

CO₂ 소화제 노즐수에 따른 유동특성 및 소화제농도분포에 대한 연구

A Study of the Characteristics of Flow and the Distribution of CO₂ Agent Concentration According to the Number of CO₂ Agent Nozzle

박 찬 수[†]

Chan-Su Park[†]

목포해양대학교 기관공학부
(2005. 3. 8. 접수/2005. 6. 7. 채택)

요 약

가스계소화설비인 CO₂ 소화장치의 구성 중 CO₂ 노즐수에 따른 유동특성 및 CO₂ 소화제 농도분포를 분석하기 위하여 CO₂ 노즐수를 변화시키면서 전산모사실험을 3차원 비정상상태로 수행하였다. 실제 선박의 기관실을 방호공간으로 선정하여 유동장과 CO₂ 소화제 농도장을 계산하였다. CO₂ 소화제 노즐수를 2개에서 4개로 증가시킬 경우는 낮은 농도분포를 나타냈고, CO₂ 소화제 노즐수를 6개 이상으로 증가시킬 경우는 전 영역에 영향을 미치는 재순환 유동이 형성되었다. CO₂ 소화제 노즐수를 4개 이상 증가시킬 경우는 0.36이하의 등농도선대가 확장 또는 수축 되었다. 따라서 CO₂ 소화장치 설계 시 적절한 소화제노즐수와 노즐배열을 고려해야 할 것으로 생각된다.

ABSTRACT

We have conducted a numerical simulation under three-dimensional unsteady conditions in order to analyze the characteristics of flow and the distribution of CO₂ agent concentration according to the number of CO₂ agent nozzle. The engine room of a ship was selected as a protection space, and flow fields and CO₂ concentration fields were measured. In case of increasing the number of CO₂ nozzle from 2 nozzles to 4 nozzles, the distribution of CO₂ concentration showed low, and in case of increasing the number of CO₂ nozzle to above 6 nozzles, the recirculating flow affected to all region was generated. In case of increasing the number of CO₂ agent nozzle to above 4 nozzles, the iso-concentration line below 0.36 expanded or contracted slightly. Therefore, the proper number and the arrangement of CO₂ agent nozzle are considered when CO₂ fire fighting system is designed.

Keywords : CO₂ mass transfer, Nozzle, CO₂ concentration, Numerical simulation

1. 서 론

화물선의 화물창 및 기관실의 고정식 소화장치로 가스계 소화장치인 CO₂ 소화장치의 사용이 주류를 이루고 있으며 이 소화장치의 구성은 크게 소화제 저장실, 밸브제어실, 제어밸브와 방호구역에 설치되는 분사노즐군으로 나눌 수 있다.

가스계(CO₂) 소화설비를 선박의 고정식 소화장치로 설치 시 방호공간의 용적에 따른 소화제량과 소화제 방출시간에 대한 것만 규정하고 있으며 소화제 분사

노즐군에 관한 사항은 특별히 규정하지 않고 있다. 하지만 선박 기관실은 많은 기기와 층 및 격벽 등으로 분리됨으로 구조가 복잡하게 되어있어 이러한 특성을 고려하여 소화제 분사노즐군을 배치하여야 한다. 특히 소화제 분사노즐수에 따른 유동 및 소화제 농도분포 특성을 분석하여 CO₂ 소화장치설계 시 가장 적합한 소화제 노즐수 및 배치조건을 결정하여야 한다. 선박화재사고에 대한 金子俊男¹⁾의 보고서에 따르면 선박화재를 착화물에 따라 분리하여 보면, 주, 보조기관의 연료유에 의한 화재가 57.6%, 스토브에 의한 화재가 24.2%, 기타 원인이 18.2%를 차지하고, 이 중 57.6% 차지하는 연료유에 의한 화재는 기관실화재에 해당되

