

음파가진에 의한 동축공기 수소 확산화염의 NOx 배출저감연구

김문기* · 한정재* · 윤상욱* · 윤영빈***

Reduction of NOx Emissions in Turbulent Hydrogen Diffusion Flame using Acoustic Excitation

Munki Kim, Jeong Jae Han, Sang Wook Yoon and Youngbin Yoon

ABSTRACT

Measurements of flame length and NOx emissions have been conducted to investigate the effects of acoustic excitation on flame structure in turbulent hydrogen diffusion flames with coaxial air. When the acoustic excitation of a specific frequency is applied to coaxial air stream, flame length is dramatically reduced, resulting in reduction of flame residence time. Consequently, EINOx could decrease up to 35 % and this shows that acoustic excitation is effective in reducing NOx emissions. Mie scattering technique has been used to visualize the vortex structure induced by acoustic excitation and vortex formation, development and destruction were observed quantitatively. As a result, vortex entrains coflow air into fuel stream and mixing rate between fuel and air is significantly enhanced, which may contribute to reduction of NOx emissions.

Key Words : NOx emission, Acoustic excitation, Coaxial air, Vortex structure

기 호 설 명

u_F	Fuel velocity	d_F	Fuel nozzle inner diameter
u_A	Coaxial air velocity	EINOx	Emission Index of NOx
L_f	Flame length	τ_R	Flame residence time

1. 서 론

난류 비예혼합 화염에서의 질소산화물(NOx) 생성에 관한 연구는 이론적, 실험적 접근을 기초하여 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 그 결과, NOx 생성은 화염온도, 산소원자 농도, 가연혼합기와 연소생성물의 혼합률, 화염체류시간 등과 같은 변수들에 의존하는 것으로 알려져 있다[1]. 특히, Driscoll 등[2-3]은 수소 비예혼합 화염에 대한 NOx 측정 실험을 통해 화염체류시간으로

무차원화된 질소산화물 배출지수(EINOx/ τ_R)가 연료유속을 연료노즐 내경으로 나눈 값(global strain rate, u_F/d_F)의 1/2승에 비례하는 것을 보였다. Chen과 Kollmann[4]은 확률밀도함수를 이용한 수치해석을 통해 위의 결과에서 얻어진 1/2-scaling 관계가 스칼라 소산율로 대표되는 화학적 비평형 효과에 의한 것임을 밝혀내었다.

또한, 김승한 등[5-7]은 동축공기가 있는 수소 비예혼합 화염에 대한 NOx scaling 실험을 정량적으로 수행하였는데, 위에서 관측된 1/2-scaling이 동축공기가 존재하더라도 유지되는 것을 확인하였다. 하지만, 동축공기 조건에 따라 1/2승의 기울기에서 벗어나는 정도가 달라지는 것을 관측하였으며, 수소에 헬륨을 희석한 실험을 통해 1/2승에서 벗어나는 이유가 복사 열손실과 부력

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

† 연락저자, ybyoon@snu.ac.kr

효과에 의한 것임을 밝혔다.

동축공기가 존재하는 난류 비예혼합 화염의 경우 상류에서 동축공기의 예혼합 효과에 의해 연료와 공기의 혼합이 증대되기 때문에 화염길이 동축공기가 없는 단순 확산화염의 경우보다 훨씬 줄어든다. 그 결과, 고온부를 지나는 연료의 화염 체류시간이 짧아져 NO_x 발생이 급격히 감소하게 된다[6]. 최근에 연구되고 있는 NO_x 저감 기법으로는 유동을 교란시키는 방법이 있는데, 대표적인 방법 중 하나는 음향장치를 통해 외부의 음파를 유동장에 가진하는 방식이다. 음파 가진에 관한 이전의 연구들은 주로 음파 가진을 통해 vortex 구조를 유도하여 화염 안정성 실험이나 유동 가시화 실험을 통해 화염의 구조적 특성을 밝히는데 초점을 두어왔다.

Meyer 등[8]은 hot wire와 레이저유도 형광(PLIF) 기법을 사용하여 특정 주파수에 의해 야기되는 vortex 구조의 속도장 및 농도 분포를 정량적으로 측정하였다. 또한, Hardalupas와 Selbach[9]는 천연가스를 사용한 스윙 방식의 버너에서 주파수 특성에 따른 화염 구조의 변화를 TiCl₄를 이용하여 가시화 하였으며, 연소 한계와 화염 부상에 대한 음파 가진의 영향을 살펴보았다. Demare와 Baillot[10]은 비예혼합 부상화염에서 Mie 산란법과 PIV, LDV, Tomography 등의 기법을 적용하여 가진 주파수가 부상 높이와 재부착 현상에 끼치는 영향에 대한 정량적인 분석을 수행하였다.

