

인젝터 리세스와 추진제 공급유량이 메탄-산소 확산화염의 가연한계와 구조에 미치는 영향

홍준열^a · 배성훈^a · 김정수^{a,*}

Effects of the Recess and Propellants Mass Flow on the Flammability Limit and Structure of Methane-Oxygen Diffusion Flame

Joon Yeol Hong^a · Seong Hun Bae^a · Jeong Soo Kim^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

ABSTRACT

In order to analyze the flammability limit and structure of the gaseous methane-gaseous oxygen diffusion flame formed through a shear coaxial injector, combustion experiments were carried out according to the condition of injector recess and propellant mass-flow rate. As a result, it was confirmed that stable anchored flame was observed even at the high oxygen Reynolds number as the propellant momentum flux ratio increased, and that the recess had no significant influence on the flame shape and flammability limit. The anchored flame visualized through a chemiluminescence showed the maximum OH radical emission intensity at a specific position, irrespective of the propellant injection condition, and the radical intensity was greatly reduced by the injector recess.

초 록

전단 동축형 인젝터를 통해 분사된 기체메탄-기체산소 확산화염의 가연한계와 구조분석을 위해 인젝터 리세스와 추진제 공급유량에 따른 연소실험이 수행되었다. 연구 결과, 추진제 운동량 플럭스 비가 증가함에 따라 높은 산화제 레이놀즈 수 구간에서도 안정적인 부착화염이 관찰되었으며, 인젝터 리세스는 화염의 형태와 가연한계에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 자발광 기법을 통해 가시화된 부착화염은 추진제 분사조건이 변함에도 불구하고 항상 일정한 지점에서 최대 OH 라디칼 방사강도를 나타내었으며, 그 강도는 리세스에 의해 심하게 감소함을 확인하였다.

Key Words: Propellant Momentum-flux Ratio(추진제 운동량 플럭스 비), Oxygen Reynolds Number(산화제 레이놀즈 수), Injector Recess(인젝터 리세스), Flammability Limit(가연한계), OH Radical Chemiluminescence(OH 라디칼 자발광)

Received 15 October 2017 / Revised 22 December 2017 / Accepted 27 December 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

21세기 들어 추진기관의 개발 및 운용에 있어 환

경문제, 추진제의 취급성, 그리고 경제성 등이 대두되면서 우주기술 선진국을 중심으로 친환경 추진제에 대한 연구수요가 증가하고 있다. 메탄은 침탄한계(coking limit)가 높아 냉각제로써의 성능이 우수하여, 재생냉각 방식을 적용하는 재사용 액체로켓엔진에 적합한 추진제이다. 또한 도차지 행성에서 연료를 채취하는 현지자원활용(In-situ Resource Utilization, ISRU)이 가능하며, 이산화탄소와 수소를 반응물로 사용하는 Sabatier process를 통해 현지우주환경에서 직접 생산할 수 있다. 이외에도 액체메탄-액체산소 추진제조합은 우수한 비추력 성능, 무독성, 다른 추진제에 비해 저렴한 가격 등의 다양한 장점을 가지고 있어 최근 들어 전 세계적으로 각광받고 있다 [1]. 따라서 메탄을 연료로 하는 로켓엔진의 기술개발이 해외에서 활발히 진행 중이지만, 아직 연구 초기단계로서 우주환경에서의 안정적인 로켓성능 및 추진제 저장성과 연소실에서 발생하는 연소불안정성(combustion instability) 등에 관한 근본적인 문제를 해결하기 위한 기초적인 메탄-산소의 연소특성 연구가 요구된다[2].

