

초음파 가진 시간에 따른 케로신-기체 산소 확산화염의 연소거동 변이

배창한^a · 강윤형^a · 김정수^{b,*}

Behavioral Change of Kerosene-GOx Diffusion Flame according to Ultrasonic-wave Excitation Time

Chang Han Bae^a · Yun Hyeong Kang^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

An experiment was conducted to investigate the effect of ultrasonic wave excitation on the combustion performance of kerosene. The ultrasonic excitation time was set to 0, 30, and 60 seconds, with a plenum chamber installed at the front of the injector for ultrasonic wave excitation of the fuel. The relative proportion of low carbon number compounds in kerosene increased with ultrasonic wave excitation, and the fuel temperature rose with excitation time. Additionally, the intensity of OH-radical chemiluminescence emission intensified, and the region of high-intensity distribution was observed to broaden.

초 록

초음파 가진이 케로신의 연소성능에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험이 수행되었다. 초음파 가진 시간은 0, 30, 60초로 설정되었고, 연료에 초음파를 가진하기 위한 플레넘 챔버는 인젝터 전단에 설치되었다. 초음파 가진시, 케로신에 포함된 저탄소수(low carbon number)의 화합물의 상대비율이 증가하였으며, 이때 연료의 온도는 초음파 가진 시간이 증가함에 따라 상승하였다. 또한, OH* 자발광의 강도가 강화되었으며 높은 강도분포의 영역이 넓어지는 것이 확인되었다.

Key Words: Ultrasonic Wave Cavitation(초음파 캐비테이션), Kerosene(케로신), Ultrasonic Wave Energy(초음파 에너지)

1. 서 론

신 우주시대가 도래함에 따라 국가 주도로 수행되었던 우주산업은 최근 민간으로의 이전을 통해 효율성 및 경제성에 대한 개선이 이루어지고 있다. 지구 저궤도(Low Earth Orbit, LEO)를 목

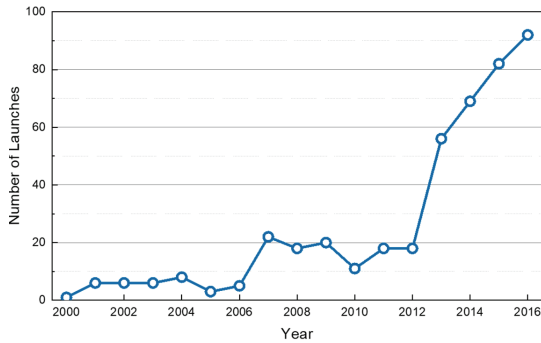


Fig. 1 Number of small satellite launches by year [7].

표로 발사되는 주요 발사체의 페이로드(payload) 킬로그램당 발사비용은 발사연도의 경과에 따라 감소하는 경향을 보인다[1-6]. 이러한 비용의 감소는 상당한 비용과 개발 기간이 요구되는 중대형 위성 대신 위험 부담이 적은 소형위성에 대한 수요를 촉진시키며, Fig. 1에서 도시한 것과 같이 그 발사빈도 또한 급증하고 있다.

현재 운용되고 있는 대부분의 소형위성에는 뛰어난 비추력 성능을 갖추고 있어 장기간 운용이 가능한 전기 추진시스템이 채택되고 있으나, 낮은 추력성능으로 인해 자세제어 등과 같은 급격한 기동에는 불리하다[8,9]. 따라서, 소형위성에는 단시간 내 충분한 속도 증분(Delta-V)을 획득하기 위한 별도의 추진시스템을 필요로 하며, 이에 대한 방안으로 소형위성용 화학식 추진시스템 개발의 중요성이 대두되고 있다[10,11]. 화학식 추진시스템은 단위 부피당 에너지밀도가 높아 추력 및 비추력 성능이 우수한 특징이 있다.

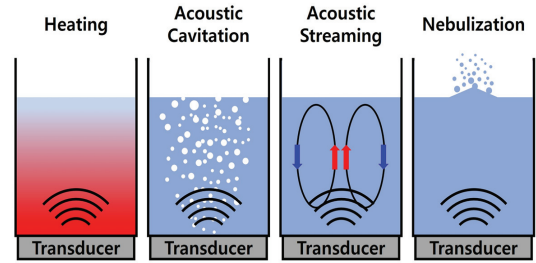


Fig. 2 Four types of effect resulting from ultrasound propagation in a liquid [12].

