

개구부 면적이 CO₂ 소화설비의 소화성능에 미치는 영향
-기계실 석유 표면화재의 CFD simulations-
The Effects of the Area of Openings on the Performance of a CO₂
Extinguishing System
-The CFD Simulations of the Oil Surface Fire in a Machine Room-

전흥균[†] · 최영상 · 박종택

Heung-Kyun Jeon[†] · Young-Sang Choi · Jong-Tack Park

대구보건대학 소방안전관리과
(2007. 5. 2. 접수/2008. 1. 10. 채택)

요 약

이산화탄소는 다른 어떤 가스계 소화약제보다도 화재를 안전하게 진압하는 소화약제로서 다양한 방호구역과 화재에 대하여 널리 사용되고 있다. 성능위주설계 개념에 따라 이산화탄소 소화설비는 설계 단계에서 해당 방호구역의 발생 가능한 화재시나리오에 따라 소화성능을 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 100 m³의 체적을 갖는 기계실의 석유 유출 (설계)화재시 개구부의 크기가 CO₂ 소화설비의 소화성능과 유동장의 유동특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 CFD 시뮬레이션을 수행하였다. 소화완료 시간은 개구부의 면적 크기에 비례하여 증가하였고, 3가지 화재모델의 소화완료 시간 모두 CO₂ 소화설비의 성능기준에 부합하였다. 개구부의 질량 유동율은 화재 열방출과 CO₂ 소화약제 분사의 복합적인 작용에 의해 영향을 받았다. CO₂ 소화약제 분사 완료 후 방호구역의 산소농도는 화재모델 모두 연소한계산소농도 보다 적었다.

ABSTRACT

Carbon dioxide(CO₂) agent, which has more safely extinguished fire than any other gaseous fire extinguishing agents, has been widely used in various protected enclosures and types of fires. According to the concept of performance-based design(PBD), CO₂ extinguishing system to be designed is needed to be evaluated for the performance of fire suppression with possible fire scenarios in an enclosure. In this paper, CFD simulations were carried out to study the effects of opening area on the performance of CO₂ extinguishing system and the flow characteristics in the machine room of 100 m³ in which kerosene spill fire happened. This study showed that time of fire suppression increased linearly in proportion to the size of opening area, and fires for each model were completely suppressed prior to the end of discharge of CO₂ agent. It was shown that mass flow rate through opening was influenced by the combined effects of heat release rate of fire and discharge of CO₂ agent. After CO₂ agent was completely discharged, oxygen concentrations in enclosures for each model were lower than the limit concentration of combustion.

Keywords : CO₂ agent, Performance-based design, CFD simulations, Opening area, Performance of CO₂ extinguishing system

1. 서 론

이산화탄소는 다른 어떤 가스계 소화약제보다도 화재를 안전하게 진압하는 소화약제로서 다양한 방호구

역과 화재 종류에 대하여 널리 사용되고 있다.¹⁾

고정식 CO₂ 소화설비는 고압가스용기에 저장된 불연성가스인 이산화탄소가스를 화재시 배관을 통해 밀폐된 방호구역에 분사시켜 질식 및 냉각작용으로 화재를 소화하며, 주로 인화성액체 저장실, 전기실, 기계실, 발전실, 변전실, 비행기격납고, 선박엔진실, 주차공

[†] E-mail: jeonhk@mail.dhc.ac.kr

간 및 일반가연물 등 특수한 위험 또는 고가의 시설이 있는 다양한 장소에 많이 적용된다.²⁾

이산화탄소 소화특성에 대한 연구로서, Katta 등³⁾의 화염 종류별 이산화탄소 소화약제의 소화특성에 대한 수치적 연구와, 국내에서는 박 등^{4,6)}의 화재위치에 따른 이산화탄소 소화약제의 전달특성, 노즐수에 따른 유동특성과 농도분포, 노즐분사각과 속도가 농도분포에 미치는 영향에 관한 연구가 있다.

상기 연구들은 화염의 종류와 화재위치, 노즐수, 분사각 등의 변화에 대한 유동장내의 이산화탄소의 농도분포 특성에 대한 연구로서 화재시 CO₂ 소화설비의 전반적인 작동과 관련된 소화 성능을 확인하기에는 다소 거리가 있다고 사료된다.

이산화탄소 소화설비의 소화성능은 먼저 설계단계에서 확인되어야 하며, 시공 후 유지관리시에도 CO₂ 소화설비 작동의 신뢰성을 확보하고, 더불어 소화성능에 대한 기대를 보장할 수 있어야 한다. 비록 방호구역의 체적과 설계농도를 고려하여 이산화탄소 소화약제량을 정확히 계산하여 제대로 시공하였다 하더라도 유지관리상 제대로 운영되지 않는다면, 실제 화재시 CO₂ 소화설비의 주변 장치, 즉 개구부 폐쇄장치, 환기팬, 감지기 등이 제대로 동작하지 않는 경우가 발생하여 CO₂ 소화설비의 소화성능에 영향을 미칠 수도 있다. 특히 개폐장치의 고장으로 개구부가 폐쇄되지 않는 경우 화재진압의 실패 가능성도 배제할 수 없다.

