

유전 알고리즘을 이용한 디젤 엔진의 최적 연료주입 모델 추종형 μ -합성 제어 시스템의 설계

· 김동완* · 황현준**

*동명전문대학 전기과 · **부산대학교 전기공학과

A Design on Model Following μ -Synthesis Control System for Optimal Fuel-Injection of Diesel Engine Using Genetic Algorithms

· Dong-Wan Kim* · Hyun Joon Hwang**

*Dong-Myung Junior College · **Pusan National University

Abstract - In this paper we design the model following μ -synthesis control system for optimal fuel-injection of diesel engine using genetic algorithms. To do this, we give gain and dynamics parameters to the weighting functions and apply genetic algorithms with reference model to the optimal determination of weighting functions that are given by D-K iteration method which can design μ -synthesis controller in the state space. These weighting functions are optimized simultaneously in the search domain selected adequately. The effectiveness of this μ -synthesis control system for fuel-injection is verified by computer simulation.

1. 서 론

현재 디젤엔진의 연료주입 제어 시스템의 가장 큰 문제점은 구동기가 들어 있는 주입펌프내의 온도변화에 따라 연료의 점도가 변화하며 연료속에 잠겨서 왕복운동을 하는 측정슬리브(metering sleeve)의 동작이 이러한 점도변화에 직접적인 영향을 받는다는 점이다. 따라서 온도변화에 따른 연료주입 시스템의 파라메타 변동에 대해서도 제어 시스템의 성능을 보장하는 강인한 서보 제어기의 설계가 요구된다.

지금까지 강인한 제어는 강인한 안정성 문제(robust stability)를 주로 다루어 왔으나 최근에는 강인한 성능(robust performance)[1] 문제가 제기되고 있으며 이것은 루프형상방법에 기초한 기존의 H_{∞} 제어이론으로는 해결이 곤란하다. 1982년 J. C. Doyle 등은 구조적 특이치(structured singular value)를 제안하여 강인한 성능 문제를 다루는 μ -합성(μ -synthesis)법을 소개하였고 1988년 D. A. Milich 등은 개선된 D-K 반복(D-K iteration)법을 통하여 강인한 성능 문제의 해를 구하였다. 한편 최근까지 H_{∞} 제어기 및 μ -합성 제어기를 설계하기 위한 적절한 가중치 함수(weighting function)의 선정은 최적의 가중치 함수를 선정하기 위한 다수의 방법[2,

3]들이 발표되었음에도 불구하고 실제 적용상의 어려움 등으로 인하여 시행착오(trial-and-error)적인 방법[3, 4]에 크게 의존하고 있다.

본 연구에서는 복잡한 최적화의 과정이 없이 유전 알고리즘(simple genetic algorithms, SGAs)을 사용하여 가중치 함수들을 동시에 최적화함으로써 시스템의 불확실성에 대한 강인한 성능과 기준모델에 따른 최적의 명령추종성을 가지는 디젤엔진의 연료주입 모델 추종형 μ -합성 제어 시스템을 설계한다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 설계된 디젤엔진의 연료주입 μ -합성 제어 시스템의 유용성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 디젤엔진의 연료주입 제어 시스템

본 연구에서는 H. Kuraoka와 N. Ohka 등[5]에 의해 제시된 연료주입 시스템의 적분요소 첨가형 선형 모델들($P_{00}(s)$ at $0^{\circ}C$, $P_{25}(s)$ at $25^{\circ}C$: 공칭 플랜트, $P_{60}(s)$ at $60^{\circ}C$)을 사용한다.

