

중대사고 이슈 리포트

重大事故 Issue Report

산소는 공기가 아닙니다. 위험물입니다!

2021. 4

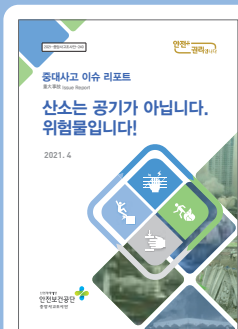


Contents

중대사고 이슈 리포트
重大事故 Issue Report

2021. 4

1.	산소는 공기가 아닙니다 1
	» 중앙사고조사단 강성광 부장
2.	산소배관 시스템 설계·운영 실태 기획조사5
	» 중앙사고조사단 윤영호 차장
3.	산소를 공기로 취급하면 일어나는 일 16
	» 중앙사고조사단 이민영 대리
4.	의료용 산소도 예외가 아니다 20
	» 중앙사고조사단 강성광 부장



중대사고 이슈 리포트 2021. 4

[2021-중앙사고조사단-240]

발행인 박두용
발행처 한국산업안전보건공단
울산광역시 중구 종가로 400(북정동)
문의처 052)703-0129
편집디자인 한국장애인문화인쇄협회
Tel. 02)2683-0955



01

산소는 공기가 아닙니다

산소의 두 얼굴

공기는 지구를 둘러싼 대기 하층을 구성하는 무색 투명한 기체로 지구의 역사와 더불어 생성되었으며, 인간을 비롯한 지구상 생명체에 꼭 필요한 역할을 한다. 공기의 성분은 질소(N₂) 78%, 산소(O₂) 21%, 나머지는 아르곤(Ar), 이산화 탄소(CO₂) 등으로 이루어져 있다. 다시 말해 공기는 산소가 21% 포함된 여러 기체가 모여 있는 집합을 말하는 것이며, “공기=산소” 의미는 결코 아니다.

산소는 불소 다음으로 반응성이 크며, 철이 녹스는 이유도 산소 때문이다.

산소는 지구 모든 생물체의 생명의 근원이기도 하지만 반대로 독이 되는 두 얼굴을 가지고 있다. 과거 지구를 지배했던 혐기성 세균들을 대부분 멸종시킨 것도 산소이고, 체내에 있는 백혈구 역시 세균을 죽일 때 산소를 넣어 죽인다.

에너지 생산 과정에서 물과 이산화탄소 및 산소가 발생하는데, 이 산소를 활성산소라 한다. 활성산소는 몸 안의 병균이나 이물질을 없애는 면역 기능과 신호전달 물질로 작용한다. 세균, 바이러스, 곰팡이와 같은 병원체와 니코틴 같은 몸에 해로운 이물질을 없애는 생체방어 기능을 가지고 있다. 그러나, 활성산소가 많이 발생하게 되면 돌변하여 세포질을 공격하게 되고 노화나 질병의 원인으로 작용한다.

산업안전보건 측면에서 산소의 부족과 과잉은 화재·폭발, 질식 등 근로자의 생명에 밀접한 영향을 끼치는 매우 중요한 위험 요소이기 때문에 항상 적정 농도가 유지되도록 관리하여야 한다.

산소가 부족할 경우

지구상에 존재하는 생명체는 산소를 유기물 분해에 사용해서 에너지를 만들기 때문에 부족하거나 없다면 죽게 된다. 인간은 물 없이 3일, 음식 없이 3주 가량은 생존 가능하지만, 산소가 없으면 3분을 버티기가 불가능하다. 특히, 뇌세포는 산소가 30초만 공급되지 않아도 파괴되기 시작한다.

산소가 부족 할 때 나타나는 증상으로 대표적인 것이 두통이다. 두뇌는 전체 산소 소모량의 30% 이상을 사용하기 때문에 스트레스를 많이 받거나 신경을 많이 쓰면 산소 소모량이 늘고 이를 공급하기 어려워지면 두통이 발생한다. 또한, 에너지를 많이 소비할 경우 산소를 보충해주기 위해 수시로 하품을 하게 되고, 산소가 더 많이 부족하면 기억력과 기력이 떨어질 수도 있다.

공기 중 산소농도가 15% 까지 떨어지면 현기증이 나고 시력이 저하되며, 몸은 부족한 산소를 보충하기 위해 호흡수가 급격하게 증가한다. 이보다 더 떨어지면 지능이 급격하게 떨어지고 운동능력이 급격하게 감소한다. 12% 미만이면 단시간만 노출되도 위험해지며 의식을 잃을 수 있고 7% 이하면 사망한다.

이와 반대로 화재 측면에서는 산소농도를 낮추는 것이 화재예방 설계나 소화활동에 활용된다. 어떤 물질이 화염을 전파하기 위해서는 최소한의 산소농도가 필요하며 이를 최소산소농도(MOC: minimum oxygen concentration)라 한다. 폭발 및 화재는 연료의 농도와 무관하게 산소의 농도를 감소시킴으로써 방지 가능한데 이때 최소산소농도가 유용한 값이 된다.

$$\text{최소산소농도(MOC)} = \text{연소하한계} \times \text{산소몰수}$$

화재 폭발을 방지하기 위해서 불활성 기체로 치환하는 것을 이너팅(inerting) 이라 하며, 최소산소농도 보다 약 4% 낮게 유지한다. 예를 들면 인화성 가스의 최소산소농도는 10%, 분진은 8% 인데 불활성화를 위해서는 이보다 약 4% 낮은 최소산소농도가 유지되도록 설계를 한다. 즉, 인화성 가스는 6%, 분진은 4%의 최소산소농도가 유지되도록 해야 한다. 가스계 소화설비의 설계농도를 결정할 때도 공기 중 산소농도 보다 낮은 값이 기준이 된다. 예를 들면 이산화탄소 소화설비의 경우에는 질식소화 목적 달성을 위해 실내의 산소농도가 15% 이하가 되도록 이산화탄소 방사량을 결정한다.



프랑스의 생화학자인 폴 베르는 산소가 생명을 유지하는데 필수적인 물질이나 고압의 공기에 노출된 동물이 경련을 일으키고, 그보다 낮은 압력이라도 100% 산소를 호흡할 경우에는 경련을 일으키는 것을 밝혀냈다. 이처럼 고농도 산소나 고압 산소는 인체 장기에 악영향을 끼치게 되는데 이를 “산소 중독”이라 한다.

잠수부의 경우 수심이 깊어질수록 압력이 올라가 산소중독 위험이 높기 때문에 호흡을 위해 산소를 사용하지 않고 일반 공기를 사용하도록 하고 있다.

고농도 산소는 중증 환자의 생명 유지나 일반인도 피로 개선· 활력 증진 등의 효과를 위해 흡입하기도 한다. 그러나, 매일 고농도 산소를 장시간 흡입할 경우 과다 흡입된 산소가 신진대사를 거치는 동안 형성되는 유해 산소가 세포 손상과 노화 등을 유발할 수 있으므로 치료 목적일 경우 의사의 지시에 따라 고농도 산소에 잠깐 노출되는 정도로만 이용하는 것이 바람직하다.

