

수직평판에서 복사열전달을 고려한 층류확산화염에 관한 수치적 연구

Numerical Study on Laminar Diffusion Flame with Radiation Along Vertical Wall

안 중 기* 김 진 곤**
An, Jung-Ki Kim, Jin-Kon

Abstract

To understand the phenomena of laminar diffusion flame along vertical wall, the numerical analysis has been performed. Keller-box method was used to solve the problem in the boundary layer. The governing equation is simplified by thin-flame approximation. And energy and chemical species equations are normalized with Schvab-Zeldovich variables.

A physical domain is divided the boundary layer along streamwise coordinate as the combustion region and the propagation region. And Radiation model is concerned in these region. As a result, typical phenomena have been observed. Comparison of the numerical results with experimental data shows that the present method can successfully predict phenomena of laminar diffusion flame along upright surface.

요 약

본 논문은 수직평판 위에 형성된 층류 확산화염의 현상적인 문제를 파악하는 수치적 연구를 수행하였다. 수치적 방법으로는 Keller-box method를 사용하였다. 지배방정식은 매우 얇은 화염면 가정을 도입하여 간단화시킬 수 있으며, 에너지와 화학성분 식은 Schvab-Zeldovich 변수를 이용하여 무차원화 하였다.

물리적 공간은 연소영역과 전파영역으로 나누었고, 복사열전달을 고려하였다. 연구의 결과, 층류확산 화염의 전형적인 현상들이 관찰되었으며, code의 신뢰성을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 복사열손실의 영향에 따른 제반 현상들을 파악하여 비교, 분석할 수 있었다.

1. 서 론

수직평판에서 층류연소에 관한 연구는 화재에 의 연구에 있어서 매우 중요한 분야중의 하나이다. 실제의 화재에서 벽면의 연소는 주로 난류이

1994년 2월 5일 접수, 3월 15일 수리

* 국방과학기술연구소

** 한국항공대학교 기계설계학과

지만 실제적인 소규모의 연소성 시험은 층류에 해당된다. 또한, 층류확산 화염은 기본적으로 연소에 의한 다양한 물리적 현상을 잘 나타내고 있다. 수직평판에서 자연대류 형태의 화염은 그림 1에서 보는 바와 같이 4개의 주요 부분으로 구분된다.

(1) 연소(combustion) 영역-벽면에서의 응축 연료가 기화하여 산소와 반응, 열과 화염을 발생시키고, 이열의 일부는 다시 벽면으로 전달되어 연료가 기화한다. 이러한 과정을 통해 연소가 지속되며, 연료면의 온도는 액체의 경우, 끓는 점, 고체의 경우, 열분해(pyrolysis) 온도가 된다.

Kim, de Ris와 Kroesser[1]는 자연대류 형태의 층류흐름 상태에서 이 영역을 해석하였는데, 여기서 기하학적, 또는 유체역학적 효과는 주로 Grashof number 에 의해 영향을 받으며, 열화학적 효과는 주로 mass transfer number인 B와 stoichiometric parameter인 r에 영향을 받음을 보여주었다. 또한, 분자량이 적은 연료에 대한 실험치는 이론적인 값과 매우 정확한 일치를 보이며, 큰 분자량의 연료일 경우 Lewis number에 많은 영향을 받음을 보여주고 있다. Pagni[2]의 연구는 9가지의 주된 층류확산 화염형태에 대해 고찰을 하였는데, 이 중에는 수직평판에서의 혼합흐름 형태도 포함되어 있다. 여기서 구한 결론은 위험한 화재 방지를 위한 연료의 특성은 높은 r값과 작은 B, 그리고 무차원 연소열(Dc)이 낮아야 함을 보여주었다. Beier, Pagni, Okoh[3]의 연구는 강제대류와 자연대류현상에 대하여 화학반응이 무한히 빠르다고 가정한 반면, 복사열을 고려하여 연구하였는데 열분해를(local or excessive pyrolysis)과 같은 화학적 효과의 주된 인자는 B와 r로써 복사를 고려하지 않았을 때와 유사하나, 화염의 온도를 결정하는데는 복사시스템의 경우 Dc가 큰 영향을 미치는 것을 발견하였다. Burning rate는 복사열전달을 고려함으로써 해서 더 좋은 결과를 얻었다. Ahmad[4]는 이 영역에서 액체연료에 대한 실험과 thin flame approximation을 사용한 이론식을 제시하였다. 복사열전달을 무시하였지만 비교적 만족할 만한 결과를 얻었다. 한편, Sibulkin, Kulkari, Annamalai[5]의 연구는 Arrhenius 형태의 화학반응을 고려함과 동시에,

복사열전달도 함께 고려하였다. 유한한 화학반응은 burning rate에 심각한 영향을 주지는 않으나, extinction limit의 결정에 매우 중요함을 밝히고 있다.

(2) 전파(Propagation) 영역-combustion 영역에서 기화한 모든 연료들이 이 영역에서 소모된다. 벽면에서는 더 이상의 연료 공급이 없고, mass transfer에 의해 열을 차단하는 blockage 효과가 없으므로 벽면으로의 열전달은 매우 높게 된다. 한편, 화염은 벽면을 향해서 접근한다.

Ahmad와 Faeth[6]는 액체연료의 경우, 두 영역에서의 화염형태와 벽면의 heat flux는 combustion 영역에서의 결과는 실험치와 거의 일치함을 보였으나, propagation 영역에서는 약 15-20%의 오차를 보였다. 이는 복사열전달, 유한한 화학반응 속도 등의 중요한 인자들을 무시했기 때문으로 추정된다.

따라서, 본 연구는 앞서 설명한 두영역에 대한 복사열전달을 고려하여, 수치적 방법을 통해 현상을 모사하고자 한다. 특히 이전의 연구는 propagation 영역에 대해 복사 열전달을 고려하지 않았

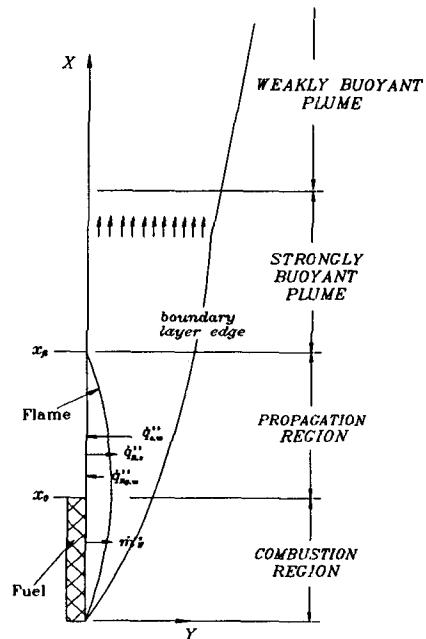


그림 1. 수직평판에서 층류 확산 연소의 개요도

으나, 본 연구에서는 이 영역의 복사 열전달을 고려하였다.

2. 지배 방정식

본 연구는 해석의 간편함을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 흐름은 층류, 이차원, 정상상태이다.
- ② 대기의 온도와 조성은 균일하다.
- ③ 연소는 화염면 이론(thin flame theory)을 따른다.
- ④ 화학반응은 1-step으로 가정한다.
- ⑤ 흐름은 이상기체이며 비열, 확산계수는 일정하다.
- ⑥ Lewis number는 1이다.
- ⑦ 흐름은 음속보다 매우 작다.

여기서 가정 ③은 무한히 얇은 화염면과 벽면사이에는 산소가 존재하지 않으며 화염면 바깥에는 연료가 존재하지 않음을 의미한다. 가정 ⑥은 물질전달계수(mass diffusion coefficient : D)와 열전달계수(thermal diffusion coefficient : α)가 같음을 의미하므로 에너지 전달식과 화학성분 전달식이 동일화하여 수식을 간단화시킬 수 있다.

한편, 복사열전달에 관한 수학적 모델을 구성하기 위해, 가스의 복사열 흡수효과를 무시하는 optically thin flame을 가정하였다.

2.1. 보존 방정식[7], [8]

- 연속 방정식

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2-1)$$

- 운동량 방정식

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = g(\rho_\infty - \rho) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2-2)$$

- 에너지 방정식

$$\rho u \frac{\partial h}{\partial x} + \rho v \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \dot{q}_c''' - \dot{q}_R''' \quad (2-3)$$

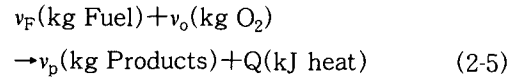
$$\text{여기서, } h = \int_{T_0}^T C_p dT$$

- 화학성분 전달 방정식

$$\rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + \dot{m}_i''' \quad (2-4)$$

여기서 i = f(연료), o(산소) 또는 p(생성물)이다.

- 화학 반응식



여기서 ν_i 는 stoichiometric 계수다.

- 상태 방정식

$$\rho T = \rho_\infty T_\infty \quad (2-6)$$

2.2 복사 열전달

복사의 가장 중요한 변수중의 하나는 가스의 optical thickness이다. Absorption coefficient k_λ 가 온도와 무관하다는 가정아래, Sparrow와 Cess[9]는 optical thickness를 다음과 같이 표현하였다.

$$\tau_{o\lambda} = \frac{L}{1/k_\lambda} = \frac{L}{\lambda_p}$$

여기서, L은 물리적인 특성길이이며, λ_p 는 photon의 평균 자유경로다. Optically thin의 경우 $\tau_{o\lambda} \ll 1$ 이며, 이는 유체입자로부터 방출된 photon이 주위의 유체입자로부터의 간섭이나 손실없이 인접한 표면으로 직행하는 것으로, 유체입자 간의 복사 상호작용이 없음을 가정한 것이다. 이러한 가정을 이용해 Sparrow[9]는 화염으로부터의 체적당 복사 열손실을 식 (2-7)과 같이 표현하였다.

$$\dot{q}_R''' = 4K_p \sigma T^4 \quad (2-7)$$

그런데, 이 손실의 절반은 연료면으로 흡수되므로 복사 플럭스는

$$\dot{q}''_{Rg, w} = 2\epsilon K_p \sigma \int_0^{\delta} T^4 dy \quad (2-8)$$

이다. 벽면에서 방출되는 복사 열전달은 다음과 같다.

$$\dot{q}''_{Rs, w} = \epsilon \sigma (T_w^4 - T_z^4) \quad (2-9)$$

따라서, 연료면으로부터의 총 복사플럭스는 아래와 같다.

$$\dot{q}''_{R, w} = \dot{q}''_{Rs, w} - \dot{q}''_{Rg, w} \quad (2-10)$$

3. 경계 조건

벽면과 벽면으로부터 무한히 떨어진 곳의 경계 조건은 전 영역에 걸쳐 동일하다.

$$\begin{aligned} y = 0 \text{에서} \\ u = 0, T = T_w, Y_f = Y_{fw}, Y_o = 0 \\ y \rightarrow \infty \text{에서} \\ u = Y_F = 0, Y_O = Y_{O\infty}, T = T_\infty \end{aligned}$$

나머지 경계조건은 그 영역에 따라 달라진다. combustion 영역에서 벽면의 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$y = 0, 0 \leq x \leq x_0 \text{에서} \\ m''_w = \rho v_w = \frac{\lambda}{LC_p} \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_w - \dot{q}''_{Rs, w} + \dot{q}''_{Rg, w} \quad (3-1)$$

$$m''_w Y_{FT} = m''_w Y_{Fw} - \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial Y_F}{\partial y} \Big|_w \quad (3-2)$$

$$h = h_w \quad (3-3)$$

propagation 영역에서는 벽면에서 연료의 방출이 없다.

$$h = h_w, v_w = \frac{\partial Y_i}{\partial y} = 0; x_0 \leq x, y = 0 \quad (3-4)$$

본 연구에서는 propagation 영역의 벽면온도를 combustion 영역의 벽면온도와 동일한 연료의 증발온도(vaporization temperature, τ_0)로 가정하거나, 그외에 몇가지 벽면온도(τ_1)를 가정하여 propagation 영역의 벽면온도의 변화에 따른 벽면 heat flux 변화를 관찰했다.

벽면에서의 heat flux는 전 영역에 걸쳐 동일하게 표현된다.

$$\dot{q}''_w = \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_w \quad (3-5)$$

4. Schvab-Zeldovich 변수

에너지와 화학성분 식에서 생성항 \dot{q}''' , \dot{m}''' 은 다음의 관계를 이용해서

$$-\frac{\dot{m}_F'''}{v_F M_F} = -\frac{\dot{m}_O'''}{v_O M_O} = \frac{\dot{q}_i'''}{Q_c} \quad (4-1)$$

다음과 같은 Schvab-Zeldovich 변수를 정의 함으로 해서 제거된다.

$$\beta = \frac{Y_F}{v_F M_F} - \frac{Y_O}{v_O M_O} \quad (4-2)$$

$$\gamma = \frac{h}{L} + \frac{Y_O Q}{v_O M_O L} \quad (4-3)$$

이 변수들은 다음과 같이 normalized 된다.

$$J_{hO} = \frac{\gamma - \gamma_\infty}{\gamma_w - \gamma_\infty} \quad (4-4)$$

$$J_{FO} = \frac{\beta - \beta_\infty}{\beta_w - \beta_\infty} \quad (4-5)$$

위의 두변수는 연료벽면에서는 그 값이 1 이 되며, 경계층 끝에서는 0이 된다.

화염면에서는 연료와 산소가 존재하지 않으므로 다음과 같은 값을 갖게 된다.

$$J_{FL} = \frac{B+1}{B} \frac{r}{r+1} \quad (4-7)$$

이 값은 화염면의 전 영역에서 모두 같은 값을

가진다. 여기서 B는 물질전달 계수(mass transfer number)이고, r는 stoichiometric parameter로서 화염의 특성을 결정하는 연료의 중요한 변수이다.

$$B = \frac{Y_{O\infty}}{M_O v_O L} - \frac{h_{\infty}}{L} \quad (4-8)$$

$$r = \frac{Y_{O\infty} v_F M_F}{Y_{FT} v_O M_O} \quad (4-9)$$

벽면에서의 에너지 물질 보존법칙은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\lambda}{LC_p} \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{\omega} = \frac{-\rho D}{Y_{FT} - Y_{F\omega}} \frac{\partial Y_F}{\partial y} \Big|_{\omega} \quad (4-10)$$

복사열전달이 없을 경우, 벽면에서의 연료의 질량분율은 다음과 같고, combustion 영역에서의 고정된 값이다.

$$Y_{F\omega} = Y_{FT}(B-r)/(B+1) \quad (4-11)$$

한편, 경계층 내에서의 성분 분포는 화염면을 기준으로 화염면 바깥쪽 영역에서는

$$0 \leq J \leq J_{FL}$$

$$Y_F = 0, Y_O = Y_{O\infty} \left(\frac{J_{FL} - J_{FO}}{J_{FL}} \right) \quad (4-12)$$

화염면의 안쪽 영역에서는

$$J_{FL} \leq J \leq 1$$

$$Y_O = 0, Y_F = Y_{F\omega} \left(\frac{J_{FO} - J_{FL}}{1 - J_{FL}} \right) \quad (4-13)$$

이 된다. 나머지 불활성 기체(inert gas)와 생성물의 성분비는 아래와 같다.

$$Y_{IN} = Y_{IN\infty} + (Y_{IN\omega} - Y_{IN\infty}) J_{FO} \quad (4-14)$$

$$Y_{PR} = 1 - Y_F - Y_O - Y_{IN} \quad (4-19)$$

5. 지배 방정식의 무차원 변환

지배방정식은 정의된 다음 몇가지 변수들의 조합으로 무차원 변환(transformed)된다. 연속방정식(2-1)을 만족하는 유량함수는

$$\rho u = \rho_{\infty} \frac{\partial \psi}{\partial y}, \rho v = -\rho_{\infty} \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5-1)$$

이고, 무차원 변수는 다음과 같이 정의한다.

$$\xi = x/x_0 \quad (5-2)$$

$$\eta = (Gr_x^{1/4}/x) \int_0^y \rho/\rho_{\infty} dy \quad (5-3)$$

$$\psi/v_{\infty} = 4Gr_x^{1/4} f(\eta, \xi) \quad (5-4)$$

이를 이용하여 운동량 방정식, 에너지 방정식와 화학성분 보존방정식을 무차원 미분 방정식으로 변환하면

$$f''' + 3ff'' - 2(f')^2 + F = 4\xi \left[f' \frac{\partial f'}{\partial \xi} - f \frac{\partial f}{\partial \xi} \right] \quad (5-5)$$

$$J_{hO}'' + 3Pr f J_{hO}' = 4Pr\xi \left[f' \frac{\partial J_{hO}'}{\partial \xi} - J_{hO} \frac{\partial f}{\partial \xi} \right] + \psi_R \quad (5-6)$$

$$J_{FO}'' + 3Pr f J_{FO}' = 4Pr\xi \left[f' \frac{\partial J_{FO}'}{\partial \xi} - J_{FO} \frac{\partial f}{\partial \xi} \right] \quad (5-7)$$

이 되고, 여기서 식 (5-5)와 식 (5-6)의 무차원 생성항은

$$F = \frac{h}{L}$$

$$\psi_R = -\frac{q_R Pr x^2}{BL\rho v_{\infty} Gr_x^{1/2}} \quad (5-8)$$

이 된다. 또한, 밀도 분포를 의미하는 무차원 부력항 F는 화염면의 안과 바깥에서 서로 다른 값을 가진다.

$$J_{FO} \geq J_{FL} : F = B(1 - J_{hO}) + \tau_0 \quad (5-9)$$

$$J_{FO} \leq J_{FL} : F = (B + \tau_0) \left(\frac{J_{FO}}{J_{FL}} \right) - BJ_{hO} \quad (5-10)$$

무차원화된 식들의 경계조건은 다음과 같다. $\eta \rightarrow \infty$ 에서의 경계조건은 복사 열손실의 유무에 관계없이 전 영역에 걸쳐 다음과 같은 동일한 형태로 표현된다.

$$f' = J_{hO} = J_{hF} = J_{FO} = 0 \quad (5-11)$$

그러나, $\eta=0$ 인 벽면 경계조건은 복사의 유무와 그 영역에 따라 다르게 표현된다.

(1) 복사가 없을 경우

① combustion region ($\xi \leq \xi_0$)

$$\begin{aligned} f' &= 0 \\ f &= BJ_{hO}' / 3Pr \\ J_{hO} &= J_{hF} = J_{FO} = 1 \end{aligned} \quad (5-12)$$

② propagation region ($\xi_0 < \xi$)

$$\begin{aligned} 3f &= \frac{J_{hO}' B}{Pr} - 4\xi \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ f' &= J_{FO}' = 0 \\ J_{hO} &= 1 + (\tau_0 - \tau_1) / B ; \xi_0 < \xi < \xi_f \\ J_{hF} &= \tau_1 J_{FL} / (\tau_0 + J_{FL}) B ; \xi_f < \xi \end{aligned} \quad (5-13)$$

(2) 복사가 있을 경우

① combustion region ($\xi \leq \xi_0$)

$$\begin{aligned} f' &= 0 \\ 3f &= (J_{hO}' + \frac{Pr(q_{Rs}'' - q_{Rg}'')}{BL\mu_\infty Gr_x^{1/4} \xi^{-1}}) \frac{B}{Pr} - 4\xi \frac{\partial f}{\partial \xi} \\ J_{FO} &= Pr(3f + 4\xi \frac{\partial f}{\partial \xi}) (\frac{B+1 - BJ_{FO}}{B}) \\ J_{hO} &= J_{hF} = 1 \end{aligned} \quad (5-14)$$

② propagation region ($\xi_0 < \xi$)

복사를 고려하지 않았을 경우와 동일하다.

여기서, $\tau_0 (=h_{\infty}/L)$ 와 $\tau_1 (=h_w/L)$ 은 combustion 영역과 propagation 영역의 벽면 무차원 엔탈피 값이다. 이 연구에서는 두 영역에서의 벽면 온도가 같은 경우와 더불어, 여러 온도의 경우를 취해 비교해 보았다. 만일, $\tau_1=0$ 이라면 이는 propagation 영역의 벽면온도가 대기온도와 같음

을 의미하는 것이다. 전파영역이 끝나는 위치(ξ_f)는 화염이 벽면에 있을때 즉 $J_{FO}(\xi)=J_{FL}$ 가 되는 점이다.

유량함수의 정의에 관한 식 (5-1)과 벽면 경계조건식 (3-2)을 조합하면, combustion 영역의 단위면적당 연소율(burning rate)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$-m_w'' x / \mu_\infty Gr_x^{-1/4} = 3f(0) + 4\xi \frac{\partial f(0)}{\partial \xi} \quad (5-15)$$

벽면으로의 heat flux는 다음과 같다.

$$q'' x Pr Gr_x^{-1/4} / BL\mu_\infty = -J_{hO}'(\xi, 0) \quad (5-16)$$

6. 수치 해석

이상에서 표현된 지배방정식과 경계조건을 수치적으로 해석하기 위해 유한 차분법인 Keller-box method[10]를 이용하였다.

우선 3차 편미분 방정식을 다음과 같이 1차 미분 방정식으로 변형시킨다.

• 무차원 운동량 방정식

$$\begin{aligned} f' &= u \\ u' &= v \\ v' + 3fv - 2u^2 &= 4\xi(u \frac{\partial u}{\partial \xi} - v \frac{\partial f}{\partial \xi}) \end{aligned}$$

• 무차원 에너지 전달식

$$\begin{aligned} J_{hO}' &= P_{hO} \\ P_{hO}' + 3Pr f P_{hO} &= 4Pr\xi(u \frac{\partial J_{hO}}{\partial \xi} - P_{hO} \frac{\partial f}{\partial \xi}) + \psi_R \end{aligned}$$

• 무차원 화학성분 전달식

$$\begin{aligned} J_{FO}' &= P_{FO} \\ P_{FO}' + 3Pr f P_{FO} &= 4Pr\xi(u \frac{\partial J_{FO}}{\partial \xi} - P_{FO} \frac{\partial f}{\partial \xi}) \end{aligned}$$

이상의 지배방정식은 중앙차분법($\xi^{n-1/2}, \eta^{j-1/2}$)을 사용하여 차분화하고, 비선형의 선형화

는 newton의 방법으로 식을 선형화한다.

$$f_j^{i+1} = f_j^i + \delta f_j^i$$

여기서 위첨자 i는 iteration 수를 나타내며, δf_j^i 는 매우 작은 값이므로 고차항은 무시하여 선형화된 식을 얻을 수 있다. 그 결과, tridiagonal matrix system이 얻어지고 이를 inverse하여 해를 구할 수 있다.

문제의 해석은 영역을 네 부분으로 나누어 수행했다.

- ① 복사열손실이 없는 combustion 영역 - similarity eqn.
- ② 복사열손실이 없는 propagation 영역 - non similarity eqn.
- ③ 복사열손실이 있는 combustion 영역 - non similarity eqn.
- ④ 복사열손실이 있는 propagation 영역 - non similarity eqn.

Propagation 영역의 초기값은 combustion 영역의 최종해를 이용하였다. 이로 인해 나타나는 combustion 영역과 propagation 영역사이의 불연속면은 Keller-box의 특성으로 인해 문제없이 극복되었다.

Grid는 직각 격자계로 다음과 같이 구성하였다.

ξ 방향에 대해,

- ① 복사 열손실이 없는 combustion 영역 : 범위 0-1.0, 간격 0.01
- ② 복사 열손실이 없는 propagation 영역 : 범위 1-20, 간격 0.1
- ③ 복사 열손실이 있는 combustion 영역 : 범위 0-1.0, 간격 0.001
- ④ 복사 열손실이 있는 propagation 영역 : 범위 1-20, 간격 0.1

η 방향에 대해서는 Cebeci[11]의 방식을 참조로 하여 인접한 두 스텝의 간격비를 1.06, η_∞ 는 8로 주었다. 그 결과, η 방향의 grid의 총 갯수 106개를 얻었다.

각각의 영역에 대한 수렴조건은

$$\delta v_{(wall)} < 10^{-5}$$

일때를 취했다.

본 연구는 연료로 액체연료인 methanol과 고체연료로는 PMMA를 사용하였으며, 이에 따른 각종 성질들은 표와 같다.

표 1. 대기조건과 기본상수
(Ambient Conditions and Constants)

Properties	연료 Methanol	고체연료 PMMA
Q_c kJ/kg	21022	26560
L kJ/kg	1226	1590
$\tau_0 h_{vap}/L$	0.044	0.2945
$C_p(\text{mean})$ kJ/kgK	1.37	1.3
분자량(molecular weights)	32.04	100
$\nu_0(\nu_F=1)$	1.5	6
ν_∞ m ² /s	15.3E-6	9.6E-6
대기 온도 K	300.	
대기중 산소농도	0.233	
대기 압력 atm	1.0	
대기 밀도 kg/m ³	0.524	
Prandtl number	0.73	
Lewis number	1.0	
Emisivity ϵ	0.55	0.9
Plank mean absorption coefficient K_p m ⁻¹	0.016	0.2
Stefan-Boltzmann constant σ kW/m ² K ⁴	5.670E-11	5.670E-11
mass transfer number B	2.6	1.5
stoichiometric parameter r	0.154	0.12

7. 결과 및 고찰

그림 2와 3은 methanol의 경우 combustion 영역에서의 무차원 온도와 속도에 대한 실험치 비교를 수행한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 자연 대류의 전형적인 속도와 온도 분포를 보이고 있으며, 온도와 속도의 이론적 계산이 실험치와 잘 일치하고 있다. 그러나 온도의 경우 최고값 부근에서의 불일치는 비열비의 온도와 성분에 따른 변화를 무시하였기 때문인 것으로 여겨진다. 그러나, 그림 4, 5에서 보는바와 같이 전파영역에서의 온도와 속도는 특히 온도의 경우 큰 편차를 보이고 있다. 이는 연소 영역에서와 유사한 원인에 기인한 것으로 여겨진다. 전파영역에서 온도와 속도의

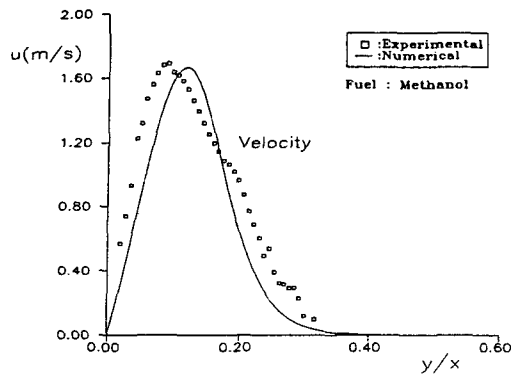


그림 2. 연소영역에서 온도의 이론과 실험치 비교 ($\xi=1, X_0=51\text{mm}$)

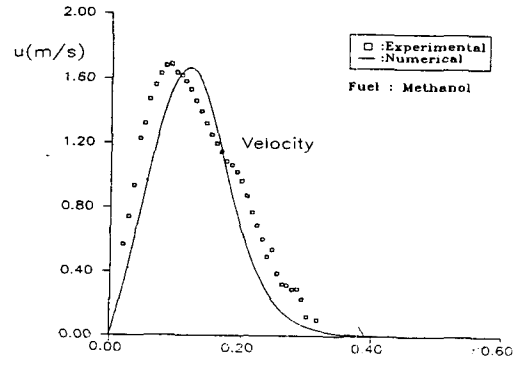


그림 3. 연소영역에서 속도의 이론과 실험치 비교 ($\xi=1, X_0=51\text{mm}$)

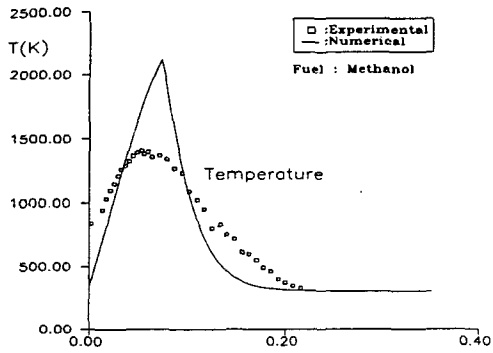


그림 4. 전파영역에서 온도의 이론과 실험치 비교 ($\xi=2, X_0=51\text{mm}$)

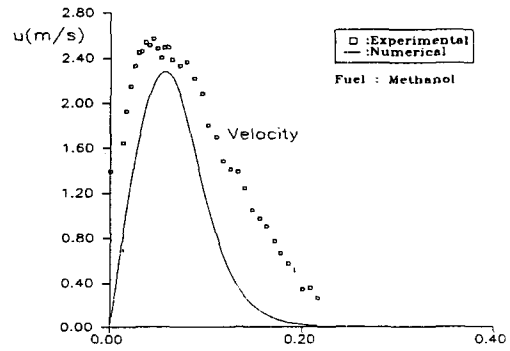


그림 5. 전파영역에서 속도의 이론과 실험치 비교 ($\xi=2, X_0=51\text{mm}$)

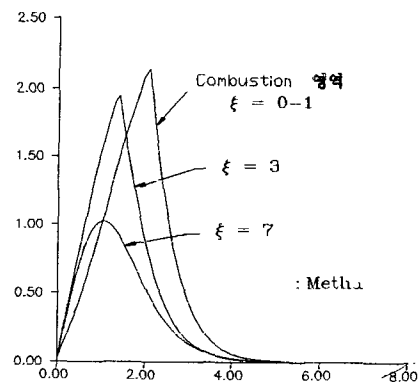
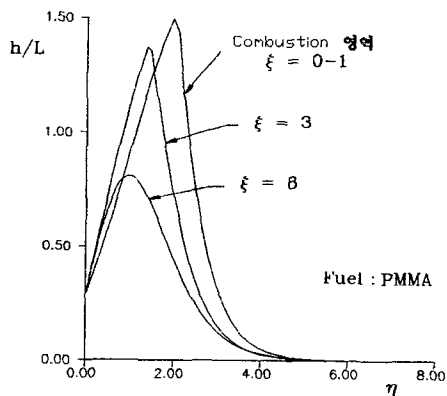


그림 6. 전 영역에서의 온도 분포(No Radiation) (PMMA : $T_w=600^\circ\text{K}$, Methanol : $T_w=340^\circ\text{K}$)

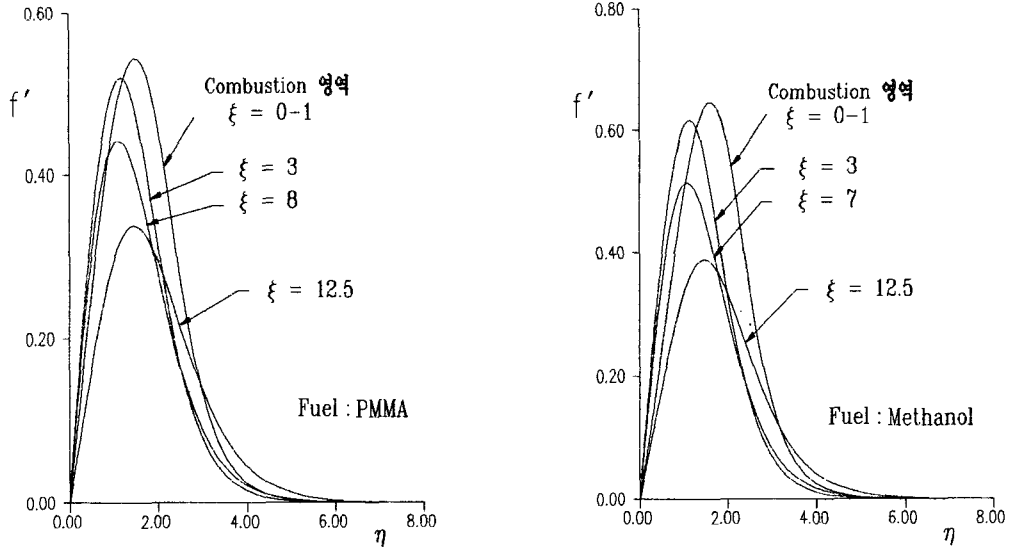


그림 7. 전 영역에서의 속도분포(No Radiation) (PMMA : $T_w=600^{\circ}\text{K}$, Methanol : $T_w=340^{\circ}\text{K}$)

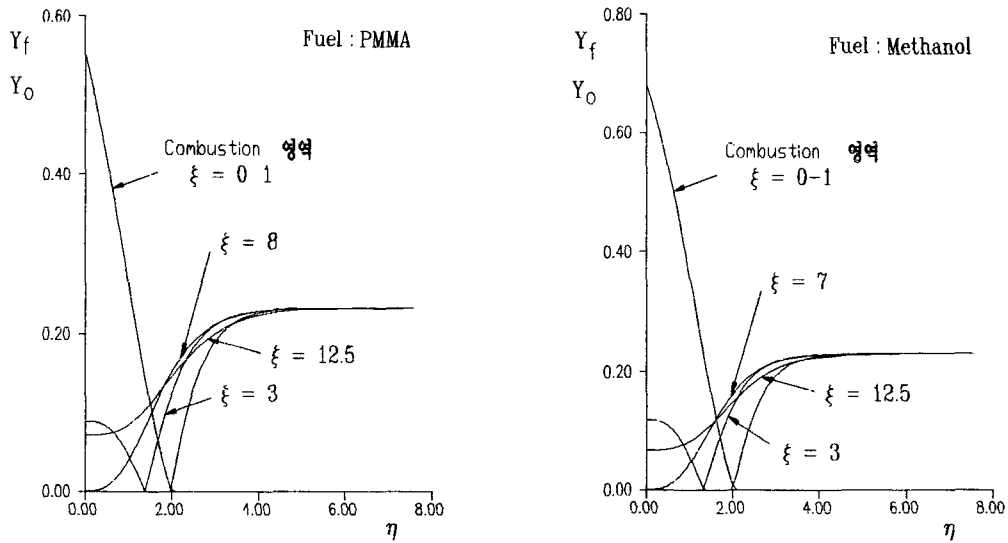


그림 8. 전 영역에서의 연료, 산소 성분비 분포(No Radiation) (PMMA : $T_w=600^{\circ}\text{K}$, Methanol : $T_w=340^{\circ}\text{K}$)

최고점은 각각 벽면을 향해서 접근하는 경향을 보이고 있다.(그림 6, 7) 한편, 연소영역에서 경계층 내의 최고 속도점은 최고 온도 위치, 즉 화염면보다 안쪽으로 형성되는 전형적인 확산화염의 유형을 관찰 할 수 있었다. 대류현상은 벽면에서 최고 속도점이 존재하는 방향으로 물질확산을 도와준

다. 그러나 이점을 지나서는 외부로의 물질확산을 방해하는 역할을 하는데, 이는 물질확산계수(Lewis number)가 중요한 역할을 함을 의미하는 것이다.

벽면에서의 연료 성분은 전파영역에서 점차 감소하여 이 영역을 지나서는($\xi > 6$) 주변의 산소가

확산되어 옴을 알 수 있다. 두선의 교차점이 0이 되는 점이 화염면을 나타내고($\xi=0-1$, $\xi=3$) 이런 점이 없는 선은 화염이 존재하지 않음을 나타낸다.(그림 8) Methanol의 경우 벽면에서의 연료 농도는 PMMA보다 큼을 알 수 있다.

그리고, 벽면의 열전달은 연소 영역에서 일정하

나 전파영역에서 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 벽면에서의 물질전달이 없어짐으로 나타나는 현상이다. 그러나, 이론적으로 이 두 경계면은 불연속이므로 양쪽의 벽면 온도차가 클 경우 급격한 상승을 보인다.(그림 9)

복사열전달을 고려할 경우, 화염으로부터의 열

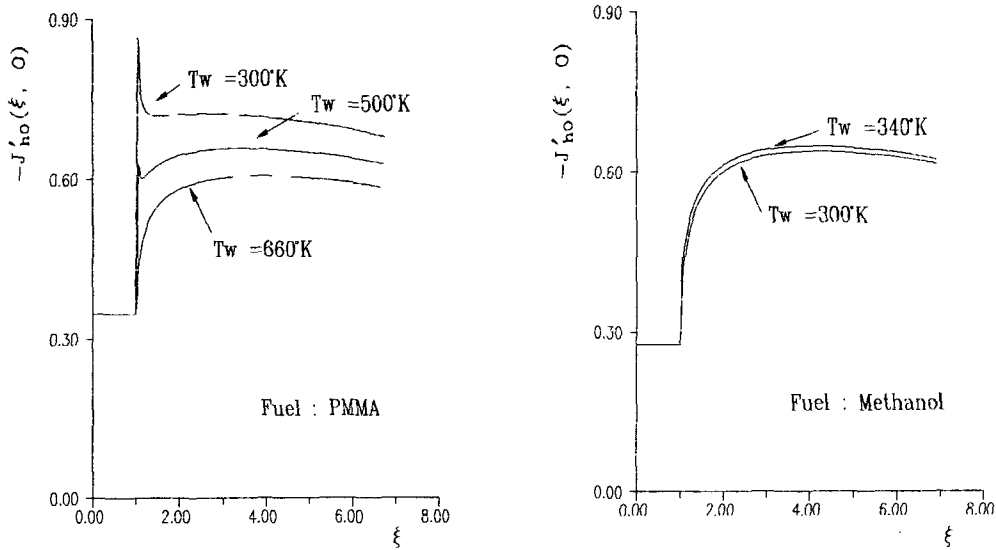


그림 9. 전 영역에서 벽면 heat flux(No Radiation)

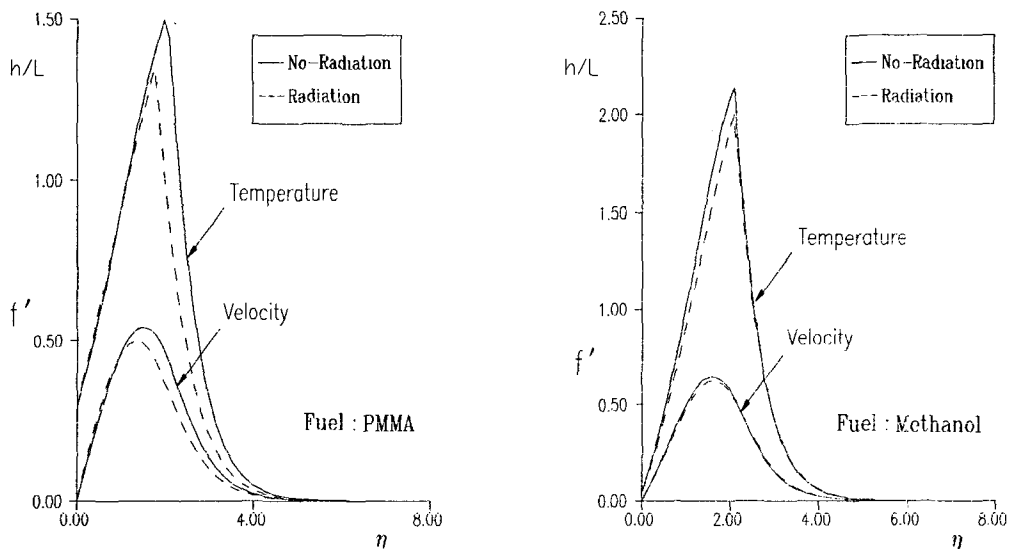


그림 10. 무차원 온도 및 속도 분포

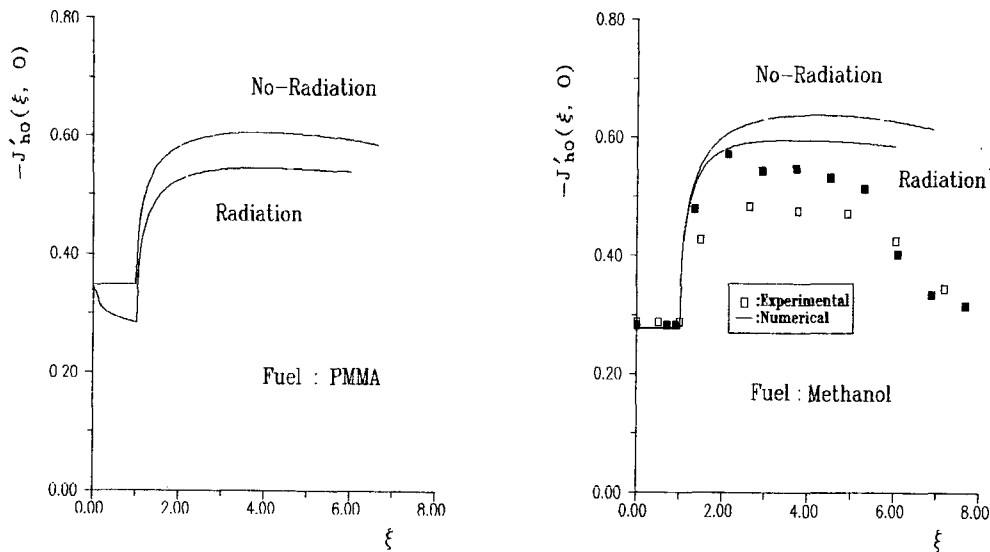


그림 11. 벽면 heat flux에 대한 복사열전달 효과 (PMMA : $T_w=600^{\circ}\text{K}$, Methanol : $T_w=340^{\circ}\text{K}$, \blacksquare : $X_0=11\text{mm}$, \square : $X_0=16\text{mm}$)

