

# 보이스코일형 LOA의 진동능동제어 시스템에의 응용에 관한 연구

장석영\*, °정상섭\*, 서진호\*, 김형규\*\*, 박희창\*\*\*, 문석준\*\*\*,  
정종안\*\*\*, 박찬일\*\*\*, 정태영\*\*\*

충남대학교 전기공학과\*, 한국원자력연구소\*\*, 한국기계연구원\*\*\*

A Study on the Application for the Vibration  
Active Control by using a Voice coil type LOA

S.M.Jang\*, °S.S.Jeong\*, J.H.Seo\*, H.G.Kim\*\*, H.C.Park\*\*\*,  
S.J.Moon\*\*\*, J.A.Chung\*\*\*, C.I.Park\*\*\*, T.Y.Chung\*\*\*

Chungnam Nat'l Univ.\*, KAERI\*\*, KIMM\*\*\*

## Abstract

In this paper, an active vibration control system using a voice coil type linear oscillating actuator(LOA) is studied to suppress structural vibration. Being compared with a hydraulic actuator, a LOA has simplified structure and requires a few elements in the driving system, so it has lots of merits with respect to economics and maintenance. The general mathematical dynamic model to obtain the algorithm for the realization of vibration active control system is treated. Actually, the performance test of the control system using LOA is carried out on a steel test structure under sinusoidal and white noise excitation. From this test it is confirmed that acceleration level of test structure is reduced near the resonance region. In the future research on the application to large structures will be studied.

## 1. 서론

본 논문에서는 유압식에 비해 구조가 간단하고 부품수가 작아 경제적이며 유지보수에 매우 유리한 전기식 액츄에이터로 보이스코일형 LOA를 진동제어시스템의 구동장치로 이용하기 위한 연구를 하였다. 즉 평판형 NdFeB의 영구자석 계자와 플라스틱 보빈에 감겨진 코일로 이루어지는 가동자로 이루어지는 보이스코일형 LOA를 설계제작하여 이를 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템의 구동력발생장치로 개발하기 위한 연구를 하였다. 결과적으로 LOA를 구동력으로 하는 능동제어시스템을 구성하여 500kg급 시험구조물을 대상으로 하는 제어시스템의 성능 시험을 수행하여 제어의 응답성이 매우 좋은 결과를 얻으므로써, 실제 응용개발을 위한 중요한 기반을 확립하였다.

## 2. 제어의 수학적 모델링 및 알고리즘

### 2.1 동특성파악 및 전달함수

제어시스템에의 응용을 위해 제작한 LOA의 동특성을 조사하였다. 이를 위한 실험은 신호발생기에서 발생하는 임의의 일정 주파수를 입력시켰을 때, 입력전압에 따른 LOA의 왕복운동과 관련되는 LVDT의 출력 변위전압을 계측하여 이로부터 선형성의 확인 및 동특성 함수인 전달함수를 도출하였다. 이때 주파수는 5Hz로부터 20Hz까지의 범위에서 실험을 수행하였다. 각 주파수에서의 응답결과를 이용하여 curve fitting한 결과를 전달함수로 나타내면 식(1)과 같은데 이때 적용한 방법은 최소자승법이다.

$$G(s) = \frac{1.86 \times 10^2}{s^2 + 1.50s + 376.50} \quad (1)$$

### 2.2 수학적 모델링 및 적용

제작한 시험구조물의 전후진동을 1자유도로 치환하면 다음과 같다.

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_s \ddot{x}_b + u \quad (2)$$

여기서  $\ddot{x}_b$  및  $x_s$ 는 각각 기반가속도 및 구조물의 기반에 대한 상대변위이다. 또한 등가질량  $m_s = 432\text{kg}$ , 등가강성 계수  $k_s = 4.15 \times 10^6 \text{N/m}$ 이며 등가점성계수  $C_s$ 는 감쇠비를 1.3%를 적용하였다. 그런데 등가질량은 FEM 해석결과로부터 해당 진동형 구조물의 유효질량을 구한 것이고, 강성계수는 이미 알고 있는 구조물의 고유진동수와 등가질량으로부터 계산한 결과이며, 감쇠비는 직접 계측한 값이다. LOA와 관련 된 보조질량의 운동에 의한 관성력 또는 제어력은 다음의 식과 같다.

$$u = m_a \ddot{x}_a \quad (3)$$

여기서  $m_a = 23\text{kg}$ 으로 보조질량이며,  $\ddot{x}_a$ 는 보조질량의 구조물에 대한 상대 가속도이다.

