

듀얼 서보모터 구동형 프레스 시스템의 동기화 제어기법 연구

나상건*, 권오신⁺, 강재훈⁺⁺, 허 훈⁺⁺⁺

(Manuscript received: Feb, 5, 2013 / Revised: Mar, 6, 2013 / Accepted: Mar, 7, 2013)

A Study on Synchronization Control Technique of Dual-Servo Press System

Sang-Gun Na*, O-Shin Kwon⁺, Jae-Hoon Kang⁺⁺, Hoon Heo⁺⁺⁺

Abstract

In this paper, a synchronization control technique of dual-servo motor driven press system is proposed. An independent cascade PID control technique has been applied to the conventional press system for advancement of control stability. However, it is not easy to reduce synchronous error using the independent cascade PID control technique when some different load disturbances are involved in each motor. The eccentric error of the slide caused by the problem degrade the control performance of the BDC(Bottom Dead Center). In order to achieve reduction of the synchronous error between two servo motors and accurate position control simultaneously, a new control scheme comprised with cascade PID control loop and cross-coupling loop is proposed. In simulation using Matlab SIMULINK, the AC servo system is designed. The control performance of proposed technique is compared with conventional control technique to the model of AC servo system. Also, the sub-scale model of dual-servo motor driven press system which can replicate the slide motion is constructed for experimental verification for the performance of the proposed control technique. The cross-coupling control technique reveals more precise and stable performances in the position and synchronization controls.

Key Words : Dual-servo motor driven press system(듀얼 서보모터 구동 프레스 시스템), Cross-coupling control technique(연동제어 기법), Synchronous error(동기오차), Synchronization control method(동기화 제어 방법), PID controller(비례적분미분 제어기), Permanent magnet synchronous motor(영구자석형 동기모터), Cascade control(중속 제어)

1. 서론

기존의 프레스 시스템은 일반적인 기계 구동형 프레스로 벨트, 클러치, 플라이 휠, 그리고 크랭크 기구 등을 거쳐 슬라이드가 상하로 운동할 수 있도록 구성 된 것이다. 이는 에너지 소모,

유지비 및 소음 발생 등과 같은 많은 단점을 가지고 있다. 또한, 최근 추진 중인 녹색성장 산업화에 부응하기 위하여 자동차, 전자 및 전기산업 등의 여러 산업분야에서는 고부가가치 부품들을 생산하기 위해 기존에 사용하던 기계적 프레스 생산기법으로부터의 탈피가 시급하다. 특히, 에너지 절약과 생산효율 향

* 고려대학교 제어계측공학과
+ LG전자 CTO HAE 연구센터
++ 한국기계연구원
+++ 교신저자, 고려대학교 제어계측공학과
주소: 136-701 서울시 성북구 안암로 145

✉ Corresponding Author E-mail: heo257@korea.ac.kr

상을 위한 제품의 경량화 요구가 증대되면서 필연적으로 소재의 대체화가 진행되고 있다. 이를 통해 신소재(고 장력판, 마그네슘 및 알루미늄 합금 등)와 같은 고기능 난성형재에 대해 보다 진보화 된 기구방식의 성형 시스템이 요구되고 있다. 이에 최근에는 다음의 Fig. 1과 같이 서보모터를 이용하여 그 구동원이 타이밍 벨트, 메인기어, 그리고 링크구조를 거쳐 슬라이드의 위치와 속도를 변화하는 서보프레스 시스템이 개발되었다.

이 시스템은 서보모터가 가지는 디지털 제어방식의 속도 가변 특성 등을 기반으로 성형구간에서 자유롭게 제어 할 수 있는 자율동작(Free Motion)의 특성을 효율적으로 활용할 수 있다. 이러한 자율동작의 특성으로 인하여 재질의 특성에 따른 하사점에서의 위치와 속도 제어가 가능하고, 성형구간에서의 거동변화를 다양하게 부여할 수 있다는 장점을 갖는다. 이는 즉, 기존의 기계구동식 프레스에서 스프링 백 현상 등으로 인하여 정밀한 성형이 곤란했던 신소재 재료를 효율적으로 성형할 수 있다는 서보프레스의 특징을 나타내는 것이다^(1~2). 하지만, 고토크 및 고출력이 요구되는 재료를 성형하기 위해서 단일 서보모터로 구성된 서보프레스 시스템을 이용하여 가공할 경우, 제작비용이 높아질 뿐만 아니라 생산 및 에너지 소비 측면에서 비효

율적인 단점이 발생한다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 고토크의 단일 서보모터를 저토크의 서보모터 2개로 대체하여 구성된 듀얼 서보프레스 시스템이 개발되었다.

듀얼 서보프레스 시스템은 단일 고토크의 서보프레스보다 제작비용 및 에너지 소비 측면에서 효율적인 장점을 가진다. 그러나 서보모터가 각각 독립적으로 구동될 때, 힘의 불균일 분포와 편심하중 등이 발생하여 공정의 생산효율을 저하시키거나, 하사점(下死點, Bottom Dead Center : BDC)에서의 불안정성을 야기할 수 있다는 단점을 가지고 있다^(3~5). 이러한 문제점을 개선하기 위하여 현재까지 서보제어 기법에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 본 논문에서는 중속 비례적분비분(Cascade PID) 제어루프와 연동(Cross-coupling) 제어루프를 이용한 동기화 제어기법이 제안되었다.

2. 교류 서보모터 시스템

기존의 서보제어 기법과 제안된 제어기법을 적용하여 그 성능을 비교하고, 검증하기에 앞서 적절한 수치 모의실험의 수행을 위해 다음과 같이 교류(AC) 서보모터 시스템을 설계하였다.

