



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.3.041>

## 전단 동축형 인젝터를 통해 분사된 기체메탄-기체산소 확산화염의 연소특성

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

### Combustion Characteristics of a Gaseous Methane-Gaseous Oxygen Diffusion Flame Sprayed by a Shear Coaxial Injector

Joon Yeol Hong<sup>a</sup> · Seong Hun Bae<sup>a</sup> · Oh Chae Kwon<sup>b</sup> · Jeong Soo Kim<sup>a,\*</sup>

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

<sup>b</sup>School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

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

#### ABSTRACT

The combustion characteristics of gaseous methane-gaseous oxygen, an eco-friendly bipropellant injected by shear coaxial injector, were investigated. Flame was photographed under various combustion conditions using a DSLR camera, and the characteristics of the flame shape was quantified by image post-processing. From the view point of stabilization, the diffusion flame could be divided into anchored flame regime and blow-off regime. As the oxidizer Reynolds number ( $Re_o$ ) increased, a probability of the formation of anchored flame increased with the length of flame. The shear coaxial injector used in this experiment was found to require a large length-to-diameter ratio of combustion chamber because it formed a relatively long flame in the injection direction due to a poor mixing depending only on the momentum diffusion of two propellant jets.

#### 초 록

전단 동축형 인젝터를 통해 분사된 친환경 이원추진제 기체메탄-기체산소의 연소특성을 규명하기 위한 연구를 수행하였다. DSLR카메라를 이용하여 다양한 연소조건에서 화염을 촬영하였고, 이미지 후처리 기법을 통해 화염형상을 정량화한 후 그 특성을 분석하였다. 안정화 관점에서 확산화염은 anchored flame regime과 blow-off regime으로 구분될 수 있었으며, 산화제 레이놀즈 수( $Re_o$ )가 증가함에 따라 부착화염의 형성, 화염의 길이가 증가하는 경향을 나타냈다. 본 실험에 이용된 전단 동축형 인젝터는 추진제 제트의 운동량 확산에만 종속하고 그리 양호하지 않은 혼합으로 인해 분사방향으로 길이가 긴 화염을 형성하게 되므로 보다 큰 연소실 길이직경비가 요구됨을 확인할 수 있었다.

**Key Words:** Combustion Stability Limit(연소안정한계), Diffusion Flame(확산화염), Anchored Flame(부착화염), Flow Residence Time(유동정체시간), Momentum Diameter(운동량지름)

Received 24 March 2017 / Revised 8 May 2017 / Accepted 12 May 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

연료와 산화제를 추진제로 사용하는 이원추진제(bipropellant) 로켓엔진은 화학식 액체추진시스템(liquid propulsion system) 중에서 가장 높은 비추력 및 추력 성능과 다양한 추진제 공급량 조절에 기인하는 다양한 추력대의 작동특성을 가지고 있다. 로켓엔진은 추진제를 저장하기 위한 저장탱크(tankage), 추진제공급을 위한 터보펌프(turbopump), 연소실(combustion chamber), 추진제 분사 장치(injector) 그리고 노즐(nozzle) 등으로 구성되며, 이원추진제 로켓엔진은 발사체 시스템(launch vehicle system), 우주비행체(spacecraft), 우주정거장(space station), 인공위성(satellite), 위치자세제어시스템(Divert and Attitude Control System, DACS) 뿐 아니라, 탐사선 착륙을 위한 역추진 로켓(retro-rocket) 등에 이용되고 있다[1]. 현재 운용되는 대부분의 액체로켓엔진은 kerosene/LOx 또는 LH<sub>2</sub>/LOx를 추진제로 사용하며, LH<sub>2</sub>/LOx 추진제 조합은 타 이원추진제에 비해 월등히 높은 비추력(specific impulse, Isp), 무독성, 친환경의 장점을 지니지만 낮은 밀도와 액화점으로 인한 대용량 저장탱크의 필요성, 높은 반응성에 기인하는 부가적인 안전장비의 설치에 따른 무게 및 부피증가의 단점을 지니고 있다[2]. 이에 반해 메탄을 연료로 하는 추진제는 LH<sub>2</sub>/LOx 이원추진제 다음으로 우수한 비추력 성능, 안정성, 저장성의 장점을 가진다. 또한, kerosene/LOx 추진제를 이용하는 로켓엔진과 비교했을 때, 연소실의 온도가 더 낮음에도 불구하고 메탄의 특성속도(characteristic velocity, C\*)와 비추력 성능이 앞서는 것으로 평가되고, 운용비용 측면으로는 kerosene보다 3배 이상 경제적이며, 매우 높은 침탄한계(coking limit)로 인한 엔진의 재사용성, 현지자원활용(in-situ resource utilization, ISRU), 무독성, 냉각제(coolant)로서의 우수한 성능 등과 같은 특징으로 인해 세계적으로 LCH<sub>4</sub>/LOx 이원추진제가 각광받고 있다[3]. 이러한 장점으로 인해 메탄을 연료로 하는 로켓엔진의 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직 초기연구단계에 있다. 특히, 불안정한 추진제의 공급, 유동, 연소과정(combustion process), 연소실 음향모드(chamber acoustic

