

에탄올-공기 예혼합기의 층류 화염두께 예측

권 순 익* · 김 상 진*

(2004년 5월 31일 접수, 2004년 8월 13일 심사완료)

Prediction of Laminar Flame Thickness of Ethanol-Air Pre-Mixture

Soon Ik Kwon and Sang Jin Kim

Key Words: Laminar Flame Thickness(층류화염두께), Premix Code(예혼합 코드), Preheat Zone(예열영역), Ethanol(에탄올)

Abstract

The thickness of laminar flame and preheat zone was computed from equation with burning velocity and the temperature profile, which is obtained by using premix code of Chemkin program for ethanol-air mixture. The computations were carried out under the unburned gas pressure 0.5bar-30bar and temperature of 300K-700K at ϕ 1.0. A difference flame thickness showed between temperature profile and equation with burning velocity. The ratio of flame thickness derived from the equation was about 45~65% of the temperature profile, and the thickness of preheat zone was about 67.1% of the flame thickness. The flame thickness was decreased by increasing the pressure and temperature, but the effect of pressure is more significant than the effect of temperature on the flame thickness. The flame thickness was predicted by using the following equation.

$$X(\text{mm}) = X_{st}(T/300)^{-0.65}(P)^{-0.68} \quad (0.5\text{bar} \leq P \leq 30\text{bar}, 300\text{K} \leq T \leq 700\text{K})$$

기호설명

X : 전체 화염두께(mm)
 CX : 식 (1)에 의해 계산된 화염두께(mm)
 MX : 온도구배로부터 구한 화염두께(mm)
 XI : 전체 화염두께 중 예열영역의 두께(mm)
 CXI : 식 (2)에 의해 계산된 예열영역의 두께(mm)
 MXI : 온도구배에서 구한 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)
 ρ : 미연가스의 밀도(kg/m³)
 S_L : 층류화염속도(m/s)

하첨자

b : 연소된
 u : 미연소된
 m : 평균값
 h : 수소생성이 최대인 점
 st : 1atm, 300K에서의 화염두께

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

* 회원, 대림대학 자동차과

1. 서 론

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

화염의 두께는 열 및 물질전달 특성에 의해 결정되는 영역의 두께로, 화염안정성을 나타내는 Kalovitz수의 결정인자 중 하나로 화염의 기본구조에 영향을 미친다.⁽²⁾ 즉 화염의 두께는 온도 구배를 가지며 이 온도구배의 크기에 따라 화염속도가 결정되어 연소과정 및 배기물 생성에 영향을 미치게 된다. 따라서 화염두께를 알면 화염속도와 연소 현상에 관한 것을 간접적으로 예측할 수 있다.

화염의 두께를 측정하는 방법에는 미세 열전대와 슈리렌 사진 등을 이용한 직접 측정법과 계산식을 이용하여 화염속도로부터 구하는 방법으로 나눌 수 있다. 온도계측과 사진 측정에 의한 직접 방법은 시간적 및 공간적으로 상당히 복잡하며 성가신 부분이 있을뿐더러 그 정도 면에서도 오차를 수반할 수가 있다. 이에 비해 계산에 의한 화염두께의 예측은 최근 들어 프로그램의 개발로 간편하고 손쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 화염 두께에 대한 직접측정의 예로서 Andrew와 Bradely⁽³⁾는 12.7 μ m의 미세 열전대와 슈리렌 간섭계를 이용하여 메탄-공기 혼합기의 화염의 두께를 측정하였으며, 계산에 의해 화염두께를 구한 예로서 Gottgens 등⁽⁴⁾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 계산결과와 측정

결과에는 상당한 차이가 존재하여 두 방법에 대한 검토가 요구되고 있다.

이에 본 연구는 전보의 메탄에 관한 연구⁽⁵⁾와 같이 Sandia 연구소에서 개발한 Chemkin(Computer Modeling of Chemically Reacting Flows) 프로그램의 Premix code를 이용하여 당량비를 0.6에서 1.6까지 변화시켜 에탄올과 공기의 혼합기의 연소속도를 먼저 구한 후, 이 결과를 이용하여 화염의 두께와 예열영역의 두께를 구하였다. 화염의 두께를 구하는 방법으로는 Premix 코드로부터 구한 화염의 연소속도에서, 연소속도와 화염면의 두께에 관한 계산식을 이용하는 방법^(4~8)과 Premix 코드의 결과로부터 산출된 화염의 온도변화에서 그 온도구배로부터 화염의 두께를 구하는 방법이 있다. 이 두 가지 방법에 의해 구한 화염의 두께를 비교함과 동시에 전체 화염두께 중 예열영역의 두께가 차지하는 비율도 검토하였다. 그리고 미연가스의 온도와 압력을 변화시켜 이들의 인자가 연소속도와 화염두께에 미치는 영향도 살펴보았다.

