

나노 측정시스템을 위한 방진 구조물의 동적 설계에 관한 연구

전종균[†] · 이흥기* · 김강부* · 백재호*

선문대학교 기계공학부, *RMS TECHNOLOGY CO., LTD

A Study on the Dynamic Design of Anti-Vibration Structures for Nano-class Measuring System

Chong-Keun Chun[†], Hong-Ki Lee*, Kang-Boo Kim*, and Jae-Ho Baek*

[†]Div. of Mechanical Engineering, SunMoon Univ., *RMS TECHNOLOGY CO., LTD

ABSTRACT

It is necessary to design the anti-vibration system of precision machinery for a quality assurance. However, in general, the allowable vibration limit is not well known. In this paper, the vibration criteria for foundation of sensitive machinery is proposed and anti-vibration system is designed by using vibration measurement results of foundation. Also, the finite element analysis is performed to verify the effectiveness of the designed anti-vibration system and to determine the allowable dynamic loads of precision measuring system. The results of this study will be helpful for the future design of anti-vibration structures with nano scale measuring system.

Key words : Precision Measuring System(초정밀측정시스템), Vibration Criteria(진동규제치), Anti-Vibration System(방진시스템)

1. 서 론

반도체 칩의 집적도 향상은 고청정 기술과 함께 미진동 제어 기술이라는 또 하나의 문제를 등장시켰다. 메가 비트(mega-bits) 수준에서 기가(giga-bits)급에 이르는 반도체 칩을 생산하기 위해서는 가공에 필요한 선폭은 수 마이크로 미터에서 서브 마이크로미터 수준이다. 메모리 소자인 256 M DRAM의 경우 손톱 크기의 면적에 선폭이 0.25 μm 이고 1.5 μm 정도의 미세한 틈 사이로 금속을 채우는 기술이 필요하다. 선폭이 서브 마이크로미터 수준의 반도체를 생산하기 위해서는 개발, 제조, 검사 등 각 생산 공정에 사용되는 장비들이 고 정도, 고 성능, 고 신뢰성이 요구되고 있다. 반도체 칩의 실험 시제품 개발에서 엔지니어링 샘플, 양산용 샘플 제작 이후 반도체 공장을 건설하고 최종제품의 양산에 들어간다. 양산을 위해서는 광범위한 고급기반기술의 확보가 필수적이다.

미진동 제어를 위한 구조의 동적 해석 및 설계, 진동 전달 특성 및 방진, 제진 기술 등이 미진동의 제어라는 차원에서 전체를 총괄할 수 있는 해석 및 설계기술이 반도체공장 기반기술의 한 부분으로 반드시 필요하다. 일반적으로 반도체 공장에서 정밀장비의 진동허용규제치는 고정밀 노광장비, 반도체 웨이퍼를 제조하는 실리콘 단결정성장기 등이 설치되는 독립 절연기초와 제진대(除振臺) 위에서 3차원으로 주파수별로 제한하고 있다. 이러한 진동대책을 위한 설계의 한계는 초정밀측정/분석시스템의 구조적인 동적특성을 표현하고 있는 진동허용 규제치가 명확하게 알려져 있지 않다는 점이다.

이러한 문제를 해결하는 방법의 하나는 기존의 방진 및 내진기술로서 성취할 수 있는 Floating Seismic Mass Anti-Vibration System[1,2]의 진동 상태를 부지 및 내외 부의 진동원을 고려하여 성취할 수 있는 진동상태가 얼마인가를 평가하고, 이를 설계 목표치로 결정하는 방법이다[3,4].

따라서 본 연구에서는 초 정밀 장비의 정상적인 가

[†]ckchun@sunmoon.ac.kr

동을 위한 미 진동제어 기술의 하나로 기존의 진동대책 기술로 얻을 수 있는 Floating Seismic Mass Anti-Vibration System의 진동 허용규제치의 설계 목표치를 설정하고, 초 정밀측정/분석시스템 구조의 동적 설계를 위한 최소한의 가이드 라인을 제시하는 방안을 결정하는 것이다.