2.1 기계시스템의 모델링

모터와 부하를 포함한 기계 시스템은 다음의 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 V_a , V_b , V_c 는 모터를 구동하기 위한 a, b, c상 각각의 전압을 나타내며, T_e 는 이 전압들을 통해 발생하는 모터의 발생 토크를 나타낸다. 또한, T_L 은 부하토크이다. 그리고 관성부하 J_m 과 마찰계수 B 를 가지는 기계 시스템 모델의 기본적인



Fig. 1 Servo motor driven press system

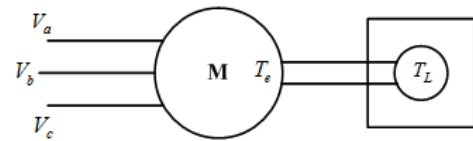


Fig. 2 Concept of mechanical system

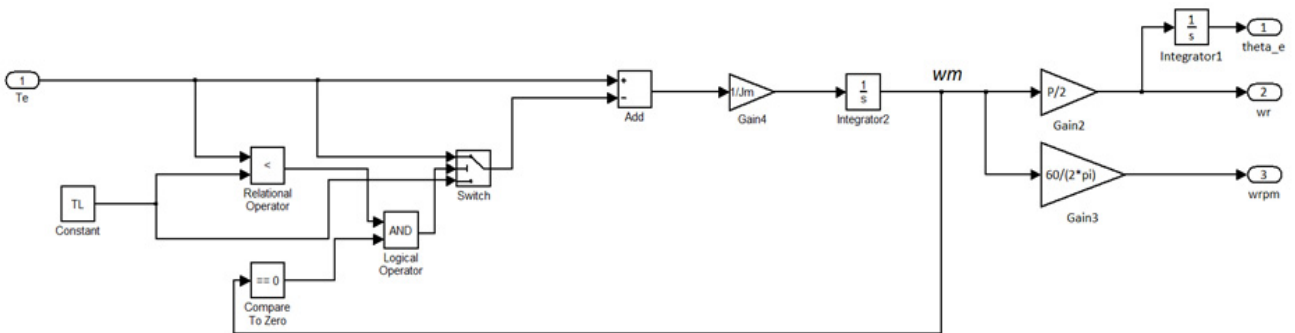


Fig. 3 Mechanical system model using Simulink

형태는 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega = \int \{(T_c - T_L)/J_m\} dt \quad (1)$$

위의 식에 대한 기계 시스템의 모델을 MATLAB Simulink의 블록(block)으로 구성 하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 교류 서보모터 모델링

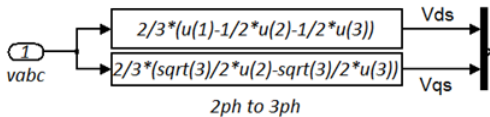
교류 서보모터는 Fig. 2에서도 볼 수 있듯이 a, b, c상 각각의 전압인 V_a, V_b, V_c 를 기반으로 구동된다. 그러므로 교류 서보모터의 모델링 방법은 일반적으로 3상 전압인 V_a, V_b, V_c 를 이용하여 토크방정식을 유도한다. 이 방법에는 모터의 두 권선 간 자속의 쇄교 정도를 나타내는 상호 인덕턴스가 시변 함수로 표현되어 있다. 이와 같은 인덕턴스의 특성으로 인하여 모터가 정지하고 있는 경우를 제외하고는 교류 서보모터의 전압 방정식은 시변 계수를 갖는 미분 방정식으로 표현된다. 이에 대한 해석이 용이하지 않기 때문에 본 논문에서는 다음의 식 (2), (3)과 같은 좌표변환 기법을 적용하였다. 식 (2)는 고정자 a-b-c 3상을 고정자 d-q 2상으로 변환하는 함수이며, 식 (3)은 고정자 d-q 2상을 회전자 d-q 2상으로 변환하는 함수를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^s \\ v_b^s \\ v_c^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

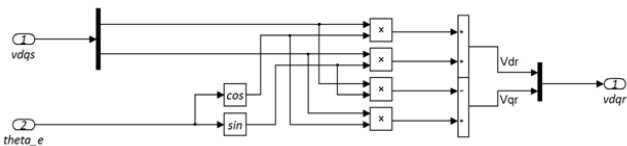
$$\begin{bmatrix} v_d^r \\ v_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

이 좌표변환 기법을 MATLAB Simulink의 블록으로 구성하면 다음의 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

시변 미분방정식으로 표현되는 일반적인 교류 서보모터의 전



(a) Function to convert 3-phase stator to 2-phase stator



(b) Function to convert 2-phase stator to 2-phase rotor

Fig. 4 Coordinate transformation function

압방정식에 위와 같은 d-q축 좌표변환 기법을 적용하여 시변계수가 제거되고 일정한 계수를 갖는 시불변 미분방정식으로 변환되어, 그 해석이 용이하게 된다. 다음의 식 (4)는 좌표변환 기법이 적용된 교류 서보모터의 전압방정식이다.

$$\begin{bmatrix} v_d^r \\ v_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^r \\ i_q^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (4)$$

AC 서보모터의 d-q축 전압방정식은 다음의 Fig. 5와 같이 MATLAB Simulink의 블록으로 구성하여 나타낼 수 있다. 식 (4)의 d-q축 전압방정식을 이용하여 교류 서보모터의 토크방정식을 구하면 다음의 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_c = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \{ \Psi_a i_q^r + (L_d i_d^r) i_q^r - (L_q i_q^r) i_d^r \} \quad (5)$$

위와 같이 표현된 토크방정식 또한 Simulink의 블록으로 구성하면, Fig. 6과 같다. 앞의 식 (5)를 통하여 교류 서보모터의 토크에는 영구자석의 자속 Ψ_a 과 전류 i_q^r 가 상호작용하여 발생

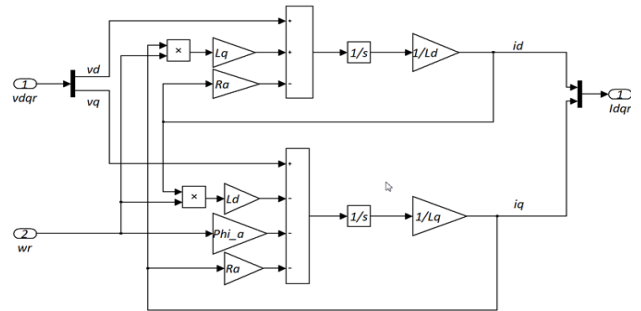


Fig. 5 Voltage equation in d-q coordinate

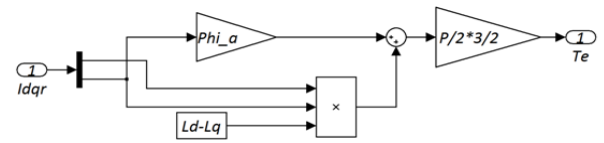


Fig. 6 Torque equation in d-q coordinate

Table 1 Definition of AC servo motor variables

Variable	Definition	Variable	Definition
v	Voltage	ω	Angular velocity
i	Current	P	Number of pole
L	Inductance	d	d-coordinate
R	Phase Resistance	q	q-coordinate
Ψ	Magnetic flux interlinkage	p	Differential operator

