

자기동조제어에 의한 선박용 디젤엔진제어에 관한 연구*

양주호 · 김창화 · 정병건** · 정해종***

부산수산대학교 · **한국해양대학교 · ***한국어업기술훈련소

(1992년 8월 12일 접수)

A Study on Marine Diesel Engine Control by Application of Self-Tuning Control*

Joo-Ho YANG, Chang-Hwa KIM, Byung-Gun JUNG**
and Hae-Jong JEONG***

National Fisheries University of Pusan, **Korea Maritime University,

***Korea Fishing Training Center

(Received August 12, 1992)

In this study, we selected a DC servo motor as an actuator of the marine diesel engine governor and constructed the position control system of the DC servo motor using the algorithm proposed by authors.

Next, we proposed an another method to construct an adaptive control system for marine diesel engine by regarding the controlled system including the DC servo motor as a second order controlled system and verified the validity of this method through the real time control responses.

Finally, the results have shown a good response characteristic.

1. 서 론

디젤엔진은 연료비가 싸고 고효율을 얻을 수 있기 때문에 선박용은 물론, 육상의 중장비용의 원동기, 대형 자동차 및 소형 승합 자동차용에 이르기까지 널리 이용되고 있다.

비교적 소형에 속하는 육상용 디젤 엔진의 제어에 관한 연구^{1)~3)}는 연료분사제어 까지를

포함하여 미국 자동차 학회 등에서 많이 보고 되고 있으나 대형의 선박용 디젤 엔진의 연구는 주로 엔진의 제작회사를 주축으로 이루어지고 있는 실정이다^{4)~10)}.

또한 최근에는 선박용 주기관으로 이용되는 디젤 엔진의 정격 회전수는 점차 낮아지는 반면 한 실린더 당의 출력은 증가되어 가고 있는 추세이고 이에 따라 같은 출력에 대

* 이 논문은 1991년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 지방대학 육성 학술연구조성비에 의하여 연구 되었음.

해 엔진의 기통수가 줄어들게 되어 저속에서 회전 토크의 변동이 심하고 연료 분사 계통에서의 연소 지연 시간이 길어지게 되었으며, 주위환경의 변화(운전환경의 변화)에 따라 엔진 계통의 파라미터가 크게 변화하게 되었다.

그리하여 종래에 사용해 오고 있던 재래식 유압 조속기는 제어기의 파라미터를 고정된 값으로 하고 있기 때문에 파라미터의 변화에 따른 원만한 제어를 기대할 수 없게 되었고, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선박용 디젤 엔진의 제작회사들이 엔진의 운전 조건에 따라 제어기의 파라미터를 선택적으로 선정할 수 있는 디지털 가바나를 개발하여 엔진을 제어하고 있다. 이 디지털 가바나는 기계식 조속기 보다는 성능이 우수하나 이것 또한 제어기의 파라미터를 미리 정해진 값을 선택적으로 선정하기 때문에 넓은 운전 범위에서의 정교한 제어는 불가능하다.

따라서 열악한 운전조건이나 넓은 운전 범위에 자유로이 대처할 수 있게 하기 위해서는 적응성이 뛰어난 엔진 제어계의 구성이 필요하다.

본 연구에서는 선박용 주기관으로 이용되는 디젤 엔진을 제어대상으로 하고 먼저 제어 대상을 제어하기 위한 가버너의 액츄에이터로서 DC 서보 모터를 선정하여 연료 래크의 위치 지령에 최단시간내에 도달할 수 있는 서보계를 설계한 다음, 제어대상인 디젤엔진을 모델링한 후 운전 조건에 따라 파라미터가 변화 하더라도 목표치에 잘 추종하도록 하는 적응제어계를 설계하고 응답 실험을 통하여 그 타당성을 검토한다.

2. DC 서보 모터를 이용한 연료 래크의 위치제어

자동제어에 이용되는 액츄에이터로서 서보 모터는 빼 놓을 수 없이 중요한 기구이며,

서보모터에는 AC 서보모터와 DC 서보모터가 있다. DC 서보모터는 브러시가 있기 때문에 불꽃등이 발생하는 문제점이 있기는 하나 제어가 용이하기 때문에 널리 이용되고 있다.

본 연구에서는 DC 서보모터를 구동하기 위해 Power Transister를 이용한 PWM (Pulse Width Modulation) 구동방식을 이용하고, 제어칙은 최단시간내 목표치에 도달할 수 있는 최단시간 제어칙과 오차가 일정범위 내로 들어 왔을 때 PI제어모드로 동작되는 제어 알고리즘을 이용한다¹¹⁾.

제어용 마이크로 프로세서는 제어칙의 연산을 위한 마이크로 프로세서와 PWM 파형을 만들어 내는 마이크로 프로세서를 각각 분리하여 2개의 CPU를 갖는 시스템으로 구성한다.

