

화재위치에 따른 CO₂ 소화제 전달특성

The Transfer Characteristics of CO₂ Extinguishant According with the Location of Fire Plume

박찬수[†] · 최주석*

Chan-Su Park[†] · Ju-Seok Choi*

목포해양대학교 기관공학부, *목포대학교 기계공학과 대학원
(2003. 7. 1. 접수/2003. 9. 18. 채택)

요 약

선박기관실과 유사한 공간에 CO₂ 소화제를 방사하였을 때 화재위치에 따른 CO₂ 소화제 전달특성을 분석하기 위하여 전산묘사연구를 수행하였다. 화재위치를 변화시키면서 유동장과 농도장을 계산하였으며, 실험결과 화재화염위치가 유동패턴과 CO₂ 소화제 질량전달특성에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 1층과 2층으로 구성된 기관실의 2층 중앙 좌측영역에 화재화염이 위치하는 경우에는 에어 커튼과 같은 효과가 화재가 발생한 영역에서 나타났고, 이 영역으로의 질량전달을 방해하였다. 높이에 따른 특성에서는 1, 2층 중앙 좌측영역에 화재가 위치한 경우, CO₂ 소화제가 완전히 분사된 후에도 이 영역에 소화가능한 한계 이하의 등농도선이 형성되었다. 따라서 본 연구결과들은 CO₂ 소화장치 설비 시 CO₂ 소화제 분사노즐을 배열하는데 고려되어야 할 것으로 생각된다.

ABSTRACT

To analyze the transfer characteristics of CO₂ extinguishant when extinguishant is injected into a closed space similar to a marine engine room, a numerical simulation was performed. Flow and Concentration fields are calculated according with the variation of the fire plume,s location. The results show that the variation of fire plume,s location greatly effected on the flow patterns and the characteristics of CO₂ extinguishant transfer. In case of the fire plume located at left region of the 2nd floor center in the engine room consisted of first and second floor, The effects similar to the air curtain is found and cut off the mass transfer. In the characteristics with hight, the iso-concentration line below the extinguishable limit is formed in the left region of the 1st and 2nd floor center after the CO₂ extinguishant is completely injected. therefore I think that the results of this study are considered to arrange the CO₂ injection nozzles for the CO₂ fire fighting equipments.

Keywords : Fire plume simulation, CO₂ extinguishant, Mass Transfer

1. 서 론

선박 기관실의 소화설비를 살펴보면 이동식 소화기와 고정식 소화장치로 대별할 수 있으며, 이동식 소화기의 종류는 포말, 분말, 할론 및 이산화탄소 소화기 등이 있다.

고정식 소화장치로는 폼, CO₂와 미분무수 소화장치

등이 있으며, 초기 화재시 이동식 소화기로 진화에 실패하였을 때 모든 기관실 근무자가 탈출한 후 최후의 수단으로 고정식 소화장치를 사용하여 화재를 진압하도록 되어있다.

선박 기관실에 화재가 발생하면 선박의 특수성(고립성) 때문에 대부분 대형 화재로 확산되어 해난사고로 이어지며 항해불능 상태에 빠지게 되어 선사에 큰 손실을 주게되고, 인명사고까지 이어지는 경우도 있다.

[†] E-mail: cspark@mmu.ac.kr

기관실 화재 특성에 대한 보고서¹⁾에 따르면 선박 화재는 주로 항해중에 발생하며 그중 52%의 선박이 항해 불능상태에 빠지고, 화재의 주원인은 연료유나 윤활유의 분출에 의한 화재이며, 그 결과 천장 밑에 배선된 주 전원 케이블이나 조정실내의 주 배전반이 손상을 입어 주 전원을 상실하여서 선박이 항해 불능의 상태에 이르게 된다고 보고하고 있다.

또한 모든 소화기 및 소화장치를 사용하고도 진화에 실패하여 전소 후 자연진화된 화재도 15%나 된 것으로 나타났다.

이러한 중요성 때문에 해상인명안전국제협약(SOLAS)에서는 기관실, 펌프실 및 보일러실 등과 같은 유류 화재 발생 가능성이 높은 구역에 영구적인 고정소화장치를 설치하도록 규정하고 있으며, 고정식 소화장치중 이산화탄소 소화장치를 기관실에 설치한 선박이 주류를 이루고 있다.

