

산화제 과잉 예연소기 점화특성

문일윤* · 문인상* · 홍문근* · 강상훈* · 유재한* · 하성업* · 이선미* · 이수용*

Ignition Characteristics of an Oxidizer Rich Preburner

Ilyoon Moon* · Insang Moon* · Moongeun Hong* · Sang Hun Kang*
Jaehan Yoo* · Seong-Up Ha* · Seon-Mi Lee* · Soo Young Lee*[†]

ABSTRACT

It was designed and tested ignition that an oxidizer rich preburner for a staged combustion cycle liquid rocket engine propelled by kerosene and LOx. Operation conditions of the preburner are about 60 of OF ratio and 20 MPa of combustion pressure. Ignition characteristics were compared by propellants flowrate. As the results, the higher propellants flowrate, the shorter the ignition delay time and the higher ignition stiffness. The ignition delay time was affected by incoming the oxidizer flowrate through the refrigerative cooling channels. The oxidizer flowrate from the cooling channels decreased by inflow of combustion gas during initial ignition. The oxidizer flowrate of the cooling channels increases, it is rapid recovery by cooling effect, eventually the ignition delay time decreases.

초 록

케로신과 액체산소를 추진제로 하는 다단연소 사이클 액체엔진용 산화제 과잉 예연소기를 설계하여 점화시험을 수행하였다. 산화제 과잉 예연소기는 혼합비 60, 20 MPa의 연소압에서 작동하도록 설계되었다. 가압식 연소시험설비에서 안정적 점화를 위해 점화초기 추진제 유량을 변화시켜 점화특성을 비교하였다. 시험결과 점화초기 추진제 공급유량이 많을수록 점화지연시간이 짧아졌으며 점화강도도 높아졌다. 연소실 재생냉각채널 내의 산화제 온도 측정을 통해 점화 시 연소가스가 재생냉각채널로 유입됨을 확인할 수 있었다. 점화 시 발생한 연소가스가 재생냉각채널로 유입되어 재생냉각채널 내 산화제 온도를 상승시켜 산화제 공급이 줄어들게 되어 점화지연을 야기한다. 추진제 공급유량이 많을 경우 재생냉각채널 내 산화제가 빠르게 냉각되어 연소실로 원활히 공급되면서 점화지연시간이 짧아진다.

Key Words: Staged Combustion Cycle(다단연소 사이클), Preburner(예연소기), Oxidizer Rich(산화제 과잉), Ignition(점화), Ignition Delay(점화지연)

1. 서 론

* 한국항공우주연구원 미래로켓연구팀

† 교신저자, E-mail: sylee@kari.re.kr

다단연소 사이클 로켓엔진은 고추력을 요하는 우주 발사체용 1단 로켓에 널리 사용되고 있다. 케로신과 액체산소를 추진제로 하는 다단연소 사이클 로켓엔진의 예연소기는 연소기에 사용되는 산화제 전부와 연료 일부를 연소시켜 산화제 과잉 가스를 생성한다. 예연소기의 산화제 과잉 가스는 터보펌프의 터빈을 구동한 후 연소기로 공급되어 연소되므로 다단연소 사이클 로켓엔진의 예연소기는 개방형 사이클 로켓엔진의 가스 발생기에 비해 높은 연소압을 갖는다[1].

본 논문에서는 케로신과 액체산소를 추진제로 하는 산화제 과잉 예연소기를 설계하여 가압식 실험설비에서 점화시험을 수행한 결과를 바탕으로 설계된 산화제 과잉 예연소기의 점화조건에 따른 점화특성 변화를 고찰하였다.

2. 시험장치

2.1 산화제 과잉 예연소기

시험에 사용된 예연소기는 연료와 산화제 일부를 혼합헤드를 통해 연소실에 공급하여 1차 연소시키고 나머지 산화제를 연소실 냉각채널을 거쳐 연소실 중앙의 분사공을 통해 연소실로 주입하여 기화시키는 형태로 최종적으로 연소압 20 MPa, 혼합비 60에서 작동하도록 설계되었다[2].

