

반복점화장치 사용시 정적연소실내 메탄-수소 희박혼합기의 연소특성 연구(II)

김 봉 석[†]

원주대학 동력기계과

A Study on Combustion Characteristics of the Methane-Hydrogen Lean Mixture by Using Multiple Spark Capacity Discharge in a CVCC (II)

Bong-Seock Kim[†]

Department of Mechanical Engineering for Power, Wonju National College

요 약

본 연구에서는 정적연소실을 이용하여 차량용 대체연료로써 메탄 및 수소첨가 메탄의 연소특성을 수소첨가율, 점화위치 및 점화방법에 따라 고찰하였다. 그 결과, 중심점화이고 수소를 첨가하지 않은 순수 메탄의 화염전파과정은 타원형으로 전파하나 수소첨가율이 증가함에 따라 화염면상에 매우 규칙적인 세포구조를 가진 불안정한 타원형화염으로 천이되었고 연소속도도 증가하였다. 또한, 벽면 및 0.5R 점화이고 수소를 첨가하지 않은 순수 메탄의 화염전파과정은 불안정한 타원형으로 전파하고 있었지만, 수소첨가율이 증가함에 따라 연소중기에 불안정한 타원형에서 평면형으로 천이 됐다가 연소말기에는 화염면 선단이 움푹 패인 매우 불규칙한 세포구조를 갖는 썩기형으로 변화되었으며 연소속도도 증가하였다. 한편, 세 가지 점화위치 모두에 있어서 MSCDI와 CDI 사용에 따른 화염전파형태는 외견상 큰 차이는 없었지만, 동일시간에 MSCDI 장치의 화염면적은 CDI의 화염면적보다 약간 더 크게 나타났다.

주요어: 반복점화장치, 정적연소실, 메탄-수소 희박혼합기, 연소특성

Abstract—In the present study, the combustion characteristics of methane and hydrogen-supplemented methane as alternative fuels for automotive vehicles were investigated at various hydrogen substitution rate, ignition position and ignition methods in a CVCC. The main results obtained from the study can be summarized as follow. In case of center ignition and neat methane-air mixture, the flame propagation processes are propagated with an elliptical shape, but they are changed an instable elliptical shape flame with very regular cells and higher velocity by increasing the hydrogen supplement rate. In case of side, 0.5R ignition and neat methane-air mixture, the flame propagation processes are propagated with an instable elliptical shape flame, but they are changed from an instable elliptical shape to wedge shape flame with very irregular cells and higher velocity by increasing the hydrogen supplement rate. Although the flame propagation shape with ignition position and ignition devices was not differ, the flame area of MSCDI device was a little larger than it of CDI device at the same time.

Key words: MSCDI, CVCC, Methane-hydrogen lean mixture, Combustion characteristics

[†]To whom correspondence should be addressed.
Department of Mechanical Engineering for Power, Wonju
National College
Tel: 033-760-8416
E-mail: bskim@wonju.ac.kr

1. 서 론

천연가스는 내노크성이 우수하여 기관의 고압축비화에 의해 출력과 열효율을 높이는 것이 가능하며, 지구 온난화의 원인의 하나로 되는 CO₂의 배출량은 석유계 연료에 비해 작고, SO₂는 거의 배출되지 않는 뛰어난 특성을 가지고 있다. 그러나, 고압축비화에 따른 NO_x 농도의 증가라는 문제점이 제기되기 때문에 선진각국의 자동차 업계에서는 연료의 경제성 및 배기가스 저감이라는 측면에서 희박연소방식의 불꽃점화 천연가스엔진의 개발과 상용화에 관심을 집중시키고 있다^{[1][2]}.

한편, 천연가스를 희박연소시킬 경우에는 상기와 같은 장점이 있는 반면에 연소속도의 저하와 초기점화의 불안정성과 같은 문제점이 남아있기 때문에 이에 대한 해결이 선결과제라 하겠다. 희박연소로 인한 연소속도의 저하문제는 점화시기 부근에서 연소실내에 강한 난류강도를 가진 유동을 발생시킨다거나 연소속도가 빠른 수소를 천연가스에 소량 첨가하는 등의 방법으로 해결할 수 있다. 희박연소엔진의 초기점화시 불안정성은 부실을 갖는 연소실을 사용하여 부실에는 농후한 혼합기를, 주실에는 희박한 혼합기를 공급하는 방안과 점화플러그 주위의 혼합기는 평균 혼합기보다 농후한 상태를 이루고 이외의 지역에서는 평균 공연비보다 더 희박한 상태가 되도록 하는 연료공급의 성층화 방안 그리고 기존의 점화장치보다 더욱 강력한 점화장치를 사용하여 해결하는 방안 등으로 대처하고 있다^{[3][7]}.

