

## 스윙 동축형 인젝터에 의해 형성되는 메탄-산소 확산화염의 연소특성

배성훈<sup>a</sup> · 홍준열<sup>a</sup> · 김희동<sup>b</sup> · 김정수<sup>a,\*</sup>

### Combustion Characteristics of Methane-Oxygen Diffusion Flame Formed by Swirl-coaxial Injector

Seong Hun Bae<sup>a</sup> · Joon Yeol Hong<sup>a</sup> · Heuy Dong Kim<sup>b</sup> · Jeong Soo Kim<sup>a,\*</sup>

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

<sup>b</sup>Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [jeongkim@pknu.ac.kr](mailto:jeongkim@pknu.ac.kr)

#### ABSTRACT

In order to analyze combustion characteristics of methane-oxygen diffusion flame in a model combustor, combustion experiments were carried out under various spray conditions of propellant scrutinizing combustion stability limit and flame shapes. As the propellant approached the theoretical equivalence ratio condition, a stable detached flame was observed even under high oxygen Reynolds number. And the length of the visible flame increased and the lift-off distance of the flame exhibited a tendency toward decrease. Due to the swirl effect of the propellant by the swirl-coaxial injector, a wide and short flame was produced. Thus, it may be appropriate to employ the swirl-coaxial injector in thrusters having a limited physical dimension.

#### 초 록

본 연구에서는 모델연소실 내부 메탄-산소 확산화염의 연소특성을 분석하기 위해 추진제의 다양한 분사조건에서 연소실험을 수행하여 연소안정한계 측정 및 화염의 형상변이를 관찰하였다. 연구 결과, 추진제가 이론당량비 조건으로 접근할수록 높은 산소 Reynolds 수( $Re_o$ ) 구간에서도 안정적인 부상화염이 관찰되었으며, 가시화염의 길이는 증가하고, 부상높이는 감소하는 경향이 나타났다. 스윙 동축형 인젝터에 의한 추진제의 스윙효과로 인해 폭이 넓고, 길이가 짧은 화염이 생성되어 연소실 크기가 제한적인 추력기에서의 사용이 적합함을 확인하였다.

Key Words: Bipropellant(이원추진제), Methane(메탄), Swirl Coaxial Injector(스윙 동축형 인젝터), Diffusion Flame(확산화염), Combustion Characteristics(연소특성)

우주추진기관의 개발에 있어 획기적인 운용비용 절감을 위해 재사용 로켓의 필요성이 전세계적으로 거론되고 있으며, 친환경 추진제에 대한 연구수요 또한 증가하고 있다. 현재 운용되고 있는 우주발사체의 주 엔진에는 케로신(RP-1), 액체수소 등이 주로 사용되고 있다. 케로신의 경우, 재생냉각시 발생하는 큰 압력손실 및 높은 침탄(carbon deposit)으로 인해 재사용 액체로켓 엔진의 추진제로서 불리하다. 액체수소는 우수한 비추력 성능을 갖지만, 낮은 밀도, 액화온도 및 높은 반응성 때문에 추진제 저장탱크의 질량, 체적이 과도하게 증가하고 추가적인 안전장치가 필요하게 된다[1,2].

이에 반해, 액체메탄은 침탄이 적고, coking limit가 높아 냉각제로서의 성능이 우수하여 재생냉각 방식을 적용한 재사용 액체로켓엔진에 적합한 추진제이다. 또한, 메탄은 우주비행체의 행성간 탐사 및 심우주항행(deep space exploration) 등과 같은 임무수행 시, 행성의 현지 자원활용(in-situ resource utilization, ISRU)이 가능하고, 액체산소와 유사한 저온특성을 가져 추진제 취급이 용이하여 발사체 운용비용을 저감시킬 수 있어 경제성 측면에서 매우 유리하다 [3]. 메탄을 연료로 하는 로켓엔진의 기술개발이 해외에서 활발히 진행 중이지만, 아직 초기단계이므로 우주환경에서의 안정적인 연소성능, 추진제의 저장성 등에 대한 지속적인 연구개발이 수행되어야 한다. 특히, 연소실 내부 연소 불안정(combustion instability) 문제는 추진제 공급유량 및 추력 벡터의 불균일성 등을 초래하여 시스템의 성능을 저하시킬 뿐 아니라, 비행체에 적용된 정밀부품, 탑재체 등에 손상을 입히기 때문에 연소 불안정 타개를 위한 체계적인 연구가 반드시 필요하며, 이에 선행하여 기초적인 메탄-산소의 연소특성 연구는 필수적이라 할 수 있다.

