

공기스프링과 압전구동기를 이용한 제진대의 능동 제어 방법 Method of Active Control for Vibration Isolation Table using Air-Spring and Piezo Actuator

*안채현¹, #임경화², 이규섭³

*C. H. An¹, #K. H. Rim(rim@kut.ac.kr)², G.S.Lee³

¹한국생산기술연구원, ²한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부, ³알엠에스 테크놀로지

Key words : Air-Spring, Piezo Actuator, Active Vibration Isolation

1. 서론

반도체 및 디스플레이 산업 등 초정밀 측정 및 가공 분야의 집적도 및 대형화, 수율 향상에 대한 요구에 따라 이의 생산 장비는 급속히 고정밀화, 고속화, 대형화가 진행되는 추세이다. 이에 외란 또는 내부에서 발생하는 진동을 신속히 제거하는 제진 시스템이 필수적으로 요구된다. 따라서 이에 대응하여 높은 제진 성능을 가지는 능동 제진 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

제진 시스템은 넓은 주파수 방진 영역을 확보하기 위하여 낮은 고유진동수를 가지며 큰 하중을 지지하는 공기스프링(air spring)이 많이 사용된다. 그러나 공기스프링은 공기의 압축성, 고무의 비선형성에 기인하는 비선형 특성으로 특성 예측 및 제어가 매우 까다로운 편이다. 또한 넓은 주파수 영역에서 고정밀 변위 제어가 가능한 압전구동기(piezo actuator)는 변위량이 매우 작고, 강성이 커서 방진 주파수 영역에서 불리하게 된다.

본 논문에서는 두 개의 구동기를 직렬로 연결하여 공기스프링의 낮은 고유진동수와 압전구동기의 정밀 제어 능력을 조합하여 이용한다. 또한 두 구동기를 직렬로 연결할 경우 큰 강성차이에 기인하여 압전구동기의 구동이 무력화 되는 경향을 가지게 된다. 따라서 추가 스프링(additional spring)을 부착하여 이의 특성을 완화 시켰으며, 이를 이용하여 3 자유도 능동 제진대를 구성하고, 적응 제어 기법을 적용하여 제어하는 방법을 연구하였다.

2. 공기스프링의 특징

공기스프링은 Fig. 1과 같이 초기 압력(P_0), 초기 부피(V_0)에서 외력 또는 외부에서 유입되는 공기의 유량에 대하여 격막(diaphragm)의 형상 변화에

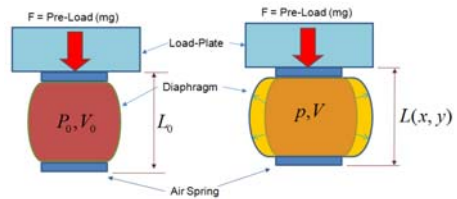


Fig. 1 Behavior of air-spring

기인하여 압력과 부피, 지지 높이가 모두 변화하는 복잡한 비선형 시스템이다. 공기의 거동을 폴리트로픽 변화(polytropic process)라고 가정하면 이의 강성은 식(1)과 같이 모델링 된다.¹⁾ 이때 κ 는 폴리트로픽 지수이며, A_p 는 공기스프링의 압력 유효단면적(pressure effective area)이다.

$$k(x, y) = \frac{\kappa(A_p P_0 + mg)}{L_0} \left(\frac{L_0}{L(x, y)} \right)^{\kappa+1} \quad (1)$$

따라서 공기스프링의 강성은 지지하중, 압력과 형상으로 결정되게 된다.

3. 제진 모듈의 구성

제진 모듈은 공기스프링의 낮은 고유진동수와 압전구동기의 정밀 제어 능력을 부여하기 위하여 Fig. 2와 같이 직렬 연결 구조를 채택하였다. 또한 동특성을 개선하기 위하여 추가 스프링을 부착한다. 추가스프링의 강성(k_i)이 낮을수록 공진영역에서 큰 압전구동기와 하중판(load-plate)의 전달비 및 방진 주파수 영역에서 낮은 지반 대 하중판의 전달비가 유도된다. 하지만 실제 제작을 위하여 허용되는 지지하중을 고려하여 선정한다.

