

◆ 특집 ◆ 시뮬레이션 기반 기계장비 설계 기술

CNC 제어 이송계의 Hardware-in-the-loop 시뮬레이션

Hardware-in-the-loop Simulation of CNC-controlled Feed Drives

이원균¹, 이찬영¹, 김주영¹, 송창규², 민병권^{1,✉}
Wonkyun Lee¹, Chan-Young Lee¹, Joo-Yeong Kim¹, Chang Kyu Song², and Byung-Kwon Min^{1,✉}

¹ 연세대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)

² 한국기계연구원 첨단생산장비연구본부 (Advanced Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials)

✉ Corresponding author: bkmin@yonsei.ac.kr, Tel: +82-2-2123-5813

Manuscript received: 2015.4.14. / Revised: 2015.4.18. / Accepted: 2015.4.20.

Design and application of hardware-in-the-loop simulation (HILS) for design of CNC-controlled machine tool feed drives is discussed. The CNC machine tool is a complex mechatronics system where the complexity results from the software-based controller composed of a variety of functionalities and advanced control algorithms. Therefore, using a real CNC controller in the control simulation has merits considering the efforts and accuracy of the simulation modeling. In this paper challenges in HILS for a CNC controlled feed drive, such as minimization of time delay and transmission error that are caused by discretization of the feed drive model, is elaborated. Using an experimental HILS setup of a machine tool feed drive applications in controller gain selection and CNC diagnostics are presented.

KEYWORDS: HILS (HIL 시뮬레이션), Virtual machine tool (가상공작기계), Machine tool controller (공작기계 제어기), Failure mode simulation (고장모드 시뮬레이션)

1. 서론

CNC 제어 이송계의 시뮬레이션 기술은 기계장비의 제어성능을 예측하고, 이를 이용하여 최적의 가공 조건과 제어기 설정을 얻는 것을 목적으로 한다.^{1,2} 또한 CNC 공작기계를 설계하는 단계에서 제어성능을 예측하고, 이를 기반으로 기계장비 요소부품 및 제어기 파라미터를 선정함으로써 개발 시간과 비용을 효과적으로 줄이는 데 사용될 수 있다.^{3,4} CNC 제어 이송계 시뮬레이션을 위해서는 이송계와 CNC 제어기의 모델이 필요하다. 상용

CNC 제어기에는 위치, 속도의 피드백 제어 등 선형 알고리즘 이외에도 다양한 환경변화에 대응하기 위한 복잡한 비선형 알고리즘들이 복합적으로 적용되어 있어 이를 정확히 모델링하기 어렵다. 기존의 공작기계 시뮬레이션 연구는 주로 자체 제작한 제어기가 적용된 공작기계를 대상으로 시뮬레이션을 구성했기 때문에 제어기의 정확한 모델링이 가능하였지만, 상용 CNC 제어기가 적용되어 있는 일반적인 공작기계의 위치제어특성 예측에는 적용하기 어렵다. 이러한 문제의 대안으로 CNC 제어 이송계의 Hardware-in-the-loop 시뮬레이션

(HILS) 연구가 제안되었다.⁵⁻⁷ HILS는 복잡한 시스템의 시뮬레이션에서 모델링이 어려운 요소를 실제 하드웨어로 대체하는 시뮬레이션 기법으로, 비행체, 자동차 등의 제어시스템의 성능을 테스트하기 위해 사용된다.^{8,9} HILS는 실제 제어시스템을 시뮬레이션 루프에 포함시키므로, 모델만으로 구성되는 시뮬레이션에 비해 정확도가 높다. 하지만 하드웨어와의 입출력 신호 전달 과정에서 이산화와 양자화에 의해 발생하는 신호의 유실, 잡음 및 시뮬레이션과 하드웨어의 시간 동기화 문제 등에 의해 안정성과 정밀도가 떨어질 수 있다.^{10,11} 따라서 본 연구에서는 CNC 제어 이송계의 HILS 구성 과정에서 발생할 수 있는 문제를 분석하고, 그 해결방법을 제시하였다. 2장에서는 HILS 구성 방법, 이송계의 정밀 모델링, 이산화와 양자화에 의한 오차를 최소화하기 위한 피드백 신호의 생성 알고리즘, 이산화에 의한 시간지연 보상방법 등 CNC 제어 이송계의 HILS 구성을 위한 요소기술들에 대해 자세히 설명하였다. 이송계 테스트베드를 구성하여 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 구성된 HILS의 정확도를 검증하였다. 3장에서는 제어성능의 예측과 이를 이용한 제어기 파라미터 결정, 실제 동작기계를 이용하여 수행하기 어려운 고장진단기능의 시험 등 HILS의 활용에 대해 정리하였다.

