모델연소실 내 메탄/산소 동축 제트화염의 연소특성 연구

최선* · 김태영* · 김희경* · 권오채**†

Studies on combustion characteristics of gaseous CH_4/O_2 coaxial jet flames in a single-element combustor

Sun Choi*, Tae Young Kim*, Hee Kyung Kim*, Oh Chae Kwon*†

Key Words : Methane, oxygen, bipropellants, stability limits, OH* chemiluminescence

로켓 엔진의 극저온추진제로서 미국, 일본, 유럽 등에서 활발히 사용되고 있는 수소(H_2)/산소(O_2) 액체이원추진제는 케로신(RP-1) 및 메탄(CH_4)과 같은 타 액체이원추진제에 비해 비추력이 압도적으로 높은 값을 가지는 반면 낮은 밀도와 매우 낮은 액화 온도로 인한 추진제 탱크의 무게와 부피 증가, 매우 높은 반응성으로 인한 안전장치의 필요성, 산화제와의 밀도 차이로 인한 별도의 터보펌프 설치 등의 문제를 갖기 때문에 이의 해결을 위해서는 높은 기술력과 비용이 요구된다. 반면 메탄/산소 이원추진제는 무독성, 친환경, 경제성, 우수한 재생냉각 성능 등의 장점을 가지며 수소에 비해 저장이 용이하고, coking limit가 높아 재사용 엔진의 추진제로서도 적합하기 때문에 최근 들어 차세대 액체이원추진제로서 각광을 받고 있다.

오랜 기간 기초 연구 및 시행착오를 통해 연구된 수소/산소 이원추진제나 케로신, 하이드라진에 비해 이원추진제로서 메탄에 대한 기초적인 특성 연구나 연소 불안정성에 대한 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구를 통해 설계, 제작된 기초 특성 연구용 모델연소실 내에서 기체 메탄/기체 산소 동축 제트화염의 연소안정한계를 측정하고, OH* 자발광 가시화 및 직접 사진 촬영을 통해 분사 조건 변화에 따른 화염의 구조와 형태를 파악하였다.

메탄/산소 동축 제트화염 연소특성 연구를 위한 실험장치는 Fig. 1과 같이 모델연소실, 메탄/산소 공급 시스템, 질소(N_2) 퍼지(purge) 시스템, 메탄/산소 토치 점화기(torch ignitor), 연소실 내 압력 측정을 위한 압력계, 분사 과정 제어를 위한 데이터 수집 장치, 직접 사진 촬영을 위한 DSLR, ICCD를 포함한 OH* 자발광 가시화 시스템 등으로 구성되어 있다.

* 성균관대학교 기계공학과
** 성균관대학교 기계공학부
† 연락저자, okwon@skku.edu
TEL : (031)290-7465 FAX : (031)290-5889

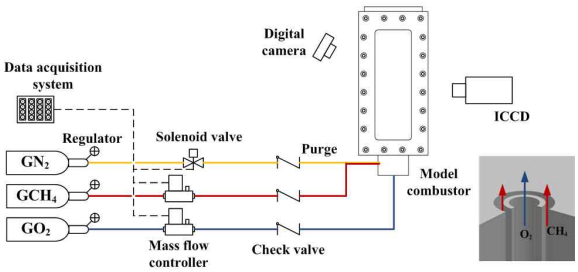

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

모델연소실은 좌우에 광학창이 있는 정사각형 덕트(60×60×188 mm^3)로 후단에는 노즐 형태의 오리피스(내경 4.8 mm)를 설치하여 승압 조건에서 메탄/산소 화염의 연소특성 실험이 가능하도록 했다. 모델연소실 및 인젝터의 제원은 Table 1과 같다.

비예혼합 화염의 안정화 여부에 주된 영향을 미치는 것으로 알려진 산소-연료 모멘텀 비($(O/F)_{mom}$)와 산소 제트의 레이놀즈수(Re_O)를 변화시키면서 메탄/산소 동축 제트화염의 화염거동을 파악하고, 연소안정한계를 측정했다. 또한 DSLR을 통해 화염의 직접 사진을 촬영하여 화염의 형태를 관찰했고, ICCD를 사용하여 인젝터 후단의 OH* 자발광을 측정한 후 측정된 이미지를 Abel 변환(Abel transform)을 적용하여 화염 단면을 분석하였다.

Table 1 Specifications for model combustor.

