

CO₂ 소화제 노즐과 벽간 거리의 영향 The Effect of the Distance Between CO₂ Agent Nozzle and Wall

박 찬 수[†]

Chan-Su Park[†]

목포해양대학교 기관공학부
(2004. 8. 5. 접수/2004. 10. 8. 채택)

요 약

CO₂ 소화장치의 CO₂ 노즐과 방호공간 내 벽 사이의 거리변화에 따른 유동 및 CO₂ 질량전달효과를 분석하기 위하여 CO₂ 노즐과 후측 벽 사이의 거리를 변화시키면서 전산모의실험을 3차원 비정상상태로 수행하였다. 유동장과 CO₂ 소화제 농도장을 계산하였다. CO₂ 노즐과 후측 벽 사이의 거리 증가에 따라 다른 재순환 유동형태와 벽면제트기류가 형성되었다. CO₂ 소화제 질량전달은 모든 경우에서 각 벽으로부터 방호공간의 중앙으로 일어나지만 CO₂ 소화제 노즐의 전 후 영역의 CO₂ 질량분율은 CO₂ 노즐과 벽 사이의 거리 증가에 따라 높거나 낮게 나타났다.

ABSTRACT

We have conducted a numerical simulation under three-dimensional unsteady conditions in order to analyze the effect of flow and CO₂ mass transfer according to the distance between the CO₂ nozzle of CO₂ fire fighting system and the rear wall in a protection space. Flow fields and CO₂ concentration fields were measured. The different recirculation flow form and wall jet was developed according to increasing the distance between CO₂ nozzles and rear wall. In all the case, CO₂ mass transfer was generated toward the center of a protection space from each walls, but the CO₂ mass fraction of front and rear areas based on CO₂ nozzles showed higher or lower by increasing the distance between CO₂ nozzle and rear wall.

Keywords : CO₂ mass transfer, CO₂ nozzle, Wall jet

1. 서 론

가스계 소화장치인 CO₂ 소화장치는 선박 화물창과 기관실의 고정식 소화장치로 사용되고 있으며 이 소화장치의 구성은 소화제 저장실, 밸브제어실, 제어밸브와 방호구역에 설치되는 분사노즐군으로 이루어져 있다.

가스계 소화설비를 선박의 고정식 소화장치로 설치할 때에 고려사항은 방호공간의 용적에 따른 소화제량과 소화제 방출시간뿐이며 방출 후에 방호공간의 복잡한 구조가 유동 및 CO₂ 소화제 전달 효과에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대한 요건은 고려하지 않고 있는 실정이다. 특히 선박의 방호공간인 기관실내는 여러 구역으로 분리되어 있어 소화제 분사노즐은 각 구역의

벽과 일정한 간격을 두고 배열되는 경우가 대부분이다. 따라서 방호공간의 구조중 소화제 분사노즐과 벽간의 거리가 유동 및 소화제 전달 효과에 미치는 영향에 대한 분석이 필요한 실정이다.

가스계 소화설비와 관련된 최근 연구들을 살펴보면, Park¹⁾ 등은 가스계 소화약제 방사 후 설계농도 유지시간에 대한 연구를, 김²⁾ 등은 가스계 소화제를 배관 형태의 저장 용기속에 충전한 후 소화제 자체의 증기압만으로 방사시키는 노즐 오리피스에 따른 방사특성을 분석하였다. 김³⁾ 등은 화재실의 열유동에 관한 연구를, J.X. Wen⁴⁾ 등은 제트화재의 거동과 독성을 가진 생성물에 관한 연구를 수행하였다.

가스계 소화설비에 관한 최근 연구들 중 소화제 분사노즐과 방호공간구조와의 상관관계에 대한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 방호공간의 구조가 CO₂ 소화

[†]E-mail: cspark@mmu.ac.kr

제 분사후의 유동 및 전달효과에 미칠 수 있는 여러가지 인자에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 CO₂ 분사노즐과 벽간의 거리가 CO₂ 소화제 유동 및 전달 효과에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 이론해석

본 연구에서 채택한 방호공간은 선박의 장방형 중앙 기관실이며 치수는 길이 20 m, 폭 14 m, 높이 5.5 m이고 해석 대상 공간중앙에는 기관실내 기기들을 상징하는 장애물이 위치한다. 선박의 중앙 기관실형은 x축 방향 및 z축 방향으로 대칭성이 있다고 보아 Fig. 1과 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 단지 기관실 천장에 위치한 배기구만이 개방되어 있다고 본다.

