

자기변형 구동기를 이용한 보의 진동제어

A Study on Vibration Control of a Beam Using Magnetostrictive Actuators

⁰임채욱* 문석준** 정태영** 박영진***

Chae-Wook Lim, Seok-Jun Moon, Tae-Young Chung, Young-Jin Park

Key Words : Magnetostrictive actuator, Beam, Vibration control

ABSTRACT

In this paper we explore the effectiveness of a magnetostrictive actuator(MSA) as a structural control device. A series of numerical and experimental tests are carried out with a simple aluminum beam only supported at each end by the actuator. After the equation of motion of the controlled system is obtained by the finite element method, a model reduction is performed to reduce the numbers of degree of freedom. A linear quadratic feedback controller is realized on a real-time digital control system to damp the first four elastic modes of the beam. Through some tests, we confirmed the possibility of this actuator for controlling beam-like structures.

1. 서론

최근 지능재료 중에서 PZT와 같은 압전재료나 Terfenol-D와 같은 자기변형재료를 이용한 구조물의 진동 제어에 대한 관심과 응용에 관한 연구가 국내외적으로 많이 진행되고 있다. PZT는 크게 patch형과 stack형으로 볼 수 있는데, 보나 평판의 진동 제어에 대한 연구는 patch형에 대한 것이 대부분이다^(1,2). Terfenol-D도 크게 적층형과 막대형으로 분류할 수 있는데, 이에 대한 연구는 PZT에 대한 연구만큼 많지 않지만 연구가 꾸준히 진행되고 있다. Stack형의 PZT나 막대형의 Terfenol-D를 진동제어용의 구동기로 적용된 사례는 많지 않지만 기계, 우주항공, 토목·건축 등의 분야에 조금씩 적용되고 있다⁽³⁻⁵⁾. Stack형의 PZT나 막대형의 Terfenol-D를 이용한 구동기는 재료의 변형률은 크지만 전체적인 구동기의 변위는 크지 않기 때문에 최근에는 정밀산업분야의 미소진동제어에 적용되고 있다⁽⁶⁻⁹⁾.

저자들은 선행연구에서 Terfenol-D를 이용한 선

형 자기변형 구동기의 설계 및 특성 연구를 수행하였다⁽¹⁰⁾. 본 연구에서는 Terfenol-D 재료의 특성을 이용한 자기변형 구동기(MSA)를 단순보의 진동제어에 사용하여 구조물의 진동제어에 대한 효과들을 살펴보고자 한다. 단순지지보의 형태에 가까운 양 끝단이 각각 MSA로 지지된 알루미늄 보에 대하여 수치 및 실험적인 시험을 수행하였다.

2. MSA의 수학적인 모델

Fig.1처럼 MSA가 질량과 강성을 가지는 구조물과 연결된 경우를 생각해 보자. MSA는 자유단에서, 즉 외부에 구조물이 없을 경우에는 변위만 발생하고 힘은 생기지 않는다. 이때 자유단에서의 변위를 u_{ISA} 라고 하자. 그러나 MSA가 구조물과 연결되었을 경우에 실제 MSA의 변위는 u 가 된다. 따라서 이때 MSA에서 힘이 발생하는데 그 힘은 다음의 식 (1)과 같다.

$$F_a = k_a(u_{ISA} - u) \quad (1)$$

여기서 k_a 는 MSA의 강성이다.

* 정회원 · KAIST 기계공학과 박사과정
** 정회원 · 한국기계연구원 구조연구부
*** 정회원 · KAIST 기계공학과 교수

그리고 MSA에 의해서 구조물에 전달되는 힘은 식 (2)와 같다.

$$F_a = m\ddot{u} + k_e u \quad (2)$$

여기서 m 은 구조물의 질량, k_e 는 구조물의 강성이다.

식 (1)과 식 (2)로부터 다음의 식 (3)이 성립하는데, 이는 MSA의 강성과 자유단에서의 변위 특성만 알면 MSA가 구조물과 연결된 경우의 변위와 힘을 추정할 수 있음을 보여 준다.

$$m\ddot{u} + (k_e + k_a)u = k_a u_{ISA} \quad (3)$$

식 (3)을 그림으로 나타내면 Fig.2와 같다.

