

커플링구조를 이용한 가동위어의 동기제어시스템 설계

양경욱* · 변정환**

The Synchronous Control System Design of a Movable Weir using Coupling Structure

Kyong-Uk Yang* · Jung-Hwan Byun**

요약

조석수조에서 수위를 조절하기 위한 위어는 자체에 부착된 2대의 전동실린더에 의해 상하로 이송된다. 이때 발생하는 좌·우 전동실린더의 이동거리 차는 위어의 불균형과 마찰을 일으키므로, 위어는 목표지점으로 이송될 수 없게 된다. 본 연구에서는 위어를 신속하고 정확하게 이송하기 위한 동기제어시스템이 구축된다. 교차결합구조에 기초한 이 동기제어시스템은 두 개의 I-PD제어기와 한 개의 진상보상기로 구성된다. 각 I-PD제어기는 전동실린더가 오버슈트와 입력포화를 발생시키지 않고 위치지령을 정확히 추종하도록, 그리고 진상보상기는 신속하고 안정적으로 동기가 되도록 설계된다. 끝으로 시뮬레이션을 통해 설계된 동기제어시스템이 동기오차의 제거에 효과적임을 나타낸다.

ABSTRACT

The weir to regulate water level in a tide generation tank is above and below carried by two electric cylinders which are mounted on right and left of weir itself. In this case, a movement difference between right and left cylinder causes unbalance of weir and friction between weir and guide. And then, the weir will not be sent to target point. In this study, a synchronous control system is developed to take accurate and quick equilibrium of the weir. The control system based on cross coupled structure consists of two I-PD controllers and a lead compensator. Each of the I-PD controllers is designed in order that the electric cylinder may exactly follow the reference signal without overshoot and input saturation. And the lead compensator is designed to achieve stable and accurate synchronization. Finally, the simulation result shows that the designed synchronous control system is effective for elimination of synchronous error.

키워드

Movable Weir, Electric Cylinder, Synchronous Error, Skew Disturbance, Lead Compensator
가동 위어, 전동 실린더, 동기 오차, 비대칭 외란, 진상 보상기

1. 서론

조석, 쓰나미와 같은 장주기파를 재현하기 위한 수조(Tide flume)에는 수위를 조절하는 상하계이트방식의 위어(Weir)가 있다. 폭이 좁은 위어는 한 대의 전

동실린더(Electric cylinder)로 이송되지만, 폭이 넓은 위어는 한 대의 전동실린더만으로 이송되기 어렵다. 이러한 경우에는 구조물의 좌·우 끝에 연결된 두 대의 전동실린더를 동시에 구동하면 상하로 이송될 수 있다. 그리고 간척지 등에 차단된 내수와 해수를 나누고

* 전남대학교 해양기술학부(yangku@jnu.ac.kr)

** 교신저자 : 전남대학교 해양기술학부

• 접수일 : 2017. 07. 05

• 수정완료일 : 2017. 08. 13

• 게재확정일 : 2017. 10. 18

• Received : July 05, 2017, Revised : Aug 13, 2017, Accepted : Oct 18, 2017

• Corresponding Author : Jung-Hwan Byun

School of Marine Technology, Chonnam National University

Email : bjh@jnu.ac.kr

홍수 발생 시에 내수의 배수가 가능하도록 한 구조물인 배수갑문(Sluice gate)에서도 두 대의 유압실린더를 이용하여 배수문을 개폐한다[1]. 이때 각 실린더의 이동변위가 허용된 범위 내에서 연속적으로 일치되지 않으면, 구조물이 기울어져 이동경로에서 심한 마찰 또는 찌그러짐 현상이 발생한다. 따라서 구조물이 목표점에 도달하기 어려워지므로 정밀한 수위 조절이나 수문 개폐가 곤란하게 될 수 있다.

