

〈논 문〉

벽면 충돌 층류 확산화염의 특성

박 용 열* · 김 호 영**

(1995년 2월 20일 접수)

The Characteristics of Laminar Diffusion Flame Impinging on the Wall

Y. Y. Park and H. Y. Kim

Key Words : Impinging Jet(벽면 충돌 제트), Impinging Jet Flame(벽면 충돌 화염), Laminar Diffusion Flame(층류 확산화염), Combustion Flow Field(연소유동장), Effective Heating Area(유효가열면적)

Abstract

A theoretical study for the laminar round jet diffusion flame impinging on the wall was carried out to predict the characteristics and structure of impinging jet flame and heat transfer to the wall. Finite chemistry via Arrhenius equation was adopted as the combustion model. All the transport properties were considered as the variable depending on the temperature and composition. For the parametric study, the distance from nozzle to perpendicular wall and Reynolds number at nozzle exit were chosen as the major parameters. As the results of the present study, the characteristics of flow field and the distributions of temperature, density and each chemical species were obtained. The heat transfer rate from flame to the wall and the effective heating area were calculated to investigate the influence of the major parameters on the heat transfer characteristics.

기 호 설 명

Ar : Arrhenius 반응식의 계수	Pe : Peclet 수
D_N : 노즐의 직경	Pr : Prandtl 수
D : 확산계수	q : 반응열
E_a : 활성화 에너지	q_w'' : 벽면에서의 열전달률
f : 이론 당량비(Stoichiometric ratio)	r : 반경 방향 좌표
g : 중력 가속도	r_N : 노즐의 반경
H : 노즐 출구에서 벽면까지의 무차원 거리	Re : Reynolds 수
l : 노즐 출구에서 벽면까지의 거리	R^o : 일반 기체상수
Le : Lewis 수	T : 온도
Nu : Nusselt 수	u : 축방향 속도
p : 압력	v : 반경방향 속도
	W_i : i 성분의 분자량
	x : 축방향 좌표
	X_i : i 성분의 몰분율

*회원, 삼성데이타시스템

**회원, 고려대학교 기계공학과

- Y_i : i 성분의 질량분율
 Z : 혼합분율
 Z_c : 성분 결합 변수
 λ : 열전도 계수
 μ : 점도
 ρ : 밀도
 ν_i : i 종의 정량 반응 계수
 ω_i : 반응 생성량

하첨자

- c : 중심축
 F : 연료
 O_2 : 산소
 ∞ : 주위의 상태

1. 서 론

벽면 충돌 제트(impinging jet) 유동은 노즐로부터 분사된 제트를 벽면에 직접 충돌시키는 형태의 유동으로서, 동력 소비가 비교적 적고 충돌 제트의 유량 및 유동장의 제어를 통하여 열전달 및 물질 전달의 제어를 정밀하게 할 수 있다는 장점으로 인해 산업의 여러 분야에서 냉각 및 건조의 수단으로 광범위하게 사용되고 있다. 또한 액체 및 기체 연료를 사용하는 대부분의 연소기들은 노즐을 통하여 연료를 분출시켜 형성되는 화염을 벽면 또는 특정 형상의 용기에 충돌 제트 화염(impinging jet flame)의 형태로 유동시켜 열 및 물질 전달을 행하고 있다. 이 때 국부적인 가열 또는 전체의 효율적인 가열 등의 목적에 따라 화염으로부터 목적물로의 열전달이 조절되어야 하며, 이를 위해서는 화염의 구조 및 특성은 물론 유동 특성이 이에 부합되어야 한다. 따라서 벽면 충돌 제트 화염을 이용하여 열전달을 촉진시키고 목적에 부합되는 열전달 과정을 행하는 연소 시스템의 개발을 위해서는 기본적으로 벽면 충돌 화염의 구조 및 특성과 아울러 열전달 및 질량 전달에 대한 해석이 절실히 요구된다.

기존의 문헌들은 대부분 냉각이나 건조 등으로 사용되는 산업 현장에서 필요한 자료의 제공을 목적으로하여 주로 비반응 제트가 벽면에 충돌하는 유동의 특성과 열전달 및 물질 전달에 대한 연구에 치중되어 왔으며,^(1~4) 반응 유동장에 대한 연구는

주로 실내의 화재 발생시에 생성되는 플럼(plume)에 관한 연구들^(5~7) 및 벽면 충돌 화염에 대한 연구^(8,9) 등이 있으나 단순한 모델을 통한 계산이거나 실험의 경우에도 온도 측정을 통한 열전달의 문제에 국한되어 있다. 따라서 열전달이 가장 효율적이고 국부적인 가열 등 많은 특수 상태로 이용될 수 있는 벽면 충돌 제트 화염에 대한 연구는 미흡하며 많은 연소 시스템에서 기본적인 연구 없이 사용되고 있는 실정이다.

