

〈論 文〉

# 고온벽면에 의한 수소-공기 예혼합기체의 자연발화에 관한 수치적 해석

박은성\* · 백승욱\*\*

(1991년 5월 24일 접수)

## Numerical Analysis on the Autoignition of Hydrogen/Air Mixture near a Hot Surface

E.S. Park and S.W. Baek

**Key Words :** Hydrogen Gas(수소가스), Multistep Reaction(다단반응), Onestep Reaction(단일 반응), Ignition Delay(점화지연시간), Minimum Surface Temperature(최소벽면온도)

### Abstract

Ignition of hydrogen-air premixed gas in the vicinity of a hot surface has been investigated. Especially multistep reaction model was compared with a single reaction model. It was found that the multistep model with 48 step elementary chemical reactions produced a phenomenologically reasonable trend in ignition delays. The ignition delays increase as the mixture becomes either fuel-rich or fuel-lean with a minimum near the stoichiometric value. The minimum surface temperature has been deduced by extrapolating predicted ignition delays. It was in quite good agreement with the experimental data.

### 기 호 설 명

$C_p$  : 비열  
 $D$  : 확산계수  
 $h$  : 엔탈피  
 $k_B$  : 볼츠만 상수  
 $k_{k,a}$  : 전방 반응 상수  
 $k_{k,r}$  : 후방 반응 상수  
 $M$  : 화학종 기호  
 $N$  : 화학종 갯수  
 $P$  : 압력  
 $R$  : 일반 기체 상수  
 $t$  : 시간 변수  
 $T$  : 온도

$u$  :  $x$ 방향속도  
 $x$  : 거리  
 $y$  : 화학종의 질량분율  
 $\epsilon$  : 포텐셜 매개변수  
 $\rho$  : 밀도  
 $\sigma$  : 포텐셜 매개변수  
 $\eta$  : 점성계수  
 $\lambda$  : 열전도계수  
 $\omega_i$  : 화학종의 생성량

### 1. 서론

예혼합상태의 연료와 산화제는 전기적인 스파크, 점화 플러그 또는 가열된 벽면 등의 외부적인 에너지가 가해질 때 혼합물의 열물리적인 성질을 지배

\*정회원, 한국과학기술연구원 공조·환경제어실

\*\*정회원, 한국과학기술원 항공공학과

하는 대류 및 확산 등의 이동현상과 열화학적 측면인 연료의 연소현상이 유발되면서 이 두가지 요소의 상호작용이 강하게 연관된다. 그 상호작용이 Deflagration이나 Detonation Wave의 초기현상인 점화에 필요한 요건을 갖출수 있느냐하는 문제는 외부에서 주어지는 에너지의 강도, 지속도 및 양적인 요소 등에 의해 결정된다. 또한, 점화현상은 외부조건에 못지않게 혼합물의 화학적 성질이나 초기조건등과 같은 내부적인 면에 의해서도 많은 영향을 받는데 그들은 점화 지연 시간(ignition delay)과 연료의 그램당 열 방출량 등을 결정하기 때문이다. 따라서 점화현상은 특정한 연료와 산화제가 결합된 상태에서 일어나는 복합적인 현상으로, 이동현상(transport phenomena)과 혼히 잘 알려져 있지 않은 화학적 인자들에 의해 강하게 지배받는다. 점화현상 및 최소점화에너지에 관련된 성질들은 실험적인 방법뿐 아니라 이론적으로도 적지않은 연구들이 행해졌다. Lewis와 Von Elbe<sup>(1)</sup>는 전기적인 스파크를 점화원으로 하여 점화현상에 대해 광범위한 자료를 제시하고 있으며, Weinberg와 Kingdon<sup>(2)</sup>은 점화원이 스파크와 레이저일 경우에 필요한 점화에너지를 비교연구하므로써 작은 Quenching distance로 혼합물에 짧은주기의 필스를 가할때 두 점화소스에 의한 점화에너지는 별 차이가 없음을 보여주고 있다. Dixon-Lewis와 Shepherd<sup>(3)</sup>는 시간에 따른 변화를 고려한 화염 모델을 채용해서 초기 Radical농도의 변화와 초기 점화원의 기하학적 변화에 따른 영향을 연구하였으며, 가열된 벽면에 형성된 경계층에서의 점화현상에 대해서는 Mullen<sup>(4)</sup>, Cairnie<sup>(5)</sup> 등이 연구하였는 바, 특히 Cairnie등<sup>(5)</sup>은 자연대류 경계층 흐름에서 연료-공기 혼합물의 점화에 대한 상세한 고찰이 가능한 실험적 기술을 제시하고 후류쪽의 온도장을 수학적 모델에서 얻은 결과와 비교하면서 점화현상에 대한 그 모델이 비실제적임을 보여주며 이것은 연료의 산화과정을 종래의 많은 연구(Chen<sup>(6)</sup>, Toong<sup>(7)</sup>, Tyler<sup>(8)</sup> 등)에서와 같이 간단한 One-step으로 반응기구를 가정한 까닭이라고 지적하면서 보다 상세하고 실제에 가까운 다단 화학반응모델의 필요성에 대해 언급하고 있다. 본 연구에서는 수소와 공기의 예혼합기체가 가열된 벽면에 노출되어 있는 경우의 점화문제를 1차원 비정상상태로 예측하고자 하며 특히, 계산에서 가정하는 화학반응기구가 갖는 정확성에 관하여 수치해석적으로 고찰하고자 한다.

