

## 벽면 충돌 난류 확산화염의 특성

박 용 열\* · 김 호 영\*\*

(1998년 2월 27일 접수)

### The Characteristics of Turbulent Diffusion Flame Impinging on the Wall

Yong Youl Park and Ho Young Kim

**Key Words:** Impinging Jet(벽면충돌제트), Impinging Jet Flame(벽면충돌화염), Turbulent Diffusion Flame(난류확산화염), Combustion Model(연소모델), Effective Heating Area(유효가열면적)

#### Abstract

A theoretical study on the turbulent 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 and eddy dissipation model was adopted as a combustion model, and the Favre averaging and k-ε model were introduced in the theoretical modeling. The SIMPLE algorithm was applied to the calculation. All the transport properties were considered as the variable depending on the temperature and composition. For the parametric study, the distance from nozzle to impinging wall and Reynolds number at nozzle exit were chosen as the major parameters. As the results of the present study, the characteristics of flow fields, the distributions of main variables and each chemical species and the flame shapes were obtained. The heat transfer rate from the flame to the wall and the effective heating area were calculated to investigate the influences of the major parameters on the heat transfer characteristics.

#### 기호설명

$A_r$  : Arrhenius 반응식의 계수  
 $C_p$  : 정압비열  
 $C_1, C_2, C_D, C_\mu$  : 난류상수  
 $C_r$  : 와류소멸 반응 모델 상수  
 $D_N$  : 노즐의 직경  
 $D$  : 확산계수  
 $E_a$  : 활성화 에너지(kcal/mol)  
 $f$  : 이론 당량비 (Stoichiometric ratio)  
 $g$  : 중력 가속도  
 $H$  : 노즐 출구와 벽면간의 무차원 거리

( $= l/D_N$ )

$k$  : 난류 운동 에너지  
 $l$  : 노즐 출구와 벽면간의 거리  
 $Le$  : Lewis 수  
 $Nu$  : Nusselt 수  
 $p$  : 압력  
 $Pe$  : Peclet 수  
 $Pr$  : Prandtl 수  
 $q$  : 반응열  
 $q_w''$  : 벽면에서의 열전달율  
 $r$  : 반경 방향 좌표  
 $r_N$  : 노즐의 반경  
 $Re$  : Reynolds 수  
 $R^\circ$  : 일반 기체상수  
 $R_{f, arr}$  : Arrhenius 반응율  
 $R_{f, edr}$  : 와류 소멸율(eddy dissipation rate)

\* 한국생산기술연구원

\*\* 회원, 고려대학교 기계공학파

$T$	: 온도
$u$	: 축방향 속도
$v$	: 반경방향 속도
$W_i$	: $i$ 성분의 분자량
$x$	: 축방향 좌표
$X_i$	: $i$ 성분의 몰분율
$Y_i$	: $i$ 성분의 질량분율
$Y_\infty$	: 주위 공기의 산소 질량분율
$Z$	: 혼합분율
$Z_c$	: 성분결합변수
$\epsilon$	: 난류 소멸율
$\lambda$	: 열전도 계수
$\mu$	: 점도
$\rho$	: 밀도
$\sigma_h, \sigma_e, \sigma_{Yi}$	: 난류 모델 상수
$\nu_i$	: $i$ 종의 정량 반응 계수
$\omega_i$	: 반응 생성량

#### 하첨자

$F$	: 연료
$i$	: $i$ 종 성분
$O_2$	: 산소
$W$	: 벽면
$\infty$	: 주위상태
$c$	: 중심축

#### 상첨자

-	: Reynolds 평균
~	: Favre 평균

## 1. 서론

벽면 충돌 제트(impinging jet) 유동은 자유제트 유동, 정체점 유동 및 벽면제트 유동의 세 가지가 복합된 특수한 형태의 유동으로서, 동력 소비가 비교적 적고 충돌 제트의 유량 및 유동장의 제어를 통하여 열전달 및 물질전달의 제어를 정밀하게 할 수 있다는 장점으로 인하여 산업의 여러 분야에서 냉각 및 건조의 수단으로 사용되고 있다. 또한 액체 및 기체 연료를 사용하는 대부분의 산업용 및 가정용 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 있으며, 이 때 국부적인 가열 또는 전체의 효율적인 가열 등의 목적에 따라 화염으로부터 목적물로 전달되는 열전달의 제어가 필요하며 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 물질전달에 대한 해석이 요구된다.

