

노즐 위치 및 분사각이 공기유동 및 CO₂소화제 전달특성에 미치는 영향

박 찬 수 *

The Effect of Nozzle's Location & Injection Angle on the Characteristics of Air Flow and CO₂ Extinguishant Transfer

C-S Park *

Key words : CO₂extinguishant(이산화탄소 소화제), nozzle location & injection angle(노즐위치 및 분사각), Recirculation flow(재순환 유동)

Abstract

To analyze the characteristics of air flow and CO₂extinguishant transfer when extinguishant is injected into a closed space similar to marine engine room, a numerical simulation on a space was performed. Flow fields and CO₂concentration fields are calculated according with the variation of the location & injection angle of nozzles. The results of simulation showed that the pattern of recirculation flow was affected greatly with the location & injection angle of nozzles and such a recirculation flow accelerated mass transfer of CO₂and greatly affected the diffusion process of CO₂extinguishant. It is considered that this result of this study can be useful to designing the arrangement of nozzles for the CO₂ fire fighting equipments in a marine engine room.

1. 서 론

선박에서 화재가 발생하면 대부분 대형 화재로 확대되어 해난사고 발생 및 선박에 큰 손상을 초래하게 된다. 또한 선박의 특수성(고립성) 때문에 큰 인명피해와 재산피해가 필연적으로 동반되게 된다.金子¹⁾의 보고서에 따르면 선박화재사건의 원인을 인적원인과 물적원인으로 분류할 때, 인적원인은 83.3%, 인적 및 물적 원인은 3.2%, 물적 원인

은 1.6%, 불가항력은 1.6%, 원인불명은 9.5%와 기타 0.8%을 차지하고 있어 인적 원인이 선박화재 원인의 주류를 이루고 있다. 또한 매년 선박 화재의 건수가 약 200건씩 증가하는 추세라고 보고되고 있으며, 그 중에서 해난심판에 회부되는율이 38%에 해당한다고 보고하고 있다.

착화물에 따른 화재의 비중을 분리하여 보면, 주기관, 보조기관 및 보일러의 연료유에 의한 화재가 57.6%을 차지하고, 스토브에 의한 화재도 24.2%

* 목포해양대학교 기관공학부

을 차지하여 이 두종의 착화물이 선박화재의 81.8%를 차지하고 있는 실정에 있다. 따라서 이들 착화물에 의한 화재중 57.6%의 비중을 차지하고 있는 연료유에 의한 화재는 기관실의 화재에 해당되며 선박 대형화재의 원인이기도 하다. 이러한 중요성 때문에 해상인명안전국제협약(SOLAS)에서는 기관실, 펌프실 및 보일러실 등과 같은 유류 화재 발생 가능성이 높은 구역에 영구적인 고정소화장치를 설치하도록 규정하고 있다.

국제협약에 합당한 고정식 소화장치에는 소화제의 종류에 따라 고정 포말 소화장치, 고정 이산화탄소 소화장치, 고정 할론 소화장치 및 고정 분말소화장치 등이 있으며, 이 중에서 고정식 이산화탄소 소화장치를 기관실에 설치한 선박이 주류를 이루고 있다. 또한 국제해사기구(IMO)에서 채택한 선원의 훈련, 자격증명 및 당직근무의 기준에 관한 국제협약(STCW)규정에서는 선원은 소화 훈련과정을 의무적으로 이수하도록 하고 있다. 따라서 선박 기관실 화재로 인한 인명 및 재산피해를 최소화하기 위해서는 기관실의 화재에 대한 소화 및 화재예방대책이 치밀하게 수립되어 있어야 하며, 이러한 소화 대책을 수립하는 데는 소화제 특성이나 소화제 투입 방법 등에 따른 소화특성 등 기초적인 소화관련 자료들이 필요하다. 하지만 선박 건조 시 기관실 용적에 따른 CO₂공급량만을 산출하여, 일정한 시간 내에 방사하여야 한다는 조건만 만족시키면 규칙에 적합한 것으로 판정하고 있는 실정이다. 그러나 선종과 선박의 크기에 따라 기관실의 형태와 치수가 다르므로, CO₂소화장치 설비 시 이러한 사항들을 고려하여야 한다. 즉 CO₂소화제 노즐의 위치, 노즐의 수 및 노즐의 분사각에 따른 기류유동이나 CO₂소화제 전달특성 등이 CO₂소화장치 설비 시 고려되어 져야 한다. 그러므로 선박 기관실 고정식 소화장치의 주류를 이루고 있는 고정식 이산화탄소 소화장치에 대한 기초적인 연구가 필요하며, 특히 기관실내에 CO₂소화제를 방사할 때 노즐의 분사 조건에 따른 유동의 특성이나 CO₂소화제의 전달특성에 관한 연구가 필수적이라 할 수 있다.

지금까지의 분사제와 소화와의 상관관계에 대한 연구들을 살펴보면, Magee 등¹⁾은 플라스틱 화

재를 대상으로 수분무를 이용한 소화실험을 플라스틱의 연소율과 외부에서 가해지는 열유속과의 상관관계에 관점을 두어 수행하였고, Mike 등²⁾은 목재 화재에 대하여 수분무를 이용한 소화연구를 수행하였다. 장등³⁾은 유류화재에 수분무를 적용하여 소화에 대한 실험을 수행하여 적용 가능성을 보여주었다. 지금까지의 연구들은 육상화재 시에 소화제로서 물을 주로 사용하고 있으며, 이와 유사한 연구들이 주류를 이루고 있어서, 고정식 CO₂소화설비를 갖추고, 기관실 및 화물창 내에 CO₂를 직접 분사하여서 화재를 소화하는 방식의 선박 화재에 대한 연구들은 거의 찾아 볼 수가 없는 실정이다. 따라서 선박의 화재에 대한 연구가 필요하며, 특히 선박화재의 대부분을 차지하는 기관실 화재에 소화제로 CO₂를 분사하였을 시 소화특성에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 기관실 화재 발생의 초기 진화에 실패했을 때, 최후의 소화방법으로 사용하는 CO₂소화제 방사 시 노즐의 위치, 수 및 노즐의 분사각이 기관실 유사 공간내 기류유동특성 및 소화제의 전달특성에 미치는 영향을 분석하여 선박소화설비의 기초적인 자료를 제공하는데 목적이 있다.

