

## 전기 구동방식 디지털 가버너의 최적제어계 설계에 관한 연구

김성환 · 라진홍 · 양주호

부산수산대학

(1990년 1월 15일 접수)

### A Study on the Design of the Optimal Control System for Electric Driving Digital Governor

Seong-Whan KIM, Jin-Hong RA and Joo-Ho YANG

National Fisheries University of Pusan

(Received January 15, 1990)

Since sea state changes engine load instantaneously, the speed governing apparatus is essential for marine engine to maintain constant speed regardless of the load.

As governing apparatuses, mechanical, pneumatic, and electrical governors have been employed.

But, recently, according to the introduction of low speed-long stroke engines to increase thermal efficiency, the development of governor which has better response characteristics is requisite.

In this paper, to design the governor that meets above requirement, author made a performance test for the existing PID control digital governor with the aid of computer simulation, and investigated digital governor applying the optimal control algorithm, then, executed computer simulation by the same way.

As the result of simulations, found that the former let engine have large overshoot and long settling time at low speed, on the other hand, the latter made engine have better reponse.

If we design and invent a good observer for delay time element so that the optimal control theory can be applied, better governor will be expected.

#### 기호설명

A, A' ; System matrix

B, B' ; Input matrix

C, C' ; Output matrix

e(t) ; Error

J ; Inertia moment of actuator

#### part

K, K ; Optimal feedback gain matrix

$K_e, K_i, K_n, K_r, K_s, K_t, K_{tg}, K_v$  ;

Proportional gains

L ; Delay time

N ; Engine r.p.m

n ; Cylinder number

Q ; Weighting matrix for state  
 R ; Weighting matrix for input  
 S ; Laplace operator  
 T<sub>e</sub> ; Time constant for engine part  
 T<sub>d</sub> ; Derivative time  
 T<sub>i</sub> ; Intergral time  
 Δt ; Sampling period  
 U ; Input for engine  
 U<sub>o</sub> ; Optimal input for engine  
 X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> ; State value  
 X<sub>1r</sub>, X<sub>2r</sub>, X<sub>3r</sub> ; Steady state value  
 Y ; Actual output of engine  
 Y<sub>in</sub> ; Reference value for rack scale  
 Y<sub>out</sub> ; Actual value for rack scale  
 Y<sub>r</sub> ; Reference value  
 Y(t) ; Output of microprocessor  
 X(t) ; dX(t)/dt  
 Z ; dZ/dt  
 A<sup>T</sup> ; Transpose of matrix A  
 R<sup>-1</sup> ; Inverse of matrix R

## 서 론

선박용 엔진은 해상 상태에 따라 부하가 급변하는 경우가 많으므로 부하엔 관계없이 엔진의 회전수를 일정하게 유지시키기 위한 조속장치가 필요하다. 이러한 조속장치로는 기계식, 유압식, 전기식 등이 널리 사용되어 왔다. 그러나, 최근 기관 효율을 상승시키기 위해 저속 장행정 엔진을 많이 채용하게 되었고 이를 효과적으로 제어하기 위해 보다 성능이 우수한 조속장치의 개발이 불가피하게 되었다. 또한 선박 자동화, 기관실 무인화 추세에 따라 내구성과 신뢰성이 뛰어난 조속장치가 요구된 바, 마이크로 프로세서를 이용한<sup>1)</sup> PID 제어 디지털 가버너(Digital governor)가 출현하게 되었다.

PID제어 시스템은 그 특성상 저속으로 인해 지연 시간(Delay time)이 큰 엔진을 임의로 제어하는 데는 어느정도 제한적이다.

특히 저속에서 헌팅(hunting)이 심해 회전수

(rpm)를 일정하게 유지시키기 어렵고 연속 연소, 폭발을 위한 최저 rpm 근처에서는 엔진이 정지하는 경우가 있다.

본 논문에서는 보다 성능이 우수한 조속장치의 구성 가능성을 타진하기 위해 최적 제어 알고리즘을 적용하여 디지털 가버너를 설계해 보고자 한다. 기존 PID 제어기의 파라미터 선정은 제어계를 시불변계로 간주하여 상수로 취급하였으나 여기서는 최적 PID 제어기 파라미터를 한계 감도법에 의해 회전수에 대한 함수로 나타내고 또한 최적 제어이론을 적용하여 상태 피이드 백 게인도 회전수에 대한 함수로 나타내어 게인 스케줄(gain schedule)의 개념을 도입하였다.

그 다음, 가버너 액츄에이터(랙 구동 모터), 엔진 부 특성을 수식적으로 모델링 한 후 아날로그 컴퓨터를 사용하여 액츄에이터 부의 동특성을 해석하였고 앞에서 언급한 게인 스케줄의 개념을 갖는 PID 제어기 및 최적 제어기의 실 시간 제어 실험을 행하기 위하여 액츄에이터 부와 엔진 부를 아날로그 컴퓨터로 모의하고 제어기로는 16 bit IBM 계의 퍼스널 컴퓨터를 이용하였다. 아날로그 신호와 퍼스널 컴퓨터 사이의 신호 변환을 위해서는 카드 타입의 12 bit A/D, D/A 컨버터를 사용하였다.

위와 같이 시뮬레이션을 한 후 그 결과를 비교, 검토하였다.

## 액츄에이터 부를 포함한 엔진 부의 동특성 해석

### 1. 박용 엔진의 모델링<sup>2)</sup>

#### 1.1. 박용 엔진의 특성

선박의 전 저항을 R, 속력을 V, 배수량을 D, 지시마력을 IHP, 연료 소비량을 Q라 하면 통상의 속력에 있어서

$$R \propto V^2 D^{2/3}$$

$$\therefore RV \propto V^3 D^{2/3}$$

또한 IHP  $\propto$  RV 이므로 IHP  $\propto$  V<sup>3</sup>D<sup>2/3</sup>이며 Q  $\propto$  IHP 이므로 Q  $\propto$  V<sup>3</sup>D<sup>2/3</sup>, 따라서 배수량이 일정할 때의 소요 마력은 속력의 3승에 비례하며 연료

소비량도 속력의 3승에 비례한다.

연료 소비량  $Q \propto rpm \cdot rack \text{ scale}$  이므로 출력 토크는 래크 스케일에 비례하고  $rpm$ 의 세곱에 비례한다.

