

〈論 文〉

예혼합기체 연료의 화염생성에 관한 연구

백 승 욱*

(1988년 10월 7일 접수)

Initiation of Gaseous Premixed Flame

Seung Wook Baek

Key Words : Flame Initiation(화염생성), Premixed Gases(예혼합기체), Ignition(점화), Minimum Ignition Energy(최소점화에너지), Lewis Number(루이스 수)

Abstract

The flame initiation of an infinite fuel system exposed to a planar ignition kernel has been investigated numerically. The aim has been to promote an understanding of the flame initiation by using the simplest mathematical formulation which retains the essential physical features. It has been found that there exists a minimum ignition energy below which a combustion wave cannot be initiated. For a fixed value of Lewis number, the same flame propagation velocity has been obtained regardless of the amount ignition energy supplied. Furthermore, for a fixed energy input there is a maximum Lewis number over which the flame cannot be initiated.

1. 서 론

예혼합기체 연료에 있어서의 화염형성 및 전파에 관한 연구는 연소공학에 있어서 점화현상과 더불어 매우 의미있는 기본적 연구라 하겠다. 예혼합된 기체연료가 어떤 외부 점화 장치에 노출되었을 경우, 점화 장치로부터의 열전달이 충분할 경우는 예혼합 연료가 가열되어 점화 됨으로써 화염이 생성전파 되어 갈 것이다. 그러나 점화장치로부터의 열전달이 기체연료가 점화조건에 이르지 못하도록 충분하지 않을 경우, 주위로의 열손실로 인해 예혼합 연료는 점화되지 못할 것이다. 이와같이 각 기체연료에 대해 가연 한계가 존재하는데 이는 각 기체의 열적 화학적 성질 및 점화장치의 형태 및 이로부터 전달 되는 점화에너지 등에 의존하게 된다. 이러한 화염형성에 관한 연구는 Zeldovich⁽¹⁾ 등에 의해 잘

정리되어 제시되어 있으며 열적 점화이론에 관해서도 포괄적으로 다루어져 있다⁽²⁾. 예혼합기체에서의 유한두께의 고온기체에 의한 점화현상은 적분방법에 의해 Spalding⁽³⁾에 의해 다루어졌다.

또한 예혼합기체에서의 구형상의 고온점화 현상도 근사방법⁽⁴⁾과 수치해석적⁽⁵⁾으로 다루어졌다.

본 연구에서는 이러한 예혼합기체의 유한두께의 고온기체에 의한 점화현상을 일차원 평면적으로 다룸에 있어 점화를 일으키는 고온기체의 두께와 기체의 물리적 성질의 비를 나타내는 Lewis수의 영향을 알아 보고자 한다.

2. 지배방정식

예혼합기체의 화염생성에 관한 연구를 수행함에 있어 우선 다음과 같은 가정을 도입한다.

(1) 화학반응은 아레니우스(Arrhenius) 형태로 나타낼수 있는 1단 비가역 반응이다.

(2) 예혼합기체의 물리적 성질값은 전체과정에 걸쳐

*정회원, 한국과학기술원 기계공학과(항공전공)

상수이다.

- (3) 예혼합기체는 정체하고 있다고 가정한다.
 - (4) 무한대로 존재하는 예혼합개스는 개방된 상태에서 모든 과정이 수행된다.
 - (5) 복사에 의한 열전달은 무시한다.
- 위의 가정하에 예혼합기체에 대한 에너지 식은 다음과 같이 나타낼수있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + A \rho Y Q \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 ρ , c , λ 는 각각 예혼합기체의 밀도, 비열, 열전도계수이고, Y 는 예혼합기체 연료의 질량분율, a 는 화학반응상수를 나타낸다. E 와 R 은 각각 예혼합기체의 활성화에너지 및 일반기체상수이며, Q 는 예혼합기체 연료의 단위 질량당 발열량이다.

