

실리콘기반 자기유변탄성체의 진동특성 연구

A Study on the Vibration Characteristics of MR Elastomers Based on Silicon

박 정 현*. 이 철 희†. 김 철 현**. 조 원 오***

Jeong-Heon Park, Chul-Hee Lee, Cheol-Hyun Kim and Won-Oh Cho

(2011년 3월 22일 접수 ; 2011년 8월 8일 심사완료)

Key Words : Magneto-rheological Elastomer(자기유변탄성체), Vibration Characteristic(진동특성)

ABSTRACT

This paper presents vibration characteristics of magnetorheological(MR) elastomer, whose elastic modulus are controllable by applied magnetic field. By using this property, the material can be applied to vibration absorber, so that the stiffness of the absorber can be changed and actively controlled according to the magnetic flux density. However, the various performances of MR elastomer depends on different polarized direction of particles by applied magnetic field and dimension during the manufacturing process. In this paper, in order to obtain the optimal characteristics of MR elastomer, MR elastomers with different types and dimensions are prepared for a series tests. Using this test setup, extent of natural frequency shifted against magnetic field at various excitation frequencies can be measured. Specimens are prepared with 3 types, as cylinder samples exposed to magnetic field vertically, horizontally and unexposed during cure, respectively. Also, a set of design variables are considered to produce MR elastomers. Through the modal tests of mass structure with MR elastomer, the optimal design as well as the polarization direction of MR elastomer is obtained among the various dimensions and 3 directional types of MR elastomers.

1. 서 론

자기유변탄성체(magnetorheological elastomer)는 자기장의 영향에 의해 감쇠 및 강성 특성이 변화하는 지능재료이다. 자기유변학적(magnetorheological, MR)

재료들은 액체형태의 MR 유체(MR fluid, MRF)와 고무와 같은 고체형태인 MR elastomer(MRE) 두 가지로 나눌 수 있다. MR 유체는 자기장에 의해 극성을 가질 수 있는 입자들이 점성유체에 섞여있는 재료로써 입자들이 점성 유체 안에 불규칙적으로 분포하고 있으나 외부 자기장의 방향에 따라 입자들이 체인 형태로 정렬하여 기계적 성질이 변하게 된다. 이러한 성질을 이용하여 MR 유체는 브레이크와 클러치^(1,2), 댐퍼⁽³⁾, 엔진마운트⁽⁴⁾에 활용되어져 왔다. 또한 MR 유체는 진동감쇠 성능뿐만 아니라 트라이볼로지 성질에 대한 연구도 활발히 진행 중이다⁽⁵⁾. 그러나 MR 유체는 여러 가지 단점들이 있는데 예를 들어 완전한 밀폐가 되지 않아 액체가 누출되어 환경오염을 가져 올 수 있으며, MR 유체

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : chulhee@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7311, Fax : (032)868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과
** 장암엘에스(주) 기술연구소, 연세대학교 과학기술대학 화학과

*** 장암엘에스(주) 기술연구소

이 논문의 일부는 2011년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

에서 극성을 가지는 입자들의 잔류물로 인한 MR 장비의 성능 저하를 단점으로 들 수 있다. 이와 같은 MR 유체의 단점을 보완하며 MR의 성질을 활용할 수 있는 MR elastomer가 개발되어왔으며 그 연구가 이루어지고 있다.

MR elastomer는 MR 유체와 유사하게 천연 고무나 실리콘 고무와 같은 폴리머 재료 안에 자기력에 의해 극성을 이룰 수 있는 입자들을 첨가한 고체이다. MR elastomer의 제작 시에 자기장을 주어 입자들의 체인 형성 방향을 결정하여 줄 수 있다.