다양한 연료 중, 상온 액체연료는 저장성(storability)이 우수하여 소형 인공위성의 장기간 임무 수행을 가능케 한다. 그러나, 상온 액체연료는 연소를 위해 높은 상변화 에너지를 요구하는데, 이로 인해 발생하는 점화지연은 하드 스타트(hard start)와 같은 연소 불안정을 야기하며, 연소실 손상 및 성능 저하로 이어진다. 이를 개선하기 위해, 상온 액체연료에 초음파 에너지를 가진하여 연료의 엔탈피를 높이는 방식으로 점화지연을 단축시키고자 한다.

Fig. 2는 초음파가 액체에 가진될 때 발생하는 대표적인 현상을 도시한 그림이다. 그 중, 가장 대표적으로 발생하는 현상인 캐비테이션(cavitation)은 액체가 고속으로 유동할 때, 순간적으로 압력이 증기압 이하로 낮아져 증기 기포가 생성되는 현상이다[12,13]. 캐비테이션에 의해 생성된 증기 기포는 Fig. 3에 도시된 그림과 같이 초음파 가진으로 인해 발생하는 압력파에 의해 팽창과 수축을 반복하면서 붕괴된다. 이때, 기포 내 온도

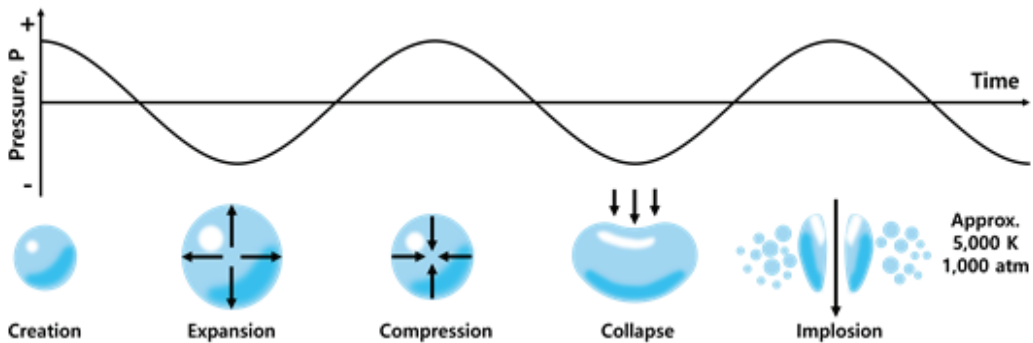


Fig. 3 Schematic of the ultrasonic cavitation phenomena in liquids.

와 압력이 순간적으로 증가하여 분자 사슬구조에 열분해(pyrolysis)를 일으킬 충분한 에너지가 발생한다[14]. 이처럼 초음파 가진에 의해 발생하는 캐비테이션을 활용하여 탄화수소 기반 연료의 개질을 조사하는 연구가 전 세계적으로 활발하게 수행되고 있다. Choi [15]는 선박용 연료유에 초음파를 가진하여 캐비테이션에 의한 분해 효과에 의해 고탄소수(high carbon number) 화합물의 감소와 더불어 저탄소수 화합물의 증가를 관찰한 바 있다. 또한, Margeta 등[16]과 Zhou [17]는 초음파 에너지 가진이 연료유의 산화반응을 촉진시키고 탈황효율이 증가함을 실험으로 확인하였다. 일련의 연구결과들은 초음파 가진을 통한 상온 액체연료 연소성능의 개선 가능성을 시사한다. 따라서 본 연구에서는 초음파 가진 시간에 따른 케로신-기체산소(kerosene-GO_x) 확산화염의 연소 거동 변이를 관찰하기 위한 실험이 수행되었다.

2. 실험 장치 및 방법

초음파 가진에 의한 케로신-기체산소 확산화염의 구조와 연소 강도를 측정하기 위한 모델연소실(model combustor)과 추진제 공급시스템의 개략도를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 도시한다.

모델연소실은 내식성 및 강성이 우수한 STS304로 제작되었으며, 케로신 연소특성의 분석을 위한 석영 가시창(quartz window), 점화기, 플레넘 챔버(plenum chamber), 열전대, 압력센서, 점화기, 그리고 추진제 분사를 위한 전단 동축형 인젝터로 구성된다. 하드 스타트에 의해 발생하는 급격한 압력 상승과 연소 화염에 의한 석영 가시창의 파손을 방지하고자 지름 3 mm의 홀이 등간격으로 가공된 보호 플레이트를 설치하였다.

