

## 스파크플러그 주위의 HC 농도 측정 및 연소특성 분석

### Measurement of HC Concentration near Spark Plug and Combustion Analysis

조 한 승\*, 송 해 박\*, 이 종 화\*\*, 이 귀 영\*\*\*  
H. S. Cho, H. B. Song, J. H. Lee, K. Y. Lee

#### ABSTRACT

Unburned hydrocarbon is a key contributor to both the fuel economy and emissions of automotive engine. Cyclic variation of HC emission is of importance, especially during throttle transients. The real time measurement of hydrocarbon is particularly important to obtain a better understanding of the mechanisms for combustion and emissions, especially during cold start and throttle transient condition.

This paper reports the cycle resolved measurement technique of unburned hydrocarbons to quantify rapid changes of in-cylinder concentration in the vicinity of spark plug by using the Fast Response Flame Ionization Detector(FRFID). While this instrument actually measures fuel concentration, its results can be indicative of the AFR behaviour. In order to understand the rapid change of hydrocarbons with cylinder pressure, it is necessary to study the response time delay of the system, including the time associated with gas transportation to FID. And signal from FRFID is correlated with cylinder pressure data to relate changes in mixture preparation to the classic analysis, such as indicated mean effective pressure(IMEP) and ignition delay, etc.

주요기술용어 : Unburned Hydrocarbon(미연탄화수소), Spark Plug(스파크플러그) The Fast Response Flame Ionization Detector(고속응답 미연탄화수소 측정장치), Response Time Delay(응답지연시간), Cylinder Pressure(실린더 압력)

---

\* 정회원, 아주대학교 대학원  
\*\* 정회원, 아주대학교  
\*\*\* 정회원, 고등기술연구원

## 1. 서 론

엔진의 설계 또는 시스템 개발에 있어서 중요하게 고려되어야 할 사항이 몇 가지가 있는데 그 중에서 환경오염을 줄이기 위한 유해배출물 저감은 대기오염 규제가 강화되고 있는 현실의 실정에서 매우 중요하다. 그리고 오일파동 이후, 유가상승으로 인하여 엔진의 연비향상에도 비중을 두게 되었다. 최근 배출가스 저감 측면에서는 냉시동(cold start)시 연료의 액상형태로의 과도한 유입과 불완전연소, 또는 트로틀 급개폐에 따른 공연비의 급격한 변화로 인하여 과도하게 배출되는 미연탄화수소(hydrocarbons, HC)를 저감시키려는 연구가 활발히 진행되어왔다.<sup>1)~4)</sup>

이러한 연구들을 수행하기 위해서는 실린더 내부 및 엔진시스템에서 발생하는 복잡한 현상 즉, 실린더내로의 연료유입현상, 점화 및 연소과정 그리고 배출과정 등을 해석할 필요가 있으며 최근에는 엔진의 운전조건에 따라 실시간으로 측정할 수 있는 계측방법(diagnostic instrument)의 기술개발이 뒤따르고 있다. 최근 실시간으로 HC를 측정할 수 있는 계측장비중의 하나인 고속응답 미연탄화수소 측정장치(Fast Response Flame Ionization Detector, FRFID)는 많은 엔진 엔지니어들의 관심을 끌면서 엔진해석 및 개발분야에서 이용되어왔다. 배기포트에서 측정된 HC 농도의 변화특성은 산화과정 및 엔진의 운전조건 변화에 따른 배출물 특성을 이해하는데 많은 도움을 주고 있으며 최근에는 이러한 해석 노력이 엔진의 운전조건에 따른 실린더 내 혼합비의 특성을 이해하기위한 분야로 집중되고 있다.<sup>5)~12)</sup>

실린더내의 HC 농도를 측정하는 것은 흡입공기와 복잡한 연료의 거동을 이해하는데 도움을 준다. 특히 스파크플러그 주위의 HC 농도는 점화후 초기화염형성 및 화염전파에 대한 해석에 도움을 줄뿐만 아니라 흡기압이 낮은 저부하나 공회전상태에서 사이클 변화에 따른 연소안정성 측면에서 밀접한 관계가 있다. 그러므로 자동차 엔진에서 회전속도, 부하, 공연비(air-fuel ratio), 밸브타이밍 등의 운전조건에 따른 스파크플러그