최근 MR elastomer 장점을 활용하는 다양한 연구가 이루어지고 있다. 1992년에는 도요타의 R&D 연구실에서 엔진 마운트를 위해 철입자를 가지는 실리콘 젤을 개발하였고⁽⁶⁾, Ford 연구소에서는 Ginder⁽⁷⁾ 등이 천연 고무와 합성 고무를 이용하여 MR elastomer를 제작하였다. Watson은 MR elastomer를 이용한 자동차 부싱을 개발하였다⁽⁸⁾. 국내에서는 MR elastomer의 기계적 물성 중 인가 전류 세기 및 입자 구성비에 따른 전단계수에 대한 초기실험 및 연구가 진행되었다^(9,10).

MR elastomer의 감쇠 및 강성특성 변화를 컨트롤함으로써 다양한 분야에서의 활용이 기대된다. 예를 들어 능동진동제어 분야 및 차량의 현가장치, 기계부품의 마운트 등에 널리 활용 될 것으로 보인다.

이 연구에서는 여러 가지 실리콘 매트릭스 기반의 MR elastomer의 강성변화에 따른 공진주파수에서의 진동감쇠효과를 알아보기 위하여 초기 시험을 수행하였다. MR elastomer를 제작하고 자기장을 부하하였을 때와 부하하지 않았을 때 진동을 주어 특성을 관찰하였다. MR elastomer는 여러 가지 두께와 배양 시 자기장을 부하하는 방향을 다르게 하여 제작되었다. MR elastomer의 실험은 축방향 진동에 대한 실험 장치를 구성하고 공진주파수에서의 감쇠 가능성을 탐구하였다. MR elastomer가 자기장을 주었을 경우 공진주파수의 이동을 확인하였으며 이 실험 장치에서의 최적의 MR elastomer 두께 등에 대한 조사를 하였고, 감쇠 가능성을 수식 및 실제 공진주파수 영역에서의 실험을 통하여 나타내었다.

2. MR Elastomer의 제작

MR elastomer를 만들기 위해 α,ω -Vinyl poly-

dimethylsiloxane과 α,ω -Hydrido polydimethylsiloxane이 이용되어 hydrosilylation 반응을 통해 실리콘 젤을 합성하였는데, 5가지 서로 다른 점도를 지닌 고분자를 사용하여 만들어졌으며, 자성에 대하여 극성을 나타내는 충전재로는 Fe, Ni, Co 분말을 첨가하였다. 사용된 충전재가 실리콘 고분자와 섞여 있을 때 가능한 한 분리가 늦게 되고, 실리콘 반응 시 각 충전재와의 결합이 이루어지도록 하기 위해 adhesion promoter로 vinyl trialkoxy silane과 hydrogen trialkoxy silane 등을 첨가하였다. 촉매로는 백금산 6배위수와 divinyl tetramethyl disiloxane을 사용하여 반응시킨 후 적정 Pt 함량이 되도록 합성하여 첨가하였다.

MR elastomer는 잘 섞인 채로 Fig. 2와 같은 형틀에 붓고 기포가 제거되도록 상온에서 방치하였다가 금형을 조립하여 오븐에서 2시간동안 경화하였다.

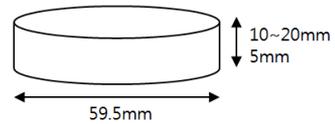


Fig. 1 MR elastomer dimension

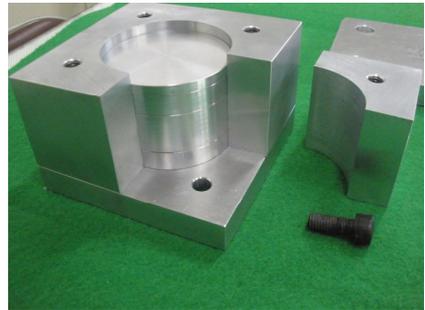


Fig. 2 Mold for MR elastomer manufacturing



Fig. 3 MR elastomers

MR elastomer의 크기는 Fig. 1에서와 같이 직경 59.5 mm 두께 10 mm에서 20 mm까지 5 mm간격으로 만들어졌으며, 경화 시에는 영구자석(직경 50 mm)을 사용하여 상하 방향(원통높이방향), 좌우 방향(높이에 수직)으로 배양을 하였으며 배양을 하지 않고 비방향성의 MR elastomer도 제작하였다.