점화 방식으로는 신뢰성이 높고 구조가 간단한 가스-토치스파크 점화 방식이 채택되었다. 또한, 고온의 화염에 의한 과도한 열전달로 촉발될 수 있는 연소실의 손상을 방지하고자 물을 냉각제로 하는 냉각 채널이 연소실 벽 내부에 형성되어 있다.

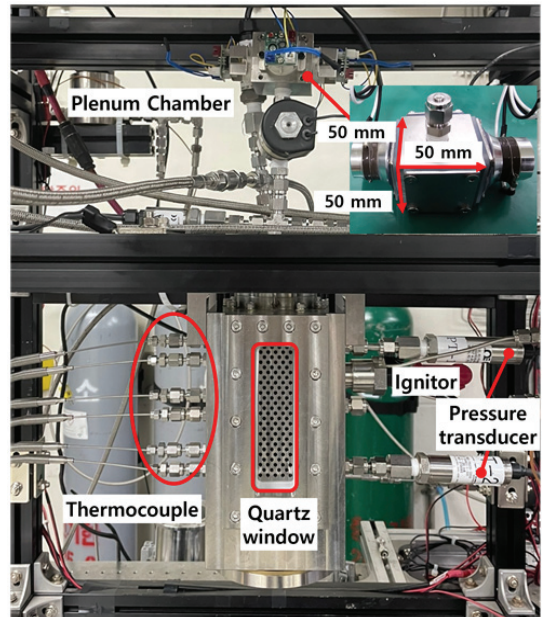


Fig. 4 Overview of the experimental apparatus.

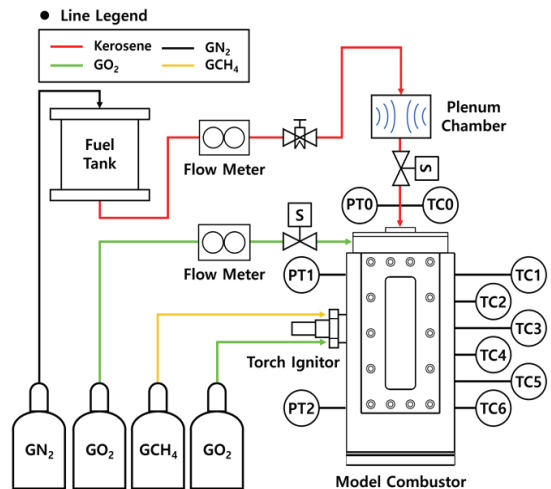


Fig. 5 Schematic of experimental setup.

초음파 가진을 위한 플레넘 챔버는 연료 인젝터의 전단에 설치된다. 플레넘 챔버 양단에는 초음파 진동자가 부착되는데, 작동 주파수는 68 kHz이며, 총 60 W의 소비전력으로 작동한다. 초음파 가진이 연소효율에 미치는 영향을 관찰하기 위해 초음파 진동자의 가진 시간을 변수로 하여 실험을 수행하였으며, 사용된 조건들을

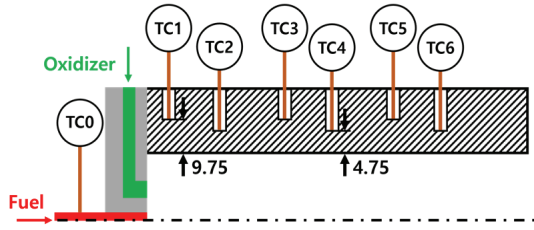


Fig. 6 Position of the thermocouples installed at model combustor.

Table 1. Experimental condition.

Fuel mass flow rate (g/s)	9
Oxi. mass flow rate (g/s)	12
Equivalence ratio, ϕ	2.55
Combustion time (s)	4
Excitation time, t_e (s)	0, 30, 60

Table 1에 요약한다. 열전대는 Fig. 6의 그림과 같이 일정한 간격으로 배치되며, 화염의 과도한 열전달로 인한 열전대의 손상을 방지하고자 내벽으로부터 9.75 mm, 4.75 mm의 깊이에 열전대 비드(bead)가 위치한다. 연소실로 공급되는 추진제 제어를 위한 밸브 및 유량계와 열전대 및 압력센서를 통해 획득된 데이터는 데이터 수집 및 제어장치(Data Acquisition & Control System, DACS)에 의해 처리된다. 또한, 연소실 내에서 형성되는 화염의 구조 분석을 위해 band-pass filter (central wave length: 307.1 ± 3 nm)가 장착된 ICCD (Intensified Charge Coupled Device) 카메라를 이용하여 OH^* 자발광 강도를 측정하였다. 그리고 초음파 가진된 연료의 조성 변화를 관찰하기 위해 가스크로마토그래피 질량분석기(Gas Chromatography/Mass Spectrometry, GC/MS)를 사용하였으며, 운용조건은 Table 2에 제시된다.

