

## 장비 자체 가진력에 의한 방진대의 과도응답 진동제어

손성원\*, 전종균\*\*, 이흥기\*, 이규섭\*

\*알엠에스 테크놀러지, \*\*신문대학교

### 초록

최근의 반도체/display 관련 생산장비 및 검사장비들이 대형화/고속화 되어감에 따라 과거 stepping 방식에서 scanning 방식으로 전환된 장비들이 공정 상에 발생하는 과도응답 형태의 진동으로 인하여 제품 수율의 저하와 생산 효율의 감소를 가져오고 있다. 이러한 과도응답의 진동은 장비 자체의 가진력으로부터 발생하므로 건물 구조의 동강성 증대 방안이나 고효율의 방진 시스템 적용으로는 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 smart 재료인 MR 유체를 이용한 MR damper를 이용하여 방진효율을 유지하면서 과도응답의 진동을 제어하기 위한 반 능동제어 방식의 방진/제진 시스템을 구성하였으며, 시스템 해석과 제어 시스템의 구성을 위하여 6자유도 강체 진동에 대한 운동방정식을 고려하였다.

### 1. 서론

반도체/display생산공정 상 필요한 노광장비, 정밀 검사장비 등 정밀 방진을 요하는 장비들이 생산 효율 증대를 위한 고속화에 따라 scanning 방식에 의한 거대 이동질량의 관성력으로 생산 공정 중 과도 진동이 발생하여 제품의 생산 수율에 악영향을 미치고 있다. 이러한 과도진동을 제어하기 위해서는 기존의 수동제어 방식으로는 한계가 있으며, smart material을 응용한 능동제어의 적용이 요구된다. 환경 및 작업 조건의 변화가 빈번한 현장 적용의 경우에는 actuator를 사용하는 능동제어보다 이러한 변화에 최적의 조건으로 따라갈 수 있는 반 능동제어 방법이 더욱 안정적이고 안전적일 수 있으며, 이러한 조건을 충족시키는 것이 MR 유체(Magneto-Rheological Fluid)이다. MR 유체는 수  $\mu\text{m}$  이하의 ferrite particle과 기름이 결합된 구조로 magnetic field 하에서 particle들이 chain 결합을 함으로써 제어력을 발생시킨다.(그림1) 이러한 결합력은damper 설계방식에 따라 차이가 나지만 일반적으로 50 kPa 내외의 큰 힘을 가지고 있으며, 5 watt미만의 적은 전력이 소요되는 장점이 있어 field 적용이 가속화 되고 있다. 이러한 MR damper는 토목분야에 먼저 적용이 시작되어 현수교의 cable 장력제어<sup>[1]</sup>, 교량의 탄성받침<sup>[2]</sup> 및 고층 건물의 진동제어<sup>[3]</sup> 등에 적용하기 위한 연구들이 수행되었으며, 자동차의 suspension<sup>[4]</sup>, seat suspension<sup>[5]</sup> 등에 응용되고 있다.

