

<論 文>

수소-공기 난류확산화염 구조 예측에 관한 연구

신 현 동*

(1983년 5월 31일 접수)

The Predictions on the Structure of Turbulent Hydrogen-Air Diffusion Flame

Hyun Dong Shin

Abstract

The turbulent hydrogen-air diffusion flame was studied experimentally and theoretically. Laser Doppler anemometer was used to measure the velocity field in the flame.

Two mathematical models for the combustion reaction term, which are infinite rate model and finite rate to be derived eddy break-up model, were tested by comparing predictions with experimental data for coaxial turbulent diffusion flame.

The agreement between the predictions and the data is, on the whole, very good in the case of employing the finite rate model rather than the infinite rate model.

But, it was shown that the finite rate model was practically applicable to the predictions of the turbulent diffusion flame structure.

1. 서 론

확산화염(diffusion flame)은 연료와 공기가 연소기에 별도의 유로를 거쳐 도입되는 연소형태로서, 역화(flash back)의 위험성이 없을 뿐더러 연료와 공기의 유량비가 크게 변하여도 국소적으로 연소하기 쉬운 혼합비(mixture ratio)의 영역이 반드시 존재하는 특징이 있어서 실제 연소기에 많이 쓰이고 있는 화염의 일종이다. 한편, 이와같은 실제 연소기의 대부분은 좁은 공간에서 많은 열량을 얻어야 하므로 연료와 공기의 흐름이 난류(turbulent flow)이며 그 혼합 자체도 난류확산에 의하여 이루어 진다.

따라서, 난류확산화염(turbulent diffusion flame)에 있어서의 연소상태는 주로 연료와 공기의 혼합 및 반응에 지배되며, 연소상태의 수치적 예측은 난류이동

과정(turbulent transport process)과 운동량, 열 및 물질의 보존방정식을 풀어야 되는데, 난류이동과정 및 연소반응과정이 현상론적으로 복잡할 뿐더러 화염이 난류이동과정에 어떤 영향을 미치는가가 중요하게 되어, 이와같은 현상을 수학적으로 표현할 수 있는 모델이 필요하게 된다. 난류이동과정 및 반응과정에 관한 모델은 이때까지 상당수 제안되어 있으며^{1,2)}, 측정결과와 비교 검토한 연구도 다수 있다. 그러나 이들 대부분은 사용된 모델과 실제 현상과의 관계를 명확히 제시하지 못하고 있는 실정이다. 이와같은 모델을 검토하기 위해서는 비교적 연소반응기구가 간단하며, 기하학적으로 간단한 난류확산화염에 대한 정교한 실험결과와 계산결과를 비교 검토할 필요가 있다.

본 연구는 연소반응기구가 지극히 간단한 수소-공기 축대칭 난류확산화염 내의 유속, 온도 및 각종 가스농도를 비교적 정밀한 실험결과와 계산결과를 비교하였다. 그리고 계산에 사용된 모델은, 난류혼합과정에 대하여서는 Prandtl의 혼합거리(mixing length)도

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

멜이며, 연소반응모델은 연료와 산화제가 만나자 말자 연소하는 무한대 반응속도 모델과 어느 유한한 반응속도로 연소를 일으키는 유한대 반응속도 모델이다.

또한, 화염이 있을 경우와 없을 경우 각각에 대한 계산결과와 실험결과를 비교 하므로써 화염의 유동에 미치는 영향을 검토하고, 화염의 존재로 말미암은 소위 국소총류화의 영향을 고려해 주므로써 상기 모델들의 적용성을 검토한다.

2. 기본 관계식

2.1. 기본 방정식

연구 대상으로 선정된 문제는 내경 4.9mm, 외경 6.0mm의 원관 노즐로부터 수직상방으로 연료를 분출시켰을 때 형성되는 분류(Jet) 및 분류화염이며, 연료 분출 노즐 주위에는 같은 축방향으로 공기가 흐르고 있다. 따라서 좌표계로서는 원주좌표를 선택 하였으며, 연료 노즐 출구 끝 부분을 원점으로 분류 중심축에 따라 수직상방으로 x 축, 그리고 x 축과 직각방향으로 r 축을 잡는다. 기본 방정식은 질량, 운동량, 각종 가스농도 및 에너지의 보존식으로 구성되어, $x-r$ 좌표계로 나타낸 후, 경계층근사 ($\partial/\partial x \ll \partial/\partial r$)를 적용하면 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(r\rho U) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho V) = 0 \tag{1}$$

$$\rho\left(U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial r}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau) - \rho g \tag{2}$$

$$\rho\left(U\frac{\partial m_j}{\partial x} + V\frac{\partial m_j}{\partial r}\right) = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rJ_j) + R_j \tag{3}$$

$$\rho\left(U\frac{\partial h}{\partial x} + V\frac{\partial h}{\partial r}\right) = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rq - rU\tau) - \sum_j \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(h_j r J_j) \tag{4}$$

