

엔진 제어의 수학적 모델

김유남 이윤우 박희철 조장원 우광범
연세대학교 전기공학과

A Mathematical Model of Engine Control

Y.N.Kim, Y.W.Lee, H.C.Park, J.W.Jo, and K.B.Woo
Yonsei University, Dept. of Electrical Engineering.

ABSTRACT

This paper suggests mathematical engine model which can simulate generalized gasoline engine. Suggested engine model contains air/fuel inlet element, intake manifold, combustion, engine dynamics. In order to analyze a gasoline engine, physical characteristics of engine and steady state engine data should be controlled. In adaptation for abrupt change of circumstance or drive conditions, this model can analyze important physical phenomena in the intake manifold by computer simulation. This model can also evaluate statuses of drive under various working conditions precisely. Therefore, this model suggests basic datum to evaluate the engine system which are needed in design-ing and development of engine controller.

1. 서론

자동차 엔진이 개발된 이래 엔진의 성능 향상과 연료 소비 절약의 노력이 계속되고 있고 최근에는 연료소비 감소와 배기 가스를 줄여 공해 문제를 해결하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 반도체를 중심으로 한 전자공학 관련 기술의 진보, 환경규제, 에너지 문제, 자동차 시장예의 대응등 복합적인 요구에 따라 자동차 업

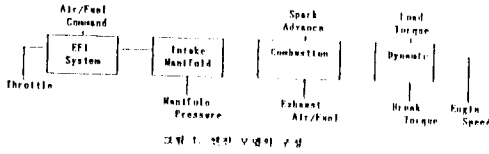
계는 물론 전자업계에서도 자동차 기능의 전자화를 산업규모로 발전시키기 위한 기술개발에 관심이 높아져가고 있다. 자동차의 전자화중 복잡하고 새로운 엔진 제어 장치의 개발은 자동차 산업에 있어서 제일 중요한 관심사가 되었다. 최근 개발된 대부분의 엔진의 제어 장치들은 디자인된 제어를 자동차에 직접 설치하고 실험하는 방법으로 개발되었다. 그러나, 이러한 방법은 제어기 디자인이 실제적인 엔진데이터에 기초하여 개발될 수 있다는 장점이 있지만 많은 시간과 자금을 요하는 결점이 있다. 엔진 제어 개발을 위한 해석적인 엔진 모델은 다양한 엔진상태나 운전조건을 새로히 map data를 얻지 않고서도 시뮬레이션 할수 있다.

그러나 지금까지 해석적인 엔진 모델의 개발에 대하여 보고된 바로는 다음과 같은 상당한 제한점들이 내포되고 있다. 첫째, 흡기관 영향과 흡기관 온도를 설명하는 실제적인 흡입다기관 모델을 포함하지 않는다. 둘째, 엔진 배기 문제를 예견할 수 있는 능력을 가지지 못한다.

본 연구에서는 이러한 문제들을 극복하기 위한 수학적 엔진 모델을 발전시키는 것이다. 이 모델은 일반적인 가솔린 엔진에서 일어나는 물리적인 현상을 설명하는 분석적인 관계와 경험적인 상호작용에 근거를 두고 있다. 이 모델은 흡기 다기관에서 일어나는 중요한 물리적 현상을 시뮬레이션한다. 그러므로 이 수학적 모델은 엔진 제어를 설계하고 개발하는데 유용하게 이용될 수 있을것이다.

2. 모델 구성

그림 1은 엔진의 중요한 구성 요소의 개략도를 나타내었다.



최근에 연료 조절 장치인 기화기 대신에 마이크로 프로세서로 조정되는 EFI (Electronic Fuel Injector) 를 사용하는 것에 관심이 모여지고있다. 이 모델은 이와같은 엔진 제어기 개발에 응용될 수 있다.

여기서 사용된 모델은 실린더 안에서의 연소에 대하여 상세한 정보를 얻는 것이 아니다. 간단하고 효과적인 프로그램을 개발하기 위해 이 엔진 모델에 대한 이산 (Discrete) 상태를 사용하였는데, 이러한 이산 상태는 운전성에 대한 결과가 정확성이 비교적 잘 유지되고 계산시간과 가격을 줄이면서 시뮬레이션할 수 있는 장점이 있다.

