



가스계 소화설비 오작동으로 인한 질식사고의 피해영향 평가

†김의수

한국교통대학교 산업경영안전공학부 안전공학전공 교수
(2020년 3월 23일 접수, 2020년 4월 12일 수정, 2020년 4월 13일 채택)

A Study on Damage Effects Assessment for Asphyxiation Accident due to Malfunction of Gas Type Fire Extinguishing System

†Eui-Soo Kim

Dept. of Safety Engineering, Korea National University of Transportation
(Received March 23, 2020; Revised April 12, 2020; Accepted April 13, 2020)

요약

가스계 소화설비는 경제적으로 매우 유용한 설비이지만 설비를 갖춘 후 장기간 미사용될 경우 용기부식으로 인한 파열 현상과 설비 시스템 작동 오류 등이 나타날 가능성이 있어 큰 위험성을 내재하고 있다. 하지만 소화설비 특성상, 설비의 정상작동 여부를 확인하기 위한 실험이 불가하여 파열 및 오작동으로 인해 밀폐공간 내에 가스가 일시적으로 방출되면 가스질식으로 인한 큰 인명 피해를 가져올 수 있다. 본 연구에서는 최근 발생한 가스계 소화설비 작동 오류로 인한 질식 사망 사고를 바탕으로 사고 메커니즘을 분석하기 위해 실제사고가 발생한 현장에 대해 3D 스캐너와 FLACS를 활용하여 설비 오류로 인한 이산화탄소 가스의 유입경로와 이로 인한 사망 가능성 및 사망에 이르는 시간 등을 추정하였으며 이를 통해 질식사고로 인한 정확한 피해 영향을 평가하고자 한다.

Abstract - Gas system fire extinguishing equipment is a very economically useful facility, but if it is not used for a long period of time after installing the equipment, there is possibility of rupture due to corrosion of containers and operation errors of equipment systems, and this is very dangerous. However, it is impossible to experiment to check whether the equipment is operating normally. If gas is temporarily released into the enclosed space due to rupture and malfunction, it can cause serious human damage due to gas suffocation. In this study, based on the suffocation death accident of gas system fire extinguishing facility, the inflow path of released gas and the possibility of death and time to death were estimated using a 3D scan and FLACS.

Key words : numerical analysis, fire extinguishing system, gas asphyxiation, FLACS, damage assessment

1. 서론

터널 및 지하주차장, 다중이용시설 등의 밀폐공간의 경우 질식, 화재, 붕괴 등 다양한 위험이 존재하고 특히 질식사고 발생 시 대형 사회 재난에 준

하는 인명피해가 발생할 여지가 있다. 최근 10년간 가스 질식 사고는 총 193건에 달하며 이로 인해 약 322명의 사상자가 발생하였고 사망자는 191명으로 건당 1명씩 사망자가 발생할 정도로 매우 심각한 수준이다. 그 중 이산화탄소 등을 사용한 가스계 소화설비에서 발생한 질식사고로만 사망 7명, 부상 21명이 발생하였다.[1] 사고의 주요원인은 시설의 오작동 및 시스템오류로 인해 작업 중이던 작

†Corresponding author: es92kim@ut.ac.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

업자가 대피할 수 있는 시간적 여유도 없이 가스에 질식되어 큰 인명 피해가 발생한다. 가스계 소화설비는 가스를 이용하여 질식 및 냉각작용으로 화재를 소화하는 설비로 이산화탄소 소화설비, 할로젠 소화설비, 청정소화약제 소화설비 등 다양한 약제가 사용되고 있으므로 각 약제마다 특성이 달라 주어진 위험에 대해 신뢰할 수 있는 소화방법에 관한 판단이 필요하다.

