대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 54, No. 4, pp. 294-300, August 2017
eISSN:2287-7355, https://doi.org/10.3744/SNAK.2017.54.4.294

질식사고 방지용 CO_2 소화설비의 선박 적용성

하연철·서정관†
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원

Applicability of CO_2 Extinguishing System for Ships

Yeon Chul Ha·Jung Kwan Seo†
The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University

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

The offshore installations and ships are the structures most likely to be exposed to hazards such as hydrocarbon fire and/or explosion. Developing proactive measures to prevent the escalation of such events thus requires detailed knowledge of the related phenomena and their consequences. CO_2 extinguishing systems are extensively used for fire accidents of on-and offshore installations because of outstanding performance and low cost. There is, however, the risk of carbon dioxide system which enumerates many of the fatalities by suffocation associated with industrial fire protection requirements. Therefore, the aim of this study is to perform the prediction of fire suppression characteristics of the carbon dioxide system in realistic enclosed compartment area of ships and propose CO_2 extinguish fire fighting system for preventing suffocation accidents during fire fighting. According to CFD calculations, it can be observed and assessed that various fire profiles with CO_2 and O_2 mole fraction in the target enclosed compartment area are applicable within the proposed system. Additionally, the design of fire safety system of ships and offshore installations can utilize ventilation system and/or layout arrangement through the proposed system.

Keywords : CO_2 extinguishing system(이산화탄소 소화시스템), Safety system(안전시스템), Asphyxiation accident(질식사고), Compressor room(압축기실), Sensor system(계측시스템)

1. 서 론

선박 및 해양플랜트에서의 화재 및 폭발사고는 수많은 인명 및 재산과 환경파괴 그리고 경제적 손실 등을 유발하게 된다. 특히 선박 및 해양플랜트 설비 내에서의 화재사고는 피난 및 구난의 범위가 육상설비와는 달리 매우 한정적이다. 이와 같은 상황을 고려하여 화재사고 확산 방지 및 화재 초기 대응을 위해 여러 가지 방안을 마련하고 있는 실정이다.

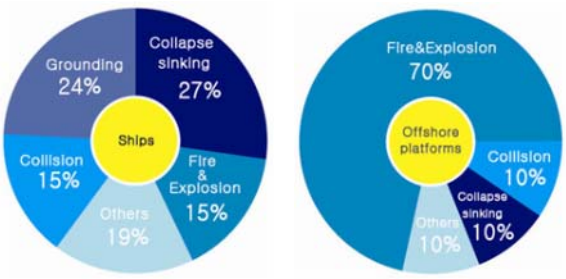


Fig. 1 Hazard of ships and offshore platforms

선박 및 해양플랜트 사고 발생 빈도를 보면 70%가 화재 폭발 사고들이며 선박 및 해양플랜트에 있어서 가장 심각한 위험 요소 중의 하나에 해당된다 (Fig. 1). 이러한 사고들은 인간의 안전, 주위 환경 그리고 구조물의 안전에 심각한 결과를 가져다준다. 이러한 위험에 노출되어 있는 선박 및 해양 구조물의 설계, 설치 및 운영 등은 직면하고 있는 중요한 과제이다 (Park, et al., 2011).

1988년 북해에서 발생한 Piper Alpha 사고 이후 1990년부터 국제적으로 폭발화재사고에 대한 국제공동연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 노력에도 불구하고 2010년 4월 20일 멕시코만 사고가 발생했고 11명의 사상자, 17명의 부상자, 27억불($)의 환경 손해를 발생시켰다. 이러한 결과로 사고조사 및 안전시스템 등 예방을 위한 다양한 잠재적인 위험요소 제거 등의 첨단 안전 설계기술을 적용한 시스템 설계법이 요구되고 있는 실정이다 (Paik & Czujko, 2011).

선박의 경우 이동용 소화기(portable fire extinguisher), 고정식 소화장치(fixed extinguishing system) 등 다양한 소화설비들

Received : 4 May 2017 | Revised : 29 May 2017 | Accepted : 30 May 2017
† Corresponding author : Jung Kwan Seo, seojk@pusan.ac.kr

이 선박소방설비기준에 따라 엄격하게 구비되어 있다. 특히 화재 진압의 마지막 단계로 미분무소화설비(water mist system), 에어로졸 소화장치(aerosol system), 고팽창 포말 소화장치(high expansion foam system) 또는 CO_2 소화설비(CO_2 system) 등의 고정식 소화장치(fixed extinguishing system)를 사용하고 있다.

이 중, CO_2 소화설비는 CO_2를 화재발생 장소에 수동 또는 자동으로 분사하여 소화시키는 설비로서 O_2의 농도가 21%에서 15% 이하로 저하될 경우 소화가 되는 원리(Hwang, et al., 2008)를 이용한 것으로, 선박의 화재 진압용 소화설비로 활용되고 있으며, 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 선박용 CO_2 소화설비에 대하여 SOLAS(International Convention for the Safety of Life at Sea) 규정(regulation)을 따르고 있고, 선박에 설치되는 CO_2 소화설비는 이 요건을 만족하여야 한다 (IMO, 2007).

