

가솔린 엔진에서 액막 연료량 추정 및 이를 이용한 공연비 예측에 관한 연구

Estimation of Wall Wetting Fuel at Intake Port and Model Based Prediction A/F in a S.I Engine

황승환*, 이종화**, 박경석***
Sunghwan Hwang, Jonghwa Lee, Kyoungseok Park

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. The purpose of this study is to estimate of wall wetting fuel in the intake port and the inducted fuel mass was predicted by using wall wetting fuel model. The model coefficient(α, β) and fuel film mass on the port wall were determined from measured in-cylinder HC concentration using FRFID after injection off. The fuel film mass was increased, but α (ratio of directly inducted fuel mass into cylinder from injected fuel mass) was decreased with increasing load at the same engine speed. β is nearly constant value(0.8~0.9). When injected fuel mass is varied at 1500rpm, the calculated air fuel ratio using well wetting fuel model was nearly the same as measured by UEGO.

주요기술용어 : Fuel film(연료 액막량), Fast Response Flame Ionization Detector(FRFID), Wall Wetting fuel model(벽류 연료 모델), Air Fuel Ratio(공연비).

1. 서론

최근 배기가스에 의한 지구 환경 문제가 심각해짐에 따라 배기가스 규제가 강화되고

있으며 이중에서도 특히 미연탄화수소 배출 물에 대한 규제치가 가장 엄격한 수준으로 강화되었다¹⁾. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 많은 노력과 연구가 진행되고 있으나 흡기 포트 연료 분사 방식의 가솔린 엔진의 경우, 특히 엔진 시동 시나 예열 기간중 연료 액막의 벽류 현상으로 인해 해결에 많은 어려움이 있다²⁾. 아울러 급가속과 같은 비정상 상태에

* 정회원, 아주대학교 기계공학과 대학원
** 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부
*** 정회원, 금오공과 대학교 기계공학부

서 연료 이송 지연 현상에 의해 공연비 변동이 수반되고, 심한 경우 실화가 발생하여 미연탄화수소 배출량에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 연료 이송 현상에 대한 연구는 정확한 공연비 제어를 통한 배기가스내 미연탄화수소 배출량을 줄이기 위해서 선행되어 연구되어야 할 중요한 분야이다.

연료 이송 현상을 해석하기 위해서 흡기 포트와 흡기 밸브에서 연료 증발율을 모델링하여 분석하는 방법과³⁾, 실험적 방법을 이용하여 연료 액막량을 측정하는 연구가 진행되고 있다⁴⁾.

본 연구에서는 벽류 연료 모델(Wall Wetting Fuel Model)을⁵⁾ 이용하여 연료 이송 현상을 예측하였으며, 모델의 계수는 실험을 통하여 구하였다. 각 운전조건에 따른 영향을 분석하였으며 엔진운전조건 변화에 따른 공연비 변화를 예측하고 실험 결과와 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 엔진은 4기통 1.5리터 DOHC 가솔린 엔진이며, 흡기 밸브 개폐시기는 IVO : BTDC 8°, IVC:ABDC 42°이다. 엔진 제어를 위해서 점화 시기 조절 장치(IC5200)와 연료 분사 조절 장치를(IC5160) 설치하였다. 흡기 포트내의 압력을 측정하기 위하여 절대압 센서(Kistler, 4045A)를 설치하였으며, 공연비는 광영역 산소 센서(Horiba, Mexa-8120)를 사용하여 측정하였다. 4번 실린더의 흡기 밸브와 흡기 포트의 온도를 측정하기 위해서 열전대를 설치하였고 연료 소비량을 측정하기 위해서 연료 유량계(AVL, 730)를 설치하였다. 연구 목적상 모터링이 가능한 동력계(AVL, APA-102)를 설치하였다.

실린더내의 미연탄화수소를 측정하기 위해서는 응답성이 매우 빨라야하며 샘플되는 가스의 양이 연소에 영향을 미치지 않아야 한

다. FRFID는 기존의 FID보다 응답성이 매우 빠르며(3-4ms) 미연탄화수소의 농도를 거의 실시간으로 측정할 수 있다. 연소실내의 미연탄화수소를 측정하기 위하여 FRFID (Combustion Ltd., HFR400)를 4번 실린더에 설치하였고, FRFID에 일정한 유량의 샘플링가스가 공급될 수 있도록 정압실(Constant Pressure Chamber)을 대기에 노출시켰다. 이때 정압실과 연소실(Flame Chamber)의 압력 차는 0.07bar로 하였다⁶⁾. FRFID를 사용하여 배기가스의 미연탄화수소를 측정하기 위해서 4번 배기 밸브로부터 50mm떨어진 곳에 샘플프루부가 위치하도록 설치하였다. 실험시 각 물리량은 A/D 컨버터에 의해 1도 간격으로 측정되어 PC에 저장된다(Fig.1).