2. 화염의 연소속도 계산

연소속도 계산은 1차원적인 단일 예혼합 화염의 자유전과 상태에서의 층류의 연소속도를 계산할 수 있는 Chemkin 프로그램의 Premix 코드를 이용하였다. 이 코드는 뉴턴 반복법에 의해 정상상태에서의 질량, 종(species) 및 에너지 보존 방정식을 계산하도록 되어있으며, GRI-mech의 화학반응 메커니즘은 에탄올 산화 반응에서 56종 351요소반응으로 구성되어 있다.⁽⁹⁾ 계산은 에탄올-공기 혼합기를 연료로 당량비를 0.6에서 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.^(1,4) 전체 화염의 두께 X 는

$$X = \frac{(T_b - T_u)}{(T^0 - T_u)} \left(\frac{\lambda}{C_p} \right) \cdot \frac{1}{\rho_u \cdot S_L} \quad (1)$$

이고, 예열영역의 두께 $X1$ 은 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$X1 = \left(\frac{\lambda}{C_p} \right) \cdot \frac{1}{\rho_u \cdot S_L} \quad (2)$$

여기서, T^0 값으로 평균 연소가스 온도 즉 연소가스 온도(T_b)와 미연소가스 온도(T_u)의 산술 평균값을 이용하는 경우⁽²⁾와 H₂-CO 산화영역에서 H₂ 발생이 최고인 점 즉 연료 소모율이 최고인 지점에서의 온도를 이용하는 경우⁽⁴⁾를 들 수 있는데 두 가지 모두 계산하여 비교하였다.

또한 λ/C_p 의 값은 다음 식 (3)을 이용하여 구하였다.⁽⁴⁾

$$\left(\frac{\lambda}{C_p} \right) = 2.58 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{298} \right)^{0.7} \quad (3)$$

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 온도상승이 급격해지고 열팽창이 일어나 온도곡선은 상승한다. 이 영역에서의 화학반응은 주위 온도가 낮은 관계로 지극히 느리게 진행되나, 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 예열영역이며 부(-)의 형태를 나타내는 것이 반응영역으로 볼 수 있다.⁽⁷⁾ 따라서 온도구배에서 식 (4)를 이용하여 직접 화염면의 두께를 구할 수 있으나, 실제의 온도 변화곡선에서는 미연소가스 온도(T_u)로부터 연소가스 온도(T_b)까지 점선을 연결하여 그 점선과 만나는 미연소가스 온도점과 연소가스 온도점 사이의 X 축 상의 거리를 직접 측정함으로써 화염의 두께

를 얻을 수 있다.⁽⁴⁾ 이 경우 전체 화염두께를 X , 그리고 T^0 점까지의 예열영역의 두께를 $X1$ 으로 구분하였다.

$$X = \frac{T_b - T_u}{(dT/dx)_{max}} \quad (4)$$

4. 계산결과

4.1 연소속도

각 당량비 하에서의 에탄올-공기 혼합기의 층류 연소속도를 Fig. 2에 나타낸다. 층류 연소속도는 일반적으로 연료의 연소경향을 살펴보는 데 유용하다. Premix 코드를 이용하여 계산된 연소속도를 Gulder의 실험결과⁽⁶⁾와 비교해 볼 때, 당량비 1.0 이상의 혼합기에서 약간 저하하는 경향을 보이고 있으나, 전반적으로 잘 일치하고 있어 이 연소속도를 이용하여 구하는 화염두께의 값은 유효할 것으로 사료된다.

