

액체로켓엔진 연소기 및 가스발생기의 점화 특성 연구

김승한* · 문일윤* · 이광진* · 김종규* · 서성현* · 김성구* · 설우석*

Study on the Ignition Characteristics of Liquid Rocket Engine Combustor and Gas Generator

Seung-Han Kim, Il-Yoon Moon, Kwang-Jin Lee, Jong-Kyu Kim, Seong-Hyun Seo, Seong-Ku
Kim and Woo-Seok Seol

ABSTRACT

Study on the ignition characteristics of combustor and gas generator for LOx-kerosene liquid rocket engine was performed experimentally through a series of combustion tests of sub-scale engine combustor and gas generator.

Characteristic of gas-torch ignitor based on gaseous methane and gaseous oxygen was compared with hypergolic ignition using propellant tri-ethyl-aluminium. Gas-torch ignitor showed good performance on igniting sub-scale liquid rocket engine combustor and gas generator. It was observed that the ignition delay is also affected by the extent of nitrogen in the combustion chamber.

Key Words : Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Gas Generator(가스발생기), Tri-Ethyl-Aluminium(TEA), Gas Torch(가스 토치 점화기)

1. 서 론

액체로켓 엔진의 성공적인 운용을 위해서는 연소성능, 연소불안정, 벽면 냉각성능 등 고려하여 해결해야 할 항목들이 많지만 기본적인 선결과제는 안정적인 점화이다. 초기 로켓 개발에 있어 점화시의 점화 지연 등의 문제로 연소실 안에서의 hard start 및 폭발 등의 문제가 있었고, 현재 개발하고 있는 연소기들 또한 이러한 문제가 존재하고 있다[1]. 액체 로켓엔진의 점화방법은 반응성이 높은 추진제가 연소실에 쌓이기 전에 빠르고 안정적으로 연소가 이루어지도록 설계가 되어야 한다. 연소기 안으로 들어온 추진제가 빠르게 연소되지 않는 경우 연소기 안에서 폭발이 발생해 엔진의 파괴, 발사체나 시험설비에 치명적인 대형 사고를 유

발할 수 있다.

액체로켓 엔진의 안정적인 점화를 위해 주로 사용되는 것은 pyrotechnic 점화기, 접촉발화성 추진제, 가스-토치 점화기 등으로 다양하다. 2002년에 발사한 KSR-III 엔진의 경우는 접촉발화성 추진제인 Tri-Ethyl-Aluminum(TEA)을 연료 라인에 공급하는 방식의 점화기를 사용하였다.

탄화수소 계열의 추진제를 사용하는 액체 로켓 엔진의 경우 화염의 전파에 초기 추진제의 분무 특성이 매우 중요한 요소가 된다. 분무 연소의 최소 단위인 액적에서의 점화과정에 액적 주위의 온도, 압력 등이 점화지연 시간에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다[2]. 액적의 점화지연은 증발시간, 혼합시간 그리고 화학반응시간의 총합으로 볼 수 있는데, 혼합시간은 다른 것에 비해 상대적으로 짧다. 현재 진행중인 액체산소-케로신 추진제 조합의 경우 케로신의 증발율이 낮고 분사되는 초기 액적 직경이 평균적으로 커서 열용량이 크기 때문에 점화지연은 증발시간에 크게

* 한국항공우주연구원 우주추진기관실 엔진그룹

† detokim@kari.re.kr

의존할 것으로 사료된다. 액적증발시간, 연료와 산화제의 혼합시간, 그리고 화학반응시간 등은 주위의 열 및 유동에 따라 매우 다른 특성을 보여 주기 때문에 액체 로켓 엔진 연소기 안의 점화 현상은 정량적으로 예측/해석하기는 어렵다. 이러한 관계로 액체로켓 엔진에서의 점화현상 특성을 파악하기 위해서는 실험적인 검증이 필수적이다.

많은 탄화수소 액체로켓엔진의 경우 설계점 운용조건에서 공연비가 연료 과농인 관계로 초기 점화시 연료가 먼저 공급되는 것이 연소기 안에서 최대 열방출로 연소기 벽면의 냉각에 해로운 이론 혼합비 상태의 연소를 방지할 수 있어 주연료를 먼저 공급하는 것을 선호하기도 하지만, 산화제를 먼저 공급하는 것도 점화초기의 점화지연시간을 줄여주어 안정적인 점화를 가능하게 한다는 측면에서 선호되는 부분도 있다. 하지만, 둘 중의 하나를 얼마나 먼저 공급해야 하는 지의 문제는 추진제 성분 및 head 구조와 관계있으므로, 가장 적합한 공급순서를 결정하기 위해서 각각의 추진제와 연소기 헤드구조를 충분히 고려해야 한다.

