

75톤급 액체엔진 연소시험설비의 액체산소 과냉각 시스템

서대반* · 유병일* · 이정호* · 조남경* · 김승한* · 한영민*

Liquid Oxygen Supercooling System in the 75 tonf-class Liquid Engine Combustion Test Facility

Daeban Seo* · Byoungil Yoo* · Jungho Lee* · Namkyung Cho* · Seunghan Kim* · Yeoungmin Han*

ABSTRACT

In the design of KSLV-II, there is a scenario in which supercooled liquid oxygen is supplied to prevent a geysering phenomenon in the oxidizer pipe and a cavitation phenomenon at the pump inlet. To verify this condition in the engine development test phase, a system that supplies supercooled liquid oxygen to the engine was applied in the engine combustion test facility. In this system, supercooling methods using a vacuum ejector and using helium injection to the tank were applied. Both tests were carried out for about 17 minutes. Supercooling results of about 3.3K for the ejector test and about 2.2K for the helium injection test were obtained at the 50% level of the tank.

초 록

한국형발사체의 설계안에는 산화제 배관의 geysering 현상과 펌프 입구의 cavitation 현상을 방지하기 위하여 발사대기 중 산화제인 액체산소를 과냉각 하여 공급하는 시나리오가 포함되어 있다. 이 조건을 75톤급 엔진 개발 시험 단계에서 검증하기 위해 엔진 연소시험설비에는 액체산소를 과냉각 할 수 있는 시스템이 적용되었다. 여기에는 진공 이젝터를 이용한 방법과 탱크 내 헬륨 분사를 통한 방법이 적용되었으며, 성능 평가를 위해 각각에 대한 과냉각 시험이 수행되었다. 두 시험에서 모두 약 17분간 시험이 진행되었으며, 탱크 50%수위 지점 기준 이젝터를 이용한 시험에서는 약 3.3K, 헬륨 분사를 이용한 시험에서는 약 2.2K 의 과냉각 결과를 나타내었다.

Key Words: KSLV-II(한국형발사체), Engine Combustion Test Facility(엔진연소시험설비), LOx(액체산소), Supercooling(과냉각)

1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 한국형발사체(KSLV-II)의 1단/2단 엔진인 75톤급 액체엔진의 개발시험을 나로우주센터 내 엔진연소시험설비(RETF)에서 수행하고 있다[1]. 현재까지의 한국

* 한국항공우주연구원 엔진시험평가팀

† 교신저자, E-mail: seodb@kari.re.kr

형발사체 설계안에서는 발사 운용 시 산화제 배관에서 액체산소가 증발하면서 발생하는 geysering 현상의 억제와 터보펌프 입구에서의 공동화 (cavitation)의 억제를 위해 액체산소를 90K 이하로 과냉각하여 공급하는 시나리오가 포함되어 있다. 이것을 엔진 시험 단계에서 검증하기 위하여 엔진 연소시험설비에는 연소시험시 진공 이젝터 및 탱크 내 헬륨 가스 분사를 통해 액체산소를 과냉각하여 엔진으로 공급하는 시스템이 적용되어 있다. 본 논문에서는 이 액체산소 과냉각 시스템의 소개 및 시스템의 인증 시험 결과에 대해 기술하였다.

2. 시스템 구성

2.1 진공 이젝터

대기압에서 포화 온도가 90K인 액체산소를 포화 온도 이하로 과냉각하는 방법으로는 먼저 액체산소가 저장된 탱크 내부의 압력을 대기압 이하로 낮추어주는 방법이 있다. 이젝터 또는 진공 펌프 등을 통하여 탱크 내부의 압력을 낮추게 되면 포화 온도가 압력에 따라 낮아지게 되는데, 이에 따라 탱크 내 액체산소는 활발히 기화되면서 일정 시간 후 그 포화 온도에 도달하게 된다. 발사체에서 발사대기 시 요구되는 액체산소의 온도인 약 87K가 포화 온도일 때의 압력은 약 0.7 barA 로 런탱크 내부는 높은 진공도를 필요로 하지는 않으므로, 과냉각 시스템을 위해서는 진공 펌프 보다 구조가 간단하고 고장이 거의 없는 이젝터를 적용하였다. 런탱크 가압 용 가스인 질소 가스를 구동 가스로 하여 구동 가스의 압력, 탱크 내부의 부피 및 증발량을 고려해 이젝터의 사이즈를 도출하였으며, 제작된 이젝터를 Fig.1 과 같이 런탱크 상부에 설치하였다.