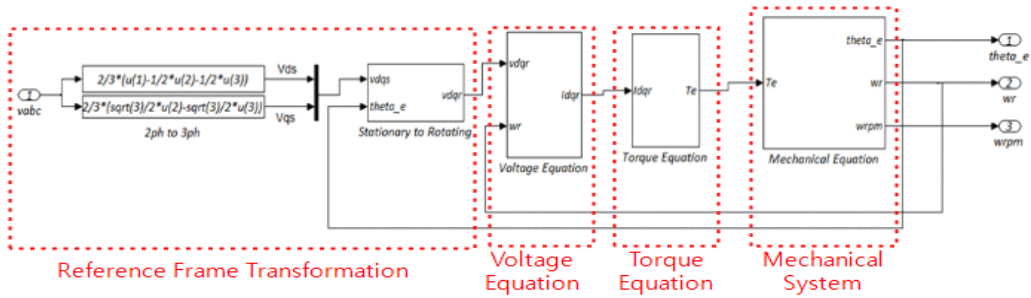


Fig. 7 Simulink schematics of AC servo motor model system

하는 리액션 토크(Reaction torque : $\Psi_a i_q^r$ 항)가 존재하며, 추가적으로 인덕턴스의 차이에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크(Reluctance torque : $(L_d - L_q) i_d^r i_q^r$ 항)가 존재하는 것을 알 수 있다. 전압방정식과 토크방정식에서 사용된 변수들의 정의는 다음의 Table 1과 같다.

앞에서 설명한 기계 시스템, 전압방정식 그리고 토크방정식의 모델로 전체적인 교류 서보모터의 모델을 Fig. 7과 같이 MATLAB의 Simulink 블록으로 나타낼 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 a, b, c상 각각의 전압인 V_a, V_b, V_c 가 입력이 되며, 회전각(θ)과 각속도(ω)가 교류 서보모터 모델의 출력이 된다⁽⁶⁾.

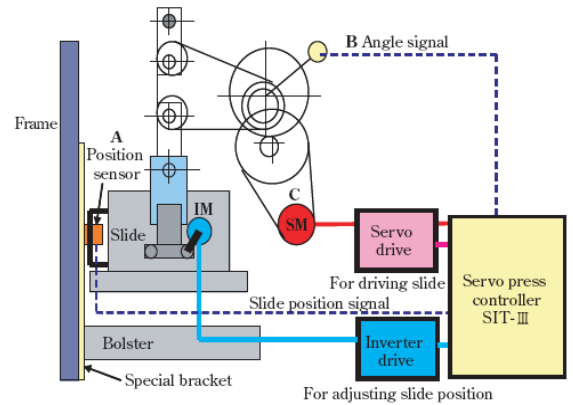


Fig. 8 Feedback control scheme of slide motion

3. 제어 시스템 설계

3.1 기존의 제어기법

서보프레스 시스템에서 슬라이드의 위치와 속도가 Fig. 8과 같이 자율적으로 피드백 제어될 수 있도록 하는 연구가 진행되어 왔다.

자세한 제어구조는 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있으며, 슬라이드의 위치와 모터의 속도제어를 위해 완전 폐쇄 피드백 루프(Full closed feedback loop)로 구성된다. 이는 세부적으로 외부 루프(Outer loop)와 내부 루프(Inner loop)로 분류되며, 외부 루프는 위치센서를 이용하여 슬라이드의 위치를 디지털 값으로 변환하여 위치조절기로 피드백 해주는 기능을 수행한다. 또한, 내부 루프는 광학 엔코더를 이용하여 모터의 속도를 측정하고 디지털 값으로 변환하여 서보 드라이브로 피드백 해주는 역할을 한다⁽⁵⁾.

본 논문에서 고려하는 듀얼 서보모터 구동형 프레스 시스템에서는 앞에서 언급한 완전 폐쇄 피드백 제어구조를 응용하여 Fig. 10과 같은 구조로 적용된다. 이 기법은 종속 피드백(Cascade feedback) 제어구조를 각 서보시스템에 독립적으로 사용하여 독립 종속 피드백(Independent cascade feedback) 제어기법이라고 정의한다.

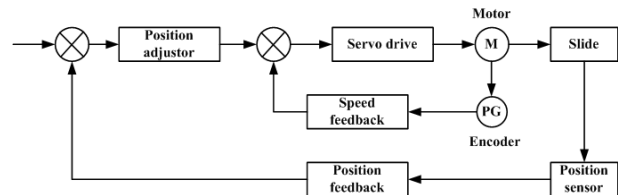


Fig. 9 Conventional control loop of slide motion

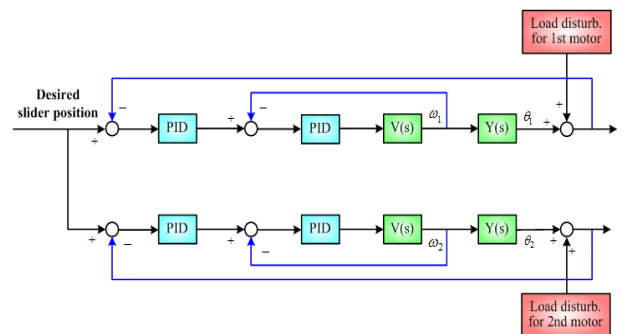


Fig. 10 Conventional control technique of dual servo press system

3.2 새롭게 제안한 제어기법

Fig. 10과 같은 기존의 제어기법은 각 서보시스템에 발생하는 외란을 보상하는데 효과적이다. 하지만, 각 시스템에서 발생

하는 힘의 불균일 분포와 서로 다른 외란에 의해 하사점(下死點, BDC)에서의 불안정성이 야기된다. 이를 개선하기 위하여 다음과 같은 동기화 제어기법에 대한 연구를 하였다.

2개의 서보모터 위치를 동기화시키기 위하여 다음의 Fig. 11과 같은 연동(Cross-coupling) 제어 구조가 다양한 공작기계 분야에서 연구되었다. 이 방법에는 두 서보모터의 제어를 위하여 총 4개의 채널(Channel)이 사용된다. 2개의 채널은 모터의 증폭기(Amplifier)에 연결되며, 나머지 2개의 채널은 제어신호의 비연동(Decouple)을 위해 사용된다. 비연동을 위한 두 개의 루프(loop)는 각 모터의 위치에 대한 차이를 계산하고, 이를 '0'과 비교하는 구조로 구성된다. 만약 이 오차가 '0'이 아닐 경우, 두 모터 궤도에 올바르게 추종하기 위하여 각 모터의 보상신호를 상대 모터에 전달될 수 있도록 구성되어 있다⁽⁷⁻⁹⁾.

