

능동진동제어를 위한 선형 자기 액추에이터 개발

Development of Linear Magnetic Actuator for Active Vibration Control

이 행 우* · 곽 문 규† · 김 기 영* · 이 한 동*

Haeng Woo Lee, Moon K. Kwak, Ki Young Kim and Han Dong Lee

(2009년 3월 11일 접수 ; 2009년 6월 5일 심사완료)

Key Words : Linear Magnetic Actuator(LMA, 선형 자기 액추에이터), Active Vibration Control(능동 진동 제어), Active Tuned-mass Damper(능동 동조질량 감쇠기)

ABSTRACT

This paper is concerned with the development of linear magnetic actuator for active vibration control. The newly developed linear magnetic actuator consists of permanent magnets and copper coils. On the contrary to the voice-coil type actuator, the linear magnetic actuator utilizes magnetic flux to generate the shaft movement. In this study, experiments on the prototype linear magnetic actuator were carried out to investigate its dynamic characteristics. Block and inertia forces generated by the actuator were measured. The experimental results show that the actuator can be used as both actuator and active tuned-mass damper. The linear magnetic actuator was attached to a cantilever as the active-tuned mass damper and active vibration control experiment was carried out. The experimental results show that the newly developed linear magnetic actuator can be effectively used for the active vibration control of structures.

1. 서 론

구조물의 진동을 억제하기 위한 능동 진동 제어 시스템은 센서부, 제어부, 작동부로 구성되어있다. 제어부 같은 경우 고성능 마이크로 컨트롤러 또는 디지털 신호 처리 장치(DSP)의 개발로 인하여 복잡한 능동진동제어 알고리즘도 구현이 가능하다. 센서부 역시 다양한 센서가 개발되어 있어 능동진동제어에 활용이 가능하다.

작동기는 능동진동제어 분야 뿐만 아니라 모든 산업에서 반드시 필요한 요소들 중 하나이다. 작동기는 전기나 다른 에너지 원을 기계적인 에너지로 변환하는 에너지 변환기로써 정의 될 수 있다. 일반적인 작동기는 공압(pneumatic), 유압(hydraulic), 보

이스 코일(voice coil), 전자석 구동기 등과 같은 구동기들이 사용되고 있다. 이들 중 공압과 유압 구동기는 작동 주파수 대역이 매우 낮아 고주파 대역의 진동을 억제하기가 어렵다. 따라서 능동진동제어를 위해서는 voice coil actuator가 주로 활용되었다. Kato⁽¹⁾ 등은 스프링 타입의 서보 밸브와 코일 스프링을 작동기로 사용한 능동 제어 방진 테이블을 설계하였다. 이런 형태의 방진테이블은 반도체 제조, 정밀 공작 기계, 정밀 계측기기에 널리 사용되고 있다. Chen⁽²⁾ 등은 voice coil actuator를 능동 방진 테이블에 적용하였다. Park⁽³⁾ 등은 네 개의 지지대와 그 내부의 voice coil를 사용하여 능동 진동 방진 시스템을 설계 하였다. Chen⁽⁴⁾ 등은 마이크로-위치제어를 할 수 있는 전자석 작동기를 제안하였고, Gao와 Li⁽⁵⁾는 자외재료와 영구자석을 이용하여 능동 진동 제어하는 방진 테이블을 제시하였다.

방진 테이블의 능동진동제어를 위해 사용된 이들 작동기는 성능에 있어서 만족할 만한 결과치를 보여준다. 그러나 이들 작동기가 범용적이고, 누구나

† 교신저자; 정희원, 동국대학교 기계로봇에너지공학과
E-mail : kwakm@dongguk.edu

Tel : (02)2260-3705, Fax : (02)2263-9379

* 정희원, 동국대학교 대학원 기계로봇에너지공학과

운용하기 쉬운 작동기로 보기는 어렵다. Voice coil actuator의 경우를 고려하면 작동기 자체만으로 운용하기 어려우며 리니어 가이드와 하우징 같은 부가장치가 필요하다. 공압 작동기 또한 공기탱크, 솔레노이드 밸브 같은 부가적인 장치들이 필요하다. 무엇보다도 이와 같은 작동기들의 가격은 일반적인 엔지니어들이 사용하기에는 너무 비싼 것이 가장 큰 단점이다. 따라서 넓은 작동 주파수대역과 충분한 발생력을 가지고 있는 저가의 액추에이터 개발이 반드시 필요하다.