모델은 다음과 같은 변수를 가진다. 입력 변수들로서

- α : Throttle position (angle)
- A/F : air / fuel ratio
- SA : spark advance

출력 변수들로서

- T_m : manifold temperature
- P_m : manifold pressure
- N : engine speed

2.1 공기/연료 흡입장치

자동차의 외부에서 흡입다기관으로 들어오는 공기를 흐르게 하는 중요한 요인은 흡입다기관 내의 압력과 외부 압력의 차이이다. Throttle 위치도 공기흐름을 변화시킨다.

$$f1 = \begin{cases} 3.87(P_m/P_b) & [1 - (P_m/P_b)^{0.714}] & P_m/P_b > 0.528 \\ 1.0 & & P_m/P_b < 0.528 \end{cases} \quad (1)$$

$$f2 = 1 - \cos \alpha \quad (2)$$

이 모델이 특정한 엔진에 한정되는 것을 피하기 위해서 흡기 다기관으로 들어가는 실제 공기 흐름의 비율 다음과 같이 쓸수 있다고 가정한다.

$$\dot{m}_{a,i} = \dot{m}_{a,m}(P_b, T_i) f1 f2 \quad (3)$$

여기서 $\dot{m}_{a,m}(P_b, T_i)$ 는 채택한 엔진에 대한 P_b 와 T_i 의 함수로서 최대 공기 흐름의 비율 나타내고, 대부분의 엔진에 대하여 측정할 수 있는 양이다. 인젝터에서 나오는 연료 흐름의 비는 다음과 같이 가정한다.

$$\dot{m}_{f,i} = D_m / Dt \quad (4)$$

$$D_m = \frac{V_d \bar{\gamma} P_m}{R T_m A F} \quad (5)$$

$$Dt = \frac{120}{N N_c} \quad (6)$$

- $D_m f$: 엔진 firing 당 인젝터가 내뿜는 연료의 양
- Dt : 주어진 엔진 속도 N 에 대한 firing사이의 시간 간격
- V_d : 엔진 배기량
- $\bar{\gamma}$: 체적 효율 (Volumetric efficiency)
- R : universal 기체상수
- P_m : 측정된 흡기 다기관의 압력
- T_m : 측정된 흡기 다기관의 온도

2.2 흡기 다기관

흡기 다기관을 모델링 하는 것은 엔진을 모델링하는 작업중에서 가장 중요한 부분이다. 정확히 모델링 하기 위해서는 과도상태에서 흡기 다기관의 공기 온도와 압력을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 흡기 다기관은 프로펠라의 변화에 따른 엔진 토르크의 동력 반응에 있어서 중요한 역할을 한다. 흡기관의 중요목적은 실린더에 일정한 공기를 제공하는 것이다.

흡기 다기관에서의 동력을 연구하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 1) 흡기관의 구성물은 이상가스(ideal gas)임.
- 2) 온도와 압력은 동질성을 가짐.

흡기다기관 모델의 목적은 흡기 다기관으로의 공기 흐름과 연료 계산을 위한 실린더로의 공기 유입의 계산이다. 흡기 다기관에서 발생하는 가장 중요한 물리적 현상은 연료의 전달 지연이다. 분사된 연료는 Fuel vapor,

Liquid fuel droplet, Liquid fuel film 으로 나뉘어진 다

연료의 흐름은 Fast-flow, Low-flow 로 분류되며 Fast-flow 는 Air, Fuel vapor, Liquid fueldroplet 이며 Low-flow 는 Liquid fuel film 이다. 실린더에 공급 되는 연료의 양은 새가지 성분의 다른 속도 때문에 분사 된 연료의 양과는 상당한 차이가 생긴다. 연소효율을 높이기 위해서는 Fuel Atomization을 증가시켜야하며, 이것은 중요한 제어 변수가 된다.

흡기 대기관의 공기 온도와 압력은 새가지 성분의 흐름속도를 결정하고, 연료의 분산에 영향을 미치는 중요한 역할을 한다. 흡기 대기관에서 공기와 기체 연료의 보존에 의해 다음 식을 유도할 수 있다.

$$dm_a/dt = \dot{m}_{a,i} - \dot{m}_{a,o} \quad (7)$$

$$dm_f/dt = \dot{m}_{f,i} - \dot{m}_{f,o} \quad (8a)$$

여기서

$$m_f = m_{fv} + m_{f1} \quad (8b)$$

$$\dot{m}_{f,o} = \dot{m}_{fv,o} + \dot{m}_{fd,o} + \dot{m}_{f1,o} \quad (8c)$$

$$dm_{fv}/dt = \dot{m}_{fv,g} - \dot{m}_{fv,o} \quad (8d)$$

여기서 m_{fv} 와 m_{f1} 는 대기관 내의 기체 연료와 액체 의 양이며 $\dot{m}_{fv,g}$ 는 대기관 안에서 Fuel droplet 와 액체 연료 필름이 기화함으로 생기는 기체연료의 Mass generation rate 이다.

