

클램핑 공정을 위한 유압실린더-부하계의 다축 위치 동기제어

Multiple Axes Position Synchronizing Control of Hydraulic-Cylinder Load System for Clamping Process

조승호^{1,✉}
Seung Ho Cho^{1,✉}

¹ 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 (Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik Univ.)
✉ Corresponding author: shcho@hongik.ac.kr, Tel: +82-2-320-1682

Manuscript received: 2013.11.20 / Revised: 2013.12.18 / Accepted: 2013.12.26

This paper presents a synchronizing adaptive feedforward control for clamping servomechanism of injection molding machines. Based on MBS, virtual design model has been developed for a direct forcing clamping mechanism. A synchronizing controller is designed and combined with adaptive feedforward control to accommodate mismatches between the real plant and the linear plant model used. From tracking control simulations, it is shown that significant reduction in position tracking error is achieved through the use of proposed control scheme.

Key Words: Multiple Axes Synchronizing Control (다축 위치 동기제어), Adaptive Feedforward Control (적응 피드포워드 제어), Virtual Design Model (버추얼 디자인 모델), Tracking Error (추적오차)

기호설명

e_{fi}, e_{fs} : tracking error, synchronizing error
 $x_r, x_{i(i=1-4)}$: reference input, piston displacement
 V_M, V_P : velocity of linear plant model, velocity of virtual design model
 G, T_i, T_d : proportional, integral and derivative gain
 ω_n, ζ_n : natural frequency, damping ratio

1. 서론

동특성이 다른 다수의 구동축을 갖는 생산시스템에서 제품 정밀도 혹은 생산효율을 향상시키기 위해서는 정상상태 뿐만 아니라, 과도상태에 대해서도 구동축간의 동기화를 도모할 필요가 있다.¹ 부하변동 등에 의한 과도상태에서 동기화를 실현하기 위해서는, 각축의 출력은 목표 궤도에 추종

하는 것에 우선하여 먼저 축 간의 동기화를 실현하고 동기상태를 계속 유지시키면서 목표 궤도에 추종하도록 제어하지 않으면 안된다. 본 연구에서는 직압식 사출성형기²의 클램핑 공정을 대상으로 4축 실린더 시스템의 동기화 제어를 다룬다. 기본적인 다축 시스템의 동기화 방법으로서 한 축을 주축으로 하고 그 외의 축을 추종축으로 하는 마스터 슬레이브(Master Slave)³ 방법이 고려되고 있으나, 동기화 속도는 추종축의 동특성에 의존한다. 그러나 일반적으로 구동축의 동특성도 동작 조건에 의하여 임의 범위에서 변동하므로 양축을 동등하게 취급하는 방식이 바람직하다. 그리고 고정게인(Gain) 제어기는 동특성의 변동에 대처할 수 없으므로 적응기능을 갖는 제어기가 필요하다. 이를 위하여 응답성의 개선과 외란 보상에 유효한 적응 피드포워드 제어기(AFC)를 4축 시스템에 적용하는 문제를 고찰한다. 본 연구에서 제안하는 4축 위치

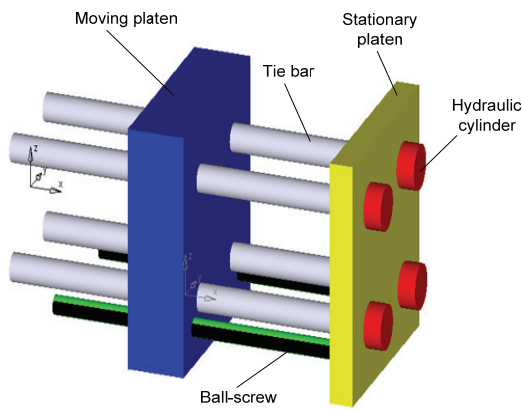


Fig. 1 3D CAD model for clamping unit

동기시스템은 주축과 추종축을 동등하게 취급하는 방식을 택한다. AFC를 이용한 시스템에 각 축의 출력차, 즉, 동기화 오차를 도입하고, 추적오차 뿐만 아니라 동기화 오차도 영에 수렴시킴으로써 과도상태와 정상상태에서의 동기화를 도모한다.

