

공압서보밸브를 이용한 제진대의 정밀 위치 복원 제어 Precision leveling control of Pneumatic Vibration Isolator using pneumatic servo valve

*정규철¹, #송원길², 이현준²

*K. C. Jung¹, #W. G. Song(swg@rmstech.co.kr)², H.J.Lee²
¹알엠에스 테크놀로지(주), ²알엠에스 테크놀로지(주)

Key words : pneumatic servo valve, vibration isolator , MR Damper

1. 서론

차세대 반도체/디스플레이 공장의 초정밀 생산 및 검사 설비들은 건물을 통해 전달되는 진동의 영향에 매우 민감하기 때문에 이를 차단하기 위해 제진대를 사용하는 경우가 많다.

제진대는 통상적으로 정반과 공압스프링의 동특성을 이용하여 바닥의 진동을 차단하고, 댐퍼를 이용해서 동하중에 따른 과도 진동을 억제하는 구조를 가진다.

사용되는 공압스프링의 1차 수직 고유진동수는 3Hz 이하이므로, 강성이 크지 않은 편이다. 따라서 정반위의 이동질량이 움직일 경우 비교적 큰 변위 편차가 발생할 수 있으므로 이를 보상해야 한다.

수동형 공압제진대의 경우 정반의 변위에 따라 공압스프링에 유입/유출되는 유량을 제어하여 정반의 높이를 일정하게 유지하기 위해 기계적 높이 조절 밸브 (Height Control Valve)를 사용한다.

기계적 높이 조절밸브는 외부에서 제어가 불가능하므로, 동하중에 따른 제진대의 동적거동을 최소화하기 위해 MR(Magneto-Rheological) 댐퍼를 함께 사용하는 경우 밸브/댐퍼의 동작시점 불일치로 인해 제진성능이 악화된다. 공압서보밸브를 적용하면 이러한 단점을 개선할 수 있다.

2. 공압 스프링 시스템

본 논문에서 적용한 제진대는 이동질량, 정반, 공압스프링, MR 댐퍼, 공압서보밸브로 구성되었다. 공압스프링과 MR 댐퍼는 각각 직사각형 정반모퉁이 4개소에 장착되고, 서보밸브는 공압스프링 1개당 흡기/배기 용도로 2개씩 배치되어 있다. 공압서보밸브를 동기화시켜 구동하면 제진대 시스템은 1자유도 시스템으로 모델링할 수 있다.

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_{air} \quad (1)$$

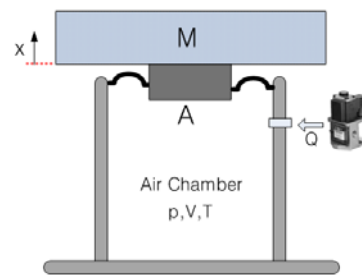


fig. 1 Block diagram of an air spring

공압스프링의 동적거동은 기체에 대한 상태방정식으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_0 \frac{dV}{dt} + V_0 \frac{dp}{dt} = QRT + WR \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

공압스프링 내부의 압력이 매우 느린 속도로 변할 경우, 등온과정(isothermal process)으로 가정할 수 있으므로, 위 식은 다음과 같이 정리된다.

$$p_0 \frac{dV}{dt} + V_0 \frac{dp}{dt} = QRT \quad (3)$$

$$f_{air} = pA \quad (4)$$

이러한 관계식을 블록다이어그램으로 나타내면 다음과 같다.

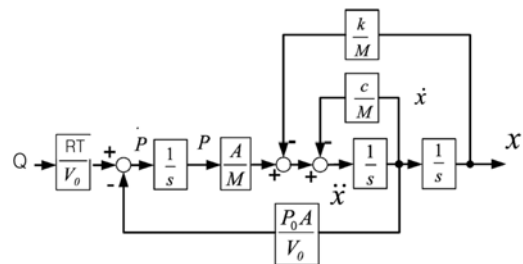


fig. 2 Block diagram of a pneumatic isolation table

3. 제어 알고리즘

제진장치의 제어알고리즘은 변위센서의 노이즈를 제거하는 칼만필터와 좌표결합된 센서신호를 독립좌표계로 만드는 좌표분리 모듈, 속도신호와 위치신호에 대해 각각 PD, Modified PID 제어모듈과 제어신호(u)를 Mount 좌표계(P1~P4)로 변환하는 역변환 모듈 등으로 구성된다.