듀얼 서보모터 구동방식의 프레스 시스템에서 외란 보상과 동기화 제어를 동시에 만족시키기 위하여 연동 제어구조를 Fig. 12와 같이 응용하였으며, 이를 연동(Cross-coupling) 제어 기법이라고 정의한다. 이 방법은 크게 두 가지의 제어기법이 병합된 구조로, 첫 번째로는 각 서보 시스템에 발생하는 외란을 보상하기 위한 완전 폐쇄 피드백 루프(Full closed feedback loop)가 구성되어 있다.

앞에서 언급한 바와 같이, 이 구조는 슬라이드의 위치정보를

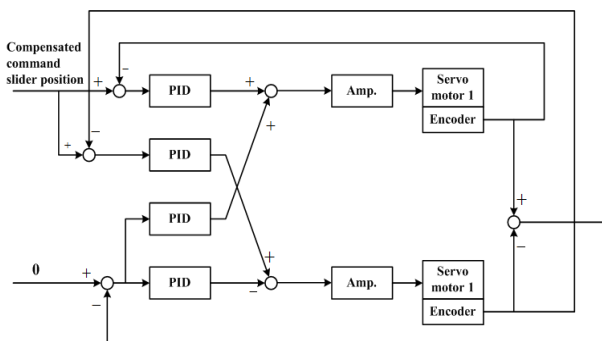


Fig. 11 Cross-coupling control loop of slide motion

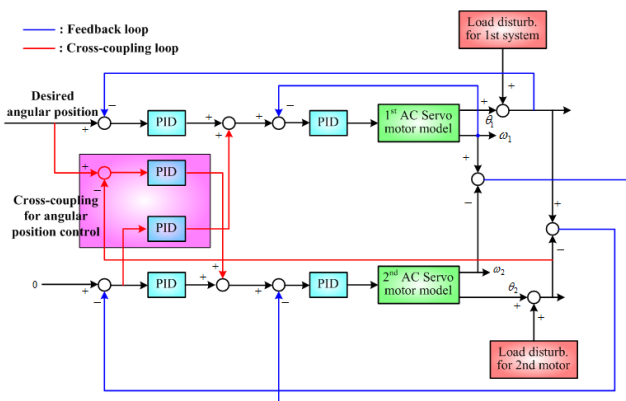


Fig. 12 Cross-coupling control technique of dual servo press system

피드백 하는 외부 루프와 모터의 속도정보를 피드백 하는 내부 루프로 이루어져 있다. 두 번째는 2개의 서보시스템의 동기화 오차를 최소화하기 위한 연동 루프(Cross-coupling loop)가 구성되어 있다. 이는 각 서보모터를 통해 변화하는 슬라이드의 위치와 모터의 속도정보를 서로 다른 서보시스템으로 전달하여 두 모터간의 동기화 오차를 감소시키는 기능을 하게 된다⁽¹⁰⁻¹²⁾.

4. 수치모의 실험

MATLAB Simulink를 이용하여 2장에서 설계한 AC 서보모터 모델을 바탕으로 듀얼 서보시스템을 설계하고, Fig. 12와 같은 구조로 제한한 새로운 제어 기법을 적용하여 수치 모의실험을 수행하였다. 수치 모의실험에서는 서보시스템의 AC 서보모터는 다음의 Fig. 13과 같은 벡호프(Beckhoff)사의 3상 영구자석형 동기모터(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM)의 모델을 사용하였다.

이 모터의 제원은 다음의 Table 2와 같다. 또한, 외란 보상효과와 동기화 제어성능을 보다 효과적으로 검증하기 위하여 Fig. 14와 같이 서로 다른 시간에 다른 크기를 갖는 계단(Step) 형태의 외란을 각 서보시스템에 적용하였다.

다음의 Fig. 15와 Fig. 16은 각 시스템의 외란과 동기화 오차에 대한 제어성능을 나타낸 것이다. 이는 기존의 제어기법인 독립 종속 피드백(Independent cascade feedback) 제어기법과 본 논문에서 제안한 연동(Cross-coupling) 제어기법의 성능을 비교한 결과이다. 검은색 실선은 각위치의 목표 값이며, 파란색 실선은 기존 제어기법의 결과를, 그리고 붉은색 점선은 제안한 제어 기법의 결과를 나타낸다.

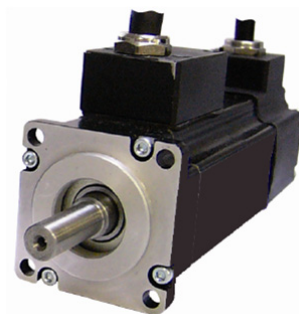


Fig. 13 Beckhoff's 3-phase AC servo motor

Table 2 The spec. of Beckhoff's AC servo motor

Model	AM3121	Driving voltage	DC 24V
Rated torque	0.65N·m	Rated current	4.6A
Maximum velocity	2000rpm	Moment of inertia	0.15kg·cm ²
Number of poles	8	Static friction torque	0.0195N·m

Fig. 15는 계단(Step) 형태로 가해진 모터의 입력과 외란에 대한 각위치의 제어응답 결과를 나타낸다. (a)는 마스터(主, Master) 서보시스템의 응답, 그리고 (b)는 슬레이브(從, Slave)

