

◆ 특집 ◆ 기계장비 정밀도 시뮬레이션 기술

기계장비 제어특성 시뮬레이션 플랫폼 기술

Accuracy Simulation Technology for Machine Control Systems

송창규^{1,✉}, 김병섭¹, 노승국¹, 이성철¹, 민병권², 정영훈³
Chang Kyu Song¹, Byung-Sub Kim¹, Seung-Kook Ro¹, Sungcheul Lee¹, Byung-Kwon Min²
and Young Hun Jeong³

1 한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부 (Nano Convergence and Manufacturing Systems Research Division, KIMM)

2 연세대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)

3 한국산업기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University)

✉ Corresponding author: song@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7178

Manuscript received: 2011.1.28 / Accepted: 2011.2.1

Control systems in machinery equipment provide correction signals to motion units in order to reduce or cancel out the mismatches between sensor feedback signals and command or desired values. In this paper, we introduce a simulator for control characteristics of machinery equipment. The purpose of the simulator development is to provide mechanical system designers with the ability to estimate how much dynamic performance can be achieved from their design parameters and selected devices at the designing phase. The simulator has a database for commercial parts, so that the designers can choose appropriate components for servo controllers, motors, motor drives, and guide ways, etc. and then tune governing parameters such as controller gains and friction coefficients. The simulator simulates the closed-loop control system which is built and parameter-tuned by the designer and shows dynamic responses of the control system. The simulator treats the moving table as a 6 degrees-of-freedom rigid body and considers the motion guide blocks stiffness, damping and their locations as well as sensor locations. The simulator has been under development for one and a half years and has a few years to go before the public release. The primary achievements and features will be presented in this paper.

Key Words: Control system simulator (제어 시스템 시뮬레이터), Dynamic characteristics (운동 특성), Positioning stage simulation (위치결정 스테이지 시뮬레이션), Friction model (마찰 모델)

1. 서론

기계장비의 제어적 특성을 실제 제작 전에 미리 예측하여 장비 개발에 활용하고자 하는 시도가 계속되어 왔다.¹⁻⁴ 이러한 시도들은 디자인 초기 단계에서 실제 제품을 생산하였을 때 발생할 수 있는 문제들을 해결하기 위한 것으로서 일정 정도의 성과를 거두고 있다.^{5,6} 하지만 제어적 거동의 해석

에만 집중하여 모델링과 시뮬레이션이 이루어져서 설계자가 체감하는 시뮬레이션 정확도는 그다지 높지 않았다. 그러한 원인으로 운동유니트의 비선형적 특성, 상업용 제어기의 모델링 부정확성 등을 꼽을 수 있고 일부 극복을 위한 연구가 진행되기도 하였다.^{7,8}

본 연구는 설계 단계에서의 기계장비 제어 시뮬레이션 기법을 개발하는 것이 목표이며 설계자

에게 실질적인 도움이 될 수 있도록 시뮬레이션 정확도를 높이는 방향으로 연구를 수행하고 있다. 이를 위해 기계장비의 구동부위에서 설계자가 직면하는 모든 특성들을 모델링하고자 하며 또한 일반적인 제어기법만 모델링되는 제어기를 실제 설계자가 사용하는 상용 제어기 수준으로 모델링 정확도를 높이는 연구를 진행중이며 본 논문은 그 중 일부 연구 결과에 대해 기술한다.

본 논문의 2 장에서는 시뮬레이션 정확도를 높이기 위해 개발된 제어시스템의 모델링 기법에 대해 기술하고 3 장에서는 개발된 모델링 기법이 적용된 시뮬레이터의 개발에 대해 논한다. 4 장에서는 실험을 통하여 각 부분 모델링 기법의 검증 및 전체 시뮬레이터의 정확도를 검증한다.

2. 기계장비 제어 시스템의 구성 및 모델링

2.1 제어시스템의 구성

제어 시스템은 크게 Fig. 1 과 같이 이송계의 기계적 스테이지 부분(Mechanical system), 모터 및 드라이브 등 전기 부분 (Electrical system), 제어기 부분 (Control system)으로 분류할 수 있으며, 기능적으로는 Fig. 2 에 나타난 것처럼 실제 운동이 일어나는 테이블의 기계 시스템 블록(Mechanical dynamics block)과 엔코더 등과 같은 측정 블록 (Measurement block), 이송 제어시 명령에 해당하는 명령 생성 블록 (Reference generator block), 순수 서보 제어 알고리즘을 포함한 블록 (Servo controller block)과 드라이브의 전기적 특성을 갖는 블록 (Drive and electronics block)으로 나누어 구성된다.

