

디젤 기관의 최적 속도제어에 관한 연구

하주식 · 진강규 · 유영호

A Study on the Optimal Speed Control of a Diesel Engine

Ha, Jooshik · Jin, Ganggyoo · Yu, Youngho



Abstract

Conventional diesel engine speed controllers are regulators based on simple proportional control. It is difficult to adjust the full range of the engine speed successfully because of the variations of both engine dynamics and environmental disturbances. This demand has made it necessary to replace the hydro-mechanical speed control units by a more sophisticated system. As electronic devices become cheaper and more reliable, it worth while considering their use for controllers which traditionally have been hydraulic or mechanical.

A satisfactory speed controller is designed and simulated for the development of an electronic diesel engine speed control system. The controller is designed so that the output can track the step reference input with zero steady-state error for any variations in the system parameters. The proposed approach is based on obtaining the optimal control of the augmented system with one additional integrator at the output side. As the entire states are not accessible, an observer is combined to synthesize the controller.

1. 서 론

최근 선박주기관용 디젤기관은 선박의 추진효율을 높이고 선박의 운항비를 절감할 목적으로 장행정 저통수가 됨에 따라 저속에서의 출력토크의 변화가 심하고 운전속도와 주위환경에 따라 퍼라미터의 변화가 크고 해상상태에 따라 기관에 걸리는 부하변동이 크므로 재래식 유압조속기를 이용한 기관속도제어에는 어려운 점이 많다.

최근 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선진 자동화기기 제작사들은 경제성이 있고 신뢰성이 향상된 마이크로프로세서 기술을 이용하여 디지털조속기 개발을 위한 연구에 박차를 가하고 있다. 선진 몇몇 대학과 연구소에서도 이에 대한 연구를 진행중이나 연구실적이 극히 미미할 뿐만 아니라 기술보호 측면에서 연구결과 발표를 꺼리고 있는 실정이다. 특히 北川正人¹은 선형제어 모델에서 Ziegler-Nichols의 한계감도법으로 몇가지 동작속도에서 PID제어기의 최적계수를 구한 후 출력궤환하여 제어하는 연구를 수행하였으며 田村直樹²는 Flexible Ployhedron법을 이용하여 PID제어기의 최적퍼라미터를 구하는 방법을 제시하였으며 몇가지 회전수와 평가함수에 대한 최적 페라미터의 변화를 정량적으로 검토하였다. 佐藤 勳³ 또한 PID연산을 이용하여 MG-800가바나 시스템을 개발하고 육상시운전에서 좋은 실험 결과를 얻었음을 밝혔으며 최근 Soren T. Lyngso사⁴에서는 선박주기관과 소기공급 장치 모델을 선형화하여 상태궤환제어 이론을 이용하여 제어하는 두 가지 모델의 EGS900 디지털 가바나 시스템을 연구개발하여 시판하고 있다.

실제 선박용 주기관의 원만한 조속을 위하여 동작속도의 변화, 해상상태의 불규칙한 요동으로 기인하는 퍼라미터의 변화와 모델링 오차등으로 부터 생길 수 있는 속도변화에 대한 영향을 적게하고 만족할 만한 과도응답특성을 갖도록 제어기 설계가 요구되어 진다. 또한 열악한 해상조건에서는 외부 부하변동이 극심하므로 이에 대처할 수 있는 능력을 가져야 한다. 따라서 본 연구에서는 제어모델의 진향방향에 적분기를 삽입하고 최적 이론을 이용하여 상태궤환하는 제어기를 설계하였으며 해상조건이 열악하여 주기관에 부과되는 부하변동이 클 때는 이를 측정하여 피이드포워드(Feedforward) 제어하여 심한 속도변동을 막도록 하였고 실제 제어기 실현에 요구되는 상태변수 중에서 측정 불가능한 상태변수는 상태관측기를 설계하여 이로부터 추정하도록 하였다.