최근에는 가스계 소화설비 중 13종을 많이 사용하지만 20년 이상된 시설에서는 이산화탄소 소화설비가 여전히 많이 사용되고 있다.[2] 이처럼 가스계 소화설비는 경제적으로 매우 유용한 설비이지만 설비를 갖춘 후 장기간 미사용될 경우 용기부식으로 인한 파열 현상과 설비 시스템 작동 오류 등이 나타날 가능성이 있어 큰 위험성을 내재하고 있다. 하지만 소화설비 특성 상, 설비의 정상작동 여부를 확인하기 위한 실험이 불가하여 파열 및 오작동으로 인해 밀폐공간 내에 가스가 일시적으로 방출되면 가스질식으로 인한 큰 인명 피해를 가져올 수 있으나 지금의 연구는 가스계 소화설비 자체 설계 및 성능에 초점이 맞추어져 있어 질식사고의 위험성 및 피해영향 평가에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다.[3],[4] 정확한 사고 원인 규명 및 피해 영향 평가를 위해서는 가스 유입 경로 및 이로 인한 농도 변화, 작업 환경 등에 관한 사고 재현이 요구되어지며 이에 본 연구에서는 최근 발생한 가스계 소화설비 작동 오류로 인한 질식 사망 사고를 바탕으로 사고 메커니즘을 분석하기 위해 실제사고가 발생한 현장을 3D스캐너를 사용하여 모델링하고 가스의 확산과 폭발, 폭연과 충격파의 전달 해석 등에 주로 사용되는 폭발 피해 예측 전용 해석 프로그램인 FLACS를 활용하여 설비 오류로 인한 이산화탄소 가스의 유입경로와 사망에 이르는 시간을 도출하였으며 최종적으로 이를 통해 사망 가능성 등을 추정함으로써 사고 발생 메커니즘을 규명할 수 기술을 확보하고 이를 통해 질식사고로 인한 정확한 피해 영향을 평가하고자 한다.[4]-[10]

II. 사고 개요 및 재구성

2.1. 사고 개요

Table 1에서 나타난 바와 같이 최근 10년간 가스계 소화설비로 인한 질식 사고를 살펴보면, 대부분 기계실 작업 중 인적오류나 시스템 오류 등으로 인해 가스소화약제가 일시 방출되면서 작업자가 질식 사망하는 사고가 주를 이루고 있고 이로 인한 사망자 도 지속적으로 발생하고 있는 추세이며 이

Table 1. Accident case for gas type fire extinguishing facility

Date	Location	Damage	Gas
'08.09	Nonsan University	Death 1, Injury 1	CO2
'11.09	Incheon Korea GM	Death 1, Injury 2	CO2
'14.03	S Semiconductor	Death 1,	CO2
'15.04	Gyeongju Hotel	Death 1, Injury 2	CO2
'18.06	Army unit	-	IG541
'18.06	Prevention of disasters	Death 1	CO2
'18.08	Seoul shopping center	Injury 2	CO2
'18.09	S Electron	Death 2, Injury 1	CO2
'18.12	Natural Museum	Injury 13	HCFC

밖에도 알려지지 않은 사고가 다수 발생하고 있다. 본 연구에서 적용된 질식 사망사고는 S전자에서 발생한 이산화탄소 방출 질식 사망사고로 사고원인은 노후 자동화탐지 설비교체 작업공정 중 기동장치를 작동시키는 전선을 포함한 자동화제감시 장치 작동 전선을 절단하는 과정에서 절단도구가 전선 내 구성회로를 연결시켜 주는 역할을 하여 기동밸브가 개폐되도록 신호를 줌으로써 기동밸브가 열리면서 이산화탄소 용기(199개, 6.15ton)내 가스가 파손된 선택밸브로 일시 방출되어 저장실 상부에 설치된 석고보드 벽면을 파손시켰고 이에 방출된 가스가 급격히 확산되어 저장실 옆에서 작업 중이던 작업자 2명이 사망하고 1명이 부상을 입은 것으로 현장조사 당시 확인되었다. 사고 현장의 가스 저장실은 지하1층에 가로 8.3m, 세로 6.6m, 높이 7.5m로 아래 3m은 콘크리트구조로 위로 3.6m은 석고보드로 구성되어 있고 고압가스저장소 설치기준에 따라 아래로 부터 2m은 철판으로 보강되어 있다. 가스저장소에는 Figure 1에서 보듯 솔레노이드 밸브, 가스저장용기, 기동용기, 선택밸브, 가스배관으로 구성되었으며 화재가 감지되면 기동용기의 솔레노이드 밸브가 격발에 의해 개방됨으로

선택밸브를 통해 해당방호구역 내로 가스가 방출되는 구조이다. Figure 2에 나타난 바와 같이 사고현장의 특이점은 저장실 내부에 설치된 9개의 선택밸브 중 1개의 선택밸브가 배관으로부터 이탈된 형태이고 피해 작업자의 위치가 저장실 내부가 아닌 저장실 외부 복도였으며 선택밸브 상부, 복도와 저장실이 접한 벽이 파손됨을 확인하였다.