Figure 1에서와 같이 혼합헤드에는 7개의 연료 분사기와 24개의 산화제 분사기가 사용되었으며 1개의 연료 분사기를 6개의 산화제 분사기가 둘러싸는 별집형태로 배열하였다.

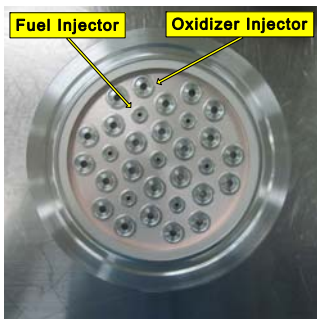


Fig. 1 Mixing Head

Figure 2는 재생냉각채널을 보여주기 위해 연소실을 절단한 것이다. Fig. 2에서 액체산소 주입구를 통해 A로 주입된 액체산소 일부는 연소실 중앙에 위치한 분사공(C) 전단의 냉각채널만 거쳐 B로 나오고 나머지 액체산소는 연소실 끝 쪽 매니폴드 E를 거쳐 D로 나온다. E와 D를 통해 연소실 중앙동에 모인 액체산소는 중앙 분사공(C)를 통해 연소실에 주입되어 혼합헤드의 연소가스와 혼합되어 기화된다.

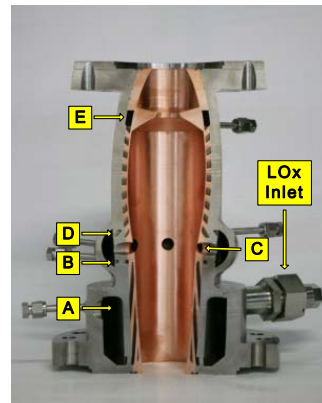


Fig. 2 Chamber with Cooling Channels

2.2 연소시험설비

연소시험설비는 Fig. 3과 같이 예연소기 혼합헤드로 케로신과 액체산소를, 연소실로는 액체산소를 독립적으로 공급할 수 있도록 구성되었다. 각각의 추진제 공급 배관에는 점화초기 유량제어를 위한 오리피스와 보조밸브, 정상연소 시 설계유량 공급을 위한 주 밸브라인을 설치하여 추진제를 2단으로 공급할 수 있다.

Figure 1에서와 같이 혼합헤드에는 별도의 점화용 분사기 없이 전체 연료 분사기를 통해 점화용 연료를 분사하여 점화하였다. 케로신으로 점화용 연료를 밀어내는 구조로 점화용 추진제가 먼저 연소실에 공급된 후 연료가 공급된다.

배관 내 오리피스 크기를 교체하는 방식으로 점화초기 공급되는 유량을 제외한 추진제 가압압력, 시험 사이클로그래프 등 모든 조건이 동일하게 하여 보조모드 공급유량에 따른 점화특성을 비교하였다[3].

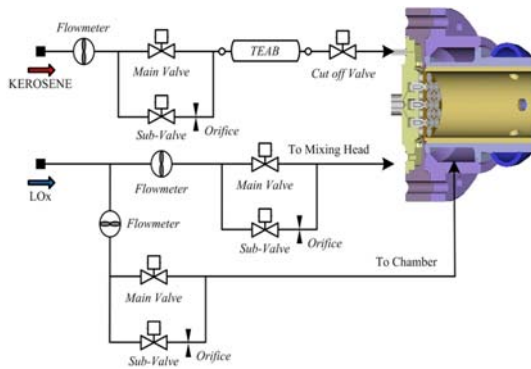


Fig. 3 Schematic of Propellants Feed Lines of the Combustion Test Facility

3. 시험결과

각각의 추진제 공급배관 보조 밸브만 개방하여 3초정도 저압 점화모드인 보조모드를 유지한 후 주 밸브를 1초간 개방하여 설계 연소압까지 승압하였다.

