

서보전동기 운전을 위한 자기동조제어 시스템에 관한 연구

(A study on the Self Tuning Control System for Servo Motor Drives)

吳元錫*, 李允鍾*

(Won Seok Oh and Yoon Jong Lee)

要約

본 연구는 직류 서보 전동기의 고성능 운전을 위한 연구로 부하변동이 잦은 서보 시스템에 적합한 자기동조제어 알고리즘을 제안하였고, 그의 구현을 위하여 고속연산 신호처리용 프로세서인 TMS320C25 고정소숫점 프로세서를 이용한 제어 시스템을 개발하였다. 제어 알고리즘의 적용책은 순환형 최소자승법으로, 제어책은 최소분산제어 방식으로 구성하였다. 제어시스템은 PC에 기초한 DSP 제어시스템으로 설계 제작하였으며 PC에서 프로그램 개발, 디버깅, monitoring 등을 하도록 하여 적응제어 알고리즘의 적용을 용이하게 하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여, 제안된 제어 시스템이 시스템의 매개변수를 추정할 수 있고 부하변동에 강인한 특성을 보이며 서보전동기 운전에 적합한 제어기임을 입증하였다.

Abstract

In this paper, a self tuning control algorithm is proposed for the high performance drive of DC servo motor, which is adequate to the servo system having frequent load variation. In order to realization of the algorithm, the control system is developed using a fixed point high speed digital signal processor, TMS320C25. Control algorithm is composed of two parts. One is estimation law part using recursive least mean square method, the other is control law part using minimum variance control method. For the purpose of easiness of applying adaptive algorithm, developed control system is based on PC-DSP structure which can develop, debug programs and monitor the dynamic behaviors, etc. Through computer simulation and experimental results, it was verified that proposed control system could estimate system parameters and was robust to the variation of the load and as a result, was adequate to the servo motor drives.

1. 서론

산업 자동화가 가속됨에 따라 로봇이나 수치제어용 공작기계 및 사무자동화 기기, 항공기등의 분야에서

고속응답 및 고정밀 응답의 서보 전동기 시스템이 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하여 외란이나 부하변동에 강인한 서보전동기 시스템에 관한 연구가 이루어져 왔다.^[1] 이러한 서보 시스템 구성의 어려움 점은 시스템 매개변수의 큰 변동과 시변외란에 기인하는 오차를 허용범위로 줄여 신속하고 진동이 없는 과도 응답특성을 얻는 것이다. 일반적으로 산업계에서 사용되어 왔던 PI 제어기는 한 동작점에서 부분적

* 正會員, 漢陽大學校 電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.)
接受日字: 1993年 4月 13日

선형화에 기초하여 설계되었으므로 부하변화가 작거나 시스템을 선형 평형동작점에서 운전한다면 매우 유용한 방법이다. 그러나, 로봇이나 공작기계등 정밀 서보 구동을 필요로 하는 응용분야에서는 넓은 폭의 부하변동 특성을 갖는 운전을 하게 되며 시스템의 매개변수가 변하게 된다. 그러므로, PI 제어기의 이득을 조정해 주어야 한다. 이 이득을 운전 조건에 따라 온 라인으로 구하는 것은 어려우므로 PI 제어기는 적절하지 않다고 생각되며 매개변수 변화를 보상하는 적응제어 알고리즘의 도입이 필수적이다.

적응제어 이론 중 자기동조제어이론은 Astrom과 Witternmark^[2]가 발표한 이래로 여러형태가 연구되어 공정제어나 산업제어 응용에 폭넓게 사용되어 왔으며 대별하여 두가지 부류로 나눌 수 있다. 하나는 최적제어 개념을 도입하여 최소분산제어라 하는 것인데, Astrom 과 Witternmark^[2], Clarke와 Gawthrop^[3] 등에 의해 체계화되었다. 또 하나는 고전제어이론에 기초하여 선형제어기로서도 분류되는 극배치 제어방법이다.^[4] 역시 Astrom과 Witternmark^[5]가 언급하였고 Prager와 Wellstead^[6]가 시뮬레이션과 실험을 통하여 유용성을 입증하였다. 최소분산제어방식은 시스템의 오차항과 제어입력항등으로 구성된 cost function(loss function) J를 최소로 하도록 제어를 설계하는 방식으로 제어가 비교적 간단하고 구현하기 용이하며, 최적의 제어를 할 수 있다. 그러나, 제어입력이 급변하고^[6], 특히 비최소 위상시스템에 적용되었을 때, 오차항과 제어입력항 사이의 가중치에 따라서 불안정해질 수 있다는 단점이 있다.^[7] 반면에 극배치 제어방법은 시스템 설계자가 쉰시스템의 페루프 이득을 안정된 극점으로 배치하는 것이다. 시스템 특성에 따라 안정된 제어를 구성할 수 있다는 점과 시스템의 제한 조건들(입력 한계, 매개변수 변동범위 등)을 고려할 수 있다는 것이 장점이다. 그러므로, 비최소위상 시스템을 포함한 여러시스템에 강인하고 신뢰성 있는 제어를 할 수 있으나, 시스템 특성에 알맞는 안정된 극점 선정에 유의해야 한다. 자기동조제어 이론을 전동기계어에 적용한 최근의 연구는 Brickwedde^[8], Furuta^[9] 등이 있다. Brickwedde는 범용 직류전동기에 적용하였는데, 극배치제어 방식으로 속도 제어를 구성하고, 위치제어기로 시간최적제어를 도입하였다. 부하로 전동기를 커플링하여 부하를 가변하였다. Furuta는 최소분산제어이론을 Direct Drive 전동기에 적용하였다. 적응적으로 순환형 최소자승법을 이용하였고, 시스템 벡터로 두스텝간의 제어입력의 합과 출력차를 이용하였다. 제어적의 cost function

은 3 스텝간의 출력 오차의 합을 가중항을 포함하고 2 스텝의 입력차를 평가요소로 하였다. 부하는 관성 변동만을 고려하였다.

