

TDC와 ETDO를 이용한 유도무기용 전기식 날개구동장치의 위치제어

論 文
55D-8-1

A Position Control of an Electrical Fin Actuator for Guided Missile using TDC and ETDO

李榮哲[†] · 李興浩^{*}
(Young-Cheol Lee · Heung-Ho Lee)

Abstract - This paper illustrates the practical design procedure on a position control of an electrical fin actuator for the guided missile using Time Delay Control(TDC) and Enhanced Time Delay Observer(ETDO). Since TDC is robust to the model uncertainties such as the parameter variation and the external disturbance, it has been frequently used in nonlinear control systems. For a position control of an electrical fin actuator in the missile system, TDC requires the velocity sensor as well as the position sensor. To resolve the problems of the cost, the space and the malfunction due to the velocity sensor, ETDO is used as the velocity observer. ETDO is enhanced version of TDO that has the problems of the reconstruction errors and the restriction on selecting its gains. To maximize the control performance, the parameters of ETDO are optimized by using the genetic algorithm. The effectiveness of this approach is proved through a series of simulation studies and experiments, and the designed controller is compared with the typical TDC and TDC using the reduced order observer.

Key Words : Time Delay Controller, Enhanced Time Delay Observer, Genetic Algorithm, Brushless DC Motor

1. 서 론

유도무기용 날개구동장치는 유도탄의 비행방향 및 자세를 조종하기 위해 조종명령에 따라 유도탄 날개의 위치를 제어하는 장치이다. 유도무기용 구동장치는 유압식, 공압식 및 전기식이 주로 사용되지만 자성재료, 전력전자, 마이크로프로세서, 모터 설계, 배터리 등의 기술발전으로 전기식의 사용이 증대되고 있다.

유도무기용 BLDC(brushless DC) 모터 날개구동장치는 장착공간이 협소하면서도 고출력이 요구되며 포화요소와 같은 비선형성과 비행 시 발열 및 공력 등의 문제로 인한 파라미터 변동 및 외란이 존재한다. 따라서 이와 같은 문제에 잘 대처하여 제어를 설계하기 위해서는 강건 성능이 높은 현대 제어이론을 적용하는 것이 필연적이다. 근래에 슬라이딩모드 제어기(Sliding Mode Control)[1-2], H_{∞} 제어기[3-5] 등 여러 가지 강건 제어 알고리즘들이 제안되었으나 본 논문에서는 구조가 비교적 간단하고 구현하기 용이한 강건 제어기인 시간지연제어기(Time Delay Controller, TDC)[6-7]를 유도탄 날개 구동장치의 위치제어기로 사용하였다.

TDC는 제어시스템의 거동 시 측정되는 입출력 값 및 상태변수들의 정보를 이용하여 외란 및 모델 파라미터 변동량을 추정하여 전체시스템의 특성이 기준모델을 따르게 하

는 강건성이 높은 제어기이다. TDC를 이용하여 유도무기용 날개구동장치의 위치제어기를 구현하기위해 지금까지는 구동기의 위치센서 이외에 속도센서를 사용하였다. 속도센서를 사용할 경우 물리적으로 정확한 속도 정보를 얻을 수 있어 안정된 위치제어를 수행할 수 있다. 그러나 속도센서의 추가로 인해 고장률이 증대되고 유도무기의 특성상 장착공간이 검토되어야 하며 경제성 측면에서도 불리하다. 이러한 단점들을 해결하기 위해 소프트웨어적으로 구동기의 속도를 추정할 수 있는 관측기의 적용이 요구되었다. 일반적으로 많이 사용되는 감소차수관측기(Reduced Order Observer, ROO)의 경우 시스템 모델을 이용하여 제어입력과 측정 가능한 신호로부터 관측하고자하는 상태 값을 추정하지만 유도무기용 구동시스템의 경우 비선형성 및 파라미터 변동 등의 요인으로 큰 추정 오차가 발생할 수 있으므로 시스템 모델 변동에 둔감한 관측기에 대한 연구가 진행 되었다.

최근 시간지연제어기의 개념을 이용한 시간지연관측기(Time Delay Observer, TDO)[8]가 제안되었으나 관측기 이득 선정의 제한과 저주파수에서 불확실성에 대한 재구성 오차의 문제가 발견되어, 이를 보완한 향상된 시간지연관측기(Enhanced Time Delay Observer, ETDO)[9]가 제안되었다. ETDO는 동적 필터를 도입함으로써 TDO의 단점을 해결할 뿐만 아니라 설계 시 모델이 필요하지 않아 시스템 동특성이 불확실해도 설계가 가능하며 파라미터 변동 및 외란에 둔감하며 구조가 비교적 간단하여 실제 시스템에 용이하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 구동기의 속도를 관측하기 위하여 ETDO를 사용하였으며 관측된 신호를 이용하여 유도무기용

[†] 교신저자, 正會員 : 國防科學研究所 責任研究員

E-mail : lyc7170@paran.com

^{*} 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授. 工博

接受日字 : 2006年 4月 5日

最終完了 : 2006年 6月 28日

BLDC 모터 날개구동장치의 위치제어기로 TDC를 설계 및 구현을 한다. TDC는 기준모델을 추종하는 특성을 갖고 있기 때문에 구현 시에 시스템의 요구조건을 이용하여 기준모델을 정하고 이를 이용하여 TDC의 파라미터를 결정한다. 그러나 ETDO를 설계할 때는 관측기의 오차 특성 근의 위치가 시스템 전체의 제어 특성에 큰 영향을 주기 때문에 시스템 제어 특성 측면에서 최적의 오차 특성 근을 정하는 방법이 필요하다. 이를 위하여 제어기의 위치오차와 제어입력을 이용하여 평가함수를 만들고 유전알고리즘[11-13]을 적용하여 최적의 관측기 이득을 선정한다. 설계된 유도무기용 BLDC 모터 날개구동장치 위치제어기의 성능 평가와 강건성 및 유용성을 알아보기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행한다.