2.1 DC 서보모터의 모델링

직류전동기의 제어에는 전기자 제어방식과 제자 제어방식의 두가지 방법이 있는데, 본 연구에 이용된 DC 서보모터는 전기자 제어방식으로서, 이 경우 전기자 시정수가 기계시정수 보다 훨씬 작으므로 모터의 전달 함수는 식 (2-1)과 같이 근사화된다.

$$G(s) = \frac{\theta}{\theta_u} = \frac{k_m}{S(1+\tau S)} \quad (2-1)$$

- 단, k_m : 모터의 이득
- τ : 모터의 시정수
- θ : 각변위
- θ_u : 가해진 전압

출력값과 기준값의 오차를 상태(state)로 취하여 상태 방정식으로 나타내면 아래와 같다.

$$X_1 = \theta - \theta_{ref} = e_m \quad (2-2)$$

$$X_2 = \dot{X}_1 = \dot{e}_m \quad (2-3)$$

단, θ_{ref} 는 계단 입력

식(2-1)을 풀어 정리하면

$$\tau \ddot{e} + \dot{e} = k_m \theta_u \quad (2-4)$$

로 되며 여기에 식(2-2), (2-3)을 대입하면

$$\tau \dot{X}_2 + X_2 = k_m \theta_u \quad (2-5)$$

$$X_2 = -\frac{1}{\tau} X_2 + \frac{k_m}{\tau} \theta_u \quad (2-6)$$

이 되고 식(2-3), (2-6)에서 상태방정식 (2-7)을 얻게 된다.

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{\tau} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k_m}{\tau} \end{pmatrix} \theta_u \quad (2-7)$$

2.2 최단시간 제어칙

DC 서보 모터의 상태 방정식(2-7)에 대해 제어입력의 구속조건 및 경계조건이 식(2-8), (2-9)로 주어져 있다고 하자.

$$\text{제어입력 제한: } \theta_u = A \quad (2-8)$$

경계 조건 :

$$X_1(0) = X_0 = e(0), \quad X_1(t_f) = 0 \quad (2-9)$$

$$X_2(0) = 0, \quad X_2(t_f) = 0$$

$$\text{평가함수} \quad : J = \int_0^{t_f} dt = t_f \quad (2-10)$$

단, t_f : 최종시간

이때 식(2-10)으로 주어지는 평가함수를 최소로 하는 제어 입력을 Pontryagin의 최대 원리에 의해서도 구할 수 있으나, 위상면도의 해석법으로 구하면 다음과 같다.

$$S(X_1, X_2) = X_1 + \tau X_2 - kA \tau \ln(1 + X_2/kA),$$

$\theta_u = A$ 일때

$$S(X_1, X_2) = X_1 + \tau X_2 + kA \tau \ln(1 - X_2/kA),$$

$\theta_u = -A$ 일때

$$\text{단, } k = k_m \quad (2-11)$$

이때의 최적 입력 θ_{uo} 는 식(2-12)와 같다.

$$\theta_{uo} = A \text{ sign}(S(X_1, X_2)) \quad (2-12)$$

식(2-11)의 위상면도(Phase Plane)는 Fig. 1과 같고, 선분 BOB'가 스위칭라인(switching line)이고 상태가 이 라인 우측에 있을 때는 $\theta_u = -A$ 이고, 좌측에 있으면 $\theta_u = A$ 로 된다.

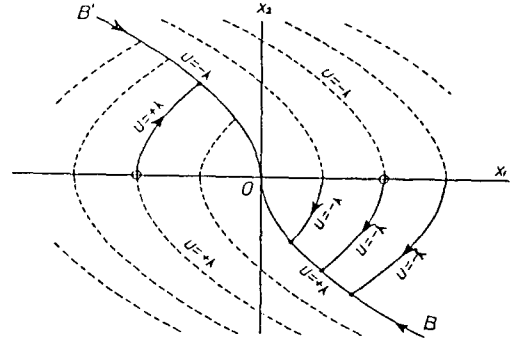


Fig. 1. Switching line.

식(2-12)의 제어입력 θ_{uo} 를 구하기 위해서는 식(2-11)로 주어지는 스위칭 line을 계산해야 하는데, 이 계산은 범용 퍼스날 컴퓨터에서는 대단히 용이하지만 제어 전용 원보드 마이크로 컴퓨터에서는 자연대수의 계산 서브루틴이 구비되어야 함으로 쉽지 않다. 그런데 식(2-11)의 자연대수를 포함하는 항의 값은 X_2 가 큰 값이 아닌한 매우 작은 값이므로 생략 할 수 있어 식(2-13)과 같이 간략히 되고 새로운 스위칭 line은 Fig. 2와 같이 된다.

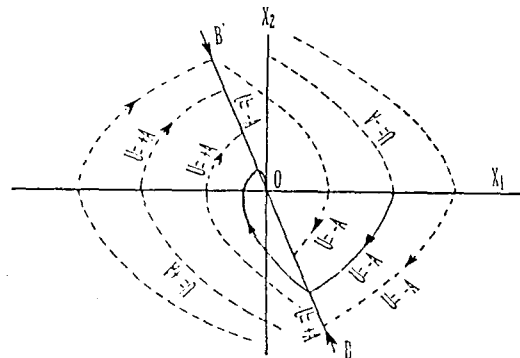


Fig. 2. Modified switching line.