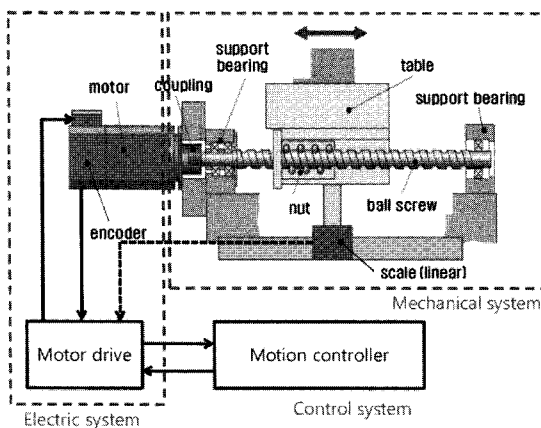


Fig. 1 Structure of a motion control system (a typical ball screw stage)

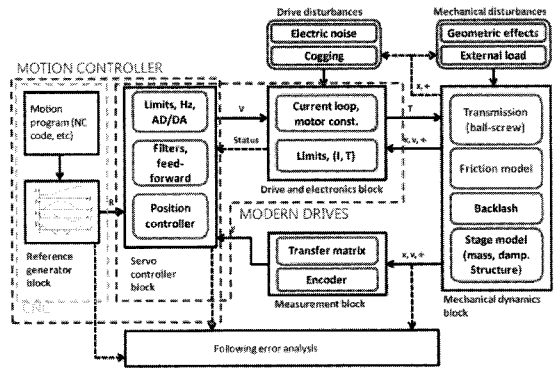


Fig. 2 Functional block diagram of a motion control system

제어시뮬레이션이 이루어지기 위해서는 이러한 제어시스템의 각 부분이 모델링되어야 하며 본 장에서는 정확도를 높이기 위한 모델링 기법에 대해 서술한다.

2.2 운동유닛의 6 자유도 강체 모델링

본 해석 모델에서는 테이블의 경우, 강체 테이블을 가정하고, 각각의 베어링 위치와 강성 및 감쇠계수를 고려한 모델을 적용하였다. 이는 베어링 강성에 의한 동특성을 포함하고, 추력의 발생점 (모터 및 볼스크류 너트 구정점) 및 제어를 위한 변위 센서의 위치에 따른 특성을 동특성을 포함하여, 집중질량만을 고려한 경우보다 동특성 해석의 정밀도를 높일 수 있다. 특히, 테이블에 고정된 임의의 지점에 작용하는 외란과 임의의 지점에서의 응답을 구할 수 있다. 다음의 Fig. 3 는 이러한 테이블의 이송방향을 포함한 6 자유도 강체 모델과, 테이블의 전달함수의 예시를 나타내고 있다.

이러한 모델의 6 자유도 운동방정식은 상태공간모델을 통하여 구현될 수 있다. Fig. 4 는 이러한 테이블의 특성모델의 예로, 센서의 위치에 따라 다른 응답특성을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

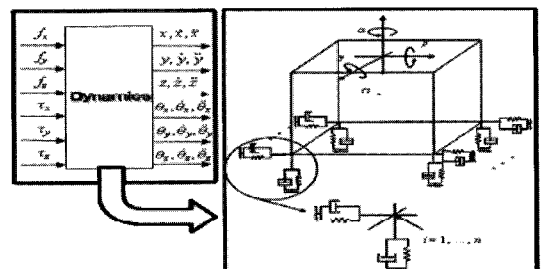


Fig. 3 6-DOF table model with bearings

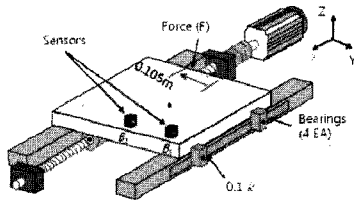


Fig. 4(a) An example of a table with bearings (table mass = 26 kg, bearing stiffness: $K_{y0}=100 \times 10^6$, $K_{z0}=200 \times 10^6$)

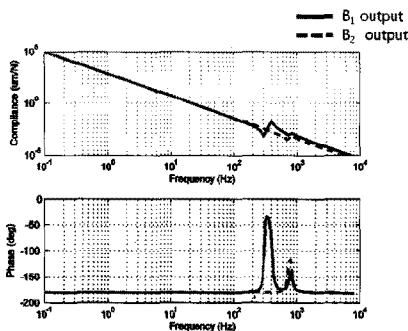


Fig. 4(b) Example of transfer function (x_B/F) of table with different output position (B_1, B_2)

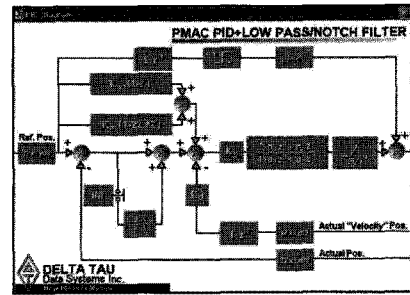
2.3 상용 제어기의 시뮬레이션 모델

본 논문에서는 공작기계 및 제조장비에 폭넓게 이용되고 있는 상용 CNC 제어기 중 하나인 PMAC (PMAC2 PC104, Delta Tau) 제어기를 시뮬레이션의 대상으로 하였다.