2. 이론해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 선박의 기관실을 2차원적 공간으로 설정하였다. 공간의 중앙에는 선박기관실의 기관 및 기기들에 상응하는 장애물이 위치한다. 공간은 1, 2층으로 나누어지며 중심부에서 연돌로 연결되는 상부공간이 수직 상 방향으로 길게 뻗어있다. 공간의 시간에 따른 유동특성과 CO₂소화제의 전달 특성을 예측하기 위하여 각 층의 노즐위치 및 노즐 분사각을 변화시켜 해석하고자 하며, 공간 내부의 온도는 15℃로 일정하게 유지한다. 이러한 상태에서 CO₂소화제를 공간으로 분사시키면서 시간경과와 함께 나타나는 특성들을 검토하고자 한다.

2.1 해석모델

Fig. 1에 나타낸 공간은 실제 선박의 기관실 치수로서 폭 14.5 m, 높이 13 m이며 공간은 좌우 대

칭조건을 가지므로 대칭면을 중심으로 반쪽 부분에 대해서만 계산을 하였다. 노즐의 위치는 각 층 천장의 중앙을 기준으로 좌우로 변화시켰으며, 노즐의 분사각은 0°~45°까지 변화시키면서 계산을 수행하였다

2.2 지배방정식

유동장을 해석하기 위해 사용되는 방정식은 2종 유체 등온장, 비압축성 유체를 가정하고, 비정상 상태에 대해 유도한 것으로 연속방정식, 운동량방정식 및 화학종보존방정식은 다음과 같다.

1) 연속방정식

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

2) 운동량 방정식

▷x방향

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u} \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{u} \bar{v})}{\partial y} \\ & - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

▷y방향

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u} \bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \bar{v} \bar{v})}{\partial y} = \\ & - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - \rho g \end{aligned} \tag{3}$$

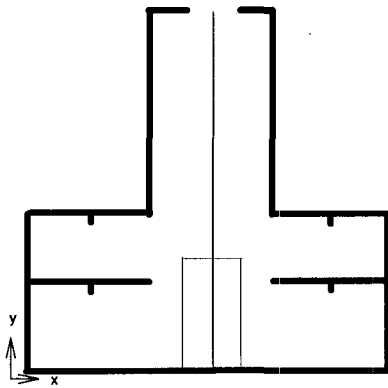


Fig. 1 Schematic diagram

3) 화학종 보존 방정식

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

4) 난류 운동 에너지 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{v}k) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v}k) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G - C_D \rho \varepsilon \end{aligned} \tag{5}$$

5) 난류 소멸율 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{u}\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v}\varepsilon) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \end{aligned} \tag{6}$$

6) 이상기체 상태방정식

$$p = \rho \bar{R} T \sum_i \frac{\bar{Y}_i}{W_i} \tag{7}$$

여기서

- $\mu_{eff} : \mu + \mu_t$
- $\bar{u} : x$ 축 방향의 평균속도, $[m \cdot s^{-1}]$
- $\bar{v} : y$ 축 방향의 평균속도, $[m \cdot s^{-1}]$
- $\mu_{eff} : \text{유효점성계수, } [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$
- $\mu : \text{점성계수, } [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$
- $\mu_t : \text{난류점성계수, } [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$
- $\rho : \text{기체밀도, } [kg \cdot m^{-3}]$
- $g : \text{중력가속도, } [m \cdot s^{-2}]$

k : 난류운동에너지, [$m_2 \cdot s^{-2}$]
 ϵ : 난류소멸율
 G : 난류운동에너지 생성항
 C, C_1, C_2 : 실험적 난류모델상수

\bar{Y}_i : i 종 기체평균질량분율
 W_i : i 종기체분자량, [$kg \cdot mol^{-1}$]
 D : 확산계수, [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 \bar{R} : 일반기체상수
 T : 온도, [K]
 P : 압력, [$kg \cdot m^{-2}$]

2.3 초기 및 경계조건

최초의 실내공간은 공기가 가득 차 있는 상태이고, 공간의 중앙에 장애물인 주기판이 위치하고있으며, 온도는 상온 288K, 압력은 대기압, x 및 y방향의 속도성분은 “0”, 이산화탄소 질량분율은 “0”이다. 경계조건으로 모든 벽면에서의 x 및 y 속도성분은 “0”이고, 질량확산율도 “0”이며, 각층의 분사노즐(폭:0.15m)에서는 4m/s의 속도로 이산화탄소가 분사되고 있는 것으로 하였다. 배출구 초기조건은 실내공간의 초기조건과 동일하며 공간의 최 상부에 위치하고있다.

3. 수치 해석

본 연구에서는 검사체적에 기초한 유한차분방법(control-volume basic finite difference method)을 이용하는 상용 code인 Fluent 5.0 버전을 사용하였다. up-wind scheme을 사용하였으며, 난류모델로는 k-ε모델을 사용하여 운동방정식에서 유동항의 평균을 취할 때 생기는 레이놀즈응력(Reynolds stress)항을 해결하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 실내 공간에 CO₂소화제 분사 시 노즐의 위치 및 노즐 분사각에 따른 유동특성 및 전달특성을 예측하기 위하여 0 ~ 20초까지를 계산시간으로 하였으며, CO₂노즐의 위치 및 분사각을 변화시켜서 공간 내 기류유동 및 CO₂소화제 농도분

포변화를 고찰하였다. 시간 영역대를 0 ~ 20초로 선정한 것은 CO₂분사시 초기의 기류유동 및 CO₂소화제의 전달경로가 초기 소화에 지배적인 영향을 미치고 있다고 생각되기 때문이다.

