

## 전자석 액츄에이터에 의한 수동방진 테이블의 제어

최 현\*(시그널링크(주)), 이 정윤\*\* (경기대 기계시스템디자인공학부)

### Vibration control of the vibration isolation system using the electromagnetic actuator

Hyun Choi\*, Jung-Youn Lee\*\*

#### ABSTRACT

As the most precision equipment requiring very strict vibration environment are vulnerable to the surrounding vibration condition, they adapt the passive or active vibration isolation system. When it comes to the passive isolation system, the resonance of the isolation system causes excessive resonance response, and finally results in the degrade the equipment performance.

This paper deals with the active control method to control this resonance induced response, and includes the experiment on the active control for controlling the resonance response on the table against the excitation of the same frequency with the natural frequency of the isolation system. The electromagnetic actuator was designed and the control effect was verified by the experiment. The experiment showed that the electromagnetic actuator is effective for controlling the low frequency isolation resonance response of the precision equipment.

Key Words : vibration control(진동 제어), resonance response(공진응답), electromagnetic actuator(전자석 액츄에이터)

#### 1. 서론

가공 및 회로기술의 비약적인 발전에 따라 반도체를 비롯한 초정밀 가공분야에 많은 정밀가공, 검사 및 측정장비들이 사용되고 있다. 최근의 정밀생산 및 검사장비는 작업 정도(accuracy)에 따라서 엄격한 진동환경이 요구된다. 그러나 현장에서는 각종 유틸리티 공급을 위해 팬, 펌프 및 콤프레셔 등을 사용하고 있으며 이로 인해 진동이 발생하고 있다. 이런 진동으로부터 정밀장비를 보호하기 위해 방진효율이 높은 공기 스프링이나 공기 부상을 이용한 수동 방진 시스템<sup>(1)</sup>이

널리 사용되고 있다. 그러나 높은 방진효율을 얻기 위하여 방진 고유진동수를 낮게 설정하는 경우, 방진 고유진동수와 동일한 주파수를 포함하는 진동 외란(vibration disturbance)에 의하여 방진시스템에 공진이 발생하여 오히려 작업 테이블에 과도한 진동이 발생되고 정밀 작업에 나쁜 영향을 주게 된다<sup>(2)</sup>.

진동원으로부터 전달되는 진동을 효과적으로 제어하는 방법에는 에너지의 공급 유무에 따라 크게 수동제어와 능동제어<sup>(3)</sup>로 나누어진다. 수동제어는 외부의 에너지를 필요로 하지 않지만 진동을 제어하는 주파수에 한계

가 있고 공진 주파수 부근에서 더 큰 진폭이 발생할 수 있는 문제점이 있다. 이에 반해 능동제어는 피드백 제어에 의해 진동제어가 우수하므로 외부에서 발생하는 지진이나 바람과 같은 하중에 대해서도 효과적으로 제어할 수 있다.

이렇게 구조물을 능동제어하는 방식은 건물이나 교량 등에 적용한 사례가 많이 보고(4~6)되고 있다. 그러나 건물이나 교량은 구조물의 규모가 매우 크기 때문에 고유진동수가 낮아 공작기계나 반도체 장비와 같이 소규모이고 정밀 제어에 적용하는 데는 어려움이 있다.

본 연구에서는 고정밀 작업이 요구되고 수동방진이 된 공작기계나 반도체 장비 등이 예기치 못한 바닥 가진 상태로 인하여 발생하는 진동을 저감시키기 위해 능동제어를 사용하였다. 먼저 이론적인 해석을 통하여 유효성을 확인하고 실험을 실시하였으며 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 제시한 제어기의 효과와 적용성을 검토하였다.

## 2. 본 론

### 2-1 대상 시스템의 수학적 모델

여러 형태의 가속도 운동을 표현하기 위하여 건물의 질량이 무시될 정도의 큰 질량 (large mass)을 선택하였으며, 대상시스템을 Fig.1 과 같은 단순화모델을 이용하여 운동방정식을 표현하였다. 지반 질량에 지반 가속도를 발생시키는 지진력을 작용시켜 지반 가속도 운동을 표현함으로써, 지반과 구조물 간의 상대운동에 의한 지진력의 전달과정을 보다 현실적으로 표현할 수 있다. 특히, 이러한 모델의 장점은 축소모델의 가진실험 등 (shake table test)의 물리적 의미를 보다 직접적으로 표현할 수 있다는 장점이 있다. 큰 질량에 입력 지진가속도를 발생시킬 수 있는 힘을 작용하여 입력된 가속도를 발생시키고 지반, 건물바닥 및 장비의 질량을 표현하는 2 자유도의 집중질량 시스템(2 DOF

lumped parameter model)으로 단순화하였으며, 운동방정식은 식(1)과 같이 하였다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad (1)$$