현재까지 메탄-산소의 연소특성에 관한 여러 연구가 수행되어 왔다. Chahine 등[3]은 메탄-공기 화염에 추가적인 산소공급이 연소특성에 미치는 영향을 연구하여 화염온도 상승, 연소효율 증대, 그리고 부상높이의 감소효과 등을 확인하였다. Fumiaki 등[4]은 탄화수소계연료와 공기의 연소특성을 도출하기 위해 원형동축버너를 이용한 실험적 연구를 수행하여 산화제와 연료의 분사속도 조건에 따른 연소안정한계를 도출하였다. Jeffrey 등[5]은 전단 동축형 인젝터(shear-coaxial injector)를 통해 분사되는 메탄-산소 화염의 형태, 산화제 레이놀즈 수(oxidizer Reynolds number, Re_O) 및 추진제 운동량 비(momentum flux ratio of propellants, $(O/F)_{mom}$)에 따른 연소안정한계와 각 화염형태에 대한 경계를 수식적으로 도출하였다. Fdida 등[6]은 인젝터의 형상 및 리세스 길이(recess length)가 연소특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였고, OH^* (OH 라디칼) 자발광 가시화를 통해 화염구조를 획득하였다. 그들의 연구에서, 스윙 동축형 인젝터(swirl-coaxial injector)로부터 생성된 화염은 전단형 인젝터에 의한 제트화염에 비해 보다 원뿔(conical)에 가까운 형상을 가지

며 반경방향으로 넓은 화염이 형성되어 상대적으로 안정적인 연소반응이 관찰되었다. 또한 인젝터의 리세스 길이는 화염의 폭과 길이, 압력 강하량 등에 영향을 미치는 것을 확인하였고, 저자는 연소 불안정성의 개선 가능성을 시사하기도 하였다. Shengteng [7] 등은 소형로켓엔진 내부에 발생하는 메탄-산소 화염의 연소특성을 분석하기 위해 shadowgraph 기법, OH^* 자발광(chemiluminescence), 평면레이저 유도형광법(Planar Laser-induced Fluorescence, PLIF), 그리고 레이저 광산란(laser light scattering) 기법 등을 활용하여 실험을 수행하였다. 동일한 조건에서 스윙 및 전단 인젝터를 사용한 실험이 진행되었고, 인젝터 종류가 연소특성에 미치는 영향을 비교, 분석 하였다. 실험 결과, 스윙 인젝터는 전단 인젝터에 비해 추진제의 혼합 및 미립화 성능이 우수하여 상대적으로 높은 연소효율을 보였다.

메탄을 연료로하는 이원추진제 추력기(thruster) 개발에 선행하여, 본 연구에서는 스윙 동축형 인젝터의 연소성능과 비교하기 위해, 전단 동축형 인젝터를 사용하여 기체메탄-기체산소의 연소시험을 수행하였고, 추진제 공급조건 및 인젝터 리세스에 따른 화염의 가연한계와 구조를 분석, 제시한다.

2. 실험장치 및 방법

기체메탄-기체산소 확산화염의 연소특성 도출을 위한 실험장치는 모델연소기(model combustor), 데이터 수집 및 제어장치(Data acquisition and Control System, DACS), 연료 및 산화제 공급장치 등으로 구성되며 Fig. 1에 도시한다.

모델연소기는 전단 동축형 인젝터, 연소실(combustion chamber), 토치 점화기(torch-spark ignitor), 그리고 노즐(nozzle)로 구성된다. 연소실은 내부에 형성된 확산화염 관측을 위해 장착된 퀴츠가시창(quartz-glass window)과 함께 준 원통형(quasi-cylindrical)으로 제작되었다(Fig. 2). 또한 연소시 발생하는 고온가스로부터 연소실을 보호하기 위해 그 내벽 주변으로 냉각채널이 형성되어 있고, 예비 실험을 통해 그 성능을 검증하였다[8].

