

위상 조절방법에 의한 유연 회전체의 능동제어에 관한 연구

이원창*(창원대학교 기계공학과), 김성원(창원대학교 기계공학과), 김재실(창원대학교 기계공학과), 최현오(한국기계연구원)

A study on the Active Control for Flexible Rotors Using Phase Control Method

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 performed by a previous research for the applying expert system to active vibration control algorithm. In order to increase productivity and efficiency, high-speed rotating machines become popular these days. They are likely to vibrate and cause machine failure even though they have small unbalance. Therefore, a high-speed rotating machine needs a balancing technique. ISO 11342 classifies flexible rotors in accordance with their balancing requirements and establishes methods of assessment of residual unbalance. But, even if they finished balancing work, they have harmful effect vibration under the high-speed rotating environment. This vibration effect is very small, but it must be removed for the improvement of the rotor's spin accuracy. This paper introduces a new active control method that remove the exciting force by a phase control. For this method, the high-speed rotating rotor was reconstructed by a flexible rotor model. The forces which excite the rotating system suppose cyclic forces, we obtain the responses by numerical method. And then through the pattern analysis about the vibraton responses, the controler generate the control force with the reverse phase and similar magnitude. This paper suggest an phase control method and shows how to improve the rotating vibration accuracy of the flexible rotor dynamics system using phase control method.

Key Words : Flexible rotor(유연 회전체), Expert system(전문가 시스템), Phase control method(위상조절법), Active control(능동제어)

1. 서론

최근 개발되고 있는 공작 기계의 주축 시스템이나 터보관련 회전기계는 능률향상을 위하여 점점 고속화, 대형화 되어가고 있는 추세이다. 이러한 회전체의 고속화에 따라 야기되는 소음과 진동은 시스템의 안정성과 가공 및 운전 정밀도 향상을 위해서 반드시 해결해야만 하는 문제이다. 특히 고속 회전체의 불평형 질량에 의한 진동은 진동의 크기가 회전속도의 제곱에 비례하고 임계 속도에 따라 무한히 증폭되므로 회전체 시스템 전체에 심각한 손상을 줄 수 있다.

일반적으로 이러한 불평형 질량에 의한 진동 제거를 위해 밸런싱(balancing) 작업을 필수적으로 시행하고 있으며 방법도 회전체의 정지 상태에서 보

정 질량을 탈부착하는 오프-라인(off-line) 밸런싱 뿐만 아니라 회전기계 작동중에 밸런싱 로터(rotor)를 이동 시켜 밸런싱 작업을 수행하는 온-라인(on-line) 능동 밸런싱¹등 다양한 방법이 연구되고 있다.

하지만, 이러한 방법으로 밸런싱 작업이 이루어진 회전체도 실제 운전시 원하는 오차 범위내의 정밀도가 나오지 않는 경우가 대부분이다. 이러한 문제점을 개선하고자 자기베어링을 이용한 능동 진동 제어에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다².

자기베어링은 전자기력을 이용한 비접촉식 지지 방식으로 회전축을 지지하므로 윤활이 필요없고 작동 온도 범위가 넓어 진공 중에서도 작동이 가능한 메카트로닉스적인 기계요소이다. 또한, 자기베어링은 비접촉식 지지방식으로 인해 마찰과 마멸이 거

의 없으므로 소음 및 진동 특성향상을 위해 고속 회전 기계와 고정밀 구동 장치에 적용되어 왔다³.