예혼합기체의 질량분율에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial Y}{\partial t} = \rho D \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} - A \rho Y \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

위의 두 식을 다음의 무차원 수를 이용하여 변형한다.

$$\theta = \frac{T - T_o}{T_b - T_o}, \quad \psi = \frac{Y}{Y_o} \quad (3)$$

이때 단열기체온도 T_b 는

$$T_b = T_o + Y_o Q / c \quad (4)$$

로 나타낼수 있다.

식 (1), (2)의 지수항을 간단화하기 위하여

$$\beta = \frac{E/R}{T_b - T_o}, \quad \gamma = \frac{T_o}{T_b - T_o} \quad (5)$$

을 도입하고 독립변수인 t, x 는 각각 특성시간 t_c 과 특성길이 l_c 를 도입하면

$$X = \frac{x}{l_c}, \quad \tau = \frac{t}{t_c} \quad (6)$$

이 된다. 여기서 l_c 와 t_c 는

$$l_c = \left(\frac{\lambda t_c}{\rho c}\right)^{1/2}, \quad t_c = \frac{1}{A e^{-\beta}} \quad (7)$$

로 정의되며, 식 (1)과 (2)는 각각

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \psi \exp\left\{-\beta\left(\frac{1}{\theta + \gamma} - 1\right)\right\} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = Le^{-1} \frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} - \psi \exp\left\{-\beta\left(\frac{1}{\theta + \gamma} - 1\right)\right\} \quad (9)$$

로 나타낼수 있다. 여기서

$Le = \lambda / \rho c D$ 는 Lewis 수이다.

본 연구에서는 예혼합기체가 주어진 점화에너지에 대해 점화가 일어남으로 해서 화염이 생성될 수 있는지에 대해 알아보기위해 일정두께의 $\theta=1$ 인 연소가스를 사용한다. 다시 말해서 다음과 같은 초

기조건을 사용한다.

$$\left. \begin{aligned} \theta &= 1 \\ \psi &= 0 \end{aligned} \right\} 0 \leq X \leq X_{ig}, \quad \tau = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \theta &= 0 \\ \psi &= 1 \end{aligned} \right\} X_{ig} < X, \quad \tau = 0 \quad (10)$$

경계조건으로서는 $X=0$ 에서 각각

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{\partial \psi}{\partial X} = 0 \quad X=0, \quad \tau > 0 \quad (11)$$

을 사용하고, 무한대에 있는 예혼합기체의 경계조건으로는

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{\partial \psi}{\partial X} = 0$$

$$X = \infty, \quad \tau > 0 \quad (12)$$

을 사용한다.

이때 초기에 주어진 초기에너지는

$E_o = \int_0^\infty \theta(X) dX$ 로 나타낼수 있는데 식 (10)의 초기조건에 의해 $E_o = X_{ig}$ 가 된다.

3. 계산결과

식 (8)과 (9)를 주어진 초기 및 경계조건 식 (10)~(12)에 대해 X_{ig} 와 Le 의 값을 변화시키며 해를 구하였다 수치방법으로는 안정조건을 늘 만족하는 implicit 방법을 택하였고 시간차와 격자거리는 각각 얻어진 해가 주어진 오차의 범위내에 들어 올때 까지 줄여가면서 선택하였다. 식 (8)의 지수항의 무차원온도는 explicit방법으로 처리하면서 반복계산 하였다.

본 계산에서는 식 (5)의 무차원 변수에 대해 각각 $\beta=7.5$, $\gamma=0.15$ 의 값을 사용하였는데 이는 $T_o=300K$, $T_b=230K$, $E/R=15000K$ 에 해당한다.

