

사출공정을 위한 AC 서보모터-부하계의 다축 속도 동기제어

Multiple-Axes Velocity-Synchronizing Control of AC-Servomotor Load System for Injection Process

전윤선¹, 정권¹, 최장훈¹, 안현¹, 이형철¹, 김영신¹, 홍성호², 조승호^{2,✉}
Yun-Son Jon¹, Kwon Jung¹, Jang Hoon Choi¹, Hyun Ahn¹, Hyeong Cheol Lee¹, Young Shin Kim¹,
Seong Ho Hong², and Seung Ho Cho^{2,✉}

¹ ㈜우진플라임 (Woojin Plaimm Co., Ltd.)

² 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 (Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University)

✉ Corresponding author: shcho@hongik.ac.kr, Tel: +82-2-320-1682

Manuscript received: 2015.2.23. / Revised: 2015.6.21. / Accepted: 2015.6.23.

This paper presents a velocity-synchronizing control for the multiple axes of an injection unit; based on MBS, a virtual design model has been developed for the multiple-axes servomechanism. Prior to the design of the controller, a linear plant model was derived via open-loop response simulations. To synchronize the motions of the multiple axes, a cross-type synchronizing controller was designed and combined with the PID control to accommodate any parameter mismatches among the multiple axes. From the tracking control simulations, a significant reduction of both velocity-tracking and position-tracking errors was achieved through the use of the proposed control scheme.

KEYWORDS: Multiple axes velocity-synchronizing control (다축 속도 동기제어), Injection servomechanism (사출 서보메카니즘), Virtual design model (버추얼 디자인 모델), Tracking error (추적오차)

기호설명

$e_{fsi(i=1-4)}, e_{pi(i=1-4)}$: tracking error, synchronizing error

$v_{ref}, v_{i(i=1-4)}$: reference input, ball-screw velocity

$d_{i(i=1-4)}, u_{i(i=1-4)}$: disturbance, control input

G, T_i, T_d : proportional, integral and derivative gain

ω_n, ζ_n : natural frequency, damping ratio

1. 서론

다축 구동 생산시스템에서 제품 정밀도 혹은 생

산효율을 향상시키기 위해서는 정상상태 뿐만 아니라, 과도상태에 대해서도 구동축 간의 동기화를 도모할 필요가 있다.¹ 특히 과도상태에서 부하변동 등이 발생할 경우에는 동특성이 다른 구동축들 사이에 동기화가 요구된다. 이때 각축의 출력은 목표 궤도에 추종하는 것에 우선하여, 먼저 축 간의 동기화를 실현하고 동기상태를 계속 유지시키면서 목표 궤도에 추종하도록 제어하지 않으면 안 된다. 사출성형기의 전형적인 사이클 선도가 Fig. 1에 나타나 있다. 클램프가 닫히고 형체력이 형성된 후, 사출공정 및 보압공정, 그리고 냉각공정을 거쳐 최종적으

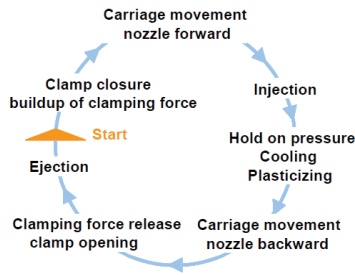


Fig. 1 Duty cycle of an injection molding machine

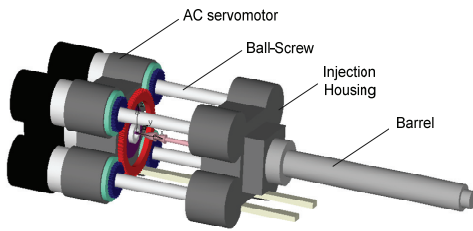


Fig. 2 3D CAD model for injection unit

로 이젝션(Ejection)이 이루어진다. 이 가운데에서 클램핑공정과 수지가 용융되어 사출되는 사출공정이 제품의 품질에 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 사출성형기의 사출공정²을 대상으로 4축 구동 AC서보 시스템의 속도 제어 동기화 문제를 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.

본 연구에서는 우선 2축 구동 AC서보 시스템의 동기화 문제를 다루고, 그 과정에서 설계 파라미터들의 변화가 동기제어 성능에 미치는 영향을 고찰한다. 그리고 이를 4축 구동 AC서보 시스템에 적용하는 문제를 고찰한다. 본 연구의 4축 속도 동기제어 시스템에서는 주축과 추종축을 동등하게 취급하는 방식을 택한다. 기본적으로 각 축의 추적오차뿐만 아니라, 각 축의 출력차이, 즉, 동기화 오차를 도입한다. 나아가 동기화 오차도 영에 수렴시킴으로써 과도상태와 정상상태에서의 동기화를 도모한다.

