



75톤급 액체로켓엔진 연소시험에서의 액체산소 공급부 예냉특성 고찰

서대반^{a,*} · 조남경^a · 한영민^a

Investigation of Chill Down Characteristics of Liquid Oxygen Feeding System in 75 Tonf-class Liquid Rocket Engine Firing Test

Daeban Seo^{a,*} · Namkyung Cho^a · Yeoungmin Han^a

^aEngine Test and Evaluation Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: seodb@kari.re.kr

ABSTRACT

A firing test of the 75 tonf-class liquid rocket engine to be used as the first and second stage engines of the KSLV-II was carried out at the rocket engine test facility(RETF). Since this engine uses liquid oxygen as the oxidizer, which is a cryogenic fluid, it is essential that the chill down of the supply pipe line and engine proceed for the firing test; thus, the given inlet requirements must be met. Moreover, it is important to understand the chill down characteristics of the facility and the engine and the amount of liquid oxygen consumed in the chill down process for efficient test operation in the future. In this paper, chill down characteristics of the supply pipe and the engine were evaluated through the investigation of the chill down process of the 75 tonf-class liquid rocket engine at each stage before and after run tank pressurization. In addition, the amount of liquid oxygen consumed was also evaluated.

초 록

한국형발사체의 1단 및 2단 엔진으로 사용될 75톤급 액체로켓엔진의 연소시험이 엔진 연소시험설비에서 수행되었다. 이 엔진은 산화제로 극저온 유체인 액체산소를 사용하므로, 연소시험을 위해서는 필수적으로 설비의 공급 배관 및 엔진의 예냉과정이 진행되어 주어진 엔진 입구 온도 및 압력 요구조건이 만족되어야 한다. 따라서 향후 효율적인 시험 운용을 위해서는 시험 시 설비와 엔진에서의 예냉특성 및 예냉과정에서 소모되는 액체산소의 양을 파악하는 것이 중요하다. 이 논문에서는 75톤급 액체로켓엔진의 연소시험에서 예냉과정의 고찰을 통하여 런탱크 가압 전, 후 각 단계에서의 설비 배관 및 엔진의 예냉특성을 평가하였으며, 시험 시 소모되는 액체산소의 양을 평가하였다.

Key Words: 75 Tonf Liquid Rocket Engine(75톤급 액체로켓엔진), Firing Test(연소시험), LOx(액체산소), Chill Down Characteristics(예냉특성)

Received 8 August 2017 / Revised 3 November 2017 / Accepted 8 November 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 한국형 발사체의 1단 및 2단 엔진으로 사용되는 추력 75톤급의 액체로켓엔진을 개발하고 있다. 이 엔진은 연료로는 케로신, 산화제로는 액체산소가 사용되며, 터보펌프를 사용하여 연료 및 산화제가 연소실로 공급되는 터보펌프식 액체로켓엔진이다. 주요 엔진 구성품(연소기, 터보펌프, 가스발생기, 밸브)들의 개발과정을 거쳐 75톤급 엔진의 초도기가 조립 완료되었으며, 조립 후 나로우주센터 내 엔진 지상 연소시험설비(Rocket Engine Test Facility, RETF)에 장착되어 15회에 걸친 연소시험이 성공적으로 수행되었다[1].

극저온 유체를 사용하는 터보펌프식 로켓엔진의 경우 일반적으로 시동시 펌프에서의 공동현상(cavitation)을 방지하기 위하여 펌프 입구부의 온도와 압력 요구조건이 주어진다. 75톤급 액체로켓엔진에서는 75톤급 터보펌프 개발과정에서 산화제 펌프 입구부에서의 정격 온도 및 압력 요구조건이 결정되었고[2], 이 조건은 그대로 엔진 연소시험에도 적용되었다. 엔진 연소시험 준비 단계에서 산화제 펌프 입구부의 요구온도를 맞추기 위해 엔진 연소시험설비에서는 산화제 런탱크(Runtank)에 충전된 액체산소를 설비배관 및 엔진에 흘려주어 예냉하는 과정이 진행된다. 예냉에 사용된 액체산소를 다시 탱크로 재순환시키는 발사체와는 달리, 엔진 연소시험설비에서는 예냉에 사용된 액체산소를 대기로 방출하게 되므로 냉각시간의 소요와 함께 액체산소의 소모도 같이 일어나게 된다. 또한 산화제 펌프 입구부의 요구 압력을 만족하기 위하여 시험 전 런탱크를 질소가스로 가압하게 되는데, 이때 압력 증가에 따라 배출되는 액체산소의 유량도 증가하게 되어 냉각량은 증가하나 액체산소의 소모량도 동시에 증가하게 된다.

따라서 보다 효율적인 시험 준비 및 수행을 위해서는 예냉과정에서의 특성을 파악하고 소모되는 액체산소량에 대한 데이터를 확보하는 것이 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 75톤급 엔진의 개발시험에서 설비 및 엔진의 예냉과정의 고찰을 통해 예냉 특성을 파악하고 예냉에 소모되는 추진제 양을 평가하였다.

