



고압산소 이송배관시 화재·폭발 사고 방지를 위한 산소 취급 설비 안정성 향상에 관한 연구

오상규 · †김상령*

전남대학교 화학공학부 박사과정, *한국산업안전보건공단
(2023년 6월 12일 접수, 2023년 8월 20일 수정, 2023년 9월 13일 채택)

A Study on the Stability Improvement of Oxygen Handling Equipment to Prevent Fire and Explosion Accidents in High-Pressure Oxygen Transport Piping

Sang Kyu Oh · †Sang Ryung Kim*

Dept. Chemical engineering, Chonnam National Univ., Gwangju, 61186, Korea

*Korea Occupational Safety and Health Agency Ulsan, 44429, Korea

(Received June 12, 2023; Revised August 20, 2023; Accepted September 13, 2023)

요약

연소의 3요소 중 대기 중에 상시 존재하는 산소는 고압산소 조건에서는 극미량의 가연물만으로도 화재·폭발이 발생할 수 있으며, 연소속도 역시 상당하여 순식간에 공정 설비 및 배관을 녹이는 등 직접적인 영향을 줄 수 있는 온도까지 상승할 수 있다. 따라서 고압산소 상태에서 발생한 사고는 기타 사고에 비해 큰 피해가 발생하는 경우가 많다. 최근 산소공급 배관에 설치되어 있는 밸브를 조작하던 도중 내부에서 급격한 연소와 함께 파열이 발생하여 폭발로 인한 인명피해가 발생하였는데, 오래된 탄소강 배관인 경우 운전 중 발생한 Particle이 가연물이 되어 사고가 발생할 수 있다. 특히나 산소설비는 고압가스안전관리법에 따라 허가된 시설이고, 산업안전보건법에 의한 제한규정이 없는 상태이기 때문에 이러한 기준 적립이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 사고사례 및 해외기준을 바탕으로 고압 산소 취급 시 안정성 향상을 위한 방법에 대해 검토하고자 한다.

Abstract - Oxygen, which is always present in the atmosphere among the three elements of combustion, can cause fires and explosions with only a very small amount of combustibles under high-pressure oxygen conditions. The burning rate is also significant, and can rise to temperatures that can have a direct impact, such as melting process equipment and piping in an instant. Therefore, accidents that occur under high pressure oxygen often cause more damage than other accidents. Recently, while operating a valve installed in an oxygen supply pipe, rapid combustion and rupture occurred inside, resulting in human casualties due to an explosion. In the case of an old carbon steel pipe, particles generated during operation become combustible and can cause accidents. . In particular, since oxygen facilities are facilities licensed under the High Pressure Gas Safety Management Act and there are no restrictions under the Occupational Safety and Health Act, accumulating these standards is of utmost importance. Therefore, in this study, based on accident cases and overseas standards, methods for improving safety when handling hyperbaric oxygen are reviewed.

Key words : oxygen, carbon steel pipe, particle

†Corresponding author: InSTRUCTOR0321@naver.com
Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

공기의 성분은 질소 78%, 산소 21%, 나머지는 아르곤, 이산화탄소 등으로 이루어져 있다. 다시 말해 공기는 산소가 21% 포함된 여러 기체가 모여 있는 집합을 말하는 것이며, “공기=산소” 의미는 결코 아니다[1].

반도체 산업에 공급되는 Cylinder Filling, 특수가스 용접, 로켓 추진체 등 고순도 산소가 필요한 산업이 발달함에 따라 이에 따른 안전장치 등도 점차 강화되고 있다[2]. 공정 운영 중 산소의 쓰임이 활발해지면서 발생가능한 사고를 예방하기 위하여 BPCS(Basic Process Control System) 및 ESD(Emergency Shutdown System)를 갖추고 있다[3]. 하지만 산화성기체인 고순도 산소의 경우 산소처럼 인식되어 취급 시 위험성 등이 구체적으로 설명되어 있지 않은 경우가 빈번하다. 특히 압력에 따른 사용 재질 측면에서는 기술지원 관점에서 제공하고 있는 KOSHA GUIDE에는 사용·취급 시 주의사항이 표현되어 있으나 산업안전보건법 등 주요 법령에 법적으로 제시되지 않아 개인의 경험, 기존에 사용되는 재질을 안정성 분석 없이 그대로 활용하고 있다. 또한 산소 관련 사고가 꾸준히 발생되고 있어 대형사고 예방 관점에서 어떻게 고순도 취급설비를 운영할 것인가가 계속 대두되고 있다. 따라서 최근에 발생된 고압산소 이송배관 화재·폭발 사고를 검토하여 산소 취급 설비의 안정성 향상을 위해 설계 시 적용되어야 하는 관점, 운영 시 주의사항, 유사 사고 예방대책을 제시하고자 한다.

II. 사고 분석

2.1. 사고개요 및 공정 설명

(주)000 사업장에서 유지보수를 위한 산소 배관 철거 작업을 위하여 노후 배관 내 밸브를 개방하던 도중 배관 내부 Particle 충돌 또는 Particle과 배관의 충돌로 금속 화재가 발생하여 배관이 파열되는 사고가 발생하였다. 해당 사업장에서는 고순도의 산소를 활용하여 불순물을 연소시키는 목적으로 사용하는 공정과 순수한 산소를 적정하게 첨가하여 생산성을 높이는 공정 등에 사용하고 있다.

2.2. 고압산소 이송 배관(탄소강)의 폭발 메커니즘

과잉산소라 하면 산소의 농도가 부피 기준으로 23.5% 이상인 것으로 정의할 수 있다. 이러한 상황에서 산소의 반응성은 발화 및 화재 위험을 상당히 증가시킬 수 있는데, 일반 공기에서 타지 않는 물질까지 산소가 풍부한 환경에서 격렬하게 타오르게 된다. 뿐만 아니라 일반적으로 점화원이 될 수 없는 적은 에너지 역시 고농도 산소 조건에서는 급격한 화재를 일으킬 수 있다. 그리고 일반 공기에서 연소되는 물질은 훨씬 더 뜨거운 화염으로 연소되고 훨씬 더 빠른 속도로 전파될 수 있으므로 이에 대한 대비책이 필요하다.

산소 배관은 운영이 오래된 사업장의 경우 탄소 Particle로 인한 문제를 인지하기 전에 지어진 곳이 많아 대부분 탄소강 재질로 운영되고 있다. 탄소강의 페 라이트는 연소 중에 열방출이 크고 온도가 급격히 상승할 수 있다는 특성이 있어, 화재 시 급격한 확산이

Table 1. Accidents Case

	Date, Country	Damage	Accident details
1	1991yr Japan	2 deaths, 1 injured	During manual hauling of ceramics to the dryer, benzene vapour at a higher oxygen concentration would cause an explosion.
2	2013yr India	1 deaths	ground. Damage was caused to the valve of a cylinder filled up to the pressure of 20 MPa. The force generated by decompressing gas led to ejection of the damaged cylinder valve directly into the employee's stomach, and as an effect his being thrown ca. 6 metres away
3	1996yr Korea	1 injured	During test operation, residual oil between the shut-off valve installed at the rear of the compressor and the strainer exploded due to reaction with oxygen
4	1999yr Korea	1 death, 1 injured	At the gas filling station, the oil and oil mixed in the filling container react with oxygen, causing the oxygen container to explode
5	2009yr Korea	1 death,	A fire broke out while cutting pipes under hyperoxic(low pressure, high concentration oxygen) conditions with a portable grinding machine
6	2014yr Korea	3 death	During the operation of the pressure reducing valve at the oxygen plant, the fat and oil remaining inside the oxygen pipe was ignited by high-pressure oxygen expanded to a pipe fire



Fig. 1. Metal Particle in Oxygen pipe

일어날 수 있다. 이러한 산소 및 탄소강 배관을 취급하는 공정의 화재·폭발 메커니즘은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- ① 고압 구간과 저압 구간의 밸브가 갑작스럽게 열리면 저압 구간의 산소가 급격히 압축되며 단열 압축이 형성
- ② 단열 압축으로 인한 국부적 온도 상승
- ③ 압축 시 탄소배관의 금속 녹이 배관 벽에 마찰하고, Elbow 등 배관 부속 설비가 충격을 가중
- ④ 순간적으로 점화가 발생하여 고농도 산소 상태에서 급격히 확대

2.3. 사고 사례

국내·외 고순도 산소 취급으로 인한 사고 사례를 Table 1에 정리하였다[1][4][5]. 단순 고장으로 운영상의 문제만 있는 경우도 있었지만, 계측기기의 오작동을 시작으로 여러 사건이 연결되어 중대재해까지 발생한 사건도 있었다. 이는 계측기기가 설계 관점에서의 적정 수위 확보뿐 아니라 안전관점에서의 화재·폭발·누출 예방을 위해서도 충분히 고려되어야 함을 설명하고 있다.

그밖에 국내에서 발생한 사고와 아주 유사한 사고가 해외에 발생하여 이를 소개하자면, 사고가 발생한 배관은 탄소강으로 이루어져 있는데, 산소의 이송압력이 높고, 선속이 빠르며, 탄소강관이 오래되었을 경우 금속 Particle이 발생할 수 있고 이것이 가연물로 사용되었을 수 있다[6]. 이를 Fig. 1에 제시하였다. 고순도 산소상태에서는 일반 상태에서보다 연소속도가 급속히 상승되어 화재가 발생하면 소화가 매우 어렵

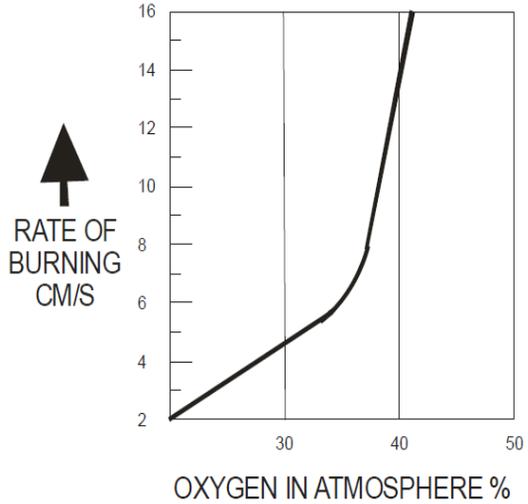


Fig. 2. Reactivity for fire exposed cotton in increasing oxygen levels[7]

게 되고 폭발로 진행될 가능성이 매우 높다. Fig. 2에 산소농도에 따른 연소속도를 제시하였다.

III. 사고원인 추정

3.1. 배관 Particle의 발생 가능성

앞에 설명한 원인에 따라 배관 Particle이 발생 가능하다. 단, 빠른 선속으로 관내에서 떨어진 Particle은 산화되기 전이라 점화원으로 적용이 가능하지만, 부식생성된 Particle의 산화물은 가연성이 없어 충돌 시 점화원으로 작용하게 된다. 고순도 산소상태에서는 일반 상태에서보다 연소속도가 급속히 상승되어 화재가 발생하면 소화가 매우 어렵게 되고 폭발로 진행될 가능성이 매우 높다. Fig. 2에 산소농도에 따른 연소속도를 제시하였다.

화재의 3요소는 가연물, 산소공급원, 점화원인데 노후 탄소배관에서 확인되는 금속 Particle은 가연물과 점화원의 역할을 둘 다 할 수 있다. 즉, 미세한 금속 Particle이 가연성물질의 역할을 하며, 고압의 산소 분위기에서 곡선 벽면, 밸브 등과 충돌 시 발생한 미세한 스파크가 점화원이 되는 것이다. Table 2는 유럽산업가스협회(EIGA)에서 제시하는 대표적인 잠재적 점화원인데, 여기에서도 Particle Impact와 관련된 내용이 포함되어 있음을 알 수 있다.

3.2. 고압산소에 따른 압력에 따른 적정 재질 사용 미흡

고압 산소 배관은 근본적으로 스테인리스 스틸 등

Table 2. Potential ignition mechanisms in gaseous oxygen piping system

Ignition mechanisms	Conditions	Contributing factors
Particle impact	<ul style="list-style-type: none"> • Particle(s) present • Impact point • Flammable targets related to operating conditions 	<ul style="list-style-type: none"> • Density, quantity, and composition of particles present • Impact point in the flow path of the particle; ignition enhanced as angle approaches perpendicular • High pressure drop
Adiabatic compression	<ul style="list-style-type: none"> • Rapid pressurisation • Exposed non-metal or contamination close to the end • High pressure ratio 	<ul style="list-style-type: none"> • Quick-opening valve • Volume of gas pressurised • Function of final pressure, initial temperature, and pressure ratio, Low AIT of non-metals can lead to ignition at pressure greater than 10 bar (145 psi)
Promoted ignition/kindling chain	<ul style="list-style-type: none"> • Ignition mechanism present and active • Flammable materials to kindle or propagate 	<ul style="list-style-type: none"> • Usually non-metals • Ignition and combustion of a flammable material igniting a less flammable material
Mechanical friction	<ul style="list-style-type: none"> • Two or more rubbing surfaces • Relative motion • Mechanical load • Galling 	<ul style="list-style-type: none"> • High speed and/or high load on rubbing surfaces • More severe with aluminium alloys • High rotational velocity or high oscillation/vibration frequency under normal load
Mechanical impact	<ul style="list-style-type: none"> • Single or repeated impact loading • Non-metal or metal at point of impact 	<ul style="list-style-type: none"> • Porous material (exposed to liquid oxygen in most cases) • Quick closing valve • Chattering check or relief valve

피복화되어 Particle이 발생하지 않는 재질을 사용하는 것이 바람직하다. KOSHA GUIDE(P-170-2021) 산소 배관 및 배관설비에 관한 기술지침에서는 탄소배관으로 적용 가능한 압력별 속도를 제시하였는데, 이를 Fig. 3에 나타내었다[8].

사고가 발생한 배관의 경우 주 배관에서 분산되는 유량을 명확히 파악할 수 없어 유량을 단면적으로 나누어 계산할 수 있는 객관적 근거는 부족하다. 일반적으로 회사 내 운전되는 산소의 운전압력은 2.0 MPa 미만이므로 허용가능한 선속도는 30 m/s 이하가 된다. 또한 실제적으로 유수의 설계회사 매뉴얼에는 압력강하의 문제로 그 이하로 선속도를 규정하고 있다. 해당 사고 역시 설계자체는 해당 기준을 충분히 만족했으리라 추정된다. 그러나 중간 중간 유지보수를 위한 밸브를 개방하거나 컨트롤 밸브로 조절하는 경우 고순도 산소가 밸브를 지날 때 밸브 개도에 의하여 압력강하가 발생하고 베르누이 방정식에 의하여 속도가 순간적으로 상승하여 Fig. 3의 기준을 초과할 가능성이 충분히 존재한다. 그리고 이러한 공정운전이 오래 지속될 경우 급속 Particle이 발생할 수 있게 된다.

3.3. 밸브 개방 시 균압 조치 소홀

사용처가 다변화되어 있는 산소공정의 경우 메인

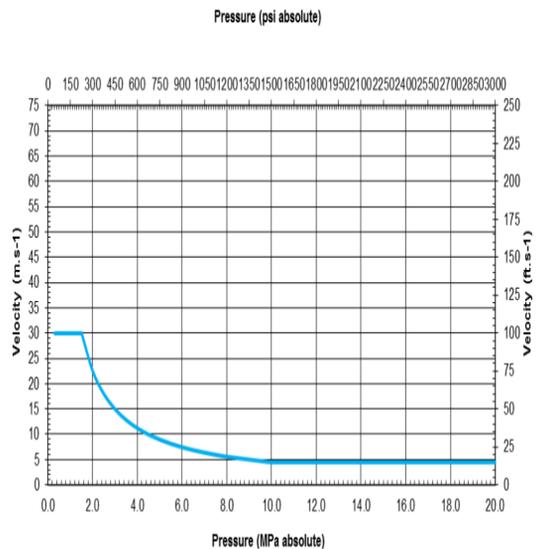


Fig. 3. Impingement velocity curve

헤더에서 밸브를 통하여 분기배관으로 공급하게 된다. 유지보수 후 재공급 또는 신규설비에 연결 등 고순도 산소가 없었던 배관에 밸브를 개방하여 산소를 공

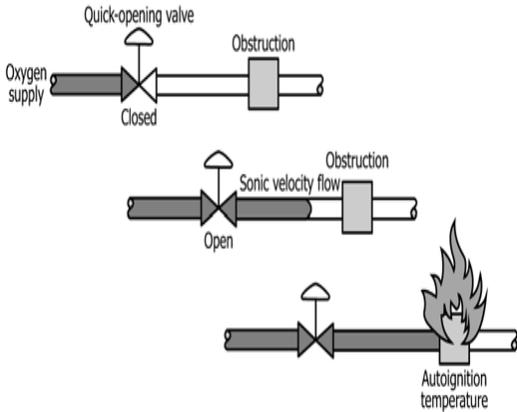


Fig. 4. Adiabatic compression can occur when oxygen under high pressure

급하려고 할 때는 배관 내에 인화성 물질, Particle 등이 물질로 인한 화재·폭발을 예방하고, 순간적인 단열 압축으로 인한 점화원 발생을 예방하고자 분기밸브 전·후단에 천천히 고온도 산소를 흘리는 균압배관을 설치한다. 그러나 사고 공정에서는 밸브의 순간적인 조작으로 선속이 빠르게 되었고, 이로 인한 난류흐름이 발생되어 내부 Particle끼리의 충돌을 유발한 것으로 판단된다. 균압 배관이 미설치된 경우에는 밸브의 급격한 개방 시 음속까지 도달하게 되어 단열압축으로 인한 화재가 발생할 수 있게 되는데 관련 그림을 Fig. 4에 제시하였다[9].

IV. 사고 예방대책

4.1. Particle이 발생하지 않는 재질 변경

일반적으로 공장에서 사용되는 배관 재질, 밸브 재질은 탄소강 또는 스테인리스강으로 구분할 수 있다. 그 이상의 재질도 유체의 특성, 운전 압력, 부식의 정도 등으로 구분할 수 있지만 산소를 취급하는 공정에서는 일반적으로 2 MPa 이내에서 운전되므로 높은 그레이드의 재질은 운전 최적화 측면에서는 적합하지 않다. 해당 사고는 노후화된 탄소강에서 Particle에 의해 발생하였으므로 적합한 조건을 파악하여 스테인리스강으로 선정하는 것이 바람직하다. 이를 Table 3에 제시하였다[6].

2.0 MPa 정도로 운영되기 때문에 스테인리스강을 적용했을 경우에는 6.35 mm 최소두께를 가지는 배관을 선정하도록 한다. 추가적으로 KOSHA GUIDE “화학설비의 부식 위험성평가에 관한 기술지침”을 참고하여 손상메커니즘을 확인하고, 관리하여 설비의 설

Table 3. Table of exemption pressure and minimum thicknesses

Engineering alloys	Minimum thickness	Exemption pressure
304, 304L, 316, 316L, 321, 347	3.18 mm	1.38 MPa
304, 304L, 316, 316L, 321, 347	6.35 mm	2.58 MPa

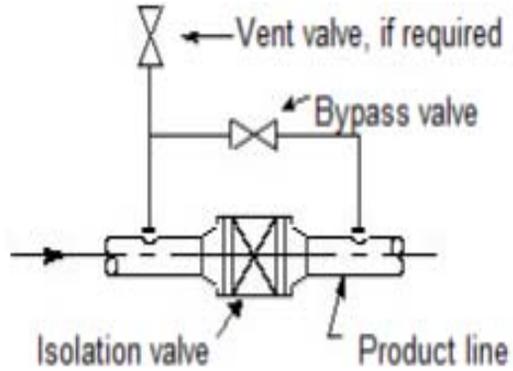


Fig. 5. Bypass installation

비의 건정성을 유지하도록 한다.

4.2. 균압 배관의 적절한 설치 및 활용

Fig. 4와 같이 균압 배관이 없는 경우 급격한 밸브 개방으로 인해 단열압축이 발생되어 화재·폭발 우려가 있기 때문에 균압 배관을 활용하여 동압을 맞춘 뒤 주 밸브를 개방하도록 한다. 균압 배관의 적절한 설치 및 사용을 위해서는 4가지 조건이 있는데,

- ① 균압 배관도 금속 Particle이 발생할 수 있으므로 이를 고려한 재질 선정
- ② 균압 배관 지름과 주배관 지름의 비는 1:4를 초과하지 않고, 최대 3 inch를 초과하지 않을 것
- ③ 균압이 되었는지 확인이 가능하도록 균압 배관 전·후단에 압력계이지 등 압력 확인 장치를 설

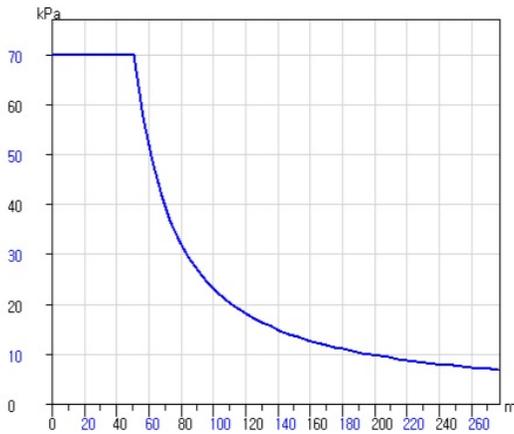


Fig. 6. Consequence analysis about Oxygen

치할 것

- ④ 균압 배관이 하단부에 설치될 경우 중력에 의해 이물질이 축적될 수 있으므로 상단부 또는 측면부에 설치할 것

으로 정리할 수 있다. 균압 배관의 기본적인 형태를 Fig. 5에 제시하였다[6].

4.3. 밸브 스테이션 주변에 방호벽 설치

본질적인 대책이 될 수는 없지만 방호벽을 설치하고 해당 벽 밖에서 밸브를 조절할 수 있도록 제작하여 운영하도록 한다. 즉, 밸브를 구동하는 밸브 스테이션을 방호벽 밖으로 만드는 것이다. 아직까지 국내법에 고순도 산소 취급 시 방호벽 설치에 관한 기준은 명확히 없으나, 정량적 위험성 평가를 바탕으로 방호벽까지 도달하는 압력을 추정하여 해당 압력에서 견딜 수 있도록 조치하도록 한다. 실제 화재에 영향을 미친 배관길이를 추정할 순 없지만 사고 후 중지된 이격거리에 여유율을 두어 200 mm 직경에 30 m 배관을 물리적 폭발로 가정하였을 경우 피해범위를 Fig. 6에 제시하였는데 순간적으로 70 KPa의 압력이 발생하는 것으로 Simulation 되었다. KOSHA GUIDE(D-65-2018) 방호구조의 설계 및 설치에 관한 기술지침에는 폭발이 발생하였을 경우 20 ms 동안에 70 KPa 및 100 ms 동안에 20 KPa의 압력이 견딜 수 있는 구조로 설계되도록 권고하는 만큼 이를 견딜 수 있는 두께 이상으로 방호벽을 설치하도록 한다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 산소배관 철거 작업을 위하여 배관

내 밸브를 개방 중 배관 내부에서 연소반응이 시작되어 배관이 파열되는 사고를 바탕으로 고순도 산소공급 배관의 위험성 및 유럽산업가스협회(EIGA) 및 아시아산업가스협회(AIGA)에서 제시하는 안전한 취급 방법, 기준 등에 대해 알아보았다. 연구결과 탄소강과 같은 배관은 선속이 적정속도를 유지한다고 해도 오랜 시간이 지나게 되면 금속 Particle이 발생하여 가연물이 될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 고순도 산소환경에서는 연소 속도가 급격히 증가하기 때문에 화재에서 폭연·폭굉으로 발달이 빠르다는 것을 알 수 있었다. 이러한 사고를 예방하기 위하여 아래와 같은 사항이 검토되어야 한다.

① Particle이 발생하지 않는 재질로의 변경이 필요하다. 운전 압력이 2.0 MPa 정도면 스테인리스강으로 적합하기 때문에 재질 변경이 반드시 되어야 한다. 단, 고순도 산소의 공급은 공장운전에서 반드시 필요한 사항이므로 유지보수 기간에 이를 전면적으로 개선할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 사업장에서는 이를 점진적으로 계획을 세워 단계별로 재질 변경이 될 수 있도록 한다.

② 균압 배관의 적절한 설치 및 사용을 통하여 순간적으로 단열압축이 발생하지 않도록 한다. 또한 하단부에 설치될 경우 중력으로 인해 이물질이 발생되어 필요시 제 역할을 못하므로 주 배관의 상단부 또는 측면부에서 연결하도록 한다.

③ 밸브를 구동하는 밸브 스테이션을 지정하여 해당 주변을 방호벽 등으로 설치하도록 한다. 방호벽의 두께 등은 정량적 위험성평가를 통해 도출된 압력을 충분히 견딜 수 있도록 설계한다.

위의 결론 및 제언에 제시한 기준을 고순도 산소 취급공정에 적용한다면 동일 사고 예방에 충분히 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

REFERENCES

- [1] KOSHA-MAJOR ACCIDENTS ISSUE REPORT, *Oxygen is not air. It is dangerous goods.*, KOSHA, (2021)
- [2] Ji, J. K., and Lee, S. G., and Moon, H. M., and Lee, S.H., and Lee, C.H. "Development of O_2 Purifier by Pressure Swing Adsorption Process", *KIGAS*, 8(1), 38-47, (2004)
- [3] KOSHA-CCPS-0806, "Valve cut during gasket cleaning Hydrogen Fluoride Leak Accident", *KOSHA*, (2008)

- [4] BIZENA, K., and SZYMON, P., and MARZENA, P., and MAREK. W., "Fire and Explosion caused by oxygen cylinders", *WIT*, 174(7), 141-148, (2018)
- [5] One Point Lesson "Hyperbaric oxygen transport pipe fire accident", *KOSHA*, (2020)
- [6] EIGA, "Oxygen pipeline and piping systems", *European Industrial gases association*, 9-70 (2020)
- [7] EIGA, "Fire hazard of oxygen and oxygen-enriched atmospheres", *European Industrial gases association*, 2-15 (2018)
- [8] KOSHA GUIDE P-170, "Technical instructions for the oxygen piping and piping equipment", *KOSHA*, (2021)
- [9] ASTM G128/G128M-15 "Standard guide for control of hazard and risks in oxygen enriched systems", (2014)
- [10] KOSHA GUIDE P-138, "Technical instructions for fire hazards and prevention measures in oxygen-rich atmosphere", *KOSHA*, (2013)
- [11] KOSHA GUIDE P-32, "Safety technical guidelines for oxygen supply facilities", *KOSHA*, (2012)