3. MR Elastomer의 진동 실험 장치

3.1 실험 장치 구성

MR elastomer의 강성변화에 따른 감쇠효과를 관찰하기 위하여 shaker, 전자석, MR elastomer, 질량체로 이루어진 실험 장치를 구성하였다.

이 실험에서는 데이터 수집을 위한 DAQ 보드, 가속도계, function generator, shaker, power amplifier, conditioning amplifier, 전자석(직경 60 mm, 높이 60 mm, 0.2T)을 사용하였다. Fig. 4는 이 실험에 사용된 장비들을 보여주는 사진이다.

Fig. 5와 같이 MR elastomer의 윗부분에는 직경 59 mm, 높이 23 mm의 무게 500 g의 추가 질량을 부착하였고 최상단에 가속도계를 부착하였다. Shaker에 의하여 MR elastomer 바닥면에 해당하는 전자석이 진동을 하게 되고 MR elastomer를 거쳐 상단에 있는 질량체에 진동이 전달된다. 진동신호가 가속도계로 전달되어 가속도계에서 나오는 신호는 conditioning amplifier를 거쳐 DAQ보드를 통해 PC와 연결되며 LABVIEW 프로그램을 이용하여 주파수 응답 곡선을 구할 수 있었다. Shaker를 통해 2 Hz~500 Hz 사이의 주파수대역으로 가진시키고 가속도계의 신호를

받아 주파수 응답 곡선을 구하였다. 전자석의 전원을 넣지 않은 상태에서 먼저 실험을 하였으며, 전자석을 통해 자기장을 가해줬을 경우의 주파수 응답 곡선상 변화를 관찰하였다.

3.2 실험 장치의 수학적 모델링

이 실험에 사용된 장치는 Fig. 6과 같이 시스템이 바닥면의 운동에 의해 가진이 되는 것으로 생각하여 모델링 할 수 있다⁽¹¹⁾.

바닥면이 shaker 위에 설치되어있는 전자석, MR elastomer는 질량체와 전자석 사이에 스프링-댐퍼 역할을 하게 된다. 질량 m 에 관계된 힘을 합하면 식 (1)로 표현된다.

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \tag{1}$$

바닥면의 진동운동은 조화적으로 움직인다고 가정하면 식 (2)와 같다.

$$y(t) = Y\sin(\omega_b t) \tag{2}$$

이때의 Y 는 바닥면 진동의 진폭, ω_b 는 바닥면 진동의 진동수를 나타낸다.

식 (2)를 질량 m 에 관한 식 (1)에 대입하여 풀면

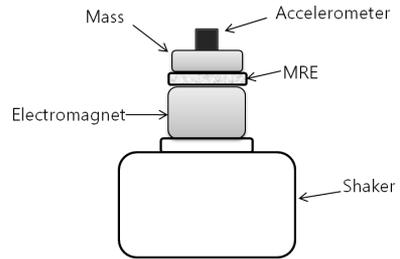


Fig. 5 Diagram of system for MR elastomer vibration test



Fig. 4 Vibration test equipments

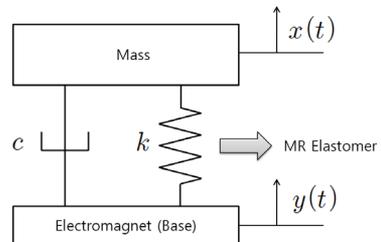


Fig. 6 Modeling of system

다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cY\omega_b \cos(\omega_b t) + kY \sin(\omega_b t) \quad (3)$$

식(3)에서 특수해 $x_p(t)$ 를 구하기 위하여 입력 가진을 $cY\omega_b \cos(\omega_b t)$ 와 $kY \sin(\omega_b t)$ 두 가지의 입력에 대한 각각의 운동방정식을 구한다.

$$x_p^{(1)} = \frac{2\zeta\omega_n\omega_b Y}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2}} \cos(\omega_b t - \theta_1) \quad (4)$$

$$x_p^{(2)} = \frac{\omega_n^2 Y}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2}} \sin(\omega_b t - \theta_1) \quad (5)$$