2. 사출 메카니즘 서보시스템

2.1 기본특성

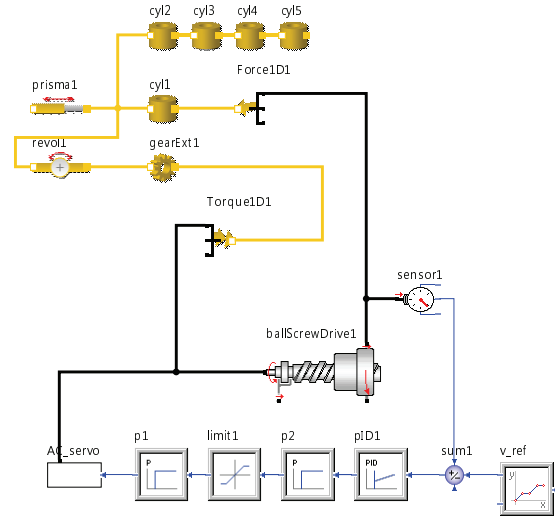


Fig. 3 AC-Servo system for single axis

Table 1 Component specifications

Parameters		Value
Injection AC servomotor	Rated torque	1,100Nm
	Rated rpm	300rpm
Ball-Screw	Pitch	20mm
Injection part	Total weight	5,156kg

사출성형기의 사출 메카니즘 서보시스템은 크게 두 개의 부 시스템, 즉, 전기시스템과 기계적인 사출 메카니즘으로 구성된다. 본 연구에서 구축한 4축 구동 사출장치의 기본 설계도가 Fig. 2에 나타나 있다. AC서보모터-볼스크루(Ball-Screw) 유닛 4개에 의하여 사출부가 속도제어되는 구조이다. 그리고 사출부가 일정한 위치에 도달하면 보압공정에 들어가게 된다. 따라서 4축의 동기제어가 시스템 성능을 좌우한다. 그 중 한 개의 구동축을 대상으로 하여 메카니즘을 구성하는 MBS(Multi-Body System), AC서보모터, PID 제어기, 그리고 입력신호 발생부가 Fig. 3에 도시되어 있다.

2.2 모델링

사출부 메카니즘을 표현하는 3D CAD (Fig. 2) 모델과, 이를 구동하는 AC서보시스템 (Fig. 3)이 결합되어, 동기제어를 구현하기 위한 버추얼 디자인 모델(Virtual Design Model)이 구성되었다. 여기에는 가동부에 내재된 비선형 쿨롱 마찰, 볼-스크루의 피치, 백래시(Backlash), 그리고 서보모터의 동특성 등이 포함되어 있으므로, 실제에 상응하는 모델이

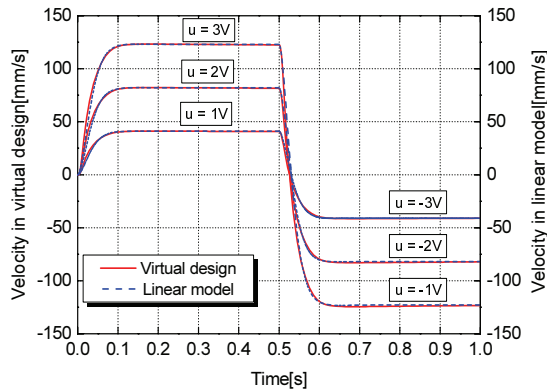


Fig. 4 Validation of linear model

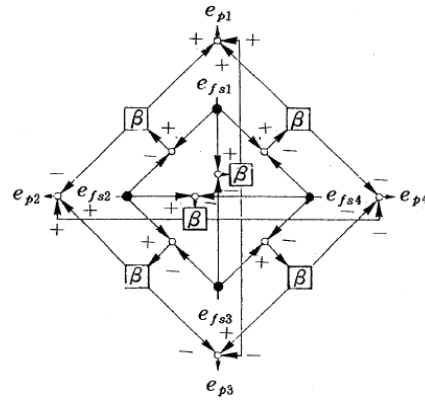


Fig. 6 Synchronizing controller (Cross-Type)