4.2 화염의 두께

식 (1)을 이용하여 화염의 두께를 구하는 방법에

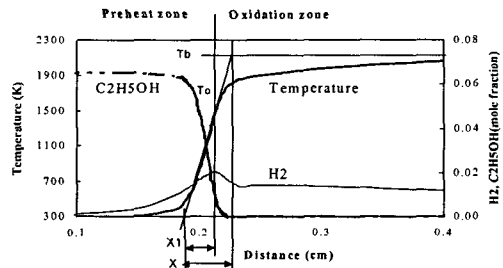


Fig. 1 Flame structure of C₂H₅OH - Air mixture

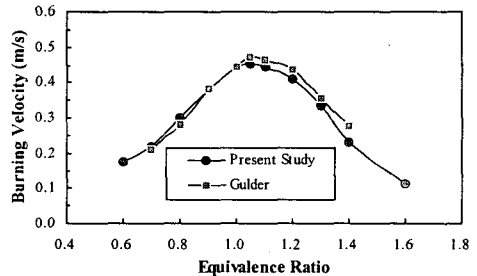


Fig. 2 Comparison of burning velocity at various equivalence ratio

있어서 식 중의 T^o 에 어느 온도를 사용할 것인가가 문제가 된다. T^o 는 연료소모율이 가장 클 때의 온도 즉 수소 생성이 가장 많을 때의 온도(T_h)로 정의되나,⁽⁴⁾ 실제로는 이 부분의 온도 계측 등이 쉽지 않은 점등에서 근사적으로 미연소가스의 온도와 연소가스의 온도를 평균하여 사용하고 있는 것이 일반적이다.

Fig. 3에 각 당량비에서 T^o 의 온도로서 T_h 와 미연소가스와 연소가스의 온도를 평균한 온도 T_m 을 서로 비교하고 있다. 당량비 1.0 이하에서는 평균온도 T_m 이 T_h 보다 약 200℃ 이상 높으나, 당량비 1.0 이상에서는 그 차이가 더욱 커지고 있다. 즉 평균온도 T_m 의 경우, 당량비 1.05까지는 온도가 증가하고 1.05를 지나면 다시 감소하고 있는 반면, T_h 는 당량비 증가 즉 연료량 증가에 비례하여 수소가 최대 생성되는 온도도 점차 높아지고 있다. 두 온도의 차는 당량비 1이상 영역에서 더욱 크게 벌어지고 있으나, 이는 연료량의 증가에 따른 최고 연료소모율 지점의 온도도 점차 증가하기 때문이라 생각된다. 당량비 1.4이상은 H_2 생성이 계속적으로 증가되어 최대점을 구할 수가 없었기 때문에 그 값을 표시할 수가 없었다.

Fig. 4는 T^o 에 T_h 와 평균온도 T_m 을 식 (1)에 대입하여 화염의 두께를 비교하였다. 당량비 변화에 따른 화염의 두께는 연소속도에 반비례함을 알 수 있다. 즉 연소속도가 빠를수록 화염의 두께는 얇아지고 있으며, 두 종류의 온도를 이용하여 구한 화염면의 두께는 평균온도를 이용한 방법이 약간 클 뿐 전반적으로 그 차이가 아주 적음을 알 수 있다. 이는 식 (1)과 식 (3)에서 보는 바와 같이 T_h 증가에 따라 (NC_p)의 값도 증가하므로 두 값이 서로 상쇄되어 화염의 두께는 Fig. 3에서 보여준 두 온도의 차이만큼 크지는 않다. 그러나 Fig. 3에서처럼 당량비 1.3이상부터 온도가 계속 증가되는 경향이 있어 물리적인 타당성이 떨어지기 때문에 본 연구에서는 이 값들을 사용하지 않았다.

식 (1)을 이용하여 구한 화염의 두께(CX_m)와 Premix 코드의 계산결과에서 얻은 온도기울기로부터 구한 화염의 두께(MX)를 비교한 것을 Fig. 5에 나타낸다. 화염의 두께는 MX 가 CX_m 보다 전영역에서 약 0.1~0.15mm 정도 큰 경향을 보이고 있다.

