



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

이산화탄소 소화설비에서 누출로 인한
질식사고의 원인분석과 대책에 관한 연구



2021年 8月

釜慶大學校 大學院

消防防災工學協同課程

姜 鎬 汀

工學博士 學位論文

이산화탄소 소화설비에서 누출로 인한
질식사고의 원인분석과 대책에 관한 연구

指導教授：崔 載 旭

이 論文을 工學博士 學位論文으로 提出함



2021年 8月

釜慶大學校 大學院

消防防災工學協同課程

姜 鎬 汀

姜鎬汀의 工學博士 學位論文을 認准함

2021年 8月 27日

The logo of Pukyong National University is a circular emblem. It features a stylized 'P' and 'K' intertwined in the center, with the university's name 'PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY' written in English around the top half and '부경대학교' in Korean around the bottom half.

委員長	工學博士	崔 日 坤	
委 員	工學博士	具 玟 成	
委 員	工學博士	崔 俊 鎬	
委 員	工學博士	鄭 斗 均	
委 員	工學博士	崔 載 旭	

목 차

1. 서 론	1
2. 이산화탄소 소화설비	4
2-1. 소화약제로서 이산화탄소	4
2-2. 이산화탄소 소화설비의 소화원리와 소화효과	7
2-2-1. 이산화탄소 소화설비 소화원리	7
2-2-2. 이산화탄소와 질소의 소화효과 비교	8
2-3. 이산화탄소의 안전을 위한 고려사항	11
2-3-1. 인체에 미치는 영향	11
2-3-2. 이산화탄소의 안전을 위한 법규	12
2-3-3. 설계 · 사양 및 구성요소 승인	14
2-3-4. 설치 및 테스트	16
3. ○○전자(주) 이산화탄소 소화설비 사고 원인분석	17
3-1. 이산화탄소 저장용기 저장 · 누출 조건	17
3-1-1. 이산화탄소 소화설비 구성	17
3-1-2. 이산화탄소 저장용기 저장조건	19
3-2. 이산화탄소 누출	21
3-2-1. 이론적 배경	21
3-2-2. 저장용기에서의 자유방출 순서	22
3-2-3. 용기로부터 누출된 CO ₂ 의 이동과정	25
3-3. 1D Transient 해석 결과	27

3-3-1. 1D Transient 해석 조건	27
3-3-2. 해석을 위한 추출위치	29
3-3-3. 해석 결과	31
3-4. CO ₂ 확산 분석	37
3-4-1. 전산유체역학 적용조건	37
3-4-2. 기하학적인 형상	39
3-4-3. 산소농도 분석	40
3-4-4. 시간에 따른 산소농도 변화	44
3-4-5. 시간에 따른 이산화탄소 농도 변화	50
3-4-6. 벽면 파손부위 분석	57
3-5. 재해발생 원인	61
3-5-1. CO ₂ 소화약제 방출 원인	61
3-5-2. 선택밸브 이탈 원인	63
3-5-2-1. 나사 부분의 파손형태	63
3-5-2-2. O-ring의 설치상태	65
3-5-2-3. 상대플랜지 상태	69
3-5-2-4. 선택밸브 이탈 원인 추정	71
3-5-3. 작업자의 재해발생 원인	72
4. 이산화탄소 소화설비 사용 사업장 실태조사	75
4-1. 실태조사 개요	75
4-2. 실태조사 분석결과	76

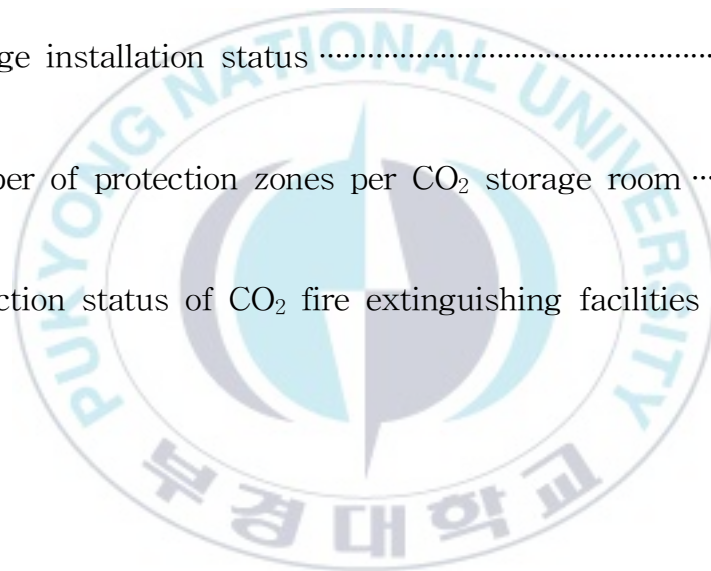
4-2-1. 산업업종 분포	76
4-2-2. 소화약제 저장소 설치현황	79
4-2-3. 방호구역	81
4-2-4. 소화설비 검사	84
4-2-4-1. 검사 주기	86
4-2-5. 소화약제 보유량	88
4-2-6. 저장소 관리 현황	90
4-2-6-1. 저장소의 위치 및 환기시설	90
4-2-6-2. 안전관리(시설 요인)	92
4-2-6-3. 안전관리(행정 요인)	95
4-2-6-4. 위험경보 장치 및 경고표지	97
4-2-5-5. 선택밸브 체결형식	99
5. 이산화탄소 소화설비 질식사고 예방대책	101
6. 결 론	104
참고 문헌	112
Abstract	115

List of Figures

Fig. 1 Typical fire scenario for a CO ₂ system in a tower parking or floor machinery parking facility	15
Fig. 2 Piping and instrument diagram of CO ₂ fire extinguishing system	18
Fig. 3 CO ₂ P-H diagram, (NIST Chemistry web book)	20
Fig. 4 Changes in CO ₂ bottle, P-H diagram criteria	23
Fig. 5 Changes in CO ₂ bottle, P-T diagram criteria	24
Fig. 6 Movement process of CO ₂ leakage from CO ₂ bottle, P-H diagram criteria	26
Fig. 7 Analysis result extraction location	30
Fig. 8 Pressure change analysis results at point A	32
Fig. 9 Pressure change analysis results at point B	33
Fig. 10 Pressure change analysis results at point C	34
Fig. 11 Pressure change analysis results at point D	35

Fig. 12 Mass flow analysis results at point D	36
Fig. 13 Geometry shape	39
Fig. 14 Oxygen concentration variation over time at MP5	41
Fig. 15 Oxygen concentration variation over time at MP6	42
Fig. 16 Oxygen concentration variation over time at MP7	43
Fig. 17 Changes in oxygen concentration after 11 seconds	45
Fig. 18 Changes in oxygen concentration after 30 seconds	46
Fig. 19 Changes in oxygen concentration after 46 seconds	47
Fig. 20 Changes in oxygen concentration after 121 seconds	48
Fig. 21 Changes in oxygen concentration after 302 seconds	49
Fig. 22 Changes in CO ₂ concentration after 1 second	51
Fig. 23 Changes in CO ₂ concentration after 10 seconds	52
Fig. 24 Changes in CO ₂ concentration after 30 seconds	53
Fig. 25 Changes in CO ₂ concentration after 45 seconds	54
Fig. 26 Changes in CO ₂ concentration after 121 seconds	55

Fig. 27 Changes in CO ₂ concentration after 302 seconds	56
Fig. 28 Wall breakage after 1 second	58
Fig. 29 Wall breakage after 10 seconds	59
Fig. 30 Wall breakage after 31 seconds	60
Fig. 31 CO ₂ storage room and MCC electrical room layout plan	74
Fig. 32 Storage installation status	80
Fig. 33 Number of protection zones per CO ₂ storage room	83
Fig. 34 Inspection status of CO ₂ fire extinguishing facilities	85



List of Tables

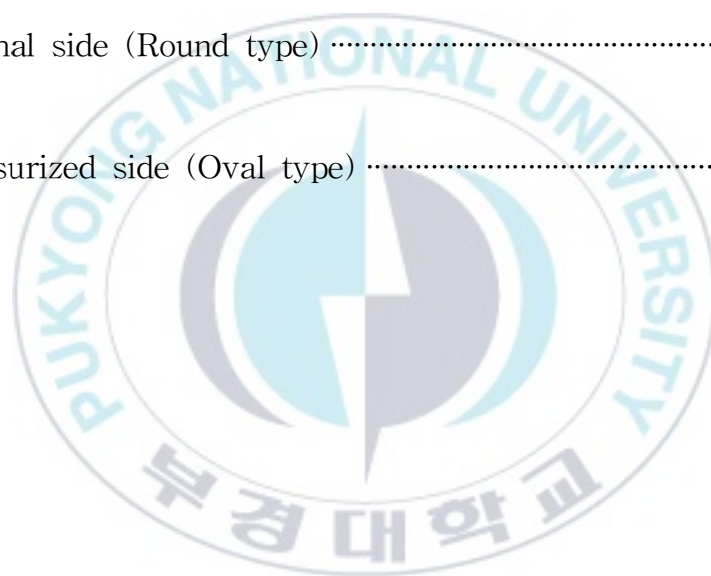
Table 1 Required CO ₂ /air ratios(v/v) and minimum carbon dioxide concentrations to prevent	10
Table 2 1D Transient analytical conditions	28
Table 3 Computational fluid dynamics application conditions	38
Table 4 Results of thread length calculation of standard screw gourmet flanges according to KS	70
Table 5 Regional business site	77
Table 6 Distribution of CO ₂ storage industries	78
Table 7 Number of protection zones per CO ₂ storage room	82
Table 8 Self-inspection cycle	87
Table 9 Amounts of CO ₂ fire extinguishing agent	88
Table 10 Businesses with a lot of fire extinguishing agents	89
Table 11 Storage location and ventilation system	91
Table 12 Safety management of facilities	94

Table 13 Working status of workers in the protected area	96
Table 14 Alert method for workers in the protected area	98
Table 15 Selection valve installation status	100



List of Photos

Photo 1 Locking pin installed on solenoid valve	62
Photo 2 Threads on the crushed valve side	64
Photo 3 O-ring installed away from the O-ring groove shapes of flange side screws	66
Photo 4 Normal side (Round type)	67
Photo 5 Pressurized side (Oval type)	68



1. 서 론

가스계 소화설비인 이산화탄소 소화설비는 수계 소화설비와는 달리 설치비용이 저렴하고 소화 후 대상물이 온전히 남아있으며, 소화약제의 흔적이 없고 청결하여, 화재를 안전하게 진압하는 소화약제로서 일반 화재, 유류화재, 전기화재에 널리 사용되고 있다¹⁾.

특히, 인화성액체 저장실, 전기실, 기계실, 발전실, 변전실, 비행기 격납고, 선박 엔진실, 주차 공간 및 일반 가연물 등 특수한 위험 또는 고가의 시설이 있는 다양한 장소에 많이 사용되고 있다²⁾.

또한, 이산화탄소 소화설비는 산업현장에서 널리 사용되고 있는 소화설비이지만, 밀폐공간에 방출되는 이산화탄소 가스는 작업자 등 사람들이 상주하는 장소에 산소부족으로 인한 질식 피해의 위험을 가지고 있어, 관리와 사용에 주의가 필요한 소화설비이다³⁾.

최근 ○○전자(주) 사무실동 지하층에 설치되어 있는 이산화탄소 소화설비에서 이산화탄소 누출 및 질식사고가 발생하여 사회적인 문제가 되었다. 이 사업장에서 이산화탄소 소화설비가 원인 미상의 이유로 작동하여 계통 라인에 설치된 선택밸브 몸체가 탈락되면서, 이산화탄소 가스가 용기 저장실로 대량 누출되어, 가스 압력에 의해 용기 저장실 벽면 등이 파손되었고, 누출 가스가 인근 통로로 유입되어 작업 중이던 작업자 2명이 질식하여 사망하고 1명이 부상당한 것으로 보도되었다⁴⁾.

이와 같이 이산화탄소 소화설비는 소화약제인 이산화탄소 가스가 누출되었

을 때 질식사사고로 이어질 수 있으므로 가스누출을 사전 예방하고 사후 확인
· 점검이 무엇보다 중요하다.

이산화탄소 소화설비에 의한 질식사고 중 국내에서 발생했던 대표적인 사례는 2014년 3월 ○○전자(주) 연구소 지하 변전실에서 이산화탄소 소화설비 오작동으로 CO₂ 가스가 방출되어 두 사람이 질식사한 사고와 2015년 2월 ○○호텔 보일러실의 노후 된 배관과 벽체 단열재 제거작업을 하던 중 소화설비 작동으로 CO₂ 가스가 방출되어 작업자들이 질식(사망 1명, 부상 7명)한 사고였다⁵⁾.

국제적으로 이산화탄소 소화설비에 의해 발생한 사고는 1975년 이전까지 총 11건의 사고에서 사망 47명, 부상 7명의 인명피해가 발생했고, 1975년 이후부터 이산화탄소 소화설비 관련 사고는 총 51건에, 사망 72명, 부상 145명의 사상자가 발생하였다⁶⁾.

이산화탄소 소화설비와 관련된 연구사례를 살펴보면, 국내에서는 Kim(2015)⁷⁾은 이산화탄소 소화설비 사고사례 분석과 실험을 통한 이산화탄소 소화설비의 안전대책에 관한 연구를 하였고, Lee와 Kang(2015)⁸⁾ 등은 이산화탄소 소화설비의 현장 방출시험 방법론에 관한 연구를 하였으며, Lee(2015)⁹⁾는 최적화 기법을 이용한 이산화탄소 소화설비 설계 프로그램에 관한 연구를 하였다. 외국에서는 Katta 등(2003)¹⁰⁾은 화염 종류별 이산화탄소 소화약제의 소화 특성에 관한 수치적 연구를 하였다.

그리고 이번 사고처럼 이산화탄소 소화설비 누출에 의한 질식 재해를 예방하기 위한 연구로서는 Kang과 Koo(2021)¹¹⁾는 CO₂ 소화설비에서의 질식사고

원인분석을 하였고, Ha와 Seo(2015)¹²⁾는 선박에서의 CO₂ 소화설비와 관련된 질식사고에 대한 원인분석을 하였으며, Jeon(2015)¹³⁾은 CO₂ 소화설비 비화재 방출사례 분석 및 예방대책에 관한 연구를 하였다. 그러나 이번 사고처럼 이산화탄소 소화설비 누출에 의한 질식재해 예방을 위한 연구는 전무하였다.

따라서 본 연구에서는 2018년 8월에 ○○전자(주) 사무실동 지하 1층에 설치된 CO₂ 소화설비 집합관실에서 선택밸브 이탈로 CO₂ 가스가 방출되면서 집합관실로 누출되어 인접한 이동 통로에서 자재정리를 하던 협력업체 작업자 3명 중 2명이 사망하고, 1명이 부상당한 사고의 원인을 분석하고, 이에 대한 대책을 제시하고자 한다.

또한, 이러한 사고를 예방하기 위하여 전국의 사업장에서 보유하고 있는 이산화탄소 소화설비의 저장소 업종 분포, 저장소 설치 추이, 저장소 검사 현황, 소화약제 총량, 저장소 관리현황 등 실태를 조사·분석하여 작업이나 점검 시 발생할 수 있는 질식 재해 예방을 위한 대책을 제시하고자 한다.

2. 이산화탄소 소화설비

2-1. 소화약제로서 이산화탄소

이산화탄소(분자량 44)는 무색, 무취로 비중은 상온, 상압에서 공기(분자량 29)보다 무거운 1.52배로 더 이상 산소와 반응하지 않는 불연성 물질이며, 압축 및 냉각 시 쉽게 액화되고, 더욱 냉각하면 고체화(드라이아이스)되어 보관이 용이한 소화약제이다¹⁴⁾.

소화 효과로는 연소반응이 정지할 때까지 공기 중 산소농도를 낮추는 질식소화와 공기 중의 기화열에 의해 냉각하는 냉각소화 및 비중이 공기보다 무거운 이산화탄소 특성으로 가연물의 내부까지 침투하고 피복하여 소화하는 피복소화 및 자체 분해 잔존물을 생성하지 않는 특성이 있다¹⁵⁾.

이산화탄소 소화약제는 고압가스 저장 용기 속에서 액화시켜 보관하며 자체 증기압이 21 ℃에서 5.8 MPa 정도로 매우 높으므로 다른 가압원의 도움 없이 자체 압력으로도 방사가 가능하고, 방출 시 배관 내를 액상으로 흐르지만, 헤드에서는 기화되어 분사된다. 소화 후에는 잔존물이 남아있지 않으므로 소화약제를 별도로 정리할 필요가 없다¹⁶⁾.

이산화탄소는 대부분의 다른 물질들과 상대적으로 반응하지 않으며 전기적으로 비전도성의 불연성 가스이며, 소화 후 깨끗하게 처리되므로 고가장비나 중요시설의 손실을 최소화할 수 있어 항공기 격납고, 차고와 주차장, 방사성 폐기물 저장시설, 터널, 지정문화재 등에 설치한다¹⁷⁾.

그리고 물을 사용하는 소화설비와는 달리 감전이나 수손피해 등의 문제를

발생시키지 않으므로 사람이 상주하지 않거나 전기를 많이 사용하는 전기실 · 전산실 · 변전실 · 통신실 · 기계실 등에 주로 설치한다.

일반적으로 화재를 제어하고 진압하는 방법은 두 가지로 나눌 수 있다. 물을 기반으로 하는 스프링클러 소화설비, 물분무소화설비, 미분무소화설비 등 수계 소화시스템과 가스를 기반으로 하는 이산화탄소 소화설비, 할론 소화설비, 할로젠화합물 및 불활성기체소화설비 등 가스계 소화시스템으로 구분할 수 있다.

전 세계적으로 이산화탄소 소화설비는 방호 대상물의 손상을 최소화하고 보호할 필요가 있는 컴퓨터실, 습식 화학 벤치, 분진 집진기, 인쇄기, 케이블 트레이, 전기실, 모터 제어실, 페인트 스프레이 부스, 고압 변압기, 원자력 설비, 폐기물 저장시설 등 산업 전반에 걸쳐 일찍부터 폭넓게 사용되어 왔다¹⁸⁾.

미국의 경우에는 소화설비 중 약 20%가 이산화탄소 소화설비로 사용되고 있으며 1920년대와 1960년대 사이에서는 이산화탄소가 유일한 가스계 소화 약제로 사용되었지만, 1960년대부터는 할로젠화합물을 기반으로 한 소화 시스템도 많이 사용되고 있다.

이산화탄소 소화설비는 산업 분야뿐 아니라 국제 해상무역이 활발한 선박이나 선박 관련 시설에도 많이 활용하는 소화 시스템으로, 선박 엔진실, 인화성액체 저장소, 화물 선박의 차량 운송 구역 및 가연성 액체 저장 구역 등에도 사용되고 있다¹⁹⁻²⁰⁾.

그러나 이산화탄소는 방출 시 인명피해가 우려되는 장소인 사람이 상시 근무하는 방재실 및 제어실, 자기 연소성 물질인 니트로셀룰로오스, 셀룰로이

드 제품 등을 저장 또는 취급하는 장소, 반응성 금속류인 나트륨, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 티타늄, 지르코늄 등을 저장 또는 취급하는 장소, 금속 수소화물류를 저장 또는 취급하는 장소에는 설치를 금지하도록 규정하고 있다.



2-2. 이산화탄소 소화설비의 소화원리와 소화효과

2-2-1. 이산화탄소 소화설비 소화원리

이산화탄소에 의한 소화는 산소농도를 15%이하로 낮추는 질식 작용과 이산화탄소 방사 시 고압의 액화가스가 급격히 팽창(온도에 따라 500배 이상 팽창)하면서 순간적으로 온도가 -80°C 까지 저하되고, 배관의 좁은 구멍을 통하여 압축된 기체를 팽창(Throttling process)시키면서 온도가 저하되는 현상으로 상온·상압에서 수소, 네온, 헬륨을 제외한 모든 기체에 적용되는 줄-톰슨 효과(Joule-Thomson effect)를 이용한 냉각 작용으로 소화한다²¹⁾.

질식소화는 이산화탄소 설계농도가 34%에서 75% 사이일 경우 대응하는 산소농도가 14%에서 5% 범위로 낮아지는 점을 이용한 소화 방법이며, 34%를 이산화탄소의 최소설계농도라고 한다. 이산화탄소 최소설계농도 식은 이산화탄소 최소설계농도 34% 이상, 공기 중 산소농도 21%, 가연물에 따른 산소농도(% O_2)로 나타내며,

식(1)에서 이산화탄소 설계농도와 대응되는 산소의 농도를 구하였다.

$$CO_2 \text{ 설계농도}(\%) = \frac{21 - \%O_2}{21} \times 100 \quad (1)$$

반면, 냉각소화는 주로 줄-톰슨 효과를 이용한다. 이때 온도가 저하되는 원리는 분자들이 충돌하여 물체에서 열이 발생하고, 압축상태의 기체 분자들이 서로 간격이 좁아 충돌을 많이 한다. 만일 압축된 기체를 급격히 팽창시키면 분자 간 거리가 멀어져 충돌이 적게 일어나므로 온도가 내려가게 된다.

2-2-2. 이산화탄소와 질소의 소화효과 비교

이산화탄소는 가장 일반적으로 사용되는 불활성가스소화약제이며, 다음으로 질소를 많이 사용한다. 부피 기준으로 이산화탄소는 질소보다 약 2배 효과적이다.

예를 들면, 에탄올 화재의 경우 공기 중 이산화탄소와 질소의 최소 필요 체적비는 각각 0.48과 0.86이다. 그러나 이산화탄소(분자량 44)는 주어진 부피에 대해 질소(분자량 28)보다 1.57배 더 무거우므로 두 기체는 중량 기준으로 거의 동등한 효과를 가진다. 식(2)와 식(3)에서 가스용적 등가물과 중량 등가를 비교하였다.

$$\text{가스용적 등가물}(GVEq) = \frac{N_2 \text{ 부피비}}{CO_2 \text{ 부피비}} = 1.8 \quad (2)$$

$$\text{중량 등가} = \frac{(GVEq) \times N_2 \text{ 분자량}}{CO_2 \text{ 분자량}} = 1.1 \quad (3)$$

다양한 연료가 연소되지 않도록 하는 지점까지 산소농도를 낮추는 데에는 상대적으로 많은 이산화탄소의 양은 필요하므로, 이산화탄소 농도에 의해 인간이 신체상의 영향을 상당히 받을 수 있다.

Table 1은 공기 중 이산화탄소의 최소 요구 비율(v/v), 25 °C에서 여러 가지 증기 연료의 연소를 방지하는 해당 산소농도와 이론적인 최소 이산화탄소 농도 및 여러 종류의 연료에 대한 이산화탄소의 최소 설계농도를 나타내

었으며, 기체나 증기만을 의미하지만, 액체나 고체 상태에도 적용될 수 있다. 이는 액체나 고체도 기화 또는 열분해를 통해 연소되기 때문에 액체나 고체에도 적용될 수 있다. 일반적으로 수소나 이황화탄소 같은 몇 가지 예외를 제외하면 공기 중 산소의 부피를 10% 감소시키면 화재와 폭발이 불가능하게 된다.



Table 1. Required CO₂/air ratios(v/v) and minimum carbon dioxide concentrations to prevent⁶⁾

Vapor Fuels	CO ₂ /air (v/v)	O ₂ Concentration (%)	Theoretical Minimum CO ₂ Concentration (%)	Minimum Design CO ₂ Concentration (%)
Carbon Disulfide	1.59	8.1	60	72
Hydrogen	1.54	8.2	62	75
Ethylene	0.68	12.5	41	49
Ethyl Ether	0.51	13.9	38	46
Ethanol	0.48	14.2	36	43
Propane	0.41	14.9	30	36
Acetone	0.41	14.9	27	34
Hexane	0.40	15.0	29	35
Benzene	0.40	15.0	31	37
Methane	0,33	15.7	25	34

2-3. 이산화탄소의 안전을 위한 고려사항

2-3-1. 인체에 미치는 영향²²⁾

이산화탄소 소화설비의 최소 설계농도(34%) 이상에서 이산화탄소는 사람에게 치명적이지만, 생리 활성 가스이고 낮은 농도(4% 미만)에서 혈액가스의 정상적인 성분이므로 특정 노출 조건에서 이산화탄소의 농도가 낮은 경우에는 유익할 수 있다.

하지만 이산화탄소 농도가 건강에 미치는 영향은 17% 이상의 농도에서 초기 흡입 1분 이내에 통제되고 목적있는 활동의 상실, 의식불명, 경련, 혼수상태 및 사망이 발생하며, 10%에서 15% 사이의 농도에서 이산화탄소는 몇 분 이내에 의식불명, 졸음, 심각한 근육 경련 및 현기증을 일으키는 것으로 나타났다.

7%에서 10% 사이의 농도에서 이산화탄소는 몇 분에서 1시간 이내에 의식불명, 심박수 증가, 현기증, 두통, 시각 및 청각 기능 장애, 정신적 우울증, 호흡곤란 및 땀이 관찰되었다.

4%에서 7% 사이의 농도에서 이산화탄소에 노출되었을 때 가벼운 두통, 가벼운 발한, 청각과 시각 장애, 혈압 증가, 호흡곤란, 정신적인 우울증, 그리고 떨림이 발생할 수 있다.

2-3-2. 이산화탄소의 안전을 위한 법규

국내의 경우에는 이산화탄소 소화설비는 가스계 소화설비로써 ‘화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률’을 적용하고 ‘가스계 소화설비의 성능에 관한 인정기준과 소방기술기준에 관한 규칙을 기준으로 하는 ‘이산화탄소소화설비의 화재안전기준(NFSC 106)’을 따르고 있으며, 화재를 제어하기 위한 다른 시스템과 마찬가지로 국가에서 강제적으로 이산화탄소 소화설비의 설계 · 설치 · 시험 · 유지 및 사용을 관리하고 있다.

‘국가화재안전기준(NFSC)’의 주요 내용을 살펴보면 소화약제 저장용기 등 · 소화약제 · 기동장치 · 제어반 등 · 배관 등 · 선택밸브 · 분사헤드와 분사헤드 설치제외 · 자동식 화재감지기 · 음향경보장치 · 자동폐쇄장치 · 비상전원 · 배출설비 · 과압 배출구 · 설계프로그램 · 안전시설 및 설치 · 유지기준의 특례 등으로 규정하고 있다.

소화설비를 제어하는 권한은 시스템의 위치와 계획된 시나리오 및 시스템 유형에 따라 달라진다.

미국에서는 미국방화협회(National Fire Protection Association; NFPA)가 제정하는 NFC(National Fire Code)를 활용하고 있다. NFPA는 1896년 미국 매사추세츠주 보스턴 근교에서 설립된 비영리 민간 방재기관으로 비록 표준 자체는 법적 구속력을 가지고 있지 않지만, 정부와 지방 당국은 그 표준을 통용되는 소방 법규로 채택하여 시행하고 있으며, 소화설비에 대한 NFPA Code, Standards, Practice에서 설계농도 유지시간 및 배기제어와 방호구역의 과압 방지를 위한 배기와 약제손실을 방지하기 위한 밀봉, 근로자의 인명안

전을 위한 조기경보 및 대피시간, 소화약제와 열분해 생성물의 독성 및 부식 특성과 충격에 의한 냉각 손상 등 가스계 소화설비의 설계 시 고려해야 하는 사항에 대한 기준을 정하고 있다.

그 외에는 ISO(International Standards Organization)가 화재 안전분야에서 국제표준분류인 ICS(International Classification for Standard)의 화재예방과 소방용 기계 · 기구, 화재안전 등 화재안전 관련 분야의 기준을 제정하고 있다.

또한 미국내 선박과 관련된 규정은 미국해안경비대(USCG) 규정과 연방 규정(46 CFR Part 76.15)에서 정하고 있으며, 국제적으로 등록된 선박은 국제해양 기구 중 해양 생명안전을 관할하는 국제 해사기구(IMO : International Maritime Organization)의 SOLAS(International Convention for the Safety of Life at Sea) 규정을 따르고 있다.

육상에 기반을 둔 사업장에서는 미국산업안전보건청(OSHA)이 근로자의 안전을 보장하기 위해 이산화탄소에 대한 노출을 규제하고 있다.

