액체산소를 사용하는 발사체 산화제 및 산화제 지상공급시스템의 품질관리

김지훈* · 유병일* · 강선일** · 오승협*

Quality control for the liquid oxygen as the oxidizer of launcher and the liquid oxygen filling system as ground facility

Jihoon Kim* · Byungil Yoo* · Sunil Kang** · Seunghyub Oh*

ABSTRACT

The various hazards should be eliminated before operations for the successful launches or tests. Using the contaminated propellants is one of the causes for the launch and test failures. Especially, the systems using liquid oxygen as an oxidizer have risks about fires and explosions not be forecasted if they are contaminated by oil, water and mechanical impurities. The procedure for the quality control of the liquid oxygen and the liquid oxygen filling system and the lessons learned from the first launch preparation with the system are introduced on this paper.

초 록

성공적인 발사나 시험 운용을 위해서는 여러 가지 위험 요소들을 사전에 제거하여야 한다. 오염된 추진제 사용은 발사 혹은 시험을 실패하게 하는 원인들 중 하나이다. 특히 액체산소를 산화제로 사용하는 발사체 및 공급시스템의 경우 기계적 불순물, 유지분, 수분 등의 오염원들로 청정상태를 유지하지 못할 경우 예기치 못한 화재나 폭발의 위험도가 높아지게 된다. 본 논문에서는 이러한 오염원들을 제거하고 시스템을 청결하고 안전한 상태로 유지하기 위한 방법을 제시하고 그 적용결과 및 교훈을 정리해 보았다.

Key Words: Oxygen(산소), LOx(액체산소), Contaminant(오염원), Purity(순도), Hazard(위험), LOFS, Cleaning(세척), Quality control(품질관리), Ground facility(지상설비), Sampling(샘플링)

1. 서 론

성공적인 로켓 발사는 궁극적으로는 페이로드를 목표 궤도에 올리는 등의 임무를 완수하

* 한국항공우주연구원 추진기관체계팀
** 한국항공우주연구원 발사대개발팀
연락저자, E-mail: jhk0622@kari.re.kr

였을 경우 완성되는 것이지만, 일단 발사대로부터 깨끗한 화염을 분출하며 하늘을 향해 비상하여 우리의 시야에서 사라질 때까지 정상적인 비행의 모습을 보여준다면 지상시스템의 담당자들은 한시름 놓게 된다. 그러나 우리는 과거에도 로켓이 발사가 되는 순간 혹은 엔진 연소시험을 하는 도중 비극적인 폭발사고가 발생하는 경우들을 많이 보아왔다. 비정상적인 사고가 발생하게 되는 원인은 매우 다양하지만, 오염된 추진제가 사고의 원인이 되는 경우도 종종 있었다. 추진기관이나 엔진의 설계인자들 중 오류가 있는 것을 발견해 내어 수정하는 것은 그리 간단한 일이 아니지만 시스템과 추진제를 청결하게 유지하도록 관리하는 것은 조금만 관심을 가지면 눈에 띄는 성과를 얻을 수 있는 부분이다. 따라서 여기서는 산화제인 액체산소와 시스템을 청결하고 안전한 상태로 유지하기 위한 방법을 살펴보고 그 적용결과와 교훈을 정리하고자 한다.

2. 본 론

2.1 산소의 특성

1774년 Priestley에 의해 발견된 산소는 물의 88.8%, 공기 중의 20.9%, 지각의 49.5%를 차지하고 있다. 발사체에 추진제로 사용되는 액체산소는 흔히 액상의 공기에서 추출하는데 액체산소 그 자체로서는 비독성, 비연소성, 비폭발성이어서 위험도가 낮으나 알콜이나 RP-1과 같은 액체연료가 지니고 있지 않은 취급 및 저장에 대한 문제가 있다. 조연성을 갖고 있어 가연물질과 점화원이 있으면 격렬하게 반응하여 연소를 하도록 하며 기체상태의 산소는 반응속도가 더욱 빨라 가연물질과 점화원이 있을 때 가연물질의 폭발 위험도가 증가한다. Fig.1과 같이 발화의 3요소가 만족되면 연소가 일어나는 것이다. 액체산소는 비용도 저렴하고 이러한 조연성의 성질로 발사체에서는 산화제로 사용되어 RP-1, 수소, 알콜 등의 연료를 연소시킨다.

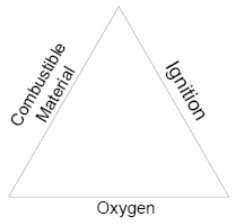

Fig. 1. Fire triangle

2.2 액체산소 지상공급시스템 개요

액체산소 지상공급시스템(이하 LOFS)의 주요 구성에는 다음과 같은 설비들이 요구된다.