Fig. 6은 예열영역의 두께($X1$)를 식 (2)을 이용하여 구한 값과 온도 변화의 구배로부터 구한 값을 서로 비교한 것이다. 온도구배로부터 얻은 $MX1$ 이 식 (2)에서 구한 $CX1$ 보다 전 영역에서 약 0.2mm 정도 크며, 당량비 증가에 따라 그 차이가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

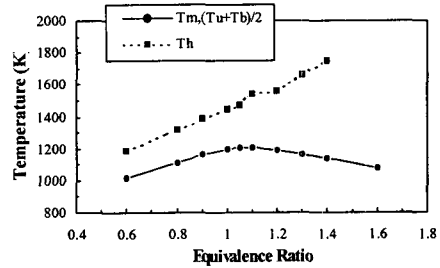


Fig. 3 Comparison of mean temperature(T_m) and temperature at which the fuel consumption rate is peak point(T_h) as T^o

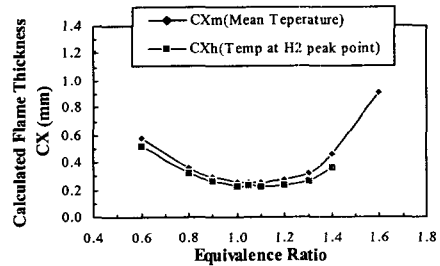


Fig. 4 Comparison of calculated flame thickness(CX) between mean temperature and temperature at which the fuel consumption rate is peak point as T^o

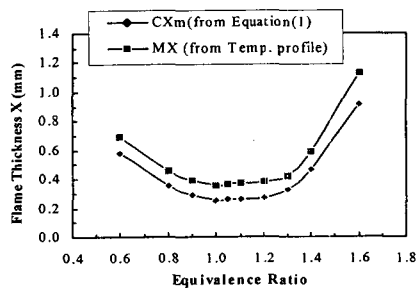


Fig. 5 Comparison of flame thickness

5. 고찰

식 (1)과 식 (2)의 계산에 의해 구한 화염두께 및 예열영역의 두께와 혼합기 온도 기울기로부터 구한 두께를 Fig. 7에 무차원수로 각각 나타내었다. 화염의 두께나 예열영역의 두께에 관계없이 앞의 Fig. 5, 6에서와 마찬가지로 온도구배로부터 측정된 화염의 두께가 계산된 두께보다 큰 것을 알 수 있다. 본 연구에서 구한 CX/MX 와 $CX1/MX1$ 의 비, 즉 계산에 의해 구해진 두께와 온도기울기로부터 얻은 두께는 전체 화염의 두께나 예열영역의 두께에

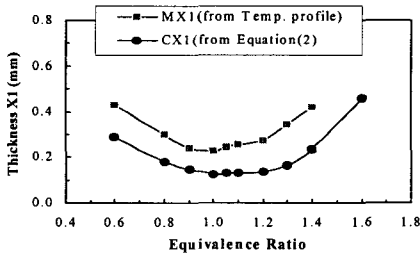
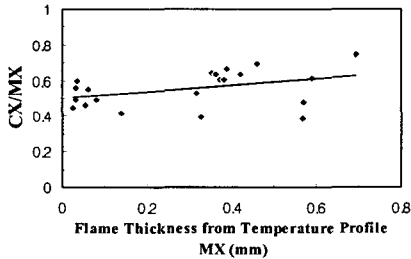


Fig. 6 Comparison of thickness at preheat zone

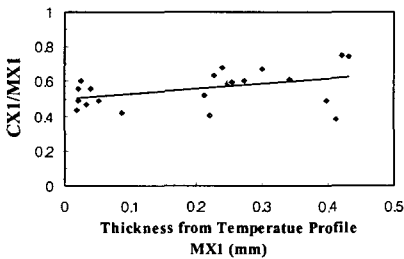
상관없이 어느 것이나 약 45~65% 범위이며, 그 평균값은 두 경우 모두 55.6% 수준임을 나타내고 있다.

이러한 결과로부터 본 연구에서 사용한 두 방법에 의해 구한 화염의 두께에는 약간의 차이가 존재함을 알 수 있으며, 이는 화염두께를 구하는 기존의 두 방법에 약간의 허점이 있다는 것을 나타내며, 또한 이 부분에 대한 상세한 연구도 필요하다는 것을 의미하기도 한다.

Fig. 8은 전체 화염두께 중에서 예열영역의 두께가 차지하는 비율에 대해 식 (1),(2)에서의 계산값과 온도곡선의 구배로부터 측정된 값을 각각 구분하여 나타낸 것이다. 온도구배에서 구한 값과 계산식에 의해 구한 값, 어느 것이나 동일하게 약 0.671의 비율을 나타내고 있다. 즉 예열영역의 두께는 전체화염 두께의 약 67.1%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 이것은 식 (1)에서 $(T_b - T_w) / (T^o - T_w)$ 의 값이 Turns의 경우⁽²⁾ T^o 를 $(T_b + T_w)$ 의 평균값 즉 $(T_b + T_w)/2$ 로 정리하여 그 값이 2인데 비해 본 연구에서는 1.45로, 그 차이만큼 화염의 두께가 얇음을 나타내고 있다.

