

Slit-jet 노즐을 통해 분사되는 초음파 무화 케로신 화염의 정상초음파 가진에 의한 거동 변이

배창한^a · 강윤형^a · 안현종^a · 김정수^{b,*}

Behavioral Change of the Ultrasonic Standing Wave-affected Flame in the Reaction Zone of the Ultrasonically-atomized Kerosene Injected through a Slit-jet Nozzle

Chang Han Bae^a · Yun Hyeong Kang^a · Hyun Jong Ahn^a · Jeong Soo Kim^{b,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Korea

^bDepartment of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

ABSTRACT

A study was conducted to analyze the behavioral change of the kerosene flame ultrasonically-atomized under an ultrasonic standing-wave. Combustion region was visualized through DSLR, ICCD camera and the Schlieren photography with high-speed camera. The fuel consumption was measured by a precise scale. As a result, in the case of ultrasonic standing-wave excitation, it was observed that the intensity of OH radical(OH*) was enhanced and optimal combustion condition was formed around the upper edge of the standing-wave field.

초 록

본 연구는 정상초음파 가진 유무에 따른 초음파 무화 케로신 화염의 거동변이를 분석하기 위해 수행되었다. Slit-jet 노즐을 통과하며 생성된 연소영역은 DSLR, ICCD 및 초고속카메라와 슬리덴 기법을 통해 가시화되었고, 연료소모량은 정밀저울을 통해 측정하였다. 그 결과, 정상초음파 가진시, OH 라디칼의 강도가 증가하는 것이 관찰되었고 정상파장 상단부에서 최적 연소 조건이 형성됨을 확인하였다.

Key Words: Slit-jet Flame(슬릿 제트 화염), Ultrasonic Atomization(초음파 무화), Kerosene(케로신), Lifted Flame(부상화염), Ultrasonic Standing Wave(정상초음파)

1. 서 론

높은 액적 수밀도(high number density of droplet)를 동반하는 분무화염은 액적의 집적효과로 인해 국소적인 연료과농 영역(fuel-rich region)을 형성하게 된다. 액적 군집체(droplet cluster)는

내부에 산소농도가 낮아 화염이 균집체를 통과하지 못하여 단일 액적의 확산화염과 유사한 거동으로 그룹연소(group combustion)를 일으킨다 [1,2].

층류확산화염에서는 화염을 부상시키면 연료와 산화제의 원활한 혼합이 발생하고, 이로 인해 질소산화물 발생이 감소하는 것이 확인된다[3]. 노즐이 직접적인 화염의 영향을 적게 받는 부상화염은 고온의 연소환경에서 장시간 운전되는 가스터빈 연소기 등에서 발생하는 화염에 의한 열손상 방지에 유리하다[4]. 그러나, 부상화염의 경우 부착화염에 비해 상대적으로 강한 대류강도로 인해 쉽게 블로우 오프(blow off)가 발생하는 등 화염안정성이 낮다는 단점이 있으므로, 이를 개선하기 위하여 부상화염의 연소 안정성 증대에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. Oh 등 [5]은 부상된 수소 난류확산화염에서 질소 희석가스의 농도를 증가시키에 따라 부상화염 높이가 감소하는 효과를 확인한 바 있으며, Hirota 등[6]은 메탄-공기 동축류 부상화염에서 정상초음파 가진시, 화염의 높이가 낮아진다는 실험결과를 통해 화염 안정도의 증가 가능성을 언급한 바 있다.

또한, 연료를 초음파 무화(ultrasonic atomization)

시켜 생성된 에어로졸에 정상초음파 가진시 발생하는 현상에 대한 연구도 진행되었다. Duvver 등[7]은 수치 모사(numerical simulation)를 통해 정상파가 에어로졸의 기화 특성에 상당한 영향을 미친다고 주장한 바 있고, Okai 등[8]은 음향파장(acoustic field)에서 액적을 연소시켜 연소속도가 증가한다는 것을 실험으로 입증하였으며 Luo 등[9]은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 액적 유동장에 정상초음파를 가할 경우, 골(node)과 마루(antinode) 사이의 압력 구배가 발생하여 입자들이 골 부분으로 모이는 droplet banding 현상을 실험을 통해 확인하였다.

이외에도 압력구배의 효과를 명확하게 관찰하기 위해 고주파 진동자를 사용하여 많은 연구가 진행되어 왔다[10,11]. 이상의 모든 결과는 정상초음파 가진시 연소반응이 촉진된다는 것을 지시하고, 파동을 통하여 유동장의 변화가 야기될 수 있다는 사실 또한 예측케 한다.

본 연구팀은 케로신 부착화염에서 수송기체(carrier gas) 유량의 변화와 초음파 무화기 소비전력의 변화에 따른 화염거동에 대해 관측한 바 있다. 수송기체 유량의 증가는 화염의 신장률을 높였고, 소비전력의 증가는 연료 무화도 증대를 통해 연료의 질량유량 증가를 야기하였다. 추가적으로, 부착화염에서 정상초음파장을 가진하였을 때 에어로졸의 증발을 촉진시켜 연료소모율이 증가함도 확인하였다[12,13].

본 연구에서는 수송기체의 유량 조절을 통해 화염의 부상 높이를 변화시키고, 부상화염에 정상초음파를 가진하여 그 구조와 거동의 변화를 관찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

초음파 가진에 의한 부상화염의 거동 변이를 관찰하기 위한 실험장치의 개략도와 실물사진을 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 도시한다. 실험장치는 크게 버너(burner)와 데이터 수집 및 제어장치(DACS: Data Acquisition & Control System)로 구성되며, 실험조건을 Table 1에 정리한다.

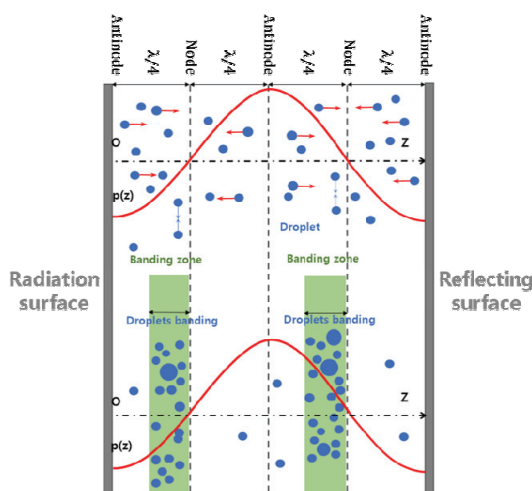


Fig. 1 Schematic diagram of droplets banding formation under ultrasonic standing waves (Red line $p(z)$: acoustic pressure distribution)[9].

버너는 연료탱크와 노즐부로 나뉜다. 연료탱크는 원통형이고, 재질은 제작의 용이성을 위해 PMMA(Poly Methyl Methacrylate)가 채택되었으

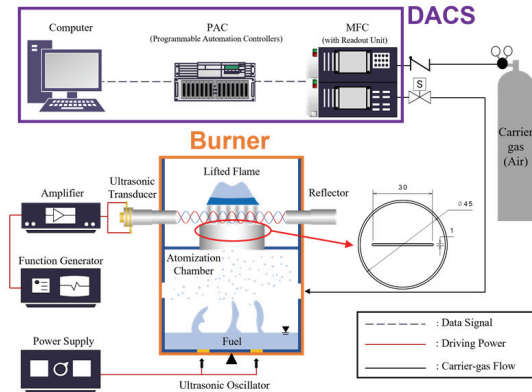


Fig. 2 Schematic of experimental setup.

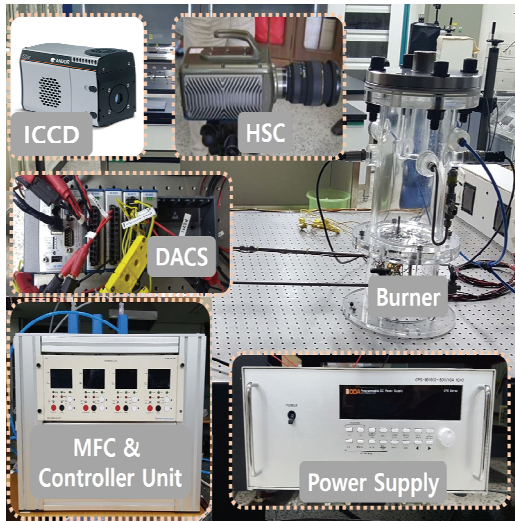


Fig. 3 Experimental apparatus.

Table 1. Experimental parameters.

Parameter	Specification
Fuel	Kerosene
Carrier-gas	Air
Fuel temperature	$65 \pm 5^\circ\text{C}$
Oscillator frequency, f	2.4 MHz
*USW frequency	40 kHz

*USW: Ultrasonic standing wave

며, 연료 온도 측정을 위해 열전대(thermocouple)가 부착된다. 탱크 하단에는 연료를 무화시키기 위한 2.4 MHz 초음파 진동자 5개가 설치된다. 버너의 노즐부는 지름 45 mm, 높이 60 mm의 몸체에, slit 크기 $30 \times 1 \text{ mm}^2$ 인 원통형 STS304 (Stainless Steel 304)로 제작되었다. 노즐 내부에는 역화방지와 유동 균일화를 위해 에어로졸이 통과하는 부분에 mesh가 이중으로 설치된다. 버너 연료탱크에서 초음파 무화로 생성된 에어로졸은 탱크 외부에서 공급되는 수송기체와 혼합되어 노즐을 통해 분사된다.

연료는 케로신(순도 95%)이고, 수송기체로는 공기 [순도 99.999% 이상의 O_2 (20.9%)와 N_2 (79.1%)]를 사용하며, 유량제어기(MFC: Mass Flow Controller)를 통해 공급량을 정밀하게 제어한다. 케로신의 수위 및 온도는 무화도의 변화를 최소화하기 위하여 $23 \pm 2 \text{ mm}$ 의 높이와 $65 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 온도로 유지한다.

에어로졸 유동장 양단에 국소적 정상초음파장을 생성하기 위한 PZT [lead zirconate titanate, $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$] 진동자(piezo effect transducer) 및 이와 동일 지름의 리플렉터(reflector)를 노즐 양 끝단에 설치한다. PZT 진동자의 고유 진동수는 40 kHz로, 전원 인가 시 형성되는 정상초음파의 파장은 약 8.575 mm이고, 노즐의 형상을 고려하였을 때 정상초음파가 형성되는 최소거리는 49.3 mm이다. 이때, 진동자 및 리플렉터의 거리는 slit의 길이 방향으로 설치된 레일 시스템을 이용하여 정밀하게 조절된다.

연소장을 가시화하기 위한 슐리렌 장치는 광원, 한 쌍의 구형 오목거울(초점거리: 2,000 mm), 나이프엣지(knife edge), 그리고 핀홀(pin hole) 등으로 구성된다. Fig. 4는 슐리렌 기법으로 획득한 전형적인 이미지를 나타내는데, 초음파 가진시 압력구배(pressure gradient)를 야기하는 마루에서 음영이 짙어지는 것이 그림을 통해 관찰된다. 슐리렌 기법으로 획득된 이미지는 이진화 과정(binartization process)을 거쳐 화염의 구조를 분석하는데 사용된다. Slit 노즐 주변에서 생성되는 연소장은 여러 종류의 촬영장치를 사용하여 가시화되었다. 가시화염의 영상은 DSLR 카메라

를 통해 얻고, 초고속카메라에 슬리렌 기법을 적용하여 연소장 음영 이미지들을 획득하였다. 추

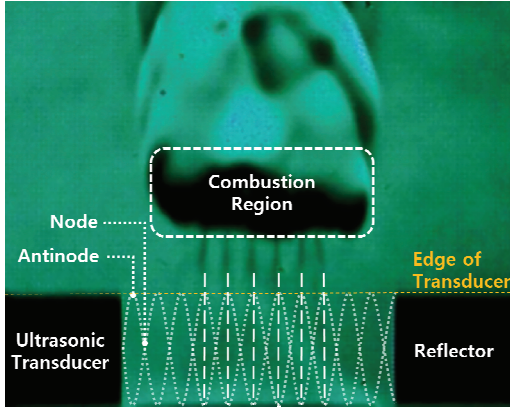


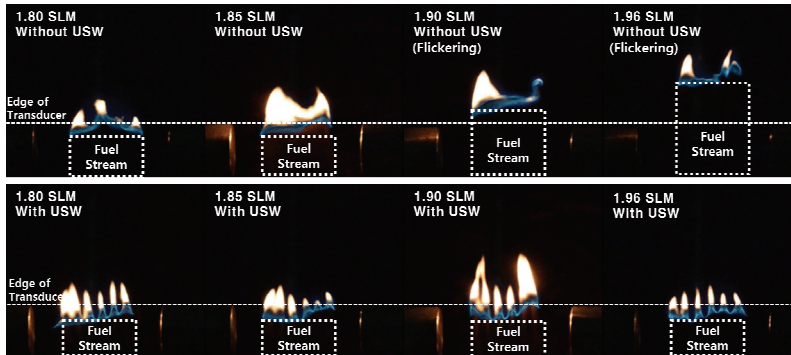
Fig. 4 Typical Schlieren image of standing wave field with combustion flame.

가로 band pass filter[Andover, 307Fs10-50(307.1 nm bandpass filter)]를 장착한 ICCD 카메라 (Andor Technology, Istar sCMOS)는 OH 라디칼(OH^{*}) 자발광의 가시화를 통하여 연소강도를 비교하는데 활용된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염 부상 높이의 변화

부상화염의 가시 영역을 촬영한 영상과 슬리렌 기법을 통해 촬영된 영상을 Fig. 5의 (a)와 (b)에 각각 도시한다. 그림에서는 수송기체 유량이 증가함에 따라 화염의 부상 높이가 상승하는 것이 확인된다. 이때, 화염 높이가 높아질수록 화염의 떨림과 같은 불안정성이 관찰되는데, 이



(a) DSLR visible image of lifted flames



(b) Schlieren image of lifted flames

Fig. 5 Lifted flame images of without or with USW according to the flow-rate of carrier gas.

는 수송기체 유량의 증가로 유발되는 에어로졸 연료 제트의 대류장도 증대에 기인한다.

부상화염에 정상초음파를 가진할 경우 화염은 진동자 상부 끝단으로 밀려나거나 당겨져 안정화되는 것이 슬리텐 영상을 통해 관찰된다. 정상 초음파 가진시의 가시화 화염은 정상초음파의 골과 마루에 따라 화염이 분기되는 것이 관찰되는데, 이는 골에는 droplet banding으로 인해 마루보다 상대적으로 연료과농 상태가 되어 연소 강도가 약해지고, 반대로 마루에서는 상대적으로 이론 당량비에 가까워져 화학반응이 더욱 활발하게 발생하기 때문으로 판단된다. 따라서, Fig. 4의 화염단 하부에서 보이는 6개의 음영 띠는 초음파장의 마루에 해당되고, Fig. 5(a)에서 보이는 6개의 분기 화염부와 일치한다.

화염의 부상 높이 비교를 위해, 정상초음파 가진 전·후 슬리텐 이미지 30장의 화염 선단 높이를 산술평균한 결과를 Fig. 6에 도시한다. 정상초음파 가진 전, 화염의 부상 높이는 수송기체의 유량에 비례하여 선형적으로 증가하는 경향을 보였으나, 가진 후 화염의 부상 높이는 평균 12.8 mm에 형성되는 것이 확인된다. 이는 정상 초음파 가진시 국소적인 압력변화에 기인하는 효과로, 골 부분의 수밀도 증가 및 공기와 연료의 원활한 혼합으로 인해 초음파장 상단부에서 최적 연소 조건이 형성되기 때문인것으로 판단된다.

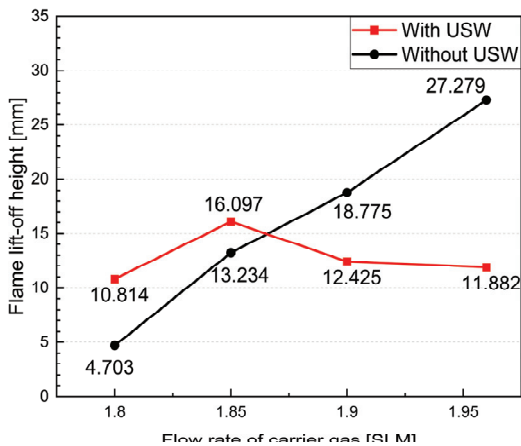


Fig. 6 Flame lift-off height according to the carrier gas flow-rate variation.

3.2 연료소모량의 변이

Fig. 7은 정상초음파 유·무와 수송기체 유량에 따른 연료소모량의 관계를 나타낸다. 1.80~1.90 SLM 구간에서의 연료소모량은 수송기체의 유량에 비례하여 증가하는 경향이 확인된다. 다만, 수송기체 유량이 1.96 SLM인 경우에서 연료소모량은 급격히 감소하는데, 이는 다량의 에어로졸이 노즐을 통과하던 중 slit 노즐 양끝단에서 부분적으로 응집되어 연료 분사가 제대로 이루어지지 못해 발생한 것으로 판단된다. 또한, 부상화염에 정상초음파를 가진할 경우 연료소모량

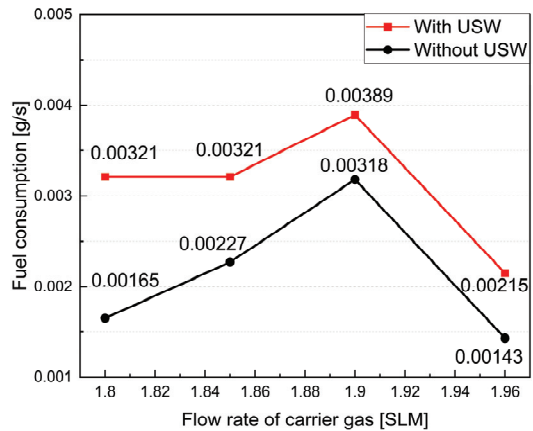


Fig. 7 Fuel consumption without or with USW according to carrier gas flow-rate.

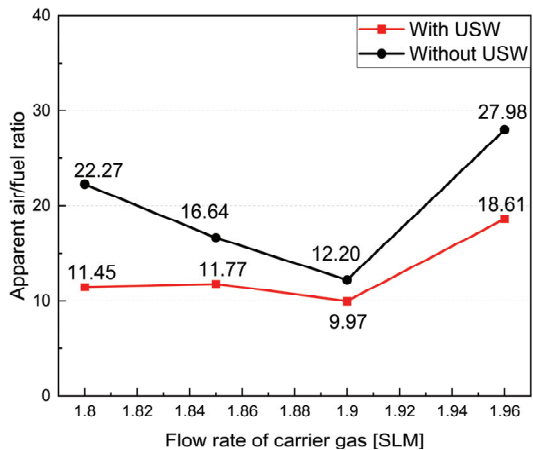


Fig. 8 Variation of apparent air/fuel ratio according to the carrier gas flow-rate.

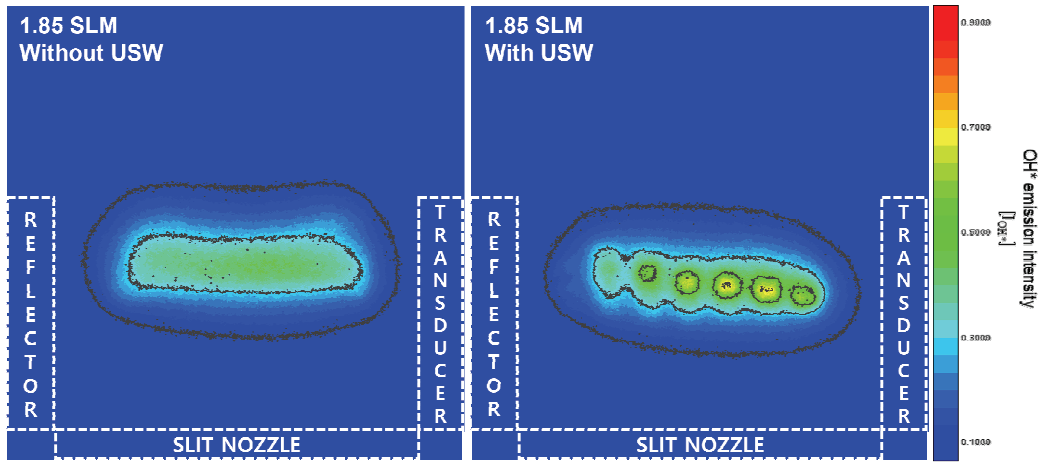
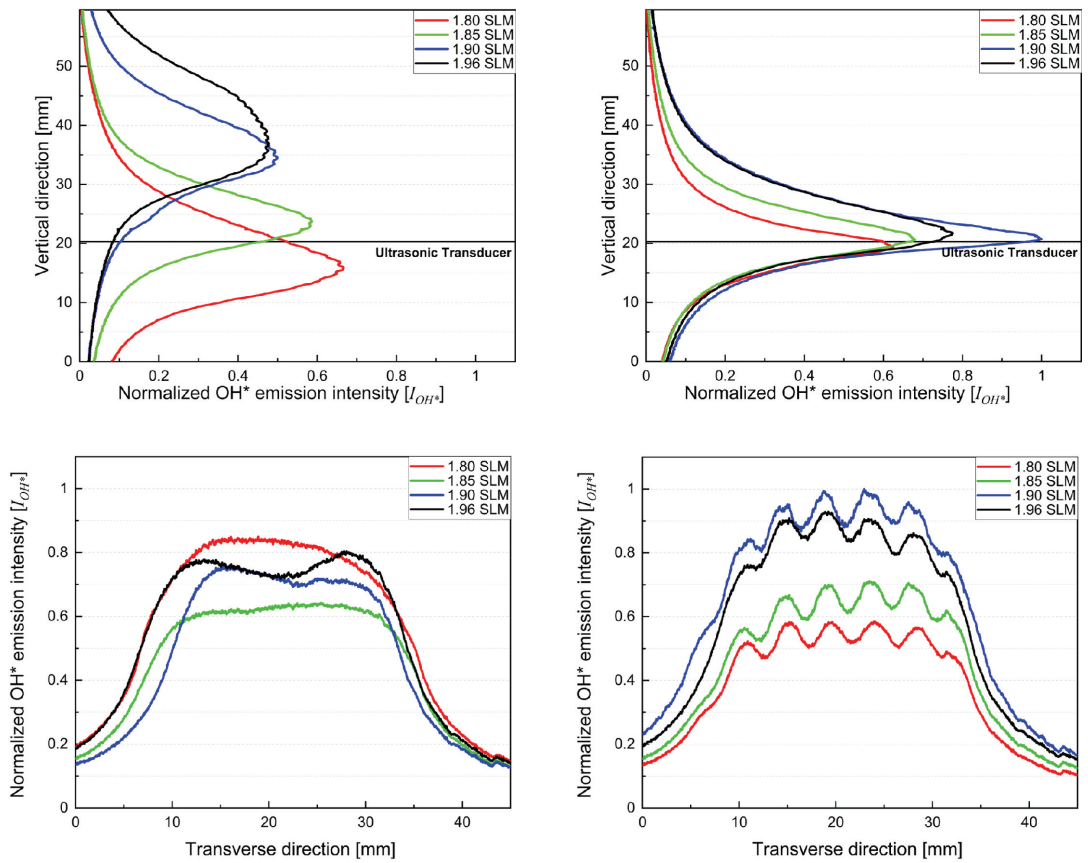


Fig. 9 Contour image of the distribution of OH* emission.