본 연구에서는 직류서보 전동기의 고성능운전을 위한 적응제어이론의 도입을 목적으로 서보시스템에 적합한 자기동조알고리즘을 제안하였고 그의 구현을 위하여 고속연산 프로세서를 이용한 제어시스템을 개발하였다. 적응적은 순환형 최소자승법을 이용하고, 순환형 최소자승법이 특정값을 추정한 후, 매개변수가 다시 변동하면 추정능력이 떨어지므로 Fortescue 등^[10]이 제안한 가변망각인자와 Goodwin 등^[11]이 제안한 covariance resetting 방법을 적용하여 매개변수 변동에 대처할 수 있도록 하였다. 제어적은 최소분산 제어 방식을 도입하였고^[4], 갑작스런 제어입력변동을 보상하기 위해 2스텝간의 제어 입력차를 평가요소로 하였고, 시스템의 2진성을 향상시키기 위하여 출력 오차의 적분항^[13]을 cost function에 포함하였다. 또한, 부하변동을 매개변수의 변동으로 표현하여 추정된 매개변수로 최소분산제어기를 이용하여 제어기의 이득을 보상할 수 있게 하였다. 적응제어를 실제 구현하기 위해서는 방대한 연산을 수행해야 하므로, 덧셈과 곱셈 연산 능력에 매우 빠른 구조를 갖고 있으며 일반 마이크로 프로세서와 비슷한 가격으로 어떤 경우에는 대형 컴퓨터의 성능을 낼 수 있는 수준에 와 있는 디지털 신호 프로세서(Digital Signal Processor, DSP)를 이용하는 것이 필수적으로 요구되고 있으므로, 프로세서로 TMS320C25 고정소숫점 프로세서를 이용하였다. 고가의 emulation 장비없이 제어시스템을 구현하기 위해 PC에 기초한 DSP 제어 시스템을 설계하여 PC에서 프로그램을 개발, 디버깅, monitoring 을 하게 하고 제어 프로그램을 공유 메모리로 다운로드하여 DSP에서 제어 프로그램이 실행되도록 하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 직류서보전동기 자기동조제어 시스템의 타당성을 입증하였다.

II. 시스템의 수학적 모델

본 연구에서는 2개의 직류 서보 전동기를 구동용 전동기와 부하용 전동기로 커플링 시킨 모델을 대상 시스템으로 하였다. 그림1에 시스템의 구성도를 보인다. 전동기의 기계적 특성과 전기적 특성은 식(1), 식(2)와 같다.

$$K_m i_a(t) = J_m \frac{dw_m(t)}{dt} + D_m w_m(t) T_L(t) \quad (1)$$

$$v(t) = K_m w_m(t) + r_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (2)$$

- 여기서, r_a : 전기자 저항
 L_a : 전기자 인덕턴스
 v : 전기자 인가 전압
 i_a : 전기자 전류
 T_L : 부하 토오크
 w_m : 회전자 속도
 J_m : 전동기 관성 모멘트
 K_m : 역기전력, 토오크 상수
 D_m : 감쇄정수.

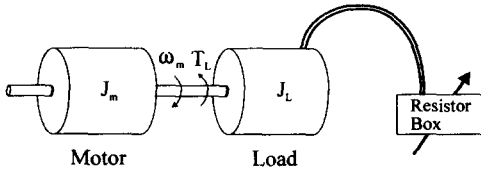


그림 1. 대상 시스템 구성도
 Fig. 1. Target system configuration.

부하토오크는 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

$$T_L(t) = K_L(t)w_m(t) + J_L(t) \frac{dw_m(t)}{dt} \quad (3)$$

여기서, $K_L(t)$ 은 부하의 관성 모멘트이고 $J_L(t)$ 은 부하용 전동기의 출력단자 측에 연결된 저항박스에 반비례하는 부하 토오크 상수이다. 식(1)과 식(2)를 주파수 영역으로 변환하면 식 (4)가 얻어진다.

$$\frac{W_m(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{r_a D(1 + \tau_c s)(1 + \tau_m s) + K_m^2} \quad (4)$$

여기서,

$$\tau_c = \frac{L_a}{r_a},$$

$$\tau_m = \frac{J}{D} \quad (\text{단 } J = J_m + J_L(t), D = D_m + K_L(t))$$

으로 각각 전기적 시정수이고 기계적 시정수이다. 전기적 시정수가 매우 작아 무시할 수 있다고 한다면 식(4)는 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{W_m(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{r_a (Js + D) + K_m^2} = \frac{b}{s + a} \quad (5)$$

식 (5)를 zero order hold(ZOH)를 포함하여 이산형으로 변환하면 식(6)을 얻는다.

$$\frac{W_m(z)}{V(z)} = \frac{b_0 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (6)$$

여기서 a_1 과 b_0 는 식 (5)의 a 와 b 로 구성된 시스템 매개변수이다. 식 (5)와 식 (6)에서 보는 바와 같이 제어 시스템의 시정수와 DC이득은 부하용 전동기가 갖는 관성과 부하토오크 상수의 변화에 의존함을 알 수 있으며, 이러한 부하측의 변동이 시스템 전체의 매개변수에 영향을 미침을 알 수 있다.