본 연구는 화염에서 가열 목적물로의 효율적인 열전달이나 국부적인 열전달을 하는 연소 시스템의 개발을 위한 기초연구로서, 층류 확산화염을 대상으로 이론적인 모델의 구성 후 수치해석을 통하여 연구를 수행한다. 연료 분출 노즐과 가열 목적물과의 거리 및 노즐에서의 연료 공급속도, 즉 노즐 출구에서의 레이놀즈수를 중요 변수로하여 이들의 변화에 따른 유동장의 구조 및 특성, 화염의 형태, 구조 및 특성, 열전달 특성 등을 이론적 해석을 통하여 도출한다. 이 자료들은 향상된 열전달 기능을 갖는 연소기의 개발 또는 국부적인 가열을 수행할 수 있는 모든 가열 시스템의 개발에 기초 자료들로서 사용될 것이 기대된다.

2. 이론해석

2.1 해석 모델

Fig. 1은 이론적 해석을 위하여 설정한 모델로

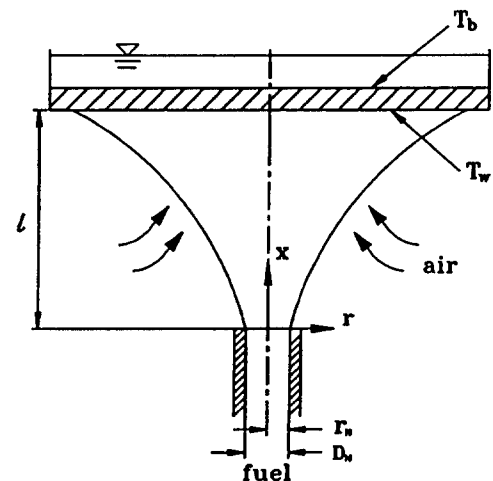


Fig. 1 Schematics of gaseous impinging jet diffusion flame model

서, 직경 D_N 인 원형 노즐로부터 분출되는 기체 연료인 프로판(propane : C_3H_8)이 주위의 산소와 만나 반응하여 확산화염을 형성하며, 이 화염은 노즐 상부에 수평으로 위치한 일정 온도 T_w 를 갖는 벽면에 수직으로 충돌하고, 평판 위에는 일정 온도를 유지하기 위하여 비등 온도의 물이 있는 것으로 한다.

해석의 편의를 위하여 채택한 가정들은 다음과 같다. 모든 기체는 이상기체와 같이 거동하며 Soret, Dufour 효과, 압력구배에 의한 확산, 중력, 운동 에너지, 점성 소멸 및 복사는 무시할 수 있고, 2종간 확산 계수는 모두 동일하며, Fick의 법칙이 성립하고 Lewis 수는 1로 한다.

이상과 같은 가정을 토대로하여 Fig. 1에 도시된 바와 같은 축대칭 2차원 좌표계에 따라 유도된 층류 정상상태 지배 방정식들은 다음과 같이 정리된다.

- 연속 방정식

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

- 운동량 보존 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v u) &= \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu \frac{\partial u}{\partial r}) + S_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v v) &= \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu \frac{\partial v}{\partial r}) + S_v \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} S_u &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu \frac{\partial v}{\partial x}) \\ &- (\rho - \rho_a) g - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S_v &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \mu \frac{\partial v}{\partial r}) \\ &- \frac{2\mu v}{r^2} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

- 연료 성분 보존 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_F) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v Y_F) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial Y_F}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial Y_F}{\partial r} \right) + \omega_F \end{aligned} \quad (6)$$

- 에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{q}{C_p} \omega_F \quad (7)$$

- 혼합분율 보존 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v Z) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial Z}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial Z}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

- 성분결합변수 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Z_c) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v Z_c) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial Z_c}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial Z_c}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

- 상태 방정식

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{p}{R^\circ T \sum_i \frac{Y_i}{W_i}} \\ i &= C_3H_8, O_2, CO_2, H_2O, N_2 \end{aligned} \quad (10)$$