여기서, ρ 는 밀도를 나타내며, U, V 는 x 또는 r 방향의 유속, P 는 압력, τ 는 r 에 수직한 면의 x 방향 전단응력을 나타낸다. 그리고 g 는 x 방향으로 작용하는 중력 가속도, m_j 는 j 성분의 질량분율, J_j 는 j 성분의 r 방향으로의 확산 flux 및 R_j 는 단위 체적당 j 성분의 생성속도를 각각 나타낸다. 그리고 h, h_j 는 혼합가스 및 j 성분의 단위질량당 엔탈피이고, q, J_j 는 질량 평균속도에 상대적인 r 방향의 열 flux와 j 성분의 질량 flux를 각각 나타낸다. 한편, 난류유동에서의 계산이므로 상기식의 모든 기호는 시간 평균치를 표시한다.

2.2. τ, q, J_j 의 모델

운동량 flux τ 는 Newton의 점성법칙에 유사한 다음식과 같이 모델화 한다.

$$\tau = -\mu_{\text{eff}} \frac{\partial U}{\partial r} \tag{5}$$

μ_{eff} 는 유효점성계수로서, $\mu_{\text{eff}} = \mu_i + \mu_t$ 이며 첨자 i 과 t 는 총류 및 난류 상태를 지칭한다. 따라서 μ_i 는 유체의 물성치이지만 μ_t 는 난류에 의한 운동량 이동효과를 나타내는 것으로 여기서는 Prandtl의 혼합거리 모델을 사용한다.

즉, $\mu_t = \rho l_m^2 \left| \frac{dU}{dr} \right|$ 이며, 축대칭 분류에 많이 사용되는 다음과 같은 방법으로 l_m 를 잡았다¹⁾. $l_m = 0.075b$, 여기서 b 는 분류폭의 반이다. 화염의 존재에 따른 현상론을 고려하여 l_m 의 산출방법에 약간의 수정을 가하게 되는데 이에 관하여서는 (4.2)에서 논하기로 한다.

한편, 열 flux q 는 Fourier의 열전도 법칙과 유사한 다음식과 같은 형태로 모델화 한다.

$$q = -\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} \tag{6}$$

λ_{eff} 는 유효열전도율로서, 총류에 의한 열전도율 λ_i 과 난류에 의한 열전도 효과 λ_t 와의 합을 나타낸다. 그리고 난류 Prandtl 수 σ_t 는 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_t = \mu_{\text{eff}} / (\lambda_{\text{eff}} / c_p)$$

여기서 c_p 는 가스의 정압비열을 의미한다. 본 계산에서는 σ_t 를 0.7로 잡았다. 질량 flux J_j 에 관하여서도 운동량, 열 flux와 같은 방법으로 모델화 한다.

$$J_j = -\rho \mathcal{D}_{j,\text{eff}} \frac{\partial m_j}{\partial r} \tag{7}$$

여기서 $\mathcal{D}_{j,\text{eff}}$ 는 유효확산계수로서, 총류에서의 확산계수 $\mathcal{D}_{j,i}$ 과 난류에 의한 확산효과를 고려한 $\mathcal{D}_{j,t}$ 와의 합이다. 그리고 난류 Schmidt 수 $\sigma_{m,j}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_{m,j} = \mu_{\text{eff}} / (\rho \mathcal{D}_{j,\text{eff}})$$

난류에서는 $\sigma_{m,j}$ 는 j 의 종류에 따라 그 차이가 거의 없음이 알려져 있으므로 $\sigma_{m,j} = \sigma_m = \sigma_t$ 로 잡았다.

2.3. 좌표변환 및 보조방정식

유동함수(stream function) ψ 를 도입 하므로써 식 (1)는 자동적으로 만족하게 된다.

