

〈論 文〉

부분밀폐공간내에서 화재로 야기되는 열 및 유동특성에 관한 연구

박희용* · 한철희** · 박경우**

(1993년 9월 28일 접수)

A Study of Thermal and Flow Characteristics Induced by Fire in a Partial Enclosure

Hi-Yong Pak, Chul-Hee Han and Kyoung-Woo Park

Key Words : Partial Enclosure(부분밀폐공간), Fire(화재), PMMA, Radiation Heat Transfer
(복사열전달), Combustion(연소)

Abstract

Mathematical modeling and numerical calculation on the flow and thermal characteristics induced by fire in a partial enclosure are performed. The solution procedures include the Shvab-Zeldovich approximation for the physical transport equations, low Reynolds number $k-\epsilon$ model for the turbulent fluid flow and Discrete Ordinate method (DOM) to calculate the radiative heat transfer. PMMA (Polymethylmethacrylate) is adopted as a solid fuel. Two different cases are considered : combustions with and without gas radiation occurring in a open cavity for variable pyrolyzing location of PMMA. When the fire source is located at the left-wall, the flow region of flame gas is limited at the left-wall and ceiling and recirculation region of inlet gas is formulated at near the floor. In case of neglecting the radiative heat transfer, more large flame size and higher temperature is predicted. It is essential to consider the radiative heat transfer for analysis of fire phenomenon.

기 호 설 명

<p>a : 흡수계수, $[m^{-1}]$</p> <p>B : 질량전달수, $(Q_p Y_{ox_w} / \nu'_{ox} M_{ox} - h'_w) / L_v$</p> <p>$C_\mu, C_1, C_2, \epsilon$: 난류모델의 상수</p> <p>D : 중화산계수, $[m^2 \cdot s^{-1}]$</p> <p>D_3 : Damkohler 수, $Q_p Y_{ox_w} / h_w$</p> <p>f_1, f_2, f_μ : 난류모델의 감쇄함수</p> <p>g : 중력가속도, $[m \cdot s^{-2}]$</p> <p>G_B : 부력에 의한 생성항</p> <p>h : 비엔탈피, $[J \cdot kg^{-1}]$</p>	<p>H : 높이, $[m]$</p> <p>I : 복사강도, $W / (m^2 \cdot Sr)$</p> <p>J_1 : 무차원 Shvab-Zeldovich 변수, $(\gamma - \gamma_\infty) / (\gamma_w - \gamma_\infty)$</p> <p>$J_2$: 무차원 Shvab-Zeldovich 변수, $(\beta - \beta_\infty) / (\beta_w - \beta_\infty)$</p> <p>$k$: 난류 운동에너지, $[m^2 \cdot s^{-2}]$</p> <p>L : 길이, $[m]$</p> <p>L_v : 열분해 유효잠열, $[J \cdot kg^{-1}]$</p> <p>\dot{m}'' : 국소 열유속, $[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$</p> <p>$\dot{m}'''$: 단위체적당 질량생성률, $[kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}]$</p> <p>$M_i$: i-종의 분자량, $[kg \cdot mol^{-1}]$</p>
---	--

*정회원, 한양대학교 기계공학과

**정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

- n : 연직방향 단위벡터[식(20)]
- P_k : 난류에너지 생성항
- Pr : 프란틀수
- \dot{q}'' : 국소 복사열유속, [$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]
- Q : 연소열, $Q_p \nu_{ox} M_{ox}$, [$J \cdot mol^{-1}$]
- Q_p : 산소 1 kg당 반응열, [$J \cdot kg^{-1}$]
- r : 질량소비수, $(Y_{ox_n} / Y_{f_n}) \cdot (\nu_f M_f / \nu_{ox} M_{ox})$
- R : 일반 기체상수
- Re_n, Re_t : 국소 레이놀즈수
- T : 온도, [K]
- u : x 방향 속도, [$m \cdot s^{-1}$]
- v : y 방향 속도, [$m \cdot s^{-1}$]
- w : 가중인자
- x : 수평방향의 좌표, [m]
- X_p : 열분해물질의 길이, [m]
- y : 수직방향의 좌표, [m]
- Y_i : i -종의 질량분율

그리스문자

- α : 열확산계수, $k / \rho C_p$, [$m^2 \cdot s^{-1}$]
- β : 무차원변수, $Y_f / \nu_f M_f - Y_{ox} / \nu_{ox} M_{ox}$,
상각계수($\sigma + a$, m^{-1}), 열팽창계수
- γ : 무차원변수, $-h / Q_p \nu_{ox} M_{ox} - Y_{ox} / \nu_{ox} M_{ox}$
- ϵ : 난류에너지 소산율 또는 방사율
- μ, μ_t : 층류 및 난류 점성계수, [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]
- ρ : 밀도, [$kg \cdot m^{-3}$]
- ν : 점성계수, 화학량론적인 계수, [$m^2 \cdot s^{-1}$]
- $\sigma, \sigma_k, \sigma_t, \sigma_e$: 산란계수, [m^{-1}] 및 k, T, ϵ 에 대한
난류 프란틀수

- Ω : 복사의 유출방향
- \emptyset : 위상함수
- μ, ξ : Ω 의 방향코사인

첨자

- b : 흑체
- C : 이산화탄소
- e, w, s, n : 검사체적면의 위치
- fl : 화염
- i, j : 종(species) 또는 x, y 의 공간방향
- N : 질소
- n : 각지수(angular index)
- ox : 산소
- p : 연소생성물, p 번째 검사체적의 중심
- t : 난류

- w : 벽, 열분해물질이 존재하는 벽면
- wa : 수증기
- ∞ : 주위영역의 값(ambient value)
- ' : 입사방향

1. 서 론

건물내에서 화재발생시 이를 초기에 감지하고 연기 및 유독가스의 흐름을 효율적으로 제어한다면 인명피해를 줄일 수 있음은 물론이고, 연소가스에 의한 화재영역의 확산을 방지할 수 있기 때문에 그동안 이 분야에 대한 연구는 많은 관심의 대상이 되어왔다. 화재현상에 대한 실험적 연구는 실측크기의 실험수행이 어렵고 연소특성상 모형실험의 어려움으로 인하여 많은 제한을 받아왔다. 따라서 수학적 모형이 대형 화재현상의 시험에 대한 효과적인 보완책이 될 수 있다. 또한 연소에 의하여 발생하는 그을음(soot)이나 물, 이산화탄소 등은 복사에 관여하는 물질인데 이런 매질의 비회체 특성으로 인한 물리적인 현상은 가스복사를 고려함으로써 이해될 수 있으나 지금까지의 연소에 관련된 연구는 복사를 고려하지 않은 경우가 많다.

지금까지 연소 및 복사열전달현상은 그 중요성으로 인하여 여러 연구자들에 의하여 서로 분리된 상태에서 연구되고 있다. 화재와 관련된 물리적 현상의 복잡성으로 인하여 이 분야에 대한 이론연구는 주로 부분밀폐공간내에서 화재발생영역을 일정한 크기의 열원으로 가정한 후 부력으로 야기되는 유동장을 해석한 경우가 주를 이루고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그리고 Mao 등⁽⁴⁾은 벽-천정 및 부분밀폐공간내에서 고체연료의 연소시 화염거동 및 유동특성을 해석하였다. 그러나 이들은 난류효과와 고온의 참여가스로부터의 복사열전달을 무시함으로써 계산결과는 실험치와 비교적 큰 오차를 나타내었다. 실제크기의 실내에서 화재발생시 이 두가지 효과는 축소모형을 사용한 Mao 등의 경우보다 더욱 지배적인 인자로 작용될 것이다. Liu 등⁽⁵⁾은 경계층문제에 관심을 두어 2차원 층류화염에 대한 유동특성을 규명하였다. 그러나 부분밀폐공간내에서 복사 및 난류화염을 동시에 고려하여 수치적으로 예측한 연구는 거의 없는 실정이다.