2. 동적 설계 방향 결정

현재까지 기가급 반도체 공장을 건설하기 위한 구조물 및 Clean Room의 진동허용규제치의 설계 목표치가 0.2 μm [rms] 수준이며, 256 M DRAM C/R의 Main Structure의 진동이 최대한으로 성취할 수 있는 한계가 진동속도로 6 $\mu\text{m/s}$ 로 알려져 있다. 이 값은 국내의 대부분 C/R에서 측정/분석한 데이터를 근거로 하여 내린 결론이다. 이것은 기본적으로 건물에서 특별한 조건이 부여되지 않는 한 장비에서 이를 기본적인 방진 및 내진성능 향상을 위한 기준점으로 설정 해야 한다는 것을 의미한다. 다른 하나는 기본적으로 Floating Seismic Mass Anti-Vibration System에서 성취할 수 있는 진동상태를 인정하고 이를 초 정밀측정/분석시스템의 구조물 동적 설계의 기본자료로 반영하는 방법이다. 이것은 초 정밀측정/분석시스템의 구조 및 시스템설계에 제한을 주는 것이기 때문에 이에 대한 논의는 반드시 이루어져야 한다[5,6]. 본 논문에서는 위에 논의한 두 가지를 동시에 고려하는 방법을 선택하였다. 즉, 기존의 진동대책 기술로 얻을 수 있는 진동 변위 0.2 μm [rms]와 진동속도 6 $\mu\text{m/s}$ [rms]를 성취할 수 있는 Floating Seismic Mass Anti-Vibration System의 진동허용규제치를

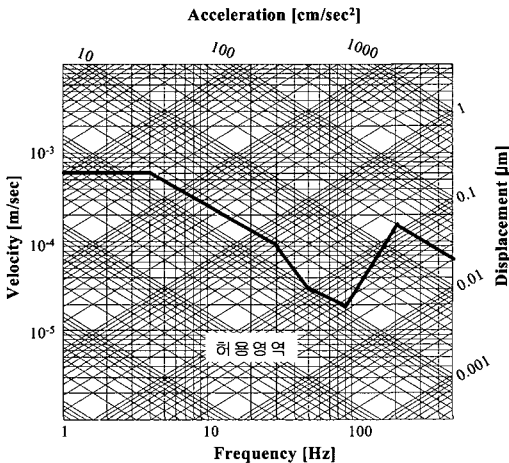


Fig. 1. Vibration criteria on the isolation pad(CANON ES3-SCANNER).

설계 목표치로 설정하고, 초 정밀측정 / 분석시스템 구조의 동적(動的) 설계를 위한 최소한의 가이드 라인을 제시하는 방향으로 연구의 목표를 설정하였다. Fig. 1 과 Fig. 2는 분해능 5 nm의 반도체 가공장비에서 요구하고 있는 진동허용규제치와 구조물 동적 허용규제치의 예를 나타낸 것이다.

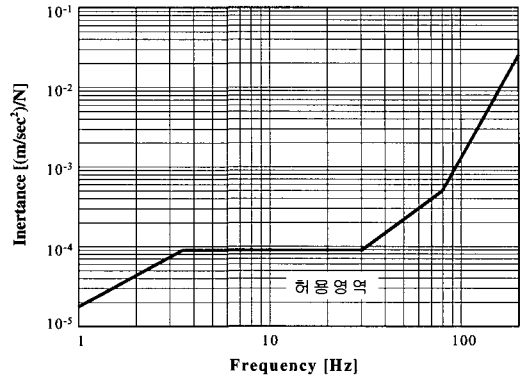


Fig. 2. Dynamic stiffness criteria on the isolation pad (CANON ES3-SCANNER).

2.1. 방진 시스템의 진동허용규제치

초 정밀측정/분석시스템의 정상적인 운영을 위한 외부 및 건물 내부 진동 영향성 문제를 측정/분석하고 정밀 측정시스템의 거리 1 m에 대한 상대 불확도가 1 nm 이하를 구현할 수 있는 방진시스템(Floating Seismic Mass Anti-Vibration System)을 설계 하고자 한다.