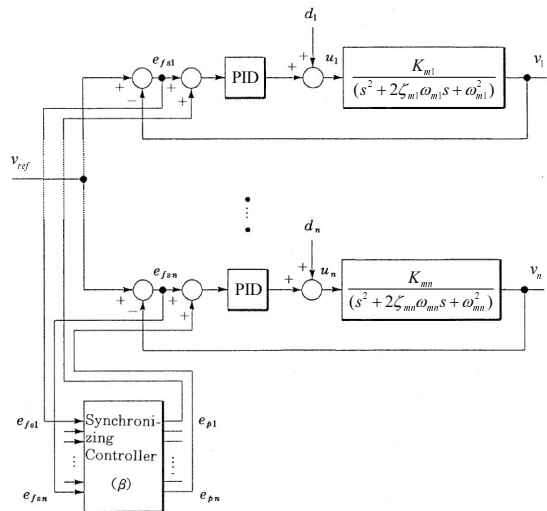


Fig. 5 Overall block diagram of control system

다. 사용된 주요 부품들의 사양이 Table 1에 나타나 있다. 다음 단계는 제어기 설계를 위하여 AC서보모터-볼스크루와 부하로 구성된 개회로의 전달함수를 구하는 일이다. 이를 위해 버추얼 디자인 모델을 대상으로, AC서보모터에 입력신호로서 구형파를 가하고 볼스크루의 속도파형을 조사하였다. 또한 버추얼 디자인 모델을 근사화할 수 있는 선형 모델을 도출하기 위하여, 식(1)로 표현되는 전달함수를 이용하여 속도응답 파형을 조사하였다.

두 개의 응답을 비교한 것이 Fig. 4에 나타나 있다. 일반적으로 선형화를 시키면, 입력의 크기가 증가할수록 비선형모델과의 차이가 증가하는 경향을 보인다. Fig. 4에서도 과도상태에서 버추얼 디자인모델과 선형모델의 차이가 약간 관찰되었다. 이

와 같은 과정으로부터 추정된 선형모델의 설계 파라미터들은 개회로 게인(Open Loop Gain)=0.041(m/s)/Volt, 고유진동수(Natural Frequency)=8.3Hz, 감쇠비(보 Ratio)=0.9이다.

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

3. 다축 속도 동기시스템

3.1 시스템구성

본 연구에서 고찰할 다축 구동 속도 동기제어 시스템의 구성이 Fig. 5에 나타나 있다. 제1축부터 제4축의 액추에이터-부하계는 각각 파라미터가 다른 2차 모델로 근사화 하였다. 축 사이의 상호간 영향은 외란으로 모델링 하였다. 응답특성의 개선을 도모하기 위하여, 각축의 추종오차로부터 동기 상태를 판단하고, 동기화 오차를 출력하는 동기화 제어기를 설계하였다. 본 시스템에서 각축이 동기 상태에 있다면 동기화 오차는 영으로 된다. 그리고 동기화의 강도는 동기화 파라미터의 게인에 의존하고, 게인이 영이면 각각의 축은 독립된 다축 시스템이 된다.

3.2 동기제어기

각 축의 동기제어기는 기본적으로 각각의 대응하는 축의 추적오차를 서로 비교하는 데에서 출발한다, 본 연구에서 고찰할 크로스타입의 동기 제어기가 Fig. 6에 나타나 있다. 예를 들어 제1축의 추적오차(e_{fs1})는 왼편에 위치한 제2축의 추적오차(e_{fs2})와의 차이를 구한 후, 동기화 게인을 곱하여

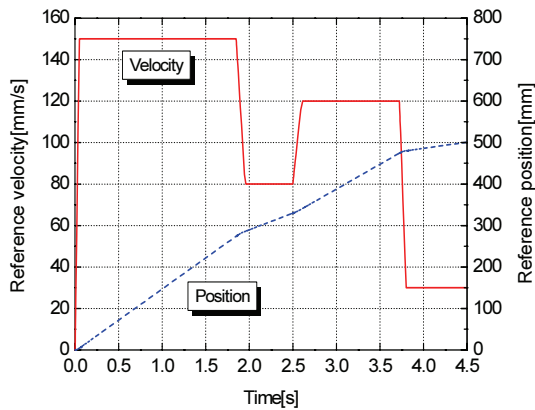


Fig. 7 Reference profiles for position and velocity

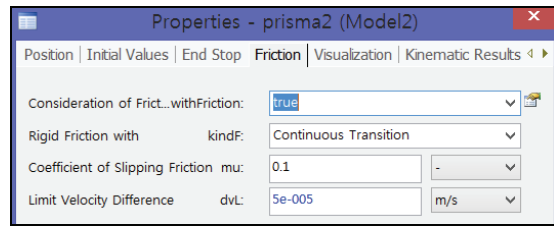
제1축, 제2축의 동기제어기로 피드백 되어진다. 마찬가지로 오른쪽에 위치한 제4축의 추적오차(e_{fs4})와의 차이를 구한 후, 동기화 계인을 곱하여 제1축, 제4축의 동기제어기로 피드백 되어진다. 최종적으로 크로스(Cross)하여 맨 하단에 위치한 제3축의 추적오차(e_{fs3})와의 차이를 구한 후, 동기화 계인을 곱하여 제1축, 제3축의 동기제어기로 피드백 되어진다. 이 방식에서는 모든 축사이의 동기화를 실현하도록 제어기가 구성된다. 동기화 오차신호는 $i, j = 1 \sim 4; i \neq j$ 일 때 식(2)로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 e_p(t) &= \beta \sum_{j=1}^4 \{x_j(t) - x_i(t)\} \\
 &= \beta \{3e_{fsi}(t) - \sum_{j=1}^4 e_{fsj}(t)\}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