2.2 냉각 헬륨 분사 장치

탱크 내부의 액체산소를 과냉각시키는 또 다른 방법으로는 헬륨 가스를 탱크 하부에 분사시키는 방법이 있다. 열교환기를 거쳐 냉각된 헬륨 가스를 탱크 하부에서 분사시키면 먼저 헬륨 기

포 내의 산소 분압과 기포의 경계면에서의 포화 압력의 차이에 의해 액체산소가 헬륨 기포 속으로 확산되는데, 이때 경계면에서는 포화상태를 유지하기 위하여 액체산소의 증발이 일어나게 된다. 이 과정에서 증발되는 액체산소가 주위의 잠열을 흡수하면서 증발하게 되어 결과적으로 액체산소의 냉각효과가 나타나게 된다[2,3]. 헬륨 가스를 냉각시키기 위하여 액체산소를 이용한 열교환기를 런탱크 옆에 설치하고, 열교환기를 통과한 헬륨가스 배관은 다시 런탱크 상부에서 탱크 내부의 하부로 들어가도록 하여 분사 직전까지 냉각된 온도를 유지하도록 함으로써 헬륨 가스 온도에 의한 액체산소의 온도 상승 효과를 최소화 하도록 하였다. Fig. 1은 앞서 기술한 액체산소 과냉각 시스템의 개념도를 나타낸다.

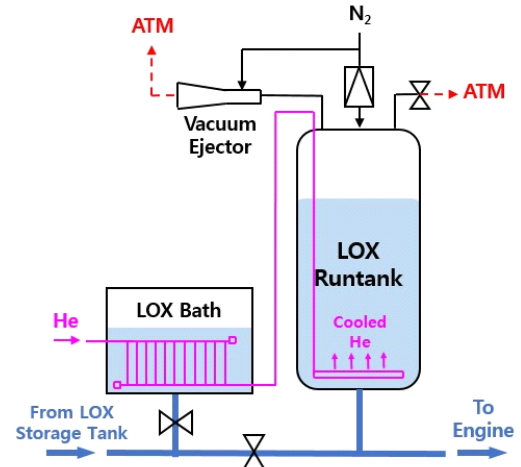


Fig. 1 Schematic drawing of liquid oxygen supercooling system.

3. 성능 평가

3.1 진공 이젝터를 통한 냉각 시험

내부 용량이 31 m³ 인 액체산소 런탱크에 약 25 m³ (전체 용량 대비 약 81.5%) 의 액체산소를 충전한 후, 이젝터를 구동하여 과냉각 시험을 수행하였다. 이젝터 구동 전 탱크 상단부에 설치된 배출 밸브를 충분한 시간 동안 열어 두어 탱

크 내부의 액체산소 온도가 약 90K 에 도달하도록 하였다. 탱크 내부의 온도는 2개의 온도센서로 측정하였는데, TT2206 센서는 탱크의 수위 50% 지점에, TT2207 센서는 수위 7% 지점에 설치되었다. 이젝터는 약 17분간 구동하였으며, 이젝터의 구동 가스인 질소는 40 bar의 압력으로 이젝터에 주입되었다. 이젝터 구동 시작과 함께 런탱크 내부의 압력이 감소하기 시작하여 이젝터 구동 종료 직전까지 압력은 절대압 0.6 bar에 도달하였으며, 수위는 81.5%에서 77.8%로 감소하였다. Fig. 2는 이젝터 구동 시간 동안의 런탱크 압력 및 수위를 나타내며, Fig. 3은 탱크 내부의 온도 변화를 나타낸다.

