

고압산소설비의 안전성향상을 위한 연구

윤재건 · 고신영

한성대학교 안전과학기술연구소

1. 서론

2002년 8월 창원의 한공장 신축공사장의 건물 내부에서 공사중 LPG용기(20kg) 및 산소용기(41ℓ) 각 1개가 파열되면서 가스가 누출, 폭발하여 작업자 1명이 사망하고 6명이 부상당한 사고가 있었다(Fig. 1, Fig. 2) 공사현장에 위생설비 도면, 절단용 토치 및 철판에 사이펜으로 절단부 표시 등으로 보아 공장동 2층 철판 바닥에 산소+LPG토치로 절단 작업을 하기 위한 것으로 추정되며, 파열된 41ℓ 용기와 5.1ℓ 용기에 산소를 이·충전하기 위한 연결구가 각각 접속되어 있고, 밸브개폐 및 이·충전시 사용된 것으로 추정되는 멍키스패너 2개가 발견된 것으로 보아 사무동 1층 작업장에 있던 41ℓ 용기에서 소형용기(5.1ℓ)로 산소를 이·충전 과정중 산소용기의 파열과 동시에 LPG용기에 충격으로 LPG용기도 파열, 가스가 누출되어 폭발한 사고로서, 산소용기 파열원인은 충전작업중 용기의 전도·전락에 의한 충격 파열, 용기의 누적된 피로에 의한 파열, 또는 작업자의 실수로 유지류가 산소에 접촉되어 심한 산화반응에 의한 파열, 이충전후 용기밸브 조작중 마찰불꽃에 인한 급격한 연소에 의한 파열로 추정되나, 사고제품에 대한 정확한 감정이 요구된다.^[1] 이와 유사한 산소용기파열사고는 1992년부터 총 21건이 보고되어있다.^{[2],[3]} 국내에 보고된 산소와 유지류와의 폭발사고를 살펴보면 LPG-산소 용접기에서 가스가 역류하여 LPG용기나 산소용기가 폭발한 사고가 제일 많고, 산소를 충전 중에 용기내부의 유지류와 반응하여 폭발한 경우, 또는 산소를 사용하기 위해 밸브를 여는 순간 배관, 압력조절기 및 유량계 등에 남아 있던 유지류와 폭발한 사고가 대부분이다.^[5]



Fig 1. 파열된 산소용기

즉 고압의 산소를 충전·이충전 및 사용할 때 가스온도가 상승하여 유분 및 금속성분이 있을 경우 쉽게 착화하며, 용기, 밸브, 배관 등 재료를 쉽게 용융, 파열, 화재사고를 일으킨 것이다.

일반적으로 150기압 충전시 온도가 140 °C까지 상승할 수 있다고 알려져 있으나, 충전과정을 단열압축으로 볼 경우 다음의 식에 의해서 최고온도를 계산 할 수 있다.

$$\frac{T_f}{T_i} = \left(\frac{P_f}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

T_f = final temperature(abs), T_i = initial temperature(abs)

P_f = final pressure(abs), P_i = initial pressure(abs)

n = ratio of specific heats(1.40 for oxygen)

위의 식으로 상온(27°C)의 용기에 순간적으로 150기압까지 가압 할 경우 온도는 982°C까지 상승 할 수 있다. 이 것은 다른 점화원 없이도 잔존유지와 산소가 점화될 수 있음을 의미한다.

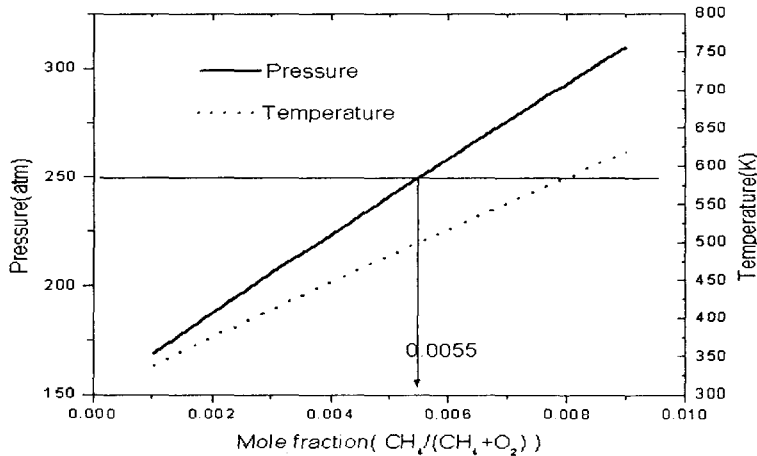


Fig.3 기압 산소용기+메탄 물분율에 따른 압력, 온도변화(등적, 등내부에너지 과정을 가정)

