

〈논 문〉 SAE NO. 96370073

이 논문은 1995년도 조선대학교 교수 해외 파견 연구비의 지원을 받아 연구되었습.

## 직접분사 성층연소방식에서 수소 첨가에 의한 미연 탄화수소의 저감

### The Reduction of Unburned Hydrocarbons on the Direct-Injection Stratified-Charge Combustion Method by Hydrogen Addition

홍 명 석\*, 김 경 석\*\*  
M. S. Hong, K. S. Kim

#### ABSTRACT

The direct injection stratified charge(DISC) engine enhances the fuel tolerance and the anti-knock tendency. This enhanced antiknock tendency allows use of a higher compression ratio which results in higher thermal efficiency. But its actual utilization is prevented by high emission levels of unburned hydrocarbons during light load operation. Over-lean mixtures due to the long combustion time and wall quenching will be the main causes of increasing unburned hydrocarbons in DISC system. In order to solve this problem, small amount of hydrogen was added to the charging air or injected fuel. The effects of hydrogen addition were examined experimentally by radial fuel injection using a pancake-type constant volume bomb. In case of the hydrogen addition to the charge of air, the combustion pressure was increased and the unburned hydrocarbon was reduced with increasing the amount of hydrogen. In case of the hydrogen addition to the fuel, the combustion pressure was significantly increased.

주요기술용어 : Direct Injection Stratified Charge(직접분사 성층급기), Fuel Injection(연료 분사)  
Unburned Hydrocarbon(미연 탄화수소), Spark Ignition(스파크 점화), Hydrogen Addition(수소 첨가)

#### 1. 서 론

최근 자동차의 배기가스에 의한 대기오염이 심  
각한 공해문제가 되고 있으므로 배기가스 내의

공해물질을 감소시키는 것이 시급한 문제로 대두  
되고 있다. 또한 자원 고갈에 대비하여 다양한  
연료의 이용 방안을 찾고, 열효율을 향상시킬 수  
있는 새로운 방식을 이용한 기관의 개발이 요구  
된다. 이를 위한 방안으로 연소실 내에 연료를  
직접 분사하는 직접분사식 성층급기(Direct In-  
jection Stratified Charge, DISC) 방식이 연구

\* 정회원, 조선대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 조선대학교 공과대학 기계설계공학과

되고 있다.

이 방법은 연소실 내의 연료 분포를 충상화하여 국소적인 가연층을 형성하는 것으로 전체적으로는 희박연소를 실현하는 것이다. 이 방법의 특징은 노킹이 발생하지 않음으로 고압축비를 얻을 수 있으며, 부분 부하시 흡기 교축이 필요 없다. 또 희박연소이므로 배기가스 중에 CO, NO<sub>x</sub>의 배출량이 적다.

지금까지 많은 종류의 DISC 기관이 시도되고 있지만 아직까지 실용화되지 못하고 있는데, 그 가장 큰 이유는 저부하 운전시에 미연 탄화수소의 배출량이 많기 때문이다. 같은 운전조건에서 가솔린 기관의 약 10배에 달하는 HC가 배출되는 것으로 보고되고 있다<sup>1)~3)</sup>. 그리고 이 경우에는 배기가스의 온도가 낮아 촉매에 의한 배기가스 정화도 곤란하게 된다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해 성층연소에 관한 기초적인 연구를 이미 한 바 있다<sup>3)~6)</sup>. 지난 번 연구에서 정적 연소용기를 이용하여 연소실 내의 공기유동, 연료 분사 방향, 점화위치, 점화시기 등을 변화시켜 실험하였다. 지금까지의 성층연소에 대한 기초적인 연구에서 HC 배출의 주요 원인은 연소기간의 증가로 인해 연소실 벽면 근처에 미연 혼합기가 남아 있게 되고 이 혼합기가 과희박화 된 후에 연소되기 때문으로 생각된다. 특히 희박연소 한계인 당량비에서는 미연 탄화 수소의 배출량이 상당히 증가되고 있다.

그러므로 본 연구의 목적은 희박가연한계 부근의 적은 연료를 분사할 경우에 수소를 첨가하여 연소기간을 단축시킴으로써 HC의 배출량을 감소시키는 것이다. 수소의 연소기간은 매우 짧음으로 소량의 수소를 첨가하여 연소성능의 개선 및 HC의 감소 효과의 가능성을 검토하였다.

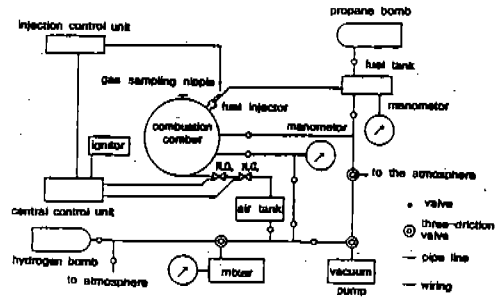
연료는 프로판가스를 사용하였고, 연료분사 방향은 연소실 중심의 중심을 향하여 반경방향으로 분사하였다. 압력변환기로 연소압력을 측정하였고, 가스분석기를 이용한 미연 탄화수소량의 측정, 슐리렌법에 의한 연료의 성층화과정과 연소 과정을 고찰하였다.

## 2. 실험

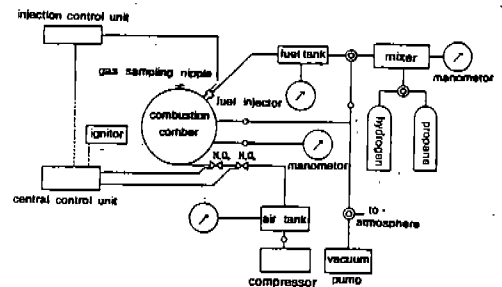
### 2.1 실험장치

직접분사 성층연소에서 수소의 첨가가 연소에 미치는 영향을 조사하기 위한 연구로서, 수소를 첨가하는 방법은 급기 공기(Charging air)에 소량의 수소를 혼합하여 연소실에 분사한 후에 연료를 분사하는 방법, 그리고 공기만 분사한 후에 수소를 혼합한 연료를 분사하는 2가지 방법을 사용하였다. 공기에 수소를 첨가한 경우의 실험장치 개요는 Fig.1의 (a)에, 연료에 수소를 첨가한 경우의 실험장치의 개요는 (b)에 나타내었다.

