

정밀기기의 미진동 제어기술

(Control Techniques Micro-Vibration for Sensitive Mechanical Equipment)

* 이홍기* 이규섭*
(Hong-ki Lee, Gyu-seop Lee)

1. 서 론

근래에 들어 미진동에 대한 관심이 산업의 고도화와 더불어 증대되고 있으며, 미진동을 다른 진동과 구분하는 것은 일반적인 진동이라는 점에서 다를 바는 없으나, 진동환경의 또다른 차원으로 대지진, 중진동 레벨의 공해진동과는 구별할 필요성이 있기 때문이다. 미진동은 인간이 느낄수 없는 변위진폭 1 μ m 이하의 진동으로 편의상 구별하고 있으며, 근년에 들어 반도체 관련산업, 정밀공작공장, 광학기계 관련분야등에 사용되는 제조설비, 측정기기, 검사장비들의 고정밀화에 설비의 가동부분에 의한 진동과 장비나 설비를 지지하고 있는 구조물의 바닥에서 오는 외부진동은 매우 민감하게 반응하므로, 장비의 성능상의 여러가지 문제를 야기하고 있다. Table 1.에 일반적인 정밀장비의 정밀도, 본해능에 따른 바닥의 허용진동기준을 계층적으로 정리하였고, Table 2.에는 정밀기기를 사용하는 공장의 총체적인 미진동 평가과정을 나타내었으며, 이는 반도체 공장이나 정밀공장의 미진동 제어를 초기설계 단계 또는 기존 설치된 공장에서 진동문제가 발생시 검토되어야 할 과정을 흐름도 형식으로 나타낸 것이다. 통상적으로 장비자체 진동원에 의한 진동문제는 제작회사가 개선해야 할 문제이지만 정밀장비의 외부 진동환경에 대한 문제는 Structure Engineer에 의해 진동특성의 분석, 평가, 개선이 Table 2.의 흐름도에 따라 적절하게 검토되어야 한다. Structure Engineer의 입장에서는 정밀장비나 설비가 정상적으로 제 성능을 발휘할 수 있도록 최선의 외부 진동환경을 조성하는 것이다. 이러한 관점에서 정밀기기의 미진동 제어를

경에서 방진 및 검증까지의 수행과정을 기본 반도체 공장에서 실제 사용되고 있는 전자빔 추사장치인 Aligner에 대해 아래와 같이 분류하여 진행한다.