이러한 여러 가지 화재모델 조건에 대하여 실제로 방호대상물의 건물 내부에 설치된 이산화탄소 소화설비의 소화성능에 대한 실험화재실험을 통해 확인 작업은 현장 여건상 어려운 실정이다. 또 향후 성능위주설계의 적용을 고려한다면 CO₂ 소화설비의 설계 단계에서 해당 방호구역의 조건을 고려하여 발생 가능한 화재시나리오에 따라 그 성능기준의 부합 여부를 확인할 필요가 있으나, 이와 관련된 연구가 매우 부족한 실정이다.

따라서 이산화탄소 소화설비의 작동시 소화에 걸리는 시간과, 발생 가능한 개구부의 개폐조건이 소화성능에 어떠한 영향을 미칠지에 대한 연구가 요망된다.

본 연구에서는 100 m³의 체적을 갖는 기계실의 석유 유출 화재시 국가화재안전기준에 근거해 설치한 CO₂ 소화설비에 대하여 개구부의 크기가 소화성능과 유동장의 유동특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이러한 조사를 위하여 본 연구에서는 개구부의 면적과 위치가 다른 3가지 화재모델을 대상으로 미국 NIST에서 개발한 FDS 프로그램을 사용하여 CFD 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구의 목적은 CO₂ 소화설비의 설계시 CFD 시뮬레이션을 이용한 CO₂ 소화설비의 소화성능 확인과 성능위주설계기법의 기초적인 자료를 제공하는 것이다.

2. 화재모델링

2.1 화재모델

본 연구의 화재모델은 기계실 석유 유출 화재시 열 방출율, 온도, 개구부로의 질량 유동을 및 방호구역내의 산소 및 CO₂ 소화약제량의 변화 등 CO₂ 소화설비의 성능과 유동장내의 질량 변화를 정확히 조사할 수 있도록 균일 격자계(uniformed-grid systems)로 구성되었다.

화재모델의 크기는 길이×폭×높이가 8.0m×5.0m×2.5m이며, 계산에 사용된 격자는 각 변의 길이가 0.1m이며, 격자수는 X, Y, Z방향으로 80개, 50개, 25개로서, 전체 격자수는 100,000개이다. Figure 1과 Figure 2는 화재모델과 격자계를 나타낸다.

개구부는 화재모델에 따라 크기와 위치를 다르게 하였다. Figure 1에서 보듯이 Model No. 0의 경우는 개구부가 없으며, Model No. 1의 경우는 누설면적에 해당하는 면적을 고려하여 0.01 m²의 크기로 왼쪽 벽면 하단부의 뒤쪽에 위치하며, Model No. 2의 경우는 2개의 환기구를 고려하여 각각 0.24 m²의 크기로 왼쪽 벽면 하단부의 뒤쪽과 오른쪽 벽면 상단부의 중앙에 위치하며, Model No. 3의 경우는 출입문의 면적을 고려하여 3.78 m²의 크기로 앞쪽 벽면 왼쪽 부분에 위치한다.

CO₂ 분사노즐은 분구면적이 0.01 m²이며, 2개의 노즐을 좌표 (1.95, 2.45, 2.40)와 (6.05, 2.45, 2.40)의 위

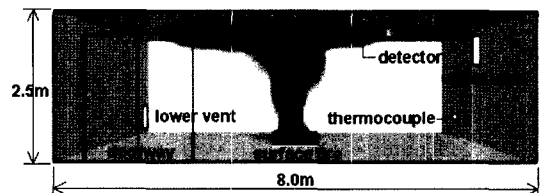


Figure 1. Fire model.

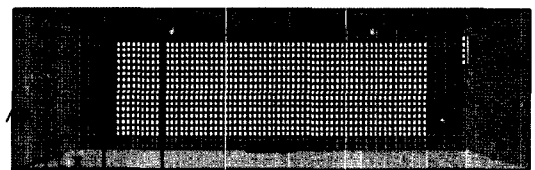


Figure 2. Grid systems.

치에 각각 설치하여 방호구역 공간에 CO₂ 소화약제를 균일하게 분사한다.

감지기는 Heskestad model⁷⁾의 연기감지기이며, 2개의 감지기를 좌표(2.5, 2.5, 2.45)와 (5.5, 2.5, 2.45)의 위치에 각각 설치하여 CO₂ 소화설비 작동 지연시간에 연동된다.

열전대(thermocouples)는 각 개구부의 면적 중앙에 설치하여 개구부의 면적을 통해 유출·입되는 질량 유동율을 계산한다.

화재는 기계실 바닥 중앙에 10 l의 석유(kerosene)가 1 m²의 면적으로 누출되어 왼쪽 뒤 모서리에서 발생한 것으로 하였다. 설계화재는 아래 Table 1의 상태량 값과 관련 식에서 계산된 값을 이용하였다. 본 연구의 경우 단위면적당 열방출율(heat release rate per unit area)은 1,156 kW, 연소지속시간은 214초이다. 또 화재의 화염전파속도는 액체연료의 화염전파속도에서 0.3 m/s 값으로 하였다. Table 1은 본 연구에 적용한 설계화재의 상태량을 나타낸다.

2.2 CO₂ 소화설비

밀폐 구획 화재시 실내 공간에 CO₂ 소화약제를 분

사하면 공간 내부의 초기 21%의 산소 농도가 점점 감소하게 되며, 연소한계농도인 15% 이하로 감소되면 화재는 CO₂ 소화약제에 의해 질식소화 된다.

밀폐 공간 내부의 산소농도가 연소한계농도인 15%에 도달하는데 필요한 CO₂ 소화농도는 28.57%이며, 안전율 20%를 고려하면 CO₂ 설계농도는 34%이다. 본 연구에 사용된 석유 표면화재의 소화를 위한 CO₂ 소화약제는 34%의 농도를 적용하였고, 액화탄산의 품질은 2중으로 함량(volume%)이 99.5 이상이다.