① 액체산소 저장설비
② 발사체 산화제 탱크에 주입하기 위한 펌프 설비
③ 주입 유량을 조절하기 위한 최종 밸브단 설비
④ 액체산소 온도 제어를 위한 설비
⑤ 각종 밸브를 구동하기 위한 솔레노이드 밸브판넬 및 계측설비
⑥ 액체산소 드레인 설비

LOFS의 LOx 저장탱크, 공급배관 및 밸브 등은 모두 이중자켓으로 진공단열 처리해야 하며 밸브류들은 모두 초저온용이어야 한다.

발사대는 크게 Central Building(이하 CB동)과 Launch Building(이하 LB동)으로 나누어져 있는데 액체산소의 저장시설과 펌프 시설은 CB동에, 최종 밸브단과 온도제어 시설은 LB동에 구축되어 있으며 양측은 지하 공동구에 진공배관으로 연결되어 있다. 배관 및 밸브 등과의 연결부위는 대부분 용접타입으로 설계하였으며 이는 단열효과를 높이기 위함이다.

LOFS의 액체산소 저장탱크는 약 270톤의 액체산소를 저장할 수 있다. 발사운용 당일 발사 약 5시간 전부터 시스템을 준비하고 나로호의 1단 산화제 탱크에 액체산소를 주입하는 일련의 작업들을 수행한다.

2.3 시스템 구축 단계 및 품질관리 요구

다른 유공압 시스템들과 마찬가지로 LOFS를 구축할 때에도 ①설계->②제작->③설치->④검증

의 과정을 거쳐야 한다. 각 단계별로 상세한 작업절차 및 품질관리 방법이 기술된 문서를 준비해야 하며 관련 작업자들은 해당 문서의 절차대로 작업을 수행하여야 한다. NASA와 같은 경험이 많은 기관의 경우 액체산소 공급시스템을 구축하기 위한 상세 절차서가 안전 규정으로 준비되어 설계 단계에서는 재료를 선정하는 법부터 제작/설치 단계에서 세척 방법들까지 상세하게 기술해 놓았다.

또한 발사체로 주입되는 산화제의 경우 까다로운 기준으로 품질 관리가 요구되는데 이러한 액체산소에 대한 품질관리에 대한 필요성은 일찍이 제시되어 Table 1은 MIL 표준규격(MIL-p-25508B)에 규정되어 있는 것이다.

Table 1. MIL-p-25508B

Item	Requirement
Purity	99.5% min.
Carbon	25 ppm max.
Moisture	26.3ppm max.
Acetylene	0.5 ppm max.

2.4 LOFS 구축 과정 중 설치 단계

우리의 경우도 각 단계별로 절차서를 준비하였고 작업자는 이를 따르도록 요구하였다. 그러나 실질적으로 안전관리 차원에서의 시스템 구축 단계별 절차 마련으로 접근한 것이 아니어서 액체산소를 다루는 설비로서의 '설치'에 관한 상세 절차 마련이 미흡하였다. 해외의 액체산소 시험시설 설치 규정에서는 설치환경이 청정한 상태에서 단품들을 조립할 것을 명시하고 있다. 물론 단품을 조립하는 단계에서 시스템이 오염되는 것을 완전히 막을 수는 없다. 그러나 여러 가지 방법을 동원하여 시스템이 오염되는 것을 최소화 하는 노력을 기울여야 한다는 것이 해외 규정들의 공통적인 내용이다. 우리의 경우 제작 단계로부터 납품 과정에서 밸브나 배관 등을 생산자가 기본적으로 산세척 등의 cleaning을 하는 과정은 필수로 지켜졌으나 일정 단축과 비용 절감 등의 요구로 건물 토목 분야의 보수 등 작업이 병렬적으로 이루어져 청정한 환경이 유지되지 못하였다. 그로 인하여 8개월이라는 긴 설치 과정을 거친 후 액체질소로 LOFS 설비를 1차 검증한 후 시스템의 주요 필터들을 분리 검사한 결과 다량의 이물질과 유지분 성분이 발견되었다. 2차 검증에서는 액체산소를 사용하기 때문에 반드시 시스템의 청결작업이 완료된 후 다음 단계로 넘어갈 수 있었다.

시스템의 세척은 질소를 사용하였는데 시스템에 사용되는 조건과 유사한 액체질소와 가스질소를 번갈아 가면서 수행하는 방법이 추천되었다. 따라서 약 15일간에 걸쳐 배관 내부를 규정된 품질기준을 만족하는 액체질소와 가스질소로 블로잉하는 작업을 수행하였다. 매일 블로잉 작업 종료 후 배관을 분리하여 내부를 검사하였다. 배관 내부에 있는 이물질들은 블로잉 작업시 점차 드레인 탱크로 모아지게 되었으며 마지막으로 드레인탱크를 세척하는 것으로서 시스템 세척작업을 모두 완료하였다.

