

3 자유도 능동형 제진 시스템을 위한 신호처리 및 강인제어에 관한 연구 A Study on the Signal Processing and Robust Control for a 3-DOF Active Vibration Isolator

문준희† · 김화수* · 박희재**

Jun Hee Moon, Hwa Soo Kim and Heui Jae Pakh

Key Words : Active Vibration Isolation.(능동형 제진), Signal Processing (신호 처리), Robust Control (강인 제어), System Identification (시스템 식별)

ABSTRACT

The vibration isolation system is a system that attenuates the vibration transmitted from surroundings by using external energy supply like electricity and feedback and/or feedforward functions. Such a system needs stiff structure to make precise positioning without ripple within a certain bandwidth. So, a horizontal and rotary arrangement of the actuation module is suggested by using lever linkage. Modeling and kinematic formulation are completed and system identification is accomplished to tune the design variables accurately. The vibration isolation control is performed by mu-synthesis with the uncertainties in design variables. Low frequency signal enhancement circuit and saturation proof integration algorithm are devised to use seismic sensors for displacement control. This overall system shows good disturbance rejection performance.

1. 서론

반도체 및 디스플레이 산업의 발전에 따라 초정밀 환경조성의 필요성이 대두되고 있다. 제품의 불량율에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나인 진동을 제어하기 위해 여러 가지 방법들이 연구되고 있다. 본 연구에서는 능동형 제진 기법을 사용하여 국부적으로 진동을 제거하거나 감소시키는 스테이지를 설계하고 제어 및 측정 시스템을 구축하였다. 각각의 과정에서 개발된 기술과 내용을 소개하고자 한다.

2. 3 자유도 능동형 제진 시스템의 구조 및 모델링

2.1 구조

본 연구에서 개발한 능동형 제진 시스템의 개략도는 Fig.1 과 같다. 하판과 상판, 그리고 3 개의 구동 모듈로 이루어져 있으며, 각각의 구동 모듈은 압전 구동 소자와 레버 링크지 및 플렉서 힌

지를 이용한 치구들로 구성되어 있다. 구동 모듈의 배치는 서로간의 간섭이 최소화되도록 회전형(rotary) 배치를 하였으며 상판도 원형이 되어 어느 방향에서도 대칭이 되도록 하였다. 레버 링크지를 이용하여 수평 구동이 되도록 한 것은 수평 방향의 강성을 최대한 확보하기 위함이다. 각 구동 모듈은 압전 구동 소자의 수평 방향의 구동을 수직 방향의 구동으로 전환하는 역할을 한다.

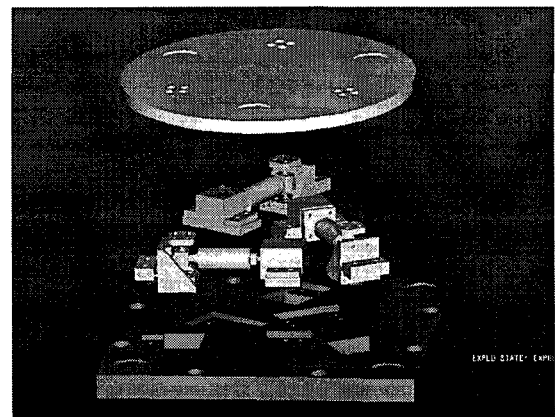


Fig. 1 Horizontal and rotary arrangement of the actuation module in the vibration isolation system

2.2 모델링

본 연구에서 모델링을 하는 이유는 제진이 수행하는 주파수 영역에서 실제 시스템과 비슷한 주

† 서울대학교 마이크로열시스템 연구센터
E-mail : junimoon@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-1680

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

과수 응답을 보이는 모델을 만듦으로 효율적인 제어기를 설계하는 것을 돕는 데 있다. 따라서, Fig. 2 와 같이 각각의 구동 모듈을 스프링과 댐퍼로 단순하게 모델링 하였다.

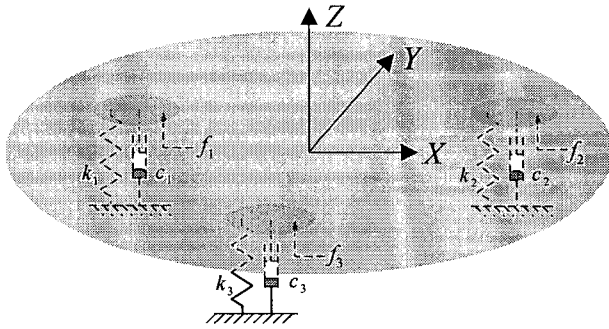


Fig. 2 Schematic diagram of the vibration isolation system

이러한 모델링을 기초로 상관에 미치는 힘과 각 부분의 상관 관계를 도식한 것은 Fig. 3 과 같다.