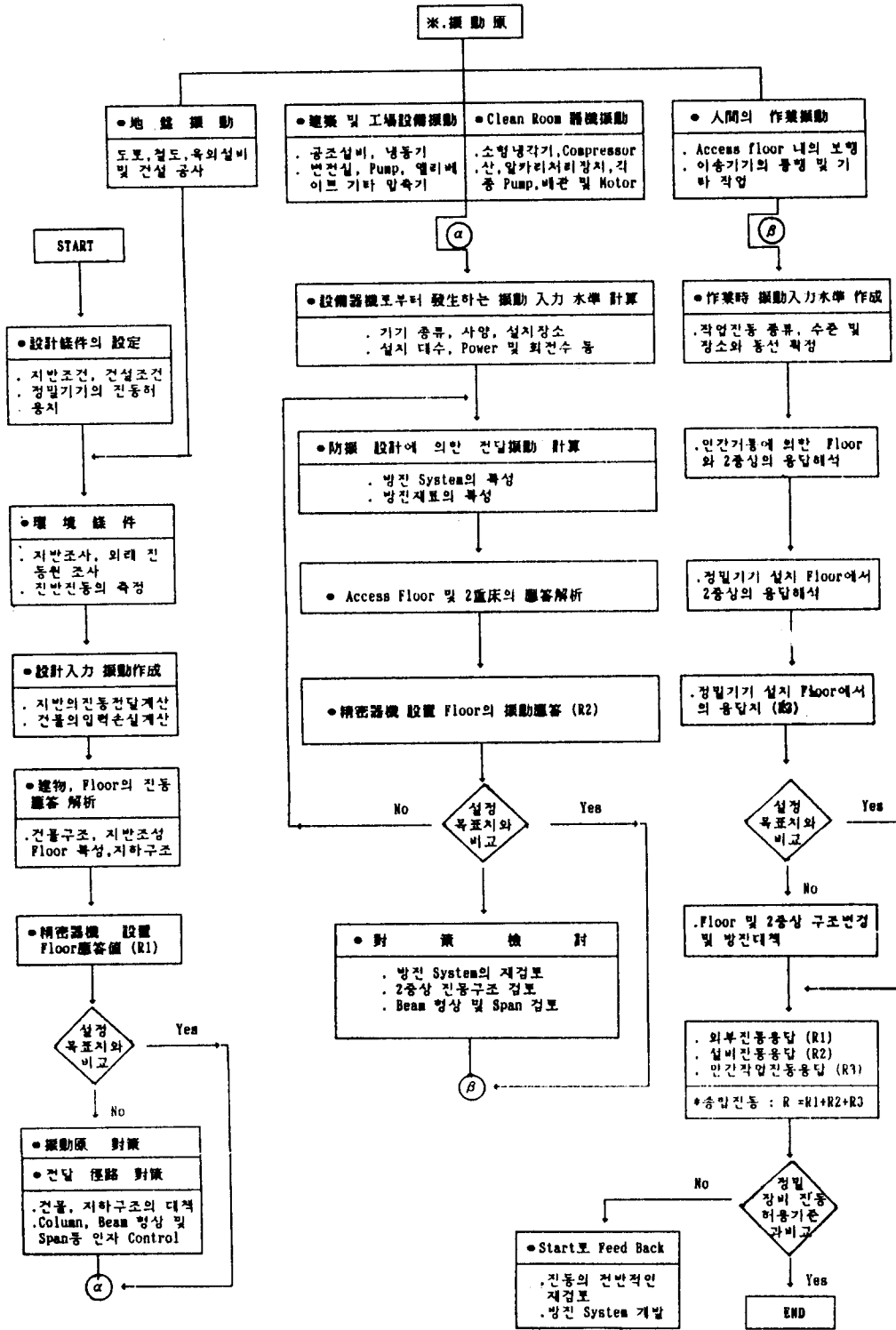
- (1) 정밀장비 허용 진동기준의 결정
- (2) 지반 및 Floor에 대한 미진동 측정
- (3) 정밀 방진 System의 구성
- (4) 검증 및 평가

Table 1. General Vibration Criteria.

Descrip. Class	Facility Equipment or Use	Vibration Criteria	
		4-8Hz RMS Acc.	8-80Hz RMS Vel
일반적인 振動환경	일반 작업장	4gal(變位16 μ m)	800 μ m/s
	사무실	2gal(變位 8 μ m)	400 μ m/s
	거주지역 Computer System	1gal(變位 4 μ m)	200 μ m/s
精密振動 Class: A	100배 정도 편미경, 보보브수술실, Operators Room, 일반연구실 기타	0.5 gal (變位 2 μ m)	100 μ m/s
	400배 정도 편미경, 測定실 Optical or Other Balance Optical Comparators, 전자裝備 생산설비 등 * 검사, Probe Test, 생산 지원설비 및 장치.	0.25 gal (變位 1 μ m)	50 μ m/s
精密振動 Class: B	400배 이상 편미경, 精密. 안과. 신경계 수술실, 防護 설비를 갖춘 광학裝備, 반도체 생산설비 등 * Aligner, Steppers 등 3 μ m 이상 선폭을 노광장치	0.13 gal (變位 0.5 μ m)	25 μ m/s
精密振動 Class: C	30000배까지 전자편미경 Magnetic Resonance Imagers, 半導體 생산설비 * Aligner Steppers 등 1 μ m 선폭 노광장치 : 1M DRAM 정도	0.06 gal (變位 0.25 μ m)	12 μ m/s
精密振動 Class: D	30000배 이상 전자편미경 Mass Spectrometer 세초이식 장치, 半導體 생산설비 * Aligner, Stepper 등 1/2 μ m 선폭 노광장치 : 4M DRAM 정도	0.03 gal (變位 0.12 μ m)	6 μ m/s
精密振動 Class: E	Unisolated laser and Optical research System, 半導體 생산설비 * Aligner, Stepper 등 1/4 μ m 선폭 노광장치 : 64M DRAM 정도	0.015 gal (變位 0.06 μ m)	3 μ m/s

