

공회전 속도제어를 위한 엔진 시스템 모델

조장원 이운섭 이덕규 최돈 우광방

연세대학교 전기공학과

Modeling of an Engine System for Idle Speed Control

Jang-Won Jo, Yoon-Seop Lee, Deog-Kyoo Lee, Don Choi, Kwang-Bang Woo

Department of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract

This paper describes dynamic engine model that is applicable to idle speed control system development. A basic linear engine model responds to throttle and load torque inputs to provide manifold pressure and speed outputs. Transfer functions are then derived for the modified linear engine model and significant dynamic characteristics are discussed. Lastly, the strategy for controlling idle speed uses the linear optimal control theory. The linear optimal regulator was designed using a state variable and the performance index was minimized.

1. 서론

이 논문에서는 프로틀 밸브와 부하 토오크 입력, 대기관 압력, 그리고 속도 출력에 관련된 기본적인 선형 엔진 모델을 구성하고, 이 모델을 공회전 속도 제어에 적용하고자 한다.

비선형 엔진 모델은 중요한 기능간의 모든 관계를 포함하고 있기 때문에 대단히 복잡하며, 자세하게 표현할수록 엔진의 기능을 이론적으로 좀 더 확실하게 나타낼 수 있다는 장점이 있는 반면에 실제 시스템에 적용하기란 매우 어려우며, 분석하는데도 많은 어려운 문제들을 내포하고 있으므로, 엔진의 특성을 공칭 작동점 부근에서 정규화 (normalization) 시키는 것은 엔진 시스템 모델링을 하는데 있어서 중요한 역할을 하게 된다.

그러므로 실제 시스템에 적용하기 위하여 각 기능간의 특성들을 적절히 표현할 수 있는 기본적인 선형 엔진 모델이 필요하며 비선형 엔진 모델로부터 프로틀 각을 주요 입력으로 하고, 엔진 속도를 주요 출력으로 하는 기본적인 엔진 모델을 이끌어낼 수 있다.

기본적인 선형 엔진 모델을 이끌어 내기 위하여 엔진의 흡기다기관을 공기 펌프의 개념으로 고려한다. 이런 상황에서는 EGR의 변화, 공기/연료비 등이 무시될 수 있으며 실린더로 들어오는 공기양에 따라 토오크는 발생하게 된다.

위와 같이 연구된 선형적인 엔진 모델은 매글라이터 분야의 하나로서 공회전 속도 제어에 이용될 수 있다.

조절되는 변수(RPM)의 직접적인 측정, 그리고 공회전 속도 상에서의 엔진 동특성의 모델링 등 필요한 요소들을 얻을 수 있으므로 제어 시스템을 설계할 수 있는 것이다. 선형적인 엔진 모델은 시스템 특성의 여러 변화의 영향을 받지 않도록 구성되어 있으며, 이 모델을 통해 제어 보상의 적절한 설계와 함께 가해지는 부하에 대해 공회전 속도를 조절할 수 있다는 것을 이 논문에서 보이고자 한다. 정상적인 주행 상태에서 피드백 제어의 확장은 엔진 속도가 일정한 상수값이 아니기 때문에 좀 더 복잡한 많은 어려움이 따른다. 그러나 공회전 상태에서는 엔진 속도가 일정한 상수값 부근에 수렴할 수 있으며 잠정적인 계산시간동안에 최적으로 결정된 값 부근으로 엔진 상태를 유지시키는 데에는 선형 엔진 모델이 매우 유

용하게 이용될 수 있다.

2. 엔진 시스템 모델링

2.1 비선형 엔진 모델

엔진내에서 일어나는 물리적인 현상과점들에 근거한 비선형 엔진 모델의 구성 요소를 대략적으로 나타내면 그림 1과 같다.

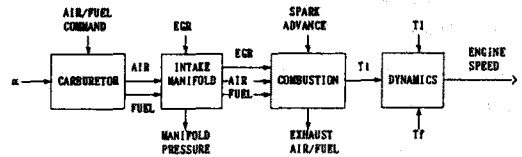


그림 1 비선형 엔진 모델

이 그림에서 나타난 구성요소들은 각 상호작용을 명확하고 쉽게 나타내주기 위하여 각 부시스템으로 나누어 구성하였으며, 엔진 모델에서 부시스템으로 분할된 부분들은 각기 모듈화하여 좀더 세밀하고 완전한 모델구성을 할 수 있다.