본 연구에 사용된 CO₂ 소화설비는 CO₂ 소화약제가 화재모델 공간 전체에 균일하게 분사될 수 있도록 2개의 분사노즐을 천장 바로 아래에 설치하였다. 국가화재안전기준(NFSC 106)에 근거하여 표면화재의 경우에 대해 방호구역 체적이 100 m³인 경우에 해당하는 방출계수는 0.9 kg/m³이다. 따라서 소화에 필요한 CO₂ 소화약제량은 90 kg이다.

분사노즐 1개가 분사시간 1분 동안 담당하는 소화약제량은 45 kg이다. 이때 20°C인 경우에 대한 이산화탄소의 비체적 0.5463 m³/kg 값을 이용하여 노즐에서 분사되는 이산화탄소의 분사속도를 계산하면 40.97 m/s이 된다.

Table 1. Property and data for design fire(kerosene)⁸⁾

Property	Descriptions and Data
ρ	ρ : density [kg/m ³] = 820 [kg/m ³]
\dot{m}_{∞}''	\dot{m}_{∞}'' : asymptotic diameter mass loss rate [kg/m ² ·s] = 0.039 [kg/m ² ·s]
ΔH_c	ΔH_c : complete heat of combustion [MJ/kg] = 43.2 [MJ/kg]
$k\beta$	k : extinction-absorption coefficient of flame [m ⁻¹] β : mean beam length corrector $k\beta$ = 3.5 [m ⁻¹]
$D = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}}$	D : equivalent diameter of fire area [m] = 1.128 [m] A_f : area of surface fire [m ²] = 1 [m ²]
$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}'' (1 - e^{-k\beta D})$	\dot{m}'' : burning rate per unit area [kg/m ² ·s] = 0.0382 [kg/m ² ·s]
$\chi = \frac{\Delta H_{eff}}{\Delta H_c}$	χ : efficiency of combustion = 0.7 ΔH_{eff} : effective heat of combustion [MJ/kg]
$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \chi \cdot \Delta H_c$	\dot{Q} : Heat release rate [kW] = 1,156.6 [kW]
$t_c = \frac{m}{\dot{m}}$	t_c : duration time of combustion [s] = 214 [s]

Table 2. Property and data of CO₂ extinguishing system^{9,10)}

Property	Descriptions and Data
$Q = \frac{21 - O_2}{O_2} \times V_{en}$	Q : CO ₂ volume for extinguishing fire [m ³] O ₂ : O ₂ concentration after CO ₂ flooding [%] V _{en} : enclosure volume [m ³]
$C_{th} = \frac{Q}{V + Q} \times 100$ $C_{th} = \frac{21 - O_2}{21} \times 100$	C _{th} : theoretical CO ₂ concentration [%] = 28.57 [%]
$C_a = S \times C_{th}$	C _a : CO ₂ concentration [%] = 34 [%] S : safety factor = 1.2
$m = V \times F$	m : calculated quantity of CO ₂ [kg] = 90 [kg] F : flooding factor [kgCO ₂ /m ³] = 0.9
$m_n = \frac{m}{N}$	m _n : quantity of CO ₂ per nozzle [kgCO ₂ /ea] = 45 [kgCO ₂ /ea] N : nozzle number [ea] = 2 [ea]
$\dot{m}_n = \frac{m_n}{t_f}$	\dot{m}_n : mass flux of CO ₂ [kgCO ₂ /s] = 0.75 [kgCO ₂ /s] t _f : flooding time [s] = 60 [s]
$\dot{Q}_n = v_{co} \cdot \dot{m}_n$	\dot{Q}_n : volume of CO ₂ per nozzle [m ³ CO ₂ /s] = 0.4097 [m ³ CO ₂ /s] v _{co} : specific volume of CO ₂ at 20°C [m ³ /kg] = 0.5463 [m ³ /kg]
$V_n = \frac{\dot{Q}_n}{A_n}$	V _n : velocity at nozzle [m/s] = 40.97 [m/s] A _n : area of nozzle [m ²] = 0.01 [m ²]

Table 2는 본 연구에 사용된 이산화탄소 소화약제량과 분사노즐에서의 분사속도 등 이산화탄소 소화설비의 상태량을 나타낸다.

2.3 화재시나리오

본 연구에서는 개구부 면적이 CO₂ 소화설비의 소화성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 3가지 화재모델을 구성하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. Table 3은 각 화재모델별 화재시나리오의 내용을 나타낸다.

FDS 프로그램은 CO₂ 또는 미분무수와 같은 소화약제의 분사로 화재를 진압하는 것을 모델링할 수 있다. 본 연구에서 화재모델의 초기 및 경계조건은 FDS(ver. 4.07)의 기본경계조건¹¹⁾을 적용하였다.

Table 3. Fire scenarios

Fire model	Time (s)	Descriptions	Note
No. 0(0.00 m ²)	t = 0	ignition	free burn test
	t = 214	end simulation	
No. 1(0.01 m ²) No. 2(0.48 m ²) No. 3(3.78 m ²)	t = 0	ignition	performance test of CO ₂ extinguishing system
	t = 25	start discharge of CO ₂ agent	
	t = 85	end discharge of CO ₂ agent	
	t = 100	end simulation	

※The value in parenthesis indicates the area of opening.

