

메탄-공기 예혼합기에서의 층류 화염속도 및 화염두께 예측

권 순 익* · 보웬 필립*

(2002년 12월 13일 접수, 2003년 7월 7일 심사완료)

Prediction of Laminar Burning Velocity and Flame Thickness in Methane-Air Pre-Mixture

Soon Ik Kwon and Philip J. Bowen

Key Words: Flame Thickness(화염두께), Laminar Burning Velocity(층류화염속도), Premix Code(예혼합코드), Pre-Heat Zone(예열영역),

Abstract

The thickness of flame and preheat zone from burning velocity which was computed by using Premix code of Chemkin program for methane-air mixture. Also the thickness was evaluated from temperature profile which is also obtained from Premix code for the equivalence ratio of 0.5 to 1.6. The computations were carried out for the laminar flame thickness and burning velocity under the unburned gas temperature 0.5bat-30bar and temperature of 300K-700K at $\phi=1.0$. Comparison of the results showed no difference between these two methods. The flame thickness was decreased by increasing the pressure and temperature, but, the affect of pressure is more significant than the effect of temperature on the flame thickness. The thickness of preheat zone was about 66.5% of the flame thickness, and flame thickness and burning velocity were also predicted by using empirical equation.

기호설명

- CX : 식에 의해 계산된 화염두께(mm)
- MX : 온도곡선으로부터 측정된 화염두께(mm)
- CX1 : 식에 의해 계산된 예열영역의 두께(mm)
- MX1 : 온도곡선으로부터 측정된 예열영역의 두께(mm)
- T : 온도(K)
- T^o : 연료소모가 최대인 점의 온도(K)
- P : 압력(bar)
- λ : 열전도도(W/m·K)

- C_p : 정압비열(J/K·mol)
- u : 미연가스의 밀도(kg/m³)
- S_L : 층류화염속도(m/s)

하첨자

- b : 연소된
- u : 미연소된
- m : 평균값
- h : 수소생성이 최대인 점

1. 서론

화염면을 형성하는 화염의 두께는 연소속도와 밀접한 관계를 가지며, 주위 가스의 온도 및 압력, 즉 밀도에 의해 그 두께변화가 지배를 받는다. 화염면은 일반적으로 예열과 반응의 두 영역으로 구성되어 있다. 예열영역은 미연소가스의 낮은

† 책임저자, 회원, 두원공과대학 기계과
E-mail : sikwon@doowon.ac.kr
TEL : (031)670-7131 FAX : (031)670-7035

* Cardiff University, 기계공학과, UK

온도영역에서 발화온도까지이며, 반응영역은 발화온도 위치에서 평형상태의 높은 온도까지를 말한다. 반응영역은 다시 강한 발광영역을 가지는 1차영역과 CO 산화 때문에 약한 2차적 발광을 가지는 2차 영역으로 나누어진다.⁽¹⁾ 그러나 일반적으로 예혼합영역과 반응영역을 통틀어 화염면의 두께로 나타내고 있다.

화염의 두께를 측정하는 방법에는 미세 열전대와 슈리렌 사진 등을 이용한 직접 측정법이 있다. 온도계측과 사진 측정에 의한 직접방법은 시간적 및 공간적으로 상당히 복잡하며 성가신 부분이 있을뿐더러 그 정도 면에서도 오차를 수반 할 수가 있다. 이에 비해 계산에 의한 화염두께 예측은 최근 들어 프로그램의 개발로 간편하고 손쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 화염 두께에 대한 직접측정의 예로서 Andrew와 Bradely⁽²⁾는 12.7 μ m의 미세 열전대와 슈리렌 간섭계를 이용하여 메탄-공기 혼합기의 화염의 두께를 측정하였다. 계산에 의해 화염두께를 구한 예로서 Gottgens 등⁽³⁾은 82종의 반응요소의 운동 메커니즘을 이용하여 희박연소 상태에서의 메탄, 에틸렌, 에탄, 아세틸렌 및 프로판가스의 화염속도를 유도한 뒤, 이 화염속도를 이용하여 예열영역의 두께와 전체 화염의 두께를 계산하였다. 그러나 계산결과는 측정결과와 상당한 차이가 존재하며 두 방법에 대한 검토가 요구되고 있다.