가스계 소화장치와 관련된 최근 논문들을 살펴보면 할론 소화제의 퇴출로 인하여 할론 대체 소화제 개발과 소화효과에 관한 연구에 집중되어 있다.

Fischer, G.²⁾등은 Sodium Powder 소화약제의 소화효과에 관한 연구를 Cup Burner Test 장치를 이용하여 수행하였고, Saso, Y.³⁾등은 불활성 가스 혼합체의 소화효과에 관한 연구를 FRI glass Cup Burner Test 장치를 이용하여 수행하였다.

D. Tree⁴⁾(1994) 등은 11종의 가스소화제를 대상으로 한 실험적 연구에서 할론(1301) 대체 소화제로의 가능성을 제시하였다.

J.D. Kim⁵⁾(2001)등은 이산화탄소와 불활성 가스계 물질의 이성분계 및 삼성분계 혼합물의 불꽃소화농도 측정에 관한 연구를 수행하였다.

지금까지의 연구들은 할론 대체 소화약제 개발에 관한 연구들이 주류를 이루고 있으며, 고정식 CO₂ 소화설비를 갖추고, 기관실 및 화물창 내에 CO₂를 직접 분사하여서 화재를 소화하는 방식의 선박 화재에 대한 연구들은 미흡한 실정이다.

따라서 선박화재의 대부분을 차지하는 기관실 화재 발생 시 CO₂ 소화제를 분사하였을 때 화재발생위치에 따른 유동 및 소화제 전달특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기관실 화재 발생 시 초기 진화에 실패했을 때, 최후의 소화방법으로 사용하는 CO₂ 소화제 분사 시 화재발생위치가 기관실내 기류유동특성 및 소화제 전달특성에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 선박소화설비의 기초적인 자료를 제공하는데 목적이 있다.

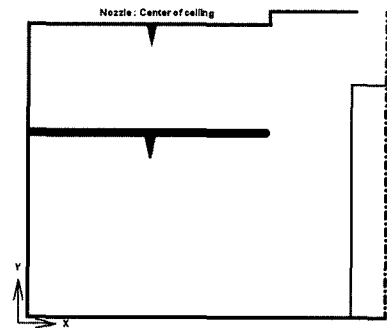


Fig. 1. Schematic diagram.

2. 이론해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 선박의 기관실을 2차원적 공간으로 설정하였다. 기관실내 화재발생위치에 따른 유동특성과 CO₂ 소화제의 전달 특성을 예측하기 위하여 화재발생위치를 1층과 2층의 중심에서 좌우로 변화시켜 해석하고자 하며, 흐름은 2차원 난류유동으로 가정한다. 일정한 열유속을 주어 화재화염을 비정상상태에서 형성시킨 후 CO₂ 소화제를 화재가 발생한 공간으로 분사시키면서 시간경과와 함께 나타나는 특성들을 검토하고자 한다.

2.1 해석모델

Fig. 1에 나타낸 공간은 실제 선박기관실의 치수는 길이 14.5 m, 높이 5.5 m이지만 공간이 좌우 대칭조건을 가지므로 대칭면을 중심으로 반쪽 부분에 해당되며 이 부분에 대해서만 계산을 하였다. 공간의 중앙에는 선박기관실 기기들에 상응하는 장애물이 위치하고, 장애물 상부 천장에는 배기구가 위치하는 것으로 하였다. 공간은 1층과 2층으로 분리되어 있으며, 중심부에서 연돌로 이어지는 공간은 소화제 분사노즐이 설치되어 있지 않고 기류유동 및 CO₂ 소화제 전달특성에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 고려하지 않았다.

2.2 지배방정식

유동장을 해석하기 위해 사용되는 방정식은 2중 유체 등온장, 비압축성 유체를 가정하고, 비정상 상태에 대해 유도한 것으로 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 및 성분 보존방정식은 다음과 같다.