2. 시험설비 및 엔진 구성

2.1 RETF 산화제 공급 시스템 구성

RETF의 산화제 공급 시스템은 Fig. 1과 같이 연소시험에 필요한 액체산소를 저장탱크로부터 공급받아 운용하는 런탱크/시동탱크와 액체산소를 엔진으로 공급해주기 위한 공급배관, 배관내 액체산소의 흐름을 제어하기 위한 밸브, 탱크 가압을 위한 가스 레귤레이터와 온도/압력/유량 측정을 위한 센서들로 구성된다[3]. 설비 내에서는 산화제 런탱크실과 테스트 스탠드에 나뉘어 설치하였는데, 먼저 산화제 런탱크실에는 런탱크 2개와 레귤레이터를 포함한 런탱크 가압 시스템을 런탱크 상부에 설치하였으며 런탱크 아래에는 배관 및 밸브를 설치하여 런탱크실 외부의 테스트 스탠드로 연결되도록 하였다. 테스트 스탠드에는 런탱크실에서 이어진 배관이 밸브와 시동탱크를 거쳐 엔진으로 연결되며, 유량, 온도, 압력 측정을 위한 센서들을 배관 곳곳에 설치하였다.

설비 및 엔진 예냉을 위해 극저온 유체인 액체산소가 상온 상태인 배관 내부에 흐르기 시작하

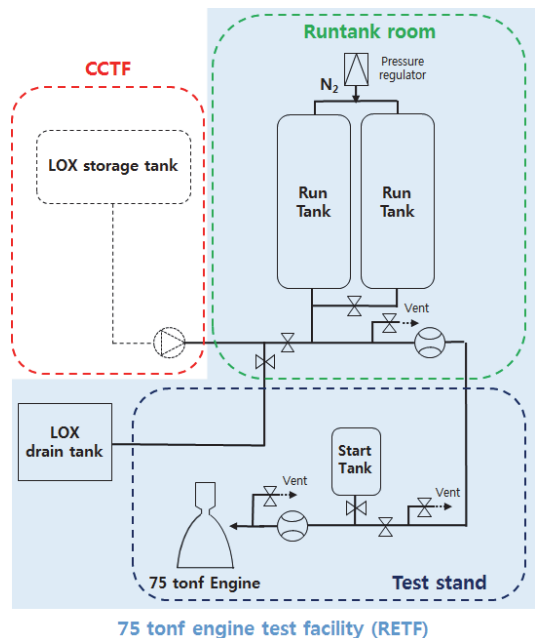


Fig. 1 Schematic of oxidizer supply system in RETF.

면 배관 내부에서는 액체산소의 기화가 활발히 일어나는데, 이 기화된 산소가 배관 내에 정체하게 될 경우 액체산소의 흐름을 방해해 결과적으로 배관 내부의 냉각을 방해하게 된다. 따라서 산화제 공급 배관에는 일정한 간격으로 기화된 산소를 배출해주기 위한 배출배관 및 배출밸브(Vent valve)를 Fig. 1과 같이 설치하였다. 엔진 시험 준비 과정에서 이 밸브들의 조작을 통해 런 탱크와 엔진 사이의 공급배관 및 엔진 예냉을 수행하게 된다. 설비의 예냉상태를 확인하기 위해 런 탱크 실에는 시험 설비의 센서 Tag 번호 식별 체계에 따라 명명된 TT2202, TT2203 온도센서를 설치하였으며, 테스트 스탠드에는 엔진 입구까지 순서대로 Tag 번호가 TT2403, TT2401, TT2503인 온도센서를 설치하였다(Fig. 2 참조).

2.2 75톤급 엔진의 구성

먼저 Fig. 3은 75톤급 엔진의 구성을 나타낸 개략도이다. 예냉 단계에서는 배관을 통해 공급된 액체 산소가 터보펌프 및 엔진 내부 배관을 냉각하고 산화제 주 개폐밸브인 MOV(Main Oxidizer Valve)를 거쳐 외부로 배출된다. 엔진이 시동되면 액체산소는 터보펌프에서 승압된 후 분기되어 MOV와 가스 발생기의 산화제 개폐밸브인 GOV(Gas generator Oxidizer Valve)를 거쳐 연소기 및 가스발생기로

각각 주입된다. 그리고 가스 발생기로 주입되는 액체산소의 유량은 유량제어 밸브인 GOCV(Gas generator Oxidizer Control Valve)를 통하여 제어 가능하다. 예냉의 진행상태는 터보펌프 산화제 입·출구(TILP, TELP), MOV 밸브 전단(TIMOV), 산화제 재순환 라인에 설치된 온도센서(TLOChill) 및 산화제펌프 표면에 설치된 온도센서(TLPS1, TLPS2)를 통하여 확인하였으며, 이들 온도센서와 함께 산화제 펌프 입구에 설치된 압력센서(PILP)를 통해 산화제 입구 압력 요구조건 만족 여부를 확인하였다.