이에 본 연구는 Sandia 연구소에서 개발한 Chemkin(Computer Modeling of Chemically Reacting Flows) 프로그램의 Premix code를 이용하여 당량비를 0.5에서 1.6까지 변화시켜 메탄-공기 혼합기의 연소속도를 먼저 구한 후, 이 결과를 이용하여 화염의 두께와 예열영역의 두께를 구하였다. 화염의 두께를 구하는 방법으로, 첫째, Premix 코드로부터 구한 화염의 연소속도에서 연소속도와 화염면의 두께에 관한 계산식을 이용하여 구함⁽³⁻⁸⁾과 동시에 둘째, Premix 코드의 결과로부터 산출된 화염의 온도 변화에서 온도 구배를 구하여 그 기울기로부터 화염의 두께를 직접 예측하였다. 또한, 전체 화염 두께 중 예열영역에서의 두께도 이 두 가지 방법에 의해 구한 뒤, 계산에 의한 값과 온도 변화에서 구한 화염

의 두께를 비교함과 동시에 전체 화염두께 중 예열영역의 두께가 차지하는 비율도 검토하였다. 그리고 미연가스의 온도와 압력을 광범위하게 변화시켜 이들의 인자가 연소속도 및 화염두께에 미치는 영향도 살펴보았다.

2. 화염의 연소속도 계산

연소속도 계산은 1차원적인 단열 예혼합 화염의 자유전파 상태에서의 종류별 연소속도를 계산할 수 있는 Chemkin 프로그램의 Premix 코드를 이용하였다. 이 코드는 뉴턴 반복법에 의해 정상상태에서의 질량, 종(species) 및 에너지 보존 방정식을 계산하도록 되어있으며, 화학반응 메커니즘인 GRI-Mech는 메탄 산화 반응에서 32종 177요소반응으로 구성되어 있다. 계산은 메탄-공기 혼합기를 연료로 당량비를 0.5에서 1.6까지, 초기온도 및 압력을 당량비 1.0상태에서 각각 300K~700K, 0.5bar~30bar로 변화시켰다.

3. 화염의 두께 계산

3.1 연소속도를 이용한 계산

일반적으로 화염의 연소속도로부터 화염의 두께는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.^(1,3) 전체 화염의 두께 X 는

$$X = \frac{(T_b - T_u)}{(T^o - T_u)} \left(\frac{\lambda}{C_p} \right) \cdot \frac{1}{\rho_u \cdot S_L} \quad (1)$$

이고, 예열영역의 두께 X_1 은 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$X_1 = \left(\frac{\lambda}{C_p} \right) \cdot \frac{1}{\rho_u \cdot S_L} \quad (2)$$

여기서, T^o 값으로 평균 연소가스 온도 즉 연소가스온도(T_b)와 미연소가스 온도(T_u)의 산술 평균 값을 이용하는 경우와 H_2 -CO 산화영역에서 H_2 발생이 최고인 점 즉 연료 소모율이 최고인 지점에서의 온도를 이용하는 경우를 들 수 있는데 두 가지 모두 계산하여 비교하였다.

3.2 화염온도의 기울기를 이용한 계산

Premix 코드를 이용하여 얻은 화염의 온도 및 연료의 농도변화를 Fig. 1에 나타낸다. 이는 기본적인 화염면의 구조로서 예열 영역과 산화 영역(반응영역)으로 구분되어 진다. 연소가스 영역에서 미연소 혼합기 영역으로 열이 이동함에 따라 예열영역에서의 혼합기는 열전도에 의해 온도 상승이 급격해지고 열팽창이 일어나 온도곡선은 상승한다. 이 영역에서의 화학반응은 주위 온도에 의해 반응이 진행되며, 화학반응이 활발해지면서 발열반응에 의해 온도는 더욱 상승하게 된다. 그러나 반응물이 거의 소모된 영역에서부터 온도상승은 종료한다. 예열영역과 반응영역을 나누는 변곡점을 확실하게 구분하는 것은 쉽지 않으나, 발열성 반응이 일어나고 온도구배의 형태를 고려하면 열의 흐름의 기울기가 정(+)의 형태가 예열 영역이며 부(-)의 형태를 나타내는 것이 반응영역으로 볼 수 있다.⁽⁵⁾ 따라서 온도구배에서 식 (3)을 이용하여 직접 화염면의 두께를 구할 수 있으나, 실제의 온도 변화곡선에서는 미연소가스 온도(T_u)로부터 연소가스 온도(T_b)까지 접선을 연결하여 그 접선과 만나는 미연소가스 온도점과 연소가스 온도점 사이의 X축 상의 거리를 직접 계측함으로써 화염의 두께를 측정할 수 있다.⁽³⁾ 이 경우 전체 화염두께를 X, 그리고 T° 점까지의 예열영역의 두께를 X_1 으로 구분하여 측정하였다.