연소 모델로는 Quasi-global 화학반응을 가정하여 다음과 같이 Arrhenius 식으로 표시되는 모델을 사용하여 해석한다.⁽¹⁰⁾

$$\begin{aligned} \omega_F &= -\nu_F W_F A_r \rho^{(a+b)} \left(\frac{Y_F}{W_F} \right)^a \left(\frac{Y_{O_2}}{W_{O_2}} \right)^b \exp \left(-\frac{E_a}{R^\circ T} \right) \\ A_r &= 7.2 \times 10^8, a = 0.1, b = 1.65, \\ E_a &= 30 \text{ kcal/mol} \end{aligned} \quad (11)$$

또한 식 (8) 및 (9)의 Z 와 Z_c 는 각각 다음과 같이 정의되며, 이들로부터 산소 및 연소생성물의 질량분율을 구한다.

$$Z = \frac{Y_F - \frac{Y_{O_2}}{f}}{1 + \frac{Y_{O_\infty}}{f}} + \frac{Y_{O_\infty}}{f + Y_{O_\infty}} \quad (12)$$

$$Z_c = \frac{Y_{O_2}}{\nu_{O_2} W_{O_2}} + \frac{Y_{CO_2}}{\nu_{CO_2} W_{CO_2}} \quad (13)$$

위의 지배 방정식들의 해를 구하는 데에 사용되는 경계 조건들은 다음과 같다. 노즐 출구에서는 속도의 경우 포물선형 분포를, 온도는 화염온도를 고려하여 Gauss 분포로 지정하였으며, 스칼라 변수에 대하여는 순수하게 연료만이 분출되는 조건을 지정하였다.

- 1) $x=0, 0 < r < r_N$:

$$\begin{aligned} u &= u_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{r_N} \right)^2 \right\} \\ v &= 0 \end{aligned}$$

$$\frac{T - T_c}{T_f - T_c} = \exp\left\{-200\left(\frac{r_N - r}{10r_N}\right)^{1.5}\right\}$$

$$Y_F = Z = 1.0$$

2) $x=0, r_N < r < \infty$:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = Y_F = Z = 0$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_f - T_\infty} = \exp\left\{-200\left(\frac{r - r_N}{10r_N}\right)^{1.5}\right\}$$

3) $r=0$:

$$v = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial Y_F}{\partial r} = \frac{\partial Z}{\partial r} = 0$$

4) $x=l$:

$$u = v = \frac{\partial Y_F}{\partial x} = \frac{\partial Z}{\partial x} = 0$$

$$T = T_w$$

5) $r=\infty$:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial Y_F}{\partial r} = \frac{\partial Z}{\partial r} = 0$$

벽면으로의 열전달 계산에 필요한 단위 면적당의 전열량은 다음의 식으로 계산한다.

$$q_w'' = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{wall} \quad (14)$$

또한 화학 반응이 있는 연소 유동장에서는 반응에 의한 고온의 형성 및 연소 가스들의 조성이 변화하므로 이에 따른 전달 상태량(transport property)들은 Chapman-Enskog 분자 운동론에 근거한 통계 역학적 모델을 사용하여 계산한다.⁽¹¹⁾

2.2 수치해석

수치해법으로는 Patankar⁽¹²⁾의 방법을 적용하며 이를 통하여 지배 방정식들을 대수 방정식으로 변환한 후 전산 프로그램을 작성하고 각 방정식의 해를 구한다. 압력의 해석에는 SIMPLE 알고리즘⁽¹²⁾을, 방정식의 계산에는 TDMA를 사용한다. 계산 과정은 대략 다음과 같다. 먼저 속도 성분을 계산하고 압력수정을 계산하여 속도 수정을 한 후 스칼라량들을 계산한다. 구해진 온도 및 성분조성으로부터 전달 상태량을 계산하고 처음으로 돌아가 전 과정을 수렴시까지 반복하고 벽면으로의 열전달을 계산한다.

3. 결과 및 고찰

벽면에 충돌하는 층류 제트 확산화염의 이론적

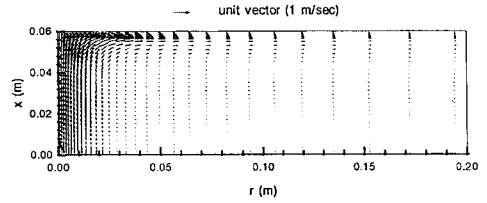


Fig. 2 Velocity vector field (H=12, Re=400)

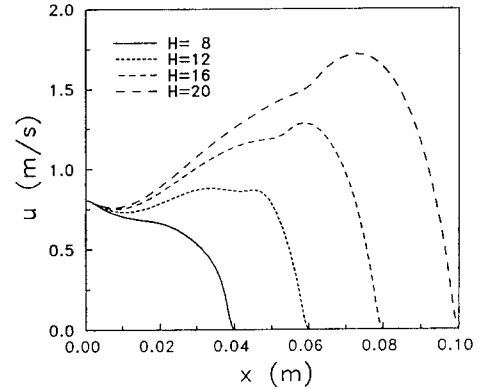


Fig. 3 Distributions of axial velocity along centerline with H (Re=400)