Fig. 3과 Fig. 4는 방진시스템에서 성취 해야 할 주파수 범위 2~80 Hz에서 진동 변위 0.2 μm [rms] 진동허용규제치와 구조물 동특성 허용 규제치의 설계 목표치이다.

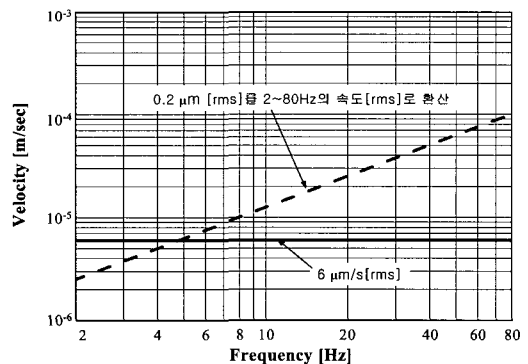


Fig. 3. Design criteria of floating seismic mass anti-vibration system.

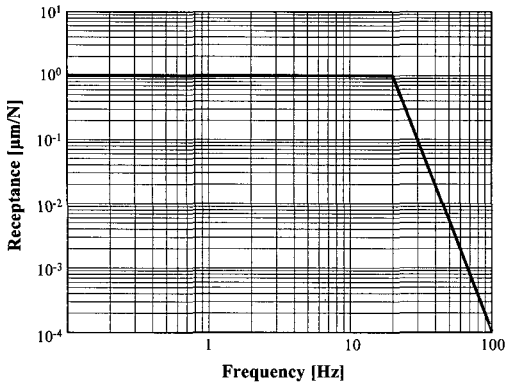


Fig. 4. Dynamic stiffness criteria of floating seismic mass anti-vibration system(1 μm/N)

2.2. 방진 시스템의 설계

초 정밀측정/분석시스템의 진동환경 측면에서 안정된 운영을 위한 방진 시스템(Floating Seismic Mass Anti-Vibration System)의 설계 방향은 두 가지의 관점에서 이루어 져야 한다. 하나는 초 정밀측정/분석시스템의 진동허용규제치(floor allow-able vibration criteria)

이고 다른 하나는 방진시스템의 구조물 동특성 허용 규제치(structure allowable dynamic property criteria)가 있다. 전자는 초 정밀측정/분석시스템이 외부의 진동에 의한 교란을 방지하기 위한 규제치이고 후자는 자체의 진동원에 의하여 발생하는 방진 시스템의 진동으로 인한 상호 작용을 방지하기 위한 규제치이다. 물론, 두 가지의 설계조건은 상호작용이 발생하기 때문에 이에 대한 고려가 이루어 져야 한다. 그러나 우선적으로는 내외부로 기인하는 진동이 초 정밀측정/분석시스템(거리 1 m/불확도 1 nm)의 구조적인 동적 특성을 표현하고 있는 진동 허용 규제치를 만족 해야 한다. 진동 허용 규제치와 구조물 동특성 허용규제치의 목표 설계를 만족할 수 있는 방진시스템의 개념도는 Fig. 5와 같다. 기본적인 방진시스템의 수직방향 고유진동수는 3 Hz이하이며, 블록의 지지(support) 시스템은 강성을 가변형으로 하여 건물 기초 및 초 정밀측정/분석시스템의 자체 동하중 특성에 대하여 유연하게 작동할 수 있도록 하였다.

