

자기부상방식의 능동 미세진동 제어시스템

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

Active Microvibration Control System Using Maglev Actuator

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

Abstract - A system, featuring the electromagnetic levitation actuator for control in the vertical direction, of active microvibration control was proposed. The main components of this system are a vibration isolation table with built-in acceleration sensors for detecting microvibration, electromagnetic levitation actuators with built-in permanent magnets and electromagnets, and a digital controller with high precision signal converters.

1. 서 론

반도체 공정으로 대표되는 마이크로 및 나노 Fab.에서는 가공, 측정, 검사 등의 공정에서 다양한 정밀장비들을 사용한다. 장비의 정밀도를 유지하기 위해서는 공정에 영향을 주는 진동의 제한이 필수적인 사항이며 이는 진동 표준으로 규정되어 있다. 나노기술이 급속히 향상되면서 생산제품의 정밀도는 더욱 높아지고 있으며 공정에서 필요한 진동 제한치는 진동표준에서 규정하고 있는 가장 높은 등급 이상이 되고 있다. 현재 실용화되고 있는 1G(Giga)급 반도체의 경우 180nm 선폭의 생산설비가 필요하며 2008년경에는 64G급의 70nm 선폭의 생산설비가 필요하다. 일반적으로 생산설비는 가공선폭의 1/10을 진동허용치로 규제하고 있다. 지금까지 허용진동 규제치를 만족하기 위하여 사용된 공정지반구조물과 고무마운트, 에어스프링 등과 같은 수동(passive) 방진시스템은 1G급인 18nm를 만족하기에도 어려우며 장치별로 고정밀의 방진설비를 추가로 요구하고 있다.

본 논문에서는 초정밀급 AVC(Active Vibration Control, 능동진동제어)를 위한 자기부상방식의 능동형 아이솔레이터와 제어시스템을 제안한다.

2. 본 론

2.1 노이즈 제어(Noise Control)

Noise는 acoustic noise와 mechanical noise로 구분할 수 있으며 acoustic noise는 sound로 mechanical noise는 vibration으로 표현된다. Noise control은 특정주파수의 sound나 vibration을 제거하는 것이다.

Noise의 특정 주파수를 물리적으로 흡수하는 장치를 사용하여 제거하는 제어방식을 passive noise control이라고 한다. 센서를 이용하여 noise를 측정하고 제어를 통해 electro-mechanical actuator를 구동하여 역위상의 sound나 vibration을 생성하여 발생 noise를 제거하는 제어방식을 active noise control이라고 한다.

Passive noise control은 중·저주파 noise 제거에 유용하지만 저주파 noise 제거에는 한계가 있다. Active noise control은 passive noise control 방법으로 제거하기 어려운 저주파 noise의 제거를 목적으로 한다.

표 1에 Noise Control의 제어방식과 Noise의 형태에 따른 구분을 표현하였다.

표 1. Noise Control

Type	Frequency	Form	Realization	Control
Passive	Middle/High Frequency	Sound	Silencer Absorber Muffler	Absorb
		Vibration	Insulator Mount Isolator	
Active	Low Frequency	Sound	- Sensor	Cancellation
		Vibration	- Actuator - Controller	Suppression

2.2 진동표준(Vibration Criteria)

진동은 그림 1과같이 변위, 속도, 가속도와 주파수에 의하여 영역을 정의할 수 있다. 1Gal(=10⁻²m/sec²) 이하의 가속도를 갖는 진동영역을 미세진동(Microvibration 또는 미진동)으로 정의한다.

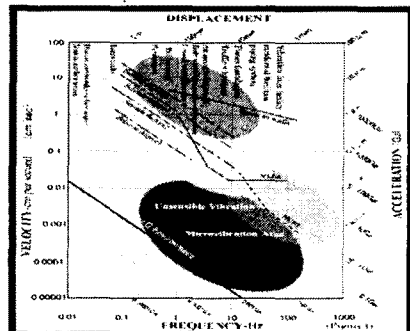


그림 1. 진동특성영역도

특히 미세진동영역(Microvibration Area)은 정밀장비에 따라서 허용진동표준(VC-Vibration Criteria 또는 BBN-Criteria)을 정의하여 공정의 진동환경을 권고하는 데 이는 표 2와 같다.