주요소들은 기화기, 흡기 다기관, 연소 장치, 동력 장치등으로 이루어져 있다. 이 모델의 제어 입력은 다음과 같다.

- α : 프로틀 각도
- A/F_c : 공기/연료비 명명
- EGR : 배기 가스 재순환
- SA : 집화 진각
- T1 : 부하 토오크
- T1 : 순수 발생 토오크

출력은 다음과 같다.

- P_m : 흡기 다기관 압력
- A/F_e : 배기 공기 연료비
- Tf : 마찰 토오크
- N : 엔진 속도

공기 - 연료 흡입장치는 프로틀각의 변화에 따라 공기의 양을 받아 들이고, 또한 인젝터에 의해 연료를 받아 들여 흡기 다기관으로 공기와 연료를 보낸다.

흡기 다기관에서는 공기 연료 흡입장치에서 받아들인 공기와 연료를 연소장치로 보내게 되는데, 흡기 다기관에서의 연료의 기화율과 펌프 생성에 의한 연료의 전달 지연으로 인해 입력된 연료와는 다른 양의 연료가 출력된다. 연소장치에서는 입력된 공기, 연료로써 토오크와 배기가스를 발생시킨다. 이 발생된 토오크 (indicated torque) 와 부하 토오크, 마찰 토오크 등과의 산술적인 계산에 의해 가속 또는 감속 토오크가 발생하며, 동력장치에 의해 엔진 속도로 변환된다.

2.2 선형 엔진 모델

흡기 다기관으로 들어가는 공기 흐름 M_i 는 오직 프로펠 각도에 관련된 식으로 표시될 수 있다.

$$M_i = f_1(\alpha)$$

다기관을 통해 나가는 공기 흐름을 M_o 라 하면 흡기 다기관 안에서의 공기량 M_m 은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_m = \int (M_i - M_o) dt$$

다기관 압력은 다기관 공기량과 직접적인 관련이 있으므로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = f_2(M_m)$$

흡기 다기관을 나가는 공기 흐름은 다기관안의 공기량과 엔진 속도와의 함수이므로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_o = f_3(M_m, N)$$

순수 발생 토크 (Indicated Torque), T_i 은 실린더 안으로 들어오는 공기 흐름과 관련되며, 공기가 유입되는 시기와 토포크가 발생하는 시기와는 시간 지연 발생하게 된다.

$$T_i = f_4\left(\frac{M_o(t-\tau)}{N(t-\tau)}\right)$$

결국 엔진 속도는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{1}{J} \int (T_i - T_f - T_l) dt$$

$$T_f = f_5(N)$$

여기서, J : 엔진과 부하의 관성 계수
Tf : 마찰 토포크
Tl : 부하 토포크

위 식의 관계들을 공칭 작용점 부근에서 선형 근사화시키면 다음과 같다.

$$\Delta M_i = \Delta K_1$$

$$\Delta M_m = \int (\Delta M_i - \Delta M_o) dt$$

$$\Delta P_m = K_6 \Delta M_m$$

$$\Delta M_o = k_2 \Delta M_m + k_3 \Delta N$$

$$\Delta T_i = k_4 \Delta M_m(t-) + k_5 \Delta N(t-)$$

$$\Delta N = \frac{1}{J} \int (\Delta T_i - \Delta T_f - \Delta T_l) dt$$

$$\Delta T_f = k_7 \Delta N$$

이 관계들을 블럭 다이어그램으로 나타내면 그림 2 와 같다.

이 모델은 엔진 속도 출력관계와 부하등의 작용을 시뮬레이션하기에 매우 유용하다. $\Delta\alpha, \Delta M_m$ 그리고 ΔN 에 관련된 M_m 은 전형적인 대기 압력비에 대한 다기관 압력의 작용관계를 포함한다. 이와 비슷하게 제작 효율과 EGR 관계는 K2 와 K3 로 잠작하게 되어 있다. T_i 는 M_o 의 영향을 받으며, M_o 는 ΔM_m 에 의존하므로 ΔM_m 에 의존하는 ΔT_i 와의 선형적인 관계를 이끌어 낼 수 있다.

τ, J, K 등과 같은 각 파라미터 값들은 계산에 의해 구해지거나, 엔진 테스트를 통해 얻을 수가 있다.

즉 예를 들어 K1 은 프로펠 특성 곡선의 기울기를 말하며, 모델에서의 적절한 기능적인 관계들을 규명하기 위해서는 엔진 테스트가 요구 된다.

