

전자기 액츄에이터를 이용한 능동 진동제어시스템

이주훈, 전정우, 황돈하, 강동식, 최영규*
한국전기연구원 산업전기연구단 / 부산대학교 전기공학과*

Active Vibration Control System Using Electromagnet Actuator

JOO-HOON LEE, JEONG-WOO JEON, DON-HA HWANG, DONG-SIK KANG, YOUNG-KIU CHOI*
Industry Applications Research Laboratory, KERI / Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University*

Abstract - In this paper, we address an active vibration control system, which suppresses the vibration engaged by magnetically levitated stage. The stage system consists of a levitating platen with four permanent magnetic linear synchronous motors in parallel. Each motor generates vertical force for suspension against gravity and propulsion force horizontally as well. This stage can generate six degrees of freedom motion via the vertical and horizontal forces. In the stage system, which represents the settling-time critical system, the motion of the platen vibrates mechanically. We designed an active vibration control system for suppressing vibration due to the stage moving. The command feedforward with inertial feedback algorithm is used for solving stage system's critical problems. The components of the active vibration control system are accelerometers for detecting stage tables's vibrations, a digital controller with high precise signal converters, and electromagnetic actuators.

형 동기전동기 형태로 구성된다. Platen의 액츄에이터로서 병렬로 배치된 비접촉 방식의 마그네트를 채용하고 있으므로 6-DOF Stewart platform 같은 전형적인 병렬형 기구의 구동방식과는 달리 액츄에이터 자체의 기구적인 동역학은 존재하지 않는다. 이러한 특징은 전체 운동방정식 기술을 단순화시킨다.

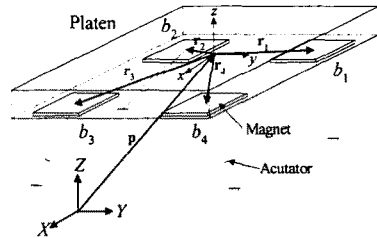


그림 1. Maglev stage model

구동력은 그림 2에 나타난 바와 같이 각 선형 동기터의 고정자에 해당하는 구동권선에 입력되는 3상 전류에 의해서 생성된 자계와 platen에 부착된 영구자석의 상호작용에 의해서 형성된 부상력과 추력으로 구성된다.

1. 서 론

반도체 공정으로 대표되는 마이크로 및 나노 공정에서는 가공, 측정, 검사 등과 같은 생산 단계에서 다양한 정밀 장비들을 사용한다. 장비의 공정 정밀도를 유지하기 위해서는 공정에 영향을 주는 진동의 제한이 필수적이며 이는 진동 표준으로 규정되어있다. 초정밀 기술이 급속히 향상되면서 공정 장비의 정밀도는 더욱 높아지고 있으며 공정에서 필요한 진동 제한치는 진동 표준에서 규정하고 있는 가장 높은 등급을 상회하고 있다. 특히 반도체 공정용 스테이지의 경우 장치의 운동에 의하여 방진 테이블에 진동을 발생시키고 이는 beam장비와 웨이퍼사이의 상대적인 변위 오차를 야기하여 제품의 불량으로 연결된다.

본 논문에서는 마이크로 및 나노 공정 적용을 목표로 초정밀 자기부상 스테이지의 진동 특성을 분석하고 스테이지 구동 시에 발생하는 impact성 disturbance를 제어하기 위한 능동 진동 제어시스템을 제안한다.

2. 본 론

2.1 자기부상 스테이지 시스템

자기부상 스테이지 시스템은 부상되어 이동하는 platen과 부상을 위한 힘을 발생시키는 4개의 액츄에이터들이 병렬로 연결된 형태로 구성되어있다. 자기부상 스테이지를 기술하는데 필요한 좌표와 기구학적 벡터들을 그림 1에 나타내었다. 액츄에이터는 platen에 부착된 영구자석과 고정자에 부착된 구동권선이 짝을 이루는 선