실제 제어에서는 LOA의 입력전압을 조정함으로써 제어력을 발생시키므로 입력전압과 보조질량의 변위  $x_a$ 와의 관계인 전달함수 식(1)을 이용한다. 즉, 식(1), 식(2) 및 식(3)을 이용하여 시스템의 모델링을 하고 이로부터 제어이득을 산정하게 된다.

### 2.3 제어 알고리즘

진동제어 대상구조계의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = \overline{B}u + \overline{H}f \quad (4)$$

여기서  $M, C$  및  $K$ 는 구조계의 관성, 감쇠 및 강성 매트릭스이며,  $u$ 와  $f$ 는 각각 제어력 및 기진력 벡터이다. 또한 식(4)을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{z} = Az + Bu + Hf \quad (5)$$

여기서 상태량 벡터  $z$ 와 계수 매트릭스는 각각

$$z = \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}\bar{B} \end{Bmatrix}, \quad H = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}\bar{H} \end{Bmatrix}$$

와 같다. 또한 상태량 벡터와 출력벡터  $y$ 와의 관계는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = Dz \quad (6)$$

여기서  $D$ 는 출력매트릭스이다. 제어계의 2차 성능지수는 식(7)과 같이 정의한다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (z^T Q z + u^T R u) dt \quad (7)$$

여기서 상첨자  $T$ 는 전치 매트릭스를 나타내고,  $Q$  및  $R$ 은 각각 실수값을 갖는 positive semi-definite 및 positive definite 대칭매트릭스이다.

식 (7)의 성능지수를 최소화하면서 제한조건식 (5)을 만족하는 제어이득  $G$ 를 Riccati 방정식으로부터 구할 수 있다. 이 경우 모든 상태량벡터를 제한시켜야 하므로 미지의 상태량이 존재하거나 출력상태량을 이용하기 위해서 준최적화 방법을 도입하여 산정된 제어이득을 수정하였다. 제어력 및 수정된 제어이득  $C^*$ 는 다음과 같다.

$$u = C^* y \quad (8)$$

여기서  $C^* = GD^T(DD^T)^{-1}$

본 연구에서는 준최적화방법이 대상 제어계의 안정성을 보장하지 못하므로, 수정된 제어이득에 의한 대상 구조계의 안정성을 확인한 후 제어성능검증시험을 수행하였다.

### 3. 제어시스템의 구성 및 시험결과검토

#### 3.1 LOA의 구동 및 제어회로구성

능동제어를 위한 구동력 발생부는 보이스코일형 LOA와 구동회로, 직류전원과, 신호발생장치, 위치센싱을 위한 LVDT와 케환회로, 합산부, 적분기, 증폭부로 구성이 된다. 즉 함수발생기에서 발생하는 제어신호와, LVDT로부터 케환되는 위치센싱신호를 비교하여 합산부와 적분기를 통하여 그 차이를 계산하여 증폭부를 거치며 LOA를 제어하게 된다. LOA에는 그림.1에서와 같이 구동회로와 위치제어용 LVDT 및 직류공급기 등으로 구성되어 있다. 구동회로에는 PID제어가 가능한 회로가 내장되어 있어 LVDT신호를 이용한 내부 폐루프가 형성되도록 하였다. 이는 LOA의 선형성을 높이고 보조질량의 움직임을 항상 안정한 상태로 있게하여 컴퓨터에 의한 외부 폐루프가 보다 효율적으로 형성될 수 있도록 하기 위함이다.

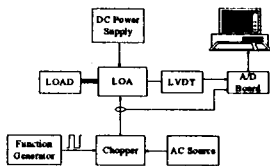


그림. 1 LOA의 구동 및 제어회로

#### 3.2 진동의 능동제어시스템 구성

진동을 능동적으로 제어하기 위한 시스템은 그림.2에서 보는 바와 같이 LOA와 구동회로 및 구조물을 포함한 요소에 의해 구현한다. 그런데 제어시스템은 진동을 발생시키는 진동대, 구조물, 진동가속도를 측정하는 가속도계와 신호증폭기, 컴퓨터와의 통신을 위한 A/D, D/A 보드와 제어 알고리즘등으로 구성된다.