현재까지 메탄-산소의 연소특성에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다. Moore[4]는 연소실 내부 메탄-산소 확산화염(diffusion flame)의 연소안정화에 대한 연구를 수행하였다. 전단 동축형 인젝터(shear-coaxial injector)에서 분사되는 추진제의 제트(jet) 속도 및 모멘텀 비에 따른 화염거

동을 분석하고 연소 안정한계를 고찰하였다. Fdida[5]는 인젝터의 형상 및 리세스 길이(recess length)가 연소특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였고, OH\* 자발광 가시화를 통해 화염 형상을 획득하였다. 스윙 동축형 인젝터(swirl-coaxial injector)로부터 생성된 화염은 제트 화염에 비해 보다 원뿔(conical)에 가까운 형상을 가지며 반경방향으로 넓은 화염이 형성되어 보다 안정적인 연소성능이 관찰되었다. 또한 인젝터의 리세스 길이는 화염의 폭과 길이, 압력강하량 등에 영향을 미쳐 저자는 연소 불안정성의 개선 가능성을 시사하기도 하였다. Pauly[6]는 OH\* 자발광 및 슐리렌(Schlieren) 가시화 기법을 이용하여 메탄-산소의 운동량 비 및 연소실 내부 압력이 메탄-산소 제트화염의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 추진제 질량유량이 증가할수록 화염이 안정화되는 시간이 길어지고, 압력이 상승할수록 화염의 부상높이(lift-off distance)가 감소하는 것을 확인하였다. Salgues[7]는 소형로켓엔진 내부 메탄-산소 화염의 연소특성을 분석하기 위해 shadowgraph 기법, OH\* 자발광, 평면레이저유도형광법(Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF), 그리고 레이저 광산란(laser light scattering) 기법 등을 활용하였다. 동일한 조건에서 스윙 및 전단 인젝터를 사용하여 실험을 각각 진행하였고, 인젝터 형상이 연소특성에 미치는 영향을 비교, 분석 하였다. 실험 결과, 스윙 인젝터는 전단 인젝터에 비해 추진제의 혼합 및 미립화 성능이 우수하여 상대적으로 높은 연소효율을 보였다.

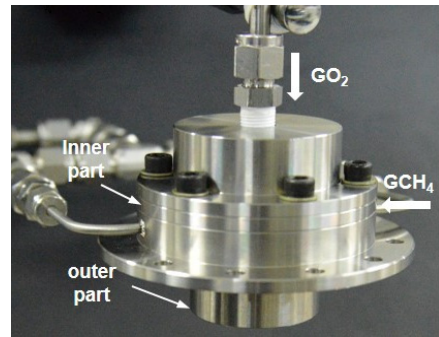
본 연구에서는 메탄을 연료로 하는 이원추진제 추력기(thruster)의 연구개발을 위한 선행연구로써, 화염의 직접이미지(direct image) 촬영과 이미지 후처리 과정(image postprocessing)을 통해 모델연소실(model combustor) 내부에서 스윙 동축형 인젝터에 의해 형성되는 메탄-산소 확산 화염의 연소안정화 연구 및 화염구조 변이를 분석하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