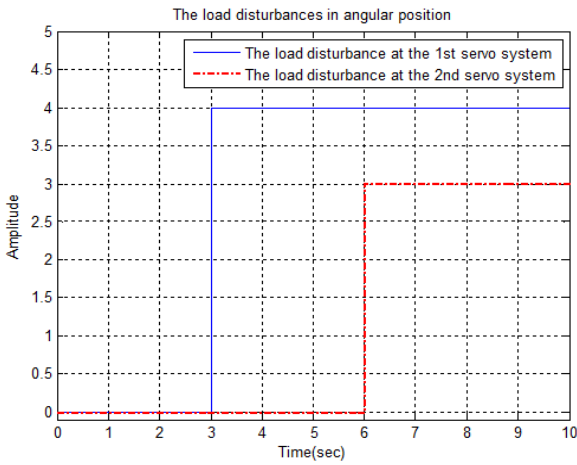
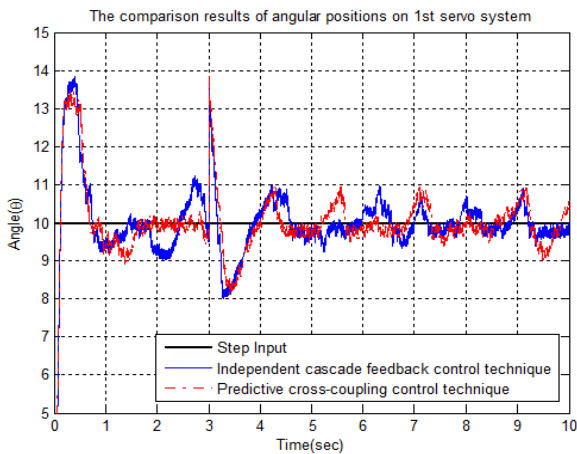
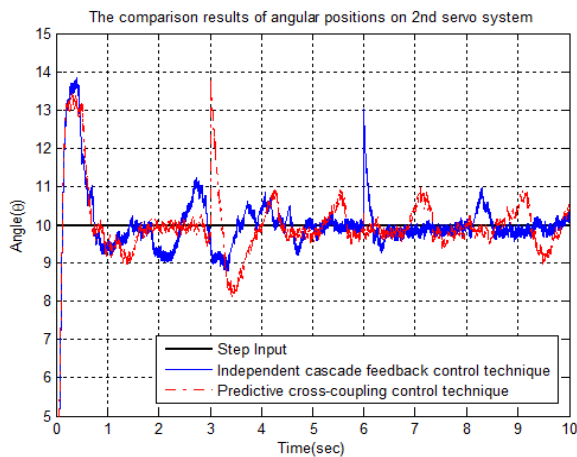


Fig. 14 Independent disturbances for each servo system



(a) master servo system



(b) slave servo system

Fig. 15 Control responses of servo system

서보시스템의 응답이다. 이를 통하여 각 모터 시스템의 외란에 대한 안정적인 제어성능을 확인할 수 있다. 3초까지의 모의실험 구간에서 제안한 제어기법은 마스터와 슬레이브 시스템의 위치 편차를 모두 저감시키며 기존의 제어기법보다 빠른 수렴성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 외란이 적용되는 3초 이후에는 마스터 시스템과 슬레이브 시스템의 제어 응답이 기존의 제어응답과 비교하여 차이가 나는 것으로 보인다. 제안한 연동(Cross-coupling) 제어기법을 적용한 마스터 시스템의 응답 패턴(pattern)이 전체적으로 기존의 제어기법의 패턴과 유사한데 반하여 슬레이브 시스템의 응답패턴은 기존의 제어기법과는 다르게 마스터 시스템의 응답패턴과 유사하다. 이는 제어기의 구조적인 차이에서 기인하는 것으로 각각의 독립적인 폐루프(closed loop)만을 가지는 기존의 독립 종속 피드백(Independent cascade feedback) 제어기법은 슬레이브 시스템이 마스터의 응답을 고려하지 않는 반면에 제안한 기법은 슬레이브 시스템이 마스터 시스템의 응답으로 동기화시키려는 구조를 갖기 때문이다. 이에 제안한 연동(cross-coupling) 제어기법에 의한 각위치의 오차는 기존 제어기법에 의한 결과보다 최소 약 5.6% ~ 최대 약 25%로 개선되었다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 16은 듀얼 서보시스템의 동기화 오차를 나타낸 것으로, 기존 제어기법과 제안된 제어기법의 동기화 제어응답 결과를 비교하여 확인할 수 있다. 기존의 제어기법을 통한 동기화 제어 성능에서는 마스터와 슬레이브 시스템에 외란이 적용된 시점부터 동기화 오차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 연동(cross-coupling) 제어 기법을 통한 동기화 제어성능은 각 시스템에 외란이 적용된 시점에만 정점(Peak) 편차가 발생할 뿐, 전체적인 모의실험 구간에서 '0'에 가까운 동기화 오차가 발생한다. 따라서 제안한 제어기법의 동기화 제어성능은 기존의 방법보다 그 성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

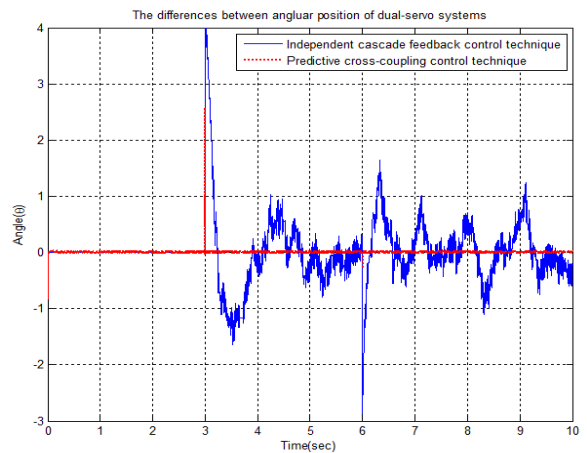


Fig. 16 The differences between angular position of dual-servo systems

5. 실험 및 검증

4장에서는 설계된 연동(Cross-coupling) 제어기법의 성능검증을 위하여 듀얼 서보시스템을 대상으로 수치 모의실험을 수행하였다. 듀얼 서보시스템에 대하여 보다 실증적인 검증을 수행하기 위하여 본 장에서는 축소형 하드웨어 설계를 통한 실험환경을 다음과 같이 구축하였다.

5.1 실험환경 구축과 그 구성

다음의 Fig. 17은 듀얼 서보모터 구동형 프레스 시스템의 축소모델을 사용하여 구축한 실험환경을 보여준다. 이 서보프레스 시스템의 축소모델은 실제 프레스 시스템의 동작을 모사할 수 있도록 설계되었다.

듀얼 서보모터 구동형 프레스 시스템의 축소 모델에서 각 서보모터에 기계적으로 연결된 슬라이드의 위치 및 동기화 제어를 위하여 다음의 Fig. 18과 같이 실험환경을 구축한다. 이 세부 구성에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

실제 서보프레스 시스템의 슬라이드 동작을 모사하기 위하여

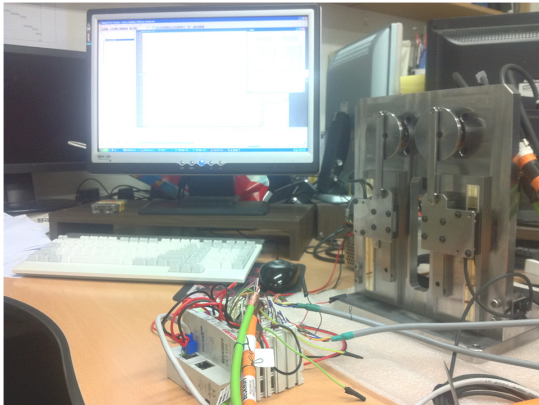


Fig. 17 The dual-servo motor driven press system with PC and EtherCAT coupler

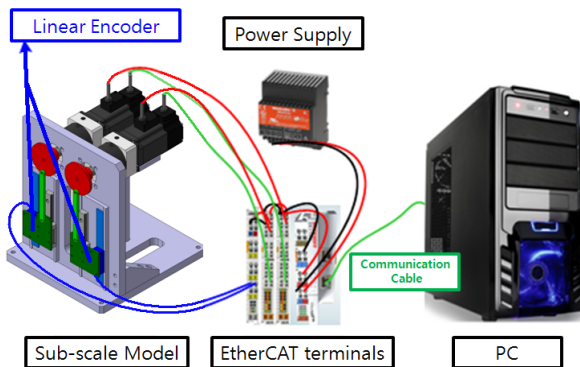


Fig. 18 Experimental setup of subscale dual-servo driven press system

축소형 모델을 제작하였다. 이는 크게 다음의 세 가지 부분으로 구분할 수 있다.

