한국기계가공학회지, 제10권, 제1호, pp. 87-92 (2011. 2)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10 No. 1, pp. 87-92 (2011. 2)

유연 회전축의 다물체 동역학 모델링 및 위상 조절법을 이용한 진동 제어

정훈형*, 조현민*, 김재실#, 조수용**

Multi-Body Dynamic Modeling for a Flexible Rotor and Vibration Control using a Novel Phase Adjusting Technique

Hoon-Hyung Jung*, Hyeon-Min Jo*, Chae-Sil Kim#, Soo-Yong Cho**

(Received 20 January 2011; received in revised form 31 January 2011; accepted 14 February 2011)

ABSTRACT

This article proposes a new technique of the dynamic model using multi-body dynamic analysis tool for a flexible main spindle rotor system with a novel phase adjusting control technique for the purpose of an active control of rotor vibration. The dynamic model is used as a plant model. Also in order to make control system, a component parameters and phase controller is composed and simulated by SIMULINK. The vibration is reduced to 50%. Therefore the ADAMS dynamic model for the flexible main spindle rotor and the phase adjusting control techniques may be effective for the suppressing the vibration and helpful for the future active control for rotor vibration.

Key Words : Micromachining(미세가공), Micro-Structures(마이크로 구조물), EDM(방전가공), Micro-EDM(마이크로 방전가공)

1. 서 론

공기 베어링, 마그네틱 베어링 등과 같이 능동적인 제어가 가능한 베어링에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며 회전 기계의 정확성, 효율성 및 속도를 향상하는데 사용되고 있다. 능동 제어에 의한 진동 억제는 주축 로터의 성능에 직접적인 연관 관계가 있다. 진동을 극복하기 위하여, 능동 베어링-주축 로터 시스템의 제어 기법과 제조 기법들이 연구되고 있다[1-2].

제어 영역에서 PID, Fuzzy, Feed-forward 등등 많은 고전적 연구가 수행되었다[3]. 그러나 그들은 현대 주축 로터에서 요구되는 속도와 정확성과 대면하기에 충분하지 않다.

각각의 경우에 대한 경험적인 테스트는 많은 비용이 소모되기 때문에 시뮬레이션 기법이 필요하다. 위상 조절법을 이용하여 로터의 진동 제어에 대한 수치적인 상태 공간 모델에 관한 연구가 수행되고

* 창원대학교 대학원 기계공학전공
# 교신저자 : 창원대학교 기계공학전공
E-mail : kimcs@changwon.ac.kr
** 경상대학교 기계항공공학부

있지만[4], 단순 회전체에 대한 실효성을 판단하기 위한 정도로써 고속 주축 로터의 정확한 플랜트 모델로는 만족스럽지 못하다. 따라서 능동 베어링-주축 로터 시스템에 대한 시뮬레이션 수행을 위해 제어 모델과 주축에 대한 정확한 동역학 모델이 필요하다.

본 논문에서는 먼저 상용 다물체 동역학 해석 툴인 ADAMS를 사용하여 유연한 주축 로터의 동역학 모델을 제안하여 플랜트 모델로 사용한다. 그리고 소개된 주축 로터의 위상 조절 제어 기법을 이용하여 SIMULINK 모델을 구성한다. 마지막으로 두 모델을 결합하고 동시에 해석을 수행한다.

2. 유연 주축 로터의 다물체 동역학 플랜트 모델

상용 다물체 동역학 해석 툴인 ADAMS의 "Auto flex" 모듈에서 유연 주축 로터에 대한 동역학 모델은 만족할 만큼 정확하지 않을 수 있다. 따라서 Fig. 1에 보는 것과 같이 유연 주축 로터의 더욱 정확한 모델을 구축하기 위한 과정을 제안한다.

우선 상용 유한요소 해석 툴인 ANSYS를 이용하여 유연한 주축 로터 모델을 만들고 모달 해석을 수행한다. ANSYS 모델에서 계산된 고유진동수를 다른 상용 회전체 동역학 해석 툴인 ARMD와 비교한다. 그리고 ANSYS에서 추출된 모드의 특성을 가지고 있는 모델을 만든다. 여기서 ADAMS 제어 모듈에서 입력과 출력이 정의된 다물체 동역학 유연 주축 로터 모델에 대한 MATLAB의 M-file을 생성한다. 마지막으로 이것을 SIMULINK에서 진동 제어를 위한 플랜트 모델에 적용시킨다.

