

산화제 오염에 대한 추진기관의 안전한 시험방법에 대한 연구

유병일* · 베르샤드스키** · 김상현*** · 이정호* · 강선일* · 오승협*

A Study on Method for Safe Testing of Propulsion System according to Oxidizer Contamination

Byung-Il Yu* · V.A.Bershadskiy** · Sang-Hern Kim*** · Jung-Ho Lee* · Sun-Il Kang* · Seung-Hyub Oh*

ABSTRACT

A study was conducted to investigate safe testing on propulsion system, especially concentrated on effects of contaminants accumulation and transfer in LOX system. Several methods for system operation decreasing accidents caused by oxidizer leakage and contaminants accumulation was investigated. These methods can be applied to LOX system and other propellants system in liquid propellants propulsion system.

초 록

본 연구를 통해 액체 로켓 추진기관의 안전한 시험을 수행하는데 있어 발생할 수 있는 문제점들에 대한 연구를 수행 하였다. 특히 산소시스템 내부에 축적되는 오염물질과 그것들의 시스템 내부 이동에 관하여 심도 있는 연구를 하였다. 추진기관의 산화제 누출로 일어날 수 있는 사고의 확률을 감소시키기 위한 시스템 운영에 대한 몇 가지 방법들을 연구하였고, LOX 내에 오염물질의 축적으로 인한 사고 감소 방법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 method의 일반적인 원리는 추진기관 시험설비의 산소시스템에 적용할 수 있을 뿐 아니라, 기타 추진제에도 적용할 수 있다.

Key Words: LOX(액체산소), Propulsion system(액체로켓 추진기관), Propellant(추진제)

1. 서 론

추진기관을 개발하고 그에 따른 시험을 진행할 때에 추진제의 누설로 인한 사고가 일어날

수 있고, 이러한 사고는 물적, 인적 손실을 발생시킨다. 산소와 같은 산화제의 누출사고는, 대량 누출되었을 경우 다른 물질과 접촉하여 화학반응을 일으켜 다량의 열에너지를 방출시키는 원인이 된다. 이러한 산화제의 누출 사고는 화재나 폭발을 불러올 수 있고, 추진기관 및 시험설비를 파손시킬 수 있다.

현존하는 대부분의 추진기관들의 경우 초기개발 단계에서부터 개발완료 단계에까지 산소시스

* 한국항공우주연구원 추진기관체계그룹

** 한국항공우주연구원 유체과학자

*** (주)로템 기술연구소

연락처, E-mail: biyoo@kari.re.kr

템이 원인인 되어 발생한 화재사고 경험을 지니고 있다. 예를 들면 미국의 Space shuttle 및 러시아의 Zenit 등도 개발 및 제작 단계에서 이러한 사고를 수차례 겪었으며, 기타 다른 추진기관 등도 지상시험설비에서의 시험 및 비행 시에 이러한 원인으로 사고를 경험 하였다.[3,4]

본 논문에서 인용한 데이터는 참고문헌 [1-7]을 참고 하였고, 연구결과로 발사체와 시험설비 산소시스템 내부의 오염물질 축적으로 인한 산소시스템 화재발생과 그에 따른 추진기관의 추진체 누출 사고가 발생할 수 있는 확률을 감소시키는 방안을 제시 하였다.

2. 본 론

2.1 산소시스템에서의 오염 물질 축적 및 이동

추진기관 및 시험설비를 운영할 때에 가압 등의 목적으로 사용되는 가스 등이 LOX 내부에 용해되지 않는 상태로 존재하면서, particle의 형태로 LOX 시스템 내부에 축적된다. 이때 고체 상태의 particle 질량은 LOX 내부에 용해되고 응축되는 가압용 가스 등의 무게이며, 결과적으로 이러한 것들이 산소시스템 내부에 particle로 축적되게 된다. 이러한 것은 LOX 운송 도중에도 발생할 수 있으며, 발사체에 충전하기 위해 준비하는 도중 및 충전 중에 발생할 수도 있고, 시험을 진행하는 동안에도 발생한다. 또한 상기와 같은 현상들은 LOX의 성분자체를 공장출하 상태와는 다르게 만든다.