주위의 HC 농도변화 및 연소와의 상관관계에 대한 연구는 엔진의 흡·배기계 설계, 성능개발 및 배기가스 저감 측면에서 매우 중요하다.<sup>9)~12)</sup>

본 연구에서는 FRFID를 이용하여 스파크플러그 주위의 HC 농도를 측정하여 실린더 내에서의 출력신호(output signal)의 특성에 대해 언급하고자한다. 아울러 HC 농도와 연소상태와의 상관관계를 해석하여 실린더내 특성을 이해하기위한 기초자료로 활용하고자한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용되는 엔진은 현재 양산되고 있는 자동차용 4기통 1.5리터 DOHC 가솔린엔진이고 4번 실린더에 압전형 압력센서(Kistler, 6051A)를 설치하여 엔코더 신호에 따라 크랭크 각도별 압력을 측정할 수 있도록 하였다. 그밖에 흡기압을 측정하기 위해서 흡기메니폴드에 흡기압 센서(Kistler, 4045A)를 설치하였으며 배기가스 분석기(Horiba 사의 Mexa-8120) 및 온도 센서, 가스연료(프로판) 공급장치 등을 설치하였다. Fig.1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험에서는 연료를 프로판으로 이용하였는데 이것은 액체연료에서 발생하는 증발과정 및 액막형태로의 실린더내 유입 등의 복잡한 포트내 연료거동현상을 배제하여 뚜렷한 출력신호(output signal) 및 정확한 현상을 얻기위한 것이다.

실린더내의 HC 농도를 실시간으로 측정하기 위하여 FRFID의 샘플링 프루브(sampling probe)를 스파크플러그 중심전극에서 약 7mm정도 떨어진 곳에 설치하였다. 배기포트에서도 HC 농도를 측정하였는데 그 위치는 배기밸브에서 약 50mm정도 떨어진 곳이다. HC 농도를 측정할 때 중요한 점은 실린더내의 압력변화에 관계없이 항상 일정량의 샘플링가스를 FRFID로 공급하는 것이다. Hydrocarbon Sampling Module(HSM)에서는 정압실(Constant Pressure Chamber)를 설치하고 진공펌프에 의해 FRFID와 정압실사이에서 일정한 압력차( $\Delta P$ )를 생기게 함으로서 FRFID로 보내는 샘플가스량을 일정하게 하였다. FRFID 내 압력과  $\Delta P$ 의 선택은 FRFID 화염의 안정성

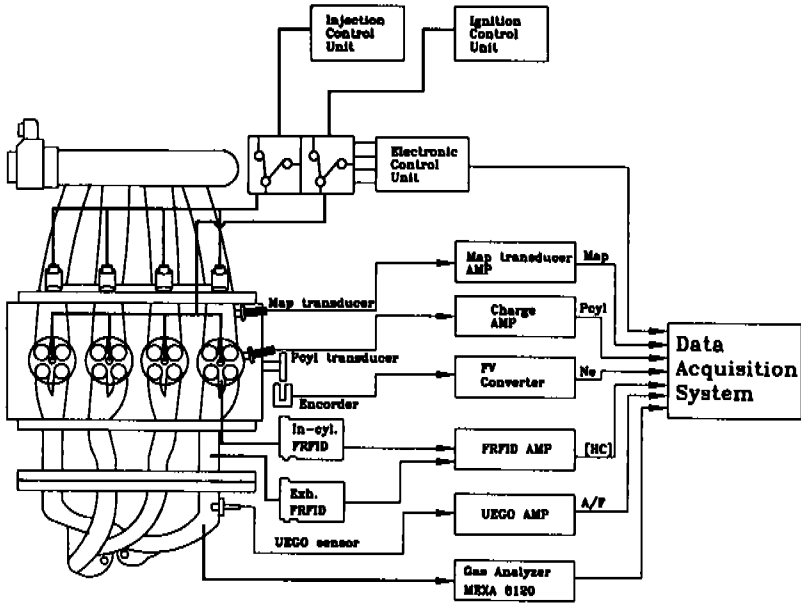


Fig.1 Schematic diagram of test engine

과  $\text{span gas}$ 의 농도의 변화에 따른 FRFID의 출력신호와의 비례정도(linearity)에 근거하여 선택하였다. 배기포트에서 측정시 정압실의 압력은 0.7(bar)이며  $\Delta P$ 는 0.132(bar)로 하였고 실린더내의 가스를 샘플링시에는 정압실의 체적이 작으면 실린더내 압력의 상승에 따라 정압실로 들어오는 샘플링 가스량이 과다하게 될 경우 정압실내 압력이 상승하게 되어 FRFID로 보내는 샘플량을 일정하게 유지할 수 없으므로 이러한 문제점을 해결하기위해 정압실을 대기상태로 노출시켜 압력을 대기압으로 하였으며  $\Delta P$ 는 0.08(bar)로 고정하였다.<sup>11),12)</sup>