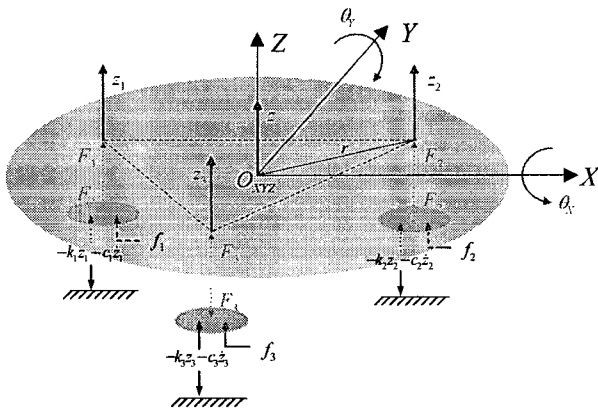


Fig. 3 Kinematics for the platform of the vibration isolation system

위의 자유물체도를 통해 다음과 같은 운동방정식들을 얻을 수 있다.

$$M\ddot{z} = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

$$I_{xx}\ddot{\theta}_x = \frac{r}{2}F_1 + \frac{r}{2}F_2 - rF_3 \quad (2)$$

$$I_{yy}\ddot{\theta}_y = \frac{\sqrt{3}r}{2}F_1 - \frac{\sqrt{3}r}{2}F_2 \quad (3)$$

여기서, 각 구동모듈의 지지점에서 작용하는 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$F_i = f_i - (k_i z_i + c_i \dot{z}_i), \quad i=1, 2, 3 \quad (4)$$

또한, 각 점에서의 기구학적인 관계를 통해 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$z_1 = z + \frac{r}{2}\sin\theta_x + \frac{\sqrt{3}r}{2}\sin\theta_y \quad (5)$$

$$\approx z + \frac{r}{2}\theta_x + \frac{\sqrt{3}r}{2}\theta_y$$

$$z_2 = z + \frac{r}{2}\sin\theta_x - \frac{\sqrt{3}r}{2}\sin\theta_y \quad (6)$$

$$\approx z + \frac{r}{2}\theta_x - \frac{\sqrt{3}r}{2}\theta_y$$

$$z_3 = z - r\sin\theta_x \approx z - r\theta_x \quad (7)$$

상태와 입력을 식(9)와 식(10)과 같이 놓으면 능동형 제진 시스템을 기술하는 상태공간 방정식은 식(11)~(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du \quad (8)$$

$$x = [z \quad \dot{z} \quad \theta_x \quad \dot{\theta}_x \quad \theta_y \quad \dot{\theta}_y]^T \quad (9)$$

$$u = [f_1 \quad f_2 \quad f_3]^T \quad (10)$$

where

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{3k_1}{M} & -\frac{3c_1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3k_2 r^2}{2I_{xx}} & -\frac{3c_2 r^2}{2I_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{3k_3 r^2}{2I_{yy}} & -\frac{3c_3 r^2}{2I_{yy}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & \frac{1}{M} & \frac{1}{M} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{r}{2I_{xx}} & \frac{r}{2I_{xx}} & -\frac{r}{2I_{xx}} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}r}{2I_{yy}} & -\frac{\sqrt{3}r}{2I_{yy}} & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{r}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}r}{2} & 0 \\ 1 & 0 & \frac{r}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}r}{2} & 0 \\ 1 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$D = 0_{3 \times 3} \quad (14)$$

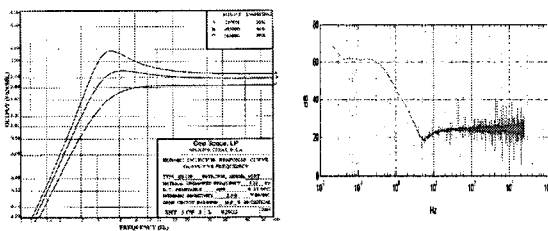
여기서 상판의 질량과 관성 모멘트, 중심에서 지지점까지의 거리는 다음과 같다: $M = 1.2 \text{ kg}$, $I_{XX} = I_{YY} = 4.9 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$, $r = 80 \text{ mm}$.

