

반도체공장에서 미진동제어를 위한 격자보의 동적 설계에 관한 연구

이홍기, 권형오*, 김두훈*

(A study on dynamic design for the sub-micro vibration control of substructure in semi-conductor factory)

(Hong-Ki Lee, Hyeong-Oh Kweon, Doo-Hoon Kim)

1. 서론

반도체 칩의 집적도의 향상은 고정정 기술과 함께 미진동제어 기술이라는 또 하나의 인자(因子)를 생산제품 수율에 영향을 미치는 인자로 등장시켰다.

Mega에서 Giga급에 이르는 DRAM의 반도체 칩을 생산하기 위해서 다루어야 할 선풍은 수 마이크로미터에서 서브마이크로미터 수준에 이르게 되었다. 256M DRAM의 경우 손톱크기의 면적에 선풍이 0.25 μ m이고 1.5 μ m 정도의 미세한 틈사이로 금속을 채우는 기술이 필요하다. 선풍이 서브마이크로미터 수준의 반도체를 생산하기 위해서는 개발, 제조, 검사 등 각 생산공정에 사용되는 장비에 대해서 고정도, 고성능, 고신뢰성이 요구되고 있다 (Fig.1,2,3, Table.1 참조). 반도체 칩의 실험시제품 개발에서 엔지니어링 샘플, 양산용 샘플 제작 이후 반도체 공장을 건설하고 최종제품의 양산에 들어간다. 이때, 제품 양산을 위해서는 광범위한 고급기반기술의 확보가 필수적이다. 구조의 동적 해석 및 설계, 진동유발 유틸리티의 배치, 진동 전달 특성 및 방진, 제진 기술등도 미진동의 제어라는 차원에서 고급 기반기술의 한 부분을 차지하고 있다. 이는 초기 설계단계에서부터 진동의 엄밀한 예측과 측정/분석 및 진동제어로 집약되는 Total Engineering기술이 요구된다는 것을 의미하고 있다. 그리고 반도체 칩의 집적도의 향상은 미진동제어(微振動制御)라는 기술의 중요성을 더욱더 부각시키게 될 것이다. 반도체 공장에서 진동제어와 관련된 밀접한 구조물은 공기청정을 위한 격자보(substructure)라는 독특한 구조물이다. 이 격자보라는 구조물 위에 access floor가 설치되고 다시 그 위에 정밀 반도체 생산설비들이 놓이게 된다. 일반적으로 반도체 공장에서 진동허용 규제치도 access floor 위와 스테퍼(stepper), 어라인너(aligner) 등 고정밀 노광장비등이 설치되는 독립절연기초인 제진대 위에서 3차원으로 진동허용치를 주파수별로 제한하고 있다.

일반적으로 16M DRAM 생산 공정에서는 제조공정별로 제시되고 있는 진동허용치는 0.5~1 μ m 수준이지만 64~256M DRAM에서는 0.2~0.5 μ m, 그리고 Giga급에서는 0.1 μ m 이하로 더욱더 엄밀하게 제한 될 것으로 예상되고 있다. 이는 정밀 반도체 공장의 입지여건이나 생산설비가 설치되는 access floor와 격자보의 구조설계등이 미진동제어를 위한 동적 해석과 진동전달특성등이 매우 엄밀하게 고려되어야 한다는 것을 의미한다. 그러나 현재, 서브마이크로미터 수준까지 내려간 진동허용 설계규제치에 대응하는 반도체 공장과 같은 대형, 복합구조물에 대한 동적특성과 진동전달에 대한 합리적이고 신뢰성이 입증된 진동에측 및 대책기술이 필요로하고 있다. 그러나 복잡한 구조형태나 지지조건, 다양한 결합부, 복합재료를 사용하고 있는 반도체공장의 콘크리트 구조물이나 격자보를 정확히 모델링하고 해석하더라도 서브마이크로미터 수준의 정밀하고 신뢰성 있는 동적 특성을 정량적으로 예측하는 것은 어려운 일이다. 이러한 제한조건을 해결하는 하나의 방안으로 실제 대형구조물에 대하여 동적 실험을 수행하여, 전달함수를 직접 구함으로써 구조물의 동적 특성을 실제 구조물 상태에서 파악하는 것이다. 그리고 이 실측된 전달함수를 기초로 하여 SDM(structure dynamic modification)이나 FRS(force response simulation)을 수행함으로써 필요한 위치의 진동수준을 좀더 현실적으로 예측할 수 있을 뿐만 아니라, 구조물의 미진동제어를 위한 동적 인자를 변경시킬 수 있는 방법과 반도체 제조공정에 사용되는 각종 장비의 방진수준을 신뢰성 있게 결정할 수 있다. 또한, 현재 가동 중인 기존 반도체 공장의 격자보에 대해 실험적으로 얻어진 동특성을 이론적 동적해석 방법과 접목함으로써 새로운 고정밀도의 반도체 칩을 생산하는 격자보의 설계에 활용할 수 있을 것이다. 이에, 본 논문에서는 실험적 모우드해석법을 이용하여 현재, 국내에서 가동 또는 건설 중인 반도체공장의 세가지 유형에 대한 격자보의 동적특성을 분석, 결정하고 이를 격자보의 동적설계에 활용하고자 한다.