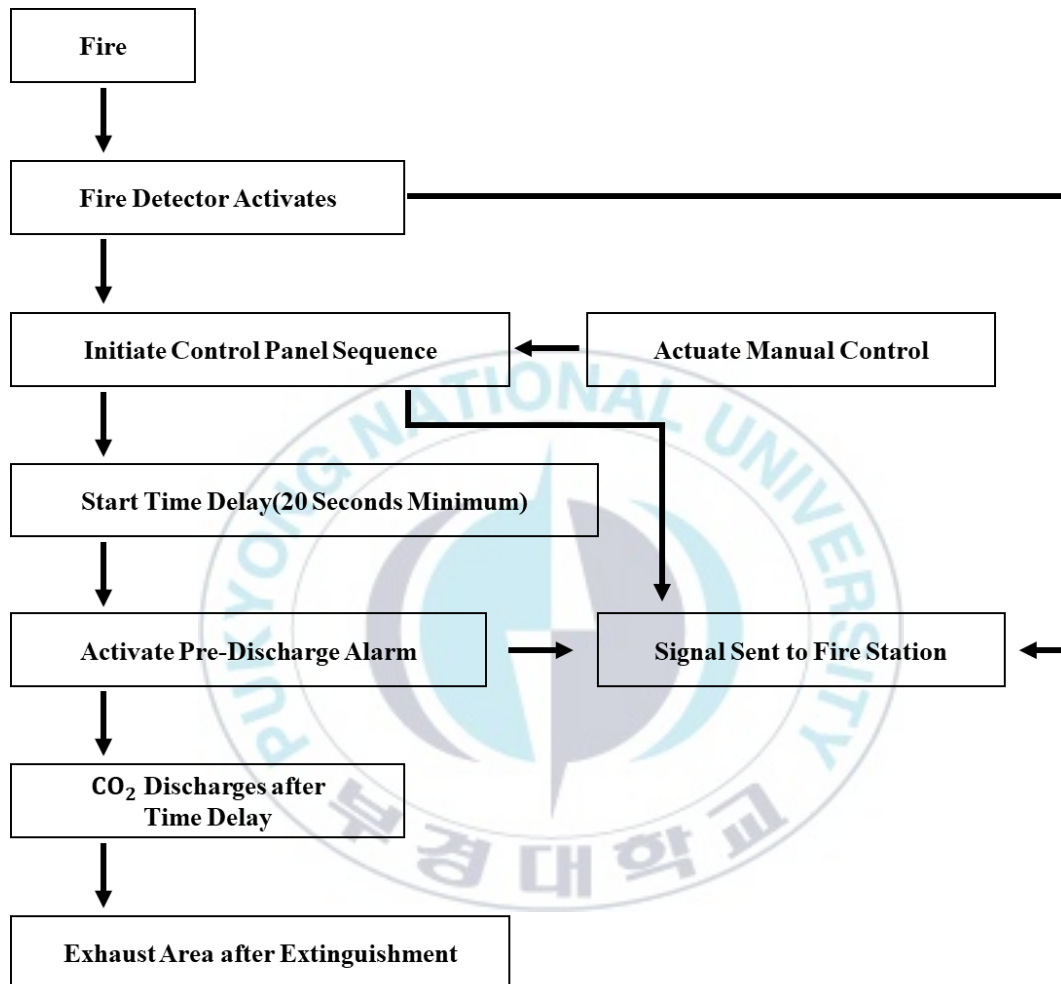
2-3-3. 설계 · 사양 및 구성요소 승인

국내에서 가스계 소화설비를 설계 및 제조하여 승인받을 경우 ‘국가 화재 안전기준(NFSC)’에 따라 관계 기관으로부터 승인받고 설치 후 성능을 확인 받게 된다.

미국에서는 화재진압을 위한 가스계 시스템 승인을 일반적으로 획득하는 과정은 제조자가 Underwriters Laboratory(UL) 및 Factory Mutual(FM)과 같은 기관을 통해 자사의 부품을 목록화하는 것으로 시작한다. 목록 작성 과정 중 일부는 시스템의 도면을 포함하여 시스템의 전체 작동에 대한 설명을 포함하는 지침 및 유지관리 설명서의 개발이다.

이산화탄소 시스템에 대한 사양 또는 계획은 이산화탄소 시스템 설계에 많은 경험이 있고 자격을 갖춘 노련한 사람이 감독하고 당국의 조언을 받아 작성하여 설치를 시작하기 전에 설계서를 당국에 제출하여야 한다.

Fig. 1에서는 타워 주차장과 기계공장의 작업장에서 이산화탄소 소화설비를 설계하기 위한 기본적인 시나리오를 설명하고 있다. 기본적인 개념은 국내의 ‘국가화재안전기준’과 비슷하며 방출 시간, 방출표시등, 시각경보장치 등을 설치하도록 하고 있다.



Source: Ishiyama, 1998

Fig. 1. Typical fire scenario for a CO₂ system in a tower parking or floor machinery parking facility⁶⁾.

2-3-4. 설치 및 테스트

미국의 경우에는 일반적으로 제조업체의 대표자나 설치업자가 이산화탄소 소화설비의 설치를 수행한다. 설치자는 공식적인 인가나 인증을 받지 못하더라도 시스템 구성품의 적절한 설치에 관하여 제조자에 의해 훈련을 받고 설치할 수 있다.

설치가 완료된 소화설비는 관계 당국의 승인 요구 사항을 충족하도록 검사 및 테스트하여야 하며 요구된 사항은 다음과 같다.

1) 소화설비가 둘 이상의 방호구역을 보호하는 경우 배관을 통해 방호구역으로 전체 설계용량의 완전 방출시험이 수행되어야 하며, 설정된 유지 시간(Soaking time) 동안 설계 농도(Design concentration)에 도달되고 유지되는지 확인·점검되어야 한다.

2) 화재를 검출하고 경보 및 작동하는 시스템의 적절한 기능에 필요한 모든 장치의 작동 점검되어야 한다.

3) 이산화탄소 배출 가능성을 경고하는 기기 및 방호구역의 적절한 표시 여부를 확인한다. 또한 경보가 울리면 직원 등 관계자에게 해당 지역을 나오도록 경고하는 표지판이 있어야 한다.

4) 시스템이 규격 및 사양을 만족하고 화재 위험 유형에 적합한지 확인하기 위해 시스템 및 방호구역의 검사를 확인하고 완료한다.

3. ○○전자(주) 이산화탄소 소화설비 사고원인 분석

3-1. 이산화탄소 저장용기 저장 · 누출 조건

3-1-1. 이산화탄소 소화설비 구성

이산화탄소 소화설비는 저장용기 · 기동용기 · 선택밸브 · 니들밸브 등으로 구성되어 있으며, 사고 당시 방호구역 내 설치된 저장용기의 구성은 Fig. 2와 같다. 저장용기는 충전비가 1.5인 고압식의 저장용기이며 총 4단으로 구성되어 있다.

첫 번째 단에서는 고압식 저장용기가 25병 설치되었으며, 둘째 단으로부터 넷째 단까지는 저장용기가 36병씩 저장되어 있었다. 선택밸브에서 가장 먼 저장용기에서의 거리는 약 13 m이며, 집합관에서 선택밸브까지의 배관의 크기는 ND150이었다.

저장용기에서 집합관 사이의 니들밸브(Needle valve)는 ND25이었으며, 사고 당시 선택밸브 12개 중 3개의 선택밸브는 폐쇄된 상태였으며, 나머지 9개만 사용되고 있었다. 선택밸브 9개 중 일부는 ND150, 일부는 ND125였으며 파괴된 선택밸브는 ND125였다.

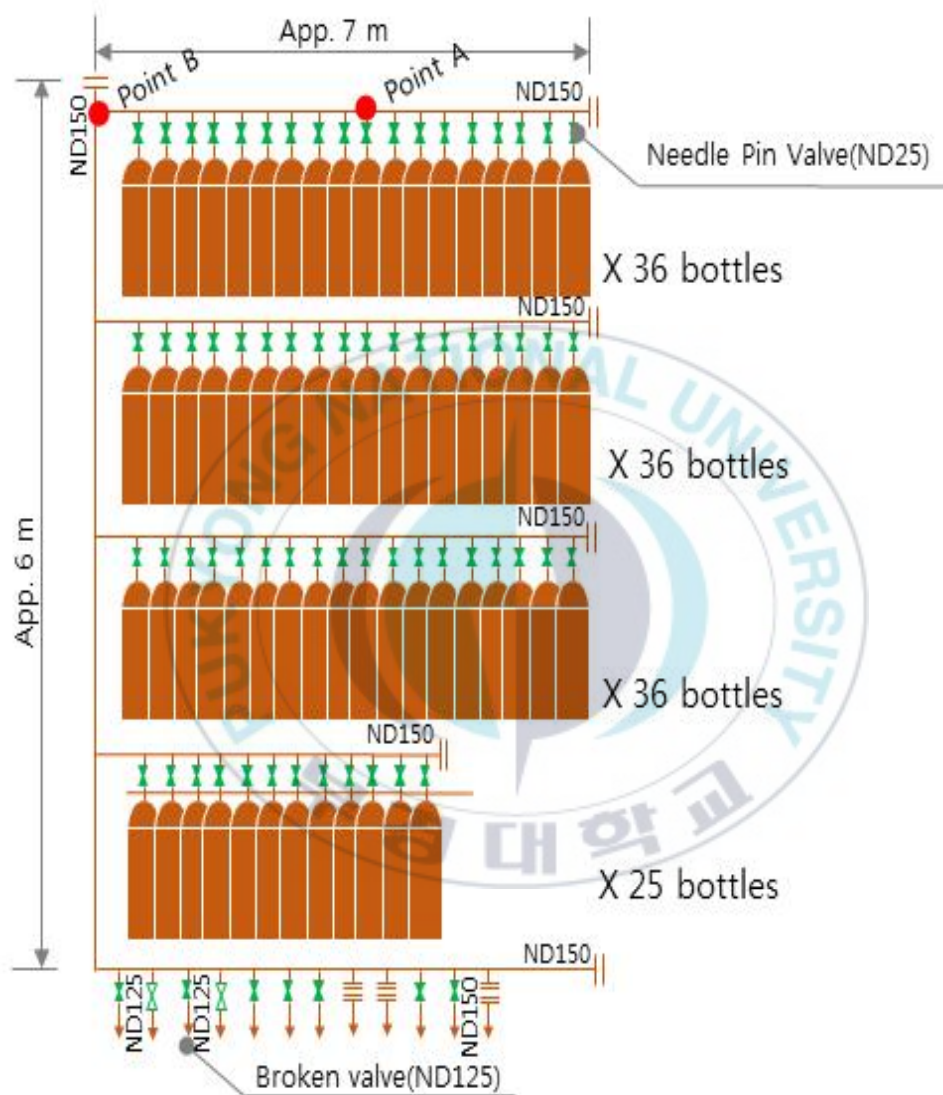


Fig. 2. Piping and instrument diagram of CO₂ fire extinguishing system.

3-1-2. 이산화탄소 저장용기 저장조건

저장된 고압식 이산화탄소 저장용기는 충전비가 1.5로서 용기 용량은 67.5 L이며, 저장량은 45 kg 내외이다. 중량 기준으로 로드 셀(Load cell) 위에서 45 kg 이상 충전하기 때문에 용기마다 충전량이 조금씩 다르며, 정확한 충전량을 산출할 수는 없다. 또한, 시간이 경과 할수록 용기마다 밀폐 정도에 따라 극소량의 이산화탄소가 누출되는 형태이다.

Fig. 3과 같이 압력과 엔탈피와의 관계 곡선(P-H diagram)을 보면 충전시단열팽창으로 인해 20 °C 내외일 경우 5.0 MPa에서 6.0 MPa 사이이다. 그러나 대기 온도 변화에 따라 임계 압력(7.37 MPa) 이상까지 변화될 수 있음을 가정하면, 실내온도 25 °C 기준에서 저장압력은 약 6.4 MPa, 밀도 710.5 kg/m³, 저장량은 47.9 kg 내외로 추정된다.

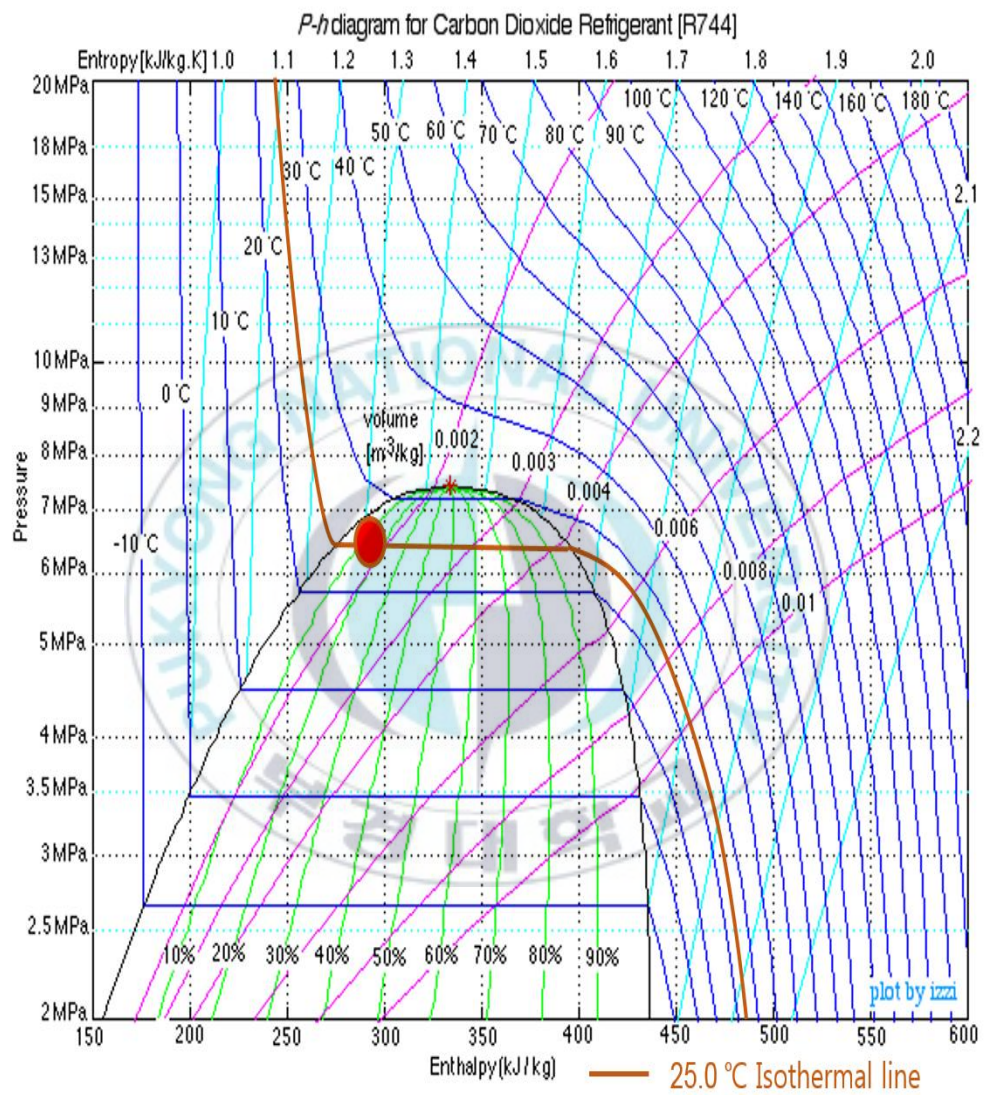


Fig. 3. CO₂ P-H diagram, (NIST Chemistry web book).

3-2. 이산화탄소 누출

3-2-1. 이론적 배경

이산화탄소는 무색 · 무취 · 무독성 가스이며 비중은 1.529, 밀도는 1.976 g/L, 승화점(Sublimation point)은 -78.5°C , 20°C 에서 5 MPa으로 압축하면 무색의 액체가 되며, 임계점은 31.35°C 이다²³⁾.

이산화탄소는 물성 자체가 대기압에서 온도에 따라 기체 및 고체 상태로 존재할 수 있다. 또한 고압 실린더에서 자유 방출되면 압력강하와 더불어 급격한 온도 강하 현상으로 인해 기체 · 고체가 동시에 방출되며, 급격한 압력 변화로 단열팽창에 가까운 조건을 보인다.

주된 소화 효과는 질식 및 냉각소화 효과이다. 즉, 표준설계농도는 34% (산소농도를 21%에서 15%로 낮춤)이며, 이때 액체 이산화탄소 방출온도는 -83°C 이다. 기체팽창률(액체에서 기화 시 체적비는 539배) 및 기화잠열이 크며, 자체 증기압(증기압 60 kg/cm^2 , 20°C)이 높다.

3-2-2. 저장용기에서의 자유방출 순서

이산화탄소 저장용기에서의 자유방출은 Fig. 4와 Fig. 5와 같은 순서에 따라 방출된 것으로 추정된다.

- ① 저장 상태는 6.4 MPa, 25 °C 조건에서 밀폐 용기 내에서는 L/G ratio(Liquid Gas ratio)는 약 9 : 1 수준으로 저장되어 있었다.
- ② 솔레노이드 밸브(Solenoid valve)가 기동용기를 작동시켜 압축공기 시스템(Pneumatic system)으로 전환되며 니들 밸브(Needle valve)에서 pin이 판(plate)을 파괴시키면서 밸브가 개방되었다.
- ③ 밸브 개방과 동시에 L/G ratio 중 기체 상태의 이산화탄소가 배관을 통해 방출되기 시작하면서 용기 내부의 압력이 감소하고, 이와 함께 온도 강하 및 이산화탄소 기화 현상이 발생하게 되었다.
- ④ 이와 같은 온도 · 압력감소는 이산화탄소의 삼중점인 -56.6 °C, 0.51 MPa까지 낮아지면서 고체(드라이아이스)를 형성하기 시작하였다.
- ⑤-⑥ 삼중점 이하에서는 고체 · 기체 조건으로 전환되며, 승화점(-78.5 °C)까지 감압 된 후부터 승화가 발생하였고, 대기와 열교환으로 승화가 계속 발생하면서 대기 온도(약 25 °C)까지 상승하였다.

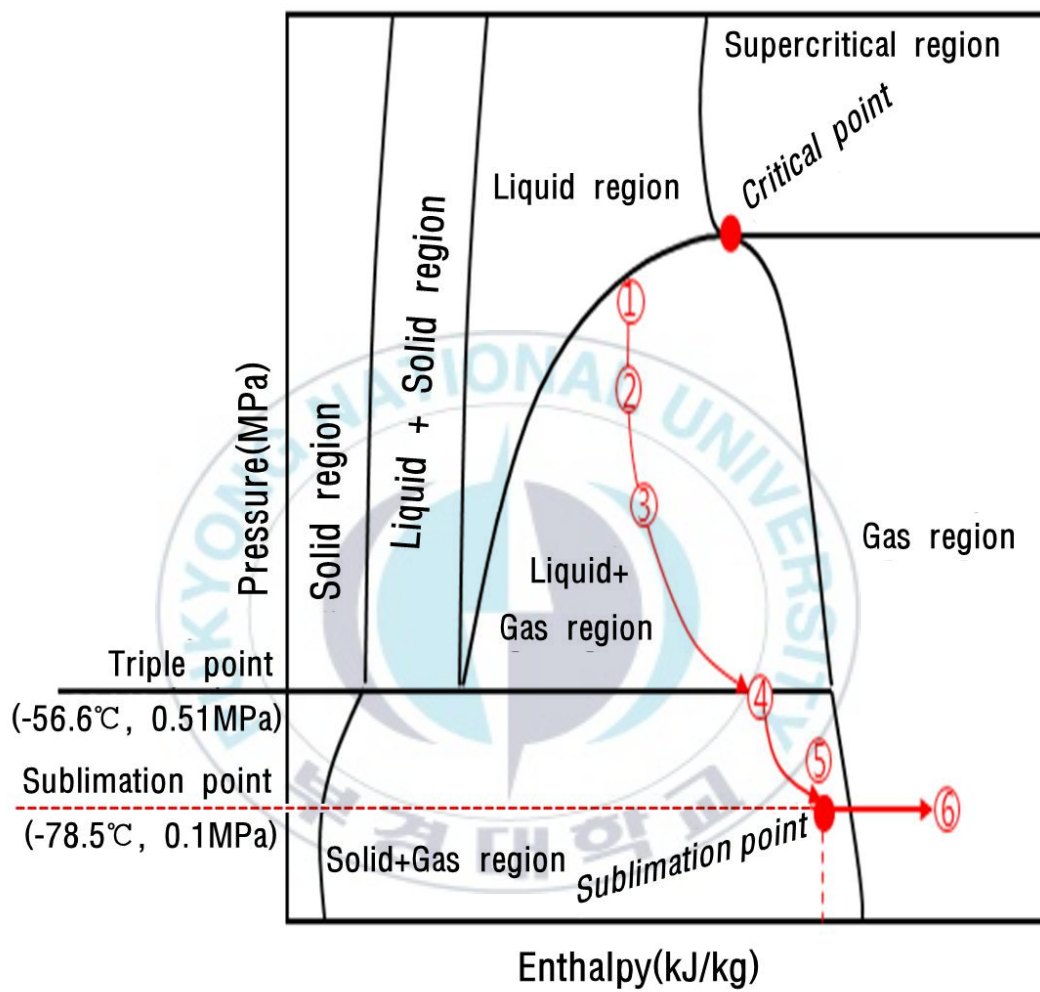


Fig. 4. Changes in CO₂ bottle, P-H diagram criteria.

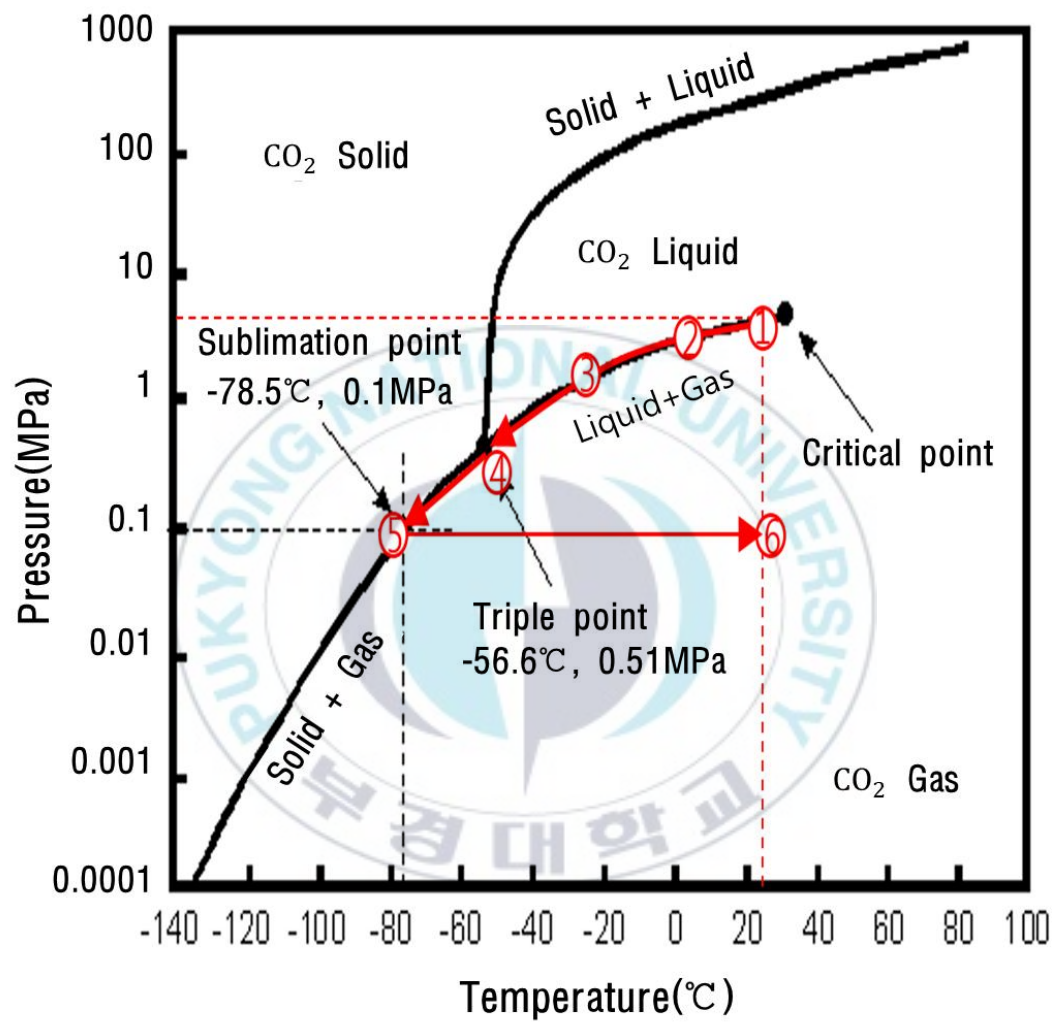


Fig. 5. Changes in CO₂ bottle, P-T diagram criteria.

3-2-3. 용기로부터 누출된 CO₂의 이동과정

저장용기로부터 누출된 이산화탄소의 이동과정은 Fig. 6에서와 같은 순서로 유출이 된 것으로 추정된다.

- ① 저장 상태는 6.4 MPa_g, 25 °C 조건에서 밀폐 용기 내에서 L/G ratio(Liquid - Gas ratio)는 약 9 : 1 수준으로 저장되어 있었다.
- ② 밸브에서 ND25 후렉시블관 사이에서는 밸브 개방과 동시에 용기로부터 중력으로 인해 상부에 체류하던 가스가 약 0.5 m 길이, ND25 후렉시블관을 거쳐나가며 압력강하가 발생하였다.
- ③ ND25 후렉시블관에서 ND150 분기관 사이에서는 ND150 분기관에서 단열팽창에 가까운 거동 발생으로 약간의 증기 응축과 압력 강하가 발생하였다.
- ④ ND150 분기관에서 ND150 주관 사이에서는 분기관에서 일부 응축되었던 증기가 주관에서 열교환으로 인해 전량 또는 일부 기화하면서 이동으로 인한 압력 강하가 발생하였다.
- ⑤ ND150 주관으로부터 최종 누출되는 과정에서 대기압 조건으로 누출되면 일부는 급격히 응결되며 작은 알갱이 형태의 고체로 누출된 것으로 보인다.
- ⑥ 최종 누출 후에 알갱이 형태로 누출된 고체 이산화탄소는 대기와의 열교환으로 인해 승화되었다.

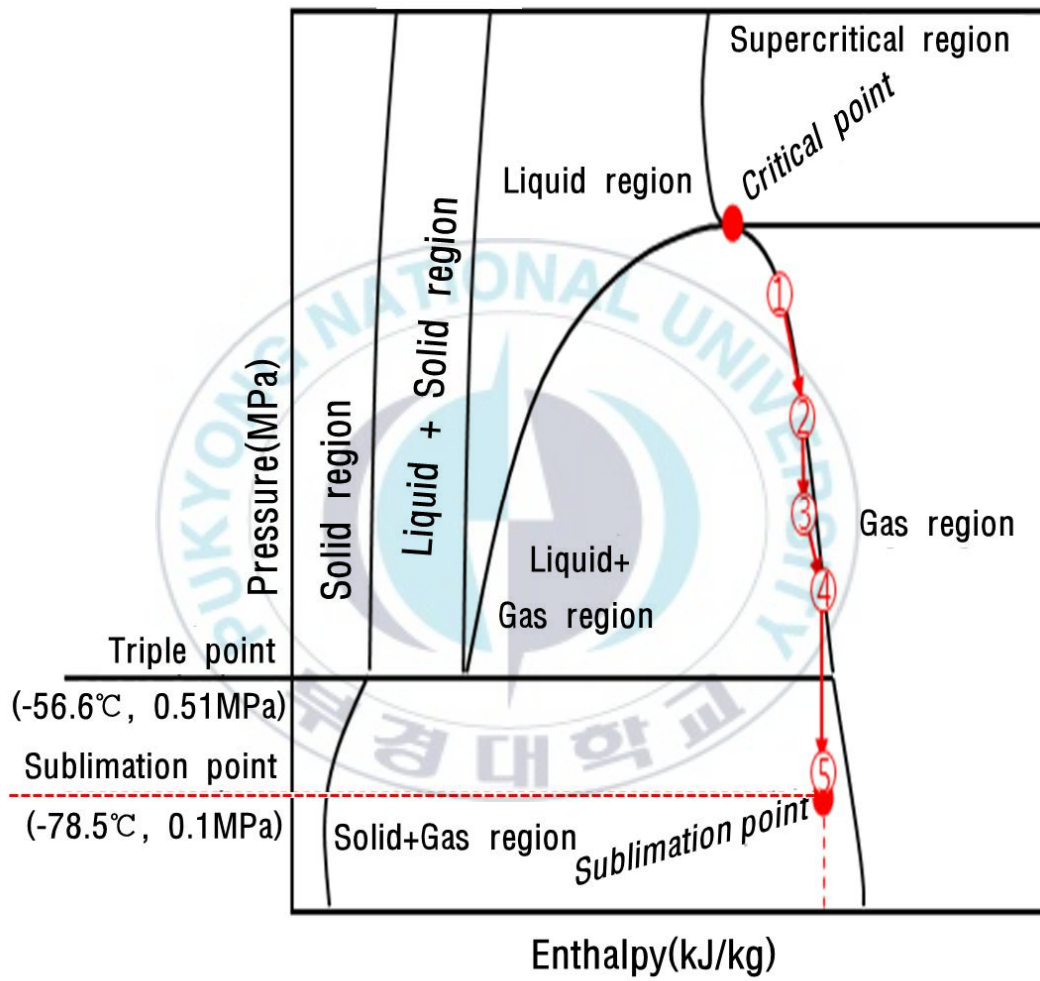


Fig. 6. Movement process of CO₂ leakage from CO₂ bottle,
P-H diagram criteria.