$x-r$ 좌표계로 표시되어 있는 식 (2)~(4)를, $x-\psi$ 좌표계로 변환시키면 다음과 같다. 단, q 및 J_j 는 식 (5)~(7)를 사용한다.

(1) 운동량 보존방정식

식 (2)를 $x-\psi$ 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(r^2 \rho U \frac{\mu_{eff}}{\sigma_m} \frac{\partial U}{\partial \psi} \right) + \frac{1}{\rho U} F_x \quad (8)$$

여기서, $F_x = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial x}$ 이다.

경계층 흐름이므로 주위류의 압력이 분류 내부에 침투한다고 볼 수 있으므로, $\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho_0 g$ 로 되어 결국 $F_x = (\rho_0 - \rho)g$ 의 형태로 된다. ρ_0 는 주위류의 밀도를 나타낸다.

(2) j 성분 보존방정식

식 (3)을 $x-\psi$ 좌표계로 나타내면,

$$\frac{\partial m_j}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(r^2 \rho U \frac{\mu_{eff}}{\sigma_m} \frac{\partial m_j}{\partial \psi} \right) + \frac{1}{\rho U} R_j \quad (9)$$

로 된다. 여기서, 성분의 종류로서 H_2 , O_2 , H_2O , 및 N_2 를 고려하게 되며, 식 (9)는 이들 각 성분에 대하여 성립한다. 한편, 연소반응을 $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ 로 잡으면 화학량론의 관계로부터 반응항 R_j 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$R_{H_2} = \frac{1}{8}R_{O_2} = -\frac{1}{9}R_{H_2O}, \quad R_{N_2} = 0 \quad (10)$$

상기 관계를 고려해서 다음과 같은 변수 $\varphi_i (i=1, 2)$ 를 정의하면 연소 반응에 무관한 양이 되므로 사용상 편리하게 된다.

$$\varphi_1 = m_{H_2} - \frac{m_{O_2}}{8}, \quad \varphi_2 = m_{H_2} + \frac{m_{H_2O}}{9}$$

또한, φ_i 를 정규화 한 무차원 변수 f_i 를 다음 식과 같이 정의한다.

$$f_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{i0}}{\varphi_{iF} - \varphi_{i0}} \quad (i=1, 2) \quad (11)$$

단, φ_{iF} 또는 φ_{i0} 는 분류 출구 또는 주위류 입구의 φ_i 의 값을 각각 나타낸다. 결국 f_i 는 보존량이 되며 식 (9)는 형식상 반응항을 포함하지 않는 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(r^2 \rho U \frac{\mu_{eff}}{\sigma_m} \frac{\partial f}{\partial \psi} \right) \quad (i=1, 2) \quad (12)$$

f_i 는 식 (11)로부터 알 수 있듯이 i 에 관계없이 분류출구에서 1의 값을 가지며, 주위류에서는 0의 값을 갖는다. 그리고 $i=1, 2$ 인 경우 공통으로 식 (12)를 만족시키므로 f_1, f_2 대신에 f 로 나타낼 수 있다.

본 실험조건을 고려하면, 연료분사 출구에서는 O_2, H_2O 를 포함하고 있지 않으며, 주위류에서는 N_2, O_2 만이 존재하므로, $\varphi_{1F} = (m_{H_2})_F$, $\varphi_{10} = -(m_{O_2})_0/8$, $\varphi_{2F} = (m_{H_2})_F$, $\varphi_{20} = 0$ 로 된다. 따라서 식 (11)를 다시 쓰면,

$$f = \frac{m_{H_2} + m_{O_2}/8 + (m_{O_2})_0/8}{(m_{H_2})_F + (m_{O_2})_0/8} \quad (13)$$

$$f = \frac{m_{H_2} + m_{H_2O}/9}{(m_{H_2})_F} \quad (14)$$

과 같이 된다. 그러므로, 식 (9)로부터 m_{H_2} , 그리고 식 (12)로부터 f 를 각각 구하면, 다른 성분에 대하여 서 나머지 성분에 대한 식 (9)를 별도로 풀 필요없이 다음 관계로부터 질량분을 $m_{O_2}, m_{H_2O}, m_{N_2}$ 을 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} m_{O_2} &= 8m_{H_2} + (m_{O_2})_0 - f\{(m_{H_2})_F + (m_{O_2})_0\} \\ m_{H_2O} &= 9\{f(m_{H_2})_F - m_{H_2}\} \\ m_{N_2} &= 1 - m_{H_2} - m_{O_2} - m_{H_2O} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