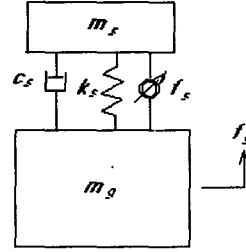


Fig. 1 Simplified lumped model of 2 degrees of freedom

여기서  $x$ 는 변위,  $M$ 은 질량행렬,  $C$ 는 감쇠행렬이며  $K$ 는 강성행렬로서 식(1)은 다음과 같이 표현된다.

$$M = \begin{bmatrix} m_g & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix},$$

$$x = \begin{Bmatrix} x_g \\ x_s \end{Bmatrix}, \quad f = \begin{Bmatrix} f_g - f_s \\ f_s \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 외력 벡터,  $f_g$ 는 지반가속도로부터 발생하는 힘이며  $f_s$ 는 전자석 액츄에이터에서 발생하는 제어력으로 작업 테이블과 큰 질량에 짝힘으로 작용된다. 또한  $c_s, k_s$ 은 테이블과 지반사이의 강성 및 감쇠 계수를 나타낸다.

운동방정식을 상태방정식으로 변환시키기 위하여 변위와 속도로 이루어진 상태벡터  $z$ 를 다음 식과 같이 정의한다.

$$z = \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

식(1)의 양변을 질량행렬의 역행렬을 곱하면 다음 식으로 된다.

$$\ddot{x} + M^{-1}C\dot{x} + M^{-1}Kx = M^{-1}f \quad (4)$$

여기서 식(4)를 식(3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{x} \\ \dot{z}_2 &= \ddot{x} = -M^{-1}Kx - M^{-1}C\dot{x} + M^{-1}f \\ &= -M^{-1}Kz_1 - M^{-1}Cz_2 + M^{-1}f \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 다음의 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} u \\ &= Az + Bu \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $u$ 는 입력벡터이다.

전자석 액츄에이터에 설치된 회로방정식은 다음과 같이 전류에 대한 1차 미분방정식<sup>(7)</sup>으로 표현된다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri + e_c - e_b) \quad (7)$$

여기서  $i$ 는 전류,  $L$ 은 리액턴스,  $R$ 은 저항,  $e_c$ 는 제어기에서 발생하는 제어 출력이며  $e_b$ 는 전자석 액츄에이터에서 발생하는 역기전력을 나타낸다. 전자석 액츄에이터의 제어력은 코일에 인가된 전류에 비례하며, 그 크기는 식(8)와 같다<sup>(8)</sup>.

$$f_c = N i l \times B = K_c i \quad (10)$$

여기서  $N$ 은 코일의 감긴수,  $l$ 은 길이,  $B$ 는 자속 밀도이며  $K_c$ 는 힘의 정수이다.

## 2-2 제어시스템의 구성

외부에서 가진되는 지진 가속도, 바닥의 진동 및 장비에 작용하는 외력 등 여러 입력을 고려하기 위하여 큰 질량과 정밀장비의 질량인 2 자유도계로 상태방정식으로 표현하

였다. Fig.1에서 수직방향에 대한 자유도만을 고려하므로 2 입력, 1 출력의 제어시스템 블록을 Fig.2와 같은 제어시스템으로 구성하였다.

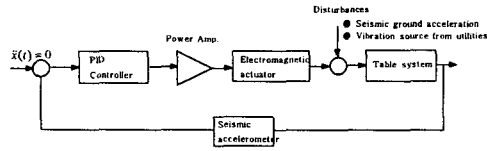


Fig.2 Acceleration feedback PID control

## 3. 시뮬레이션

Fig.1에 있는 2자유도계로 모델링하였으며 입력으로는 El Centro 지진(1940, NS)을 사용하였다.

Fig.3은 El Centro 지진 가속도를 힘으로 변환하여 큰 질량  $m_g$ 에 작용하였을 때 질량  $m_g$ 에 발생한 가속도와 El Centro 가속도를 비교한 그림으로 서로 잘 일치하므로 큰 질량을 이용한 해석 모델이 지진과 같은 지반 운동을 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

Fig.4는 정밀장비 테이블의 가속도를 제어하기 위하여  $m_s$ 에 제어력을 작용시킨 결과로 제어하지 않았을 때보다 제어하였을 때 가속도가 현저히 감소되어 제어가 양호함을 알 수 있다.

