

밀폐공간에서 스마트 안전기술 적용 사례 연구

정태희 · 소한섭 · 서경득 · 진정일 · 박교식*

송실대학교 안전·보건융합 공학과

Case study on Smart Safety Technology Application To Confined Space

Tae-hoi Jung · Han-sub So · Kyeong-deuk Seo · Jeong-il Jin · Kyo-shik Park*

Department of Safety and Health convergence Engineering, Soongsil University

ABSTRACT

Objectives: The utility of the system was analyzed by applying the smart safety technology system to the aging pipe rehabilitation facility construction classified as a confined space.

Methods: Smart safety management system was applied to a site where the aging pipe rehabilitation work was in progress. The working environment was measured for 25 days, and the toxic gas saturation was analyzed according to the working time and working place.

Results: Based on the measured results, two characteristic environmental changes in the confined space were confirmed. First, when working inside an aging pipe, the tendency of carbon dioxide saturation increases with working time and the number of workers. Second, oxygen decreases when working in a space away from the entrance.

Conclusions: Various applications of smart safety technology have been confirmed based on the measured data, and this is expected to be useful for environmental characteristic analysis and safety management when applied to a confined space composed with various conditions in the future.

Key words: confined space, site application, smart safety technology

1. 연구배경

밀폐공간은 근로자가 작업을 수행하는 작업환경 내에서 환기가 불충분한 상태에서 산소가 부족하거나, 유해가스로 인한 질식 등 건강장애와 인화성 물질에 의한 폭발이나 화재 등의 위험이 있는 장소¹⁾를 말한다. 안전보건공단의 밀폐공간 관련 연구^{2,3)}에서는 지난 10년간(2010년~2019년) 밀폐공간에서 발생한 재해 현황의 경우 표 1과 같으며 총 312명의 재해자 중에서 166명이 사망하여, 사망률이 약 53%로 일반재해 사망률 1.2%에 비해 상대적으로 매우 높은 치명율을 가진 재해라는 것을 확인할 수 있다.

건설현장의 밀폐공간은 여러 가지 이유로 환기가 어려워 산소결핍과 유해가스로부터 위험에 노출될 경우가 상당하다. 이러한 밀폐공간에서 작업 시 질식 재해 및 화재폭발 등의 사고로 이어질 가능성이 높으나, 사고의 예측이 까다롭고 사고 발생 시 대응이 어려워 대형사고로 이어질 가능성이 높다.


특히, 상수도 시설물에서 도복장된 상수도용 강관은 도심지의 주요 시설물로서 내부 직경이 2 m이하로 매우 협소하고, 수압을 이용하여 배수지에서 공급처로 수도를 보내기 때문에 환기가 되지 않는 폐쇄적인 환경적 특징을 지닌다.


관 갱생 작업에 따라 잔류수 배출 및 제수 밸브실 작


*Corresponding author: Jin-Kyo-shik Park, Tel: 02-828-7342, E-mail: safetyguy@ssu.ac.kr

Room #217 Computer Institute, 369 Sangdo-ro, Dongjak-gu, Seoul, South Korea


Received: November 26, 2021, Revised: December 13, 2021, Accepted: December 28, 2021

 Kyo-shik Park <http://orcid.org/0000-0001-5983-6628>

 Han-sub So <http://orcid.org/0000-0003-4007-025X>

 Jeong-il Jin <http://orcid.org/0000-0001-8380-604X>

 Tae-hoi Jung <http://orcid.org/0000-0002-9167-4961>

 Kyeong-deuk Seo <http://orcid.org/0000-0002-8336-5704>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Suffocation accidents in 10 years

(2010~2019)

Division	Sum	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Occurrences	193	12	17	26	28	27	19	19	14	15	16
Injured	146	9	15	15	24	25	11	19	5	12	11
Dead	166	12	14	20	31	16	14	18	18	14	13
Total	312	21	29	35	55	41	25	23	23	26	24

업 과정에서 기존 폐관의 잔존가스에 의한 질식 사고가 빈번하게 발생하며, 노후화된 상수도관을 갱생하는 시설물 공사의 경우 작업 범위가 수 km에 해당하여, 즉각적으로 작업자를 재해 인자로부터 보호하는 안전보건관리를 진행하는데 어려움이 있다.