이들 방안 중, 난류강도 고려와 연료의 성층화에 대한 연구 등은 다수 행해져 왔지만, 수소첨가와 강력한 점화장치를 사용하여 재통적으로 조사한 연구는 볼 수 없었다. 이에 실제기관의 연소과정을 보다 잘 모의할 수 있도록 한 가시화용 정적연소기를 제작하고, 연소실내의 메탄-공기 희박혼합기의 유동이 정지된 조건하에서 수소첨가율, 점화위치 및 점화방법에 따른 연소실험을 행하였다.

본보는 전보^[8]의 연소압력, 연소시간, 화염온도, NO 농도 및 연소축진율에 대한 결과에 이어 화염전파과정에 대해 고찰함으로써 저연비 희박엔진용 기술개발에 중요한 설계 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도로써 정적연소실(내경 80 mm, 폭 40 mm), 점화장치, 혼합기 제조장치, 압력측정장치, 온도측정장치, NO 측정장치, 쉐리렌 사진 촬영장치, 데이터 수집 및 해석장치로 구성되어 있다. 이들 장치에 대한 설명은 참고문헌^{[8][13][14]}에 자세히 기술하였으므로, 여기서는 점화위치와 쉐리렌사진 촬영장치에 대해서만 간략하게 설명하기로 한다.

점화위치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 연소실 벽면으로부터 5mm지점(side ignition position, 이하 side ignition으로 표기), 연소실 반경의 1/2지점(0.5R ignition

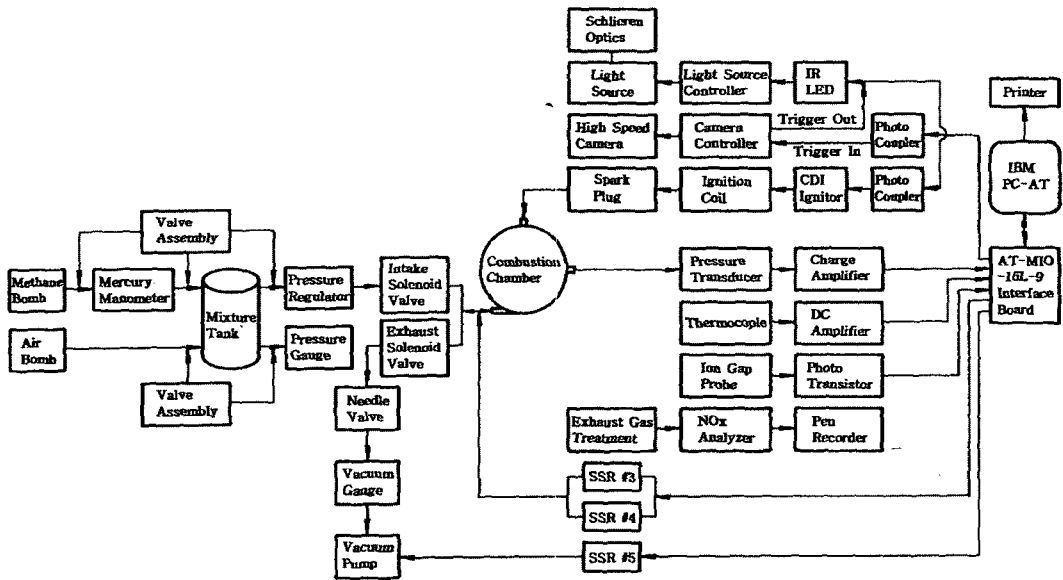


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

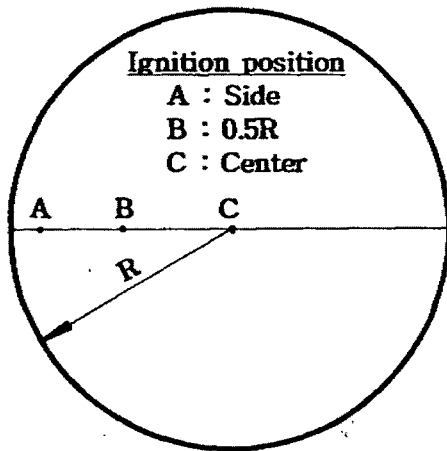


Fig. 2. Ignition position.