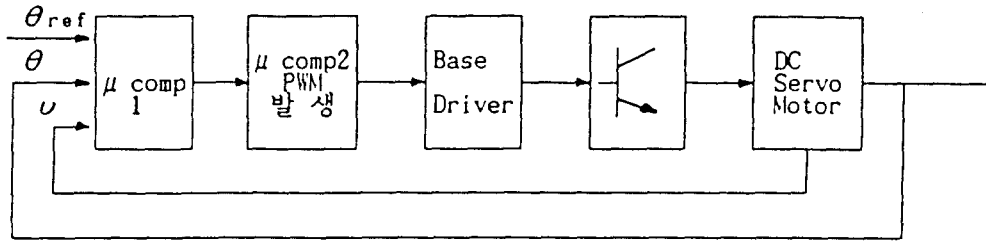


Fig. 3. Block diagram of Control system.

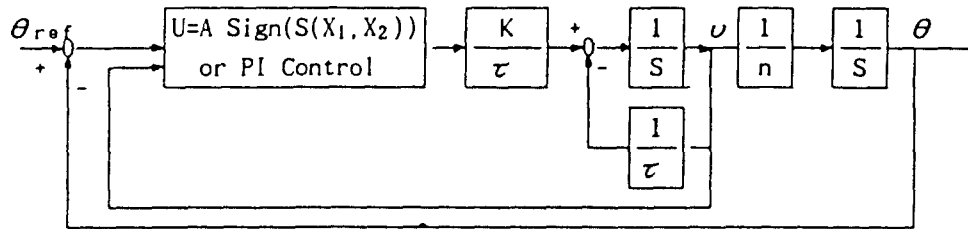


Fig. 4. Transistor Driver.

$$S'(X_1, X_2) = X_1 + \tau X_2 \quad (2-13)$$

이때의 제어입력 θ_u 는 식(2-14)와 같이 된다.

$$\theta_u = A \text{ sign}(S'(X_1, X_2)) \quad (2-14)$$

모터의 모델링 식(2-7)과 제어칙(2-14)을 이용한 DC 서보 모터의 서보제어시스템을 블록선도로 나타내면 Fig. 3과 같다.

2.3 DC 서보 모터 구동 하드웨어 설계

본 연구에서는 정격전압 96V, 정격전류 7.6A인 DC 서보모터를 사용하였고, 제어칙 계산전용 마이크로 프로세서(Micro computer 1) 및 PWM파형을 만들어내는 마이크로 프로세서(Micro computer 2)는 공히 Intel사의 8085를 이용하였다. Micro computer 1은 외부로부터 위치, 속도를 제측하여 식(2-14)의 최단시간 제어칙에 의한 제어입력을 계산하고 그 결과를 Micro computer 2가 받아 그 명령에 상응하는 PWM(Pulse Width Modulation) 파형을 만들어 각 트랜지스터의 베이스에 신호를 출력하여 DC 서보모터를

구동한다. 이러한 구성을 Fig. 4에 나타내었고 제어알고리즘의 플로우차트는 Fig. 5와 같다.

2.4 응답실험

본 연구에서는 DC 서보모터에 Step Input

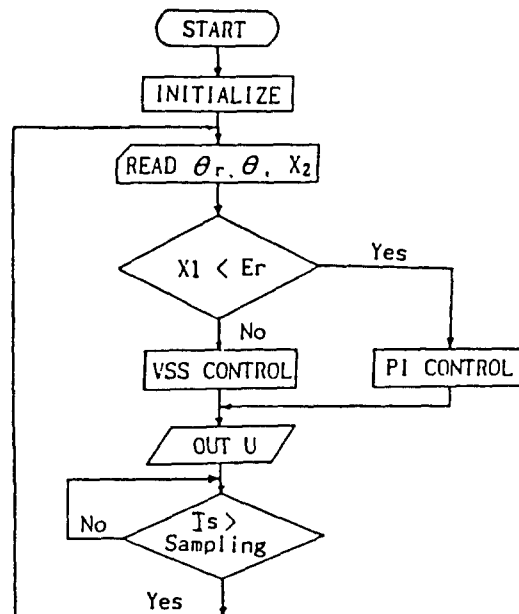


Fig. 5. Flow Chart.