본 논문에서는 액체로켓엔진 축소형 연소기 및 가스발생기의 점화 특성에 대해 간략히 살펴하고, 점화 시퀀스의 영향, 점화기의 종류에 따른 영향, 액체산소-케로신의 O/F비에 따른 연소기와 가스발생기의 점화시의 거동을 살펴보았다. 축소형 연소기나 가스발생기의 점화 시퀀스 결정을 위한 측정 변수 중 엔진이나 설비에서의 측정된 정압력의 경우 측정 유도관의 영향 등으로 추진제의 공급시기를 정확히 판단하지 못하므로 본 연구에서는 각각의 연소기 및 가스발생기의 추진제 매니폴드 체적과 공급 배관체적, 자동밸브 작동시간을 고려하고, 유량과 동압의 측정 변수로 각각 sequence를 결정하여 연소시험을 수행하였다.

2. 시험방법 및 조건

2.1 축소형 연소기

본 시험에서 사용한 축소형 액체 로켓 연소기는 KSR-III 실물형(Full-scale)엔진에 적용된 점화용 인젝터 및 FOOF 형식의 분사기와 동일한 크기의 분사기 9개를 H-type으로 배열한 축소형 연소기이다[3]. 본 로켓연소기의 점화는 점촉발화성물질인 TEA와 메탄/ 산소 혼합기의 가스 토치를 이용할 수 있도록 하였다. 총돌형 분사기의 연료 총돌반각은 15°이며, Fig.1에 나타난 형태로 가운데에

3-On-1 형태의 분사기는 TEA로 점화를 할 때에는 연료 측에 TEA가 공급되고, 주위의 9개의 FOOF 방식 분사기는 가능하면 실물형 연소기의 분사기 배치와 동일한 형태로 배치되게 하였다. 축소형 액체 로켓엔진 연소실의 축 방향 전체 길이는 565mm, 연소실 최대 직경은 $\Phi 108\text{mm}$, 노즐목 직경은 $\Phi 62.4\text{mm}$ 이다. 본 연구에 사용된 축소형 연소기는 연소실 내벽에 삭마형 내열재를 채택하여 연소열에 의한 엔진 손상을 막는 heat sink 형식의 연소기이다.

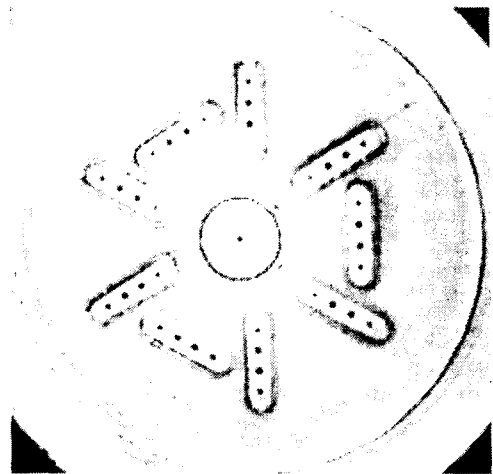


Fig. 1 Injector Head of Small Scale Combustor

축소형 연소기 연소 시험의 설계점 운용 조건은 표 1에 정리한 바와 같다. 단위 분사기 당의 설계 유량 조건은 실물형 연소기와 동일하게 구성되었다.

표 1. 축소형 엔진 운용 조건(설계점)

	설계점 조건
LOx 총 유량	1920 g/s
LOx 점화기 유량	114 g/s
연료 총 유량	820 g/s
연료 점화기 유량	80 g/s
O/F ratio	2.34
정상 연소압력	200 psig

2.2 가스발생기

본 연구에 사용된 가스발생기는 160kW급의 터빈을 구동할 수 있는 사양으로 설계 제작되었다. 추진제 총유량은 900g/sec 이며, 액체산소-케로신