2.2 연료주입 μ -합성 제어 시스템의 설계

μ -설계법은 구조적 특이치 μ 를 도입하여 시스템에 대한 μ -해석(μ -analysis)을 행한 후 D-K 반복에 의해 H_{∞} 제어이론과 μ -해석을 합성(synthesis)시킴으로써 강인한 성능 문제를 해결하도록 한 것이다. 강인한 성능을 얻기 위한 필요충분조건식은 선형분수변환식 $F(P, K)$ 에 대해 식(2.2.1)과 같다.

$$\mu[F(P, K)(j\omega)] < 1, \forall \omega \quad (2.2.1)$$

그런데 일반적으로 μ 의 값은 직접 구할 수 없으므로 스케일링 행렬(scaling matrix) D를 도입하여 식(2.2.2)와 같이 μ 의 상한치를 나타낸 후 D-K 반복법[1]에 의해 이것을 최소화한다.

$$\mu[F(P, K)] < \|DF(P, K)D^{-1}\|_{\infty} \quad (2.2.2)$$

여기서 D-K 반복법에 따른 가중치 함수 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 는 각각 외란 $d(s)$ 와 플랜트 $P_{00}(s)$, $P_{60}(s)$ 에 대한 곱셈형 모델링 오차 $E_{m00}(s)$ 및 $E_{m60}(s)$ 에 대해 식(2.2.3)과 식(2.2.4)를 만족하도록 모델링한다. 단 $d(s)$ 는 단위 계단의외란으로 가정한다.

$$|d(j\omega)| \leq |W_1(j\omega)| \quad \text{at low frequencies} \quad (2.2.3)$$

$$\max(|E_{m00}(j\omega)|, |E_{m60}(j\omega)|) \leq |W_2(j\omega)| \quad \text{at high frequencies} \quad (2.2.4)$$

본 연구에서는 시스템의 응답속도와 외란제거 및 강인한 안정성 등을 고려하여 게인교차 주파수 ω_c 를 50[rad/sec] 정도로 하고 %오버슈트는 20% 이내로 한다. 식(2.2.3)과 식(2.2.4) 및 위의 설계사양들을 동시에 만족시키기 위해 참고문헌[5]를 기준으로 시행착오법에 의해 선정된 가중치 함수 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 는 각각 다음과 같다.

$$W_1(s) = \frac{\rho \times (20)}{s(s+20)} \quad \text{and } \rho = 20 \quad (2.2.5)$$

$$W_2(s) = \frac{(s+30)(s+60)}{30 \times 60 \times 10} \quad (2.2.6)$$

2.3 유전 알고리즘을 이용한 최적 모델 추종형 μ -합성 제어기의 설계

2.3.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 적자생존에 따른 확률적인 방법으로 최적해를 찾아가는 최적화 기법중의 하나이다. 유전 알고리즘의 특징 및 자세한 내용은 참고문헌[6]에 제시되어 있으므로 본 연구에서는 이를 생략한다.

2.3.2 가중치 함수들의 동시최적화

유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수들을 동시에 최적화하기 위해 먼저 식(2.2.5)와 식(2.2.6)으로 주어진 가중치 함수에 크기와 형태를 결정하는 게인(gain) 및 동특성(dynamics) 파라메타를 변수로 주고 식(2.3.1) 및 식(2.3.2)와 같이 가중치 함수의 매개변수화를 행한다

$$W_1(s) = \frac{g_{w1} \times (p_{w1})}{(s^2 + p_{w1}s)} \quad (2.3.1)$$

$$W_2(s) = \frac{g_{w2} \times (s^2 + (p_{w2} + p_{w3})s + (p_{w2} \times p_{w3}))}{(p_{w2} \times p_{w3} \times 10)} \quad (2.3.2)$$

최적화를 위해 식(2.2.3) 및 식(2.2.4)를 고려하여 선정된 게인 및 동특성 파라메타의 탐색구간 $D_1 \sim D_5$ 는 각각 다음과 같다.

