

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

김 봉 석

원주대학 동력기계과

E-mail : bskim@sky.wonju.ac.kr

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

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 연소효율, 최고연소압력 등과 같은 연소특성을 악화시키지 않고 희박 혼합기 조건하에서도 MSCDI 장치 사용에 의해 전 연소시간과 NO 농도를 저감시킬 수 있었다. 또한, 수소를 천연가스의 주 성분인 메탄에 혼합함에 따라 전 연소시간은 순수 메탄만을 사용할 때에 비해 단축되었으며, 이와 동시에 연소촉진율도 순수 메탄만을 사용하였을 때에 비해 상당히 향상되었다.

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. As a result, it is possible to decrease the total burning time and to obtain the reduction of NO concentration by using MSCDI device under the lean mixture conditions without deteriorating combustion characteristics such as combustion efficiency, maximum combustion pressure etc.. And by mixing hydrogen into methane, it was found that the reduction of the total burning time was obtained, in comparison with the use of methane only ; and at the same time, the combustion promotion rate was improved remarkably in comparison with the use of methane only.

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)~3)}

한편, 천연가스를 희박연소시킬 경우에는 상기와 같은 장점이 있는 반면에 연소속도의 저하와 초기점화의 불

안정성과 같은 문제점이 남아있기 때문에 이에 대한 해결이 선결과제라 하겠다.

희박연소로 인한 연소속도의 저하문제는 점화 시기 부근에서 연소실내에 강한 난류강도를 가진 유동을 발생시킨다거나 연소속도가 빠른 수소를 천연가스에 소량 첨가하는 등의 방법으로 해결할 수 있다. 희박연소엔진의 초기점화의 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 상층화 방안 그리고 기존의 점화장치보다 더욱 강력한 점화장치를 사용하여 해결하는 방안 등으로 대처하고 있

다.¹³⁾⁴⁷⁾

이들 방안 중, 난류강도 고려와 연료의 성층화에 대한 연구 등은 다수 행해져 왔지만, 수소 첨가와 강력한 점화장치를 사용하여 계통적으로 조사한 연구는 볼 수 없었다. 이에 실제기관의 연소 과정을 보다 잘 모의할 수 있도록 한 가시화용 정적연소기를 제작하고, 연소실내의 메탄-공기 희박혼합기의 유동이 정지된 조건하에서 수소첨가율, 점화위치 및 점화방법에 따른 연구를 수행함으로써, 저연비 희박연진용 기술개발에 중요한 설계자료를 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, 쉐리텐 사진 촬영장치, 데이터 수집 및 해석장치로 구성되어 있다. 이들 장치에 대한 설명은 참고문헌¹⁸⁾¹¹⁾에 자세히 기술하였으므로, 여기서는 점화위치와 점화장치에 대해서만 간략하게 설명하기로 한다.

점화위치는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 연소실 벽면으로부터 5 mm 지점(side ignition position, 이하 side ignition으로 표기), 연소실 반경의 1/2 지점(0.5R ignition position, 이하 0.5R ignition으로 표기), 연소실 중심지점(center ignition position, 이하 center ignition으로 표기)으로 전극길이가 서로 다르게 제작된 점화플러그를 각

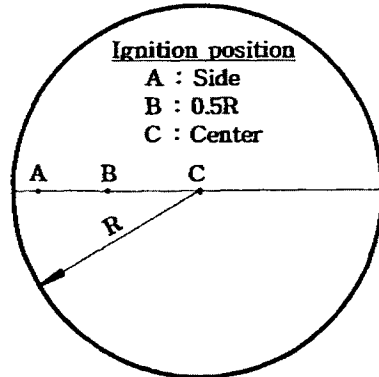


Fig. 2. Ignition position.

각 사용하였다.

연소실내 혼합기의 점화를 위해 사용한 용량방전 점화장치(capacity discharge igniter, 이하 CDI로 표기)는¹⁸⁾ 100 kΩ의 저항을 통하여 4 μF 용량의 콘덴서에 직류 전압 200 V로 일정하게 충전시킨 후, 고속도카메라의 shutter open signal이나 컴퓨터의 트리거신호와 같이 외부에서 오는 pulse에 의해 1회의 전기방전이 이루어지게 되어있다. 이때 콘덴서에 충전된 전기 에너지의 용량은 $E=1/2 CV^2=80mJ$ 로 전 실험에서 일정하게 유지, 사용하였다.