3. 결과 및 고찰

3.1 CO₂ 소화설비의 소화성능

본 연구에서는 전역방출 방식의 CO₂ 소화설비의 소화성능을 확인하기 위하여 CO₂ 소화약제 분사 완료 시간(1분) 이내에 질식소화되는 것을 성능기준으로 적용하였다.

Figure 3은 개구부가 없는 체적 100 m³, 화재면적 1 m²로서 최대열방출을 1,156 kW, 연소지속시간 214초의 설계화재의 화재모델(Model No. 0)에 대한 FDS 화재모의실험 결과로서 열방출율(heat release rate)을 나타낸다.

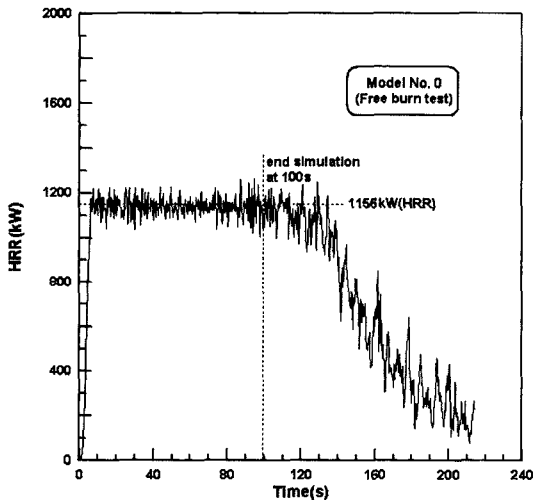


Figure 3. Heat release rate of model No. 0 (free burn test).

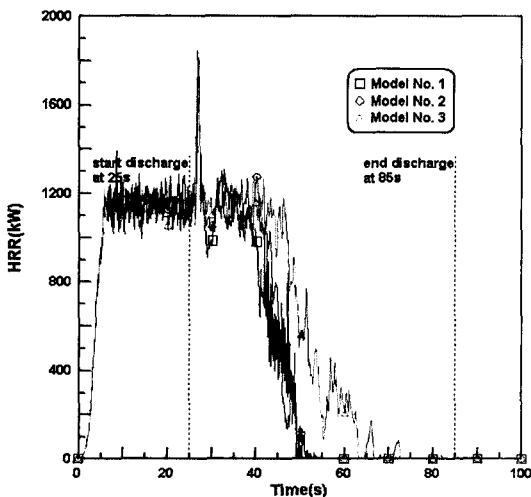


Figure 4. Heat release rate of models (No. 1, 2, 3).

Figure 4는 Model No. 0의 동일 화재조건에서 개구부의 면적을 각각 0.01 m², 0.48 m², 3.78 m²으로 만든 화재모델(Model No. 1, 2, 3)에 대해 CO₂ 소화약제 분사에 대한 FDS 화재모의실험 결과로서 열방출율을 나타낸다. 수직점선은 CO₂ 소화약제 분사 시작시간(t=25s)과 완료시간(t=8s)을 나타낸다.

Figure 5는 3가지 화재모델에 대한 소화완료시간을 나타낸다.

Figure 6은 3가지 화재모델 중 개구부의 면적이 0.01 m²인 화재모델(Model No. 1)에 대해 y=2.5 m의 위치에서 각 시간대별 온도분포를 나타낸다.

먼저 Figure 3에서 화재는 석유 표면화재의 빠른 화염전파속도로 인해 발화 후 약 7초에 완전성장화재(fully developed fire)로 성장하고, 이후 113초까지 약 1,156 kW의 평균 최대열방출율로 일정하며, 이후 감소한다.

완전밀폐 구획화재의 경우(Model No. 0)로써 약 113초까지는 연소가 정상적으로 진행되며, 이때까지 구획 내 산소농도는 연소에 의해 점차 감소된다. 이후 화재는 환기제어화재로 되어 구획 내 해당 산소량(농도)에 상응하여 연소가 진행됨에 따라 연소율은 감소되며, 동시에 열방출율도 감소된다. 113초의 최대 열방출율 지속시간은 감지기 작동 후 약 20초의 지연시간과 60초의 CO₂ 소화약제 분사시간을 고려한 100초의 화재모의실험 시간과 비교해 볼 때 최대 열방출율이 유지되는 화재상황에서 CO₂ 소화설비의 소화성능을 실험할 수 있는 충분한 실험조건이 형성된다는 것을 확인할 수 있다.

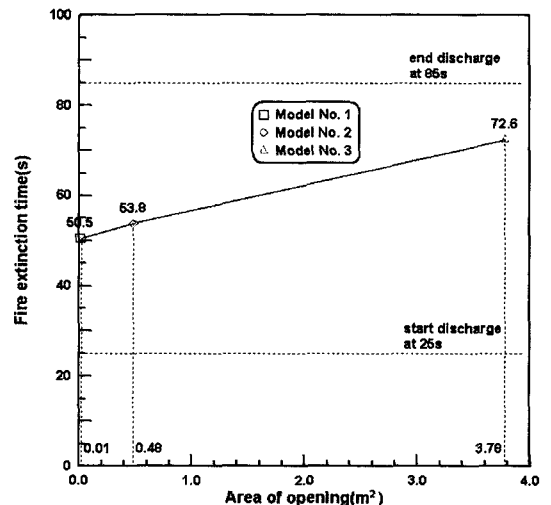


Figure 5. Fire extinction time.