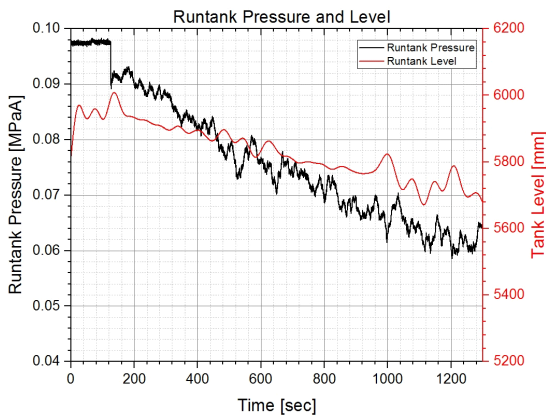


Fig. 2 Runtank pressure and level in Lox supercooling test using vacuum ejector.

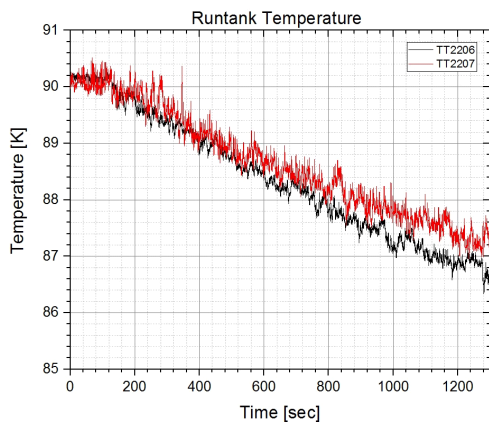


Fig. 3 Runtank temperature in Lox supercooling test using vacuum ejector.

탱크 내부 액체산소는 구동 직전 약 90K에서 구동 후 탱크 압력이 감소함에 따라 하강하기 시작하여 20분 후 TT2207은 87.2K, TT2206은 86.7K 에 도달하였다. TT2207의 최종 온도가 약 0.5K 높은 것은 탱크 내 압력 감소에 따른 증발이 액체산소 표면에서 일어나므로, 이에 따른 과냉각이 표면에서부터 일어나게 되어 상대적으로 온도센서가 상부에 위치한 TT2206 의 온도가 낮게 측정된 것으로 판단된다.

3.2 헬륨 분사를 통한 냉각 시험

다음으로 열교환기를 통해 냉각된 헬륨가스를 액체산소 런탱크에 주입하는 헬륨 분사에 의한 과냉각 시험을 수행하였다. 시험을 위해 이젝터를 이용한 과냉각 시험과 같이 액체산소를 런탱크에 약 80% 가량 충전하였으며, 탱크 내 압력을 대기압 상태로 충분히 유지시켜 액체산소의 온도를 약 90K 가 되게 하였다. Fig. 4는 헬륨 분사 시험을 위한 장치의 구성도를 나타내며 Fig. 4는 런탱크 상부로 주입되는 헬륨가스의 압력과 온도를, Fig. 6 은 헬륨 분사에 의한 런탱크 내부 액체산소의 온도변화를 나타낸다.

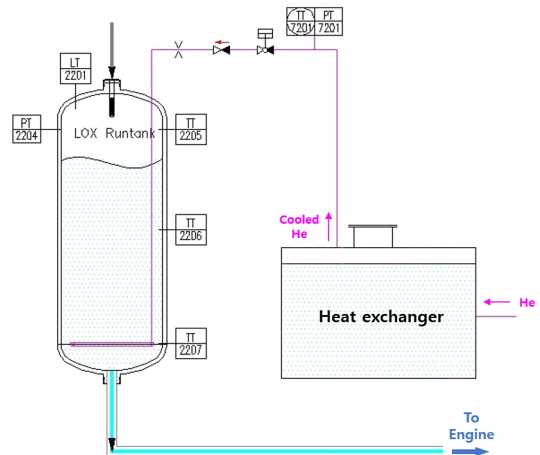


Fig. 4 Schematic drawing of helium injection system.