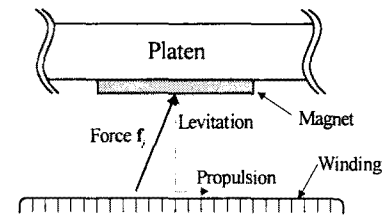


그림 2. 선형동기전동기의 actuating force

선형동기전동기의 역할은 권선에 입력되는 3상 전류의 제어를 통해서 platen 영구자석의 위치 b_i 에 대하여 수직 및 수평방향의 2-DOF 구동력을 발생시키는 것이다. 이때 주의할 점은 사용된 선형동기전동기는 4개 모두 수직 방향에 대해서는 권선의 배치에 따라서 f_x 또는 f_y 방향의 힘만 발생할 수 있다. 또한, platen과 권선 사이에 기구적인 구속이 없으므로 권선으로부터 platen에 작용하는 힘 f_i 의 발생 방향은 platen의 미소한 기울어짐을 무시하면 platen과 권선의 상대 위치에 의존하지 않는다.

Newton-Euler 방식을 이용한 운동방정식 유도는 대상 물체의 translation에 대해서는 Newton 방정식을, rotation에 대해서는 Euler 방정식을 적용한다. 이때, platen을 강체로 가정한다. 강체의 운동은 무게중심에 대해서 병진운동과 회전운동으로 분리하여 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$m_p \ddot{x} + m_p g = \sum_{i=1}^4 f_i \quad (1a)$$

$$I_c \dot{\omega} + \omega \times (I_c \omega) = \sum_{i=1}^4 r_i \times f_i \quad (1b)$$

(1)에서 사용된 변수는 특별한 언급이 없는 경우 모두 관성 좌표계 기준으로 기술되었다. (1)은 다음과 같이 행렬과 벡터를 이용하여 간단히 기술할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_p E & 0 \\ 0 & I_c \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{\omega} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} m_p g \\ \omega \times (I_c \omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum f_i \\ \sum r_i \times f_i \end{Bmatrix} \quad (2)$$

이때, 중력은 분포력(distributed force)이므로 모멘트 평형식인 Euler 방정식에 영향을 미치지 않는다. m_p 는 platen의 질량을, g 는 중력가속도를, E 는 단위행렬을, I_c 는 질량중심에서의 회전관성을, \ddot{x} , ω 는 각각 부상체의 선가속도 및 각속도를, r_i 는 질량중심에서 연구자석의 중심위치 벡터를, f_i 는 각 진동기의 발생력을 나타내며, 모든 진동기는 수직방향 힘 성분을 갖지만, 진동기의 순서 i 에 따라서 수평방향에 대해서는 x 방향 혹은 y 방향의 성분만 갖는다.

앞에서 기술한 (2)로 표시되는 부상 스테이지의 운동방정식은 다음과 같은 특징을 갖는다. 자기부상 스테이지 시스템은 병렬형 기구의 운동방정식을 복잡하게 만드는 요소인 액츄에이터의 관성이 존재하지 않기 때문에 그에 따른 복잡한 비선형항이 존재하지 않게 된다. 관성행렬 부분에서 선가속도 \ddot{x} 와 각가속도 ω 에 해당하는 부분이 서로 독립인 관계가 있을 뿐만 아니라 비선형항 부분의 경우도 완전히 독립인 관계에 있으며, 계산과정의 복잡함은 platen의 자세각도에 주로 의존함을 알 수 있다. 자기부상 스테이지의 platen의 최대 자세각도 범위에 대하여 특이값을 이용한 회전관성 행렬의 크기 변화 계산결과를 그림 3에 나타내었다. 계산 결과에 의하면 자세각도가 $\pm 5^\circ$ 범위에 있으면, 회전관성의 최대 특이값의 변화는 최대 약 10% 정도의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 실제로 platen이 1° 미만의 자세 각도로 움직이는 특성을 감안할 경우 특이값의 변화는 거의 무시할 수 있다.

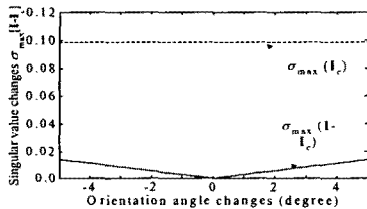


그림 3. Platen의 orientation angle 변화에 따른 platen 관성행렬의 최대 특이값의 변화

한편, platen은 position 3-DOF, orientation 3-DOF로 총 6-DOF의 운동을 할 수 있다. 위치 변수의 경우 일반적인 직교 좌표계를 사용하여 platen의 무게 중심 위치를 $p = \{xyz\}^T$ 로 나타낼 수 있으며, 벡터의 특성을 가지므로 간단히 방정식 기술에 사용할 수 있다. 반면, 자세 각도를 기술하는 데는 각도 변수 $\{\alpha\beta\gamma\}^T$ 를 사용한다. 회전 각도 기술에는 여러 가지 방법이 존재하지만, Euler 각도법을 사용한다. 먼저 x 축 방향에 대하여 α ,

