

## 한국형발사체 7톤급 액체로켓엔진 냉각 특성

임지혁<sup>a,\*</sup> · 유병일<sup>a</sup> · 이광진<sup>a</sup> · 한영민<sup>a</sup>

# Cool Down Characteristics of 7 Tonf-class Liquid Rocket Engine for KSLV-II

Ji-Hyuk Im<sup>a,\*</sup> · Byungil Yu<sup>a</sup> · Kwang-Jin Lee<sup>a</sup> · Yeoung-Min Han<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Engine Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [jhim1@kari.re.kr](mailto:jhim1@kari.re.kr)

### ABSTRACT

Engine cool down process is necessary for the liquid rocket engines using cryogenic propellants in order to meet the requirement of engine inlet temperature. This paper evaluates the cool down characteristics of oxidizer supply pipeline and engine in prechill process prior to the engine firing tests, and calculate the quantity of liquid oxygen consumption.

### 초 록

한국형발사체에 사용되는 액체로켓엔진과 같이 극저온 추진제를 사용하는 엔진은 시험 전 시험설비 배관 및 엔진 냉각이 필수적으로 선행되어 엔진 입구 온도를 만족시켜야 한다. 본 논문에서는 한국형발사체 7톤급 액체로켓엔진의 시험 전 냉각 단계에서 소모되는 액체산소의 양을 확인하였고, 시험설비 배관 및 엔진 냉각특성을 평가하였다.

Key Words: KSLV-II(한국형발사체), 7 Tonf-class Liquid Rocket Engine(7톤급 액체로켓엔진), LOx(액체산소), Cool Down(냉각)

### 1. 서 론

한국형발사체 7톤급 액체로켓엔진 시험이 나로우주센터 3단엔진연소시험설비에서 진행되고 있다. 7톤급 액체로켓엔진은 케로신과 액체산소를 추진제로 사용하기 때문에 시험 전 시험설비 배관과 엔진에 추진제 충전 및 냉각과정이 필요하다. 연료로 사용되는 케로신은 시험설비 배관

과 엔진 충전시 기포 발생을 방지하기 위해 진공화 과정을 거쳐 충전을 하며 시험 전까지 지속적으로 기포 제거 과정을 수행한다. 산화제로 사용되는 액체산소는 공급배관, 터보펌프, 밸브를 천천히 냉각하면서 충전하게 된다. 냉각이 충분하지 않은 상태에서 연소시험을 수행하면 펌프가 고속으로 회전하면서 기포 발생에 따른 캐비테이션이 발생하여 터보펌프가 손상되는 문제를 야기할 수 있다. 또한, 냉각이 부족한 경우 서지(surge)가 발생할 수 있다. 냉각이 충분히 진행되지 않은 상태에서 극저온 유체인 액체산소

가 공급되기 시작하면 액체산소가 증발되면서 유로의 압력이 상승하게 되어 추진제의 공급이 지연되고 점화 지연과 충격, 그리고 추력 기여 없이 추진제를 소모하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 엔진 연소시험 전까지 산화제 배관과 엔진을 충분히 냉각하는 과정은 필수적이다[1,2].

산화제 런탱크에서 공급되는 액체산소는 시험설비 배관을 거쳐 터보펌프 입구로 공급되어 엔진 배관을 채운 후 연소기 산화제 개폐밸브(MOV, Main Oxidizer Shutoff Valve)를 통해 배출되어 냉각이 이루어진다. 엔진 냉각 초기에는 기화된 산화제가 배관을 냉각하게 되며 배관 벽면 온도와 액체산소의 포화 온도와의 온도차이가 감소하면서 액체 상태의 산화제가 점차 배관과 엔진으로 침투되며 액체 상태의 산화제가 배관 벽면에 접촉하기 시작하면 냉각량은 최대가

된다. 이때의 산화제는 annular flow로 이상유동(two phase flow) 상태이며 점차 냉각이 됨에 따라 순수 액체로 충전된다[3].

