

비대칭외란을 고려한 2축 전동실린더의 동기제어에 관한 연구 A Study on the Synchronous Control of Two Motor Cylinders with Skew Disturbance

변 정 환
J. H. Byun

(접수일 : 2009년 10월 12일, 수정일 : 2009년 10월 23일, 채택확정 : 2009년 10월 26일)

Key Words : Motor Cylinder(전동실린더), Skew Disturbance(비대칭 외란), Synchronous Error(동기오차), Disturbance Observer(외란관측기), Lead Compensator(진상보상기), Synchronous Control(동기제어)

Abstract : A motor cylinder is widely used as an apparatus for transportation of a small scale load. It is, however, difficult for only one motor cylinder to transfer a large scale load such as a weir. The large scale load is transferred by two motor cylinders which are mounted on right and left of load itself. In this case, the displacement difference generated between two motor cylinders, namely, the synchronous error has a bad influence on the transportation. In this study, a synchronous control system is designed to restrain synchronous error caused by skew disturbance. The control system is composed of two disturbance observers and one synchronous controller. Each disturbance observer is designed to restrain the skew disturbance. And the synchronous controller is designed to achieve stable and accurate synchronization. Finally, the simulation results show that the designed control system is effective for the skew disturbance which lead to synchronous error.

1. 서 론

작업로봇이 탑재된 거더(girder)의 좌우 끝단에 2대의 모터를 설치하여 작업로봇을 이송할 경우, 모터 축간의 이동거리 차인 동기오차(synchronous error)는 거더의 원활한 주행을 방해한다¹⁾. 이와 같이 축 간에 발생하는 동기오차를 감소시키기 위한 다양한 연구가 있었다. 이들 연구는 대부분 주종축 제어와 교차결합제어에 기반을 두고 있다²⁻⁸⁾. 주종축 제어에서는 주축의 위치출력이 추종축의 입력신호로 이용되므로 구조가 간단하지만 동기오차는 추종축에 의해서만 제거된다^{2,3)}. 반면 교차결합제어에서는 구동축 간에 부가된 동기제어기가 각 구동축의 변위를 조절하여 동기오차를 감소시킨다^{4,5)}. 이때 외부입력에서 동기오차까지의 동특성을 충분히 고려하지 않고 설계된 과도한 고정이득의 동기제어기는 불필요한 부하 진동을 발생시킬 뿐만 아니라, 신속한 동기오차의 억제를 곤란하게 할 수 있다^{6,7)}.

한편 비선형마찰을 일으키는 기계요소의 조합에 의해 추진력이 발생하는 전동실린더(motor cylinder)는 제한된 범위 내에서 부하를 이송하거나 지지하는 기구로 유용하게 이용되고 있다⁸⁾. 길이가 짧고 가벼운 부하는 한 대의 전동실린더로 이송될 수 있으나, 길고 무거운 부하는 한 대의 전동실린더만으로 이송되기 어렵다. 이러한 부하는 복수의 전동실린더를 공동으로 구동하여 이송하는 것이 효율적이지만, 부하가 목표점에 도달하기까지 각 실린더의 이동변위가 연속적으로 일치되지 않으면 원활한 이송이 어렵게 될 수 있다.

따라서 전동실린더의 활용범위를 다양하게 확대하기 위해서는 실린더 간의 변위 차인 동기오차를 제거하기 위한 방안이 요구된다. 동일한 제품의 전동실린더를 구동기로 이용한다면 동기오차는 전동실린더 간의 동특성 차보다는 각각의 전동실린더에 인가되는 서로 다른 크기의 비대칭외란(skew disturbance)에 의해 발생된다.

본 연구는 비대칭외란에 의해 발생하는 전동실린더 간의 동기오차를 신속하게 제거함으로써 부하를 목표지점까지 안전하게 이송시키는 제어계의 구축

변정환(책임저자) : 전남대학교 해양기술학부
E-mail : bjh@chonnam.ac.kr, Tel : 061-659-3135

에 목적을 두고 있다. 이를 위해 다양한 기계요소로 조합된 전동실린더를 모델링 한다. 그리고 비대칭외란에 의해 발생하는 동기오차를 능동적으로 억제하기 위해 외란관측기와 동기제어기로 구성되는 동기제어계를 설계한다. 이 제어계에서 외란관측기는 동기오차를 발생시키는 각 축의 외란을 독립적으로 제거하며, 양 축에 종속되어 있는 동기제어기는 각 축의 실린더 변위를 동시에 조절하여 동기오차의 발생을 능동적으로 억제하는 역할을 한다. 이때 관측기의 필터는 외란제거성능, 관측잡음 등을 고려하여 결정되며, 동기제어기는 진동을 억제하면서 신속히 동기오차를 제거하기 위해 속응성 및 상대안정성에 유리한 동특성을 갖도록 선정된다. 끝으로 시뮬레이션을 통해 설계된 동기제어계의 유효성을 확인한다.