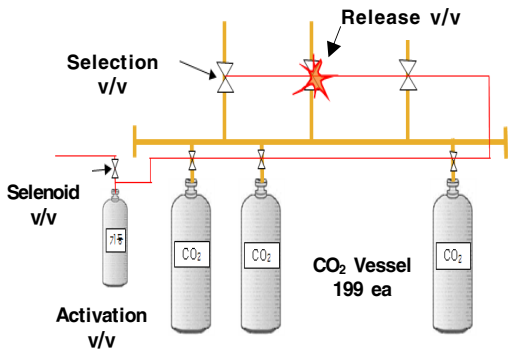


Fig. 1. Schematic of accident extinguishing facility.

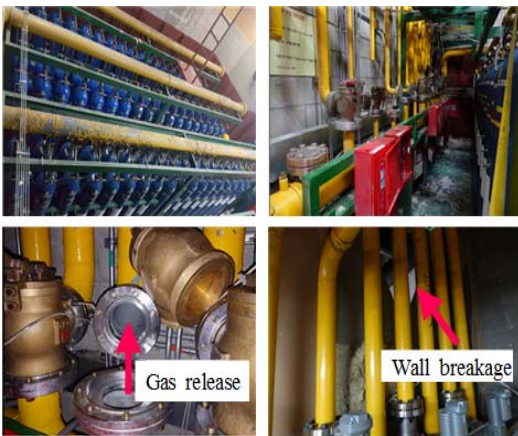


Fig. 2. Photograph of accident extinguishing facility room.

2.2. 현장 재구성

최근에는 사고를 재구성하기 위해 다양한 공학 첨단 장비를 이용해서 실제 사고 현장을 신속 정확하게 재현하는 기법이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 기법을 적용하여 실제 질식 사망사고가 발생한 현장을 3D 스캔 작업을 통해 모델링하고 여기에 FLACS 프로그램을 활용한 전산유체해석을 수행함으로써 사고 당시 가스의 유입경로와 사망에 이르는 시간을 도출하였고 사망 가능성 등을 판단하고자 하였다. 사고 현장의 내부 구조를 상세하게 모델링으로 표현하기 위해서는 3D 스캐너를 사용하여 다양한 방향과 각도로 여러 차례 공간을 스캔하는 작업이 필수적이다. 3D 스캔을 이용한 후 수치해석을 통한 사고 재현 기법은 타 구성 방법에 비해 현장 상태를 그대로 보존하여 언제든지 공간

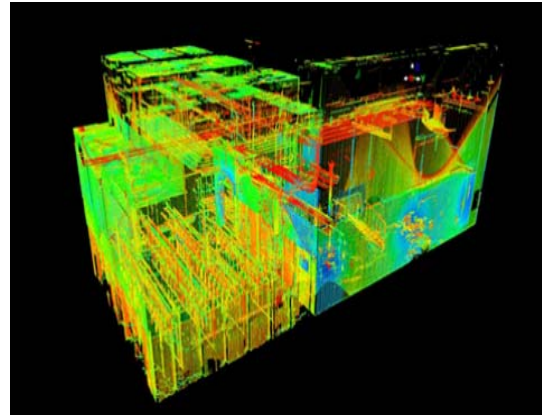


Fig. 3. Reconstruction of the accident site using 3D scanner.