modes) 등 다양한 이유로 발생하는 연소불안정성(combustion instability)은 추력성능의 저하 및 엔진 부품의 손상 등을 초래하므로 연소불안정성 해결을 위해 체계적인 연구가 수행되어야 한다. 이에 따라 액체메탄-액체산소의 선행연구로서 기체메탄-기체산소 연소특성의 규명은 필수적이라 할 수 있다. M. Chahine 등[4]은 메탄-공기 화염에 산소의 추가 공급에 따른 연소특성 변이에 관한 연구를 수행하였고 그 결과 화염온도 상승, 연소효율 증대, 부상높이의 감소 등을 확인하였다. T. Fumiaki 등[5]은 메탄 및 탄화수소 확산화염(diffusion flame)의 소화 및 연소안정성에 대한 해석을 위해 원형동축버너를 이용한 실험적 연구를 수행하였고 산화제, 연료의 분사속도 조건과 층류 및 난류영역에 따른 연소안정한계를 도출하였다. D. Jeffrey 등[6]은 전단 동축형 인젝터(shear coaxial injector)를 통해 분사되는 메탄-산소의 위치, 산화제 레이놀즈 수(Re<sub>o</sub>) 및 추진제 운동량 비에 따른 연소안정한계와 각 화염형태에 대한 경계를 수식적으로 도출하였다.

본 연구는 이원추진제 추력기(thruster)에 사용되는 메탄의 연소특성을 규명하기 위한 선행연구의 일환으로, 모델 연소실 내 전단 동축형 인젝터를 통해 분사되는 기체메탄-기체산소 화염의 이미지 후처리(image postprocessing)를 통해 화염특성을 분석하고 연소안정한계 도출 과정을 기술한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 기체메탄-기체산소의 연소특성 연구를 위한 모델연소실 및 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 토치점화기(torch ignitor), 밸브(valve), 역화방지기(back-fire protector), 질량유량제어기(Mass Flow Controller, MFC), 데이터 수집 및 제어 장치(Data Acquisition and Control System, DACS) 등으로 이루어지며, 모델연소실은 추진제 혼합을 위한 전단 동축형 인젝터(shear-coaxial injector), 연소실(combustion chamber), 노즐(nozzle) 등으로 구성된다. 연소실 내부 형상