본 연구에서 제안한 방법의 우수성을 확인하기 위하여 저속 장행정 선박주기관용 디젤기관에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

2. 모델링

그림 1은 디젤기관의 속도제어를 위한 제어대상으로서 제어대상은 기계적인 마찰부분에서의 쿠롱마찰, 연료분사 계통의 분사지연요소, 동작 회전수와 외부환경에 따른 연소계통과 회전계통의 변화 등 많은 비선형 요소를 포함하고 있으나 동작점 부근에서 선형화하면 다음 식(1)과 같이 표시될 수 있다.

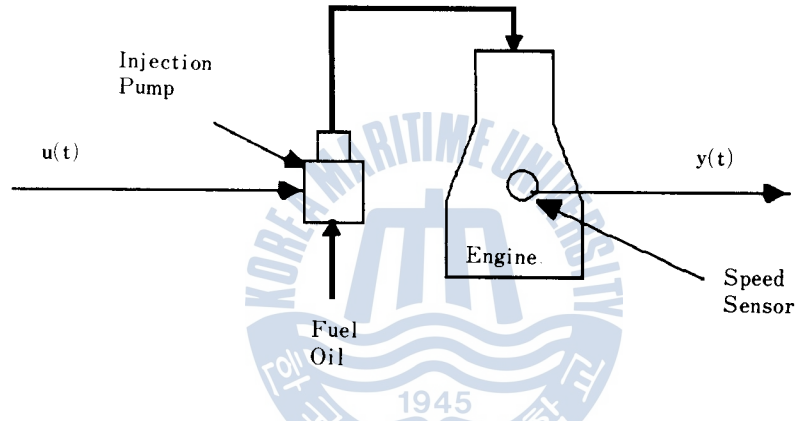


Fig. 1. Controlled plant

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Dq} + \mathbf{d} \\ \text{(S)} \quad \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} \end{aligned} \tag{1}$$

식(1)에서 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 는 3x1 상태벡터이며 u 는 연료분사 펌프의 래크변위, y 는 기관회전수, q 는 부분적으로 측정 가능한 외부 부하, d 는 외란이며 계수행렬 A, B, D, C 는 다음과 같이 주어진다.

$$A = \begin{pmatrix} -1/T_r & K_r/T_r & 0 \\ 0 & -1/T_c & K_c/T_c \\ 0 & 0 & -1/L \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} -K_r/T_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0].$$

여기서

L = 연료분사 지연시간

K_c = 연소계통의 정상이득

T_c = 연소계통의 시정수

K_r = 회전계통의 정상이득

T_r = 회전계통의 시정수

이다. 식(1)에서 x_2, x_3 는 측정장치를 이용하여 직접 측정할 수 없는 상태변수로 간주하며 기관에 걸리는 외부부하 q 는 측정장치로부터 부분적으로 측정 가능하며 외란 d 는 측정장치로부터 측정할 수는 없으나 일정한 것으로 간주한다. 한편 주어진 개회로 제어 시스템은 가제어(Controllable)하고 가관측(Observable)하다.

3. 제어기 설계

주어진 제어시스템에서 제어기는 요구되는 과도응답 조건을 만족하면서 운전중 퍼라미터의 변화나 모델링 오차에도 목표치를 정상편차 없이 잘 추종하도록 설계되어 저야 하므로 본 논문에서는 출력이 계단상의 목표치를 정상편차 없이 잘 추종하도록 다음과 같이 새로운 상태변수 z 를 정의한다.

$$\dot{z} = y - y_r$$

식(1), (2)로부터 상태변수를 재구성한 후 시스템 방정식을 다시 쓰면 식(3)과 같게 된다.