2. TDC와 ETDO

2.1 TDC

비선형 단일 입출력 시스템의 동적 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = A(x,t)x(t) + B(t)u(t) + d(t) \quad (1)$$

여기서

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_r \end{bmatrix}$$

$$x \in R^{n \times 1}, A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times 1}$$

여기서 $x(t)$ 는 플랜트 상태변수, $u(t)$ 는 플랜트 입력, A 는 선형 또는 비선형 동특성 행렬, B 는 입력행렬, $d(t)$ 는 외란 벡터이다. 제어시스템의 기준입력 $r(t)$ 에 대한 특성을 따르고자 하는 기준모델의 방정식은 다음 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t) \quad (2)$$

여기서

$$x_m = \begin{bmatrix} x_{m1} \\ x_{m2} \\ \vdots \\ x_{m(n-1)} \\ x_{mn} \end{bmatrix}, A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_{m1} & -a_{m2} & -a_{m3} & \dots & -a_{mn} \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_{mr} \end{bmatrix}$$

$$x_m \in R^{n \times 1}, A_m \in R^{n \times n}, B_m \in R^{n \times 1}$$

실제 플랜트와 모델 상태변수의 오차 e 는 다음 식 (3)을 만족한다.

$$\dot{e} = A_e e + (A_m + K)e \quad (3)$$

여기서

$$e(t) = x(t) - x_m(t)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ K_r \end{bmatrix}, K \in R^{n \times n}, K_r \in R^{1 \times n}, A_e \in R^{n \times n}, 0 \in R^{(n-1) \times n}$$

위에서 K 는 임의로 정해서 오차의 0 값에 대한 수렴속도를 규정한다. 식 (3)에서 규정한 오차 동특성에 따라 식 (1)

의 플랜트가 식 (2)의 기준모델을 추종하기 위한 시간지연 제어법칙은 다음과 같이 주어진다.[6-7]

$$u(t) = u(t-L) + (1/b_r)[-x_n(t-L) - a_{mn}x_n(t) - \dots - a_{m1}x_1(t) + b_{mr}r(t) + K_r e(t)] \quad (4)$$

식 (4)의 L 은 시간지연 양이다. 여기서 입력 값은 플랜트와 모델의 현재 또는 지연된 시간에서의 상태변수들로 구성되어 있지만 플랜트의 동특성(a_1, a_2, \dots, a_n)이나 외란 $d(t)$ 등은 나타나 있지 않으므로 플랜트의 파라미터 변동과 외란에 강인함을 알 수 있다.

2.2 ETDO

비선형 단일 입출력 시스템을 다음의 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}^{(n)} &= f(x) + g(x)u + d \\ y &= x \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 x 는 상태벡터 $[x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$, u 는 입력, y 는 출력, $f(x)$ 는 모르는 비선형, $g(x)$ 는 알고 있는 범위의 비선형항, d 는 모르는 외란이다. 식 (5)를 위상변수 형태로 재배열하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= E_n x + \hat{F}(x, u) + \hat{G} \cdot u \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$$E_n = \begin{bmatrix} 0_{(n-1) \times 1} & I_{(n-1)} \\ 0_{1 \times n} & \end{bmatrix}, \hat{F}(x, u) = \begin{bmatrix} 0_{(n-1) \times 1} \\ \hat{f}(x, u) \end{bmatrix}$$

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} 0_{(n-1) \times 1} \\ \hat{g} \end{bmatrix}, C = [1 \ : \ 0_{1 \times (n-1)}]$$

$0_{i,j}$ 는 모든 엘리먼트가 영인 행렬, I_k 는 $k \times k$ 유닛행렬, \hat{g} 은 $g(x)$ 의 알고 있는 영역의 상수이며, $\hat{f}(x, u)$ 는 전체 시스템 불확실성 항으로써 다음과 같이 표현한다.

$$\hat{f}(x, u) = f(x) + g(x) \cdot u + d - \hat{g} \cdot u \quad (7)$$

식 (6)에서 다음과 같은 형태의 관측기가 가능하다고 가정한다.

$$\dot{z} = E_n z + \hat{F}(z, u) + \hat{G}u - K(z - y) \quad (8)$$

여기서 $z \in R^n$ 은 재구성 상태벡터, K 는 관측기 이득행렬이며, 관측오차 $e = z - x$ 는 다음과 같이 지수 함수적으로 수렴하는 동특성이며 K 값을 적당히 선택하여 수렴속도를 조절할 수 있다.

$$\dot{e} = (E_n - KC)e \quad (9)$$

관측기를 구현하기 위해서는 식 (7)의 $\hat{f}(x, u)$ 를 추정하여야 한다. 우선 $\hat{f}(x, u)$ 를 연속함수로 가정할 때 L 이 충분히 작은 시간지연 간격이면

$$\hat{f}(x, u) \approx \hat{f}(x_{-L}, u_{-L}) \quad (10)$$

이다. 둘째, 식 (6)과 식 (10)에서 다음의 추정치를 얻을 수 있다.

$$\hat{f}(x, u) = \dot{x}_n - \hat{g}u \approx \dot{x}_{n-L} - \hat{g}u_{-L} \quad (11)$$

이때, 식 (9)의 오차 동특성의 수렴속도가 충분히 빠르다고 가정하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\hat{f}(x, u) \approx \dot{z}_{n-L} - \hat{g}u_{-L} \quad (12)$$

식 (8)에서 식 (12)를 빼고, 정적 필터를 도입하면 식 (13)과 같이 TDO 식이 된다.[8]

$$\dot{z} = E_n z + \alpha [0_{1 \times (n-1)}, \dot{z}_{n-L} - \hat{g}u_{-L}]^T + \hat{G}u - K(z_1 - y) \quad (13)$$

α 는 정적필터 상수이다. TDO에 1차 저역필터를 적용하면 다음과 같이 ETDO의 구조[9]로 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= E_n z + [0_{1 \times (n-1)}, v]^T + \hat{G}u - K(z_1 - y) \\ \dot{v} &= -a.v + a[\dot{z}_{n-L} - \hat{g}u_{-L}] \end{aligned} \quad (14)$$

a 는 저역필터의 차단주파수이며 v 는 필터의 상태변수이다. ETDO의 오차 동특성[9]은 식 (6)과 식 (14)로부터 유도할 수 있다.

$$\dot{e}_{ol} = A_{ol} e_{ol} + \Psi_{etdo} \quad (15)$$

여기서

$$e_i = z_i - x_i, e_{ol} = [e_1, e_2, \dots, e_{n+1}]^T, e_{n+1} = \dot{e}_n$$

$$A_{ol} = \begin{bmatrix} -K_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -K_2 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -K_{n-1} & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ \frac{(-a+K_1)K_n}{1+aL} & -\frac{K_n}{1+aL} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{etdo} = [0_{1 \times n}, \psi_{etdo}]^T, \psi_{etdo} = -\left\{ \frac{d}{dt}(\hat{f}(x, u)) + \frac{2aL}{1+aL} O(L) \right\}$$

식 (15)로부터 다음과 같이 특성 방정식을 구할 수 있다.

$$s^{n+1} + K_1 s^n + K_2 s^{n-1} \dots + K_{n-1} s^2 + \frac{K_n}{1+aL} s + \frac{aK_n}{1+aL} = 0 \quad (16)$$

플랜트가 2차 시스템이라고 가정하면 ETDO와 특성방정식은 다음과 같다.

$$\dot{z}_1 = z_2 - K_1(z_1 - y) \quad (17)$$

$$\dot{z}_2 = v + \hat{g}u - K_2(z_1 - y)$$

$$\dot{v} = -a.v + a[\dot{z}_{2-L} - \hat{g}u_{-L}]$$

$$s^3 + K_1 s^2 + \frac{K_2}{1+aL} s + \frac{aK_2}{1+aL} = 0 \quad (18)$$

오차동특성의 특성방정식과 임의의 원하는 극점 $(-\lambda_1, -\lambda_2, -\lambda_3)$ 을 가지는 방정식의 계수들을 비교하면 3개의 방정식을 얻는다.

$$K_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \quad \frac{1}{1+aL} K_2 = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_3, \quad (19)$$

$$\frac{a}{1+aL} K_2 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$$

이들 방정식으로부터 ETDO의 이득 K_1, K_2, a 를 구한다.

