

산소 시스템의 설계와 운용

임하영* · 조인현**

Design and operation of the oxygen system

Hayoung Lim* · Inhyun Cho**

ABSTRACT

Physical characteristics of liquid and gaseous oxygen and the detailed ignition characteristics of oxygen system were introduced. Compatible and non-compatible materials for oxygen were discussed. To ensure the safety operation of the oxygen system, one of the most important point, cleaning, was reviewed. To design the gaseous and liquid oxygen system, key points were introduced. To safe operation, the operating procedure and considerations were introduced.

초 록

액체 및 기체 상태의 산소의 물리적 특성을 소개하였으며, 산소 시스템을 설계할 때 고려해야할 점화 특성에 대하여 자세히 설명하였다. 또한 산소와 호환 및 호환되지 않는 비금속과 금속 재료에 대하여 소개하였다. 산소 시스템의 안전을 확보하기 위해 가장 중요한 것 중의 하나인 세척에 대하여 살펴 보았으며, 액체 및 기체 산소 시스템의 설계시 고려해야할 주요 사항들을 소개하였다. 시스템을 구축한 후 안전한 운용을 위해 갖춰야할 절차서와 고려해야할 사항에 대하여 살펴보았다.

Key Words: Oxygen(산소), Liquid Oxygen(액체산소), Ignition(점화), Cleaning(세척)

1. 서 론

액체로켓의 산화제로 가장 널리 사용되는 산소는 로켓 분야 뿐만 아니라 의료 분야를 비롯한 산업 전반에 널리 사용이 되고 있다. 다양한 분야에서 사용이 되다 보니 산소의 취급이 별로 어렵지 않다고 생각을 할 수 있으나, 실제로는 취급에 상당히 많은 주의를 기울여야 한다. 압축

가스 충전소 함께 취급하는 불활성 가스인 질소와 비교하여 위험도가 높기 때문에 설계와 운용에서 특별히 주의를 기울여야 한다. 일반적으로 낮은 압력과 온도에서 산소 시스템을 이용할 때에는 그 위험성이 그리 높지 않지만 높은 온도와 압력에서는 위험성이 증가하므로 이러한 조건에서 산소의 특성과 위험도를 잘 파악하고 있어야 한다. 액체로켓 개발과 관련된 산소 시스템은 기체의 경우엔 높은 압력과 온도, 액체의 경우엔 낮은 온도와 높은 압력에서 사용되는데 대부분이다. 본 논문에서는 이러한 조건에서 사용되는 산소 시스템의 설계와 운용을 위해 요

* 한국항공우주연구원 추진제어팀

** 한국항공우주연구원 추진제어팀

연락처, E-mail: hylim@kari.re.kr

구되는 여러 가지 기술적 사항들을 소개한다.

2. 산소의 특성

산소는 우주에서 수소와 헬륨 다음인 세 번째로 많으며, 무게로는 지구 지각에서 가장 풍부한 원소이다[1]. 산소는 강력한 산화제로서 연료와 혼합되고 점화원이 있으면 격렬한 반응을 일으키며 연소를 한다.

기체산소는 0℃, 100kPa의 조건에서 공기의 밀도인 1.2g/l보다 무거운 1.4g/l의 밀도를 갖고, 액체산소는 끓는점이 90.2K, 밀도는 1.141kg/l로 물보다 무겁다. 액체산소의 증발 잠열은 213kJ/kg으로서 물의 2,260kJ/kg의 약 1/10 정도이다. 액체산소는 열은 하늘색을 띄며 기체산소는 무색무취이다.

3. 산소 시스템의 설계시 고려사항

산소 시스템을 설계와 운용에 대한 많은 자료가 있으나 그 중에서 미국 NASA의 NSS 1740.15가 자료가 시스템 설계와 운용에 대하여 상세히 규정이 되어있다[2]. 액체산소는 대기압에서 90.2K의 끓는점을 갖기 때문에 신체와 접촉하면 동상에 걸린다. 극저온 상태의 액체산소를 단열이 되지 않은 밀폐된 용기에 넣어 두면 기화되며 압력이 상승하여 용기의 파손을 일으킨다. 산소와 연관된 사고의 주요 원인은 오염된 물질과의 액체 또는 기체상태의 접촉, 부적합한 재료의 사용 등이다. 산소 환경에서 오일이나 유기물의 필름(막)은 점화를 일으킬 수 있다. 앞서 설명한 특성을 비롯하여 시스템 설계시 이해하고 있어야 할 구체적인 사항들은 다음과 같다.