2.1 유연 주축 로터의 유한요소 모델링

본 연구에 사용된 주축은 연삭기 등에 사용될 수 있는 공작기계용 주축이다. 주축의 직경은 60mm 이고 총길이는 360mm 이다. Fig. 2는 주축 로터 시스템에서 주축과 베어링이 결합된 설계 도면을 나타내고 있다. 이 그림에서 A부분은 베어링이 설치될 위치이고 B부분은 40,000RPM 급 내장형 모터가 설치되는 위치이다. 베어링의 특성값은 업체에서 제공된

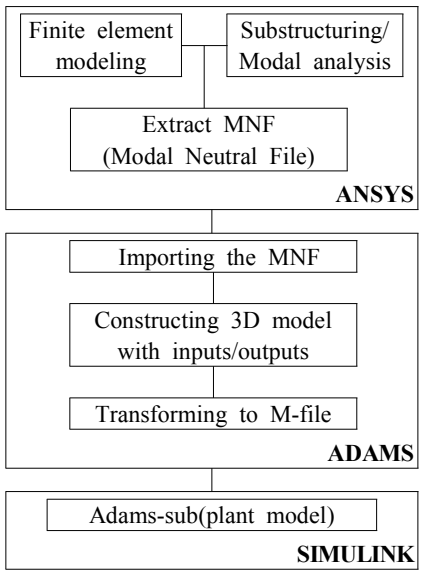


Fig. 1 Procedure for constructing the dynamic plant model of flexible rotor

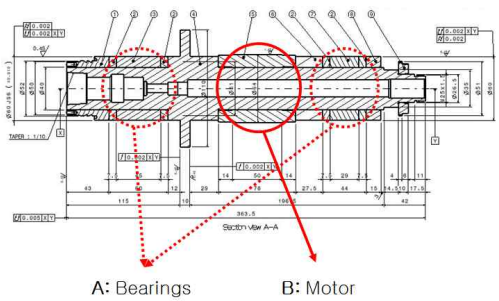


Fig. 2 Drawing of flexible rotor with air-magnetic hybrid bearings driven by a built-in motor

되는 위치이다. 베어링의 특성값은 업체에서 제공된 값을 사용하였으며 K = 54.08N/mm^2, C = 0.014 N/mm^2 이다. 베어링 위치의 중심부에 노드를 생성시켜 그 특성값을 입력하였다.

Fig. 3은 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 구축한 주축의 유한요소모델이다. 이 주축의 모달 해석을 통하여 모드별 고유진동수를 구하였다. 주축은 3차원 8-노드 솔리드 요소(Solid 45)를 사용하였다. 베어링은 결합 요소(Combine 14)를 사용하여 지지점에 적용하였다.

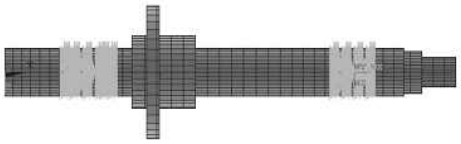


Fig. 3 Finite element rotor model in ANSYS

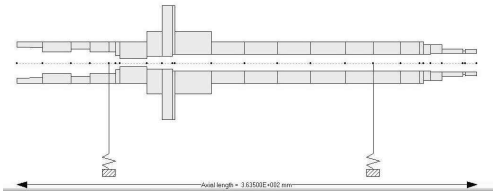


Fig. 4 Finite element rotor model in ARMD

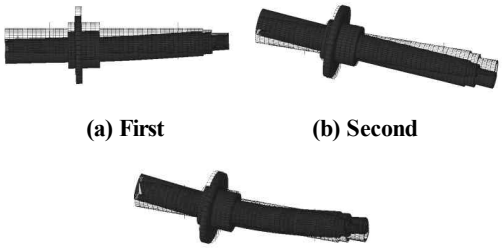
ANSYS를 이용한 모델이 동역학 프로그램에서 유연 주축으로 사용이 되기 때문에 정확성의 검증이 필요하다. 그래서 정확성을 검증하기 위하여 회전체 전용 해석 프로그램인 ARMD를 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 베어링 파트의 중심 노드에 베어링 특성을 적용하였고, 2-노드 빔 요소를 사용하여 주축을 구성하였다. 그리고 ARMD를 이용하여 모달 해석을 수행하여 모드별 고유진동수를 구하였다.

ANSYS와 ARMD에서의 추출된 모드를 확인한 결과 비슷한 구역에서 각 모드가 발생하였으며 해석 수행 결과를 Table 1에 나타내었다. ANSYS와 ARMD의 해석결과가 2차 모드에서 조금의 차이(약 10%)가 나타났다. 이러한 오차는 두 프로그램상의 자유도 차이로 인해 발생할 수 있다. 나머지 모드에서는 비교적 정확하다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5는 ANSYS 모델에서 주축이 회전할 때 발생하는 각 모드 형상을 나타내고 있다. 이러한 주축의 동적 거동은 매우 합리적이다. 따라서 ANSYS 모델의 정확성이 검증된다.

