

## 커플링구조와 외란관측기를 결합한 회전시스템의 위치동기제어

변정환\*

### Position-Synchronous Control of a Rotating System by Adding Disturbance Observer to Coupling Structure

Jung Hoan Byun\*

#### ABSTRACT

In this study, a methodology of synchronous control which can be applied to position synchronization of a two-axis rotating system is developed. Based on coupling structure, the synchronous control system is composed of disturbance observer, speed and synchronous controllers. The speed controller is designed to follow speed reference. The disturbance observer is designed to restrain synchronous error. In addition, the synchronous controller is designed for a viewpoint of accurate synchronization in lead compensation law. The effectiveness of the proposed method is verified through simulation.

**Key Words** : Roating system (회전시스템), Coupling Structure (커플링구조), Disturbance Observer (외란관측기), Synchronous Error (동기오차), Position Synchronization (위치동기), Lead Compensator (진상보상기)

#### 1. 서론

연속적으로 회전하는 시스템은 박판의 이송시스템, 근거리 화물의 이송을 위한 크레인시스템 등과 같은 다양한 분야에서 이용되고 있다. 이때 회전 축간의 속도 및 위치동기의 정밀성은 이송 효율 및 제품의 정도에 중대한 영향을 미친다.<sup>1-7</sup>

최근 정밀한 위치동기를 실현하기 위한 다양한 연구가 발표되었다. 이들 연구에서 제어시스템의 구조는 주로 고정구조와 커플링구조로 분류된다. 동기제어기가 임의의 축에 영향을 미치는 고정구조는 동기 축의 확장성에서 커플링구조보다 유리하

다.<sup>3,4</sup> 그리고 동기제어기가 양 축에 영향을 미치는 커플링구조는 동기오차를 고정구조보다 효율적으로 제거할 수 있다.<sup>5,6,7</sup> 한편 커플링구조를 이용한 기존의 위치동기 연구에서 동기오차의 제거는 동기 제어기에 전적으로 의존하고 있다.

본 연구에서는 외란이 위치동기에 미치는 영향을 고려하여 외란관측기와 동기제어기로 동기오차를 제거하는 커플링구조의 동기제어방식을 제안한다. 이 방식에 의하면 동기시스템은 속도제어기, 외란관측기, 동기제어기로 구성된다. 속도제어기는 과도상태에서 발생하는 위치동기오차의 감소를 위해 양 축의 속도폐루프 전달함수가 일치되도록 설

\*\* 2002년 4월 26일 접수

\* 여수대학교 동력시스템공학과

계된다.

외란관측기는 각 축에 인가되는 토크외란을 억제하여 동기오차를 감소시키도록 설계된다. 그리고 동기제어기는 동특성의 불일치 및 외란에 의해 발생하는 위치동기오차를 영으로 수렴시키도록 설계된다. 끝으로 동특성이 다른 직류 모터를 이용하여 제안된 방식의 타당성을 검증한다.

## 2. 위치동기 제어계의 구성 및 설계

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  $C_1(s)$ ,  $C_2(s)$ , 예비필터  $C_{A1}(s)$ ,  $C_{A2}(s)$ , 외란관측기  $O_1(s)$ ,  $O_2(s)$ , 동기제어기  $C_p(s)$ 로 구성된다.

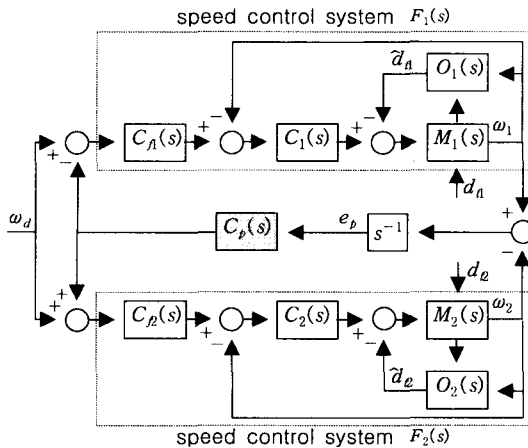


Fig. 1 Schematic diagram of the synchronous control system with disturbance observer

본 연구에서 영으로 수렴시키고자 하는 위치동기오차  $e_p$ 는 속도지령  $r$ 에 대해서 과도 및 정상상태에서 발생하는 속도출력  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 의 속도 차의 누적분이다. 이 속도 차는 과도상태에서는 양 축간의 동특성의 불일치에 의해, 정상상태에서는 각 축에 인가되는 토크 외란  $d_n$ ,  $d_e$ 에 의해 발생된다.

