

가솔린엔진에서 FRFID를 이용한 액막 연료량 추정

Estimation of Wall Wetting Fuel by FRFID in an S.I Engine

황 승 환*, 이 종 화**, 유 재 석**
S. H. Hwang, J. H. Lee, J. S. Yoo

ABSTRACT

According to the stringent exhaust emission regulation, precise control of air fuel ratio is one of the most important issues on gasoline engine. Although many researches have been carried out to identify the fuel transport phenomena in a port fueled gasoline engine, complexity of fuel film behavior in the intake port makes it difficult. The fuel film behavior was investigated recently by using visualization method and these gave us qualitative understanding. In this paper, the quantitative measurement method for the port fuel film is studied by using Fast Response Flame Ionization Detector(FRFID). The mass of fuel film on the port wall was measured by using the methods of fuel injection off, injection on and regression. The Fuel film mass was increased with increasing load at the same engine speed.

주요기술용어 : Air Fuel Ratio(공연비), Fuel Film(연료액막량), Fast Response Flame Ionization Detector(FRFID), Load(부하), Engine Speed(엔진회전속도)

1. 서 론

최근 배기가스에 의한 지구 환경 문제가 심각

해짐에 따라 북미를 중심으로 배기가스규제가 강화되고 있으며 이중에서도 특히 미연탄화수소에 대한 규제치가 가장 엄격한 수준으로 강화되었다.¹⁾ 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 많은 노력과 연구가 계속 진행되고 있으나 가솔린을 연료로 사용하는 엔진의 경우, 특히 워업 기간

* 정회원, 아주대학교 대학원

** 정회원, 아주대학교 기계공학과

중, 연료막의 벽류현상으로 인해 해결에 많은 어려움이 있다.²⁾ 아울러 비정상 상태로 운전될 때 이러한 문제에 기인된 연료의 이송 지연에 의해 공기연료비의 변동이 수반되고 이는 배출가스량과 직접적으로 연관된다. 그러므로 연료액막에 관한 정량적 연구는 정밀한 연료분사량 제어를 위해 필요하며, 특히 공연비 제어 알고리즘 개선을 위하여 선행되어 연구되어야 할 중요한 분야이다.

현재 연료액막량 측정에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 가시화 엔진을 이용하여 레이저 유도 현광법을 이용하여 실린더내의 연료분포에 대한 촬영 및 분석기법이 연구되고 있으며,³⁾ 흡기포트내의 연료분사를 비디오풀 촬영하여 연료의 거동에 관한 정성적 분석 방법이 수행되고 있다. 도요다 자동차에서는 전자 제어되는 밸브 기구를 사용하여 연료액막량을 정량적으로 측정하였으며⁴⁾ 혼다에서는 FRFID를 사용하여 연료액막량을 측정하였으며 이를 제어알고리즘에 활용하였다.⁵⁾

본 연구에는 FRFID 장비를 사용하여 정상상태에서의 연료액막량을 추정하는 방법에 관하여 연구하고 각 해석방법에 대한 차이를 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 엔진은 4기통 1.5리터 DOHC 가솔린엔진이며, 흡기밸브타이밍은 IVO : BTDC 8° IVC : ABDC 42°이다. 엔진제어를 위해서 점화시기 조절장치(IC5200)와 연료분사 조절장치를(IC5160) 설치하였다. 플레넘챔버의 압력을 측정하기 위하여 절대압센서(Kistler, 4045A)를 설치하였으며, 공연비는 UEGO센서(Horiba, Mexa-8120)를 사용하여 측정하였다. 연료소비량을 측정하기 위해서 연료유량계(AVL, 730)를 설치하였다. 연구 목적상 모터링이 가능한 동력계(AVL, APA-102)를 설치하였으며 연소실내의 미연탄화수소를 측정하기 위하여 FRFID(Combustion Ltd., HFR400)를 4번 실린더에 설치하였다. 실험중 각 물리량은 A/D 컨버터에 의해 1° 간격으로 측정되어 PC에 저장된다(Fig.1).

실린더내의 미연탄화수소를 측정하기 위해서는 응답성이 매우 빨라야 하며 샘플 되는 가스의 양이 연소에 영향을 미치지 않아야 한다. FRFID는 기존의 FID보다 응답성이 매우 빠르며(3-4ms) 미연탄화수소의 농도를 거의 실시간으로 측정할 수 있다.

