

# 외란 관측기와 PID제어기를 이용한 2축 주행시스템의 동기제어

변정환\* · 김영복\*\* · 양주호\*\*\*

\*여수대학교 기관공학과, \*\*경상대학교 수송기계공학부, \*\*\*부경대학교 기계공학부

## Synchronous Control of a Two-Axes Driving System by Disturbance Observer and PID Controller

JUNG-HOAN BYUN\*, YOUNG-BOK KIM\*\* AND JOO-HO YANG\*\*\*

\*Dept. of Power System Engineering, Yosu National University, Chonnam 550-749, Korea.

\*\*School of Transport Vehicle Engineering, Gyeongsang National University, Kyongnam 650-160, Korea.

\*\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea.

**KEY WORDS:** Two-axes driving system 2축 주행 시스템, Disturbance observer 외란 관측기, Synchronous error 동기오차, Position synchronous control 위치동기제어

**ABSTRACT:** In this study, a methodology of synchronous control which can be applied to position synchronization of a two-axes driving system has been developed. The synchronous error is caused by model uncertainties and torque disturbance of each axis. To overcome these problems, the proposed synchronous control system has been composed of two speed controllers, disturbance observers, and one synchronous controller. The speed controllers, based on the PID control law are aimed at the following to speed reference. And the parameters of speed controllers have been designed in order for the speed response of the second axis to correspond with the one of the first axis. The disturbance observer has been designed to restrain the torque disturbance. The synchronous controller eliminates the synchronous error by controlling the speed of the second axis. The effectiveness of the proposed method has been verified through simulation.

### 1. 서 론

복수 모터(multi-motor)의 동시 구동은 박판(thin plate)의 이송 시스템, 근거리 화물의 이송을 위한 크레인시스템 등과 같은 다양한 분야에서 이용되고 있다. 천장 크레인(overhead crane), 갠트리 크레인(gantry crane)시스템 등은 이송될 화물의 탑재를 위한 거드(girder)와 거드의 이동 경로인 레일(rail), 그리고 거드의 양단 끝에 설치된 모터와 모터 축의 회전에 의해 레일 위를 주행하는 휠(wheel)로 구성된다. 이때 화물은 복수 모터의 동시 구동에 의해 이송된다. 그러나 모터간의 이동거리가 다를 경우에는 레일과 휠 플랜지(wheel flange)간의 심한 마찰로 인하여 휠의 마모가 발생하게 되고, 마모현상이 심할 경우에는 휠이 레일에서 이탈되므로 화물의 이송이 곤란하게 된다. 또한 박판 이송시스템에서 모터 축간의 위치 동기오차는 박판의 두께를 일정하지 않게 한다. 이와 같이 축간의 위치동기의 정밀성은 이송 효율 및 제품의 정도에 중대한 영향을 미친다.

최근, 부하변동 및 과도상태에서도 모터 축간의 정밀한 위치동기를 실현하기 위해, 다양한 동기제어방식이 제안되었다.

鎌野 등은 적응 피드포워드 제어기의 적응 파라미터를 조정하여 추종오차와 동기오차를 동시에 영으로 수렴시키는 동기제어법을 제안하였는데, 이 방식에 의하면 외란에 대한 안정성은 고정 계인의 피드백 제어기에 의존한다. 그리고 後藤 등은 주축의 위치출력을 종축의 입력신호로 하고, 종축의 제어기

는 종축 서보시스템의 역 다이내믹스를 이용한 동기제어법을 제안하였으며, 이 방식은 외란이 종축에 인가될 경우에는 정밀한 위치동기를 기대하기 어렵다. 中村(1997) 등은 後藤(1994) 등이 제안한 위치동기법의 특성 해석과 모델오차에 대한 강인성을 검토하였다. 이 연구는 특성 해석에 주목하고 있으며, 제어기 및 알고리즘은 後藤 등의 방식과 동일한 특성을 갖고 있다. 변 등은 속도제어기와 동기제어기로 구성되는 고정구조와 가변구조의 동기제어법을 제안하였으나, 외란이 위치동기오차에 미치는 영향에 대해서는 적극적으로 고려하지 않았다.

한편 淺野(1994) 등은 몰드(mold) 내의 용해된 강(molten steel)의 레벨 제어에, 土手(1993) 등은 모터의 속도제어에 외란 관측기(disturbance observer)를 적용하였으며, 이 관측기의 이론적 타당성을 검증하였다.