기존의 난류 충돌 제트에 대한 연구들은 Anamo 등의 액체 제트를 이용한 고체의 절단 해석<sup>(1)</sup>, Kunugi 등의 수치해석적 연구<sup>(2)</sup> 등을 비롯하여 상당수 있으나<sup>(3,4)</sup> 주로 비반응 제트가 벽면에 충돌하는 난류 유동의 특성과 열전달 및 물질전달에 대한 연구들이며, 반응 유동장에 대한 연구는 주로 실내의 화재 발생시에 생성되는 난류 플럼(plume)에 관한 연구들<sup>(5-8)</sup> 및 벽면 충돌 화염 또는 정체점을 갖는 화염에 대한 연구들<sup>(9,10)</sup>이 있으나 대부분 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 연구없이 사용되고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 화염에서 가열 목적물로써의 효율적인 열전달이나 국부적인 열전달을 하는 연소시스템의 개발을 위한 기본 자료를 도출하는 것이다. 이를 위하여 난류 확산화염을 대상으로 하여 모델의 구성 후 수치해석을 통한 이론적인 연구를 수행하며 해석상의 중요 변수로는 연료 분출 노즐과 가열 목적물과의 거리 및 노즐에서의 연료 공급속도(레이놀즈수)를 선정하여 이들의 변화에 따른 유동장의 구조 및 특성, 화염의 형태, 구조 및 특성, 열전달 특성 등의 자료들을 도출한다. 이 자료들은 향상된 열전달 기능을 갖는 연소기의 개발 또는 국부적인 가열을 수행할 수 있는 모든 가열 시스템의 개발에 기초 자료로 사용될 것이 기대된다.

2. 이론 해석

2.1 해석모델

본 연구에서 채택한 해석 대상 모델은 Fig.1과 같다. 직경  $D_N$ 인 원형 노즐로부터 분출되는 기체 연료인 프로판( $C_3H_8$ )이 주위의 산소와 만나 반응하여 확산화염을 형성하며, 이 화염은 노즐 상부에 수평으로 위치한 일정 온도  $T_w$ 를 갖는 벽면에 수직으로 충돌하며, 평판 위에는 일정 온도를 유지하기 위하여 비등 온도의 물이 있는 것으로 한다.

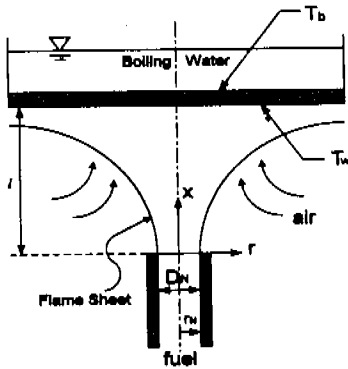


Fig. 1 Schematics of gaseous impinging jet diffusion flame model.

해석의 편의를 위하여 채택한 가정들은 다음과 같다. 모든 기체는 이상기체(ideal gas)와 같이 거동하며 Soret, Dufour 효과, 압력구배에 의한 확산, 중력일, 운동 에너지, 점성 소멸 및 복사 열전달은 무시할 수 있고, 2종간 확산 계수(binary diffusion coefficient)는 모두 동일하며, Fick의 법칙이 성립하고 Lewis 수는 1로 한다.

난류의 해석을 위하여 지배 방정식에 Favre 평균을 취하였고 난류모델로는 표준  $k-\epsilon$  모델 및 벽면함수물 사용하였다. 다만 밀도의 요동(fluctuation)이 고려되지 않음으로써 실제로는 Reynolds 평균과 계산 결과는 동일하다. 평균식에 나타나는 난류 용력항은 Boussinesq 근사를 적용하였고 스칼라량과 난류 유속(turbulent flux)은 구배 확산 모델(gradient diffusion model)을 사용하였다<sup>(11)</sup>.

위의 가정 및 난류 해석에 따라 유도된 정상상태 축대칭 지배 방정식들은 다음과 같이 일반적인 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(r\bar{\rho}u\phi) + \frac{\partial}{\partial r}(r\bar{\rho}v\phi) = \frac{\partial}{\partial x}(r\Gamma_o \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_o \frac{\partial \phi}{\partial r}) + rS_\phi \quad (1)$$

윗식의 일반변수  $\phi$ , 확산계수  $\Gamma\phi$  및 생성항  $S\phi$ 를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Summary of terms in the governing equations.

$\phi$	$\Gamma_o$	$S_o$	
1	0	0	(2)
$\tilde{u}$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x}[\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r}] - \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff}\theta + \bar{\rho}k) - (\bar{\rho} - \rho_o)g$	(3)
$\tilde{v}$	$\mu_{eff}$	$\frac{\partial}{\partial x}[\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r\mu_{eff} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r}] - \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_{eff}\theta + \bar{\rho}k) - \frac{2\mu_{eff}\tilde{v}}{r}$	(4)
$\bar{\gamma}$	$\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$	$-\frac{q}{C_p} \bar{\omega}_F$	(5)
$\bar{\gamma}_F$	$\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_{\gamma_F}}$	$\bar{\omega}_F$	(6)
$k$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G - C_D \bar{\rho} \epsilon$	(7)
$\epsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k}(C_1 G - C_2 \bar{\rho} \epsilon)$	(8)
$Z$	$\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_Z}$	0	(9)
$Z_c$	$\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_{Z_c}}$	0	(10)

$$G = \mu_t [2 \{ (\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \tilde{v}}{\partial r})^2 + (\frac{\tilde{v}}{r})^2 \} + (\frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x})^2] - \frac{2}{3} \epsilon (\mu_t \theta + \bar{\rho}k)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

$$\theta = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} + \frac{\tilde{v}}{r}$$

