

# 고압산소공급시스템의 위험성에 대한 고찰

윤재건

한성대학교 안전과학기술연구소

## 1. 개 요

산소는 공기중의 21%정도가 항상 존재하고 생명체에는 매우 필수적이고 친숙한 가스이다. 그러나 고 순도의 산소는 소량의 가연성 성분이 존재하거나 가연성 재료를 잘못 사용할 경우 폭발위험성이 큰 매우 위험한 물질이다. 따라서 고압산소의 공급시스템은 주기적인 검사와 탈지 세척공정을 통하여 이러한 위험을 줄이기 위한 노력을 하고 있다. 본 논문에서는 산소용기 및 산소설비에서 발생하는 폭발사고의 위험성을 사고사례를 통하여 분석하고, 사고를 야기하는 유지류와 같은 오염물질의 처리기준을 살펴보고, 안전성 향상을 위한 방법론을 고찰하고자 한다.

## 2. 산소관련 국내의 사고사례

1999년 8월 충주의 고압가스 충전소에서 산소를 충전 중이던 압력용기가 폭발하여 2명의 사상자가 발생하는 사고가 있었다. 이 사고는 용기내부에 유지성분의 이물질이 잔존하고 있다가 충전된 산소와의 연소반응에 의한 폭발로 추정하고 있다. 41ℓ의 이음매 없는 용기의 충전압력이 보통 150기압임을 감안하면 잔존하는 유지류의 위험성이 매우 크다는 것을 증명한 것이다.

일반적으로 150기압 충전시 온도가 140℃까지 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),  $T_i$  = intial 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℃)의 용기에 순간적으로 150기압까지 가압 할 경우 온도는 982℃까지 상승 할 수 있다. 이 것은 다른 점화원 없이도 잔존유지와 산소가 점화될 수 있음을 의미한다.

1992년부터 현재까지 국내에서 산소와 유지류와의 폭발사고가 총 21건이 보고되어 있다.(표 1 참조) LPG-산소 용접기에서 가스가 역류하여 LPG용기나 산소용기가 폭발한 사고가 제일 많고, 산소를 충전 중에 용기내부의 유지류와 반응하여 폭발한 경우,

Table 1. 국내의 산소와 유지류 사고 사례(1992. 1. 1 - 2001. 12. 20 현재) <sup>1,2,3</sup>

번호	사고일시	장 소	피 해	사 고 개 요
1	92. 2. 22(토) 09:10	부산시 북구 충전소	사망 1명	충전중인 용기내에 유지성분이 들어 있던 것으로 추정되며, 충전원이 이 사실을 모르고 산소충전중 용기내 유지가 산소와 반응을 일으켜 폭발한 사고임.
2	92. 3. 19(목) 18:30	부산시 부산진구 병원	부상 2명	산소 캡슐 내 들어가 있는 환자가 무의식적으로 라이타를 켜 산소가 발열반응으로 캡슐이 폭발한 사고임.
3	94. 2. 15(화) 14:00	광주시 광산구 신창동	부상 2명	석재표면처리용 가열토치를 사용하던중 조작실수로 고압의 산소가 LPG용기로 유입되면서 LPG용기가 폭발한 사고임.
4	94. 5. 16(월) 16:20	서울 강서구 충전소	없음	소형 산소용기에 산소를 이충전하기 위하여 용기 밸브를 여는 순간 진공펌프용 냉매압축기가 파열된 사고임.
5	95. 7. 11(화) 16:00	서울 구로구 공장	부상 7명	알루미늄다이캐스팅에 부착된 압력용기(질소와 오일 혼합)에 질소를 충전중 질소용기내에 산소가 들어가 있는 것을 모르고 주입하던중 용기내의 유지류와 반응을 일으켜 폭발한 사고임.
6	96. 8. 15(목) 20:50	전남 여수시 석유플랜트	부상 1명	옥소알콜공장에 산소공급공정에 대한 시운전중 압축기 후단에 설치되어 있는 차단밸브와 스트레이너사이의 배관내부에 기름 등이 완전히 제거되지 않은 상태에서 산소가 통과하면서 산화반응을 일으켜 폭발한 사고임.
7	97. 1. 7(수) 09:50	경남 창원시 신촌동 특수기계	사망 1명	절단·용접용으로 액화산소용기와 LPG 50Kg용기를 토치에 연결 사용도중 LPG 용기가 폭발하여, 상부동체가 18m 비산된 사고임.
8	97. 12. 2(화) 10:00	서울 강남구 역삼동 건설현장	없음	앵글절단작업을 하던중 토치의 구멍이 막혀 가스가 나오지 않아 용기밸브를 열어둔 채 교체할 토치를 가지러 가는 중에 산소용기가 폭발함.
9	98. 5. 27(수) 08:00	경기 안산시 공단	없음	암모니아가스를 질소가스 압력으로 열처리내로 공급하는 과정에서 산소용기를 잘못 연결하여 유지류와 산소가 반응하여 암모니아용기가 폭발한 사고임.
10	98. 5. 27(수) 13:30	서울 양천구 공공건물	부상 1명	산소용기를 교체후 용기밸브를 열고 압력조정기의 압력조절밸브를 여는 순간 압력조정기가 파열된 사고임.
11	98. 7. 10(금) 11:56	서울 중구 병원	부상 1명	응급환자에게 산소공급을 위하여 산소용기에 유량계를 연결한 후 용기밸브를 여는 순간 누출된 산소가 폭발한 사고임.