본 연구에서는 각 축의 토크 외란에 적극적으로 대처할 수 있는 외란 관측기와 위치동기제어기로 구성되는 고정구조의 동기제어방식을 제안한다. 이 위치동기시스템은 각 축의 속도제어기와 외란 관측기, 그리고 위치동기제어기로 구성된다. 속도제어기는 속도지령을 추종하도록 설계된다. 그리고 외란 관측기는 외란이 위치동기에 미치는 영향을 감소시킬 목적으로 설계된다. 그리고 위치동기제어기는 과도상태 및 외란에 의해 발생하는 위치동기오차를 영으로 수렴시키도록 설계된다. 끝으로 직류 서보 모터를 이용하여 위치동기 제어계를 구성한 후, 시뮬레이션을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검증한다.

## 2. 위치동기 제어계의 구성

본 연구는 2축 구동시스템의 정밀한 위치동기에 목적을 두고 있으며, 이를 수행하기 위한 위치동기 제어계의 개략도는 Fig. 1과 같다. 이 제어계는 모터  $M_1(s)$ ,  $M_2(s)$ , 속도제어기  $C_1(s)$ ,  $C_2(s)$ , 외란관측기  $O_1(s)$ ,  $O_2(s)$ , 위치동기제어기  $C_p(s)$ 로 구성된다.

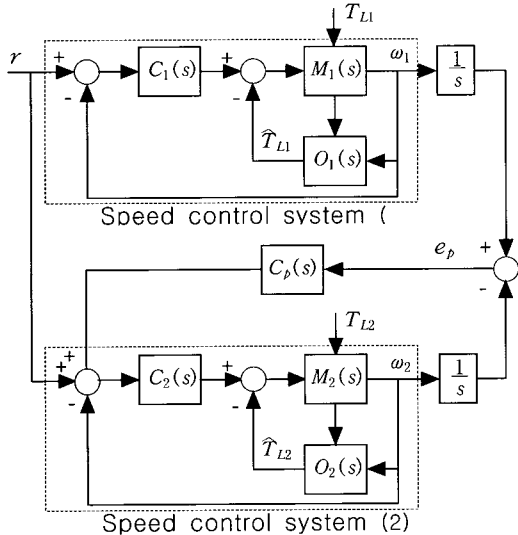


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed position synchronous control system for a two-axes driving system

본 연구에서 영으로 수렴시키고자 하는 위치동기오차  $e_p$ 는 속도지령  $r$ 에 대해서 과도 및 정상상태에서 발생하는 속도출력  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 의 속도차( $\omega_1 - \omega_2$ )의 누적분( $\int_0^t (\omega_1 - \omega_2) \cdot dt$ )에 해당한다. 이 속도차는 과도상태에서는 2축의 동특성의 불일치에 의해, 정상상태에서는 각 축에 인가되는 토크 외란  $T_{L1}$ ,  $T_{L2}$ 에 의해 발생된다.

속도제어기와 외란 관측기, 동기제어기의 역할은 다음과 같다. 각 축의 속도제어기는 오버슈터를 발생시키지 않고 속도지령  $r$ 을 추종하도록 한다. 그리고 각 축의 외란 관측기는 관측된 외란  $\hat{T}_{L1}$ ,  $\hat{T}_{L2}$ 를 모터에 직접 보상함으로써 외란  $T_{L1}$ ,  $T_{L2}$ 가 속도출력  $\omega_1, \omega_2$ 에 미치는 영향을 억제한다. 즉, 이 관측기는 정상상태에서 외란이 인가된 축의 속도를 빠른 시간 내에 회복시켜 2축간의 속도 차를 감소시킨다. 이것은 위치동기오차  $e_p$ 가 속도제어계에서 일차적으로 감소됨을 의미한다.

그러나 외란 관측기는 토크 외란 및 2축간의 동 특성의 불일치에 의해 발생한 위치동기오차  $e_p$ 를 영으로 수렴시킬 수 없으므로, Fig. 1에서와 같이 독립된 제1, 2축의 속도제어계에 위치동기제어기  $C_p(s)$ 를 갖는 피드백 루프를 부가한다. 이  $C_p(s)$ 는 제2축의 속도를 조절하여  $e_p$ 를 영으로 수렴시키는 역할을 한다.

## 3. 모델링

Fig. 1에서 제어대상인 모터는 전기자 제어방식의 직류 서보모터를 이용한다. 회로방정식을 이용하여 모터의 전기자 전압 입력  $e_{ai}$ 에서 속도출력  $\omega_i$ 까지의 모터의 전달함수는 식 (1)과 같이 1차계로 표현할 수 있다.

$$M_i(s) = \frac{\omega_i(s)}{e_{ai}(s)} = \frac{K_{Ti}}{R_{ai}J_i s + R_{ai}b_i + K_{Ti}K_{bi}} \quad (1)$$

여기서  $R_{ai}$ :전기자저항[Ω],  $K_{bi}$ :역기전력상수[V/rad/s],  $K_{Ti}$ :토크상수[Nm/A],  $J_i$ :관성모멘트[kgm<sup>2</sup>],  $b_i$ :점성마찰계수[Nm/rad/s]이다. 첨자  $i$ 는  $i=1, 2$ 로 각각 제1축과 제2축에 관련된 변수를 의미하며, 이하 수식에서도 동일하다.

