

〈논 문〉

## 준 경험기법을 이용한 고집적 반도체공장의 미진동 제어를 위한 구조물의 동적설계에 관한 연구

A Study on the Structural Dynamic Design for Sub-micro Vibration Control in High Class Semiconductor Factory by Semi-Empirical Method

이흥기\* · 백재호\* · 원영재\*\* · 박해동\*\*\* · 김두훈\*\*\*

Hong-Ki Lee, Jae-Ho Pak, Young-Jae Won, Hae-Dong Park and Doo-Hoon Kim

(1999년 9월 4일 접수 : 1999년 11월 16일 심사완료)

**Key Words :** Vibration Criteria(진동허용규제치), Structure Dynamic Design(구조물동적설계), Semi Empirical Method(준 경험법), Sub-micro Vibration Control(미진동제어)

### ABSTRACT

Modern technology depends on the reliability of extremely high technology equipments. In the production of semiconductor wafer, optical and electron microscopes, ion-beam, laser device must maintain their alignments within a nanometer. This equipment requires a vibration free environment to provide its proper function. Especially, lithography and inspection devices, which have sub-nanometer class high accuracy and resolution, have come to necessity for producing more improved giga and tera class semiconductor wafers. This high technology equipments require very strict environmental vibration standard, vibration criteria, in proportion to the accuracy of the manufacturing, inspecting devices. This paper deals with the structural dynamic design in high class semiconductor factory in order to be satisfied more strict vibration criteria for high sensitive equipment.

### 1. 서 론

오늘날, 구조 설계자에게 있어서 어려운 과제 중의 하나는 지반 위에 기초를 설치하고 복잡한 구조와 많은 복합 재료를 사용하고 있는 대형 구조물에 대한 동적 설계이다. 특히, 반도체 공장과 같은 대형 구조물에서 서브마이크로 수준의 미진동(微振動)을 다루어야 하는 문제는 앞으로도 여전히 어려운 과제

로 남아 있을 것이다. 이는 진동 응답을 결정하는 구조와 재료는 복잡하고 다양한 형태를 갖고 있는 반면에 다루어야 할 동적응답은 극한적으로 작은 마이크로(micrometer) 이하의 값을 다루어야 하기 때문에 기존에 이용되고 있는 해석과 실험의 개념으로는 신뢰성 있는 동적 특성을 결정하는 것은 어렵다. 구조물의 엄밀한 응답 예측과 제어를 위해서는 새로운 개념의 동적 해석과 실험 방법이 필요할 것으로 예상된다. 이러한 대표적인 실 예의 하나로 진동에 민감한 장비를 사용하고 있는 반도체 공장의 동적설계가 아직까지도 추상적이며 정성적으로 이루어지고 있는 실정이다. 생산하는 반도체의 집적도가 높을수록 다루어야 할 진동이 미소하기 때문에 동적

\* 정희원, RMS Technology Co., LTD

\*\* 금호공과대학교

\*\*\* 정희원, 유니슨산업 기술연구소

관련인자와 특성에 대한 엄밀한 정의가 요구되고 있다. 최근, 기가급(giga class) 메모리칩(DRAM)을 설계하기 위해서는 0.23~0.1 $\mu\text{m}$  이하의 회로선폭을 가공할 수 있는 기술이 필요하다. 이러한 가공성을 유지하기 위하여 정밀장비가 설치되는 건물의 진동을 엄격하게 제한하고 있다. 기가급 반도체의 양산 공장을 건설할 경우, 청정구역(clean room)에서 가속도 0.1 gal[half peak], 변위 0.1~0.2  $\mu\text{m}$  [half peak] 이하의 진동 수준으로 구조물을 설계하고 있다. 이러한 진동 수준을 정량적으로 접근하기 위하여 어떠한 동적설계 방법과 절차가 필요한가? 이러한 문제를 풀려는 노력의 하나로 Gordon<sup>(9)</sup>은 반도체 공장의 기본 진동설계에 순수 해석적인 기술보다는 실험과 경험을 기본으로 하고 해석은 개개의 실험데이터와 경험식을 연결하는 통합시스템으로 활용하는 "Semi Empirical Method"를 제안하고 있다. 이미, 이러한 방법이 국내 메가급 메모리 반도체 공장의 구조물 설계에 일부분 활용하여 왔다. 그러나 이러한 방법이 정확히 어떠한 특성과 절차를 가지고 있어야 한다는 정의는 아직까지 확보되지 않고 있다. 다만 구조물의 동적해석에 필요한 데이터와 해석 구조를 가능한 모든 부분에서 불확실한 요인을 제거한 실제적인 요소로 형성된 통합 구조를 갖도록 하는 방법론일 것이라는 점만 예상할 뿐이다. 실 예로서는 복잡한 동적 인자(mass, damping, material properties, dynamic stiffness, boundary condition, inter-action of material)로 구성된 구조물의 전달함수를 직접적으로 실제 구조물에서 실험적으로 찾아내고 이를 기본 데이터로 하여 다른 해석(SDM, FRS)을 진행하는 것도 이러한 방법론의 하나로 파악된다. 본 논문에서는 서브마이크로 수준의 진동제어를 위한 semi empirical method의 기본 특성을 설명하고 독자적으로 개발한 이러한 진동 제어 절차서(procedure)를 활용하여 기가급 반도체 공장의 구조물 동적설계(動的設計)에 활용하였다.