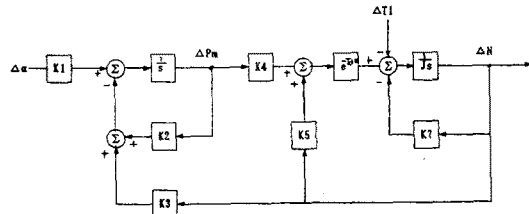


그림 2 선형 엔진 모델

2. 공회전 속도 제어 시스템

지금까지 배기 가스를 줄이고 연료 경제성과 승차감을 향상시키며, 공회전 속도를 조절하는데 쓰여온 많은 엔진 제어기들은 정적 최적화 (static optimization) 방법에 근거한 제어 법칙을 채택하여 왔다.

최적 제어 입력들은 도로 테스트 방법에 의하여 마이크로 컴퓨터안에 운전 조건에 따른 map 형태로 저장되어지고 추적된 운전 조건에 응답한다. 그런데 이러한 방법은 제어 함수들이 고정되어 있기 때문에 여러가지 문제들이 발생되어진다. 즉 프로펠 밸브를 여닫는 실행 과정과 센서 측정 편차, 그리고 시간 지연에 따른 변수들의 변화에 의해 일어나는 과도 상태에 대한 문제, 또한 엔진 제어 장치를 개발하기 위해서는 이러한 방법은 주어진 하나의 시뮬레이션이 단지 하나의 특정한 엔진 특성과 조건에만 의미가 있는 결과를 만들어내기 때문에, 다른 엔진을 사용할 때에는 새로운 데이터를 가지고 새롭게 프로시저 작업을 해야하며, 모든 가능한 운전 조건들을 테스트한다는 것은 매우 어렵고 개발 시간도 상당히 길어진다는 문제점을 가지게 되는 것이다.

위에 설명한 바와 같이 피드백 제어의 필요성에 따라 이 논문에서는 선형 최적 제어 (Linear optimal control) 방법을 전장에서 연구된 선형 모델에 적용함으로써 공회전 속도 제어에 응용하고자 한다. 최적 제어 시스템을 채택하려 한다면 가능한 간단한 모델이 바람직하며, 이런 이유들로 그림 2 와 같은 선형 모델과 지배극점 (dominant pole) 을 이용하여 저차수 모델을 이끌어 내 보고자 한다.

표 1 모델의 파라미터 값들

파라미터	값	파라미터	값
K1	35.90	K5	0.022
K2	6.84	K7	0.005
K3	0.41	J	0.022
K4	1.58	Td	0.075

그림 2 에 표 1 의 값들을 대입하면 다음과 같은 전달 함수를 얻을 수 있다.

$$G(s) = \frac{-3.14 (s^2 - 711.3)}{s^2 + 3.89s + 21}$$

엔진 부하의 약 20% 가량 에어콘 부하가 걸린다고 가정하면, 엔진의 시동신호 입력과 에어콘의 신호 입력은 일종의 스텝 입력이라고 할때 그림 2 로부터 다음과 같은 전달함수를 얻을 수 있다.

$$G2 = \frac{-5.54 s^2 - 9.9 s + 3673}{s^2 + 3.89 s + 21}$$

위에서 얻은 G1 은 무부하 엔진의 전달함수이며, G2 는 애어른 부하가 첨가되었을 때의 전달함수이다. 그리고 이것을 이용하여 공회전 속도 제어 시스템에 응용할 수 있다. 이때 G1, G2 의 open loop step response 를 그래프로 나타내면 그림 3 와 같다.

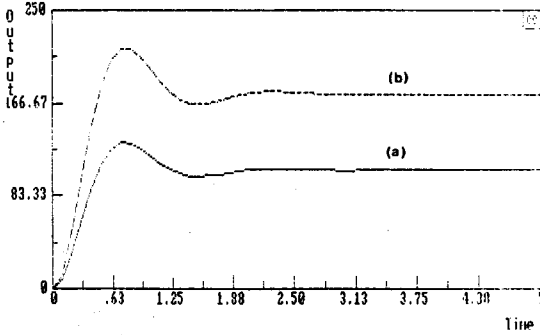


그림 3 G1 과 G2 의 계단 응답
(a) 무부하 (b) 부하 첨가

무부하 상태 일때의 스텝 응답은 일정한 값을 유지하고 있으나 이 값은 자동차를 주행하는 동안 여러 파라미터들에 의해 변화될 수 있으며, 부하가 첨가되었을 때의 공회전 속도는 무부하 상태일 때의 공회전 속도보다 급격히 상승한다. 그 이유는 부하가 첨가되므로 큰 토오크가 필요하게 되고, 큰 토오크를 발생시키기 위하여 엔진의 브로틀 밸브가 무부하 상태일 때보다 더 많이 열리게 되기 때문이다. 즉 소형 엔진에서의 KI 값이 상승하게 되는 것이다.