position, 이하 0.5R ignition으로 표기), 연소실 중심지점(center ignition position, 이하 center ignition으로 표기)으로 전극 길이가 서로 다르게 제작된 점화플러그를 각각 사용하였다.

연소실내 혼합기의 점화를 위해 사용한 용량방전 점화장치(capacity discharge igniter, 이하 CDI로 표기)는⁸⁾ 100 k Ω 의 저항을 통하여 4 μ F 용량의 콘덴서에 직류전압 200V로 일정하게 충전시킨 후, 고속도카메라의 shutter open signal이나 컴퓨터의 트리거신호와 같이 외부에서 오는 pulse에 의해 1회의 전기방전이 이루어지게 되어있다. 이때 콘덴서에 충전된 전기 에너지의 용량은 $E=1/2 CV^2=80$ mJ로 전 실험에서 일정하게 유지, 사용하였다. 또한, 점화에너지 및 점화회수를 증가시키기 위해 사용한 다회수 용량방전 점화장치(multiple spark capacity discharge igniter, 이하 MSCDI로 표기)는 2차 전압이 400 V의 고압이므로 희박혼합기 영역에서도 실험현상이 없을 뿐만 아니라 완전방전으로 인해 유해배기가스가 저감될 수 있도록 제작한 것으로, 본 실험에서 점화회수는 5회 연속방전으로 고정하였다.

연소실내의 화염전파과정은 Fig. 3에서와 같이 Light source(Cordin사 model 359, xenon pulse type, maximum energy : 1100 mJ), Schlieren concave mirror(Spindler & Hoyer사 model SP 15, 초점거리 1500 mm, 유효직경 250 mm) 등으로 구성된 광학시스템으로 가시화 하였다.

광원에서 나온 광선은 집광렌즈를 통해, 직경 1 mm의 핀홀을 지나 1차 쉐리렌 오목거울에 의해 평행광선으로 된 후, 연소실을 통과하여 동일한 제원의 2차 쉐리렌 오목거울에 의해 집광되어 고속도카메라로 보내진다. 고속도카메라 직전 2차 쉐리렌 오목거울 초점거리

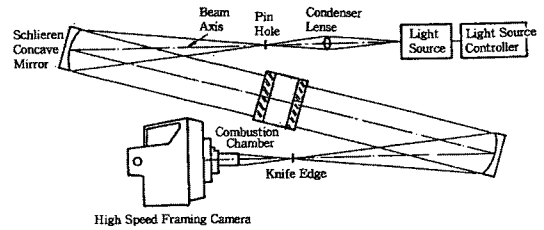


Fig. 3. Schlieren optics arrangement.

에 가로 3 mm, 세로 6 mm의 Slit형의 Knife edge를 설치하여 연소실내의 밀도구배에 의해 생긴 굴절된 빛의 일부를 차단함으로써 고속도카메라의 필름면에 쉐리렌상이 맺히게 하였다. 쉐리렌사진 촬영에는 드럼형의 16 mm 고속도카메라(Cordin사 model 350F, maximum framing rate : 35,000 fps)와 ASA 100의 Kodak제 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), Monitor 등으로 구성된 화상처리장치(image processing system)로 처리하여 화염반경을 계산하였다.¹³⁾¹⁴⁾

2.2. 실험방법

실험은 혼합기 제조장치내에서 균일하게 교반되어 만들어진 메탄-공기(또는 메탄-수소-공기) 예혼합기를 미리 진공상태로 소기된 연소실로 실온하에서 충전하고, 유동이 완전히 정지된 3분후에 시작하였다. 이때 연료-공기의 혼합비는 $\phi=0.6$, 초기압력은 $P_i=1.5$ kg/cm²으로 각각 고정하였다.