## 2. 진동제어 절차서의 확립

### 2.1 현황

구조물의 미진동(微振動) 제어를 위한 체계적인 연구는 반도체 산업이 고집적화, 초정밀화가 진전되고 있는 최근 1980년대에 들어와서 시작되었다. 이러한 미진동 제어와 관련된 연구는 학계보다는 전문 반도체 제조장비 및 정밀장비의 제작자를 중심으로 장비성능을 개선하기 위한 목적으로 이루어졌

다. 그리고 미사일의 관성항법장치와 전파 안테나 등과 같은 정밀 전자제어가 필요한 군사용과 고속한 진동환경에 사용되면서도 정밀한 제어가 필요한 인공위성용 정밀 제어장치들의 기능에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 구미 선진국에서 오랜 기간동안 연구되어져 왔을 것으로 추측되지만, 이에 대한 정확한 정보는 거의 알려지지 않고 있다. 초기 반도체 산업을 주도한 미국을 중심으로 Beranek, Newman, Ungar 등 일부학자와 반도체 진동제어를 수행하는 전문연구소와 엔지니어링 회사들에 의하여 연구되어 왔지만, 반도체 공장 전체에 대한 진동원과 구조물 사이에 대한 접근이 아니라 부분적인 방진(防振) 및 내진(耐振) 문제를 다루어 왔다. 진동에 민감한 지역에 대한 진동문제를 다루기 위해서는 지반의 기초에서 정밀 장비가 설치되는 구조물에 관련된 토목, 건축, 기계, 설비, 유틸리티, 전기, 전자, 광학에 이르는 동적 문제를 동시에 접근할 수 있는 total engineering technique이 필요하기 때문에 일부의 엔지니어링 회사나 연구소에서 이러한 문제를 체계적으로 다루기에는 많은 한계점을 가지고 있다. 일반적으로 진동제어 수준을 결정하기 위해서는 정밀장비의 진동허용규제치의 엄밀한 결정이 필요하다. 장비 자체의 구조설계와 구조물의 동적해석 및 미진동 제어를 위하여 결정된 절차서(procedure)의 최종적인 판단을 위한 설계의 목표치로 결정되기 때문에 이에 대한 이해와 정확성이 무엇보다도 필요한 기본인자(因子)이다. 특히, 반도체 공장이나 정밀 실험실 구조물등의 엄밀한 동적설계, 해석 및 대책을 위해서 정확한 진동허용규제치는 과도한 방진 및 내진 설계를 사전에 방지하고 진동 문제를 발생시킬 수 있는 소지를 최소화하기 위해 필요한 기본자료이다. 정밀장비의 사용자와 구조설계 연구자의 입장에서는 장비 제작자의 진동허용규제치에 대한 '가능한 한 진동이 없는 곳에 설치하라'는 애매한 표현을 사용하거나 불명확한 자료의 제시는 일반적으로 진동허용규제치를 더욱 엄격하게 하는 결과를 가져오기 때문에 장비의 설치, 운영과 유지보수에 어려움을 증가시키게 될 뿐만 아니라 초기 건축 구조물 설계 및 시공에 많은 시간과 경비의 증가를 가져오게 될 여지를 갖고 있다. 장비 제작자가 제출하는 진동허용규제치는 장비의 하부 구조물(base frame)을 통하여 전달되는 진동, 즉 장비가 설치되는 건물 구조물 바닥(floor)의 진동이 장비의 정상적인 성능을 발휘하지 못하는 진동 상한치를 주파수(frequency)에 대한 진동 크기(amplitude)로