3. 설비 및 엔진의 예냉 결과

3.1 극저온 유체의 예냉과 관련된 운용 단계

극저온 공급계통의 예냉에 있어서는 초기 배관 충전 및 예냉시에는 유체의 압력을 낮추어 증발을 촉진시켜야 하는 단계가 필요하며, 이후에는 압력을 높여서 액체상태가 되게 하여 냉각을 촉진시켜야 하는 단계가 필요하다[4]. 이에 따라 RETF에서의 75톤급 엔진 시험에서는 산화제 런 탱크에 액체산소가 충전된 후 충전된 액체 산소를 설비배관 및 엔진에 런 탱크의 수두압으로만 흘러 초기 예냉을 실시하는 단계와 런 탱크

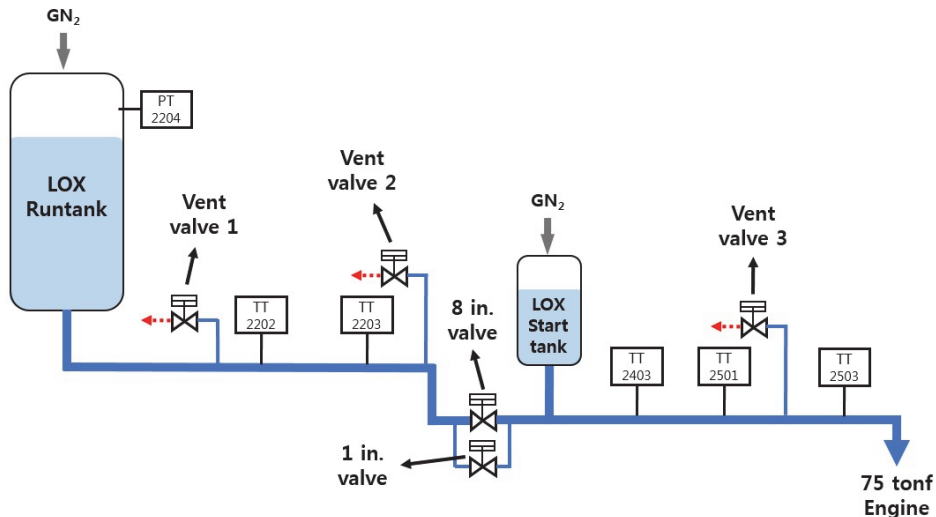


Fig. 2 Schematic of supply pipe line.

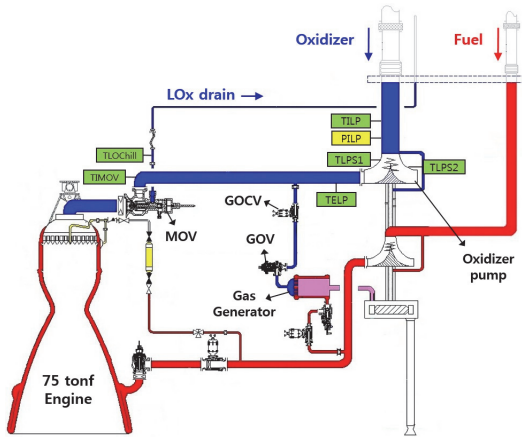


Fig. 3 Schematic of 75 tonf-class engine.

를 가압하여 엔진입구의 압력 요구조건을 만족 시키고 동시에 배관 내부에 액체 상태의 흐름을 생성해 엔진입구의 온도 요구조건을 만족시켜주는 단계로 진행되었다. 또한 온도 요구조건이 만족 된 이후에도 모든 시스템의 시험준비 단계가 종료되어 연소시험이 시작될 때까지 배관 및 엔진 내부에는 그 시간 동안 외부로부터의 열전달에 의해 액체산소의 온도가 상승할 가능성이 존재한다. 요구조건에 맞춰진 온도를 유지 해 주기 위하여 극저온 유체를 사용하는 엔진 공급 계통에는 데워진 액체산소를 탱크로 다시 재순환 시키는 방법과 외부로 배출시키는 방법이 사용되고 있는데[4], RETF에서는 비록 추진체를 일정량 소모하더라도 엔진과 런탱크 사이 거리의 한계로 인해 배출 방법을 적용하였다. 따라서 75톤급 엔진의 연소시험에서 연소준비 단계에서 소모되는 액체산소 소모량과 그에 따른 예냉상태를 파악하는 것은 향후 엔진의 설계 및 효율적인 엔진 연소시험을 위해 중요한 요소가 된다.