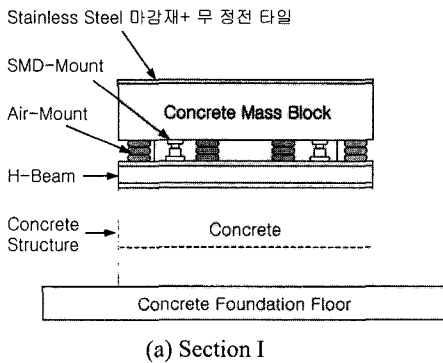
3. 진동측정 및 동특성 실험

3.1. 지반진동 측정

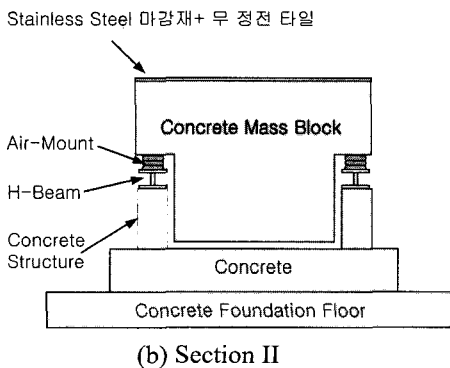
신축부지의 진동상태를 대표할 수 있는 총 4개 지점에서 3개 채널을 이용하여 수평 2방향 (x, y), 수직 1방향(z)을 동시에 압진동을 측정하였다.

동특성 실험 분석 환경

- Trigger Mode : Free Run
- No. of Average : 50
- Time Span : 8 sec(2048)
- Frequency Span : 100 Hz(801)
- Average Method : Linear



(a) Section I



(b) Section II

Fig. 5. Schematic diagram of floating seismic mass anti vibration system.

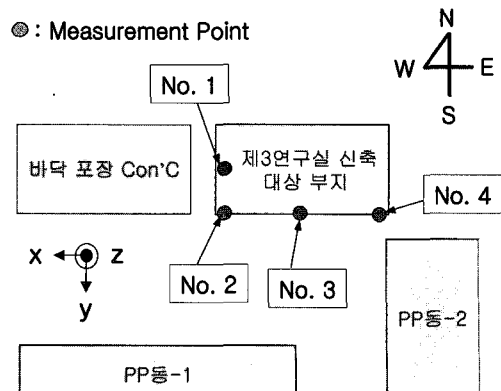


Fig. 6. Measurement point for ground vibration.

Fig. 6에서는 암진동 측정 지점을 나타내고 있으며, Table 1은 측정지점에 대한 암진동 측정/분석 결과를 나타내고 있다. Fig. 7은 암진동 측정 결과 중 No. 1 지점의 x방향에 대한 진동 가속도 그래프이다.

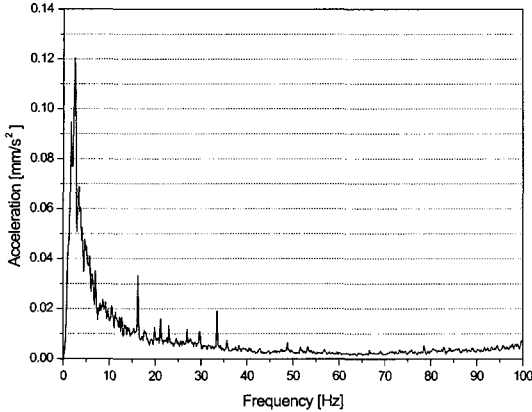


Fig. 7. Measured acceleration in frequency domain (No.1 x-direction).

Table 1. Experimental data of ground vibration

Point	Peak Frequency [Hz]	Peak displacement [μm]		OverAll [rms : μm]	Direction
		[0-Peak]	[rms]		
No. 1	2.38	0.5142	0.3636	1.0617	X
	2.00	0.6655	0.4706	0.9287	Y
	2.00	0.3490	0.2468	0.6199	Z
No. 2	2.00	0.9525	0.6735	1.5142	X
	2.00	0.4047	0.2862	0.7151	Y
	2.00	0.4590	0.3246	0.7437	Z
No. 3	2.00	0.6514	0.4606	1.1435	X
	2.00	0.4663	0.3297	0.7822	Y
	2.00	0.4349	0.3075	0.7050	Z
No. 4	2.00	0.7523	0.5320	1.2983	X
	2.00	0.3378	0.2389	0.6388	Y
	2.00	0.5295	0.3744	0.7607	Z

초 정밀연구실 신축예정부지에서 암진동상태는 Z방향으로 약 0.25~0.37[μm : rms] 수준으로 나타났다. 이는 실험실 방진설계 진동허용규제치 0.2 μm[rms : 2 (80 Hz)]의 약 1.25~1.85배에 도달하고 있으며, 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 내외부의 유틸리티뿐만 아니라 건물 구조와 기초에 대한 방진 및 내진을 위한 동적 설계가 필요하다.