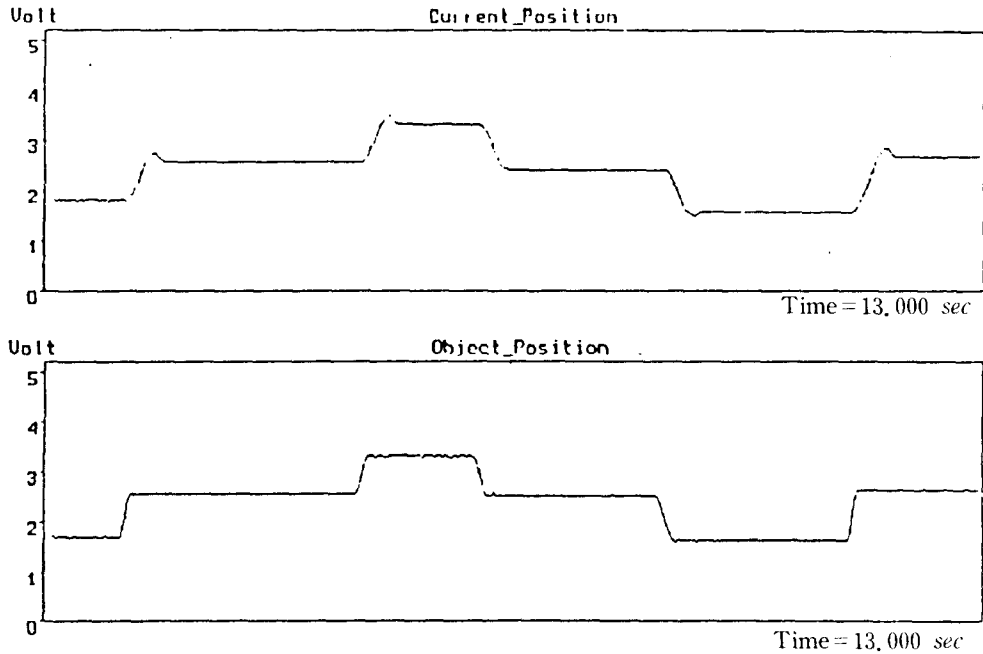


Fig. 6. Response of servo motor.

을 가한 Indicial 응답으로부터 식(2-1)의 각 파라미터를 측정된 결과 다음과 같다.

$$K = 7.0$$

$$\tau = 0.15$$

교류전원을 슬라이드스스로부터 약 50V를 인가하고, 상태 X_2 (속도)는 TG (Tacho Generator)로 계측하였으며, 위치 출력 θ 는 회전식 포텐서미터(Rotary Type Potentiometer)를 이용하여 계측하였고, 입력제한치는 $\theta_{umax} = 5V$ 로 하였으며, 무부하인 상태에서 샘플링 시간 0.015초에 대대 목표치를 계단상으로 변경시켜 실험을 한 그 결과는 Fig. 6과 같다.

2.5 고찰

본 연구에서 제안한 수정된 최단시간 제어칙 식(2-13) 및 식(2-14)은 식(2-11), 식(2-12)에 비해 계산량이 적을 뿐만 아니라 계산도 용이하다. Fig. 6의 응답실험 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 이 제어칙을 이용하더라도 응답시간의 짧으면서도 양호한 제어가

가능하다는 것을 알 수 있다. 그리고 위치오차가 허용치 이내로 들어오게 되면 PI제어모드로 동작하게 되어 제어입력의 급격한 변화(채터링 현상)를 억제함과 동시에 오차를 제거할 수 있다. 또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 2%의 정착시간이 0.4[Sec] 정도로 응답특성의 우수함을 알 수 있다.

3. 서보모터를 포함한 디젤엔진 제어계의 구성

3.1 디젤엔진의 모델링

제어하고자 하는 제어대상인 디젤엔진에 대해 모델링하기 위해서는 디젤엔진의 특성을 파악하여야 한다.

디젤엔진은 래크가 조정된 시간부터 증감되어진 연료가 분사, 착화하여 엔진의 축에 토크의 변화를 가져오기 위해서는 일정한 시간이 걸리며, 이 지연된 시간 즉 지연시간(delay time)은 근사적으로 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$L=15/N+30/Nn \quad (3-1)$$

단, N : 회전수 (rpm)

n : 실린더 수

래크의 위치가 엔진 축에서의 토크로 변화할 때의 이득을 K_r , 지연시간을 L 이라 할 때 래크의 위치로 부터 토크까지의 전달함수 G_r 은 식(3-2)와 같이 된다.

$$G_r(S) = K_r \cdot \exp(-LS) \quad (3-2)$$

발생 토크로 부터 엔진 회전수까지의 전달함수는 1차 요소로 근사화 할 수 있으며 그 때의 이득을 K_e' , 시정수를 T_e 라 하면 식(3-3)과 같이 모델링 된다.