## 2. 이론전개 및 수식화

화학반응기구가 자연점화에서 차지하는 중요도를 파악하고자 한다면 간단한 유동조건과 단순한 계산 영역이 필요하므로 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 1차원 비정상상태로 지배방정식을 정식화한다.

### 2.1 다단반응모델의 지배방정식

다단 반응을 고려한 자연 점화 모델은 다음과 같이 정식화 된다(Kuo<sup>(9)</sup>, Williams<sup>(10)</sup>).

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

화학종 보존방정식

$$\rho \frac{\partial y_i}{\partial t} + \rho u \frac{\partial y_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_i \frac{\partial y_i}{\partial x} \right) + \omega_i \quad (2)$$

에너지 보존방정식

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho \sum_{i=1}^N h_i D_i \frac{\partial y_i}{\partial x} \right] \quad (3)$$

여기서,  $h = \sum_{i=1}^N y_i h_i$

$$h_i = \int_{T_0}^T C_{p,i} dT + \Delta h_{f,i}$$

$C_p$ 는 혼합물의 비열이고 이것은  $C_p = \sum y_i C_{p,i}$ 로 표시한다.

여기서,  $C_{p,i}$ 는 온도에 대한 함수로  $C_{p,i} = a_i + b_i T + c_i T^2 + d_i T^3 + e_i T^4$ 이다.

윗 식에서 각각의 계수들은 Janaf Table<sup>(11)</sup>에 있는 값들을 Curve Fitting해서 구한다.

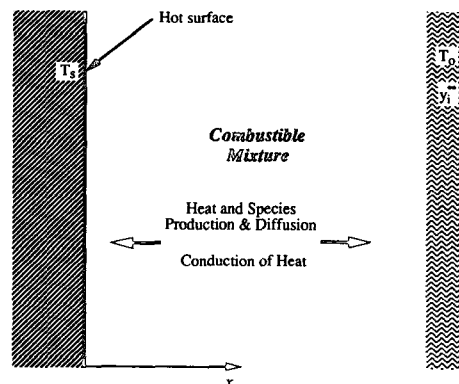


Fig. 1 Schematic description of the ignition model

식(3)은, 식(2)과  $dh = C_p dT + \sum_{i=1}^N h_i dy_i$ 로 부터

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \sum_{i=1}^N \rho D_i \left( \frac{\partial y_i}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial h_i}{\partial x} \right) - \sum_{i=1}^N h_i \omega_i \quad (4)$$

와 같이 된다.

또한 이상기체 상태방정식에서

$$\rho = \frac{P_o}{\sum_{i=1}^N \frac{y_i}{W_i} RT} \quad (5)$$

이 성립한다.

## 2.2 단일반응모델의 지배방정식

비교를 위해 단일반응모델을 채용한 지배방정식은 이제까지의 연구들(Cairnie<sup>(6)</sup>, Merzonov<sup>(12)</sup>)처럼 다음과 같이 정식화 한다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

에너지보존방정식

$$\rho \frac{\partial(C_p T)}{\partial t} + \rho u \frac{\partial(C_p T)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \omega_f (\Delta H) \quad (7)$$

산화제보존방정식

$$\frac{\partial y_o}{\partial t} + u \frac{\partial y_o}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \omega_o + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_o \frac{\partial y_o}{\partial x} \right) \quad (8)$$

연료보존방정식

$$\frac{\partial y_f}{\partial t} + u \frac{\partial y_f}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \omega_f + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_f \frac{\partial y_f}{\partial x} \right) \quad (9)$$

여기서  $\omega_o$ 는 산소의 순생성률,  $\omega_f$ 는 연료 즉 수소의 순생성률을 나타내며  $D_o$ ,  $D_f$ 는 각각 산소와 수소개스의 확산계수를 표시한다.