[†]E-mail: cspark@mmu.ac.kr

어 고정식 소화 장치의 중요성을 대변해 주고 있다. 가스계 소화설비와 관련된 최근 연구들을 살펴보면, 김재덕²⁾ 등은 이산화탄소와 불활성 가스계 물질의 혼합물의 불꽃소화농도에 관한 연구를 하였으며, Saso Y³⁾ 등은 대항류 확산화염에 대한 할론 대체 소화약제의 소화농도에 관한 연구를 수행하였다. 김윤중⁴⁾ 등은 가스계 소화제를 배관 형태의 저장 용기속에 충전한 후 소화제 자체의 증기압만으로 방사시키는 노즐 오리피스에 따른 방사특성을 분석하였고, Lee⁵⁾ 등은 이산화탄소 소화설비 작동시 정보저장장치 저온손상에 관한 연구를, Park⁶⁾ 등은 가스계 소화설비의 개구부를 통한 소화약제 누출 및 보상문제에 관한 연구를 수행하였다. 가스계 소화설비에 관한 최근 연구들 중 소화제 분사노즐수와 농도분포에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 소화제 분사노즐수에 따른 유동 및 CO₂ 소화제 농도분포에 대한 연구가 필요하며, 본 연구에서는 CO₂ 소화제분사노즐수를 변화시켜서 나타나는 유동특성 및 CO₂ 소화제농도분포에 대한 연구를 수행하여 CO₂ 소화장치 설계 시 고려해야할 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 이론해석

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

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

(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

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

2.2 경계조건

방호공간은 정지된 288K, 1기압의 공기, CO₂ 질량분율은 0이다. 이 같은 조건에서 천장 노즐로부터 질량분율 1인 일정한 온도(288K)의 CO₂가 분출되며 배기구는 장애물 바로 위측 천장 벽면에 위치하고 모든 속도성분 및 온도, 이산화탄소 질량분율의 구배는 0이다. 모든 벽면은 단열이며 대칭면은 구배가 0이라는 조건을 적용하였으며 분사노즐(크기: 0.5 m×0.5 m, 오리피스: 0.07 m)에서의 소화제분사속도는 분사노즐수에 따라 총유량이 일정하도록 속도를 계산하여 주었다. {계산식 = CO₂ 규정량/분사시간 = 분사율을 구하고, 분사율/(노즐분사면적×밀도×노즐수) = 분사속도를 구한다.}

3. 실험방법

본 연구에서 채택한 방호공간은 실제 운항중인 선박의 장방형 중앙 기관실이며 치수는 길이 20 m, 폭 14 m, 높이 5.5 m이고 해석 대상 공간중앙에는 기관실내 기기를 상징하는 장애물이 위치한다. 선박의 중앙 기

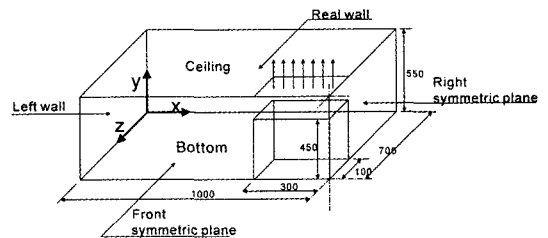


Fig. 1. Calculation domain (unit:cm).

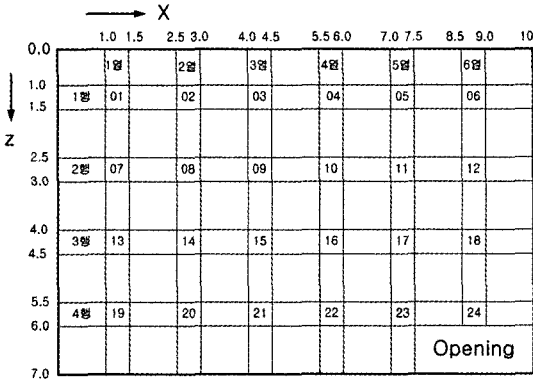


Fig. 2. The location of CO₂ injection nozzles(unit: m).

관실형은 x축 방향 및 z축 방향으로 대칭성이 있다고 보아 Fig. 1과 같이 기관실 전공간의 1/4(10m×7m×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 부르고자 한다. 기관실 출입문들은 모두 폐쇄되어 있다고 보고 단지 기관실 천장에 위치한 배기구만이 개방되어 있다고 본다.