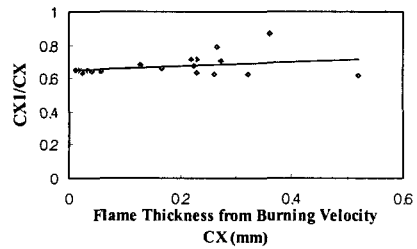


(a) Flame thickness

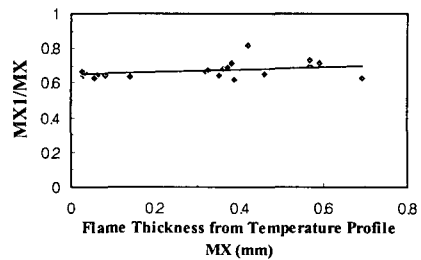


(b) Thickness at preheat zone

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



(a) From temperature profile



(b) From equation(1),(2)

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

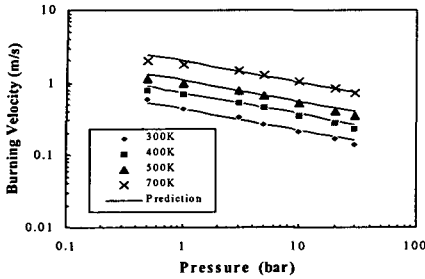


Fig. 9 Variation of burning velocity under various unburned gas pressure and temperature at 1.0

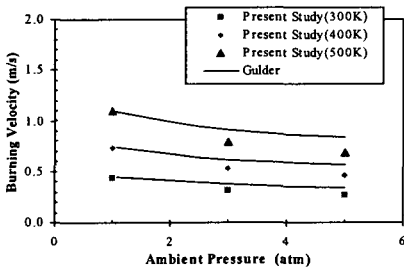


Fig. 10 Comparison of burning velocity with other result at 1.0

Fig. 9는 에탄올-공기 혼합기를 당량비 1.0 하에서 압력을 0.5bar에서 30bar까지, 미연 혼합기의 온도를 300K에서 700K까지 변화시킬 때의 층류화염의 연소속도를 지수함수로 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 각 점들은 Premix코드를 이용하여 계산한 값이며 직선은 이 각 점들로부터 도출된 근사식에 의해 예측한 결과이다. 미연소가스의 압력을 증가시킬수록 화학반응의 차수, 압력에 따른 연쇄반응 및 재결합 반응과의 경쟁 등의 화학반응에 의해 화염속도가 감소하며, 미연가스의 온도와는 비례하여 화염속도는 증가하고 있다. 연소속도에 관한 경험적인 식은 Metghalchi 등⁽¹⁰⁾에 의해 제안되었으며, 본 연구의 결과로부터 다음의 범위 내에서 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 9에 나타낸 것과 같이 각 점들과 근사식 (5)에 의한 직선은 전체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

$$S_L(m/s) = 0.44(T/300)^{1.79}(P)^{-0.29} \quad (5)$$

$$0.5bar \leq P \leq 30bar$$

$$300K \leq T \leq 700K$$

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

Researcher	Equation	Range
Present study	$S_L(m/s) = 0.44(T/300)^{1.79}(P)^{-0.29}$	$0.5bar \leq P \leq 30bar$ $300K \leq T \leq 700K$
Gulder ⁽⁶⁾	$S_L(m/s) = 0.45(T/300)^{1.75}(P)^{-0.17}$	$1bar \leq P \leq 8bar$ $300K \leq T \leq 500K$

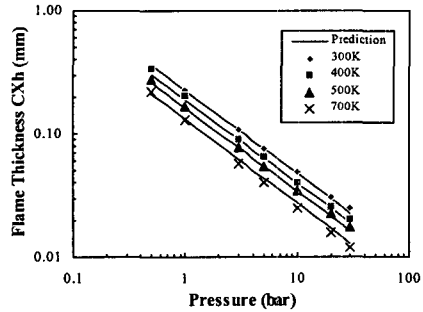


Fig. 11 Variation of flame thickness under various unburned gas pressure and temperature at 1.0

