자기베어링 스테이지의 동적 거동 통합 시뮬레이션을 통한 제어 설계

김병섭

Integrated Dynamic Simulation of a Magnetic Bearing Stage and Control Design

Byung-Sub Kim^{a*}^a Advanced Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, South, 305-343, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	8	July	2013
Revised	30	July	2013
Accepted	5	August	2013

Keywords:

Dynamic simulation
Structural dynamics
Dynamic motion
Control simulation
Magnetic bearing stage

ABSTRACT

The dynamic simulation of machine tools and motion control systems has been widely used for optimization, design verification, control design, etc. There are three main streams in dynamic simulation: structural dynamic analysis based on the finite element method, dynamic motion analysis based on equations of motion, and control system analysis based on transfer functions. Generally, one of these dynamic simulation methods is chosen and employed for specific purposes. In this study, an integrated dynamic simulation is introduced, in which the structure, motion, and control dynamics are combined together. Commercially well-known software is used in the integrated dynamic simulation: ANSYS, ADAMS, and Matlab/Simulink. Using the integrated dynamic simulation, the dynamics of a magnetic bearing stage is analyzed and the causes of oscillation and noise are identified. A controller design for suppressing a flexible dynamic mode is carried out and verified through the integrated dynamic simulation.

1. 서론

공작기계나 운동 제어 시스템의 동역학적 시뮬레이션 기술은 최적화 설계나 설계 검증, 제어기 설계를 위하여 널리 사용되고 있다. 크게 보아 유한요소법을 이용한 구조 동역학 해석, 운동 방정식을 이용한 운동 해석, 전달 함수 등을 이용한 제어 시스템 해석 등이 필요에 따라 특정 영역의 시뮬레이션을 위해 독립적으로 수행되는 경우가 대부분이다. 본 논문에서는 상용 소프트웨어인 ANSYS, ADAMS, Matlab/Simulink를 사용하여 구조/운동/제어 동특성을 통합하여 시뮬레이션하는 기법에 대하여 소개한다. 통합 동특성 시뮬레이션에서는 ANSYS가 유연체의 구조적 특성, ADAMS는 기

구적 운동 해석, Matlab/Simulink는 제어기 특성을 담당한다.

본 논문에서는 통합 동특성 시뮬레이션을 자기 베어링 이송 시스템에 적용하여 제작된 자기 베어링 이송 시스템의 동적인 문제를 파악하고 시뮬레이션을 통한 적절한 제어기 설계로 진동과 소음 문제를 해결한 예를 제시한다.

2. 자기 베어링 이송 시스템

통합 시뮬레이션으로 해석할 대상은 Fig. 1에 보이고 있는 자기 베어링 이송 시스템이다. 이송 테이블의 코너 4군데에 영구자석과 전자석이 혼합된 자기베어링 액추에이터가 장착되어 가이드와 0.3

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7109

Fax: +82-42-868-7180

E-mail address: bkim@kimm.re.kr (Byung-Sub Kim).

mm의 간극을 유지하며 공중 부양하고, 주 이송방향은 장착된 리니어 모터의 추력으로 이송한다. 이송되는 테이블의 무게는 자기 부상 액추에이터를 포함하여 9.4 kg이며 액추에이터는 수직 방향으로 총 8개, 수평 방향으로 총 4개가 장착되어 있고 각기 쌍으로 묶어서 6개의 폐루프 제어기를 구성하였다. 리니어 모터로 구동되는 주이송 방향은 분해능 20 nm의 레이저 엔코더(Encoder)를 이용하여 폐루프 제어를 한다.

자기 베어링은 부상력을 유지하기 위하여 항상 일정한 바이어스 자속이 필요하며, 이를 전류를 통하여 인가하는 경우 열이 지속적으로 발생하게 된다. 발열을 최소화하기 위하여 바이어스 자속을 영구자석으로 대체하는 영구자석/전자석 혼합형 액추에이터를 적용하여, 영구자석과 전자석이 직렬로 연결되어 있는 구성을 가지도록 하였다. 전자석 코일의 자기저항을 최소화하기 위해 영구자석의 두께가 가급적 작은 것을 사용하도록 하였고, 지지 강성을 높이기 위하여 자기 액추에이터를 서로 마주보도록 배치하여 쌍으로 구성하였다.

