

## 메탄-공기 예혼합기의 열면점화에 미치는 촉매반응 및 자연대류의 영향

김형만\*, 정종수\*\*

### Effects of Catalytic Reaction and Natural Convection on the Hot Surface Ignition of Methane-Air Mixtures

H. M. Kim\*, J. S. Jung\*

Key words : Microgravity Combustion, Catalytic Reaction, Natural Convection, Hot Surface Ignition

#### Abstract

In this study, the experimental and numerical investigations of the ignition of methane-air mixtures by a electrically heated wire have been carried out. In order to define the initial condition and make the analysis simple, the following control unit was developed; which heats the wire to the setting temperature in a very short time, and maintains the wire temperature constant until ignition. Experiments with the feedback control have been performed using nickel and platinum wires in normal gravity and microgravity. From experimental results, ignition temperatures in normal gravity are higher than those in microgravity, however, the dependences of ignition temperature on equivalence ratio are not affected by natural convection. Numerical calculations, including catalytic reaction for platinum, have been performed to analyze the experimental results in microgravity. Numerical results show that reactants near platinum wire are consumed by catalytic reaction, therefore, the higher temperature is needed to ignite the mixture with platinum wire.

#### 기 호 설 명

$A$  : 열선의 단면적 [ $m^2$ ]

$C_b$  : 정압 비열 [ $J/mol/K$ ]

$C_{CH_4}$  : 백금 표면에서의 메탄의 몰분율

$C_{CH_4}$  : 백금 표면에서의 메탄의 몰분율

$C_{O_2}$  : 백금 표면에서의 산소의 몰분율

$D_k$  : 화학종  $k$ 의 확산계수 [ $m^2/s$ ]

$E_{SR}$  : 촉매반응의 활성화에너지 [ $KJ/mol$ ]

$H_k$  : 화학종  $k$ 의 엔탈피 [ $KJ/mol$ ]

$l$  : 열선의 길이 [ $m$ ]

\* 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

\*\* 정회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

- $p$  : 압력 [N/m<sup>2</sup>]  
 $R$  : 기체정수 [J/mol/K]  
 $R_A, R_B$  : 휘스톤·브릿지의 고정 저항 [ $\Omega$ ]  
 $R_C$  : 열선온도 설정용 저항 [ $\Omega$ ]  
 $R_{HW}$  : 열선의 저항 [ $\Omega$ ]  
 $r$  : 반경방향의 좌표 [m]  
 $r_{SR}$  : 촉매반응의 반응율 [mol/cm<sup>2</sup>/s]  
 $T_s$  : 열선의 설정온도 [K]  
 $Y_k$  : 화학종  $k$ 의 질량분율  
 $\gamma$  : 체적 저항율 [ $\Omega \cdot m$ ]  
 $\epsilon(\lambda)$  : 단색 복사율(0.65  $\mu m$ )  
 $\lambda$  : 열전도율 [W/m/K]  
 $\mu$  : 점성계수 [kg/m/s]  
 $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma_m$  : 점성 응력 [kg/m/s<sup>2</sup>]  
 $\omega_k$  : 화학종  $k$ 의 생성율

## 1. 서론

가연성 혼합기를 가열된 고체표면에 접촉시키면, 특정한 조건에서 스스로 전파하는 능력을 가진 화염을 생성시키는 것이 가능하다. 이것을 열면 점화라고 한다<sup>1)</sup>. 자동차용 엔진 등에서 열면 점화를 이용한 예로서는, 디젤 엔진의 글로우 플러그(Glow Plug)를 들 수 있으며, 스파크 점화기관의 녹킹(Knocking) 현상도 열면 점화가 관계가 있다. 그 외에도, 가옥의 화재 발생이나 광산에서의 폭발 사고 등의 원인이 되는 현상도 있다. 실용적인 면외에도, 방재학 및 연소학의 기초적인 관점에서도 열면 점화는 중요한 연구 대상이 되어 왔다.

열면점화에 관한 연구는, 지금까지 실험적<sup>2)~4)</sup>, 이론적<sup>5)~6)</sup>, 및 수치해석적<sup>4),7)</sup>으로 수행되어 왔지만, 열면 점화의 메커니즘은 충분히 밝혀졌다고 말하기는 어렵다. 열면 점화의 메커

니즘을 연구하는데 중요한 장애요인의 하나는 자연대류의 영향이다. 열면점화에서는, 열면을 가열하기 시작하여 예혼합기의 점화가 일어날 때까지 어느 정도의 시간지연이 있기 때문에, 고온 열면에 의한 자연대류의 영향을 무시할 수 없다. 또한, 점화원으로서 촉매작용이 있는 금속을 이용하는 경우에는, 자연대류에 의한 열면으로부터의 열손실 효과 이외에도, 화학종이 열면 표면에 공급되어져 촉매반응이 활발해지는 효과가 있다. Nagata 등의 실험<sup>4)</sup>을 제외하고는, 열면점화 실험은 정상중력장(Normal Gravity) 하에서 수행되었으며, 밀폐용기 내에서의 열면 점화 실험의 경우, 정상중력장에서의 예혼합기는 실제로 정지 상태라고 가정하기는 어렵다.