(3) 에너지 보존방정식

식 (4)를 $x-\psi$ 좌표계로 나타내면,

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(r^2 \rho U \frac{\mu_{eff}}{\sigma_t} \frac{\partial h}{\partial \psi} \right) \quad (16)$$

로 된다. 상기식은 점성마찰에 의한 열발생 및 복사에 의한 방열을 무시하고, $\sigma_t = \sigma_m$ 으로 가정하므로서 얻어진다. 그리고 온도 T 와 엔탈피 h 와의 관계는 다음과 같다.

$$h = \int_{T_0}^T \sum_j C_{p,j} m_j dT + \sum_j H_j m_j \quad (17)$$

여기서, $C_{p,j}, H_j$ 및 T_0 는 j 성분의 정압비열, 표준 생성열 그리고 기준온도를 각각 나타낸다. 그러므로 식 (16)에서 구한 엔탈피 h 는 다음 식에 의하여 구한다.

$$T = \frac{h - \sum_j H_j m_j}{\sum_j m_j C_{p,j}} + T_0 \quad (18)$$

$$\text{단, } C_{p,n,j} = \int_{T_0}^T C_{p,j} dT / (T - T_0)$$

로 정의된 평균비열을 나타낸다. 평균비열 $C_{p,n,j}$ 는 온도함수로서 3차 근사식으로 미리 주어진다. $C_{p,j}$ 의 기초 데이터는 JANAF 표⁽³⁾에 의한다. 그리고 밀도 ρ 는 완전가스의 상태방정식에 의하여 산출된다.

이상을 정리하면, 풀어야 할 방정식은 식 (8), 성분 H_2 에 대한 식 (9), 식 (12) 및 식 (16)이며, 이들 식 으로부터 종속 변수인 축방향 유속 U , H_2 의 질량분율 m_{H_2} , f 및 h 의 해가 구해진다. 그리고 식 (15)의 관계로부터 $m_{O_2}, m_{H_2O}, m_{N_2}$ 가 각각 얻어지며 식 (18)로부터 온도를 계산할 수 있다.

2.4. 반응항 R_{H_2} 의 모델

식 (9)를 풀때 R_{H_2} 를 산출해야 한다.

이 항은 단위체적, 단위시간당 H_2 의 반응속도이지만, 난류이므로 모델화가 요구된다. 본 연구에서는 반응모델로서 소위 무한대반응속도 모델과 유한대반응속도 모델을 고려해서 서로 비교 검토한다.

(1) 무한대반응속도모델

이 모델은 연료와 산소가 혼합하는 즉시 반응을 일으켜, 연료와 산소가 시간평균적으로 공존하지 않은 경우를 가르킨다. 즉 화염면(flame front)의 두께가 없

는 flame-sheet 모델이다.

H₂와 O₂의 혼합상태가 화학양론비이면 식 (13)으로부터,

$$f_{st} = \frac{(m_{O_2})_0/8}{(m_{H_2})_F + (m_{O_2})_0/8} \quad (19)$$

로 나타내어진다. H₂와 O₂가 공존하지 않으므로 다음과 같이 계산한다.

$$\left. \begin{aligned} f > f_{st} \text{인 경우,} \\ m_{H_2} &= f \cdot \{(m_{H_2})_F + (m_{O_2})_0/8\} - (m_{O_2})_0/8 \\ m_{O_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} f < f_{st} \text{인 경우,} \\ m_{H_2} &= 0 \\ m_{O_2} &= (m_{O_2})_0 - f \cdot \{8(m_{H_2})_F + (m_{O_2})_0\} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

한편, 나머지 성분 H₂O, N₂의 농도는 식 (15)로부터 구해질 수 있다. 이상과 같이 무한대 반응속도모델을 적용시킬 경우에는 m_{H₂}에 관한 식 (9)를 풀 필요 없이 f를 구하면 된다.

(2) 유한대반응속도모델

난류에 의한 연소반응에 관하여서 다음과 같은 혼합과정을 가상한다. ① 연료 덩어리와 산화 제덩어리가 붕괴되어서 분자크기의 혼합상태에 도달 되었을 때 연소반응이 일어난다. ② 그 반응속도는 난류의 eddy가 미소한 eddy로 붕괴되는 속도에 비례한다. ③ 이 eddy의 붕괴속도는 난류에너지의 감쇄속도에 비례한다고 가정한다.