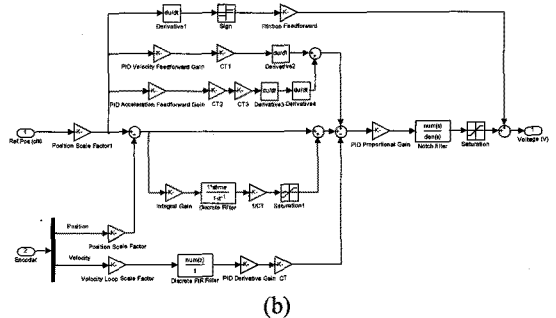
PMAC의 속도 프로파일러, 위치보간기, 예견 제어(Look ahead control), PID 제어, 노치 필터, 적분 제한, 전류제한 기능을 실제제어기의 특성을 구현 하도록 모델링하였다. 제어기의 모델은 MATLAB Simulink를 이용하여 모듈화된 구조로 설계하였다.

PID 제어, 노치 필터, 전류제한 알고리즘은 Fig. 5와 같이 제조사에서 공개한 자료를 이용하여 모델링하였고, Fig. 6에 도시한 바와 같이 제어기의 입/출력 신호를 이용하여, 모델의 정확도를 검증하였다. 알고리즘이 정확히 공개되어 있지 않은 위치보간기, 속도 프로파일러, 예견제어 및 적분제한 알고리즘은 입/출력 신호를 이용하여 추정하였다.

Fig. 7 은 작성한 제어기의 모델의 성능을 검증하기 위한 Hardware-in-the-loop simulation (HILS) 장치의 구성도이다. 제어기 시뮬레이터의 성능을 검증하는 과정에서 제어기의 모델과 운동유니트의 모델을 연결하여 시뮬레이션을 할 경우 실제 시스



(a)



(b)

Fig. 5 Modeling of PMAC control algorithm from a technical document: (a) screen shot of PMAC TuningPro V2.0 application running in Windows OS; (b) a matching MATLAB Simulink diagram of the algorithm in (a)

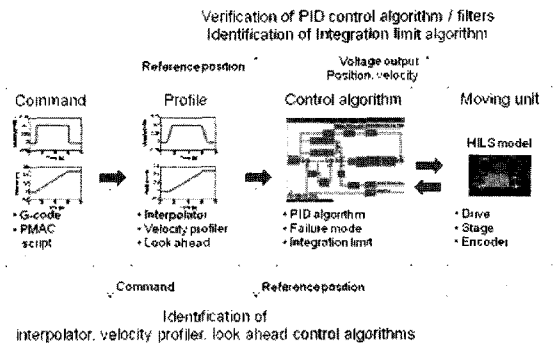


Fig. 6 Verification and identification of controller algorithms using PMAC testbed

템 구동 결과와의 오차 발생원인이 제어기와 운동유니트 중 어느 곳에 있는지를 판별하기 어렵다.

본 연구에서는 제어기 모델의 정확도를 검증하기 위해서 제어기 모델과 운동유니트의 모델을 DSP (DS1103, dSPACE)를 이용하여 실시간 시뮬레이션을 수행한 후, 같은 DSP 를 이용하여 실제 제어기 하드웨어와 운동유니트의 모델을 연결하여

HILS 를 수행하는 방법을 이용하였다. 또한, HILS 를 이용함으로써 실제 제어기의 작동 성능뿐 아니라, 장비를 구동하는 중에 발생할 수 있는 고장 모드를 모델링하여 장비의 부품에 문제가 발생하였을 때 제어기의 반응을 시뮬레이션 할 수 있도록 하였다.

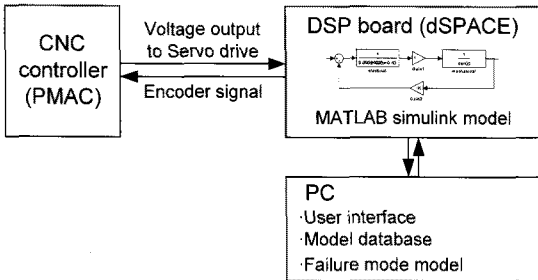


Fig. 7 Hardware-in-the-loop simulation setup for controller model verification

2.4 마찰력 및 이송계 강성 모델링

이송계의 마찰력은 크게 정마찰과 동마찰 특성으로 나누어 고려될 수 있다.⁹ 일반적으로 정마찰은 stick-slip 특성으로 언급되며, 동마찰은 이송계의 작동 시의 주요 저항성분으로 언급된다. 본 연구에서는 참고문헌¹⁰의 정마찰과 동마찰 모델을 통합하여 이송계의 시뮬레이션에 활용하였다.

Fig. 8은 본 연구의 마찰력 모델의 구성을 보여준다. Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 구성된 마찰력 모델은 최대정지마찰력을 고려한 정마찰 모델과 Stribeck 곡선⁹을 고려한 동마찰 모델로 구성되어 있으며, 두 마찰특성 간의 전이는 테이블의 이송속도를 기준으로 삼았다. 특히 시뮬레이션의 안정성을 확보하기 위해 Karnopp¹¹이 제안한 바와 같이 미소한 크기의 속도에 대해서는 정지상태로 가정하였다.