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

식(2-1)로 표시된 서보모터의 시정수는 식(3-3)으로 표시된 디젤엔진의 시정수에 비해 극히 작으므로 서보모터를 직류 이득 K_m 을 갖는 비례 요소로 생각하면 엔진계통의 전체 전달 함수는 식(3-4)와 같이 된다.

$$G(S) = \frac{y(S)}{u(S)} = \frac{\exp(-LS)K_e}{1 + T_e S} \quad (3-4)$$

단, $K_e = K_r K_e' K_m$

여기서 지연시간 $\exp(-LS)$ 를 식(3-5)와 같이 1차식으로 근사화 하면 식(3-4)는 식(3-6)과 같은 단순 2차계로 근사화 된다.

$$\exp(-LS) = 1 / (1 + LS) \quad (3-5)$$

$$G(S) = K / (S^2 + \alpha_1 S + \alpha_2) = K / (S + P_1)(S + P_2) \quad (3-6)$$

단, $K = K_e / LT_e$

$$\alpha_1 = (L + T_e) / LT_e$$

$$\alpha_2 = 1 / LT_e$$

$$P_1 = \frac{\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_2}}{2}$$

$$P_2 = \frac{\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_2}}{2}$$

식(3-6)을 샘플링시간 T 로써 이산화한 경우 차분 방정식은 식(3-7)과 같이 된다.

$$y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) = b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) \quad (3-7)$$

단, $a_1 = -\exp(-P_1 T) + \exp(-P_2 T)$

$$a_2 = \exp(-(P_1 + P_2) T)$$

$$b_1 = -\{k_1(\exp(-P_1 T) + \exp(-P_2 T)) + k_2(1 + \exp(-P_2 T)) + k_3(1 + \exp(-P_1 T))\}$$

$$b_2 = k_1 \exp(-(P_1 + P_2) T) + k_2 \exp(-P_2 T) + k_3 \exp(-P_1 T)$$

$$k_1 = K / P_1 P_2$$

$$k_2 = K / P_1 (P_1 - P_2)$$

$$k_3 = K / P_2 (P_2 - P_1)$$

3.2 실시간 파라미터 추정¹³⁾

식(3-7)으로 주어지는 차분방정식의 파라미터 a_1, a_2, b_1, b_2 를 실시간으로 추정하기 위해 순환형 최소 자승 추정알고리즘(recursive least square estimation algorithm)을 이용한다.

추정해야 할 파라미터 및 추정에 이용되는 입·출력 신호를 식(3-8) 및 식(3-9)로 정의한다.

$$\theta^T = [a_1, a_2, b_1, b_2] \quad (3-8)$$

$$\phi^T(k) = [-y(k-1), -y(k-2), u(k-1), u(k-2)]$$

(3-9)

이 때 추정알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + P(k-1) \phi(k) [\mu + \theta^T(k) P(k-1) \phi(k-1)]^{-1} [y(k) - \phi^T(k) \theta(k-1)] \quad (3-10)$$

$$P(k) = 1 / \mu \{ P(k-1) - P(k-1) \phi(k) [\mu + \phi^T(k) P(k-1) \phi(k)]^{-1} \phi^T(k) P(k-1) \} \quad (3-11)$$

단, μ : 망각계수 (forgetting factor)

: 추정치를 표시하는 기호

Table 1. Trial engine specification

rpm	25	40	55
$L(sec)$	0.84	0.525	0.382
Ke	1.04	1.02	0.896
$Te(sec)$	1.85	1.85	1.85

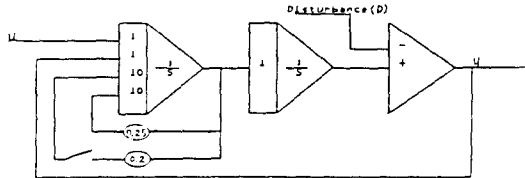


Fig. 8. Analog computer simulation diagram of engine.

어 실험을 행한 결과는 Fig. 9~Fig. 11과 같다.

Fig. 9는 엔진의 회전수를 스텝상으로 변화시킨 경우의 응답을 표시하고 있으며 Fig. 10은 Fig. 8에서 외란에 해당하는 D값을 변화시킨 경우 외란에 대하여 응답이 회복되는 것을 보이고 있다.

Fig. 11은 Fig. 8에서 계수(파라미터)의 값을 임의로 변화시킨 경우의 파라미터의 추종과 그 때의 응답을 보이고 있다.

3.5 고찰

본 연구에 이용된 Table 1의 디젤 엔진의 시정수는 약 6초 정도이다.

Fig. 9의 출력에서 보는 바와 같이 목표치를 스텝상으로 변화시켰을 경우, 약간의 오버슈터를 가질뿐 정상오차 없이 잘 추종해 감을 알 수 있다. 이때 5% 정착시간도 약 5~6초 이내이고, 파라미터 a_1 , a_2 , b_1 , b_2 도 잘 추종되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 60초 부근과 120초 부근에서 출력의 스케일(scale)로 0.6[V]의 외란을 가감한 경우로서, 외란이 존재하더라도 목표치로 곧 회복됨을 보이고 있다. 그리고 외란이 존재하는 동안에 파라미터 b_1 , b_2 가 약간 변화 있음을 육안으로도 확인할 수 있다.

Fig. 11은 100초 부근에서 연속계에서의 파라미터 a_1 의 값을 약 배로 변화시킨 경우의 응답 및 파라미터의 추정 결과로서, 파라미터를 변화시킨 순간 큰 움푹을 발생시키지만 시간이 지나 파라미터의 값을 바르게 추정하고 난 후 부터는 정상오차 없이 잘 추종해 감을 알 수 있다.