번호	사고일시	장 소	피 해	사 고 개 요
12	98. 7. 14(화) 15:30	서울 송파구 송파2동	부상 1명	냉장고용 콤프레샤를 이용하여 산소용기(41.1ℓ →6.8ℓ)에 불법 이충전 하던중 콤프레샤 윤활유와 산소가 접촉하여 화학반응을 일으켜 산소용기가 폭발한 사고임.
13	98. 8. 3(월) 10:40	경북 김천시 아포읍	부상 1명	배관공사후 기밀시험을 실시하면서 산소를 이용하므로써 계량기내부에 묻어있는 유지류와 반응을 일으켜 계량기가 파열된 사고임.
14	98. 9. 1(화) 15:00	제주시 건입동 공공건물	부상 2명	차량지붕 공사중 산소와 LP가스를 이용하여 용접작업을 하던중 LP가스가 산소용기로 역류하여 산소용기가 폭발하고 LPG용기가 파편 충격으로 파손된 사고임.
15	99. 8. 5(목) 17:45	충북 충주시 일반가스충전소	사망 1명 부상 1명	산소가스충전중 용기내에 혼재되어 있는 유지류와 산소와 반응하면서 산소용기가 폭발한 사고임.
16	99. 9. 10(금) 12:50	부산 사상구 일반가스충전소	사망 2명	고압가스판매시설 보관실에 보관되어 있던 혼합가스 용기를 가스시험분석을 위해 이동하던 중 충전된 용기가 갑자기 폭발한 사고임.
17	2000.5.11(목) 11:05	전남 목포시 상가점포	부상 3명	화원(花園)내 저온 보관용 냉장고가 적정온도를 유지하지 못해 냉장고 수리 후 기밀시험을 산소로 하던 중 산소와 유지류의 반응으로 폭발한 사고임.
18	2000.9.8(목) 11:37	경남 거제시 석산공장	사망 1명 부상 6명	석재분쇄기 부품을 교체하는 과정에서 부품이 크게 제작되어 끼워지지 않아 크기를 줄이려고 드립통 내부에 액체산소를 뽑아 부품을 넣고 잠시 후 산소와 유지류 접촉하고 용접불티에 인화 폭발한 사고임.
19	2001.4.24(화) 15:20	서울 서대문구 병원	부상 1명	용기 및 flow meter주위에 화염흔적이 있고 용기 하부가 파열된 것으로 볼 때 용기충전등의 과정에서 이물질 또는 유지류가 용기내부로 혼입되었거나 부품연결부 등에 유지류가 묻어 있다가 용기밸브를 여는 순간, 산소와 급격한 산화반응이 일어나면서 폭발한 사고임.
20	2001.5.4(금) 20:30	경남 거창군(읍) 치과기공소	부상 1명	2001. 4. 30일 사고장소에 대한 배관 시공등을 완료하고 사고당일(2001. 5. 4)3번째 사용하려고 산소배관에 설치된 중간밸브를 개방하는 순간 산소압력조정기 및 산소배관 내부에서 폭발이 발생하여 가스시설 및 건물 일부가 소손된 사고임.
21	2001.6.21(목) 12:20	서울 도봉구 창동 아파트 내부	사망 1명 부상 1명	에어컨설치 용접작업중 LP가스가 산소용기로 유입, 산소용기가 폭발한 사고임.