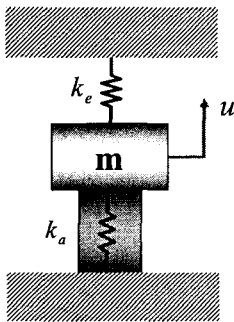


Fig.1 MSA and structure

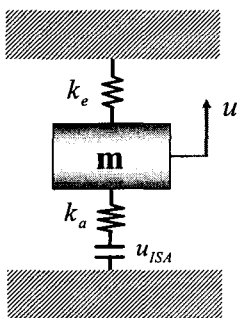


Fig.2 Equivalent mathematical model

3. 양 끝단이 MSA로 지지된 보

Fig.3은 양 끝단이 각각 MSA로 지지된 보를 보여 주고 있다. 이의 수학적인 모델은 Fig.4에서 보여 주는 것과 같이 FEM을 사용했는데, 보는 10개

의 요소로 나누었고 보의 양 끝단의 경계조건은 MSA의 강성값을 사용하였다. 각 요소의 회전방향의 변위는 모델축소(Static Condensation Method)를 통해 없앴다. MSA의 강성값은 매우 크기 때문에 고유진동수와 모드형상은 단순지지보와 거의 비슷하다. Fig.5는 $b = 25mm$, $h = 10mm$, $L = 1m$ 인 알루미늄 보의 경우에 1차에서 4차까지의 모드형상을 보여 주고 있는데, MSA의 강성이 유한한 값을 가지므로 보의 양 끝단에서의 변위가 발생한다. u_1 과 u_2 가 같은 방향이면 홀수 차수의 모드만 가진이 되고, u_1 과 u_2 가 반대 방향이면 짝수 차수의 모드만이 가진됨을 알 수 있다. Fig.6은 각 모드의 감쇠비가 0.1%인 경우에 입력에 대한 출력의 비($u_1 = u, u_2 = 0$, 또는 $u_2 = u, u_1 = 0$)를 보여주고 있는데, 보의 양 끝단에서의 MSA의 조그마한 움직임은 통해 전체 보의 진동을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

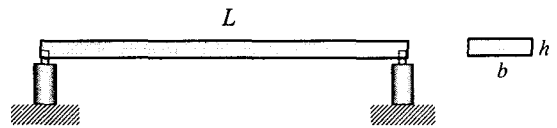


Fig.3 Beam supported at each end by 2 MSAs

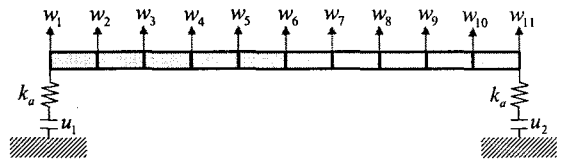


Fig.4 Model of beam and MSA structure

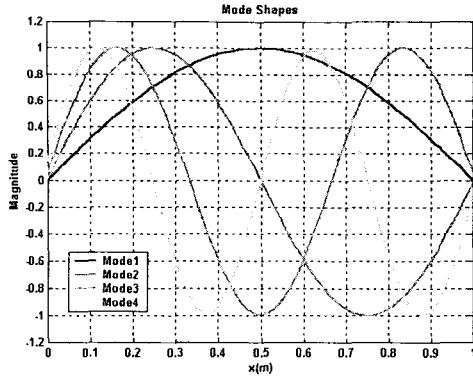


Fig.5 Mode Shapes of beam

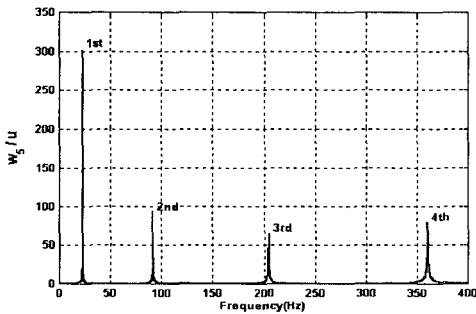


Fig.6 Transfer function of w_5/u

4. 제어성능 실험

4.1 실험 장치

Fig.7은 실험 장치를 보여 주고 있다. 보의 재질은 알루미늄으로 $b = 25mm$, $h = 10mm$, $L = 1m$ 이다. Table 1은 이의 동특성 실험 결과를 보여 주고 있다. 고유 진동수는 수학적 모델과 거의 일치하였다.