3-3. 1D Transient 해석 결과

3-3-1. 1D Transient 해석조건

1D(One dimensional) Transient 해석조건과 가정 사항은 Table 2와 같다. 고상이 존재하므로 Multiphase property package를 적용해야 한다. 그러나 현존하는 상용 프로그램 중 이산화탄소에 대한 Multiphase 해석이 가능한 것은 없기 때문에 대기압을 600 kPa로 가정한 상태로 조건을 정하였다.

사용된 Solver는 1D Transient interpretation solver인 'Flownex'이며, 배관의 주된 마찰손실은 'Darcy-Weisbach'식을 적용하였다. 파이프의 호칭지름은 ND(Nominal diameter), 강관의 표면 거칠기는 탄소강의 경우(45 Roughness (μm))를 적용하였고, 방출계수(Discharge coefficient)는 1.0, Property package는 Mixed package로서 Two phase package (Homogeneous) + Gaseous package 상태를 가정한 상태였다.

용기 압력은 6.4 MPa, 용기 온도는 25 °C, CO₂량은 45 kg, 용기 체적은 67.5 L를 적용하였다.

Table 2. 1D Transient analytical conditions

Classification	Data	Remarks
Bottle pressure (MPa)	6.4	▪ Apply estimate – initial charge capacity : Unknown – Temperature at the time of accident : Unknown – Amount of leakage by container over time : Unknown
Bottle temperature (°C)	25.0	
CO ₂ amount (kg)	45.0	
Bottle volume (L)	67.5	▪ Bottle imprint criteria
Pipe diameter	ND	▪ Application of nominal diameter – Thickness not measurable – External painted condition
Roughness (μm)	45	▪ Carbon steel criteria
Solver	Flownex	▪ 1D Transient interpretation solver
Discharge coefficient	1.0	–
Primary loss	Darcy weisbach	▪ Application of typical method
Forward k-loss	1.0	–
Reverse k-loss	0.5	–
Boundary	Temperature, Pressure	▪ Apply assumption
Property package	Mixed package	Two phase package(Homogeneous) + Gaseous package

3-3-2. 해석을 위한 추출위치

Fig. 7은 해석을 위한 추출위치를 나타내었으며, 저장용기의 끝단(A)과 집합관 끝단(B), 각 저장용기가 모이는 위치(C) 및 집합관으로부터 선택밸브까지 위치(D)로 하였다.

Point A1, A2, A3, A4는 고압식 저장용기의 끝 지점이다.

Point B1은 저장용기 A1 지점으로부터 36 병이 저장된 용기의 집합관 끝점을 나타내며, Point B2는 저장용기 A2 지점으로부터 36 병이 저장된 용기의 집합관 끝점을 나타내며, Point B3은 저장용기 A3 지점으로부터 36 병이 저장된 용기의 집합관 끝점을 나타낸다.

Point C1은 저장용기 A1 지점으로부터 Point B1과의 합산 지점을 나타내고, Point C2는 Point C1과 Point A2에서 B2까지의 합산지점을, Point C3는 Point C1과 C2 및 Point A3에서 B3까지의 합산지점을 나타내고 있다.

Point C4는 Point C1에서 C3 및 Point A4에서 B4까지의 합산지점, Point C5는 Point C1에서 C4까지의 합산지점을 나타낸다.

Point D1, D2, D3는 선택밸브를 나타내며 Point D2가 파괴되었던 선택밸브이다.

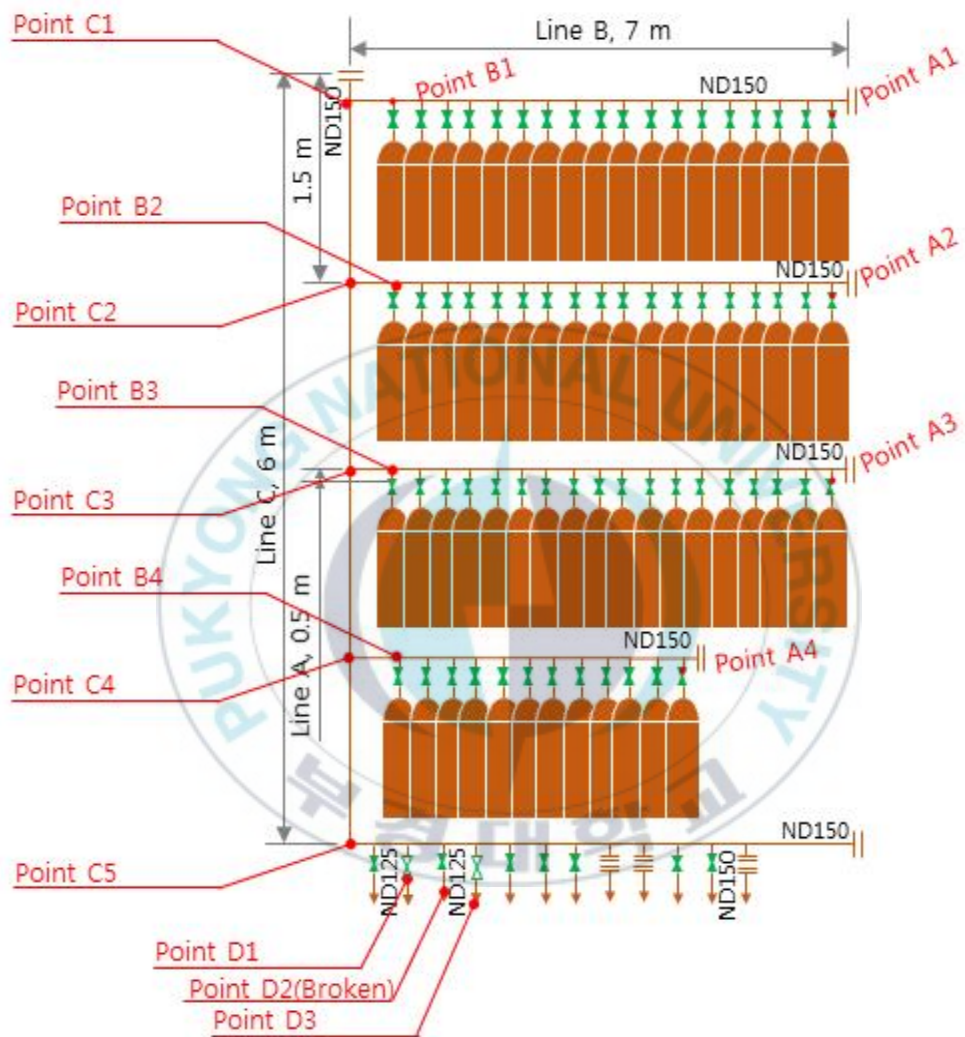


Fig. 7. Analysis result extraction location.

3-3-3. 해석 결과

Point A, B, C, D지점에서의 압력변화는 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 또한 D지점에서의 질량유량 분석결과는 Fig. 12와 같다.

사고 당시의 이탈된 밸브위치에서 최대 압력은 약 3.6 MPa로, 대기압을 600 kPa으로 가정하였을 때 실제 압력은 3.6 MPa이하일 것으로 추정된다.

소방청 ‘국가화재안전기준’은 표면화재에서 1분 이내에 방사하도록 규정하고 있으며, 누설압력이 10%를 초과하지 않는 범위를 정상 범위로 보고있다,

누출시간은 대기압을 600 kPa로 가정하였을 때 실제 1분 이내보다 짧은 약 40.5초로 나타났다.

Point D지점인 D1, D2와 D3에서의 최초 질량유량 변화는 D2, D1, D3 순으로 감소하다가 약 12초 부근에서 D1과 D2의 흐름에서 약간의 변동이 있었지만 질량유량이 변하는 속도는 일정한 것으로 나타났다.

이것은 Fig. 7에서 보이는 바와 같이, 선택밸브 D1은 화재감지 신호(작업 중 전선을 잘못 자름)를 받고 개방되어 CO₂가 해당 방호구역으로 방출되었고, 선택밸브 D2는 배관에 가해진 CO₂의 압력을 견디지 못하고 플랜지에서 이탈되면서 CO₂가 집합관실 내부로 방출된 것을 보여준다.

또한 D2와 D1에서의 질량유량의 차이는 Fig. 7에서와 같이 Point C5 이후의 선택밸브의 직경 차이(ND125, ND150)와 식 (4)와 같이 압력변화에 따른 유량의 변화 차이로 보인다.

$$\text{유량}(Q) = K(\text{상수}) \times \Delta P(\text{압력변화}) \quad (4)$$

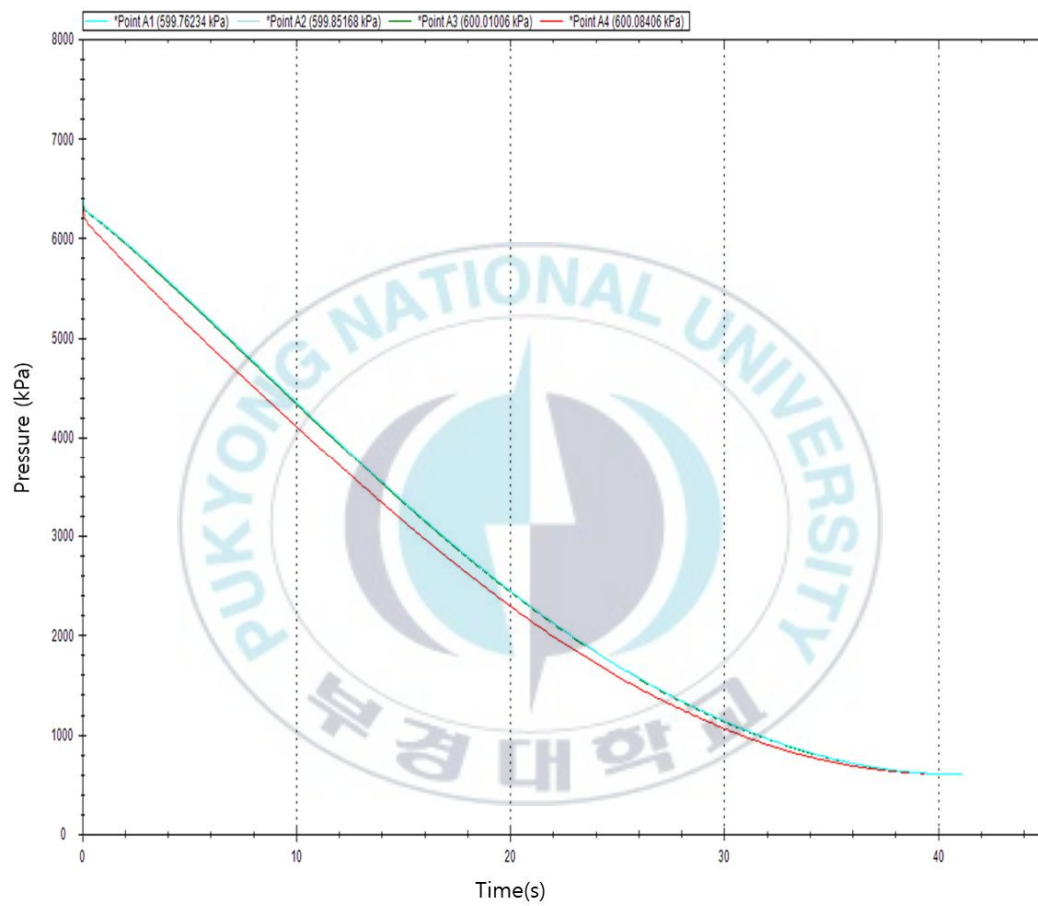


Fig. 8. Pressure change analysis results at point A.

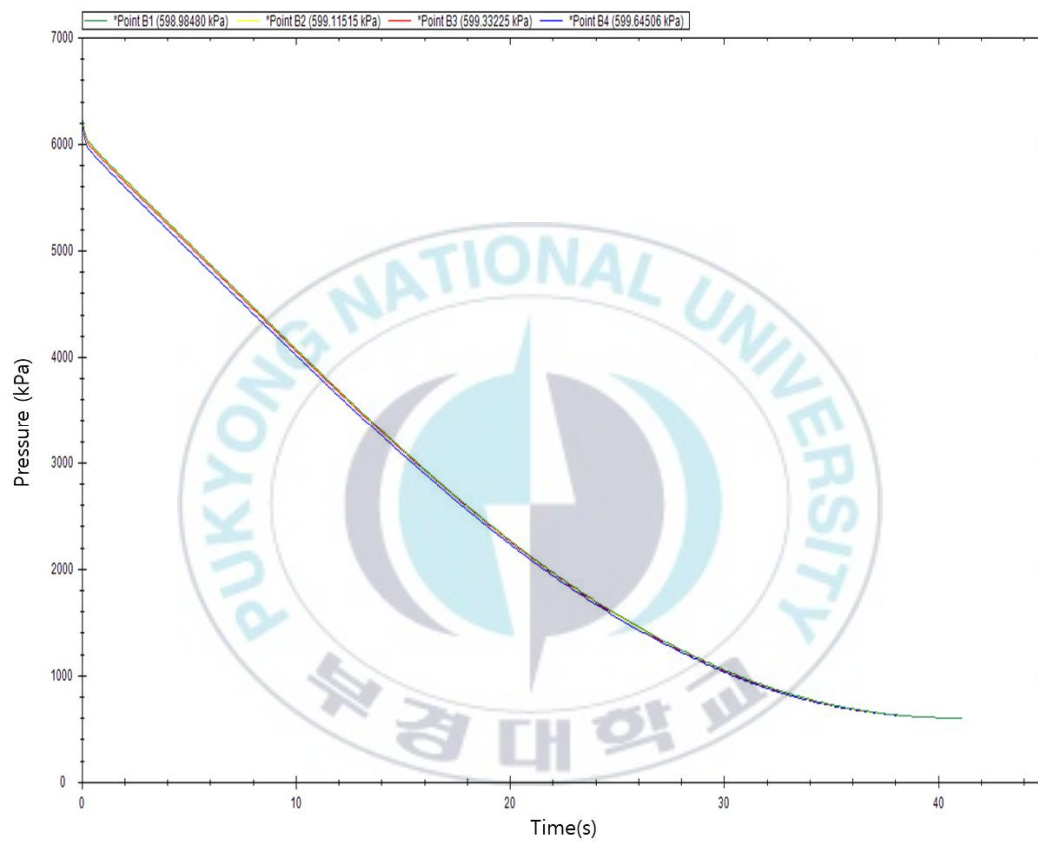


Fig. 9. Pressure change analysis results at point B.

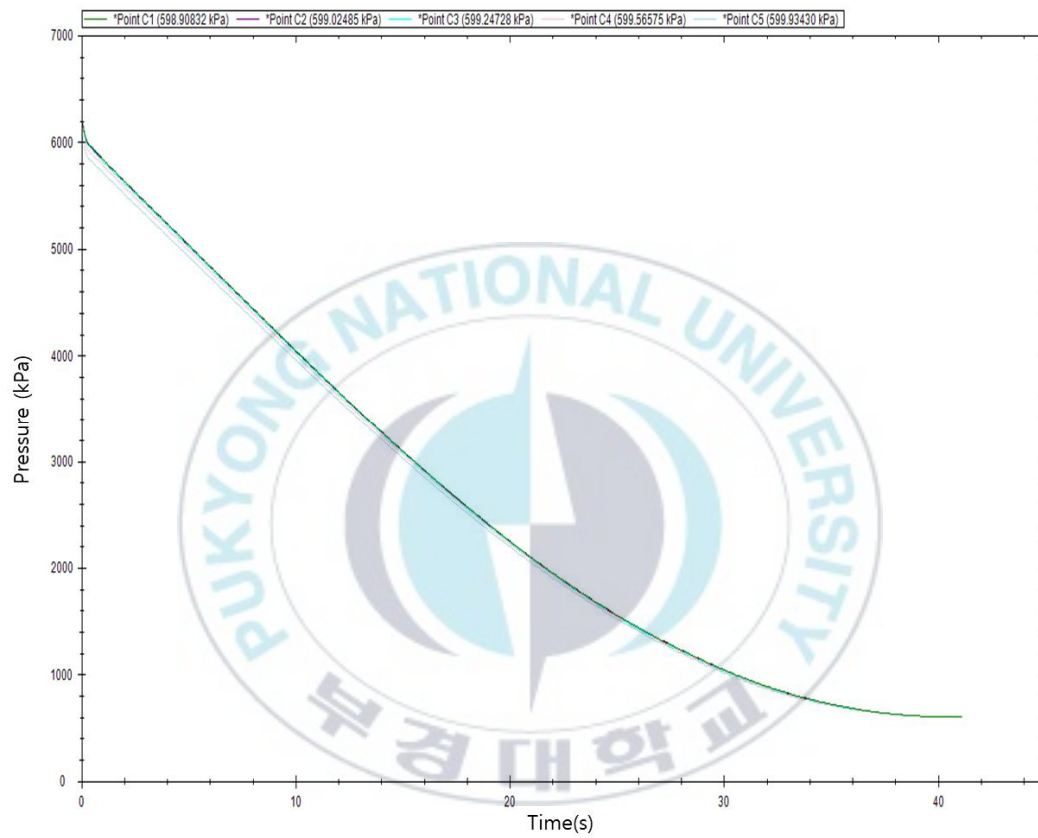


Fig. 10. Pressure change analysis results at point C.

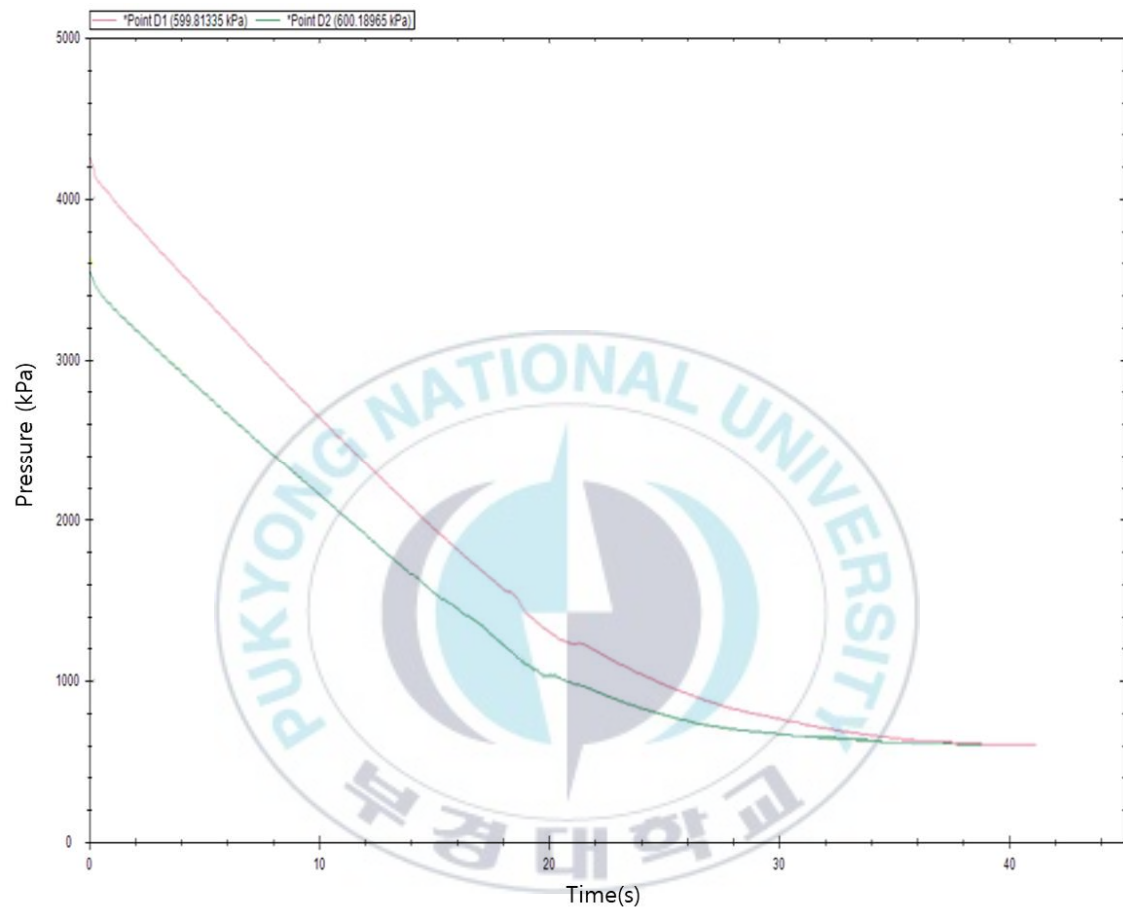


Fig. 11. Pressure change analysis results at point D.

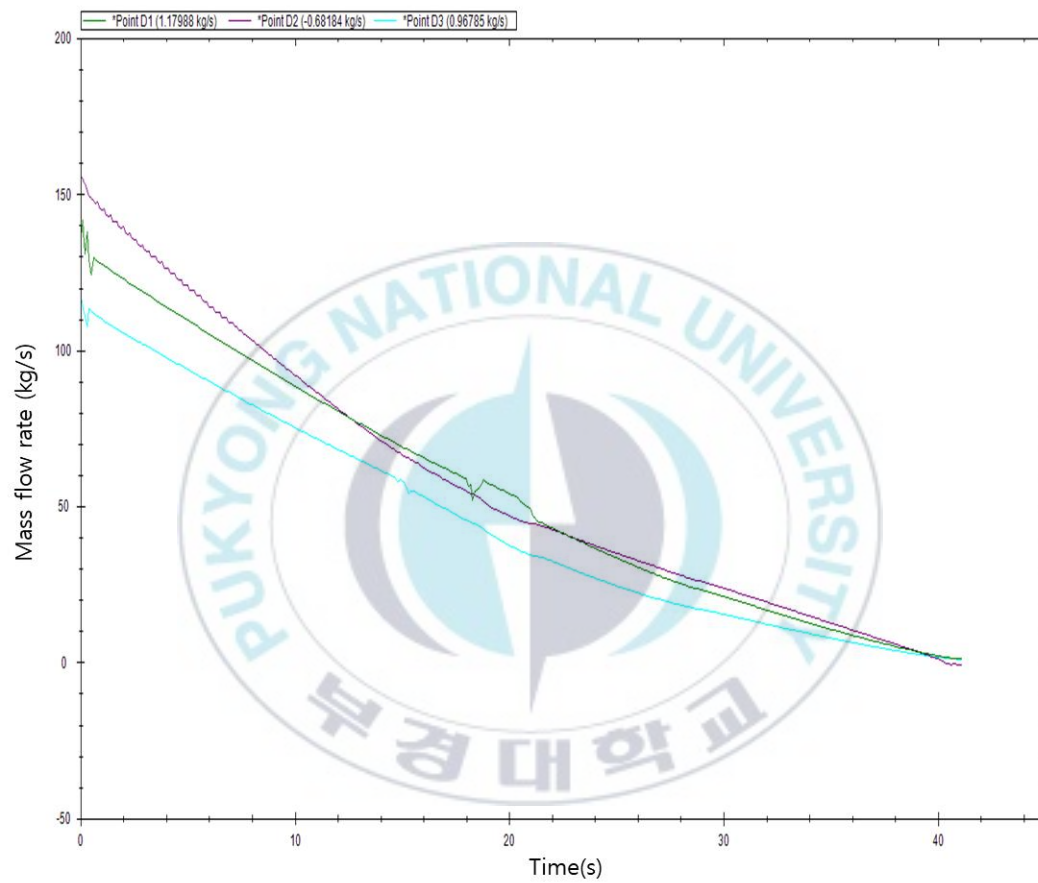


Fig. 12. Mass flow analysis results at point D.

3-4. CO₂ 확산 분석

3-4-1. 전산유체역학 적용조건

이산화탄소의 누출 및 확산을 분석하기 위해, 검사체적(Control volume)은 45(w) × 45(d) × 18(h), (cm³), 좌표는 카네시안 격자(Cartesian grid), CFLV는 5, CFLC는 0.5, 프로그램은 FLACS v10.7 Ventilation and Dispersion (Solver, pre-post)을 적용하였고, 누출은 정상상태(Steady state)로 가정하였다.

외부온도는 298.15K, 물질온도는 223.15K, 바람은 불지 않아 풍속의 세기는 0.0 m/s이며, 압력은 1,000 hPa, 방출율(Release rate)는 43.32 kg/s였으며, 방출시간은 45초를 적용하였으며 상세한 적용조건은 Table 3과 같다.

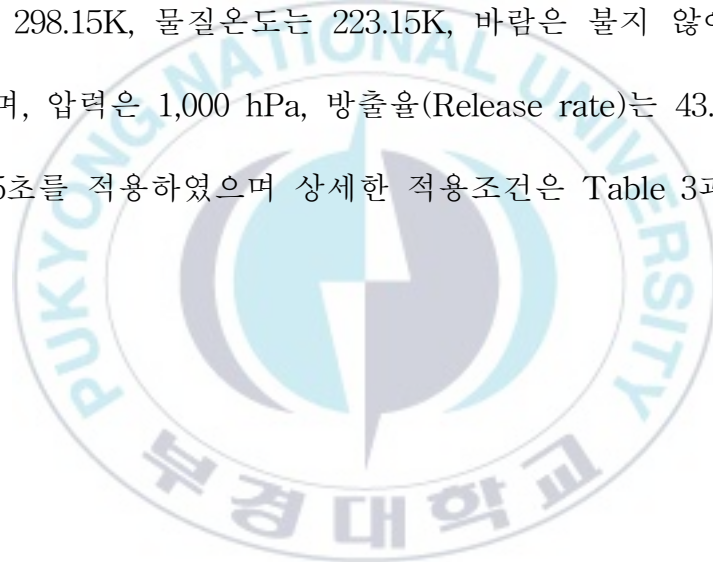


Table 3. Computational fluid dynamics application conditions

Classification	Contents	Remarks
Control volume (cm ³)	45(w) × 45(d) × 18(h)	–
Grid	Cartesian grid	Specified lines with equal distribution
CFLV	5	–
CFLC	0.5	–
Application	FLACS v10.7 Ventilation and dispersion (Solver, Pre-post) Flowvis 5.8.0 (Post processing)	
Release rate	Continuous release	–
Ambient temperature	298.15 K	
Material temperature	223.15 K	
Wind direction	None	
Wind speed	0.0 m/s @ 10 m above	
Ambient pressure	1,000 hPa	
Ground roughness	0.0002 m	
Pasquill stability	None	Heavy gas behavior
Boundaries	Wind / Nozzle	–
Release rate	43.32 kg/s	Duration : 45 s
Physical properties	CO ₂ in listspecies	–

3-4-2. 기하학적인 형상

전산유체역학의 프로그램 특성상 해석의 오류를 최소화하기 위해 기하학적인 형상을 원형이 아닌 사각형으로 도식화 하였으며 기하학적인 형상은 Fig. 13과 같다.