설계유량의 27%로 보조모드를 유지하여 시험한 Case 1의 연소압과 연소실 재생냉각채널 각 지점에서 측정된 산화제 온도를 Fig. 4에 나타내었다. 연소압은 예연소기의 혼합링과 연소압 생성을 위해 부착한 노즐 사이에서 측정하였다. Fig. 4의 연소압 그래프를 보면 5.722초에 압력 피크가 발생한 것을 볼 수 있다. 이는 점화용 추진제가 액체산소와 반응하여 발생한 것으로 점화가 시작되는 시점으로 볼 수 있다. 이후 연소압이 완만히 상승하다가 6.6초대에서 연소압이 가파르게 상승하여 6.847초에 보조모드 정상상태에 진입한 것을 볼 수 있다. Case 1의 보조모드 정상상태의 경우 정상 설계유량의 27% 유량을 공급하여 5.5 MPa 연소압을 유지하였다. 이후 주 밸브의 개방에 따라 8.4초에서 연소압이 가파르게 상승하여 20 MPa 정상연소구간으로 진입하였다.

Case 1의 경우 보조모드 점화시작부터 보조모드 정상상태에 이르기까지 1.125초의 점화지연을 가지며 4.9 MPa/s의 강도로 점화되었음을 알 수 있다.

Figure 4에서 THO는 혼합헤드 내 산화제 매

니폴드, TA, TB, TD는 Fig. 2에 나타난 연소실 재생냉각 채널의 A, B, D 지점에서 측정된 산화제 온도이다. 점화전 산화제가 재생냉각채널에 공급되면서 온도가 점점 낮아져 -140 ℃에 이른다 5.73초에 온도가 급격히 상승하여 정점을 찍은 뒤 6.8초부터 다시 급격히 낮아지며 안정화되는 것을 볼 수 있다. Fig.4의 재생냉각채널 내 산화제 온도 그래프에 나타난 5.73초부터 6.8초간의 고온구간은 연소압력 그래프에서 점화시작 시점에서부터 보조모드 정상상태에 진입하는 점화 지연 구간과 일치함을 볼 수 있다. 연소실 중앙 매니폴드 산화제의 온도가 급격히 증가하는 것은 고온의 연소가스가 유입되었기 때문이다. 이는 재생냉각채널을 거쳐 연소실 중앙 분사공으로 분사되는 산화제가 충분히 냉각되지 않아 의도한 양의 산화제가 분사공을 통해 분사되지 않았음을 의미한다. 따라서 적은 추진제 공급이 보조모드 정상상태에 이르는 점화지연의 주된 이유로 판단된다.

이러한 유량 변동 현상을 유량 계측 신호를 통해 확인할 수 없었다. 이는 계측하고자 하는 극저온 유체의 특성과 유량계의 위치, 종류 및 계측 속도에 의한 제한 때문으로 판단된다.

추진제 가압압력과 사이클로그래프 변경 없이 오리피스 교체를 통해 보조모드 추진제 공급유량을 정상 설계유량 대비 27%에서 46%로 늘려 시험한 Case 2의 연소압과 연소실 냉각채널 각 지점에서 측정된 산화제 온도를 Fig. 5에 나타내었다.

Figure 5에서 5.568초에 압력 피크가 발생하여 점화가 시작됨을 볼 수 있다. 이후 연소압이 완만히 상승하다가 6.1초에 연소압이 가파르게 상승하여 6.179초에 보조모드 정상상태에 진입하였다. Case 2의 보조모드 정상상태의 경우 정상 설계유량의 46%의 유량을 공급하여 8.4 MPa 연소압을 유지하였다. 이후 주 밸브의 개방에 따라 Case 1과 동일하게 8.4초에서 연소압이 가파르게 상승하여 20 MPa 정상연소구간으로 진입하였다.

Case 2의 경우 보조모드 점화시작부터 보조모드 정상상태에 이르기까지 0.611초의 점화지연을 가지며 13.7 MPa/s의 강도로 점화되었음을 알 수

있다.

Case 1과 동일하게 점화전 산화제가 재생냉각 채널에 공급되면서 온도가 점점 낮아져 -140 ℃에 이르다 5.57초에 온도가 급격히 상승하여 정점을 찍은 뒤 6초부터 다시 급격히 낮아지며 안정화 되는 것을 볼 수 있다.

