

〈논 문〉

## 저공해 수소첨가 천연가스차량 개발을 위한 기초연구

김봉석\* · 이영재\*\* · 류정인\*\*\*

(1995년 12월 18일 접수)

### A Fundamental Study of Hydrogen Supplemented Natural Gas Vehicle to meet ULEV

Bong-Seock Kim, Young-Jae Lee and Jeong-In Ryu

**Key Words :** Hydrogen Supplemented Natural Gas(수소첨가 천연가스), ULEV(초저공해차량), Combustion Characteristics(연소특성), Hydrogen Supplement Rate(수소첨가율), Combustion Pressure(연소압력), Flame Temperature(화염온도), NOx(질소산화물), Flame Propagation Process(화염전파과정)

#### Abstract

In the present study, investigations were carried out to obtain data on combustion characteristics of methane gas and hydrogen supplemented methane gas in a constant volume combustion chamber. The main results obtained from the study can be summarized as follows. The maximum combustion pressure increases as the initial pressure and hydrogen supplement rate increase, the total burning time is shorten by lowering the initial pressure and by increasing the hydrogen supplement rate. The maximum flame temperature and NO concentration increase by the initial pressure and hydrogen supplement rate increase. The flame propagation processes in near stoichiometric mixture are propagated with a spherical shape, but in excess rich or lean mixtures are propagated with a elliptical shape. And, they are changed an unstable elliptical shape flame with very regular cells by increasing the hydrogen supplement rate.

#### 1. 서 론

천연가스는 기존 내연기관의 구조를 크게 변경시키지 않고도 사용이 가능하며, 저공해성, 안전성, 내구성 등에 있어서 우수한 특성을 가지고 있고, 매장량이 풍부하다는 점에서 자동차용 대체연료로서 유망시 되고 있다. 따라서 오래전부터 보급이 추진되어, 이미 세계적으로 100만 대 정도의 NGV

(natural gas vehicle)가 운행되고 있다. 이들 차량의 대부분은 기존 가솔린차량을 개조한 가솔린/CNG 2중 연료방식의 차량이나, 최근에는 천연가스의 특성을 충분히 살릴 수 있는 CNG 전용기관의 개발이나 대형엔진에의 적용도 활발히 추진되고 있다.<sup>(1~4)</sup>

그러나, 천연가스의 주성분인 메탄의 연소속도는 다른 연료와 비교할 때 상대적으로 느릴뿐만 아니라, 배출가스문제와 연비문제를 해결하기 위해 희박연소를 시킬 경우에는 초기점화의 불안정성과 연소속도의 저하 등으로 엔진출력이 감소되는 등 아직도 실용화를 위한 몇몇 미해결과제가 남아 있

\*회원, 원주전문대학 자동차과

\*\*회원, 한국에너지기술연구소 수송기술연구팀

\*\*\*회원, 충남대학교 기계공학과

다. (5,6)

현재까지 이와 같은 희박천연가스 연소상의 문제는 부실을 갖는 연소실을 사용하는 방안,<sup>(7)</sup> 연료의 상층화를 통한 방안,<sup>(8)</sup> 연소실 내에 강한 난류나 스윙 등을 발생시키는 방안,<sup>(9)</sup> 그리고 보다 강력한 점화장치를 사용하는 방안<sup>(10)</sup> 등과 같이 주로 하드웨어 측면에서 해결코자 시도되어 왔다. 그러나, 수소가 연료물성 측면에서 천연가스보다 점화에너지가 낮고 연소속도가 빠르며 가연범위가 넓다는 점을 감안해 볼 때 천연가스에 수소를 첨가, 사용함으로써 상기 문제점을 해결하는 방안도 고려해 볼직하다고 본다.<sup>(11)</sup> 특히, 수소는 가솔린, 경유 등 석유계연료의 연소와 달리 입자상물질, SOx, CO, CO<sub>2</sub>, HC 또는 다른 유기배출물들의 방출이 없는 청정연료이기 때문에 이를 천연가스에 첨가, 희박운전함으로써 미국의 엄격한 초저공해차량 (ULEV : ultra low emission vehicle) 규제를 만족시킬 수 있을 것으로 예상하고 있다.

이에 본 연구에서는 저공해 수소첨가 천연가스 차량을 개발하기 위한 전 단계로서, 순 메탄가스와 천연가스의 주성분인 메탄에 수소를 용적비율로 최대 50%까지 첨가한 메탄가스를 사용하였을 때의 연소촉진효과를 규명코자 하였다. 이를 위해, 실기관을 모의한 원통형의 정적연소실을 이용하여 혼합기의 유동이 정지된 상태에서 당량비, 수소첨가율 및 초기압력을 변화시켰을 때의 메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성에 대해 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도로서 정적연소실, 점화장치, 혼합기 제조장치, 압력측정장치, 슐리엔 사진 촬영장치, 온도측정장치, NO 측정장치, 데이터 수집 및 해석장치로 구성되어 있다.

황동제의 정적연소실은 Fig. 2에서와 같이 내경 80mm, 폭 40mm(체적 201cc)의 원통형이다. 연소실 중앙에는 전극직경이 1mm인 침형의 스테인리스 점화플러그가 설치되었으며, 간극은 1mm로 용량방전 점화장치(CDI : capacity discharge igniter)와 자동차용 점화코일에 의해 방전, 점화 된다.

연소실하단의 접선부위에는 예혼합기 및 연소가스의 흡·배기를 위해 SSR(solid state relay)과 연결된 솔레노이드 밸브(밸브장착으로 인한 연소실의 체적증가 및 이상연소를 방지하기 위해 니들선단이 연소실벽면에 위치하도록 설계되어 있음)가 부착되어 있다. 이들 SSR은 Interface board가 내장된 컴퓨터의 제어신호에 의해 온라인으로 작동된다.

연소압력을 측정하기 위해 연소실의 중앙측면에 압전식 압력변환기를 설치하였으며, 압력변환기의 출력은 증폭기를 사용하여 증폭시켰다.

연소실 내의 화염전파과정은 Light source, Schlieren concave mirror 등으로 구성된 광학시스

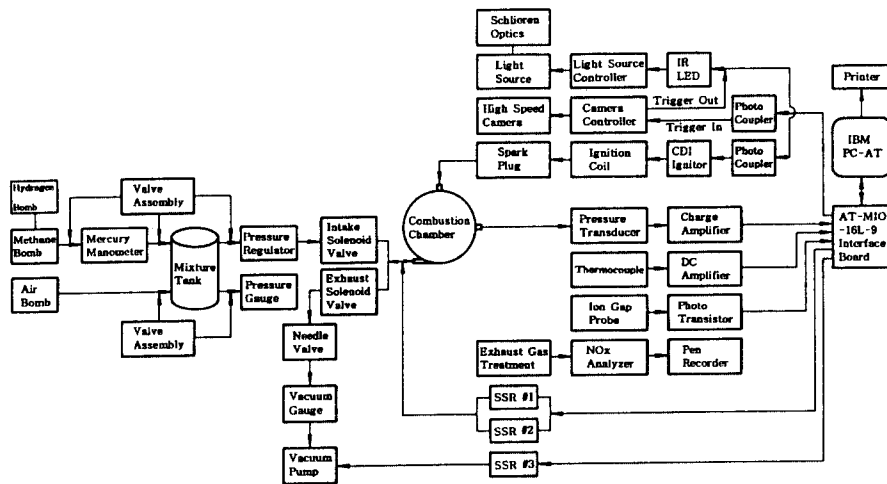


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

템으로 가시화 하였고, 슬리렌사진 촬영에는 16 mm 고속카메라와 ASA 100의 Kodak 제 Tri Plus-X film을 사용하였다.