속도제어기와 예비필터, 외란관측기, 동기제어기의 역할은 다음과 같다. 각 축의 속도제어기와 예비필터는 오버슈트를 발생시키지 않고 속도지령

$\omega_d$ 를 추종하도록 한다. 그리고 각 축의 외란관측기는 관측된 외란  $\hat{d}_n$ ,  $\hat{d}_e$ 를 모터에 직접 보상함으로써 외란  $d_n$ ,  $d_e$ 가 속도출력  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 에 미치는 영향을 억제한다. 즉, 이 관측기는 정상상태에서 외란이 인가된 축의 속도를 빠른 시간 내에 회복시켜 양 축간의 속도 차를 감소시킨다. 이것은 위치동기오차  $e_p$ 가 속도제어계에서 일차적으로 감소됨을 의미한다.

그러나 외란관측기는 토크 외란 및 양 축간의 동 특성의 불일치에 의해 발생한 위치동기오차  $e_p$ 를 영으로 수렴시킬 수 없다. 따라서 제1, 2축의 속도제어계에 동기제어기  $C_p(s)$ 를 갖는 피드백 루프를 부가한다. 이  $C_p(s)$ 는 양 축의 속도를 동시에 조절하여  $e_p$ 를 영으로 수렴시키기는 역할을 한다.

한편 Fig. 1에서  $M_1(s)$ ,  $M_2(s)$ 는 각각 전기자제어방식의 직류모터이다. 회로방정식을 이용하여 모터의 전압입력  $e_i$ 에서 속도출력  $\omega_i$ 까지의 전달함수  $M_i(s)$ 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M_i(s) = \frac{K_{ai} K_{Ti}}{R_{ai} J_i s + R_{ai} b_i + K_{Ti} K_{bi}} \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

여기서,  $L_{ai}$ 는 전기자인덕턴스[H],  $R_{ai}$ 는 전기자저항[Ω],  $K_{ei}$ 는 역기전력상수[V/rad/s],  $K_{Ti}$ 는 토크상수[Nm/A],  $J_i$ 는 관성모멘트[kgm<sup>2</sup>],  $b_i$ 는 점성마찰계수[Nm/rad/s],  $K_{ai}$ 는 증폭기이득이다. 그리고 첨자  $i$ 는 제1, 2축에 관련된 변수를 의미하며, 이하 수식에서도 동일하다.

### 2.1 속도 제어계

동기제어계에서 양 축의 속도제어기는 제어대상이 오차 없이 목표치를 추종함과 동시에 과도상태에서 양 축의 속도응답이 일치하도록 설계한다. 즉, 양 축의 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 필터(low pass filter)를 갖는 외란관측기<sup>8</sup>를 부가한다.

#### 2.1.1 외란관측기

Fig. 2는 관측된 외란  $\hat{d}_i$ 를 모터에 직접 보상함으로써, 토크 외란  $d_i$ 가 속도출력  $\omega_i$ 에 미치는 영향을 억제할 목적으로 이용된 외란관측기의 블록도이다. 이 관측기는  $1/(J_i s + b_i)$ 의 역모델  $J_i s + b_i$ 와 관측기의 구현이 가능하도록 하는 필터  $1/(T_{fi} s + 1)$  등으로 구성된다. 그리고 토크 외란  $d_i$ 와 측정잡음  $n_i$ 에서 속도출력  $\omega_i$ 까지의 전달함수를 구하면 각각 식 (2), (3)과 같다.

$$O_{fi}(s) = \frac{R_{ai} T_{fi} s}{(T_{fi} s + 1)(R_{ai} J_i s + R_{ai} b_i + K_{Ti} K_{bi})} \quad (2)$$

$$O_{ni}(s) = \frac{-R_{ai}(J_i s + b_i)}{(T_{fi} s + 1)(R_{ai} J_i s + R_{ai} b_i + K_{Ti} K_{bi})} \quad (3)$$

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

$$P_i(s) = \frac{K_{mi}}{s - \alpha_i} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha_i = -(R_{ai} b_i + K_{Ti} K_{bi}) / (R_{ai} J_i)$ ,  $K_{mi} = (K_{ai} K_{Ti}) / (R_{ai} J_i)$ 이다.