선형시스템 중첩의 원리로부터 전체 특수해 $x_p(t)$ 는 $x_p^{(1)}$ 과 $x_p^{(2)}$ 의 합으로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$x(t) = \omega_n Y \left[\frac{\omega_n^2 + (2\zeta\omega_b)^2}{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \times \cos(\omega_b t - \theta_1 - \theta_2) \quad (6)$$

식(6)에서 구한 특수해 $x_p(t)$ 에서의 진폭을 X 라고 진동수의 비 $r = \omega_b/\omega_n$ 이라고 하면 다음과 같이 정리된다.

$$X = Y \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

식(7)에서 나타났듯이 바닥면 가진 시스템에서의 진폭 전달량은 진동수의 비 r 에 의해 변화된다. 특히 $r = \omega_b/\omega_n = 1$ 즉, 공진주파수에서의 바닥면 가진일 경우 진동변위의 최대량이 질량의 변위로 전달된다. 위 식에서 바닥면 진동이 공진주파수로 가진될 경우 공진주파수를 변화시켜 변위전달량을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 이 실험에서는 MR elastomer의 강성변화를 통하여 공진주파수를 변화시켜 변위 전달량의 감쇠시키는 효과를 관찰하였다.

4. 실험결과

실험은 10 mm, 15 mm, 20 mm MR elastomer에 대하여 각각 상하방향성, 비방향성, 좌우방향성 세 가

지 방향성에 대하여 총 9개의 샘플에 대한 실험이 진행되었다. 전자석을 이용하여 실험을 진행하였으며, 전자석은 원통 형태로써 자기장의 세기는 표면중심에서 약 0.2T정도로 부하하여 실험을 진행하였다. 각각의 실험결과에 대해 주파수 응답을 관찰하였으며 다음 그림과 같은 결과들을 얻을 수 있었다.

Fig. 7의 그래프는 여러 가지 방향성과 두께를 가지는 MR elastomer 샘플들 중에 두께 10 mm MR elastomer이며 배양 시 좌우방향성에 대하여 자기장을 부하한 샘플의 주파수 응답 그래프이다. x축은 주파수, y축은 amplitude를 나타내며, 각 그래프의 피크점일 때 x값이 공진주파수임을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 자기장이 부하되었을 때 강성이 증가하여 자기장을 가해주지 않았을 때에 비해 공진주파수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 다른 샘플들에 대해서도 비슷한 결과가 나타났으며, 방향성 및 두께에 따라 공진주파수가 증가하는 정도가 다른 것을 알 수 있었다. Table 1에서 각 두께 및 방향성에 따른 공진주파수 이동 정도를 확인 할 수 있다.

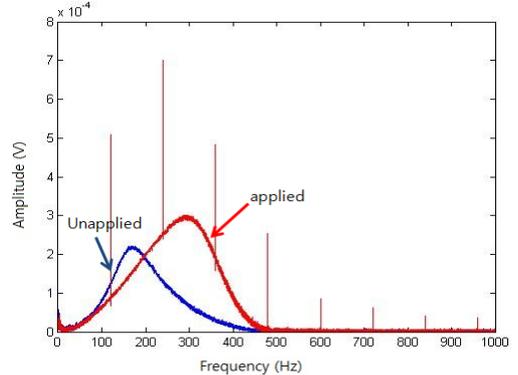


Fig. 7 Frequency response for MR elastomer(10 mm, horizontal magnetized direction)

Table 1 Resonance frequency for MR elastomers

	State	Vertical direction (Hz)	Non-direction (Hz)	Horizontal direction (Hz)
10 mm	Unapplied	147	131	167.2
	Applied	281.7	288.6	294.1
15 mm	Unapplied	92.9	86.3	85.6
	Applied	236.3	218.8	221.9
20 mm	Unapplied	68.2	69.1	74
	Applied	163.1	148.4	146.9