2. CNC 제어 이송계의 HILS 구성

2.1 HILS 장치 구성

Fig. 1은 CNC 동작기계의 제어시스템과 제어기의 HILS 구성이다. 제어기에서 출력 되는 신호를 실시간 컴퓨터에서 측정하여 이송계 모델을 구동하고, 그 결과를 센서의 출력과 동일한 형태로 변환하여 제어기에 피드백한다. CNC 제어기는 아날로그 전압, 펄스, 네트워크 등 다양한 인터페이스를 이용하여 서보드라이브에 지령을 전달하고 위치 신호를 피드백 받으므로, HILS 구성을 위해서는 실시간 컴퓨터에 제어기의 입출력 신호와 동일한 인터페이스를 구성해야 한다. 상용화된 개방형 CNC 제어기는 범용 서보드라이브로 구성되는 이송계를 제어하기 위해 다양한 인터페이스를 제공하므로 HILS 구성이 용이하다. 하지만 전용드라이브를 사용하는 CNC는 제어성능의 향상을 위해 일반적으로 제어기와 함께 서보드라이브, 모터를 패키지로 사용한다. 제어기에서는 보간, 각 축의 경로생성 및 위치제어를 수행하고, 각 축의 속도, 전

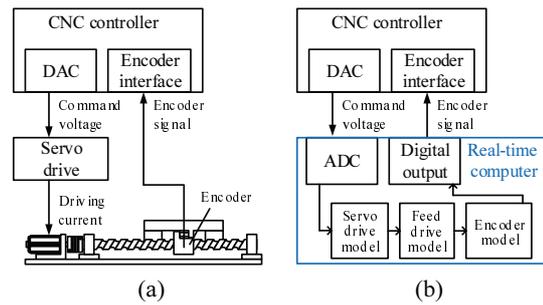


Fig. 1 Configuration of the (a) machine tool control system and (b) HILS

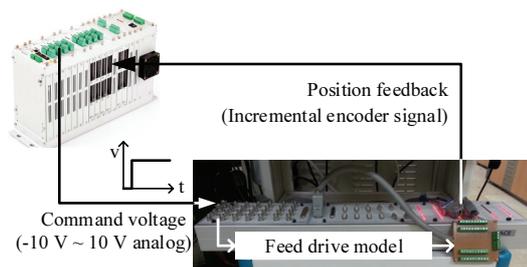


Fig. 2 Configuration of HILS

류제어 및 필터링은 서보드라이브에서 수행한다. 이러한 경우 제어기와 드라이브는 제조사 전용 필드버스를 사용하여 데이터를 교환하므로 HILS의 구성이 어렵다. 일반적으로 범용 장비와의 호환을 위해 제어기에서 출력되는 전용 필드버스 신호를 아날로그 전압, 네트워크 기반 범용 입출력 신호로 변환해주는 인터페이스 장치를 옵션으로 제공하므로 이를 이용하여 HILS를 구성할 수 있다. 이러한 경우 제어기에 포함되어있는 일부 기능만을 하드웨어로 대체하는 것이므로, 서보드라이브에 포함되어있는 기능들은 모델링을 해야 한다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 CNC 제어 이송계의 HILS 구성이다. 제어기(Turbo PMAC, Delta Tau)에서 출력된 -10 V ~ 10 V 아날로그 전압은 실시간 컴퓨터(ds1103, dSPACE)의 아날로그-디지털 변환기를 통해 이송계 모델로 전달된다. 실시간 컴퓨터에서는 입력된 제어신호를 이용하여 이송계의 동적 거동을 시뮬레이션 하며, 그 결과를 기반으로 분해능 0.1 μm의 엔코더 신호를 생성하여 제어기로 피드백한다.

2.2 피드백신호 생성모델

CNC 제어 이송계의 HILS 구성 시 사용되는

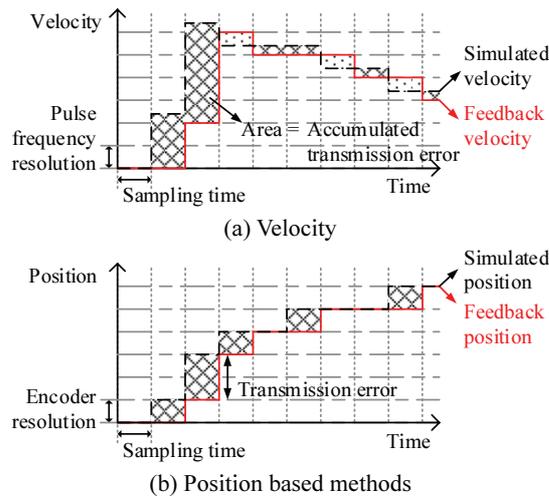


Fig. 3 Transmission error generated in accordance with the encoder signal generation methods

