

# 가솔린 엔진의 흡기효율 데이터 측정

장현탁\*

\*아주자동차대학

e-mail: wslong@motor.ac.kr

## Data Measurement for the Volumetric Efficiency of SI Engines

Hyun Tak Jang\*

\*Ajou Motor College

### 요 약

가솔린 기관의 체적 효율은 흡기 장치의 효율의 척도로 표현된다. 현재 체적효율은 4행정 가솔린 엔진의 흡기장치의 특성과 공연비 제어를 위한 중요한 파라미터로 사용되고 있다. 체적 효율은 이론적으로 실린더로 흡입 가능한 양에 대한 실제로 실린더로 흡입한 공기량의 비율이다. 체적효율은 엔진회전속도와 흡기다기관 부압에 따라 결정되는 중속변수이다. 체적 효율은 정상상태와 과도상태와 같은 엔진의 모든 운전조건을 시험하는데 한계와 제약이 매우 크다. 이 논문에서는 선형 알고리즘을 사용하여 체적 효율의 파라미터를 규명하여 선형 다항식 모델을 개발한다. 그리고 실험으로 구한 체적효율 데이터와 다항식 모델을 비교하고 객관적인 타당성을 평가 하였다.

### 1. 서 론

체적효율( $\eta_V$ )이란 흡기행정 중에 실린더에 흡입된 공기질량과 행정체적에 상당하는 대기질량과의 비율 말한다. 흡입 행정 중 실린더에 흡입된 공기질량은 이론적으로 흡입 가능한 흡입 질량( $\rho_a \cdot V_h$ )이 되지 않는다. 그 이유는 흡입 관내의 마찰저항 및 흡기관의 형상, 밸브의 교축 등으로 실린더 안의 압력과 대기압 사이에 압력차가 발생한다. 엔진에 열을 흡수하여 공기는 팽창한다. 흡기의 관성이 피스톤 운동속도를 추종하지 못한다. 흡기 배분 손실이 발생한다. 피스톤 링이나 밸브로부터 누설되어 흡기가 일부 외부로 빠져 나간다. 이상과 같은 이유 때문에 실제 1 사이클 당 흡입되는 공기량은 이론 흡기량보다 작다. 체적 효율이 저하되면 압축압력이 감소하므로 열효율이 낮아지고, 불안전 연소원인이 된다.

체적 효율 모델은 흡기 장치 내부에서 발생하는 현상을 정확히 분석하여 공연비 제어 및 흡기 시스템 설계에 사용 할 수 있다. 체적 효율은 엔진 회전수, 흡기 압력, 배기압력, 공연비, 흡기장치의 구조 등 많은 엔진 변수에 종속되어 있다.

엔진의 운전 상태를 정상상태와 비정상상태로 나누어 볼 수 있다. 정상상태는 스로틀과 엔진 회전속도의 시간에 따른 변화가 없는 상태를 의미하고, 비정상상태는 주로 스로틀이나 부하가 또는 엔진 회전속

도가 운전 조건에 따라 변하는 때를 말한다. 엔진이 정상상태 있을 때 두 개의 독립 변수로 엔진 회전속도와 스로틀 각도이다. 스로틀 각도는 엔진의 부하가 어느 정도 인가를 나타내지만 실제로는 스로틀의 공기 유로 면적을 나타낸다. 본 연구는 일반적인 연료 분사식 가솔린 기관의 흡기관에서 공기량을 측정하는 것이다. 먼저 스로틀과 회전속도를 일정 량 만큼 조금씩 변화시켜 정상상태 하에서 엔진 운전 상태의 변동에 따른 공기량의 변화를 측정한다.

### 2. 흡기 효율 관계식

엔진의 흡기계는 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 먼저, 한 부분은 외기를 포함하는 스로틀 밸브의 상류로서, 에어클리너에서의 압력강하와 마찰손실을 무시하면 거의 대기압으로 볼수 있다. 또 하나는 엔진의 플래넘 챔버와 흡기 매니폴드를 이루는 부분으로서 스로틀을 지나서부터 흡기 밸브까지이다. 마지막 하나는 바로 흡기밸브를 지난 후 흡기 포트 및 실린더이다. 이렇게 세부분으로 나누는 이유는 압력인데, 각 부분의 압력은 거의 균일하게 유지되는 하나의 부피로 볼 수 있다. 이렇게 세부분으로 나누는 후, 플래넘 챔버를 포함하는 매니폴드를 중심으로 질량 보존법칙으로 나타내면 다음의 식(1)과 같다.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{at} - \dot{m}_{ap} \quad (1)$$

여기서  $\dot{m}_{at}$ 는 스로틀을 통과해서 매니폴드로 들어오는 공기량,  $\dot{m}_{ap}$ 는 매니폴드에서 실린더로 나가는 공기량이다.  $\dot{m}_a$ 는 스로틀 밸브와 흡기 포트 사이의 공기질량의 변화율이다. 이 모델은 바로 Filling & Empty 모델의 일부이다.