표 2. Microvibration Criteria

Criterion	Detail Size	Vibration Criteria
VC-A	선폭 8μm급	400배 이하의 현미경, 측정, 검사 및 생산 설비
VC-B	선폭 3μm급	1000배 이하의 현미경, 정밀 안과·신경계 수술장비, 정밀 측정, 검사 및 생산설비
VC-C	선폭 1μm급	30000배 이하의 전자현미경, 리소그래피 장치, Magnetic Resonance Imager 등
VC-D	선폭 300nm급	30000배 이상의 전자현미경, 리소그래피 장치, Mass Spectrometer, 세포분석 장치, E-Beam설비 등
VC-E	선폭 100nm급	Laser 설비, 1G급 반도체 생산 장비

표 3은 등급별 변위와 속도 그리고 가속도의 제한치를 나타낸다. 8Hz이하 진동영역에서는 가속도에 따라 규정되며 100Hz이하 영역에서는 속도에 따라서 규정된다. 그림 2에는 이를 도시(圖示)하였다.

표 3. Microvibration Criteria ($1g = 10^{-2} m/sec^2$)

Criterion Curve	Vibration Criteria		
	Displacement	RMS Acceleration [4-8Hz]	RMS Velocity [8-80Hz]
VC-A	1 μ m	0.25gal	50 μ m/sec
VC-B	0.5 μ m	0.13gal	25 μ m/sec
VC-C	0.25 μ m	0.06gal	12 μ m/sec
VC-D	0.12 μ m	0.03gal	6 μ m/sec
VC-E	0.06 μ m	0.015gal	3 μ m/sec

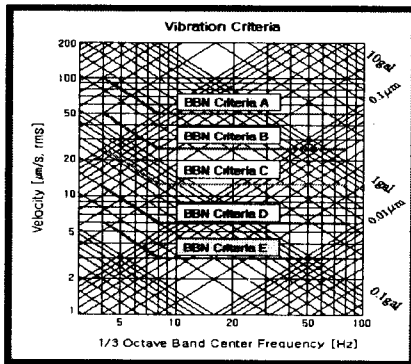


그림 2. Microvibration Criteria

규정된 가장 정밀한 허용진동등급(VC-E)은 선풍 100nm 단으로 1Giga급의 반도체 공정기준인 180nm는 만족하지만 64Giga급의 공정기준인 70nm는 충족하지 못한다. 수년내에 보다 정밀한 Nanovibration에 대한 표준도 필요할 것이다.

2.3 능동진동제어(Active Vibration Control)

AVC기술은 electromechanical 제어기술의 응용분야로 ANC(Active Noise Cancellation) 기술의 결과물인 항공기 조종사용 ANC headphone을 시작으로 개발되어왔다. 그러나 AVC기술은 수동진동절연(passive vibration isolation)기술에 비하여 상대적으로 복잡하고 경제적이 못한 단점으로 인하여 널리 적용되지 않았다. 특히 주기적인 특정대역의 진동에는 효과적이지만 비주기적인 대역의 진동제어를 위한 복잡하고 비선형적인 계산을 수행하는데 제어의 한계가 있었다.

디지털프로세싱기술이 급속히 발전하면서 비선형적인 복잡한 계산이 가능한 제어가 구현 가능해졌으며 아울러 디지털신호처리기술에 의한 고도로 정밀한 신호의 측정 및 제어가 가능해지면서 능동진동제어기술은 본격적인 가능성을 갖게 되었다.

Passive 방식의 1-DOF(Degree of Freedom) 진동절연 시스템 모델과 제진특성개념은 그림 3과 같다.

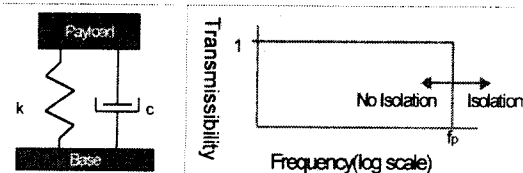


그림 3. 1-DOF Passive Vibration Isolation System Model and its concept

Passive isolator는 스프링 k와 댐퍼 c로 모델링되며 k와 c에 의해서 isolator의 차단주파수 f_p 가 결정된다. f_p 이상의 주파수를 갖는 진동은 전달율이 0가되어 진동절연이 이루어지며 f_p 이하의 주파수를 갖는 진동은 전달율 1이되면서 진동절연이 이루어지지 못한다. 일반적으로 passive isolator는 중·고주파대역에 f_p 가 위치하기 때문에 중·고주파 제진에는 효과적이지만 f_p 이하의 저주파 진동의 제진은 수행하지 못하는 것이다.