4.1 1, 2층 노즐이 천장의 중앙에 위치할 때

Fig. 2는 배출구가 공간의 최 상부에 위치하며, CO₂소화제 노즐이 모두 천장중앙에 위치하고, 분사속도는 4m/s일 때의 시간의 변화에 따른 속도장 및 CO₂농도장을 나타내고 있다.

Fig. 2의 (a)는 CO₂ 소화제 분사가 시작된 후 2초 경과한 때 속도장을 나타낸 것으로서 1, 2층 CO₂노즐우측은 상부영역에 반시계 방향의 재순환 유동이, 좌측은 하부영역에 시계방향의 재순환 유동이 형성되었으며, 중앙 장애물 상부영역은 배출구를 향하는 유동이 형성되고 있다. 또한 재순환 유동중심이 CO₂ 노즐 좌측은 공간의 하부 영역에, 우측은 공간의 상부 영역에 위치하는 것을 볼 수 있다. 노즐우측은 밑바닥면에 도달하기 전부터 배출구를 향하는 유동을 형성하기 때문이고, 좌측은 밑바닥면에 도달하여 벽면 기류를 형성한 후 상승하여 다시 재순환 유동에 유입되는 유동을 형성하기 때문으로 분석된다.

Fig. 2의 (c)는 CO₂분사 후 10초 경과한 때의 속도장으로서 1, 2층 재순환 영역이 확대되고있다. 2층 노즐 우측영역의 재순환 유동중심이 상부측에서 우측 하부측으로 이동 확장되고 있음을 알 수 있다. 이 같은 현상은 분사 기류가 밑바닥면에 이른 후 배출구를 향하는 주 유동을 형성하기 때문으로 여겨진다. 반면에 노즐 좌측 영역은 재순환 유동 중심이 하부측으로 빠르게 이동하여 밑바닥면에 이른 후 더 진행이 불가능하여 하부 측에 재순환 유동 중심이 머물면서 밑바닥 면과 좌측 벽면을 따르는 벽면기류를 형성시키기 때문에 하부에서 상부측으로 재순환 유동영역이 확장됨을 알 수 있다.

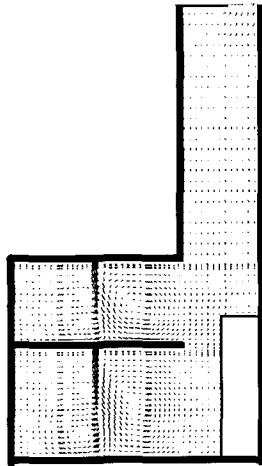
Fig. 2의 (e)는 20초 경과한 때의 속도장을 나타내고 있다. 모든 영역에서 재순환 유동이 확대되고 있음을 알 수 있다. 특히 2층 노즐 우측 영역의 재순환 유동은 배출구 측으로 굴곡 되는 재순환 유동형태를 볼 수 있으며, 1층 노즐 우측 영역은 재순환 유동중심이 우측으로 이동되어 확장되고있다. 이 같

은 현상은 분사된 CO₂ 기류가 1층은 밑 바닥면과 장애물벽면을 따르는 벽면기류를 형성한 후 2층의 밑 바닥면과 장애물상부좌측벽면을 따라 형성되는 상승기류와 합류하여 배출구를 향하는 주 유동을 형성함에 따라 나타나는 현상으로 생각된다.

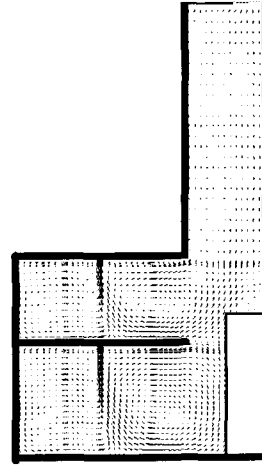
Fig. 2의 (b), (d) 및 (f)는 시간 경과에 따른 CO₂ 질량분율의 변화를 나타내고 있다. 선박소화설비 규정상 이산화탄소를 일정한 체적 내에 방사했을 때 13.8% 이하의 산소체적농도로 떨어뜨릴 수 있어야 한다고 되어 있다. 해상인명안전국제협약 (SOLAS) 에 의하면 산소체적농도 13.8%는 CO₂ 질량분율 0.45에 해당하므로 CO₂ 질량분율 0.45

이상의 이 영역을 “소화가능영역대”라고 부르기로 한다.

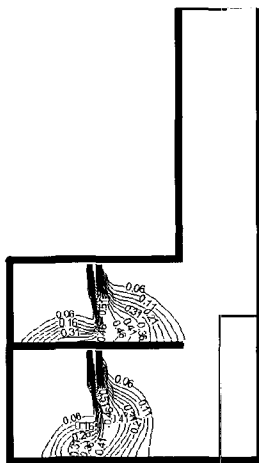
Fig. 2의 (b)는 2초 일 때의 경우로서 노즐의 좌측공간에서는 밑바닥면에 가까운 분사기류의하부에서 질량전달이 활발한 반면 노즐의 우측공간에서는 분사기류의 중간부에서 질량전달이 활발하여 등농도곡선이 확장되었음을 볼 수 있다. 이 같은 현상은 CO₂분사기류에 의해 발생하는 시계방향과 반 시계방향의 재순환 유동에 의해 형성된 유동이 CO₂질량전달을 촉진했기 때문으로 분석된다. 또한 소화가능영역대는 분사 노즐 바로 밑 부분을 제외하고는 전반적으로 형성되지 않고 있음