나타내고 있다. 이에 대한 적용에서 발생할 수 있는 여러가지의 문제점이 제기되고 있지만, 무엇보다도 현재의 문제는 정밀장비의 진동허용규제치가 다양한 양식과 통일되지 않은 형태로 사용자에게 제출되고 있기 때문에 장비 제작자와 사용자 그리고 구조설계자 사이에 여러가지 적용상의 문제점을 야기하고 있다.

### 2.2 정밀 미진동제어 절차서의 구성

서브마이크로 미터 수준의 미진동(微振動) 제어를 위해서는 구조의 동적해석 및 설계, 진동유발 유틸리티의 배치, 진동 전달특성 및 방진, 제진 기술과 구조물의 정밀한 동적 실험, 측정/분석기술로 집약되는 종합적인 기술이 요구된다. 마이크로 수준의 진동허용규제치는 대형, 복합 구조물에 대한 합리성과 신뢰성이 확보된 새로운 개념의 고정도 해석 및 실험 기술을 요구하고 있다. 이러한 제한 조건을 해결하는 하나의 방법으로 실제 대형 구조물에 대하여 직접 동적실험을 수행하여, 전달함수를 구함으로서 실험적으로 구조물의 동적특성을 결정한다. 이러한 실험 데이터를 바탕으로 하여 SDM(structure dynamic modification)이나 FRS(force response simulation)을 수행함으로써 유의 위치에서 진동수준을 예측할 뿐만 아니라 구조물의 진동제어를 위한 동적인자를 변경시킬 수 있는 정보를 엄밀하게 제공받을 수 있다. 본 연구에서도 해석적으로 접근하기 어려운 부분에 대해서는 실험 및 측정 데이터를 이용하는 진동제어 절차서를 정립하고 이에 의하여 연구 과제를 수행하고자 한다. 기본적인 미진동 제어의 절차서의 구성은 Fig. 1과 같다.

