

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2023.27.1.001>

정상초음파장의 위치에 따른 초음파 무화 케로신 부상화염의 거동

배창한^a · 김정수^{b,*}

A Behavior of the Ultrasonically-atomized Kerosene Lifted-flame According to the Position of Ultrasonic Standing-wave Field

Chang Han Bae^a · Jeong Soo Kim^{b,*}

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

^bSchool of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

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

ABSTRACT

A study was conducted to scrutinize the behavior of the ultrasonically-atomized kerosene lifted-flame according to the carrier gas flow-rate and position of ultrasonic standing wave (USW). The combustion region of the kerosene-aerosol generated through a slit-jet nozzle was visualized using a DSLR, ICCD, high-speed camera, and Schlieren technique, and the fuel consumption was measured by using a precision balance. As a result, the flame was confined within the region bounded by the USW-field, and the fuel consumption decreased as the position of the USW field increased.

초 록

본 연구는 수송기체 유량 및 정상초음파장의 가진 위치에 따른 초음파 무화 케로신 화염의 거동을 분석하기 위해 수행되었다. Slit-jet 노즐을 빠져나오는 에어로졸의 연소장은 DSLR, ICCD 및 초고속 카메라와 슬리렌 기법을 통해 가시화되었으며, 연료소모량은 정밀저울을 통해 측정되었다. 그 결과, 정상초음파장 경계영역에서 화염이 갇히고, 정상초음파장의 위치가 높아질수록 연료소모량은 감소하였다.

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

Received 2 January 2023 / Revised 4 February 2023 / Accepted 11 February 2023

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

액체연료를 사용하는 연소기의 경우 점화 지연(ignition delay) 방지 및 효율적인 연소를 위해 다양한 분무 연소 방식을 채택하고 있다. 초음파 무화법은 2상 노즐(two-phase nozzle)이나 액체 압축(liquid compression)을 통한 무화법에 비해 소음이 적고 균일한 분무입자 형성에 유리하며 평균 입자의 크기 조절이 가능하다는 특징을 가지고 있다[1]. 또한, 액체연료를 초음파 진동자로 가진시 예열과정 없이 연소가 가능한 크기의 액적을 형성할 수 있어 엔진의 시동 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다[2,3]. 초음파 무화 방식에는 계면접촉무화식(interfacial contact atomizer type), 표면파무화식(surface acoustic wave atomizer type), 수중무화식(submerged atomizer type) 등의 세 가지가 있는데 그 중, 수중무화식은 다른 두 방식에 비해 액적의 크기를 보다 일정하게 형성하므로 더욱 안정된 연소를 가능하게 한다. 추가로, 초음파 에너지는 연료의 분자 고리 구조 변화 및 점성 저하와 증발을 촉발하여 연소에 유리한 환경을 조성한다[3,4].

수중무화를 통해 생성된 높은 수밀도의 액적은 집적효과로 인해 연료과농 조건의 액적 군집체(droplet cluster)를 형성한다. 이는 낮은 내부 산소농도로 인해 화염이 군집체를 통과하지 못하고 단일 액적의 확산화염과 같은 거동으로 그룹 연소(group combustion)를 일으킨다[5]. 부상된 확산화염의 경우 연료와 산화제가 원활히 혼합되어 질소산화물의 발생이 감소한다[6]. 이와 같은 특징들은 확산화염과 유사한 거동을 보이는 그룹 연소 화염에서도 나타날 것으로 기대된다. 그러나, 부착화염에 비해 대류강도가 강한 부상화염은 쉽게 블로우 오프(blow off)가 발생한다는 단점을 가지고 있다[7]. 이를 개선하고자 부상화염의 안정성 증대에 대한 연구가 수행되고 있다. Chao 등[9]은 프로판-공기 난류 예혼합 화염의 연소실 내 초음파 가진시 화염 부상높이 감소 및 blow-out 한계 속도 증가 등 부상화염 안정성 개선을 실험으로 확인하였으며, Hirota 등[10]은 메탄-공기 동축류 부상화염 연료유동장

에 정상초음파(USW: Ultrasonic Standing Wave) 가진시 화염의 부상높이가 낮아진다는 결과를 통해 부상화염의 안정도 증대 가능성을 시사한 바 있다.