케로신은 $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ 의 화학식을 가지며 알케인계(alkane), 사이클로-알케인계(Cyclo-alkane) 그리고 방향족 탄화수소(aromatic hydrocarbon)의 조성을 포함한 혼합물(mixture)이다. 이러한 특성으로 인해 강도가 상대적으로 낮은 성분은 탐지하는데 제한되고, 그 정확도 또한 낮아지므로 케로신의 주요 구성성분인 알케인계 탄화수소 화

Table 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 $^{\circ}\text{C}$	
Injection volume	0.2 μL	
Oven temperature	Initial temp.	40 $^{\circ}\text{C}$
	Rate	10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$
	Final temp.	300 $^{\circ}\text{C}$

합물의 표준용액($\text{C}_8 \sim \text{C}_{15}$)과 비교하여 초음파 가진 시간에 따른 케로신 내 알케인계 탄화수소의 성분 변화를 분석하여 각 성분에 대한 peak area를 산출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가스크로마토그래피 질량분석법(GC/MS)

Fig. 7은 가스크로마토그래피 질량분석법을 통해 정성 분석된 초음파 가진 시간 변이에 따른 케로신 연료 내 알케인계 탄화수소의 상대비율을 나타낸 결과이다.

초음파 가진 전, C_{10} (Decane) 및 C_{11} (Undecane)

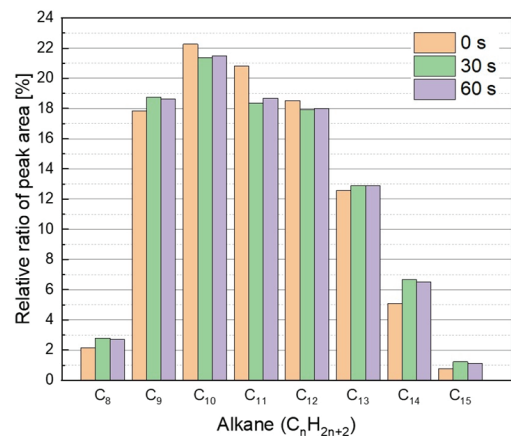


Fig. 7 The relative ratio of the hydrocarbon mixture (alkane) in kerosene according to ultrasonic wave excitation time.

화합물의 상대비율은 각각 20.97%와 20.68%로 측정되었다. 하지만 30초간 초음파를 가진한 경우, C₁₀과 C₁₁의 상대비율은 각각 19.04%, 17.83%로 감소하였고 이보다 낮은 탄소수의 C₈(Octane) 및 C₉(Nonane) 화합물의 상대비율은 각각 1.15%, 0.92% 증가하였다. 이는 초음파 가진을 통해 발생한 캐비테이션이 국소적인 고온·고압의 환경을 형성하여 탄화수소계 사슬구조를 분해시켜 더 낮은 탄소수의 화합물과 자유 라디칼로 분리되기 때문이다. 케로신에 초음파를 60초간 가진하였을 때 alkane계 탄화수소의 상대비율은 30초간 초음파를 가진한 경우와 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 초음파 가진에 의한 탄화수소 구조의 분해가 포화된 것으로 판단된다.

C₁₃(Dodecane) 이상의 탄화수소 화합물은 상대비율이 오히려 증가하였는데, 이는 일정 시간 이상 캐비테이션 효과가 지속되어 이미 생성된 자유 라디칼이 화합물로 재결합되는 속도가 화합물의 붕괴 속도보다 빠르게 발생하였기 때문이다[18].

3.2 OH* 자발광 강도

Fig. 8은 DSLR 카메라를 통해 획득된 모델연소실 내 가시화염의 이미지이다. 모델연소실 내 화염의 형상은 모든 경우에서 유사한 화염이 형성되는 것이 확인된다.