기관실 벽과 소화제분사노즐간의 거리가 유동 및 CO₂ 소화제 전달효과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 후 측 벽과 소화제분사노즐과의 거리를 변화시키면서 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.

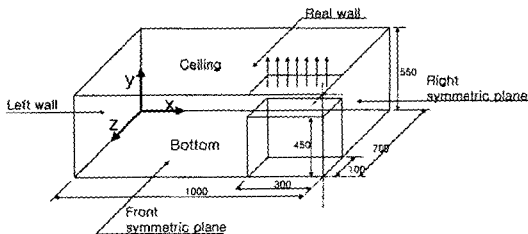


Fig. 1. Calculation domain (unit:cm).

(1) 연속방정식

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

(2) 운동량방정식

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

(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) 난류유동에너지방정식

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

(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

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

2.2 경계조건

방호공간은 정지된 288 K, 1기압의 공기, CO₂ 질량분율은 0이다. 이 같은 조건에서 천장 노즐로부터 질량분율 1인 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)에서는 일정한 속도(2.4 m/s)의 이산화탄소 소화제가 분사되는 것으로 하였다.

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 잔류생성항의 절대치 합이 10⁻³ 이하이고, 일정한 지점에서 속

도와 같은 주요변수들의 반복계산 결과가 거의 변화하지 않을 때를 수렴한 것으로 판단한다. Time step은 1sec로 주었고 비정상항에 대해 Implicit scheme을 사용하였다.

