

산화제 충전 및 대기 과정의 추진제 공급배관 내부 현상

권오성* · 조남경* · 정용갑* · 이중엽**

Liquid Oxygen in Feeding Line during Propellant Filling and Holding

Ohsung Kwon* · Namkyung Cho* · Yonggahp Chung* · Joongyoup Lee**

ABSTRACT

Propellant filling and holding test was carried out using liquid oxygen as a working fluid. The feeding line system has a filter at propellant tank outlet. Vaporization of liquid oxygen during holding after completion of filling and effect of vaporization to recirculation performance in this system was observed. Filling rate and pressure of tank ullage had the effect on state of liquid oxygen in feeding line. There was no geysering in feeding line during holding because of the position of filter.

초 록

액체산소를 작동유체로 하여 추진제 공급배관에 대한 충전 및 대기 시험을 수행하였다. 추진제 공급 시스템은 추진제 탱크의 출구에 필터가 장착된 형상이다. 추진제의 충전이 완료된 후 대기 과정동안 액체산소의 증발과 이것이 시스템의 재순환 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 추진제의 충전 속도와 탱크 얼리지의 압력이 배관 내 액체산소의 상태에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 필터의 장착 위치로 인해 대기 과정동안 배관 내부에서 geysering 현상은 발생하지 않았다.

Key Words: Liquid Oxygen(액체산소), Feeding Line(공급배관), Filling(충진), Propellant(추진제)

1. 서 론

추진제의 충전 초기 배관의 예냉이 끝난 후 정상 충전 과정동안 배관 내의 액체산소는 수두에 의해 과냉각 상태를 유지하게 된다. 하지만, 충전 완료 후 대기 시간동안 외부로부터의 열침

입에 의하여 액체산소는 포화상태에 도달하고 배관 내의 각 위치에서의 정압에 해당하는 포화 온도를 유지하게 된다. 이러한 포화 온도는 배관 내의 액체산소가 증발함으로써 유지된다.

발사체 기체공급계는 엔진시스템이 요구하는 유량, 압력, 온도로 추진제를 공급하여야 하는 바 배관시스템의 chill-down 및 액체산소의 컨디셔닝을 위하여 재순환배관을 설치하여 액체산소를 순환시키는 방법이 있다[1]. 이는 공급배관과 재순환배관의 액체산소의 밀도차를 이용하는 방

* 한국항공우주연구원 추진제어팀

** 한국항공우주연구원 발사체미래기술연구실
연락처자, E-mail: oskwon@kari.re.kr

법으로서 그 성능은 배관 내부 액체산소의 상태에 의해 영향을 받게 된다.

본 논문에서는 추진제 충전 완료 시점에서의 배관 내 액체산소 상태와 추진제의 충전 속도, 가압 과정, 해압 과정에 따른 액체산소의 상태 변화를 살펴보았다. 또한, 대기 시간동안 배관 내의 geysering 현상 발생 여부를 관찰하였다.

액체산소 충전 및 대기 과정 동안의 이러한 현상들을 살펴봄으로써 배관 내 액체산소의 상태를 파악하고 추후 시스템의 운용과정을 위한 기초자료로 삼고자 하였다.

2. 시험 설비

시험설비는 산화제 탱크와 직경 2.5인치의 공급배관, 직경 1인치의 재순환배관으로 구성되어 있다. 재순환배관은 공급배관의 하부에서 분기되어 산화제 탱크의 중간 높이 측면으로 들어가게 된다. Fig. 1은 탱크를 제외한 배관시스템의 형상과 센서가 장착된 위치를 나타낸다.

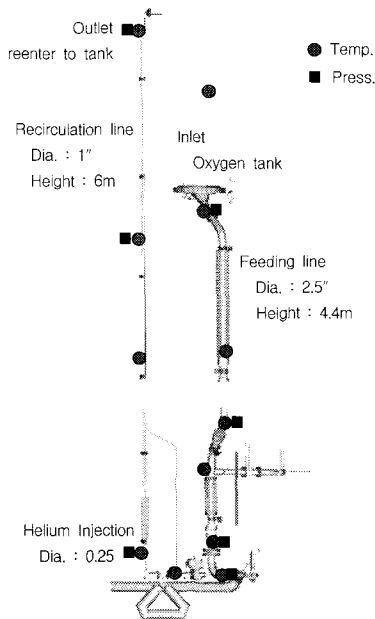


Fig. 1 Configuration of propellant feeding system

재순환배관에는 재순환밸브와 액체산소의 순환량을 측정하기 위한 유량계를 장착하였고 배관 길이방향으로 12개의 온도센서와 7개의 압력센서를 장착하였다. 모든 배관은 폴리우레탄 폼을 이용해 단열처리하였다.

필터 element는 7겹 소결 필터로서 150 μm 의 여과율을 갖고 있고 직경은 209 mm이다. 필터는 산화제탱크 출구에 장착되어 있으며 탱크 플랜지와 outlet 사이에 고정되어 있다.