$$X = \frac{T_b - T_u}{(dT/dx)_{max}} \quad (3)$$

4. 계산결과

4.1 연소속도

각 당량비 하에서의 메탄-공기 혼합기의 층류 연소속도를 Fig. 2에 나타낸다. 층류 연소속도는 일반적으로 연료의 연소경향을 살펴보는 데 유용하다.

Premix 코드를 이용하여 계산된 연소속도를 Andrew & Bradely의 실험결과⁽²⁾와 비교해 볼 때, 당량비 1.4 이상의 농혼합기에서 약간 저하할 뿐 전반적으로 잘 일치하고 있어 이 연소속도를 이용하여 구하는 화염두께의 값은 유효할 것으로 사료된다.

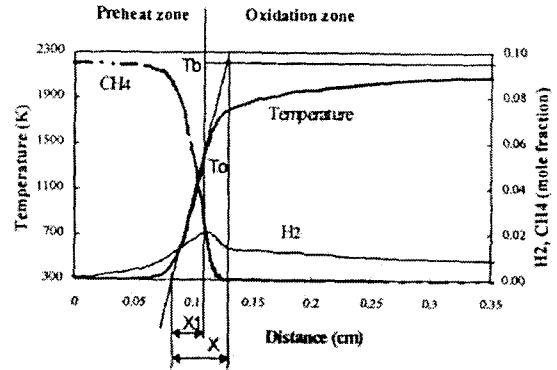


Fig. 1 Flame structure of CH4 - air mixture

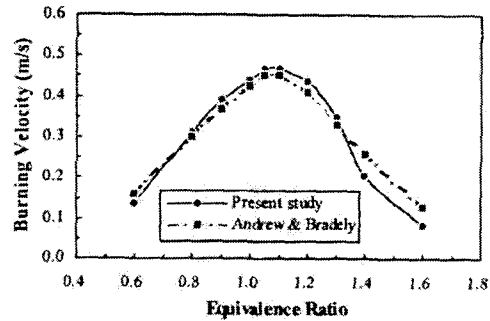


Fig. 2 Comparison of burning velocity at various equivalence ratio

4.2 화염의 두께

식(1)을 이용하여 화염의 두께를 구하는 방법에 있어서 식 중에 T° 에 어느 온도를 사용할 것인가가 문제가 된다. T° 에 연료소모율이 가장 클 때의 온도 즉 수소 생성이 가장 많을 때의 온도, T_h 로 정의하나, 실제로는 이 부분의 온도 계측 등이 쉽지 않은 점 등에서 근사적으로 미연소가스의 온도와 연소가스의 온도를 평균하여 사용하고 있는 것이 일반적이다. Fig. 3은 T° 에 T_h 와 평균온도를 식 (1)에 대입하여 계산한 화염의 두께를 비교하였다.

두 종류의 온도를 이용하여 구한 화염의 두께는 평균온도를 이용한 방법이 약간 클 뿐 전반적으로 그 차가 아주 적음을 알 수 있다. 또한 당량비 변화에 따른 Fig. 2의 화염속도와 Fig. 3의 화염의 두께는 서로 반비례하고 있음을 알 수 있다. 즉 연소속도가 빠를수록 화염의 두께가 얇아짐을 나타내고 있다.