또한, 연료 에어로졸에 정상초음파를 가진하였을 때 발생하는 현상에 관한 연구도 수행되었다. Okai 등[11]과 Saito 등[12]은 액적 연소장에 음향과장을 가진시키면 연소속도가 증가한다는 것을 실험으로 입증하였으며, Luo 등[13]은 정상초음파가 개재된 액적 유동장에서 압력구배로 인해 액적이 끝(node)부분으로 모이는 droplet banding 현상을 실험을 통해 확인하였다.

상술한 모든 결과는 정상초음파 가진시 연소 반응이 촉진된다는 것을 제시하고, 파동을 통해 유동장의 변화가 유발될 수 있다는 사실 또한 예측케 한다.

본 연구팀은 케로신 부상화염에서의 수송기체 유량의 변화와 정상초음파 가진 유무에 따른 화염 거동에 대해 관측한 바 있다. 수송기체 유량의 증가는 화염의 부상높이를 높였고, 정상초음파 가진은 droplet banding 효과에 의해 보다 양호한 연소조건을 형성하였으며 이때 부상화염에서 정상초음파장을 가진하였을 때 액적의 증발을 증대시켜 연료소모율이 증가한다는 사실도 확인하였다[14].

본 연구에서는 수송기체 유량 및 초음파 진동자의 위치를 변화시켜 정상초음파장의 여기(excitation) 위치에 따른 부상화염의 구조와 거동을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 초음파 가진에 따른 부상화염의 거동을 관찰하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 버너(burner)와 데이터 수집 및 제어장치(DACS: Data Acquisition & Control System)로 구성된다.

버너는 노즐부와 연료탱크부로 나뉜다. 버너의 노즐부는 상단에 slit이 부착된 원통형으로 제작되었다. 탱크 하단에는 연료를 무화시키기 위한

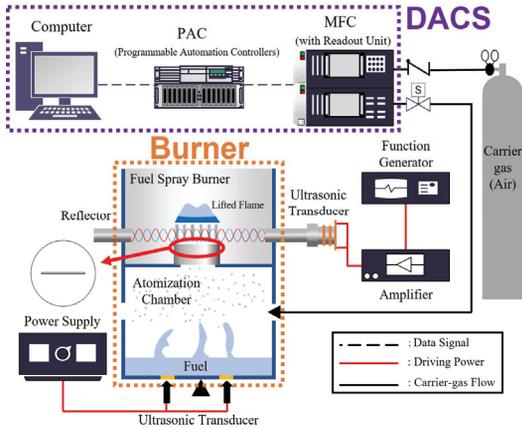


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

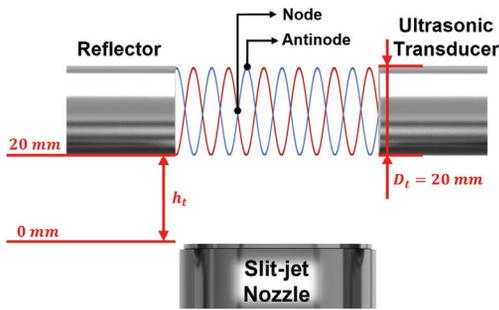


Fig. 2 Configuration of USW excitation system.

초음파 진동자 5개가 설치된다. 버너 연료탱크에서 초음파 무화로 생성된 에어로졸은 탱크 외부에서 공급되는 수송기체와 혼합되어 노즐을 통해 분사된다.

연료는 케로신(순도 95%)이며, 수송기체로 공기[순도 99.9% 이상의 O_2 (20.9%), N_2 (79.1%)]를 사용하고, 유량제어기(MFC: Mass Flow Controller)로 공급량을 제어한다. 초음파에 의한 액체연료의 미립화 성능은 온도와 수위 등에 지배적인 영향을 받는 것이 Suzuki 등[15]에 의해 확인되는바, 본 실험에서는 무화도 변화를 최소화하고자 케로신의 온도 및 수위를 $65 \pm 5^\circ C$ 와 23 ± 2 mm로 유지한다.