시험 전 운용단계에서는 배관과 엔진의 냉각 상태를 확인하며 냉각 유량을 늘리거나 줄이면서 냉각 속도를 조절한다. 발사체에서는 엔진을 냉각한 액체산소가 다시 산화제 탱크로 회수되어 재사용이 되지만 엔진연소시험설비에서는 이를 외부로 배출하여 버리게 되므로 시험 전 냉각단계에서 소모되는 액체산소의 양을 사전에 파악하는 것이 중요하다. 또한, 엔진의 주요 온도를 통해 냉각수준을 평가해야 소모되는 액체산소의 양을 조절할 수 있다. 한국형발사체 7톤급 액체로켓엔진의 냉각특성연구는 초기 7톤급 액체로켓엔진 1G와 파워팩에 대한 비교가 있었지만[4] 7톤급 액체로켓엔진 1G는 현재 엔진구

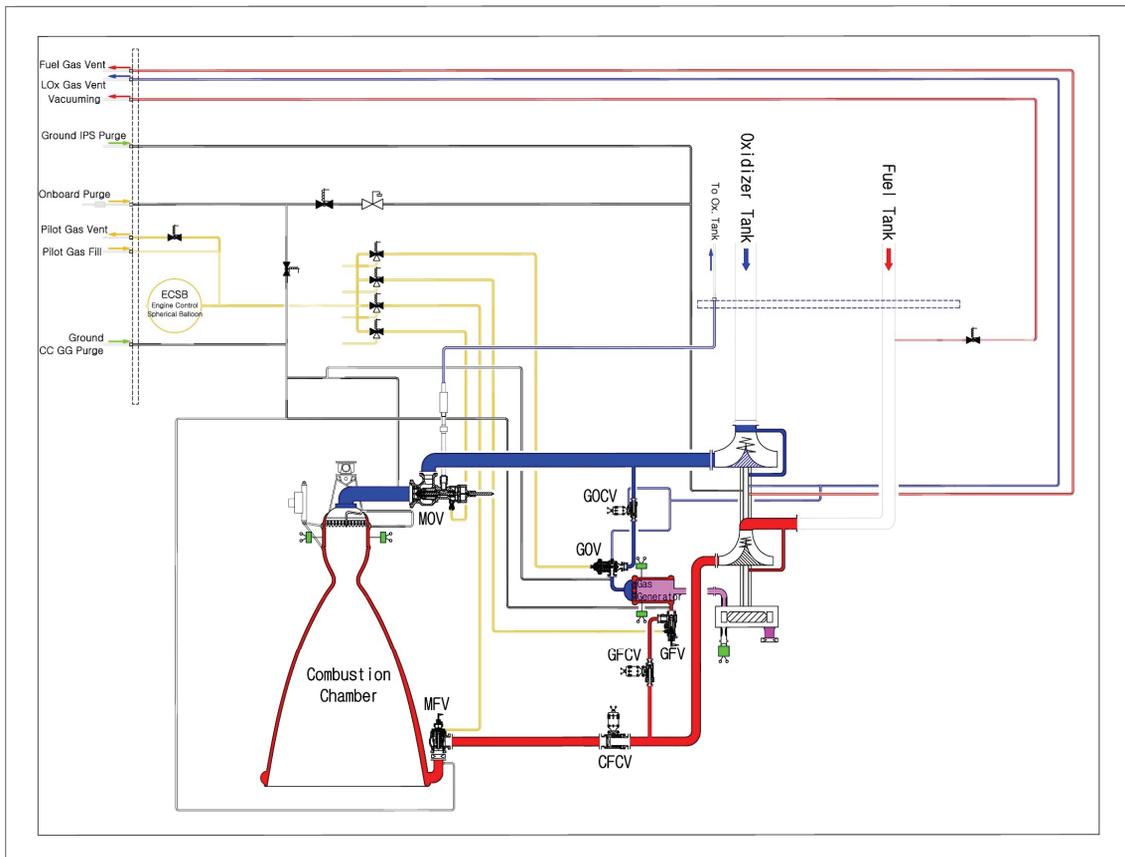


Fig. 1 Schematics of 7 tonf-class Engine.

성과 다르고 냉각 절차가 완전히 수립되기 이전이기 때문에 현재의 7톤급 액체로켓엔진의 냉각 특성을 살펴볼 필요가 있다. 본 논문에서는 7톤급 액체로켓엔진의 냉각 단계에서의 산화제 소모량과 냉각 특성에 대해 소개하였다.