복사열전달해석을 위한 방법에는 Zone법,⁽⁶⁾ Monte Carlo법⁽⁷⁾ 그리고 플럭스법(flux method)^(8,9) 등으

로 대별되는데 Zone법은 유동장과 연계되는 복사열전달을 해석할 수 없고 통계학적인 개념을 기초로 하는 Monte-Carlo법은 많은 계산시간 및 컴퓨터용량이 요구되는 단점이 있다. 앞에서 언급하였듯이 연소에 의한 유동장은 자연대류와 복사가 매우 중요한 열전달 형태가 되기 때문에 유동장과 연계된 복사열전달의 해석을 위하여 유동장해석 기법인 검사체적법에 적용할 수 있는 방법이 요구되고 있는데 이러한 요구에 부응하는 방법이 플럭스 모델이다. 플럭스 모델중에서 최근 유동장과 연계되어 가장 많이 사용되고 있는 방법이 P-N근사법으로 알려진 구조화 근사법(spherical harmonics approximation)⁽¹⁰⁾과 S-N근사법으로 알려진 구분좌표법(discrete ordinate method)⁽¹¹⁾이 있다. 구조화근사법은 복사강도를 구조화함수의 급수로 전개하여 계산의 편리성을 위하여 특정항까지만 취한 후 미적분 형태로 표현되는 복사전달방정식을 복사강도의 모멘트들로 표현된 몇개의 편미분방정식으로 변환하여 해를 구하는 방법으로 방정식의 형태가 유동장의 지배방정식과 같이 미분방정식으로 표현되기 때문에 유동장과 복사의 동시해를 구하기 쉬우나 계산시간이 많이 필요할 뿐만 아니라 보다 정확한 해를 구하기 위하여 구조화함수 및 경계조건을 유도하는 과정에서의 복잡성으로 인하여 많은 노력과 계산과정에서 오류를 범하기가 쉽다. 구분좌표법은 개념적으로는 플럭스 모델과 동일하지만 플럭스 모델에서 고려되지 않은 각 방향에 대한 복사강도들 사이의 상호관련성을 고려한 방법이다. 즉, DOM은 미적분 형태로 나타나는 복사전달방정식(radiative transfer equation, RTE)을 공간상의 4π 의 입체각을 유한한 수의 종방향으로 나누고 이들 각각의 방향에 특정한 가중함수를 고려하여 RTE에서 나타나는 복사강도의 각적분(angular integral)을 종방향에 대한 합의 형태로 대체하여 해를 구하는 방법으로 산란효과를 고려한 보다 엄밀한 해를 구하기 위해서는 구분화된 좌표의 수만 확장하면 되는 편리성이 있다.

이 연구에서 채택한 DOM과 관련된 연구를 살펴보면 Fiveland 등⁽¹¹⁾과 Jamaluddin 등⁽¹²⁾이 있는데 이들은 2,3차원 직사각형 밀폐공간에서 DOM의 차수를 변화시키면서 복사열전달만의 특성을 분석하였고, Yucel 등⁽¹³⁾은 2차원 직사각형 밀폐공간에서 층류 자연대류-복사현상을 수치적으로 해석하였다.

이 연구에서는 화재에 의한 연소장해석을 위한

기초연구단계로서 연소장과 복사열전달이 서로 연계되는 경우에 수학적 모델링과 해석방법에 초점을 맞추었다. 채택한 계산모델은 2차원 부분밀폐된 공간내에서 벽면의 일부를 형성하는 고체연료가 정상연소되는 난류화염의 경우이다. 연소에 대한 수치적 모델은 참고문헌^(4,5)에 의하여 제시된 모델에 근거하였으며 난류모델링을 위하여 Davidson⁽¹⁴⁾이 제안한 모델을 사용하였으며 복사열전달방정식을 계산하기 위하여 구분좌표법을 추가하였다. 열분해물질의 여러가지 위치에 대하여 화염의 구조, 연소가스의 분포, 열적 및 유동특성을 해석하였으며, 복사열전달을 모델에 포함한 경우의 효과를 복사를 무시한 경우의 결과와 비교하여 나타내었다.

2. 이론해석

2.1 계산모델 및 가정

이 연구에서 연소장해석을 위하여 채택한 해석모델은 Fig. 1과 같이 오른쪽 면이 개방된 부분밀폐공간으로 벽면의 일부를 형성하는 열분해 물질인 고체연료가 정상연소되는 경우이다. 이 연구는 실제화재에 의한 연소장 해석을 위한 기초단계로서 이 연구에서 채택한 열분해물질인 PMMA(poly methyl metacrylate)의 열역학적 및 화학적인 물성치의 특성과 실험에 의한 연소장해석에서 기존의 여러 연구자들이^(4,15) 채택한 기하학적인 형상을 고려하여 수평방향의 길이를 0.54 m, 그리고 수직방향을 0.18 m로 하였다. 고체연료면을 제외한 모든 벽면은 단열되어 있고 유동은 부력에 의해 야기되며 자연대류와 복사열전달이 연계되어 일어난다. 연소현상에서 화염전파속도(flame spread speed)는 유동장에서의 열 및 질량전달과정과 열분해물질의 거동사이의 상호 연관성에 의하여 결정되는데, 유동이 정상상태라 함은 일정한 화염전파속도를 의미하지만 실제적으로는 화염의 위치가 변하므로 실험

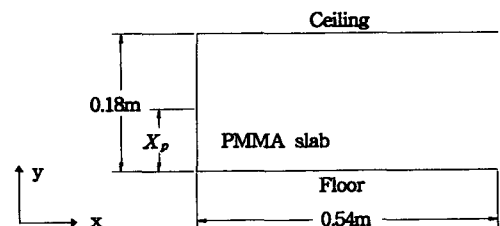


Fig. 1 Computational domain for this study

조건에서는 비정상문제가 된다. 그러나 유체유동에서의 운동량, 열 및 질량전달에 대한 응답시간(response time)이 고체연료의 가열시간보다 훨씬 빠르기 때문에 고체상(state)에 대한 기체상에서 준정상상태라는 의미가 타당성을 갖게 된다. 해석을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 유동장은 2차원 준정상상태 난류이다.
- (2) Lewis수는 1이고, 화학반응에 대하여 flame sheet근사가 적용된다.
- (3) 점성열소산효과 및 압축일은 무시한다.
- (4) 모든 화학종의 평균질량(molecular weight)은 일정하다.
- (5) 복사 고려시 산란효과는 무시한다.
- (6) 모든 벽면은 균일한 방사율을 갖고 확산적으로 방사 및 반사하는 비투과경계면이다.

2.2 지배방정식

2차원 직교좌표계에서 밀도가 변하는 경우의 난류화염을 기술하는 보존방정식(연속, 운동량, 에너지 및 화학종) 및 상태방정식은 아래와 같다.