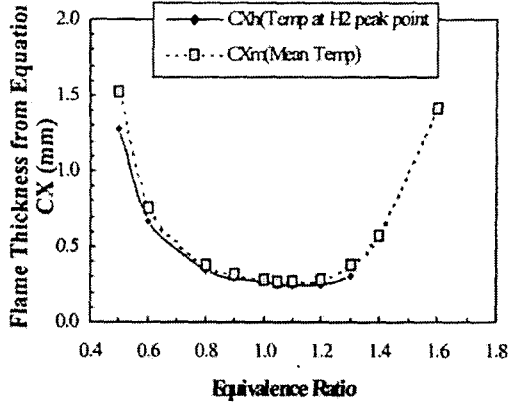


Fig. 3 Comparison of calculated flame thickness (CX) between mean temperature and temperature at which the fuel consumption rate is peak point as T°

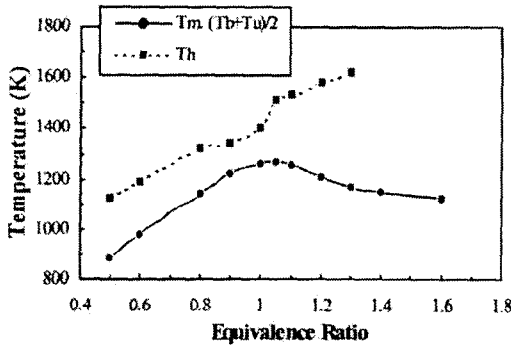


Fig. 4 Comparison of mean temperature (T_m) and temperature at which the fuel consumption rate is peak point (T_h) as T_o

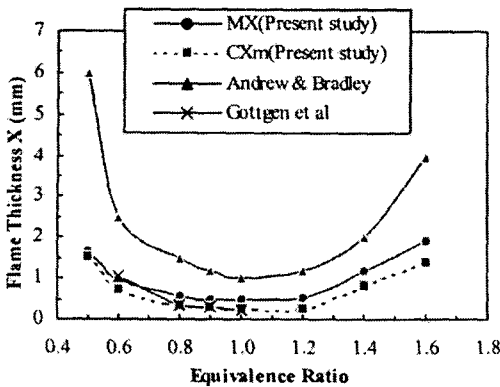


Fig. 5 Comparison of flame thickness with others results

Fig. 4에 각 당량비에서 T° 의 온도로서 T_h 와 미연소가스와 연소가스의 온도를 평균한 온도를 서로 비교하고 있다. 평균온도는 당량비 1.05까지는 온도가 증가하고 있으나 1.05를 지나면 다시 감소하고 있는 반면, T_h 는 당량비 증가 즉 연료량 증가에 비례하여 수소가 최대로 생성되는 온도도 점차 높아지고 있다. 두 온도의 차는 당량비 1 이상 영역에서 더욱 크게 벌어지고 있으나, 식 (1)에서 보는 바와 같이 T_h 값의 증가에 따라 λ/C_p 의 값도 증가하므로 화염의 두께는 두 값이 서로 상쇄되어 두 온도의 차이만큼 크지는 않다.

식 (1)을 이용하여 구한 화염의 두께(CXm)와 Premix 코드의 계산결과에서 얻은 온도기울기로부터 구한 화염의 두께(MX)를 다른 두 연구 결과^(2,3)와 비교한 것을 Fig. 5에 나타낸다. 먼저 본 연구의 결과로부터 화염의 두께는 MX가 CXm보다 0.2~0.5mm 정도 크며 그 차이는 당량비 증가에 의해 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있다. Gottgen 등⁽³⁾은 반응요소들의 운동 메커니즘을 이용하여 희박연소 상태에서의 메탄의 화염속도를 유도한 뒤, 이 화염속도를 이용하여 전체 화염의 두께를 계산하였는데 그 결과는 본 연구의 계산 결과(CXm)와 비교할 때 당량비 0.8에서 1.0의 범위 내에서 아주 잘 일치하고 있다. 반면에 미세 열전대와 슈리렌 사진 등에 의해 직접 측정된 Andrew & Bradley⁽²⁾의 화염 두께는 다른 연구 결과에 비해 전 영역에서 크게 나타나고 있다. 이는 화염두께 그 자체가 아주 얇기 때문에 실제 측정이 쉽지 않을 뿐 더러 미세 열전대를 사용하여 화염온도의 변화를 측정하는데 있어서도 열전대의 응답 지연 보상이 필요한 점⁽⁹⁾ 등 여러 가지 요인이 있을 것으로 예측되어 계산과의 차가 생긴 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 6은 예열영역의 두께(X1)를 식 (2)을 이용하여 구한 값과 온도 변화의 기울기로부터 구한 값 및 Gottgen 등의 계산결과를 서로 비교한 것이다. Gottgen 등은 메탄연료에서 MX1/CX1의 평균값이 0.118의 표준 편차를 가질 때, 0.994라는 값을 산출하였다. 그러나 이 값은 거의 1에 가깝기 때문에 MX1과 CX1을 동일하게 취급하고 있으나, 본 연구의 결과로서는 동일시키기에 그 값의 차이가 큰 것으로 나타났다. 그리고