3. 센서의 신호처리

3.1 저주파 증폭 회로

제진 시스템의 특성상 센서는 지진형 센서 (seismic sensor)를 사용한다. 제진 시스템의 제어에 위해서는 지반의 진동을 측정하여야 하는데 이를 위한 별도의 측정계 (metrology frame)을 구성하는 것이 불가능하기 때문에 관성을 이용한 측정 장치인 지진형 센서를 사용한다. 본 연구에서는 속도 측정 장치인 지오폰 (geophone)을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 미국 Geospace 사의 GS-11D는 5Hz 부근에서 고유진동수를 갖는다. 능동형 제진 시스템은 저주파에서의 성능이 중요하므로 고유진동수 이하의 영역에서도 신호저하 (attenuation)를 보상하는 회로를 채택하였으며, 그 주파수 응답 성능은 Fig. 4에 도시하였다. 도시된 것과 같이 지오폰의 고유진동수 부근에서 주파수 응답 특성에 반대가 되도록 회로를 꾸밈으로 0.5 Hz 부터 측정이 가능하도록 저주파 특성을 크게 개선하였다.



(a) FRF of the Geophone (b) FRF of the circuit
Fig. 4 Frequency Response Functions of the Geophone and the Low Frequency Amplification Circuit

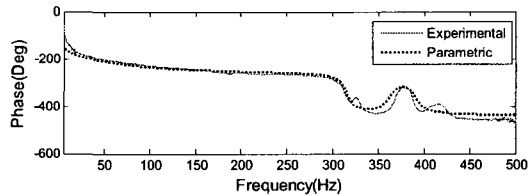
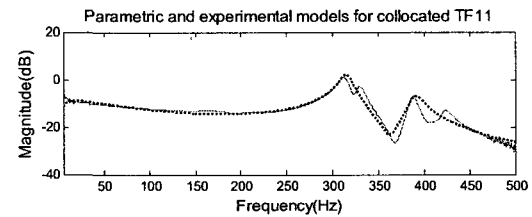
3.2 신호의 포화를 방지하는 적분 알고리즘

지오폰을 통해 들어오는 측정 정보는 속도이고, 구동 모듈은 변위 제어를 함으로, 측정 신호의 적분이 불가피하다. 일반적인 적분 알고리즘을 적용하면 측정 신호에 약간의 DC 성분이 있어도 적분 알고리즘을 통과하면 곧 지나치게 큰 값으로 변환되어 변위 제어에 사용할 수 없게 된다. 따라서, 본 연구에서는 누설 적분기와 고대역 통과 필터를

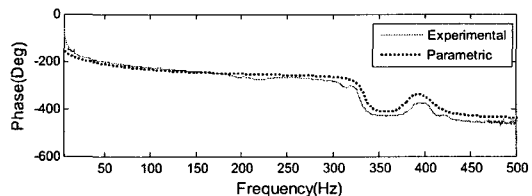
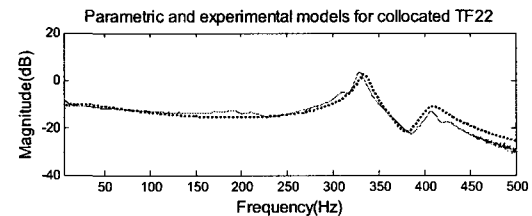
사용하였다. 상기된 회로에 의해 개선된 측정 영역인 0.5 Hz 에서 절점을 갖는 누설 적분기와, 같은 절점을 갖는 고대역 통과 필터를 직렬로 연결하여 DC 성분을 없앴과 동시에 측정 영역에서는 적분이 수행되도록 하였다.

4. 제진 시스템의 시스템 식별

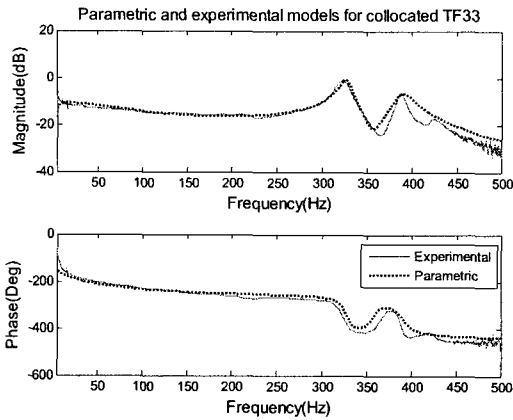
시스템 식별을 수행하는 목적은 모델이 좀 더 실제 시스템에 가까운 주파수 응답 특성을 가지게 함으로써 우수한 성능을 갖는 제어기를 설계하는데 있다. 다음 Fig. 5를 통해 보여주는 시스템의 시스템 식별 결과는 본 연구에서 제안한 모델이 시스템의 주파수 응답 특성을 잘 모사하고 있음을 보여준다. Fig. 5의 그림들은 모두 가진점과 측정점이 일치선 상에 있는 경우의 주파수 응답 함수이다.