III. 제어 알고리즘

본 연구에서 제어하고자 하는, 부하변동이나 기타 외란에 영향을 받는 시스템에 대한 수학적 모델은 식 (7)과 같은 확률적인 단 입력, 단 출력 ARMAX (Autoregressive moving average model with auxiliary input) 모델로 표현할 수 있다. ^[12]

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})\omega(t) \quad (7)$$

여기서, $\{y(t)\}$ 와 $\{u(t)\}$ 는 시스템의 출력과 입력이고 $\omega(t)$ 는 무상관 백색 잡음(uncorrelated white noise sequence)이고, t 는 샘플링 순간 ($t = 1, 2, 3, \dots$), q^{-1} 은 단위 시간 지연 연산자로서 $q^{-d}y(t) = y(t-d)$ 가 되며, $d(d \geq 1)$ 는 시스템의 시간지연을 나타낸다. A, B 와 C 는 q^{-1} 의 다항식이고 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m} \quad ; b_0 \neq 0 \quad (8)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_l q^{-l}$$

상수 n, m, l 은 다항식 A, B, C 의 차수이고 이 차수와 d 를 알면 모델 매개변수들은 매개변수 추정법으로 구할 수 있다. 본 연구에서 적용한 적응 최소 분산 제어기는 시스템 실제 출력과 기준 출력과의 평균제곱오차(mean square error)를 최소화하는 제어 입력을 구하는 최소 분산 제어기와 시스템의 매개변수를 추정하는 순환형 최소 자승 추정기를 합한 제어기이며 일반적으로 자기동조제어기(Self Tuning Regulator)로 불리운다. 서보시스템에 적합한 최소 분산제어기를 설계하기 위하여 식 (9)와 같은 평가함수를 정의한다.

$$J(u, t) = E\left\{\left[y(t+d) - y_{ref}(t+d)\right]^2 + \rho_u [Ru(t)]^2 + \rho_v [v_e(t+d)]^2\right\} = E\{\sigma(t)\} \quad (9)$$

여기에서 $E\{\cdot\}$ 는 샘플링 순간 t 에서 얻어진 값에 의한 샘플링 순간 $t+d$ 에서의 기대값을 나타내고, $y_{ref}(t)$ 는 기준 궤적을 나타낸다. 강인한 제어 성능을 갖게 하기 위해 제어 루프에 추적오차의 적분항인 $v_e(t)$ 를 포함하였고, $v_e(t)$ 는 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_e(t) = v_e(t-1) + e(t) \quad (10)$$

$$e(t) = y_{ref}(t) - y(t) \quad (11)$$

그러므로, 평가 함수를 최소화함으로써 시스템 응답과 기준 궤적의 오차를 최소화할 수 있다. ρ_u, ρ_v 는 제어 입력의 크기와 시스템 응답의 정밀도 사이의 가중치를 선택하기 위한 인자들이다. 그리고, 제어 입력 $u(t)$ 의 갑작스런 변화를 제한하기 위해 R 을 식(12)과 같이 하였다.

$$R = 1 - q^{-1} \quad (12)$$

시간 t 에서 $\sigma(t)$ 를 최소화하면 $J(u, t)$ 가 최소화되므로 $\sigma(t)$ 를 제어입력에 대하여 미분하여 식(13)을 만족하는 제어입력 $u(t)$ 를 구한다.

$$\frac{d\sigma(t)}{du(t)} = 2\left[y(t+d) - y_{ref}(t+d)\right] \left[\frac{dy(t+d)}{du(t)}\right] + 2\rho_u(1 - q^{-1})u(t) + 2\rho_v v_e(t+d) \left[\frac{dv_e(t+d)}{du(t)}\right] = 0 \quad (13)$$

본 연구에서 제어하고자 하는 시스템의 차수를 식(6)으로부터 구하면, $n=1, m=0$ 로 되고 노이즈 레벨을 나타내는 의 값과 지연 는 실제 시스템의 모델 응답에 따라 선택해야 하는데 본 연구에서는 $l=1, d=1$ 로 선정하였다. 그러므로 식(7)은 식(14)와 같은 모델로 표현된다.

$$y(t) + a_1 y(t-1) = b_0 u(t-1) + \omega(t) \quad (14)$$

식(14)로부터 식(13)은 식(15)와 같이 된다.

$$y(t+1) + y_{ref}(t+1) + \frac{\rho_u}{b_0}(1 - q^{-1})u(t) - \rho_v v_e(t+1) = 0 \quad (15)$$

식(14)를 $t+1$ 순간에 대하여 정돈하면,

$$y(t+1) = -a_1 y(t) + b_0 u(t) + \omega(t+1) \quad (16)$$

식(15)의 우변 마지막항은 노이즈(noise sequence)가 무상관(uncorrelated)하므로, 예측될 수 없는 미래의 외란이다. 그러므로 $J(u, t)$ 의 최소화에는 고려되지 않는다. $y(t+1)$ 은 시간 t 에서의 one-step-ahead predictor의 성격을 갖추며 식(17)이 성립하게 된다.^[12]

$$y(t+1) = -a_1 y(t) + b_0 u(t) \quad (17)$$

식(17)을 식(15)에 대입하여 $u(t)$ 를 구하면 식(18)을 구할 수 있다.

$$u(t) = (b_0 + \frac{\rho_u}{b_0})^{-1} \left[a_1 y(t) + y_{ref}^{(t+1)} + \frac{\rho_u}{b_0} u(t-1) + \rho_v v_e(t+1) \right] \quad (18)$$

$u(t)$ 는 최소분산 제어기의 출력이 된다. 이 제어기에는 임출력 오차를 보상할 적분항과 비례항이 포함되어 있으며 정제환 루프와 입력치의 급격한 변화를 방지하는 항이 포함되어 있다. 그러므로, 제안된 제어기는 빠른 과도 응답과 부하변동시 신속하고 안정된 회복 능력을 갖게 된다. 그림2에 본 연구에서 제안한 제어기의 블럭선도를 나타낸다.