FRFID의 샘플링 프루브는 스파크플러그 내

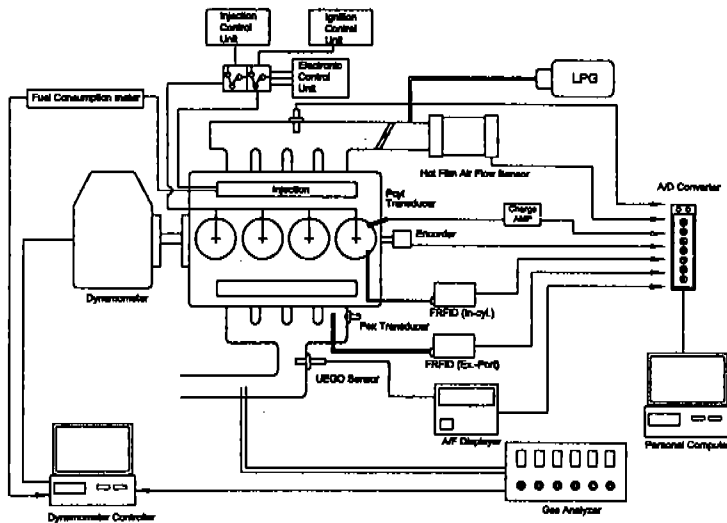


Fig.1 Schematic diagram of test engine

Table 1 Experimental conditions

rpm	MAP	Air/Fuel
1500rpm	0.4, 0.6, 0.8 bar	14.6
2000rpm	0.4, 0.6, 0.8 bar	14.6
2500rpm	0.4, 0.6, 0.8 bar	14.6

에 설치되어 있으며 중심전극에서 약 7mm정도 떨어진 곳에 설치하였다. FRFID에 일정한 유량의 샘플링가스가 공급될 수 있도록 정압실(Constant Pressure Chamber)을 대기에 노출시켰으며, 정압실과 연소실(Flame Chamber)의 압력차는 0.07bar로 하였다.⁶⁾ 실험장비의 교정을 위하여 프로판가스(C₁: 12,000ppm)를 사용하여 실험초기에 교정(Calibration)하였다.

엔진의 운전조건에 따른 연료액막량의 변화를 알아보기 위하여 엔진회전속도와 흡기압을 변수로 하여 실험하였다(Table 1). 이때 점화시기와 연료분사량제어는 상용 ECU에 의해서 제어되었으며, A/F는 14.6으로 하였다.

3. 연료액막량 추정 방법

3.1 엔진운전중 연료분사 정지 방법에 의한 추정

엔진운전중 연료분사와 전기점화를 중단하면 연소실내의 미연탄화수소 농도가 바로 '0'이 되지 않고 일정기간동안 상당히 높은 값을 유지하는데 이는 실린더내에 존재하는 연료액막과 흡기 포트 벽면의 연료액막이 증발하여 유입되기 때문이다. 정상상태시 연소실 온도가 높으므로 연소실내에 존재하는 액막상태의 연료량은 극히 적을 것이다. 따라서 이를 무시하면 실린더내 미연탄화수소 농도로부터 흡기포트 벽면에서 유입된 연료의 양을 구할 수 있으며, 이의 총합이 흡기 포트주위의 연료액막량이 된다.

Fig.2은 엔진 운전 중 연료분사 정지 방법으로 측정된 실린더압력과 실린더내의 미연탄화수소 농도를 나타낸 것이다. 점화신호와 연료분사를 정지하였을 때 실린더내 미연탄화수소 농도가 연료액막에서 증발되어진 연료의 유입에 의

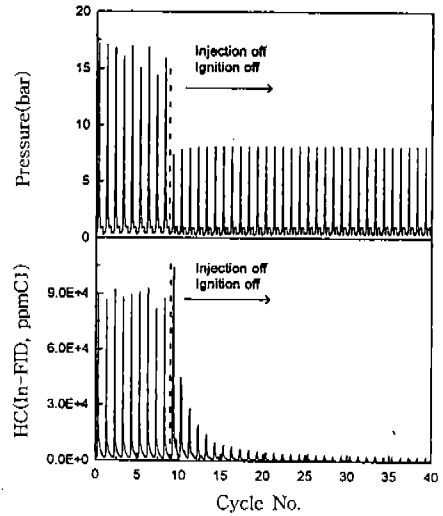


Fig.2 Behavior of cylinder pressure and in-cylinder HC concentration after injection and ignition off