## 2. 7톤급 액체로켓엔진 및 연소시험설비

### 2.1 7톤급 액체로켓엔진

7톤급 액체로켓엔진 8A의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 7톤급 액체로켓엔진은 터보펌프, 가스발생기, 연소기, 밸브, 파이프 부품류, 그리고 배관 등으로 구성된다. 액체산소는 터보펌프 입구로 공급되어 산화제 펌프 출구에서 연소기와 가스발생기로 공급되는 배관으로 분기된다. 가스발생기로 분기된 배관에는 가스발생기로 공급되는 액체산소의 유량 제어를 위한 가스발생기 산화제 유량제어밸브(GOCV, Gas Generator Oxidizer Flowrate Control Valve)가 있으며 가스발생기 산화제 개폐밸브(GOV, Gas Generator Oxidizer Shutoff Valve)를 통해 액체산소가 가스발생기 산화제 매니폴드로 공급된다. 가스발생기로 공급되는 배관 냉각을 위해 GOCV와 GOV

에 산화제 배출 라인이 구성되어 있으며 이는 IPS(Inter-Propellant Seal) 산화제 배출라인과 합쳐져 외부로 배출된다. 연소기로 공급되는 배관을 냉각한 액체산소는 MOV의 산화제 재순환 배관을 통해 외부로 배출된다. 산화제 펌프 입구와 배관, MOV 재순환 배관에 엔진의 냉각정도를 판단할 수 있는 온도센서가 장착되어 있다.

### 2.2 3단엔진연소시험설비

7톤급 액체로켓엔진은 나로우주센터 3단엔진 연소시험설비에서 시험이 수행된다. 3단엔진연소 시험설비는 지상 환경에서의 시험을 위한 지상 셀과 고공 환경 모사를 통한 엔진 성능 평가를 위한 고공셀이 갖춰져 있다. 7톤급 엔진 8A는 연소기가 확대 노즐로 제작되어 고공셀에서 시험이 수행되었다.

3단엔진연소시험설비의 산화제 시스템은 액체산소 충전 및 저장을 위한 산화제 저장탱크, 시험에 필요한 액체산소를 저장하는 런탱크와 시동탱크, 탱크 압력 제어를 위한 가압 시스템, 엔진으로 연결되는 공급 배관, 액체산소의 공급을 제어하기 위한 밸브 그리고 유량, 압력, 온도 등의 계측 센서로 구성되어 있다. 산화제 시스템은 7톤급 엔진의 1,000초 시험이 가능하도록 설계되

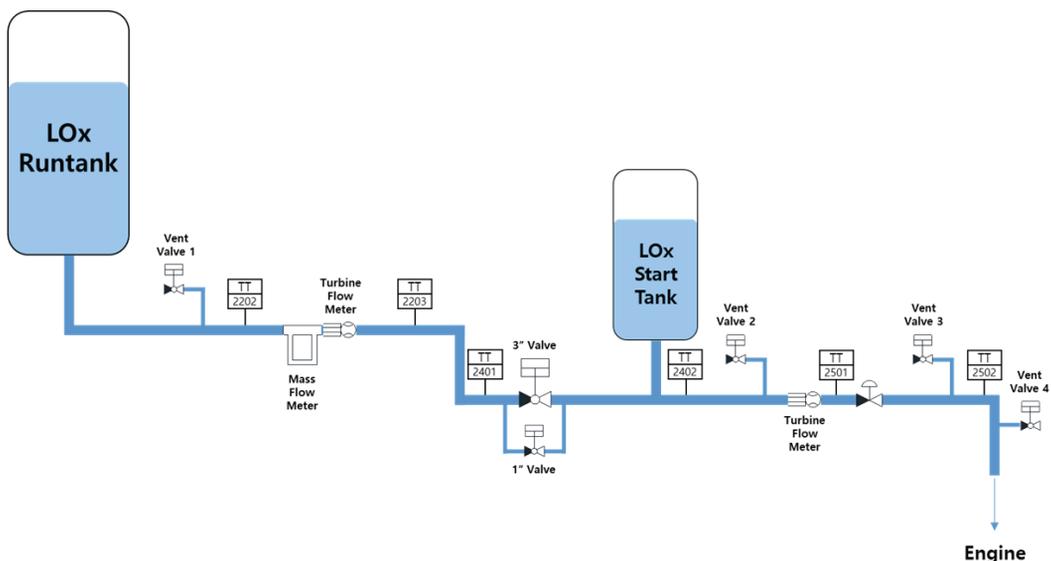


Fig. 2 Schematics of LOx supply system.

었다. 런탱크부터 엔진까지 연결되는 배관에는 배관 냉각을 위한 밸브, 공급 차단 밸브, 압력 센서, 온도 센서, 유량계 등이 설치되어있다. 배관 냉각시 초기에 액체산소가 기화되어 기체상태의 산소가 액체산소의 흐름을 방해하게 되어 배관의 원활한 냉각을 막는다. 냉각 밸브를 개방하면 배관에 존재하는 기체를 제거할 수 있으며 액체산소의 흐름을 원활하게 하여 배관 냉각을 촉진시켜준다. 배관에 설치된 온도센서로 냉각 정도를 감시하며 냉각 밸브를 반복 작동시켜 엔진과 공급배관의 충분한 냉각 상태를 유지한다.