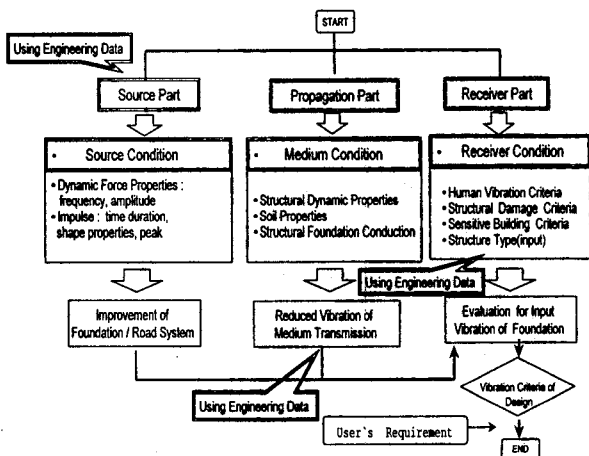


Fig. 1 Schematic procedure of sub-micro vibration control

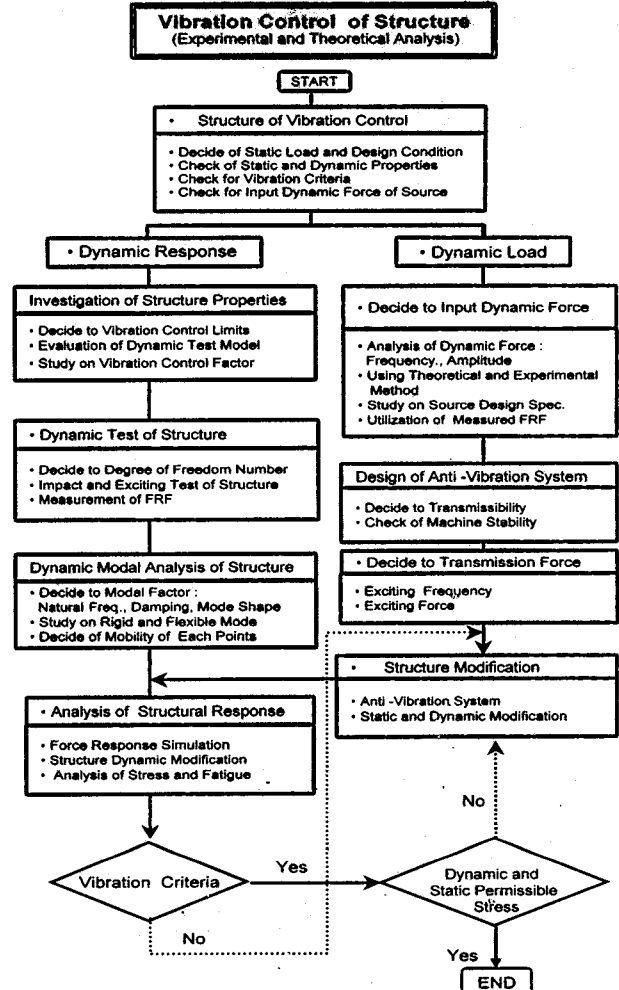


Fig. 2 Procedure for sub-micro vibration control in semiconductor factory

### 2.3 정밀 미진동제어 절차서

반도체공장의 진동원에서 구조물에 이르는 미진동 제어를 위한 세부 절차서는 Fig. 2와 같다

## 3. 기가 디램급 반도체공장의 동적구조설계

### 3.1 진동제어의 목표

기가급 메모리 반도체공장의 생산공정에 사용되는 진동에 민감한 장비에 대한 진동허용규제치와 건물의 진동제어 목표치 설정하고 건물의 설계에서 완공에 이르기까지 진동제어 목표치를 성취할 수 있는 절차서를 개발하여 공장부지의 상시진동의 평가에서 건물 기초의 동적 특성, 건물구조와 격자보에 대한 동적 특성해석 및 실험을 통하여 기가급 반도체공장의 구조에 대한 최적설계를 제시하고자 한다. 동적 구조설계를 위하여 수행한 내용은 아래와 같다.

- (1) Sub-structure의 dimension에 따른 응답특성 계산(receptance, 구조물 고유진동수, mode shape)
- (2) 건물기초의 MAT 및 pile 구조 응답특성 계산(receptance, 건물기초 고유진동수, mode shape)
- (3) Access Floor 및 제진대 개념설계

**3.2 구조물의 동적 설계 조건(Receiver Part)**

반도체 공장에서 정밀장비가 설치되는 격자보(sub-structure)는 공기 청정을 위한 독특한 구조이다. 격자보 상에 어세스 플로어(access floor)가 설치되고 이 위에 정밀반도체 생산설비들이 놓이게 된다. 일반적으로 반도체 공장에서 정밀장비의 진동허용규제치는 어세스 플로어 위와 스테퍼(stepper), 어라인너(aligner)등 고정밀 노광장비, 반도체 웨이퍼를 제조하는 실리콘단결정성장기 등이 설치되는 독립절연기초와 제진대(除振臺) 위에서 3차원으로 주파수별로 제한하고 있다. 반도체 웨이퍼의 집적도에 따른 웨이퍼의 진동 특성을 Table 1에 정리하였다. 16M DRAM 생산 공정에서는 제조공정별 제시되고 있는 진동허용치는 0.5~1 μm 정도이고 64~256M DRAM에서는 0.2~0.5 μm수

**Table 1** Vibration properties of semiconductor chip

Capacity of D-ram	Wafer size (inch)	Chip size (mm <sup>2</sup> )	Number of chip (개)	Line width (μ m)	0-peak displacement design criteria (μ m, 0-peak)
64K	4	20	310	수십 ~ 수 μm	.
256K	5	40	245		.
1M	6	50	288	약 2 μm	약 2 μm
4M	6	90	156		약 0.5~1 μm
16M	8	130	179	약 2 μm	약 0.2~0.5 μm
64M	8	190	132	약 1.5 μm	약 0.1~0.2 μm
256M	8	285	88	약 0.25 μm	

**Table 2** Vibration control design criteria of Giga class semiconductor factory (p-p value)

Area \ Item	Vibration criteria		Freq. span (Hz)	Remarks
	Displ. [μm]	Accel. [gal]		
Anti-vibration system	0.2	0.2	4~80	p-p value(3-D)
Access floor	0.5	0.5	4~80	p-p value(3-D)
Sub-structure	0.1	0.1	4~80	p-p value(3-D)
Office & Lab.	0.2	0.2	4~80	p-p value(3-D)

준이다.