에어로졸 유동장 양단에 정상초음파장의 생성을 위한 피에조 진동자(piezo effect transducer) 및 리플렉터(reflector)를 노즐 양 끝에 Fig. 2

와 같이 설치한다. 진동자 하부와 노즐 상단부와의 간격으로 정의되는 정상초음파장 가진 높이 (h_t)는 진동자 지름(20 mm)의 0, 1배인 0, 20 mm로 각각 설정된다.

Slit 노즐 주변에 생성되는 연소장은 다양한 장치를 통해 가시화되었다. DSLR 카메라를 통해 가시화염의 영상을 얻고, 연소장의 음영이미지들은 초고속카메라에 슬리텐 기법을 적용하여 획득하였다. 또한, 대역필터[Andover, 307Fs10-50(307.1 nm)]를 장착한 ICCD 카메라(Andor Technology, Istar sCMOS)는 연소강도를 비교하고자 OH라디칼(OH^*) 자발광을 가시화하는 데 활용된다.

슬리텐 이미지는 MATLAB 프로그램을 통해 이진화하여 화염의 부상높이 측정을 위해 사용된다. 이진화된 이미지는 Eq. 1의 행렬 B로 정의되며 화염 선단과 노즐 간의 거리 h 를 계산하기 위해 행렬 B의 열(column)은 Eq. 2와 같이 일정한 간격으로 투사(projection)되고, 이를 평균한 결과를 Eq. 3의 평균 화염 부상높이 H로 정의한다.

$$B = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ x_{m1} & & & & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

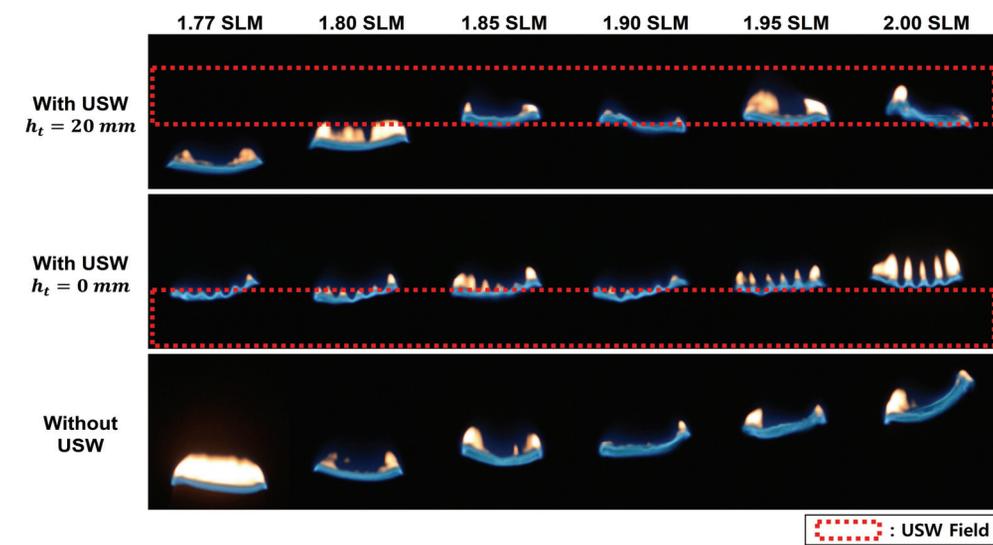
$$h[j] = \sum_{i=1}^m B[i,j] \quad (2)$$