Table 1은 전체적인 실험조건을 나타낸 것으로 실험 변수는 수소첨가율, 점화위치 및 점화 방법이며, 메탄에 대한 수소첨가율 S_c 은 다음 식(1)로 정의하였다.

Table 1. Experimental conditions.

Term	Specification
Combustion chamber volume, V(cc)	201
Fuel/Oxidizer	Methane/Air, Methane-Hydrogen/Air
Equivalence ratio, ϕ	0.6
Hydrogen supplement rate, S_c , (Vol% H ₂)	0, 10, 20, 30, 40, 50
Ignition position	Side, 0.5R, Center
Ignition method	CDI, MSCDI
Initial pressure, P_i (kg/cm ²)	1.5
Initial temperature, T_i (K)	Ambient

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

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4의 (a)와 (b)는 $\phi=0.6$, center ignition인 경우에 있어서 CDI를 사용했을 때의 화염전파과정으로, $S_r=0\%$ H_2 과 $S_r=50\%$ H_2 에 대해 각각 나타난 것이다. 먼저, 수소를 첨가하지 않은 $S_r=0\%$ H_2 인 경우의 화염전파는 상당히 느리게 진행될 뿐만 아니라, 점화위치가 연소실의 중심임에도 불구하고 연소실의 위쪽으로 치우쳐 전파하는 타원형을 띠고 있다. 그러나, 수소첨가율이 최대인 $S_r=50\%$ H_2 로 증가하게 되면 $S_r=0\%$ H_2 에 비해 초기화염이 빠르게 성장하고 있으며, 20 ms부터 화염의 윗면으로부터 연소실 종 방향으로 길게 화염의 분열현상이 나타나 45 ms 이후에는 화염면상에 세포분열과 같은 cell이 발

생하여 미세한 구조를 가진 불안정한 층류화염으로 천이되고 있다. 뿐만 아니라, 화염전파시간도 수소를 첨가하지 않은 순수 메탄-공기 예혼합기의 경우에 비해 더욱 단축되고 있다. 이와 같이 메탄-공기 예혼합기에 수소를 첨가함에 따라 화염면상에 세포분열과 같은 셀상의 불안정성이 생기는 원인에 대해서는 Markstein^[9], Sivashinsky^[10], Groff^[11] 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 instability) 효과와 연소실 벽면과의 급격한 밀도변화에 의한 유체역학적 불안정(hydrodynamic instability) 효과 등이 복합적으로 작용하기 때문으로 사료된다.

또한, 메탄에 수소를 첨가함에 따라 화염전파시간이 단

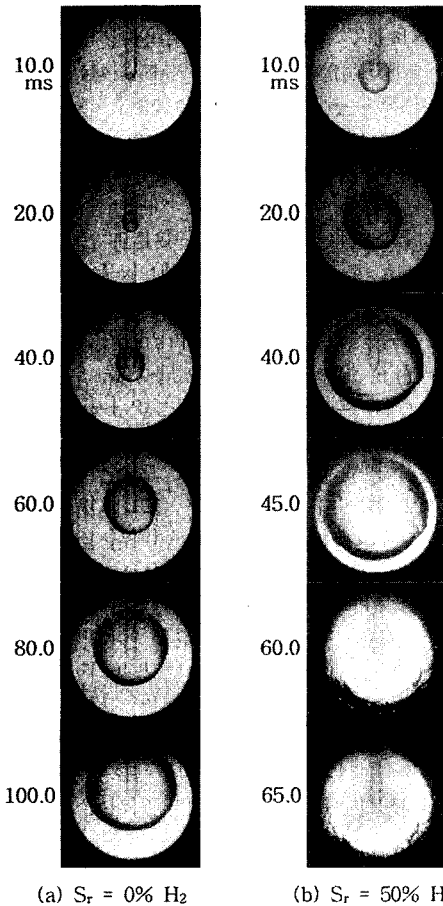


Fig. 4. Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation process ($\phi=0.6$, center ignition, CDI).