본 연구에서는, 위에서 서술한 내용을 고려하여, 열선에 의한 메탄-공기 예혼합기의 점화에 미치는 촉매반응 및 자연대류의 영향을 실험적 및 수치해석적 연구를 수행하였다. 촉매작용의 영향을 비교하기 위하여, 열선의 재료로는 대표적인 촉매인 백금 및 니켈을 사용하였다. 실험에 있어서는, 초기 조건을 명확히 하고, 해석을 가능한 한 용이하게 하기 위하여, 실험 도중에 열선 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하는 열선온도 제어장치를 이용하였다. 실험은 대기압·상온이고 정상중력장 및 미소중력장의 환경에서 행하였다. 상세한 기체반응 모델, 다성분 확산, 및 백금에 대한 촉매반응 모델을 고려한 수치해석을 행한 결과와 미소 중력장에서 얻어진 열면점화 실험결과를 비교하여 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략적인 구성은 Fig. 1과 같다. 두랄루민(Duralumin)으로 만들어진 연소 용기는 내경 60 mm, 길이 16 mm의 원통형으로, 용기 내의 현상을 관찰할 수 있도록 양끝에 파이렉스(Pyrex) 재질의 유리창을 설치하였다. 열선이 가열 중에 변형되는 영향을 최소화하기 위하여 황동재질의 지지

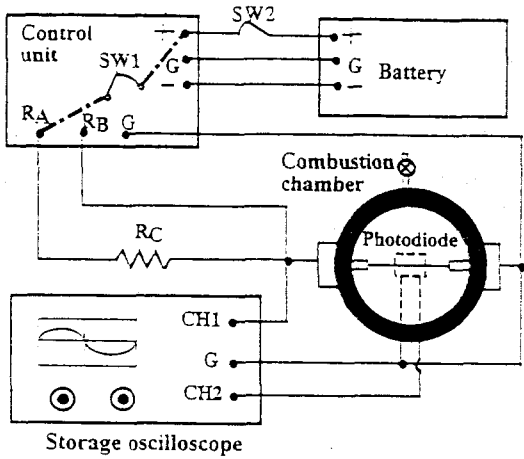


Fig. 1 A Schematic of the experimental apparatus.

대에 고정하는 방향을 일정하게 하였다. 열선으로서 직경 0.6 mm, 길이 30 mm의 니켈선 및 백금선이 쓰여졌다. 이 열선은 다음에 서술할 열선온도 제어장치에 의하여, 짧은 시간 내에 가열되어 설정온도에 도달하고, 예혼합기가 점화될 때까지 일정 온도로 유지된다. 이 열선은 예혼합기를 점화하는 역할뿐만 아니라, 점화를 확인하는 방법으로서도 이용된다.

Figure 2에 열선온도 제어회로의 개략적인 구성을 나타내었다. 이 회로는 열선의 저항을

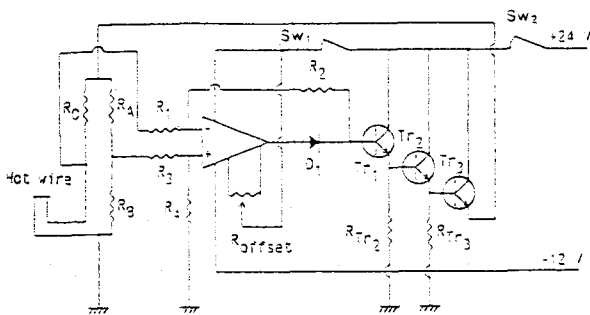


Fig. 2 A Schematic of the control circuit.

임의의 설정값을 유지하도록 작동하고, 그 설정값은  $R_C$ 의 값에 의해 결정된다. 열선을 포함하는 휘스톤·브릿지(Wheatstone Bridge)의  $R_A - R_B$  사이와  $R_C - R_{HW}$  사이의 전위를 각각 차동 증폭회로에 입력한다. 차동 증폭회로는 열선의 전기저항의 변화에 의하여 발생한 휘스톤·브릿지의 불평형 전압을 증폭하고, 전력 증폭부를 거쳐서, 이것에 비례한 전력을 휘스톤·브릿지에 공급한다. 이 휘드백(Feedback) 효과에 의하여, 열선의 저항값을 일정하게 유지할 수 있다. 열선의 체적 저항과 온도와의 사이에는 거의 1차 함수적인 상관관계가 있으므로, 열선의 저항을 제어하는 것으로 열선 온도를 제어하게 된다.