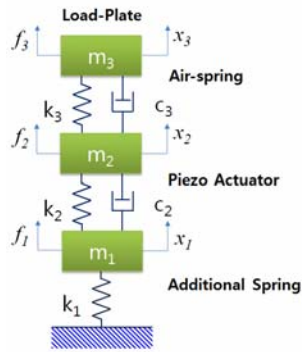


Fig. 2 Structure of active vibration control module with additional spring

4. 기준 모델 적응 제어기

제진대 시스템의 모델은 Fig. 3과 같이 수직방향(z-dir)과 두 회전방향(roll, pitch)의 3 자유도로 모델링 한다. 제진대의 네 모서리에 설계된 제진 모듈이 부착되어 있으며 압전구동기 및 추가스프링이 제진대의 거동에 미치는 영향은 미소하므로 공기스프링만 고려하였다.

또한 시변(time varying), 비선형(non-linear) 시스템의 제어에 강인하다고 알려진 적응제어기(adaptive controller) 중 모델 참조 적응 제어기(MRAC, model reference adaptive controller)를 채택하였다. 이는 Fig. 4와 같이 기준 모델과 병렬로 연결된 레직 추적 제어용과 직렬로 연결된 외란 제거용 제어기로 구성하였다.

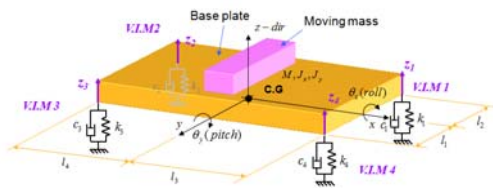
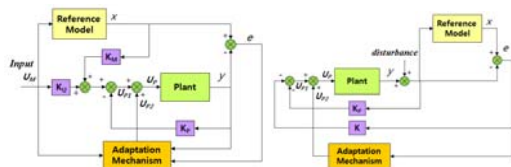


Fig. 3 Schematic diagram of vibration isolation table

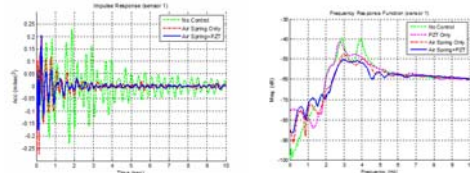


(a) target tracking (b) disturbance elimination
Fig. 4 Block diagram of model reference adaptive control

공기스프링의 제어를 위하여 공기스프링에 압력 센서를 부착하고 이를 피드백 받아 공급 유량을 결정하는 제어기를 각각 부착하였으며 정밀한 유량 조절을 위해 공압 비례제어밸브를 이용하였다.

5. 실험 방법 및 결과

Fig. 5 (a)는 제진대의 사분면 중앙에 충격입력을 가하고 이때의 응답을 한 모서리에 부착된 가속도 센서로 측정된 것으로 정착시간이 크게 향상된 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5 (b)는 이때의 주파수 응답 함수를 나타낸 것으로 능동 제어가 공진영역에서 우수한 진동 제거 능력을 보임을 확인할 수 있다.



(a) impulse response (b) frequency response
Fig. 5 Effect of active vibration control

5. 결론

공기스프링과 압전구동기의 특성을 모두 이용하기 위하여 직렬방식의 능동 제진 모듈을 설계하였으며 이의 특성을 개선하기 위하여 추가스프링이 부착된 3단 직렬 방식을 설계하였다. 3 자유도로 구성된 제진대에 모델 참조 적응 제어기를 적용하여 우수한 진동 제거 효과를 실험적으로 증명하였다.

후기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재 양성 사업의 연구 결과입니다.

참고문헌

1. Marcel Heertjes, Nathan van de Wouw, "Nonlinear Dynamics and Control of a Pneumatic vibration Isolator," Journal of vibration and Acoustics, 128, 439-448, 2006.