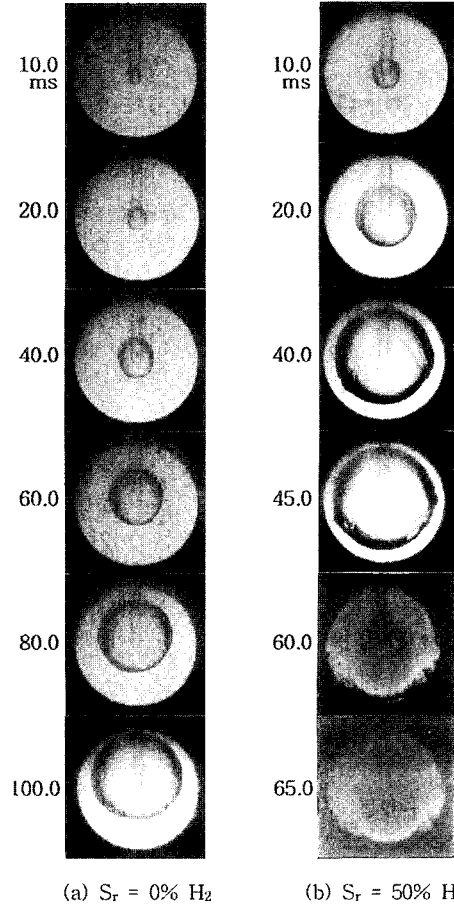


Fig. 5. Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation process ($\phi=0.6$, center ignition, MSCDI).

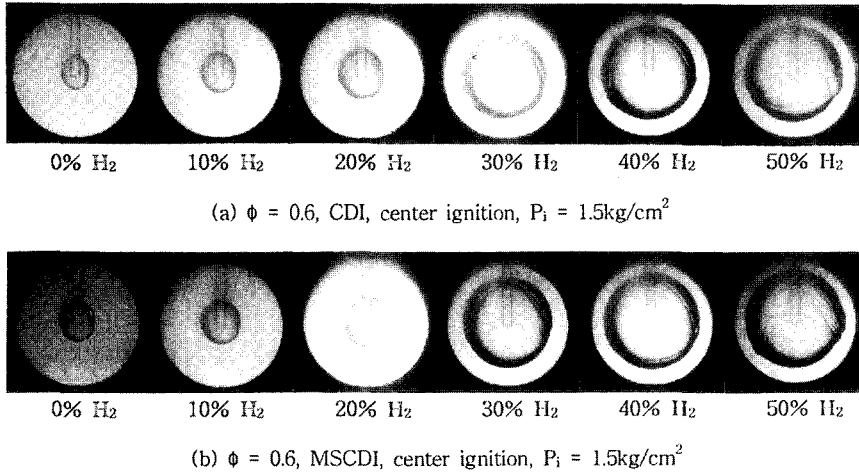


Fig. 6. Effect of hydrogen supplement rate and ignition device on flame propagation process ($\phi=0.6$, center ignition, 40 ms from spark).

측되는 것은 메탄에 비해 7배 정도의 연소속도(수소의 최대 층류연소속도 : 278 cm/s, 메탄의 최대 층류연소속도 : 41 cm/s)를 갖는 수소가 메탄의 연소속진제로 작용하기 때문이다^[12]. 특히 $\phi=0.6$ 과 같은 희박혼합기측에서 수소첨가량 증가에 따라 이런 경향이 뚜렷해지는 것은 수소가 희박혼합기측에서 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. 5의 (a)와 (b)는 $\phi=0.6$, center ignition인 경우에 있어서 MSCDI를 사용했을 때의 화염전파과정으로, $S_r=0\%$ H₂과 $S_r=50\%$ H₂에 대해 각각 나타낸 것이다. MSCDI를 사용했을 때의 화염전파형태는 CDI 사용했을 때의 화염전파형태에 비해 외견상 큰 차이는 나타나고 있지 않지만, 화상처리장치(image processing system)에 의해 분석^{[13][14]}해 보면, 동일시간에 외견상의 화염면적이 약간 더 크게 나타나고 있다.

즉, Fig. 6의 (a)와 (b)에서 볼 수 있듯이, 동일시간에 외견상의 화염면적은 MSCDI 사용시가 CDI 사용시에 비해 약간 더 크게 나타나고 있다. Fig. 6은 $\phi=0.6$, center ignition인 경우에 있어서 2가지 점화장치를 사용했을 때의 화염전파형태를 점화 후 40 ms에서 촬영한 것이다. 사진으로부터 볼 수 있는 바와 같이, 동일시간에 있어서 화염전파형태는 수소첨가율이 증가함에 따라 점차 더 크게 나타나고 있으며, $S_r=30\%$ H₂인 경우부터 화염면상에 연소실 종 방향으로 길게 화염의 분열현상이 나타나고 있다.

