

다축 구동 시스템의 정밀 위치동기 제어 (I)

변정환*, 정석권**, 양주호*

High Precision Position Synchronous Control in a Multi-Axes Driving System

Jung-Hoan Byun*, Seok-Kwon Jeong** and Joo-Ho Yang*

ABSTRACT

Multi-axes driving system is more suitable for FMS(Flexible Manufacturing System) compared with a conventional single-axis driving system. It has some merits such as flexibility in operation, improvement of net working rate, maintenance free because of no gear train, etc. However, studies on position synchronous control for high precision in the multi-axes driving system are not enough. In this paper, a new method of position synchronous control is suggested in order to apply to the multi-axes driving system. The proposed method is structured very simply using speed and position controller based on PID control law. Especially, the position controller is designed to keep position error to minimize by controlling either speed of two motors. The effectiveness of the proposed method is successfully confirmed through several experiments.

Key Words : Multi-Axes Driving(다축 구동), Position Synchronous Control(위치동기 제어), Speed Controller(속도 제어기), Position Controller(위치 제어기), PID Controller(PID 제어기)

1. 서론

연속적으로 회전하는 복수의 디스크(disk)나 원통(drum)과 같은 부하장치에 대한 정밀한 위치동기 제어 방식 중에서 현재까지 널리 이용되고 있는 방식은 단일축 구동(single Axis driving)방식 즉, 집중 구동방식이다. 이 방식은 단일의 모터 축에 다수의 기어(gear)와 캠(cam)을 결합시켜서 복수의 부하장치를 기계적으로 동기시키는 방법으로서, 동작의 전달이 정확하고 기구학적으로 비교적 간단히 위치동기를 취할 수 있는 장점이 있

는 반면, 시스템의 구성 및 운용상 다음과 같은 결점을 갖게 된다. 첫째, 기어의 정기적인 마모도 점검 및 보수가 필요하다. 둘째, 단일축상에 다수의 기어가 접촉되므로 장치가 거대화, 복잡화된다. 셋째, 각각의 부하장치가 단일축상에 연동되어 있으므로 일부 시스템의 고장시 전체 시스템의 정지가 불가피하게 되어 작업 가동률이 저하된다. 넷째, 대동력원을 이용하기 때문에 에너지 이용면에서 불리하다. 다섯째, 기어에 의한 마찰, 잡음, 진동으로 환경문제 유발과 고속화에 한계가 있다. 여섯째, 하드웨어(hardware)에 강하게 의존되므로 유연성이 결여되어

* 부산수산대학교 제어기계공학과
** 부산수산대학교 해양산업개발연구소

FMS(Flexible Manufacturing System) 혹은 CIM(Computer Integrated Manufacturing) 시스템에서의 유연한 대응이 불가능하게 된다. 따라서 이러한 집중 구동방식의 결점을 해결하기 위한 수단으로, 각각의 부하장치를 독립된 모터로 개별 구동하는 다축 구동(multi-axes driving)방식 즉, 분산 구동방식이 주목받고 있다.^{(1),(2)} 이 방식은 위에서 열거한 집중 구동방식의 결점을 극복할 수 있으나, 집중 구동방식에서의 기계적인 구속력에 의한 위치동기를 제어 알고리즘에 의하여 실현하는 제어방식의 개발이 필요하다. 한편, 기존의 분산 구동방식으로는 마스터-슬레이브적인 운전방식이 있다. 이 방식에는 마스터(Master) 모터의 속도를 검출하여, 이 정보를 슬레이브(Slave) 모터의 구동 입력으로 하는 방식과 위치지령에 대한 속도 및 위치 피드백으로 위치동기를 취하는 방식 등이 있다. 이 경우 전자는 개루프(Open Loop)제이기 때문에 속도동기 제어는 가능하나 정밀한 위치동기 제어에는 부적합하다. 또한 후자는 위치동기만을 적극 고려한 방식으로서 주어진 속도지령에 대한 추종성과 정밀한 위치동기를 동시에 요하는 시스템에는 적합하지 않다. 또 다른 방법으로는 PLL(Phase-Locked Loop)을 이용한 제어법^{(3),(4)}이 있으나, 이 방법도 고정도의 속도제어법으로서 다수 제안되어 있을 뿐, 위치동기 제어에 대한 검토는 행해져 있지 않다.