연소실 내의 화염온도는 세션직경이 75 $\mu$ m인 백금과 백금-13% 로듐(Pt/Pt-13% Rh) 합금선을 사용하여 제작한 R형의 열전대 프로브를 연소실 원주벽면으로부터 5mm 떨어진 위치에서 폭방향으로

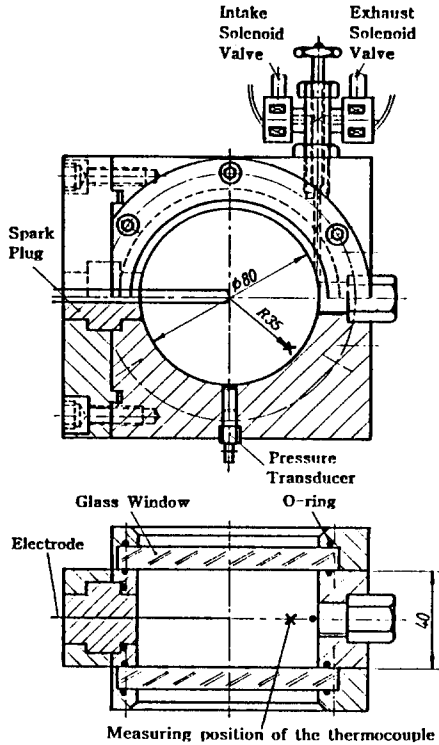


Fig. 2 Schematic diagram of combustion chamber

20mm 삽입하여 측정하였다(Fig. 2의 측정위치 참조). 열전대의 온도변화에 따른 전압신호는 DC 증폭기를 통해 계인 200배의 크기로 증폭시켰다.

연소가 종료된 직후 연소가스를 채취하여 불활성 기체인 아르곤가스와 혼합한 후 NO 농도를 분석하기 위해 시료병(내용적 3000cc), 아르곤 가스병, 진공펌프 등으로 구성된 연소가스 회색장치를 제작하였다. NO 농도분석은 화학발광반응법에 의한 NO 분석기를 이용하였다.

## 2.2 실험방법

실험방법 및 순서는 다음과 같다. 혼합기 제조장치 내에서 균일하게 교반되어 만들어진 메탄-공기(또는 메탄-수소-공기) 예혼합기를 미리 진공상태로 소기된 연소실로 실온하에서 필요한 초기압력만큼 충전한다. 3분 후, 연소실 내 혼합기의 유동이 정지되면, 컴퓨터로부터 발생된 트리거신호에 의해 고속도 카메라의 셔터가 열리게 되며, 이 Shutter open signal에 의해 CDI와 Light source가 동작하여 연소실 내 혼합기의 점화와 슬리렌사진 촬영이 행해진다. 슬리렌사진 촬영을 하지 않을 경우에는 컴퓨터의 트리거신호를 동기신호로 사용하였다.

이때 연료-공기의 혼합비는 각각의 분압법에 의해 결정하였으며, 메탄(순도 99.99%), 수소(순도 99.99%) 및 탈습공기를 혼합용기 내에서 팬으로 충분히 교반, 혼합시켜 필요한 예혼합기를 만들었다. 제조된 예혼합기는 메탄과 수소의 밀도차가 크기 때문에 Gas sampler로 일정량씩 수 회 채집하여 가스 크로마토그래피로 분석하였다.

점화 후 연소특성을 파악하기 위한 신호들은 인

Table 1 Experimental conditions

Combustion chamber volume, V (cc)	201
Fuel / Oxidizer	Methane / Air, Methane-Hydrogen / Air
Equivalence ratio, $\phi$	0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3
Hydrogen supplement rate, $S_r$ (Vol% H <sub>2</sub> )	0, 10, 20, 30, 40, 50
Initial pressure, $P_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1.5, 2.0, 2.5
Initial temperature, $T_1$ (K)	Ambient
Ignition position	Center
Ignition energy, E (mJ)	80
Data sampling rate (ms)	0.1

**Table 2** Specification of measuring equipments

Instruments	Specification
Interface board	National Instrument model AT-MIO-16L
Pressure transducer	Piezoelectric type, Kistler model 601A
	Amplifier, Kistler model 5007
Light source	Xenon pulse type, Cordin Model 359
Schlieren concave mirror	Spindler & Hoyer model SP15
High speed camera	Drum type, Cordin Model 350F
Thermocouple	R type, Engelhard Pt/Pt-13% Rh
	Amplifier, Analog Design model ADL-8731T
NO analyzer	Thermo Environmental Instruments model 10AR
Gas chromatography	Hewlett Packard model HP 5890GC, Column packing material : molecular sieve MS 5A, detector : TCD

터페이스 보드를 거쳐 컴퓨터 디스크에 저장되며, 압력변환기와 열전대로부터 출력된 전압신호들은 절대압력과 절대온도로 각각 환산하였다.

Table 1은 전체적인 실험조건을 나타낸 것으로 실험변수는 당량비, 수소첨가율 및 초기압력이며, 각각의 당량비에 있어서 메탄에 대한 수소첨가율  $S_r$ 은 다음 식 (1)로 정의하였다.

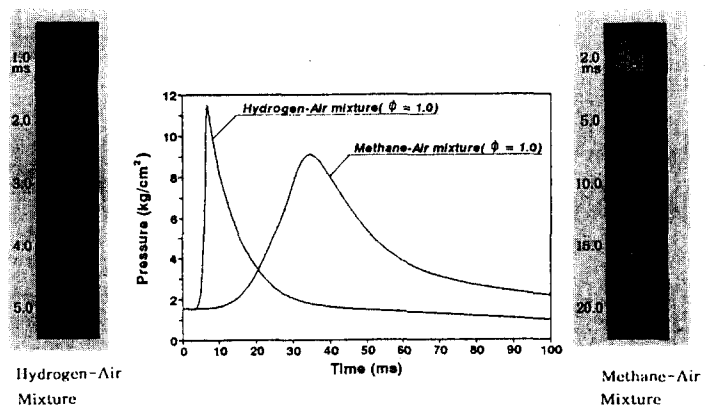
$$\text{수소첨가율 } S_r = \frac{H_2}{CH_4 + H_2} (\text{Vol } \%) \quad (1)$$