전단 동축형 인젝터의 형상 및 화염 형성 기구

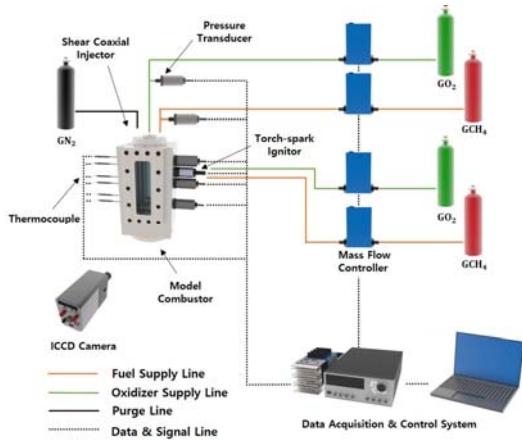


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

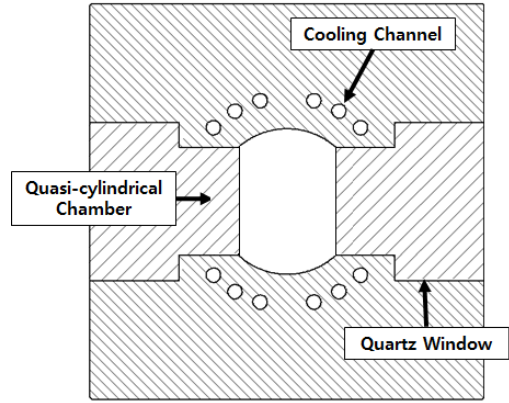


Fig. 2 Cross section of model combustor.

를 Fig. 3에 도시한다. 인젝터를 통해 산화제는 중심방향으로, 연료는 그 주변 환형으로 분사된다. 그리고 각각의 속도성분 차이에 의해 인젝터면(injector face)을 기점으로 운동량 확산이 발생하여 추진제의 혼합영역(mixing zone)이 형성된다. 추가적으로 인젝터 구조에 따른 기체메탄-기체산소 확산화염의 구조를 관찰하고자, 인젝터면으로부터 후퇴된 산화제 오리피스의 끝단까지의 거리인 리세스 길이(l_r)와 그 오리피스 직경($d_{i,ox}$) 비로써 정의되는 리세스 비($l_r/d_{i,ox}$)가 실험변수로 적용되었다.

일반적으로 연소실험에서는 화염의 대칭구조와 안정성에 대한 부력의 영향을 최소화하기 위해 연료와 산화제가 아래쪽에서 위쪽으로 분사되도록 인젝터 및 연소실을 설치한다. 본 실험의 경우, 연소시 발생하는 생성물에 의한 관측의 왜곡방지와 추후에 수행될 연구와의 모사유지를 위해 추진제가 상측에서 하측으로 분사되도록 모델 연소기를 설치하였다. 또한, 추진제의 분사방향으로 높은 대류강도(convection strength)를 가지는 확산화염의 경우 부력의 영향을 무시할 수 있어, 실험결과는 상하의 분사방향에 의해 크게 영향을 받지 않는다.

Fig. 4는 실험에 적용된 모델 연소기의 작동순서와 추진제 공급유량에 따른 압력선도를 나타낸다. 점화지연(ignition delay)을 동반하는 토치 화염은 점화 시 큰 압력(ignition spike)을 발생시

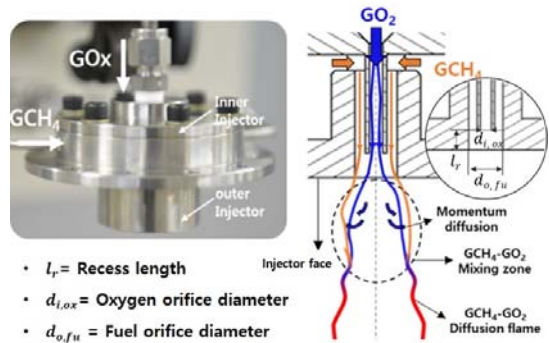


Fig. 3 Configuration of and flame formation mechanism through the shear-coaxial injector.

킨다. 따라서 연소실 및 토치 점화기 손상을 최소화하고 연료와 산화제의 충분한 혼합을 위해 점화 추진제를 2초간 공급한 뒤, 스파크플러그(spark plug)로 점화시킨다. 그 후 인젝터를 통해 주 연료 및 산화제를 공급하여 연소실 내 압력이 안정된 시점으로부터 8초간 연소실험이 진행된다. 다음으로 추진제 공급을 차단하고 질소가스를 이용하여 공급배관 및 연소실의 잔류가스를 배출(purge)한다. 그림에서는 torch flame ignition과 primary ignition이 발생할 때, 연소실 내부에서 ignition spike가 나타나고, 산화제 레이놀즈 수(oxygen Reynolds number, Re_o) 및 연료 레이놀즈 수(fuel Reynolds number, Re_f)의 증가에 따라 압력이 상승하는 것을 확인할 수 있다.

