[Research Paper]

이산화탄소 소화설비에서 누출로 인한 질식사고 원인분석

강호정 · 구채칠* · 정기혁** · 최재욱***†

부경대학교 소방공학과 대학원생, *한국산업안전보건공단 부장, **한국산업안전보건공단 차장, ***부경대학교 소방공학과 교수

Analysis of the Cause of Suffocation Resulting from Leakage in Carbon Dioxide Fire Extinguishing Systems

Ho-Jung Kang · Chae-Chil Koo* · Ki-Hyuk Jung** · Jae-Wook Choi***†

Graduate Student, Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong National Univ.,

*Manager, Korea Occupational Safety and Health Agency,

**Senior Manager, Korea Occupational Safety and Health Agency,

***Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, Pukung National Univ.

(Received December 09, 2020; Revised December 23, 2021; Accepted January 11, 2021)

요 약

본 연구는 이산화탄소 소화설비에서 발생한 누출사고의 근본적인 원인분석을 통해 이산화탄소 소화설비에서 안전을 유지할 목적으로 수행되었다. 국내에서는 2001년 이후 이산화탄소 소화설비에서의 누출로 인한 사고는 11건으로 9명이 사망하고 60여명이 부상을 입었다. 최근에는 S전자(주) 사무동 지하1층에 위치한 CO₂ 소화설비 집합관실에 서, 선택밸브 이탈로 CO₂가스가 방출되어 집합관실 밖으로 누출되면서 집합관실 밖 이동통로에서 자재정리를 하던 협력업체 근로자 3명이 CO₂가스를 흡입하여 2명이 사망하고 1명이 부상당한 사고였으며, CO₂ 소화설비의 누출로 인한 질식재해에 대한 사회적인 관심을 불러일으킨 사고였다. 사고 발생원인, 1D transient analysis을 이용하여 이산화탄소 누출 과정에서의 압력, 온도 변화 등 분석하였고, 전산유체학을 이용한 이산화탄소 확산 시뮬레이션을 통하여 확산 경로, 재해자 위치에서의 산소·이산화탄소 농도 분석 및 누출 시 발생압력으로 인한 영향을 분석하여 이산화탄소 소화설비에서의 질식재해를 예방할 수 있는 대책을 제시하였다.

ABSTRACT

The safety of carbon dioxide fire extinguishing facilities is studied through a fundamental case analysis of leakage accidents in carbon dioxide fire extinguishing facilities. In Korea, since 2001, there have been 11 accidents caused by leaks from carbon dioxide fire extinguishing facilities, killing 9 people and injuring more than 60 others. Recently, three subcontractors inhaled CO₂ gas from a transportation passage outside a collection chamber, killing two of them and injuring the other. This incident brought social attention to the CO₂ fire extinguishing facility in the first basement of S Electronics. In this study, we analyze the cause of the accident (e.g., pressure and temperature changes in the carbon dioxide leakage process) using a one-dimensional transient model, the effects of oxygen and CO₂ concentration at the location of the incident, and that these results can be used as basic data to prevent suffocation disaster in carbon dioxide fire extinguishing facilities.

Keywords : Carbon dioxide fire extinguishing system leakage, The cause of the accident, Computational fluid dynamics

1. 서 론

최근 S전자(주) 사무실 지하층에 위치한 이산화탄소 소화설비에서 이산화탄소가 누출되어 질식사고가 발생됨으로써 사회적인 문제가 되었다. 이산화탄소 소화설비가 원 인미상의 이유로 작동되어 계통라인에 설치되어 있던 밸브 바디(Body)가 탈락과 동시에 이산화탄소가 대량 누출되어

용기저장실 벽면 등이 파손되고 인근 통로에서 작업 중이던 근로자 1명이 질식하여 사망한 것으로 보도되었다⁽¹⁾. 이산화탄소 소화설비는 누출될 경우 질식사고로 이어질 수 있으므로 이를 사전에 예방하는 것이 무엇보다 중요하다. 국내에서 발생한 이산화탄소 소화설비에 의한 질식사고는 2015년 2월 OOO호텔 보일러실에서 노후된 배관 및 벽체 단열재(유리섬유) 제거작업 중 소화설비 작동으로 CO₂ 가