가연성 혼합기로서는 메탄-공기 예혼합기를 이용하였고, 당량비와 열선의 설정온도를 변화시키며 실험을 행하였다. 우선, 연소 용기에 상온, 대기압의 예혼합기를 충전한다. 정상중력장에서 실험을 행하는 경우는, 실험장치의 스위치를 넣어 열선을 가열하고, 예혼합기를 점화한다. 미소중력장에서 실험을 수행하는 경우는, 실험장치 본체를 낙하탑 내에 매달아, 1차측의 스위치를 넣은 후에, 실험장치 본체를 낙하시킨다. 낙하 개시후, 실험장치가 미소중력 조건에 이르면 미소중력 검지 스위치에 의하여 자동적으로 열선온도 제어장치가 작동한다. 이때, 작동 직후로부터의 휘스톤·브릿지의 열선 상류의 전압 및 포토다이오드(Photodiode)의 전압 상승을 디지털 메모리 오실로스코프로 측정한다. 미소중력 환경은 높이 약 2.5 m의 낙하탑을 이용하여 자유낙하법에 의하여 얻었으며, 미소중력 상태는 약 0.6초동안 유지된다.

### 3. 수치해석 방법

수치계산에서의 해석 모델은 다음과 같다. 예혼합기 중에 무한 길이의 원통형 고온 물체, 즉 열선이 있고, 축 방향은 일정하다. 기체의 유속

은 음속에 비하여 충분히 작기 때문에, 압력은 일정하다고 생각하고, 따라서 운동량 보존식은 쓰여지지 않는다. 중력장의 영향은 없고, 현상은 모두 축 대칭으로 일어난다고 생각하여 반경 방향 1차원의 원통 좌표계를 이용한다. 지배 방정식으로서 질량 보존식, 에너지 보존식, 및 화학종 보존식을 고려하고, 다음과 같다<sup>8)</sup>.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho V r)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial r} = - \frac{p}{r} \frac{\partial(Vr)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\sigma_{rr} Vr)}{\partial r} - \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \sum_{k=1}^{29} \dot{\omega}_k H_k \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \rho V \frac{\partial Y_k}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho D_k r \frac{\partial Y_k}{\partial r} \right) + \dot{\omega}_k \quad (3)$$

여기에서, 화학종의 생성율은 29종류의 화학종을 포함한 134개의 가역 화학반응식<sup>9)</sup>으로부터 구하였다. 각 화학종의 물성값은 JANAF의 열물성표<sup>10)</sup>의 값을 이용하였다.

경계조건은 다음과 같이 주어졌다.

$$r = r_w: T = T_{iw}, V = 0, \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial r} = \frac{\nu_k}{\nu_F} W_k \dot{r}_{SR} \quad (4)$$

$$r = \infty: \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial V}{\partial r} = 0, \frac{\partial Y_k}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

여기에서,  $\nu_k$  및  $\nu_F$ 는 촉매반응에서 화학종  $k$  및 연료의 양론(量論) 계수를 나타낸다. 촉매 반응이 없는 불활성 표면(Inert Surface)의 경우, 촉매반응의 반응율  $\dot{r}_{SR}$ 은 0이 된다. 수치 계산에서, 경계조건을 주는 열선의 위치 및 무한대는 각각 0.3 mm, 25mm이다.

본 계산에서 쓰여진 백금 표면에서의 메탄과 산소와의 촉매반응율은 다음과 같이 된다<sup>7)</sup>.

$$\dot{r}_{SR} = A \exp\left(-\frac{E_{SR}}{RT}\right) C_{CH_4} C_{O_2}^{0.5} \quad (6)$$

촉매반응식에서 쓰여진 활성화 에너지 및 전지수 인자(Pre-exponential factor)는, Trimm 등<sup>11)</sup>이 제안한  $E_{SR} = 134.7$  [KJ/mol],  $A = 1.3 \times 10^{11}$ 의 값을 이용하였다. 식 (6)에 나타내어진 촉매반응율은 낮은 표면 피복율을 가정한 Langmuir-Hinshelwood 형식의 반응 메커니즘을 잘 나타낸다.