지배방정식에서, 열전도계수는

$\eta_k = \frac{\eta_k}{W_k} (f_{trans} C_{v,trans} + f_{rot} C_{v,rot} + f_{vib} C_{v,vib})$ 로 주어지고<sup>(13)</sup>

$$\eta_k = \frac{5}{16} \frac{\sqrt{M_k k_B T}}{\sigma_k^2 \Omega_{(2,2)}^*} \text{이다.}^{(14)}$$

$\sigma_k$ 는 Lennard-Jones 충돌 지름이고,  $M_k$ 는 분자들의 질량을 나타낸다. 충돌적분 (collision inter-

gral)은 Reduced temperature  $T^*_k = \frac{k_B T}{\epsilon_k}$ 로 부터

구해진다.  $\epsilon_k$ 는 Lennard-Jones potential이고,  $k_B$ 는 Boltzmann 상수이다.

이진확산계수(binary diffusion coefficients)는 압력과 온도의 함수로

$$D_{jk} = \frac{3}{16} \frac{\sqrt{2\pi k_B^3 T^3 / M_{jk}}}{P \pi \sigma_{jk}^2 \Omega_{(1,1)}^*}$$

와 같이 주어진다.<sup>(14)</sup>

여기서  $M_{jk}$ 는 변형된 분자질량으로 ( $j, k$ )의 쌍으로

$$M_{jk} = \frac{2M_j M_k}{M_j + M_k}$$

이다. 혼합물에 대한 평균된 값들은 각각

$$\lambda = \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^N x_i \lambda_i + \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\lambda_i}} \right)$$

$$D_i = \frac{1 - y_i}{\sum_{j \neq i}^N \frac{x_j}{D_{ji}}} = \frac{\sum_{j \neq i}^N y_j}{\sum_{j \neq i}^N \frac{x_j}{D_{ji}}}$$

에 의해 구한다.<sup>(13)</sup>

두가지 반응모델에 의한 지배방정식을 풀기 위해 필요한 초기 조건과 경계조건은

$$\begin{aligned} y_i(0, x) &= y_i(t, \infty) = y_i^\infty \\ T(0, x) &= T(t, \infty) = T_o \\ T(t, 0) &= T_s, t > 0 \\ u(t, 0) &= u(0, x) = 0 \\ \frac{\partial y_i}{\partial x} &= 0 \text{이 된다.} \end{aligned}$$

일반적으로 점화현상을 기술하는 지배방정식들은 매우 stiff하기 때문에 해를 구하기 위한 여러가지 방법들이 존재하지만 본 연구에서는 안정조건을 늘 만족하는 Implicit 방법을 택하여 계산을 수행하였다. 먼저 벽면에서(온도와 화학종의 물농도 분포에 영향이 없을 만큼 충분한 거리에 우측 경계 조건을 주고, time step은  $10^{-8}$ sec 부터  $10^{-7}$ sec까지, 격자수는 50~100개 사이에서 몇가지 조합으로 계산하여 최종 결과는  $10^{-7}$  sec의 time step과 50개의 격자수로 부터 구하였다.

## 2.3 화학반응기구

(1) 다단반응모델

$N$ 개의 화학종이 관여하는  $I$ 개의 화학반응기구는

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N \nu'_{ik} M_i \leftrightarrow \sum_{i=1}^N \nu''_{ik} M_i \quad (k=1, \dots, I)$$

$M_i$ 는 화학종을 나타내고,  $k$ 는  $i$ 화학종이 속해있는 특정의 화학반응을 나타낸다. 따라서  $i$ 화학종의 생성율  $\omega_i$ 는

$$\omega_i = \sum_{k=1}^I \nu_{ik} q_k \quad (i=1, \dots, N)$$

$$\nu_{ik} = (\nu''_{ik} - \nu'_{ik})$$

$$q_k = k_{k,r} \prod_{i=1}^N [M_i]^{\nu'_{ik}} - k_{k,f} \prod_{i=1}^N [M_i]^{\nu''_{ik}}$$

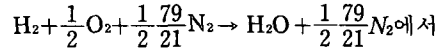
여기서,  $[M_i]$ 는  $i$ 화학종의 몰농도이고,  $k_{k,r}$ 는 전방,  $k_{k,f}$ 는 후방 반응 상수이다. 계산에서 고려되는 화학종은  $H_2, O_2, N_2, H_2O, OH, HO_2, O, H, H_2O_2$  등의 9개이다. 이들의 실제 반응식은 Table 1에 있으며 기본적으로 Kumar<sup>(15)</sup>와 같다.

