NOx 저감 효과가 큰 주파수로 가진할 때, NOx 저감 효과가 작은 주파수로 가진할 때의 가시광선 사진과 OH 자발광을 촬영하여 조건별로 화염의 길이와 반응 영역의 두께를 비교하였다. 한편 OH 자발광은 Abel inversion [6] 수행을 통해 단면에서의 반응 영역 양상을 확인하였다.

Table 1 가진 주파수별 NOx 발생량 측정 조건

$u_F$	$u_A$		
	12 m/s	16 m/s	20 m/s
150 m/s		●	
200 m/s	●	●	●
250 m/s		●	

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 가진 주파수에 따른 NOx 발생량

5가지 유동 조건에 대한 음향 가진 실험 결과

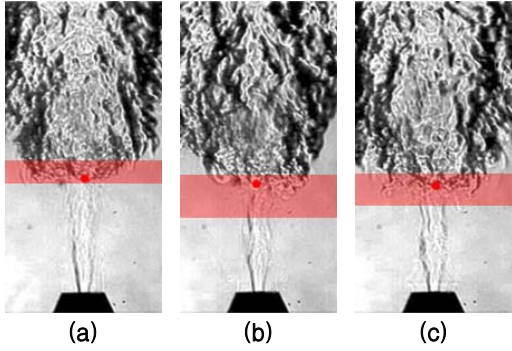


Fig. 4 화염 부상 높이 변화; (a) 가진 없음, (b) 490 Hz, (c) 340 Hz

를 Fig. 2에 나타내었다. 이 결과로부터 수소와 동축공기의 속도 변화에 따라 전반적인 NOx 발생 수준은 차이를 보이지만 주파수에 대한 경향은 동일함을 알 수 있었다. NOx 발생량은 260 Hz, 490 Hz, 680 Hz, 890 Hz 부근에서 크게 줄어들고 있으나, 가장 크게 감소될 때의 주파수는 490 Hz 부근이었다.

이와 같이 NOx 저감이 크게 이루어지는 주파수의 물리적 의미를 분석하기 위해 동축공기 공급관의 공진주파수를 측정하였다. 모든 유량이 0인 상태에서 스피커를 작동시키면서 동축공기 노즐 출구에 설치된 마이크로폰으로 주파수에 따른 음압을 측정한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 응답이 크게 나타나는 주파수는 동축공기 공급관의 형상에 의한 공진주파수임을 의미한다. 이 공진주파수가 NOx 저감이 이루어지는 주파수와 일치하는 것은 연소기의 형상에 의한 공진주파수와 가진 주파수가 일치할 때 동축공기의 속도 변화에 큰 섭동이 발생하고 이것이 NOx 발생량 감소에 큰 영향을 준다는 것을 의미한다.

한편, 동축공기 공급관을 양 끝이 막힌 단순한 튜브 형태로 가정하여 이론적인 공진주파수 계산을 하고 이를 실험 결과와 비교하였다. 공진주파수 계산에 사용한 식은 다음과 같다.

$$f_R = \frac{nc}{2l} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$f_R$ 은 공진주파수,  $c$ 는 음속,  $l$ 은 길이를 의미한다. 그리고  $n$ 은 길이방향 공진모드의 차수이다. 노즐에서의 면적 변화를 감안하여 스피커와

