

전자기 액츄에이터를 이용한 진동제어시스템

A Design of Active Vibration Control System Using Electromagnetic Actuators

이주훈†·전정우*·미티카 카라이아니*·강동식*

Joo-hoon Lee, Jeong-woo Jeon, Mitica Caraiiani and Dong-sik Kang

Key Words : pneumatic isolator, electromagnetic actuator, active vibration control, counter force control

ABSTRACT

The pneumatic isolator is widely adopted for anti-vibration of precision measuring and manufacturing equipments. But, when the precision demand on anti-vibration is extreme or the load is moving, the performance of anti-vibration can not meet satisfaction. In these cases, as a complementary, active vibration suppression system can be added for advanced performance. In this paper, an active control system is presented, which uses electromagnetic actuators for vibration suppression. The anti-vibration characteristic of pneumatic isolator is analyzed for system modeling and actuator specifying. The modeling and the 3D dynamic simulation is performed for control system design. For the electromagnetic actuator design, the magnetic flux density and the current-force characteristic analysis are achieved.

1. 서론

초정밀 공정에서 장비에 전달되는 지반진동은 장비의 오작동 및 제품불량의 원인이 될 수 있다. 최근에는 보다 엄격한 진동제한조건을 만족하기위해서 제어가 불가능한 기존의 고무마운트나 스프링을 이용한 방진장치 보다는 제어가 가능한 에어스프링을 이용한 진동제어가 일반화되고 있다. 그러나 저주파수의 미세한 지반진동이나 장비가 운동을 하는 경우 에어스프링만을 이용한 방진시스템 만으로는 정밀한 진동제어와 대응력제어가 불가능하다. 장비의 운동에 의하여 발생하는 진동이나 지반진동의 정밀제어를 위해서는 액츄에이터를 적용하여 발생 진동을 적극적으로 상쇄시키는 능동진동제어가 필요하다.

특히, 장비가 운동을 하는 경우 지반진동에 비하여 복잡한 진동을 발생시키며 수직력에 비하여 수평력이 크게 작용하므로 액츄에이터의 특성에 의하여 전체적인 진동제어

성능이 좌우된다.

본 논문에서는 운동을 수행하는 장치인 자기부상스테이지에 적용한 에어스프링방식의 진동절연장치의 특성을 분석하고, 정밀한 진동 및 대응력 제어를 위한 전자기 액츄에이터와 이의 제어를 위한 시스템을 제시한다.

2. 플랜트

2.1 제진대상 시스템

일반적으로 민감쇠 코일스프링의 경우 공진점에서 증폭이 많이 되지만 진동절연효율은 좋다. 반면 감쇠 코일스프링은 공진점에서 증폭이 감소되지만 진동절연효율은 낮아진다. 그러나 에어스프링 진동절연장치는 공진점에서 최소 증폭과 높은 진동절연율을 얻을 수 있다.

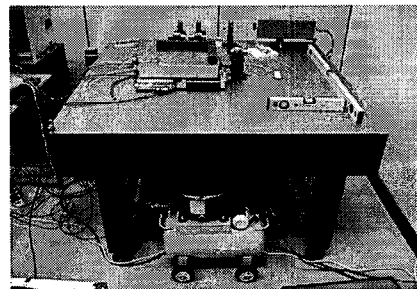


그림 1. 에어스프링 방식의 제진테이블

† 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹
E-mail : jhlee@keri.re.kr
Tel : (055)2800-1448, Fax : (055) 280-1547

* 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹

제진대상 시스템은 에어스프링방식의 진동절연장치와 광학정반으로 구성된 제진테이블이다. 그림 1은 대상 제진테이블의 사진이고, 사양은 표 1에 나타내었다. 제진테이블상에는 자기부상 스테이지가 장착되어 수직의 부상력과 추진력에 의하여 평면운동을 수행한다.

표 1. 제어대상 제진테이블의 사양

항목	사양
상판치수	1200×1200×200 $W(mm) \times D(mm) \times t(mm)$
상판 단위질량	139 kg/m^2
상판 구조	Steel Honeycomb Core
지지구조	4-Post
진동절연장치	Pneumatic Isolator
진동절연방향	전방향(수평계진기구 장착)
수평유지방식	레벨컨트롤 밸브에 의한 압력조절

2.2 동특성 실험 및 분석

그림 2와 그림 3은 에어스프링 방식 제진테이블의 수직 및 수평모드 분석결과이다.