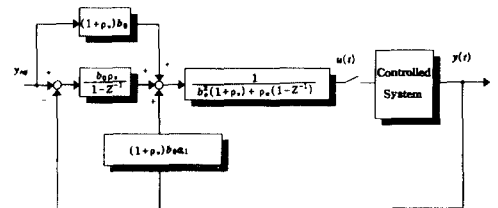


그림 2. 제안된 제어기의 블럭선도
Fig. 2. Block diagram of proposed controller.

IV. 매개 변수 추정 알고리즘

제어입력을 나타내는 식(18)이 시스템의 매개변수로 구성되어 있으므로 제어 입력을 구하기 위해서는 시스템의 매개변수를 추정하여야 하는데, 본 연구에서는 매개변수를 순환형 최소자승법을 이용하여 추정하였다. 시스템의 방정식 식(17)로부터, 매개변수 벡터와 데이터 벡터를 식(19), 식(20)과 같이 정의할 수 있다.^[12]

$$\theta^T(t) = [a_1, b_0] \tag{19}$$

$$X^T(t) = [-y(t), u(t)] \tag{20}$$

순환형 최소자승법을 이용하면 매개 변수 추정치 $\hat{\theta}(t)$ 는 식(21)과 같다.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)[y(t) - X^T(t-1)\hat{\theta}(t-1)] \tag{21}$$

이득 벡터 $K(t)$ 는

$$K(t) = \frac{P(t-1)X(t-1)}{[\lambda + X^T(t-1)P(t-1)X(t-1)]} \tag{22}$$

$$P(t) = (I - K(t)X^T(t-1))P(t-1)/\lambda \tag{23}$$

이다. λ 는 과거의 측정치보다 현재의 측정치에 더 크게 가중을 두는 망각인자로, 과거의 데이터 영향을 감소시키기 위하여 $0 < \lambda \leq 1$ 로 도입된다. 매개변수 추정이 안정하게 동작하면 공분산행렬 P 는 시간이 흐를수록 감소하여 영으로 수렴하며, 이것은 매개변수가 시불변이라면 바람직한 현상이지만 매개변수가 변동하는 경우는 매개 변수가 수렴한 후, 다시 변동한 매개변수로의 추정이 어렵게 되므로 시스템 매개변수의 변동이 발생할 경우에 λ 를 가변시키는 Fortescue등^[10]이 제시한 가변 망각인자를 도입한다. 가변 망각인자를 식(24)에 나타낸다.

$$\lambda(t) = 1 - \frac{[1 - X^T(t-1)K(t)]e^2(t)}{\sigma^2 N_0} \tag{24}$$

여기서, σ^2 는 계통에 대한 잡음분산이고, N_0 는 메모리길이에 상응하는 적응속도이다. σ^2 를 정확히 추정하기는 매우 어려운 문제이므로 P 가 발산하거나 영으로 수렴할 수 있다. 그러므로, 식(25)와 같이 P 를 P 의 추정상태에 따라 초기화 시키는 방법^[11]도 도입하였다.^[7]

$$P(t) = P_0 \tag{25}$$

V. 시뮬레이션 결과

본 연구의 제어 알고리즘을 표1과 같은 매개변수를 갖는 직류 서보 전동기에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

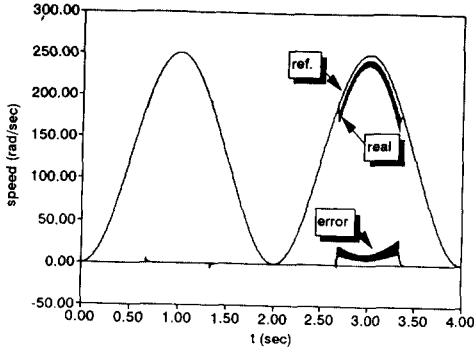
표 1. 시험된 직류 서보 전동기의 정격
(형명 R406-011)

Table 1. Rating of tested DC servo motor (type R406-011)

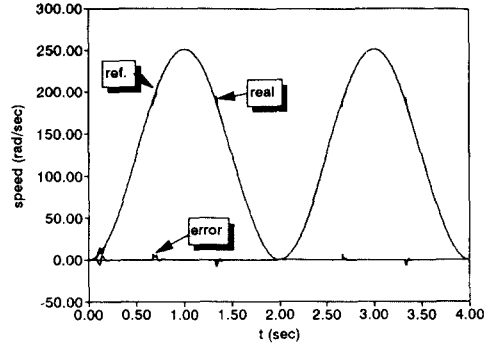
W	60 (W)	J_m	0.106 g cm sec ²
r_a	1.1 (Ω)	K_m	0.51 kg cm / A
L_a	0.4 (mH)		

제안된 알고리즘의 성능 비교를 위하여 일반적인 서보제어기로 널리 이용되는 PI 제어기와 비교하였다. 일정한 관성부하를 인가하고, 기동하여 정상상태에 도달 한 후, 부하를 변동시켜서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며 그에 따른 시스템의 응답 특성을 고찰하였다. 일정 관성부하로 관성이 큰 부하측 전동기의 관성 모멘트를 이용하였다 ($J_m \ll J_l$). 또한, 가변부하특성은 기준계적을 정확히 추종하는 정상상태 시점에서 부하토크 상승을 변동시켰다. 부하변동은 두번시켰으며 첫번째 부하변동에 PI제어기의 동작점을 맞추어 PI제어기 이득을 선정하였고 시행착오법으로 최적의 이득을 선정하였다. 그림3는 PI제어기의 동작특성이고 그림4는 본연구의 자기동조제어기의 동작특성이며 기준속도 계적은 정현적이다.