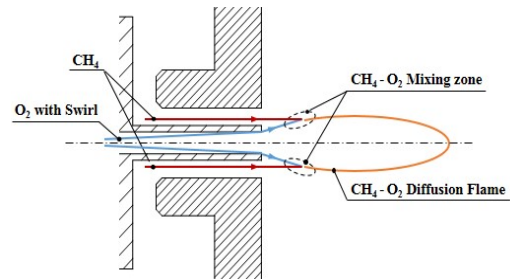
모델연소실 및 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 도시한다. 실험에 사용된 모델연소실 및 장비는 확산화염의 특성을 분석하기 위한 퀴츠 가시창 (quartz window), 압력센서(pressure transducer), 열전대(thermocouple), 인젝터, 토치 점화기(torch ignitor), 노즐(nozzle), 그리고 데이터수집제어시스템(Data Acquisition & Control System, DACS) 등으로 구성된다. 모델연소실 내부는 준원통형(quasi-cylindrical) 형상을 가지며, 길이직경비는 3.1이다. 연소실 내부 메탄-산소 확산화염의 초기 점화를 위한 토치 점화기는 그 내부에서 혼합된 메탄과 산소에 spark plug로 고전압의 외부에너지를 가하여 작동시킨다. 연소과정에서 연소실 내부 압력을 상승시키기 위해 후단에 노즐을 설치하였다. 토치 점화기 및 연소실 내부 추진제 공급유량을 조절하기 위한 질량유량제어기(Mass Flow Controller, MFC), 솔레노이드 밸브(solenoid valve), 그리고 각종 센서 등의 제어는 DACS에 의해 이루어진다. 높은 연소온도로 부터 발생할 수 있는 연소실의 변형/균열을 방지하기 위한 냉각채널(cooling channel)이 연소

실 벽 내부에 형성되어 있고, 본 연구에 앞서 수행된 예비실험을 통해 연소실의 냉각성능을 검증하였다[8]. 시험대(test stand)는 모델연소실을 수평/수직 방향으로 설치하여 연소실험을 수행할 수 있도록 설계되었으며, 본 실험에서는 화염의 배출방향이 아래로 향하도록 수직으로 모델연소실을 설치하였다.

Fig. 2(a)는 연소실험에 사용된 스윙 동축형 인젝터이다. 인젝터의 중심에서는 스윙이 가해진 산화제가 접선방향 속도성분을 가지고 분사되고,



(a) Injector assembly



(b) CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> mixing mechanism

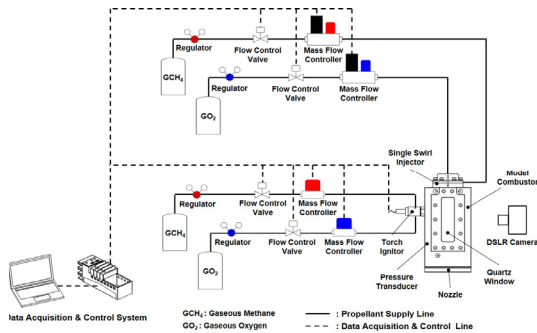


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

Fig. 2 Configuration of swirl-coaxial injector.

Table 1. Experimental conditions.

$(O/F_{nom})$	O <sub>2</sub> - CH <sub>4</sub> Equivalence Ratio	Chamber Pressure, $P_c$ (psi)	Reynolds No. of O <sub>2</sub> , $Re_o$	Reynolds No. of CH <sub>4</sub> , $Re_F$
19.8 - 20.1	0.62 - 0.63	25.64 - 36.55	12,911 - 25,516	3,788 - 7,705
23.9 - 24.2	0.75 - 0.76	27.67 - 47.22	15,347 - 36,085	3,820 - 8,848
27.7 - 28.6	0.87 - 0.89	31.26 - 53.36	17,865 - 41,836	3,837 - 8,894
31.9 - 32.8	0.98 - 1.01	33.55 - 58.46	20,025 - 47,275	3,851 - 8,971

산화제 주변에서 환형으로 연료제트(fuel-jet)가 분사되도록 제작되었다. 선행연구 결과[9]로부터 추진제간 혼합이 인젝터 외부에서 일어나는 조건인 리세스 길이( $l_r$ )가 존재하지 않는  $l_r/d_i=0$ 로 설정하였다. 여기서  $d_i$ 는 Fig. 2(b)에서 보듯이 산화제(O<sub>2</sub>)가 분사되는 오리피스(orifice)의 직경이다.