FRFID에서  $\text{span gas}$ 는 프로판( $\text{C}_3\text{H}_8$ )가스, fuel은 수소( $\text{H}_2$ ), zero gas는 공기 그리고 purge gas는 질소( $\text{N}_2$ )를 사용하였다.  $\text{span gas}$ 의 경우, 배기포트에서 샘플링시에는 프로판 가스의 농도는 1,035ppm $\text{C}_3/\text{N}_2$ , 실린더내에서 샘플링시에는 40,436ppm $\text{C}_3/\text{N}_2$ 로 하여 교정(calibration)하였다. 엔진의 운전조건은 1500rpm, bmep 1.5(bar), 당량비 1.0 그리고 점화시기는 MBT 조건에서 실험을 수행하였으며 FRFID 교정의 검증 및 확인을 위해서 임의로 실화(misfire)를 일

켜 확인하였다.

### 3. 실험결과 및 해석

#### 3.1 FRFID를 이용한 실린더내 HC 농도 측정 및 해석

Fig.2는 실린더 압력과 실린더내에서 측정된 FRFID의 결과를 나타낸 것이다. 정압실 압력이 대기압, 1(bar)이므로 연소실의 압력이 대기압 이상으로 되는 지점부터 FID로 혼합기가 공급되어 측정시 시작된다고 볼 수 있다. 그런데, 그림에서 실린더의 압력이 1(bar)가 되는 지점과 측정값의 상승지점이 일치하지 않는데 이것은 FRFID의 샘플링 프루브를 통과하는 시간(transport time)과 FID 내의 화학반응에 의해 전기적인 응답으로 나타낼 때까지 걸리는 시간(transit time)을 고려한 응답지연시간(response time delay)에 의해 나타나는 현상이다.

Fig.3과 Fig.4는 엔진운전중 실화(misfire)시켜 얻은 실린더압력과 실린더내에서 측정된 FRFID의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 A는 점화한 경우, B는 실화한 경우를 나타내는데 A 사이클