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n h[j]}{n} \quad (3)$$

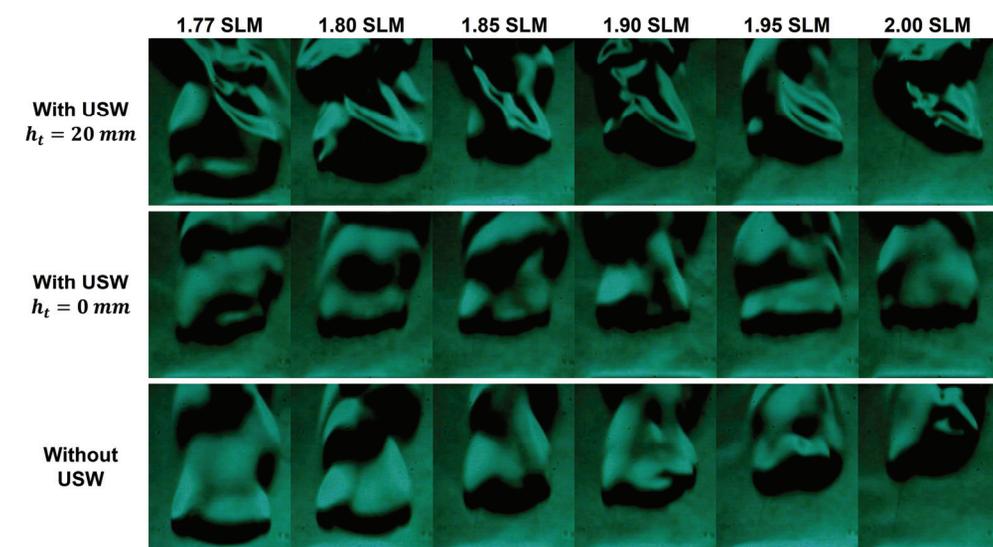
3. 실험결과 및 고찰

3.1 부상 화염의 높이 변화

Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 부상화염의 가시영역 영상과 슬리텐 기법을 통해 획득된 영상이다. 정상초음파 가진전, 수송기체 유량의 변화에 따라 높이가 증가하고, 정상초음파 가진 위치 h_t 가 0 mm 인 경우, 화염의 높이는 균일하고 droplet banding에 의한 화염 분기가 관찰되는 등 선형



(a) DSLR camera's visible images of lifted flame



(b) Schlieren images of lifted flame

Fig. 3 Lifted flame images according to the flow-rate of carrier gas and the height of USW excitation region.

연구와 동일한 경향을 보인다[14]. h_t 가 20 mm 일 때 또한 h_t 가 0 mm일 때의 결과와 유사하게 화염 선단 대부분이 정상초음파장의 영역 경계에서 형성되는 것이 관찰된다. 이는 정상초음파장 가진시 국소적으로 증가한 여기 에너지로 인해 화학반응이 활발해져 화염의 부상이 억제되기 때문으로 판단된다. 화염 선단 위치의 정량화

를 위해 280 fps로 연속촬영된 슐리엔 사진 30장에서 추출한 평균 화염 부상높이 H 를 산술평균하여, 이를 Fig. 4에 도시한다. 정상초음파 가진전, 화염의 부상높이는 수송기체의 유량에 비례하여 단조적으로 증가한다. 그러나 가진 위치 (h_t) 0 mm에서 정상초음파를 조사할 때, droplet banding 효과에 의해 공기와 연료가 원활히 혼

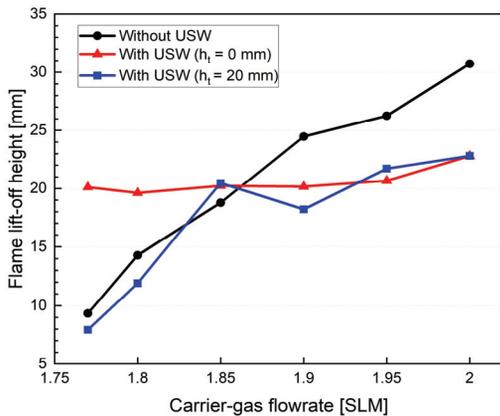


Fig. 4 Flame lift-off height according to the carrier gas flow-rate and excitation region.

합되고, 초음파 여기 에너지에 의한 화학반응 강도의 증대와 그로 인한 화염의 부상이 화염 선단을 초음파장 상단부 경계($H = 20.6$ mm)에 붙들어 두는 결과를 낳는다.

h_1 가 20 mm인 경우, 화염의 부상높이는 수송기체 유량이 1.85 SLM (standard liter per minute)에 도달할 때까지 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 그러나 수송기체 유량이 1.85 SLM 이상일 때, 정상초음파의 에너지 여기장(exited field)으로 인해 화염이 더이상 부상하지 않고 평균 20.64 mm에서 머무르게 된다.

3.2 OH^* 자발광 특성

정상초음파 가진 높이에 따른 화염 구조를 파악하고자 ICCD 카메라로 OH^* 자발광을 20 fps로 연속 촬영한 순간이미지의 종방향 및 횡방향 강도분포를 Fig. 5에 도시한다.

정상초음파 가진전, 화염대 중심(core)영역에서의 OH^* 의 강도는 대체로 균일한 분포를 보인다. 또한, 수송기체 유량이 1.85 SLM으로 증가할 때까지 OH^* 의 강도는 증대되나, 더 높은 유량이 공급되더라도 화염중심부의 강도는 약 0.85에 머무르게 된다. 이를 통해 앞서 언급한 연료 제트의 대류강도 증대가 촉발하는 화염의 불안정 가능성이 예상된다.

h_1 가 0 mm일 때, 횡과 형태의 굴곡진 OH^* 강도 선도가 형성됨이 확인된다. 이는 정상초음파

에너지에 기인하는 액적의 현열(sensible enthalpy) 증대로 인한 연소의 촉진과 정상초음파장이 형성하는 압력과 골과 마루(antinode)에서의 droplet banding 효과, 혹은 압력장의 영향을 받는 차등화된 화학반응강도의 결과로 해석된다.

h_1 가 20 mm 일 때, 화염의 좌측 부분에서 더욱 강한 비대칭적 강도를 보이는데 이는 Fig. 3에서 관찰되는 초음파장에 의해 기울어진 화염의 정량화된 결과를 반영하는 것이다. 또한, 1.95 SLM과 2.00 SLM에서 높은 화학반응 강도를 보이는데, 초음파장에 노출된 주 화염대에서의 액적 증발을 증대로 인한 효과로 판단된다. Fig. 5의 우측에서와 같이 횡방향(transverse direction)으로의 OH^* 강도 평균값의 종방향 분포를 관찰하면 활발한 화학반응이 발생하고 있는 화염대의 높이를 확인할 수 있다. 측정자료의 평균화와 슬리텐 이미지 후처리 과정에 기인하는 오차를 제외하면 수송기체의 증대에 따르는 부상화염의 상승과 초음파 에너지 여기가 낳는 화염대 구속 효과 등이 그림에서 뚜렷이 관찰되고 있다.

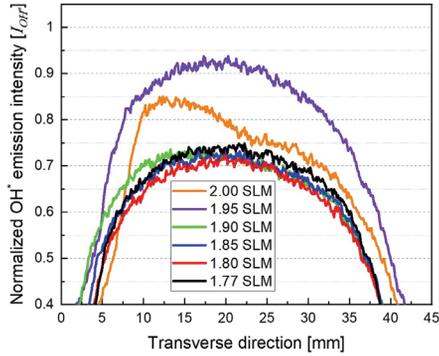
3.3 연료소모량의 변이

Fig. 6은 수송기체 유량과 정상초음파 가진 위치에 따른 연료소모량의 관계를 나타낸다. 수송기체 유량에 비례하여 증가하는 연료소모량은 h_1 가 0 mm일 때, 비가진 조건에 비해 최대 26%, 그리고 평균 20% 가량 증가한다. 초음파장은 slit 노즐 출구 근방에서 에어로졸의 부가적인 무화 또는 액적 수밀도의 증대를 일으킨다. 수밀도 증대는 연료의 증발율(evaporation rate) 상승을 야기하고, 노즐 근처에서 수직방향으로의 연료 농도구배를 높여 부력효과와 더불어 연료 확산을 촉진시켜 연료 탱크 내 액적 토출량 증대에 영향을 미치는 것으로 판단된다. h_1 가 20 mm일 때, 가진하지 않은 경우 대비 연료소모량은 8.5% 상승한다. 또한, 수송기체 유량에 따른 연료소모량의 기울기는 h_1 가 0 mm일 때 가장 가파르며 h_1 가 20 mm인 경우에는 그 기울기가 감소한다. 이는 외기로 확산된 액적군의 농도가 slit 노즐과 멀어질수록 감소하게 되고 h_1 가 20 mm일 때 정상초음파에 의한 액적의 무화효과 또한 감소하

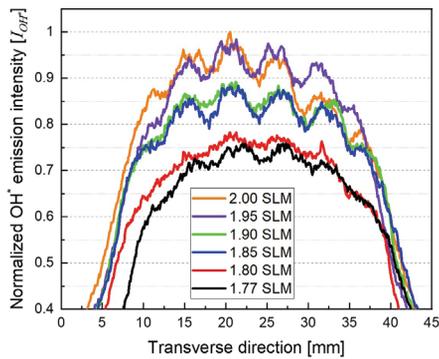
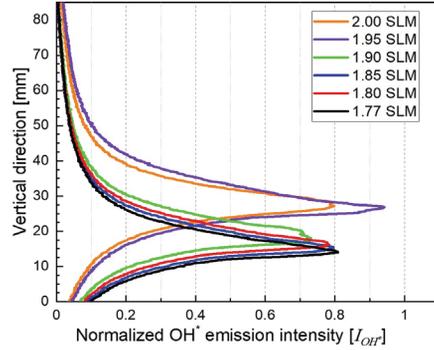
게 되어 출구 영역에서의 농도구배가 감퇴하는 것에 기인하는 것으로 이해된다.

4. 결 론

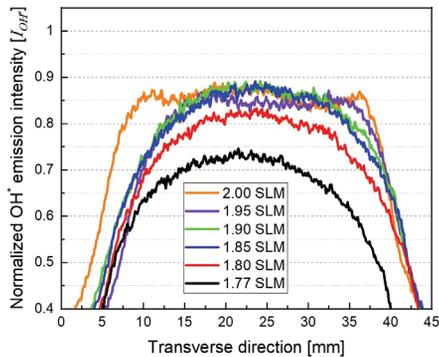
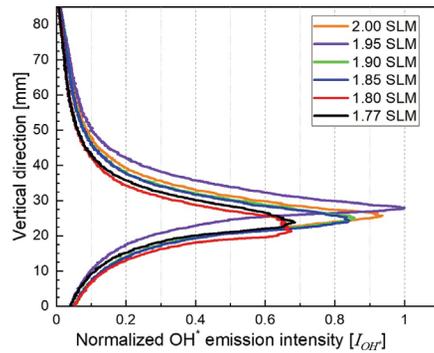
수송기체 유량과 초음파 진동자 위치의 변화를 통해 부상화염의 높이 변화 및 가진 전·후



(a) With ultrasonic standing wave ($h_t = 20$ mm)



(b) With ultrasonic standing wave ($h_t = 0$ mm)



(c) Without ultrasonic standing wave

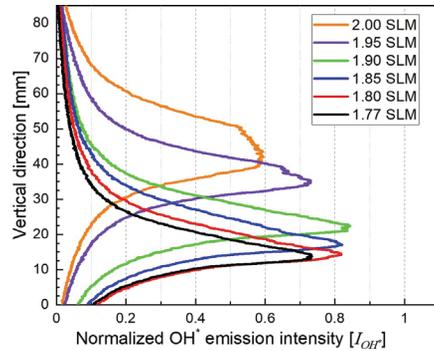


Fig. 5 Normalized OH* emission intensity according to flow-rate of carrier gas.

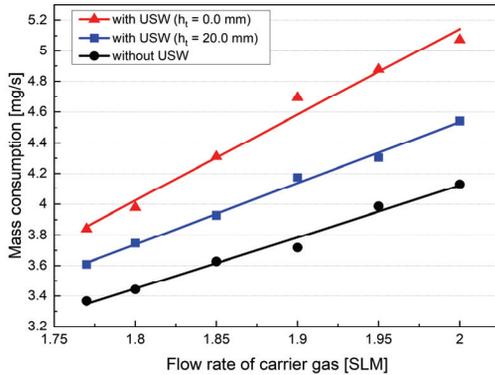


Fig. 6 Fuel consumption in the case without or with USW according to carrier gas flow-rate.

화염의 거동 변이를 관찰하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 정상초음파 가진전, 연료 제트의 대류강도가 증대됨에 따라 화염 부상높이는 증가하지만, 정상초음파가 가진될 경우 화염의 부상높이는 정상초음파장의 경계영역에 간히게 된다. 이는 초음파에 의한 에너지 여기로 인해 초음파장 내에서 최적연소 조건이 형성되고, 화염대의 부력과 대류강도가 균형을 이룬 결과이다.
- 2) OH^* 강도분포를 통해 Droplet banding 효과에 의한 화염단의 분기 현상을 관찰할 수 있으며 h_1 가 20 mm일 때, 여기에너지의 집속도 저하로 화염의 분기는 약화된다.
- 3) 정상초음파 가진시 slit 노즐 출구 근처에서의 연료 증발을 증대에 따른 농도구배 효과로 연료소모량은 약 9~20% 상승하는데, 본 실험조건에서 그 소모량은 h_1 의 증가에 반비례한다.

이상과 같이 정상초음파 가진 위치에 따른 연소반응 변화와 화염 부상높이 제어를 통한 부상화염의 불안정성 촉발 억제 가능성이 확인되었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Takuya, F., Yasuki, H., Noriyuki, K., Masanobu, H. and Yoshio, T., "Characteristics of Low Vapor Pressure Oil Ignition Developed with Irradiation of Mega Hertz Level Ultrasonic," *Fuel*, Vol. 83, No. 16, pp. 2205-2215, 2004.
2. Bouguslavskii, Y.Y. and Eknadiosyants, O.K., "Physical mechanism of the acoustic atomization of a liquid," *Akust. Zh.*, Vol. 15, No. 1, pp. 17-24, 1969.
3. Antonevich, J.N., "Ultrasonic Atomization of Liquids," *IRE Transactions on Ultrasonics Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 6-15, 1959.
4. Matusura, K., Nii, S., Fukazu, T. and Tsuchiya, K., "Efficient Reduction of Gasoline Volatility through Ultrasonic Atomization," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 46, No. 7, pp. 2231-2234, 2007.
5. 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, pp. 1-14, 2005.
6. Hiroyuki, H., "Liquid Atomization and Spray Combustion," *Eurozoru Kenkyu*, Vol. 12, No. 3, pp. 189-194, 1997.
7. Kazuhiro, Y., Shinya, K., Yusuke, I., Naoki, H. and Hiroshi, Y., "Lifted flame structure of coannular jet flames in a triple port burner," *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 33, No. 1, pp. 1195-1201, 2011.
8. Broadwell, J.E., Dahm, W.J.A. and Mungal, M.G., "Blowout of turbulent diffusion flames," *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 20, No. 1, pp. 303-310, 1985.
9. Chao, Y.C. and Jeng, M.S., "Behavior of the Lifted Jet Flame Under Acoustic Excitation," *Symposium (International) on*

- Combustion*, Vol. 24, No. 1, pp. 333-340, 1992.
10. 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.
 11. 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.
 12. Saito, M., Sato, M. and Suzuki, I., "Evaporation and combustion of a single fuel droplet in acoustic fields," *Fuel*, Vol. 73, No. 3, pp. 349-353, 1994.
 13. 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.
 14. Bae, C.H, Kang, Y.H., Ahn, H.J. and Kim, J.S., "Behavioral Change of the Ultrasonic Standing Wave-affected Flame in the Reaction Zone of the Ultrasonically-atomized Kerosene Injected through a Slit-jet Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 26, No. 1, pp. 60-67, 2022.
 15. Suzuki, K., Kirpalani, M.D. and McCracken, W.T., "Experimental Investigation of Ethanol Enrichment Behavior in Batch Continuous Feed Ultrasonic Atomization System," *Chem. Eng. Technol.* Vol. 29, No. 1, pp. 44-49, 2006.