2. 클램핑 메카니즘 서보시스템

2.1 기본특성

직압식 사출성형기의 클램핑 메카니즘 서보시스템은 세 개의 부 시스템, 즉, 전기시스템, 유압시스템, 기계적인 클램핑 메카니즘으로 구성된다. 본 연구의 기저를 형성하는 직압식 클램핑 유니트의 기본 설계도가 Fig. 1에 나타나 있다. 가동형판(Moving Platen)이 볼스크루(Ball-Screw)에 의하여 일정한 위치에 다다르면, 고정형판에 위치한 4개의 유압실린더가 타이바를 인장시켜 형체력을 발생시키는 구조이다. 이때 유압실린더 4개의 동기제어가 시스템 성능을 좌우한다. Fig. 2에는 그 중 한 개의 유압실린더를 대상으로 하여 클램핑 메카니즘을 제어하기 위한 유압회로, 동기제어기, 그리고 적응제어기가 함께 나타나 있다.

2.2 모델링

클램핑 메카니즘을 표현하는 3D CAD 모델(Fig. 1)과 이를 구동하기 위한 유압시스템(Fig. 2)이 결합되어, 동기제어를 구현하기 위한 버추얼 디자인 모델(Virtual Design Model)이 구성되었다. 주요 부품들의 사양이 Table 1에 나타나 있다. 다음 단계는 제어기 설계를 위하여 방향 비례제어밸브, 유압실린더, 그리고 부하로 구성된 개회로의 전달함수를

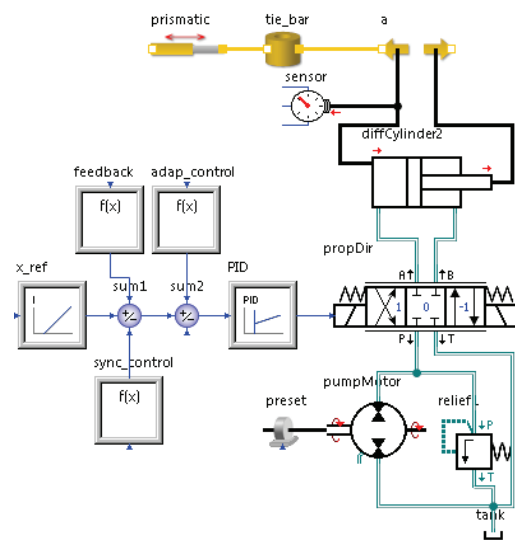


Fig. 2 Hydraulic system with controller

Table 1 Component specifications

Parameters		Value
Single rod cylinder	Piston diameter	410 mm
	Rod diameter	190 mm
	Stroke	20 mm
Pump	Volumetric displacement	360 cm ³ /rev
Proportional directional control valve	Natural frequency	10 Hz
	Flow rate	120 l/stroke

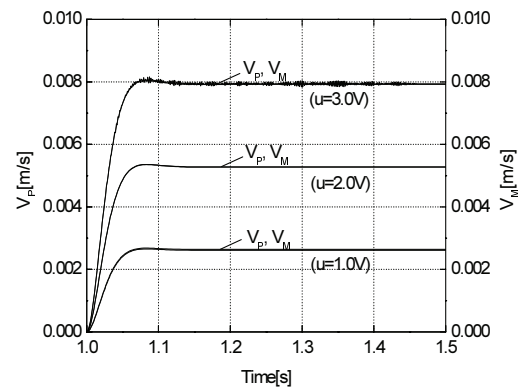


Fig. 3 Comparison of velocities in virtual design model and linear plant model

구하는 일이다. 이를 위해 버추얼 디자인 모델을 대상으로 방향 비례제어밸브에 스텝입력을 가하고 피스톤 속도과형을 조사하였다. 아울러 식(1)로 표

