



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.1.063>

모델연소실 내 압력 변화가 메탄/산소 이원추진제의 연소특성에 미치는 영향

최 선^a · 김태영^a · 김희경^a · 구자예^b · 권오채^{a,*}

Effects of Pressure Variation on the Combustion Characteristics of a Gaseous CH₄/O₂ Bipropellant in a Model Combustor

Sun Choi^a · Tae Young Kim^a · Hee Kyung Kim^a · Jaye Koo^b · Oh Chae Kwon^{a,*}

^aSchool of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

^bSchool of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace University, Korea

*Corresponding author. E-mail: okwon@skku.edu

ABSTRACT

Liquid methane (CH₄)/oxygen (O₂) bipropellants have been recently considered as a next-generation propellant due to eco-friendly and non-toxic properties, low cost and high performance. In this study, the combustion characteristics of gaseous CH₄/O₂ nonpremixed coflow flames in a model combustor with variation of internal pressure are investigated through measuring the combustion stability limits and visualizing flames. Results show that the combustion stability limits are extended and the reaction region is widened with increasing internal pressure of the combustion chamber for fuel-rich condition.

초 록

메탄(CH₄)/산소(O₂) 액체이원추진제는 친환경성, 무독성, 경제성, 우수한 성능 등의 장점으로 최근 들어 차세대 친환경 이원추진제로서 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 연소실 내 압력 변화에 따른 기체 메탄/산소 비예혼합 동축 화염의 연소안정한계를 측정하고, 화염 및 유동의 가시화를 통해 분사 조건 및 압력 변화에 따른 화염의 구조와 특성을 파악하였다. 연구 결과 연료과농 조건에서 연소실 내 압력이 증가할 경우 연소안정한계가 확장되고 반응 영역이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words: Nonpremixed Flame(비예혼합화염), Methane(메탄), Oxygen(산소), Bipropellant(이원추진제), Combustion Stability Limits(연소안정한계)

Received 6 July 2016 / Revised 16 November 2016 / Accepted 21 November 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2016년도 춘계학술대회(2016. 5. 25-27,

제주 사인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

현재 미국, 유럽, 일본 등 로켓엔진기술 선진

국에서 스페이스 미션 및 위성 발사에 사용되는 로켓엔진은 대부분 수소(H_2)/산소(O_2) 또는 케로신(RP-1)/산소 액체이원추진제를 사용한다. 수소/산소 액체이원추진제는 타 액체이원추진제에 비해 압도적으로 높은 비추력을 가지는 장점이 있으나 수소의 낮은 밀도와 매우 낮은 액화 온도로 인해 추진제 탱크의 무게와 부피가 증가하여 높은 비추력의 장점은 상쇄된다[1]. 또한 높은 반응성으로 인한 안전장치의 필요성, 산화제와의 밀도 차이로 인한 별도의 터보펌프 설치 등의 문제가 있으며 이의 해결을 위해서는 높은 기술력과 비용이 요구된다.

최근 로켓엔진 개발에 있어 환경문제, 경제성 등이 이슈가 되며 친환경 추진제에 대한 연구가 로켓엔진기술 선진국을 중심으로 진행되고 있다[2]. 메탄/산소 액체이원추진제는 무독성으로 취급이 용이하고, 생산비용이 저렴하여 경제적이며, 친환경적인 특성을 갖고, 수소/산소 이원추진제에 비해 저장이 용이하며, 케로신/산소 이원추진제보다 높은 비추력을 낼 수 있는 장점이 있다[3]. 또한 메탄은 로켓엔진 추력실 내 재생냉각제로서 사용 시 우수한 재생냉각성능을 가지고 있고, 코킹(coking) 한계가 높아 열분해의 가능성이 적어 재사용 엔진의 추진제로서 적합하다[4-6]. 이와 같은 장점으로 메탄/산소 액체이원추진제는 최근 들어 차세대 친환경 액체이원추진제로서 많은 관심을 받고 있다.

반면, 오랜 기간 기초 연구 및 시행착오를 통해 연구된 수소/산소 이원추진제나 케로신, 하이드라진 등에 비해 메탄/산소 이원추진제의 비행역사나 지상 시험은 아직 제한적이다. 뿐만 아니라 이원추진제로서 메탄에 대한 기초적인 특성 연구나 연소 불안정성에 대한 연구 역시 많지 않은 편이며, 비교적 최근 들어 진행되기 시작하였다[7-9]. Planar laser induced fluorescence (PLIF) 가시화를 통해 모델연소실 내 압력 1 MPa 이하에서 액체 산소/기체 메탄과 액체 산소/기체 수소의 화염 안정화에 대한 연구가 진행되었고[7], 동일한 모델연소실에서 천임계(transcritical) 및 초임계(supercritical) 조건에서 산소와 메탄의 분무 및 연소 특성이 OH^* 및

CH^* 자발광 가시화를 사용하여 연구되었다[8]. 또한 모델 연소기를 사용하여 인젝터의 유형 변화에 따른 액체 산소/기체 메탄의 분무 및 연소 특성 연구가 쉘리렌, OH^* 자발광, OH-PLIF 등의 가시화를 통해 진행된 바 있다[9]. 이와 같이 선행적으로 진행된 메탄/산소 기초 연구들은 대부분 액체 산소/기체 연료로 진행되었으며 연소 안정화에 대한 명확한 조건을 언급하고 있지 않다.

추진제 연소 시 로켓 엔진 내에서는 추진제의 미립화, 액적 기화, 혼합 및 난류 연소 등 복잡한 현상이 일어나기 때문에 새로운 추진제의 실제 적용을 위해서는 다양한 조건에서 기초적인 실험을 통해 추진제의 안정화 메커니즘을 통제할 수 있는 물리적/화학적 메커니즘을 파악하는 것이 중요하다. 또한 로켓 엔진 설계 변수를 효율적으로 찾기 위해서는 수치해석을 통한 연구가 필수적인데, 기초 연구를 통해 수치해석 기법을 검증하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 앞서 언급된 선행 연구들과 같은 액체추진제의 분무 및 연소 특성 연구에 앞서 기초 연구 데이터 베이스 확보를 위해 기체 메탄/기체 산소의 연소특성을 실험을 통해 확인해보았다. 선행 연구를 통해 설계, 제작된 기초 연소특성 연구용 모델연소실[10] 후단의 오리피스를 교체하여 연소실 내 압력 변화에 따른 기체 메탄/기체 산소 비예혼합 동축 화염의 연소안정한계를 측정하고, OH^* 자발광 가시화 및 쉘리렌 유동 가시화, 직접 사진 촬영을 통해 분사 조건 및 압력 변화에 따른 화염의 구조와 형태를 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

메탄/산소 이원추진제의 연소특성 연구를 위한 실험 장치는 모델연소실, 메탄/산소 공급시스템, 질소(N_2) 퍼지(purge) 시스템, 토치 점화기(torch ignitor), 연소실 내 압력 측정을 위한 압력계, 직접사진 촬영을 위한 DSLR(Sony A65; resolution: 3376×6000 pixels), ICCD(PI-max4; resolution: 1024×1024 pixels)를 포함한 OH^* 자

발광(OH^* chemiluminescence) 가시화 시스템, 광원(Newport 100 W mercury arc lamp)과 초고속 카메라(Redlake X3-plus; resolution: 1280×1024 pixels, maximum frame per sec: 128,000 fps)를 사용하여 유동을 가시화하는 쉘리렌(Schlieren) 시스템 등으로 구성되어 있으며, Fig. 1 과 같다.

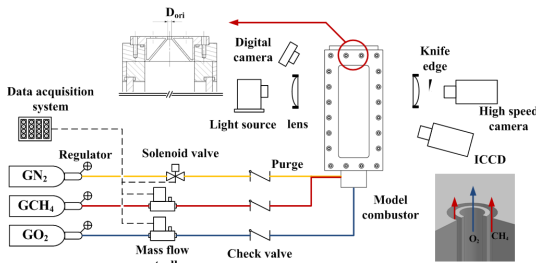


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

Table 1. Specifications for model combustor.

Combustion chamber (SUS316L)	$60.0 \times 60.0 \times 188.0 \text{ mm}^3$
Optical windows (quartz)	$180.0 \times 60.0 \times 20.0 \text{ mm}^3$
Optical entrance (quartz)	$162.0 \times 3.0 \times 8.0 \text{ mm}^3$
Diameter of center jet injector	2.0 mm
Thickness of center jet post	0.4 mm
Diameter of annulus jet injector	3.4 mm
Orifice inner diameter (D_{ori})	2.4-4.8 mm

모델연소실은 좌우에 광학창(optical windows)이 있는 정사각형 덕트(combustion chamber) 형태이며 후단에 노즐 형태의 오리피스를 설치하여 기체 메탄과 기체 산소 공급 조건에 따라 연소실 내부 압력이 변화하도록 실험을 진행했다. 모델연소실 및 인젝터의 제원은 Table 1에 나타내었다. 메탄/산소는 질량유량계(Porter 632M0ABD88V; accuracy $\pm 0.5\%$)를 사용하여 동축 단일 인젝터를 통해 모델 연소실로 공급되며 중앙(center jet injector)에 산소가 공급되고, 그 주위에 환형(annulus jet injector)으로 메탄이 공급되는 비예혼합 역확산 연소의 형태이다. 본 실험에서는 오리피스의 내경(orifice inner diameter)을 변경하여 연소실 내 압력이 변하도록 실험을 진행했으며, 비예혼합 화염의 안정화 여부에 주된 영향을 미치는 인자로 알려진 산소-연료 모멘텀 비($(O/F)_{mom}$), 산소 제트의 레이놀즈 수(Re_o) [11] 등을 변화시키면서 메탄/산소 비예혼합 화염의 거동을 확인하고, 연소안정한계를 측정했다.

$$(O/F)_{mom} = \frac{(\rho u^2)_{O_2}}{(\rho u^2)_{CH_4}} \quad (1)$$

또한 직접사진 촬영, OH^* 자발광 가시화(exposure time: 15 ms), 쉘리렌 가시화(exposure time: $1 \mu\text{s}$, frame per second: 2000 fps)를 통해 화염 구조를 파악하고, 화염의 안정화 변화의 원인을 확인해보았다. 가시화 실험에서 진행된 실험 조건은 Table 2와 같고, 연소안정한계 측정

Table 2. Experimental conditions for the flame visualization.

D_{ori} (mm)	$(O/F)_{mom}$	u_{O_2} (m/s)	u_{CH_4} (m/s)	$P_{chamber}$ (bar)	\dot{m}_{O_2} (g/s)	\dot{m}_{CH_4} (g/s)	Equivalence ratio, ϕ
4.8	3.7	50-250	36.6-183.0	1.02-1.21	0.21-1.23	0.08-0.45	1.46
	7.2	100-150	52.5-78.7	1.02-1.03	0.42-0.62	0.11-0.16	1.05
	15.0	27	9.8	1.02	0.11	0.02	0.73
2.4	3.7	50-250	36.6-183.0	1.10-3.57	0.22-3.64	0.08-1.34	1.46
	7.2	100-250	52.5-131.2	1.34-3.32	0.55-3.38	0.14-0.90	1.05
	15.0	27	9.8	1.02	0.11	0.02	0.73

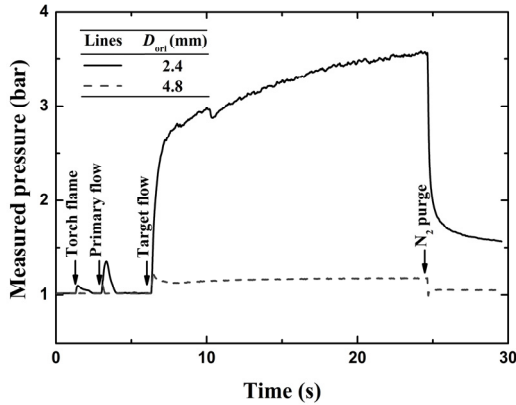


Fig. 2 Pressure-time trace in combustion chamber for CH_4/O_2 nonpremixed flames of $(\text{O}/\text{F})_{\text{mom}} = 3.7$ and $\text{Re}_\text{O} = 111,781$ ($D_{\text{ori}} = 2.4$ mm) and $37,757$ ($D_{\text{ori}} = 4.8$ mm).

실험은 $(\text{O}/\text{F})_{\text{mom}} = 2.0\text{-}27.0$, $\text{Re}_\text{O} = 3,434\text{-}111,781$ 에서 진행되었다.

연소 시험은 Fig. 2와 같이 먼저 토치 점화기 (torch flame)를 사용하여 인젝터에서 상대적으로 점화가 쉬운 저속으로 분사되는 메탄/산소 (primary flame)를 점화한 다음, 목표로 하는 유량의 메탄/산소(target flow)를 동시에 분사하여 연소실 압력이 정상상태가 될 때 연소특성을 확인하는 과정으로 진행되었다. 모델연소실의 과열을 방지하기 위해 연소 시험 시간은 30초 이내로 진행했으며 연소 시험 후에는 질소 퍼지(N_2 purge)를 통해 소염, 연소실 내부 기체 배출 및 냉각을 해주었다. 연소실 내 압력은 실험 조건에 따라 달라지나 Fig. 2와 Table 2에서 확인할 수 있듯이 $D_{\text{ori}} = 4.8$ mm의 경우 1.02-1.21 bar(절대 압력 기준), $D_{\text{ori}} = 2.4$ mm의 경우 1.02-3.57 bar로 측정되었다.

3. 실험 결과

3.1 연소안정한계

메탄/산소 비예혼합 화염의 연소안정한계 측정 결과는 Fig. 3과 같다. $D_{\text{ori}} = 4.8$ mm 오리피스를 사용한 메탄/산소 비예혼합 화염의 경우

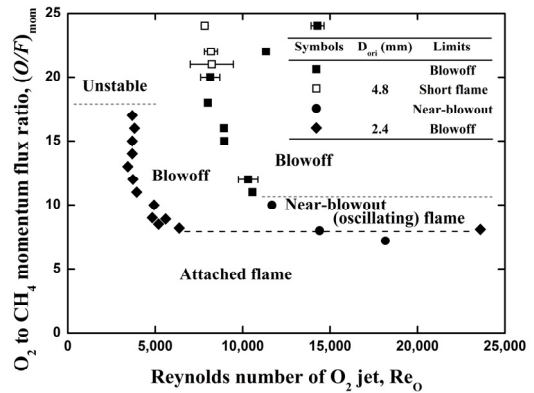


Fig. 3 Combustion stability regimes on $\text{Re}_\text{O}\text{-}(\text{O}/\text{F})_{\text{mom}}$ diagram for CH_4/O_2 nonpremixed flames in a model combustor ($D_{\text{ori}} = 2.4$ and 4.8 mm).

안정적인 부착화염(attached flame), 인젝터에서 부상하여 위아래 크게 진동하는 near-blowout 화염, 화염의 길이가 급격히 짧아져 소음이 발생하는 short 화염 등 세 종류의 화염 형태가 관찰되었다. 일반적으로 비예혼합 화염에서 관찰되는 안정적인 부상화염은 본 실험에서 관찰되지 않았다. 연료 및 산화제 분사량 기준 대체로 연료 과농(fuel-rich) 조건에서 매우 안정적인 부착화염이 관찰되었고, near-blowout 화염은 이론당량 비($(\text{O}/\text{F})_{\text{mom}} = 8$) 근처의 연료희박(fuel-lean) 및 연료과농 조건($(\text{O}/\text{F})_{\text{mom}} = 7.5\text{-}10$)에서 관찰되었는데, 이는 메탄/산소 비예혼합 화염의 연소실 벽면에 대한 열손실로 인해 발생하는 것으로 확인된 바 있다[10]. Short 화염은 $(\text{O}/\text{F})_{\text{mom}}$ 값이 큰 연료희박 조건($(\text{O}/\text{F})_{\text{mom}} > 20$)에서 관찰되었다. 메탄/산소 비예혼합 화염에서 $(\text{O}/\text{F})_{\text{mom}}$ 와 Re_O 값이 증가할수록 미연가스에는 산소량이 증가하는데, 연소실 후단에 오리피스가 설치되어 있는 벽면으로 인해 산소가 재순환하게 된다. 이때 인젝터에서 분사되는 메탄과 산소의 일차적인 연소는 증가하는 분사속도로 인해 소염되거나 재순환된 산소와 분사된 메탄이 연소하면서 이와 같은 화염의 유형을 보이는 것으로 확인된다. 연소실 벽면으로 인한 재순환 효과는 3.2 절의 Schlieren 가시화 결과를 통해 확인되었다.

$D_{\text{ori}} = 2.4$ mm 오리피스를 사용한 경우에는

부착화염 이외 다른 화염 형태는 확인되지 않았다. $D_{ori} = 4.8$ mm 오리피스 사용 시 short 화염과 near-blowout 화염이 발생하는 분사 조건과 동일한 조건에서 $D_{ori} = 2.4$ mm의 경우 연소실 압력은 $D_{ori} = 4.8$ mm 경우와 거의 동일하기 때문에 오리피스 직경으로 인한 압력 변화가 아닌 유동의 변화로 인해 short 화염과 near-blowout 화염이 관찰되지 않는 것으로 보인다. 연소안정 한계는 연료희박 조건에서 $D_{ori} = 4.8$ mm 오리피스를 사용한 경우에 비해 축소되었고, $(O/F)_{mom}$ 이 높은 경우($(O/F)_{mom} > 18$) 산소 유속에 상관없이 소멸되는 것이 확인되었다. 반면 연료과농 조건($(O/F)_{mom} < 8$)에서는 매우 안정적인 연소가 관찰되며 $D_{ori} = 4.8$ mm 오리피스를 사용한 안정한계보다 다소 확장되었다. Fig. 2에서 확인 가능하듯이 연소실 내 압력이 3배 이상 증가함에 따라 연소안정한계가 확장된 것으로 보인다. 이와 같이 메탄/산화제 연소에 있어 연소실 압력이 증가함에 따라 연소안정한계가 확대되는 경향은 Maruta 등[12]의 실험 연구를 통해 확인된 바 있다. Liu 등[13]은 압력 증가로 인해 해리(dissociation) 현상의 약화로 화염강도(온도)가 증가하며 이로 인해 연소안정한계가 확장되는 결과를 제시한 바 있고, 또한 Chen 등[14]의 수치해석 연구에 의하면 압력 증가에 따라 복사 재흡수(radiation reabsorption)율이 증가하게 되며 이로 인해 연소 강도와 안정한계가 확대되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 실험에서의 압력 증가에 따른 연료과농 조건에서의 연소안정성 증가와 한계 확장은 해리의 약화와 메탄/산소의 반응으로 생성된 이산화탄소(CO_2)로 인한 복사 흡수 증가에 기인한 것으로 판단된다.

3.2 화염 가시화

Fig. 4는 Schlieren 가시화를 통해 관찰된 동일한 조건($D_{ori} = 2.4$ mm, $(O/F)_{mom} = 3.7$, $Re_O = 19,118$)에서 메탄/산소 비예혼합 화염이며, 두 사진의 시간차는 1.5 ms이다. 사진의 중앙에서 인젝터를 통해 상단으로 분사되는 메탄/산소 제트를 확인할 수 있으며, 주위로 벽면을 따라 하단으로 재순환되는 유동을 확인할 수 있다. 이를

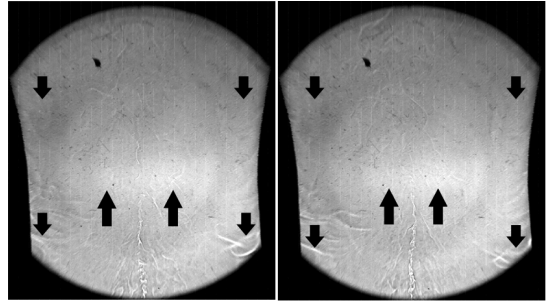


Fig. 4 Schlieren images of CH_4/O_2 nonpremixed flame of $D_{ori} = 2.4$ mm, $(O/F)_{mom} = 3.7$ and $Re_O = 19,118$.

통해 모델연소실 후단의 벽면으로 인해 재순환되는 효과는 확인되었으나 D_{ori} 변화에 따른 재순환 효과의 변화는 명확하게 확인되지 않았다.

Fig. 5는 DSLR을 사용하여 D_{ori} 의 변화에 따른 메탄/산소 비예혼합 화염의 직접 사진을 촬영한 결과로, 각 열은 연소실 내 압력 변화로 인한 밀도 변화로 Re_O 값의 차이가 있으나 동일한 분사 속도 조건의 결과이다. 연료과농($(O/F)_{mom} = 3.7$) 조건의 $D_{ori} = 2.4, 4.8$ mm 경우 모두 일반적으로 난류 비예혼합 연소 영역에서 분사 속도 증가에 따라 화염 길이가 변하지 않는 경향과 달리 충분히 난류 연소로 볼 수 있는 조건($Re_O > 12,970$)임에도 화염 길이가 Re_O 증가에 따라 계속 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 본 연구실에서 진행된 선행 연구[15]에서의 결과와 같이 상대적으로 반응성이 강한 순산소의 사용으로 인해 연소안정한계가 확장되었고, 난류 강도 증가에 따라 높아지는 메탄/산소의 확산 및 혼합 효과가 포화 상태에 이르면서 높아지는 메탄/산소의 유속을 상쇄시키지 못하여 화염의 길이가 증가하는 결과로 보인다. 또한 인젝터 근처에서 메탄/산소의 강한 연소가 국소적으로 난류 강도를 완화시켜 층류 연소와 같이 메탄/산소의 유속 증가에 따라 화염길이가 증가하는 경향을 보이는 것이 선행 연구[15]의 Schlieren 가시화를 통해 확인된 바 있다. 연료과농($(O/F)_{mom} = 3.7$) 조건의 경우 연소실 내 압력이 증가(D_{ori} 감소)함에 따라 화염의 밝기는 증가하였고, 난류 강도 증가로 인해 후단에서 난류화염 거동이 관찰되

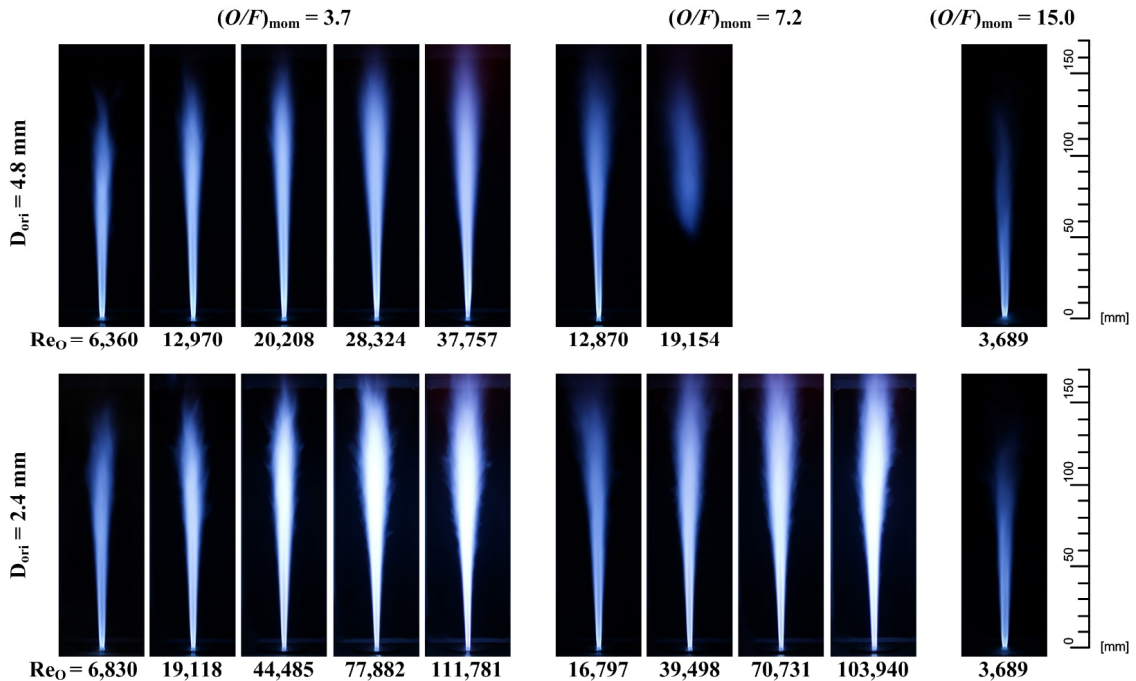


Fig. 5 Direct images of CH_4/O_2 nonpremixed flames for $(O/F)_{mom} = 3.7-15.0$, $Re_O = 3,689-111,781$ and $D_{ori} = 2.4$ and 4.8 mm.

었다. 이로 인해 화염의 평균 반경은 증가하는 경향을 보였으나 화염 길이는 크게 차이 나지 않았다. 3.1 절에서 언급한 바 있듯이 $D_{ori} = 4.8$ mm, $(O/F)_{mom} = 7.2$ 조건에서 Re_O 증가 시($Re_O > 19,154$) near-blowout 화염이 관찰되었으나 $D_{ori} = 2.4$ mm의 경우에는 $Re_O = 16,797-103,940$ 조건 전체에서 안정적인 부착화염이 관찰되었다. 반면, $(O/F)_{mom} = 15.0$ 의 경우 낮은 메탄/산소의 유량으로 인해 연소실 압력 차가 거의 없었고, 화염의 형태 역시 차이가 관찰되지 않았다.

Fig. 6은 압력 변화에 따른 메탄/산소 비예혼합 화염의 OH^* 자발광 측정 결과(각 OH^* 사진의 왼쪽)를 Abel 변환(inversion transform)[16]을 통해 평면 이미지(각 OH^* 사진의 오른쪽)로 변환한 결과이다. 화염의 두께는 선행 연구[15]와 동일하게 OH^* 평면 이미지에서 OH^* 강도가 최대가 되는 지점의 두께로 정의되었다. Figure 6(a)의 경우 Fig. 5와 마찬가지로 각 D_{ori} 에 상응하는 이미지는 동일한 분사속도 조건의 결과이다. D_{ori} 변화에 따른 OH^* 자발광 변화(Fig. 6(a))

를 보면 $D_{ori} = 2.4$ mm를 사용한 경우, $D_{ori} = 4.8$ mm를 사용한 경우에 비해 화염의 반응 영역이 크게 확장되었으며 화염의 두께 역시 증가한 것이 확인되었다. 이는 연소실 내 압력 증가로 인해 연소안정한계가 확장되면서 $D_{ori} = 4.8$ mm의 경우에는 높은 유속 조건으로 인해 상대적으로 반응하지 않던 메탄/산소가 $D_{ori} = 2.4$ mm로 오리피스 교체 후에 압력 증가로 인해 반응하는 결과로 보인다. 특히, 앞서 3.1 절에서 언급한 복사 재흡수율은 압력 증가뿐만 아니라 화염의 크기 증가에 따라 증가하기 때문에[14] 압력 증가, 화염의 두께 및 부피 증가로 인해 연소안정한계가 증가하는 결과를 보이는 것으로 판단된다. 반면, 최대 OH^* 자발광 강도는 D_{ori} 가 감소함에 따라 감소하는 경향이 관찰되었다. $D_{ori} = 2.4$ mm의 경우에 $(O/F)_{mom}$ 변화에 따른 OH^* 자발광 결과(Fig. 6(b))를 보면 화염의 두께는 크게 변화가 없었으나 $(O/F)_{mom}$ 이 이론당량비에 가까워질수록 최대 OH^* 자발광 강도가 증가하는 경향이 관찰되었다. 3.1 절에서 확인된 바 있듯

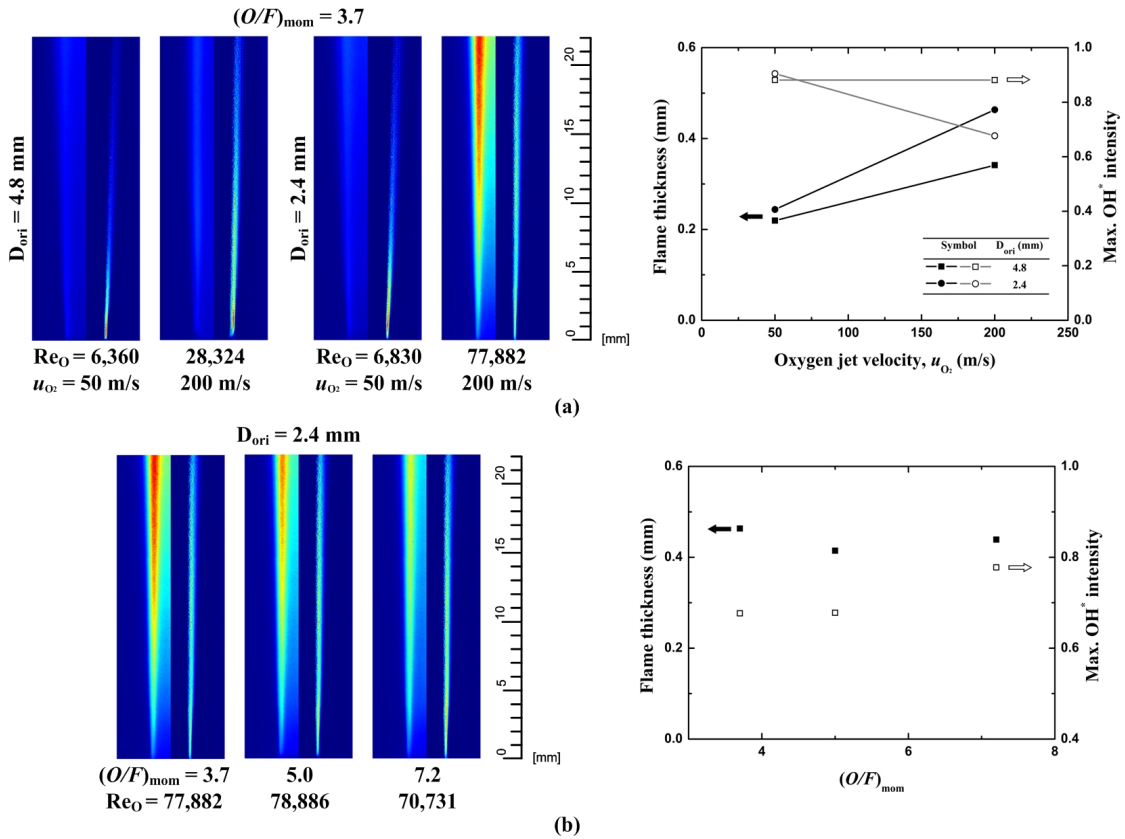


Fig. 6 Distribution of OH^* in injector near-field for CH_4/O_2 nonpremixed flames: $(O/F)_{mom} = 3.7$, $Re_O = 6,360-77,882$ and $D_{ori} = 2.4-4.8$ mm (a) and $(O/F)_{mom} = 3.7-7.2$, $Re_O = 70,731-78,886$ and $D_{ori} = 2.4$ mm (b).

이 연료과농 조건에서 메탄/산소 비예혼합 화염이 대체로 안정되는 결과가 확인되었으나 실제로 연료과농 조건에서 이론당량비에서 멀어질수록 화염의 반응성은 조금씩 감소하는 결과로 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 이원추진제로서 기초적인 연소 특성 연구를 위해 연소안정한계, 직접 사진 촬영, OH^* 자발광 가시화를 통해 연소실 내 압력 변화에 따른 메탄/산소 비예혼합 동축 화염의 연소특성을 고찰해 보았다. 연소실 후단에 위치한 노즐 형태의 오리피스 직경을 4.8 mm에서 2.4 mm로 교체함에 따라 연소실 내 압력은 약

1-3 배 정도 증가하는 것이 측정되었다. 또한 오리피스 직경 교체에 따라 화염 거동이 달라지는 것이 관찰되었는데, $D_{ori} = 4.8$ mm 오리피스 사용 시 관찰되던 short 화염과 near-blowout 화염이 $D_{ori} = 2.4$ mm 오리피스 사용 시에는 확인되지 않았다. 실제 short 화염과 near-blowout 화염이 발생하는 조건에서 오리피스 교체에 따른 압력 차가 크지 않기 때문에 이는 유동의 변화에 기인한 것으로 판단하였다. 연료과농 조건에서 연소실 내 압력 상승에 따라 연소안정한계가 확장되는 결과가 관찰되었고, 이는 압력 증가로 인한 복사 재흡수율의 증가, 해리 감소의 영향으로 기인하며, 직접 사진과 OH^* 자발광 가시화를 통해 확인된 압력 증가에 따른 화염 두께 및 반경 증가에 의해 뒷받침된다. 또한 연료과농 조건에서 $(O/F)_{mom}$ 이 증가할수록 증가하는 경향이 확

인되어 메탄/산소 비에혼합 화염은 이론당량비 근처의 연료과농 조건에서 가장 안정적인 것으로 확인된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(No. 2013073861)의 연구 결과입니다.

References

1. Lee, T.H. and Lee, C.H., "Review of the Liquid Propulsion Technology," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 132-139, 2013.
2. Sackheim, R.L. and Masse, R.K., "Green Propulsion Advancement: Challenging the Maturity of Monopropellant Hydrazine," *49th Joint Propulsion Conference*, San Jose, C.A., U.S.A., AIAA 2013-3988, Jul. 2013.
3. Kim, J.S., Jung, H. and Kim, J.H., "State of the Art in the Development of Methane/Oxygen Liquid-bipropellant Rocket Engine," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 120-130, 2013.
4. Burkhardt, H., Sippel, M., Klevanski, J. and Herbertz, A., "Comparative Study of Kerosene and Methane Propellants for Reusable Liquid Booster Stages," *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Indianapolis, I.N., U.S.A., AIAA 2002-5235, Jul. 2002.
5. Haeseler, D., Mäding, C., Götz, A., Roubinski, V., Khriisanfov, S. and Berejnoj, V., "Recent Developments for Future Launch Vehicle LOx/HC Rocket Engines," *6th International Symposium on Propulsion for Space Transportation of the 21st Century*, Versailles, France, AAAF-02-100, May. 2002.
6. Excoffon, T. and Borromee, J., "Future European Reusable Propulsion Systems," *Proceedings of the International Symposium on Space Technology and Science*, Vol. 23, No. 2, pp. 2558-2563, 2002.
7. Singla, G., Scoufflaire, P., Rolon, J.C. and Candel, S., "Flame Stabilization in High Pressure LOx/GH₂ and GCH₄ Combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 2, pp. 2215-2222, 2007.
8. Singla, G., Scoufflaire, P., Rolon, J.C. and Candel, S., "Transcritical Oxygen/Transcritical or Supercritical Methane Combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 2921-2928, 2005.
9. Salgues, D., Mouis, A.-G., Lee, S.-Y., Kalitan, D., Pal, S. and Santoro, R., "Shear and Swirl Coaxial Injector Studies of LOX/GCH₄ Rocket Combustion Using Non-intrusive Laser Diagnostics," *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 2006-757, 2006.
10. Choi, S., Kim, T.Y., Kim, H.K., Koo, J., Kim, J.S. and Kwon, O.C., "Properties of Inverse Nonpremixed Pure O₂/CH₄ Coflow Flames in a Model Combustor," *Energy*, Vol. 93, No. 1 pp. 1105-1115, 2015.
11. Moore, J.D. and Kuo, K.K., "Effect of Switching Methane/Oxygen Reactants in a Coaxial Injector on the Stability of Non-premixed Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 180, No. 3, pp. 401-417, 2008.
12. Maruta, K., Abe, K., Hasegawa, S., Maruyama, S. and Sato, J., "Extinction

- Characteristics of CH₄/CO₂ Versus O₂/CO₂ Counterflow Non-premixed Flames at Elevated Pressures up to 0.7 MPa," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 1, pp. 1223-1230, 2007.
13. Liu, F. and Gülder, Ö, "Effects of Pressure and Preheat on Super-adiabatic Flame Temperatures in Rich Premixed Methane/Air Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 180, No. 3, pp. 437-452, 2008.
14. Chen, Z., Qin, X., Xu, B., Ju, Y. and Liu, F., "Studies of Radiation Absorption on Flame Speed and Flammability Limit of CO₂ Diluted Methane Flames at Elevated Pressures," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 2, pp. 2693-2700, 2007.
15. Kim, T.Y., Choi, S., Kim, H.K., Jeung, I.S., Koo, J. and Kwon, O.C., "Combustion Properties of gaseous CH₄/O₂ Coaxial Jet Flames in a Single-element Combustor," *Fuel*, Vol. 184, pp. 28-35, 2016.
16. Yuan, Z.G., "The Filtered Abel Transform and Its Application in Combustion Diagnostics," *1995 Fall Meeting, Western State Section of the Combustion Institute*, Stanford, C.A., U.S.A., NASA/CR-2003-212121, 2003.