y' 축 방향에 대해서 β , 마지막으로 z'' 축 방향에 대해서 γ 회전으로 정의한다. 회전각도는 벡터 특성을 갖지 않으므로 각도기술에 주의하여 사용하여야 한다. 즉, 회전동작을 적용하는 순서에 영향을 받게 된다.

2.2 진동특성

2.2.1 동특성 실험

그림 4는 진동특성분석을 수행한 자기부상 스테이지 시스템이다. 방진테이블로는 공기스프링방식의 아이슬레이터를 적용하였다.

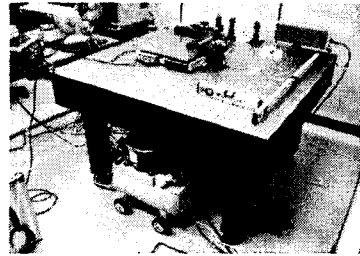


그림 4. 자기부상 스테이지 시스템

자기부상 스테이지를 구동하지 않을 경우(Case 1)와 구동할 경우(Case 2)를 구분하여 동특성실험을 수행하였으며 그림 5와 같은 결과를 취득하였다.

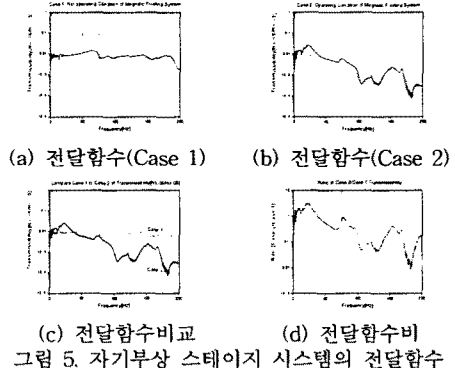


그림 5. 자기부상 스테이지 시스템의 전달함수

Case 2의 경우 Case 1에 비하여 35Hz 부근에서 전달함수가 급격히 감소함을 알 수 있다.

2.2.2 동적 해석

동특성해석결과를 실험결과와 유사하도록 산출한 스프링 상수는 표 1과 같다.

표 1. 동특성실험 및 해석결과 비교

Direction	Mode	Natural Frequency [Hz]		Spring Constant [N/m]	
		Experimental	Analysis	Each	Avg.
Vertical	1st	3.29	3.26	21,000	29,000
	2nd	7.52	7.49	37,000	
Horizontal	1st	2.86	2.87	9,000	30,000
	2nd	8.67	8.66	21,000	

2.2.3 동하중 특성평가

자기부상 스테이지 구동시의 테이블의 수직 및 수평방향 가속도 응답시간이력은 그림 6과 같다.

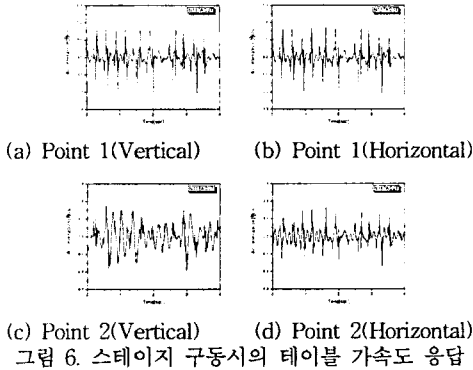


그림 6. 스테이지 구동시의 테이블 가속도 응답

수직방향 동하중 주파수특성은 그림 7과 같다. 스테이지 테이블의 수직방향 강제진동모드가 존재하는 고유주파수에서 동적하중이 가장 크게 나타나고 있으며, 최대값은 3.25Hz에서 약 9.8N의 동하중이 작용한다.