3.1. 산소의 점화 조건

산소 또는 산소가 농후한 환경에서 산소와 연료의 혼합물은 대기 조건에서의 연료의 점화 에너지와 온도 보다 적은 에너지, 낮은 온도에서 점화가 일어난다. 산소 시스템에서 점화를 일으키는 주요 원인을 살펴보면 다음과 같다.

- 입자의 충돌(particle impact): 작은 입자(파티

클)가 높은 속도를 가지고 밸브 또는 배관에 부딪히면서 운동에너지가 열에너지로 변환되면서 열이 발생하고 이 열이 점화를 일으킬 수 있다. 예를 들어 1,600μm의 알루미늄 입자가 244m/sec 이상의 속도로 부딪히면 점화가 일어난다.

- 기계적 충돌(mechanical impact): 상대적으로 큰 질량이나 모멘텀을 가지고 있는 물체가 부품에 충돌하면서 운동에너지가 열에너지로 변환되면서 발생하는 열에 의해 점화가 일어난다. 예를 들어 솔레노이드로 작동하는 밸브의 포핏(poppet)이 밸브 seat에 충돌하면서 점화가 일어날 수 있다.
- 공압 충돌(pneumatic impact) 또는 압축 가열(compression heating): 가스 산소가 압축되면서 발생하는 열에 의해 점화가 일어날 수 있다. 예를 들어 고압 가스 산소 시스템에서 한 쪽 끝이 막힌 쪽으로 밸브를 갑자기 열면 막힌 쪽에서 순간적으로 압축이 되면서 점화가 일어난다.
- 마찰(galling and friction): 서로 다른 두 부품이 마찰하면서 발생하는 열에 의해 점화가 일어난다. 예를 들어 원심 압축기의 로터가 케이스와 마찰될 때 점화가 일어난다.
- 공진(resonance): 공진 공동(cavity)에서 음향 진동이 발생하면서 급격한 온도 상승이 일어나면서 점화가 발생한다. 예를 배관의 Tee에 산소 가스가 흘러가면서 공진이 발생할 수 있다.
- 전기 아크(electrical arcing): 모터의 브러쉬, 전원 스위치 등에서 발생하는 전기 아크는 매우 효과적인 점화원이다.

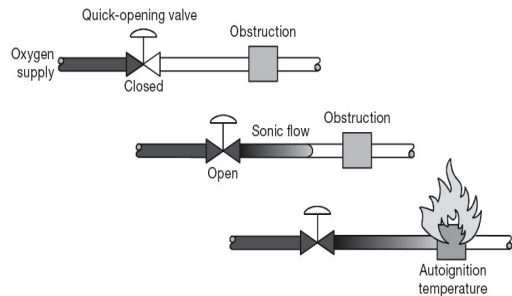


Fig. 1 Ignition by compression heating[3]

3.2 재료

산소 시스템의 설계에서 적절한 재료를 선택함으로써 시스템의 파손을 사전에 방지할 수 있다. 시스템의 압력이 1~20.7MPa에 대하여 다양한 재료에 대한 실험 데이터가 있으나, 20.7MPa 이상의 압력에 대해서는 제한된 범위의 시험 데이터가 있다. 따라서 새로운 재료를 산소시스템에 적용할 때에는 이에 대한 적합성 여부를 반드시 시험을 통해 확인한 후 적용해야 한다.

산소 시스템과 적합한 비금속 재료로는 Viton®과 Fluorel®과 같은 플루오르 탄성중합체 (fluorinated elastomer), PTFE 테플론, FEP 테플론, PCTFE, Kel-F 등과 같은 폴리머가 널리 사용된다. 산소 시스템에 사용되는 윤활제 또는 그리스로는 불소계열이나 CTFE 계열의 윤활제가 적합하다 [].

