

고정식 소화장치 노즐조건에 따른 CO₂ 전달특성

The Characteristics of CO₂ Extinguishant Transfer According to the Nozzle Conditions of a Fixed Fire System

박찬수[†] · 최주석* · 전철균**

Chan-Su Park[†] · Ju-Seok Choi* · Chul-Kyun Chun**

목포해양대학교 기관공학부, *목포대학교 기계공학과 대학원, **목포대학교 기계공학과
(2004. 4. 6. 접수/2004. 6. 2. 채택)

요 약

선박 기관실의 고정식 소화장치로 사용되는 CO₂ 소화장치의 소화효과에 영향을 미칠 수 있는 인자 중 분사노즐위치를 변화시켜 이산화탄소 소화제 전달특성에 대한 전산모의실험을 3차원 비정상상태로 수행하였다. 노즐위치에 따라 유동장과 CO₂ 소화제 농도장을 계산하였다. 소화제 분사노즐을 공간의 천장 중앙에 배치한 경우, 천장에 형성되는 대칭 천장 제트가 대칭면에서 서로 부딪혀 저농도 하향 유동을 발생시켜 분사주위에는 규정농도 이하의 농도분포를 형성시킨다. 벽의 모서리에서는 소화제질량전달이 촉진되는 경향으로 인해 농도곡선은 모서리 부근에서 피크를 나타낸다.

ABSTRACT

We have conducted a numerical simulation under three-dimensional unsteady conditions in order to analyze the characteristics of CO₂ extinguishant transfer by varying the location of the injection nozzle, which affects the effect of a CO₂ fire fighting system used in the form of fixed systems for the marine engine room. Flow fields and CO₂ concentration fields were measured according to the location of the injection nozzle. In the case of arranging the injection nozzle on the center of the ceiling, the low-normal concentration distribution was developed along the CO₂ jet due to the downward flow created by impinging ceiling jets in the symmetric plane. The concentration line reaches its peak due to the mass transfer of CO₂ at the corner.

Keywords : CO₂, Extinguishant transfer, Fixed fire fighting system, Ceiling jet

1. 서 론

선박에서는 선박의 특성을 고려하여 설치 및 유지가 용이한 가스계 소화장치인 CO₂ 소화장치를 화물창과 기관실의 소화장치로 채택한 선박이 주류를 이루고 있다.

선박기관실에 설치된 CO₂ 소화장치의 실제 사용실태에 관한 보고서¹⁾에 따르면 기관실 화재의 20%를 고정식 CO₂ 소화장치를 이용하여 소화한 것으로 보고하고 있으나, 이 소화장치로도 소화하지 못하고 전소에 이른 경우도 15%나 되는 것으로 보고하고 있다. 이 같은 사실은 기관실 화재 시 최후의 수단으로 사용하는 고정식 CO₂ 소화장치의 실질적인 소화성능 면에 대한

평가의 필요성을 제시해주고 있다 하겠다.

가스계 소화설비와 관련된 최근 연구들을 살펴보면, 김²⁾등은 CO₂와 불활성 가스계 물질의 이성분계 및 삼성분계 혼합물의 불꽃소화농도 측정에 관한 연구를 발표한 바 있고, 대항류 확산화염에 대한 할론 대체 소화약제의 소화농도에 관한 연구를 Saso and Saito³⁾ 등이 수행하였다.

Ishizuka and Stone⁴⁾ 등은 질소, 아르곤 및 이들 혼합약제에 대한 실제 화재실험을 실시하였으며 김⁵⁾등은 질소, 아르곤, CO₂와 같은 불활성가스 및 이들의 혼합물 소화약제의 n-Heptane 화염에 대한 불꽃소화농도를 측정하였다. Sridhar⁶⁾ 등은 우주 정거장의 CO₂ 소화장치에 관한 연구를 수행하였다.

최근 연구들은 할론 소화제의 퇴출로 인하여 동 소

[†] E-mail: cspark@mmu.ac.kr

화제의 대체 약제개발에 치우쳐 있으며 가스계 소화장치의 소화능성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 선박기관실의 고정식 소화장치인 CO₂ 소화장치의 소화효과에 영향을 미칠 수 있는 여러가지 인자에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 선박기관실의 특성에 따라 배열되는 CO₂ 소화제 분사노즐의 조건에 따라 나타나는 CO₂ 소화제 전달특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 이론해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 선박의 장방형 중앙 기관실 치수는 길이 20 m, 폭 14 m, 높이 5.5 m이며 해석 대상 공간중앙에는 기관실내 기기들을 상징하는 장애물이 위치한다.