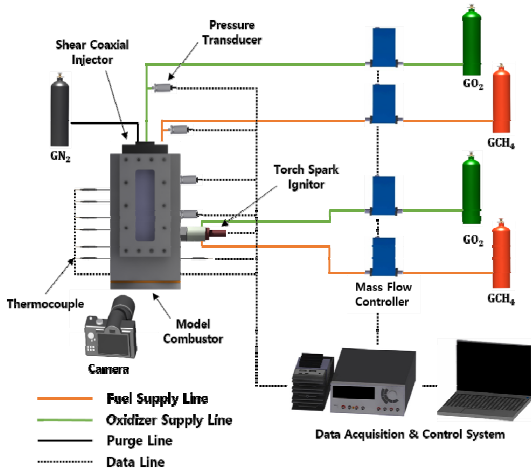
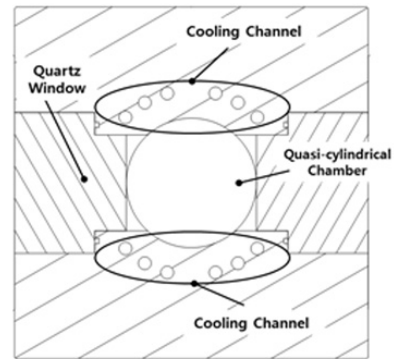


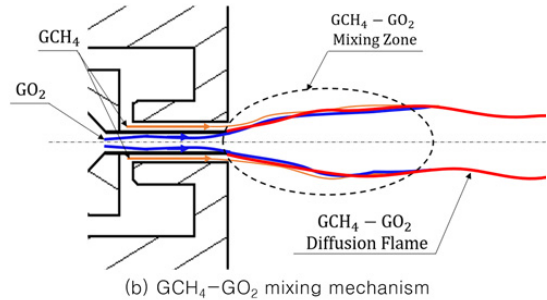
Fig. 1 Schematic of experiment setup.

(Fig. 2(a))은 준 원통(quasi-cylindrical) 형상으로 내부 화염관측을 위한 퀴즈가시창(quartz window), 연소실 및 센서(sensor) 등의 열 손상을 방지하기 위한 냉각채널(cooling channel)로 구성된다. Fig. 2(b)는 실험에 사용된 전단 동축형 인젝터를 통해 분사된 추진제의 혼합 메커니즘을 도시한다. 인젝터 중심에서는 산화제가, 그 주변으로는 환형의 연료제트(fuel-jet)가 각각 다른 속도성분을 가지고 분사되어 운동량확산에 의해 추진제간 혼합이 이루어지며, mixing zone 부근에서 확산화염이 발생된다.

본 실험의 연소순서는 Fig. 3에 도시하며, 산화제의 레이놀즈 수( $Re_o$ )와 연소순서에 따른 연소실 압력변화를 Fig. 4에 나타낸다. Ignition delay에 의존하는 토치화염의 압력은 점화 시 큰 압력을 발생시킨다. 따라서 모델연소실의 손상을 최소화하며, 연료와 산화제의 충분한 혼합을 위해 추진제를 2초간 공급하고, 점화플러그(spark plug)를 통한 고전압의 외부에너지를 이용하여 점화하였다. 그 후 주 추진제(primary propellant)를 주입하여 14초간 연소실험을 진행한 이후에 추진제공급을 차단하고 질소가스를 이용하여 공급유로 및 연소실의 잔류가스를 배출(purge)시킨다. 연소실의 압력은 주 추진제 연소 시에 큰 값으로 발생하며,  $Re_o$ 의 증가에 따라 압력이 상승하는 것을 확인하였다.



(a) Model combustor cross section



(b) GCH<sub>4</sub>-GO<sub>2</sub> mixing mechanism

Fig. 2 Configuration of the model combustor and shear-coaxial-injector.

확산화염의 안정화여부에 큰 영향을 미치는 변수인 추진제 모멘텀 플럭스 비(momentum flux ratio,  $(O/F)_{mom}$ )와 추진제의 레이놀즈 수에 따른 연소실험을 수행하기 위해 산화제와 연료의 공급량을 조절하였고 질량비( $(O/F)_{mass}$ )에 따른 실험 조건을 Table 1에 나타낸다. 연소실 압력, 추진제 공급압력을 측정하여 추진제 분사속도를 산출하는데 이용되었으며, 다음의 Eq. 1을 통해  $(O/F)_{mom}$  값을 도출하였다.