○ 연속방정식

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

○ x-방향 운동량방정식

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\rho k) \end{aligned} \tag{2}$$

○ y-방향 운동량방정식

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) \\ & + g \cdot (\rho_\infty - \rho) \end{aligned} \tag{3}$$

○ 에너지방정식

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial h}{\partial x} + \rho v \frac{\partial h}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \dot{q}''_c + \dot{q}''_r \end{aligned} \tag{4}$$

○ 화학종방정식

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_i}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right] + \dot{m}''_i \end{aligned} \tag{5}$$

○ 상태방정식

$$P = \rho RT \tag{6}$$

2.2.1 연소모델링

식(4)와 (5)에 나타난 \dot{q}''_c 와 \dot{m}''_i 는 각각 단위체적당 연소열과 질량생성률로서 종속변수에 복잡하게 관여되는 미지함수인데 연소반응이 얇은판(sheet)과 같이 좁은영역에 한정적으로 일어나며, 이 영역 내에서 반응물, 즉 산소와 연료가 완전반응을 하여 동시에 존재하지 않는다는 가정(flame sheet)과 아래의 식



과 같이 표현되는 단단계화학반응(single-step global chemical reaction)을 적용하면 Shvab-Zeldovich 변환에 의하여 이들을 제거시킬 수 있다. Shvab-Zeldovich변수로 변환 후 규준화(normalizing) 과정을 거치면 에너지 및 화학종 보존방정식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.^(4,5)

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial J_1}{\partial x} + \rho v \frac{\partial J_1}{\partial y} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}} \right) \frac{\partial J_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}} \right) \frac{\partial J_1}{\partial y} \right] \\ & + \frac{1}{Q_p Y_{O_{\infty}} - h_w} \nabla \cdot \dot{q}''_r \\ \rho u \frac{\partial J_2}{\partial x} + \rho v \frac{\partial J_2}{\partial y} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}} \right) \frac{\partial J_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{Y_i}} \right) \frac{\partial J_2}{\partial y} \right] \end{aligned} \tag{8}$$

연소가스의 거동이 이상기체라는 가정과 밀도변화가 주로 온도에 영향을 받는다면 운동량방정식에서 나타나는 부력항은 다음의 식으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} g \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho} - 1 \right) = & g \cdot \left(\frac{1}{\theta_r} - 1 \right) \{ D_3 - J_1 (D_3 - 1) \} \\ & J_2 > J_{2,r} \\ = & g \cdot \left(\frac{1}{\theta_r} - 1 \right) \left\{ \frac{D_3 (1+r) J_2}{r} - J_1 (D_3 - 1) \right\} \\ & J_2 < J_{2,r} \end{aligned} \tag{10}$$

여기서, $\theta_r (= T_\infty/T_w)$ 이며 D_3 는 Damköhler 수, r 은 질량소비수(mass consumption number)를 나타내며 첨자 fl 은 화염을 의미한다. 식(8)과 (9)로부터 J_1 , J_2 가 계산되면 물리량의 계산은 정의식과 대수적 조작에 의하여 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} J_2 > J_{2,fl} \text{ 일 때} \\ h/h_w = D_3 - J_1(D_3 - 1) \\ Y_f/Y_{fw} = (1+r)J_2 - r \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} J_2 \leq J_{2,fl} \text{ 일 때} \\ h/h_w = D_3(1+r)J_2/r - (D_3 - 1)J_1 \\ Y_{ox}/Y_{oxw} = 1 - (1+r)J_2/r \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $J_{2,fl}$ 은 화염위치에서의 J_2 값으로 flame sheet 근사에 의하여 연료와 산소가 화염위치에서 동시에 소멸된다는 조건으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J_2(y_{fl}) = r/(1+r) \quad (13)$$

복사참여가스의 분압을 계산하기 위해서는 화학종의 질량분율을 먼저 구해야 한다.⁽⁶⁾

2.2.2 난류모델링

연소에 의하여 야기되는 유동은 자연대류로 난류 레이놀즈수가 작기 때문에 벽근처에서 벽면함수를 사용하는 표준 $k-\epsilon$ 모델로는 난류유동장을 정확히 예측하기 힘들며,⁽¹⁶⁾ 또한 실내와 같은 형상에서 점성효과는 속도를 감쇄시켜 난류생성항을 작게하며 부력의 영향으로 재층류화(relaminarization)를 유발시키기 때문에⁽¹⁴⁾ 이 연구에서는 벽면 근처에서의 유동을 효과적으로 예측할 수 있는 저 레이놀즈 $k-\epsilon$ 모델을 채택하였다.

난류 운동에너지(k)와 난류에너지 소산율(ϵ)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + P_k + G_B - \rho \epsilon \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \\ + \frac{\epsilon}{k} [f_1 C_{1\epsilon} P_k + C_{1\epsilon} G_B - f_2 C_{2\epsilon} \rho \epsilon] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, $x_1 = x$, $x_2 = y$ 을 의미하며, 난류 생성항(P_k)과 부력에 의한 생성항(G_B)은 아래와 같이 정의된다.

$$P_k = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad G_B = - \frac{\mu_t g \beta}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (16)$$

그리고, 난류 점성계수는

$$\mu_t = \frac{f_\mu C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (17)$$

이다. 식(14) 및 (15)에 사용된 각종 실험상수값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad \sigma_t = 0.9 \\ C_\mu = 0.09, \quad C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92 \end{aligned} \quad (18)$$

이러한 저 레이놀즈 $k-\epsilon$ 모델은 Jones and Launder⁽¹⁷⁾(JL-모델)가 처음 제시한 이래로 여러 연구자들에 의하여 서로 다른 모델들이 제시되었는데 Patel 등⁽¹⁸⁾은 여러가지의 저 레이놀즈 $k-\epsilon$ 모델에 대한 테스트를 통하여 JL모델의 우수성을 입증하였고 또한 Lam and Bremhorst 모델⁽¹⁹⁾이 실험치와 아주 잘 일치한다고 보고하였다. 그러나 식(23)에서 언급한 실험상수값 이외의 함수(f_1 , f_2 , f_μ)에 대한 정의는 여러 모델이 서로 다르므로 이 연구에서는 최근에 발표된 Davidson⁽¹⁴⁾이 제안한 모델을 적용하였다. 이 Davidson 모델에 의하면 벽근처에서 난류 운동에너지를 감소시키기 위하여 ∂ 의 생성을 촉진시키는 역할을 하는 함수 f_1 과 난류에너지 소산율식에 나타나는 소산항이 벽면에서 소멸되게 하기 위한 함수 f_2 에 대한 새로운 식을 도입하였다. 이들에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_\mu = \exp \left[- \frac{3.4}{(1 + Re_t/50)^2} \right] \\ f_1 = 1 + \left(\frac{0.14}{f_\mu} \right)^3 \\ f_2 = [1 - 0.27 \exp(-Re_t^2)] [1 - \exp(-Re_n)] \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, Re_t 와 Re_n 은 각각 다음과 같이 정의되는 국소 레이놀즈수이다.

$$Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \epsilon}, \quad Re_n = \frac{\rho \sqrt{k} n}{\mu} \quad (20)$$

이때, 벽면에서는 $k = \partial \epsilon / \partial n = 0$ 의 경계조건을 사용한다.

2.3 복사모델링

에너지방정식, 식(4)에서 복사열유속의 발산(divergence)항으로 주어지는 복사생성항은 복사열 전달 방정식을 풀어서 구할 수 있다. 흡수, 방사 및 산란을 하는 복사참여매질(participating medium)에 대한 복사열전달 방정식을 2차원 직교좌표계에

서 다음과 같이 표현된다. ⁽²⁰⁾

$$\frac{1}{\beta(s)}(\Omega \cdot \nabla) I(s, \Omega) + I(s, \Omega) = S(s) \quad (21)$$

$$S(s) = (1-\omega)I_b(T) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Omega' \rightarrow \Omega) \cdot I(s, \Omega') \cdot d\Omega' \quad (22)$$