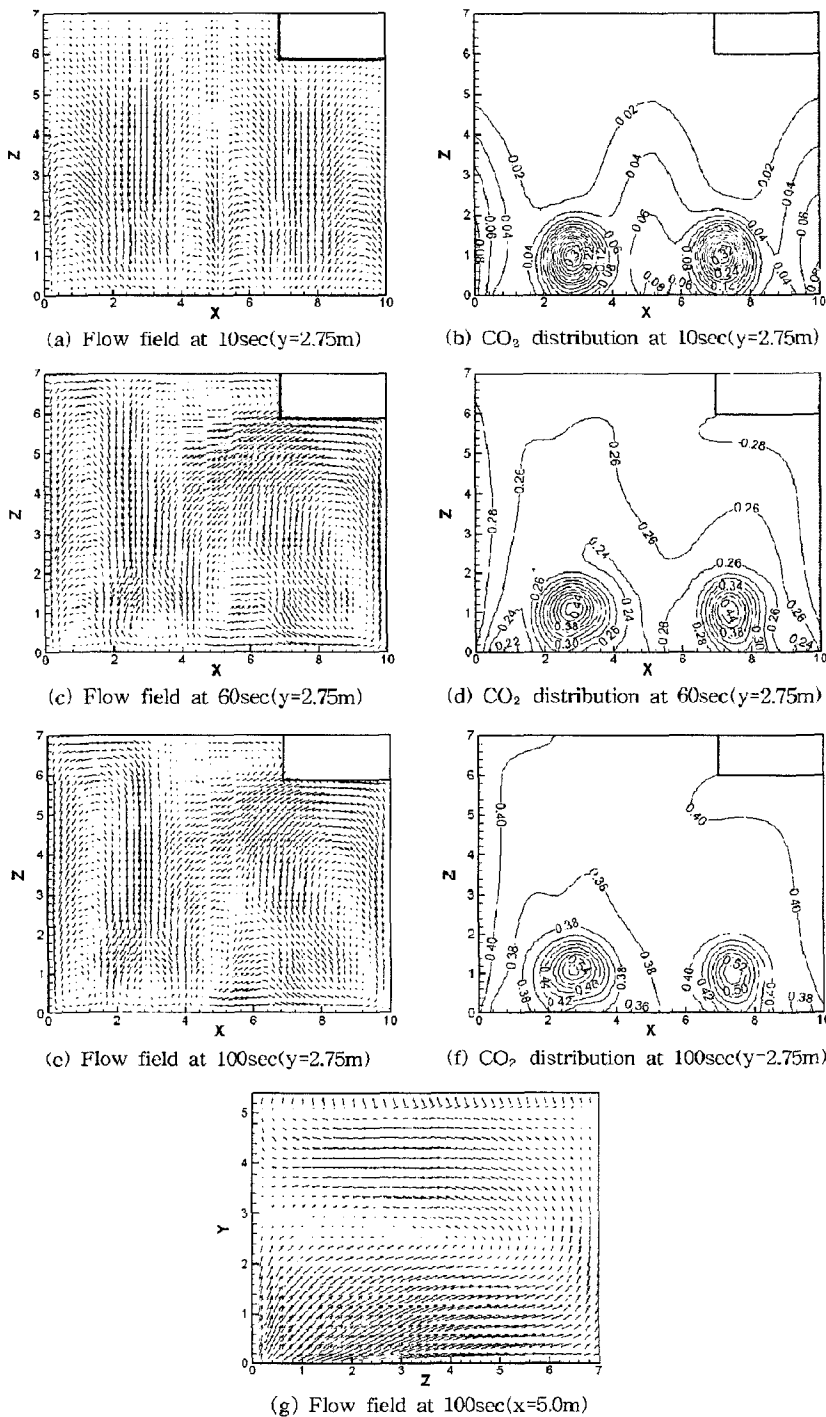


Fig. 2. The variation of transient flow and CO₂ distribution (The distance between CO₂ agent nozzle and wall is 1.25 m).

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 방호공간에 CO₂ 소화제를 분사하였을 시 방호공간의 벽과 소화제분사노즐과의 거리가 유동 및 CO₂ 소화제 전달효과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 서로 4.5 m의 간격을 가진 2개의 소화제 분사노즐을 하나의 군으로 묶어 후측 벽과의 거리를 변화시키면서 나타나는 방호공간 내 유동 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.

3.1 소화제분사노즐과 후측 벽 사이의 거리가 1.25 m일 경우

Fig. 2는 소화제 분사노즐이 좌측 벽으로부터 2.75 m, 후측 벽으로부터 1.25 m 떨어져 배치한 경우로서 y=2.75 m 단면의 유동장과 CO₂ 농도분포를 나타내고

있다.

유동장에서는 분사초기에 전방대칭면으로부터 분사로 유입되는 기류와 분사노즐 사이에서 전방대칭면을 향해 유출되는 기류가 형성되고 좌측벽과 우측 대칭면에 근접하여 재순환 유동이 발생하고 있다. 시간이 경과하면서 이들 재순환 유동이 공간의 중앙측으로 확장되어 유동을 지배하면서 분사노즐 사이에서 유출되는 기류가 사라지고 분사로 유입되는 기류가 강하게 나타나고 있다. 이 같은 현상은 그림(g)에서와 같이 분사기류가 밀바닥면에 부딪힌 후 곧장 상승하는 기류와 밀바닥면과 전방대칭면을 따라 발생한 벽면제트기류가 공간의 중앙 부근을 기점으로 다시 분사로 유입되는 유동형태를 나타내기 때문인 것으로 생각된다.

농도장은 좌측 벽과 우측 대칭면 및 후측 벽 부근이 공간의 중앙보다 더 높은 농도선대를 보이고 있어 CO₂ 질량전달이 각 벽으로부터 공간의 중앙으로 일어남을 알 수 있다.