선박의 중앙 기관실형은 x축 방향 및 z축 방향으로 대칭성이 있다고 보아 Fig. 2와 같이 기관실 전공간의 1/4(10 m×7 m×5.5 m)부분에 대해서만 해석을 하고자 한다. 따라서 해석 영역에는 두 개의 수직벽과 천장 및 바닥, 그리고 두 개의 대칭면이 있게 된다.

향후 분석 시 혼동을 피하기 위하여 이들을 각각 좌측벽(left wall), 후측벽(rear wall), 천장, 바닥으로 호칭하고자 하며 두 개의 대칭면은 좌표축 원점으로부터의 위치를 고려하여 각각 우측대칭면(right symmetric plane)과 전방대칭면(front symmetric plane)으로 부르하고자 한다. 기관실 출입문들은 모두 폐쇄되어 있다고 보고 단

지 기관실 천장에 위치한 배기구만이 개방되어 있다고 본다.

소화제분사노즐 조건에 따른 유동 및 CO₂ 소화제 전달특성을 분석하기 위하여 소화제분사노즐이 소화제전달특성에 큰 영향을 미칠 수 있다고 예측되는 각 대칭면 중앙과 천장의 중앙에 위치할 경우에 대해서 해석하고자 하며 흐름은 3차원 난류유동으로 가정한다.

2.1 지배방정식

유동장을 해석하기 위해 사용되는 방정식은 비압축성 유체로 가정하고, 난류 현상을 효과적으로 해석하기 위하여 지배 방정식들에 대해 밀도가중 평균인 Favre 평균을 취한 후 비정상 상태에 대해 유도한 것으로 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 및 성분 보존 방정식은 다음과 같다.

(1) 연속방정식

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0$$

(2) 운동량방정식

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i \right) + \rho b_i$$

(3) 에너지보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right)$$

(4) 성분보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{Y}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{ij} \frac{\partial \tilde{Y}_i}{\partial x_j} \right)$$

(5) 난류운동에너지방정식

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

(6) 난류소멸율방정식

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} C_1 C_k - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k}$$

(7) 이상기체상태방정식

$$P = \rho R T \sum_i \frac{\tilde{Y}_i}{W_i}$$

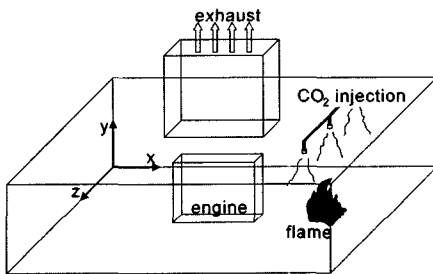


Fig. 1. Schematic of marine engine room.

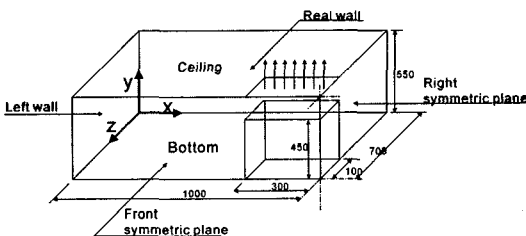


Fig. 2. Calculation domain (unit: cm).

2.2 경계조건

실내공간은 정지된 288K, 1기압의 공기, CO₂ 질량분율은 0이다. 이 같은 조건에서 천장 노즐로부터 질량분율 1인 CO₂가 분출되는 것으로 한다. 배기구는 장애물 바로 위측 천장 벽면에 위치하고 모든 속도성분 및 온도, CO₂ 질량분율의 구배는 0이다. 모든 벽면은 단열이며 대칭면은 구배가 0이라는 조건을 적용하였다.

분사노즐(0.5 m×0.5 m)에서는 일정한 속도(4.8m/s)의 CO₂ 소화제가 분사되는 것으로 하였다.

본 연구에서는 검사체적에 기초한 유한체적방법(Control-volume based finite difference method)을 이용하는 상용 코드인 Fluent 5.0 버전을 사용하였다. Up-wind scheme 및 Simple algorithm을 적용하였으며 난류모델로는 표준 κ - ϵ 모델을 사용하였다.