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{B}}u + \tilde{\mathbf{D}}q + \tilde{\mathbf{d}} - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} y_r \quad (3)$$

($\tilde{\mathbf{S}}$)

$$y = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}$$

여기서

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{C} & 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} \mathbf{D} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \ 0], \quad \tilde{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ z \end{pmatrix}$$

식(3)과 같이 새로이 Augment된 시스템 ($\tilde{\mathbf{S}}$)는 원래의 시스템 (S)가 가제어하고

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{A} \\ 0 & \mathbf{C} \end{pmatrix} = 4$$

이면 가제어하다.^{5,6,7}

식(3)에서 q 는 기관에 부과되는 측정 가능한 외부 부하로서, q 에 의해 야기되는 상태 변수 \tilde{x}_q 와 제어입력 u_q 로 부터 새로운 오차 변수를 아래와 같이 정의하면

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{x} &= \tilde{x} - \tilde{x}_q \\ \Delta u &= u - u_q \end{aligned} \quad (4)$$

식(3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \dot{\tilde{x}} = \tilde{A} \Delta \tilde{x} + \tilde{B} \Delta u + \tilde{d} - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} y_r \quad (5)$$

식(5)를 점근적으로 안정하게 (Asymptotically stable) 하는 제어를

$$\Delta u = -\tilde{K} \Delta \tilde{x} \quad (6)$$

라 놓고 식(5)에 대입한 후 양변을 한번 미분하면

$$\Delta \ddot{\tilde{x}} = (\tilde{A} - \tilde{B}\tilde{K}) \Delta \dot{\tilde{x}} \quad (7)$$

가 되어

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \dot{\tilde{x}}(t) = 0$$

즉

$$\dot{z}(t) = y(t) - y_r(t) = 0$$

이 되어 출력이 목표치에 정상오차 없이 따르는 추종제어가 됨을 알 수 있으며 식(6)에 식(4)를 대입하여 원래의 상태변수와 제어입력으로 표시하면 식(8)과 같게 된다.

$$u = u_q - K(x - x_q) - k_z(z - z_q) \quad (8)$$

여기서 $\tilde{K} = [K \ k_z]$ 이며 x_q, z_q, u_q 는 시스템(S)에서 y_r 와 d 를 0으로 놓은 수정된 식으로 부터 각각 다음과 같이 구할 수 있으며

$$\begin{aligned} x_{1q} &= 0 \\ x_{2q} &= q \\ x_{3q} &= (T_c \dot{q} + q) / K_c \\ u_q &= [L T_c \ddot{q} + (L + T_c) \dot{q} + q] / K_c \\ z_q &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

한편 식(6)에서 폐회로 제어시스템을 점근적으로 안정하게 하는 상태 궤환이득 \tilde{K} 는 식(5)에서 $y_r = 0, d = 0$ 라 놓고 이와 같은 시스템이 평가함수

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta \tilde{x}^T \tilde{Q} \Delta \tilde{x} + \Delta u^2) dt \quad (10)$$

를 최소로 하도록 구해진다.^{8,10} 여기서 \tilde{Q} 는 반양한정 하중행렬이며 오우버슈터(Overshoot), 도달시간(Rise Time), 정정시간(Settling Time) 등 출력의 과도 응답특성들은 하중행렬 \tilde{Q} 의 선정에 따라 달라질 것이다.

4. 상태관측기 설계

이미 설계된 제어 법칙의 실현을 위하여 모든 상태변수의 측정이 요구되나 주어진 제어시스템에서는 모든 상태변수가 측정 불가능 함으로 상태관측기를 통한 상태추정이 요구된다. 이미 주어진 시스템(S)는 완전 가관측함으로 다음 식(11)로 표시되는 Luenberger형의 상태관측기⁹를 구성할 수 있다.

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{D}q(t) + \mathbf{G}[y(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t)] \quad (11)$$

여기서 상태관측기의 게환이득 \mathbf{G} 는 상태추정치 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 가 상태변수 $\mathbf{x}(t)$ 에서 점근적으로 도달되도록 극배치법에 의해 구해지도록 한다. 일반적으로 게환이득의 증가는 $(\mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{C})$ 의 고유치를 S 평면의 좌반쪽으로 이동시켜 상태추정 속도를 증가시키나 한편 시스템에 추가되는 불가피한 노이즈 영향을 증폭시키게 된다. 따라서 게환이득 \mathbf{G} 는 추종속도와 노이즈 영향 사이에서 적절히 타협되어 결정되어야 할 것이다. 그림 2는 상태관측기를 갖는 디젤기관의 속도제어시스템을 보여주고 있다.

