

AFM용 보이스 코일 구동 방식의 능동 방진 시스템 연구

Active Vibration Isolation System Using Voice Coil Actuators for AFM

#박기환¹, 최동엽², *김상유¹

#K. H. Park¹ (khpark@gist.ac.kr), D. Y. Choi², *S. Y. Kim¹

¹광주과학기술원 기전공학과, ²삼성탈레스 기계설계그룹

Key words : active vibration isolation system (AVIS), flexible body mode, loop shaping control

1. 서론

최근 마이크로미터 단위의 제조, 측정 기술을 넘어 나노미터, 서브 나노미터 단위의 생산기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 마이크로 단위로 동작되는 시스템에서는 진동이 그다지 큰 문제가 되지 않지만, 나노 단위의 시스템에서는 주변 환경으로부터 바닥 면을 통해 타고 들어오는 마이크로 단위의 진동이 주요한 문제점으로 대두된다. 특히, AFM (Atomic Force Microscopy)이나 LSV (Laser Scanning Vibrometer)와 같은 정밀 측정 시스템에서는 진동에 대한 영향이 시스템의 성능에 민감하게 반영된다. 그러므로 초정밀 시스템의 높은 성능을 위해 진동 절연 시스템이 요구된다.

기존의 수동 진동 절연 시스템은 보통 Mass, Damper, Spring 요소에 의한 2차 시스템으로 구현되는데 이러한 수동 요소에 의한 진동 절연 시스템은 저주파 영역에서 한계를 드러낸다. 이것을 극복하기 위해서는 진동 측정 센서와 작동기를 이용한 능동 진동 절연 시스템 (Active Vibration Isolation System, AVIS)이 개발되어야 한다.

능동 진동 제어를 위해 중앙 제어 기술 (Centralized Control)과 분산 제어 기술 (Decentralized Control)이 사용된다. 분산 제어 기술은 각각의 위치에 있는 작동기와 센서가 독립적인 제어루프를 형성하여 동작하는 방식이다. 반면에 중앙 제어 기술은 상판에 전달되는 진동을 상판의 중심에서 일반좌표계 (generalized coordinate)로 변환하여 제어하는 MIMO (multi input multi output) 시스템이다. Engel [1]은 이 두 가지의 제어 기술을 비교하고 중앙 제어 기술이 분산 제어 기술보다 성능 면에서 차이가 거의 없음을 밝혀냈다.

상판은 유연구조이기 때문에 전기 노이즈가 포함된 제어신호의 주파수가 유연구조의 공진 주파수와 일치할 경우 시스템을 불안정하게 만들 수 있다. 그러므로 본 논문에서 FEM 해석을 통해 상판의 유연구조 모드를 분석하고 Loop Shaping Technique를 이용해 유연구조의 공진 주파수 대역을 피하는 동시에 저주파 대역의 진동을 제거하기 위한 제어기 설계를 제안한다. 또한 수동 진동 절연 시스템과의 비교를 통해 제안한 능동 진동 절연 시스템의 다양한 진원에 대한 성능을 평가한다.

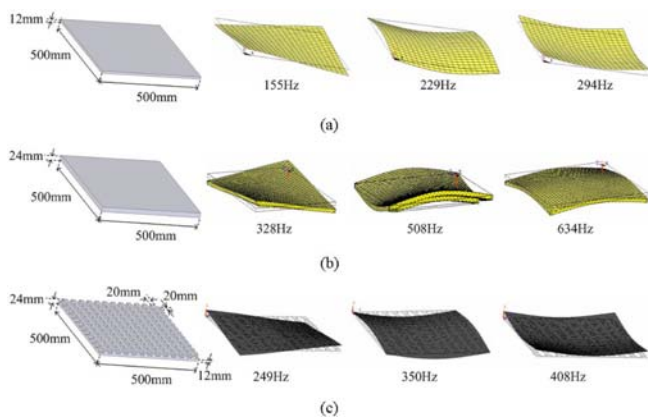


Fig. 1 The FEM analysis of (a) thin rectangular shape plate, (b) thick rectangular shape plate, (c) the plate with honeycomb shape reinforcement

2. 상판 (upper plate)의 유연구조 해석

상판은 재질이 알루미늄이며 유연 구조물이다. 상판의 유연 모드 주파수는 보통 시스템의 제어 주파수 대역보다 높지만 전기 노이즈가 포함된 제어 신호가 유연 구조의 공진 주파수와 일치할 경우 시스템은 불안정해진다. 그러므로 제어기를 설계할 때 상판의 공진 주파수를 확인해야 할 필요가 있다.

