

비에혼합 제트화염에서 고주파수의 노즐 구멍음에 의한 부상화염 혼합성능에 관한 연구

조준익* · 이기만†

A Study on the Mixing Capacity of Lifted Flame by the Nozzle Hole-tone of High Frequency in Non-premixed Jet Flames

Joonik Jo and Kee-Man Lee

Abstract. An experimental investigation of the characteristic of non-premixed lifted flames with nozzle hole-tone of high-frequency has been performed. Before the fuel was supplied to nozzle, the fuel was supplied through a burner cavity which was located under the nozzle. The fuel passed through the excitation cavity under the influence of the high-frequency affects the lifted flame characteristics. The measurements were performed in flow range that occurs lifted flame and blow out. When the high-frequency is generated from burner cavity, the lifted length became shorter, and noise reduced comparing to unexcitation case. Additionally, operating flow range was increased and diameter of flame base became smaller with high-frequency effect. Through this experiments, it's ascertained that the high-frequency excitation can be adopted with effective method for flame stability and noise reduction.

Key Words: Lift-off flame(부상화염), Hole-tone(구멍음), Combustion noise(연소소음), Flame stability(화염안정화)

기호설명

c : Sound velocity
k : Ratio of specific heat
R : Gas constant
 T_s : Surface temperature
n : Resonance mode number
l : Cavity length
dBA : A-weighted sound level
 L_{eq} : Equivalent continuous sound level

1. 서 론

부착화염에 비해 부상화염은 연소성능이 뛰어나지

만 이는 화염 안정화 문제로 상업용 또는 가정용 연소기 적용에 부착화염 보다 많은 어려움이 있다. 화염이 생성됨에 있어서 일정한 유속에서는 노즐에 화염이 부착된 형태의 부착화염(Attached flame)이 발생하지만 그보다 더 높은 유속이 발생하는 구간에서는 화염은 더 이상 노즐에 부착되지 못하고 노즐로부터 떨어진 곳에 형성되게 된다. 이를 부상화염(Lifted flame)이라고 하고 유속이 증가할수록 노즐로부터 화염 밑단까지의 거리인 부상높이(Lift-off height)가 증가하게 되며 이는 화염날림현상(Blow-out)⁽¹⁾⁻⁽²⁾ 현상이 발생하는 시점까지 증가하게 된다. 또한 부상된 화염은

부착화염에 비해 높은 연소 소음을 발생시키게 되는 데 연소소음도 마찬가지로 유속증가에 따라 꾸준히 증가하게 된다. 이처럼 높은 유속에서 발생하는 부상화염 비에혼합 제트 화염의 안정화 연구에 있어서 중요한 논점 중에 하나로서 화염장에 스피커를 통한 음향 가진의 효과로 화염의 구조에 변화를 주는 방법⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ 등의 비에혼합 제트 화염에서 연소성능 향상을 위한 연

†순천대학교 기계우주항공공학부

E-mail : kmlee@sunchon.ac.kr

*순천대학교 대학원 우주항공공학과

구가 활발히 이루어져왔다⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾. 기존의 외부 가진방법은 가진 주파수를 변화시킬 수 있는 장점이 있지만 구조가 복잡해지며 스피커 등의 고장으로 인해 가진의 효과가 발휘되지 못할 수도 있는 단점 등이 있다.

본 연구는 그 동안 화염에 가진을 주는 여러 가지 방법을 토대로 간단한 유로계 변경을 통해 화염의 안정화에 대해 살펴보고자 버너 공동(burner cavity)을 제작, 사용하였으며 연료가 노즐로부터 분출되기 전 공동을 통과하면서 노즐 구멍에서 발생하는 구멍음(Hole-tone)의 효과로 고정된 단일 특정 주파수가 발생하게 되고 이로 인해 가진된 연료가 노즐로부터 분출되어 부상화염을 이룰 때 화염의 부상 높이가 변화와 소음 감소의 전반적인 특성을 파악하기 위한 것이다. 유속의 변화에 같이 변화되는 레이놀즈 수에 따라 부상 화염의 부상 높이가 화염의 내부 직경인 화염 폭을 비교하기 위해 유동가시화 기법으로 슐리렌(Schlieren)촬영, 초고속카메라(High-speed Camera) 및 PIV 촬영을 통해 부상화염이 형성되는 유동장을 분석하였으며 마이크로폰을 이용하여 버너 공동이 연소 소음에 미치는 영향을 확인 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 높은 유속으로 부상화염을 생성하기 위해 노즐은 2 mm의 작은 스테인리스 스틸관을 사용 하였고 연료는 버블 미터(bubble meter)를 통해 검증된 상용 프로판을 공급 하였으며 노즐 하단에 장착된 버너 공동은 직경과 높이가 14 mm로 제작하였다. 가진의 정도 검증 및 부상 화염의 연소 소음과 각 소음의 주파수 특성을 알기 위