3. 전기식 날개구동장치의 위치제어기 설계

3.1 BLDC 모터 구동장치 모델링

일반적인 3상 BLDC 모터는 3개의 전류 동특성을 갖는다. 회전하는 회전자에 동기된 직교 좌표계로의 변환을 통하여 3상 BLDC 모터의 $d-q$ 모델을 얻을 수 있다. 자기포화가 없으며 일정 공극이라는 가정을 하면 BLDC 모터의 $d-q$ 모델은 다음과 같이 나타난다.

$$V_q = R_m i_q + L_m \frac{di_q}{dt} + L_m i_d \omega_r + \lambda_m \omega_r \quad (20)$$

$$V_d = R_m i_d + L_m \frac{di_d}{dt} - L_m i_q \omega_r \quad (21)$$

$$T_m = K_T i_q \quad (22)$$

여기서 R_m 과 L_m 은 각각 모터의 저항값과 인덕턴스, λ_m 은 회전자의 영구자석에 의한 쇄교자속 (flux linkage)의 크기, K_T 는 토크 상수, ω_r 은 전기적 각속도를 나타낸다.

본 연구에서와 같이 BLDC 모터를 홀센서(Hall sensor)를 이용한 구형파 구동을 할 경우, 모터에 인가되는 전압은 q 축에 동기되며, 이때 d 축 성분의 전류는 무시할 수 있으므로 식 (20)과 식 (21)은 다음과 같이 하나의 식으로 근사화 할 수 있다.

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_m}{L_m} i_q - \frac{\lambda_m}{L_m} \omega_r + \frac{1}{L_m} V_q \quad (23)$$

또한 모터의 기계 방정식과 각속도 관계식은 다음과 같다.

$$T_m = J_m \dot{\omega}_m + B_m \omega_m + T_L \quad (24)$$

$$\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m \quad (25)$$

$$K_B = \frac{p}{2} \lambda_m \quad (26)$$

여기서 p 는 모터의 극수이다. 식 (23)~(26)을 이용한 선형화된 BLDC 모터의 블록선도는 그림 1과 같다.

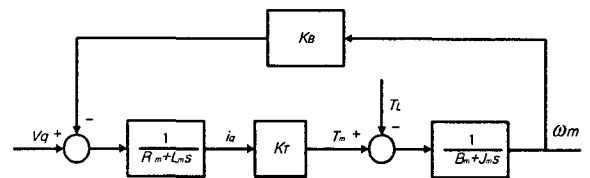


그림 1 BLDC 모터 선형화 블록선도
Fig. 1 Linearized block diagram of BLDC motor

선형화된 BLDC 모터 구동장치의 모델을 위상변수 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\tau_m} \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_r \end{bmatrix} u(t) + d \quad (27)$$

τ_m 과 b_r 은 다음과 같이 각각 기계적 시상수 및 입력 이득이다.

$$\tau_m = \frac{R_m J_e}{R_m B + K_T K_B}, \quad b_r = \frac{K_T}{R_m J_e N}$$

여기서, R_m 은 모터저항, B 는 비스코스 댐핑 계수, J_e 는 관성, K_T 는 토크상수, K_B 는 역기전압 상수, N 은 기어비이다.

3.2 TDC 설계

식 (2)에서 기준모델을 다음과 같이 2차 시스템으로 설정하고 고유진동수 ω_n 과 감쇠비 ζ 를 선정한다.

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} x_m + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} r \quad (28)$$

식 (4),(27),(28)에서부터 다음과 같이 TDC 제어 입력식을 얻을 수 있다.

$$u(t) = u(t-L) + (1/b_r) [-\dot{\omega}(t-L) + 2\zeta\omega_n\omega(t) - \omega_n^2\theta(t) + \omega_n^2 r(t)] \quad (29)$$

3.3 ETDO 설계

식 (6)에서 다음과 같이 식들을 유도할 수 있다.

$$E_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{f}(x,u) = -1/\tau_m \cdot \omega(t), \quad (30)$$

$$\hat{g} = b_r, \quad \hat{C} = [10]$$

식 (17)에서 BLDC 모터 구동장치의 ETDO 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_1 &= z_2 - K_1(z_1 - y) \\ z_2 &= v + b_r \cdot u - K_2(z_1 - y) \\ \dot{v} &= -a \cdot v + a \cdot [z_2 - L - b_r \cdot u - L] \end{aligned} \quad (31)$$

ETDO의 파라미터를 선정하기 위한 절차는 다음과 같다.

- 1) 시간지연(L) = 샘플링 주기(T)
- 2) $\hat{g} = b_r$
- 3) 시스템 차수가 2차이므로 오차동특성은 3차로 한다.

$$s^3 + A_1 s^2 + A_2 s + A_3 = 0 \quad (32)$$

4) 식 (18)과 식 (32)의 계수를 비교하면 다음의 K_1, K_2, a 를 얻을 수 있다.

$$K_1 = A_1, \quad K_2 = A_2 + A_3 \cdot L, \quad a = A_3/A_2$$

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

유도무기용 BLDC 모터 날개구동장치의 위치제어기를 설계하고 파라미터를 선정하기 위해 MATLAB™/SIMULINK 툴을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 블록은 그림 2와 같이 위치제어기로 사용된 TDC, 속도관측을 위해 사용된 ETDO, 와인드업방지 보상기[10], 선형화된 BLDC 모터, 감속기구, 백래시 및 강성모델로 구성되어 있다.

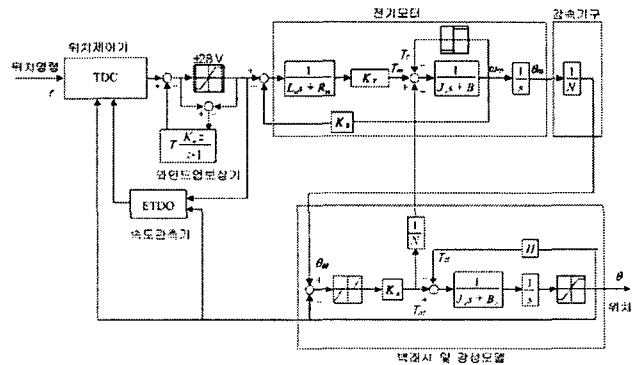


그림 2 BLDC 모터 날개구동장치 시뮬레이션 블록
Fig. 2 Simulation block of BLDC motor fin actuation system