실험장치는 연소실, 연료탱크, 공기탱크, 수소 혼합기와 각종 측정기기 및 이들을 연결하는 파이프로 되어 있다. 연소실내의 초기 압력을 설정



(a) Hydrogen addition in the air



(b) Hydrogen addition in the fuel

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

하거나 소기용으로 진공펌프와 공기압축기가 부착되어 있다.

연소 실험에 사용한 정적 연소실은 직경 110mm, 두께 30mm의 원판형으로 체적은 285cm<sup>3</sup>이다. 연소현상의 가시화를 위해 양 측면에는 파이렉스 유리를 부착한 관측창을 설치하였으며, Fig.2에 그 모양을 나타냈다. 연소실 주위에는 반경방향의 연료분사밸브, 접선방향의 공기분사밸브, 연소가스 샘플링용 커풀링, 연소압력 측정을 위한 압력변환기(Semi-Conductor Pressure Transducer, Toyoda, PMS-5)와 증폭기(DC Amplifier, Toyoda, AA3004)가 부착되어 있다.

연료분사밸브는 직경 2.5mm인 니들 타입의 고속전자밸브로 GTO소자를 이용한 여자장치(300V/50A)에 의해 구동된다. 연료분사시간은 10ms로 일정하게 하였고, 연료의 분사방향은 연소실 중심을 향한 반경방향이다. 연료분사밸브와 연결된 연료탱크의 체적은 1,000cm<sup>3</sup>이며 디지털 압력계를 부착하여 여기에서 연료분사 초기압력을 설정하였다.

급기용 공기탱크는 체적이 1,000cm<sup>3</sup>이며 압력계와 공기압축기가 부착되어 공기분사 압력을 설정하며, 수소혼합기와 연결되어 있다. 압축된 공기는 연소실 벽에 설치된 공기분사공을 통하여 접선방향으로 분사된다. 연소실과 공기탱크 사이에는 상시 폐쇄형 전자밸브(N.C.)와 상시 개방형 전자밸브(N.O.)로 차단되어 있다. 공기탱크

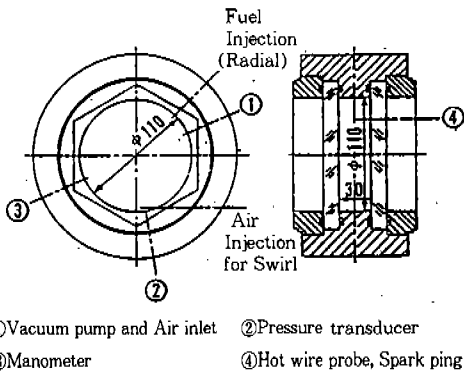


Fig.2 Schematic view of combustion chamber

에 압력 0.150MPa로 공기나 수소혼합기를 충전한 뒤에 N.C.밸브를 열어 공기분사를 시작하고 N.O.밸브를 닫아 분사를 종료시킨다. 공기분사시간은 200ms로 일정하게 하였다.

수소혼합기는 실린더형으로 그 안에는 압축형 피스톤과 교반용 팬이 있으며, 밖에는 팬을 구동하기 위한 모터가 부착되어 있다. 점화는 실리콘 정류소자를 이용한 스위치회로에 의해 불꽃방전하였다. 콘덴서가 충전한 전압은 300V이며 점화 에너지는 1.4J이다. 점화전극은 직경 1.5mm의 스테인레스 선을 사용하였고, 간극은 2mm로 하였다.

공기분사, 연료분사와 점화의 작동은 Z80 원보드 마이크로 컴퓨터를 이용하여 제어하였다. 작동순서는 먼저 공기를 분사하여 스월을 형성시킨 다음, 공기분사로 부터 25ms후에 연료분사를 시작하여 10ms동안 분사하였다. 점화는 연료분사 시작으로부터 8ms에서 20ms사이에서 실행된다. Fig.3에 각 기기의 작동시기를 나타내고 있다.

연소가스중 미연탄화수소의 검출을 위해 가스 분석기(Yanaco, G3800)를 이용하였다. 컬럼 충전제는 활성 알루미늄이고, 캐리어 가스는 헬륨을 사용하였다. 샘플가스를 유로 I과 II에서 둘로 분리하여 열전도 검출기(TCD)와 수소염이온화 검출기(FID)에서 동시에 측정 분석하였다. 슬리렌 사진의 촬영에는 35mm카메라를 사

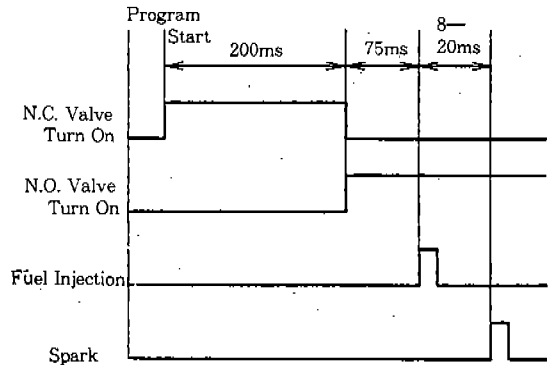


Fig.3 Operation time of equipments

용하였다. 광원은 스트로보스코프(방전관 입력 10W sec, 섬광시간 12 $\mu$ sec)로 Z80 마이크로 컴퓨터에 연결되어 발광시기를 설정하여 촬영하였다.