소화제분사노즐의 배치는 Fig. 2와 같이 천장을 4행 6열로 균일하게 나눈 후 행과 열에 분사노즐 수에 따라 배열시킨다. 분사노즐 수를 2개에서 8개까지 변화시키면서 유동특성 및 CO₂ 소화제농도분포를 해석하고자 하며 흐름은 3차원 난류유동으로 가정한다. 검사체적에 기초한 유한체적방법(Control-volume based finite difference method)을 이용하는 상용 코드인 Fluent 5.3 버전을 사용하였고, Up-wind scheme 및 Simple algorithm을 적용하였으며 난류모델로는 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 사용된 격자수는 54×37×28이며 균일 격자를 사용하였고, 수렴조건은 각 검사체적에서 계산한 잔류 생성항의 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.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 방호공간에 CO₂ 소화제를 분사하였

을 시 소화제분사노즐 수에 따른 유동 및 CO₂ 소화제 농도분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 분사노즐 수를 2개, 4개, 6개 및 8개로 증가시키면서 나타나는 방호공간 내 유동특성 및 CO₂ 소화제 농도분포변화를 고찰하였다. 선박소화설비 규정상 2분 이내에 소화제를 방사해야 한다고 규정하고 있기 때문에 계산시간을 0~120초까지로 선정하였다. 해상인명안전국제협약(SOLAS)에 방호공간 내의 산소농도를 15%이하로 떨어뜨릴 것을 규정하고 있으므로 이에 해당하는 CO₂ 질량분율 0.38을 규정 농도라 부르고 이 농도 이상의 영역을 ‘규정농도대’라고 부르기로 한다. 방호공간의 중간 높이 면에 이 규정농도대가 형성되는 시점인 90초대를 선정하여 나타나는 유동특성과 CO₂ 소화제 농도분포변화를 분석하였다.

3.1 소화제분사노즐수가 2개일 경우

Fig. 3은 소화제 분사노즐중심이 좌측 벽으로부터 2.75m, 후측 벽으로부터 2.75m, 노즐간 거리는 4.5m 떨어져 배치한 경우로서(Fig. 2상의 노즐번호는 08, 11번에 해당)분사노즐로부터 2.4 m/s의 이산화탄소 소화제가 분사될 때 각 단면의 유동장과 CO₂ 소화제농도분포를 나타내고 있다.

그림(a)의 유동장에서는 밀바닥면에 근접한 부근에서 4개의 재순환 유동이 발생하고 있으며 분사기류의 영향이 나타나는 좌, 우의 재순환 유동의 방향이 상반됨을 알 수 있다. 이는 분사노즐로부터 분사된 분사류가 밀바닥면에 이른 후 분사노즐간 사이에서 다시 부딪쳐서 상승기류를 형성시키기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 그림(e)에서 벽면 제트기류가 분사로 유입되면서 후측 영역에 재순환유동을 발생시키고 있다.

농도분포에서는 이와 같은 유동특성으로 인하여 밀바닥면에 근접한 영역에서 규정농도대 이상의 농도분포를 나타내고 바닥면에서 방호공간의 상부영역으로 질량전달이 일어남을 보여주고 있다.

그림(c)와 (d)는 밀바닥면에 근접한 단면과 중앙단면의 농도분포를 나타내고 있다. 밀바닥면은 전 영역이 규정농도대 이상의 농도분포를 보이고 중앙단면은 분사노즐과 전방 대칭면과의 사이에서 0.36의 등농도선대가 형성되어 있다. 그림(b)와 (d)를비교하여 보면 0.36의 등농도선대의 내부는 0.36 이하의 농도분포를 나타냄을 알 수 있다. 이는 분사기류가 밀바닥면에 이른 후 전방대칭면과 후 측벽을 따라 상승하는 벽면제트기류를 발생시키고 배출구가 전방대칭면 천장에 위치하고 있기 때문인 것으로 여겨진다.