2. 전동실린더

전동실린더는 모터의 회전운동을 동력전달요소를 통해 직선운동으로 변환하여 부하를 이송하는 역할을 한다. 부하와 연동된 실린더 축을 이송시키는 모터 회전계에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_m \ddot{\theta}_m(t) + B_m \dot{\theta}_m(t) = T_m(t) - T_d(t) \quad (1)$$

여기서 $T_m(t)$ 는 모터토크, $T_d(t)$ 는 외란토크, $\theta_m(t)$ 는 회전각, J_m 은 질량관성모멘트, B_m 은 점성마찰계수이다.

또한 전기계에 대한 회로방정식은 다음과 같다.

$$u(t) = [L_a \dot{i}_a(t) + R_a i_a(t) + K_e \dot{\theta}_m(t)] / K_a \quad (2)$$

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (3)$$

여기서 K_a 는 증폭기이득, $u(t)$ 는 전기자 전압입력, R_a 는 전기자 저항, L_a 는 전기자 인덕턴스, $i_a(t)$ 는 전기자 전류, K_e 는 역기전력상수, K_t 는 토크상수이다.

그리고 실린더에 의해 이송되는 부하질량에 대한 병진운동방정식은 다음과 같다.

$$F_d(t) = M_l \ddot{y}(t) + B_l \dot{y}(t) \quad (4)$$

여기서 $y(t)$ 는 이송거리, M_l 는 부하질량, $F_d(t)$ 는 실린더에서 받는 힘, B_l 은 점성마찰계수이다.

그리고 모터 회전각 $\theta_m(t)$ 와 실린더 변위 $y(t)$ 에

대한 관계는 다음과 같다.

$$y(t) = \lambda \theta_m(t) \quad (5)$$

여기서 $\lambda = l/2\pi$, l 는 모터 1회전 당 실린더 변위이다. 그리고 실린더에 인가되는 외란토크 $T_d(t)$ 와 실린더로부터 받는 힘 $F_d(t)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$F_d(t) = \frac{\eta}{\lambda} T_d(t) \quad (6)$$

여기서 η 는 실린더의 마찰효율이다.

한편 비교적 작은 값인 L_a 를 무시하고 식 (1)~(6)을 전압입력 $u(t)$ 와 이동변위 $y(t)$ 에 대해 정리하면 다음 식으로 된다.

$$u(t) = K_m \ddot{y}(t) + K_b \dot{y}(t) \quad (7)$$

여기서 $K_m = \frac{R_a}{\lambda K_a K_t} (J_m + \frac{\lambda^2}{\eta} M_l)$,

$K_b = \frac{R_a}{\lambda K_a K_t} (B_m + \frac{\lambda^2}{\eta} B_l) + \frac{K_e}{\lambda K_a}$ 이다.

식 (7)을 라플라스 변환하여 전압입력 $u(s)$ 과 실린더 변위 $y(s)$ 의 관계를 구하면 다음과 같이 된다.

$$P(s) = \frac{1}{s(k_m s + k_b)} \quad (8)$$

그리고 식 (8)의 전달함수와 비례제어기 K_p 로 피드백 제어계를 구성하면, 위치지령 $r(s)$ 에서 실린더 변위 $y(s)$ 까지의 폐루프 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K_p/K_m}{s^2 + K_b/K_m s + K_p/K_m} \quad (9)$$

3. 동기제어계

3.1 동기제어계의 구조

2대의 전동실린더를 동시에 구동하여 화물을 이송하는 경우, 각 전동실린더에 인가되는 서로 다른 크기의 비대칭외란은 이송을 방해하는 요인으로 작용한다. 따라서 비대칭외란에 의해 발생하는 실린더 간의 변위 차인 동기오차를 능동적으로 억제하기 위한 제어계의 개발이 요구된다.

Fig. 1은 비대칭외란에 의해 발생하는 동기오차를 빠르게 제거하기 위해 제안된 동기제어계 구조이다. 이 제어계에서 $G(s)$ 의 공칭플랜트인 $G_n(s)$ 와 필터 $Q(s)$ 로 구성된 외란관측기는 동기오차를 발생시키

는 각 축의 외란 $d_1(s)$, $d_2(s)$ 를 독립적으로 제거한다. 그리고 양 축에 종속되어 있는 동기제어기 $C(s)$ 는 각 축의 실린더 변위 $y_1(s)$, $y_2(s)$ 를 동시에 조절하여 동기오차를 제거한다.