래크가 조정된 순간부터 증감된 연료가 분사, 착화되어 엔진 토크의 변화를 가져오기 까지 요하는 시간, 즉 지연 시간(Delay time;  $L$ )을 아래 식으로 근사화 할 수 있다.

$$L(s) = 15/N + 30/N \cdot n \quad (1)$$

단,  $N$  ;  $rpm$ ,  $n$  ; cylinder 수

### 1.2. 박용 엔진의 모델링

래크 스케일에 따른 연료량이 엔진에 분사, 폭발하여 토크가 발생한다. 래크 위치가 토크로 변환할 때의 비례상수를  $K_r$ , 지연 시간을  $L$ 이라 하자. 또한 폭발로 발생한 토크에 의해 엔진이 회전하여 설정  $rpm$ 에 추종하게 되는데 이 시스템을 1차 요소로 근사화하여 계수를  $K_e$ , 시정수를  $T_e$ 라하면 전달 함수는

$$G_r(S) = K_r \cdot e^{-LS} \quad (2)$$

$$G_e(S) = K_e / (1 + T_e S) \quad (3)$$

가 된다.

## 2. 기존 디지털 가버너 시스템 해석

### 2.1. 시스템 개요

구동 모터를 갖는 조속 시스템의 구성은 마이크로 프로세서 부, 액츄에이터 부, 엔진 부로 나눌 수 있다. 마이크로 프로세서 부에서는 PID 제어 연산을 행하고 액츄에이터 부는 DC 모터가 장치된 전동 액츄에이터이다.

Fig. 1은 이 시스템의 대략적인 구성을 나타내는 그림이다.

핸들로 엔진  $rpm$ 을 설정하면 마이크로 프로세서에서 설정치와 제어량을 비교하여 그 편차에 의해 래크 위치의 설정치가 결정되고 이 값에 따라 액츄에이터가 작동하여 래크 위치를 조정한다.

래크 위치에 따라 연료 분사량이 조절되어 회전수를 증감시키고 이 증감된 엔진의  $rpm$ 은 피이드백 되어 설정치와 다시 비교하여 똑같은 과정이 반복되는 것이다. 이렇게 하여 결국 엔진의  $rpm$ 은 설정치와 같게 된다.

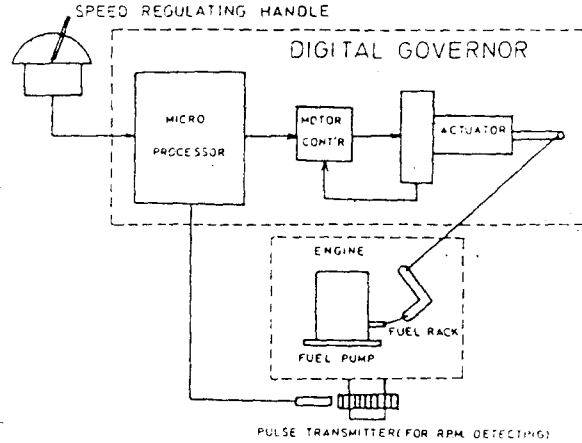


Fig.1. Schematic diagram.

### 2.2. 속도 제어 시스템의 구성

이 시스템을 블록 선도로 그리면 Fig. 2와 같다.

(1) PID제어부

PID제어의 기본식은,

$$Y(t) = K_p \{ e(t) + 1/T_i \int_0^t e(t)/dt \cdot + T_d \cdot de(t)/dt \} \quad (4)$$

이고 이를 전달 함수 형식으로 표시하면,

$$G_c(S) = K_p (1 + 1/T_i S + T_d S) \quad (5)$$

으로 된다.

여기서,  $Y(t)$  ; PID출력

$e(t)$  ; 편차

$K_p$  ; 비례계인

$T_i$  ; 적분시간

$T_d$  ; 미분시간

단위 계단상의 입력에 대한 PID 출력은 Fig. 3과 같다.

(2) 액츄에이터 부<sup>3)</sup>

모터 제어 회로는 실제로 비 선형계이지만 정상 상태로 부터 미소 변동에 주목할 때 선형계로 취급할 수 있다.

액츄에이터 부를 보다 상세하게 그리면 Fig. 4와 같다.

래크 스케일 설정치가 피이드 백 값과 비교, 그 편차가  $K_s$ 배 증폭 되어 모터 속도 설정치로

전기 구동방식 디지털 가버너의 최적제어계 설계에 관한 연구

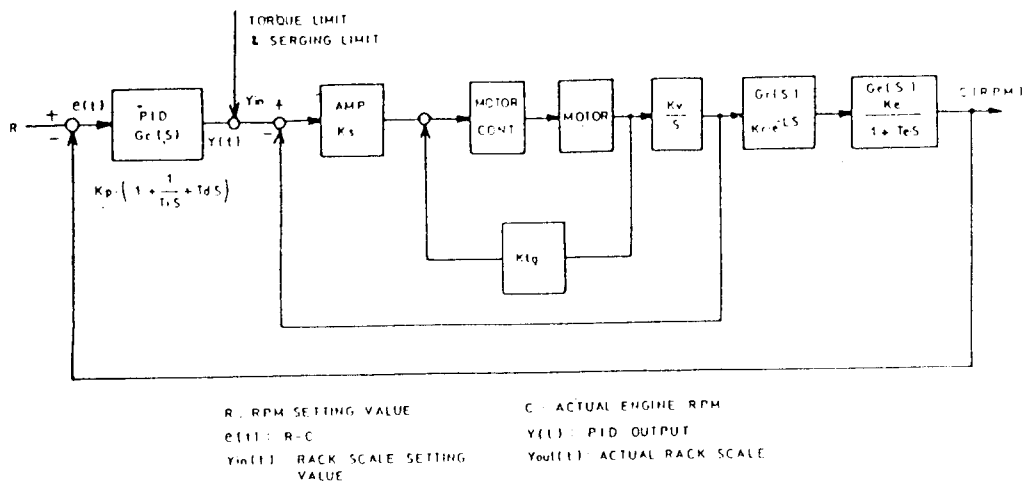


Fig.2. Block diagram.