(a) Normalized OH* emission intensity without USW

(b) Normalized OH* emission intensity with USW

Fig. 10 Normalized OH* emission intensity according to flow-rate of carrier gas.

은 약 1.5배 상승하고 있다. 초음파장은 slit 노즐 출구 근처에서 에어로졸의 추가적인 무화 혹은 액적 수밀도의 증대를 낳는다. 수밀도 증대는 연료의 증기화율을 높이고 이는 노즐 근처에서 수직 방향으로의 농도구배를 키워 부력효과와 더불어 연료 확산을 증대시켜 연료탱크 내 액적 토출량 증대요인으로 작용하는 것으로 판단된다.

추가적으로 수송기체 유량의 변화에 따라 겉보기 공연비(AFR: Apparent Air/Fuel Mass Ratio)를 비교하였으며 이를 Fig. 8에 도시한다. 이때 겉보기 공연비는 다음의 Eq. 1로 정의된다.

$$AFR = \frac{\dot{m}_{Carrier}}{\dot{m}_{Fuel}} \quad (1)$$

여기서 $\dot{m}_{Carrier}$ 와 \dot{m}_{Fuel} 은 각각 공급되는 수송기체와 소모되는 연료의 질량유량을 나타낸다. 정상초음파 가진 전, 수송기체 유량의 변화에 무관하게 겉보기 공연비는 큰 변화 없이 일정하게 유지되는 것이 그림에서 확인된다. 그러나 정상초음파 가진시 겉보기 공연비는 상승하게 되는데, 이는 Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 동일한 수송기체 유량 조건에서 소모되는 연료량 증가의 직접적인 결과이다.

3.3 OH* 자발광 특성

OH* 자발광을 통해 화염 구조를 파악하고자 ICCD 카메라로 촬영한 순간이미지 50장을 산술 평균하여 등치선(contour)으로 나타내었으며, 그중, 대표적으로 수송기체 유량이 1.85 SLM인 경우의 결과를 Fig. 9에 도시한다. 정상초음파 가진 전, 화염대 핵(core) 영역에서의 OH* 강도는 대체로 균일한 분포를 보이지만, 정상초음파의 영향을 받게 되면 전술한 바와 같이 droplet banding 효과에 의해 OH* 강도가 정상초음파의 마루 위치에 집중되는 것이 확인된다.

OH* 자발광 강도 비교를 위해 정상초음파 가진 전·후의 종방향 및 횡방향 강도 분포도를 작성하였으며, 이를 Fig. 10(a)와 (b)에 각각 도시

한다. 정상초음파 가진 전, OH*의 강도는 수송기체 유량이 증가함에 따라 약화되며, 위치가 높아지면서 분포는 넓어지는 것이 관찰된다. 이를 통해 앞서 설명한 에어로졸 연료 제트의 대류강도 증대로 유발되는 화염 불안정 가능성이 추정된다.

정상초음파를 가진 할 경우, OH*의 강도는 수송기체 유량에 비례하여 증가함을 보이고 있다. 또한, 초음파 진동자 상단부 높이 근처(수직방향 위치 20 mm)에서 OH*의 최대강도가 집중되는 현상을 보이는데, 이는 전술한 바와 같은 초음파 에너지에 의한 무화증대 효과 및 droplet banding의 영향으로 이 영역에서 연소 최적 조건이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

수송기체 유량의 변화를 통해 부상화염의 높이를 변화시키고, 정상초음파 가진 전·후 화염의 거동 변이 관찰을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 정상초음파 가진 전 수송기체 유량이 증가함에 따라 화염 부상높이가 상승하지만, 정상초음파 가진시 화염의 높이가 약 12.8 mm로 거의 일정하게 유지되는 것이 관찰된다. 이는 국소적인 압력변화로 인해 초음파장 상단부에 최적 연소 조건이 형성됨을 의미한다.

2) 정상초음파 가진시, 연료소모량은 약 1.5배 상승하는데, slit 노즐 출구 근처에서 연료 증기 화율 증대에 따른 농도구배에 의한 효과로 판단된다.

3) 정상초음파 가진 전 수송기체 유량 증가에 따른 대류강도 증대로 유발되는 화염 불안정 가능성이 OH* 자발광을 통해 추정되었으며, 정상초음파 가진시 초음파 마루 위치와 초음파장 상단부에 최대강도가 집중되는 현상을 보인다. 이를 통해 Droplet banding에 의해 최적 연소 조건이 형성됨을 명확히 알 수 있다.

후 기

본 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A3B01012622) 의 연구결과임.

References

1. Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R. and Katsuki, M., "Combustion mechanism of liquid fuel spray in a gaseous flame," *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 12, 123301, 2005.
2. Watanabe, H., Kurose, R., Hwang, S.M. and Akamatsu, F., "Characteristics of flamelet in spray flames formed in a laminar counterflow," *Combustion and Flame*, Vol. 148, No. 4, pp. 234-248, 2007.
3. Fujimori, T., Riechelmann, D. and Sato, J., "Effect of Lift off on NOx Emission of Turbulent Jet Flame in High-temperature Coflowing Air," *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 27, No. 1, pp. 1149-1155, 1998.
4. Jeong, H.H. and Lee, K.M., "Effect of Swirl Angles and Combustion Characteristics of Low Swirl Model Combustor," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 40-49, 2016.
5. Oh, J.S. and Yoon, Y.B., "The Effect of N2 Dilution on the Flame Stabilization in a Non-Premixed Turbulent H2 Jet with Coaxial Air," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 33, No. 7, pp. 477-485, 2009.
6. Hirota, M., Hasimoto, K., Oso, H. and Masuya G., "Improvement of Laminar Lifted Flame Stability Excited by High-Frequency Acoustic Oscillation," *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 169-177, 2009.
7. Duvvur, A., Chiang, C.H. and Sirignano, W.A., "Oscillatory Fuel Droplet Vaporization: Driving Mechanism for Combustion Instability," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 12, No. 2, pp. 358-365, 1996.
8. Okai, K., Moriue, O., Arai, M., Tsue, M., Kono, M., Sato, J., Dietrich, D.L. and Williams, F.A., "Combustion of Single Droplets and Droplet Pairs in a Vibrating Field under Microgravity," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, No. 1, pp. 977-983, 2000.
9. Luo, X., Cao, J., Yin, H., Yan, H. and He, L., "Droplets Banding Characteristics of Water-in-Oil emulsion under Ultrasonic Standing Waves," *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 41, pp. 319-326, 2018.
10. Qureshi, S., Khan, W. and Prosser, R., "Behaviour of a Premixed Flame Subjected to Acoustic Oscillations," *PLoS One*, Vol. 8, No. 12, e81659, 2013.
11. Abe, Y. and Aoki, K., "Study on Levitated Droplet Control by Ultrasonic Wave," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 70, No. 692, pp. 1072-1077, 2002.
12. Kim, M.S. and Kim, J.S., "Flame Formation of Ultrasonically-atomized Liquid-fuel Injected through a Slit-jet Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 1, pp. 17-25, 2017.
13. Ahn, H.J., Kang, Y.H. and Kim, J.S., "Effects of Ultrasonic Standing Wave on the Ultrasonically-atomized Aerosol Flame Injected through a Slit-jet Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 24, No. 6, pp. 53-60, 2020.