손실로 인한 온도의 감소와 이에따른 속도의 감소를 나타내고 있으며 실험치에 더욱 접근함을 알 수 있다.(그림 10)

그리고, 벽면에서의 열전달은 연소영역에서 PMMA의 경우 많이 감소한다. 이것은 화염에서 전달되는 복사열보다 벽에서 방출되는 복사열이 더욱 크기 때문이다. 화재의 경우 복사열전달은 soot의 생성과 매우 밀접한 관계가 있다. 따라서 화염의 K_p 는 soot에 의존되며, 층류의 경우 이의 생성이 작아 화염면의 K_p 는 매우 작은 값을 갖는다. 그러나 methanol의 경우 거의 변화가 없는데 이는 벽면의 emissivity와 K_p 가 작기 때문이다.(그림 11)

전파영역에서 methanol의 경우 벽면에서의 열전달은 복사열전달을 고려하지 않을 경우 실험치와 큰 차이를 보이고 있으나, 복사열전달을 고려할 경우 실험치에 접근됨을 알 수 있다. 따라서, 복사열전달의 고려는 전반적으로 이론적 해석의 정확성을 기할 수 있음을 알 수 있다.

PMMA의 경우 기본적인 실험 결과의 부족으로 -특히 전파영역은 비정상상태로 실험을 하기 매우 어렵다.-실제의 값과 정확한 비교를 할 수 없으나, burnuig rate의 경우 참고문헌[3]과

잘 일치하고 있다. 한편, 전파영역은 methanol의 결과와 비교할 때 물리적으로 합당한 결과를 보여 주고 있다.

8. 결 론

이상으로 수직평판에서의 층류 확산화염에 대한 수치적인 연구를 수행하였다. 기존의 실험, 전산 연구가 부분적인 영역에 국한하여 현상을 해석 하였던 바, 본 연구는 수직평판 위의 현상적인 문제를 규명하였으며 여기에, propagation 영역의 복사 열전달 영향에 관한 연구를 집중적으로 수행 하였다. 연구수행의 방법으로는 Keller-box method을 이용하였으며, 연료는 액체연료 (Methanol)와 고체연료 PMMA를 사용 하였다. 실험과 비교하여 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었 으며, 복사열전달을 고려하여 개선된 결과를 얻었다. 수직평판에 형성되는 층류확산화염의 현상적인 문제를 규명할 수 있었으며 나아가, propagation 영역에 미치는 복사열전달의 영향을 파악 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Kim, J. S., De Ris J., and Kroesser, F. W., "Laminar free convective Burning of Fuel Surface", Thirteenth Symposium on Combustion, 1971
2. Pagni, P. J., "Diffusion Flame Analysis", Fire Safety Journal, Vol 3, 1980-81, pp.273-285
3. Beier, R. A., Pagni, P. J., and Okoh, C. I., "Soot and Radiation in Combusting Boundary Layers", Combustion Science and Technology, 1984, Vol. 39, pp.235-262
4. Ahmad, T., "An Investigation of Laminar Overfire Region Along Upright Surfaces", Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University, 1978
5. Sibulkin, M., Kulkarni, A. K., and Annamalal, K., "Burning on Vertical Fuel Surface with Finite Chemical Reaction Rate", Combustion and Flame, Vol 44, 1982, pp. 187-199
6. Ahmad, T., Faeth G. M., "An Investigation of Laminar Overfire Region Along Upright Surfaces", Transaction of the ASME, 1978, Vol. 100, pp.112-119
7. Kuo, K. K., Principle of Combustion, John Wiley & Sons, 1986
8. Schlichting, H., Boundary Layer Theory, 7ed. McGraw-Hill, 1985
9. Sparrow, E. M., Cess, R. D., "Radiation Heat Transfer", Brooks /Cole Pub., 1965
10. Cebeci, T., Bradshaw, P., Momentum Transfer in Boundary Layers, Hemisphere Publishing Company, 1977
11. Cebeci, T., Bradshaw, P., and Whitelaw, J. H., Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow, Academic Press, 1981

기 호 목 록

- B mass transfer number
 r stoichiometric parameter
 Gr_x^* modified Grashof number ($LgX^3/4C_pT_\infty v_\infty$)
 D species diffusion coefficient
 α thermal diffusion coefficient
 λ thermal conductivity ($\alpha\rho C_p$)

- Pr Prantle number (v/α)
 Le Lewis number (α/D)
 f dimensionless stream function
 J_i Schvab-Zeldovich variables
 F buoyancy parameter
 C_p specific heat
 h enthalpy
 L effective heat of vaporization
 M_i molecular weight of i
 \dot{m}'' mass flux
 \dot{q}'' heat flux
 T temperature
 Q_c heat of combustion per v'_F moles of fuel
 ϵ emissivity
 K_p Plank mean absorption coefficient
 σ Stefan-Boltzmann constant
 x streamwise coordinate
 y transverse coordinate
 ξ dimensionless distance along wall
 ξ_0 end of combustion region
 η dimensionless distance normal to wall
 u streamwise velocity
 v transverse velocity
 μ dynamic viscosity
 ν kinematic viscosity
 v_i' stoichiometric coefficients
 ρ density
 ψ stream function
 Y_i mass fraction of species i
 Y_{FT} fuel mass fraction in transferred gas
 τ_0, τ_1 dimensionless wall temperature

첨 자 목 록

- c combustion
 F fuel
 O oxygen
 PR products of combustion
 IN inert gas
 R radiation
 Rg gas phase radiation
 Rs surface radiation
 w wall in propagation region
 w_0 wall in combustion region
 fl flame position
 ∞ ambient