또는 산소를 사용하기 위해 밸브를 여는 순간 배관, 압력조절기 및 유량계 등에 남아 있던 유지류와 폭발한 사고가 대부분이다. 즉 고압의 산소를 충전·이충전 및 사용할 때 가스온도가 상승하여 유분 및 금속분이 있을 경우 쉽게 착화하며, 용기, 밸브, 배관 등 재료를 쉽게 용융, 파열, 화재사고를 일으킨 것이다.

### 3. 고압산소공급시스템의 탈지 세척 기준

탈지라 함은 산소공급시스템의 부품 또는 배관 등에 잔류하는 유지물질이 고압의 산소와 결합하는 경우나 또는 배관 내에서 고속으로 유동하는 금속성 이 물질들의 마찰/충격에 의한 불꽃이 고압산소에 점화되는 경우 발생할 수 있는 폭발사고를 방지하기 위한 공정이다. 이러한 유지성분 및 이물질 등은 단품 제작과정, 조립 및 설치과정을 통해 유지성분 및 이물질이 유입될 수 있고, 또한 금속의 부식을 통해 생성될 수도 있다.

예전에는 탈지세정제로 사염화탄소( $CCl_4$ )나 TCE(Tri-Chloro Ethane) 등이 널리 사용되어 왔으나 그 독성 및 지구 오존층 파괴 요인으로 인해 1996년 이후 전 세계적으로 사용이 금지되고 있다. 따라서 최근에는 독성 및 환경파괴 정도가 낮은 대체세정제 Hydrochlorofluorocarbons(HCFC), deionized(DI) water, isopropyl alcohol(IPA) 등을 포함하여 많은 세척제 들이 개발되어 사용되고 있다.

이러한 탈지 세척 공정은 주기적으로 이루어지고 있는데, 실제 설비의 오염도는 사용 빈도와 사용조건 및 사용된 산소의 순도 등에 의해 달라질 수 있다. 이 세척공정기간동안 전체 설비가 가동 중단되고 부수적인 많은 손실이 발생하고 있는데 반하여 오염도를 검사하고 세척주기를 결정할 적절한 방법이 아직 강구되고 있지 못하다.

어느 정도의 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 대응반안을 강구하는 것이 보통이다. 액체산소가 액체추진로켓의 연료로 많이 사용되고 있으므로 NASA에서 제시한 검사방법과 기준을 살펴보면 다음과 같다.<sup>4</sup>

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

- 1) 표면적  $0.1 \text{ m}^3$ 당 100 ml의 세정제를 사용하여 평균다음 세정제를 포집한다.
- 2) 이 세정제를  $0.45\text{-}\mu\text{m}$  필터로 걸른다음 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 표 2의 기준과 비교한다.

일반적인 산소설비에서 비휘발성 잔유물은 1 mg/0.1 m<sup>2</sup> (1 mg/ft<sup>2</sup>)의 값이 최대 허용치이다. 고체입자에 대한 기준은 50, 100, 300이 적용부위에 따라 달라진다.

Table. 2 Typical Maximum Allowable Particles for Different Cleaning Levels<sup>5</sup>

Cleaning Level	Particle Size Range (μm)	Number of Particles <sup>a</sup>
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 <sup>a</sup>	
A	1 mg	

<sup>a</sup> Per 0.1 square meters

#### 4. 산소공급시스템의 안전성 향상을 위한 고찰

산소공급 및 사용설비의 전단과 후단에서의 산소순도를 비교하면 오염도에 대한 정량적인 데이터를 제시할 수 있으리라 판단된다. 장치의 사용시간이 경과할수록 장치의 오염도가 증대되고 따라서 장치를 통과한 산소의 순도가 떨어질 것을 예상한다. 이 데이터를 쉽게 확보한다면 세척주기 결정도 가능하다고 본다.