설계된 제어기에서 모델 추종을 위한 TDC 기준모델의 특성방정식은 식 (28)과 같이 2차 시스템으로 감쇠비 ζ 와 고유진동수 ω_n 은 시스템 요구조건으로부터 각각 0.8 및 72.3 rad/sec로 선정하였다. ETDO의 오차동특성 전달함수는 3차로 표현되며, 전달함수의 극점들의 배치에 따라 제어 시스템의 성능이 크게 영향을 받게 된다. ETDO의 오차 특성 근을 3중근으로 배치하여 적용한 예[9]가 있으나 본 논문에서는 특성 근의 위치를 더욱 넓은 범위에서 찾기 위해 한 개의 실근과 2개의 복소근으로 극점배치를 시도하였다. 구동장치의 비선형 특성으로 인해 해석적 방법으로는 극점배치가 용이하지 않으므로 유전알고리즘[11-13]을 사용하였으며 유전 알고리즘에 사용될 적합도 함수는 식 (33)과 같이 위치오차와 제어입력을 이용하여 정의하였다.

$$F(t) = \int_0^{T_f} \{Qe(t)^2 + Ru(t)^2\} dt \quad (33)$$

T_f 는 최종시간(0.5 sec), $e(t)$ 와 $u(t)$ 는 각각 위치오차, 제어입력이다. Q와 R은 각 파라미터의 가중치를 의미한다.

유전 알고리즘에 사용된 변수들은 표 1과 같으며 세대 진행에 따른 각 세대의 최적치를 그림 3에 나타내었다. 표 2는 이를 통해 얻어진 ETDO의 오차동특성 전달함수 극점이다. 표 2의 결과에서 3중근 극점배치를 한 경우에 비해 실근/복소근 극점배치를 한 경우가 적합도가 작으며 효과적임을 알 수 있다.

표 1 유전알고리즘에 사용된 변수
Table 1 Parameters of genetic algorithm

Population Size	10
Generations	50
Number of Variables	3 (실수근, 복소근의 실수/허수 값)
Number of Bits/variables	10
Selection	Ranking
Crossover	25%
Mutation	10%

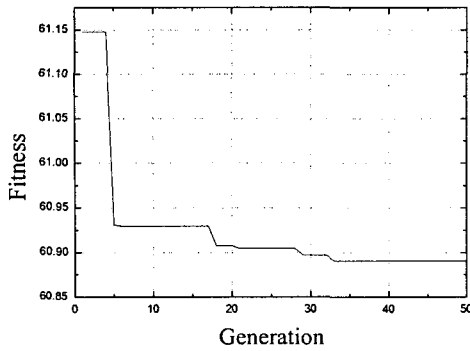


그림 3 세대에 따른 최적치 변화
Fig. 3 Optimal fitness of each generation

표 2 극점 배치형태에 따른 최적 극점 및 적합도
Table 2 Optimal poles and fitness for pole placements

극점 배치형태	극점(rad/sec)			적합도
	$-\lambda_1$	$-\lambda_2$	$-\lambda_3$	
3중근	-504.68	-504.68	-504.68	61.82
실근 및 복소근	-1183.3	-102.2 + 520.5i	-102.2 - 520.5i	60.89

표 3은 BLDC 모터 날개구동장치의 시뮬레이션을 위해 사용된 파라미터이며 본 논문에서 제안된 TDC+ETDO(향상된 시간지연관측기를 사용한 TDC)의 성능을 확인하기 위해 TDC+TACHO(속도센서를 사용한 TDC) 및 TDC+ROO(감소차수관측기를 사용한 TDC)와 비교하였다. 또한, 공칭 상태에서의 계단응답 및 공력모사를 위한 스프링 부하상태에서의 계단응답 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 파라미터 변동에 대한 강건성을 확인하기 위해 모터 권선 저항과 관성을 변화시켜서 시뮬레이션하였다.

표 3 BLDC 모터 날개구동장치 파라미터
Table 3 Parameters of BLDC motor fin actuation system

Symbol	Description	Value	Unit
B	Motor viscous damping	8.73×10^{-5}	lb-in/(deg/sec)
Je	Equivalent inertia	4.36×10^{-6}	lb-in-sec ²
Kb	Back emf constant	0.0013	volt/(deg/sec)
KT	Torque constant	0.6812	lb-in/amp
Lm	Motor inductance	0.37	mH
Rm	Motor resistance	1.5	ohm
N	Gear ratio	150	-
Ba	Link viscous damping	0.0175	lb-in/(deg/sec)
Ja	Link inertia	4.27×10^{-4}	lb-in-sec ²
Ka	Link stiffness	2000	lb-in/deg
Kw	Anti-windup compensator gain	150	-
T(L)	Sampling Time	0.001	sec

그림 4는 공칭 상태에서의 TDC+ETDO, TDC+TACHO 및 TDC+ROO에 대한 5° 계단응답 시뮬레이션 결과이다. TDC+ROO의 경우 5° 계단응답에 대해 TDC+ETDO의 응답특성과 거의 흡사하도록 시행착오의 방법으로 ROO의 파라미터를 조정하였다. 시뮬레이션 결과, 그림 4에서와 같이 사용된 세 가지의 위치 제어기 모두 유사한 응답을 보이며 상승시간이 약 40ms, 최대 오버슈트가 약 3%로 안정된 응답특성을 보였다. 그림 5는 모터의 저항이 2배 변동하였을 경우 TDC+ETDO, TDC+TACHO 및 TDC+ROO에 대한 계단응답 결과이다. 모두 상승시간이 공칭상태(40ms)에 비해 약 54ms로 증가함을 볼 수 있으며, TDC+ETDO와 TDC+TACHO의 경우 저항변화에 대해 최대 오버슈트가 약 3%로 거의 변화가 없이 안정하지만 TDC+ROO의 경우는 7%로 불안정해짐을 알 수 있다. 그림 6은 모터의 관성이 2배 변동하였을 경우에 대한 계단응답 결과이다. 모두 상승시간이 공칭상태에 비해 44ms로 약간 증가함을 볼 수 있으며, TDC+ETDO와 TDC+TACHO의 경우 관성변화에 대해 최대 오버슈트가 약 3%로 거의 변화 없이 안정하지만 TDC+ROO의 경우는 9%로 불안정해짐을 알 수 있다. 그림 7은 스프링 부하가 존재할 경우에 대한 계단응답 결과이다. 모두 상승시간이 공칭상태에 비해 약 46ms로 약간 증가함을 볼 수 있으며, TDC+ETDO와 TDC+TACHO의 경우 스프링 부하에 대해 정상상태 오차가 없이 5° 계단명령을 잘 추종하지만 TDC+ROO의 경우는 정상상태오차가 0.26°, 즉 5.2% 존재함을 알 수 있다. 따라서 TDC+ETDO는 시스템 파라미터 변동 및 스프링 부하 시 TDC+TACHO와 유사하게 정상상태오차 없이 강건한 응답을 보여준 반면, TDC+ROO는 파라미터 변동에 다소 불안정한 응답을 보이며 스프링 부하 시 정상상태오차가 존재함을 알 수 있다.