동마찰은 일반적으로 습동면의 특성에 의한 Coulomb 마찰과 습동면 윤활유의 점성특성에 의존

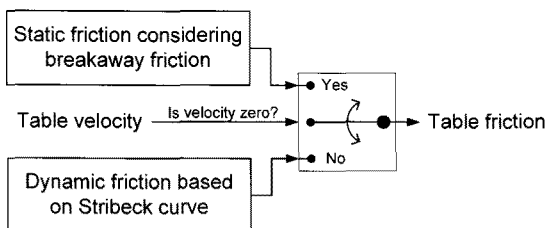


Fig. 8 Overview of friction model for a linear table

하는 점성마찰, 윤활유의 윤활막 생성 시까지의 전이 특성인 Stribeck 효과를 포함한다.⁹ 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하기 위해 (1)과 같이 모델링하였으며, 마찰력의 이송방향에 대한 특성을 고려하기 위해 테이블의 속도를 이용하였다. 또한 정마찰은 동마찰과의 연계 및 시뮬레이션의 안정성을 확보하기 위해 Coulomb 마찰과 Stribeck 효과를 포함하는 것으로 모델링하였다.

$$f_{dynamic} = \frac{v}{|v|} \left(\mu_C + \mu_v \cdot v + \mu_S e^{-\frac{v}{\sigma}} \right) M_t g \quad (1)$$

여기서, v, μC, μv, μS, σ, Mt, g 는 각각 테이블 속도, Coulomb, 점성, Stribeck 마찰계수, Stribeck 효과 특성속도, 테이블 질량, 중력가속도이다. (1)의 타당성을 확인하기 위해 질량이 약 1,000 kg 이며, 서보모터와 볼스크류, LM 가이드를 장착한 실험용 이송테이블의 마찰특성을 (1)을 이용하여 모델링하였다.

Fig. 9는 실험과 모델을 통해 얻어진 마찰토크 성분을 보여준다. 특히 실험은 이송테이블이 일정한 속도로 이송하도록 하여 마찰 특성만이 존재하도록 하고 이를 5 회 반복하여 얻어졌다. 그림으로부터 (1)은 일반적인 이송계의 특성을 잘 반영할 수 있음을 알 수 있다.

볼스크류의 강성특성은 볼스크류의 기구학적 특성과 함께 선형이송테이블의 작동특성에 영향을

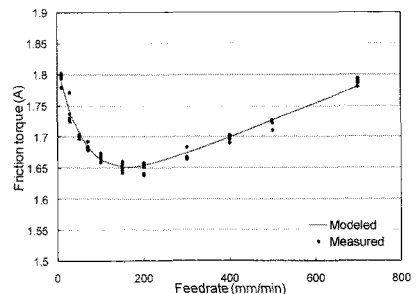


Fig. 9 Modeled dynamic friction behavior

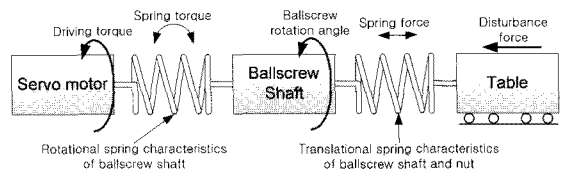


Fig. 10 Modeling of spring characteristics of ballscrew

미친다. 따라서, 이송 시스템의 동적 거동을 예측하기 위해서는 볼스크류의 강성특성을 고려하는 것이 필요하며, 이를 위해 본 연구에서는 볼스크류의 비틀림 강성과 축방향 강성을 모델링하였다. Fig. 10 은 모델링한 볼스크류의 강성특성을 도식적으로 보여준다. 볼스크류의 비틀림강성과 축강성은 중실축으로 가정하여 모델링 되었으며, 너트의 축방향 강성은 사용된 볼스크류 사양서로부터 얻었다. 볼스크류의 비틀림 강성은 (2)와 같이 모델링 되었으며, 이것이 모터의 작동에 미치는 효과는 (3)과 (4)와 같이 모델링 될 수 있다.

$$K_{r_ls} = \frac{\pi G_{ls} d_{ls}^4 \text{valley}}{32 L_{ls}} \quad (2)$$

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} + K_{r_ls} \cdot (\theta_m - \theta_{ls}) = T_m \quad (3)$$

$$K_{r_ls} \cdot (\theta_m - \theta_{ls}) = J_l \frac{d\omega_{ls}}{dt} + T_p \quad (4)$$

여기서, K_{r_ls} , G_{ls} , d_{ls_valley} , L_{ls} , θ_{ls} , ω_{ls} , J_l , ω_m , θ_m , T_m , J_m , T_p 는 각각 볼스크류의 비틀림 강성, 볼스크류의 전단계수, 골지름, 길이, 관성모멘트, 회전각도와 속도, 모터의 회전속도와 각도, 모터의 구동토크와 관성모멘트 그리고 볼스크류의 예압에 의한 정적 마찰토크이다.