(1) 교류 서보모터와 감속기

듀얼 서보모터 구동형 프레스 시스템 설계를 위하여 다음의 [그림 13]과 같은 백호프(Beckhoff)사의 영구자석형 동기모터(PMSM) 2개를 사용하였다. 이 모터는 정현파(Sine파 혹은 Cosine파) 형상의 전류 및 전압을 출력하여 부드러운 회전운동이 가능하며, 리졸버(Resolver)가 통합 구성되어 있어 회전축의 각위치 및 각속도 정보를 피드백(Feedback) 하기에 유용한 특징을 가지고 있다. 본 실험에서 사용한 모터의 제원은 시뮬레이션과 같은 Table 2와 같다. 또한, 실제 서보프레스의 슬라이드 동작에 대한 상승 및 하강 속도를 구현하기 위하여 모터의 회전축에 감속기를 부착하여 낮은 속도의 회전을 실현하였다. 이 감속기의 제원은 다음의 Table 3과 같다.

(2) 축소형 프레스 시스템의 기구부

듀얼 서보모터 구동형 프레스 시스템의 축소형 모델 설계를 위한 기구부는 시스템 기구부의 고정판 후면에 2개의 듀얼 서보모터를 배치하며, 각 모터의 회전축에 캠(CAM)을 부착한다. 또한, 원형 캠의 가장자리와 각 슬라이드를 링크(Link)구조로 연결하여 모터 축의 회전운동을 슬라이드의 직선 왕복운동으로 변환하도록 설계하였다. 이렇게 동작하는 슬라이드의 위치를 측정하기 위하여 그림의 정면도에서 볼 수 있듯이 기구부 고정판의 정면에 리니어 엔코더(Linear Encoder)를 부착하여 슬라이드와 연결하였다.

(3) 리니어 엔코더(Linear Encoder)

기구부 고정판의 정면 좌우측에 리니어 엔코더를 부착하여 각 슬라이드의 위치를 측정하였다. 본 실험에서는 하이덴하인(Heidenhain)사의 증분형 리니어 엔코더를 사용하였으며, 자세한 제원은 Table 4와 같다. 듀얼 서보모터와 기구부가 결합되어 모터의 구동에 따라 움직이는 슬라이드의 위치 및 동기화

Table 3 The specification of Beckhoff's Planetary gear unit

Model	AG2250	Gear ratio	10 : 1
Rated torque	15N·m	Combination	AM312X
Torsional backlash		< 16arcmin	

Table 4 The specification of Heidenhain's linear encoder

Model	LIDA487	Accuracy	1~10 μ m
Signal period	4~20 μ m	Measuring Length	120~150mm
Interface		~ 1Vpp	

제어를 수행하기 위해서 개인용 컴퓨터(PC)를 사용하여 프로그램 한다. 또한, 리니어 엔코더를 이용하여 측정된 슬라이드의 위치와 리졸버를 통하여 측정되는 모터의 속도를 PC로 피드백(Feedback)해야 한다. 이러한 피드백 신호와 PC에서 출력되는 제어신호를 전송하기 위하여 다음과 같은 벡호프(Beckhoff)사의 통신 모듈을 사용하였다.

(4) 서보모터 터미널

실험에서 사용하는 서보모터의 구동전원을 제공하고, 리졸버에서 출력되는 피드백 신호를 PC로 전송하기 위하여 서보모터 터미널(EL7201)을 사용한다.

(5) 정현파(Sinusoidal) 신호 터미널

프레스 시스템의 축소 모델에서 슬라이드의 위치를 측정하기 위하여 리니어 엔코더를 사용하였다. 또한, 측정된 신호는 모터에 정현파의 형태로 전송이 되어야 하므로 정현파 신호 터미널(EL5021)을 사용 한다. 이 터미널은 리니어 엔코더와 직접적으로 연결되어 측정된 슬라이드의 위치 값에 대한 피드백 신호를 PC 내 제어 프로그램으로 전송한다.

(6) 이더넷 커플러(EtherCAT coupler)

이더넷(EtherCAT)은, Ethernet for Control Automation Technology의 약자로, 이더넷(Ethernet) 통신규약을 기반으로 데이터를 송수신 한다. 앞의 두 터미널들(서보모터 터미널, 정현파 신호 터미널)을 Fig. 19와 같이 이더넷 커플러(EtherCAT coupler)에 장착하여 각 터미널을 위한 전원을 제공한다. 또한, 커플러(Coupler)와 PC에 연결된 이더넷 통신을 기반으로 모터의 리졸버와 리니어 엔코더 값을 PC 내 제어 알고리즘으로 피드백(Feedback)하여 슬라이드의 위치 및 동기화 제어동작을 수행한다.

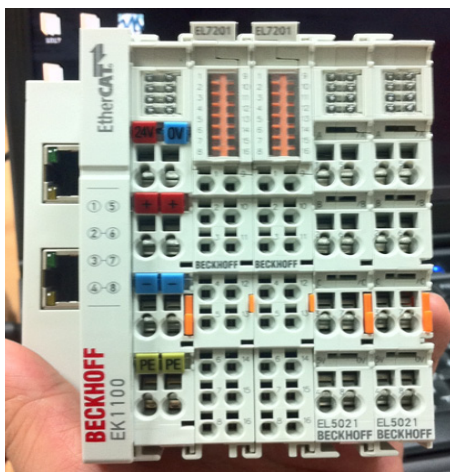


Fig. 19 EtherCAT coupler combining of terminals

5.2 실험 결과 및 검증

앞의 5.1절에서는 듀얼 서보모터 구동형 프레스 시스템의 축소모델과 데이터의 전송 및 통신을 위한 모듈을 이용하여 하드웨어 실험환경을 구축하였다. 본 장에서는 제안된 연동(Cross-coupling) 제어기법과 기존의 독립 종속 피드백(Independent cascade feedback) 제어기법을 서보프레스의 축소형 모델에 적용하여, 제안한 제어기법의 외란에 대한 제어 성능과 동기화 오차의 개선효과를 실증적인 실험으로 비교하고 확인하였다.

시험 시나리오는 먼저 일정 목표 값에 수렴한 후, 마스터와 슬레이브 모터에 각각 다른 크기를 갖는 사각파 형태의 외란이 서로 다른 시간에 작용하는 경우를 가정하였다. 수치모의실험에서 수행했던 실험과 유사한 외란을 적용하는 경우로, 다음의 Fig. 20과 같이 표현할 수 있다. 본 서보프레스 축소 모델은 마스터와 슬레이브 모터의 회전축이 0°인 경우 슬라이드가 최고점에 위치하며, 180°인 경우 하사점에 위치한다.

이러한 경우에 대해 기존의 제어기법과 새롭게 제안한 제어기법의 응답 결과는 Fig. 21과 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 각 모터에 각기 다른 크기의 외란이 서로 다른 시간에 적용되는데 마스터 모터에는 30°의 외란이 30~35초에 적용되며, 슬레이브 모터에 40°의 외란이 60~65초에 적용된다.

독립 종속 피드백 제어기법의 제어응답을 살펴보면, 외란이 발생하기 전까지 마스터와 슬레이브의 모터응답은 약 ±20°의 오버슈트(Overshoot)를 가지며 약 25초 후에 목표 값으로 수렴한다. 이 후, 30초에 발생하는 외란으로 마스터 모터의 제어응답이 -40°~20°로 크게 진동하고 수렴하게 된다. 한편, 60초 이후에 목표 값에 수렴하고 있던 슬레이브 모터에 외란이 작용하고, 이에 따라 슬레이브 모터 역시 약 40°의 편차를 갖고 진동하며 목표 값에 수렴하게 된다. 즉, 기존의 제어기법에 의한 모터 응답은 각 외란에 대해 서로 독립적으로 반응 한다. 반면, 연동 제어기법은 그것의 동기화 루프(Loop) 영향으로 각 시스템에 독립적으로 작용하는 외란에 대해 반응하는 모터의 응답이 다른 모터의 응답에도 적용된다. 이러한 동기화 동작으로 인하여 발생하지 않던 편차가 발생되어 좋지 않은 성능을 보이기도 하나, 기존의 제어기법에 의해 발생하는 큰 오버슈트를

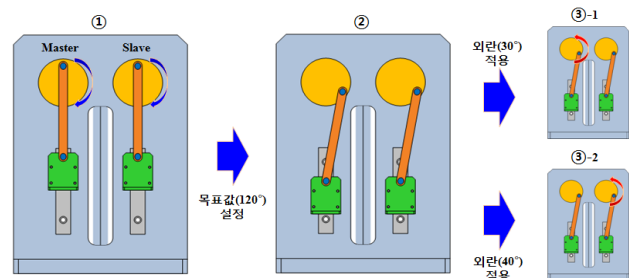


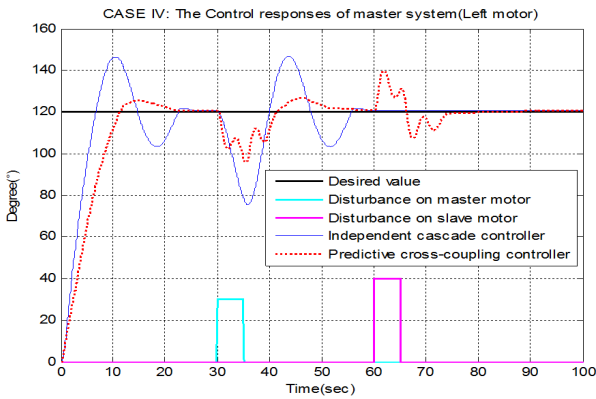
Fig. 20 scenario of experiment

감소시켜 개선된 제어성능을 보이기도 한다.

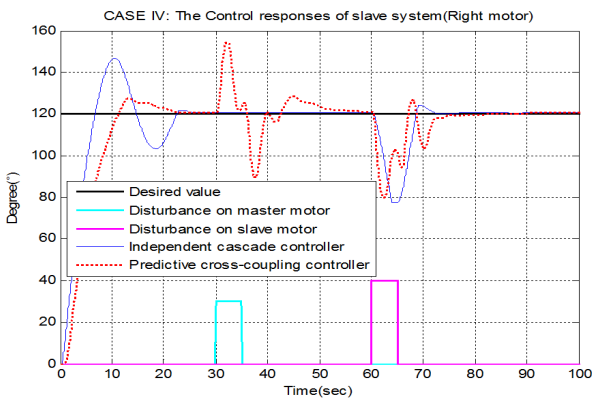
다음의 Fig. 22와 Fig. 23은 동기화 오차와 슬라이드의 편심 오차를 나타낸다. 제안된 제어기법을 통한 결과에서 각 외란에 대해 발생하는 순간, 최대 동기화 오차와 슬라이드의 편심오차는 약 60°와 30mm로 비교적 큰 값을 갖는다. 하지만, 그 이후 마스터와 슬레이브 모터의 동기화 동작에 의하여 동기화 오차

와 편심 오차가 빠르게 '0'에 가까운 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 마스터 모터에 작용하는 외란에 대해 나타나는 응답의 구간에서 수렴시간을 기존의 기법보다 약 10초정도 앞당기며 빠르게 동기화되어 안정적으로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

기존의 제어기법과 제안한 제어기법의 동기화 오차에 대한 제어성능을 Fig. 24와 Table 5를 이용하여 정량적으로 평가하였다. 마스터 모터에 외란이 발생하기 전과 그 직후까지는 기존의 제어기법에 의한 동기화 오차의 제곱 평균 제곱근 (Root Mean Square of Synchronous Error :RMSE)보다 새롭게 제안한 제어기법에 의한 수치가 더 높게 산출된다. 하지만, 외란 발생 후, 연동(cross-coupling) 제어기법의 동기화 루프(Loop) 영향으로 그 오차가 빠르게 저감되며 기존의 제어기법보다 오



(a) The control responses of master system(left motor)



(b) The control responses of slave system(right motor)