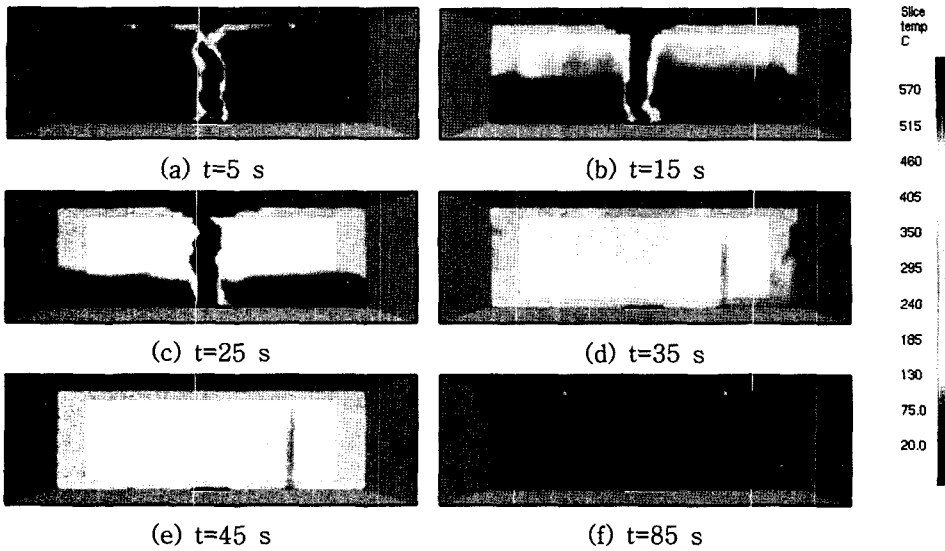


Figure 6. Temperature of model No. 1 (at y = 2.5 m).

Figure 4에서 3가지 화재모델(Model No. 1, 2, 3) 각각의 시간-열방출율 변화 내용은 비슷하며, CO₂ 소화약제 분사 직후 약 t=27s에 열방출율은 순간적으로 상승하고 최대 1,843 kW, 1,813 kW, 1,651 kW이 되고, 이어 약 t=30s에 910 kW, 1,020 kW, 1,096 kW로 감소한다. 이후 화재모델별로 각각 t=39s, t=41s, t=47s 까지 열방출율은 일정하다가 급격히 감소하기 시작하여 t=50.5s, t=53.8s, t=72.6s에 0 kW가 된다. 열방출율이 일정시간 간격에서 순간적으로 최대로 상승하였다가 감소한 것은 t=25s에 CO₂ 소화약제가 높은 속도로 분사되어 방호구역 내부 전체에 난류 교란 현상이 발생하여 상부 연기층의 미연소 가스와 하부 공기층의 산소의 혼합으로 표면화재와 별도로 공간 내에서 국부적인 연소가 추가적으로 이루어지고, 이어 짧은 시간 동안 산소 소모가 순간적으로 증가함에 따라 바닥 표면화재의 연소율은 감소되기 때문이다. 이후 3가지 화재모델별, 열방출율 감소시점과 소화완료 시점의 차이로서 나타나는 소화성능 차이는 개구부 면적에 따라 분사된 CO₂ 소화약제의 외부 유출량의 차이로 인해 방호구역내의 산소농도 감소율이 다르기 때문이다.

Figure 5에서 소화완료시간은 0.01 m²인 경우 50.5초(CO₂ 분사 후 25.5초), 0.48 m²인 경우 53.8초, 3.78 m²인 경우 72.6초로서 개구부의 면적이 증가됨에 따라 소화완료시간은 증가된다. 즉 CO₂ 소화약제의 분사량이 일정한 경우 소화완료시간은 개구부의 면적에 비례한다.

Figure 6에서 유동장의 상부 연기층의 온도와 높이는 t=25s까지 점점 증가하여 각각 약 200°C와 바닥

에서 약 0.7m까지 하강한다. CO₂ 소화약제 분사 전의 유동장은 상하부의 연기층과 공기층으로 구분되나, CO₂ 소화약제 분사 후의 유동장은 상부 노즐에서의 CO₂ 소화약제의 높은 분사속도로 인해 연기와 공기의 난류 교란 현상에 의해 혼합이 된다. 이러한 작용으로 유동장의 온도분포도 점점 균일하게 되며, 계속적으로 CO₂ 소화약제의 소화효과에 의해 열방출이 감소됨에 따라 온도도 감소된다.

3.2 개구부의 질량 유동율

Figure 7은 개구부의 면적이 각각 0.01 m², 0.48 m², 3.78 m²인 화재모델(Model No. 1, 2, 3)에 대한 FDS 화재모의실험 결과로서 각 개구부 면적을 통한 질량 유동율을 나타낸다.

수직점선은 Figure 4에서 설명한 바와 같이 CO₂ 소화약제 분사 시작시간(t=25s)과 완료시간(t=85s)을 나타낸다.

수평점선은 질량 유동율이 0인 경우로서 유동이 없음을 나타낸다. 또한 이 점선과 각 화재모델의 질량 유동율에 해당하는 실선과 이루는 폐곡선의 면적은 화재모의실험 시간(Δt=100초)의 전체 유출(또는 유입) 질량이 된다.