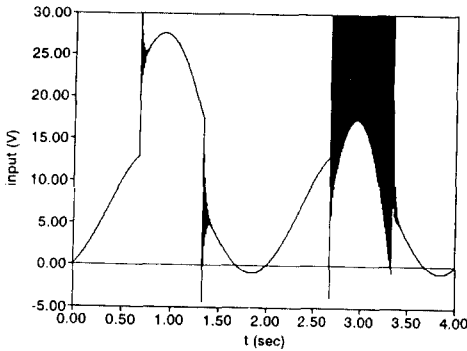
일정 관성부하에 대한 기동 특성을 보면 PI 제어기의 경우와 자기동조 제어기의 경우 모두 양호한 특성을 보이고 있으나 자기동조 제어기의 경우 임의의 매개변수에서 제어기가 동작하기 때문에 초기 기동시 실제 시스템 매개변수에 수렴하기 전까지 동작특성이 PI 제어기의 경우보다 불안정한 특성을 보이고 있다. 그림5는 매개변수 추정특성이다. 임의의 매개변수에서 시스템 매개변수로 정확히 추정하고 있음을 알 수 있다. 가변부하특성을 보면 첫번째 부하가 인가된 시점에서는 PI제어기가 본연구의 자기동조제어기보다 약간 우수한 특성을 보여 주고 있다. 이것은 既知의 부하에 대한 최적의 제어기 이득을 갖도록 PI제어기의 이득을 선정하였기 때문이다. 그러나, 다음 부하변동에 대해서는 동작점이 달라 최적의 이득이 되지 않으므로 부하변동에 적절히 대응하지 못하게 된다. 본연구의 제어기는 부하변동에 의한 시스템 매개변수의 변화를 추정하여 제어기를 조정하므로 어떤 부하변동에도 강인한 특성을 보이게 된다. 또한, 자기동조제어기는 제어기를 구성할 때 제어입력을 최적화하도록 제어기 구조를 설계하므로 PI제어기보다 최적의 입력 전압으로 부하변동에 동작함을 알 수 있다. 그림5는 부하변동에 따라 추정된 매개변수의 변화를 보여주고 있다.



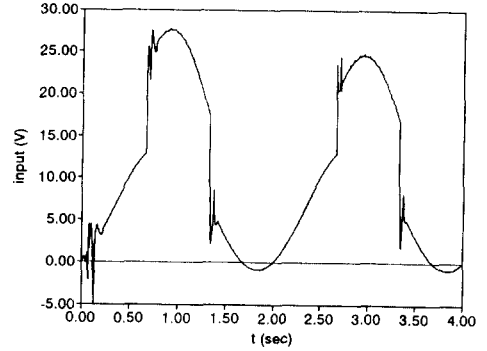
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 3. PI 제어기의 동작특성(시뮬레이션)
(a) 속도, 속도오차 (b) 입력전압

Fig. 3. Response of PI controller (simulation).
(a) speed, speed error (b) input voltage.

그림 4. 자기동조 제어기의 동작특성(시뮬레이션)
(a) 속도, 속도오차 (b) 입력전압

Fig. 4. Response of self-tuning controller (simulation).
(a) speed, speed error (b) input voltage.

VI. 실험 결과 및 고찰

본 연구의 알고리즘을 구현하기 위해서는 빠른 명령 주기(Instruction Cycle time)를 갖는 프로세서가 필요하므로 고속 디지털 신호처리용 프로세서인, 명령 주기가 100nsec의 TMS320C25를 이용하였다. 그림 6에 실험 시스템 구성도를 나타내었다. 제작된 DSP 보드는 64Kword의 고속 static RAM을 PC (IBM호환기종)와 공유하며, 외부입력 포트로 D/A 변환기, 속도 카운터를 갖고 있고 출력포트로 8채널을 갖게 설계하였다. D/A 변환기는 12bit의 분해능을 갖는 AD667을 사용하였고 D/A 변환기 출력은 전력 증폭기(4상한 chopper)를 통하여 전동기의 전력 공급을 제어하는 제어 신호로 이용된다. 속도 측

정에 사용된 엔코더는 500 펄스를 발생하며, 2채배하여 사용하였다. 또한, 속도측정은 8254 Programmable Interval Timer 를 이용하여 M/T 방법으로 구하였다. 프로그램 작업과 디버깅은 PC에서 수행되며 작업된 프로그램은 공유 RAM 영역으로 download 되어 DSP가 제어 알고리즘을 실행할 수 있도록 하였다. 알고리즘은 C언어와 어셈블리어로 작성하였고 샘플링 시간은 5 msec로 하였다.

실험은 시뮬레이션과 동일한 조건으로 수행하였고 비교 대상으로 선정한 PI제어기와 본 연구의 자기동조제어기와도 동일한 조건하에서 실험되고 비교되었으며 세가지 경우의 실험을 수행하였다.

첫번째 실험은 일정 관성 부하시 기동특성을 살펴 보았다. 정현 제적을 추종하게 하였고 일정관성 부하

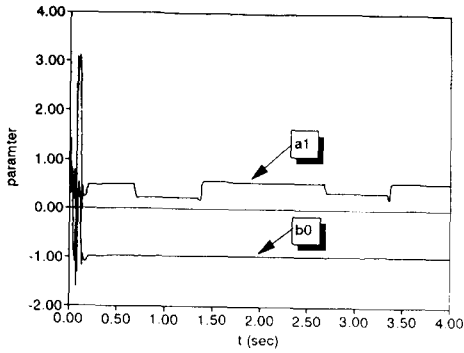


그림 5. 매개변수 추정 특성 (시뮬레이션)
 Fig. 5. Estimation characteristics of system parameter (simulation).