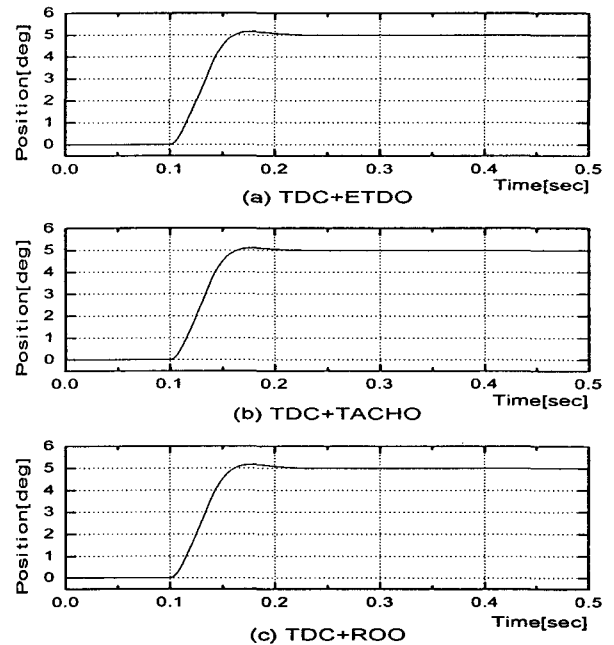


그림 4 공칭 조건에서의 계단응답 시뮬레이션
Fig. 4 Simulation of step response at nominal condition

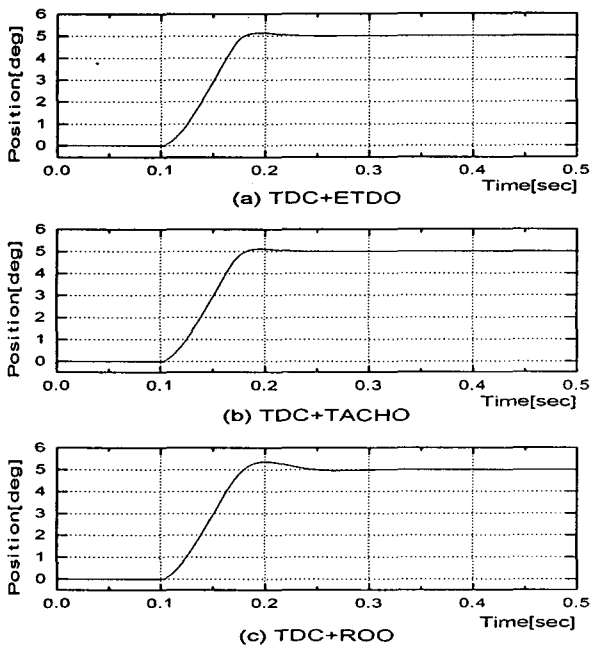


그림 5 저항 2배 변화시 계단응답 시뮬레이션
Fig. 5 Simulation of step response with resistance variation ($R \leftarrow R \times 2$)

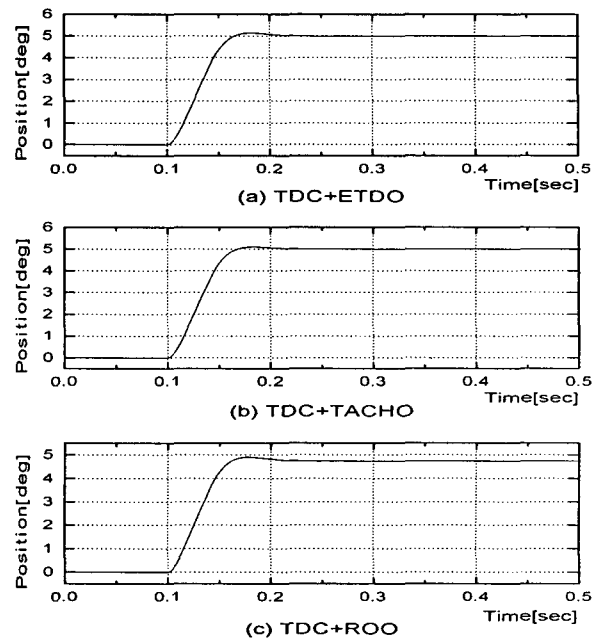


그림 7 스프링부하(130 lb-in/deg)시 계단응답 시뮬레이션
Fig. 7 Simulation of step response with spring load ($H=130$ lb-in/deg)

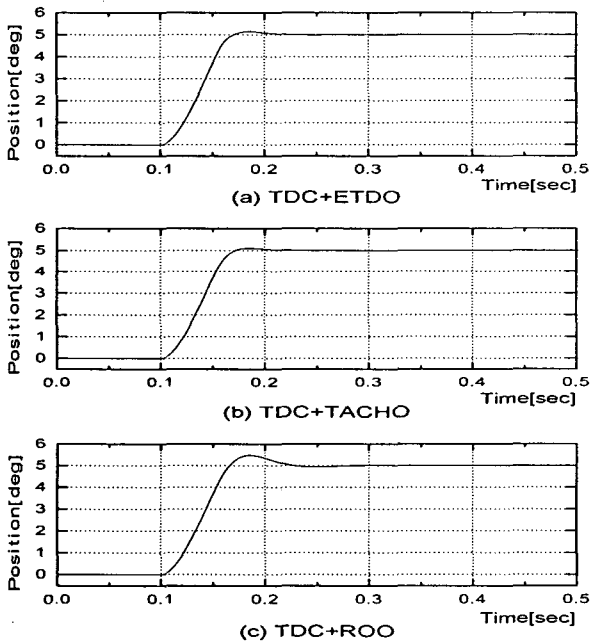


그림 6 관성 2배 변화시 계단응답 시뮬레이션
Fig. 6 Simulation of step response with inertia variation ($J_e \leftarrow J_e \times 2$)

4.2 실험

유도무기용 날개구동장치는 유도탄의 비행자세 및 방향을 조종하기 위해 날개구동기를 구동 및 제어하는 장치이다. 유도탄이 비행 중에는 유도탄의 속도, 자세 등에 의해 외란 및 파라미터 변동 특성이 발생한다. 이러한 특성을 갖고 있는 날개구동장치의 위치제어를 위해서 강건성능이 우수한 TDC와 ETDO를 적용하여 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있었던 성능을 확인하기 위한 실험을 하였다.

이러한 실험을 위해서 표 4와 같은 설계 요구조건을 만족하도록 BLDC 모터를 이용한 유도무기용 날개 구동장치를 제작하였다. 날개구동장치의 성능평가는 공칭상태의 조건 외에도 부하외란이 있는 경우에 대한 실험적 성능 입증 이 중요하다. 즉, 유도탄이 비행운동을 할 때의 부하 환경상태와 유사한 경우의 구동장치 응답특성을 평가할 수 있는 장치가 필요하다. 유도탄이 비행운동을 할 때 공기력으로 인하여 날개 면에 힘이 가해지며 이 힘이 구동장치 측면에서 보면 부하로 작용한다. 이 부하를 공력부하라고 하며 이는 날개의 위치에 비례하여 증가하는 특성을 갖고 있다. 따라서 공력부하를 모사하기 위하여 팬스프링을 이용하여 구동장치 실험장치를 제작하였다.