아래 Eq. 1과 같이, 확산화염 형성에 주요한 영향을 미치는 산화제-연료 모멘텀 플럭스 비(momentum flux ratio,  $(O/F)_{mom}$ )와 Reynolds 수를 변화시키면서 연소실험을 진행하였고, 주요 실험조건들을 Table 1에 요약한다.

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

연소실험에 적용된 점화 시퀀스(sequence) 및 노즐에 의한 연소실 압력상승 효과를 Fig. 3에 나타낸다. 먼저 토치 점화기를 작동시켜 점화에 필요한 충분한 열에너지를 공급한 후에 추진제를 분사하여 연소실 내부 온도 및 압력이 정상상태(steady state)에 도달할 때까지 실험을 진행하고, 최종적으로 질소를 이용해 연소실 내부를 퍼지(purge)한다. 측정된 연소실 내부 압력의 경우, 토치 점화기 작동과 추진제 분사 직후에 급격히 압력이 상승한다. 연소실 내부로 추진제의 공급과 함께 증가된 압력은 일정시간이 지나면

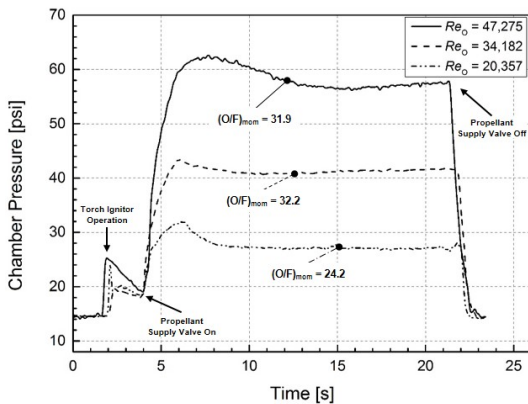


Fig. 3 Pressure variation and ignition sequence with time in the model combustor.

정상상태에 도달하게 된다. 추진제  $(O/F)_{mom}$  및 산소의 Reynolds 수( $Re_o$ )가 증가함에 따라 연소실 내부 압력은 추진제 공급유량의 증가로 인해 상승하였고, 실험조건에 따른 압력과 산소 및 메탄의 Reynolds 수 변화 등은 Table 1에 요약되어 있다.

모델연소실 내부에서 형성된 메탄-산소 확산화염의 형상은 DSLR 카메라를 통해 획득하고, MATLAB® (R2015a)을 이용한 이미지 후처리 과정을 거쳐 연소특성 분석에 활용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

추진제 분사조건에 따른 메탄-산소 확산화염의 연소안정화 연구를 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 도시한다. 일반적인 저속구간의 난류확산화염에서는 크게 부착화염(anchored flame), 부상화염(detached flame), near-blowout 화염 영역으로 구분되지만[4], 본 연구에서는 인젝터 표면에서 떨어져 안정적인 연소가 발생하는 부상화염 영역과 추진제 혼합조건의 불균일로 인해 화염이 생성되지 않는 blow-off 영역이 관찰되었다. 낮은 산소의  $Re_o$  조건에서는 넓은  $(O/F)_{mom}$  영역에 걸쳐 안정적인 부상화염 영역이 관찰되지만,  $Re_o$ 가 증가함에 따라 연료과농

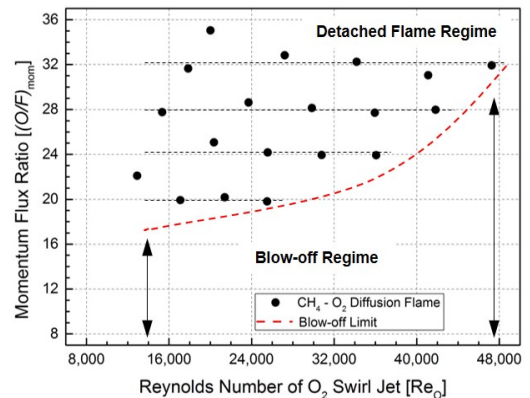


Fig. 4 Stability regime of CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> diffusion flame in terms of  $(O/F)_{mom}$  and  $Re_o$ .