또한, Chao 등[11]은 프로판/공기 예혼합 화염에서 음파 가진과 화염 부상이 NO_x 발생을 줄이는데 효과적인 인자임을 확인하였다. 하지만, 음파 가진에 의한 연구는 vortex 구조에 대한 해석에 국한되어 있을 뿐 NO_x 발생에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다. 따라서 본 실험에서는 동축공기가 존재하는 수소 난류확산화염에서 음향장치를 통해 외부에서 음파를 가진하여 가진 주파수가 유동장과 화염길이 및 EINO_x 저감에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 비반응 조건에서 Mie 산란법을 통해 유동에 주기적인 영향을 주는 음파의 주파수 특성을 분석하여 NO_x 저감 메커니즘과의 연관성을 파악하고 화염의 구조적인 특성을 진단하여, 반응영역에서 추가적인 질소산화물 저감요인 인자로서 음파 가진에 대한 효용성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

실험 장치는 참고문헌 [5]의 Fig. 1에서와 같이 연료노즐, 동축공기 노즐, 주위공기 등으로 구성되는 유동 공급부와 가시화 창으로 구성된 시

부, 연소 후 생성된 가스를 배출하는 배기부로 구성되어 있다. 연소기 시험부의 단면은 20cm × 20cm의 정사각형이며, 높이는 80 cm이다. 연료 노즐은 연소기 중앙에 위치하며 이 노즐을 통해 연료인 수소가 분출된다. 연료 노즐의 내경은 3.0 mm이고, 동축공기 노즐은 연료 노즐과 동심이며 그 내경은 15.0 mm이다. 당량비를 0.25로 일정하게 유지하기 위해서 주위 공기의 유량을 조절한다. 하지만, 주위공기 속도는 화염 특성에 영향을 끼치지 않도록 매우 작게 유지하였다(<0.1 m/s). 동축공기와 주위공기는 honeycomb과 구슬을 이용하여 유동이 균일하도록 만든다.

Figure 1에서 보는 것과 같이 NO_x 측정 장치(Horiba, Mexa720)는 배기 덕트 후방부에 위치하며, Zirconia(ZrO₂)-ceramic 센서 방식으로 샘플링 가스를 채집할 필요 없이 프로브에서 직접 측정하는 방식을 채택하여 기존의 화학발광법에 기초한 NO_x 측정 장치에 비해 반응성이 매우 빠른 장점이 있다. 측정 범위는 0-3k ppm이며, 반응시간은 0.7초 이내이다. 제트의 유동을 음파로 가진하기 위해 compression driver(Sammi, SU-150E/F)를 동축공기 유동라인에 장착하였다. 스피커의 최대 출력은 150 W이며, 150-5,000 Hz의 주파수를 가진할 수 있다. LabView를 이용해 발생한 신호는 DAQ 보드를 통해 증폭기로 들어가며, 증폭된 신호는 스피커를 가진한다.

비반응 조건에서 유동을 가시화하기 위해 향을 태울 때 발생하는 smoke를 동축공기 라인에 주입하여 레이저 평면광에 의해 산란되는 smoke의 Mie 산란 신호를 CCD 카메라(Kodak, ES1.0)로 획득한다. 카메라의 해상도는 1008×1018 pixels이

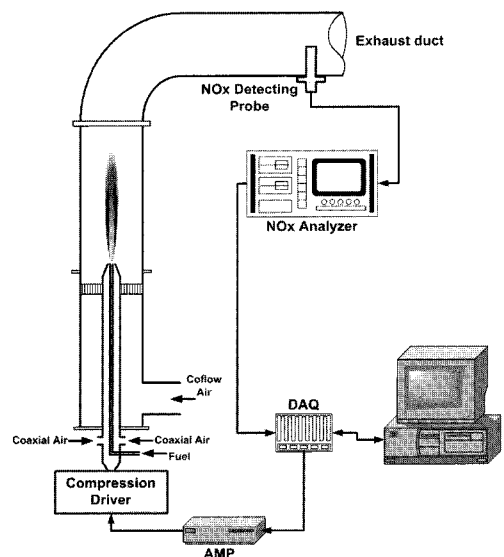


Fig. 1 Schematic of Experimental systems

며, 노즐 출구에서부터 $668 \times 675 \text{ mm}^2$ 의 실제 영역을 측정하였다. Nd:YAG 레이저의 532 nm 광을 광학 렌즈를 사용하여 평면광으로 만들며, 카메라는 평면광에 수직인 위치에서 측정한다. 화염길이를 측정하기 위해서 직접 측정 방식을 사용해 화염 이미지를 획득하였고, 화염의 번짐 현상을 막기 위해 노출시간은 최소로 하였다. 화염 이미지는 경계값을 정하였으며, 총 100장의 이미지를 평균하여 화염길이를 구하였다.