한편, 본 실험은 어느 정도의 편차를 수반하기 때문에 동일조건에서 10회 이상 실험을 행하고 그 평균치를 측정하였으며, 측정에 사용한 각 장비들의 사양을 Table 2에 나타냈다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 연소압력 및 연소시간

Fig. 3은 수소-공기 예혼합기 및 메탄-공기 예혼합기의 연소특성을 조사하기 위해 연소의 초기조건이  $\phi=1.0$ ,  $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$ 인 경우에 있어서 연소실 내의 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 완만



**Fig. 3** Flame propagation processes and pressure-time traces of Hydrogen-Air/Methane-Air premixtures ( $\phi=1.0$ ,  $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$ )

하게 상승되고 있다. 최고연소압력( $P_{max}$ )에 이르기까지의 시간을 전연소시간(total burning time)  $t_{max}$ 로 정의할 때 수소-공기 예혼합기의 전연소시간은 메탄-공기 예혼합기의 전연소시간에 비해 거의 6배 정도이다. 따라서, 이와 같이 빠른 연소속도를 갖는 수소를 메탄에 소량 첨가할 경우, 천연가스가 갖고 있는 연료로서의 우위성을 살리면서 기관의 효율개선을 도모할 수 있을뿐만 아니라, 희박연소로 인한 초기점화의 불안정성과 연소속도의 저하와 같은 문제를 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 4는  $S_r=0\%$   $H_2$ ,  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 인 경우에 있어서 당량비 변화에 따른 압력선도를 나타낸 것이다. 메탄만을 연소시킨 경우 연소실 내의 압력은 이론혼합기보다 약간 농후한 혼합기인  $\phi=1.1$ 에서 가장 높고 이보다 농후하거나 희박한 혼합기 측에서는 낮게 나타나고 있으며, 전연소시간도  $\phi=1.1$ 에서 가장 짧고 과농 또는 희박 혼합기 측으로 갈수록 길어지고 있다.

Fig. 5의 (a)와 (b)는 혼합기의 초기압력을  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 로 고정하고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 연소실 내의 최고압력과 전연소시간을 당량비에 따라 나타낸 것이다. 상술한 바와 같이 최고 압력은 수소첨가율에 관계 없이  $\phi=1.1$ 에서 가장 높고 희박혼합기인  $\phi=0.7$ 에서 가장 낮게 나타나고 있으며, 전연소시간 또한 수소첨가율에 관계 없이  $\phi=1.1$ 에서 가장 짧고  $\phi=0.7$ 에서 가장 길게 나타나고 있다.

이들을 이론혼합기보다 약간 농후한 혼합기( $\phi=1.1$ ), 희박한 혼합기( $\phi=0.7$ ) 및 농후한 혼합기( $\phi=1.3$ )인 조건으로 나누어 살펴보면 다음과 같다. 먼저,  $\phi=1.1$ 인 경우에 있어서 연소실 내의 최고 압력은 수소첨가율이 증가함에 따라 그리 큰 변화

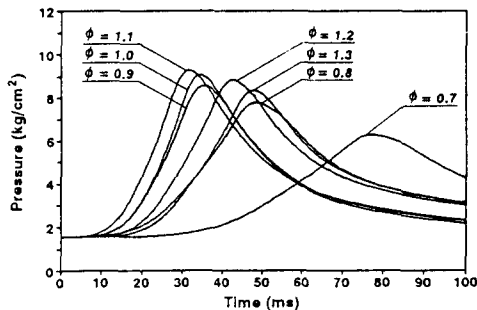
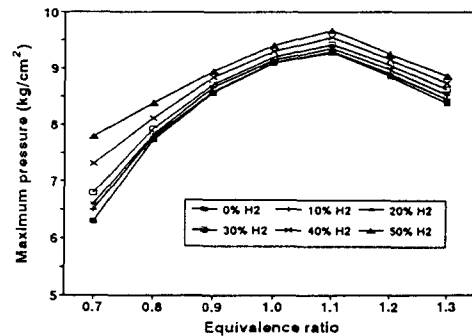


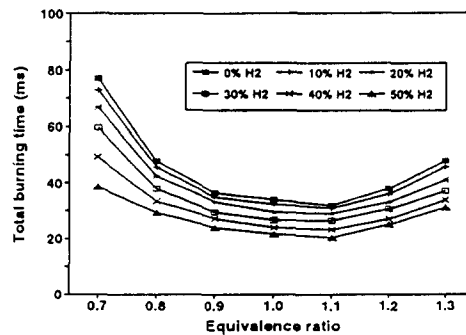
Fig. 4 Effect of equivalence ratio on pressure-time traces ( $S_r=0\%$   $H_2$ ,  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ )

가 없으나 전연소시간은 상당히 단축됨을 알 수 있다. 일례로  $S_r=50\%$   $H_2$ 인 경우  $P_{max}$ 은  $S_r=0\%$   $H_2$ 인 경우에 비해 3.3% 밖에 증가되지 않았으나,  $t_{max}$ 은  $S_r=50\%$   $H_2$ 인 경우가  $S_r=0\%$   $H_2$ 인 경우에 비해 36.5% 정도 단축되었다. 그러나, 혼합기가 희박( $\phi=0.7$ )하거나 농후( $\phi=1.3$ )한 경우에는 이와 같은 경향이 달라진다.  $\phi=0.7$ 일 때의  $P_{max}$ 은 수소첨가율이 증가함에 따라 점차 급격히 상승하는 경향을 보여 최대첨가율  $S_r=50\%$   $H_2$ 인 경우의  $P_{max}$ 은  $S_r=0\%$   $H_2$ 인 경우에 비해 23.8% 정도 증가되었고  $t_{max}$ 은  $S_r=50\%$   $H_2$ 인 경우가  $S_r=0\%$   $H_2$ 인 경우에 비해 50% 정도 단축되었다. 또한,  $\phi=1.3$ 일 때의 최고압력은  $\phi=0.7$ 의 경우보다 큰 증가는 없지만( $S_r=50\%$   $H_2$ 인 경우의  $P_{max}$ 은  $S_r=0\%$   $H_2$ 인 경우에 비해 5.5%정도 증가),  $t_{max}$ 은  $S_r=50\%$   $H_2$ 인 경우가  $S_r=0\%$   $H_2$ 인 경우에 비해 37.2% 정도 단축되고 있다.