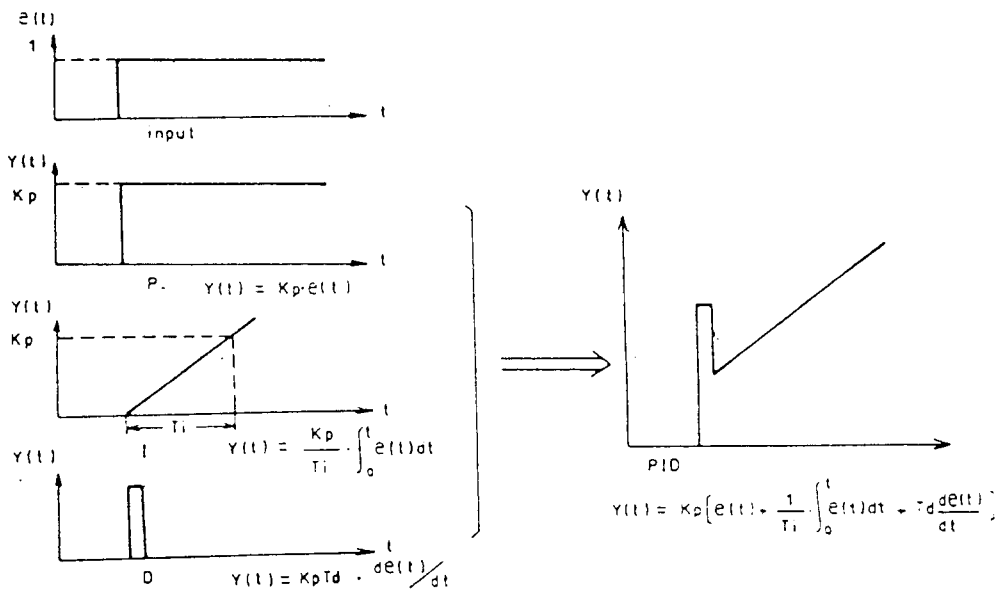
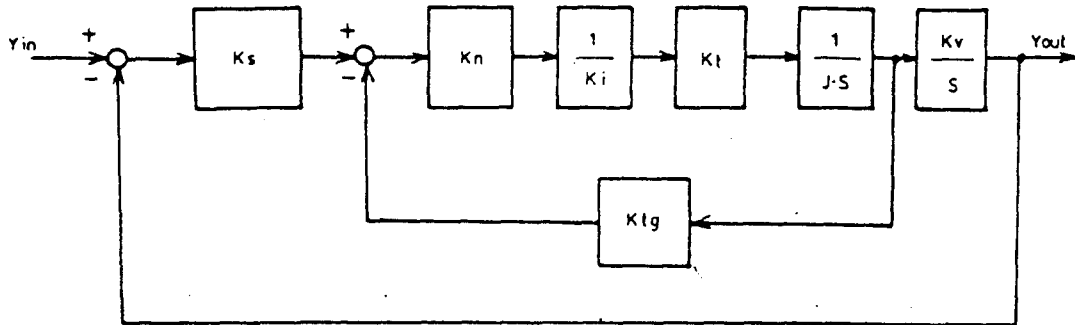


Fig.3. PID Controller output.

되고 이것과 각속도 피드백 값과 비교하여 그 차이가 P 동작의 입력이 된다. P 동작의 출력 전압이 모터에 작용해서 전류가 흐르고 그로 인해

토크가 발생하여 회전 운동을 하게 되고 다시 직선 운동으로 바뀌어 래크 위치가 이동 함으로써 설정치와 일치하게 된다.



J : 모타와 부하의 관성 능률  
 K<sub>t</sub>, K<sub>i</sub>, K<sub>n</sub>, K<sub>s</sub> : 비례 게인  
 K<sub>tg</sub> : 피이드 백 게인

Fig.4. Block diagram of actuator.

3. 최적 제어 이론에 의한 제어 알고리즘<sup>4)</sup>

최적 제어 알고리즘을 적용한 제어 알고리즘을 도출하기 위하여 엔진 부에 의해 시정수가 대단히 작은 액츄에이터 부의 전달 함수를 1로 간주하고 지연 요소  $e^{-Ls}$ 를 2차 요소로 근사화하면 속도 제어 시스템을 Fig.5와 같이 간략화 할 수 있고 이를 상태 방정식 및 출력 방정식으로 표시하면,

$$X = AX + BU \quad (6)$$

$$Y = CX \quad (7)$$

으로 되고 여기서,

$$A = \begin{pmatrix} -1/T_e & K_e/T_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2/L^2 & -2/L \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2/L^2 \end{pmatrix}$$

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

로 된다.

가제어성과 가관측성을 판별해 보자<sup>5)</sup>.

가제어성을 판별하는 식  $S = [B \ AB \ A^2B]$ 의 행렬식이  $-8K_e/T_e L^6$ 이 되어 rank가 3이므로 이 시스템은 가제어성이다.

그리고 가관측성을 판별하는 식  $V = [C^T \ A^T C^T \ (A^T)^2 C^T]$ 의 행렬식이  $(K_e/T_e)^2$ 이 되어 rank가 3이므로 이 시스템은 가관측성이다.

여기서 새로운 상태  $\Delta X$ ,  $\Delta U$ ,  $\Delta Y$ 를 다음과

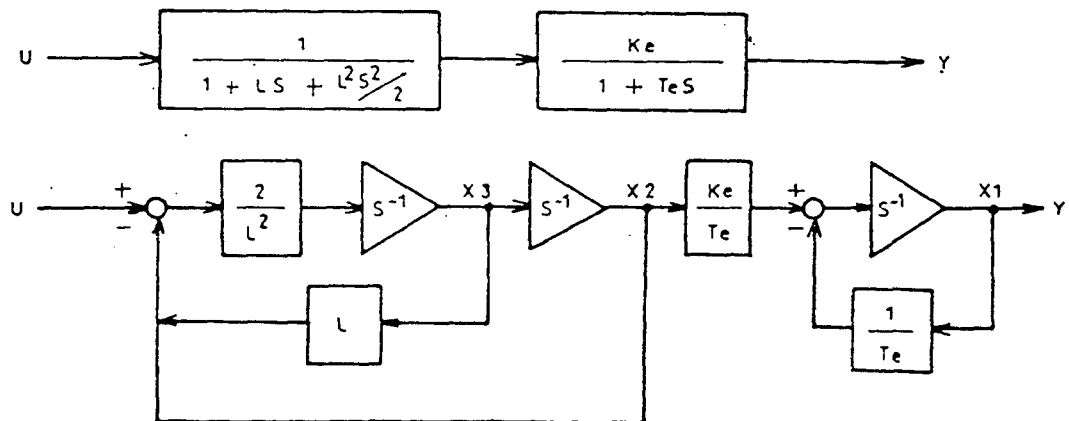


Fig.5. Block diagram of controlled system.

