

초정밀 자기부상 스테이지용 능동진동제어시스템 설계

A Design Of Active Vibration Control System For Precise Maglev Stage

이주훈*·김용주*·손성완**·이홍기**·이세한***·최영규****

Joo-Hoon LEE, Yong-Joo KIM, Sung-Wan SON, Hong-ki LEE, Se-Han LEE, Young-Kiu CHOI

Key Words : Active Vibration Control (능동 진동 제어), Maglev Stage (Magnetically Levitated Stage, 자기부상 스테이지), Predictive Control (예측 제어), Counter Force Control (대응력 제어)

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 table's vibrations, a digital controller with high precise signal converters, and electromagnetic actuators.

1. 서론

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 표준(vibration criterion)으로 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 빔(beam)장비와 웨이퍼(wafer) 사이의 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 impact 성 disturbance 를 제어하기 위한 능동 진동 제어 시스템을 제안한다.

2. 자기부상 스테이지 시스템

자기부상 스테이지 시스템은 부상되어 이동하

는 platen 과 부상을 위한 힘을 발생시키는 4 개의 액츄에이터들이 병렬로 연결된 형태로 구성되어 있다. 자기부상 스테이지를 기술하는 데 필요한 좌표와 기구학적 벡터들을 그림. 1 에 나타내었다. 액츄에이터는 platen 에 부착된 영구자석(permanent magnet)과 고정자(stator)에 부착된 구동권선(winding)이 짝을 이루는 선형동기전동기(linear synchronous motor)형태로 구성된다. Platen 의 액츄에이터로서 병렬로 배치된 비접촉 방식의 마그네트를 채용하고 있으므로 6-DOF(Degrees-Of-Freedom) Stewart platform 같은 전형적인 병렬형 기구(parallel manipulator)의 구동 방식과는 달리 액츄에이터 자체의 기구적인 동역학은 존재하지 않는다. 이러한 특징은 전체 운동 방정식 기술을 단순화시킨다.

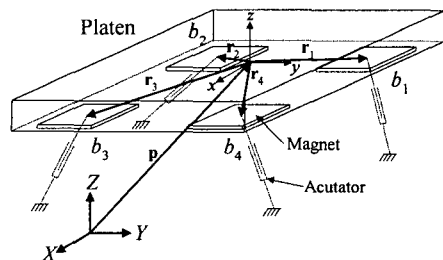


그림 1. Maglev stage model

구동력(driving force)은 그림 2 에 나타난 바와 같이 각 선형 동기모터의 고정자에 해당하는 구동 권선에 입력되는 3 상(3-phase) 전류에 의해서 생성된 자계(magnet field)와 platen 에 부착된 영구자석의 상호작용에 의해서 형성된 부상력(levitation force)과 추력(thrust force)으로 구성된다.

* 한국전기연구원 기기제어응용연구그룹
E-mail : jhleec@keri.re.kr
Tel : (055) 280-1448, Fax : (055) 280-1547
** RMS 테크놀러지(주)
*** 경남대학교 기계공학과
**** 부산대학교 전기공학과

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 수직방향에 대해서 구동력을 발생시키는 반면에 수평방향에 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.

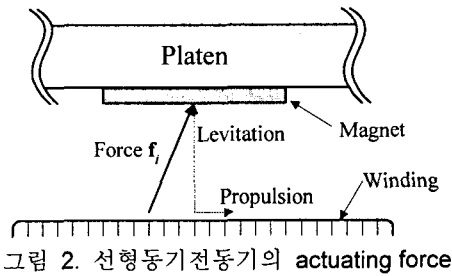


그림 2. 선형동기전동기의 actuating force

Newton-Euler 방식을 이용한 운동방정식 유도에는 대상 물체의 병진운동(translation)에 대해서는 Newton 방정식을, 회전운동(rotation)에 대해서는 Euler 방정식을 적용한다. 이때, platen을 강체(rigid body)로 가정한다. 강체의 운동은 무게중심(center of mass)에 대해서 병진운동과 회전운동으로 분리하여 다음과 같이 기술할 수 있다.

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

$$\mathbf{I}_c \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_c \boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i \quad (1b)$$

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

$$\begin{bmatrix} m_p \mathbf{E} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} m_p \mathbf{g} \\ \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_c \boldsymbol{\omega}) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum \mathbf{f}_i \\ \sum \mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_i \end{Bmatrix} \quad (2)$$

이 때, 중력은 분포력(distributed force)이므로 모멘트 평형식인 Euler 방정식에 영향을 미치지 않는다. m_p 는 platen의 질량을, \mathbf{g} 는 중력 가속도를, \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 방향만의 성분만 갖는다.