*. 유니슨산업(주) 부설 유니슨기술연구소

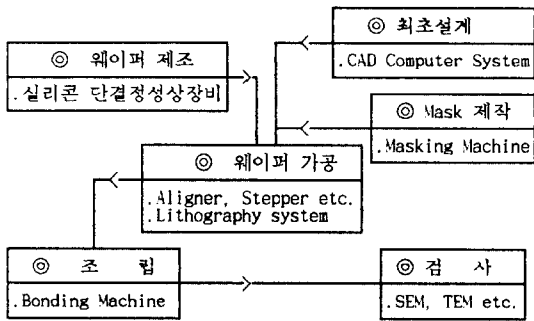
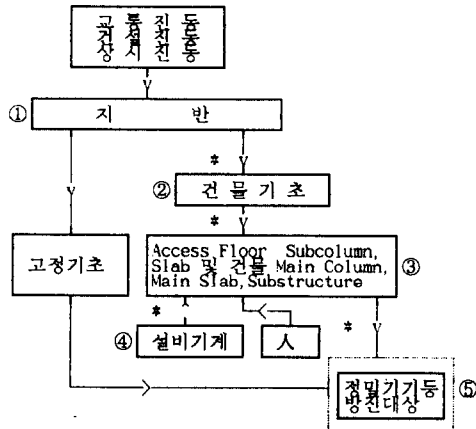


Fig.1 반도체 제조공정과 사용 정밀장비

Table.1 집적도에 따른 웨이퍼 특성

D램수	웨이퍼 (inch)	칩크기 (mm ²)	유효칩수 (개)	선 폭 (μm)	진동규제치 (μm)
64K	4	20	310	수십~수μm	
256K	5	40	245		
1M	6	50	288	약 2μm	약 2μm
4M	6	90	156		
16M	8	130	179	약 0.5~1μm	약 0.2~0.5μm
64M	8	190	132	약 1.5μm	
256M	8	285	88	약 0.25μm	



‘*’는 방진대책을 시행할 수 있는 부분.
①,②,③,④,⑤는 진동 측정이 필요한 과정 및 위치.