엔진 부하 변화에 따른 영향을 알아보기 위해서 1500rpm, 공연비 14.6에서 BMEP를 1.5~6bar까지 1.5bar씩 증가시키며 실험하였다. 분사시기는 압축 상사점을 기준으로 BTDC 120°로 하였고 냉각수 온도는 80°C로 일정하게 유지하였다.

실험으로부터 구한 벽류 연료 모델을 이용하여 공연비 변화에 따른 연료 이송 현상을 예측하기 위해서 다음과 같은 3가지 조건에서 실험을 수행하였다. 먼저 공연비를 14.6, BMEP 4.5bar에서 스톱트 밸브를 고정시키고 연료 분사량을 증가시켜 공연비를 11.6로 낮추는 경우, 공연비 11.6에서 14.6으로 증가시키는 경우, 연료 분사량을 빠른 시간 안에 주기적으로 변화시켜 공연비가 정상 상태에 도달하지 못하는 경우에 대해서 실험하였다. 이때 연료 분사시기는 압축 상사점을 기준으로 BTDC120°로 하였고 냉각수 온도는 80°C로 일정하게 유지하였다.

3. 연료이송 모델

흡기 포트내 연료 이송 현상을 설명하기 위한 모델로 많이 알려진 것은 벽류 연료 모델

로서, 실린더로 유입되는 연료량은 그 사이클에서 분사된 연료가 직접 유입되는 양과 흡기 포트와 밸브 주위에 존재하는 연료 액막량으로부터 증발된 양의 합이 된다는 것이다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

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

$$M_w(k) = (1 - \alpha) M_{inj}(k) + (1 - \beta) M_w(k-1) \quad (2)$$

M_{ind} : 실린더로 유입된 연료량

M_{inj} : 그 사이클에 분사된 연료량

M_w : 연료 액막량

α : 그 사이클에 분사된 연료중 바로 유입된 연료량의 비

β : 그 사이클의 연료 액막량중 실린더내로 유입된 연료량의 비

k : 사이클 수

윗식에서 분사된 연료량은 연료 유량계를 이용하여 측정할 수 있으며, 연료 액막량은 엔진 운전중 점화와 연료 분사를 중단한 후 실린더로 유입되는 연료량을 적분하는 방법(엔진 운전중 연료 분사 정지 방법)으로 구할 수 있다⁷⁾. 이때 유입된 연료량은 FRFID를 이용하여 실린더내의 농도를 측정하고 식 (3)을 사용하여 유입된 질량으로 환산하여 구한다.

$$M_{ind} = \frac{([HC]_k - [HC]_{k-1,ex} \cdot X_{r,m}) \cdot M_{ini,s}}{1 - X_r} \cdot \left\{ 1 + \frac{(1 + \frac{X}{4}) \cdot 4.773}{\phi} \right\} \quad (3)$$

$[HC]$: 실린더내의 미연탄화수소 농도

$[HC]_{ex}$: 배기가스내의 미연탄화수소 농도

X_r : 정상 연소시 잔류가스 몰 분율

$X_{r,m}$: 모터링시 잔류가스 몰 분율

y : 연료의 H/C

ϕ : 당량비

식 (3)에서 모터링시 잔류가스 몰 분율은 모델링을 사용하여 구하였으며⁸⁾ 배기 가스내의 미연탄화수소는 FRFID를 사용하여 측정하였다.