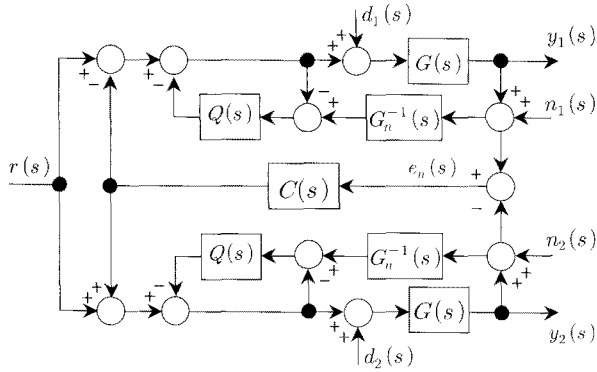


Fig. 1 The synchronous control system of two motor cylinders

한편 $e_n(s)$ 는 관측잡음 $n_1(s)$, $n_2(s)$ 를 포함한 동기오차이며, 동기오차 $e(s)$ 는 다음으로 정의된다.

$$e(s) = y_1(s) - y_2(s) \quad (10)$$

그리고 $r(s)$, $d_s(s)$, $n_s(s)$ 등의 외부입력과 동기오차 $e(s)$ 의 관계는 다음 식과 같이 된다.

$$e(s) = G(s) \frac{1}{1+L(s)} d_s(s) - \frac{L(s)}{1+L(s)} n_s(s) \quad (11)$$

$$\text{여기서 } L(s) = \frac{G(s)G_n^{-1}(s)Q(s) + 2G(s)C(s)}{1-Q(s)},$$

$$d_s(s) = d_1(s) - d_2(s),$$

$$n_s(s) = n_1(s) - n_2(s) \text{이다.}$$

식 (11)은 각 축의 외란관측기 필터 $Q(s)$ 를 먼저 결정한 후, 양 축의 위치지령에 동시에 영향을 미치는 동기제어기 $C(s)$ 를 설계하면 비대칭외란 $d_s(s)$ 에 의해 발생하는 동기오차 $e(s)$ 를 동기제어기 또는 외란관측기에만 의존하는 것보다 효과적으로 감소시킬 수 있음을 나타내고 있다.

3.2 외란관측기

동기오차를 효과적으로 제거하기 위해서는 각각의 전동실린더에 인가되는 외란을 빠르게 제거하는 것이 선행되어야 한다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 외란관측기가 부가된 위치제어계를 구성한다. 이 외란관측기는 관측된 외란 $\hat{d}(s)$ 에 근거한 보상입력 $u_d(s)$ 를 $G(s)$ 에 보상하여 외란을 억제한다⁹⁾. 이때

관측기의 성능을 결정하는 필터 $Q(s)$ 는 외란억제 및 관측잡음 등을 고려하여 결정할 필요가 있다.

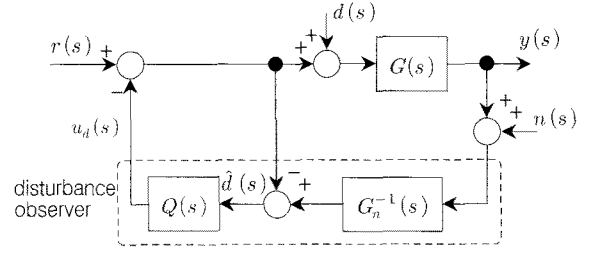


Fig. 2 The structure of a motor cylinder control system with disturbance observer

Fig. 2에서 외부입력 $r(s)$, $d(s)$, $n(s)$ 에 대한 실린더 변위 $y(s)$ 는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$y(s) = G_{ry}(s)r(s) + G_{dy}(s)d(s) - G_{ny}(s)n(s) \quad (12)$$

여기서

$$G_{ry}(s) = \frac{G(s)(1-Q(s))^{-1}}{1+L_o(s)} \quad (13)$$

$$G_{dy}(s) = \frac{G(s)}{1+L_o(s)} = G(s)S_o(s) \quad (14)$$

$$G_{ny}(s) = \frac{L_o(s)}{1+L_o(s)} = T_o(s) \quad (15)$$

$$L_o(s) = \frac{G(s)G_n^{-1}(s)Q(s)}{1-Q(s)} \quad (16)$$

이며, $S_o(s)$ 는 관측기가 포함된 위치제어계의 감도함수, $T_o(s)$ 는 상보감도함수를 의미한다.