## 2.2 실험방법

연소실험은 프로판을 연료로 사용하였고, 수소의 첨가비율, 점화위치와 점화시기를 변화시켜 실험하였다. 수소혼합기를 이용하여 공기나 프로판에 수소를 첨가하였으며, 그 혼합 방법은 진공 펌프를 구동하여 수소혼합기를 진공으로 만든 후에 수소를 임의의 압력까지 주입하고, 그 다음에 공기나 프로판을 대기압까지 주입하는 분압 충전법을 이용하였다. 임의의 비율로 만든 혼합기는 팬을 구동하여 약 10분간 교반한 후 피스톤을 이용하여 초기 공기분사압력이나 초기 연료분사압력까지 압축한다. 먼저 공기를 분사하여 연소실 내에 스웰(swirl)을 형성시킨다. 연소실내의 초기 진공압력은 0.04MPa이며 공기분사압력은 0.150MPa로서 공기분사가 끝나면 연소실내는 대기압(0.101MPa)이 된다. 공기분사 직후에는 외주 부근이 약간 돌출되는 속도분포를 갖고 있으나 그 뒤에는 연소실 중앙에 선회 중심을 갖는 강제회전(solid body rotation) 속도분포를 계속 유지하며 감소한다.<sup>7)</sup> 연료분사는 공기분사후 25ms에서 시작하며 그때 스웰 외주의 속도는 10m/s이다. 공기에 수소를 첨가한 경우에 초기 연료 분사 압력은 0.118~0.130MPa이며, 연료 분사가 완료된 후에는 연소실 전체 당량비가 약 0.25가 되도록 하였다. 프로판에 수소를 첨가한 경우의 연료분사 초기 압력은 0.144MPa이다. 마이크로 컴퓨터에 점화시기를 설정하고, 스타트 시키면 공기분사밸브, 연료분사밸브 그리고 점화하는 순서로 작동된다. 연소압력은 압력변환기로 측정하여 증폭기에서 100배로 증폭시킨뒤 오실로스코프(Hitachi, VC-801B)에 보내진 다음 GP-IB보드를 이용하여 퍼스날 컴퓨터에 저장한다.

점화전극은 원판형 연소실의 중앙에 점화전극을 삽입하였다. 점화위치는 Fig.4에 나타난 것과 같이 반경 방향으로 11mm에서 44mm까지 4점, 원주방향으로 45°씩 8방향으로 하여 합계 32개

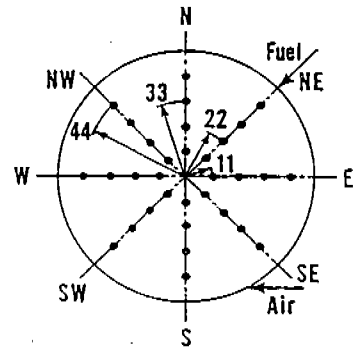


Fig.4 Ignition positions

점이다. 점화시기는 연료분사 시작신호로부터의 시간을 의미하며, 8ms, 12ms, 16ms 및 20ms의 4가지로 실험하였다. 연료는 10ms동안 분사되고, 연료분사 시작신호로부터 실제로 연소실에 연료가 분출되기까지는 약 2ms가 걸린다. 그러므로 점시시기 8ms는 연료분사 중에 점화되고, 12ms는 분사직후에, 16ms와 20ms는 분사가 종료된 후에 점화된다.

## 2.3 미연비율

본 실험에서 공기에 수소를 첨가하는 경우, 수소는 연소실내의 공기에 대해 체적비 0.5%, 1%, 3% 되도록 하였다. 수소 첨가비율  $X$ 는 다음과 같다.

$$X = \frac{m_H}{m_A + m_H} \quad (1)$$

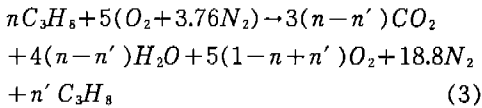
여기서  $m_H$ 는 수소의 몰수,  $m_A$ 는 공기의 몰수이다.

가스분석기(Yanaco. G3800)를 이용하여 연소가스 내의 미연 탄화수소의 농도를 측정하였으며, 그 중에서 프로판과 소량의 에탄 등이 검출되었다. 연소 전 혼합기의 프로판농도와 연소가스 내의 미연 탄화수소농도량을 측정하여, 미연비율을 구하였다. 연소가스중에서 여러 탄화수소계 성분들이 검출되었으므로 다음과 같이 프로판의 농도로 환산하였다.

$$C_T = C_P + \sum \frac{m_{oi}}{m_{op}} C_i \quad (2)$$

여기서  $C_T$ 는 여러 탄화수소계 성분을 프로판으로 환산한 전 탄화수소 농도,  $C_P$ 는 프로판 농도,  $C_i$ 는  $i$ 성분의 탄화수소 농도,  $m_{op}$ 는 프로판 연소시 필요한 산소의 몰수이며,  $m_{oi}$ 는  $i$ 성분의 연소시 필요한 산소의 몰수이다.

수소를 첨가하지 않았을 경우, 연소가스내의 미연 비율을 다음과 같은 방법으로 구하였다. 질소는 연소에 관여하지 않으므로 질소의 몰수를 기준으로 프로판의 연소반응식을 나타내면



가 되며, 여기서  $n$ 은 질소 18.8몰에 대한 연소 전 혼합기의 프로판 몰수이고,  $n'$ 는 질소 18.8몰에 대한 연소가스중의 탄화수소계 성분을 프로판으로 환산한 전탄화수소 몰수이다.

그리고,  $C_P$ ,  $C_T$ ,  $n$ ,  $n'$ 의 관계는

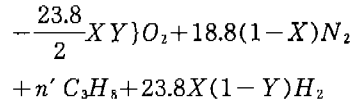
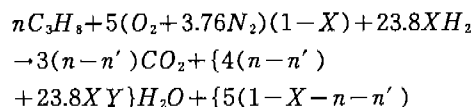
$$n = \frac{23.8}{1 - C_P} C_P \quad (4)$$

$$n' = \frac{23.8 - 2n}{1 - 3C_T} C_T \quad (5)$$

이며, 질소의 몰수를 기준으로 한  $n$ ,  $n'$ 를 이용하여 미연비율  $\gamma_u$ 를 구하였다.

$$\gamma_u = \frac{n'}{n} \quad (6)$$

또한 수소를 첨가했을 경우 미연비율은 다음과 같다. 첨가한 수소가 연소한 비율을  $Y$ 라 하면 연소반응식은



가 되므로 위 식과 식(6)으로부터 미연비율을 구하였다. 그러나 실제로 본 실험에서는 첨가한 수소 중 미연 수소의 농도만을 측정할 수 없으므로 수소가 전부 연소되었을 경우인  $Y=0$ 하여 미연비율의 최대값을 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 솔리덴 사진

Fig.5 반경방향으로 분사된 연료와 공기의 혼합과정에 대한 솔리덴사진이다.