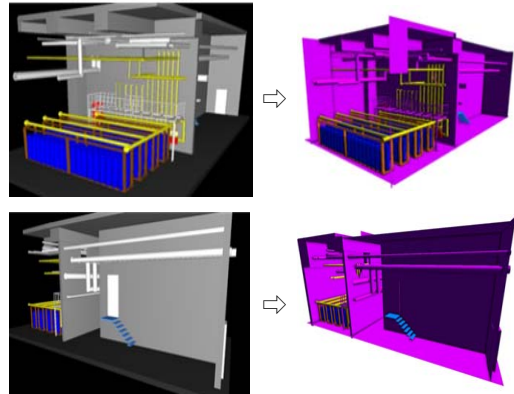


Fig. 4. Converting 3D scanner model to CFD based model.

및 내부물체에 대한 정확한 정보를 3차원 모델링 상에서 확인 가능하고 이를 기반으로 정확한 해석을 수행할 수 있다는 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 용기보관실 내부와 작업자 위치에서 총 19차례 스캔 작업을 진행하였고 스캔 밀도는 10 m거리에서 12.5 mm 로 약 100 m이내에 있는 모든 공간 정보데이터를 취득하였다. 실제 폭발 사고 현장에 대해 스캔 작업을 통해 얻은 결과는

Figure 3에 나타난 바와 같다. 3D스캔 작업을 통해 모델링된 데이터를 유체누출확산 및 폭발, 폭연과 충격파의 전달, 플과 제트화재 등에 사용하는 전산 유동해석(CFD) 프로그램인 FLACS에 활용할 수 있도록 Figure 4와 같은 형태로 Cyclonec 프로그램을 사용하여 모델링을 변환하여 연구를 수행하였다.[11],[12]

III. 가스 유동 해석과 평가

3.1. 해석 개요

본 연구에서 활용한 FLACS 프로그램은 유체누출 확산, 가스와 분진 폭발, 폭연과 충격파의 전달, 풀과 제트 화재 등에 사용하는 전산 유동 해석(CFD)코드이다. 주요지배 방정식은 운동량 방정식, 연속방정식, 화학종 보존 방정식, 에너지 전달 방정식에 의해 해석되며 난류(Turbulence)모델은 K-ε 모델을 통해 계산된다.

FLACS을 활용하여 공간 내 가스 유입 및 가스 누출확산 경로를 추정하기 위해 변환된 모델링에 격자를 생성하였다. 격자 형태 및 구성된 형상은 Table 2, Figure 5와 같으며 유동 해석을 위해 적용된 경계조건은 Table 3과 같다. 격자(Grid)는 수치해석에 있어서 결과 값의 정확도에 영향을 주는 가장 중요한 요소이다. 볼륨과 면적을 갖고 있는 구조물이나 건물에 대해 유동 시뮬레이션을 수행함에 있어 중요한 포인트의 경우 좁은 간격으로 격자를 생성하여 측정정밀도를 높이도록 요구하고 있음으로 본 연구에서는 구조물의 크기를 고려해 제어볼륨을 X=58m, Y=53m, Z=43m 로 구성하였고, Grid cell size는 X, Y, Z축 모두 0.08-0.87m로 조밀하게 격자를 생성하였다. 그리고 Z축 상층부 유동영향을 받는 부분의 격자사이지를 0.87m로 하여 여유를 주었다. 그 결과, 대상건물의 형상과 물질의 특성을 고려한 전체 격자수는 132,182개로 사고 현장 건물을 구성하였다.

FLACS상에서 CO₂ 가스의 초기 누출 조건은 실제 Table 3에서 보듯 사고 당시 주변 물리량을 고려하여 사고당시 경계 측정값인 내부 온도는 28℃, 저장실 압력은 대기압, 용기 내 가스압력은 69 bar, 가스조성은 CO₂ 100%, 가스 저장량은 6.15 ton 을

적용하였다. 사망자 위치 및 파손된 벽 등의 위치에 물리량을 분석하고자 Figure 5에 나타난 바와 같이 분석을 원하는 위치 각 4곳에 MP(Monitor Point)를 설정하여 가스농도 및 유동형태를 분석하였다. 또한, 구조물 공간 내에는 경계조건 입력, 바람 등은 구조물 내부임을 고려하여 노출에서 분사되는 것으로 설정하였고 시뮬레이션 조건의 일반적인 설정 및 출력 파라미터의 CO₂ 조건은 28℃에서 바람이 없는 타입으로 지정하고 수치해석 시간을 결정짓는 격자크기 및 개수, CFLC값은 격자크기와 해석 시간 단계와 연결하여 출력데이터를 1초 간격으로 저장토록 설정하였다.