식 (13)에서 $Q(s) = 1$ 로 두면 $G_{ry}(s) = G_n(s)$ 이 되며, 이것은 식 (17)과 같이 $G(s)$ 가 공칭모델 $G_n(s)$ 에 근접될 수 있음을 의미한다.

$$G(s) = G_n(s) \quad (17)$$

또한 식 (14)에서 필터 $Q(s) = 1$ 이면 $G_{dy}(s) = 0$ 이 되어 이상적인 외란억제가 가능하지만 식 (15)에서 $G_{ny}(s) = 1$ 이 되는 문제점이 발생되며, 외란관측기의 구현에 필요한 아래 조건이 충족되지 않는다¹⁰⁾.

$$Q(s)G_n^{-1}(s) \in RH_\infty \quad (18)$$

필터 $Q(s)$ 는 공칭플랜트 $G_n(s)$ 의 상대차수가 2인 2차 시스템임을 고려하여 위의 조건을 만족하도록 다음과 같이 결정한다¹¹⁾.

$$Q(s) = \frac{1}{(\omega_o^{-1}s + 1)^3} \quad (19)$$

여기서 ω_o 는 절점주파수이다.

그리고 식 (14), (15)에서 $G(s) = G_n(s)$ 이면 $S_o(s)$ 와 $T_o(s)$ 는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$S_o(s) = 1 - Q(s) \quad (20)$$

$$T_o(s) = Q(s) \quad (21)$$

식 (20)의 $S_o(s)$ 와 $Q(s)$ 의 관계로부터 ω_o 를 높이면 외란억제력은 향상될 수 있다. 그러나 식 (21)의 $T_o(s)$ 와 $Q(s)$ 의 관계로부터 관측잡음 및 동기제어계의 안정성을 위해서는 ω_o 를 낮게 하는 것이 유리하다. 따라서 외란관측기의 성능을 결정하는 필터 $Q(s)$ 의 절점주파수 ω_o 는 외란억제, 관측잡음 등을 동시에 고려하여 결정한다.

3.3 동기제어기

식 (17)을 이용하면 외란관측기와 동기제어기로 구성되는 동기제어계의 입출력 관계를 나타내는 식 (11)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$e(s) = G(s) \frac{1}{1+L(s)} d_s(s) - \frac{L(s)}{1+L(s)} n_s(s) \quad (22)$$

$$= G(s)S(s)d_s(s) - T(s)n_s(s)$$

여기서 $L(s) = \frac{Q(s) + 2G(s)C(s)}{1 - Q(s)}$, $S(s)$ 는 동기제어계의 감도함수, $T(s)$ 는 상보감도함수이다.

식 (22)에서 $e_s(s) = 0$ 이 되려면 $S(s) = 0$, $T(s) = 0$ 이어야 하지만 $S(s) + T(s) = 1$ 의 구속조건 때문에 모든 주파수역에서 $S(s)$ 와 $T(s)$ 의 이득을 동시에 작게 하는 것은 어렵다. 따라서 $L(s)$ 의 이득이 저주파역에서 높고, 고주파역에서 낮도록 동기제어기 $C(s)$ 를 설계할 필요가 있다. 이 때 $e(s)$ 의 빠른 제거와 진동억제를 위해 진상보상기를 $C(s)$ 로 이용한다.

$$C(s) = \frac{K_t(1 + \alpha T_i s)}{1 + T_i s} \quad (23)$$

여기서 K_t 은 상수이득, $-1/\alpha T_i$ 은 영점, $-1/T_i$ 은 극점, $\alpha (\alpha > 1)$ 는 영점과 극점의 거리 비이다.

3.4 동기오차

식 (19)와 식 (23)을 식 (22)에 대입하면, 비대칭 외란 $d_s(s)$ 에 대해 외란관측기와 동기제어기가 $e(s)$

의 최종값 e_{ss} 에 미치는 영향은 각각 다음과 같다. 이 때 $d_s(s) = \frac{D_s}{s}$ 이다.

먼저 $C(s) = 0$ 이고 $Q(s) = 0$ 이면, e_{ss} 는 다음과 같이 된다.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s G(s) d_s(s) = D_s \quad (24)$$

식 (24)는 $e(s)$ 가 $d_s(s)$ 의 크기에 비례하여 발생됨을 나타내고 있다. 그리고 $C(s) \neq 0$ 이고 $Q(s) = 0$ 이면 e_{ss} 는 다음과 같이 된다.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G(s)}{1 + 2G(s)C(s)} d_s(s) = \frac{D_s}{1 + 2K_t} \quad (25)$$

식 (25)는 $C(s)$ 의 이득에 비례하여 $d_s(s)$ 에 의해 발생하는 $e(s)$ 가 억제됨을 나타내고 있다. 그리고 $C(s) = 0$ 이고 $Q(s) \neq 0$ 이면, e_{ss} 는 다음과 같이 된다.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s G(s)(1 - Q(s)) d_s(s) = 0 \quad (26)$$

