



## Slit-jet 노즐을 통과한 초음파 무화 에어로졸 화염에 정상초음파가 미치는 영향

안현종<sup>a</sup> · 강윤형<sup>a</sup> · 김정수<sup>a,\*</sup>

### Effects of Ultrasonic Standing Wave on the Ultrasonically-atomized Aerosol Flame Injected through a Slit-jet Nozzle

Hyun Jong Ahn<sup>a</sup> · Yun Hyeong Kang<sup>a</sup> · Jeong Soo Kim<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

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

#### ABSTRACT

In liquid-fuel spray combustion, an experimental study was conducted to observe the effect of ultrasonic excitation on the ultrasonically-atomized liquid fuel flame by controlling pressure field through an ultrasonic standing wave. Flame of the ultrasonically-atomized kerosene aerosol was visualized by using a high speed camera, DSLR, and Schlieren photography. The amount of fuel consumed was obtained by a precise flow-rate measurement technique during combustion, through which the ratio of carrier gas (air) to fuel mass was able to be obtained, too. As a result, it could be found that the combustion reaction-rate of the liquid-fuel aerosol was increased by applying an ultrasonic standing wave to the secondary flame zone of the flame.

#### 초 록

액체연료 분무 연소에서 화염 외부에 정상초음파 가진을 통해 압력장을 조절함으로써 초음파 무화 액체연료 화염에 미치는 초음파 가진의 영향을 관찰하는 실험을 수행하였다. 초음파에 의해 미립화된 케로신 에어로졸화염은 초고속카메라, DSLR 그리고 슬리렌 촬영기법을 이용하여 가시화하였다. 연소시 소모된 연료량은 정밀유량측정법으로 계측하였고, 이를 통해 수송기체 공연비를 구할 수 있었다. 실험결과, 2차화염영역에 정상초음파를 가함에 따라 액체연료 에어로졸의 연소반응률이 증대되는 것을 관찰할 수 있었다.

Key Words: Ultrasonic Atomization(초음파 미립화), Spray Combustion(분무 연소), Standing Wave (정상파), Laminar Flow(층류 유동), Aerosol Flame(에어로졸 화염)

#### 1. 서 론

Received 9 October 2020 / Revised 26 November 2020 / Accepted 30 November 2020

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

eISSN 1226-6027 / ISSN 2288-4548

연소과정에서의 급격한 열 방출과 연소실 내

음향 모드와의 위상(phase) 일치로 인한 공명은 연소불안정성을 발생시킬 수 있으며, 심할 경우 연소기기의 파손을 유발한다. 특히 항공기나 로켓 등에 사용되는 엔진의 경우 파손 시 인명 및 재산에 막대한 피해가 발생하기 때문에 선진국에서는 수십 년간 연소불안정성을 억제하거나 방지하기 위한 대규모 연구가 수행되어 왔다. 이 문제를 해결하기 위해 인위적으로 압력장을 조절함으로써 연소 반응을 촉진시키고, 연소불안정성 해결에 기여할 수 있다는 사실이 보고되고 있다. 또한, 연소안정성을 향상시킴으로써 연소부산물인 질소산화물을 감소시킬 수 있는 바 [1-3], 연소불안정성 제어기술은 연소로 인한 환경문제 대처와 연소 효율 제고에 필수적이라 할 수 있다.

Duvver[4]는 수치 모사(numerical simulation)를 통해 정상파가 에어로졸의 기화 특성에 상당한 영향을 미친다고 주장하였고, Umemura[5]는 음향 가진시 압력 진동의 효과와 증발 안정성에 관해서 연구하였다. 또한, Okai[6]는 음향파 내부에서 액적을 연소시켜 연소속도가 증가한다는 것을 실험을 통해 입증하였다. 상기의 결과에 따라 파동을 통한 유동장의 변화는 연소안정성의 향상에 기여할 것으로 기대된다. 이러한 모든 결과는 음향가진이 연소반응을 촉진한다는 것을 전제로 하고 있다. 또 일반적인 진행 파동은 무시할 정도의 강도이므로 압력구배의 효과를 명

확하게 관찰하기 위해 고주파 진동자를 사용하여 많은 연구가 진행되어 왔다[7-8].