Fig. 9는 ICCD 카메라를 통해 획득된 OH* 자발광 강도를 평균화하여 나타낸 분포도이며 초음파 가진 시간의 증가에 따라 높은 강도의 분포영역이 점차 확장되는 것이 관찰된다. OH* 자발광 강도의 증가는 연소강도의 증가를 의미하므로, 그림을 통해 초음파 가진이 연소를 촉진시

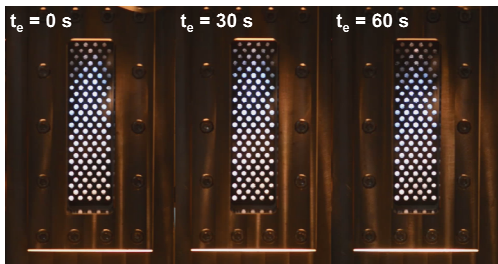


Fig. 8 DSLR image of visible flames according to ultrasonic excitation time variation.

키는 효과가 명확히 확인된다.

Fig. 10은 Fig. 9에 도시된 OH*의 강도분포를 수평 방향으로 정규화한 결과이다. Fig. 9에서

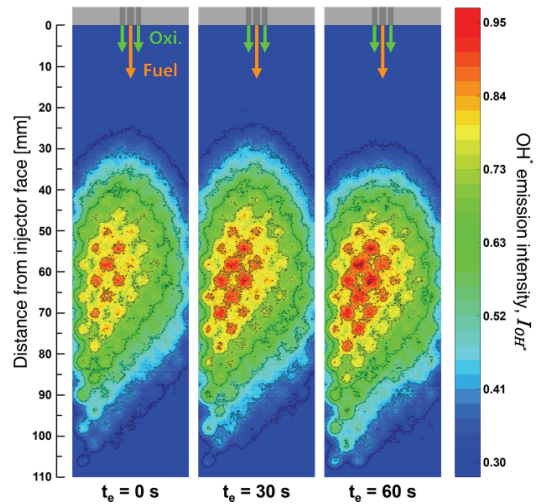


Fig. 9 Contour distribution images of OH* emission.

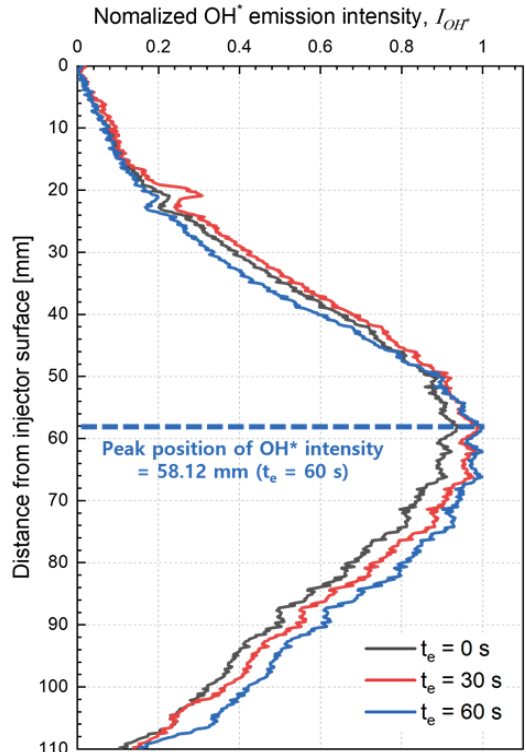


Fig. 10 Normalized OH* emission intensity according to the ultrasonic excitation time variation.