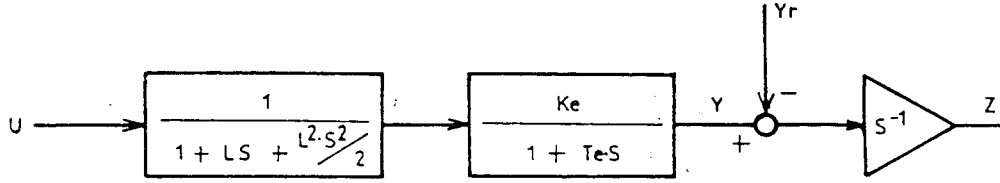


Fig.6. Block diagram of augmented system.

같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= X - X_r \\ \Delta U &= U - U_r \\ \Delta Y &= Y - Y_r \end{aligned}$$

(8)

$$\begin{pmatrix} X_{1r} \\ X_{2r} \\ X_{3r} \\ U_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_r \\ Y_r / K_e \\ 0 \\ Y_r / K_e \end{pmatrix} \quad (16)$$

단,  $X_r$ ,  $U_r$ ,  $Y_r$ 은 정상 상태 값(steady state value)이다.

최적 제어 이론에 의하면 2차 형식의 평가 함수  $J = \int_0^{\infty} (\Delta X^T Q \Delta X + \Delta U^T R \Delta U) dt$ 의 값을 최소로 하는 최적 제어 입력

$$\Delta U_0 = -K \Delta X \quad (9)$$

이다.

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

여기서 P는 다음 RICCATI 방정식의 해 행렬이다.

$$-\dot{P} = A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P \quad (10)$$

$Q$  ; positive semi-definite

$R$  ; positive definite

각 상태에 대한 정상 상태의 값을 알아보자.

시스템 방정식 식(6), 식(7)에 대해 정상 성분의 값만을 표시하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{X}_r = A X_r + B U_r \quad (11)$$

$$Y_r = C X_r \quad (12)$$

$Y_r$ 이 일정하면  $\dot{X}_r = 0$  이므로,

$$A X_r + B U_r = 0 \quad (13)$$

$$C X_r = Y_r \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} X_r \\ U_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & O \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ Y_r \end{pmatrix} \quad (15)$$

A, B, C에 각 값을 대입 하면,

으로 된다.

계단상의 입력에 대한 정상 상태 편차를 없애기 위하여 적분기를 도입, 상태를 추가하고 식(8)의 새로운 상태에 대한 시스템 방정식을 표시하면 식(17), 식(18)과 같이 된다.

$$\dot{Z} = Y - Y_r \quad (17)$$

$$\dot{X}' = A' X' + B' \Delta U \quad (18)$$

여기서,

$$A' = \begin{pmatrix} A & O \\ C & O \end{pmatrix} \quad B' = \begin{pmatrix} B \\ O \end{pmatrix} \quad X' = \begin{pmatrix} \Delta X \\ Z \end{pmatrix}$$

Fig.6은 상태 Z를 추가한 경우의 블록 선도이다.

평가 함수  $J = \int_0^{\infty} (X'^T Q X' + \Delta U^T R \Delta U) dt$ 의 값을 최소화 시키는 최적 제어 입력

$$\Delta U_0' = -K' \Delta X' \quad (19)$$

이다. ( $t \rightarrow \infty$ )

여기서,  $K' = R^{-1} B'^T P'$

P'는 다음 Riccati 방정식의 해 행렬이다.

$$-\dot{P}' = A'^T P' + P' A' + Q - P' B' R^{-1} B'^T P' \quad (20)$$

## 제어계의 구성

### 1. 지연 요소 $e^{-Ls}$ 의 근사화

본 연구에서 모델로 택한 엔진은 6L80MCE 엔

진이다.

컴퓨터 시뮬레이션을 위해서는 비선형 요소인  $e^{-LS}$ 를 선형화 해야 한다. Fig. 7은 저속(25 rpm), 중속(45 rpm), 고속(65 rpm)상태 에서의 지연 요소  $e^{-LS}$ 를 1차, 2차 및 3차 요소로 근사

화한 경우를 도시하고 있다. 그림에서 2차 요소로 근사화, 즉  $e^{-LS} = 1/(1+LS+L^2S^2/2)$ 로 선형화 하는 것이 오차 2승 면적의 평가 함수를 판단 기준으로 할 때 가장 적당하였기 때문에 본 연구에서는 2차 근사화 하기로 한다.

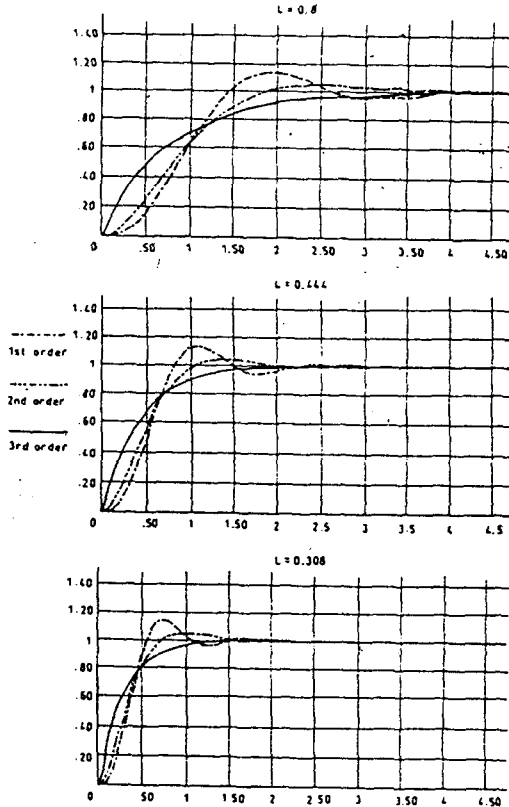


Fig. 7. Approximation curves of delay time  $e^{-LS}$ .

## 2. 각 상수값 결정

### 2.1. 액츄에이터부

적당한 게인  $K_s$ ,  $K_n$ 의 값을 구하기 위해 아날로그 컴퓨터를 이용하여 래크 스케일 설정치  $Y_m$ 에 계단상의 입력을 가해서 응답을 구해보자. 각 상수값을 6L80MCE 엔진에 부착된 PID 디지털 가버너의 카탈로그에 기재된 값을 사용한다.

$$J = 0.0226 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$$

$$K_t = 4.29 \text{ kgg} \cdot \text{cm} / \text{A}$$

$$K_i = 0.25 \text{ V/A}$$

$$K_{tg} = 0.03184 \cdot \text{V} \cdot \text{s} / \text{rad}$$

$$K_v = 0.796 \text{ mm/rad}$$

윗 값을 대입하여 시뮬레이션 회로를 구성하면 Fig. 8과 같다.