Voice coil actuator의 경우 코일에 전류가 흐르게 되면 자장이 생성되고 이 자장이 프레임에 고정된 영구 자석의 자장과 반응하도록 되어 있다. 여기에 사용되는 원리는 Lorentz 힘 원리에 근거한 전기-기계 에너지 변환 과정이다. 이 법칙은 전류를 운반하는 도체가 자장에 놓이게 되면 힘이 작용하는 것인데 이 힘은 전류와 자력 밀도에 비례한다. 이런 작동기를 일반적으로 전동식 작동기로 부른다. 이에 반해 이 연구에서 개발한 linear magnetic actuator(LMA)는 전자석 원리에 기반한 작동기로서 코일에 의해 생성된 자력과 영구 자석의 자력을 이용한다. 이와 같이 영구 자석과 코일을 이용하는 경우 위에서 언급한 문제점들을 쉽게 해결할 수 있으며 저가의 작동기를 구현할 수 있다. 이 연구에서는 개발된 LMA에 대해 성능 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

2. LMA의 구조 및 작동 원리

이 연구에서 개발한 LMA의 구조는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에 보이는 LMA는 세 개의 영구자석과 두 부분에 코일이 감겨 있는 구조이다. 세 개의 영구자석은 서로 반대되는 극성으로 배열되어 있어 기본적으로 자력 스프링과 같이 작동한다. 코일이 감겨 있는 부분에 전류를 통하면 양쪽에 배열되어 있는 자력이 감소될 수도 있고 증가될 수도 있다. 즉, 서로 반대의 극성으로 인해 영구자석들에 척력이 작용하게 되어 있고, 코일에 전류를 흘려주게 되면 자석에서 나온 자력선과 코일에서 나온 자력선이 같을 경우에는 자력이 증가되고 반대일 경우에는 감소하게 된다⁽⁶⁾. 이를 이용해 가운데 축을 움직일 수 있다. 이 연구에서 제안한 액추에이터는 이런 방

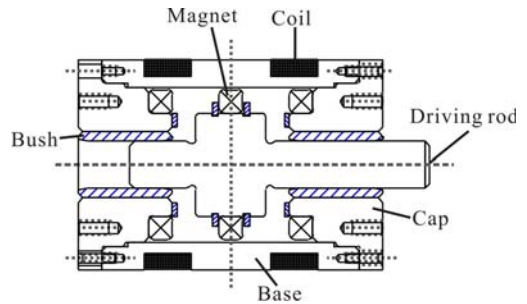


Fig. 1 Schematic diagram of LMA



Fig. 2 LMA prototype

식으로 구동되는 단순한 작동기이다. 이 작동기는 스프링, 댐퍼 그리고 능동 운동 제어 장치 등 여러 가지 다양한 목적의 장치로 사용될 수 있다. 이 연구에서 개발한 LMA의 중요한 특징 중 하나는 운동 축이 항상 가운데에서 평형상태를 유지하고 있다는 것이다.

Fig. 2에 보이는 LMA의 제원은 다음과 같다. 외형 크기 지름은 45 mm이며 높이는 75 mm이다. Stroke는 4 mm이고, coil turn 수는 약 250이다. LMA는 ring-magnet 3개, driving rod, cap 2개, base, 두께 0.6 mm인 코일로 구성된다. Fig. 1에서 제안한 LMA는 자석의 추가가 가능한 구조로 되어 있어 발생력을 조절할 수 있으며 병렬 또는 직렬로 연결할 경우 작동력을 배가시킬 수 있다.