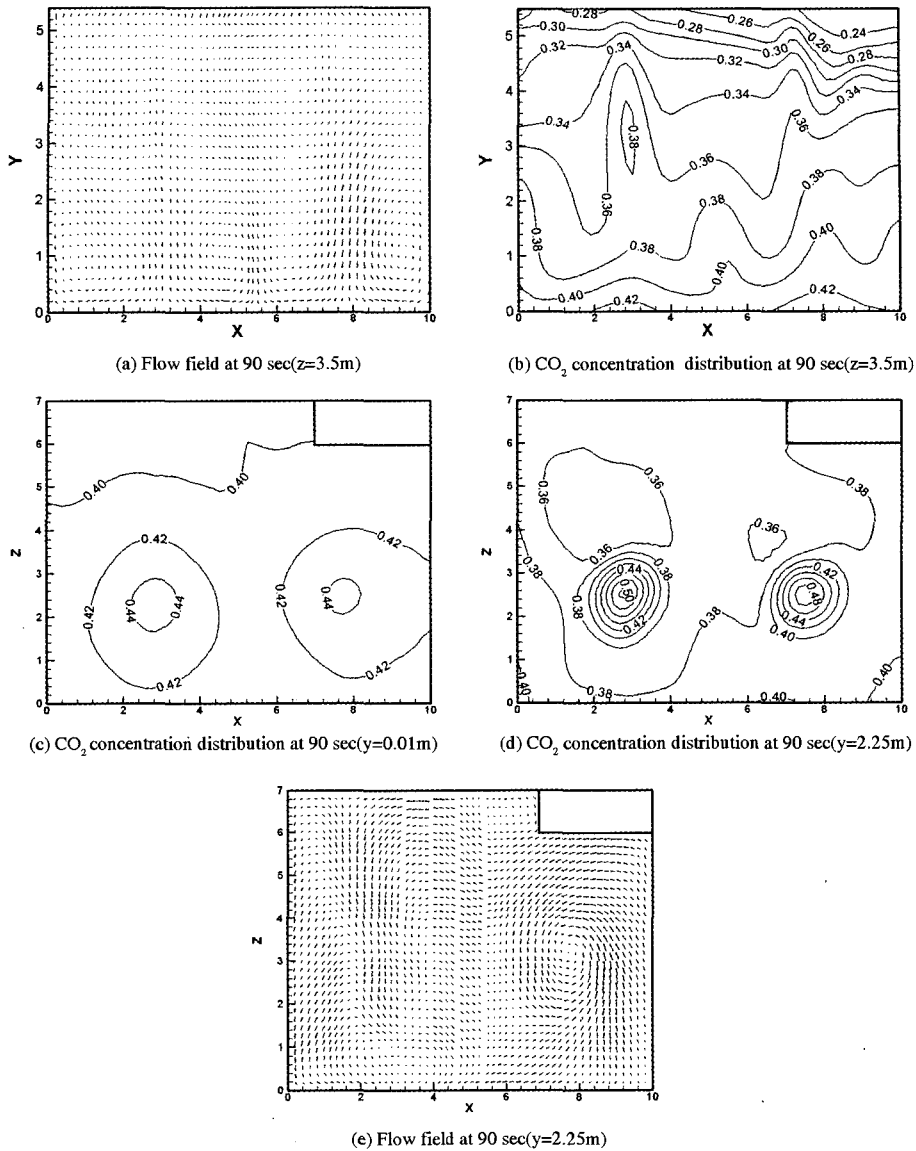


Fig. 3. Flow field and CO_2 concentration distribution at 90 sec.

3.2 소화제 분사노즐수가 4개일 경우

Fig. 4는 소화제 분사노즐중심이 2개의 분사노즐은 좌측 벽으로부터 2.75 m, 후측 벽으로부터 1.25 m, 노즐간 거리는 4.5 m (Fig. 2상의 노즐번호는 02, 05번에 해당), 다른 2개의 분사노즐은 좌측 벽으로부터 2.75 m, 후측 벽으로부터 3.75 m, 노즐간 거리는 4.5 m (Fig. 2상의 노즐번호는 14, 17번에 해당) 떨어져 두 행으로 배치한 경우로서 분사노즐로부터 1.2 m/s의 이산화탄소 소화제가 분사될 때 각 단면의 유동장과 CO_2 소화제

농도분포를 나타내고 있다.

그림(a)의 유동장을 보면 분사기류의 영향이 강하게 나타나며 시계방향의 재순환 유동이 분사기류 좌측영역에 발생하고, 약한 재순환유동이 후측 좁은 영역에서 발생하고 있다. 그림(e)에서는 재순환 유동이 분사기류를 향해 유입되는 기류로 인해 분사기류 주위에 형성되며 Fig. 3의 (e)보다 더 크고 중심위치가 다름을 알 수 있다.