식 (9) 및 (10)의  $Z$ 와  $Z_c$ 는 각각 혼합분율 및 성분결합변수로서 다음과 같이 정의되며 산소 및 연소생성물의 질량분율을 구하는 데 사용된다.

$$Z = \frac{\bar{Y}_F - \frac{\bar{Y}_{O_2}}{f}}{1 + \frac{\bar{Y}_{O_2}}{f}} + \frac{\bar{Y}_{O_2}}{f + Y_{O_2}} \quad (11)$$

$$Z_c = \frac{\bar{Y}_{O_2}}{\nu_{O_2} W_{O_2}} + \frac{\bar{Y}_{CO_2}}{\nu_{CO_2} W_{CO_2}} \quad (12)$$

본 연구에서 채택한 연소모델은 다음과 같이 화학반응은 Arrhenius 식으로 표시되는 유한 화학반응율과 와류성분에 의한 연료와 산소의 혼합을 중에서 작은 것에 의해 반응이 지배되는 모델을 사용하였다.

o Arrhenius 반응식<sup>(12)</sup>

$$R_{f, arr} = \nu_F W_F A_r \bar{\rho}^{-(a+b)} \left( \frac{\bar{Y}_F}{W_F} \right)^a \left( \frac{\bar{Y}_{O_2}}{W_{O_2}} \right)^b \exp\left( \frac{-E_a}{R \cdot \bar{T}} \right) \quad (13)$$

$$A_r = 7.2 \times 10^8, \quad a = 0.1, \quad b = 1.65, \quad E_a = 30$$

o 와류 소멸 모델<sup>(13)</sup>

$$R_{f, str} = \begin{cases} C_R \bar{\rho}^{-\frac{\epsilon}{k}} \frac{\bar{Y}_F}{k} & \text{for } Z \leq Z_i \\ C_R \bar{\rho}^{-\frac{\epsilon}{k}} \frac{\bar{Y}_{O_2}}{f} & \text{for } Z > Z_i \end{cases} \quad (14)$$

$$C_R = 4.0, \quad f = \frac{W_{O_2} \nu_{O_2}}{W_F \nu_F}$$

$$\text{따라서 } \bar{\omega}_F = -\text{MIN}(R_{f, arr}, R_{f, str}) \quad (15)$$

그 외에 필요한 보조 방정식들은 다음과 같다.

o 상태 방정식

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{p}}{R \cdot \bar{T} \sum_i \frac{\bar{Y}_i}{W_i}} \quad (16)$$

$$i = C_3H_8, O_2, CO_2, H_2O, N_2$$

o Kolmogorov - Prandtl 식

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

화염으로부터 벽면으로의 열전달 특성을 고찰

하기 위하여 사용된 국부 열전달율은 다음과 같이 정의한다.

$$q_w'' = -\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \Big|_{wall} \quad (18)$$

위의 지배 방정식들의 해를 구하는 데에 사용되는 경계 조건들은 다음과 같다.

$$x=0, \quad 0 < r < r_N :$$

$$\tilde{u} = u_{max} \left( 1 - \frac{r}{r_N} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\tilde{v} = 0$$

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

$$\bar{Y}_F = Z = 1.0$$

$$k = 0.03 u_{max}^2 \left[ 1 + 2 \left( \frac{r}{r_N} \right)^2 \right]$$

$$\epsilon = \frac{C_{\epsilon} k^{\frac{3}{2}}}{0.03 r_N}$$

$$x=0, \quad r_N < r < \infty :$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} = \bar{Y}_F = Z = 0$$

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

$$k, \epsilon = \text{given (small definite value)}$$

$$r=0 :$$

$$\begin{aligned} \tilde{v} &= \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} = \frac{\partial \bar{Y}_F}{\partial r} \\ &= \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = \frac{\partial Z}{\partial r} = 0 \end{aligned}$$

$$x=l :$$

$$\bar{T} = \bar{T}_w$$

$$\tilde{u} = \tilde{v} = k = \frac{\partial \bar{Y}_F}{\partial x} = \frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$$

$$r=\infty :$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r} &= \frac{\partial \tilde{v}}{\partial r} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} = \frac{\partial \bar{Y}_F}{\partial r} \\ &= \frac{\partial Z}{\partial r} = \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial \epsilon}{\partial r} = 0 \end{aligned}$$

