

초정밀 시스템의 능동 진동제어용 전자기 액츄에이터

Electromagnetic Actuator for Active Vibration Control of Precise System

이주훈*, 김정우*, 황돈하*, 강동식**, 최영규***

Joohoon LEE, Jeongwoo JEON, Donha HWANG, Dongsik KANG, Youngkiu CHOI

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.

Key Words : active, vibration, control, electromagnet, actuator

1. 서론

반도체 공정으로 대표되는 마이크로 및 나노공정에서는 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 규정되어 있다. 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 beam 장비와 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. 시스템 분석

2.1 자기부상 스테이지 시스템

자기부상 스테이지 시스템은 부상되어 이동하는 platen과 부상을 위한 힘을 발생시키는 4개의 액츄에이터들이 병렬로

연결된 형태로 구성되어 있다. 자기부상 스테이지를 기술하는데 필요한 좌표와 기구학적 벡터들을 그림 1에 나타내었다. 액츄에이터는 platen에 부착된 영구자석과 고정자에 부착된 구동권선이 짝을 이루는 선형동기전동기 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 운동 방정식 기술을 단순화시킨다.

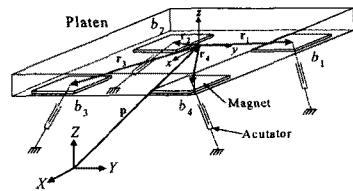


그림 1. Maglev stage model

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

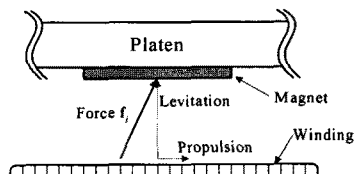


그림 2. 선형동기전동기의 actuating force

저자 소개

- *한국전기연구원 산업전기연구단 선임연구원
- **한국전기연구원 산업전기연구단 책임연구원, 그룹장
- ***부산대학교 전기공학과 교수

선형동기전동기의 역할은 권선에 입력되는 3상 전류의 제어를 통해서 platen 영구자석의 위치 bi에 대하여 수직 및 수평방향의 2-DOF 구동력을 발생시키는 것이다. 이때 주의할 점은 사용된 선형동기전동기는 4개 모두 수직방향에 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.

$$\begin{bmatrix} m_p \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_c \boldsymbol{\omega}) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum \mathbf{f}_i \\ \sum \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

이때, 중력은 분포력(distributed force)이므로 모멘트 평형식인 Euler 방정식에 영향을 미치지 않는다. m_p 는 platen의 질량을, \mathbf{g} 는 중력가속도를, \mathbf{E} 는 단위행렬을, \mathbf{I}_c 는 질량중심에서의 회전관성을, $\ddot{\mathbf{x}}$ $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 는 각각 부상체의 선가속도 및 각속도를, \mathbf{r}_i 는 질량중심에서 영구자석의 중심위치 벡터를, \mathbf{f}_i 는 각 전동기의 발생력을 나타내며, 모든 전동기는 수직방향 힘 성분을 갖지만, 전동기의 순서 i 에 따라서 수평방향에 대해서는 x 방향 혹은 y 방향의 성분만 갖는다.

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.

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 $\mathbf{p} = \{x \ y \ z\}^T$ 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 대하여 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 진동특성분석

그림 3은 진동특성분석을 수행한 자기부상 스테이지 시스템이다. 방진장치로는 공기스프링방식의 아이솔레이터를 적용하였다.

자기부상 스테이지 시스템의 수직방향 동하중 주파수 특성은 그림 4와 같다. 스테이지 테이블의 수직방향 강체진동모드가 존재하는 고유주파수에서 동적하중이 가장 크게 나타나고 있으며, 최대값은 3.25Hz에서 약 9.8N의

동하중이 작용한다.

수평방향 동하중 주파수 특성은 그림 5와 같다. 수평 방향의 고유모드가 존재하는 부근에서 큰 동적하중을 보이고 있으며, 최대값은 약 13N의 크기를 나타내고 있어 수직방향 보다 크다. 이는 스테이지의 구동에 따른 질량의 이동으로 기인한 것이다.

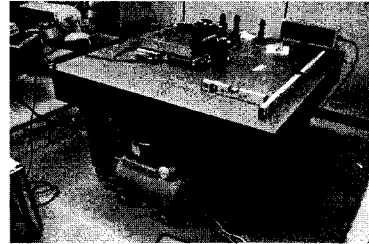


그림 3. 자기부상 스테이지 시스템

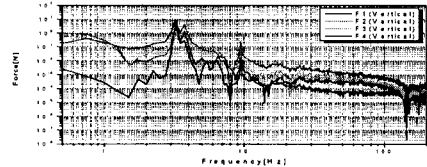


그림 4. 수직방향 동하중 주파수 특성

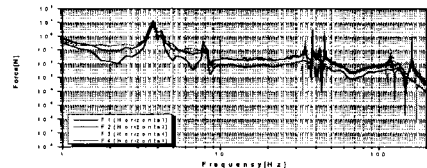


그림 5. 수직방향 동하중 주파수 특성

3. 액츄에이터 설계

3.1 구조설계

일반적으로 자석의 흡인력(attractive force)은 반발력(repulsive force)에 비해 수배이상 크며 이로 인하여 수직방향의 제어를 선형적으로 수행하기가 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 능동 진동제어의 관점에서 부하를 수직으로 미는 반발력과 당기는 흡인력의 발란스를 맞추어 최적의 진동제어성능을 얻을 수 있도록 하는 데에 중점을 두었다.