사용된 격자수는 54×37×28이며 균일 격자를 사용하였고, 수렴조건은 각 검사체적에서 계산한 잔류생성항의 절대치 합이 10⁻³ 이하이고, 일정한 지점에서 속도와 같은 주요변수들의 반복계산 결과가 거의 변화하지 않을 때를 수렴한 것으로 판단한다. Time step은 1 sec로 주었고 비정상항에 대해 Implicit scheme을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 선박 기관실과 유사한 공간에 CO₂소

화제를 분사하였을 시 소화제분사노즐 조건에 따른 유동특성 및 CO₂ 소화제 전달특성을 검토하기 위하여 시간경과에 따라 나타나는 공간 내 유동 및 CO₂ 소화제 농도분포변화와 규정농도대 형성 능력을 고찰하였다. 계산시간은 0~120초까지로 선정하였다. 이 시간 영역대를 선정한 것은 선박소화설비 규정상 2분 이내에 소화제를 방사해야 하기 때문이다.

해상인명안전국제협약(SOLAS)에 산소농도를 15%이하로 떨어뜨릴 것을 규정하고 있으므로 이에 해당하는 CO₂ 질량분율 0.38을 규정 농도라 부르고 이 농도 이상의 영역을 '규정농도대'라고 부르기로 한다.

3.1 1개의 분사노즐이 계산영역의 천장 중앙에 위치할 경우

본 연구의 계산영역은 해석 대상 공간의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4로 잡았으므로 이 계산 영역의 천장 중앙에 1개의 노즐이 존재하는 이 경우는 전 영역에 4개의 노즐이 배치된 경우에 해당한다.

Fig. 3은 1개의 CO₂ 소화제 분사노즐이 계산영역 천장의 중앙점에 위치하며 노즐로부터 4.8 m/s의 CO₂ 소화제가 분사될 때 분사 노즐 중심을 지나는 z=3.5 m 단면(xy중양단면)에서의 유동장 및 농도분포 변화를 나타내고 있다.

z=3.5 m인 수직단면에 나타난 유동장을 보면 그림(a)와 같이 분사초기에 CO₂ 소화제 분사기류 좌, 우의 바

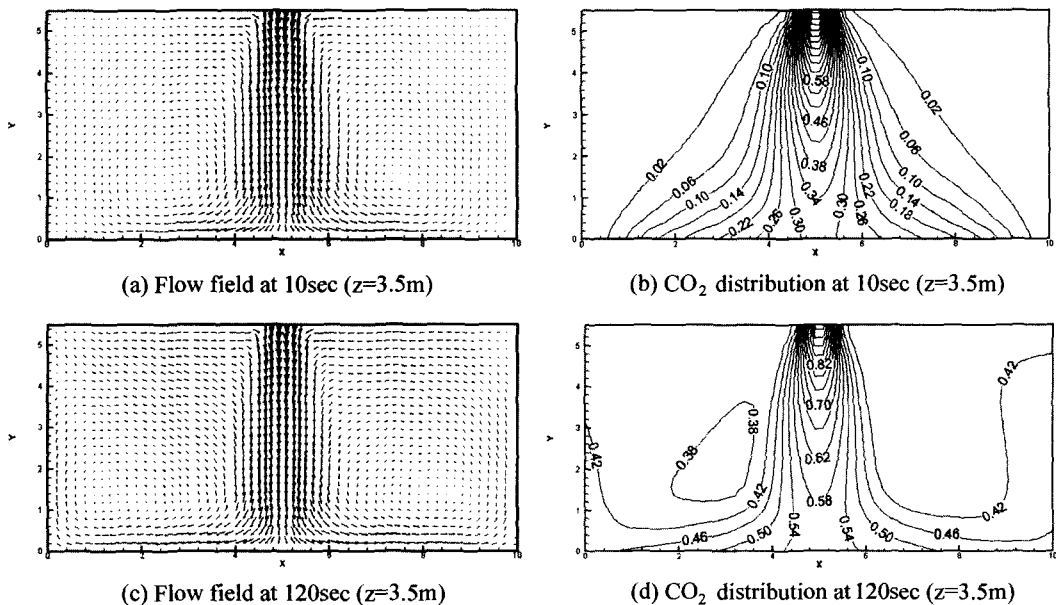


Fig. 3. The variation of transient flow and CO₂ distributions in engine room.