Fig.2 Clean Room 및 Access Floor에 미치는 진동원

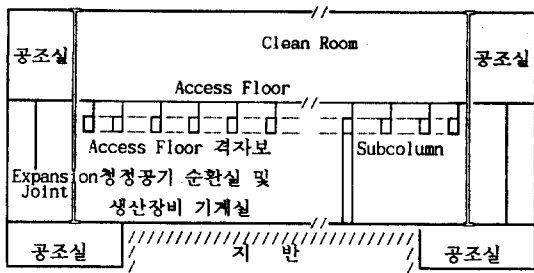


Fig.3 반도체공장의 크린룸의 개략 단면 구조도

2. 격자보의 실험적 모우드해석

일반적으로 구조물에 대한 동특성 해석은 이론적 해석과 실험적 모드해석을 통해서 이루어지고 있다. 이론적 해석에 의한 동특성 평가의 유용성에 대해서는 언급을 생략하더라도 구조물에 대한 실험적 모우드 해석은 최근의 컴퓨터, 측정/분석장비 및 센서의 비약적인 발달로 한층 더 많은 가능성과 신뢰성을 부여받게 되었다. 이런 고성능 장비들의 출현에 힘입어 현재, 실험적 모우드 해석법을 이용한 구조물의 동특성 해석의 경우 실험실 수준으로는 다양형태로 활용되고 있는 실정이지만, 실제 구조물의 경우 입력 가진력(加振力)과 출력 응답의 측정문제에 의하여 중대형 철골, 콘크리트 구조물들에 대해서 적용한 예가 흔하지 않다. 따라서 본 논문에서 실험 모델이 되고 있는 철근 콘크리트 구조물인 격자보에 대한 실험적 모우드 해석을 적용하기 위해서는 대용량의 가진(加振)과 측정 응답신호의 충분한 S/N비를 확보하는 것이 선행되어야 한다. 이를 위하여 당 연구소에서는 대형 충격가진기(최대충격력=10000N, time duration = 20ms)를 자체적으로 설계 제작하고 다양한 검증 및 현장실험을 통하여 신뢰성을 확인한 후 반도체 공장의 격자보에 대한 실험적 모우드 해석에 활용하였다.

2.1 실험적 모드해석의 기본이론

실험적 모드해석은 구조물의 동특성을 나타내는 고유진동수(natural frequency), 감쇠(damping) 그리고 모드형상(mode shapes)을 실험을 통하여 결정하는 것이다. 기본적으로 모우드 해석기법에는 normal modal testing방법과 주파수 응답함수법이 있는데 본 실험 해석에는 주파수 응답함수를 이용하였다. 실험적 모드해석에 있어서 적용되는 기본 이론은 다음과 같다.

Laplace 영역에서의 운동방정식

다자유도계에 대한 시간영역에서의 선형운동 방정식은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

여기서 [M]은 질량행렬(mass matrix), [C]은 감쇠행렬(damping matrix), [K]는 강성행렬(stiffness matrix), 변위벡터, $\{\dot{X}(t)\}$ 는 속도벡터, $\{\ddot{X}(t)\}$ 는 가속도벡터 그리고 $\{F(t)\}$ 는 가진력벡터이다.

선형 운동방정식(1)에 Laplace 변환을 적용하면 다음 식(2)을 얻을 수 있다.

$$s^2[M]\{X(s)\} - s[M]\{X(0)\} - [M]\{\dot{X}(0)\} + s[C]\{X(s)\} - [C]\{X(0)\} + [K]\{X(s)\} = \{F(s)\} \quad (2)$$

여기서 $\{X(s)\}$ 는, 변위의 Laplace 변환, $\{F(s)\}$ 는 작용력의

Laplace 변환, $\{X(0)\}$ 는 초기변위, $\{\dot{X}(0)\}$ 는 초기속도 그리고 s (Laplace 변수)는 $\sigma + j\omega$ 이다.
초기조건이 0일때 운동방정식(2)는 다음 식(3)과 같이 된다.

$$[B(s)]\{X(s)\} = \{F(s)\} \quad (3)$$

여기서 $[B(s)]$ 는 $s^2[M]+s[C]+[K]$ 이며 구조물의 물리적 특성에 관한 정보를 갖는다. 식(3)은 전달함수행렬(transfer function matrix)을 사용해서 다음 식(4)와 같이 된다. 있다.

$$\{X(s)\} = [H(s)]\{F(s)\} \quad (4)$$

여기서 $[H(s)]$ 는 전달함수행렬이다.