(1) 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(2) 운동량 방정식

▷x방향

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u} \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{u} \bar{v})}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

▷y방향

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u} \bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} \bar{v})}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - \rho g \quad (3)$$

(3) 성분 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{Y}_i) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{u} \bar{Y}_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v} \bar{Y}_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\rho D + \frac{\mu_t}{\sigma_x} \right) \frac{\partial \bar{Y}_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\rho D + \frac{\mu_t}{\sigma_y} \right) \frac{\partial \bar{Y}_i}{\partial y} \right] \quad (4)$$

(4) 에너지 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{u} T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v} T) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{k}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (5)$$

(5) 난류운동 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G_k - C_D \rho \epsilon \quad (6)$$

(6) 난류 소멸을 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{u} \epsilon) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v} \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon) \quad (7)$$

(7) 이상기체 상태방정식

$$P = \rho RT \sum_i \frac{\bar{Y}_i}{\bar{W}_i} \quad (8)$$

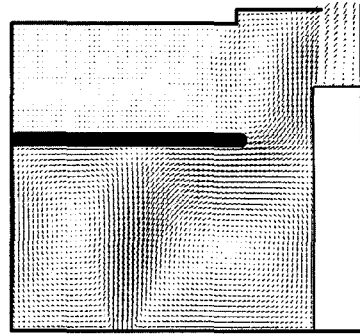


Fig. 2. Flow field at 120 sec(Fire plume located at the center of the 1st floor).

2.3 경계조건

지배방정식을 해석하기 위한 초기 및 경계조건은 다음과 같다. 모든 벽은 단열되어 있으며 CO₂ 소화제에 대해 불침투성이고, 표면에서의 속도는 영이다. 실내공간의 이산화탄소 질량분율도 “0”이다. 이와 같은 조건 하에서 화재화염을 묘사하기 위하여 각 층의 밀바닥에 위치한 노즐로부터 화재크기에 부합한 일정 속도의 공기를 분사시키고, 화재부하는 일정한 열유속을 주어서 화재화염을 비정상 상태에서 형성시킨다. 초기진화에 실패한 경우와 유사한 상태를 조성하기 위하여 120초 경과 시의 화재위치에 따른 유동장(Fig. 2 참조)을 초기조건으로 택하였고, 이 조건하에서 CO₂ 소화제를 분사시킨다. 공간의 중앙에는 장애물인 주기관이 위치하고 있으며, 각층의 분사노즐에서는 7 m/sec의 속도로 이산화탄소가 분사되고 있는 것으로 하였다. 배출구는 공간의 최상부에 위치하고 있다.

해석에 있어서는 검사체적에 기초한 유한차분방법(Control volume based finite difference method)을 이용하는 상용 code인 Fluent V5.0을 사용하였다. 사용된 격자수는 70×60이며 균일 격자를 사용하였고, Up-wind scheme을 사용하였으며, 수렴조건은 각 검사체적에서 계산한 생성항의 최대값의 절대치가 10⁻³ 이하이고 일정한 지점에서 속도와 같은 주요 변수들의 반복계산 결과가 거의 변화하지 않을 때를 수렴한 것으로 판단한다. 난류모델로는 k-ε 모델을 사용하여 운동방정식에서 유동항의 평균을 취할 때 생기는 레이놀즈 응력(Reynolds stress)항을 해결하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 화재가 발생한 선박 기관실과 유사한 공