가스가 용해된 혼합물의 경우 LOX가 기화 하게 되면 LOX 내부에 존재하는 이러한 오염물은 LOX의 양에 비례하여 농도를 높여가고, 액상에서 고체로 상을 전환하게 된다.[2,5]

실제 상황에서는 다른 것보다 이산화탄소, 아세틸렌, 수분 등의 LOX에 대한 용해도에 더 관심을 갖게 된다. 상대적으로 LOX 내부에 아주 소량의 상기와 같은 오염물질이 존재한다면, 즉 다시 말해 LOX volume 대비 $3.7 \cdot 10^{-4} \sim 1.2 \cdot 10^{-6}$ 정도 양의 오염물질이 존재한다면 LOX에 고체

의 particle이 발생할 가능성이 있다.[3, 7] LOX 내부에서 가스가 경화되고 난 후의 경화물질은 대략 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 정도의 크기와 LOX와 비슷한 밀도를 가지며, LOX 내부에 균일하게 분포하면서 LOX와 더불어 배관내부를 이동하게 된다.

이론적인 방법으로는 이러한 particle의 크기 및 양을 정확하게 산정하는 것이 효과적이지 못하므로, 시험을 통해서 이러한 particle의 크기 및 무게를 규정한다.

Fig. 1은 각기 다른 유량으로 충전 한 경우 축적되는 particle에 대하여, LOX 탱크에 LOX를 충전하고 control 필터를 장착한 후 일정시간 LOX를 배출시켜 필터망을 탈거하여 걸러진 particle을 분석하는 방법을 사용하여 얻은 데이터로 작성한 그림이다. 본 시험을 위해서 88m^3 용량의 LOX 탱크를 사용하여 선세척하지 않은 상태에서 실험을 하였다. Fig. 1에서는 LOX 충전 속도가 결과적으로 particle 형성에 영향을 주는, 즉 충전 속도에 따른 온도변화가 LOX 시스템 구성품에 미치는 영향을 보여주고 있다.

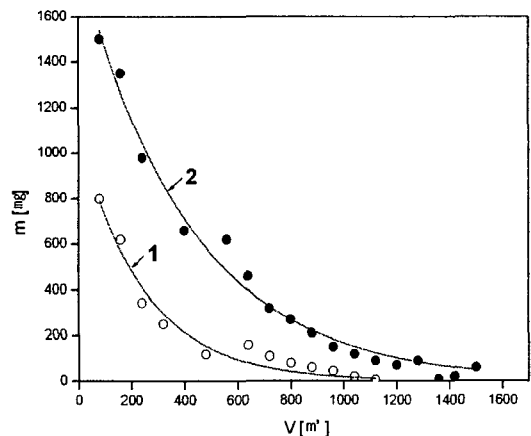


Fig. 1 LOX를 탱크에 저속으로 선냉각하고 충전 할 경우(1)와 그렇지 않을 경우(2)에 추진체 탱크 세척을 위해 소모되는 LOX의 양[10]

지금까지 수행된 연구의 시험결과를 보면 산화제 탱크내부의 산화제 이송속도가 형성되면, 산화제 탱크 내부에 있는 mechanical particle은

산화제와 같이 산화제 탱크에서 빠져 나온다. 그러나 이러한 방법으로 산화제의 오염도를 낮추기 위해서는 여러 번에 걸친 산화제 탱크로의 극저온 산화제 충전을 해야 하고, drain 시켜야 한다. Fig. 2에는 실제 추진기관이 작동할 때의 작동 조건으로, 즉 추진기관이 작동할 때의 유량으로 시험한 데이터를 사용하였다. 이때 탱크 제작사에서 선세척 혹은 선세척하지 않은 탱크를 가지고 시험을 진행 하였다. Fig. 2에서는 산화제 탱크 drain 배관의 필터를 지난 산화제의 양에 따른, 필터망에 걸려진 particle의 무게 변화에 대해서 보여주고 있다.