Table 3. Input and boundary condition for FLACS analysis

Input conditions	
Ambient temperature [°C]	28
Ambient pressure [bar]	1.01325
Gas pressure [bar]	69
Gas composition	CO ₂ = 1
Boundary conditions	
Mass flow rate [kg/s]	582.7
Leak type	JET
Duration	10.5s for 6,118kg
Wind condition [m/s]	No wind
Leak hole [mm ²]	0.5

Table 2. Modelling information for CFD analysis

Contents	X	Y	Z
Control volumes (m)	58	53	43
Min control vol size (m)	0.16	0.08	0.12
Max, control vol size (m)	0.87	0.67	0.87
Max percentage difference (%)	23.43	53.14	43.49
Occurred at indices	4	17	37
Max aspect ratio	3.88		
Total of control volumes defined (ea)	132182		

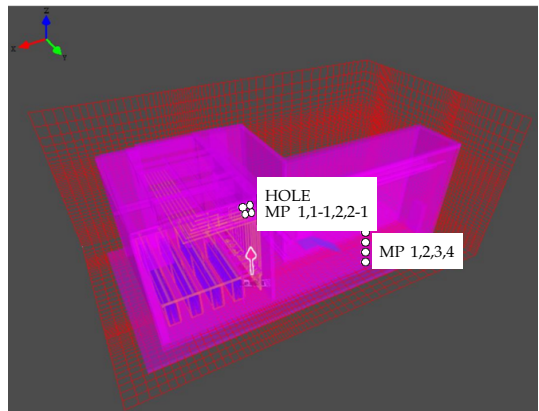
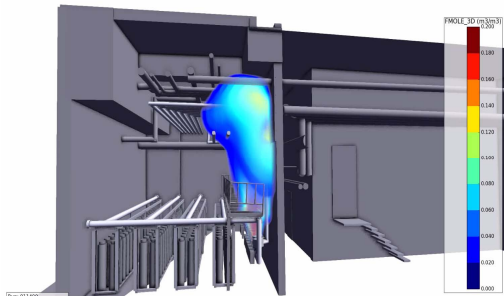


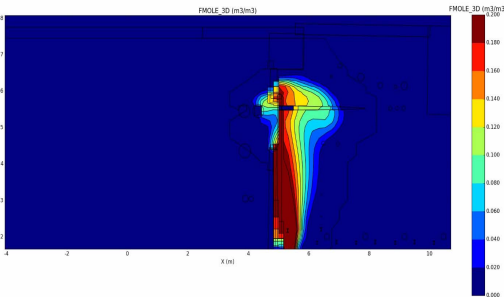
Fig. 5. Result of grid generation for 3D model.

3.2. 해석 결과 및 평가

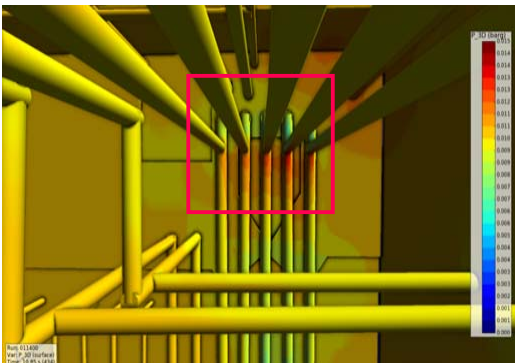
본 연구에서는 가스계 소화장치 오작동으로 인한 질식 피해를 크게 물적 피해와 인적 피해라는 두 가지 관점에서 해석을 수행하였고 그 결과를 분석, 고찰하였다. 우선 분출된 가스가 분출당시 벽에 미치는 영향과 파손 여부를 판단하기 위해 파손된 벽을 사고 발생 이전 상태로 모델링하여 가스 분출 유동으로 인한 벽체의 구조적 영향을 해석하였다.