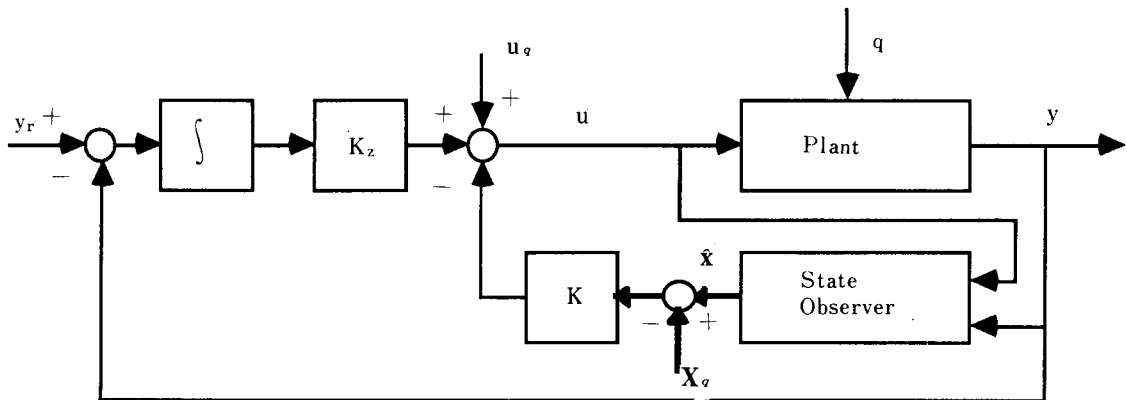


Fig. 2. Speed control system with an observer

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 연구에서 제안한 상태관측기를 갖는 디젤기관의 속도제어시스템의 성능을 검토하기 위하여 선박주기관용 2짜이클 B&W 4L80MC/E엔진을 MCR의 40% 운전시 운전회전수 60rpm 부근에서 모델링한 후 다음 식을 얻을 수 있었다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} -1.168 & 0.014 & 0 \\ 0 & -6.993 & 582.73 \\ 0 & 0 & -8 \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 8 \end{pmatrix} \mathbf{u} + \begin{pmatrix} -0.014 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \mathbf{q} + \mathbf{d} \quad (12)$$

$$\mathbf{y} = [1 \ 0 \ 0] \mathbf{x}$$

일반적으로 선박용 대형 주기관은 저속이며 여러 가지 운전 여건상 빠른 속도추종 성능 즉 짧은 도달시간이 요구되지 않으므로 오우버슈터(Overshoot) 0%, 도달시간(Rise Time) 4.5%sec, 정정시간(Settling Time) 7.5sec 이내인 제어를 설계한다. 장시간의 컴퓨터 시뮬레이션 결과 하중행렬계수 \tilde{Q} 값으로

$$\tilde{Q} = \text{diag}(300, 10, 10, 15000)$$

가 선택되었고 이때 최적 제환제어는

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_q - 90.260(x_1 - x_{1q}) - 2.926(x_2 - x_{2q}) - 19.913(x_3 - x_{3q}) - 122.475(z - z_q) \quad (13)$$

와 같이 얻어졌다. 여기서 구한 제어를 이용하여 목표치 변화에 대한 응답실험을 행하기 위해 상태관측자를 설계하여 구성하였으며 상태관측자의 제환이득은 $(A-GC)$ 의 고유치가 모두 -10 이 되도록 즉 $G = [13.839 \ 1361.143 \ 0.981]$ 이 되도록 정하였다. 그림 3은 외부 부하변화가 적을 경우 $\mathbf{q} = 0$ 으로 두고 목표치를 동작회전수(60rpm)에서 5rpm 증가시켰을 때의 출력응답을 나타내며 그림 4는 $\mathbf{q} = 0$ 상태에서 목표치를 반대로 5rpm 감소시켰을 때의 출력응답을 보여준다. 그림으로 부터 둘 다 만족할 만한 응답특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