이때 식 (2)에서 양호한 외란 억제성능을 얻기 위해서는 필터의 시정수  $T_{fi}$ 가 작아야 한다. 그러나  $T_{fi}$ 를 작게 하면, 식 (3)에서 측정잡음  $n_i$ 가 속도출력  $\omega_i$ 에 미치는 영향이 증가되므로  $T_{fi}$ 에 대한 적절한 절충이 요구된다.

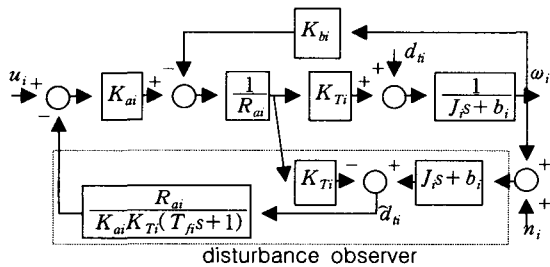


Fig. 2 Block diagram of disturbance observer

### 2.1.2 속도제어기

각 축의 속도제어기  $C_i(s)$ 는 PI제어법을 이용하여 오버슈트를 발생시키지 않고, 속도지령  $\omega_d$ 를 추종하도록 설계되며, 전달함수는 다음 식과 같다.

$$C_i(s) = \frac{K_{ci}(s - \beta_i)}{s} \quad (5)$$

여기서,  $K_{ci}$ 는 비레이득,  $\beta_i$ 는 영점이고, 제어 시스템이 비최소위상시스템이 되지 않도록  $K_{ci} > 0$ ,  $\beta_i < 0$ 을 만족해야 한다.

각 축의 속도 페루프 전달함수  $T_i(s)$ 는 식 (4), (5)를 이용하면 다음 식과 같이 된다.

$$T_i(s) = \frac{K_{mi} K_{ci}(s - \beta_i)}{s^2 + (K_{mi} K_{ci} - \alpha_i)s - K_{mi} K_{ci} \beta_i} \quad (6)$$

식 (6)에서 영점은 계단입력에 대해 오버슈트를 증가시키는 효과를 가져온다. 따라서 영점을 제거하기 위해 식 (7)과 같은 예비필터  $C_{fi}(s)$ 를 사용한다.

$$C_{fi}(s) = -\frac{\beta_i}{s - \beta_i} \quad (7)$$

즉 식 (7)을 이용함으로써 식 (6)의 페루프 전달함수  $T_i(s)$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$F_i(s) = T_i(s) C_{fi}(s) = \frac{-K_{mi} K_{ci} \beta_i}{s^2 + (K_{mi} K_{ci} - \alpha_i)s - K_{mi} K_{ci} \beta_i} \quad (8)$$

#### 1) 제1축 속도제어기

제1축의 속도제어기 설계방법은 다음과 같다. 퍼센트 오버슈트  $P.O$ 와 정착시간  $T_s$ 를 설계조건으로 하여 식 (9)의 대표극을 구한다.

$$a_i, \hat{q}_i = -\zeta_i \omega_{ni} \pm j\omega_{ni} \sqrt{1 - \zeta_i^2} \quad (9)$$

여기서,  $\zeta_i$ 는 감쇠비,  $\omega_{ni}$ 는 고유진동수이며 각각 다음 식과 같다.

$$\zeta_i = \sqrt{\frac{[\ln(P.O/100)]^2}{\pi^2 + [\ln(P.O/100)]^2}} \quad (10)$$

$$\omega_{ni} = \frac{4}{T_s \zeta_i}$$

그리고 설계조건을 만족하는 특성방정식은 식 (11)과 같이 된다.

$$s^2 - (q + \hat{q})s + q\hat{q} = 0 \quad (11)$$

한편 식 (8)로부터 제어기의 계수가 포함된 특성방정식을 구하면 식 (12)와 같이 된다.

$$s^2 + (K_{m1}K_{c1} - \alpha_1)s - K_{m1}K_{c1}\beta_1 = 0 \quad (12)$$

식 (11)과 식(12)의 계수를 비교하면, 식 (5)의  $K_{c1}$ ,  $\beta_1$ 는 식 (13)과 같이 된다.

$$K_{c1} = \frac{\alpha_1 - (q + \hat{q})}{K_{m1}} \quad (13)$$

$$\beta_1 = -\frac{a\hat{q}}{K_{m1}K_{c1}}$$

## 2) 제2축 속도제어기

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

$$F_1(s) = F_2(s) \quad (14)$$

한편 식 (14)의 조건을 만족시키는  $C_2(s)$ 의 계수값  $K_{c2}$ ,  $\beta_2$ 는 식 (6)에서 제1축의 특성방정식과 일치되도록 하면 다음과 같이 구해진다.