산화제 런탱크는 질소 가압식으로 돔 작동식 레귤레이터를 이용하여 가압된다. 돔 압력은 서보 밸브로 제어되며 이를 통해 런탱크 가압압력을 조정하게 된다. 런탱크에는 크기가 다른 해압 밸브가 2개 설치되어 런탱크 압력을 제어할 수 있다. 엔진 시험에서 추진제가 소모됨에 따라 런탱크의 수위가 낮아지게 되며 이에 따라 수두에 의한 압력이 줄어들게 되어 런탱크 압력을 일정하게 유지하더라도 엔진 입구 압력은 점차 감소한다. 또한, 엔진 탈설계 영역 시험에서는 시험 중에 엔진 입구 압력을 변경시키게 된다. 따라서 원하는 엔진 입구 압력으로 설정하고 이를 유지하기 위해서는 런탱크의 압력제어는 필수적이다. 3단엔진연소시험설비에는 엔진 입구 압력 피드백을 통해 런탱크 압력을 제어하는 제어시스템이 구축되어 있어 실시간으로 엔진 입구 압력을 감시하여 목표 압력으로 제어할 수 있다.

엔진의 탈설계 영역 시험에서는 엔진 입구 압력을 변경시키고 엔진 입구 온도를 높이거나 낮추게 된다. 엔진 탈설계 시험을 위해 액체산소의 과냉각이 가능하도록 산화제 런탱크에 이젝터(ejector)와 헬륨 분사장치가 설치되어있다. 이젝터는 고압의 질소를 이용하여 구동되며 런탱크의 압력을 낮춰 액체산소의 포화 온도를 낮춤으로써 액체산소의 온도를 떨어뜨리는 역할을 한다. 헬륨 분사장치는 액체산소와의 열교환을 통해 저온 상태의 헬륨을 런탱크 하부에 분사하도록 구성되어 있다. 런탱크 하부에서 저온 헬륨을 분사하면 헬륨 기포가 액체산소를 통과하게 되고 액체산소가 헬륨 기포 안으로 확산되면서 경

계면에서의 포화상태를 유지하기 위해 액체산소가 증발한다[5]. 이때 액체산소가 증발하면서 주변의 온도를 흡수하여 액체산소의 온도를 떨어뜨리게 된다.

### 3. 냉각 결과

#### 3.1 엔진 냉각 특성

엔진 냉각은 시험 전 준비사항에 따라 유동적이지만 시험 약 1시간 전에 시작한다. 엔진 저압 퍼지가 시작되면 엔진을 냉각하기 시작하고 연료 진공화도 동시에 수행된다. 냉각 초기에는 공급 배관 및 엔진이 상온의 상태이기 때문에 액체산소가 공급되면 즉시 기화하게 되어 큰 유량으로 냉각할 경우 기화로 인한 압력 상승을 유발시킬 수 있다. 따라서 초기 냉각은 저유량으로 수행하며 Fig. 2의 1 “밸브만 개방하여 냉각한다. 2.2절에 기술한 것처럼 초기 냉각에서 기화된 산소가 배관을 막아 액체산소의 유입을 방해하게 된다. 따라서 Fig. 2의 4개의 냉각 밸브를 반복적으로 개방하여 기화된 산소를 제거하여 유동의 흐름을 만들어 냉각을 유도한다.

Fig. 3은 냉각 초기에 배관 및 엔진의 온도를 보여준다. TIOP는 엔진 입구의 온도, TOP1S, TOP2S는 산화제 펌프의 표면 온도이다. 약 40초에 밸브를 개방하여 냉각이 시작되었고 냉각

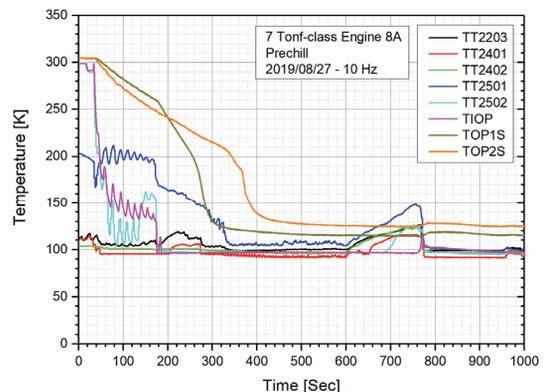


Fig. 3 Temperature of LOx pipeline at the beginning of cool down.