피드백신호 생성 알고리즘은 참조하는 값(속도 또는 위치)에 따라 두 종류로 구분할 수 있다. 첫 번째는 이송계의 속도를 참조하는 방법으로, 속도에 상응하는 주파수의 펄스신호를 생성한다. 알고리즘이 단순하고 쉽게 구성 가능하지만 Fig. 3(a)와 같이 이송계 모델의 이산화와 양자화에 의한 속도의 오차가 발생한다. 오차는 누적되어 전송오차(시물레이션위치 - 피드백위치)를 발생시키고, 이는 HILS의 정확도를 떨어뜨린다. 두 번째는 이송계의 위치를 참조하는 방법으로, 이송계의 위치변화의 누적값이 엔코더 분해능보다 커질 경우 펄스를 생성하고 누적값을 초기화한다. 속도를 참조하는 방법에 비해 알고리즘이 복잡하고 고속 연산이 요구되지만, 위치를 참조하기 때문에 Fig. 3(b)와 같이 오차가 누적되지 않는다. 본 연구에서는 이송계의 위치를 참조하는 방법을 사용하여 엔코더 신호를 생성하였다. 이송계에서 생성되는 엔코더신호의 주파수가 실시간 컴퓨터에서 생성가능한 신호의 최대주파수(f_s)보다 클 경우 시물레이션이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 f_s 를 높이기 위해 이송계 모델과 피드백신호 생성모델을 서로 다른 주파수로 시물레이션하는 복합전송률(multi-rate) 시스템을 구성하였다. 이송계와 피드백신호 생성모델의 시물레이션 주파수는 각각 8 kHz, 40 kHz로, 실시간 컴퓨터에서 시물레이션 가능한 최대 주파수로 설정하였다. 제어기 연산 주파수는 5 kHz로 설정하였다. 고분해능 엔코더가 장착된 정밀 이송계

의 경우 고속이송시 수 MHz의 고주파 엔코더 신호가 생성된다. 이러한 경우 실시간 컴퓨터로부터 이송계 모델의 위치정보를 입력받아 고주파 엔코더신호를 생성하기 위한 별도의 장치를 제작하여 HILS를 구성할 수 있다.¹²

2.3 이송계 모델

이송계 모델의 정확도는 HILS 정확도를 결정하는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 CNC 공작 기계에 일반적으로 사용되는 볼스크류 타입의 직선이송계를 정밀하게 모델링하였다. 이송계는 서보드라이브, 모터, 볼스크류, 직선이송가이드, 테이블로 구성된다. 서보드라이브에서는 입력된 전압을 토크 지령으로 환산하고, 이를 모터의 토크상수로 나누어 토크생성에 필요한 전류를 계산/출력한다. 모터는 볼스크류를 구동하며, 이 때 각 요소에서 발생하는 관성, 마찰력 등은 외란으로 작용한다. 이송계 모델을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$M_m \ddot{x} + B_m \dot{x} = u - F_d \tag{1}$$

x 는 이송계의 위치이며, M_m, B_m, u, F_d 는 모터의 관성모멘트와 댐핑, 지령, 외란으로, 볼스크류의 피치를 이용하여 회전이송을 직선이송으로 환산하였다. 외란은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = (M_b + M_l + M_t) \ddot{x} + F_f \tag{2}$$

M_b, M_l, M_t 는 각각 질량 단위로 환산된 볼스크류의 관성모멘트, 직선이송가이드와 테이블의 질량이며, F_f 는 이송계에서 발생하는 마찰력이다. 마찰력은 이송계의 동적 거동의 복잡성을 증가시키는 대표적인 비선형 특성으로, 이송계의 정확한 모델링을 위해 정밀한 마찰력 모델이 필수적이다.^{13,14} 본 연구에서는 마찰력을 이송계의 속도(\dot{x}), 접촉면의 돌기들의 평균 휨(z)의 함수로 표현한 LuGre 모델을 사용하여 다음과 같이 모델링하였다.¹⁵

$$F(\dot{x}, z) = \sigma_0 z + \sigma_1 \left(\dot{x} - \sigma_0 \frac{|\dot{x}|}{f_n(\dot{x})} z \right) + \mu_v \dot{x} \tag{3}$$

σ_0, σ_1 은 각각 접촉면 돌기들의 탄성계수와 댐핑상수이며, μ_v 는 점성 마찰계수다. $f_n(\dot{x})$ 는 마찰력의 비선형 특성의 함수로 다음과 같다.