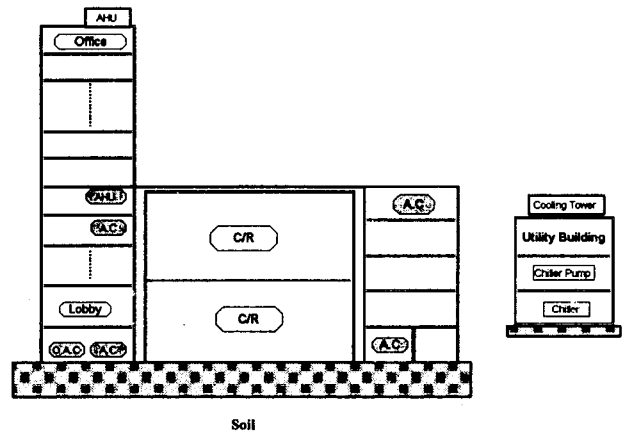
구조설계의 목표가 되고 있는 기가급 반도체공장에 대한 생산, 공정, 구역별 진동허용규제치는 공정에 사용되는 정밀장비에 의하여 결정된다. 아래 Table 1에는 진동설계목표치를 정리하였다.

**3.3 기가급 반도체공장의 개념설계(Propagation Part)**

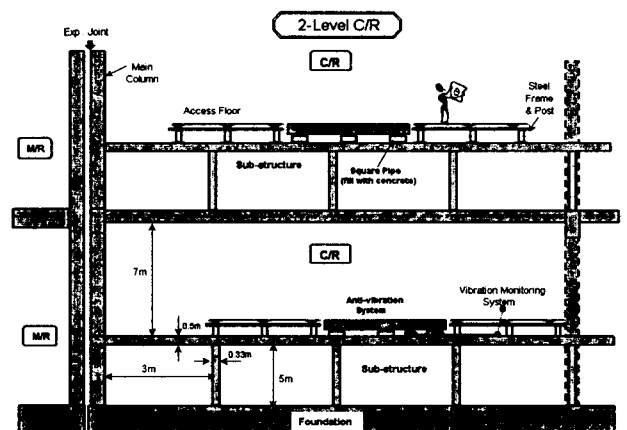
반도체공장의 기본적인 배치 및 구조의 개념도는 Fig. 3에 청정구역의 개략 구조도는 Fig. 4와 같다.

**3.4 반도체공장 진동원 특성**

현재, 기가급 메모리칩의 양산을 위한 생산공장을 건설할 경우, 노광장비(lithographic exposure tool)가 설치되는 청정구역(clean room)에서 진동허용규제치(vibration criteria)는 0.1 μm[0-peak] 이하의 수준이다. 진동허용규제치가 0.5 μm[peak to peak]



**Fig. 3** Cross section of a semiconductor factory



**Fig. 4** Cross-section of a clean room

수준의 메가급 반도체공장에서 항공기 소음으로 기인하는 미소한 진동을 예방하기 위하여 기존의 비행기 항로를 변경하는 실 예가 있는 실정이다. 이것은 미소한 진동원에 의해서도 설계 진동허용규제치에 영향을 미치기 요소로 작용하기 때문에 제어해야할 진동원의 범위가 확대된다. 그리고 나노급 초정밀 장비가 운영되고 있는 청정구역(clean room)의 내 외부에는 청정을 위한 수 백대의 대형 공조기(AHU, max. 10000 m<sup>3</sup>/h, Max. dynamic load 10000N, 23 Hz)와 배관, 펌프, 냉동기, 냉각 탑, 덕트 라인 등 무수히 많은 진동 발생 설비가 운전되고 있기 때문에 다양한 특성의 진동에 노출되어 있다.