과 동시에 대부분의 온도가 급격히 하강하는 것을 확인할 수 있다. TIOP를 포함한 주요 배관 온도는 냉각 시작 후 약 70 초가 지나면 100 K 정도로 떨어지고 TT2501은 약 300 초가 소요되었다. 산화제 배관 입구 온도가 100 K 이하로 내려가고 TOP1S의 온도가 120 K 정도에 도달하면 냉각이 완료된 것으로 판단하므로 냉각 시작 후 400 초가 지나면 1차 냉각이 완료된 것으로 보인다. 시험설비 배관의 온도보다 엔진 입구 온도가 더 빠른 속도로 하강하는 것을 확인할 수 있는데 이는 시험설비 배관보다 엔진이 아래쪽에 위치하고 있어 소량의 액체산소가 공급되면 바로 냉각이 된다. 엔진 냉각이 시작된 직후 주요 온도들이 상승과 하강을 반복하면서 냉각이 진행되는 것을 확인할 수 있다. 초기에 액체산소가 공급되지만 배관이 냉각되지 않은 상태므로 기화된 차가운 산소가 배관의 온도를 떨어뜨리고 이후 액체상태의 산소가 공존하는 이상유체가 배관을 냉각시키면서 온도의 상승, 하강이 반복되는 패턴을 보인다. 이후에는 약간의 기포만 존재하는 액체산소에 가까운 상태로 배관이 충전된다[6]. 한편, 600 초에 냉각 밸브를 모두 닫으니 곧바로 온도가 상승하는 현상이 관찰되었다. 배관 및 엔진의 냉각이 완료된 이후에도 냉각 밸브를 사용하지 않으면 액체산소의 흐름이 원활하지 못하기 때문에 국부적으로 온도가 상승하는 지점이 발생할 수 있다. 따라서 냉각 밸브는 엔진 및 배관의 온도를 지속적으로 관찰하면서 반복 작동시키는 것이 필요하다. Fig. 3에서 600초 이후 온도가 상승하지만 Fig. 4의 배관 압력은 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 온도 상승으로 인해 액체산소가 증발하게 되지만 냉각 유량이 작아 압력 상승을 유발시킬 정도의 정체는 발생하지 않는 것으로 보인다.

엔진과 산화제 공급 배관의 냉각이 어느 정도 진행된 이후 런탱크를 시험 압력으로 가압하여 산화제 배관의 연결부위와 가압시스템의 이상유무를 확인하는 과정을 선가압 단계로 부른다. 1차 냉각이 완료된 이후 선가압 전에 Fig. 2의 3 “의 주 공급 밸브를 개방한다. 따라서 선가압 이후에는 냉각량이 이전보다 많이 증가한다. 선가

압 전에는 런탱크의 수두로만 냉각을 수행하게 되지만 가압을 하면 배관에 큰 압력으로 액체산소를 밀어 보낼 수 있어 기화되어 배관에 기포로 존재하는 산소를 제거하고 순수 액체산소를 충전할 수 있다. 런탱크 선가압은 약 760 초에 시작하였다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 엔진 입구 압력(PIOP1)을 약 0.58 MPa까지 가압하였다. 이 구간에서는 냉각밸브를 모두 닫은 상태로 런탱크 가압압력으로만 액체산소를 밀어준다. 선가압 전에는 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 질량 유량계의 유량 값이 정확히 측정되지 않는다. 이는 순수 액체가 아닌 기포가 섞인 이상유체이기 때문에 유량계가 정확한 유량을 측정하지 못하고 있는 것으로 보인다. 가압 이후에는 유량 값이 측정되는 것을 확인할 수 있는데 가압을 통해 배관 곳곳에 정체되어 있던 기포가 제거되어 배관이 순수 액체산소에 가까운 형태로 충전이 되어 유량값이 정확히 측정되는 것으로 판단된다.