일반적으로 VC-C급 진동표준이 passive 제진의 한계라고 할 수 있다.

그림 4는 active 방식의 1-DOF 진동절연시스템 모델과 제진특성개념도이다.

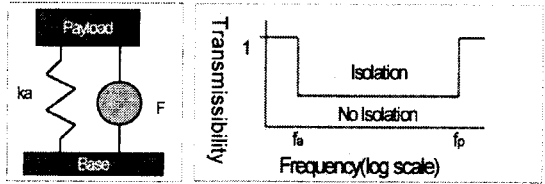


그림 4. 1-DOF Active Vibration Isolation System Model and its concept

Active isolator는 스프링 k와 actuator의 force로 모델링된다. f_p 이외에도 actuator의 특성에 의해 결정되는 f_a 를 갖는다. f_a 와 f_p 사이의 주파수를 갖는 진동은 특정 전달율에 따라 진동을 isolation하는데 전달율은 actuator의 특성과 제어특성에 따라 결정된다. Active isolator의 f_a 와 f_p 는 저주파대역에 위치하기 때문에 passive isolator가 제진할 수 없는 저주파진동의 제진에 효과적이다. 따라서 공장장비의 광대역 제진을 위해서는 passive 방식과 active 방식을 조합한 hybrid 진동절연시스템의 형태로 적용한다.

Hybrid 진동절연시스템의 passive와 active성분은 serial 또는 parallel로 조합하여 사용된다. 그림 5는 serial로 구성된 1-DOF Hybrid 진동절연시스템 모델과 제진특성개념을 보여준다.

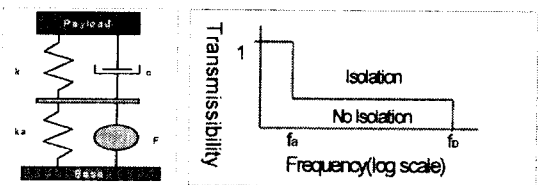


그림 5. 1-DOF Hybrid Vibration Isolation System Model and its concept

Hybrid isolator의 제진특성은 Active isolator와 passive isolator의 제진특성을 결합한 형태로 나타나며 f_a 와 f_p 사이의 주파수를 갖는 진동은 전달율에 따라 제진이 이루어지고 f_p 이상의 주파수를 갖는 진동은 차단된다.

VC-D급 이상의 진동표준을 만족하기 위해서는 능동형 제진장치(actuator)를 포함하여 하이브리드 시스템을 구현하여야 한다.

2.4 자기부상방식 액츄에이터(Maglev Actuator)

각각의 자기부상방식 진동액츄에이터는 500kg의 하중을 담당할 수 있고 Z방향으로 ± 10 mm의 스트로크를 갖도록 설계하였다.

그림 6은 자기부상방식 액츄에이터의 구조도이다. 각

액츄에이터는 전자석과 영구자석으로 구성되며 자기부상 방식으로 Z축의 변위를 제어한다. 액츄에이터의 가이드 역할도 수행하는 passive isolator는 하중의 지지를 맡아 무진동상태에서의 중립위치를 유지할 수 있는 스프링으로 이루어진다.

반도체 공정에서 운영되는 장비들의 경우 수 내지 수십 ton의 하중을 갖기 때문에 반도체 공정에 적용할 진동절연시스템은 제어의 정밀도뿐만 아니라 큰 구동력을 발생시켜야 한다.

전자석만으로 액츄에이터를 구성할 경우 큰 하중을 구동하기 위한 고전류 및 이로 인한 발열문제 그리고 절연 파괴 등의 문제가 시스템 구성에 어려움을 준다. 따라서 본 시스템에서는 큰 힘을 낼 수 있는 영구자석과 전자석으로 조합된 자기부상방식의 액츄에이터를 설계하였다. 이 경우 하나의 전자석의 자속방향과 전류를 제어함에 따라 액츄에이터의 구동방향과 힘을 제어하게 된다.

