

동역학 S/W와 연계한 회전체 제어의 모델링에 관한 연구

이원창*(창원대학교), 김성원(창원대학교 대학원), 김재실(창원대학교), 최현오(기계연구원)

A study on the Modeling for Rotors Control with Dynamics Analysis S/W

W. C. Lee(Mech. Eng. Dept., CWU), S. W. Kim(Mech. Eng. Dept., CWU), J. S. Kim(Mech. Eng. Dept., CWU), H. O. Park(KIMM)

ABSTRACT

This study provides the method to build the rotor system model using dynamic analysis software. also, it introduces the traditional methods of the rotor system modeling and informs the each merits and demerits. We will make up the flexible system of rotor system model with ADAMS, multi-body dynamics S/W, in order to develop dynamics model and get the response of plant model near to real model through connection the SIMULINK of MATLAB. We will develop the computing dynamics-controlling model possible controlled simulation similar to a real model with controlling the plant model.

Key Words : Flexible bod dynamics(유연체 동역학), Roror system(회전체), Flexible rotor control-유연회전체 제어

1. 서론

최근 컴퓨터 기술의 비약적인 발달은 기계분야의 제어 알고리즘 구현 및 시뮬레이션 과정에 있어서 하드웨어의 성능 문제로 기인한 여러 가지 제약을 극복하고 있다. 회전체 제어모델에 있어서 회전축을 모델링 하기 위한 전통적인 방법인 축의 질량과 강성 값을 이용한 전달함수를 작성하여 제어 모델의 플랜트로 사용하였다. 그러나, 컴퓨팅 시스템의 비약적인 성능 향상과 더불어 보다 정확한 결과를 위한 모델 구성을 하기 위해 회전축을 유한요소 모델로 구성된 상태공간모델을 작성하여 플랜트로 사용하고 있다. 그러나 제어모델에서 회전축의 정확한 거동을 파악할 수 있는 플랜트 모델을 만들기 위해서는 기존의 방법보다 더욱 직관적인 모델 구성 방법의 개발이 요구되고 있다.

한편 기구의 동적인 거동을 분석하고 거동을 예측하는 다물체 동역학 해석 프로그램의 경우 실물의 거동 분석을 위해 기계공학의 다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 있으며 그 결과 또한 신뢰할 만하다. 게다가 모델의 동작을 직관적으로 관찰, 분석 할 수 있는 장점이 있다. 회전체의 경우도 이

와 같이 다물체 동역학 프로그램을 이용해 실제 회전 시와 같은 환경을 조성한 후 회전 시 발생하는 거동을 파악할 수 있으며 그 정확성 역시 신뢰할 수 있다. 하지만, 다물체 동역학 해석 상용소프트웨어 자체만으로 제어 모델을 만들거나 제어 시뮬레이션을 수행하는 기능은 대단히 미비한 상태이거나 존재하지 않는다. 뿐만 아니라 다물체 동역학 해석 상용소프트웨어의 경우 일반적으로 해석을 위한 연산시간이 많이 필요한 단점도 있다. 그러나, 컴퓨터 시스템의 비약적인 성능 향상으로 인한 컴퓨팅 연산속도의 향상은 모델이 비교적 단순한 유연 회전축의 경우는 연산시간이 문제되지 않는다.

본 연구에서는 다물체 동역학 상용 소프트웨어인 ADAMS를 이용하여 유연 회전체 모델을 구성하고 여기에 제어시스템 시뮬레이션에 널리 이용되고 있는 MATLAB의 SIMULINK와 연계하여 유연 회전체 제어 모델을 구성함으로써 다물체 동역학 해석 프로그램을 통한 좀더 실물에 근접한 플랜트 모델의 응답을 얻어 내고 이를 이용하여 플랜트 모델을 제어함으로써 실제 모델과 유사한 제어 시뮬레이션이 가능한 전산 동역학-제어 모델을 개발하고자 한다.

