

시간지연제어 기법을 이용한 능동형 3 자유도 공압제어 제진대계의 구현

3-DOF active pneumatic vibration isolation table using time delay control

선종오* · 신윤호** · 김광준†

Jong-Oh Sun, Yun-ho Shin and Kwang-joon Kim

1. 서론

반도체, LCD 산업 등 정밀산업에서 사용되는 장비의 성능은 환경진동, 특히 지반진동에 민감한 특성을 보인다. 이러한 지반진동으로부터 정밀장비를 절연시키기 위해 제진대가 널리 사용되고 있다. 최근, 공진주파수 부근에서 전달율이 악화되고, 상부가진에 취약한 수동형 제진대의 한계를 극복하고자 능동형 제진대의 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구팀은 시간지연 제어기법(Time delay control)을 이용하여 오직 공기스프링 챔버 내부 압력만을 제어하였으며, 이는 MR 댐퍼, 전자기식 구동기, 피에조 구동기, 또는 복합 구동 방법을 이용하는 타 연구와 차별화 된다. 본 연구팀은 1 자유도 공압 제진대에 대한 연구를 2007 년에 발표한 바 있으며, 본 논문에서는 이를 3 자유도 제진대에 확장 적용한 결과를 발표한다.

2. 능동형 3 자유도 공압제진대의 구성

3 자유도(heave, pitch, roll) 능동형 공압제진대의 실험 구성을 그림 1 에 나타내었으며, 이에 해당하는 블록 선도를 그림 2 에 나타내었다.

정반 위 3 개의 가속도계에서 측정된 가속도 정보를 이용하여 3 자유도 가속도 및 각가속도를 계산하며, 이를 적분하여 시간지연제어 기법에 필요한 속도 및 변위 정보를 얻는다. 여기서, DC 신호 누적을 방지하기 위해 수정적분법을 사용하였으며, 이는 식 (1)과 같이 라플라스역에서 표현된다.

$$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{1}{s+a} \quad (1)$$

이와 같이 얻은 정반의 운동 정보와 시간지연 제어 기법을 이용해 제어 입력, 즉 공기스프링 챔버내의 제어 압력을 계산한다. 그리고, 본 연구에서 제어하

고자 하는 것은 강제 운동, 즉 저주파 영역의 운동이기 때문에 제어 압력 신호는 저주파 통과 필터를 거치게 된다.

마지막으로 공압 구동부(비례제어 밸브+공압 라인+챔버)의 특성을 반영해 주기 위해 피드포워드 제어를 적용하여 공기 스프링 챔버 내 압력을 제어하였다. 본 연구팀에서는 실험을 통해 그림 3 과 같이 입력 전압에 대한 출력 압력의 위상이 -90° 이하로 떨어지는 현상을 관찰하였다. 기존 연구에서는 공압 구동부의 응답 특성을 1 차 함수로 표현하였으나, 위상이 -90° 이하로 떨어지는 특성은 1 차함수로 표현할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 공압 구동부의 응답함수를 식(2)와 같이 2 차 함수로 묘사하였다.

$$\frac{P}{V} = \frac{a}{(s+b)(s+c)} \quad (2)$$

여기서, P는 챔버 내부 압력을, V는 입력 전압을 나타낸다. 곡선접합결과를 그림 3 에 나타내었는데 관심주파수 내에서 거의 오차 없이 구동부의 응답을 표현할 수 있었다. 또한, 피드포워드 제어 결과를 그림 4 와 같이 시간역에서 나타내었는데 원하는 압력을 챔버 내 압력이 잘 추종하고 있다.

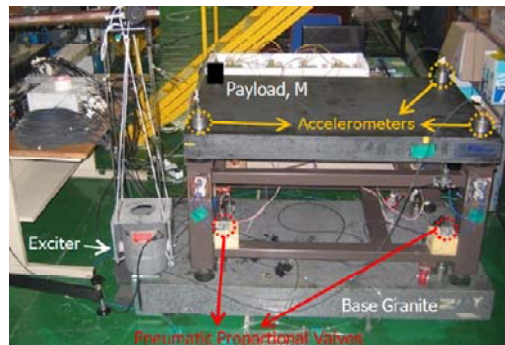


그림 1. 3 자유도 능동형 공압제진대의 실험 구성

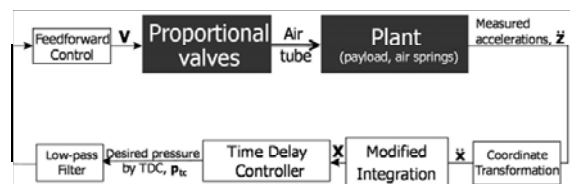


그림 2. 실험 구성 블록 선도

† 김광준; 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : kjkim@kaist.ac.kr
Tel : (042) 350-3024, Fax : (042) 350-8220
* 한국과학기술원
** 전력연구원