모델 계수는 다음의 방법으로 구할 수 있다. 엔진 운전중 연료 분사를 정지한 후 첫 번째 사이클에서 M_{ind} 이 '0'이므로 식 (1)에서 α 항은 무시되고 β 에 의한 항만 남게 된다. 정상 상태에서 모델 계수 α, β 가 상수라고 생각할 수 있으므로 연료 분사를 중단한 후 첫 사이클에서 실린더내로 유입된 연료량으로부터 β 를 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{M_{ind}}{M_w} \quad (4)$$

연료를 일정하게 분사하고 공연비가 일정한 상태인 정상 상태에서 이상적으로 M_{ind} 과 M_{inj} 이 같다고 생각할 수 있다. 이를 식 (2)에 대입하고 정리하면 식(5)와 같이 되며, 여기에 식 (4)로부터 구한 β 를 대입하여 구할 수 있다.

$$\alpha = 1 - \frac{\beta M_w}{M_{inj}} \quad (5)$$

4. 실험결과 및 고찰

Fig.3에 부하의 변화에 따라 각 실험 조건에서 3회 측정된 연료 액막량을 분사된 연료량의 비로 나타내었다. 부하가 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 그 값은 약 4배에서 6.5배 정도로 증가하고 있다.

부하의 증가에 따라 흡기압은 0.31bar에서 0.7bar로 증가하였으며, 흡기 포트의 온도는 약 2.5°C, 밸브의 온도는 약 30°C 정도 증가하였다. 온도의 변화가 그리 크지 않기 때문에 온도 상승에 의한 감소 효과보다 흡기압 증가에 의한 액막량 증가 효과가 더 크게 작용하여 액막량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig.4에 모델계수 α , β 를 나타내었다. 부하가 증가할수록 그 사이클에 분사된 연료중 실린더내로 바로 유입되는 양이 줄어들어 α 의 값이 감소하는 경향을 보이고 있으며, β 의 값은 큰 변화 없이 0.8에서 0.9 사이의 값을 나타내고 있다.

벽류 연료 모델을 이용하여 공연비 변화에 따른 연료 이송 현상을 예측하기 위해서 연료량만을 증가시킨 실험 결과와 모델링 결과를 Fig.5에 나타내었다. 이 때 모델링 계수는 같은 실험 조건에서(1500rpm, BMEP 2.1bar) 구한 값을 사용하였는데, 흡기압과 흡기 시스템 부위의 온도 변화가 거의 없으므로 일정한 값을 사용하였다. 연료 조절 장치에 의해서 연료량을 증가시킬 때 연료량이 바로 증가하지 못하고 5사이클 후에 설정된 양만큼 증가하였다. 이 때 광영역 산소 센서를 이용하여 측정된 공연비를 살펴보면 연료량 증가에 따라 공연비가 작아지며, 증가된 연료 분사량이 일정한 상태로 되기 전까지 급격히 감소하는 형태를 나타내고 있다. 연료량이 정상 상태에 도달한 이후에는 감소량이 서서히 떨어지며 연료량을 변화시킨 후 약 50사이클 후에 정상 상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 분사된 연료량이 일정한 상태에 도달하여도 공연비가 변화하는 것은 분사된 연료가 전부 유입되지 못하고 일부가 잔류하여 다음 사이클에 영향을 미치기 때문이다. 잔류량의 증가분과 연료액막에서 증발되어 유입되는 양이 같아져 연료액막량이 일정하게 될 때까지 공연비가 변화하게 되며, 그 이후에 일정한 공연비 값을 가지게 된다.

모델을 사용하여 실린더내로 유입되는 연

료량과 연료액막량을 구하였다. 실린더내로 들어가는 연료량은 분사량이 일정한 양으로 도달되기 전까지 급격히 증가하다 일정한 상태에 도달하면서 서서히 증가한다. 연료액막량은 연료 분사량과 함께 증가하며, 연료 분사량을 증가시킨 후 약 50사이클 뒤에 일정한 값으로 수렴되는 경향을 보이고 있다.

실린더내로 유입되는 연료량을 이용하여 공연비를 계산하였다. 이 때 흡입되는 공기량은 측정된 흡기 포트의 압력으로부터 계산하였다. 광영역 산소 센서로 측정된 공연비와 비교하면, 연료량이 변하는 구역에서는 다소 차이가 발생하나 분사된 연료량이 일정한 상태에 도달된 이후에는 거의 같은 값을 나타내고 있다. 전체적으로 광영역 산소 센서로 측정된 결과와 비교적 정확히 일치함을 알 수 있다.

Fig.6에 연료 분사량을 감소시키며 측정된 결과와 모델링으로부터 구한 결과를 나타내었다. 앞의 실험 결과와 같이 연료액막량의 변화에 의해서 연료 분사량보다 공연비가 일정한 값으로 수렴하는데 더 많은 사이클이 필요하며, 연료 분사량이 일정하게 도달된 약 50 사이클 후에 정상상태에 도달되는 것을 알 수 있다. 모델링으로부터 예측한 공연비 변화와 광영역 산소 센서로 측정된 결과가 비교적 정확히 일치하게 나타났다.