3. 시험 결과

3.1 배관 내 액체산소의 기화

Figure 2는 충전 완료 후 배관 내부 액체산소의 온도분포를 나타낸다. 탱크 열리지 압력의 감소로 인해 액체산소의 온도가 전체적으로 감소하는 가운데 공급배관 상부의 온도는 급격히 상승하였고 시간이 지날수록 이러한 현상이 공급배관 하부로 전파되었다. 이것은 충전 완료 시점에 배관 내의 액체산소가 이미 각 위치에서의 정압에 해당하는 포화온도를 유지하고 있고, 발생한 기포들이 탱크 하부에 장착된 필터로 인해 배관을 빠져나가지 못하고 상부에서부터 점차로 쌓여가기 때문이다.

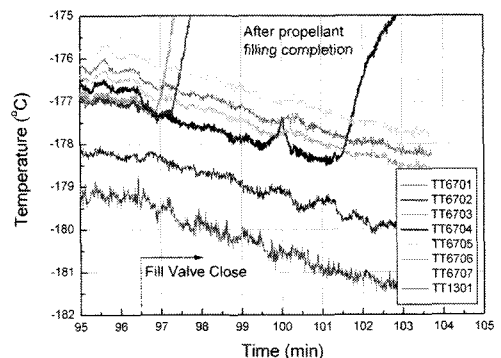


Fig. 2 LOX Temperature after Filling

이는 배관시스템에 장착된 필터의 위치에 기인한 것으로서 필터를 기준으로 상부의 탱크에는 액체산소가, 하부의 배관에는 기체산소가 존

재하게 된다. 결국, 충전 완료 후 액체산소에 대한 컨디셔닝 없이 단순 대기할 경우 공급배관 내부의 액체산소는 점점 줄어들어 배관 내는 기체산소로 차게 된다.

3.2 액체산소의 기화가 재순환에 미치는 영향

공급배관 내에 증발된 기체산소가 존재하는 경우 액체산소의 재순환이 원활하게 이루어지지 못하였다. 분사되는 헬륨을 증가시켜도 재순환이 발생하지 않다가 약 95 SLPM의 분사량에서 공급배관과 재순환배관 사이의 수두차를 극복하고 재순환이 발생하기 시작하였고 이후 헬륨 분사량에 관계없이 순환이 유지되었다[2].

재순환 발생 전에는 장시간의 대기로 인하여 공급 배관 내부가 거의 기체로 차 있다가 재순환 발생과 동시에 배관 내부 전체가 액체산소 온도로 급격히 감소하였다.

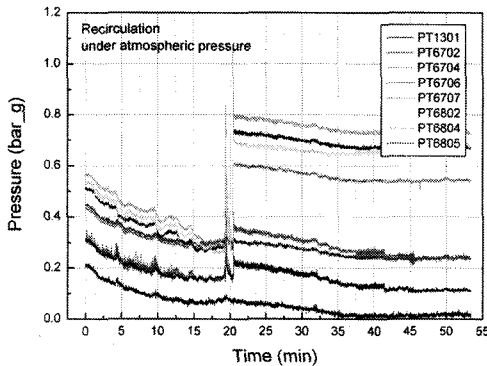


Fig. 3 Pressure Variation at Recirculation Point

Figure 3은 재순환이 발생하기 전후의 배관 내부 압력을 비교한 것이다. 공급배관 내부는 기체 상태이므로 거의 동일한 압력을 보이다가 액체산소의 급격한 유입과 함께 정상적인 압력 분포를 형성하였다. 하지만 이로 인하여 추진제 탱크의 수위 또한 불연속적으로 떨어지는 현상이 발생하였다.

3.3 충전속도와 배관 내부 상태

Figure 4는 충전 속도가 빠른 경우에 충전 완료 시점의 배관 내 액체산소 온도분포를 나타낸

다. 충전 속도가 빠른 경우 배관 내부의 정압이 높게 형성됨으로 인해 액체산소의 온도가 전체적으로 더 높게 나타나지만 해당 위치의 정압에 대하여 과냉각 상태를 유지하고 있다. 이러한 경우 주입밸브를 차단하였을 때 배관 내부의 액체산소는 공급배관에서부터 재순환배관에 이르기까지 자연스럽게 온도구배를 형성하고 재순환이 발생하기 시작하였다. 이 과정은 약 1분 30초가 걸렸다. 배관 내의 압력분포 역시 정상적인 수두압을 형성하였다.