이러한 결과들을 종합하여 볼 때 추진기관의 작동준비와 작동 시 particle이 주는 영향과 잠재적인 사고의 확률을 줄이기 위해, 산소시스템 운영에 대한 시스템 내부 오염물질의 축적을 막을 수 있는 운영 및 충전방법에 대한 method가 필요하다.

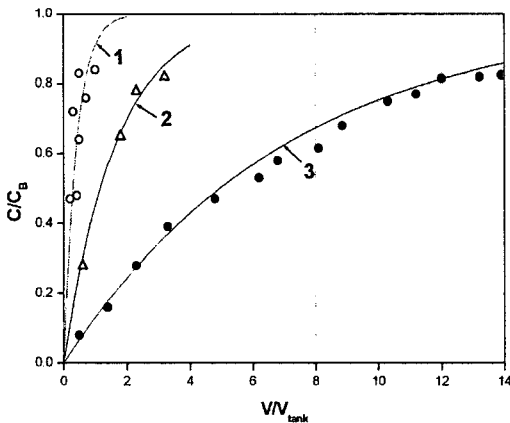


Fig. 2 추진기관을 제작 공장에서 생산/조립 후에 실시한 선세척 정도에 따른 실제 시험장 및 발사장에서 산화제 탱크 세척에 소모되는 LOX의 양[10]

1. K = 2.4 능동적 방법을 이용한 선세척
2. K = 0.6 수동적인 방법을 이용한 선세척
3. K = 0.14 선세척 하지 않은 경우

2.2 추진기관 운영 시 사고 확률을 줄이는 방법

미국과 러시아의 추진기관을 설계/제작하고 시험한 결과를 분석하여 볼 때, 시스템의 일부

파트 연소로 인한 산소의 누출사고를 막기 위한 방법으로는 설계방법에 따른 해결책, 기술적인 운용방법에 따른 해결책, 시험방법에 따른 해결책이 있음을 보여주고 있다. 이러한 method에 대한 설명은 다음과 같다.

2.2.1 설계방법에 따른 해결책

- (1) 이미 검증된 method를 통해 영향을 미치는 particle에 대한 규정을 정한다. 즉 용해되는 가스의 허용농도, particle의 형태 및 크기/무게 등에 대한 허용 기준을 연구를 통해 검증 받은 방법에 따라 사용하는 가압용 가스 및 시험조건등을 고려하여 결정한다.
- (2) 방염성 있고 열흡수 용량이 큰 소재를 분별 사용하고, 비금속 소재의 사용은 최소화한다.
- (3) 추진기관 시스템의 운용조건 변경 시에는 급격한 조건 변경으로 인한 유공압 시스템 일부에 대량의 열충격을 받지 않도록 한다.
- (4) LOX 탱크의 충전 라인 및 가압 라인에 particle을 제거하기 위한 필터의 설치하며, 필터의 규격은 시스템내의 수력학적 손실을 고려하여 선정한다.(5 ~70 μm)
- (5) 추진기관의 작동 시 발생하는 파라미터를 통해 추진제 누설을 막기 위한 diagnostic에 대한 대책을 마련하고 운용 중 제어해야 하는 파라미터가 허용 한계값에 도달하면 다른 조건으로 전환하거나 또는 비상정지 로직에 의해 비상정지 시킨다.