니켈과 니켈 합금은 점화 및 연소에 큰 저항을 갖고 있으며, 니켈 합금은 강도가 우수하기 때문에 산소 시스템에 적합하다. 스테인레스 스틸은 티타늄이나 알루미늄에 비해 점화 및 연소 저항이 크기 때문에 고압의 산소 시스템에 많이 사용된다. 그러나 드문 경우이지만 고압/고유량의 산소 환경에서 작동하는 스테인레스 밸브와 같은 부품에서 점화가 일어나기도 한다. 아울러 알루미늄 보다는 덜하지만 스테인레스 입자도 점화를 일으키기도 한다.

구리 및 구리 합금은 점화 및 연소에 큰 저항을 갖고 있기 때문에 모든 압력 조건에서 산소 시스템에 적합하다. 러시아 Keldysh Research Center에서는 밸브 및 피팅에 사용되는 가스켓은 알루미늄은 절대 사용하지 않고 대신 구리 재질을 사용한다.

알루미늄과 알루미늄 합금은 티타늄 합금처럼 쉽게 점화되지 않아 가벼운 중량이 요구되는 항공용으로 사용되며 주로 저장 탱크에 사용된다. 고압 산소 환경에서 알루미늄을 이용한 배관이나 밸브 등의 부품은 쉽게 점화되고 빠르게 연소가 일어나기 때문에 사용을 금해야 한다. 알루미늄 파티클은 쉽게 점화를 일으키기 때문에 알루미늄 저장탱크를 사용할 경우 알루미늄 파티클이 배관으로 유입되지 않도록 해야 한다.

철 합금은 쉽게 점화되기 때문에 산소 시스템에는 적합하지 않지만 무게에 대한 요구조건이 없는 실린더 등에 사용이 된다.

티타늄과 티타늄 합금은 산화 환경에서 기계적 충돌에 매우 민감하기 때문에 사용을 금해야 한다.

3.3 세척

오염은 시스템의 오작동과 점화를 초래할 수 있기 때문에 이를 제거하는 세척이 매우 중요하다. 산소 시스템에 사용하는 모든 부품들(산소와 접촉하는)은 적절한 세척을 거친 “산소용” 제품을 사용해야 한다. 처음 시스템을 구축하면, 시스템을 모두 분해하여 세척을 한 후 조립, 기밀 시험 및 깨끗한(오일과 수분이 없는) 질소 가스로 퍼지를 해서 배관 내에 잔류한 세척 용제를 제거한다. 산소 시스템에서 세척은 파티클 등을 제거하는 것뿐만 아니라 탄화수소계열의 유기물과 오일을 제거하는 것이다. 파티클 등은 시스템을 처음 구축할 때 주의를 기울이면 대부분 제거할 수 있으나, 오일은 시스템의 운용 중에 액체산소와 기체산소에 미량 포함된 것들이 파이프 내벽 등에 균일하지 않게 축적이 되기 때문에 이것을 제거하기 위한 탈지(degreasing) 작업을 1년 또는 1.5년 마다 주기적으로 수행해야 한다. 탈지를 위한 용제는 주로 CFC 계열을 사용하였으나 오존층을 파괴하기 때문에 사용이 금지되었고 이를 대체하기 용제가 개발되고 있다. IPA(Isopropyl Alcohol)를 이용하여 탈지를 수행할 수 있으나 IPA를 완전하게 제거하지 않으면 잔류 IPA와 산소가 연소를 일으킬 수 있다. 온도와 압력이 증가함에 따라 표면의 오일 양이 적어도 점화가 일어날 수 있다. 탈지의 정도는 탈지를 수행한 용제에 함유된 오일을 분석하여 확인하며, 시스템 압력이 32MPa에서는 5mg/ℓ, 20MPa의 시스템에서는 10mg/ℓ 이하를 요구한다. 산소시스템의 세척과 분석에 대한 자세한 사항은 참고문헌 [4],[5][6],[7],[8]에 상세히 기술되어 있다.

4. 설계 지침

산소 시스템을 설계할 때 주의해야 할 사항들 중 앞서 설명한 재료의 선정 및 세척에 대한 것을 외에 중요한 것들을 살펴보면 다음과 같다.

- 배관 및 밸브에서 초크가 발생하지 않게 하여 파티클의 충돌을 피한다.