상기모델은 Spalding²³⁾에 의하여 제안된 것으로 본 연구는 이 모델을 기초로 해서 반응속도를 계산한다. 그리고 이론당량비 보다 연료가 과다한 영역에서는 산화제의 미세한 혼합이 반응속도를 주로 결정짓는 것으로 판단되므로 다음식과 같이 연료과잉 및 회박으로 나누어서 적용한다.

$$\left. \begin{aligned} f < f_{st} \text{인 경우,} \\ R_{H_2} &= -c \cdot \rho m_{H_2} \left| \frac{\partial U}{\partial r} \right| \\ f > f_{st} \text{인 경우,} \\ R_{H_2} &= -c \cdot \rho \frac{m_{O_2}}{8} \left| \frac{\partial U}{\partial r} \right| \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

여기서, c는 실험정수로서 1.2로 잡았다.

2.5. 경제조건 및 수치계산

편수 u, f, m_{H₂} 및 h의 경제조건이 필요하게 되는 데 다음에 제시될 실험조건에 대응시켜 결정한다. 측정될 계산 대상의 흐름은 경제층 흐름이므로 경제조건으로서는 상류단면 및 주위류의 경제에서의 값 또는 이에 준하는 조건식을 준다. 우선 연료노즐 출구유속분

포는 원관내의 흐름이므로 1/7승법칙을 적용해서 구하였다. 주위공기류는 평탄한 유속분포 (5.1m/s)를 갖고 있으며, 연료노즐의 rim의 두께는 무시하였다. 한편, 혼합분율 f는 정의로부터 노즐내에서는 1, 주위공기류에서는 0의 값을 갖는다. 엔탈피 h는 식 (17)로 계산하게 되는데, H₂, N₂ 및 O₂의 표준생성 엔탈피가 0이고, 입구 가스온도는 실험에서 송풍기 사용을 고려해서 실온보다 다소 높은 35°C로 잡았다.

나아가서 풀어야 할 방정식은 식 (8), (9), (12) 및 (16)이다. 이 4개의 미분방정식은 다음과 같은 공통된 형태로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(r^2 \rho U \cdot a_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \right) + S_\phi \quad (23)$$

이다. 여기서 종속변수 φ에 대응하는 a 및 S는 Table 1과 같다.

Table 1 a and φ in Eqn. (23)

φ	a _φ	S _φ
U	μ _{eff}	F _x /ρU
f	μ _{eff} /σ _m	0
m _{H₂}	μ _{eff} /σ _m	R _{H₂} /ρU
h	μ _{eff} /σ _t	0

수치계산법은 기존프로그램²⁴⁾을 사용 하였으며 주위공기류는 분출구 반경 2.45~52mm 범위에서 48분할하였다. x방향의 격자점의 간격은 노즐선단으로부터 310mm까지 58분할하고, 노즐 근처에서도 미세한 간격(1mm 이하)으로 분할 하였다.

3. 실험

연구대상으로 한 난류확산분류 및 난류확산화염은 축대칭연료분류와 주위공기류로 형성되는 분류 및 분류화염이며 연소기 개요를 Fig. 1에 나타낸다.

연료로는 연소반응이 지극히 간단한 H₂를 사용하였으며, 부력효과를 감소시키고 동시에 고온으로 말미암은 측정상 문제점을 줄이기 위하여 N₂를 첨가 하였다. 평균유속 U, 난류강도 u', v', w' 그리고 uv는 레이저 도플러 유속계(Laser Doppler Anemometer)를 사용 하였다.

그리고 화염내의 시간평균온도 검출에는 선경이 0.1mm인 Pt-Pt/Rh 13%의 열전대를 사용 하였으며 연소가스에 의한 촉매 반응효과를 줄이기 위하여 산화마그네슘 피막을 입혔다. 그리고 열전대로부터의 복사방열

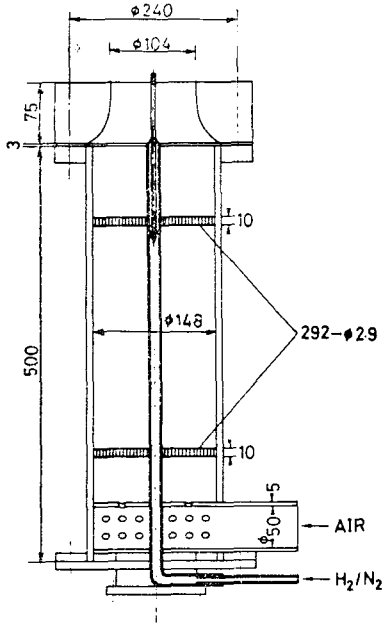


Fig. 1 Schematic diagram of the combustor

에 의한 온도저하를, 온점점을 구형으로 근사시켜 보정 하였다.