이와 같이 메탄에 수소를 첨가함에 따라 최고압력이 높아지고 전연소시간이 단축되는 것은 메탄에



(a) Maximum pressure



(b) Total burning time

Fig. 5 Effect of equivalence ratio and hydrogen supplement rate on maximum pressure and total burning time ( $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ )

비해 7배 정도의 연소속도(수소의 최대충류 연소속도 : 278cm/s, 메탄의 최대충류 연소속도 : 41cm/s)를 갖는 수소가 메탄의 연소속진제로 작용<sup>(12)</sup>하기 때문이다. 특히 희박혼합기 측에서 수소 첨가량 증가에 따라 이런 경향이 뚜렷해지는 것은 수소가 희박혼합기 측에서 Lewis number가 1보다 작아 확산·열적효과가 현저하게 크기 때문<sup>(13)</sup>인 것으로 사료된다. 따라서 수소첨가로 인한 연소시간의 단축은 실제기관에서 연소를 이상적인 정적과정에 이르게 함으로써 열효율을 더 높여줄 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 6은  $\phi=1.1$ 인 경우에 있어서 수소첨가율과 초기압력 변화에 따른 최고압력과 전연소시간을 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 연소실 내의 초기압력이 높을수록 최고압력과 전연소시간은 점차 증대되는 경향을 보이고 있는데, 최고압력의 증가는 초기압력의 증대에 따른 당연한 결과이며, 전연소시간의 증대는 밀폐된 용기 내를 화염이 충류화염진과를 할 경우 초기압력이 증가할수록 질량연소율(mass burned rate)이 상대적으로 감소되기 때문이다.<sup>(14)</sup>

### 3.2 화염온도

본 연구에서와 같이 연소가 수십 ms 이내에 종료되는 경우, 복사 열손실, 전도 열손실 및 촉매작용 등을 무시한다면 가스 중의 세션의 열평형식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_w C_w V_w \frac{dT_w}{dt} = h_w A_w (T_g - T_w) \quad (2)$$

여기서  $A_w$ 는 열전대 세션의 표면적,  $C_w$ 는 열전대 세션의 비열,  $T_g$ 는 가스의 온도,  $T_w$ 는 열전대

세션의 온도,  $V_w$ 는 열전대 세션의 체적,  $h$ 는 국소 열전달계수,  $t$ 는 시간,  $\rho_w$ 는 열전대 세션의 밀도이다.

식 (2)를  $h_w A_w$ 로 나누면 다음의 식이 된다.

$$T_g = T_w + \tau_c \left( \frac{dT_w}{dt} \right) \quad (3)$$

여기서  $\tau_c = \frac{\rho_w C_w V_w}{h_w A_w}$ 로 정의되는 시정수(time constant)이다.

그런데  $\tau_c$ 는 열전대의 성분, 세션의 직경, 가스의 조성, 유동상태에 따라 다를뿐만 아니라 화염 내 각 측정점에 있어서도 다르기 때문에 이론적으로 구하는 것은 곤란하다. 따라서 열전대를 이용한 온도계측에 있어서  $\tau_c$ 의 결정은 주로 실험결과나 단열화염온도(adiabatic flame temperature)의 계산결과를 사용하고 있다. 시정수  $\tau_c$ 는 본 정적연소실내의 단열화염온도를 수치해석적으로 구한 결과와 실험결과를 이용하여 결정하였다. 메탄-공기 예혼합기의 당량비가 1.0일 경우 연소실 내의 단열화염온도의 계산결과는 2311K였으며, 이와 같이 하여 구한 시정수는  $\tau_c=54$ 일 때 화염온도가 최고 2100K 정도로 열해리 등을 가정할 경우 합리적인 값이라 생각하여 본 연구에서는  $\tau_c=54$ 로 하여 온도보상을 하였다.<sup>(15)</sup>

Fig. 7은 수소첨가율과 초기압력을  $S_r=0\% \text{ H}_2$ ,  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 로 고정시키고 혼합기의 당량비를 변화시켰을 때의 화염온도를 나타낸 것이다. 열전대 설정위치의 온도는 Hopkinson 효과 때문에 연소실 내의 장소에 따라 다르지만, 본 연구에서와 같이 점화플러그가 연소실 중심에 설치된 관계로 연소실 원주벽면으로부터 5mm 떨어진 위치에서 폭방향으로 20mm 삽입하여 측정된 최고화염온도는

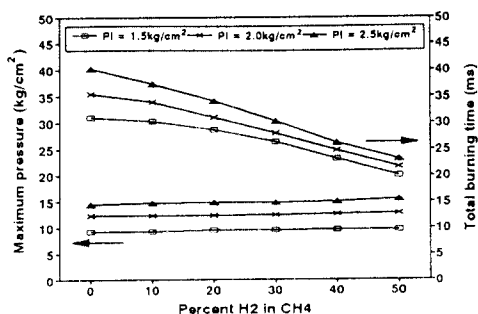


Fig. 6 Effect of hydrogen supplement rate and initial pressure on maximum pressure and total burning time ( $\phi=1.1$ )

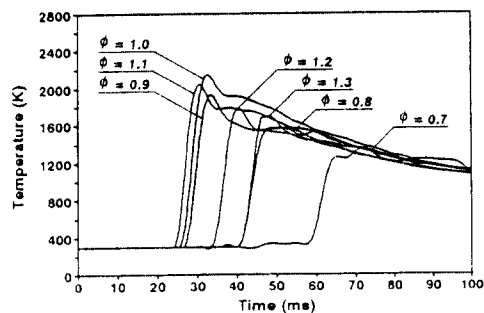


Fig. 7 Effect of equivalence ratio on flame temperature-time traces ( $S_r=0\% \text{ H}_2$ ,  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ )

이론혼합기인  $\phi=1.0$ 에서 가장 높고 이보다 농후하거나 희박한 혼합기 측에서는 감소되는 경향을 보이고 있었다.

Fig. 8의 (a), (b) 및 (c)는 초기압력과 당량비를  $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$ ,  $\phi=0.7, 1.0$  및  $1.3$ 으로 고정시키고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 화염온도를 나타낸 것이다. 연소실 내의 화염온도는 세 가지 당량비 모두 수소첨가율이 증가됨에 따라 점차 증가하여, 순수 메탄에 비해 수소를 최대량 첨가한 경우의 최대화염온도는  $\phi=0.7$ 인 경우  $214.5\text{K}$  ( $S_r=0\% \text{ H}_2: 1351.7\text{K}$ ,  $S_r=50\% \text{ H}_2: 1566.2\text{K}$ ),  $\phi=1.0$ 인 경우  $55.6\text{K}$  ( $S_r=0\% \text{ H}_2: 2143.8\text{K}$ ,  $S_r=50\%$

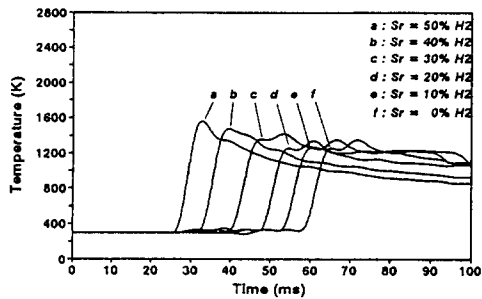
$\text{H}_2: 2199.4\text{K}$ ),  $\phi=1.3$ 인 경우  $268.2\text{K}$  ( $S_r=0\% \text{ H}_2: 1694.1\text{K}$ ,  $S_r=50\% \text{ H}_2: 1962.3\text{K}$ ) 정도 각각 높게 나타나고 있다. 이와 같이 수소첨가율이 증가할수록 화염온도가 높아지는 것은 메탄-수소-공기 예혼합기의 비열이 수소혼합에 따라 점차 적어지기 때문이며, 또한 공기중에서 수소의 화염온도가 메탄에 비해  $322\text{K}$  정도 높기 때문이다.<sup>(16)</sup>