질량 유동율의 부호는 x와 y의 좌표방향과 개구부의 위치에 따라 결정된다. 예를 들면 Model No. 1의 누설 틈새와 Model No. 2의 하부 환기구 및 Model No. 3의 출입문은 각각 x와 y 방향의 기준면(방호구역의 왼쪽 벽면과 앞쪽 벽면)에 있고, Model No. 2의 상부 환

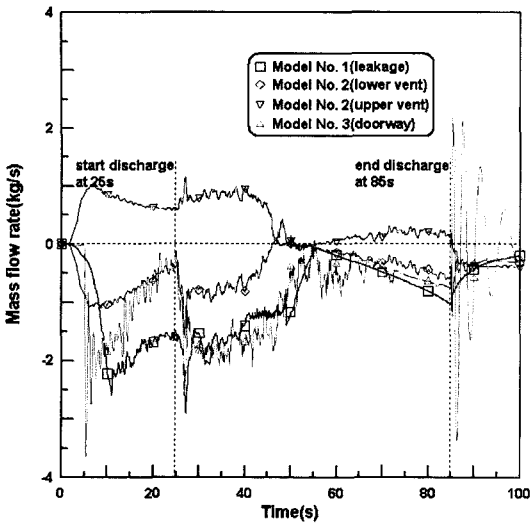


Figure 7. Mass flow rate through openings.

기구는 x의 증가방향 면(오른쪽 벽면)에 있어 방호구역내의 유체 질량이 외부로 유출되어 질 때 각각 - 값과 + 값으로 나타나게 된다.

Model No. 2의 경우 왼쪽 벽면의 하부 환기구와 오른쪽 벽면의 상부 환기구의 질량 유동을 실선내의 면적은 화재모의실험 시간($\Delta t = 100s$)의 전체 유출(일부 유입) 질량이 된다.

Model No. 1의 누설틈새, Model No. 2의 하부 환기구와 상부 환기구 및 Model No. 3의 출입문의 경우 질량 유동율은 각각 $t = 10.9s$, $t = 8.7s$, $t = 7.2s$, $t = 5.4s$ 까지 급격히 증가되어 최대 약 -2.59 kg/s , -1.09 kg/s , $+1.06 \text{ kg/s}$, -3.68 kg/s 가 되고, 이후 CO_2 소화약제 분사 직전까지 감소된다. 이것은 화재성장과 더불어 연기의 팽창에 의해 내부 압력이 증가 되어 외부로의 유출량이 증가되기 때문이다. 이때 Model No. 2와 3의 경우에는 개구부 면적은 내부 압력을 해소할 수 있을 정도의 크기로서 화재성장시 내부 압력 증가와 더불어 외부로의 유출량이 증가되지만, Model No. 1의 경우에는 개구부 면적이 매우 작아 화재성장시 압력해소가 원활하지 못하여 내부압력이 계속 증가되기 때문이다.

이후 CO_2 소화약제가 분사되면 질량 유동율은 다시 증가와 감소가 불규칙적으로 이루어지다가 약 50초와 55초 정도에서 질량 유동율이 거의 0이 되며, CO_2 소화약제 분사완료 직전까지 서서히 증가된다. 이것은 CO_2 소화약제의 분사로 인한 압력상승효과와 CO_2 소화약제의 소화효과에 의한 열방출 감소에 의한 압력감소효과가 복합적으로 작용하기 때문이며, 이후 소화 또는 소화에 가까워지면서 열방출에 의한 압력감소효과

는 거의 없고, CO_2 소화약제의 분사로 인한 압력상승효과가 단독으로 작용하기 때문이다.

이후 질량 유동율은 화재모델의 경우에 따라 다르게 나타난다. Model No. 1의 누설틈새의 경우에는 포물선의 형태로 감소되며, Model No. 2의 하부 환기구의 경우에는 순간적으로 급격히 감소되다가 다시 서서히 감소하며, Model No. 2의 상부 환기구의 경우에는 - 값이 되어 외부공기가 방호구역 내부로 유입되며, Model No. 3의 출입문의 경우에는 - 값과 + 값이 반복되어 내부 유체(연기, CO_2 소화약제)의 유출과 외부 공기의 유입이 반복된다. 이것은 CO_2 소화약제의 분사가 완료됨에 따라 더 이상의 외부로 부터의 압력상승효과가 없어져 내부 잔류 압력이 서서히 감소되기 때문이다. 이때 Model No. 2의 경우에는 이산화탄소의 높은 비중에 의해 방호구역 내부의 CO_2 소화약제가 바닥 면으로 가라앉으면서 하부 유체를 가압하는 효과를 발생시켜 바닥 면 부근의 유체를 하부 환기구로 유출시킴과 동시에 상부환기구로 외부공기를 흡입시키기 때문이다. 또 Model No. 3의 경우에는 출입구의 크기가 바닥 면에서 2.1 m 높이로서 내·외부의 온도차에 의해 중성대(neutral plane)가 형성되고 이를 기준으로 상·하부로 유출과 유입이 불규칙적으로 이루어지기 때문이다.