산소농도가 21% 보다 높아지는 과잉 산소분위기에서 연소현상은 평소와 크게 달라진다. 산소가 충분하면 산화할 수 있는 모든 물질이 폭발적인 연소가 가능하다는 의미이며, 우리가 생각할 수 있는 모든 물건에 작은 스파크만 주어진더라도 급속한 화재가 발생하게 된다.

철은 평소에는 공기와 접촉하여 산화되더라도 녹이 스는 정도지만 과잉산소가 공급되면 일반 목재처럼 연료 역할을 하여 격렬하게 타오른다. 심지어 비닐 튜브에 산소를 공급하면서 불을 붙인 후 물속에 호스를 넣어도 불은 꺼지지 않고 계속 타 들어가기도 한다.

[그림 1] 물속에서 산소 연소

[출처: <https://www.youtube.com/watch?v=991qJTzj64>]



그림 1

다음 그림에서 보듯이 섬유류의 연소속도는 산소 농도가 35% 이상일 경우 공기 중일 때보다 거의 수직으로 급속하게 빨라진다.

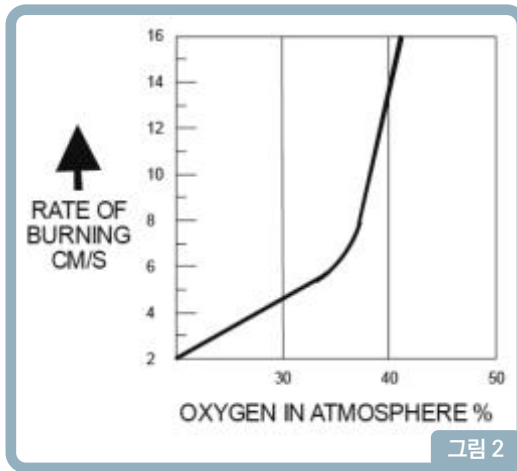


그림 2

[그림 2] 산소농도별 연소속도¹⁾

이처럼 고농도 산소는 많고 적음에 따라 우리의 건강이나 화재·폭발에 커다란 영향을 미친다. 그러나 안타깝게도 우리들은 ‘산소=공기’로 생각하며 숨을 쉴 때 들이마시는 공기가 위험하다 느끼지 못하는 것처럼 산소 역시 위험성을 느끼지 못하고 있는 경우가 허다하다.



➡ 권고 용도

암모니아, 메틸알코올 등 합성가스의 제조, 호수나 저수지의 부영양화의 중화제, 철 및 강철산업에서 산화제, 우리나라 침출용 산화제, 로켓 추진제 등

➡ 유해성·위험성 분류

기체 산소는 산화성 가스, 고압가스로 분류되어 있으며, 화재를 일으키거나 강렬하게 하는 산화제로 분류되어 있다.[CAS번호 7782-44-7]



[그림 문자]

1) EIGA 유럽산업가스협회

과잉 산소

무색, 무취이며 맛이 없다. 따라서 산소가 풍부한 대기의 존재는 정상적인 인간의 감각으로는 감지 할 수 없다.

산소는 공기보다 무겁다

산소는 공기보다 무겁기 때문에 트렌치, 지하 등과 같이 낮은 지역에 축적될 수 있다. 액체산소에 의해 생성된 기체산소는 공기보다 3배 더 무겁다. 즉, 쉽게 확산이 되지 않는 무거운 가스다.

법적규제 현황

액체산소와 고체산소는 산업안전보건법에서 산화성 액체 및 고체 위험물로 분류되지만, 기체 산소는 해당되지 않는다. 화학물질관리법 등 타 법령 규제에도 해당되지 않는다. 법에 의한 위험물은 아니나 고농도 기체 산소는 산화성 고체나 액체와 같은 위험물과 동일하게 취급하는 것이 바람직하다.

특성

[표 1] 산소의 물리화학적 특성

녹는점/어는점	끓는점	증기압	용해도	비중
-218 ℃	-183 ℃	760 mmHg(-183 ℃)	3.1 mL/100 mL(20 ℃)	1.1407(-183 ℃)



02 산소배관 시스템 설계 · 운영 실태 기획조사

동일한 회사에서 '14년, '20년 두 번의 산소배관 화재사고로 6명의 근로자가 목숨을 잃었다. 닫았던 밸브를 반대로 다시 열기만 했을 뿐인데 배관과 밸브가 갑자기 녹아내리면서 뿜어져 나온 불길을 미처 피할 겨를도 없이 희생을 당했다.

새로 설치한 밸브
개도 조절 중 화재

'14년 7월 산소 사용설비 시운전 중 산소 홀더(holder) 하부에 설치된 감압밸브로 정상 압력으로 승압하다 산소 배관 내부에 잔류하고 있던 유지분이 고압의 산소에 의해 발화되어 1명 사망하고, 2명은 치료 중 사망하였다.



그림 3



그림 4

[그림 3] 산소 홀더

[그림 4] 밸브 스테이션(Station)

☞ 사고발생 원인

- 감압밸브의 스템의 스프링들에 그리스를 주입하였으나 세척작업을 실시하지 않고 피깅(Pigging)²⁾ 작업 실시

2) 피깅(Pigging) : 스펀지 등의 피그볼(pigball)을 배관 인입부에 삽입한 후 고압의 질소 등을 이용하여 배관 끝단부로 배출함으로써 배관 내에 잔존할 수 있는 이물질 제거하는 작업으로 4단계로 실시됨.(단, 배관의 직경이 변하거나 직진 방향이 아닌 Tee 연결배관, 밸브 및 계기류 등이 설치된 부분은 완벽한 실시가 불가능)

- 감압밸브를 조정하던 중 감압밸브에 주입된 그리스 등이 산소와 충돌 또는 반응, 급격한 조작에 따른 마찰열, 단열압축현상에 의해 발화되어 배관 등의 화재로 이어진 것으로 추정



[그림 5] 사고발생 감압밸브

[그림 6] 파손된 수동밸브

7년 후 닫혀 있던
밸브를 다시 열다
화재 발생

'20년 11월 노후된 산소공장 철거를 위해 잠겼던 산소배관 차단밸브를 다시 여는 과정에서 화재가 발생하여 폭발적으로 연소되면서 근로자 3명이 사망한 재해가 발생하였다.