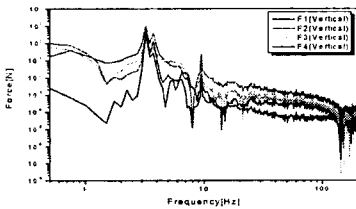


그림 7. 수직방향 동하중 주파수 특성

수평방향 동하중 주파수 특성은 그림 8과 같다. 수평방향의 고유모드가 존재하는 부근에서 큰 동적하중을 보이고 있으며, 최대값은 약 13N의 크기를 나타내고 있어 수직방향 보다 크다. 이는 스테이지의 구동에 따른 질량의 이동으로 기인한 것이다.

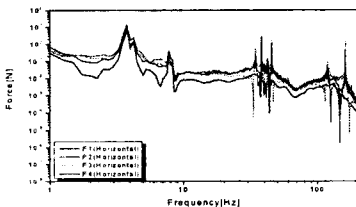


그림 8. 수직방향 동하중 주파수 특성

2.3 능동 제어시스템

2.3.1 액츄에이터

능동 진동제어의 성능을 최적화하기 위해서는 기준위를 기준으로 상승하고 하강하는 진동을 양방향으로 상쇄시킬 수 있는 액츄에이터가 필수적이다. 전자기를 이용한 능동 진동제어용 액츄에이터는 흡인력을 이용하는 것이 일반적인 경우이다. 이는 흡인력이 반발력에 비해 월등히 크기 때문이지만, 이로 인하여 액츄에이터의 구조가 복잡하게 설계될 수밖에 없었다.

본 논문에서는 흡인력과 반발력이 균형을 갖는 액츄에이터를 설계하여 시스템에 적용하였다. 그림 9에 액츄에이터의 해석모델과 동포텐셜 분포를 나타내었다.

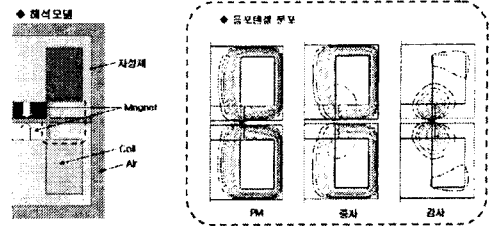


그림 9. 액츄에이터 해석모델과 동포텐셜 분포

2.3.2 제어 알고리즘

일반적으로 적용되는 능동 진동제어 알고리즘은 그림 10과 같은 피드백방식을 채택한다.

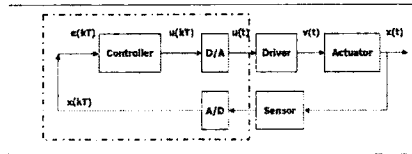


그림 10. Feedback Control System

피드포워드 제어알고리즘은 피드백 알고리즘에 비하여 구현하기가 어렵지만 피드백 알고리즘의 제어범위와 성능을 개선하는데 효과적으로 적용될 수 있다. 특히 스테이지 시스템과 같이 진동원의 disturbance 발생 특성을 알고 있는 경우 command 피드포워드 알고리즘을 적용하면 predictive counter force 제어를 수행할 수 있다. 그림 11은 피드백 제어시스템에 피드포워드 알고리즘을 추가하여 하이브리드 방식의 제어를 수행하는 시스템의 블록도이다.

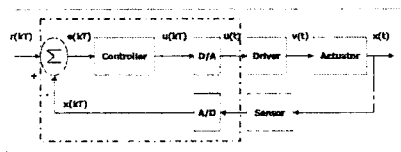


그림 11. Feedback/feedforward combined control system

3. 결 론

초정밀 공정용 스테이지의 구동으로 인한 진동 특성을 분석하였으며, 이를 제어하기 위한 양방향 동일한 힘으로 가진할 수 있는 전자기 액츄에이터를 설계하여 시스템에 적용하였다. 제어알고리즘으로는 진동 피드백 알고리즘에 스테이지 제어명령의 피드포워드 알고리즘을 추가하여 효과적인 predictive counter force control을 수행할 알고리즘을 설계하였다.

[참 고 문 헌]

[1] J.H.Lee, Y.J.Kim, S.W.Son, H.G.Lee, S.H.Lee, Y.K.Choi, "A Design of Active Vibration Control System For Precise M aglev Stage", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp.121-124, 2004.
 [2] S.H.Lee, K.C.Lee, J.W.Jeon, D.H.Hwang, Y.J.Kim, "A Position Control for a Magnetic Levitated Stage with 6 Degrees of Freedom", 49th Magnetism and Magnetic Materials, IEEE /AIP, 2004.
 [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.