식 (26)은 $d_s(s)$ 가 $e(s)$ 에 미치는 영향을 $Q(s)$ 로 억제할 수 있음을 나타낸다. 그러나 관측잡음, 모델링 오차 등을 고려하면 전적으로 $Q(s)$ 의 이득만을 크게 하여 $e(s)$ 를 제거할 수 없다. 한편 $C(s) \neq 0$ 이고 $Q(s) \neq 0$ 이면, $e(s)$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G(s)(1 - Q(s))}{1 + 2G(s)C(s)} d_s(s) = 0 \quad (27)$$

식 (27)은 분자 항의 $Q(s)$ 를 결정한 후, 분모 항의 $C(s)$ 를 적절히 설계하면 $d_s(s)$ 에 의해 발생하는 $e(s)$ 가 식 (26)의 경우 보다 더욱 감소될 수 있음을 나타내고 있다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서 제안된 동기제어계의 유효성 검증에 이용된 전동실린더 계수는 Table 1과 같다.

Table 1 The parameters of a motor cylinder

K_t	[Nm/A]	2.15×10^{-1}	B_m	[Nm/rad/s]	6.56×10^{-5}
K_a		6.00×10^0	M_t	[kg]	5.00×10^0
K_e	[V/rad/s]	2.16×10^{-1}	B_t	[N/m/s]	1.20×10^{-1}
R_a	[Ω]	1.53×10^0	η		0.21×10^0
J_m	[kgm ² /rad]	1.80×10^{-3}	λ	[m/rad]	1.27×10^{-4}

Table 1의 계수를 식 (8)에 대입하고 과도한 전압

입력 $u(s)$ 가 요구되지 않도록 $K_p = 505$ 로 정하면 식 (9)의 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같이 된다.

$$G(s) = \frac{30.25}{s^2 + 16.96s + 30.25} \quad (28)$$

그리고 부하외란에 대한 감도저감, 관측잡음 등을 고려하여 식 (19)에서 절점주파수를 $\omega_o = 10[\text{rad/s}]$ 로 선정하면 외란관측기의 필터 $Q(s)$ 는 다음과 같이 된다.

$$Q(s) = \frac{1}{(0.1s + 1)^3} \quad (29)$$

그리고 위상이득 $\phi_m = 70^\circ$ 과 이득교차주파수 $\omega_g = 12[\text{rad/s}]$ 를 만족하도록 결정된 식 (23)의 동기제어기 $C(s)$ 는 다음과 같이 된다.

$$C(s) = \frac{3.2(1 + 0.085s)}{1 + 0.029s} \quad (30)$$

식 (28), (29)의 $G(s)$, $Q(s)$ 와 식 (30)의 진상제어기 $C(s)$, 비례제어기 $C_1(s) = 1$, $C_2(s) = 3.2$, 를 각각 식 (22)의 $L(s)$ 에 대입하여 구한 주파수응답은 Fig. 3과 같다. 그림에서 $C_1(s) = 1.0$ 이면 $\phi_m = 54^\circ$, $\omega_g = 6[\text{rad/s}]$ 이 되고, $C_2(s) = 3.2$ 이면 $\phi_m = 48^\circ$, $\omega_g = 10[\text{rad/s}]$ 이 된다. 즉, $C_2(s)$ 는 $C_1(s)$ 보다 ω_g 는 증가되지만 ϕ_m 은 감소된다. 그러나 진상보상기 $C(s)$ 는 비례제어기 $C_1(s)$, $C_2(s)$ 보다 증가된 위상여유 ϕ_m 와 이득교차주파수 ω_g 를 가진다. 따라서 동기제어기로 진상보상기를 이용하는 것이 동기오차를 보다 신속하고 안정적으로 제거할 수 있다.

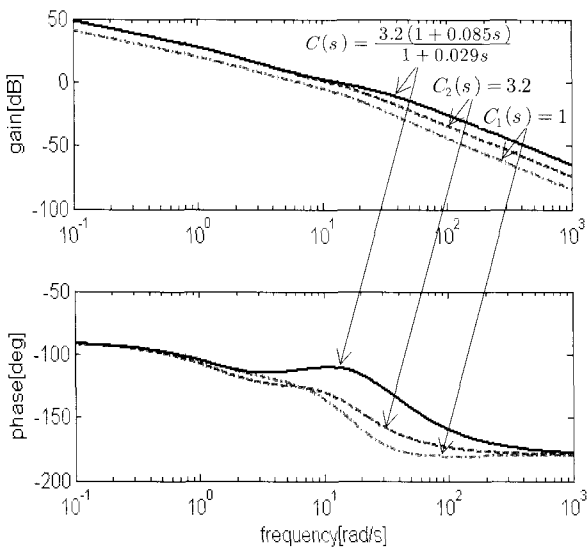
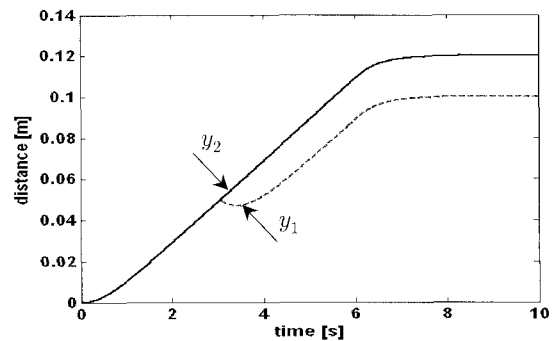