(a) Release flow rate of CO2 in room



(b) Release flow rate of CO2 in pipe



(c) Overpressure on wall and pipe

그 결과 Figure 6에 나타난 바와 같이 가스 분출 시 가스는 밸브 직상부 및 파손된 벽 위주로 분출되는 것을 확인할 수 있었고 이 경우 분출 압력은 파손된 벽에 집중적으로 영향을 미치는 것을 파악할 수 있었다. Figure 7에서 파손된 벽 주변의 가스 거동을 분석한 결과, 이탈된 밸브 직상부에 위치한 배관으로 인해 파손된 벽 방향으로 가스의 유동이 집중되며 10초 후에 가스를 방출하는 것으로 설정하였을 때 0.2초 후에 0.2 kPa, 0.7초 후에 1kPa, 1초 후에 1.3kPa의 압력을 나타내었다. 이 압력은 Table 4에 나타난 KOSHA Guide 폭발 과압의 영향 판단표와 비교 시 저장실 상부에 있는 석고보드에 손상을 줄 수 있는 값인 2kPa에 근접하므로 직상부로 방출되는 가스압력은 배관의 장애물로 인해 벽쪽으로 영향을 미치는 모습을 나타내었다.^[13] 또한, 저장실에서의 이산화탄소 방출에 대한 가스 거동 형태 및 농도를 확인하기 위해 사망자 발생 위치의 바닥, 무릎, 가슴, 머리 높이 등 총 4개의 MP를 선정하여 해당 지점에서 시간에 따른 거동 및 농도의 변화를 확인하였다. 그 결과, Figure 8에서 보듯 초기 시나리오 상에서 밸브 이탈 시간을 10초로 설정하였을 경우 사망자 위치의 감지 시간은 20초를 나타냈다. 즉, 가스분출 10초 만에 사망자 위치로 가스가 확산되었으며 최고 농도는 밸브이탈 34초 후에 나타나는데 이는 정신활동장애 및 호흡곤란을 가져오는 8.6%의 이산화탄소 농도임을 확인할 수 있다. CO₂사고로 인한 인체 질식 피해의 영향을 최종적으로 판단하기 위해 FLACS 해석을 통해 산출된 유입 경로에 따른 농도와 확산 시간을 Table 5에서 나타난 바와 같이 이산화탄소 농도별 인체에 미치는 영향표와 비교검토 하였다.[14] 저장실의 선택밸브에서 누출된 CO₂가 저장실벽면을 통해 누출

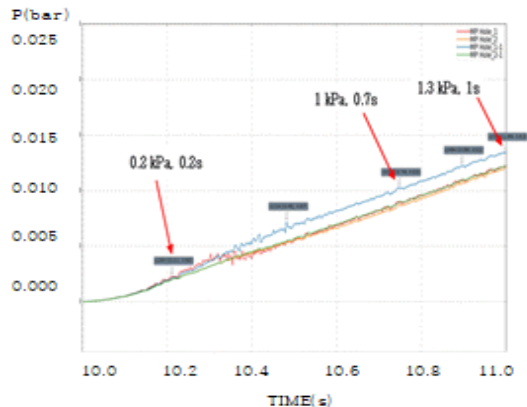
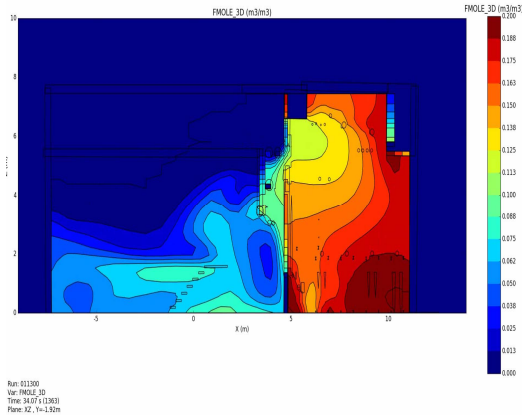


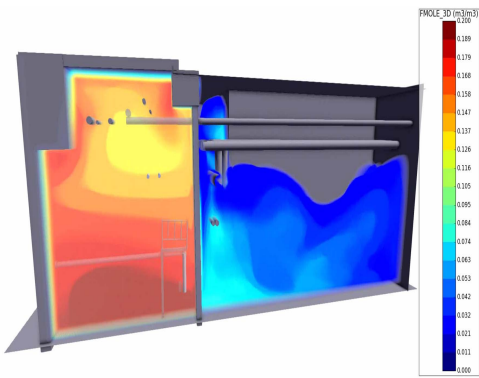
Fig. 7. Graph of overpressure on the wall hole.