1927년 Wood와 Loomis[9]에 의해 초음파를 이용한 미립화 방법이 최초로 소개된 이후, 1962년 Lang[10]에 의해 초음파 무화에 관한 기본이론이 정립되었다. 그는 초음파에 의한 미립화가 표면장력파(capillary wave)에 의해 생성된다고 주장하였으며, 실험을 통해 그 이론을 뒷받침하였다. 그러나 초음파 미립화 과정은 대단히 복잡하고 비정상적(unsteady)이어서 초음파를 이용한 액체 미립화 구조(mechanism)를 규명하기 위한 연구는 여전히 진행 중이다[11]. 초음파를 통해 생성된 에어로졸은 크기의 균일성이 높고, 낮은 유속에서도 사용할 수 있다는 장점이 있어 산업, 의학 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[12].

초음파에 의한 액체의 미립화 방법은 크게 직진법(direct vibration method)과 무화법(aerosol method)으로 대별되며 Fig. 1에 그 개략도가 도시된다. 특히 MHz 단위의 진동자를 이용한 무화법은 진동자에서 발생한 초음파에너지를 액체에 통과시켜 액체의 표면에서 미립화가 발생되도록 하는 방법이다[13].

본 연구팀은 선행연구로 수송기체(carrier gas) 유량의 변화와 초음파 무화기 소비전력의 변화에 따른 화염 거동을 초고속카메라, CCD 그리고 열화상 카메라를 이용해 관측한 바 있다. 이 때 소비전력의 증가에 따라 화염의 신장효과가 확인되었고, 연료의 무화도(degree of atomization)가 증가하여 에어로졸의 분사량이 증가하였음을 확인할 수 있었다. 또한, 초음파의 힘이 등유의 표면장력보다 커지면 에어로졸이 등유 기둥에서 떨어져 나오게 되는데 이때의 평균 입경은  $1.7 \mu\text{m}$ 로 예측된 바 있다[14-16].

선행 연구에 더해 본 연구에서는 연소불안정성의 제거 및 능동적 제어를 목적으로 화염 외부에서 정상초음파 가진에 의해 압력장을 조절함으로써 케로신 에어로졸 화염의 연소특성 변화를 관찰하고자 한다.

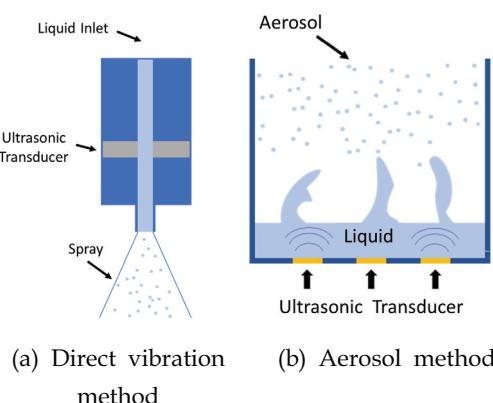


Fig. 1 Ultrasonic atomization method.

## 2. 실험장치 및 방법

초음파를 통해 무화된 액체연료의 연소특성을 관찰하기 위한 실험장치의 개략도와 실물사진을 Fig. 2와 3에 각각 도시한다. 실험장치는 크게 베너와 데이터 수집 및 제어장치(Data Acquisition & Control System, DACS)로 구성된다.

베너는 에어로졸의 생성부와 노즐부로 구분되는데, 베너 내부에서 생성된 에어로졸은 유입된 외부 공기와 혼합된 후 노즐 외부로 분사되도록 설계하였다. 수송기체로는 공기[순도 99.999% 이상의 O<sub>2</sub> (20.9%)와 N<sub>2</sub> (79.1%)]를 사용하였으며, 질량유량제어기(Mass Flow Controller, MFC)를 이용하여 수송기체의 공급 유량을 정밀하게 제어하였다. 에어로졸 생성부는 원통형으로, 재질