모우드 매개변수

작용력이 존재하지 않을때 운동방정식(3)는 다음 식(5)와 같은 제차방정식이 된다.

$$[B(s)]\{X(s)\} = \{0\} \quad (5)$$

식(5)는 복소고유치 문제가 되며, $[B(s)]$ 의 determinant을 0 이 되게 하는 고유치는 고유진동수와 모드감쇠를 나타낸다.

$$\text{Determinant } |B(s)| = 0 \quad (6)$$

만일 구조계의 자유도가 N 개이면, 고유치는 $2N$ 개가 존재하며 복소쌍의 형태로 표현된다. 각 고유치에 대한 고유벡터(eigenvector : u_k, u_k^*)도 또한, 복소쌍의 형태로 존재한다.

$$P_k = \sigma_k + j\omega_k, P_k^* = \sigma_k - j\omega \quad \text{for } k=1 \text{ to } N$$

$$[B(P_k)]\{u_k\} = \{0\}, [B(P_k^*)]\{u_k^*\} = \{0\} \quad (7)$$

여기서 P_k, P_k^* 는 k 번째 모드의 Poles, σ_k 는 k 번째 모드의 감쇠, ω_k 는 k 번째 모드의 고유진동수, 그리고 u_k, u_k^* 는 k 번째 모드의 고유벡터이다.

주파수 응답함수(Frequency Response Function)

전달함수를 부분전개 형태로 나타내면 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[H(s)] = \sum_{k=1}^n \left[\frac{[R_k]}{s - P_k} + \frac{[R_k^*]}{s - P_k^*} \right] \quad (8)$$

여기서, $[R_k]$ 는 k 번째 모드의 residue 행렬이다. 전달함수 행렬은 Poles와 모드형상을 이용해서 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[H(s)] = \sum_{k=1}^n \left[\frac{A_k\{u_k\}\{u_k\}^T}{s - P_k} + \frac{A_k^*\{u_k^*\}\{u_k^*\}^T}{s - P_k^*} \right] \quad (9)$$

여기서 A_k 는 k 번째 모드에 대한 모드형상의 크기를 결정하는 상수이다. 만일 Laplace 변수 s 의 실수부를 0으로 하고 허수부만을 취하면 식(9)의 전달함수 행렬은 다음 식(10)의 주파수 응답함수 행렬이 된다.

$$[H(\omega)] = \sum_{k=1}^n \left[\frac{A_k\{u_k\}\{u_k\}^T}{j\omega - P_k} + \frac{A_k^*\{u_k^*\}\{u_k^*\}^T}{j\omega - P_k^*} \right] \quad (10)$$

2.2 격자보의 충격 모우드 실험(Impact Hammer Test)

전형적인 형태의 격자보를 실험 모델링한 후 대형 충격가 진기를 사용하여 격자보 해석 모델의 각각의 요소를 가진하고 동시에 측정점에 대한 구조물의 동적 응답을 측정한다. 가진기의 가진력과 구조물의 동적응답은 2채널 주파수분석기(dual channel signal analyzer)로 전송되어 주파수응답함수를 계산한 후 PC로 전송한후 모우드 해석 s/w를 이용하여 구조물의 동특성을 구하였다. 현재, 반도체공장에서 적용되고 있는 3가지 유형의 격자보에 대하여 실험적 모우드 해석을 수행하였으며 각각의 유형별 특성은 아래와 같다. 그리고 각 유형별 격자보의 설치 구조도와 모우드 해석 실험모델을 Fig.4, 5, 6, 7에 나타내었다. Fig.5(A), 6(A), 7(A)에서 기호(●)는 동적응답 측정위치를 나타내며, 기호(○)는 충격가진 요소위치를 나타낸다. Type C형 격자보에서는 4개소에 대한 전달함수만을 구하였다.

- Type A형 격자보 : 1~4M DRAM 수준 반도체 칩 생산 크린룸의 격자보(크린룸에서 진동허용기준: 1~2 μ m)
- Type B형 격자보 : 16M DRAM 수준 반도체 칩 크린룸의 격자보(크린룸에서 진동허용기준: 0.5~1 μ m)
- Type C형 격자보 : 64M DRAM 수준 반도체 칩 크린룸의 격자보(크린룸에서 진동허용기준: 0.2~0.5 μ m)