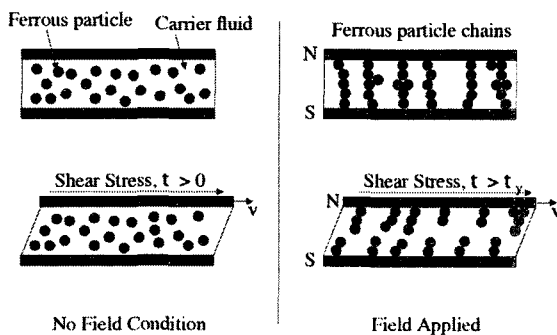


그림 1. MR 유체의 작동원리

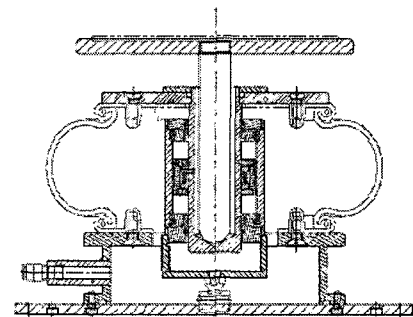
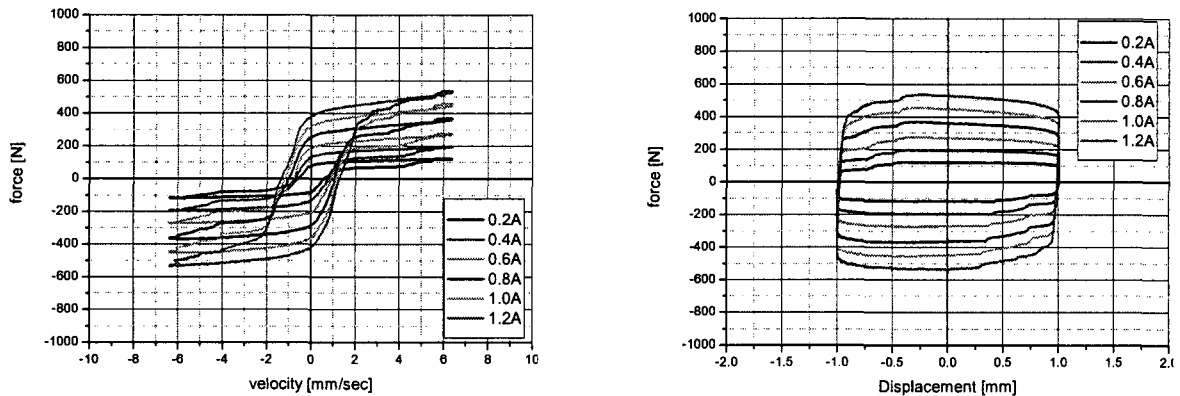


그림 2. Air spring과 MR damper의 결합구조

본 논문에서는 노광장비 혹은 정밀검사장비 등을 탄성지지하고 있는 방진대가 장비의 자체 가진력에 의한 과도응답의 진동이 발생하는 경우, MR damper를 이용하여 이를 효율적으로 제어하면서 방진효율을 손상하지 않는 반응동 제어시스템을 구성하는 것이 그 목적이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 반응동 제어형 마운트는 그림2와 같이 air spring과 MR damper가 parallel하게 결합된 구조를 가져야 한다. 장비에 의한 자체 가진이 없는 경우에는 MR damper의 감쇠력은 작용하지 않으므로 air spring에 의한 방진효과가 그대로 적용되며, 과도응답의 진동이 발생하는 경우에만 MR damper는 제어력으로써 감쇠력이 발생된다.

적용된 MR damper는 실제 적용대상 시스템을 고려하여 진동변위 1mm, 진동속도 6mm/s에서 500N 이상의 감쇠력을 낼 수 있도록 설계되었으며, 힘 대 변위 및 힘 대 속도 곡선은 그림 3과 같다.



힘 대 변위 곡선  
힘 대 속도 곡선  
그림 3. 입력 전류에 따른 MR damper의 힘 대 변위 및 속도 곡선

그림 3에 제시된 바와 같이 MR damper는 내부에 장입된 coil(저항 5Ω 내외)에 인가되는 전류의 크기에 따라 감쇠력이 변화되며, 이는 과도응답의 진동을 제거하기 위한 제어력으로 사용된다. 제시된 air spring의 정격하중은 5,000 N 수준으로 MR damper의 동적 제어력은 지지하중의 약 10%에 해당한다.

2. 실험 방법

실험장치의 구성은 그림 4와 같이 2 ton 하중의 방진대를 4개의 MR damper 마운트가 지지하는 구조로 하였으며 이동질량에 의한 관성력을 모사하기 위하여 linear motor에 의해 움직이는 80 kg의 이동질량이 방진대 위에 설치되어 있다.

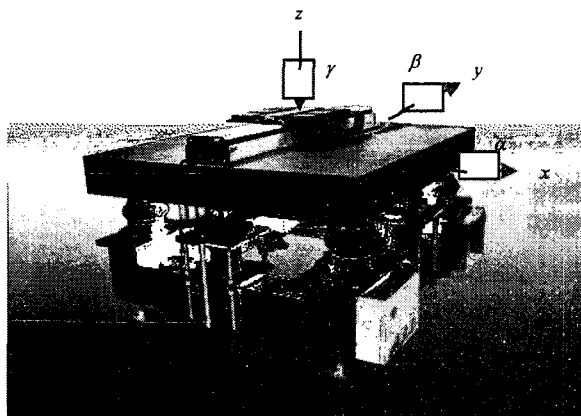


그림 4. MR damper마운트로 지지된 방진대

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + k_x(x + a_z\beta) &= f_x \\
 I_{yy}\ddot{\beta} + k_x a_z x + (k_x a_z^2 + k_z a_x^2)\beta &= m_y \\
 m\ddot{y} + k_y(y - a_z\alpha) &= f_y \\
 I_{xx}\ddot{\alpha} + k_y a_z y + (k_y a_z^2 + k_z a_y^2)\alpha &= m_x \\
 m\ddot{z} + k_z z &= f_z \\
 I_{zz}\ddot{\gamma} + (k_x a_y^2 + k_y a_x^2)\gamma &= m_z \quad (1)
 \end{aligned}$$