3.3 방호구역 내부의 가스질량

Figure 8은 개구부의 면적이 각각 0.01 m^2 , 0.48 m^2 , 3.78 m^2 인 화재모델(Model No. 1, 2, 3)에 대한 FDS 화재모의실험 결과로서 방호구역내의 산소 질량, 분사 후 잔류되는 CO_2 소화약제의 질량과 전체 유체(연기, 공

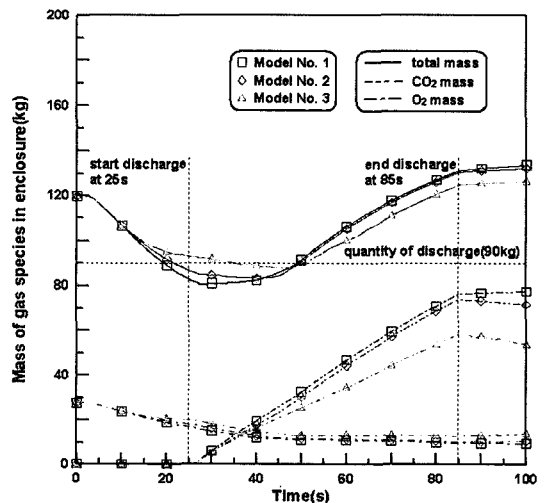


Figure 8. Mass of gas species in enclosure.

기, CO₂ 소화약제)의 질량을 나타낸다.

3가지 화재모델의 경우 산소량 감소, CO₂ 소화약제량 증가 및 전체 유체의 질량변화는 모두 비슷하게 나타난다.

방호구역 내부의 초기 산소량은 Model No. 1, 2, 3의 경우 모두 27.56 kg이며, 최종 산소량은 개구부의 면적과 연소상태에 따라 각각 9.61 kg, 10.72 kg, 13.87 kg이다.

또 방호구역 내부에 잔류되는 CO₂ 소화약제량은

Model No. 1, 2, 3의 경우 모두 t=25초에 분사를 시작하여 t=85초 분사가 완료될 때까지 선형적으로 증가한다. 이때 증가율은 개구부가 작은 경우가 큰 경우보다 크다. 이후 t=85s부터 t=100s 까지 각각 거의 일정하거나 감소하여 각각 약 77.63 kg, 71.80 kg, 53.90 kg이다.

방호구역 내부의 초기 전체 질량은 Model No. 1, 2, 3의 경우 모두 119.8 kg이며, 이후 감소하여 t=28.2s, t=40.7s, t=46.9s에서 각각 약 80.51 kg, 83.21 kg,

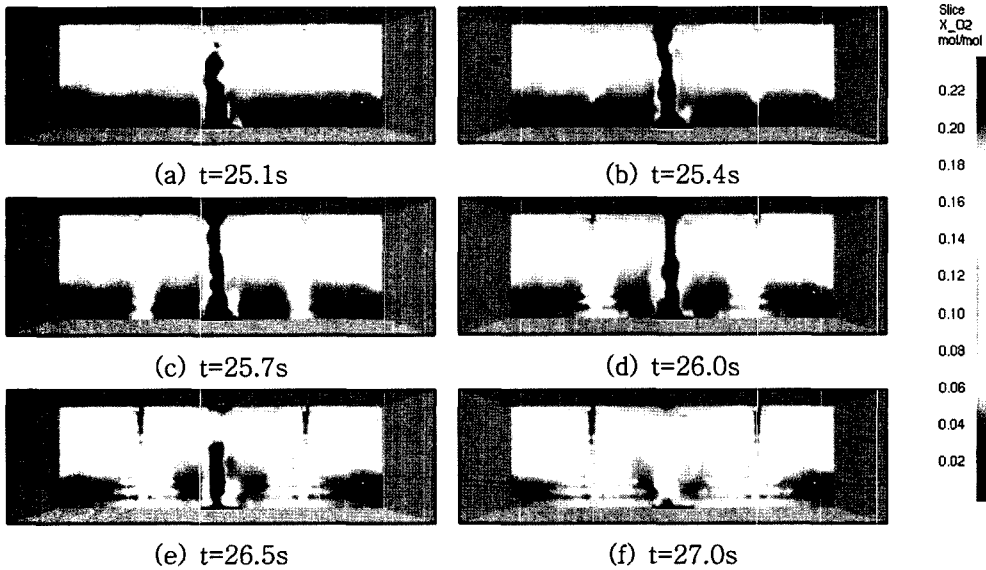


Figure 9. Discharge of CO₂ agents (model No. 1).

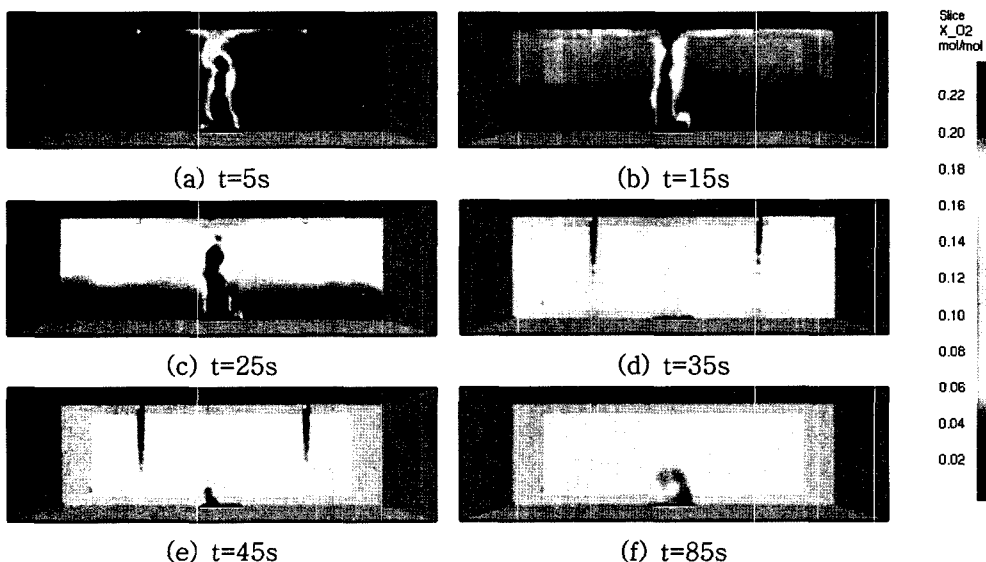


Figure 10. O₂ concentration of model No. 1 (at y = 2.5 m).