Fig. 1(a), (b), 그리고 (c)는 각각 얇은 사각형 모양 (thin rectangular shape), 두꺼운 사각형 모양 (thick rectangular shape), 그리고 벌집구조 모양 (honeycomb shape)을 보여준다. 공진 주파수는 구조물의 모양과 기하학적 수치에 따라 달라진다. 상판 유연 구조물의 공진 주파수가 높게 설계되어야 제 3장에서 대역이 높고 차수가 낮은 제어기 설계가 가능하다.

3. 루프 셰이핑 제어 (Loop shaping technique)

본 논문은 외부 진동의 제거를 위해 속도 피드백 제어를 적용한다. Fig. 2는 속도 피드백 제어 블록 다이어그램을 나타낸다. 여기에서 $C(s)$ 는 제어기의 전달함수, $G(s)$ 는 플랜트의 전달함수, $H(s)$ 는 센서의 전달함수를 나타낸다. 상판의 유연구조 모드 중 첫 번째 고유 진동수에 가까운 노이즈 n 이 포함된 제어 신호로 인해 발생하는 불안정성을 피하고, 저주파 진동절연 효과를 높이기 위해 루프 셰이핑 제어기법을 적용한다. 라플라스 변환된 에러는 Fig. 2로부터 다음과 같이 구해진다.

$$E(s) = S(s)R(s) - S(s)\tilde{G}(s)D(s) + T(s)N(s) \dots\dots\dots (1)$$

여기에서 $S(s)$ 는 민감도 (Sensitivity function), $T(s)$ 는 여민감도 (complementary sensitivity function), 그리고 $\tilde{G}(s)$ 는 외란부터 출력까지의 전달함수이다. $D(s)$ 와 $N(s)$ 는 각각 라플라스 변환된 외란과 노이즈를 나타낸다. Fig. 1에서 FEM 해석을 통해 얻은, 본 논문에서 사용한 얇은 상판의 첫 번째 공진 주파수 155Hz를 고려해 루프 셰이핑 제어를 이용하기 위해서는 다음 세 가지 조건을 만족해야 한다. 첫째, 155Hz를 포함하는 고주파 노이즈 $N(jw)$ 가 시스템에 미치는 영향을 작게 해야 한다. 이는 Eq. 1로부터 155Hz 이상의 주파수에서 $T(jw) \ll 1$ 을 만족해야 하고, 시스템의 개루프 전달함수 $C(jw)G(jw)H(jw) \ll 1$ 이 되도록 설계해야 한다. 둘째, 저주파 외란 $D(jw)$ 에 대한 영향을 작게 해야 한다. 만약 $D(jw)$ 를 5Hz 정도로 가정하면 $w < 5Hz$ 에서 $S(jw)\tilde{G}(jw) \ll 1$ 이어야 하고, $C(jw)G(jw)H(jw) \gg 1$ 이어야 한다. 마지막으로 개루프 전달함수의 보드선도가 0dB를 지나갈 때 기울기가 -20dB/decade가 되도록 설계해야 한다[2]. Fig. 2는 위 세 가지 조건을 보여주고, 이 조건을 만족 시키는 제어기는 다음과 같다.

$$C(s) = \frac{1.08 \times 10^{11} s^5 + 9.504 \times 10^{11} s^4 + 1.026 \times 10^{17} s^3 + 7.655 \times 10^{18} s^2 + 9.957 \times 10^{16} s + 4.623 \times 10^{21}}{2.988 \times 10^{10} s^5 + 1.285 \times 10^{13} s^4 + 1.554 \times 10^{15} s^3 + 3.585 \times 10^{16} s^2} \dots\dots(2)$$

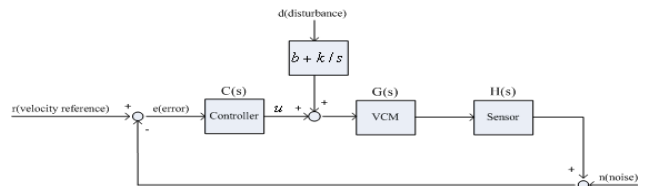


Fig. 2 The system block diagram for AVIS based on absolute velocity feedback

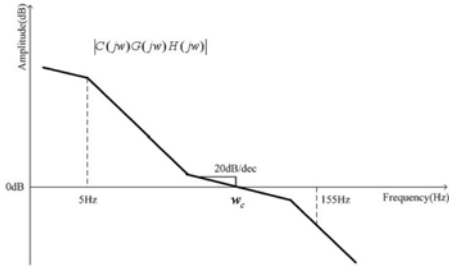


Fig. 3 Loop Shaping condition for attenuating the effect of the low frequency disturbance of 5Hz and avoiding the instability caused by first resonant of 155Hz of the flexible modes

Fig. 4은 설계된 제어기의 주파수 특성을 보여준다. 제어기는 DSP를 이용해 구현되고 시스템에 적용된다.