## 4. 위치동기 제어계의 설계

### 4.1 속도 제어계

속도제어기는 제어대상이 오차 없이 목표치를 추종함과 동시에 과도상태에서 2축간의 속도응답이 일치하도록 설계한다. 즉, 2축의 속도응답이 일치하게 되면 외란이 인가되지 않는 한 위치동기오차는 발생하지 않는다.

한편 정상상태에서의 동기오차는 각 축에 인가되는 외란에 의해 발생된다. 이 외란에 적극적으로 대처하기 위하여 각 축에 저주파 필터를 갖는 외란 관측기를 부가한다.

#### (1) 외란 관측기

Fig. 2는 관측된 외란  $\hat{T}_{Li}$ 를 모터에 직접 보상함으로써, 외란  $T_{Li}$ 이 속도출력  $\omega_i$ 에 미치는 영향을 억제할 목적으로 이용된 외란 관측기의 블록도이다.

이 관측기는 홀소자를 이용한 전기자 전류의 계측을 전제로 하여,  $1/(J_i s + b_i)$ 의 역모델  $J_i s + b_i$ 와 관측기의 구현이 가능하도록 하기 위한 필터  $1/(T_i s + 1)$  등으로 구성된다. 그리고 토크 외란  $T_{Li}$  및 측정잡음  $n_i$ 에서 속도출력  $\omega_i$ 까지의 전달함수를 구하면 각각 식 (2), (3)과 같다.

$$\Omega_{Ti}(s) = \frac{\omega_i(s)}{T_{Li}(s)} = \frac{R_{ai}T_i s}{(T_i s + 1)(R_{ai}J_i s + R_{ai}b_i + K_{Ti}K_{bi})} \quad (2)$$

$$\Omega_{ni}(s) = \frac{\omega_i(s)}{n_i(s)} = \frac{-R_{ai}(J_i s + b_i)}{(T_i s + 1)(R_{ai}J_i s + R_{ai}b_i + K_{Ti}K_{bi})} \quad (3)$$

또한 제어입력  $u_i$ 에서 속도출력  $\omega_i$ 까지의 전달함수는 다음과 같다.

$$P_i(s) = \frac{\omega_i(s)}{u_i(s)} = \frac{K_{Ti}}{R_{ai}J_i s + R_{ai}b_i + K_{Ti}K_{bi}} \quad (4)$$

이때 식 (2)에서 양호한 외란 억제성능을 얻기 위해서는 필터의 시정수  $T_i$ 가 작아야 한다. 그러나  $T_i$ 를 작게 하면, 식

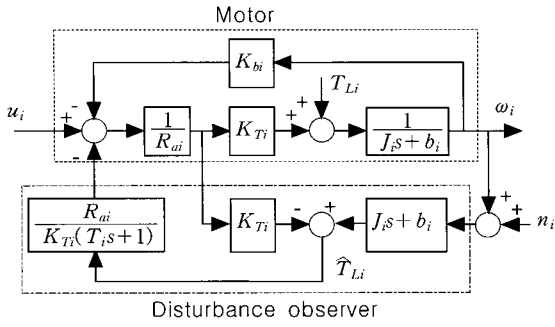


Fig. 2 Block diagram of disturbance observer

(3)에서 측정잡음  $n_i$ 가 속도출력  $\omega_i$ 에 미치는 영향이 증가되므로  $T_i$ 에 대한 적절한 절충이 요구된다.

(2) 속도제어기

본 연구에서 이용되는 각 축의 속도제어기  $C_i(s)$ 는 다음 식과 같다.

$$C_i(s) = K_{pi} \left( 1 + \frac{1}{T_{ii}s} \right) \quad (5)$$

여기서  $K_{pi}$ 는 비례게인,  $T_{ii}$ 는 적분시간을 의미한다.