(a) FRF at the collocation position 1



(b) FRF at the collocation position 2



(c) FRF at the collocation position 3

Fig. 5 system identification results for the vibration isolation system

다음의 Table 1 에서 시스템 식별을 통해 구한 탄성계수 k_i 와 감쇠 계수 c_i 를 보여준다.

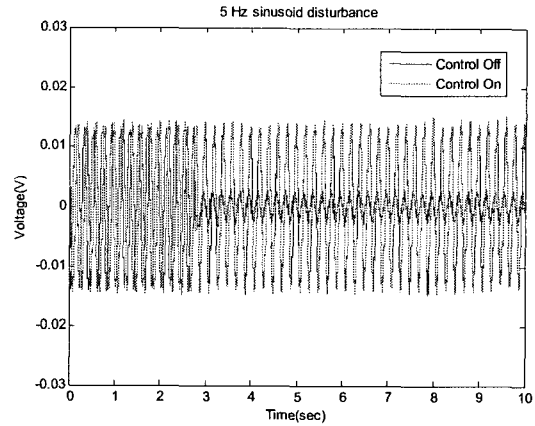
Damping Parameters				Stiffness Parameters			
Para.	Min	Max	Unit	Para.	Min	Max	Unit
c_1	40.0	70.0	N/m/s	k_1	2400	2620	N/m
c_2	40.0	45.0	N/m/s	k_2	2000	2250	N/m
c_3	40.0	45.0	N/m/s	k_3	2000	2250	N/m

Table 1 Identified system parameters

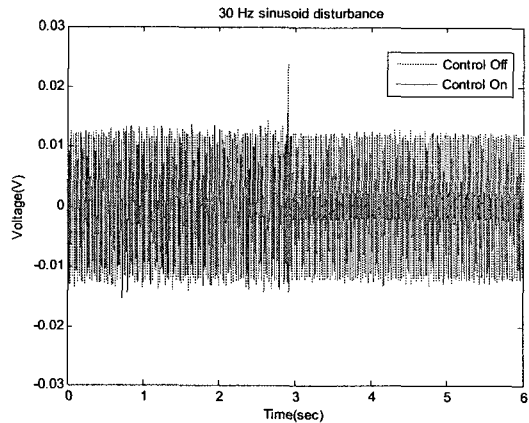
식별된 계수값에 범위가 있는 것은 각각의 구동 및 측정점에서 주파수 응답 함수를 통해 시스템 식별을 할 때 그 값을 Table 1 의 범위 내에서 변화시켰을 때 최적의 식별이 가능하였기 때문이다. 이와 같은 특성은 이후 강인 제어에서 불확정성으로 인식하도록 하였다.

5. 3 자유도 제진 시스템의 강인 제어

위에서 식별된 모델을 가지고 강인 제어를 설계하였다. Matlab 의 mu tool 을 사용하였으며, 제어의 수행은 dSpace 와 연동이 되는 Simulink 의 Real Time Workshop 을 이용하였다. Fig. 6 은 제어를 수행한 결과이다. 능동형 제진 시스템을 사용하는 목적이 저주파에서의 제진이므로 5 Hz 와 30 Hz 에서의 제진을 수행하였다. 각각의 경우에 대해서 -15dB 전후의 진동 절연을 이룸을 확인하였다.



(a) Disturbance rejection at 5 Hz



(b) Disturbance rejection at 30 Hz

Fig. 6 Results of the vibration isolation control

6. 결론

3 자유도 능동형 제진 시스템을 구성하기 위하여 모델링 및 시스템 식별을 수행하였고, 지진형 센서를 변위 제어에 사용하기 위하여 신호처리 알고리즘을 개발하였다. 또한, 시스템 변수의 식별 과정에서 나타난 불확정성을 위해 강인 제어의 기법 중 μ 합성을 이용하였으며, 실제 시스템에 적용한 결과 -15dB 정도의 제진 성능을 보임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Bai, M.R., Liu, W., 2002, "Control design of active vibration isolation using μ -synthesis", J.of Sound and Vibration, Vol.257, No.1, p.157-175
- (2) Lei Zuo and Samir A. Nayfeh, 2004, "An integral sliding control for robust vibration isolation and its implementation", Proc. SPIE 5386, 1