해 노즐 출구부분에 마이크로 폰을 설치하였고 이는 전문 주파수 분석기(01 dB Co., DB4)를 통해 샘플링 주파수 51.2 kHz로 측정시간 10초 동안 데이터를 수집 하였으며 측정데이터는 인간의 가청 주파수중 인간의 청각특성을 반영하여 산업 현장 소음 측정에 일반적인 A-Weighting Filter로 분석 되었다. 화염의 부상 높이가 화염 밑면 폭 측정을 위해 CCD camera를 이용하여 직접 사진을 촬영 후 픽셀수를 판독하여 거리화 하였으며 조금 더 자세한 유동장의 관찰을 위해 슐리렌 촬영과 초고속 카메라(frame speed: 2000¹sec)가 사용되었다. 유동장 관찰과 더불어 유동장 분석을 위해 PIV 장치를 통해 촬영한 이미지를 분석하였다.

2.2 실험 방법

간단한 유로계의 변경으로 노즐 하단에 위치한 버너 공동은 10,000 Hz의 고주파를 발생시키게 되고 이로 인해 가진 된 연료로 노즐로부터 생성된 부상화염을 관찰 하고자 실험변수를 유속 증가에 따른 레이놀즈 변화를 토대로 부상지점인 레이놀즈 수 5,000 부근에서 화염 날림 현상이 발생하는 시점인 레이놀즈 수 27,000 부근을 차례로 관찰하며 10,000 Hz이 고주파로 가진되는 효과를 갖는 버너공동 장착 유무에 따라 부상높이와 화염폭의 비교 소음의 음압정도 등을 비교하며 본 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 버너공동 가진 효과에 의한 화염 유동장의 가시화

특정 레이놀즈 수의 대표적인 화염의 직접사진을 Fig. 2를 통해 나타내었다. 직접 사진에 표시된 내용을 통해 알 수 있듯이 버너 공동이 있는 경우 화염의 부

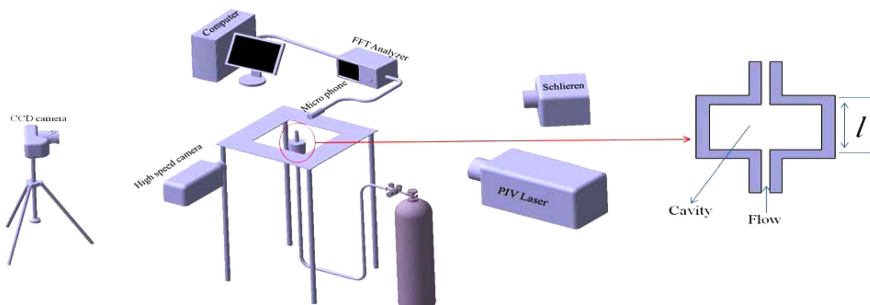


Fig. 1. Experimental set-up.

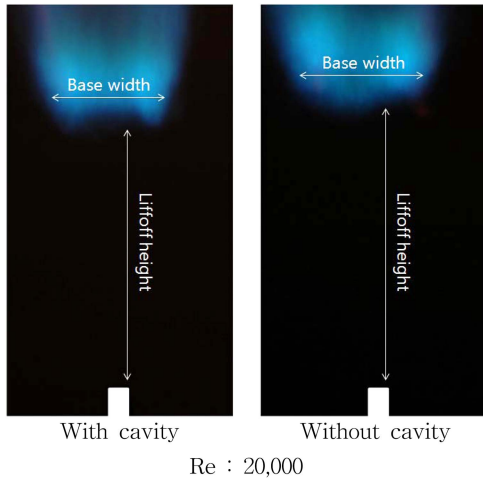


Fig. 2. Representative photos of flames.