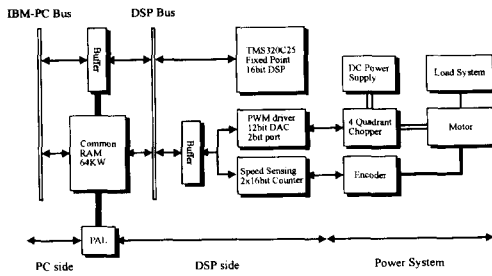
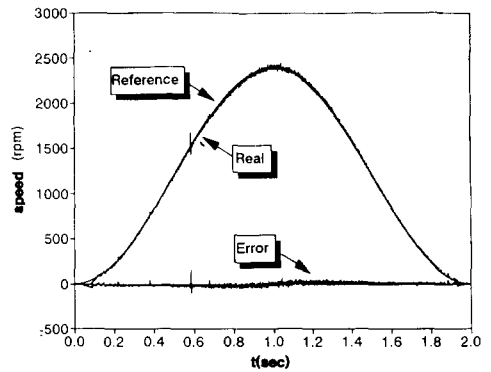


그림 6. 실험 시스템 구성도
 Fig. 6. Configuration of experimental system.

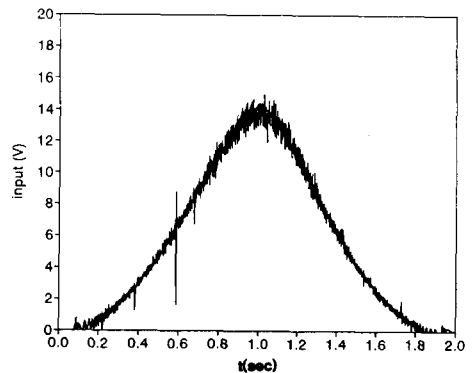
는 부하용 전동기의 관성을 이용하였다. 그림7은 PI 제어기의 경우이고 그림8은 본 연구의 자기동조제어기(STR)의 경우이다. 역시, 기동시에는 PI제어기가 STR보다 양호한 특성을 보이고 있다. 그이유는 STR 제어기가 시스템 매개변수를 추정하기 전까지는 임의의 매개변수로 제어입력을 발생하기 때문이다. 그림9는 STR의 매개변수 추정특성을 보여주고 있으며 임의의 매개변수로 부터 시스템 매개변수로 정확히 추정하고 있다. 또한, 입력 전압특성에서 STR의 경우가 PI의 경우보다 리플이 적고 양호한 특성을 보인다. 두번째 실험은 정상상태 동작하에서 부하변동이 발생했을 때의 동작특성을 나타내 준다. 역시 정현 제적을 추정하게 하였고 부하는 시뮬레이션 모델에서 언급한 바 대로 부하측 전동기의 두출력 단자에 저항을 연결하여 그림1과 똑같은 형태로 실험하였다. 그림10은 PI제어기의 경우이고 그림11은 STR의 경우이다. STR이 PI보다 부하 변동에 강인

한 특성을 보인다. 제어 입력전압도 STR이 리플이 적고 양호한 특성을 보인다. 이는 최소분산 제어기 설계시에 제어입력을 최적의 값으로 갖도록 설계했기 때문이다.

세번째 실험은 전동기가 일정 속도로 동작하고 있을 때 부하변동이 생긴 경우의 동작특성을 나타내 준다. 기준속도는 2400rpm이다. 그림12는 PI의 경우이고 그림13은 STR의 경우이다. PI의 이득은 시행착오법으로 既知의 부하에 대하여 최적의 이득이 되도록 구하였다. STR이 부하에 관계없이 제어입력전압도 양호하고 속도응답특성도 부하변동에 빠르게 대처함을 보이고 있다. 그러나, 부하변동의 최대치가 STR의 경우 크게 나타나는데, 그이유는 부하가 변동

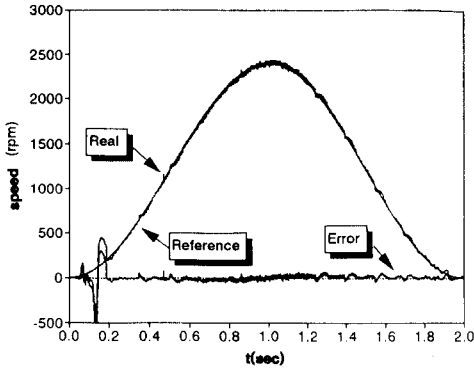


(a)

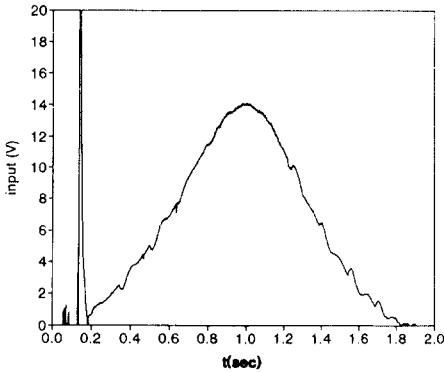


(b)

그림 7. PI 제어기의 동작특성(기동시, 실험결과)
 (a)속도, 속도오차 (b) 입력전압
 Fig. 7. Response of PI controller(when starting, experiment).
 (a) speed, speed error. (b) input voltage.