4. 결론

액추에이터로서 DC 서보모터를 이용하여 연료펌프 래크 구동시스템을 설계하고 엔진부의 지연요소를 1차 요소로 근사화하여 적응 제어계를 구성한 후, 응답 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) DC 서보모터의 최단시간 제어시 Fig. 1과 같은 스위칭 line 대신에 근사적으로 직선인 Fig. 2의 스위칭 line을 이용하면 마이크로 프로세서의 연산에 부담을 줄이면서 양호한 서보모터의 위치제어 특성을 얻을 수 있었다.

(2) 엔진부의 지연요소를 1차계로 근사화하고 액추에이터를 비례 요소로 생각하여 액추에이터와 엔진부 전체의 제어 대상을 2차계로 간주하여 적응 제어계를 구성하여도 양호한 제어응답을 얻을 수 있었다.

(3) 외란이 존재하거나 회전수 변화 및 다른 요인에 의해 파라미터의 값이 변화가 있더라도 양호한 응답특성을 얻었다.

이상과 같은 결론을 얻었으나 향후 실제 엔진을 대상으로 실험장치를 구성하여 응답 실험을 행해 보아야 할 과제가 남아 있다고 생각 된다.

참고 문헌

- 1) Matsuo Odaka, Yujiro Tsukamoto, Hiroyuki Yagi and Takashi Hashizume (1990): Development of Automatic

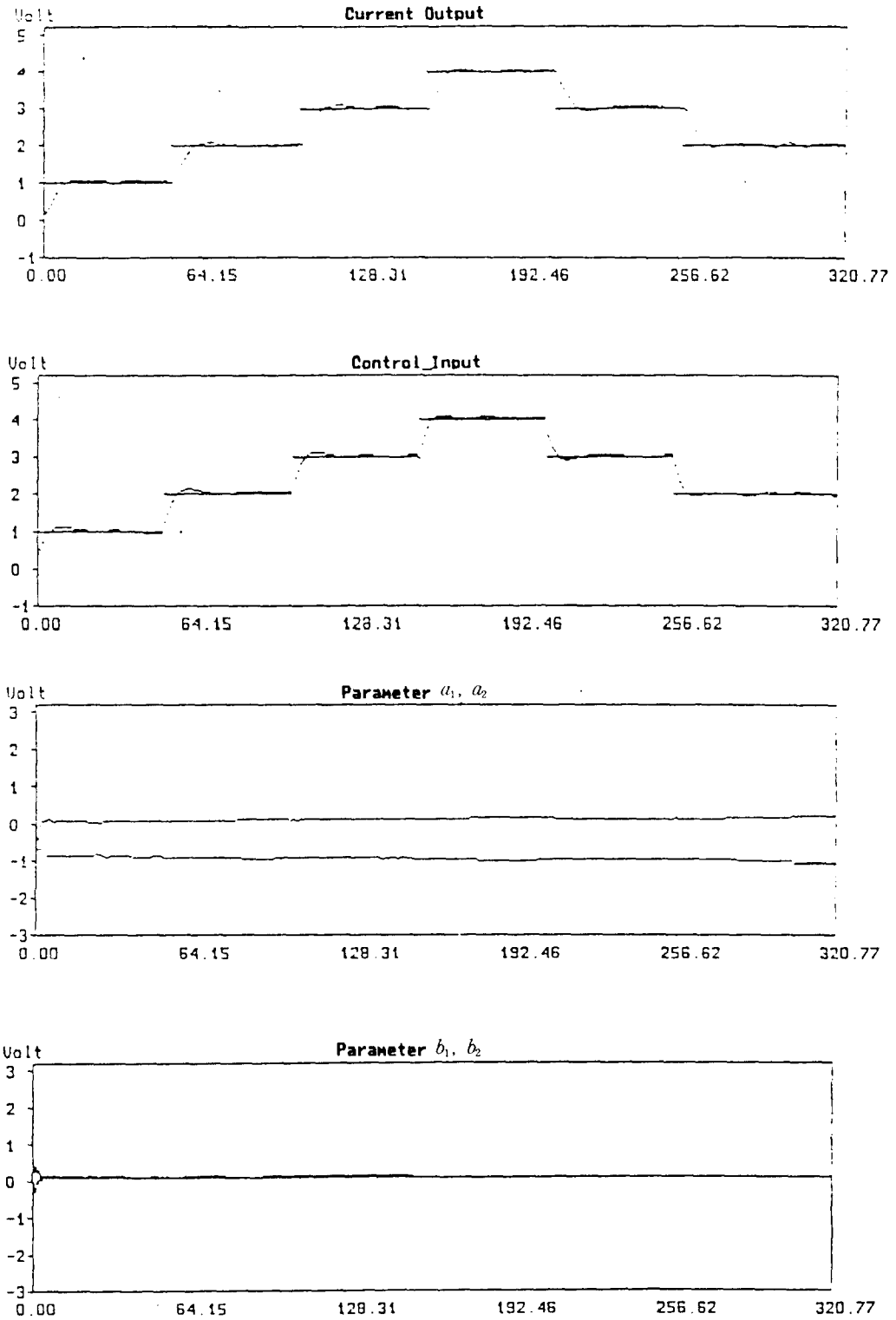


Fig. 9. Response for step input.