농도분포에서도 이 같은 유동형태로 인해 분사기류

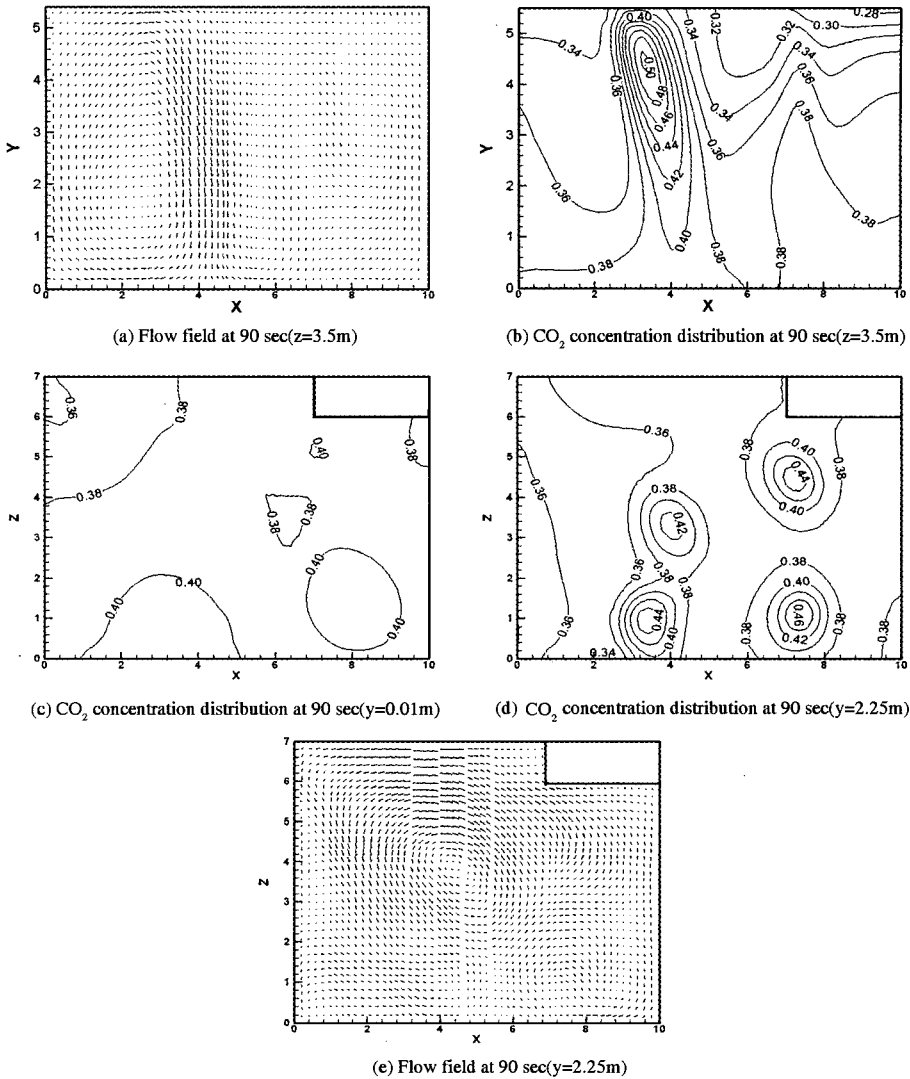


Fig. 4. Flow field and CO₂ concentration distribution at 90 sec.

가 강하게 나타난 영역에는 주위보다 더 높은 등농도 선대가 형성되고 밀바닥면과 좌측 벽과 우측대칭면을 따라 방호공간의 상부 영역으로 질량전달이 일어나고 있다. 그림(c)에서는 좌측 벽과 전방대칭면 모서리에 0.36 등농도 선대가 나타나고 전반적으로 0.40 이하의 등농도 선대가 형성되어 Fig. 3의 (c)보다 더 낮은 농도 분포를 나타내고 있다. 그림 (d)에서도 0.36 이하의 농도 분포대가 Fig. 3의 (d)보다 더 확장됨을 알 수 있다.

3.3 소화제 분사 노즐수가 6개 일 경우

Fig. 5는 소화제 분사 노즐중심이 3개의 분사 노즐은

좌측 벽으로부터 2.75 m, 후측 벽으로부터 1.25 m, 노즐간 거리는 3.0 m(Fig. 2상의 노즐번호는 02, 04, 06번에 해당), 다른 3개의 분사 노즐은 좌측 벽으로부터 2.75 m, 후 측벽으로부터 3.75 m, 노즐간 거리는 3.0 m (Fig. 2상의 노즐번호는 14, 16, 18번에 해당) 떨어져 두 행으로 배치한 경우로서 분사 노즐로부터 0.8 m/s의 이산화탄소 소화제가 분사될 때 각 단면의 유동장과 CO₂ 소화제 농도 분포를 나타내고 있다.