추진제의 원활한 혼합 및 연소를 위해 총돌반각 22.5도를 갖는 12개의 F-O-F 형 분사기와 가운데에는 3-On-1 형태의 총돌형 분사기가 배치된 구조이다(Fig.2)[4]. 또한, 연소기 벽면 및 분사기 면에서의 국부적인 열손상을 방지하기 위한 냉각용 연료분사공이 설치되어 있다. 가스발생기의 점화 특성에 중요한 영향을 가지는 분사기 헤드부는 추진제를 각각의 분사기로 균일하게 공급하기 위한 링 형태의 연료 매니폴드와 돔형태의 산화제 매니폴드로 구성된다. 가스발생기의 연소실 최대 직경은 $\phi 52\text{mm}$ 이고, 연소기 축방향 길이는 220mm에서 350mm까지 변화시킬 수 있게 설계되었다.



Fig. 2 Injector head of gas generator

2.3 가스 Torch 점화기

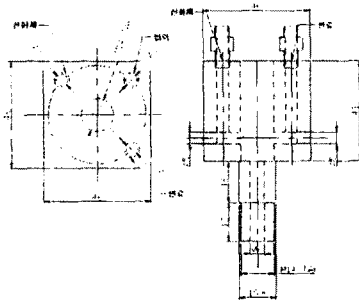


Fig. 3 GCH4+GO2 Gas Torch Ignitor

축소형 연소기 및 가스발생기 연소시험에서의

점화를 위해 당량비 2.0 - 2.5 범위의 기체산소와 기체 메탄 혼합기를 이용한 전기점화 방식의 가스 토치 점화기를 이용할 수 있도록 하였다(Fig. 3). 이러한 당량비 범위는 연소기 및 가스발생기 내의 저혼합비 영역에서의 안정적인 점화를 위한 충분한 점화 에너지를 공급하면서도, 고온의 토치 화염에 의한 연소기 벽면이나 점화기 챔버 내부의 열손상이 발생하지 않는 화염온도 환경을 조성하기 위한 것으로, 이 범위 내의 혼합비에서는 스파크 플러그 및 점화기의 열손상이 관측되지 않았다. 가스발생기의 경우에 토치 점화기는 분사기 면으로부터 축방향으로 35mm 떨어진 위치에 설치된다.

3. 결과 및 토의

3.1 축소형 연소기 점화특성

Figure 4에 가스 토치 점화기를 이용한 축소형 연소기의 점화과정을 압력으로 도시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 연소기나 가스발생기에서 정압 측정결과는 추진제 공급의 정확한 시점을 판단하는 데에는 한계를 가지며, Fig. 4에서도 산화제 매니폴드 및 연료 매니폴드에서 측정한 정압이 연소기 압력보다 낮게 나타나는 부분이 관찰되는데 이는 실제 현상이 아니라 정압측정을 위한 유도관 속에서 액체가 흘러가는데 소요되는 시간에 의한 오차이다. Fig. 4는 축소형 연소시험의 sequence를 보여주기 위한 것으로 먼저 가스 토치에 기체 메탄과 기체 산소가 공급되면, 미리 작동하고 있던 스파크 플러그에 의해 점화되고 약 2bar 정도의 연소압이 점화기 챔버 내에서 형성된다. 그 후에 축소형 연소기 내의 분사기면 중심부의 분사기를 이용한 강한 점화원을 확보하기 위한 액체산소와 케로신이 공급되어 점화가 되고, 액체산소-케로신 점화기의 점화가 확인된 이후에, 주 추진제의 공급이 케로신 먼저, 그 다음에 액체산소의 순서로 이루어지게 된다. 주추진제인 액체산소의 공급이 시작되면 연소압은 상승하기 시작하여 정상적인 연소압까지 증가하게 되는 것이다. 축소형 연소기의 설계 운용점에서의 연소압이 상승하기 시작해서 정격 연소압에 도달하기까지의 시간은 가스 토치 점화기를 사용하였을 경우 약 0.24초 정도이지만, 이것은 밸브 작동 시간의 변화 및 선행하는 추진제의 종류 및 두 추진제 공급 사이의 시간에 따라

변화하는 값이다.