그러나 CO_2 소화설비는 가스 상태로 화재구역의 심부까지 침투가 용이하여 화재에 매우 효과적인 장점을 가지고 있지만 이에 반하여 질식의 위험이 있어 사용의 주의가 필요한 실정이다. 최근 CO_2 소화설비의 CO_2 다량 유출 또는 오작동으로 인해 사망사고가 빈번하게 발생하고 있어 질식사고 예방을 위한 대책 및 방법에 대한 관련 연구가 진행되고 있다. 최근에 육상 및 선박엔진룸에 대해서 CO_2 소화설비의 수치적 및 실험적 연구가 수행되어지고 있으나 대상 구조물의 기존 배치변경 및 현상학적인 분석으로만 이루어지고 있다 (Kim, et al., 2006; Jeon, et al., 2008; Lee, et al., 2012).

Fig. 2는 일반적으로 활용되고 있는 CO_2 소화설비의 제어시스템이다. CO_2를 일정한 압력 용기에 저장해 두었다가 화재 발생 시 수동 또는 자동으로 CO_2를 분사하여 화재가 진압되도록 구성되어져 있다. 그러나, 이러한 기존 CO_2 소화설비는 화재 발생 구역에 재실자를 감지하여 CO_2의 무분별한 분사를 차단하는 기능과 CO_2가 분사된 이후 잔존하는 CO_2의 농도를 측정하여 후속적인 화재진압이나 화재현장 복구 시 잔존하는 CO_2로 인한 현장요원들의 질식사고나 부상 등을 고려한 기능은 포함하고 있지 않다.

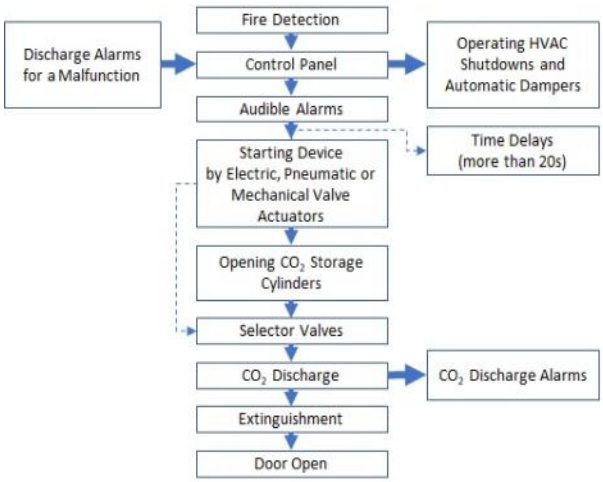


Fig. 2 General CO_2 extinguish fire fighting system

따라서, 화재구역에 재실자를 감지하여 CO_2의 분사를 조정하는 기능과 현장요원들이 진입할 수 있는 환경이 되어 있는지를 판단할 수 있는 기능이 적용되어 있지 않아 이를 해결할 수 있는 안전제어 시스템의 구성이 필요하다.

질식사고방지기법과 관련하여 가상의 선박 기관실에 대해 관련 제어기법에 대한 수치해석기반을 통한 기술을 제안하였지만 적용성 및 배치 기술에 대하여 부족한 결과를 도출하였다 (Ha, et al., 2015). 따라서 본 논문은 기존 시스템에 안전제어 시스템을 적용하여 자동모드에서 화재감지기가 화재 감지 시 재실자를 감지하여 CO_2의 무분별한 분사를 차단하고, CO_2가 분사된 이후에도 후속적인 화재진압이나 화재현장 복구 시 잔존하는 CO_2의 정밀한 분석을 통하여 현장요원의 투입시 2차적인 질식사고 혹은 부상을 방지할 수 있도록 하는 기법 및 상세 배치 및 제어기법을 제안하고자 한다.

또한, 적용성 검증을 위하여 CO_2 소화설비가 설치되는 선박의 밀폐구역 6,000(W) × 3,000(D) × 2,600(H)에서의 제안된 제어기법을 정밀한 3차원 수치시뮬레이션을 수행하여 적용성을 검토하였다.

2. 시스템 구성

2.1 질식사고 방지용 CO_2 화재 진압 시스템

제안된 질식 방지 기법은 다음과 같은 기존의 설비에 질식방지를 위한 4가지의 안전시스템 장치를 추가하여 아래와 같이 구성 할 수 있다.

