

HDD 용 구동 및 현가 장치의 축소 진동 모델의 생성 및 해석

한정삼* (안동대학교 기계공학부)

Generation and Analysis of Reduced Vibration Models for a HDD Actuator and Suspension System

Jeong Sam Han (School of Mechanical Engineering, Andong National University)

ABSTRACT

In the case of mechanical control systems, it is highly useful to be able to provide a compact model of the mechanical system to control engineers using the smallest number of variables, while still providing an accurate model. The reduced mechanical model can then be inserted into the complete mechanical control system models and used for system-level dynamic simulation. In this paper, a moment-matching based model order reduction (MOR) which reduces the number of degrees of freedom of an original finite element model via the Arnoldi process is considered to study the dynamic responses of a HDD actuator and suspension system.

Key Words : Model order reduction (모델차수축소법), Finite element method (유한요소법), Krylov subspace (크리로프 부공간), Frequency response (주파수 응답), Arnoldi process (아놀디 과정), HDD (하드디스크 드라이브)

1. 서론

유한요소법은 공학시스템의 해석 및 설계시 시스템의 동역학 특성을 얻기 위하여 널리 이용되는 방법의 하나이다. 그런데, 이 경우에 시스템의 기계적인 부분을 원래의 응답 특성을 충분히 정확하게 나타내면서도 최대한 작은 축소모델로 표현할 수 있다면 이 축소모델은 기계와 제어 부분으로 구성된 전체 시스템에 이용되어 전체 시스템의 동역학 특성을 규명하는데 유용하게 활용될 수 있다. 이렇듯 효율적인 해석을 위하여 초기의 대형 유한요소 모델의 차수를 줄인 축소모델에 대한 연구는 기계 구조물의 진동해석, 각종 회로해석, 미소기전시스템의 동해석, 열해석 등에 널리 이용되고 있다.⁽¹⁾

본 논문에서는 모델차수축소법의 한 방법인 모멘트 일치법(moment-matching method)에 근거한 축소모델생성프로그램 mor4ansys⁽²⁾을 이용하여 HDD 용 구동 및 현가 장치의 진동 특성을 해석하고자 한다. 또한 축소모델과 초기 유한요소모델과의 오차를 축소모델의 차수에 따라 비교하고자 한다.

2. 이차 시스템의 모델차수축소법

구조물의 일반적인 운동방정식은 다음의 이차 상미분방정식으로 표현되며

$$\begin{aligned} M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) &= Bu(t) \\ y(t) &= L^T x(t) \end{aligned} \quad (1)$$

이 때, t 는 시간변수, $x(t)$ 는 상태변수벡터, $u(t)$ 는 입력하중벡터, 그리고 $y(t)$ 는 출력벡터를 의미한다. 상태변수벡터, 입력하중벡터, 출력벡터의 차수는 각각

N, m, p 이다. 모델차수축소법의 기본 개념은

$$x(t) \equiv Vz(t) \quad \text{where } z(t) \in \mathbb{R}^n, \quad n \ll N \quad (2)$$

의 관계를 만족하는 부공간(subspace) $V \in \mathbb{R}^{N \times n}$ 을 구함으로써, 초기의 큰 차수의 $x(t)$ 의 응답을 작은 차수의 벡터 $z(t)$ 로 근사화 하는 것이다. 따라서, V 를 구한 후에 초기 상미분방정식을 V 에 투영시키면 식(1)은 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned} M_r \ddot{z}(t) + C_r \dot{z}(t) + K_r z(t) &= B_r u(t) \\ y(t) &= L_r^T z(t) \end{aligned} \quad (3)$$

위에서 축소행렬은 $M_r = V^T M V$, $C_r = V^T C V$, $K_r = V^T K V$, $B_r = V^T B$ 및 $L_r = V^T L$ 로 표현된다. 이 때, 축소모델의 차수는 $n \ll N$ 이고, 축소모델에서 입력하중벡터 $u(t)$ 와 출력벡터 $y(t)$ 의 차수는 초기와 비교하여 변동이 없음을 알 수 있다.

먼저 질량 및 강성행렬의 축소행렬을 구하기 위하여 식(1)의 전달함수(transfer function)에서 감쇠행렬을 무시하고 $s=0$ 에 대하여 테일러 급수 전개하면 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$H(s) = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i L^T (K^{-1}M)^i K^{-1} B s^{2i} = \sum_{i=0}^{\infty} m_i s^{2i} \quad (4)$$

이 때, 계수 m_i 를 $H(s)$ 의 모멘트라고 한다. 비감쇠 동적 시스템의 모멘트 일치법에 따르면, 변환행렬 V 가 다음과 같이 정의되는 q 차의 크리로프 부공간으로부터 얻어지면, 축소모델의 모멘트는 초기모델의 모멘트와 첫 $q+1$ 모멘트까지 일치한다.(3)

$$\begin{aligned} \mathcal{K}_q(K^{-1}M, K^{-1}B) \\ = \text{span}\{K^{-1}B, (K^{-1}M)K^{-1}B, \dots, (K^{-1}M)^{q-1}K^{-1}B\} \end{aligned} \quad (5)$$

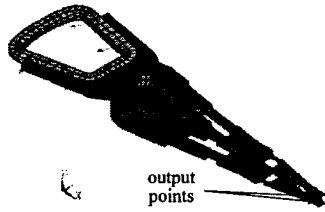


Fig. 1 ANSYS finite element model of an HDD actuator and suspension model. The actuation forces are applied at four points of the voice coil.

