

<논 문> SAE NO. 96370060

메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(Ⅱ)

Combustion Characteristics of Methane-Hydrogen-Air Premixture(Ⅱ)

김 봉 석*, 이 영 재**
B. S. Kim, Y. J. Lee

ABSTRACT

The present work is a continuation of our previous study to investigate the effects of parameters such as equivalence ratio, hydrogen supplement rate and initial pressure on combustion characteristics in a disk-shaped constant volume combustion chamber. The main results obtained from the study can be summarized as follows. The flames in near stoichiometric mixture of methane-air are propagated with a spherical shape, but in excess rich or lean mixtures are propagated with a elliptical shape. And, they are changed to an unstable elliptical shape flame with very regular cells by increasing the hydrogen supplement rate. Also, flame is sluggishly propagated at increased initial pressure in combustion chamber. Volume fraction of burned gas and flame radius as the combustion characteristics are increased by increasing the hydrogen supplement rate, especially at the combustion middle period, but they are slowly increased by increasing the initial pressure.

주요기술용어 : Combustion Characteristics(연소특성), Methane-Hydrogen-Air Premixture(메탄-수소-공기 예혼합기), Hydrogen Supplement Rate(수소첨가율), Flame Propagation Process(화염전파과정), Volume Fraction of Burned Gas(체적연소율), Flame Radius(화염반경)

1. 서 론

최근의 산성비, 지구온난화현상 및 오존층파괴 등과 같은 환경문제에 가장 큰 오염원의 하나로

간주되고 있는 자동차 배출가스에 대한 규제가 점차 강화되는 추세에 따라 대체에너지를 이용한 저공해차 및 무공해차 등과 같은 차세대 자동차의 개발을 위한 연구노력이 활발히 추진되고 있다. 이중 압축천연가스도 유망한 저공해 차량용 대체연료로 간주되고 있는데 특히 화석연소를 이용한 NGV(natural gas vehicle)는 배출가스문

* 정회원, 국립원주전문대학 자동차과
** 정회원, 한국에너지기술연구소 수송기술연구팀

제와 연비문제를 동시에 만족시킬 수 있는 하나의 방안으로 많이 연구되고 있다.¹⁾ 그러나 회박연소를 시킬 경우에는 상기와 같은 장점이 있는 반면에 초기점화의 불안정성과 연소속도의 저하 등으로 엔진출력이 저하함은 물론 운전성의 문제가 야기되기 때문에 아직도 실용화를 위한 몇몇 미해결과제가 남아있다²⁾. 이와같은 회박연소로 인한 초기점화의 불안정성의 문제는 부실을 갖는 연소실을 사용함으로써 부실에는 농후한 혼합기를, 주실에는 희박한 혼합기를 공급하는 방안과 점화플러그 주위의 혼합기는 평균 공연비보다 농후한 상태를 이루고 이외의 지역에서는 평균 공연비보다 더 희박한 상태가 되도록 하는 연료의 성층화를 통한 방안 그리고 강력한 점화장치를 사용하여 해결하는 방안 등으로 대처하고 있다.³⁾ ~⁵⁾ 한편, 회박연소로 인한 연소속도의 저하문제는 점화시기 부근에서 연소실내에 강한 난류강도를 가진 유동을 발생시킴으로써 해결할 수 있다.⁶⁾

그러나, 연료물성 측면에서 수소가 천연가스보다 점화에너지가 낮고 연소속도가 빠르며 가연범위가 넓다는 점을 감안해 불태 천연가스에 수소를 첨가하여 사용함으로써 상기의 두가지 문제점을 해결하는 방안⁷⁾도 고려해 볼적하다고 본다. 특히, 수소를 첨가한 천연가스를 실기엔진에 사용함에 따라 천연가스만을 사용할 때에 비해 안정된 회박혼합기의 운전범위와 회박실화한계가 더 넓어짐은 물론 기존의 천연가스 사용엔진을 크게 개조하지 않고도 사용 가능하다는 장점이 있다. 또, 수소는 가솔린, 경유 등 석유계연료의 연소와 달리 입자상물질(PM), SO_x, CO, CO₂, HC 또는 다른 유기배출물들의 방출이 없는 청정연료이기 때문에 미국의 엄격한 초저공해차량(ULEV : ultra low emission vehicles) 규제를 만족시킬 수 있을 것으로 예상하고 있다.

이에 저자들은 연소현상을 단순화할 목적으로 원통형의 가시화용 정적연소실을 제작하고 연소실내의 메탄-수소-공기 예혼합기의 유동이 정지된 상태에서 당량비, 수소첨가율 및 초기충전압력 등의 실험변수에 따라 연소될때 생성되는 질소산화물농도와 연소압력, 연소시간, 열발생을 및 화염온도 등의 연소특성에 대해서 전보⁸⁾에서

소개한 바 있다. 본보에서는 그에 이어 화염전파과정, 체적연소율, 화염반경의 시간적변화 등과 같은 메탄-수소-공기 예혼합기의 화염전파특성에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig.1은 본 실험장치의 개략도로서 정적연소실(내경 80mm, 폭 40mm), 점화장치, 혼합기 제조장치, 압력측정장치, 온도측정장치, NO_x 측정장치, 쉐리렌사진 촬영장치, 이온 및 화염발광량신호 측정장치, 데이터 수집 및 해석장치로 구성되어 있다. 이들에 대한 사항은 전보⁸⁾에 상세하게 기술하였으므로, 여기서는 쉐리렌사진 촬영장치에 대해서만 간략하게 설명하기로 한다.

연소실내의 화염전파과정은 Fig.2에서와 같이 Light source(Cordin사 Model 359, xenon pulse type, maximum energy : 1100mJ), Schlieren concave mirror(Spindler & Hoyer사 model SP15, 초점거리 1500mm, 유효직경 2500mm)등으로 구성된 광학시스템으로 가시화 하였다.