위의 Eq. 1과 같이 정의되는 추진제의 운동량

플릭스 비와 산화제 레이놀즈 수는 확산화염의 안정화여부에 크게 영향을 미치는 것으로 선행연구를 통해 확인되었다[5]. 따라서 Table 1에 보이는 바와 같이 $(O/F)_{mom}$ 의 변화와 일정한 $(O/F)_{mass}$ 에서의 Re_O 변이에 따른 실험이 수행되었고, recess

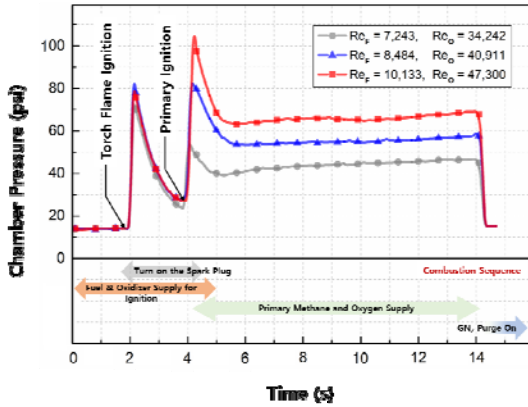


Fig. 4 Pressure variation along with combustion sequence of the reactants.

$(l_r/d_{i,ox} = 1)$ 가 있는 경우 동일한 실험이 반복되었다.

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

연소실 내에서 형성되는 확산화염의 연소특성 분석을 위해, ICCD(Intensified Charge Coupled Device) 카메라와 307 nm 파장대 필터(filter)를 이용하여 연소시 발생하는 OH* 자발광(OH radical chemiluminescence) 이미지를 획득하였고, 실험 조건에 따른 화염구조의 원활한 비교를 위해 OH* 자발광 강도의 정규화(normalize)를 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Flammability Limit

실험조건에 따라 기체메탄-기체산소 확산화염의

Table 1. Experimental conditions.

without recess ($l_r/d_{i,ox} = 0$)				with recess ($l_r/d_{i,ox} = 1$)			
(O/F) _{mass}	Equivalence ratio ($\Phi = \frac{(O/F)_{mass}}{(O/F)_{st.mass}}$)	(O/F) _{mom}	Reynolds No. of Oxidizer, ReO	(O/F) _{mass}	Equivalence ratio ($\Phi = \frac{(O/F)_{mass}}{(O/F)_{st.mass}}$)	(O/F) _{mom}	Reynolds No. of Oxidizer, ReO
2.0	0.500	15.55	17,166 *	2.0	0.500	15.71	17,367 *
		15.31	20,478 *			16.66	21,711 *
		17.47	24,047 *			14.87	23,082 *
		15.40	27,671 *			15.00	26,151 *
2.5	0.625	19.53	21,435	2.5	0.625	19.51	21,475
		19.35	25,635 #A			19.82	25,867
		19.86	29,809 *			19.19	29,389 *
		19.42	34,440 *			19.00	34,104 *
3.0	0.750	22.99	25,316 #B	3.0	0.750	23.32	25,583
		23.38	30,793			22.98	30,023
		23.86	35,571			23.51	35,716
		23.45	41,133 *			23.52	42,058 *
3.5	0.875	27.01	29,720 #C	3.5	0.875	27.79	29,988
		27.88	35,890			27.61	35,670
		27.05	41,334 #D			27.82	42,044
		27.05	47,300 *			27.92	46,635 *
4.0	1.000	31.02	34,242	4.0	1.000	31.41	34,258
		31.49	40,911 #E			32.50	40,456 #F
		30.52	47,300			31.89	47,692
		31.50	54,594 *			34.38	52,607 *