$X_s$ ,  $K_n$ 을 파라메타로 시뮬레이션하여 오버슈트가 일어나지 않는 범위 내에서 가장 빨리 정상치에 도달할 때의  $K_s$ ,  $K_n$  값을 찾아 보자.

Fig. 9에서  $K_s=1$ ,  $K_n=4$ 가 적당한 게인이라는 것을 알 수 있다.

### 2.2. 엔진부

간략화 하기 위해  $K_r$ 을 1로 놓으면 엔진 토크는 연료 래크 스케일로 직접 표시된다.

엔진 부 정수는 6L80MCE 카탈로그 상<sup>6)</sup>의 값

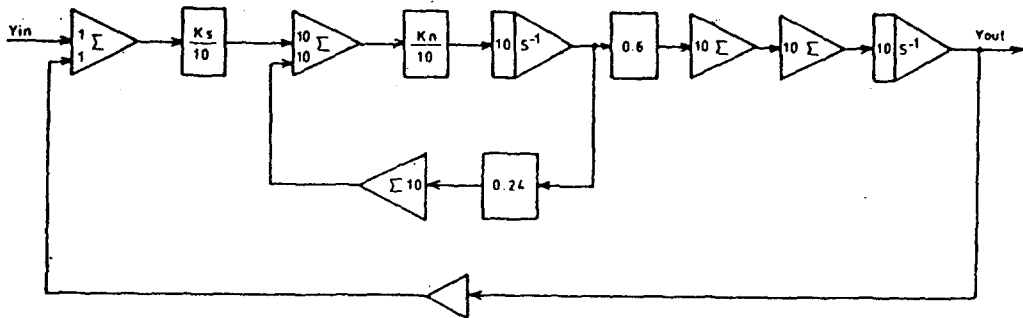


Fig. 8. Simulation diagram of actuator.

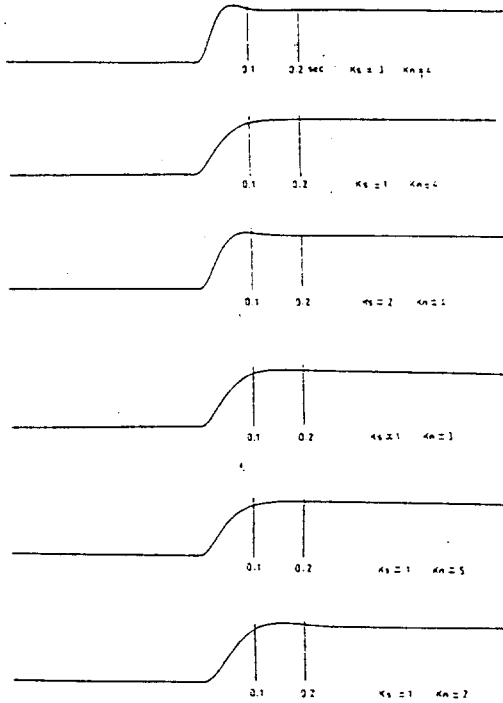


Fig.9. Initial responses of actuator.

을 사용하자.

Delay time을 각 회전수에 대해 (1)의 식에 의해 계산된다.

이에 따라 결정된 상수값은 Table 1과 같다.

Table 1. Parameter values of engine

normal rpm const.	25	45	65
Delay time L(sec)	0.800	0.444	0.308
$K_e(\text{rpm}/\text{min})$	25.0/23.1	45.0/39.5	65.0/65.3
$T_e$		2.13	
$K_r$		1	

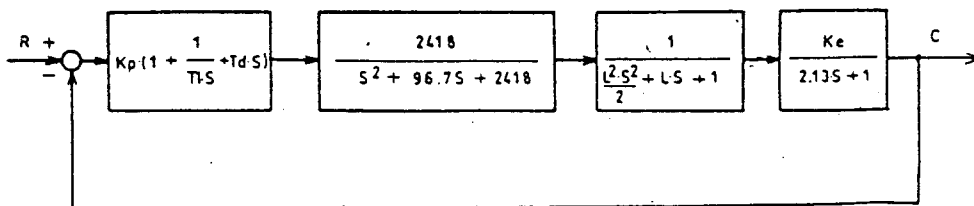


Fig.10. Block diagram.

$K_e$  값은 rpm(N)에 대하여 대략 아래와 같은 함수 관계가 있다.

$$K_e = -0.00025125N^2 + 0.0204N + 0.728 \quad (21)$$

### 2.3. PID제어계의 구성

1.에 의해 지연 요소  $e^{-LS}$ 를 2차 근사화, 2.에 결정한 상수 값으로 전 시스템을 블록 선도로 표시하면 Fig. 10과 같다.

한계 감도법<sup>7)</sup>에 의해 각 rpm에 대한 최적 PID 상수를 구하니 아래와 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} K_p &= 0.001325N^2 - 0.02125N + 3.523 \\ T_i &= 0.000375N^2 - 0.05625N + 2.772 \\ T_d &= 0.0000938N^2 - 0.0141N + 0.6939 \end{aligned} \quad (22)$$

윗 식을 그래프로 그리면 Fig. 11과 같다.

PID 제어의 기본 식 (4)에서 샘플링 주기  $\Delta t$ 를 미소한 값으로 취하고  $Y_n, e_n$ 을  $Y_n(n, \Delta t), e_n(n, \Delta t), n=0, 1, 2, 3, \dots$ 로 놓아 윗 식을 근사화 하면,

$$Y_n = K_e e_n + S_n + K_p T_d (e_n - e_{n-1}) / \Delta t \quad (23)$$

$$S_n = S_{n-1} + K_p \Delta t e_n / T_i \quad (24)$$

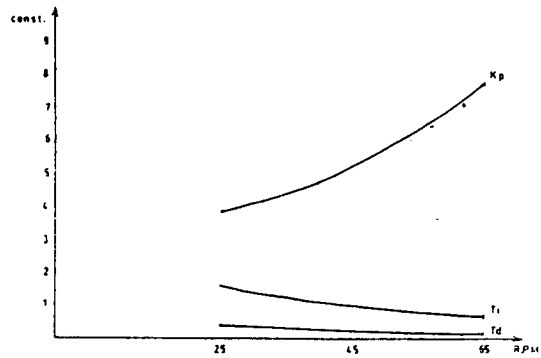


Fig.11. Parameter values of PID controller vs rpm



으로 된다.