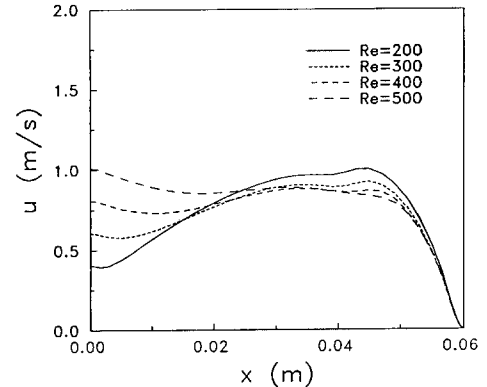


Fig. 4 Distributions of axial velocity along centerline with Re (H=12)

모델을 해석하여 유동장, 혼합분율, 온도 및 밀도 분포, 각 성분의 조성 및 화염의 형태, 벽면으로의 열전달 특성을 구하였다. 이때 연료로는 프로판(C₃H₈)을, 산소의 공급원으로는 공기를 택하였으며, 사용한 노즐의 직경(D_N)은 5 mm이고, 해석 상의 중요 인자들로는 노즐과 벽면간의 무차원 거리(H = l/D_N) 및 노즐 출구의 레이놀즈수(Re)를 택하였다.

Fig. 2는 $H=12, Re=400$ 인 경우 유동장의 벡터 선도 분포를 도시한 것으로서 분출된 제트는 노즐에서 멀어질수록 운동량의 확산으로 인하여 폭이 증가하며, 벽면 부근에서는 유동의 방향이 급격히 변하는 것을 볼 수 있다. 또한 방향이 바뀐 유동은 벽면을 따라 흐르는 벽면 제트 유동으로 천이됨을 알 수 있다.

Fig. 3은 $Re=400$ 인 경우 중심축상의 축방향 속도를 H 의 변화에 따라 비교 도시한 것이다. 벽면 부근에서는 벽면의 영향으로 속도가 급격히 감소함은 공통적이나, H 가 커질수록 밀도 변화에 따른 팽창 및 부력 효과가 작용하는 시간이 길어짐으로써 속도가 증가함을 볼 수 있다. $H=8$ 인 경우 노즐과 벽면간의 거리가 가깝기 때문에 속도가 증가하지 못하고 급격히 감소하나 $H=20$ 인 경우 커다란 속도 증가를 관찰할 수 있다. 또한 벽면 근처에서 증가율이 커지는 것을 볼 수 있는데 이는 정체점의 영향으로 속도가 감소함에 따라 상류로부터

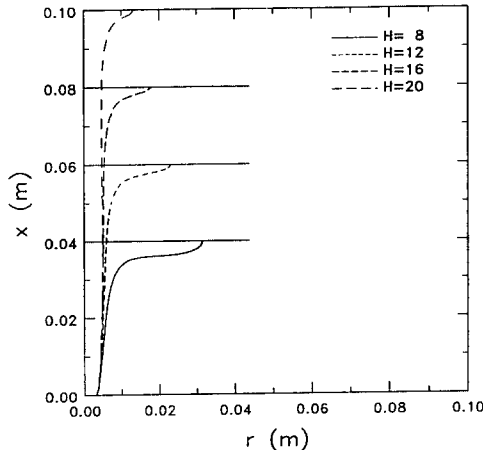


Fig. 5 Flame shapes with H ($Re=400$)

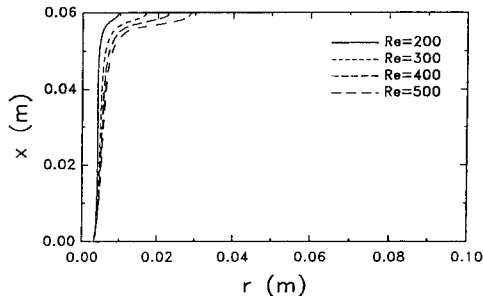


Fig. 6 Flame shapes with Re ($H=12$)

전달된 열이 축방향으로 대류에 의한 열전달이 되지 못하므로 축적되어 온도가 증가함에 따른 결과로 해석된다. Fig. 4는 $H=12$ 인 경우 화염의 중심축상에서의 축방향 속도 분포를 도시한 것이다. 전체적인 경향은 연료가 노즐에서 분출된 후 운동량의 확산으로 속도가 약간 감소하다가 온도 변화에 의한 팽창과 부력의 효과가 커지면서 운동량의 증가로 인한 속도의 증가를 보이고 있다. 레이놀즈수가 작을수록 노즐로부터 벽면에 도달하는 시간이 길어짐에 따라 온도 변화의 영향 또한 더욱 크게 작용함으로써 속도 증가율이 커짐을 볼 수 있다.