은 제작이 용이한 PMMA (Poly methyl methacrylate)이다. 챕버의 하단에는 액체연료를 무화시키기 위한 2.4 MHz 초음파 진동자 5개를 설치하였다. 진동자의 전압과 전류는 전력 공급기(power supply)를 이용해 24 V, 0.550 A로 설정되고, 진동자는 압전소자(piezoelectric element)를 이용하여 원형으로 제작되었다. 또한, 역화방지를 위해 에어로졸이 통과하는 부분에 미세한 mesh를 설치하였다. 한편, 베너의 노즐부는 PMMA의 내열한계를 고려해 STS304 (Stainless Steel 304)로 제작되었다. 노즐부의 크기는 지름 45 mm, 높이 60 mm의 원통형으로, 무화된 액체연료는 노즐부 상단의 30 × 1.5 mm<sup>2</sup> (종횡비 20:1) 크기의 slit을 통해 분사되도록 설계하였으며, 실험에 사용된 베너의 전체적인 형상은 Fig. 4와 같다. 베너 에어로졸 생성부에는 압력센서 (pressure transducer)와 열전대(thermocouple)를 설치하였고, 연료로는 휘발성이 낮고 상온 저장이 용이한 등유(Kerosene)를 사용하고 무화도를 고려하여 그 수위를 일정 높이(20 mm)로 유지하였다.

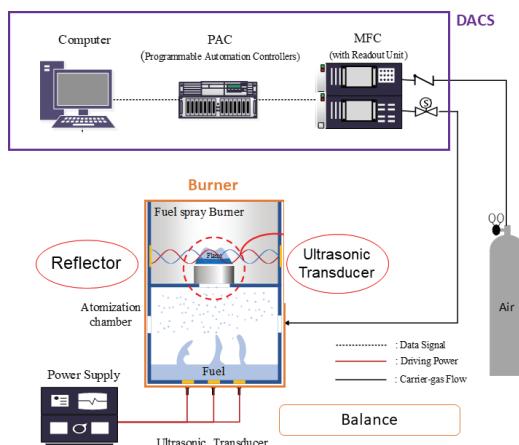


Fig. 2 Schematic of experimental setup.

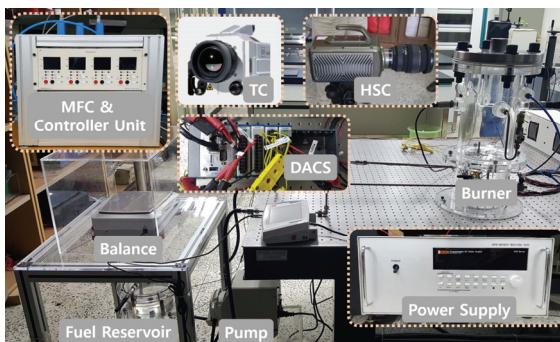


Fig. 3 Experimental apparatus.

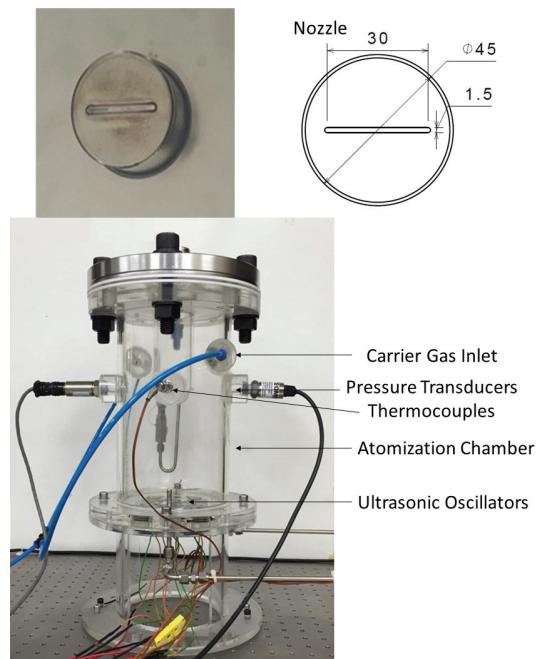


Fig. 4 Configuration of experimental burner.