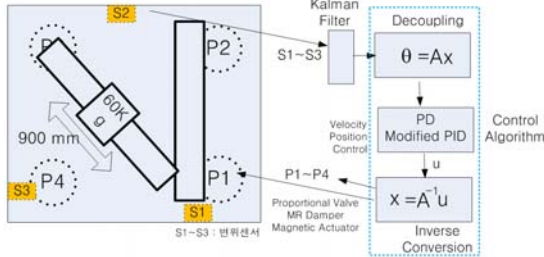


fig. 3 Block diagram of a pneumatic controller

알고리즘 중 좌표분리 부분은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = BF(t) \quad (5)$$

$$x(t) = M^{-1/2}q(t) \quad (6)$$

$$\ddot{q} + \tilde{C}\dot{q} + \tilde{K}q = M^{-1/2}BF(t) \quad (7)$$

$$\tilde{C} = M^{-1/2}CM^{-1/2}$$

$$\tilde{K} = M^{-1/2}KM^{-1/2}$$

$$\tilde{K}v = \lambda v, \lambda = \text{eigen value}, v = \text{eigen vector}$$

$$\text{Let } q(t) = Pr(t) \quad (8)$$

$$P = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ \dots \ v_n], \ P'P = I$$

$$\ddot{r} + \text{diag}[2\zeta_i w_i] \dot{r} + \Lambda r = P'M^{-1/2}BF(t) \quad (9)$$

직교좌표 coordinate인 r 에서 공압서보밸브와 MR 댐퍼에 대해 각각 Modified PID/PD Control을 수행하고, Matrix 역연산을 통해 마운트 좌표계로 변환한다. 제진대의 수평거동을 무시할 수 있고, 상태변수 $x(t)$ 를 모두 측정하기 곤란할 경우 평면의 방정식이용해서 마운트 좌표를 구한 후, 좌표분리 연산을 수행한다.

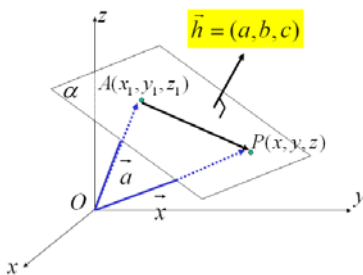


fig. 4 A plane in 3 Dimensions

$$(\vec{x} - \vec{a}) \cdot \vec{h} = 0 \text{ 이므로} \\ ax + by + cz + d = 0, \quad d = \text{상수} \quad (10)$$

$$\vec{h} = (\vec{s}_1 - \vec{s}_2) \times (\vec{s}_1 - \vec{s}_3) \\ = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x_{s1} - x_{s2} & y_{s1} - y_{s2} & z_{s1} - z_{s2} \\ x_{s1} - x_{s3} & y_{s1} - y_{s3} & z_{s1} - z_{s3} \end{vmatrix} \quad (11) \\ (\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3 = \text{센서의 위치})$$

4. 실험결과

공압서보밸브와 제안된 알고리즘을 적용하여 개루프/폐루프 제어 시스템의 계단응답 특성을 측정하였다. 측정결과는 다음 그래프와 같다. 특히, 폐루프제어 실험에서는 레벨링오차 10um 이내의 정밀한 제어특성을 보였다.

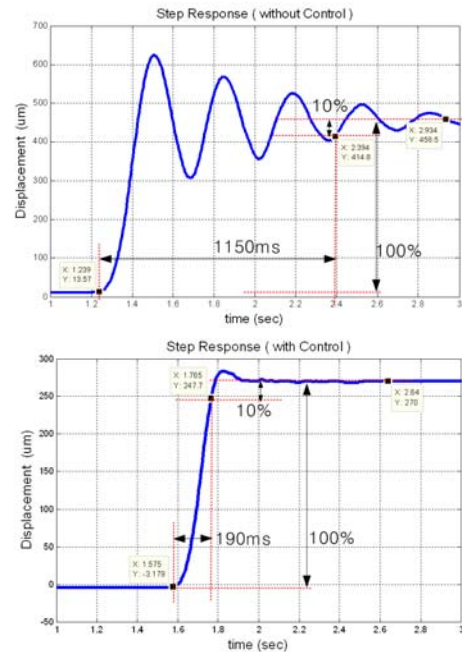


fig. 5 Step Response of pneumatic Isolation system

5. 결론

제진대의 제진/방진 성능을 높이기 위해 공기스프링과 MR 댐퍼, 공압서보밸브를 이용하여 공압제진대를 구성하였다. 공기스프링의 동특성 해석을 통해 서보밸브의 제어알고리즘을 설계하고, 실험을 통해 그 성능을 확인하였다.

참고문헌

1. Tomonori Kato, Kenji Kawashima, "Active Control of pneumatic isolation table using model following control and a pressure differentiator," Precision Engineering, **31**, 269-275, 2007.