표 4 구동장치 하드웨어 설계 요구조건

Table 4 Design requirements of actuation system

항목	설계조건
상승시간	공칭조건(5°계단명령, 무부하): 50ms이하 부하조건(5°계단명령, 130 lb-in/deg부하) : 60ms 이하
정상상태오차	±0.1° 이하
샘플링 시간	1 ms
주파수대역폭	9 Hz 이상
A/D 변환기 해상도	12 bit (1bit = 0.008°)
통신방식	MIL-STD-1553B통신
출력신호	위치, 속도, 제어입력
입력신호	위치명령

4.2.1 실험구성 및 내용

그림 8과 그림 9는 BLDC 모터 날개 구동장치의 실험사진과 실험구성도이다. 날개구동장치는 유도탄의 날개를 움직이게 하기위한 날개구동기와 이를 제어하기위한 디지털 서보제어기로 구성되어 있다.

날개구동기는 BLDC 모터, 동력전달장치 및 위치센서로 구성되어 있다. BLDC 모터는 홀센서가 내장되어 있으며 6스텝 구동방식으로 동작하며, 동력전달장치는 스퍼기어, 볼스크류 및 링크로 구성되어 전체기어비가 150:1 이다. 또한 날개의 위치센서로 포텐서미터를 사용하였다.

디지털 서보제어기는 크게 CPU, MIL-STD-1553B 통신 모듈, A/D 변환기, FPGA(Field Programmable Gate Array), 3상 인버터 등으로 구성된다. CPU는 설계된 제어 알고리즘의 연산을 수행하며, MIL-STD-1553B 통신모듈은 항공기 및 유도탄에 널리 사용되는 군사용 통신방식으로 유도탄 내의 여러 장비간의 데이터 송수신 기능을 수행한다. 본 실험에서는 실험장치 콘솔과 디지털 서보제어기 간의 데이터 송수신에 사용되었다. A/D 변환기는 위치센서(포텐서미터)로부터 출력된 아날로그 신호를 디지털로 변환시키는 기능을 하며, FPGA는 BLDC 모터의 홀센서 신호와 제어입력신호를 받아 PWM(Pulse Width Modulation) 스위칭 신호를 발생시킨다. 또한, 3상 인버터는 PWM 스위칭 신호를 받아 BLDC 모터를 구동하기 위해 5Volt 전압을 28Volt로 증폭시키는 기능을 하며 6개의 FET 소자로 구성되어 있다.

실험장치는 표 5와 같은 설계조건을 이용하여 제작되었으며 그 구성은 날개의 관성과 공력부하를 모사하기 위한 부하실험장치와 실험결과를 계측하기 위한 실험장치 콘솔로 되어있다. 실험장치 콘솔은 IBM PC 계열의 컴퓨터와 MIL-STD-1553B통신모듈을 이용하여 날개구동장치에 위치명령을 송신하고 날개구동장치로부터 각종 신호를 수신하여 저장하고 분석하는 장치이고, 부하실험장치에는 날개와 동일한 관성을 갖는 디스크가 부착되어 있으며 유도탄 비행시의 공력부하를 모사하기위해 판스프링이 사용되었다. 유도탄의 받음각(angle of attack)에 비례하여 공력부하가 증가하는 특성을 이용하여 구동기의 위치각에 비례하여 부하

가 증가하도록 판스프링을 제작하였다. 또한 판스프링의 길이를 조정하여 부하토크의 양을 조정하도록 하였으며 이때의 출력토크를 측정하기 위해 토크센서를 부하실험장치의 판스프링 끝단에 장착하였다.

표 5 실험장치 하드웨어 설계조건

Table 5 Design requirements of test equipment

항목	설계조건
통신 샘플링 시간	2 ms
통신방식	MIL-STD-1553B 통신
출력신호	위치명령
입력신호	위치, 속도, 제어입력
부하조건	130 lb-in/deg

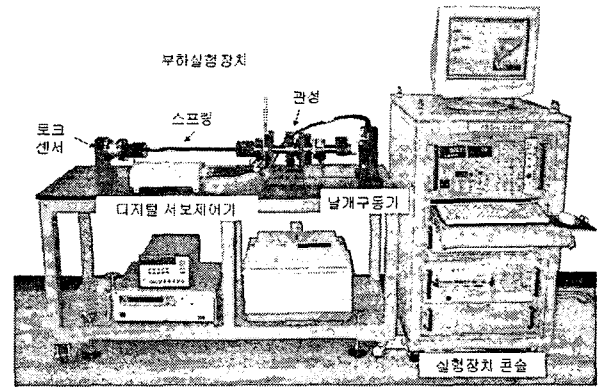


그림 8 날개구동장치의 실험 사진
Fig. 8 Picture of fin actuation system test

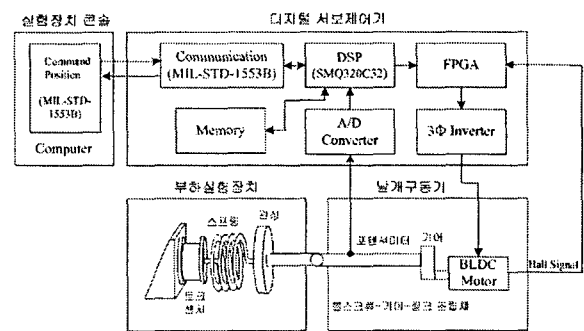


그림 9 날개구동장치 실험 구성도
Fig. 9 Test structure of fin actuation system

BLDC 모터 날개 구동장치의 위치제어기의 성능을 확인하고 비교하기위해 TDC+ETDO, TDC+TACHO 및 TDC+ROO의 3가지 제어기에 대해 실험을 하였으며 실험내용은 표 6과 같다. 공칭조건 및 스프링부하시 계단응답실험은 5° 명령에 대해 3가지 제어기의 위치, 속도 및 제어입력신호를 비교 분석한다.