광원에서 출광된 광선은 집광렌즈를 통해, 직경 1mm의 편홀을 지나 1차 쉐리렌 오목거울에 의해 평행광선으로 된 후, 연소실을 통과하여 동일한 제원의 2차 쉐리렌 오목거울에 의해 집광되어 고속도카메라로 보내진다. 고속도카메라 직전 2차 쉐리렌 오목거울 초점거리에 가로 3mm, 세로 6mm의 Slit형의 Knife edge를 설치하여 연소실내의 밀도구배에 의해 생긴 굴절된 빛의 일부를 차단함으로써 고속도카메라의 필름면에 쉐리렌상이 멩히게 하였다. 쉐리렌사진 촬영에는 드럼형의 16mm 고속도카메라(cordin사 model 350F, maximum framing rate : 35,000fps)와 ASA 100의 Kodar계 Tri Plus-X film을 사용하였다.

또한, 쉐리렌사진 촬영으로부터 얻은 필름을 Film-video processor(Tomron사 model FOTO-VIX II-X, 최대배율 : 6), Image processing board(Data translation사 model DT-2853),

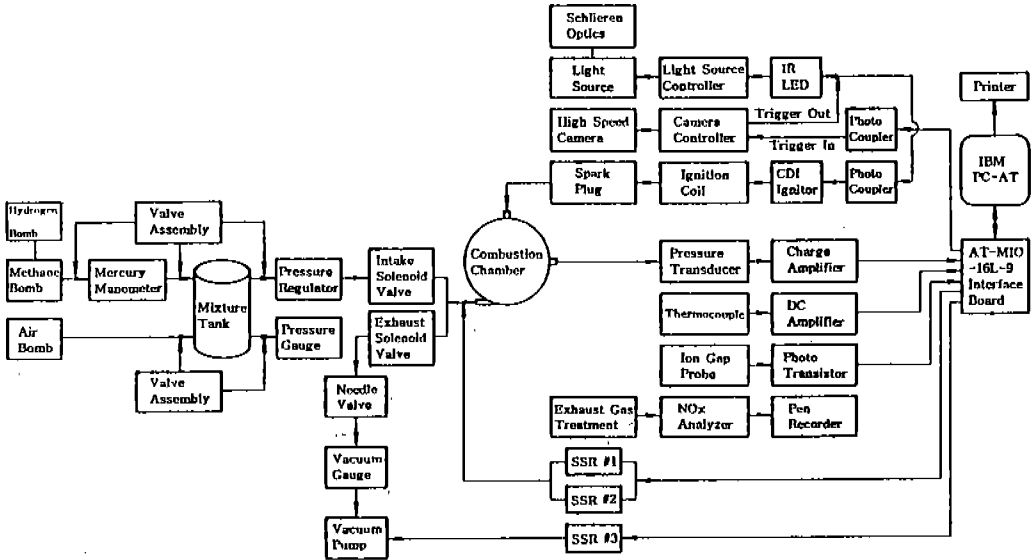


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

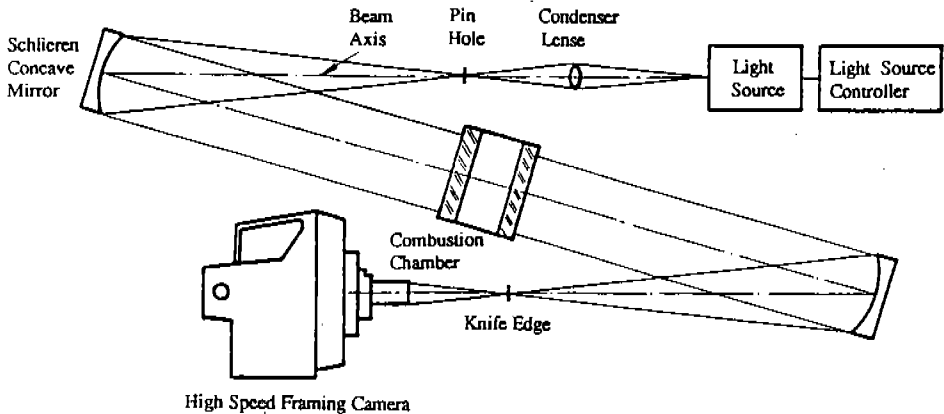


Fig.2 Schlieren optics arrangement

Monitor 등으로 구성된 화상처리장치 (image processing system)로 처리하여 화염반경 및 화염전파속도를 계산하였다.

2.2 실험방법

실험방법 및 순서는 다음과 같다. 실험은 혼합기 제조장치내에서 균일하게 교반되어 만들어진 메탄-공기(또는 메탄-수소-공기) 예혼합기를 미리 진공상태로 소기된 연소실로 실은하에서 초

기압력만큼 충전하고, 유동이 완전히 정지된 3분후에 시작하였다. 쉐리렌사진 촬영시에는 고속도카메라의 Shutter open signal을 CDI와 Light source의 동기신호로 사용하였다. 이때 연료-공기의 혼합비는 각각의 분압법에 의해 결정하였으며, 메탄(순도 99.99%), 수소(99.99%) 및 탈습공기를 혼합용기내에서 팬으로 충분히 교반, 혼합시켜 필요한 예혼합기를 만들었다. 제조된 예혼합기는 메탄과 수소의 밀도차가 크기 때문에

Gas sampler로 일정량씩 수회 채집하여 가스 크로마토 그래피(Hewlett Packard사 model HP 5890GC, column packing material : molecular sieve MS 5A, detector : TCD)로 분석·확인하였다.

Table 1은 전체적인 실험조건을 나타낸 것으로 실험변수는 당량비, 수소첨가율 및 초기압력이다. 각각의 당량비에 있어서 메탄에 대한 수소첨가율 Sr은 다음식 (1)로 정의하였으며, 특정

당량비에서 식(1)에 따라 메탄의 일부를 수소로 대체하여 Sr을 계산하였다.

$$\text{수소첨가율 } Sr = \frac{H_2}{CH_4 + H_2} (\text{Vol}\%) \quad (1)$$

한편, 본 실험은 어느정도의 편차를 수반하기 때문에 동일조건에서 10회 이상 실험을 행하고 그 평균치를 측정하였다.

