

초정밀 스테이지용 능동 진동제어시스템 설계

이주훈*, 이세한*, 황돈하*, 김용주*, 최영규**
 한국전기연구원 기기제어응용연구그룹*, 부산대학교 전기공학과**

Active Vibration Control System Design for Nano-scale Stage

Joo-hoon LEE, Se-han LEE, Don-Ha Hwang, Yong-Joo Kim, Young-Kiu Choi

Abstract - A system, featuring the hybrid isolator for control in the vertical direction, of active microvibration control was proposed. The main components of this system are a stage vibration isolation table with built-in acceleration sensors for detecting microvibration, hybrid isolators and a digital controller with high precision signal converters. The vibration control algorithm is focused on settling-time critical application and feedback/feedforward combination.

그림 2는 구성된 자기부상 스테이지 시스템의 사진이다. 스테이지용 테이블은 에어스프링(air spring)을 이용한 진동절연기(vibration isolator)로 지지하고 있다.

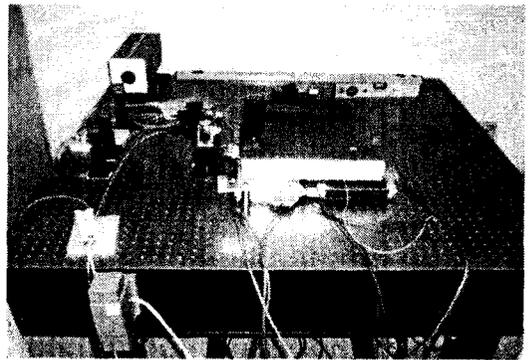


그림 2. Maglev Stage System

1. 서 론

반도체 공정으로 대표되는 Micro 및 Nano Fab.에서는 가공, 측정, 검사 등의 공정에서 다양한 정밀장비들을 사용한다. 장비의 정밀도를 유지하기 위해서는 공정에 영향을 주는 진동의 제한이 필수적인 사항이며 이는 진동표준(vibration criteria)으로 규정되어있다. 나노기술이 급속히 향상되면서 생산제품의 정밀도는 더욱 높아지고 있으며 공정에서 필요한 진동 제한치는 진동표준에서 규정하고 있는 가장 높은 등급 이상이 되고 있다.

특히 반도체 공정용 스테이지(stage)의 경우 부하의 직선운동에 의하여 가공테이블에 진동을 발생시키고 이는 빔(beam)장비와 웨이퍼사이의 오차를 야기하여 제품의 불량으로 연결된다.

본 고에서는 마이크로 및 나노공정 Fab.에 적용되는 정밀 스테이지 테이블의 진동제어알고리즘을 설계하였다.

2. 본 론

2.1 자기부상 스테이지

자기부상(Maglev; magnetic levitation) 스테이지 시스템은 이동할 수 있는 부상체(platen)와 각각 2-DOF(Degrees Of Freedom, 자유도)로 직선운동을 수행하는 4개의 구동장치들이 병렬로 연결된 형태로 구성되어있다. 자기부상 스테이지를 기술하는데 필요한 좌표와 기구학적 벡터들은 그림 1과 같다.

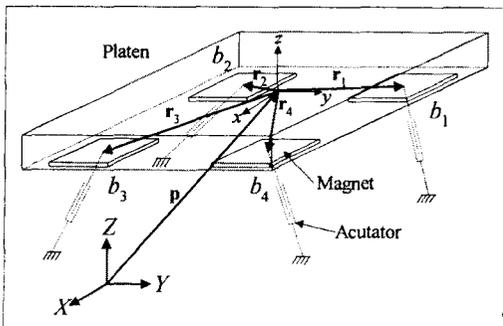


그림 1. Magnetic levitating stage system using multi linear synchronous motors.

2.2 스테이지 테이블 진동특성

자기부상 스테이지용 테이블에 발생하는 진동은 전달 경로에 따라서 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 지반에서 전달되는 진동
- 대기를 통해 전달되는 소음
- 자체적으로 발생하는 진동

지반을 통하여 전달되는 진동은 지반에 접촉하여있는 다양한 진동원에 의하여 발생한다. 이러한 진동은 지반과 장비 사이에 절연체를 삽입하여 전달되는 진동을 차단하는 방법으로 제거한다.

소음에 의하여 발생하는 진동은 대기를 통하여 전달되는데 이러한 진동은 소음을 차폐(noise shielding)시키는 방식으로 제거한다.

자체적으로 발생하는 진동은 장비가 동작을 하면서 발생하는 진동으로 기계적인 마찰이나 무게중심의 이동에 의하여 발생된다. 이러한 진동은 발생 진동을 상쇄(vibration cancellation)시키는 방식으로 제거하는데 이를 위해서는 능동형 진동제어시스템(active vibration control system)이 필요하다.