MX1의 경우 당량비 1.4 이상은 H₂ 생성이 계속적으로 증가되어 최대점을 구할 수가 없었기 때문에 그 값을 표시할 수가 없었다.

5. 고찰

식 (1)의 계산에 의해 구한 화염두께 및 예열

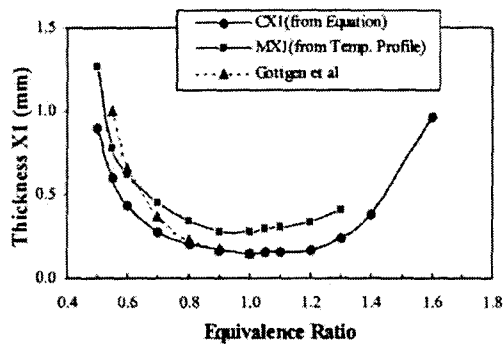
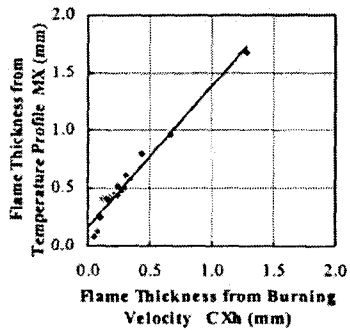
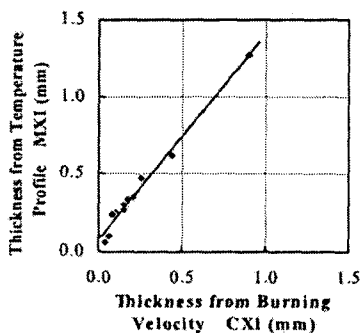


Fig. 6 Comparison of thickness of preheat zone



(a) Flame thickness

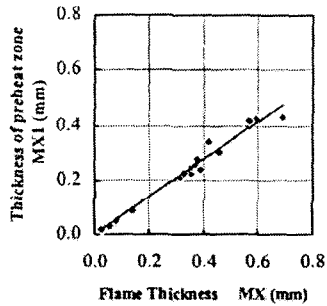


(b) Thickness of preheat zone

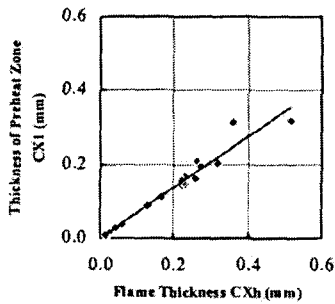
Fig. 7 Comparison of calculated value from burning velocity and measured value from temperature profile

영역의 두께와 혼합기 온도 기울기로부터 구한 두께를 Fig. 7에 각각 비교하였다. 화염의 두께나 예열영역의 두께에 관계없이 앞의 Fig. 5와 6에서와 마찬가지로 온도 기울기로부터 측정된 화염의 두께가 계산된 두께보다 큰 것을 알 수 있다. 본 연구에서 구한 MX1/CX1의 비는 예열영역에서의 화학반응이 활성화되지 않았다는 가정 하에서 Gottgen 등이 구한 MX1/CX1의 값 0.994보다 훨씬 크게 나타나고 있으며, 그 값은 화염의 두께나 예열영역의 두께와 상관없이 어느 것이나 근접선을 그은 결과, 약 1.43의 상관관계를 나타내고 있다. 즉 계산에 의해 구해진 두께는 온도기울기에 의해 측정된 두께의 약 70%수준임을 나타내고 있다. 계산에 의해 구해진 화염의 두께가 실제 측정된 화염두께보다 작다는 결과는 Bradely and Mitcheson의 연구⁽¹⁰⁾에서도 언급하고 있다. 그들은 예열영역의 두께와 산화 반응영역의 두께를 따로 구하여 이 두 두께를 합한 값으로서 전체화염의 두께를 구한 결과, 실제 실험⁽¹¹⁾에 의해 구한 값보다 작아 실험값과 동일한 화염두께를 만들기 위해 일정한 상수를 곱하여 사용하였으며, 이때 산화 반응영역의 두께를 구하기 위해 점화온도에서의 온도 구배를 이용하였다는 보고가 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 사용한 두 방법에 의해 구한 화염의 두께에는 약간의 차이가 존재함을 알 수 있으며, 이는 화염두께를 구하는 기존의 위의 두 방법에 약간의 허점이 있다는 것을 나타내며, 이 부분에 대한 상세한 연구도 필요하다는 것을 의미하기도 한다.