2.5 액체산소 품질관리

시스템이 액체산소를 사용하는 단계부터는 표와 같은 품질 기준이 적용되었다. 액체산소는 공급처에서 발사대의 저장탱크에 이송되는 단계에서도 오염될 수 있고 저장탱크에 보관하는 중에도 오염될 수 있기 때문에 각 단계에서 샘플링을 하여 화학분석을 통해 품질 기준을 만족하는지 여부를 확인해야 한다. 액체산소의 샘플링 및 화학분석은 한국표준연구원에 의뢰하여 수행하였다.

Table 2. 액체산소 품질 기준

항목	기준
순도(%mol/mol)	99.5 이상
CO2농도(%mol/mol)	0.3 이하
water, oil, mechanical impurities	육안검사시 없어야 함.

액체산소 저장탱크에는 샘플링을 할 수 있는 포트가 있으며 이 포트에 Fig. 2와 같이 시료 포집을 위한 배관과 탱크를 연결하여 약 10L 정도의 시료를 포집한다. 포집한 액체산소 시료를 화학분석하여 순도 및 오염원을 검사한다.

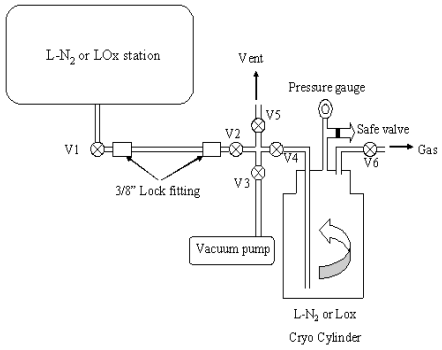

Fig. 2 액체산소 시료포집 개념

액체산소를 샘플링하는 경우는 ①공급처로부터 저장탱크에 액체산소를 이송 완료 직후 ②발사체에 주입하기 위한 운용 직전 ③발사체 탱크로부터 지상 저장탱크로 액체산소를 복귀시킨 후이다. 만약 어느 한 단계에서라도 화학분석 결과가 기준치를 만족하지 않으면 저장탱크에 있는 액체산소를 모두 폐기하고 시스템 세척 후 다시 액체산소를 저장하고 샘플링한 후 합격하여야 시스템 재운용이 가능하도록 규정하였다.

LOFS는 시스템 운용에 앞서 검증 단계에서 충분한 블로잉 세척작업을 통해 시스템 청결상태를 확인하였으며 액체산소로 시스템 운용시 각 단계별 샘플링 및 화학분석 결과 모두 기준을 만족하였으며 성공적이고 안전하게 발사운용 임무 수행을 완료하였다.

2.6 향후 계획

2차 발사운용 전까지 시스템 주요 부위의 청결상태를 재확인하고 배관 내부를 가스질소로 채워놓아 오염을 사전에 방지하도록 할 것이다. 또한 향후 유사한 설비를 개발하는데 앞서 액체산소 설비를 위한 상세 안전 작업 절차서 마련이 필요하다.

3. 결 론

발사체 산화제로서의 액체산소를 다루는 설비를 개발할 때에는 반드시 안전 차원에서 각 개발 단계별 절차가 확립되고 지켜져야 한다. 금번 LOFS 설비 구축 시에는 설치 단계에서의 기준과 절차를 준수하는데 애로점이 있었던 관계로 시스템을 다시 세척하고 검사하는 데 한 달 이상의 시간과 노력을 쏟아야 했다. 더욱이 초저온용 설비는 용접을 많이 하기 때문에 시스템을 분리하고 검사하는데 상당히 어려움이 많았다. 따라서 이번 경험을 통해 설비 구축 시에 상세한 작업절차와 기준에 대한 체계가 보완되어야 하고 이를 준수하는 것이 결과적으로는 비용절감, 일정단축, 성능향상에 이득이 되는 것임을 알 수 있었다.

액체산소의 품질관리 기준과 절차는 발사운용 결과 만족스러웠으며 확립되었다고 볼 수 있다. 유사한 시험을 하는 타 기관에서도 시험 실패 시 원인을 분석하는데 불필요한 시간을 아끼기 위해서는 시스템의 충분한 세척과 샘플링을 할 것을 추천하는 바이다.

참 고 문 헌

1. HUGH E. MALONE, The Analysis of Rocket Propellants, Academic Press London, New York, San Francisco, 1976
2. Fire Hazards of Oxygen and Oxygen Enriched Atmospheres, EIGA
3. 이정호, V.A. Bershadsky, 김상헌, 강선일, 유병일, 오승협, “액체로켓엔진 시험설비에서 위험을 감소시키는 방법에 관한 연구”한국추진공학회지, 2005
4. Safety standard for oxygen and oxygen systems, Office of safety and mission assurance, Washinton D.C. 20546
5. 유병일, V.A. Bershadskiy, 김상헌, 이정호, 김용욱, 오승협, “액화산소(LOX)오염으로 인한 추진기관 사고발생 저감방법에 대한 연구”, 한국가스학회지, 2006