해서 곧바로 '0'이 되지 않는 것을 알 수 있다. 사이클이 진행되면 연료액막은 점점 감소하고 이에 따라 실린더내로 유입되는 미연탄화수소 농도가 '0' 근처로 수렴하게 된다. 그러나 연료분사가 중단된 이후 상당한 시간이 지나도 실린더내의 미연탄화수소의 농도는 '0'으로 수렴하지 않는데 이러한 현상은 연료액막이 존재하기 때문에 일어나는 현상이 아니라 실린더 내의 온도가 높고 엔진이 계속 모터링 상태이므로 윤활유로부터 증발한 HC등이 기화하여 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

같은 실험조건에서 4회 반복하여 측정된 실린더내의 미연탄화수소 농도를 Fig.3에 나타내었다. 연료분사를 중단한 이후 첫 사이클의 미연탄화수소 농도는 거의 비슷한 값을 나타내고 있는데 이는 흡기포트 주위에 존재하는 액막연료의 양이 거의 같음을 의미한다. 이 때 실린더내의 미연탄화수소 농도를 질량으로 환산하는 식은 다음과 같다.

$$M_{cyl} = \frac{[HC] \cdot M_{inj, steady}}{(1 - X_r) \cdot 125,000 \cdot \phi} \quad (1)$$

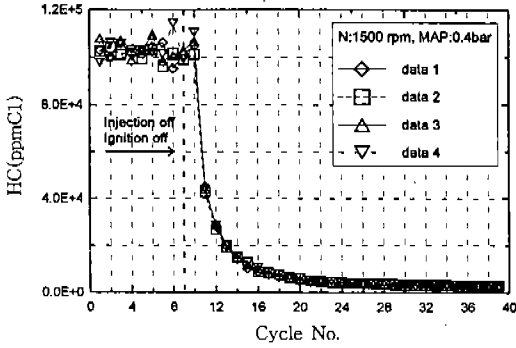


Fig.3 Behavior of HC concentration measured by in-cylinder FRFID after injection and ignition off

여기서 M_{cyl} : 실린더내에 존재하는 연료의 총 질량, $M_{inj,steady}$: 정상조건에서 한 사이클동안 분사된 평균연료량, X_r : 잔류가스물분율, $[HC]$: 미연탄화수소 물분율, ϕ 는 당량비를 나타낸다.

흡입행정동안 실린더로 들어오는 연료량(M_{ind})은 실린더내의 총량에서 잔류가스 속에 존재하고 있는 연료량(M_{res})을 빼주어야 한다.

$$M_{ind} = M_{cyl} - M_{res} \quad (2)$$

잔류가스속의 연료의 질량은 다음식으로 구할 수 있다.

$$M_{res} = \frac{[HC]_b \cdot M_{inj,steady}}{(1 - X_r) \cdot 125000 \cdot \phi} \quad (3)$$

여기서 $[HC]_b$ 는 전체 물분수에 잔류가스속에 있는 미연탄화수소 몰수이다.

정상연소과정에서는 잔류가스속에 남아 있는 미연탄화수소량이 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 $M_{cyl} \approx M_{ind}$ 로 생각할 수 있으나, 정확을 시키지 않는 경우는 연소되지 않은 앞 사이클의 농후한 혼합가스가 잔류가스로 남게 되므로 잔류가스속의 미연탄화수소량을 무시할 수 없다. 그러므로 실린더속의 총 연료량(HC_k)에서 잔류가스속에 남아있는 양을 빼주어야 한다. 이때 잔류가스는 앞 사이클에서 빠져나가지 못한 혼합가

스의 농도와 같으므로 앞 사이클의 농도(HC_{k-1})를 사용한다. 정상연소와 모터링시 잔류가스의 물분율이 같다고 생각하면, 잔류가스속에 남아있는 연료의 양은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$M_{res} = \frac{[HC]_{k-1} \cdot X_r \cdot M_{inj,steady}}{(1 - X_r) \cdot 125000 \cdot \phi} \quad (4)$$

(2)식에 (1)식과 (4)식을 대입하면 다음과 같다.

$$M_{ind} = \frac{([HC]_k - [HC]_{k-1} \cdot X_r) \cdot M_{inj,steady}}{(1 - X_r) \cdot 125000 \cdot \phi} \quad (5)$$

식(4.5)에 측정된 데이터의 평균값을 대입하여, 실린더로 유입된 질량을 구하였으며 이때 잔류가스비는 FRFID를 사용하여 구한 값을 이용하였다.⁷⁾

모터링시 오일의 증발에 의하여 오랜 시간이 지나도 측정된 미연탄화수소의 농도 값이 '0'이 되지 않기 때문에 이를 보정하기 위해서 분사정지 후 200에서 300사이클 사이의 평균값을 Background Noise로 간주하고 측정된 데이터에서 그 값만큼을 빼준 후 계산하였다.

