



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

초음파 가진이 탄화수소계 연료의
연소특성에 미치는 영향



2024년 2월

국립부경대학교대학원

기계공학과

배창한

공학석사학위논문

초음파 가진이 탄화수소계 연료의
연소특성에 미치는 영향

지도교수 김정수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2024년 2월

국립부경대학교 대학원

기계공학과

배창한

배창한의 공학석사 학위논문을 인준함.

2024년 2월 16일



위원장	공학박사	이형주	(인)
위원	공학박사	정욱철	(인)
위원	공학박사	김정수	(인)

목 차

List of Tables	i
List of Figures	ii
Abstract	v
I. 서 론	1
1. 연구배경 및 목적	1
1.1 연구의 필요성	1
1.2 관련이론 및 연구현황	5
II. 정상초음파 가진을 통한 부상화염의 연소불안정성 개선	8
1. 연구배경	8
2. 실험 장치 및 방법	10
3. 실험결과 및 고찰	15
3.1 화염 부상 높이의 변화	15
3.2 OH* 자발광 특성	18
3.3 연료소모량의 변이	22
III. 초음파 분해된 케로신과 기체산소의 연소특성	24
1. 연구배경	24
2. 실험 장치 및 방법	24
3. 실험결과 및 고찰	30
IV. 결 론	37
참고문헌	39

List of Tables

Table 3.1. Experimental parameter.	29
Table 3.2. Operation condition of GC-MS.	29



List of Figures

Fig. 1.1	Launch cost per kilogram to LEO versus first system launch date.	1
Fig. 1.2	Small satellite launches by year.	2
Fig. 1.3	Four effects resulting from ultrasound propagation in a liquid.	5
Fig. 1.4	Schematic representation of the ultrasonic cavitation phenomena in liquids.	6
Fig. 1.5	Schematic diagram of droplets banding formation under ultrasonic standing waves (Red line $p(z)$: acoustic pressure distribution).	7
Fig. 2.1	Schematic of experimental setup.	10
Fig. 2.2	Experimental apparatus.	11
Fig. 2.3	Configuration of USW excitation system.	12
Fig. 2.4	Typical Schlieren image of standing wave field with combustion flame.	13
Fig. 2.5	Definition of partial flame lift height (a), flame lift height measuring method (b).	13
Fig. 2.6	Lifted flame images according to the flow-rate of carrier gas and the height of USW excitation region.	16
Fig. 2.7	Flame lift-off height according to the carrier gas flow-rate and excitation region	17
Fig. 2.8	Contour image of the distribution of OH^* emission	19
Fig. 2.9	Normalized OH^* emission intensity according to flow-rate of carrier gas.	21

Fig. 2.10	Fuel consumption without or with USW according to carrier gas flow-rate.	22
Fig. 3.1	Overview of the experimental apparatus.	25
Fig. 3.2	Schematic of experimental setup.	26
Fig. 3.3	Schematic of model combustor and temperature sensor position.	27
Fig. 3.4	Section view of the model combustor.	28
Fig. 3.5	Plenum chamber assembly.	28
Fig. 3.6	DSLR visible image of flames according to ultrasonic excitation time variation.	30
Fig. 3.7	Contour image of the distribution of OH* emission.	31
Fig. 3.8	Normalized OH* emission intensity according to the ultrasonic excitation time variation.	32
Fig. 3.9	Temperature profiles of the model combustor wall according to the ultrasonic excitation time variation.	34
Fig. 3.10	The relative ratio of the hydrocarbon(alkane) in kerosene according to ultrasonic wave excitation time.	35

Effect of Ultrasonic Wave Energy on Combustion Characteristics of Hydrocarbon Fuel

Chang Han Bae

Department of Mechanical Engineering, The Graduate School
Pukyong National University

Abstract

This study was performed to analyze the combustion characteristics of storable hydrocarbon-fuels with ultrasonic wave energy. The demand for launching satellites is rapidly increasing due to the decreasing cost of space launch vehicles. In particular, the demand for small satellites is steadily rising because of the reduced development and launch costs, as well as the short lead time. Small satellites are primarily operated in Low Earth Orbit (LEO), which has the disadvantage of short mission duration due to perturbations such as gravity and atmospheric drag. To make up for these disadvantage, propulsion system is required for orbit transition and attitude control. Among them, chemical propulsion systems that use storable fuels are suitable as fuels for small satellites due to their high thrust performance and high energy density per unit volume. But, the characteristic of storability requires sufficient phase change energy for combustion. This can cause combustion instability, such as ignition delay, which can degrade the performance of thruster. However, ultrasonic atomization can be used to create droplets that can be burned immediately. In addition, when ultrasonic energy is excited to the fuel, the combustion efficiency can be increased due to the cavitation effect, such as the collapse of the hydrocarbon chain structure. To take advantages of this effect, an experiment was conducted to explicate the behavior of an

ultrasonically-atomized kerosene lifted-flame in accord with position of ultrasonic standing wave (USW) and the carrier gas flow-rate. The combustion region was visualized by using DSLR, ICCD camera and Schlieren photography with the high-speed camera. As a result, when the flame was exposed to ultrasonic standing wave, it was confined within the boundary region of the standing-wave field, and its OH radical (OH^{*}) emission field was intensified. Flame chopping by USW could be also observed in detail through the distribution of OH^{*}. And in order to determine the effect of ultrasonic-wave excitation time on the combustion characteristics of kerosene, an experiment was conducted. The fuel, kerosene and oxygen were injected through a coaxial shear injector and burned in a model combustion chamber. The ultrasonic-wave excitation time(t_e) was set to 0, 30, and 60 seconds, and the composition of the fuel was analyzed by gas chromatography mass spectrometry (GC/MS). The OH^{*} intensity was then acquired by ICCD camera. As a result, the temperature of the fuel was higher with the increase of t_e , and the hydrocarbon chain structure of high molecular composition was decomposed into low carbon numbers composition and free radicals by the cavitation effect due to the ultrasonic-wave excitation energy. As a consequence, OH^{*} emission intensity increased with t_e .

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

1.1 연구의 필요성

신 우주시대(New space Era)가 도래함에 따라 국가 또는 군의 주도로 수행되었던 우주산업은 현재 민간으로의 이전을 통해 효율 및 경제성에 대한 개선이 이루어지고 있다. Fig. 1.1은 각 우주 발사체의 첫 발사연도와 지구 저궤도(Low Earth Orbit, LEO)를 목표로 발사되는 페이로드의 킬로

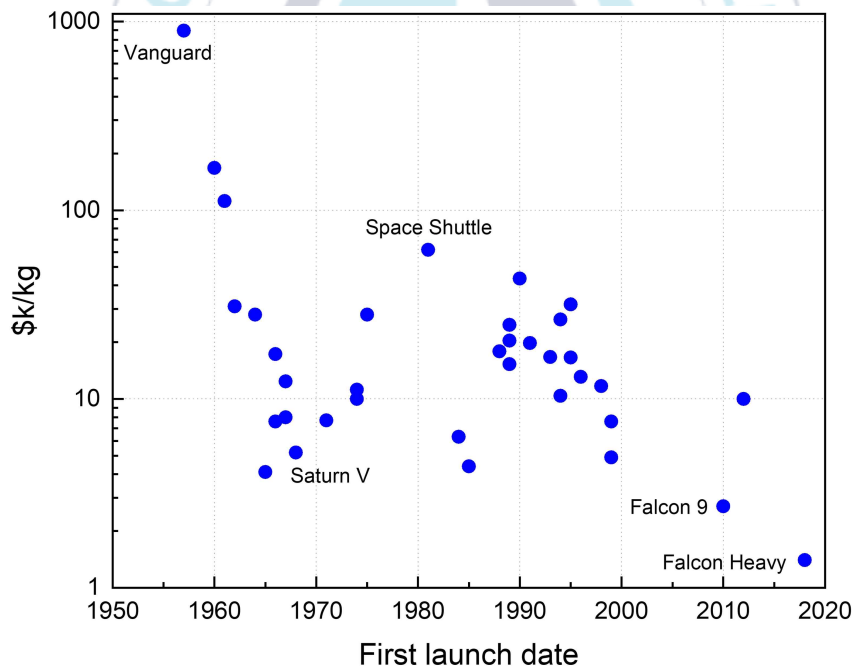


Fig. 1.1 Launch cost per kilogram to LEO versus first system launch date[1-6].

그램당 발사비용을 정리한 그래프이다. 미국의 초기 우주 발사체인 Vanguard의 경우 kg당 발사비용이 1000 k\$/kg에 육박하였으나, 이후 급격히 감소하여 Saturn V의 발사비용은 5 k\$/kg에 도달하였다. 이후, 1970년부터 2000년까지 평균발사비용의 경우 크게 변화하지 않았으나, 2010년도 재사용 기술을 적용한 Space X사의 Falcon 9의 등장으로 인해 다시 한번 급격한 가격 하락이 발생하였으며, Falcon Heavy의 경우 1.4 k\$/kg으로 현저히 낮아졌다.

우주 발사체의 발사비용 감소에 따라 위성의 발사 수요는 급증하는 추세이다. 그 중, 소형위성은 중대형 위성 대비 개발 및 발사비용의 절감과 납품 소요기간이 짧다는 장점이 있으며 Fig. 1.2에 도시된 그래프와 같이 그 수요와 발사 빈도는 증가하고 있다. 지구 저궤도에서 운용되는 소형위성의 경우 낮은 전력을 사용하여 높은 대역폭과 낮은 통신 대기시간을 제공할 수 있으며, 그 발사비용 또한 저렴하다[7]. 하지만, 이러한 장점에도 불구하고

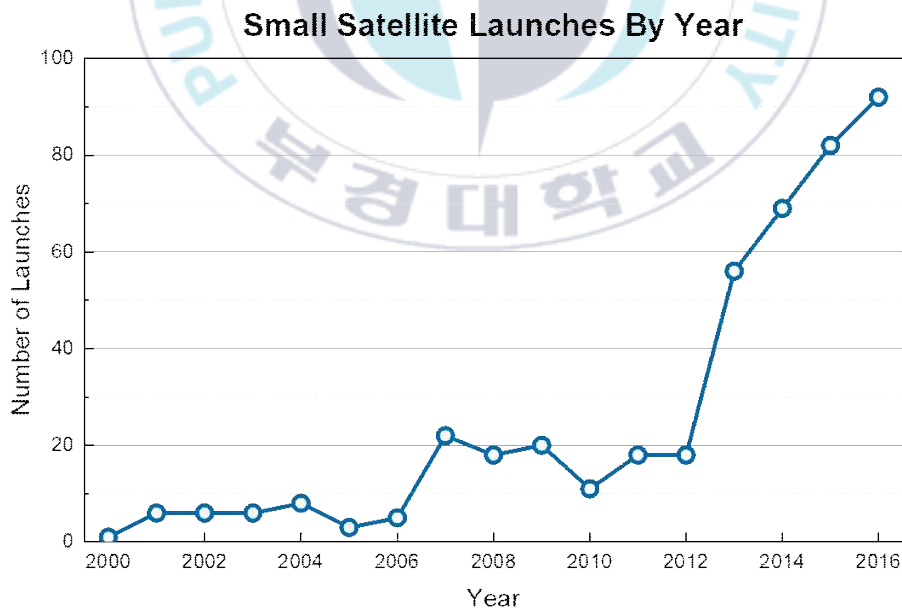


Fig. 1.2 Small satellite Launches by year[7].

하고 지구 저궤도에는 중력의 영향과 희박한 대기로 인한 항력이 존재하여 임무 수행시간이 짧다. 이러한 단점을 보완하고자 소형위성에는 충분한 속도 증분(Delta-V)을 획득하여 궤도를 수정하기 위한 별도의 추진시스템이 장착된다. 초소형 위성 또는 그 이하 크기의 위성은 탑재 중량 및 부피의 제약으로 인해 전기 추진 시스템 또는 안정성이 높고 구조가 단순한 냉기체 추진시스템을 주로 사용하고 있다. 특히, 전기 추진 시스템은 뛰어난 비추력 성능을 갖추고 있어 장시간 운용이 가능하나, 낮은 추력 성능으로 인해 자세제어나 급격한 궤도 전이 기동에는 불리하다.