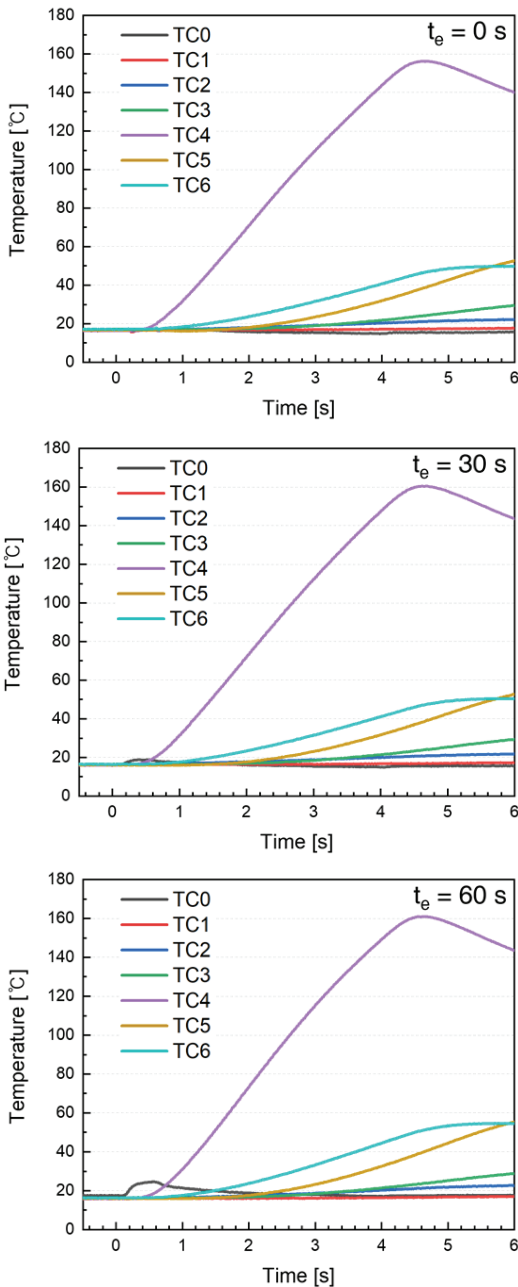


Fig. 11 Temperature profiles of the model combustor wall with varying the ultrasonic excitation time.

관찰되는 강도분포의 경우 가진 시간의 증가에 따라 연소강도가 강해지는 것이 정성적으로 확인된다. 하지만 Fig. 10의 정규화된 결과를 관찰하였을 때, 초음파 가진 유무에 따른 강도 차이는

뚜렷하게 관찰되나, 최고점이 위치한 58.12 mm에서의 강도 차이는 미미하다. 그러나 최고점 이후의 강도선도에서는 초음파 가진 시간이 길어짐에 따라 연소영역이 확대되고 그 강도가 강해지는 것이 관찰된다. 이는 앞서 GC/MS를 통해 분석된 케로신 연료의 열분해 효과가 직접적으로 반영된 결과이다.

3.3 온도

Fig. 11은 열전대를 통해 획득된 연료 분사 온도(TC0)와 모델연소실의 벽면온도(TC1~TC6)를 도시한 그래프이다. 초음파를 가진하지 않았을 때, TC4에서 측정된 최대 벽면 온도는 156.3°C이다. 이후 가진 시간을 30초와 60초로 설정했을 때 연소실의 최대 벽면 온도는 각각 160.5°C와 161.3°C로 측정되었다. 앞서 살펴본 OH* 강도분포의 최고점과 온도 센서의 위치를 비교하였을 때 온도와 OH* 강도의 peak 지점이 유사함을 알 수 있다. 또한, 초음파 가진 시간의 증가에 따라 연료의 분사 온도가 상승한다. 초음파 가진 전, 연료의 분사온도는 최고 17.1°C로 측정되었으나, 초음파를 30초 및 60초간 가진하였을 때, 측정된 연료의 최고 분사온도는 각각 18.9°C, 24.7°C이다. 이는 초음파 가진시 발생하는 열로 인해 연료의 온도가 상승한 것으로 판단된다. 이러한 온도 상승은 초음파 분해와 함께 연소성능 향상에 기여한 것으로 사료된다.

4. 결 론

초음파 가진 시간에 따른 케로신 연료의 연소거동 변이를 관찰하는 실험이 수행되었다. GC/MS를 통한 초음파 가진 시간에 따른 케로신 내 알케인계 탄화수소 상대비율을 관찰하였을 때, 초음파 가진에 의해 고탄소수의 화합물의 감소와 저탄소수의 화합물의 증가가 확인되었다. 이는 초음파 가진에 의한 케비테이션이 열분해 효과를 촉발하여 고탄소수의 화합물을 저탄소수의 화합물과 자유라디칼로 붕괴시켰기 때문이다. 초음파 가진된 연료를 모델연소실에서 연소시켰을

때, OH^* 의 최대강도는 가진하지 않은 경우보다 약 10% 증가하였으며, 강한 연소강도의 분포 또한 넓어졌다. 이는 초음파 가진에 의한 효과 중 가장 주요하게 나타나는 캐비테이션이 케로신 연료 내 탄화수소 사슬구조의 분해를 촉진시키고 연료 온도를 높여 연소에 더욱 적합한 조건을 형성하였기 때문이다. 따라서 본 연구를 통해 초음파 가진이 탄화수소계 연료인 케로신의 연소효율 증대에 긍정적인 영향을 미침을 확인하였다.

후 기

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2085070)의 지원과 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(20026368)을 받아 수행된 연구결과임.

References

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.spacex.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-star-link-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., Primius 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. 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.