3. 제어특성 시뮬레이터의 개발

3.1 시뮬레이터의 구성

제어 특성 시뮬레이터는 솔버(Solver)로 Mathworks 사의 MATLAB 엔진을 사용하며 해석해야 할 문제는 Simulink 블록을 사용하여 구성한다. 제어시스템 구성요소의 모델링 시에도 Simulink 블록을 사용하므로 모델링에서 구축된 모델을 시뮬레이터의 해석 시 그대로 사용하는 이점이 있으며 MATLAB 은 이미 시장에서 충분히 검증된 소프트웨어로 Simulink 블록 모델이 정밀할 경우 신뢰할 수 있는 해석 결과를 만들어 낸다. 개발된 시뮬레이터는 최종적으로 클라이언트(Client)-서버(Server) 개념으로 구성될 예정인데, 클라이언트 쪽에서는 사용자의 입력과 결과의 출력을 담당하며 서버 쪽에서는 클라이언트 쪽에서 입력된 데이터를 바탕

으로 데이터베이스에서 관련 파라미터를 추출하고 전체적인 제어 특성 해석 스크립트를 Simulink 블록으로 구성하며 MATLAB 엔진을 호출하여 해석을 한 후 결과를 다시 클라이언트 쪽으로 보내도록 구성된다. 최종단계에서의 제어특성 시뮬레이터의 구성 모습을 Fig. 11 에 나타내었는데 클라이언트와 서버는 TCP/IP 를 통해 서로 통신하도록 되어있다.

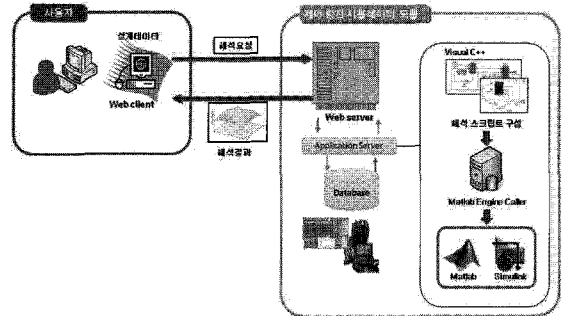


Fig. 11 Configuration of a control system simulator

3.2 사용자 인터페이스

현재까지 개발된 제어 특성 시뮬레이터는 개발의 편의상 클라이언트-서버 모듈로 완전히 분리되어 있지 않으며 독립적으로 구동하는 한 개의 프로그램 형태를 하고 있다. 통합 시뮬레이터에서 사용하는 프로그래밍 툴인 MS-Visual C++ 2005 를 사용하여 1 차 프로토타입 제어 특성 시뮬레이터를 개발하였는데 그 모습을 Fig. 12 에 나타내었다.

사용자는 프로그램 왼쪽의 펼침(Drop-down) 목록에서 사용하고자 하는 제어기, 모터, 드라이버와 같은 제어시스템의 기본 구성요소를 선택하고 다음 단계로 계속 넘어 가면서 오른쪽에 나타나는 상세 정보창에서 세부정보를 입력하거나 데이터베이스에서 가져온 파라미터들을 수정하도록 구성 되어있다. 현재까지 구성된 정보창들을 살펴보면, 테이블 정보창에서는 질량, 관성모멘트 및 관심점의 위치정보를 입력받으며, 가이드 정보창에서는 LM 가이드를 우선 고려하여 LM 블록의 위치정보를 받는다. 운동지령 정보창에서는 커맨드로 사용할 S-커브, 사다리꼴, 파일입력을 선택할 수 있으며, 서보 콘트롤 정보창에서는 엔코더의 해상도 및 주요 제어 게인값을 설정하도록 되어있다. 모터/드라이브 정보창에서는 각각의 기계적, 전기적 파라미터를 수정 입력할 수 있으며, 리드스크류 정보창에서는 리드스크류의 기하학적 특성치를 입력받고, 마찰력 정보창에서는 각종 마찰관련 파라

미터들을 수정 입력할 수 있다. 정보창에 나타나는 많은 파라미터값들은 데이터베이스에서 그대로 사용할 수 있는 기본값을 제공하여 사용자의 편의를 제공하도록 되어있다.