3.2 탱크 가압 전 예냉 단계

75톤급 엔진의 연소시험을 위하여 RETF 산화제시스템에서는 가장 먼저 저장탱크의 액체산소를 이송시켜 런탱크로 충전하는 과정이 수행된다. 충전량은 연소시험에서 엔진의 연소에 필요한 양과 예냉단계에서 소모되는 양 등을 고려하여 결정된다. 런탱크의 충전이 완료되면 테스트

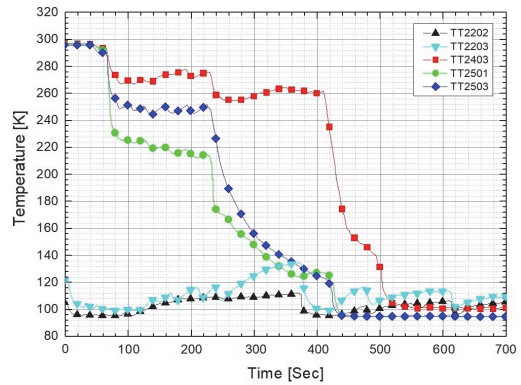


Fig. 4 Temperature in the LOX pipe line at the beginning of a chill down process.

스탠드에 위치하고 있는 밸브를 개방하여 액체산소를 엔진으로 주입하게 되는데, 이 시점부터 테스트 스탠드 배관 및 엔진의 예냉과정이 시작된다. 여기서 배관의 급격한 수축현상과 그로 인한 구조적 부하를 최소화하기 위해 테스트스탠드에는 Fig. 2와 같이 배관 직경과 같은 직경 8인치 밸브 전/후단으로 직경 1인치우회 배관 및 밸브를 추가적으로 설치하여 예냉초기 단계에서는 소량의 액체산소만이 주입되도록 하였다.

Fig. 4는 예냉시작 시점의 테스트 스탠드의 배관 온도 변화를 나타낸다. 약 70초 시점은 예냉시작을 위해 직경 1인치의 우회 배관 밸브(Fig. 2의 1 in. valve)를 개방한 시점이며 230초 시점은 Fig. 2의 Vent valve 3을 개방한 시점, 그리고 410초 시점은 직경 8인치의 밸브(Fig. 2의 8 in. valve)를 개방한 시점이다. 밸브 개방에 따른 예냉초기 배관 온도 변화는 액체산소의 이상유동(two phase flow)에 의해 나타나는데, 먼저 일반적인 극저온 유체의 이상유동 패턴 및 냉각량 특성을 보면 Fig. 5와 Fig. 6과 같다.

예냉 시작 시점에서 직경 1인치 밸브로 소량의 액체산소가 상온 상태인 밸브 후단의 8인치 직경의 배관 내부로 주입되면 주입된 액체는 전량 기화되어 기체상태가 된다. 이 시점은 기화된 산소의 온도와 배관 내부 벽면온도의 차이가 크므로 Fig. 6의 E 지점으로 볼 수 있다. 이후 증발된 차가운 기체가 지속적으로 유입되면서 배관 내부온

도는 급격히 감소하며, 배관 내부에서는 Fig. 6의 D 지점을 지나 액체상태가 배관 바닥부에서 형성되기 시작한다. 밸브개방 직후 약 140초간 배관 온도는 큰 변화 없이 TT2403은 약 270 K, TT2501은 약 220 K, TT2503은 약 250 K를 유지하는데, 이는 1인치 배관을 통해 소량의 액체산소가 배관으로 공급되면서 Fig. 6의 C 지점까지 진행되지 못하고 Fig. 5(b)와 같이 stratified flow 상태가 유지되어 배관의 중심부에 위치한 온도센서의 tip 부분에는 기체 상태의 온도가 측정되기 때문이다. Fig. 6의 냉각량 곡선에 의하면 C 지점에서 가장 냉각량이 크므로 원활한 냉각 진행을 위해 약 230초 시점에서 테스트 스탠드의 배출밸브 3을 개방하여 배관 내 기체가 강제적으로 배출되도록 하였다. 이 경우 밸브 개방에 의해 압력의 하강과 함께 액체가 추가적으로 증발됨으로서 증발냉각이 일어나는데, 그 결과로 배관 내부에는 액체의 비율이 높아지며 Fig. 6의 C 지점을 지나 냉각량이 최대가 된다. 이에 따라 배관

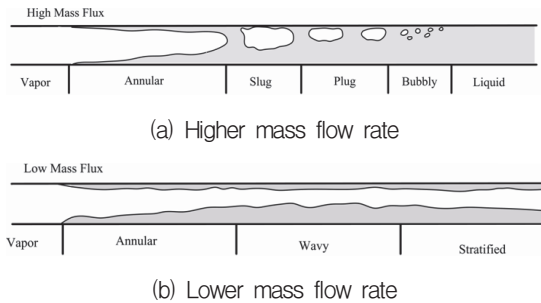


Fig. 5 Two-phase flow pattern[5].