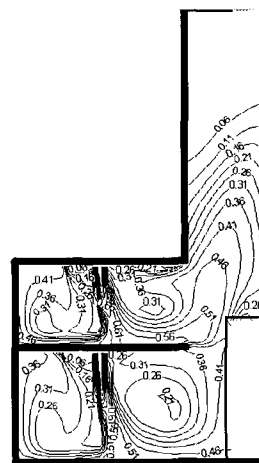
(b) Time = 2 sec



(c) Time = 10 sec



(b) Time = 2 sec



(d) Time = 10 sec

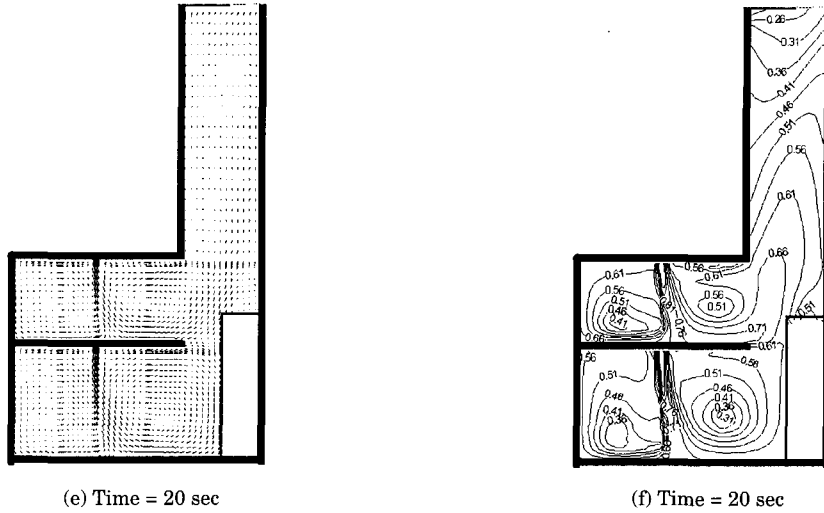


Fig. 2 Velocity & CO₂Concentration fields (Nozzle : Center of ceiling)

을 알 수 있다.

Fig. 2의 (d)는 10초 경과한 경우로서, 1, 2층노즐 좌측영역은 밀바닥에서 좌측벽면으로 질량전달이 일어나고, 1, 2층 노즐 우측은 밀바닥 면으로부터 영역의 중간부 및 우측 장애물 측으로 등농도선이 많이 확장되어 있다. 이 같은 현상은 CO₂분사기류에 의해 발생된 재순환 유동중 좌측은 밀바닥면과 좌측벽을 향하는 유동이, 우측은 밀바닥면과 장애물을 향하는 유동이 각각 좌측벽 및 장애물 방향으로 CO₂질량전달을 촉진했기 때문으로 생각된다.

소화가능영역대는 1,2층에서 밀바닥 면을 따라 좌, 우측 영역으로 확장되기 시작하며, 특히 2층 우측영역은 밀바닥면과 장애물벽을 따라 소화가능영역대가 주 유동의 방향으로 더 확장됨을 알 수 있다.

Fig. 2의 (f)는 20초 경과한 경우로서 1, 2층 노즐 좌측 영역은 재순환 유동 중심이 위치하는 부분을 제외하고 거의 전 영역이 소화가능영역대의 농도분포를 나타내고, 2층 노즐 우측영역은 전 영역이 소화가능영역대의 농도분포를 보이고

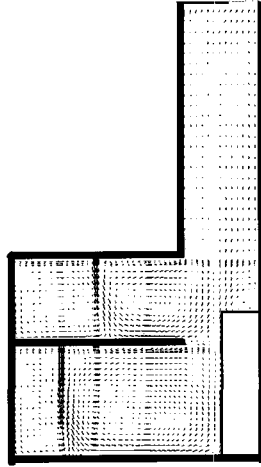
있으며, 1층 노즐 우측 영역은 재순환 유동 중심이 위치한 부분에서 0.46이하의 등농도선대를 나타내고 있다. 밀바닥면과 좌측벽면 및 장애물벽면

에서 높은 CO₂농도를 나타내고 내부공간으로 갈수록 낮은 등농도선대의 분포를 나타내는 것은, 벽면제트형태로 CO₂가 벽을 따라 내부공간으로 전달되기 때문이다.

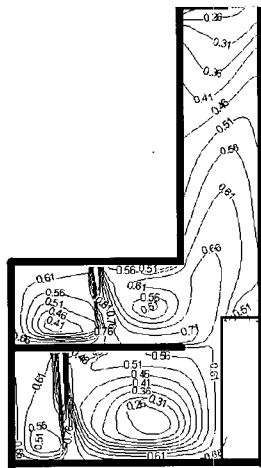
장애물 상부 공간에서는 장애물 수직벽의 상방향으로 등농도선이 멀리까지 신장된 것을 볼 수 있는데 이는 배출구를 향하는 주 유동의 영향으로 해석된다.

이상으로부터 1, 2층 노즐이 천장의 중앙에 위치할 때는 노즐 우측영역은 반시계방향의 재순환 유동이 공간의 상부측 영역에서 발생하여 밀바닥면과 장애물을 향해 이동 발달하면서 CO₂의 질량전달을 촉진하고, 노즐 좌측영역은 시계방향의 재순환 유동이 초기에 하부에 형성된 후상부영역으로 확장되면서 CO₂의 질량전달을 촉진한다. CO₂분사 약 10초 후부터 1, 2층의 밀바닥 면을 따라 좌, 우측 영역으로 소화가능영역대가 형성되기 시작하여, 좌측영역은 밀바닥과 좌측벽면을 따라, 우측영역은 밀바닥과 장애물 벽을 따라 공간의 내부영역으로 확장되며, CO₂분사 약 20초 후에는 재순환 유동 중심부를 제외한 영역이 소화가능영역대 이상의 CO₂ 질량분포를 나타냄을 알 수 있다.