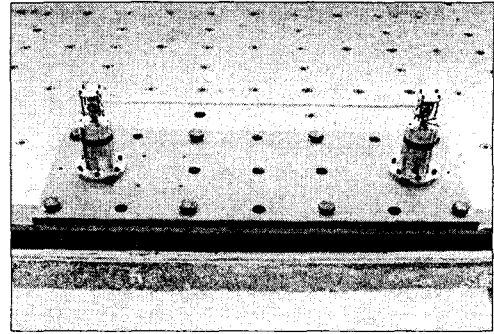


Fig.7 Experimental setup

Table 1 Natural frequencies and damping ratios of the test structure

	Natural Frequencies	Damping Ratios
	Experiment (FEM)	Experiment
1 st	25.6Hz (24.8Hz)	0.50%
2 nd	98.1Hz (98.7Hz)	0.30%
3 rd	220.0Hz (220.4Hz)	0.14%
4 th	387.4Hz (387.6Hz)	0.11%

4.2 제어기의 설계

MSA는 Terfenol-D의 자기변형 특성을 이용한다. 즉 Terfenol-D에 자기장을 형성하기 위해서 코일에 전류를 흘려주면 전류에 비례하여 변위가 발생한다. 사용된 MSA는 3A까지 선형적인 특성을 가지는데, 1A당 $9.17\mu m$ 의 변위가 발생한다. 실제의 입력은 전압이므로 전류앰프를 통해 전압을 전류로 바꾸어 준다. 제어기의 설계에 있어서 전류앰프의 동특성을 다음과 같이 고려하였다.

$$\frac{I}{V} = \frac{b}{s+a} \quad (4)$$

여기서 $a=439.82$, $b=917.47$ 이고 DC에서 약 0.55V의 입력은 1A의 전류를 형성한다.

시스템의 수학적 모델은 보의 동특성, MSA의 동특성, 전류앰프의 동특성이 모두 포함되게 하였다. 제어 대상 모드는 저차의 4개의 모드만을 고려하였다. 이를 위해 먼저 저차의 4개의 모드만의 동특성을 가지는 수학적 모델을 얻기 위해 모델 축소(Balanced Model Reduction)를 수행하였다. 제어기는 최적제어 이론인 LQG 방법을 적용하였고, 5

7번째 노드에서의 가속도 신호만을 피드백 신호로 사용하였다.

4.3 제어성능 : 수치실험 결과

수치실험에서는 7번째 노드에 외력이 가해지는 경우를 고려하였다. Fig.8은 외력이 랜덤파형일 때의 5번째 노드에서의 변위(w_5)와 가속도 신호를 보여 주고 있다. 1.5V이하의 최대 입력 전압에 대하여 변위의 rms값은 약 1/3, 가속도의 rms값은 약 1/4 정도의 진동레벨로 줄이는 제어 성능을 확인할 수 있었다. 외력에 대한 각 노드 점에서의 변위를 각 모드별로 그리면 Fig.9와 같다. 1차 모드의 경우 보의 양 끝단에서의 변위는 제어 후에 약간 커졌다. 이는 보의 양 끝단은 MSA에 의해서 움직이므로 실제 제어 시의 이 곳에서의 변위는 제어하지 않았을 때보다 약간 크기 때문이다. 능동 제어 시의 보의 양 끝단에서 커지는 변위가 보에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 각 노드에서의 변위 신호와 모드형상을 이용하여 모드변위로 변환하였다. Fig.10은 각 모드에서의 모드변위를 보여 주고 있는데, 능동 제어의 수행 시에 보의 양 끝단에서의 MSA에 의한 변위의 증가가 각 모드를 가진하는 효과는 없음을 확인할 수 있다.