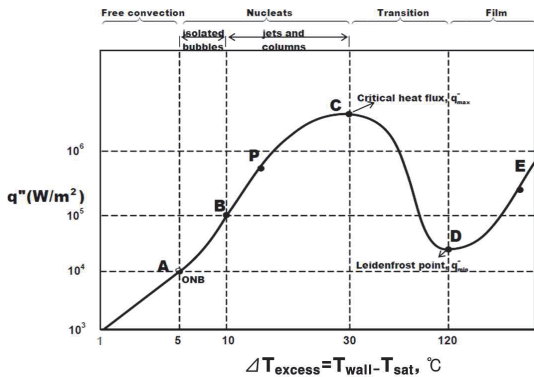


Fig. 6 Two-phase flow chilling curve[6].

내부온도도 Fig. 4와 같이 하강하면서 냉각이 진행되었다. 약 410초 시점에서 8인치 밸브가 개방되자 대유량의 액체산소가 유입되면서 배관 내부에는 slug flow를 거쳐 액체 상태가 지배적인 bubbly flow가 형성되어 TT2501, TT2503 온도가 액체산소 포화온도에 근접하였다. TT2403 센서의 경우는 센서 위치가 8인치 밸브와 1인치 우회 배관 출구 사이에 위치하고 있어 1인치 밸브를 통해 주입된 기체가 센서가 설치된 부분에 정체되어 있게 되므로 8인치 밸브 개방 시점부터 온도가 포화온도에 근접하였다.

예냉 시작 시점의 엔진 내 온도 변화는 Fig. 7과 같다. 약 70초 시점에서 예냉이 시작되자마자 증발된 기체산소가 주입되면서 TILP, TELP, TIMOV, TLOChill의 온도가 테스트 스탠드의 배관 온도와 같이 하강하였다. 그러나 배관 온도의 경우 배출밸브가 개방될 때까지 약 140초간 온도 변화가 거의 없으나 엔진의 경우는 액체와 기체가 혼합된 annular flow 또는 slug flow가 형성되면서 온도센서 tip에 접촉되는 상(phase)에 따라 온도가 급격히 변화하는 결과를 나타내었다. 이것은 엔진이 장착된 위치가 테스트 스탠드의 배관보다 아래에 있어 주입된 액체 상태의 산소가 배관 하부로 흘러 엔진으로 바로 주입되기 때문으로 볼 수 있다. 약 230초 시점 테스트 스탠드의 배출밸브 3가 개방되어 배관 내 기체들이 배출되면서 TILP, TLOChill 센서가 약 100

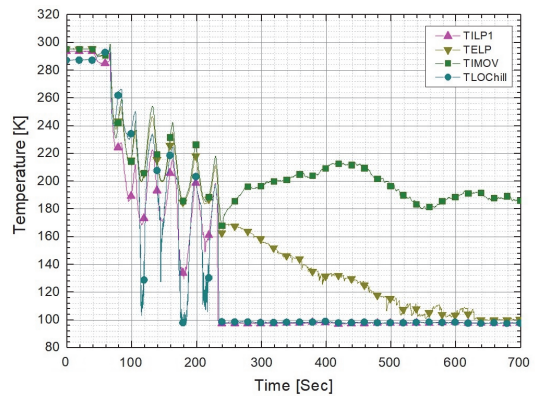


Fig. 7 Temperature in the engine at the beginning of a chill down process.

K에 도달하였다. TELP와 TIMOV 센서의 경우에는 센서의 삽입 깊이 및 위치에 의해 TELP는 약 640초 시점에서 약 100 K에 도달하였으며, TIMOV는 700초 시점까지도 약 180 K를 유지하였다. 따라서 MOV 입구 부분의 예냉을 위해서는 압력을 높여 MOV를 통해 외부로 배출되는 유량을 증가시켜 액체가 MOV 전단 부분에 접촉되도록 하는 것이 필요하다고 판단되었다.

Fig. 8은 산화제 펌프 표면에 부착된 표면센서의 예냉 시작 후 온도변화를 나타낸 그래프이다. 센서 부착 위치는 TLPS1은 인듀서 표면, TLPS2는 볼류트 표면이다. 예냉이 시작되자마자 액체와 기체가 혼합된 산소가 펌프 입구로 주입되면서 표면 온도가 하강하기 시작하였다. TLPS1은 배출밸브 개방 시점과 8인치 밸브 개방 시점에서 각각 온도 하강 속도의 변화가 나타나는 것에 반해 TLPS2는 밸브개방 시점과는 관계없이 약 670초부터 온도 하강 속도의 변화가 나타났다. 이는 TLPS2가 부착된 볼류트 부분에서는 임펠러의 냉각 때문에 밸브개폐와는 무관하게 약 670초 시점에서 표면으로 액체상태가 접촉되기 시작함을 알 수 있다(Fig. 6의 C 지점 전후).