Table 2 동축공기 공급관의 공진주파수

모드	실험값 (Hz)	계산값 (Hz)	오차 (%)
1L	255	244	4.3
2L	485	489	0.8
3L	685	733	7.0

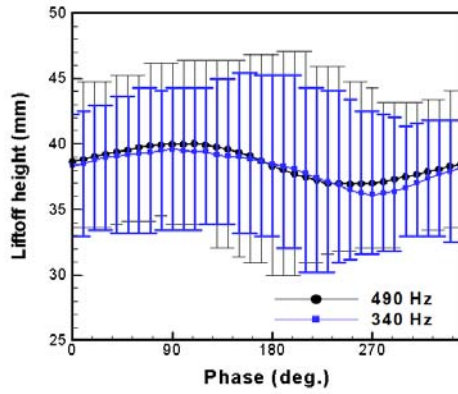


Fig. 5 위상에 대한 화염 부상 높이

노즐 사이에 형성되는 길이 700 mm를 18°C에서의 음속인 342.0 m/s와 함께 위 식에 대입하여 Table 2와 같은 결과를 도출하였다. 오차는 ((측정값)-(계산값))/(측정값)의 절대값으로 구하였다. 측정값과 계산값 사이에는 형상의 단순화 과정에서 발생된 약간의 차이가 있지만 대체로 유사하였다.

### 3.2 가진에 의한 부상 높이 변화

노즐 출구에서  $u_F=200$  m/s,  $u_A=16$  m/s인 경우에 대해 촬영된 Schlieren의 고속카메라 이미지로부터 화염의 부상 높이를 산출하고, 가진이 되지 않을 때와 490 Hz, 340 Hz로 가진이 될 때의 높이 변화를 관찰하였다. 490 Hz는 공진주파수로서 가진에 의해 NOx 저감이 가장 크게 이루어지는 주파수이며, 340 Hz는 공진주파수와 차이가 커서 NOx 저감 효과가 작은 주파수이다.

Fig. 4에 각각의 경우에 대한 Schlieren 사진을 나타내었다. (a)는 가진이 이루어지지 않을 때, (b)는 490 Hz로 가진될 때, (c)는 340 Hz로 가진될 때를 나타낸다. 또한 음영처리된 사각형은 부상 높이의 변동 범위를 의미한다. 가진이 없을 때에 비해 가진이 주어질 때의 평균적인 부상 높이가 낮아졌으나, 공진주파수로 가진될 때의 부상 높이 변화 폭은 공진주파수가 아닐 때와 큰 차이를 보이지 않았다.

한편, Fig. 5는 가진에 의해 발생하는 부상 높이 변화를 위상에 대해 분석한 결과이다. 이 위상은 음향 가진의 위상이 아닌 부상 높이 섭동의 위상이며, 원형 표식은 490 Hz로 가진될 때, 사각형 표식은 340 Hz로 가진될 때의 위상에 따른 평균 부상 높이이다. 오차 막대는 0.2초 동안 측정된 결과에서 나타나는 부상 높이의 상한선과

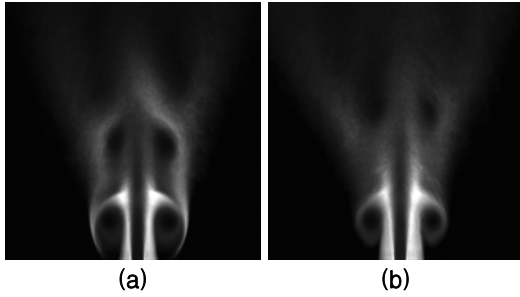


Fig. 6 가진으로 생성된 와류; (a) 490 Hz, (b) 340 Hz

하한선을 의미하는데, 가는 오차 막대는 490 Hz, 굵은 오차 막대는 340 Hz의 가진을 나타낸다. 오차 막대의 비교를 통해, 공진주파수에 해당하는 가진이 주어질 때 부상 높이가 더욱 큰 폭으로 변화한다는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3 가진으로 생성되는 와류의 영향

동축공기의 가진에 의해 노즐 출구에서 속도 섭동이 발생하며, 이에 따라 와류가 생성된다. Fig. 6은  $u_F=200$  m/s,  $u_A=16$  m/s 조건에서 공진 주파수인 490 Hz와 비공진주파수인 340 Hz의 가진이 이루어질 때 동축공기에 포함된 이산화규소 ( $SiO_2$ ) 입자에 의한 레이저 광의 Mie 산란을 이용하여 특정 위상에서 촬영한 영상이다. 공진주파수로 가진될 때에는 와류가 더욱 크고 선명하게 나타나 있다. 그러나 화염이 시작되는 부분부터는 입자의 연소가 일어나기 때문에 다소 흐리게 촬영되었다.