일례로 2022년 2월 전기추력기가 장착된 Starlink 위성의 경우 태양 활동에 기인한 지구대기 밀도 증가로 인해 기체에 항력이 작용하였고, 40기의 인공위성이 대기권으로 추락하여 소멸한 사례가 있다[8, 9]. 따라서, 이에 대한 방안으로 추력 성능과 반응성이 우수한 소형위성용 화학식 추진 시스템의 개발이 요구된다[10, 11].

화학식 추력기의 추진제의 종류는 크게 기체, 고체, 액체 추진제로 나뉜다. 기체 추진제를 사용하는 추진시스템의 경우 그 구조가 간단하고 점화 지연 등과 같은 연소불안정성의 발생 가능성이 작다. 하지만 낮은 밀도에너지로 인해 연료탑재량이 매우 한정적이다. 고체추진제의 경우 신뢰성이 높고 높은 추력 성능을 가지고 있으나, 한번 점화가 시작되면 추력 조절(throttling)과 재점화가 불가능하다. 액체연료의 경우 단위 부피당 밀도에너지가 높으며 상온 액체 추진제를 사용할 경우 저장성 또한 우수하다. 이러한 특성으로 인해 장시간 임무를 수행하는 소형 인공위성의 연료로 적합하다.

본 연구에서는 다양한 상온 액체 추진제 중, 대표적인 탄화수소 계열 연료인 케로신(kerosene)을 채택하였는데, 이는 점축 점화성 연료보다 안정적이고 독성이 적으며, 그 취급법이 간단하며 가격 또한 저렴하다. 하지만

상온에서 액체로 존재한다는 특성으로 인해 점화를 위한 충분한 상변화 에너지가 요구되는데, 이로 인해 점화지연을 유발하여 하드 스타트(hard start)나 연소불안정성을 유발하여 연소실의 손상 및 성능 저하의 주 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 초음파를 이용하여 대표적인 상온 저장성 연료인 케로신의 연소효율 개선을 위한 실험을 수행하였다.



1.2 관련이론 및 연구동향

Fig. 1.3은 액체에 초음파를 가진할 때 발생하는 대표적인 현상을 보여 준다. 그 중, 액체가 고속으로 유동할 때 압력이 증기압 이하로 낮아져 증기 기포가 생성되는 캐비테이션(cavitation)은 가장 주요하게 발생하는 현상이다[12, 13]. 캐비테이션은 액체를 열분해시켜 분자의 고리 구조를 끊어낸다[14]. 캐비테이션의 경우 초음파를 액체에 가진할 때 Fig. 1.4에서 도시된 일련의 과정을 거친다. 초음파 가진을 통해 액체 내 공동이 발생하게 되며, 생성된 공동은 압력파에 의해 팽창과 수축을 반복하며 반지름 방향의 크기가 증가되고, 초음파 가진 시 생성되는 액체 내 공동은 이때 기포 주변에서 고온, 고압의 조건이 형성되며 이로 인해 분자 고리 구조의 열분해(pyrolysis)가 발생한다. Choi[15]는 선박용 연료유에 초음파를 가진하여 캐비테이션 효과에 의해 고 탄소수(carbon number) 화합물의 감소와 더불어 저 탄소수 화합물의 증가를 관찰하였다. 또한 Margeta등[16]과 Zhou[17]은 초음파 에너지 가진을 이용한 연료유의 산화반응 촉진을 통해 탈황 효율을 높이는 등 초음파 캐비테이션을 활용한 연구가 지속적으로 수행되었다. 일련의 연구 결과들을 통해 초음파 가진에 의해 발생한 캐비테

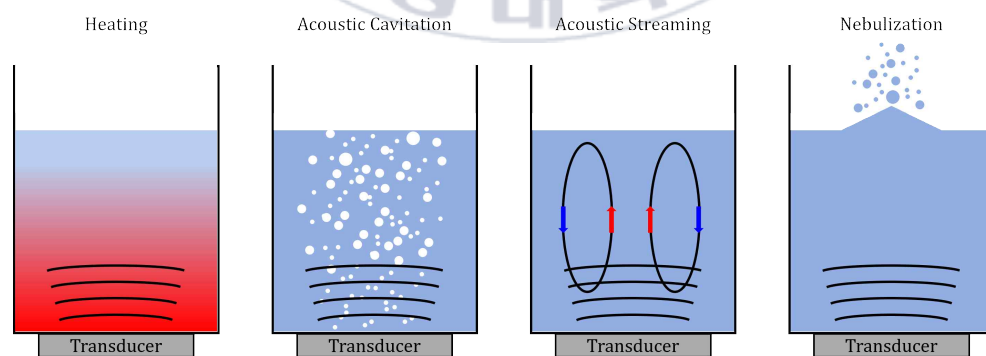


Fig. 1.3. Four effects resulting from ultrasound propagation in a liquid[12].

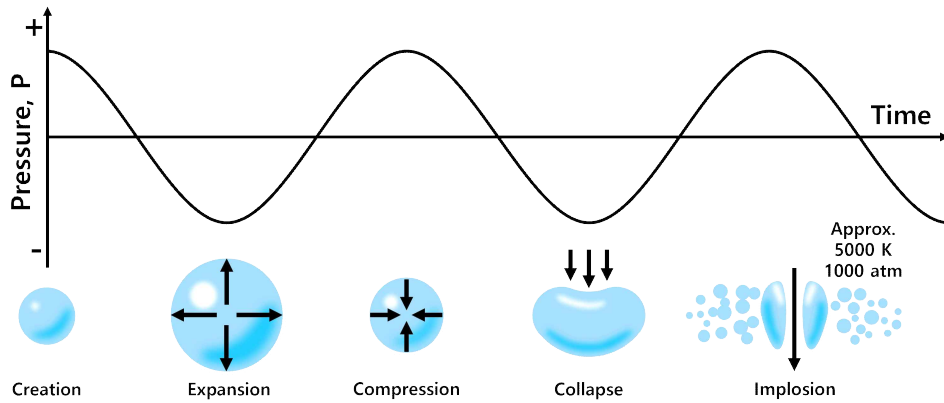


Fig. 1.4. Schematic representation of the ultrasonic cavitation phenomena in liquids.

이전의 열분해 효과는 탄화수소계 연료의 연소성능을 크게 향상할 수 있을 것으로 판단된다.

초음파를 이용한 미립화 연구의 경우 1927년 Wood와 Loomis[18]에 의해 시작되었으며, 이후 다양한 연구자들에 의해 연료 초음파 가진을 통한 분자고리 구조 변화와 미립화 성능 개선에 대한 연구가 수행되었다. 또한, 초음파 무화(ultrasonic atomization)에 의해 생성되는 에어로졸에 정상초음파를 가진하였을 때 발생하는 현상에 대한 연구도 수행되었다. Duvver 등[19]은 수치 모사(numerical simulation)를 수행하여 정상파가 액적의 기화 특성에 지대한 영향을 미친다고 주장한 바 있으며, Okai 등 [20] 및 Saito 등[21]은 음향파장(acoustic field) 내에서 에어로졸을 연소시켜 연소속도가 증가함을 실험으로 입증하였다. Luo 등[22]은 Fig. 1.5와 같이 액적의 유동장에 정상초음파를 가할 때, 마루(antinode)와 골(node) 사이의 압력구배로 인해 입자들이 node로 균집되는 droplet banding 현상을 확인하였다.

이외에도 초음파 가진에 의한 압력구배의 효과를 확인하기 위해 초음파

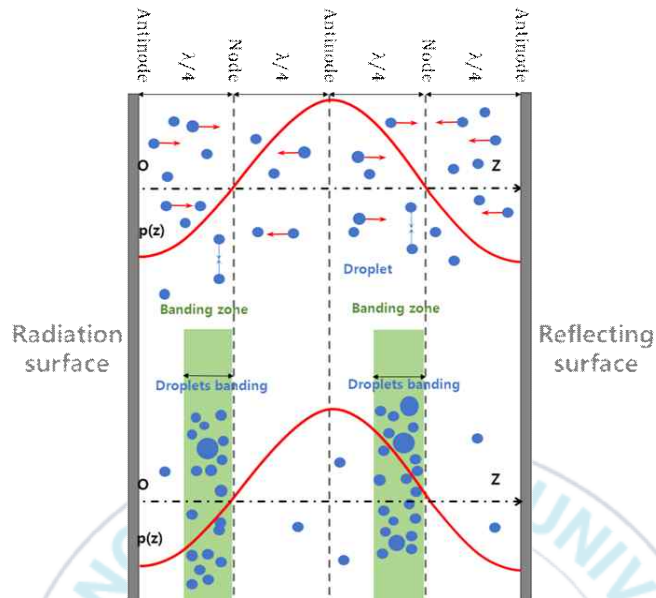


Fig. 1.5. Schematic diagram of droplets banding formation under ultrasonic standing waves (Red line $p(z)$: acoustic pressure distribution)[22].

진동자를 사용하여 많은 연구가 수행되어 왔다[23, 24]. 상기한 모든 결과는 초음파 가진시 연소반응이 촉진된다는 것을 뜻하고, 파동을 통하여 유동장의 변화가 촉발될 수 있다는 사실 또한 예측하게 한다.

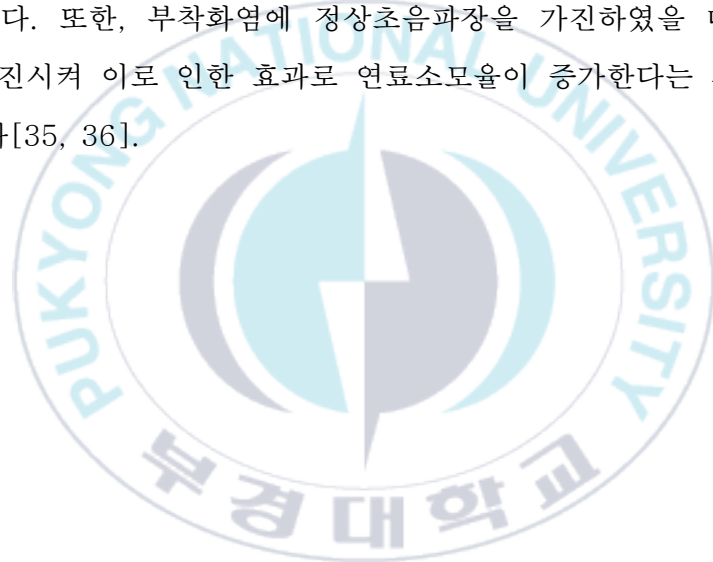
II. 정상초음파가진을 통한 부상화염의 연소불안정성 개선

1. 연구배경

수중무화를 통해 생성되는 고 수밀도의 액적(droplet of high number density)은 집적효과로 인해 산화제 희박 조건의 액적 군집체(droplet cluster)를 형성한다. 이러한 군집체는 산소농도가 낮아 화염이 통과하지 못하여 단일 액적과 같은 거동의 그룹연소(group combustion)를 발생시킨다[25-27]. 확산화염의 경우 화염을 부상시키게 되면, 연료와 산화제의 활발한 혼합이 발생하고, 이로 인해 질소산화물 등의 생성이 감소하는 것이 확인된다[28, 29]. 또한, 연료 분사를 위한 노즐이 화염에 의한 열전달을 적게 받는 부상화염의 경우, 고온의 연소환경에서 장시간 운용되는 연소기 등에서 발생하는 화염에 의한 분사기의 열손상 방지에 유리하다[30]. 이러한 특징들은 확산화염과 거동이 유사한 그룹 연소 화염에서도 발생할 것으로 기대된다. 그러나, 부착화염 대비 상대적으로 강한 대류강도에 의해 쉽게 블로우 오프(blow off)되는 부상화염의 안정성은 매우 낮다[31]. 이러한 단점을 개선하기 위하여 부상화염의 안정성 증대에 대한 다수의 연구가 수행되고 있다. Oh 등[32]은 부상된 수소 난류 확산화염의 높이 감소 효과를 질소의 희석농도를 증가시켜 확인한 바 있으며, Chao 등[33]은 연소실 내 초음파 가진을 통해 프로판-공기 난류 예혼합 화염 부상높이의 감소와 blow-out 한계 속도 범위의 증가 등 화염 안정성 개선을 실험을

통해 확인하였다. 추가적으로 Hirota 등[34]은 정상초음파(Ultrasonic Standing Wave, USW)가 메탄-공기 동축류 부상화염 연료유동장에 가진 되었을 때, 화염의 부상 높이가 감소하는 것을 통해 화염 안정성의 증대 가능성을 확인한 바 있다.