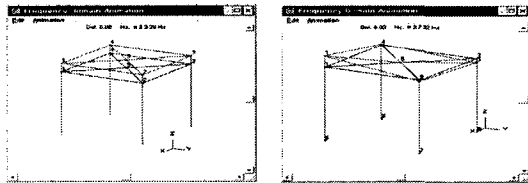


그림 2. 수직 모드분석(1차: $F_n=3.29 Hz$, 2차: $F_n=7.52 Hz$)

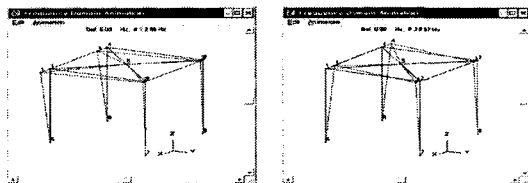


그림 3. 수평 모드분석(1차: $F_n=2.86 Hz$, 2차: $F_n=8.6 Hz$)

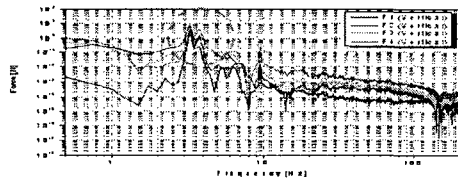


그림 4. 수직방향 동하중 주파수특성

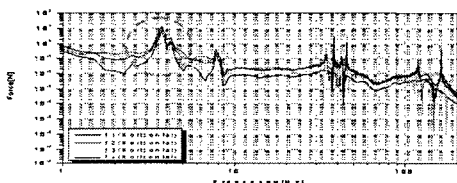


그림 5. 수평방향 동하중 주파수특성

그림 4와 5는 제진테이블이 적용된 자기부상스테이지가 평면운동을 수행할 때의 수직 및 수평방향 동하중 주파수 특성을 보여준다. 각각 3.25 Hz 에서 최대 9.8 N 및 13 N 의 특성을 보인다.

3. 모델링 및 시뮬레이션

3.1 모델링

진동제어의 대상인 방진테이블은 상판이 4개의 에어스프링 마운트에 의해 지지되는 구조로 모델링할 수 있다. 각 마운트는 z축뿐만 아니라 x 및 y축 자유도도 가진다. 상판은 질량이 197 kg 이며 가로와 세로가 1200 mm 이고 높이가 200 mm 인 허니콤 구조물이다. 상판은 중앙을 가로지르는 축에 대하여 직각인 평판구조로서 관성을 계산하면 식 (1)로부터 x축과 y축에 대하여는 24.30 kgm^2 , z축에 대하여는 47.28 kgm^2 을 구할 수 있다.

$$I = \frac{1}{12} M(a^2 + b^2) \quad (1)$$

여기서 I와 M은 각각 inertia와 mass이며, 가로지르는 축에 대하여 수직인 양면의 길이를 a와 b로 나타내었다.

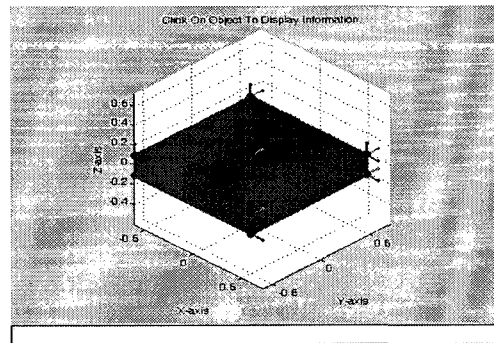


그림 6. 제진테이블의 3D 모델링

상판을 지지하는 에어스프링 진동절연장치의 고유진동주파수는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma AG}{V}} \quad (2)$$

여기에서, γ 는 공기의 비열, A 는 에어피스톤의 유효단면적, G 는 중력가속도, V 는 에어챔버의 체적을 나타낸다. 즉, 진동절연장치의 고유진동수는 하중에 영향을 받지 않고, 피스톤의 유효단면적과 공기챔버의 체적비율에 의하여 정해짐을 알 수 있다.

3.2 동역학 시뮬레이션

그림 6의 3D모델을 이용하여 임펄스 충격을 가

하고 그에 따른 변위, 속도 및 가속도의 변화추이를 시뮬레이션 하였다.