Fig. 7과 8은  $u_F=200$  m/s,  $u_A=16$  m/s 조건에서 각각 340 Hz, 490 Hz로 가진이 이루어질 때 스피커에 공급되는 가진 신호의 위상에 따라 PIV에 의해 측정된 결과를 해당 위상에 부합되는 Schlieren 사진과 함께 나타낸 것이다. 이미지의 좌측 반은 PIV에 의해 측정된 속도장이고 우측 반은 Schlieren 이미지이다. Fig. 7 (b)에서 노즐 출구 부근에 생성된 와류가 확인되며, Fig. 7 (c), (d)로 위상이 진행됨에 따라 와류가 화염 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 8의 경우 공진주파수로 가진이 이루어지기 때문에 PIV 결과에서 Fig. 7에서보다 와류가 더욱 크고 확실하게 나타난다.

Fig. 9 (a)에서 (d)까지는 화염이 와류에 의해 영향을 받는 과정을  $u_F=200$  m/s,  $u_A=16$  m/s, 가진 주파수 490 Hz 조건에서 4개의 위상에 따라 단계별로 나타낸 것으로, 각각 스피커의 위상이 180°, 270°, 0°, 90°일 때의 이미지이다. 또한 각각의 이미지에서 좌측 반은 Mie 산란 사진 위에

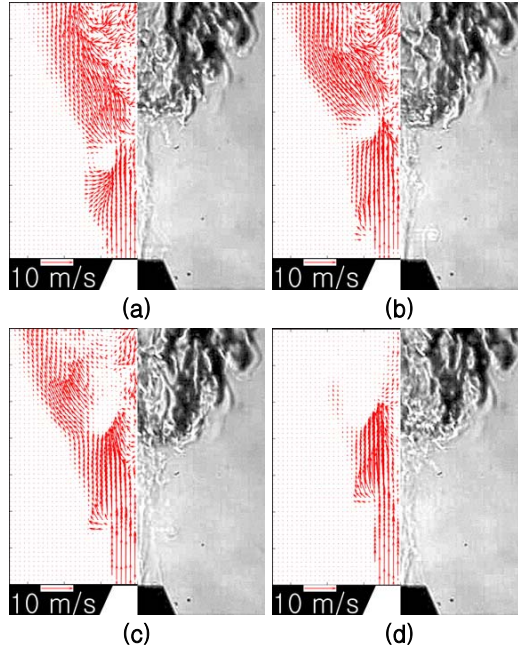


Fig. 7 가진 주파수 340 Hz; (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°, (d) 270°

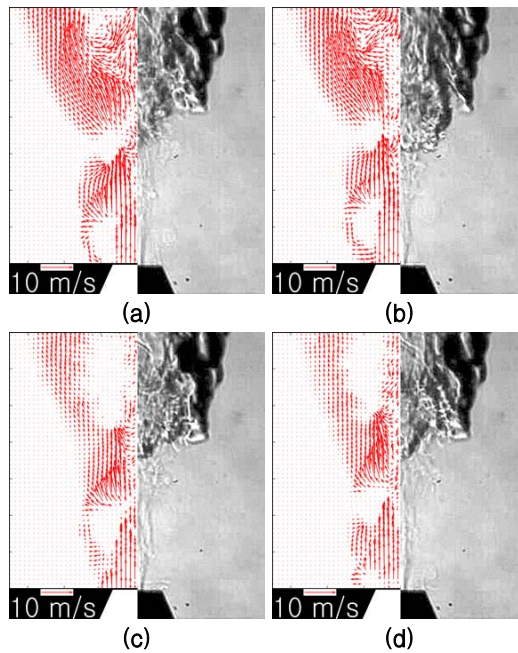


Fig. 8 가진 주파수 490 Hz; (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°, (d) 270°

PIV로 측정된 속도장을 표현한 것이고 우측 반은 해당 위상에서의 Schlieren 사진이다.