그림(a) 및 (e)의 유동장은 전 영역에 영향을 미치는 재순환 유동이 발생하는데 이는 분사 속도 감소로 인해 관성력이 저하되어 분사기류가 우측 대칭면에 이르면

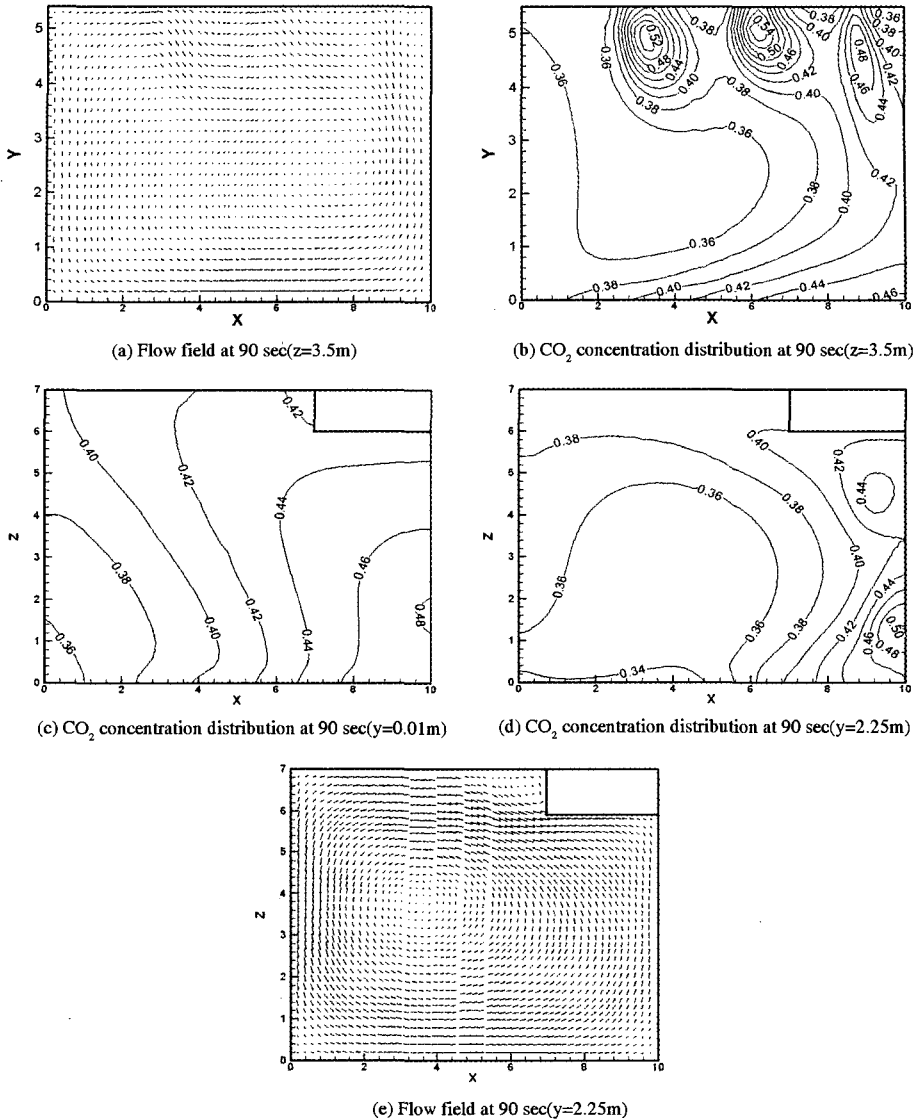


Fig. 5. Flow field and CO_2 concentration distribution at 90 sec.

밀바닥면과 좌측 벽을 따라 천장에 이르러 천장제트기류를 발생시키기 때문인 것으로 여겨진다.

농도분포를 보면 이와 같은 유동형태로 인해 좌측 벽 부근의 영역에서 0.36 이하의 농도분포를 보이고 질량전달이 우측 대칭면, 밀바닥면과 좌측 벽으로부터 공간의 중앙으로 일어나고 있다. 그림(c)는 Fig. 3의 (c)보다 낮은 등농도선대(0.38 이하)가 나타나고 Fig. 4의 (c)보다는 0.38 이하의 등농도선대가 수축되고 있다. 그림(d)에서는 0.38 이하의 등농도선대가 재순환 유동을 중심으로 좌측 벽과 후측 벽으로 치우쳐 형성되고 있

으며 0.34 이하의 등농도선대가 Fig. 3과 Fig. 4의 (d)보다 약간 확장되고 있다.