2.2.2 기술적 운용방법에 따른 해결책

- (1) 추진기관의 제작/조립 시 사전에 유공압 부품들을 안전한 용매 및 수용성 전해물질을 사용하여 탈지를 한다.
- (2) 추진기관 제작/조립 후 내부 세척을 실시하고, 필터를 설치하여 배관 내 존재하는 허용치 이상의 particle을 걸러 낸다. 이러한 세척 작업 시 세척제로 사용되는 용매의 청정도가 허용값에 다다르면 세척작업을 종료 한다.
- (3) 스탠드 및 발사설비에서 시스템을 LOX로 세척하며, particle을 필터를 이용하여 걸러낸

다. 이러한 공정에 소모되는 LOX의 양은 아래와 같은 경험식을 이용한다.

$$C / C_B = 1 - \exp \left(\frac{K \cdot V_{lox}}{V_{tank}} \right)$$

여기서, C/C_B : 필터를 통해서 흘러간 부분에 대한 필터링된 particle 농도(필터망 20 μm 기준), V_{tank} : 탱크 용량, V_{lox} : 연료탱크로부터 배출된 추진제 용량, K : 세척 정도를 나타내는 계수 (0.14~2.4)

상기식의 계수 K 값 중 최소값은 추진제 탱크를 제작공장에서 선제척하지 않은 경우에 적용하는 것이 적당하고, 최대값은 추진제 탱크를 제작공장에서 능동적인 방법을 이용하여 선제척한 경우에 적용하는 것이 적정하다.

2.2.3 시험방법에 따른 해결책

- (1) 외부 육안검사, 배관 기밀검사 및 Valve 기능검사 등의 상태 점검 및 유공압 시스템 내부 표면에 존재하는 수분을 제거한다.
- (2) 사전에 추진제를 샘플링 하여 이미 검증된 방법을 통하여 화학 성분 분석을 실시한다.
- (3) LOX 충전 시 반드시 배관을 선냉각한 후에 충전을 시작한다.
- (4) 근무 인력에 대한 행동 규정을 정하고, 상황 판단 및 사고의 제거 능력을 배양시킨다.
- (5) 사고 시 사고의 확산을 막기 위해 추진제 탱크로부터 비상 배출 시간을 짧게 설계한다.

3. 결 론

본 연구를 통해서 LOX 시스템 내부 오염물질의 축적 및 그것들의 시스템 내부 이동에 대해서 연구를 진행 하였다. 아울러 이러한 LOX 내 오염 물질의 축적으로 인한 화재사고 발생 후 추진제 누출사고로 이어질 수 있는 것에 대한 확률을 줄일 수 있는 method를 연구하였다. 연

구결과로 얻은 method의 기본적인 원리는 기타 추진제 및 연료를 사용하는 추진기관에 적용 할 수 있다. 이러한 방법을 통하여 보다 상세한 적용 방법을 제시하기 위해서는 유공압 시스템 내부의 오염물질 축적 및 그것들의 유공압 시스템 내 이동에 대한 심도 있는 연구가 뒤따라야 하며, 추진기관의 운용 시 사고 상황 발생을 예방하는 효율적인 방법에 대한 연구가 뒤따라야 한다.

참 고 문 헌

1. B.A.Ivanov, A.S.Rozovski, "LOX작업환경에서의 작업 안전", Himiya, 1989
2. N.V.Filin, A.B.Bulanov, "액체 극저온 시스템", Mashinostroenie, 1985
3. A.P.Sidorenko, "재사용 가능한 aerospace 시스템 energy plant 및 엔진의 안전한 stand 시험을 위한 현대적인 concept", 러시아 엔지니어 아카데미, 국제 컨퍼런스 1993 No.4
4. G.K.Korovin, I.G.Logino-Loginskaya, G.K. Rukhkin, "LRE LOX공급 라인에서의 연소시 내구성 연구", journal "aerospace system 추진기관", 러시아 엔지니어 아카데미, 국제 컨퍼런스 1993 No.4
5. V.A. Bershadsky, "비행체 엔진 작동 시 극저온 연료의 가스성분 모델링", journal "aerospace system 추진기관", 러시아 엔지니어 아카데미, 국제 컨퍼런스 1993
6. R.P.Timirkeev, V.M.Sapoznikov, "산업 청정도 및 비행체의 component 필터링", Mashinostroenie, 1986
7. V.A.Bershadsky, "추진기관의 점화전 component 탱크의 선제척에 필요한 극저온 component의 소모량에 대한 연구", 학회지 "rocket engine & energy plant", HIXXIMASH 1999