표 6 실험내용

Table 6 Test contents

실험항목	실험내용
공칭조건 계단응답	* 외부부하(스프링 부하)가 없는 상태에서의 5° 계단응답 실험 * 과도상태와 정상상태에서의 응답특성 확인
공칭조건 추종특성	* 정현파 명령(5°, 0.1Hz)에 대한 응답 실험 * 저주파수에서의 추종특성 확인
부하조건 계단응답	* 토크부하(130 lb-in/deg)가 있는 상태에서의 5° 계단응답 실험 * 과도상태와 정상상태에서의 응답특성 확인

4.2.2 실험결과

그림 10은 공칭 상태에서의 TDC+ETDO, TDC+TACHO 및 TDC+ROO에 대한 5° 계단응답 실험결과이다. 그림 10에서와 같이 세 가지의 위치 제어기 모두 위치신호가 유사한 응답을 보이며 상승시간 약 40ms, 최대 오버슈트 약 3%, 정상상태오차 ±0.016°로 안정된 응답특성을 보였다. 그림 10(a)와 (c)의 속도신호는 각각 ETDO와 ROO 관측기로 계산된 신호이며 그림 10(b)의 TACHO로 직접 측정된 것 보다는 ±3deg/sec 정도의 리플이 있지만 양호한 결과를 보여준다. 제어입력 신호를 보면 TDC+ETDO와 TDC+ROO의 경우 정상상태에서 TDC+TACHO 보다 ±2Volt 정도의 리플은 있지만 둘 다 비슷한 결과를 보이며, 제어입력이 이 정도로 변화하여도 위치신호는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그림 11은 공칭상태에서의 저주파수 정현파(5°/0.1Hz) 명령에 대한 추종특성을 실험한 결과이며 세 가지 제어기 모두 양호하게 명령을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 따라서 세가지 제어기 모두 공칭상태에서는 양호한 응답특성을 보여준다.

그림 12는 스프링 부하(130 lb-in/deg)가 존재할 경우에 대한 5° 계단응답 실험결과이다. 모두 상승시간이 공칭상태에 비해 약 48~52ms로 증가함을 볼 수 있고 TDC+ETDO와 TDC+TACHO의 경우 스프링 부하에 대해 정상상태 오차가 ±0.008°로 계단명령을 잘 추종하지만 TDC+ROO의 경우는 정상상태오차가 0.21°, 즉 4.2% 존재함을 알 수 있다. 이는 스프링 부하가 있는 경우 ROO 관측기가 속도관측 오차를 보이며 정상상태에서 속도가 0으로 인식하지 못하고 약 11deg/sec로 관측됨을 알 수 있고 이에 따라 제어입력도 충분하지 못한 약 8.7Volt 정도 계속되었다. 반면 TDC+ETDO는 TDC+TACHO와 유사하게 부하조건에도 불구하고 속도추정이 양호함을 알 수 있고 제어입력도 동일하게 약 9.3Volt로 계속되었다. 이를 통해 유도탄 비행시 발생하는 공력부하에 대해 기존의 ROO를 적용할 경우 설계 요구조건을 만족하지 못하는 결과를 알 수 있다. 표 7은 계단응답 실험결과를 표로 요약한 것이다.

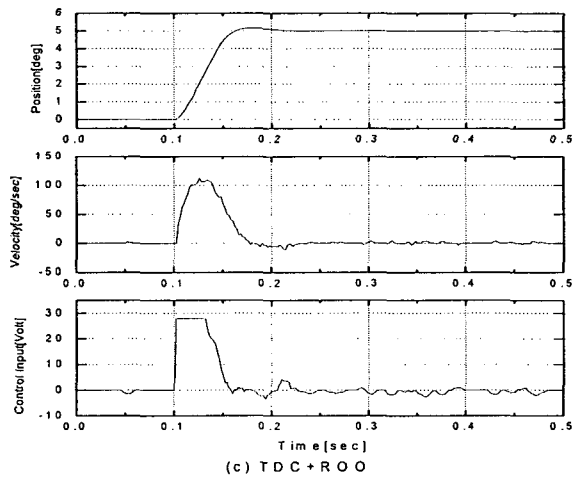
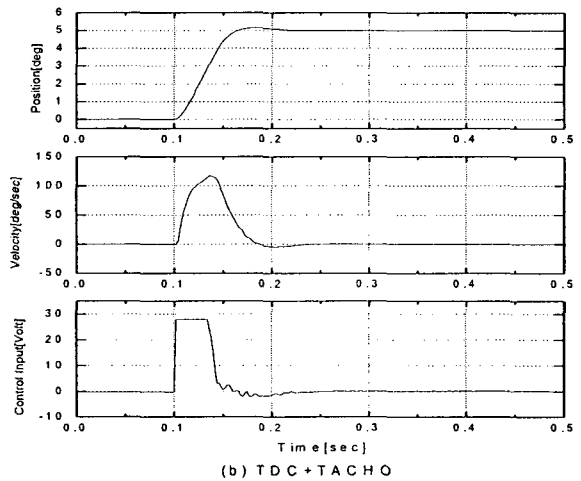
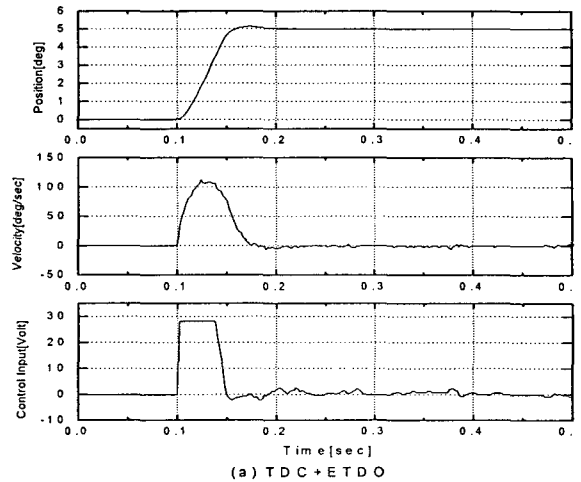


그림 10 공칭 조건에서의 계단응답 실험
Fig. 10 Test of step response at nominal condition

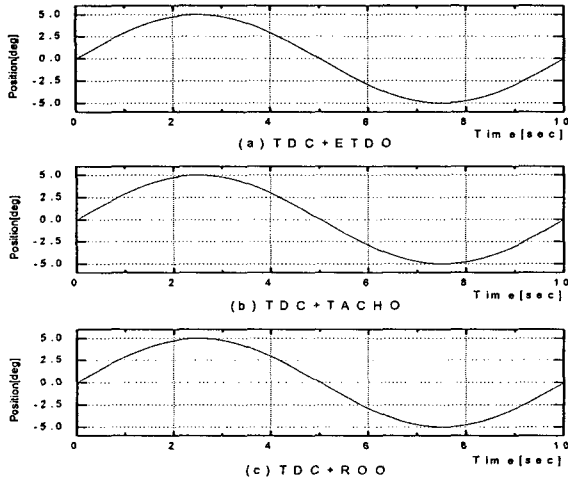


그림 11 저주파수 명령에 대한 추종특성 실험
 Fig. 11 Test of tracking performance at low frequency command