본 연구는 전문가 시스템을 제어 알고리즘으로 적용하기 위한 선행 연구로서 고속 회전체를 진동하게 하는 가진력과 이로부터 도출되는 응답 변위의 주파수, 위상 및 변위 분석을 통하여 주기성분을 갖는 가진력의 효과를 감소 시킴으로써 고속 회전체의 변위를 최소화하는 방법의 이론적 검증에 있다. 이를 위하여 실제 고속 회전축을 유연 회전축으로 모델링하여 MATLAB의 SIMULINK를 이용하여 제어 시스템을 구성하였다. 모델링된 유연 회전체를 수치해석적인 방법으로 해석하여 가진력과 제어력과의 관계를 규명하고 고속 회전체를 가진시키는 성분을 주기적인 성분으로 가정하고 가진력에 대한 응답 성분을 제한하여 주파수와 위상을 분석하였다. 가진력과 90~180 사이의 위상차를 갖고 가진력과 스케일이 같은 제어력을 발생시켜 진동 발생 원인에 지대한 영향을 미치는 주기성분을 제거하는 위상조절법을 제안한다. 지속적으로 유효한 제어력 발생을 위해 제어기의 이득값과 위상 조절 계수들은 회전시스템 동작중 동적으로 변화되도록 구성하였다. 제안된 기법은 수치해석적인 방법으로 능동제어를 시도하여 유효성을 검증하였다. 본 연구에서는 고속으로 회전하는 회전체를 런-아웃(run-out) 상태에서 자기베어링을 이용하여 진동을 능동적으로 제어하여 회전정밀도를 높일 수 있는 제어 알고리즘의 이론적인 검증을 하고자 한다.

2. 탄성회전체 동역학

2.1 탄성회전체의 모드 형상

회전체의 모드들은 감쇠 효과를 무시하면 굽힘 주모드(flexural principal modes)이고 모든 방향에서 동일한 반경강성을 가진 베어링으로 지지된 특별한 경우 Fig. 1과 같은 회전 평면 곡선(rotation plane curve)으로 표현된다. 회전체의 모드 형상과 불평형에 대한 응답은 베어링과 베어링 지지부의 동특성 및 축방향 위치에 의해 매우 큰 영향을 받는다⁴.

3. 위상조절법을 이용한 유연 회전체의 능동제어

3.1 위상조절법

전문가 시스템을 제어 알고리즘으로 적용하기 위한 선행 연구로서 전문가 시스템의 추론엔진 부분의 자율 학습 자료를 위한 근거와 자료의 데이터 베이스를 위한 좋은 경향에 대한 이론적 자료로 시도되었다.

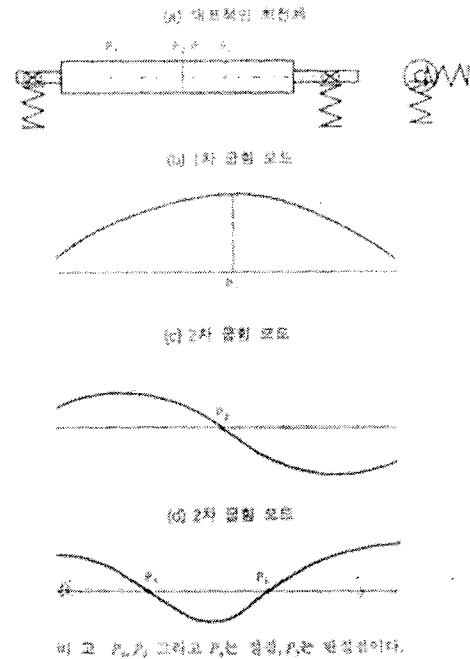


Fig. 1 Simplified mode shapes of the flexible rotor

단순 회전체에서 실험에서와 같이 시스템의 질량이 변화되어도 그 변화율이 작다면 임계속도와 전달함수의 크기에 대한 영향이 거의 없다⁵. 또한 탄성 회전체에서 주어진 불평형 분포에 대한 모드 불평형은 탄성 회전체 모드의 함수로 Fig. 1 단순화된 회전체에 대해 특정 모드에서의 불평형 보정 효과는 보정면의 축방향 위치에서의 모드 형상의 서로좌표에 따라 결정된다⁴.

뿐만 아니라 능동 밸런싱에 관한 기존의 연구에서 밸런싱 이전에 제어 프로그램의 이득 행렬을 미리 측정하여 사용하는 기법이 효율적이라 언급하고 있다⁶.