Fig.3은 41 l 산소용기에 고압산소가 150기압으로 충전되어 있을 경우 가연성 메탄이 혼입되어 연소 될 경우 용기내부의 압력과 온도를 chemkin code^[6]로 계산한 것이다. 용기가 250기압에서 파열된다고 가정하면 메탄의 mole fraction이 0.0055이면 이 압력에 도달하여 용기가 폭발할수 있다.

mole fraction 0.0055는 $41 \text{ l} \times 150 \times 0.0055 = 33.8 \text{ l} = 0.034 \text{ Nm}^3$ 이고,

이는 1.51mole이고 중량으로는 24g이다. 즉 메탄 1.51mole이 산소용기에 혼입되면 용기를 파열시킬수 있다. 앞에서 살펴본것과 같이 고압의 산소를 사용하는 곳에 소량의 가연성 성분이 유입될 경우 연소폭발이 발생하여 큰 사고를 야기할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 산소설비에 대한 국내외의 기술기준을 살펴보고, 설비의 안전성을 향상시

킬 수 있는 방안을 찾아보고자 한다.

2. 산소설비 관련 기술기준

2-1. 국내의 기술기준

고압가스안전관리법^[7]의 고압가스일반제조 기술기준의 방향을 보면 다음과 같다.

바. 공기액화분리기의 불순물 유입금지
공기액화분리기(1시간의 공기압축량이 1천m³이하의 것을 제외한다)에 설치된 액화산소통내의 액화산소 5ℓ 중 아세틸렌의 질량이 5mg 또는 탄화수소의 탄소의 질량이 500mg을 넘을 때에는 그 공기액화분리기의 운전을 중지하고 액화산소를 방출할 것

이 항목에서 중요한 점은 액화산소 5ℓ 중에서 아세틸렌의 질량이 5 mg 또는 탄화수소의 탄소의 질량이 500 mg 일 때 운전을 중지하고 기존의 액화산소를 대기 중에 방출 하라는 것이다. 이 조항에 의해서 모든 공기액화분리공정은 매일 아세틸렌과 메탄의 농도를 측정하고 있다. 측정은 가스크로마토그래프를 이용하여 행하여지는데 측정결과는 부피 % 농도로 표시되므로 위의 질량 단위를 부피단위로 변환시켜야 한다.

1기압에서의 액화산소의 액비중은 1.118 kg/ℓ (-183℃)이므로

$$5 \text{ ℓ} \times 1.118 = 5.59$$

$$O_2 = \frac{5590}{32} = 174.69 \text{ mol} \quad C = \frac{0.5}{12} = 0.042 \text{ mol}$$

$$C_2H_2 = \frac{0.005}{26} = 1.92 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

$$[C_2H_2] = 1.10 \text{ ppm} \quad [C] = 238.52 \text{ ppm}$$

따라서 기화된 산소중의 아세틸렌의 농도가 1.10 ppm 또는 메탄으로 환산된 탄화수소의 농도가 238.52 ppm이 되면 공정을 중지해야 한다. 아세틸렌은 그 자체가 폭발성을 갖는 매우 위험한 가스이므로 액화산소 중에 절대 포함되어서는 안 되는 가스이나 메탄은 공기 중에 약간은 포함되어 있어 보통 10 ppm 이하로 검출된다. 이 값은 거의 변화가 없어 이 값으로 공기액화분리장치의 가동을 멈춘 적은 국내에는 없다고 한다. 공기액화분리장치를 처음 설치 시에는 탈지(degreesing)세척하나 시운전 이후에 주기적으로 장치를 세척하는 기준은 없다. 인도네시아에서 대규모의 산불로 대기 중에 메탄을 비롯한 가연성 성분이 많아져서 이 성분이 공기액화분리장치에 유입되어 장치가 폭발하였다는 사고사례가 있고 국내에서도 위의 기술기준이 제정되어 아세틸렌과 메탄의 농도를 모니터링하기 이전에는 공기액화분리장치의 폭발이 있었다고 하나 한국가스안전공사에 보고된 적은 없다.