3.2 소화제분사노즐과 후측 벽 사이의 거리가 2.75 m일 경우

Fig. 3은 소화제 분사노즐이 좌측 벽으로부터 2.75 m,

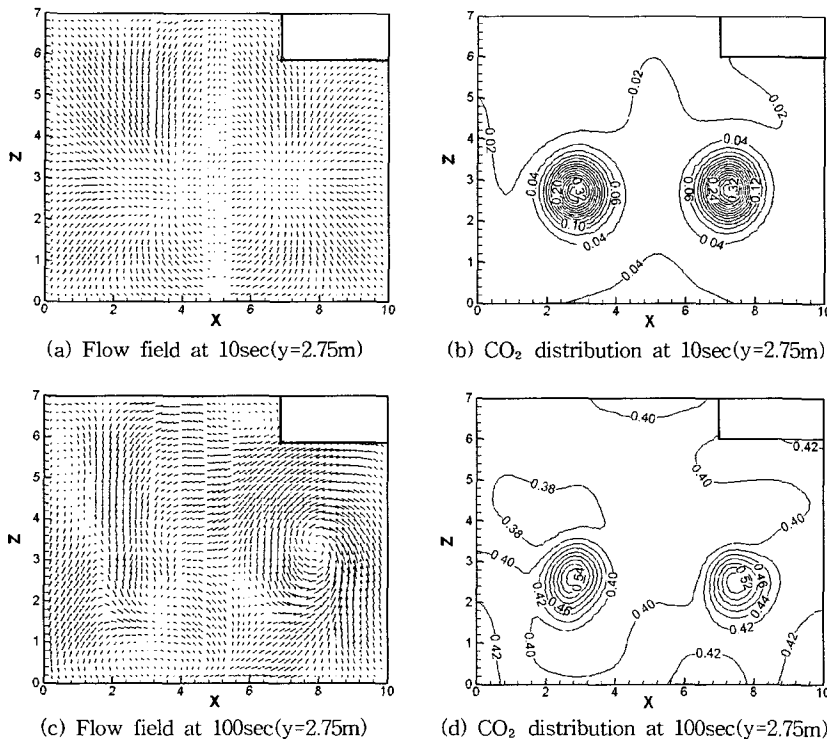


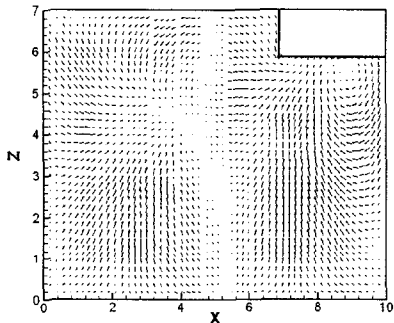
Fig. 3. The variation of transient flow and CO₂ distribution (The distance between CO₂ agent nozzle and wall is 2.75 m).

후측 벽으로부터 2.75 m 떨어져 배치한 경우로서 $y=2.75$ m 단면의 유동장과 CO₂ 농도분포를 나타내고 있다.

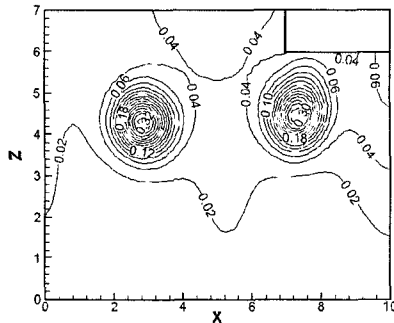
유동장을 보면 분사초기부터 각 벽으로부터 분사로 유입되는 기류가 형성되고 시간이 경과하면서 더 강해짐을 알 수 있다. 또한 우측 대칭면에 근접한 분사 주위에 반시계방향의 재순환 유동이 분사 후 30초부터 발생하고 있다. 이것은 밑바닥면과 전방대칭면 및 장애물 벽을 따라 발생하는 제트기류의 영향 때문인 것으로 사료된다.

농도장은 분사초기에는 균일한 농도분포를 보이지만

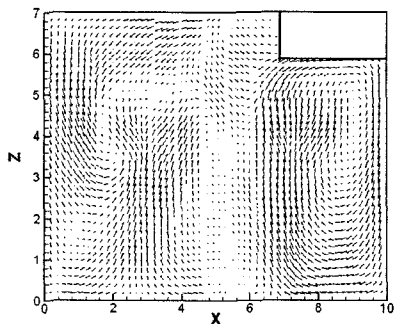
시간이 경과하면서 우측 대칭면 부근이 좌측 벽 부근보다 더 높은 농도대가 형성되고 있다. 이 같은 현상은 우측 대칭면에 근접한 분사 주위에 발생된 반시계방향의 재순환 유동의 영향 때문인 것으로 생각된다. 또한 CO₂ 질량전달이 각 벽으로부터 공간의 중앙으로 일어남을 알 수 있고 분사노즐과 후측 벽 사이가 분사노즐과 전방대칭면 사이보다 더 높은 등농도선대를 나타내고 있다. Fig. 2와 비교하여 보면 다른 유동형태를 보이고 각 시간대에서 더 높은 등농도선대가 나타나 분사노즐과 후측 벽 사이의 거리가 유동 및 질량전달 효과에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