### 3.5 메가급 반도체공장의 동적특성 평가

일반적으로 구조물에 대한 동특성 해석은 이론적 해석과 실험적 모드해석을 통해서 이루어지고 있다. 이론적 해석에 의한 동적 특성 평가의 유용성과 발전성에 대해서는 언급을 생략하더라도 구조물에 대한 실험적 모드해석은 최근의 컴퓨터, 측정/분석장비 및 센서의 비약적인 발달로 한층 더 많은 가능성과 신뢰성을 부여받게 되었다. 이런 장비에 힘입어 현재 실험실 수준에서는 실험적 모드 해석법을 이용한 구조물의 동특성 해석을 다양하게 활용되고 있는 실정이지만, 입력 가진력(加振力)과 출력 응답의 측정문제에 인하여 중대형 철골, 콘크리트 구조물 등에 대해서 이용한 예는 흔하지 않다. 그래서 실험 모델이 되고 있는 철근 콘크리트 구조물인 격자보에 대한 실험적 모드해석을 적용하기 위해서는 대응량의 가진(加振)과 측정 응답신호의 충분한 S/N비를

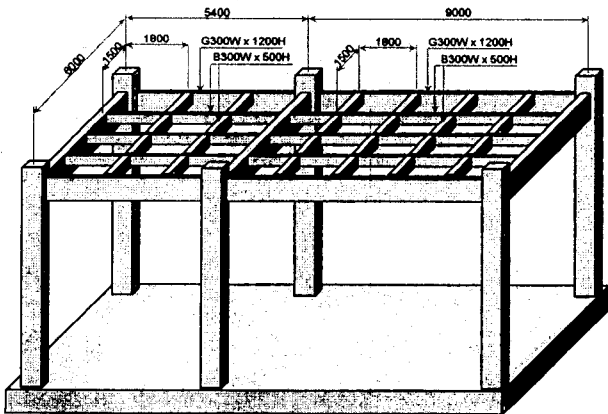


Fig. 5 Structure model of Mega D-ram class semiconductor factory

Table 3 Comparison of acceleration according to structure type [unit : (m/s<sup>2</sup>)/N]

Description	Measure. point	Frequency (Hz)		
		8 Hz	24 Hz	30 Hz
Type A (4 MDRAM)	Point mobility	17 μ	143 μ	127 μ
	FRF at 2 m distance	6 μ	102 μ	47 μ
Type B (16 MDRAM)	Point mobility	4 μ	81 μ	124 μ
	FRF at 2 m distance	3 μ	71 μ	114 μ
Type C (64~256 MDRAM)	Point mobility	.	29 μ	168 μ
	FRF at 2 m distance	.	20 μ	148 μ

확보하는 것이 선행되어야 한다. 이를 위하여 대형 충격가진기(max. peak force 20000N, time duration 20 ms)를 자체적으로 제작하고 다양한 테스트를 통하여 신뢰성을 확보한 후 격자보의 실험적 모드해석에 활용하였다. 전형적인 메가 디램급 반도체공장의 기초 및 구조물의 개념도는 Fig. 5에 구조의 동적특성은 Table 3과 같다.

### 3.6 기가 디램급 반도체공장의 동적 설계

기가급 디램 반도체공장의 동적특성으로는 점-모빌리티(point mobility)가 대형 공조기의 가진 주파수 24Hz에서 최소한 15 μm/sec<sup>2</sup>/N(0.0006 μm/N), 2 m 거리에서 주파수응답함수(FRF)는 10 μm/sec<sup>2</sup>/N(0.0004 μm/N)이상이 되어야 할 것으로 예상된다. 동적 구조변경(structural dynamic modification)을 위한 해석은 256 MDRAM 현장에서 실험한 구조물의 주파수응답함수를 직접적으로 사용하였으며, 응답해석(force response simulation)