Fig. 5는 동일한 설계의 축소형 연소기에 대해 동일한 추진제 유량 및 가압조건으로 설계점 연소시험을 수행하고, 점화기의 종류 및 점화조건에 변화를 주었을 경우에 연소압의 발달을 압력 상승 시작 시간의 함수로 나타낸 것이다. 세 개의 압력선도 중 가장 빨리 압력이 발달하는 것은 메탄과 기체 산소를 이용한 가스 토치 점화기를 이용한 경우이고, 그 다음으로 압력 발달 속도가 빠른 것은 TEA를 점화제로 사용한 경우이며, 압력 발달이 가장 느린 것은 점화시에 TEA를 점화제로 쓰면서 연소실 내에 질소 가스를 주입하는 경우이다. 점화 기간동안 공급되는 점화에너지의 크기와 관계되는 것으로 보이는데, 메탄과 기체 산소를 이용하는 가스 토치 방식의 점화기가 TEA 방식의 점화기보다 점화에너지가 더 크기 때문이기 보다는 가스 토치 및 TEA가 축소형 연소기에 공급되는 방식의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 앞서 설명한 바와 같이 가스 토치를 사용하여 점화하는 경우에는 가스 토치가 점화되어 축소형 연소기의 별도의 점화기용 분사기의 액체산소와 케로신 화염을 점화하게 되고, 이 후에 주 추진제가 연소실 내로 공급되는 경우에는 가스토치와 충돌형 점화기 두개의 점화원으로부터 열원을 공급받기 때문에 압력 상승 속도가 가스 토치 없이 TEA 점화기만 이용하는 것 보다 크게 되는 것으로 판단된다. 가장 아래쪽 커브는 TEA만을 연소기 head 중심의 충돌형 점화기로 공급하면서 연소실에 기체 질소로 교란을 주는 경우로서, 압력 상승의 속도가 기체 질소의 교란이 없는 가스 토치 점화의 경우나 TEA 점화의 경우에 비해 상당히 느리게 나타난다. 기체 질소가 갖는 이러한 효과를 이용해서, 액체로켓 엔진 연소기의 점화 특성을 부드럽게 해주기 위해 의도적으로 점화 초기에 연소기 내부를 질소분위기로 만들어 주는 경우도 있다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 연소기 내부가 질소 분위기인 경우에 연소압이 발달하기 시작해서 정격 압력까지 증가하는데 걸리는 시간은 가스 토치 점화 방식에 비해 4배에 달하는 1초 정도의 시간이 소요된다. 점화시점에서의 연소기 내부의 질소 분포에 따른 점화 지연에 대해서는 안정적이고 신뢰성 있는 점화 방식을 확보한다는 측면에서 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

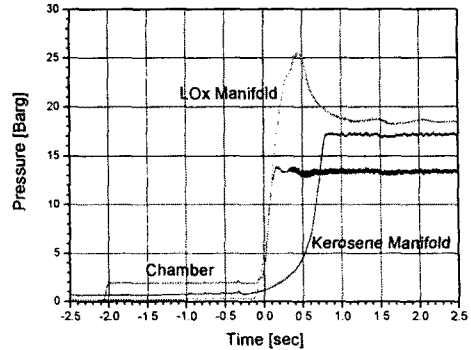


Fig. 4 Pressure of subscale combustor during ignition process

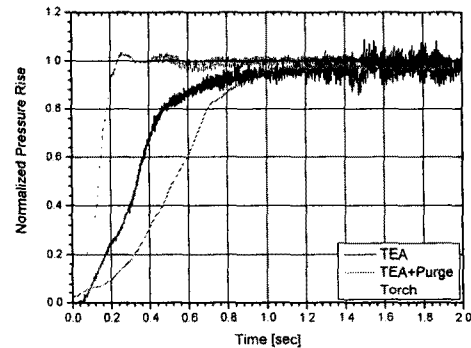


Fig. 5 Comparison of pressure build-up w.r.t. various ignition source conditions

3.2 가스발생기 점화특성

가스발생기의 설계에 있어서 축소형 연소기와 달리 분사기 면 중심부의 분사기는 독립적으로 추진제 공급이 이루어지지 않기 때문에 점화기로 이용될 수는 없다. 따라서 가스발생기의 점화순서는 가스 토치 점화기에 spark를 발생시키고 가스메탄을 공급한 후에 기체 산소를 공급하여 토치 화염을 형성하고, 토치 점화기에서의 안정적인 연소가 확인된 후에 주추진제인 케로신을 먼저 공급하고, 0.3초 후에 주추진제인 액체산소를 공급하여 점화 및 연소가 이루어지는 순서로 구성된다. 가스발생기의 경우 점화기의 점화가 이루어진 후에, 주 산화제를 주 연료에 앞서 공급하는 방식도 이용되고 있으나, 설비 및 시험 운용의 안정성을 위해 이전에 경험한 연료 선행 방식을 적용하였다.