Fig.1은 E_{ig} 은 $X_{ig}=10$, $Le^{-1}=1.0$ 에 대한 무차

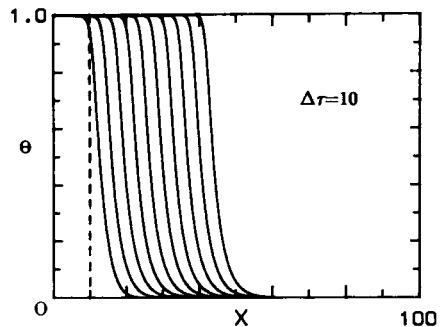


Fig. 1 Temperature variation for $X_{ig}=10$ and $Le^{-1}=1.0$

원 온도 θ 의 변화를 나타내는데 점선은 식 (10)의 초기조건을 의미한다. 각 실선은 무차원 시간이 10 증가할때의 경우인데 $\theta=0$ 에서 $\theta=1$ 로 변하는 부분이 바로 완전히 형성된 화염면의 위치를 나타낸다. 각 실선 사이의 거리 ΔX 는 거의 일정하므로 화염면은 일정한 속도로 진행되어가는 것을 볼수있다.

Fig. 2는 X_{ig} 는 10, $Le^{-1}=1.0$ 에 대한 예혼합기체 연료의 무차원 질량분율의 변화를 나타내는데 화염면이 지나가면서 $\psi=1$ 에서 0으로 되는것을 알수 있고 Fig. 1에서와 마찬가지로 각실선사이의 거리는 일정하다. Figs. 3,4는 $X_{ig}=2$, $Le^{-1}=1.0$ 에 대한 온도와 연료의 질량분율 변화로 Figs. 1,2와 같은 형태의 변화를 나타내고 화염의 전파속도도 $X_{ig}=10$ 의 경우와 다르없다. 이로부터 본 연구에서의 예혼합기체의 화염형성에 있어서 $Le^{-1}=1.0$ 인 경우 초기점화에너지에 관계없이 완전히 형성된 화염전파속도는 동일한 것임을 알수있다. 그러나 Fig. 5에서와 같이 $X_{ig}=1$, $Le^{-1}=1.0$ 에 대해서는 주어진 초기에너지가 부족한 관계로 주어진 에너지는 미연소 기체쪽으로 확산 분산되어 점화를 야기시키