- 4.2 1층 노즐은 천장의 좌측,
- 2층 노즐은 천장의 중앙에 위치할 때



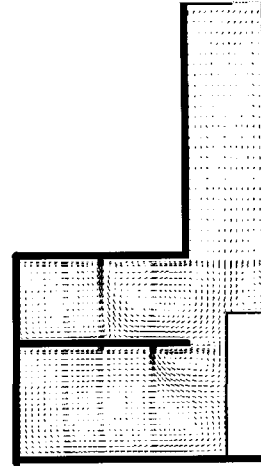
(a) velocity vector



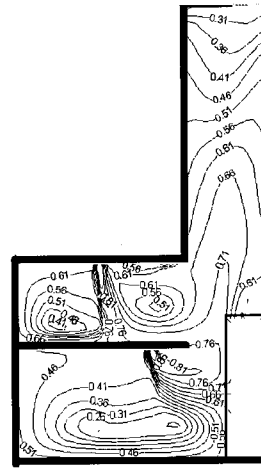
(b) CO₂ Contour

Fig. 3 Velocity & CO₂ Concentration fields at 20 sec (1st floor, nozzle : Left side of ceiling, 2nd floor, nozzle : Center of ceiling)

Fig. 3은 Fig. 2와 1층 노즐 위치만 천장의 좌측으로 1m이동 변화시킨 경우로서 20초 때의 속도장 및 CO₂ 농도장을 나타내고 있다. Fig. 2의 (e) 및 (f)와 비교해보면, 1층 노즐좌측 영역에서는 전 영역에 발달된 시계방향의 재순환 유동이 형성되어 소화가능영역대가 밀바닥 면과 좌측벽 면을 따라 공간의 상부영역으로 확장되고, 1층 노즐 우측영역은 소화가능영역대가 밀바닥면과 장애물 벽을 따라 보다 폭넓게 형성되어있다. 장애물 상부 수직공간에서의 CO₂ 분포는 매우 유사하다. Fig.



(a) velocity vector



(b) CO₂ Contour

Fig. 4 Velocity & CO₂ Concentration fields at 20 sec (1st floor, nozzle : Right side of ceiling, 2nd floor, nozzle : Center of ceiling)

3의 (b)에서는 1층 노즐 좌측영역과 2층 노즐 우측영역은 전 영역이 소화가능영역대 이상의 CO₂ 질량분포를 나타내고, 1층 노즐 우측영역은 재순환 유동 중심부근에서 0.46이하의 등농도선대가 확장됨을 알 수 있다. 이것은 분사기류가 밀바닥면과 장애물 벽을 따르는 벽면기류를 형성하지만 노즐의 위치 변화로 인하여 재순환 유동이 넓은 영역에 걸쳐 형성되기 때문에 공간내부영역으로의 CO₂ 질량전달이 활발치 못하여 나타나는 현상으로 생각된다. 이 같은 사실로부터 노즐 위치변화가 벽면

제트기류 및 재순환 유동형성과 CO₂질량전달에 지배적인 영향을 미친다는 것을 예측 할 수 있다.

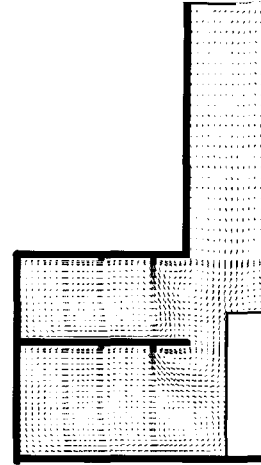
4.3 1층 노즐은 천장의 우측에,
2층 노즐은 천장의 중앙에 위치할 때

Fig. 4는 Fig. 2와 동일조건 하에서 1층 노즐 위치만 우측으로 1m 이동시킨 경우로써 20초 때의 속도장 및 CO₂농도장을 나타내고 있다.

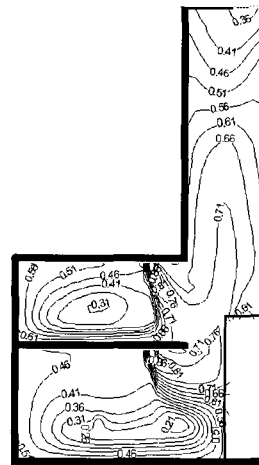
Fig. 2의 (e) 및 (f)와 비교하면, 1층 노즐 우측 영역에서는 분사 초기부터 장애물을 향해 사선방향으로 진행하다 장애물 벽을 따라 상승하는 U자형 유동이 강하게 형성되어 재순환 유동이 크게 발달하지 못하고 공간상부 노즐 부근에 국한되어 형성된다. 좌측은 재순환 유동영역이 확장되어 노즐의 하부영역까지 이른 후 좌측에 형성된 재순환 유동영역에 편입됨이 나타난다. 소화가능영역대인 0.45 이상의 등농도대가 10초 경과시 1층 노즐우측상부영역에 걸쳐서 형성되고, 좌측영역은 재순환 유동중심부근에서 0.46이하의 낮은 등농도선대가 확장되어 나타나지만 장애물 주위에는 소화가능영역대 보다 높은 CO₂질량분포를 나타내어 기관실기기를 상징하는 장애물 부근소화에는 더 효과적일 것으로 생각된다.

4.4 1, 2층 노즐이 모두 천장의 우측에 위치할 때

Fig. 5는 Fig. 2와 동일 조건 하에서 1, 2층 노즐 위치만 천장의 우측으로 1m 이동시킨 경우로써 20초 때의 속도장 및 CO₂농도장을 나타내고 있다. Fig.2 (e) 및 (f)와 비교하면, 1, 2층 노즐의 좌측영역은 재순환 유동이 좌측벽면까지 이른 후 노즐의 하부 공간까지 확장되는 유동을 형성하지만, 각종의 재순환 유동중심부근에서 0.46이하의 등농도선대가 나타나며, 2층 소화가능영역대는 밀바닥면을 따라 형성된다. 우측영역은 배출구를 향하는 U자형 유동이 형성되어서 재순환 유동이 공간상부영역에서만 발생하고, 10초대가 경과하면 1, 2층 노즐우측장애물주위에 소화가능영역대 이상의 CO₂질량분포가 형성되어서 장애물 부근 영역으로 공기 유입을 차단시킴으로 장애물주위에 화재가 발생했을 시 소화에 효과적일 것으로 여겨진다.



