



액화산소(LOX) 오염으로 인한 추진기관 사고발생 저감방법에 대한 연구

†유병일 · V. A. Bershadskiy* · 김상헌 · 이정호 · 김용욱 · 오승협
한국항공우주연구원 추진기관체계그룹, *한국항공우주연구원 유체과학자
(2006년 10월 20일 접수, 2006년 12월 13일 채택)

A Study on Method of Decreasing Accident of Propulsion System according to LOX Contamination

†Byung-Il Yu · V. A. Bershadskiy* · Sang-Heon Kim · Jung-Ho Lee ·
Yong-Wook Kim · Seung-Hyub Oh

Propulsion System Department, Korea Aerospace Research Institute, Deajeon 305-333, Korea
(Received 20 October 2006, Accepted 13 December 2006)

요 약

본 연구를 통해 액체로켓 추진기관의 운용 및 시험을 수행하는데 있어 LOX 시스템 내의 불순물로 인해 발생할 수 있는 문제점들에 대한 연구를 수행 하였다. 특히 LOX 시스템 내부에 축적되는 오염물질과 그것들의 시스템 내부이동 및 이에 따른 사고발생 확률에 관하여 심도 있는 연구를 하였다. 추진기관의 산화제 누출로 일어날 수 있는 사고의 확률을 감소시키기 위한 시스템 운영에 대한 몇 가지 방법들을 연구하였고, LOX 시스템 내 오염물질 축적으로 인한 사고발생 저감방법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 실험식의 일반적인 원리는 액체 추진기관의 LOX 시스템에 적용할 수 있을 뿐 아니라, 기타 추진제에도 적용할 수 있다.

Abstract – A study was conducted to investigate the problem caused by the mechanical particles in LOX system during operating and testing 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.

Key words : LOX(Liquid Oxygen), Propulsion system, Propellant, Oxidizer

I. 서 론

액체로켓 추진기관을 개발하고 그에 따른 시험을 진행 할 때에 추진제의 누설로 인한 사고가 일어날 수 있고, 이러한 사고가 발전되어 물적, 인적 손실을 발생하기도 한다. 특히 LOX와 같은 산화제의 누출사고는, 이러한 것들이 대량 누출되었을 경우 다른 물질과 접촉하여 화학반응을 일으킬 수 있으며, 이 경우 다량의 열 에너지를 방출시키는 원인이 된다. 이러한 산화제의 누출 사고는 화재나 폭발을 불러 올 수 있고, 추진기관 및 시험설비를 파손시킬 수 있으며, 주변의 생태계를 파손시킨다.

그간의 발사체 설비의 LOX 시스템 운영경험을 바탕으로 한 연구를 통해서 추진제 누출 사고는 아래와 같은 원인으로 발생하는 것을 알 수 있다.

- 허용치 이상의 시스템 내부 압력상승
- Water hammer 현상 및 저주파 진동
- 극저온 온도조건하에서의 발사체 및 시험설비 구성품 파손
- 시험설비 및 발사체에 허용치 이상의 기계적 하중 발생
- LOX 시스템 내부구성품에서의 국부화재

현존하는 대부분의 추진기관의 경우 초기개발 단계에서부터 개발완료 단계까지 LOX 시스템이 원인이 되어 발생한 화재사고 경험을 지니고 있다. 예를 들면, 미

†주저자:biyoo@kari.re.kr

국의 “Space shuttle” 및 러시아의 “Zenit” 등도 개발 단계에서 이러한 사고를 수차례 겪었으며, 기타 다른 추진기관 등도 지상시험시와 비행 시에 이러한 원인으로 사고를 경험하였다[1,2].

실제 환경에서 이러한 사고는 어떠한 점화원으로 부터 발화가 시작되었을 때 LOX 시스템을 구성하는 구성품의 연소가능 여부 및 연소속도에 따라 실제 사고가 발생할 수 있다.

실제로 사고가 발생하려면 점화원이 존재하여야 하고, 이 점화원으로 부터 일정한 에너지가 방출되어 화재로 이어진다. 그러한 것들의 예는 아래와 같다.