2-2. 실험방법

실험은 혼합기 제조장치내에서 균일하게 교반되어 만

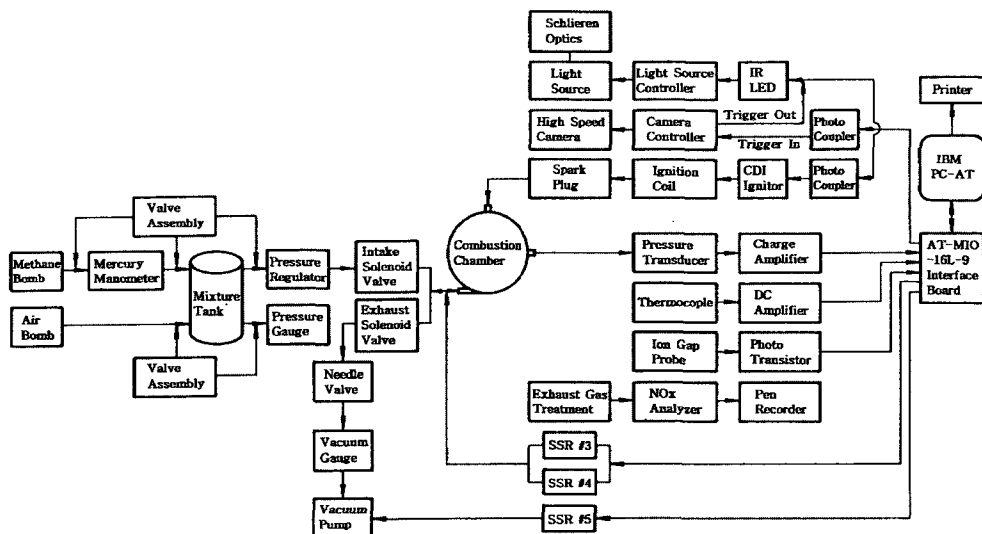


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

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, Sr(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

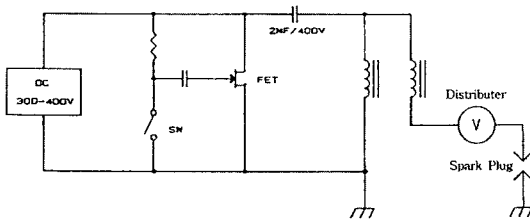


Fig. 3. Circuit diagram of MSCDI.

들어진 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 $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$ 으로 각각 고정하였다.^[8]

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

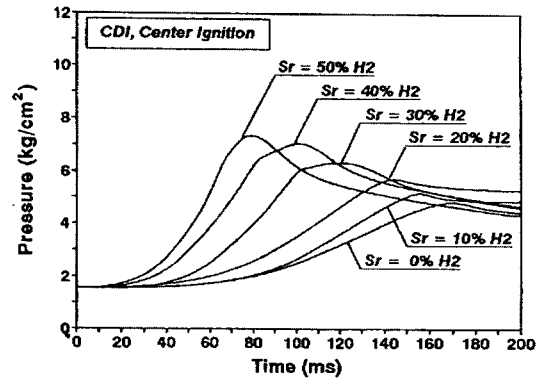
$$S_r = \frac{H_2}{CH_4 + H_2} (\text{Vol\% H}_2) \quad (1)$$

Fig. 3에는 점화에너지 및 점화회수를 증가시키기 위해 사용한 다회수 용량방전 점화장치(multiple spark capacity discharge igniter, 이하 MSCDI로 표기)의 회로도를 나타냈다. 이 MSCDI는 2차 전압이 400 V(160 mJ)의 고압이므로 희박혼합기 영역에서도 실화현상이 없을 뿐만 아니라 완전방전으로 인해 유해배기가스가 저감될 수 있도록 제작한 것이다.^[12] 한편, 본 실험에서 점화 회수는 5회 연속방전으로 고정하였다.