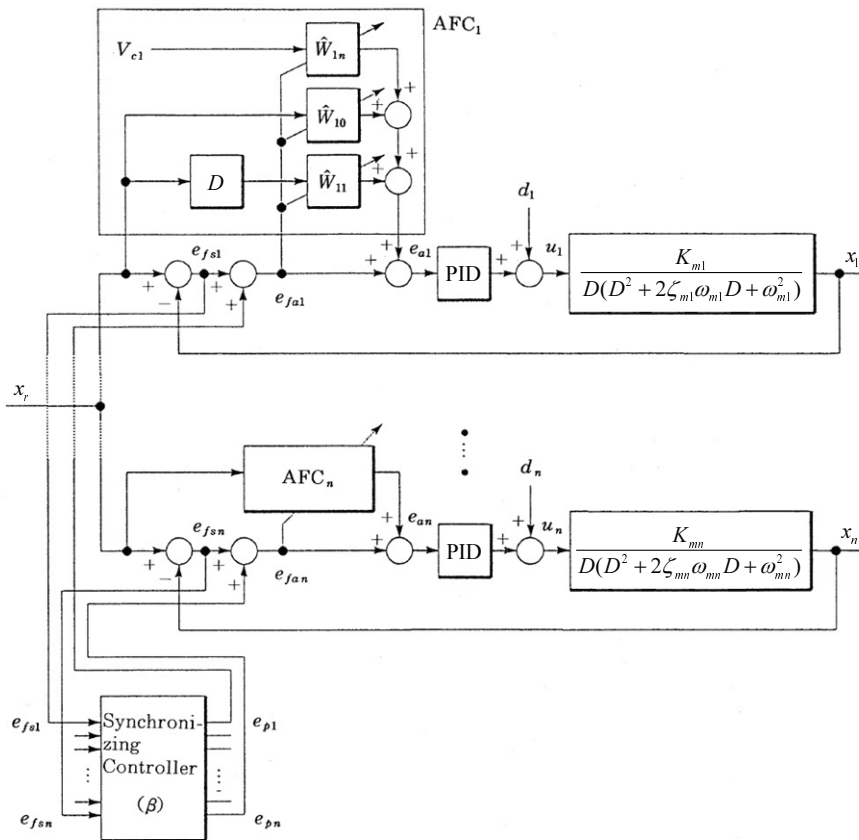


Fig. 4 Synchronizing adaptive feedforward control

현되는 전달함수^{4,5}를 이용하여 속도응답 과형을 조사하였다. 그 결과가 Fig. 3에 비교되어 나타나 있다. 베타열 디자인 모델의 속도과형을 선형모델의 속도과형으로 근사화 시킬 수 있었다. 이로부터 추정된 선형모델의 설계 파라미터들은 개회로 (Open Loop Gain) 게인=0.00264(m/s)/Volt, 고유진동수(Natural Frequency)=10Hz, 감쇠비(Damping Ratio)=0.8이다.

$$\frac{X_n(s)}{U_n(s)} = \frac{K_n}{s(s^2 + 2\zeta_n\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1)$$

3. 다축 위치 동기시스템

3.1 시스템구성

본 연구에서 고찰할 다축 위치 동기시스템의 구성이 Fig. 4에 나타나 있다. 제 1축부터 제 4축의 액추에이터-부하계는 각각 파라미터가 다른 3차

모델로 근사화 하였으며, 이들의 값은 미지값으로 다르다. 각각의 축에는 다른 축과의 동기화를 도모하여 추종오차를 감소시켜 응답특성의 개선을 도모하기 위하여 AFC를 설계한다. 또 축 사이에는 각축의 추종오차로부터 동기상태를 판단하고, 동기화 오차를 출력하는 동기화 제어기를 설계한다. 본 시스템에서 각축이 동기상태에 있다면 동기화 오차는 영으로 된다. 또 동기화의 강도는 동기화 파라미터의 게인에 의존하고, 게인이 영이면 각각의 축은 독립된 다축 시스템이 된다.