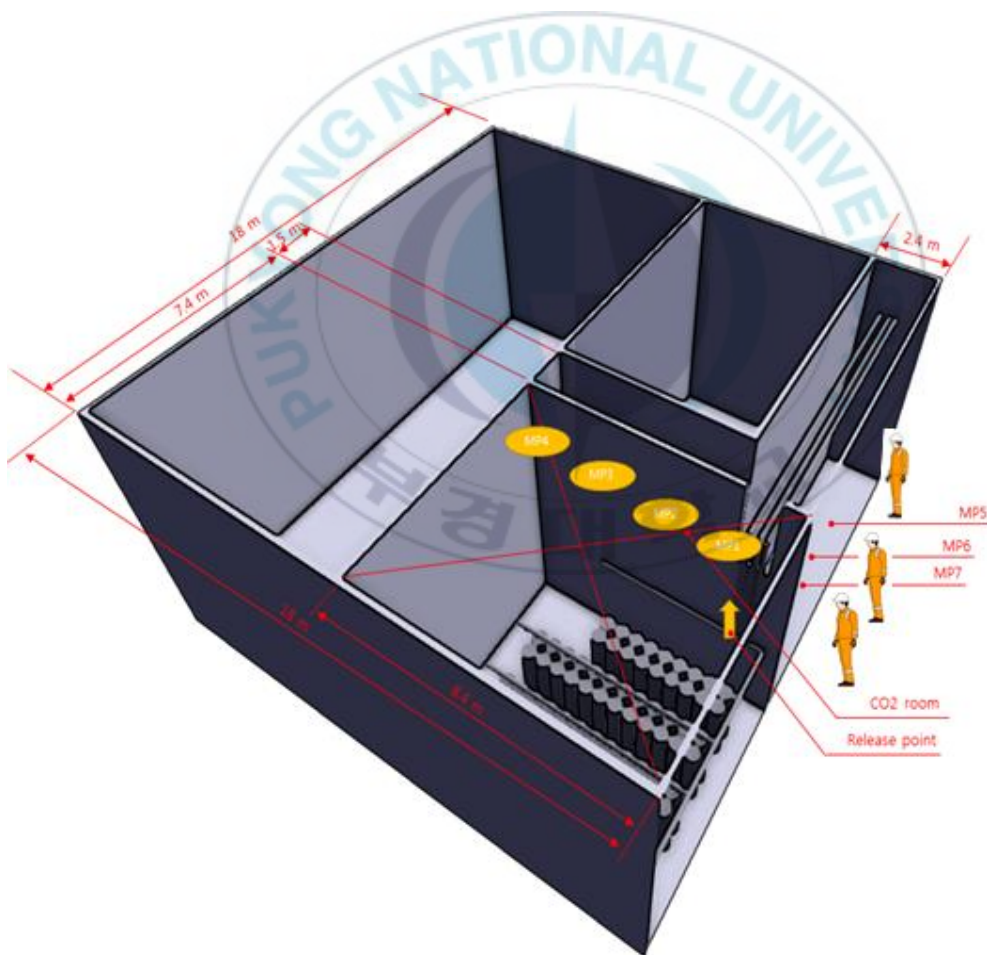


Fig. 13. Geometry shape.

3-4-3. 산소농도 분석

당시에 작업을 했던 작업자들의 위치는 Fig. 13에서 나타내고 있다. 작업자들의 위치인 MP5, MP6, MP7 지점에서의 산소농도 분석결과는 Fig. 14, Fig. 15 및 Fig. 16과 같다.

MP5, MP6, MP7 지점에서의 산소농도 분석 결과 누출 후 25초경 작업자들의 위치에서 산소농도는 10%이하였으며, 누출이 완료된 50초경에는 산소농도가 최저 5.3%까지 낮아졌다. 이는 작업자들을 질식시킬 수 있는 농도였다.



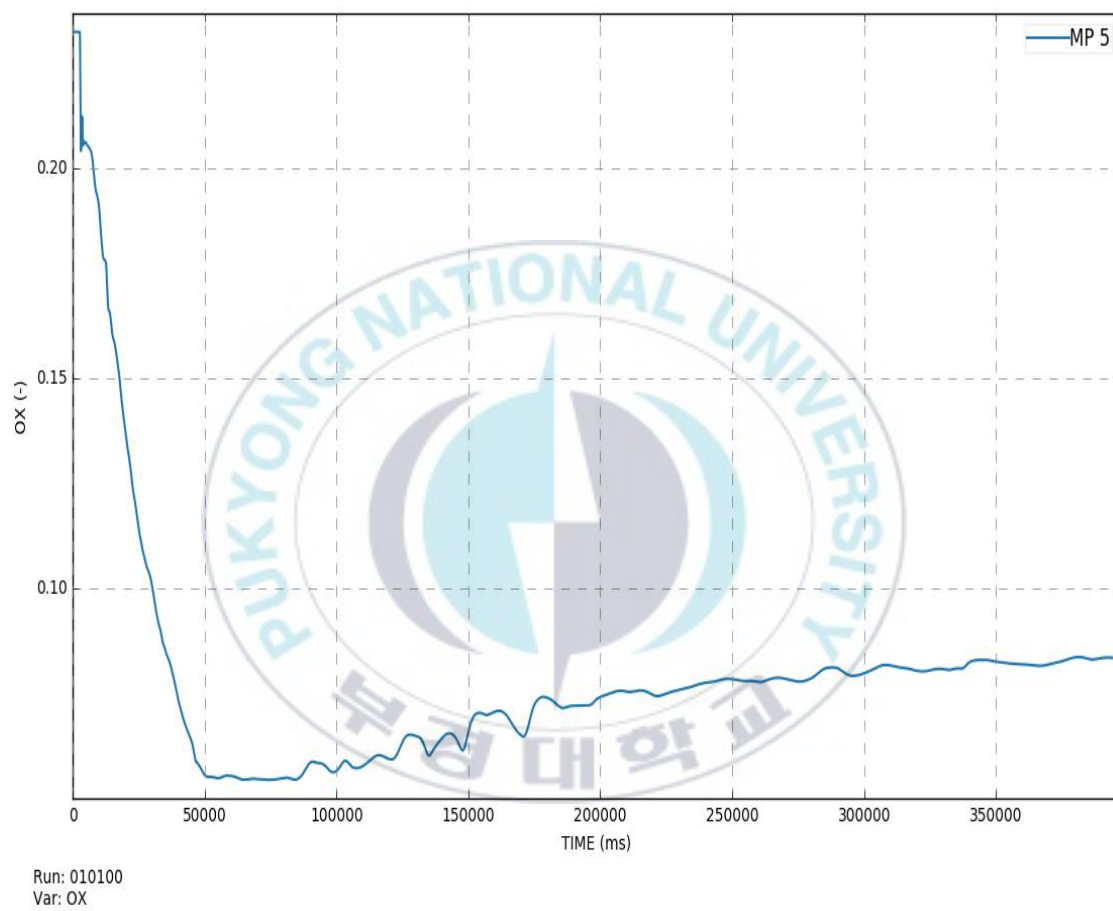


Fig. 14. Oxygen concentration variation over time at MP5.

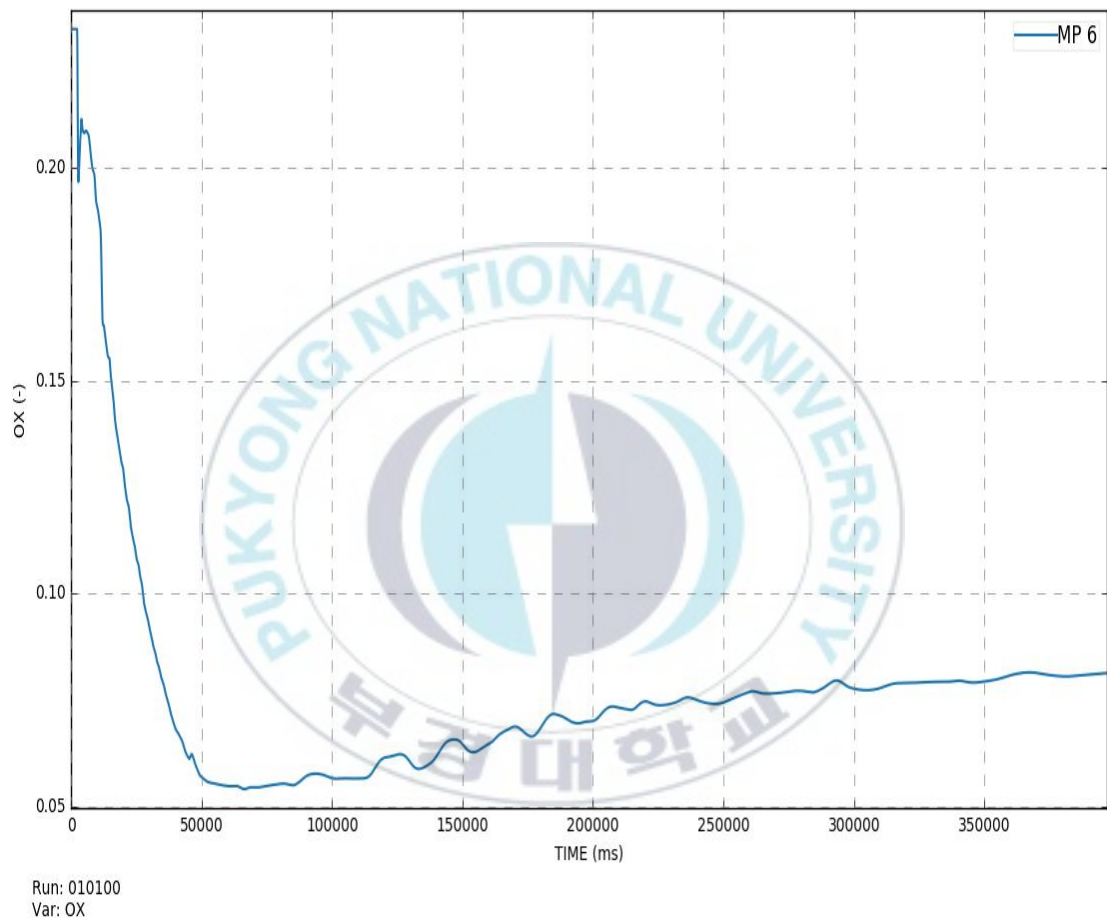


Fig. 15. Oxygen concentration variation over time at MP6.

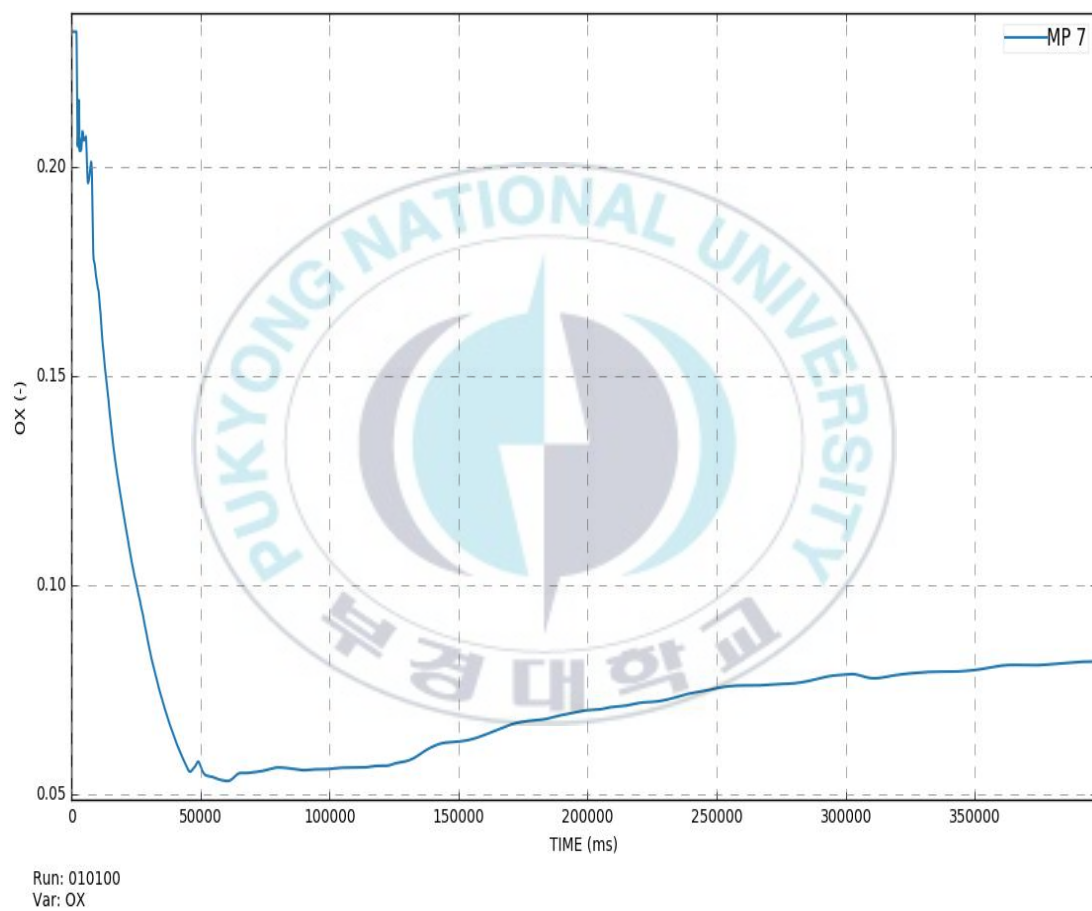


Fig. 16. Oxygen concentration variation over time at MP7.

3-4-4. 시간에 따른 산소농도 변화

Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20 및 Fig. 21은 시간에 따른 산소농도 변화를 나타내고 있다. 확산특성에서 누출된 이산화탄소는 천정 부위를 타고 확산되어 위치와 상관없이 산소농도가 낮아지게 된다.

따라서 작업자 3명이 다른 위치에 있었다고 가정하더라도 같은 농도의 이산화탄소에 노출되었을 것으로 추정된다. 이후 이산화탄소는 별도의 환기조치가 없는 상태에서 공기와 밀도차로 인하여 아래 방향으로 확산하는 경향을 나타낸다.

이는 유체가 에너지 손실을 최소화하기 위해 주로 벽면, 모서리를 타고 흐르는 특성이다. 현존하는 전산유체역학 코드를 이용하여 해석하는 방법으로 고체 상태인 이산화탄소 알갱이의 누출로 인한 영향을 분석할 수 없는 한계가 있을 때, 실제로는 이산화탄소가 아래 방향으로 확산을 하는 경향이 더 높으므로 산소농도는 더 낮았을 가능성이 있다.

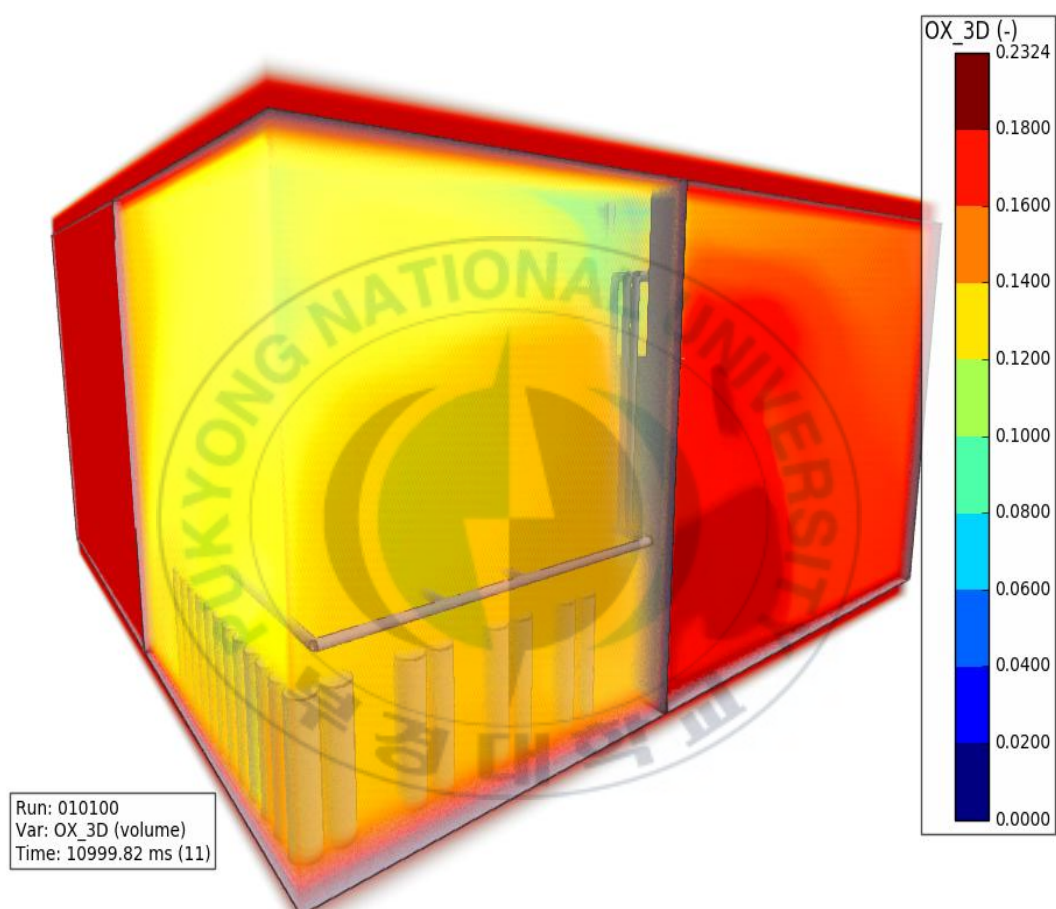


Fig. 17. Changes in oxygen concentration after 11 seconds.

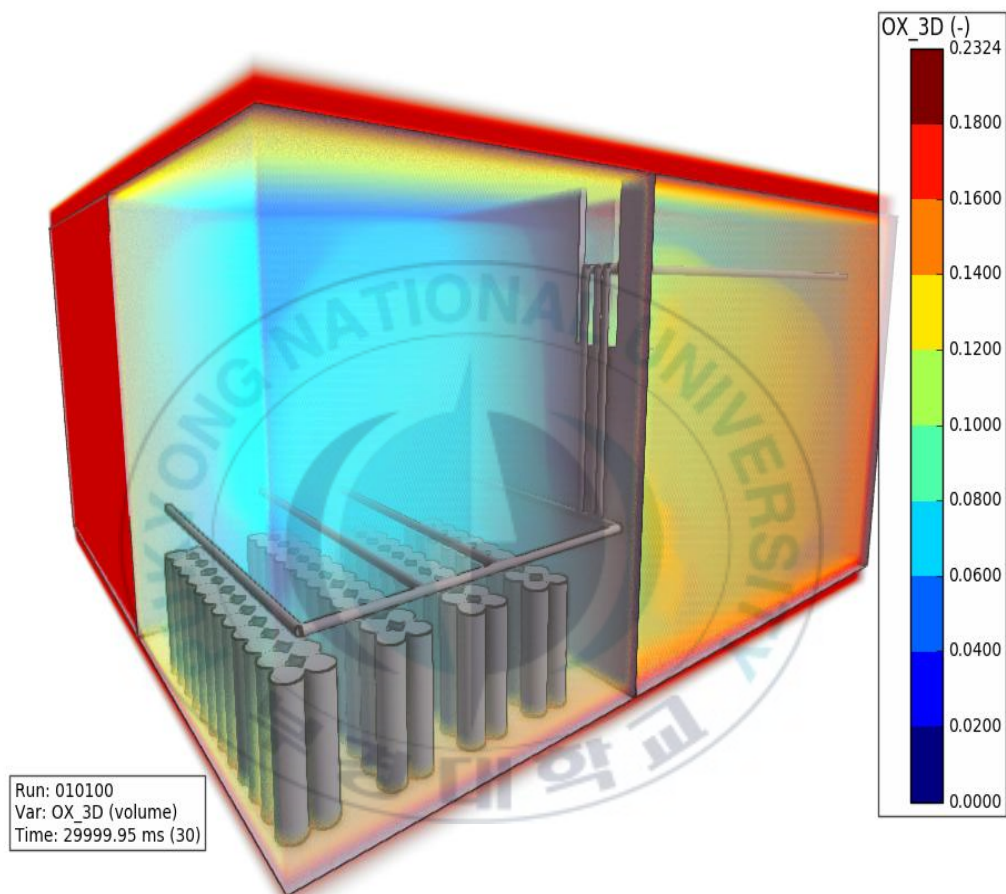


Fig. 18. Changes in oxygen concentration after 30 seconds.

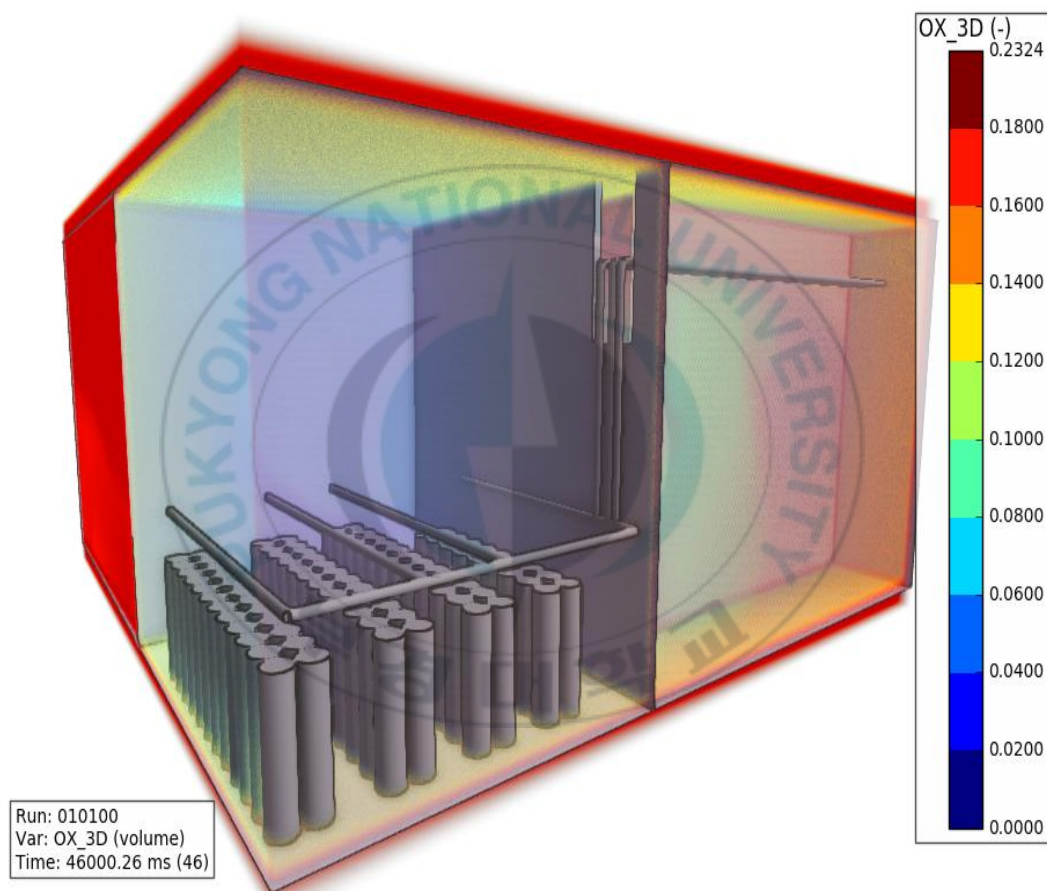


Fig. 19. Changes in oxygen concentration after 46 seconds.

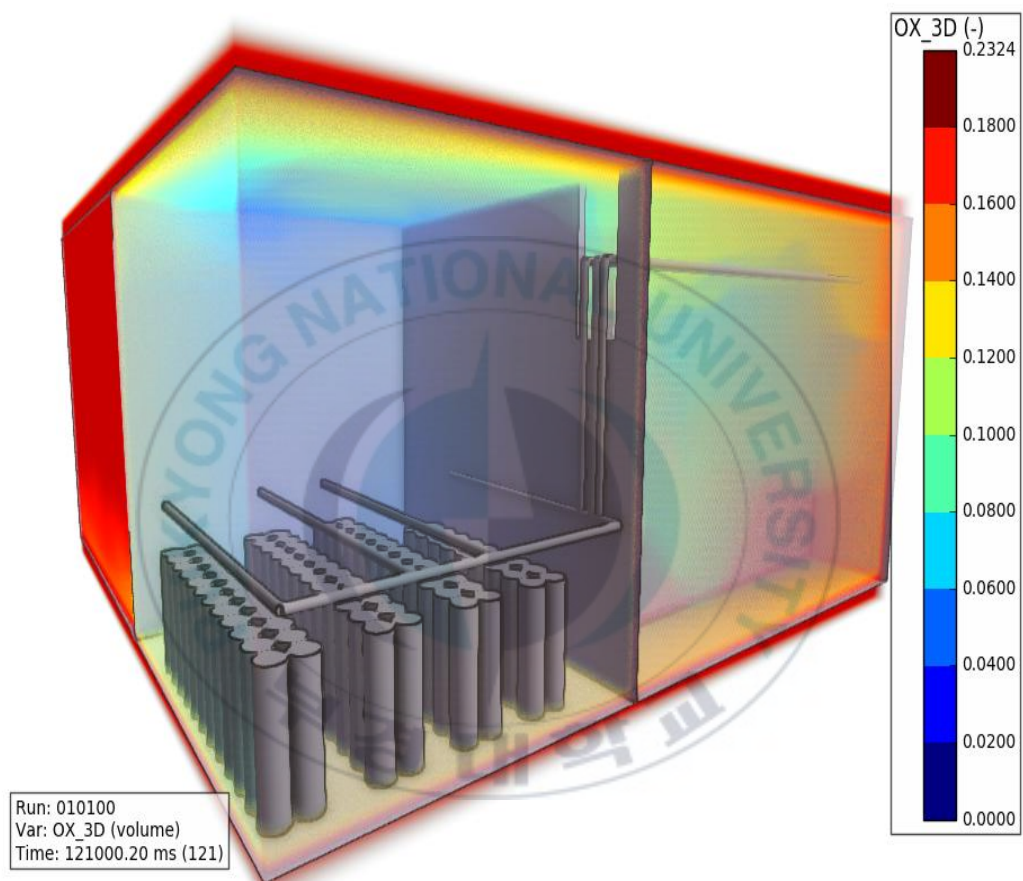


Fig. 20. Changes in oxygen concentration after 121 seconds.

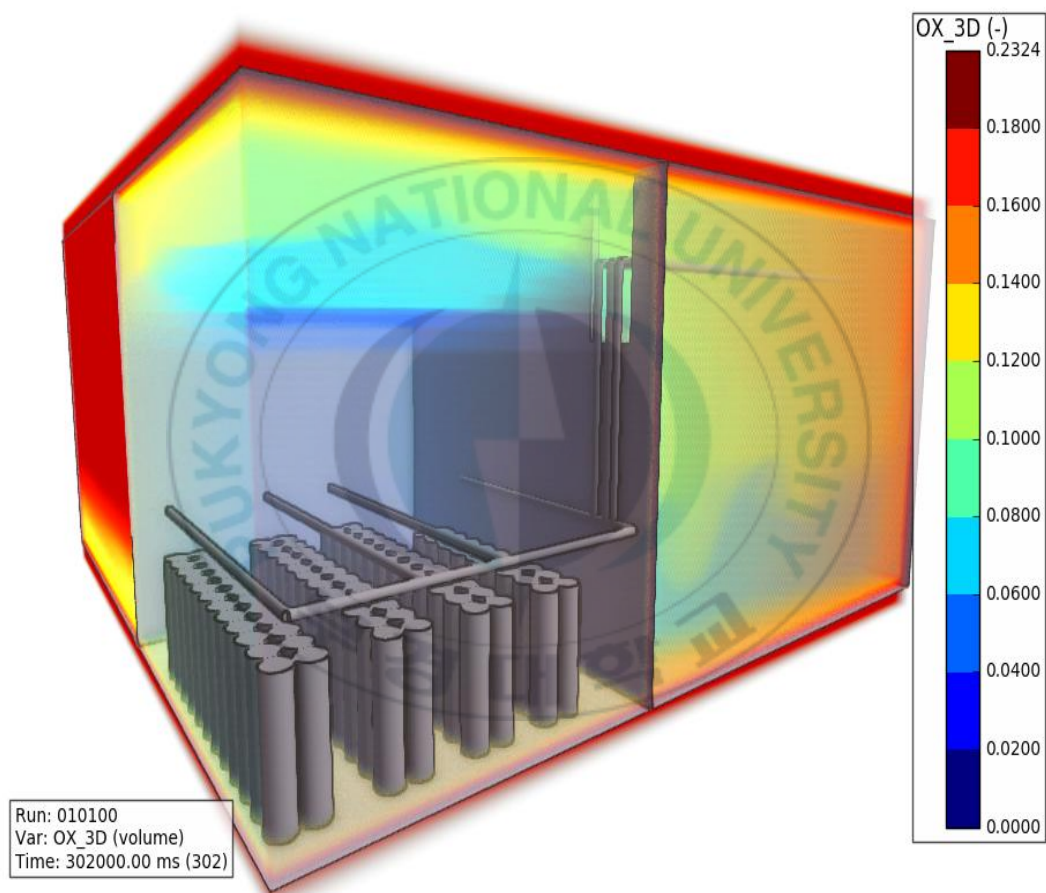


Fig. 21. Changes in oxygen concentration after 302 seconds.