Fig. 5 및 6은 중요 인자들의 변화에 따른 화염의 형태를 도시한 것들이며 화염면은 연료와 산소가 혼합되어 완전반응비를 만족하는 지점, 즉 혼합분율의 값이 0.06인 지점으로 결정하였다. Fig. 5는 $Re=400$ 인 경우 H 의 변화에 따른 화염의 형태를 비교 도시한 것으로서 거리가 가까운 경우($H=8$) 화염은 노즐로부터 하류로 갈수록 폭이 커지나 거리가 먼 경우($H=20$) 화염의 폭은 증가하다가 다시 감소하며 벽면에 충돌하면서 다시 넓어짐을 볼 수 있고 거리가 가까울수록 벽면에 충돌한 후 벽면을 따라 형성되는 화염은 반경방향으로 더 넓게 퍼짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 6은 $H=12$ 인 경우 레이놀즈수의 변화에 따른 화염의 형태를 비교 도시한 것으로 레이놀즈수가 클수록 화염의 폭은 두꺼워지며, 또한 벽면에 충돌한 후 벽면을 따라 반경방향으로도 더 멀리까지 화염이 퍼짐을 알 수 있다. 이는 레이놀즈수가 커지면 공급 연료가 많아짐으로써 화염의 폭 및 퍼짐이 커지는 현상으로 해석된다.

Fig. 7은 $H=12, Re=400$ 인 경우 계산 영역내의 등온선 분포를 도시한 것이다. Fig. 5의 화염의 형태와 비교해 볼 때 화염면에서 온도가 가장 높으며 노즐로부터 벽면 쪽으로 갈수록 온도가 점차 증가하다가 벽면 부근에서는 찬 벽면으로의 열전달로 인하여 온도가 급격히 감소하고 있음을 볼 수 있다. 벽면으로 갈수록 온도가 증가하는 이유는 노즐

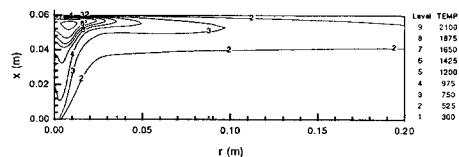


Fig. 7 Contour of isotherms ($H=12, Re=400$)

출구로부터 연소로 인하여 발생된 고온의 기체가 유동에 따라 진행하면서 열이 전달되어 나타나는 현상으로 해석된다. 화염의 끝부분을 지난 영역에서는 벽면을 따라서 반경방향으로 넓은 범위에 걸쳐 고온의 영역이 형성됨을 볼 수 있는데, 이것 역시 화염으로부터 생성된 열이 화염을 떠난 후에도 유동에 의하여 반경방향으로 전달되어 나타난 현상으로 해석된다.

Fig. 8은 $Re=400$ 인 경우 H 의 변화에 따른 중심축상의 온도 분포를 도시한 것으로, 네 경우 모두 노즐 출구로부터 온도가 점차 증가하다가 벽면에 의한 냉각 효과로 벽면근처에서 급격히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 다만 거리가 멀수록 벽면 가까이에서 온도가 더욱 급격히 증가하고 온도가 높은 영역도 넓어짐을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 3의 속도분포와 비교해 보면 거리가 멀수록 큰 속

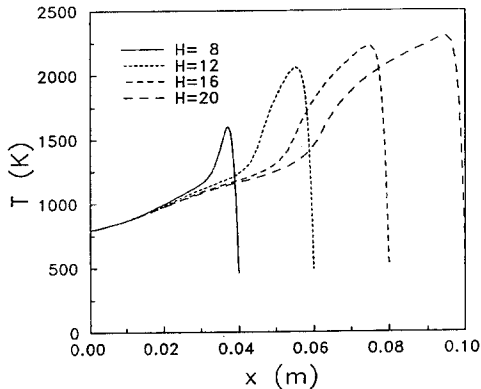


Fig. 8 Distributions of temperature along centerline with H ($Re=400$)