Fig.4는 이러한 과정을 거쳐 구한 실린더로 유입되는 연료량을 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면 연료분사를 중단한 후 첫 사이클에서($k1$)

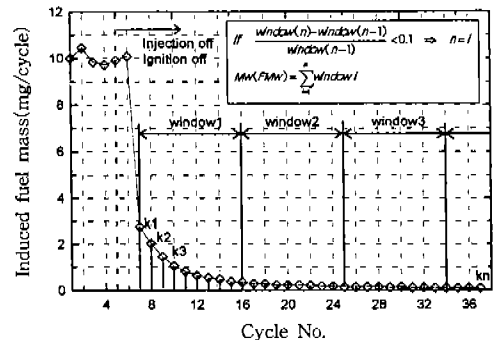


Fig.4 Illustration of the method to estimate wall-wetting fuel mass by using induced fuel after injection and ignition off

약 2.8mg의 연료가 실린더로 유입됨을 보여주고 있다. 이 그래프에서 액막연료에 의해 유입된 값을 적분하면 흡기포트에 존재하는 액막연료의 양이 된다. 이 때 액막연료가 모두 유입된 시기는 다음과 같은 방법으로 판정하였다.

연료분사를 중단한 후 첫 사이클부터 10개씩의 사이클 값을 더하여 Window값으로 정의하고 아래의 조건을 만족시키는 Window 까지를 적분하여 액막연료량(FM_w)을 구하였다. 여기서 하첨자 n은 Window의 순서를 나타낸다.

$$\frac{Window(n) - Window(n-1)}{Window(n-1)} \leq 0.1 \Rightarrow n = i$$

$$M_w(FM_w) = \sum_{i=1}^n Window(i) \quad (6)$$

3.2 모터링중 연료분사 방법에 의한 추정

이 실험을 하기 위해서는 엔진 흡기포트와 흡입밸브의 온도가 측정하고자 하는 정상운전조건과 같은 온도를 유지하고 있어야 한다. 만일 흡기포트와 밸브주위의 온도가 낮게 되면 연료의 증발율이 감소하게 되어 정상운전조건에서의 액막연료량과 차이를 보이게 된다. 앞의 실험을 통해서 정상운전중 연료분사를 중단할 경우 약 100 사이클이 지나면 흡기 포트주위에 액막연료가 모두 증발하여 소멸하게 되므로 연료분사를 중단한 후 100~150사이클 정도에서 연료를 다시 분사시키면서 측정을 하였다.

엔진의 속도와 드로틀 개도를 고정시키고 점화신호를 끊은 상태로 연료분사를 시작하면 실린더로 유입되는 연료의 양은 급격히 증가하다가, 일정한 값에 수렴하게 된다. Fig.5에 사이클 증가에 따른 실린더 압력과 실린더내 미연탄화수소량을 표시하였다. 모터링 중 연료를 분사하게 되면 연료의 일부는 실린더로 유입되고 일부는 벽면에 잔류하게 된다. 그 다음 사이클의 미연탄화수소의 농도는 조금 더 증가하는데 그 이유는 전 사이클에서 유입되지 못하고 흡기포트 주위에 남은 액막연료가 증발하여 들어오기 때문이다. 시간이 지나면 일정한 값으로 수렴하게 되며 이 때는 액막연료 증발에 의하여 소멸되는

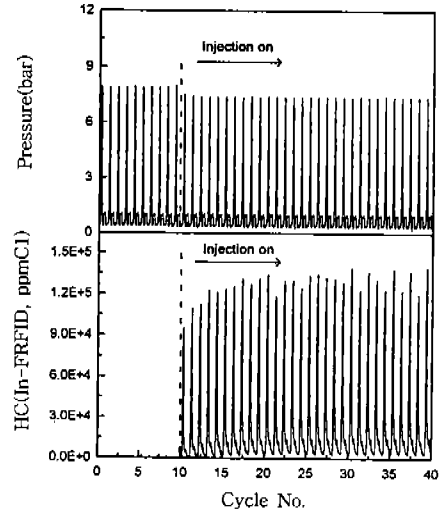


Fig.5 Behavior of cylinder pressure and in-cylinder HC concentration after injection on