Fig. 9 (a)에서는 위쪽으로 이동중인 와류가 나



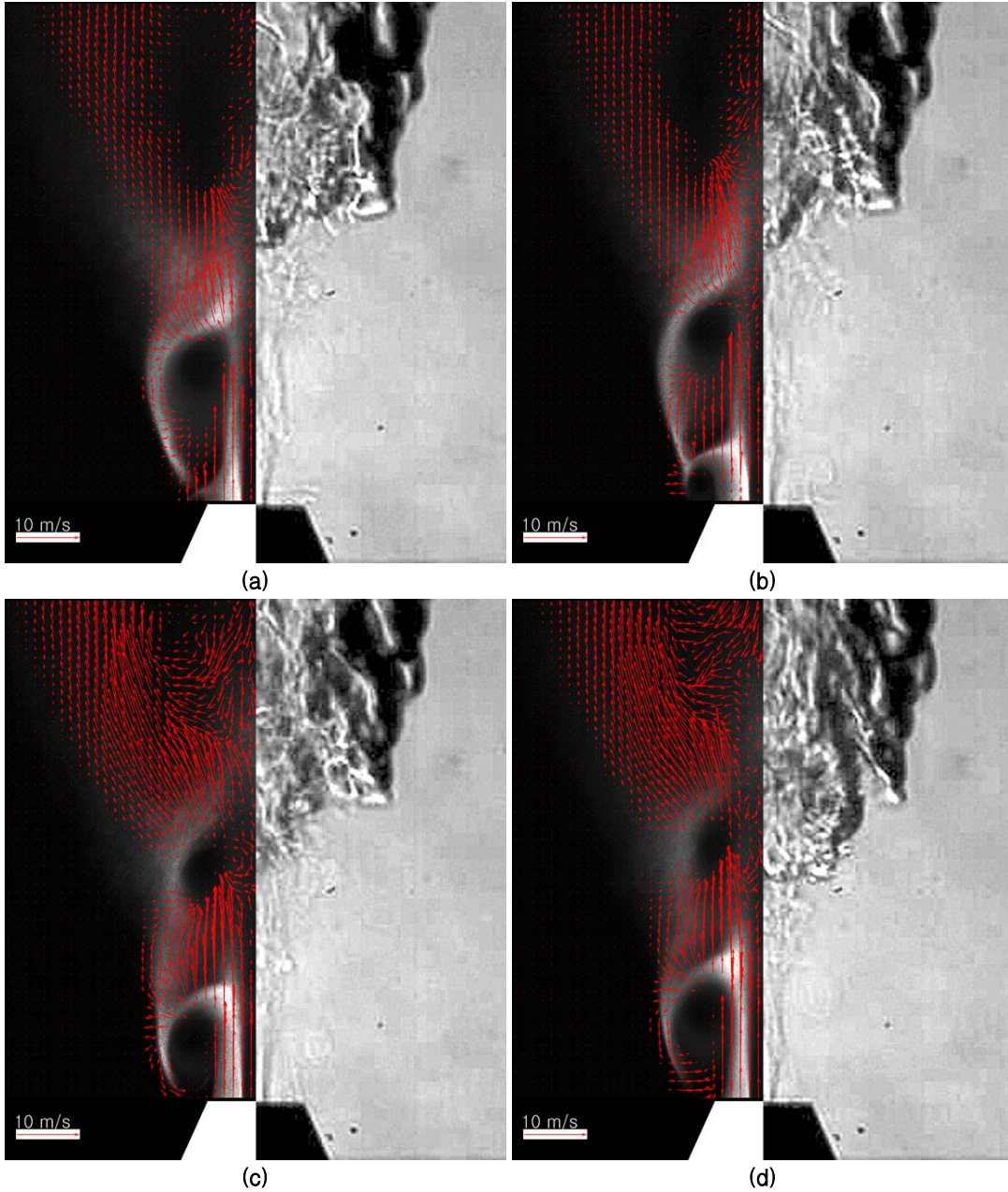


Fig. 9 화염-와류 상호작용; (a) Phase 180°, (b) Phase 270°, (c) Phase 0°, (d) Phase 90°

타나 있는데, 와류는 속도장과 Mie 산란 이미지를 통해 확연히 드러난다. Schlieren 사진에서는 다소 흐리게 구분된다.