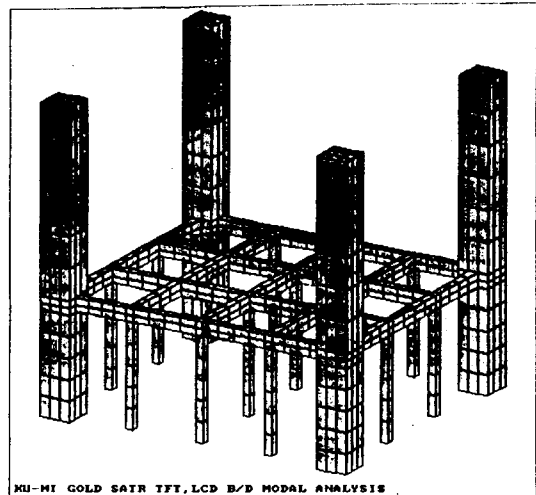
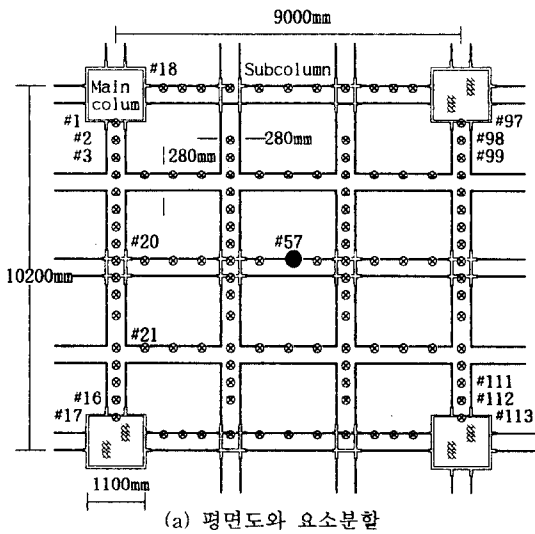
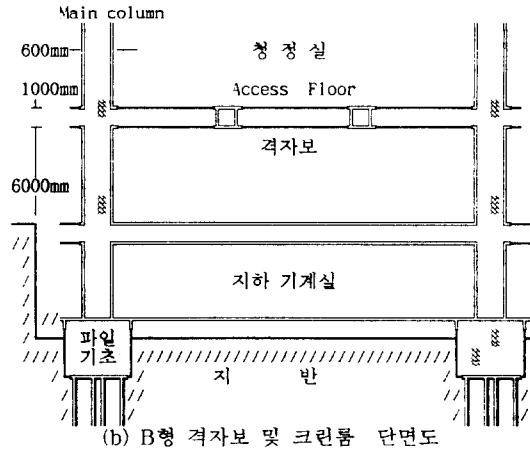