3.4 소화제분사노즐수가 8개 일 경우

Fig. 6은 소화제 분사노즐중심이 4개의 분사노즐은 좌측 벽으로부터 2.75 m, 후측 벽으로부터 1.25 m, 노즐간 거리는 3.0과 1.5 m(Fig. 2상의 노즐번호는 02, 04, 05, 06번에 해당), 다른 4개의 분사노즐은 좌측 벽으로부터 2.75 m, 후측 벽으로부터 3.75 m, 노즐간 거리는 3.0 m과 1.5 m(Fig. 2상의 노즐번호는 14, 16, 17, 18번

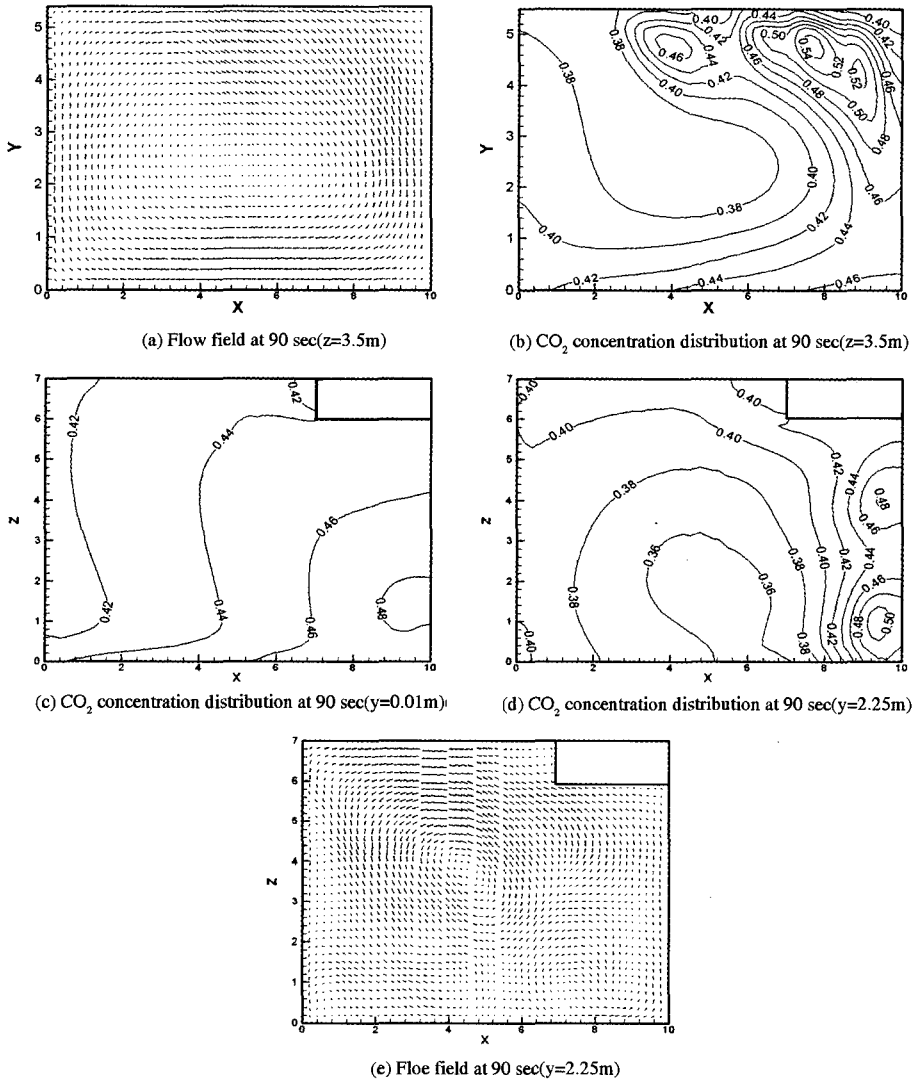


Fig. 6. Flow field and CO₂ concentration distribution at 90 sec.

에 해당떨어져 두 행으로 배치한 경우로서 분사노즐로부터 0.6 m/s의 이산화탄소 소화제가 분사될 때 각 단면의 유동장과 CO₂ 소화제농도분포를 나타내고 있다.

유동장은 그림(a)에서는 Fig. 5의 (a)보다 더 강한 시계방향의 재순환유동이 형성되고 그림(e)는 유사한 유동형태를 나타내지만 재순환 유동의 중심이 우측 대칭면 측으로 이동되어 있다.