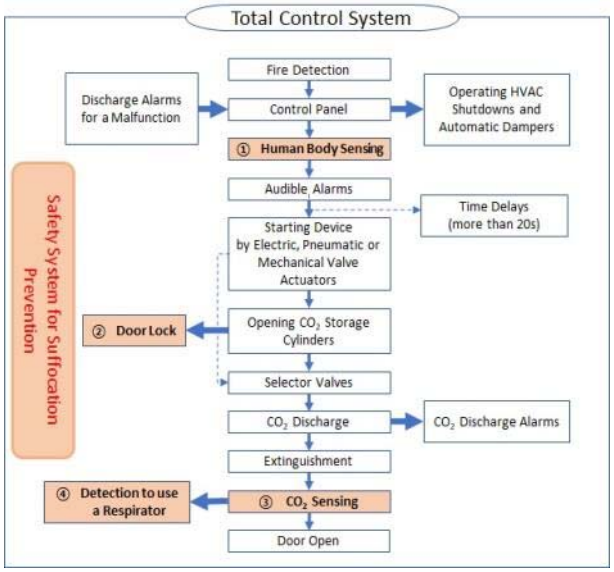


Fig. 3 Proposed CO_2 extinguish fire fighting system

Fig. 3에 나타내고 있듯이 기존의 CO_2 소화설비에 ① 인체감지시스템, ② 출입문 폐쇄장치, ③ CO_2 농도측정 시스템, ④ 호

흡기 이탈감지 시스템을 구축하고, 화재가 감지되었을 경우, 방호구역 내부에 재실자의 유무를 감지한다.

방호구역 내부에 인체가 감지되었을 경우 20초 이상 인체가 감지되지 않을 때까지 CO_2 분사를 지연시켜 피신시간을 확보한다. 인체가 감지되지 않고 화재가 감지되면 CO_2를 분사시키고, 출입구 잠금장치를 작동시켜 외부에서의 출입을 차단시킨다.

출입구 잠금장치는 방호구역 내부 CO_2 농도를 측정하여 설정된 기준치와 측정된 농도를 비교 분석한다. 분석결과 허용 기준치를 만족하지 못하는 경우에는 잠금상태를 유지하고, 허용된 기준치를 만족하면 잠금상태를 해제하는 것을 기본으로 한다.

산소호흡기는 방호구역 내부에 들어가기 위한 안전장치로서, 화재가 진압되었을 경우라도 잔존 CO_2에 의해 2차 사고가 발생할 수 있기 때문에 반드시 산소호흡기를 착용하여야 도어가 개방될 수 있도록 하였다.

이와 같은 4가지의 수정된 안전설비를 통하여 질식사고 방지용 CO_2 소화설비 시스템을 구축할 수 있다.

2.2 상세 시스템의 구성

2.2.1 산소 농도 측정

CO_2 소화설비의 직접 시험 방법은 COS 소화약제를 방사하여 설계농도 및 설계농도유지 시간을 확보하는지 직접 확인하는 방법이 가장 신뢰성이 있으나 비용, 환경문제, 시험절차 등의 어려움으로 활용에 한계가 있다. 이에 공기 중 O_2 농도를 한계산소농도(15%) 이하로 낮추기 위해 필요한 CO_2의 최소이론농도를 구하는 식 (1)을 이용하여 CO_2 농도를 구할 수 있으므로 (NFPA 12., 2008) O_2 농도를 측정하기 위한 장치 개발이 필요하다.

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

따라서 산소 분석기, Calibration을 위한 밸브류, 분석기 공급 유량 확인을 위한 유량계, 2차 수분제거를 위한 Drierite Housing, 압력계 전원 공급 장치가 구성된다.

또한, 원할한 산소농도 분석을 위하여 Suction Pump, 미세먼지 제거를 위한 Hepa Vent Filter 등이 추가로 구성되어져야한다.

2.2.2 측정 및 운용 프로그램 수립

화재 사고시 실제 측정된 데이터를 실시간으로 표시하고 저장하기 위한 운용 프로그램이 필요하다. 즉, 계측된 데이터를 내부의 최적화된 위치에 산소 농도, 룸(room) 온도, 노즐 온도를 각각 측정/저장하여 제어/운용할 수 있는 프로그램이 필요하다.

2.2.3 모션감지 시스템

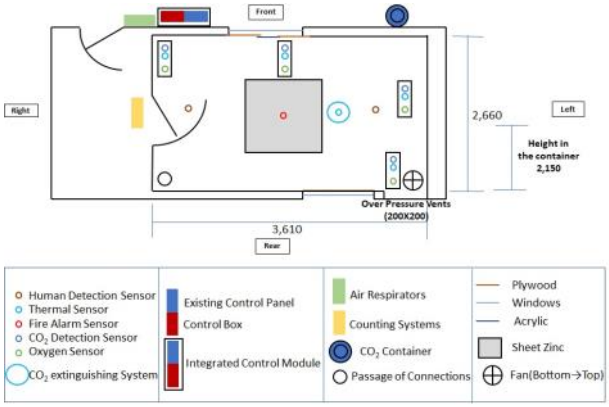
출입자 출입여부 감시를 위한 대상 구획실 입구 설치 카운트 센서의 발광부 및 수광부 설계와 모션감지 센서는 적외선 모션감지 기법을 적용하였고, 2중 인체감지 카운팅 알고리즘을 시스템에 적용하였다.