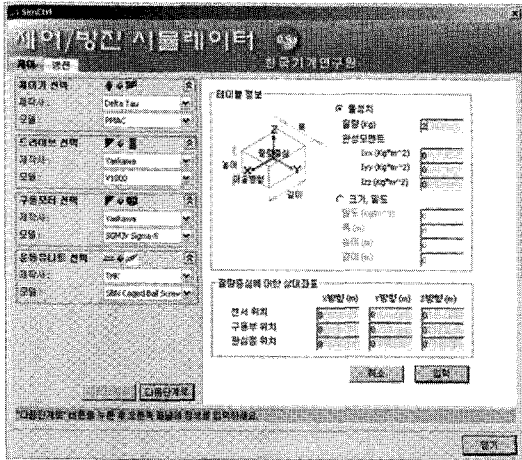


Fig. 12 Graphic user interface of the prototype control system simulator

4. 시뮬레이터의 검증

4.1 제어기 시뮬레이션의 정확도 검증

MATLAB Simulink 를 이용하여 제작한 제어기 시뮬레이션 모델의 정확도를 검증하기 위해 각 기능별 시뮬레이션 결과를 실제 PMAC 제어기의 구동결과와 비교하였다. Fig. 13 은 PMAC 의 속도 프로파일러 기능의 시뮬레이션 결과를 실제 제어기의 속도 프로파일러와 비교한 것으로, 0.3m 의 직선 구간을 6m/min 의 이송속도로 이동할 때, 가속시간 (TA)이 0.1sec 와 0.2sec 인 경우의 비교결과이다. PMAC 의 속도 프로파일러는 PMAC Plot32 Pro (Ver. 3.2.3, Delta Tau)의 기능을 이용하여 추출하였다. 그림에서와 같이, 가속시간에 따른 속도 프로파일러가 잘 생성됨을 확인할 수 있다. 속도 프로파일러와 원호보간을 적용한 위치보간 결과를 Fig. 14 에 비교하였다. 지름 0.2m 와 0.4m 의 원을 각 6m/min 와 12m/min 의 속도로 이송할 때의 원호의 궤적과 시간에 따른 x 축의 위치지령 값을 시뮬레이션 결과와 비교하였다. PMAC 의 실제 위치지령 값은 Plot32 Pro 기능을 이용하여 추출하였다. 가속 시간은 0.05sec 를 이용하였으며, 그림에서와 같이 가속구간의 특성을 포함한 위치 지령이 생성되었음을 확인할 수 있다.

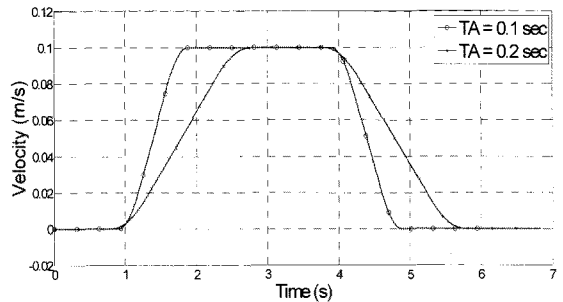


Fig. 13 Comparison of the velocity profiles generated by simulation and real PMAC hardware (- - : simulation, — : PMAC)

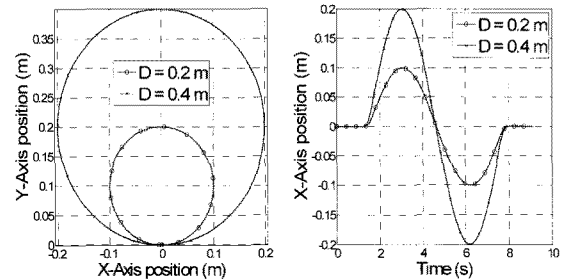


Fig. 14 Comparison of the circular interpolation generated by simulation and real PMAC hardware (left) and x-axis position command (right) (- - : simulation, — : PMAC)

4.2 마찰력 및 이송계 강성 모델의 검증

마찰력 모델과 볼스크류 강성 특성을 고려한 이송테이블의 시뮬레이션 모델을 구성하고 이에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 마찰력은 LM 가이드에 존재하는 것으로 고려하였으며, 이 중 볼스크류의 예압에 의한 Coulomb 마찰이 볼스크류에 존재하는 것으로 모델링 하였다. 강성 특성의 고려에서는 점성마찰이 감쇠 역할을 가지며, 그 외의 감쇠성분은 고려하지 않았다. 시뮬레이션의 검증을 위한 실험을 위해 모터 전류를 Hall 효과 센서를 이용하여 측정하였으며, 모터의 엔코더로부터 모터의 운동을 측정하였다.

Fig. 15 와 16 은 시뮬레이션과 실험으로부터의 측정결과를 비교한 결과를 보여준다. Fig. 15 에서부터 보여지는 바와 같이 모터의 회전 시작시점이 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 이로부터 이송테이블의 관성특성뿐 만 아니라 정마찰 특성이 매우 유사하게 모델링 되었음을 추정할 수 있다. 또한 정상상태에서의 운동 또한 매우 유사하게 시뮬

레이션 됨을 확인할 수 있었다. 이와 함께 모터의 거동과 테이블의 거동이 볼스크류의 강성 특성에 의해 차이가 발생함을 볼 수 있다. Fig. 16 에서는 모터로부터 전달되는 구동전류가 실제와 매우 유사하게 예측됨을 확인할 수 있으며, 정상상태에서의 전류 거동 비교결과로부터 동마찰 특성의 정확도를 추정할 수 있다.