(a) Velocity vector



(b) CO₂ contour

Fig. 5 Velocity & CO₂Concentration fields at 20 sec (Nozzle : Right side of ceiling)

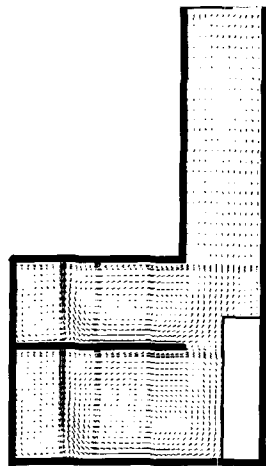
4.5 1, 2층 노즐이 모두 천장의 좌측에 위치할 때

Fig. 6은 Fig. 2와 동일한 조건 하에서 노즐의 위치만 모두 1, 2층 천장의 좌측으로 1m 이동시킨 경우로써, 20초 때의 속도장과 CO₂농도장을 나타내고 있다.

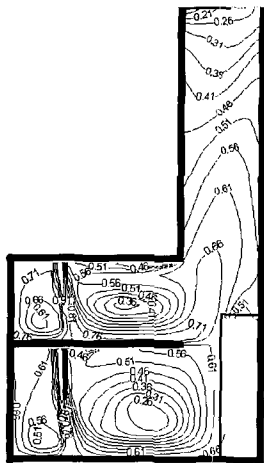
Fig. 2의 (e) 및 (f)와 비교하면, 노즐 좌측영역은 재순환 유동이 좌측벽면을 따라 전 영역에 걸쳐 형성되고, 소화가능영역대도 좌측벽면을 따라 공간상부영역으로 확장되며 크게 형성된다. 1, 2층 노

즐 우측영역은 밀바닥 면과 장애물 벽을 따라 형성되는 벽면기류가 배출구를 향하는 안정적인 주 유동을 형성하기 때문에 재순환 유동이 배출구와 장애물 측으로 확장되고, 소화가 능영역대도 밀바닥 면과 장애물 및 배출구를 향하여 확장되나, 각층의 재순환 유동 중심이 위치하는 부근은 기류 유동이 미미하기 때문에 질량전달이 활발하지 못하여 0.46이하의 등농도선대가 형성되고 있다.

이상으로부터 CO₂분사노즐 위치 변화가 각 층 영역내의 벽면기류 형성과 재순환 유동 크기 및



(a) Velocity vector



(b) CO₂ contour

Fig. 6 Velocity & CO₂ Concentration fields at 20 sec (Nozzle : Left side of ceiling)

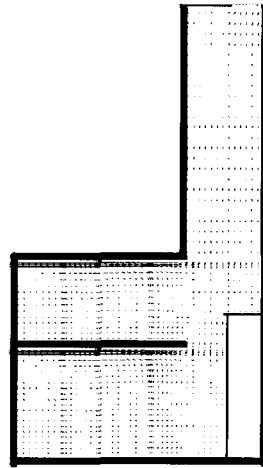
CO₂ 화제의 질량전달에 지배적인 영향을 미침을 예측할 수 있다.

4.6 1, 2층 노즐이 각 층 좌측벽면 최상부에 위치하고 노즐 분사각이 0° 일 때

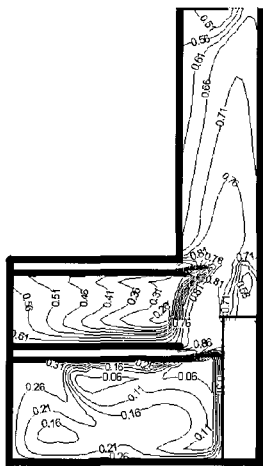
Fig. 7은 Fig. 2와 동일한 조건 하에서 노즐이 각 층의 좌측벽면 최상부에 위치하고, 노즐분사각도 0° 일 때 20초 후의 속도장과 CO₂농도장을 나타내고 있다. 1층은 공간의 상부영역 중앙부근에서 시계방향의 재순환 유동이 발생하여 공간 하부측으로 이동 발달한 후 공간 중앙 부근에 반시계방향의 재순환 유동을 형성하고, 장애물 하부 모서리와 공간의 좌측벽 하부 모서리에 시계방향의 별도의 재순환 유동이 발생하고 있다. 이는 분사초기에는 분사기류 바로 밑의 공기층만 분사기류의 영향을 받지만 장애물과 밀바닥면 및 좌측벽면을 따르는 벽면기류가 발달된 후에는 전 영역이 이 벽면기류의 영향을 받기 때문에 나타나는 현상이며, 또한 2층 영역에서 배출구를 향하는 주 유동이 형성된 후부터는 이 벽면기류의 영향이 약해지면서 공간하부 양 모서리 부근에서 별도의 재순환 유동이 발생하는 것으로 여겨진다. 2층은 노즐 하부 공간에 미약한 재순환 유동이 넓은 영역에 걸쳐서 형성되고, 장애물 좌측 2층 우측영역에 별도의 재순환 유동이 발생하고 있다. 이는 1층의 분사기류가 장애물에 이른 후 장애물벽면을 따르는 상승기류와 하강기류를 형성하는데 이 상승기류와 2층의 분사기류가 충돌한 후 하강하는 유동을 형성시키고, 다시 밀바닥면을 따르는 벽면기류를 형성하기 때문으로 여겨진다. 농도장을 보면, 장애물 주위에 소화가능영역대 보다 높은 0.76 이상의 CO₂질량분포를 보이고, 1, 2층 모두 좌측 벽면측에서 공간중앙 및 우측영역으로 CO₂질량전달이 일어남을 알 수 있다. 이것은 장애물과 밀바닥면 그리고 좌측벽면을 따라 형성되는 벽면기류의 영향 때문에 나타나는 현상으로 여겨진다. 1층 영역은 0.26이하의 낮은 CO₂ 질량분포를 나타낸다.