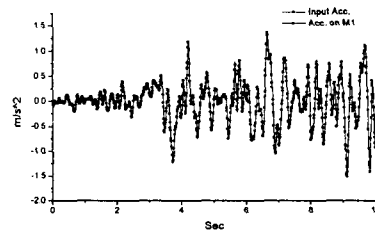


Fig.3 Acceleration of the input and acceleration on the ground mass

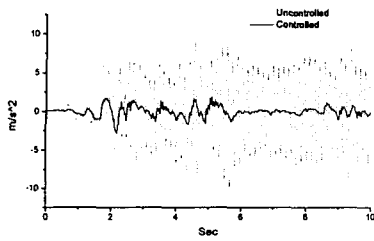


Fig.4 Simulated control effect

#### 4 실험장치

정밀장비에서 발생할 수 있는 큰 진동응답을 제어하기 위하여 Fig.5와 같은 시험장치를 구성하였다. 질량이 50kg의 테이블을 스프링 방진소자를 이용하여 수직방향의 고유진동수가 6Hz가 되도록 방진시스템을 구성하였다. 정밀장비가 설치되는 테이블 위의 진동가속도를 측정하기 위하여 테이블 위에 저주파수에서 감도가 우수한 지진 가속도계를 설치하고, 전자석 액츄에이터(magnetic actuator)를 이용하여 테이블 중앙 하부에 테이블의 가속도를 제어할 수 있도록 제어력을 작용시키도록 설계하였다.

Fig.6은 비제어시와 제어시의 주파수 응답함수를 나타낸 그림으로 임팩트 해머를 이용하여 테이블 상단 중앙부에서 수직방향으로 가진 후 측정하였다. 이 그림은 제어에 의한 테이블 시스템의 동특성 변화를 보여주며 특히 6.75Hz의 고유진동수에서 최대진폭이 제어의 영향으로 약 50% 수준으로 낮아짐을 알 수 있다. 제어시 전자석 액츄에이터의 코일에 전류가 흐르면서 코일간에 발생하는 유도전자기력에 의하여 코일의 접촉 및 진동이

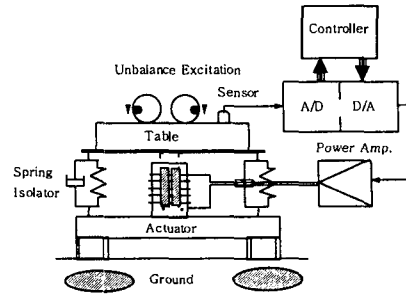


Fig.5 Experimental setup

Table 1 Specification of the electromagnetic actuator

Coil	R(resistance)	21.7 $\Omega$
	L(inductance)	120.2 mH
Magnetic flux	Upper	+0.120 Tesla
	Lower	-0.105 Tesla
Back emf constant		7.20 V/(m/s)

발생하였으며, 이는 제어시의 Fig.6의 주파수특성곡선 노이즈(Noise)로 작용하고 있음을 알 수 있다.

Table 2은 전자석 구동 파워앰프의 게인 값에 의한 고유진동수 및 최대 진폭을 나타낸 표로 게인이 증가함에 따라 제어가 효과적으로 이루어짐을 알 수 있다.

실제 지진파에 의한 가진을 모사하기 위해서는 표준 가속도 파형으로 가진되는 가진 테이블위에서 가속도를 제어하는 실험이 진행되어야 하나 비용 등의 현실적인 문제로 인하여 불평형력에 의하여 수직방향으로 작