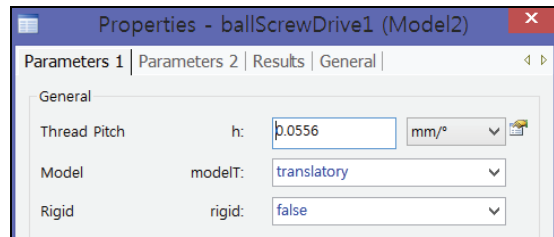
어느 축에 외란이 가해지는 경우에도 외란의 영향은 동기화 제어기에 커플링된 모든 축에 직접 나타난다. 따라서 다른 방식에 비교해서 강한 동기화 특성이 실현될 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구의 벤틀리 디자인모델 시뮬레이션에는 상용 소프트웨어 SimulationX를 사용하였다. 사출부를 구동하는 AC서보모터-볼스크루의 속도 추적 제어 성능을 서로 다른 운동모드 하에서 고찰하기 위해서, AC서보모터에의 입력신호 파형을 가속모드, 등속모드, 그리고 감속모드를 결합하여 구성하였다.⁵ 시뮬레이션에 사용한 기준입력신호 파형이 Fig. 7에 구체적으로 나타나 있다.



(a) Coulomb friction coefficient



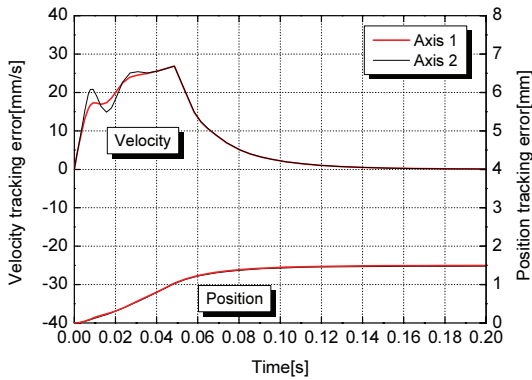
(b) Ball-Screw pitch

Fig. 8 Input window for design parameter

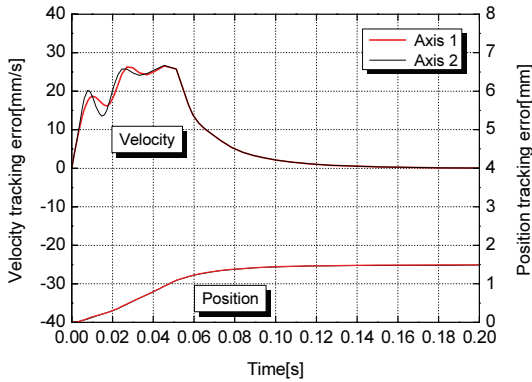
Table 2 Parameters for two axes

	Gain	Time constant(s)	Friction coeff.	Ball-Screw pitch(mm/°)
1 st axis	1.0	0.01	0.0	0.05560
2 nd axis	0.5	0.02	0.2	0.05004

동기제어의 필요성을 부각시키기 위하여, 우선 2축으로 구동되는 AC서보모터-볼스크루-부하계의 설계 파라미터에 변화를 주어 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용한 2축 구동에 관련된 설계 파라미터 값들을 Table 2에 열거되어 있다. 그리고 한 예로서 마찰계수와 볼스크루 피치에 대한 입력 창이 Fig. 8에 나타나 있다. 여기에 나타난 파라미터들을 이용하여 벤틀리 디자인모델의 성능을 시뮬레이션 하였다. 이로서 플랜트에 내재된 불확실성이 제어성능에 미치는 영향을 예측할 수 있다. Fig. 5의 전체 블록선도에서, 실제로 그 안에 있는 선형 플랜트 모델이 벤틀리 디자인 모델로 대체되어 시뮬레이션이 수행된다. 우선 Table 2에 나타난 것과 같이 제1축과 제2축의 쿨롱 마찰계수를 서로 다르게 설정하여, 두 축의 제어 특성을 시뮬레이션 한 결과가 Figs. 9(a)와 9(b)에 각각 도시되어 있다. 동기제어를 수행하였을 때, 과도상태의 속도 응답에서 두 개의 파형 사이에 동기화를 이루려는 시도가 Fig. 9(b)에 나타나 있다. 제1축, 제2축의 볼-스크루 피치를 서로 다르게 설정하여, 제어특성을 시뮬레이션 한 결과가 Figs. 10(a)와 10(b)에 도시되어 있다. Fig. 10(b)로부터 속도와 위

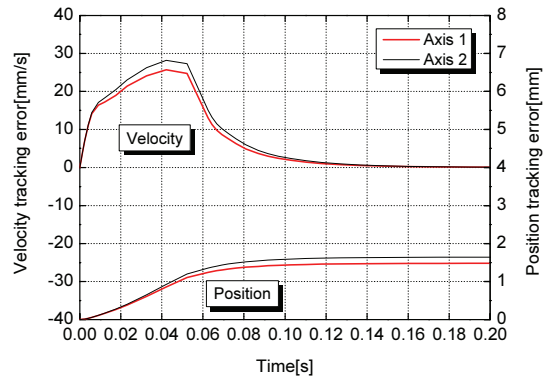


(a) w. o. synchronizing control

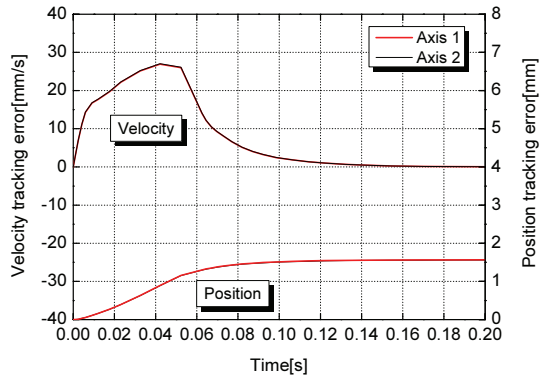


(b) w. synchronizing

Fig. 9 Tracking error due to coulomb friction



(a) w. o. synchronizing control



(b) w. synchronizing

Fig. 10 Tracking error due to ball-screw pitch

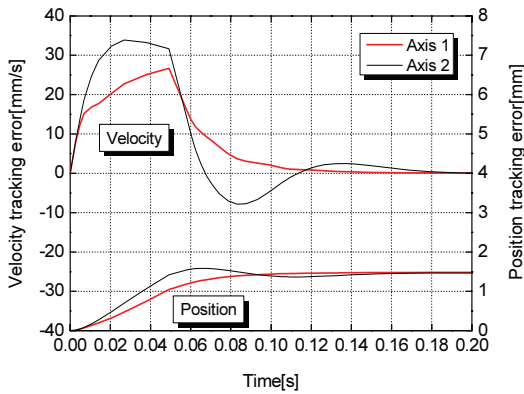
Table 3 Controller parameters

	G	T_i	T_d	β
PID	50	0.02	0.001	
Synchronizing control	50	0.02	0.001	2.0

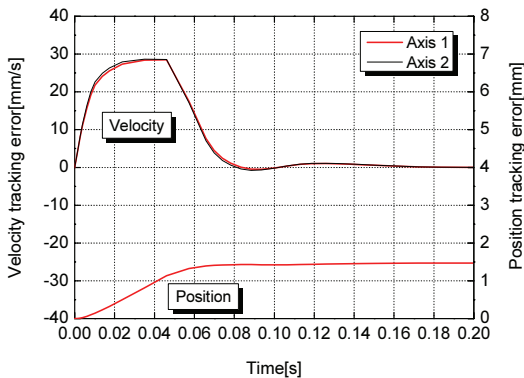
치과형에서 동기화가 거의 완벽하게 이루어지는 것을 알 수 있다. 다음에는 두 축을 구동하는 AC 서보 모터의 동특성이 서로 다를 때를 가정하여, 제1축, 제2축의 모터 게인(Gain)과 시정수(Time constant)를 서로 다르게 설정하여 시뮬레이션을 하였다. Fig. 11(b)로부터, 속도와 위치과형에서 0.1초 이내에 동기화가 거의 완벽하게 이루어지는 관찰할 수 있다. 실제의 사출공정에서는 위에서 고찰한 세 가지의 불확실성 요인들이 동시에 작용할 가능성이 크다. 따라서 이들을 모두 고려한 경우에 대하여 동기제어의 성능을 고찰하였다. Fig. 12(b)로부터 동기제어를 수행하였을 때, 속도와 위치과형에서 동기화 성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 또한 동기화를 이룩하기 위하여 과도상태에

서 토크가 변화하는 모습이 Fig. 13(b)에 매우 잘 나타나 있다. 0.1초 이후에 양쪽 축에 작용하는 토크가 상당히 근접하고 있다.

다음에는 네 개의 사출 축을 모두 고려한 경우의 동기화 특성을 속도과형, 위치과형, 그리고 토크과형의 관점에서 고찰하였다. 시뮬레이션에 사용된 네 개의 축에 대한 설계 파라미터 값들이 Table 4에 열거되어 있다. 네 축의 경우에는 모터 동특성, 마찰계수, 그리고 볼-스크루 피치 값들이 동시에 복합적으로 작용할 때, 제어성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 네 개의 사출축에 대하여 동기제어를 수행하지 않은 경우와 동기제어를 수행한 경우, 각 축의 속도과형들이 기준속도 과형에 추종하는 모습이 Figs. 14(a)와 14(b)에 각각 도시되어 있다. 동기제어를 수행하지 않은 경우, 과도상태에서 속도과형에 오버슈트가 나타나면서 네 축의 속도가 동기화를 이루지 못하고 있다. 동기제어를 수행한 경우에는, 과도상태에서 속도과형에 오버슈트(Overshoot)가 감소하면서, 네 축의 속도가



(a) w. o. synchronizing control



(b) w. synchronizing

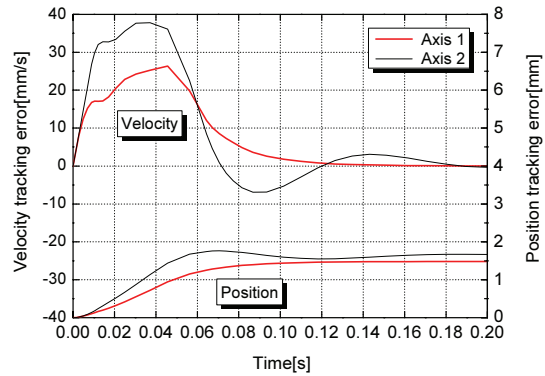
Fig. 11 Tracking error due to AC servomotor dynamics

Table 4 Parameters for four axes

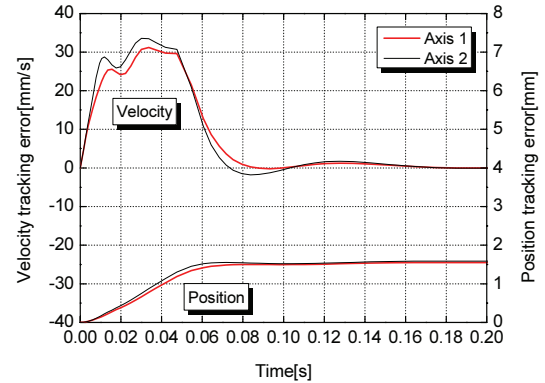
	Gain	Time constant(s)	Friction coeff.	Ball-Screw pitch(mm/°)
1 st axis	1.0	0.01	0.0	0.05560
2 nd axis	0.8	0.008	0.1	0.05282
3 rd axis	0.6	0.006	0.2	0.05004
4 th axis	0.4	0.004	0.3	0.04726

동기화를 매우 잘 이루고 있다. 정상상태에서는 속도파형에서 별다른 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 과도응답에서 비동기 상태에 있는 속도파형들이 적분 누적되어, 결국 위치오차로 나타나게 된다. 추적오차 신호만을 별개로 하여, 그래프로 나타낸 것이 Figs. 15(a)와 (b)에 각각 도시되어 있다. 과도응답 구간 0.2초 이내에서 동기제어의 효과를 확연하게 보여주고 있다.

다음에는 사출부의 위치추적제어 성능을 고찰하기 위하여, 네 개의 사출축을 대상으로 제각기 Fig. 7에 도시되어 있는 기준 위치 파형에 대한 추



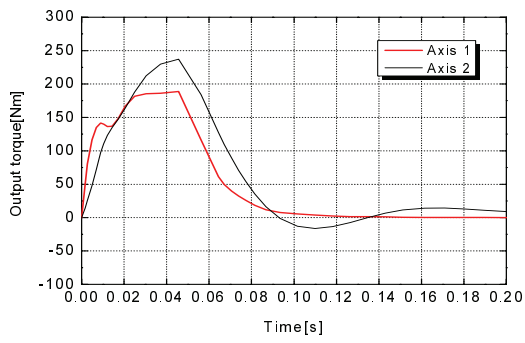
(a) w. o. synchronizing control



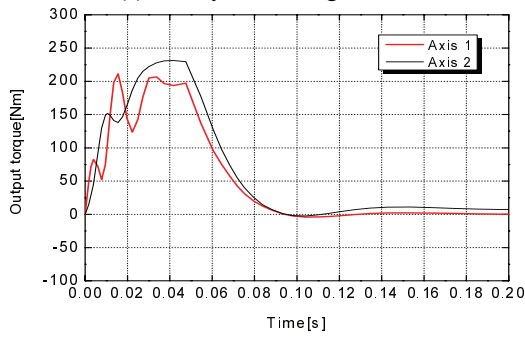
(b) w. synchronizing

Fig. 12 Tracking error due to composite uncertainty

적성능을 고찰하였다. 동기제어를 수행하지 않은 경우와 동기제어를 수행한 경우로 나누어서, 위치오차 신호를 그래프로 나타낸 것이 Figs. 16(a)와 16(b)에 각각 도시되어 있다. 동기제어를 수행하지 않은 경우에 네 개의 축의 위치오차가 서로 달라서 실제로 작동시켰을 때 사출부의 파손을 가져올 수 있으므로 주의가 필요하다. 동기제어를 수행하였을 경우에는 네 개의 축의 위치오차가 상당히 근접하여 과도상태와 정상상태 모두에서 동기화를 이루고 있음을 보여주고 있다. 사출장치에서 각 축을 구동하는 AC서보모터의 출력토크는 볼스크루의 구동 힘으로 변환되므로, 궁극적으로 사출압력 정보와 밀접한 관계가 있다. 따라서 동기제어를 수행하지 않은 경우와 동기제어를 수행한 경우로 나누어, 각 축의 출력 토크신호를 그래프로 나타낸 것이 Figs. 17(a)와 17(b)에 각각 도시되어 있다. 출력토크 파형에서 0.08초 일 때의 응답을 비교해 보면, 동기제어를 수행한 경우 토크차이($T_4 - T_1 = 22.5N$)가 동기제어를 수행하지 않은 경우의 토

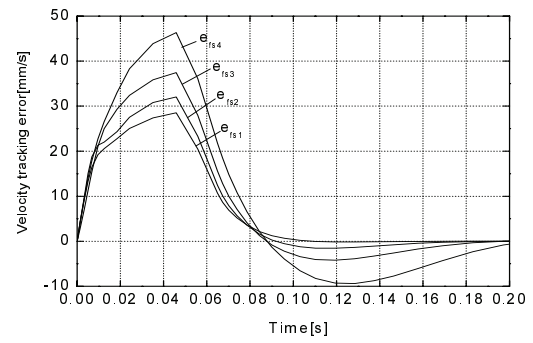


(a) w. o. synchronizing control

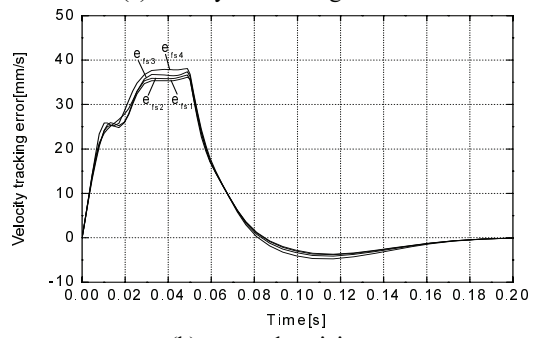


(b) w. synchronizing

Fig. 13 Torque waveforms under composite uncertainty

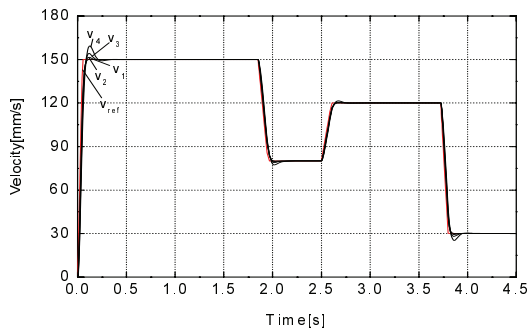


(a) w. o. synchronizing control

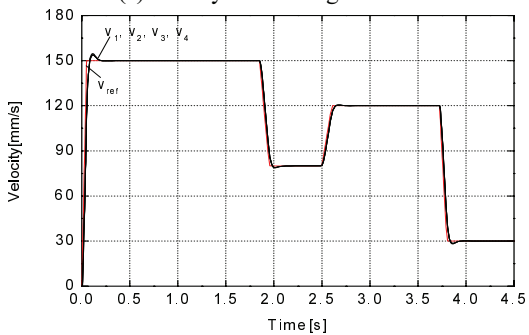


(b) w. synchronizing

Fig. 15 Velocity error due to composite uncertainty

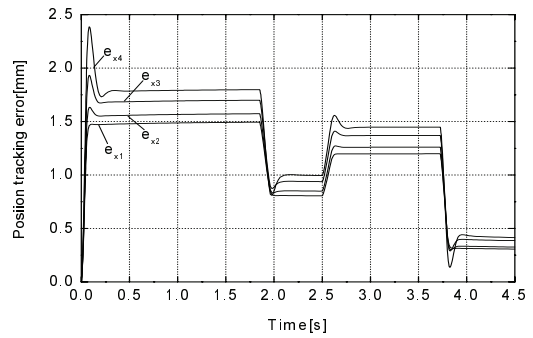


(a) w. o. synchronizing control

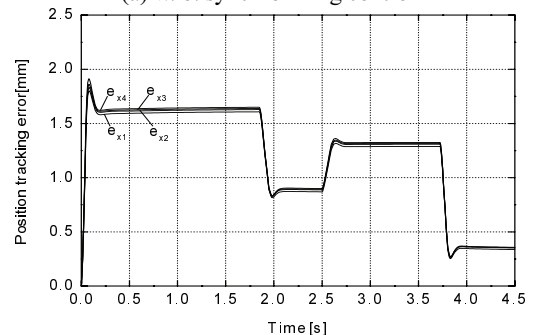


(b) w. synchronizing

Fig. 14 Velocity waveforms under composite uncertainty



(a) w. o. synchronizing control



(b) w. synchronizing

Fig. 16 Position error due to composite uncertainty

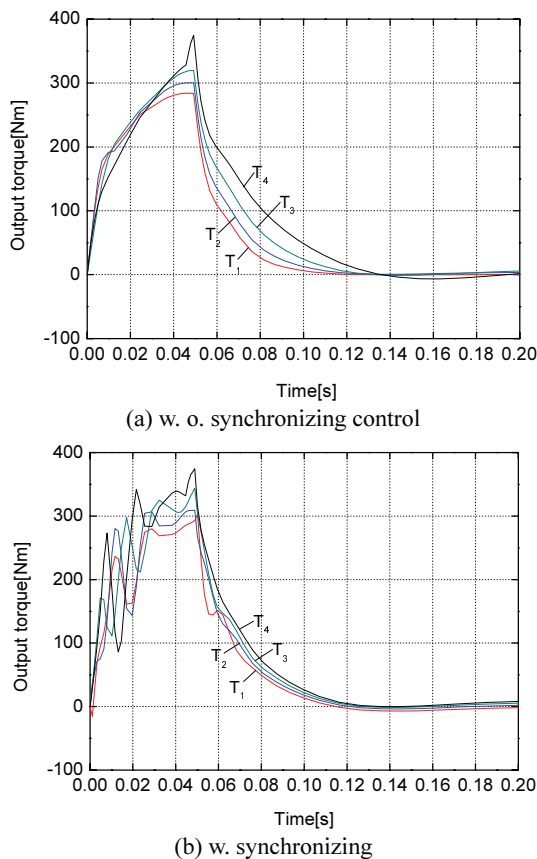


Fig. 17 Torque waveforms under composite uncertainty

크차이($T_4 - T_1 = 75.9\text{N}$)에 비하여 토크오차가 70% 정도 감소하였다. 아울러 0.06초 ~ 0.12초 사이에서 네 축의 토크가 동기화를 이루는 정도가 양호한 편이다. 아울러 Fig. 17(b)에서 초기의 과도상태, 즉 0.0초 ~ 0.04초 사이의 토크 응답을 비교해보면, 동기제어를 수행하기 위하여 토크파형들이 변화하는 과정이 잘 나타나 있다.

5. 결론

본 연구에서는 4축 구동 사출장치에 대하여 벡추얼 디자인 모델을 구축하고, 이를 기초로 동기 제어 성능을 고찰하였다. 그 과정에서 상용소프트웨어 SimulationX의 주요 기능 중 하나인 MBS를 사용하여 4축 구동 사출장치의 메카니즘을 구현하였다. 제어대상 플랜트의 전달함수를 구하기 위하여 AC서보모터와 볼스크루-부하로 구성된 개회로에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 기초로

하여 시스템의 고유진동수와 감쇠비를 추정하였다. 제어방식으로는 PID 제어기와 외란에 강인한 크로스타입의 동기제어기를 결합하여 사용하는 방식을 택하였다. 비 동기화를 유발하는 불확실성 요인으로서 AC서보모터의 계인파 시정수, 가동부의 쿨롱마찰계수, 그리고 볼스크루의 피치가 동기화에 미치는 영향을 고찰하였다. 이들 이 개별적 또는 복합적으로 미치는 영향을 2축 구동 AC서보 시스템을 대상으로 고찰하였다. 이를 기초로하여 4축 구동 사출장치의 동기제어특성을 시뮬레이션으로 고찰하였다. 그 결과 동기제어를 통하여 각축의 동특성 차이를 보상할 뿐 더러, 나아가 정상상태에 국한하지 않고 과도상태에서도 각축의 속도 동기화를 실현하는 과정을 명확하게 보여주었다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부의 글로벌 전문기술 개발사업(WC-300)의 “다기능 초정밀 사출성형 시스템 구현” 과제의 일환으로 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Tomizuka, M., Hu, J.-S., Chiu, T.-C., and Kamano, T., “Synchronization of Two Motion Control Axes under Adaptive Feedforward Control,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, No. 2, pp. 196-203, 1992.
2. Johannaber, F., “Injection Molding Machines,” Hanser Gardner Publications, 4th Ed., pp. 131-139, 2008.
3. Uchiyama, M. and Nakamura, Y., “Symmetric Hybrid Position/Force Control of Two Cooperating Robot Manipulators,” *Proc. of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots*, pp. 515-520, 1988.
4. Giam, T., Tan, K., and Huang, S., “Precision Coordinated Control of Multi-Axis Gantry Stages,” *ISA Transactions*, Vol. 46, No. 3, pp. 399-409, 2007.
5. Dubay, R., Pramujati, B., Han, J., and Strohmaier, F., “An Investigation on the Application of Predictive Control for Controlling Screw Position and Velocity on an Injection Molding Machine,” *Polymer Engineering & Science*, Vol. 47, No. 4, pp. 390-399, 2007.