초기치를 설정하면 뒷 식을 이용하여 PID 연산을 할 수 있다.

2.4 최적 제어 이론에 의한 제어계의 구성

2.2.에 표시된 엔진에 대해 최적 제어 이론에 의한 제어계를 구성하기 위해 중량 matrix(weighting matrix)가 아래 두 경우에 대한 최적 계인을 구하여 보자.

i) CASE I

중량 matrix가

$$Q = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad R=1$$

인 경우에 식(20)의 Riccati방정식을 풀어 최적 계인을 구한 결과 아래와 같은 값을 얻었다.

$$\begin{aligned} K_1' &= 2.65 \\ K_2' &= -0.0079N + 1.697 \\ K_3' &= 0.8 \\ K_z &= 1.0 \end{aligned} \quad (25)$$

ii) CASE II

중량 matrix가

$$Q = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad R=1$$

인 경우에 대해서는 변화가 거의 없이 아래와 같은 값으로 되었다.

$$\begin{aligned} K_1' &= 1.84 \\ K_2' &= 1.1 \\ K_3' &= 0.77 \\ K_z &= 1.0 \end{aligned} \quad (26)$$

시뮬레이션 결과 및 고찰

실 시간 제어 실험을 행하기 위하여 제어 부로는 퍼스널 컴퓨터를, 퍼스널 컴퓨터와 아날로그 컴퓨터와의 신호 전달을 위해 A/D, D/A 컨버터를, 응답을 기록하기 위해 X-Y 레코더를 사용하였고 여기서 사용된 기기들의 사양은 다음과 같다.

1. PID 제어계에 의한 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig. 12는 PID 제어계 시뮬레이션 회로이다.

Fig. 13은 저속(25rpm), 중속(45rpm) 및 고속(65rpm)에서 엔진 rpm을 +5 혹은 -5 증감시키기 위하여 계단상의 입력을 가했을 때의 응답 상태를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 PID 제어 가버너는 전반적으로 오버슈트가 크고 중속 및 고속 상태에서는 정정 시간이 비교적 짧지만 저속에서는 정상 상태에 도달하는 데 상당히 오랜 시간이 걸린다.

따라서 저속 운전 중 연속 연소 최저 rpm에

Table 2. Micro computer, analog computer

Microcomputer	Analogcomputer	A/D & D/A converter
기기명 ; TG-AT MAIN CPU ; 80286 RAM ; 511KB ROM ; 512KB I/O SLOT ; 12EA Real time clock Hard DISC ; 30MB FDD ; 1, 2MB 제작사 ; WON COMP.	기기명 ; ADAC L-100 연산전압 ; -10~+10V 출력전류 ; +4mA 정적정도 ; ±1~±.3% (선형) ±.1~±1.5%(비선형) 동적정도(CYCLE TEST)치 ; ±.1%Cycle w=1rad/s ; ±.3%Cycle w=100rd/s 제작사 ; ANDO 전기(주)	기기명 ; PCL-712 구성요소 ; IBM-BUS Translator DI ; 16Channel DO ; 16Channel D/A ; 2Channel A/D ; 16Channel TIMER/COUNTER 제작사 ; HANDO Engineering CO.

전기 구동방식 디지털 가버너의 최적제어제 설계에 관한 연구

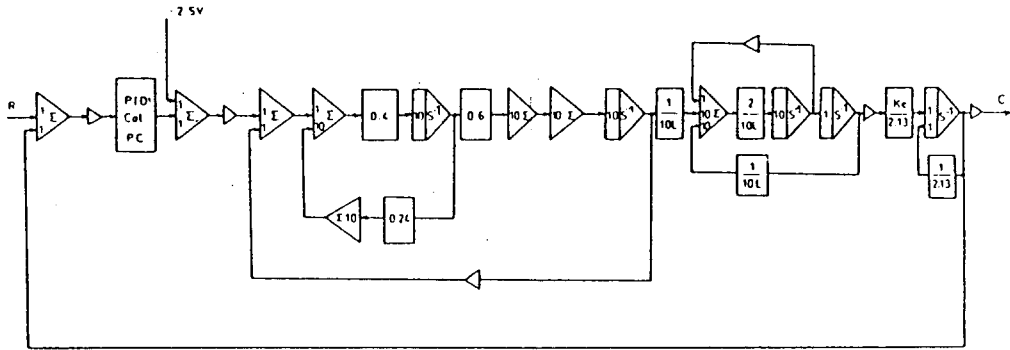


Fig.12. Real time control system with PID controller.

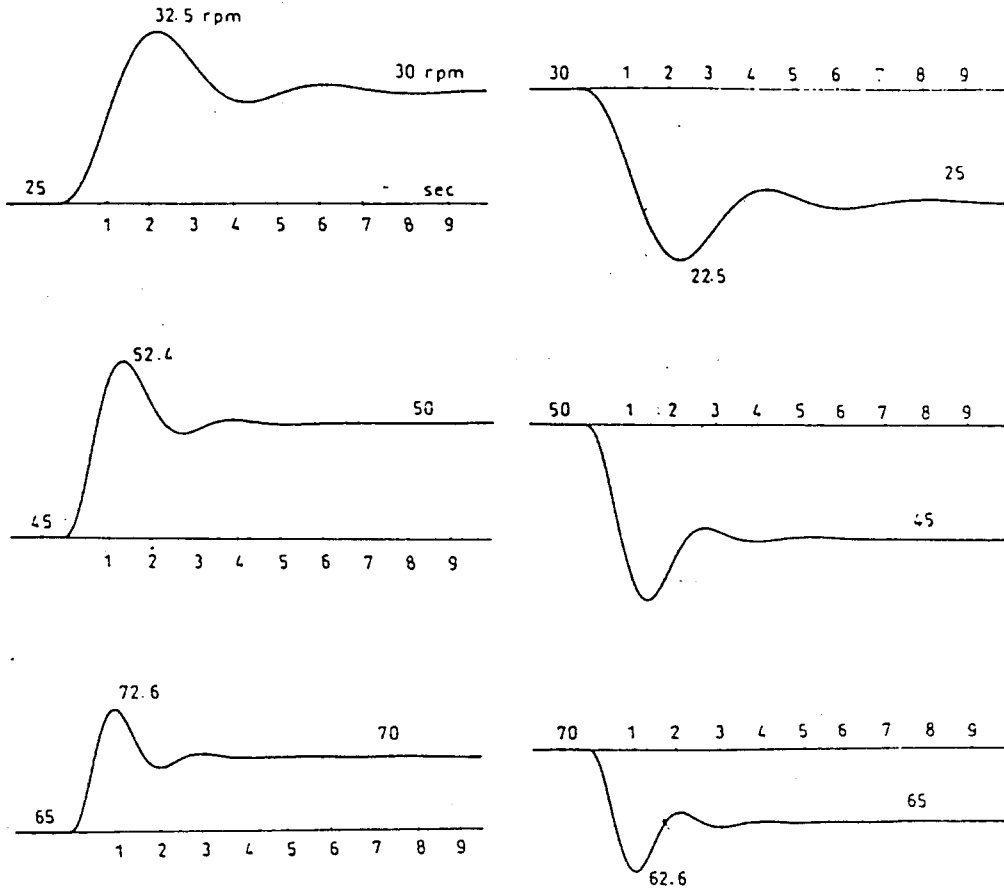


Fig.13. Responses of control system with PID controller.