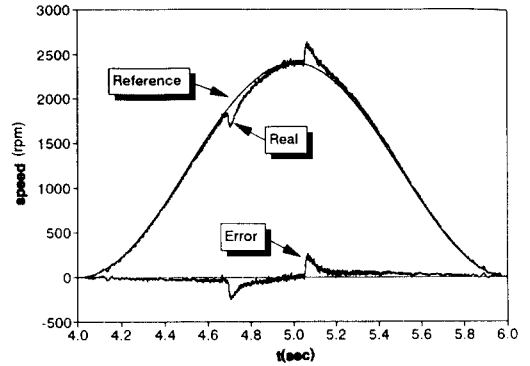


(a)

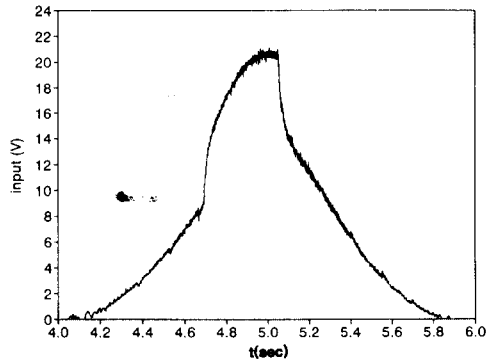


(b)

그림 8. 자기동조 제어기의 동작특성(기동시, 실험결과)
 (a) 속도, 속도오차 (b) 입력전압
 Fig. 8. Response of self-tuning controller
 (when starting, experiment).
 (a) speed, speed error, (b) input voltage.



(a)



(b)

그림 10. PI 제어기의 동작특성(가변부하시, 실험결과)
 (a) 속도, 속도오차 (b) 입력전압
 Fig. 10. Response of PI controller(when
 varying load, experiment).
 (a) speed, speed error, (b) input voltage.

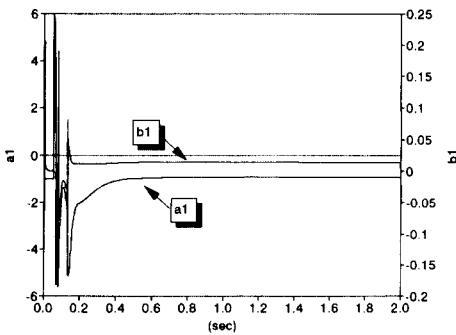
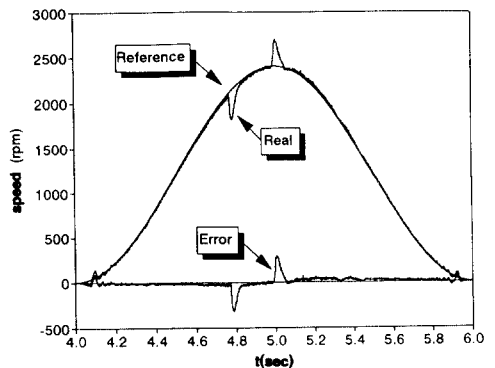


그림 9. 매개변수 추정 특성 (실험결과)
 Fig. 9. Estimation characteristics of system
 parameter(experiment).



(a)

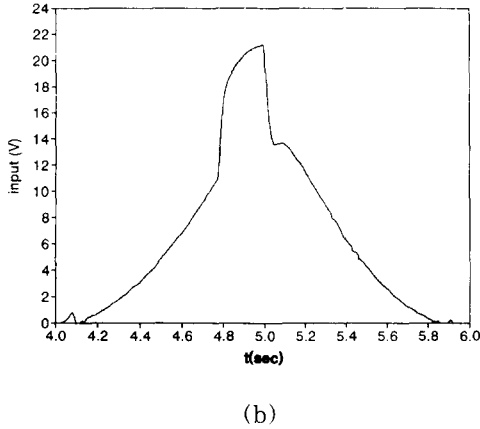


그림 11. 자기동조 제어기의 동작특성(가변부하시, 실험결과)
 (a) 속도, 속도오차 (b) 입력전압
 Fig. 11. Response of self-tuning controller (when varying load .experiment).
 (a) speed, speed error. (b) input voltage.

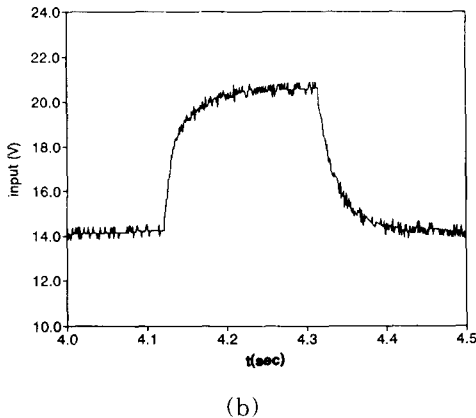
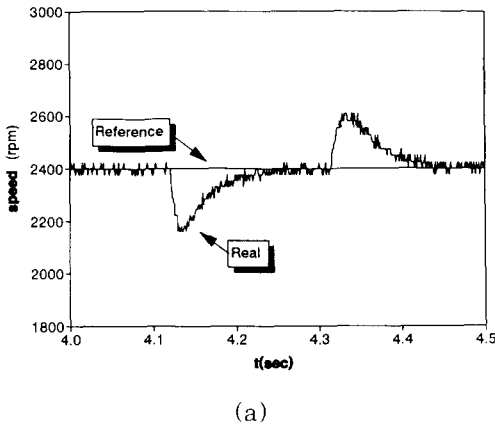


그림 12. PI 제어기의 동작특성(일정속도, 가변부하시, 실험결과)
 (a) 속도 (b) 입력전압
 Fig. 12. Response of PI controller (constant speed, varying load . experiment).
 (a) speed. (b) input voltage.