Table 1 Reaction mechanism

No.	Reaction
1.	$H+OH \rightleftharpoons O+H_2$
2.	$H+HO_2 \rightleftharpoons H_2+O_2$
3.	$H+HO_2 \rightleftharpoons OH+OH$
4.	$H+HO_2 \rightleftharpoons O+H_2O$
5.	$H+H_2O_2 \rightleftharpoons H_2+HO_2$
6.	$H+H_2O_2 \rightleftharpoons OH+H_2O$
7.	$OH+H_2 \rightleftharpoons H+H_2O$
8.	$OH+OH \rightleftharpoons H_2+O_2$
9.	$OH+OH \rightleftharpoons O+H_2O$
10.	$OH+HO_2 \rightleftharpoons O_2+H_2O$
11.	$OH+H_2O_2 \rightleftharpoons H_2O+HO_2$
12.	$H_2+HO_2 \rightleftharpoons OH+H_2O$
13.	$HO_2+HO_2 \rightleftharpoons O_2+H_2O_2$
14.	$O+OH \rightleftharpoons H+O_2$
15.	$O+HO_2 \rightleftharpoons OH+O_2$
16.	$O+H_2O_2 \rightleftharpoons O_2+H_2O$
17.	$O+H_2O_2 \rightleftharpoons OH+HO_2$
18.	$H+H+M \rightleftharpoons M+H_2$
19.	$H+OH+M \rightleftharpoons M+H_2O$
20.	$H+O_2+M \rightleftharpoons M+HO_2$
21.	$OH+OH+M \rightleftharpoons M+H_2O_2$
22.	$O+H+M \rightleftharpoons M+OH$
23.	$O+OH+M \rightleftharpoons M+HO_2$
24.	$O+O+M \rightleftharpoons M+O_2$

## (2) 단일반응모델

단일반응의 연소모델은 중간화학종의 생성없이



연료 생성항은 Cairnie<sup>(5)</sup>, Merzov<sup>(12)</sup>와 같이

$$\omega_f = A (\rho y_f)^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

산소의 생성항은 수소와 당량비만큼 반응한다고 가정하여

$$\omega_o = \left(\frac{O}{F}\right)_{stoi} \omega_f$$

## 3. 결과 및 검토

이론적으로 점화시기에 대한 정의는 다소 임의적인 면이 존재하는 까닭에 여러가지 기준이 제시되고 있다. 본 해석에서는 점화시기에 대한 정의로서 Van't Hoff criterion을 채용하는데 그것은 예혼합기체의 온도가 벽면의 온도를 초과하는 순간을 점화시기로 간주하는 것이다. Fig. 2에서 보듯이, 30% 수소-공기 혼합물이 온도가 1000K 벽면에 노출되어 있는 경우 기체의 시간에 따른 온도분포를 보면, 기체온도가 벽면온도를 초과하는 최초의 시각은 0.546msec인데 기체가 1500K에 이르는 시간은 그로부터 0.02msec에 불과하다. 이것은 전체 지연시간중에서 5% 미만이므로 임의의 점화기준을 채택하더라도 지연시간 계산에 결정적인 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 또 다른 기준으로 특정의 중간 생성물(intermediate species), 예로,  $HO_2$ 와 같은 화학종을 포함하는 방법도 가능하다. Fig. 3

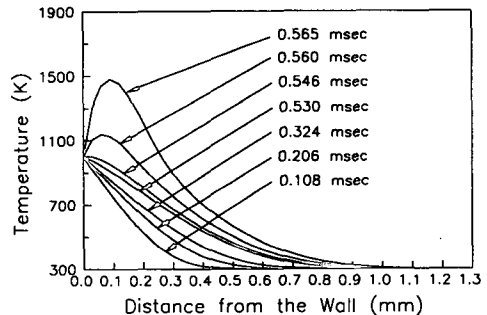


Fig. 2 Temperature profiles in the gas at various instant of time (30% hydrogen mixture, 300K, 100kPa, multi-step model)