본 논문에서는 속도지령을 추종하면서 동시에 정밀한 위치동기를 요하는 복수의 연속 회전 시스템을 상정하여 이를 제어 알고리즘으로 실현하기 위한 하나의 방식을 제안한다. 제안된 방식은 과도상태부터 두 모터간의 위치오차를 검출하고 이에 대한 보상은 슬레이브측 모터만의 속도를 가·감속시킴으로써 위치동기를 취한다. 또한 이 방식은 각각의 모터가 속도지령을 정상상태에서 오차 없이 추종하도록 하기 위한 속도 제어기와 모터간의 위치오차를 제거하기 위한 위치 제어기로 구성된다. 한편, 본 방식의 타당성을 검증하기 위해, 독립된 2개의 모터로 구성되는 2축 구동계와 모터 구동회로를 설계 제작하여 실험장치를 구성하고 실험을 통하여 유효성을 검증한다.

2. 제어계의 설계

2.1 위치동기 제어계

본 논문에서는 정밀한 위치동기를 필요로 하는 생산 시스템에 적용이 가능한 위치동기 제어계를 Fig.1과 같이 제안한다.

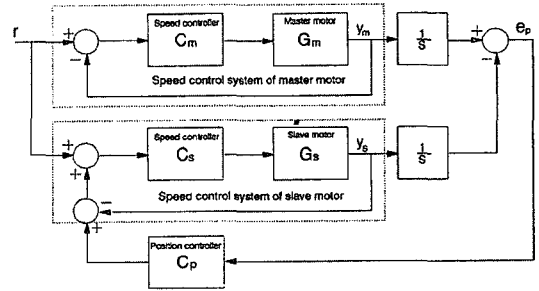


Fig. 1 Block diagram of the proposed control system

이 방식은 마스터 모터와 슬레이브 모터가 속도지령을 추종하도록 하는 속도 제어기(C_m, C_s)와 두 모터의 속도차에 의해 발생하는 위치오차를 제거하기 위한 위치 제어기(C_p)로 구성된다. 즉, 과도상태부터 두 모터의 위치오차를 검출하고 이에 대한 보상은 슬레이브측 모터만의 속도를 가·감속시킴으로써 위치동기를 취한다. 결과적으로 이 방식은 연속적으로 회전하는 복수의 부하 장치를 주어진 속도지령에 추종시키면서 정밀한 위치동기를 실현한다.

그리고 본 논문에서는 제안된 제어 시스템의 유용성을 확인하는데 주목하여 제어가 용이한 두 대의 직류 서보모터를 제어 대상으로 하였다.

2.2 모터의 모델링

모터의 전기자 전압 입력(u)으로부터 구동 앰프(Amp.)를 포함한 속도 출력(y)까지의 주파수 응답 특성을 조사한 바 고주파 부근의 점근선이 약 40[dB/decade]이었으므로 전달함수는 식 (1)과 같이 2차계로 표현할 수 있다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

여기서, ω_n 은 고유 각주파수, ζ 는 감쇠비, k 는 이득 그리고 s 는 라플라스 연산자를 각각 나타낸다.

두 대의 50[W]급 직류 모터를 제어대상으로 하고, 식 (1)의 계수값을 주파수 응답 실험을 통하여 동정한 후, 응답이 빠른 쪽을 슬레이브 모터로 한다.

한편, Table 1은 주파수 응답 실험을 이용하여 동정한 계수값인데 표 중의 전달함수나 계수에 붙어있는 하첨자 m 과 s 는 마스터 모터와 슬레이브 모터를 각각 지칭한다.