여기서, $P(\Omega' \rightarrow \Omega)$ 는 Ω' 의 방향에서 들어와 Ω 방향으로 나가는 에너지전달의 위상함수(phase function)이며, $I(s, \Omega)$ 는 복사강도로서 위치와 방향의 함수이고, $I_b(T)$ 는 매질온도에 대한 흑체의 복사강도를 의미한다. 그리고 $\beta(s)$ 는 흡수계수(a)와 산란계수(σ)의 합으로 정의되는 상각계수(extinction coefficient)이며, ω 는 매질에서 산란효과가 차지하는 비율을 나타내는 산란알베도(scattering albedo)로서 상각계수에 대한 산란계수의 비로 정의된다. 즉, 산란알베도가 1이면 순수산란을, 0이면 흡수 및 방사하는 경우를 의미한다. 식(21)의 좌변 첫째항은 입의 방향에 대한 복사강도의 구배를 나타내며 둘째항은 흡수와 out-scattering을 의미한다. 그리고 식(22)의 생성항으로 표시된 우변은 각각 방사와 in-scattering 과 관련된 항이다. 식(21)을 전 입체각에 대하여 적분하면 복사열유속의 발산항은 다음식으로 구할 수 있다.

$$-\nabla \cdot \vec{q}'' = a(x, y) \left[\int_{4\pi} I(x, y, \Omega) d\Omega - 4\pi I_b \right] \quad (23)$$

식(21)을 계산하기 위하여 이 연구에서는 DOM (Discrete Ordinate Method)를 사용하였다. DOM의 가장 큰 장점중의 하나는 매질의 광학두께의 크기에 상관없이 적용될 수 있다는 것이며, 따라서 이 연구에서와 같이 영역내에 참여기체 영역과 복사에 투명한 영역이 공존할 때 적용될 수 있는 방법이다. DOM에 대한 자세한 계산방법은 참고문헌(11)에 잘 수록되어 있다. 연소가스중 복사열전달에 참여하는 가스는 H_2O 와 CO_2 이며 이들 연소가스는 복사에 대하여 파장별 특성을 지니므로 단순히 회체매질로 취급하는 것은 오차를 크게할 수 있다. ⁽²¹⁾ 이 연구에서는 Smith 등⁽²²⁾이 제시하여 최근 많이 사용되고 있는 WSGGM(Weighted Sum of Gray Gases Model)을 이용하여 혼합가스의 전방사율을 계산하였다. 전방사율이 구해지면 가스의 흡수계수는 다음과 같이 계산된다.

$$a(x, y) = -\ln[1 - \epsilon(x, y)] / L_m \quad (24)$$

여기서, L_m 은 복사선의 평균 이동거리로서 다음식

으로 구하였다.

$$L_m = 3.6 \frac{V}{A} \quad (25)$$

여기서, V 와 A 는 각각 가스의 체적과 표면적의 의미한다.

2.4 경계조건

열분해 연료기관 위에서 경계조건은 다음과 같다.

$$u(0) = \frac{Y_{fw} + Y_{oxn} \nu_f M_f / \nu_{ox} M_{ox}}{1 - Y_{fw}} \left(-D \frac{\partial J_2}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (26a)$$

$$J_1 = J_2 = 1 \quad (26b)$$

위의 식중에서 속도조건은 연료기관위에서 수직방향의 속도성분에 대한 조건으로 열분해 물질의 위치에 따라 다소 변경될 수 있으며, 이때 연소물질의 열분해 온도는 663[K]로 주어진다. 복사를 고려하지 않은 경우, 열분해 물질이 존재하는 벽 이외의 벽면에서는 아래의 단열조건을 부여하였다.

$$\frac{\partial J_1}{\partial n} = \frac{\partial J_2}{\partial n} = 0 \quad (27)$$

식(27)에서 n 은 벽으로부터 수직방향의 성분을 나타낸다. 가스나 공기가 유출, 유입되는 개방된 부분에서 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(u, v)}{\partial n} = 0 \quad (28)$$

유체가 유입될 때,

$$J_1 = J_2 = 0 \quad (29a)$$

유체가 유출될 때,

$$\frac{\partial J_1}{\partial n} = \frac{\partial J_2}{\partial n} = 0 \quad (29b)$$

위의 식(29b)에서의 n 은 식(27)과는 달리 유동방향과 나란한 방향의 성분을 나타낸다.

구분중좌표법을 적용하여 복사전달방정식을 계산할 때, 해석영역의 벽면에서의 경계조건은 벽면의 국소 에너지평형을 이용하면 다음과 같다.

$$I_w = \epsilon I_{b,w} + \frac{1-\epsilon}{\pi} \sum_{n=1, \pi, \Omega' < 0}^{NN} \omega_n |n \cdot \Omega'| I_n, \quad n \cdot \Omega > 0 \quad (30)$$

위와 같이 복사를 고려하는 경우에, 벽면에서 단열조건은 식(27)과는 달리 벽면에서 열평형을 고려하여 아래의 식으로 표현된다.

$$(-k \nabla T + \vec{q}'') \cdot i = 0 \quad (31)$$

2.5 수치해석

2.5.1 유동장의 경우

운동량방정식 및 에너지방정식을 계산하기 위하여 계산영역을 62×42 의 비균일 격자계로 나누고 검사체적법을 적용하였다. Fig. 2는 이 연구에서 채택한 격자구조이다. 연소장과 복사가 연계하여 이루어지는 난류유동장을 해석하기 위해서는 격자구조가 매우 중요하므로 이를 위하여 여러개의 격자구조에 대하여 기준 모델(위치 ①)을 선택하여 격자의존성을 규명하여 보았다. 즉 2차원 격자구조를 52×32 , 62×42 그리고 72×52 등 3가지의 비균일 격자구조를 선택하여 $y=0.09$ m에서의 수직방향 속도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 52×32 인 경우 나머지 두 경우에 비하여 최대속도는 약 5%의 오차를 보였으며, 62×42 와 72×52 는 0.4%의 오차를 보여 거의 일치하고 있음을 보이고 있다. (세 경우의 최대속도는 각각 1.4415, 1.5174, 1.5234 (m/s) 이다.) 또한 1회 반복하는 시간은 세 경우 각각 5초, 8초 그리고 12초(PC486-DX2 기준)가 소요되었다. 그러므로 이

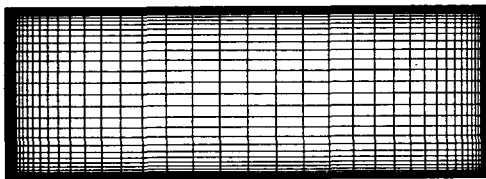


Fig. 2 Grid system for this study

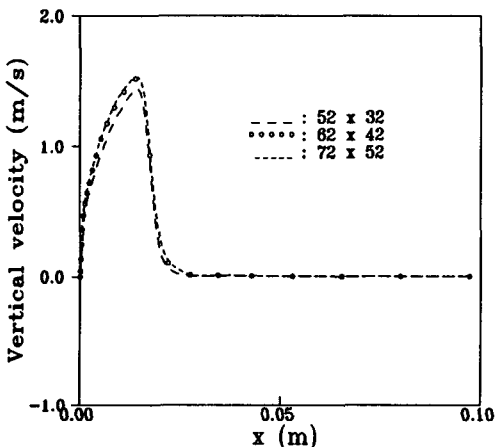


Fig. 3 Vertical velocity profiles for grid dependency at location ①

연구에서는 62×42 의 격자구조를 선택하였다. 운동량방정식에 나타나는 압력항은 SIMPLER 알고리즘으로 처리하였으며, 이산화된 방정식은 선순법으로 반복계산하였다.⁽²³⁾ 해석영역에서의 물성치변화가 크므로 정상상태에 도달할 때까지 time-matching 기법을 사용하였다. 반복계산중 해의 발산을 막고 수렴을 향상시키기 위해 하향이완을 시켰는데, 이때 하향계수로는 속도에 대해서는 0.2을 사용하였고 J_1 , J_2 , P 에 대해 각각 0.2, 0.3, 0.5를 사용하였으며 k 와 ϵ 은 각각 0.3을 사용하였다. 해의 수렴은 검사체적내로 유입 및 유출되는 유량의 차이를 조사하여 그 차이가 10^{-5} 이하이며 종속변수가 20회 이상 반복하는 동안에 유효자리 5자리안에서 변화가 없을 때를 수렴된 해로 간주하였으며 복사가 고려된 경우에 약 6,000회 반복시 수렴된 해를 구할 수 있었다.

2.5.2 복사전달방정식의 계산의 경우

구분종좌표의 근사해법에서는 각 종좌표의 입체각에 대한 적분계산시 적절한 가중치의 선택이 계산결과에 정확도에 많은 영향을 끼치며, 종좌표의 수는 이차원의 경우에 n 이 구분종좌표법의 차수를 가리킬 때 $n(n+2)/2$ 개 이다. 2차원 밀폐공간에서 구분종좌표법으로 복사전달방정식을 해석할 때 계산시간이나 해의 정확성의 측면에서 S4가 적절하다고 기존의 여러 연구결과⁽¹¹⁻¹³⁾에 따라 이 연구에서는 S-4를 사용하였다. 식(26)에 DOM을 적용하여 일반적인 경우인 산란을 고려하여 변화시킨 구분종좌표 방정식(DOE)에 dx , dy 를 곱한 후 Fig. 4의 C.V에 대하여 적분하면 다음과 같다

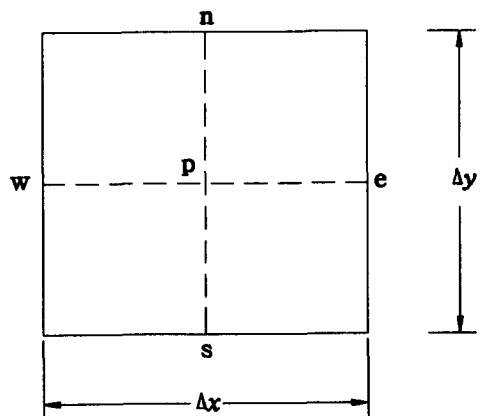


Fig. 4 Arbitrary control volume

$$\mu_n(A_e I_{ne} - A_w I_{nw}) + \xi_n(B_n I_{nn} - B_s \cdot I_{ns}) + \Delta V_p \cdot I_{np} \beta = \Delta V_p \cdot S_{np} \quad (32)$$

여기서, $S_{np} = a \cdot I_{bp} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{n=1}^{NN} w_{nn} \cdot \Phi_{nn} \cdot I_{np}$ 이며, $A_w = A_e = \Delta y$, $B_n = B_s = \Delta x$, $\Delta V_p = \Delta x \cdot \Delta y$ 이다. 위의 식에서 산란을 포함하지 않은 경우에는 산란계수를 0으로 두면된다. 식 (32)에서 I_{ne} , I_{nw} , I_{ns} , I_{nn} 는 C.V의 표면의 강도이고, I_{np} 는 C.V의 중앙의 값이다. 원하는 격자점에서의 복사강도를 계산하기 위하여 기지의 복사강도와 미지의 복사강도를 연관시켜 미지의 복사강도 수를 줄임으로써 계산을 간편하게 하는 방법이 있는데 이 연구에서는 Calson 등⁽²⁴⁾이 제안한 GWDD(General Weighted Diamond Difference)를 적용하였으며 GWDD의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$I_{np} = w_{in} I_{ne} + (1 - w_{in}) I_{nr} \quad (33)$$

여기서, r 는 기준면(reference face)을, e 는 외삽면(extrapolated face)을 가리킨다. 위의 식들을 이용하여 방향코사인 μ , ξ 의 음, 양에 따라 서로 다른 4방향에 대하여 sweep함으로써 검사체적내의 복사강도를 계산하는데 자세한 내용은 참고문헌 (25)에 수록되어 있다. 이때 식(32)의 생성항(S_{np})은 미지의 복사강도를 포함하고 있으며, 경계조건은 입사되는 복사에너지와 밀접한 관계가 있기 때문에 반복적으로 계산을 수행한다. 해석 도중에 검사체적면에서 물리적으로 타당하지 않는 음의 복사강도가 나타나면 음의 강도고정기법(negative intensity fix-up technique)을 적용하여 해결한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석모델의 타당성 검증

연소가스의 유동장해석을 위하여 이 연구에서 채택한 Shvab-Zeldovich변수에 의한 연소모델과 복사전달방정식을 계산하기 위하여 Flux모델의 일종인 구분중좌표법에 의한 복사모델등의 타당성을 검증할 필요가 있다. 연소에 대한 수치해의 타당성은 실제 실험값과의 비교를 통하여 검증하였으며 복사모델링은 엄밀한 해석해(analytical solution)와 비교하였다.

3.1.1 연소모델의 검증

연소모델의 타당성을 검증하기 위하여 Mao 등⁽⁴⁾

이 행한 실험 및 2차원 층류화염이라는 가정하에 수치적으로 해석한 화염의 위치($J_2=0.1803$)에 대하여 이들과 동일한 기하학적 형상에 층류 및 난류 유동장에 대한 이 연구의 결과와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 비교를 위한 실내의 기하학적인 형상은 좌측 벽면아래에 열분해 물질인 7cm의 PMMA가 존재하고 우측 천장부분에 10cm의 차폐막(soffit)이 있으며 이 이외의 벽면은 단열되어 있는 2차원 형상이다. 먼저, 복사의 효과를 고려하지 않은 상태에서 2차원 층류라 가정한 Mao 등의 결과와 이 연구의 층류에 대한 결과는 매우 잘 일치하고 있으며 실험결과와는 약간의 오차가 있으나 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 난류화염에 대한 화염위치는 층류화염에 비하여 보다 천정쪽에 위치하여 실험결과와 매우 근접해 있음을 알 수 있다. 이는 난류 및 복사열전달의 영향으로 부력의 효과가 더욱 커져 연소가스의 활발한 혼합에 의하여 화염의 위치가 보다 천정쪽에 위치하기 때문이다.

3.1.2 복사모델의 검증

이 연구에서 사용한 복사모델과 수치해법의 타당성을 확인하기 위하여 복사만 존재하는 경우의 벽면에서의 무차원 복사열유속을 광학두께의 변화(0.1, 1, 10)에 대하여 해석적인 해⁽²⁶⁾ 및 P-3⁽²⁷⁾의 결과와 비교하여 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6은 방사력이 모두 0이며 흑체벽면을 갖는 2차원 직각밀폐공간내에서 흡수 및 방사하는 균일한 온도의 회체 가스가 존재하는 경우이다. 광학두께가 10인 경우 P-3 근사해는 해석적인 해에 비하여 약간 작게

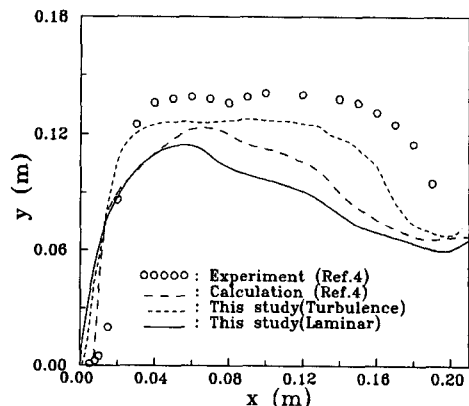


Fig. 5 Comparison of measured and predicted results for the flame location

예측되고 있으나 P-3와 동일한 정확성을 갖는 것으로 알려진⁽²⁸⁾ S-4는 물론 S-2 역시 해석해와 잘 일치하고 있다. 또한 광학두께가 1.0인 경우 P-3 및 S-4 모두 중앙부에서 약간 크게 예측되고 있으나 이 이외의 영역에서는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 매질의 흡수계수가 적은 광학두께가 0.1일 때 S-6는 해석적인 해와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이 연구에서와 같이 산란효과를 무시한 경우에 S-4와 S-6의 결과가 매우 잘 일치하고 있어 DOM의 차수를 높이지 않고 S-4를 이용하여 충분히 복사열전달을 해석할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 연소장 해석

이 연구에서 고려한 벽면에서 열분해되는 고체연료는 PMMA (Poly Methyl Metacrylate)로 계산시 사용된 값은 $T_v=663\text{ K}$, $L_v=1.59 \times 10^6\text{ J/Kg}$, $B=1.7$, $D_3=6.45$ 및 $r=0.22$ 이다.⁽⁴⁾ 열분해 물질

의 길이는 7cm로 좌측 벽면의 아래쪽 및 윗쪽 그리고 아래측 벽면의 왼쪽 및 중간부분에 위치하는 네가지 경우를 고려하였다. 이를 각각 위치 ①, 위치 ②, 위치 ③ 그리고 위치 ④로 부르기로 한다. 그리고 에너지방정식에 나타난 종에 대한 난류 프란틀수는 온도에 대한 난류 프란틀수와 동일하게 주었으며 프란틀수(Pr)는 0.72, 벽면방사율(ϵ_w)은 0.8로 두었다. 복사열전달 계산시 모든 경우에 4차의 DOM을 적용하였다.

Fig. 7은 전유동장에 대하여 속도벡터로 유동형태를 도시한 것으로 열분해물질이 좌측벽면 하단에 있는 위치 ①과 아래측 벽면 중앙부근에 있는 위치 ④의 경우를 각각 (a)와 (b)에 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 그림 모두 개방부에서는 크게 유입되는 층과 유출되는 층으로 구분되어 나타났다. 내부유동은 두 경우 재순환유동이 발생하는 위치가 비슷하였고 좌측벽면의 주유동방향 오른편에 미세한 재순환유동을 포함하여 서로 다른 방향의 속도를 갖는 4개의 유동구조가 관찰되었다. (a)의 경우 열분해 물질의 벽면속도(blowing velocity)는 일정하지 않고 벽면하단에서부터 벽면을 따라 점차 감소하는데 이는 그림에서 보는 바와 같이 하단부근에서 유동에 의한 경계층이 발달하기 전에 유입되는 공기의 영향으로 벽면의 온도구배를 증가시키고 이것이 고체 연료면의 열분해를 촉진시키기 때문이다. 그리고 연소가스의 흐름은 주로 열분해물질이 있는 좌측 벽면에서 발생하여 천정부근에 제한되고 있음을 알 수 있다. 아래측벽면 중앙부근에 PMMA가 위치한 (b)의 경우 전체적인 유

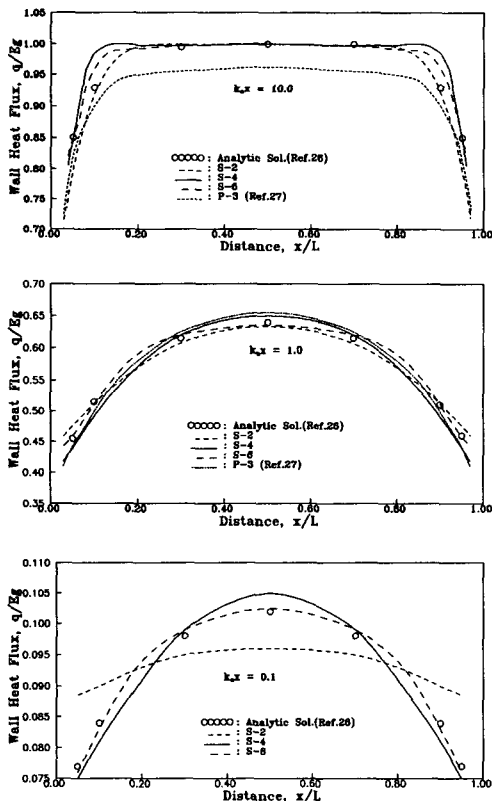


Fig. 6 Comparison of Ref.(26), Ref.(27) and this study for the net heat flux at the wall

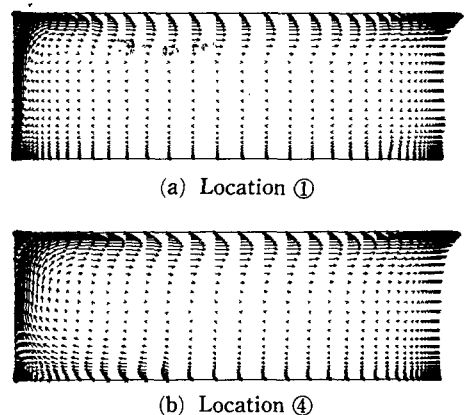


Fig. 7 Velocity vectors at different locations of PMMA

동구조는 (a)와 비슷하지만 좌측벽면을 제외한 전 영역에서의 유동속도의 크기는 위치 ① 보다 크게 나타나는데 이는 하단에 열분해물질이 위치할 경우가 부력의 영향을 더 많이 받아 유동이 활발하기 때문으로 여겨진다. 그리고 (a)의 경우보다 좌측 벽면 상·하단의 모서리 부근에서 발생한 재순환 영역이 훨씬 더 크을 알 수 있는데 이러한 큰 재순환 영역으로 인하여 화염의 위치는 아래측 중앙부 근에서 시작하여 천정의 좌측 일부분까지만 한정적으로 위치하리라 예측할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 유동을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 PMMA 위치변화에 따른 $x=0.27\text{ m}$ 및 개방부에서의 수평속도를 수직방향에 대하여 각각 (a)와 (b)에 도시하였다. 두 그림에서 보듯이 동일한 PMMA 위치인 경우 유동형태는 매우 흡사하며 위치 ④를 제외한 나머지 경우는 유입 및 유출되는 분기점은 약 $y=0.11\text{ m}$ 로 거의 동일하였다. 그리고 개방부로 갈수록 유출속도의 크기는 증가하였고 최대 유출속도의 위치는 보다 천정쪽으로 접근되어 있음을 알 수 있다. (a)에서 보는 바와 같이 위치 ① 및 위치 ②의 경우가 다른 두 경우에 비하여 유입 및 유출되는 속도가 적는데 이는 열분해물질이 좌측벽면에 위치할 경우에 유동이 주로 그 벽면을 따라 상승되기 때문이며, 하단에 위치할 경우는 부력의 영향을 더욱 많이 받아 입구영역과 평행한 바닥면에서부터 왼쪽벽면을 따라 위로 상승하기 때문에 큰 속도분포를 갖게 된다. 이러한 현상은 (b)에도 동일한 경향을 보인다. 그리고 위치 ④의 경우, 개방부에서 유입되는 속도분포는 원만한 곡선을 그리며 유입되는 반면 $x=0.27\text{ m}$ 위치에서는 벽면에서 갑자기 상승하다가 (최대 유입 속도) 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 열분해물질이 있는 곳으로 큰 온도차이에 의하여 유입공기

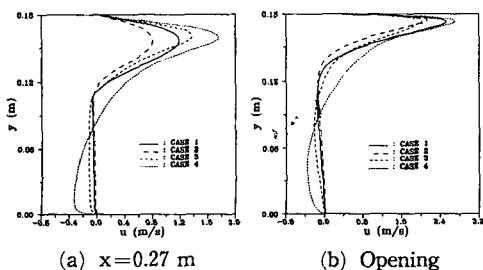


Fig. 8 Horizontal velocity profile for various PMMA locations at $x=0.27\text{ m}$ and opening

가 빨려 들어가기 때문이다.

Fig. 9는 4가지 열분해 물질의 위치에 대하여 복사를 고려하지 않은 순수 연소장인 경우 $x=0.27\text{ m}$ 위치에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 위치 ④를 제외한 나머지 위치에서는 유입속도 영역 ($y=0.11\text{ m}$ 이하)에서 거의 균일하게 외부 대기온도를 가지고 내부로 유입되고 있으며 유출속도 영역에서는 연소에 의한 고온의 연소가스로 인하여 유입되는 유체보다 몇배나 더 큰 온도를 가지고 유출됨을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 좌측벽면에 열분해 물질이 위치할 경우가 아래측벽면에 위치할 경우보다 유출온도가 보다 높으며 또한 동일한 연직위치에서 대해서도 높은 온도분포를 보이는데 이는 화염의 위치 (flame location)에 밀접한 관계가 있으므로 이러한 현상은 Fig. 11에서 다시 언급하기로 한다. 위치 ④의 경우 유출되는 위치인 실내의 중간높이에서 상당히 높은 온도 ($y=0.09\text{ m}$ 에서 490 K)를 유지한채 유출되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 대표적인 경우로 위치 ①에 대하여 복사열전달을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 순수 연소장의 경우의 수직방향의 온도분포를 여러 수평 위치 ($x=0.1\text{ m}$, 0.27 m 그리고 개방부)에서 비교하여 나타낸 것이다. 영역내의 최고온도는 화염과 열분해 벽면사이에 위치하며 복사가 고려된 경우에 2317 K 로 그렇지 않은 경우의 2465 K 에 비하여 낮게 예측되었다. 그림에서 보면 수평방향으로 갈수록 두 경우의 온도차이는 증가하여 개방부에서 수직방향의 온도차는 가장 큰 온도의 위치에서 1160

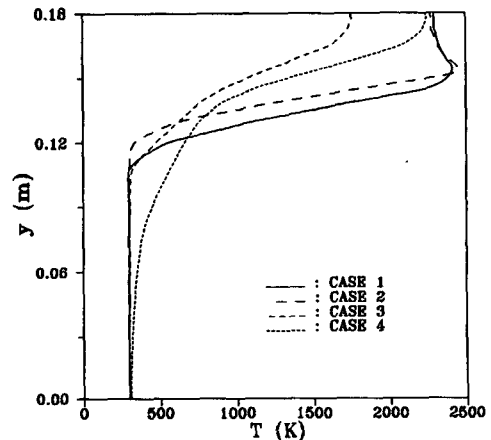


Fig. 9 Temperature distribution for various PMMA locations at $x=0.27\text{ m}$

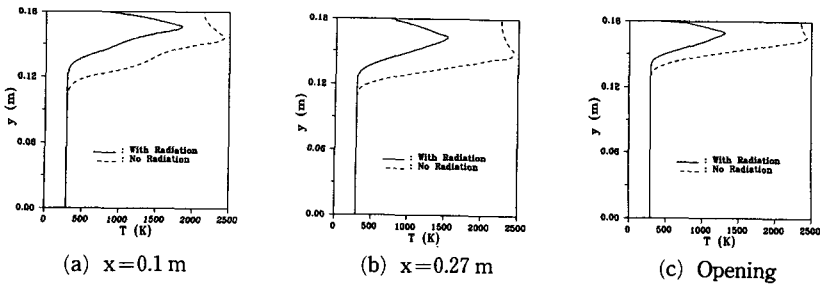


Fig. 10 Comparison of temperature distribution at various horizontal locations for with and without radiation

K정도가 되었다. 복사열전달이 무시된 경우 개방부 쪽으로 감에 따라 온도감소는 크지 않지만 복사열전달을 고려한 경우에는 현저히 감소되고 있다. 이러한 현상은 복사가 무시된 경우 연소가스가 개방부에 이를 때까지 열손실은 거의 전도열전달에 의해 지배되지만 복사가 고려될 경우 복사로 인한 개방부로의 원거리 열손실로 인한 것이다.

화재에 의한 실내에서의 화염의 위치는 화재의 위험도 평가에 있어서 가장 중요한 요소이다. Fig. 11은 화염위치 및 J_2 의 분포를 나타낸 것으로 (a)는 열분해 물질의 위치에 따른 화염위치를 그리고 (b)는 복사열전달현상이 화염의 위치에 미치는 영향을 규명하기 위하여 위치①에서의 J_2 의 분포를 복사를 고려하지 않은 경우에 대하여 도시한 것으로 이때 J_2 의 값은 0에서 1 사이에서 변하는데 이 연구의 경우 화염위치인 $J_2=0.1803$ (아래에서 두번째 곡선)을 제외하고는 0.1씩 등간격으로 도시 하

였다. 먼저 (a)의 경우 열분해 물질이 좌측벽면에 있는 경우(위치 ① 및 ②)는 모두 화염이 영역 바깥까지 확장되어 있으며 위치 ③ 및 위치 ④는 열분해 물질이 위치한 영역에서부터 좌측벽면을 포함하여 천정의 일부분까지만 차지하고 있는데 이는 화염이 차지하는 비율이 상대적으로 작으나 높은 유동속도 및 좌측벽면 상·하단의 넓은 재순환 유동으로 인하여 화염의 전파를 막기 때문이다. 특히 위치 ① 및 ②의 경우 화염이 천정에서 멀리 떨어진 곳에 위치하고 연소생성물이 실내에서 보다 많은 영역을 차지하고 있는데 이 영역에서의 온도는 Fig. 9 및 Fig. 10에서 언급하였듯이 위치 ③ 및 ④에 비하여 높게 분포되어 있다. 이는 화염위치에서 천정까지의 영역이 연소로부터 발생한 고온의 가스로 가득차 있으며 내부 유동속도가 적어 외부로부터 유입되는 저온의 유체와의 에너지 교환이 활발하지 못하기 때문이다. 그러므로 전체 실내를 고려할때 좌측벽면에서 화재 발생시 화염이 낮게 위치

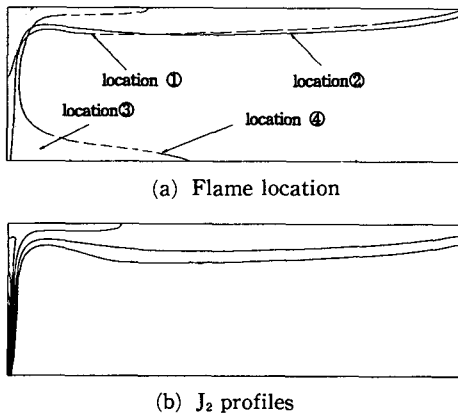


Fig. 11 (a) Flame location for various PMMA locations and (b) Constant J_2 profiles and flame location at the location ① for without radiation

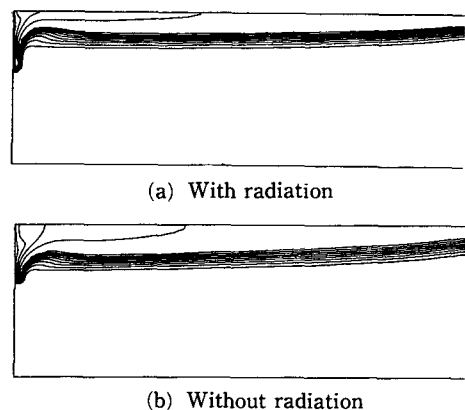


Fig. 12 Contours of CO_2 mass fraction for with and without radiation at location ②

하고 온도가 높아 화염이나 기타 연소생성물의 전파 가능성으로 인하여 보다 위험할 것으로 판단된다. 복사를 고려하지 않은 경우와 비교하기 위한 (b)에서 복사를 고려한 경우의 화염위치가 그렇지 않은 경우보다 천정쪽으로 근접하여 위치하고 있음을 보여주고 있다. 즉 복사를 무시한 경우 화염의 크기가 과대평가되고 있음을 볼 수 있다. 이는 복사를 고려한 경우에 복사참여가스가 주로 화염위와 천정사이에 존재하여 주위 유체입자나 벽면으로부터 방사되는 복사에너지로 인하여 상대적으로 높은 에너지를 갖게 되며 이로 인하여 부력의 효과가 커지기 때문이다.