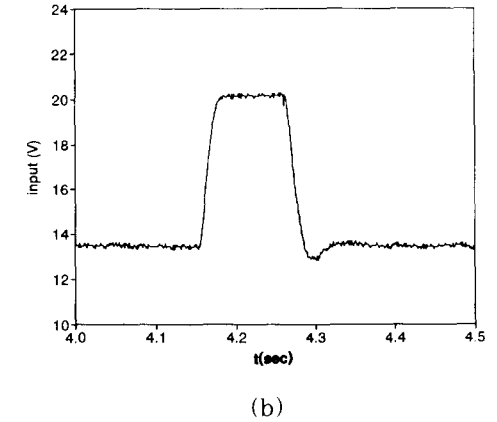
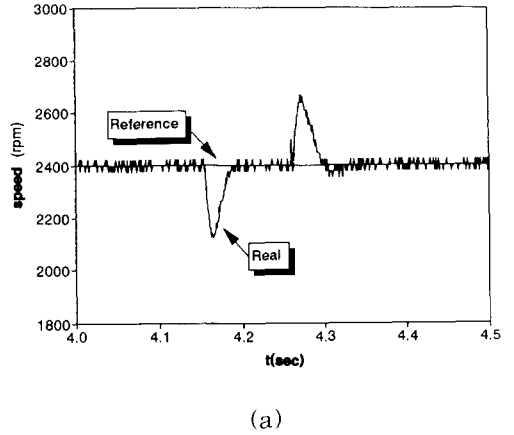


그림 13. 자기동조 제어기의 동작특성(일정속도, 가변부하시, 실험결과)
 (a) 속도 (b) 입력전압
 Fig. 13. Response of self-tuning controller (constant speed, varying load . experiment).
 (a) speed. (b) input voltage.

하면 STR은 부하변동으로 인한 매개변수 변동을 추정하려 하며, 이과정의 수렴속도에 따른 오차인 것으로 생각된다.

VII. 결 론

본 연구는 부하변동에 강인한 서보 시스템 설계를 목적으로 적응제어이론의 적용과 실현을 한 연구이다. 일정 부하운전이 아닌 부하를 예측하기 어려운 서보 전동기 운전 시스템에서 부하변동에 적응할 수 있는 제어기의 실현은 매우 유용하다. 본 연구에서는 가변 부하운전에 적합한 자기동조제어이론에 기초한 제어기를 제안하였다. 적용적으로는 순환형 최소자승법을 이용하였고 제어책으로는 최소분산제어기를 수정 적용하였다. 또한 그의 실현을 고속연산 신호처리용 프로세서인 TMS320C25 고정소속점 프로세서로 하였고, 알고리즘 적용이 용이하도록 PC에서 프로그램 개발, 디버깅, monitoring 등을 할 수 있게 하였다. 기존의 제어기인 PI제어기와 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과를 통하여 PI제어기는 부하 동작점이 변화했을 때 부하변동을 적절히 보상하지 못함을 알 수 있었고 본연구의 적응제어기는 부하변동에 의한 시스템 매개변수의 변화를 추정하고 제어기를 조정하여 부하변동에 강인한 특성을 보였으며 서보 전동기 운전에 적합한 제어기임을 입증하였다.

參 考 文 獻

- [1] B.K. Bose, Power Electronic and AC drive, Prentice Hall, 1986.
- [2] Astrom, K.J. and B. Witternmark, "On self-tuning regulators", Automatica 9, 1973, pp185-199.
- [3] Clark, D.W. and J.P. Gawthrop, "Self-tuning controller", Proc. IEE, vol. 122(a), 1975, pp929-934.
- [4] Isermann, R., Lachmann, K.-H. and Matko, D., Adaptive control systems, Prentice Hall, 1992, pp70-71
- [5] Astrom, K.J., Witternmark, B., and Westerburg, B., "Self tuning controllers based on pole placement design", Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1978
- [6] Wellstead, P.E., Edmunfs, J.M., Prager, D. and Zanker, P., "Self-tuning pole/zero assignment regulators", INT. J. CONTROL, 1979, vol. 30, no. 1, pp1-26
- [7] Grimble, M., "Generalized Minimum Variance Controller revisited", Optimal Control Application & Methods, 1988, vol. 9, pp63-77
- [8] Brickwedde, A., "Microprocessor-based adaptive speed - and position - control for electrical drives", IAS Annual meeting, 1984, pp. 411-417
- [9] Furuta, K., Kosuge, K. and Kobayashi, H., "Self-tuning, sliding mode and adaptive control for direct drive motor", IECON '88, pp459-465
- [10] T.R. Fortescue, L.S. Kershenbaum, B. E. Ydstie, "Implementation of self-tuning regulator with variable forgetting factors", Automatica, V17, 1981, pp831-835.
- [11] Goodwin, G.C. and H. Elliott, "Deterministic convergence of a self-tuning regulator with covariance resetting", IEE PROC. V130, Pt. D, no. 1, pp6-8.
- [12] Goodwin, G.C. and K.S. Sin, Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984.
- [13] Eduard Eitelberg, "A regulating and tracking PI(D) controller.", INT. J. CONTROL, vol. 45, no. 1, 1987, pp91-95.

 著者紹介



吳元錫(正會員)

1962年 2月 19日生. 1985年 2月 한양대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1987年 2月 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정. 주관심분야는 전동기제어, 전력변환기, 적응제어응용, DSP응용등임.

李允鍾(正會員)

1948年 9月 14日生 1948年 2月 서울대학교 전기공학과 졸업. 1971年 2月 한양대학교 대학원 전기공학과(공학박사) 현재 한양대학교 공과대학 전기공학과 명예교수. 주관심분야는 전동기설계 및 제어, 전력전자 등임.