앞에서 기술한 (2)로 표시되는 부상 스테이지의 운동방정식은 다음과 같은 특징을 갖는다. 자기부상 스테이지 시스템은 병렬형 기구의 운동방정식을 복잡하게 만드는 요소인 액추에이터의 관성이 존재하지 않으므로 그에 따른 복잡한 비선형항이 존재하지 않게 된다. 관성행렬 부분에서 선가속도 $\ddot{\mathbf{x}}$ 와 각가속도 $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 에 해당하는 부분이 서로 독립인 관계가 있을 뿐만 아니라 비선형항 부분의 경우도 완전히 독립인 관계에 있으며, 계산 과정의 복잡함은 platen의 자세각도에 주로 의존함을 알 수 있다. 자기부상 스테이지의 platen의 최대 자세각도 범위에 대하여 특이값을 이용한 회전관성 행렬의 크기 변화 계산 결과를 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 1도 미만의 자세 각도로 움직이는 특성을 감안할 경우 특이값의 변화는 거의 무시할 수 있다.

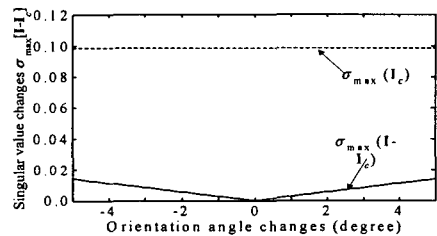


그림 3. Platen의 orientation angles 변화에 따른 platen 관성행렬의 최대 특이값의 변화

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 $\mathbf{p} = \{x \ y \ z\}^T$ 로 나타낼 수 있으며, 벡터의 특성을 가지므로 간단히 방정식 기술에 사용할 수 있다. 반면, 자세 각도를 기술하는데 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 각도 기술에 주의하여 사용해야 한다. 즉, 회전 동작을 적용하는 순서에 영향을 받게 된다.

3. 진동특성

3.1 동특성 실험

그림 4 는 진동특성분석을 수행한 자기부상 스테이지 시스템이다. 방진테이블로는 공기스프링방식 아이솔레이터를 적용하였다.

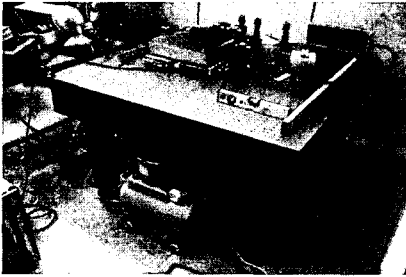


그림 4. 자기부상 스테이지 시스템

자기부상 스테이지를 구동하지 않을 경우(Case 1)와 구동할 경우(Case2)를 구분하여 동특성시험을 수행하였으며 그림 5 와 같은 결과를 취득하였다.

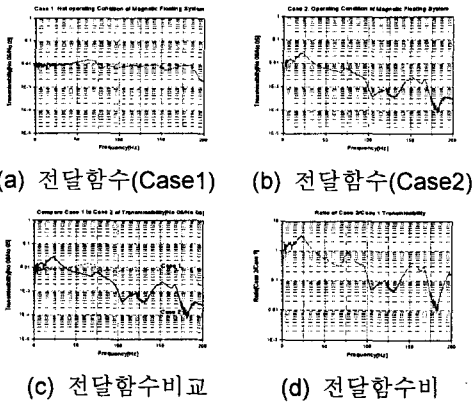


그림 5. 자기부상 스테이지 시스템의 전달함수

Case2 의 경우 Case1 에 비하여 35Hz 부근에서 전달함수가 급격히 감소함을 알 수 있다.

3.2 동적해석

동특성해석 결과를 실험 결과와 유사하도록 산출한 스프링 상수는 Table 1 과 같다.

Table 1. 동특성실험 및 해석결과 비교

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

3.3 동하중 특성평가

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

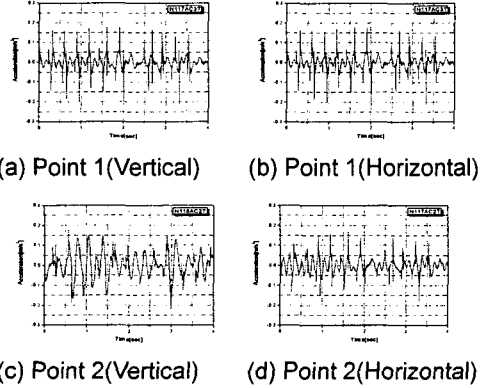


그림 6. 스테이지 구동시의 테이블 가속도 응답

수직방향 동하중 주파수특성은 그림 7 과 같다. 스테이지 테이블의 수직방향 강제진동모드가 존재하는 고유주파수에서 동적하중이 가장 크게 나타나고 있으며 최대값은 3.25Hz 에서 약 9.8N 의 동하중이 작용한다.