$$K_{c2} = \frac{K_{m1}K_{c1} - \alpha_1 + \alpha_2}{K_{m2}} \quad (15)$$

$$\beta_2 = \frac{K_{m1}K_{c1}\beta_1}{K_{m2}K_{c2}}$$

## 2.2 위치동기 제어기

관측기를 포함한 속도제어기  $F_1(s)$ ,  $F_2(s)$ 와 동기제어기  $C_p(s)$ 로 구성되는 동기제어계의 블록도는 Fig. 3과 같다. 여기서  $d_1$ ,  $d_2$ 는 일정 시간동안 제거되지 않은 토크외란  $d_{n1}$ ,  $d_{n2}$ 가 위치동기에 미치는 영향을 의미한다.

Fig. 3에서 속도지령  $\omega_d$  및 외란  $d_1$ ,  $d_2$ 에서 동기오차  $e_p$ 까지의 전달함수를 구하면 각각 식 (16), (17)과 같다.

$$\frac{e_p(s)}{\omega_d(s)} = \frac{F_1(s) - F_2(s)}{s + C_p(s)(F_1(s) + F_2(s))} \quad (16)$$

$$\frac{e_p(s)}{d_1(s) - d_2(s)} = \frac{s}{s + C_p(s)(F_1(s) + F_2(s))} \quad (17)$$

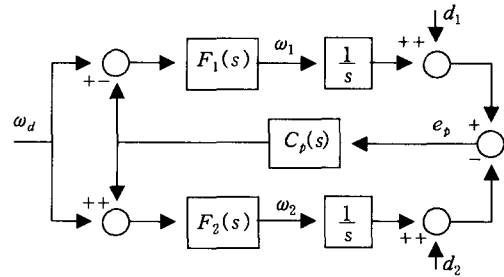


Fig. 3 Block diagram of simplified control system

식 (16)은  $F_1(s)$ 와  $F_2(s)$ 의 동특성 차에 의해, 식 (17)은  $d_1$ ,  $d_2$ 에 의해  $e_p$ 가 발생됨을 의미한다. 그리고 속도지령  $\omega_d$  및 외란  $d_1$ ,  $d_2$ 를 계단입력으로 가정하면 동기제어기  $C_p(s)$ 가 상수이득만을 갖더라도 식 (16), (17)의 동기오차  $e_p$ 는 영으로 수렴된다. 그러나  $e_p$ 의 빠른 제거와 진동 억제체를 위해 동기제어기  $C_p(s)$ 로 식 (18)의 진상보상기(lead compensator)를 이용한다.

$$C_p(s) = \frac{K_I(1 + aT_I s)}{1 + T_I s} \quad (18)$$

여기서  $K_I$ 은 상수이득,  $-1/aT_I$ 은 영점,  $-1/T_I$ 은 극점,  $a(a>1)$ 는 영점과 극점의 거리 비이다.

Fig. 4는 공칭 플랜트  $G(s)$ 에 대해 동기제어계를 안정하도록 하는 동기제어기  $C_p(s)$ 를 설계하기 위한 블록도이다. 여기서  $w$ 는 외란 등의 외부입력이고,  $G(s) = s^{-1}F_1(s) = s^{-1}F_2(s)$ 이다.

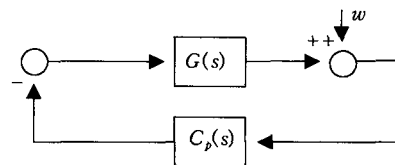


Fig. 4 Block diagram for the controller  $C_p(s)$  design

목표로 하는 위상여유  $\phi_{mo}$ 와 이득교차 주파수  $\omega_{go}$ 를 만족하기 위한  $C_p(s)$ 의 설계순서는 다음과 같다.  $\phi_{mo}$ 를 만족하는  $C_p(s)$ 의 최대 위상진행각  $\theta_m$ 은 식 (19)와 같이 된다.

$$\theta_m = \phi_{mo} - 180^\circ + \angle G(j\omega_{go}) \quad (19)$$

식 (19)를 이용하여  $a$ 를 구하면 식 (20)과 같이 된다.

$$a = \frac{1 + \sin \theta_m}{1 - \sin \theta_m} \quad (20)$$

그리고  $\theta_m$ 을 주는 주파수  $\omega_m$ 을  $\omega_{go}$ 로 선택하면  $T_i$ 은 식 (21)과 같이 된다.

$$T_i = \frac{1}{\omega_{go} \sqrt{a}} \quad (21)$$

그리고  $\omega_{go}$ 가 루프전달함수  $C_p(s)G(s)$ 의 이득교차 주파수가 되도록 하는  $K_i$ 은 식 (22)와 같다.

$$K_i = \frac{1}{\sqrt{a} |G(j\omega_{go})|} \quad (22)$$

### 3. 시뮬레이션 및 고찰

일반적으로 연속 회전시스템에는 동급의 모터가 이용되지만, 본 연구에서는 제안된 위치동기법의 검증에 위해 제1축은 300[W]급, 제2축은 400[W]으로 특성이 다른 직류모터를 이용한다. Table 1은 각 모터의 계수값이다.

Table 1 The parameters of motor 1, 2

parameter \ motor	motor 1	motor 2
$K_{ai}$	$6.0000 \cdot 10^0$	$6.0000 \cdot 10^0$
$R_{ai}[\Omega]$	$1.0200 \cdot 10^0$	$1.2000 \cdot 10^0$
$L_{ai}[H]$	$1.0700 \cdot 10^{-3}$	$8.9000 \cdot 10^{-4}$
$K_{bi}[\text{v/rad/s}]$	$2.2279 \cdot 10^{-1}$	$2.2279 \cdot 10^{-1}$
$K_{Ti}[\text{Nm/A}]$	$2.2246 \cdot 10^{-1}$	$2.2246 \cdot 10^{-1}$
$J_i[\text{kgm}^2]$	$2.4500 \cdot 10^{-4}$	$3.3320 \cdot 10^{-4}$
$b_i[\text{Nm/rad/s}]$	$8.0000 \cdot 10^{-4}$	$9.0000 \cdot 10^{-3}$
$T_{Bi}[\text{Nm}]$	$9.5000 \cdot 10^{-1}$	$1.2700 \cdot 10^0$

제1, 2축의 관측기 필터 시정수  $T_f$ 는 저주파의 토크 외란  $d_n$ 에 대한 감도 저감화와 고주파의 측정잡음  $n_i$ 를 고려하여  $T_{f1} = T_{f2} = 0.001$ 로 선정한다. 이때 식 (2), (3)에 대한 제1, 2축의 주파수응답은 Fig. 5와 같다.

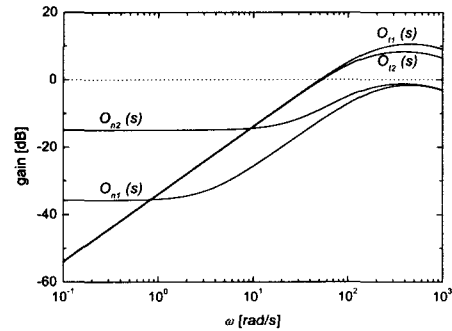


Fig. 5 Bode plots of  $O_{n1}(s)$ ,  $O_{n2}(s)$ ,  $O_{e1}(s)$ ,  $O_{e2}(s)$

제1축 속도제어기  $C_1(s)$ 의 계수값은  $P.O=0.1\%$ ,  $T_s=0.03[\text{s}]$ 를 설계조건으로 하여 식 (9)~(13)을 이용하면  $K_{c1}=0.0122$ ,  $\beta_1=-329.67$ 로 된다. 그리고 제2축 속도제어기  $C_2(s)$ 의 계수값은 식 (15)를 이용하면  $K_{c2}=0.0347$ ,  $\beta_2=-185.43$ 로 된다. 속도제어기  $C_1(s)$ ,  $C_2(s)$ 와 예비필터  $C_{f1}(s)$ ,  $C_{f2}(s)$ 의 계수값을 식 (8)에 대입하면, 속도제어계의 전달함수  $F_1(s)$ ,  $F_2(s)$ 는 다음과 같이 된다.

$$F_1(s) = F_2(s) = \frac{21454.8599}{s^2 + 266.6667s + 21454.8599} \quad (23)$$

한편 위치동기제어기  $C_p(s)$ 의 계수값은 위상여유  $\phi_{mo}=90^\circ$ 와 이득교차 주파수  $\omega_{go}=40[\text{rad/s}]$ 를 성능규격으로 하여 설계한다. Fig. 6은 개루프전달함수  $G(j\omega)$ 와 루프전달함수  $C_p(j\omega)G(j\omega)$ 의 이득 및 위상선도를 나타내고 있다. Fig. 6의 위상선도에서  $\angle G(j40)=-118.32$ 이므로 식 (19)로부터  $\theta_m=28.323$ 가 되고, 이 값을 식 (20)에 대입하면  $a=2.8054$ 가 된다. 이  $a$ 와  $\omega_{go}$ 를 식 (21)에 대입하면  $T_i=0.0149$ 가 된다. 그리고 Fig. 6의 이득선도로부터  $|G(j40)|=0.0237$ 을 식 (22)에 대입하면

$K_I = 25.164$ 이 된다.

따라서 위치동기제어기  $C_p(s)$ 는 다음과 같이 된다.

$$C_p(s) = \frac{25.164(1+0.0419s)}{1+0.0149s} \quad (24)$$

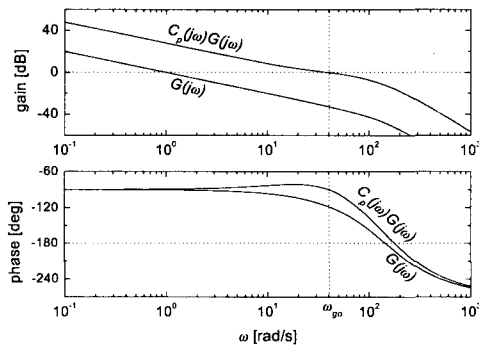


Fig. 6 Bode digram of  $G(s)$ ,  $C_p(s)G(s)$

앞에서 설계된 외란관측기, 속도제어기와 위치 동기제어기를 이용하여 동기제어계를 구성한 후, MATLAB의 SIMULINK<sup>9</sup>를 이용한 시뮬레이션으로부터 제안된 방법의 타당성을 검증한다. 이때 플랜트의 변동 및 토크 외란이 동기계에 미치는 영향을 검토하기 위한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- (1) Table 1에서  $J_i, b_i$ 는 30%,  $R_{ai}, K_{bi}, K_{Ti}$ 는 10% 변동시킨다.
- (2) 모델링에서 제외된  $L_{ai}$ 를 30% 변동시킨 후, 부가시켜 플랜트의 차수를 증가시킨다.
- (3) 모터1, 2의 정격부하  $T_{Ri}$ 의 30%에 해당하는 계단상의 토크 외란을 인가한다.

Fig. 7~9는 30[rad/s]의 계단입력에 대한 속도(a) 및 동기오차(b) 응답을 나타내고 있다.

Fig. 7은 외란관측기 및 동기제어기가 없을 경우의 응답이다. 식 (7)과 (15)를 이용하여 식 (23)과 같이 모터1, 2의 속도폐루프 전달함수가 완전히 일치되도록 속도제어기를 설계함으로써 동기오차는 발생되지 않는다. 그러나 공칭 플랜트  $P_i(s)$ 가 변동된 경우에는 Fig. 7(a)와 같이 과도상태에서 모터1,

2의 속도응답이 일치하지 않게 된다. Fig. 7(b)는 과도상태에서 발생된 모터1, 2의 속도 차가 누적되어 동기오차로 됨을 나타내고 있다.

Fig. 8은 동기제어기는 없고, 외란관측기만 있을 경우의 응답이다. 외란관측기는 변동된 플랜트  $P_i(s)$ 의 응답을 공칭 플랜트  $P_i(s)$ 와 유사하도록 하는 역할을 한다. 따라서 Fig. 8(a)의 속도응답이 Fig. 7(a)에 비해 더욱 일치되므로, Fig. 8(b)의 동기오차는 동기제어기와 관계 없이 Fig. 7(b)보다 감소됨을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 외란관측기 및 동기제어기가 있을 경우의 응답이다. 동기제어기는 과도상태부터 동기오차를 제거하기 위해 모터1, 2의 속도를 동시에 조절하는 역할을 한다. 따라서 Fig. 9(a)는 Fig. 7(a), 8(a)에 비해 복잡한 거동을 하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 9(b)에서 플랜트가 변동된 경우에도 동기제어기에 의해 동기오차는 0[rad]으로 수렴됨을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 10~12는 각각 Fig. 7~9의 연속 응답으로 모터1, 2에 토크 외란이 인가될 경우의 속도 (a) 및 동기오차(b) 응답을 나타내고 있다.

Fig. 10(a)는 토크 외란이 인가될 경우, 일정한 시간이 경과되면 모터1, 2의 속도가 속도제어기에 의해 회복되는 과정을 나타내고 있다. 그러나 Fig. 10(b)와 같이 회복되는 과정에서 발생된 모터1, 2간의 속도 차에 의해 동기오차는 더욱 증가됨을 나타내고 있다.

Fig. 11(a)는 토크 외란이 인가될 경우, 각 축의 관측기에 의해 외란이 Fig. 10(a)보다 빠른 시간 내에 제거됨을 나타내고 있다. 따라서 Fig. 11(a)의 동기오차는 Fig. 10(a)보다 매우 감소됨을 확인할 수 있다. 그러나 동기오차를 완전히 제거하기 위해서는 동기제어기가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 12는 토크 외란에 의해 동기오차가 발생되면 동기제어기가 모터1, 2의 속도를 동시에 조절하여 동기오차를 0[rad]로 수렴시킴을 나타내고 있다. 또한 동기오차의 최대치도 Fig. 11에 비해 작게 됨을 확인할 수 있다.

따라서 관측기는 동기오차의 최대치 감소 및 제거에 중요한 역할을 담당하고 있음을 알 수 있다. 또한 동기제어기는 동기오차의 완전한 제거를 위해 반드시 필요함을 확인할 수 있다.

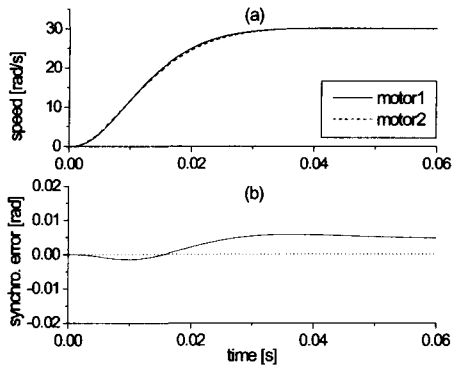


Fig. 7 Speed(a) and synchro. error(b) without observer and synchro. controller for step input

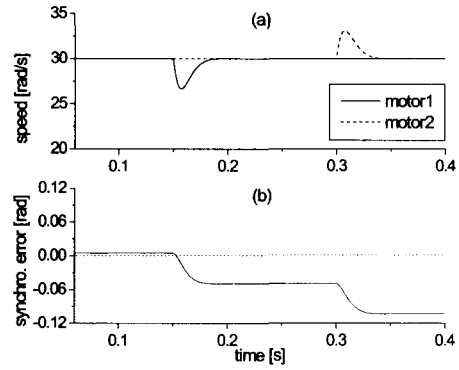


Fig. 10 Speed(a) and synchro. error(b) without observer and synchro. controller under disturbance

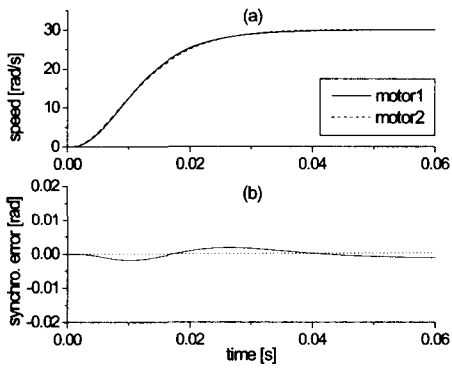


Fig. 8 Speed(a) and synchro. error(b) with observer, without synchro. controller for step input

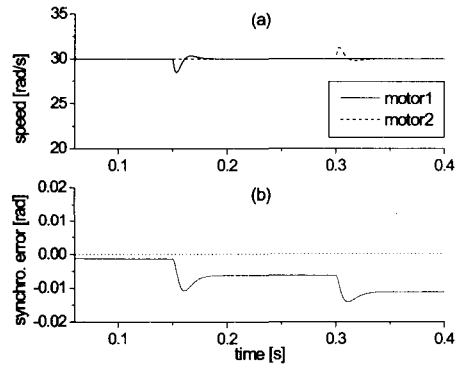


Fig. 11 Speed(a) and synchro. error(b) with observer, without synchro. controller under disturbance