Table 1 Experimental conditions

Combustion chamber volume, V(cc)	201
Fuel/Oxidizer	Methane/Air, Methane-Hydrogen/Air
Equivalence ratio, ϕ	0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3
Hydrogen supplement rate, Sr(Vol% H ₂)	0, 10, 20, 30, 40, 50
Initial pressure, P _i (kg/cm ²)	1.5, 2.0, 2.5
Initial temperature, T _i (K)	Ambient
Ignition position	Center
Ignition energy, E(mJ)	80
Data sampling rate (ms)	0.1

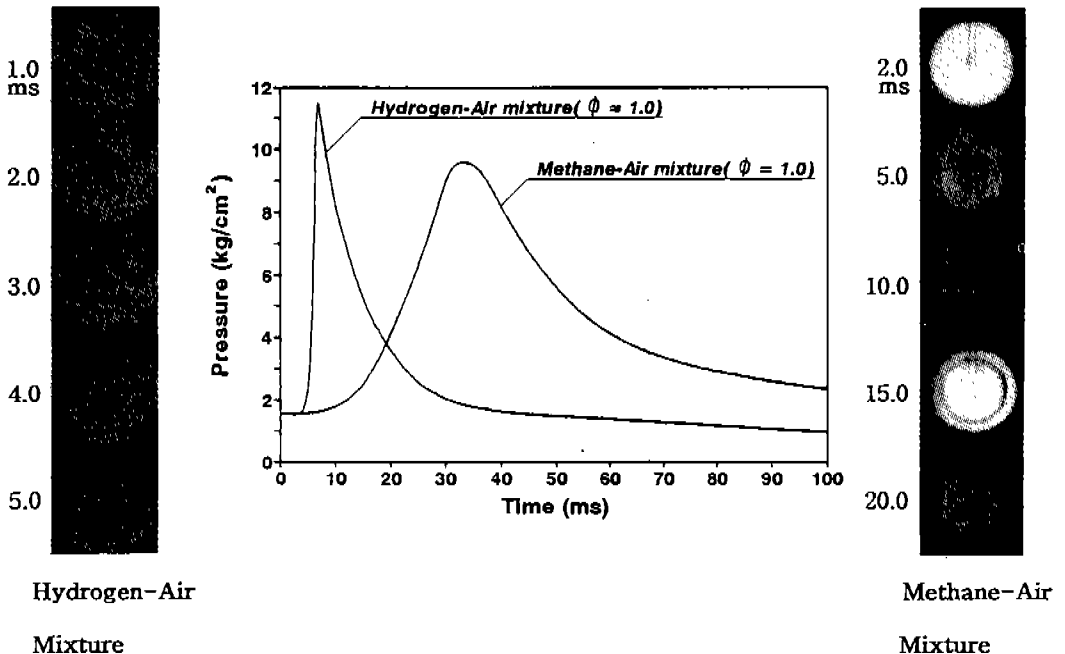


Fig.3 Flame propagation processes and pressure-time traces of Hydrogen-Air/Methane-Air premixtures($\phi=1.0$, P_i=1.5kg/cm²)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염전파과정

Fig.3은 수소-공기 예혼합기 및 메탄-공기 예혼합기의 연소특성을 조사하기 위해 연소의 초기 조건이 $\phi=1.0$, $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 인 경우에 있어서 연소실내의 압력변화와 화염전파과정을 점화 후 경과 시간에 대해 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수소-공기 예혼합기의 경우, 연소시간은 극히 짧아 연소가 거의 폭발적으로 일어나기 때문에 연소압력이 급격히 상승하고 있다. 반면, 메탄-공기 예혼합기의 경우는 수소에 비해 연소속도가 상대적으로 느리기 때문에 연소압력은 비교적 완만하게 상승되고 있다. 최고연소압력에 이르기까지의 시간을 전 연소시간으로 정의 할때 수소-공기 예혼합기의 전 연소시간은 메탄-공기 예혼합기의 전 연소시간에 비해 거의

1/6정도이다. 따라서, 이와 같이 빠른 연소속도를 갖는 수소를 메탄에 소량 첨가할 경우, 희박 연소로 인한 초기점화의 불안정성과 연소속도의 저하와 같은 문제를 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig.4의 (a), (b) 및 (c)는 $S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 일때 희박혼합기($\phi=0.7$), 이론혼합기($\phi=1.0$) 및 과농혼합기($\phi=1.3$)에 대한 화염전파과정을 각각 나타낸 것이다. 어느경우에 있어서나 점화직후의 화염의 형태는 점화플러그의 냉각효과로 인해 화염의 중앙부위가 약간 오목하게 들어간 형태를 취하고 있다. 또, 이론혼합기에서는 화염의 초기성장이 빠르고 화염전면이 거의 구면형(spherical shape flame)으로 진행되는데 반해, 과농 또는 희박 혼합기에서는 화염의 초기성장도 느리고 화염전면은 20ms 이후에 매끄러운 타원형(elliptical shape flame)으로 진행되고 있다.

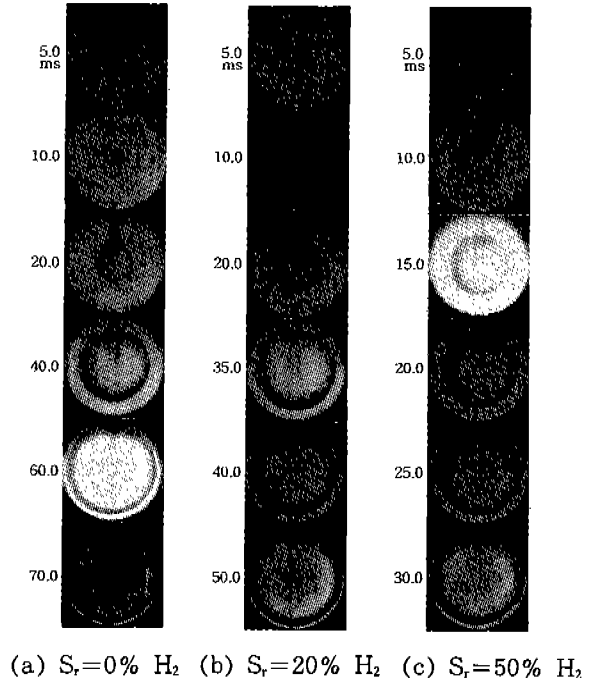
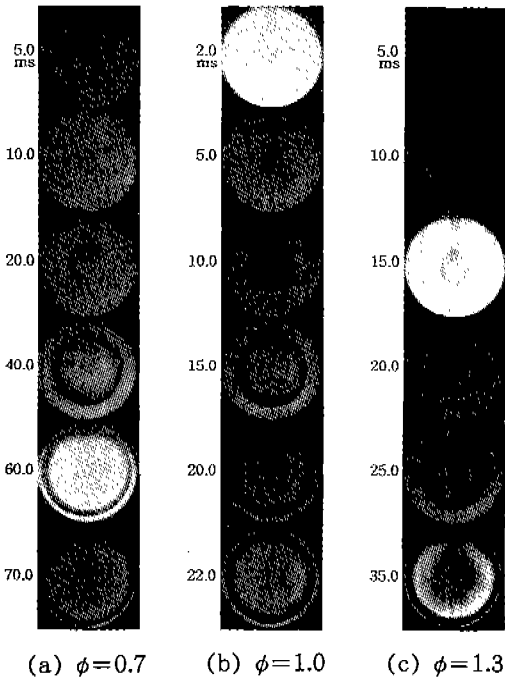