Fig. 6. Result of FLACS analysis for system.

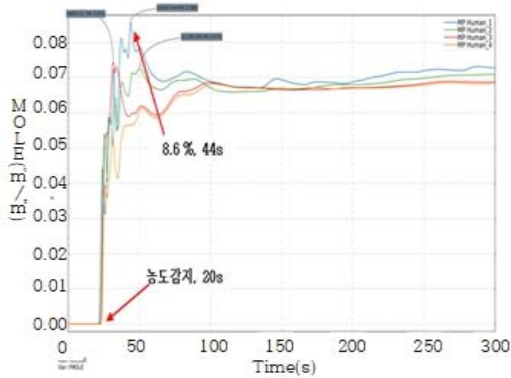
가스계 소화설비 오작동으로 인한 질식사고의 피해영향 평가



(a) Flow over time of CO2 in room



(b) Flow over time of CO2 in work position



(c) Overpressure on wall and pipe

Fig. 8. Result of FLACS analysis for system.

후 10초 만에 사망자가 발생한 MP1,2,3,4 에서 계측되었고 34초 이후엔 정신활동의 장애와 호흡이

Table 4. Influence judgement of explosion overpressure

Overpressure [kPa]	Influence content
0.15	Noise generation
0.2	Partial breakage of windows
0.3	Loud noise generation
1	Glass rupture pressure
2	10% damage to the roof and windows of the house
3	Light damage to structures
3.5-7	Window breaks and some windows break
5	Structure damage of houses
omitted	omitted
below	below

Table 5. Influence on human body by CO2 concentration

CO2 Vol(%)	Human Impact
1%	Breath rate increases slightly
2%	The respiratory rate is 50% higher than usual and continuous exposure causes headache and fatigue
3%	Increased respiration, facial warmth, 2 times faster than normal breathing rate, slow motion, poisoning symptoms and difficulty breathing
4-5%	Headache, fever, facial flushing, hypertrophy, elevation of sores, stimulation of respiration rate 4 times more than normal
6%	Skin vasodilation, vomiting
7-8%	Disorders of mental activity, difficulty breathing Breathing is very slow, headache, visual impairment and judgment are blurred and may become unconscious in the water
10% Over	Apnea, unconsciousness, death, Choking death can occur

곤란해지는 8.6% 의 농도에 도달하는 것을 확인할 수 있었으며 10% 이상이 되면 수 분내 중추신경이 마비되는 치아노제 상태에 도달하는 사실도 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 최근에 발생한 이산화탄소 소화설비 저장용 용기보관실에서 방출된 이산화탄소로 인해 용기보관실 인근에서 작업 중이던 작업자 2명이 사망한 사고를 바탕으로 3D 스캔을 이용해 실제 사고가 발생한 현장을 모델링하고 FLACS를 활용하여 이산화탄소 가스의 유입경로와 이로 인해 사망에 이르는 시간을 도출하였으며 최종적으로 이를 통해 사망 가능성 등을 판단하였다. 피해영향은 크게 물적 피해와 인적 피해라는 두 가지 관점에서 해석을 수행하였고 물적 피해 측면에서는 이탈된 밸브 직상부에 위치한 배관으로 인해 파손된 벽 방향으로 가스의 유동이 집중되며 이 경우 압력은 최대 1.3 kPa 을 나타내는데 이 압력은 석고보드에 손상을 줄 수 있는 값으로 판단되었다. 인체 피해 측면에서는 이산화탄소 유입에 따른 구조물 공간 내 필요지점에서의 농도변화를 유동해석을 통해 정량화 하였고 이를 통해 누출 가스가 인체에 미치는 영향을 도출하였다. 사망 작업자가 있는 곳에 방출된 이산화탄소가 도달한 시간이 10초이며 34초 이후엔 정신헌동의 장애와 호흡이 곤란해지는 8.6%의 농도에 이르는 것을 보아 가스방출이 시작된 이후 안전한 곳으로 대피할 수 있는 시간적 여유가 매우 부족했던 것으로 판단된다. 소화설비 교체 작업 중 가스 질식 사고는 작업 오류로 가스계 소화계 기동 밸브가 열리고 이산화탄소가 방출된 경우가 대부분으로 화재감시 및 작동시스템이 자동으로 설정되어 있을 경우 이산화탄소 등이 누출되어 질식 사고를 일으킬 수 있는 개연성을 가지고 있으므로 가스계 소화설비가 있는 밀폐공간에서 작업 시에는 자동형태의 소화장치 작동을 수동으로 전환하여 작업하는 것을 의무화할 필요가 있다. 아울러, 가스계 소화설비의 안전관리 및 관련법령체계가 소방기본법, 위험물안전관리법, 고압가스안전관리법 등에 따라 중첩 및 이원화 되어 있어 용기보관실의 관리주체가 명확하지 않고 선택밸브 등 관련제품도 관계법령에 따라 재료 및 접합방법에 차이를 나타냄으로 관계법령에 대한 기준을 일원화하는 안전관리체계를 개선할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1D1A1B03028163)

REFERENCES

- [1] Annual Gas Accident Statistics, Gas Accident Almanac, Korea Gas Safety Corporation, 27-32, (2016)
- [2] International Fire Safety Standards(NFSC 106), Fire safety standards for carbon dioxide fire extinguishing facilities, (2018).
- [3] Jo, I., Song, D. W., Kim, K. S., J. Lee, S. Y., “A Study on the Proactive of the Enclosure Integrity Test of Gaseous Extinguishing Systems”, Spring Conference , *Journal of The Korean Institute of Gas*, 98, (2014)
- [4] Lee, H. J., “A study on the maintenance inspection and performance models evaluation of gas fire extinguishing systems”, *Master’s Thesis*, (2017)
- [5] Kwon, B. H., “A Study on Asphyxiation Accidents occurred in the confined space, and their Prevention”, *Journal of KSMS*, 18(3), 47-54, (2016)
- [6] Kim, E. S., Cho, W. S., “A Study on Calculation of Leakage for LPG Explosion Accident using 3D Scan and CFD”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 33(3), 1-7, (2018)
- [7] Kim, E. S., Cho, W. S., “An Estimation of the Consequence Analysis for Asphyxiation Accident in Confined Space using CFD”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 33(5), 28-34, (2018)
- [8] Aha, H. J., Lee, S. H., Hur, N. K., Lee, M. K., Yong, G. J., “The Numerical Simulation of Hydrogen Jet Diffusion For Hydrogen Leakage in The Enclosed Geometry”, *Journal of KSCFE*, 14(2), 32-38, (2009)
- [9] Kim, E. S., Sim, J. H., Kim, J. P., Park, N. K., “The Study on Evaluation of Human Body Injury by Explosion of Portable Butane Gas Range”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 31(3), 60-67, (2016)
- [10] Kim, E. S., Kim, J. H., Kim, M. G., “Forensic Engineering Study on the Explosion Accident Investigation of the Centrifugal Casting Machine Using ADINA FSI”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 26(4), 27-33, (2011)
- [11] Kim, E. S., Sim, J. H., Kim, J. H., J. Kim, P., Goh, J. M., Park, N. K., “A Forensic Engineering Study on Evaluation of Explosive Pressure and Velocity for LNG Explosion Accident using AUTODYN”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 30(4), 56-63, (2015)
- [12] Cyclone Ver,9.1.5 Leica Geosystems, (2017)

가스계 소화설비 오작동으로 인한 질식사고의 피해영향 평가

- [13] 3D Reshaper Ver 17.0.06.2451 HEXAGON, (2017)
- [14] Technical Guidelines for Enforcement of Confined Space Health Work Program, KOSHA GUIDE H-80-2012, *Korea Occupational Safety & Health Agency*, (2012)

- [15] Susan A, Rice, “Health effects of acute and prolonged CO₂ exposure in normal and sensitive populations”, *Second Conference On Carbon Sequestration*, (2003)