머물면 엔진이 정지하는 경우가 발생할 수 있다.

만일 모델로 택한 엔진에 비해 보다 저속인 엔진에 사용하게 되면 이 같은 현상이 심화 될 것으로 보여 안정성이 감소되리라 사료된다.

Fig. 14는 액츄에이터 전달 함수( $2418/(S^2+96.7S+2418)$ )를 포함한 경우와 생략 (즉, 전달 함수를 1로 간주)한 경우에 대한 응답을 CC

Program<sup>8)</sup>에 의해 구한 결과를 비교, 도시하고 있다.

Fig. 14에 의하면 액츄에이터 부 시정수 (약 0.05)가 엔진 부 시정수( $T_e=2.13$ )에 비해 아주 작으므로 액츄에이터 부 전달 함수를 1로 간주해도 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

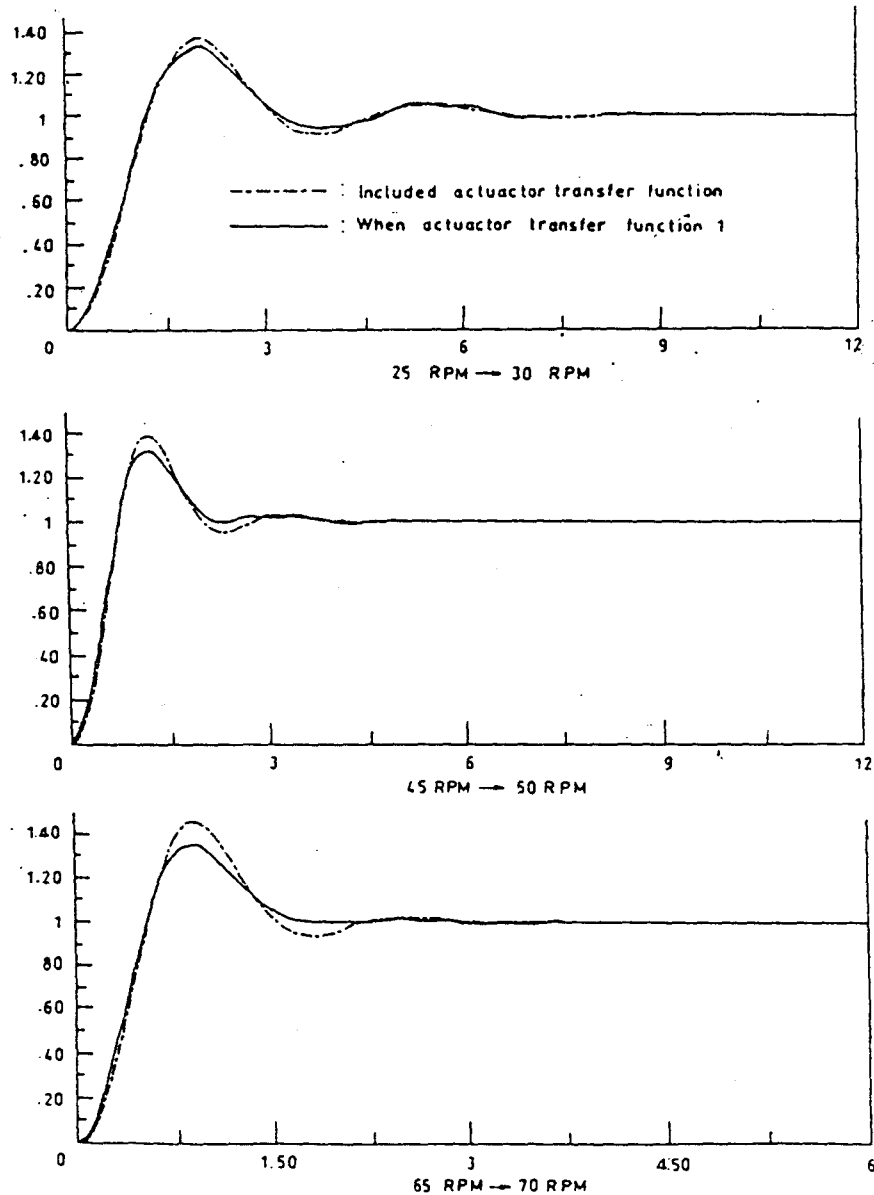


Fig.14. Simulation curves of PID system by CC Program.

2. 최적 제어계에 의한 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig. 15는 최적 제어계 시뮬레이션 회로이다.

Fig. 16은 중량 matrix를 CASE I과 같이 두었을 경우, 엔진 rpm을 25↔30, 45↔50, 및 65↔70으로 증감시키기 위해 계단상의 입력을 가했을 때의 응답 상태를 도시하고 있고 Fig. 17은 중량 matrix를 CASE II와 같이 두었을 때의 응답 상태를 도시하고 있다.

Fig. 16, Fig. 17에 의하면 어느 경우나 오버슈트가 없고 시정수도 작을 뿐 아니라 정상 상태에 도달하는 시간도 PID 제어 가버너에 비해 훨씬 짧다는 것을 알 수 있다.

따라서, 중량 matrix를 적당히 선택하여 최적

피드 백 계인을 구한 후 마이크로 프로세서에 저장하여 제어를 구성하면 훨씬 응답 특성이 좋은 가버너를 설계할 수 있음을 보여준다.

또한, 모델로 택한 엔진에 비해 보다 저속인 엔진에 사용되어도 안정성이 있으리라 사료된다.