농도분포를 보면 그림(b)에서는 0.38의 등농도선대가 Fig. 5의 (b)보다 축소되고 그림(c)에서는 0.42 이상의 농도분포를 나타내어 Fig. 5의 (c)보다 더 높고 균일한 농도분포대가 형성되고 있다. 그림(d)에서도 0.36의 등

농도선대가 Fig. 5의 (d)보다 수축됨을 알 수 있다. 이와 같이 균일한 농도분포가 형성되는 것은 전 영역에 영향을 미치는 재순환 유동의 형태 때문이며 유동의 형태가 소화제 농도분포에 지배적인 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 결 론

가스계소화설비인 CO₂ 소화장치의 구성 중 노즐군에 해당하는 소화제 분사노즐수에 따른 유동특성 및 CO₂ 소화제 농도분포변화를 분석하고자 전산모사실험

을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CO₂ 소화제분사노즐수가 2개 및 4개일 경우는 분사류는 밀바닥면에 이른 후 벽면을 따라 상승하는 유동형태를 나타내며 이러한 유동형태로 인해 CO₂ 소화제 질량전달은 밀바닥면에서 벽을 따라 방호공간의 상부영역으로 일어난다.

2. CO₂ 소화제분사노즐수를 2개에서 4개로 증가시킬 경우는 0.36등농도선대가 나타나고 전반적으로 0.40이하의 등농도선대가 형성되어 더 낮은 농도분포를 나타냄을 알 수 있다.

3. CO₂ 소화제분사노즐수가 6개 및 8개일 경우는 분사류는 관성력 저하로 인해 우측 대칭면으로 치우쳐 우측 대칭면에 이른 후 밀바닥면과 좌측 벽을 따라 천장에 이르러 천장제트기류를 발생시키고 전 영역에 영향을 미치는 재순환유동이 형성된다.

4. CO₂ 소화제분사노즐수가 6개일 경우는 4개일 경우보다 일부영역에서 0.36 이하의 등농도선대가 확장되고 분사노즐수를 6개에서 8개로 증가시키면 0.36이하의 등농도선대가 수축됨을 알 수 있다.

5. 위 결론에서와 같이 CO₂ 소화제분사노즐수에 따라 다른 유동형태가 형성되고 농도분포도 유동형태에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타나 CO₂ 소화장치 설계시 적정한 분사노즐수와 노즐배열을 고려해야 할 것으로 사료된다.

기호설명

μ_{eff}	: $\mu + \mu_t$
u	: x축 방향의 favre 평균속도[m · s ⁻¹]
\tilde{v}	: y축 방향의 favre 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[m · s ⁻²]
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	: i종 기체평균질량분율
W_i	: i종기체분자량[kg · mol ⁻¹]
D	: 확산계수[m ² · s ⁻¹]
\bar{R}	: 일반기체상수
T	: 온도[K]
P	: 압력[kg · m ⁻²]
h	: 엔탈피

참고문헌

- 金子俊男, 桶富和夫, “船舶火災の 實態と 原因について”, 船舶機術研究所 報告”, Vol. 17, No. 6, pp.361-411.
- 김재덕, 이윤우, “가스계 혼합소화약제의 불꽃소화농도”, 한국화재소방학회, Vol. 15, No. 1, pp.34-40 (2001).
- Saso, Y. and Saito, N., “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.
- 김윤중, 윤명오, “용기 일체형 가스소화 방식의 오리피스 방사특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회, Vol. 16, No. 2호, pp.2-9(2002).
- 이수경, 김종훈, 김영진, “CO₂ 소화설비 방사시 정보 저장장치의 저온손상에 관한 연구”, 한국화재소방학회, Vol. 13, No. 3, pp.19-26(1999).
- 박승민, “가스계 소화설비의 개구부를 통한 소화약제 누출 및 보상문제에 관한 소고”, 한국화재소방학회, Vol. 16, No. 3, pp.77-83(2002).
- J. X. Wen, L. Y. Huang, E. M. Amin, and P. Nolan, “Modeling Sooting Jet Fires in a Large Scale Offshore Compartment”, Twenty Seventh Symposium on Combustion/the Combustion Institute, pp.2881-2886(1998).
- S. Ishizuka and H. Tsuji, “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).
- 해상안전국제협약(SOLAS) 2-2, 5.2.1 규칙.