그리고 제1, 2축의 속도 폐루프 전달함수  $F_i(s)$ 는 식 (4), (5)를 이용면 식 (6)과 같이 된다.

$$F_i(s) = \frac{\omega_i(s)}{r(s)} = \frac{P_i(s)C_i(s)}{1 + P_i(s)C_i(s)} \quad (6)$$

1) 제1축 속도제어기

제2축이 가능한 한 쉽게 제1축을 추종하기 위해, 속도제어기  $C_1(s)$ 는 오버슈터를 발생시키지 않도록 설계될 필요가 있다. 본 연구에서는 모터의 전달함수가 1차계이므로  $F_1(s)$ 의 극점이 실수축 상에 존재하도록  $C_1(s)$ 의 계수를 결정하는 방식을 이용한다. 즉, 실수축 상의 극점  $\sigma_1, \sigma_2$ 를 지정한 후,  $s^2 - (\sigma_1 + \sigma_2)s + \sigma_1\sigma_2 = 0$ 과 식 (6)의 특성방정식  $1 + P_1 C_1(s) = 0$ 의 계수를 비교하면  $K_{p1}, T_{i1}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$K_{p1} = -\frac{R_{a1}[J_1(\sigma_1 + \sigma_2) + b_1]}{K_{T1}} - K_b, \quad T_{i1} = \frac{K_{p1}K_{T1}}{R_{a1}J_1\sigma_1\sigma_2} \quad (7)$$

2) 제2축 속도제어기

Fig. 1에서 제1축 속도제어기  $F_1(s)$ 와 제2축의 속도제어기  $F_2(s)$ 의 시간응답이 과도상태 및 정상상태에서 정확히 일치되면, 축간의 속도 차가 발생하지 않으므로 위치동기오차  $e_p$ 는 영이 된다. 따라서 식 (6)에 포함되어 있는 제2축의 속도제어기  $C_2(s)$ 의 계수값은 다음의 조건이 만족되도록 설계할 필요가 있다.

$$F_1(s) = F_2(s) \quad (8)$$

한편 식 (8)의 조건을 만족시키는  $C_2(s)$ 의 계수값을 구하기 위한 한 방법으로 식 (9)의 평가함수  $J_w(t)$ 를 이용한다. 이때  $J_w(t)$ 가 영에 근사하도록 되는  $C_2(s)$ 의 계수( $K_{p2}, T_{i2}$ )값은 시행착오적으로 구한다.

$$J_w(t) = \int |\omega_1(t) - \omega_2(t)| dt \quad (9)$$

여기서  $\omega_1(t), \omega_2(t)$ 는 각각  $F_1(s)$ 와  $F_2(s)$ 의 단위계단응답(unit step response)이다.

4.2 위치동기 제어기

관측기를 포함한 속도제어기  $F_1(s), F_2(s)$ 와 동기제어기  $C_p(s)$ 로 구성되는 제안된 동기 제어기의 블록도는 Fig. 3과 같다. 여기서  $d$ 는 일정 시간동안 제거되지 않은 토크 외란  $T_{Li}$ 이 위치동기에 미치는 영향을 의미한다. 이 외란  $d$  및  $F_1(s)$ 와  $F_2(s)$ 의 동특성 차는 동기오차  $e_p$ 를 발생시키는 요인이다.

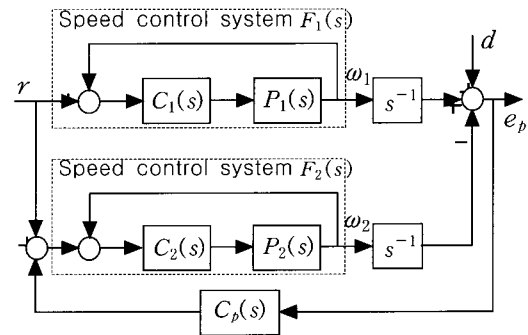


Fig. 3 Block diagram for the position synchronous controller design

한편 Fig. 3에서 외란  $d$  및 속도지령  $r$ 에서 동기오차  $e_p$ 까지의 전달함수를 구하면 각각 식 (10), (11)과 같다.

$$T_d(s) = \frac{e_p(s)}{d(s)} = \frac{s}{s + C_p(s)F_2(s)} \quad (10)$$

$$T_r(s) = \frac{e_p(s)}{r(s)} = \frac{F_1(s) - F_2(s)}{s + C_p(s)F_2(s)} \quad (11)$$

식 (10)에서 동기제어기  $C_p(s)$ 에 적분기가 포함되지 않을 경우, 외란  $d$ 가 계단(step)형이면 위치동기오차  $e_p$ 는 영으로 수렴되지만, 경사(ramp)형이면  $e_p$ 가 영으로 되지 않는다. 또한 식 (11)에서  $F_1(s)$ 와  $F_2(s)$ 의 동특성 차에 의해 발생된  $e_p$ 는  $C_p(s)$ 에 적분기가 포함되지 않으면 영으로 수렴될 수 없다. 따라서 본 연구에서  $C_p(s)$ 는 식 (12)와 같이 적분기가 포함된 PID 제어기를 이용한다.

$$C_p(s) = K_{pp} \left( 1 + \frac{1}{T_{ip}s} + T_{dp}s \right) \quad (12)$$

여기서  $K_{pp}$ 는 비례게인,  $T_{ip}$ 는 적분시간,  $T_{dp}$ 는 미분시간을 의미한다.