다면 부근에서 각각 시계방향과 반시계방향의 재순환 유동이 발생한다. 이들은 시간 경과에 따라 그림(c)와 같이 좌측 벽과 우측 대칭면 쪽으로 이동 발달하면서 전 영역으로 확장된다. 또한 수직 분사된 기류는 바닥면에 부딪혀 수평방향으로 유동하는 1차 벽면제트를 형성하고 이것이 다시 수직벽과 만나면서 2차 벽면제트를 형성하며 이 같은 기류는 천장에 부딪혀 다시 3차 벽면제트를 형성한다. 이 기류는 천장을 따라 유동하다가 다시 분사로 유입되면서 전체적으로 큰 재순환 유동을 형성한다.

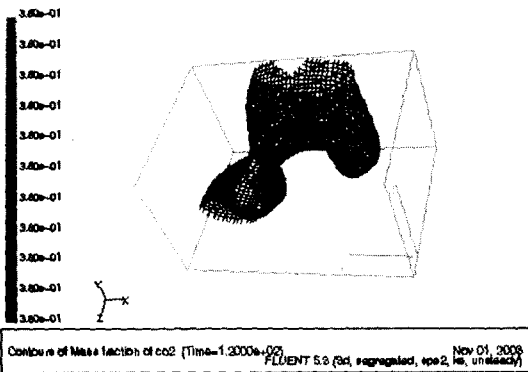


Fig. 4. The surface of equi-mass fraction(0.38) after 120 sec of injection.

동일 경우에 대한 $z=3.5$ m인 수직단면에서 CO_2 질량분을 분포의 변화를 살펴보면, 분사초기인 10초의 그림(b)에는 밑 바닥면을 따라 확장되는 등농도선이 나타나며 120초경과 후에는 각각 좌측 벽과 우측 대칭면을 따라 공간의 상부영역으로 확장되는 등농도선이 나타난다.

시간이 경과하면서 규정농도대는 분사 중심부로부터 좌우로 영역을 넓혀가며 바닥면으로부터 좌측 벽과 우측 대칭면까지 확장되고 있다.

Fig. 4는 동일한 경우 120초에서의 규정농도인 소화제 질량분율 0.38인 곡면을 보여주고 있다. 그림에서 보이는 형상의 내부는 규정농도보다 낮은 것이고 나머지는 모두 규정농도 이상의 CO_2 질량분율 값을 가지고 있다. 규정농도에 도달하지 못한 영역은 주로 노즐 분사의 상부 주변영역이다. 이 같은 현상은 분사된 소화제가 주로 모서리 및 벽을 타고 우선적으로 전달되며 공간의 중심에 있는 분사 노즐 주위로는 전달이 늦은데서 기인한다고 해석된다.

3.2 1개의 분사노즐이 계산영역의 우측 대칭면에 위치할 경우

Fig. 5는 1/2개의 CO_2 분사노즐이 계산영역 우측대칭면 천장의 장애물과 벽면 사이 거리 2등분 점에 위치할 때 $z=3.5$ m(xy중양단면)에서의 유동장 및 농도분