수식구성

일반적인 전달함수는 상태공간으로 변환이 가능하다. 즉, G(s) 는 다음과 같이 변환된다.

$$\dot{X} = A X + B u$$

$$y = C X$$

{ A , B } 쌍이 제어 가능 (controllable) 하고, { A , C } 쌍이 관측 가능 (observable) 할때, 최적제어를 위한 입력 u 가

$$u = - G X (t)$$

이고, 평가 함수 (cost function) J 가

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt$$

로 표현되면, 정상 상태에서의 리카티 (riccati) 방정식은

$$P A + A^T P - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

$$G = R^{-1} B^T P$$

과 같이 표시된다.

3. 시뮬레이션

부하가 첨가되었을 때의 전달함수 G2 를 가제어 준거 행렬 (Controllable Canonical Form) 으로 변환하면 다음과 같다.

$$G2 = \frac{-5.54 s^2 - 9.9 s + 3675}{s^2 + 3.89 s + 21}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -21 & -3.89 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 3789 & 11.65 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -5.54 \end{bmatrix}$$

여기서, { A , B } 는 제어 가능 (controllable) 하고 { A , C } 는 관측 가능 (observable) 하므로, 하중 행렬 Q 와 trade off parameter R 을 분류하여 각 리카티 방정식의 해를 이끌어 내면 다음과 같다.

$$\text{CASE1: } Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, R = 1$$

$$\text{CASE2: } Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, R = 3 \times 10^6$$

$$\text{CASE3: } Q = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, R = 50$$

$$\text{CASE4: } Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, R = 1$$

Riccati equation solution P 는 유효 숫자 6 제자리 까지 정확히 일치하는 대칭 행렬 (symetric matrix) 로써 구해졌다.

$$\text{CASE1: } P = \begin{bmatrix} 2.210731 D -01 & 2.379604 D -02 \\ 2.379604 D -02 & 6.112432 D -03 \end{bmatrix}$$

$$\text{CASE2: } P = \begin{bmatrix} 2.211538 D -01 & 2.380952 D -02 \\ 2.380952 D -02 & 6.120700 D -03 \end{bmatrix}$$

$$\text{CASE3: } P = \begin{bmatrix} 3.140591 D +00 & 4.761797 D -02 \\ 4.761797 D -02 & 1.407249 D -01 \end{bmatrix}$$

$$\text{CASE4: } P = \begin{bmatrix} 4.904350 D -01 & 2.379604 D -02 \\ 2.379604 D -02 & 1.892467 D -02 \end{bmatrix}$$

이때, 각각의 Gain G 는 다음과 같다.

$$\text{CASE1: } G = \begin{bmatrix} 0.0238 & 0.00611 \end{bmatrix}$$

$$\text{CASE2: } G = \begin{bmatrix} 7.93 D -9 & 2.04 D -9 \end{bmatrix}$$

$$\text{CASE3: } G = \begin{bmatrix} 0.000952 & 0.0028 \end{bmatrix}$$

$$\text{CASE4: } G = \begin{bmatrix} 0.0238 & 0.0189 \end{bmatrix}$$

각각의 Pole 점은 다음과 같다.

CASE1: $-1.948 + j 4.15$, CASE2: $-1.945 + j 4.149$
 $-1.948 - j 4.15$, $-1.945 - j 4.149$
 CASE3: $-1.946 + j 4.149$, CASE4: $-1.954 + j 4.148$
 $-1.946 - j 4.149$, $-1.954 - j 4.148$

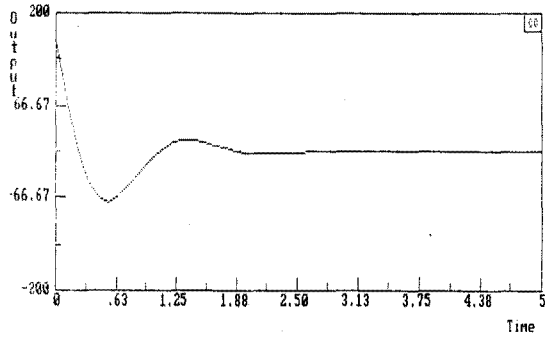
각각의 경우, 선형 최적 레귤레이터의 응답을 그래프로 나타내면 그림 4 와 같다.