Fig. 9 (b)에서 와류는 화염 밑단에 근접하였다. 그리고 노즐 출구에서 새로 생성된 와류도 관찰된다. 그러나 아직 와류가 화염에 접촉하지 않았기 때문에 화염은 영향을 받지 않은 상태이다.

Fig. 9 (c)에서는 와류가 화염 밑단에 도달하여 화염이 영향을 받았다. 이전 단계와의 차이가 발견되었는데, 화염이 와류의 영향에 의해 상류로 전파되어 부상 높이가 낮아진 것을 확인하였다. 또한 와류에 의해 공기 유입이 발생하는 것이 속도장에 나타나며 이러한 외부 공기 유입으로 인해 연료와 공기의 혼합이 증대될 것임을 추정할 수 있다.

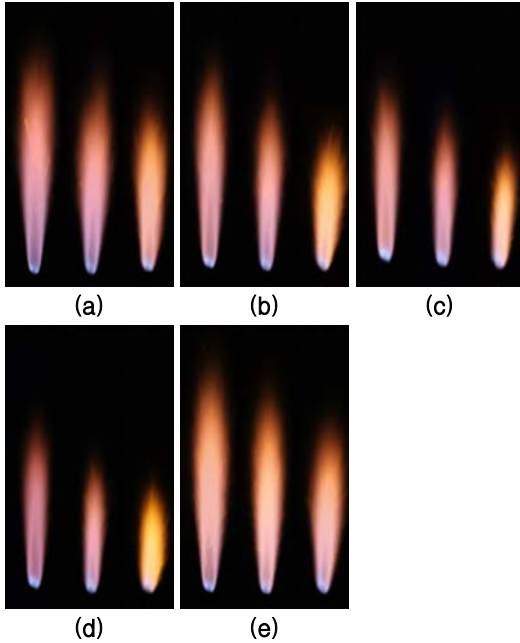


Fig. 10 유량과 가진 조건에 따른 화염 길이; (a)  $u_F=200$  m/s,  $u_A=12$  m/s, (b)  $u_F=200$  m/s,  $u_A=16$  m/s, (c)  $u_F=200$  m/s,  $u_A=20$  m/s, (d)  $u_F=150$  m/s,  $u_A=16$  m/s, (e)  $u_F=250$  m/s,  $u_A=16$  m/s

마지막 단계인 Fig. 9 (d)에서 화염은 더욱 상류로 전파되어 화염의 부상 높이가 가장 낮은 위치에 도달하였다. 화염 밑단에 도달했던 와류는 완전히 화염에 유입되어 있는 것이 관측된다. 그러나 주변 공기의 유입이 계속되고 있는 것을 속도장을 통해 확인할 수 있다.

상기와 같은 단계를 거친 후 낮아졌던 부상 높이는 다시 높아지며 뒤따르는 와류로 인해 다시 낮아지는 순환 과정이 가진 주파수와 동일한 주파수로 반복된다.

NOx 발생량이 저감되는 것은 이러한 화염-와류 상호작용에 의해 혼합이 활발해졌기 때문에 일어나는 것으로 판단된다.

### 3.4 가진에 의한 화염 길이 변화

화염 길이의 비교를 위해 실시한 가시광선 사진 촬영 결과를 유량 조건에 따라 Fig. 10에 나타내었다. 각각의 유량 조건에 대한 사진은 좌에서 우로 차례대로 가진이 없을 때, 340 Hz로 가진할 때, 490 Hz로 가진할 때의 화염 모습이 나열되어 있다.