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

화염은 DSLR 카메라를 이용하여 직접이미지를 촬영하였고, 화염이미지를 그레이 스케일(gray scale)로 변환, 이미지 밝기강도(intensity), 선예도(sharpness) 조절, 이진화(binartization) 과정 등을

통해 이미지 후처리(post-processing)를 하여, 화염특성을 정량화하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소안정한계

일반적인 확산화염은 Fig. 5와 같이 부착화염(anchored flame), 부상화염(detached flame), 그리고 near-blowout 화염 등, 크게 3가지 형태로 나타나며, 추가로 화염이 유지되지 않는 blow-off 상태 등으로 이루어진다. 부착화염은 인젝터의 출구위치에 화염이 부착된 형태로 연소 시 발생하는 진동이 매우 작으며, 안정적인 연소를 유지한다. 또한, 화염 관측 시 일말의 부상거리가 있지만 인젝터와 화염사이 희미한 화염인 faint flame이 존재하는 경우도 부착화염으로 분류된다. 인젝터 출구로부터 일정거리 이격되어 연소

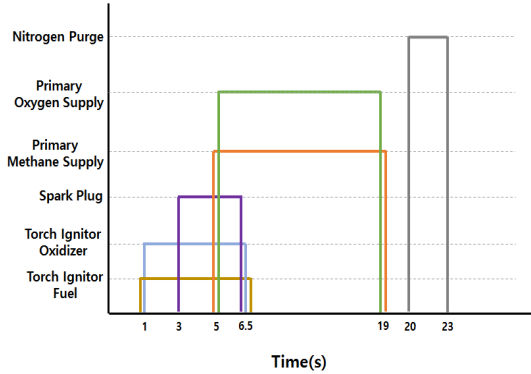


Fig. 3 Sequence of combustion experiment.

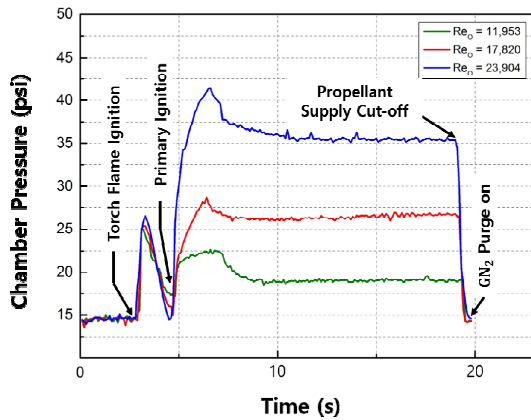
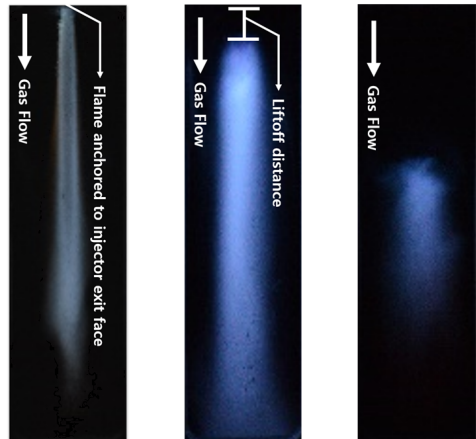


Fig. 4 Pressure variation with combustion sequence of methane and oxygen.



(a) Anchored Flame (b) Detached Flame (c) Near-blowout Flame

Fig. 5 Categorization of diffusion flame[6].

Table 1. Experimental conditions.