선가압 하여 시험설비 점검을 마친 후 런탱크가 다시 해압되는 1,000 초 이후에는 가압 이전과는 달리 유량계가 정확히 측정되는 것을 보아 순수 액체산소에 가까운 충전상태가 유지되는 것을 알 수 있다. 런탱크 해압 후에는 다시 런탱크의 수두로만 배관 및 엔진을 냉각해야 하므로 다시 냉각밸브를 적절히 이용하여 냉각을 수행한다. 이때 증발한 산소가 배관에 정체되었다가 배출되는 것이 반복되면서 측정되는 유량값이 진동을 하게 된다. 2,200 초에는 연소시험 직전으로 런탱크를 최종 목표 압력으로 가압하는 단계이다. 연소시험 단계로 들어가면 냉각 밸브를 작동시킬 수 없기 때문에 최종 가압 이후에는 냉각 밸브를 개방하여 공급 배관과 엔진을 최대 냉각상태로 유지하고 시험 직전 모든 냉각 밸브를 닫게 된다. 엔진의 산화제 입구 압력은 정격 조건에서 0.39 MPa이므로 이를 맞추기 위해 시험 전 런탱크의 가압은 0.42 MPa로 설정하게 된다.

Fig. 6에 전체 엔진 냉각 구간에서의 산화제 온도를 나타내었다. 선가압 이후부터 시험 직전까지는 다른 시험 준비를 위한 시간으로 엔진

및 배관 냉각을 적정 수준에서 유지해야 한다. 선가압 이후에는 3 “주배관 밸브가 개방되어 있어 냉각을 위한 액체산소의 소모량이 커지기 때

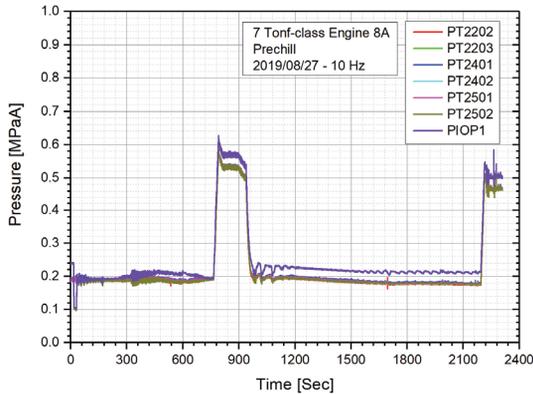


Fig. 4 Pressure of LOx pipeline at cool down.

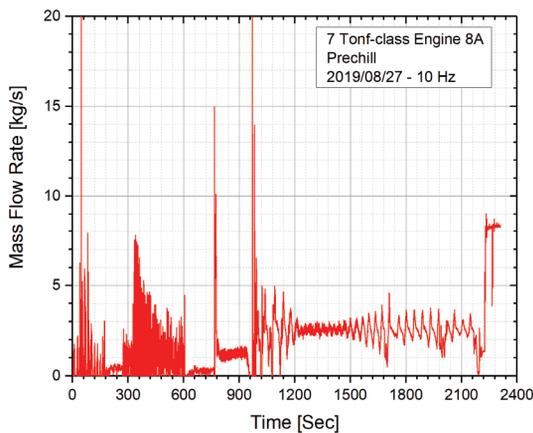


Fig. 5 Mass flow rate of liquid oxygen for cool down.

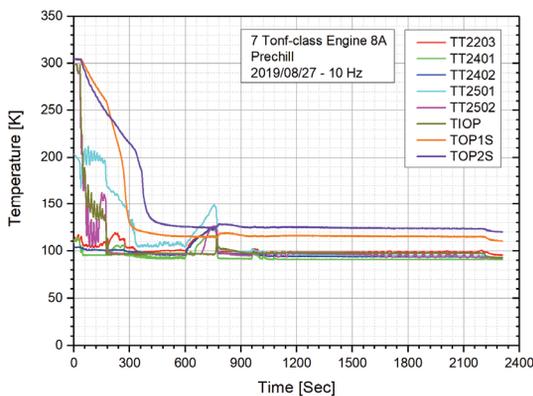


Fig. 6 Temperature of LOx pipeline at cool down.

문에 냉각 밸브를 적절히 사용하여 엔진 및 배관의 냉각을 유지한다. 시험 직전의 최종 가압 직전까지 배관 및 엔진의 온도가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 2,200초 이후 최종 가압 단계에서는 엔진 및 배관의 최대 냉각을 수행하고 모든 냉각 밸브를 닫기 때문에 온도가 조금 낮아지게 됨을 알 수 있다.