예냉이 진행되면서 산화제 펌프 표면온도 센서는 TLPS1은 약 800초 시점에 110 K에 도달한 후 거의 일정한 온도를 유지하며, TLPS2는 약 2000초부터 125 K에 도달한 후 일정한 온도를 유지하였다. 표면온도 센서가 일정한 온도를 유

지한다는 것은 런탱크가 가압되지 않은 조건에서 펌프 내부가 충분히 냉각되어 외부와의 열평형 상태를 유지한다는 것이므로, 런탱크를 가압하지 않는 초기 예냉단계에서는 펌프가 충분히 냉각되기까지 약 1700초가 필요함을 확인하였다.

3.3 탱크 가압 후 예냉 단계

75톤급 엔진의 연소시험 준비 단계에서 산화제 펌프의 표면온도 TLPS1, TLPS2가 일정한 온도를 유지하기 시작한 시점까지 초기 예냉단계가 완료된 것으로 간주하고, 이후 런탱크를 가압하여 최종적으로 산화제 펌프 입구 요구조건을 맞추는 단계로 진행하였다. 입구 요구조건 중 압력은 펌프가 정상 가동되어 설계유량이 흐를 때의 압력이므로, 유량 생성 시의 배관에서의 압력손실과 수두압 손실, 레귤레이터의 오차범위를 고려하여 런탱크 가압 압력을 설정하였다.

가압이 이루어지면 MOV를 통해 외부로 배출되는 유량이 증가하고, 압력상승에 의해 배관 표면에서의 증발이 억제됨으로써 열전달 계수가 기체와 비교하여 월등히 큰 액체가 배관 내면에 접촉되어 냉각이 촉진된다[4].

Fig. 9는 런탱크 가압에 따른 배관의 온도 변화와 산화제 펌프 입구 압력을 나타내며, Fig. 10은 런탱크 가압에 따른 엔진 내부의 온도 변화를 나타낸다.

약 140초 시점부터 런탱크의 가압과 함께 배

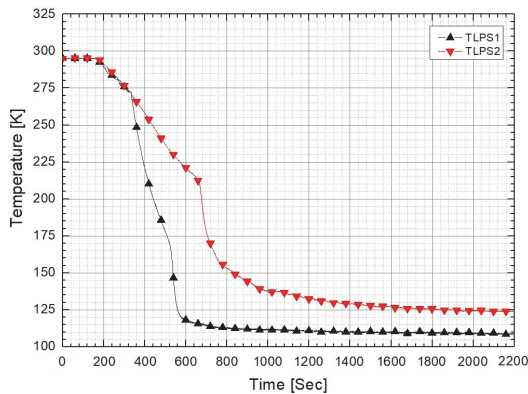


Fig. 8 Temperature of LOX pump surface at the beginning of a chill down process.

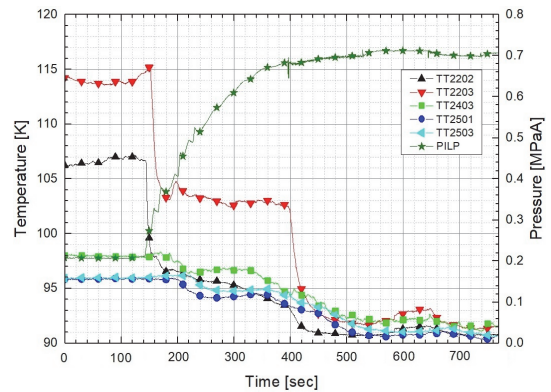


Fig. 9 Temperature of LOX pipe line with run tank pressurization.

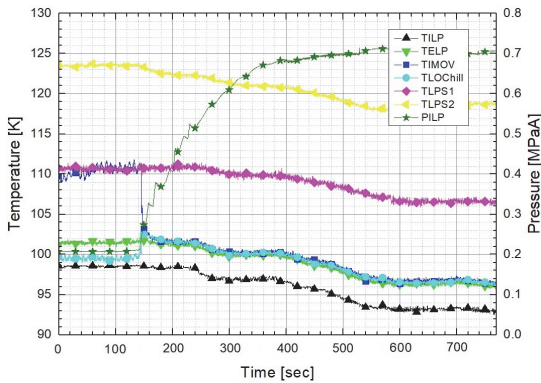


Fig. 10 Temperature in the engine with run tank pressurization.