3. LMA의 Block Force

전류대비 정적인 힘을 계측하기 위하여 Fig. 3과

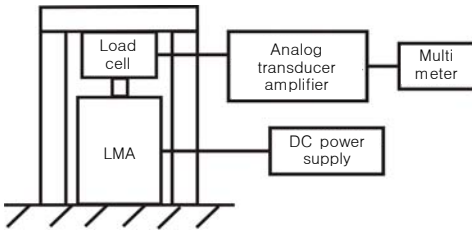


Fig. 3 Block diagram for experimental setup for static block force measurement

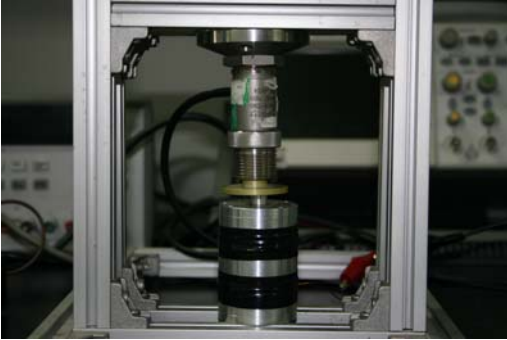


Fig. 4 Experimental setup for static block force measurement

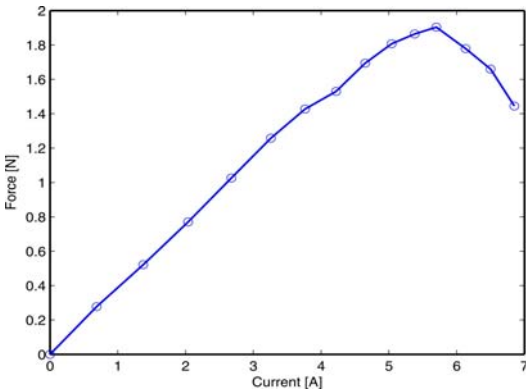


Fig. 5 Block force vs. current of LMA

같이 실험장치를 구성하였다. DC Power Supply 장비인 Agilent사의 E3633A⁽¹¹⁾를 LMA에 연결하고 입력전압을 증가시켜 힘을 크게 하면서 입력 전류를 측정하였다. Fig. 4에 보이는 바와 같이 LMA의 끝 단에 정적인 힘을 계측 할 수 있는 Schaevitz사의 Load Cell(9834)⁽¹²⁾를 부착하고, Analog Transducer Amplifier⁽¹²⁾를 거쳐 HP사의 34401A Multi-meter⁽⁷⁾로 전압을 측정하고 이를 힘으로 변환하였다. 이와 같은 방법으로 산출된 전류 대비 정적 블

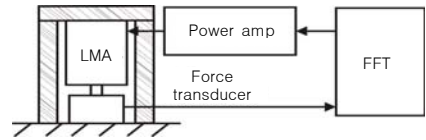


Fig. 6 Block diagram for experimental setup for block force measurement

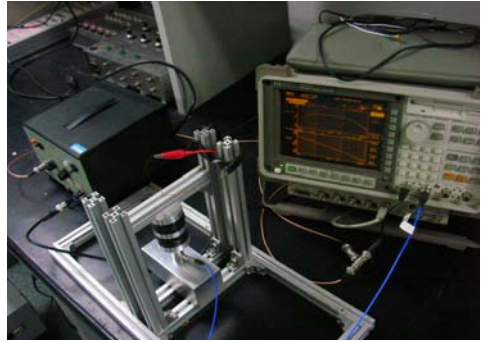
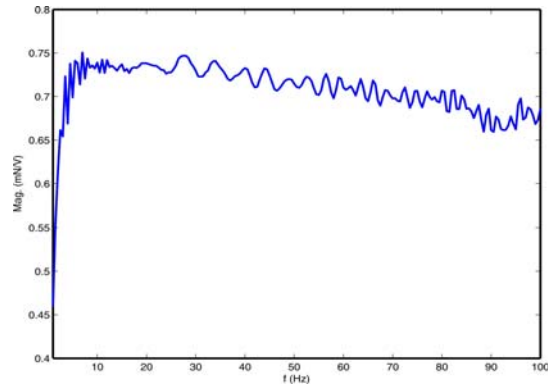
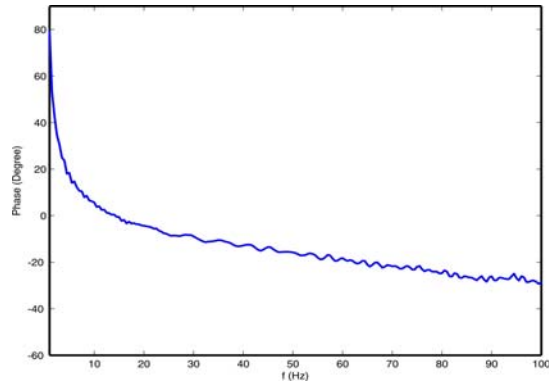


Fig. 7 Experimental setup for block force measurement



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 8 Block force transfer function of LMA

록력 선도가 Fig. 5이다. Fig. 5로부터 알 수 있듯이 6A 부근 에서 가장 큰 힘을 보여주고 이후 전류를 증가시켜도 정적 블록력은 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 전류 증가가 코일의 발열로 변환 되어 효율이 떨어지는 것으로 볼 수 있다.

LMA의 주파수별 동적인 블록력을 계측하기 위해 Figs. 6, 7과 같은 실험 장치를 구성하였다. ICP type의 Force Transducer(208C02)⁽⁹⁾를 LMA의 끝단에 연결하고 FFT 장비인 HP사의 Dynamic Signal Analyzer(HP 35670A)⁽⁷⁾와 구동 앰프(Bruel & Kjaer type 2706)⁽⁸⁾, 전하앰프(2706)⁽⁸⁾를 이용해 주파수 응답 곡선을 계측하였다. 계측한 주파수 대역은 0~100 Hz이다. Fig. 8은 주파수별 증폭앰프로의 입력 전압 대비 발생한 블록력을 보여준다. Fig. 8(a)으로부터 약 75 mN/V의 힘이 발생함을 알 수 있다. 또한 10 Hz이상에서 안정적인 블록력을 제공함을 알 수 있다.

4. LMA의 Inertia Force

앞에서 언급하였다시피 LMA는 active tuned mass damper로 사용될 수 있다. 이 경우 축을 구조

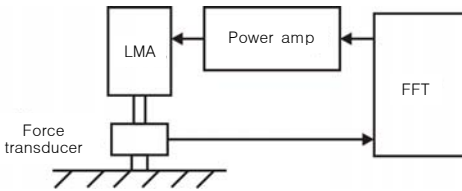


Fig. 9 Block diagram for experimental setup for inertia force measurement

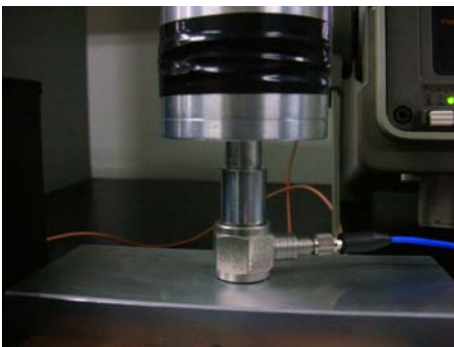
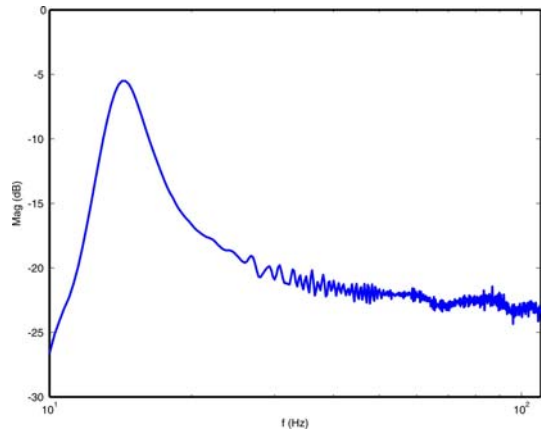
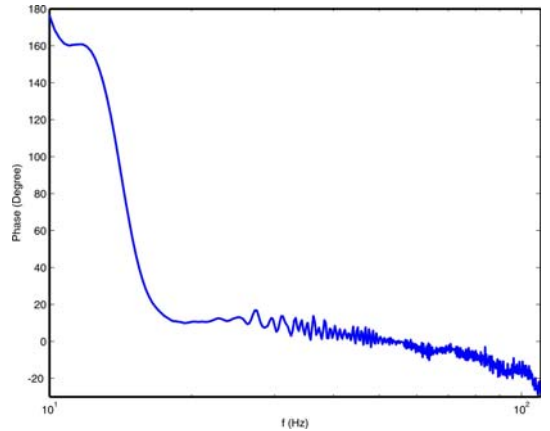