그리고 동기제어기  $C_p(s)$ 의 계수값은 MATLAB의 SIMULINK(1997)를 이용하여 가능한 한 짧은 시간 내에 정밀한 위치동기가 되도록, 시행착오적으로 결정한다.

### 5. 시뮬레이션

일반적으로 2축 주행시스템에는 동급의 모터가 이용되지만, 본 연구에서는 제안된 위치동기법의 검증에 위해 제1축은 400[W], 제2축은 300[W]급으로 특성이 다른 직류 서보 모터를 이용한다. Table 1은 각 모터의 계수값이다.

식 (2), (3)에 포함되어 있는 제1, 2축의 필터 시정수  $T_i$ 는 저주파의 토크 외란  $T_{Li}$ 에 대한 감도 저감화와 고주파의 측정잡음  $n_i$ 를 고려하여 시행착오적으로 구한다. Fig. 4는  $T_1 = T_2 = 0.005$  일 경우, 식 (2), (3)에 대한 제1, 2축의 주파수응답을 나타내고 있다.

Table 1 The parameters of motor 1, 2

Parameter	Motor 1	Motor 2
$R_a$ [ $\Omega$ ]	$1.2000 \cdot 10^0$	$1.0200 \cdot 10^0$
$L_a$ [H]	$8.9000 \cdot 10^{-4}$	$1.0700 \cdot 10^{-3}$
$K_b$ [v/rad/s]	$2.2279 \cdot 10^{-1}$	$2.2279 \cdot 10^{-1}$
$K_T$ [Nm/A]	$2.2246 \cdot 10^{-1}$	$2.2246 \cdot 10^{-1}$
$J$ [kgm <sup>2</sup> ]	$3.3320 \cdot 10^{-4}$	$2.4500 \cdot 10^{-4}$
$b$ [Nm/rad/s]	$9.0000 \cdot 10^{-3}$	$8.0000 \cdot 10^{-4}$

#### 5.1 관측기의 필터 시정수

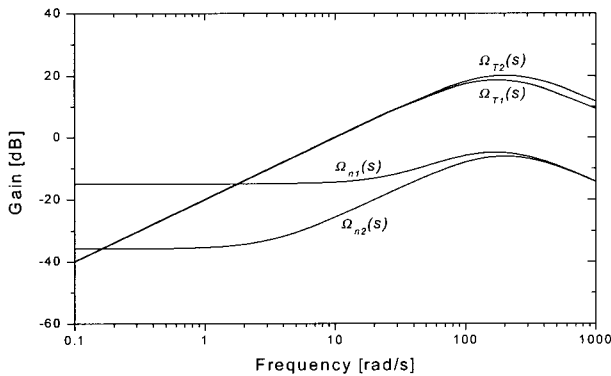


Fig. 4 Bode plots of  $\Omega_{T1}(s)$ ,  $\Omega_{n1}(s)$ ,  $\Omega_{T2}(s)$ ,  $\Omega_{n2}(s)$

#### 5.2 속도 및 동기제어기의 계수값

제1, 2축의 속도제어기 계수값은 각각 식 (7)과 식 (9)를 이용하여 구한다. Table 2는  $\sigma_1 = -45.0$ ,  $\sigma_2 = -200.0$  일 경우의  $C_1(s)$ 와  $J_w(t) = 6.65 \cdot 10^{-4}$  일 경우의  $C_2(s)$  계수값이다.

Table 2 Parameters of speed controller  $C_i(s)$

Controller	Parameter	$K_{pi}$	$T_{ii}$
$C_1(s)$		$1.69 \cdot 10^{-1}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$
$C_2(s)$		$1.39 \cdot 10^{-1}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$

Table 1, 2에서 모터 1, 2 및 속도제어기  $C_1(s)$ ,  $C_2(s)$ 의 계수값을 식 (6)에 대입하면, 속도제어계의 전달함수  $F_1(s)$ ,  $F_2(s)$ 는 각각 다음 식과 같이 된다.

$$F_1(s) = \frac{94.0377s + 9000.0}{s^2 + 245.0s + 9000.0} \quad (13)$$

$$F_2(s) = \frac{123.7373s + 12373.7255}{s^2 + 325.325s + 12373.7255} \quad (14)$$

그리고 Fig. 5는  $F_1(s)$ ,  $F_2(s)$ 의 속도응답이며, 두 응답이 과도상태에서 상당히 일치하므로 속도 차의 누적에 의해 발생되는 위치동기오차  $e_p$ 가 영에 근사적이다.

한편 다양한 응답 시뮬레이션을 통하여 식 (11)의 페루프 전달함수  $T_r(s)$ 의 영점과 극점이 Table 3과 같이 되는 위치동기 제어기  $C_p(s)$ 의 계수값은 Table 4와 같다.