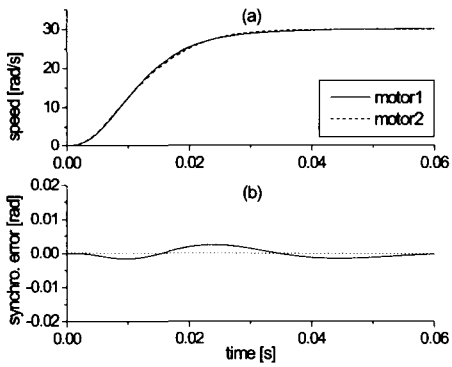


Fig. 9 Speed(a) and synchro. error(b) with observer and synchro. controller for step input

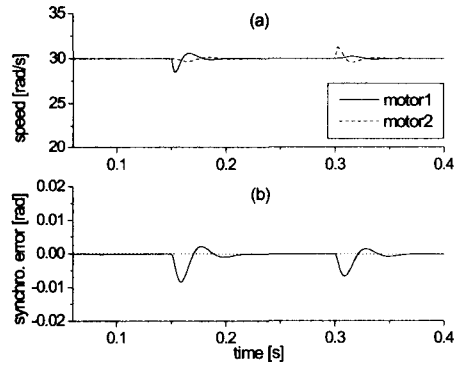


Fig. 12 Speed(a) and synchro. error(b) with observer and synchro. controller under disturbance

#### 4. 결론

연속적으로 회전하는 2축간의 정밀한 위치동기를 위해 커플링구조에 외란관측기를 결합한 동기방식이 제안되었다. 각 축의 속도제어계는 속도제어기인 PI제어기와 예비필터, 외란관측기로 구성하였다. 또한 양 축에 커플링된 위치동기제어기로 진상보상기를 이용하였다. 그리고 설계된 외란관측기와 속도제어기, 위치동기제어기를 이용하여 2축 동기제어계를 구성한 후, 다양한 시뮬레이션을 통하여 다음 사항을 확인할 수 있었다.

(1) 모터의 동특성이 다른 경우, 양 축의 속도응답이 일치하도록 제2축의 예비필터와 속도제어기의 계수를 선정함으로써 과도상태에서 발생하는 위치동기오차의 감소가 가능하였다.

(2) 각 축의 속도제어계에 부가된 외란관측기는 토크 외란을 빠르게 제거함으로써 외란에 의해 발생하는 동기오차를 감소시키는 효과를 얻을 수 있었다.

(3) 속응성 향상과 진동 억제를 위해 동기제어기로 이용된 진상보상기는 파라미터 변동 및 외란에 의해 발생하는 위치동기오차를 0[rad]로 수렴시킴을 확인할 수 있었다.

(4) 동기제어기로 이용된 진상보상기는 설계가 비교적 용이하지만, 외란관측기가 포함된 제어대상의 모델불확실성을 고려한 설계가 곤란하다. 따라서 정밀한 위치동기와 동기제어계의 강인한 안정성을 동시에 고려할 수 있는 동기제어기의 설계가 요구됨을 확인하였다.

템의 정밀위치동기제어(II)," 한국정밀공학회지, 제14권, 제3호, pp. 98-106, 1997.

4. 변정환, 여동준, "외란관측기를 이용한 2축 구동시스템의 동기제어," 대한기계학회 논문집, 제25권, 제2호, pp. 242-249, 2001.
5. 정석권, 김영진, 유삼상, "협조제어에 의한 2축 연속 회전시스템의 고정도 위치동기 제어," 대한기계학회 논문집, 제25권, 제12호, pp. 2078-2090, 2001.
6. 안승욱, 최만수, 박영준, 김재훈, "2축구동방식을 갖는 대형 겐트리 로봇시스템의 주행축 동기제어," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 436-439, 1998.
7. Kamano, T., Suzuki, T., Iuchi, N. and Tomizuka, M., "Adaptive Feedforward Controller for Synchronization of Two Axes Positioning System," SICE, Vol. 29, No. 7, pp. 785-791, 1993.
8. 土手康彦, 原島文雄, "モーションコントロール," コロナ社, pp. 93-100, 1993.
9. The MathWork Inc., SIMULINK-Dynamic System Simulation for MATLAB, 1997.

#### 참고문헌

1. Goto, S., Nakamura, M., Oka, S. and Kyura, N., "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, 1994.
2. Nakamura, M., Hiyamizu, D. and Kyura, N., "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, 1997.
3. 양주호, 변정환, 김영복, 정석권, "다축 구동시스