† Corresponding Author, TEL: +82-51-629-6470, FAX: +82-51-629-7078, E-Mail: jwchoi@pknu.ac.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

스가 방출되어 질식(사망 1명, 부상 7명)한 사고가 있었으며, 2014년 3월 S전자 연구소 지하변전실에서 소화설비 오작동으로 CO₂ 가스가 방출되어 질식(사망 1명)한 사고가 발생되었으며, 2001년 이후 이산화탄소 소화설비에서의 누출로 인한 사고는 11건으로 9명이 사망하고 60여명이 부상을 입었으며 사고는 계속 일어나고 있다⁽²⁾. CO₂ 소화설비에 대한 연구는 Kim⁽³⁾이 사고사례 분석과 실험을 통한 이산화탄소 소화설비의 안전대책에 관한 연구를 하였으며, Lee 등⁽⁴⁾은 이산화탄소 소화설비 현장 방출시험 방법론에 관한 연구를 하였다. 또한 Lee⁽⁵⁾는 최적화 기법을 이용한 이산화탄소 소화설비의 설계프로그램에 관한 연구가 있으나, 이번 사고처럼 실제 이산화탄소 소화설비에서 누출에 의한 질식재해를 예방하기 위한 체계적인 연구는 진행되지 않았다. 본 연구에서는 2014년 3월 S전자 연구소 지하변전실에서 소화설비 오작동으로 CO₂ 가스가 방출되어 질식(사망 1명)한 사고 후, 2018년 8월에 S전자 사무동 지하1층에 위치한 CO₂ 소화설비 집합관실에서, 선택밸브 이탈로 CO₂ 가스가 방출되어 집합관실 밖 이동통로에서 자재정리를 하던 협력업체 근로자 3명이 CO₂ 가스를 흡입하여 2명이 사망하고 1명이 부상당하는 등 사고가 계속되고 있어, CO₂ 가스에 대한 원인과 예방 대책을 제시하고자 한다.

2. CO₂ 소화설비 구성 및 저장조건

2.1 이산화탄소 소화설비 구성

이산화탄소 소화설비는 저장용기, 기동용기, 선택밸브, 니들밸브 등으로 구성되며, S전자의 방호구역 내에 설치된 저장용기의 구성은 Figure 1과 같다.

2.2 이산화탄소 저장용기 저장조건

이산화탄소의 저장용기의 충전비(용기의 용적과 소화약제의 중량과의 비율)는 국가화재안전기준에 의하면 1.5 이상 1.9 이하여야 한다. 사고당시 저장된 용기의 용량은 67.5 L, 저장량은 45 kg 내외였다. 중량 기준으로 로드셀 위에서 45 kg 이상 충전하게 되므로 용기마다 충전량이 다르고 정확한 충전량을 산출할 수는 없으며 시간이 지날수록 용기마다 밀폐정도에 따라서 극소량이 누출될 수 있다. Figure 2에서와 같이 압력과 엔탈피의 관계곡선(P-H diagram)을 볼 때 충전 시에는 단열팽창의 영향으로 10 °C 내외일 경우 5.0~6.0 MPa 수준이지만, 대기온도 변화에 따라 임계압력(7.37 Mpa) 이상까지도 변화될 수 있음을 볼 때 실내온도 25 °C기준일 경우 저장압력은 6.4 MPa 내외로 보인다. 저장량은 밀도 710.5 kg/m³@25 °C일 경우 47.9 kg 내외로 추정된다.

3. 이산화탄소 소화약제 누출 원인분석

3.1 개요

이 사고는 노후 자동화재탐지설비 교체에 따른 기존 케

Figure 1. Piping and instrument diagram of CO₂ fire extinguishing system.

Figure 2. CO₂ P-H diagram, NIST chemistry web book.

이불 철거작업 시 철거대상 유무 확인을 소홀히 하여 공사와 관련되어 작동이 우려되는 CO₂ 소화설비 일부에만 기동 솔레노이드 밸브에 Locking pin을 설치함으로써 Locking pin을 설치하지 않은 소화설비가 오신호에 의하여 작동하게 되었고, 소화설비 선택밸브 나사산의 강도부족과 가스 집합관의 외벽의 강도 부족 등의 원인으로 소화약제가 누출된 것으로 판단된다.