그림 5와 6은 무시되지 못할 정도의 외부부하가 가해질 때의 응답으로서 목표치를 동작회전수 60rpm에 고정하고 기관출력의 5%의 크기를 갖고 주기가 6sec인 sine 커브 형태의 부하가 걸린다고 보고 그림 5는 부하에 대한 피드포워드 제어를 하지 않을 때의 응답을 보여주며 그림 6은 피드포워드 제어를 할 때의 응답을 보여준다. 그림 6은 부하변화가 커서 이것을 측정후 피드포워드 제어를 하면 응답특성이 월등히 개선되어

짐을 보여준다.

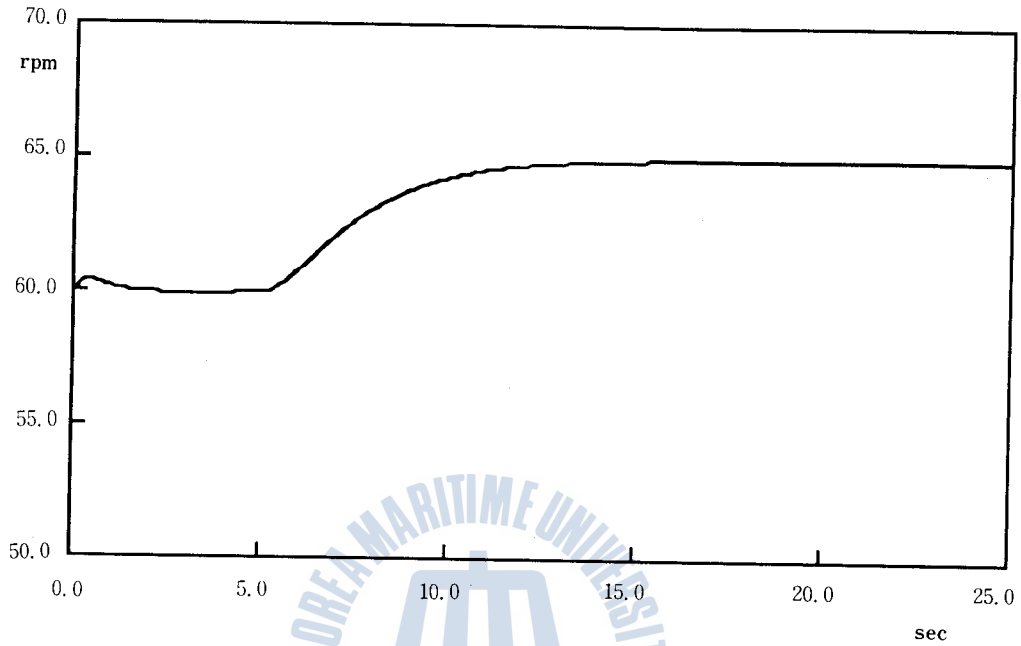


Fig. 3. Step response for $q=0$

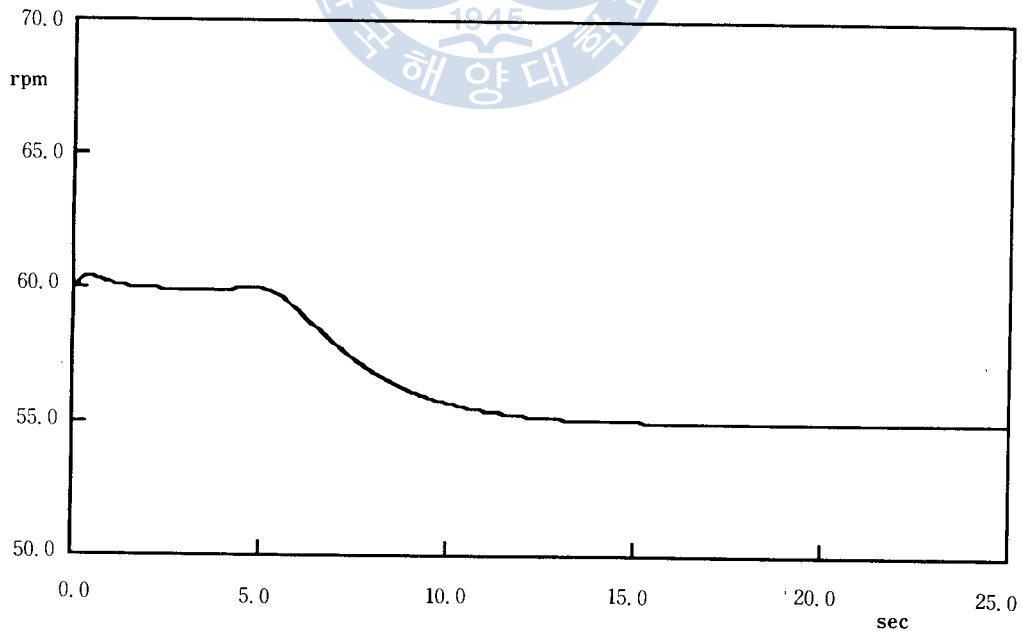


Fig. 4. Step response for $q=0$

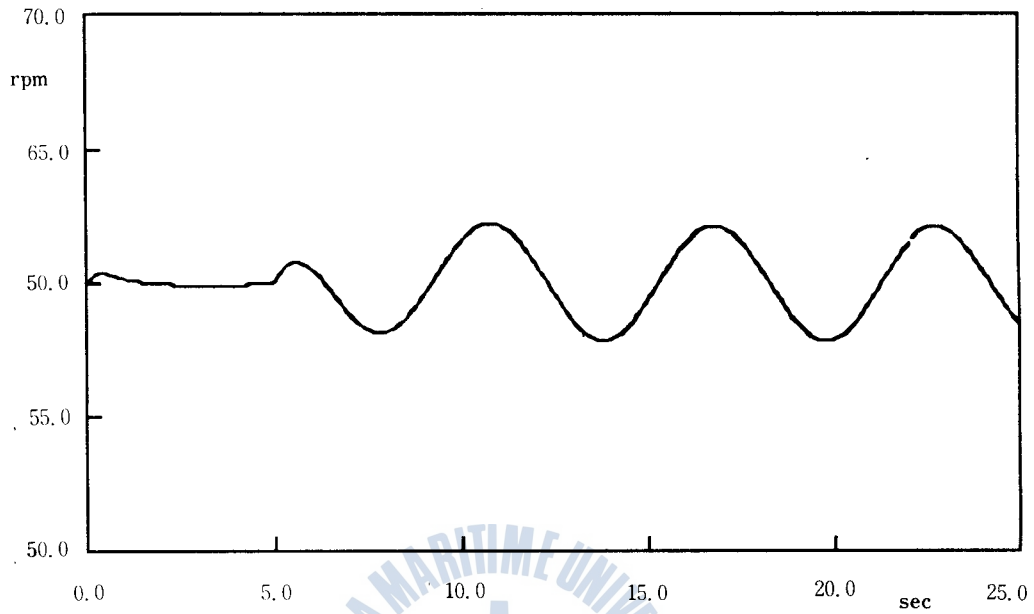


Fig. 5. Response with no feedforward control for the load change.