이 모드를 추출하여 동역학프로그램으로 삽입함으로써 연동 해석을 수행한다. Fig. 6은 ADAMS의 “Export to ADAMS” 모듈을 이용하여 모드를 포함한 주축 모델의 MNF를 추출하는 과정을 나타낸다.

Table 1 Natural frequencies(Hz) from both ANSYS and ARMD

Mode	First	Second	Third	Fourth
ANSYS	558.3	750.2	1752.0	4014.6
ARMD	550.6	679.0	1737.7	4035.8



(a) First **(b) Second**

(c) Third

Fig. 5 Mode shape in each mode from ANSYS

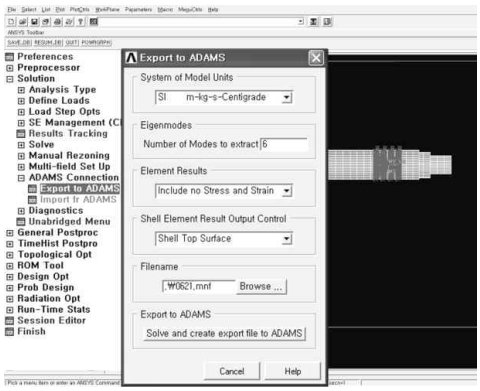


Fig. 6 Procedure for exporting the MNF(rotor model with modes) in ANSYS

2.2 유연 주축의 플랜트 모델

ANSYS 모델에서 추출한 MNF를 불러들임으로써 구축하는 ADAMS의 유연 주축 모델은 Fig. 7과 같이 추가적인 조인트와 인덱스 포인트, 구속, 회전 조건 등을 설정한다. 그리고 베어링 요소는 ADAMS의 부싱을 사용하여 K, C 값을 입력하였다. 그리고 질량 포인트는 베어링 부싱 중앙에 설정한다. Fig. 8의 “Point motion” 모듈은 각속도에 의해 스텝함수와 시

간, 회전축을 정의함으로써 회전 모션이 발생하여 모터의 위치에 RPM을 조절할 수 있다.

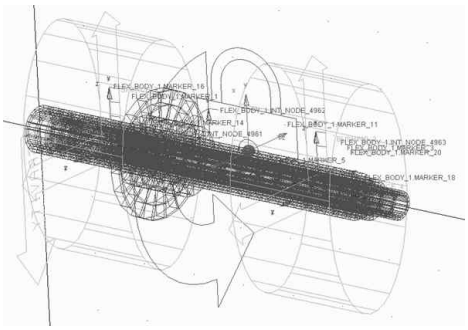


Fig. 7 Flexible body model of rotor in ADAMS

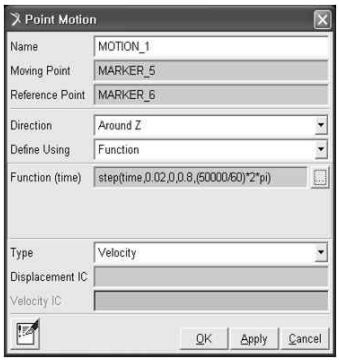


Fig. 8 Defining rotation of model in ADAMS

Fig. 9의 “Control toolkit”의 ”Plant output“ 모듈과 “Plant input” 모듈에서 주축 모델의 입력과 출력 변수가 정의 된다. 본 논문에서는 4개의 플랜트 입력으로 전면과 후면 양쪽 베어링에 횡방향의 제어력으로 작용하고, 4개의 플랜트 출력으로 전면과 후면 양쪽에 베어링의 중앙에서 발생되는 횡방향 진동이 있다. Fig. 10은 플랜트 입력을 정의하는 과정을 보여준다.

그 다음에 Fig. 11의 “Controls” 모듈의 ”ADAMS /Controls plant export“에서 MATLAB의 “Adams_ sub” 블록으로 다물체 동역학 유연 주축 모델의 입력과 출력은 변환된다. Fig. 12는 SIMULINK의 ”Adams_sub“ 블록을 상세하게 나타낸다. 이것은 능동 진동 제어를 위한 플랜트 모델에 적용된다.