3. 수치해석을 통한 적용성

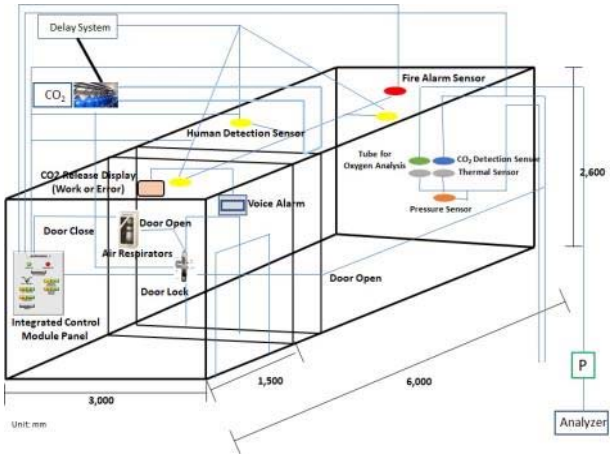
3.1 밀폐된 구역 화재 모델

제안된 화재 구역의 질식사고 방지 시스템의 적용성을 검증하기 위하여 선박 내 대표적인 밀폐 구역에 대해서 제안된 CO_2 소화설비를 가정하여 설치하였다.

Fig. 4는 대상 밀폐 구역의 외부 및 내부 수치 측정 도면이다. 외부 크기는 6,000(W) × 3,000(D) × 2,600(H) (mm)이고, 내부 높이는 2,150 mm이다. 밀폐 구역은 화재 실험을 위한 방화구역과 제어설비를 장착할 수 있는 안전설비제어실로 나누었다. 방화구역 내부의 크기는 3,610 (W) × 2,660 (D) × 2,150(H)mm으로 방화구역의 부피는 20.65 m^3 이다. 따라서 CO_2 소화설비에 필요한 용량 등의 설정은 방화 구역 내부 부피기준을 사용하여 적용하였다.



(a) Location of the proposed systems at the target room



(b) Location of control system and detecting system

Fig. 4 Arrangement of the proposed system at the target room

안전설비제어실은 방화구역과 인접하며 CO_2 방출 표시등, 화재수신반, 산소 호흡기함, 도어락 등을 설치하여 실제 사고 시 환경을 제어할 수 있게 구성하였다.

또한 실제 실증시험을 대비하여 방호구역은 내부에 큰 공간과 충분히 환기를 시킬 수 있는 환풍기를 구비하여 시험 중 위급상황 발생 시 CO_2의 배출이 용이하도록 구성하였다.

3.2 FDS 수치해석을 통한 검증

3.2.1 화재 시나리오

방호구역 내부에는 단면적 0.4×0.4 m^2의 개구부 1개와 반대편 쪽 벽면에 단면적 1.0×2.0 m^2의 출입문을 두었으며, 출입문은 닫힌 상태로 밀폐된 조건을 설정하였다 (Fig. 5).

일반적으로 다양한 화재의 종류가 선박 및 해양플랜트에 존재하지만 본 화재는 일반적으로 밀폐된 구역에 오일에 관련한 기계류에 발생이 가능한 액면 화재(pool fire)를 고려하였다. 즉, 선박 및 해양플랜트의 밀폐구역에 있는 기관실 및 터빈 등에서 오일 누출에 의해 발생하는 액면 화재를 재현하였다.

액면 화재 재연을 위하여 가로 0.2 m, 세로 0.2 m, 높이 0.3 m의 연료통을 두고, 해당 연료통에서 점화하여 화재가 발생하는 것으로 설정하였다. 그러나 향후 실증 실험 조건의 재현성을 위하여 Fig. 5와 같이 연료통 바닥에서 0.2 m 높이로 물을 채우고, 점화조건으로 연료통 측면전체에서 500 kW/m^2로 10초 동안 가열이 이루어지도록 설정하였다.

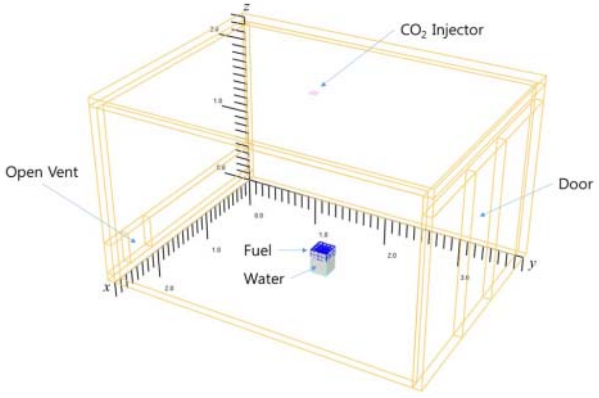


Fig. 5 CFD modelling for the target room

액면 화재 발생 후 100초 이 후에 CO_2 소화설비가 작동하여 CO_2가 분사되도록 설정하였으며, 화재진압에 필요한 CO_2 소화약제량은 2016년 NFSC 106 (CO_2 소화설비의 화재안전기준) 및 표준 CO_2 용기기준에 따라 45 kg(68.0 Liter)으로 설정하였으며, 분사시간은 200초로 설정하였다 (NFSC, 2011).