본 논문에서는 지반에서 전달되는 진동과 스테이지의 운동에 의해서 발생하는 진동의 제어를 그 대상으로 한다. 그림 3은 임펄스 진동에 대한 테이블의 진동이고 그림 4는 스테이지가 운동할 때 발생하는 진동 특성이다.

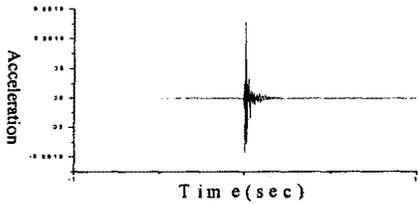


그림 3 Impulse Vibration Isolation Characteristic

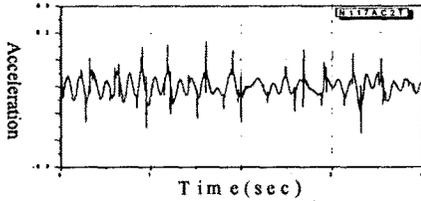


그림 4. Stage Vibration Isolation Characteristic

2.3 Settling-time Critical 시스템

진동제어 방안을 수립하는데 있어서 장비가 vibration critical application 인지 settling-time critical application에 따라 제어방식이 달라질 수 있다. Vibration critical에 대한 제어성능은 대부분의 경우 passive 방식의 제진시스템이 active 방식에 비해 효과적이다. Active 방식이 더 효과적인 경우는 대형 구조물과 같은 경우이다. Settling-time critical application의 경우 active 방식의 장점을 최대한 발휘하는 경우이다. 그림 5에서처럼 대부분의 경우 passive 방식에 비해 active 방식이 settling-time 측면에서 뛰어나다.

자기부상스테이지의 경우에는 스테이지의 이동이 이루어진 이후의 진동의 제거가 중요하며 이를 위해서 진동 표준 이내로 수립하는 settling-time을 최소화하는 제어가 필요하다. 따라서 액츄에이터를 추가하여 능동형의 진동제어시스템을 설계하여야 한다.

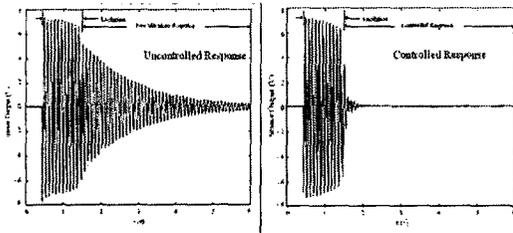


그림 5. Settling-time of Passive and Active Control

2.4 능동진동제어

일반적인 능동진동제어시스템은 플랜트, 진동센서, 제어기와 액츄에이터로 구성된다. 자기부상 스테이지의 능동진동제어시스템은 스테이지 테이블, 가속도센서, 디지털제어기, 액츄에이터와 구동을 위한 리니어 전류드라이버로 구성하였다.

스테이지테이블에 발생하는 진동을 feedback하여 반대의 위상과 크기를 갖는 힘을 가함으로써 진동을 발생시켜 테이블의 진동정밀도를 유지하는 방식이다.

그림 6은 전형적인 feedback 진동제어시스템의 구성을 보여주는 블록도이다.

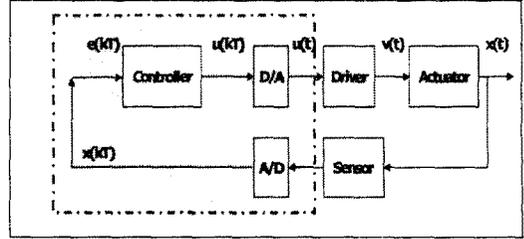


그림 6. General Feedback AVC System

2.5 Feedforward 능동진동제어

Feedforward 제어방식은 feedback 제어방식에비해서 구현하기가 어렵지만 feedback 시스템의 제어범위와 성능을 개선하는데 효과적으로 적용될 수 있다. Feedforward 방식에는 vibrational feedforward 방식과 command feedforward 방식이 있다.

Vibrational feedforward 방식은 지반진동신호를 feedforward 하는 방식으로 지반진동 $\Delta z(z\text{-motion})$ 가 발생하면 부하에는 $k\Delta z(k=\text{spring})$ 의 힘이 작용한다는 것을 활용하여 지반진동이 감지되면 이로부터 부하진동제어를 수행하는 방식이다. 공중환경에서 지반을 통해 전달되는 진동을 제어하는데 효과적이며 비주기적으로 발생하는 충격의 제어에도 활용될 수 있다. 그림 7의 시스템은 지반진동의 feedforward가 추가된 방식이다. $r(kT)$ 가 진동센서신호일 경우 해당시스템은 vibration feedforward 방식의 진동제어시스템이 된다.