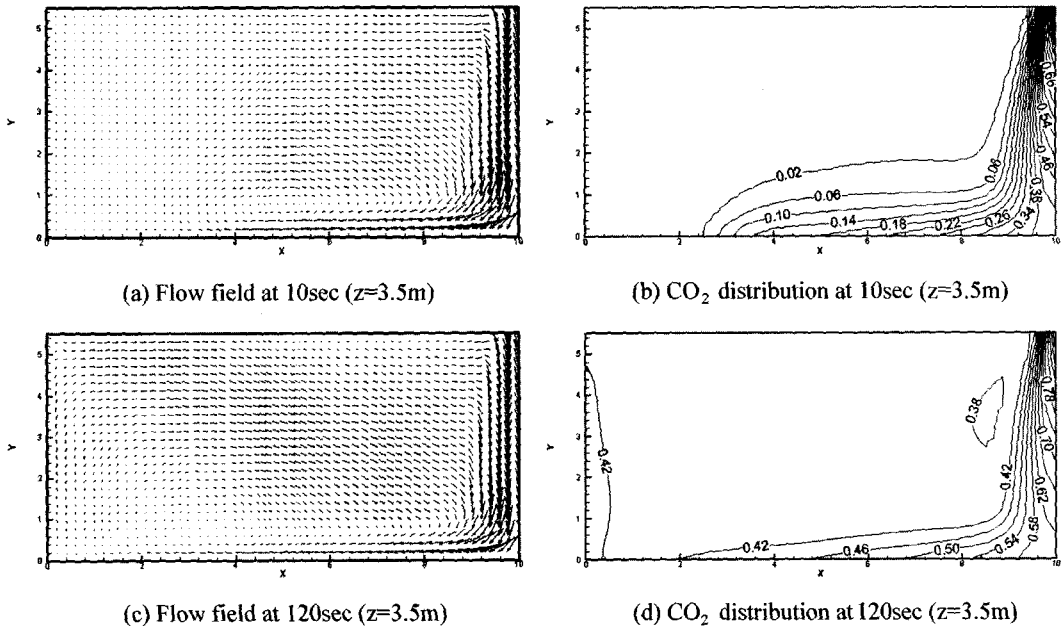


Fig. 5. The variation of transient flow and CO_2 distributions in engine room (1/2 nozzle at center of right symmetric plane).

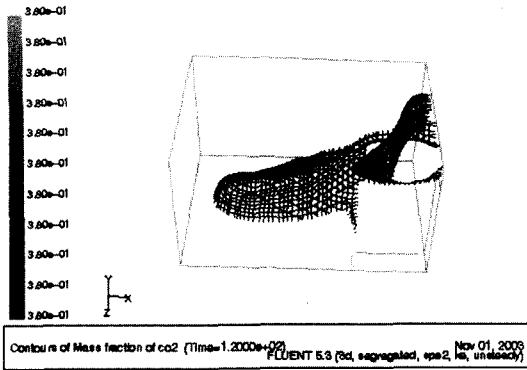


Fig. 6. The surface of equi-mass fraction(0.38) after 120 sec of injection (1/2 nozzle at the center of right symmetric plane).

포 변화를 시간에 따라 보여주고 있다. 이 경우는 대칭성을 고려하면 전체적으로 2개 노즐이 있는 것이 되어 유량을 동일하게 하기 위해 분출속도는 9.6 m/s로 하였다.

유동장을 보면 수직하향 분사가 바닥에 벽면제트를 형성하고 있다. 분사초기에는 밀바닥면 가까운 좁은 영역에서 재순환 유동이 발생하여 시간 경과와 함께 좌측 벽을 향해 이동 발달하면서 전 영역에 영향을 미치

는 시계방향의 재순환 유동을 형성시키고 있다.

농도분포에서는 CO₂ 소화제 질량전달이 분사기류에서 밀바닥면과 좌측 벽 및 천장을 따라 일어난 후 CO₂ 분사기류를 향해 확장되는 등농도선을 보여주고 있다. 이는 밀바닥면과 좌측 벽 및 천장을 따라 형성된 제트기류가 CO₂ 분사기류로 재 유입되는 유동형태를 나타내기 때문인 것으로 여겨진다.

Fig. 6은 동일 경우 120초경과 시 규정농도인 질량분율 0.38 곡면의 모습이다. 배출구 및 분사구 상부에 규정농도에 미치지 못한 영역이 남아 있다. Fig. 4와 유사하게 분사 주위에 저 농도대로 규정농도에 이르지 못하고 있다.

3.3 1개의 분사노즐이 계산영역의 전방 대칭면에 위치할 경우

Fig. 7(a)~(d)는 1/2개의 CO₂ 분사노즐이 계산영역 전방대칭면 천장의 장애물과 벽면 사이 거리 2등 분점에 위치할 때 시간 경과에 따른 z=3.5 m단면(xy중앙단면)의 유동장 및 농도분포 변화를 보여주고 있다. 이 경우는 대칭성을 고려하면 전방대칭면 상부에 전체적으로 2개 노즐이 있는 것이 되어 투입유량을 동일하게 하기 위해 분출속도는 9.6 m/s로 하였다.