Table 2 Resonance frequency shift for MR elastomers

	Vertical direction	Non-direction	Horizontal direction
10 mm	191 %	220 %	176 %
15 mm	236 %	253 %	247 %
20 mm	239 %	215 %	198 %

Table 1에서 알 수 있듯이 모든 두께 및 방향성에 대하여 자기장을 적용하였을 경우 공진주파수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 두께, 방향성에 따라서 그 이동 정도가 차이가 남을 알 수 있었다. MR elastomer의 제작시 각 두께에 따라 세가지 방향성에 대하여 똑같은 강성을 가지는 샘플은 제작시 어려움이 있다. 따라서 자기장을 적용하지 않았을 때의 공진주파수를 기준으로 그 변화량에 대한 비율을 비교하였다.

Table 2는 공진주파수 변화량에 대한 비율을 각 두께 및 방향성에 따라 정리한 표이다. 초기 자기장을 부하하지 않았을 경우 공진주파수 대비 자기장을 부하하였을 때 공진주파수의 이동정도 퍼센트를 나타내면 176%부터 253%까지 다양하다. 공진에서의 변위전달량 감소를 알아보기 위해서 공진주파수역역대에서 자기장을 적용하여 변위전달량 감소를 확인하였다.

Fig. 8은 두께 10 mm 좌우방향성 MR elastomer에 대하여 자기장을 부하하여 변위전달량 감소를 확인하였다. 실험구성은 앞에서 공진주파수를 찾기 위해 설치한 구성과 같으며 공진주파수 영역대(160 Hz)에서 가진 후 2초 후에 자기장 약 0.2T를 부하하였다. 자기장을 부하하지 않았을 때와 비교하여 진폭이 감소함을 확인 할 수 있었다. 공진에서의 진동을 효과적으로 감쇠하기 위해서는 공진주파수의 이동정도를 최대화하여 제어 시 공진 영역대에서 가장 멀리 회피하는 경우가 효과적이다. 따라서 진동 감쇠효과를 극대화하기 위하여 최적의 두께 및 방향성의 MR elastomer를 구하였다. 이 연구에서는 최적화 프로그램을 이용하여 두 가지 변수(방향성, 두께)에 대하여 공진주파수의 이동 정도의 response surface model을 도출해 내었다.

Fig. 9는 두께, 방향성에 대한 공진주파수의 이동정도(%)를 나타낸 그래프이다. x축은 두께를 나타내며 10 mm~20 mm 범위에서 적용하였으며, y축

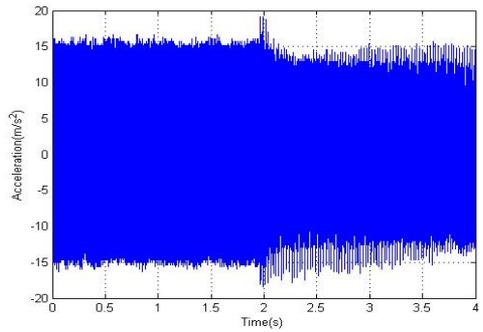


Fig. 8 Time response for MR elastomer(10 mm, horizontal magnetized direction)

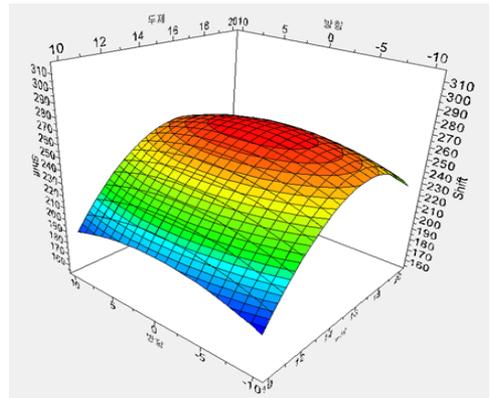


Fig. 9 Response surface model

방향성에 대해서는 상방향성, 비방향성, 좌우방향성에 대하여 각각 10, 0, -10으로 근사하였다.