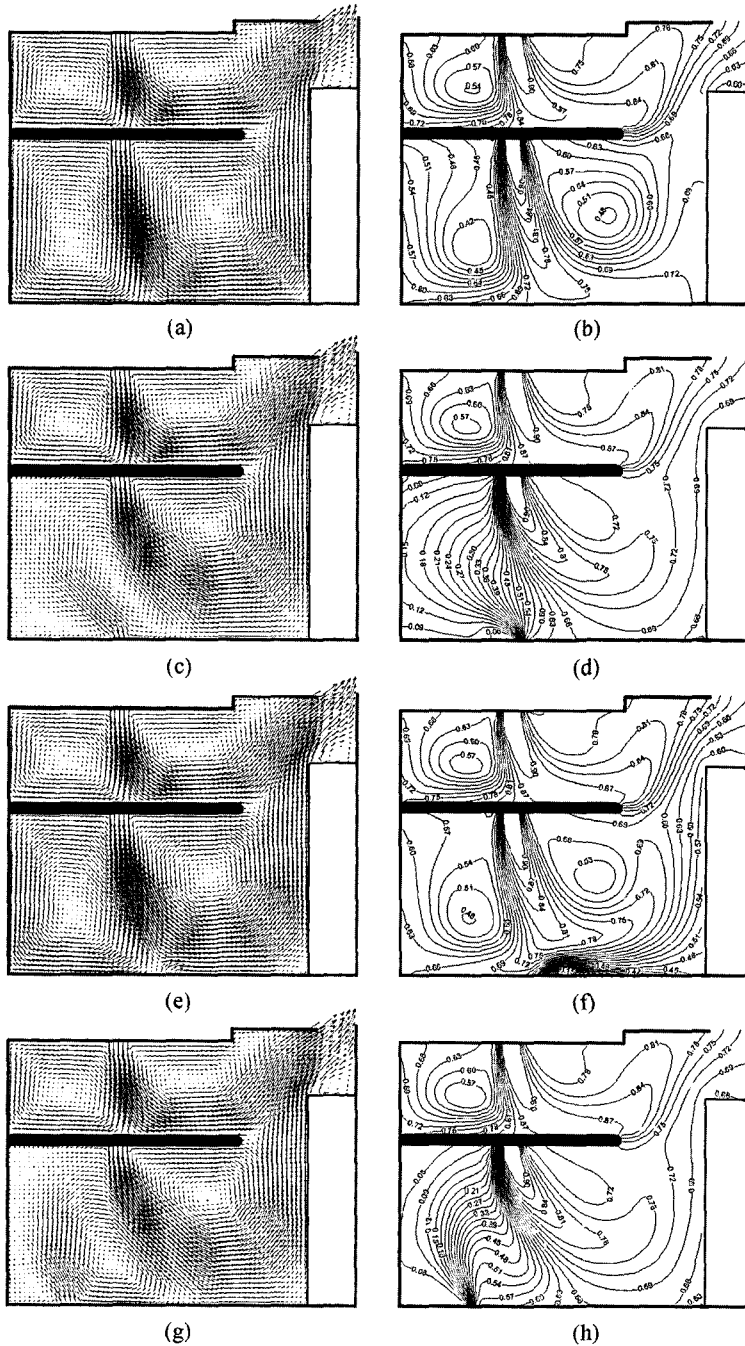


Fig. 3. Velocity and CO₂ concentration fields at 6 sec according with the variation of fire plume location(Fire plume located at the 1st floor). (a) Velocity field without fire plume, (b) CO₂ concentration field without fire plume, (c) Velocity field with fire plume located at center of the 1st floor, (d) CO₂ concentration field with fire plume located at center of the 1st floor, (e) Velocity field with fire plume located at right side of the 1st floor center, (f) CO₂ concentration field with fire plume located at right side of the 1st floor center, (g) Velocity field with fire plume located at left side of the 1st floor center, (h) CO₂ concentration field with fire plume located at left side of the 1st floor center.

간에 CO₂ 소화제 분사 시 유동특성 및 CO₂ 소화제 전달특성을 예측하기 위하여 화재발생위치를 변화시키면서 공간 내 기류유동 및 CO₂ 소화제 농도분포변화를 고찰하였다. 화재발생위치는 1층과 2층의 밀바닥 중앙과 중앙으로부터 좌, 우측으로 변화시켰으며, 계산시간은 0~120초까지로 하였다. 시간 영역대를 0~120초로 선정한 것은 규정상 2분 이내에 소화제를 방사해야 하기 때문이다.

Fig. 3은 CO₂ 소화제 분사 후 6 sec시의 화재유무 및 화재발생위치에 따른 유동장과 CO₂ 소화제 농도장을 보여주고 있다.

선박소화설비 규정상 이산화탄소를 일정한 체적 내에 방사했을 때 13.8% 이하의 산소체적농도로 떨어뜨릴 수 있어야 한다고 되어 있다. 산소체적농도 13.8%는 CO₂ 질량분율 0.45에 해당하므로 CO₂ 질량분율 0.45 이상의 이 영역을 “소화가능영역대”라고 부르기 한다.

유동장을 보면 화재가 발생하지 않은 2층은 유사한 유동패턴을 나타내고 화재가 발생한 1층 영역은 화재 위치에 따라 CO₂ 소화제 분사 노즐 좌측영역의 재순환 유동 크기와 형태가 다를 것을 보여주고 있다. 또한 화재가 1층 밀바닥면 중앙에서 우측에 위치한 경우(e)는 CO₂ 소화제 분사기류가 화재화염에 의한 기류를 지배함으로 인하여 화재가 발생하지 않은 (a)의 경우와 유사한 유동형태를 나타내지만 기류가 더 강해짐을 알 수 있다.