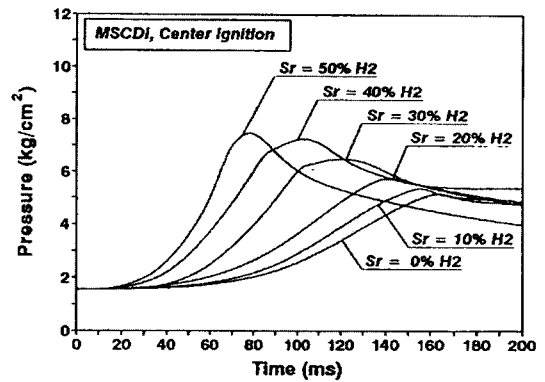
3. 실험결과 및 고찰

3-1. 연소압력 및 연소시간

Fig. 4의 (a)와 (b)는 $\phi=0.6$, center ignition인 경우에



(a) CDI



(b) MSCDI

Fig. 4. Effect of hydrogen supplement rate and ignition device on pressure-time traces($\phi=0.6$, center ignition).

있어서, CDI와 MSCDI를 사용했을 때의 수소첨가율 변화에 따른 압력선도를 각각 나타낸 것이다. CDI와 MSCDI 모두 수소첨가율이 증가함에 따라 연소압력은 증가하고 연소시간^[8]은 단축되고 있다. 일례로, CDI에 의해 혼합기를 연소시켰을 경우 $S_r=50\% \text{ H}_2$ 는 $S_r=0\% \text{ H}_2$ 에 비해 최고연소압력(P_{max})은 51.6% 정도 증가하고, 전 연소시간(t_{max})은 53% 정도 단축된다. 이러한 연소개선효과에 의해 수소를 최대 50%까지 첨가했을 때의 최고연소압력은 Fig. 5에서와 같이 수소를 첨가하지 않은 이론혼합기($\phi=1.0$)의 연소압력에 비해 18%(MSCDI)~ 20%(CDI) 밖에 차이가 나지 않아, 희박연소시의 출력 및 연소속도의 저하 등과 같은 문제점이 어느 정도 해결될 수 있음을 알 수 있다. 또한, 상기 그림들로부터 볼 수 있듯이, MSCDI를 사용함으로써 CDI에 비해 2~13% 정도의 연소압력 상승 및 연소시간 단축효과가 있다. 이는 MSCDI의 사용에 따른 연속방전 및 2차 에너지의 증가효과가 초기의 연소를 촉진시켜서 전연소시간^[8]을 단

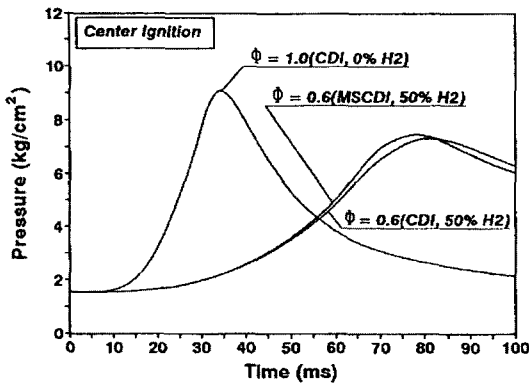


Fig. 5. Comparison of pressure-time traces(center ignition).

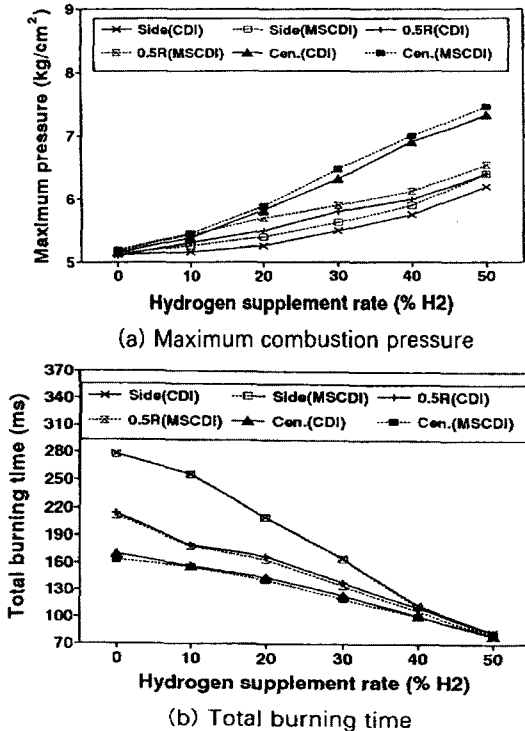


Fig. 6. Comparison of maximum combustion pressure and total burning time($\phi=0.6$).