4. 결론

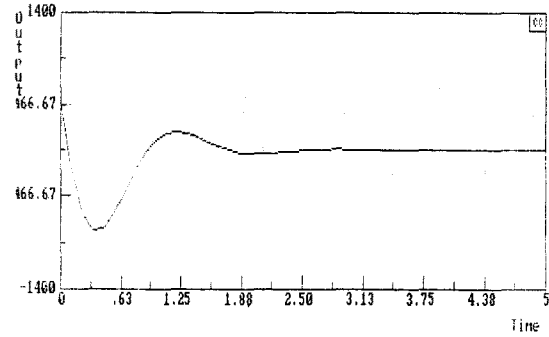
비선형 엔진 모델은 엔진의 기능을 이론적으로 좀 더 확실하게 나타낼 수 있다는 장점이 있는 반면에 실제 시스템에 적용하기란 매우 어려우며, 분석하는데도 많은 어려운 문제들을 내포하고 있으므로 실제 시스템에 적용하기 위하여 각 기능간의 특성들을 적절히 표현할 수 있는 기본적인 선형 엔진 모델을 구성하였으며 이 모델로부터 원하는 공회전 속도로 조절할 수 있는 선형 최적 레귤레이터의 응답을 얻을 수 있었다.
 이 기본적인 선형 엔진 모델을 좀 더 정확한 모델로 발전시키기 위하여 공기/연료비와 점화 진각의 요소들 고려해 볼 필요가 있으며, 좋은 특성의 응답을 얻기 위해 발전된 제어 이론의 연구도 필요할 것이다.

참고 문헌

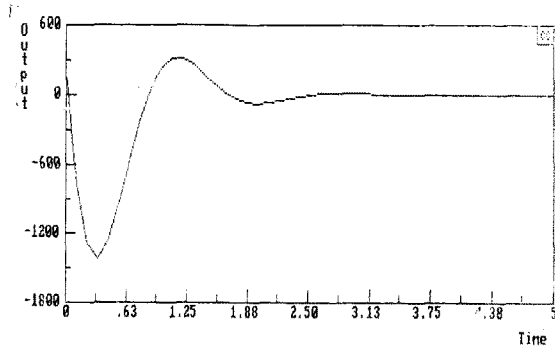
- 1) Donald J. Dobner : " Dynamic engine models for control development part 1 : Nonlinear and linear model formulation ", GMR - 3783 January 13, 1982
- 2) D. J. Dorf : " Modern Control System ", Reading, Massachusetts, Addison - Wesley Publishing Company, 1967
- 3) Robert L. Woods, David L. Hunn, and Phil D. Dobson : " Deveopment of an idle speed control system for Spark - Ignition engines ", Proc. of ACC February 9, 1983
- 4) L. M. Sweet : " Automotive Applications of Modern Control Theory ", SAE 820913 , 1982
- 5) R. L. Morris, M. V. Warlick, and R. H. Borcherts : " Engine Idle Dynamics and Control : A 5.8L Application ", SAE 820778 , 1982
- 6) 이 덕규 : " 연료상태와 점화시기에 관한 엔진 모델의 컴퓨터 해석 ", 연세대학교 대학원 석사 학위 논문, 1989



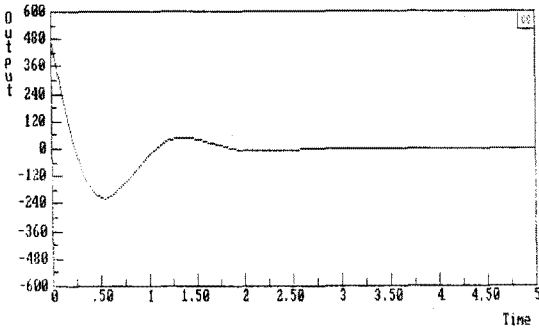
(b) CASE 2



(c) CASE 3



(d) CASE 4



(a) CASE 1

그림 4 선형 최적 레귤레이터의 응답