수치계산에서 점화한 순간의 정의는, 기체에서의 화학반응에 의한 발열량이 전 시간단계(Time Step)보다 작아진 구간이 나타난 순간으로 한다. 이러한 열면점화의 정의는 이론해석에서 널리 사용되는 Van't Hoff criterion<sup>3)</sup>을 만족함을 온도장의 분석을 통하여 확인하였다. 점화지연 및 점화위치는 각각 계산 개시로부터 점화할 때까지의 시간 및 최대 온도를 갖는 구간의 위치로 정의한다.

## 4. 실험 및 수치계산의 결과

### 4.1 열선의 설정온도의 측정

열선의 설정온도는 열선온도 제어회로에 들어 있는 설정저항  $R_c$ 의 값에 의해 결정된다. 열선의 저항  $R_{HW}$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R_{HW} = \frac{\gamma l}{A} \quad (7)$$

$R_c$ 의 값에 대한  $\gamma$ 는 식(7)에 의해 정해지고, 또한  $\gamma$ 와 온도와의 관계에서 열선의 설정온도  $T_s$ 를 계산할 수 있다. 그렇지만, 실험에서는 열선의 축방향으로 온도분포가 발생하여 열선의 체적저항율  $\gamma$ 가 일정하지 않으므로, 위의 방법으로는 열선의 설정온도를 정확히 계산할 수 없다.

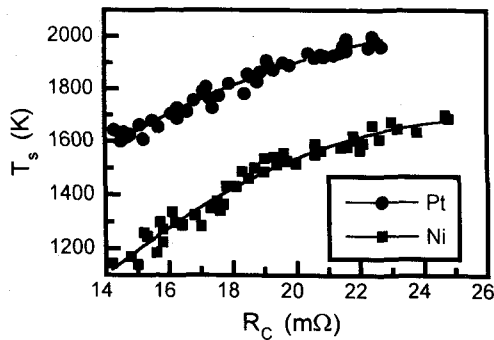


Fig. 3 Variation of the setting temperature with the resistance of constantan.

열선의 설정온도를 측정하기 위하여, 연소용기 내에 질소를 충전하고,  $R_c$ 를 임의의 값에 설정한 후에 열선을 가열한다. 광 고온계 (Optical Pyrometer)를 이용하여 열선의 중심부의 휘도온도를 측정하고, 다음과 같은 식으로 보정하여<sup>12)</sup> 열선의 설정온도를 구한다.

$$\frac{1}{T_s + 273} = \frac{1}{T_l + 273} + \frac{\log \epsilon(\lambda)}{9593} \quad (7)$$

이러한 측정을 여러  $R_c$ 에 대하여 행하여  $R_c - T_s$ 의 관계를 구하였다. 니켈선 및 백금선에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내고, 2차식으로 근사하면 다음과 같은 식으로 된다.

$$T_s = -1027.0 + 207.6 R_c - 3.98 R_c^2 \quad (\text{Ni}) \quad (8)$$

$$T_s = 57.7 + 145.5 R_c - 2.67 R_c^2 \quad (\text{Pt}) \quad (9)$$

이후에 사용되는 니켈선 및 백금선의 설정온도는, 실험조건으로 설정된  $R_c$ 로부터 각각 식 (8)과 (9)에 의해 계산한 값을 의미한다.

#### 4.2 점화지연(Ignition Delay)의 정의

Figure 4에, 미소중력장에서 백금선을 이용

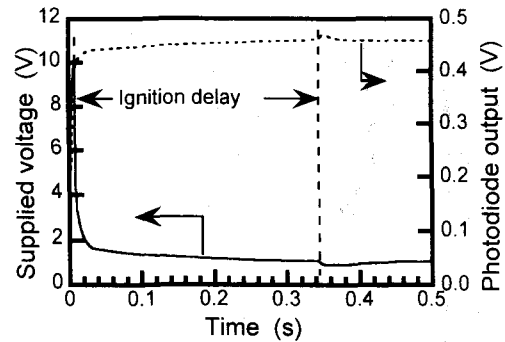


Fig. 4 Histories of supplied voltage to the wire and photodiode output voltage for the stoichiometric mixture with platinum wire of 1751 K.

하여 이론혼합비의 메탄-공기 예혼합기를 점화시켰을 때의 열선으로의 공급전압 및 열선과 화염의 발광(發光)에 의한 포토다이오드의 출력전압을 나타낸다. 그림에서, 예혼합기가 점화하여 화염이 내는 빛에 의해 포토다이오드의 출력전압이 증가하는 순간 공급전압이 감소하는 현상이 관찰된다. 이러한 현상은, 화염으로부터 열선으로 열이 유입되어 온도가 상승하므로 저항이 커져서 일어나는 것으로 생각된다. 따라서 본 실험에서는, 열면점화의 시간적 평가의 기준으로서의 점화지연을 열선온도가 설정온도에 도달하여 공급전압이 감소하기 시작하는 때부터 예혼합기의 점화가 일어나는 순간까지의 소요시간으로 정의한다.