화학반응을 수반하는 연소유동장에서는 고온의 형성에 따른 각종 전달 상태량의 변화가 있으므로 Chapman-Enskog 분자 운동론에 근거한 통계 역학적 모델을 사용하여 전달 상태량을 계산하며, 이때 기체혼합물의 점도는 Wilke의 식으로, 열전도도는 Wassiljewa의 식으로 계산한다.<sup>(14)</sup>

2.2 수치해석

수치해법으로는 Patankar<sup>(15)</sup>의 방법을 적용하며 이를 통하여 지배 방정식들을 대수 방정식으로 변환한 후 전산 프로그램을 작성하고 각 방정식의 해를 구한다. 압력의 해석에는 SIMPLE 알고리즘<sup>(16)</sup>을, 방정식의 계산에는 TDMA를 사용한다. 계산 과정은 대략 다음과 같다. 먼저 속도 성분 분을 계산하고 압력수정을 계산하여 속도 수정을 한 후 스칼라량들을 계산한다. 구해진 온도 및 성분조성으로부터 전달 상태량을 계산하고 처음으로 돌아가 전과정을 수렴시까지 반복하고 벽면으로의 열전달을 계산한다.

3. 결과 및 고찰

벽면에 충돌하는 난류 제트 확산화염의 이론적 모델을 해석하여 유동장, 각 변수들의 분포, 성분 및 조성 및 화염의 형태, 벽면으로의 열전달 특성을 구하였다. 사용한 노즐의 직경(D<sub>N</sub>)은 5 mm이며, 해석 상의 중요 인자들로는 노즐과 벽면간의 무차원 거리(H=1/D<sub>N</sub>) 및 노즐 출구의 레이놀즈수(Re)를 선정하였다. 계산 조건은 H = 8, 12, 16, 20이며 Re = 4000 ~ 7000 으로 하였다.

Fig.2는 H=16, Re=5000인 경우 유동장의 속도 벡터분포를 도시한 것이다. 노즐 출구에서 큰 속도를 가지고 분출된 연료는 주위의 공기를 유인하여 벽면으로 접근하며 벽면 가까이에서는 정체점으로부터 압력 구배의 영향으로 유동의 방향이 바뀌며 이후 벽면을 따라 흐르는 벽면 제트 유동이 됨을 볼 수 있으며 비반응 충돌 제트 유동장과 유사한 구조를 이루고 있다.

Fig.3은 Re=5000 인 경우 H의 변화에 따른 중심축상에서의 축방향 평균 속도 분포를 나타낸 것으로 노즐 출구로부터 감소하면 속도가 벽면 근처에서 정체점으로부터의 압력 구배가 큼으로 인하여 급격히 감소하며, H가 작을수록 속도감소

율이 큼을 알 수 있다. Fig.4는 H=16일 때 Re수의 변화에 따른 중심축상의 축방향 평균속도 분포를 나타낸 것으로서 Re가 증가할수록 전반적으로 큰 속도 분포를 가지며 벽면에서의 속도감소율도 큰 것을 알 수 있다.

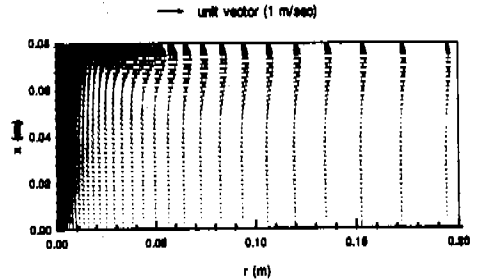


Fig. 2 Velocity vector field for turbulent impinging flame (H=16, Re=5000).

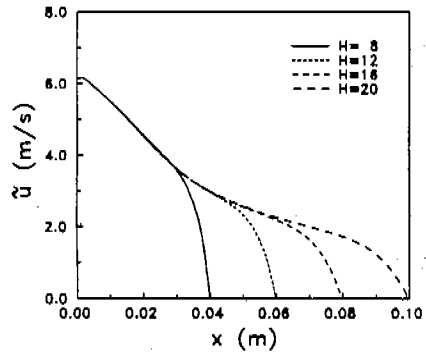


Fig. 3 Distributions of mean axial velocity along the centerline for various nozzle-to-wall distances(Re=5000).

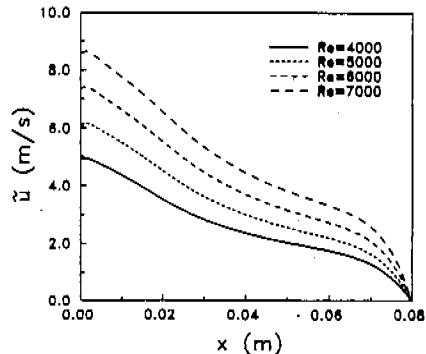


Fig. 4 Distributions of mean axial velocity along the centerline for various Re (H=16).