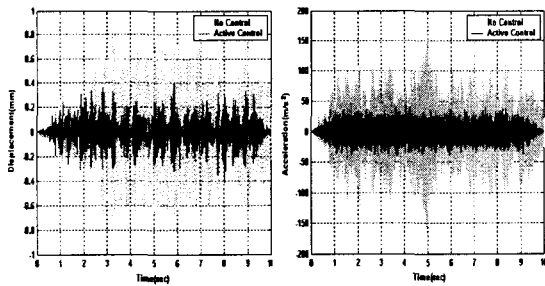


Fig.8 Control performances : simulation results

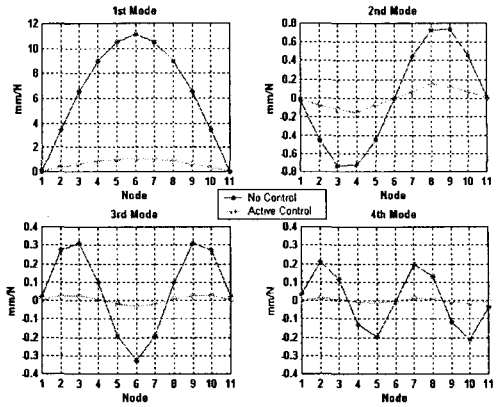


Fig.9 Displacement at each node

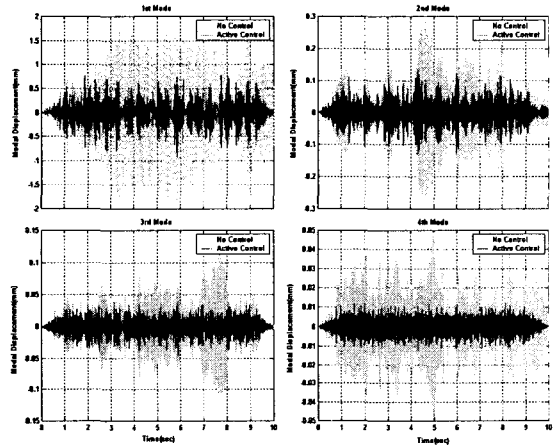


Fig.10 Modal displacements

4.4 제어성능 : 실험 결과

제어성능을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. Impact 실험과 정현파 입력 실험을 수행하였다. Impact 실험에서는 impact 햄머로 7번째 노드를 가진하였는데, 제어성능 결과는 Fig.11과 Fig.12에서 보여 주고 있다. Fig.11은 5번째 노드 점에서의 변위와 가속도의 시간이력을 보여 주고 있고, Fig.12는 외력에 대한 가속도의 전달함수를 보여 주고 있다. 능동제어 결과 가속도 레벨이 1차 모드에서 약 15dB, 2차 모드에서 약 12dB, 3차 모드에서 약 13dB, 4차 모드에서는 약 20dB로 주는 제어 성능을 확인할 수 있었다.