Fig.4 일반적인 크린룸과 격자보의 구조도

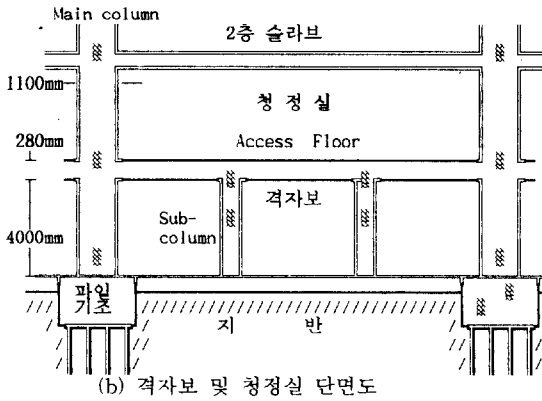


(a) 평면도와 요소분할



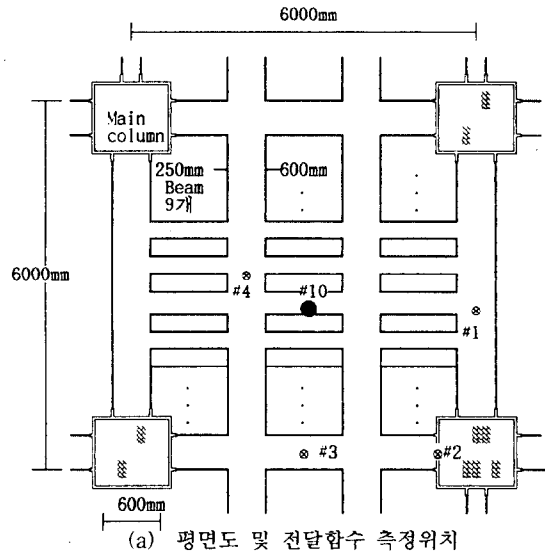
(b) B형 격자보 및 크린룸 단면도

Fig.6 B형 격자보의 개략적인 구조도 및 요소분할

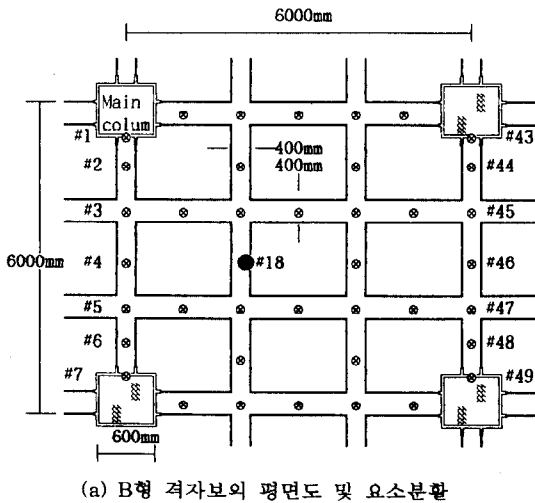


(b) 격자보 및 청정실 단면도

Fig.5 A형 격자보의 개략적인 구조도 및 요소분할



(a) 평면도 및 전달합수 측정위치



(b) 격자보 및 청정실 단면도

Fig.7 C형 격자보의 개략 구조도 및 전달합수 측정위치

2.3 실험적 모드 해석의 장비구성

실험에 사용된 측정/분석 장비의 구성도는 Fig.8에 나타나 있으며 Type A, B, C형 격자보에 대한 전형적인 전달함수와 충격 및 응답시간 신호를 Fig.9~13에 나타내었다.