화염속의 가스농도측정은 내경 0.9mm인 스테인레스관을 통하여 가스를 채취한 후 가스크로마토그래프(Gas Chromatograph)로 분석 하였다. 가스 채취관은 측정점의 가스농도의 변화를 동결시키기 위하여 수냉 자켓에 의하여 냉각 시켰다.

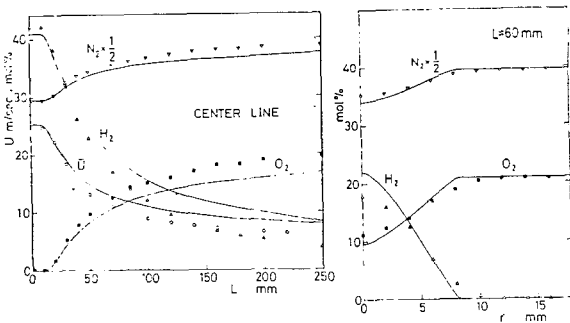


Fig. 2 (a) (b)

Fig. 2 Comparisons of predictions and data for isothermal jet, concentration profiles(points are data) (a) Axial profiles (b) Radial profiles (L=60mm)

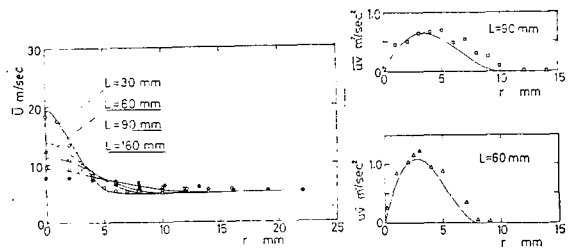


Fig. 3 Fig. 4

Fig. 3 Comparison of predictions and data for isothermal jet, time mean velocity profiles (points are data)

Fig. 4 Comparisons of predictions and data for isothermal jet, \overline{uv} profiles. (points are data)

4. 실험결과와 계산결과와의 비교

연료노즐 출구평균유속은 20.4m/s이며 화염이 없는 경우(분류)와 화염이 있는 경우(분류화염)를 고려한다. 연료로서는 N₂와 H₂의 혼합가스인데 체적 유량비는 1:0.68로 고정시켰다. 그리고 주위 공기류의 유속은 5.1m/s로 일정하게 유지 시켰다.

우선, 반응에 관한 불확실 요인이 전혀없는 연료분류에 대하여 계산 결과와 실험 결과의 비교를 통하여 난류모델의 적용 타당성을 검토한다. 그리고나서 화염이 있는 경우 상기한 바와 같은 비교를 실시 하므로써, 분류화염에 대한 난류모델 적용여부 및 무한대 반응속도 모델과 유한대 반응속도모델의 특징을 검토한다.

4.1. 분류

화염이 없는 분류에 관한 계산결과와 실험결과와의 비교를 실시한다.

Fig.2~Fig.4에 분류 중심축상 및 대표단면에 있어서 축방향 유속 \overline{U} , 각종 가스농도 및 축방향과 반경방향의 속도변동상관 \overline{uv} 의 실험측정 결과와 계산결과와의 비교를 나타낸다(계산치는 실선으로 표시되어 있다).

\overline{uv} 의 계산은 \overline{U} 의 분포의 계산결과로부터 다음 관계를 사용해서 산출 하였다.

$$\rho \overline{uv} = \mu_t \frac{\partial \overline{U}}{\partial r} = \rho l_n^2 \left| \frac{\partial \overline{U}}{\partial r} \right| \frac{\partial \overline{U}}{\partial r}$$