### 3.2 액체산소 소모량

Fig. 7은 냉각 단계에서의 런탱크 수위 변화를 보여준다. 선가압 단계 이전 초기 냉각 단계에서는 1 “의 작은 구경의 밸브만 개방하고 런탱크 가압 없이 수두에 의한 압력으로만 냉각을 수행하므로 냉각에 따른 수위 변화가 크지 않는 것을 확인할 수 있다. 선가압이 시작되는 760 초부터는 3”의 주 밸브가 개방되기 때문에 냉각에 소모되는 액체산소의 양이 증가하여 수위가 감소하는 기울기가 증가한 것을 확인할 수 있다. 런탱크 선가압 상태인 약 760초부터 950초까지는 냉각 밸브를 모두 닫은 상태로 유지하였다. Fig. 5에서 보이는 것과 같이 산화제 런탱크 목표 압력에서 산화제 재순환 배관을 통해 약 1.25 kg/s의 액체산소가 빠져나간다. 선가압 종료 후에는 다시 런탱크를 해압하고 수두로만 냉각 밸브를 이용하여 냉각을 수행한다. 2,200 초 이후 최종 가압 단계에서는 1 “의 보조 라인을 닫고 3 “의 주배관만 개방된 상태에서 런탱크를 가압하여 냉각하기 때문에 냉각량이 증가하게 되며 이와 더불어 최대 냉각상태를 유지하기 위해 모든 냉각밸브를 작동시켜 액체산소가 최대 유량이 공급되어 런탱크 수위가 감소되는 기울기가 최대가 되는 것을 확인할 수 있다.

엔진 냉각 전 런탱크의 수위는 약 5,000 mm로 시작하고 시험 직전에 3,500 mm까지 감소하는 것으로 확인된다. 이를 부피로 환산하면 약 4.3 m<sup>2</sup>이며 전체 냉각 시간으로 고려해볼 때 평균 2.1 kg/s의 냉각 유량으로 계산되며 약 4.8 kg의 액체산소를 소모하였다. 실제 Fig. 4에서 보면 선가압 이전에는 냉각 유량이 크지 않고 선가압 이후에는 약 2.5 kg/s의 유량으로 냉각하게 되며 최종 가압 이후에는 8 kg/s가 넘는

유량을 사용하는 것을 알 수 있다. 다만, Fig. 2의 냉각 밸브 1은 질량 유량계 전에 설치되어 있기 때문에 이를 통한 냉각 유량은 질량 유량계를 통해 파악할 수 없다. 그러나 냉각 밸브 1, 2, 3이 모두 같은 구경의 밸브를 사용하기 때문에 실제 최종 가압 이후 산화제 소모량은 약 11 kg/s에 달할 것으로 보인다.

시험 전 산화제 시스템 운용자는 런탱크를 충전할 때 시험 후 잔량, 시험에 사용하는 액체산소의 양, 냉각에 소모되는 액체산소의 양과 원활한 시험 운용을 위한 여분까지 종합적으로 고려하여 충전을 해야 한다. 선가압 이후에는 약 2~3 kg/s 수준으로 냉각을 지속하게 되고 냉각 시작 약 1시간 후 점화가 시작되기 때문에 이를 고려하여 런탱크 충전을 수행한다. 하지만 냉각 시작부터 연소시험 전까지의 시간은 시험 준비 상황에 따른 변동, 선가압 여부, 비정상 현상에 의한 대기시간 등을 포함하므로 운용자가 시험 준비 상황과 엔진의 냉각 정도, 그리고 연소시험에 사용해야 할 액체산소의 양을 고려하여 냉각에 사용하는 액체산소의 양을 조절해야 한다.

### 3.3 연소시험 결과

7톤급 엔진 8A의 연소시험에서의 산화제 라인의 온도를 Fig. 8에 나타내었다. 20초에 점화가 이루어져 70초 연소시험이 진행되었다. 대부분의 배관 온도와 엔진 입구 온도는 점화 전 유동 흐름이 작은 상태와 연소시험의 고유량 흐름

이 발생하였을 때와의 차이가 크게 발생하지 않았다. 따라서 엔진 시험 전 배관 및 엔진의 산화제 라인 냉각이 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 정격 조건에서 산화제 목표 입구 온도(TIOP)는 93K로 실제 시험에서도 92~93 K 부근에서 온도가 제어되었음이 확인되었다.