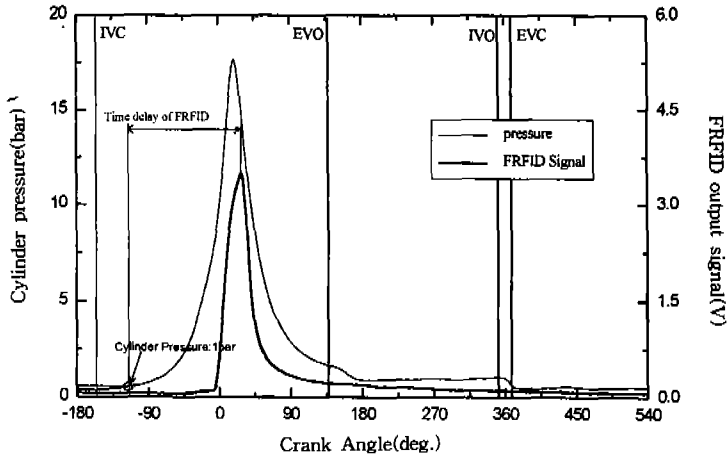


Fig.2 Typical patterns of measured HC concentration using FRFID

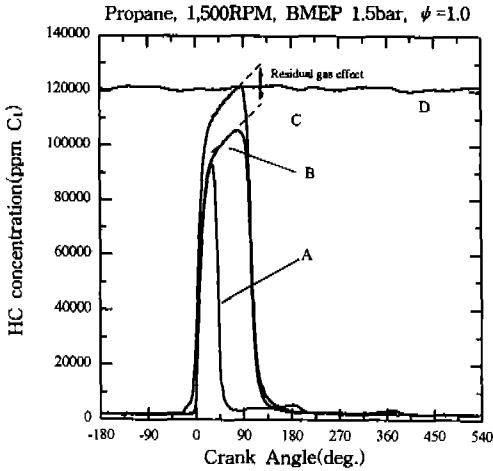


Fig.3 Some selected cycles in cylinder: FRFID signal & pressure signal

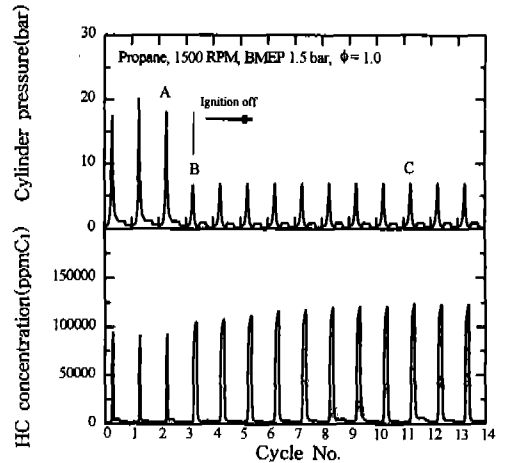


Fig.4 Comparison of in cylinder FRFID signals

의 바로 다음 사이클을 표시한 것이며 C는 모터링(motoring)상태의 경우이다. D는 모터링 상태에서 배기메니폴드내에서 측정된 FRFID 출력신호이다. 모터링의 경우, 혼합기가 실린더에서 배출될 때 동질성(homogeneous)을 띠기 때문에 배기메니폴드에서 측정된 출력신호(D)가 편평함을 나타낸다. 실린더 내에서의 출력신호(C)는 피스톤의 상하운동에 의해서 혼합기의 압축, 팽창 과정이 생기나 정상상태에 이르는 마지막 정점

이 배기포트에서 측정된 결과와 동일함을 나타내고 있다. 그러나, 실제 점화한 경우인 (A)에는 화염이 측정위치를 지나가기 때문에 더 이상 샘플링할 수가 없어 출력신호가 똑 떨어지는 형태를 띠고 있다.

모터링인 경우, 급격한 신호의 상승에 의해 최고점에 도달한 값이 샘플링 프루브가 위치한 스파크플러그 주위의 HC 농도로 볼 수 있는데, 실린더내의 HC 농도가 균일하다면 이 값이 설

정한 공연비와 일치하여야 한다. 프로판의 경우 실린더내의 HC 농도는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.<sup>11)</sup>

$$C_n H_m + \frac{(n + \frac{m}{4})}{\phi_{C_n H_m}} (O_2 + 3.773 N_2) + n_{RG} W_{RG} \rightarrow \text{chemical reaction (1)}$$

여기서

$$HC_{\text{molar concentration}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\phi_{C_n H_m}} (n + \frac{m}{4}) \times 4.773 + n_{RG}}$$

식(1)에서  $n_{RG}$ ,  $W_{RG}$ 는 각각 잔류가스량의 몰과 분자량을 나타낸다. 프로판( $C_3H_8$ )의 H/C 비가 2.67이고 당량비( $\phi_{C_n H_m}$ )가 1.0,  $n_{RG} = 0.0$ 인 경우 HC 물농도는 약 12.0%(120,000ppm  $C_1$ )가 된다. 그러나, Fig.4에서 실화한 경우인 (B)에는 (C)의 경우처럼 포화상태(saturation state)로 이르는 정점 위치까지 도달하지 못함을 나타내고 있는데 이것은 이전 사이클에서 실린더내에 남아있던 잔류가스의 영향에 의해 FRFID에서 샘플링한 실린더내 혼합기의 농도에 편차가 생기기 때문이다. Fig.4의 (B)와 (C)에서 나타나듯이 포화될 때까지의 기울기와 위치가 일치함을 볼 수 있는데 이를 근거로 하여 점화시의 잔류가스량은 (A)의 최대값과 이때의 위치에 해당하는 (C)에서의 값과의 차라고 볼 수 있다.

측정한 스파크플러그 주위의 HC 농도 신호는 충분히 포화되기전에 화염이 도달하게 되므로, 연소조건에서 포화된 실린더내 HC 농도를 측정하기 위해서는 이에 대한 보정이 필요하게 된다. Fig.4에서 점화과정의 출력신호와 실화시 두 신호를 비교해볼 때 각 경우의 최대값으로 수렴해가는 기울기가 거의 동일함을 알 수 있다. 동일한 운전조건에서 신호의 상승하는 형상은 FRFID의 샘플링과정에서 발생하는 특성으로 볼 수가

있으므로 정상상태에서 포화지점까지의 보정식은 실화된 사이클들의 평균사이클(ensemble average cycle)를 기준으로 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$HC_{\text{saturation}} = HC_{ms} - (HC_{m,deg} - HC_{f,deg}) \quad (2)$$

보정값인  $HC_{\text{saturation}}$ 은 연소조건에서의 최대값인  $HC_{f,deg}$ 와 동일한 위치에서의 평균사이클에서의 값인  $HC_{m,deg}$ 과의 차이를 평균사이클에서 포화된 값인  $HC_{ms}$ 에서 감해주는 값으로 계산할 수 있다. Fig.5에서 그래프 (E)는 식(2)을 사용하여 포화되는 지점을 표시한 것이다.

### 3.2 스파크플러그 주위의 HC 농도와 엔진 연소와의 관계

본 절에서는 연소의 사이클 변화의 주요 요인들중의 하나인 스파크플러그 주위의 HC 농도와 실린더 압력을 이용한 연소해석 결과와의 상관관계에 대해 고찰하고자 한다. 스파크플러그 주위의 HC 농도는 식(2)에 의해 계산한 포화되는 지점의 농도, 즉 Fig.5에서 그래프(E)의 최고정점을 의미한다. 연소의 사이클 변화에 있어 중요인자라고 생각되는 각 사이클의 화염발달기간, 열

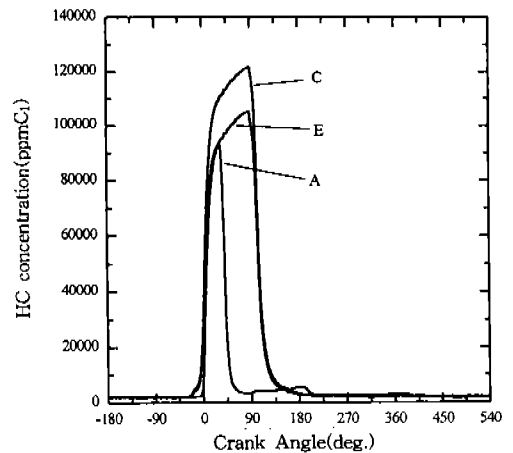


Fig.5 Saturated HC concentration using Equ.(2)

발생량, 실린더 압력이 최대일때의 크랭크각(Location of Peak Pressure, LPP), 도시평균 유효압력(Indicated Mean Effective Pressure, IMEP) 등을 선택하여 그 결과를 비교하였다. 해석결과는 연속 120 사이클의 실험결과를 이용한 것이다.

본 연구에서 연소율을 구하는데 사용한 방법은 Gatowski et al.(13)에 근거하고 있다. 실린더내를 하나의 시스템으로 설정하고 연소에 의한 열발생률( $\delta Q_c$ ), 피스톤 운동에 의한 일( $PdV$ ), 시스템 내부에너지( $dU$ ) 및 실린더 외부로의 열손실( $\delta Q_L$ )에 대한 에너지 balance로부터 연소율을 구해내는 방법으로 실린더내의 압력데이터 뿐만아니라 잔류가스량, 열손실 계수, 운전조건 등의 값들이 입력되어야 한다.(식(3) 참조)

$$\delta Q_c = PdV + dU + \delta Q_L \quad (3)$$

크랭크 각( $\theta$ )에 대한 미분식으로 표현하면 식(4)와 같다.

$$\frac{dQ_c}{d\theta} = P \frac{dV}{d\theta} + \frac{dU}{d\theta} + \frac{dQ_L}{d\theta} \quad (4)$$

내부에너지항에 이상기체 상태방정식을 적용하면 식(4)는 식(5)로 표현할 수 있다.

$$\frac{dQ_c}{d\theta} = \frac{V}{\gamma-1} \frac{dP}{d\theta} + \frac{\gamma P}{\gamma-1} \frac{dV}{d\theta} + \frac{dQ_L}{d\theta} \quad (5)$$

여기서

$$\gamma = 1.392 - 7.35 \times 10^{-5} T_g(K)$$

$$\frac{dQ_L}{d\theta} = hA(T_g - T_w)$$

$A$ 는 표면적을 의미하고  $T_w$ ,  $T_g$ 는 각각 표

면온도, 가스의 평균온도를 나타낸다.  $h$ 는 열전달계수로서 Woschni's correlation[14]을 이용하였다. 그러므로 총 발생열량  $Q$ 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있고 식(5)의 결과를 식(6)에 대입하여 구한다.

$$X_b = \frac{\delta Q_c}{\sum \delta Q_c} \quad (6)$$

이와같이 구해진 각 사이클의 실린더 압력을 이용한 연소해석 결과로부터 HC 농도와 상관계수를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 Fig.6은 질량연소율 2.5%, 10%, 50%, 90%인 크랭크 각을 HC 농도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 대부분 연소 초기의 영향이 연소 후기까지 계속됨을 알 수 있다. 혼합비가 희박할수록, 즉, HC 농도가 낮을수록 연소율이 느리게되며 HC 농도가 약 11.0% 이하에서는 연소의 진행상황이 화염발달기간에 비례하여 길어지는 형태를 띠고 있다. 반면에 HC 농도가 11.0% 이상에서는 초기의 화염발달기간의 변화에 따라 이 후의 연소기간이 단순히 이동(shift)하는 경향을 띠고 있다.

Fig.7은 열발생량과의 관계를 나타낸 것으로 식(5)에서 계산한 값을 적분한 것이다. 전반적으로 HC 농도에 따라 일정한 분포를 나타내고 있어 스파크플러그 주위의 극소 혼합비의 변화가 열발생량에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

각각의 사이클에서 실린더 압력이 최고일때의 크랭크각은 연소의 사이클 변화해석에 있어서 연소율과 관련된 중요한 인자중의 하나이다. Fig.8은 HC 농도에 따른 실린더 압력이 최대일때 크랭크각의 분포를 나타낸 것으로 HC 농도가 상대적으로 낮은 경우에 상사점에서 멀어지는 경향을 보이고 있다. Fig.6에 나타낸 결과와 같이 화염발달기간이 길어지는 경향과 관련이 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 HC 농도에 따라 도시평균 유효압력(IMEP)의 분포를 나타낸 것이며 실험에서의 IMEP의 변화계수(Coefficient of Variation)는 2.1%이다. HC 농도에 따라 선형적인 분포를

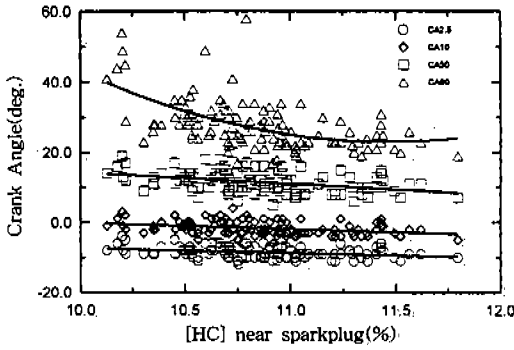


Fig.6 Effect of HC concentration on combustion

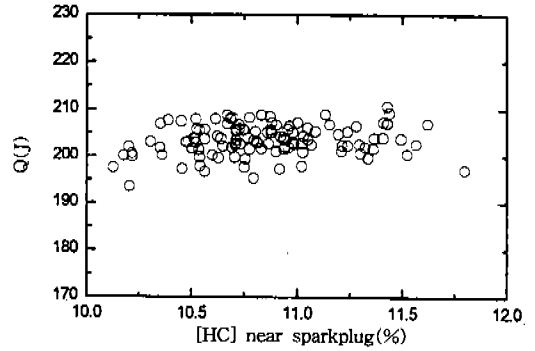


Fig.7 Effect of HC concentration on Q

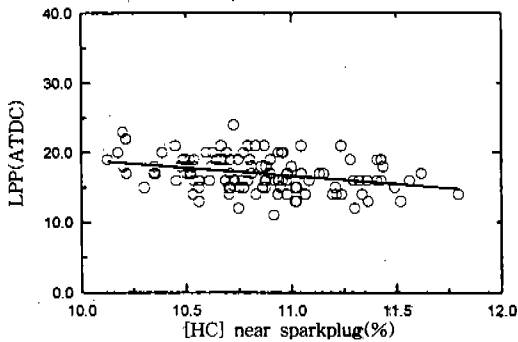


Fig.8 Effect of HC concentration on LPP

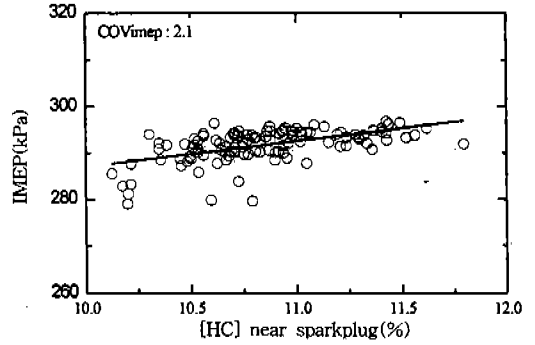


Fig.9 Effect of HC concentration on IMEP

나타내고 있어 스파크플러그 주위의 HC 농도 변화와 IMEP의 분포가 서로 연관이 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 FRFID를 이용하여 실시간으로 스파크플러그 주위의 HC 농도를 측정하고 연소실 압력변화에 대한 신호의 특성과 연소 해석 결과와의 상관관계에 대해 고찰하였다. 본 연구의 해석결과는 엔진의 성능 및 배기가스 저감에 관한 연구를 위한 기초자료로서 활용할 수 있다.

1) 점화시 연소과정에서의 FRFID의 신호는 화염도달에 의해 충분히 포화되지 못하고

낮은 농도를 나타낸다. 비록 화염도달에 의해 낮은 농도를 나타내지만 그 이후의 출력신호의 기울기는 실화시 FRFID 출력신호의 포화되는 기울기와 같다는 가정하에서 점화시 화염도달시기의 위치와 출력신호의 값을 이용하여 포화되는 HC 농도를 계산할 수 있었다.

2) HC 농도가 낮을수록 연소기간이 화염발달 기간에 비례하여 길어지는 경향을 보이거나 스파크플러그 주위의 HC 농도변화가 총 열발생량의 변화에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

3) 연소의 사이클 변화에 있어서 연소율과 관련된 중요한 인자들인 도시평균 유효압력 (IMEP)와 실린더 압력이 최대일때의 크랭크각(LPP)과의 관계에서도 HC 농도와

선형적인 관계를 나타내고 있다.

### 참 고 문 헌

1. J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, 1987.
2. H. Kaoru, T. Hitoshi and A. Shusuke, Emissions Reduction During Warm-up Period by Incorporating a Wall-Wetting Fuel Model on the Fuel Injection Strategy during Engine Starting, SAE paper 952478, 1995.
3. J. Fox, K. D. Min, W. K. Cheng and J. B. Heywood, Mixture Preparation in a SI Engine with Port Fuel Injection during Starting and Warm-up, SAE paper 922170, 1992.
4. P. Brown and W. Woods, Measurement of Unburnt Hydrocarbons in a Spark Ignition Combustion Engine during Warm-up Period. SAE paper, 922233, 1992.
5. N. Collings and J. Willey, Cyclically Resolved HC Emissions from a Spark Ignition Engine. SAE paper 871691, 1987.
6. G. R. Sleightholme, In-Cylinder Measurements of Charge Inhomogeneity in a Spark-Ignition Engine. SAE paper 900484, 1990.
7. P. R. Meernik and A. C. Alkidas, Impact of Exhaust Valve Leakage on Engine-Out Hydrocarbons. SAE paper 932752, 1993.
8. R. C. Meyer and R. H. Thring, Mixture Preparation Measurements. SAE paper 950069, 1995.
9. S. M. Schurov and N. Collings, An Experimental Investigation of Fuel Transport in a Port Injected Engine. SAE paper 952485, 1995.
10. J. G. Grawford and J. S. Wallace, Validation Tests for a Fast Response Flame Ionisation Detector for In-Cylinder Sampling Near the Spark Plug. SAE paper 961201, 1996.
11. 조한승, 이종화, 이귀영, 전기절화기관에서 실린더내 잔류가스량 측정방법에 관한 연구, KSAE 96380311, 1996.
12. Cambustion Ltd., *HFR400 Fast FID User Manual*.
13. J. A. Gatowski, E. N. Balles, K. M. Chun, F. E. Nelson, J. A. Ekchian and J. B. Heywood, Heat Release Analysis of Engine Pressure Data, SAE paper 841359, 1984.
14. G. Woschni, A Universally Applicable Equation for Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine. SAE paper 670931, 1967.