Combustion chamber	60.0×60.0×188.0 mm^3
Optical windows	193.0×75.0×20.0 mm^3
Optical entrance	162.0×3.0×8.0 mm^3
Diameter of center jet injector	2.0 mm
Thickness of center jet post	0.4 mm
Diameter of annulus jet injector	4.0 mm
Orifice inner diameter	4.8 mm

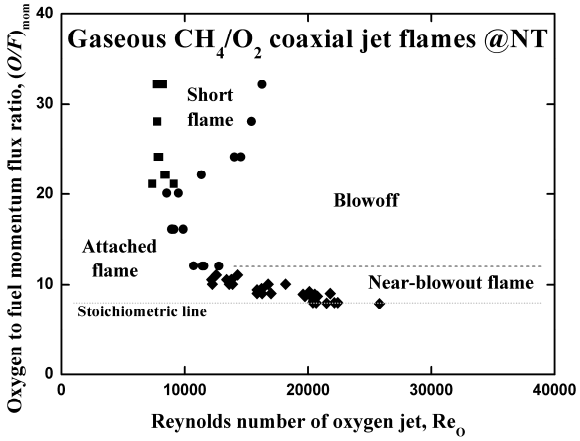

Fig. 2 Combustion stability limits of CH_4/O_2 coaxial jet flames at NT: $(O/F)_{mom}$= 2-32 and Re_O= 6661-65902.

Fig. 2는 모델연소실 내 메탄/산소 동축 제트화염의 연소안정한계 측정결과이다. 연소실 후단에 위치한 오리피스로 인해 분사조건에 따라 연소실 내부 압력은 1.0-1.5 atm로 측정되었고, 화염의 형태는 세가지가 관찰되었는데 안정적인 부착화염(attached flame, Fig. 3(a)), 인젝터에서 떨어진 채 상하로 크게 진동하는 near-blowout 화염(Fig. 3(b)), $(O/F)_{mom}$이 큰 조건에서 산소 유속이 증가함에 따라 급격히 화염의 길이가 짧아지며 소음이 발생하는 short 화염(Fig. 3(c))이다. 대체로 연료과농 조건에서 화염안정한계는 매우 넓어지는 경향이 보였고, near-blowout 화염은 대체로 이론 당량비 근처의 연료희박 조건

Fig. 3 Direct images of CH_4/O_2 coaxial jet flames at NT: $(O/F)_{mom}$= 7.2 (a), 10.0 (b) and 28.0 (c) and Re_O= 6197-21149.

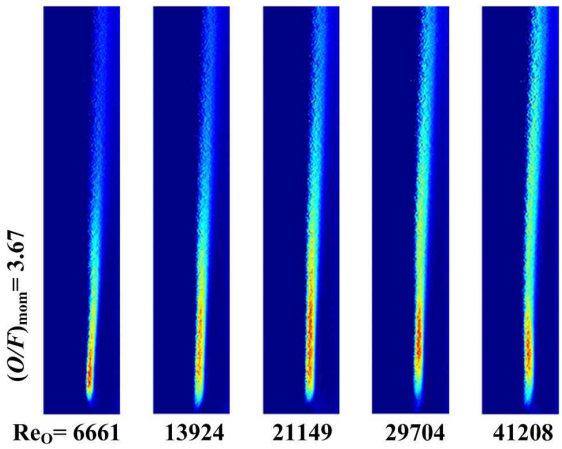

Fig. 4 OH^* chemiluminescence images of CH_4/O_2 coaxial jet flames at NT: $(O/F)_{mom}$= 3.67 and Re_O= 6661-41208.

($(O/F)_{mom}$= 8.0-11.0)에서 확인되었다. Short 화염은 연료희박 조건인 높은 $(O/F)_{mom}$ (> 21.0) 값에서 발생하는 것이 확인되었다.

Fig. 4는 ICCD를 사용하여 촬영된 메탄/산소 동축 제트화염의 OH* 자발광 가시화 이미지를 Abel 변환한 결과이다. 가시화 이미지 분석 결과, 인젝터로부터 최대 OH* 강도 위치까지의 거리(Lf)는 ReO = 6661-21149 조건에서 증가하다가 유속이 더 증가하는 조건(ReO> 21149) 에서 다시 감소했다. 반면 화염의 두께는 전반적으로 일정하고 유량의 변화에도 크게 변화가 없는 것이 확인되었다.

기체 메탄/산소 동축 제트화염의 연소안정한계를 측정하고, 분사 조건 변화에 따른 화염의 구조와 형태를 파악하였으며 이를 통해 친환경 이원추진제로서 메탄의 기초특성 데이터베이스를 구축하였다.

후 기

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

참고 문헌

[1] O.J. Haidn, “Advanced rocket engines”, Institute of Space Propulsion, German Aerospace Center (DLR) 74239 Lampoldshaunsen, Germany, 2013.

[2] 임하영, 조인현, “수소의 특성 및 로켓 추진제로서의 고려사항”, 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 2009, pp. 22-26.

[3] R.L. Sackheim, R.K. Masse, “Green propulsion advancement - challenging the maturity of monopropellant hydrazine”, 49th Joint Propulsion Conference, 2013, AIAA2013-3988.