또, Fig. 9에서와 같이 당량비와 수소첨가율을 고정시킨 경우 ( $\phi=1.0$ ,  $S_r=20\% \text{ H}_2$ )에 초기압력을 높이면 화염온도가 증가하며, 최고화염온도가 나타나는 시기도 약간씩 지연되는 경향을 볼 수 있다. 이와 같이 초기압력이 증가함에 따라 화염온도가 높아지는 것은 단위체적(연소실) 내의 혼합기량이 증가하기 때문이며, 최고화염온도가 나타나는 시기가 점차 지연되는 것은 상술한 바와 같이 밀폐된 용기내를 화염이 충류전파할 경우 초기압력이 증가할수록 질량연소율이 상대적으로 감소되기 때문이라고 생각한다.<sup>(14)</sup>

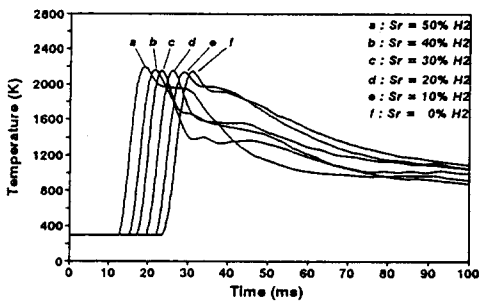
### 3.3 NO 농도

탄화수소계열의 연료가 연소될 때 생성되는 유해 물질 중 질소산화물의 대부분은  $\text{NO}$ 이며, 그 외  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  등 9종류로 이루어져 있다. 일반적으로 당량비가 1.0보다도 작은 희박혼합기 또는 이론혼합기에 가까운 혼합기의 연소시 Thermal  $\text{NO}$ 는 확대 Zeldovich 기구<sup>(17)</sup>라 불리우는 반응에 의해 잘 예측될 수 있으며, 희박혼합기 연소에 있어서의  $\text{NO}$ 의 생성률은  $\text{N}$ 의 농도를 정상상태로 가정한다면 Kinetic theory에 의하여 연소계가 고온으로 지속되는 시간에 강한 의존성을 보인다.

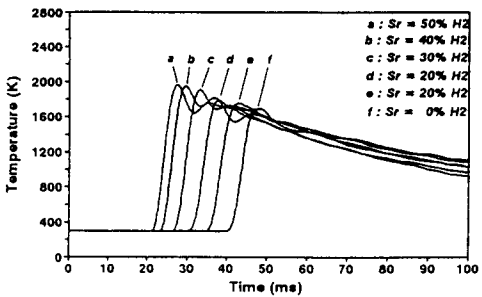
Fig. 10은  $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$ 일 때 당량비와 수소첨가율 변화에 따른  $\text{NO}$  농도를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 당량비 변화에 따른  $\text{NO}$



(a)  $\phi=0.7$



(b)  $\phi=1.0$



(c)  $\phi=1.3$

Fig. 8 Effect of hydrogen supplement rate on flame temperature-time traces ( $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$ )

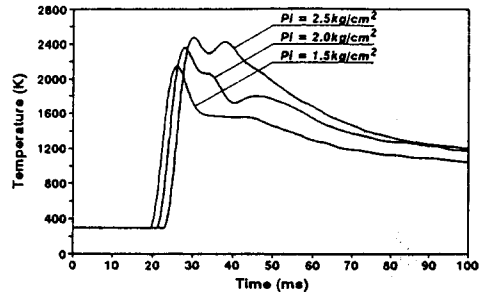


Fig. 9 Effect of initial pressure on flame temperature-time traces ( $\phi=1.1$ ,  $S_r=20\% \text{ H}_2$ )

농도는 최고압력과 달리 약간 희박한 혼합기인  $\phi = 0.9$ 에서 가장 높으며, 희박한 혼합기이거나 농후한 혼합기 측에서는 대폭적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 또 수소첨가율 변화에 따른 NO 농도는  $\phi = 1.2$  이상의 농후한 혼합기 범위에서는 큰 차이가 없지만,  $\phi = 0.7 \sim 1.1$  범위에서는 수소첨가율이 증가할수록 NO 농도의 차이가 커진다. 이러한 이유는 비록  $\phi = 0.9$  이하의 희박한 혼합기 영역에서는 화염온도가  $\phi = 1.0 \sim 1.1$ 에 비해 낮지만 NO 농도가 생성속도에 주로 지배되어 화염온도에 민감하게 대응하는 반면, 농후한 혼합기 영역에서는 주로 분해속도에 의해 결정되어 화염온도에 대해 별로 민감하지 않기 때문<sup>(18)</sup>인 것으로 사료된다. 또한, 수소첨가율이 증가할수록 NO 농도가 증가하고 있는 이유로는 상기한 바와 같이 수소첨가율이 증가할수록 화염온도가 증가되기 때문이다.

이와 같이,  $\phi = 0.7 \sim 1.1$  범위의 천연가스에 수소를 첨가하게 되면 연소속도 증가 및 출력증가와 같은 장점이 있는 반면, NO의 발생은 위험한 수준에 이르게 되기 때문에, 천연가스차량의 NO 저

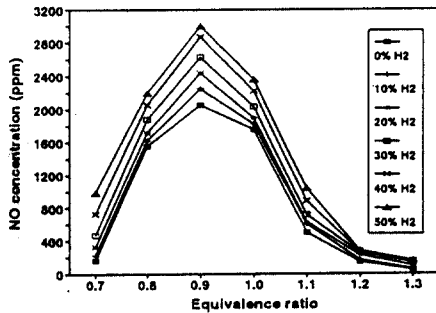


Fig. 10 Effect of equivalence ratio and hydrogen supplement rate on NO concentration ( $P_i = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ )

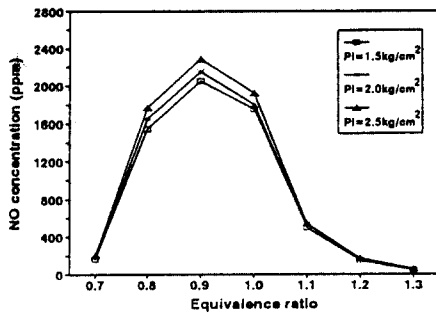


Fig. 11 Effect of equivalence ratio and initial pressure on NO concentration ( $S_r = 0\% \text{ H}_2$ )