상높이와 화염폭이 버너 공동의 효과를 보지 못한 경우에 비해 감소됨을 확인 할 수 있었다. 이 직접 사진을 토대로 유동장을 가시화하여 면밀하게 관찰하기 위해 슐리렌 촬영 기법으로 화염의 전반적인 크기와 형태를 나타낸 촬영한 결과를 Fig. 3에 나타내었고 그림을 통해서 알 수 있듯이 부상높이와 화염 밑면에서 화염폭이 전반적으로 감소됨을 알 수 있다. 연료가 노즐에서부터 화염 밑단의 도달 시점까지를 확대하여 면밀히 보기 위해 초고속 카메라를 이용하여 촬영한 사진도 Fig. 4에 나타내었고 그림에 연료의 분출각을 쉽게 비교하기 위해 실선으로 표시해 두었다. 이러한 사진을 통해 나타난 부상 화염의 부상 높이와 화염 폭의 변화를 Fig. 5과 Fig. 6의 선도로 표현 하였다.

나타난 선도처럼 부상지점에서는 부상높이와 화염폭의 길이변화가 거의 나타나지 않지만 실험변수인 레이놀즈 수 증가에 따라 그 격차가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 PIV 기법을 통해 취득한 정량적 유동장 영상을 나타낸 Fig. 7을 통해 확인 할 수 있었는데 버너 공동 장착 유무에 따른 부상 화염의 분사노즐과 화염 기저간 유동패턴을 정량적으로 비교 분석하여 보았다. 그림 상단에 나타나 있는 실선은 화염의 부상높이이며 이는 유동장 분석을 통한 후의 그림에서는 화염 기저의 위치를 알기 쉽지 않기 때문에 PIV장치를 통해 촬영된 사진의 분석영역을 동일한 크기로 결정해 두고 유동장 분석 전, 후의 사진을 비교하여 화염의 위치가 동일하게 표현될 수 있도록 하였다. 분출

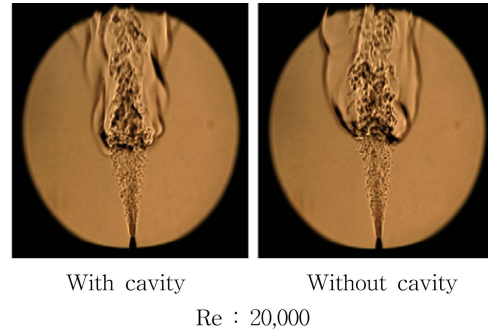


Fig. 3. Schlieren photos of flames.

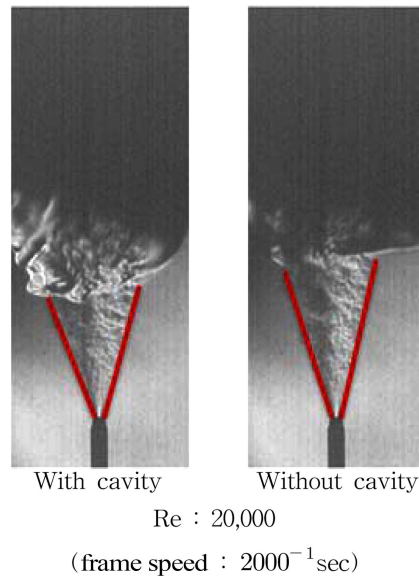


Fig. 4. High-speed photos of flames.

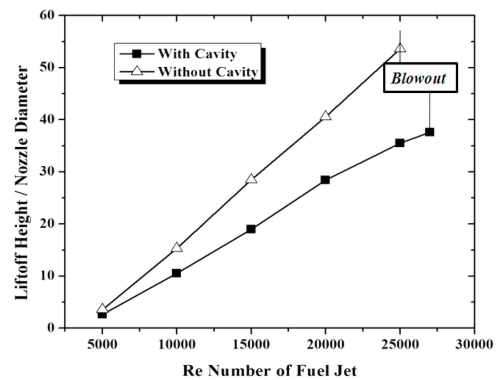


Fig. 5. Liftoff height according to Reynolds number.

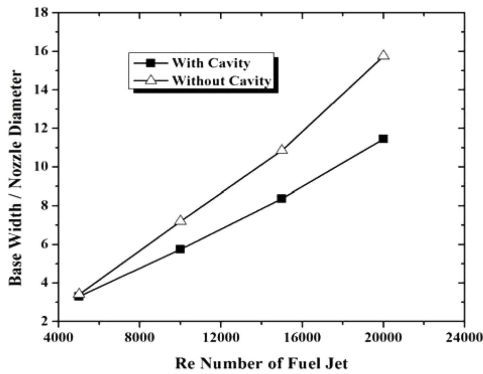


Fig. 6. Flame base according to Reynolds number.