- LOX 시스템의 발화 가능 온도를 낮추는 효과를 나타내는 시스템 내부의 금속 particle 연소 및 시스템 내부에 축적된 유지층으로 부터 발화.
- LOX 시스템 내부에 존재하는 금속 particle로 인해 LOX 내에 기화된 가스가 발생하고 그로 인해 LOX 로 유힬작용을 하는 회전체의 유힬특성 저하로 인한 마찰 계수의 증가
- 금속에 비해 발화시키는데 필요한 에너지량이 현저하게 적은, 금속부분과 접촉하는 부분의 비금속 소재에서의 발화
- 시험도중 운용 조건 변경 시 발생하는 단열계수 변화나 water hammer 등으로 인한 LOX 시스템의 국부 온도 상승.
- 한시적으로 발생하는 LOX 시스템의 기계적인 충격, 고온의 물질과의 직접적인 접촉, 전기 누전으로 인한 시스템의 가열.

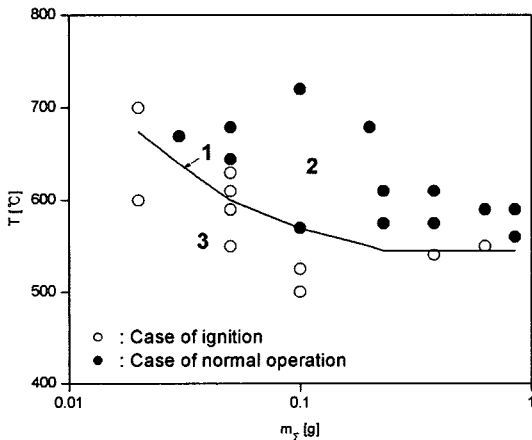


Fig. 1. Ignition boundary of Ni-Alloy metal, in case of combustion caused by Al particle (0.4 mm max.) in LOX system[6]. 1: Ignition boundary line, 2: Ignition range, 3: Normal range.

Fig. 1에는 시험을 통하여 산출한 LOX 시스템 중 니켈합금 소재로 이루어진 파트 내부에 존재하는 알루미늄 particle로 인하여 국부연소가 발생하고, 그로 인해 니켈합금 소재의 연소 가능한 온도범위를 저하시키는 연관관계를 보여주고 있다. 러시아의 “Zenit” 발사체가 시험도중 사고로 인하여 대량의 추진제가 누출되는 사고가 발생하였고, 원인은 터보펌프 시스템 내에 존재하던 particle이 터빈 출구부터의 라인을 타고 이송도중 배관내부에서의 1차 화재로 인한 것이었음이 사고 원인분석결과 밝혀졌다. Fig. 1에 사용한 데이터는 이러한 “Zenit” 발사체의 사고원인분석 연구결과를 토대로 한 것이다.

본 논문에서 인용한 해석방법은 참고문헌[1-9]를 참고 하였고, 연구결과로 발사체와 시험설비 LOX 시스템 내부에 오염물질 축적으로 인한 LOX 시스템 화재 발생과 그에 따른 추진기관의 추진제 누출 사고가 발생할 수 있는 일반적인 확률을 감소시키는 방안을 제시 하였다.

II. 본 론

2.1. LOX 시스템에서의 오염 물질 축적 및 이동

추진기관 및 시험설비를 운영할 때 가압 등의 목적으로 사용되는 가스가 LOX 내부에 완전 용해되지 않는 상태로 존재하면서, LOX 탱크 내부의 조건이 산소가 액체로 유지되는 조건이고, LOX 내부 혼합물의 증기 포화압력이 LOX의 포화압력보다 높으면 LOX의 오염을 불러오고 궁극적으로 고체 상태의 particle로 LOX 시스템 내부에 축적된다. 이때 고체상태의 particle 질량은 LOX 내부에 용해되고 응축되는 가압용 가스 등의 무게이며, 결과적으로 이러한 것들이 산소시스템 내부에 particle로 축적되게 된다.

앞서 설명한 내용은 LOX 생산 공장에서부터 발사장 및 지상 시험설비의 LOX 저장탱크로 LOX를 운송하는 도중에도 발생할 수 있으며, 또 발사장 및 지상시험설비의 LOX 저장탱크로부터 발사체에 충전 준비 및 충전 중에 발생할 수도 있고, 정해진 cyclogram대로 시험을 진행하는 동안에도 발생한다. 또한 상기와 같은 현상들은 LOX의 성분자체를 공장출하 상태와는 다르게 만든다.