3-4-5. 시간에 따른 이산화탄소 농도 변화

시간에 따른 이산화탄소의 농도변화는 Fig. 22, Fig. 23, Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26, 및 Fig. 27과 같다. 확산특성은 누출된 이산화탄소는 천정부위를 타고 확산되어 산소농도가 위치와 무관하게 낮아지게 된다.

따라서 작업자 3명이 다른 위치에 있었다고 가정하더라도 같은 농도의 이산화탄소에 노출되었을 것으로 추정된다. 이후 이산화탄소는 별도의 환기 조치가 없는 상태에서 공기와의 밀도차이로 인하여 아래 방향으로 확산하는 경향을 나타내게 된다.

이는 유체의 방향 전환을 최소화하기 위해 주로 벽면과 모서리를 타고 흐르는 특성이다. 전산유체역학 코드를 이용한 해석 방법으로는 이산화탄소 알갱이(고체) 누출로 인해 영향을 분석할 수 없는 한계가 있다고 볼 때, 실제 이산화탄소의 아래 방향 확산경향이 더 높아 산소농도가 더 낮았을 가능성이 있다.

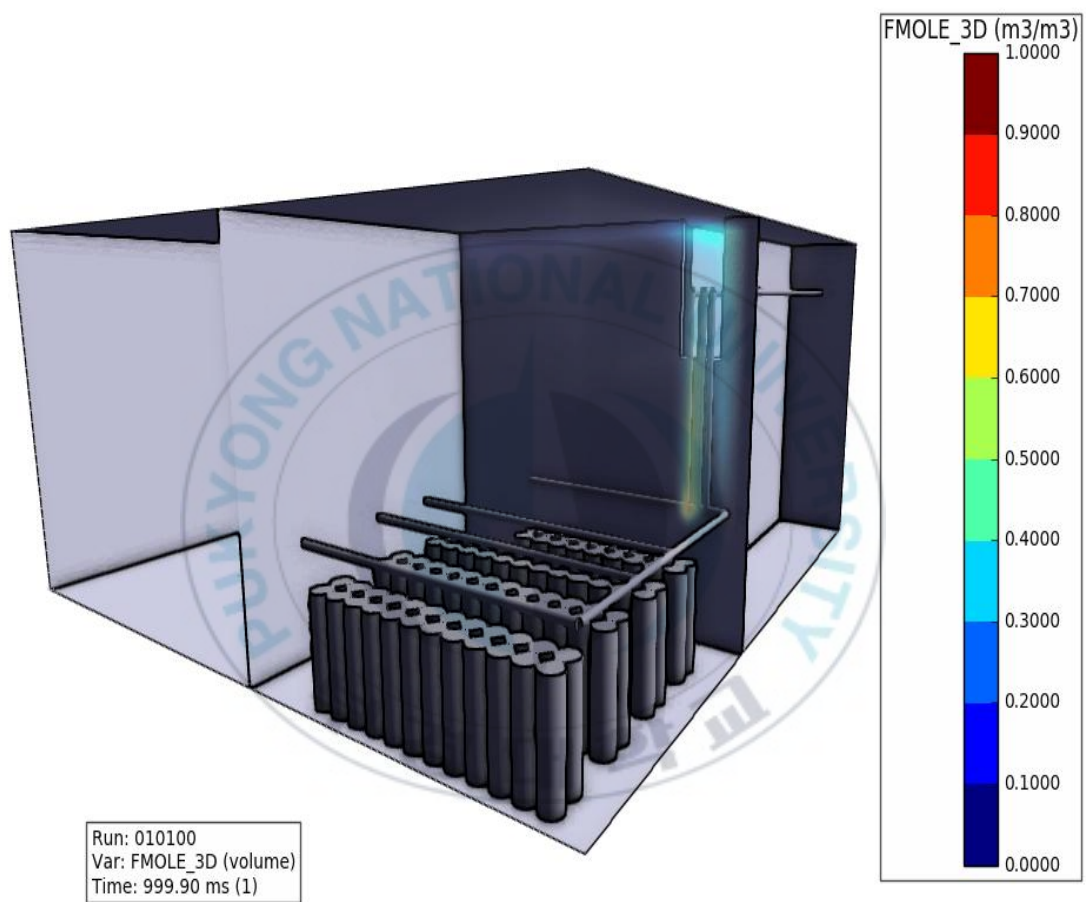


Fig. 22. Changes in CO₂ concentration after 1 second.

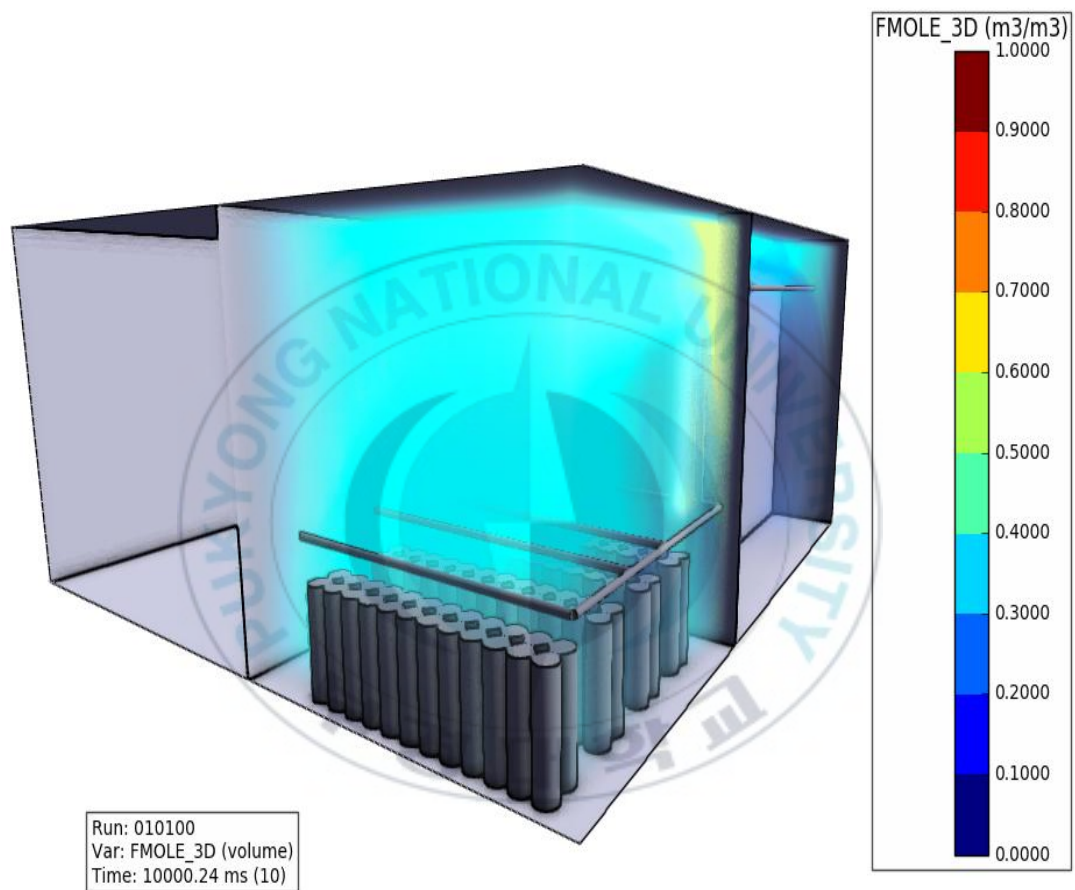


Fig. 23. Changes in CO₂ concentration after 10 seconds.

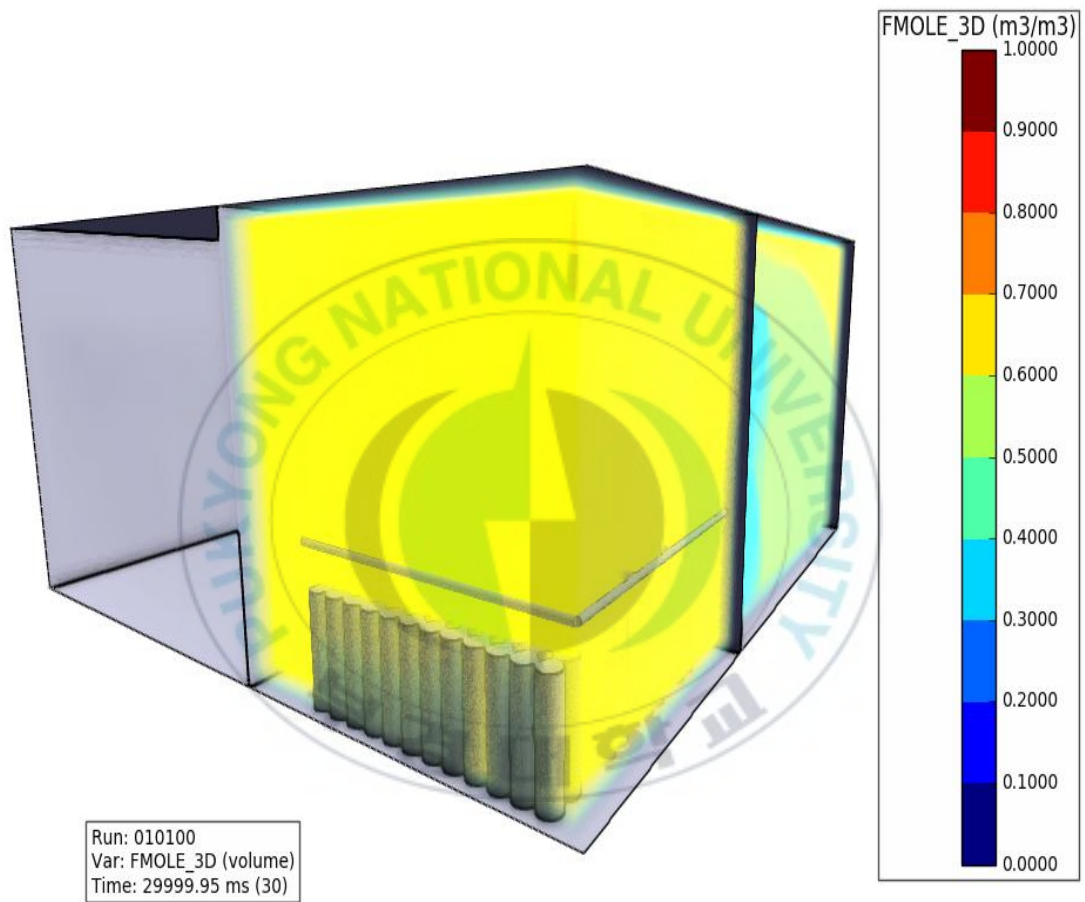


Fig. 24. Changes in CO₂ concentration after 30 seconds.

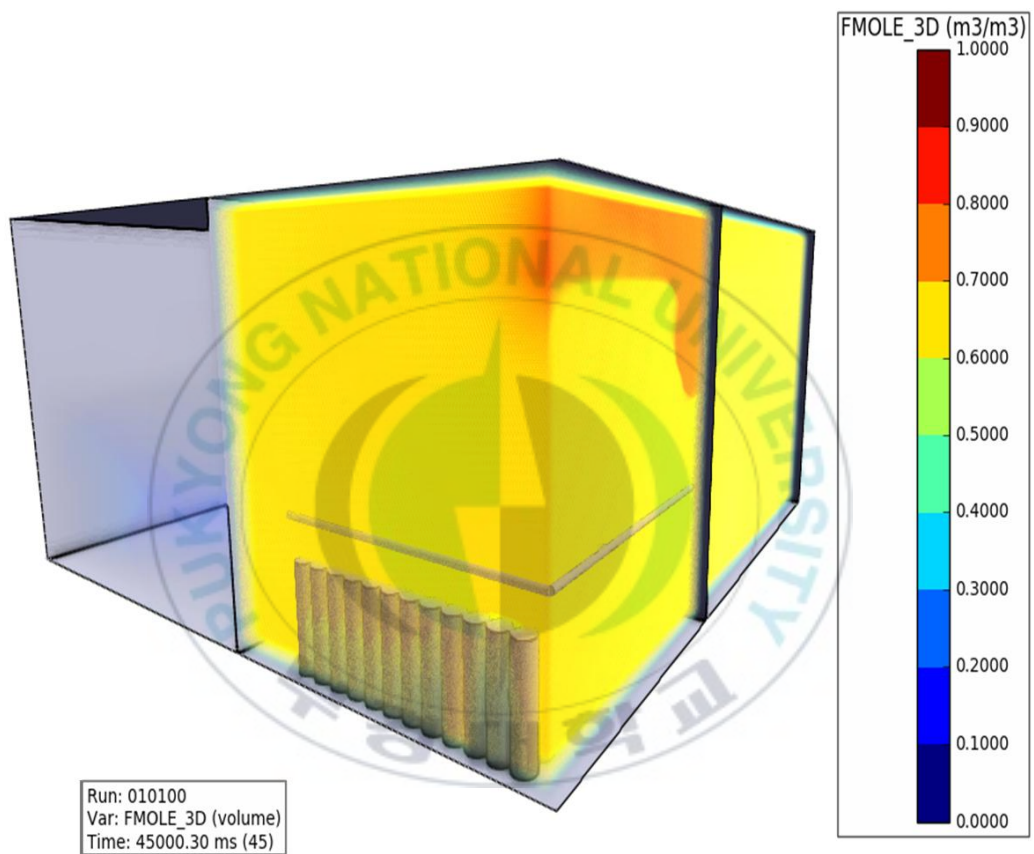


Fig. 25. Changes in CO₂ concentration after 45 seconds.

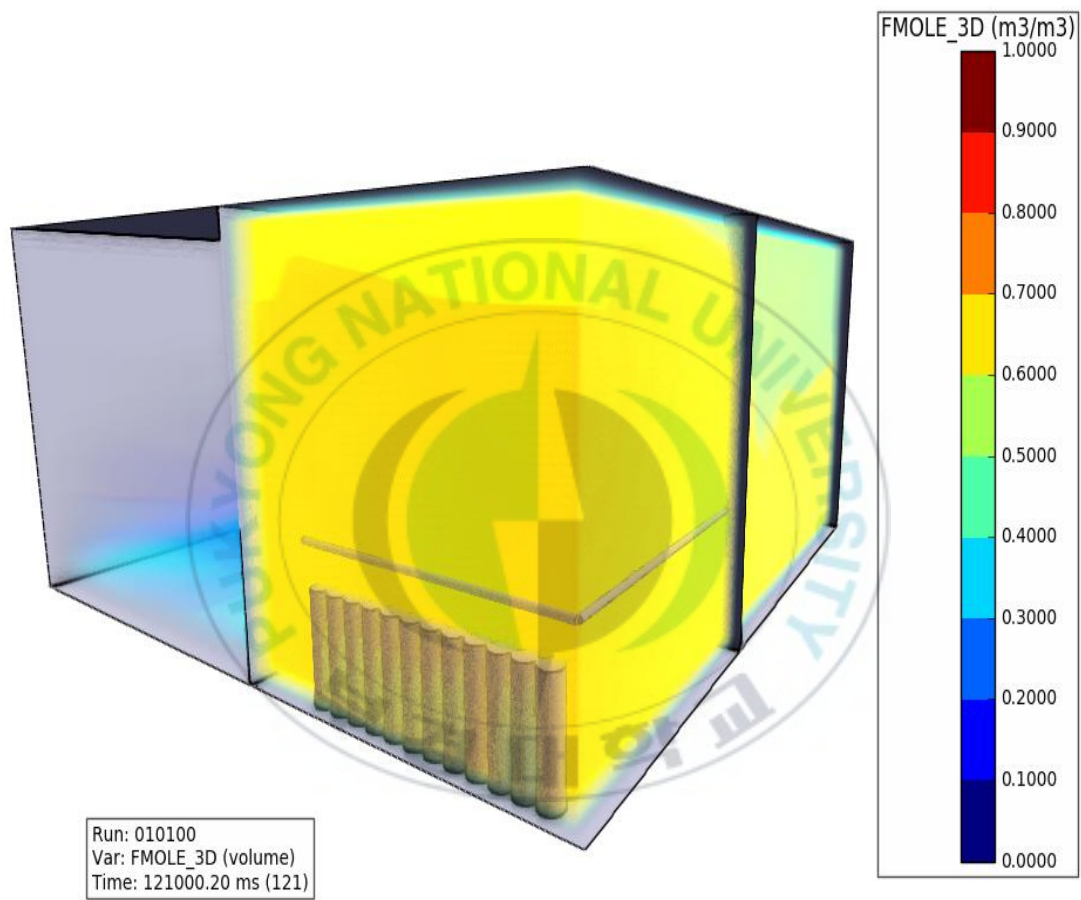


Fig. 26. Changes in CO₂ concentration after 121 seconds.

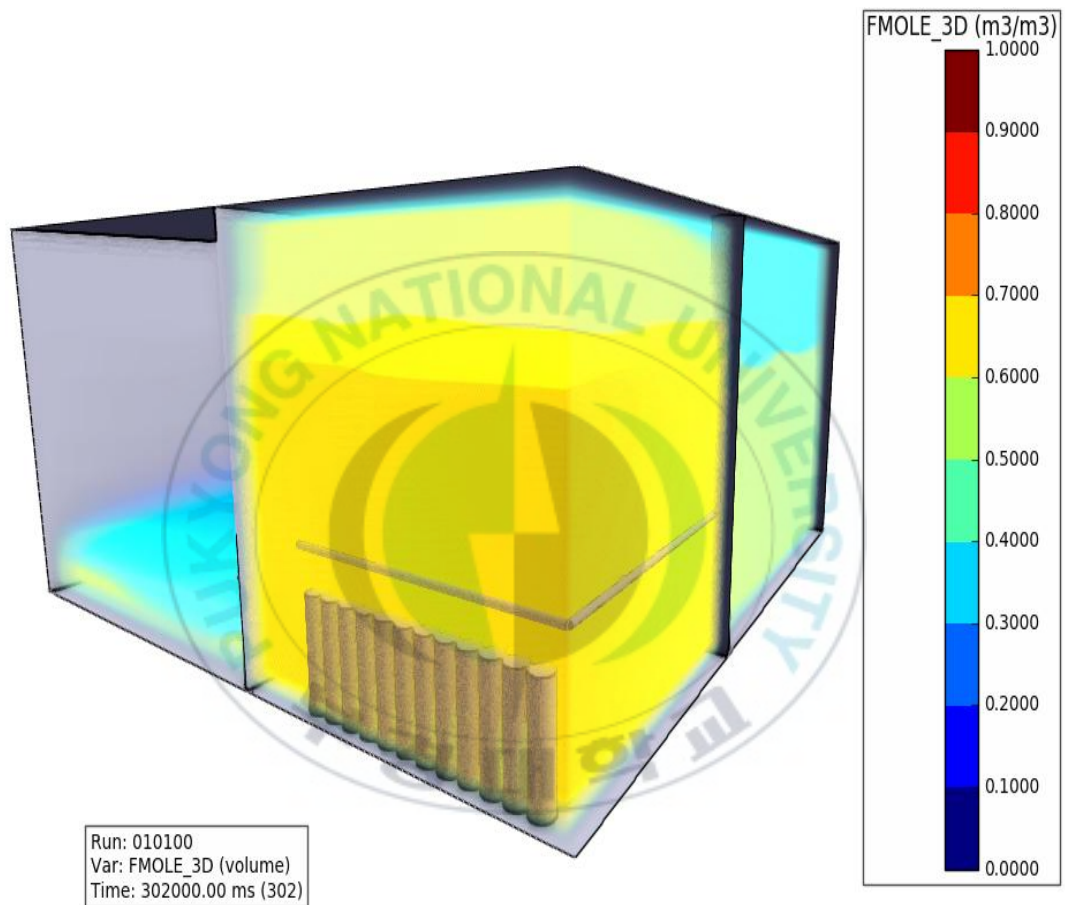


Fig. 27. Changes in CO₂ concentration after 302 seconds.

3-4-6. 벽면 파손부위 분석

이산화탄소의 저장 용기실 벽이 부서진 부위는 Fig. 28, Fig. 29 및 Fig. 30과 같다. 이산화탄소 가스가 천정 면과 충돌한 후 유체는 벽면과 모서리를 타고 흐르면서 두 지점에서 파손이 발생한 것으로 생각되며, 에너지 손실을 최소화하기 위해서 방향 전환하여 인접통로로 확산된 것으로 판단되며, 이때의 압력은 약 50 kPa 수준으로 해석되었다.

Fig. 28에서는 1초 후 저장용기실과 바깥쪽과 접하는 상부 공간 2개소에 작은 파손이 있었으며, 이때의 유속은 약 30 m/s 정도로 관측되었다.

Fig. 29에서는 10초 후 저장 용기실과 바깥쪽과 접하는 상부 공간 1개소에 1초 후의 파손보다는 조금 더 큰 파손이 있었으며, 이때의 유속은 약 32 m/s 정도로 관측되었다.

Fig. 30에서는 31초 후 저장 용기실과 바깥쪽과 접하는 상부 공간 1개소 (이동통로)로 이산화탄소 소화약제가 방출되었다.

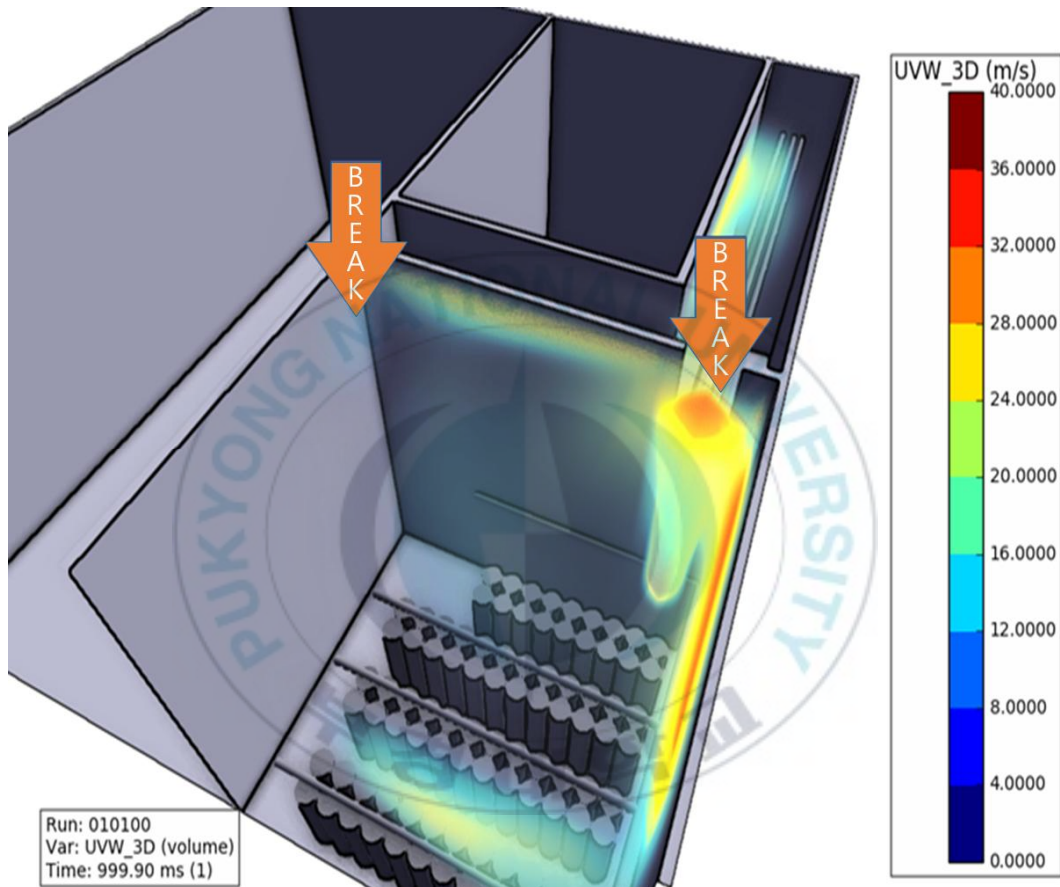


Fig. 28. Wall breakage after 1 second.

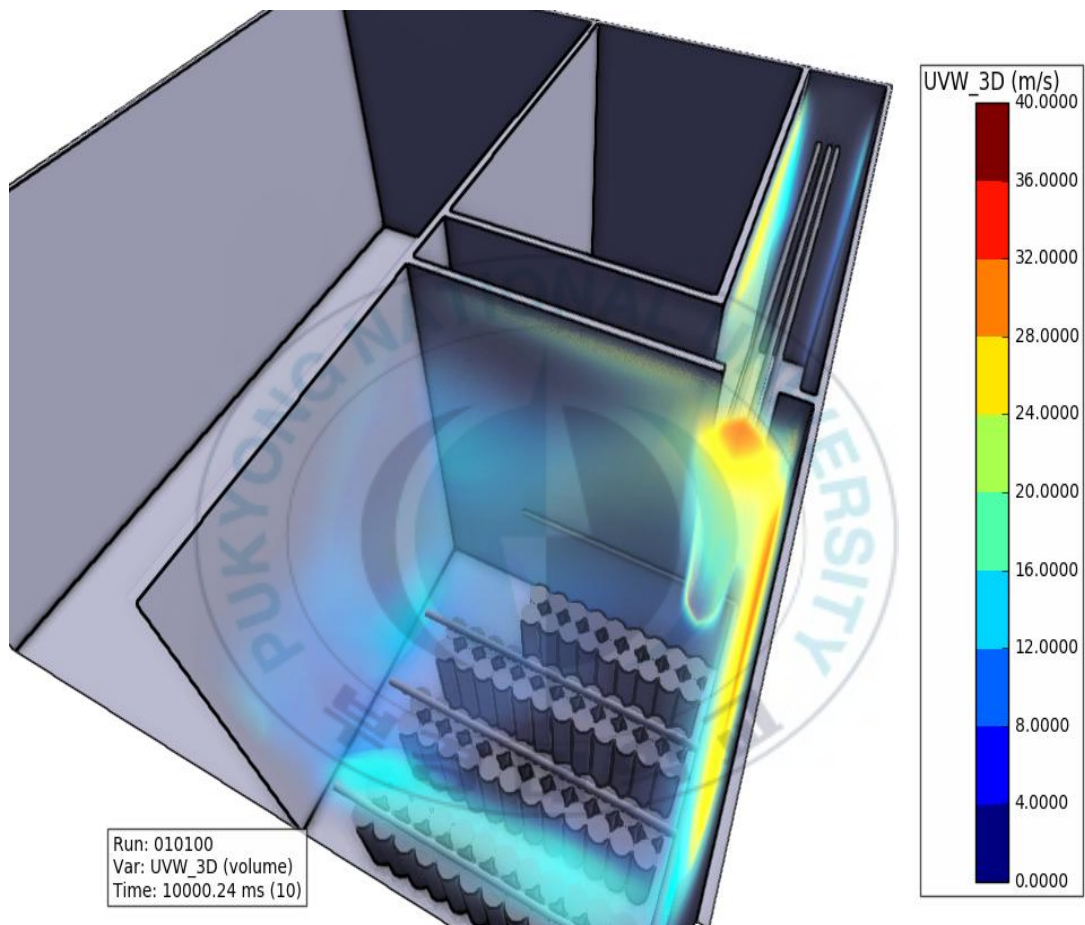


Fig. 29. Wall breakage after 10 seconds.