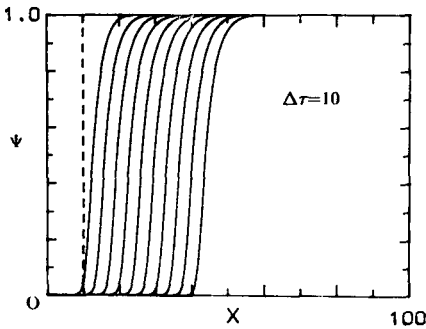


Fig. 2 Mass fraction variation of fuel for $X_{ig}=10$ and $Le^{-1}=1.0$

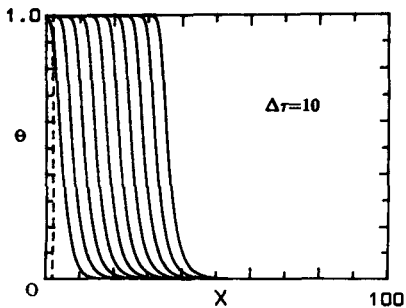


Fig. 3 Temperature variation for $X_{ig}=2$ and $Le^{-1}=1.0$

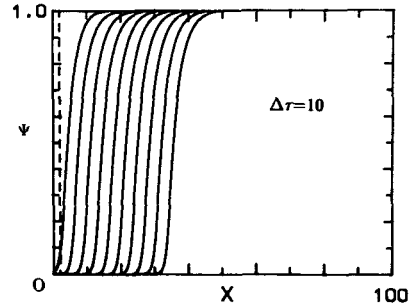


Fig. 4 Mass fraction variation of fuel for $X_{ig}=2$ and $Le^{-1}=1.0$

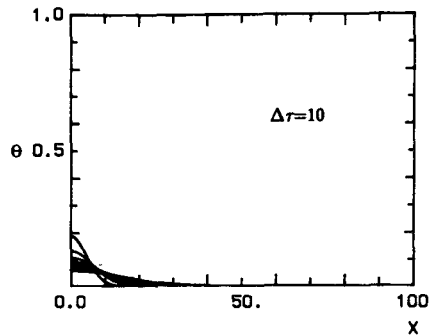


Fig. 5 Temperature variation for $X_{ig}=1$ and $Le^{-1}=1.0$

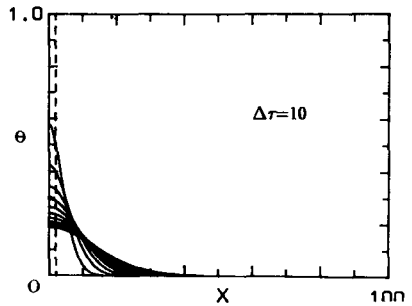


Fig. 6 Temperature variation for $X_{ig}=2$ and $Le^{-1}=0.8$

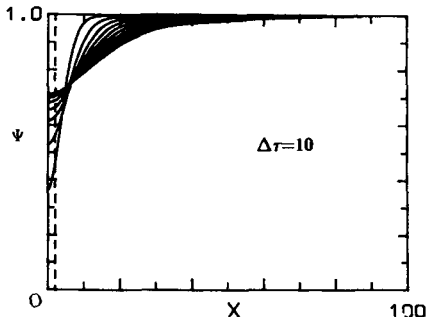


Fig. 7 Mass fraction variation of fuel for $X_{ig}=2$ and $Le^{-1}=0.8$

지 못하게 된다.