Fig. 10은 당량비 1.0에서 Table 1에 나타난 Gulder의 연소속도 실험결과를 분위기 온도 300K, 400K 및 500K에서 비교한 것이다. 그림에 나타낸 점들은 본 연구에 의해 계산된 값이며, 직선은 Gulder가 구한 근사식을 이용한 것이다. 본 연구보다 좁은 영역에서 구한 Gulder⁽⁶⁾의 실험결과는 대기압 영역에서는 본 연구 결과와 잘 일치하고 있으나, 분위기 압력의 증가에 따라 그 차이는 약간씩 커지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 에탄올-공기 혼합기를 당량비 1.0 하에서 압력을 0.5bar에서 30bar까지, 미연 혼합기의 온도를 300K에서 700K까지 변화시킬 때의 층류 화염의 두께를 지수함수로 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 각 점들은 Fig. 9의 화염속도를 식 (1)을 이용하여 계산한 값이며 직선은 이 값들로부터 도출된 근사식 (6)에 의해 예측한 결과이다. 식 (6)의 형태는 화염속도를 나타내는 근사식 (5)를 참고로 한 것이다. 전체적으로 화염의 두께는 분위기압력과 온도 증가에 따라 감소하고 있다.

Premix코드의 결과와 식 (6)에 의해 예측한 결과를 살펴보면, 전 영역에서 온도 및 압력변화에 따

른 화염의 두께는 잘 일치하고 있다. 따라서 아래 범위 내에서 미연 혼합기의 온도와 압력 변화에 대한 화염두께를 근사식 (6)을 이용하여 구할 수 있다. 식 (6)에 의해 화염두께를 계산함으로써 온도구배의 정도와 화염속도 및 그 이후의 연소 현상을 간접적으로 예측할 수 있을 것으로 생각할 수 있다.

$$X(\text{mm}) = 0.2272(T/300)^{-0.65}(P)^{-0.68} \quad (6)$$

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

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

6. 결론

Chemkin 프로그램의 Premix 코드를 사용하여 혼합기의 연소속도를 먼저 구한 후, 이 결과를 이용하여 화염면의 두께와 예열영역의 두께를 구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계산식에 의해 구한 화염두께는 온도 구배로부터 구한 값의 45~65%를 나타내고 있어, 이 두 가지 방법에 의해 구한 화염의 두께에는 약간의 차이가 존재함을 알았다. 이는 화염두께를 구하는 기존의 두 방법에 약간의 허점이 있다는 것을 의미하며, 또한 이 부분에 대한 연구도 필요하다는 것을 뜻하기도 한다.

(2) 전체화염 영역에서 예열영역의 두께부분은 약 67.1% 임을 알았다.

(3) 온도와 압력이 증가할수록 화염면의 두께는 감소하며, 압력의 의존성이 온도보다 더 큼을 알 수 있다.

(4) 화염면의 두께는 다음 식에 의해 예측 가능하다.

$$X(\text{mm}) = X_{st}(T/300)^{-0.65}(P)^{-0.68}$$

$$(0.5\text{bar} \leq P \leq 30\text{bar}, 300\text{K} \leq T \leq 700\text{K})$$

후 기

본 연구는 두원공과대학 교내연구비의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Rallis, C. J. and Garforth, A. M., 1980, "The Determination of Laminar Burning Velocity," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 6, pp. 303~329.
- (2) Turns, R. S., 2000, *An Introduction to Combustion* (2nd Edition), McGraw-Hill, pp. 254~288.
- (3) Andrew, G. E. and Bradely, D., 1972, "The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 19, No. 275, Vol. 275~288.
- (4) 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.
- (5) Kwon, S. I. and Bowen, J. P., 2003, "Prediction of Laminar Burning Velocity and Flame Thickness in Methane-Air Pre-Mixture," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers(B)*, Vol. 27, No. 9, pp. 1201~1208.
- (6) Gulder, O., 1982, "Laminar Burning Velocity of Methanol, Ethanol and Iso-Octane-Air Mixtures," *Nineteenth Symposium (international) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 275~281.
- (7) 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, pp. 108~128.
- (8) Glassman, I., 1996, *Combustion* (3rd Edition), Academic Press, pp. 119~219.
- (9) Marinov, N. M., 1998, "A Detailed Chemical Kinetic Model for High Temperature Ethanol Oxidation," *International Chemical Kinetics*, UCRL-JC-131657.
- (10) 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, pp. 143~153.