4.7 1, 2층 노즐이 각 층 좌측벽면 최상부 위치하고 노즐 분사각이 30° 일 때

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 조건 하에서 노즐 분사



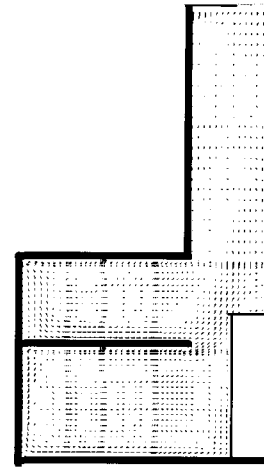
(a) Velocity vector



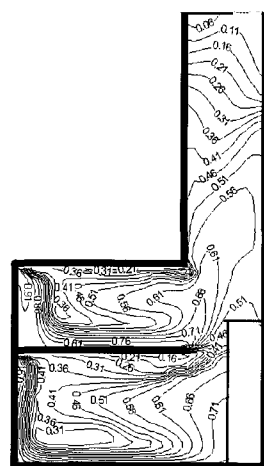
(b) CO₂contour

Fig. 7 Velocity & CO₂Concentration fields at 20 sec (Nozzle injection angle = 0°)

각이 30° 일 때 20초 후의 속도장과 농도장을 나타내고 있다. 2층 영역 모두 분사초기부터 좌측벽면과 밀바닥면 및 장애물벽면을 따르는 벽면기류가 형성되어 전 영역에 영향을 미치는 반시계방향의 재순환 유동이 발생한다. 1층 영역은 분사초기에는 전영역에 걸쳐 영향을 미치는 반시계 방향의 재순환 유동이 형성되지만 10초 후부터는 공간의 하부측은 반시계방향의 재순환 유동이 발생하고, 상부측은 별도의 시계방향재순환유동이 발생한다. 이것은 장애물벽면을 따라 형성된 벽면기류가 2층



(a) Velocity vector



(b) CO₂contour

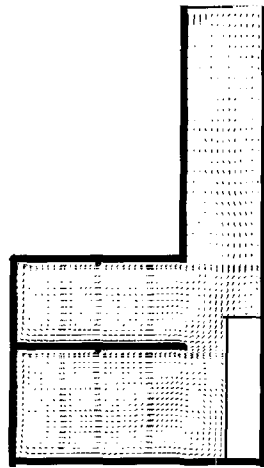
Fig. 8 Velocity & CO₂Concentration fields at 20 sec (Nozzle injection angle = 30°)

영역으로 원활히 합류하지 못하고 다시 공간의 중앙영역으로 하강하는 유동을 발생시킨 후 상승하여 천장벽면을 따르는 벽면기류를 형성하는 S자형 유동을 형성시키면서 2층의 상승기류와 합류하기 때문에 나타나는 현상으로 여겨진다. 농도장을 보면, 장애물이 있는 공간우측영역에서 좌측영역으로 CO₂질량전달이 일어나고 있어 노즐분사각 0° 일때와 정반대의 질량전달 경향을 나타내고 있다. 특히 밀바닥면과 장애물부근에서 소화가능영역 대 이상의 CO₂질량분포가 나타나고 있어, 기관실

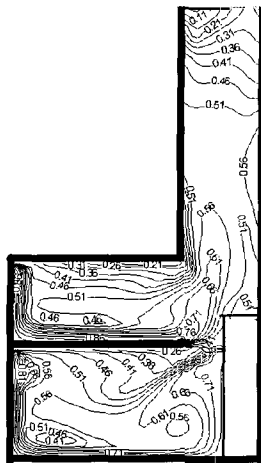
화재가 기기주위와 기관실 빌지 및 밑바닥면에서 주로 발생함을 고려할 때 소화에 효과적일 것으로 생각된다.

4.8 1, 2층 노즐이 각 층 좌측벽면 최상부에 위치하고 노즐분사각이 45°일 때

Fig. 9는 Fig. 7과 동일한 조건 하에서 노즐 분사각이 45°일 때 20초 후의 속도장과 CO₂농도장을 나타내고 있다. 1, 2층 모두 분사초기에는 노즐 바로 밑 영역에서 반시계방향의 재순환 유동이 발생하여 공간의 전 영역으로 확장된 후 1층은 장애물



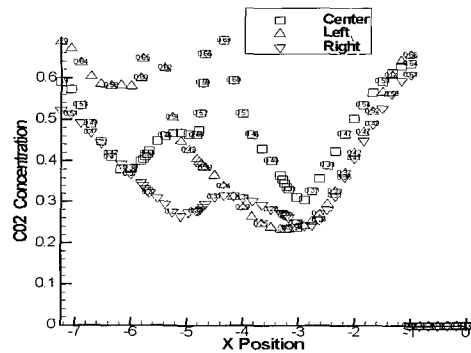
(a) Vector field



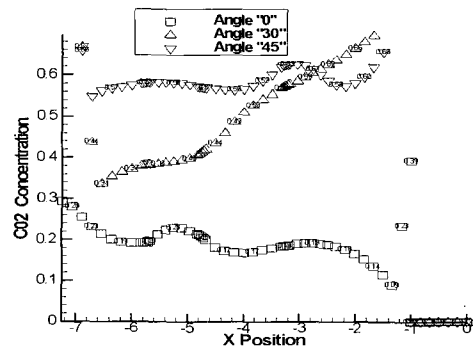
(b) CO₂ contour

Fig. 9 Velocity & CO₂ Concentration fields at 20 sec (Nozzle injection angle = 45°)

하부영역, 영역상부중앙부근과 좌측벽 하부 모서리부근영역에 별도의 재순환 유동이 발생하며, 2층 영역은 장애물좌측벽면 부근영역, 공간우측상부부근영역과 좌측벽면하부모서리 근처에 별도의 재순환 유동이 형성되어 있다. 이것은 분사초기부터 좌측벽면, 밑바닥면과 장애물벽을 따라 형성된 벽면기류가 1층 영역은 2층의 상승기류와 합류하여 배출구를 향하는 주유동을 형성하지 못하고 다시 하강기류를 형성한 후 상승하여 천장벽면을 따르는 벽면기류를 형성시켜서 배출구를 향하는 주유동과 합류하는 S자형 유동을 발생시키기 때문이며, 2층 영역은 좌측벽면, 밑바닥면과 장애물상부벽면을 따라 발생한 벽면기류가 배출구를 향하는 주유동을 형성하기 때문에 주 유동좌측에서 별도의 재순환 유동이 발생되고, 그 외 영역에서도 미