2. 회전체 시스템의 제어 모델링

2.1 전달함수를 이용한 회전체 모델링

전달함수를 이용하는 것은 시스템을 모델링하는 가장 고전적인 방법의 하나로 회전체 시스템 역시 일반적인 진동시스템의 하나로 볼수 있으므로 다음과 같은 지배방정식으로부터 회전체모델의 전달함수를 유도한다.

$$\ddot{M}x + \dot{C}x + Kx = F \quad (1)$$

여기서

M : total mass matrix of the rotor system

C : damping matrix of the rotor system

K : stiffness matrix of the rotor system

이고 이를 라플라스 변환하여 전달함수의 형태로 만들면 일반적으로 다음과 같이 전달함수가 구성된다.

$$\frac{1}{MS^2 + CS + K} \quad (2)$$

이와 같이 전달함수를 이용한 회전체 시스템 모델링은 상당히 간단하며 컴퓨터를 이용한 계산 시에도 계산시간이 짧다는 장점이 있으나 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 먼저 위식의 전달함수는 SISO(Single input single output)시스템의 플랜트 모델이라는 것이다. 회전체 시스템을 제어하기 위해서는 최소한 2축에 대한 제어가 이루어져야 하므로 MIMO(Multi input multi output)시스템으로 구성하는 것이 일반적이다. 그러므로 위와 같은 방법으로 시스템을 모델링 할 때는 항상 다른 축과의 연성을 고려한 전달함수를 구성하거나 또는 연성효과를 무시할 만큼 작은 경우 한축에 관한 모델링만으로 충분함을 검정해야 한다. 그러나 이러한 모델의 경우 회전체가 가지는 다양한 거동을 모델링하지 못한다는 단점이 있다. 일반적인 질량-감쇠-스프링 진동모델과 달리 회전체의 경우 회전으로 발생하는 다양한 거동이 존재하므로 이와 같이 전달함수로 모델링 할 경우 모델에 따라 실제 회전축의 거동과 시뮬레이션상의 모델에 거동한 상당한 차이를 야기할 수 있다.

2.2 상태공간 방정식을 이용한 회전체 모델링

상태공간 방정식을 이용한 회전체 시스템의 모델링 과정은 유한요소법을 이용하여 축의 M, C, K 행렬을 구한 후 이를 유한요소 모델로 구성하는 순서로 이루어진다.

회전체 시스템은 다음과 같이 다자유도계의 진동

시스템으로 모델링 할 수 있다.

$$\overline{M}\ddot{\overline{X}} + \overline{C}\dot{\overline{X}} + \overline{K}\overline{X} = \overline{F} \quad (3)$$

여기서,

\overline{X} : 각 노드당 2회축의 변위 및 각 변위를 포함하는 회전축의 변위벡터

\overline{M} : mass matrix of the rotor system

\overline{C} : damping matrix of the rotor system

\overline{K} : stiffness matrix of the rotor system

예를 들면 그림과 같은 회전체가 있을 경우 유한요소법을 이용해 노드당 4자유도를 가지는 2노드 보요소를 이용하여 이산화 하면 각각의 M, C, K 행렬을 얻을 수 있다.

이를 상태공간 모델 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{I}\dot{\overline{Z}} = \overline{A}\overline{Z} + \overline{B}\overline{U} \quad (4)$$

여기서

$$\overline{A} = \begin{bmatrix} \overline{M}^{-1}\overline{C} & \overline{M}^{-1}\overline{K} \\ -\overline{I} & \overline{0} \end{bmatrix}$$

$$\overline{B} = \begin{bmatrix} \overline{M}^{-1} \\ \overline{0} \end{bmatrix}$$

$$\overline{Z} = [\overline{X}' \overline{X}]^T$$

(4)식은 단일입출력 상태공간모델의 일반적인 형태와 동일하나 각 항이 벡터와 행렬로 확장되어 표시된다는 것에 유의한다.

출력방정식은 다음과 같다.

$$\overline{Y} = \overline{C}\overline{Z} \quad (5)$$

(5)식에서 $\overline{Z} = [\overline{X}' \overline{X}]^T$ 로 상태공간모델과 같다. 이 중에서 \overline{C} 를 적절히 구성하여 유한요소모델에서 원하는 노드의 출력값을 표시할 수 있다.

상태공간 모델이 가지는 장점은 모델링의 정확성 이라고 할 수 있다. 유한요소모델을 이용함으로써 회전체가 가지는 Flexible 모드의 거동이 나타날 수 있도록 함으로서 실제 모델과 시뮬레이션과의 차이를 좀더 줄일 수 있다. 일반적으로 요소가 많게 만들어진 모델일수록 좀더 정밀한 결과를 제공하는 유한요소모델의 단점으로 인해 정밀한 모델링의 경우 상태공간 모델의 A, B, C, D 행렬의 크기가 커진다는 단점이 있다. 이로 인해 모델이 복잡해지고 계산시간이 전달함수를 이용한 모델에 비해 길어지게 된다.