Fig.2~Fig.4로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있

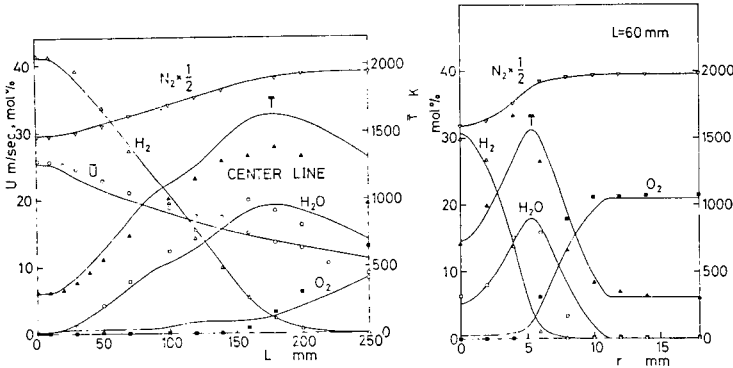


Fig. 5 Comparisons of predictions and data for the flame, concentration and temperature profiles (points are data)

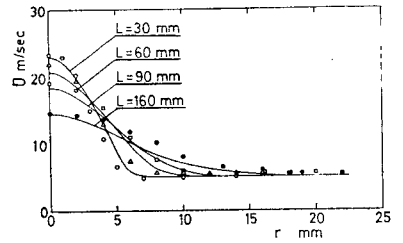


Fig. 6 Comparison of predictions and data for the flame, time mean velocity profiles (points are data)

다.

(1) 중심축상의 유속 \bar{U} 의 분포 및 각종 가스농도 분포에 관하여, 계산 결과는 실험 결과를 비교적 잘 예측할 수 있으나 하류로 가면서 계산 결과의 속도감소 그리고 각종 가스농도의 확산이 실험 결과보다 다소 늦게 됨을 알 수 있다.

(2) 반경방향에 대하여서도 유속 및 가스농도의 확산을 비교적 잘 예측할 수 있으나, 하류로 가면서 실험 결과가 계산결과 보다 평탄한 분포를 갖는다.

(3) \bar{w} 의 분포에 관하여서도 계산으로 실험결과를 예측할 수 있다.

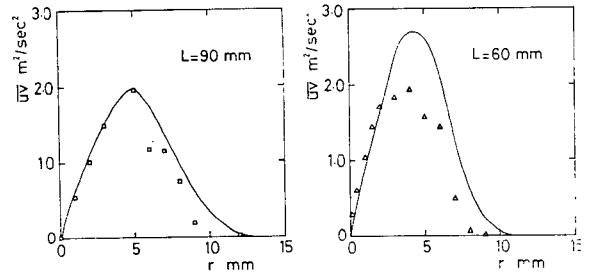


Fig. 7 Comparison of predictions and data for the flame, \bar{w} profiles (points are data)

방향평균유속 \bar{U} , 온도 \bar{T} , 각종 가스농도 및 축방향과 반경방향의 속도변동상관 \bar{w} 의 실험결과와 계산결과와의 비교를 나타낸다. 앞에서 언급한 혼합거리모

4.2. 분류화염

Figs. 5~8에 중심축상 및 대표단면에 있어서의 축

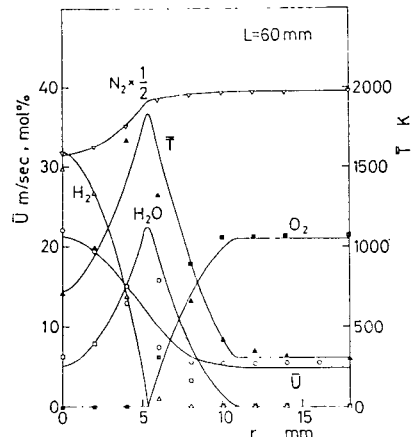
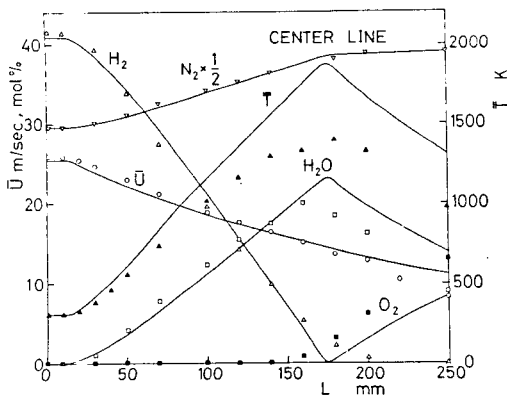


Fig. 8 Comparisons of predictions and data for the flame, concentration and temperature profiles (infinite rate combustion model, points are data)