*유니슨산업(주) 부설유니슨기술연구소

Table 2. 반도체공장 미진동평가 Procedure : 평가계획, 방진대책, 평가방법 및 전파특성을 고찰하는 Procedure를 간략히 도시하면 아래와 같다.



2. 전자 Beam 추사장치 Aligner의 진동제어

2.1 Aligner의 용도 및 제한

Electron-Beam을 사용하여 Wafer Plane상 초미세 회로(약 1MDRAM) Pattern을 추사하는 장치로 반도체 제조공정의 중요한 설비중에 하나이다. Table 3.에 Aligner의 특성 및 제한을 나타내었다.

Table 3. Aligner의 제한 및 특성

ITEM	Description	비고	
제작사	PERKIN-ELMER Semiconductor Equipment Group		
Model	MICRALIGN M500		
Total Weight	1200Kg		
Demension	1727(L) X 1240(B) X 1750(H) mm		
Electron-Beam 추사 Part	Weight	544Kg	* 고 유 진동수 $f_n=2-3\text{Hz}$
	구조	Air - Spring Isolation System	

2.2 Aligner의 진동허용 Criteria

Aligner의 Floor Vibration Sensitivity Test를 제작사측에서 실시하여 진동허용 기준을 제시하였다.

Test 방법은 가진장치를 이용하여 Sinusoidal Waveform Signal을 주파수와 진폭을 변화시켜 Wafer면에서 Mask Image Motion이 수평, 수직방향 진동에 의해 RMS $0.1\mu\text{m}$ 를 초과하지 않는 진동수준을 측정하는 것이다. Fig 1.에 Vibration Test Sheet를 각 주파수별 가속도로 나타내었다. 장비의 진동환경 특성이 명확하지 않을시 Table 1.을 기준으로 참고할 수 있지만, 장비 개

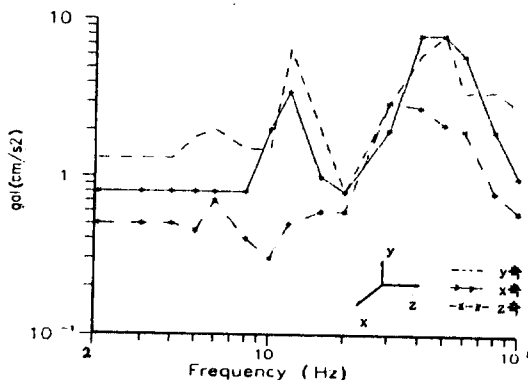


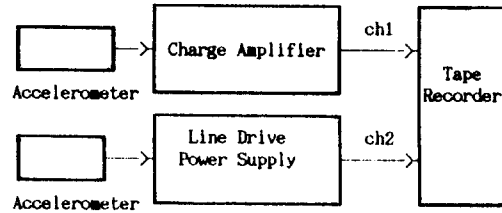
Fig.1 Aligner Floor 진동 허용기준

개의 진동특성은 복잡한 형태를 가지고 있으므로 정밀 장비의 진동허용 Criteria의 결정은 제작사측의 정밀 장비에 대한 진동환경 시험에 의해서 신뢰성 있는 기준이 결정된다.