제작된 자기베어링 액추에이터는 자극 면적 600 mm^2 ($15 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$)에 영구자석 두께 1 mm, 코일 감은 수 250회이며 자기 특성 계산 결과, 최대 자속 밀도는 약 0.7 T로 약 0.3 mm의 간극에서 자계 강도-자속 밀도 사이의 관계(BH선도) 값이 최대점을 나타내었다. 또한 한 개의 베어링에 대한 자기력은 공극이 0.3 mm일 때 약 57.5 N이며, 2A 전류에서 100 N까지 증가하도록 설계되었다.

Fig. 1 Experimental magnetic bearing stage

자기 베어링 이송 시스템의 제작 완료 후, dSpace 시스템을 이용하여 25 kHz의 샘플링 주기로 PID-제어기를 적용하여 자기 베어링의 부상을 시도하였더니 이송 테이블의 부상은 유지 되었지만 높은 주파수의 진동과 소음이 발생하였다. 테스트를 통하여 발생한 진동과 소음은 테이블이 갖고 있는 유연 모드에서 발생한 것으로 판명되었다. 구조적인 동특성과 제어기의 동특성이 폐루프를 형성하여 발생한 이러한 진동, 소음은 설계 단계에서 진행했던 6자유도 강체 테이블에 대한 제어기 시뮬레이션이나 급격한 테이블 가감속 시 자기 베어링 모듈에 걸리는 힘을 계산하기 위한 운동 시뮬레이션 등에서 재현 혹은 파악될 수 없는 것으로 통합적 동특성 시뮬레이션을 시도하는 계기가 되었다.

통합 시뮬레이션에서는 유연체의 모델을 ANSYS를 이용하여 구성하고 고유진동수와 진동 모드가 포함된 모델을 ADAMS로 읽어 들인다. ADAMS에서는 강체와 유연체로 자기베어링 이송 시스템의 하드웨어 부분을 구성하고, 측정이 필요한 부위에 변위 센서를 설정하고 자기베어링 액추에이터와 리니어 모터에 힘 작용점을 설정한다. Matlab/Simulink와 ADAMS의 동기화 시뮬레이션 동안에 Simulink에서는 ADAMS에서 보내주는 센서값을 받아서 자기 부상 제어기의 구동에 따른 전류값과 현재 자기 간극을 바탕으로 자기 베어링 액추에이터에 작용하는 자기력을 계산하며, 마찬가지로 리니어 모터에 발생하는 추력도 계산하여 ADAMS로 넘겨 준다. ADAMS는 중력과 리니어 모터와 액추에이터에서 발생하는 힘을 바탕으로 유연체를 포함한 이송체 부품들의 동적 움직임을 계산하여 이송계 내의 각 부품들의 위치를 계산한다. Matlab/Simulink와 ADAMS의 동기화 시뮬레이션은 실제 실험에서와 같이 1초당 25,000번의 시간 스텝을 밟아가며 두 개의 프로그램이 상태 정보를 계속 주고 받으며 시스템 내의 각 상태변수들이 어떻게 변하는가를 계산하게 된다.

3. 유연 테이블 모델링

테이블의 구조적인 유연체 동특성을 고려한 모델링을 위해 자기 베어링 액추에이터와 리니어 모터 부분을 제외한 알루미늄 이송 테이블에 대해 ANSYS를 사용하여 모드해석을 수행하였다. Fig. 2에 ANSYS에서의 메시 모델과 모드 해석 결과로 나타나는 처음 3개 모드를 나타내었다. 실제 제작된 자기 베어링 부상 실험에서 문제가 된 모드는 750 Hz에서 나타나는 대각 방향으로의 비틀림 모드인데 각 코너의 자기 베어링 액추에이터와 중앙에 리니어 모터의 개략적인 크기와 무게를 가정하여 부착한 후 모드 해석을 수행하면 750 Hz 모드는 400 Hz 후반 영역으로 내려온다.

이송체에서 자기 베어링 모듈과 리니어 모터를 제외하고 알루미늄으로 제작된 테이블만을 ANSYS로 모델링한 이유는 구조적인

Fig. 2 Preparation of a flexible table model using ANSYS and its three mode shapes at low frequency

동적 거동의 고려가 필요한 부분만을 유연체 모델에 집어넣어서 파일 크기, 계산 속도, 애니메이션 처리 등 다루고자 하는 문제의 크기를 가능한 작게 유지하기 위해서이다.