$$f_n(\dot{x}) = F_c + (F_s - F_c) \exp(-|\dot{x}|/v_s) \tag{4}$$

Table 1 Identified feed drive model parameters

Symbols (units)	Values	
	Positive dir.	Negative dir.
M_s (kg)	100	
B_m (N s/m)	380	260
F_c (N)	66	67.5
F_s (N)	96	90.48
v_s (m/s)	0.0010	0.0014
μ_v (N s/m)	1826.5	1673.5
σ_0 (N/m)	3.35×10^7	
σ_1 (N s/m)	4.54×10^3	

F_c , F_s , v_s 는 각각 쿨롱 마찰력, break-away 마찰력, 스트라이백 속도를 의미한다. 식(1)-(4)를 통해 유도된 이송계 모델은 다음과 같이 상태-공간 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{X} = AX + Bu, \quad X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ z \end{bmatrix}, \quad Y = [1 \ 0 \ 0]X \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\sigma_1 + \mu_v + B_m}{M_s} & -\frac{\sigma_0 \left(1 - \sigma_1 \frac{|\dot{x}|}{f_n(\dot{x})}\right)}{M_s} \\ 0 & 1 & -\sigma_0 \frac{|\dot{x}|}{f_n(\dot{x})} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad M_s = M_m + M_b + M_l + M_t \quad (7)$$

모델 파라미터는 실험을 통해 추출하였으며, Table 1에 정리하였다.¹⁶ 식(5)의 상태공간 모델을 기반으로 기계장비의 배치에 따라 각 축에 인가되는 하중을 고려하여 이송계 모델을 제작하고, 이를 이산화하여 HILS를 구성하였다.

2.4 시간지연 보상

일반적으로 CNC 제어기의 연산 주기는 0.1 ms ~ 1 ms 사이로 설정된다. 이송계 모델의 시뮬레이션 주기는 실시간 컴퓨터의 성능과 모델의 복잡성에 의해 결정되는데, 시뮬레이션 주기가 제어기 연산주기보다 충분히 빠르지 못할 경우 시간지연이 발생하게 된다. Fig. 4는 제어기와 이송계 모델

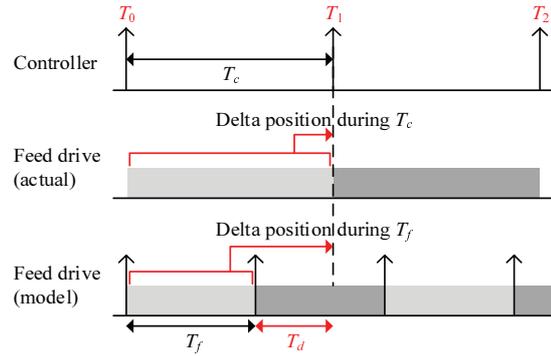


Fig. 4 Time delay in HILS

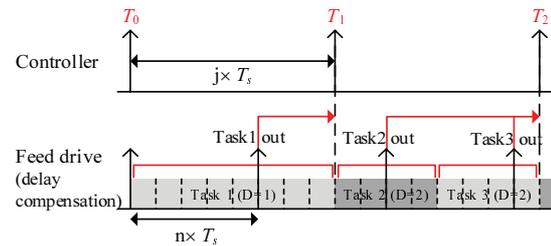


Fig. 5 Proposed Time delay compensation method

의 시뮬레이션 주기의 차이에서 발생하는 시간지연이다. 제어기에서는 T_c 를 주기로 계산된 제어신호를 출력하고 이송계의 위치를 업데이트한다. 실제 이송계의 경우 T_0 에 제어기에서 생성되는 신호를 받아 T_c 동안의 구동된 결과가 T_1 에 제어기로 피드백 된다. 하지만 T_f 를 주기로 시뮬레이션되는 이산화된 이송계 모델의 경우 T_f 동안의 구동결과만이 T_1 에 제어기로 피드백되고, 이는 T_d 에 해당하는 시간지연이 발생한 것과 같다. 이러한 시간지연은 이송계 모델의 오차와 더불어 HILS의 정확도와 안정성을 떨어뜨리는 중요한 요소다. Fig. 5는 이를 해결하기 위해 본 연구에서 제안한 시간지연 보상방법이다. f_d 는 제어기와 이송계 모델의 샘플링 주파수의 최소공배수이며, 이를 이용하여 시간지연 보상을 위한 가상의 샘플링시간 T_s 를 계산한다. 제어기와 이송계 모델의 샘플링시간은 각각 $j \times T_s$, $n \times T_s$ 로 표시할 수 있다. 다음 식과 같이 이산화된 이송계 모델을 n 등분한 후, 이를 j 번 곱함으로써 T_c 에 해당하는 시간동안의 이송계의 구동결과를 T_f 의 시간동안 시뮬레이션할 수 있다.