Fig. 3 Bode plots of open loop transfer function $L(s)$

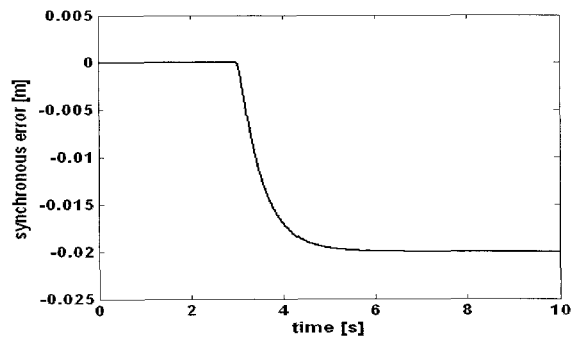
위에서 결정된 1, 2축 실린더의 외란관측기, 진상보상기 등으로 동기제어계를 구성한다. 그리고 비대칭외란에 대한 동기제어계의 유효성을 시뮬레이션으로 확인하기 위해 1축 실린더에만 $3[s]$ 의 시점에서 $d_1(s) = 0.02/s$ 의 비대칭외란을 인가한다. 이 때 위치지령 $r(s)$ 으로는 전동실린더의 정격속도를 고려하여 $0 \leq t \leq 6$ 인 구간에서는 $r(s) = 0.02/s^2$ 이고 $6 < t \leq 10$ 인 구간에서는 $r(s) = 0.12/s$ 인 사다리꼴의 구동지령을 이용한다.

Fig. 4~7은 동기제어기 $C(s)$ 및 외란관측기 필터 $Q(s)$ 의 유무에 따른 1, 2축 실린더의 변위와 동기오차를 나타낸 것이다. (a) 선도에서 점선은 1축 실린더 변위 y_1 , 실선은 2축 실린더 변위 y_2 를 나타낸다. 그리고 (b) 선도는 동기오차 $e = y_1 - y_2$ 를 나타낸다.

Fig. 4는 동기제어기와 외란관측기 필터가 모두 없는 경우의 응답이다. (a)에서 외란이 없는 2축 실린더는 목표지점에 도달하지만, 1축 실린더는 외란의 영향을 전혀 극복하지 못하기 때문에 목표지점과 $0.02[m]$ 의 오차를 갖는다. 따라서 (b)와 같이 비대칭외란이 인가된 시점부터 목표지점까지 $0.02[m]$ 의 동기오차를 유지하게 된다.

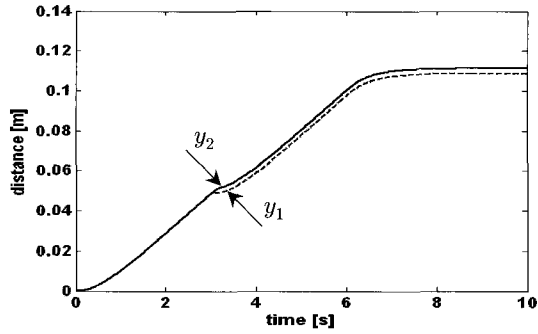


(a) responses y_1, y_2

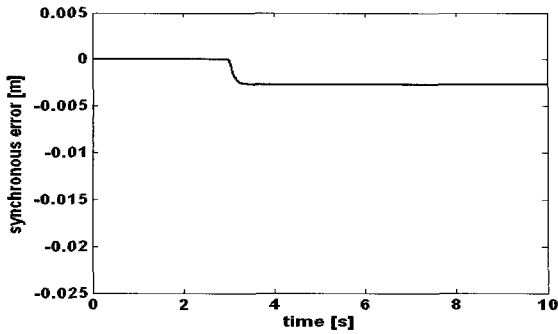


(b) synchronous error e

Fig. 4 Responses and error under skew disturbance in case of $C(s) = 0$ and $Q(s) = 0$