Fig. 10 Experimental setup for inertia force measurement

물에 고정하고 LMA의 하우징을 진동시킴으로써 구조물의 진동을 상쇄시키게 된다. LMA에 의한 전달력을 계측하기 위해 Fig. 9와 같은 실험 장치를



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 11 Transfer function of transmitted force of LMA

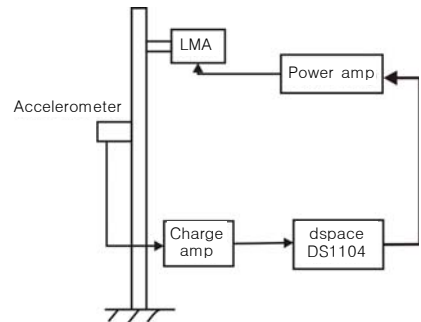


Fig. 12 Block diagram for experimental setup for forced vibration suppression

구성하였다. LMA의 베이스에서 발생 되는 힘을 측정하기 위해 고정된 지지대에 force transducer를 고정하고 블록력을 계측한 방식으로 실험을 수행하

였다. 10~110 Hz 대역으로 정하였다.

Fig. 11은 전달력과 위상을 보여준다. 실험결과로부터 LMA의 고유진동수는 약 14 Hz임을 확인할 수 있다. 또한 전달력은 14 Hz 이후 급격하게 떨어지는데 현재 개발된 LMA를 효과적으로 사용하기 위해서는 고유진동수에 맞추는 것이 가장 효과적일 것으로 보인다. 물론 LMA에 자석을 추가하거나 스프링을 추가해 LMA의 동적 특성을 바꿀 수 있다.

5. 능동진동제어 실험

LMA를 이용한 능동진동제어 실험을 위해 Fig. 12와 같이 실험을 구성하였다. LMA와 가속도계를 외팔보에 부착하고 제어기로는 PPF 제어기를 사용하였다. 자유진동 실험을 통해 외팔보의 기본진동수는 9.5 Hz임을 알 수 있었다. 능동진동제어는 이 기본 진동 모드를 제어할 수 있도록 설계되었다. 사용된 능동진동제어 알고리즘은 PPF 제어 알고리즘이고 DS1104(dspace)⁽¹⁰⁾ 보드를 이용해 구현하였다. Fig. 14는 Simulink로 구성한 PPF 제어 알고리즘을 보여주고 있다.

Fig. 15로부터 외팔보를 자유진동 시킨 후 제어기를 구동하는 경우 진동이 저감되는 것을 알 수 있다. 외팔보의 고유진동수가 LMA의 고유진동수보다 낮기 때문에 LMA의 능동진동제어 효과는 약간 떨어진다. LMA의 고유진동수를 대상 구조물의 고유진동수에 맞출 경우 능동진동제어 효과는 커질 것으로 판단된다. 제어기 구동후 발생하는 잡음은 구동축과 하우징 사이의 베어링 마찰로 인해 발생하는 것으로 예상된다. 차후 이 부분을 개선하면 LMA가 보다 효과적인 작동기로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

6. 결 론

이 연구에서는 능동진동제어를 위해 새로운 개념의 선형 자기 액추에이터(LMA)를 개발하였다. 이 연구에서 개발한 LMA의 동적 특성에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) LMA의 구동은 예상한 작동 원리에 입각해 액추에이터로 사용 가능하다.
- (2) LMA는 진동 제어를 위해 충분한 구동력을

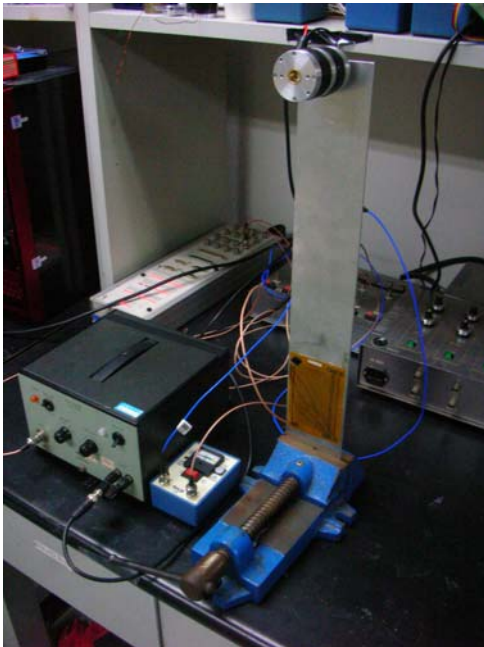


Fig. 13 Experimental setup for forced vibration suppression

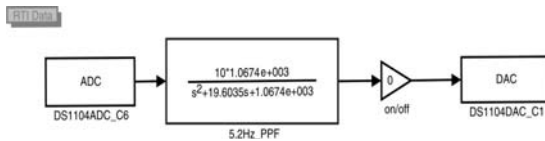


Fig. 14 PPF controller using Simulink

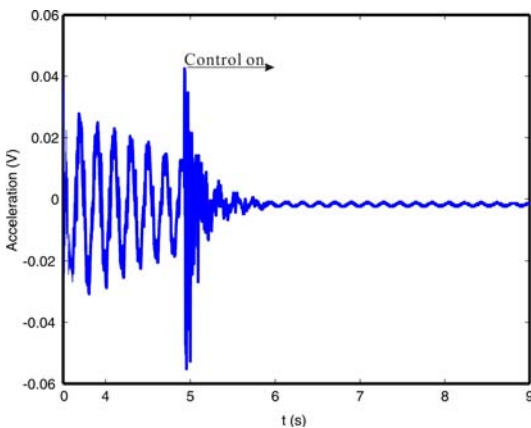


Fig. 15 Time history of accelerometer output

제공할 수 있다.

(3) LMA를 이용해 능동진동제어를 성취할 수 있다.

차후 LMA의 이론적인 모델링에 대한 연구와 성능 파라미터를 분석하여 보다 개선된 액추에이터를 개발할 예정이다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소가 지원하는 수중 운동 특화 연구센터의 수중/구조진동 연구실의 지원으로 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드린다.

참 고 문 헌

(1) Kato, T., Kawashima, K., Sawamoto, K. and Kagawa, T., 2007, "Active Control of a Pneumatic Isolation Table Using Model Following Control and a Pressure Differentiator," Precision Engineering 31.

(2) Chen, Y. D., Fuh, C. C. and Tung, P. C., 2005, "Application of Voice Coil Motors in Active Dynamic Vibration Absorbers," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 3, pp. 1149~1159.

(3) Park, K. H., Choi, D. Y. and Kim, S. Y., 2008, "Four-mounted Active Vibration Isolation System Using the Voice Coil Actuators," International Congress on Sound and Vibration, pp. 582~589

(4) Chen, M. Y., Tzeng, H. W. and Hung, S. K., 2007, "A New Mechanism Design of Electro-magnetic Actuator for a Micro-positioner," ISA Transactions 46, pp. 41~48.

(5) Gao, Y. and Li, L., 2008, "Model of the Active Vibration Isolation Platform with Magnetostrictive Actuators," International Conference on Automation and Logistics, pp. 346~350.

(6) Kim, J. K., 1998, "Handbook of Magnet & DC Motor," Han-Jin.

(7) <http://www.hp.com/>

(8) <http://www.bksv.com/>

(9) <http://www.pcb.com/>

(10) <http://www.dspace.de/>

(11) <http://www.agilent.com/>

(12) <http://schaevitz.com/>