위상조절법은 고속으로 회전하는 유연회전체에서 유연 회전체를 진동하게 하는 가진력은 회전속도에 종속이며 진동면을 따라 서로 수직인 두 방향의 주기 성분이라 가정하고 이로부터 도출되는 응답 변위의 주파수, 위상 및 변위 분석을 통하여 주기성분을 갖는 가진력의 효과를 감소시킬 수 있는 반 위상차 제어력을 예측 적용 시킴으로써 고속 회전체의 변위를 최소화하는 방법이다. 부연하면 고속 회전체를 가진시키는 성분을 주기적인 성분으로 가정하고 가진력에 대한 응답 성분을 제한하여 주파수와 위상을 분석하였다. 가진력과 90~180 사이의 위상차를 갖고 가진력과 스케일이 같은 제어력을 발생시켜 진동 발생 원인에 지대한 영향을 미

치는 주기성분을 제거하는 것이다. 지속적으로 유효한 제어력 발생을 위해 제어기의 이득값과 위상 조절 계수들은 회전시스템 동작중 동적으로 변화되도록 구성하였다.

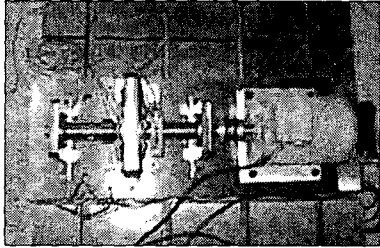


Fig. 2 Test rig set of the high speed shaft system

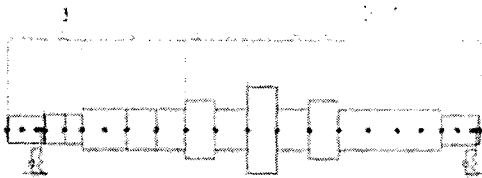


Fig. 3 Configuration of the shaft fe model

3.2 유연회전체 모델링

위상조절법의 실효성을 알아보기 위하여 실제 고속 회전하는 Fig. 2과 같은 실험 모델을 Fig. 3과 같이 축의 연성을 고려하여 노드당 4 자유도를 가지는 2노드 보요소를 이용하여 이산화 하였다.

3.3 유연회전체의 상태공간 모델

회전축을 유연회전축으로 모델링하여 MATLAB의 SIMULINK를 이용하여 제어 시스템을 구성하기 위해 먼저 유연회전체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\overline{M} \ddot{\overline{X}} + \overline{C} \dot{\overline{X}} + \overline{K} \overline{X} = \overline{U} \quad (1)$$

여기서,

\overline{X} : 각 노드당 2평축의 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

이를 상태공간 모델 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\overline{Z}} = \overline{A} \overline{Z} + \overline{B} \overline{U} \quad (2)$$

여기서

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

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

$$\overline{Z} = [\overline{X} \quad \dot{\overline{X}}]^T$$

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

출력방정식은 다음과 같다.

$$\overline{Y} = \overline{C} \overline{Z} \quad (3)$$

(3)식에서 $\overline{Z} = [\overline{X} \quad \dot{\overline{X}}]^T$ 로 상태공간모델과 같다. 이 중에서 \overline{C} 를 적절히 구성하여 유한요소모델에서 원하는 노드의 출력값을 표시할 수 있다.

상태공간모델 (2)식과 출력방정식 (3)식을 이용하여 상용 소프트웨어인 MATLAB의 SIMULINK를 이용하여 상태공간모델을 구성하면 Fig. 4와 같다.

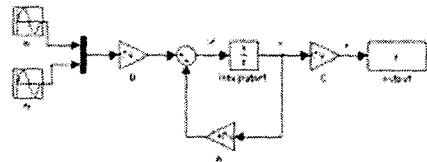


Fig. 4 The state space model of the flexible rotor

3.4 유연회전체의 상태공간 모델 해석

해석을 위하여 Fig. 3과 같은 21개의 절점과 20개의 요소를 갖는 유한요소모델로 구성하였다. 회전체를 지지하는 베어링은 2개로 전방 2번 절점과 후방 18번 절점에 위치한다. 베어링의 강성 값은 $10.0E+06$ N/m로 모두 동일하게 하였다. 축을 가진시키는 불평형력은 11번 절점에 축방향과 서로 수직한 두 개의 분력으로 적용하였다. 자기 베어링은 액츄레이터(actuator)와 같은 역할을 수행하면서 제어 효과가 극대화 될 수 있도록 가진력이 작용하는 11번 절점에 장착하였다.