3.2 CO₂ 소화약제 누출원인 분석

3.2.1 CO₂ 소화약제 누출 원인

노후 자동화재탐지설비 교체공사로 인한 CO₂ 방출을 방지하기 위하여 방호구역 전체에 대해 방출 방지조치를 하여야 하나, 작업이 진행되는 장소인 MCC룸 1개소에 대해서만 기동 솔레노이드밸브에 CO₂ 방출 방지조치인 Locking pin을 설치함으로써 오신호를 받은 타 층 전기실의 솔레노이드밸브가 작동하여 CO₂가 방출되었다.

3.2.2 선택밸브의 이탈원인

선택밸브 나사와 체결부 나사 길이가 배관에 가해진 CO₂ 압력을 견디기에 충분하지 않는 구조로 설계된 조건에서 가공 불량 등으로 암나사와 슛나사의 치수가 불일치

하여 정상적인 체결이 이루어지지 않음으로써 체결부의 강도가 유지되지 못하였고, 체결 과정에서 오링이 이탈되어 선택밸브 바닥에 끼어 나사산 2산 정도가 미체결 됨으로써 체결부의 강도 저하를 더욱 악화시켜 나사부가 CO₂ 압력을 견디지 못하고 뭉그러지면서 밸브가 이탈한 것으로 사료된다.

3.2.3 재해자 질식 원인 추정

가스집합관실 내부로 방출된 CO₂의 압력에 의해 석고보드로 된 가스집합관실 외벽의 상부가 파손되면서 인접한 이동통로 구역으로 CO₂가 누출되어 재해자 위치에서의 산소농도가 최저 5.3%까지 저하됨으로써 산소결핍에 의한 질식사고가 발생하였다. 누출된 이산화탄소는 천장부위를 타고 확산되면서 산소농도가 낮아지게 됨에 따라 재해자 3명이 다른 위치에 있었다고 하더라도 같은 농도의 이산화탄소에 노출되었을 것으로 추정된다.

3.2.4 CO₂소화설비에 의한 질식재해 예방대책

CO₂ 가스가 누출된 경우에는 산소의 농도가 저하되어 질식사망하거나 독성에 의한 피해를 입게 된다. 따라서 통풍이 불충분한 지하실에 설치된 CO₂ 소화설비의 케이블 교체공사 등을 할 경우에는 소화설비가 작동되지 않도록 절거대상 케이블의 올바른 선정 및 절단방법을 명확히 규정하고 준수하여야 한다. CO₂ 소화설비의 선택밸브가 플랜지에서 이탈되는 위험을 방지하기 위하여 체결 나사부가 적절하게 조여져 있는지를 수시로 확인하여야 하며, 지하에 위치한 가스집합관실 내부로 방출된 CO₂ 가스가 집합관실 바깥의 일반 작업구역으로 누출되지 않도록 적절한 강도의 외벽 설치 또는 소화대상 방호구역에 준하여 과압 배출구 설치 등의 조치가 필요하다.

3.3 1D Transient 프로그램 해석 결과

3.3.1 1D Transient 프로그램 해석 조건

저장용기로부터 누출된 이산화탄소의 배관내의 유동현상을 해석하기 위한 프로그램인 1D Transient 해석 조건과 가정 사항은 Table 1과 같다. 저장용기의 압력은 6.4 Mpa, 저장온도 25 °C, 저장량 45 kg, 용기의 용량은 67.5 L를 적용하였다. Solid phase가 존재하므로 Multiphase property package를 적용해야지만 현존 상용 프로그램 중 이산화탄소에 대한 Multiphase 해석이 가능한 것은 없으므로, 대기압을 0.6 MPa로 가정한 상태로 해석하였으며 실제 자연현상은 ① 누출시간 : 실제시간 > 해석결과, ② 최대 누출압력 : 실제압력 < 해석결과, ③ 최저 누출온도 : 실제온도 < 해석결과와 같다.