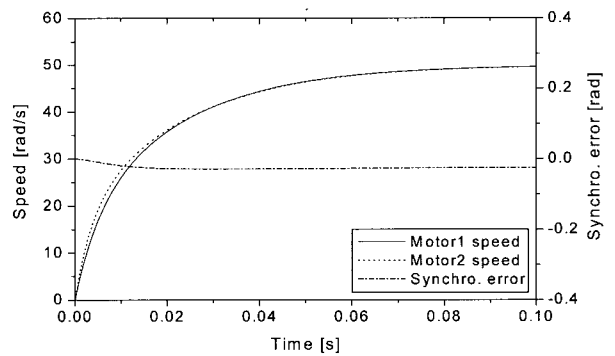


Fig. 5 Step responses and synchronous error under non-perturbation on  $J_w(t) = 6.65 \cdot 10^{-4}$

Table 3 Poles and zeros of  $T_r(s)$

Poles	$+6.5310 \cdot 10^{+13}$ , $-8.2303 \cdot 10^{+01}$ , $-2.1959 \cdot 10^{+01}$ , $+9.9228 \cdot 10^{-04}$ , $-4.9614 \cdot 10^{-04} \pm j8.5909 \cdot 10^{-04}$
Zeros	$-2.7628 \cdot 10^{+02}$ , $-2.0000 \cdot 10^{+02}$ , $-2.3555 \cdot 10^{+00}$ , $-4.5000 \cdot 10^{+01}$ , $-2.3343 \cdot 10^{+01} \pm j5.0494 \cdot 10^{+00}$

**Table 4** Parameters of position synchronous controller  $C_p(s)$

parameter controller	$K_{pp}$	$T_{ip}$	$T_{dp}$
$C_p(s)$	15.0	0.5	1.0

**5.3 시뮬레이션 및 고찰**

앞 절에서 설계된 모터 1, 2의 외란 관측기, 속도제어기와 동기제어기를 이용하여 동기 제어계를 구성한 후, 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증한다.

이때 플랜트의 변동 및 토크 외란이 동기시스템에 미치는 영향을 검토하기 위한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

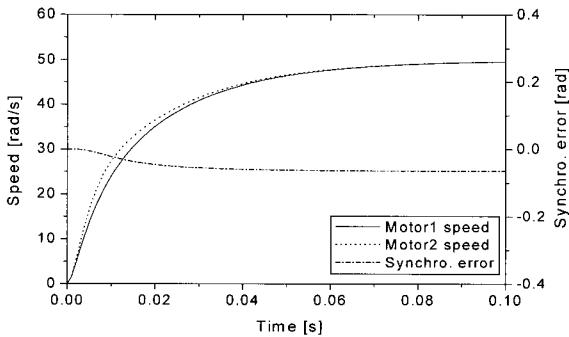
- (1) 모터1, 2의 관성모멘트  $J_1, J_2$  [Nm/s<sup>2</sup>] 및 등가점성 마찰계수  $b_1, b_2$  [Nm/rad/s]를 각각 30% 변동시킨다.
- (2) 모델링에서 제외된 각 모터의 인덕턴스는 Table 1의  $L_{a1}=8.9000 \cdot 10^{-4}$ ,  $L_{a2}=1.0700 \cdot 10^{-3}$  [H]를 부가시켜 플랜트의 차수를 증가시킨다.
- (3) 모터1, 2의 정격부하  $T_{R1}=1.27$ ,  $T_{R2}=0.95$  [Nm]의 30%에 해당하는 계단상의 토크 외란을 인가한다.

Fig. 6~Fig. 8은 시뮬레이션 조건 (1)~(3)이 적용될 경우이고, 그림에서 (a)는 50[rad/s]의 속도지령에 대한 과도상태의 속

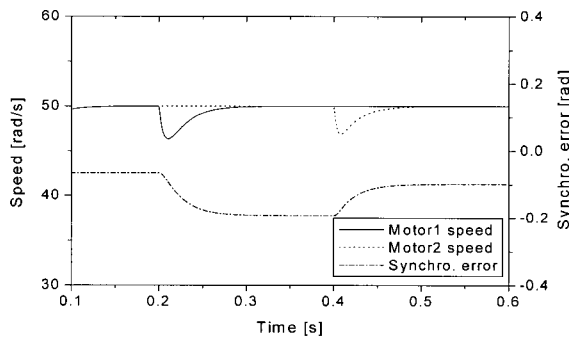
도 및 동기오차 응답을 타내고 있다. 그리고 (b)는 (a)의 연속 응답으로 0.2[s]의 시점에서 모터1, 0.4[s]의 시점에서 모터2에 외란이 인가될 경우의 속도 및 동기오차 응답을 나타내고 있다. 이때 실선은 모터1, 점선은 모터2의 속도응답이고, 일점쇄선은 위치동기오차이다.