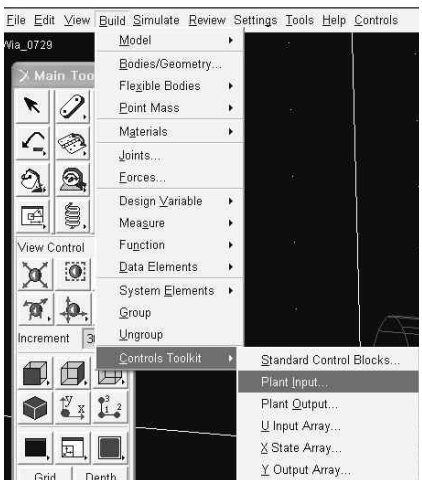


Fig. 9 Defining plant inputs and outputs

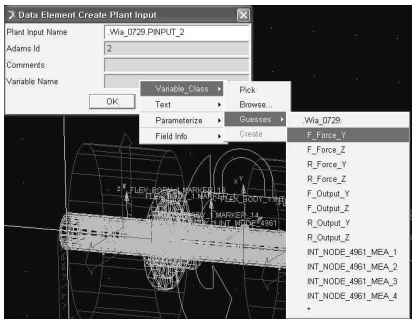


Fig. 10 Procedure for defining control force as a plant input

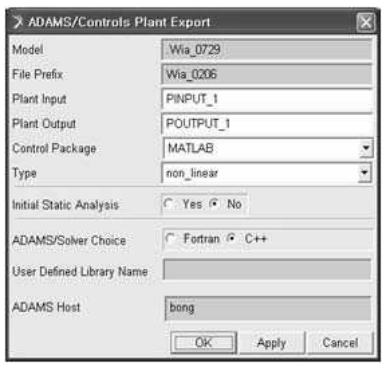


Fig. 11 Procedure for converting to "Adams_sub" block

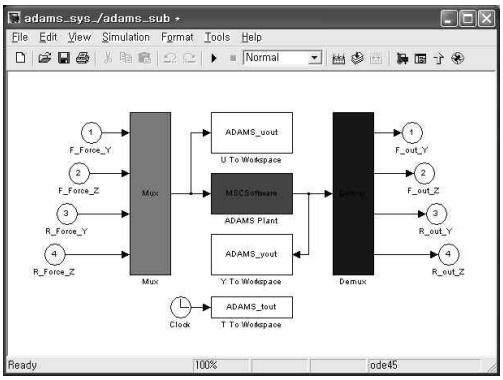


Fig. 12 Detail "Adams sub" block in SIMULINK

3. 고속 주축 로터의 위상 조절법

본 연구의 위상 조절법은 특정 주축 로터 속도 제어 기능에 초점을 맞추고 있다. 일정한 속도로 주기적인 가진력을 가진 주축의 동적 응답은 일반적으로 Fig. 13에 나타난 것처럼 주기적인 응답(진동)으로 표현된다.

Fig. 14에서 응답에 대한 반대 방향의 반주기 제어력을 더함으로써 진동이 줄어들 수 있다. 이러한 기술은 주축 로터에 대한 위상 조절법이라고 불려진다. Fig. 15에 SIMULINK에 구성된 위상 컨트롤러를 나타낸다.