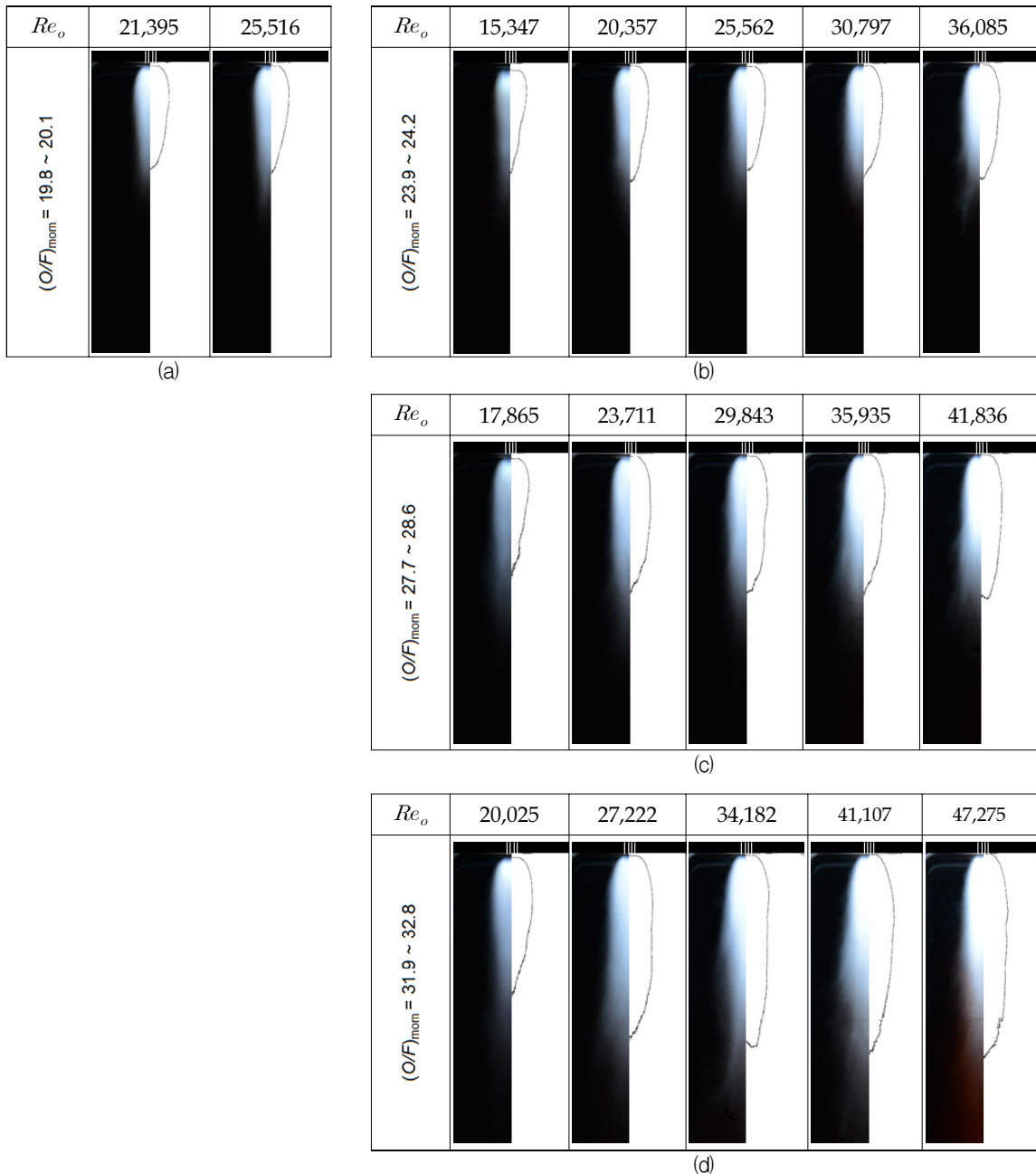


Fig. 5 Direct-flame and flame-edge images of methane-oxygen diffusion flame with various propellant supply conditions.