유동장을 보면, 분사초기에는 좌, 우 밀바닥 면의 모

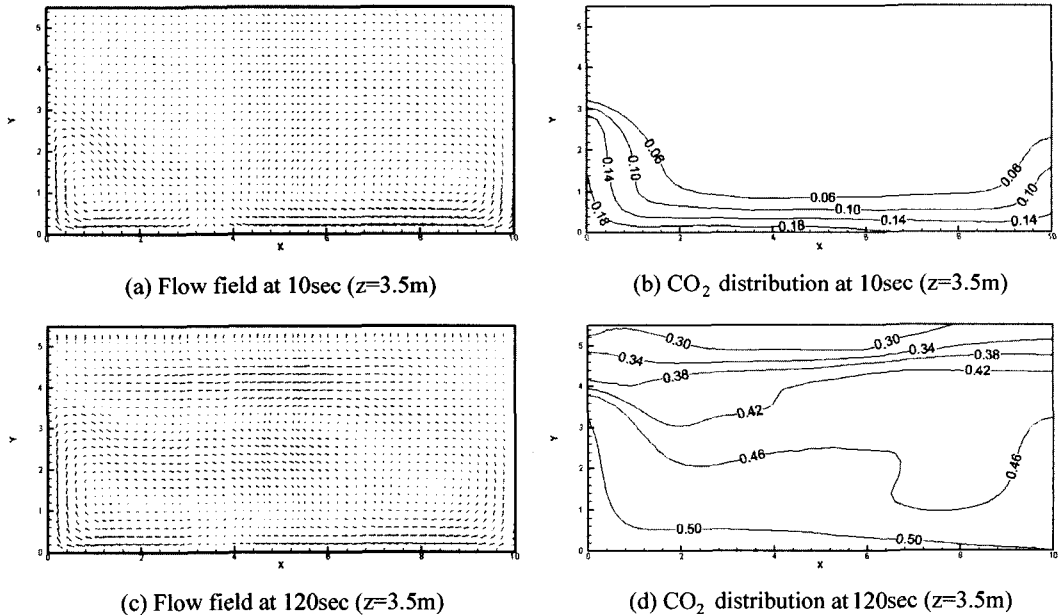


Fig. 7. The variation of transient flow and CO₂ distributions in engine room (1/2 nozzle at the center of the front symmetric plane).

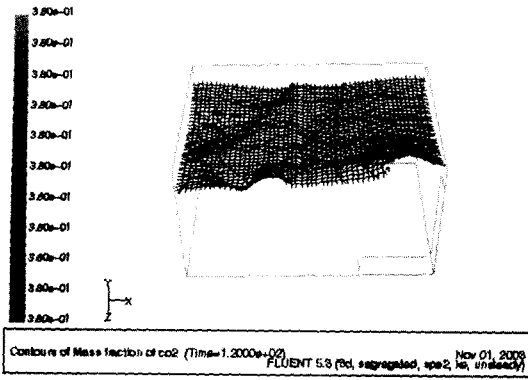


Fig. 8. The surface of equi-mass fraction(0.38) after 120s of injection (1/2 nozzle at the center of front symmetric plane).

서리의 좁은 영역에서 미약한 재순환 유동이 형성되며 시간경과에 따라 우측 영역의 재순환 유동이 발달되어 좌측 영역으로 확장되는 유동형태를 보여주고 있다. 이는 우측 상부 모서리로부터 유입되는 기류가 유동을 지배하면서 나타나는 현상으로 여겨진다.

농도분포에서는 재순환 유동의 중심이 위치하는 좌, 우 모서리 부근 영역이 더 높은 등농도선대를 나타내고 있어 재순환 유동이 질량전달에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 좌측 벽과 우측 대칭면부근의 농도 증가가 빠른 것으로 나타난다. 고농도대가 영역의 상부측으로 확장되어 나타나며 CO₂ 분사노즐이 1개일 경우 가장 넓은 면적에서 농도 증가를 보여주고 있다.