[그림 7] 화재 발생 부위

[그림 8] 산소배관 및 밸브

☞ 사고발생 원인

- 차단밸브 조작전 전·후단 균압조치 소홀

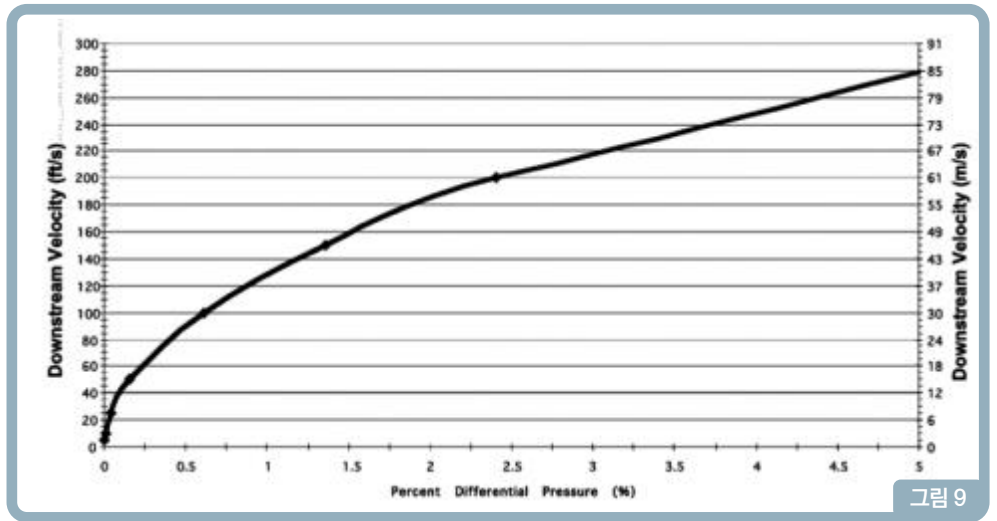
차단밸브 조작전 전·후단의 균압(pressure equalization) 조치를 소홀히 하여 밸브 조작(throttling)시 배관내 산소의 고속흐름을 유발하였고, 생성된 난류가 배관내 금속입자 간 또는 금속입자와 배관 간 충돌을 촉진시켜 고농도(99.5%이상) 산소 하에 점화되어 고압산소화재로 발전

- 산소배관 재질 선정 부적정³⁾

배관내 허용유속 이상의 산소 흐름을 형성되는 경우 화재·폭발에 취약한 일반탄소강 재질의 배관을 선정

3) ASTM G 88-13, Standard Guide for Designing Systems for Oxygen Service

[그림 9] 차압에 따른 최대 유속
(등온 흐름 가정)



- 산소배관 내 금속입자(Particles) 존재 및 생성

산소배관 내부 부식, 마모 등으로 인해 식별 가능할 정도의 금속입자 발견되었으며, 가연물로 작용함

흔히 말하는 산소는 생산 공정에서 중요한 관리요소가 아니다. 유틸리티(Utility)일 뿐 전혀 생산량 증대에는 영향을 미치지 않는다고 생각한다. 또한 대기 중에 넘치는 공기를 원료로 만들기에 산소 내면에 있는 무서운 폭발력을 알지 못한 채 별로 위험하지 않을 거라고 생각하기가 쉽다.

두 사고의 원인조사 과정에서 해당 사업장이 고압산소를 수십 년간 생산해 왔지만 산소배관과 밸브 취급 작업의 위험성에 대해 정확히 알지 못하고 있다는 사실을 알게 되었다. 안타까운 것은 해당 산소공장을 설계했던 외국의 원천기술사와 산소산업 관련 단체에서는 이미 다음과 같이 산소배관과 밸브 취급작업 시 화재·폭발 메커니즘에 대한 정보를 가지고 있었으나 해당 사업장에서는 이러한 내용이 전달되지 못했다.

☞ 산소배관에서 화재·폭발의 주요 원인

[표 2] 산소배관 화재·폭발 주요원인⁴⁾

점화 메커니즘	조건	기여 요인
입자충돌 (particle impact)	<ul style="list-style-type: none"> 입자 존재 제한속도 이상 유속 가연물 	<ul style="list-style-type: none"> 밀도, 양, 입자의 조성 입자경로상 충돌 포인트 높은 차압
단열압축 (adiabatic compression)	<ul style="list-style-type: none"> 급격한 가압 관말단 부근의 오염원 또는 비금속 물질 높은 압축비 	<ul style="list-style-type: none"> 급속한 밸브 개방 가압기체 초기온도, 최종압력, 압축비 낮은 자연발화점을 갖는 물질의 10bar이하에서 점화가능성
(유기물에 의한) 촉진 점화 (promoted ignition/ kindling chain)	<ul style="list-style-type: none"> 점화메커니즘 존재하에 화염을 전파시킬 수 있는 가연물 	<ul style="list-style-type: none"> 일반적으로 비금속 물질 가연성물질이 적은경우의 점화

4) ASTM G 128-02, Standard Guide for Control of Hazards and Risks in Oxygen Enriched Systems
EIGA(European Industrial Gases Association) Oxygen Pipelines and Piping Systems
AIGA(Asia Industrial Gases Association) Oxygen Pipelines and Piping Systems

기계적마찰 (mechanical friction)	<ul style="list-style-type: none"> • 2개 이상의 표면 마찰 	<ul style="list-style-type: none"> • 빠른 속도/높은하중 마찰 • 알루미늄 합금은 더 취약 • 높은 회전속도, 진동
기계적충격 (mechanical impact)	<ul style="list-style-type: none"> • 금속 또는 비금속부에 가해지는 충격 	<ul style="list-style-type: none"> • (대부분 액체산소에 노출된) 다공성 물질 • 급속한 잠금 가능 밸브 • 밸브, 릴리프의 채터링(chattering)
열적 점화 (thermal ignition)	<ul style="list-style-type: none"> • 구성품의 자연발화점 이상의 외부 열 • 열원에 의해 발생하는 온도이하의 발화점을 갖는 물질 • 윤활유나 가연성 오염물의 인화점 	<ul style="list-style-type: none"> • 나화 • 흡연 • 스파크 • 용접 • 기타열원
전기아크 (electrical arcing)	<ul style="list-style-type: none"> • 전력공급원 • 물질을 기화시키거나 용융시킬 수 있는 아크 • 아크에 노출된 가연물 	<ul style="list-style-type: none"> • 미접지, 단락 • 낙뢰

이에 자체 산소공장을 보유하고 있는 철강업종을 대상으로 우리나라의 고압산소 배관 취급 실태 파악의 필요성이 대두되어 관계자 면담과 현장 확인, 관련 자료 조사를 통한 기획조사를 실시하게 되었다.

[표 3] 기획조사 체크리스트

확인항목	점검결과		비고
	유	무	
<input type="checkbox"/> 차단밸브 전·후단 균압 배관, 압력계는 설치되었나?			
<input type="checkbox"/> 차단밸브 조작 전 전·후단 균압조치 매뉴얼은 있는가? - 없다면 균압 조치의 중요성 인지하였는가? - 다른 작업 방법은 있는가?			
<input type="checkbox"/> 산소배관의 재질은 무엇인가? (제조공장 / 이송배관)			
<input type="checkbox"/> 차단밸브 설치 위치(방호벽)는 격리되어 있는가?			
<input type="checkbox"/> 차단밸브 조작 시 작업표준, 안전매뉴얼은 있는가?			
<input type="checkbox"/> 산소 공장 설계 자료 및 안전 운전 매뉴얼은 있는가? (Start-up / Shut-down 절차)			
<input type="checkbox"/> 고압, 고농도 산소의 위험성에 대한 자료는 있는가?			
<input type="checkbox"/> 위의 내용에 대해 근로자에게 안전교육은 하였는가?			
<input type="checkbox"/> 정비, 보수 등 작업 시 관리 담당자는 누구이며, 산소 위험성에 대한 충분한 지식이 있는가?			

산소배관 시스템 설계 · 운영 실태

산소공장 기술 원천

산소공장은 대부분 프랑스와 일본, 영국 회사의 기술을 턴키(Turn-Key)* 형태로 설계, 제작, 설치되었다. 산소공장 운영도 2개사는 국내 산소제조 전문 업체에 위탁, 2개사 자체 운영, 1개사는 밸브 조작 등의 업무를 협력업체에 도급하는 형태로 이루어지고 있었다.