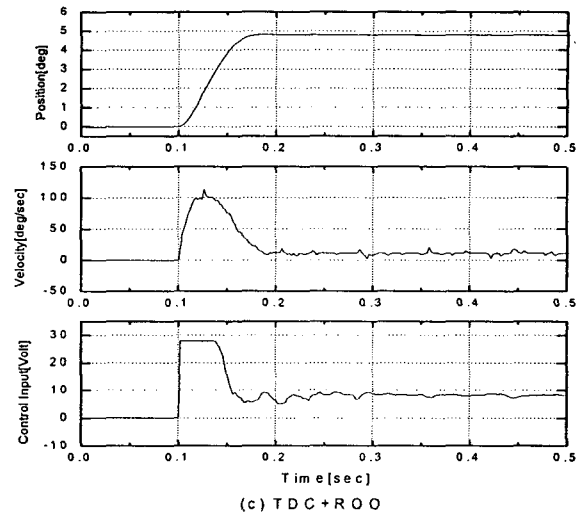
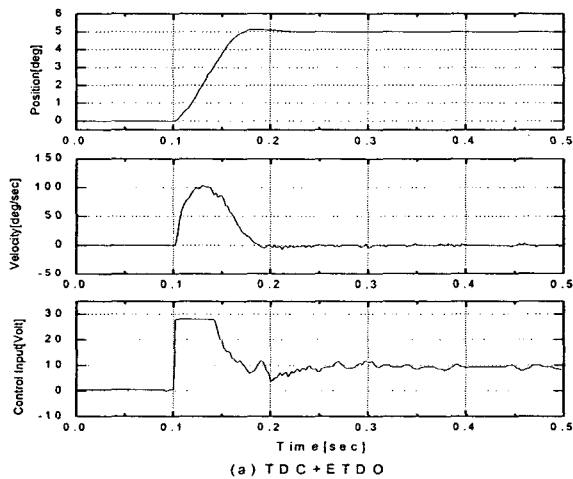
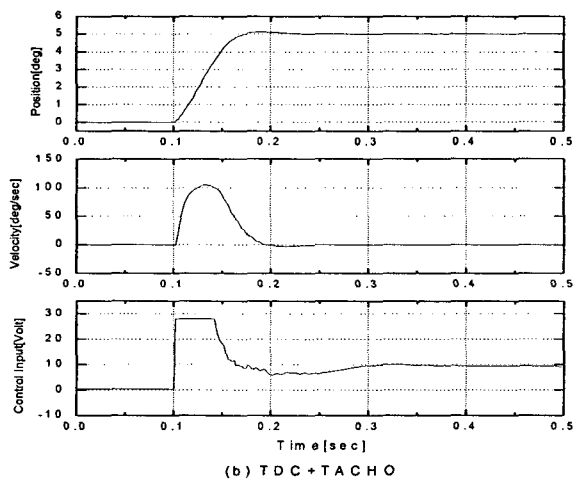


그림 12 스프링부하(130 lb-in/deg)시 계단응답 실험
 Fig. 12 Test of step response with spring load (H=130 lb-in/deg)



(a) TDC+ETDO



(b) TDC+TACHO

표 7 계단응답 실험결과
 Table 7 Test result of step response

실험 항목	위치제어기	상승시간[ms]		정상상태오차[°]	
		실험치	규정치	실험치	규정치
공칭조건 계단응답	TDC+ETDO	약 40	50 이하	±0.016	±0.1 이하
	TDC+TACHO	약 40		±0.008	
	TDC+ROO	약 40		±0.016	
부하조건 계단응답	TDC+ETDO	약 50	60 이하	±0.008	
	TDC+TACHO	약 48		±0.008	
	TDC+ROO	약 52		0.21	

5. 결 론

시간지연제어기와 향상된 시간지연관측기를 사용하여 유도무기용 BLDC 모터 날개구동장치의 위치제어기를 설계하고 유전알고리즘을 이용하여 최적의 파라미터를 선정하였다. 설계된 위치 제어기의 성능 검증과 유용성 및 강건성을 입증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 속도센서를 사용한 경우와 감속차수 관측기를 사용한 경우에 대해 성능 비교를 하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과, 제안된 제어기는 모터의 저항 및 관성 변화에 대해 3%의 최대 오버슈트 값을 보여 감속차수 관측기를 사용한 경우에 비하여 안정된 응답특성을 나타내었고 스프링 부하 시에도 정상상태오차 없이 강건한 응답특성을 보여줌으로써 모델 불확실성과 부하외란에 강건함을 확인하였다. 또한, 속도센서를 적용한 경우와 유사한 응답특성을 보임으로써 속도센서를 사용하지 않음에 따른 비용절감, 장착공간 축소 및 고장률 향상 등 긍정적인 효과를 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Slotine, J. J. E., and Sastry, S. S., "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Applications to Robot Manipulators", International Journal of Control, Vol. 38-2, pp.465-492, 1983

[2] Elmali, H. and Olgac, N., "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE) : A New Approach", International Journal of Control, Vol. 56, No. 4, pp.923-941, 1992

[3] Doyle, J. C., "Synthesis of Robust Controllers and Filters", Proceeding of IEEE Conference on Decision and Control, pp.109-114, 1983

[4] J. Doyle, K. Glover, P. Khargonekar and B. Francis, "State Space Solutions to Standard H₂ and H_∞ Control Problems", IEEE Trans. A.C., vol. 34, pp.831-846, 1989

[5] M. Safonov, D. Limebeer and R. Chiang, "Simplifying H_∞ Theory via Loop-shifting, Matrix Pencil and Descriptor Concepts", International Journal of Control, vol. 50, pp.2467-2488, 1989

[6] Yousef-Toumi, K., and Ito, O., "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics", ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 112, pp.133-142, 1990

[7] Yousef-Toumi, K., and Redy, S., "Analysis of Linear Time Invariant Systems With Time Delay", ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 114, pp.544-555, 1990

[8] P. H. Chang, J. W. Lee and S. H. Park, "Time Delay Observer: A Robust Observer for Nonlinear Plants", ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 119, pp.521-527, 1997

[9] S. H. Park and P. H. Chang, "An Enhanced Time Delay Observer for Nonlinear Systems", ICASE Transactions of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 2, pp.149-156, 2000

[10] Park Y. C., Chang W. W., and Roh H. S., "Anti-Jump Resonance Characteristics of Anti-Windup Compensator for Systems With a Saturating Actuator", KSME, Vol. 17, No. 6, pp.1342-1350, 1993

[11] David E. goldberg, "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Pub., 1993

[12] Randy L. Haupt, Sue E. Haupt, "Practical Genetic Algorithms", John Wiley & Sons Inc., 1998

[13] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms+Data Structures= Evolution Programs", Springer, 1996

저 자 소 개



이 영 철 (李榮哲)

1962년 6월 16일생. 1985년 경북대 전자공학과 졸업. 1987년 경북대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 국방과학연구소 책임연구원

Tel : 042-821-4437

Fax : 042-821-2224

E-mail : lyc7170@paran.com



이 흥 호 (李興浩)

1950년 10월 28일생. 1973년 서울대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1977년 동대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5656

Fax : 042-821-8895

E-mail : leehh@cnu.ac.kr