Anchored flame Case

* Blow-off

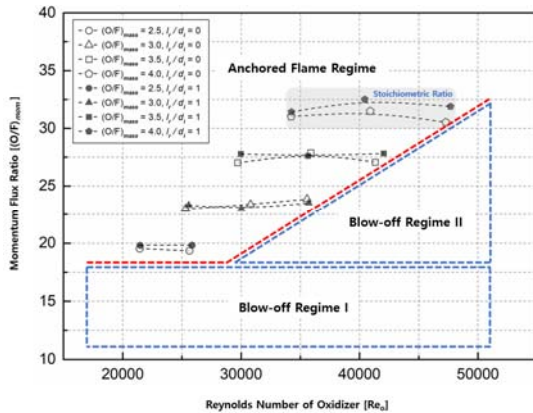


Fig. 5 Flammability limit according to the oxygen Reynolds number, oxygen methane momentum ratio, and recess.

가연한계 도출을 위한 실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 5에 도시한다. 일반적인 난류확산화염은 부착화염(anchored flame), 부상화염(detached flame), near-blowout flame의 세 가지 형태로 분류되지만[9], 본 실험에서는 인젝터 표면에 화염이 부착되어 안정적인 연소를 하는 부착화염(anchored flame)과 연료와 산화제의 불충분한 혼합으로 인해 발생하는 blow-off만이 관찰되었다.

확산화염은 낮은 유동강도(flow strength)와 높은 화학반응강도(chemical reaction strength)에서 안정화하는 것으로 밝혀져 있다[10]. 하지만 blow-off regime I은 $(O/F)_{\text{mom}} < 17$, $(O/F)_{\text{mass}} < 2.5$ 의 영역으로, Re_O 혹은 유동강도에 관계없이 화염이 유지되지 않는다. 이는 연료와 산화제의 반응에 충분치 않은 $(O/F)_{\text{mom}}$ 혹은 $(O/F)_{\text{mass}} = 4$ 인 이론 반응비(stoichiometric ratio)로부터 상당히 벗어난 연료-산화제 공급유량비에 기인하는 것으로 판단된다.

Blow-off regime II는 $(O/F)_{\text{mom}} > 19$ 의 반응조건을 갖추고 있지만, $Re_O > 28,000$ 에 해당하는 높은 대류강도를 가지고 있다. 유동강도의 증가는 연소실 내 유동정체시간(flow residence time)의 감소를 유발한다. 따라서 동일한 $(O/F)_{\text{mom}}$ 조건에서 Re_O 의 증대는 화학반응강도(chemical reaction strength) 대비 높은 대류강도로 인해 화염의 blow-

off를 낳는다. 그림에서는 blow-off regime II의 가연한계에 있어 Re_O 의 증가가 $(O/F)_{\text{mom}}$ 혹은 $(O/F)_{\text{mass}}$ 의 증가에 선형적으로 관계한다는 사실을 관찰할 수 있다.

Anchored flame regime은 $(O/F)_{\text{mass}} \geq 2.5$ 의 연료과농 상태에서 이론반응비($(O/F)_{\text{mass}} = 4$)까지 형성되어 있으며, 적절한 $(O/F)_{\text{mom}}$ 과 Re_O 에 의해 안정적인 연소가 일어나는 영역이다.

전단 동축형 인젝터를 통해 분사되는 연료와 산화제는 수직 속도성분만을 가지고 분사되어, 인젝터 리세스가 연료-산화제 혼합성능 향상과 그로 인한 확산화염의 가연한계에 영향을 못 미치는 것으로 관찰된다. 그러나 부착화염의 반응강도는 실험변수에 따라 상이한 경향을 보이고 있는 바, 화학반응정도의 지표인 라디칼을 이용하여 이후에 그 특성을 비교한다.