Fig.5는 반응 유동장 내의 난류 운동 에너지의 동에너지 분포를 나타낸 것으로서 분출된 연료 제트의 경계, 즉 자유전단층(free shear layer)을 따라 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 일반적인 난류제트와 일치하는 경향이며 속도 구배가 큰 곳에서 커지는 난류 운동 에너지의 특성을 잘 보여준다. 또한 벽면의 정체점으로부터 반경방향으로 벽면 부근 영역에서 큰 값을 나타내는데, 이는 정체점에서부터 유동의 방향이 급격히 바뀌게 되며 따라서 속도 구배 역시 커짐에 기인하는 현상으로 해석된다.

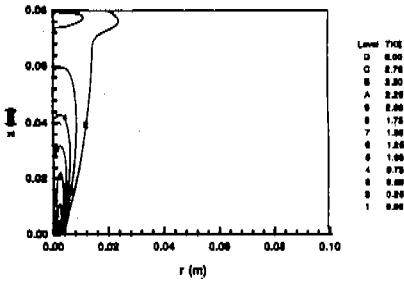


Fig. 5 Contours of iso-turbulent kinetic energy (H=16, Re=5000).

Fig.6은 Re=5000 인 경우 H의 변화에 따른 난류 운동 에너지의 분포를 벽면으로부터 일정한 축방향 위치 ( $H_p=x/D_N=4$ )에서 비교 도시한 것으로서, H가 작을수록 화염의 경계에서 큰 값을 나타내며, H가 클수록 확산이 커짐으로써 작은

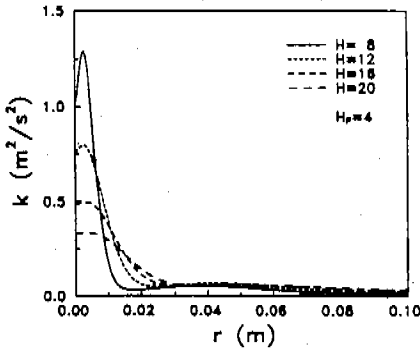


Fig. 6 Distributions of turbulent kinetic energy at given axial location ( $H_p=4$ ) for various nozzle-to-wall distances

(Re=5000).

값을 나타낸다. 또한 반경방향으로 급격히 감소하다가 약간 증가하고 다시 서서히 감소함을 볼 수 있는데, 이와 같이 난류 운동 에너지가 조금 증가하는 것은 정체점 영역에서 유동의 방향이 급격히 바뀌에 따른 영향이라 판단된다. Fig.7은 Re 변화에 따른 난류 운동 에너지의 분포를  $x=0.05$  m인 위치에서 비교하여 도시한 것으로서, Re가 클수록 평균 속도가 커지며 따라서 자유전단층에서 큰 속도구배로 인하여 난류 운동에너지가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

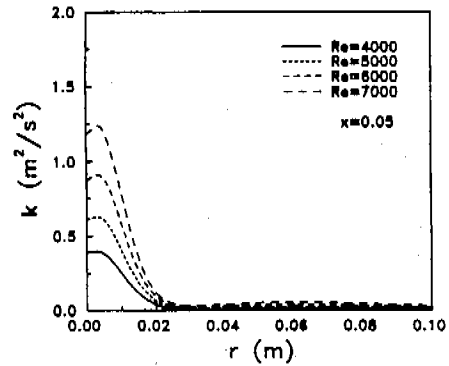


Fig. 7 Distributions of turbulent kinetic energy at given axial location ( $x=0.05$ m) for various Reynolds numbers (H=16).

Fig.8은 H의 변화에 따른 화염의 형태 변화를 비교 도시한 것이며, 이 때 화염면은 연료와 공기의 이론당량비(Stoichiometric ratio)를 만족하는 지점을 연결하여 구하였다. H가 변화해도 벽면에 충돌한 화염이 벽면을 따라 퍼지는 거리는 거의 같음을 알 수 있는데 이는 H가 작을수록 큰 운동량으로 벽면에 부딪침으로써 상대적으로 반발력이 크고, 따라서 음(-)의 축방향으로 운동량 확산이 커짐에 따라 반경방향으로의 속도 성분의 감소에 의한 영향이라 판단된다. 이는 곧 화염의 형태 비교에서 H가 작은 경우에 화염의 굽곡도가 큰 것으로도 설명될 수 있다. Fig.9는 Re의 변화에 따른 화염형상의 변화를 비교 도시한 것으로 Re가 증가할수록 공급되는 연료 유량의 증가로 인하여 벽면을 따라 형성된 화염면은 벽과의 거리가 멀어지게 되며 또한 멀리까지 퍼짐을 알 수 있다.