Fig.5(a)는 수소를 첨가하지 않은 경우로서 연료분사압력은 0.134MPa이며 이때 공기분사에 의한 원주벽 부근의 스웰속도는 열선유속계를 이용하여 측정된 결과 10m/s이었다. 연료분사공으로부터 연소실 중심을 향해 분출된 연료분사류(fuel jet)는 스웰을 통과하여 연소실 중심까지 거의 직선으로 나아가지만 그 뒤의 스웰에 의해 강한 전단력을 받아 확산되고 있다.

Fig.5(b)는 수소 첨가비율 1%인 경우로 연료분사압력은 0.133MPa이다. 여기서 연료분사류는 선단이 약간 휘어지면서 연소실 중심을 통과하였으며 주분사류는 거의 직선으로 나아갔지만 연료분사류 선단부분은 확산되지 않아 선명하게 나타나고 있다.

여기서 주분사류란 분출된 연료분사류가 거의 확산되지 않고 진행하는 연료분사류의 주류를 말하며, 연료분사류의 선단부분은 연소실 중심을 향해 진행하는 연료분사류의 앞쪽을 의미한다.

Fig.5(c)는 수소 첨가비율 3%, 연료분사압력이 0.129MPa일 때로 연료분사 직후부터 스웰의 영향을 받아 주분사류가 휘어졌으며 연료는 연소실 벽면을 따라 이동하며 확산되고 있다.

성층연소에서는 연료가 공기와 층상으로 확산되는 과정을 파악하는 것이 매우 중요하며 그 혼합 과정에 따른 최적의 점화시기 및 점화위치를 선정해야 한다.

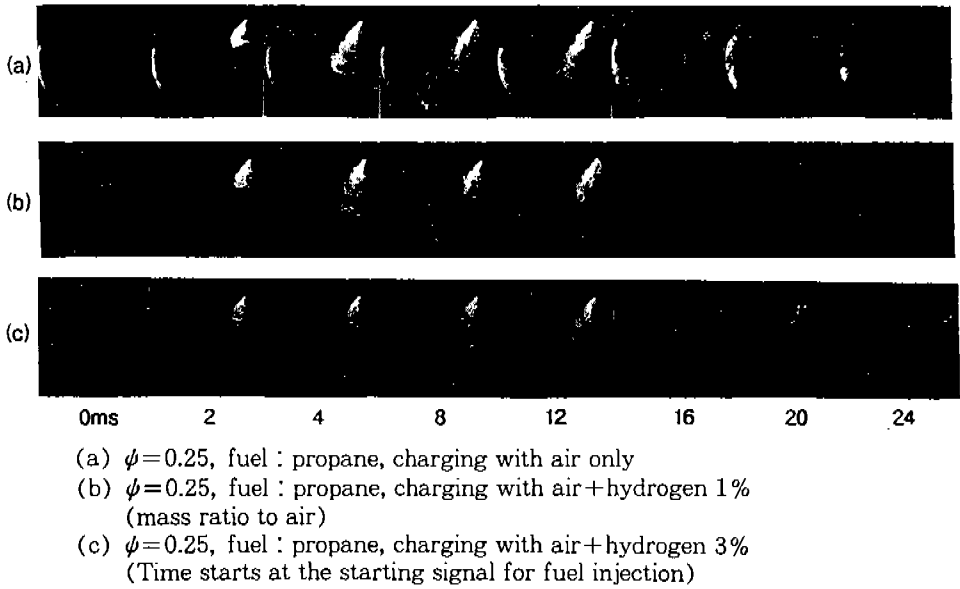


Fig.5 Schlieren photographs of stratification process in radial fuel injection

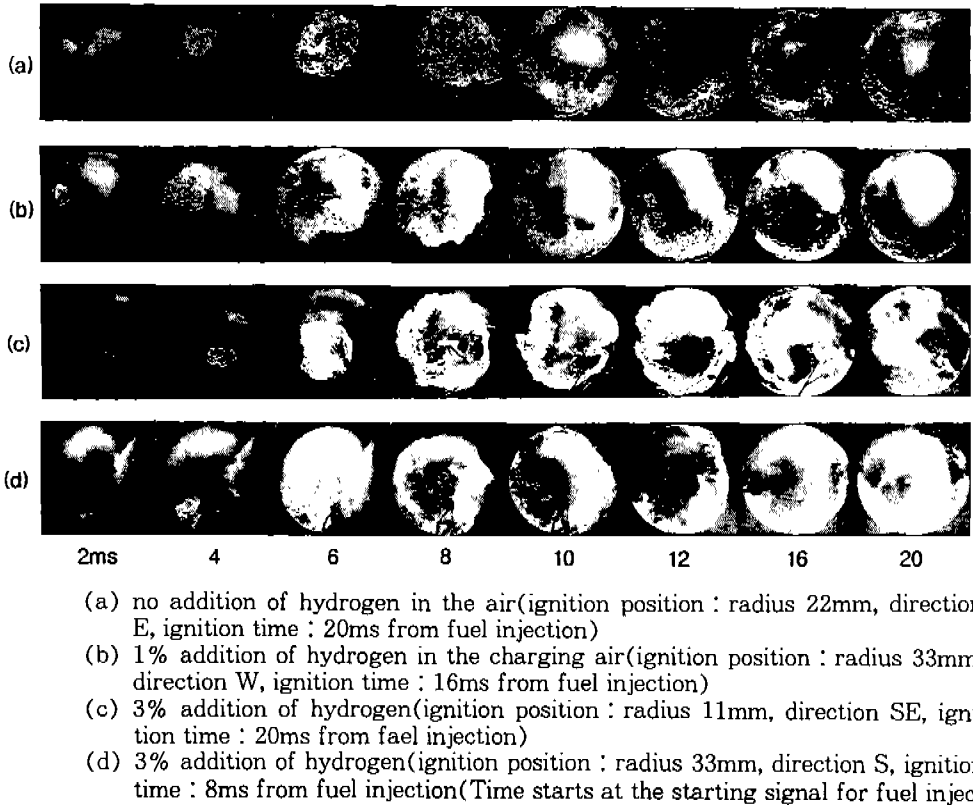


Fig.6 Schlieren photographs of combustion process

본 실험에서와 같이 반경방향으로 연료를 분사했을 때는 분사압력에 따라 스월과의 상호작용으로 인하여 연료분사류의 궤적은 달라지지만 거의 모든 연료가 연소실 중심부에 분포하고 있다. 또한 분사구에서 가까운 후단측 연료분사류는 윤곽이 선명하지만 연소실 중앙에 있는 선단측은 명확하지 않는데 이는 연료분사류의 선단측에서 스월의 전단력에 의해 공기와 연료의 혼합이 활발하게 이루어지고 있기 때문이다. 연료분사류의 선단측과 같이 공기와의 혼합이 잘 이루어지고 혼합기가 균질한 농도를 갖고 있는 부분에서 점화위치를 설정해야 최적의 연소가 이루어질 수 있다.