관 내부온도와 산화제 펌프 표면온도를 포함한 엔진 내부온도는 하강하기 시작하였다. 런탱크실에 위치하는 TT2202와 TT2203 센서의 경우는 테스트 스탠드보다 높은 위치에 런탱크실이 위치하고 있어 배관 내 기체의 비율이 상대적으로 높아 가압 전 상태에서는 105 K 이상의 온도를 나타내었으나, 런탱크가 가압되면서 배관 내 유량이 형성되며 기체의 비율이 감소하기 시작하여 큰 폭으로 온도가 하강하였다. TIMOV의 경우 런탱크 가압 즉시 온도가 급격히 하강하였는데, 이는 MOV 밸브가 닫혀 있어 밸브 전단 부분에 정체하고 있던 기체가 압력이 증가하자마자 드레인 배관을 통해 배출된 것으로 판단되었다. 하지만 런탱크의 압력이 지속적으로 증가되어도 약 300초 시점부터는 배관과 엔진 내부의 온도는 더 이상 하강하지 않고 일정한 온도를 유지하기 시작하였다. 특히 TT2203 센서의 경우는 압력이 증가되어도 다른 센서에 비해 비교적 높은 103 K 온도를 유지하였다. 이는 배관 구성이 TT2203 센서를 지나 아래로 굽어져 낮은 위치에 있는 테스트 스탠드로 연결되도록 되어 있어 런탱크 가압에 의해 생성된 유량만으로는 이 부분에 정체되어 있던 기체가 배출되지 못하기 때문으로 판단되었다. 따라서 가압이 완료된 약 400초 시점에서 TT2203 센서 후단에 있는 배출 밸브 2를 먼저 개방하여 이 부분에 정체되어 있던 기체를 강제적으로 배출해 주었다. 밸브의 개

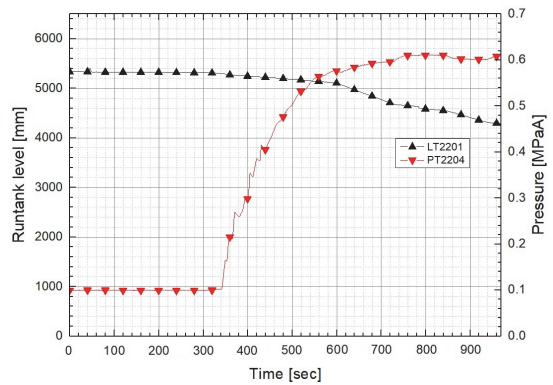


Fig. 11 Run tank level and run tank pressure curves.

방에 따라 배관 내부 정체된 기체가 배출됨과 동시에 증발이 일어나면서 배관 및 엔진의 온도는 다시 하강하기 시작하여 약 600초 시점에서 TILP 온도는 목표 온도인 93 K, 그리고 산화제 펌프 표면온도인 TLPS1, TLPS2는 각각 106.5 K, 119 K에 근접하였다. 약 650초 시점에서 최종적으로 테스트 스탠드의 배출밸브 3을 개방한 후 배관 온도는 전 구간에서 액체산소의 포화온도인 약 91 K를 나타내었으며, 엔진 입구 온도도 93 K 이하를 나타내어 연소시험을 위한 예냉 단계가 완료되었다.

4. 액체산소 소모량

75톤급 엔진 연소시험 준비 단계에서는 산화제 공급 시스템뿐만 아니라 연료 공급 시스템, 가스 공급 시스템, 제어/계측 시스템 및 후류 시스템 등 엔진 연소시험 설비의 모든 시스템에서 각각의 시험준비 단계가 진행된다. 따라서 예냉시에도 타 시스템의 준비 상황에 따라 예냉단계의 진행 속도를 조절할 필요가 있으며, 특히 예냉이 완료된 후에도 모든 시험 준비가 끝날 때까지 대기상태로 온도를 유지해야 할 경우도 존재하게 된다. 앞서 기술한 것과 같이 엔진 연소 시험설비에서는 예냉이 완료된 후 온도를 유지하기 위하여 배출 방법을 적용하였으므로, 향후

보다 효율적인 시험 운용을 위하여 예냉 각 단계에서의 액체산소 소모량을 확인하였다.

Fig. 11은 런탱크 가압 전, 후의 런탱크 수위 변화 및 압력을 나타낸 그래프이다. 약 340초 시점 이전 탱크의 수두압 만으로 예냉이 진행될 때에는 수위 변화는 아주 미미하며, 이는 탱크 가압 전 단계에서는 예냉에 소모되는 액체산소량은 런탱크에 충전된 전체 액체산소의 양이 비해 무시해도 될 수준임을 알 수 있다. 하지만 런탱크가 가압이 시작된 시점부터는 배관 및 엔진을 냉각하고 MOV의 배출구를 통해 외부로 배출되는 유량이 증가하면서 런탱크의 수위변화도 눈에 띄게 증가하는데, 특히 최종 온도 조절을 위해 배관의 배출밸브를 개방하게 되면 밸브를 통해서도 액체산소가 배출되므로 소모량은 더욱 증가하게 된다. 먼저 배출밸브 3가 개방되어 있던 구간인 850초부터 940초 사이의 런탱크 수위 하강 속도를 계산하면 2.55 mm/sec이며 이를 부피유량 단위로 환산하면 약 10 liters/sec의 유량이 MOV 배출구 및 테스트 스탠드의 배출 배관으로 배출되었다. 배출 밸브 3을 닫은 940초부터 연소 시험 시작 시점인 970초 구간에서는 약 0.84 mm/sec의 속도로 수위가 하강하였으며 이를 부피유량 단위로 환산하면 약 3.4 liters/sec 유량이 배출되었다. 따라서 런탱크가 가압된 후 배출 밸브를 개방하면 초당 10 리터의 많은 유량이 배출되므로 배관 및 엔진의 최종 온도조절을 위해 배출 밸브를 개방하는 것은 다른 시스템의 모든 준비가 끝난 후 실시하는 것이 효율적인 시험 운영 측면에서 바람직하다고 판단할 수 있다. 그리고 배출 밸브를 개방하지 않더라도 런탱크 가압 상태에서는 초당 3.4 리터로 액체산