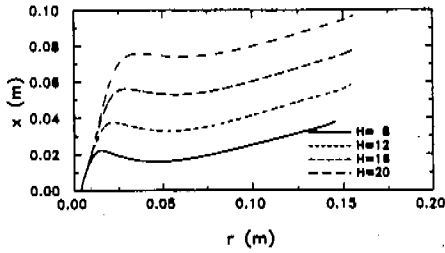


Fig. 8 Turbulent flame shapes for various nozzle-to-wall distances ( $Re=5000$ ).

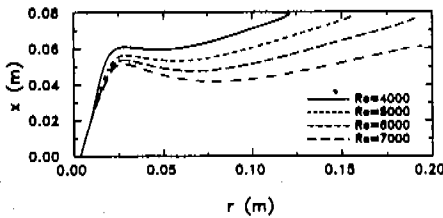


Fig. 9 Turbulent flame shapes for various Reynolds numbers ( $H=16$ ).

Fig.10은  $H=16$ ,  $Re=5000$ 의 경우 계산 영역내의 평균온도의 등온선 분포를 도시한 것으로 화염에서 방출되는 고온의 연소열로 인하여 넓은 부분에까지 가열되고 있음을 볼 수 있다. 또한 벽면을 따라서 반경방향으로는 화염의 끝을 지난 후에도 화염에서 방출된 열이 기체유동에 따라 전달됨으로써 고온의 분포를 나타내고 있으며 전반적으로 화염이 존재하는 온도장의 구성을 잘 보여준다.

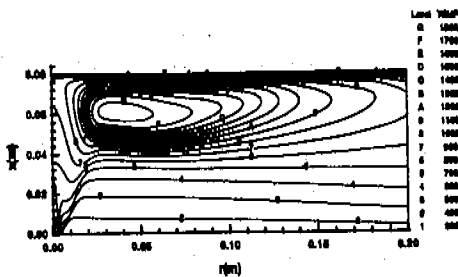


Fig. 10 Contour of isotherms ( $H=16$ ,  $Re=5000$ ).

Fig.11은 노즐과 평판간의 거리 변화에 따른

축방향 일정 위치( $H_p=4$ )에서의 평균 온도분포를 도시한 것으로  $H$ 가 작은 경우 전반적으로 온도 분포가 낮으며,  $H$ 가 클수록 고온의 영역이 반경 방향으로 이동함을 볼 수 있다. Fig.12는  $Re$  변화에 따른 축방향의 주어진 위치( $x=0.05m$ )에서 평균온도 분포를 도시한 것으로서  $Re$ 가 큰 경우 고온의 영역이 폭 넓게 형성됨을 보이는데, 이는 Fig.9의 화염 형태와 비교해 볼 때 주어진 축방향 위치가  $Re$ 가 큰 경우 화염면 주위의 고온 영역에 더욱 가까이 위치함으로써 나타나는 현상임을 알 수 있다.

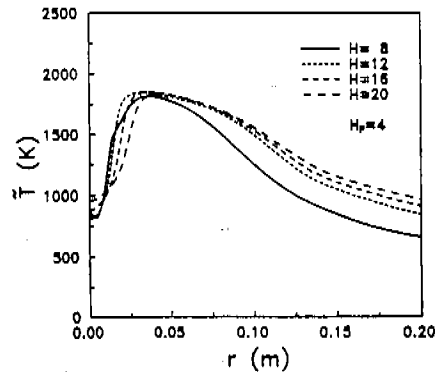


Fig. 11 Distributions of mean temperature at given axial location ( $H_p=4$ ) for various nozzle-to-wall distances ( $Re=5000$ ).

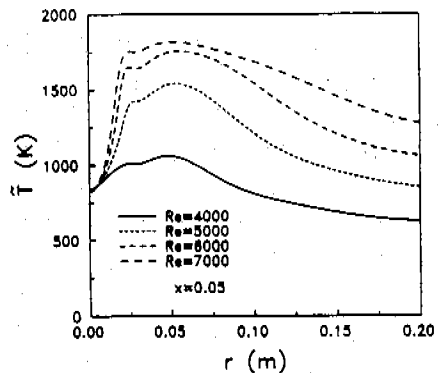


Fig. 12 Distributions of mean temperature at given axial location ( $x=0.05m$ ) for various Reynolds numbers ( $H=16$ ).

Fig.13은 축방향의 위치  $x = 0.07m$ 인 단면에서의 각 조성 성분들의 분포를 도시한 것이다. 연

표 성분은 중심축으로부터 반경방향으로 멀리가 지 분포하고 있으며, 산소 성분은 중심 부근에서 크고 서서히 감소하다가 다시 증가하는 분포를 보이는데, 이는 지정된 위치가 충돌 후 벽면을 따라 형성된 화염 내부의 영역이기 때문에 화염 면의 직각 방향에서의 전형적인 분포와는 다른 양상을 나타내며, 난류 요동에 의해 확산 및 혼합이 증가하여 나타난 현상으로 해석된다. 이산화탄소 및 수증기의 분포는 비슷한 경향을 보이며 산소 성분과는 대조적인 분포를 이룸을 보여 준다.