연료 분사량을 빠른 시간안에 주기적으로 변화시키는 결과를 Fig7에 나타내었다. 연료량을 증가시킨 후 연료 분사량이 일정하게 되어도 흡기 포트주위에 존재하는 연료액막량이 수렴하지 못하고 연료 분사량 감소에 따라서 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러므로 실린더로 유입되는 양도 계속 변화하기 때문에 공연비가 일정한 값으로 수렴되지 못하고 연료액막량 변화와 유사한 경향으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 광영역 산소 센서로 측정된 결과와 모델링으로 구한 결과를 비교하면 거의 일치하는 경향을 보이고 있다.

이상과 같은 실험으로부터 벽류 연료 모델

을 사용하여 연료이송거동의 예측이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

1. 실린더내 미연탄화수소 농도를 실시간으로 측정하여 흡기 포트내의 연료 액막량을 추정할 수 있었으며 이로부터 벽류 연료 모델 계수를 구할 수 있었다.
2. 일정한 엔진 회전 속도에서 엔진 부하의 증가에 따라 분사된 연료중 그 사이클에 바로 유입되는 연료량의 비는 감소하는 경향을 보였으며, 연료 액막량중 유입되는 연료량의 비는 큰 변화없이 거의 일정한 값을 나타내었다.
3. 엔진 운전중 연료량을 변화시키는 경우 연료 액막량의 변화에 의해서 연료량 변화시기보다 더 늦게 공연비가 수렴되는 것을 알 수 있었다.
4. 벽류 연료 모델을 사용하여 연료량만을 변화시킬 때 공연비 예측이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 삼성자동차(주) 지원에 의하여 수행되었습니다. 도움을 주신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이기영, 이창식, "HC저감용 최적 연료 분

사 시스템에 관한 연구", KSAE 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. M. Nagaoka, K. Ohsawa, B. Crary, T. Yamada, S. Sugiura, and N. Imatake, "Numerical Analysis of fuel Behavior in a Port Injection Gasoline Engine", SAE paper 970878, 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 Takahashi, 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. 황승환, 이종화, 유재석, "가솔린엔진에서 FRFID를 이용한 액막 연료량 추정", 자동차공학회지 제6권 제3호 1998.
8. 조한승, 이종화, 이귀영, "전기점화기관에서 실린더내 잔류가스량 측정방법에 관한 연구, KSAE 96380311, 1996.

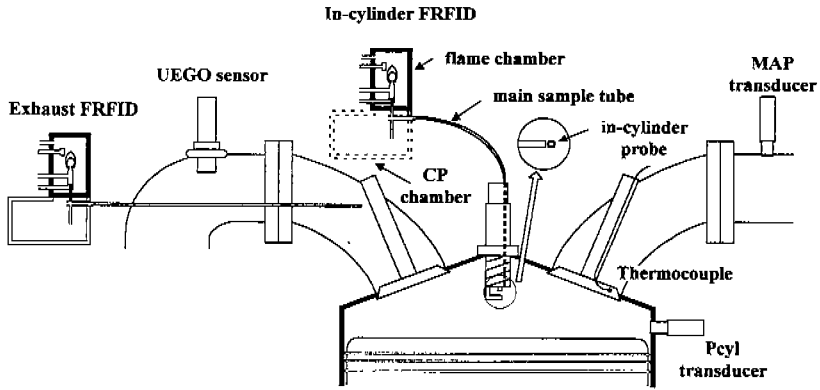


Fig.1 Schematic diagram of test engine

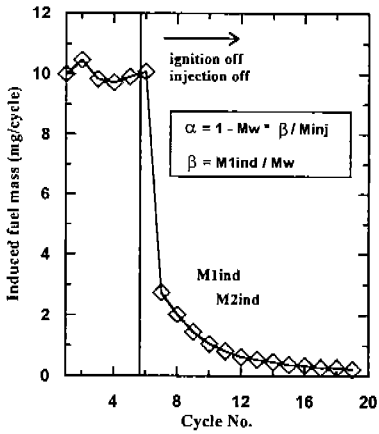


Fig.2 Illustration of the method to calculate fuel mass after injection and ignition off