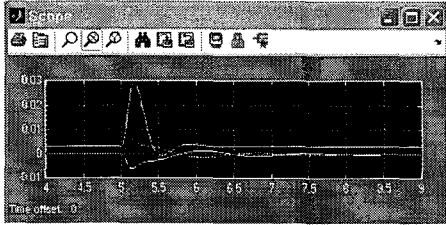


그림 7. 임펄스 3D 시뮬레이션(변위)

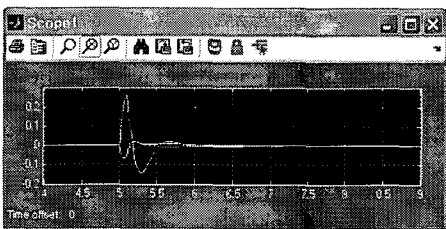


그림 8. 임펄스 3D 시뮬레이션(속도)

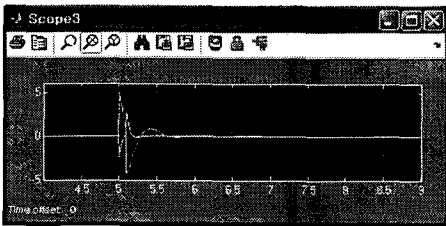


그림 9. 임펄스 3D 시뮬레이션(가속도)

본 시뮬레이션 결과를 통하여 에어스프링의 진동 흡수 특성을 분석할 수 있다.

4. 액츄에이터 설계 및 시뮬레이션

4.1 전자기 액츄에이터 설계

에어스프링 방진시스템의 동적특성 측정치와 플랜트 시뮬레이션을 통해 얻은 데이터를 근거로 그림 10과 같이 전자기 액츄에이터를 설계하여 등포텐셜 분포와 발생기자력의 특성을 해석하였다.

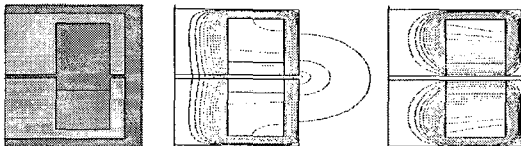


그림 10. 해석모델 및 등포텐셜 분포도

중앙과 우측의 그림은 각각 흡인력 및 반발력 작용 시의 등포텐셜 분포도이다.

4.2 전자기 액츄에이터 시뮬레이션

그림 10의 설계 모델에 철심의 치수와 코일의 굵기 및 턴수, 인가 전류 등을 최적화하고 손실을 고려하여 액츄에이터 1쌍이 80N의 유효한 힘을 발생하도록 하여 시제품을 제작하였다.

그림 11은 제어입력의 스텝인가시 액츄에이터가 힘을 발생시키는 특성곡선이다.

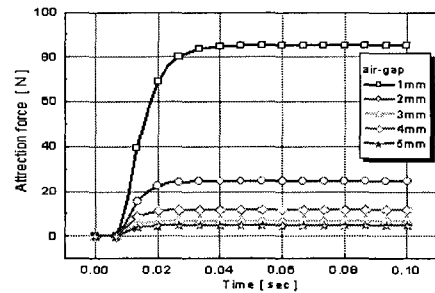


그림 11. 스텝입력 인가시 흡인력 발생특성 곡선

5. 제어시스템

5.1 하드웨어 시스템

그림 12는 에어스프링 방진시스템의 진동제어 성능 개선을 위한 능동 진동제어시스템의 구성도이다.

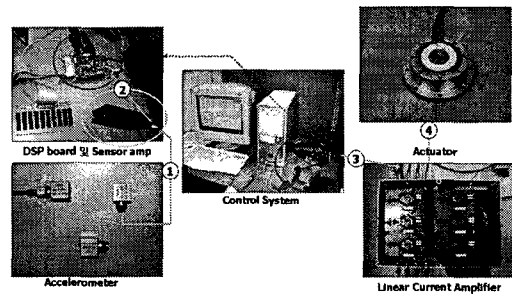


그림 12. 능동 진동제어시스템

하드웨어시스템의 개요는 다음과 같다.

표 2. 능동 진동제어시스템의 하드웨어사양

항목	사양
센서	전압출력형 가속도센서
입력	24bit A/D
제어기	C6711 floating point DSP
출력	24bit D/A
구동장치	linear amplifier
액츄에이터	전자기 액츄에이터

5.2 소프트웨어 시스템

개발 소프트웨어시스템은 윈도우기반으로 개발하였으며 다음과 같은 기능을 수행한다.

