

LM가이드 스테이지의 운동해석을 위한 6자유도 운동모델 6 Degrees-Of-Freedom Dynamic Models for LM-Guide Stages

#김병섭, 이성철, 노승국, *송창규

#B.-S. Kim(bkim@kimm.re.kr), S. C. Lee, S. K. Ro, *C. K. Song

한국기계연구원 초정밀시스템연구실

Key words : Dynamic simulation, LM guide, Positioning stage, Matlab/Simulink, Simmechanics

1. 서론

이송계의 제어 시스템은 기계 장비의 정밀도와 동특성을 결정짓는 핵심 요소로 설계 단계에서 제어 특성을 정확하게 시뮬레이션 할 수 있으면 운동 특성에 영향을 주는 인자를 미리 예측하여 개선 할 수 있으므로 이송계의 성능 향상을 꾀할 수 있다. 본 논문에서는 이송 시스템에서 일반적으로 사용하는 LM (Linear Motion) 가이드 테이블에 대하여 운동 방정식을 기반으로 유도된 6자유도 강제 운동 모델을 기술한다. 운동 방정식을 이용하여 다축 이송계를 모델링 할 경우 식의 복잡도가 급격히 증가하고 여러 가지 다축 구성 방식에 따라 개별적으로 모델링해야 하는 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위한 방법으로 물리적인 연결부(joint)와 스프링-댐퍼를 이용하여 모델링 하는 방법을 소개하고 두 가지 방법의 비교 결과를 소개한다.

2. 이송 시스템의 모델링

이송 시스템은 크게 Fig. 1과 같이 이송계의 기계적 스테이지 부분 (Mechanical system), 모터 및 드라이브 등 전기 부분 (Electrical system), 제어기 부분 (Control system)으로 분류할 수 있다.

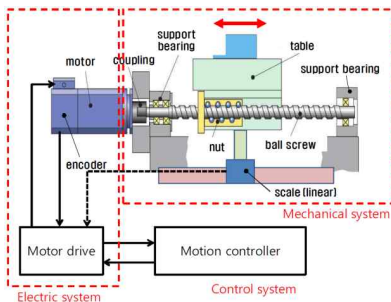


Fig. 1 Structure of a motion control system – a typical ball-screw stage

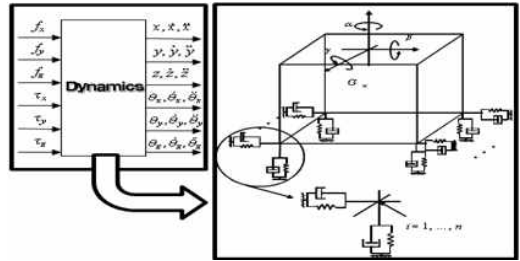


Fig. 2 6-DOF table model with LM guide

LM 가이드에 의해 지지되고 있는 이송 테이블은 Fig. 2에서처럼 각 코너에 수직과 수평으로 스프링-댐퍼가 설치되어 있는 강제 모델로 가정할 수 있다. 질량 중심의 위치와 자세에 대해 6자유도 변위를 $q = [x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]^T$ 라 하고 Lagrangian 방정식을 이용하여 운동 방정식을 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = [A]F$$

여기서 테이블의 질량을 m 이라 하고, 질량 중심에 대한 관성 텐서(Inertia Tensor)를 $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}$ 로 표시하면 질량 행렬 $[M]$ 은

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & I_{xy} & I_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ 0 & 0 & 0 & I_{zx} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

질량 중심에 위치한 좌표계를 기준으로 임의의 점 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3})$ 좌표에 LM 블록이 존재하고 그 점에서 감쇠와 강성이 수평 방향 c_{yi}, k_{yi} , 수직 방향 c_{zi}, k_{zi} 로 주어지면 감쇠 행렬 $[C]$ 와 강성 행렬 $[K]$ 는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{yi} & 0 & -c_{zi}p_{i3} & 0 & c_{yi}p_{i1} \\ 0 & 0 & c_{zi} & c_{zi}p_{i2} & -c_{zi}p_{i1} & 0 \\ 0 & -c_{yi}p_{i3} & c_{zi}p_{i2} & c_{yi}p_{i3}^2 + c_{zi}p_{i2}^2 & -c_{zi}p_{i1}p_{i2} & -c_{yi}p_{i1}p_{i3} \\ 0 & 0 & -c_{zi}p_{i1} & -c_{zi}p_{i1}p_{i2} & c_{zi}p_{i1}^2 & 0 \\ 0 & c_{yi}p_{i1} & 0 & -c_{yi}p_{i1}p_{i3} & 0 & c_{yi}p_{i1}^2 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{yi} & 0 & -k_{zi}p_{i3} & 0 & k_{yi}p_{i1} \\ 0 & 0 & k_{zi} & k_{zi}p_{i2} & -k_{zi}p_{i1} & 0 \\ 0 & -k_{yi}p_{i3} & k_{zi}p_{i2} & k_{yi}p_{i3}^2 + k_{zi}p_{i2}^2 & -k_{zi}p_{i1}p_{i2} & -k_{yi}p_{i1}p_{i3} \\ 0 & 0 & -k_{zi}p_{i1} & -k_{zi}p_{i1}p_{i2} & k_{zi}p_{i1}^2 & 0 \\ 0 & k_{yi}p_{i1} & 0 & -k_{yi}p_{i1}p_{i3} & 0 & k_{yi}p_{i1}^2 \end{bmatrix}$$