(fuel-rich) 조건( $(O/F)_{mom} = 19.8 \sim 28.6$ )에서는 blow-off 영역이 확장되고 있다. 이는 동일한  $(O/F)_{mom}$  조건에서 추진제 가스의 속도가 증가하게 되면 연소과정에서 대류물질전달을

(convective mass transfer rate)이 상승하고, 화학반응율(chemical reaction rate)이 상대적으로 감소하여 화염의 난류강도 증가에 따라 불완전한 연소가 발생하는 혼합조건을 갖게 되기 때문

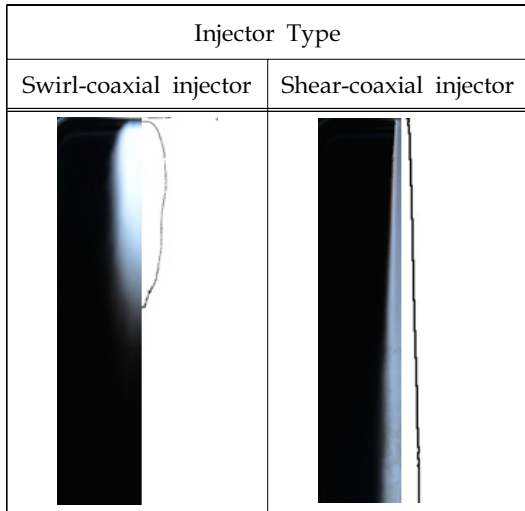


Fig. 6 Diffusion flame shape according to the injector type.

이다. 또한 낮은  $Re_o$  구간에서는 추진제의 유동 정체시간(flow residence time)이 길어 인젝터 부근에서 화염이 형성되지만,  $Re_o$ 가 증가하게 되면 그 정체시간이 짧아져 추진제간 혼합이 인젝터 후단에서 형성되어 불안정한 연소가 발생하거나 화염이 생성되지 않는다. 하지만 이론당량비( $(O/F)_{mom} \approx 32$ ) 조건에 근접할수록 메탄-산소간 혼합조건의 영향이 줄어들고, 화학반응률이 증가하여 높은 산소  $Re_o$  조건에서도 안정적인 부상화염이 관찰된다.

다양한 분사조건에서 관찰된 화염형상을 Fig. 5에 나타낸다. 각각의 그림에서 좌측은 DSLR 카메라를 이용해 획득한 확산화염의 직접이미지이고, 우측은 이미지 후처리 과정을 통한 가시화염(visible flame)의 선단(edge) 형상이다. 이미지 후처리 과정은 이미지를 그레이 스케일(gray scale)로 변환한 후에 이진화(binartization) 과정을 거쳐 밝기 강도가 높은 화염의 코어(core) 부분만 측정하기 때문에 선단 형상은 직접이미지에 비해 짧게 나타나고 있다. 제시된 확산화염에서 부상화염이 생성되는 원인은 인젝터 형상에 기인한다. 즉, Fig. 2(b)와 같이, 산소는 스월을 가지고 분사되어 추진제간 혼합영역(mixing zone)이 인젝터 외부에서 형성되기 때문이다. 부

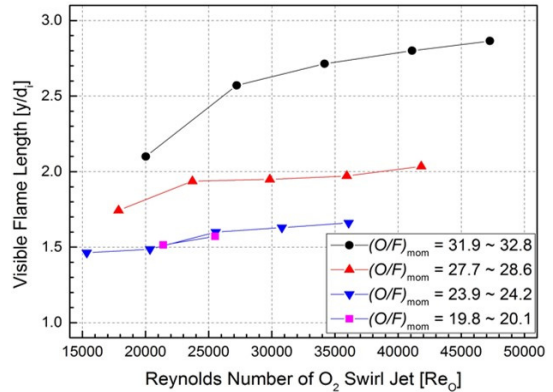


Fig. 7 Variation of visible flame length according to  $O_2$  Reynolds number and  $(O/F)_{mom}$ .