3.2 적응 피드포워드 제어

각축의 AFC는 3개의 적응 파라미터로 구성되며, 대응하는 축의 추적오차와 동기화 제어기로부터의 동기화 오차와의 합으로 구하여지는 적응오차를 사용하여 식(2)에 의하여 조정된다. 여기에서 $\hat{P}_i(t)$ 와 $\Phi_i(t)$ 는 각각 다음의 식(3)과 식(4)로서 표현되는 적응 파라미터 벡터 및 입력벡터이다.

$$\frac{d\hat{P}_i(t)}{dt} = \gamma \cdot e_{fsi}(t) \cdot \Phi_i(t) \quad (2)$$

$$\hat{P}_i^T(t) = [\hat{W}_i(t), \hat{W}_{i0}(t), \hat{W}_m(t)] \quad (3)$$

$$\Phi_i^T(t) = [Dx_i(t), x_i(t), V_{ci}] \quad (4)$$

적용 파라미터 벡터의 안에 있는 $\hat{W}_{i1}(t)$ 와 $\hat{W}_{i0}(t)$ 는 대응하는 플랜트의 역시스템을 구성하기 위하여, 또 $\hat{W}_m(t)$ 는 일정한 외란을 보상하기 위하여 설계된다.

3.3 동기화 제어기

본 연구에서 고찰할 크로스 타입의 동기화 제어기가 Fig. 5에 나타나 있다. 이 방식에서는 모든 축 사이의 동기화를 실현하도록 제어기가 구성된다. 동기화 오차신호는 $i, j=1 \sim 4; i \neq j$ 일 때 식(5)로

$$e_{pi}(t) = \beta \sum_{j=1}^4 \{x_j(t) - x_i(t)\} \\ = \beta \{3e_{fsi}(t) - \sum_{j=1}^4 e_{fsj}(t)\} \quad (5)$$

표현된다. 제어기의 구성이 복잡하고, 어느 축에 외란이 가해지는 경우에도 외란의 영향은 동기화 제어기에 커플링된 모든 축에 직접 나타난다. 따라서 다른 방식에 비교해서 강한 동기화 특성이 실현될 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구의 비추열 디자인 시뮬레이션에는 상용 소프트웨어 SimulationX를 사용하였다. 클램핑 실린더의 위치 추적제어 성능을 서로 다른 운동모드 하에서 고찰하기 위해서, 비례제어밸브에의 입력 신호 파형을 가속모드, 등속모드, 감속모드, 그리고 정지모드를 결합하여 구성하였다. 다음에는 동기화 제어의 필요성을 부각시키기 위하여, 4개의 축을 구동하는 클램핑 실린더의 동특성을 서로 다르게 설정하였다. 주요 불확실성 인자로서 실린더에서 발생하는 누설을 고려하였다. 유압실린더의 누설 파라미터 입력창이 Fig. 6에 나타나 있다. 여기에 나타난 파라미터들을 이용하여 비추열 디자인 모델의 성능을 시뮬레이션 하였다. Fig. 4는 적

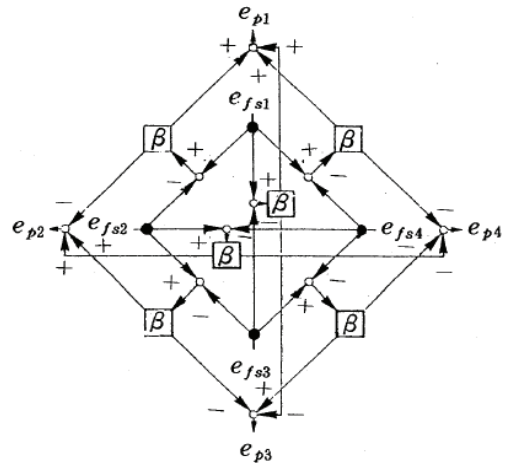


Fig. 5 Synchronizing controller(Cross type)