한편 전동실린더는 유공압실린더에 비해 시스템의 구성이 간단하고 유지관리가 편리하므로 산업현장에서 수습에서 수백 킬로그램의 중량물을 이송하는 기구로 많이 이용되고 있다[2]. 이 기구는 모터와 기어, 스크류 등의 동력전달 요소로 구성되며, 모터와 연결된 스크류의 회전운동에 의해 실린더 로드(Rod)가 가이드(Guide)를 따라 직선으로 운동한다. 모터의 회전력이 실린더의 추력(Thrust)으로 변환될 때, 이 추력은 마찰을 일으키는 다양한 기계요소들의 조합에 의해 생성된다. 일반적으로 마찰은 선형 마찰인 점성 마찰과 비선형 마찰인 정지마찰, 쿨롱마찰 등의 조합으로 표현되고 있다[3-4]. 이 비선형 마찰은 전동실린더에서도 발생되며 외란과 동일하게 제어성능 저하의 요인이 될 수 있다[5-6].

본 연구는 위어를 평행상태로 유지하면서 목표점까지 이송시키기 위해 전동실린더 간에 발생하는 동기오차(Synchronous error)를 신속하고 안정적으로 억제시키는 것에 목적을 두고 있다. 이를 위해 다양한 기계요소로 조합된 전동실린더를 모델링한다. 그리고 커플링구조(Coupling structure)의 동기제어기법[7-10]에 기초하여, 동기오차를 제거하기 위한 피드백제어 신호가 위치지령에 추가되는 동기제어시스템을 설계한다. 그리고 각 실린더에 인가되는 서로 다른 크기의 비대칭 외란(Skew disturbance)과 제어대상의 동특성 차이가 동기오차에 미치는 영향을 분석한다. 이 분석을 통해 진동을 억제하면서 신속하게 위어를 이송할 수 있는 위치와 동기제어기를 설계한다. 끝으로 설계된 동기제어시스템의 유효성을 시뮬레이션으로 확인한다.

II. 가동위어장치

그림 1은 조석, 쓰나미 현상 등을 재현하기 위한 조석수조의 일부인 위어장치를 나타내고 있다. 이 장치는 조석 및 쓰나미의 수위를 조절하기 위한 것이며, 위어와 전동실린더 등으로 구성된다. 이 실린더는 그림 2와 같이 모터의 회전운동을 실린더 로드의 직선운동으로 변환시키는 기구이다. 따라서 위어의 좌·우에 로드를 연결시킨 후, 모터를 정역으로 회전시키면 위어는 이동경로인 가이드를 따라 상하로 이동된다.

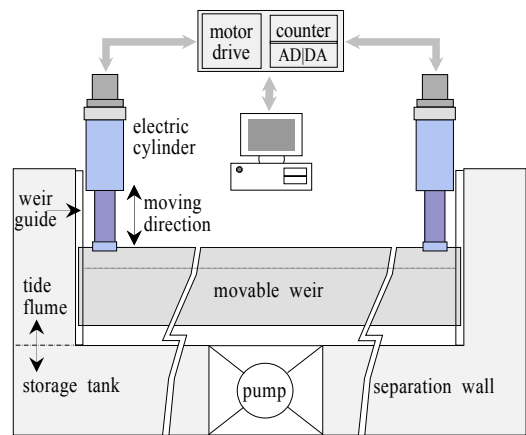


그림 1. 가동위어장치의 개략도
Fig. 1 Schematic diagram of a movable weir control apparatus

이때 위어가 평행한 상태로 이동되지 않으면 위어의 측면과 가이드 사이에 발생하는 마찰 때문에 목표지점까지 위어의 이송이 곤란하게 될 수 있다.