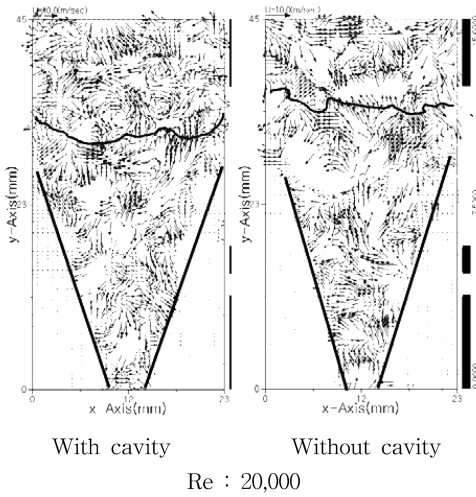


Fig. 7. PIV photos of flames.

각도를 나타내고 있는 실선을 통해 알 수 있듯이 화염이 버너 공동의 가진을 통해 노즐 출구에서 분출이 되고 연료가 이루는 분출각이 화염 밑면에 도달하기 전까지 주변 산화제와 빠르게 유입, 혼합되는 효과로 버너 공동을 장착하지 않은 화염에 비해 넓어진 것으로 확인하였다. 노즐 출구에서 넓어진 분출각에 의해 화염은 노즐쪽으로 조금 당겨지게 되고 이러한 효과는 부상높이를 낮추는 원인으로 판단된다. 또한 화염 밑면의 폭은 넓어진 분출각 하단에 화염이 자리 잡게 되어 부상화염의 지름이 공동 미장착 화염에 비해 줄어든 것으로 판단된다.

3.2 버너공동 가진 효과에 의한 부상화염 소음 분석

부상화염이 발생한 시점부터 실험 변수인 레이놀즈수를 증가시키면서 부상된 비에 혼합화염장에서 버너 공동의 유무에 따른 소음의 정도를 dBA로 측정하여 실험을 진행하였다.

$$f = \frac{nc}{2l} \tag{1}$$

위 식은 일반적인 실린더형 공동에서 유체가 통과되었을 때 나타나는 공명주파수(resonance frequency, f)를 나타내고 있는 식으로 n 은 공명모드의 차수, l 은 버너 공동의 길이를 나타낸다.

c 는 연료의 음속으로써 아래와 같이 정의 되는데 본 연구에서 사용된 상용 프로판의 경우 아래와 같은 식으로 계산된다.

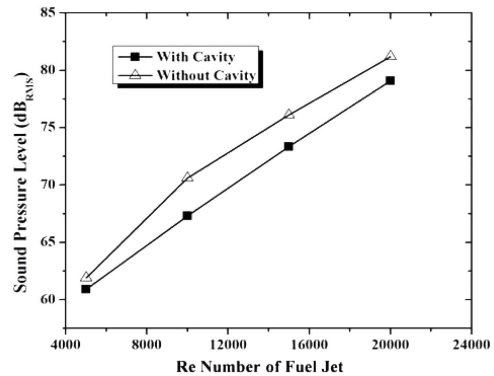


Fig. 8. Relation between SPL and Reynolds number.

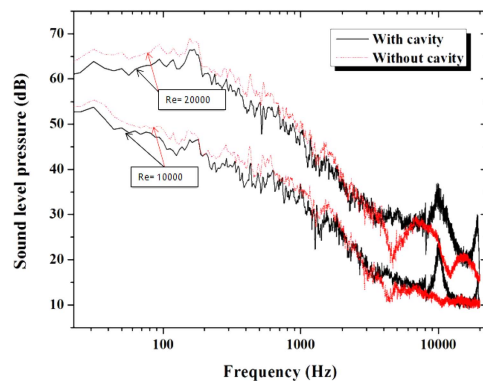


Fig. 9. Relation between SPL and frequency.

$$c = \sqrt{kRT} \quad (2)$$

버너공동이 갖는 특정 공명 주파수는 다음과 같은 이론식으로 결정이 되고 SPL(sound pressure level)과 L_{eq} 는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_0}, \text{ with } P_0 = 20 \mu Pa \quad (3)$$

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P^2}{P_0^2} dt \right] \quad (4)$$

이러한 조건들로 부상화염이 발생하는 소음의 정도를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 것처럼 소음의 크기는 부상지점에서는 큰 차이가 없지만 레이놀즈 수가 증가함에 따라 그 격차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 특정 레이놀즈 수에서 각 음압레벨이 가지고 있는 주파수 특성을 FFT분석을 통해 Fig. 9에 나타내었다.