ANSYS에서의 육면체 요소(예, SOLID185)는 각 절점에서 회전에 대한 자유도 없이 이동에 대한 3개의 자유도만을 갖는다. 유연체를 육면체 요소용 메시로 나누고 특정한 하나의 절점에 다른 강체나 유연체를 부착하게 되면 연결점을 통하여 직선 변위는 연결된 부품 사이에서 서로 전달될 수 있지만 회전은 전달되지 않는다. 따라서 다른 부품들과의 연결점에서는 회전이 전달될 수 있도록 회전에 대한 자유도를 갖는 빔 요소(예, BEAM188)를 사용하여 거미줄 구조를 형성하는 것이 필요하다. Fig. 3에 보이듯이 유연체로 모델링된 테이블 부분과 강체로 모델링 되는 자기베어링 액추에이터 및 리니어 모터와의 연결을 위하여 빔 요소(BEAM188)로 거미줄 구조를 형성하여 연결점에서의 회전 운동이 유연체 모델인 테이블에 전달될 수 있도록 하였다. ANSYS에서 모드 해석 후, 그 결과를 ADAMS에서 요구하는 MNF (Modal Neutral File) 파일 형식으로 만드는데 이 MNF 파일에는 일반화된 질량과 강성 행렬, 각 절점의 질량과 관성(Inertia), 절점 좌표, 고유값과 모드 형상, 연결점 정보 등이 포함되어 파일 크기가 일반적으로 상당히 크게 된다^[1-2].

4. ADAMS와 Matlab의 동기화 시뮬레이션

통합 시뮬레이션에서 하드웨어를 나타내는 부품들의 조립은 ADAMS 환경에서 진행된다. 우선 자기 베어링 이송 시스템에서 가이드 프레임 등 고정된 부분들에 대한 정보를 CAD 프로그램에서 작성된 형상 파일을 읽어들이고 고정체로 설정한다. 유연체 테이블에 대한 정보를 ANSYS에서 작성된 MNF 파일에서 읽은 후,

Fig. 3 Spider web of beams constructed at an interface point

테이블의 각 코너 4곳에 강체로 모델링된 액추에이터를 연결하고 중앙에 강체로 모델링된 리니어 모터를 연결하여 움직이는 이송체의 운동 정보 구성을 완성한다. ADAMS에서는 Matlab과의 동기화 시뮬레이션이 될 수 있도록 변위 센서들을 정의하여 ADAMS에서의 출력 변수로, 힘 작용점들을 정의하여 ADAMS로의 입력 변수로 설정한다. 변위 센서가 필요한 부분은 수직 방향 자기 베어링에 대한 4곳과 수평 방향 자기 베어링에 대한 2곳, 그리고 리니어 모터 제어에 사용될 테이블 센터 위치용 1곳이다. 힘 작용점은 자기 베어링 12개소와 리니어 모터 센터 1개소인데 자기 베어링은 2개가 한 쌍을 이루고 있으므로 실제로는 Matlab에서 자기 베어링용 6개의 페루프 출력을 나누어 힘 작용점에 연결시킨다.

Matlab/Simulink에서는 제어기 부분과 자기력을 계산하는 블록이 주요 구성부분이 된다. Fig. 5에 통합 시뮬레이션에 쓰이는 Simulink 블록을 나타내었다. Matlab에서는 ADAMS 플랜트(최좌측 음영 블록)에서 변위 센서 값을 받아서 신호 잡음을 제거한 후 중앙에 있는 7개의 제어기(중앙 음영 블록)에서 모터 출력용 전

Fig. 4 Magnetic bearing stage model represented in ADAMS

Fig. 5 Control blocks in Matlab/Simulink

류값을 계산한다. 리니어 모터는 전류에 상수를 곱하여 추력을 바로 계산할 수 있지만 자기 베어링 액추에이터에 작용하는 자기력의 경우 전류값과 공극이 모두 영향을 미치므로 이를 고려한 자기력을 다시 계산하는 부분(최우측 6개 음영 블록)이 필요하다. 계산된 힘들은 다시 ADAMS 플랜트로의 입력 신호로 들어간다. ADAMS 플랜트는 ADAMS에서 입출력 점을 정의한 후, Matlab/Simulink와의 인터페이스를 위한 플랜트로 내보내기를 수행하면 Simulink에서 사용하는 블록으로 생성되므로 이를 Matlab/Simulink에서 읽어들이어 생성된 것이다.