원천기술사로부터 설계 자료나 설계 당시 현장에 반영된 안전을 위한 제약 조건 등과 같은 필수자료, 산소공장에서 가장 위험한 밸브 조작 시 위험성 등에 관한 자료는 확보하지 못하고 있었으며, 운전 매뉴얼 정도만 제공받고 있었다.

원천기술이라 제공하지 못한다는 외국 원천기술사에 대해 우리나라의 최고의 철강회사들조차 더 이상 자료를 요구하지 못하고 확보된 운전매뉴얼과 그동안 운전 경험으로 습득한 범주 내에서 산소공장의 위험을 관리하고 있었다.

* 턴키(Turn-Key): 제품을 구매자가 바로 사용할 수 있도록 생산자가 인도하는 방식

산소 배관 재질

최근에 설치된 공장도 예전에 설치된 공장이라도 난류 형성을 야기할 수 있는 엘보(Elbow)류에는 스테인리스스틸을 사용하였지만, 대부분의 공장은 탄소강을 사용하고 있었다. 일부 스테인리스스틸로 설치된 공장도 외부 환경에 부식을 방지하기 위해 설치한 것으로 알고 있는 등 탄소 배관 부식에 따른 금속 입자가 가연물이면서 점화원이 된다는 것을 잘 알고 있지 못하였다.

차단밸브 전·후단 균압 배관설치

균압 배관은 최근 설치된 공장을 제외하고 설치된 곳이 없었다. 고압 산소 배관에서 밸브의 급속한 개방에 따른 위험성을 인지하지 못하고, 단순히 고압의 경우 밸브가 쉽게 열리지 않으니 천천히 열어야 한다고만 알고 있는 곳이 많았다. 방문한 사업장의 균압밸브, 차단밸브 설치 형태는 다음과 같이 여러 형태로 설치되어 있었다.

① 균압배관과 압력계를 설치(권장)



그림 10

[그림 10] 균압배관(상방향) 및 압력계

② 균압배관만 설치(압력계 미설치). 주배관의 측방향, 상방향, 하방향 등 여러 형태로 설치됨

[그림 11] 균압배관 측방향
[그림 12] 균압배관 하방향(잘못 설치)



③ 차단밸브와 우회밸브(bypass valve) 설치하였으나, 우회밸브는 균압 용도가 아닌 차단밸브 이상발생 시 대체용도

[그림 13, 14] 우회배관(By-Pass)만 설치



④ 차단밸브만 설치. 대부분 버터플라이밸브나 글로브밸브를 설치하고 있으나 일부 사업장은 볼밸브 등 종류 구분 없이 설치

[그림 15] 볼밸브
[그림 16] 버터플라이밸브



기타 안전조치

차단밸브 주위에 콘크리트 방호벽을 설치하고, 핸들을 연장하여 방호벽 밖에서 조작하도록 하여 화재 시 작업자를 보호할 수 있도록 한 사례도 있었다.



[그림 17, 18]
방호벽 및 밸브 조작 위치

차단밸브 조작 시 작업표준, 안전매뉴얼 작성

'20년 타 회사의 사고를 통해 산소의 위험성을 인지하고 별도 위원회를 구성하여 세부적인 매뉴얼을 다시 작성하고 있는 사업장도 있지만, 대부분 사업장의 작업표준과 매뉴얼은 밸브 조작 관련 어떤 위험성 있는지, 왜 그렇게 조작해야 하는지에 대한 자세한 설명을 포함되어 있지 못했다.

산소공장 근무자의 경력 및 지식

1개사를 제외하고 대부분 산소공장에 입사하여 순환 없이 근무를 하고 있었으며, 산소공장 1~2명은 산소의 일반적인 위험성 정도는 인지하고 있었으나 외부 위탁 등으로 인해 배관 유속 제한, 밸브 조작 시 위험성 등 구체적인 위험은 알지 못하였다.

산소배관 취급 위험성 인식 부족

파티클의 충돌, 단열압축, 유분 등에 의한 화재 발생 위험이나 산소 배관 밸브 조작 시 위험성과 이에 대한 예방대책은 EIGA*, AIGA**, 원천기술사 등 산소 관련 산업에서는 이미 통용되고 있는 내용들이나 국내 산소공장 보유 사업장은 관련 자료 확보나 내용 인지가 부족한 실정이다.

* European Industrial Gases Association, **Asia Industrial Gases Association

산소 사고를 예방할 수 있는 규정 부족

근로자의 안전을 위해 존재하는 산업안전보건법에서 조차 산소의 위험을 알리고 사고 예방을 위한 관련 조항은 단 2개이다. 산소밸브를 천천히 열어라! 환기를 위해 산소를 사용하지 마라! 가 전부이다. '14년 사고 이후 산소공장의 현실을 파악하고 외국 관련 기술 지침, 규격 등을 참고하여 전문가들에 의해 매뉴얼이 마련되었어야 하나 현재까지도 작성되지 못하고 있다.



⇒ 원천 기술력의 부족

턴키(Turn-Key) 형태의 공장 설립으로 인해 원천기술사에서 자료를 제공하지 않아 설계사상 등 안전운전에 매우 중요한 자료들이 확보되지 않은 것이 가장 큰 문제이다. 일부는 운전매뉴얼도 영문으로 가지고 있다. 원정에서 이러한 기술자료를 확보하지 못하고 있으니 공장 운전을 위탁받은 외부업체도 운전만 할뿐 예상치 못한 돌발 상황에 대한 대처는 하지 못하는 것이 현실이다. 왜 그렇게 설계 되었는지도 모른 채 오랜 기간 운전하다 설비가 노후화되어 정비 작업 시 사고가 반복하여 발생되고 있다.

⇒ 경제성 우선의 공장 건설과 운전

원천 기술이 없는 상태에서 자체적으로 공장을 설치하여 운전하기는 경제성 대비 위험부담이 너무 크다. 그래서 대부분 쉬운 방법으로 턴키 방식의 공장 설립을 선호하고 있다. 배관 재질 교체도 수공은 하지만 경제성에 선뜻 실행을 하지 못하고 있는 경우가 많다. 산소공장은 제품 생산의 부수적인 공정이므로 경영층의 무관심을 유발하고 투자를 미룬채 현상유지만을 목표로 하루하루 가동을 하는 것이다.

⇒ 산소에 대한 전문가 부족

기술자료 부족, 규제 법령 부재, 기업 이윤과 무관한 공정 이라는 인식 등의 이유로 회사에서는 산소에 대한 전문가를 육성하지 않고 있다. 대부분의 사고가 산소의 전문적인 특성을 알지 못한 채 안일한 생각으로 작업을 수행하다 발생하고 있다.

⇒ 산소배관 취급 위험성 인식 확대 및 관련자료 확보

EIGA 등 산소 관련 산업에서는 이미 통용되고 산소 배관 설계기준이나 밸브 조작 시 위험성 및 대책 관련 자료를 우선적으로 확보하고 운전매뉴얼, 작업표준 등 사내 관련 지침에 반영하는 것이 필요하다.

⇒ 명확하고 적용 가능한 국내 기준 마련

앞에서 원인으로 제시한 기술력 확보를 위해 외국의 지침, 규격, 우주 항공분야의 매뉴얼 등 다양한 산소의 위험성을 제시한 문헌을 참고로 하여 빠른 시간 내에 국내 기준을 마련하고 관련 사업장에 제공해야 한다. 우리 공단에서는 위 사항들을 반영한 산소배관 시스템 설계·운영에 관련한 KOSHA GUIDE 제정을 진행하고 있다.

⇒ 투자와 교육을 통한 전문가 육성

몇 번의 산소공장 재해를 통해 위험성을 인지하였다면 정부, 원천 기술사에서 제공하는 자료들을 참고하여 과감한 투자를 통해 안전을 확보하여야 한다. 또한 근로자에게 지속적인 교육을 통해 전문 인력을 양성해야 한다.

근본적인 해결방안

정기적인 점검

탄소강의 부식에 의해 금속입자가 가연물 또는 점화원이 된다는 사실을 알았다면 정기적인 배관의 두께 측정(PAUT)⁵⁾을 통해 적정 두께를 초과한 것은 교체를 실시하여야 한다. 먼저 난류흐름⁶⁾을 유발할 수 있는 구간은 스테인리스강 등 적합한 재료로 교체가 필요하다.

[그림 19] 탄소배관 표면 거칠기 및 프로파일

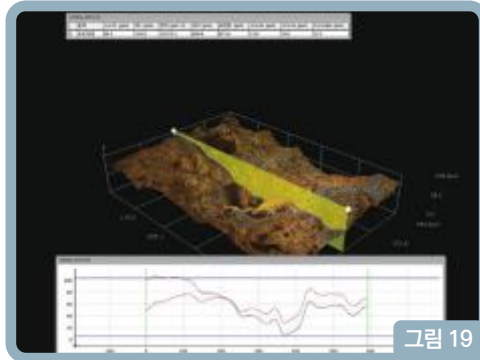


그림 19

[그림 20] 광학현미경 500배 사진



그림 20

그리고 배관을 교체하는 경우에는 다음의 표를 참고하여 재질을 선정하여야 한다.

■ <표1>배관의 재질에 따른 두께와 압력의 변화 추이

ALLOY/ALLOY FAMILY	MINIMUM THICKNESS	EXEMPTION PRESSURE
Copper Alloys		
Copper	None Specified	207 bar g(3000psig)
Copper-Nickel Alloys	None Specified	207 bar g(3000psig)
Brass Alloys	None Specified	207 bar g(3000psig)
Stainless Steels, Wrought and Forged		
304,316,321,347	3.18mm(0.125in)	13.8 bar g(200psig)
304,316,321,347	6.35mm(0.250in)	20.0 bar g(290psig)
17-4PH(aged)	3.18mm(0.125in)	20.7 bar g(300psig)
Nickel Alloys		
Inconel 625	3.18mm(0.125in)	86.2 bar g(1250psig)
Monel 400	None Specified	207 bar g(3000psig)

1. **Minimum Thickness** : 최소 사용 배관 두께를 의미하며 "None Specified"로 기재된 부분은 최소 사용 두께가 규정되어 있지 않고, 사용되는 압력의 감도에 맞는 배관을 선정하여 사용하라는 의미이다.
 2. **Exemption Pressure** : 최대 사용할 수 있는 압력을 의미하며, 만일 여기서 기재된 압력 이상으로 사용 시에는 3.1 및 3.2의 그림에서 Carbon Steel에 적용되는 속도를 적용하여 사용하면 된다.

위의 표 이용 방법
 Exemption Pressure 이하의 압력에서 사용하는 경우 → 속도제한 없이 사용 가능
 Exemption Pressure 이상의 압력에서 사용하거나 최소 두께 이하로 사용하는 경우 → Carbon Steel에 적용되는 속도 적용

그림 21

[그림 21] 배관의 재질에 따른 두께와 압력의 변화 추이⁷⁾

- Minimum Thickness : 최소 사용 배관 두께
- Exemption Pressure : 최대 사용할 수 있는 압력
- Exemption Pressure 이하의 압력 사용 : 속도제한 없이 사용
- Exemption Pressure 이상의 압력 또는 최소 두께 이하로 사용 : [그림 22] 그래프의 유속 적용
- (예시) 운전압력 2.3Mpa : 스테인리스강(300계열), 최소두께 6.35mm

5) 위상배열초음파시험(PAUT : Phased Array Ultrasonic Testing) : 신속검사와 모양이 복잡하여 탐촉자 접근이 어려운 곳에서 검사를 할 수 있으며, 결함 정밀 측정을 할 수 있음. 컴퓨터 기반 데이터 취득 가능
 6) 난류흐름 유발 지점(밸브, Elbow, Reducer, 가지배관 등) 전·후단 지름의 최소 8배 길이 구간 적용
 7) EIGA(European Industrial Gases Association) Oxygen Pipelines and Piping Systems, Appendix B
 AIGA(Asia Industrial Gases Association) Oxygen Pipelines and Piping Systems, Appendix D

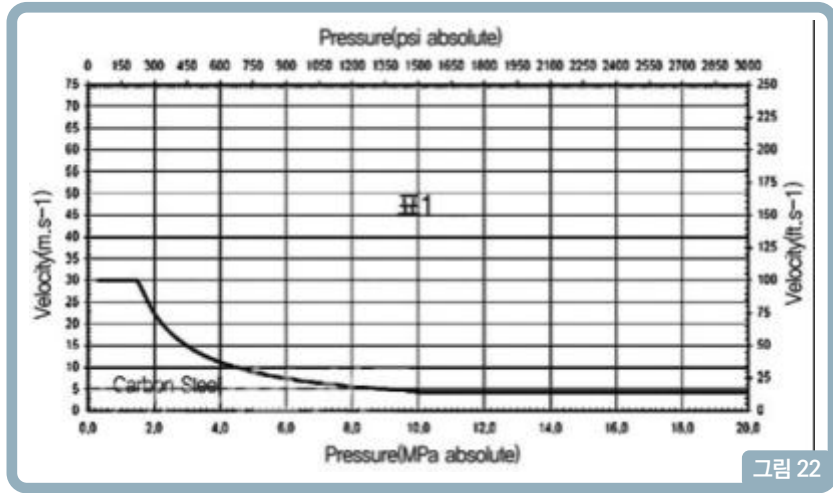


그림 22

[그림 22] 고압산소 배관의 유속 제한⁸⁾

- (예시) 운전압력이 10 Mpa 압력일 때 약 5 m/s 유속 이하인 경우에는 탄소강 재질 사용 가능

☞ 균압의 중요성 인지

5개의 철강회사들의 산소공장 배관에는 대부분 균압배관이 미설치되어 있다. 그렇다고 모든 공장을 정지하고 설치할 수는 없는 것이다. 향후 산소공장이 정지된 후 정비기간에 가능하면 설치하는 것을 권장한다. 그동안에는 ①차단밸브 개방 전에 밸브 후단에 질소를 가압하여 질소분위기를 형성하고, 배압을 제공하여 차압을 최대한 줄여주는 작업이 필요할 것이다. ②또한 차단밸브 전·후단 압력을 확인하면서 밸브를 천천히 열어 유속을 낮게 유지하는게 필요하다.

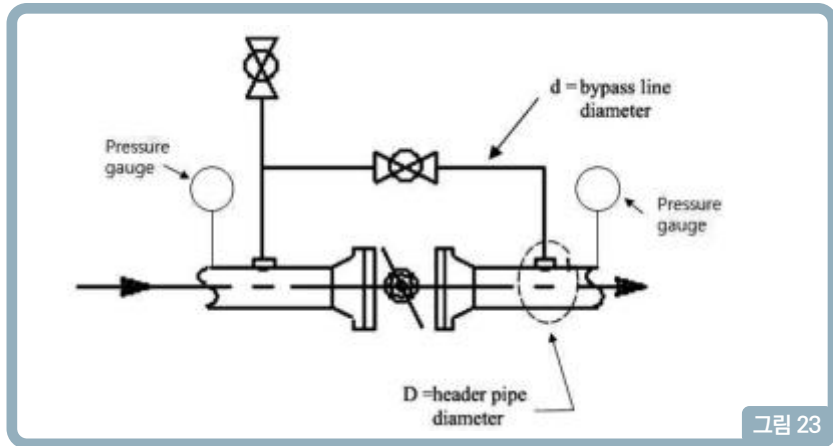


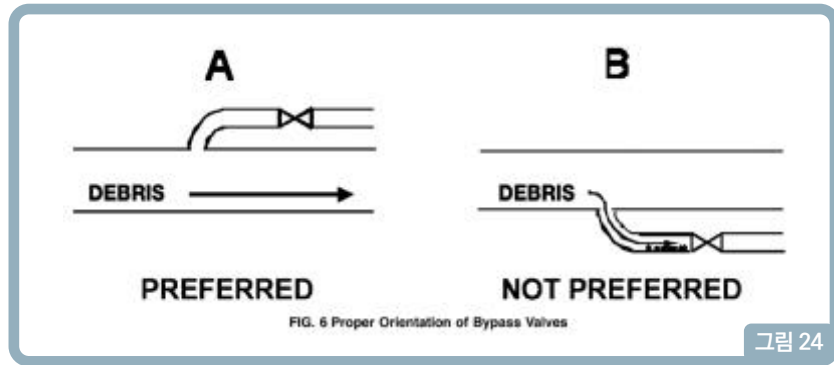
그림 23

[그림 23] 고압산소 배관의 유속 제한⁹⁾

- 균압배관 및 균압밸브는 난류생성 가능성을 고려하여 허용재질선정
- 균압배관의 지름(d)은 주배관의 지름(D)의 1/4을 초과하지 말고 최대 3인치를 초과하지 말 것
- 균압여부 확인 후 차단밸브를 조작할 수 있도록 전·후단에 압력계(pressure gauge) 설치

8) EIGA(European Industrial Gases Association) Oxygen Pipelines and Piping Systems, Appendix B
AIGA(Asia Industrial Gases Association) Oxygen Pipelines and Piping Systems, Appendix D
9) EIGA(European Industrial Gases Association) Oxygen Pipelines and Piping Systems
AIGA(Asia Industrial Gases Association) Oxygen Pipelines and Piping Systems
AIR LQUIDE, Safe design of gaseous oxygen piping and pipeline systems

균압배관 또는 우회배관을 설치하는 경우에는 이물질 유입을 방지하기 위해 측방향이나 상방향으로 설치를 권장한다.



[그림 24] 균압배관 및 우회배관(By-Pass) 설치 기준¹⁰⁾

➡ 적합한 차단밸브 타입 선정

차단밸브는 완전 폐쇄 또는 완전 개방 위치에서 작동해야하며 스로틀링(Throttling)모드에서 사용을 지양(유량 또는 압력 제어 밸브 제외)해야 한다. 볼 또는 플러그 밸브는 빠르게 개폐가 가능하며 밸브 후단 측 난류가 형성되는 곳에 단열압축에 의해 온도가 상승이 가능하다. 빠른 개폐를 방지하기 위해 기어 작동기(Gear Operator)를 장착하여 사용하여야 한다.

※ 기어 작동기(Gear Operator) : 밸브 핸들의 종류로서 기계 구동장치에 의해 작동

**산소는 공기가 아닙니다. 산소는 불에 가깝습니다.
우리에게 반드시 필요하지만 항상 경계하고 관리해야 할 요소입니다.**

10) ASTM G88-13, Standard Guide for Designing Systems for Oxygen Service



03 산소를 공기로 취급하면 일어나는 일

많은 사람들이 '산소=공기'라는 등식에 익숙해져 옷에 먼지 털기, 배관 내부 불어내기 등 압축 공기를 사용해야 하는 것을 산소로 대신하다 많은 사고들이 발생하고 있다.

그래서, 산업안전보건기준에 관한규칙 제241조에서는 '통풍이나 환기가 충분하지 않은 장소에서 화재위험작업을 하는 경우에는 통풍 또는 환기를 위하여 산소를 사용해서는 아니 된다' 라고 규정하고 있으나 아직도 많은 사람들이 산소와 공기는 동일하다는 통념에 젖어 있다 보니 유사 형태의 화재사고가 계속 반복되고 있다.

에어재킷
산소 오염속으로
인한 화재

[표 4] 에어재킷 화재사고 발생 현황

구분	계	'20	'19	'18	'17	'16	'15	'14	'13	'12	'11
계	39	1	4	3	0	4	7	2	4	7	7
사고사망자	9	0	1	0	0	1	1	0	1	3	2
사고부상자	30	1	3	3	0	3	6	2	3	4	5



※ 에어재킷(Air jacket)

선박용 블록의 내부와 같은 공간에서 용접·용단 등의 작업시 작업자의 작업복 안으로 시원한 공기(Air)를 공급하여 더위를 식히기 위한 것으로써 재킷, 호스, 플러그 등으로 구성되어 있으며, 매니폴드*의 커플링에 플러그를 연결하여 공기를 공급받는 구조를 말한다.

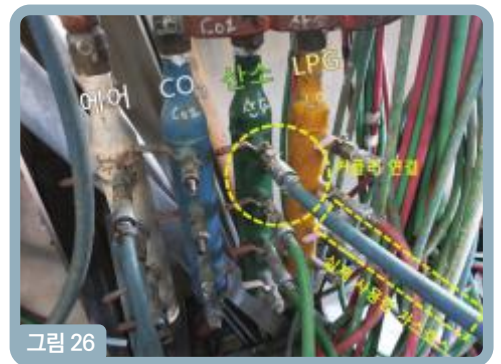
* 매니폴드(분기관): 가스 또는 액체를 분배하는 다기관으로 된 장치, 각각의 연결부분은 커플러(암)로 구성되어 있음

30도가 넘나드는 무더운 한여름날 A씨는 숨이 턱턱 막히는 열기를 참아가며 용접작업을 하였다.

점심식사를 마치고 더위를 식히기 위해 에어재킷의 접속구에 산소공급용 매니폴드를 연결하고 에어재킷을 착용 후 용접작업을 재개하였다.

작업을 하던 중 용접 불티가 에어재킷에 튀면서 화재가 발생하였고 A씨는 작업복에 불이 붙은 채 산소밸브를 잠그기 위해 매니폴드로 이동하였다.

매니폴드로 이동하는 상황을 목격한 B씨는 “불이야” 소리를 지르며 A씨가 에어재킷을 벗는 것을 도와주었고 C씨는 매니폴드 근처에 위치한 소화기를 이용하여 작업복과 에어재킷에 붙은 불을 껐다.



[그림 25] 에어 재킷

[그림 26] 산소 매니폴드에 연결된 호스

☞ 산소와 공기는 다르다는 말을 누군가 했더라면...

산소는 일상생활에서 항상 접하고 있는 가스이므로 위험성을 대부분의 근로자가 간과하고 있다. 그래서 공기 대신 산소를 사용해도 되겠지? 라는 생각으로 오용하여 사고가 나는 경우가 적지 않다.

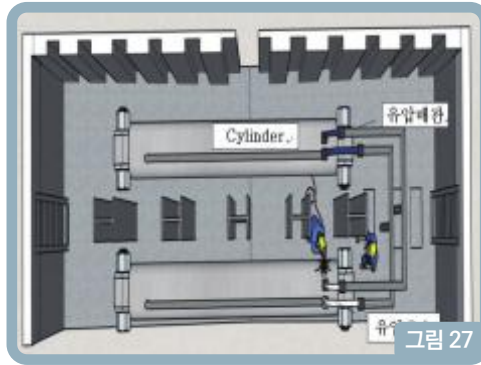
산소가 대기 중에 고농도로 존재하는 경우 화재 가능성이 급격하게 증가한다. 이러한 위험성에 대해 대부분의 근로자는 정확히 알지 못하므로 산소의 위험성에 대한 교육을 통해 더 이상 동종 재해가 발생하지 않도록 할 필요가 있다.



A씨와 B씨는 어느 날과 같이 작업 장소에 출근하여 바지선에 용접장비를 옮겼다. 갑판 위에 산소통, LPG통을 놓고 호스를 연결한 후 산소절단기를 유압실린더실 내부로 갖고 들어가 유압호스 교체작업을 하였다.

갑자기 ‘핑’하는 소리가 났고 동료근로자 C씨는 유압실린더실로 가던 중 불길의 순간 치솟았다 꺼지는 것을 보았다. 이때 A씨와 B씨는 유압실린더실 내부에서 사다리를 타고 외부로 탈출하였다.

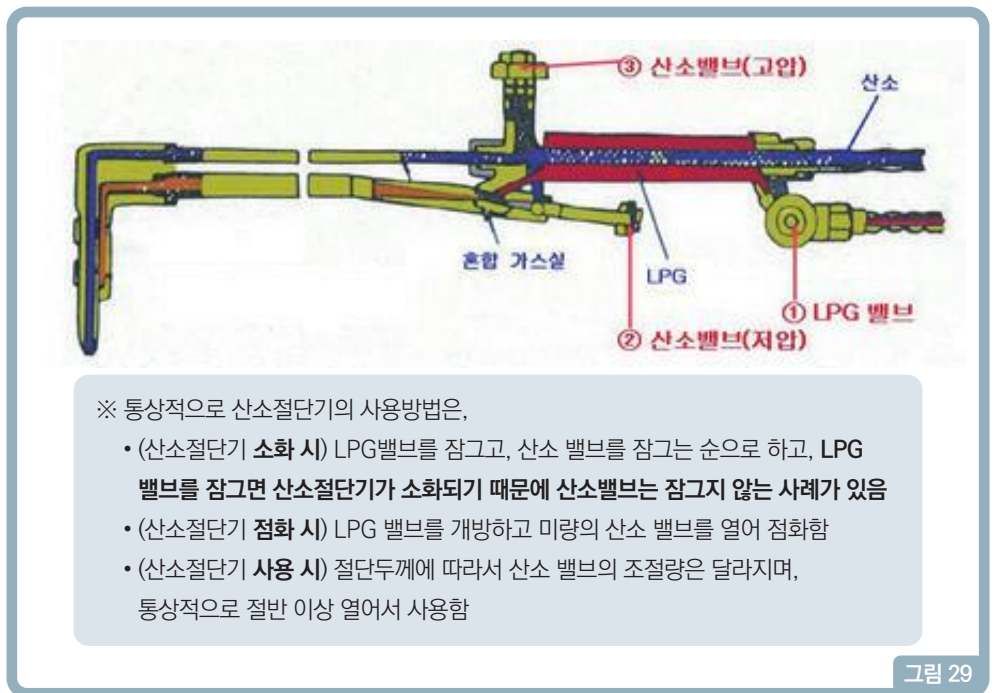
C씨가 유압실린더실 위에서 아래로 내려다보니 산소절단기 호스에서 불이 붙고 있었고 D씨에게 갑판의 LPG와 산소 밸브를 잠궈 달라고 요청하여 밸브를 잠그니 내부에 불이 꺼졌다.



[그림 27] 유압실린더실 내부 단면도
[그림 28] 유압실린더실 입구

현장조사 당시, 산소절단기의 산소밸브(저압)가 일부 열린 상태로 방치되어 있었다.

→ ① LPG밸브 닫힘 ② 산소(저압)밸브 열림 ③ 산소(고압)밸브 닫힘



[그림 29] 산소절단기 구조도

환기가 불충분한 장소에 누출된 산소로 인하여 유압실린더 내부에 고농도의 산소가 축적되었고 점화원이 존재함으로써 급속한 연소 및 화재로 이어졌다. 고농도 산소 분위기에서 가장 직접적으로 근로자의 안전에 영향을 미치는 일반적인 가연성 물질은 작업복으로, 모든 작업복은 고농도 산소 분위기에서 맹렬하게 탄다. 사고 당시 A씨는 작업복이 상당부분 연소되어 거의 나체 상태로 탈출하였다.

산소 누출로 인한 위험성을 알았다면 밸브를 열린 상태로 방치해 두었을까? 눈에 보이지 않고 냄새도 나지 않아 누출이 되는 지도 몰랐을 수도 있다. 산소는 관리를 조금만 소홀히 해도 화재 또는 폭발을 발생시키므로 좀 더 깊게 지식을 습득하고 취급하는 것이 중요하다.

[표 5] 고농도 산소분위기에서 화재·폭발 사고사례

연월	재해개요	피해상황
'19. 06.	산소 절단기로 유압호스 교체 작업중 산소과잉으로 추정되는 화재·폭발 발생	사망1명, 부상1명
'19. 01.	기화된 산소가 존재하는 바닥에 베어링이 떨어진 충격으로 폭발	사망1명
'13. 09.	산소밸브가 열린 상태에서 휴대용 연삭기로 배관 절단 작업중 화재	사망1명
'13. 04.	산소 밸브가 열린 상태에서 히팅토치를 점화하는 순간 화재 발생	사망1명
'12. 01.	탱크내부에 통풍 또는 환기를 위하여 산소를 주입하면서 용접작업중 화재	사망1명
'09. 07.	산소배관 절단 작업중 메인 배관에서 방출되는 산소에 의해 화재 발생	사망1명
'09. 07.	산소가 누출되는 상태에서 산소 절단기로 절단 작업중 화재	사망1명, 부상1명



04 의료용 산소도 예외는 아니다

**'산소마스크 화재'
수술보다 큰 화상,
사망까지**

[MBC 보도, '16.4.23]

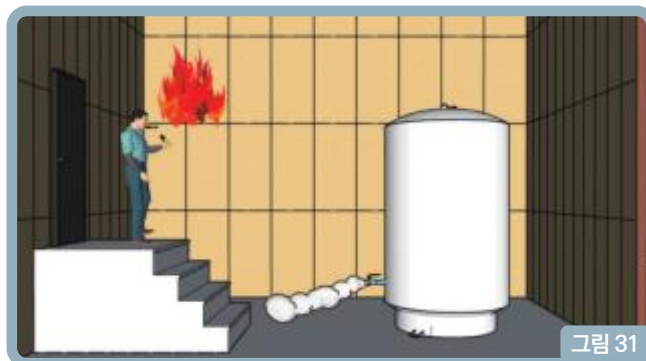
수술할 때 보통 환자에게 씌우는 산소마스크에서 새어나온 산소 때문에 불이 나는 경우가 적지 않다고 한다. '13년 미국에서 수술실 화재로 89세의 노인이 사망을 했는데, 마스크에서 새어나온 산소가 지혈기 같은 전기 장치들에 의해 착화가 된 것이다.



[그림 30] 산소마스크 화재 실험

수술 거즈와 소독용 알코올 등과 반응하면 더욱 맹렬히 타오를 수 있는데, 미국에서 수술실 화재사고는 연간 650건에 달한다고 한다. '20년 5월에는 러시아 상트페테르부르크의 '성 게오르기 병원'에서 산소마스크에서 시작된 것으로 보이는 화재로 인해 코로나19 환자 5명이 사망하기도 했다.

우리나라에서도 '08년 OO병원 반지하 형태의 액체산소저장소에서 산소탱크에 액체산소를 충전 후 압력 조절을 위해 산소를 방출시킨 다음 압력을 재조정하기 위해 담배를 피우면서 계단을 내려가다 담뱃불에 의해 화재가 발생하여 전신에 화상을 입어 사망한 사고가 있었다.



[그림 31] 담뱃불에 의한 산소화재

‘19년 2명이 사망하고 47명이 부상한 김포 요양병원 화재도 보일러실에 함께 설치되어 있던 의료용 산소저장탱크 조작과 관련이 있다는 소방당국의 발표처럼 국내 의료용 산소와 관련된 사고는 계속 증가하는 추세이다.

의료용 산소 취급 방법

의료용 산소공급기는 산소통(대형탱크, 실린더 등), 산소 투여용 튜브·카테터 등과 결합하여 환자의 호흡을 위해 사용하는 기구이며, 최근에는 산소 충전이 필요 없는 의료용 산소발생기* 보급도 활발해 지고 있다.

* 공기의 대부분을 차지하는 질소를 제거해 산소를 높은 농도(약 90%)로 농축하는 기구. 휴대형의 호흡용 산소 배출 농도는 80% 이상



그림 32



그림 33

[그림 32] 산소발생기(출처: 엔에프)

[그림 33] 휴대용 산소발생기 (출처: 오투케어)

인간의 생명을 위해서는 꼭 필요한 의료용 산소이지만 산업용 산소와 동일한 화재 위험성이 있다는 사실도 분명히 함께 알고 사용해야 유용한 의료 보조수단이 될 수 있다.

대부분의 의료기관에서는 산소 저장탱크를 설치해 안전한 배관을 통해 환자들에게 공급하는 방식이지만 일부 장소가 협소한 경우 기계실 또는 보일러실 등에 설치하여 기계실 내 설비에 묻어 있는 유분과 접촉으로 화재가 발생 위험성이 높은 경우도 많다.

의료기기 제조사에서도 산소를 사용하는 기기 제품설명서에 산소화재 위험성에 대해 자세히 언급을 하고 있다. 따라서 의료종사자들은 해당 제품설명서의 내용을 주의 깊게 살펴보고 주의사항에 따라 설치하고 사용하여야 한다.

예) □□□사의 인큐베이터 사용설명서

- 공기 중에 산소 농도가 높은 경우 직물, 기름 및 기타 가연성 물질이 쉽게 점화되어 불이 크게 번질 수 있습니다.
- 산소를 공급중인 경우 인큐베이터가 설치된 실내에서 성냥 등 모든 점화원을 제거 하십시오
- 인큐베이터나 그 부근에 에테르, 알콜 등의 가연성 약품이 소량이라도 남아 있으면 산소 농도가 높은 환경에서 화재 위험을 초래할 수 있습니다.
- 환기가 적당히 이루어져 인큐베이터 부근에 산소가 축적되지 않도록 하십시오.
- 산소 커넥터에 그리스나 오일이 묻어 있지 않은지 확인하십시오.

안전보건공단의 기술지침(KOSHA GUIDE P-138-2013), 식품의약품안전처 산소공급기 안전매뉴얼에서는 이러한 의료용산소로 인한 화재방지 대책을 자세히 기술하고 있다. 해당 내용들의 요점은 조연성가스로 스스로 탈 수 없는 산소이나 화재 측면에서 관리는 LPG와 같은 가연성가스에 준하여 관리하라는 것이다.

즉, 취급 장소는 항상 환기를 충분히 하고, 점화원 제거와 더불어 오일과 같은 유분도 없애야 한다는 것이다. 특히 지하에 설치된 기계실 등에 보관된 산소는 누출될 경우 별도의 강제 환기 조치 없이는 체류되어 언제든지 화재로 이어질 수 있다는 것을 명심해야 한다.

의료용산소 취급방법

- » 환기를 위한 개구부 면적은 산소 취급 실 바닥면적의 1/100 이상이어야 하고, 대각선으로 서로 반대쪽에 위치하여야 하고, 자연스런 공기 순환을 방해하지 않아야 한다.
- » 자연환기가 가능하지 않을 때 시간당 약 6회의 공기량을 환기할 수 있는 강제 환기 설비를 제공해야 한다.
- » 지하에 있는 실, 용기, 피트, 덕트 및 배수로에 대한 환기를 위해서는 특별한 고려사항이 요구되며, 환기장치가 고장 날 경우에 알릴 수 있는 적절한 경보장치를 설치해야 한다.
- » 산소의 과다 공급 시 산소중독 현상이 발생할 수 있으므로 장시간 사용하지 말아야 한다.
- » 제품 혹은 산소실린더에 오일, 그리스 등의 유지류가 묻어 있을 경우 산소 용기의 폭발 위험이 있으니 반드시 이들을 제거 후 사용해야 한다.
- » 제품은 불꽃이나 담뱃불 등 화기 근처에서 사용할 경우 산소 용기가 폭발할 위험이 있으니 이러한 환경에서는 사용하지 말아야 한다.
- » 안전사고가 발생할 위험이 있으니 산소실린더를 넘어뜨리거나 충격을 가하면 안된다.
- » 통풍이 잘되는 곳에 설치하고, 벽면으로부터 지정된 간격 이상을 유지해야 한다.

중대사고 이슈 리포트

重大事故 Issue Report