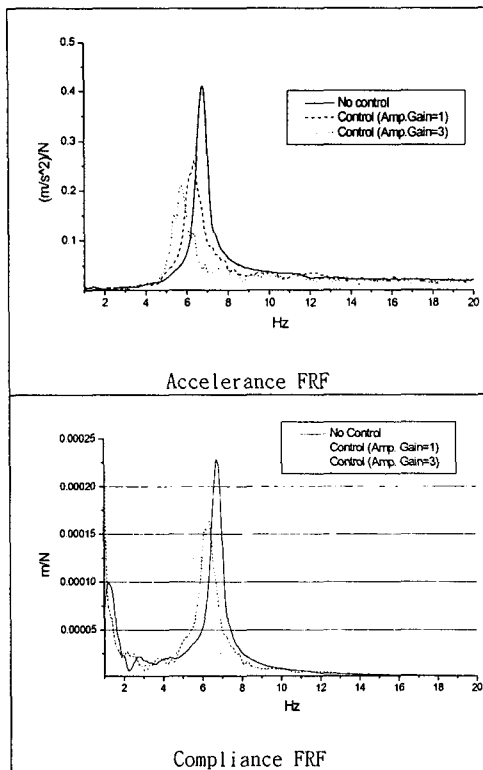


Fig.6 Controlled and uncontrolled state of frequency response function

Table 2 Change of dynamic characteristics by the control effect

	Amp. Gain	$f_n$ (Hz)	peak ( $m/s^2$ )/N
No control	-	6.75	0.424
Control	1	6.37	0.282
	3	5.75	0.220

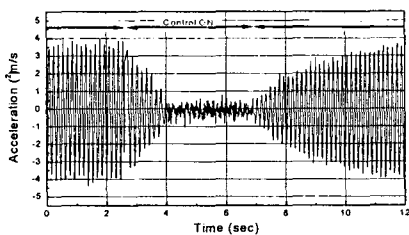


Fig.7 Controlled and uncontrolled acceleration on the table

용하는 하중을 테이블의 중앙부에 작용시켜 테이블의 진동가속도를 제어하는 실험을 실시하였다.

Fig.7은 정밀장비의 방진 고유진동수에 해당하는 회전주기인 405 rpm으로 불평형 가진력이 작용할 때 테이블의 상부에서 측정된 진동가속도를 나타내며 신호의 전반부에서는 공진에 의해서 큰 진동가속도가 발생하다가 제어를 시작하면서 진동가속도가 크게 줄어들어 제어가 잘 되고 있음을 보여 준다. 제어시에 해당하는 중앙부에서 노이즈가 발생한 것은 전자석 작동기 코일의 상호 접촉에 의한 결과로 추후 노이즈를 최소화하는 방안이 검토되어야 한다고 생각한다.

#### 4. 결론

정밀장비의 엄격한 진동환경을 만족시키기 위한 노력으로서, 정밀장비가 위치한 건물에 작용하는 지진하중, 풍하중 등에 의한 구조진동에 의한 정밀장비의 진동환경에 대한 영향을 최소화시키기 위하여 능동진동제어 시스템을 검토하고, 그에 따른 모델실험을 시도하였다.

지반운동을 표현하는 집중질량 모델의 해석을 통하여, 정밀장비의 테이블 위의 진동가속도를 능동제어 함으로써, 지진지 발생하는 구조물의 진동가속도의 증폭현상을 효과적으로 방지할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 지진상태를 모사하는 가진 테이블에서 실험을 수행할 수는 없었으나, 지진시 정밀장비에 작용하는 관성력을 불평형 모터를 이용하여 직접 실험장치의 고유진동수에 해당하는 주파수로 작용시키고 이를 전자석 작동기를 이용하여 제어하는 실험을 수행하여 테이블 위의 진동가속도를 크게 줄이는 실험결과를 얻을 수 있었다.

향후, 보다 개선된 형태의 전자석 작동기의 설계를 통하여 실험에서 문제가 되었던 코일간의 접촉에 의한 노이즈를 최소화시키고, 본 논문에서 단순화를 위하여 고려하지

않았던 정밀 테이블의 회전 자유도를 고려한 제어시스템 구성을 통하여 보다 개선된 제어 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- (1) Daniel J. Inman, "Engineering Vibration", Prentice Hall, 1996.
- (2) Farzad Naeim, "The seismic design handbook", Structural Engineering Series, Van Nostrand Reinhold, 1989.
- (3) H.H.E. Leipholz and M. Abdel-Rohman, "Control of Structure", Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
- (4) T.T. Soong, "Active Structural control :Theory and Practice", Longman Scientific & Technical, 1990.
- (5) L.L. Chung, et al, "Experimental Study of Active Control for MDOF Seismic Structure", Journal of Engineering Mechanics. Vol. 115. No. 8, pp. 415~436, 1986.
- (6) J.T.P. Yao, "Concept of Structural Control", Journal of Structural Division ASCE 98, pp. 1567~1574, 1972.
- (7) G.F. Franklin and J. David Powell, "Feedback Control of Dynamic Systems", 1986.
- (8) John D. Kraus, "Electromagnetics", McGraw-Hill Book, Co., 1988.