흡인력과 반발력의 균형이라는 관점에서 전자석만을 이용하는 철심형 액츄에이터는 배제하고 영구자석과 전자석을 혼용하는 하이브리드 형태의 액츄에이터를 설계하였다.

자력의 효율적인 이용과 제작의 편의성 등을 고려하여 액츄에이터의 형태는 원통형을 기본으로하여 그림 5와 같은 두 가지 방식을 고려하였다.

두 모델은 자속의 path 형태가 다른데 좌측모델은 side path를 통해 자속이 흐름으로 인해서 repulsive force에 기여하는 자속의 누설이 많고 attractive force에 기여하는 자속의 누설은 적은 특징을 보인다. 우측모델은 return path를 설치함으로써 repulsive force에 기여하는 자속의 누설을 줄인 형

태로 상대적으로 attractive force에 작용하는 누설은 커진다. 따라서 return path와 영구자석사이의 간격을 최적화 하여 자속의 누설을 최소화 하여야 한다.

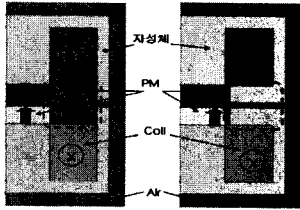


그림 6. 영구자석과 전자석을 혼용한 진동 액츄에이터의 축대칭 모델

3.2 최적화설계

완성된 액츄에이터의 단면도와 대칭모델은 그림 7과 같다.

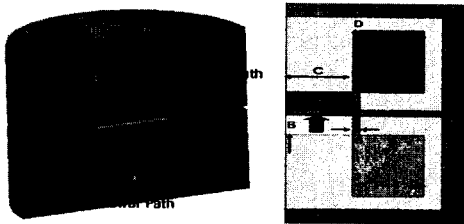


그림 7. Actuator 단면도 및 대칭모델

액츄에이터의 최적화 설계를 위해 필요한 네가지 요소들 그림에서 볼 수 있다. Return path와 영구자석간의 간격(A), 영구자석의 두께(B), main path의 폭(C)과 upper 및 lower path의 두께(D)가 그것이다. 이들 요인들은 발생력의 크기를 좌우하며 각 요인간 상호 작용하기도 한다.

그림 8은 각 요인들이 응답력에 끼치는 영향을 보여준다.

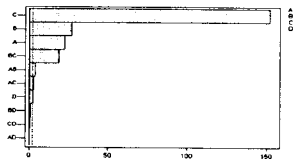


그림 8. 설계 요인들이 응답력에 끼치는 영향

또한 각 요인들의 범위에 따라 반응값이 얼마나 민감하게 반응하는가는 그림 9에 나타내었다. 그림 8과 9로부터 발생력의 크기를 결정하는 가장 중요한 요소이면서 최적화 설계에 가장 민감한 요소는 main path의 폭임을 알 수 있다.

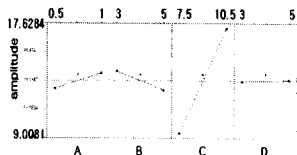


그림 9. 요소별 반응값에 영향을 주는 민감도

위와 같은 방법을 이용하여 액츄에이터 설계요소들의 사이즈를 결정하였으며 등포텐셜 분포를 해석하였다.

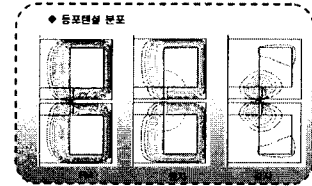


그림 10. 액츄에이터의 등포텐셜 분포

상하 두 모듈의 등포텐셜 분포해석에 의하여

$$Balance = \frac{\text{repulsive force}}{\text{attractive force}} = 1 \text{임을 알 수 있다.}$$

즉, 두 모듈간의 배치에 관계없이 반발력과 흡인력을 동일한 비율로 제어할 수 있도록 액츄에이터를 설계하였다.

4. 결론

수직 및 수평축 진동을 변형시키는 힘이 동일한 액츄에이터를 설계하였다. 본 설계를 최적화하기 위하여 단독 철심형과 영구자석 삽입형을 고려하였다. 또한 air gap return path, 영구자석의 크기, main path의 폭, upper 및 lower path의 길이 등 중요인자들이 반응값에 영향을 주는지를 평가하여 최적화 설계에 반영하였다.

참 고 문 헌

- [1] 이주훈, 김용주, 손성완, 이흥기, 이세한, 최영규, 2004, "초정밀 자기부상 스테이지용 능동진동제어시스템 설계", 추계 학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.121~124
- [2] 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.