LOX에 용해되는 비용축 가스는 헬륨, 질소, 아르곤이 있다. 이러한 가스들이 LOX를 오염시킬 수 있는 이유로는 이러한 가스들이 주로 가압용 가스로 사용되기 때문이다. 그리고, 질소와 아르곤의 경우는 LOX에 무한정 용해되는 특성을 지니고 있다. LOX에 용해되는

헬륨의 양을 산정하고자 할 때에는 아래와 같은 관계식을 사용한다.

$$n'_{He} = \frac{P_{He}}{13.44 \cdot \exp\left(\frac{400}{T}\right)} \quad (1)$$

여기서, n'_{He} = 용해된 가스의 몰농도

P_{He} = 시스템에서의 가스 분압(혼합기체의 성분기체)[bar]

T = LOX 온도[K]

LOX 시스템 내부의 온도상승이나 LOX가 배관을 따라서 흐를 경우 발생하는 수력학 저항으로 인해 LOX 내부에 용해되어 액상 상태로 존재하는 가압용 가스가 기화하게 되고, 기화로 인해 LOX는 두개의 상(象)을 지니게 된다. 대표적인 용해되는 응축 가스로는 메탄, 프로필렌, 아세틸렌, 이산화탄소, 일산화탄소, 물이 있다. 용해되는 응축 가스인 인한 고체 particle은, 처음에는 액상으로서 LOX 내부에 존재하다가 그것들이 포화상태로 되면 고체의 형태로 바뀐다.

가스가 용해된 혼합물의 경우 LOX가 기화되면 LOX 내부에 존재하는 이러한 오염물의 기화는 LOX의 양에 비례하여 농도를 높여가고, 포화상태에 이르게 되면 액상에서 고체로 상을 전환하게 된다[4,6].

가압용 가스로 인하여 응축 혼합물을 포함하고 있는 LOX의 오염도는 아래와 같은 식을 이용하여 산정한다.

$$\Delta C_1 = \frac{V_{Pressurization} \cdot C_{mixture}}{V_{liquid} \cdot K} \quad (2)$$

여기서, $V_{pressurization}$ = 가압용 가스의 양

$C_{mixture}$ = 가압용 가스 혼합물 밀도

V_{liquid} = LOX의 양

K = 기화정도를 나타내는 계수

그리고, LOX가 기화할 때, 응축(응결)되는 혼합물의 합량변경은 아래의 식으로 평가할 수 있다.

$$\Delta C_2 = \frac{\Delta C_1 \cdot \Delta V_{liquid}}{V_{liquid}} \quad (3)$$

여기서, ΔV_{liquid} = 기화한 LOX 량

실제 상황에서는 다른 것보다 이산화탄소(CO₂), 아세틸렌(C₂H₂), 수분(H₂O)이 어느 정도 LOX에 용해되는지, 즉, 상기 물질의 LOX에 대한 용해도에 더 관심을 갖게 된다. 상대적으로 LOX 내부에 아주 소량의 상기

와 같은 오염물질이 존재한다면, 즉 다시 말해 LOX 부피 대비 1.2 · 10⁻⁶~3.7 · 10⁻⁴% 정도 양의 오염물질이 존재한다면 LOX에 고체 particle이 발생할 가능성이 있다[3,7]. LOX 내부에서 가스가 경화되고 난 후의 경화물질의 크기는 대략 10~50 μm 정도이다. 이런 오염 혼합 물질로부터 만들어진 고체형태의 particle의 밀도는 대략 LOX와 비슷하며, LOX 내부에 균일하게 분포하고 있다. 이러한 이유로 이러한 고체 particle들은 LOX가 배관을 통해 이동하게 되면 LOX와 더불어 배관내부를 이동하게 된다.

LOX 내부의 mechanical 오염물질의 출현은 아래의 사항들과 연관관계가 있다.

- LOX 시스템 내부 표면에 경화되어 축적된 유지성분과 수분
- 제작 시에 발생한 particle, 소재 자체의 불량 및 추진기관의 제작공장에서부터 발사장까지의 이송 및 조립 단계에서 발생한 금속 particle
- 회전체 부분의 윤활특성 악화로 인한 시스템 구성품의 파손으로 인한 particle
- 철사, 모래, 기타 금속 particle 및 추진제 탱크에 충전 시 유입되는 오염물질, 그리고 추진제 탱크로의 극저온 유체 충전 시 극저온 추진제에 의한 관련부품 파손 및 particle 유입

이러한 particle이 점점 많아지게 되면 추진제 탱크 등 내부 표면에 점착하게 되고, 일부는 침전물로 쌓이게 된다. 이런 산소탱크 내부에 발생한 particle의 크기에 대한 허용 한도, 즉 현재의 기술로 지상시험을 수행할 수 있는 허용 mechanical particle의 크기는 10~200 μm 정도이다.

현존하는 이론적인 방법으로는 이러한 particle의 크기 및 양을 정확하게 산정하는 것이 효과적이지 못하므로, 실제로는 시험을 통해서 이러한 particle의 크기 및 무게를 규정한다. 널리 사용되는 방법을 살펴보면 LOX 공급탱크에 LOX를 충전하고 LOX 공급라인에 필터를 장착하고 일정시간 LOX를 배출시킨다. 그리고 난 후에 필터의 필터망을 탈거하여 그것을 분석하여 particle의 크기, 무게, 성분을 분석한다.

Fig. 2에서는 각기 다른 LOX 유량(각기 다른 질차로 충전)으로 LOX 탱크에 충전한 경우에 축적되는 particle에 대하여, 상기의 방법을 사용하여 얻은 데이터를 바탕으로 작성한 그림이다. 본 시험을 위해서 88 m³ 용량의 LOX 탱크와 LOX 배관에 필터를 장착하였으며, 사전에 LOX 탱크를 선세적하지 않은 상태에서 실험을 하였다. Fig. 2에서는 LOX 탱크에 LOX 충전 시

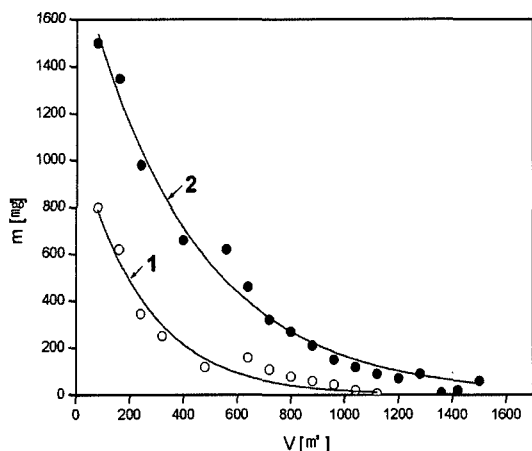


Fig. 2. Amount of particle to LOX consumption for cleaning [10]. 1: Case of precooling and small flow filling, 2: Other case except case 1.

LOX 충전 속도가 결과적으로 particle 형성에 영향을 주는, 즉 선냉각 후 낮은 충전속도가 particle 발생 방지에 더 효과가 있다는 것을 보여준다.

아직까지는 이러한 particle들이 유공압 시스템 내부에서 어떻게 이동하고 혼합되는지에 대해서는 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 이러한 LOX 공급 배관 내 particle의 이동은 배관 내 흐르는 LOX의 critical speed로 설명할 수 있다. 다시 말해 LOX 공급 배관 내 축적되어 내부 표면에 점착되어 있는 오염물질이 표면 점착력 이상의 속도로 LOX가 배관 내에 공급된다면 공급 내관내의 표면에서 떨어져 나와 LOX와 같이 혼합되어 배관내부를 이동하게 된다. 근래에 개발되는 추진기관의 경우 LOX 공급배관의 이송속도는 3~5 m/sec 정도이다. 앞서 말한 배관 내 침적되어 있는 오염물질이 LOX 유동의 속도에 의해 떨어져 나가는 critical speed는 대략 0.5~2.3 m/sec 정도이다[8]. 이러한 이유로 배관 내 침적되어 있는 오염물질은 particle 형태로 LOX와 섞여 산화제의 이동방향으로 같이 이동하게 된다.

그러나, 이러한 논리는 아직 완벽하지는 않고 만약에 mechanical particle이 LOX 공급 배관에서 이동하는 것에 대한 메커니즘을 설명할 수 있다면, LOX 탱크에서도 이러한 메커니즘을 밝히기 위한 연구를 수행하여야 한다. 왜냐하면 실제로 추진기관이 작동 시 LOX 탱크 내부에서의 LOX의 이송 속도는 0.004~0.1 m/sec로 앞서 말한 critical speed보다 현저히 작기 때문이다. 지금까지 수행된 연구의 시험결과를 보면 앞서 말한 LOX 탱크내부의 산화제 이송속도가 형성되면, LOX

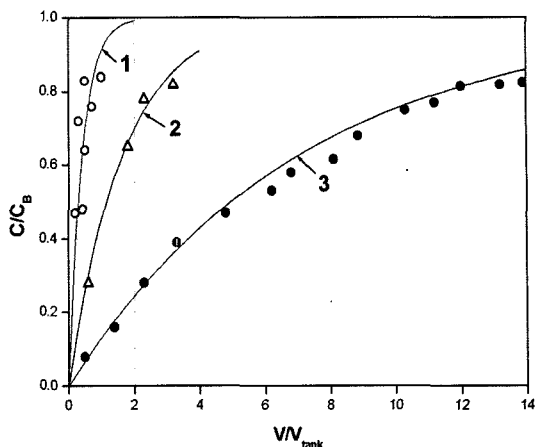


Fig. 3. Particle volume ratio to LOX volume ratio for cleaning [10]. 1. $K = 2.4$: active cleaning, 2. $K = 0.6$: passive cleaning, 3. $K = 0.14$: no cleaning.

탱크 내부에 있는 mechanical particle은 LOX와 같이 LOX 탱크에서 빠져 나온다. 그러나 이러한 현상이 발생하기 위해서는 여러 번에 걸친 LOX 탱크로의 극저온 LOX를 충전 및 배출시켜야 한다. Fig. 3에는 실제 추진기관이 작동 할 때의 작동 조건으로, 즉 추진기관이 작동할 때의 유량으로 시험한 데이터를 사용하였다. 이때 탱크 제작사에서 선세척 혹은 선세척 하지 않은 탱크를 가지고 시험을 진행 하였다. Fig. 3에서는 산화제 탱크 drain 배관의 필터를 지난 LOX의 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, LOX 시스템 운영에 대한 시스템 내부 오염물질의 축적을 막을 수 있는 운영 및 충전 방법에 대한 method가 필요하다.

2.2. 추진기관을 운용할 때 사고 확률을 줄이는 일반적인 법칙

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 알 수 있다. 상기와 같은 해결책에 대한 설명은 아래와 같다.

2.2.1. 설계 방법에 따른 해결책

(1) 이미 확실하게 검증된 method를 통해 추진기관의

시험 준비 및 점화, 운용 도중에 발생하여 영향을 미치는 particle에 대한 규정을 정한다. 즉, 용해되는 가스의 허용농도, particle의 형태, 그것들의 크기 및 무게 등에 대한 허용 기준을 연구를 통해 검증 받은 방법에 따라 사용하는 가압용 가스 및 시험조건등을 고려하여 결정한다.

(2) 방열 기능이 있고 열흡수 용량이 큰 소재를 분별 사용하고, 비금속 소재의 사용은 최소화 한다. 또 고온의 산화제가 지나는 배관의 경우에는 배관 내벽에 화재를 막기 위한 별도의 코팅을 한다.

(3) 추진기관 시스템의 운용조건을 변경할 때에는 급격한 조건변경으로 인한 유공압 시스템 일부분에 대량의 열응력을 받지 않도록 한다.

(4) LOX 탱크 충전라인 및 가압라인의 particle을 제거하기 위한 필터를 설치한다. 필터는 일반적인 금속망 형태의 것을 사용하며, 필터의 규격은 시스템내의 수력학적 손실을 고려하여 선정한다(5~70 μm).

(5) 추진기관 운용 시 추진기관 시스템 및 추진제 탱크에서의 추진제 누설을 막기 위한 진단시스템에 대해 연구한다. 추진기관 운용도중 제어해야 하는 파라미터가 허용 한계 값에 도달하면 다른 운용조건으로 전환시키거나 비상정지 로직에 의해 비상정지 시킨다.