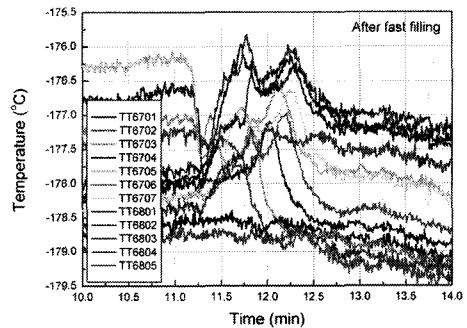


Fig. 4 LOX Temperature Variation after Fast Filling

일반적으로 충전 완료 시점이 가까워질수록 수위조절을 위하여 충전 속도를 줄이게 되는데 이 경우 배관 내부는 포화상태에 가까워지게 되고 충전 완료 후 대기시 기포가 발생하게 된다. 빠른 속도로 충진을 종료하는 경우에는 자연재순환이 발생하게 되고 대기시간동안 탱크 열리지 압력이 점점 감소하여도 재순환은 유지된다. 그러나, 이 경우 액체산소의 충전량을 적절히 조절하기가 쉽지 않은 단점이 있다.

3.4 가압 및 해압 과정

충전 완료 후 대기시간동안 공급배관 내에 기포가 발생하였더라도 탱크를 가압하게 되면 기포의 응축으로 인하여 배관 내부는 액체산소로 채워지게 된다. 그러나 이 때 배관 내 온도와 압력의 급격한 변화 및 충전 레벨의 부정확성이 발생하게 된다. Fig. 5는 탱크를 가압하는 동안 배관 내 액체산소의 온도변화를 나타낸다. 가압이 진행되면서 공급배관 내가 액체산소로 채워

지고 공급배관과 재순환배관 사이에 명확한 온도 차이가 발생하면서 배관 길이 방향으로 매끄러운 온도구배가 형성되었다. 물론 이때 자연재순환이 발생하였다.

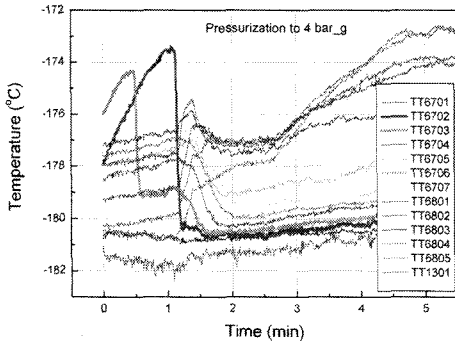


Fig. 5 LOX Temp. during Pressurization

산화제탱크 가압을 통하여 탱크와 배관 내부의 액체산소 온도가 충분히 상승한 상태에서 해압을 수행하게 되면 액체산소는 해당 온도의 증기압에 급방 도달하게 되므로 탱크와 배관에서 전체적으로 급격한 증발이 일어나게 된다. 결과적으로 급격한 해압과정에서는 상당량의 액체산소가 증발되어 벤트되므로 충전레벨의 변화가 크다. 또한, 배관 내부에 급격하게 기포가 쌓임으로 인해 재순환은 중지된다.

3.5 Geysering 현상

배관 내의 Geysering 현상을 관찰하기 위하여 액체산소를 충전하고 재순환밸브를 닫은 상태에서 대기하였다. 공급배관에는 액체산소의 증발 외에는 아무런 현상도 발생하지 않았다. 이것은 앞에서 언급했듯이 산화제탱크 하부에 필터가 장착되어 있음으로 인하여 공급배관 내부에서 묻혀진 기포가 배관 밖으로 쉽게 빠져나가지 못하고 결과 액체산소가 배관 내로 떨어지지 못하기 때문이다. 재순환배관 내부에서는 온도와 압력이 섭동이 계속 발생하였는데 그 크기는 그리 크지 않았다. 재순환배관의 직경이 1 inch로 작기 때문에 판단된다.

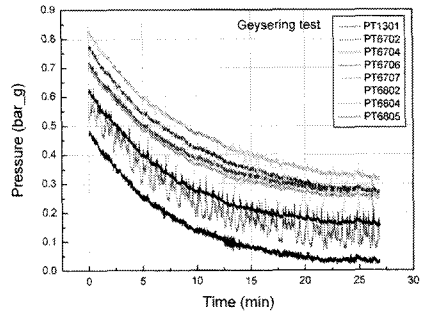


Fig. 6 Pressure Pulsation in Recirculation Line

4. 결 론

추진제의 충전 및 대기 과정의 배관 내부 액체산소의 상태를 온도와 압력을 통해 관찰하였다. 탱크 하부에 장착된 필터로 인하여 대기 과정 동안 배관 내부에 기포가 축적되었으며 이것이 재순환 성능에 영향을 주었다. 충전 속도가 빠른 경우와 가압을 하는 경우 자연재순환이 발생하였으나 이 경우 충전량을 조절하기가 어렵고 수위가 급격하게 변화는 문제가 발생하였다. 필터로 인하여 공급배관 내 geysering 현상은 발생하지 않았다.

후 기

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업인 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. E. Ring, Rocket Propellant and Pressurization Systems, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1964
2. 권오성, 이중엽, 정용갑, "Gas-lift를 이용한 극저온 추진제의 재순환 성능에 대한 실험", 제4회 유체공학학술대회, 2006, pp.551-554