Fig. 6은 외란 관측기 및 동기제어기가 없을 경우의 응답이다. 식 (9)의 평가함수를 이용하여 모터1, 2의 응답이 거의 일치되도록 속도제어기를 설계함으로써 동기오차는 Fig. 5와 같이 영에 근사하였다. 그러나 플랜트의 변동이 발생될 경우에는 Fig. 6(a)와 같이 모터1, 2의 속도응답이 일치하지 않게 된다. 즉, 플랜트의 변동으로 인해 과도상태에서 모터1, 2의 속도차가 누적되어 동기오차로 나타남을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 토크 외란이 인가될 경우 일정한 시간이 경과되면 모터1, 2의 속도는 회복되나, 회복되는 과정에서 발생된 모터1, 2의 속도차에 의해 동기오차는 더욱 증가됨을 나타내고 있다.

Fig. 7은 동기제어기는 없고, 외란 관측기만 있을 경우의 응답이다. 변동된 모터의 관성모멘트 및 점성마찰계수  $\hat{J}_i, \hat{b}_i$ 이 관측기의  $J_i, b_i$ 에 비해 큰 경우, 과도상태에서 관측기의  $\hat{T}_{Li}$ 가 증가되어 모터의 속도는 증가된다. 한편  $\hat{J}_1 > \hat{J}_2, \hat{b}_1 > \hat{b}_2$ 이면  $\hat{T}_{L1} > \hat{T}_{L2}$ 이 되어 모터1의 속도가 상대적으로 모터2의 속도보다 증가되므로 동기오차는 동기제어기의 역할과 관계없이 감소하게 된다. 즉, Fig 7(a)에서 모터1, 2간의 속도 차가 Fig. 6(a)에 비해 감소되므로 Fig. 7(a)의 동기오차도 Fig. 6(a)에 비

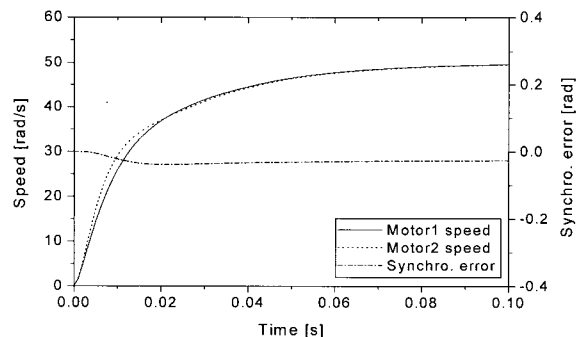


(a) transient state

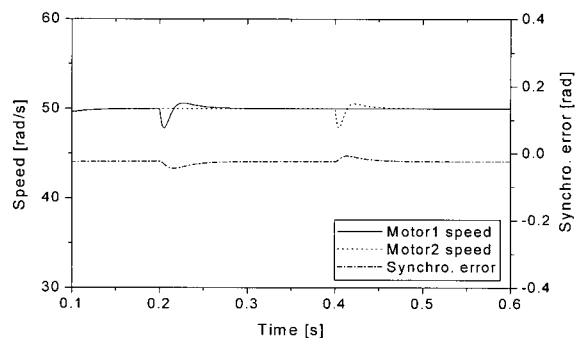


(b) with torque disturbance

**Fig. 6** Speed responses and synchronous error without observer and synchronous controller



(a) transient state

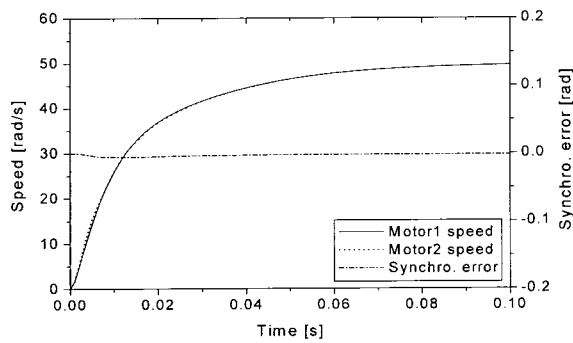


(b) with torque disturbance

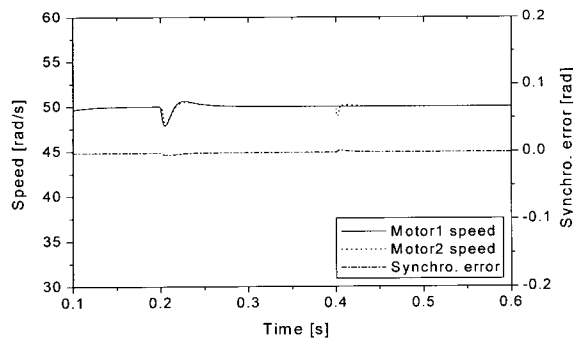
**Fig. 7** Speed responses and synchronous error with observer, without synchronous controller

해 감소하게 된다. Fig. 7(b)는 토크 외란이 인가될 경우, 관측기에 의해 Fig. 6(b)보다 빠른 시간 내에 외란이 제거되므로 동기오차가 감소됨을 나타내고 있다. 그러나 동기오차를 완전히 제거하기 위해서는 동기제어기가 필요로 된다.