이 연구에서는 노후화된 상수도관의 시설공사에 스마트 안전시스템을 적용한 사례를 검토하였다. 해당 시설공사는 밀폐된 공간으로 분류되며, 관 갱생 작업에 따른 공정과 작업공간에서 발생하는 재해인자를 지속적으로 관리해야 하는 특징을 지니고 있다. 또한 기존의 인력으로 진행되는 안전관리 방법과 병행하여, 스마트 안전관

리 시스템을 평가하였다.

II. 스마트 안전관리 시스템 구축

1. 노후화된 상수도관 시설공사

광역 상수도의 노후화에 따른 대규모의 수도사고를 예방하기 위한 기존 상수도관의 관 갱생 시설공사는 공정의 대부분이 외부와 단절된 지하에 매설된 협소한 관 내부에서 작업이 진행된다. 작업공정은 수 km에 해당하는 노후화된 관을 따라 24시간 동안 연속적으로 진행되며, 동일공정이 반복되는 특징을 지니고 있다. 그림 1



1) Drainage and survey



2) Cleaning & removal



3) Surface treatment



4) Painting work

Figure 1. Aged pipe repair work

과 같이 첫 번째로 기존 관 내부의 잔류수 배출과 인력에 의한 검사가 이뤄지며, 이후 관 내부 세정 및 도막 관련 작업공정과 도장을 위한 표면처리단계를 거쳐 완료된다.

2. 공종별 위험인자

관 내부 작업시 밀폐공간이라는 특성상 유해(잔존)가스와 산소부족에 의한 작업자의 질식 위험이 있다. 또한 도장작업을 위한 전후처리 작업에서는 기존 광관의 도막제거와 표면처리 및 도장작업에서 장비사용에 따른 과열과 누전과 같은 화재로 발생하는 유해가스에 의한 질식 사고가 발생할 수 있어 관리자 및 작업자의 주의가 요구된다. 밀폐된 관 내부 작업현장은 국내 산업안전 보건기준에 따라 적정공기가 유지되어야 하며 아래와 같은 4대 유해가스의 농도를 지속적으로 관리하여야 한다.

- 1) 산소 농도 : 18% 이상 23.5% 미만
- 2) 황화수소 농도 : 10 ppm 미만
- 3) 일산화탄소 농도 : 30 ppm 미만
- 4) 탄산가스 농도 : 1.5% 미만

3. 스마트 안전관리 시스템

ICT(정보통신기술, information and communications technology)와 IoT(사물인터넷, internet of things) 기술을 접목한 안전관리 시스템은 인력으로 관리할 수

없는 다양한 환경인자에 관한 데이터를 실시간으로 관리 및 공유할 수 있는 기술적 장점을 지니고 있다.

기존 인력에 의한 안전관리 시스템은 작업 범위가 광범위 하거나, 24시간 연속적인 작업이 요구될 경우, 안전관리에 대한 인력 증가 및 실시간 정보전달 과정에서 안전관리 사각지대가 발생할 가능성이 올라간다. 또한, 인력에 의한 데이터 수집 및 전달은 휴먼에러라고 불리는 오차확률을 지니고 있어 안전관리가 요구되는 공간의 환경인자를 양질의 데이터로 지속적으로 수집 및 관리하는데 오차가 발생할 가능성이 높다. 이와 대조적으로 스마트 안전관리 시스템의 경우, 작업자와 작업환경에 대한 영향인자를 실시간으로 계측하고, 관리자가 환경정보를 모니터링하여 양질의 데이터를 관리하는 것이 가능하다.

대표적인 스마트 안전관리 시스템의 핵심기술은 크게 3가지로 분류된다.

첫 번째로, Sensor for Safety는 IoT 환경센서, 화재/연기감지, 안전고리 체결감지와 관련된 안전과 관련된 정보를 실시간으로 수집한다.

두 번째로, Safety Cloud(SaaS)는 안전센서를 통해 수집된 데이터를 분석하여, 클라우드 기반으로 정보를 수집 및 연동하게 하는 플랫폼이다.

세 번째로, 분석/예측 솔루션이 있다. 그림 2와 같이 수집된 정보를 리스크 매트릭스 알고리즘으로 분석하여 그동안 정량적 지표로 사용자에게 제공하기 어려웠던 안전에 대한 정보를 지표로 제공한다.



Figure 2. Risk matrix using smart safety system.