자기동조제어에 의한 선박용 디젤엔진제어에 관한 연구

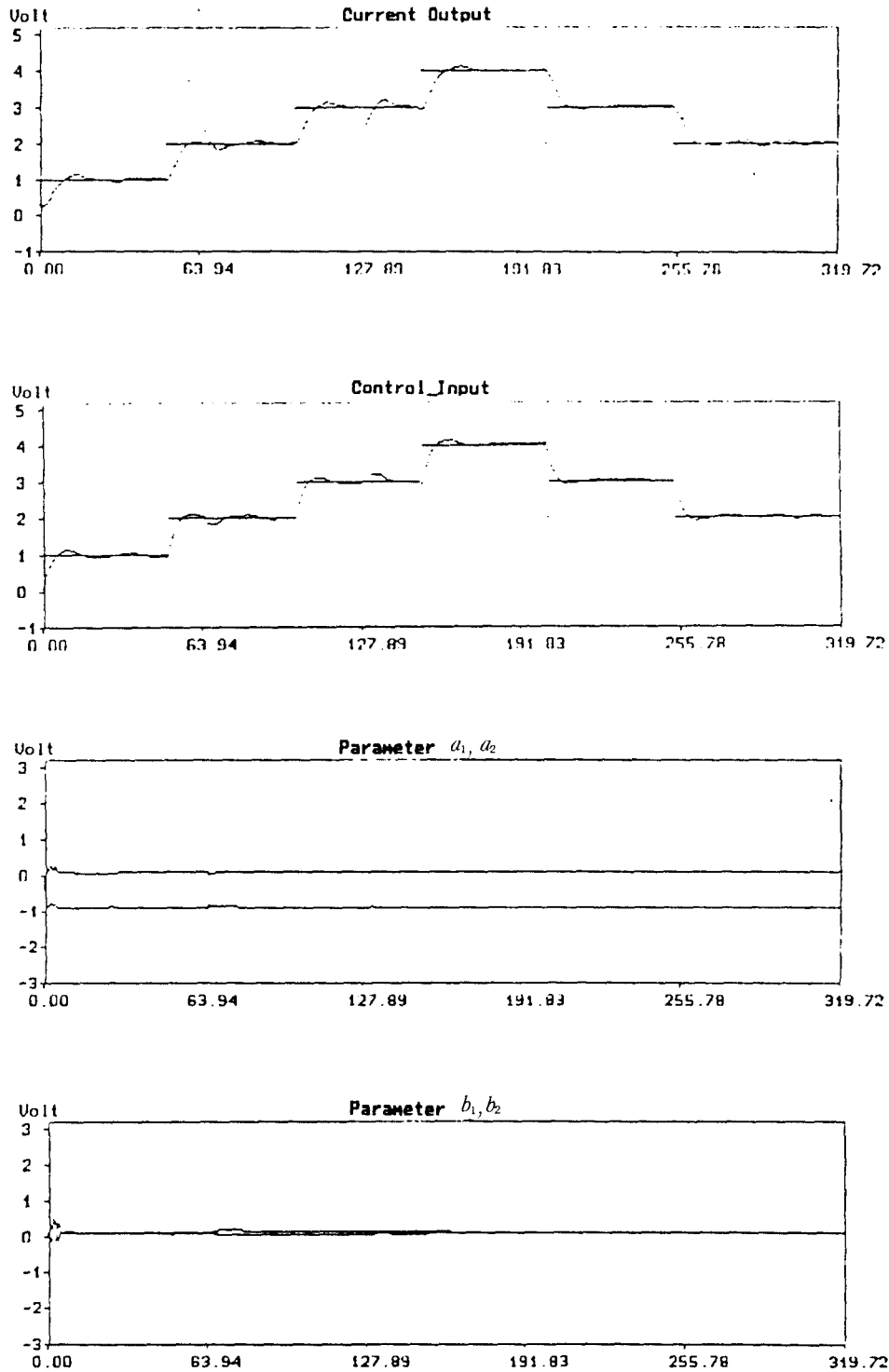


Fig. 10. Response for disturbance.