본 연구팀은 선행연구에서 수송기체(carrier gas) 유량 및 초음파 무화기 소비전력의 변화에 따른 케로신 부착화염의 거동 변화를 관찰한 바 있다. 이때 화염의 신장률(strain rate)은 수송기체 유량의 증가에 비례하였으며, 연료의 질량유량은 진동자의 소비전력이 증가함에 따라 상승하는 것이 확인되었다. 또한, 부착화염에 정상초음파장을 가진하였을 때 액적의 반응성을 촉진시켜 이로 인한 효과로 연료소모율이 증가한다는 사실이 확인된 바 있다[35, 36].



2. 실험 장치 및 방법

초음파 가진에 의한 부상화염 거동 변이의 관찰을 위해 설치된 실험장치의 개략도 및 배치도를 Fig. 2.1과 Fig. 2.2에 각각 도시한다. 실험장치는 크게 데이터 수집 및 제어장치(DACS: Data Acquisition & Control System)와 버너(burner)로 구성된다.

버너는 연료탱크와 노즐부로 분류된다. 연료탱크의 형상은 원통형이며, 재질은 가공성이 유리한 PMMA (poly methyl methacrylate)가 채택되었고, 연료의 온도 변화를 측정을 위한 열전대(thermocouple)가 측면에 부착된다. 또한, 연료의 무화를 위해 2.4 MHz로 작동되는 초음파 진동자 5개가 탱크 하단부에 설치된다. 버너의 노즐은 $30 \times 1 \text{ mm}^2$ 크기의 slit이 높이 60 mm, 지름 45 mm의 원통형 몸체에 부착된 형태이며 STS304로

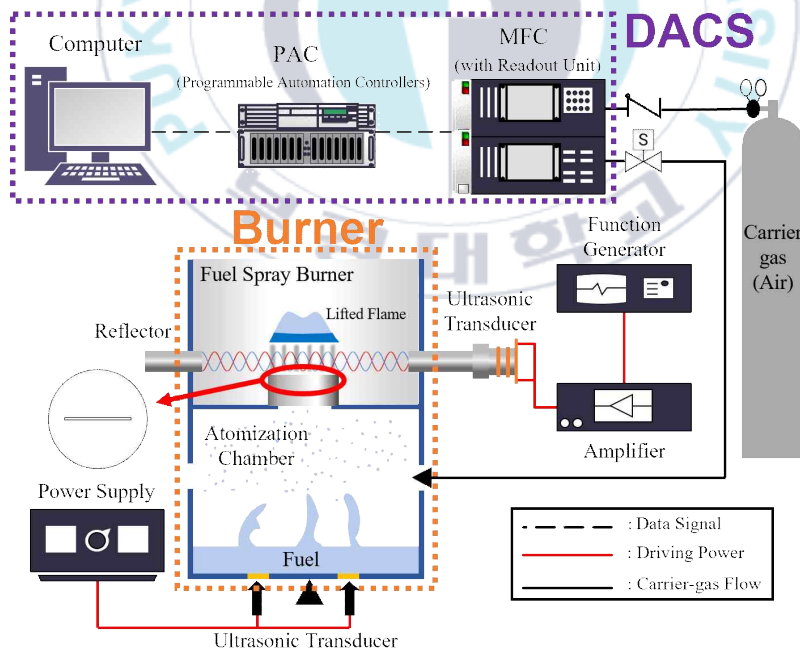


Fig. 2.1. Schematic of experimental setup.

제작되었다. 노즐 내부에는 이중의 mesh가 유동 균일화와 역화 방지를 위해 에어로졸이 통과하는 부분에 설치된다. 에어로졸은 버너 하단에 설치된 무화 진동자에 의해 생성되어 측면에서 공급되는 수송기체와 섞여 노즐에 의해 분사된다.

수송기체로는 공기[순도 99.99% 이상의 O_2 (20.9%) 및 N_2 (79.1%)]를 사용하고, 연료는 케로신(순도 95%)을 채택하였다. 수송기체는 유량제어기를 통해 정밀하게 제어된다. 연료 온도 및 수위 등에 영향을 받는 초음파에 의한 액체연료의 미립화 성능은 Suzuki 등[37]에 의해 확인되었다. 따라서 본 실험에서는 균일한 무화도를 유지하기 위해 케로신의 수위 및 온도는 23 ± 2 mm와 $65 \pm 5^\circ C$ 로 각각 설정되었다.

노즐 양 끝단에 피에조 진동자(piezo effect transducer)와 동일한 지름

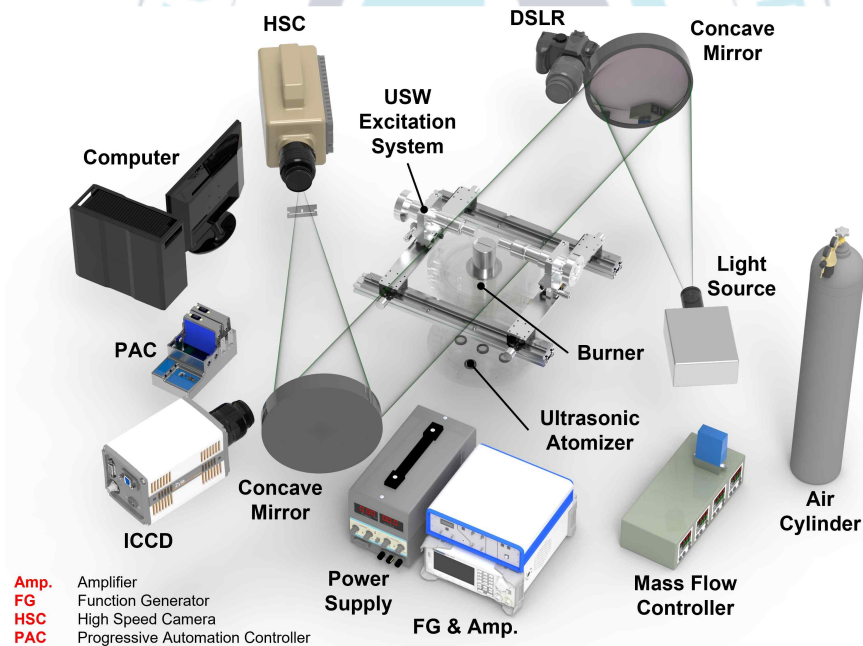


Fig. 2.2. Experimental apparatus.

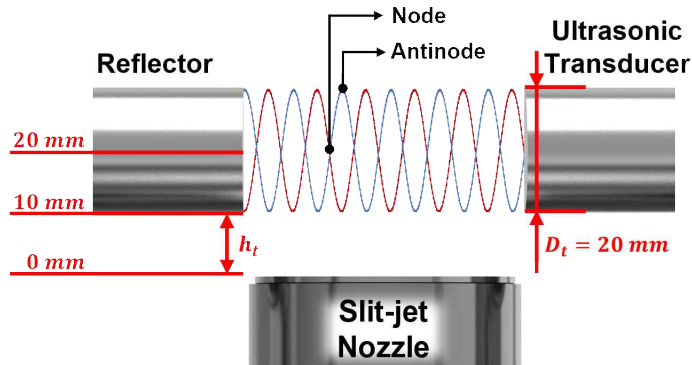


Fig. 2.3. Configuration of USW excitation system.

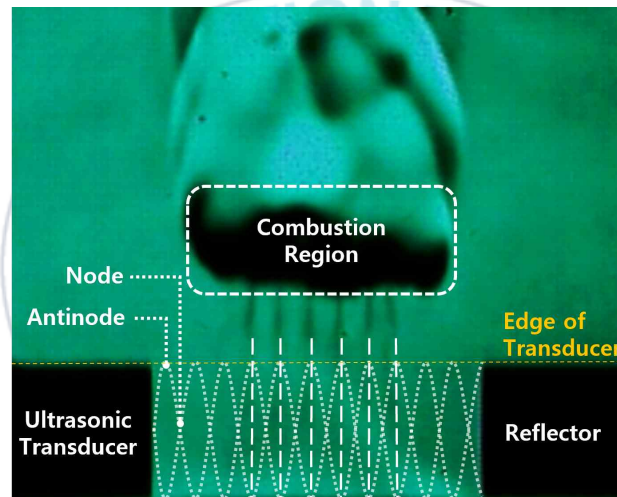


Fig. 2.4. Typical Schlieren image of standing wave field with combustion flame.

의 리플렉터(reflector)를 에어로졸 유동장 양단에 국소적 정상초음파장을 생성하고자 Fig. 2.3과 같이 설치한다. 이때, 리플렉터와 진동자 간의 거리는 slit의 길이 방향으로 설치된 x축 스테이지에 의해 정밀 조절된다. 또한, 진동자 하부와 노즐의 간격으로 정의되는 정상초음파 가진 높이(h_t)는 초음파 진동자 지름($D = 20 \text{ mm}$)의 0, 0.5, 1배인 0, 10, 20 mm로 각각 설정된다.

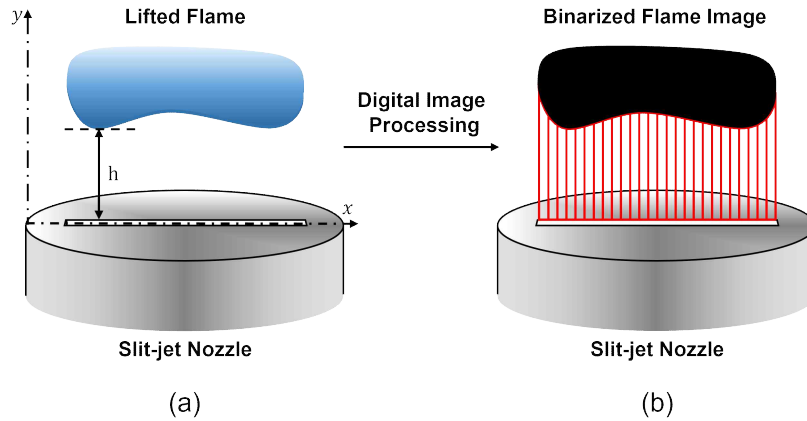


Fig. 2.5. Definition of partial flame lift height (a), flame lift height measuring method (b).

연소장의 가시화를 위한 슬리렌 장치는 광원, 핀홀(pin hole), 오목거울 (초점거리: 2 m) 한 쌍 그리고 나이프엣지(knife edge) 등으로 구성된다. Fig. 2.4는 슬리렌 기법으로 획득한 대표적인 이미지이다. 정상초음파장의 마루에서 음영이 짙어지는 것을 통해 초음파 가진시 발생하는 압력구배 (pressure gradient)가 확인된다. 화염의 구조를 분석하기 위해 슬리렌 기법으로 획득된 연소장의 이미지는 이진화(binazation)되어 사용된다. 또한, 여러 종류의 촬영장치에 의해 Slit 노즐 주변에서 생성되는 연소장이 가시화 되었는데, 가시화염의 이미지는 DSLR 카메라를 통해 획득되었으며, 슬리렌 기법이 적용된 초고속 카메라에 의해 연소장 음영이미지가 획득되었다. 추가로 연소강도를 비교하고자 band pass filter[Andover, 307Fs10-50(307.1 nm bandpass filter)]를 장착한 ICCD 카메라(Andor Technology, Istar sCMOS)를 이용하여 화염의 OH 라디칼(OH^{*}) 자발광 강도 데이터를 추출하였다.