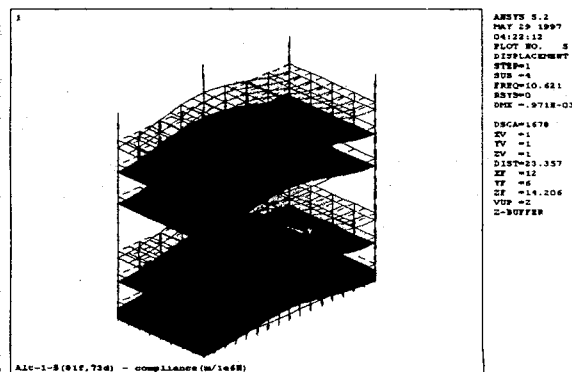


Fig. 6 First bending mode

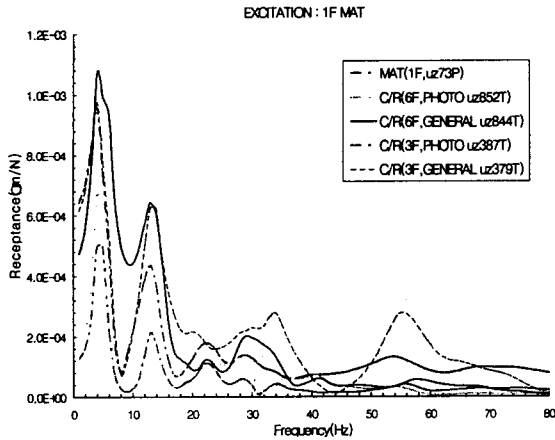


Fig. 7 Receptance plot for MAT at 1F excitation

Table 4 Summary of results of receptance at R-3

Floor	Recep.	Point ( $\mu\text{m}/\text{N}$ )	Transfer ( $\mu\text{m}/\text{N}$ )	Remark
1F MAT		$4.4 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-4}$ (12.5 Hz)	11.5 Hz
3F C/R	Photo	$2.1 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^{-4}$ (15.3 Hz)	12.5 Hz
	General	$2.6 \times 10^{-3}$		12.5 Hz
4F sub FAB		$6.6 \times 10^{-3}$	$8.1 \times 10^{-4}$ (15.3 Hz)	15.3 Hz Transfer Excitation : sub-FAB at 4F slab Response : photo area at 6F slab
6F C/R	Photo	$2.1 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^{-4}$ (19.2 Hz)	12.5 Hz
	General	$2.7 \times 10^{-3}$		13.6 Hz

\* Frequency span : 8 Hz ~ 30 Hz

Excitation and response position : the center at interval of  $12 \times 12$  column.

Point receptance : One where the response position and the excitation position are identical

Transfer receptance :

- ① A clean room layer : Excitation → general area  
Response → photo area
- ② A remainder layer : One where the response layer and excitation layer are different

에 사용된 가진력과 주파수는 실제 실험을 통하여 얻어진 데이터를 사용하였다. Fig. 6은 반도체공장의 부분 구조에 대한 실험데이터를 활용하여 동적해석한 결과이고, Fig. 7은 기초에 대한 주파수응답함수 그래프이다. 그리고 Fig. 8은 최종적으로 동적 해석 결과에 의한 진동허용규제치  $2 \mu\text{m}$  (p-p)를 만족하는 RC 구조의 기가 디램급 반도체공장의 개념 구조이다.

Table 4는 Fig. 8의 Giga DRAM Class 반도체공장의 구조개념도에서 재해석을 통하여 얻어진 구조의 모빌리티에 대한 데이터이다. 각층별로 구조물의

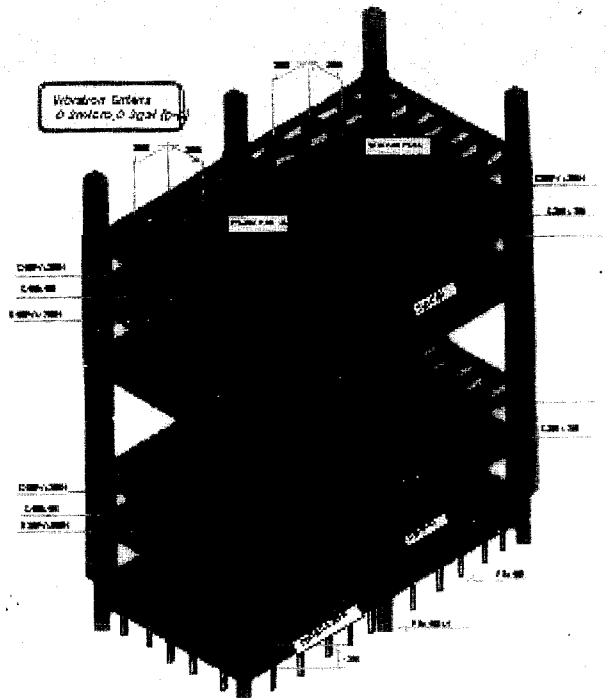


Fig. 8 A concept drawing of Giga D-ram class semiconductor factory

FRF인 receptance를 주파수범위 8 Hz ~ 30 Hz사이의 최대치를 정리하였다.