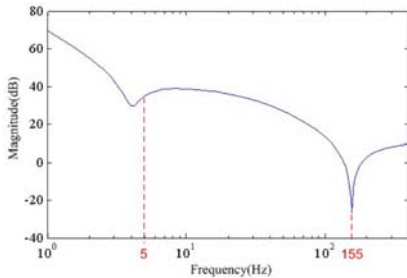


Fig. 4 Simulated frequency response of controller satisfying the loop shaping conditions

4. 실험 결과

본 논문에서는 간단하고 좋은 성능을 보여주는 분산 제어 기법을 적용한다. Fig 5는 성능평가를 위해 실험용으로 제작된 4개의 작동기 모듈과 센서, 상판, 하판, 하중으로 구성된 AVIS를 보여준다. Table 1은 기하학적 특성을 나타내는 시스템 파라미터를 나열한다. 성능평가를 위해 두 개의 속도 센서를 각각 상판과 하판에 두고 진동의 크기를 측정한다. 넓은 주파수에 대한 성능을 관찰하기 위해 다양한 방식으로 하판을 가진다. Fig. 6 와 Fig. 7에서 다양한 진원에 대한 수동 진동 절연 시스템과 능동 진동 절연 시스템의 비교 결과를 보여준다. 시스템의 전달률 (Transmissibility)은 상판에 부착한 센서와 하판에 부착한 센서의 최대 진폭 크기의 비율로 구한다. 실험결과에서 본 논문에서 제안한 능동 진동 절연 시스템이 수동 진동 절연 시스템보다 저주파 대역에서 좋은 성능을 갖는 것을 보여준다.

5. 결론

본 논문은 보이스 코일 작동기를 이용한 능동 진동 절연 시스템의 진동 제어를 제안하고, 설계하였다. 또한 성능 평가를 위해 실험용 AVIS를 제작했고, 여러 가지 진원에 대해 수동 시스템과 비교 실험을 하였다. 루프 셰이핑 제어를 이용한 AVIS는 수동 시스템보다 외부 진동의 절연 성능이 뛰어났으며, 특히 2~4Hz 저주파 대역의 진동에 대해서 전달률이 -18dB이하의 성능을 나타냈다.

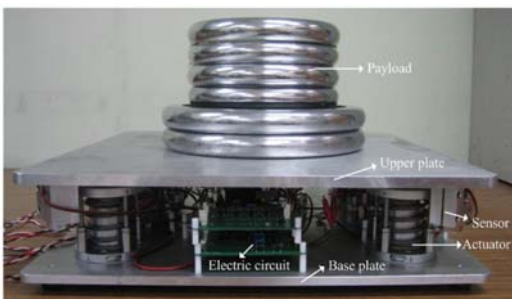


Fig. 5 The real configuration of the AVIS

Table 1 Four actuator mounted active vibration isolation system parameters

Active Vibration Isolation system parameters used for experiment(four actuator model)	
width of upper plate	500 mm
Length of upper plate	500 mm
Mass of upper plate	60 kg
Spring constant	9671 N/m
Damping constant	70 N/m/s

Situation	Experimental result	Transmissibility
2Hz frequency vibration		Upper plate signal = 98 mV Base plate signal = 151mV → -3.7dB
4Hz frequency vibration		Upper plate signal = 232 mV Base plate signal = 245mV → -0.47dB
Walking vibration		Upper plate signal = 30 mV Base plate signal = 70mV → -7.35dB
Jumping vibration		Upper plate signal = 126 mV Base plate signal = 252mV → -6.02dB
Impulse vibration		Upper plate signal = 68.4 mV Base plate signal = 450mV → -16.36dB

Fig. 6 Transmissibility of passive vibration isolation system

Situation	Experimental result	Transmissibility
2Hz frequency vibration		Upper plate signal = 24mV Base plate signal = 192mV → -18.06dB
4Hz frequency vibration		Upper plate signal = 18mV Base plate signal = 165mV → -19.24dB
Walking vibration		Upper plate signal = 5mV Base plate signal = 72mV → -23dB
Jumping vibration		Upper plate signal = 10mV Base plate signal = 150mV → -23.5dB
Impulse vibration		Upper plate signal = 10mV Base plate signal = 200mV → -26dB

Fig. 7 Transmissibility of AVIS using the loop shaping technique

참고문헌

1. W. P. Engels, O. N. Baumann, and S. J. Elliott, "Centralized and decentralized control of structural vibration and sound radiation", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 119, pp. 1287-1495, 2006
2. H. Ozbay, 2002, "Introduction to Feedback Control Theory", CRC Press LLC