$$X_{k+1} = A_d^{j/D} X_k + B_d u_k \times \sum_{i=1}^{j/D} A_d^{i-1} / \sum_{i=1}^n A_d^{i-1} \quad (8)$$

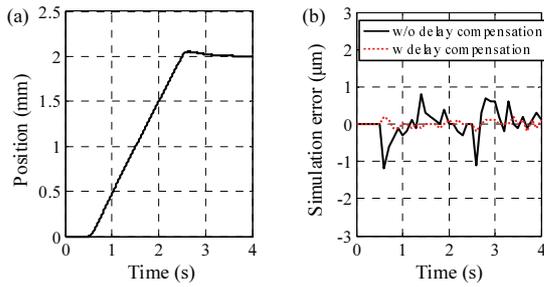


Fig. 6 (a) Position profile and (b) simulation errors with and without delay compensation

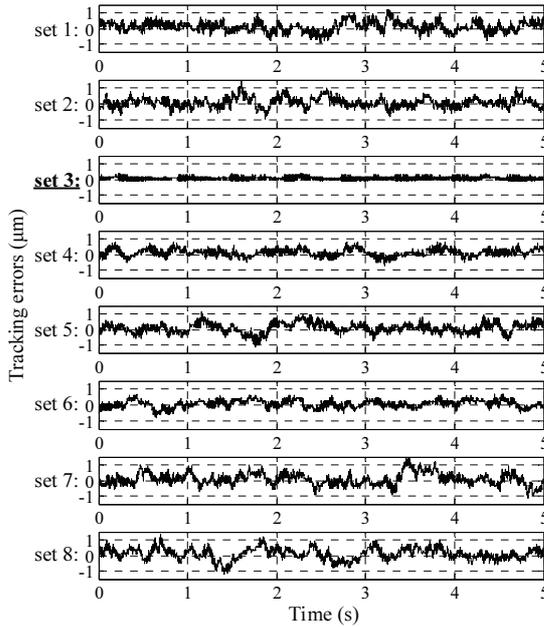
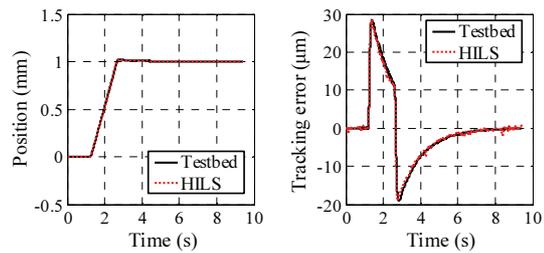
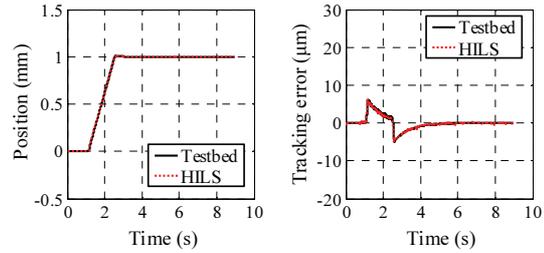


Fig. 7 Experimental results for detecting the time skew between controller and real-time computer

A_d, B_d 는 각각 식(5)의 A, B 의 이산화 행렬이다. D 는 T_c 에 포함된 시뮬레이션 결과의 업데이트 수다. 시간지연 보상 시 D 의 크기는 T_c 와 T_f 에 의해 결정되며, n 개의 주기로 반복된다. 본 연구에서 $T_c = 0.2$ ms, $T_f = 0.125$ ms 이므로, D 는 [1,2,2,1,2,2,2,2]의 주기를 갖는다. Fig. 6은 제안한 시간지연 보상 알고리즘의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 이송계 모델을 T_c 의 주기로 시뮬레이션함으로써 시간지연이 없는 시스템을 구현하고, 직선이송 시 시간지연 보상 알고리즘 적용 여부에 따른 시뮬레이션오차(시간지연이 없는 시스템의 위치 - 시간지연이 있는 시스템의 위치)를 비교하였다. 시



(a) P gain = 1000, I gain = 1280



(b) P gain = 5000, I gain = 2000

Fig. 8 Comparison of the position and tracking errors of testbed and HILS with respect to a variety of controller parameters

간지연 보상 적용 시 시뮬레이션오차가 감소함을 통해 제안한 방법의 효과를 확인할 수 있다.

시간지연 보상제어를 HILS에 적용하기 위해서는 제어기의 연산과 시뮬레이션의 초기 시작시간의 차이(time skew)를 알아야 한다. 하지만 정확한 시간 차이를 측정하기 어렵다. 따라서 Fig. 7과 같이 HILS 중 이송계의 목표위치를 0으로 설정한 후 D 의 원소를 하나씩 시프트하며(set1~set8) 발생하는 추종오차가 최소가 되는 점(set 3)을 찾아 그 때의 값을 적용하였다.