## 4. 결 론

7톤급 액체로켓엔진의 연소시험을 위한 냉각 특성 및 액체산소 소모량을 살펴보았다. 냉각 초기에는 액체산소가 공급됨에도 바로 기화되어 배관과 엔진을 냉각하게 되며 시간이 지남에 따라 이상유체에서 점차 액체산소로 충전된다. 엔진은 설비 배관보다 하단에 위치하므로 배관보다 빠르게 냉각됨을 확인하였다. 냉각 시작 후 엔진이 완전히 냉각되었다고 판단되는 시점까지는 약 400초가 소요되었다. 선가압 이전에는 작은 보조 밸브만 개방하여 천천히 냉각을 수행하였으며 선가압부터는 대구경의 주배관을 개방하여 냉각을 수행하였다. 선가압 이전에는 엔진 및 배관의 온도가 순수 액체산소에 가깝게 유지되지만 고립된 기포가 존재하였으나 선가압 시점부터 엔진 및 배관에 순수 액체산소에 가까운 형태로 충전됨을 질량 유량계의 측정값으로부터 확인하였다. 선가압 이후부터 시험 전까지는 냉각상태를 유지하게 되고 최종 가압 이후에는 엔

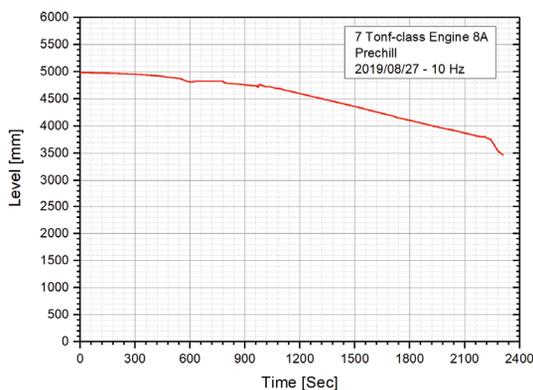


Fig. 7 LOx runtank level.

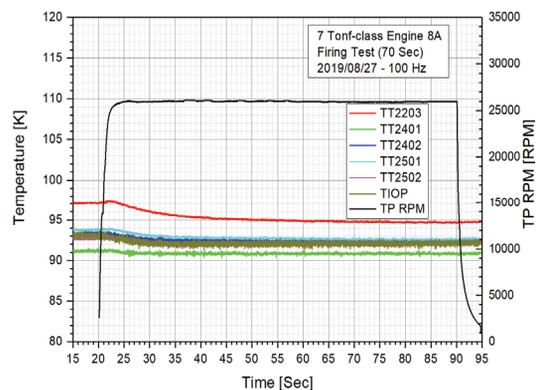


Fig. 8 Temperature of LOx pipeline at firing test.

진을 최대 냉각상태를 유지하고 냉각을 종료한다. 엔진 예냉 단계에서의 평균 액체산소 소모량은 약 2.1 kg/s로 계산되었다. 그러나 선가압 이전, 선가압부터 최종 가압 이전, 최종 가압 이후 단계별로 소모량이 크게 차이가 있기 때문에 운용자가 주요 온도를 확인하여 냉각에 소모되는 액체산소 양을 조절하는 것이 중요하다. 엔진 냉각 후 연소시험에서 엔진 입구 목표 온도인 93 K로 온도가 잘 제어되었음이 확인되었다.

#### References

1. Yuan, K, "Cryogenic Boiling and Two-phase Chillover Process under Terrestrial and Microgravity Conditions," Ph.D. Dissertation, University of Florida, 2006.
2. Kutsche, W., *Operation of a Cryogenic Rocket Engine*, Springer, 2010.
3. Agrawal, G., Kumar, S.S. and Agarwal, D.K., "Pressure Surge During Cryogenic Feedline Chillover Process," *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-9, 2016.
4. Hwang, C., Kim, S., Lee, K. and Han, Y.M., "Pre-chilling Characteristics Study of 7tonf class Engine System for KSLV-II," *2015 KSPE Fall Conference*, 2015.
5. Seo, D., Yu, B., Lee, J., Cho N., Kim, S. and Han, Y.M., "Liquid Oxygen Supercooling System in the 75 tonf-class Liquid Engine Combustion Test Facility," *KSPE 2017 Fall Conference*, 2017.
6. Seo, D., Cho, N. and Han, Y.M., "Investigation of Chill Down Characteristics of Liquid Oxygen Feeding System in 75 Tonf-class Liquid Rocket Engine Firing Test", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 22, No. 4, pp. 108-116, 2018.
7. Im, J.H., Seo, D., Hwang, C.H., Yu, B., Lee, K.J., Kim, S. and Han, Y.M., "Combustion Test Results according to Oxidizer Inlet Pressure Control of 75 Tonf-class Liquid Rocket Engine for KSLV-II", *KSAS 2018 Spring Conference*, 2018.