델을 그대로 적용하면 실제보다 난류점성계수 μ_t 를 과대하게 잡는 결과가 됨을 확인 하였다. 이 점에 관하여서는 이미 저자에 의해 현상론적으로 검토 되었다⁵⁾. 즉 노즐근처에서의 국소적인 층류화에 기인되는 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 혼합거리 L_m 를 다음과 같이 수정 하였다.

$$L_m' = L_m \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{A_2} \frac{\mu_t}{\mu_i}\right) \right\}$$

여기서 A_2 는 실험정수로서 2.5로 잡았다. 즉, 점성계수 μ_i 이 난류점성계수 μ_t 에 비하여 무시할 수 없는 영역에서는 층류화 현상을 고려하여 혼합거리 L_m' 를 상기식에 따라 구한다. 본 계산에서는 μ_t/μ_i 이 5정도의 값 또는 그 이하의 값을 갖는 곳이 국소적으로 존재함을 확인 하였다. 이것은 벽면 근처에서의 층류화 영역에 대한 혼합거리 수정을 실시한 Van Driest의 예와 비슷한 형태로 μ_t/μ_i 인 무차원변수를 도입해서 L_m 를 수정한 것이다.

Fig. 5~Fig. 7는 유한반응속도모형을 사용해서 계산한 결과와 실험 결과와의 비교를 나타낸다. 이 결과로부터 다음과 같은 사항을 설명할 수 있다.

(1) 중심축상 및 반경방향 즉 단면에서의 유속 \bar{U} , 각종 가스농도, 온도 \bar{T} 의 계산 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

(2) \overline{uv} 의 분포에 대하여서는 $L=60\text{mm}$ 단면에서는 계산에 의한 값이 실험 측정치보다 다소 크게 나타나지만 정성적으로 양자가 잘 일치하고 있다.

한편, Fig. 8(a), (b)는 Fig. 5와 같은 난류모형을 사용하고, 연소반응 모델로서 무한대 반응속도모형을 채용한 경우의 계산 결과와 실험 결과의 비교이다. 계산 결과를 보면 화염면의 두께가 없는 상태가 되어, O_2 와 H_2 가 공존하지 않음을 알 수 있다. 그러나 실제에 있어서는 시간 평균적으로 O_2 와 H_2 가 공존하는 영역이 있게 된다. 그러나 유속, 온도 및 가스농도 분포의 전반적인 경향이 정성적으로 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이와같은 사실은 연소반응속도모형이 계산 결과에 미치는 영향이 유동 특성에 비하여 지배적이지 아니라는 사실을 알 수 있다. 이는 무한대 반응속도모형과 같이 비현실적인 모델을 사용해도 계산 결과에 큰 영향을 주지 않은 점으로부터 유추할 수 있다.

5. 결 론

분류 및 분류화염에 있어서, 질량, 운동량, 에너지 및 각종 가스농도의 보존식을 $x-\psi$ 좌표계로 변환한 후 수치 계산을 함으로서 유속, 온도, 가스농도, 축방향 및 반경 방향의 속도 변동상관 \overline{uv} 을 산출하여서 실험에 의한 측정 결과와 비교 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 계산 결과는 실험조건의 분류 및 분류화염에 대하여 측정치를 비교적 잘 예측할 수 있다. 단, 난류모델로서 사용한 혼합거리모델에 대해서는 화염이 있을 경우 일부영역에서 층류점성을 무시할 수 없으므로, μ_t/μ_i 을 변수로 혼합거리에 수정을 가할 필요가 있다.

(2) 난류에너지 소산(dissipation)에 의한 혼합과정과 유사한 형태로 유추한 반응속도모델 즉 유한대 반응속도모델이 무한대 반응속도모델 보다 실험 결과를 잘 예측할 수 있다. 그러나 무한대 반응속도모델도 화염면 근처를 제외하고는 비교적 실험 결과를 잘 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

1. B.E. Launder and D.B. Spalding, *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, 1972
2. D.B. Spalding, "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames." 13th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1971, p.649.
3. D.R. Stull and H. Prophet, *JANAF Thermochemical Tables*, United States Department of Commerce, 1971.
4. D.B. Spalding and S.V. Patankar, *Heat and Mass Transfer in Boundary Layers*, Intertext Books, 1970
5. H.D. Shin, T. Takagi and A. Ishio, "Local Laminarization in Turbulent Diffusion Flames." *Combustion and Flame*, 40, 1981, p.121.