3.2.2 CFD 수치해석

수치해석 프로그램은 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 화재해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator) ver 6.1.2 SNV 20564를 사용하였으며, FDS에서 지원하는 유동장의 난류 모델 2가지 DNS(Direct Numerical Simulation) 및 LES(Large Eddy Simulation) 중 LES 모델을 채택하였고, 벽면에서는 Smooth Wall로 가정하였다.

화원에서 발생되는 물질의 열유동에 대한 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식 및 화학반응식을 풀어서, 유동장, 온도장 및 구성물질 농도를 검토하였으며, CO_2 소화약제 분사 여부에 따른 화재 양상을 분석하기 위해, 소화약제가 분사되지 않는 경우와 화재발생 100초 후에 분사를 시작하는 경우에 대하여 FDS 해석을 수행하였다. Table 1은 2000년 미국환경보호국(USEPA) 보고서에 제시된 CO_2 농도에 따른 인체의 심각성을 명시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 보고서에서 제시된 CO_2 농도 2% 미만을 허용구간으로 설정하였고, 이를 CO_2 소화설비에 의한 화재진압 성능평가의 기준으로 활용하였다.

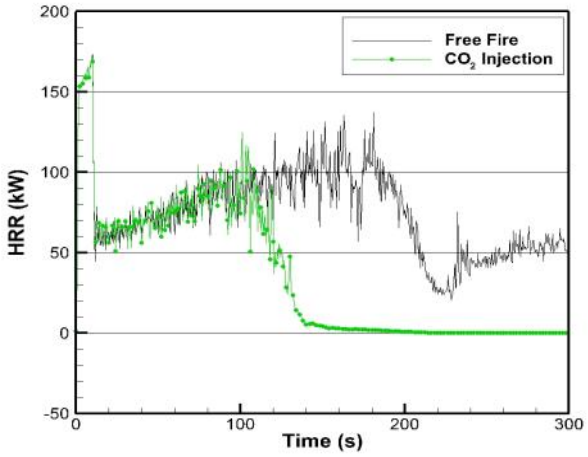
Table 1 Health effects of CO_2 concentrations (USEPA, 2000)

Concentration	Time	Effects
2%	Several hours	Headache, dyspnea upon mild exertion
3%	1 hour	Dilation of cerebral blood vessels, increased pulmonary ventilation, and increased oxygen delivery to the tissues
4 ~ 5%	Within a few minutes	Mild headache, sweating and dyspnea at rest
6%	1 ~ 2 minutes	Hearing and visual disturbances
	≤16 minutes	Headache and dyspnea
	Several hours	Tremors
7 ~ 10%	Few minutes	Unconsciousness or near unconsciousness
	1.5 minutes ~ 1 hour	Headache, increased heart rate, shortness of breath, dizziness, sweating, rapid breathing
10 ~ 15%	1+ minute	Dizziness, drowsiness, severe muscle twitching and unconsciousness
17 ~ 30%	< 1 minute	Loss of controlled and purposeful activity, unconsciousness, convulsions, coma and death

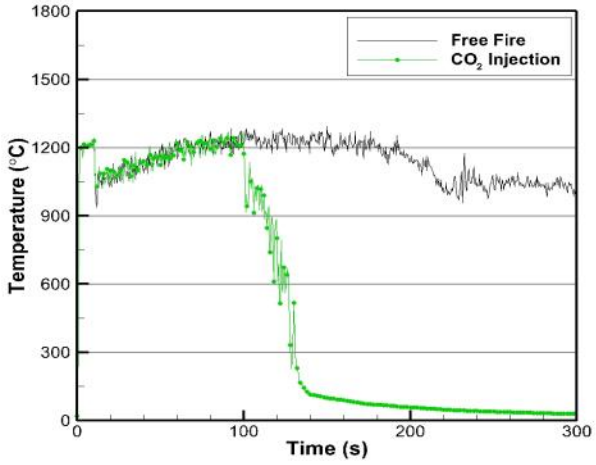
3.2.3 CFD 수치해석 결과

해당 소화설비의 화재진압 성능을 평가하기 위하여 CFD 계산을 0초부터 300초 시간까지 수행하여 열발생률(Heat Release Rate, HRR) 및 온도 변화를 조사하였다. Fig. 6(a)에서 보이는 것과 같이 CO_2 소화설비가 작동하지 않는 일반 화재에서는 초기 점화원 작동 후 열발생률이 130 kW까지 상승되었다가 50kW로 감소되는 경향을 보여주고 있지만, 소화설비가 작동하는 경우에 대해서는 CO_2 분사시점 100초 때부터 열발생률(HRR)이 감소하기 시작하였으며 분사노즐 작동시간 100초 내에서 열발생률(HRR)이 0으로 떨어지면서 화재가 진압되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6(b)는 화재발생으로 인한 구획 내 최대온도의 변화를 나타낸 그래프이다. CO_2 소화설비를 작동하지 않는 경우 온도가 약 1,250℃까지 상승되는 것을 볼 수 있었고, 소화설비가 작동하는 경우에는 CO_2 분출 후 열발생률(HRR) 및 온도가 감소되는 것을 알 수 있었다.