고속 회전체를 구성하여 해석과 제어 응답 분석을 수행하였다. Fig. 5는 제어가 이루어지기전의 11번 관심 절점에서의 응답을 나타내고 있다.

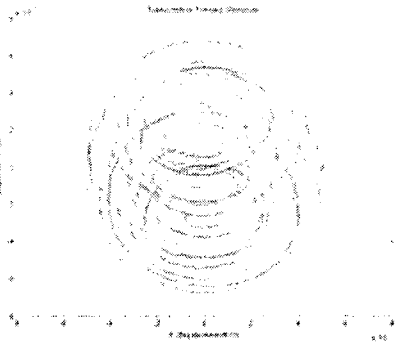


Fig. 5 Non controlled forced vibration response

x 방향으로 $-5 \sim +5 \cdot 10^{-7}$ m, y 방향으로 $-7 \sim +7 \cdot 10^{-7}$ m의 진동변위가 발생된다.

Fig. 4의 상태공간모델에 위상조절 제어기와 자기베어링 관련 매개변수를 고려하여 MATLAB의 SIMULINK를 이용하여 상태공간모델을 구성하면 Fig. 6과 같다.

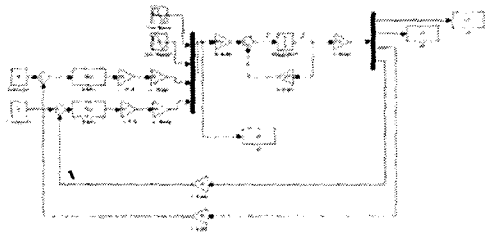


Fig. 6 The state space model of the flexible rotor with a controller

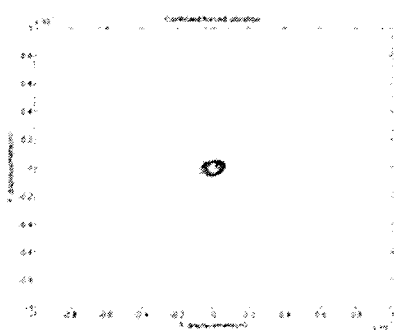


Fig. 7 Under the controlled forced vibration response

Fig. 7은 위상조절 제어기를 적용하여 동일한 고속 회전체의 해석과 제어 응답 분석을 수행하였을 때의 결과이다.

x 방향으로 $-8 \sim +8 \cdot 10^{-9}$ m, y 방향으로 $-7 \sim +7 \cdot 10^{-9}$ m의 진동변위가 발생된다.

제어 전후 약 90%의 진동에 의한 변위 감소 효과

가 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 전문가 시스템을 제어 알고리즘으로 적용하기 위한 선행 연구로서 가진력과 90~180 사

이의 위상차를 갖고 가진력과 스케일이 같은 제어력을 발생시켜 진동 발생 원인에 지대한 영향을 미치는 주기성분을 제거하는 위상조절법을 제안하였다. 지속적으로 유효한 제어력 발생을 위해 제어기의 이득값과 위상 조절 계수들은 회전시스템 동작중 동적으로 변화되도록 구성하였다. 제안된 기법은 수치해석적인 방법으로 고속 유연회전체에 능동제어를 시도한 결과 약 90%의 진동 감소 효과를 볼 수 있었다. 위상조절법은 고속 회전체의 진동 능동제어에 유효한 방법임을 보여주었다. 이제는 실제 실험 장치에 적용하여 하여 문제점을 보완하여야 할 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 Superconductivity, 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. 김봉석, 김종수, 이수훈, "영향계수를 이용한 고속 주축시스템의 자동밸런싱 기법에 관한 연구." 한국정밀공학회지, 제18권, 제8호, pp. 48-53, 2001.
6. 김종수, 박현규, 이수훈, "고속 회전체의 능동밸런싱에 관한연구 (1): 능동 밸런싱 장치의 개발," 한국정밀공학회지, 제19권, 제4호, pp. 140-146, 2002.