슬리렌 이미지는 MATLAB 프로그램을 통해 Fig. 2.5의 과정으로 부상 높이를 측정하기 위해 이진화 되며, 그 결과는 Eq. 1의 행렬 B로 정의되고 노

즐과 화염 선단 간의 거리 h 를 계산하기 위해 Eq. 2과 같이 행렬 B 의 열 (column)은 일정한 간격으로 투사(projection)된다. 일련의 과정에 의해 평균화된 결과를 평균 화염 부상높이 H 로 정의한다.

$$B = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \\ x_{m1} & & & & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$h[j] = \sum_{i=1}^m B[i, j] \quad (2.2)$$

$$H = \frac{\sum_{j=1}^n h[j]}{n} \quad (2.3)$$



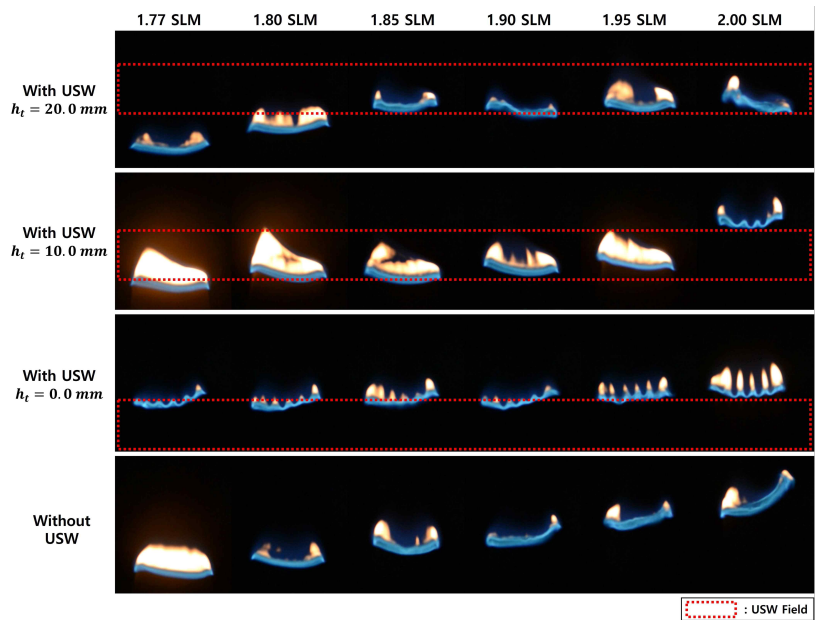
3. 시험결과 및 고찰

3.1 화염 부상 높이의 변화

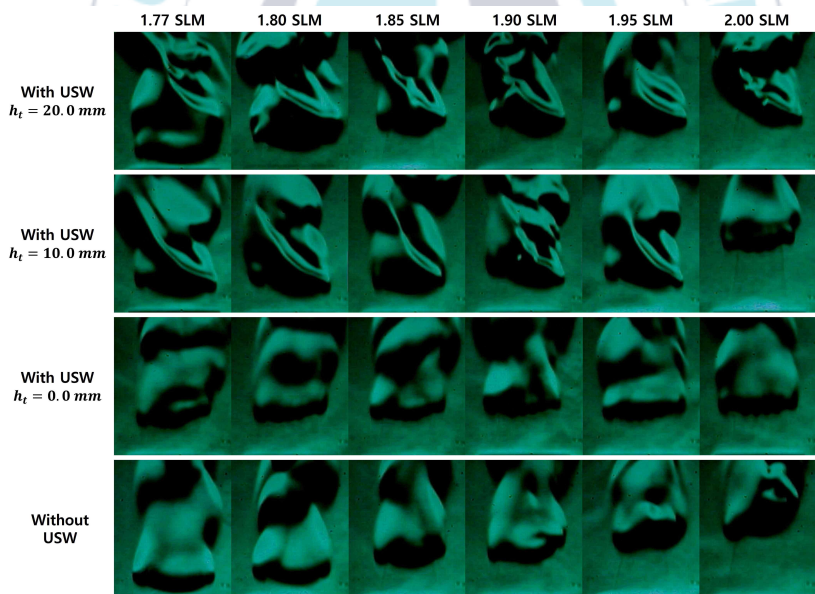
부상화염 가시영역의 이미지 및 솔리덴 기법을 통해 획득된 이미지를 각각 Fig. 2. 6의 (a) 및 (b)에 도시한다. 정상초음파가 가진되지 않았을 때, 화염의 부상 높이는 수송기체의 유량이 증가함에 따라 상승하는 것이 확인된다. 이때, 화염의 떨림과 같은 불안정성이 화염의 높이가 높아질수록 관찰되는데, 이는 수송기체 유량의 증가가 촉발하는 에어로졸 연료 제트의 대류강도 증대의 직접적인 결과이다.

정상초음파 가진 위치가 0 mm일 때, droplet banding에 의한 화염 분기 및 균일한 화염 높이가 관찰된다. 또한, h_t 가 10, 20 mm 일 때, 정상초음파장 영역의 경계에서 대부분의 화염 선단이 형성되었다. 이는 정상초음파 가진시 국소적으로 증가한 초음파 가진 에너지로 인해 활발한 화학반응으로 인해 화염의 부상억제 효과가 발생하는 것으로 판단된다. h_t 가 10 mm이고 수송기체 유량이 2.00 SLM일 때, 화염 선단은 정상초음파장 상단으로 이동하는데, 이는 높은 수송기체 유량으로 인해 증대된 대류강도가 앞서 언급한 정상초음파 가진에 의한 에너지 여기 효과를 넘어서기 때문으로 판단되며, h_t 의 위치가 0 mm일 때 나타나는 droplet banding에 의한 화염단 분기 및 안정화 효과도 뚜렷이 관찰된다.

화염 선단 위치의 정량화를 위해 솔리덴 영상 중 연속촬영된 30장을 추출하였고, 평균 화염 부상높이인 H 를 산술평균하여 Fig. 2.7에 도시한다. 정상초음파 가진전, 수송기체의 유량에 비례하여 화염의 부상 높이는 단조적으로 증가한다. 그러나 정상초음파를 가진 위치 (h_t) 0 mm에서 주사할 때, 정상초음파에 의한 droplet banding 효과가 연료와 공기의 혼합을 증



(a) DSLR visible image of lifted flames



(b) Schlieren image of lifted flames

Fig. 2.6. Lifted flame images according to the flow-rate of carrier gas and the height of USW excitation region.

가를 야기시키고, 초음파 에너지에 의한 화학반응 강도 증대를 유발하여 부상화염의 선단을 초음파장 상단부 영역($h_t = 20.6 \text{ mm}$)에 유지시키는 결과를 낳는다.

h_t 가 10 mm일 때, 정상초음파장의 압력장으로 화염 부상높이는 10 mm 이하로 형성된다. 하지만 수송기체 유량이 2.00 SLM 이상일 때, 대류강도 증대로 인해 화염은 정상초음파장 상단으로 밀려나며, 동일 수송기체 유량에서 정상초음파가 가진되지 않을 때와 유사한 높이가 형성된다.

h_t 가 20 mm인 경우, 수송기체 유량이 1.85 SLM에 도달할 때까지 화염의 부상높이는 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 하지만 수송기체의 유량이 1.85 SLM 보다 클 때, 화염은 평균 20.64 mm에서 머무르며 더 이상 부상하지 않게 되는데, 이는 정상초음파 가진시 발생하는 에너지 여기장(exited field)에 의한 결과이다.

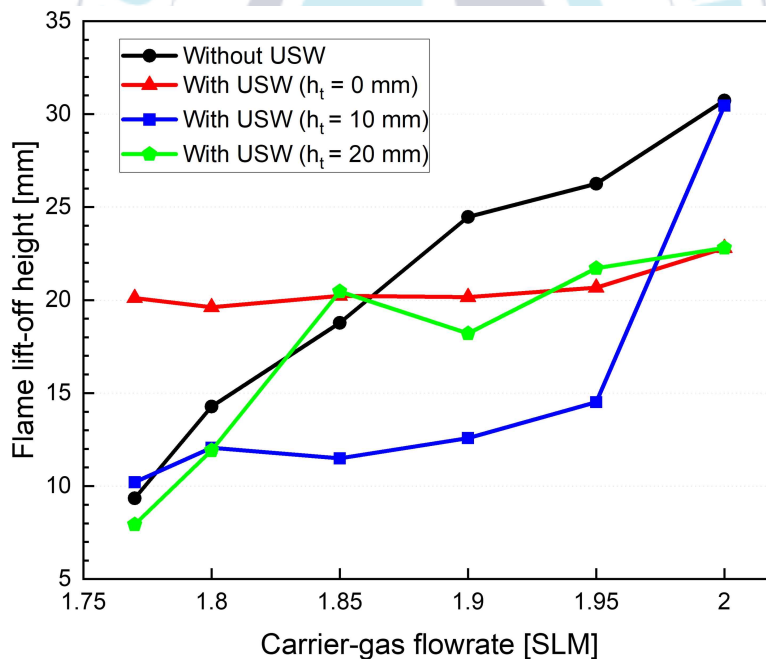


Fig. 2.7. Flame lift-off height according to the carrier gas flow-rate and excitation region.

3.2 OH* 자발광 특성

Fig. 2.8은 정상초음파 가진 위치에 따른 화염의 구조를 파악하고자 ICCD 카메라를 이용하여 연속 촬영된 OH* 자발광 강도분포도이며, 이때 종방향 및 횡방향의 강도분포를 정리한 결과를 Fig. 2.9에 도시한다.

정상초음파 가진 전, OH*의 강도는 화염대 중심(core)영역에서 대부분 균일한 분포를 보인다. 또한, OH*의 강도는 수송기체의 유량이 1.85 SLM으로 도달할 때까지 증대되나, 이 이상의 유량이 공급되더라도 중심부의 강도는 약 0.85에서 머무르게 된다. 이를 통해 앞서 명시한 에어로졸 연료 제트의 대류강도 증대로 촉발되는 화염 불안정 가능성이 확인된다.

h_t 가 0 mm일 때, 수송기체 유량에 비례하여 OH*의 강도는 지속적으로 증가한다. 또한, OH*의 최대강도가 초음파 진동자 상단부 근처(수직방향위치 20 mm)에서 집중되는 현상을 보이며 화염대 핵(core) 영역에서 마치 송충이(caterpillar) 형상과 같은 쪼개진(chopping) 분포가 생성되는데, 이때 횡과 형태의 굴곡진 OH* 강도선도가 형성됨이 Fig. 2.9를 통해 확인된다. 이는 액적의 현열(sensible enthalpy)이 정상초음파 에너지에 의해 증대되어 발생하는 연소의 촉진과, 정상초음파장에 의해 생성된 압력파의 마루와 골에서의 droplet banding 효과, 또는 압력장의 의한 차등화된 화학 반응강도의 직접적인 결과이다.

h_t 가 10 mm 일 때, 강한 비대칭적 강도가 화염의 좌측 부분에서 관찰되는데 이는 h_t 의 증가에 따른 정상초음파장 에너지의 유출(spillage)로 인해 화염에 전해지는 정상초음파장의 에너지가 감소하였기 때문이다. 또, 2.00 SLM에서 보이는 횡과 형태의 OH* 강도선도는 전술한 바와 같이 droplet banding에 의한 연소반응 촉진과 화염 분기를 대변하고 있다. 정상초음파의 가진 위치 h_t 가 20 mm일 때, 강한 화학반응 강도는 1.95, 2.00 SLM에서 보이는데, 주 화염대가 초음파장에 노출되어 액적의 증발

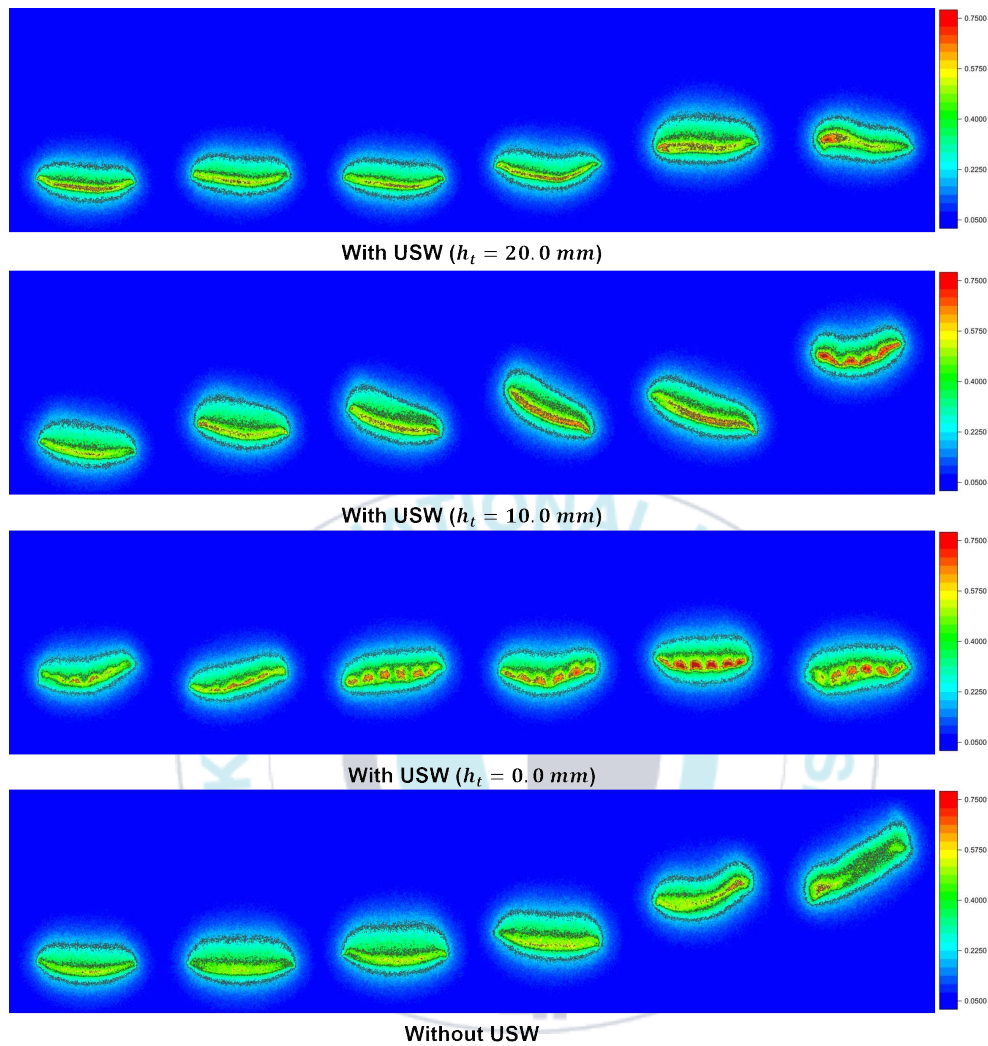
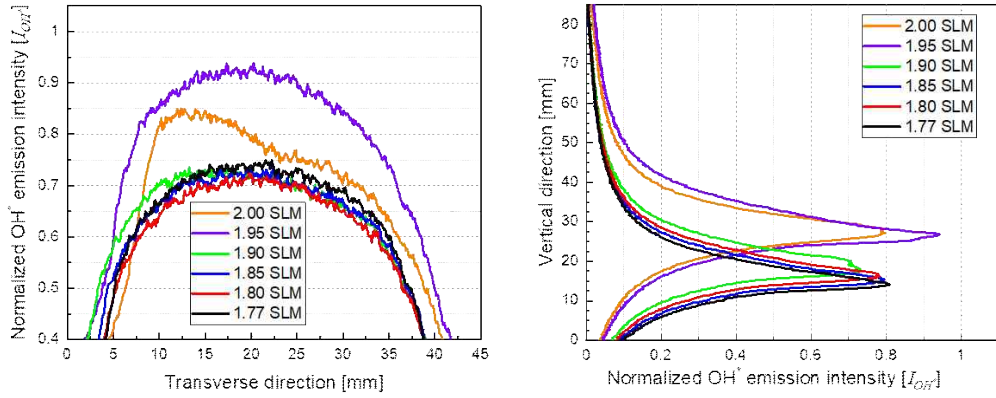
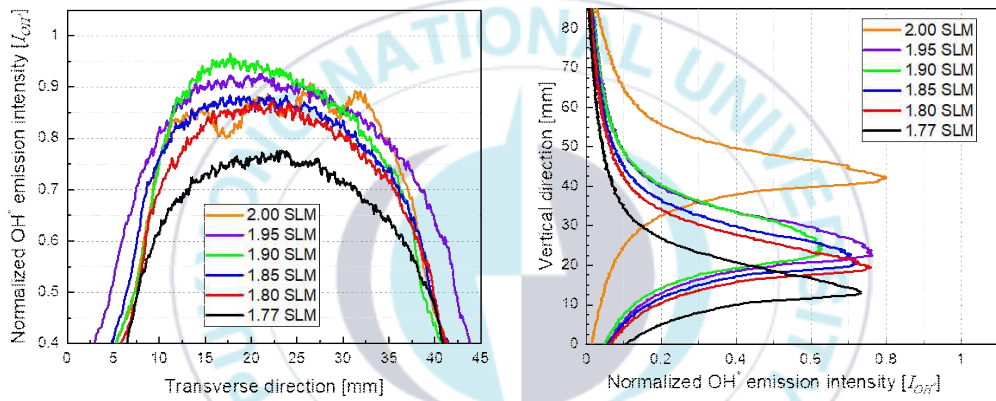


Fig. 2.8. Contour image of the distribution of OH* emission.

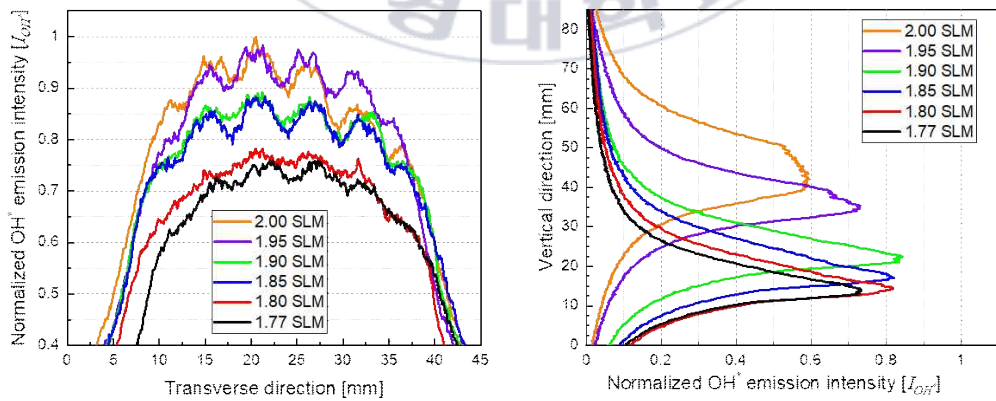
이 촉진된 것으로 판단된다. Fig. 2.9의 우측에 위치한 횡방향(transverse direction)의 OH* 강도 평균치의 종방향(vertical direction) 분포를 관찰하면 주요한 화학반응이 발생하는 화염대의 지점을 확인할 수 있다. 이를 통해, 수송기체 유량 증대에 의한 부상화염의 상승 및 초음파 에너지 여기에 기인하는 화염대 구속효과 등이 그래프에서 뚜렷이 관찰된다.



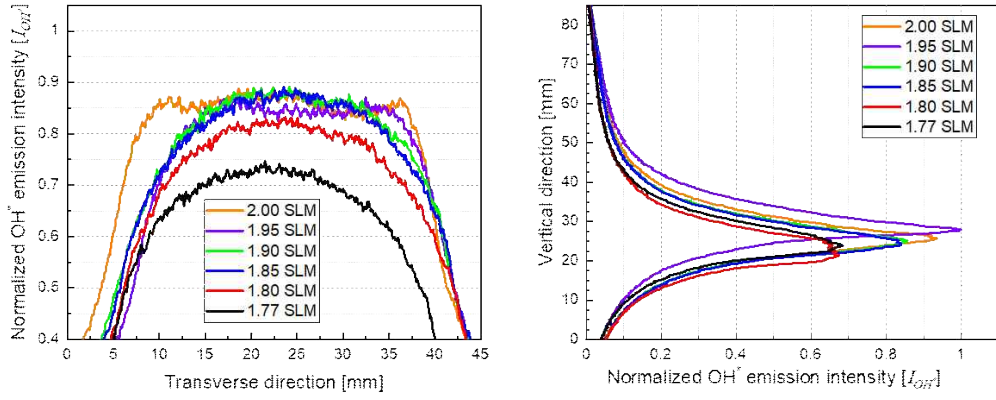
(a) with ultrasonic standing wave ($h_t = 20$ mm)



(b) with ultrasonic standing wave ($h_t = 10$ mm)

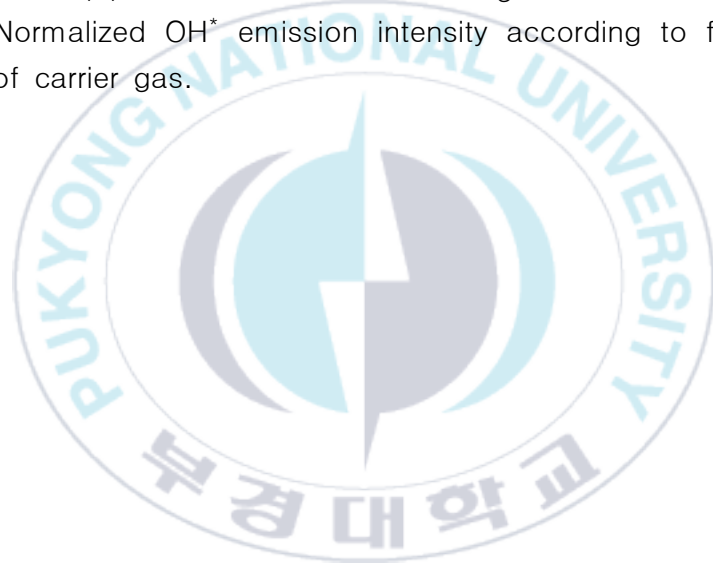


(c) with ultrasonic standing wave ($h_t = 0$ mm)



(d) Without ultrasonic standing wave

Fig. 2.9. Normalized OH* emission intensity according to flow-rate of carrier gas.



3.3 연료소모량의 변이

Fig. 2.10은 정상초음파 가진 위치와 수송기체 유량과 연료소모량의 관계를 나타낸다. 연료소모량은 수송기체 유량에 비례하여 증가하며 h_t 가 0 mm일 때, 미가진 조건 대비 평균 20%, 그리고 최대 26% 가량 증가한다. 이는 초음파장이 slit 노즐의 토출 영역에서 에어로졸의 무화를 발생시켜 유발하는 액적 수밀도의 증대의 직접적인 결과이다. 수밀도 증대는 연료의 증기화율(evaporation rate)을 향상시키고, 노즐 근처에서의 연료 농도구배를 수직방향으로 증가시켜 부력효과와 함께 연료의 확산을 촉진하여 연료 탱크로부터의 액적 토출량 증대요인에 지대한 영향을 미치는 것으로 판단된다. h_t 가 10, 20 mm일 때, 가진하지 않은 경우보다 연료소모량은 평균 16%, 8.5% 각각 상승한다. 또한, 수송기체 유량에 대한 연료소모량의 기울기가 가장 가파른 경우는 h_t 가 0 mm일 때이며, h_t 의 증가와 함께 그

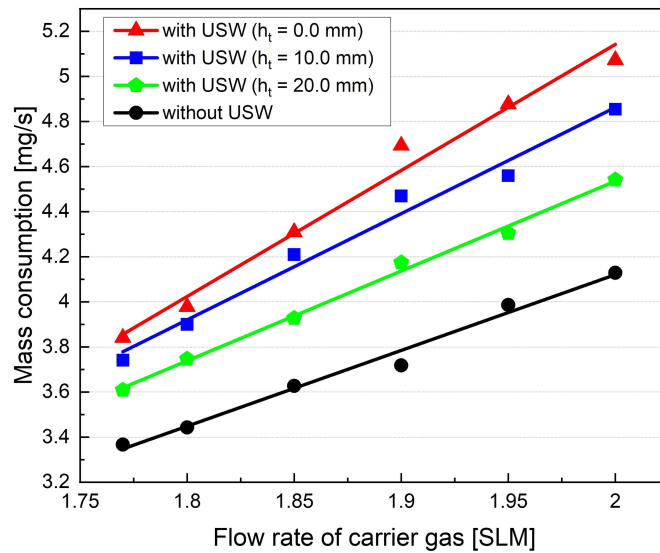


Fig. 2.10 Fuel consumption without or with USW according to carrier gas flow-rate.

기울기는 감소한다. 이는 초음파 진동자 위치의 상승으로 인한 정상초음파 에너지의 유출(spillage)로 인해 증발 효과가 감쇄되었고, 그 영향으로 인해 농도 구배에 기인한 토출효과가 감소한 것으로 판단된다.



Ⅲ. 초음파 분해된 케로신과 기체산소의 연소특성

1. 연구배경

케로신은 대표적인 상온저장성 탄화수소계 연료로 높은 경제성 및 밀도 비추력 등의 다양한 특징을 고려하여 로켓엔진의 연료로 많이 채택되고 있다[38-39]. 하지만 케로신은 높은 상변화 에너지를 요구하여 소형 추력기와 같은 적은 유량을 사용하는 연소기에서 점화지연을 발생시켜 연소기 시동 시 하드스타트(hard start)를 유발하여 연소실의 파손이나 연소효율을 심각하게 저하시킨다.