2.3 반도체 공장 Floor 진동측정

(1) 측정 시스템의 구성

① Field Measurement System



② Lab Analysis and Data Acquisition System

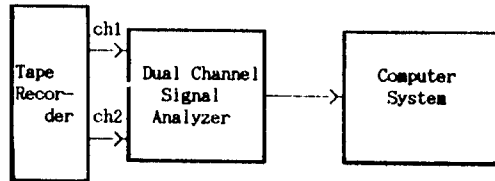
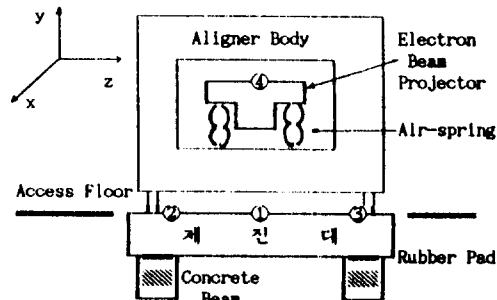


Fig.2 측정시스템의 구성도

(2) Aligner 설치위치의 Floor 진동

방진전 Aligner가 Floor상에 놓여진 개략도와 측정 위치를 Fig 3.에 나타내었고, 제진대 Electron Beam Projector부의 진동특성을 알기위해 Impact Test를 실



※ ①, ②, ③, ④는 측정위치

Fig.3 방진전 Aligner의 개략도와 측정위치 및 좌표계

시켰다. 그리고 Table 4.에는 각 측정위치에서 방진편의 진동수준을 나타내며, Electron Beam Projector의 진동계의 특성을 알기위해 Impact Test를 실시하여 Peak값을 나타내는 진동주파수를 구하였다.

Table 4. 각 측정위치의 가속도레벨 대비표

Unit : gal (cm/s²)

Frequency		5Hz	10Hz	20Hz	31.5Hz	50Hz	63Hz
Description							
제진대 상단 ① 번 위치	x	0.03	0.06	0.1	0.11	0.14	0.22
	y	0.024	0.563	0.608	1.606	6.57	4.463
	z	0.057	0.681	0.546	3.913	1.366	0.906
제진대 상단 ② 번 위치	x	0.03	0.18	0.39	1.27	1.35	1.86
	y	0.02	0.76	0.68	2.99	7.85	7.57
	z	0.04	0.28	0.41	2.84	0.7	0.71
제진대 상단 ③ 번 위치	x	0.03	0.16	0.25	0.89	2.03	1.80
	y	0.029	0.857	0.895	1.123	4.952	2.072
	z	0.03	0.28	0.41	2.93	0.83	0.61
Aligner 가동부 상단	x						
	y	0.08	1.107	0.147	0.373	0.15	0.14
	z	0.239	1.299	0.14	0.316	0.094	0.123

* 1/3 Octave Band 진동에서 유의 중심 주파수 선택

Impact Test Data 요약

Frequency		Peak Frequency
Description		
제진대 상단 ① 번 위치	y	35, 55.5, 110 Hz
	z	10.25, 29.75 Hz
Aligner 가동부 상단 ④ 번 위치	y	10.25, 29.75 Hz
	z	6.5, 12.5 Hz

* 주파수 Span은 Narrow Band로 0.25 Resolution 가짐.

(3) Floor 진동의 평가

Aligner의 허용진동기준과 반도체 공장에 Aligner가 설치될 위치의 Floor진동과 비교하면 수평방향의 일부 높은 주파수에서 Floor 진동허용 규제치를 넘고 있다.

3. Aligner의 방진대책

Floor 진동이 Aligner의 진동허용 기준에 적합한 진동환경을 구성하기 위해서는 적극적인 대책방안으로는

반도체공장 내부의 진동원이 되는 설비를 전반적으로 제어 개선하는 방법이 있으며, 소극적인 방안으로는 Aligner가 설치되는 위치만을 개선시키는 것이다. 전자의 경우는 반도체공장의 초기 설계단계에서 총괄적으로 진동환경 평가 및 제어가 이루어져야 그 효과를 극대화 할 수 있으나, 모든 설비나 장비가 설치된 후의 진동환경의 제어나 개선방안은 미비하고 제한적이며 경제적으로 불리하다. 여기서는 여러가지 상황을 고려하여 후자의 추진점 방안을 수행했다.