질량 중심에 대해 임의의 점 $G = (g_1, g_2, g_3)$ 에 힘 f 와 토크 (Torque) τ 로 구성된 힘 벡터 $F = [f_x, f_y, f_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z]^T$ 가 작용하면 $[A]$ 행렬은 다음과 같이 구성된다.

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -g_3 & g_2 & 1 & 0 \\ g_3 & 0 & -g_1 & 0 & 1 \\ -g_2 & g_1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

위의 운동 방정식을 상태 공간 (State Space) 으로 표현하기 위해 상태 벡터 $X = [\dot{q}, q]^T$ 를 정의하면

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ I & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} M^{-1}A \\ 0 \end{bmatrix} F$$

로 표현되며 Simulink의 상태 공간 블록으로 모델을 나타내어 시뮬레이션에 사용할 수 있다. 그러나 운동 방정식을 기반으로 하는 모델은 2개 축 이상의 다축 운동을 기술하는데 복잡도가 급격히 증가하며 각 문제마다 별도의 운동 방정식을 유도해야 하는 문제가 따른다.

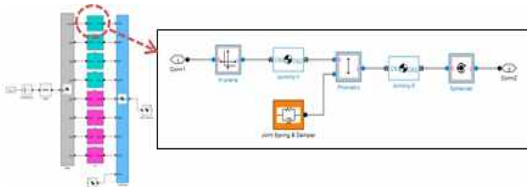


Fig. 3 SimMechanics physical modeling using joints, spring-damper

Simulink에 있는 SimMechanics를 사용하여 연결 조건, 스프링-댐퍼로 물리적인 상태를 기술하여

6자유도 문제를 모델링하면 다축 문제로의 확장을 용이하게 할 수 있다. LM가이드 스테이지의 6자유도 SimMechanics 모델을 Fig. 3에 나타내었는데 테이블의 각 코너에 수직, 수평 방향으로 In-plane, Prismatic, Spherical Joint를 설치하여 Fig. 2에서와 동일한 운동이 일어날 수 있도록 한 후, Prismatic Joint에는 스프링-댐퍼를 설정하였다.

이송축 방향으로 좌우 각 2개씩 LM 블록을 설치한 경우에 대하여 운동방정식으로 유도된 상태공간 모델과 연결부를 중심으로 기술된 SimMechanics 모델을 비교한 결과를 다음 Fig. 4에 나타내었다.

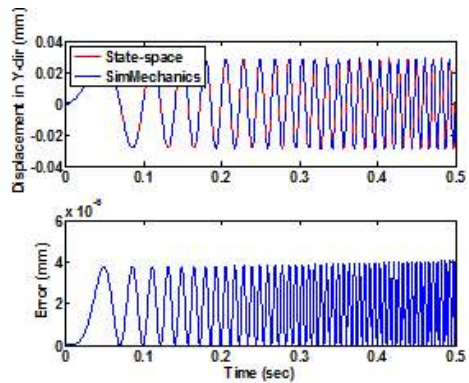


Fig. 4 Comparison of State-space model and SimMechanics physical model

Chirp 신호로 주어진 외부 가진에 대하여 수평 방향 운동은 두 모델의 차이가 0.01% 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 수직 방향도 비슷한 크기의 오차를 확인할 수 있었다.

3. 결론

LM가이드 이송 테이블의 운동 해석을 위해 운동 방정식 기반의 상태 공간 모델을 사용할 경우 다축 이송 시스템으로의 확장성이 떨어지는 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 SimMechanics를 사용한 연결부 중심의 물리적 모델링을 소개하였다. 이 모델링 기법을 사용할 경우 기존의 Simulink 모델과의 연계성을 떨어뜨리지 않고 하고 다축 이송 시스템의 모델을 용이하게 할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. "SimMechanics Users Guide," The MathWorks Inc., 2011.