Fig. 5는 USW(Ultrasonic Standing Wave)에 의한 외부 가진 장치를 도시한다. 화염 양단에 국소적 정상초음파장을 생성하기 위하여 PZT [lead zirconate titanate,  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ ] 진동자(piezo effect transducer)와 리플렉터(reflector)를 설치하였다. 초음파 발진기(generator), 부스터(booster) 및 혼(horn) 등으로 구성된 진동자는 다수의 원판을 적층시킨 BLT (Bolt clamped Langevin-type Transducer)를 사용한다. BLT의 출력단에서 발생하는 초음파 진폭은  $5\text{-}15 \mu\text{m}$ 로 매우 작아 진동자의 진폭 증대를 위해 고배율의 혼과 부스터를, 또 출력증대를 위해 전압증폭기(FLC사의 P100)를 사용하였다. 또한, 함수 생성기(nF사의 WF1974)는 주파수와 진폭을 제어하는데 사용되었다. Table 1은 실험조건을 정리한 것이다. 진동자의 주파수는 진동 시스템의 공진 주

Table 1. Experimental conditions.

Parameter	Value
Fuel	Kerosene
Carrier-gas	Air
Fuel temperature	$60\pm2^\circ\text{C}$
Oscillator Frequency, $f$	2.4 MHz
*USW Frequency	40 kHz

\*USW: Ultrasonic Standing Wave

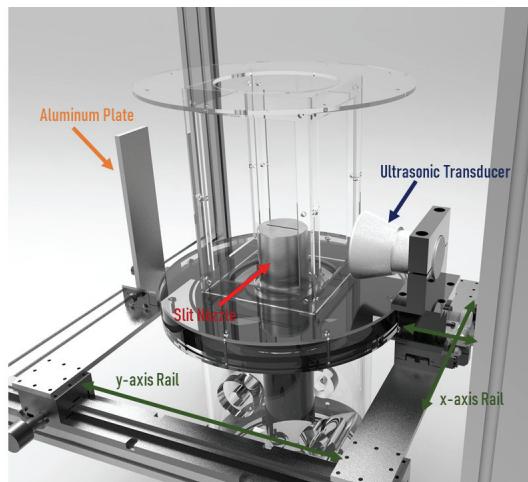


Fig. 5 System for flame excitation by USW.

파수에 근접한 40 kHz로 설정하였다. 진동자는 플랜지 부분을 알루미늄판으로 고정시켰고 y축 레일을 통해 거리를 조절하였다. 진동 표면의 속도 변화가 거의 없다는 사인파의 장점을 이용하여 BLT의 전극 사이에 사인파 전압을 통해 진동을 생성하였다.

Slit-jet 노즐 주변에서 생성되는 화염은 고속 카메라(Vision Research사의 Phantom v7.2)를 이용해 1000 PPS (pictures per second) 속도로 이미지가 획득되었다. 획득한 이미지들은 매트랩을 사용하여 gray scale화 한 후 고역필터(high pass fileter)를 통과시켜 선예도(sharpness)를 향상시켰으며, 이미지 강도(intensity)를 조절하여 이진화(binarization) 시켰다. 그 후, 이진화된 화염 이미지와 보정용 이미지(calibration image)를 비교하여 픽셀(pixel)간 간격을 도출하고, 화염의 평균 단면적을 계산하였다. 고속카메라 이미지의 촬영 속도 차이로 인한 오차율을 최소화하기 위해 획득한 데이터의 평균값을 이용해 이미지들이 비교되었다.

슬리렌 시스템은 한 쌍의 구형 오목거울, 나이프 엣지(knife edge), 광원과 빛의 강도를 조절할 수 있는 가리개 등으로 구성되며, DSLR 카메라와 초고속카메라 등을 통해 정상초음파장을 가시화하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 정상초음파를 통해 부상시킨 물체의 이미지이다. 부상된 물체 사이의 간격은 8.4 mm로 이론값인 8.57 mm(40 kHz, 343 m/s)와 유사하다는 것을 알 수 있다. 정의상, 한쪽은 노드(node)이고 다른 한쪽이 안티노드(antinode)일 때 정상초음파장이 형성되는 바, 이때의 진동자와 리플렉터 사이의 거리는  $(2n-1)\lambda/4$ 로 정의된다. 여기서,  $n$ 은 정수이고  $\lambda$ 는 파장을 의미한다. 노즐 슬릿의 길이가 30 mm인 실험조건을 고려하였을 때, 진동자와 리플렉터 사이 거리가 최소  $15\lambda/4$ 일 때 정상초음파장이 형성된다.