$$D_1 = \{ g_{w1} \mid L_1 = 1 \leq g_{w1} \leq 50 = U_1 \} \quad (2.3.3)$$

$$D_2 = \{ g_{w2} \mid L_2 = 0.5 \leq g_{w2} \leq 1.5 = U_2 \} \quad (2.3.4)$$

$$D_3 = \{ p_{w1} \mid L_3 = 1 \leq p_{w1} \leq 40 = U_3 \} \quad (2.3.5)$$

$$D_4 = \{ p_{w2} \mid L_4 = 1 \leq p_{w2} \leq 60 = U_4 \} \quad (2.3.6)$$

$$D_5 = \{ p_{w3} \mid L_5 = 1 \leq p_{w3} \leq 120 = U_5 \} \quad (2.3.7)$$

최적 μ -합성 제어기를 설계하기 위해 5개의 게인 및 동특성 파라메타들을 하나의 문자열에 적절한 크기($g_{w1,2} : m_1=m_2=7, p_{w1,2,3} : m_3=m_4=m_5=8$)의 비트(bit)수로 부호화(coding)한다. 여기서 비트수 m_i 로 부호화된 임의의 i 번째 파라메타 X_i 에 대하여 탐색구간 D_i 와의 관계식을 유도하면 식(2.3.8)과 같다. 단 x_i 는 m_i 의 비트수를 가지는 2진수의 현재 정수값이며 U_i 와 L_i 는 각각 D_i 의 상·하한치이다.

$$X_i = L_i + \frac{x_i}{2^{m_i} - 1} (U_i - L_i) \quad (2.3.8)$$

또한 D-K 반복법(2번째 반복)에 의해 설계된 디젤엔진의 연료주입 μ -합성 제어 시스템의 강인한 성능을 보장하기 위해 식(2.2.1)로부터 구조적 특이치 μ 에 대해 다음과 같은 제한조건을 주어 최적화를 행한다.

$$\mu < 1, \quad \forall \omega \quad (2.3.9)$$

본 연구에서는 디젤엔진의 연료주입 μ -합성 제어 시스템이 설계사양에 따른 최적의 명령추종성을 가지도록 식(2.3.10)과 같이 적절한 기준모델을 선정 후 유전 알고리즘에 의한 최적화시 플랜트의 출력이 기준모델의 출력을 추종하도록 하였다. 기준모델은 시스템의 응답속도 등을 고려하여 ITAE의 최소표준형 2차모델($\omega_0=55.5$ [rad/sec])로 선정하였다.

$$M_0(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 1.4 \times \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2.3.10)$$

또한 기준모델 및 유전 알고리즘에 따른 개별 문자열의 적합도 fit_{weight} 는 온도변화에 따른 시스템의 파라메타 변동을 최적화에 따른 모델 추종형 제어기의 설계시 직접적으로 고려하기 위해 적절한 가중치를 도입하여 식(2.3.11)과 식(2.3.12)와 같이 선정하였다. 여기서 $k(t+1) = k(t) + T_s$, $k(1) = 0$ [sec]이며 $T_s = 0.02$ [sec]는 샘플링 시간을 나타낸다.

$$\begin{aligned} err_{fit_weight} &= \sum_{j=1}^3 (w_j \times \sum_{i=1}^{16} abs(err_i(k(t)))) \\ &= \sum_{j=1}^3 (w_j \times \sum_{i=1}^{16} abs(y_m(k(t)) - y_j(k(t)))) \quad (2.3.11) \end{aligned}$$

$$fit_{weight} = \frac{1}{1 + err_{fit_weight}} \quad (2.3.12)$$

단 각각의 가중치는 제어 시스템의 공칭성능 및 기준모델에 대한 추종성 등을 고려하여 $w_1 = 0.15$, $w_2 = 0.5$, $w_3 = 0.35$ ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$)로 선정하였다. 여기서 $y_c(k(t))$, $y_m(k(t))$ 는 각각 연료주입 시스템 및 기준모델의 출력율, $err_j(k(t)) = \text{abs}(y_m(k(t)) - y_c(k(t)))$ 는 이에 따른 기준모델 추종오차를 나타낸다. 또한 $j = 1, 2, 3$ 은 각각 플랜트 $P_{00}(s)$, $P_{25}(s)$, $P_{60}(s)$ 를 의미한다.