3. 동역학 S/W를 이용한 회전체 제어모델의 구성

회전체를 제어모델로 만들기 위해 기존에 사용되었던 전달함수나 상태공간 모델 대신 동역학 S/W를 이용하여 구성된 플랜트 모델을 연동하여 동역학 제어모델을 구성하였다. 이와 같은 방법의 장점은 동역학 프로그램의 신뢰할 수 있는 예측응답을 제어모델에 적용할 수 있다는 점이다. 모델 구성은 상용 다물체 동역학 프로그램인 ADAMS를 이용한 플랜트 모델의 구성과 Matlab Simulink로 작성된 제어기 부분을 연동을 통해 제어모델을 구성하는 과정으로 진행하였다.

3.1 ADAMS를 이용한 회전체 모델 구성

회전체의 모델은 그림과 같이 양끝단이 베어링으로 지지되고 가운데 디스크를 가지며 디스크에 비해 축 직경이 상당히 작은 Jeffcott rotor kit의 형상을 응용하여 모델링 하였다.

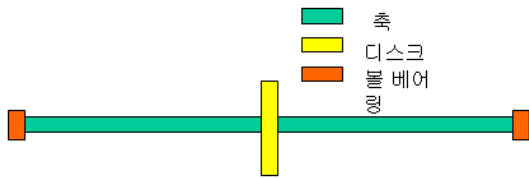


Fig.1 concept of Jeffcott rotor system

Fig. 2는 ADAMS 상에서 구성된 회전체의 모델로서 베어링의 경우 회전만 가능하도록 회전자유도를 제외한 자유도는 구속하였고 한쪽 끝에서 회전을 주었다. 정확한 거동을 살펴보기위해서 유연체로 모델링이 필요하므로 먼저 형상에 따른 강체 모델링을 실시한 후 유연체로 구성하기 위해 Fig. 3과 같이 모드해석을 실시하고 해석결과를 이용해 강체로 모델링된 회전축을 유연체로 교체하였다.

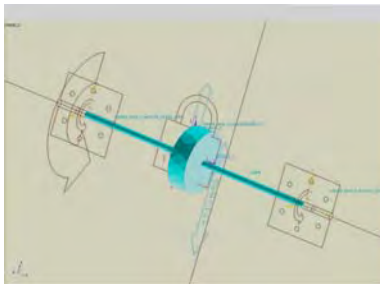


Fig. 2 Rigid body plant model By ADAMS

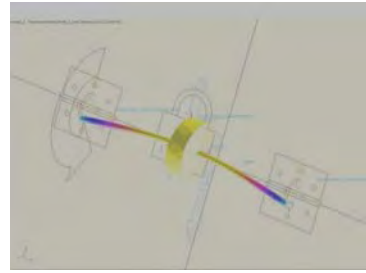


Fig. 3 Result of model analysis by ADAMS

3.2 Matlab Simulink와 동역학 모델의 연계

Simulink상에서의 모델은 Fig. 4와 Fig. 5처럼 제어기가 포함된 모델과 제어기가 없는 모델을 작성하여 제어효과를 비교하도록 하였다.