Table 1 Parameters of $G_m(s), G_s(s)$

Transfer function	Natural frequency [rad/s]	Damping ratio	Gain
$G_m(s)$	$\omega_{m1}=18.870$	$\zeta_m=1.236$	$k_m=22860$
$G_s(s)$	$\omega_{s1}=19.610$	$\zeta_s=1.265$	$k_s=25080$

2.3 속도 제어기의 설계

각각의 모터가 속도지령을 추종할 수 있도록 Fig. 1의 속도 제어기를 먼저 설계할 필요가 있다. 그리고 마스터 모터의 속도응답이 오버슈터(overshoot)를 갖게 되면 과도상태와 외란 인가시에 슬레이브 모터가 마스터 모터를 추종하는 것이 어렵게 되거나 불필요한 추종 동작으로 인하여 에너지 손실을 초래할 수 있다. 따라서 속도 제어기는 모터의 속도응답이 오버슈터를 갖지 않으면서 동시에 주어진 속도지령을 추종하도록 하는 조건으로부터 설계할 필요가 있다.

본 논문에서는 PID제어기로써 속도 제어계를 구성하며, 이 경우 I 동작을 크게하면 속응성을 둔화시켜 빠른 시간 내에 위치를 동기시키는데 역효과를 가져올 가능성이 있으나, 모터가 정상상태에서 속도지령을 오차 없이 추종하도록 하기 위하여 PD제어기에 I 동작을 부가한다. 이 때 두 모터의 속도 제어기의 전달함수 $C_m(s), C_s(s)$ 는 각각 식 (2), (3)과 같다.

$$C_m(s) = K_{pm}(1 + \frac{1}{T_{im}s} + T_{dm}s) \tag{2}$$

$$C_s(s) = K_{ps}(1 + \frac{1}{T_{is}s} + T_{ds}s) \tag{3}$$

여기서, K_{pm} 과 K_{ps} 는 비례 게인, T_{dm} 과 T_{ds} 는 미분 시간, T_{im} 과 T_{is} 는 적분 시간이다.

식 (2), (3)을 제어기로 할 경우, 마스터 모터와 슬레이브 모터에 대한 속도지령(r)에서 속도출력(y_m, y_s)까지의 각각의 페루프 전달함수 $T_m(s)$ 및 $T_s(s)$ 는 식 (4), (5)와 같이 된다.

$$T_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{G_m \cdot C_m}{1 + G_m \cdot C_m} = \frac{d_{Tm}s^2 + e_{Tm}s + f_{Tm}}{s^3 + a_{Tm}s^2 + b_{Tm}s + c_{Tm}} \tag{4}$$

$$T_s(s) = \frac{Y_s(s)}{R(s)} = \frac{G_s \cdot C_s}{1 + G_s \cdot C_s} = \frac{d_{Ts}s^2 + e_{Ts}s + f_{Ts}}{s^3 + a_{Ts}s^2 + b_{Ts}s + c_{Ts}} \tag{5}$$

한편, 속도 제어기의 각 파라미터 값들은 P, I, D의 개념을 도입하여 설계하되, 각 파라미터 값들은 CACSD(Computer-Aided Control System Design)용 프로그램을 이용하여 결정하고, 응답 시물레이션을 통하여 시간응답의

특성이 과도상태에서는 오버슈터를 갖지 않고, 정상상태에서는 속도지령을 오차 없이 추종하도록 시행착오적인 반복법을 거쳐 Table 2와 같이 결정하였으며, 이 때 영점(zero)과 극점(pole)은 Table 3과 같다.