Fig. 8은 전체 화염두께 중에서 예열영역의 두께가 차지하는 비율에 대해 식 (2)에서의 계산값과 온도기울기 곡선에서 측정된 값을 각각 구분하여 비교한 것이다. 온도 기울기 곡선에서 구한 값과 계산식에 의해 구한 값, 어느 것이나 동일하게 약 0.665의 기울기를 나타내고 있다. 이는 $(T_b - T_w) / (T^0 - T_w)$ 의 값이 0.665를 가지고 있음을 뜻하며 결론적으로 예열영역의 두께는 전체 화염두께의 약 66.5%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 이 값은 Gottgen 등⁽³⁾이 식 (2)로부터 구한 값 0.57~0.71의 중간에 존재하므로 신뢰성을 가지고 있다고 할 수 있다.



(a) From temperature profile



(b) From equation

Fig. 8 Relationship between flame thickness and thickness of preheat zone

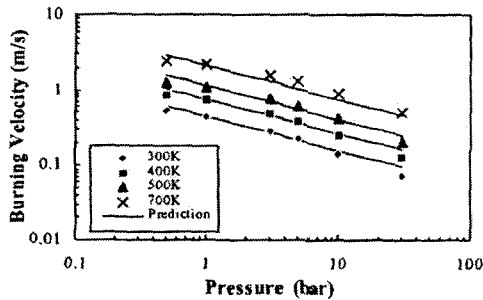


Fig. 9 Variation of burning velocity under various unburned gas pressure and temperature at 1.0

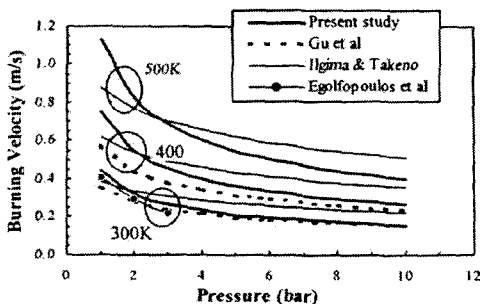


Fig. 10 Comparison of burning velocity with other result at 1.0

Table 1 Comparison of predicted equation of burning velocity at $\phi 1.0$

Researcher	Equation	Range
Present study	$S_L(\text{m/s}) = 0.44(T/300)^{1.85}(P)^{-0.45}$	$0.5\text{bar} \leq P \leq 30\text{bar}$ $300\text{K} \leq T \leq 700\text{K}$
Gu et al ⁽⁸⁾	$S_L(\text{m/s}) = 0.36(T/300)^{1.612}(P)^{-0.374}$	$1\text{bar} \leq P \leq 10\text{bar}$ $300\text{K} \leq T \leq 400\text{K}$
Iijima & Takeno ⁽⁹⁾	$S_L(\text{m/s}) = 0.369(T/291)^{1.6} [1 - 0.42 \log(P)]$	$0.5\text{bar} \leq P \leq 30\text{bar}$ $291\text{K} \leq T \leq 500\text{K}$
Andrew & Bradley ⁽²⁾	$S_L(\text{cm/s}) = 43(P)^{-0.5}$ $S_L(\text{cm/s}) = 10 + 0.000371T^2$	$0.1\text{bar} \leq P \leq 100\text{bar}$ $150\text{K} \leq T \leq 700\text{K}$