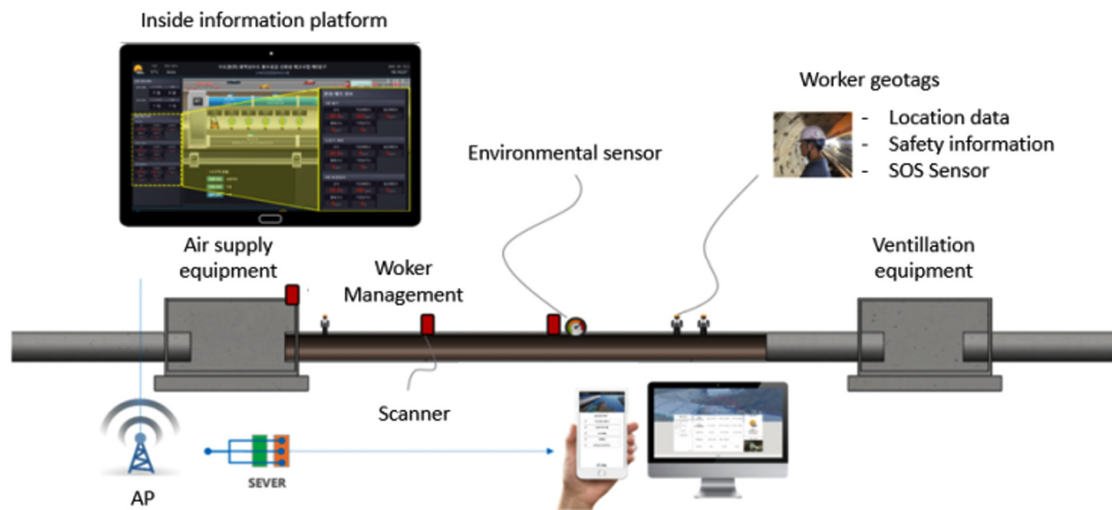


Figure 3. Application of smart safety system to aged pipe repair.

스마트 안전관리 시스템을 적용한 현장의 계측개요 및 정보전달과정을 그림 3에 나타내었다. 관 내부의 환경인자에 대한 정보를 수집하기 위한 환경센서를 배치하였고, 위치태그와 관 내부 위치파악 스캐너를 구축하여 작업자의 실시간 위치정보를 수집하였다. 수집된 정보는 클라우드 기반의 서버로 전달되어 안전관리 시스템을 구축하였다.

환경센서의 경우, 관 내부의 유해가스의 농도를 측정하는 용도로 사용되었으며, 밀폐된 공간에서 발생할 수 있는 유해가스는 작업자의 생명과 밀접한 정보로 실제 작업 위치에서 측정하였다. 실시간으로 수집 및 분석된

유해가스와 관련된 환경정보는 기준치 이상의 데이터가 계속될 경우 자동적으로 작업자에게 경보를 하여, 신속한 대피가 가능하도록 하는 자동화 기능을 지니고 있다. 해당 센서기기는 그림 4에 나타내었으며, 계측범위는 아래와 같다.

- | | |
|--------------|--------------------|
| 1) 산소농도 | : 0 ~ 25% |
| 2) 황화수소 | : 0 ~ 100 ppm |
| 3) 이산화탄소 | : 0 ~ 5000ppm |
| 4) 가연성가스(메탄) | : 300 ~ 10,000 ppm |
| 5) 일산화탄소 | : 0 ~ 1000 ppm |



Figure 4. Environment sensor.



Figure 5. Scanners and geotags.

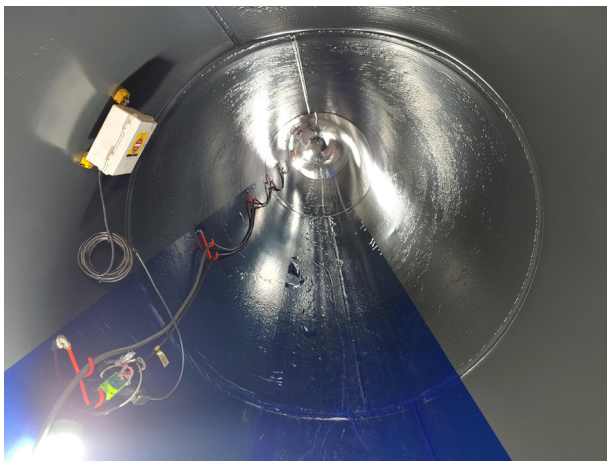


Figure 6. Measurement status.