Table 2 Parameters of $C_m(s)$ and $C_s(s)$

Transfer function	Proportional gain	Integral time	Derivative time
$C_m(s)$	$K_{pm}=2.80$	$T_{im}=0.45$	$T_{dm}=0.04$
$C_s(s)$	$K_{ps}=2.65$	$T_{is}=0.45$	$T_{ds}=0.04$

Table 3 Poles and zeros of $T_m(s)$ and $T_s(s)$

Transfer function	Poles	Zeros
$T_m(s)$	-2582.24, -22.453, -2.45	-22.53, -2.47
$T_s(s)$	-2682.88, -22.439, -2.45	-22.53, -2.47

따라서 Table 1, Table 2를 이용하면 식(4), (5)의 파라미터값들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{Tm} &= 2607, d_{Tm} = 64370, c_{Tm} = 142300, d_{Ts} = 2561, e_{Tm} = 64020, \\ f_{Tm} &= 142300, d_{Ts} = 66840, c_{Ts} = 147700, d_{Ts} = 2658, e_{Ts} = 66450, \\ f_{Ts} &= 147700 \end{aligned}$$

2.4 위치 제어기의 설계

2.3절에서 설계된 속도 제어기만을 이용하여 위치동기 제어를 할 경우, 정상상태에서 마스터 모터와 슬레이브 모터의 속도오차는 발생하지 않지만, 각 모터의 동특성의 차로 인하여 과도상태에서 발생한 속도 오차가 누적되어, 과도상태에서 뿐만 아니라 정상상태에서도 위치오차가 발생한다. 따라서 고정도의 위치동기를 위해서는 과도상태부터 발생하는 위치오차를 제거하기 위한 위치 제어기를 필요로 한다.

위치 제어기로서는 동일한 속도지령에 대하여 두 모터의 위치오차가 발생하지 않도록 PID제어기를 이용한다. 이 때 위치 제어기의 전달함수 $C_p(s)$ 는 식 (6)과 같다.

$$C_p(s) = K_{pp}(1 + \frac{1}{T_{ip}s} + T_{dp}s) \tag{6}$$

한편, 위치 제어기를 포함한 전체 제어 시스템의 블록 선도 Fig. 1은 Fig. 2와 같이 간략화된다.

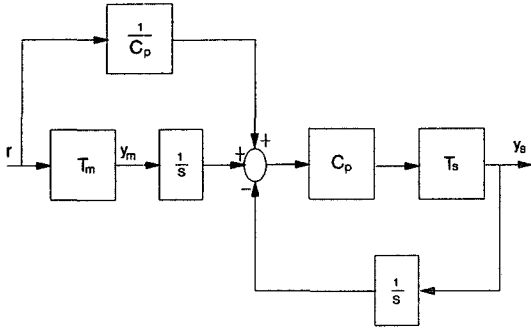


Fig. 2 Simplified block diagram of the control system

Fig. 2에서 속도지령 r 로부터 슬레이브 모터의 속도출력 y_s 까지의 페루프 전달함수 $T_{rs}(s)$ 는 식 (4), (5) 및 식 (6)으로부터 식 (7)과 같이 된다.

$$T_{rs}(s) = \frac{Y_s(s)}{R(s)} = \frac{C_p T_m T_s + s T_s}{s + C_p T_s}$$

$$= \frac{n_1 s^7 + n_2 s^6 + n_3 s^5 + n_4 s^4 + n_5 s^3 + n_6 s^2 + n_7 s + n_8}{s^8 + d_1 s^7 + d_2 s^6 + d_3 s^5 + d_4 s^4 + d_5 s^3 + d_6 s^2 + d_7 s + d_8} \quad (7)$$

그리고 위치 제어기의 파라미터 값들은 속도 제어기와 동일한 방법으로 CACSD용 프로그램을 이용하여 결정하고, 응답 시물레이션을 통하여 시간응답의 특성이 과도상태부터 가능한 짧은 시간 내에 정밀한 위치동기가 취해지도록 시행착오를 거쳐 Table 4와 같이 결정하였으며, 이 때 위치 제어계의 페루프 전달 함수 $T_{rs}(s)$ 의 영점과 극점은 Table 5와 같다.

