

공기스프링과 압전구동기를 이용한 능동 제진 테이블의 제어기 설계

Design of Controller for Active Vibration Isolation Table using Air Spring and Piezo Actuator

임경화† · 안채현* · 최경락** · 이규섭***

Kyung-Hwa Rim, Chae-Hun An, Gyeong-Rak Choi and Gyu-Seop Lee

1. 서 론

반도체 및 디스플레이 산업과 같은 초정밀 가공, 측정이 필요한 산업 분야에서는 외란 또는 내부 가진에 의한 진동을 빠르게 제거하는 제진 시스템의 도입이 필수적이다. 공기스프링은 낮은 강성으로 낮은 고유진동수를 유지하며 큰 하중을 지지 할 수 있어서 매우 유리하다. 또한 날로 발전하는 초고정밀 공정의 발전 추세에 따라 높은 성능 및 위치 결정 능력을 지닌 능동 제어 방법에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 그러나 공기 스프링의 능동 제어는 공기의 압축성과 고무의 비선형 특성으로 인하여 초정밀 제어는 매우 까다롭다. 또한 압전구동기(Piezo Actuator)는 높은 주파수 대역폭까지 정밀 제어가 가능하지만 변위량이 매우 작을 뿐 아니라 강성이 크기 때문에 방진 영역 측면에서 불리하다. 본 논문에서는 공기스프링에 압전구동기를 직렬로 부착하고 추가스프링이 부착된 제진 모듈을 이용하여 3 자유도 제진 테이블을 구성하고, 다자유도계의 제어를 위하여 적응 제어 기법을 적용하여 제어하는 방법을 연구하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 제진 모듈 및 제진 테이블의 구성

제진 모듈은 공기스프링을 채용하여 낮은 고유진동수로 넓은 방진 영역을 확보하고, 정밀 위치 제어를 위하여 압전구동기를 직렬로 부착한다. 그러나 두 장치의 강성 차이가 매우 커서 시스템이 비연성화 되는 효과를 가지게 되어 압전구동기의 동작이 하중판(Load-plate)에 전달되지 못하게 된다. 이를 보정하기 위하여 Fig. 1과 같이 추가 질량 (m_1) 및 추가 스프링(k_1)을 부착한 3 자유도 제진 모듈을 구성한다. 추가 스프링의 탄성계수는 압전구동기 보다 작을수록 유리하지만 허용 지지하중을 고려하여 선정하여야 한다.

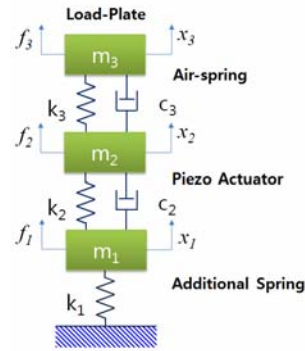


Fig. 1 Structure of a active vibration control module with additional spring

2.2 시스템 모델링 및 해석 방법

본 제진 테이블은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 무게 중심을 기준으로 120도 간격으로 3개의 지지점을 가지는 원형 정반으로 무게 중심을 기준으로 $z-dir$, θ_x , θ_y 등 3자유도 계로 모델링 된다. 또한 한 축은 Fig. 1과 같은 구조의 모듈로 구성된다. 따라서 공기 스프링과 압전구동기를 선형 강성으로 가정하여 상태 변수가 18개인 상태 공간 방정식으로 모델링 하였다.

제진 모듈의 동특성을 해석하기 위하여 상용 기계, 공유압 해석 프로그램인 AMESim을 이용하여 Fig. 3과 같이 각각의 제진모듈을 모델링한다. 이때 공기스프링의 비선형 거동을 반영하기 위하여 공압 격막(diaphragm)요소를 이용할

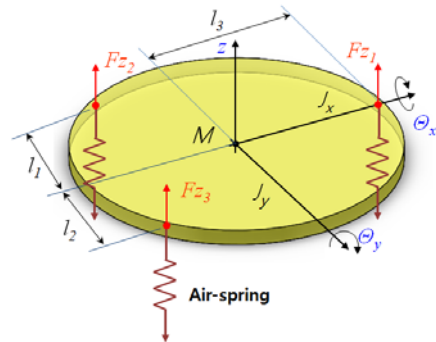


Fig. 2 mathematical modeling of vibration isolation table

† 교신저자; 한국기술교육대학교
E-mail : rim@kut.ac.kr
Tel : (041) 560-1147, Fax : (041) 560-1253