3.2. 동특성 해석

초 정밀측정/분석시스템의 구조물 동특성 영향을 평가 위하여 초기 설계된 구조물에 대하여 범용 유한요소해석프로그램인 ANSYS[7]를 이용하여 해석을 수행하였다. 경계조건으로 Foundation에 설치되는 Pile의 자유도를 0으로 하고 경계부는 대칭조건(symmetric condition)으로 단순화 하였다. 해석모델은 개념 설계를 바탕으로 Fig. 8과 같이 방진시스템을 모델링 하였다. 현재 초기 설계된 구조물에서 정밀장비가 놓일 바닥부(CONC MASS BLOCK)에 대하여 동특성 영향을 실시하였으며, 방진시스템 사이의 진동 영향성 문제를 동적 해석을 통하여 전달함수를 결정하고 진동 가진력 허용규제치를 결정하였다. Fig. 9는 단위하중에 대한 주파수별 진동응답변위를 나타내고 있다.

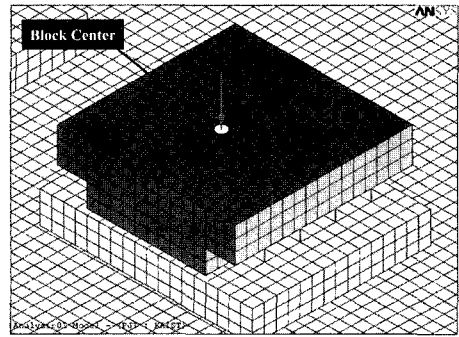


Fig. 8. Modelling of floating seismic mass system.

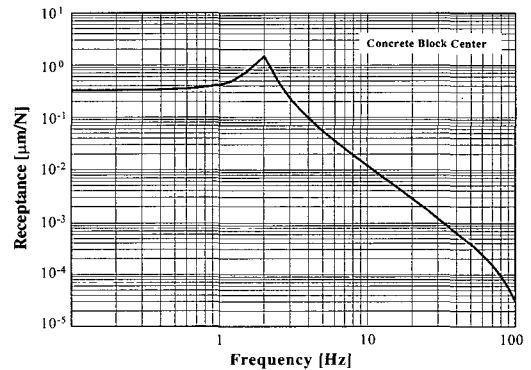


Fig. 9. FEM result of point frequency response function.

3.3. 동하중 허용규제치

초 정밀 측정/분석시스템의 내부에 동하중을 발생시키는 진동원이 존재 할 경우, 방진시스템이 이러한 내부 동하중으로 기인하는 진동응답이 진동허용규제치를 만족 해야 한다.

동하중허용규제치는 초정밀측정 / 분석시스템이 설

치되는 방진시스템의 동특성을 나타내는 데이터이다. 즉, 진동허용 규제치를 만족할 수 있는 초 정밀측정 / 분석시스템의 동하중에 대한 제한 조건과 주변의 유틸리티에서 발생하는 진동의 방진 효율을 결정하는 기본적인 데이터이다.

주파수 응답 함수(FRF) 해석 결과를 이용하여 진동 허용 규제치 $0.2 \mu\text{m}(\text{rms})$ 를 만족하는 정밀장비의 동적 하중 허용 규제치를 Fig. 10과 같이 산출하였다. 그래프에서 곡선 이상의 동하중이 입력될 경우에는 설계 진동허용규제치를 초과한다는 것을 의미한다.

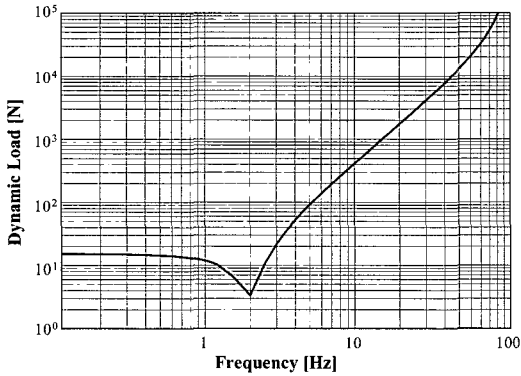


Fig. 10. Dynamic stiffness criteria of Precision Measuring System.