Table 4 Parameters of $C_p(s)$

Transfer function	Proportional gain	Integral time	Derivative time
$C_p(s)$	$K_{pp}=162$	$T_{ip}=4.5$	$T_{dp}=0.0005$

Table 5 Poles and Zeros of $T_{rs}(s)$

Transfer Function	Poles	Zeros
$T_{rs}(s)$	-1.940*10 ⁶ , -2582.403, -22.535, -22.453, -2.465, -2.454, -0.111	-1.869*10 ⁶ , -22.535, -22.535, -2.465, -2.465, -0.111±21.07i, ±21.07i

따라서 식 (7)의 파라미터 값들은 다음과 같다.

$$d_1 = 1.943 \cdot 10^6, d_2 = 2.535 \cdot 10^9, d_3 = 2.235 \cdot 10^{11}, d_4 = 6.003 \cdot 10^{12},$$

$$d_5 = 1.263 \cdot 10^{14}, d_6 = 1.652 \cdot 10^{15}, d_7 = 6.146 \cdot 10^{15}, d_8 = 6.807 \cdot 10^{15},$$

$$n_1 = 2658, n_2 = 4.969 \cdot 10^9, n_3 = 2.459 \cdot 10^{11}, n_4 = 5.918 \cdot 10^{12},$$

$$n_5 = 1.249 \cdot 10^{14}, n_6 = 1.642 \cdot 10^{15}, n_7 = 6.219 \cdot 10^{15}, n_8 = 6.807 \cdot 10^{15}$$

3. 실험 및 고찰

Fig. 3은 제안된 방식에 의한 실험장치의 개략도이다.

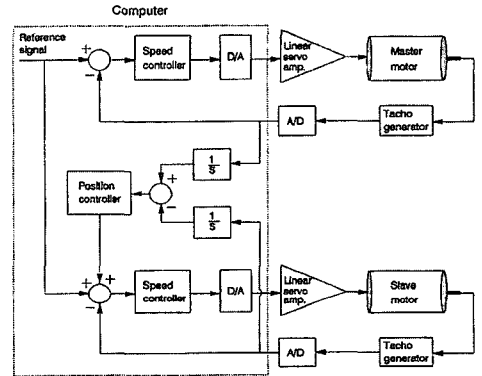


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

모터 구동회로는 자작한 선형 서보 증폭기를 이용하였다. 모터의 속도는 모터 축에 장착된 타코 제너레이터(tacho generator)로써 검출하였으며, 이 때 검출된 신호 1[v]는 15[rad/s]에 상당한다. 그리고 위치는 속도출력을 적분하여 구하였다. 그리고 데이터의 수수(授受)는 12비트(bit)의 분해능을 가진 A/D 및 D/A 변환기를 이용하였다. 또한 연속계의 속도 및 위치 제어기는 샘플링 시간(sampling time)을 500[μs]로 하여 이산화하였고, C언어로 프로그래밍하여 32비트 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 실험하였다.

Fig. 4는 Fig. 1에서 위치 제어기가 없을 경우의 속도 응답 및 위치오차를 나타내고 있다.

Fig. 4(a)는 15[rad/s]의 속도지령에 대해 극히 미소하지만 과도상태 응답부터 속도오차가 발생하고 있음을 나타내고 있다. 한편, Fig. 4(b)는 과도상태부터 발생한 속도오차의 누적으로 인한 위치오차를 보여 준다. 정상상태에 이르기까지 약 0.025[rad]의 위치오차가 발생하고

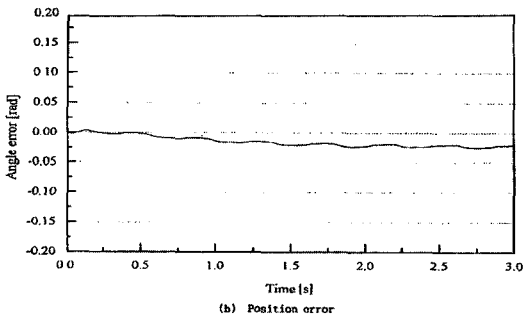
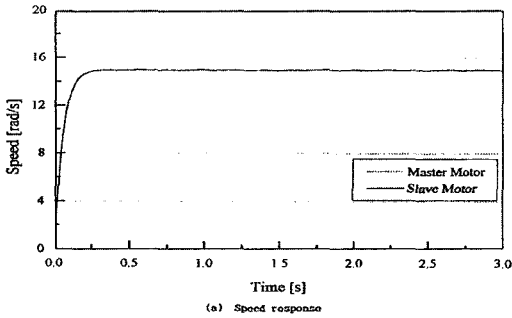