(6) 허용 가능한 최대 LOX의 오염정도에서 LOX 공급계 시스템 및 구성품이 원만하게 작동하는지 시험을 통하여 확인한다. 이러한 시험은 인위적으로 LOX의 최대 오염정도까지 LOX를 오염시킨 후 실시한다.

2.2.2. 기술적인 운용 방법에 따른 해결책

(1) 추진기관의 제작 및 조립 시 사전에 유공압 부품들을 화재 및 폭발이 없는 안전한 용매 및 수용성 전해물질을 사용하여 탈지를 한다.

(2) 제작 공장에서의 추진기관 제작 및 조립 후에는 배관 및 시스템 세척을 실시하고, 필터를 설치하여 배관 내에 존재하는 일정크기, 일정무게 이상의 particle을 걸러 낸다. 세척용으로 사용하는 세척용매는 가능하면 실 극저온 추진제를 사용하는 것이 좋고, 실제 추진기관의 작동조건의 유량으로 탱크에서부터 세척을 하는 것이 바람직하다. 이러한 세척 작업 시 세척제로 사용되는 용매의 청정도가 규정된 규격서에 명기한 값에 다다르면 세척작업을 종료한다.

(3) 추진기관 시험 또는 발사 전에 공급계 배관 및 시스템을 LOX로 세척하며, 추진기관이 원만하게 작동할 수 있는 수준의 제한된 mechanical particle을 필터를 이용하여 걸러낸다. 상기와 같은 과정의 공정을 거치자면 어느 정도의 LOX가 소모되는지에 대한 의문이

생기는 데, 이때 소모되는 LOX의 양은 아래와 같은 경험식을 이용하면 된다:

$$\frac{C}{C_B} = 1 - \exp\left(-\frac{K \cdot \tau \cdot V_{liquid}}{V_B}\right) \quad (4)$$

여기서, C, C_B=필터를 통해 흘러간 부분과 걸러진 particle의 농도비(20 μm 기준)

V_B = 탱크 용량

τ · V_{liquid} = 탱크에서 배출된 LOX 용량

K = 0.14~2.4(세척정도를 나타내는 계수)

상기식의 계수 K 값의 최소값은 추진제 탱크를 제작장에서 선제적하지 않은 경우에 적용하는 것이 적당하고, 최대값은 추진제 탱크를 제작공장에서 능동적인 방법을 이용하여 선제적한 경우에 적용하는 것이 적정하다.

2.2.3. 시험방법에 따른 해결책

(1) 외부 육안 검사, 배관의 기밀 검사 및 밸브의 기밀검사. 또한 유공압 시스템에 LOX를 공급하기 전에는 시스템 내부 표면에 존재하는 수분을 제거 하여야 하며, 건조한 가스를 이용한 건조작업을 통해 수분을 제거한다(이슬점 -55°C 이하). 근접하기 힘든 형상의 배관 및 내부 유로에 있는 수분이라면 열진공 건조기를 이용하여 수분을 제거한다(해당부분의 압력이 15 mmHg 미만일 때, 해당부위를 최소 40°C까지 가열).

(2) 추진제 탱크와 가압용 가스 용기에 추진제와 가압용 가스를 충전할 경우 사전에 샘플링하여 검증된 방법을 통해 화학성분 분석을 실시한다. 이때 화학성분 분석의 결과는 추진기관이 원만한 작동을 할 수 있도록 규정된 규격서의 제시값과 반드시 일치하여야 한다.

(3) LOX 탱크에 추진제를 충전할 경우에는 반드시 소량의 LOX로 천천히 배관을 선냉각한 후에 충전을 시작한다. 이러한 방법은 선냉각을 하지 않고 극저온 추진제를 공급할 경우 극저온 온도에 의한 형상훼손이 따르게 되고, 결과적으로 그로인해 발생하는 particle을 줄일 수 있다.

(4) 시험 설비 및 발사설비 등지에서 근무하는 인원에 대한 행동 규정을 정하고, 그 인원으로 하여금 상황 판단 및 가능한 사고의 제거 능력을 키워주고 합당한 자격을 부여한다.

(5) 사고 상황시의 유공압 파트들을 제어하고 관측하기 위해 제어계측관련 채널은 2중화 또는 3중화로 설계한다.

(6) 사고발생 시 사고의 확산을 막기 위해 화재 시

예상되는 화염의 전파속도보다도 추진제의 탱크로부터 비상 배출시간을 짧게 설계한다. 이러한 비상배출은 사고가 확산될 때 사고에 따른 손실정도를 감소시키게 된다.

아직까지는 유공압 시스템 내부에서의 오염물질 이동 및 그것들이 축적되는 메커니즘에 대한 연구가 충분하지 않고, 또 이렇게 축적된 오염물질의 형상과 축적량에 대한 효과적인 제어 방법이 완벽하지는 않다. 잠재적인 사고와 발생 가능한 사고원이 존재할 때 사고로 확산되려면 어느 정도의 에너지원이 필요한 지에 대한 체계적인 자료들 역시 충분치 않다. 또한 본 논문에서 제시한 방법에 대해서 살펴보면 아직까지는 어떻게 사고상황에 영향을 미치는지 정확하게 규정하지 못하고 있으며, 실험식에 제시한 방법들의 효율성에 대한 비교평가가 데이터가 충분하지 못하므로 어떠한 방법이 추진제 누출사고 상황에 더 적합하다고 규정지을 수 없다.

III. 결 론

LOX의 오염 발생은 시스템의 운영도중 발생하기도 하고, 로켓 추진기관의 점화 및 점화를 하기 위한 일련의 작업 중에 발생하기도 하므로 LOX 내 이러한 오염물질의 발생을 완벽하게 막을 수는 없다.

본 연구를 통해서 LOX 시스템 내부 오염물질의 축적 및 그것들의 시스템 내부 이동에 대해서 연구를 진행하였다. 아울러 이러한 LOX 내 오염 물질의 축적으로 인한 화재사고 발생 후 추진제 누출사고로 이어질 수 있는 것에 대한 확률을 줄일 수 있는 방법을 연구하였으며, 이를 설계적인 측면과 운용 측면, 그리고 시험방법적 측면에서의 해결방안을 제시하였다. 연구결과로 얻은 method의 기본적인 원리는 기타 추진제 및 연료를 사용하는 추진기관에 적용할 수 있다. 제시된 method를 통하여 보다 상세한 적용 방법을 구하기 위

해서는 유공압 시스템 내부의 오염물질 축적 및 시스템 내 이동에 대한 심도 있는 연구가 뒤따라야 하며, 추진기관의 운용 시 사고 상황 발생을 예방하는 효율적인 방법에 대한 연구가 뒤따라야 한다.

참고문헌

- [1] Sidorenko, A.P., “재사용 가능한 aerospace 시스템 energy plant 및 엔진의 안전한 stand 시험을 위한 현대적인 concept”, 러시아 엔지니어 아카데미, 국제 컨퍼런스 1993, No. 4
- [2] Adushkina, V.V. and C.I. Kazlova, “Ecological problems and Risk of Rocketspace Technology on the Natural Environment”, Ankil, Moscow, (2000)
- [3] Ivanov, B.A. and A.S. Rozovski, “LOX 작업환경에서의 작업 안전”, Himiya, (1989)
- [4] N.V. Filin and A.B. Bulanov, “액체 극저온 시스템”, Mashinostroenie, (1985)
- [5] Korovin, G.K., I.G. Logino-Loginskaya, and G.K. Ruthkin, “LRE LOX 공급 라인에서의 연소시 내구성 연구”, Journal “aerospace system 추진기관”, 러시아 엔지니어 아카데미, 국제 컨퍼런스 1993, No. 4
- [6] M.P. Malkova 편저, “극저온의 물리-기술적 원리(법칙)”, Energiya, (1973)
- [7] Bershadskiy, V.A. “비행체 엔진 작동 시 극저온 연료의 가스성분 모델링”, journal “aerospace system 추진기관”, 러시아 엔지니어 아카데미, 국제 컨퍼런스 (1993)
- [8] Timirkeev, R.P. and Sapoznikov V.M., “산업 청정도 및 비행체의 component 필터링”, Mashinostroenie, (1986)
- [9] Bershadskiy, V.A., “추진기관의 점화전 componet 탱크의 선제적에 필요한 극저온 componet의 소모량에 대한 연구”, 학회지 “rocket engine & energy plant”, HIXXIMASH (1999)