액체산소순도를 실시간으로 분석할 수 있다면 산소배관의 안전성을 확보하는데 이보다 더 좋은 방법은 없을 것이다. 산소순도를 실시간으로 모니터링하는 방법은 두가지를 생각할 수 있는데, 첫 번째는 Transmission Spectroscopy 이다. 이 방법은 시료를 통과한 빛의 양은 시료속의 가스에 의해 줄어드는데 이러한 빛의 감쇄를 측정하여 시료가스중의 다른 가스의 농도를 분석하는 방법으로 예전부터 많이 사용되던 방법이다.

이 방법은 배관 내를 흐르는 액체산소의 순도를 측정하기 위하여 액체산소의 일부를 기화시켜 기화된 산소의 순도를 측정하는 간접적인 방법이다. Fig. 1에 개략도를 보이고 있다. 기화기를 통하여 기화된 고압의 산소는 양쪽에 투시창이 설치되어 있는

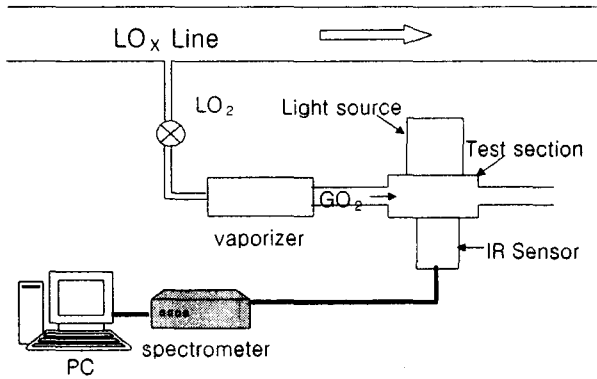


Figure 1. Optical Detecting System

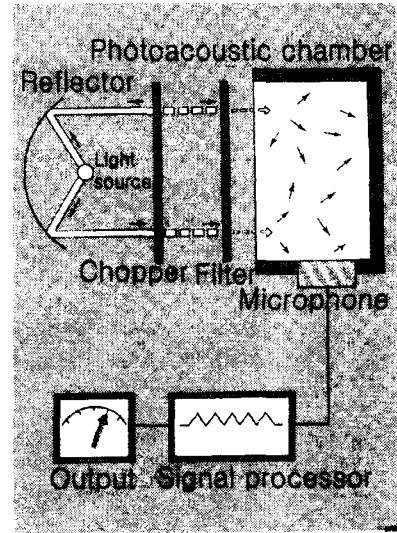


Figure 2. Photoacoustic pectorscopy<sup>6</sup>

Test section을 지나가고 이때 광원과 IR sensor를 이용하여 산란된 빛의 스펙트럼을 얻는다. 이 스펙트럼을 분석하여 가스산소의 순도를 정량적으로 측정할 수 있다.

또 다른 방법은 Photoacoustic Spectroscopy(PSA)라는 방법으로 그 원리는 Fig. 2와 같다. 광원으로는 Infrared light를 사용하고 빛을 단속적으로 만드는 chopper와 분석하고자 하는 성분에 맞는 빛만을 통과시키는 필터가 있다. 시료가 들어 있는 photoacoustic chamber에 condenser microphone을 설치하여 단속적인 IR에 단속적으로 활성화되는 가스에 의해 pressure wave가 발생하고 이 wave의 강도를 측정하여 분석하고자 하는 성분의 농도를 측정하는 것이다. 신호의 크기와 signal to noise ratio 면에서 두 번째의 Photoacoustic Spectroscopy가 고전적인 Transmission Spectroscopy에 비해 우수하다. 따라서 PSA에 의해 실시간 순도를 모니터링하고 가스크로마토그래프 등을 이용하여 PSA의 값을 교정하면 산소 순도의 변화를 쉽게 측정할 수 있다. 이 방법의 적용이 산소공급시스템의 안전성 증대에 크게 기여할 것으로 본다.

## 참고문헌

1. 가스사고년감, 한국가스안전공사, 1998, 1999, 2000, 2001.
2. 가스사고편람, 한국가스안전공사, 1997.
3. 2001년도 가스사고 모의실험 보고서, 한국가스안전공사, 2001.
4. Safety Standard for Oxygen Systems, NSS 1740.15, NASA, 1996.
5. Contamination Control Requirements Manual, JPG 5322.1, NASA, 2000.
6. Photoacoustics in Gas Detection, DK BR 0474-11, Brüel & Kjær.