Table 1의 실험결과를 바탕으로 도출한 그래프로써, 두께에 대한 공진주파수 이동정도, 방향성에 대한 공진주파수 이동정도의 그래프를 3차원으로 나타낸 그래프이다. 가장 공진주파수 이동정도가 큰 부분에서의 두께 및 방향성을 찾아낼 수 있으며 공진주파수의 이동정도가 가장 큰 MR elastomer는 비방향성의 두께 약 16.12 mm의 MR elastomer라는 것을 알 수 있었다. 실험을 통해 확인해본 결과 16 mm의 비방향성 MR elastomer의 경우 초기 58.8 Hz에서 자기장을 부하하였을 때, 156.3 Hz로 약 266%의 공진주파수 이동을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 제안된 MR elastomer의 제작 및

제작된 elastomer의 실험을 통하여 진동 특성을 조사하였다. MR elastomer는 천연 고무 또는 실리콘 고무와 자기장에 극성을 가지는 재료의 혼합물로 만들어지며, 이 연구에서는 실리콘 고무를 기반으로 하는 MR elastomer를 제작하였다. 실험 장치의 수학적 모델링을 통하여 바닥면 가진 시스템에서의 공진주파수의 이동이 진동 변위 감쇠에 미치는 영향에 대해서 조사하였으며, 실험을 통해 MR elastomer의 방향성과 두께에 따라 자기장을 부하하였을 때 공진주파수의 이동 정도를 확인할 수 있었으며, 공진주파수대의 가진 실험을 통하여 변위 감쇠를 확인할 수 있었다. 또한 MR elastomer의 두께 및 방향성에 따라 공진주파수의 이동정도가 다르므로 각 샘플별 실험 결과 비교 및 최적화를 통하여 이 시스템에서의 최적의 두께 및 방향성의 MR elastomer를 예측할 수 있었고, 실험을 통하여 확인하였다.

이 연구 결과의 내용을 바탕으로 MR elastomer의 기계장치 및 진동저감분야의 적용이 기대되며, 자기장을 제어할 수 있는 제어 시스템을 융합시켜 기계 시스템의 능동-반능동 진동제어 시스템으로 응용 가능할 것으로 보이며 이에 대해서는 현재 연구가 진행 중이다.

후 기

이 연구는 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업(No.000408360111)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. 또한 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과이며 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Carlson, J. D., 1991, US Patent 5054593.

(2) Gentry, S. B., Mazur, J. F. and Blackburn, B. K., 1995, US Patent 5460585.

(3) Dyke, S. J., Spencer, B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1998, An Experimental Study of MR Dampers for seismic Protection, *Smart. Mater. Struct.*, Vol. 7, pp.693~703.

(4) Carlson, J. D. and Weiss, K. D., 1995, US Patent 5382373.

(5) Lee, C. H. and Jang, M. G., 2011, Virtual Surface Characteristics of a Tactile Display Using Magneto-rheological Fluids, *Sensors*, Vol. 11, No. 3, pp. 2845~2856

(6) Shiga, A., Fujimoto, Y. and Hirose, M., 1993, Tokai Hei Japanese Patent 5-25315, Feb.2.

(7) Ginder, J. M., Nichols, M. E., Elie, L. D. and Clark, S. M., 2000, Controllable-stiffness Components Based on Magnetorheological Elastomers, In: Wereley, N. M.(ed.), *Smart and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems*, Proceedings of SPIE 3985, pp.418~425

(8) Watson, J. R., 1996, US Patent 5609353.

(9) Jung, M. S., Bae, B. C., Heo, S., Song, M. H. and Kwak, M. K., 2007, Experimental Study on the Damping and Stiffness Characteristics of MR Elastomers, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, KSNVE07S-33-06.

(10) Yoon, J. H., Lee, J. H., Fawazi, N., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2009, Experimental Investigation of Shear Modulus of Anisotropic Magneto-rheological Elastomer due to Volume Percent of MRP and Magnetic Field(II), *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp.272~273.

(11) Inman, D. J., 2001, *Engineering Vibration*, Pearson Education, Inc., Prentice-Hall.