Fig. 9는 메탄-공기 혼합기를 당량비 1.0 하에서 압력을 0.5bar에서 30bar까지, 미연 혼합기의 온도를 300K에서 700K까지 변화시킬 때의 층류 화염의 연소속도를 지수함수로 나타낸 것이다. 미연소가스의 압력을 증가시킬수록 공기의 밀도가 증가함에 따라 화염의 팽창속도가 저하하므로 화염속도도 감소하고 있으며, 미연가스의 온도와는 비례하여 화염속도는 증가하고 있다. 그림에서 나타낸 각 점들은 Premix코드를 이용하여 계산한 값이며 직선은 이 각 점들로부터 도출된 식에 의해 예측한 결과이다. 연소속도에 관한 경험적인 식은 Metghalchi 등⁽¹¹⁾에 의해 제안되었으며, 본 연구의 결과로부터 다음의 범위 내에서 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 9에 나타낸 것과 같이 계산값은 이 값으로부터 도출된 식 (4)와 전체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

$$S_L = 0.44(T/300)^{1.85}(P)^{-0.45} \quad (4)$$

$$0.5\text{bar} \leq P \leq 30\text{bar}$$

$$300\text{K} \leq T \leq 700\text{K}$$

Fig. 10은 당량비 1.0에서 Table 1에 나타낸 각 연구자들의 연소속도를 비교한 것이다. 본 연구보다 좁은 영역에서 구한 Gu 등⁽¹²⁾의 실험결과는 압력이 낮은 영역에서 본 연구 결과보다 낮은 값을 나타내고 있다. 이것은 미연가스의 온도 300K 및 압력 1bar에서의 화염속도의 차이 때문이며, 이 초기조건에서의 화염속도를 같은 값

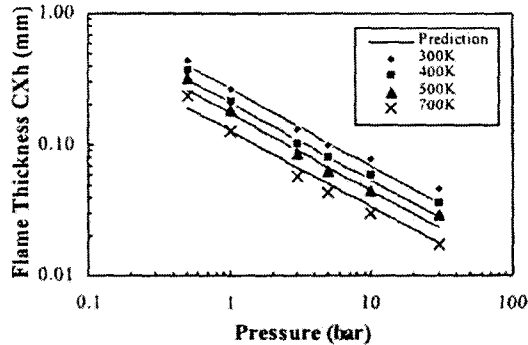


Fig. 11 Variation of flame thickness under various unburned gas pressure and temperature at 1.0

으로 할 경우 전체적으로 잘 일치할 것으로 사료된다. 반면에 Iijima 등⁽¹³⁾의 실험결과는 압력 3bar 이상의 전 온도영역에서 빠른 화염속도를 나타내고 있으며, Egolfopoulos 등⁽¹⁴⁾의 실험결과는 온도 300K, 압력 3bar 이하에서 본 연구결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 11은 메탄-공기 혼합기를 당량비 1.0 하에서 압력을 0.5bar에서 30bar까지, 미연 혼합기의 온도를 300K에서 700K까지 변화시킬 때의 종류 화염의 두께를 지수함수로 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 각 점들은 Fig. 9의 화염속도 식 (1)을 이용하여 계산한 값이며 직선은 이 값들로부터 도출된 식 (5)에 의해 예측한 결과이다. 화염두께는 압력과 온도에 의해 변화하므로 식 (5)의 형태는 화염속도를 나타내는 식 (4)를 참고로 한 것으로 화염의 두께는 압력과 온도 증가에 따라 감소하고 있다.

Premix코드의 결과와 식 (5)에 의해 예측한 결과를 살펴보면, 미연가스의 압력이 0.5bar와 30bar에서 약간의 차이를 보이고 있으나 그 이외의 영역에서는 온도 및 압력변화에 따른 화염의 두께는 잘 일치하고 있다. 따라서 아래 범위 내에서 미연 혼합기의 온도와 압력 변화에 대한 화염두께를 경험식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$X = 0.2643(T/300)^{-0.85}(P)^{-0.58} \quad (5)$$