캐비테이션은 액체에 초음파를 가진할 경우 가장 대표적으로 일어나는 현상 중 하나이다. 액체 내 초음파 가진에 의해 발생하는 캐비테이션은 케로신의 대표적인 구조인 alkene계 사슬구조의 결합력을 약화시키기에 충분한 에너지를 가할수 있다. 결합력이 약화된 탄화수소 사슬구조는 연소에 더욱 적합할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 케로신의 점화지연을 개선하고자 초음파 가진 시 발생하는 캐비테이션 효과를 적용하여 초음파 가진 유무 및 가진 시간에 따른 점화지연과 연소특성을 관찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

초음파 가진에 의한 케로신-기체산소 이원추진제의 화염구조 분석과 연소강도 분석 등을 위한 모델연소실과 추진제 공급시스템의 개략도를 Fig. 3.1와 Fig. 3.2에 각각 도시한다.

모델연소실은 내식성 및 강성이 우수한 STS304로 제작되었으며, 케로신의 연소특성 분석을 위해 가시창, 점화기, 열전대, 압력센서 그리고 추진제 분사를 위한 전단 동축형 인젝터로 구성된다. 열전대는 Fig. 3.3의 그림과 같이 일정한 간격으로 배치되며, 과도한 열전달로 인한 열전대의 손

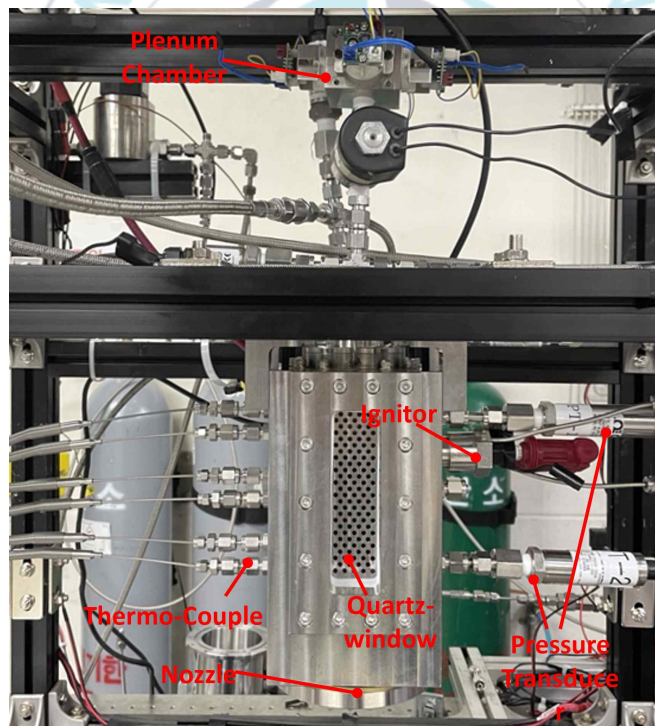


Fig. 3.1 Overview of the experimental apparatus.

실을 방지하기 위해 외벽으로부터 17 mm, 24 mm의 깊이에 열전대 비드 (bead)가 위치한다. 또한, 연소화염에 의한 과도한 열전달 및 하드 스타트에 의해 발생하는 급격한 압력 상승으로 인한 가시창의 파손을 방지하기 위해 보호 플레이트를 설치하였다. 보호 플레이트에는 화염의 형상 및 연소강도 측정을 위해 지름 3 mm의 홀이 균일한 간격으로 가공되었다.

케로신-기체산소의 점화를 위해 신뢰성이 뛰어나고 구조가 간단한 가스-토치스파크 점화법을 채택하였다. 토치스파크 점화기는 메탄을 연료로 하고, 산소를 산화제로 하여 토치 내부에서 예혼합되며, spark plug를 통해 전기에너지가 인가되어 점화된다. 연소실로 공급되는 추진제 제어를 위한 밸브와 유량계, 열전대 및 압력센서를 통해 획득된 데이터는 데이터 수집

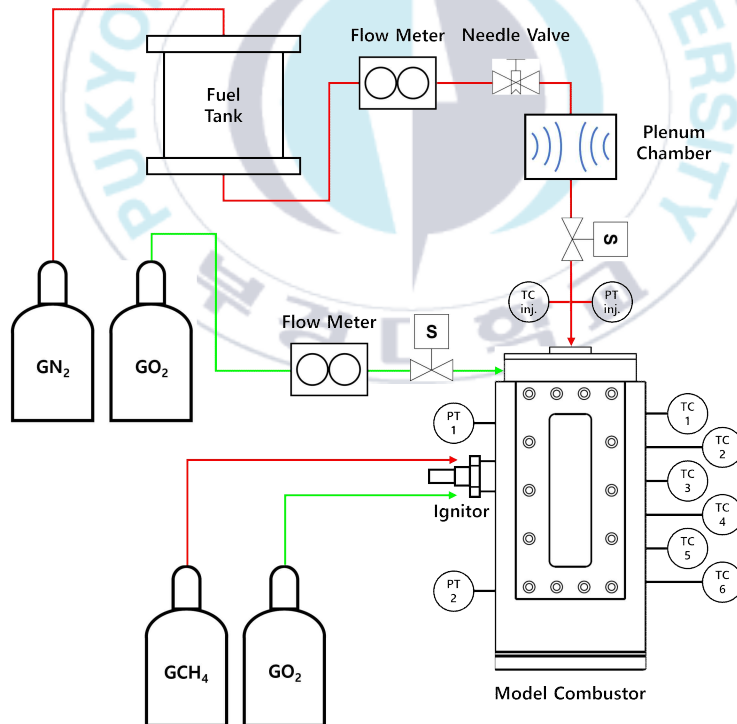


Fig. 3.2. Schematic of experimental setup.

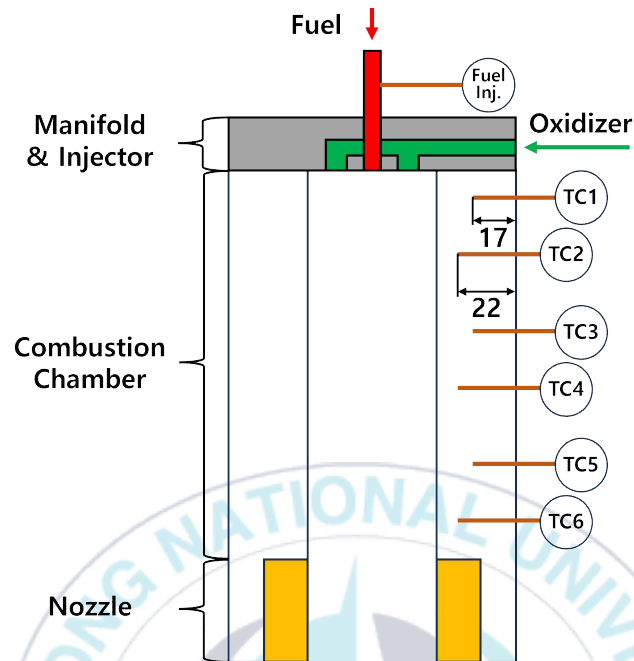


Fig. 3.3. Schematic of model combustor and temperature sensor position.

및 제어장치에 의해 처리된다.

Fig. 3.4은 고온의 화염으로부터 발생 될 수 있는 연소실의 손상을 방지하고자 형성된 냉각 채널이며 연소실 벽 내부에 형성되어 있고, 냉각제인 물이 공급된다. 연소실 후단에는 화염으로 인한 손상을 방지하기 위해 황동으로 제작된 개방형 노즐을 사용하였다. 연소 시 발생하는 화염은 시험대 하단에 설치된 스크리버를 통해 배출된다.

Fig. 3.5에는 초음파 가진을 위한 플레넘 챔버를 나타낸다. 플레넘 챔버 양단에는 초음파 진동자가 장착되는데, 초음파 진동자의 작동 주파수는 68 kHz이며, 총 60 W의 소비전력으로 작동한다. 초음파 가진이 연소효율에 미치는 영향을 관찰하기 위해 초음파 진동자의 가진 시간을 변수로 하여 실험을 수행하였으며, 그 상세 조건은 Table 3.1과 같다.

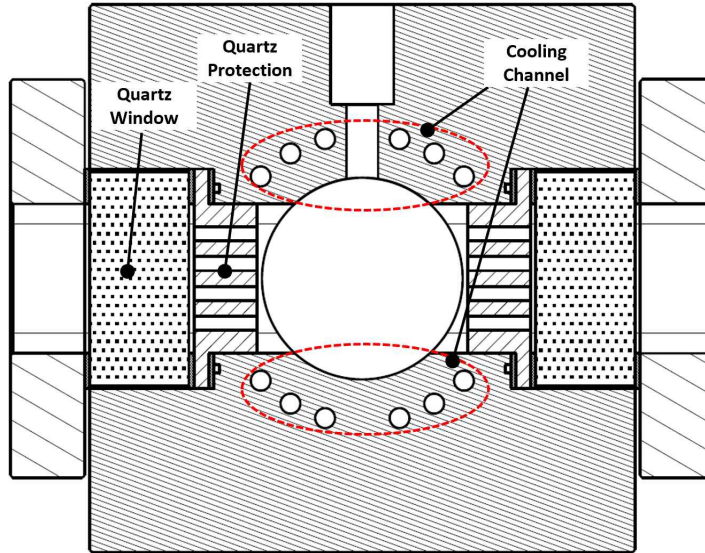


Fig. 3.4 Sectional view of the model combustor.



Fig. 3.5. Plenum chamber assembly.

초음파 가진된 연료의 조성 변화를 관찰하기 위해 가스크로마토그래피 질량분석기(Gas Chromatography/Mass Spectrometry, GC/MS)를 이용하였으며, 분석시 사용된 조건은 Table 3.2와 같다.

Table 3.1. Experimental parameter.

Excitation Time, t_e (s)	Fuel Mass Flow Rate (g/s)	Oxygen Mass Flow Rate (g/s)	Equivalence Ratio (ϕ)	Combustion Time(s)
0	9	12	2.55	4
30				
60				

Table 3.2. Operation condition of GC-MS.

Model	GCMS-QP2010 Ultra	
Column	30 m \times 0.25 mm(I.D)	
Carrier gas	He	
Injection temperature	280.00 $^{\circ}$ C	
Injection volume	0.2 μ L	
Oven temperature	Initial temp.	40 $^{\circ}$ C
	Rate	10 $^{\circ}$ C/min
	Final temp.	300 $^{\circ}$ C

모델연소실 내부에서 형성되는 가시 화염의 이미지는 DSLR 카메라를 통해 촬영되었다. 그리고 화염의 연소 강도 측정을 위해 band-pass filter(central wave length: 307.1 \pm 3 nm)가 장착된 ICCD (Intensified Charge Coupled Device) 카메라를 이용하여 OH* 자발광 강도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3.6는 DSLR 카메라를 통해 획득된 모델연소실 내 가시화염의 이미지이다. 모델연소실 내 화염의 형상은 모든 초음파 가진 시간에서 유사한 화염이 형성되는 것이 확인된다.

Fig. 3.7는 ICCD 카메라를 통해 획득된 OH^* 자발광 강도 분포도이다. 초음파 가진 시간이 증대됨에 따라 강한 강도영역이 점차 확장되는 것이 관찰된다. OH^* 자발광 강도의 증가는 연소강도의 증가를 의미하므로, 초음파 가진이 연소를 촉진시키는 효과가 명확히 관찰된다.

Fig. 3.8은 Fig. 3.7에서 나타낸 OH^* 의 강도분포를 수평 방향으로 정규화한 그래프이다. Fig. 3.7에서의 강도분포의 경우 가진 시간의 증가에 따라 연소강도가 강해지는 것이 정성적으로 확인이 가능하다. 하지만 Fig.