고압가스안전관리법의 고압가스일반제조 기술기준 사항을 보면 다음과 같다.

사. 윤활제

(1)석유류·유지류 또는 글리세린은 산소압축기의 내부윤활제로 사용하지 아니할 것
(2)공기압축기의 내부윤활유는 재생유가 아닌 것으로서 잔류탄소의 질량이 전질량의 1%이하이며 인화점이 200℃이상으로서 170℃에서 8시간이상 교반하여 분해되지 아니하거나, 잔류탄소의 질량이 1%초과 1.5%이하이며 인화점이 230℃이상으로서 170℃에서 12시간이상 교반하여 분해되지 아니하는 것을 사용할 것

가연성 성분은 윤활제로 사용되지 않으므로 설혹 공기를 액화하는 중에 압축기로부터 혼입되어도 사고를 야기하지는 않는다. 특히 산소제조공정에서 잘못된 윤활유를 선택한다는 것은 제조공장 자체를 위험에 빠뜨리는 것이므로 그럴 가능성은 희박하다고 본다.

국내의 기술자료^[8] 중에 공기액화분리장치의 폭발원인과 대책에 관하여 서술된 것이 있는데, 공기액화분리장치는 공기를 압축·냉각시켜, 공기를 구성하고 있는 산소, 질소, 아르곤 등이 비점이 다른 점을 이용하여 분리하는 장치로서 압축, 여과, 냉각하는 과정에서 탄화수소 등 이물질이 혼입되면 산소와 반응하여 폭발을 일으킬 수 있다.

● 공기액화분리장치의 폭발원인

- ① 공기 취입구로부터 아세틸렌의 침입
- ② 압축기용 윤활유의 분해에 따른 탄화수소의 생성
- ③ 공기중의 산화질소(NO), 과산화질소(NO₂)등 질소산화물(NO_x)의 혼입

● 이와 같은 폭발원인에 대한 대책

- ① 공기액화분리기의 액화공기탱크와 액화산소증발기와의 사이에는 석유류·유지류 그 밖의 탄화수소를 여과·분리하기 위한 여과기를 설치한다.
- ② 공기흡입구의 위치를 아세틸렌 등이 흡입되지 않는 곳으로 한다.
- ③ 흡입구 부근에서 아세틸렌을 이용한 용접작업 등을 금지한다.
- ④ 압축기의 윤활유는 양질의 것을 사용하고, 냉각을 충분히 시키며, 유수분리를 반드시 행한다.
- ⑤ 장치는 1년에 1회정도 내부를 세척하는 것이 좋고, 세척액은 사염화탄소(CCl₄)등이 사용된다.

여기서 특기할 만 한 것은 장치를 1년에 1회 정도 내부를 세척하라는 것이다. 따라서 무조건 년 1회 세척하는 방안도 고려할 만한 안전 확보방안이나 운전중인 장비를 세척을 위해 가동을 중단한다는 것은 세척비용 이외에도 많은 비용발생을 초래하므로 세척여부결정을 위한 기준의 확립이 시급하다.

2-2. 미국의 기술기준

미국의 기술기준은 어디에도 산소공급설비의 세척여부 및 세척주기에 대한 규정이 없다. 다만 산소설비의 탈지세척과 오염도 검사방법이 나와 있다.^{[9],[10]} 현재 어느 정도

의 오염도가 점화폭발의 위험을 야기하는지가 밝혀져 있지 않다. 따라서 경험적으로 설비의 오염도를 관리하고 있는데, 예를 들면 한 부품이 설비로부터 분해되면 이 부품을 검사하여 전체 설비의 오염도를 예측하고 세척주기나 강도를 결정한다. 또한 필터 등을 분해하여 포집된 잔유물들을 분석하여 적절한 대응방안을 강구하는 것이 보통이다. 액체산소가 액체추진로켓의 연료로 많이 사용되고 있으므로 NASA에서 제시한 검사방법과 기준을 살펴보면 다음과 같다.

비교적 깨끗한 세정제로 부품이나 설비를 행군 다음 세정제의 오염도를 검사하여 설비나 부품의 오염도를 결정한다.