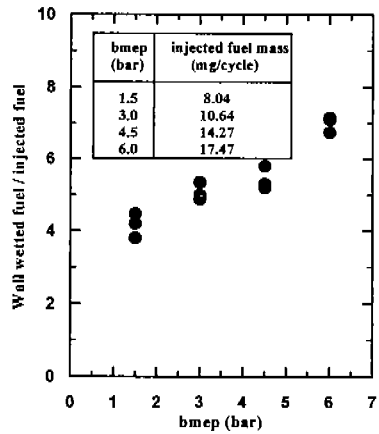


Fig.3 The ratio of wetted fuel mass and injected fuel mass as function of load at 1500rpm

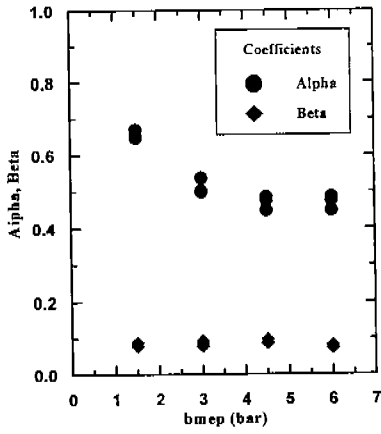


Fig.4 Alpha and beta as function of load at 1500rpm

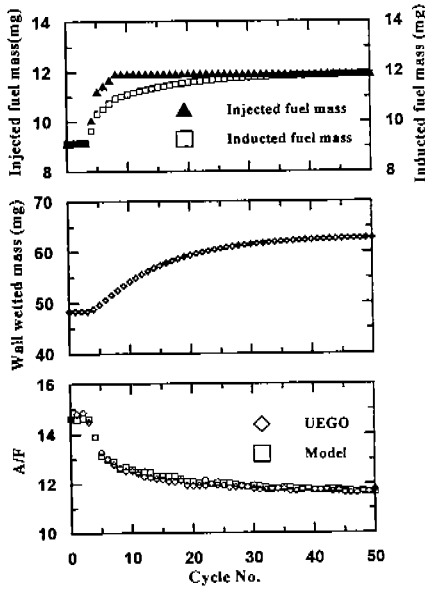


Fig.5 Comparison A/F between measuring and modeling calculated model coefficients in case of changed from 14.6 to 11.6 at 1500rpm

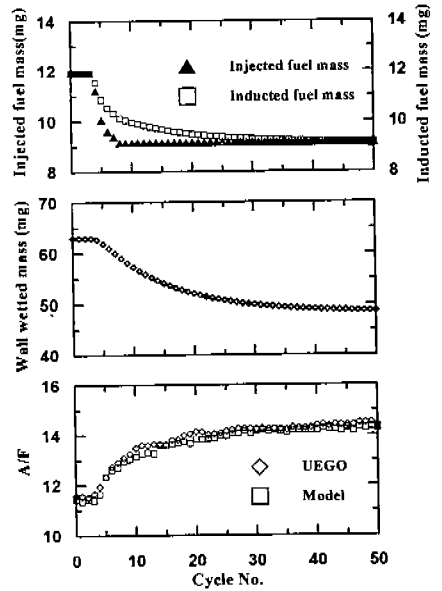


Fig.6 Comparison A/F between measuring and modeling calculated model coefficients in case of changed from 11.6 to 14.6 at 1500rpm

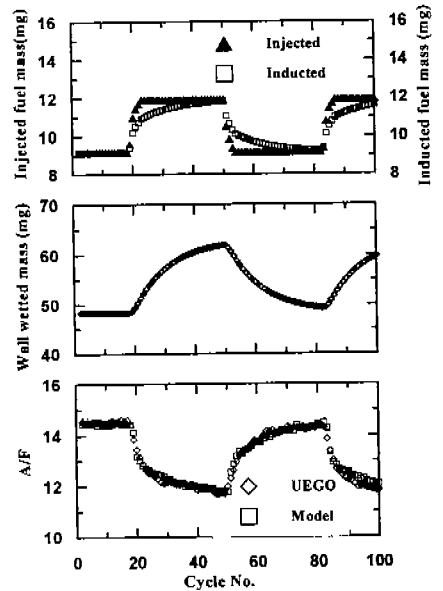


Fig.7 Comparison A/F between measuring and modeling calculated model coefficients in case of rapidly changed injection fuel mass at 1500rpm