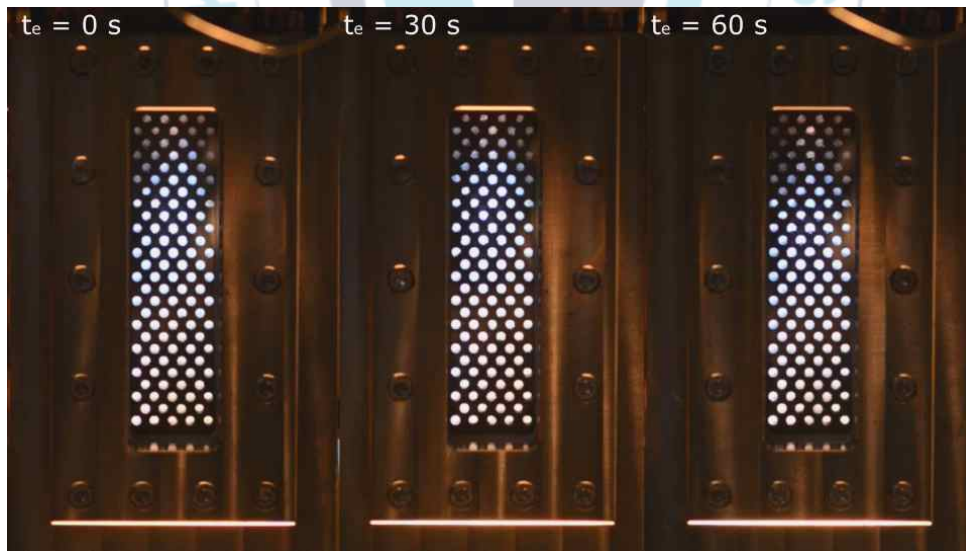


Fig. 3.6. DSLR visible image of flames according to ultrasonic excitation time variation.

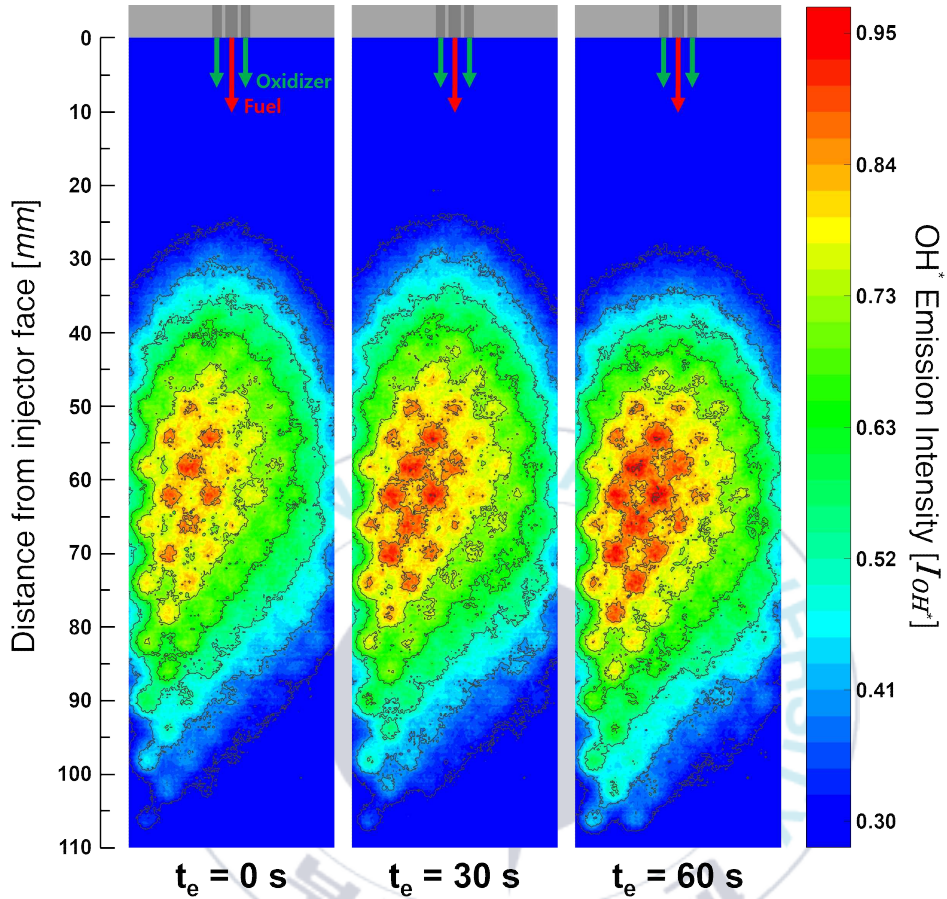


Fig. 3.7. Contour image of the distribution of OH* emission.

3.8에서 정규화된 강도선도를 관찰하였을 때, 초음파 가진 유무에 따른 강도 차이는 뚜렷하게 관찰되는데에 반해 가진 시간에 따른 강도선도의 최고 점인 58.12 mm에서의 강도 차이는 미미하다. 그러나, 인젝터 분사면에서 58.12 mm 지점 이후의 강도선도에서는 초음파 가진 시간이 길어짐에 따라 연소영역이 확대되고, 그 강도가 강해지는 것이 관찰된다. 이는 초음파 에너지 가진이 연료인 케로신의 성질을 개질시켜 연소효율을 증대시키고, 그 결과로 화염의 OH* 자발광 강도가 증가한 것으로 사료된다. 이를 통해

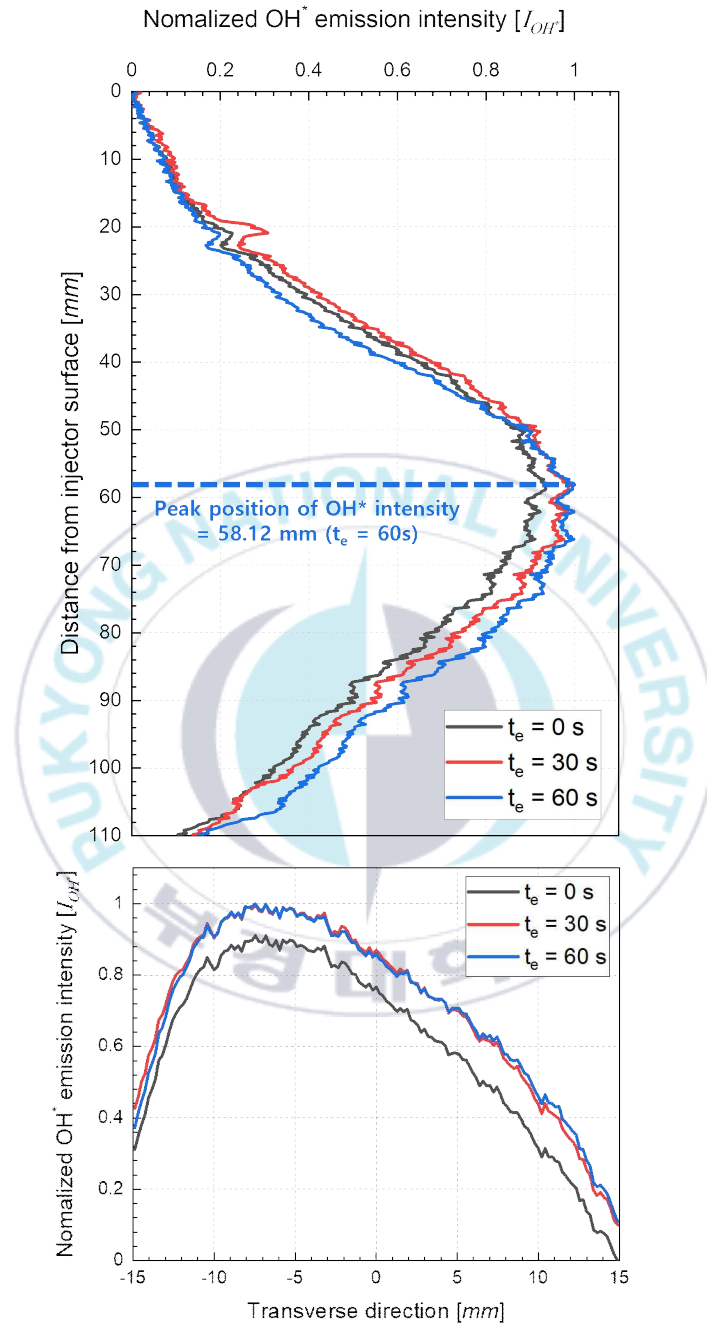


Fig. 3.8. Normalized OH* emission intensity according to the ultrasonic excitation time variation.

앞서 설명한 초음파 가진 에너지에 의한 연소 강도 증대 효과를 정량적으로 확인할 수 있다.

Fig. 3.9는 열전대를 통해 획득된 모델연소실의 벽면 온도와 연료 분사 온도를 도시한 결과이다. 초음파를 가진하지 않은 경우, 벽면의 최대온도는 156.3°C로 측정되었다. 이후 가진 시간이 30초인 경우, 벽면의 최대온도는 160.5°C이며, 가진 시간이 60초에 도달하였을 때, 161.3°C로 가장 높은 온도가 측정되었다. 또한, 이때 TC4에서 측정된 온도 증가율은 초음파 가진 시간이 30초 증가할 때마다 평균 4%씩 상승하였다. 앞서 살펴본 OH* 강도분포의 최고점과 온도 센서의 위치를 비교하였을 때 온도와 OH* 강도의 peak 지점이 유사함을 알 수 있다. 또한, 연료 분사 온도는 초음파 가진 시간이 증가할 때마다 상승하는 경향을 보인다. 초음파 가진 전, 연료가 분사될 때 온도는 최고 17.1°C도로 측정되었으며, 분사 전 평균온도인 16.4°C도와 큰 차이가 나지 않는다. 하지만, 초음파 가진을 30초간 수행하였을 때의 연료의 최고온도는 18.9°C이며, 60초 가진한 결과, 24.7°C도로 측정된다. 가진 시간에 따라 약 2.7°C, 7.1°C씩 온도 차이가 발생한다. 이는 가진 전과 비교하여 약 7도 가량의 온도 차이를 보인다.

Fig. 3.10은 가스크로마토그래피 질량분석법을 통해 정성 분석된 초음파 가진 시간에 따른 케로신 연료 내 탄소수에 따른 알케인(alkane) 탄화수소의 상대비율을 나타낸 결과이다. 일반적으로 케로신은 C_nH_{2n+2} 의 식을 가지며 alkene계, cyclo-alkane계 그리고 방향족 탄화수소(aromatic hydrocarbon)의 조성비를 가지는 혼합물(mixture)이므로 같은 peak 일지라도 여러 가지 성분이 검출될 수 있으며 n-alkane 및 iso-alkane도 포함될 가능성이 높다. 이러한 특성으로 인해 강도가 상대적으로 낮은 peak의 성분은 예측하기에 어렵다. 따라서, 측정이 예상되는 탄화수소계 화합물의 표준용액($C_5 \sim C_{15}$)과 비교하여 초음파 가진 시간에 따른 케로신 내 alkane

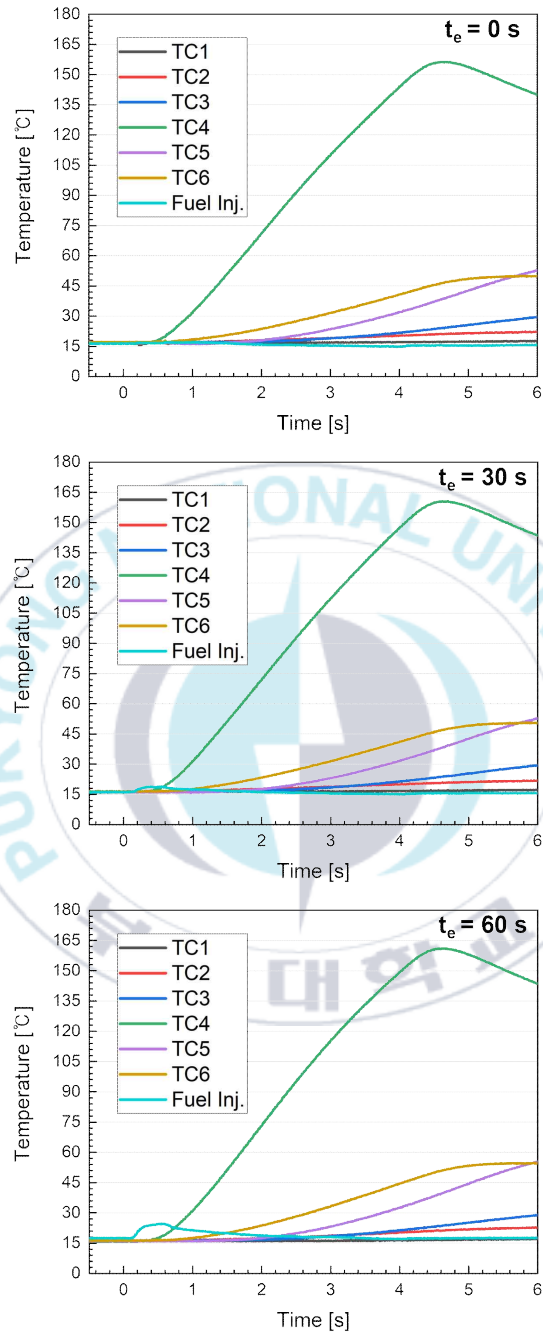


Fig. 3.9. Temperature profiles of the model combustor wall according to the ultrasonic excitation time variation.