체적 효율의 개념을 이용하여 다음식을 유도할 수 있다.

$$m_{a,o} = \frac{Vd Pm X_a}{R Tm} \gamma \quad (9)$$

$$m_{fv,o} = \frac{Vd Pm (1 - X_a)}{R Tm} \gamma \quad (10)$$

여기서 γ 는 체적 효율, X_a 는 혼합 기체에서 의 공기의 마찰양이다.

체적 효율 γ 의 값은 엔진과 엔진의 운전 조건에 따라 달라지며 흡기 대기관 온도, 압력, 배기 압력, 엔진 속도 그리고 엔진의 다른 기하학적인 변수의 복잡한 함수 이며 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\gamma = \gamma_p \gamma_z \quad (11)$$

γ_p : 흡기 대기관과 배기대기관의 압력차에 의한 체적 효율

γ_z : 흡기 대기관 온도와 엔진 속도에 의한 체적 효율

흡기 대기관에서의 온도와 압력의 내력을 결정하기 위해서 에너지 보존의 법칙을 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dU/dt = H_i - H_o + Q \quad (12)$$

여기서 U는 대기관 안의 전체 내부에너지이고 H_i 는 흡입 공기/연료 혼합 기체의 엔탈피이며 H_o 는 배기 혼합기체의 엔탈피, Q 는 대기관으로 들어오거나 나가는 총 열전달이다. 수학적으로 U 는 m_a , m_{fv} , m_{f1} 과 대기관 온도 T_m 과 관계되어있다.

2.3 Combustion

Combustion의 기본적인 관계는 실린더에 들어오는 공기/연료량에 비례하며 토오르크를 발생시키는 것이다. 이 모델에서는 엔진 실린더 안에서 발생하는 연소과정의 상세한 것은 시뮬레이션 되지 않았다. 여기서는 실린더 안에 들어가는 혼합기의 공기 연료비의 함수와 다른 엔진 변수들로 엔진 토오르크의 발생을 예상하는 것이다. 혼합기체의 공기/연료비와 함께 트로블과, 엔진 속도, 점화시기가 엔진 토오르크를 발생시키는 데 중요한 영향을 끼친다.

트로블과와 공기/연료비의 영향에 대한 데이터들은 여기서 사용한 모델에 대하여 factor F1(ϕ , AF) 을 나타내기 위하여 표준화되었다. 점화시기의 영향을 나타내기 위하여 factor F2 가 주어졌다. 엔진 속도에 대한 영향을 나타내기 위하여 F3 로 나타내었다.

새개의 토오르크에 대한 여러가지 엔진변수의 영향을 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$Tq = (Tq)_{max} F1(\phi, AF) F2(spkn) F3(N) \quad (13)$$

$(Tq)_{max}$ 는 엔진에 의해 발생하는 최대 토크이며 일반적으로 일반적인 엔진의 크기와 압축비 그리고 다른 기하학적인 변수들의 함수이다.

2.4 Dynamics

엔진의 동력은 엔진 관성 및 부하관성, 부하관성, 부하 토크등에 관계되며 토크를 계산하기 위해서는 마찰 토크가 고려되어야 하며 이 마찰 토크는 흡입 대기 관 압력과 엔진 속도의 함수이다.

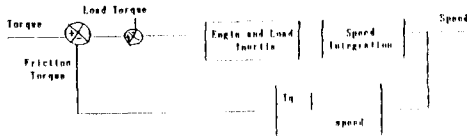


그림 2. 동역학 모델

엔진의 가속 (또는 감속)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{Tq - (Tq)_p - (Tq)_f}{I_e + I_f} \quad (14)$$

여기서 (Tq) : 부하 토크
 $(Tq)_p$: 마찰 토크
 I_e : 엔진 관성
 I_f : 부하 관성

3. 시뮬레이션 및 결과

이 엔진 모델을 사용한 시뮬레이션은 초기 아이들링 상태에서 엔진을 빠르게 가속할 때의 변화이다. 공기/연료비는 초기 아이들링 상태에서의 공기/연료비 14.7에서 12.5로 변화시킨다.

$t = 0$ 에서 엔진 변수들을 다음과 같이 변화 시킴으로써 시뮬레이션을 한다.

$$A/F = 12.5$$

$$\text{inlet air temperature } (T_i) = 300 \text{ K}$$

$$\lambda = 10 + 600t \quad t < 0.133$$

$$= 90 \quad t > 0.133$$

시뮬레이션 결과는 그림 3 과 같다.

4. 결론

본 연구에서는 초기 아이들링 상태에서 빠르게 가속할 때의 변화물 고찰하였다.