실제 수치적으로, 변환행렬 V 는 아놀디 과정⁽¹⁾을 통해 계산되며 V 의 열벡터는 정규직교(orthonormal)하다. 감쇠행렬을 질량 및 강성행렬의 선형 결합으로 표현하는 레일리(Rayleigh) 감쇠를 사용하면 $C = \alpha M + \beta K$ 의 관계에서 축소된 감쇠행렬은

$$C_r = V^T C V = V^T (\alpha M + \beta K) V = \alpha M_r + \beta K_r \quad (6)$$

로 표현되며, α 와 β 는 축소모델에서도 매개변수로 유지되어 그 값을 변화시키면서 응답을 효율적으로 해석할 수 있게 된다.

3. HDD 용 구동 및 현가 장치의 진동 해석

하드디스크 드라이브의 현가 장치⁽⁴⁾는 트랙의 검색 및 추종 방향으로는 구동부와 큰 강성을 가지도록 연결되고, 디스크의 수직 방향으로는 에어 베어링으로 지지되는 헤드 부분이 디스크의 형태나 진동에 잘 순응하도록 유연성을 가지는 것이 필요하다. 트랙의 검색 및 추종을 위한 servo 제어기 설계를 위하여 우선 VCM 구동력에 대한 그 방향의 주파수응답 특성을 파악할 필요가 있다.

이 시스템의 ANSYS 유한요소모델은 3338개의 SOLID45 요소로 구성되며, 볼베어링 부분은 8개의 COMBIN14 요소로 모델링 되었다. 코일 부위에 VCM 구동력이 네 곳에 작용하고, 헤드 끝부분의 위/아래에서 주파수응답을 관찰하였다.(Fig. 1 참고)

Fig. 2는 1~20 kHz 구간에서 위쪽 출력점의 X(반경) 및 Y(원주)방향으로의 주파수응답을 도시한 것이다. ANSYS의 결과는 full method를 이용하여 구하였고, MOR은 mor4ansys에서 $n=50$ 에 해당하는 축소모델을 생성하여 Mathematica를 이용하여 주파수응답을 계산하였다. 디스크에 정보를 쓰고 읽는 작동을 고려할 경우에 Y방향으로의 주파수응답이 중요한데, 약 3 kHz 부근에서 피크값이 발생하며 또한 위상이 반전되는 것을 확인할 수 있다. 대략 10 000 개의 자유도(DOF)로 구성된 유한요소모델을 50 자유도의 축소모델로 20 kHz의 고주파수 영역까지 거의 정확하게 계산할 수 있어 효율적인 진동해석이 가능함을 알 수 있다. 모멘트 일치법은 고주파수 영역으로 갈수록 오차가 커지게 되는데, $f=10$ kHz에서 축소모델의 차수에 따른 ANSYS와의 오차를 도시하면 Fig. 3과 같다. 축소모델의 차수가 $n=42$ 에서

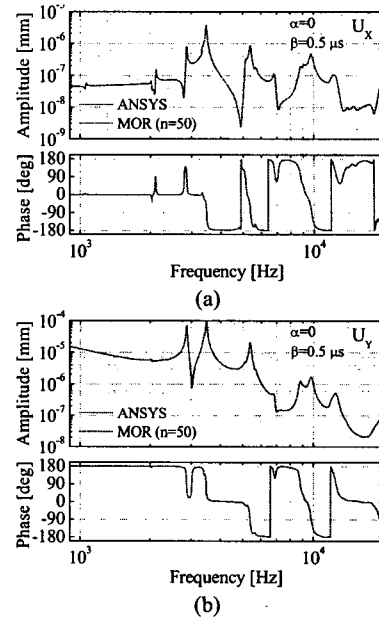


Fig. 2 Frequency responses at the reading head: (a) X-direction; (b) Y-direction. ANSYS uses the full method for the harmonic simulation. The Rayleigh damping of $\alpha=0$ and $\beta=0.5 \mu s$ is used as damping.

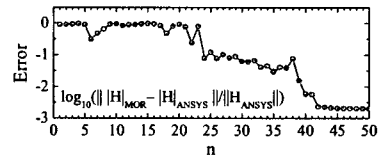


Fig. 3 Error between ANSYS and MOR according to the order (n) of reduced systems.

이미 수치오차 범위에서 ANSYS 해석 결과에 수렴함을 알 수 있다.

4. 결론

오차 예측이 가능한 축소모델을 통하여 하드디스크 구동 및 현가 장치의 진동해석을 정확하게 수행할 수 있으므로 모델차수축소법은 구조 및 제어 분야에 공히 효율적으로 활용 가능할 것이다.

참고문헌

1. 한정삼, "모델차수축소법을 이용한 효율적인 진동해석," 대한기계학회논문집 A 권, 제 30 권, 제 3 호, pp. 310-317, 2006.
2. Rudnyi, E. and Korvink, J., "Model Order Reduction for Large Scale Engineering Models Developed in ANSYS," Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3732, pp. 349-356, 2006.
3. Su, T. and Craig, R., "Krylov model reduction algorithm for undamped structural dynamics systems," J. Guid. Control Dyn., Vol. 14, pp. 1311-1313, 1991.
4. Hatch, M., "Vibration Simulation Using Matlab and ANSYS," Chapman & Hall/CRC, 2001.