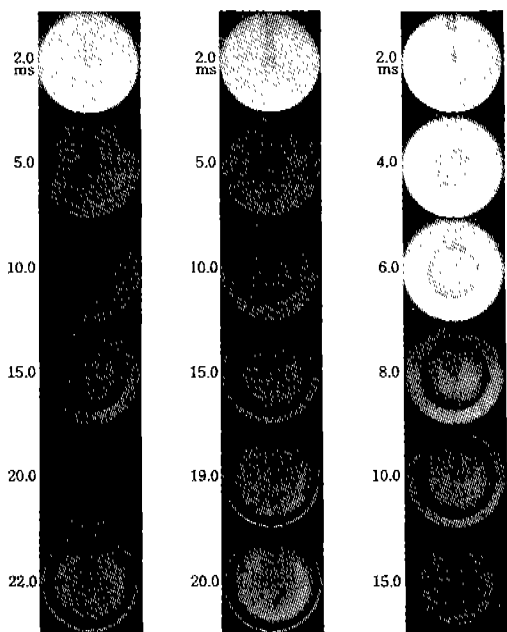
Fig.4 Effect of equivalence ratio on flame propagation processes($S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)

Fig.5 Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation processes($\phi=0.7$, $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)

Fig.5, Fig.6 및 Fig.7은 혼합기의 초기압력을 $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$ 으로 고정하고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 화염전파과정을 나타낸 것으로, 희박혼합기($\phi=0.7$), 이론혼합기($\phi=1.0$) 및 과농혼합기($\phi=1.3$)인 경우의 일례이다. 먼저, 수소를 첨가하지 않은 $S_r=0\%$ H_2 인 경우에는 전술한바와 같이 당량비에 관계없이 화염면은 대체로 매끈한 형태로서 진행되고 있다. 그러나, 수소를 첨가하게 되면 화염면은 당량비에 따라 서로 다른 형태를 띠게 된다. 즉, 수소를 첨가한 $S_r=20\%$ H_2 와 $S_r=50\%$ H_2 인 경우에는 $S_r=0\%$ H_2 인 경우와 달리 초기에는 거의 난류가 없는 층류 화염이지만, 연소말기에 이르러 화염면상에 세포분열과 같은 Cell(일례로 $\phi=1.0$ 에서 $S_r=20\%$ H_2 인 경우에는 20ms, $S_r=50\%$ 인 경우에는 15ms 일때)이 발생하여 미세한 구조를 가진 불안정한 층류화염으로 천이되고 있다. 뿐만 아니라, 화염전파시간도 수소를 첨가하지 않은 순수 메탄-공

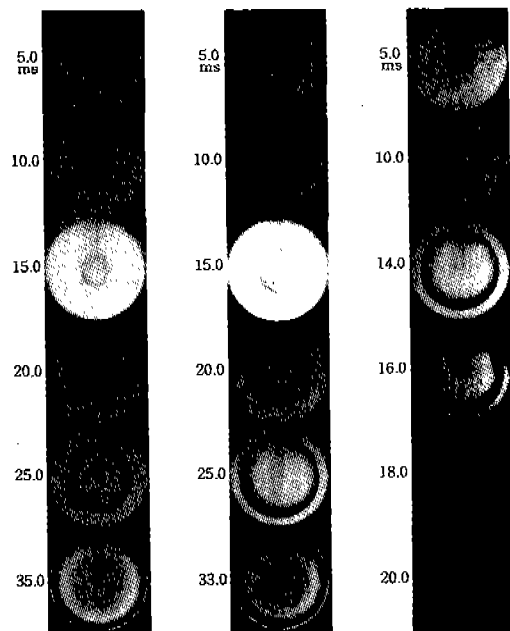
기 예혼합기의 경우에 비해 더욱 단축된다. 특히, 이와같은 경향은 희박혼합기인 $\phi=0.7$ 에서 현저하게 나타나고 있으며, 연소실 종방향으로의 셀의 크기도 더 크고 수소첨가로 인한 화염전파시간의 단축효과도 가장 크게 나타나고 있다.

이와 같이 메탄-공기 예혼합기에 수소를 첨가함에 따라 화염면상에 세포분열과 같은 셀상의 불안정성이 생기는 원인에 대해서는 Markstein⁹, Sivashinsky¹⁰, Groff¹¹) 등에 의해 상세한 연구가 행해져 왔으나, 아직 뚜렷한 결론은 내리지 못하고 있다. 그러나, 이들 연구결과와 본실험결과로부터 유추해 볼때 상기와 같은 원인은 메탄과 수소를 혼합하여 연소시킬때 발생하는 수소에 의한 선택·확산적 불안정(preferential diffusive instability) 효과와 연소실 벽면과의 급격한 밀도 변화에 의한 유체역학적 불안정(hydrodynamic instability) 효과 등이 복합적으로 작용하기 때문으로 사료된다. 즉, 본 연구에 사용된 연소실



(a) $S_r=0\%$ H_2 (b) $S_r=20\%$ H_2 (c) $S_r=50\%$ H_2

Fig.6 Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation processes($\phi=1.0$, $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$)



(a) $S_r=0\%$ H_2 (b) $S_r=20\%$ H_2 (c) $S_r=50\%$ H_2

Fig.7 Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation processes($\phi=1.3$, $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$)

은 구형이 아닌 원통형이기 때문에 연소실 벽면, 특히 관찰창과 화염면과의 밀도의 불연속에 의한 유체역학적 불안정성이 발생될 수 있다.