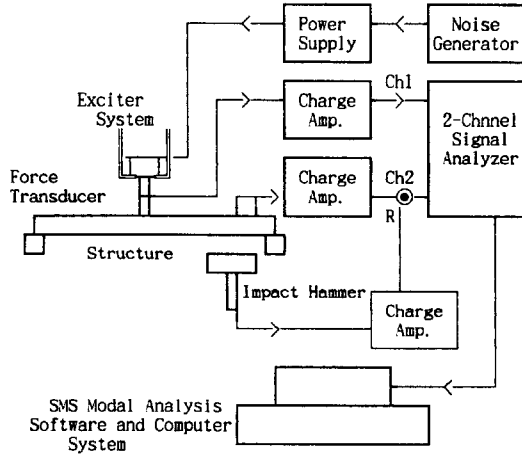


Fig.8 실험적 모드 해석을 위한 실험장비 구성도

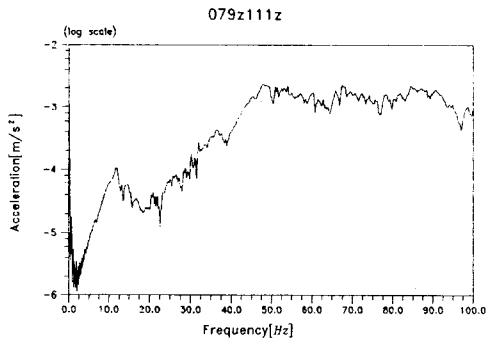


Fig.9 A형 격자보의 요소 #57번 충격시 #79번의 전달함수

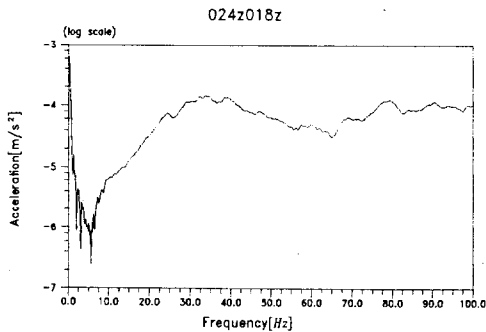


Fig.10 B형 격자보의 요소 #18번 충격시 #24번의 전달함수

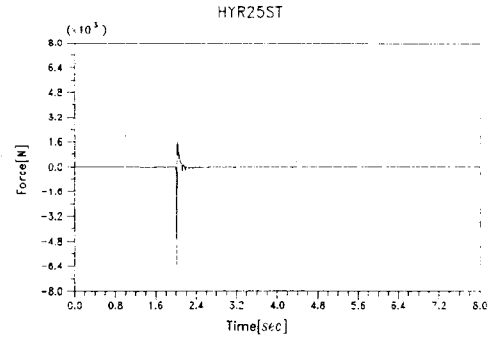


Fig.11 Type C형 격자보의 #10번 충격가진 신호

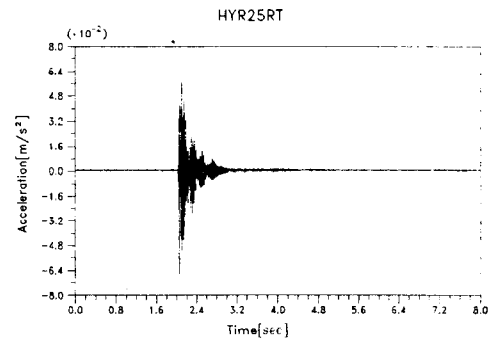


Fig.12 Type C형 격자보 #10번 충격가진시 #5번의 응답신호

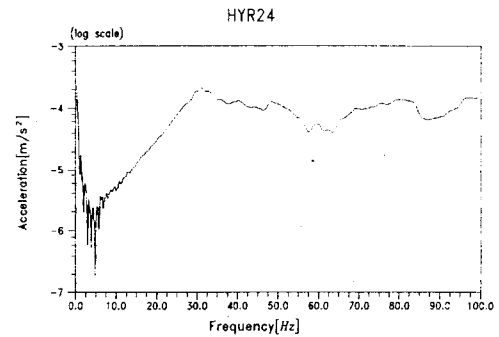


Fig.13 Type C형 격자보의 요소#10번 충격가진시 #4번의 전달함수

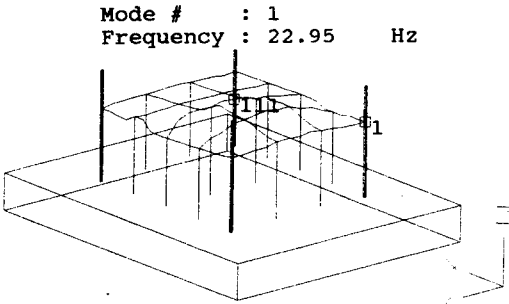
2.4 실험 결과의 분석

Type A, B, C형 격자보의 실험모델에 대한 모드 실험에서 측정된 주파수 응답함수로 부터 curve fitting방법을 사용하여 모드 매개변수를 추출하였으며 그 결과를 Table 2에 나타 내었다.

Table 2. Type별 실험모델의 고유진동수와 모드감쇠

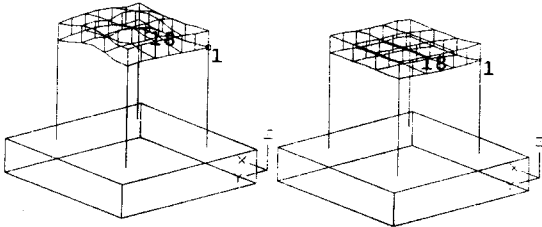
Mode No.	Natural Frequency [Hz]			Damping ratio ζ [%]		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
	1	23.0	12.4	31.0	12.0	5.4
2		24.6			5.8	

모우드형상에 대한 결과는 Fig.14에 Type A, B형에 대하여 도시하였다.