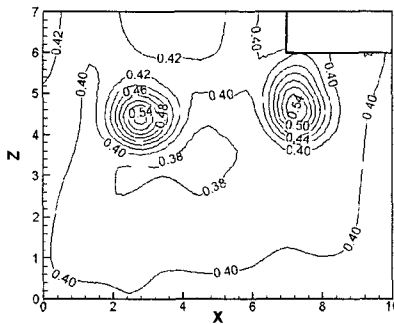
(a) Flow field at 10sec($y=2.75$ m)



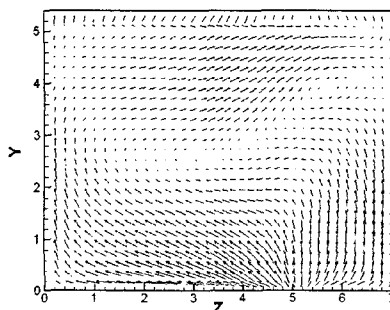
(b) CO₂ distribution at 10sec($y=2.75$ m)



(c) Flow field at 100sec($y=2.75$ m)



(d) CO₂ distribution at 100sec($y=2.75$ m)



(e) Flow field at 100sec($x=5.0$ m)

Fig. 4. The variation of transient flow and CO₂ distribution (The distance between CO₂ agent nozzle and wall is 4.25 m).

3.3 소화제분사노즐과 후측 벽 사이의 거리가 4.25 m일 경우

Fig. 4는 소화제 분사노즐이 좌측 벽으로부터 2.75 m, 후측 벽으로부터 4.25 m 떨어져 배치한 경우로서 $y=2.75$ m 단면의 유동장과 CO_2 농도분포를 나타내고 있다.

유동장은 분사초기부터 분사로 유입되는 형태의 유동을 보이고 장애물에 근접하여 시계방향의 재순환 유동이 발생하고 있다. 이 재순환 유동이 시간이 경과하면서 확장되어 전방대칭면으로부터 분사로 유입되는 기류가 강해짐을 보여주고 있다. 이 같은 현상은 분사노즐과 후측 벽 사이의 거리를 증가시킴으로 인하여 Fig. 3과는 상반되는 밀바닥면과 후측 벽 및 천장을 따르는 제트기류가 발생하기 때문인 것으로 여겨진다.

농도장에서는 분사노즐과 전방대칭면 사이의 영역에서 후측 벽과 분사노즐 사이의 영역보다 더 높은 농도분포를 나타내고 있어 Fig. 3과는 상반된 현상을 보여주고 있다. 이 같은 사실로부터 분사노즐과 후측 벽 사이의 거리가 CO_2 질량전달경로에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.4 소화제분사노즐과 벽 사이의 거리가 5.75 m일 경우

Fig. 5는 소화제 분사노즐이 좌측 벽으로부터 2.75 m, 후측 벽으로부터 5.75 m 떨어져 배치한 경우로서 $y=2.75$ m 단면의 유동장과 CO_2 농도분포를 나타내고 있다.

유동장을 보면 후측 벽면으로부터 분사로 유입되는 기류가 분사초기부터 나타나며 시간이 경과하면서 더 강해짐을 보이고 있다. 이는 분사기류가 밀바닥면에 이른 후 후측 벽과 천장을 따르는 제트기류의 영향으로 여겨진다. 또한 Fig. 2의 유동형태와 상반되는 경향을 보여주고 있다.

농도장은 후측 벽 부근에서 공간의 중앙보다 더 높은 농도분포대가 형성되고 있어 CO_2 질량전달이 후측 벽과 좌측 벽 및 후측 대칭면으로부터 공간의 중앙으로 일어남을 보여주고 있다.