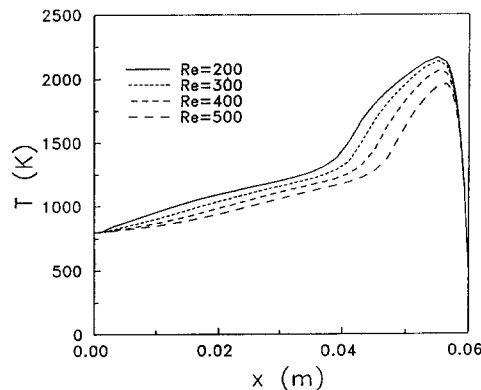


Fig. 9 Distributions of temperature along centerline with Re ($H=12$)

도 분포를 보이다가 벽면에 의한 압력 구배의 영향으로 속도의 감소율이 커짐에 따라 유동의 상류로부터 전달되어온 열이 급격한 속도의 감소로 인하여 열의 축적효과가 증대됨으로써 나타나는 현상으로 해석된다. Fig. 9는 $H=12$ 인 경우 Re 의 변화에 따른 화염의 중심축상의 온도 분포를 비교 도시한 것으로 노즐로부터 벽면으로 진행할수록 중심축 온도가 증가하다 벽면으로의 열전달로 인하여 급격히 감소하는 경향은 모두 같으며 레이놀즈수가 작을수록 중심축상의 온도가 전반적으로 크게 나타나는데 이는 축방향의 대류 효과에 비해 반경방향으로의 확산의 영향이 상대적으로 크고 반응물 역시름으로 인하여 화염으로부터 중심축으로의 열확산이 커짐으로써 나타나는 현상으로 해석된다.

Fig. 10은 축방향의 지정된 위치 ($x=0.03$)에서 각 성분의 분포들을 비교 도시한 것으로 전형적인 확산화염의 분포를 잘 보여주고 있다. 연료와 산소의 곡선이 교차하는 지점이 바로 화염면의 위치이며 이 지점에서 이산화탄소 및 수증기의 최대점이 나타남을 볼 수 있다. 또한 유한 화학 반응물의 채택으로 인하여 화염면의 외부에도 연소되지 않은 연료 성분이 존재하며 산소 성분 역시 완전히 반응되지 않고 확산되어 화염면 내부에도 존재함을 볼 수 있다. 생성된 이산화탄소 및 수증기는 수치적인 차이는 있으나 동일한 경향을 보이며, 외부로 확산되어 나가고 있다. 대기 중의 질소 성분은 화염 내부로 상당량 확산되어 들어가 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 동일한 레이놀즈수의 경우 노즐과 벽면의 거리에 따른 국부 전열량을 도시한 것으로 정

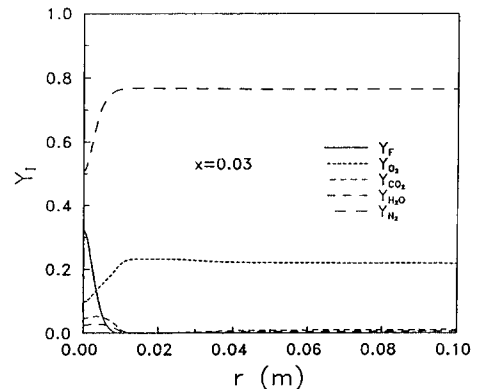


Fig. 10 Distributions of mass fraction of various species at given axial location ($H=12$, $Re=400$)

체점에서 최대값을 나타내고 반경방향으로 멀어질수록 줄어드는 분포를 보인다. 노즐과 벽면의 거리가 멀수록 정체점 부근에서는 큰 값을 가지나 반경방향으로 갈수록 감소율이 크며, $r=0.03$ 정도부터는 반대로 노즐과 벽면의 거리가 작은 경우 큰 값을 나타내고, $r=0.15$ 정도부터는 거의 같아짐을 볼 수 있다. 이는 노즐과 평판의 거리가 큰 경우 노즐로부터 벽면에 도달하기까지 중심축 부근에서 많은 연소열로 인하여 온도가 더욱 증가하게 되고, Fig. 5의 화염 형태와 비교해 볼 때 벽면에 부딪친 후 벽면을 따라 형성되는 화염의 크기가 작기 때문에 정체점 부근의 열전달률은 커지나 반경방향으로 화염을 지난 후 유동에 의하여 형성되는 고온의 영향이 더 작아짐으로써 나타나는 현상으로 해석된다. $H=8$ 의 경우에는 정체점의 약간 외부에서 최대값을 갖는 분포를 나타내며 이후 다른 경우와 경향은 같으나 $r=0.03$ 부터 $r=0.1$ 까지의 영역에서는 큰 값을 보이는데 이는 화염이 벽면에 충돌한 후 화염면이 벽면에 가깝게 그리고 넓게 형성됨에 기인하는 현상으로 해석된다. Fig. 12는 레이놀즈수의 변화에 따른 국부 전열량의 분포를 도시한 것으로, 정체점 부근에서는 레이놀즈수가 작은 경우 약간 큰 값을 가지나 모든 경우 거의 비슷한 값을 나타내며, 이후 반경방향으로 벽면을 따라 진행하면서 레이놀즈수가 클수록 전반적으로 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 앞서 고찰한 바와 같이 레이놀즈수가 클수록 연료의 유량이 많음으로써 화염의 크기가 커짐에 따른 결과로 판단된다. 또한 Fig. 11과 Fig. 12를 비교해 보면 노즐과 벽면의 거리의