당량비 0.25는 프로판-공기 예혼합기에 의한 연소일 때는 희박연소한계 이하의 농도이다. 이와 같은 희박연소에서는 연소기간이 길어지면 화염전과 후기에 미연소 혼합기가 너무 희박화 된 다음 연소됨으로 인하여 미연 탄화수소량이 증가 되는 것으로 생각된다.<sup>8)</sup>

Fig.6(a)~(d)는 수소를 첨가하지 않는 경우와 체적비 1% 및 3%의 수소를 첨가했을 때의 연소 슬리렌 사진이다. 여기에 나타난 시간은 점화신호로부터의 시간이다.

전체적으로 보면 점화 후에 생긴 화염은 공기와 혼합이 잘 진행된 연료분사류의 선단측에서 전파되기 시작하여 그 뒤에 급속히 연소실 전체에 확대되어 점화 후 약 16ms내에 연소가 거의 끝나고 있다.

그러나 수소를 첨가한 경우가 첨가하지 않는 경우보다 화염전과 초기에 빠른 속도로 전파되고 있으나 전 연소기간의 단측에는 뚜렷한 차이를 발견할 수는 없었다.

Fig.6(c)와 (d)는 수소 첨가비율이 3%인 경우로서 (c)는 점화시기가 20ms로서 연료분사가 끝난후에 점화한 것이고, (d)는 점화시기 8ms로 연료분사중에 점화한 것이다. Fig.6(c)는 화염전과 초기에는 빠른 속도로 연소실 전체로 확대되지만 후기에는 연소 속도가 늦어지고 있다.

(d)는 분출되고 있는 분사류 선단측에 점화되어 화염전과 초기뿐만 아니라 후기에도 빠른 속도로 연소가 끝나고 있다. 그러므로 점화시기를

빨리하여 연료혼합이 활발하게 이루어지고 있는 영역에 점화하여 연소기간을 줄임으로써 화염전과 후기의 과희박화를 막을 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2 연소압력

한 점화위치에서 5회 이상의 연소실험을 하여 얻어진 압력선도 중에서 최대값을 구하고 이들의 평균값을 연소압력  $P_m$ 이라고 하였다. 또 정적 연소시의 이론 평행 연소압력  $P_{m0}$ 을 계산하여 구하고 이들에 대한 비  $P_m/P_{m0}$ 를 구하였다.

Fig.7에 수소첨가 비율이 0.5%, 1%, 3%일 때와 수소를 첨가하지 않았을 때, 그리고 프로판에 수소를 첨가하였을 경우에 각 점화위치 및 점화시기에서  $P_m/P_{m0}$ 의 값을 타원의 크기로 나타냈다. 이를 전체적으로 보면, 연소실 중심에서는 점화가 불가능하고 연소실 원주벽 근처에서 점화 및 연소가 가능한 점들이 많이 분포하고 있다. 이것은 Fig.5의 연료분사류에 대한 슬리렌 사진에서 고찰한 바와 같이 공기분사에 의해 형성된 연소실 내의 스월에 의해 연료분사류가 연소실 중심보다는 원주벽을 따라 진행하면서 확산되고 있기 때문이다.

수소를 첨가하지 않았을 경우에 점화시기 16ms까지는 점화 가능한 위치가 늘어나고 있으나 20ms가 되면 점화 가능한 위치가 적어지고 연소압력도 낮아지고 있다. 이것은 점화시기가 20ms가 되면 연료분사류가 광범위하게 확산되어 과희박화되기 때문이다.

또한 각 점화시기마다 연료분사류의 선단부근에 점화하면 높은 연소압력이 얻어지고 있는데, 이것은 연료분사류의 선단측에 연소에 적합한 혼합기가 형성되기 때문으로 생각된다. 그러나 공기에 수소를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우를 같은 점화시기에서 비교하면 특히 점화시기 12ms 이후에서 수소의 첨가량이 증가함에 따라 점화 가능한 위치의 수가 증가하고 있다. 이는 연료와 공기의 혼합이 진행됨에 따라 희박화되지만 연료분사류 주변에 존재하는 수소의 영향에 의해 점화가 가능한 것으로 생각된다. 또한 연소압력도 첨가한 수소량이 증가함에 따라 모든 점

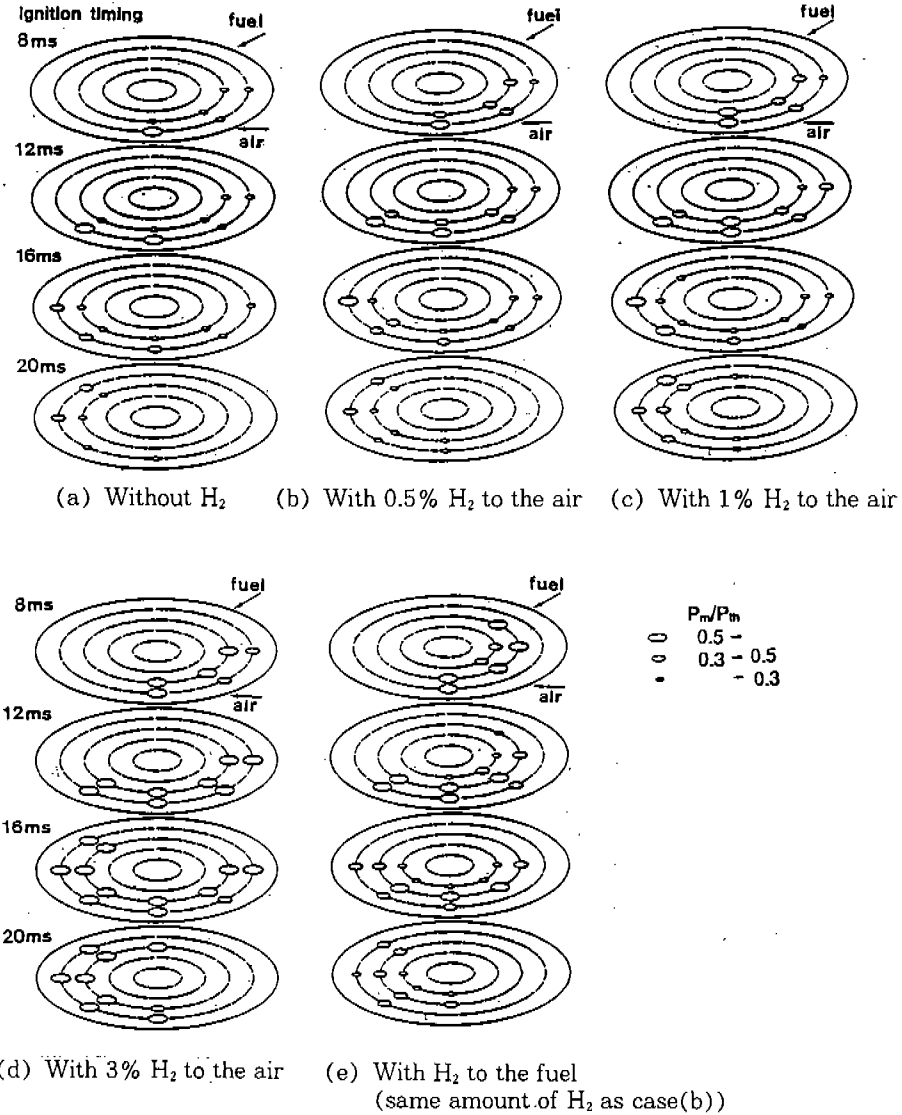


Fig.7 Ratio of measured combustion pressure to theoretical one,  $P_m/P_{th}$

화위치에서  $P_m/P_{th}$ 의 값이 수소를 첨가하지 않은 경우보다 더 크게 나타나고 있다. 특히 수소의 첨가비율이 3%인 경우에는 점화시기에 영향을 받지 않고 많은 점화위치에서  $P_m/P_{th}$ 가 크게 나타나고 있다. 그러므로 수소의 첨가로 인하여 점화가 가능한 범위가 확대될 뿐만 아니라, 그 후 연소에도 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 수소의 연소특성이 희박연소한계가 가장 낮

고, 난류장에서 연소속도의 증가율이 크므로 과회박화된 혼합기의 연소촉진에 매우 효과적인 것으로 생각된다.<sup>9)</sup> 또한 수소를 프로판에 첨가한 경우를 Fig.7(e)에 나타내고 있다.

모든 점화시점에서 점화가능한 위치를 비교하여 보면, 연료에 수소를 첨가한 경우가 공기에 같은 양의 수소를 첨가한 경우보다 점화 가능한 위치가 더 많았다. 또 같은 점화위치에서 연소압



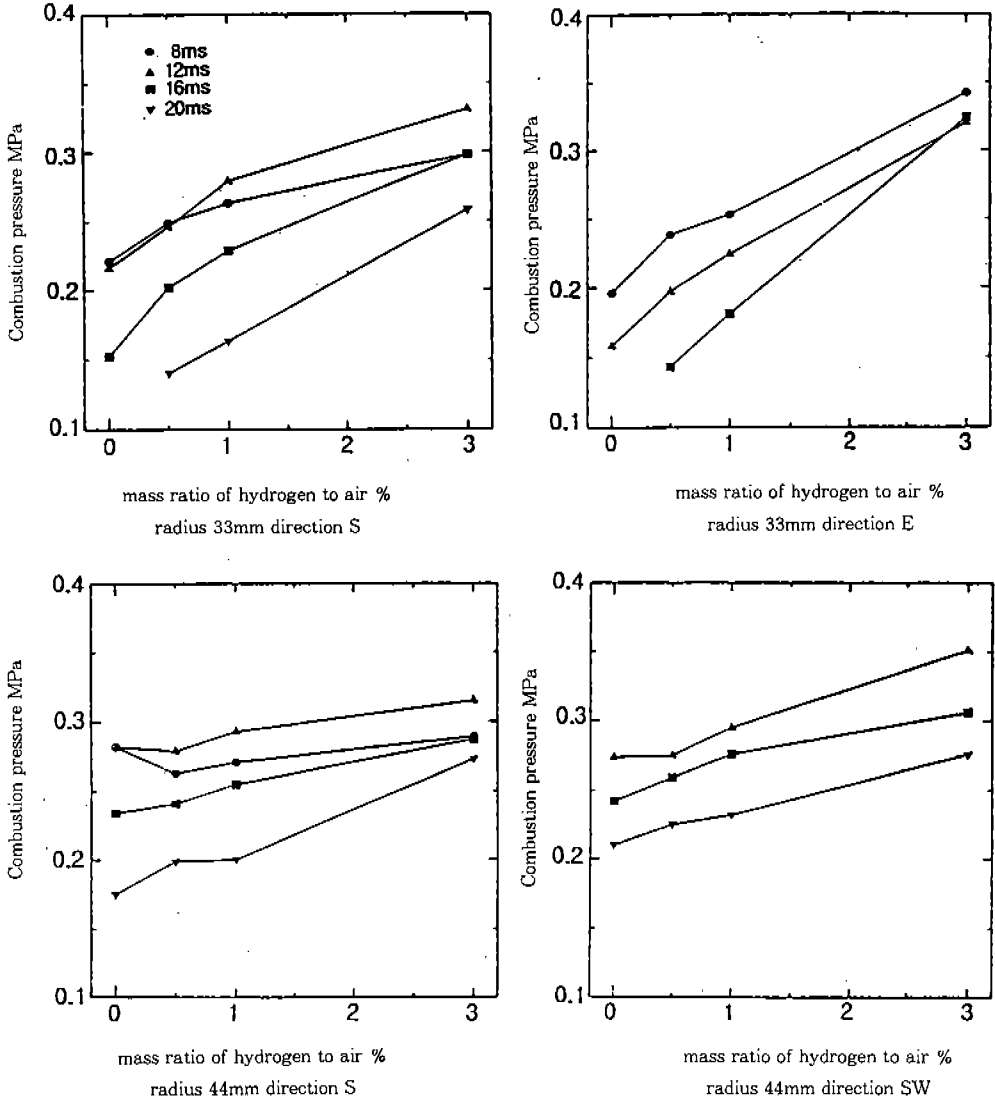


Fig.8 Combustion pressure to mass ratio of hydrogen to air in the various ignition position

력을 비교하여보면, 모든 점화위치에서 연료에 수소를 첨가한 경우가 공기에 수소를 첨가한 경우보다 연소압력이 높게 나타났다. 그러므로 공기에 수소에 첨가하는 것보다 연료에 직접 수소를 첨가하는 것이 연소성능의 개선에는 효과적인 것으로 생각된다.