상화염의 경우, 부착화염에 비해 인젝터 표면으로부터 떨어지게 되므로, 장시간 작동시 연소가스의 과도한 열전달로 인한 인젝터 및 추진제 공급시스템의 열손상 및 파괴를 방지할 수 있다. 그리고 스월이 가해진 산화제는 접선방향의 속도성분을 갖는 유동에 의해 화염 내부에서 재순환 영역을 형성하여 추진제의 혼합을 촉진시킨다. 따라서 Fig. 6에서와 같이, 스월 동축형 인젝터에 의해 형성되는 확산화염은 전단 동축형 인젝터의 그것에 비해 폭이 넓고 길이가 짧아지게 된다. 이러한 화염형상은 노즐에서의 직접적인 열손상 가능성을 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 인젝터로부터 분사되는 산화제의 스월강도를 조절하여 화염의 폭과 길이 및 연소안정한계를 제어할 수 있기 때문에[12] 연소실의 크기가 제한적인 추력기의 경우, 스월 동축형 인젝터를 사용하는 것이 목표성능 구현에 있어 보다 적합하다고 할 수 있다.

부상화염이 인젝터 표면으로부터 떨어진 거리인 부상높이는 수 mm에 불과하지만 이론당량비 조건에 근접할수록, 그리고  $Re_o$ 가 증가할수록 그 높이가 감소하는 경향을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이, 이론당량비 근처에서는 추진제의 확산율보다 화학반응율이 압도적일 뿐만 아니라, 산소 공급량의 증가로 인해 스월강도가 강화되어 인젝터 표면에서 화염의 재순환 영역이 확장되기 때문이다. 또한 Pauly

등[6]의 연구결과에서도 확인되듯이, 연소실 내부 압력이 증가할수록 부상높이가 감소하는 경향을 Fig. 5에서 관찰할 수 있다.

Fig. 7에서는 측정된 가시화염의 길이를  $Re_o$  및  $(O/F)_{mom}$ 의 변이에 따라 도시하고 있다. 그림에서는 이론당량비 조건으로 접근할수록 화염의 길이가 증가하고 있는데, 이는 산소의 공급량 증가에 따라 메탄-산소의 화학반응영역이 확장되고, 내부 압력의 증가로 인해 부력의 영향이 줄어들기 때문이다. 추가적으로, Kim[10]은 메탄-산소의 연소과정에서 연소실 압력이 증가함에 따라 연소반응물의 해리율이 감소하고, 화염온도가 상승하게 되어 추진제간 화학반응영역이 확대되는 현상을 제시하였고, Choi[11]의 실험적 연구결과를 통해 검증된 바 있다. 그림에서는 또한  $Re_o$ 가 증가할수록 화염의 길이가 길어지고 있지만, 그 증가폭은 줄어든다는 사실도 관찰된다. 난류화염에서 화염의 길이는 추진제 제트의 속도와 무관하게 일정한 길이가 유지되거나, 길이 증가율이 감소한다고 알려져 있는데[12] 이는, 메탄-산소의 확산 및 혼합효과가 포화 상태에 이르게 되면서, 추진제의 증가속도를 쫓아가지 못하기 때문인 것으로 판단된다[11].

#### 4. 결 론

모델연소실에서 메탄-산소 확산화염의 연소특성을 분석하기 위해 추진제의 다양한 분사조건에서 실험이 진행되었다.

추진제의  $(O/F)_{mom}$ 와 산소의  $Re_o$  증가에 따라 연소실 내부 압력은 추진제 공급유량의 증가로 인해 상승하였고, 안정적인 연소실험을 위한 점화 시퀀스가 검증되었다.