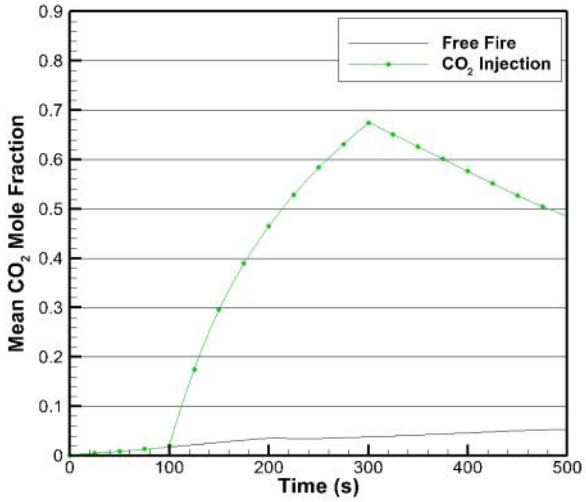


(a) HRR vs. time

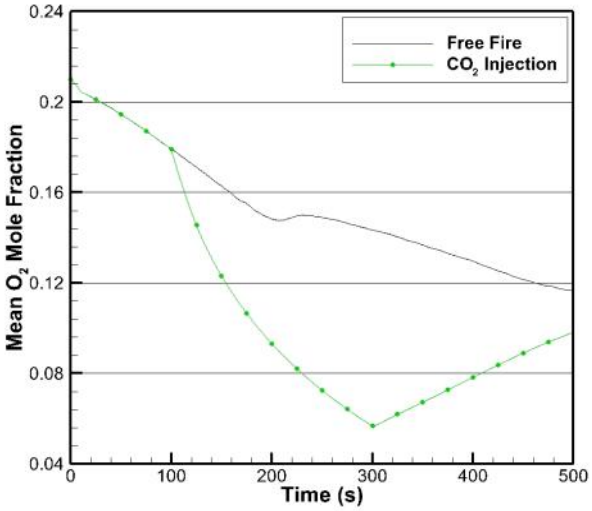


(b) Temperature vs. time

Fig. 6 Comparison of HRR and temperature the CO_2 injection in test room



(a) Mean CO_2 Model Friction vs. time



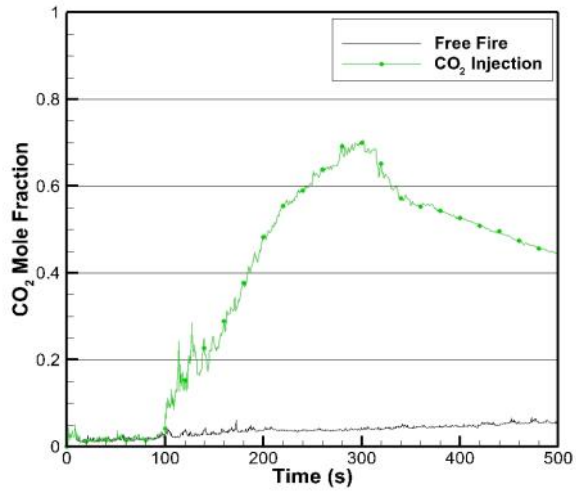
(b) Mean O_2 Model Friction vs. time

Fig. 7 Comparison of mean CO_2 mole fraction and O_2 mole fraction in test room

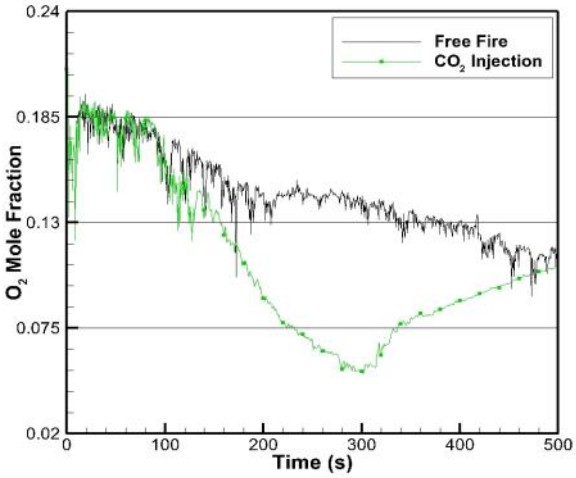
시험대상 구역 내부의 CO_2 및 O_2의 평균 몰분율 변화를 Fig. 7에 보여주고 있다. CO_2 소화설비에 대한 고려가 없는 경우는 화재발생 후 CO_2는 지속적으로 증가되어지나 O_2는 반대로 감소되는 것을 알 수 있다. 이것은 연료 연소를 위한 O_2의 소모 및 연소결과에 따른 CO_2의 발생을 설명할 수 있다. 또한, 소화설비의 작동으로 인한 CO_2 분사 시점에서 CO_2 평균 몰분율이 증가하기 시작하여, 분사가 완료되는 시점에서 최대값을 나타낸 후, 개구부(0.4 m × 0.4 m)를 통한 자연 환기로 인하여 CO_2 농도가 서서히 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