Fig. 12는 CO₂의 질량분율을 위치 ②에 대하여 복사를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 각각 (a)와 (b)도시한 것이다. H₂O의 분포도 CO₂와 같은 모양을 나타내었으며 CO₂와 H₂O의 최대 질량분율은 각각 0.22와 0.72로 계산되었고 연소가스의 질량분율이 큰 영역은 고온영역과 일치하였다. 좌측벽면에 화재원이 있는 이러한 경우 연소가스는 거의 천정에 인접하여 흘러나가며 그림에서 나타나지 않았지만 열분해 물질이 아래측벽면에 위치한 경우는 연소가스가 좌측벽면에서 천정일부까지 한정적으로 위치함이 관찰되었다. 또한 복사를 고려하지 않은 경우가 복사가 고려된 경우보다 영역내에서 연소가스가 차지하는 비율이 많이 증가했음을 볼 수 있다. 이러한 복사열전달효과는 화재영역의 크기가 커져 광학두께가 증가할 경우 더욱 커질 것으로 예상되기 때문에 실제크기의 실내화재현상을 해석할 때 복사열전달은 매우 지배적인 인자가 될 것이다.

4. 결 론

실내에서의 화재현상을 연구하기 위한 기초연구로서 2차원 부분밀폐공간내에서 고체연료가 정상연소될때의 유동 및 열적특성을 수학적 모델링 후 수치적으로 연구하였다. 고체연료로는 PMMA가 고려되었고 연소모델을 위하여 Shvab-Zeldovich 변수, 난류유동장에는 저 레이놀즈 $k-\epsilon$ 모델을 도입하였으며 복사열전달 계산을 위하여 DOM을 적용하였다.

계산은 열분해되는 고체연료가 좌측벽면 및 아래측벽면의 일부를 형성할 때 4가지의 다른 위치에 대하여 수행하였다. 화재원이 좌측벽면에 존재할

때 실내에서의 연소가스의 유동은 좌측벽면과 천정부근에 제한되었고, 바닥쪽에 유입공기의 재순환영역이 길게 형성되었다. 복사열전달을 무시한 경우 화염의 크기는 더 크게 예측되었으며 온도는 전체적으로 매우 높게 계산되었다. 특히 복사열전달에 의한 연소가스로 부터의 열손실이 무시되었기 때문에 수평방향으로의 연소가스온도는 실제와는 달리 거의 변화가 없는 것으로 나타나 복사를 고려한 경우보다 개방부에서의 최고온도가 1160 K 이상 높게 예측되었다. 따라서 화재발생의 해석시 복사열전달의 중요성이 입증되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 : 921-0900-047-2)에 의하여 수행된 연구결과와의 일부로서 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Emmons, H. W., 1973, "Heat Transfer in Fire," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.95, pp. 145~151.
- (2) Steckler, K. D., Quintiere, J. G. and Rinkinen, W. J., 1982, "Flow Induced by Fire in a Compartment," *Nineteenth Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 913~920.
- (3) Quintiere, J. G., 1984, "A Perspective on Compartment Fire Growth," *Combustion Science and Technology*, Vol. 39, pp. 11~54
- (4) Mao, C. P., Fernandez-Pello, A. C. and Humphrey, J. A. C., 1984 "An Investigation of Steady Wall Ceiling and Partial Enclosure Fires," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 221~228.
- (5) Liu, C. N. and Shih, T. M., 1980, "Laminar, Mixed-Convection, Boundary Layer, Nongray-Radiative, Diffusion Flames," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 102, pp. 724~730.
- (6) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., 1967, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (7) Howell, J. R., 1968, "Application of Monte-Carlo to Heat Transfer Problem," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 1~54, Academic Press, New York.

- (8) Viskanta, R., 1966, "Radiation Transfer and Interaction of Convection with Radiation Heat Transfer," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 3, pp. 175~251, Academic Press, New York.
- (9) Siddall, R. G., 1974, "Flux Methods for the Analysis of Radiant Heat Transfer," *J. Inst. Fuel*, Vol. 47 pp. 101~109.
- (10) Menguc, M. P., 1985, *Modeling of Radiative Heat Transfer in Multi-Dimensional Enclosure Using Spherical Harmonics Approximation*, Ph. D. Thesis, Purdue Univ.
- (11) Fiveland, W. A., 1984, "Discrete-Ordinate Solutions of the Radiative Transport Equation for Rectangular Enclosure," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 669~706.
- (12) Jamaluddin, A. S. and Smith, P. J., 1988, "Predicting Radiative Transfer in Rectangular Enclosure using the Discrete Ordinate Method," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 59, pp. 321~340.
- (13) Yucel, A., Acharya, S. and Williams, M. L., 1989, "Natural Convection and Radiation in a Square Enclosure," *Numerical Heat Transfer*, Part A, Vol. 15, pp. 261~278.
- (14) Davidson, L., 1990, "Calculation of the Turbulent Buoyancy-Driven Flow in a Rectangular Cavity Using an Efficient Solver and Two Different Low Reynolds Number $k-\epsilon$ Turbulence Models," *Numerical Heat Transfer*, Part A, Vol. 18, pp. 129~147.
- (15) Zhou, L. and Fernandez-Pello, A. C., 1993, "Turbulent, Concurrent, Ceiling Flame Spread : The Effect of Buoyancy," *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp. 45~59.
- (16) Chen, Q., van der Kooi, J. and Meyers, A., 1988, "Measurement and Computations of Ventilation Efficiency and Temperature Efficiency in a Ventilated Room," *Energy and Buildings*, Vol. 12, pp. 85-99.
- (17) Jones, W. P. and Launder, B. E., 1972, "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 310-314.
- (18) Patel, V. C., Rodi, W. and Scheuerer, G., 1986, "Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flow : A Review," *AIAA J.*, Vol. 23, No. 9, pp. 1308~1319.
- (19) Lam, C. K. G. and Bremhorst, K. A., 1981, "A Modified Form of the $k-\epsilon$ Model for Predicting Wall Turbulence," *J. Fluid Eng.*, Vol. 103, pp. 456~460.
- (20) Ozisik, M. N., 1973, *Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection*, John Wiley and Sons, Co., New York.
- (21) Pearce, B.E. and Emery, A.F., 1970, "Heat Transfer by Thermal Radiation and Laminar Forced Convection to an Absorbing Fluid in the Entry Region of Pipe," *ASME J. of Heat Transfer*, pp. 221~231.
- (22) Smith, T. F., Shen, Z. F. and Friedman, J. N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 602~608.
- (23) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, D. C.
- (24) Carlson, B. G. and Lathrop, K. D., 1968, *Transport Theory-the Method of Discrete-Ordinates in Computing Methods in Reactor Physics*, edited by Greenspan, Kelber, and Okrent ; Gordon and Breach, New York
- (25) 박희용, 박철현, 박경우, 1993, "연소물질의 크기 및 위치에 따른 복사를 고려한 연소가스의 열 및 유동특성," 공기조화냉동공학회, 하계학술대회 논문집, pp. 55~61.
- (26) Lockwood, F. C. and Shah, N. C., 1981, "A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures," *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, p.1405.
- (27) 차상명, 김종열, 박희용, 1992, "흡수, 방사 및 선형비등방 산란매질을 포함하는 밀폐공간내의 자연대류-복사열전달에 대한 수치해석," 대한기계학회논문집, 제16권, 제5호, pp. 952~964.
- (28) Hyde, D. J. and Truelove, J. S., 1977, *The Discrete Ordinates Approximation for Multi-Dimensional Radiant Heat Transfer in Furnaces*, AERE R-8502, AEWE Harwell, U. K.