3.3.2 해석 결과를 위한 추출 위치

해석 결과를 위한 추출위치는 저장용기의 끝단(A), 집

Table 1. 1D Transient Analytical Conditions

Classification	Data	Remarks
Vessel pressure (MPa)	6.4	• Apply estimate - initial charge capacity : Unknown
Vessel temperature (°C)	25.0	- Temperature at the time of accident : Unknown
CO ₂ amount (kg)	45.0	- Amount of leakage by container over time : Unknown
Vessel volume (L)	67.5	• Vessel 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

Figure 3. Analysis result extraction location.

합관 끝단(B), 각 저장용기가 모이는 위치(C), 집합관에서 선택밸브까지 위치(D)로 했으며 상세한 위치는 Figure 3과 같다.

Figure 4. Pressure change analysis results.

3.3.3 해석 결과

해석결과는 Figure 4의 A, B, C, D와 같이, 사고 당시 이탈된 밸브위치에서의 최대 압력은 약 3.6 MPa로 나타났으며, 압력을 0.6 MPa 가정으로 인해 실제 압력은 3.6 MPa 이하였을 것으로 추정된다. 누출량은 밸브 이탈구에서의 이산화탄소 누출량과 개방된 밸브 2기로 인해 방출된 양은 평균적으로 15% 오차 내외에서 유사한 것으로 나타났다. 누출시간은 대기압 0.6 MPa 가정으로 인해 실제보다 짧은 누출시간 약 40.5 s로 나타났다.

4. CO₂ 확산 분석

4.1 전산유체역학 적용조건

누출된 이산화탄소의 확산을 분석하기 위하여 검사체적은 $45 \times 45 \times 18$ (xyz), 누출은 연속누출로, 프로그램은 FLACS v10.7을 사용하였으며, 전산유체역학 적용조건은 Table 2와 같다.

4.2 산소농도 분석

누출된 이산화탄소에 의하여 산소농도가 낮아지는 것을 해석하기 위하여 기하학적인 형상은 Figure 5와 같으며, 각 지점의 MP5, MP6 및 MP7에서의 산소농도를 나타내는 결과를 Figure 6에 나타내었다. 산소 농도의 분석 결과 누출 후 25 s경 재해자 위치에서의 산소농도는 10% 이하이고, 누출이 완료된 45~50 s경에는 산소농도가 최저 5.3%까지 떨어졌다가 서서히 증가하고 있다. 이것은 이산화탄소가 인근 파이프 피트를 따라 확산 배출되면서 산소의 농도가 서서히 증가하고 있는 것으로 사료된다.

4.3 시간에 따른 산소농도 및 이산화탄소 농도 변화

시간에 따른 산소농도의 변화를 Figure 7에 나타내었으며, 이산화탄소의 농도변화는 Figure 8과 같다. 이산화탄소 가스가 누출된 경우에는 산소의 농도가 저하되어 질식사망하거나 독성에 의한 피해를 입을 수 있다.

Figure 8에서 이산화탄소가 방출 후 MP5, MP6, MP7지점에서의 농도 변화는 45 s 후에 약 70%까지 상승하였다가

Table 2. Computational Fluid Dynamics Application Conditions

Classification	Contents	Remarks
Control volume	45 × 45 × 18 (xyz)	-
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	Heavy gas behavior
Ground roughness	0.0002 m	
Pasquill stability	None	-
Boundaries	Wind / nozzle	
Release rate	43.32 kg/s	Duration : 45 s
Physical properties	CO ₂ in listspecies	-

120 s 후 약 60%아래로 떨어졌으며, 300 s 후 약 50%아래로 떨어진 것으로 나타났다. 확산특성을 보면 누출된 이산화탄소는 천정부위를 타고 확산되면서 위치와 무관하게 산소농도가 낮아지게 된다. 따라서 재해자 3명이 다른 위치에 있었다고 하더라도 같은 농도의 이산화탄소에 노출되었을 것으로 추정되며, 이후 별도의 환기조치가 없는 이상 공기와의 밀도차이로 인해 하방향 확산경향을 나타나게 된다. 이는 방향전환을 최소화(에너지 손실을 최소화)하기 위해 유체는 주로 벽면, 모서리를 타고 흐르는 특성이 있다. 현존하는 전산유체역학 코드를 이용한 해석방법으로는 이산화탄소 알갱이(고체) 누출로 인한 영향을 분석할 수 없는 한계가 있음을 볼 때, 실제로는 이산화탄소의 아래 방향 확산경향이 더 높아서 산소농도는 더 낮았을 가능성이 있다.