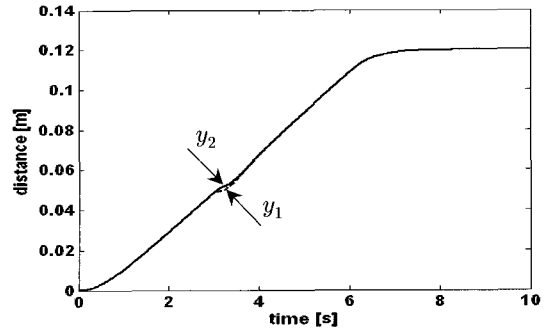


(a) responses y_1, y_2

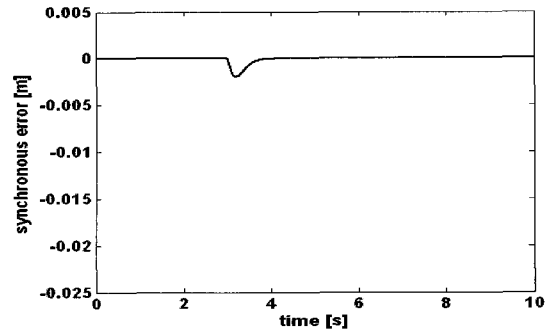


(b) synchronous error e

Fig. 5 Responses and error under skew disturbance in case of $C(s) \neq 0$ and $Q(s) = 0$

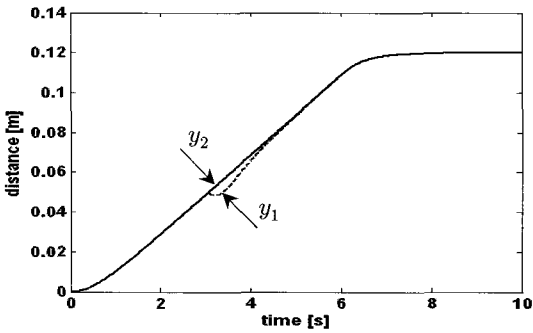


(a) responses y_1, y_2

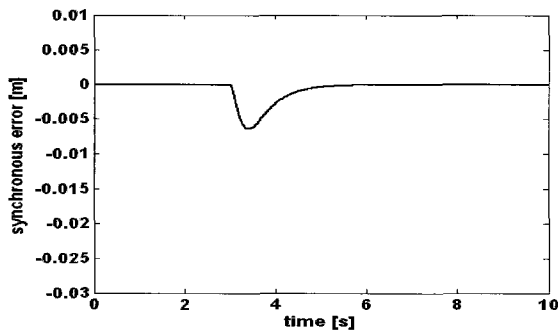


(b) synchronous error e

Fig. 7 Responses and error under skew disturbance in case of $C(s) \neq 0$ and $Q(s) \neq 0$



(a) responses y_1, y_2



(b) synchronous error e

Fig. 6 Responses and error under skew disturbance in case of $C(s) = 0$ and $Q(s) \neq 0$

Fig. 5는 동기제어기는 있고 외란관측기 필터가 없는 경우의 응답이다. 2축 실린더에 외란이 인가되지 않았음에도 불구하고 Fig. 4와 5의 응답 y_2 가 서로 다른 것은 동기제어기가 2축 실린더의 위치를 감소시키기 때문이다. 또한 동일한 외란이 인가된 1축 실린더에 대한 Fig. 4와 5의 응답 y_1 이 다른 것은 동기제어기가 1축의 위치를 증가시키기 때문이다. 즉 동기제어기가 변위 y_1 은 증가시키고 변위 y_2 를 감소시켜서 동기오차를 $e = 0.0027[m]$ 로 억제한다. 따라서 1, 2축 실린더는 목표지점까지 모두 도달할 수 없으나, 동기오차는 Fig. 4의 경우보다 크게 감소됨을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 동기제어기는 없고 외란관측기 필터가 있는 경우의 응답이다. 1, 2축 실린더의 변위 y_1, y_2 에 동시에 영향을 미치는 동기제어기와 다르게 외란관측기는 관측된 외란만 제거하므로 Fig. 4와 6의 2축 실린더 응답 y_2 는 동일하다. 반면 1축 실린더에 인가된 외란은 외란관측기에 의해 2.0[s]이내에 완전히 억제된다. 따라서 외란관측기를 이용한 경우의 Fig. 6은 동기제어기를 이용한 경우의 Fig. 5와 달리 1, 2축의 실린더가 모두 목표지점인 0.12[m]에도

오차 없이 도달함과 동시에 동기오차도 $e=0[m]$ 이 됨을 확인할 수 있다. 그러나 최대 동기오차는 Fig. 5의 $0.0027[m]$ 보다 2배 이상 큰 $0.0064[m]$ 이 된다.