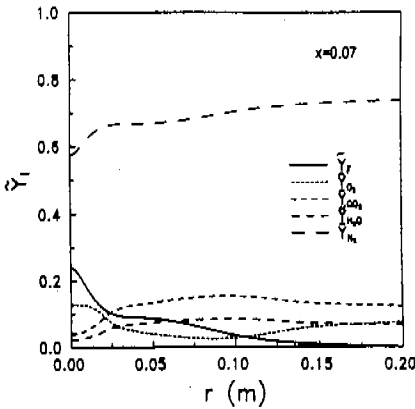


Fig. 13 Distributions of mass fraction of chemical species at given axial location ( $x=0.07m$ ) ( $H=16$ ,  $Re=5000$ ).

Fig.14와 Fig.15는 각각 H 및 Re의 변화에 따른 국부 열전달 량의 분포를 비교 도시한 것들이다. Fig.14의 경우 정체점 부근에서는 H가 큰 경우 큰 값을 지나 반경방향으로 진행하면서 H가 작을 경우가 더 커지고  $r = 0.07m$  정도부터는 거의 같은 값을 나타낸다. 이는 Fig.8의 화염 형태와 비교해 보면 H가 클수록 중심축 부근의 온도 증가가 커짐으로써 전열량이 커지지만 벽면에 충돌한 후 형성된 화염면이 벽면에 더 가깝게 위치함으로써 H가 작은 경우 전열량이 커지는 것으로 해석된다. Fig.15는 전반적으로 Re가 큰 경우 H가 작은 경우와 유사한 분포를 나타내고 있다. 이는 Re가 클수록 중심축 부근의 온도 증가가 느리고 유량이 많음으로써 화염의 폭 및 벽면에 충돌 후에 형성된 화염의 크기는 커지며 연소 열 또한 증가함에 따른 결과로 해석된다. 따라서 이는 난류의 경우에 유량은 많으나 속도가 빠르

고 형성된 화염이 벽면에서 멀리에 위치함으로써 벽면으로의 국부 전열량은 작으며, 넓은 범위에 걸쳐 전열량이 큰 값을 유지하는 것으로 볼 수 있다.

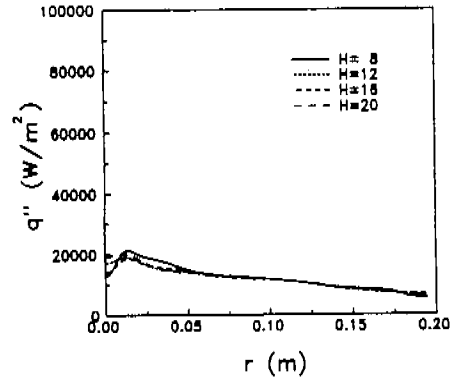


Fig. 14 Distributions of heat flux at the impingement surface for various nozzle-to-wall distances ( $Re=5000$ ).

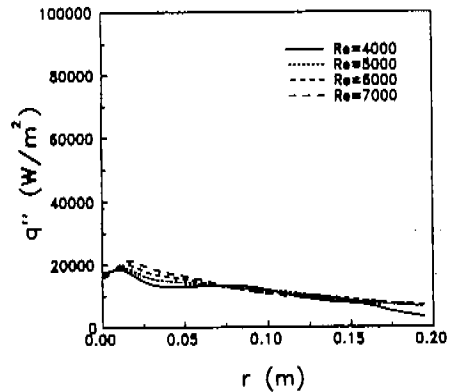


Fig. 15 Distributions of heat flux at the impingement surface for various Reynolds numbers ( $H=16$ ).

Fig.16과 Fig.17은 공급된 연료의 총발열량 중에서 5% 및 10%의 열이 전달되는 원형 유효가열면적의 반경(유효거리)을 나타낸 것이다. Fig.16은 동일한 Re에 대하여 H 변화에 따른 유효거리를 도시한 것으로 난류 화염에서는 공급 연료량이 많음에 따라 발열량이 많아지고 화염이 크게 형성되며 화염의 크기 또한 거의 비슷함으로써 노즐과 벽면의 거리 변화에 따라서는 유효



거리가 거의 일정함을 보이며, Fig.17의 Re에 따른 유효거리는 Re가 짧수록 공급되는 열량이 많음으로써 가열범위가 커짐을 나타낸다.