4.4 벽면 파손부위 분석

이산화탄소 저장용기실 벽면의 파손 부위 결과는 Figure 9와 같으며, 벽면으로의 방향전환으로 인한 에너지손실을 최소화하기 위해서 초기 천정부위와 충돌된 유체는 이후 벽면과 모서리 부위를 타고 흐르면서 두 지점에서 파손이

Figure 5. Geometry shape.

Concentration change at MP5 point (Based on fraction)

Concentration change at MP6 point (Based on fraction)

Concentration change at MP7 point (Based on fraction)

Figure 6. Oxygen concentration change.

발생한 것으로 판단되며 이때의 압력은 약 0.5 MPa 정도로 해석되었다.

5. CO₂ 소화설비 질식재해 예방대책

이산화탄소 소화설비의 누출에 의한 질식재해를 예방하기 위하여 먼저 CO₂ 소화설비의 선택밸브가 플랜지에서

Figure 7. Oxygen concentration variation over time.

Figure 8. CO₂ concentration variation over time.

이탈되는 위험을 방지하기 위하여 체결 나사부가 적절하게 조여져 있는지를 수시로 확인하여야 하며, 가스집합관실 내부로 방출된 CO₂ 가스가 집합관실 바깥의 일반 작업구역으로 누출되지 않도록 적절한 강도의 외벽 설치 또는 방호구역에 준하여 과압배출구 설치 등의 조치가 필요하다. 점검 후 보수작업이 있을 경우에는 작업 시작 전 소방시설

운영 담당자와 작업장소 도면 검토 및 현장조사를 실시하여 소화설비의 배치도, 화재감지기의 종류 및 형식, CO₂ 소화설비 작동 위험성, 경보장치 작동, 대피 출입문 위치, 안전조치 사항 등을 확인하여야 한다.

Figure 9. Fluid flow characteristic (fluid velocity).

6. 결 론

이산화탄소 소화설비의 누출로 인한 질식사고 예방을 위하여 다음과 같은 원인을 분석하였다.

- 1) 기동 솔레노이드밸브에 CO₂ 방출방지 조치인 Locking pin을 설치함으로써 오신호를 받은 타 층 전기실의 솔레노이드밸브가 작동하여 CO₂가 방출되었다.
- 2) 설계된 조건에서 가공 불량 등으로 암나사와 슛나사의 치수가 불일치하여 체결 과정에서 오링이 이탈되어 미체결 됨으로써 나사부가 CO₂ 압력을 견디지 못하고 뭉그러지면서 밸브가 이탈하였다.
- 3) 가스집합관실 내부로 방출된 CO₂의 압력에 의해 석고 보드로 된 가스집합관실 외벽의 상부가 파손되면서 인접한 이동통로 구역으로 CO₂가 누출되어 재해자 위치에서의 산소농도가 최저 5.3%까지 저하됨으로써 산소결핍에 의한 질식사고가 발생하였다.
- 4) 이탈된 밸브위치에서의 최대 압력은 약 3.6 MPa로 나타났다.
- 5) 이산화탄소가 누출 후 25 s에서 재해자 위치에서의 산소농도는 10% 이하이고, 누출이 완료된 45~50 s경의 산소농도는 최저 5.3%까지 낮아졌다.

6) 이산화탄소 가스가 누출되어 다른 구역으로 유입되지 않도록 적절한 강도의 외벽 설치 또는 방호구역에 준하여 과압배출구 설치 등의 조치를 하는 것이 필요하다.

References

1. Carbon Dioxide Leak at Samsung Electronics, Giheung Plant <http://namu.wiki/> (2020).
2. <http://www.fpn119.co.kr/145329>.
3. K. A. Kim, "A Study on the Control of the Carbon Dioxide Extinguishing System through Incidents Analysis and Experimental Method", Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology (2015).
4. 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).
5. 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).