4. 방진 시스템 시공 후 측정/분석 결과

초 정밀 측정/분석 시스템의 방진시스템을 Fig. 11과 같이 제작/설치하였다. 사각틀 내부에 콘크리트를 부어 양생시키고, 그림의 오른쪽 아래와 같이 Air-spring을 설치하였다.

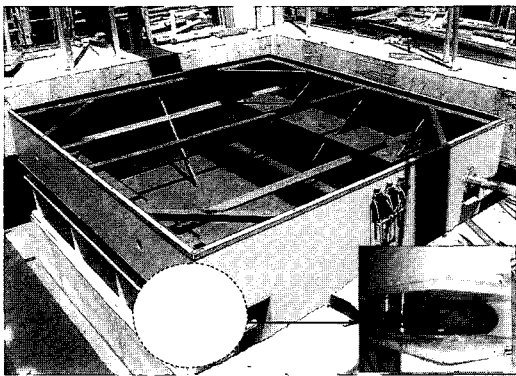


Fig. 11. Installed floating seismic mass system.

Fig. 12, Fig. 13과 같이 설치된 방진시스템에 대한 동특성 성능 평가를 위해 동특성 실험을 수행하였다.

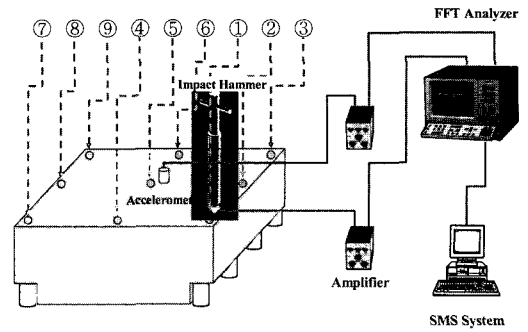


Fig. 12. Experimental set-up.

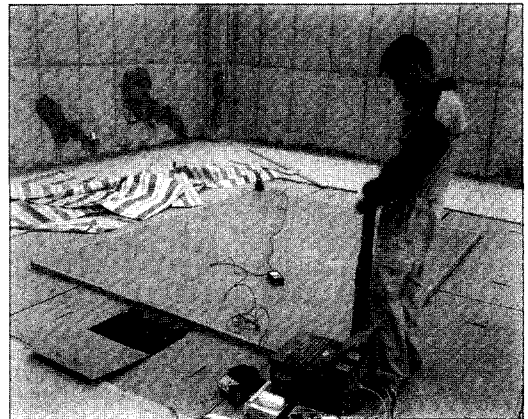
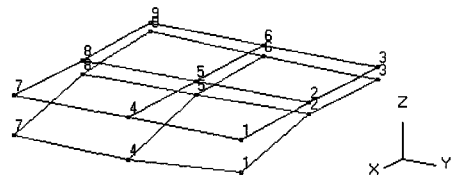
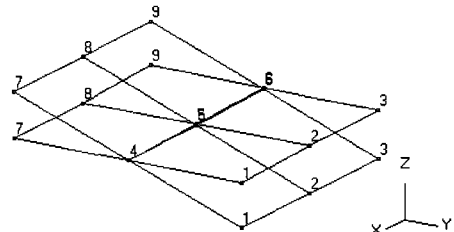


Fig. 13. Dynamic stiffness test of floating seismic mass system.

Floating seismic mass system 상단부분 9지점에서 수직방향(Z)으로 point mobility(No. 1) 및 transfer mobility(No. 2~9; No. 1를 driving point로 선정)를 구



(a) 1st mode : 2.45 Hz



(b) 2nd mode : 3.91 Hz

Fig. 14. Mode shapes of floating seismic mass system.

하였으며, 이를 이용하여 고유진동수에서의 모드 형상을 산출하였다.

실험결과 주요 고유진동수 2개를 확인하였으며, 해당하는 모드형상은 1개의 병진거동(translation behavior)과 1개의 회전거동(rotation behavior : rolling)형태이며 Fig. 14에 나타내었다.