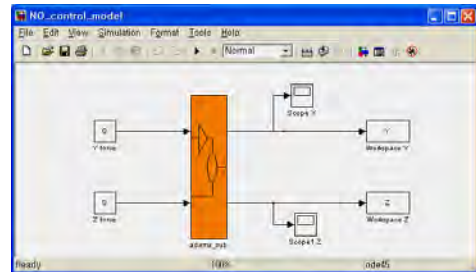


Fig. 4 Simulink model without Controller

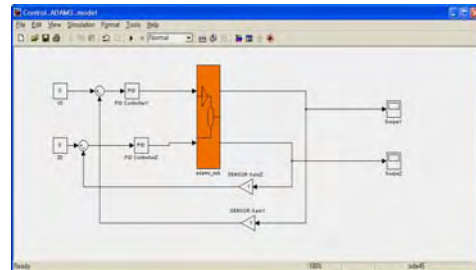


Fig. 5 Simulink model without PID Controller

Simulink 상의 플랜트 모델은 ADAMS의 Control product를 이용해 Subsystem 블록으로 구성하였다. 구성된 플랜트는 가운데 디스크 부분에서 두 x, y 반경방향으로 변위 데이터를 출력하며 입력으로 두 반경 방향 제어력을 입력 하는 MIMO 시스템을 구성하였다. 제어기가 없는 모델은 입력을 0으로 하고 출력을 보는 간단한 구조이고 제어기가 있는 모델의 경우 가장 일반적으로 사용되는 제어알고리즘인 PID와 측정값이 센서에서 나오는 신호이므로 Sensor Gain을 추가한 폐환 시스템을 구성하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4의 제어가 없는 모델의 반경방향 축 진동량은 Fig. 6과 같다. 그래프의 범위는 가로 세로 2.5×10^{-4} 로 동일하며 두 축 모두 초기에 진동이 심하게 발생한다.

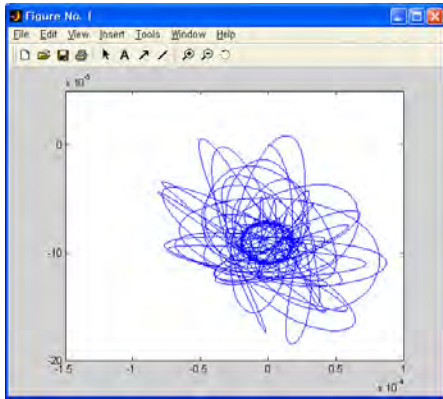


Fig. 6 Result form Simulink model without Controller

Fig. 5의 제어가 포함된 모델에서 적절한 P 게인값과 D 게인값을 적용하여 Fig. 7과 같이 진동량을 감소시킬 수 있었다. 정상상태에 이르렀을 때의 진동량 감소량은 거의 없는데 이는 모델자체의 개선을 통해 불평형 질량을 부가하는 등의 회전체 모델의 개선이 필요한 것으로 보인다.

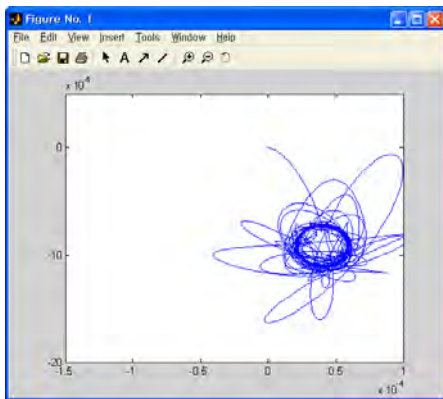


Fig. 7 Result form Simulink model with Controller

5. 결론

본 연구는 회전체의 제어모델 개선을 위해 실물과 제어 플랜트의 모델링 오차를 개선하기 위해 기존의 전통적인 모델링 기법이 아닌 다물체 동역학

해석기법과의 연계를 시도하였다. 다물체 동역학 해석용 회전체 모델을 개발하고 이를 제어모델에 연계함으로써 보다 정확한 동역학 모델 거동을 제어 시뮬레이션에 활용 할 수 있다. 앞으로 다양한 제어알고리즘의 적용과 회전체의 동역학 모델링 기법에 관한 심도있는 연구를 통해 제어 시뮬레이션의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 계기를 마련할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술연구센터 및 산업자원부 IT기반 나노제어시스템 개발사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Gosiewski, Z., "Automatic Balancing of Flexible Rotors, Part I: Theoretical Background," Journal of sound and vibration, Vol. 100, pp. 551-567, 1987.
2. 문종덕, 김봉석, 김도형, 이수훈, "공작기계 주축시스템의 능동밸런싱 장치에 관한 연구," 한국소음진동공학회지, 제15권, 제3호, pp.297-305, 2005.
3. Coombs, T., A., Campbell, A., M., Cardwell, D., A., "Development of an Active Superconducting Magnetic Bearing," IEEE Transactions on Applied Superconductiy, Vol. 5, pp. 630-633, 1995
4. ISO 11342, "Mechanical vibration Methods and criteria for the mechanical balancing of flexible rotors," Second edition, 1998-04-15.
5. 이원창, 김성원, 김재실, 최현오, "위상조절법에 의한 유연 회전체의 능동제어에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 280-283, 2005.
6. 김종수, 박현규, 이수훈, "고속 회전체의 능동밸런싱에 관한연구 (I): 능동 밸런싱 장치의 개발," 한국정밀공학회지, 제19권, 제4호, pp. 140-146, 2002.
7. Leonard, M., "Dynamics and Control of Structures," John Wiley & Sons, pp. 313-352, 1990.