그림 4로 도시된 진동계의 운동방정식은 식(1)과 같다. (식의 단순화를 위하여 탄성력 항과 같은 형태인 감쇠력 항은 생략함) 제어계 구성을 위해 필요한 계의 동적 파라미터(고유진동수, 감쇠비 등)는 식(1)로 제시된 운동방정식을 이용한 modal analysis로 도출할 수 있다. 이 수학적 모델의 타당성을 확인하기 위하여 modal testing의 실험적 방법으로 계의 고유진동수를 계측한 결과와 modal analysis에 의한 이론적 해석 방법으로 도출한 계의 고유진동수를 비교한 결과는 표 1과 같으며, 수학적 모델의 타당성을 확인할 수 있다.

표 1. 진동계의 고유진동수 (단위 : Hz)

	x	y	z	α	β	γ
이론치	2.727	2.620	2.820	4.111	4.507	4.10
실험치	2.725	2.625	2.820	4.075	4.525	4.10

방진대 위의 이동질량은 y 축을 따라 수평이동을 하므로 계에 가해지는 가진력은 y 방향의 힘과 α 방향의 모멘트가 주가 된다. 2개의 주된 mode에 대한 운동방정식은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & 0.4282\ddot{y} - 0.102\dot{y} + 416.6y - 104.2\alpha = f \\
 & 0.302\ddot{y} + 0.591\dot{y} - 308.3y + 534.1\alpha = m \quad (2)
 \end{aligned}$$

where,  $\zeta_y = \zeta_z = 0.01$

제어계에 있어 상태변수 α는 측정이 매우 어려우므로 y축 양단에 설치한 센서의 진동변위 z를 이용하여 z=λα로 치환하여 사용한다. 여기서 λ은 무게중심에서 센서까지의 거리이다.

제어 알고리즘은 sliding mode control 방법을 사용하였으며 sliding surface  $s = \lambda\dot{x} + x$ 에 대하여 sliding surface 로 수렴하기 위한 조건  $s\dot{s} < 0$ 을 고려하면 제어력은

$$F_{MR} = \lambda\dot{x} - k_1x - k_2\ddot{x} + \rho \operatorname{sat}(s) \quad (3)$$

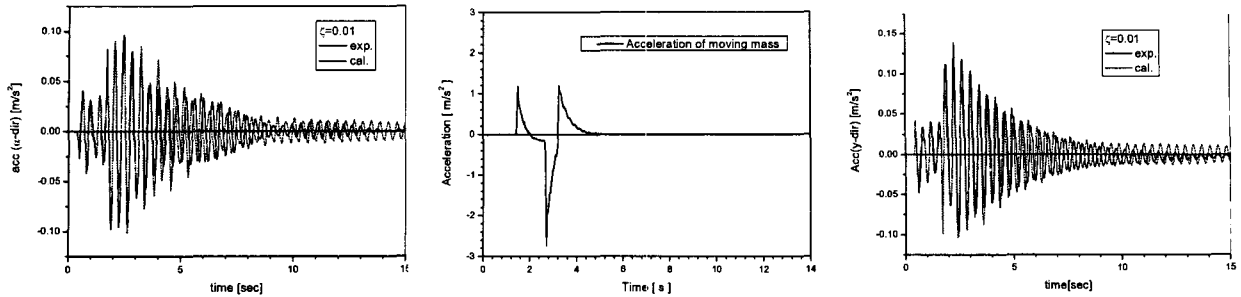
의 형태가 되며, 여기서 ρ는 식 (2)에서 관성력을 제외한 항이 된다. MR damper는 음의 감쇠력을 줄 수 없는 반능동 형태의 작동기이므로 제어력은

$$\begin{aligned}
 F_{MR} &= F_{MR} \quad , F_{MR} \dot{x} \geq 0 \\
 &= 0 \quad , F_{MR} \dot{x} < 0 \quad (4)
 \end{aligned}$$

로 작용한다.