Case 2의 경우 Case 1에 비해 점화지연시간이 절반으로 감소하였는데 이는 산화제 유량 증가로 인해 냉각능력이 증가하면서 연소가스 유입에 따른 효과가 Case 1에 비해 빠르게 해소되면서 산화제 공급이 빠르게 복구되었기 때문으로 판단된다.

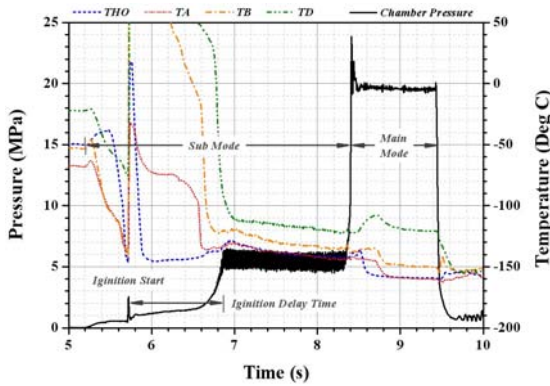


Fig. 4 Combustion Pressure and LOx Temperatures of Cooling Channels during a Hot Test in Case 1

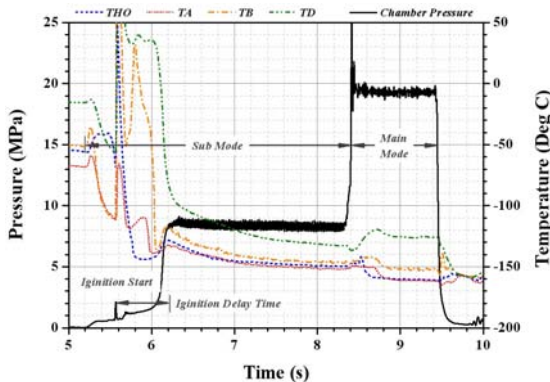


Fig. 5 Combustion Pressure and LOx Temperatures of Cooling Channels during a Hot Test in Case 2

4. 결론

케로신과 액체산소를 추진제로 하는 다단연소 사이클 액체엔진용 산화제 과잉 예연소기를 설계하여 점화시험을 수행하였다. 가압식 연소시험 설비에서 안정적 점화를 위해 점화초기 추진제 유량을 변화시켜 점화특성을 비교하였다. 점화초기 추진제 공급유량이 많을수록 점화지연시간이 짧아졌으며 점화강도도 높아졌다. 연소실 재생냉각채널 내의 산화제 온도 측정을 통해 점화 시 연소가스가 재생냉각채널로 유입됨을 확인할 수 있었다. 점화초기 추진제 공급유량이 많을 경우 재생냉각채널로 유입된 연소가스에 의한 순간적인 온도 상승을 빠르게 냉각하여 정상화함에 따라 재생냉각채널과 연결된 연소실 중앙 분사공을 통해 산화제가 충분히 공급되면서 점화지연시간이 짧아진다. 점화초기 연소가스의 유입에 의해 연소실로 충분한 산화제가 공급되지 못하게 되는 점화지연기간에는 예연소기에서 연소, 기화되는 추진제는 낮은 OF비를 갖게 되므로 예연소기에서 터빈구동을 위한 배기가스 온도도 높아진다. 점화과정과 같은 천이 구간에서도 예연소기의 연소가스 온도는 터빈입구온도 조건을 만족시켜야 하므로 제한되어야 한다. 따라서 점화 시 연소실 중앙 분사공에서 충분한 산화제가 분사되도록 하여야 한다.

참고문헌

1. Huzel, DK. and Huang, DH., "Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines," AIAA, 1992
2. 문일윤, 문인상, 유재한, 전재형, 이선미, 홍문근, 하성엽, 강상훈, 이수용, "산화제 과잉 예연소기 점화시험," 제37회 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2011, pp.869-872
3. 한영민, 조남경, 박성진, 이수용, 이대성, "KSR-III 주엔진 연소시험 Cyclogram에 대한 고찰," 한국추진공학회지, 제6권, 제3호, 2002, pp.19-27