Fig. 7은 동기제어기와 외란관측기 필터가 모두 있는 경우의 응답이다. 비대칭외란이 인가된 시점으로부터 $0.6[s]$ 가 경과하면 1, 2축 실린더 변위 y_1, y_2 가 서로 일치하여 동기오차는 $e=0[m]$ 이 된다. 이것은 동기오차가 $e=0[m]$ 으로 수렴되는 시간이 Fig. 6의 $2.0[s]$ 에 비해 3배 이상 빠르게 단축된 것이다. 그리고 최대 동기오차는 $0.0019[m]$ 이다. 이것은 Fig. 5의 $0.0027[m]$ 에 비해 1.4배, Fig. 6의 $0.0064[m]$ 에 비해 3배 이상 감소된 것이다. 따라서 Fig. 7의 응답 결과는 동기제어기 또는 외란관측기만 있을 경우의 문제점을 보완할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 비대칭외란에 의해 발생하는 실린더 간의 변위 차인 동기오차를 능동적으로 억제하기 위해 외란관측기와 동기제어기로 구성되는 동기제어계를 설계하였다. 이 제어계에서 외란관측기는 동기오차를 발생시키는 각 축의 외란을 독립적으로 제거하며, 양 축에 종속되어 있는 동기제어기는 각 축의 실린더 변위를 동시에 조절하여 동기오차의 발생을 능동적으로 억제하는 역할을 한다. 외란관측기의 필터는 실제구현을 고려하여 상대차수가 3차인 저주파 필터로, 동기제어기는 속응성 및 상대안정성에 유리한 진상보상기로 선정하였다. 그리고 동기오차 발생의 주요한 원인인 비대칭외란을 인가한 시뮬레이션 응답으로부터 다음을 확인할 수 있었다.

동기제어기는 전동실린더의 원활한 이송을 방해하는 최대 동기오차를 감소시키는 데는 효과적으로 작용하지만, 양축의 실린더를 목표지점에 도달시키면서 동기오차를 영으로 수렴시키는 역할은 수행할 수 없었다. 그리고 외란관측기는 비대칭외란을 제거하여 동기오차를 영으로 수렴시키지만 동기제어기에 비해 최대 동기오차를 증가시키는 결과를 초래한다. 반면 외란관측기와 동기제어기를 조합하여 동기제어계를 구성할 경우에는 최대 동기오차가 감소되면서 동기오차도 영으로 수렴되며, 양축의 실린더가 목표지점까지 정확히 이동되었다.

따라서 본 연구에서 설계된 전동실린더의 동기제어계는 동기제어기 또는 외란관측기만 있을 경우의 문제점을 보완할 수 있으며, 전동실린더를 2축 구동

형 이송기구로 이용범위를 확대하기 위한 하나의 방법으로 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2008년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. Ahn, S. W. et al., 1998, "Synchronized Control of 2-Driving Axes in Large Scale Gantry Robot Systems," Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting, pp. 436~439.
2. Goto, S et al, 1994, "A Method of Synchronous Position Control for Multi Servo Systems by Using Inverse Dynamics of Slave Systems," SICE, Vol. 30, No. 6, pp. 669~676.
3. Nakamura, M., Hiyamizu, D. and Kyura, N., 1997, "A Method for Precise Contour Control of Mechatronic Servo Systems with Master-Slave Axes by Use of Synchronous Position Control," SICE, Vol. 33, No. 4, pp. 274~279.
4. Jeong, S. K., Kim, Y. J. and You, S. S., 2004, "Precise Position Synchronous Control of Four-Axes Systems Based on Acceleration Control" Transactions of KSME, A, Vol. 28. No. 29, pp. 1245~1254.
5. Byun, J. H., 2002, "A Study on the Position-Synchronous Control of Coupling Structure by H_∞ Approach" Transactions of KSME, A, Vol. 26. No. 10, pp. 2052~2059.
6. Kamano, T. et al., Suzuki, T., Iuchi, N. and Tomizuka, M., 1993, "Adaptive Feedforward Controller for Synchronization of Two Axes Positioning System," SICE, Vol. 29, No. 7, pp. 785~791.
7. Zhao, Z. M., et al., 1996, "Synchronization of Two Motion Axes With Disturbance Observers," SICE, Vol. 9, No. 4, pp. 151~161.
8. Byun, J. H., 2008, "A Study on the Position Control of a Motor Cylinder with Nonlinear Friction", KSPSE, Vol. 12, No 1, pp. 80~86.

9. Noritsugu, T. and Takaiwa, M., 1993, "Robust Control of a Pneumatic Servo System Using Disturbance Observer", SICE, Vol. 29, No. 1, pp 86~93.
10. Sugie, T and Yoshikawa, T., 1986, "General solution of robust tracking problem in Two-Degree-of-Freedom", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC-31, pp. 552~554.
11. Lee, H. S. and Tomizuka, M., 1996, "Robust Motion Controller Design for High Accuracy Position Systems", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 43, pp 48~55.