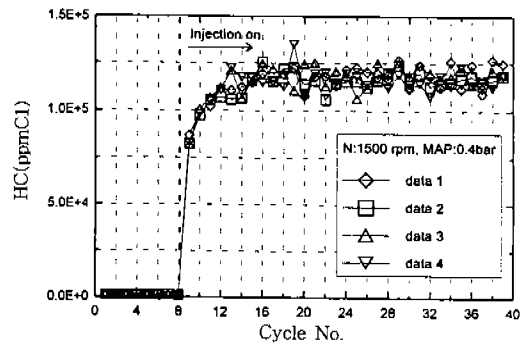


Fig.6 Behavior of HC concentration measured by in-cylinder FRFID after injection on

양과 분사된 연료중 유입되지 못하고 흡기포트 주위에 잔류하는 양이 같아지기 때문이다.

같은 실험조건에서 반복하여 측정한 실린더내의 미연탄화수소 농도를 Fig.6에 나타내었다. 연료분사 후 첫 사이클의 미연탄화수소의 농도는 거의 비슷한 값을 나타내고 있는데 이는 분사된 연료양이 거의 일정한 비율로 실린더로 유입되는 것을 의미한다. 사이클마다의 편차에 의한 오차를 줄이기 위하여 측정한 데이터의 평균값을 사용하여 연소실로 유입된 연료량을 구하여 Fig.7에 나타내었다.

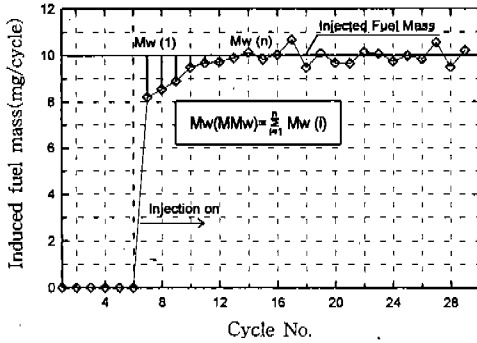


Fig.7 Illustration of the method to estimate wall-wetting fuel mass by using induced fuel mass after injection on

분사해준 연료량과 유입된 연료의 차가 흡기 포트에 남아 있는 잔류량이므로 정상상태에 도달하는 지점까지의 차를 적분하면 액막연료량을 구할 수 있다. 이 때 정상상태로의 도달여부는 연료분사 후 실린더로 유입된 연료량이 분사한 연료량과 같아지는 사이클로($M_{ind}(n)$) 정의하였다. 연료액막양(MM_w)은 연료분사 시작후 정상상태에 도달한 사이클까지 적분하여 구한다.

$$M_{inj} = M_{ind}(n)$$

$$M_w(i) = M_{inj}(i) - M_{ind}(i) \quad (7)$$

$$M_w(MM_w) = \sum_{i=1}^n M_w(i)$$

3.3 회귀법을 이용한 추정

흡기포트내 연료이송 현상을 설명하기 위한 모델로 많이 알려진 것은 Wall Wetting Model 이다.⁸⁾ 이 모델에서는 분사된 연료가 실린더로 직접 유입되는 양과 연료액막으로부터 증발되어 유입되는 양의 합으로 실린더로 유입되는 연료량을 나타낸다. 이것을 흡기포트주위에 존재하는 액막량으로 정리하면 식(8)을 얻을 수 있다.

$$M_{ind}(k) = \alpha \cdot M_{inj}(k) + \beta M_w(k-1)$$

$$M_w(k) = (1-\alpha)M_{inj}(k) + (1-\beta)M_w(k-1) \quad (8)$$

여기서 M_{inj} 는 분사된 연료의 양을 나타내며 계수인 α 는 분사된 연료중 분사한 사이클에서 실린더로 직접 유입된 연료의 비를 나타내며 β 는 연료액막에서 증발되어 실린더로 유입된 양과 연료액막 전체량의 비를 나타낸다. k 는 사이클 번호를 나타낸다.