$(O/F)_{mass}$	$\frac{(O/F)_{mass}}{(O/F)_{st.mass}} = \Phi$	Reynolds No. of Oxidizer, $Re_o$	$(O/F)_{mom}$	Chamber Pressure, $P_c$ (psi)
1.0	0.250	8,569 - 10,118	5.470 - 6.530	14.96 - 15.17
1.5	0.375	10,064 - 15,037	10.63 - 12.07	14.98 - 15.33
2.0	0.500	10,314 - 17,178	17.37 - 18.58	18.76 - 24.16
2.5	0.625	8,811 - 21,346	19.73 - 26.02	18.51 - 34.31
3.0	0.750	10,110 - 30,451	23.48 - 26.55	17.68 - 46.18
3.5	0.875	11,953 - 36,515	26.12 - 30.79	19.48 - 59.41
4.0	1.000	13,560 - 40,234	31.02 - 42.20	18.62 - 67.52

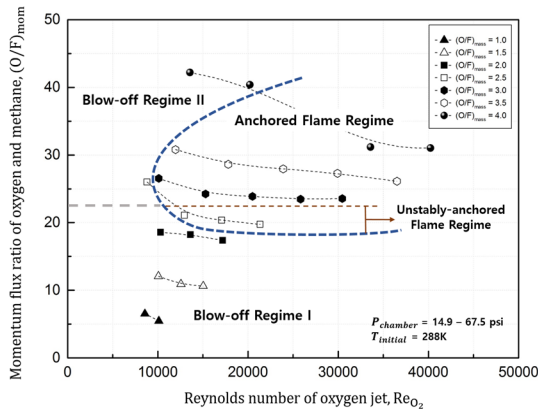


Fig. 6 Combustion flame regimes according to oxygen reynolds number and oxygen methane momentum ratio.

하는 부상화염의 경우, 약간의 진동이 발생하나, 부상된 상태에서 연소가 진행되어 인젝터의 열 손상이 적다는 장점을 갖는다. Near-blowout 화염은 인젝터 직경의 10배 이상인 매우 큰 부상 거리(lift-off distance)를 가지며 진동, 넓은 화염 폭 및 난류유동에 의한 화염의 찌그러짐 현상이 나타나는 전형적인 불안정 연소현상을 보인다.

Fig. 6은 기체메탄-기체산소 확산화염의 연소 안정한계에 대한 결과를 나타낸다. H. Shengteng 등[7]에 의하면  $(O/F)_{mom}$  증가에 따라 화염은 blow-off, near-blowout flame, detached flame, anchored flame 순으로 화염의 거동이 진행된다고 하였으나, 본 연구에서의 화염은 near-blowout flame과 detached flame의 천이과정 없이 blow-off에서 anchored flame으로 직접 진행되는 것이 관측되었다.

Blow-off regime I은  $(O/F)_{mom} < 21.1$ ,  $Re_o < 17,178$ 이며,  $(O/F)_{mass}$ 는 2.5 이하로 연료와 산화제의 이론반응비(stoichiometric ratio,  $(O/F)_{mass} = 4$ )로부터 크게 벗어난 조건이다. 또한,  $(O/F)_{mom}$ 이 낮은 조건임을 고려하면, 연료와 산화제의 미미한 속도차이로 원활하지 않은 추진제 혼합에 의해 화염이 유지되지 못하는 것으로 예측된다[6]. Blow-off regime II는 연료과농 ( $(O/F)_{mass} = 2.5 \sim 3.5$ ) 및 이론반응비 조건을 가지는 영역( $(O/F)_{mom} > 21.1$ )으로 높은  $(O/F)_{mom}$

영향에 의해 대류물질전달율(convective mass transfer rate)이 상승하고, 상대적으로 화학반응율(chemical reaction rate)이 감소하는 것으로 판단된다. 이에 따라 불완전한 연소조건에 의해 blow-off가 발생하는 것으로 보인다.

Anchored flame regime은  $(O/F)_{mom} > 21.1$ ,  $Re_o > 10,110$ 에서 안정적인 부착화염이 발생하는 영역이다.  $(O/F)_{mass} = 2.5$ 에서는 부착화염과 blow-off 모두 나타나는 unstably-anchored-flame regime이 존재한다. 이 조건에서 blow-off는 전술한 원인에 기인하는 것으로 판단되고, blow-off regime 보다 높은  $Re_o$ 에서 부착화염이 형성되나, blow-off가 공존하는 것으로 보아 blow-off regime과 anchored flame regime의 경계로 판단된다. 부착화염은 주로 연료과농 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 속도차이에 기인하는 추진제간 전단력에 의한 혼합과 flame holder의 역할을 하는 인젝터 출구 부근에서의 와류(vortex flow) 및 재순환영역(recirculation zone)으로 인해 안정적인 고온 영역이 확보, 유지되기 때문이다[6].