2.5 HILS 정확도 검증

HILS의 정확도를 검증하기 위해 이송계 테스트베드를 구성하고, 직선이송 시 테스트베드와 HILS의 제어성능을 비교하였다.¹⁷ 이송계는 회전형 엔코더가 포함된 교류동기전동기(SGM4V, Yaskawa)와 볼스크류(BNK1205, THK), 직선이송가이드(SSR20XW, THK)로 구성하였다. Fig. 8과 같이 다양한 파라미터에 대해 추종오차를 비교하고, 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 테스트베드와 HILS의 제어기 파라미터는 동일하게 설정하였으며, P gain, I gain은 실험에 사용된 제어기(Turbo PMAC)의 Ixx30, Ixx33 변수에 해당한다. HILS가 테스트베드의 제어성능을 잘 반영함을 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison of the tracking errors

	Testbed		HILS	
	Peak	RMS	Peak	RMS
P gain=1000 I gain=1280	28.4 μm	9.3 μm	28.4 μm	9.0 μm
P gain=5000 I gain=2000	6.2 μm	1.7 μm	6.0 μm	1.6 μm

3. HILS 응용

3.1 제어기 파라미터 결정

CNC 제어기의 성능은 제어기 파라미터에 의해 결정된다. 공작기계 이송계는 비선형 마찰력이 작용하고, 공작물에 의해 인가되는 하중, 가공 중 발생하는 절삭력 등 외란의 변화가 심해 동특성의 정확한 예측이 어렵다. 또한 CNC 제어기는 일반적으로 위치-속도-전류의 제어루프가 독립적으로 구성되어 있고, 안정성을 높이기 위한 다양한 필터가 적용되어 있어 구조가 복잡하다. 따라서 극점배치법과 같이 정확한 모델을 이용하는 파라미터 결정 방법의 적용이 어려워 일반적으로 공작기계 제작 시 제어기 전문가가 경험적으로 파라미터를 결정한다. 하지만 요구되는 동특성이 달라질 경우 사용자가 파라미터를 수정해야 하는데, 이 과정에서 파라미터를 잘못 입력하면 안정성이 떨어지고 오차가 증가하며 심한 경우 발산하여 장비가 손상될 수 있다. 따라서 Fig. 9(a)와 같이 HILS를 이용하여 파라미터 설정에 따른 스텝응답의 변화를 예측하고, 파라미터를 결정하였다. Fig. 9(b)와 같이 결정된 파라미터를 테스트베드의 제어에 적용하여 그 결과를 확인함으로써 CNC 제어 이송계의 HILS를 동특성 향상을 위한 제어기 파라미터 결정에 활용할 수 있음을 검증하였다.

CNC 공작기계의 윤곽제어 성능은 제품의 형상 정밀도를 결정하는 중요한 요소로, 제어기의 루프게인에 의해 결정되는 이송계의 동특성 이외에도 가감속 시간과 같은 수치제어커널의 위치지령 생성 관련 파라미터의 영향을 받는다. 따라서 윤곽제어 성능을 향상시키기 위해 HILS를 이용하여 가감속시간(T_a)과 루프게인의 설정에 따른 윤곽오차의 변화를 예측하고, 이를 기반으로 제어기 파라미터를 결정하였다. Fig. 10은 XY 테이블이 마름모꼴적으로 이송하도록 파트프로그램을 작성하였을 때의 이송궤적과 각 축의 추종오차(위치지령 - 실제위치)이다. Fig. 10(a)와 같이 가감속 시간을 길게

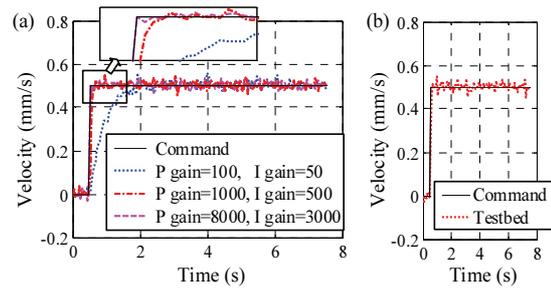


Fig. 9 Parameter tuning using HILS: step responses of (a) HILS in accordance with a variety of controller parameters and (b) testbed with fine-tuned parameters (P gain=8000, I gain=3000)