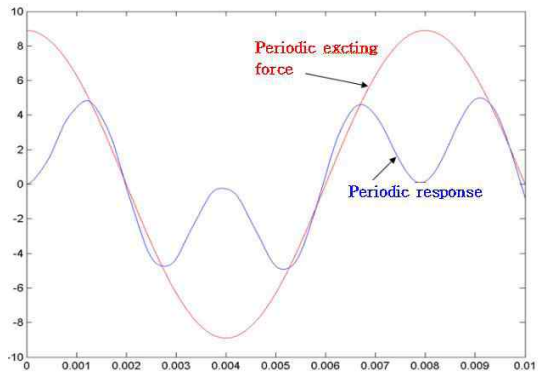


Fig. 13 Periodical input and output from general rotor system

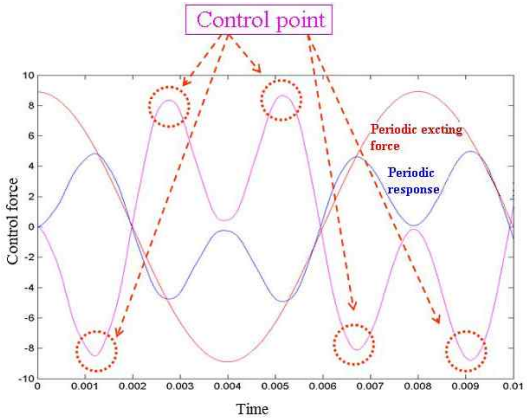


Fig. 14 Forcing point for control and periodical response

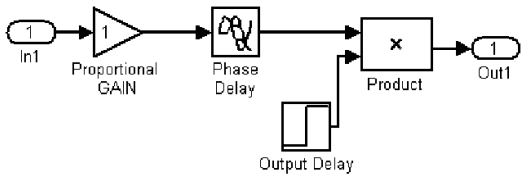


Fig. 15 Phase adjuster block in SIMULINK

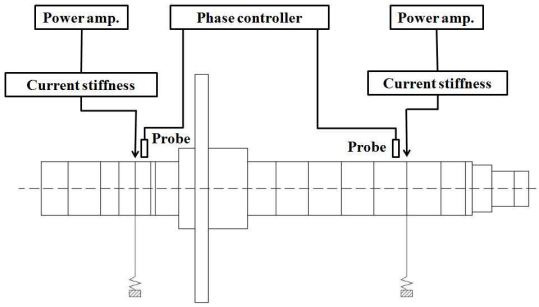


Fig. 16 Schematic of flexible rotor with control components

4. 유연 주축 로터의 진동 제어 모델

Fig. 16은 제어를 위한 구성성분과 유연 주축 로터의 모식도를 나타낸다. 베어링의 전류 강성은 90 N/Amp, 파워 엠프의 계수는 0.91, 프로브 감도는

10,000V/min 이다. 이 값들은 주축 로터 제조사에서 제공되었다. Fig. 17은 위상 조절 컨트롤러가 있는 유연 주축 로터의 “Adams_sub” 블록을 포함한 능동 진동 제어 시뮬레이션 모델을 보여준다.

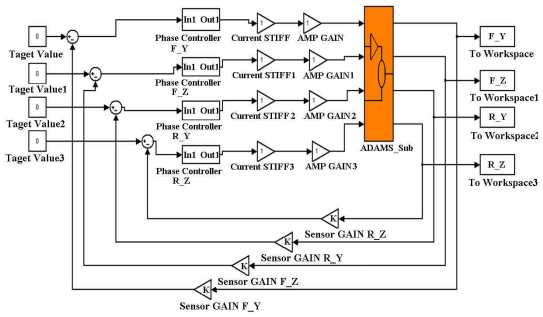


Fig. 17 Active vibration control simulation model for flexible rotor

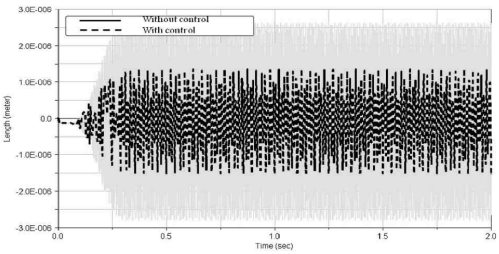


Fig. 18 Response at 40,000RPM

5. 결 론

본 연구에서는 위상 조절법을 이용하여 고속 유연 주축 로터의 진동을 제어하기 위하여 다물체 동역학 플랜트 모델을 구성하였다. Fig. 18은 40,000RPM에서 결합 모델에 대한 위상 조절 제어가 있을 때와 없을 때의 시뮬레이션 결과이며, 위상 조절 제어에 의한 진동 억제 효과는 약 50% 이다. 이로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고속 유연 주축 로터의 다물체 동역학 모델을 구축하고 이를 이용하여 SIMULINK 블록을 구성하였다.
2. 주축 로터의 진동을 제어하기 위한 방안으로 위상 조절법의 가능성을 제시하였다.
3. 이 기술은 향후 전문적인 시스템의 기초가 될 것으로 예상된다.

후 기

본 논문은 지식경제부 지방기술혁신사업 [RTI04-01-03] 지원과 2009~2010년도 창원대학교 연구비에 의하여 수행되었습니다.

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. Coombs, T., A., Campbell, A., M., and Cardwell, D., A.,, "Development of an Active Superconducting Magnetic Bearing," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 5, pp. 630-633, 1995.
3. Harri Koskinen, Olli Lindgren, and Olavi Karasti, "Fussy logic in active magnetic bearing control", Fourth International Symposium on Magnetic Bearing, 1994.
4. C. S. Kim, W. C. Lee, "A Study on the Active Control for State Space Model of Flexible Rotors Using a Phase Control Method," Engineering Research & Technology, Vol. 6, pp. 71-75, 2006.
5. ISO, Mechanical vibration Methods and criteria for the mechanical balancing of flexible rotors, Second edition, ISO 11342:1998, 1998.
6. ADAMS/View, Version Adams 2005 r1, MSC. Software Corp., Santa Ana, 2005.
7. ANSYS, Release 10.0, ANSYS Inc., Canonsburg, PA 15317, 2006.
8. MATLAB, Version R14, The MathWorks, Inc., Natick, MA 01760-2098, 2005.