3.5 소화제분사노즐과 벽 사이의 거리변화에 따른 농도분포

Fig. 6은 소화제 분사노즐과 벽 사이의 거리 변화에 따른 $y=2.75$ m, $z=3.5$ m에서의 농도분포를 시간에 따

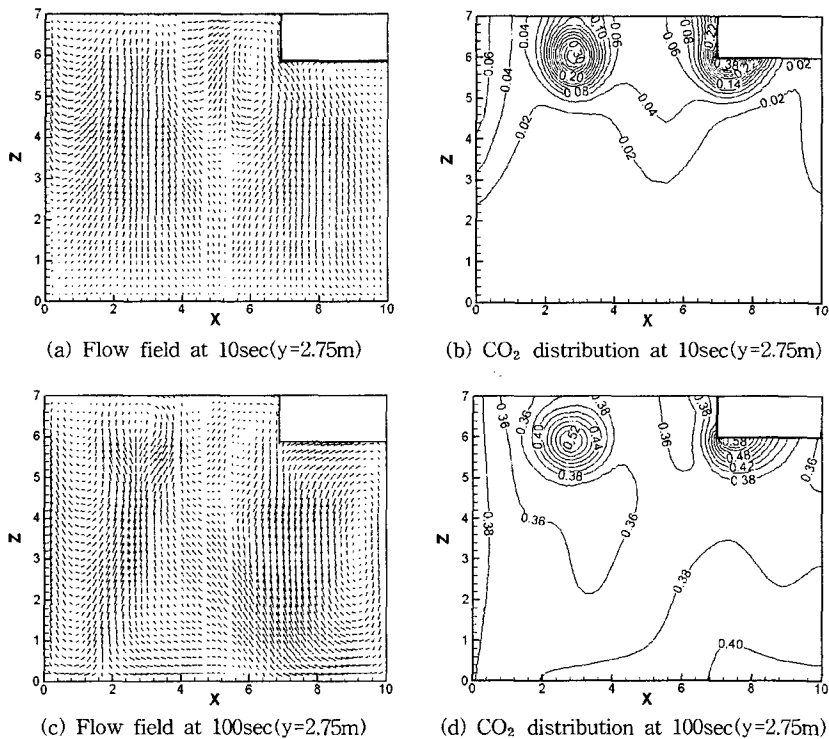
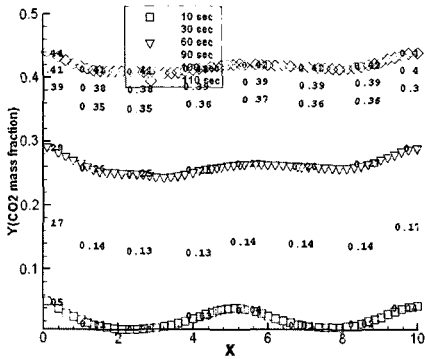
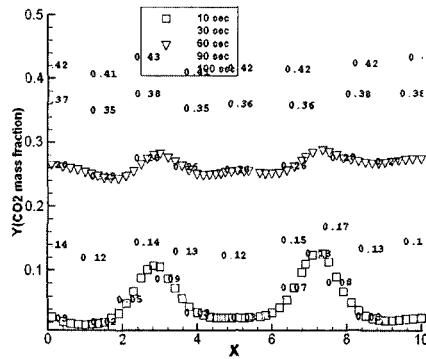


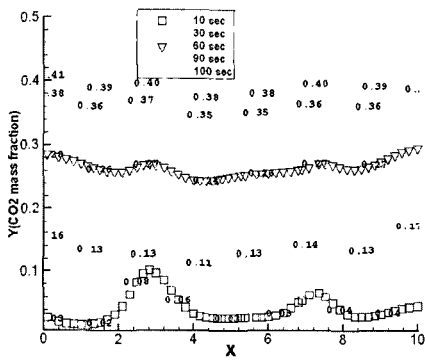
Fig. 5. The variation of transient flow and CO_2 distribution (The distance between CO_2 agent nozzle and wall is 5.75 m).



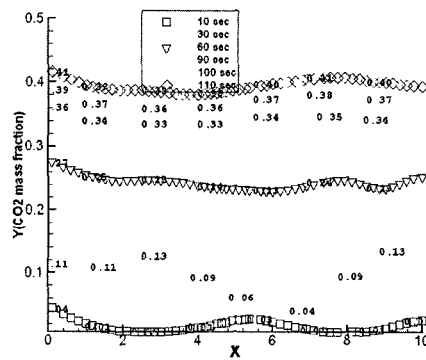
(a) The nozzle arranged at 1.25m from rear wall



(b) The nozzle arranged at 2.75m from rear wall



(c) The nozzle arranged at 4.25m from rear wall



(d) The nozzle arranged at 5.75m from rear wall

Fig. 6. CO₂ mass fraction with time and the distance between CO₂ nozzle and rear wall.