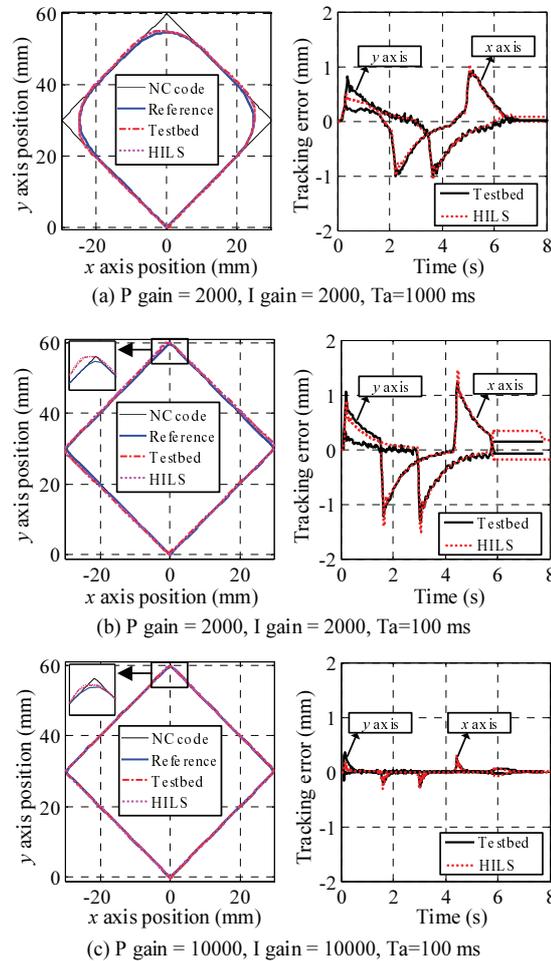


Fig. 10 Parameter tuning using HILS: contour and tracking errors of xy table in accordance with a variety of controller parameters

설정할 경우 코너에서 가감속에 의한 윤곽오차가 (파트프로그램의 궤적과 실제궤적 사이의 차이) 발생한다. 이를 줄이기 위해 Fig. 10(b)와 같이 가감속시간을 감소시킬 경우 윤곽오차는 감소하지만, 코너에서의 가속도가 증가하게 되어 추종오차는 증가한다. 추종능능을 향상시키기 위해 Fig. 10(c)와 같이 루프게인을 높일 경우 오차가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 2축 테스트베드를 구성하고 각 조건에서 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 CNC 제어 이송계의 HILS를 윤곽제어성능 향상을 위한 제어기 파라미터 결정에 활용할 수 있음을 검증하였다.

3.2 고장진단기능 성능시험

CNC 제어기는 동작기계 구동 중 문제가 발생할 경우 이를 진단하여 경보를 발생시키고 장비를 정지시킴으로써 추가적인 문제발생을 방지하기 위한 고장진단기능을 포함하고 있다. 고장진단기능의 정상작동여부를 확인하기 위해서는 구동 중 고장상태를 발생시키고 그에 대한 제어기의 대응을 확인해야 하는데, 이는 실제 동작기계에 고장을 일으켜야 하므로 많은 비용이 든다. 하지만 HILS를 이용할 경우 구동 중 이송계의 입출력 신호를 조작함으로써 간단히 고장상태를 발생시킬 수 있다. Fig. 11(a)는 구동 중 전원선의 단선 또는 충돌에 의해 이송계가 정지하는 경우에 대한 제어기의 응답이다. HILS 중 이송계의 입력신호를 차단하여 고장상태를 발생시켰다. 고장발생 후 추종오차가 증가하여 입력 전압이 가파르게 증가한다. 추종오차가 제어기에 설정한 한계값(0.2 mm)에 도달하면 제어기에서는 고장을 인식하고 전원을 차단함을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 구동중 센서고장 또는 신호선의 단선에 의해 위치신호가 피드백되지 않을 때의 제어기의 응답이다. HILS 중 엔코더 출력신호를 차단함으로써 고장상태를 발생시켰다. 전원선 단선의 경우와 마찬가지로 고장발생 후 추종오차가 증가하여 입력 전압이 증가한다. 하지만 전원선이 정상적으로 연결되어 있으므로 추종오차가 한계값에 도달할 때까지 이송계가 80 mm 이상 이동함을 알 수 있다. 이러한 경우 충돌이 발생할 수 있으므로, 추종오차 한계값을 줄임으로써 고장발생 후의 이동거리를 줄일 수 있다. 이 결과를 통해 CNC 제어 이송계의 HILS를 고장진단기능의 성능시험에 활용할 수 있음을 알 수 있다.