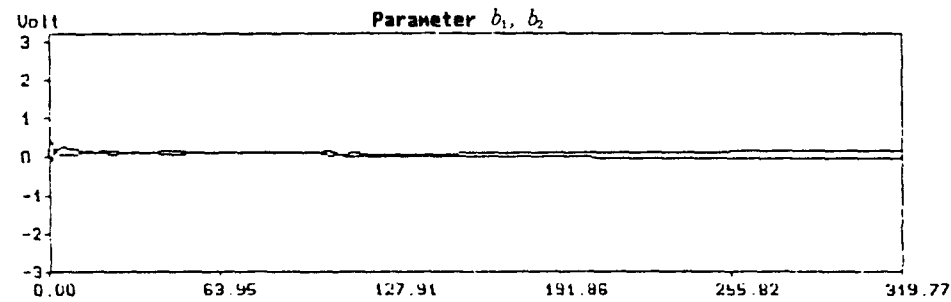
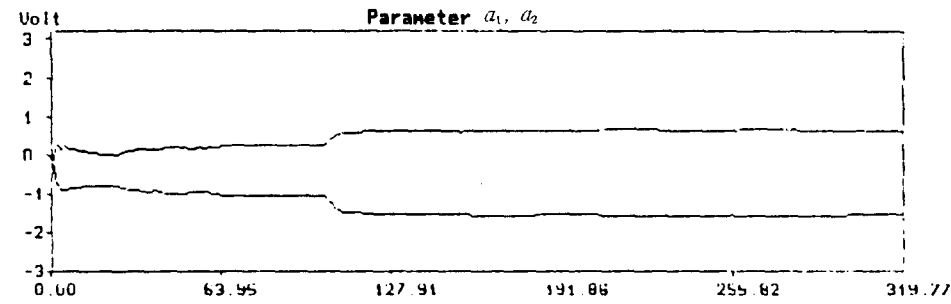
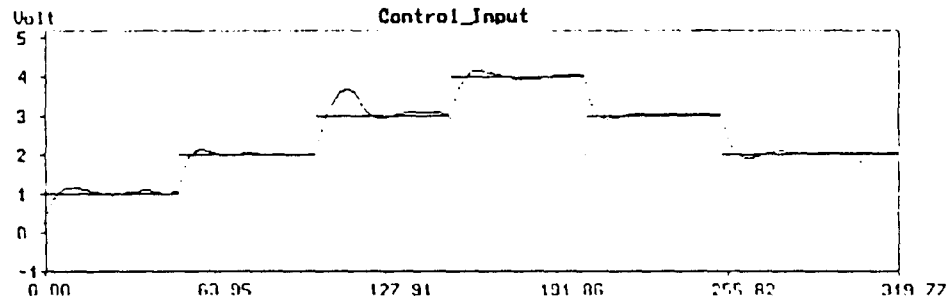
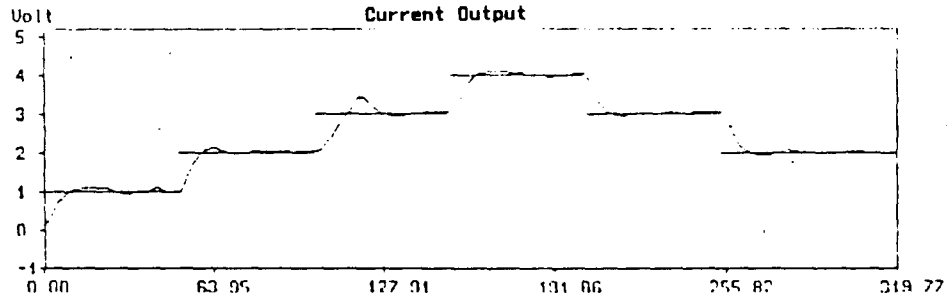


Fig. 11. Response for parameter variation.

- Engine Control System with Predictive Control and its Application for Heavy Duty Diesel Engine. SAE Technical Paper Series 900234.
- 2) Z. Bazari (1990): The Transient Performance Analysis of a Turbocharged Vehicle Diesel Engine with Electronic Fuelling Control. SAE Technical Paper Series 900236.
 - 3) G. Hong and N. Collings (1990): Application of Self-Tuning Control. SAE Technical Paper Series 900593.
 - 4) Woodward Governor Co. (1994): Meeting Minute on the Application of Woodward Governor to the B&W Engine.
 - 5) Norcontrol (1983): Digital Governor System DGS 8800. Doc. No. 0759A.
 - 6) Norcontrol (1985): Digital Governor DGS 8800 System Information.
 - 7) Norcontrol(1988): Technical Analysis of Governor for B & W 6L80MCE.
 - 8) Norcontrol (1989): Stability Analysis Governor of Main Engine RPM. Horton.
 - 9) S.T. Lyngso (1987): Electronic Governor System EGS900. CI900. 166. 623. Ver. 2. 01.
 - 10) S.T. Lyngso (1987): Electronic Governor System EGS900. STL07. A. 32. Ver. 2. 01.
 - 11) 梁注鎬·鄭柄建·金昌和·金英福(1991): DC 서보모터의 最短時間 位置制御, 韓國 船用機關學會 秋季發表會 抄錄集, 80-85. OCT.
 - 12) 李東喆(1992): 디지털 技法을 利用한 誘導電動機 시스템의 速度制御, 韓國海洋大學 大學院.
 - 13) K.J. Åström and B.Wittenmark (1989): Adaptive Control, Addison-Wesley, 72-79.