매질이 공기인 정상초음파장의 밀도구배는 상

태방정식을 통해 압력구배와 연관되어 광 굴절에 영향을 미치게 되는데, 이 원리로 슬리렌 가시화가 가능하게 된다. Fig. 7은 슬리렌 촬영기법을 이용하여 정상초음파장을 가시화한 이미지이다. 이 초음파장은 동일한 위상을 가진 두 개의 파가 반대 방향으로 이동하면서 서로의 간섭으로 인해 발생하게 되는데, 정상초음파장의 진한 지점은 파동의 보강으로 인해 생기는 압력 안티노드이고 연한 지점은 파동의 상쇄로 인해 압력이 일정하게 유지되는 압력 노드이다. 이상에서와 같이 화염에 대한 초음파장의 영향을 고찰하기에 앞서 물체의 부상과 수평 조건에서의 슬리렌 이미지를 통해 정상초음파장을 확인하였다.

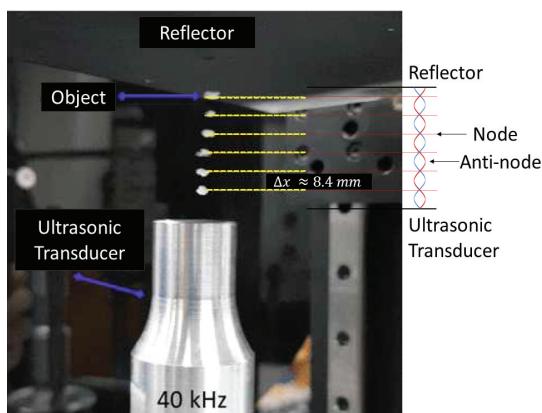


Fig. 6 Image of suspended objects subjected to standing wave.

수송기체 유량의 변화에 따른 화염의 형상이 Fig. 8에 도시된다. 에어로졸 화염(aerosol flame)은 주화염영역(primary flame zone)과 2차화염영역(secondary flame zone)으로 나뉘는데[17], 주화염영역에서는 연료와 공기가 미리 혼합되고 반응대 부근에서 연료가 완전히 기화되어 반응물이 마치 예혼합화염의 특성을 지니게 되므로 예혼합화염과 유사한 거동을 보이게 된다. 또, 2차화염영역은 주화염의 반응대에서 반응하지 못한 미연가스와 주화염영역을 통과한 에어로졸이 주위 공기와 재차 반응하여 형성된다.

수송기체 유량의 증가는 그림에서 도시된 바와 같이 대류 강도(convective strength)의 증대로 인해 화염의 신장률(strain rate)을 높이는 것

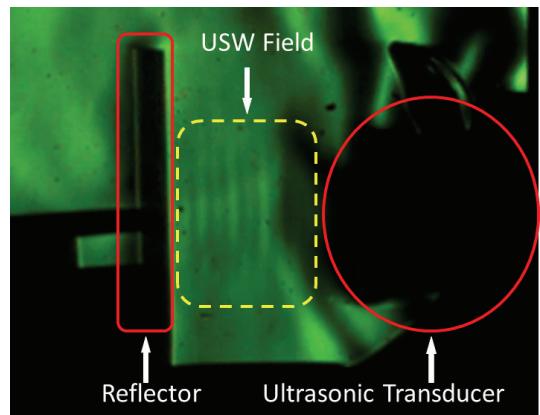


Fig. 7 Schlieren image of standing wave fields between oscillator and reflector.

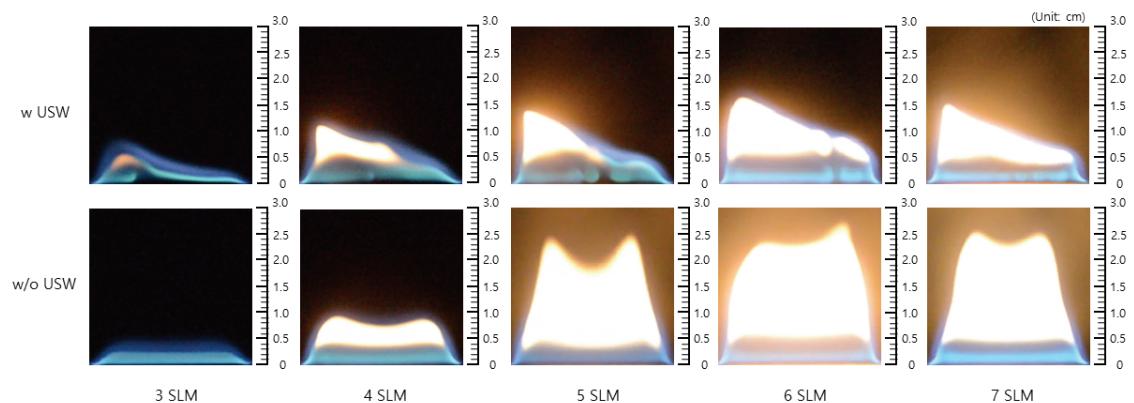


Fig. 8 DSLR camera images of slit-jet flame according to the flow rate of carrier gas.

으로 확인되고, 에어로졸의 일부는 연소되지 못하고 2차화염영역으로 확대되게 된다. 연소시 이 영역에 생성된 국소적 화염(yellow flame)은 에어로졸이 밀집된 영역에서의 일시적 연료 과농 상태로 인해 나타나는 에어로졸 그룹연소(aerosol group combustion) 현상으로 판단된다. 또한 화염에 초음파가 인가되는 경우, 고온 화염 대의 영향으로 초음파장의 기체밀도분포가 바뀌게 되어 정상초음파장은 더 이상 유지하지 못하고 압력의 영향이 큰 진동자 부근과 그 영향이 적은 리플렉터 부근의 압력 불균형으로 인해 대칭성이 깨지는 것이 관찰된다.

Fig. 9는 정상초음파 유·무에 따른 수송기체 유량과 화염의 평균면적 관계를 나타낸다. 수송기체 유량의 증가에 따라 일반적으로 화염의 평균면적은 증대되는데, USW의 영향이 없는 7 SLM(Standard Liter per Minute)인 조건에서 화염의 면적은 6 SLM보다 오히려 줄어들고 있다. 즉 수송기체 유량의 과도한 증가가 주화염영역의 부분적 확대와 함께 화염면적의 대부분을 차지하는 2차화염영역의 감소를 유발하고 있는데, 이는 에어로졸의 대류강도와 난류로의 천이 그리고 부력의 영향 등이 혼재되어 나타나는 현상으로 판단되는 바, 보다 명확한 이해를 위해서는 추가적인 실험과 검토가 필요할 것으로 보인다.

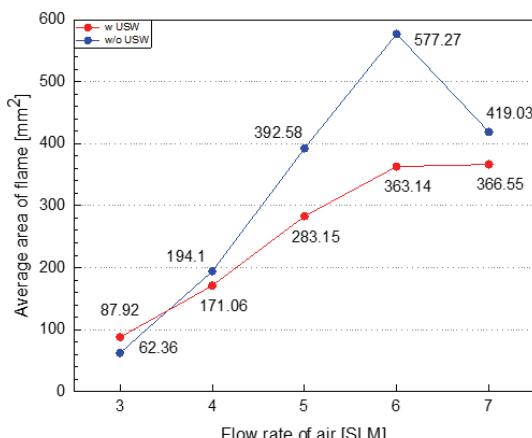


Fig. 9 Variation of average flame area without or with USW according to the flow-rate of carrier gas (air).

Fig. 8, 9에서 보이는 정상초음파 가진에 의한 화염 평균면적의 전반적인 감소는 화염의 2차화염영역에 작용하는 USW의 추가적인 에너지로 인해 반응률이 증가했기 때문일 것이다. 3 SLM에서 정상초음파 가진에 의한 화염 평균면적의 국소적 증가는 낮은 유량에서 보이는 노즐 가장자리(edge)의 열 손실과 함께 2차화염영역이 상대적으로 작아 정상초음파의 영향을 거의 받지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 정상초음파의 유·무에 따른 수송기체 유량과 연료소모율의 관계를 나타낸다. 연료소모율은 연소시 획득한 데이터를 평균하여 산출하였다. 그래프에서는 수송기체 유량의 증가에 따라 연료소모량이 증대된다는 사실을 확인할 수 있다. 또한 동일한 수송기체 유량에서 정상초음파에 의해 연료소모율이 10% 내외로 증가되는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 초음파 가진에 의한 압력교란이 에어로졸의 충발을 촉진시켜 액적 수밀도 감소와 함께 연료의 반응속도를 증대시키거나 반응대에서 에어로졸을 분산시켜 노즐 근처의 압력을 국소적으로 강하시키기 때문으로 판단된다. 본 연구팀은 선행연구를 통해 정상초음파가 인가된 예혼합화염에서 연소속도가 증가한다는 사실을 이미 관찰한 바 있다[18].

에어로졸의 수송을 위해 공급된 수송기체 유

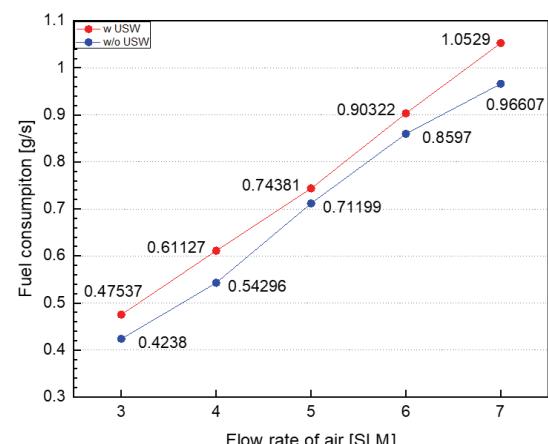


Fig. 10 Fuel consumption rates without or with USW according to the flow-rate of carrier gas.

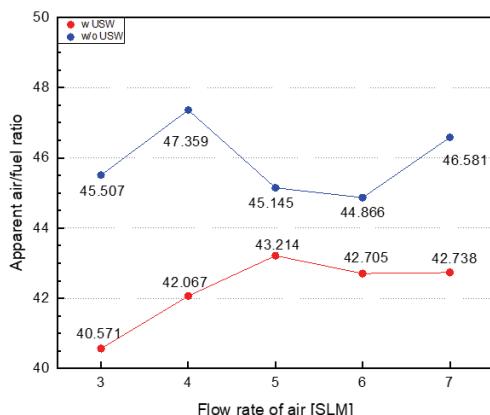


Fig. 11 Variation of apparent Air/Fuel ratio according to the change of carrier-gas flow-rate without or with USW.

량과 소모된 연료량의 비, 즉 겉보기 공연비 (apparent Air/Fuel mass ratio, AFR)를 산출하여 Fig. 11에 나타낸다. 전술한 바와 같이 수송 기체 유량의 증가는 액체연료 소모량의 증대를 동반하게 되어 초음파 가진의 유·무화 무관하게 겉보기 공연비가 큰 변화 없이 일정 수준으로 유지되는데, 이는 수송기체가 에어로졸을 수송하는 과정에서 무화된 연료액적의 크기가 수  $\mu\text{m}$ 로 매우 작고, 챔버 내에서 수송기체와 에어로졸의 혼합 또한 매우 잘 이루어져 연료·공기 혼합물이 마치 단상의 기체인 것처럼 거동하기 때문인 것으로 판단된다. 연료·공기 혼합물은 2.2 wt.% 미만의 에어로졸을 포함하고 있으므로, 노즐에서 분사되는 혼합물의 유량과 수송기체 유량이 크게 차이가 없을 것으로 미루어 짐작할 수 있다. 또한 정상초음파 가진시, 겉보기 공연비는 평균 42.3으로 USW의 영향을 받지 않는 경우보다 약 8.5% 감소한다. 이는 USW의 영향으로 인한 에어로졸 증발률의 증가뿐만 아니라 공기와의 혼합률 증대로 인한 연소반응률의 제고에 기인하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