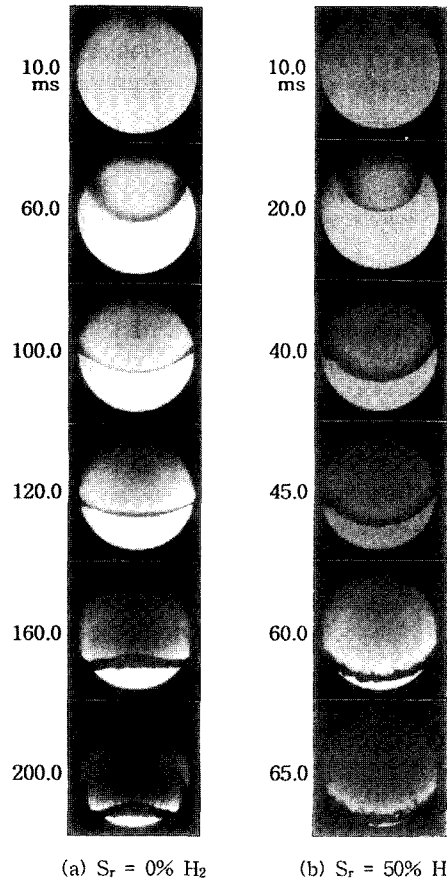


Fig. 7. Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation process ($\phi=0.6$, side ignition, MSCDI).

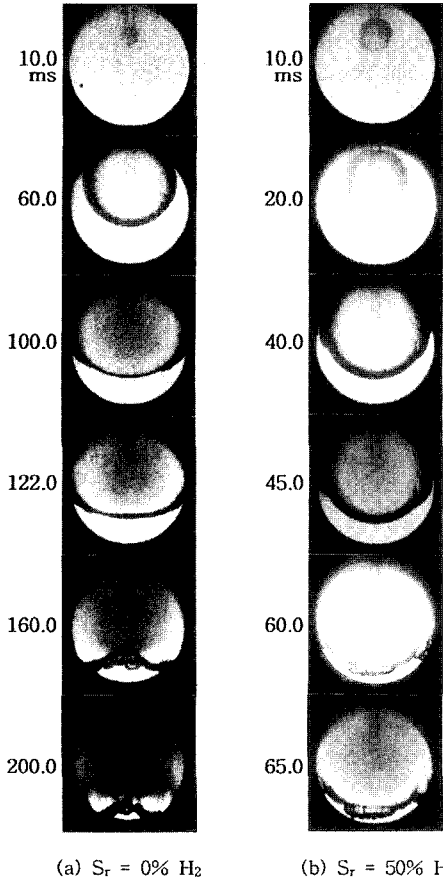


Fig. 8. Effect of hydrogen supplement rate on flame propagation process ($\phi=0.6$, 0.5R ignition, MSCDI).

Fig. 7의 (a)와 (b)는 $\phi=0.6$, side ignition인 경우에 있어서 MSCDI를 사용했을 때의 화염전파과정으로, $S_r=0\%$ H_2 과 $S_r=50\%$ H_2 에 대해 각각 나타낸 것이다. 먼저, 수소를 첨가하지 않은 $S_r=0\%$ H_2 인 경우의 화염전파형태는 점화 후 구형에서 타원형으로 변화되고 있다. 또한, 화염전파는 center ignition의 경우에 비해 상당히 느리게 진행될 뿐만 아니라, 수소를 첨가하지 않은 순수 메탄-공기 예혼합기임에도 불구하고 100 ms 이후부터 점화플러그를 중심으로 화염면상에 연소실 종방향으로 길게 화염의 분열현상이 발생했다가, 160 ms 이후에는 화염면 선단에 세포분열과 같은 cell이 발생하여 미세한 구조를 가진 불안정한 층류화염으로 천이되고 있다. 이와 같은 화염면의 거동은 전술한 바와 같이 연소 압력선도에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 배기배출물 조성에도 영향을 미치는 것으로 보고 되고 있다^{[11][12]}. 이러한 원인으로는, 점화위치 즉 화염전파거리와 연소실 벽면과의 급격한 밀도변화에 의한 유체역학적 불안정(hydrodynamic instability)효과가 작용하기 때문으로 사료된다. 그러나, $S_r=50\%$ H_2 인 경우에는 화염전파도 빠르고, 화염형태도 $S_r=0\%$ H_2 일때와 달리 연소중기에 타원형에서 평면형으로 천이됐다가 연소말기에는 화염면 선단이 움푹 패인 썸기형(wedge shape)으로 진행되고 있다. 이와 같이 $S_r=50\%$ H_2 인 경우, 연소말기에 화염면 선단이 움푹 패인 썸기형으로 진행되는 현상은 화염전파방향이 긴 원형 또는 육면체를 갖는 용기내에서 주로 나타나는 것으로 이러한 화염면의 변화과정에 대해서 기연가스 유동설^[15], 미연가스 유동설^[16], 압력파설^[17] 및 점성설^[18] 등과 같은 설은 있지만 현재까지 정설로 되어 있는 것은 없다.