O_2 평균 몰분율과 CO_2 농도 관계는 상호 상대적인 경향이 있음을 관찰할 수 있다.

O_2 및 CO_2의 위치별 몰분율 변화에 대한 검토를 수행하였다. 화원인 액체화재의 연료통의 표면 위치로부터 약 1.2 m 위쪽(1.4, 1.9, 1.7)의 CO_2 및 O_2의 몰분율 변화를 Fig. 8에 나타내었다.



(a) CO_2 Model Friction vs. time



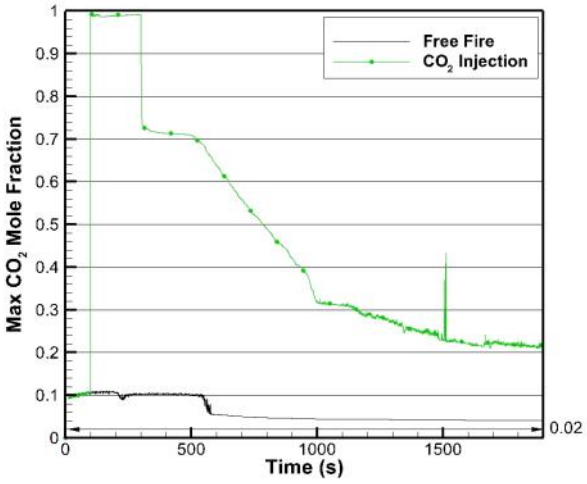
(b) O_2 Model Friction vs. time

Fig. 8 Comparison of CO_2 mole fraction and O_2 mole fraction in room (at 1.2m vertical direction from fire)

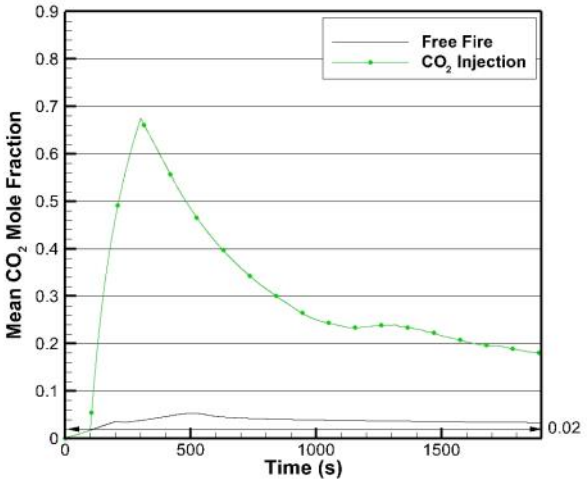
CO_2 소화약제가 분사되는 경우, CO_2 농도 변화는 분사 시작 지점에서 급격한 증가를 보이고, 분사 종료 부근에서 60% 이상의 CO_2 농도를 보이고 있으며, O_2 농도는 화재 진압 직전에 불안정성을 보이고, 화재가 진압되는 시점에서 최소 농도를 나타내고 있으며 (Fig. 8), CO_2 농도 증가 시 O_2 농도는 감소하며, CO_2 농도 감소 시 O_2 농도는 증가하는 경향을 잘 보여주고 있다. 또한, CO_2 소화설비의 작동여부와 상관없이 400초 이후에는 O_2 농도가 13% 이하로 이므로 작업자 안전에 주의하여야 함을 알 수 있다.

시험 대상 구역에서 CO_2 및 O_2 의 몰분율 장시간 변화 특성을 분석하였다. Fig. 9(a)는 CO_2 몰분율 최댓값을 Fig. 9(b)는 CO_2 몰분율 평균값을 나타내고 있다.

두 그래프의 비교에서 알 수 있듯이 하부에 있는 하나의 개구부로는 CO_2 소화설비 작동여부와 상관없이 약 30분의 시간이 지났음에도 불구하고 CO_2 안전 농도가 2% 미만으로 떨어지지 않는 것을 볼 수 있으므로, 작업자 또는 실험수행자의 안전 확보를 위하여 적절한 환기팬의 설치 또는 개구부 추가 확보 등의 조치가 필요함을 알 수 있다.