Fig. 8은 동일 경우 120초경과 후의 규정 농도대 모

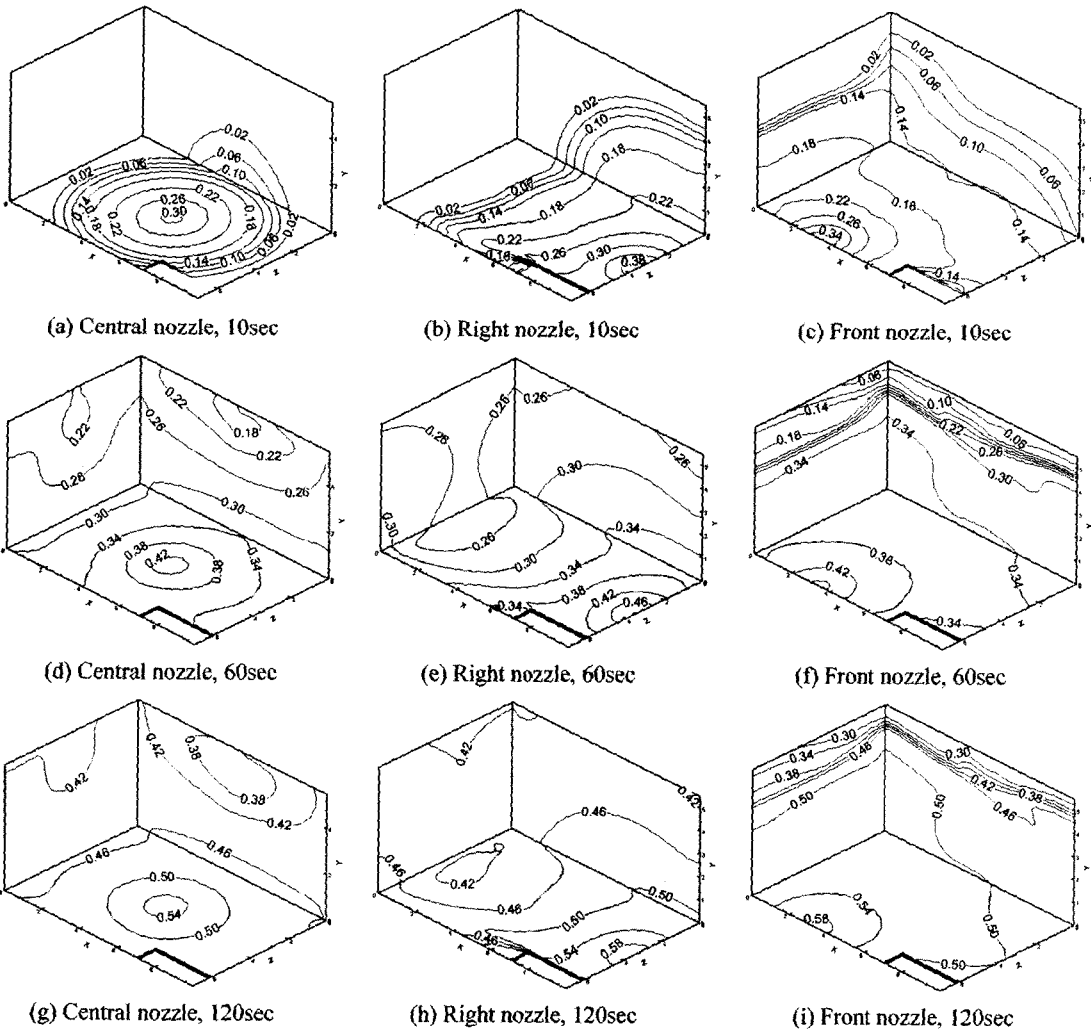


Fig. 9. The compression of CO₂ distribution on walls for three nozzle locations.

습이다. 천장 가까운 곳까지 전 영역에 걸쳐 굴곡이 적은 평면 가까운 규정 농도대가 형성되어 있어 소화에 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보여 준다 하겠다. 곡면이 평면에 가깝게 평평한 것은 Fig. 7(c)에서 나타난 수평방향 유동이 영향을 미친 것으로 분석된다.

3.4 바다 및 벽면상 규정농도대 형성 능력

Fig. 9(a)~(i)는 중앙노즐, 우측대칭면 노즐, 전방대칭면 노즐의 세 경우에 대하여 바다 및 벽면상에 형성된 소화제 농도 분포를 시간에 따라 비교 도시한 것이다.

10초경과 시 중앙, 우측, 전방 노즐인 세 경우에 대하여 그림(a),(b),(c)를 비교해 보면 후측벽 상의 질량분율을 0.02 이상인 면적은 전방 노즐이 가장 크고 우측, 중앙 순이다. 전방 노즐의 경우 모서리 부근에서 질량 전달 촉진 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

60초경과 후인 (d),(e),(f)를 비교해 보면 중앙 노즐은 벽면에 U자형 분포가 뚜렷하고 전방 노즐인 경우 조밀한 농도분포가 거의 정상부에 근접하며 0.30이상의 벽면 농도면적이 세 경우 중 가장 큼을 알 수 있다. 120초경과 후는 앞서와 유사한 경향이나 규정농도 0.38 이상인 면적이 우측노즐이 가장 크고 중앙, 전방 노즐 순임을 알 수 있다. 따라서 세 경우 중 고 농도대 벽면 형성이 가장 빠르고 바닥면에 거의 평행하게 고농도대가 형성되어 형성 분포의 높이 편차도 작은 전방 노즐의 경우가 소화에 가장 유리할 것으로 보인다.