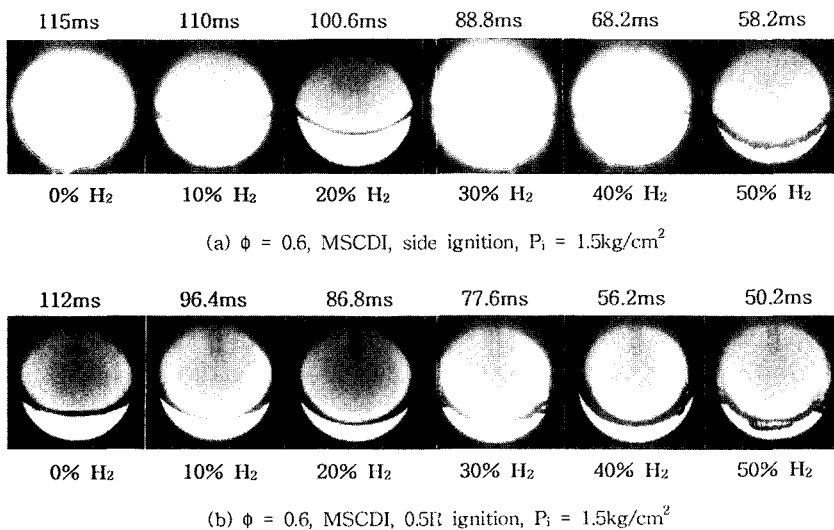


Fig. 9. Flame propagation shapes at occur the pressure fluctuation ($\phi=0.6$).

Fig. 8의 (a)와 (b)는 $\phi=0.6$, 0.5R ignition인 경우에 있어서 MSCDI를 사용했을 때의 화염전파과정으로, $S_r=0\%$ H_2 과 $S_r=50\%$ H_2 에 대해 각각 나타낸 것이다. 0.5R ignition일 때는 side ignition일 때와 달리, 수소를 첨가하지 않은 $S_r=0\%$ H_2 인 경우의 화염전파과정은 연소중기부터 말기까지 타원형으로 진행되며, 연소말기에 이르러 화염면 선단에 다소 큰 스케일의 cell을 갖는 불안정한 층류화염이 형성되고 있다. 그러나, $S_r=50\%$ H_2 일 때의 화염전파과정은 side ignition 일 때와 같이 연소초기에는 타원형으로, 연소중기에는 평면형으로 그리고 연소말기에는 화염면 선단이 비교적 완만하게 패인 썩기형으로 진행 되고 있다.

Fig. 9는 Fig. 7과 Fig. 8 즉, Side ignition과 0.5R ignition일 때 압력신도상에 변곡점이 발생하는 순간의 화염전파과정을 나타낸 것으로, 수소첨가율이 증가할수록 변곡점¹⁸⁾이 발생하는 시간이 단축되고 있으며, 화염면 선단에 불규칙한 cell 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 상술한 바와 같이, 수소첨가량 증대로 인해 연소속도가 증가하기 때문이다. 또한, 수소첨가율이 동일한 경우, Side ignition일 때가 0.5R ignition일 때에 비해 외견상의 화염면적이 작게 나타나고 있는데, 이는 화염전파거리가 증대됨에 따라 연소실 벽면으로의 열손실이 증가하기 때문이다. 따라서, 희박연소방식을 채택하는 천연가스엔진의 점화플러그는 가능한 한 화염전파거리가 짧은 위치로 선정하여 장착하여야 할 것으로 사료 된다.