측시하기 때문으로 사료된다^{[12][13]}.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 수소첨가율, 점화위치 및 점화장치 변화에 따른 연소촉진효과를 조사하기 위한 것으로, $\phi=0.6$ 인 경우에 있어서 최고연소압력과 전연소시간^[8]을 나타낸 것이다. 먼저, 3곳의 점화위치 모두 MSCDI를 사용했을 때가 CDI를 사용했을 때에 비해 수소첨가율이

증가함에 따라 P_{max} 가 더 높고 t_{max} 도 더 짧게 나타나고 있다. 또한, 점화위치가 연소실 벽면으로부터 연소실 중심으로 이동할 수록 P_{max} 가 증대되고 t_{max} 도 점차 단축되고 있다. 이는 점화위치가 연소실 벽면근처일 때는 화염전파거리와 연소실 벽면으로의 열손실이 증가하게 되어 연소압력이 저하하기 때문이다. 그러나, 점화위치가 연소실 중심일 때는 연소실 벽면에 비해 화염전파거리도 단축되고 상대적으로 열손실이 적기 때문에 연소압력은 증가하게 된다.

3-2. 화염온도 및 NO 농도

Fig. 7의 (a)와 (b)는 $\phi=0.6$, center ignition인 경우에 있어서 CDI와 MSCDI를 사용했을 때의 수소첨가율 변화에 따른 화염온도^[10]를 각각 나타낸 것이다. CDI와 MSCDI 모두 수소첨가율이 증가함에 따라 연소압력의 경향과 같이, 화염온도는 증가하고 최고화염온도가 발생되는 시간이 단축됨을 알 수 있다. 또한, MSCDI를 사용했을때의 화염온도는 CDI를 사용했을 때의 화염온도

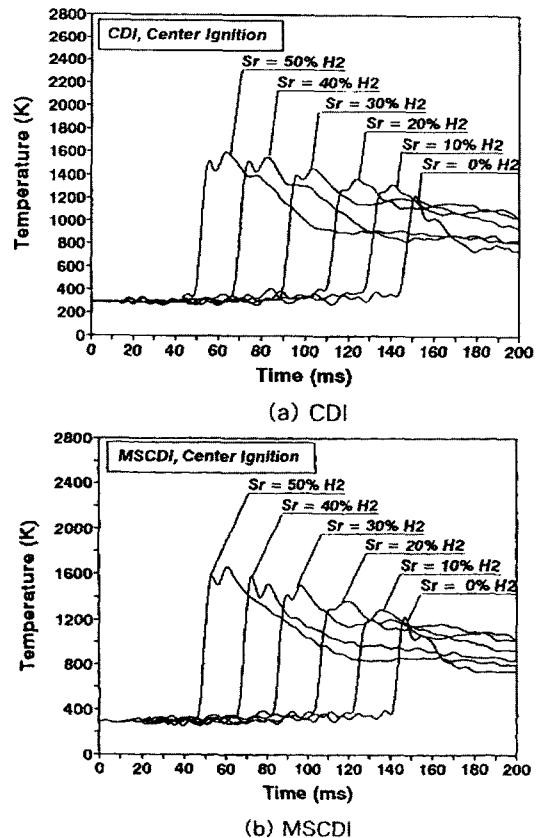


Fig. 7. Comparison of flame temperature-time traces ($\phi=0.6$, center ignition).

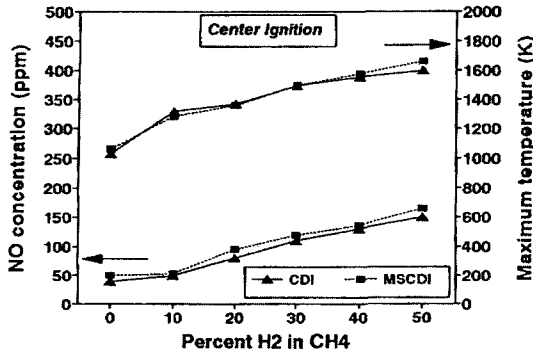
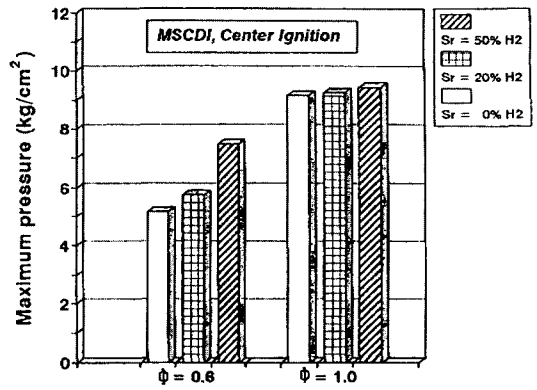


Fig. 8. Comparison of maximum flame temperature and NO concentration($\phi=0.6$, center ignition).

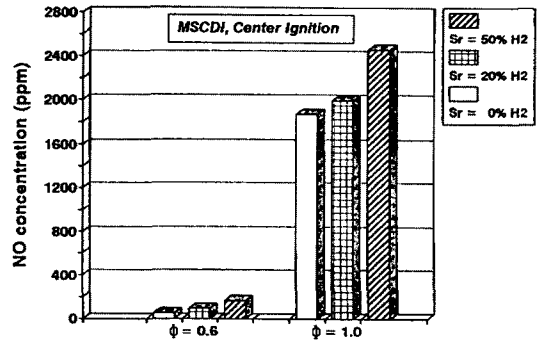
에 비해 각 수소첨가율에 있어서 24~62 K 정도 높게 나타나고 있다. 이는 희박혼합기의 경우, 초기의 화염전파는 점화불꽃의 에너지 또는 점화전극의 냉각작용의 영향을 주로 받기 때문에, 기존의 CDI 장치보다는 연속방전 및 2차 에너지의 증가효과가 큰 MSCDI 장치에 의해 혼합기를 연소시키는 것이 화염핵의 온도와 화학반응속도를 증가시킬 뿐만 아니라, 초기화염핵의 성장과 미연혼합기 중으로의 화염전파에 더 유리하게 작용하기 때문으로 사료된다^[12].

Fig. 8은 $\phi=0.6$, center ignition인 경우에 있어서 CDI와 MSCDI를 사용했을 때의 수소첨가율 변화에 따른 NO 농도와 최고화염온도를 각각 나타낸 것이다. CDI와 MSCDI 모두 수소첨가율이 증가함에 따라 NO 농도와 최고화염온도는 증가하고 있다. 그러나, 수소첨가율 변화에 따른 NO 농도의 차이는 49~166 ppm 정도로 그리 큰 편은 아니며, CDI와 MSCDI 사용에 따른 차이도 그리 크게 나타나지 않고 있어 희박연소에 의해 NO 농도를 대폭적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한, 이때의 NO 농도수준을 이론혼합기일 때의 NO 농도수준(1870~2463 ppm)과 비교하면 거의 무시할 수 있는 수준이다.

Fig. 9의 (a)와 (b)는 center ignition인 경우에 있어서 MSCDI를 사용했을 때 수소첨가율 변화에 따른 최고연소압력과 NO 농도를 $\phi=0.6$ 과 $\phi=1.0$ 에 대해 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 수소를 첨가하지 않은 $S_r=0\%$ H₂일 때의 P_{max} 는 $\phi=0.6$ 인 경우에 5.2 kg/cm², $\phi=1.0$ 인 경우에 9.2 kg/cm²으로 43% 정도의 차이를 보이고 있다. 그러나, 수소를 최대로 첨가한 $S_r=50\%$ H₂일 때의 P_{max} 는 $\phi=0.6$ 인 경우에 7.5 kg/cm², $\phi=1.0$ 인 경우에 9.5 kg/cm²으로 20% 정도의 저하된 값을 보이고 있다. 또한, 이때의 NO 농도를 살펴보면, $\phi=1.0$ 인 경우의 NO 농도는 수소첨가율에 따라 1870 ppm~2463 ppm으로 큰 값을 나타내고 있는 반면, $\phi=0.6$ 인 경우의 NO 농도



(a) Maximum pressure



(b) NO concentration

Fig. 9. Comparison of maximum pressure and NO concentration($\phi=0.6$, $\phi=1.0$, center ignition, MSCDI).

는 수소첨가율에 따라 49 ppm~166 ppm으로 거의 무시할 수준을 나타내고 있다. 따라서, 이들 결과에 의하면 희박천연가스 혼합기에 수소를 첨가함에 따라 연소압력의 큰 저하없이 NO 농도를 대폭적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

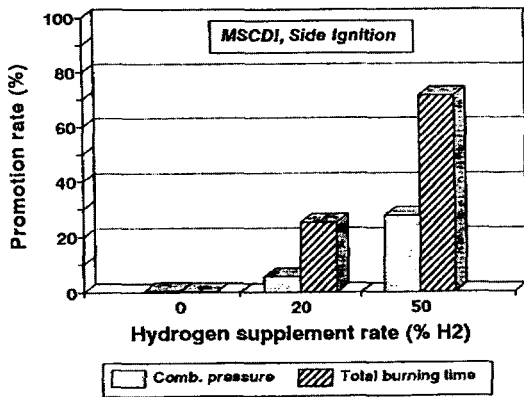
3-3. 연소속진율

Fig. 10의 (a), (b) 및 (c)는 $\phi=0.6$, MSCDI인 조건하에서, 수소첨가율 변화에 따른 연소압력 상승율(ζ)과 연소시간단축율(ξ)을 점화위치에 대해 각각 나타낸 것이다. 본 연구에서는 연소 압력상승율(ζ)과 연소시간단축율(ξ)을 식 (2)와 식(3)으로 각각 정의하였다.

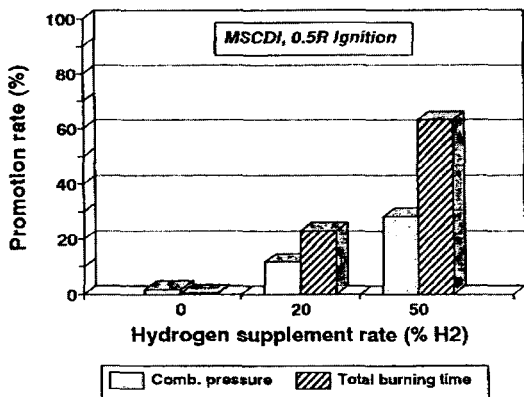
$$\zeta = \frac{P_{max(M)} - P_{max(C)}}{P_{max(C)}} \tag{2}$$

$$\xi = \frac{t_{max(C)} - t_{max(M)}}{t_{max(C)}} \tag{3}$$

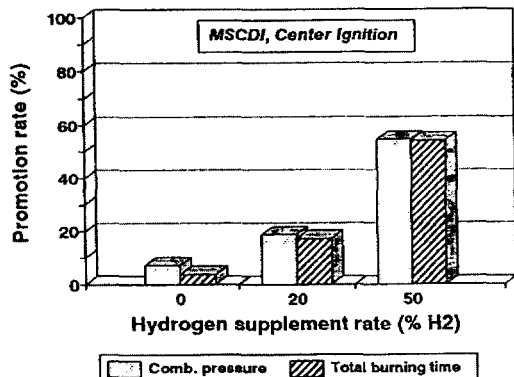
여기서 $P_{max(C)}$, $t_{max(C)}$ 는 CDI, $S_r=0\%$ H₂를 사용했을 경



(a) Side ignition



(b) R/2 ignition



(c) Center ignition

Fig. 10. Comparison of combustion promotion rate ($\phi=0.6$, MSCDI).

우의 P_{max} , t_{max} 이고, $P_{max(M)}$, $t_{max(M)}$ 은 MSCDI를 사용했을 경우의 P_{max} , t_{max} 이다.

그림에서와 같이, side ignition과 0.5R ignition의 경

우 $S_2=0\%$ H_2 일 때에는 MSCDI 사용에 따라 연소압력 상승율과 연소시간단축율은 0.2~1.6% 정도로 별 영향이 없지만, center ignition의 경우 $S_2=0\%$ H_2 일 때에는 MSCDI 사용에 따라 연소압력상승율과 연소시간단축율은 7%와 3.7%의 값을 나타내고 있다. 그러나, 수소첨가율이 20% H_2 이상으로 증가하게 되면, 3곳의 점화위치 모두 연소압력상승율과 연소시간단축율은 증가하게 된다. 일례로 $S_2=50\%$ H_2 일 때, 점화위치 변화에 따른 연소속진율을 살펴보면, 먼저 side ignition의 경우 연소압력상승율은 27.1%, 연소시간단축율은 71.4%, 0.5R ignition의 경우 연소압력상승율은 28.2%, 연소시간단축율은 62.9%이고 center ignition의 경우 연소압력상승율은 54.3%, 연소시간단축율은 53.9%의 값을 나타내고 있다. 여기서, 특이할 사항으로는 연소압력상승율은 center ignition의 경우가 그리고 연소시간 단축율은 side ignition의 경우가 가장 높게 나타나고 있다는 점이다.

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 연소특성을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CDI와 MSCDI 모두 수소첨가율이 증가할수록 그리고 점화위치가 연소실 중심일수록 연소압력은 증가하고 연소시간은 단축되었으며, MSCDI가 CDI에 비해 2~13% 정도의 연소압력상승 및 연소시간 단축효과가 있었다.

2) CDI와 MSCDI 모두 수소첨가율이 증가할수록 그리고 점화위치가 연소실 중심일수록 화염온도는 급격히 증가하고 최고화염온도가 발생하는 시간도 단축되었으며, 화염온도는 MSCDI가 CDI에 비해 24~62 K 정도 높게 나타났다.

3) CDI와 MSCDI 사용에 따른 NO 농도 차이는 없었으며, CDI와 MSCDI 모두 수소첨가율이 증가함에 따라 NO 농도는 증가하였으나, 이때의 NO 농도 수준을 이론혼합기 일때의 NO 농도 수준에 비교하면 거의 무시할 수준이었다.

4) $S_2=0\%$ H_2 인 경우, CDI와 MSCDI 사용에 따른 연소속진율의 차이는 없었으나, 수소 첨가율이 최대인 $S_2=50\%$ H_2 인 경우에 연소압력상승율은 center ignition 그리고 연소시간 단축율은 side ignition일 때가 가장 크게 나타났다.

이상의 연구결과를 토대로 판단할 때, 통상 이론혼합기로 운전되고 있는 현 천연가스차량의 NO 저감대책으로 희박천연가스 혼합기에 수소를 첨가하고 반복점화방

식을 채택하는 것이 엔진 출력의 큰 저하없이 NO 농도를 대폭적으로 감소시킬 수 있는 매우 효과적 방안이라고 볼 수 있다.

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, 第31卷, 第387號, pp. 87-93 (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, pp. 15-20 (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), 第58卷, 第550號, pp. 1943-1948 (1992).
6. 古野 志健男, 井口 哲, 井上 惠太: "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, pp. 101-104 (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. 김봉석 외: "메탄-수소-공기 예혼합기의 연소 특성(I)", 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제3호, pp. 129-139 (1995).
9. 김봉석 외: "메탄-수소-공기 예혼합기의 연소 특성(II)", 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 156-167 (1996).
10. 김봉석, 이영재, 류정인: "저공해 수소첨가 천연가스 차량 개발을 위한 기초연구", 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제3호, pp. 358-370 (1997).
11. 김봉석, 이영재: "조성변화에 따른 정적연소실내 천연가스의 연소특성(I)", 한국자동차공학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 41-49 (1999).
12. Kono, M. and Hatori, K.: "Ignition of Low Flow Velocity Mixture by Short Duration Sparks", 18th Symposium on Combustion, pp. 500-503 (1981).
13. Nagalingam, B., Duebel F. and Schmillen, K.: "Performance Study using Natural Gas, Hydrogen-supplemented Natural Gas and Hydrogen in AVL Research Engine", Int., J. Hydrogen Energy, 8(9), 715-720 (1983).