농도장을 보면 유사한 유동패턴을 보인 2층 영역은 재순환 유동중심이 위치한 곳에서 0.54~0.57대의 등농도선대가 형성되고, 화재유무에 따른 비교에서는 화재가 발생한 경우가 더 높은 질량분포를 나타내지만 화재발생위치에는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

화재가 발생한 1층 CO₂ 소화제 분사노즐 우측 영역은 화재가 발생할 경우 더 높은 질량분포를 보이고, 좌측영역은 화재가 밀바닥면 중앙과 좌측에 위치할 때 소화가능영역대 이하(0.09~0.42)의 등농도선대가 형성되며, 재순환 유동중심을 기점으로 좌측벽과 영역의 상부측으로 등농도선대가 확장되고 있어 서로 다른 질량전달경로를 나타내고 있다.

화재가 밀바닥면 중앙에서 우측에 위치할 때는 1층 좌, 우측 전 영역이 소화가능영역대 이상의 질량분포를 나타내고, 화재화염주위에 0.48이상의 등농도선대가 감싸고 있어 화재진압에 효과적일 것으로 생각된다.

이상으로부터 화재발생위치가 재순환 유동 크기 및

형태와 CO₂ 소화제 질량전달 및 경로에도 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 4는 화재가 2층에 발생한 경우로서 CO₂ 소화제 분사 후 6 sec시의 화재유무 및 화재발생위치에 따른 유동장과 CO₂ 소화제 농도장을 보여주고 있다.

유동장을 보면 화재가 발생하지 않은 1층 영역은 유사한 시계방향과 반시계방향의 재순환 유동이 발생하고 있으며, 화재가 발생한 2층 CO₂ 분사노즐 좌측 영역은 재순환 유동의 규모와 발생위치가 상이함을 알 수 있다.

농도장에서는 화재가 발생하지 않은 1층 영역은 2층에 화재가 발생할 경우에 더 낮은 등농도선대가 형성되는데 이는 화재화염에 의한 기류로 인해 더 강하게 형성된 2층의 기류와 1층의 상승기류가 원활히 합류하여 배출구를 향하는 유동을 형성하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

화재가 발생한 2층은 화재발생위치에 따라 다른 질량분포를 보이고 질량전달경로도 상이하게 나타나고 있으며, 화재가 밀바닥면 중앙에서 좌측에 위치한 경우는 화재화염에 의한 기류의 에어 커턴과 같은 효과로 인하여 이 영역으로 질량전달을 차단하여서 0.06 이하의 매우 낮은 등농도선대가 형성됨을 알 수 있다. 또한 화재가 우측에 위치한 경우는 2층 좌, 우측 전 영역에서 다른 모든 경우보다도 더 균일하고 높은 등농도선대가 형성되고 화재화염 주위를 감싸고 있어 화재를 진압하는데 가장 효과적일 것으로 사료된다.

Fig. 5와 6은 각각 1층 2.5 m 및 2층 5.0 m 높이에서 화재 위치와 시간 경과에 따른 CO₂ 질량분포를 보여주고 있다.

화재가 1, 2층 밀바닥 면 중앙과 좌측으로 치우쳐 위치한 경우는 좌측영역에서 0.3 이하의 질량분포를 보여주고 있으며, CO₂ 소화제 분사가 끝난 후에도 소화가능영역대가 형성되지 않아 이 영역에서 화재발생 시 소화시간이 더 길어질 것으로 생각된다. 또한 화재가 2층 좌측에 위치하는 Fig. 6(c)에서는 이 영역에 0.06 이하의 질량분포를 나타내어 에어커턴 효과를 확인할 수 있다.

반면에 화재가 밀바닥면 중앙에서 우측으로 치우쳐 위치한 경우에는 6초시부터 0.54이상의 질량분포를 나타내어 전 영역에 소화가능영역대가 형성됨을 알 수 있다.