5. 통합 시뮬레이션 결과

통합 시뮬레이션에서 해석용 솔버(Solver)로 ADAMS의 적분기나 Matlab/Simulink의 적분기를 특정하여 단독으로 문제를 풀도록 설정할 수도 있으나, ADAMS와 Matlab/simulink의 동기화 시뮬레이션(Co-simulation)이 비선형 문제의 해를 찾는 데 보다 나은 수렴성을 보이는 것으로 알려져 있어서 매 시간 스텝마다 서로 각각의 적분기를 통해 내부의 상태 변수를 갱신한 후, 정보를 교환하면서 시간을 계속 앞으로 나아가도록 설정하였다^[3-4].

Fig. 6에 리니어 모터 제어를 통하여 300 mm의 이송 거리를 29.4 m/sec^2 의 가속도로 이송할 때, 시뮬레이션에서의 이송 변위(아래 그림)와 수직 방향, 수평 방향의 간극 센서 신호(위, 중간 그림)를 나타내었다. 통합 시뮬레이션에서 나타난 간극 센서 신호 분석을 통하여 470 Hz 성분으로 진폭이 약 $40 \sim 50 \mu\text{m}$ 로 테이블이 떨다는 것을 알 수 있었으며 이것은 실험을 통해 확인했던 현상과

Fig. 6 Simulation result showing flexible mode vibrations

거의 일치하였다. ADAMS에서 운동 과정의 애니메이션을 통해서도 Fig. 4의 테이블 비틀림 형상이 테이블이 움직이는 동안에 계속해서 나타나는 것을 볼 수 있었다.

동적 거동 통합 시뮬레이션에서 얻을 수 있는 간극 센서 신호들을 분석하고 유연체로 모델링된 부분의 애니메이션을 통하여 수직 방향 자기 베어링 액추에이터 페루프 제어 구조 안에 유연 모드를 억제하는 보상기의 추가가 필요하다는 것을 파악할 수 있었다. Fig. 5의 아래 부분에 있는 유연 모드 억제용 제어기 블록을 확대하여 Fig. 7에 다시 나타내었는데 대각 방향에 놓인 수직 방향 변위 차를 계산하여 그 차가 없어지도록 400~500 Hz 부분을 강조한 리드-레그(Lead-Lag) 제어기를 통과시킨 후 4개 수직 방향 자기 베어링

Fig. 7 Control design to suppress the flexible mode vibration

Fig. 8 Simulation result: the effect of the designed flexible mode compensator

제어 출력단에 보상 신호를 입력해 주도록 하였다.

Fig. 8은 유연 모드 억제용 제어기가 추가된 후, 동적 거동 통합 시뮬레이션을 통해 얻어진 수직, 수평 방향의 간극 센서 신호를 나타낸다. 유연 모드 억제를 위한 제어기가 적절히 작동하여 자기 베어링의 부상이 테이블의 유연 모드를 가진하지 않았고, 그 결과로 간극 센서 신호가 깨끗해진 것을 볼 수 있으며 실험적으로도 같은 제어기를 사용하여 동일한 수준의 효과를 얻을 수 있었다.

6. 결론

ANSYS, ADAMS, Matlab/Simulink를 이용하여 동적 거동 통합 시뮬레이션을 수행하는 방법과 이를 통하여 자기 베어링 이송 시스템의 진동, 소음 문제를 해결하는데 적용한 예를 보였다. 소개한 방법은 기존의 시뮬레이션에서 파악할 수 없는 구조, 운동, 제어의 동적인 특성이 서로 맞물려 발생하는 현상을 해석할 수 있도록 해준다. 제시한 방법을 통하여 기계 가공시의 절삭력이 기계 구조

와 제어에 미치는 동적인 영향도 같은 틀 안에서 해석이 가능하리라 판단되며 추가적인 연구를 통하여 적용 결과를 보고할 예정이다.

References

- [1] Rigid-body dynamics and the ANSYS-ADMAMS interface, ANSYS 13.0 help file, Chapter 12, 2011, ANSYS 13.0, ANSYS Inc.
- [2] ADAMS/FLEX, ADM710 Course Notes, 2008, MSC MD ADAMS r3, MSC Software Corporation.
- [3] MD R3 Adams/Controls, ADM711 Course Notes, 2008, MSC MD ADAMS r3, MSC Software Corporation.
- [4] Brezina, T., Hadas, Z., Vetiska, J., 2011, Using of Co-simulation ADAMS-SIMULINK for Development of Mechatronic Systems, Proceedings of the 14th International Symposium on Mechatronika, 59-64.