Fig. 21 The control responses of both master and slave systems

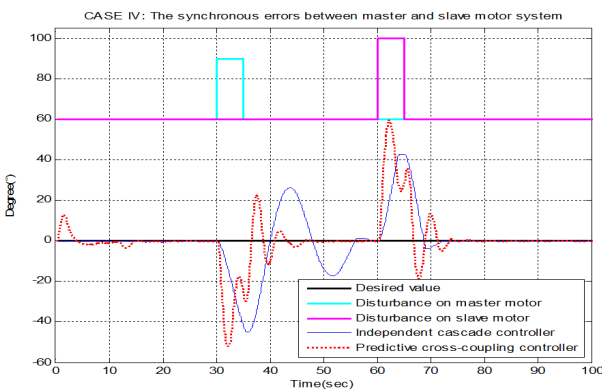


Fig. 22 The synchronous errors between master and slave motor system

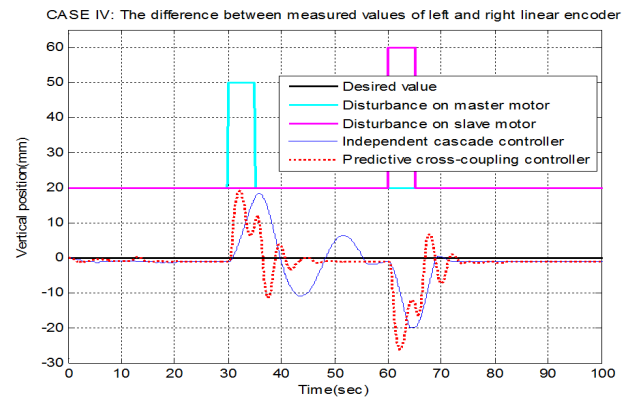


Fig. 23 The difference between left and right linear encoders

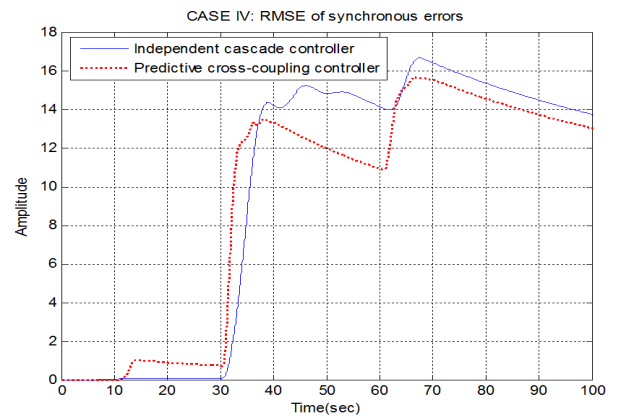


Fig. 24 RMSE of synchronous errors via two controllers

Table 5 Performance comparison of proposed control technique

	Conventional technique	Proposed technique	Improved Rate (%)
RMSSE	13.73	13.02	5.2

차가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, Table 5에서 확인할 수 있듯이 총 실험 구간에서의 최종적인 동기화 오차의 평균 제곱근은 제안된 제어기법을 통하여 정점(Peak) 오차의 크기가 약 0.71만큼 작아졌으며, 그에 따라 동기화 제어성능은 오차에 관한 기존의 기법보다 5.2% 개선되었다.

6. 결론

본 논문에서는 듀얼 서보모터 구동형 프레스 시스템의 동기화 제어기법을 제안하였다. 기존에 사용되는 독립 종속 피드백(Independent cascade feedback) 제어기법은 각 모터에 작용하는 외란 보상에는 효과적이거나, 동기화 제어성능 향상에는 한계가 있는바 이러한 문제점을 해결하기 위하여 종속 비례적분미분(Cascade PID) 제어루프와 연동(Cross-coupling) 제어루프로 구성된 새로운 제어기법을 제안하였고 이에 대하여 수치모의실험과 축소형 하드웨어를 이용한 실험을 실시하였다. 제어기법의 성능에 대한 실험적인 검증을 위하여 실제 프레스의 슬라이드 모션을 모사할 수 있는 축소형 모델을 제작하였고, 제안한 제어기법이 기존의 종속 비례적분미분 제어기법보다 정밀한 위치제어와 안정적인 동기화 제어성능을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

향후 연구로는 제안한 제어기법의 초기 동기화 성능을 보완하고 전체적인 신뢰성을 높이기 위한 감시제어기법이나 상황별 제어기법을 적용해 보고자 한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업(과제번호 10038635)의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Hong, D. P., Hong, Y., Kim, H. S., Ko, Y. G., and Kim, S. O., 2008, "The Development of a Gear System for the Micro-Press Actuation", *Proc. of the KSMTE Spring Conf.*, pp. 90~95.
- (2) Park, C. D., No, H. C., and Youn, K. T., 2010, "Trends of Related Technologies within Press Working of Sheet Metal", *J. of the KSMTE*, Vol. 19, No. 1, pp. 5~23.
- (3) Wagener, H. W., 1997, "New Development in Sheet Metal Forming : Sheet Materials, Tools and Machinery", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 72, pp. 342~357.
- (4) Miyoshi, K., 2003, "Current Trends in Free Motion Presses", *Metal forming Magazine*.
- (5) Hongmei, F., and Yu, S., 2006, "Research on the Control System of Servo Presses", *IEEE International Conference on Technology and Innovation*, pp. 2075~2080.
- (6) Kim, S. H., 2011, *DC, AC, BLDC motor control*, 2nd, bogdoo, Korea.
- (7) Koren, Y., 1980, "Cross-coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 102, Issue 4, pp. 265~272.
- (8) Lorenz, R. D., Schmidt, P. B., 1989, "Synchronized Motion Control for Press Automation", *Proceedings of the 1989 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, pp. 1693~698.
- (9) Yeung, W. K., Li, J. P., He, K., Luo, Y. X., Kong, C. T., and Du, R., 2008, "Control System Design for a New Servo Press", *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pp. 5782~5787.
- (10) Quan, J. Z., Wang, Y., and Yin, Z. P., 2008, "Design and Implement of Synchronizing Dual-drive Gantry based on Multi-axes Motion Control Card", *International Conference Intelligent Robotics and Applications*, Vol. 5315, pp. 388~397.
- (11) Kwon, O. S., Choe, S. H., and Heo, H., 2011, "A Study on the Dual-Servo System using Improved Cross-coupling Control Method", *2011 10th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*.
- (12) Kwon, O. S., Heo, H., and Kang, J. H., 2011. "Study on a Control Technique for Synchronization of Multi-Servo System", *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers fall conference*, pp. 54~54.