3.1 Aligner 방진 System의 Modeling

(1) 방진 System의 Modeling

Floor로부터 Aligner에 전달되는 진동특성과 Electron Beam Projector Part에 미치는 진동특성을 알기위해 Aligner를 몸체부와 내부의 Electron Beam Projector 부분으로 나누어서 Modeling 했다. Fig 4. 에 Aligner 방진 System의 개략적인 구성도를 나타내었고 Fig 5.에는 진동 Modeling 한것을 나타내었다. 그리고 Table 5.에는 제진대에 사용된 방진 System의 구성 사 양을 나타내었다.

Table 5. 방진 System의 구성 사양 및 제원

ITEM	Description		비 고
제진대	Dimension	1530X850X200(mm)	
	Weight	1.8 ton	
Aligner	Body Weight	656 Kg	* Electron Beam Projector의 Air-Spring System의 고유진동수 $f_n = 2 \sim 3$ Hz
	Electron Beam Projector Weight	544 Kg	
제진대 방진 System	* Air-Spring으로 방진 System을 구성하고 고유진동수 $f_n = \frac{\sqrt{k_i}}{\sqrt{m_i + m_t}} = 2.1$ Hz 설계		

진동 Modeling한 2자유도계의 진동 방정식은 감쇠를 무시할 때 다음과 같다.

$$m_t \ddot{x}_t + k_t(x_t - x_i) = f_t \quad (1)$$

$$m_i \ddot{x}_i + k_i(x_i - x_b) + k_t(x_i - x_t) = 0 \quad (2)$$

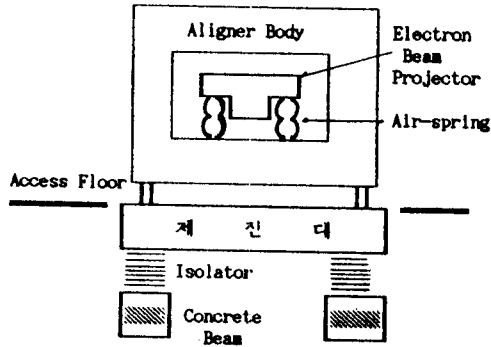


Fig. 4 Aligner방진 System의 계략도

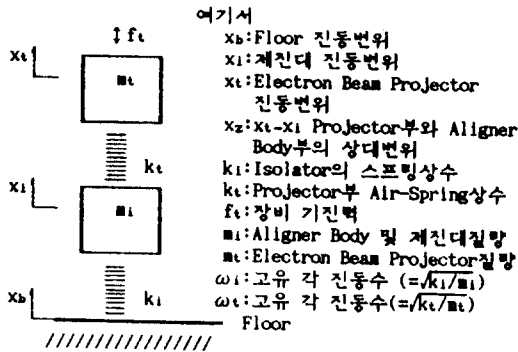


Fig. 5 계진대와 Aligner의 진동 Modeling

계진체가 ω 로 정상단진동을 하고 있다면 상대변위 $x_z = x_t - x_i$ 는

$$x_z = \frac{f_t(\omega^2 - \omega_t^2)/m_t + x_b\omega^2\omega^2}{\omega^4 - [\omega_t^2(1 + m_t/m_i) + \omega_i^2]\omega^2 + \omega_t^2\omega_i^2} \quad (3)$$

Floor부터 진동이 전달되는 것만을 고려할 때 $f_t = 0$ 이 되며, 계진대의 질량이 장비질량에 비하여 매우 크면 ($m_t \ll m_i$) Floor의 x_b 와 상대변위 x_z 사이의 진폭비 X_z/X_b (진동전달율)은

$$\frac{X_z}{X_b} \approx \frac{\omega_i^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_t^2)(\omega^2 - \omega_i^2)} \quad (4)$$

로 나타나고 또, $\omega_i \ll \omega \ll \omega_t$ 일때 Floor로부터 전달 되는 진동전달율은

$$\frac{X_z}{X_b} = -\left(\frac{\omega_i}{\omega_t}\right)^2 \quad (5)$$

로 된다. 즉 Floor로부터 전달되는 진동을 줄이기 위해서는 계진대의 질량을 충분히 크게 하며 ω_i/ω_t 를 작게한다.