Fig. 4 Speed response and position error for step speed reference without position controller

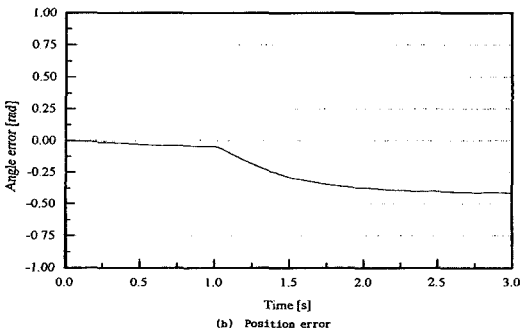
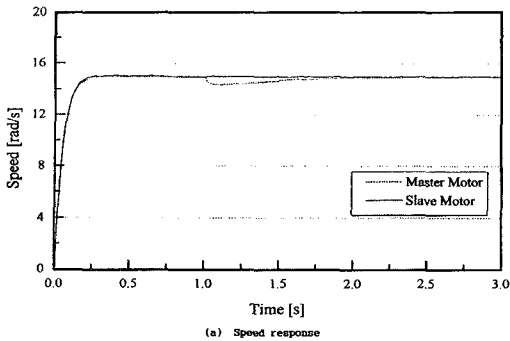


Fig. 5 Speed response and position error for speed disturbance without position controller

있으며, 위치 제어가 없기 때문에 위치오차가 계속 잔존하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 제어계에 대해, 15(rad/s)의 운전 상태에서 마스터 모터에 1(rad/s)의 속도 외란을 약 3(ms) 동안 인가하였을 때의 속도응답 및 위치오차를 나타내고 있다.

Fig. 5 (a)에서 마스터 모터는 속도 제어기에 의해 일정한 정정시간이 경과하면 원래의 속도지령을 추종하지만, 슬레이브 모터는 마스터 모터에 인가된 외란에 영향을 받지않으므로 마스터 모터의 거동과는 별도로 운전된다. 그 결과 정정시간 동안 속도오차의 적분값에 해당하는 위치오차가 Fig. 5(b)와 같이 나타난다.

Fig. 6은 제안된 방식에 의한 속도응답 및 위치오차를 각각 나타내고 있다.

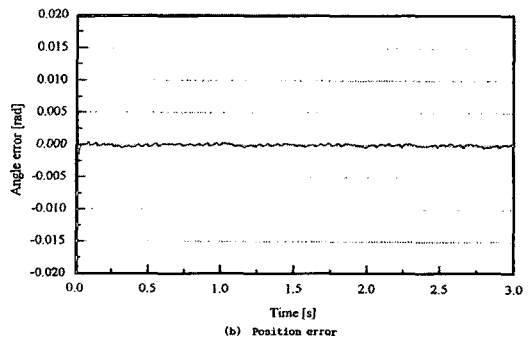
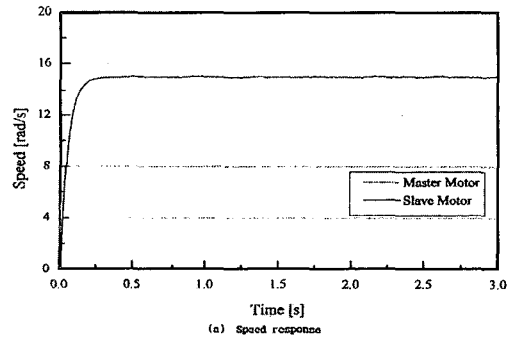