감대책으로서의 희박혼합기에 대한 수소첨가는 매우 효과적이라고 볼 수 있다. 일례로,  $\phi = 0.7$ 과  $\phi = 1.0$ 에 수소를 0%, 20%, 50% 첨가하였을 경우의 최고압력과 NO 농도를 서로 비교해보면,  $S_r = 50\% \text{ H}_2$ ,  $\phi = 0.7$ 일 때의  $P_{max}$ 은  $S_r = 0\% \text{ H}_2$ ,  $\phi = 1.0$ 일 때의  $P_{max}$ 에 비해 14.3% 정도 저하된 반면, NO 농도는 43.8% 정도 대폭적으로 저감되었다. 또한,  $S_r = 20\% \text{ H}_2$ ,  $\phi = 0.7$ 일 때의  $P_{max}$ 은  $S_r = 0\% \text{ H}_2$ ,  $\phi = 1.0$ 일 때의  $P_{max}$ 에 비해 27.5% 정도 저하된 반면, NO 농도는 81.1% 정도 대폭적으로 저감되었다. 따라서, 통상 이론공연비의 메탄-공기 혼합기를 사용하는 현 천연가스차량에서 큰 출력 저하 없이 NO 농도를 저감시키기 위해서는 희박 천연가스 혼합기에 수소를 적절히 첨가하고, 엔진운전조건을 최적화함으로써 이를 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 11은  $S_r = 0\% \text{ H}_2$ 일 때 당량비와 초기압력 변화에 따른 NO 농도를 나타낸 것이다. NO 농도는  $\phi = 0.8 \sim 1.0$  범위에서 초기압력이 증가할수록 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있으나,  $\phi = 1.0$  이상의 농후한 혼합기나  $\phi = 0.7$  이하의 희박한 혼합기 측에서는 큰 차이가 없다. 일례로  $\phi = 0.9$ 인 경우에 NO 농도는  $1.5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  및  $2.5 \text{ kg/cm}^2$ 에서 2055ppm, 2153ppm 및 2287ppm으로 증가하고 있으나,  $\phi = 0.7$ 인 경우에는 세 가지 초기압력에서 160~204ppm,  $\phi = 1.3$ 인 경우에는 45.4~59ppm으로 비슷하게 나타나고 있다.

### 3.4 화염전파과정

Fig. 12의 (a), (b) 및 (c)는  $S_r = 0\% \text{ H}_2$ ,  $P_i = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ 일 때 희박혼합기( $\phi = 0.7$ ), 이론혼합기( $\phi = 1.0$ ) 및 과농혼합기( $\phi = 1.3$ )에 대한 화염전파 과정을 각각 나타낸 것이다. 어느 경우에 있어서나 점화 직후의 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 진행되는 데 반해, 과농 또는 희박 혼합기에서는 화염의 초기성장도 느리고 화염전면은 매끄러운 타원형(elliptical shape flame)으로 진행되고 있다. 이는 과농 또는 희박 혼합기측의 화염전파속도가 이론혼합기의 화염전파속도에 비해 상대적으로 느리기 때문이다.

Fig. 13, Fig. 14 및 Fig. 15는 혼합기의 초기압력



을  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ 으로 고정하고 수소첨가율을 변화시켰을 때의 화염전파과정을 나타낸 것으로, 희박혼합기( $\phi=0.7$ ), 이혼합기( $\phi=1.0$ ) 및 과농혼

합기( $\phi=1.3$ )인 경우의 일례이다. 먼저, 수소를 첨가하지 않은  $S_r=0\%$   $\text{H}_2$ 인 경우에는 전술한 바와 같이 당량비에 관계 없이 화염면은 대체로 매끈한

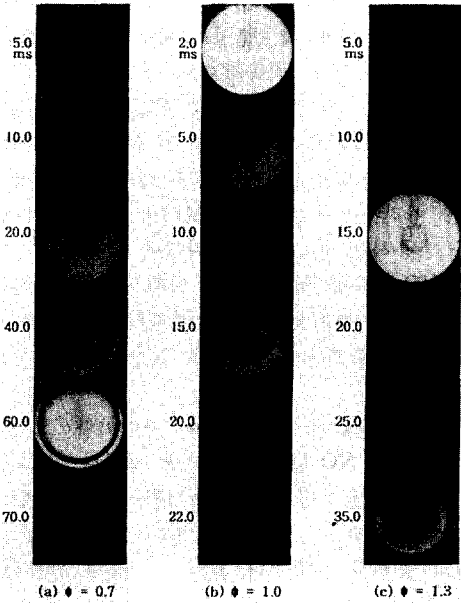


Fig. 12 Effect of equivalence ratio on flame propagation processes ( $S_r=0\%$   $\text{H}_2$ ,  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ )

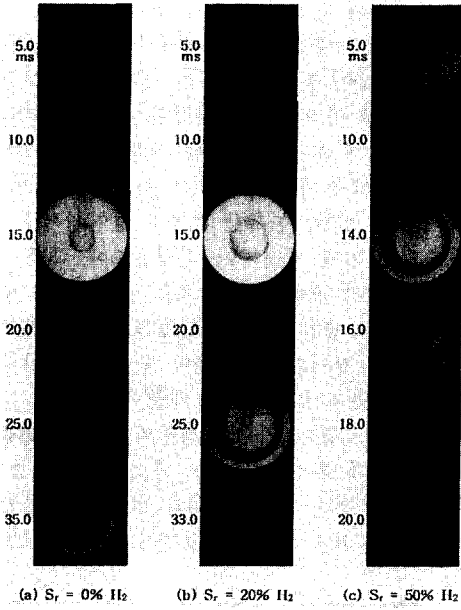


Fig. 14 Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation processes ( $\phi=1.0$ ,  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ )

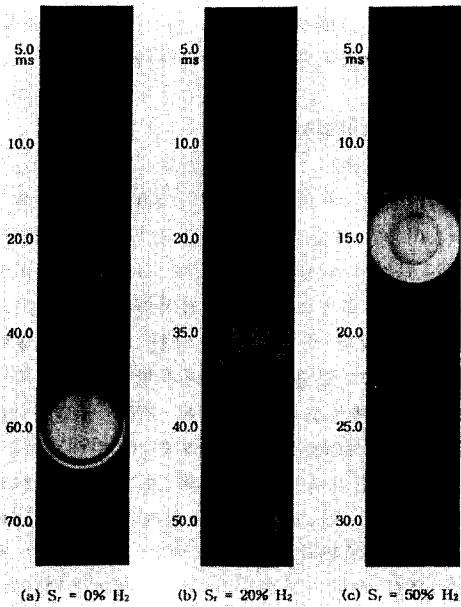


Fig. 13 Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation processes ( $\phi=0.7$ ,  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ )

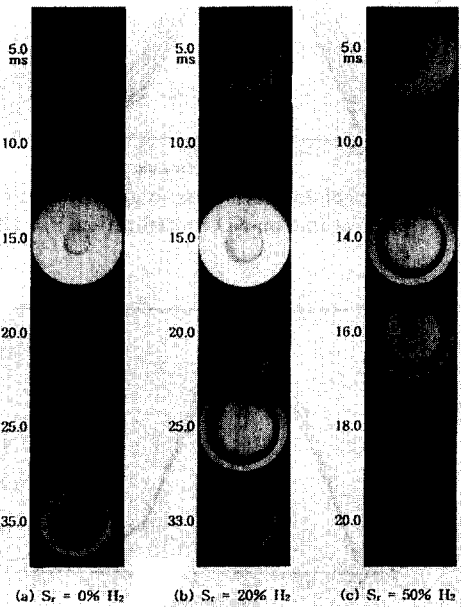


Fig. 15 Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation processes ( $\phi=1.3$ ,  $P_i=1.5\text{kg/cm}^2$ )