3.2 Flame Structures

탄화수소계 연료와 산화제간 화학반응을 통해 형성되는 라디칼은 화염대의 위치, 화학반응강도 등의 화염구조 파악에 매우 유용하다. 특히, OH^* 은 반응영역과 열방출의 지표로 이용되는 바, OH^* 자발광을 통해 anchored flame regime에서 발생하는 화염구조를 Fig. 6에 도시한다. 형성된 부착화염은 길이가 길고 폭이 좁으며, 산화제 오리피스 직경축을 중심으로 대칭성을 갖는다. 따라서 그림에서는 $(O/F)_{\text{mom}}$ 과 Re_O 각각의 변이에 따른 화염구조를 비교하기 위해 그 축을 중심으로 좌측과 우측에 라디칼 등고선을 도시하고 있다. 또한 면밀한 분석을 위해 반응이 활발히 이루어지는 $y/d_{i,ox} = 40\sim 60$ 영역을 확대하여 함께 보이고 있다. 제시된 확산화염의 OH^* 강도는 인젝터 면에서 멀어짐에 따라 점차 상승한 후, 노즐부근에 이르러 노즐부 벽면 냉각(quenching)의 영향으로 급격하게 감소한다.

Fig. 6(a)는 동일 범주의 $Re_O \approx 25,000$ 에서 $(O/F)_{\text{mom}}$ 에 따른 화염의 구조를, Fig. 6(b)는 동일 범주의 $(O/F)_{\text{mom}} \approx 27$ 에서 Re_O 에 따른 화염의 구조를 각각 나타낸다. Case A, B, C(혹은 D)의 등고선에서 나타나는 바와 같이, $(O/F)_{\text{mom}}$ 의 증가

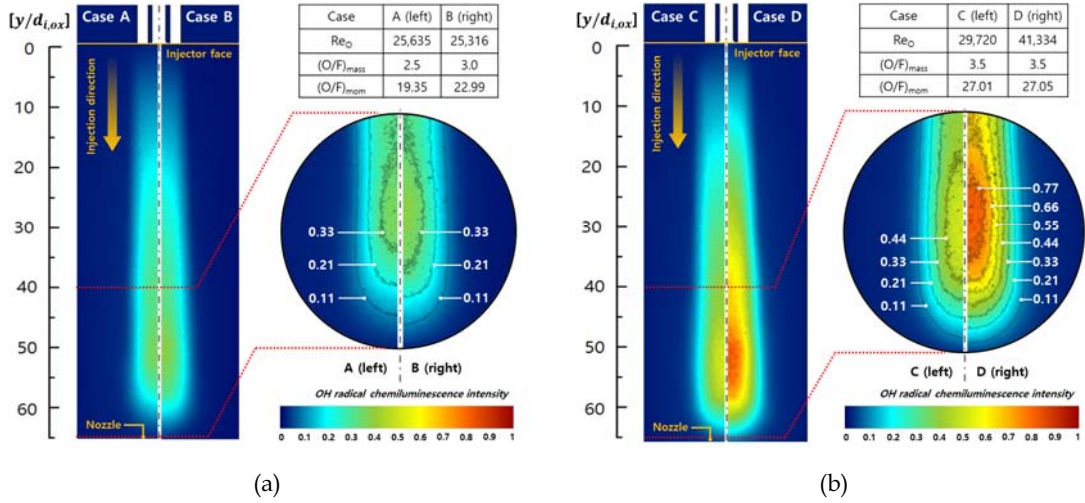


Fig. 6 Anchored flame visualized through OH* chemiluminescence: comparison according to (a) propellant momentum ratio, (b) oxygen Reynolds number.