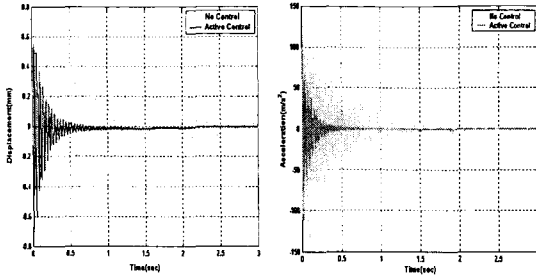


Fig.11 Time history of impact test

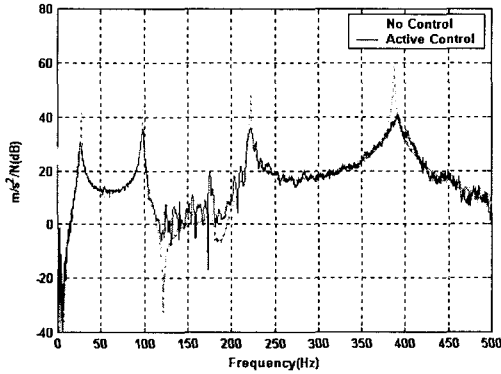


Fig.12 Transfer function of w_5/F_7

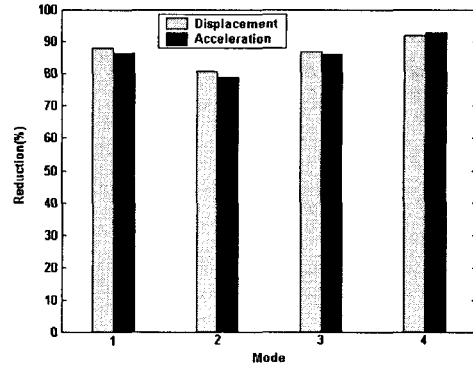


Fig.14 Control performance of sinusoidal test

5. 결론

본 연구에서는 Terfenol-D 재료의 특성을 이용한 자기변형 구동기(MSA)를 단순보의 진동제어에 적용하여 제어 성능효과를 확인하였다. 양 끝단이 각각 MSA로 지지된 알루미늄 보에 대하여 수치 및 실험적인 시험을 수행하여 저차 4개의 탄성모드를 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 토대로 MSA를 보와 같은 형태의 구조물에 적용할 경우 우수한 제어 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업 중 “제진장치를 활용한 제진설계 기술개발” 사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) E.T.Falangas, J.A.Dworak, and S.Koshigoe (1994), "Controlling plate vibrations using piezoelectric actuators", IEEE Control Systems, pp.34-41
- (2) M.Märtens, and H.Waller (1998), "Vibration control of a mechanical structures with piezoelectric actuators - A comparison of bimorph and stack actuators", Actuator 98, 6th Conference on New Actuators, pp.269-272
- (3) R.G.Loewy(1997), "Review article : Recent developments in smart structures with aeronautical

정현과 입력 실험에서는 두 개의 MSA중 하나는 가진용으로 다른 하나는 제어용으로 사용하였다. Fig.13은 1차 모드에 대한 실험 결과로 5번째 노드 점에서의 변위와 가속도의 시간이력을 보여 주고 있다. Fig.14는 각 모드에서의 5번째 노드 점에서의 변위와 가속도의 제어 성능을 보여 주고 있는데, 제어 성능이 매우 우수함을 확인할 수 있다.

Fig.13 Sinusoidal test : 1st mode

applications", Smart Material and Structures, pp.R11-R42

(4) S.Aizawa, T.Kakizawa, and M.Higasino (1998), "Case studies of smart materials for civil structures", Smart Material and Structures, pp.617-626

(5) K.Morita, T.Fujita, S.Ise, K.Kawaguchi, T.Kamada and H.Fujitani (2001), "Development and application of induced strain actuators for building structures", SPIE Conference on Smart Systems for Bridges, Structures and Highways, pp.426-437

(6) M.Hayatsu, K.Kajiwar, S.Imaoka, and T.Fujita (1996), "Large scale active microvibration control system using piezoelectric actuators applied to semiconductor manufacturing equipment", 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, pp.297-302

(7) H.Yoshioka, Y.Takahashi, K.Katayama, T.Imazawa, N.Murai (2001), "An active microvibration isolation system for hi-tech manufacturing facilities", Journal of Vibration and Acoustics, ASME, Vol.123, pp.269-275

(8) Eric.H.Anderson, and B.Houghton (2001), "Elite-3 active vibration isolation workstation", Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials 2001 : Industrial and Commercial Applications of Smart Structures, Vol.4332, pp.183-196

(9) E.H.Anderson, M.E.Evert, R.M.Glaese, J.C.Goodding, and S.C.Pendleton (1999), "Satellite ultraquiet isolation technology experiment (SUITE) : Electromechanical subsystems", Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials 1999 : Industrial and Commercial Applications of Smart Structures, Vol.3674, pp.308-328

(10) 임채욱, 정태영, 문석준, 김병현 (2003), "Terfenol-D를 이용한 선형 자기변형 구동기의 설계 및 특성 연구", 한국소음진동공학회논문집 제 13권 제4호, pp.308~316