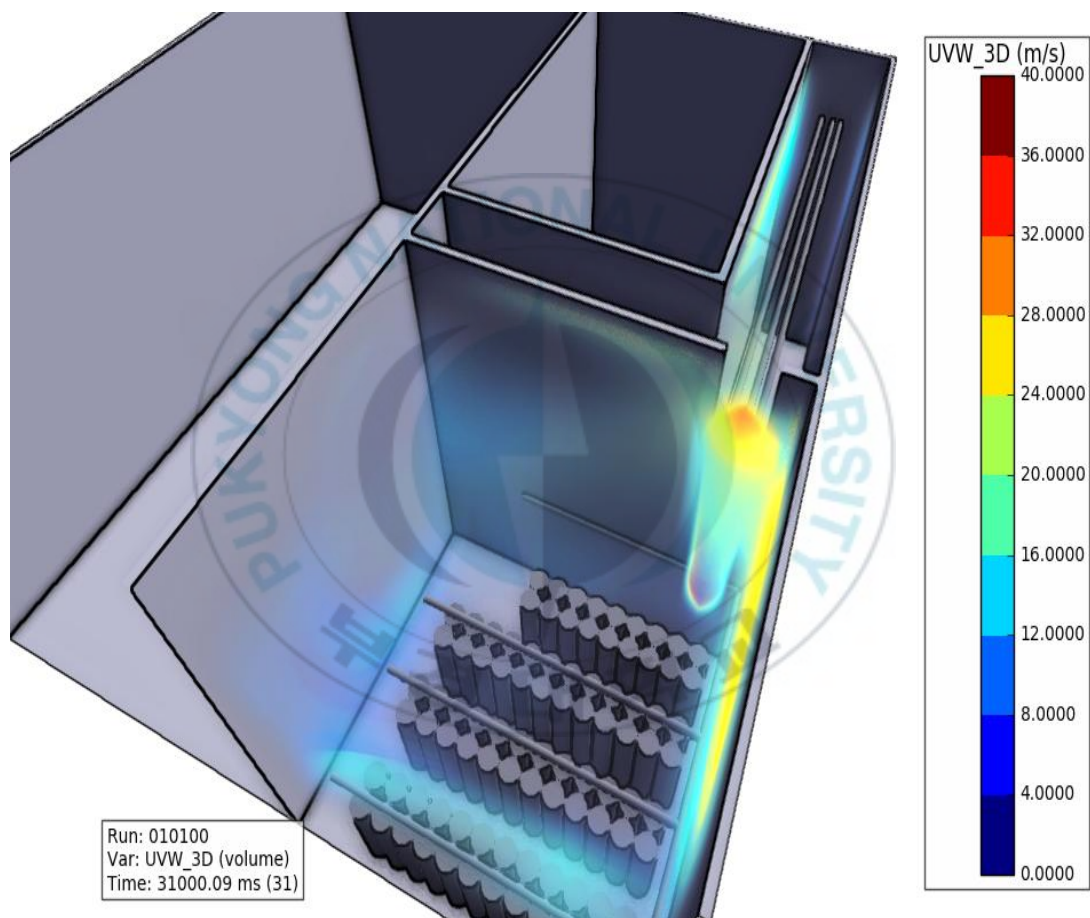


Fig. 30. Wall breakage after 31 seconds.

3-5. 재해발생 원인

3-5-1. CO₂ 소화약제 방출 원인

노후된 자동화재탐지설비 교체공사 작업 시 CO₂ 방출을 방지하기 위해 방호구역 전체에 이산화탄소 소화설비의 방출 방지조치를 하여야 한다. 그러나 사고 발생 당일에는 작업이 진행되는 MCC룸 1개소에 대해서만 기동 솔레노이드밸브에 CO₂ 방출 방지조치인 Locking pin을 설치하였으나, 전선 철거 작업 중 1층과 3층 전기실의 솔레노이드밸브가 오 신호를 받아 작동하면서 CO₂ 저장용기 133 병 모두가 방출되었고, 집합관실 상부 벽면 2개소와 작업발판 등이 파손되었으며, 이산화탄소 집합관실 내 선택밸브 1개가 파손되었다. Photo 1은 Locking pin이 설치된 솔레노이드 밸브를 나타내고 있다.

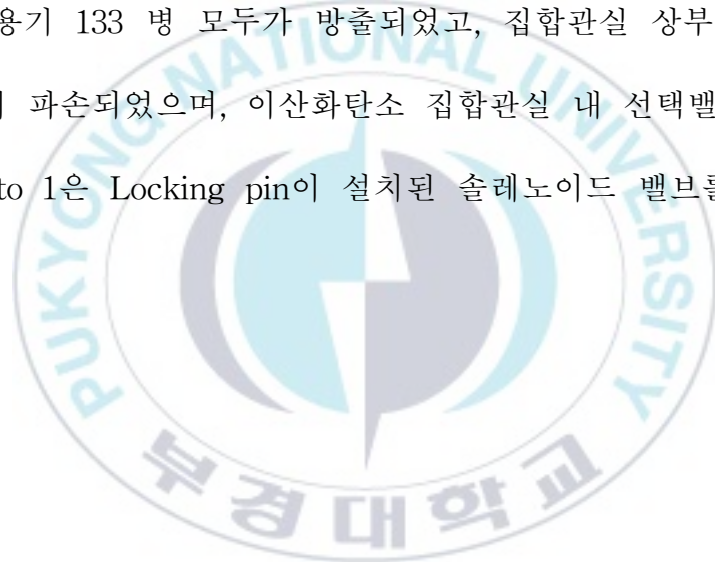




Photo 1. Locking pin installed on solenoid valve.

3-5-2. 선택밸브 이탈 원인

3-5-2-1. 나사부분의 파손형태

P형 수신기에 2개 방호구역에 대해 화재감지 오 신호가 표출되면서 해당 방호구역 기동 용기함의 솔레노이드밸브가 작동하여 기동용기가 개방되고, 기동용 가스가 동 배관을 통해 이동하여 해당 방호구역 선택밸브와 CO₂ 저장 용기를 개방시켜 CO₂가 해당 방호구역으로 방출되면서, 인접한 선택밸브 (신호가 작동하지 않은 방호구역)는 상대플랜지에 완전하게 체결되지 않아 상대적으로 강도가 약화 되었으며, 이 선택밸브가 CO₂의 압력을 견디지 못하고 플랜지로부터 이탈하면서 CO₂가 집합관실 내부로 방출되었다.

플랜지에서 이탈한 선택밸브 나사부분이 심하게 뭉그러졌으며, 선택밸브의 슛나사와 상대플랜지의 암나사 산 윗부분만 전체적으로 균일하게 뭉그러져 있었다. 상대플랜지의 나사부는 윗부분에 약간 뭉그러진 형상이 보이기는 하나 전반적으로 나사산 형태를 유지하고 있었으며, Photo 2와 같다.

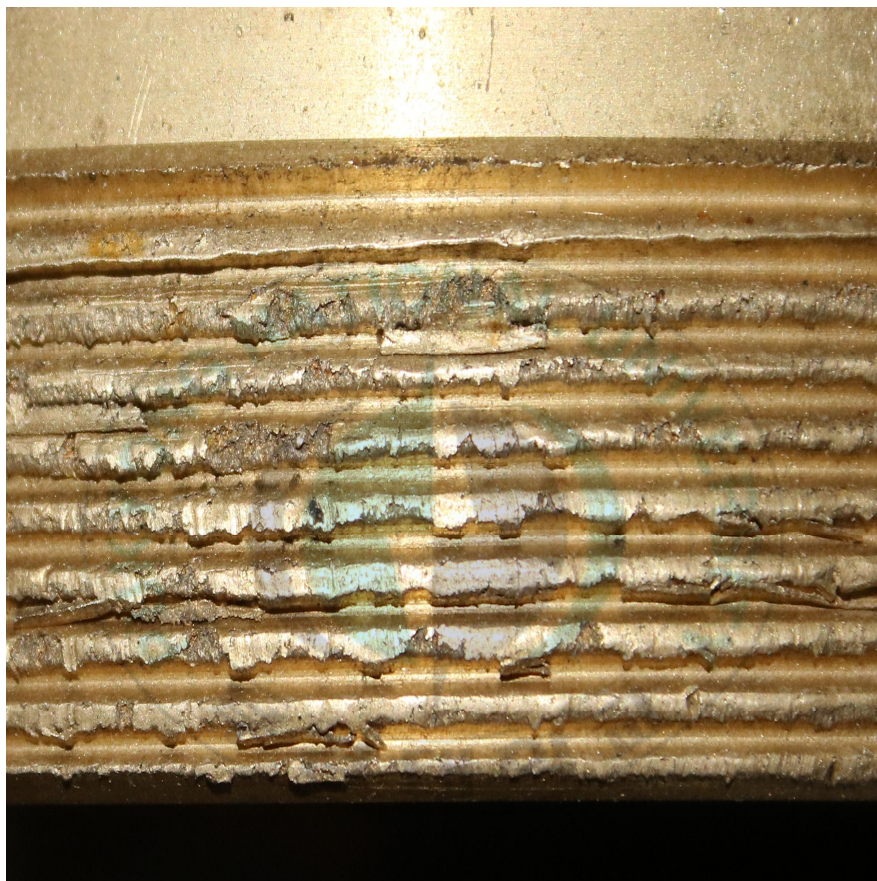


Photo 2. Threads on the crushed valve side.

3-5-2-2. O-ring의 설치상태

선택밸브 체결 시 기밀유지를 위한 O-ring이 홈 안의 제자리에 안착되어야 하나, 홈에서 이탈되어 위쪽으로 튀어나온 상태에서 선택밸브 본체와 상대 플랜지가 체결됨으로써 전체 나사산 9산 중 2산 정도가 체결되지 못하였다.

Photo 3은 현장에 남아있는 O-ring의 한쪽 부분(오른쪽 끝)이 O-ring 홈에서 이탈되어 인입 배관 플랜지면 바닥으로 튀어나와 눌러붙어 접촉부가 불일치하여 완전하게 체결되지 못하고, 암나사와 숫나사의 나사산이 서로 맞물리는 높이에 차이가 있어 나사산의 끝부분에 하중이 집중되면서 나사산 체결 길이 부족으로 나사산 자체가 하중을 견디지 못하고 뭉그러지지는 형상을 확인할 수 있다.

Photo 4는 O-ring의 끝 단면의 형상이 눌리지 않고 정상적으로 잘 안착이 되어있어 원래의 형태인 원형과 기밀을 잘 유지하고 있는 모습을 보여주고 있다.

Photo 5는 O-ring의 끝 단면이 눌러지면서 형상이 타원형이 되면서 기밀유지가 되지 않고, 압력이 걸려 선택밸브가 이탈되는 원인이 되었다.

해당 내용은 Photo 3과 Photo 5와 같다.

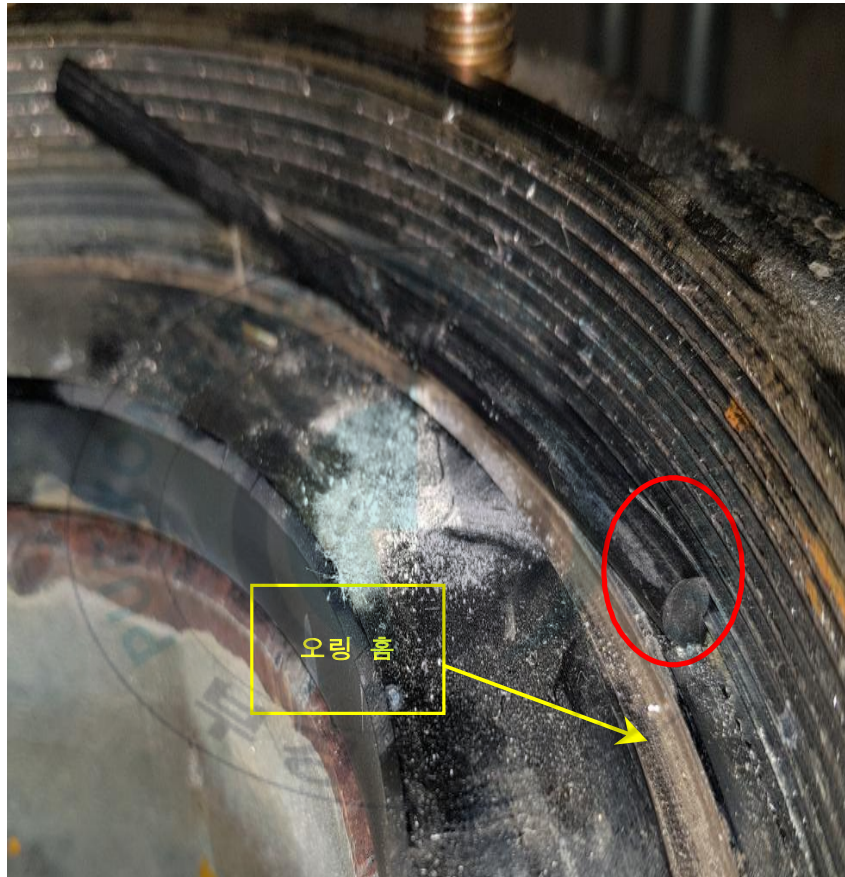


Photo 3. O-ring installed away from the O-ring groove
shapes of flange side screws.

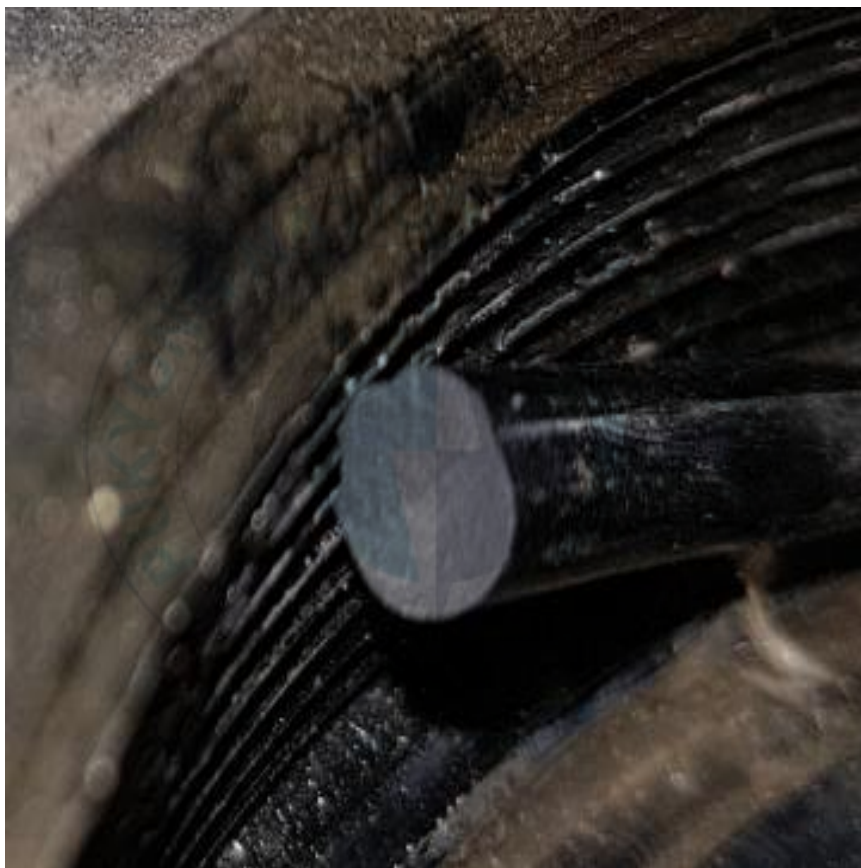


Photo 4. Normal side (Round type).



Photo 5. Pressurized side (Oval type).

3-5-2-3. 상대플랜지 상태

선택밸브가 체결된 상대플랜지(나사 박음식 플랜지, Threaded Flange)는 규격품이 아닌 것으로 보이며, 판 플랜지 형태로써 외경은 약 280 mm이며, 나사부 내경은 선택밸브 외경에 맞추어 약 200 mm로 가공되었고, 나사길이(높이)는 약 20 mm이다.

사고 당시 CO₂ 최대압력 3.6 MPa를 기준으로 해당 선택밸브에 KS에 따른 규격품 나사 박음식 플랜지로 사용을 가정할 경우, 호칭압력 PN110을 채택하여야 하며 이때의 나사길이는 최소 48 mm이어야 하나, 사고 발생 플랜지의 나사길이는 20 mm에 불과하여 부적합한 상태인 것으로 보인다. KS에 따른 규격품 나사 박음식 플랜지의 나사길이 산출 결과는 Table 4와 같다.

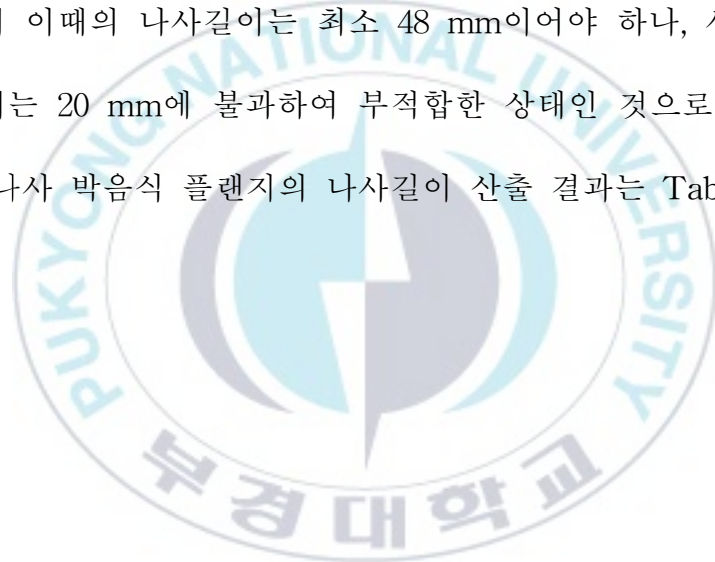


Table 4. Results of thread length calculation of standard screw
gourmet flanges according to KS

①	②	③	④
At the time of the accident CO ₂ maximum pressure at selection valve position	Flange class according to ASME specification available for 3.6 MPa	ASME flange PN nominal pressure corresponding to class 600	PN110 nominal diameter of screw gourd flange (DN) 125 reference screw length
3.6 MPa	Class 600	PN110	48 mm
CO ₂ diffusion simulation results	ASME B16.5	KS B 1426 Annex part I	KS B 1426 Annex table 16

3-5-2-4. 선택밸브 이탈 원인 추정

선택밸브의 나사체결부의 나사길이가 배관에 가해진 CO₂의 압력을 견디기에 충분하지 않은 구조로 설계되었으며, 가공 불량 등으로 암나사와 스톱나사의 치수가 불일치하여 정상적인 체결이 이루어지지 않음으로써 체결부의 강도가 유지되지 못하였다.

또한 체결 과정에서 O-ring이 이탈하여 선택밸브 바닥에 끼어 나사산 2산이 미체결 됨으로써 나사체결부의 강도가 더욱 약화되어 나사부가 CO₂ 압력을 견디지 못하고 뭉그러지면서 선택밸브가 이탈된 것으로 보인다.



3-5-3. 작업자의 재해발생 원인

자동화재탐지설비의 노후 소방시스템(D-MUX) 중계기를 신규 소방시스템(NOTIFIER)으로 교체하면서, 노후 소방시스템과 P형 수신기와의 연결을 끊고, 이 P형 수신기에 신규 소방시스템을 연결한 후 노후 시스템과 연결된 케이블(전선)을 절단, 중계기 철거 및 자재 정리작업 등을 실시하였다.

당일 사무실동 내 지하1층 MCC룸에서 작업자 12명이 노후 소방시스템 철거 등의 작업을 하였고, CO₂ 집합관실 옆 이동통로에서 작업자 3명이 자재정리 작업을 수행하는 중이었다. CO₂ 집합관실 저장용기가 작동하면서 CO₂ 가스가 이동통로 방향으로 확산되어 자재 정리작업을 하던 작업자 3명 중 2명이 사망하고 1명이 부상당하는 일이 발생하였으며 사고위치는 Fig. 31과 같다. 따라서 사고원인은 다음과 같이 살펴볼 수 있다.

1) 화재감지 오 신호 방지조치 미흡

노후 자동화재탐지설비의 교체 작업으로 기존 케이블 소선(A/B 감지기, 사이렌 방출확인)을 2가닥 이상 동시에 절단하는 과정에서 금속제 케이블커터를 통해 단락 회로가 구성되어 CO₂ 소화설비의 작동을 유발시킬 수 있는 화재감지 오 신호가 발생하여 CO₂ 소화설비가 작동하였으며, 사전에 공사와 관련하여 작동이 우려되는 CO₂ 소화설비 중 일부에만 기동 솔레노이드 밸브에 Locking pin을 설치함으로써 Locking pin이 설치되지 않은 소화설비가 오 신호를 받아 작동하게 되었다.

2) CO₂ 소화설비의 선택밸브 이탈

화재감지 신호를 받고 CO₂ 저장 용기 133 병 모두가 개방되면서 CO₂가 스가 전량 방출되었으며, 이로 인해 인접 선택밸브(이탈된 선택밸브)에 가해진 CO₂ 압력을 이탈된 선택밸브 나사부가 견디지 못하고, 강도가 부족하여 선택밸브가 플랜지에서 이탈함으로써 고압의 CO₂가 가스집합관실 내부로 방출되었다.

3) 가스 집합관실 벽면 파손

가스 집합관실 내부로 방출된 CO₂의 압력에 의해 석고보드로 된 가스 집합관실 벽면 상부가 파손되었고, 파손된 벽면을 통하여 방출된 CO₂가 인접한 이동통로 전체로 확산되면서 자재 정리작업을 하던 작업자 3명이 CO₂에 질식되어 사망자 2명과 부상자 1명이 발생하였다.

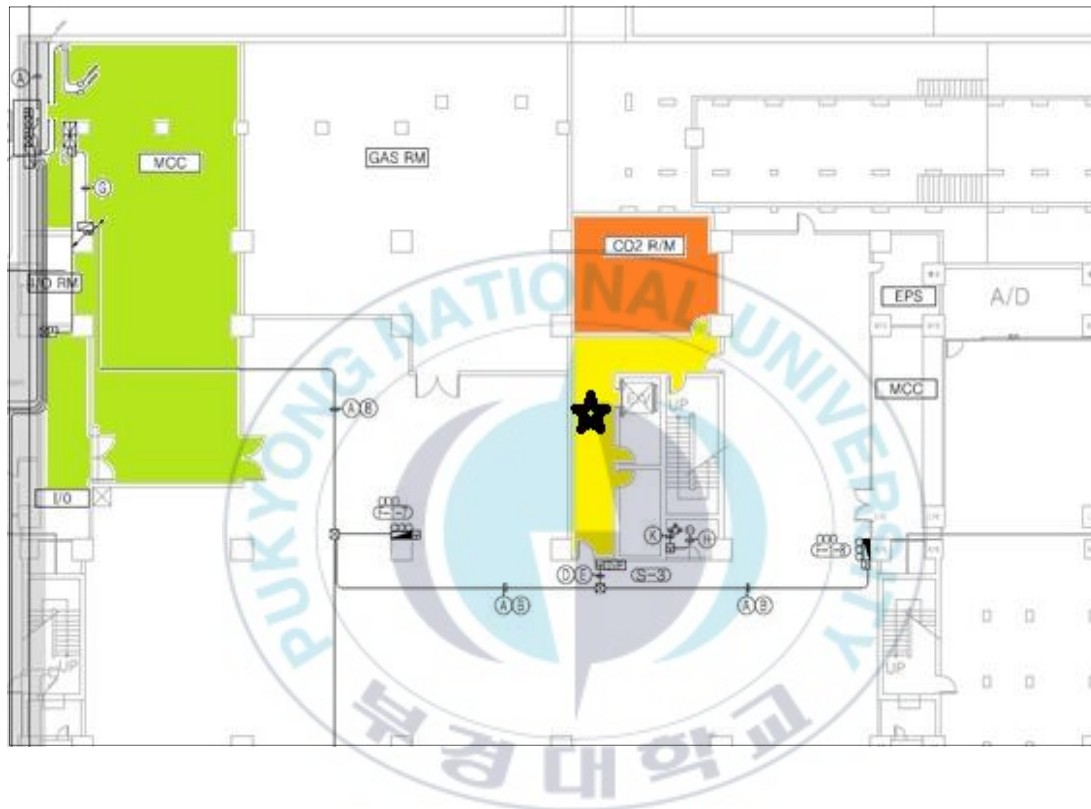


Fig. 31. CO₂ storage room and MCC electrical room layout plan.

4. 이산화탄소 소화설비 사용 사업장 실태조사

4-1. 실태조사 개요

2018년 OO전자(주) 이산화탄소 소화설비의 연결 밸브 파손으로 인한 이산화탄소 소화약제 누출사고로 사상자 3명이 발생하였다. 이후 이산화탄소에 의한 질식사고 예방 대책을 마련하기 위하여 사업장 등에 산재되어 있는 이산화탄소 소화설비의 현황 및 관리 상태를 파악하였다.

실태조사 범위는 제조업 사업장을 우선 선정하였고, 제조업 사업장의 수가 적으면 근로자가 많은 사업장을 기준으로 하였으며, 이산화탄소 소화설비 보유 사업장 중 호스릴 방식만 보유하고 있는 사업장은 선정대상에서 제외하였다.

이산화탄소 소화설비의 설치가 오래된 사업장 및 방호구역이 다수인 사업장을 선정하여 282개소를 대상으로 실태를 조사하였다.

실태조사의 주요 내용은 이산화탄소 소화설비의 저장소 업종 분포, 저장소 설치 현황, 저장소 검사, 소화약제 보유량, 저장소 관리현황 등을 조사하여, 이산화탄소 소화설비 안전 대책을 제시하였다.

4-2. 실태조사 분석결과

4-2-1. 산업업종 분포

실태조사 결과, 이산화탄소 소화설비가 설치된 사업장 282개소에 이산화탄소 소화약제 저장소는 630개소이고, 담당하는 방호구역은 2,011개소로 조사되었다.

지역으로는 경남권(부산 · 울산 · 경남), 경북권(대구 · 경북), 수도권(서울 · 인천 · 경기), 전남권(광주 · 전남 · 제주), 전북권(전북), 충남권(대전 · 세종 · 충남), 충북권(충북 · 강원)으로 구분하였으며, 수도권이 113개 사업장, 242개(28%) 저장소가 있고, 다음이 경남권으로 62개 사업장에 120개(19%) 저장소가 있으며, 충청권 순으로 분포되어있다.

업종으로는 제조업, 전기 · 가스 · 증기 및 수도사업, 서비스업 및 기타 서비스업, 운수업 · 운수창고 및 통신업, 기타로 구분하였으며, 제조업이 441개(70%) 저장소이며, 전기 · 가스 · 증기 및 수도사업이 22개(5%) 저장소 순이었으며, Table 5와 Table 6과 같다.

Table 5. Regional business sites

Categorized by industry	Gyeong nam region	Gyeong buk region	Metro politan area	Jeon nam region	Jeon buk region	Chung nam region	Chung buk region
Total business (282 places)	62	26	113	20	11	22	28
CO ₂ storage room (630 rooms)	120	34	242	60	17	88	69

Table 6. Distribution of CO₂ storage industries

Industry classificati- on	Manufac- turing industry	Electricity, Gas, Steam and Water services	Service industry, Other ser- vice industry	Transporta- tion, Ware- houses and Telecomm- unications.	etc.
CO ₂ storage room (630 rooms)	441	22	34	12	121

4-2-2. 소화약제 저장소 설치현황

조사 대상 기준으로 연도별 이산화탄소 소화설비 소화약제 저장소는 전체 630개소 중 608개소는 설치연도가 확인이 되었지만, 나머지 22개소는 설치연도가 확인되지 않았다.

설치연도가 확인된 소화약제 저장소를 보면, 1980년대까지 23개소가 설치되었으며, 1990년대에 293개소로 이산화탄소 소화설비가 12.7배로 급격하게 증가하였다. 이는 가스계 소화설비 중 소화성능이 우수한 이산화탄소 소화설비 설치로 이산화탄소 저장소가 급속히 증가 하였으며, 2000년대 이후 국제적으로 환경에 대한 관심을 증대하면서 대기 중 온실가스의 과다 배출로 인하여 지표 부근의 대기 및 바다의 평균 온도가 상승하는 현상을 방지하기 위한 국제 협약인 기후변화 협약(UNFCCC)을 체결하였고 구체적인 이행을 위하여 1997년 12월 일본 교토에서 개최된 회의에서 교토의정서가 채택되면서 선진국의 온실가스 감축 목표치가 규정되었다. 기후변화 협약의 체결과 교토의정서의 채택 이후 감축대상 가스는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 불화탄소(PFC), 수소화불화탄소(HFC), 불화유황(SF_6) 등 6가지로 지정되었고, 배출가스 중 대부분을 이산화탄소가 차지하여 이산화탄소를 중심으로 사용에 제약이 가해지면서 이후에 이산화탄소 저장소의 설치가 소폭 감소하였으며 일정수준을 유지한 것으로 보이며 Fig. 32와 같다.