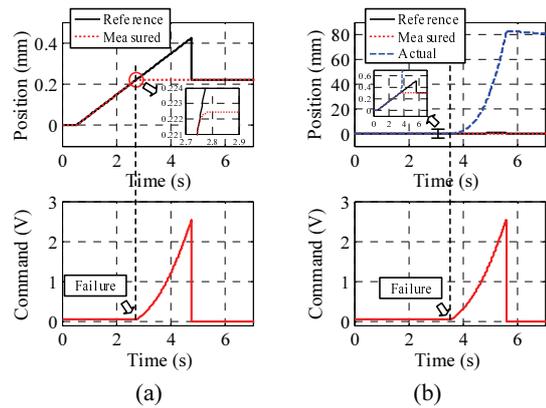


Fig. 11 Reaction of CNC controller when motor failure occurs: failure of motor (a) before and (b) after current input

4. 결론

본 논문에서는 CNC 제어 이송계의 HILS 구성 방법과 이송계 모델링, 피드백 신호 생성방법 등 요소기술을 정리하고, 이 과정에서 발생할 수 있는 문제와 그 해결방법에 대해 설명하였다.

본 논문에서 제시된 예를 통해 HILS가 제어성능의 예측뿐만 아니라 이를 기반으로 한 제어기 파라미터의 결정, 실제 동작기계를 이용하여 수행하기 어려운 고장진단기능의 성능시험 등 제어기 성능 향상 및 시험을 위한 도구로 활용될 수 있음을 보였다.

후 기

이 연구는 2015년도 한국기계연구원 주요사업 ‘고속 고정밀 기계장비의 메카트로닉스 최적화 기술 개발’의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

1. Yeung, C.-H., Altintas, Y., and Erkorkmaz, K., “Virtual CNC System. Part I. System Architecture,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 10, pp. 1107-1123, 2006.
2. Zhang, K., Yuen, A., and Altintas, A., “Pre-Compensation of Contour Errors in Five-Axis CNC Machine Tools,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 74, pp. 1-11, 2013.

3. Erkorkmaz, K., Altintas, Y., and Yeung, C.-H., "Virtual Computer Numerical Control System," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 399-402, 2006.
4. Yun, W.-S. and Min, B.-K., "Development of Virtual CNC using a Software Based Open Architecture Controller," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 19, No. 6, pp. 23-28, 2002.
5. Landers, R. G., Min, B.-K., and Koren, Y., "Reconfigurable Machine Tools," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 269-274, 2001.
6. Min, B.-K., Huang, Z., Pasek, Z. J., Yip-Hoi, D., Husted, F., et al., "Integration of Real-Time Control Simulation to a Virtual Manufacturing Environment," *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 67-87, 2002.
7. Pritschow, G. and Röck, S., "Hardware in the Loop" Simulation of Machine Tools," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 295-298, 2004.
8. Gans, N. R., Dixon, W. E., Lind, R., and Kurdil, A., "A Hardware in the Loop Simulation Platform for Vision-Based Control of Unmanned Air Vehicles," *Mechatronics*, Vol. 19, No. 7, pp. 1043-1056, 2009.
9. Gietelink, O. J., Ploeg, J., De Schutter, B., and Verhaegen, M., "Development of a Driver Information and Warning System with Vehicle Hardware-in-the-Loop Simulations," *Mechatronics*, Vol. 19, No. 7, pp. 1091-1104, 2009.
10. Linjamaa, M., Virvalo, T., Gustafsson, J., Lintula, J., Aaltonen, V., et al., "Hardware-in-the-Loop Environment for Servo System Controller Design, Tuning and Testing," *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 24, No. 1, pp. 13-21, 2000.
11. Choi, C. and Lee, W., "Analysis and Compensation of Time Delay Effects in Hardware-in-the-Loop Simulation for Automotive PMSM Drive System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 9, pp. 3403-3410, 2012.
12. Lee, W., Jang, S., Lee, K. S., Min, B.-K., and Lee, S. J., "Development of Encoder Signal Generator for HIL Simulation of Servo Motor Controller," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 77-78, 2012.
13. Lee, T. H., Tan, K. K., and Huang, S., "Adaptive Friction Compensation with a Dynamical Friction Model," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 16, No. 1, pp. 133-140, 2011.
14. Freidovich, L., Robertsson, A., Shiriaev, A., and Johansson, R., "LuGre-Model-Based Friction Compensation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 19, No.1, pp. 194-200, 2010.
15. De Wit, C. C., Olsson, H., Astrom, K. J., and Lischinsky, P., "A New Model for Control of Systems with Friction," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425, 1995.
16. Lee, W., Lee, C.-Y., Jeong, Y. H., and Min, B.-K., "Distributed Component Friction Model for Precision Control of a Feed Drive System," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, No. 99, pp. 1-9, 2014.
17. Lee, W., Lee, C.-Y., and Min, B.-K., "Simulation-based Energy Usage Profiling of Machine Tool at the Component Level," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, Vol. 1, No. 3, pp. 183-189, 2014.