다기관 온도와 압력은 공기 흐름의 증가에 따라 급격히 변화하였으나, 엔진 속도는 연료가 증가하는데 대한 영향이 나타나기전에 어느정도 지연을 나타내었다. 엔진 속도의 지연은 흡기 다기관의 온도의 저하로 인한 연료의 기화가 저하되기 때문인것으로 알수 있었다.

이 모델에 의한 시뮬레이션 결과치는 실제의 데이터와 근사함을 보였다. 따라서 이 모델의 엔진제어기의 설계 및 개발에 필요한 엔진 시스템 평가의 기초 자료가 될 수 있을 것이다. 그러나 엔진 지연의 재거 및 연료의 경제성 및 배기가스를 줄이기 위해서는 더 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

5. 참고 문헌

- 1) C.F.Taylor : "The internal - combustion engine in theory and practice", 2nd edition, The M.I.T press, cambridge, Massachusetts.
- 2) D.J.Dobner : "A mathematical engine model for development of dynamic engine control", SAE paper No. 800054.
- 3) W.W.Yuen, and H.Servati : "A mathematical engine model including the effect of engine emissions", SAE paper NO. 840036.
- 4) D.J.Dobner : "Dynamic engine models for control development part I ; Nonlinear and linear model formulation", GMR report GMR - 3783, Jan 13, 1982.
- 5) R.G.Delosh, K.J.Brewer, L.H.Bush and T.F.W. Ferguson : "Dynamic computer simulation of a vehicle with Electronic Engin Control." SAE paper No. 810447, February, 1981.
- 6) Yoshiyuki Idogawa, Kazuo Funabashi and Yukio Maehashi : "A new micro- computer for engine control", SAE paper No. 820249.
- 7) T.J.Flis : "The use of microprocessors for electronic engine control", IEEE vol. IE - 30, No. 2, May 1983.
- 8) T.Tabe, H.Namba, E.Kamei and M.Ohba : "On the application of modern control theory to automotive engine control", IECON'85 proc. vol. 1, pp 101-105, Nov. 1985
- 9) Yoshiharu Hori, Mizuho Fukuda, and Yoichi Kobayashi : "Computer simulation of vehicle fuel economy and performance", SAE Paper No. 860364.
- 10) John J. Moskqa and J. Karl Hedrick : "Automotive engine modeling for real time control applications", Proc. American Control Conf. vol. 1, pp 341 - 346, June 1987.
- 11) F.Kamei, H.Namba, K.Osaki and M.Ohba : "Application of reduced order model to automotive engine control system", Proc. American Control Conf. vol. 3, pp 1815 - 1820, June 1987.

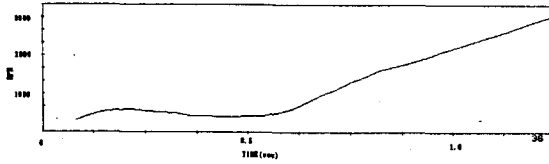


그림 3. 과도현상에서의 엔진속도

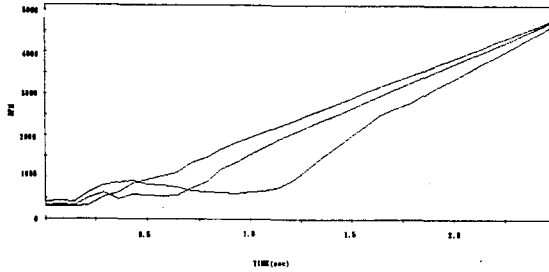


그림 5. 새가지 형배의 공기/연료 비에 의한 실린더와 흡기다기관으로 들어가는 과도 공기/연료 비

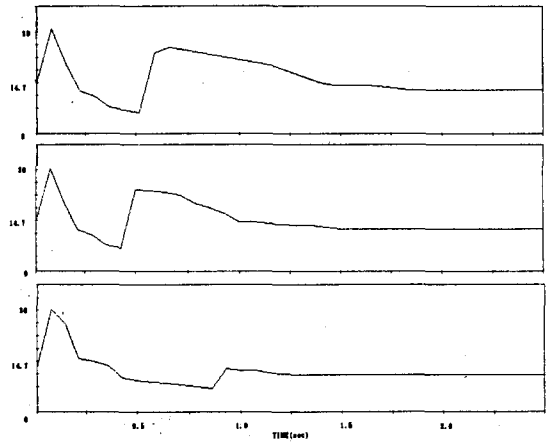


그림 4. 공기/연료 비에 의한 실린더와 흡기다기관의 과도 공기/연료 비