이상으로부터 화재발생위치와 CO₂ 분사노즐위치와의 상관관계가 유동 패턴 및 CO₂ 질량전달과 경로에도 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

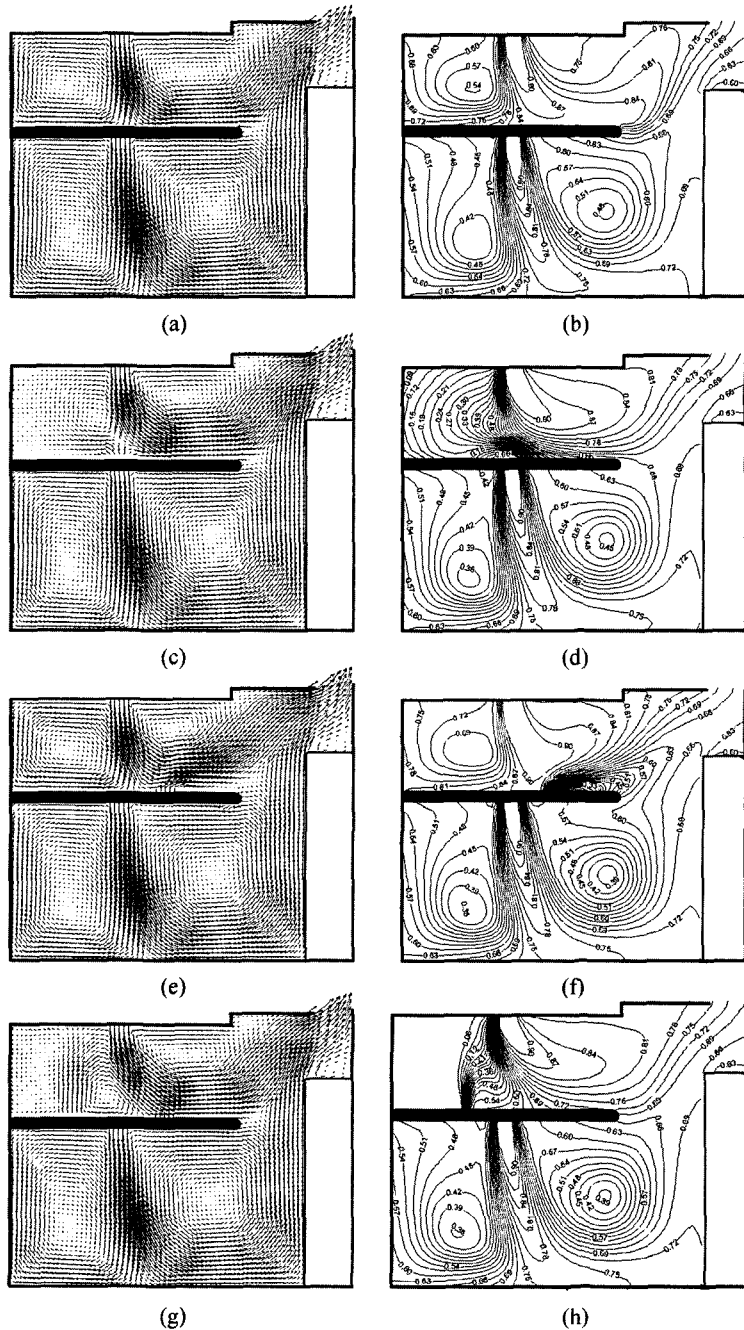
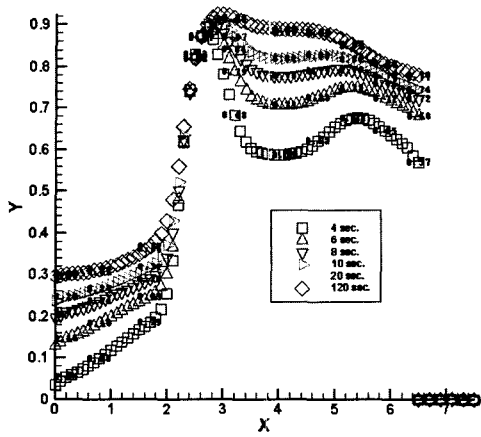
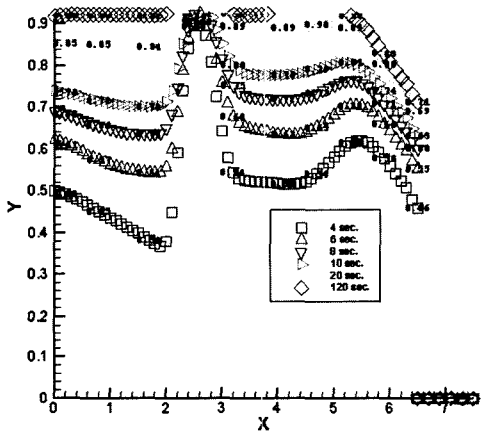