### 3. 고찰 및 결론

대형 구조물의 서브 마이크로 수준의 미진동(微振動)을 제어하기 위하여 국내외적으로 많은 연구자들의 실험과 해석에 대한 노력이 이루어져왔지만, 얻어진 결과에 대한 신뢰성은 늘 의문으로 남아 있다. 이를 개선할 수 있는 하나의 시도로서 실험과 측정/분석 데이터를 해석의 기반으로 하는 'Semi-Empirical Method'라는 방법을 이용한 절차를 확보하고 Giga DRAM Class 반도체공장의 동적 구조설계에 대하여 정량적인 접근을 시도하였다. 여기에서 얻어진 구조의 동적 전달함수(FRF)를 이용하여 진동원의 방진 수준을 결정하고 전달 특성을 평가할 수 있다. 그러나 이러한 설계가 실제로 건설된 반도체공장에서 얼마의 에러를 가지고 있는지는 최종적으로 반도체공장의 완공 후에 확인할 사항이지만, 건설 과정에서 필요한 실험과 측정 데이터를 확보하여 에러 폭을 개선할 수 있는 진동제어 절차서의 수정과 보완이 계속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

(1) Takafumi Fujita, 1986, 超LSI 工場 振動問題-微振動防振 技術, 免振技術-, 日本機械學會誌, 第 89 卷, 第 809 号, pp. 99~104.

(2) Hisao Tomita, 1989, Isolation Technology for Micro-Vibration in Semiconductor Factories, 精密 工學會, 55/12/1989, pp. 36~40.

(4) 이흥기, 김두훈, 권형오, 1994, 반도체 공장에서 미진동제어를 위한 격자보의 동적 설계에 관한 연구, 한국소음진동공학회, '94 추계학술대회 논문집 pp. 52~57.

(5) 권형오, 박해동, 김두훈, 이흥기, 1994, 반도체 공장의 격자보 구조에 대한 동특성해석에 관한 연구, 한국소음진동공학회, '94 추계학술대회 논문집 pp. 58~61.

(6) 이흥기, 박해동, 최현, 배기선, 김두훈, 1995, 정밀 장비의 미진동제어 기술에 관한 연구(HDD CELL진동 제어), '95 춘계 학술 대회 논문집 pp. 233-239.

(7) 이흥기, 김두훈, 김사수, 1996, 주파수응답함수를 이용한 고정밀 장비의 진동허용규제치 결정기법에 관한 연구, 한국소음진동공학회지, 제 6 권, 제 3

호, pp. 363~373.

(8) Lee, Hong-Ki, Park, Hae-Dong, Choi, Hyun, Kim, Doo-Hoon and Kim, Sa-Soo, 1996, A New Method of Determining Vibration Criteria for a Vibration Sensitive Equipment Using Frequency Response Function, INTER-NOISE 96, Proceeding Book 3 pp. 1253~1262.

(9) Gordon, C. G., 1996, Vibration Prediction and Control in Microelectronics Facilities, INTER-NOISE 96, Proceeding Book 1 pp. 149~154.

(10) Eric E. Ungar, 1990, Vibration Control Design of High Technology Facilities, Sound and Vibration.

(11) PERKIN-ELMER Semiconductor Equipment Group, 1989, Micralign M 500 Sensitivity to Floor Vibration and Acoustic Disturbances, MLD 0036.

(12) Eric E. Ungar, 1985, Designing Sensitive Equipment and Facilities, Mechanical Engineering.

(13) Lee, Hong-Ki, Park, Hae-Dong, Kim, Doo-Hoon and Kim, Sa-Soo, 1997, A Study on the Specification of Vibration Criteria of a Vibration Sensitive Equipment, INTER-NOISE 97, Proceeding Volume II pp. 625~629.