### 3.2 확산화염 이미지분석

DSRL 카메라를 이용하여 획득한 화염의 직접 이미지와 이진화된 화염형상을 비교, 분석하여 화염길이를 도출하였다. 다양한 화염길이 측정법 중 실험자의 관측에 의해 정의되는 가시적인 방법과 촬영된 사진으로부터 개개의 순간적 가시 화염의 길이를 평균하는 방법[8]을 통해  $(O/F)_{mom}$ 과  $Re_o$ 에 따른 메탄-산소 확산화염을 형상화하였고, 이진화한 화염이미지를 픽셀단위로 보정하여, 화염길이를 측정하였다.

Fig. 7은 동일 인젝터 직경,  $Re_o > 10,110$ ,  $(O/F)_{mass} = 2.5 \sim 4.0$ 의 실험조건에서  $Re_o$ 에 따른 화염직접이미지 및 이진화이미지를 도시하고 있다. 화염은 모두 부착화염으로 나타나는데, 이는 전단 동축형 인젝터를 통한 추진제의 혼합방식에 기인한다. 노즐방향으로 분사 시 발생하는

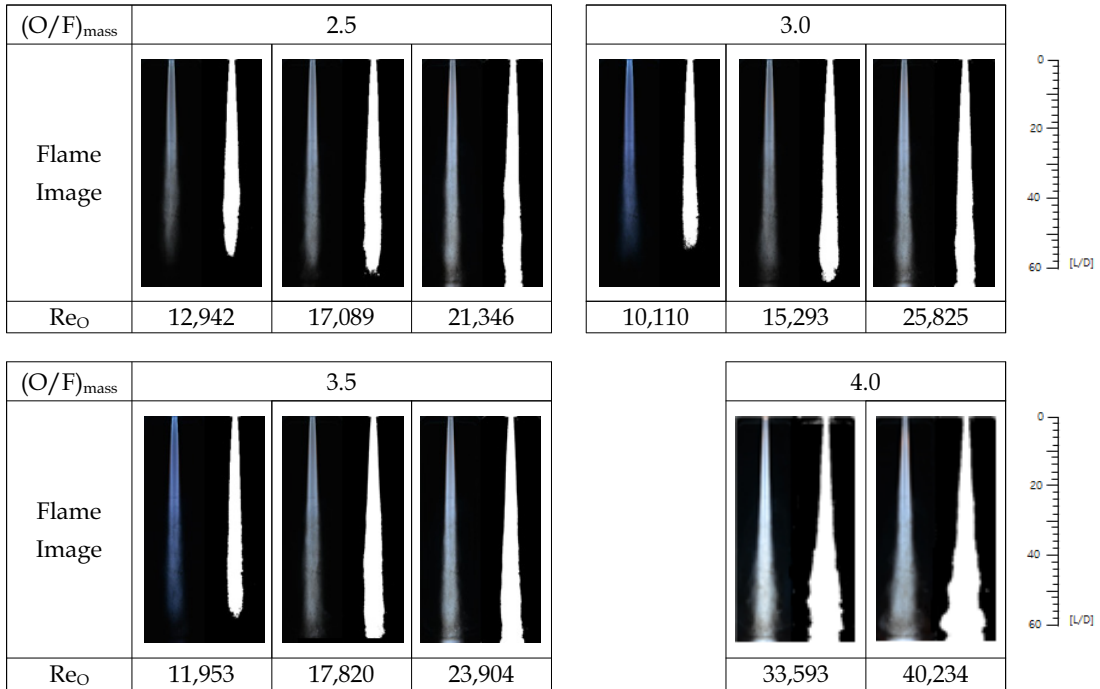


Fig. 7 Direct and binary image of the gaseous methane-oxygen flame according to the oxygen Reynolds number and propellant mass ratio.