(A) Type A형에 대한 모우드 형상

Mode # : 1 : 2
 Frequency : 12.45 : 24.60 Hz
 Damping : 5.47 : 5.80 %



(B) Type B형에 대한 1, 2차 모우드 형상

Fig.14 Type A, B형에 대한 모우드 형상

3. 실험결과에 대한 고찰 및 결론

기존 가동중이거나 건설중인 정밀 반도체 공장의 3가지 유형의 격자보에 대하여 대형 충격가진기를 이용하여 실험적으로 동특성을 측정/분석하였다. 반도체 공장에서 일반적으로 사용하고 있는 Utility 장비로는 대형 공조기와 모터, 펌프등이 주류를 이루고 있다. 이들 진동 유발장비의 가진 주파수는 대개 20~30Hz 사이에 있으며, 주된 진동원이 되고 있는 대형 공조기와 모터류는 각각 24Hz와 30Hz부근이다. 그러나 청정실 내부에 설치되는 생산설비는 장비특성에 따라 다르지만 일반적으로 8Hz부근의 진동에 민감한 것으로 알려져 있다. Table 3은 세가지 형태에 대한 전달함수를 8, 24, 30Hz에 대하여 정리하여 격자보의 동적 특성을 비교 하였다.

Table 3. 각 Type별 격자보의 전달함수(mobility) 비교 [단위 : (m/sec²)/N]

Description	측정위치	Frequency [Hz]		
		8Hz	24Hz	30Hz
Type A형	가진점:#57 응답측정점:#57	17 μ	143 μ	127 μ
	가진점:#79 응답측정점:#57	6 μ	102 μ	47 μ
Type B형	가진점:#18 응답측정점:#18	4 μ	81 μ	124 μ
	가진점:#24 응답측정점:#18	3 μ	71 μ	114 μ
Type C형	가진점:#10 응답측정점:#10	.	29 μ	168 μ
	가진점:#4 응답측정점:#10	.	20 μ	148 μ

- 3가지 형태의 격자보에서 동일한 진동원을 가진 생산설비가 설치될 경우 진동허용치를 만족하기 위해서는 C형이 A형보다 10정도의 동적저항을 가져야하고 B형은 2배정도 동적저항이 필요하다. 그러나 비슷한 위치에서 전달함수를 비교할 때 8Hz에서는 만족하고 있지만 24, 30Hz에서는 만족하지 못할뿐만 아니라 더 나쁜 상황이다. 이는 3가지 형태의 격자보의 규모를 볼때 C형이 비경제적인 설계로 판단된다.

- 반도체 공장에서 사용되는 장비의 가진 주파수가 보통 30Hz 이하이므로, 격자보의 1차 진동모우드를 30Hz 이상으로 할 필요가 있다. 이는 격자보의 질량이나 보의 크기를 증가시키는 것보다는 국부적으로 지지기둥을 많이 설치하는 것이 내부진동 제어에 유리할 것으로 판단된다.

- 격자보에 미치는 진동원은 지반 및 건물기초를 통하여 전달되는 외부진동과 청정실 내의 생산설비와 제품의 이송, 보행등에 의한 내부진동으로 구별된다. 외부진동원에 의한 격자보의 진동응답은 지반의 전파특성, 기초의 동적특성등의 복합적인 요인에 의하여 결정되지만, 내부진동에 의해서는 격자보 상에 설치되는 진동원의 위치와 격자보의 동적특성을 지배적인 인자로 결정된다. 물론, 실험적인 방법에 의한 격자보의 동적특성 파악은 엄밀한 의미에서 주변 모든 동적상황이 관련된 결과지만 대형 반도체공장 전체를 실험적으로 동적 해석하기는 어렵다. 그리고 초기 설계단계에서는 실험모델이 존재하지 않기 때문에 정확하고 신뢰성 있는 이론적해석 모델의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. SMS STAR Theory and Application, Issue A:25 January 1990.
2. D.J.Ewins, Modal Testing, Theory and Practice, Research studies press Ltd., Letchworth,herts, England.
3. ANSI S2.32 - 1982, Methods for the Experimental Determination of Mechanical Mobility, Part II.
4. 이흥기, 권형오, 구조물의 실험적 진동예측기술에 관한 연구, '92 추계학술대회 논문집
5. Sang Kyu Park, Hong Ki Lee and Hyeong Oh Kweon, Vibration Control of Synchrotron right Source Building Using Experimental Modal Analysis, ASIA-Pacific Vibration Conference '93, November 1993, Session : Control & Measurement in Mechanical Systems.