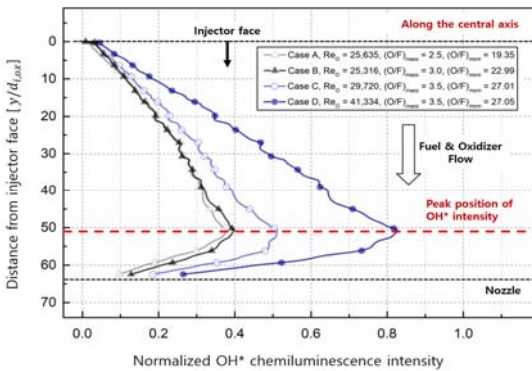


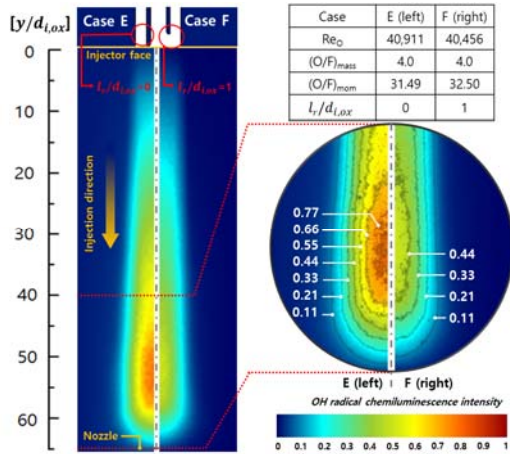
Fig. 7 OH* emission intensity of the anchored flame along the central axis.

는 화염의 반응영역을 확장시키고 강도를 증대시킨다. 이는 $(O/F)_{mom}$ 의 증가가 연료과농상태에서 공급되는 연료-산화제 공급비를 이론당량비 상태로 접근시키기 때문이다. 또, Fig. 6(b)에서 보이는 바와 같이 유사한 $(O/F)_{mom}$ 에서 Re_O 의 증가가 반응강도를 증대시키는 이유는 산화제와 연료제트 난류강도의 증대에 따른 높은 난류확산과 반응물의 혼합에 부분적으로 기인한다. 더욱이 공급되는 산화제 유량이 커진 경우 메탄-산소 반응물에 의해 연소실 압력의 증가와 함께 화학반응을 또한 증대되며, 축적되는 많은 양의 반응물로 말

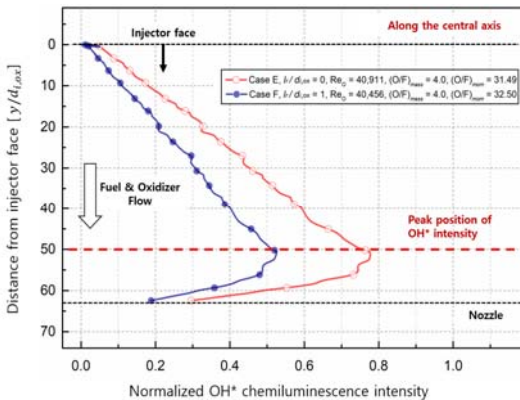
미암아 OH* 자발광의 강도 또한 커지는 것으로 판단된다[10].

부착화염의 중심축을 따라 형성되는 OH* 강도를 Fig. 7에 나타낸다. 라디칼의 방사강도가 최대가 되는 지점인 peak position은 추진제 공급조건에 관계없이 항상 일정한 지점($y/d_{i,ox} = 50.5$)에서 나타난다. 이는 산화제-연료의 공급조건과 무관하게 전단형 인젝터 출구에서 노즐에 이르는 연소실의 길이가 전단력만에 의해 산화제 제트와 연료제트를 혼합시키기에 충분하지 않아 재순환이 발생하는 노즐 위치 혹은 연소실 하부 벽면에 의해 화염의 길이가 결정되고 있음을 시사한다.

인젝터 리세스 비의 증가는 기체메탄-액체산소의 연소성능 및 이론당량혼합거리(stoichiometric mixing length) 등을 향상시키는 것으로 알려져 있다[11]. 그에 따라 본 연구는 동일한 추진제 공급유량 조건에서 리세스 비에 따른 실험을 재수행하였고, 이에 대한 결과를 Fig. 8에 도시한다. 리세스의 영향을 받는 확산화염(Case E)은 화염 구조, 공급유량 조건에 따른 자발광 강도, 그리고 최대반응점인 peak position이 Fig. 6과 7에서 기술한 내용과 동일한 경향을 나타내고 있다. 그러나 부착화염의 OH* 자발광 방사강도는 매우 큰 폭으로 감소하고 있는데 이는 리세스에 의해 인



(a)



(b)

Fig.8 Effect of recess on anchored flame: OH* emission (a)contour, (b)along the central axis.