매니폴드 압력이 균일하고 흡기다기관 온도를 상수로 가정하면 속도-밀도 식에 의하여  $\dot{m}_{ap}$  다음의 식(2)과 같이 주어진다.

$$\dot{m}_{ap} = \frac{n}{120} V_d \rho \eta_V = \frac{n}{120} \frac{V_d \eta_V}{RT_{man}} p_{man} \quad (2)$$

여기에서  $V_d$ 는 엔진의 행정체적,  $\rho$ 는 공기밀도,  $R$ 은 기체상수,  $T_{man}$ 는 매니폴드 압력이다.

이상기체 방정식을 이용하여  $\dot{m}_a$ 은 다음의 식(3)과 같다.

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{p}_{man} V}{RT_{man}} \quad (3)$$

여기에서  $V$ 는 스로틀 밸브와 흡기 포트 사이의 흡기 다기관 체적이다.

식(1)~(3)을 결합하여 흡기 다기관 내의 흡기다기관 압력을 나타내는 다음과 같은 식(4)을 얻을 수 있다.

$$\dot{p}_{man} = -\frac{n}{120} \frac{V_d}{V} \eta p_{man} + \frac{RT_{man}}{V} \dot{m}_{at} \quad (4)$$

흡기 다기관 내의 압력은 엔진 회전수와 스로틀 밸브의 개도를 통하여 정확히 예측할 수 있다. 식(4)은 엔진전자제어와 흡기계를 개발하는데 사용 할 수 있다. 특히 최적의 공연비를 얻기 위한 연료량을 계산하는데 운전조건에 따라 체적효율에 종속됨을 알 수 있다.

흡기 효율은 운전조건에 함수이며 정상상태 흡기효율은 식(2)에서부터 다음과 같이 식(5)이 유도 된다.

$$\eta = \frac{120}{n} \frac{RT_{man}}{V_d p_{man}} \dot{m}_{ap} \quad (5)$$

식(5)  $\dot{m}_{ap}$ 는 배기다기관에 설치되어 있는 선형 공연비 센서에서 측정된 공연비( $\lambda$ )로부터 추정 가능하다.

$$\lambda = \frac{1}{\alpha} \frac{\dot{m}_{ap}}{\dot{m}_f} \quad (6)$$

여기에서  $\alpha$ 는 이론 공연비( $\cong 14.7$ )이고  $\dot{m}_f$ 는 연료 분사량이다.

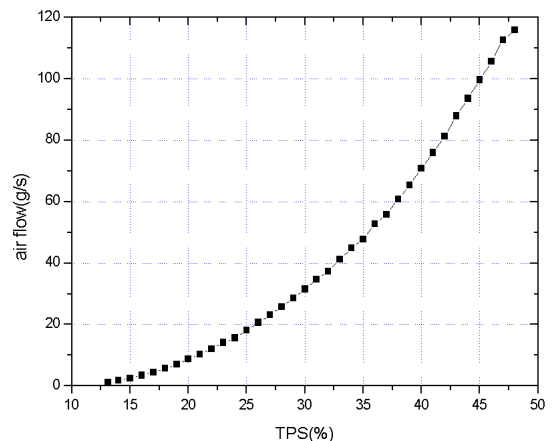
따라서 체적효율은 식(7)과 같이 관측 값이 된다.

$$\eta = \frac{120}{n} \frac{RT_{man}}{V_d p_{man}} \lambda \alpha \dot{m}_f \quad (7)$$

### 3. 체적 효율 측정

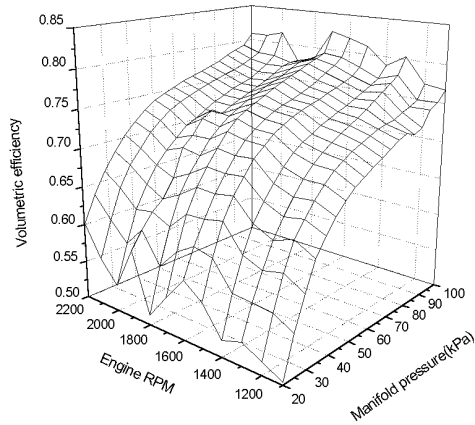
본 연구에 사용된 엔진은 4 실린더 1500cc MPI 엔진이다. 엔진 모니터링을 위해 11kW 교류모터를 사용하였고, 모터의 속도를 일정하기 위하여 인버터를 이용하였다. 엔진의 스로틀 각도를 제어하기 위하여 스로틀 어셈블리의 스프링을 제거하고, 스텝핑 모터를 스로틀추과 직결하였다. 스텝핑 모터는 회전속도와 회전각을 매우 정확히 제어 할 수 있으므로 동특성 실험에 사용하였다. 엔진 크랭크축에 1도의 해상도를 갖는 엔코더를 부착하였다. 이 엔코더 신호는 크랭크 각에 동기 되는 공기량을 측정하기위해 트리거 신호로 입력된다. 시험 전에 흡기 다기관, 배기다기관의 누설이 없도록 준비하였다. 체적 효율의 측정은  $\lambda = 1$ 이 유지하면서 측정하였다.

스로틀이 닫힌 상태에서 50% 열면서 그때의 스로틀을 통과하는 공기량을 측정을 수행하였다. [그림1]은 스로틀 개도량에 따른 공기량을 측정한 선도이다. 스로틀 개도량이 50%에 도달하면 큰 유량의 변화 없이 거의 포화상태에 도달하는 영역이 존재한다.



[그림 1] Variation of the air flow rate with throttle position

[그림2]는 흡기다기관 압력, 엔진 회전속도, 체적효율관계를 하나의 그래프로 표시한 것이다. 여기에서 엔진 회전수 실험은 1000~2200rpm 스로틀 개도에 따른 흡기다기관 압력을 변수로 실험을 수행하였다.

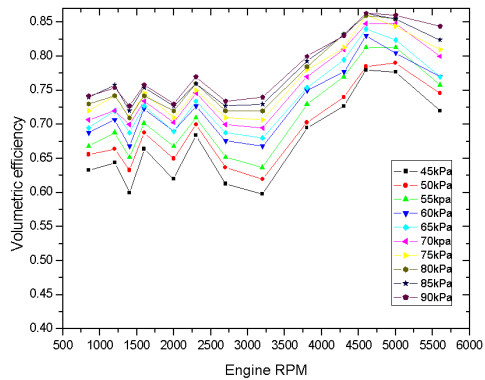


[그림 2] Volumetric efficiency as a function of RPM,  $P_{man}$

#### 4. 결론

엔진의 흡기계 설계 시와 엔진 전자제어 시에 가장 중요한 하나는 1 사이클 당 흡입공기량이다. 흡입 공기량은 체적 효율과 관련된 변수이다. 따라서 본 연구에서는 운전 조건에 따른 엔진의 흡기 유동을 파악하기 위한 체적 효율 실험을 수행하였고 엔진 전자제어의 기초 자료에 활용이 가능하다. 각 운전 조건에 따른 스로틀 통과 공기유량, 체적효율, 흡기 포트 통과 공기량을 측정하였다.

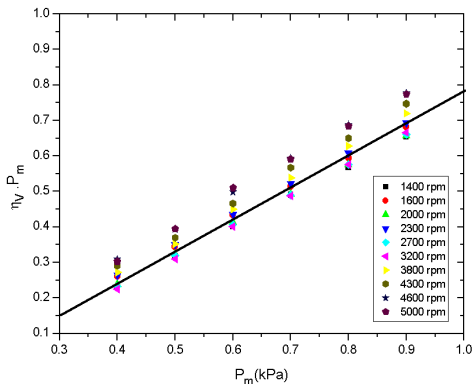
[그림3]에서 2차원 평면으로 X축은 엔진회전수와 흡기다기관 압력에 따른 체적효율을 보여준다.



[그림 3] Volumetric efficiency as a function of RPM,  $P_{man}$

1 사이클 당 흡기 포트를 통과하여 실린더에 흡입되는 공기량은 체적효율과 흡기다기관 압력의 선형적인 관계를 다음 다항식으로 유도된다.

$$\dot{m}_{ap} = \eta_V \cdot p_{man} = 0.92 p_{man} - 0.0793$$



[그림 4]  $\dot{m}_{ap}$  against manifold pressure

#### 5. 참고문헌

- [1] Hamid B. Servati, "A Regression Model for Volumetric Efficiency", SAE Paper NO.860328, 1986.
- [2] G. De Nicolao, "Modelling the Volumetric efficiency of IC Engines: Parametric, Non-Parametric and Neural Techniques", Control Engineering Practice, Vol.4, No.10, pp.1405~1415, 1996
- [3] L. A. Smith, "Engine Breathing-Steady Speed Volumetric Efficiency and its Validity under Transient Engine Operation", SAE Paper No. 1999-01-0212, 1999