2. 2 실험조건

실험은 동축공기 조건에 따라 크게 세가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 조건은 동축공기 유속을 고정하고 연료 유속을 증가시킨 경우이며(Case I), 두 번째는 유속비가 일정한 상태에서 연료와 동축공기 유속을 증가시키는 경우(Case II)이고, 세 번째 조건은 연료 유속이 고정된 상태에서 동축공기 유속을 증가시킨 경우(Case III)이며, 자세한 조건은 Table 1에 표시되어 있다. 각각의 조건마다 음파를 가진한 경우와 그렇지 않은 경우 모두에 대해 NOx 및 화염길이 측정을 수행하여 음파의 유무에 따른 변화를 살펴보았다.

본 실험에서 다루는 수소 난류확산화염의 실험 조건에서 화염의 안정성을 살펴보기 위하여 연료 및 동축공기 유속을 변화시키며 화염 부상과 날림 현상이 나타나는지 살펴보았다. Fig. 2는 연료 및 동축공기 유속에 따른 화염의 형태를 나타내고 있다. 연료의 Reynolds 수가 작은 즉, 연료 유속이 작은 영역에서는 동축공기 유속이 30 m/s 를 넘어서게 되면 부착화염에서 곧바로 화염 날림 현상이 나타난다. 반면, 연료의 Reynolds 수가 큰 영역에서는 동축공기 유속이 작은 영역

에서 화염이 부상되며, 부상된 화염이 안정화된 상태로 유지된다. 동축공기 유속을 계속 증가시키면 부상 화염의 부상 높이가 증가하다가 일정 속도 이상에서 화염 날림 현상이 나타나게 된다. 부착 화염과 부상 화염은 화염의 특성이 매우 다르기 때문에 본 연구에서는 부착 화염의 경우로 실험 조건을 국한하도록 하겠다.

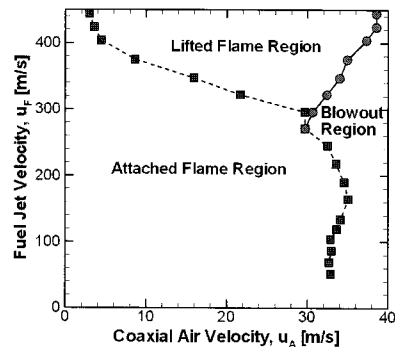


Fig. 2 Flame stability limit

3. 결과 및 고찰

3.1 주파수에 따른 화염 특성

본 실험에 앞서 화염 구조를 효율적으로 교란할 수 있는 특정 주파수를 정할 필요가 있다. 음파를 가진하는 음향 장치는 오직 동축공기 라인에 연결되어 있기 때문에 동축공기 라인의 형상에 따라 고유 주파수가 정해진다. 스피커에 100 Hz 부터 1 kHz 까지 랜덤 주파수 신호를 발생시켜 이때의 음압을 출구 노즐에서 측정한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 측정 결과 $270, 540, 740 \text{ Hz}$ 에서 음압이 큰 것을 알 수 있다. 이는 고유 주파수에서 공명하기 때문에 음압이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Figure 4는 각각의 가진 주파수에서 신호의 전

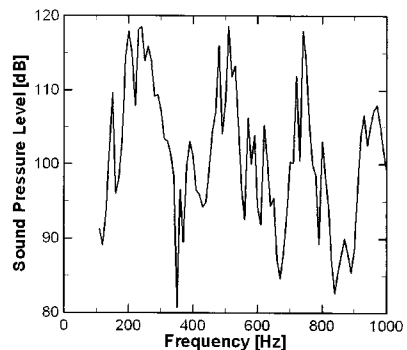


Fig. 3 Sound pressure level in response to excited frequency

Table 1 Experimental conditions for hydrogen flames with coaxial air

Test case	u_f [m/s]	u_a [m/s]	u_a/u_f	
I	1	105-384	5.0	0.013 - 0.048
	2	105-349	10.0	0.029 - 0.095
	3	105-314	20.0	0.064 - 0.190
	4	105-245	30.0	0.112 - 0.286
II	5	105-140	21.5 - 28.6	0.205
	6	105-210	14.3 - 28.6	0.137
	7	105-279	10.7 - 28.6	0.103
	8	105-384	7.16 - 26.2	0.068
	9	105-384	5.37 - 19.7	0.051
III	10	105	5.0 - 30.0	0.033 - 0.286
	11	140	5.0 - 30.0	0.036 - 0.214
	12	174	5.0 - 30.0	0.029 - 0.172
	13	245	5.0 - 30.0	0.021 - 0.122
	14	314	5.0 - 25.0	0.016 - 0.080

압을 증가시키기에 따라 화염이 부착 화염에서 부상화염으로 변하는 것을 나타내는 그림이다. 실험 조건은 $u_F = 175$ m/s, $u_A = 20$ m/s와 $u_F = 244$ m/s, $u_A = 10$ m/s인 경우이다. 본 연구의 실험은 부착 화염에 국한하고 있기 때문에 전압을 계속 증가시키면 음파의 진폭이 커져 화염이 부상하게 된다. 따라서 화염이 부상되지 않으면서 음파의 전압을 최대로 올릴 수 있는 주파수 조건을 찾고자 한다. Fig. 4의 결과를 살펴보면 주파수별로 화염이 부상되는 전압의 크기가 각각 다르게 분포함을 알 수 있는데, 가진 주파수가 150 Hz일 때 전압이 각각 3.7, 3.1 V로 가장 큰 값을 보이고 있다. 즉, 다른 주파수에 비해 150 Hz의 주파수 조건에서 전압이 크더라도 화염이 본 연구에서 고려하는 부착화염으로 유지되는 것을 알 수 있다. 따라서 다른 주파수에 비해 150 Hz의 주파수에서 음파의 전압을 최대 6배 정도 더 올릴 수 있기 때문에 부착화염에서 음압을 올리기 쉬운 이점이 있다.

Figure 5는 동일 실험 조건에서 음압을 증가시켜 부상되기 직전에 측정된 NOx 발생량을 주파수별로 도시한 결과이다. 점선은 음파를 가진하지 않았을 때의 NOx 발생량을 의미한다. 실험 조건이 $u_F = 175$ m/s, $u_A = 20$ m/s인 경우 음파가진 것이 없으면 NOx 발생량은 33 ppm인 반면, 음파를 가진한 경우 모든 주파수에서 모두 NOx가 저감되는 것을 볼 수 있으며, 특히 150 Hz에서 최대 26 ppm까지 NOx 발생량이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 두 번째 실험 조건에서도 비슷한 경향성을 보이는데, 가진이 없는 경우 69 ppm의 NOx가 발생하는 반면, 가진이 있는 경우 주파수가 150 Hz일 때 최대 61 ppm까지 줄어들게 된다. 이와 같이 150 Hz에서 NOx 발생량이 최소인 이유는 Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이 dynamic range가 커서 음파의 전압을 보다 높일 수 있기 때문으로 생각된다.

Figure 4와 Fig. 5의 결과로부터 특정 주파수인 150 Hz를 동축공기 라인에 가진하는 경우 다른 주파수에 비해 화염이 부상되기까지 올릴 수 있는 음압이 더욱 크기 때문에 작동 범위가 보다 넓고, NOx 발생량이 보다 효율적으로 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 가진 주파수를 150 Hz로 고정하여 음파 가진에 따른 화염길이 및 NOx 발생량의 변화를 다음 장에서 살펴보았다.

3.2 음파 가진에 따른 화염길이 및 EINOx 측정 결과

앞에서 언급한 것과 같이 가진 주파수는 150 Hz로 고정한 상태에서 음압을 증가시켜 화염이 부상되기 직전의 화염길이 및 NOx 발생량을 세

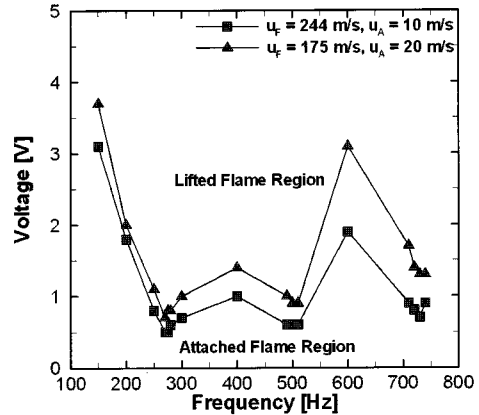


Fig. 4 Maximum signal voltage in attached flame region along excited frequency

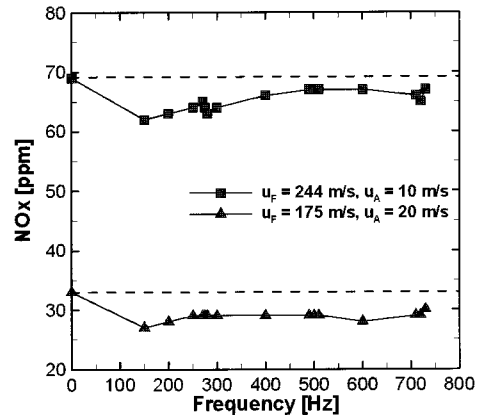


Fig. 5 Variation of NOx emissions along excited frequency

가지 동축공기 조건에 따라 측정하였다. Fig. 6은 연료 유속이 175 m/s인 조건에서 동축공기가 없는 단순확산화염(Fig. 6a)과 동축공기 유속이 10 m/s인 동축공기 확산화염(Fig. 6b), 동축공기 유속이 10 m/s인 조건에 150 Hz의 주파수를 가진한 음파가진 확산화염(Fig. 6c)의 화염 이미지를 각각 나타내고 있다. Fig. 6의 화염 이미지를 통해 단순확산화염에 비해 동축공기가 있는 확산화염이 화염길이 짧아지는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 화염의 예혼합 효과에 의해 연료와 공기의 활발히 혼합된 결과이며, Kim 등[6]에 의해 보고된 바 있다. 게다가, 동축공기가 있는 화염에 음파를 가진하게 되면 동축공기 확산화염에 비해 훨씬 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

세 가지 실험 조건의 음파 가진에 따른 화염길이의 변화를 Fig. 7(a)에 도시하였다. 화염길이를 연료노즐의 내경인 d_f 로 무차원화한 값인 L/d_f

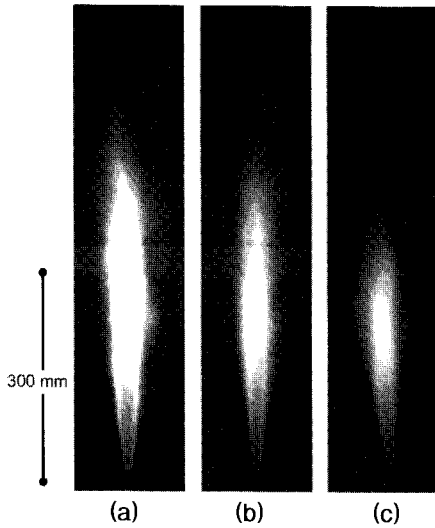


Fig. 6 Flame images of diffusion flames (a) without coaxial air, (b) with coaxial air and (c) with coaxial air and acoustic excitation

를 동축공기와 연료의 유속비인 u_A/u_F 의 함수로 표시한 결과, 화염길이는 u_A/u_F 가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하고 있다. 여기서 점선은 음파 가진이 없는 동축공기 확산화염의 무차원 화염길이를 의미하는데, 음파를 가진한 경우 화염길이의 데이터가 대부분 점선 아래에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 동축공기 확산화염에 음파를 가진하면 정도의 차이는 있지만 모든 실험 조건에서 화염길이가 줄어들게 된다.

Figure 7(b)은 동축공기와 연료의 유속비에 따른 EINOx(emission index of NOx, 연료 1 kg당 발생하는 NOx의 gram 수) 값을 모든 실험 조건에 대해 나타난 그림이다. 여기서 점선은 가진이 없는 동축공기 확산화염의 EINOx 값을 의미한다. EINOx의 데이터 역시 유속비가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 EINOx 값을 유속비와 지수 함수의 수식으로 표현할 수 있음을 의미한다. 또한, 음파 가진이 있는 경우 같은 유속비의 음파 가진이 없는 경우보다 EINOx 값이 줄어드는 것을 알 수 있는데, 이는 Fig. 7(a)에서 알 수 있듯이 화염길이가 줄어들기 때문이다. 즉, 음파를 유동장에 가진하면 연료와 공기의 혼합이 증대되어 화염길이가 줄어들게 되며, 그에 따라 화염체류시간이 감소하게 된다. 화염체류시간이 감소하게 되면 화염의 고온부를 지나는 연소 생성물의 체류시간이 감소하여 NOx가 발생하는데 필요한 특성시간이 줄어들게 된다. 이에 따라 발생하는 NOx의 양도 유사한 경향성을 보이며 줄어들게 된다.

위에서 살펴본 화염길이와 EINOx의 저감 정도를 보다 뚜렷이 확인하기 위하여 음파 가진에

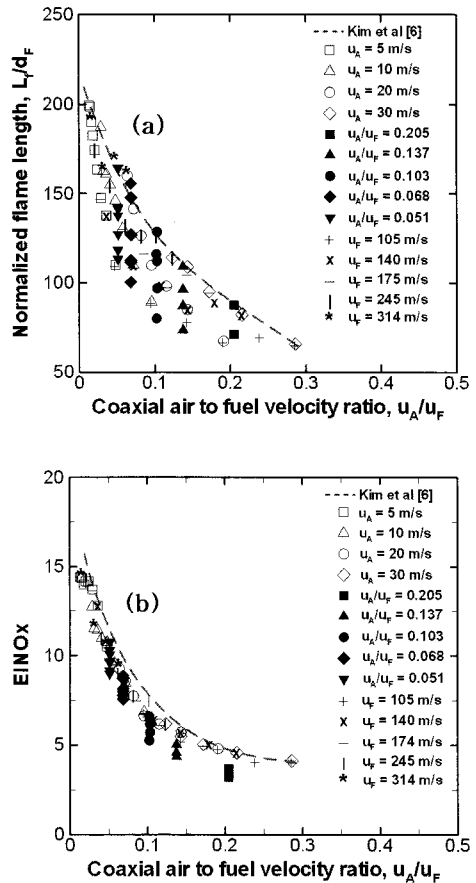


Fig. 7 (a) Normalized flame length and (b) EINOx variation as a function of coaxial air to fuel velocity ratio with acoustic excitation of 150 Hz

의한 화염길이와 EINOx의 저감률을 Fig. 8에 백분율로 계산하여 도시하였다. 화염길이와 EINOx의 저감률은 모두 음파 가진이 없는 경우보다 대략 5 - 35 %로 서로 비슷한 경향을 보이는데, 이는 화염길이와 EINOx가 밀접한 관계가 있음을 의미하고 있다. 또한, 화염길이와 EINOx 값이 연료와 동축공기의 유동조건에 상관없이 동축공기와 연료의 유속비가 0.1 근처에서 최대의 저감률을 보이고 있는데, 이는 동축공기가 너무 크거나 반대로 너무 작으면 음파 가진의 효과가 적어지는 것을 의미한다. 따라서, 연료에 대한 동축공기의 유량의 비를 적절히 유지하면서 음파를 가진하면 최대 35 %의 NOx 저감의 효과를 얻을 수 있다.

3.3 유동 가시화 실험 결과

3.2장에서 음파 가진이 화염길이 감소를 가져와 NOx 저감에 기여한다는 결과를 보여주었다. 이

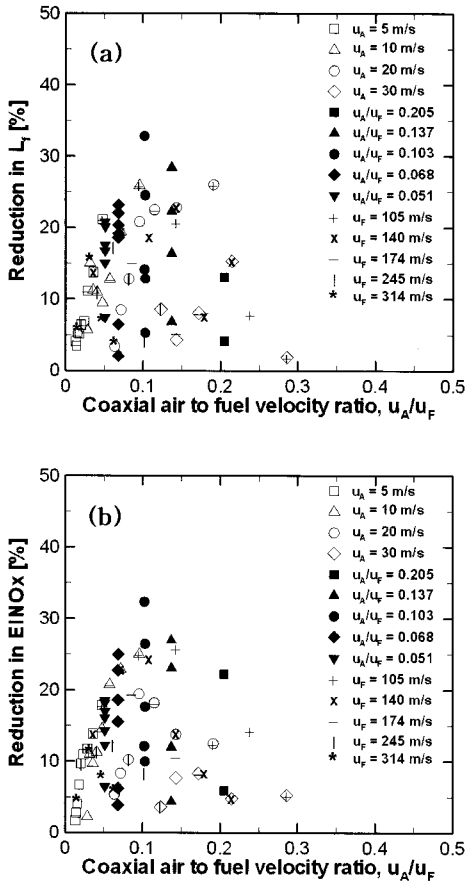


Fig. 8 Reduction percentage of (a) Flame length and (b) EINOx

장에서는 음파 가진이 유동장에 미치는 영향을 알아보고자 Mie 산란기법을 사용하여 유동을 가시화하였다.

Figure 9는 음파의 위상별 유동 구조를 동축공기에 유입시킨 향의 smoke 입자의 산란 신호를 가시화한 것으로, 사진의 크기는 50 mm×50 mm이다. 유동 조건은 $u_F = 105$ m/s, $u_A = 5$ m/s이다. 음파 신호와 레이저를 동기화하기 위해서 주파수는 153 Hz로 조절하였으며, 음파의 전압은 0.5 V이다. Fig. 9을 통해 vortex 구조가 가진 주파수와 같은 주기로 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 하나의 vortex의 발생 주기가 가진 주파수와 동조하고 있다.

여기서 vortex 구조는 동축공기 유동의 바깥쪽에서 eddy로 생성되어 roll-up되면서 하류로 흘러감에 따라 점차 발달하게 된다. 그에 따라 vortex의 지름이 커지면서 주위 공기의 유입이 더욱 활발해져 연료 제트의 중심까지 가까이 침투하며, 그 결과 유동의 혼합이 증대된다. 유동이 하류쪽으로 진행되면 vortex 구조가 더 이상 유

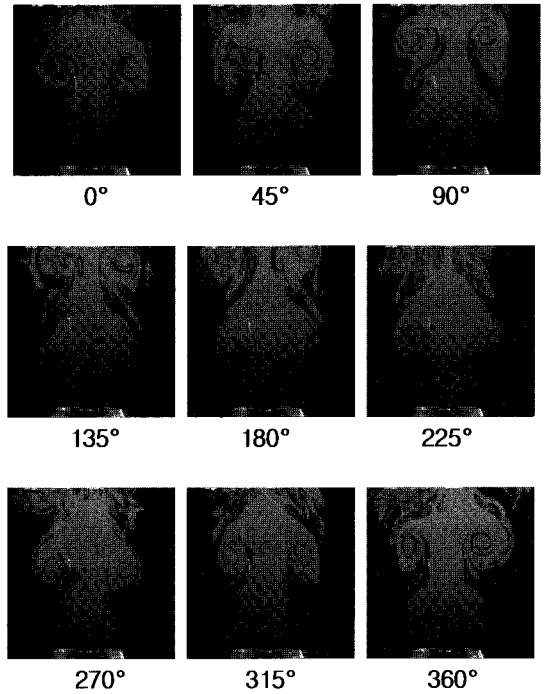


Fig. 9 Vortex structure according to phase angle of acoustic wave with 153 Hz and 0.5V

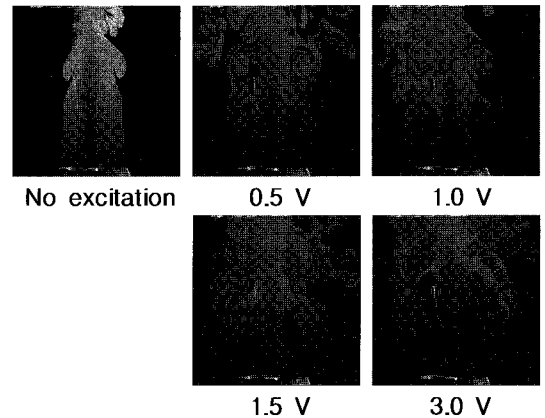


Fig. 10 Vortex structure according to amplitude of acoustic wave with 153 Hz

지되지 않고 보다 작은 단위의 난류 유동으로瓦解되며, 이는 Fig. 9의 135 - 225의 위상 이미지를 통해 확인할 수 있다.

Figure 10은 동일 주파수에서 전압에 따른 vortex 구조의 변화를 가시화한 그림이다. 음파 가진이 없는 경우 vortex 구조가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 반면, 전압이 0.5 V, 1.0 V로 증가함에 따라 뚜렷한 vortex 구조를 관찰할 수 있다. 하지만, 음압이 계속 증가하게 되면 점차 후류쪽의 vortex

구조가 파괴되어 3.0 V에서 보듯이 명확한 구조를 파악하기 어렵게 된다. 이런 현상은 음압이 증가함에 따라 유동장에 가진되는 섭동의 진폭이 점차 커지면서 vortex 구조를 유지하기 힘들게 되기 때문이다. 하지만, 노즐 출구에 가까운 영역에서는 여전히 vortex 구조가 나타나는 것으로 보듯이 vortex에 의한 유입률이 줄어들지는 않는 것으로 보인다. 한편, 음압이 증가하면 연료와 동축공기 제트의 폭이 넓어지는 것으로 보아 유동의 혼합이 매우 활발히 일어나는 것으로 생각할 수 있다.

위의 결과를 요약하면 유동장에 음파를 가진하면 주파수에 동조하여 vortex 구조가 생성되며, 이렇게 생성된 vortex가 발달, 소멸의 과정을 거치면서 주위 공기의 유입을 촉진하여 연료와 공기의 혼합이 증대되는 것을 정성적으로 확인할 수 있다. 이는 화염길이를 효과적으로 줄일 수 있으며, 따라서 3.2장과 같이 NOx의 발생을 저감시키는 결과를 가져오는 것으로 생각된다.

4. 결 론

수소 난류확산화염에서 동축공기에 따라 세 가지로 실험 조건을 나누어 음파 가진에 따른 화염 길이와 EINOx의 변화를 측정하였다. 우선, 화염이 안정적이면서 NOx 발생량을 줄일 수 있는 효과적인 주파수를 선택하여 전체 실험 조건에 적용하였다. 그 결과, 동축공기와 연료의 유속비에 따라 약간의 차이를 보이지만, 화염길이와 EINOx 저감 정도가 비슷한 경향성을 보였으며, 이는 화염길이와 NOx 발생량이 밀접한 관계를 갖고 있음을 의미한다. 본 실험에서 얻을 수 있는 EINOx의 저감률은 음파 가진이 없는 동축공기 확산화염 대비 최대 35 %의 저감을 얻을 수 있다. 음파 가진에 의한 유동장 구조의 특징을 살펴보기 위하여 Mie 산란법을 적용하였으며, 그 결과 주파수에 동조된 vortex 구조를 얻을 수 있었다. 이런 vortex 구조의 생성, 발달, 소멸 과정을 통해 연료와 공기의 활발한 혼합 과정이 이루어져 화염길이와 NOx 발생의 저감을 가져오는 것으로 보인다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 2003년도 전력산업연구개발사업(R-2003-B-546)을 통해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

[1] S. R. Turns, "Understanding NOx Formation

in Nonpremixed Flames: Experiments and Modeling," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 21, 1995, pp. 361-385

[2] R.-H. Chen and J. F. Driscoll, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames: Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameter," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, 1990, pp. 281-288

[3] J. F. Driscoll, R.-H. Chen and Y. Yoon, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames: Effects of Residence Time and Damkohler Number," *Combustion and Flame*, Vol. 88, 1992, pp. 37-49

[4] J.-Y. Chen and W. Kollmann, "PDF Modeling and Analysis of Thermal NO Formation in Turbulent Nonpremixed Hydrogen-Air Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 88, 1992, pp. 397-412

[5] 김승환, 김문기, 윤영빈, "수소 난류확산화염에서 NOx 생성특성에 대한 화염열복사의 영향," *한국연소학회지 제5권 제2호*, 2000

[6] S.-H. Kim, Y. Yoon and I.-S. Jeung, "Nitrogen Oxides Emissions in Turbulent Hydrogen Jet Nonpremixed Flames: Effects of Coaxial Air and Flame Radiation," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp. 463-471

[7] S.-H. Kim, M. Kim, Y. Yoon and I.-S. Jeung, "The Effect of Flame Radiation on the scaling of Nitrogen Oxide Emission in Turbulent Hydrogen Nonpremixed Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, 2002, pp. 1951-1956

[8] T. R. Meyer, J. C. Dutton and R. P. Lucht, "Vortex Interaction and Mixing in a Driven Gaseous Axisymmetric Jet," *Physics of Fluids*, Vol. 11, 1999, pp. 3401-3415

[9] Y. Hardalupas and A. Selbach, "Imposed Oscillations and Non-premixed Flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, 2002, pp. 75-104

[10] D. Demare and F. Billot, "Acoustic Enhancement of Combustion in Lifted Nonpremixed Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 139, 2004, pp. 312-328

[11] Y.-C Chao, T. Yuan and C.-S Tseng, "Effects of Flame Lifting and Acoustic Excitation on the Reduction of NOx Emissions," *Combustion Science and Technology*, Vol. 113-114, 1996, pp. 49-65