Fig. 6 Speed response and position error for step speed reference with position controller

Fig. 6(a)는 Fig. 4(a)와의 비교를 위해 동일한 15(rad/s)의 속도지령에 대한 속도응답 특성을 나타낸 것이다. 과도상태부터 슬레이브 모터가 속도를 가·감속하여 마스터 모터를 추종함으로써 속도오차의 누적을 최소화하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 6(b)는 위치오차

를 나타내고 있는데, 이 그림으로부터 슬레이브 모터가 마스터 모터를 추종함으로써 과도상태에서도 위치오차의 최대값이 약 0.0015(rad) 이내로 제어되고 있음을 알 수 있다. 또한, 0.05(s) 정도의 시간이 경과하면 위치오차가 거의 0(rad)으로 되어 정밀한 위치동기가 실현되고 있음을 보이고 있다.

한편, Fig. 7은 가변속 지령시의 속도응답 및 위치오차를 각각 나타내고 있다.

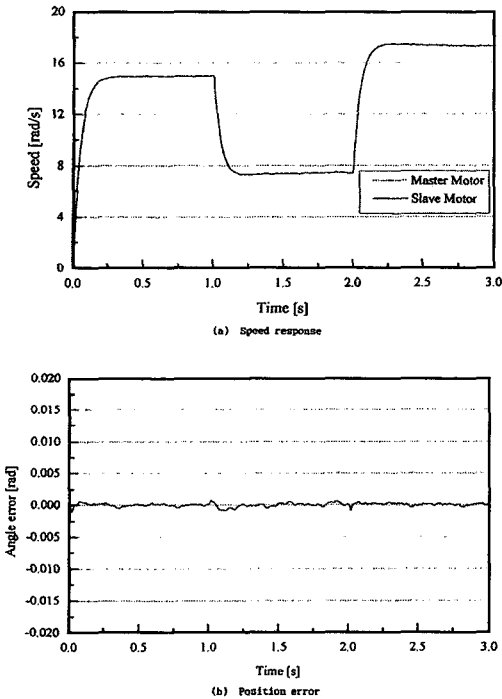


Fig. 7 Speed response and position error for changed speed reference with position controller

Fig. 7(a)는 15(rad/s)의 운전 중에 1.0(s)의 시점에서 속도지령을 7.5(rad/s)로 한 후, 2(s)의 시점에서 17.5(rad/s)로 변경하였을 때의 속도응답을 나타내고 있고, Fig. 7(b)는 그 때의 위치오차를 나타내고 있다. 속도지령을 가변시킨 경우에도 최대 위치오차가 0.0015(rad) 이내로 억제되고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 본 논문에서 제안한 방식에 의하면 모터의 기동시부터 전 운전 구간에 걸쳐 정밀한 위치동기가 가능함을 알 수 있다.

또한, Fig. 8은 제안된 방식에 의해서, 15(rad/s)의 운전 상태에서 마스터 모터에 1(rad/s)의 외란을 약

3(ms)동안 인가하였을 때, 속도응답 및 위치오차를 각각 나타내고 있다.