Fig.8에 각 점화위치와 점화시기에서 수소첨가비율의 증가에 대한 연소압력의 변화를 나타냈

다. 같은 점화위치와 점화시기에서 서로 비교하여 보면 수소의 첨가비율이 증가함에 따라 연소압력이 높아지고 있다. 수소를 첨가하지 않았을 때는 0.15MPa 정도로 낮은 연소압력이 수소첨가 비율의 증가와 함께 0.282~0.352MPa까지 연소압력이 높아지고 있다. 특히 3%의 수소첨가 비율에서 연소압력의 향상이 두드러져 0.25MPa 이상의 높은 압력을 얻을 수 있었다.

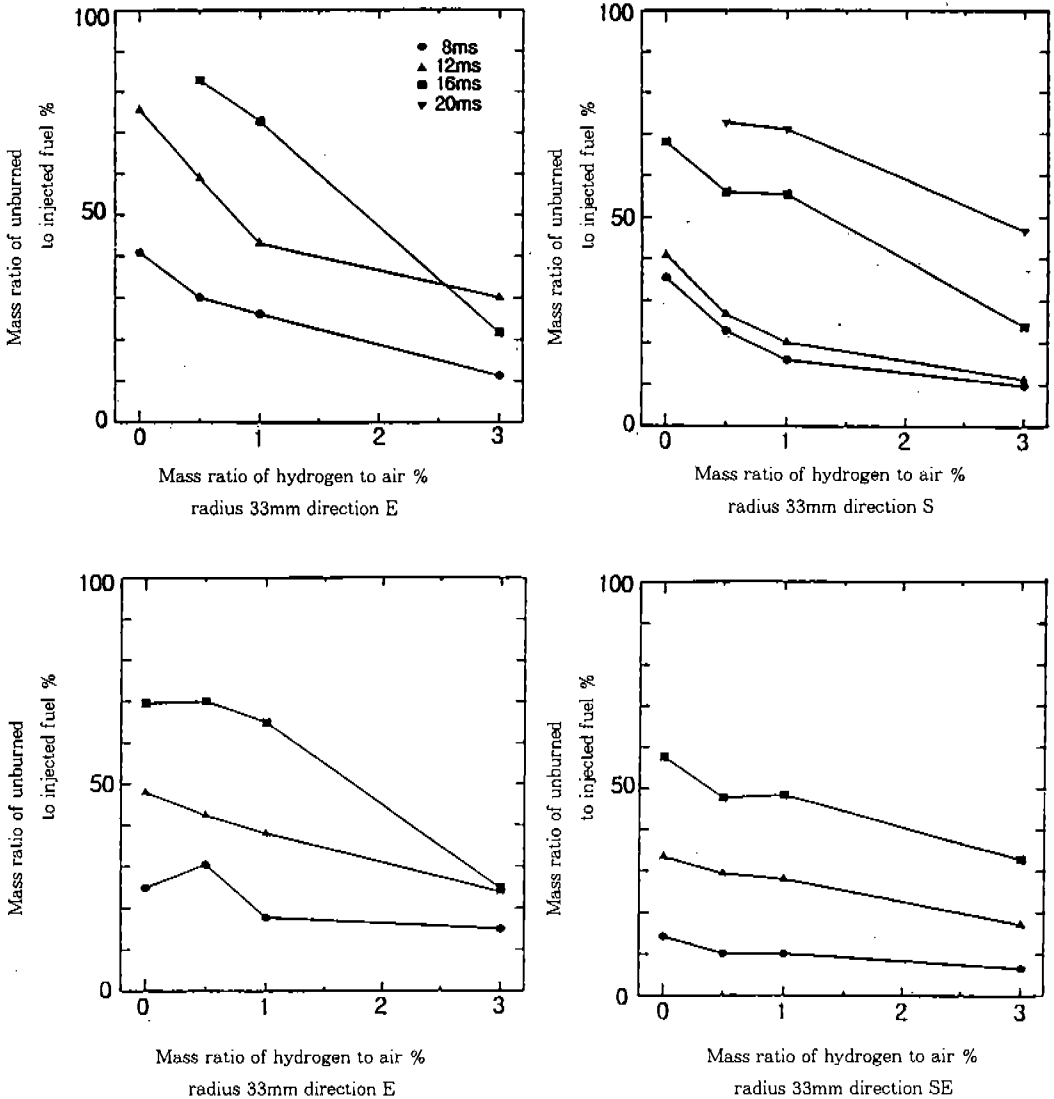


Fig.9 Mass ration of unburned hydrocarbons to hydrogen addition ratio in the various ignition positions

### 3.3 미연 비율

Fig.9에 각 점화위치와 점화시기에서 수소첨가 비율에 대한 미연 비율의 관계를 나타냈다.

많은 점화위치에서 수소의 첨가비율의 증가에 따라 미연비율이 감소하고 있음을 알 수 있으며, 수소첨가비율 3%에서 그 효과가 두드러져 미연 비율이 20% 이하가 되는 경우가 대부분이다.

그러나 전체적으로 점화시기가 늦어지면 미연비율이 증가하고 있으며, 이는 시간이 경과함에 따라 연료가 확산되고 회박화되어 연소가 불가능한 혼합기가 증가하기 때문이다.

수소첨가비율이 0%, 0.5%, 1%에서는 점화시기가 12ms 이상이면 미연비율이 50% 이상이 되는 점화위치가 많았다. 그러나 수소첨가비율 3%에서는 점화시기를 16ms, 20ms로 늦추어 연

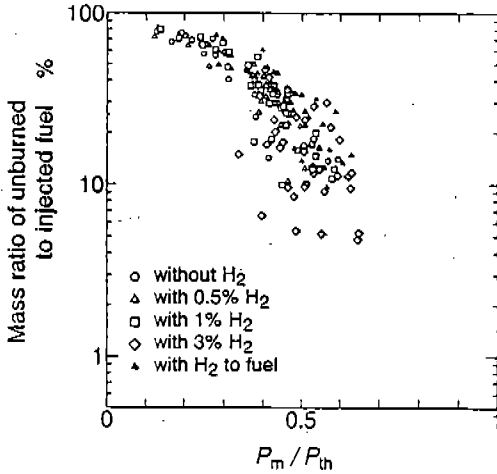


Fig.10 Mass ratio of unburned hydrocarbons to injected fuel to  $P_m/P_{th}$

료의 확산이 진행되어 과회박화됨에도 미연비율이 낮았다. 이것은 수소의 첨가가 과회박화된 혼합기의 연소촉진에 좋은 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig.10에는 미연 비율과  $P_m/P_{th}$ 의 관계를 나타내고 있다. 여기에서 수소의 첨가비율이 증가함에 따라  $P_m/P_{th}$ 의 값이 커지고 연료의 미연비율이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 특히 3%의 수소첨가의 경우에 연소압력이 높고 미연비율이 낮은 경우가 대부분이다. 수소를 첨가하지 않는 경우에는 미연 비율 80%가 되는 경우가 많이 있으나, 수소의 첨가 비율이 적은 0.5%, 1%일 때도 연소압력이 증가함과 동시에 미연 비율이 낮아지고 있으며, 특히 점화시기가 빠르면 그의 효과가 크게 나타나고 있다. 그러나 연료가 회박화가 심한 늦은 점화시기에서는 미연 비율이 낮아지지 않고 있다. 이는 어느 일정량 이상의 수소가 존재해야 과회박화된 혼합기의 연소에 도움을 주고, 미연 비율을 줄일 수 있는 것으로 생각된다.

수소의 첨가비율 3%에서는 모든 점화시기에서 미연비율이 크게 감소하고 있다. 또한 수소를 급기에 첨가하지 않고 연료에 첨가한 경우에도

낮은 미연비율을 나타내는 점화위치가 많았으며, 공기에 수소를 첨가한 경우의 값과 거의 같았다.

미연탄화수소 배출의 주 원인은 연소기간이 길어짐으로 인하여 화염전파 후기에 미연혼합기가 많이 존재하여 최후에 연소하는 것이다. 그러므로 성층화된 혼합기내를 최적 당량비 부근의 농도로 만들어 초기에 화염전파가 빨리 이루어져 지나치게 회박화되는 혼합기를 감소시키는 것이 중요하고, 수소를 첨가함으로써 전체적인 화염전파 속도를 증가시키고 화염전파 후기에 남아있는 혼합기의 연소를 촉진하는 것이 효과적이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

수소를 급기되는 공기나 연료에 첨가한 직접분사식 성층연소실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공기에 수소를 첨가한 경우 많은 점화위치에서 연소압력이 증대되고, 연소가스의 미연비율이 감소하였다.
- 2) 공기에 수소를 첨가함으로써 점화가능한 점화위치의 수가 증가하고 연소압력이 증대되지만 수소첨가비율이 0.5~1%인 경우에는 빠른 점화시기에서만 미연비율이 감소하였다.
- 3) 수소의 첨가비율이 3% 이상이 되면 연료의 농도분포에 영향을 적게 받아 빠른 점화시기에서 미연비율의 감소에 효과적이며, 늦은 점화시기에도 비교적 낮은 미연비율을 얻었다.
- 4) 수소를 연료에 첨가한 경우가 같은 양을 공기에 첨가한 경우보다 연소압력이 증대되었다.

#### 참 고 문 헌

1. Richard M. Frank and John B. Heywood, "Combustion Characterization in Direct-Injection Stratified-Charge Engine and Implication of Hydrocarbon Emissions", SAE

- paper, No. 892058, 1989.
2. Richard M. Frank and John B. Heywood, "The Importance of Injection System Characteristics on Hydrocarbon Emissions from a Direct-Injection Stratified-Charge Engine", SAE paper, No. 900609, 1990.
  3. H. Kido, K. Nakashima, T. Kitagawa and M. Nishino, "Fundamental Studies on Direct Injection Stratified Charge Combustion in A Constant Volume Bomb," ASME · JSME Thermal Engineering Joint Conference, Honolulu, pp. 205~212, 1987.
  4. 城戸裕之, 中島健四郎, 北川敏明, 西野雅明, "定容容器内直噴式火花點火成層燃焼に関する研究(障害物による局所矛盾混合化の効果)", 日本機械學會論文集(B篇), Vol.54, No.505, pp.2703~2709, 1988.
  5. 城戸裕之, 中島健四郎, 北川敏明, 西野雅明, "定容容器内直噴式火花點火成層燃焼に関する研究(半徑方向燃料噴射による局所矛盾混合化の効果)", 日本機械學會論文集(B篇), Vol. 54, No.506, pp.2949~2954, 1988.
  6. 北川敏明, 城戸裕之, 石田裕幸, "對向噴射による成層火燃焼方式の研究", 日本自動車技術會論文集, Vol.22, No.2, pp. 3~8, 1991.
  7. 홍명석, 김경석, "정적 용기내의 직접분사식 스파크 점화 성층연소에 관한 연구", 한국자동차학회 논문집, 제2권 제5호, pp.30~40, 1994.
  8. 홍명석, 장완식, "직접분사식 성층 연소 방식에서 미연 탄화수소의 저감", 동력자원연구소지(조선대), 제15권 제2호, pp.119~132, 1993.
  9. Hiroyuki kido, Shuwei Huang, Kimitoshi Tanoue, Takanori Nitta, "Improving the combustion Performance of lean hydrocarbon mixtures by hydrogen addition", JSAE Review, Vol. 15, pp. 165~170, 1994.