4. 결 론

희박연소방식을 채택하고 있는 천연가스엔진의 문제점을 해결하기 위한 한 방안으로, 정적연소실을 이용하여 연소실내의 혼합기 유동이 정지된 상태에서 수소첨가율, 점화위치 및 점화장치 변화에 따른 희박혼합기의 화염전파과정을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Center ignition일 때의 화염전파과정은 수소를 첨가하지 않았을 경우에는 매끄러운 타원형으로 진행되었으나 수소첨가율이 증가 하게 되면 화염전파도 빠르고, 화염면상에 세포분열과 같은 cell이 발생하여 미세한 구조를 가진 불안정한 층류화염으로 천이 되었다.

2) Side와 0.5R ignition일 때, 수소를 첨가하지 않은 경우의 화염전파형태는 미세한 구조를 가진 불안정한 층류화염으로 천이 되었으며, 수소첨가율이 최대 50%로 증가하게 되면 연소중기에 타원형에서 평면형으로 천이 됐다 연소말기에는 화염면 선단이 움푹 패인 썩기형으로 진행되었다.

3) 한편, 세 가지 점화위치 모두에 있어서 MSCDI와 CDI 사용에 따른 화염전파형태는 외견상 큰 차이는 없

었지만, 동일시간에 MSCDI의 화염면적이 CDI의 화염면적보다 약간 더 크게 나타났다.

따라서, 통상 이혼합기로 운전되고 있는 현 천연가스차량의 희박운전을 하기 위해서는 천연가스에 수소첨가율을 첨가하고 화염전파거리가 가장 짧은 위치에 점화플러그를 설치하여 반복점화방식을 채택하는 것이 가장 효과적 방안으로 판명됐다.

후 기

본 연구는 과학기술부 에너지 절약 연구사업 유도를 위한 기초연구의 연구비 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Elias, T.I. and Hunt, G.L.: "A quality function development approach to identifying alternative fuels and vehicles technology needs", SAE Paper 931784 (1993).
2. 卜藏傳郎 外 2人: "YANMAR-NHLG形稀薄 燃焼ガスエンジンの研究と開發", 内燃機關, 31(387), 87 (1992).
3. 石井一洋, 氏家康成, 河野通方, 西野 宏: "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, 15 (1991).
4. Advanced Hydrogen/Methane Utilization Technology Demonstration, Hydrogen Consultants INC.: Final Report No. XR-2-11175-1 (1994).
5. 中園徹: "稀薄ガス機關に關する研究(副室式稀薄燃焼における主室形狀の影響)", 日本機械學 會論文集(B編), 58(550), 1943 (1992).
6. 古野 志健男, 井口 哲, 井上 憲太: "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, 101 (1994).
7. Harrington, J.A., Shishu, R.C. and Asik, J.R.: "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).
8. 김봉식: "반복점화장치 사용시 정적연소실내 메탄-수소 희박혼합기의 연소특성(I)", 한국에너지공학회 논문집, 12(2), 124 (2003).
9. Markstein, G.H.: Journal of Aeronaut. Science, 18, 199 (1952).
10. Sivashinsky, G.I.: Annual Review of Fluid Mechanics, 15, 179 (1983).
11. Groff, E.G.: Combustion and Flame, 48, 51 (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. 김봉석 외: "메탄-수소-공기 예혼합기의 연소 특성(II)", 한국자동차공학회 논문집, 4(3), 156 (1996).
14. 김봉석, 이영재, 류정인: "저공해 수소첨가 천연가스 차량 개발을 위한 기초연구", 대한기계학회논문집(B), 21(3), 358 (1997).
15. Ellis, O.D.: Fuel Practice, 7, 449, 502-526 (1928).
16. Tabaczynski, R.J., *et al.*: J. Fluid. Mech., 42, 249 (1970).
17. Strehlow, R.A.: Fundamental of Combustion, International Textbook Company, 274 (1968).
18. Lewis, B. and von Elbe, G.: Combustion, Flames and Explosions of Gases, 2nd Edition, New York, Academic Press, 298 (1961).