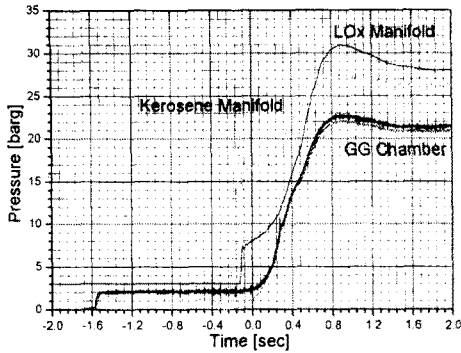


Fig. 6 Pressure of gas generator during ignition process

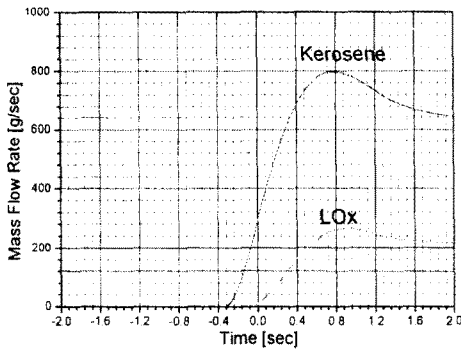


Fig. 7 Mass flow rate during ignition process

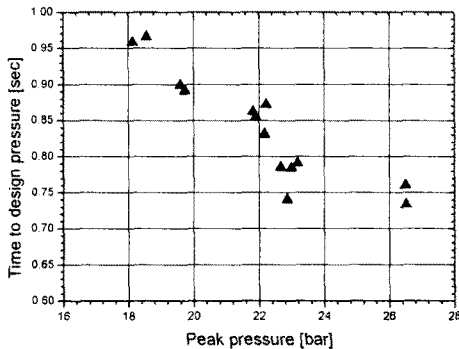


Fig. 8 Ignition peak pressure w. r. t. time to design pressure

Fig. 6, 7에서 연소에 의한 점화기 압력이 2bar로 유지되는 상태에서 추진제의 공급이 진행됨을 알 수 있다. 가스발생기에서 주 추진제의 공급이 시작된 이후 연소기 내부압력이 상승을 시작하여 설정압에 도달하는데 1초 정도의 시간이 소요됨을 확인할 수 있다. 이것은 가스발생기의 설계 O/F비(0.337)의 연료 과잉조건에서의 느린 연소 반응에 기인한다. Fig. 8에는 가스발생기 연소시험시 점화 구간에서 연소압이 평균값에 도달하는 시간을 압력의 peak 값의 함수로 나타내었다. 가스발생기의 저혼합비 조건에서도 정상 구간 평균압력에 도달하는 시간이 짧을수록 보다 높은 최고압력을 가지는 경향성을 관찰할 수 있는데, 이것은 점화시의 압력상승 속도와 가스발생기 점화의 강도와 관계된 것으로 판단된다.

4. 결론

액체산소와 케로신을 추진제로 하는 액체로켓 엔진의 축소형 연소기와 가스발생기의 연소시험에서 나타난 점화 특성을 측정 결과와 함께 제시하였다. 점착발화식 점화제와의 비교를 통해 토치 점화방식도 저유량으로 액체로켓 엔진 연소기에서의 안정적인 연소를 유발할 수 있음을 알 수 있었으며, 초기 점화가 안정적인 연소로 천이하는데 걸리는 시간은 연소기 내의 질소 분포 등에 의해서도 상당한 영향을 받음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA, 1992.
- [2] 박정 등, "소형 액체 로켓 엔진에서의 점화 시퀀스 결정 및 인젝터 수명연장 기법평가," 연소학회지, 제5권, 제1호, 2000.
- [3] 김영한 등, "KSR-III 축소형(I) 엔진의 연소 시험", 한국항공우주학회지, 제30호 제8권, pp. 120-125, 2002.12.
- [4] 권순탁, 이창진, "액체로켓 가스발생기용 F-O-F 인젝터의 설계와 분사특성", 한국항공우주학회 추계학술발표회논문집(II), pp.1039-1043, 2203. 11.