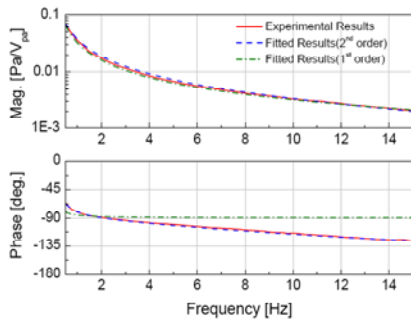


그림 3. 공압 구동부의 응답 및 곡선 적합 결과

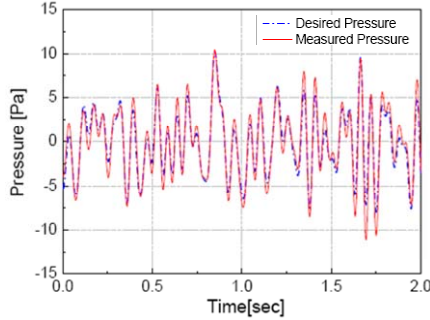


그림 4. 공압 구동부의 피드포워드 제어 결과

3. 능동형 3 자유도 공압제진대의 성능

3 자유도 공압제진대는 4 개의 지지부에서 들어오는 수직방향 지반진동을 입력으로 하며, 3 자유도 운동을 출력으로 하는 다입력-다출력계이다. 그 성능을 표현하기 위해서는 식(3)과 같이 $4 \times 3 = 12$ 개의 전달함수가 필요하나 이는 한 제진대의 성능을 표현하기에 너무 복잡하다.

$$\mathbf{T} = \mathbf{S}_{xx}^{-1} \mathbf{S}_{xy} \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_{xx} = \begin{bmatrix} S_{x1x1} & S_{x1x2} & \cdots & S_{x1xm} \\ S_{x2x1} & S_{x2x2} & \cdots & S_{x2xm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{xmx1} & S_{xmx2} & \cdots & S_{xmxm} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{xy} = \begin{bmatrix} S_{x1y1} & S_{x1y2} & \cdots & S_{x1yn} \\ S_{x2y1} & S_{x2y2} & \cdots & S_{x2yn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{xmy1} & S_{xmy2} & \cdots & S_{xmy n} \end{bmatrix}$$

여기서, x 는 지반진동, y 는 정반의 3 자유도 운동을 나타내며 $m=4, n=3$ 이다.

본 연구에서는 4×3 전달을 행렬의 최대 특이치를 계산하여 이를 복잡한 전달을 행렬을 대신해 제진대 성능의 단일 대표 값으로 삼고자 한다. 실험을 통해 얻은 수동형과 능동형 3 자유도 제진대 전달을 행렬의 최대 특이치를 그림 5 에 나타내었다. 제어 구간인 10Hz 이하에서 최대 특이치의 실효치는 수동형의 경우 351 이며 능동형은 32.6 으로서, 약 91% 감소한 결과를 보였다. 이와 같이 공기 스프링 챔버 내부의 압력을 능동 제어함으로써 수동형에서 나타나는 공진 현상을 제거할 수 있었다.

또한 본 능동형 제진대는 상부가진에 대해서도 뛰어난 정착시간을 보인다. 그림 6 은 상부 가진에 대한 수동형 및 능동형 제진대의 응답을 나타낸 것

으로서 최대 피크의 5%로 감소하는 시간을 정착시간으로 정의할 때, 정착시간은 수동형 1.68 초에서 능동형 0.33 초로 약 1/5 로 감소하였다.

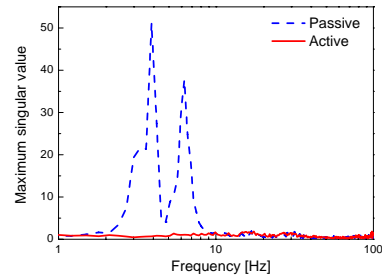


그림 5. 3 자유도 능동 및 수동형 제진대 전달을 행렬의 최대 특이치

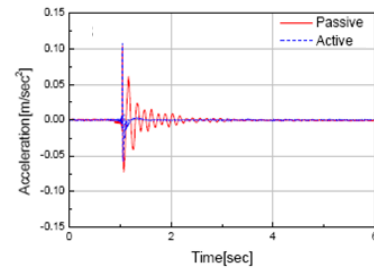


그림 6. 능동 및 수동 제진대의 상부가진에 대한 시간 응답

4. 결론

본 연구에서는 비선형 강인성 제어기법인 시간지연 제어기법을 3 자유도 공압 제진대에 적용하여 10Hz 이하에서 전달을 행렬 최대 특이치의 실효치를 351 에서 32.6 으로 약 91% 감소시켰으며, 동시에 상부 가진에 대한 정착시간을 1.68 초에서 0.33 초로 80% 감소시켰다.

타 연구에서는 능동형 제진대의 구현을 위해 정반 및 지반에 가속도계, 변위센서 등 최소 8 개 이상의 센서를 사용한 것에 반해 본 연구에서는 3 자유도 제어를 위해 단 3 개의 가속도계만을 사용하여 제어하였다. 그리고, 기존 연구에서 1 차함수로 묘사하던 공압 구동부의 응답을 실험을 통해 2 차함수로 묘사하였고, 이를 통해 제진성능을 개선할 수 있었다. 마지막으로 다입력-다출력계인 공압제진대의 성능지표로 복잡한 전달을 행렬을 대신해 단일 성능지표로 전달을 행렬의 특이치를 도입하였다.

후 기

이 연구는 한국연구재단 기초연구사업(과제번호 2010-0000373)의 지원을 받아 수행되었습니다.