이 결과를 통해 연료 및 동축공기의 유량과 가

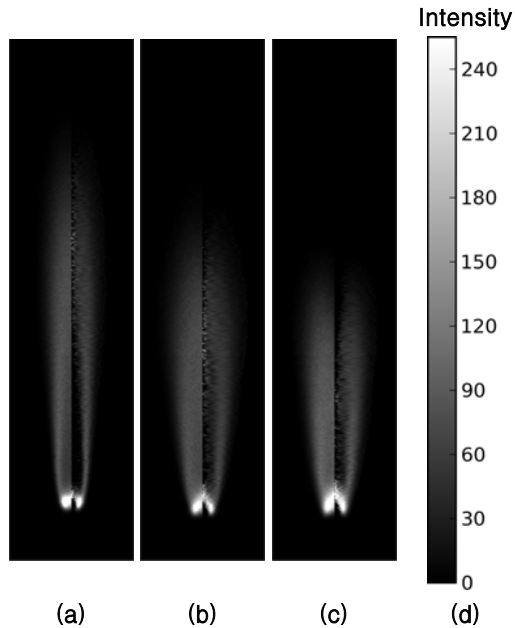


Fig. 11 OH 자발광에 의한 반응 영역 확인; (a) 가진 없음, (b) 340 Hz, (c) 490 Hz

진 조건에 따른 화염 길이의 변화 경향을 확인할 수 있었다. 연료 유속의 증가 또는 동축공기 유속의 감소에 의해서 화염 길이가 길어졌으며, 반대로 연료 유속의 감소 또는 동축공기 유속의 증가에 의해서는 화염 길이가 짧아졌다. 또한 가진이 없을 때 화염 길이가 가장 길었으며, 비공진 주파수인 340 Hz로 가진될 때에는 공진주파수가 아님에도 불구하고 화염 길이가 상당히 짧아졌고 공진주파수인 490 Hz로 가진될 때에는 화염 길이가 가장 짧았다.

화염 길이는 NOx가 생성되는 길이와 밀접한 관계를 갖는데, 화염 길이가 짧아지면 열적 NOx가 생성되는 고온 영역에서의 체류 시간 감소로 인해 전체 NOx 발생량이 감소될 수 있다. 따라서 가진에 의한 NOx 저감에 화염 길이가 작용했을 것으로 판단된다.

### 3.5 가진에 의한 반응 영역 크기의 변화

음향 가진에 따른 반응 영역 크기의 변화를 관찰하기 위해 OH 자발광 측정을 실시하였다. 연료 및 동축공기 유속은 각각  $u_F=200$  m/s,  $u_A=16$  m/s였다. Fig. 11은 OH 자발광 측정 이미지와 함께 원본 이미지의 Abel inversion 결과를 나타낸 것이다. (a), (b), (c)는 각각 가진이 없을 때, 340 Hz로 가진할 때, 490 Hz로 가진할 때의 이미지이다. 각각의 이미지에서 좌측 절반은 촬영

된 원본 영상이고 우측 절반은 원본 영상에 대해 Abel inversion을 적용하여 얻은 결과로써 화염 단면에서의 반응 영역 분포를 나타낸다. 한편, (d)는 강도에 따른 색상으로, 흰색에 대응되는 수치인 255가 최대 강도를 나타낸다.

Fig. 11 (a)에서, 가진이 이루어지지 않을 때에는 반응이 일어나는 영역이 화염면을 따라서 비교적 얇게 나타났다. 그러나 (b)에서 확인할 수 있듯이 340 Hz로 가진할 때에는 화염 길이가 짧아지고 반응 영역 층이 다소 두꺼워졌으며, (c)의 경우 공진주파수인 490 Hz로 가진할 때에는 밝게 표시된 반응 영역이 가장 두껍게 나타났다.