또한, 메탄에 수소를 첨가함에 따라 화염전파 시간이 단축되는 것은 메탄에 비해 7배 정도의 연소 속도(수소의 최대층류연소속도 : 278cm/s, 메탄의 최대층류연소속도 : 41cm/s)를 갖는 수소가 메탄의 연소속진제로 작용하기 때문이다.¹²⁾ 특히 희박혼합기층에서 수소첨가량의 증가에 따라 이런 경향이 뚜렷해지는 것은 수소가 희박혼합기층에서 Lewis number가 1보다 작아 확산·열적효과가 현저하게 크기 때문이다.¹¹⁾ 따라서 수소첨가로 인한 화염전파시간의 단축은 실제엔진에서 연소를 이상적인 정적과정에 이르게 함으로써 열효율을 더 높여줄 수 있을 것으로 판단된다.

Fig.8의 (a), (b) 및 (c)는 $\phi=1.0$, $S_r=0\%$ H_2 인 경우에 있어서 $P_i=1.5kg/cm^2$, $P_i=2.0kg$

/cm² 및 $P_i=2.5kg/cm^2$ 에 대한 화염전파과정을 나타낸 것이다. 초기압력변화에 따른 화염전파형태는 당량비와 수소첨가율을 변화시켰을때와 달리 큰 차이가 없으나, 초기압력이 증가할수록 질량연소율과 화염전파속도가 저하하기 때문¹³⁾에 동일한 연소시간에서 화염의 크기는 상대적으로 작다. 일례로, 점화 후 22ms에 있어서 $P_i=1.5kg/cm^2$ 인 경우에는 화염면이 연소실 벽면에 거의 도달한 반면, $P_i=2.5kg/cm^2$ 인 경우에는 화염면이 연소실 벽면으로부터 어느정도 떨어져 있다.

3.2 체적연소율

전보에서 서술한 압력파형과 위에서 고찰한 쉘리렌사진에 의한 화염전파특성과의 관계를 파악하기 위해 간단한 열역학적모델¹⁴⁾을 이용하여, 압력파형으로부터 체적연소율(volume fraction burned) Y_b 를 계산했다. 이 모델에서는 미연, 기연가스 모두를 이상기체로 가정하고 미연부로부터의 연손실은 무시하였다. 간단한 열역학적 계산으로부터 유도된 식은 아래와 같다.

$$Y_b = 1 - \left(\frac{P}{P_i}\right)^{-\frac{1}{k}} \frac{P_{max} - P}{P_{max} - P_i} \quad (2)$$

여기서 P는 연소중의 압력, P_i 는 초기압력, κ 는 비열비, P_{max} 는 최고연소압력이다.

한편, 상기 식 (2)의 체적연소율은 정적연소실내 전체체적에서 기연부체적을 뺀것으로 화상처리 장치를 이용하여 측정된 쉘리렌사진으로부터도 근사적으로 계산할 수 있다.

Fig.9는 쉘리렌사진과 식 (2)에 의해 계산한 체적연소율을 비교하여 나타낸 것으로, 이때의 연소조건은 $\phi=1.0$, $S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5kg/cm^2$ 인 경우이다. 그림으로부터 볼 수 있듯이, 체적연소율은 점화직후와 연소말기를 제외하고 대체로 잘 일치하고 있어 압력측정과 쉘리렌사진과의 정확성을 확인할 수 있다. 점화직후와 연소말기에 있어서의 체적연소율이 서로 다르게 나타나고 있는 이유는, 점화직후의 화염형태는 점화플러그의 냉각효과로 인해 화염의 중앙부위가 약간 오목하게

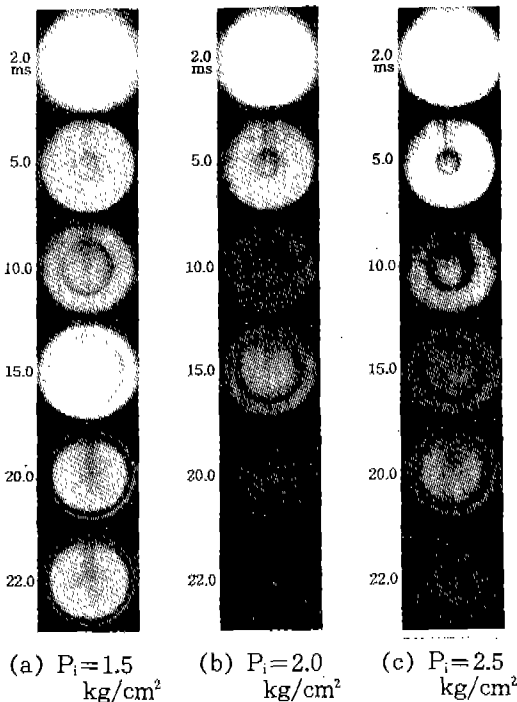


Fig.8 Effect of initial pressure on flame propagation processes($\phi=1.0$, $S_r=0\%$ H_2)

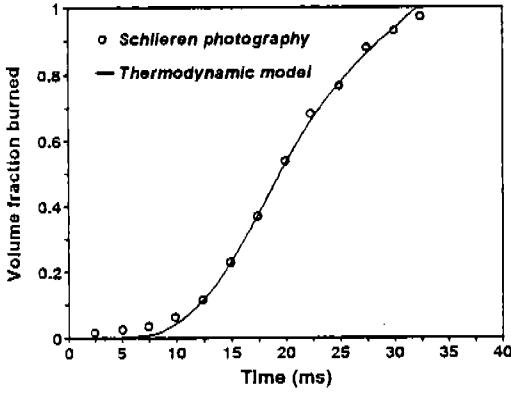
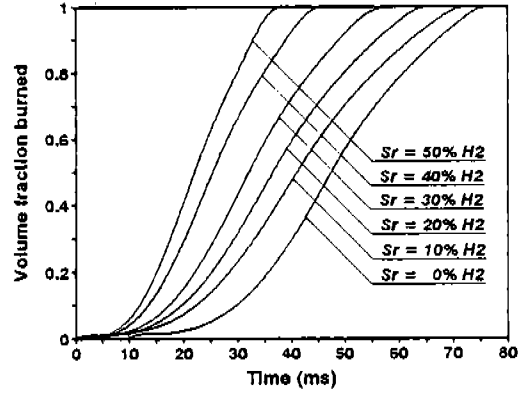


Fig.9 Comparison of volume fraction burned by calculating method($\phi=1.0$, $S_r=0\%$ H₂, $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)



(a) $\phi=0.7$

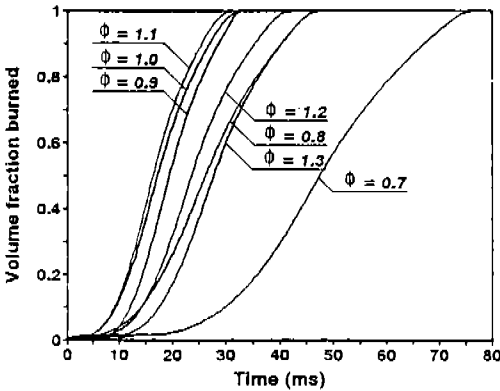
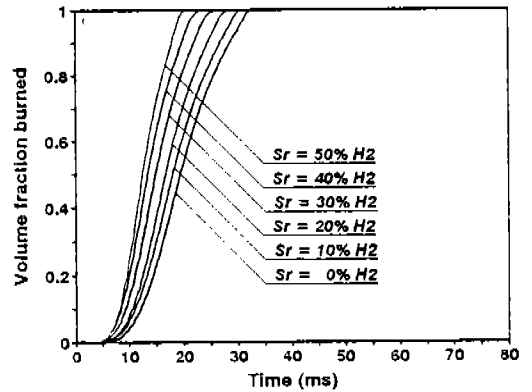


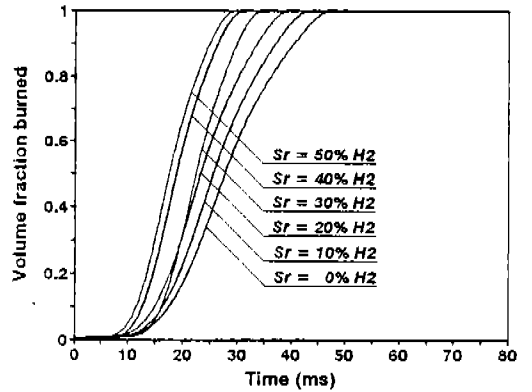
Fig.10 Comparison of equivalence ratio on volume fraction of burned gas($S_r=0\%$ H₂, $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)

들어간 형태를 취하고 있기 때문이며, 또 화염이 관찰창에 부딪힌 이후(화염반경 20mm 이후에 해당)의 형태는 관찰창의 영향으로 인해 3차원의 구면형 화염을 형성하지 못하기 때문이다. 다른조건에 있어서의 체적연소율도 상기와 같이, 점화직후와 화염이 관찰창에 부딪힌 이후를 제외하고 대체로 잘 일치하고 있었다. 따라서, 이하의 체적연소율에 대한 고찰은 주로 식(2)에 의해 계산한 결과를 중심으로 한다.

Fig.10은 $S_r=0\%$ H₂, $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 인 경우에 있어서 당량비 변화에 따른 체적연소율을 식



(b) $\phi=1.0$



(c) $\phi=1.3$

Fig.11 Effect of hydrogen supplement rate on volume fraction of burned gas($P_i=1.5\text{kg/cm}^2$)

(2)에 의해 계산하여 나타낸 것이다. $S_r=0\%$ H_2 인 경우의 체적연소율은 희박혼합기인 $\phi=0.7$ 을 제외한 모든 당량비에서 연소증기에 급격하게 증대되는 경향을 보이고 있으며, 특히 이론혼합기 부근에서 체적연소율의 증가경향은 현저하게 나타나고 있다.

Fig.11의 (a), (b) 및 (c)는 혼합기의 초기압력을 $P_i=1.5kg/cm^2$ 으로 고정하고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 체적연소율을 나타낸 것으로 희박혼합기($\phi=0.7$), 이론혼합기($\phi=1.0$) 및 과농혼합기($\phi=1.3$)인 경우이다. 먼저, $\phi=0.7$ 인 경우에 체적연소율의 기울기는 수소첨가율이 증가함에 따라 점차 급격히 증대되어, 수소를 최대 첨가한 $S_r=50\%$ H_2 인 경우의 체적연소율이 $\phi=1.0$, $S_r=0\%$ H_2 와 $\phi=1.3$, $S_r=30\%$ H_2 의 체적연소율 특성과 거의 비슷하게 나타나고 있다. 반면, $\phi=1.0$ 과 $\phi=1.3$ 인 경우의 체적연소율의 증가폭은 $\phi=0.7$ 의 경우에는 못 미치지만 수소첨가율의 증가에 따라 체적연소율이 증대됨을 볼 수 있다. 이는 상술한바와 같이, 수소가 메탄의 연소촉진제로 작용하여 연소가 신속히 완료되기 때문이며, 특히 희박혼합기측에서 수소첨가량 증가에 따라 이런 경향이 뚜렷해지는 것은 수소가 희박혼합기측에서 확산·열전효과가 현저하게 크기 때문이다.

Fig.12는 $\phi=1.0$, $S_r=0\%$ H_2 인 경우에 있어서 초기압력 변화에 따른 체적연소율을 나타낸 것이다. 초기압력이 $P_i=1.5kg/cm^2$ 인 경우의 체적연소율은 초기 화염전파과정에 해당하는 5ms까지 거의 변화가 없으나, 그 이후부터 연소증기에 이르기까지 급격히 증대되다가 연소말기에 이르러서는 다시 완만하게 증대되고 있다. 반면, 초기압력이 $P_i=2.0kg/cm^2$ 와 $2.5kg/cm^2$ 로 높아지게 되면, 체적연소율의 기울기는 $P_i=1.5kg/cm^2$ 인 경우에 비해 상대적으로 완만하게 될 뿐만 아니라 연소말기에 이르러서는 이와 같은 경향이 더욱 현저하게 나타나고 있다. 이는 초기압력이 증가할수록 질량연소율과 화염전파속도가 저하하기 때문이다.

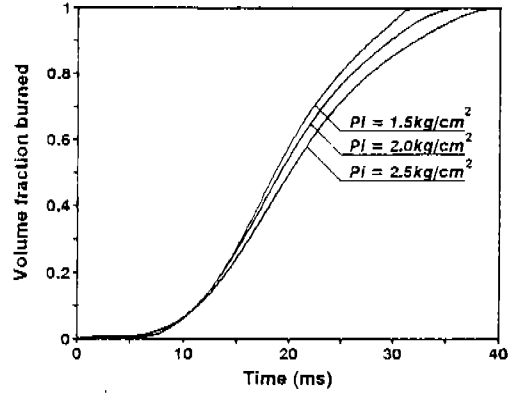


Fig.12 Effect of initial pressure on volume fraction of burned gas($\phi=1.0$, $S_r=0\%$ H_2)

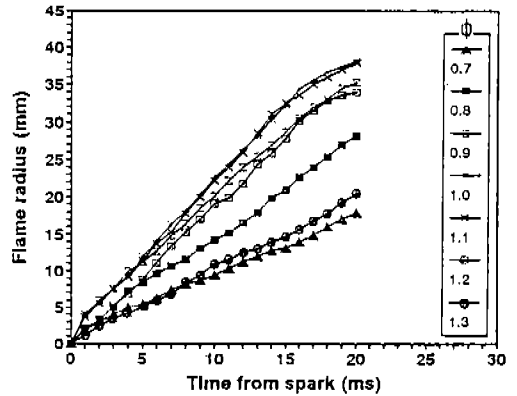
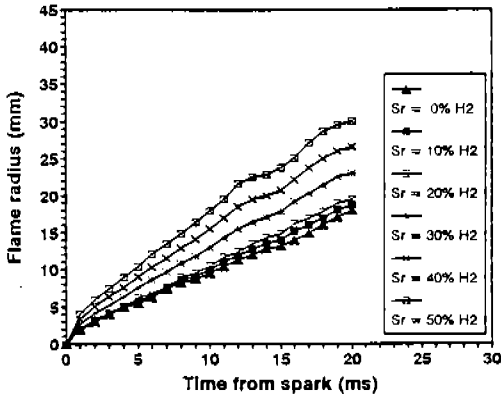


Fig.13 Effect of equivalence ratio on flame radius($S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5kg/cm^2$)

3.3 화염반경의 시간적 경과

Fig.13은 $S_r=0\%$ H_2 , $P_i=1.5kg/cm^2$ 인 경우에 있어서 당량비 변화에 따른 화염반경을 고찰하기 위한 것으로 화염반경은 전술한 바와 같이 화상처리장치를 이용하여 측정하였다. 그림으로부터 볼 수 있듯이, 이론혼합기 부근에서의 화염반경은 메탄-공기 예혼합기의 연소속도가 당량비 1.0~1.1의 범위에서 가장 빠르기 때문에 화염전파의 중기에 있어서 빠르게 증대되나, 말기(20ms 부근)에 이르러서는 다소 저하되고 있다.



(a) $\phi = 0.7$

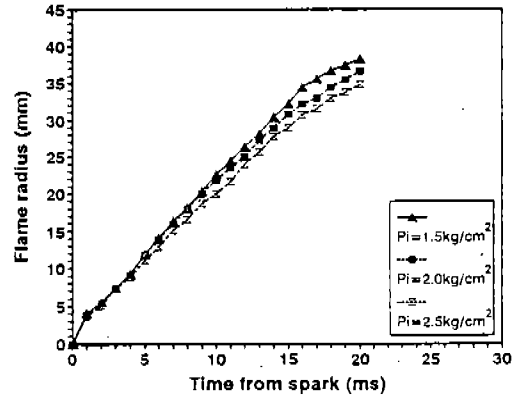
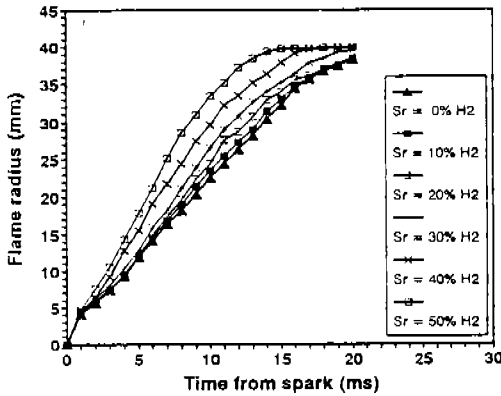
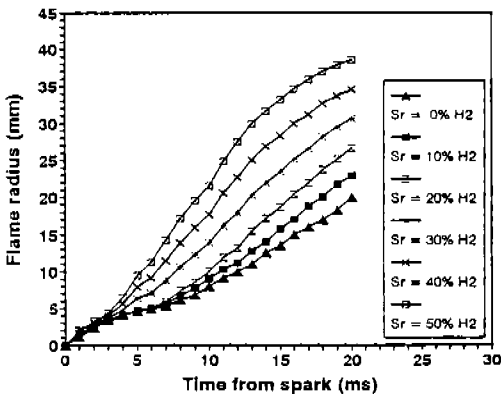


Fig.15 Effect of initial pressure on flame radius ($\phi = 1.0, S_r = 0\%$ H₂)



(b) $\phi = 1.0$



(c) $\phi = 1.3$

Fig.14 Effect of hydrogen supplement rate on flame radius ($P_i = 1.5 \text{ kg/cm}^2$)

그러나, 과농 또는 희박혼합기 측에서의 화염반경은 느린 연소속도로 인해 당량비 1.0과 1.1에 비해 매우 느리게 증대되고 있다. 일례로, 점화 후 20ms에 있어서 화염반경은 $\phi = 1.0$ 의 경우 37mm 정도이나 $\phi = 1.3$ 과 $\phi = 0.7$ 의 경우 20.4mm와 17.5mm에 지나지 않는다.

Fig.14의 (a), (b) 및 (c)는 혼합기의 초기압력을 $P_i = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ 으로 고정하고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 화염반경을 나타낸 것으로 희박혼합기 ($\phi = 0.7$), 이론혼합기 ($\phi = 1.0$) 및 과농혼합기 ($\phi = 1.3$)인 경우이다. 먼저, $\phi = 0.7$ 인 경우의 화염반경은 20ms까지의 화염전파기간이 연소초기에 해당됨에도 불구하고 수소첨가율이 증가함에 따라 그 증대폭도 점차 커지고 있다. $\phi = 1.0$ 이고 수소를 첨가하지 않은 $S_r = 0\%$ H₂인 경우에는 메탄-공기 예혼합기의 연소속도가 수소-공기 예혼합기의 연소속도에 비해 상대적으로 작음에도 불구하고 연소중기(10~20ms)에 있어서 화염반경은 비교적 빠르게 증대되고 있다. 또, 수소첨가율이 증가할 수록 수소의 연소 촉진 작용으로 인해 연소중기(5~15ms)에 있어서 화염반경의 증가폭은 더욱 커져서 점화후 10ms 일때의 화염반경은 $S_r = 0\%$ H₂, 20% H₂ 및 50% H₂의 경우에 22.6mm, 28.7mm 및 37.3mm의 크기를 보이고 있다. 참고로 이때의 연소종료시간, 즉 전연소시간은 $S_r = 0\%$ H₂, 20% H₂ 및 50% H₂의 경우에 34ms, 29.6ms 및 21.

6ms였다. 그러나, 수소첨가율이 40% 이상으로 커지면 연소말기에 있어서 화염반경의 증가경향은 다소 둔화되고 있다. 이와같이 수소첨가율이 증가할수록 화염반경의 증가폭이 커지는 것은 메탄에 비해 7배 정도의 연소속도를 갖는 수소가 메탄의 연소속진제로 작용하기 때문이다.

Fig.15는 $\phi=1.0$, $S_r=0\%$ H_2 인 경우에 있어서 초기압력에 대한 화염반경의 변화를 나타낸 것이다. 초기압력이 증대됨에 따라 질량연소율과 화염전파속도가 저하하기 때문에 연소말기로 갈수록 화염반경의 증가는 점차 둔화되고 있다. 일례로, 점화 후 4ms까지는 세가지 초기압력 모두 화염반경이 9mm정도로 거의 차이가 없으나, 23ms에는 $P_1=1.5kg/cm^2$, $2.0kg/cm^2$ 및 $2.5kg/cm^2$ 의 경우 39.6mm, 38.3mm 및 36.4mm의 크기를 보이고 있다. 이와 같은 경향은 메탄-공기 예혼합기의 초기충전압력을 변화시켜 실험을 행한 타연구자의 결과¹⁵⁾와 잘 일치하고 있다.

4. 결 론

원통형의 가시화용 정적연소실을 이용하여 연소실내의 혼합기 유동이 정지된 상태에서 당량비, 수소첨가율 및 초기압력 변화에 따른 메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 메탄-수소-공기 예혼합기의 화염전파과정은 수소를 첨가하지 않은 이혼합기에서 구면형의 층류화염으로 진행되고, 과농 또는 희박혼합기에서 타원형의 층류화염으로 진행되었다. 그러나, 수소첨가율이 증가하게 되면 불안정한 타원형의 층류화염으로 천이되었으며, 이와같은 경향은 희박혼합기측에서 가장 현저하게 나타났다. 또한, 초기압력 변화에 따른 화염전파형태에는 큰 차이가 없었으나 초기압력이 증가할수록 동일 연소시간에 화염의 크기는 작아졌다.
- 2) 메탄-수소-공기 예혼합기의 체적연소율은 수소를 첨가하지 않은 이혼합기 부근에서 현저하게 증가되었으며, 수소첨가율을

증가시키면 특히 희박혼합기측에서 크게 증대되었다. 또한, 초기압력이 증가할수록 체적연소율의 기울기는 완만하게 나타났다.

- 3) 메탄-수소-공기 예혼합기의 화염반경은 수소를 첨가하지 않은 이혼합기 부근에서 빠르게 증대되나, 과농 또는 희박혼합기측에서는 매우 느리게 증대되었다. 한편, 수소첨가율이 증가할수록 화염반경의 증가폭은 커지나, 초기압력이 높아지면 화염반경의 증가경향은 점차 감소되었다.

참 고 문 헌

1. G. J. Waldon and R. G. Allen, "Natural Gas for Vehicles(NGV)", SAE Paper 912558, 1991.
2. 中園徹, "稀薄가스機関に関する研究(副室式稀薄燃焼における主室形状の影響)", 日本機械學會論文集(B編), 第58卷, 第550號, pp.1943~1948, 1992.
3. S. J. Charlton, D. J. Jager and M. Wilson, "Computer Modeling and Experimental Investigation of a Lean Burn Natural Gas Engine", SAE 900228, 1990.
4. 古野 志健男, 井口 哲, 井上 恵太, "局部成層混合氣の稀薄燃焼特性", 自動車技術學會學術講演會前刷集, pp. 101~104, 1994.
5. J. A. Harrington, R. C. Shishu, and J. R. Asik, "A Study of Ignition System Effects on Power, Emissions, Lean misfire Limit, and EGR Tolerance of a Single Engine-Multiple Spark Versus Conventional Single Spark Ignition", SAE 740188, 1974.
6. 石井一洋, 氏氏康成, 河野通方, 西野 宏, "強亂れ場における場燃性混合氣の點火特性", 第9回内燃機關合同シンポジウム講演論文集, pp. 15~20, 1991.
7. Advanced Hydrogen/Methane Utilization Technology Demonstration, Hydrogen

- Consultants INC., Final Report No. XR-2-11175-1, 1994.
8. 김봉석, 권철홍, “메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(I)”, 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제3호, pp. 129~139, 1995.
 9. G. H. Markstein, Journal of Aeronaut. Science, Vol.18, p. 199, 1952.
 10. G. I. Sivashinsky, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 15, p. 179, 1983.
 11. E. G. Groff, Combustion and Flame, Vol. 48, pp. 51~64, 1982.
 12. 森外 14人, 日本機械學會 2P-SC 23 成果報告書, 1975-1~3, 1975.
 13. B. Lewis and G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, 2nd Edition, New York, Academic Press, p. 381, 1961.
 14. J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, McGRAW-HILL Book Company, pp. 572, 1989.
 15. T. Iijima, “Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity”, Combustion and Flame, Vol. 65, pp. 35~43, 1986.