- 1)표면적 0.1 m³당 100 ml의 세정제를 사용하여 행군 다음 세정제를 포집한다.
- 2)이 세정제를 0.45-μm 필터로 걸른 다음 필터에 걸린 입자들의 크기와 개수를 측정한다.
- 3)필터를 거친 세정제를 미리 무게를 측정한 증발접시를 이용하여 증발시킨다.
- 4)증발접시의 무게를 측정하여 세정제에 남아 있던 비휘발성 잔유물의 무게를 알 수 있다.
- 5)이 데이터로 Table. 1의 기준과 비교한다.

Table. 1 Typical Maximum Allowable Particles for Different Cleaning Levels

Cleaning Level	Particle Size Range (μm)	Number of Particles ^a
300	<100	Unlimited
	100 - 250	93
	>250 - 300	3
	>300	0
100	<25	Unlimited
	25 - 50	68
	>50 - 100	11
	>100	0
50	<10	Unlimited
	15 - 25	17
	>25 - 50	8
	>50	0
NVR(Nonvolatile Residue) Level		
Level	Maximum Quantity NVR ^a	
A	1 mg	

^a Per 0.1 square meters

일반적인 산소설비에서 비휘발성 잔유물은 1mg/0.1 m² (1 mg/ft²)의 값이 최대 허용치이다. 고체입자에 대한 기준은 50, 100, 300이 적용부위에 따라 달라진다.

깨끗함(cleanliness)에 대한 NASA의 기준은 다음과 같다. 깨끗함의 정도를 3가지로 분류한다.

(1) GC (General Cleanliness) Level

기계가공 및 제작시의 잔유물, 더러움, 기름, 그리즈, 공정찌꺼기 및 다른 외부의 오염물질이 없는 것을 뜻한다. 세척, 닦아냄, 불어냄, 빨아들임, 손질 및 행군등으로 이러한

깨끗함을 얻어낸다.

(2) VC (Visual Cleanliness) Level

보통의 시력으로 입자나 필름 등이 전혀 보이지 않아야 한다. 검사시에 접근을 용이하게 하기 위해 Borescopes, 거울 등의 도구를 사용할 수 있고 돋보기와 같은 확대경은 오염물을 확인하기 위해서만 사용해야 한다.

(3) VC + UV (Visual cleanliness + Ultra Violet light)

VC수준의 깨끗함을 확보한 뒤에 3,200~3,800 angstroms의 파장을 갖는 자외선 빛으로 표면을 쬐어 유지류등을 검사하여 합격한 수준을 뜻한다.

산소공급설비 및 고압산소용기는 VC+UV 수준의 깨끗함을 확보하여야한다. 따라서 세척제를 이용한 탈지공정 후에 자외선 램프에 의한 검사가 필수적이다.

3. 결 론

고압산소공급시스템의 위험성은 국내의 사고사례와 미국의 기술기준을 통하여 알 수 있다. 아주 작은 양의 가연성 성분도 용기의 폭발이나 배관의 파열을 야기할 수 있다. 그러나 어느 정도의 오염도가 점화폭발의 위험을 야기하는지가 밝혀져 있지 않다. 산소공급시스템의 안전성 향상을 위해서는 공기액화분리장치에서 행해지고 있는 아세틸렌과 메탄의 농도를 측정하여 산소의 순도를 모니터링하는 방법이 현재로서는 안전을 확보하는 유일한 방법으로 생각된다. 또한 용기에 산소를 충전시에는 용기의 깨끗함을 확인하기 위하여 자외선을 용기 주입구에 비추어 눈으로 확인이 어려운 오염까지도 검사하는 것이 필요하다.

참고문헌

- 1) 창원시 정민전자 신축공사장 가스사고 조사보고서, 한국가스안전공사, 2002.
- 2) 가스사고년감, 한국가스안전공사, 1998, 1999, 2000, 2001.
- 3) 가스사고편람, 한국가스안전공사, 1997.
- 4) 2001년도 가스사고 모의실험 보고서, 한국가스안전공사, 2001.
- 5) 윤재건, "고압산소공급시스템의 위험성에 대한 고찰", 2002춘계학술발표회논문집, 한국산업안전학회, pp. 221~226, 2002.
- 6) <http://www.chemkin.com/index.html>
- 7) 고압가스안전관리법, 구민사, 1996.
- 8) 가스기술사, 구민사, pp. 231, 2001
- 9) Safety Standard for Oxygen Systems, NSS 1740.15, NASA, 1996.
- 10) Contamination Control Requirements Manual, JPG 5322.1, NASA, 2000.