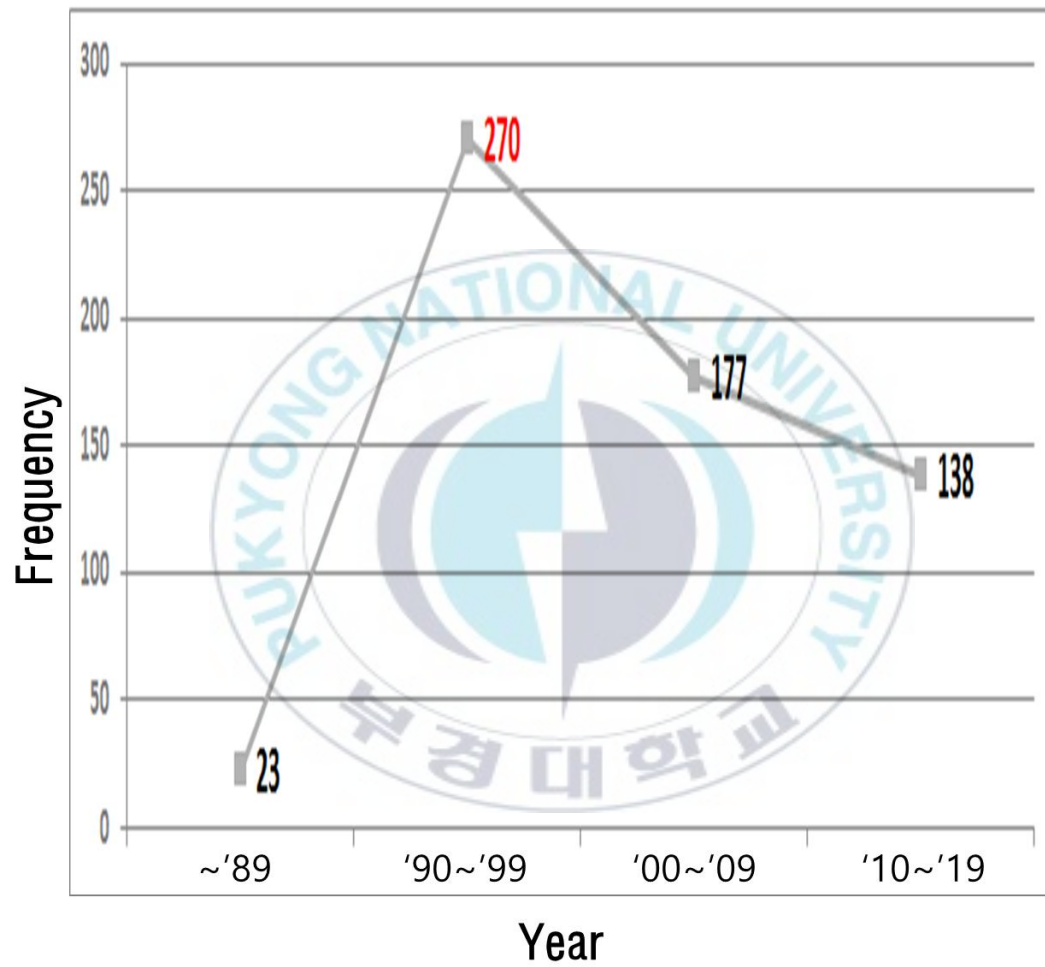


Fig. 32. Storage installation status.

4-2-3. 방호구역

방호구역이란 저장용기의 용량이나 배관의 구경 등을 수리학적으로 계산하여 밸브 1개가 담당하는 구역을 말한다.

가스계 소화설비인 이산화탄소 소화설비에서 이산화탄소 방출로 인한 인명피해 사고가 다수 발생하고 있다. 이산화탄소는 자체독성은 낮으나, 방출 농도에 따라 산소농도 저하로 사람이 질식하는 사고 위험성이 매우 높다. 따라서 이산화탄소 소화설비 설치대상은 사람이 없는 장소로 국한하고, 방호구역을 별도로 설치하도록 법적인 규제 강화에 대한 규정검토가 필요하다.

이산화탄소 소화설비에서 소화약제 방출 대상인 방호구역은 전체 2,011개소이며, 저장소는 630개소이며 이중 4개소는 파악되지 않았다. 저장소 1개소가 평균적으로 담당하는 방호구역은 3개소이며, 보통 방호구역이 1개소에서 5개소로 담당하는 저장소가 558개소(89%)로 대부분을 차지하고 있으며, 저장소 1개소가 최대로 담당한 방호구역은 28개소이며, 주요 현황은 각각 Table 7과 Fig. 33에서 언급되고 있다.

Table 7. Number of protection zones per CO₂ storage room

Number of prot- ection zone	CO ₂ storage room	Number of prot- ection zone	CO ₂ storage room	Number of prot- ection zone	CO ₂ storage room
1	244	11	3	21	1
2	114	12	1	22	0
3	120	13	3	23	0
4	49	14	3	24	1
5	31	15	2	25	0
6	9	16	1	26	0
7	15	17	4	27	0
8	6	18	0	28	5
9	4	19	1	29	0
10	8	20	1	30	0

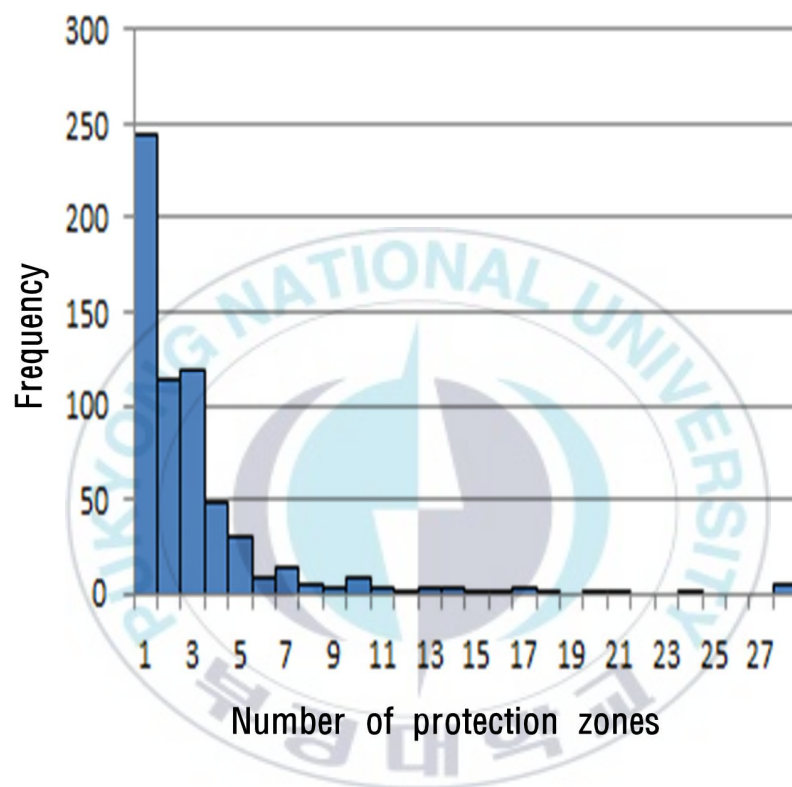


Fig. 33. Number of protection zones per CO₂ storage room.

4-2-4. 소화설비 검사

특정소방대상물에 설치된 소방시설은 ‘화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률’에 따라 대상물에 설치되어 있는 소방시설 등에 대하여 자체 점검을 정기적으로 실시하거나 관리업자 등을 통하여 정기적으로 점검하도록 하고 있으며, 구체적으로 점검방법 및 횟수 등에 따라며 특정소방대상물의 관계인이 매년 규정에 맞게 관리하도록 하고 있으나, 인명사고와 관련한 안전사항을 고려한 시설 및 용기 검사 등은 미흡한 편이다.

이산화탄소 소화설비 소화약제 저장소 630개 중에서 제조업과 제조업 외로 구분하였으며, 소화설비 검사를 자체적으로 시행하는지, 외부에 위탁하여 진행하는지에 따라 구분하였다.

외부에 위탁하는 사업장이 전체 조사 대상 중 568개소(90%)이며, 검사를 사업장 자체적으로 시행하는 사업장은 55개소(9%)이다.

자체검사를 실시하는 사업장 중에서 제조업은 53개소(8.5%), 제조업 외는 2개소(0.3%)이고, 파악되지 않은 대상이 7개소이며, Fig. 34와 같다.

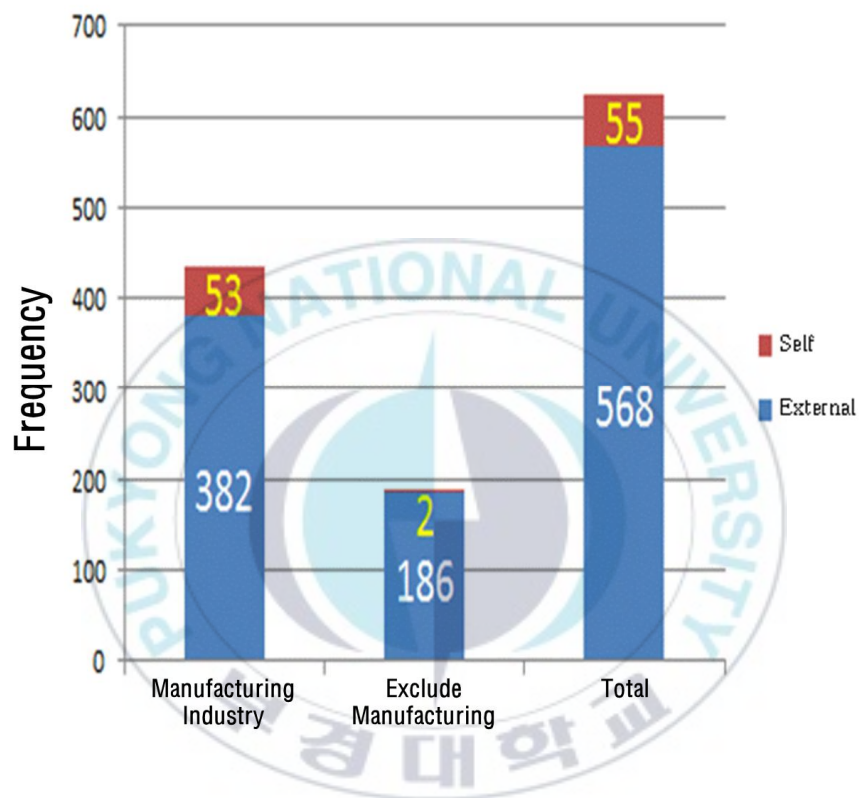


Fig. 34. Inspection status of CO₂ fire extinguishing facilities.

4-2-4-1. 검사 주기

이산화탄소 저장 용기는 ‘고압가스 안전관리법 시행규칙’에 따라 고압가스 외의 불연가스 저장업체는 매 2년마다 정기 검사를 받도록 검사 기간을 정하여 관리하고 있으며, 이산화탄소 소화약제 저장시설과 저장 용기도 이 법규에 따라 관리하고 있다.

이산화탄소 저장소 630개소의 자체검사를 실시하는 주기는 1년 미만인 4개소, 1년 마다 561개소, 2년 마다 17개소, 3년 이상이 48개소로 나타났으며, 전체 630개소 중에서 2년 이하인 582개소(92%) 대부분은 검사 주기가 양호하지만, 48개소(8%)는 3년 이상으로 관리가 미흡한 것으로 나타났다.

지역적으로는 2년 마다 자체검사를 하고 있는 곳이 수도권, 경남권, 충청권 순으로 양호하게 검사하고 있으나, 3년 이상의 자체검사 주기를 실시하는 곳은 충북권, 전남권 순으로 관리가 잘되지 않고 있다.

고압가스 저장소는 고압가스 안전관리 법령에 따라 저장소와 저장용기에 대해 검사하고 있으며, 이산화탄소 소화설비의 저장소와 저장용기도 이 법령에 따라 관리되므로 소방 특수성에 맞는 실효성 있는 관리가 이루어지지 않고 있으며, 고압가스 일부로 취급되고 있어 소화약제에 의한 인명피해가 발생할 위험성이 잠재되어있다. 소방관련 법령에는 방호구역이나 방호대상물에 대한 화재 진압에 초점을 맞춘 소화약제 설계에 관한 규정은 있으나, 안전관리 규정은 미흡한 수준이므로, 가스계 소화설비에 대한 유지·관리와 안전관리에 대한 세부 규정을 마련해야할 필요성이 있으며, 권역별 사업장에서 실시하는 자체검사주기 현황은 Table 8과 같다.

Table 8. Self-inspection cycle

Categorized by industry	Gyeong nam region	Gyeong buk region	Metro- politan area	Jeon nam region	Jeon buk region	Chung nam region	Chung buk region
Less than a year			4				
1 year	112	30	228	52	13	86	40
2 years	6		5			2	4
More than 3 years	2	4	5	8	4		25

4-2-5. 소화약제 보유량

조사대상 사업장 282개소에서 이산화탄소 소화설비 소화약제 저장소는 630개소이고, 소화약제 총보유량은 2,160톤이며, 저장소 1개소당 평균 소화약제의 양은 3,428 kg/개소이다.

이산화탄소 소화약제 총량을 많이 보유하고 있는 업종은 반도체, 석유화학, 자동차, 알루미늄, 발전소가 많고, 지역으로는 수도권(757톤), 경남권(482톤), 충북권(376톤) 순으로 많이 보유하고 있으며, 소화약제의 양과 업종 현황은 각각 Table 9와 Table 10과 같다.

Table 9. Amounts of CO₂ fire extinguishing agent

(ton)

Categorized by industry	Gyeongnam region	Gyeongbuk region	Metro-politan area	Jeonnam region	Jeonbuk region	Chungnam region	Chungbuk region
Total amount of fire extinguish agent (2,160 ton)	482	173	757	88	37	247	376

Table 10. Businesses with a lot of fire extinguishing agents

Company	Amount (ton)	Company	Amount (ton)
SH1 Icheon	253	SO	59
SH2 Cheongju	200	L	21
S1 Hwaseong	120	DS	47
S2 Onyang	44	LA	38
SS1 Chenonan	91	LS	23
SS2 Eonyang	53	P	15
SS3 Ulsan Aluminium	92	H Keumsan	20
KSEP Co., Ltd. Samcheonpo	72	D Steel	20

4-2-6. 저장소 관리 현황

4-2-6-1. 저장소의 위치 및 환기시설

이산화탄소 소화설비 소화약제 저장소 630개소 중 지상층에 있는 저장소는 468개소(74%), 지하층에 있는 저장소는 162개소(26%)로 지상에 설치한 것이 대부분이며, 이산화탄소 가스의 특성상 무색, 무취하며 공기보다 무거워 바닥에 체류하므로 인명사고의 우려가 상존하며, 특히 지하층이나 무창층이 있는 저장소는 이산화탄소 방출시 인명피해를 방지하기 위하여 최소한의 안전장치가 필요하다.

‘국가화재안전기준’에서는 이산화탄소 소화약제가 방출할 때는 이산화탄소 농도를 희석시키기 위해 환기시설을 설치하도록 규정하고 있으나 세부적인 설치기준이 없는 상태이다. 실제 사업장에서는 인명피해를 최소화하기 위한 배출설비로 환기시설이 있으며, 환기시설이 설치된 저장소는 461개소(73%)이고, 이 중 이산화탄소의 특성을 고려한 강제 환기방식은 283개소로 전체의 절반에도 미치지 못하며, 특히 상부에 환기구를 설치한 경우에는 공기보다 무거운 이산화탄소를 효과적으로 배출하는 데에는 한계가 있으며, 또한 정확한 기준조차 없는 자연 환기방식의 178개소는 효율성 및 관리적인 측면에서 많은 문제점을 내포하고 있다.

환기시설이 없는 저장소는 166개소(27%)이고, 파악되지 않는 저장소가 3개소로 많은 사업장이 안전관리가 미흡한 것으로 나타났으며, 최소한의 안전장치인 저장소의 위치와 환기시설에 대한 구체적이고 세밀한 기준이 마련되어야 하겠다. 소화약제 저장소의 위치와 환기시설 현황은 Table 11과 같다.

Table 11. Storage location and ventilation system

	Storage location		Ventilation system			
	Ground	Under ground	Forced	Natural	None	Unidentified
Storage	468 (74%)	162 (26%)	283 (45%)	178 (28%)	166 (27%)	3 (0%)

4-2-6-2. 안전관리 (시설 요인)

이산화탄소 소화설비는 이산화탄소 방출 시 가스가 고압으로 방출되면서 해당 구역의 산소농도를 짧은 시간 내에 떨어뜨려 소화하는 시스템으로 질식효과가 우수하고, 잔존물이 남지 않는 장점이 있지만, 같은 공간에 사람이 있는 경우에는 질식하여 사망에 이르게 하는 등 인명피해를 유발할 수 있으므로 시설적 안전대책이 필요하다.

시설측면의 안전대책으로는 가스가 다른 구역으로 확대되지 않도록 방호벽이나 방호구역을 설치하고, 이산화탄소 소화설비를 고압가스 안전관리 허가 대상으로 규정하여 법적으로 관리하여야 하며, 이산화탄소 농도를 측정할 수 있는 가스농도 측정기를 인근에 비치하는 등 효율적이고 체계적인 안전관리시스템이 마련되어 있어야 한다.

이산화탄소 소화약제 저장소 630개소 중에서 구획되어 있어 작업자에게 직접 노출되는 않는 저장소는 526개소(83%)이고, 구획되어 있지 않아서 이산화탄소 소화약제 방출시 작업자에게 직접 노출되는 저장소가 100개소(16%)와 파악되지 않는 4개의 저장소는 시설관리가 미흡한 것으로 파악되었다.

고압가스 안전관리 허가 대상은 114개소(18%)이고, 비허가 대상 515개소(82%)와 파악되지 않는 저장소가 1개소는 법적인 관리가 되지 않고 자율에 의존하고 있어 안전사고 우려가 상존하고 있다.

가스농도 측정기가 설치된 저장소는 276개소(44%)인 반면에 미설치 저장소는 351개소(56%)와 파악되지 않는 저장소가 3개소로 기본적인 가스농도 측정기도 비치하지 않는 곳이 절반이 넘고 있다.

방호구역 등 구획된 저장소가 562개소(89%)이고, 구획되지 않는 저장소는 56개소(9%)이며, 파악되지 않는 저장소 12개소이다.

이산화탄소 소화설비가 있는 장소나 가스가 방출된 방호구역에 들어갈 때는 이산화탄소나 산소 농도를 측정할 수 있는 가스농도측정기를 비치하고, 유사시 사용할 수 있는 공기호흡기 등을 인근 장소에 비치하여야 한다.

작업 시에는 작업시작 전과 작업 도중, 작업 후에 이산화탄소에 의한 질식사고 방지를 위하여 방호구역 내와 주변에 이산화탄소나 산소농도를 측정하고 충분하게 환기한 후에 방호구역 내에 진입한다.

작업노출상태, 가스측정기 비치 및 방호구역 설치 현황은 Table 12와 같다.

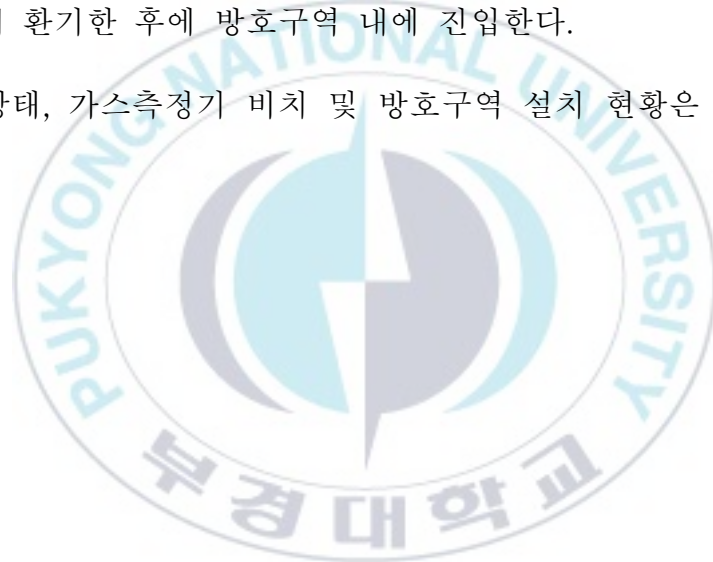


Table 12. Safety management of facilities

Workers exposed directly to the release of fire extinguishing agents		Permission for high-pressure gas safety management		gas concentration meter		Protection area	
Unexposed	Exposure	Permission	No permission required	Installation	Not installed	Installation	Not installed
526 (83%)	100 (16%)	114 (18%)	515 (82%)	276 (44%)	351 (56%)	562 (89%)	56 (9%)
626 (Unidentified:4)		629 (Unidentified:1)		627 (Unidentified:3)		618 (Unidentified:12)	

4-2-6-3. 안전관리 (행정 요인)

이산화탄소는 약제방출 시 산소농도의 저하로 질식사고 위험성이 매우 높으므로 시설물의 관리자나 작업자에게 이산화탄소 소화설비에 대한 안전 교육 등을 항상 실시해야 한다.

또한 작업 전 작업자에게 화재 발생이나 비상시 대피요령, 소화설비에 대한 위험요소와 방지대책, 공기호흡기 사용법 숙지 등 안전교육을 실시하고, 설비의 유지, 보수과정 중 오작동 부주의 및 고장 등에 따른 소화약제 방출 시 위험요인이 발생하지 않도록 현장 관리감독자는 안전교육과 훈련을 철저히 실시해야 한다.

전체 방호구역 2,011개소 중에서 작업자의 근무 여부나 이산화탄소 방출시 경보방법을 살펴보면, 작업자가 근무하는 방호구역은 1,724개소(86%)이며, 근무하지 않는 방호구역은 287개소(14%)로 대부분의 방호구역 내 작업장에서 작업자가 근무하고 있으며, 출입 시에 출입자 교육이나 훈련을 실시하는 곳이 1,755개소(87%)이며, 출입자 교육을 실시하지 않는 곳이 214개소(11%)이고, 파악되지 않는 곳이 42개소(2%)로 확인되었다.

이산화탄소는 방출 후에 산소 농도가 급격히 떨어지고, 질식사고 위험성이 매우 높으므로 이산화탄소 소화설비가 설치된 방호구역에서는 소화약제 방출 시 피난에 대한 구체적이고 단계별 행동 매뉴얼을 제작하고, 사용설명서를 비치하며, 관계자는 이산화탄소 소화설비에 대한 사용방법과 위험요인 등 작업자에게 안전교육을 실시하고, 화재나 비상시 대피요령이나 이산화탄소 소화약제 방출시 위험 요소와 공기호흡기 사용법을 숙지하여야 하고, 위험요

인이 발생하지 않도록 현장 관리감독에 대한 안전교육과 훈련을 철저히 실시하여 사전예방과 사후대비토록 하여야 한다.

방호구역에서 작업자의 근무여부와 교육실시 등 현황은 Table 13과 같다.

Table 13. Working status of workers in the protected area

Worker's working status			Education and training			
Exist	None	Sum	Do	None	Unidentified	Sum
1,724	287	2,011	1,755	214	42	2,011

4-2-6-4. 위험경보 장치 및 경고표지

이산화탄소 소화설비는 질식사고의 위험이 잠재되어 있어 방호구역, 방호 구역 입구, 인근지역 등에 약제방출에 대한 위험성을 알리기 위해 음향경보 장치, 경보기, 방송설비, 위험 경고 표시판 등을 설치하여야 한다.

전체 방호구역 2,011개소 중에서 이산화탄소 누출 시 경보 방법은 경보기가 1,906개소(95%), 방송설비가 62개소(3%)이며, 또한 경고표지가 설치된 곳은 1,692개소(84%)이고, 설치되지 않은 곳은 302개소(15%)로 파악되었다.

이산화탄소 소화설비는 방호구역 내와 부근에 소화약제가 영향을 끼칠 수 있는 장소에 위험경보 장치나 경고표지를 설치하도록 하고 있지만, 일부 저장소는 설치되지 않아 위험지역을 인식하지 못하는 경우도 있다.

경고표지는 누구나 쉽고 간단하게 인지할 수 있도록 출입문의 절반이상의 크기로 부착하고, 위험경보 장치를 활용하여 수시로 위험경보를 해주도록 조치해야 한다. 위험경보 장치와 경고표지 현황은 Table 14와 같다.

Table 14. Alert method for workers in protected area

Alerting method in case of carbon dioxide exposure					Warning sign			
Alarm	Broad-casting	Voice	Unidentified	Sum	Exist	None	Unidentified	Sum
1,906	62	3	40	2,011	1,692	302	17	2,011

4-2-6-5. 선택밸브 체결형식

사고가 발생한 ○○전자(주) 사업장과 같은 스크류(나사선) 형식의 선택밸브가 설치된 이산화탄소 소화약제 저장소를 살펴보면, 전체 이산화탄소 소화설비 소화약제 저장소 630개소 중 스크류(나사선) 형식은 430개소(68%)로 대부분의 저장소들이 높은 비율로 채택하고 있는 것을 보여주며, 그 외에도 용접식이 109개소(17%)이며, 기타 91개소(14%) 순으로 나타났다.

지역적으로는 수도권이 242개소(스크류식 117개소, 용접식 88개소, 기타 37개소)로 가장 많으며, 다음이 충청권으로 157개소(스크류식 132개소, 용접식 8개소, 기타 17개소), 경남권으로 120개소(스크류식 90개소, 용접식 5개소, 기타 25개소)로 나타났다.

이산화탄소 소화설비의 화재안전기준(NFSC 106)에 선택밸브는 방호구역이나 방호 대상물마다 설치하도록 하고, 각 선택밸브에는 그 담당 방호구역이나 방호 대상물을 표시하도록 되어 있으나, 선택밸브의 결합방법 등 세부 사항은 부재하고, 이산화탄소 소화약제가 방출되면 방호구역 내와 인근에 있는 사람이 다치거나 사망할 수 있으므로 방출 시 인명을 보호하고 대피하기 위한 보완 장치로 소화약제의 저장 용기와 선택밸브 사이의 집합배관에 수동 잠금밸브를 선택밸브 직전에 설치하도록 하고 있으나, 이산화탄소 소화설비 작동시 가스가 지연 방출되도록 안전장치 설치와 선택밸브 등 결합방법 등을 규정하도록 하여야 하며, 선택밸브의 결합상태 현황은 Table 15와 같다.

Table 15. Selection valve installation status

Catego- rized by ind- ustry	Gyeong nam region	Gyeong buk region	Metro- politan region	Jeon nam region	Jeon buk region	Chung nam region	Chung buk region	Sum
Screw (threaded)	90	28	117	54	9	75	57	430
Welded	5	4	88	1	3	6	2	109
etc.	25	2	37	5	5	7	10	91

5. 이산화탄소 소화설비 질식사고 예방대책

이산화탄소 소화설비는 ‘화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률’ 제9조 제1항 의거, 소방청 고시로 ‘이산화탄소소화설비의 화재안전 기준(NFSC 106)’에 의해 설치·유지되고 있으며, 시설기준 중심의 규정으로 인명피해를 방지하기 위한 안전대책 부분은 미비한 면이 많은 것으로 판단된다.

이산화탄소는 가스 특성상 사람들이 상주하거나 작업하는 곳에서는 안전사고의 우려가 상존하며 위험에 노출될 수밖에 없는 실정이다. 그러므로 이산화탄소 누출에 의한 질식사고 예방대책과 재발방지를 위한 관리·기술적 대책을 제시하였다.

1) 재해예방대책

(1) 소화설비 작동 방지조치 철저

소방시설 수리·유지·관리 등을 위한 작업 시 소화설비 작동 방지조치를 철저히 하고, 통풍이 잘되지 않는 지하실에 설치된 CO₂ 소화설비의 케이블 교체공사 등을 할 경우에는 소화설비가 작동되지 않도록 철거 대상 케이블의 올바른 선정 및 절단방법을 명확히 규정하고 준수하여야 한다.

(2) 선택밸브 나사부 체결 상태 확인 철저

CO₂ 소화설비의 선택밸브가 플랜지에서 이탈되는 위험을 방지하기 위하여 체결 나사부가 적정하게 조여져 있는지를 수시로 확인하는 등의 조치

를 철저히 하여야 한다.

(3) 가스집합관실 내부로 방출된 CO₂ 가스의 외부 누출 방지조치 철저

지하에 있는 가스 집합관실 내부로 방출된 CO₂ 가스가 저장실을 통하여 바깥으로 누출되지 않도록 적절한 강도의 외벽 설치하거나 방호구역에 준하여 과압 배출구 설치 등의 조치가 필요하다.