작업자의 위치를 파악하는 장비의 경우, 그림 5와 같이 태그와 스캐너가 있다. 태그의 경우 작업자의 안전모에 부착되고, 스캐너는 작업공간내부에 설치되어 작업자의 정확한 위치에 대한 정보를 수집한다. 이와 같은 정보를 바탕으로 광범위한 관 내부에서 실시간 위치를 파악할 수 있어 재난 상황 발생시 초기대응 시간을 단축시킬 수 있다. 또한 작업자의 이름, 혈액형, 질병과 질병과 같은 개인적인 정보와 안전 교육 이수과 같은 추가적인 정보를 지니고 있어 관리자가 작업자의 부가적인 정보를 신속하게 확인할 수 있는 장점을 지니고 있다. 실제 관 내부에 설치된 계측장비 현황은 그림 6과 같다.

III. 스마트 안전시스템 계측결과 및 분석

전체 공정에서 25일에 해당하는 스마트 안전관리 시스템의 계측결과를 검토하였다. 전체 공정에서 대표적

인 사례를 도출하여, 그림 7, 8에 나타내었다. 4대 유해가스의 농도를 집중적으로 계측하였으나, 해당 작업환경에서는 O_2 , CO_2 를 제외한 다른 유해가스가 계측되지 않았다. 입구에서의 급기 시스템과 출구 부분에서의 배기 및 집진설비로 인한 환기시스템으로 유해가스의 농도가 포화되기 전에 배출된 것으로 판단되었다. 또한 계측된 데이터를 분석한 결과 산업안전보건 기준치를 초과하는 데이터가 검출되지 않아 밀폐된 공간에서의 안전보건관리가 양호함을 확인할 수 있었다.

산소포화도의 경우 작업자와 계측장비의 위치가 공정이 진행됨에 따라 관 내부로 이동(1일 작업시 10 m ~ 15 m)하게 되는데, 그림 7의 a)와 같이 산소포화도가 19%에서 18.6%로 줄어드는 현상이 계측결과를 통해 확인되었다. 출입구와 작업위치에 따른 산소포화도의 상관관계를 분석하기 위해 계측결과를 선형회귀분석하여 b)와 같은 결과를 도출하였다. 이에 따라 해당공구와 동일한 작업환경 및 공정, 그리고 배기 시스템을 적용할 경우, 출입구로부터 1,160 m ~ 1,740 m에 해당하는 위치에서 작업자가 안전기준을 채우지 못하는 산소포화도에 노출될 수 있음을 확인하였다.

이산화탄소 포화도에 대한 계측결과에서는 전체 공정 25일에서 기준치 1,000 ppm에 근접한 수치가 나타나지 않았다. 이에 따라 해당 작업공간에서 이산화탄소 농도에 대한 안전기준을 확보한 것으로 확인되었다.

유해가스 농도는 작업공정과 사용장비에 따라 변화할 것으로 판단되었으나, 실제 사용된 장비의 경우 내연기관이 아닌 전기로 구동되어, 유해가스 농도에 영향을 끼치지 않은 것으로 확인되었다.

이산화탄소의 경우, 작업시간에 따라 포화도가 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, d)와 같이 7일에 해당하는 데이터를 추출하여 검토한 결과, 오후 6시부터 02시에 해당하는 작업시간에 이산화탄소 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 작업공정표를 통하여 같은 시간대에 작업이 진행된 것으로 확인되었으며, 검출된 이산화탄소 농도 증가는 작업자를 통해 발생된 것으로 판단되었다. 기존 관내 환기량 관련 설계에서는 필요 환기량이 $63 \text{ m}^3/\text{min}$ (작업자 21명)으로 도출되었고, 기타 작업공정을 고려하여 관내부의 허용풍속을 2.0 m/s , 풍량을 $377 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 적용되었다. 실제 계측 데이터에서 부분적으로 증가 및 감소하는 경향이 도출되었지만 허용치 이내의 값이 도출되었고 적용된 환기시스템의 설계가 타당한 것으로 확인되었다.

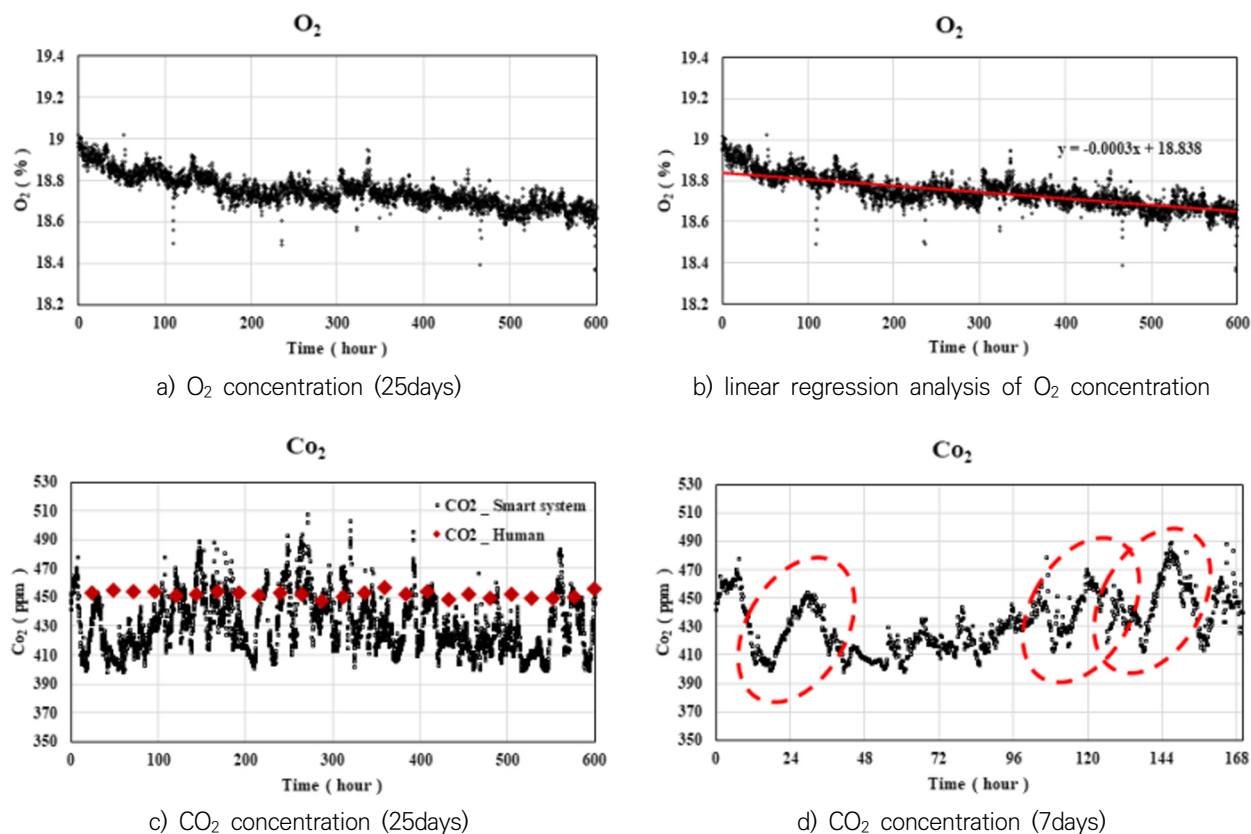


Figure 7. Measurement results of smart safety system

Table 2. Data of smart safety system

Time	O ₂ (%)	CO ₂ (ppm)	Time	O ₂ (%)	CO ₂ (ppm)	Time	O ₂ (%)	CO ₂ (ppm)	Time	O ₂ (%)	CO ₂ (ppm)
1 : 00	19.018	441.938	7 : 00	18.952	464.955	13 : 00	18.906	404.921	19 : 00	18.905	412.088
2 : 00	18.964	457.895	8 : 00	18.953	457.326	14 : 00	18.915	412.830	20 : 00	18.925	413.083
3 : 00	19.005	461.373	9 : 00	18.899	440.754	15 : 00	18.895	404.111	21 : 00	18.882	420.986
4 : 00	18.946	459.361	10 : 00	18.964	433.623	16 : 00	18.945	402.571	22 : 00	18.879	425.288
5 : 00	18.953	462.808	11 : 00	18.882	430.965	17 : 00	18.885	404.881	23 : 00	18.884	428.060
6 : 00	18.898	458.28	12 : 00	18.921	407.406	18 : 00	18.931	400.745	24 : 00	18.905	432.665

IV. 결 론

본 연구에서는 노후화된 상수도관이라는 특정한 밀폐 공간을 대상으로 스마트 안전관리 시스템의 적용성 및 실제 계측된 결과를 검토 및 분석하였다.

전체 공정에 따라 안전관리 시스템의 환경 센서로부터 계측된 데이터를 분석한 결과, 황산수소와 같은 유해가스는 검출되지 않았으며, 이는 해당 공구가 최근까지 사용했던 수도관이어서 유해가스가 발생할 시간적 환경 조건이 없었던 것으로 판단되었다. 그리고 이산화탄소

와 산소 포화도의 농도분석을 통하여 몇몇 특징적인 변화를 확인할 수 있었다.

산소 포화도의 경우, 작업의 진행에 따라 작업위치와 계측장소가 출입구로부터 멀어지게 되는데 이와 관련하여 작업 일수(위치 변화)에 따른 산소의 포화도가 다소 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 해당 데이터를 근거로 선형회귀분석을 실시하여, 그림 7의 b)와 같이 출입구와의 거리에 따른 상관관계식을 도출하였다. 이를 바탕으로 관리자가 다음 공구에 대한 안전관리를 계획할 때 특정 위치에서의 산소농도를 예측할 수 있는 스마트

안전관리 시스템의 가능성을 확인하였다.

해당 작업 공구의 경우 현장 특성상 야간에 작업이 진행되었으며, 동일시간대에서 이산화탄소의 농도 변화를 확인할 수 있었다. 작업자 또한 산소를 소비하고 이산화탄소를 배출하는 주체로 밀폐된 공간에서 이산화탄소의 농도를 증가하게 할 수 있음을 확인하였고, 작업 가능한 인원을 계획하는데 활용 가능한 데이터 분석 범위를 그림 7의 d)와 같이 분석하였다.

일부 구간의 인력계측으로 수집된 이산화탄소의 농도 변화의 경우, 그림 7의 c)와 같이 하루에 측정 가능한 횟수가 한정되어 있어, 작업공간의 대략적인 농도 값을 나타낸 것에 비해 스마트 안전관리 시스템은 작업자와 근접한 곳에서 지속적으로 환경 데이터를 수집하여 이산화탄소의 농도변화를 분석할 수 있는 양질의 계측 데이터를 제공하는 것을 확인하였다.

스마트 안전관리 시스템이 적용된 해당 현장의 사례를 통하여, 해당 밀폐된 공간의 환경적 변화를 분석 및 검토하였다. 연구결과를 통하여 스마트 안전관리 시스템의 사용으로 소수의 인력으로는 확인할 수 없는 작업공간의 다양한 환경변화 정보를 해당 시스템이 실시간으로 정보화하여 작업자와 관리자에게 정보전달 할 수 있음을 확인하였다. 또한 특정장소(노후화된 상수도관 갱생공정)에서 계측된 데이터를 바탕으로 추후 비슷한 밀폐공간에서 발생 가능한 위험 상황을 예측할 수 있는 데이터를 도출하여 스마트 안전관리 시스템의 활용성이 높음을 확인할 수 있었다.

향후 비슷한 환경적 조건을 갖추고 있는 폐관 또는 하수관에 적용할 경우, 해당 연구에서 다루지 못한 추가적인 유해가스에 대한 데이터 수집 및 안전보건관리가 가능할 것으로 판단된다.

References

- Occupational Safety and Health Act, Rule 618-1 of the Occupational Safety and Health Standards
Occupational Safety and Health Research Institute (2018), Research on the use of advanced technology to prevent accidents in confined spaces, Korea Occupational Safety and Health Agency
Choi YJ, Choi H (2018), 'Accident prevention in confined space using IoT technology', Korea Institute of Information and Communication Engineering Vol 22, No. 9:1159~1164
Hong KD, Kim GS, "Improvement plan of the Korean Institute of Gas", KIGAS, 3(1), 48-57, (1999) <https://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.9.1159>
Isermann, R., "Process fault detection based on modeling and estimation methods", Automatica, 20, 387-404, (1984) ISBN (0070517908 9780070517905)
Kwon BH, "A Study on asphyxiation accidents occurred in the confined space, and their prevention," Journal of Korea Safety Management and Science, vol. 18, no. 3, pp.47-54, Sep. 2016 [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(84\)90098-0](https://doi.org/10.1016/0005-1098(84)90098-0)
Reid RC, Prausnitz JM, Sherwood TK., The properties of gases and liquids, 3rd ed., McGraw- Hill, New York, (1997)
Yoo GM, Park HH, Jeong GJ (2009), Statistical analysis of confined space asphyxiation accidents, Journal of the Korean Society for Occupational Health 19(4), 363-369 <https://doi.org/10.12812/ksms.2016.18.3.47>

<저자정보>

정태희(박사과정), 소한섭(박사과정), 서경득(박사과정), 진정일(박사과정), 박교식(교수)