형태로서 진행되고 있다. 그러나, 수소를 첨가하게 되면 화염면은 당량비에 따라 서로 다른 형태를 띠게 된다. 즉, 수소를 첨가한  $S_r=20\%$   $H_2$ 와  $S_r=50\%$ 인 경우에는  $S_r=0\%$   $H_2$ 인 경우와 달리 초기에는 거의 난류가 없는 층류화염이지만, 연소말기에 이르러 화염면상에 세포분열과 같은 Cell(일레로  $\phi=1.0$ 에서  $S_r=20\%$   $H_2$ 인 경우에는 20ms,  $S_r=50\%$ 인 경우에는 15ms일 때)이 발생하여 미세한 구조를 가진 불안정한 층류화염으로 천이되고 있다. 뿐만 아니라, 화염전파시간도 수소를 첨가하지 않은 순수 메탄-공기 예혼합기의 경우에 비해 더욱 단축된다. 특히, 이와 같은 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 Markstein,<sup>(19)</sup> Sivashinsky,<sup>(20)</sup> Groff<sup>(21)</sup> 등에 의해 상세한 연구가 행해져 왔으나, 아직 뚜렷한 결론은 내리지 못하고 있다. 그러나, 이들 연구결과와 본 실험결과로부터 유추해 볼 때 상기와 같은 원인은 메탄과 수소를 혼합하여 연소시킬 때 발생하는 수소에 의한 선택·확산적 불안정(preferential diffusive instabil-

ity) 효과와 연소실 벽면과의 급격한 밀도변화에 의한 유체역학적 불안정(hydrodynamic instability) 효과 등이 복합적으로 작용하기 때문으로 사료된다.

즉, 화염면에 무언가의 교란으로 인해 요철이 생길 때, 연료기체와 산소의 확산속도의 차이에 의해 국소적으로 당량비의 편이가 생긴다. 이 편이가 연소속도의 증가에 연결될 경우에는 그 교란은 발달하고, 역의 경우에는 감쇄한다. 연소속도는 온도의 변수로 있기 때문에 그 요철로부터의 열전도가 확산에 의해 집중보다 빠르다면, 이와 같은 현상은 일어나지 않는다. 따라서, 이 현상을 정리하기 위해서는, 먼저, 부족성분( $\phi \leq 1$ 의 경우는 연료,  $\phi > 1$ 의 경우는 산소)의 확산계수와 미연혼합기의 온도전도율의 비로 있는 Lewis 수  $Le$ 를 계산할 필요가 있다. 여기서,

$$\alpha \equiv \frac{\kappa}{\rho c_p} \tag{4}$$

$$Le \equiv \frac{\alpha}{D_{12}} \tag{5}$$

로 있어,  $\kappa$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ 는 각각 혼합기체의 열전도율, 밀도, 정압비열,  $\alpha$ 는 온도전도율,  $D_{12}$ 는 부족성분과 최대성분으로 있는 질소와의 2성분 확산계수이다. 이들 값은 압력, 온도, 당량비를 고려한다면, 기체분자운동론<sup>(22,23)</sup>으로부터 계산할 수 있다. Table 3에 본 실험에서 이용한 각 혼합기체에 대한 계산결과를 나타낸다.

Table 3으로부터 알 수 있듯이, 수소의 경우, 수소-질소의 2성분 확산계수가 산소-질소의 확산계수를 상회하고, 동시에  $\phi \leq 1$ 에서 Lewis 수가 1보다 작기 때문에, 희박측에서 불안정하게 있다고 말할 수 있다. 메탄의 경우, 확산계수도 산소에 가깝고 Lewis 수도 각 당량비에서 상당히 1에 가깝다. 따라서, 메탄-공기 화염은 확산·열적효과에 있어서는 중립안정에 가깝다고 말할 수 있기 때문에 무엇인가의 다른 요인에 의한 것일 것이다. 이 역할을  $S_r$ 에 따른 확산·열적효과와 연소실 벽면과의 급격한 밀도변화에 의한 유체역학적 불안정 효과가 복합적으로 작용한다고 판단할 수 있다.

Fig. 16의 (a), (b) 및 (c)는  $\phi=1.0$ ,  $S_r=0\%$   $H_2$ 인 경우에 있어서  $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$ ,  $P_1=2.0\text{kg/cm}^2$  및  $P_1=2.5\text{kg/cm}^2$ 에 대한 화염전파과정을 나타낸 것이다. 초기압력 변화에 따른 화염전파형태는 당량비와 수소첨가율을 변화시켰을 때와 달리 큰 차

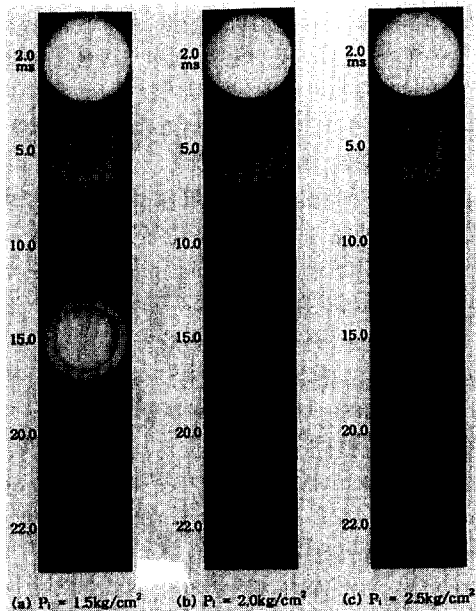


Fig. 16 Effect of initial pressure on flame propagation processes ( $\phi=1.0$ ,  $S_r=0\%$   $H_2$ )

Table 3 Diffusion coefficient, thermometric conductivity and Lewis number

Fuel	Equivalence ratio $\phi$	Diffusion coefficient (mm <sup>2</sup> /s)	Thermometric conductivity (mm <sup>2</sup> /s)	Lewis number
H <sub>2</sub>	0.5	75.959	31.684	0.417
	0.75	75.959	36.095	0.475
	1.0	75.959	40.211	0.529
	1.2	20.471	43.310	2.116
	1.5	20.471	47.662	2.328
	2.0	20.471	54.214	2.648
	2.5	20.471	60.014	2.932
	3.0	20.471	65.180	3.184
	4.0	20.471	73.971	3.614
CH <sub>4</sub>	5.0	20.471	81.185	3.966
	0.8	21.677	21.710	1.002
	0.9	21.677	21.696	1.001
	1.0	21.677	21.682	1.000
	1.1	20.471	21.669	1.059
	1.2	20.471	20.657	1.058
	1.3	20.471	20.645	1.057

이가 없으나, 초기압력이 증가할수록 질량연소율과 화염진파속도가 저하하기 때문<sup>(14)</sup>에 동일한 연소시간에서 화염의 크기는  $P_1$  상대적으로 작다. 일례로, 점화 후 22ms에 있어서  $P_1=1.5\text{kg/cm}^2$ 인 경우에는 화염면이 연소실 벽면에 거의 도달한 반면,  $P_1=2.5\text{kg/cm}^2$ 인 경우에는 화염면이 연소실 벽면으로부터 어느정도 떨어져 있다.

이상, 순메탄가스와 메탄에 수소를 용적비율로 최대 50%까지 첨가한 메탄가스를 사용하였을 때의 연소특성을 고찰한 결과, 수소첨가율이 증가함에 따라 수소가 메탄의 연소촉진제로 작용함으로써 최고압력은 높아지고 전연소시간은 단축되었다. 특히 이와 같은 경향은 희박혼합기 측에서 더욱 현저하게 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 수소첨가율이 증가함에 따라 화염온도의 증가로 인해 NO 농도는 더 증대되는 경향을 보이고 있었다. 따라서, 이와 같은 점을 감안해 볼 때 천연가스 차량의 배출가스 문제와 연비문제를 해결하기 위해서는 연소실 개조나 점화장치 개선 등과 같은 하드웨어 측면에서의 해결방안도 주요하지만, 천연가스에 수소를 첨가하여 희박운전하는 방안도 아주 유효할 것으로 판단되었다.

#### 4. 결 론

저공해 수소첨가 천연가스차량 개발시 기초자료로 활용하기 위해, 원통형의 정적연소실을 이용하여 당량비, 수소첨가율 및 초기압력 변화에 따른 메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 메탄-수소-공기 예혼합기의 최고압력은 이론 혼합기보다 약간 농후한 당량비( $\phi=1.1$ )에서 가장 높으며, 수소첨가율과 초기압력이 증가할수록 높아진다. 전연소시간은  $\phi=1.1$  부근에서 가장 짧으며, 초기압력이 낮고 수소첨가율이 증가할수록 단축된다. 한편, 수소첨가에 따른 최고압력의 증가 및 전연소시간의 단축은 희박혼합기 측에서 가장 현저하게 나타났다.

(2) 메탄-수소-공기 예혼합기의 화염온도는  $\phi=1.0$  부근에서 가장 높고 수소첨가율과 초기압력이 증가할수록 높아진다.

(3) 메탄-수소-공기 예혼합기의 NO 농도는 이론 혼합기보다 약간 희박한 당량비( $\phi=0.9$ )에서 가장 높고 수소첨가율과 초기압력이 증가할수록 높아진

다.

(4) 메탄-수소-공기 예혼합기의 화염전파과정은 수소를 첨가하지 않은 이론혼합기에서 구면형의 층류화염으로 진행되고, 과농 또는 희박혼합기에서 타원형의 층류화염으로 진행된다. 그러나, 수소첨가율이 증가하게 되면 불안정한 타원형의 층류화염으로 천이되었으며, 이와같은 경향은 희박혼합기측에서 가장 현저하게 나타난다. 또한, 초기압력 변화에 따른 화염전파형태에는 큰 차이가 없으나 초기압력이 증가할수록 화염의 크기는 작아졌다.

## 후 기

본 연구는 과학기술처에서 지원하는 에너지절약 연구사업 유도를 위한 기초연구 중 초저공해 차량 개발 연구수행의 일환으로 얻어진 결과의 일부로써, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Waldron, G. J. and Allen, R. G., 1991, "Natural Gas for Vehicles(NGV)," *SAE Paper* 912558.
- (2) Andrea Unich, et al., 1993, "Natural Gas : A Promising Fuel for I. C. Engine," *SAE Paper* 930929.
- (3) Hundleby, G. E., 1989, "Low Emissions Approaches for Heavy-Duty Gas-Powered Urban Vehicles," *SAE Paper* 892134.
- (4) Mitsunori Ishii, 1993, "Analysis of Emissions Reduction Potential and Power Output of Natural Gas Engine," *Japanese Automotive Technology*, Vol. 47, No. 10, pp. 60~65.
- (5) 中園徹, 1992, "稀薄ガス機関に関する研究(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.
- (6) 池上詢 外 4人, 1993, "火花點火ガス機関の稀薄燃焼," *日本機械學會論文集(B編)*, 第59卷, 第562號, pp. 2094~2099.
- (7) Charlton, S. J., Jager, D. J. and Wilson, M., 1990, "Computer Modeling and Experimental Investigation of a Lean Burn Natural Gas Engine," *SAE Paper* 900228.
- (8) 古野 志健男, 井口 哲, 井上 惠太, 1994, "局部成層混合氣の稀薄燃焼特性," *自動車技術會學術講演會前刷集*, pp. 101~104.
- (9) 石井一洋, 氏家康成, 河野通方, 西野 宏, 1991, "強亂れ場における可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.
- (10) Harrington, J. A., Shishu, R. C. and Asik, J. R., 1974, "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 Paper* 740188.
- (11) *Advanced Hydrogen/Methane Utilization Technology Demonstration*, 1994, Hydrogen Consultants INC., Final Report No. XR-2-11175-1.
- (12) 森 外 14人, 1975, *日本機械學會 2P-SC 23 成果報告書*, 1975-1~3.
- (13) 大八木 重治, 松井 淳, 吉橋照夫, 1994, "定容容器内お傳ばする火焰面の不安定性," *日本機械學會論文集(B編)*, 第60卷, 第569號, pp. 300~307.
- (14) Lewis, B. and von Elbe, G., 1961, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 2nd Edition, New York, Academic Press, pp. 381.
- (15) 김봉식, 권철홍, 1995, "메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성(I)," *한국자동차공학회 논문집*, 제3권, 제3호, pp. 129~139.
- (16) Karim, G. A., 1983, "Some Considerations of the Safety of Methane(CNG), as an Automotive Fuel - Comparison with Gasoline, Propane and Hydrogen Operation," *SAE paper* 830267.
- (17) Heywood, J. B., 1989, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York, McGRAW-HILL Book Company, pp. 572.
- (18) 小笠原光信 外 3人, 1977, "豫混合定容燃焼器におけるNO發生に関する實驗と解析," *日本自動車研究所研究速報*, No. 61, pp. 27~32.
- (19) Markstein, G. H., 1952, *Journal of Aeronaut. Science*, Vol. 18, pp. 199.
- (20) Sivashinsky, G. I., 1983, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 15, pp. 179.
- (21) Groff, E. G., 1982, *Combustion and Flame*, Vol. 48, pp. 51~65.

- (22) Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F. and Bird, R. B., 1954, *Molecular Theory of Gases and Liquids*, John Wiley & Sons, pp. 514.
- (23) 大八木 重治, 松井 淳, 吉橋照夫, 1994, 日本機械學會論文集(B편), 第60卷, 第569號, pp. 300~307.