Fig. 8은 외란 관측기 및 동기제어기가 있을 경우의 응답이다. Fig. 8(a), (b)의 모터1은 동기제어기의 영향을 받지 않으므로 과도상태 및 외란에 대해 각각 Fig. 7(a), (b)와 동일한 속도 응답을 나타내고 있다. 그러나 모터2는 과도상태 및 외란에 의해 동기오차가 발생되면 Fig. 7(a), (b)와 다른 응답을 나타내고 있다. Fig. 7(a)의 동기오차는 모터2의 속도가 모터1의 속도보다 빠르기 때문에 발생된다. 따라서 Fig. 8(a)와 같이 동기제어기가 모터2의 속도를 감속시켜 동기오차를 제거한다. 그리고 Fig. 8(b)에서 모터1측의 외란에 의해 동기오차가 발생되면 동기제어기가 모터2의 속도를 모터1의 속도와 동일하게 감·가속시켜 동기오차를 제거한다. 또한 모터2에 외란이 인가되면 동기제어기는 외란을 억제하는 역할을 동시에 수행하면서 동기오차를 제거하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) transient state



(b) with torque disturbance

Fig. 8 Speed responses and synchronous error with observer and synchronous controller

## 6. 결 론

본 연구에서는 외란 관측기와 PID 제어기법을 이용하여 정

밀한 위치동기를 실현하기 위한 동기제어방식이 제안되었다. 그리고 설계된 외란 관측기와 속도제어기, 위치동기제어기를 이용하여 2축 동기제어계를 구성한 후, 시뮬레이션을 통하여 다음 사항을 확인할 수 있었다.

- (1) 식 (9)의 평가함수  $J_w(t)$ 를 이용하여 2축간의 속도응답을 일치시킴으로써 과도상태에서 발생하는 위치동기오차를 감소시킬 수 있었다.
- (2) 동기제어계에 외란 관측기를 이용함으로써 각축의 외란에 의해 발생하는 동기오차를 감소시킬 수 있었다.
- (3) 2축간의 동특성 차 및 임의의 축에 인가된 외란에 의해 발생하는 위치동기오차는 제2축의 동기제어기에 의해 영으로 수렴됨을 확인할 수 있었다.
- (4) 동기제어기로 이용된 PID제어기는 설계가 비교적 용이하지만, 외란 관측기가 포함된 제어대상의 모델불확실성을 고려한 설계가 곤란하다. 따라서 정밀한 위치동기와 동기제어계의 강인한 안정성을 동시에 고려할 수 있는 동기제어의 설계가 필요함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- 변정환, 정석권, 양주호(1996). “다축구동시스템의 정밀위치동기 제어(I)”, 한국정밀공학회지, Vol. 13. No. 7, pp 115~121.
- 안승욱, 최만수, 박영준, 김재훈(1998). “2축구동방식을 갖는 대형 젠트리 로봇 시스템의 주행축 동기제어”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp 436~439.
- 양주호, 변정환, 김영복, 정석권(1997). “다축구동시스템의 정밀 위치동기제어(II)”, 한국정밀공학회지, Vol. 14. No. 3, pp 98~106.
- The MathWork Inc(1997). SIMULINK-Dynamic System Simulation for MATLAB.
- 鎌野, 鈴木, 井内, 富塚(1993). “アダプティブフイードフォワード制御を用いた2軸位置同期システム”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 29, No. 7, pp 785~791.
- 中村, 冷水, 久良(1997). “主軸縱軸關係をもつメカトロサーボ系の主軸位置同期を図った高精度輪郭制御法”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 33, No. 4, pp 274~279.
- 淺野一哉, 可地孝行, 青木秀未, 茨木通雄, 森脇三郎(1994). “外亂オブザーバを用いた連鑄モールド内溶鋼レベル制御”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 30, No. 7, pp 836~844.
- 上手康彦, 原島文雄(1993). モーションコントロール, コロナ社, pp 93~100.
- 後藤, 中村, 岡誠, 久良(1994). “複數サーボ系における從軸逆ダイナミクスを用いた主軸位置同期制御法”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 30, No. 6, pp 669~676.

2000년 10월 25일 원고 접수

2000년 1월 30일 수정본 채택