변화가 레이놀즈수의 변화보다 열전달에 미치는 영향이 크며 국부 전열량 또한 큼을 알 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 공급 연료의 총발열량 중에서 20%, 30%, 40% 및 60%의 열이 전달된 벽면의 원형 면적에 대한 반경(유효거리)을 나타낸 것이다.

Fig. 13은 동일한 레이놀즈수에 대하여 노즐과 벽면의 거리 변화에 따른 유효거리를 도시한 것으로 20%의 경우 노즐과 벽면의 거리가 멀어지면 약간 감소하는 경향을 보이고 30%의 경우에는 거의 일정하며 40% 이상에서는 증가함을 나타낸다. 이는 Fig. 11과 비교할 때 20%의 경우는 비교적 작은 열량이며 열전달률이 정체점 부근에서는 거리가 멀수록 크고 따라서 전열량이 집중되어 거리가 멀어질수록 유효거리가 감소하나 $r=0.03$ 이후에는

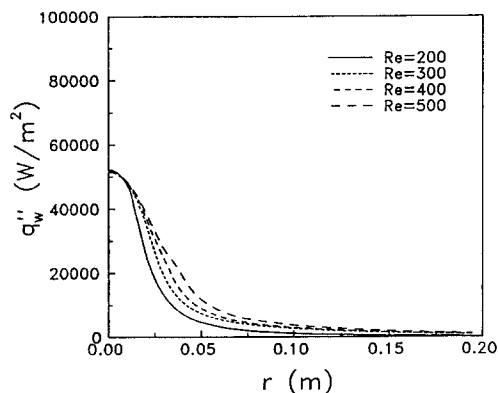


Fig. 12 Distributions of heat flux at the impingement surface with Re ($H=12$)

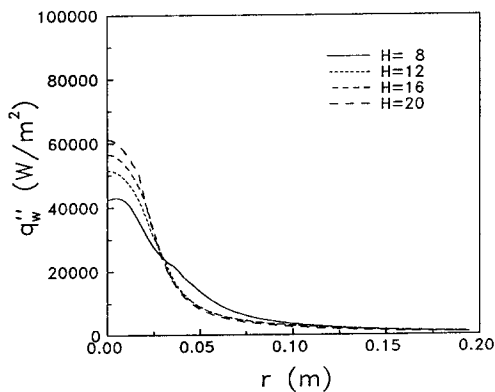


Fig. 11 Distributions of heat flux at the impingement surface with H ($Re=400$)

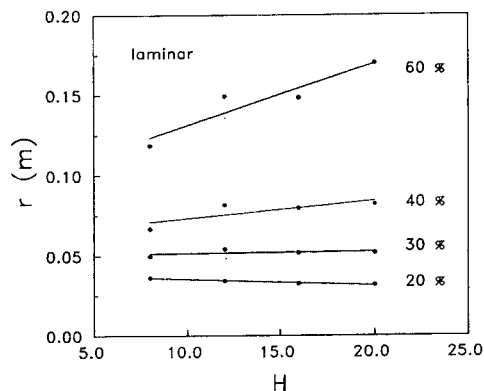


Fig. 13 Effective distances of given fractional amount of total generated heat transferred to wall with H ($Re=400$)

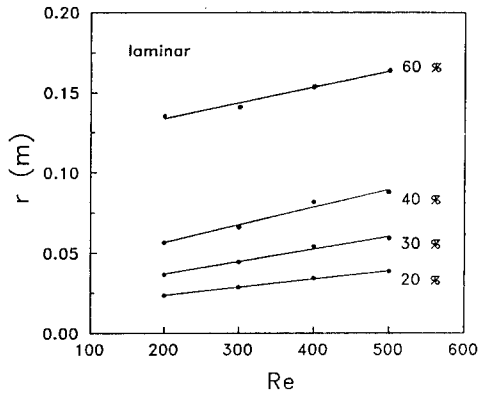


Fig. 14 Effective distances of given fractional amount of total generated heat transferred to wall with Re ($H=12$)