- 높은 농도의 가스 산소 환경에 사용하는 전기 제품은 밀봉 처리를 하거나 불활성 가스를 채운다.
- 시스템에서 기체 산소의 속도를 제한하며, 특히 30m/sec가 넘을 경우에 특별한 주의를 기울인다.
- 세척과 검사가 곤란한 형태로 설계하지 않는다.
- 세척을 수행한 후 용제를 배출시킬 수 있도록 드레인 포트를 설치한다.
- 수평으로 설치하는 배관은 세척액 배출이 용이하도록 경사지게 설치한다.
- 액체산소의 기화에 의한 압력 상승을 방지할 수 있는 밸브와 안전밸브를 반드시 고려한다.
- 고압 배관을 매설할 경우 누설, 부식 등을 확인하기 곤란하므로 매설하지 않는다.
- 산소 배관과 전기 케이블은 거리를 두어 설치한다.
- 수평으로 설치되는 액체산소 배관은 액체산소가 균일하게 흐르지 않을 경우 온도차에 의해 굽어질 수 있으므로 이를 고려하여 지지대를 설치한다.
- 액체산소 배관은 액체산소가 흐르면 수축을 하기 때문에 수축을 흡수할 수 있도록 벨로우즈 등을 설치한다.
- 용접부는 틈새가 없도록 맞대기용접을 하여 오염물이 축적되지 않도록 한다.
- 다량의 액체산소를 옥외로 배출할 때에는 별도의 벤트 스택을 만들어 배출시켜야 한다.
- 산소의 누설을 탐지할 수 있는 탐지기를 설치하여 산소 농도를 모니터링하고 허용치 초과 시 경보가 울리도록 해야 한다.
- 액체산소 저장탱크의 경우 탱크 파손에 의한 액체산소 누출을 막기 위해 탱크 용량의 110% 이상이 되는 차단벽이 있어야 한다.
- 액체산소를 취급하는 곳 주변에는 아스팔트, 유기물, 맨홀, 그리고 케이블 덕트 등이 없어야 한다.

5. 시스템 운용

산소 시스템의 안전한 운용을 위해서는 점검표 (check list)가 있는 운용 절차서를 작성하고 이를 준수한다. 운용 절차서에는 인원의 보호, 산소 누설의 방지와 탐지, 점화원의 제거 등을 포함한다. 시스템의 안전 운용을 위해서 가장 중요한 것은 운용 인원의 안전이며 이를 위해서는 이들 인원에 대해

산소와 산소 시스템의 특성에 대하여 주기적인 교육을 실시해야 하며, 운용 인원은 위험 상황에서 어떻게 대처해야 하는지 숙지하고 있어야 한다.

시스템 운용자는 화학섬유 또는 모직으로 만든 옷을 입고 작업을 해서는 안 되며 면으로 만든 옷을 입고 작업을 해야 한다.

주기적으로 시스템에 대한 탈지를 수행하여 오일에 의한 점화 가능성을 제거해야 한다.

6. 결 론

기체 산소와 액체산소를 사용하는 시스템에서 발생할 수 있는 중요한 위험 인자들을 소개하였다. 시스템 설계에서 고려해야할 점화 원인, 재료의 적합성, 그리고 세척에 대하여 간략히 살펴 보았다. 마지막으로 시스템의 안전한 운용을 위해 필요한 것 중 운용 절차서와 인원의 교육에 대하여 간단히 살펴보았다.

참 고 문 헌

1. www.wikipedia.org
2. NSS 1740.15, "Safety Standard for Oxygen and Oxygen Systems", NASA, 1996
3. www.swagelok.com, "Oxygen System Safety
4. KSC-C-123J, Space Cleanliness of Ground Support Equipment Fluid Systems, Specification for", NASA, 2009
5. MIL-M-9950A, "Missile Components, Liquid Oxygen, Liquid Nitrogen, Gaseous Oxygen, Gaseous Nitrogen, Instrument Air, Helium and Fuel Handling Systems; Cleaning and Packaging for Delivery"
6. PRC-5001, Rev E, "Process Specification for Cleaning of Hardware", NASA, 2008
7. JPG 5322.1, "Contamination Control Requirements Manual", NASA, 2000
8. MIL-STD-1330D(SH), "Standard Practice for Precision Cleaning and Testing of Shipboard Oxygen, Helium, Helium-Oxygen, Nitrogen, and Hydrogen Systems"