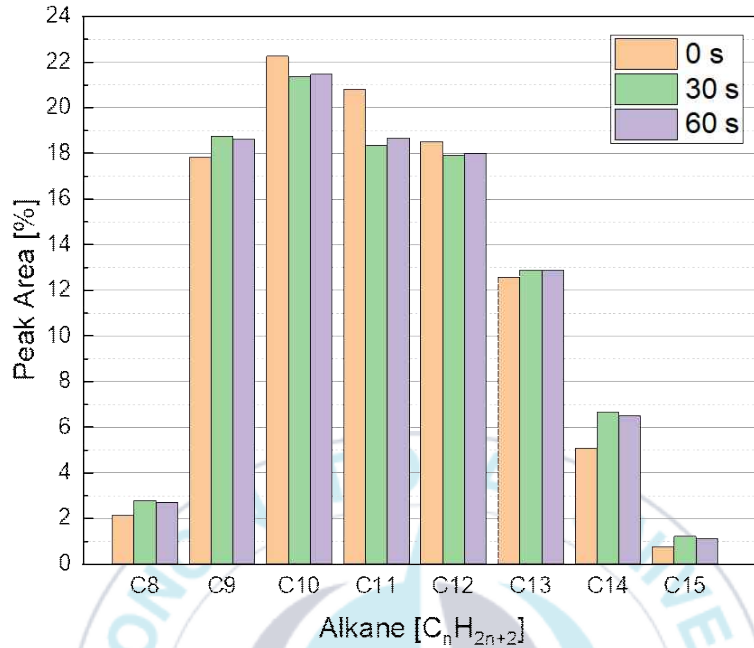


Fig. 3.10. The relative ratio of the hydrocarbon(alkane) in kerosene according to ultrasonic wave excitation time.

계의 성분 변화를 분석하였다. 초음파 가진 전, 가장 많은 비율이 함유된 C₁₀(Decane)의 상대비율은 20.97%로 측정되었으며, 두 번째로 함유량이 높은 C₁₁(Undecane)의 상대비율은 20.68%로 측정되었다. 하지만 초음파를 30초 가진하였을 때, Decane과 Undecane의 상대비율은 각각 19.04%, 17.83%로 감소하였다. 또한, C₈(Octane)과 C₉(Nonane)의 경우 각각 1.15%, 0.92% 증가하였다. 이는 초음파 가진을 통해 발생한 캐비테이션 현상에 의해 형성된 고온, 고압의 조건이 탄화수소계 사슬구조가 붕괴되었기 때문이다. 이때 탄화수소계 사슬구조는 더 낮은 carbon number의 탄화수소 구조와 자유 라디칼로 분리된다. 이러한 붕괴 현상은 탄화수소 연료를 연소에 적합한 형태로 개질시키는 것으로 판단된다. C₁₃ 이상의 탄화수소 화합물은 오히려 증가하였는데, 이는 캐비테이션 효과가 일정

시간 이상 지속되면 화합물이 분해되어 다른 화합물을 형성하는 속도보다 이미 생성된 자유 라디칼이 화합물과 재결합 하는 속도가 더욱 빠르기 때문이다[41].

상기 결과들을 통해 초음파 가진 시간에 따른 화염의 연소강도 증가 현상은 연료의 온도 증가와 연료 내 캐비테이션 효과에 따른 탄화수소계 사슬고리 구조의 붕괴 등의 효과가 복합적으로 발생한 것에 기인한 것으로 판단된다.



IV. 결 론

정상초음파 가진을 통한 Slit-jet 화염의 연소강도 변화 및 불안정성에 대해 관찰하는 실험을 수행하였다. 정상초음파 가진 전, 화염의 부상높이는 연료 제트에 의한 대류강도가 증대됨에 따라 증가하지만, 정상초음파가 가진될 경우 화염은 정상초음파장의 경계영역 주변에 갇히게 된다. 이는 초음파 에너지 여기에 의해 최적 연소 조건이 초음파장 내에서 형성되고, 연료제트의 대류강도와 화염대의 부력이 균형을 이룬 결과이다. Droplet banding 효과에 기인하는 화염단의 분기 현상을 OH^* 강도분포를 통해 관찰할 수 있으며 h_t 가 증가할수록 여기에너지의 집속도 저하로 인해 약화된 화염 분기를 보인다. 정상초음파 가진시 slit 노즐 출구 영역에서의 연료 증기화율 증대로 인한 농도구배 효과는 연료소모량은 약 9~20% 상승시키며, 그 소모량은 h_t 의 증가에 반비례한다. 이상의 결과들을 통해 정상초음파 가진 위치에 따른 연소반응 변이와 화염 부상높이 제어를 통해 부상화염의 불안정성 촉발 억제에 대한 가능성이 확인되었다.

다음으로 플레넘 챔버 내 연료의 초음파 가진 시간에 따른 연소효율 변화를 관찰하는 실험을 수행하였다. 초음파 가진 전, 연소 강도의 분포는 비교적 고른 분포를 보였다. 하지만 초음파 가진 시, 초음파 가진 전보다 OH^* 의 강도는 증가하는 것이 관찰되었으며, 그 분포 또한 넓어지는 것이 관찰된다. 또한, 초음파 가진 시간이 60초에 도달하였을 때, OH^* 의 최대 강도는 그 전보다 약 10% 증가하며, 연소강도 분포 또한 증가하였다. 이때 초음파 가진시 연료의 온도는 가진시간이 늘어남에 따라 증가하며, 연료 내 고분자 화합물의 상대비율은 감소하고 저분자 화합물의 상대비율은 증가함이 확인되었다. 이는 초음파 가진에 의한 효과 중 가장 주요하게 나

타나는 효과인 연료의 가열 효과 및 캐비테이션 효과가 케로신 연료 내 탄화수소 사슬구조의 분해를 촉진시켜 연소가 더욱 활발하게 일어난 것으로 판단된다. 이를 통해 초음파를 가진 탄화수소계 연료인 케로신의 연소효율 증대에 긍정적인 영향을 미침이 확인되었으며, 초음파 가진 시스템이 적용된 소형 화학식 추진시스템의 연소불안정성 및 연소효율 개선 등의 효과가 소형위성의 임무기간 연장에 긍정적인 영향을 끼칠 것으로 사료된다.



참 고 문 헌

1. Wertz, J. R., and Larson, W. J., *Reducing Space Mission Cost*, Springer, Dordrecht, Nederland, 1996.
2. Futron Corporation, *Space Transportation Costs: Trends in Price Per Pound to Orbit 1990-2000*, Maryland, CA: Futron Corporation, 2002.
3. Koelle, D. E., "TRANSCOST, Statistical-Analytical Model for Cost Estimation and Economic Optimization of Space Transportation Systems," MBB Report No. URV-185(91), 1991.
4. "Capabilities&Services," retrieved 2 Jan. 2024 from <https://www.space.com/media/Capabilities&Services.pdf>.
5. Williams, M., "Falcon Heavy Vs. Saturn V," retrieved 23, Sep. 2023 from <https://www.universetoday.com/129989/saturn-v-vs-falcon-heavy/>.
6. Pielke, R., and Byerly, R., "Shuttle programme lifetime cost," *Nature*, Vol. 472, pp. 38, 2011.
7. Joseph, R.K, Roman, H. and Jason, R., "Small satellites an overview and assessment", *Acta Astronautica*, Vol. 170, pp. 93-105, 2020.
8. Chelsea, G., "Solar geomagnetic storms could threaten more satellites after Elon Musk's Starlink," retrieved 25 June, 2023 from <https://www.space.com/solar-geomagnetic-storms-spacex-starlink-threat>.
9. Jeff, F., "SpaceX launches first upgraded Starlink satellites," retrieved 28 Feb, 2023 from <https://spacenews.com/spacex-launches-first-upgraded-starlink-satellites/>.

10. Tummala, A.R. and Atri, D., "An Overview of Cube-Satellite Propulsion Technologies and Trends," *Aerospace*, Vol. 4, No. 4, 58, 2017.
11. Krejci, D. and Lozano, P., "Space Propulsion Technology for Small Spacecraft," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 106, No. 3, pp. 362-378, 2018.
12. Mathieu, L., Nicolas, G., Stepane L. P., Primus B. and Andre B., "Enhancement of Heat Transfer by Ultrasound: Review and Recent Advances," *International Journal of Chemical Engineering*, Vol. 2011, pp. 1-17, 2011.
13. Christopher, E.B., *Cavitation and Bubble Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2013.
14. Shemer, H., and Narkis, N., "Trihalomethanes aqueous solutions sono-oxidation," *Water Research*, Vol. 39, pp. 2704-2710, 2005.
15. Choi, J.S., "Effect of Ultrasonic Irradiation on On-board Fuel Analyzed Using Gas Chromatography/Mass Spectrometry," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 27, No. 6, pp. 890-897, 2021.
16. Margeta, D., Sertic-Bionda, K. and Foglar, L., "Ultrasound assisted oxidative desulfurization of model diesel fuel," *Applied Acoustics*, Vol. 103, Part. B, pp. 202-206, 2016.
17. Zhou, C., Wang, Y., Huang, X., Wu, Y. and Chen, J., "Optimization of ultrasonic-assisted oxidative desulfurization of gasoline and crude oil," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, Vol. 147, 17789, 2020.
18. 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.
19. 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.
 20. 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, Issue 1, pp. 977-983, 2000.
 21. 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.
 22. 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.
 23. Qureshi, S., Khan, W. and Prosser, R., "Behaviour of a Premixed Flame Subjected to Acoustic Oscillations," *PLoS One*, Vol. 8, Issue 12, pp. 1-11, 2013.
 24. Abe, Y. and Aoki, K., "Study on Levitated Droplet Control by Ultrasonic Wave," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 70, Issue 692, pp. 1072-1077, 2004.
 25. 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.
 26. 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, Issue 4, pp. 234-248, 2007.
27. Hiroyuki, H., “Liquid Atomization and Spray Combustion,” *Eurozoru Kenkyu*, Vol. 12, Issue 3, pp. 189-194, 1997.
28. Fujimori, T., Riechelmann, D. and Sato, J., “Effect of Lift off on NO_x Emission of Turbulent Jet Flame in High-temperature Coflowing Air,” *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 27, Issue 1, pp. 1149-1155, 1998.
29. 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, Issue 1, pp. 1195-1201, 2011.
30. 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.
31. James, E.B., Werner, J.A.D. and M. Godfrey, M. “Blowout of turbulent diffusion flames,” *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 20, Issue 1, pp. 303-310, 1985.
32. 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,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, Vol. 33, No. 7, pp. 477-485, 2009.
33. Chao, Y.C., Jeng, M.S. “Behavior of the Lifted Jet Flame Under Acoustic Excitation,” *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 24 Issue 1, pp. 333-340, 1992.
34. 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 Issue 1, pp. 169-177, 2009.
35. 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, Issue 1, pp. 17-25, 2017.
 36. 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, Issue, 6, pp. 53-60, 2020.
 37. Suzuki, K., Kirpalani, M.D. and McCracken W.T., “Experimental Investigation of Ethanol Enrichment Behavior in Batch Continuous Feed Ultrasonic Atomization System,” *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 29, Issue 1, pp. 44-49, 2006.
 38. Cook, R.T. and Quentmeyer, R., “Advanced Cooling Techniques for High Pressure Hydrocarbon-Fueled Rocket Engines,” 16th Joint Propulsion Conference, Joint Propulsion Conferences, Hartford, C.T, U.S.A., AIAA 1980-1266, July 1980.
 39. Mehta, G., Stone, W., Ingram, C., Bai, S.D. and Sanders, T., “Comparative Testing of Russian Kerosene and RP-1,” 31st Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, C.A., U.S.A., AIAA 1995-2962, July 1995.
 40. Thongchun, Z.C., “Regenerative Cooling of High Pressure Hydrocarbon Rocket Combustors,” *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 427, pp. 380-386, 1989.
 41. Najafi, I. and Amani, M., “Asphaltene flocculation inhibition with

ultrasonic wave radiation: A detailed experimental study of the governing mechanisms,” *Advances in petroleum exploration and development*, Vol. 2, No. 2, pp. 32-36, 2011.

