

전단동축형인젝터를 통해 분사된 메탄-산소 이원추진제의 연소특성

홍준열* · 배성훈* · 배대석* · 김정수*[†]

Combustion Characteristics of the Methane-Oxygen Bipropellant Injected by a Shear-coaxial Injector

Joon Yeol Hong* · Seong Hun Bae* · Dae Seok Bae* · Jeong Soo Kim*[†]

ABSTRACT

This study is a preliminary research on characterization of methane - oxygen combustion used in bipropellant thruster. The limit of combustion stability and flame shape of methane - oxygen non-premixed flame injected by shear coaxial injector in the model combustion chamber Experimental studies have been carried out. A direct image of the flame was photographed using a DSLR camera, and combustion characteristics and flame length were quantified through image post-processing. As a result, it was confirmed that the stabilized flame was generated at the stoichiometric ratio as the oxidizer Reynolds number (Re_o) was increased, and the length of the turbulent flame was increased under the same injector diameter condition.

초 록

본 연구는 이원추진제 추력기(thruster)에 사용되는 메탄-산소 연소특성규명의 선행연구로서 모델연소실 내 전단동축형인젝터를 통해 분사된 기체메탄-기체산소 비에혼합화염의 연소안정한계 및 화염형을 도출하기 위한 실험적 연구가 수행되었다. DSLR 카메라를 이용하여 화염 직접이미지(direct image)를 촬영하였고, 이미지 후처리(post-processing)를 통해 연소특성과 화염길이 정량화를 수행하였다. 그 결과, 산화제 레이놀즈 수(Re_o)가 증가함에 따라 이론반응비(stoichiometric ratio)에서 안정된 화염이 발생하였고, 동일 인젝터직경 조건에서 난류화염의 길이가 늘어남을 확인하였다.

Key Words: Combustion Stability Limit(연소안정한계), Non-premixed Flame(비에혼합화염), Anchored Flame(부착화염), Flame Length(화염길이), Momentum Flux Ratio(운동량 플럭스 비)

1. 서 론

* 부경대학교 기계공학과

[†] 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

연료와 산화제를 추진제로 사용하는 이원추진

제(bipropellant) 로켓엔진은 화학식 액체추진시스템(liquid propulsion system)으로 다른 추진시스템 중 가장 높은 비추력(specific impulse, I_{sp})과 추력성능을 가지며, 추진제의 다양한 공급량 조절로 인해 우수한 작동특성을 가지고 있다. 현재 운용되는 액체로켓엔진의 추진제는 대부분 kerosene/LOx 또는 LH₂/LOx 조합의 추진제를 이용하며, LH₂/LOx 추진제 조합은 타 이원추진제에 비해 월등히 높은 비추력성능, 무독성, 친환경 등의 장점을 가지고 있지만, 낮은 밀도, 액화점과 높은 반응성으로 인해 대용량의 저장탱크와 추가적인 안정장치로 인한 무게 및 부피 증가의 단점을 가지고 있다. 메탄을 연료로 하는 추진제는 LH₂/LOx 이원추진제 다음으로 높은 비추력 성능을 가지며 보다 높은 안정성, 비추력 성능, 우수한 냉각제(coolant)성능의 특징을 가지며 경제성 또한 kerosene보다 3배 이상 저렴하며, 높은 coking limit으로 인한 엔진의 재사용성, 현지자원활용(in-situ resource utilization, ISRU), 무독성 등의 다양한 장점으로 인해 세계적으로 LCH₄/LOx 이원추진제가 각광받고 있다. 이러한 장점으로 인해 최근 해외에서 메탄을 연료로 하는 로켓엔진의 연구가 활발히 진행되고 있다. M. Chahine[1]는 메탄/공기화염에 산소의 추가 공급에 따른 연소특성 변이에 관한 연구를 수행하였고, F. Takahashi[2]는 메탄 및 탄화수소 확산화염(diffusion flame)의 소화 및 연소안정성에 대한 해석, 원형동축버너를 이용한 실험적 연구를 수행하였다. D. Jeffrey[3]는 전단 동축형 인젝터(shear coaxial injector)를 통해 공급되는 메탄-산소의 위치에 따른 연소안정성을 도출하였고 이를 수식적으로 기술하였다.

본 연구는 이원추진제 추력기(thruster)에 사용되는 극저온 메탄, 산소 연소특성 규명의 선행연구로써, 모델연소실 내 전단동축형인젝터를 통해 분사된 기체상 메탄, 산소의 비예혼합화염(non-premixed flame)의 안정화한계를 도출 및 화염형상을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 기체메탄-기체산소의 연소특성 연구를 위한 모델연소실 및 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 데이터수집 및 제어 장치(Data Acquisition and Control System, DACS), 토치점화기(torch ignitor), 질량유량제어기(Mass flow Controller, MFC), 각종 센서(sensor) 및 밸브(valve), 모델연소실 등으로 구성되며 모델연소실은 전단동축형인젝터(shear-coaxial injector), 퀴즈가시창(quartz window), 수축노즐(converging nozzle), 연소실(combustor chamber)로 구성된다. 연소실은 연소실험 시 발생하는 고온에 따른 연소실 내벽과 인젝터 등의 열적손상을 감소시키기 위해 총 12개의 냉각채널(cooling channel)을 제작하여 수류냉각(water cooling)을 진행하였다. 모델연소실은 원활한 화염 및 연소생성물의 배출을 위해 노즐이 아래로 향하는 수직방향으로 설치하였다.

본 실험의 연소순서(combustion sequence)는 다음과 같다. 토치화염의 압력은 점화지연시간(ignition delay)에 의존하여 점화 시 큰 압력을 발생시킨다. 따라서 모델연소실의 손상을 최소화하며, 연료 및 산화제의 충분한 혼합을 위해 추진제를 2초간 공급하고, 점화플러그(spark plug)를 통해 점화한 후 주 추진제(primary propellant)를 주입하여 14초간 연소실험을 진행한다. 마지막으로 질소가스를 이용하여 공급유로 및 연소실의 잔류가스를 배출(purge)하는 순서로 실험을 진행

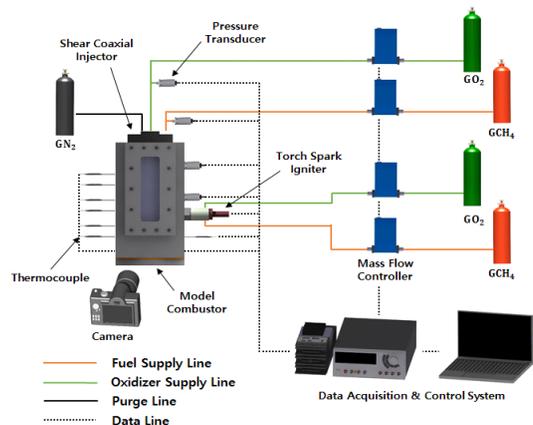


Fig. 1. Schematic of experiment setup.

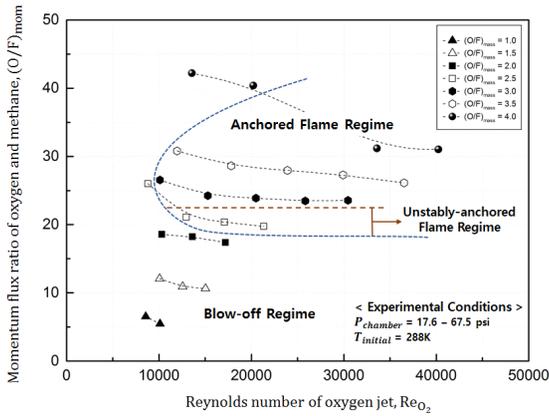


Fig. 2 Combustion flame regime according to oxygen Reynolds number and oxygen methane momentum ratio.

하였다.

비에혼합화염(non-premixed flame)의 안정성 여부에 큰 영향을 미치는 변수, 추진제 모멘텀 플럭스 비(momentum flux ratio, $(O/F)_{mom}$) (Eq. 1) 와 Re_o 에 따른 연소실험을 수행하기 위해 산화제 및 연료의 질량비($(O/F)_{mass}$)를 조절하여 실험을 진행하였다.

$$(O/F)_{mom} = \frac{(\rho_o u_o^2)}{(\rho_f u_f^2)} \quad (1)$$

화염은 DSLR 카메라를 이용하여 직접 이미지를 촬영하였고, 화염 이미지를 그레이 스케일(gray scale)로 변환, 이미지 밝기강도(intensity), 선예도(sharpness) 조절, 이진화(binartization) 과정을 통해 이미지 후처리(post-processing)하였고, 이에 따른 화염특성을 정량화하였다.

3. 연소안정한계 및 화염길이

본 실험의 기체메탄-기체산소 비에혼합화염 연소안정한계는 산화제의 모멘텀 플럭스 비와 Re_o 에 따라 anchored flame regime과 blow-off regime으로 구분되었으며, Fig. 2에 도시한다.

Blow-off regime은 $(O/F)_{mom} < 21.1$, $Re_o < 17,178$ 구간에서 발생하며, $(O/F)_{mass}$ 는 1.0 ~ 2.5

으로 연료와 산화제의 이론반응비(stoichiometric ratio)인 $(O/F)_{mass} = 4$ 로부터 크게 벗어나다. 또한, $(O/F)_{mom}$ 이 낮은 조건임을 고려하면, 연료와 산화제의 미미한 속도차이로 인하여 연소실 후단 부에서의 추진제 혼합으로 화염이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

Anchored flame regime은 $(O/F)_{mom} > 21.1$, $Re_o > 10,110$ 영역에서 안정적인 부착화염이 발생한다. 부착화염은 주로 연료과농(fuel-rich)조건에서 발생되고 Re_o 가 증가함에 따라 연소조건이 $(O/F)_{mass} = 2.5 \sim 3.5$ 에서 $(O/F)_{mass} = 3.0 \sim 4.0$ 으로 이동하였다. 부착화염은 추진제가 충분히 혼합될 수 있는 $(O/F)_{mom}$ 에서 발생하며, 이는 연료와 산화제의 속도차이로 추진제간 전단력에 의해 인젝터 출구 부근에서의 와류(vortex flow) 및 재순환영역(recirculation zone)이 발생하여 안정적인 연소가 이루어진다[3].

Fig. 3은 $(O/F)_{mass} = 2.5 \sim 4$ 일 때, Re_o 에 따른 화염길이를 정량화하여 나타내었으며, 인젝터 끝단으로부터, 분사방향 길이(L)와 산화제 인젝터의 직경(D)의 변수로 구성된 화염길이(flame length, L/D)를 이용하여 Re_o 에 따른 화염길이를 도시하였다. $Re_o > 10,110$ 이상으로 모두 난류화염이며, 난류화염의 길이는 선행연구[4]에서 밝혀진 바와 같이 추진제의 체적유량에 따른 영향은 매우 미미하며, 인젝터 오리피스 직경에 따라 큰 길이 변화를 보인다. 그러나 본 실험의 경우에는 이와 반

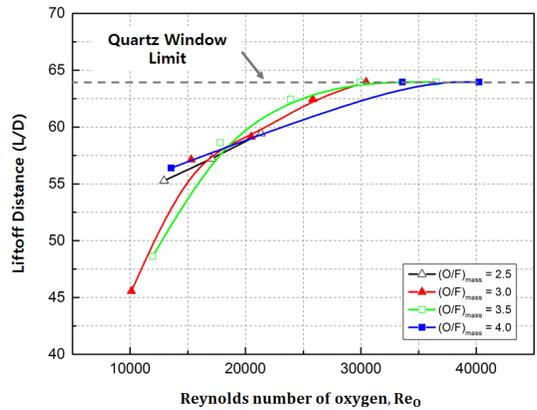


Fig. 3 Flame length according to oxygen Reynolds number.

대되는 경향으로 추진제의 체적유량이 증가함에 따라 화염길이도 비례적으로 증가하였으며, 대략적으로 $Re_0 > 30,000$ 부터는 퀴즈가시창(quartz window)의 길이를 초과하는 화염이 도출되었다.

결 론

$(O/F)_{mom}$ 과 Re_0 에 따라 기체메탄-기체산소 비에 혼합화염의 연소안정한계를 도출하였고, anchored flame regime과 blow-off regime으로 구분되었다. Blow-off regime은 $(O/F)_{mass} = 4$ 로부터 크게 벗어나는 영역으로 낮은 $(O/F)_{mom}$ 에 의해 추진제의 혼합이 원활하지 않아 blow-off가 발생하였다. Anchored flame regime은 충분한 $(O/F)_{mom}$ 으로 추진제간 속도차이로 인해 전단력이 발생하고 이는 와류 및 재순환영역을 발생시켜 안정적인 연소가 이루어진다. 화염길이는 $(O/F)_{mass}$ 에 큰 관계없이 추진제의 체적유량에 따라 상승하였다.

후 기

본 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 선도연구센터(서울대학교 차세대우주추진연구센터) 지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)과 우주핵심기술개발사업(NRF-2016M1A3A3A02018009)의 연구결과임.

참 고 문 헌

1. Chahine, M., Gillon, B., Sarh, B., Blanchard, J.N., and Gilard, V., "Stability of a laminar jet diffusion flame of methane in an oxygen enriched air co-jet," Seventh Mediterranean Combustion Symposium, Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy, ISBN 978-88-88104-12-6, Sep. 2011
2. Fumiaki, T., Viswanath, K., "Lift-off Stability of Hydrocarbon Jet Diffusion Flames" Proceedings of the 20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems(ICDERS), Montreal, Canada, Aug, 2005
3. Jeffrey, D., Kenneth, K., "Effect of Switching methane/oxygen reactants in a coaxial injector on the stability of non-premixed flames," Combustion Science and Technology, Vol. 180, Issue 3, pp. 401~417, 2008
4. Wohl, K., Gazley, C. and Kapp, N., "Diffusion Flames", Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, Baltimore, Maryland, U.S.A, pp. 288-300, 1949