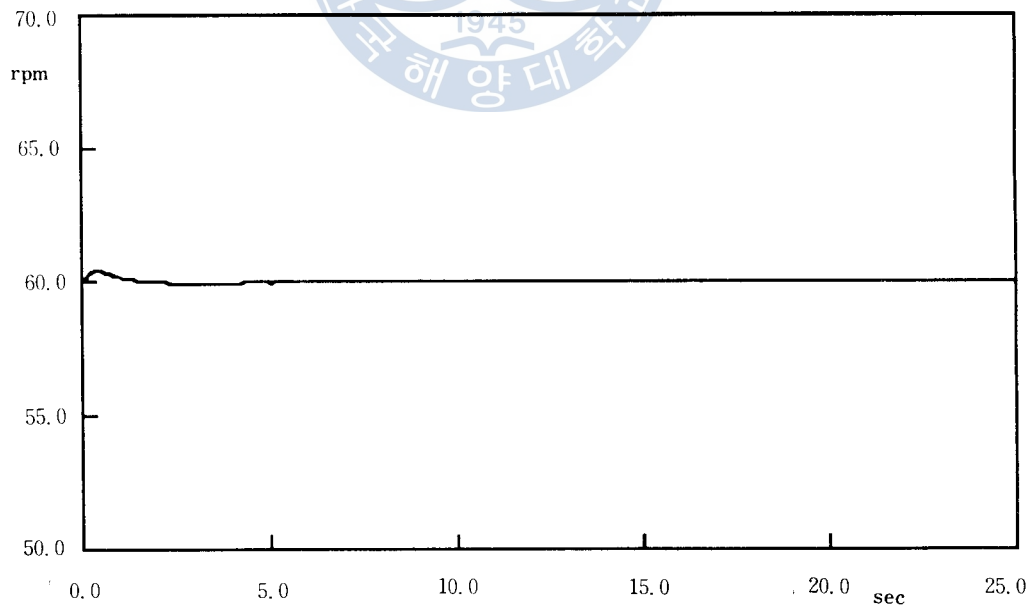


Fig. 6. Response with feedforward control for the load change.

6. 결 론

선박 디젤 기관의 조속용 디지털제어기를 개발하기 위한 전 단계로 제어 알고리즘을 개발하고 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 최적제어를 구하기 위하여 먼저 제어플랜트를 선형화하였고 목표치의 변화에 출력이 정상편차없이 잘 따르도록 전향방향에 적분기를 삽입하여 평가함수를 최소로 하는 상태제환 이득을 구하였다. 열악한 해상조건에서는 주기관에 걸리는 부하변화가 크므로 이를 측정하여 피드포워드 제어를 함으로서 출력회전수의 과도한 변화를 막을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다.

<參 考 文 獻>

1. 北天正人, “船用主機エンジンの 回轉數制御システムの 理論解析,” 나브코 技報, No. 61, pp. 3~11.
2. 田村直樹, “電子ガバナ制御 パラメータ 決定 システム의 開發,” 나브코 技報, No. 65, pp. 3~9.
3. 佐藤 薫, “MG-800 가바나시스템의 開發,” 나브코 技報, No. 64, pp. 16~19.
4. Soren T. Lyngso Co., Reference manual for the EGS
5. H. Seraji, “Design of proportional-plus-integral controllers for multivariable systems,” Int. J. Control, Vol. 29, No. 1, pp. 49~63, 1979.
6. K. P. Wong and D. E. Seborg, “Optimal proportional plus integral control for regulator and tracking problems,” Optimal Contr. Appli. & Methods, Vol. 6, pp. 335~350, 1985.
7. B. Poter and H. M. power, “Controllability of multivariable systems incorporating integral feedback,” Electronics Letters, Vol. 6, No. 22, pp. 689~690, 1970.
8. J. H. Kim and D. H. Chyung, “Delayed feedback optimal controller,” IFAC World Congress, Vol. AC-11, 1966.
9. D. G. Luenberger, “Observers for multivariable systems,” IEEE Trans. Automat. Control, Vol. AC-11, 1966.

10. 나승유, “선형 이산치 시스템의 Robust servomechanism 문제,” 87한국 자동제어학술회의 논문집, Vol. 1, 1987.