3.2 Aligner 방진과 기대효과의 예측

Aligner를 방진후 예상되는 방진 기대효과는 Table 6과 Table 7.에 나타내었다. 그리고 Electron Beam Projector Part의 방진 기대효과는 Impact Test결과를 기준으로 하였다.

Table 6. Electron Beam Projector의 방진 기대효과

수직방향 (y 방향)	방진효율 = 91 % 정도
수평방향 (z 방향)	방진효율 = 89 % 정도

* ① Electron Beam Projector의 y 방향 고유진동수는 10Hz, z 방향 고유진동수는 6Hz로 취급함.

② 수평방향 Air Mounted의 탄성계수는 일반적으로 수직방향의 20 - 50%를 취급함.

3.3 Aligner 방진 System 구성과 진동평가

실제 Aligner의 방진을 수행한 후 계진대 상에서 측정한 진동값을 예상진동값 및 Aligner 제작사측이 제시한 진동허용치를 비교하면 Table 7.과 같다.

Table 7. 방진전후 계진대상 및 허용 진동수준 대비표
Unit:gal (cm/s²)

ITEM	Freq.	방향	4Hz	10Hz	31.5Hz	50Hz	80Hz
			계진대상				
계진대상 진동치	방진전	x	0.02	0.06	0.11	0.14	0.37
		y	0.01	0.56	1.60	6.57	1.05
		z	0.03	0.68	3.92	1.37	0.85
	방진후	y	0.003	0.03	0.03	0.13	
		z	0.01	0.02	0.39	0.22	
		x	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03
PERKIN ELMER Floor 진동허용치	x	0.02	0.06	0.11	0.14	0.37	
	y	0.01	0.56	1.60	6.57	1.05	
	z	0.03	0.68	3.92	1.37	0.85	
Electron Beam Projector Part	방진전	y	0.02	1.11	0.37	0.15	0.22
		z	0.06	1.30	0.32	0.25	
	후	z	0.01	0.16	0.02	0.02	0.07