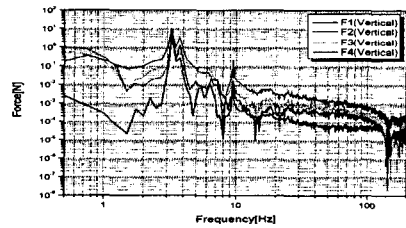


그림 7. 수직방향 동하중 주파수 특성

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

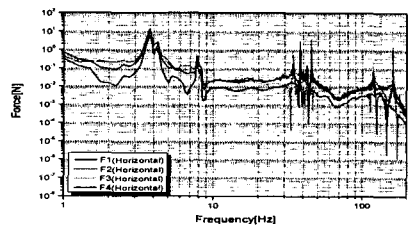


그림 8. 수직방향 동하중 주파수특성

4. 제어시스템

4.1 시스템 특성

스테이지 시스템은 초정밀 공정에서도 대표적인 **settling-time critical application** 이다. 노광장치에서의 스테이지의 성능은 **steady state** 에서의 진동 감쇠보다 **platen** 의 이동 시에 발생하는 **impact** 성 진동의 **settling-time** 을 최소화 하는 것이 중요한 요소이다.

4.2 Actuator 설계

진동 특성시험을 통하여 **15N** 급 전자석 **actuator** 를 설계하여 **10Hz** 부근에서 발생하는 동하중을 상쇄하도록 설계하였다.

4.3 제어알고리즘 설계

일반적으로 적용되는 **active** 진동 제어시스템은 그림 9 와 같은 **feedback** 방식을 채택한다.

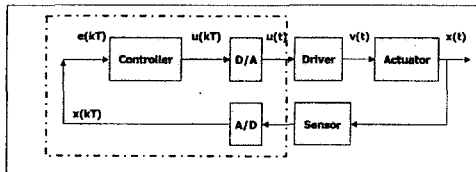


그림 9. Feedback control system

Feedforward 제어시스템은 **feedback** 시스템에 비해서 구현하기가 어렵지만 **feedback** 시스템의 제어범위와 성능을 개선하는데 효과적으로 적용될 수 있다. 특히 스테이지 시스템과 같이 진동원의 **disturbance** 발생 특성을 알고 있는 경우 **command feedforward** 알고리즘을 적용하면 **predictive counter force** 제어를 수행할 수 있다. **Predictive control** 은 이전 제어입력에 대한 현재의 **error** 신호로부터 다음 단계의 **error** 신호를 **zero** 로 하는 현재의 제어입력을 예측하는 알고리즘이다. 그림 10 은 **feedback** 제어시스템에 **feedforward** 를 추가하여 하이브리드방식의 제어를 수행하는 시스템의 블록도이다.

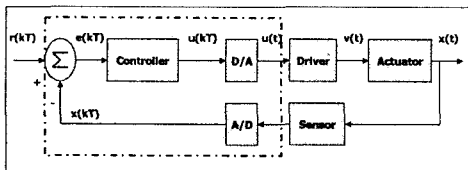


그림 10. Feedback/feedforward combined control system

4.4 제어시스템 설계

그림 11 은 기존의 공기스프링 **isolator** 와 전자기 **actuator** 를 채택한 **active** 진동제어시스템의 통합시스템 구성도이다.

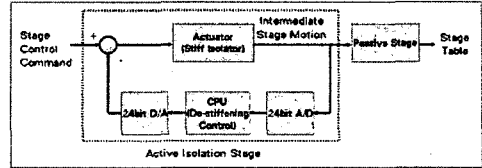


그림 11. Hybrid vibration control system for stage table

5. 결론

초정밀 공정용 스테이지의 구동으로 인한 진동 특성을 분석하여 이를 제어하기 위한 전자기 액츄에이터와 제어시스템을 설계하였다. 제어알고리즘으로는 **feedback** 알고리즘에 **stage control command feedforward** 알고리즘을 추가하여 효과적인 **predictive counter force control** 을 수행할 알고리즘을 제안하였다.

참고문헌

다음의 양식을 참고하셔서 작성해 주시기 바랍니다.

- (1) Won-Jong. Kim, *High Precision Planar Magnetic Levitation*, Ph.D. Dissertation, MIT, 1997.
- (2) Won-Jong Kim, David L. Trumper, Jeffrey H. Lang, "Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator," *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 34, No. 6, Nov./Dec., 1998, pp.1254-1262.
- (3) Se-han Lee, Ki-chang Lee, Jung-woo Jeon, Don-ha Hwang, Yong-joo Kim and Mitica Caraiani, "A position control for a parallel stage with 6 DOF using magnetic actuators," *IECON 2004*, [in press]
- (4) Se-han Lee, Mitica Caraiani, Jeong-woo Jeon, Ki-chang Lee and Yong-joo Kim, "Experiments on a High Precision Planar Magnetic Levitation Stage Structure," in *KSSET Spring Conference*, 2004, pp.68-73.
- (5) Joo-hoon Lee, Se-han Lee, Don-ha Hwang, Yong-joo Kim and Young-kiu Choi, "Active Vibration Control System Design for Nano-scale Stage," in *KIEE Summer Conference*, 2004, pp. 2495-2497.
- (6) Joo-hoon Lee, Se-han Lee, Don-ha Hwang, Yong-joo Kim and Young-kiu Choi, "Active Microvibration Control System Using Maglev Actuator," in *KIEE Summer Conference*, 2004, pp. 2492-2494.