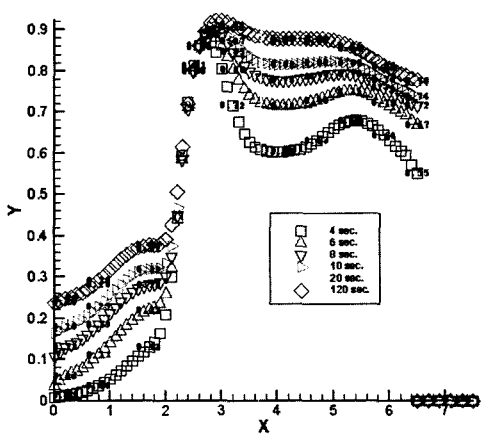
Fig. 4. Velocity and CO₂ concentration fields at 6 sec according with the variation of fire plume location(Fire plume located at the 2nd floor). (a) Velocity field without fire plume, (b) CO₂ concentration field without fire plume, (c) Velocity field with fire plume located at center of the 2nd floor, (d) CO₂ concentration field with fire plume located at center of the 2nd floor, (e) Velocity field with fire plume located at right side of the 2nd floor center, (f) CO₂ concentration field with fire plume located at right side of the 2nd floor center, (g) Velocity field with fire plume located at left side of the 2nd floor center, (h) CO₂ concentration field with fire plume located at left side of the 2nd floor center.



(a)

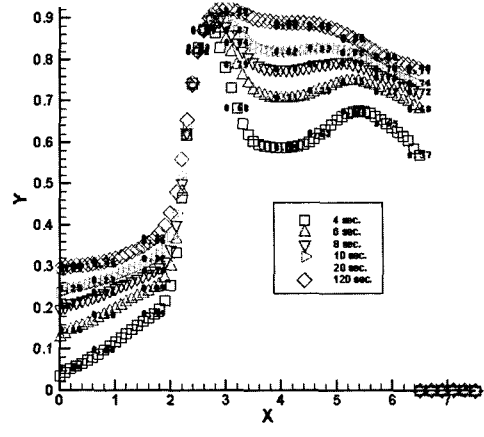


(b)

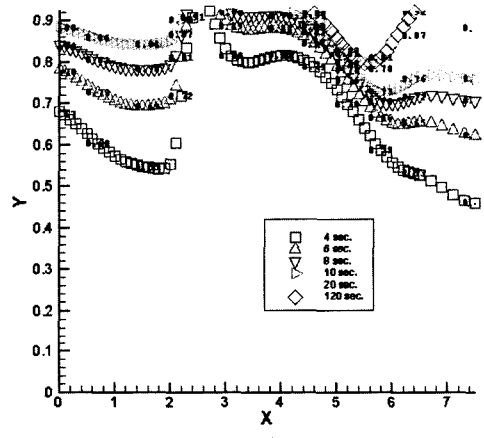


(c)

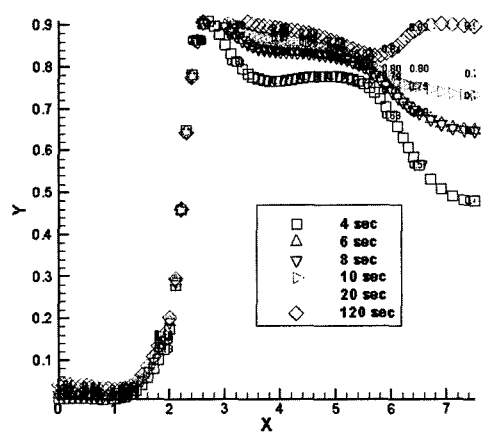
Fig. 5. CO₂ mass fraction with time and the variation of fire plume location (height=2.5 m). (a) Fire plume located at center of the 1st floor, (b) Fire plume located at right side of the 1st floor center, (c) Fire plume located at left side of the 1st floor center.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. CO₂ mass fraction with time and the variation of fire plume location (height : 5.0 m). (a) Fire plume located at center of the 2nd floor, (b) Fire plume located at right side of the 2nd floor center, (c) Fire plume located at left side of the 2nd floor center.