(a) Effect of nozzle location



(b) Effect of nozzle angle

Fig. 10 Variation of CO₂ mass fraction according with the height(h=1.5 m, (a) for various nozzle locations, (b) for various nozzle angles

약한 재순환 유동이 형성되는 것으로 여겨진다. 농도장을 보면 1, 2층 모두 좌측벽면에서 밑바닥면과 장애물벽면으로 CO₂질량전달이 일어난 후 각 벽면에서 공간의 중앙영역으로 CO₂질량전달이 활발히 일어남을 알 수 있다. 이는 분사초기부터 각 벽면을 따라 형성된 벽면기류의 영향 때문으로 생각되며, 공간 중앙영역으로 CO₂질량전달이 활발한 것은 S자형 유동영향 때문인 것으로 여겨진다. CO₂질량분포 또한 1, 2층 공간의 상부 좁은 영역을 제외하고는 소화가능영역대인 0.46 이상의 등농도선대를 나타내고 있어 기관실 화재의 특성을 고려할 때 소화에 더 효과적일 것으로 여겨진다.

4.9 CO₂질량분포

Fig. 10은 1층 밑바닥면으로부터 1.5m 높이의 X 방향 CO₂질량분포를 나타내고 있다. Fig. 10 (a)는 노즐위치가 천장중앙에서 각각 좌우로 1m 이동시킨 경우의 CO₂질량분포도이다. 노즐을 좌측으로 이동시킨 경우는 노즐좌측영역은 0.59 이상의 CO₂질량분포를 나타내지만 우측영역은 0.25 이하의 낮은 CO₂질량분포를 나타낸다. 우측으로 이동시킨 경우는 공간의 중앙영역은 더 높은 0.32대 이상의 CO₂질량분포를 나타내는 것 외에 유사한 CO₂질량분포경향을 보이고 있다.

Fig. 10 (b)는 노즐 분사각 변화에 따른 CO₂질량분포도이다. 노즐 분사각이 0° 일 경우는 0.3 이하대의 CO₂질량분포를 나타내고, 노즐분사각이 30° 일 경우는 0.34 이상대의 CO₂질량분포를 보이며 노즐분사각이 45° 일 경우는 0.54이상대의 CO₂질량분포를 나타내고 있다. 이상으로부터 노즐위치 변화는 CO₂질량전달과 소화가능영역대형성에도 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 노즐 분사각 또한 CO₂질량확산경로에 지배적인 영향을 주는 것을 알 수 있다. 특히 노즐 분사각이 30° 이상이 되면 CO₂확산경로가 분사각 0° 일 경우와는 정반대 경향을 나타냄을 알 수 있다.

따라서 소화제 노즐의 위치 및 분사각 결정 시는 각 영역에 설치되는 기기의 종류, 기기의 위치 및 주위 여건 등이 고려되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

선박 기관실과 유사하게 구성된 공간으로 CO₂소화제를 방사했을 때의 기류 유동특성과 CO₂소화제의 전달특성을 파악하기 위하여 분사노즐의 위치 및 노즐 분사각을 변화시키면서 전산실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1, 2층 노즐이 모두 천장중앙에서 우측에 위치하는 경우를 제외한 모든 경우에서 각 층 노즐우측영역은 반시계방향의 재순환 유동이, 좌측영역은 시계방향의 재순환 유동이 발생하여 확장되는 유동형태를 나타낸다. 또한 이 같은 재순환 유동이 CO₂질량전달경로에 지배적인 영향을 미치고, CO₂질량전달을 촉진시키는 것을 예측할 수 있다.

2. 노즐이 모두 천장중심에서 우측에 위치할 때는 1층 노즐우측영역은 "U"자형 유동이 공간상부 영역에 발생하고, 좌측영역은 시계방향의 재순환 유동이 나타난다. 특히 장애물 좌측상부주위에 소화가능영역대 이상의 CO₂질량분포를 나타냄을 알 수 있다.

3. 노즐 분사각 변화는 기류유동형성과정과 형태에 매우 큰 영향을 미치며, CO₂질량전달경로에도 지배적인 영향을 주는 것을 예측할 수 있다. 특히 노즐 분사각이 45° 일 경우는 10초경과 후부터 장애물 부근영역과 밑바닥면상에 소화가능영역대보다 높은 등농도선대가 형성되고, 20초경과시는 0.54이상대의 CO₂질량분포를 나타내어 선박 기관실 화재특성을 고려할 때 소화에 더 효과적일 것으로 생각된다.

Reference

- [1] Toshio Kaneko, Kazuo Hitomi, Hiroahi Sawada 1980, "On the Actual Condition and the Cause of Ship Fires" pp. 1 ~ 52
- [2] Magee, R. S. and Reitz, R. D., 1975, "Extinguishment of Radiation Augmented Plastic Fires by Water Spray" Fifteen Symposium(International) on Combustion, pp. 337 ~ 347

- [3] Mike, J. A., Evans, D. D. and Hayes, W., 1988 "Water Spray Suppression of Fully Developed Wood Crib Fires in a Compartment," NBSIR 88-37453, National Institute of Standards and Technology, Gaithersberg, MD.
- [4] 장용재, 김명배, 김진국, 1996, "Water Spray를 이용한 순수확산화염의 소화에 관한 연구" 대한기계학회논문집, 제20권 제2호, pp. 624 ~ 631.
- [5] 정해영, 1991, "A Study on Diffusion of Flammable Gas in Ventilated Space", Journal of Ship & Ocean Engineering, Vol. 7, pp. 31 ~ 42.
- [6] Flow and Ventilating Characteristics for the Room with Leaked Gaseous Fuel" 목포대학교 석사학위논문.
- [7] 박찬수, 조대환, 2000. "화물유 펌프실의 환기특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제24권 제1호, pp.134 ~ 141.

저자 소개



박찬수(朴燦洙)

1957년3월10일생. 1978년 목포해양대학교 기관학과 졸업. 2002년 목포대학교 기계공학과 박사과정 수료. 1급기관사. 1999~목포해양대학교 기관공학부 조교수. 당회원.