0.5bar ≤ P ≤ 30bar
300K ≤ T ≤ 700K

6. 결론

화염면을 형성하는 화염의 두께는 연소속도와 밀접한 관계를 가지며, 주위 가스의 온도 및 압력, 즉 밀도에 의해 그 두께변화가 지배를 받는다. 화염두께를 직접 실험에 의해 구하기는 화염면 자체의 두께가 아주 얇아 쉽지 않으며, 실험장치 및 방법 측면에서도 여러 가지 제약이 있어 간단하지는 않다. 본 연구는 Chemkin 프로그램의 Premix 코드를 사용하여 혼합기의 연소속도를 먼저 구한 후, 이 결과를 이용하여 화염면의 두께와 예열영역의 두께를 구하였다. 또한 Premix 코드의 결과로부터 산출된 화염의 온도 변화에서 온도 구배를 측정하여 그 기울기로부터 화염의 두께를 구하였으며, 이 두 가지 방법에 의해 구한 화염의 두께는 약간의 차이가 존재함을 알았다. 이는 화염두께를 구하는 기존의 위의 두 방법에 약간의 결점이 있다는 것을 의미하며, 이 부분에 대한 연구도 필요하다는 것을 뜻하기도 한다.

전체화염 영역에서 예열영역의 두께부분은 약 66.5% 정도임을 알았으며, 온도와 압력이 증가할수록 화염면의 두께는 감소하며, 압력의 의존성이 온도보다 더 큼을 알 수 있다. 또한 화염면의 두께와 연소속도는 온도와 압력의 함수로서 나타나며, 경험식에 의해 예측 가능한 것임을 알 수 있다.

후기

Chemkin 프로그램의 Premix code 계산에 도움을 주신 Cardiff 대학의 Hamid Momahedi Heravi씨에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Rallis, C. J. and Garforth, A. M., 1980, "The Determination of Laminar Burning Velocity," *Progress Energy Combustion Science*, Vol. 6, pp. 303-329.
- (2) Andrew, G. E. and Bradely, D., 1972, "The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 19, No. 275.

- (3) Gottgen, J., Mauss, F. and Peter, N., 1992, "Analytic Approximations of Burning Velocities and Flame Thickness of Lean Hydrogen, Methane, Ethylene, Ethane, Acetylene and Propane Flames," *Twenty-fourth Symposium (international) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 129~135.
- (4) Sun, C. J., Sung, C. J., He, L. and Law, C. K., 1995, "Dynamics of Weakly Stretched Flames: Quantitative Description and Extraction of Global Flame Parameters," *Combustion and Flame*, Vol. 118, No. 108.
- (5) Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 1996, "A Study on the Characteristics of Methane-Air Premixture Combustion and Combustion Radicals (I)," *Transaction of the KSME(B)*, Vol. 20, No. 2, pp. 659~669.
- (6) Turns, S. R., 2000, "An Introduction to Combustion (2nd Edition)," McGrawhill, pp. 254~288.
- (7) Glassman, I., 1996, "Combustion (3rd Edition)," Academic Press. pp. 119~219.
- (8) Beer, J. M. and Chigier, N. A., 1974, "Combustion Aerodynamics," Applied Science Publishers Ltd, pp. 49~73.
- (9) Kwon, S. I., Arai, M. and Hiroyasu, H., 1990, "Effects of Cylinder Temperature and Pressure on Ignition Delay in Direct Injection Diesel Engine," *Bulletin of Marine Engineering Society of Japan*, Vol. 18, No. 1.
- (10) Bradely, D. and Mitcheson, A., 1976, "Mathematical Solutions for Explosions in Spherical Vessels," *Combustion and Flame*, Vol. 26, No. 201.
- (11) Metghalchi, M. and Keck, J. C., 1980, "Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixture at High Temperature and Pressure," *Combustion and Flame*, Vol. 38, No. 143.
- (12) Gu, X. J., Haq, M. Z., Lawes, M. and Woolley, R., 2000, "Laminar Burning Velocity and Markstein Lengths of Methane-Air Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 124, No. 41.
- (13) Iijima, T. and Takeno, T., 1986, "Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity," *Combustion and Flame*, Vol. 65, No. 35.
- (14) Egolfopoulos, F. N., Cho, P. and Law, C. K., 1989, "Laminar Flame Speeds of Methane-Air Mixtures under Reduced and Elevated Pressures," *Combustion and Flame*, Vol. 76, No. 375.