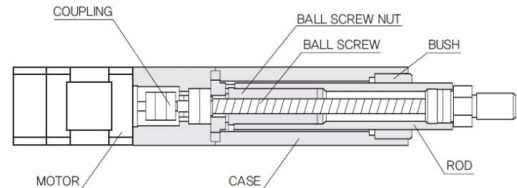


그림 2. 전동실린더의 개략도
Fig. 2 Schematic diagram of an electric cylinder

즉, 위어가 목표지점에 도달하기까지 좌·우측 실린더의 이동거리가 동일해야 된다. 따라서 위어를 목표지점까지 원활하게 이송시키기 위해 전동실린더를 모

델링하고, 제어시스템을 설계한다. 그림 3은 서보모터 [11]와 연결된 스크류의 회전운동에 의해 실린더 로드가 가이드를 따라 직선운동하는 전동실린더의 모델이다.

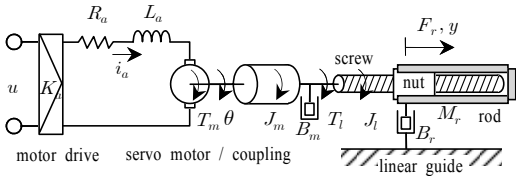


그림 3. 전동실린더의 모델
Fig. 3 Model of an electric cylinder

그림 3에서 $T_m(t), \theta(t), J_m, B_m$ 은 각각 모터 토크, 회전각 변위, 관성모멘트, 점성마찰계수, $T_l(t)$ 은 부하토크이고, $u(t)$ 는 전압입력, K_a, K_t, K_e 는 각각 드라이버 이득, 토크상수, 역기전력상수, $i_a(t), R_a, L_a$ 는 각각 전기자 전류, 저항, 인덕턴스이다. 그리고 $F_r(t)$ 는 실린더 로드에서 작용하는 추력, J, p 는 각각 리드 스크류의 관성모멘트, 피치이다. 또 $y(t), M_r, B_r$ 는 각각 실린더 로드의 변위, 질량, 점성마찰계수이다. 이때 비교적 작은 값인 L_a 와 비선형 마찰력을 제외하면 전압입력에서 실린더 변위까지의 전달함수 $P(s) = y(s)/u(s)$ 는 식 (1)과 같다[2].

$$P_n(s) = \frac{1/K_m}{s(s + K_b/K_m)} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } K_m = \frac{2\pi R_a}{pK_a K_t} (J_m + J_t + \frac{p^2 M_t}{4\pi^2}),$$

$$K_b = \frac{2\pi R_a}{pK_a K_t} (B_m + \frac{p^2 B_t}{4\pi^2}) + \frac{2\pi K_e}{pK_a} \text{이다.}$$

III. 제어시스템 설계

3.1 위치제어기

동일한 특성을 갖는 2대의 전동실린더로 병렬형 동기시스템을 구성할 경우, 각 전동실린더의 로드에서 연결된 부하가 과도한 오버슈트 없이 빠르게 이송되도록 위치제어기를 설계할 필요가 있다.

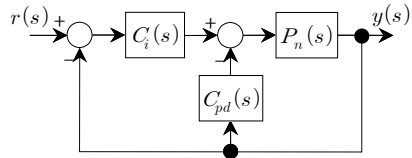


그림 4. 전동실린더의 위치제어시스템
Fig. 4 The position control system of an electric cylinder

일반적인 PID제어기로 제어시스템을 구성할 경우에 위치지령의 기울기가 크면 영점은 과도상태에서 오버슈트와 제어입력 포화의 발생요인으로 작용한다. 이점을 고려하여 그림 4와 같이 피드포워드 경로에 적분기 $C_i(s)$, 피드백 경로에 비례미분기 $C_{pd}(s)$ 를 갖는 식 (2)의 I-PD제어기를 이용하여 위치제어시스템을 구축한다.

$$C_i(s) = \frac{K_p}{T_i s}, \quad C_{pd}(s) = K_p(1 + T_d s) \quad (2)$$

여기서 K_p, T_i, T_d 는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간을 의미한다. 식 (1), (2)를 이용하면 위치지령 $r(s)$ 에서 실린더 변위 $y(s)$ 까지 전달함수 $G_n(s)$ 는 식 (3)과 같다.

$$G_n(s) = \frac{P_n(s)C_i(s)}{1 + P_n(s)(C_i(s) + C_{pd}(s))} \quad (3)$$

한편 K_p, T_i, T_d 는 퍼센트 오버슈트 O_p 와 정착시간 T_s 를 만족하도록 극배치기법으로 선정한다[12].