2.4 시뮬레이션 및 비교고찰

그림 1 ~ 그림 3은 2.3절에서의 설계 방법(방법 2, 적합도 : 0.8514)에 의해 최적화된 게인 및 동특성 파라메타($g_{w1,2} \sim p_{w1,2,3}$: 26.0787, 0.5394, 19.2000, 6.3216, 83.1333)들을 사용하여 설계된 디젤엔진의 연료주입 μ -합성 제어 시스템의 단위 계단 응답이다. 여기서 방법 1(적합도 : 0.7585)은 가중치 함수들에 게인 파라메타만을 주고 이것을 최적화($g_{w1,2}$: 26.8504, 1.4134)한 경우이다. 그림들로부터 방법 2의 경우 적합도의 증가로 인한 기준모델추종오차의 감소로 인해 과도응답특성이 시행착오법(적합도 : 0.6857) 및 방법 1에 비해서 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수들을 동시에 최적화함으로써 강인한 성능을 가지는 디젤엔진의 연료주입 모델 추종형 μ -합성 제어 시스템을 설계하였다. 설계된 제어 시스템은 기준모델과 마찬가지로 설계사양을 잘 만족한다. 한편 가중치 함수의 게인만을 최적화한 경우 및 시행착오법의 경우는 상대적으로 적합도가 낮다. 따라서 제시된 설계 방법과 같이 게인 뿐만 아니라 가중치 함수의 동특성을 함께 최적화하는 것이 필요하다. 또한 복잡한 최적화의 과정이 없으므로 제시된 설계 방법을 보다 쉽게 실제의 제어 시스템 설계에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

(참 고 문 헌)

[1] S. Fujita, "Robust Control Performance and μ -Synthesis", System and Control, Information, Vol. 37, No. 2, pp.93-101, 1993.
 [2] F. B. Yeh, etc, "Optimal Sensitivity Bound Estimation and Controller Design", Int. J. of Control, Vol. 47, No. 4, pp. 979-984, 1988.
 [3] C. D. Yang, etc, "Experimental Design of H_∞ Weighting Functions for Flight Control Systems", J. of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 17, No. 3, pp. 544-552, 1994.
 [4] S. Pannu, " μ -Synthesis Control for a Walking Robot", IEEE Control Systems, pp. 20-25, February, 1989.

[5] H. Kuraoka, etc, "Application of H_∞ Optimal Design to Automotive Fuel Control", American Control Conference, Vol. 3, pp. 1957-1962, 1989.
 [6] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing company, 1989.

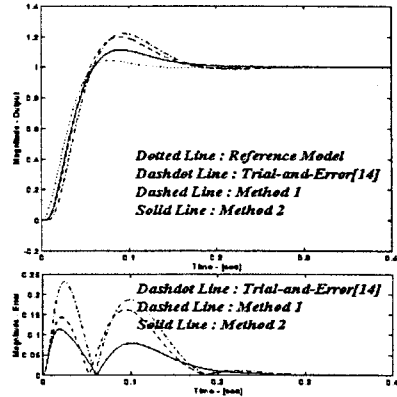


그림 1. 0°C에서의 단위계단응답과 추종오차

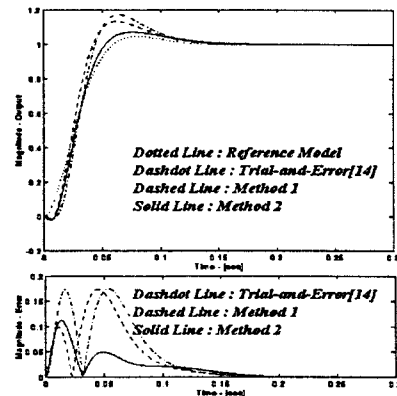


그림 2. 25°C에서의 단위계단응답과 추종오차

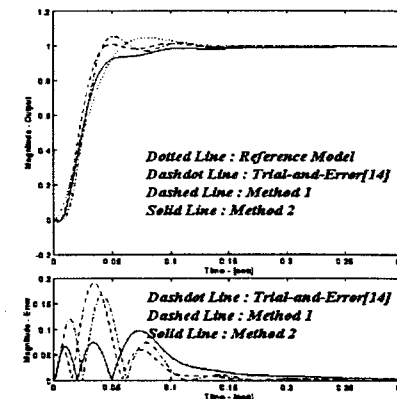


그림 3. 60°C에서의 단위계단응답과 추종오차