4. 결 론

선박 기관실의 고정식 소화장치로 사용되는 CO₂ 소화장치의 소화효과에 영향을 미칠 수 있는 인자 중 분사노즐위치를 변화시켜서 CO₂ 소화제 전달특성에 대한 전산모의실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 방호 공간을 장방형으로 4등분하고 분할된 각 공간의 천장 중앙에 노즐을 배치한 경우, 천장에 형성되는 대칭 천장 제트가 대칭면에서 서로 부딪혀 저농도 하향 유동이 되면서 분사로 재 유입되어 분사주위에 규정농도에 미달하는 층을 형성한다. 이와 같은 노즐 배치는 분사주위의 소화가능층이 얇으므로 안정적 소화에 바람직하지 않다.
2. 소화제분사노즐로부터 분사된 소화제 기류는 바닥과 부딪혀 1차 벽면제트를 형성하고 이 기류는 다시 수직벽과 부딪혀 2차 벽면제트를, 다시 2차 벽면제트는 천장에 부딪혀 3차 벽면제트를 형성한다.
3. 소화제 전달에 있어 벽의 모서리에서는 질량전달

이 촉진되는 경향이 있다. 이에 따라 모서리부근은 소화제 농도 증가가 빠르고 등 농도곡선은 피크를 나타내는 경향이 있다.

4. 바닥 및 벽면상 규정농도대 형성능력은 고농도대 형성이 가장 빠르고 바닥면에 거의 평행하게 고농도대가 형성되어 균일한 분포를 보인 전방 노즐의 경우가 소화에 유리할 것으로 생각된다.

기호설명

μ_{eff}	: $\mu + \mu_1$
\bar{u}	: x축 방향의 favre 평균속도 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
\bar{v}	: y축 방향의 favre 평균속도 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
μ_{eff}	: 유효점성계수 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
μ	: 점성계수 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
μ_1	: 난류점성계수 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
ρ	: 기체밀도 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
g	: 중력가속도 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
k	: 난류운동에너지 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]
ϵ	: 난류소멸율
G	: 난류운동에너지 생성항
C, C_1, C_2	: 실험적 난류모델상수
C_p	: 정압비열 [$\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$]
\bar{Y}_i	: 중기체평균질량분율
W_i	: 중기체분자량 [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$]
D	: 확산계수 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
\bar{R}	: 일반기체상수
T	: 온도 [K]
P	: 압력 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$]
h	: 엔탈피

참고문헌

1. 현대상선주식회사, "기관실 화재방지를 위한 지침", 95-110(1995).
2. 김재덕, 이윤우, "가스계 혼합소화약제의 불꽃소화농도", 한국화재소방학회, Vol. 15, No. 1(2001).
3. Saso, Y., Saito, N., Liao C. and Ogawa, Y. "Evaluation of Fire Suppression Efficiency of Fire Extinguishing Agents Using Counterflow Diffusion Flame", Report of Fire Research Institute of Japan, No. 77, pp.11-19(1994).
4. Ishizuka, S. and Tsuji, H., "An Experimental study of Effect of Inert Gases on Extinction of Laminar Diffusion Flames", Proceedings of 18th Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh,

- PA, pp.695-703(1981).
5. 김재덕, 김영래, 홍승태, “불활성 가스계 혼합소화약제의 n-Heptane 불꽃소화농도 및 배가스 조성”, 한국화재소방학회, Vol, 16, No. 3, pp.77-83(2002).
 6. 박승민, “가스계 소화설비의 개구부를 통한 소화약제 누출 및 보상문제에 관한 소고”, 한국화재소방학회, Vol. 1, No. 1, pp.2-9(2000).
 7. 김윤중, 윤명오, 김상욱, “용기 일체형 가스소화 방식의 오리피스 방사 특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회, Vol, 16, No, 2, pp.59-69(2002).
 8. Sridhar, “A Computational study on the Application Strategies for Carbon Dioxide to Extinguish Micro-gravity Flames”, The Degree of Master of Science, Western Reserve University(2002).