* 한국기술교육대학교 대학원

** 한국생산기술연구원

*** (주)RMS Technology

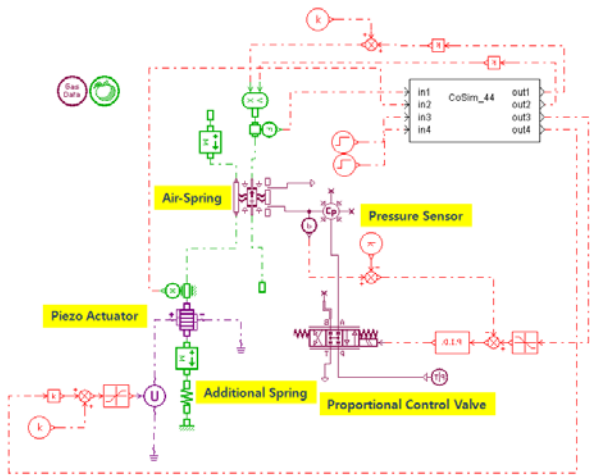


Fig. 3 Air spring model using the AMESim

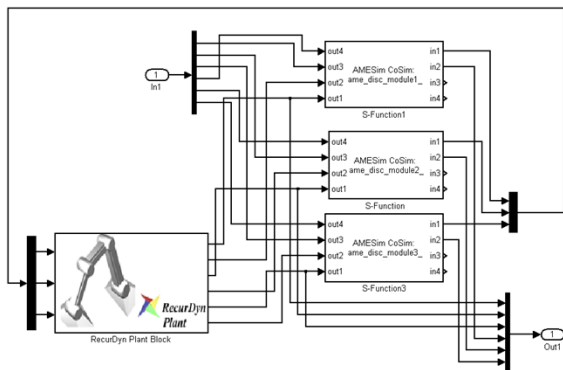


Fig. 4 simulation model of vibration isolation model using AMESim, RecurDyn and MATLAB

수 있다. 이때 격막의 유효 단면적(effective area)은 참고 자료 및 실험을 통하여 취득할 수 있다. 또한 압력 제어를 위하여 비례제어 밸브 요소를 부착하였고 압전구동기 요소 및 추가 스프링을 부착하여 시스템을 구성한다. 또한 제진 모듈의 구동에 따른 제진 테이블의 거동을 해석하기 위하여 상용 기구 해석 프로그램을 이용하여 모델링 한다. 그리고 Fig. 4와 같이 MATLAB을 이용하여 위의 두 해석 프로그램을 연동하고, 제어를 구성하여 전체 시스템의 거동 해석 시스템을 구축하였다.

3. 제어기의 설계

3.1 적응 제어기의 설계 및 적용

구성된 제진 테이블은 비선형 다자유도계 시스템으로 적응제어 중 모델 참조 적응 제어 (MRAC, model reference adaptive control) 기법을 적용하였다. MRAC는 비선형 제어에 유용한 제어 방식으로 원하는 동특성을 가지는 선형 시불변 참조 모델을 해석적으로 구성하고 실제 시스템과 동일한 크기의 입력을 공급한다. 이때 실제 시스템의 출력과

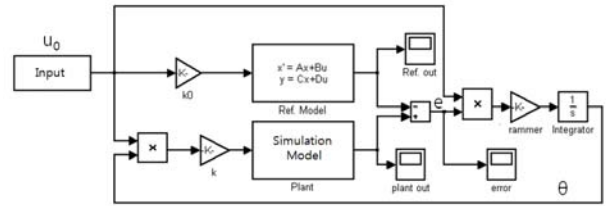


Fig. 5 block diagram of MRAC model

참조 모델의 차를 에러로 정의하면 전체 시스템의 거동은 입력과 에러에 관한 상태방정식을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(\theta - \theta_0)u_c \\ e &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

$$B^T Px = Cx = e \quad (2)$$

한편, 식 (2)를 만족하는 Lyapunov function을 선택한다면, 제어 규칙은 Kalmann-Yakubovich lemma에 의해 식 (3)과 같이 유도된다.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma u_c e \quad (3)$$

따라서 Fig. 5와 같이 Lyapunov 안정성 이론을 근거로 증명된 제어 규칙을 적용하였다. 참조 모델의 시스템 매개변수는 선형 모델을 근거로 하였고 감쇠비를 0.5로 선정하여 우수한 제진 성능을 유도하였다.

4. 결론

비선형성이 큰 공기스프링의 정밀 제어를 위하여 능동 제어 방식을 이용한 제진 테이블을 구성하였으며 위치 정밀도를 높이기 위하여 압전구동기를 직렬로 부착하였다. 복잡한 다자유도계 시스템을 제어하기 위하여 비선형 다자유도계에 강인한 특성을 가진 적응 제어기를 선택하여 적용하였다.

후 기

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