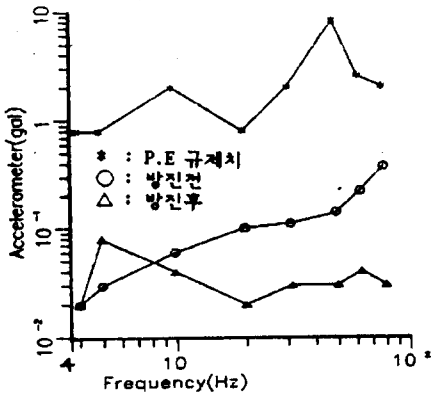


Fig. 6. 계진대상 X-방향 진동치 대비

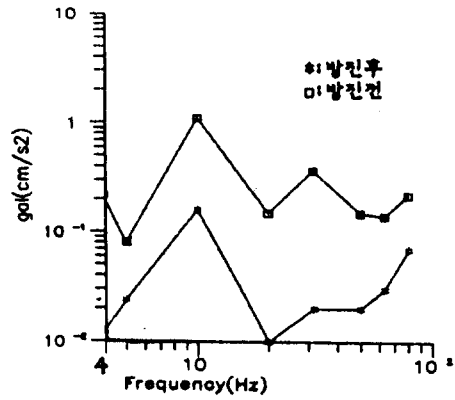


Fig.6 Electron Beam Projector y-방향 진동치비교

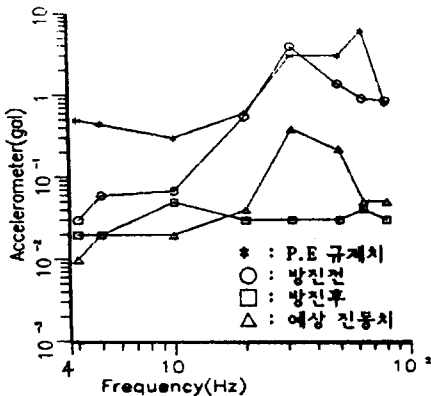


Fig. 8. 계진대상 Z-방향 진동치 대비

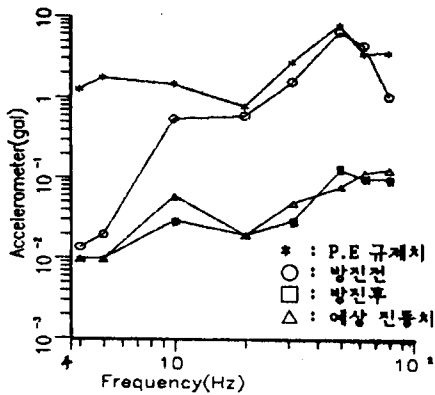


Fig. 7. 계진대상 Y-방향 진동치 대비

3.4 결론

1) Concrete Beam, Floor상에서 직접 진동을 전달하는 계진대 상진동은 방진전보다 작게는 약5배에서 크게는 100배 이상 진동수준이 감소했으며 Perkin Elmer 가 제시한 Floor 진동허용치보다 평균 수십배 이상 진동레벨이 작아졌다.

2) Aligner 몸체내의 Electron Beam Projector Part 도 방진전보다 방진후가 전반적으로 10배 이상 진동수준이 낮아졌다.

3) 방진전 이론적 예상치와 방진후 측정치와 대체적으로 잘 일치하고 있다.

4) Access Floor상에 충격을 가하고 계진대상에서 진동레벨을 측정할 결과 충격진동에 거의 영향을 받지 않았다. 이것은 Access Floor상에서 물건 이동이나 보행자와 같은 진동발생원에 대해 Aligner가 진동절연이 되었다는 것을 의미하여 Aligner 방진 System에 의해 주변 진동환경 변화에 무관하게 작동시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 맺음말

정밀장비의 진동환경을 평가, 제어하기 위해서는 우선적으로 미진동 환경을 측정할 수 있는 장비와 기술이 필요하며, 방진 System 구성시 국내에서는 방진소재의 개발이 요구되고 있다. 그리고 진동에 민감한 정밀장비들을 사용하는 반도체 및 정밀공장에서는 진동허용 기준을 나타내는 Data Sheet가 필요하고 사용자

속에서도 장비의 진동 Test 성적서를 장비구매시 제작
사에 요구할 필요성이 있다.

TEM(투과형 전자현미경)의 경우 음압에 의한 가진문
제도 대두되고 있으며 정밀장비가 최대의 성능을 발휘
하기 위해서는 이러한 문제를 검토해야 한다. 만일 국
내에서 진동에 민감한 정밀장비를 제작시 장비의 진동
특성을 평가할 수 있는 실험장치와 기술이 필요하다.

참 고 문 헌

1. PERKIN ELMER Semiconductor Equipment Group,
Micralign M500 Sensitivity to Floor Vibration
and Acoustic Disturbances.
2. 富日久雄, 半導體工業と 振動絶縁技術, 精密工學
會誌 55/12/1989.
3. ERICE. UNGAR CHIEF Consulting Engineer BBN
Laboratories Inc. Cambridge, Massachusetts,
Designing Sensitive Equipment and Facilities,
Mechanical Engineering, December, 1985.
4. Eric E. Ungar, BBN Systems and Technologies
Corporation, Cambridge, Massachusetts,
Vibration Control Design of High Technology
Facilities, Sound and Vibration, July, 1980.
5. 下郷太郎, 微振動問題と 之の 制御技術, 精密工學
會誌 55, 12, 1989.
6. 表倉貴次 外, 精密工場の 微振動対策検討例,
鹿島建設 技術研究所 年報 第 31號