메탄-산소 확산화염의 직접이미지를 획득하고, 이미지 후처리 과정을 통해 얻은 결과로부터 연소안정화 연구 및 화염구조 변이를 분석하였다. 메탄-산소 이론당량비( $(O/F)_{mom} \approx 32$ ) 조건으로 접근할수록 메탄-산소간 혼합비의 영향이 줄어들고, 화학반응율이 증가하여 높은 산소  $Re_o$  구간에서도 안정적인 부상화염이 관찰되었다. 여기서

부상화염의 생성은 스윙 동축형 인젝터의 분사 특성으로 인해 추진제간 혼합위치가 인젝터 외부에서 형성되는 사실에 기인한다. 다양한 분사 조건에서 관찰된 화염형상을 분석한 결과 가시화염의 길이는 이론당량비 조건으로 근접할수록 증가하고, 부상높이는 감소한다는 사실을 확인하였다. 이는 산소의 공급량 증가에 따라 메탄-산소의 화학반응영역이 확장되고, 내부 압력의 증가로 인해 연소반응물의 해리율 감소와 화염온도 상승으로 인한 연소 화학반응영역의 확장에 기인한 것으로 판단된다. 스윙 동축형 인젝터에 의해 형성된 부상화염은 연소가스에 의한 과도한 열전달을 방지하여 인젝터 및 추진제 공급계통의 열손상 및 파괴 방지에 유리할 수 있다. 또한 스윙 인젝터의 경우, 추진제의 스윙강도 조절에 의해 화염의 폭, 길이 및 연소안정한계를 제어할 수 있어, 연소실 크기가 제한되는 추력기에서의 적용이 적합할 것으로 판단된다.

#### 후 기

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

#### References

1. Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, 8th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 2010.
2. 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.
3. Bae, S.H., Jung, H. and Kim, J.S., "A

- Preliminary Configuration Design of Methane/Oxygen Bipropellant Small-rocket-engine through Theoretical Performance Analysis," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 47-53, 2015.
4. 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.
  5. Fdida, N., Vingert, L., Ordonneau, G., Ristori, A. and Brossard, C., "Characterization of a Double Swirl Injector in a LOX/LCH<sub>4</sub> Fueled Combustor on Mascotte Test Bench," *ONERA-DLR Aerospace Symposium*, Palaiseau, France, May 2013.
  6. Pauly, C., Sender, J. and Oschwald, M., "Ignition of a Gaseous Methane/Oxygen Coaxial Jet," *Progress in propulsion Physics*, Vol. 1, pp. 155-170, 2009.
  7. Salgues, D., Mouis, A.G., Lee, S.Y., Kalitan, D. and Santoro, R., "Shear and Swirl Coaxial Injector Studies of LOX/GCH<sub>4</sub> Rocket Combustion Using Non-Intrusive Laser Diagnostics," *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 2006-757, Jan. 2006.
  8. Bae, S.H., Hong, J.Y., Bae, D.S. and Kim, J.S., "A Preliminary Experiment for the Investigation of Combustion Characteristics on the Methane-oxygen Diffusion Flame," *Proceedings of the 2016 KSPE Fall Conference*, Gangwon-do, Korea, pp. 892-895, Dec. 2016.
  9. Bae, S.H., Kwon, O.C. and Kim, J.S., "Spray Characteristics of Swirl-coaxial Injector According to the Recess Length and Injection Pressure Variation," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 68-76, 2016.
  10. Kim, J.H., Jung, H. and Kim, J.S., "Analysis of the Theoretical Performance Characteristics for Methane-fuel Bipropellant Rocket Engine," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 1-7, 2014.
  11. Choi, S., Kim, T.Y., Kim, H.K., Koo, J.Y. and Kwon, O.C., "Effects of Pressure Variation on the Combustion Characteristics of a Gaseous CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> Bipropellant in a Model Combustor," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 1, pp. 63-71, 2017.
  12. Kuo, K.K., *Principles of Combustion*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 2005.