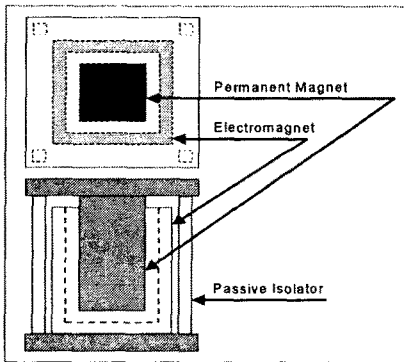


그림 6. 자기부상방식 하이브리드 액츄에이터 구조

2.5 AVC(Active Vibration Control) 시스템

일반적인 AVC시스템은 플랜트, 센서, 제어기와 액츄에이터 4가지 요소로 구성되며 플랜트의 진동을 feedback하여 반대위상과 크기의 진동을 액츄에이터로 발생시켜 진동을 제어하는 feedback 방식으로 제어를 수행한다.

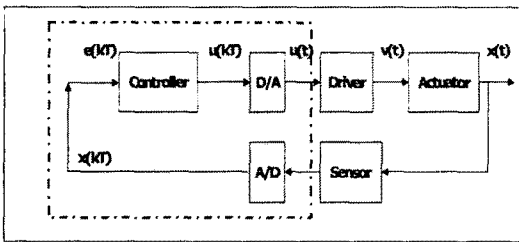


그림 7. General Feedback AVC System

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. 공정환경에서 지반을 통해 전달되는 진동을 제어하는데 효과적이며 비주기적으로 발생하는 충격의 제어에도 활용될 수 있다. 그림 8의 시스템은 지반진동의 feedforward가 추가된 방식이다.

Command feedforward 방식은 발생하는 진동의 특성을 미리 알고 있을 경우에 활용한다. 예를 들어 반도체 공정에서 stage가 wafer를 취급할 때 발생하는 진동 등은 그 특성을 미리 알고 있을 경우이다. 이미 알고 있는

크기의 힘을 부하에 가함으로써 진동을 제어하는 방식이다. Motion을 수행하는 장비의 진동이나 주기적인 진동 등에 효과적으로 적용할 수 있다. 그림 8의 $r(kT)$ 가 이미 알고 있는 진동특성이라면 command feedforward를 병행하는 것이다.

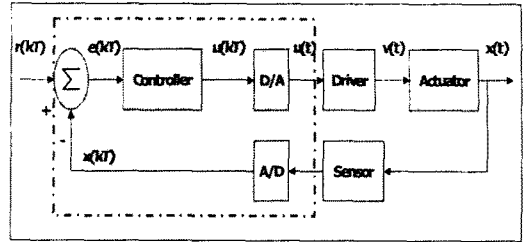


그림 8. AVC with Vibration Feedback

자기부상방식의 진동제어시스템은 그림 9와같이 구성된다.

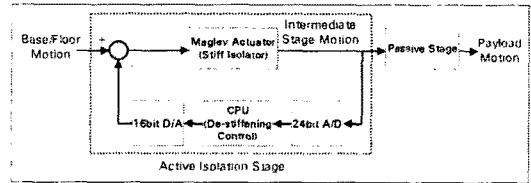


그림 9. Hybrid Vibration Control System

능동형 하이브리드 진동제어시스템의 구성은 그림 7과 같다. 진동의 저주파성분은 능동진동절연을 통해 제거되며 중·고주파성분은 수동진동절연을 통하여 제거된다. 가속도센서에 의해 측정된 플랜트의 진동신호(feedback)와 지반진동신호(feedforward)는 정밀제어를 위한 24bit A/D변환회로로 입력되며 능동진동제어알고리즘에 반영된다. 진동제어알고리즘에 의해 결정된 제어신호는 16bit D/A변환회로를 거쳐 액츄에이터의 전류제어를 위한 리니어 드라이버를 구동한다.

3. 결 론

초정밀 공정장비의 미세진동제어를 위한 능동형 하이브리드 진동제어시스템을 설계하였다. 능동 액츄에이터로서 500kg급 실험제어가 가능한 자기부상방식의 액츄에이터를 설계하였으며 일반적으로 사용하는 플랜트 진동 feedback과 진동제어의 정밀도를 높이기 위한 지반진동 feedforward 방식을 병용하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이주훈, "Active Microvibration Control Technology", <http://iarl.keri.re.kr>, e e New Letter, 2004년 4월
- [2] <http://www.rmstech.co.kr>
- [3] <http://www.techmfg.com>