임의의 $\alpha, \beta(0 < \alpha, \beta < 1)$ 를 가정하고 엔진운전 중 연료분사 정지 실험과 모터링중 연료분사 실험을 통하여 구한 값에 가장 잘 수렴하는 α, β 를 구한다. 최적의 수렴조건 판정법은 임의의 α, β 설정하고 연소실로 들어온 연료량을 구한후 측정된 데이터와 그 차를 구하여 전체 측정구간 동안 그 차의 누적합이 가장 작게 되는 α, β 를 설정한다(식 9).

$$dM = \sum_{i=1}^n \sqrt{(M_{ind,mes}(i) - M_{ind,cal}(i))^2}$$

$$dM_{min} \Rightarrow \alpha, \beta \quad (9)$$

여기서 $M_{ind,mes}$ 는 FRFID로 사용하여 측정된 그 사이클 동안 실린더로 유입된 연료량을 나타내며 $M_{ind,cal}$ 는 임의로 설정한 α, β 로부터 구한 실린더로 유입된 연료량을 나타낸다. 식(8)에 위의 과정에서 구한 α, β 를 대입한후 M_w 값이 수렴되는 값을 구한다. 이 값이 바로 연료액막량이 되며 Fig.8에 결과를 나타내었다.

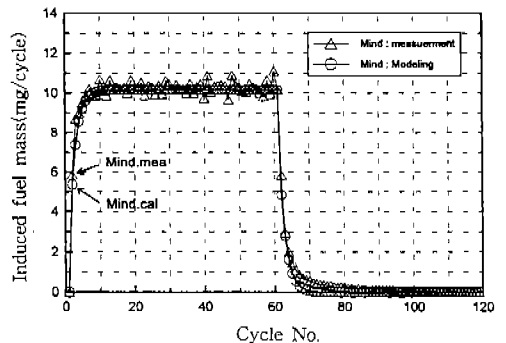


Fig.8 Induced fuel mass by using regression method

4. 실험결과 및 고찰

각 연료액막량 추정방법의 결과를 비교하기 위해 1,500rpm에서 실험한 결과를 이용하여 연료액막량을 구하였다.(Fig.9) 엔진운전중 연료분사 정지 방법에 의하여 구한 값이 가장 큰 값을 나타내었으며 모터링중 연료분사 방법으로 구한 값이 가장 작은 값을 나타내고 있으며 회귀법을 이용한 방법이 중간 값을 나타내고 있다. 이와 같이 각 해석방법에 따라 연료액막량의 차이가 발생하는 이유는 모터링시 배기과정 초기에 연소실의 압력이 배기포트의 압력보다 낮아 포트의 가스가 실린더로 역유동되어 들어오기 때문이다.

엔진운전중 연료분사 정지 방법의 경우 연료분사를 중단한 후 첫 사이클에서 연소되지 않고 배출된 가스는 두 번째 사이클에서 실린더로 들어온 미연탄화수소의 농도 보다 높으므로 두 번째 사이클에서 FRFID로 측정된 실린더내의 농도는 두 번째 사이클에서 유입된 미연탄화수소의 농도보다 높게 측정된다. 따라서 측정된 연료액막량(FM_w)은 실제의 값보다 높게 측정된다. 반대로 모터링중 연료분사 방법은 배기포트에서 역유동으로 들어온 가스의 미연탄화수소 농도가 낮으므로 두 번째 사이클에서 유입된 미연탄화수소의 실제농도보다 낮게 측정된다. 따라서 연료액막량(MM_w)이 실제의 값보다 작게 나타났

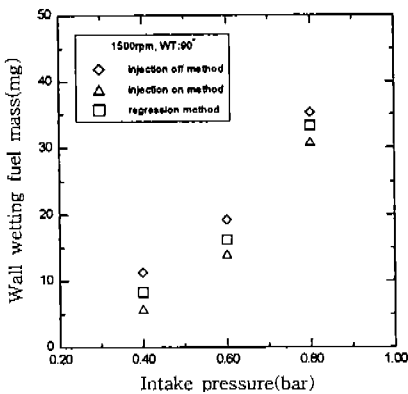


Fig.9 Comparison of wall-wetting fuel mass by using different method

다. 회귀법을 이용한 방법은 두 측정데이터를 이용하는 방법이므로 중간 값을 가지게 되는데 앞의 두 방법보다 참값에 더 근접할 것으로 생각된다.