거리가 멀수록 열전달률이 작은 값을 갖고 또한 전 열면적은 거리의 제곱에 비례하므로 40% 이상에서는 거리가 멀어질수록 동일한 열량으로 가열할 수 있는 면적은 넓어지는 것으로 해석된다. 따라서 30% 정도를 기준으로 경향이 달라짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 14는 노즐과 벽면간의 거리가 동일한 경우 레이놀즈수에 따른 유효거리를 도시한 것으로 레이놀즈수가 클수록 공급 연료량이 많고 따라서 발열량이 많음으로써 유효 가열 면적이 커짐을 알 수 있다.

4. 결 론

원형 노즐에서 연료가 분출하여 형성된 기체 확산화염이 수직인 벽면에 충돌할 때의 유동, 연소 및 열전달 특성에 대한 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 유량이 비교적 적은 증류 연소 유동장은 화염에서의 연소열로 인하여 축방향의 속도가 증가하며, 중심축상의 속도는 노즐과 벽면간의 거리가 멀수록, 레이놀즈수가 작을수록 속도 증가율이 더 크다.

(2) 화염의 형태는 노즐과 벽면의 거리가 가까울수록, 레이놀즈수가 클수록 폭은 두껍고 벽면에 충돌 후 벽면을 따라 형성되는 화염의 폭도 크다.

(3) 온도는 노즐로부터 하류로 갈수록 점차 증가하는 분포를 가지며, 벽면 근처에서는 벽면으로의 열전달로 인하여 온도가 급격히 줄어든다. 또한 노즐과 벽면의 거리가 멀수록, 레이놀즈수가 작을수

록 온도가 높아진다.

(4) 화염면에서는 연료 및 산소의 질량분율이 급격히 감소하며 이산화탄소 및 수증기의 질량분율이 크고, 화염면 내부 및 외부에도 각각 산소 성분 및 연료 성분이 존재한다.

(5) 국부 전열량은 정체점에서 가장 크고 반경방향으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내며 노즐과 벽면의 거리가 멀수록, 레이놀즈수가 작을수록 정체점 부근의 전열량이 증가된다. 또한 총발열량의 일정 비율이 벽면으로 전달되는 유효가열면적은 30% 정도를 기준으로, 그 이하에서는 노즐과 벽면의 거리가 멀어지면 감소하나 그 이상에서는 증가하며, 레이놀즈수에 따라서는 공급 연료량의 증가에 따른 발열량의 증가로 인하여 가열면적이 넓어진다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 1991년도 일반 기초연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 대하여 감사의 뜻을 포함한다.

참고문헌

- (1) Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1968, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Two-Dimensional Air Jets," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 88, pp. 101~108.
- (2) Saad, N. R., Douglas, W. J. M. and Mujumdar, A. S., 1977, "Prediction of Heat Transfer under an Axisymmetric Laminar Impinging Jet," *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol. 16, No. 1, pp. 148~154.
- (3) Womac, D. J., Ramadhyani, S. and Incropera, F. P., 1993, "Correlating Equations for Impingement Cooling of Small Heat Sources with Single Circular Liquid Jets," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 106~115.
- (4) Lee, J. H. and Lee, S. J., 1992, "Heat Transfer Characteristics of Impinging Elliptic Jets," 대한기체학회 추계학술대회 논문집(II), pp. 115~119.
- (5) Alpert, R. L., 1975, "Turbulent Ceiling-Jet Induced by Large-Scale Fires," *Combustion Science*

- and Technology*, Vol. 11, pp. 197~213.
- (6) Delichatsios, M. A., 1981, "The Flow of Fire Gases Under a Beamed Ceiling," *Combustion and Flame*, Vol. 43, pp. 1~10.
- (7) Cooper, L. Y., 1989, "Heat Transfer in Compartment Fire Near Regions of Ceiling-Jet Impinging on a Wall," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 455~460.
- (8) 김호영, 정진택, 1985, "기체 확산화염이 벽면에 충돌연소시 열전달 및 연소특성," 고려대학교 생기연 논문집, 21호, pp. 45~56.
- (9) 홍성균, 1993, "벽면 충돌 확산화염의 특성에 관한 실험적 연구," 고려대학교 석사학위 논문.
- (10) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., 1984, "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 10, pp. 17~57.
- (11) Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E., 1988, *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill.
- (12) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill.