

AC서보모터-볼스크루 구동 사출장치의 힘 동기제어 Force Synchronizing Control for AC Servomotor-Ball Screw Driven Injection Unit

조승호^{1*}

S. H. Cho

Received: 20 Apr. 2015, Revised: 26 May. 2015, Accepted: 28 May. 2015

Key Words : Virtual Design(버추얼 디자인), AC Servomotor-Ball Screw Drive(AC서보모터-볼스크루 구동), Synchronizing Control(동기제어), Injection Unit(사출장치)

Abstract: This paper focuses on the issue of force synchronizing control for the injection servomechanism of injection molding machines. Prior to the controller design, a virtual design model was developed for the injection mechanism with an AC servomotor-ball screw. A synchronizing controller is designed and combined with the PID control to accommodate the mismatches between the real plant and the linear model plant used. Due to the plant uncertainty, the stiffness and the damping of the mechanism were considered. From the tracking control simulations based on the virtual design model, it is shown that a significant reduction in force synchronizing error is achieved through the use of a proposed control scheme.

기호 설명

- $e_{fsi(i=1\sim 4)}$: tracking error signal
- $e_{pi(i=1\sim 4)}$: synchronizing error signal
- f_r : reference input force
- $f_{i(i=1\sim 4)}$: output force
- G : proportional gain
- T_i, T_d : integrating and derivative time
- β : synchronizing gain
- ω_n : natural frequency
- ζ_n : damping ratio

1. 서론

다수의 구동축을 갖는 생산시스템에서, 제품 정밀도 혹은 생산효율을 향상시키기 위해서는 정상상태와 과도상태에서 구동축간의 동기화를 도모할 필요가 있다.¹⁾ 특히 부하변동 등이 발생할 경우, 과도상태에서 동기화를 실현하기 위해서는, 각축의 출력은 목표 궤도에 추종하는 것에 우선하여, 먼저 축 간의 동기화를 실현하고 목표 궤도에 추종하도록 제어되어야 한다. 본 연구에서는 사출성형기의 사출공정²⁾을 대상으로, 4축 구동 AC서보모터-볼스크루 부하계의 힘 동기제어를 다룬다. 사출성형기의 전형적인 설계 구조를 나타내는 그림이 Fig. 1에 도시되어 있다. 크게 클램핑 장치와 사출장치로 나누어진다. 클램프가 닫히고 형체력이 형성된 후, 사출공정 및 보압공정, 그리고 냉각공정을 거쳐 최종적으로 이젝션(Ejection)이 이루어진다. 기본적인 다축 시스템의 동기화 방법으로서 한 축을 주축으로 하고 그 외의 축을 추종축으로 하는 마스터 슬레이브(Master Slave)³⁾ 방법이 고려되고 있다. 그러나 구동축의 동특성도 동작 조건에 의하여 임의 범위에서 변동하므로 각축을 동등하게

* Corresponding author: shcho@hongik.ac.kr
1 Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
Copyright © 2015, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

취급하는 방식이 바람직하다. 본 연구에서는 우선 2축 구동⁴⁾ AC서보시스템의 힘 동기제어 문제를 다루고, 그 과정에서 설계 파라미터들의 변화가 제어 성능에 미치는 영향을 고찰한다. 그리고 이를 4축 구동 사출장치의 AC서보시스템에 적용하는 문제를 고찰한다. 사출장치 메카니즘의 기하학적 정보를 상용 소프트웨어 SimulationX에 내장된 다-물체 시스템(이하 MBS; Multi-Body System)기법을 활용하여 3D CAD 모델링 한다. 그리고 멀티-도메인(Multi-Domain) 시뮬레이션을 통하여 버추얼 디자인(Virtual Design) 모델을 구축한다.

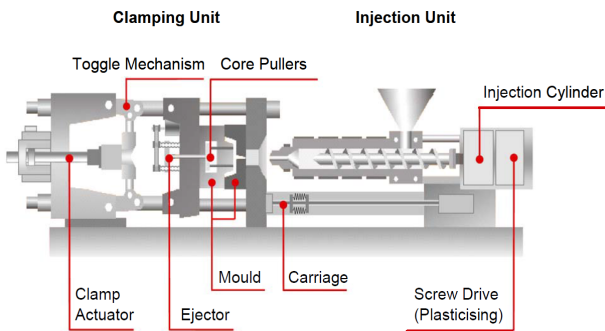


Fig. 1 Typical injection molding machine

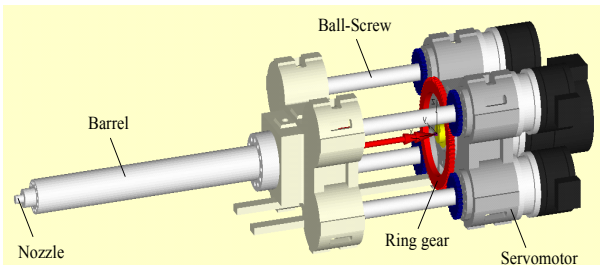


Fig. 2 3D CAD model for 4 axes injection unit

2. 구동 메카니즘 서보시스템

2.1 기본특성

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. 사출장치가 AC서보모터-볼스크루(Ball-Screw) 유닛 4개에 의하여 구동되는 것을 보여주고 있다. 사출장치에 의하여 수행되는 공정은 크게 사출공정과 보압공정으로 나누어진다. 사출공정에서는 볼스크루의 속도제어⁵⁾에 따라 용융수지가 사출되어지며, 사출부가 일정한 위치에 다다르면 보압공정에 진입하게 되며

이 때 압력제어가 이루어진다. 본 연구에서는 이 때의 압력정보를 힘으로 변환하여 4축의 힘 동기제어 문제를 고찰한다. 그 중 한 개의 구동축을 대상으로 하여 메카니즘을 구성하는 MBS, AC서보모터, PID 제어기, 그리고 입력신호 발생부가 Fig. 3에 도시되어 있다.

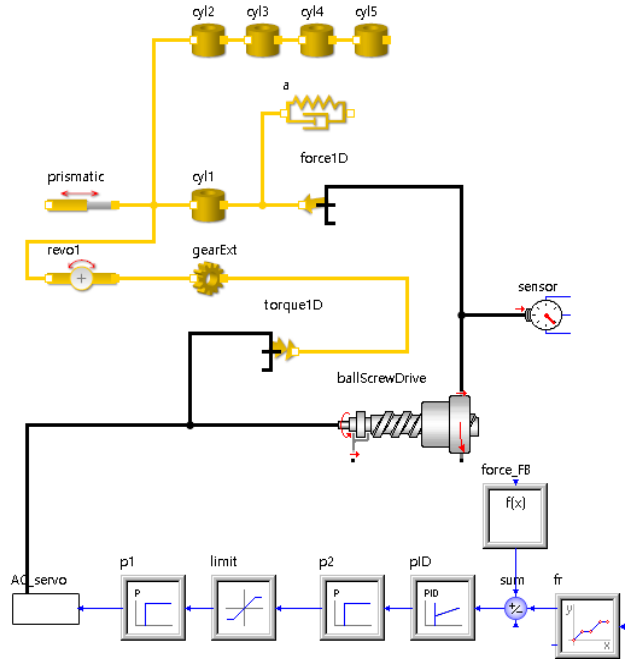


Fig. 3 Force control system with MBS

Table 1 Component specifications

Parameters		Value
AC servomotor	Rated torque	2,000Nm
	Rated rpm	300rpm
Ball-Screw	Pitch	15mm
Injection part	Total weight	3,867kg

2.2 모델링

사출부 메카니즘을 표현하는 3D CAD 모델(Fig. 2)과 이를 구동하기 위한 AC서보 시스템(Fig. 3)이 결합되어, 동기제어를 구현하기 위한 버추얼 디자인 모델이 구성되었다. 시스템 구성에 사용된 주요 부품들의 사양이 Table 1에 나타나 있다. 다음 단계는 제어기 설계를 위하여 AC서보모터-볼스크루와 부하로 구성된 개회로의 전달함수를 구하는 일이다. 이를 위해 AC서보모터-볼스크루와 부하로 구성된 버추얼디자인 모델을 이용하여 단위 피드백 시스템을 구성한 후, 스텝(Step) 입력신호를 가하고 출력 힘의 파형을 조사하였다. 아울러 버추얼 디자인모델을 근사화할

수 있는 선형모델을 도출하기 위하여, 식(1)로 표현되는 전달함수를 이용하여 단위 피드백 시스템을 구성한 후, 출력 힘의 파형을 조사하였다. 두 개의 응답을 비교한 것이 Fig. 4에 나타나 있다. 스텝입력에 대하여 정상상태 오차가 발생하고 있으므로, 식 (1)로 표현되는 타입(Type) 0의 전달함수가 타당함을 시사하고 있다. 여기에서 가한 기준입력의 크기는 0.2MN이다. 이로부터 추정한 선형모델의 설계 파라미터들은 개회로 게인(Open Loop Gain) =0.1MN/Volt, 고유진동수(Natural Frequency) =4.2Hz, 감쇠비(Damping Ratio)=1.3이다.

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

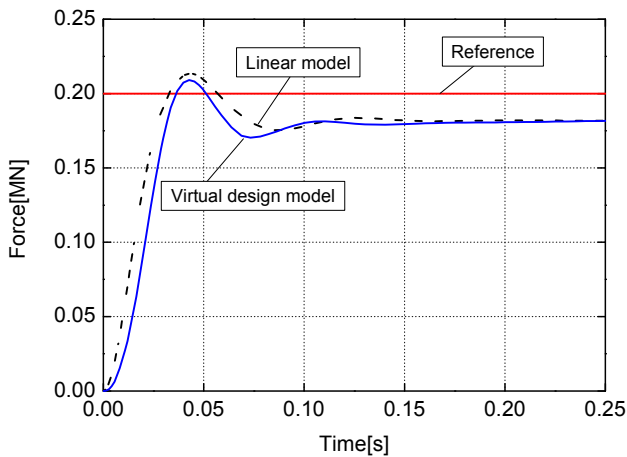


Fig. 4 Comparison of closed-loop responses

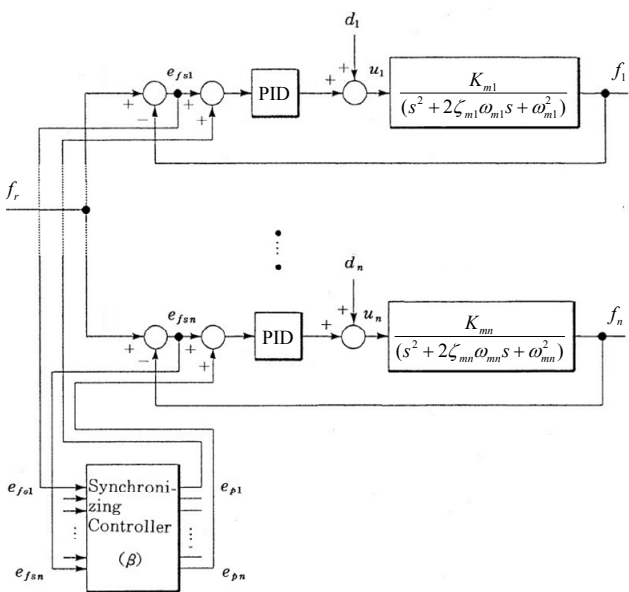


Fig. 5 Overall block diagram for force control

3. 4축 구동 힘 동기제어 시스템

3.1 시스템구성

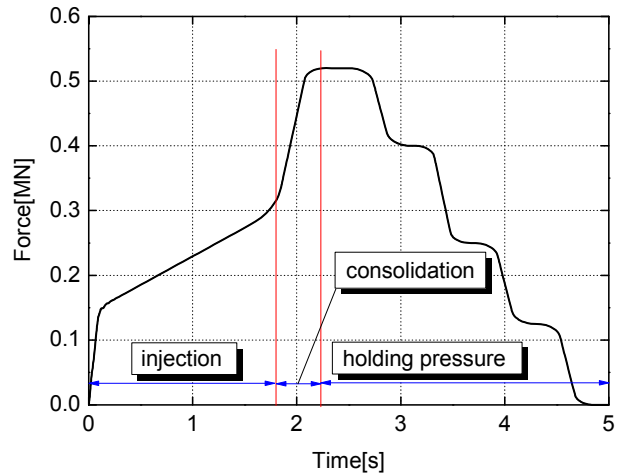


Fig. 6 Reference force profile

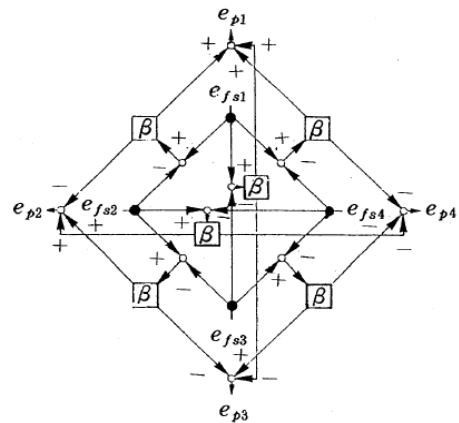
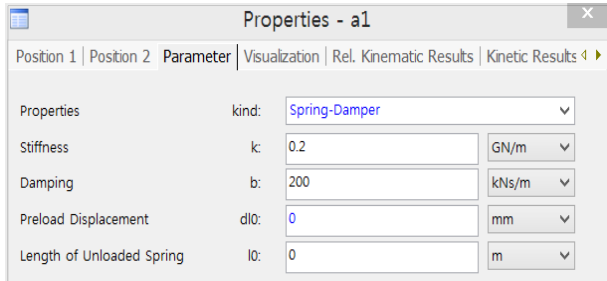


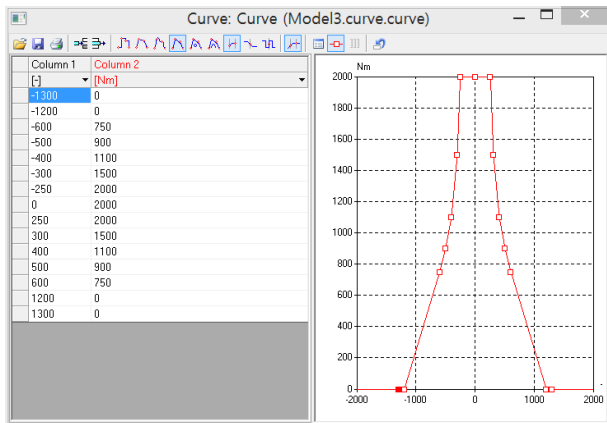
Fig. 7 Synchronizing controller(Cross type)

본 연구에서 고찰할 다축 힘 동기제어 시스템의 전체 블록선도가 Fig. 5에 나타나 있다. 제 1축부터 제 4축의 액추에이터-부하계는 각각 파라미터가 다르고 지연이 없는 2차 모델로 가정하였다. 기본적으로 각 축의 출력 힘을 피드백시켜 기준입력 힘과의 차이, 즉 힘 추적오차 신호를 피드백 제어기와 동기제어기에 가하는 구조이다. 전체 블록선도 Fig. 5에서 사용된 기준입력 힘(\$f_r\$)의 파형이 Fig. 6에 나타나 있다. 이 입력파형은 사출공정과 보압공정에서 용융수지에 가해지는 압력을 각 축에 작용하는 힘으로 변환하여 설정하였다. 각각의 축에는 다른 축과의 동기화를 도모하고, 아울러 추적오차를 감소시켜 응답특성의 개선을 도모하기 위하여 PID제어기를 설계한다. 또 축 사이에는 각축의 추종오차로부터 동기상태를 판단하

고, 동기오차를 출력하는 동기제어기를 설계한다. 각 축이 동기상태에 있다면 동기오차는 영으로 된다. 또 동기화의 강도는 동기화 파라미터 계인에 의존하고, 계인이 영이면 각각의 축은 독립된 다축 시스템이 된다.



a) Stiffness and damping



b) AC servomotor performance

Fig. 8 Input window for design parameters

3.2 동기제어기

각 축의 동기제어기는 기본적으로 각각의 대응하는 축의 추적오차를 서로 비교하는 데에서 출발한다. 본 연구에서 고찰할 크로스타입의 동기 제어기가 Fig. 7에 나타나 있다. 예를 들어 제1축의 추적오차(e_{fs1})는 왼편에 위치한 제2축의 추적오차(e_{fs2})와의 차이를 구한 후, 동기화 계인을 곱하여 제1, 2축의 동기제어기로 피드백 되어 진다. 마찬가지로 오른편에 위치한 제4축의 추적오차(e_{fs4})와의 차이를 구한 후, 동기화 계인을 곱하여 제1, 4축의 동기제어기로 피드백 되어 진다. 최종적으로 크로스(Cross)하여 맨 하단에 위치한 제3축의 추적오차(e_{fs3})와의 차이를 구한 후, 동기화 계인을 곱하여 제1, 3축의 동기제어기로 피드백 된다. 이 방식에서는 모든 축사이의 동기화를 실현하도록 제어기가 구성된다. 동기화 오차신호는 $i, j = 1 \sim 4; i \neq j$ 일 때 식(2)로 표현된다. 어느 축

에 외란이 가해지는 경우에도 외란의 영향^{6,7)}은 동기제어기에 커플링된 모든 축에 직접 나타난다. 따라서 다른 방식에 비교해서 강한 동기화 특성이 실현될 수 있다.

Table 2 Controller parameters

	G	T_i	T_d	β
PID control: $G(1 + \frac{1}{T_i}s + T_d s)$	0.0001	0.0002	0.25	0.0
PID & Synchronizing control	0.0001	0.0002	0.25	2.0

Table 3 Parameters for two axes

	Stiffness(GN/m)	Damping(kNs/m)
1 st axis	0.1	10
2 nd axis	0.4	30

Table 4 Parameters for four axes

	Stiffness(GN/m)	Damping(kNs/m)
1 st axis	0.1	10
2 nd axis	0.2	20
3 rd axis	0.4	30
4 th axis	0.8	40

$$e_{pi}(t) = \beta \sum_{j=1}^4 \{x_j(t) - x_i(t)\}$$

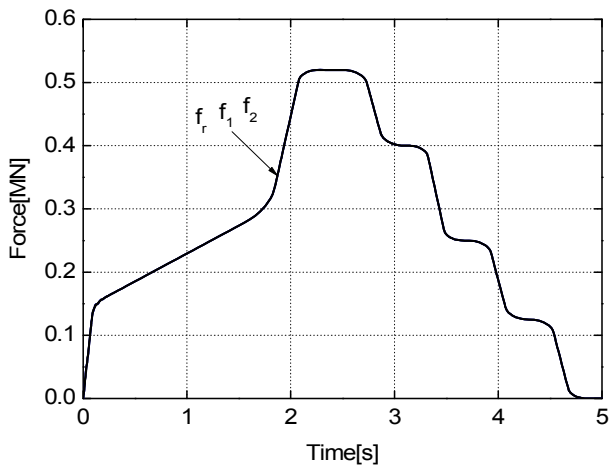
$$= \beta \{3e_{fsi}(t) - \sum_{j=1}^4 e_{fsj}(t)\} \quad (2)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

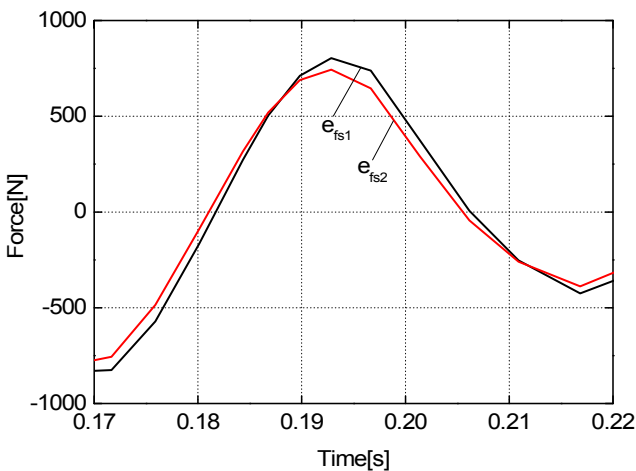
본 연구에서는 우선 PID제어에 의하여 AC서보모터-볼스크루 부하계의 힘 추적제어 성능을 고찰한 후, 여기에 동기제어기를 결합하는 방식을 채택하였다. 주요 외란 인자로서 4축 구동 부하계에 내재된 강성(Stiffness)과 댐핑(Damping)을 서로 다르게 설정하여 동기제어의 필요성을 부각시켰다. 기준 입력 신호로서 사출공정과 보압공정에서 용융수지에 가해지는 압력정보를 힘 단위로 변환하여 사용하였다. 부하계의 강성과 댐핑 파라미터 입력 창이 Fig. 8(a)에 나타나 있다. 아울러 AC서보모터의 성능곡선을 입력하는 창이 Fig. 8(b)에 나타나 있다. 이들을 이용하여 베티얼 디자인 모델의 성능을 시뮬레이션 하였다. 실

제로 전체 시스템의 제어성능을 규명하는 시뮬레이션에서는 Fig. 5에 도시되어있는 블록선도에서 선형 플랜트 모델이 버추얼 디자인 모델로 대체되어 수행된다. 강성과 댐핑 파라미터를 4개 구동축에서 서로 다르게 설정하였다. 예를 들어, 구동축 1 → 구동축2 → 구동축3 → 구동축4에서의 강성을 0.1 → 0.2 → 0.4 → 0.8(GN/m)로서 변화를 주어 입력하였다. 시뮬레이션에 사용된 제어기 파라미터 값들이 Table 2에 나타나 있다. 구동축 메카니즘에 내재된 고강성 부하의 영향으로 비례제어와 적분제어 상수 값이 매우 낮은 상태에서 안정된 응답을 보였다. 시뮬레이션은 크게 두 축의 힘 동기제어와 네 축의 힘 동기제어로 나누어 수행하였다. 각각의 경우에 사용된 파라미터 값들이 Table 3, 4에 도시되어 있다. 우선 두 축의 힘 동기제어 특성을 PID제어만을 사용하여, 시뮬레이션한 결과가 Fig. 9(a)(b)에 나타나 있다. 이를 위하여 두개

의 구동축에 대한 3D CAD 버추얼 디자인 모델을 구축하고 여기에 제어기를 결합시켜 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9(a)를 관찰하면 구동축 1, 2의 출력 힘이 기준목표 힘에 매우 잘 추종하고 있다. 그러나

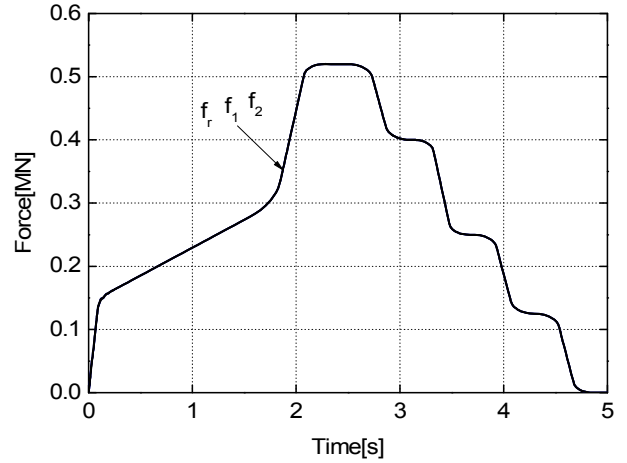


(a) Reference and actual output force

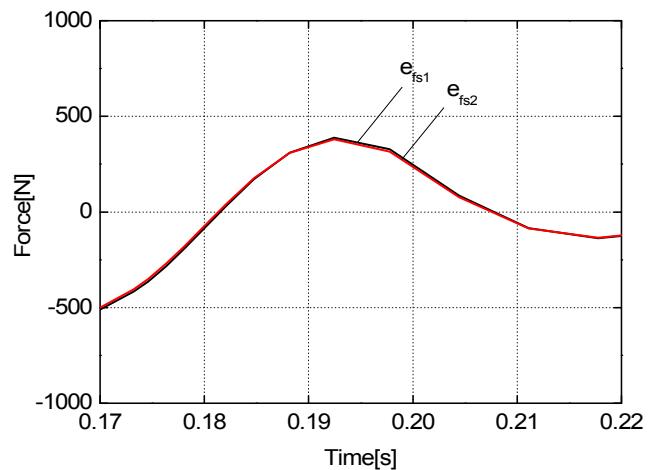


(b) Enlarged tracking error

Fig. 9 Responses under PID control



(a) Desired and actual output force



(b) Tracking error signal

Fig. 10 Responses under synchronizing control

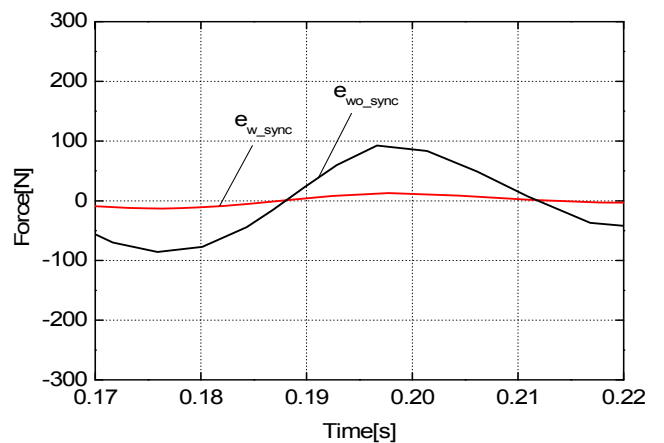
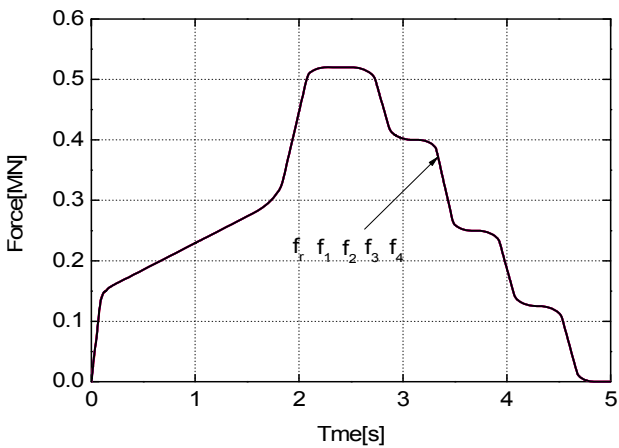
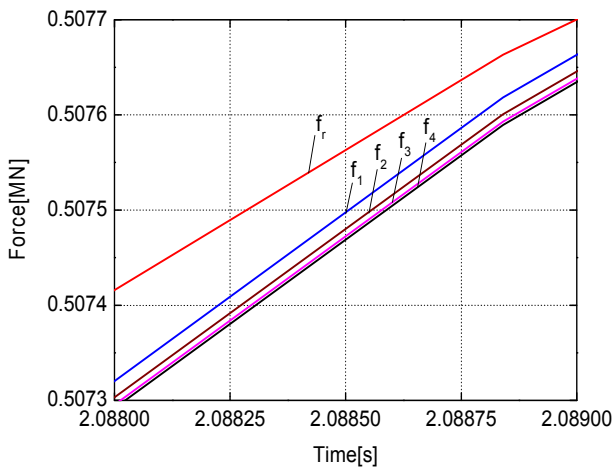


Fig. 11 Comparison of synchronizing error

Fig. 9(b)에 도시되어 있듯이, 0.17s ~ 0.22s사이에서 확대시켜 관찰하면 최대 추적오차가 대략 800N에 이르고 있다. 그리고 양축 사이의 동기화 오차는 최대 90N에 이르고 있다. PID제어에 동기제어를 결합시켜 시뮬레이션 수행한 결과가 Fig. 10(a)(b)에 나타나 있다. Fig. 10(a)를 관찰하면 구동축 1, 2의 출력 힘이 기준목표 힘에 매우 잘 추종하고 있다. 그러나 Fig. 10(b)에 도시되어 있듯이, 0.17s ~ 0.22s사이에서 확대시켜 관찰하면 최대 추적오차가 대략 388N에 이르고 있다. 그리고 양축 사이의 동기화 오차는 최대 8N에 이르고 있다. 동기제어를 수행함으로써 추적오차가 50% 정도 감소되는 효과가 발생하고 있으며, 아울러 동기화오차는 거의 90% 정도 감소되는 효과가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 변화 과정을 그래프로 나타내주기 위하여, 양축 사이의 동기화 오차신호를 비교한 결과가 Fig. 11에 도시되어 있다. 여기에서

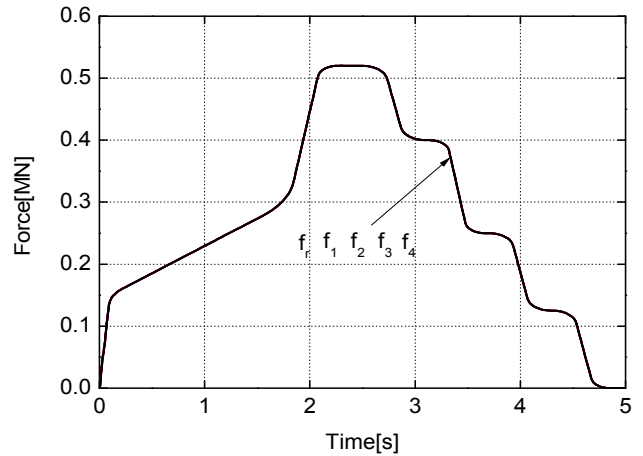


(a) Reference and actual output force

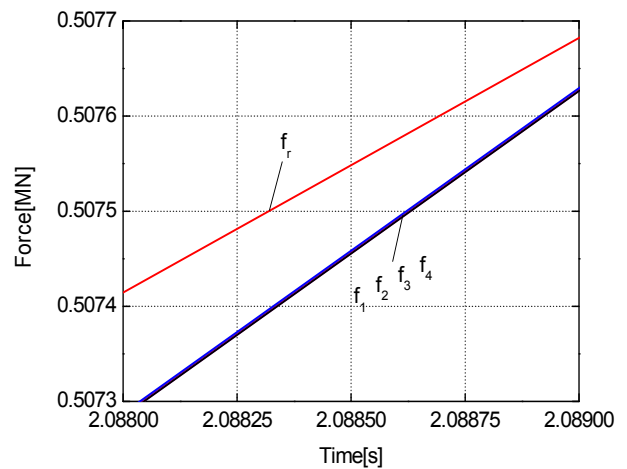


(b) Enlarged view

Fig. 12 Responses under PID control



(a) Reference and actual output force



(b) Enlarged view

Fig. 13 Responses under synchronizing control

오차신호 e_{w_sync} 는 동기제어를 수행한 경우이고, 오차신호 e_{wo_sync} 는 동기제어를 수행하지 않은 경우이다. 다음에는 네 개의 구동축을 대상으로 하여 힘 제어 특성을 고찰하였다. PID제어만을 사용하여 네 축의 힘 동기제어 특성을 시뮬레이션한 결과가 Fig. 12(a)(b)에 나타나 있다. Fig. 12(a)를 관찰하면 구동축 1, 2, 3, 4의 출력 힘이 기준목표 힘에 매우 잘 추종하고 있다. 그러나 Fig. 12(b)에 도시되어 있듯이, 2.088s ~ 2.089s사이에서 확대시켜 관찰하면, 제 1축에서 추적오차가 가장 작게 나타나고, 제 4축에서 추적오차가 가장 크게 나타나고 있다. 이를 기초로, 네 개의 축에서 발생하는 추적오차의 범위는 대략 40N ~ 120N 사이에 있음을 추정할 수 있다. 그리고 제 1축과 4축 사이의 동기화 오차는 최대 30N에 이르고 있다. 이러한 추적오차나 동기화 오차는 균일한 형체력 형성을 방해한다. 아울러 PID제어에 동기제어를 결합시켜 시뮬레이션 수행한 결과가 Fig. 13(a)(b)에

나타나 있다. Fig. 13(a)를 관찰하면 구동축 1, 2, 3, 4의 출력 힘이 기준목표 힘에 매우 잘 추종하고 있다. 또한 Fig. 13(b)에 도시되어 있듯이, Fig. 12(b)와 비교하면 동기화 성능이 크게 향상되었다. 마찬가지로 2.088s ~ 2.089s사이에서 고찰하면, 제 4축의 성능에 맞추어 동기화가 진행되었음을 추정할 수 있으며, 이때의 최대 추적오차가 대략 120N에 이르고 있다. 그러나 제 1축과 4축 사이의 동기화 오차는 최대 3N정도로써 대략 90% 감소되었다. 이상으로 부터 힘 추적오차가 발생하는 범위 내에서, 네 개의 축 사이에 힘 동기화 오차가 현저하게 감소함을 알 수 있다. 힘 추적오차를 저감시키기 위하여 향후 피드포워드(Feedforward) 제어방식의 결합이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 4축 구동 사출 메카니즘을 MBS기법으로 3D CAD모델링 한 후, AC서보모터-볼스크루와 인터페이스시켜 벡추얼 디자인 모델을 구축하였다. 사출장치 메카니즘에 내재된 강성과 댐핑을 AC서보모터-볼스크루의 지배적인 부하로 설정한 후, 이들의 변화가 제어성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 시뮬레이션을 통하여 AC서보모터에의 입력신호와 볼스크루의 출력 힘 사이의 개회로 전달함수를 유도하였다. 이를 기초로 PID제어기를 구성한 후, 메카니즘에 내재된 강성과 댐핑 변화에 대한 힘 동기제어 및 추적제어성능을 고찰하였다. 그리고 PID제어에 동기제어를 결합시킨 결과, 네 축사이의 동기제어 성능을 크게 향상시킬 수 있었다. 네 축사이의 동기오차를 모두 고려하는 크로스 방식을 사용하여 강한 동기화 특성을 구현할 수 있었다.

후 기

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 2014-045989)

References

- 1) M. Tomizuka, J. S. Hu, T. C. Chiu, and T. Kamano, "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) F. Johannaber, "Injection Molding Machines," 4th Edition, Hanser, pp. 131-139, 2008.
- 3) M. Uchiyama and Y. Nakamura, "Symmetric Hybrid Position/Force Control of Two Cooperating Robot Manipulators, Proceedings of 1988 IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems," pp. 515-520, 1988.
- 4) T. S. Giam, K. K. Tan, and S. Hwang, "Precision coordinated control of multi-axis gantry stages," ISA Trans., Vol. 46, No. 3, pp. 399-409, 2007.
- 5) R. Dubay, B. Pramujati, J. Han, and F. Strohmaier, "An investigation on the application of predictive control for controlling screw position and velocity on an injection molding," Polymer Engineering and Science, Vol. 47, No. 4, pp. 390-399, 2007.
- 6) S. H. Cho, "Force Synchronizing Control for 4 Axes Driven Hydraulic Cylinder-Clamping Load Systems," Journal of The Korean Society for Fluid Power & Construction Equipments, Vol. 11, No. 2, pp. 9-15, 2014.
- 7) J. S. Kam, D. H. Oh, I. Y. Lee, J. W. Kim, and H. C. Lee, "Synchronization Control of Two Hydraulic Cylinders Using Feedback Linearization Compensator and Disturbance Observer," Journal of The Korean Society for Fluid Power & Construction Equipments, Vol. 10, No. 3, pp. 14-20, 2013.