표 3. 능동 진동제어시스템의 소프트웨어구성

항목	기능
Calibration	analog input calibration
	analog output calibration
Simulation	shaker
	electromagnet
	air spring
Display	time
	frequency
Data logging	Data logging
	Cursor tracking
Control	Variable tuning

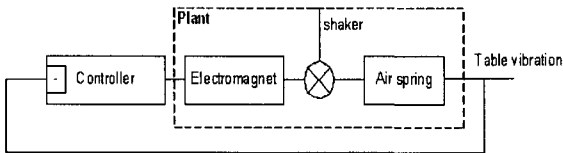


그림 13. 플랜트 시뮬레이션 블록 다이어그램

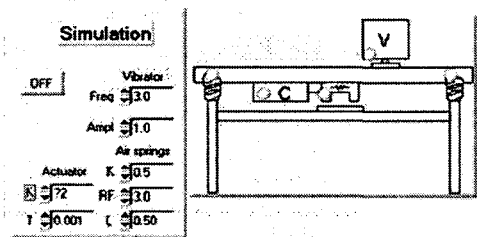


그림 14. 플랜트 시뮬레이션 윈도우

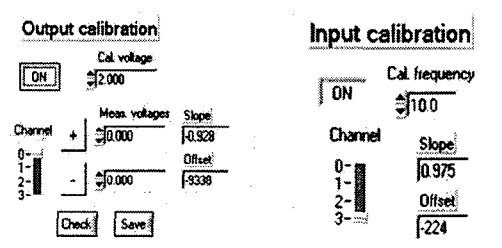


그림 15. 출력 및 입력채널 calibration 윈도우

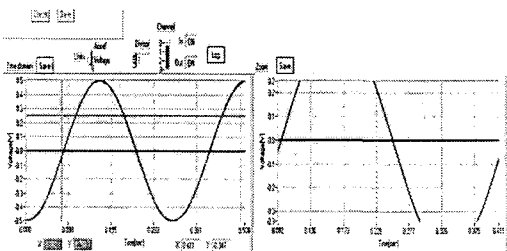


그림 16. 데이터 디스플레이 및 로깅윈도우

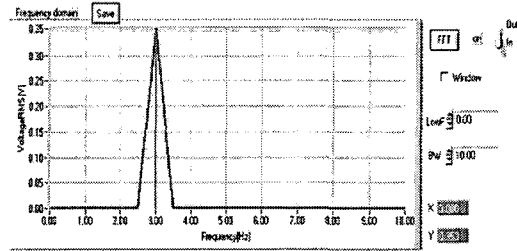


그림 17. FFT 윈도우

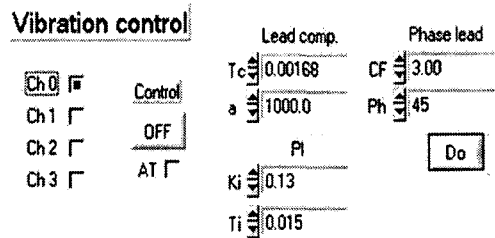


그림 18. 진동제어 윈도우

4. 결론

에어스프링 방식의 방진시스템을 분석하여 액츄에이터 및 제어알고리즘의 개발을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 따라 전자기 액츄에이터를 비롯한 제어시스템을 구축하여 단독실험을 완료하였으며, 진동제어시스템의 최적화를 위한 소프트웨어를 개발하였다. 향후 실제 시스템 적용을 통하여 정밀진동 및 대응력 제어 성능을 입증할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 이주훈, 전정우, 황돈하, 강동식, 최영규, 2005, "능동진동제어용 전자기 액츄에이터 설계", 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.522 ~ 524.
- (2) 이주훈, 김용주, 손성완, 이흥기, 이세한, 최영규, 2004, "초청밀 자기부상 스테이지용 능동진동제어시스템 설계", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.121 ~ 124
- (3) J.H.Lee, D.H.Hwang, Y.J.Kim, S.H.Lee, Y.K.Choi, "Hybrid Magnetic Vibration Isolator and Feedback/Feedforward Vibration Control Algorithm Design for Magnetically Levitated and Driven Precision Stage System, 49th Magnetism and Magnetic Materials, IEEE/AIP, 2004.