2) 재발방지를 위한 관리·기술적 대책

(1) 법적 요건에 부합하는 설계·시공

고압의 CO₂ 소화약제를 사용하는 CO₂ 소화설비는 선택밸브 전단에서 CO₂ 압력도 상당한 고압상태이므로 밸브, 배관, 배관부속품 등은 반드시 관련 법적 요건에 부합하는 설계·시공이 되어야 한다.

(2) 안전하고 통풍이 잘되는 지상에 설치

근원적으로는 지하에 설치된 집합관실 등에서 CO₂가 누출됨으로써 인접한 지하의 일반 작업구역에서 산소결핍 사고가 발생하지 않도록 지상의 안전하고 통풍이 잘되는 장소에 집합관 실을 설치하는 등 적극적인 안전 조치가 필요하다.

(3) 기술 자료를 활용한 유지·점검·보수작업

설계조건을 포함한 도면, 시방서, 사양서 등 제반 기술 자료를 확보하여 이를 근거로 정확한 유지·점검·보수작업을 수행할 수 있도록 하여야 한다.

3) 질식사고 방지를 위한 사전점검

일상적인 점검을 시행하고 이산화탄소 소화설비의 사고사례와 이산화탄소의 위험성에 대한 교육 및 경고표지 등 안전관리에 대한 점검 및 사전 점검사항을 철저히 실시하여 질식사고를 방지하여야 한다²⁰⁾.

- (1) 작업 시작 전 소방시설 운영 담당자와 함께 작업장소 도면 검토 및 현장 조사를 하여 소화설비의 종류, 배치도, 화재감지기의 종류 및 형식, 이산화탄소 소화설비 작동 위험성, 경보장치 작동, 대피 출입문 위치, 안전 조치 사항 등을 확인한다.
- (2) 이산화탄소 소화설비가 설치된 장소에서 작업 시에는 오작동 방지를 위해 자동·수동 전환스위치는 반드시 ‘수동’으로 전환(제어반의 솔레노이드밸브 연동정지)하고 잠금장치를 하여야 한다.
- (3) 건물 내 근로자들에게 사내방송 등을 통하여 작업일시 및 작업내용 등을 공지하여야 한다.
- (4) 관리감독자 또는 감시인을 배치하고 ‘관계자 외 출입금지’ 표지를 설치하고 공기호흡기를 비치하여야 한다.
- (5) 경보설비 및 이산화탄소 소화설비 감지기가 작동한 후 이산화탄소가 방출되기 30초 이내에 대피하는 방법이나 대피경로 및 장소를 파악하고, 이산화탄소의 유해·위험성 등 안전보건 교육을 실시한다.
- (6) 이산화탄소가 방출된 장소에 들어가기 전에 완전히 환기하고, 인명구조 등으로 출입하는 경우에는 공기호흡기를 착용하여야 한다.

6. 결 론

이산화탄소 소화설비는 질식사고의 위험성이 항상 존재하여 사람이 상주하는 곳에는 설치하지 않도록 규정하고 있지만, 시설물을 관리하는 관계자나 내부 작업이 요구되는 경우에는 접근이 불가피해 위험에 노출되고 있는 실정이다. 최근 일어난 ○○전자(주) 사업장의 이산화탄소 소화설비에서 이산화탄소 소화약제 누출사고는 이산화탄소 소화설비가 설치된 사업장에서는 언제든지 일어날 수 있는 사고 있다. 그러므로 이산화탄소 소화설비에서 누출로 인한 질식사고의 원인분석을 위하여 1D Transient analysis 활용하여 계통라인에서 이산화탄소 누출과정에서의 압력과 온도변화 등을 분석하고, 이탈된 선택밸브에서 누출된 이산화탄소량을 분석하고 개방된 밸브로 인한 방출된 양과 누출시간과 실제 시간을 비교하였으며, 전산유체역학을 이용한 이산화탄소 확산 시뮬레이션을 통하여 확산 경로 분석과 확산 특성을 확인하고, 작업자 위치에서의 산소-이산화탄소 농도와 누출 시 발생압력으로 인한 영향 등을 분석하였다.

이산화탄소 소화설비가 오래된 사업장 중 제조업과 근로자가 많이 근무하는 사업장을 기준으로 282개소 사업장을 대상으로 이산화탄소 저장소 업종 분포와 저장소 설치 추이, 저장소 검사현황, 저장소 관리현황 등을 확인하고, 다음과 같이 이산화탄소 소화설비 누출에 관한 분석 결과와 안전대책을 제시하였다.

1) 이산화탄소 소화설비의 계통라인 대한 1D Transient analysis를 활용하여 이산화탄소 누출과정을 분석함으로써 이탈된 선택밸브에서 누출된 이산화탄소량 분석, 이산화탄소 누출과정에서의 압력 변화 등을 분석하였으며, 전산 유체역학을 이용한 이산화탄소 확산 시뮬레이션을 통하여 확산 경로분석, 작업자 위치에서의 산소-이산화탄소 농도 분석, 누출 시 발생압력으로 인한 영향분석을 통하여 이산화탄소 누출과정에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- (1) 가스 집합관실 내부로 방출된 이산화탄소의 압력으로 인해 석고보드로 제작된 가스 집합관실 외벽의 상부가 파손되면서 인접한 통로로 CO₂가 누출되어 작업자의 위치에서 산소농도가 최저 5.3%까지 저하됨으로써 산소의 결핍으로 의한 질식사고가 발생하였다.
- (2) 이산화탄소 소화설비에서 이산화탄소의 방출 원인으로는 노후된 자동화 재탐지설비의 교체공사로 인하여 CO₂ 방출 방지조치인 Locking pin을 부분적으로 설치하였으나, 오 신호를 받은 다른 층 전기실의 기동 솔레노이드밸브가 작동하여 CO₂가 방출되었다.
- (3) 선택밸브가 이탈된 원인으로는 암나사와 슛나사의 치수가 불일치하여 나사산 2산 정도가 미체결 되었고, 이 과정에서 O-ring이 이탈되어 체결부의 강도가 더욱 약화된 나사부가 CO₂의 압력을 견디지 못하고 선택밸브가 이탈하였다.

(4) 사고 당시 이탈된 선택밸브 위치의 최대 압력은 3.6 MPa, 대기압 600 kPa로 가정하여 1D Transient를 통해 해석한 결과 이산화탄소의 누출량은 밸브의 이탈구에서 누출된 이산화탄소의 양과 개방된 밸브 2기로 방출된 양은 평균 15% 오차 내외에서 유사한 것으로 나타났다.

(5) 누출된 이산화탄소의 확산과정을 분석하기 위하여 FLACS v10.7 프로그램을 사용하였으며, 산소농도 분석한 결과 이산화탄소가 누출된 후 25초경에 작업자의 위치에서 산소농도는 10%이하이고, 이산화탄소의 누출이 완료된 50초경에는 최저 5.3%까지 산소농도가 낮아졌으며, 이는 작업자를 질식사킬 수 있을 정도의 농도였다.

2) 2018년 ○○전자(주)에서 이산화탄소 소화설비의 선택밸브 파손으로 소화약제인 이산화탄소가 누출되어 사상자 3명이 발생하는 등 이산화탄소에 의한 질식사고가 끊이지 않으면서 사업장 등에 산재되어있는 이산화탄소 소화설비의 업종분포, 저장소 설치현황, 저장소 검사현황, 저장소 관리현황 등을 조사하여, 이산화탄소 소화설비 안전대책을 다음과 같이 제시하였다.

(1) 이산화탄소 소화설비가 있는 사업장 282개로, 저장소 630개, 방호구역 2,011개에 대하여 산업 업종분포는 다음과 같다.

지역으로는 경남권 · 경북권 · 수도권 · 전남권 · 전북권 · 충남권 · 충

북권 등 7개 권역으로 구분하였으며, 수도권이 242개 저장소로 가장 많으며, 다음이 경남권, 충청권 순으로 분포되었다.

업종으로는 제조업이 441개 저장소로 가장 많이 사용하고 있으며, 서비스 · 기타 서비스업 순으로 많이 사용하고 있다. 또한 지역적으로는 수도권과 경남권 중심으로, 업종으로는 제조업을 중심으로 중점 관리할 필요가 있다.

(2) 소화약제 저장소의 설치는 '80년대 이전 23개소에서 '90년대에는 이산화탄소 저장소가 293개소로 12.7배 증가하였으며, 2000년 이후 지구온난화 등 국제적인 협약의 온실가스 규제에 따라 사용에 제약을 가하면서 6대 온실가스 감축대상 중 대부분을 차지하는 이산화탄소에 대한 규제 등으로 사용이 소폭 감소하는 추세이고, 또한 친환경에 대한 관심과 규제가 강화되고 있는 세계 기준에 맞게 국내 소방법규를 개선하고, 새로운 소화시설 시스템과 소화약제가 개발되도록 하여야 한다.

(3) 가스계 소화설비인 이산화탄소 소화설비에서 인명피해 사고가 다수 발생하고 있다. 이산화탄소는 자체독성은 낮으나, 방출농도에 따라 산소농도 저하로 질식사고 위험성이 매우 높다. 따라서 이산화탄소 소화설비에서 이산화탄소 가스 방출에 대응하는 방호구역은 전체 2,011개소이며, 저장소 1개소가 평균적으로 담당하는 방호구역은 3개소이며, 보통 방호구역 1개소에서 5개소로 담당하는 저장소가 558개소(89%)로 대부분을 차지하고

있으며, 저장소 1개소가 최대 담당하고 있는 방호구역은 28개소이다.

따라서 이산화탄소 소화설비 설치대상은 사람이 없는 장소로 국한하고, 방호구역을 별도로 설치하도록 법적인 규제 강화에 대한 검토가 필요하다.

- (4) 이산화탄소 저장용기는 ‘고압가스 안전관리법’에 따라 고압가스 불연가스 저장업체는 매 2년마다 정기검사를 받도록 검사 기간을 정하여 관리하고 있다. 이에 따라 이산화탄소 소화설비 저장소에 대해서도 정기 검사를 하고 있으며 외부에 위탁하는 사업장이 전체 대상 중 568개소(90%)를 차지하고 있고, 사업장 자체적으로 시행하는 제조업이 53개소(8%), 제조업 외 대상이 2개소를 차지하고 있다.

최근 2년간 검사한 이산화탄소 소화설비 저장소는 582개소(92%)로 대부분을 차지하고 있으며 검사주기는 양호한 편이나, 소화약제에 의한 인명피해가 발생할 가능성이 높으며, 소방에서도 방호구역이나 방호대상물에 대한 화재 진압에 초점을 맞춘 소화약제의 설계로 인명피해와 관련한 안전사항을 고려한 시설 및 용기 검사 등은 미흡하므로 시설에 대한 안전관리 규정과 설치된 시설의 유지·관리에 대한 규정을 마련해야 한다.

- (5) 소화설비 저장소의 위치는 지상층이 468개소(74%)로 대부분이며, 인명피해를 최소화하기 위한 안전장치로 환기시설이 있으며, 환기시설이 있는 시설은 461개소(73%)이고, 이 중에서 강제 환기방식은 283개소로 전체의 절반에도 미치지 못하고 있으며 자연 환기방식은 178개소로서 환기시설

특성상 환기구를 상부에 설치하므로 밀폐된 방호구역에서 환기가 효과적으로 이루어지지 않고 있다. 따라서 이산화탄소 가스를 배출하는 데에 한계가 있고, 사고위험이 높은 환기 방식 중의 하나로 나타났으며, 환기 시설이 없는 저장소는 166개소(27%)로 사업장 안전관리가 미흡한 상황으로, 배출방식에 대한 환기시설의 구체적인 규정이 마련되어야 하겠다.

- (6) 안전관리 실태를 살펴보면, 이산화탄소 소화약제의 방출 시 작업자가 직접 노출이 되는 저장소는 100개소(16%), 고압가스 안전관리 비허가 대상이 515개소(82%), 가스농도 측정기 미설치 351개소(56%), 방호벽 미설치 대상이 56개소(9%) 등으로 안전관리에 일부 미흡한 것으로 나타났다.
- 이산화탄소 소화설비가 있는 장소나 가스가 방출된 방호구역에 들어갈 때는 이산화탄소나 산소농도를 측정할 수 있는 가스 농도측정기를 비치하고, 유사시 사용할 수 있는 공기호흡기 등을 인근 장소에 비치하여야 한다. 작업 시에는 작업시작 전과 작업 도중, 그리고 작업 후에 이산화탄소가스에 의한 질식을 방지하기 위하여 방호구역 내와 주변에 이산화탄소와 산소농도를 측정하고, 충분한 환기조치가 이루어진 후에 방호구역 내에 진입하여야 한다.

- (7) 소화설비 저장소에 설치된 선택밸브에서 사고 발생 사업장과 같은 스크류(나사선) 형식은 430개소(68%)로 가장 많이 사용하고 있으며, 그 외에 용접식 109개소(17%), 기타 91개소(14%)이다.

이산화탄소소화설비의 화재안전기준(NFSC 106)에 선택밸브는 방호구역이나 방호 대상물마다 설치하도록 하고, 각 선택밸브에 그 담당방호구역이나 방호대상물을 표시할 것을 규정하고 있으나, 선택밸브의 결합 방법 등 세부 사항이 부재하므로 이산화탄소 소화설비에서 누출사고에 의한 인명피해를 줄이기 위하여 안전장치 설치와 선택밸브 결합 방법 등의 규정 마련이 요구된다.

- (8) 이산화탄소 소화설비는 ‘국가화재안전기준(NFSC 106)’에 의해 설치·유지되고 있지만, 대상물이나 방호구역을 기준으로 소화에 필요한 시설에 중점을 두므로써 상대적으로 인명 안전에 대한 규정들이 미흡한 실정이며 인명피해를 예방하기 위해서는 다음과 같은 조치들이 필요하다.

첫째, 작업 시작 전 소방시설 운영 담당자와 작업장소 도면 검토 및 현장 조사를 실시하여 소화설비의 종류, 배치도, 화재감지기의 종류 및 형식, 이산화탄소 소화설비 작동 위험성, 경보장치 작동, 대피 출입문 위치, 안전조치 사항 등을 확인한다.

둘째, 이산화탄소 소화설비가 설치된 장소에서 작업할 시에는 오작동 방지를 위해 자동·수동 전환스위치는 반드시 ‘수동’으로 전환(제어반의 솔레노이드밸브 연동정지)하고 잠금장치를 하여 사전에 오작동을 방지하며, 건물 내에 있는 모든 사람에게 사내방송·게시판 등을 통하여 작업일시 및 장소, 작업내용 등을 공지하고, 현장에는 관리감독자 또는 감시인을 배치하여 이산화탄소의 유해·위험성 등 안전보건 교육도 실시한다.

셋째, 경보설비 및 이산화탄소 소화설비 감지기가 작동 후 이산화탄소가 방출되기 30초 이내에 대피하는 방법이나 대피경로 및 장소를 사전에 파악하고, 이산화탄소가 방출된 장소에 들어가기 전에 완전히 환기하고, 인명구조 등의 목적으로 들어가야 한다면 공기호흡기를 착용하여야 한다.



참고 문헌

1. T. J. Wysocki, “ Chapter 3. Carbon Dioxide and Application Systems”, NFPA, Fire Protection Handbook, 19 edition, Vol. 1 and 2, pp. 11-65, 2002.
2. 백열선, “소방기계설비”, 형설출판사, pp. 406-408, 1996.
3. C. W. Lee, “A Technical Description on the Safety Aspects Related to Gas Suppression Fire Protection System”, Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference(Spring), pp. 21-29, 2002.
4. Carbon Dioxide Leak at Samsung Electronics Giheung Plant, <https://namu.wiki/w/>, 2020.
5. Korea Occupational Safety and Health Service, “Safety Operations Manual for the Prevention of Carbon Dioxide Asphyxiation Disaster”, www.kosha.or.kr/kosha, 2019.
6. United States Environmental Protection Agency, “Carbon Dioxide as a Fire Suppressant : Examining the Risks”, EPA430-R-00-002, pp. 35-43, 2000.
7. K. A. Kim, “A Study on the Control of the Carbon Dioxide Extinguishing System Through Incidents Analysis and Experimental Method”, Seoul National University of Science and Technology, 2015.
8. J. H. Lee, T. S. Kang, J. H. Kim and W. K. Kim, “A Study on On-site Discharge Testing for Carbon Dioxide Fire Extinguishing Systems”, Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 26-32,

2015.

9. D. M. Lee, “A Study on the Design Program Development of the Carbon Dioxide Fire Extinguishing System Using an Optimization”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 1-9, 2014.
10. V. R. Katta, F. Takahashi, and G. T. Linteris, “Numerical Investigations of CO₂ as Fire Suppressing”, *Fire Safety Science-proceeding of the 7th International Symposium*, pp. 531-542, 2003.
11. H. J. Kang, C. C. Koo, K. H. Jung, and J. W. Choi, “Analysis of the Cause of Suffocation Resulting from Leakage in Carbon Dioxide Fire Extinguishing Systems”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 78-84, 2021.
12. Y. C. Ha, J. K. Seo, J. H. Hwang, K. C. Im and S. H. Ryu, “Method for Preventing Asphyxiation Accidents by a CO₂ Extinguishing System on a Ship”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 29 No. 6, pp. 57-64, 2015.
13. Y. H. Jeon, “Case Analysis and Prevention Measures Study of the Carbon Dioxide Fire Extinguishing Discharge at Non-fire Condition”, “Graduate School of Industrial Science & Technology Yeungnam University”, pp. 26-61, 2015.
14. National Fire Safety Standards, “Fire Safety Standards for Carbon Dioxide Fire Extinguishing Facilities(NFSC 106)”, pp. 5-8, 2019.
15. J. H. Seo, “Fire Professional Engineering Textbook”, pp. 193-195, 2020.
16. S. W. Nam, “Design and Construction of Fire-fighting Facilities(1)”,

pp. 610-612, 2011.

17. Enforcement Decree of the Act on Fire Prevention and Installation Maintenance and Safety Management of Fire-Fighting Facilities, “Attached Table 5”, 2021.
18. National Fire Protection Association, NFPA 12, “Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems”, 2018.
19. C. S. Park, “The Characteristics of Flow and CO₂ Transfer When CO₂ Extinguishant in Injected Into a Closed Space”, pp. 14-28, Mokpo National University, 2004.
20. B. H. Lee, “Stress Evaluation for Saddle of Marine Liquefied Carbon Dioxide Storage Vessel Through a Thermal-structural Coupled Field Analysis”, The Graduate School Pusan National University, pp. 4-34, 2013.
21. K. W. Kang, G. C. Song, “Educational Materials for Fire Technicians”, pp. 948-949, 2009.
22. United States Environmental Protection Agency, “Carbon Dioxide as a Fire Suppressant : Examining the Risks”, EPA430-R-00-002, Air and Radiation, 2000.
23. 최영민, “저압식 이산화탄소 소화약제 방출에 있어서 소화농도에 관한 연구”, 부경대학교 석사학위논문, pp. 10-11, 2012.

A Study on the Cause Analysis and Countermeasures to Asphyxiation Accidents Due to the Leakage from Carbon Dioxide Fire Extinguishing Equipment

Ho-Jung Kang

*Dept. of Interdisciplinary Program of Fire Protection and Disaster
Prevention Engineering, Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

1) In this study, the quantity of carbon dioxide leaked from the detached selector valve and the pressure changes during the leakage process were analyzed using the ID transient analysis on the system line of carbon dioxide fire extinguishing equipment, and through the simulation of carbon dioxide diffusion using the computational fluid dynamics, the diffusion path, the oxygen-carbon dioxide concentration at the operator's position and the effect caused by the pressure generated at the time of leakage were analyzed. Based on these, the carbon dioxide leakage process were analyzed, and the results are as follows.

- (1) Due to the pressure of carbon dioxide released into the gas collection pipe room, the upper part of the outer wall of the gas collection pipe room made of gypsum board was damaged, and thus, CO₂ was leaked into the adjacent passage. Subsequently, the oxygen concentration at the operator's position was reduced to minimum 5.3%, resulting in the asphyxiation accident due to the lack of oxygen.
- (2) The cause of the carbon dioxide leakage from the carbon dioxide fire extinguishing equipment is as follows. The locking pin, a counter-measure to prevent CO₂ leakage, was partially installed due to the replacement work of the old automatic fire detection system, but upon receiving a false signal, the starter solenoid valve of the electrical room on the other floor was activated, which led to the release of CO₂.
- (3) The cause of the detachment of the selector valve is as follows. As the dimensions of the female and male threads did not match, the approximately two threads were not fastened. During this process, the O-ring was detached, which weakened the strength of the joint further, and thus, the bolted part could not withstand the pressure of CO₂, resulting in the detachment of the selector valve.

(4) The ID Transient analysis, upon the assumption that the maximum pressure was 3.6 MPa and the atmospheric pressure 600 kPa at the position of the detached selector valve at the time of the accident, showed that the amount of carbon dioxide leaked from the exit port of the valve and that released from 2 open valves were similar, with a mean error of 15%.

(5) In order to analyze the diffusion process of leaked carbon dioxide, FLACS v10.7 program was used, and the analysis of the oxygen concentration showed that it was 10% or less at the position of the operator at 25 seconds from the leakage of carbon dioxide and reduced to the minimum of 5.3% at 50 seconds when the leakage was completed, which was the concentration low enough to suffocate the operator.

2) As the asphyxiation accidents due to carbon dioxide has been continuing such as the accident at ○○Electronics in 2018 where the fire extinguishing agent, carbon dioxide, was leaked due to the damage of the selector valve of the fire extinguishing equipment, resulting in 3 casualties, the industrial distribution of carbon dioxide fire extinguishing equipment scattered across business sites, and the status of storage installation, in-

spection and management were investigated, and the safety measures for carbon dioxide extinguishing equipment suggested as follows.

- (1) The number of business sites that have the carbon dioxide fire extinguishing equipment is 282, and the industrial distribution for 630 storages and 2,011 protected areas is as follows.

In terms of the region, it was divided into 7 such as the Gyeongnam region, Gyeongbuk region, Seoul metropolitan region, Jeonnam region, Jeonbuk region, Chungnam region and Chungbuk region, and the Seoul metropolitan region has the most storages with 242, followed by the Gyeongnam region and the Chungcheong regions.

In terms of the industrial sector, the manufacturing sector has the most storages with 441, followed by the service and other service sectors.

Therefore, in terms of the region, intensive management needs to be centered on the Seoul metropolitan and the Gyeongnam regions while the manufacturing sector should be intensively managed in terms of industry.

- (2) The number of installation of fire extinguishing agent storage facilities increased 12.7 times from 23 locations before the 1980s to 293 locations in the 1990s. Since the 2000s, the use of carbon dioxide,

which accounts for most of the greenhouse gas reduction targets, has been slightly declining due to restrictions in the use of carbon dioxide following the international treaties on global warming. In addition, domestic fire regulations should be improved in line with global standards, where environmental concerns and regulations are being strengthened, and at the same time, new fire extinguishing equipment systems and fire extinguishing agents need to be developed.

- (3) A number of accidents involving casualties occur in the carbon dioxide fire extinguishing equipment, which is gas-based fire extinguishing equipment. The toxicity of carbon dioxide itself is low, but it can reduce the oxygen concentration depending on the released carbon dioxide concentration, which leads to a high risk of an asphyxiation accident. Thus, the total number of protected areas responding to the leakage of carbon dioxide from the carbon dioxide fire extinguishing equipment is 2,011, and the average number of protected areas covered by one storage is 3. The number of the storages that cover 1 – 5 protected areas is 558 (89%), accounting for the most of storages, and the maximum number of protected areas covered by a single storage is 28.

Therefore, a review to strengthen legal regulations is needed, which enforce the location where carbon dioxide fire extinguishing equip-

ment is installed to be limited to the area where there are no people around, and the protected areas to be installed separately.

- (4) In accordance with the 'High Pressure Gas Safety Control Act', carbon dioxide storage containers are managed by setting an inspection period so that those who store high-pressure gas and incombustible gas undergo regular inspections every two years. Accordingly, carbon dioxide fire extinguishing equipment storages are also undergoing regular inspections. Business sites outsourcing the inspection account for 568 (90%) of the total while 53 manufacturing sites (8%) and 2 non-manufacturing sites are conducting self-inspection.

Most of the carbon dioxide fire extinguishing equipment storages (582 locations, 92%) have been inspected in the past two years, and thus the inspection cycle is good. However, the possibility of casualties due to the fire extinguishing agent is high, and as the inspection of facilities and containers that considers safety matters related to human casualties is insufficient with the design of fire extinguishing agents mainly focused on suppression of fires in the protected area or protected object even in the fire control, the regulations on the safety management of facilities and the maintenance of installed facilities should be devised.

(5) The location of most of fire extinguishing equipment storages is above the ground with 468 sites (74%). The safety device to minimize the human casualties includes ventilation equipment, and the number of the facilities with ventilation equipment is 461 (73%). Among them, 283 facilities have forced ventilation, which is less than half of the total, and due to the nature of the facilities, the ventilation equipment is installed at the upper position, which limits the release of carbon dioxide. Natural ventilation was found in 178 facilities, which turned out to be one of the ventilation methods not providing effective ventilation in the enclosed protected area, rather increasing the risk of accidents, and not having detailed regulations. The number of storage facilities without ventilation is 166 (27%).

Specific standards for ventilation methods should be strictly set, and detailed regulations for installation of forced ventilation as well as natural ventilation be prepared.

(6) The investigation of the status of safety management found 100 (16%) storage sites where workers are directly exposed to the carbon dioxide extinguishing agent at its release, 515 sites (82%) that have not obtained approval for high-pressure gas safety control, 351 sites

(56%) without a gas concentration meter and 56 sites (9%) without a firewall, indicating that safety control was partially substandard.

When a worker enters a place where there is a carbon dioxide fire extinguishing system or a protected area where gas is released, a gas concentration meter capable of measuring the carbon dioxide or oxygen concentration should be provided, and a respirator that can be used in case of emergency should be ready in a nearby place.

When working, in order to prevent the asphyxiation due to carbon dioxide before, during and after work, the carbon dioxide or oxygen concentration should be measured within the protected area and its surroundings, and only then, after ventilation if necessary, a worker should enter the protected area.

- (7) In the selector valve installed in the fire extinguishing equipment storage, the screw (screw thread) type is the most common with 430 sites (68%) just as in the business site where the accident has occurred. Besides, the welding type is used in 109 sites (17%) and others in 91 sites (14%).

The National Fire Safety Code (NFSC) 106 on carbon dioxide fire extinguishing equipment stipulates that a selector valve should be installed at every protected area or protected object, and each selector

valve be marked with the protected area or protected object covered by it. However, as it lacks details such as the fastening method of the selector valve, the regulations such as the installation of safe devices and the method of fastening the selector valve should be established in order to reduce the human casualties caused by the leakage from the carbon dioxide fire extinguishing equipment.

- (8) Carbon dioxide fire extinguishing facilities are installed and maintained on the basis of the National Fire Safety Code 106. However, by focusing on the facilities needed to extinguish fire based on the protected area or object, it relatively lacks the regulations on the life safety. Therefore, in order to prevent human casualties, the following countermeasures are needed.

First, before commencement of work, by reviewing the work site drawings and conducting on-site inspection with the person in charge of operating fire safety facilities, the types of fire extinguishing equipment, their arrangement plan, types and forms of fire detectors, the risk of operating the carbon dioxide fire extinguishing equipment, operation of alarm devices, location of emergency exits, and safety measures should be checked.

Second, when working in a place where a carbon dioxide fire ex-

tinguishing system is installed, the automatic and manual changeover switch must be switched to the 'manual' side (with interlocking with the solenoid valve of the control panel stopped) to prevent malfunction, and a locking device is used to prevent unwanted operation in advance. Furthermore, all people in the building are notified of the date, time, location and details of work through in-house broadcasting and bulletin boards, and a supervisor or watcher is deployed at the site to provide safety and health training regarding the harmful effects and danger of carbon dioxide.

Third, how to evacuate before carbon dioxide is released within 30 seconds after the alarm system and the detector of carbon dioxide fire extinguishing equipment are activated should be learned in advance along with the evacuation route and assembly points. In addition, before entering the place where carbon dioxide is released, it should be ventilated completely, and if it is necessary to enter the place under the effect of carbon dioxide for the rescue of lives, a respirator must be worn.