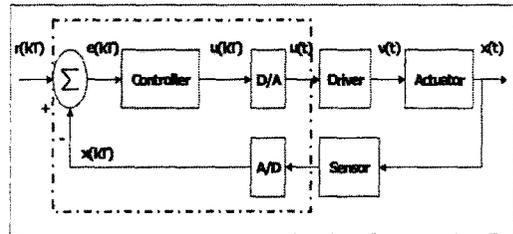


그림 7. Feedback/Feedforward Hybrid Vibration Control System

Command feedforward 방식은 발생하는 진동의 특성을 미리 알고 있을 경우에 활용한다. 이미 알고 있는 크기의 힘을 부하에 가함으로써 진동을 제어하는 방식이다. Motion을 수행하는 장비의 진동이나 주기적인 진동 등에 효과적으로 적용할 수 있다. 그림 7의 $r(kT)$ 가 이미 알고 있는 진동특성이란 command feedforward를 병행하는 것이다.

운동을 수행하는 반도체 Fab. 장비들에는 vibration feedforward 진동제어의 관점에서 장비의 질량을 높이고 있으며 이로 인하여 수십 ton에 이르는 장비들도 있다. 또한 command feedforward 진동제어의 관점에서 counter force 제어를 위한 더미부하를 추가하여 장비와 반대로 운동을 시키고 있다.

스테이지 테이블의 경우 자기부상 스테이지의 운동시 발생하는 진동데이터를 보유하고 있으므로 command feedforward 방식의 제어를 효과적으로 적용할 수 있다.

2.6 스테이지 테이블의 진동제어시스템

정밀공정용 장비의 3-dimensional 진동제어를 위해서는 3-DOF 제어부터 6-DOF까지의 제어를 수행할 수 있다.

- 3-translations: X, Y, Z motions
- 3-rotations: X, Y, Z rotations

스테이지 테이블의 3-dimensional 제어를 위해서 그림 9와 같이 3개의 액츄에이터에 의한 X-rotation, Y-rotation 그리고 Z-translation을 수행한다.

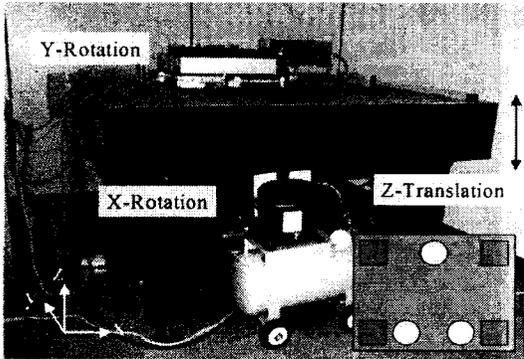


그림 8. 3-Dimensional Control of Stage Table

4개의 air spring isolator와 3개의 active hybrid isolator로 구성되어있다. 제어단계는 active와 passive로 구분할 수 있으며 그림 9와 같은 스테이지 테이블용 제어시스템의 블록도로 표현할 수 있다.

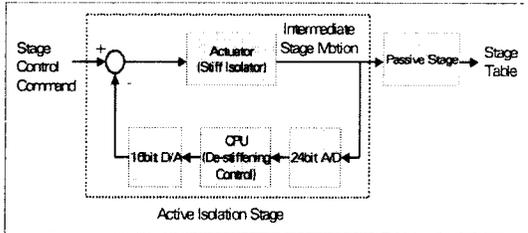


그림 9. Hybrid Active Vibration Control System for Stage Table

그림 10은 초정밀 자기부상 스테이지용 능동 진동 제어 시스템의 구성도이다.

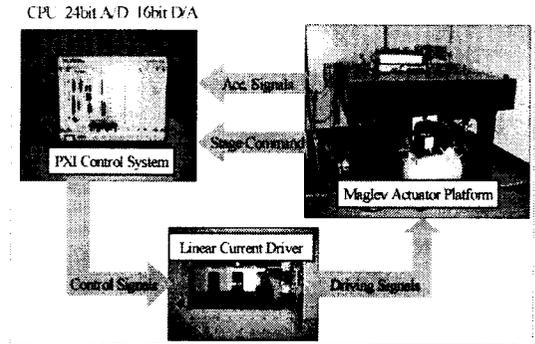


그림 10. Active Control System Configuration

3. 결 론

Settling-time critical application인 반도체 제조장비용 자기부상 스테이지 테이블용 능동진동제어 시스템을 설계하였다. 시스템은 3개의 1-DOF hybrid isolator와 가속도센서 그리고 디지털 제어로 구성하여 테이블의 3-dimensional 제어를 수행한다. 테이블의 진동 feedback과 스테이지 구동 command feedforward 제어를 병용하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이주훈, "Active Microvibration Control Technology", <http://iari.keri.re.kr>, e e New Letter, 2004년 4월
- [2] 저자명, "논문제목", 논문지명, 권호, 페이지, 출판년도
- [3] 이세한, 이기창, 전정우, 황돈하, 김용주, Mitica Caraiani, "전자기 구동장치를 사용한 병렬형 6자유도 스테이지의 위치제어", 한국반도체 및 디스플레이 장비학회, 2004년 춘계학술대회