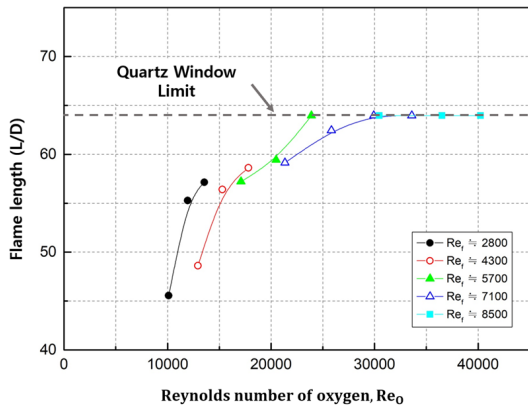


Fig. 8 Flame length according to oxygen Reynolds number.

연료와 산화제의 속도차이로 인해 인젝터 출구에서 재순환영역이 생성되어 좁고 길이가 긴 형태의 화염이 인젝터에 부착되어 발생한다. 이 경우 인젝터 표면에 화염이 부착되어 추진제가 연소되므로, 장시간 연소 시 인젝터의 열적 손상이 발생할 수 있다. 또, 긴 화염으로 인해서 스월

동축형 인젝터를 사용하는 추력기에 비해 상대적으로 큰 연소실의 길이직경비가 요구된다. 따라서 엔진의 크기가 제한적인 추력기 설계에 있어 단점이 되는 요소로 작용 할 수 있다.

Fig. 8에서는 연료의 레이놀즈 수( $Re_F$ )와  $Re_O$ 에 따른 화염길이(flame length,  $L/D$ ) 변이를 나타내었고, 여기서  $D$ 는 인젝터의 산화제 오리피스 직경이다. 화염길이는  $Re_F$  및  $Re_O$ 의 증가에 따라서 상승하고 있으며,  $Re_O > 24,000$  부근영역 부터 퀴즈가시창한계(quartz window limit)를 초과하는 화염길이가 발생하였다.

일반적으로 확산화염의 길이는 추진제 체적유량에 따라 층류와 천이영역에서는 큰 변화를 보이지만 난류영역에서는 그 영향이 미미하고, 인젝터직경이 화염길이에 미치는 영향이 크다고 알려져 있다. 본 실험의 경우, K. Wohl의 선행 연구[9]와 상반되는 결과로 나타나는데, 이는 실험에서 사용된 산화제가 공기가 아닌 반응성이 매우 뛰어난 순 산소 사용에 따른 연소안정한계의 확장의 영향으로 판단된다[10]. 또한, 기체추



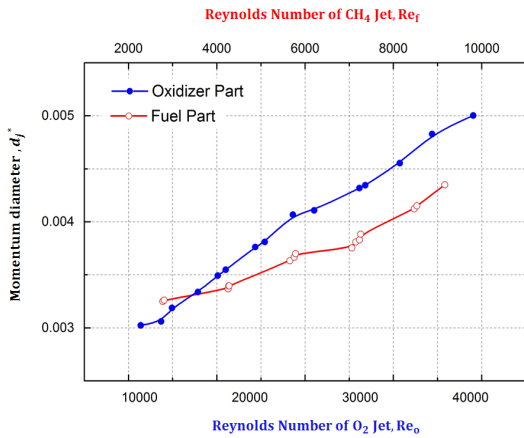


Fig. 9 Momentum diameter according to oxygen and fuel Reynolds number.