88.17 kg이다. 이후 CO₂ 소화약제가 분사완료 시점까지 증가한 후 거의 일정하게 유지되며, 최종 전체질량은 133.86 kg, 132.42 kg, 126.59 kg이다.

Model No. 1, 2, 3의 경우에 대해 산소질량과 전체 질량 값을 사용하여 최종상태의 산소농도를 계산하면 각각 7.2%, 8.1%, 10.1%이다. 따라서 최종상태의 산소농도는 연소한계농도인 15%보다 훨씬 작음을 확인할 수 있다.

Figure 9는 3가지 화재모델 중 개구부의 면적이 0.01 m²인 화재모델(Model No. 1)에 대해 y=2.5 m의 위치에서 CO₂ 소화약제 분사시 분사특성을 보여준다.

CO₂ 소화약제는 노즐 출구에서 41 m/s의 빠른 속도로 분사되어(Figure 9(a), (b)) 약 0.7초 만에 바닥 면에 도달된다.(Figure 9(c)) 바닥 면에 수직으로 충돌한 CO₂ 소화약제는 바닥제트(floor jet)가 되어 바닥 면과 평행하게 확산된다(Figure 9(d), (e), (f)). 이때 천장과 바닥 사이의 CO₂ 소화약제의 분사 기둥은 수평방향으로 돌출되어 나무 가지 모양이 된다. 이것은 노즐에서 분사된 CO₂ 소화약제가 천장과 바닥사이에서 압축효과가 발생하여 주위와의 상대적인 압력 상승에 의해 주위로의 부분적인 팽창효과가 발생하기 때문이다.

Figure 10은 Model No. 1에 대해 y=2.5 m의 위치에서 각 시간대별 산소의 질량분율(농도)을 보여준다.

산소농도는 발화 후 t=2s까지 연소로 인해 상·하부로 구분하여 각각 감소되며, CO₂ 소화약제가 분사된 이후에는 유동장 전체가 거의 균일하게 감소한다. 이것은 CO₂ 소화약제의 분사로 유동장이 난류 교란 현상에 의해 혼합되기 때문이다. t=85s의 산소농도는 10% 이하이다.

4. 결 론

본 연구에서는 100 m³의 체적을 갖는 기계실의 석유 유출 화재시 개구부의 크기가 CO₂ 소화설비의 소화성능에 미치는 영향과 유동장의 유동특성을 조사하기 위하여 개구부의 면적과 위치가 다른 3가지 화재모델을 대상으로 CFD 시뮬레이션을 수행하였다.

3가지 화재모델의 소화성능과 유동장의 유동특성에 대한 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개구부의 면적이 0.01 m², 0.48 m², 3.78 m²인 경우 소화완료시간은 50.5초, 53.8초, 72.6초로서 개구부의 면적에 비례하여 증가한다. 따라서 개구부 폐쇄와

같은 CO₂ 소화설비 주변장치의 정상 작동상태 유지관리의 중요성을 확인할 수 있다. 소화완료시간은 CO₂ 소화약제 분사완료 시간(t=85초) 이전으로 CO₂ 소화설비의 성능기준에 부합됨을 알 수 있었다.

2) 개구부의 질량 유동율은 화재 열방출에 의한 압력변화와 CO₂ 소화약제 분사에 의한 압력변화의 복합적인 작용에 의해 영향을 받는다.

3) CO₂ 소화약제 분사완료 후 방호구역 내부의 산소농도는 Model No. 1, 2, 3의 경우 모두 연소한계농도(15%) 보다 적다.

참고문헌

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. 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).
4. 박찬수, 최주석, "화재위치에 따른 CO₂ 소화제 전달 특성", 한국화재소방학회논문지, Vol.17, No.4, pp.28-35(2003).
5. 박찬수, "CO₂ 소화제 노즐수에 따른 유동특성 및 소화제농도분포에 대한 연구", 한국화재소방학회논문지, Vol.19, No.2, pp.37-44(2005).
6. 박찬수, "CO₂ 소화제 노즐 분사각 및 분사속도가 CO₂ 농도분포특성에 미치는 영향에 관한 수치적 연구", 한국화재소방학회논문지, Vol.20, No.2, pp.44-53(2006).
7. K.B. McGrattan, "Fire Dynamics Simulator(Version 4)-Technical Reference Guide", NIST, pp.39-40(2006).
8. B. Karlsson and Quintiere, J.G., "Enclosure Fire Dynamics", CRC Press, pp.30-35(2000).
9. 남상욱, "소방시설의 설계 및 시공", 성안당, pp.347-396(2006).
10. 소방방재청, "이산화탄소소화설비의화재안전기준(NFSC 106)", 소방방재청 국가화재안전기준, pp.134-147(2006).
11. K.B. McGrattan and G.P. Forney, "Fire Dynamics Simulator(Version 4)-User's Guide", NIST, pp.19-27(2006).