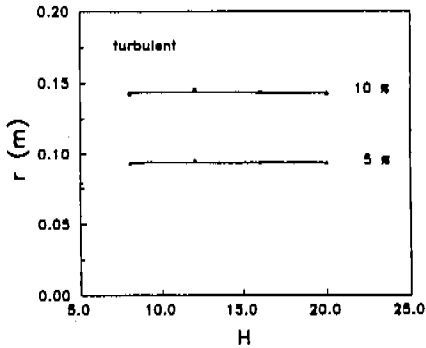


Fig. 16 Effective distances of given fractional amount of total generated heat transferred to the wall with nozzle-to-wall distance (Re=5000).

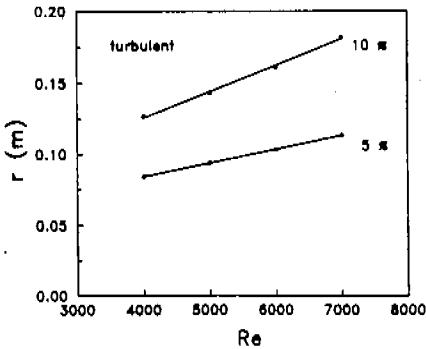


Fig. 17 Effective distances of given fractional amount of total generated heat transferred to the wall with Reynolds number (H=16).

#### 4. 결 론

벽면에 충돌하며 연소하는 난류 확산화염의 특성을 규명하기 위하여 이론적인 모델과 이를 수치해석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 유동장은 비반응 충돌 제트의 경우와 유사한 구조를 가지며, 축방향 평균속도는 하류로 갈수록 감소하고, 노즐과 벽면의 거리가 가까울수록, 레이놀즈수가 짧수록 큰 속도 분포를 나타내

며, 벽면에서의 속도 감소를 역시 크다.

(2) 난류 운동 에너지는 제트 경계의 자유 전단층 및 벽면 부근의 속도 구배가 큰 영역에서 크게 나타나며, 노즐과 벽면의 거리가 짧을수록 벽면에서 일정 위치에서의 값은 크고, 레이놀즈수가 짧수록 전체적으로 큰 값을 나타낸다.

(3) 화염의 형태는 노즐로부터 벽면으로 갈수록 폭이 커지며, 노즐과 벽면의 거리가 변화해도 충돌 후 벽면을 따라 퍼지는 화염의 폭은 거의 같고 레이놀즈수가 큰 경우 더 멀리까지 화염이 형성된다.

(4) 평균온도의 분포는 하류로 가면서 화염의 폭이 커짐에 따라 고온의 영역이 넓게 형성되며, 레이놀즈수가 짧수록 화염이 크게 형성됨에 따라 넓은 범위에 걸쳐 고온의 영역이 형성된다.

(5) 정체점의 외부에서 국부 전열량의 최대점이 존재하는 분포를 가지며 화염의 크기가 크기 때문에 넓은 영역에 걸쳐 전열량이 크다. 또한 총발열량의 일정 비율이 벽면으로 전달되는 유효가열면적은 노즐과 벽면간의 거리에 관계없이 거의 일정하며 레이놀즈수에 따라서는 공급 열량의 증가에 따른 발열량의 증가로 인하여 유효가열면적이 넓어진다.

#### 참고문헌

- (1) Amano, R.S. and Brandt, H., 1984, "Numerical Study of Turbulent Axisymmetric Jets Impinging on a Flat Plate and Flowing into an Axisymmetric Cavity," Trans. ASME, J. Fluid Eng., Vol.106, pp.410-417.
- (2) Kunugi, T. and Kawamura, H., 1987, "Application of a Two-equation Turbulence Model to Heat Transfer and Fluid Flow of an Impinging Round Jet," 2nd Int. Symposium on Transport Phenomena in "Turbulent Flows", Tokyo, pp.509-520.
- (3) Yoshida, H., Suenaga, K. and Echigo, R., 1990, "Turbulence Structure and Heat Transfer of a Two-Dimensional Impinging Jet with Gas-Solid Suspensions," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.33, No.5, pp.859-867.
- (4) 조용철, 김광용, 박상규, 1989, "수직충돌분류

- 에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제17권, 제4호, pp.1-10.
- (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) Jaluria, Y. and Cooper, L.Y., 1989, "Negatively Buoyant Wall Flows Generated in Enclosure Fires," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.15, pp.159-182.
- (9) 홍성균, 1993, "벽면 층돌 확산화염의 특성에 관한 실험적 연구", 고려대학교 석사학위 논문.
- (10) Liu, Y., Lenze, B. and Leuckel, W., 1991, "Investigation on the Combustion-Turbulence Interaction in Premixed Stagnation Flames of H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> Mixtures," *Turbulent Shear Flows*, Vol.7, Springer-Verlag, pp.357-366.
- (11) Bradshaw, P., 1981, *Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow*, Academic Press.
- (12) 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.
- (13) Magnussen, B.F. and Hjertager, B.H., 1976, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion," 16th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp.719-729.
- (14) Reid, R.C., Prausnitz, J.M. and Poling, B.E., 1988, *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill.
- (15) Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill.