

음파가진에 의한 수소 확산 화염의 NO_x 배출저감 및 혼합증진

한정재* · 김문기* · 윤상욱* · 윤영빈**†

NO_x Emission Reduction and Mixing Enhancement of Turbulent Hydrogen Diffusion Flame by An Acoustic Excitation

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

ABSTRACT

Measurements of flame length, width and NO_x emissions have been conducted to investigate the effect of an acoustic excitation on flame structure in turbulent hydrogen diffusion flames with coaxial air. The resonance frequency of oscillations was varied between 259, 514 and 728 Hz with power rate of 0.405 and 2.88w. When these frequencies imposed to hydrogen flames, dramatic reduction of flame length and NO_x emission was achieved. And acetone planar laser-induced fluorescence technique was used to measure a concentration of the near field of driven axisymmetric jet. The air-fuel stoichiometric line was plotted to investigate the mixing layer and development of air entrainment to fuel jet. Consequently, acoustic excitation on flame could enhance the air-fuel mixing resulting in abatement of NO_x emission quantitatively.

Key Words : NO_x Emission, Acoustic excitation, Mixing, Acetone PLIF, Resonance

기 호 설 명

u_F	Fuel velocity	τ_R	Flame residence time
u_A	Coaxial air velocity	I_{ac}	Acetone PLIF intensity
L_f	Flame length	I_{acp}	Pure Jet Acetone PLIF intensity
d_F	Fuel nozzle inner diameter	f_{ac}	Acetone PLIF intensity ratio
EINO _x	Emission Index of NO _x		

1. 서론

난류 비예혼합 화염에서의 질소산화물(NO_x) 생성에 관한 연구는 이론적, 실험적 접근을 기초로 하여 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 그 결과, NO_x 생성은 화염온도, 산소원자 농도, 가연혼합기와 연소생성물의 혼합률, 화염체류시간 등과 같은 변수들의 상호작용에 의하여 지배받고 있는

것으로 알려져 있다[1]. 특히, 수소 비예혼합 난류화염의 NO_x 배출지수 scaling이 화염의 형상과 물리, 화학적인 변수에 의해 지배 받음이 오래전부터 이론적, 실험적인 방법으로 오래전부터 연구되어 왔다[3-4]. 수소 비예혼합 화염에 대한 질소산화물을 화염체류시간으로 무차원화된 배출지수(EINO_x/τ_R)가 연료유속을 연료노즐 내경으로 나눈 값(global strain rate, u_F/d_F)의 1/2승에 비례하는 것으로 알려져 있다[5-6]. 동축공기가 있는 경우에도 위에서 관찰된 1/2 scaling이 유지되지만, 경우에 따라 기울기에서 벗어나는 정도가 달라지며, 헬륨을 희석한 수소화염에 대한 실험을 통하여 복사 열손실과 부력에 의한 영향

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처, ybyoon@snu.ac.kr

으로 그 이유를 밝히고 있다[6].

NO의 생성은 주로 Zeldovich Thermal NO 메카니즘으로 해석되어 왔으며, 화염길이와 줄어드는 고온부를 지나는 화염의 체류시간이 짧아져 NOx 발생률이 현저하게 감소하는 것으로 밝혀져 있다[6-7].

최근에는 NO를 저감하는 기법으로 외부 음향가진 장치를 이용한 방법이 연구되고 있다. 산업연소기에서 외부 음향가진을 하였을 때, CH라디칼의 와류구조와 화염이미지를 측정하여 음파를 이용한 제어기법으로 화염길이 감소가 NOx저감에 기여함을 밝혔고[7], 마이크로 Actuator를 이용한 펄스파가 동축제트의 혼합에 미치는 영향을 알아보기 위해 "preferred mode"에서 PLIF를 이용한 제트의 와류구조에 대한 연구가 있었다[8]. 비예 혼합 부상화염에서 Mie 산란기법과 PIV, LDV, Tomography 등의 기법을 적용하여 가진 주파수가 부상 높이와 재 부착 현상에 끼치는 영향에 대한 정량적인 분석도 수행되었다[9].

음파가진 시 화염구조에 대한 보다 구체적인 연구는 쉘리켄 신호강도를 주기적으로 측정하여 혼합층의 교란에 대한 연구와[10], 음향으로 가진된 동축제트의 와류작용을 파악하기 위해 Dual PLIF, CARS등의 기법으로 혼합률과 와류구조층의 온도분포를 측정한 연구결과가 있다[11].

본 실험에서는 동축공기가 있는 수소 난류 비예 혼합화염에서 음파가진이 NOx 저감에 미치는 영향을 분석하고 연료, 공기의 혼합층 구조를 파악하고자 하였다. 먼저, 연소기내부에서의 주파수 특성을 측정하여, 화염에 미치는 영향으로 화염길이, 폭 및 ENIOx 저감에 미치는 영향을 알아 보았다. 둘째로, 비반응 조건에서 혼합특성을 알아보고자 아세톤 PLIF를 통하여 주기적인 음파가진이 수소/공기 혼합구조를 그래프로 표기하였고, 음향학적 연소실의 특성과 NOx 저감 메카니즘을 진단함으로써, 음파가진이 질소산화물에 저감에 미치는 인자으로써, 그 효용성을 알아보하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

2.1.1 NOx 및 화염길이 측정 장치

실험장치는 참고문헌[5]의 Fig. 1에서와 같이 연료노즐, 동축공기 노즐, 주위공기 등으로 구성되는 유동 공급부와 가시화 창으로 구성된 시험부, 연소 후 생성된 가스를 배출하는 배기부로 구성되어 있다. 연소기 시험부의 단면은 20cm×20cm의 정사각형이며, 높이는 80cm이다. 연료노즐은

연소기 중앙에 위치하며 이 노즐을 통해 연료인 수소가 분출된다. 연료 노즐의 내경은 3.0mm이고, 동축공기 노즐은 연료 노즐과 동심이며 그 내경은 15.0mm이다. 당량비를 0.25로 일정하게 유지하기 위해서 주위 공기의 유량을 조절한다. 하지만, 주위 공기 속도는 화염 특성에 영향을 끼치지 않도록 매우 작게 유지하였다.(0.1 m/s). 동축공기와 주위류는 허니컴과 구슬을 이용하여 유동이 균일하도록 만들었다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 NOx 측정장치(Horiba, Mexa720)는 배기 덕트 후방부에 위치하며, Zirconia(ZrO₂)-ceramic 센서방식으로 샘플링 가스를 채집할 필요 없이 프로브에서 직접 측정하는 방식으로 기존의 화학발광법에 비하여 빠른 반응속도를 가진다(<0.7s). 측정 범위는 0-3k ppm이다. 제트의 유동을 음파로 가진하기 위해 compression driver(Sammi, SU-150E/F)를 동축공기 유동라인에 장착하였다. 스피커의 최대 출력은 150 W이며, 150-5,000Hz의 주파수 범위를 출력할 수 있다.

음파는 Labview 보드를 통하여 sampling rate 5,000 S/s로 가진되어 Amplifier로 증폭된 신호가 스피커를 가진한다.

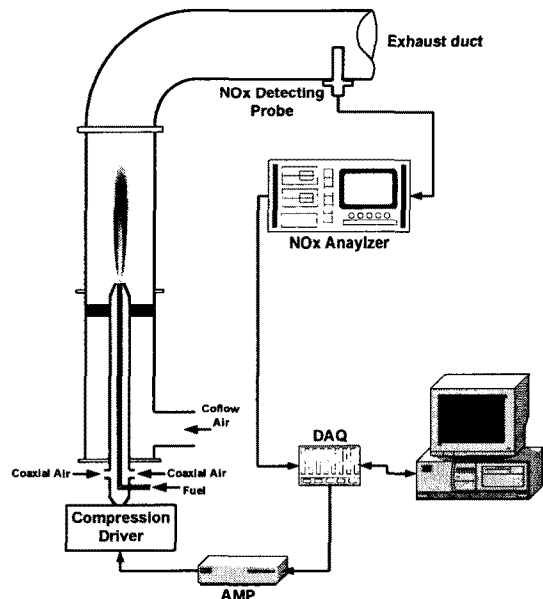


Fig. 1 NOx detecting probe and Excitation system

2.1.2 Acetone PLIF

비반응 조건에서 수소/공기 혼합제트의 유동특성을 분석하고자 아세톤 PLIF를 적용하였다. 아세톤 PLIF는 유동의 특성을 진단하는 기법으로

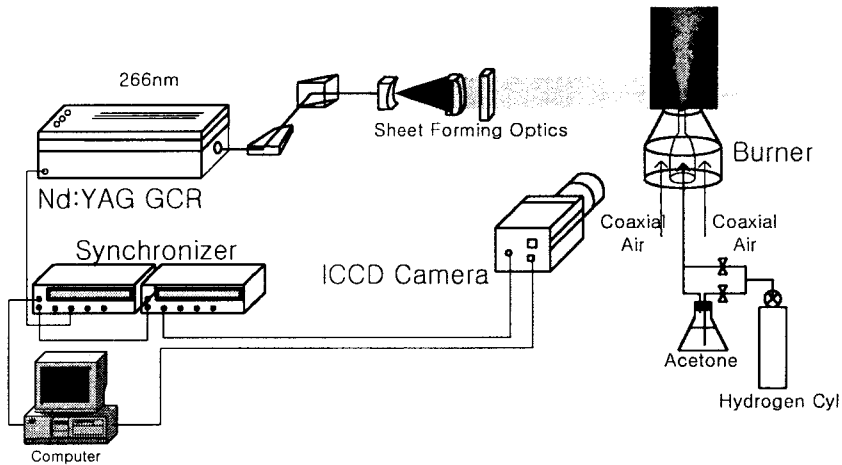


Fig. 2 Acetone PLIF 장치

입사되는 빛과 상호작용 없이 유동영역을 진단하기에 유용한 작용자(Tracer)로 가스유동의 아세톤 형광신호를 측정함으로써 간단하고 정확하게 혼합물 등의 유동의 특성을 파악할 수 있다. 아세톤은 넓은 범위의 레이저 파장(225-320nm)을 흡수하며, 이 때 형광신호는 푸른색 영역(350-550nm)의 빛을 발하며, 445nm, 480nm에서 그 강도가 최대가 된다.

본 실험에서 연료노즐을 통하여 아세톤을 유입하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 밀폐된 삼각 플라스크에 액체 상태로 담겨 있는 아세톤으로 수소가 유입되어 아세톤을 포화시킨 후 Bypass를 통한 수소와 만나 연료 노즐로 들어가게 하였다. 아세톤 형광신호는 ICCD 카메라(Stanford Computer Optics, 4 Quick 05)로 받아들였다.

카메라가 얻는 유동장은 노즐출구에서 96.7mm × 72.5mm(Resolution 680×480 pixels)의 크기이며, 출구에서 140mm까지 측정하기 위해 축 방향으로 2구역으로 나누어 100장의 이미지를 획득, 평균하여 이미지를 구하였고 노이즈를 제어하기 위해 레이저 입사만 있을 경우 이미지를 측정 이미지에서 제거하였다. 아세톤 형광신호는 입사 레이저 강도에 비례하여 신호의 강도가 달라지므로 ICCD 카메라에서 측정된 신호가 포화되지 않게 하기 위해, 수소의 물리화학적 특성 유지할 수 있는 범위 내에서 아세톤이 유입되도록 하였다.

2.1.3 실험조건

실험은 연료 Reynolds 가 5000, 7000, 9000(175, 245, 315m/s)의 세 가지 조건에서 동축공기는 0, 10, 20m/s에서 이루어 졌으며 동축공기의 유속에 따른 화염의 형태를 확인하여 부착화염 영역에서 이루어 졌다. 본 실험장치에서 부착화염과 부상 화염의 실험조건은 Reference [12]을 참조하였다.

아래의 조건(Table 1)에서 NOx 및 화염길이 측정을 수행하였고, 특정 주파수와 가진 출력을 변화시키면서 NOx 및 화염길이 변화도 측정하였다. 연료 유속이 빠른 경우 작은 출력의 음파가진에도 쉽게 부상하기 때문에 유동조건과 음파가진 조건은 상호간에 부착화염상태에서 적절하게 조작되었다.

Table 1 Experimental conditions for hydrogen flames with coaxial air and Excitation conditoin through coaxial air line

유동조건	
u_F	175, 245, 315 m/s
u_A	0, 10, 20 m/s

음파가진 조건	
Frequency	259, 514, 728 Hz
Power rate	0.405, 2.88 W

3. 결과 및 고찰

3.1 주파수에 따른 화염 특성

음파가 화염에 미치는 영향을 알아보기에 앞서, 본 실험장치의 형상에 따른 음파의 주파수 특성을 알아볼 필요가 있었다. 음파는 동축공기 라인을 통하여 유입되기 때문에 동축공기의 라인의

직경과 길이에 따라 먼저 modal frequency가 정해지나, 음파가 라인을 빠져나가는 과정에서 다른 크기의 노즐과 만나서, 반사와 회절을 겪는 동안에 변질되어 동축공기 라인의 형상만으로는 특성 주파수를 구할 수는 없다. 따라서, 스피커에 100-1k Hz의 랜던 주파수를 발생하여 노즐 출구에서 마이크로폰으로 주파수를 측정하였으며 그 결과가 Fig. 3에 잘 나타나 있다. 음압은 크게 11가지 주파수에서 크게 측정되었다. 이 주파수는 밀폐된 상태의 연소기에서 공명하는 특정주파수이며, 이 주파수가 NOx 저감에 기여할 수 있는가를 알아보기 위한 근본적인 원인을 찾고자 하였다.

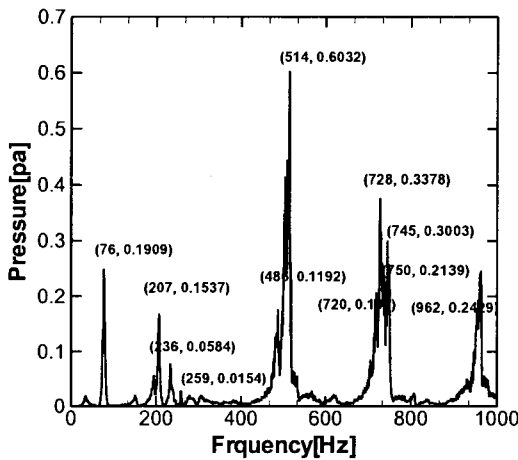
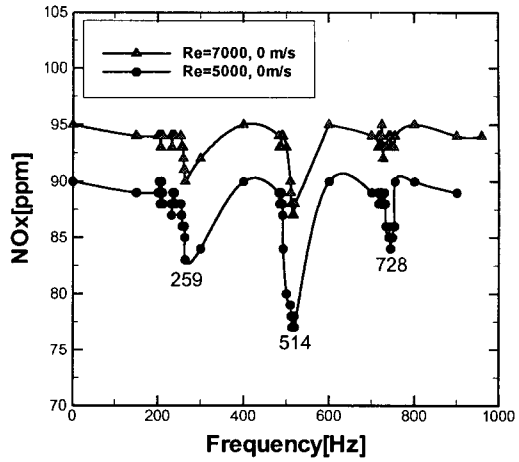


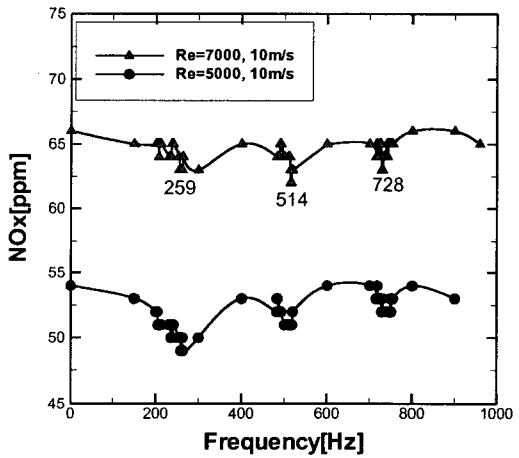
Fig. 3 Sound pressure level in response to excited frequency

Fig. 4(a),(b)는 어떠한 주파수가 NOx 저감에 가장 기여하는지를 알아보기 위해서, 동일한 출력(2.88 W)으로 스피커를 가진하여 150-1k Hz 까지 주파수를 변화시키면서 NOx 배출량을 측정 한 결과이다. Fig. 3에서 공진주파수 근처에서는 작은 주파수 변화에 의해서도 공진이 달라져 음압에 상당한 차이가 날 수 있으므로, 공진주파수 ± 5 Hz로 미세조정하여 NOx 배출량을 측정하였다.

Fig. 4(a)는 동축공기가 없는 경우, 연료 레이놀즈수가 각각 $Re=5000(u_f=175 \text{ m/s})$, $Re=7000(u_f=245 \text{ m/s})$ 일 때, NOx 배출량을 보여주고 있다. 음파의 출력은 이 유동조건에서 화염이 안정적인 부착화염 상태를 유지할 수 있는 조건으로 유지할 수 있는 최대 출력으로 가진된 것이다. NOx 배출저감은 공진주파수 근처에서 두드러지게 나타났고, 특히 259, 514, 728 Hz에서 많은 저감이 있었으며, 최대 18%가 줄어들었다 (514 Hz).



(a)



(b)

Fig. 4 Variation of fine tuned NOx emissions along frequencies with (a) $u_A=0 \text{ m/s}$ & sound power 2.88 W (b) $u_A=10 \text{ m/s}$ & sound power 0.405 W

Fig. 4(b)은 (a)와 동일한 연료유속에서 동축공기가 있는 조건에서 NOx 저감량을 측정한 결과이다. 동축공기가 없는 경우보다 NOx 저감률은 줄어들었다. 그 이유는 동축공기가 연료와 공기의 혼합을 증진한 상태에서 음파가진에 의한 혼합증대가 크게 두드러지지 않았음과 동축공기가 있는 경우 동일한 출력(2.88 W)로 가진 할 경우 부상화염이 되거나 화염 날림이 일어나 이 조건에서는 0.405 W으로 출력을 조절하여 NOx 배출량을 측정하였기 때문이기도 하다. 그러나, 이 조건에서도 음파가진에 의한 상당량의 NOx 저감이 있었으며, 저감이 많은 주파수는 동축공기가

없는 경우와 차이를 보이지 않았다. 다만, Fig. 5(a)에서 514 Hz에서 괄목한 만한 저감이 있는 반면 Fig. 4(b)에서는 259, 514, 728 Hz에서 비슷한 량, 약 3-5 ppm(8-12%)의 저감이 있었다.

따라서, 본 실험에서는 동일한 출력으로 음파를 가진하는 경우 위의 가장 NOx 배출저감이 많은 주파수인 259, 514, 728 Hz에서 NOx 배출량이 줄어드는 것을 확인하고 화염길이와 폭 변화 그리고 연료과 공기의 혼합장에 미치는 영향을 분석하였다.

3.2 음파가진에 의한 화염길이, 폭 변화와 EINOx

가진 주파수는 앞에서 언급한 것과 같이 259, 514, 728 Hz 세 가지 조건이며 화염길이, 폭 및 NOx 발생량을 동축공기 조건을 달리하면서 측정하였다. Fig. 5은 동축공기 없는 상태에서 단순 확산화염(Fig. 5(a)), 스피커 출력을 2.88 W로 고정한 상태에서 259 Hz로 가진한 화염(Fig. 5(b)), 514 Hz로 가진한 화염(Fig. 5(c)), 728 Hz로 가진한 화염(Fig. 5(d))의 이미지를 각각 나타내고 있다. 유동조건은 연료 레이놀즈수는 $Re=5000$ ($u_F=175$ m/s)이고 동축공기의 속도, $u_A=0$ m/s이다.

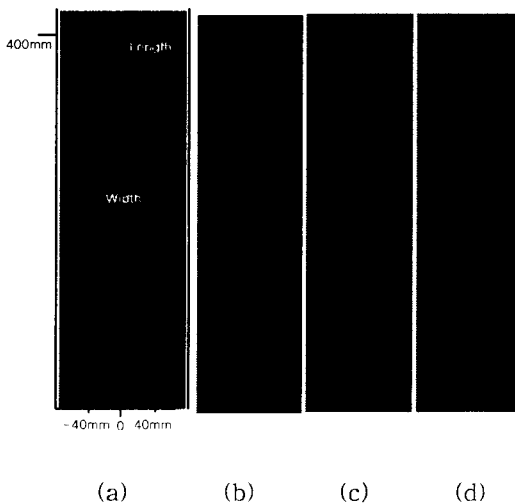


Fig. 5 Flame geometry varying frequencies (a) without excitation (b) 259 Hz (c) 514 Hz (d) 728 Hz with sound power 2.88w at fuel jet velocity $u_F=175$ m/s, coaxial air velocity $u_A=0$ m/s

화염길이는 디지털 카메라(Cannon, EOS D20)

를 이용하여 직접사진을 적당한 노출을 준 상태에서 획득하였으며, 획득한 사진으로부터 화염의 길이와 폭은 적당한 Threshold를 주어 계산하였다. 단순확산화염(Fig. 5(a))에 비하여 공진 주파수로 가진을 하는 경우, 급격하게 화염길이와 폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 514 Hz에서 가장 화염길이와 폭의 감소가 있었으며, 화염길이가 15%, 폭이 39% 줄어들었다. Kim et al.[5, 6]은 이미 단순확산화염에 동축공기가 있을 경우 화염길이가 짧아지고, 동축공기가 있는 조건에서 음파를 가진하면 화염길이 더욱 짧아지는 결과를 보여주었다. 이는 화염의 예혼합 효과에 의해 연료와 공기의 활발한 혼합의 결과이며, 공진주파수로 가진하는 경우 화염길이를 줄일 수 있으며, 감소율은 같은 출력일 경우 음압이 강한 주파수에서 더 크다. 이 현상은 다른 연구에서도 관찰되었다[7].

Fig. 6(a)는 음파가진에 의한 화염길이 변화를 화염길이를 연료노즐의 내경인 d_f 로 무차원화시킨 값인 L_f/d_f 를 동축공기와 연료의 유속비인 u_A/u_F 의 함수로 표시한 결과이다. 화염길이는 동축공과 연료의 유속비가 증가할 수록 지속적으로 감소하고 있다. 동축공기가 증가하는 경우 데이터가 오른쪽 아래에 위치하고 있다. 이는 같은 연료유속인 경우 화염길이가 짧아짐을 의미한다. 음파가진 시 화염길이는 정도의 차이는 있지만, 모든 조건에서 아래쪽에 위치함을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)는 동일한 조건에서 EINOx(연료 1kg당 NO의 gram 수)를 u_A/u_F 의 함수로 표시한 결과이다. EINOx의 데이터 역시 유속비가 증가함에 따라 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 EINOx 값을 유속비와 지수함수의 수식으로 표현할 수 있음을 의한다. 또한, 음파가진이 있는 경우 가진이 없는 경우보다 EINOx가 줄어들음을 알 수 있는데, 이는 Fig. 6(a)에서 나타났듯이 유동장에 음파가 가진되면 연료와 공기의 혼합이 증대되어 화염길이가 줄어들게 되며 그에 따라 화염의 체류시간이 줄어들게 된다. 따라서 고온부에 머무르는 연소생성물의 체류시간이 감소하여 NOx가 발생하는데 필요한 특성시간이 줄어들게 된다. 이에 따라 발생하는 NOx의 양은 유사한 경향성을 보이며 줄어들게 된다.

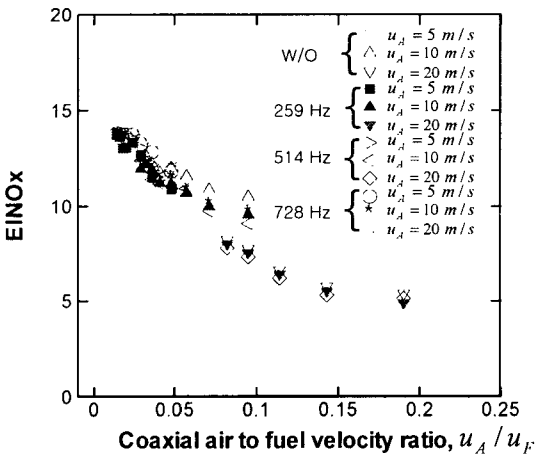
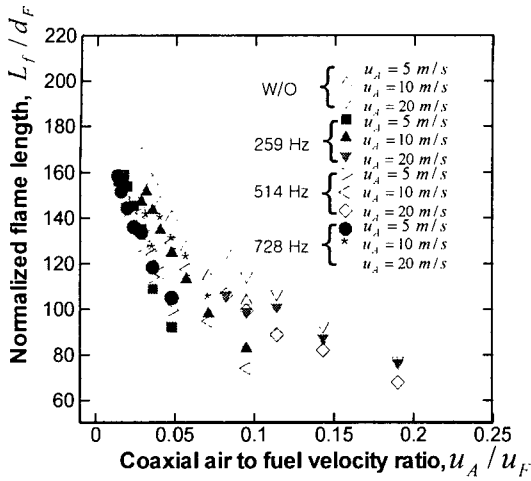


Fig. 6 (a) Normalized flame length and (b) EINOx variation as a function of coaxial air to fuel velocity ratio with sound power 0.405 W

3.2 Mixing Enhancement Result using Acetone PLIF

세 가지 조건의 주파수에서 아세톤 PLIF 실험을 하였다. Fig. 7(a)는 순간적인 아세톤 PLIF 신호를 이미지 처리한 것이고, Fig. 7(b)는 100장의 PLIF 신호를 평균처리한 후, 레이저 강도의 분포에 따라 보정한 이미지이다. 아세톤의 형광 신호는 아세톤의 부분압에 비례하므로[15], 형광 신호의 강도와 몰분율은 비례관계에 있다. 따라서, 순연료(pure jet)의 신호강도(I_{ac})와 혼합층(mixing layer)의 신호강도(I_{ac})를 비교하여 연료의 혼합 상태를 알 수 있다.

mixing layer)의 신호강도(I_{ac})를 비교하여 연료의 혼합 상태를 알 수 있다.

$$f_{ac} = \frac{I_{ac}}{I_{acp}}$$

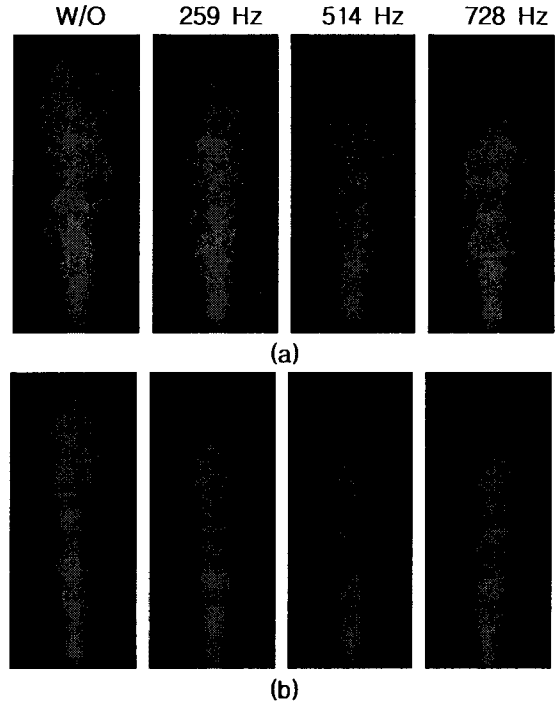
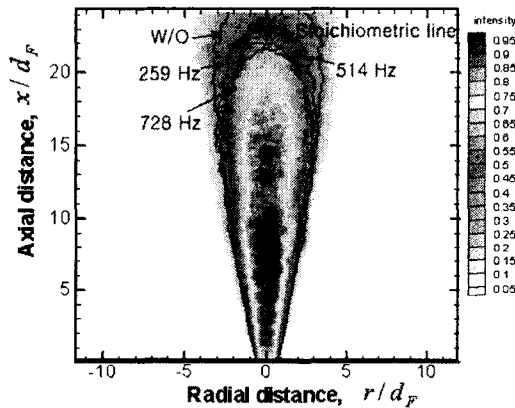


Fig. 7 (a) Instantaneous and (b) average acetone PLIF images: W/O excitation, 259 Hz, 514 Hz, 728 Hz excited with 2.88 W

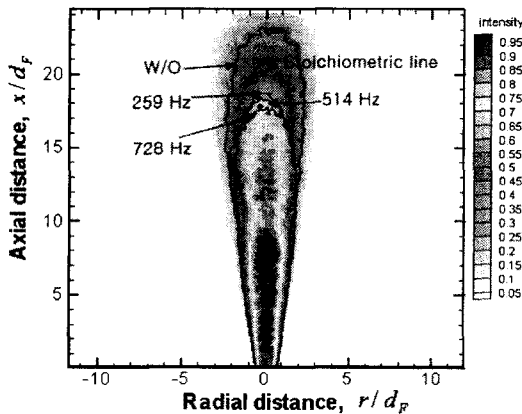
본 실험에서는 H_2 를 연료로 사용하였으므로, 연료와 공기가 혼합하는 과정에서 연료층의 신호 감쇠가 일어나며, 몰 기준으로 stoichiometric 신호 분포를 구할 수 있다. 본 실험은 밀폐된 상태에서 전체적으로 당량비가 0.25 조건으로 연료과 공기가 유입되고 있으며, 연료와 공기가 이론 당량비 $\phi=1$ 인 지점에서 아세톤의 형광신호는 약 0.3을 나타낸다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 아세톤 신호의 분포가 음파를 가진하는 경우 달라지는 것을 확인할 수 있다. 신호의 분포를 보다 정량적으로 확인하기 위해 동축공기 속도를 달리하면서 주파수에 따른 PLIF 신호의 강도를 Contour로 표기하였고, 수소와 공기의 이론 혼합층 구조를 측정하기 위해 이론당량비선을 조건별로 표시하였다 Fig. 8(a)는 동축공기가 없는 조건으로, 동축공기가 빨라지면 연료제트의 폭이 좁아지는 것을 확인할 수 있으며(Fig. 8(b),(c)), 음파를 가진 하는 경우에는 가진이 없을 때와 비교하여 이론당량비선이

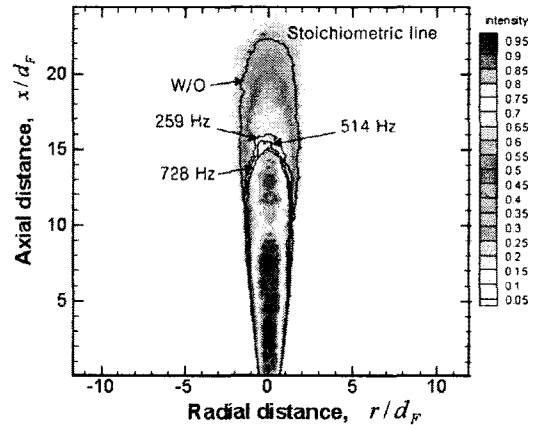
좁아지며 짧아지는 것을 알 수 있다. 즉, pure jet의 폭이 좁아지며, 후류에서는 강한 난류의 작용으로 흩어지는 정도가 커지고 있다. 특히, $x/d_f=5$ 까지는 음파가진에 의한 당량비선의 변화를 찾아보기 어려우나, 보다 후류로 갈 수록 교란되는 정도가 심해지며, 동축공기가 강한 경우 일수록 그 정도는 더욱 커진다. 즉, 빠른 동축공기 조건에서 연료노즐축구와 가깝게 가진에 의한 교란이 일어나 연료가 공기의 섞임이 활발히 일어나서 순연료의 형광신호가 급격히 감소한다. 이는 강한 동축공기 조건에서 음파가진에 의한 화염이 쉽게 부상되는 결과와 일치한다고 할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Normalized fuel intensity distribution (f_{ac}) using Acetone PLIF by varying frequencies (a) coaxial air velocity = 0 m/s, (b) 10m/s, (c) 20 m/s excited with 2.88 W

Fig. 9는 연료노즐의 중심선(x 축)을 따라 형광신호의 강도가 감소(mole fraction decay)되는 것을 그리고 있다. 연료제트의 물분율은 $x/d_f=7$ 까지는 일정하게 유지되다가 이 후부터는 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 음파를 가진 하는 경우 그 감쇠율을 더욱 커지고 있으며, 앞장에서 설명하였던 혼합층의 발달에 의한 연료 형광신호의 감쇠가 일어났다.

Fig. 10은 동일한 주파수(514 Hz)로 가진하는 경우 동축공기 조건에 따른 중심선 신호강도의 감쇠를 보기 위한 그래프이다. 동축공기가 빨라질수록 신호가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있으며, 이 결과는 Fig. 8에서 동축공기 변화시 이론당량비가 노즐출구쪽에 가깝게 급격히 감소하는 것과 동일한 결과이다.

Fig. 11은 두 가지 동축공기 조건에서 측정 위치를 달리하며 형광신호의 similarity 즉, 반경(radial)방향으로 연료가 어떻게 분포하는지 측정 한 그래프이다. 후류쪽에서 음파가진에 의한 형광신호가 급격히 줄어드는 것은 보다 강한 난류의 영향을 받기 때문에 동축공기가 강할수록 그 정도가 강해진다는 결과를 위에서부터 얻었다.

결론적으로 비반응 수소확산제트에서 아세톤 형광신호 감쇠는 공기와 연료의 혼합층에 대한 외부의 영향으로 기인되었으며, 공진 주파수에 따라 그 정도가 달라지며, 동축공기가 빠른 경우 보다 감쇠가 빨라진다는 결과를 얻었다.

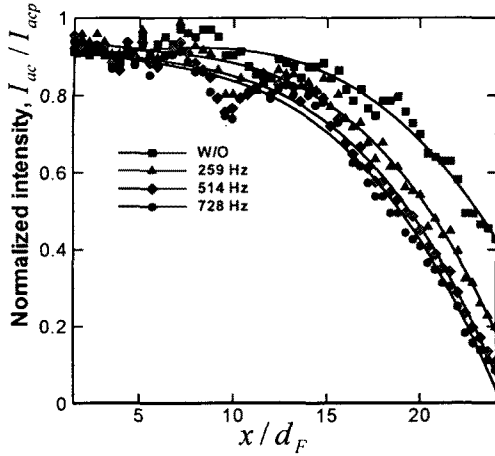


Fig. 9 Fuel mole fraction(f_{ac}) along center line in case of $U_F=175$ m/s, $U_A=0$ m/s
(■: W/O, ▲: 259 Hz, ◆: 514 Hz, ●: 728 Hz)

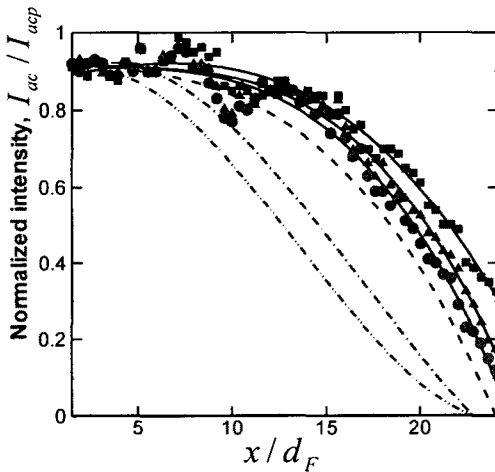


Fig. 10 Fuel mole fraction(f_{ac}) along center line in case of $U_F=245$ m/s
W/O(■: 0 m/s, ▲: 10 m/s, ●: 20 m/s)
Excited with 514 Hz, 2.88 W(dashed: 0 m/s, dashdot: 10m/s, dashdotdot: 20 m/s)

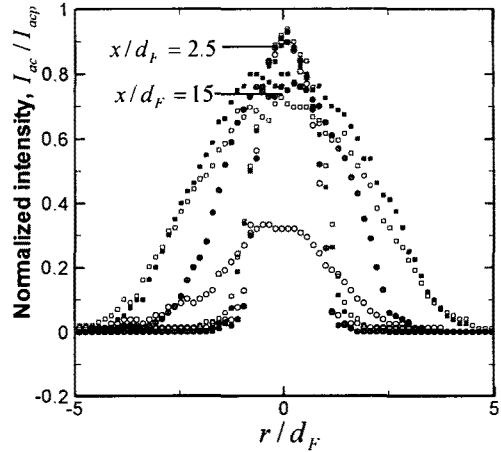


Fig. 11 Fuel mole fraction(f_{ac}) profile at $x/d_F=2.5$ and $x/d_F=15$ in condition of $U_F=245$ m/s, $U_A=0, 20$ m/s
(■: W/O, $U_A=0$ m/s, □: excited, $U_A=0$ m/s
●: W/O, $U_A=20$ m/s, ○: excited, $U_A=20$ m/s)

4. 결론

각각 세 가지 연료유동과 동축공기기로 실험 조건을 나누어져 음파가진에 의한 NOx emission 저감을 알아보기 위해 화염길이와 EINOX를 측정하였고, 공기와 연료의 혼합구조를 측정한 결과 다음과 같은 세 가지 결론을 얻었다.

첫째, 동축공기 라인과 연료노즐은 포함하는 연소실 내부에서 공진하는 특정 주파수가 존재하며, 강한 음압을 나타낸다. 전 대역 주파수와 이 공진주파수로 NOx 저감을 알아보기 위해 Fine tuning한 결과 259, 514, 728 Hz에서 NOx emission이 크게 줄어들었다.

둘째, 위 주파수로 가진시 동축공기와 연료의 유속비에 따라 다소의 차이는 있지만, 화염길이와 EINOX의 저감정도가 비슷한 경향을 보이며 줄어들었으며, 이는 화염길이와 NOx와 밀접한 관계가 있음을 의미한다.

셋째, 동축공기가 있는 경우 연료의 아세트톤 형광신호를 측정된 결과, 음파 가진에 의한 이론당량비 곡선의 변화와 연료의 물분율감쇠는 음파가진이 공기의 유입을 보다 활발히 하게 하여 공기와 연료의 혼합을 증진한 결과이며, 이 경향은 동축공기가 빨라질수록 크게 나타난다.

따라서, 수소 확산화염에서 외부 음향장치를 응용한 가진으로 NOx emission 저감에 크게 기

여하는 주파수는 공진주파수이며, 연소유동장에 미치는 강한 음압으로 기인하여 음파의 가진은 공기와 연료의 혼합을 증진하여, 화염면이 보다 일찍 일어나며, 고온부에 머무르는 체류시간이 감소하여 NO_x 발생의 저감을 가져올 수 있는 기법으로 그 가치가 있다.

참고문헌

- [1] S. R. Turns, "Understanding NO_x Formation in Nonpremixed Flames: Experiments and Modeling," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 21, 1995, pp.361-385
- [2] S. R. Turns, " Oxides of Nitrogen from Turbulent Jet Flames: Part I-Fuel Effects and Flame Radiation," *Combustion and Flame*, Vol. 87, 1991, pp. 319-335
- [3] R.-H. Chen and J. F. Driscoll, "Nitric Oxide Level of Jet Diffusion Flames: Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameter," *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 28, 1990, pp. 281-288
- [4] J. F. Driscoll, R.-H. Chen, and Y. Yoon, "Nitric Oxide Level of Turbulent Jet Diffusion Flames: Effects of Residence Time and Damkohler Number," *Combustion and Flame*, Vol. 88, 1992, pp. 37-49
- [5] 김승한, 김문기, 윤영빈, "수소 난류확산화염에서 NO_x 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] O. Delabroy, E. Haile, "Passive and Active Control of NO_x in Industrial Burners," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 16, 1998, pp. 64-75
- [8] Naoki Kurimoto, Yuji Suzuki, "Active Control Jet Mixing and Combustion with Arrayed Micro Actuators," *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics*, 2001, pp. 511-516
- [9] D. Demare and F. Billot, "Acoustic Enhancement of Combustion in Lifted Nonpremixed Flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, 2002, pp. 75-104
- [10] M. R. Davis and Li Hai Lin, "Structures Induced by Periodic Acoustic Excitation of a Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 103, 1995, pp. 151-160
- [11] T. R. Meyer, J. C. Dutton, "Vortex Interaction and Mixing in A Driven gaseous Axisymmetric Jet," *Physics of Fluids*, Vol. 11(11), pp. 3401-3415
- [12] 김문기, 한정재, 윤상욱, 윤영빈, "음파가진에 의한 동축공기 수소 확산화염의 NO_x 배출저감연구," *한국연소학회지* 제10권 제1호, pp. 13-19, 2005
- [13] J.-Y. Chen, 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
- [14] A. Lozano, B. Yip, "Acetone: A Tracer for Concentration Measurements in Gaseous Flows by Planar Laser-Induced Fluorescence," *Experiments in Fluids*, Vol. 13, 1992, pp. 369-376