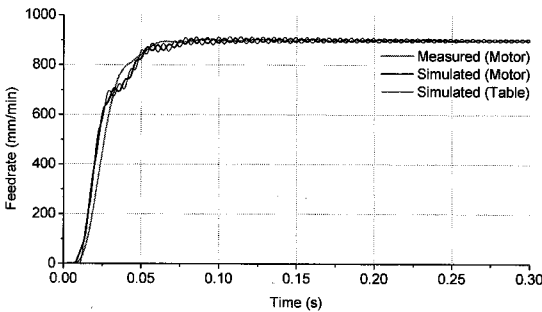


Fig. 15 Simulation results of stage motion (motor and table speeds in mm/min)

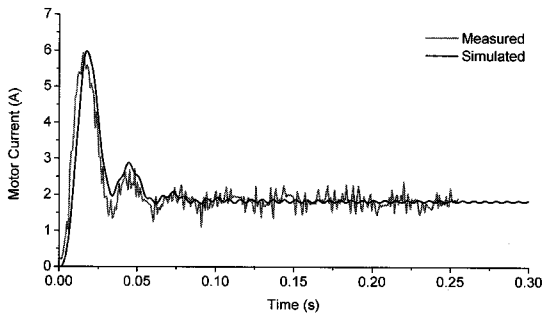


Fig. 16 Comparison between measured and simulated motor currents

4.3 기계장비 제어시뮬레이터의 실험적 검증

Fig. 4(a)에 나타낸 모델에 대하여 해석을 위한 Simulink 모델을 구축한 예는 다음의 Fig. 17 과 같다. 각각의 모델에는 기계부에 대한 구동을 위한 제어부, 위치센서의 입력을 받아 위치제어를 수행하는 제어기 부분을 포함하고 있다.

다음의 Fig. 18 은 구성된 모델의 결과 검증을 위해 적용한 볼스크류 및 LM 가이드 기반 스테이지로써, Delta Tau 사의 UMAC 제어기를 사용하고, Yaskawa SGDS-08A01A 및 SGMAS-08ACA41 (750W, 3000rpm) 모터 및 드라이브와, Heidenhain LIP571 리니어스케일을 이용하여 제어한다.

구성된 모델에 있어서 제어기는 UMAC 의 제

어기 다이어그램을 Simulink 로 모사하였으며, 드라이버의 전류제어 특성을 실험을 통해 측정하여 180 Hz 의 고유진동수를 갖는 2 차시스템으로 근사화하여 모델링하였다. 또한, 해석을 위하여 사용된 파라미터들은 다음의 Table 1 과 같다. 특히, 볼스크류 및 LM 가이드의 경우 마찰력에 대한 모델이 해석결과에 크게 작용할 수 있어, 정마찰 및 동마찰을 고려한 비선형 모델을 포함하였다. 본 실험 모델의 경우, 볼스크류가 중앙에 위치하며, 베어링의 강성이 충분히 높다고 판단되어 테이블 부분은 관성효과만을 고려한 1 자유도 모델을 적용하였다.

다음의 Fig. 19 는 구성된 모델을 이용하여 1,000 count 의 스텝명령과 Ramp 구동에 대한 응답을 실제 제어기의 Reference 신호를 이용하여 계산한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교한 것으로 과도응답 및 정상상태 응답에 있어서 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었다. 실제 응답과의 비교를 통해서 시뮬레이션 모델의 경우 마찰력 모델의 파라미터가 해석결과에 미치는 영향이 컸으며, 제품의

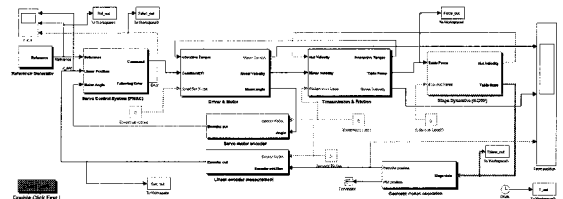


Fig. 17 Simulink model of a motion control system

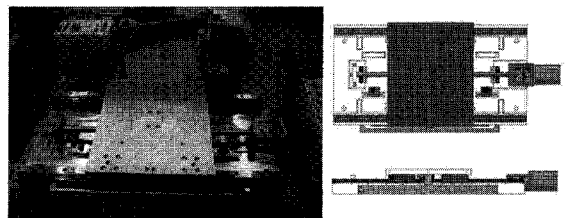


Fig. 18 Test setup for 1-axis stage with ball screw

Table 1 Comparison of measured roughness data

| | |
|------------------------|--------------------------|
| J_{BS} | $7.238e-5 \text{ kgm}^2$ |
| m_t | 26.37 kg |
| Coulomb coefficient | 0.04015 |
| Critical velocity | 0.6490414 |
| Viscous damping coeff. | 0.001187565 |
| P gain (i130) | 40000 |
| D gain (i131) | 100 ~ 600 |
| I gain (i133) | 30000 |

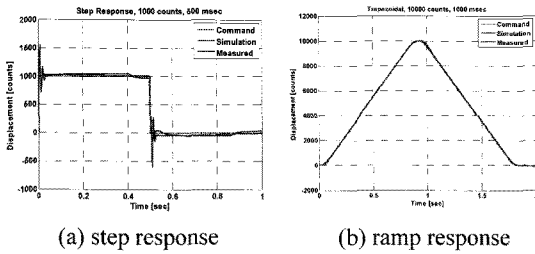


Fig. 19 Simulation and experimental result for 1-axis test set-up with LM guides and ball screw

시뮬레이션 오차를 줄이고자 시도하였다.