소가 배출되는 상태이므로, 타 시스템에서 10분 이상의 지연 사유가 발생하면 탱크를 해압하고 준비가 완료될 때까지 대기 후 재가압하는 것이 액체산소 소모를 최소화하는 데에 더욱 유리한 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

75톤급 액체로켓엔진의 연소시험 준비 단계에서 예냉과정을 고찰하고 예냉특성 및 소모되는 액체산소량을 평가하였다. 런탱크 가압 전 초기 예냉단계에서는 배관 및 엔진 내부에 이상유동이 형성되면서 이상유동의 유동 형태에 따라 냉각 상태가 결정되었다. 예냉시작 직후에는 액체산소의 포화온도와 배관 내부온도의 차이가 크고 또한 적은 유량으로 액체산소가 주입되므로 유동의 기체 비율이 높아 설비배관은 낮은 속도로 냉각이 진행되었으나, 엔진내부의 경우에는 소량의 액체가 낮은 위치에 있는 엔진으로 바로 주입되면서 배관보다 빠르게 냉각이 진행되었다. 테스트 스탠드에 설치된 배출밸브를 개방하여 배관 내부의 기체를 배출시키자 액체 상태의 비율이 높아지면서 냉각량이 증대되어 배관 및 엔진은 포화온도에 도달하였다. 산화제 펌프 표면 온도는 배출 밸브의 개방여부에 관계없이 약 1700초 후 펌프 내부가 충분히 냉각됨에 따라 평형 상태에 도달하였다. 산화제 펌프 표면온도가 평형상태에 도달한 후 엔진 입구 압력 요구 조건을 위해 런탱크를 가압하였고, 이에 따라 배관 내부 유량이 증가하며 배관 및 엔진 내부온도가 다시 하강하기 시작하였다. 가압된 탱크 압력에 의해 생성되는 유량만으로는 요구 온도까지 냉각시키는데 한계가 있었으며, 배출 밸브를 개방하여 배관 내 유량을 증가시키고 증발을 촉진시키자 엔진 입구 온도는 요구조건 이하로 냉각되었다. 이때 런탱크가 가압된 상태에서는 초당 3.4 리터의 속도로 액체산소가 소모되었으며, 배출 밸브가 개방된 상태에서는 초당 10 리터의 속도로 액체산소가 소모되었다. 따라서 효율적인 시험 운용을 위해서는 런탱크 가압은 시험 준비

Table 1. LOX consumption during chill down process.

Chilldown process	LOX consumption
MOV drain valve and vent valve 3 were opened	10 L/sec
MOV drain valve was opened	3.4 L/sec

단계의 최대한 마지막에 진행하는 것이 유리하며, 배출 밸브 개방은 연소 시험 직전 최종적으로 입구 온도를 조절을 위해 개방하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다.

References

1. Kim, S. et al., "Development Test of 75 tonf Engine System for KSLV-II," *KSPE Fall Conference*, Jeongsun, Korea, pp. 888-891, Dec. 2016.
2. Kim, J., Choi, C., Jung, E., Jeon, S. and Hong, S., "Development Status of a Turbopump for Korea Space Launch Vehicle (KSLV-II)," *KSAS Fall Conference*, Jeju, Korea, pp. 254-263, Nov. 2012.
3. Seo, D. et al., "Chill down Characteristic of 75 tonf-class Engine 1G for KSLV-II," *KSPE Fall Conference*, Jeongsun, Korea, pp. 930-933, Dec. 2016.
4. Cho, N., Seo, D., Yu, B., Kim, S. and Han, Y., "Investigation of chilling Procedure of LOX Supply System of Liquid Rocket Engine," *KSPE Fall Conference*, Jeongsun, Korea, pp. 863-867, Dec. 2016.
5. Liebenberg, L. and Meyer J.P., "The Characterization of flow regimes with power spectral density distributions of pressure fluctuations during condensation in smooth and micro-fin tubes," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, No. 1, pp. 127-140, 2006.
6. Dr. Jacob and N. Chung, "Two Phase Flow Characteristics and Boiling Heat Transfer Rates During Cryogenic Chillydown and Transport in Reduced Gravity," NASA CR-2008-215440/PART3, 2008.