Fig. 5 의 약 220초 시점부터 밸브가 개방되면서 헬륨이 주입되기 시작하였으며, 주입 압력은 약 5 barA, 주입 시간은 인젝터 시험에서와 같이 약 17분 동안 주입되었다. 헬륨 분사가 시작

되자마자 런탱크 내부 액체산소의 온도는 하강하기 시작하여 17분 후 분사가 종료된 시점에서 온도는 TT2206, TT2207 모두 약 87.8K를 나타내었다. 이젝터를 이용한 과냉각 시험과 결과를 비교해보면 동일 시간 동안 액체산소의 온도는 TT2206 기준으로 헬륨 분사 시험이 약 1K 가량 높으나, 탱크의 하부와 중간지점, 즉 TT2207 온도와 TT2206 온도가 같은 값을 나타내므로 탱크 내부 온도는 더욱 균일하게 냉각됨을 알 수 있다.

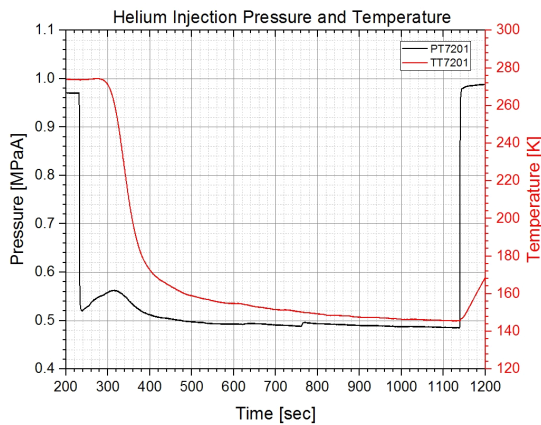


Fig. 5 Helium injection pressure and temperature.

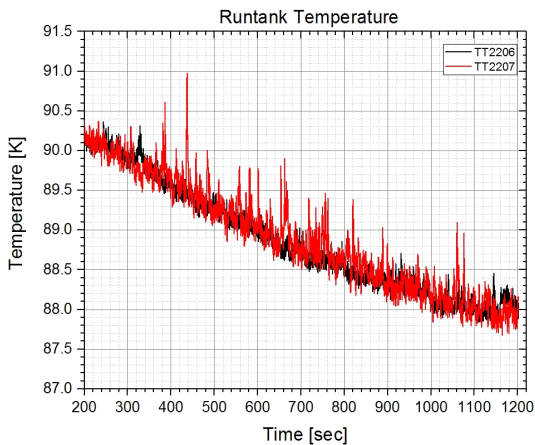


Fig. 6 Runtank temperature in Lox supercooling test using helium injection method.

4. 결론

한국형발사체의 발사대기 중 과냉각 액체산소 공급 시나리오를 엔진 개발 과정에서 검증하기 위한 액체산소 과냉각 시스템이 엔진 연소시험 설비에 적용되었다. 진공 이젝터를 이용한 과냉각 방법과 탱크 내 헬륨 분사를 통한 과냉각 방법이 적용되었으며, 각각에 대한 과냉각 시험이 수행되었다. 이젝터를 이용한 과냉각 시험에서는 약 17분간 탱크 50%수위 지점 기준 약 3.3K의 액체산소 온도 하강 결과를 나타내었으며, 헬륨 분사 시험에는 동일 위치에서 약 2.2K의 온도 하강 결과를 나타내었다. 같은 시간 동안 이젝터를 이용한 시험이 보다 높은 냉각 효과를 나타내었으나, 약 0.5K 가량 탱크 아래 부분과 50% 부분과의 온도 차이가 발생하였다. 헬륨 분사 시험의 경우는 위치와 상관없이 균일하게 온도가 하강하는 결과를 나타내었다. 이 시험을 통해 엔진 연소시험설비의 과냉각 액체산소 공급 가능성을 확인하였으며, 향후 과냉각된 액체산소를 주입한 엔진 연소시험이 수행 될 예정이다.

참고 문헌

1. 김승한 등, "한국형발사체 75톤급 엔진 개발 시험," 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회 논문집, pp.888-891, 2016.
2. 권오성 등, "헬륨분사를 통한 액체산소 과냉각에 관한 실험적 연구," 한국추진공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집, pp.179-182, 2005.
3. 권오성 등, "헬륨분사를 통한 액체산소 냉각의 이론적 고찰 및 해석과 시험의 비교," 항공우주기술 제 5권 2호, pp.134-142, 2006.