### 3. 실험결과 및 고찰(동음체 11pt, 진하게, 양쪽 혼합 정렬)

식(2)의 수학적 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 방진대 위의 이동질량에 의한 가진력에 대하여 Runge-Kutta 적분법에 의한 수치해석과 실험결과를 비교한 결과가 그림 5에 제시되어 있다. 여기서 air spring의 감쇠비는 0.01로 하였다.

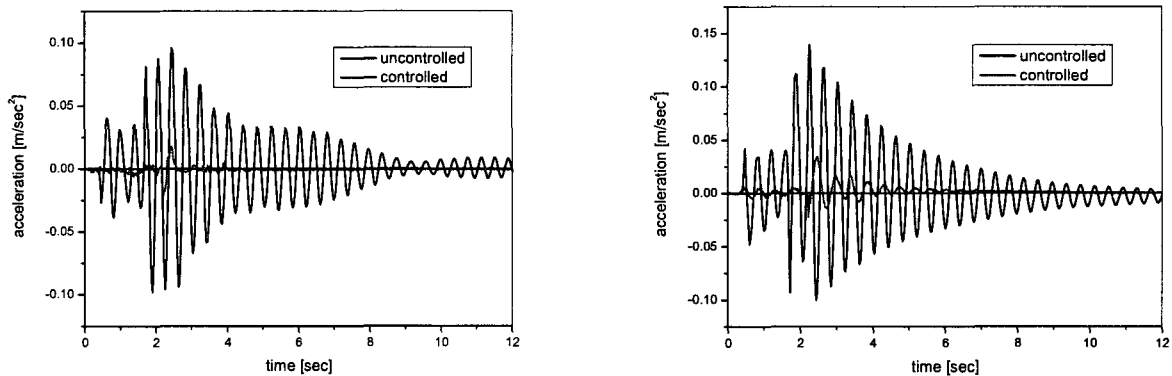


a) 이동질량에 의한 관성      b) 회전 모드에 의한 수직진동 응답      c) 수평 진동 응답

그림 5. 이동질량에 의한 입력 관성력과 진동계의 진동응답

그림 5에서 해석결과와 실험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며 모델의 타당성을 확인할 수 있다. 감쇠에 있어 차이를 보이는 것은 air spring이 구조감쇠의 특성을 갖고 있기 때문으로 판단된다.

그림 6은 제어를 수행한 결과로서 과도응답의 진동이 현저하게 줄어들음을 알 수 있다. 특히 제어력은 수직방향으로만 작용되었으나 이와 연성된 수평방향의 진동도 급격히 감소함을 확인할 수 있다.



a) 회전모드에 의한 수직 진동 응답      b) 수평진동 응답

그림 6. 과도응답 진동의 비 제어 시와 제어 시의 응답 비교

#### 4. 결론

자체 가진력을 갖는 장비에 의하여 방진대가 과도진동을 하는 경우의 진동제어를 위하여 진동계를 6자유도 강체운동으로 모델링하고 MR damper를 이용한 반능동제어 시스템을 구성하여 실험한 결과

- 수학적 모델링은 계를 정확히 묘사할 수 있음을 이론해석 결과와 실험결과로 확인할 수 있었으며,
- MR damper를 이용한 반능동제어 시스템은 과도응답의 진동을 매우 효과적으로 제어할 수 있었다.
- 본 연구에서는 단방향의 가진력을 받는 경우로 단순화하여 실험을 수행하였으나, 추후 다 축 제어의 가능성을 확신할 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 “충남지역 산업공통기술개발사업”을 통하여 수행되었으며, 지원에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

[1] W.J.Wu, C.S.Cai and S.R.Chen, "Experiments on reduction of cable vibration using MR damper," 17<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, June 13~16, 2004, University of Delaware NewYork, DE.

[2] Baris Erkus, Masato Abe and Yozo Fuzino,"Investigation of semi-active control for

- 
- seismic protection of elevated highway bridges," *Engineering Structures*, vol. 24, 2002, pp.281~293.
- [3] Laura M. Jansen and Shirley J. Dyke,"Semi-active control strategies for MR dampers: A comparative study," *ASCE J. of Engineering Mechanics*, vol.126, No. 8, pp.795~803.
- [4] Mark O. Bodie and Aleksander Hac, "Closed loop yaw control of vehicles using Magneto-Rheological Dampers," *SAE technical paper series 2000-01-0107*.
- [5] Xubin Song, Mehdi Ahmadian,"Study of semi-active adaptive control algorithms with Magneto-Rheological seat suspensions," *SAE technical paper series 2004-01-1648*.