반응 영역이 두껍게 나타난 것은 연소가 화염 내부에서도 일부 진행되는 것을 의미하기 때문에, 화염 길이의 축소에 의한 반응 영역 감소를 보상한 것으로 판단된다. 그리고 이러한 반응 영역 두께의 증가는 동축공기의 가진으로 생성된 와류가 연료와 공기의 혼합을 증대시킴으로 인해 발생했을 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 부상된 수소난류확산화염에서 동축공기의 음향 가진으로 질소산화물 발생량을 저감시킬 수 있는 효과적인 가진 주파수 조건과 함께 그러한 저감 효과가 발생될 때 음향 가진이 화염에 미치는 영향을 확인하였다.

이를 위해 먼저 연료 및 공기의 유량 조건과 주파수에 대한 NOx 발생량의 관계를 확인하는 실험을 실시하였다. 그리고 동축공기의 가진에 의해 발생하는 와류를 공진주파수와 가진 주파수의 관계에 따라 비교하고 화염 밑단에서 와류가 화염에 주는 영향을 관찰하기 위해 Schlieren 촬영 기법과 phase-locked PIV 측정을 실시하였다. 또한 유량 조건과 가진 주파수에 따른 화염 길이 변화를 확인하기 위한 가시광선 촬영과 반응 영역의 크기를 비교하기 위한 OH 자발광 측정을 진행하였다. 이러한 실험을 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 동축공기 공급관의 공진주파수와 음향가진의 주파수가 일치할 때 NOx 발생량을 효과적으로 저감시킬 수 있었다.
- 2) 음향가진이 주어질 때에는 화염의 부상 높이가 낮아졌으며, 부상 높이의 변동 폭은 공진주파수로 가진할 때 가장 크게 나타났다.
- 3) 음향가진에 의해 생성되는 와류는 공진주파수로 가진할 때 가장 강하였다.
- 4) 와류가 화염에 유입되면 화염이 상류로 전파되어 부상 높이가 낮아졌으며, 또한 와류에 의한 공기 유입으로 연료-공기 혼합이 증대되었다.
- 5) 음향가진으로 화염 길이를 감소시킬 수 있었

으며, 공진주파수로 가진할 때 가장 짧았다. 이것에 의해 NOx의 생성 길이가 감소했을 것으로 판단된다.

- 6) 음향가진에 의해 화염에서의 반응 영역이 두꺼워졌으며, 공진주파수로 가진할 때 가장 두껍게 나타났다. 이것은 와류에 의해 연료-공기 혼합이 증대되었기 때문인 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 항공우주신기술연구소 및 기초전력 연구원(한국서부발전 연구개발 과제)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Y. Chao, M. Jeng, "Behavior of the lifted jet flame under acoustic excitation," 24th International Symposium on Combustion, 1992, pp. 333-340.
- [2] Y. Chao, T. Yuan, and C. Tseng, "Effects of Flame Lifting and Acoustic Excitation on the Reduction of NOx Emissions," Combustion Science and Technology, Vol. 113, 1996, pp. 49-65.
- [3] C. Poppe, S. Sivasegaram, and J. Whitelaw, "Control of NOx Emissions in Confined Flames by Oscillations," Combustion and Flame, vol. 113, 1998, pp. 13-26.
- [4] Y. Chao, Y. Huang, and D. Wu, "Feasibility of Controlling NOx Emissions from a Jet Flame by Acoustic Excitation," Combustion Science and Technology, vol. 158, 2000, pp. 461-484.
- [5] N. Kurimoto, Y. Suzuki, and N. Kasagi, "Active control of lifted diffusion flames with arrayed micro actuators," Experiments in Fluids, vol. 39, 2005, pp. 995-1008.
- [6] G. C.-Y. Chan, G. M. Hieftje, "A LabVIEW Program for Determining Confidence Intervals of Abel-Inverted Radial Emission Profiles," Spectrochimica Acta Part B, vol. 60, 2005, pp. 1486-1501.