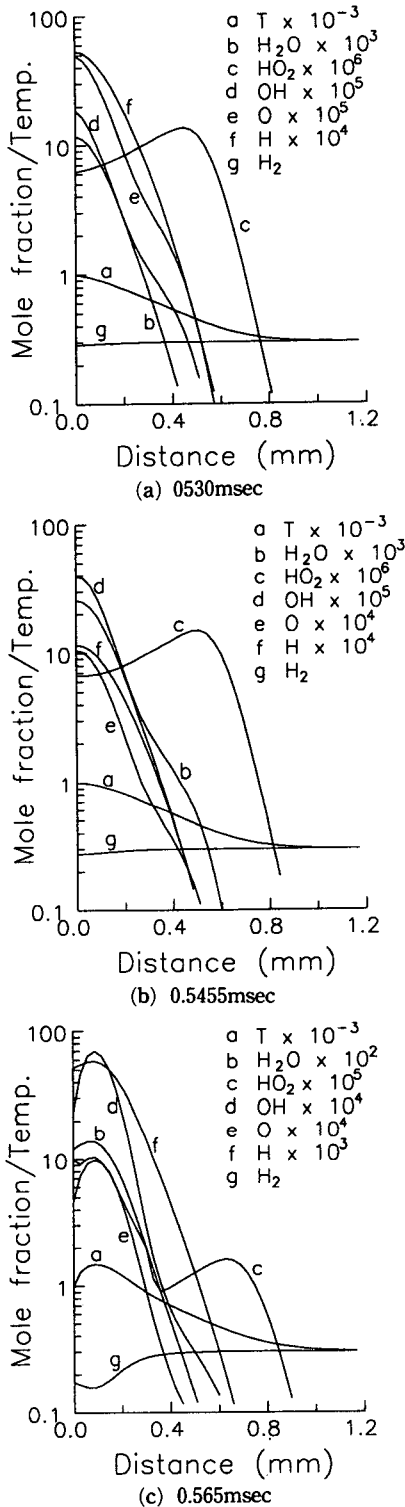


Fig. 3 Temperature and Concentration profiles at various instant of time (30% hydrogen mixture, 300K, 100kPa, multi-step model)

(a),(b),(c)는 30% 수소-공기 혼합물의  $t=0.530, 0.546$ 과  $0.565$ msec에서의 몰농도 분포를 보여준다. 각각의 시간은 점화가 되기 전, 점화가 되는 순간 및 점화가 된 직후를 나타낸다. (a)와 (b)에서 보면  $HO_2$ 를 제외한 중간생성물들은 벽면으로부터 멀어질수록 단조감소함을 알 수 있다. 점화가 되는 순간부터  $HO_2$ 의 몰농도는 그림에서 단조증가하는 구간인 벽면과 0.5mm 사이에서 기울기가 감소하다가 0.565msec가 되면 기울기의 부호가 반대로 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 점화되는 순간과 거의 일치하므로  $HO_2$ 를 포함하는 점화기준도 타당성을 갖는다. 실제로  $HO_2$ 를 중간생성물로 갖는 반응기구에서  $HO_2$ 는 점화현상을 지배하는 중요한 인자로서 특히, 저온 고압의 점화에서 그 거동을 설명하는데 매우 의미가 있는 것으로 알려져 있다.

Fig. 4과 Fig. 5는 각각 다단반응모델과 단일반응모델의 수소몰농도와 벽면온도의 변화에 따른 점화 지연시간을 나타낸다. Fig. 4의 경우 벽면 온도 1000K 일때 수소기체의 당량비(0.29577) 근처를 전후로 하여 연료과잉영역과 연료희박영역에서 점화지연시간이 길어짐을 볼 수 있다. 이것은 예혼합기체에서 화학반응이 발생할 때 당량비근처를 중심

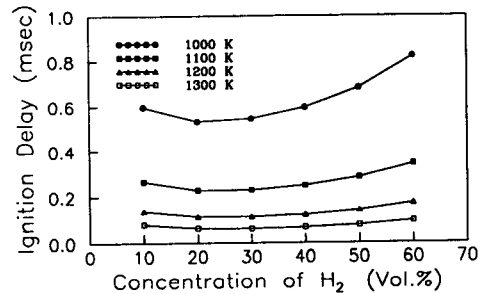


Fig. 4 Ignition delay variation with hydrogen concentration. (300K, 100kPa, multi-step model)

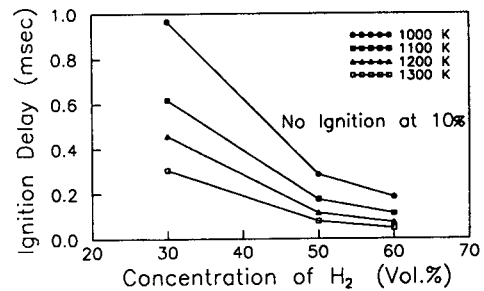


Fig. 5 Ignition delay variation with hydrogen concentration. (300K, 100kPa, one-step model)

으로 연료과잉영역에서는 반응에 참가하지 못한 연료가 남아있고, 연료희박영역에서는 산화제가 남게 되며, 그 결과 이러한 미반응물들이 화학반응의 결과 방출되는 감지엔탈피(sensible enthalpy)를 흡수하여 에너지 흡수원으로써 역할을 하기 때문이다. Fig. 5는 단일반응모델의 결과로서, 다단반응모델과 달리 수소물농도가 증가함에 따라 점화지연시간이 단조감소 즉, 발화가 촉진되는 현상을 볼 수 있다.

Fig. 6은  $T_s = T_s^\infty \exp(A/t^*)$  (여기서  $T_s^\infty$ 는 최소벽면온도이고,  $t^*$ 는 점화지연시간이다.)에 의해 최소점화온도를 구한 다단반응모델의 결과로서 Kumar<sup>(15)</sup>가 실험에서 구한 값들과 잘 일치함을 보여주고 있다. 반면에 단일반응의 경우(Fig. 7)의 계산값은 실험에서 예측한 값들보다 80K 가량 적은 값이며, 다단반응모델과는 달리 수소물농도가 커짐에 따라 최소점화온도가 올라감을 볼 수 있다. 그 까닭은 다단반응의 경우 발화에 필요한 에너지 단계를 세 단계로 구분할 때

A : 벽면에서의 에너지 공급

B : Chemical Kinetics에 의해 초래되는 에너지의 첨가와 소모

C : 발화에 필요한 에너지 획득

로 구분지을 수 있다. 따라서 A단계에서 유입되는 에너지는 B단계에서

$$h_i = \Delta h_{f,i} + \int_{T_0}^T C_{p,i} dT$$

(\*)에 의해 각각의 화학종들이 개개의 반응에 참가하여, 흡열반응에서는 에너지를 소모하고 발열반응에서는 에너지를 첨가함으로써 A단계와 C단계의 완충지대로써의 역할을 하며 결과적으로 유입된 에너지의 양적인 증대와 분배를 하게 된다. 이와 반면에 단일반응모델의 경우에는 B단계의 완충 역할없이 A 단계의 에너지를 점화모델이 곧바로 획득하여 단순한 양적팽창에 의해 발화에 이르게 되는 셈이다. 따라서 이 모델은 A단계의 변화에 일차적이고도 민감한 대응을 하게 되며, Fig. 7에서 보여주듯이 단순히 수소기체의 지분이 많아짐에 따라 그것을 발화시키기 위해 필요한 에너지(최소점화에너지)의 양도 증가하고, 다단반응모델(Fig. 6)과 비교할 때 단일반응모델에서는 전체적인 최소점화에너지가 낮게 산출되었다. 이것은 (\*)식에서 화학종의 형성 에너지(enthalpy of formation)를 나타내는 우변 첫번째항의 부재에 기인한다. 이항은 두번째항의,

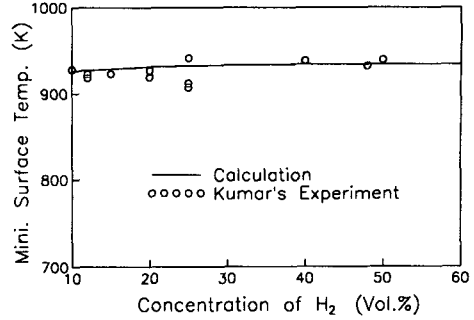


Fig. 6 Variation of minimum surface temperature with hydrogen concentration. (300K, 100kPa, multi-step model)

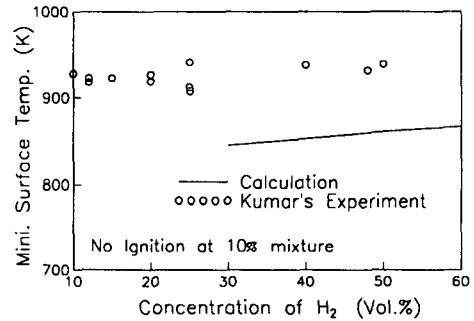


Fig. 7 Variation of minimum surface temperature with hydrogen concentration. (300K, 100kPa, one-step model)

점화모델에서 외형적인 에너지를 제공하는 감지엔탈피와는 달리 화학종 자신이 형성되는데 필요한 에너지인 셈이다. 따라서 점화모델에 존재하는 에너지중에서 다단반응모델은 화학종자신이 형성되기 위한 에너지(첫번째항)를 소모하고 나서 감지엔탈피(두번째항)를 방출하기 때문에 단일반응모델에 비해 더 많은 양의 에너지를 요구하게 되는 것이다.

#### 4. 결론

수소-공기 예혼합물이 고온벽면에 노출된 경우, 일어나는 점화현상을 수치적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다단반응모델의 경우 화학반응기구에서 점화에 중요한 역할을 하는 화학종  $HO_2$ 가 존재하며 그 거동은 점화기준으로 사용될 수 있을 만큼 특이하다.

(2) 다단반응모델의 경우는 연료희박과 과잉영역에서 점화지연시간이 증가하는 U자형 분포를 보여

주는데 반하여, 단일반응모델은 단순히 수소물농도에 따라 점화지연시간이 감소하는 비정확한 결과를 도출한다.

(3) 최소점화온도의 비교에서, 다단반응모델은 실험치와 매우 잘 일치하며 정확한 최소점화에너지를 제시한다. 반면, 단일반응모델은 실험치보다 낮은 점화에너지를 보여준다.

### 참 고 문 헌

- (1) Lewis, B., and von Elbe, G., 1969, "Combustion, Flames and Explosions of Gases", Academic Press, New York, p. 323.
- (2) Weinberg, F.J., and Kingdon, R.G., 1977, "Sixteenth Symposium (International) on Combustion", The Combustion Institute, Pittsburgh., p. 747.
- (3) Dixon-Lewis, G., and Shepherd, I.G., 1975, "Fifteenth Symposium (International) on Combustion", The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 1483.
- (4) Mullen, J.W. II, Fenn, J.B., and Irby, M.R., 1948, "Third Symposium (International) on Combustion", The Williams & Wilkins Co., Baltimore, p.317.
- (5) Cairnie, L.R., Harrison, A.J., and Morgan, P.A., 1981, "Eighteenth Symposium (International) on Combustion", Combustion Institute, Pittsburgh, p. 1799.
- (6) Chen, L.D., and Faeth, G.H., 1981, "Ignition of a Combustible Gas near Heated Vertical Surfaces", Combustion and Flame, Vol.42,p.77.
- (7) Tau Yi Toong, 1956, "Sixth Symposium (International) on Combustion", The Williams & Wilkins Co., Baltimore, p. 532.
- (8) Tyler, B.J. and Wesley, T.A.B., 1967, "Eleventh Symposium (International) on Combustion", Combustion Intitute, Pittsburgh, p. 1115.
- (9) Kuo, K.K., 1986, "Principles of Combustion", John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 161.
- (10) Williams, F.A., 1985, "Combustion Theory", 2nd Ed., The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Menlo Park, California, pp. 604~610.
- (11) Stull, D.R., and Prophet, H., 1971, "JANAF Thermochemical Tables", U.S. Government Printing Office, Washington.
- (12) Merzhanov, A.G., 1966, "On Critical Conditions for Thermal Explosion of a Hot Spot", Combustion and Flame, Vol. 10,p.341.
- (13) Kee, R.J., Waratz, J., and Miller, J.A., 1983, "Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Viscosities, Conductivities and Diffusion Coefficients", Sandial Laboratories Report, SAND-83-8209.
- (14) Hirschfelder, J.O., Curtiss, C.F., and Bird, R.B., 1954, "Molecular Theory of Gases and Liquids", John Wiley and Sons, Inc., New York.
- (15) Kumar, R. K., 1989, "Ignition of Hydrogen-Oxygen-Diluent Mixtures Adjacent to a Hot, Non reactive Surface", Combustion and Flame, Vol.75,p. 197.