Table 2. Results of modal analysis

Mode	Freq. [Hz]	Damp.[%]	Description
1 st	2.45	3.54	Vertical
2 nd	3.91	2.33	Rolling

Fig. 15는 해석모델과 실제 방진 시스템을 설치한 후에 단위하중에 대한 주파수별 진동 응답 함수(Frequency Response Function)를 비교하였다. 실선은 해석 모델에서의 데이터이고, 점선은 실험을 통해 실제 시스템에서 구한 데이터이다. Fig. 15에서 점선은 실선 아래에 있다.

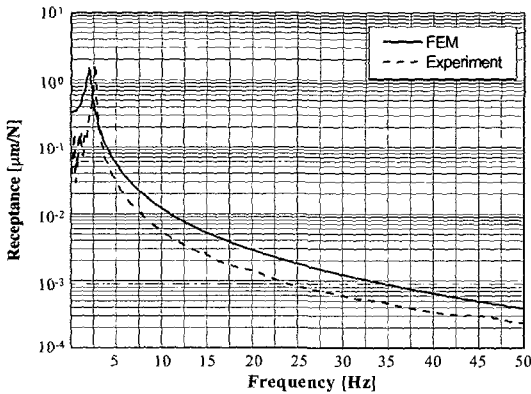


Fig. 15. Comparison of point FRF on floating seismic mass system.

이것은 실제 방진 시스템이 진동허용규제치의 설계 목표를 만족하고 있다는 것을 의미한다.

또한, 이 설계 목표치의 진동허용규제치를 만족하기 위한 조건으로 초 정밀측정/분석 장비가 유발하는 동하중은 Fig. 10에서 제시된 동하중 허용 규제치 내에 있어야 한다.

Fig. 16은 floating seismic mass system 위에 초 정밀 측정/분석 장비가 설치된 모습이다.

5. 고찰 및 결론

초 정밀측정/분석 장비가 설치될 방진시스템의 진동



Fig. 16. Installed precision measuring system on floating seismic mass system.

허용 규제치를 반도체 비의 진동허용규제치 및 구조물 통특성 허용규제치를 토대로 결정 하였다.

현재 구조상태에서의 기초 진동상태를 측정 하였으며 이를 바탕으로 결정된 진동허용규제치를 만족시킬 수 있는 방진시스템을 설계하였다.

설계된 방진시스템의 성능을 확인하기 위하여 유한 요소해석 및 동특성 실험을 통하여 검증하였으며, 예측된 전달함수를 사용하여 설계된 방진시스템에 설치될 장비의 동하중 허용규제치를 제안하였다.

본 연구를 통하여 초 정밀 장비가 설치될 기초 구조 및 방진 시스템의 진동허용규제치를 정량적으로 평가할 수 있는 방안을 제시하였으며, 본 방안을 통하여 향후 반도체장비와 같은 초 정밀 장비가 설치될 방진시스템의 설계에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 선문대학교 교내 학술 연구비 지원으로 수행되었습.

참고문헌

- Gordon, C.G. "Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment", SPIE Proceedings Volume 1610, pp. 71-85 (1991).
- Gordon, C.G. "Vibration Prediction and Control in Microelectronics Facilities", Inter. Noise 96, Book1, pp. 149-154 (1996).
- Broch, J.T. "Mechanical Vibration and Shock Measurements", B&K Series (1984).
- Ewins, D.J. 1995, "Modal Testing : Theory and Prac-

- tice”, Research Studies Press Ltd. (1995).
5. RMS 테크놀러지(주), “H-전자산업(주) 적자보와 제진대의 동적특성분석, 평가 및 진동저감대책”, RMS 테크놀러지(주) 기술용역보고서 (2000).
 6. 백재호, 이흥기, 김강부, “칩마운트(SMD) 장비의 동하중(動荷重) 발생특성에 관한 연구”, 한국 소음진동 공학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 1913-1917 (2000).
 7. Swanson Analysis System Inc., “Ansys Dynamic User's Guide for Revision 5.4”, (1993).