즉 진동하고 있는 구조물의 진동신호를 가속도를 센싱하여 그 신호를 증폭시킨 후 A/D변환기를 통하여 컴퓨터에 입력시킨 후 상태량을 연산하게 된다. 이때 제어 알고리즘에 의해 산정된 제어신호는 D/A 변환기를 통하여 LOA의 구동회로에 전달되게 된다. 여기서 가속도를 센싱한 후 컴퓨터내에서는 디지털 필터를 이용하여 속도 및 변위를 실시간으로 산정하였다. 이를 증폭기 내부의 아날로그 적분회로를 통하여 산정할 수도 있으나 구조물의 고유진동수가 매우 낮은 경우에는 신뢰성이 낮으므로 이를 채용하지 않았다. A/D 및 D/A 보드는 DT 2831, 가속계는 B&K 4370을 사용하였다.

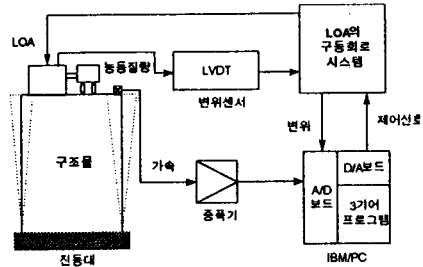


그림.2 진동의 능동제어시스템 구성도

그림.3은 능동제어시스템을 실제로 구성한 시스템 사진으로 찍은 것이다.



그림. 3 능동제어시스템의 실제구성도

#### 3.3 능동제어시험 방법

시험구조물의 진동을 능동으로 제어하는 시스템의 성능시험을 위해서, 시험을 위한 진동을 발생시키는 6자유도 대형진동대 위에 진동을 하게 될 구조물의 하판을 고정하고, 진동대에 起振신호를 입력하여 구조물을 加振하였다. 그림.4은 진동대와 구조물, 또한 구조물 상부에는 진동제어용 LOA가 설치되어 있는 모습의 사진이다.

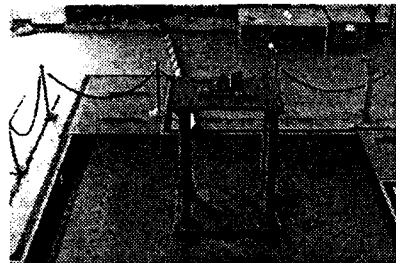


그림.4 진동대, 구조물, LOA의 실제 모습

실제 시험에서 A/D, D/A보드의 성능, 컴퓨터의 연산처리 속도 및 시간지연의 영향등을 고려하여 A/D 채널간의 샘플링주파수는 50,000Hz, triggered scanning 주파수는 500Hz로 설정하여 LOA제어 신호를 2m/sec내에 처리하였다. 이는 실제 시험구조물의 주관심 진동형 고유주기의 약 1/30에 해당한다. 시험은 진동대의 기진입력신호 주파수를 5Hz부터 15Hz까지 0.5Hz 또는 1.0Hz단위로 변경하는 정현파 기진시와, 다양한 종류의 주파수가 혼합된 백색잡음 기진시에 시험을 수행하였다.

### 3.4 시험결과 및 분석

그림.5은 14Hz의 정현파 起振 입력주파수에 따른 구조물의 진동 제어시의 가속도를 나타낸 것으로, 제어를 하기 전과 후의 진동레벨을 5회에 걸쳐 측정한 후 실효값의 최대값을 기준으로하여 평균화 처리를 수행하였다. 또한 그림. 6는 백색잡음으로 起振하였을 때의 성능시험결과를 나타낸 것으로 마찬가지로 제어가 되기 전과 후에 구조물의 진동레벨을 측정한 자료이다. 그림. 5과 그림. 6로부터 두 경우 모두 구조물의 공진구역인 14Hz근처에서 진동제어의 효과를 명확하게 확인할 수 있다.