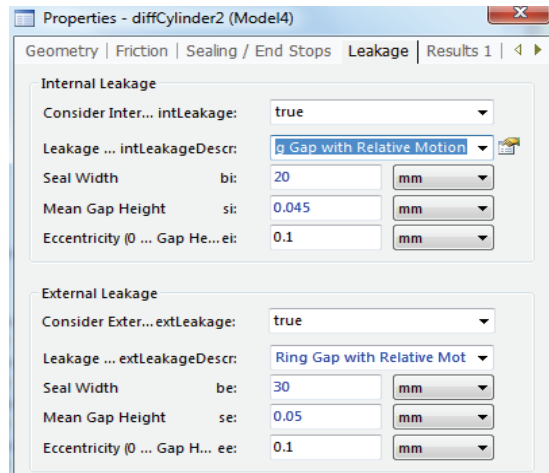
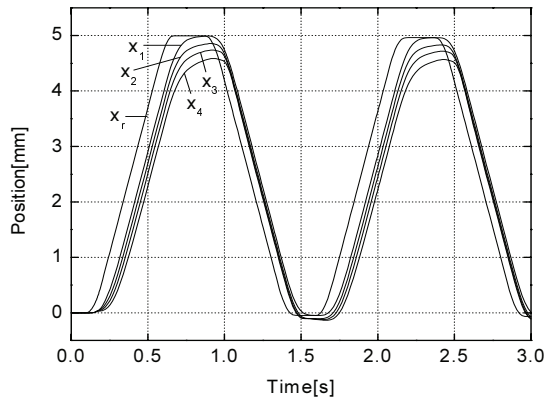
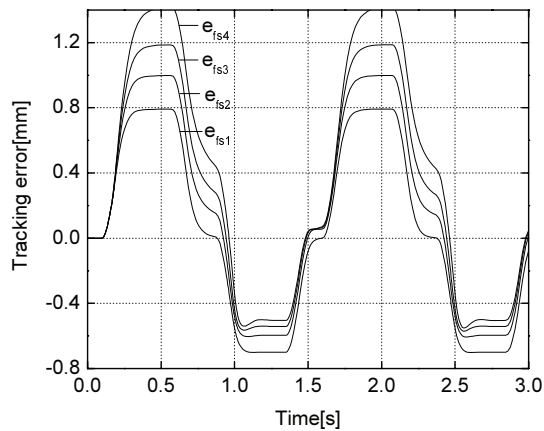


Fig. 6 Input window for leakage parameter

용 동기 제어기설계를 위한 블록선도이며, 실제로 그 안에 있는 선형 플랜트 모델이 비추열 디자인 모델로 대체되어 시뮬레이션이 수행된다. 내부누설과 외부누설 관련정보를 입력하는 파라미터 가운데 편심량(Eccentricity)을 4개의 실린더에서 서로 다르게 설정하였다. 즉, 실린더1 → 실린더2 → 실린더3 → 실린더4에서의 편심량을 0.0 → 0.1 → 0.15 → 0.2로서 변화를 주어 입력하였다. 이와 같은 상태에서 동일한 PID제어기를 사용하여, 4개의 실린더-부하로 구성된 비추열 디자인 모델에 대한 시뮬레이션 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 아울러 제어기 파라미터 값들이 Table 2에 나타나 있다. 실린더1에서는 누설이 발생하지 않으므로 기준목

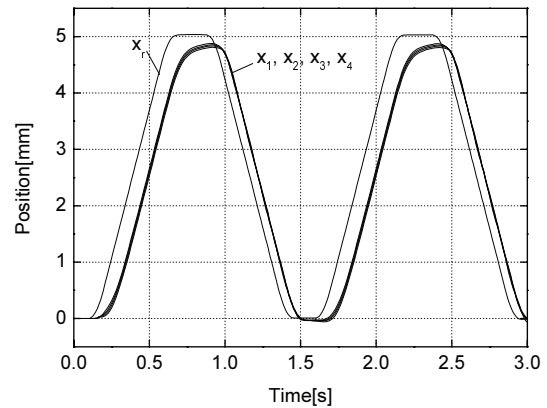


(a) Desired and actual output signal

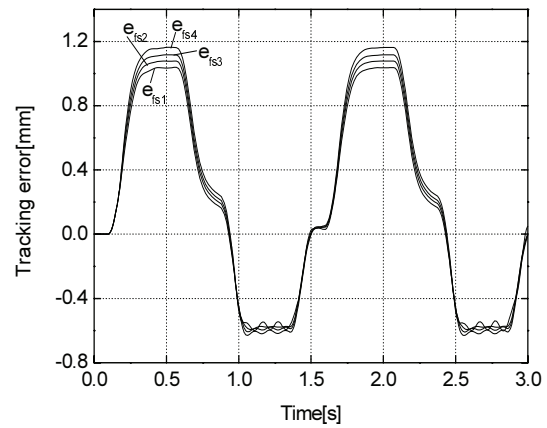


(b) Tracking error signal

Fig. 7 Responses under PID control



(a) Desired and actual output signal



(b) Tracking error signal

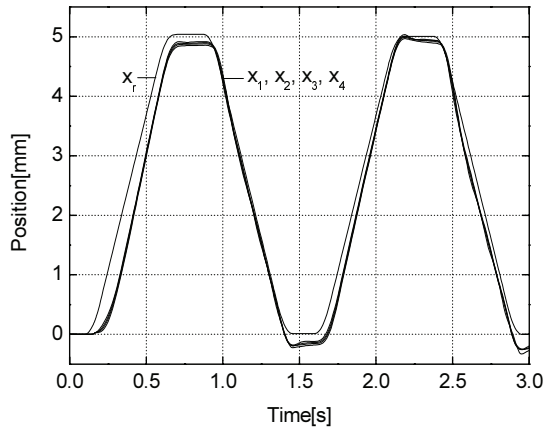
Fig. 8 Responses under synchronizing control

Table 2 Controller parameters

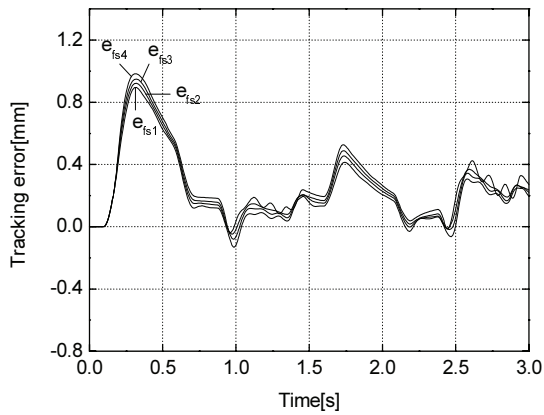
	G	T_i	T_d	β	γ
PID	5×10^3	2×10^{-2}	9×10^{-3}		
Synchronizing control	5×10^3	2×10^{-2}	9×10^{-3}	1.0	
Synchronizing AFC	5×10^3	2×10^{-2}	9×10^{-3}	1.0	2×10^4

표 입력에 비교적 잘 추종하고 있다. 다만 유압 시스템에 내재된 지연특성에 따른 위상차이를 보여 주고 있다. 누설이 가장 많은 실린더4에서 추적오차가 1.4mm에 이르고 있다. PID제어에 동기화 제어를 결합시켜 시뮬레이션을 수행한 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8(a)로 부터 4축 모두에서 동기화 제어가 어느 정도 성취된 것으로 보이나 기준입력 신호에는 잘 추종하지 못하고 있다. Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이 최대추적오차와 최소추적오

차 사이의 밴드가 상당히 줄어들었다. 최종적으로 동기화 제어에 적응 피드포워드 제어를 결합하여 시뮬레이션을 수행한 결과가 Fig. 9에 도시되어 있다. 첫 번째 사이클에서의 추적오차가 동기화 제어만을 수행한 결과보다 더 우수함을 보여준다. 두 번째 사이클에서는 추적오차가 현저하게 감소함을 알 수 있다. 실린더 위치가 영 근방에서는 추적오차가 약간 증가함을 알 수 있다. 이는 피드포워드 제어의 특성이 역시스템에 기반을 두고, 영점(Null Region)근방에서 밸브제어 시스템이 민감한 데 기인한다. Fig. 10에는 4개의 구동축에 대하여 파라미터 벡터들의 거동이 도시되어 있다. 누설이 많을수록 파라미터의 변동이 심하다. 이로 인하여 누설을 보상하여 위치 추적성능을 향상하는데 기여할 것으로 사료된다. 아울러 이는 누설 감지 신호로서도 유용하다고 생각된다.



(a) Desired and actual output signal

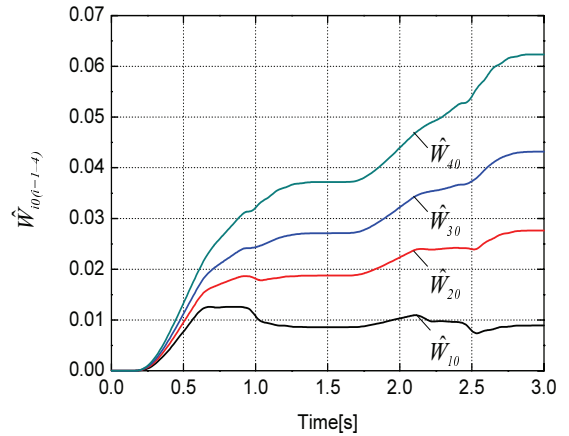


(b) Tracking error signal

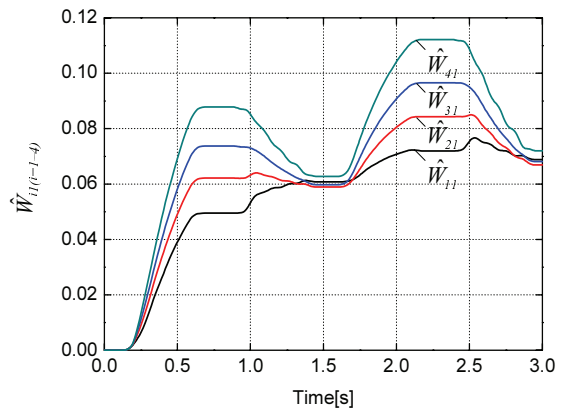
Fig. 9 Responses under synchronizing AFC

5. 결론

직압식 사출성형기의 클램핑 메카니즘은 4축 구동식으로 이루어져 강인한 동기제어가 요구된다. 본 연구에서는 적응 피드포워드 제어기와 동기화 제어기를 결합시킨 다축 동기시스템에 대하여 비추얼 디자인 모델을 구축하였다. 아울러 동기화 제어기의 구성을 상세히 고찰하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그 과정에서 비례제어밸브와 유압실린더를 사용하여 4축 구동시스템을 구축하였다. 그리고 유압실린더에서의 누설에 대한 동기화 특성 및 기준입력에 대한 추종특성을 시뮬레이션으로 고찰하였다. 그 결과 동기화 제어기는 각축의 동특성의 차이를 보상할뿐더러, 나아가 정상상태에 국한하지 않고 과도상태에서도 각축의 위치 동기화를 실현하는 과정을 명확하게 보여주었다. 동



(a) Responses of parameters



(b) Responses of parameters

Fig. 10 Responses under synchronizing AFC

기화의 과정은 동기화 파라미터의 크기에 의존하고, 또 동기화 제어기의 구성에도 관계된다. 동기화 제어기 안에서 모든 축사이의 동기화 오차를 고려하는 크로스 방식을 사용하여 강한 동기화 특성을 구현할 수 있었다.

후 기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 2013-053681).

참고문헌

1. Tomizuka, M., Hu, J. S., Chiu, T. C., and Kamano, T., "Synchronization of Two Motion Control Axes Under

- Adaptive Feedforward Control,” Transaction of American Society of Mechanical Engineers, Vol. 114, No. 2, pp. 196-203, 1992.
2. Helduser, S., “Development Trends in Electrohydraulic Drives and Controls,” Proc. of 6th International Fluid Power Conference (IFK), Vol. 2, pp. 29-64, 2008.
 3. Uchiyama, M. and Nakamura, Y., “Symmetric Hybrid Position/Force Control of Two Cooperating Robot Manipulators,” Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems,” pp. 515-520, 1988.
 4. Cho, S. H. and Lee, M. W., “Simple Adaptive Position Control of a Hydraulic Cylinder-Load System Driven by a Proportional Directional Control Valve,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 8, pp. 936-941, 2011.
 5. Merritt, H. E., “Hydraulic Control Systems,” John Wiley & Sons, pp. 145-150, 1966.