오차를 줄이기 위해서는 초기배기과정 중 역유동에의하여 실린더로 들어오는 유량을 측정하여 보정한다면 두 측정값의 차이가 줄어들 것으로 판단된다.

엔진운전중 연료분사 정지 방법을 사용하여 회전속도와 흡기압을 변수로 측정된 데이터로 부

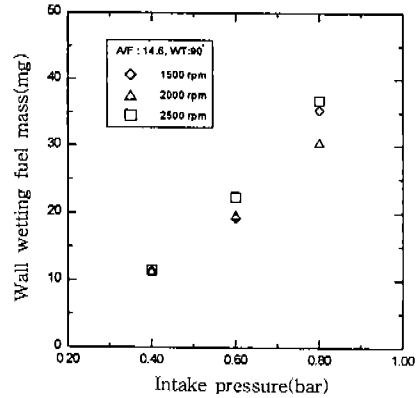


Fig.10 Wall-wetting fuel mass by in-cylinder FRFID after injection off

터 구한 결과를 Fig.10에 나타내었다. 같은 엔진 회전속도에서 흡기압을 증가시킬수록(부하를 증가시킬수록) 액막량이 증가하고 있다. 연료량증가에 따른 액막연료량의 두께 증가와 높아진 흡기압력은 연료증발율을 저하시키므로 액막량을 증가시킨다. 같은 흡기압력에서 엔진회전속도의 증가에 따른 액막량의 변화는 흡기압력의 경우보다 그 영향이 작게 나타나고 있으며 회전속도가 증가할수록 액막량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 연료가 증발하기 위한 시간이 짧아지기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

- 1) 실린더내 미연탄화수소 농도를 실시간으로 측정할 수 있는 FRFID를 사용하여 엔진

운전중 연료분사법, 모터링중 연료분사법 그리고 회귀법을 사용하여 연료액막량을 추정하였다. 엔진운전중 연료분사법, 회귀법, 모터링중 연료분사법 순으로 연료액막량이 크게 추정되었으나 그 경향은 각 방법에 상관없이 유사한 경향을 보였으며 이중 회귀법이 가장 근사한 값을 나타내는 것으로 판단된다.

- 2) 각 해석방법에 따라 해석결과의 차이가 발생하는데 이는 공회전 배기 초기과정에서 연소실 압력이 배기포트 압력보다 낮아 생기는 역유동에 기인된 연소실의 미연탄화수소 농도 변화 때문이다. 해석방법의 신뢰성을 높이기 위해서는 역유동이 연소실의 미연탄화수소 농도에 미치는 영향을 반영하여야 한다.
- 3) 같은 회전속도에서 흡기압력을 0.4, 0.6, 0.8bar로 상승시킬 때 연료액막량이 증가하였으며 증가율은 0.4bar일 때를 기준으로 각각 70%, 200% 정도 증가하였다. 일정한 흡기압력에서 엔진회전속도가 증가할 경우 연료액막량이 다소 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 이기영, 이창식, "HC저감용 최적 연료 분사 시스템에 관한 연구", KASE 943880, 1994.
2. Younggy Shin, Wai K. Cheng, and John B. Heywood, "Liquid Gasoline Behavior in the Engine Cylinder of a

SI Engine", SAE paper 941872, 1994.

3. Martin Berckmuller, Nigel P. Tait, and Douglas A. Greenhalgh, "The Influence of Local Fuel Concentration on Cyclic Variability of a Lean Burn Stratified-Charge Engine", SAE paper 970826, 1997.
4. Keiso Takeda and Takehisa Yaegashi, "A New Method to Analyze Fuel Behavior in a Spark Ignition Engine", SAE paper 950044, 1995.
5. Kaoru Horie, Hitoshi Takahasi, Shusuke Akazaki, "Emission Reduction During Warm-Up Period by Incorporating a Wall-Wetting Fuel Model on the Fuel Injection Strategy During Engine Starting", SAE paper 952478, 1995.
6. T. Summers and N. Collings, "Modeling the Transit Time of a Fast Response Flame Ionization Detector During In-Cylinder Sampling", SAE paper 950160, 1995.
7. 조한승, 이종화, 이귀영, "전기점화기관에서 실린더내 잔류가스량 측정방법에 관한 연구", KASE 96380311, 1996.
8. C. F. Aquino, "Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injection Engine", SAE 810494, 1981.