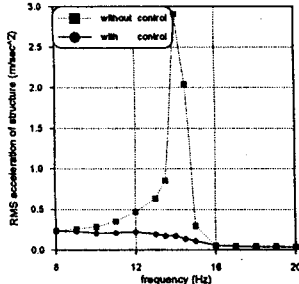


그림.5 정현기진일 때의 제어 전과 후의 가속도의 평균화 처리된 크기

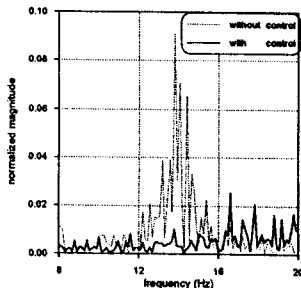


그림.6 백색잡음일 때의 제어 전과 후의 구조물의 가속도 실효치

또한 그림. 7은 진동대의 정현기진 입력주파수가 14Hz일 때 능동제어가 실시되기 전과 후에 구조물에서 측정된 가속도와 보조질량의 변위를 나타내고 있다. 즉 그림.7(a)는 제어가 되기 전의 구조물의 진동상태인데 가속도가  $\pm 4 \text{ m/s}^2$ 로 진동하고 있음을 보이고 있다. 또한 그림.7(b)는 시간이 쉰인 순간에 제어가 시작되면 구조물의 가속도가 점차 작아지기 시작하여 대략 4.5초 근처에서 가속도가 매우 작아지는 응답을 보이므로, 제어가 잘 되고 있음을 보인다. 또한 그림.7(c)는 제어가 되고있을 때 시간에 따른 보조질량의 변위를 틀 나타낸 것이다. 제어 후의 시간 이력으로 부터 제어효과가 나타나는 데 소요되는 시간은

약 6초정도가 됨을 알 수 있다. 이는 초기상태에서 구조물과 LOA가동자 사이에 상대변위운동이 발생하면서 이에 따른 관성력을 극복하기 위한 소요시간 때문인 것으로 판단된다.

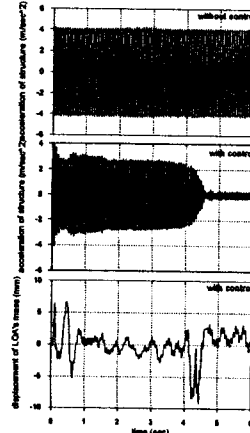


그림.7 LOA 여자 주파수 14Hz일 때 보조질량의 제어시험 응답과 변위

## 4. 결론

본 연구에서는 NdFeB제질의 영구자석계자와, 보빈과 코일로 이루어지는 가동자로 구성되는 보이스코일형 LOA를 구동력발생장치로 하여 500kg급 시험구조물을 대상으로 진동의 능동제어를 위한 시스템의 시험을 한 결과를 얻었다. 즉,

- 1) 구조물의 공진주파수 부근에서 진동의 제어효과를 확인하였다. 구조물의 유효질량에 약 5%의 보조질량으로 최대 1/10까지 제어가 가능한 것을 확인하였다.
- 2) 초기상태에서 구조물과의 상대 관성력으로 인하여 진동 제어효과가 늦게 나타남을 확인할 수 있었다. 유압식 액추에이터의 경우와 같이 초기상태에서 상대운동을 하지 않는다면 더 좋은 제어효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.
- 3) LOA는 유압식 액추에이터에 비해 구조가 간단하고 유지보수 측면에서 유리하나 코일에서 발생하는 열의 방출 문제, 고밀도 추력장치의 개발을 통한 대형구조물에의 적용문제등이 추후 계속 연구되어야 할 것이다.

이상과 같은 결과에 의하여 실용화를 위한 기반을 확립하였다. 또한 이러한 능동제어시스템은 향후 소음의 능동제어에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## [참고문헌]

- [1] Nasar, S.A., "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc., 1987
- [2] 山田 -- "리니어모터 응용핸드북"일본공업조사회, 1985
- [3] A. Basak "Permanent magnetic linear DC motors" Clarendon Press, Oxford, 1996
- [4] Schmitz, N.L. and Novotny, D.W., "Introductory Electromechanics, John Wiley & Sons, 1965
- [5] 장석명 외 "진자장이론을 적용한 FEM해석에 의한 보이스코일 평판형 LOA설계", 한국기계전기학회, 96