이러한 모델링 기법을 모두 포함한 제어 시뮬레이터를 개발하였으며 1 축 스테이지를 제작하여 실험적으로 시뮬레이터를 검증하였다.

본 연구는 제어시뮬레이션뿐만 아니라 기계장비의 모든 정밀도를 해석하는 총괄 과제에 일환으로 개발되는 과제이며 직선/회전 정밀도 및 구조 정밀도를 해석하는 여타 모듈과 결합되면 설계자에게 실질적인 도움을 줄 수 있는 강력한 도구가 될 것으로 기대하고 있다.

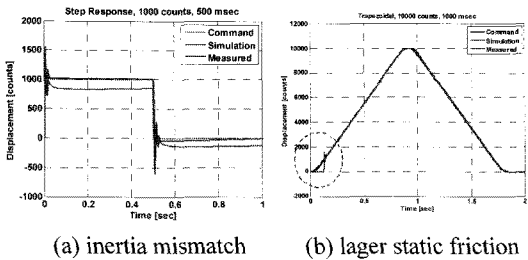


Fig. 20 Simulation results with mismatched parameters

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “기계장비 정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

카탈로그 등에서 정확히 파악할 수 없는 일부 inertia 값들에 대한 영향을 Fig. 20 에 나타난 해석 예를 통하여 파악할 수 있으며, 향후 이러한 부분의 DB 화를 통한 해석결과의 신뢰성 향상에 대한 연구가 필요하다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

5. 결론

본 연구는 기계장비의 설계단계에서 제어특성을 미리 예측가능하도록 시뮬레이션 기법을 개발하는 것이 목표인 과제으로써 기존의 방법에 비해 시뮬레이션 정확도를 높여 실용적 의미를 부여하고자 하였다. 이를 위해 제어시스템의 모델링에 있어 먼저 운동유니트의 경우 점질량 모델링에서 한걸음 나아간 6 자유도 강체모델링을 적용하였고 이를 통해 회전운동이나 센서의 위치 효과 등이 시뮬레이션됨을 보였다. 또한 제어기의 경우 기존의 위치제어와 속도루프만을 고려한 기본 제어기 모델링이 시뮬레이터의 오차를 증대시키므로 이를 실제 상용제어기에 근사하도록 모델링하였다. 대상 제어기는 PMAC 제어기로서 HILS 기법에 의해 미지의 다양한 파라미터를 모델링할 수 있었다. 그리고 안내면의 마찰력과 이송계의 비틀림 강성등을 모델링하여 실제 기계장비의 설계에서 발생할 수 있는 구동 시작순간이나 동작 역전 순간의

1. Bianchia, G., Paoluccia, F., Van den Braembusscheb, P., Van Brusselb, H. and Jovane, F., “Towards Virtual Engineering in Machine Tool Design,” *Annals of CIRP*, Vol. 45, No. 1, pp. 381-384, 1996.
2. Reinhart, G. and Weissenberger, M., “Multibody Simulation of Machine Tools as Mechatronic Systems for Optimization of Motion Dynamics in the Design Process,” *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 605-610, 1999.
3. Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G. and Brussel, H. V., “Reconfigurable Manufacturing Systems,” *Annals of CIRP*, Vol. 48, No. 2 , pp. 527-540, 1999.
4. Min, B.-K., Huang, Z., Pasek, Z. J., Yip-Hoi, D., Husted, F. and Marker, S., “Integration Of Real-Time Control Simulation To A Virtual Manufacturing Environment,” *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 67-87, 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. Donmez, M. A., “Development of Virtual Machine Tools,” *Proceedings of the 3rd International Conference on Progress of Cutting and Grinding*, pp. 8-13, 1996.
7. Jönsson, A., Wall, J. and Broman, G., “A virtual

- machine concept for real-time simulation of machine tool dynamics,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 7-8, pp. 795-801, 2005.
8. Pritschow, G. and Röck, S., “Hardware in the Loop Simulation of Machine Tools,” *Annals of CIRP*, Vol. 53, No. 1, pp. 295-298, 2004.
 9. Armstrong-Helouvy, B., Dupont, P. and Canudas De Wit, C., “A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction,” *Automatica*, Vol. 30, No. 7, pp. 1083-1138, 1994.
 10. Jeong, Y. H., Min, B.-K., Cho, D. W. and Lee, S. J., “Motor current prediction of a machine tool feed drive using a component-based simulation model,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 4, pp. 597-606, 2010.
 11. Karnopp, D., “Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic system,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, No. 1, pp. 100-103, 1985.