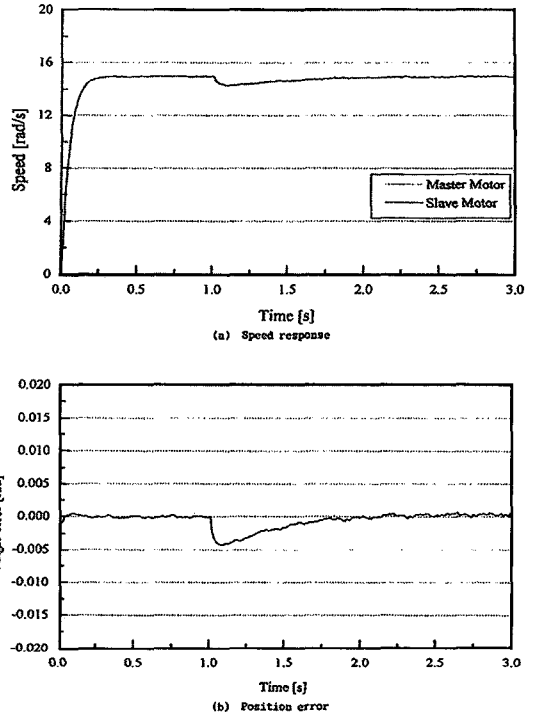


Fig. 8 Speed response and position error for speed disturbance with position controller

Fig. 8(a)는 Fig. 5(a)의 응답과 달리, 위치 제어기에 의해 슬레이브 모터가 마스터 모터를 적극 추종하는 것을 나타내고 있다. 또한, 속도 제어기에 의해 외란 인가 이전의 속도지령을 추종해가는 것을 나타내고 있다. Fig. 8(b)는 외란이 인가되면 위치오차가 증가하는 Fig. 5(b)와 달리, 시간이 경과함에 따라 위치오차가 감소하고 있음을 나타내고 있다. 따라서 제안 방식은 속도 외란을 극복함과 동시에 위치오차를 최소화함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 분산 구동 방식에서의 정밀한 위치동기 제어 방식이 제안되었다. 이 방식은 PID제어기를 이용하여 제어계를 간단히 구성하면서도 속도 추종성과 동시에 정밀한 위치동기가 실현될 수 있음을 보였고, 실험을 통하여 다음 사항을 확인할 수 있었다.

- (1) 제안된 방식은 슬레이브측 모터만의 속도를 가·감

속하여 모터간에 발생된 위치오차를 제거함으로써 정밀한 위치동기를 실현할 수 있다.

(2) 운전 속도를 스텝상으로 변속할 경우에도 순간적인 위치오차를 최소화하면서, 짧은 시간 내에 위치오차는 제거된다. 따라서 속도지령을 추종하면서 동시에 정밀한 위치동기를 실현할 수 있다.

(3) 마스터 모터에 속도 외란이 가해진 경우에도 강한 위치오차 제거 성능을 갖고 있다.

이상의 결과로부터 제안된 방식의 이론적 타당성 및 그 유효성이 검증되었다고 볼 수 있다. 따라서 본 방식은 정밀한 위치동기를 요하는 분산 구동 시스템에 적용될 경우, 시스템 유지비의 대폭적인 절감, 에너지의 효율적 이용 그리고 운전 가동률의 향상 및 유연성을 필요로 하는 FMS 등에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. S.Shirotnani, Y.Fujii, W.K.Yoo, T.Sekiguchi, "브라시리스 D C 모터による高精度同期制御のための-検討", 日本電氣學會全國大會講演論文集, 1993.
2. S.Shirotnani, Y.Fujii, W.K.Yoo, T.Sekiguchi, "Model Following Based Position Synchro-

nous Control with Robustness Property", 日本電氣學會全國大會講演論文集, 1995.

3. Fumio Harashima, Seiji Kondo, Masato Koyama, "A Microprocessor Based Digital PLL Speed Control System and Its Performance Analysis", 日本計測自動制御學會論文集, Vol.17, No.2, pp.286-293, 1981.
4. Jun-Shou Song, Ren-Yuan Huang, Ray Tsao, Yong-Xiang Wu, "A New Phase-Locked Loop Used in a Frequency Synthesizer", IEEE, Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.41, No.3, 1992.
5. Jong Sun Ko, Jung Hoon Lee, Se Kyo Chung, Myung Joong Youn, "A Robust Digital Position Control of Brushless DC Motor with Dead Beat Load Torque Observer", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.40, No.5, 1993.
6. R. MOFFAT, PARESH C. SEN, R. YOUNKER, MOHAMEDM. BAYOUMZ, "Digital Phase-Locked Loop for Induction Motor Speed Control", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.15, No.2, 1979.