그러나, PID 제어 가버너는 rpm만 피드 백 시키면 제어기 구성이 가능하지만 후자는 각 상태를 케환시켜야 하는 데, 상태  $X_1$ (회전수),  $X_2$ (토크)는 실제 물리량 이므로 pick up하여 피드 백 시킬 수 있고 상태  $X_3$ 는 자연 요소에 포함된 상태 변수 이므로 적절한 마이크로 프로세서를 이용하면 간단한 알고리즘을 통하여 실현 가능하리라 생각된다.

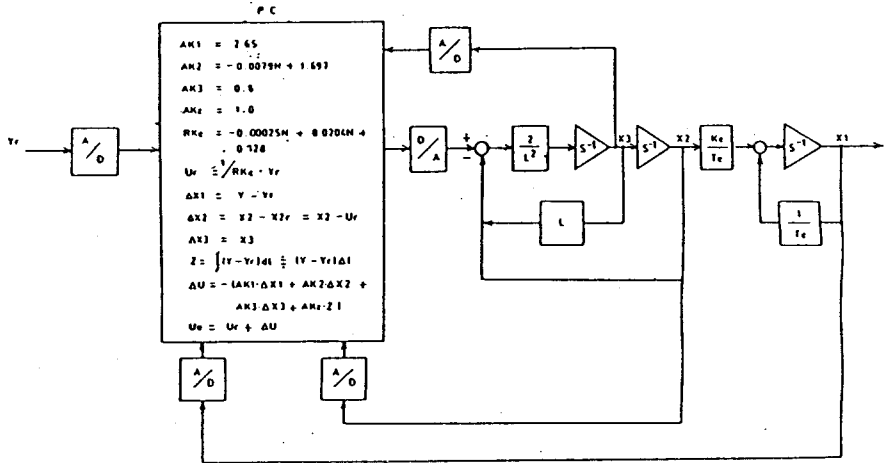


Fig.15. Real time optimal control system.

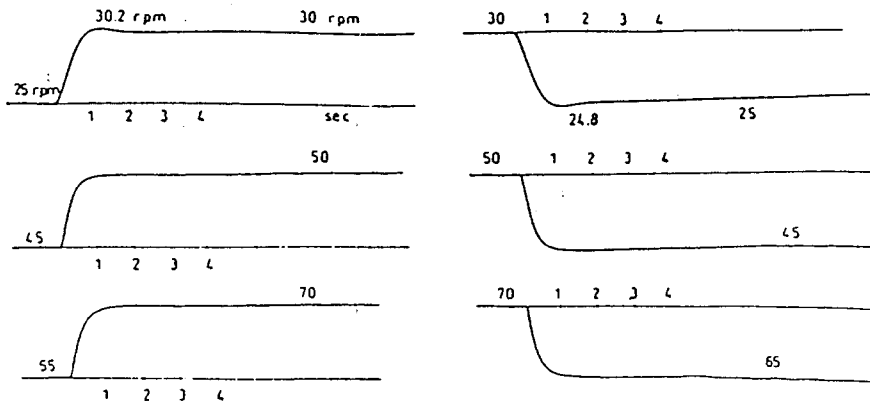


Fig.16. Responses of control system with optimal control system when  $Q=[10 \ 1 \ 1]$ ,  $R=1$ .

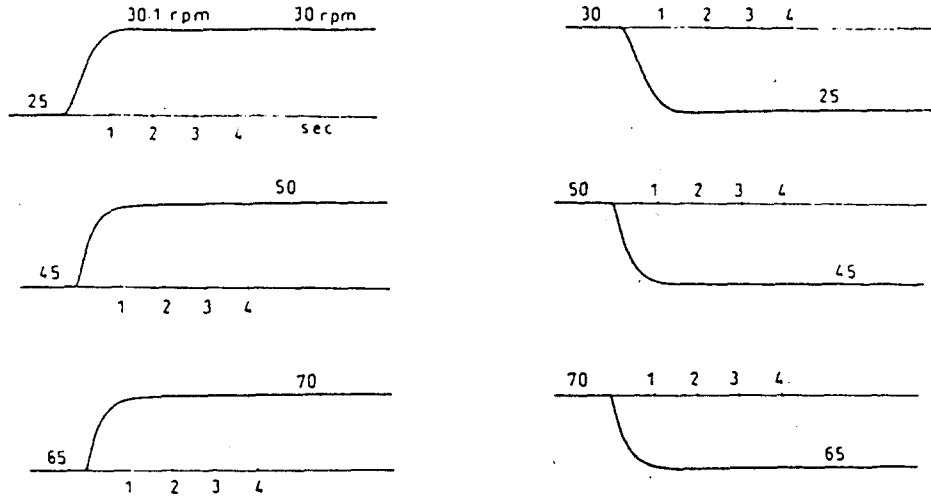


Fig.17. Responses of control system with optimal control system when  $Q=[10 \ 1 \ 1]$ ,  $R=1$

## 결 론

이상과 같이 액츄에이터의 동특성 해석을 행하고 PID 제어기 및 최적 제어기를 설계하여 응답 시뮬레이션을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 액츄에이터 부의 시정수는 엔진 부의 시정수에 비해 아주 작아 생략하여 제어계를 구성할 수 있다.

2) 한계 감도법에 의해 PID 제어기를 시뮬레이션 한 결과 PID 제어 가버너는 전반적으로 오버슈트가 크고 중속 및 고속 상태에서는 정정시간이 비교적 짧지만 저속에서는 정상 상태에 도달하는데 상당한 시간이 걸린다.

3) 중량 matrix를 적당히 선택하여 최적 피이드 백 계인을 구한 후 마이크로 프로세서에 저장하여 제어기를 구성하면 PID 제어기 보다 양호한 응답 특성을 갖는 제어기를 설계 할 수 있다.

## 참고문헌

1) Kuo, Benjamin C.(1980): Digital control

system. Holt, Rinehart and Winston. INC, 670-714.

2) 전 효중(1977): 축계 장치와 추진기. 태화출판사, 41-47.

3) Shinnars, Stanley M.(1984): Modern control system theory and application. 탐 출판사, 109-123.

4) Takahashi, Rabins and Auslander(1972): Control. Addison wesley. 657-666.

5) Kuo, Benjamin C.(1976): Automatic control system. Prentice Hall, INC 144-158.

6) 北正正人: 船用主機 Engine 回轉數 制御 System 理論 解析. NABCO 技報 61, 3-8.

7) 하 주식(1972): 자동제어 공학. 한국 해양 대학 해사 도서 출판부, 277.

8) Thompson, Peter M.(1985): Program CC Version 3.0. System technology.