4. 결 론

선박 기관실과 유사한 공간에 CO₂ 소화제를 방사했을 시 화재발생 위치에 따른 기류유동 및 CO₂ 소화제 전달 특상을 파악하기 위하여 전산수치 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화재가 발생한 영역에서 재순환 유동의 패턴, 규모 및 발생위치가 상이하게 나타났고, 1층 영역에서 화재가 발생하였을 때는 2층은 화재가 발생하지 않은 경우보다 더 높은 질량분포를 나타내지만 2층에 화재가 발생할 경우는 1층은 더 낮은 질량분포를 나타내었다. 화재가 각 층 밑바닥면 중앙에서 좌측에 위치할 경우가 가장 낮은 질량분포를 나타내었고, 특히 2층 좌측에 화재가 발생할 경우는 화재로 야기된 기류의 에어 커튼과 같은 효과로 인해 0.06 이하의 질량분포대가 형성되었다.

각 층의 밑바닥면 중앙에서 우측에 화재가 위치할 때는 분사초기부터 소화가능영역대 이상의 등농도선대가 화재주위를 감싸고 있어 화재진화에 가장 효과적일 것으로 생각된다.

2. 각 층 높이에 따른 질량분포에서 화재가 밑바닥면 중앙과 좌측에 위치한 경우에 소화가능영역대 이하의 등농도선대가 CO₂ 소화제 분사 완료 후에도 나타나, 이 영역에서 화재 발생 시 소화하는데 어려움이 따를 것으로 생각된다. 우측에 화재가 발생한 경우는 분사초기(4, 6초)에 소화가능영역대 이상의 질량분포대가 형성되었다.

3. 이상으로부터 화재발생위치와 CO₂ 소화제 분사노즐위치와의 상관관계가 유동 패턴 및 CO₂ 질량전달과 경로에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 선박 기관실내 CO₂ 소화설비 기본설계 시 본 연구결과에서 나타난 사항들이 필히 고려되어야 할 것으로 사료된다.

기호설명

μ_{eff}	: $\mu + \mu_t$
\bar{u}	: x축 방향의 평균속도, [m · s ⁻¹]
\bar{v}	: y축 방향의 평균속도, [m · s ⁻¹]
μ_{eff}	: 유효점성계수, [kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]
μ	: 점성계수, [kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]

μ_t	: 난류점성계수, [kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]
ρ	: 기체밀도, [kg · m ⁻³]
g	: 중력가속도, [kg · s ⁻¹]
k	: 난류운동에너지, [m ² · s ⁻²]
ϵ	: 난류소멸율
G	: 난류운동에너지 생성항
C, C_1, C_2	: 실험적 난류모델상수
C_p	: 정압비열[kJ/kg°C]
\bar{Y}_i	: 중 기체평균질량분율
W_i	: 중기체분자량, [kg · mol ⁻¹]
D	: 확산계수, [m ² · s ⁻¹]
\bar{R}	: 일반기체상수
T	: 온도, [K]
P	: 압력, [kg · m ⁻²]

참고문헌

1. Toshio Kaneko, Kazuo Hitomi., "On the Actual Conditions and the Causes of Ship Fires", 선박기술 연구소 보고, 제17권, 제6호, pp.361-411(1994).
2. G. Fischer, and J. T. Leonard, "Effectiveness of fire Extinguishing Powders based on Small Scal Suppression Test", Naval Research Laboratory Report Number NRL/MR?6180-95-7778(1995).
3. Y. Saso, and N. Saito, "Scale Effect of Cup Burner on Flame Extinguishing Concentrations", Fire Technol., 29, pp.22-33(1993).
4. D. Tree, and K. Seshadri, "Extinction of Nonpremixed Flames with Halogenated Fire Suppressants", Combustion and Flame 99, pp. 221-230(1994).
5. Jae-Duck Kim, "Flame Extinguishing Concentrations of Mixed Gaseous Agents", Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 15, No. 1 (2001).
6. Yong-Shik Han, and Myung-Bae Kim, "Extinguishment by the Cooling Effect of the Fuel Surface with Pool Fires", 한국화재·소방학회논문집, 제11권, 제4호, pp.15-23(1997).
7. Chan-Su Park, and Ju-Seok Choi, "The Effect of Fire Plume on the Characteristics of Air Flow and CO₂ Extinguishant Transfer", 한국화재·소방학회논문집, 제16권, 제4호, pp.33-43(2002).