3.2 동기제어기

전동실린더 간의 위치동기를 수행하기 위한 동기제어시스템의 구조는 그림 5와 같다. 그림에서 $G_1(s), G_2(s)$ 는 공칭플랜트(Nominal plant) $G_n(s)$ 에 대응하는 위어 좌·우의 실린더 위치제어시스템이고, $C_s(s)$ 는 동기제어기, $r(s)$ 는 위치지령, $y_1(s), y_2(s)$ 는 위어의 실린더 변위, $d_1(s), d_2(s)$ 는 외란, $n_1(s), n_2(s)$ 는 센서잡음이다. 또한 좌·우 실린더의 변위 차인 동기오차 $e_s(s)$ 는 식 (4)와 같다.

$$e_s(s) = y_1(s) - y_2(s) \quad (4)$$

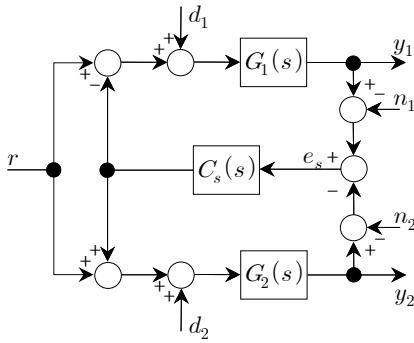


그림 5. 가동위어의 동기제어시스템
Fig. 5 The synchronous control system of a movable weir

그림 5에서 $C_s(s)$ 의 유·무에 따른 $e_s(s)$ 의 변화를 검토한다. $C_s(s)$ 를 포함한 피드백 제어가 없으면, $e_s(s)$ 는 식 (5)와 같다.

$$e_s(s) = (G_1(s) - G_2(s))r(s) + \frac{G_1(s)d_1(s) - G_2(s)d_2(s)}{1 + L(s)} \quad (5)$$

그리고 $C_s(s)$ 를 포함한 피드백 제어가 있으면, $e_s(s)$ 는 식 (6)과 같다.

$$e_s(s) = \frac{G_1(s) - G_2(s)}{1 + L(s)}r(s) + \frac{G_1(s)}{1 + L(s)}d_1(s) - \frac{G_2(s)}{1 + L(s)}d_2(s) + \frac{L(s)}{1 + L(s)}(n_1(s) - n_2(s)) \quad (6)$$

여기서 $L(s) = (G_1(s) + G_2(s))C_s(s)$ 이다. 동기오차 $e_s(s)$ 에 대해 식 (5)와 (6)을 비교하면, 식 (5)는 $G_1(s) = G_2(s)$, $d_1(s) = d_2(s)$ 이어야 $e_s(s) = 0$ 이 된다. 반면 식 (6)은 $G_1(s) \neq G_2(s)$, $d_1(s) \neq d_2(s)$ 인 경우에도 $C_s(s)$ 를 적절히 설계하면 $e_s(s) = 0$ 이 가능함을 의미한다. 이하에서는 동기오차를 신속하고 안정적으로 감소시키는 동기제어기를 설계한다.

식 (5), (6)에서 $G_1(s)$ 와 $G_2(s)$ 의 동특성 차는 e_s 를 발생시키는 하나의 요인이 된다. 이 동특성 차에 의해 발생하는 e_s 를 감소시키기 위해 두 전동실린더의 위치제어기에 대한 설계지침인 O_p , T_s 를 동

일하게 지정할 필요가 있다. 이렇게 결정된 $G_1(s)$ 와 $G_2(s)$ 는 식 (7)에 근접하게 될 수 있다.

$$G_1(s) = G_2(s) \quad (7)$$

식 (7)의 조건은 $d_1(s) \neq d_2(s)$ 인 비대칭 외란이 없으면 $C_s(s) = 0$ 일 경우에도 동기오차가 억제됨을 의미한다. 그러나 비대칭 외란 $d_s(s)$ 이 인가될 경우에는 동기오차를 감소시키기 위해 동기제어기 $C_s(s)$ 가 존재해야 한다. 식 (7)이 만족되도록 설계된 각 전동실린더의 제어시스템을 $G_n(s) = G_1(s) = G_2(s)$ 로 두면 식 (6)은 식 (8)과 같이 변환된다.

$$e_s(s) = G_n(s)S(s)d_s(s) + T(s)n(s) \quad (8)$$

여기서 $S(s)$, $T(s)$ 는 식 (9)로 표현된 동기제어시스템의 감도함수와 상보감도함수를 의미하며, $d_s(s) = d_1(s) - d_2(s)$, $n(s) = n_1(s) - n_2(s)$ 이다.

$$S(s) = \frac{1}{1 + L(s)}, T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)} \quad (9)$$

여기서 $L(s) = 2G_n(s)C_s(s)$ 는 개루프 전달함수이다. 그림 5에서 비대칭 외란 $d_s(s)$ 가 인가되면 동기제어기 $C_s(s)$ 가 식 (8)의 동기오차 $e_s(s)$ 를 감소시킨다. 이 때 $e_s(s) = 0$ 이 되려면 $S(s) = 0$, $T(s) = 0$ 이어야 하지만 $S(s) + T(s) = 1$ 의 구속조건 때문에 모든 주파수영역에서 $S(s)$ 와 $T(s)$ 의 이득을 동시에 작게 하는 것은 어렵다. 따라서 $L(s)$ 의 이득이 저주파영역에서 높고, 고주파영역에서 낮도록 $C_s(s)$ 를 설계하며, $e_s(s)$ 의 빠른 제거와 진동억제를 위해 식 (10)의 진상보상기(Lead compensator)를 동기제어기로 이용한다.

$$C_s(s) = K_f \frac{(1 + \alpha T_f s)}{1 + T_f s} = K_f C_f(s) \quad (10)$$

여기서 K_f 는 상수이득, $-1/\alpha T_f$ 은 영점, $-1/T_f$ 은 극점, $\alpha(\alpha > 1)$ 는 영점과 극점의 거리 비이다. 이때 $C_s(s)$ 의 계수는 감쇠성과 연관된 위상여유 ϕ_m 과 속응성과 연관된 이득교차 주파수 ω_g 를 설계지침으로

한다. 위상여유 ϕ_m 이 크면 비대칭 외란 $d_s(s)$ 에 대해 동기오차 $e_s(s)$ 의 감쇠성이 증가되지만, 속응성은 저하된다. 그리고 이득교차주파수 ω_g 를 높게 선정하면 속응성은 향상되지만, 센서잡음 $n(s)$ 이 동기오차 $e_s(s)$ 에 악영향을 미칠 수 있다. 이런 특성을 고려하여 ϕ_m, ω_g 를 선정한다.

IV. 시뮬레이션 및 고찰

위에서 위어와 같이 폭이 넓은 구조물을 비틀림 없이 평형한 상태로 이송하기 위한 동기제어시스템을 설계하였다. 이 제어시스템의 타당성을 검증하기 위해 이용된 동일한 특성을 갖는 2대의 전동실린더에 대한 계수값은 Table 1과 같다.

표1. 전동실린더의 파라미터
Table 1. Parameters of the electric cylinder

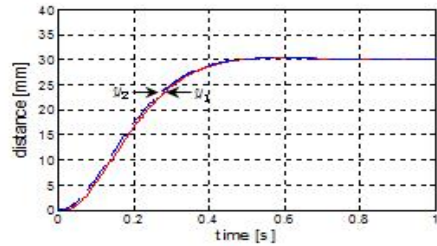
item	value	unit
K_t	2.26×10^{-1}	Nm/A
K_a	5.0	
K_c	2.22×10^{-1}	V/rad/s
R_a	1.6	Ω
J_m	3.50×10^{-4}	kgm^2/rad
B_m	5.50×10^{-3}	Nm/rad/s
J_l	2.50×10^{-4}	kgm^2/rad
M_l	5.00×10^{-2}	kg
B_l	6.00×10^{-3}	N/m/s
p	1.00×10^{-2}	m

이때 $O_p = 1\%, T_s = 0.5[s]$ 로 선정하면 $K_p = 529, T_i = 0.188, T_d = 0.011$ 이 되고, $G_n(s) = G_i(s) = \frac{5251.9}{s^3 + 72s^2 + 989.8s + 5251.9}$ 이 된다. 그리고 $\phi_m = 50^\circ, \omega_g = 30[\text{rad/s}]$ 로 선정하면 $\alpha = 6.58, T_i = 0.013, K_t = 2.211, C_s(s) = \frac{2.211(1 + 0.086s)}{1 + 0.013s}$ 이 된다.

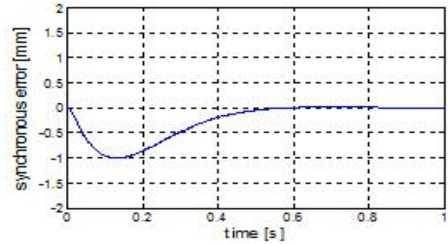
앞서 계산된 위치 및 동기제어기로 구성된 동기제어시스템의 유효성은 시뮬레이션으로 검증한다. 이때 비대칭 외란이 동기오차에 미치는 영향을 검토하기

위해, 좌측 전동실린더에만 토크부하를 인가한다.

그림 6-8은 비대칭 외란이 인가된 경우, 동기제어기 $C_s(s)$ 가 동기오차 e_s 에 미친 영향을 나타낸다. 그림에서 (a)는 스텝응답으로 y_1 (실선), y_2 (점선)는 각각 두 실린더의 변위, (b)는 동기오차 e_s 를 나타낸다.



(a) 스텝응답 y_1, y_2
(a) step responses y_1, y_2



(b) 동기오차 e_s
(b) synchronous error e_s

그림 6. 비대칭 외란 하에서 동기제어기가 없는 경우 스텝응답과 동기오차

Fig. 6 Step responses and synchronous error under skew disturbance without synchronous controller

그림 6은 동기제어기가 $C_s(s) = 0$ 인 경우의 응답이다. 그림 6(a)는 I-PD 위치제어기에 의해 좌·우의 실린더 로드가 일정한 시간이 경과되면 목표점에 도달하지만, 과도상태에서는 부하토크의 영향을 받는 y_1 가 y_2 보다 늦게 응답한다. 이러한 변위 차는 그림 6(b)와 같은 동기오차 e_s 로 나타나며, 과도상태에서 최대 동기오차는 $1[mm]$ 이고, $0.6[s]$ 의 시간이 경과되면 동기오차가 $0[mm]$ 으로 수렴된다. 그러나 $C_s(s)$ 에 의한 피드백제어가 되지 않으므로 과도상태에서 동기오차 e_s 가 능동적으로 감소되지 않는다.

그림 7은 동기제어기로서 비례이득 K_t 이 이용된 경우의 응답이다. 그림 7(a)에서는 그림 6(a)와 달리 과도상태에서 y_1 과 y_2 의 응답속도가 일정하지 않다. 이

것은 피드백 경로의 동기제어기 K_I 이 동기오차 e_s 를 억제하기 위해 좌·우 실린더의 변위를 가·감하기 때문이다. 따라서 그림 7(b)에서 0.7[s]의 시간이 경과되면 동기오차 e_s 가 0[mm]으로 수렴된다. 그러나 최대 동기오차가 0.7[mm]이므로 그림 6(b)보다 현저히 감소되지 않으며, 감쇠성이 낮아 진동이 발생되고 있다.

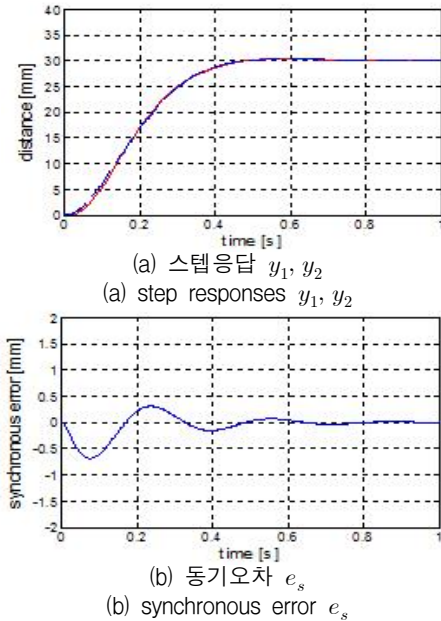


그림 7. 비대칭 외란 하에서 비례제어기에 의한 스텝응답과 동기오차

Fig. 7 Step responses and synchronous error under skew disturbance with proportional controller K_I

그림 8은 진상보상기 $C_s(s) = \frac{2.211(1+0.086s)}{1+0.013s}$ 가 동기제어기로 이용된 경우의 응답이다. 그림 8(b)에서 동기오차 e_s 가 0[mm]로 수렴되는 시간이 0.2[s]이며, 최대 동기오차는 0.5[mm]이하이다. 이것은 그림 6(b) 보다 상당히 감소된 것으로 동기제어기에 의해 좌·우 실린더의 변위 y_1, y_2 가 신속하게 일치됨을 의미한다. 특히 감쇠성이 개선되어 그림 8(b)에서 동기오차 e_s 의 진동이 그림 7(b)에 비해 감소된다. 즉, 진상보상기 $C_s(s) = \frac{2.211(1+0.086s)}{1+0.013s}$ 가 비례제어기 $C_s(s) = K_I$ 보다 동기오차 e_s 의 진동을 억제하면서 신속하게 제거한다. 따라서 진상보상기가 동기제어기로서 효과적임을 확인할 수 있다.

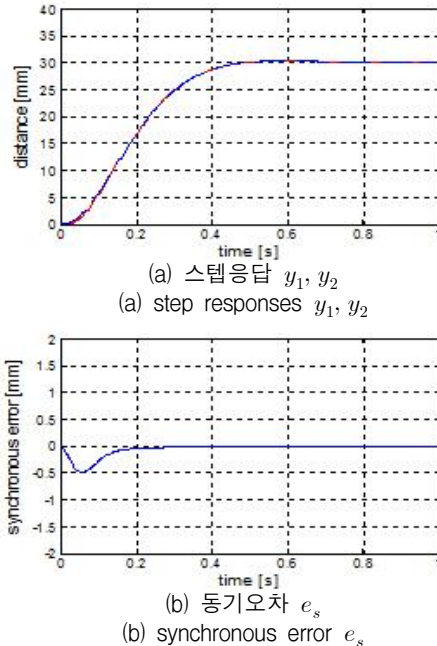


그림 8. 비대칭 외란 하에서 진상보상기에 의한 스텝응답과 동기오차

Fig. 8 Step responses and synchronous error under skew disturbance with lead compensator $C_s(s)$

V. 결론

본 연구에서는 위의 좌·우측에 설치된 전동실린더의 위치제어시스템은 영점이 과도상태에서 미치는 영향을 고려하여 I-PD제어기법으로 구성되고, 제어기 계수는 오버슈트와 정착시간을 설계지침으로 선정되었다. 이때 좌·우 위치제어기의 설계지침을 같게 함으로써 각 위치제어시스템의 특성도 일치되도록 하였다. 그리고 동기제어시스템은 동기제어기에서 생성된 피드백 제어신호가 각 전동실린더의 위치지령을 가감하여 동기오차를 억제하는 구조로 설계되었다. 동기제어기로서 진상보상기가 이용되었으며, 각 파라미터는 감쇠성과 속응성을 고려하여 선정되었다. 이와 같이 설계된 동기제어시스템에 대해 시뮬레이션을 통하여 두 대의 전동실린더가 위어를 과도한 오버슈트 없이 목표점까지 정확히 이송할 수 있음을 확인하였다. 특히 비례제어기와 비교하여 진상보상기로 동기시스템에 대한 개루프 전달함수의

루프를 고주파영역에서 정형하여 동기오차를 더욱 신속하고 안정적으로 억제할 수 있었다.

References

- [1] D. Kim and B. Sung, "The Synchronous Position Controller of Hydraulic Cylinders for Sluice Gate," *Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Annual Meeting*, Changwon, Korea, Nov., 2012, pp. 2268-2273.
- [2] K. Yang and J. Byun, "The Synchronous Control System Design for Four Electric Cylinders," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 12, 2016, pp. 1209-1218.
- [3] C. Canudas, K. Astrom, and K. Braun, "Adaptive Friction Compensation in DC-motor Drives," *Institute of Electrical and Electronics Engineers Trans. Robotics and Automation*, vol. 3, no 6, 1987, pp. 681-685.
- [4] P. Dupont and E. Dunlap, "Friction Modeling and PD Compensation at Very Low Velocities," *Trans. of the American Society of Mechanical Engineers*, vol. 117, no 1, 1995, pp. 8-14.
- [5] A. Tesfaye, H. Lee, and M. Tomizuka, "A Sensitivity Optimization Approach to Design of a Disturbance Observer in Digital Motion Control System," *Institute of Electrical and Electronics Engineers/the American Society of Mechanical Engineers Trans. on Mechatronics*, vol. 5, no. 1, 2000, pp. 32-38.
- [6] M. Iwasaki, T. Shibata, and N. Matui, "Disturbance-Observer-Based Nonlinear Friction Compensation in Table Drive Systems," *Institute of Electrical and Electronics Engineers/the American Society of Mechanical Engineers Trans. Mechatronics*, vol. 4, no. 1, 1999, pp. 3-8.
- [7] J. Byun, "A Study on the Position Synchronous Control of Coupling Structure by H_∞ Approach," *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, vol. 26. no. 10, 2002, pp. 2052-2059.
- [8] Y. Shin, C. Chen, and A. Lee, "A novel cross-coupling control for Bi-axis motion," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, no. 14, 2002, pp. 1539-1548.
- [9] S. Jeong and S. You, "Precise position synchronous control of multi-axis servo system," *Mechatronics*, vol. 18, no. 3, 2008, pp. 129-140.
- [10] J. Byun and M. Choi, "A Method of Synchronous Control System for Dual Parallel Motion Stages," *Int. J. of Precision and Manufacturing*, vol. 13, no. 6, 2012, pp. 883-889.
- [11] Y. Jeon, "Speed Control of the BLDC Motor using the Disturbance Observer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 10, 2016, pp. 955-962.
- [12] J. Byun, "The Synchronous Control System Design of a Dual Electric Propulsion System for Small Boats," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 1, 2017, pp. 85-92.

저자 소개

양경욱(Kyong-Uk Yang)



1991년 전남대학교 기관시스템공학전공 졸업(공학사)
1993년 부경대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사)

1997년 부경대학교 대학원 제어기계공학과 졸업(공학박사)

1998년 ~ 현재 전남대학교 해양기술학부 교수

※ 관심분야 : 시스템제어 및 시뮬레이션

변정환(Jung-Hwan Byun)



1992년 부경대학교 기관공학과 졸업(공학사)

1995년 부경대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사)

1997년 부경대학교 대학원 제어기계공학과 졸업(공학박사)

2000년 ~ 현재 : 전남대학교 해양기술학부 교수

※ 관심분야 : 동기제어, 전기추진시스템