Figs. 6,7은 $X_{ig}=2$, $Le^{-1}=0.8$ 인 경우로서 Figs. 3,4와 비교할때 주어진 초기에너지는 같으나

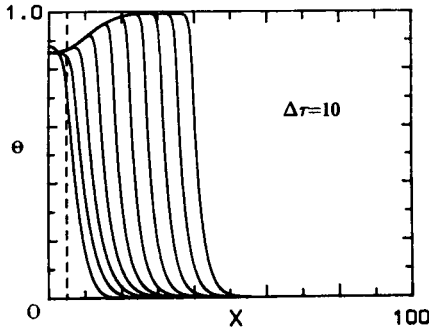


Fig. 8 Temperature variation for $X_{ig}=5$ and $Le^{-1}=0.5$

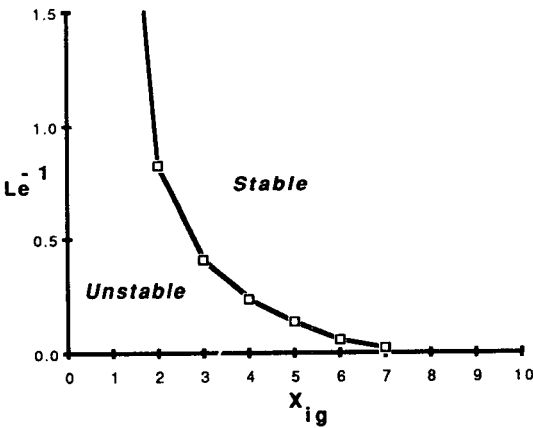


Fig. 9 Mass fraction variation of fuel for $X_{ig}=5$ and $Le^{-1}=0.5$

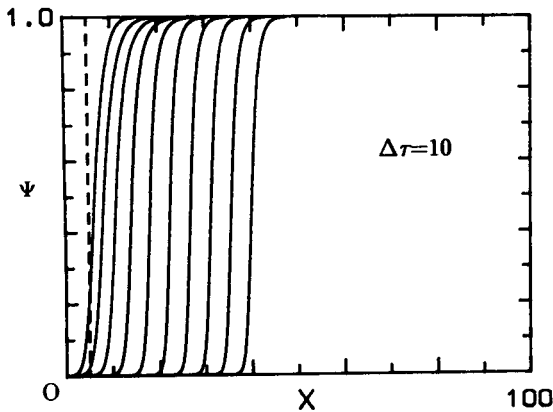


Fig. 10 Stability conditions for flame initiation

예혼합기체의 물리적 성질의 비인 Lewis수가 증가한 경우로 이때 화염이 생성되지 못하고 주어진 에너지가 확산되어 분산되는 것을 알수있다. 이는 루이스 수의 정의로부터 알수 있듯이 예혼합기체의 열전도 계수가 증가한 결과 초기에 주어진 에너지가 미연소 기체 쪽으로 더욱 급속히 확산됨으로 인해 국부온도가 낮아짐으로써 예혼합기체가 점화될 수 없기 때문이다. 그리하여 Fig.6에서와 같이 시간이 경과함에 따라 최고 온도는 점차로 낮아지면서 X방향으로 온도 분포가 확산되어 감을 알수 있다. Fig. 7의 연료의 질량분율도 화염이 생성되지 못하는 관계로 초기의 연소된 지역인 $\psi=0$ 구역과 미연소지역인 $\psi=1$ 구역이 서로 물질전달에 의해 시간이 경과함에 따라 혼합되는 현상을 볼수 있다. Figs.8,9는 $X_{ig}=5$, $Le^{-1}=0.5$ 에 대한 온도와 연료의 질량분율 변화로 온도변화에서 알수 있듯이 에너지가 확산 분산되다가 기체연료의 점화로 에너지가 공급되면서 화염이 생성, 가속되면서 정상속도로 근접하는 것을 알수 있다. 이상과 같이 예혼합된 기체연료 중에서 화염의 생성 및 전파는 초기에 주어지는 열에너지와 기체의 물리적 성질의 비인 루이스 수에 의해 화염이 생성 및 전파되어가는 안정지역(stable region)과 화염이 생성되지 못하는 불안정(unstable)지역으로 Fig. 10에서와 같이 구분될수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 예혼합된 기체연료에 일정량의 외부 열에너지를 공급하였을 때 평면화염이 생성 및 전파되는지에 관해 간단한 수학모델을 제시하여 수치해석적으로 해를 구함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 화염의 생성에는 일정량 이상의 에너지가 공급되어야 하는 최소 점화에너지가 존재한다.
- (2) 최소 점화에너지 이상의 에너지가 공급되었을 때 본 연구에서 사용한 예혼합 기체의 경우 정상화염 전파속도는 일정하였다.
- (3) 일정량의 점화에너지의 경우 예혼합기체의 루이스 수가 증가할수록 화염이 생성 및 전파되지 않는 불안정 구역이 발생하였다.

이상의 연구에서와 같이 본 연구에서는 간단한 경우의 예혼합 기체연료에서의 화염형성에 대해 연구하였는데 앞으로 이 연구는 밀폐된 용기내에서의

문제 그리고 고온에 수반되는 복사열전달 문제를 고려함으로써 실질적인 문제에 접근할 수 있다고 하겠다.

후 기

본 연구는 시스템공학센터와 한국 IBM사와의 협력사업인 SEC 컴퓨터 시스템을 사용하여 수행되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Zeldovich, Ya-B., Barenblatt, G. I. Liborovich, V.B., and Makhviadze, G. M., 1985, "The Mathematical Theory of Combustion and Explosions", Consultant Bureau, New York.
- (2) Merzhanov, A.G., 1971, "The Present State of the Thermal Ignition Theory: An Invited Review", Combustion and Flame. Vol. 16, pp. 89~124.
- (3) Spalding, D.B., 1958, "Approximate Solution of Transient and Two-dimensional Flame Phenomena: Constant Enthalpy Flames", Proceedings of Royal Society, Vol.A245, pp.352~372.
- (4) Merzhanov, A.G., 1966, "On Critical Conditions for Thermal Explosion of a Hot Spot," Combustion and Flame, Vol. 10, pp. 341~348.
- (5) Sibulkin, M. and Siskind, K., 1987, "Numerical Study of Initiation of a Combustion Wave by an Ignition Kernel", Combustion and Flame, Vol. 69, pp. 49~57.

(1) Zeldovich, Ya-B., Barenblatt, G. I. Liborovich, V.B., and Makhviadze, G. M., 1985, "The Mathematical Theory of Combustion and Explosions", Consultant