(a) Maximum CO_2 Model Friction vs. time



(b) Mean CO_2 Model Friction vs. time

Fig. 9 Comparison of CO_2 Mole Fraction in test room

제안된 시스템의 성능평가 수치해석을 통해 적용성을 확보하였다. 이는 향 후 추가적인 실 실험 평가를 수행하여 적용성 및 검증이 필요하다. 따라서 본 논문은 CO_2 소화설비의 선박 내 적용성을 고려하여 가상 시험모델에 모션감지시스템 및 소화설비의 농도측정 시스템을 적용하여 실제 선내 화재와 유사한 시나리오에 대하여 CFD 해석을 통하여 질식방지용 CO_2 소화설비의 성능 및 적용성을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 화재해석 CFD 프로그램인 FDS를 활용하여 선박 내 밀폐구역에서의 CO_2 소화설비의 화재 진압 특성 및 CO_2 소화설비 작동으로 인한 질식사고 방지를 위한 안전 제어기법을 검증하였다. 이를 통하여 다음과 같은 소결을 제시하고자 한다.

1) 화재사고 후 CO_2 소화설비 작동으로 열발생률 및 감소률을 통하여 화재 진압을 확인할 수 있다. 또한, 최대온도는 열발생률 감소와 함께 감소하다가 열발생률이 0으로 떨어진 이후에도 밀폐된 구역에 관련한 환경조건으로 일정 시간 동안 온도변화를 나타낸 후 대기온도로 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.
2) 신속한 화재 진압을 위한 CO_2 사용시 분사속도에 따른 평균 몰분률이 급증하게 되면서, 완료되는 시점에서 최고값을 보여준다. 이후 환기를 통한 대기중의 CO_2의 농도는 외부 대류 이동 속도에 따라 점차 감소하고, O_2 평균 몰분률은 CO_2 농도 증가시 감소하며, CO_2 농도 감소시 증가하는 경향을 보여준다.
3) CO_2는 공기보다 무거워서, 하부에 있는 하나의 개구부로는 CO_2 소화설비 작동여부와 상관없이 약 1,800초 이후에는 USEPA 기준값인 CO_2 허용 농도(2% 미만) 이하로 감소되지 않았다. 따라서 작업자 안전확보를 위하여 적절한 환기팬의 설치 또는 개구부 추가 확보 등 안전 대책이 필요함을 알 수 있다.
4) 제안된 시스템은 성능평가 수치해석을 통하여 질식방지용 CO_2 소화설비의 선박 적용성을 확보하였다. 이는 향후 개발된 실험 시나리오 및 추가적인 실 실험 평가를 수행하여 적용성 및 검증이 필요하다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

Ha, Y.C. Seo, J.K. Hwang, J.H. Im, K. & Ryu, S.H., 2015. Method for preventing asphyxiation accidents by a CO_2 extinguishing system on a ship. *Fire Science Engineering*, 29(6), pp.57-64.

Hwang, J.H. Chung, G.S. & Kang, D.I., 2008. *3D fire simulation manual for a engineer of the elementary and intermediate level*. Dong-hwa Technology: Korea.

International Maritime Organization(IMO), 2007. *Fire Safety Systems (FSS) code: International code for fire safety systems*. IMO Publication: UK.

Jeon, H.K. Choi, Y.S. & Park, J.T., 2008. The effects of the area of openings on the performance of a CO_2 extinguishing system - The CFD simulations of the oil surface fire in a machine room. *Fire Science and Engineering*, 22(1), pp.1-9.

Kim, D.S. Kwark, J.H. Kang, D.S. & Son, B.S., 2006. Development of fire extinguishing system suitable for unmanned engine room of a small ship. *Fire Science and Engineering*, 20(3), pp.96-100.

Lee, S.M. Moon, S.W. & Ryu, S.H., 2012. A study on verifying the reliability of CO_2 fire extinguishing systems through the direct discharge test. *Proceedings of 2012 Spring Annual Conference*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, Daegu, 3-4 May 2012, pp.155-158.

NFPA 12, 2008. *Standard on carbon dioxide extinguishing system*. National Fire Protection Association: Quincy, MA, P.5, pp. 14-16, p.33.

NFSC 106, 2015. *National fire safety code for carbon dioxide extinguishing systems*. Ministry of Public safety and Security: Korea.

Paik, J.K. & Czujko, J., 2011. Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: recent advances and future trends. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 4(3), pp.167-179.

Paik, J.K. Czujko, J. Kim, B.J. Seo, J.K. Ryu, H.S. Ha. Y.C. Janiszewski, P. & Musial, B., 2011. Quantitative assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations. *Marine Structures*, 24, pp.73-96.

USEPA, 2000. *Carbon dioxide as a fire suppressant: examining the risks, report EPA430-R-00-002, air and radiation*. USA: United States Environmental Protection Agency.

하 연 철 서 정 관