라 나타내고 있다.

그림(a)~(d)는 분사노즐과 후측 벽 사이의 거리가 각각 1.25 m, 2.75 m, 4.25 m, 5.75 m 떨어진 경우로서 서로 비교하여 보면 CO₂ 소화제 질량분율 0.38대 이상인 규정농도대가 그림(b)에서는 90초에서 나타나지만 그림(a), (c) 및 (d)에서는 100초대에서 나타나고 있어 그림(b)의 노즐배치조건이 소화에 가장 효과적일 것임을 알 수 있다. 또한 CO₂ 소화제 질량분율 0.4 이상의 농도선대의 형성은 그림(a)와 (d)의 경우는 110초에, 그림(b)와 (c)의 경우는 100초대에 이루어지고 있어 벽으로부터 2.75 m와 4.25 m 떨어지게 분사노즐을 배치하는 경우가 더 합당한 노즐배열임을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 방호공간에 CO₂ 소화제를 분사하였을 시 방호공간의 벽과 소화제분사노즐과의 거리가 유

동 및 CO₂ 소화제 전달효과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 CO₂ 소화제 노즐과 후측 벽과의 거리를 변화시키면서 전산모의실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 경우에서 장애물과 우측 대칭면 부근에 재순환 유동이 발생하여 방호공간의 중앙으로 확장되는 유동형태를 보이지만 CO₂ 소화제 노즐과 후측 벽 사이의 거리가 4.25 m 이상일 경우는 2.75 m 이하일 경우와 재순환 유동방향이 상반됨을 알 수 있다.
2. CO₂ 소화제 노즐과 후측 벽 사이의 거리가 2.75 m 일 경우는 분사기류가 밑바닥면에 이른 후 후측 벽과 천장을 따르는 벽면제트기류를 형성하고 4.25 m 일 경우는 밑바닥면, 전방대칭면과 천장을 따르는 벽면제트기류가 형성되어 유동을 지배한다.
3. 모든 경우에서 CO₂ 소화제 질량전달은 각 벽으로부터 방호공간의 중앙으로 일어나지만 CO₂ 소화제 노즐과 후측 벽 사이의 거리에 따라 CO₂ 소화제 노즐 전

후측 영역의 농도분포가 높거나 낮게 나타나 CO₂ 소화제 노즐과 후측 벽간 거리가 CO₂ 질량전달에 영향을 미침을 알 수 있다.

4. CO₂ 소화제 분사노즐과 후측 벽 사이의 거리 변화에 따른 농도분포 분석에서는 CO₂ 소화제 노즐과 후측 벽 사이의 거리가 2.75 m일 경우가 다른 경우보다 10초 빠르게 규정농도대가 나타나 가장 적합한 CO₂ 소화제 노즐배치로 생각된다.

기호설명

μ_{eff}	: $\mu + \mu_t$
\bar{u}	: x축 방향의 favre 평균속도, [m · s ⁻¹]
\bar{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

1. 박승민, “가스계 소화설비의 개구부를 통한 소화약제 누출 및 보상문제에 관한 소고”, 한국화재소방학회, 제16권 제3호, pp77-83(2000).
2. 김윤중, 윤명오, “용기 일체형 가스소화 방식의 오리피스 방사특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회, 제16권, 제2호, pp2-9(2002).
3. 김관선, 손봉세, “Simple algorithm을 이용한 화재실의 열 유체의 수치적 해석”, 한국화재소방학회, 제6권, 제1호, pp2-9(1992).
4. J. X. Wen, L. Y. Huang, E. M. Amin, and P. Nolan, “Modeling Sooting Jet Fires in a Large Scale Off-shore Compartment”, Twenty Seventh Symposium on Combustion/The Combustion Institute, pp2881-2886(1998).
5. 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, pp695-703(1981).
6. 김재덕, 김영래, 홍승태, “불활성 가스계 혼합소화약제의 n-Heptane 불꽃소화농도 및 배가스 조성”, 한국화재소방학회, 제16권, 제3호, pp77-83(2002).
7. 박찬수, 최주석, 전철균, “고정식 소화장치 노즐조건에 따른 CO₂ 전달특성”, 한국화재소방학회, 제18권, 제2호, pp41-48(2004).