진제인 점을 감안하여 산화제 및 연료의 밀도비와 초기 인젝터 직경의 관계식으로 나타낸 운동량지름(momentum diameter,  $d_j^*$ )을 도입하여(Eq. 2), 추진제의 레이놀즈 수(Re)에 따른 운동량지름을 Fig. 9에 도시화 하였다.

$$d_j^* = d_j \sqrt{\left(\frac{\rho}{\rho_\infty}\right)} \quad (2)$$

이는 서로 직경이 다른 연료와 산화제의 레이놀즈 수  $Re_f$ ,  $Re_o$ 에 따른 운동량지름으로 추진제의 Re 수가 상승함에 따라 인젝터의 운동량 지름은 선형적으로 증가함을 나타낸다. 따라서 인젝터의 직경은 동일하나, 선행연구[11,12]의 결과와 같이 난류화염의 길이는 운동량지름에 종속되어 추진제 유량에 따라 화염길이가 길어지는 것으로 나타난다.

#### 4. 결 론

모델 연소실 내 기체메탄-기체산소 확산화염의 특성을 분석하기 위해 (O/F)<sub>mom</sub>와  $Re_o$ 에 따른 연소실험을 수행하여 연소안정한계를 도출하였고, 이미지 후처리 기법을 이용하여 확산화염 이미지를 상세히 분석하였다.

연소안정한계는 anchored flame regime과 blow-off regime I, II로 분류되었다. Blow-off regime I은 (O/F)<sub>mass</sub> = 1.0 ~ 2.5, (O/F)<sub>mom</sub> < 21.1,  $Re_o$  < 17,178 구간으로, 연료와 산화제의 미미한 속도차이로 인하여 추진제의 혼합이 원활하지 않아 화염이 발생되지 않았다. Blow-off regime II는 (O/F)<sub>mom</sub> > 21.1 으로 높은 대류물질전달율(convective mass transfer rate)에 의해, 상대적으로 화학반응율(chemical reaction rate)이 감소하여 blow-off 가 발생하였다.

Anchored flame regime은 (O/F)<sub>mass</sub> = 2.5 ~ 4.0,  $Re_o$  > 10,110 로서, 충분한 (O/F)<sub>mom</sub>에 따라 원활한 추진제 혼합에 의해 화염이 발생하였다. 그러나 (O/F)<sub>mass</sub> = 2.5 인 경우, 부착화염과 blow-off가 모두 발생하는 unstably-anchored flame regime으로 구분되었다.

화염길이는 추진제 레이놀즈 수와 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 반응성이 매우 큰 순 산소를 산화제로 사용하여 연소안정한계의 확장, 강한 연소반응의 영향 그리고 기체 추진제의 밀도 증가로 인한 운동량지름의 확장에 따라 화염길이가 증가된 것으로 보인다. 따라서 분사 방향으로 길이가 긴 화염을 형성하는 전단 동축형 인젝터는 추력기 설계 시 상대적으로 큰 길이직경비를 요구하기 때문에, 연소실의 크기가 제한되는 추력기에 적용함에 있어 단점으로 작용할 수 있다.

#### 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. Bae, S.H., Kwon, O.C. and Kim, J.S.,

- "Spray Characteristic 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.
2. 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.
  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. 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.
  5. 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.
  6. 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.
  7. Shengteng, H., Peiyong, and Robert, W., "Experimental and Numerical investigation of non premixed tubular flames," *Progress in Energy and Combustion science*, Vol. 31, Issue 1, pp. 1093-1099, 2007.
  8. Turns, R., Bandaru, V., "Oxides of Nitrogen Emissions from Turbulent hydrocarbon/air Jet Diffusion Flames," Gas Research Institute, GRI-5086-260-1308, 1992.
  9. 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.
  10. Kim, T.Y., Choi, S., Kim, H.K., Jeung, I. S., Koo, J. and Kwon, O. C., "Combustion Properties of gaseous CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> coaxial jet flames in a single-element combustor," *Fuel*, Vol. 184, pp. 28-35, 2016.
  11. Thring, M.W., Newby, M.P., "Combustion length of Enclosed Turbulent Jet Flames," *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 4, Issue 1, pp. 789-796, 1953.
  12. Ricou, F.P., Spalding, D.B., "Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent jets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 11, Issue 1, pp. 21-32, 1961.