#### 4.3 설정온도에 의한 점화지연의 변화

Figure 5에, 이론혼합비의 예혼합기에 대하여 실험 및 수치계산에서 얻은 점화지연의 결과를 나타낸다. 본 연구에서 얻을 수 있는 미소중력 실험시간이 약 0.6초이기 때문에, 점화지연의 상한값을 0.5초로 하였다. 또한, 점화지연의 하한값은 다음과 같이 결정되었다. 설정온도를 올림에 따라 가열시간은 길어지고 점화지연은 짧아진다. 본 연구에서는, 점화지연에 대하여 가

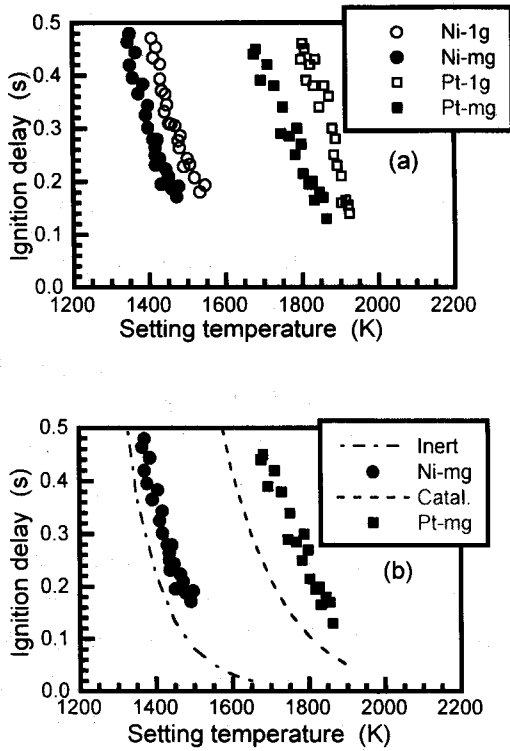


Fig. 5 Variations of ignition delay with the setting temperature for the stoichiometric mixture.

열시간이 가능한 한 짧을수록 실험조건이 명확하게 되고 실험결과 해석을 간단히 할 수 있으므로 이상적이다. 따라서 본 연구에서는, 가열시간의 약 10배의 값을 점화 지연의 하한값으로 하였다.

열면으로서 백금선 및 니켈선을 이용하여 이론혼합비의 예혼합기에 대하여 정상중력장 및 미소중력장에서 측정한 점화 지연의 결과를 Fig. 5-(a)에 나타낸다. 예혼합기를 점화시키기 위하여, 백금선을 이용한 편이 니켈선보다 높은 설정온도가 필요하였다. 백금선의 경우, 점화 지연이 길어짐에 따라 정상중력장과 미소중력장에서 예혼합기를 점화시키는 설정온도의 차가 커졌다.

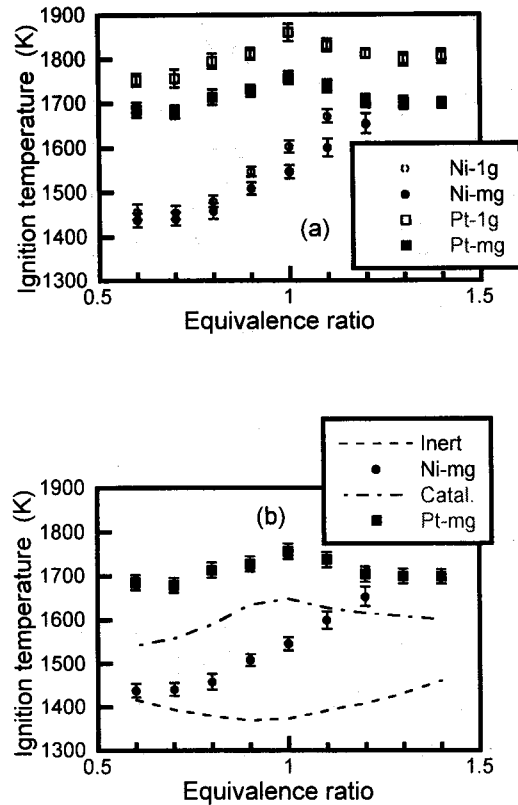


Fig. 6 Dependences of the ignition temperature in an ignition delay of 0.3 s on equivalence ratio.

미소중력장에서의 실험결과를 촉매표면 및 불활성표면을 이용한 수치계산에서 얻은 점화 지연의 결과와 Fig. 5-(b)에서 비교한다. 수치계산은 실험보다 넓은 범위의 설정온도에서 수행할 수 있었다. 그 결과, 실험에서 얻을 수 없었던 0.15초 이하의 점화 지연은 설정온도가 높아짐에 따라 비선형적으로 변함을 알 수 있었다.

#### 4.4 점화온도의 당량비의존성

열면에 의한 가연성 혼합기의 점화는 열면 온도뿐만 아니라 혼합기가 열면에 접촉한 시간, 즉 점화 지연에도 의존한다. 따라서 본 연구에서는, 점화 지연의 개념이 포함된 점화 온도를 조사

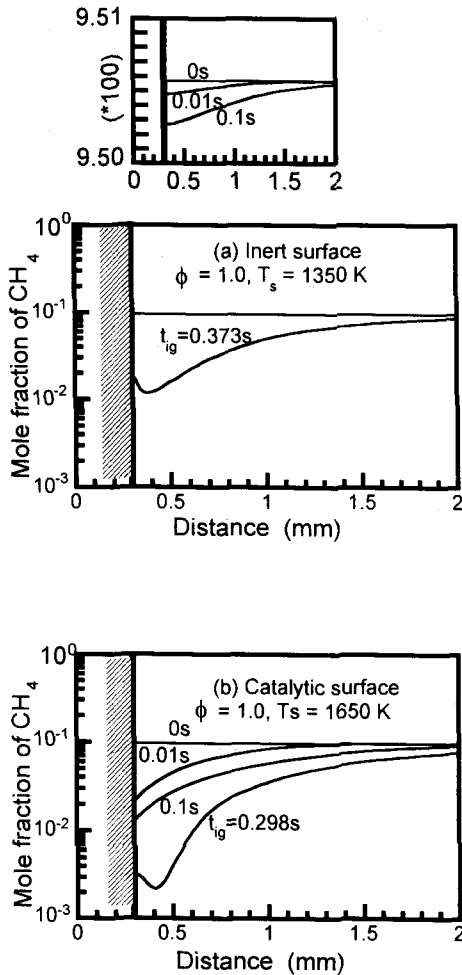


Fig. 7 Typical distributions of mole fraction of CH<sub>4</sub> for the stoichiometric mixture.

하였다. 점화온도는, 설정온도와 점화지연의 관계로부터 점화지연이 0.3초일 때의 설정온도의 값으로 정의하였다. Figure 6에, 열면점화에 대한 실험 및 수치계산에서 얻어진 점화온도와 당량비와의 관계를 나타낸다.

열면으로서 백금선 및 니켈선을 이용하여 정상중력장 및 미소중력장에서 얻은 점화온도와 당량비와의 관계를 Fig. 6-(a)에 나타낸다. 니켈선 및 백금선에서, 미소중력장에서보다 자연

대류가 존재하는 정상중력장에서의 점화온도가 높았다. 니켈선의 경우, 점화온도는 당량비가 증가함에 따라 높아진다. 그에 비해, 백금선에서의 점화온도는 이론혼합비 부근에서 최대가 된다. 실험을 행한 전 당량비에 걸쳐서, 니켈선보다 백금선에서 점화온도가 높다.

점화온도의 당량비의존성에 대하여, 미소중력장에서의 실험결과와 촉매표면 및 불활성표면을 이용한 수치계산에서의 결과와의 비교를 Fig. 6-(b)에 나타낸다. 촉매표면의 경우는 이론혼합비 부근에서 점화온도가 최대인 백금선을 이용한 실험결과를 정성적으로 잘 나타내었다. 불활성표면의 경우는 이론혼합비에서 점화온도가 최소가 되어 니켈선을 이용한 실험결과와 정성적으로 불일치하였다. 이 불일치는 열면점화에 미치는 니켈선의 고온 산화의 영향에 기인하는 것으로 설명하고 있다<sup>13)</sup>.

## 5. 결과의 토의

### 5.1 열면점화에 미치는 촉매반응의 영향

Figure 6에서 볼 수 있듯이, 불활성표면에 비해 촉매표면에서 점화온도의 당량비의존성은 크게 달라고, 또한 실험을 행한 전 당량비에 걸쳐서 니켈선보다 백금선에서 점화온도가 높았다. 이것은, 백금선 표면에서 일어나는 촉매반응의 반응물 소비효과에 의해 열면점화가 억제됨을 나타낸다. 따라서, 이론혼합비 부근에서 점화온도가 가장 높은 것은 촉매반응이 가장 활발하기 때문이라고 추측된다. Figure 7에, (a) 불활성표면 및 (b) 촉매표면에 대한 수치계산에서 이론혼합비의 예혼합기가 열면점화가 일어나기까지의 반응물 메탄의 몰농도의 시간적 변화를 나타낸다. 불활성표면의 경우, 메탄의 농도는 거의 일정하다가, 열면점화가 일어나는 때에 급격히 감소한다. 그에 비해 촉매표면의 경우, 예혼합기가 열선에 접촉하는 계산 초기부터 촉매반응에 의한 메탄의 소비가 일어난다. 촉매반응의 영향은 반응물의 소비효과외에도, 촉매반응에

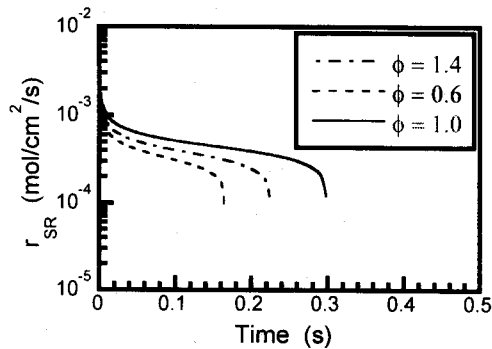


Fig. 8 Histories of catalytic reaction rate calculated with catalytic surface.

의해 발생된 열이 예혼합기의 점화를 촉진하는 효과가 존재한다<sup>14)</sup>. 본 연구에서는 열선온도 제어회로를 사용하여 열선온도를 일정하게 제어하므로, 촉매반응의 발열효과는 열면점화에는 영향을 미치지 않는다.

Figure 8에, 설정온도 1650 K의 촉매표면에 대한 수치계산에서 얻은 당량비 0.6, 1.0, 1.4의 예혼합기를 열면점화할 때의 촉매반응율의 시간적 변화를 나타낸다. 촉매반응은 예혼합기로부터 확산을 통하여 반응물이 촉매표면에 공급되어 반응이 일어나고 반응생성물이 확산을 통하여 예혼합기로 돌아오는 과정을 전체적으로 고려한 것이다. 촉매반응율은 예혼합기가 열선에 접촉한 직후부터 감소하기 시작하여, 열면점화가 일어나는 순간에 급격한 감소가 일어난다. 이론혼합비 부근에서의 촉매반응이 활발하게 일어나 열면점화가 늦게 일어난다. 촉매표면에서의 열면점화는 기체반응보다 촉매반응의 영향이 큰 것으로 생각되어진다.

## 5.2 열면점화에 미치는 자연대류의 영향

니켈선 및 백금선을 이용하여 실험을 행한 전 당량비에 걸쳐, 미소중력장보다 정상중력장에서 점화온도가 높았다. Figure 9에, 자연대류에 의한 점화온도의 증가를 나타낸다. 이 값은 4.2 절에서 설명한 점화온도의 정의로부터 점화지연

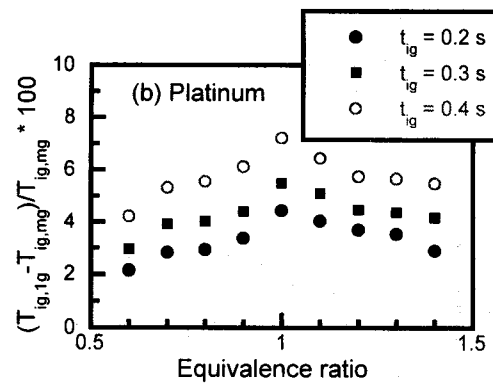
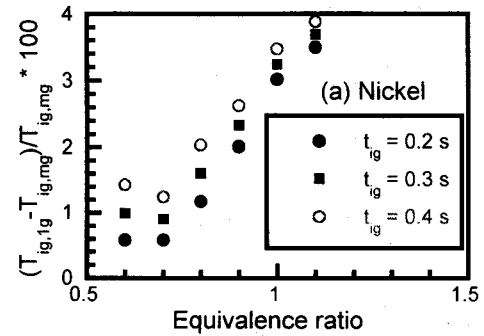


Fig. 9 Dependences of the increase of ignition temperature due to natural convection on equivalence ratio.

이 0.2초, 0.3초, 0.4초일 때의 점화온도를 구하여, 정상중력장 및 미소중력장에서의 점화온도의 차를 미소중력장에서의 점화온도로 나누어 계산하였다.

우선 니켈선의 경우는, 열선으로부터 주위의 예혼합기로의 열전달에 미치는 자연대류의 영향을 생각한다. 자연대류가 있으면 유동이 일어나고, 예혼합기의 입의 체적요소가 열선에 접촉하는 시간이 짧아지기 때문에 열면점화가 억제된다.

백금선의 경우는, 열전달 외에 촉매반응에 미치는 자연대류의 영향을 고려할 필요가 있다. 자연대류가 있으면 화학종이 열선에 공급되어져



촉매반응이 활발히 일어나고, 반응물의 소비가 커지게 되어 열면점화는 더욱 억제된다.

## 6. 결론

본 연구에서는, 메탄-공기 예혼합기의 열면점화에 관하여, 정상중력장 및 미소중력장에서 니켈선과 백금선을 이용하여 실험 및 불활성표면과 촉매표면을 이용한 수치계산을 행하고, 촉매반응 및 자연대류가 열면점화에 미치는 영향에 대해 고찰을 하였다. 열선온도 제어회로를 사용하여 행한 실험에서, 점화지연이 포함된 점화온도를 넓은 범위의 당량비에서 얻었다. 니켈선에서의 점화온도는 당량비에 따라 증가하지만, 백금선의 경우는 이론훈합비에서 최대의 점화온도를 나타내었다. 또한, 니켈선과 백금선에서의 점화온도는 미소중력장에서보다 정상중력장에서 높았다. 정온도 열선을 이용하여 상세한 기체반응 모델, 다성분 확산, 및 백금에 대한 촉매반응 모델을 고려한 수치해석으로부터 실험결과를 설명하였다. 수치계산의 결과는 메탄-공기의 이론훈합비 부근에서 촉매반응이 활발하게 일어나 열면점화를 억제함을 보여준다.

## 후 기

본 논문은 東京大學 工學部 航空宇宙工學科의 연소실험실에서 수행된 연구를 기초로 작성되었습니다. 본 연구를 수행함에 있어서 많은 도움을 주신 東京大學 工學部 航空宇宙工學科의 河野通方 교수, 津江光洋 교수, 加藤秀輝 君, 榎本啓士 君과 한국 교육부 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 態谷清一郎, 燃燒, 岩波全書, pp. 51-63, 1976.
2. H. F. Coward and P. G. Guest, "The Ignition

of Gases by a Heated Surface," *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 49, pp. 2479-2486, 1927.

3. N. M. Laurendeau, "Thermal Ignition of Methane-Air Mixtures by Hot Surfaces: A Critical Examination," *Combustion and Flame* Vol. 46, pp. 29-49, 1982.
4. H. Nagata, H. M. Kim, J. Sato and M. Kono, "An Experimental and Numerical Investigation on the Hot Surface Ignition of Premixed Gases under Microgravity Conditions," *25th Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 1719-1725, 1994.
5. C. K. Law, "Transient Ignition of a Combustible by Stationary Isothermal Bodies," *Combust. Sci. Technol.* Vol. 19, pp. 237-242, 1979.
6. C. K. Law and S. H. Chung, "Thermal and Catalytic Inhibition of Ignition through Reactant Depletion," *Combust. Sci. Technol.* Vol. 32, pp. 307-312, 1983.
7. X. Song, W. R. Williams, L. D. Schmidt and R. Aris, "Ignition and Extinction of Homogeneous- Heterogeneous Combustion:  $CH_4$  and  $C_3H_8$  Oxidation on Pt," *23th Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 1129-1137, 1990.
8. W. C. Rivard, O. A. Farmer and T. D. Butler, RICE: A Computer Program for Multicomponent Chemically Reactive Flows at All Speeds, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-5812, 1975.
9. R. J. Kee, J. A. Miller, G. H. Evans and G. Dixon-Lewis, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flames," *22th Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 1479-1494, 1988.
10. D. R. Stull and H. Prophet, JANAF Thermochemical Tables 3rd ed., U. S. Dept.

- Commerce, 1986.
11. D. L. Trimm and C. Lam, "The Combustion of Methane on Platinum-Alumina Fibre Catalysts-I," *Chem. Eng. Sci.* Vol. 35, pp. 1405-1413, 1980.
  12. 日本工業標準協會, 光溫度計による溫度測定方法, JIS Z 8706, p. 9, 1980.
  13. 金亨晩, 榎本啓士, 加藤秀輝, 津江光洋, 河野通方, "熱面點火に及ぼす觸媒反應の影響に関する研究", *Transactions of JSME -B*, Vol. 63, No. 611, pp. 279-284, 1997.
  14. H. M. Kim, H. Enomoto, H. Kato, M. Tsue, and M. Kono, "A Study of the Ignition Mechanism of Methane-Air Mixtures by Inert and Catalytic Hot Surfaces," *Combustion Science and Technology*, Vol. 128, pp. 197-213, 1997.