젝터 면에서 후퇴된 산화제 오리피스를 통해 분사되는 기체산소가 인젝터 내부에서 질량 및 운동량의 확산이 발생하고 그 주변 환경에서 분사되는 연료와 혼합이 조기에 발생하여 연소실 반경방향으로의 화염의 폭을 증대시키기 때문이다. 또, Fig. 8(b)에서 나타난 바와 같이 리세스가 있는 경우, 동일 추진제 공급조건에도 불구하고 OH* 자발광 강도가 리세스가 없는 경우보다 낮게 나타나는데, 이는 인젝터로 화염의 열손실(flame quenching)과 전술한 산화제-연료 조기혼합에 기인하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

모델연소기 내 기체메탄-기체산소 확산화염의 가연한계 및 구조를 분석하기 위한 연소실험을 수행하였다.

가연한계는 anchored flame regime, blow-off regime I, II로 분류된다. Blow-off regime I은 연료와 산화제의 충분치 않은 반응조건으로 인해 발생하였고, blow-off regime II는 화학반응강도에 비해 상대적으로 높은 유동강도에 의해 화염이 발생하지 않았다. 또한 전단형 인젝터의 리세스 비는 기체메탄-기체산소 확산화염의 가연한계에 크게 영향을 주지 않았다.

가연한계 내의 anchored flame regime에서 발생하는 부착화염의 구조와 라디칼의 방사강도를 OH* 자발광을 통해 도출하였다. 주어진 연소실 형상에서 부착화염은 추진제 분사조건에 무관하게 일정한 폭과 길이를 나타낸다. OH* 자발광 방사강도는 Re_o 에 따라 크게 상승하고, 연료-산화제의 이론당량비 조성으로 접근하는 $(O/F)_{mom}$ 의 증가 또한 방사강도의 증대를 유발한다. 리세스가 있는 경우의 부착화염 구조는 없는 경우에 비해 화염구조에서 동일한 경향을 나타내지만 OH* 자발광 방사강도는 감소한다. 이는 인젝터 내부에서 기체산소의 확산과 인젝터로 화염의 열손실이 증대하는데 기인하는 것으로 판단된다.

후 기

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

References

1. 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.
2. 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.
 3. 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, Italy, pp. 1-9, Sep. 2011.
 4. Fumiaki, T. and 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, pp. 1-4, Aug. 2005.
 5. Jeffrey, D. and 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, No. 3, pp. 401-417, 2008.
 6. Fdida, N., Vingert, L., Ordoneau, G., Ristori, A. and Brossard, C., "Characterization of a Double Swirl Injector in a LOX/LCH4 Fueled Combustor on Mascotte Test Bench," *ONERA-DLR Aerospace Symposium*, Palaiseau, France, pp. 1-10, May 2013.
 7. Shengteng, H., Peiyong, W. and Robert, W., "Experimental and Numerical investigation of non premixed tubular flames", *Progress in Energy and Combustion science*, Vol. 31, No. 1, pp. 1093-1099, 2007.
 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*, Jeongseon, Korea, pp. 892-895, Dec. 2016.
 9. Hong, J.Y., Bae, S.H., Kwon, O.C. and Kim, J.S., "Combustion Characteristics of a Gaseous Methane-Gaseous Oxygen Diffusion Flame Sprayed by a Shear Coaxial Injector," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 3, pp. 1-8, 2017.
 10. Bae, S.H., Hong, J.Y., Kim, H.D. and Kim, J.S., "Combustion Characteristics of Methane-Oxygen Diffusion Flame Formed by Swirl-coaxial Injector," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 2, pp. 1-8, 2017.
 11. Pack, T.S., "RANS-LES Simulations of Scalar Mixing in Recessed Coaxial Injector," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 1, pp. 55-63, 2012.