버너공동을 거치는 얇은 부상화염의 경우 버너공동 장착된 화염에 비해 전반적으로 높은 소음도를 나타내고 있다. 소음도를 가칭 주파수인 20,000 Hz까지로 두고 분석하였을 때 상대적으로 낮은 주파수대역에서 주 소음장을 형성하고 있다. 그런데 버너공동의 효과를 거친 경우 10,000 Hz부근에서 특정 주파수가 높게 측정되는 것을 확인 할 수가 있는데 이는 버너 공동이 생성하는 공명주파수로써 이 특정 주파수 주변의 주파수보다는 큰 소음을 나타내긴 하지만 전반적인 주 소음장의 소음도에는 영향을 끼치지 못하는 것을 확인 하였다.

소음은 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 레이놀즈수가 증가함에 따라 꾸준히 증가하게 되는데 버너 공동에 의해 화염이 가진 효과를 얻게 되면 비가진 화염에 비해 전반적으로 화염의 안정화가 이루어지게 되고 유속이 증가함에 따라 같이 증가하게 되는 소음의 증가량이 버너공동의 효과를 거치지 않은 화염의 증가량에 비해 감소하게 되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

비예혼합 제트화염에서 고주파수의 노즐 구멍음에 의한 부상화염 혼합성능에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있다.

1. 연료가 버너공동을 통과할 때 노즐 구멍음에 의해

생성된 특정 고주파수로 인해 노즐에서 분출되어 화염의 밑단에 도달하기 전에 주변의 산화제와 잘 섞이게 되어 제트가 이루는 분출각이 버너공동을 장착하지 않았을 때에 비해 넓어지게 된다. 이러한 부분 예혼합화염의 효과의 증대로 넓어진 연료의 분출각은 부상 화염의 부상 높이를 노즐 쪽으로 조금 당기게 되어 부상 높이는 감소가 되고 연료의 제트가 이루는 각도 하단에 화염이 생성되게 되어 화염의 폭이 감소된 것으로 판단된다.

2. 유속이 높아짐에 따라 부상화염이 생성하는 연소 소음 또한 꾸준히 증가하게 되는데 FFT 분석을 통해 알 수 있듯이 주 소음장은 상대적으로 낮은 저주파대역에서 형성되지만 이보다 훨씬 높은 10,000 Hz정도의 고주파로 가진을 주게 되면 전체적인 화염의 주 소음장에는 영향을 미치지 못한다. 비가진 화염에 비해 가진 된 화염이 전반적으로 안정화됨을 보이고 있고 그로 인해 소음의 증가량도 줄어드는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2011-2010-1000-10).

참고문헌

- 1) Ji-Hyun Kwark, Chung-Hwan Jeon and Young-jine Chang., 2003, "Blow-off and Combustion Characteristic of a Lifted Coaxial Diffusion Flame", KSME, Vol. 27(8), pp.1089~1096.
- 2) Tuns, SR., An introduction to Combustion-Concepts and Applications., second edition. McGRAW-HILL
- 3) Chao, Y., Wu, C., Yuan, T. and Cheng, T., 2002, "Stabilization process of a lifted flame tuned by acoustic excitation. Combustion", Sci. Technol. Vol.174, pp.223~249.
- 4) Kee-Man Lee and Sai-Kee Oh., 2001, "A Visual Investigation of Non-Premixed Flame Behavior under Acoustic Excitation", Spring Annual Conference of the KSME, pp.871~877.
- 5) Pilwon Heo, Jeongseog Oh and Youngbin Yoon., 2008, "NOx Reduction by Acoustic Excitation on Coaxial Air Stream in Lifted Turbulent Hydrogen Non-Premixed Flame", KOSCO Symposium,

- pp.106~109.
- 6) Kiran, D.Y. Mishra, D.P., 2007, "Experimental studied of flame stability and emission characteristic of simple LPG jet diffusion flame", FUEL, Vol. 87(10/11), pp.1545~1551.
 - 7) Chen, Y.-c. Chang, C.-c. Pan, K.-L. Yang, J.-T., 1998, "Flame Lift-off and Stabilization Mechanism of Non-premixed Jet Flames on a Bluff-body Burner, Combustion and Flame", Vol. 115(1/2), pp.51~65.
 - 8) Jeongseog Oh, Pilwon Heo and Youngbin Yoon., 2009. "Acoustic excitation effect on NOx reduction and flame stability in a lifted non-premixed turbulent hydrogen jet with coaxial air", International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, pp.7851~7861.