초음파 진동자를 통해 생성된 초음파 무화 에

어로졸 화염에 정상초음파 가진이 미치는 영향을 관찰하기 위한 실험이 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 수송기체 유량의 증가는 화염의 신장률을 높이고 화염의 평균면적을 증대시켰다.
- 정상초음파 가진에 의한 화염 평균면적의 감소는 2차화염영역에 작용하는 USW의 추가적인 에너지로 인해 반응률이 증대되었기 때문이다.
- 정상초음파에 의해 연료소모율이 10% 내외로 증가되는데, 이는 초음파 가진에 의한 외부교란이 에어로졸의 증발을 촉진시켜 노즐 근처의 액적 수밀도 감소와 함께 압력을 국소적으로 떨어뜨리기 때문으로 판단된다.
- 정상초음파 가진시 조성된 겉보기 공연비는 평균 42.3으로 그렇지 않은 경우보다 약 8.5% 감소하였다. 이는 USW의 영향으로 에어로졸 증발률과 공기와의 혼합률 증대로 인한 연소반응률의 제고에 기인한다.

#### 후 기

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

#### References

- Mitsutomo, H., Kota, H., Hiroki, O. and Goro, M., "Improvement of Laminar Lifted Flame Stability excited by High Frequency Acoustic Oscillation," *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 2697-2703, 2009.
- Sebastien, D., Thierry, S., Daniel, D. and Sebasetien, C., "Combustion Dynamics and Instabilities: Elementary Coupling and Driving Mechanisms," *Journal of Propulsion*

- and Power*, Vol. 19, NO. 5, 2003.
3. Yei, C.C., Chih, Y.W., Tony, Y. and Tsarng, S.C., "Stabilization Process of a Lifted Flame Tuned by Acoustic Excitation," *Journal of Combustion Science and Technology*, Vol. 174, pp. 87-110, 2002.
  4. 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.
  5. Umemura, A. and Shimada, Y., "Linear Acoustic Characteristics of Supercritical Droplet Vaporization," *Symposium on Combustion*, Vol. 27, pp. 2659-2665, 1998.
  6. 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, pp. 977-983, 2000.
  7. Qureshi, S., Khan, W. and Prosser, R., "Behaviour of a Premixed Flame Subjected to Acoustic Oscillations," *PLoS One*, Vol. 8, No. 12, 2013.
  8. 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.
  9. Wood, R.W. and Loomis, A.L., "The Physical and Biological Effects of High-frequency Sound-Waves of Great Intensity," *Philosophical Magazine*, Vol. 4, Issue 22, pp. 417-436, 1927.
  10. Lang, R.J., "Ultrasonic Atomization of Liquids," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 34, No. 1, pp. 6-8, 1962.
  11. 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, Issue 16, pp. 2205-2215, 2004.
  12. Topp, M.N. and Eisenklam, P., "Industrial and Medical Uses of Ultrasonic Atomizers," *Ultrasonic*, Vol. 10, Issue 3, pp. 127-133, 1972.
  13. Ju, E.S., La, W.J. and Choi, W.C., "A Study on Characteristics of the Liquid Atomization by Ultrasonic," *Trans. Korea Soc. Auto. Eng.*, Vol. 7, No. 5, pp. 31-39, 1999.
  14. Kim, M.C., Bae, D.S. and Kim, J.S., "Effects of the Carrier-gas Flow-rate on the Combustion Characteristics of the Ultrasonically-atomized Slit-jet Flame," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20 No. 3 pp. 9-16, 2016.
  15. Kim, M.C., Kim, M.S. and Kim, J.S., "Behavior of the Ultrasonically-atomized Liquid-fuel Flame Injected through a Slit-jet Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 22, No. 6, pp. 1-10, 2018.
  16. Kim, M.C. and Kim, J.S., "OH-and CH-Radical Chemiluminescence Characteristics in the Spray Combustion of Ultran sonically Atomized Kerosene," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 22, No. 1, pp. 72-79, 2018.
  17. Kim, M.C., Bae, D.S. and Kim, J.S., "Comparison of Dynamic Characteristics of Methane/Air and Propane/Air Premixed Flames with Ultrasonic Standing Wave," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 4, pp. 44-51, 2017.
  18. 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.