

반도체 초정밀장비의 진동허용규제치를 고려한 지지구조의 동특성 개선에 관한 연구

손성완* · 이홍기* · 백재호*

A Study on the Structural Dynamic Modification of Sub-structure of Clean Room Considering Vibration Criteria

Son Sung Wan*, Lee Hong Ki*, and Baek Jae Ho*

ABSTRACT

In the case of a vibration sensitive equipment, it require a vibration free environment to provide its proper function. Especially, lithography and inspection device, which have sub-nanometer class high accuracy and resolution, have come to necessity for producing more improved Giga Class semi conductor wafers. This high technology equipments require very strict environmental vibration criteria in proportion to the accuracy of the manufacturing. In this paper, the dynamic analysis and modal test were performed to evaluate the dynamic properties of the constructing clean room structure. Based on these results, a structural dynamic modification(SDM) were required to satisfy the vibration allowable limit for precession machine. Therefore, in order to improve the dynamic stiffness of clean room structure, the VSD system which can control the force applied on structure, were adopted and its utility were proved from dynamic test results of the improved structure after a modification work.

Key Words : vibration sensitive equipment, vibration criteria, dynamic analysis and modal test, structural dynamic modification(SDM), VSD system

1. 서 론

진동에 민감한 정밀생산 및 정밀측정/검사장비를 갖추고 있는 공장구조물을 설립하는 경우에는 공장구조물의 설계 초기단계에서부터 공정에 사용되는 각종 정밀장비의 정상 운용을 위한 가장 우선적인 기초조건으로 정밀장비업체로부터 제시되는 진동허용규제치를 만족할 수 있도록 공장내 청정실(Clean Room: C/R) 구조물의 진동측면에 대한 최적의 환경을 구현할 수 있도록 동적(動的) 특성을 검토해야만 한다. 통상적으로 이러한 동적설계조건을 만족시켜주기 위하여서는 두가지 관점에서 설계가 이루어진다. 첫 번째로 정밀장비의 외부로부터 유입되는 진동에 대한 진동절연을 위하여 진동전달률 이론을 적용하여 방진효율의 산출로 진동저감대책을 수행하는 것이며 두 번째로 정밀장비에서

발생하는 동하중에 대한 공장구조물에 대한 동적설계를 수행하는데에 최적의 구조물 동특성을 구현해 주는 방법으로써 주로 구조물 동특성 변경 SDM(Structural Dynamic Modifacation)방법이 활용된다.

이에, 본 연구에서는 TFT-LCD를 생산하기 위해 필요한 가장 중요한 핵심 부품인 Photo Mask를 생산하기 위해 건축중인 공장구조물이 공장내 생산공정에 사용되는 각종 정밀장비에 대한 진동허용규제치를 만족할 수 있는 동적 강성의 확보 여부를 평가하기 위하여 건축중인 건물에 대한 동적 해석 및 실험을 통하여 구조물의 동특성을 분석 하였으며 그 결과를 바탕으로 공장 구조물내 청정실에 설치될 정밀장비의 원활한 운영을 위해서 구조물이 만족해야할 동특성 허용규제치를 결정하고, 이를 만족할 수 있는 저감대책을 준 경험적 기법을 이용한 동적해석을 바탕으로 구조물의 가해지는 하중을 감지할수 있는 VSD를 장착하여 구조물 동적 개선 대책을 수행하고 동적 실험을 수행하여 개

*알엠펜스 테크놀로지 주식회사

선대책에 대한 유용성을 확인하였다.

2. 구조물 동적 허용치의 결정

청정실내에 설치되어 운용되어지는 주요정밀장비에 대한 진동허용규제치 및 동특성허용규제치를 정밀장비 Maker로부터 확보하였으며 이를 기초로 설립되어질 청정실내 구조물에서 유지되어야 할 진동허용규제치 및 동특성허용규제치에 대한 설계목표치를 결정하였으며 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 1. Vibration and Dynamic Stiffness Criteria of Precision Equipments

Description Item	Vibration criteria & Dynamic Stiffness
Maskwrite 1100	<0.1 cm/s ² (~8 Hz) <25 μm/s (8 Hz ~)
Inspection system (51MD73HS)	<0.1 cm/s (~8 Hz) <25 μm/s (8 Hz~)
Repair (KUBOTEC)	<0.03 cm/s (~8 Hz) <6 μm/s (8 Hz~)
Registration	<0.1 cm/s (~8 Hz) <25 μm/s (8 Hz~)
COATER	수직진동: 3.18 gal(rms) 수평진동: 1.06 gal(rms) 동강성허용규제치: 1.5×10 e-5 m/s ² /N(10 Hz) 1.0×10e-3 m/s ² /N(100 Hz)

¹상기 데이터는 Maker에서 제시됨.

²Coater 장비는 진동을 발생시키는 장비로서 동적 강성 보강과 제진대 및 방진대책이 필요

Table 2. Vibration Criteria of Clean Room Structure

Description 위치	속도 (μm/s)	주파수범위 (Hz)	비고
제진대	12~25	8~80	rms value (3축)
격자보	6	8~80	rms value (3축)

Table 3. Dynamic Stiffness Criteria of Clean Room

Design Dynamic Mobility(point)
Criteria: Dynamic Load 100 N 이상이면 진동허용규제치 6 μm/s 초과하는 동적(動的) 강성 결정
→ Max. Point Mobility=0.06(μm/s)/N 이하 (8~80 Hz)

3. 구조 동적해석 및 실험

3.1. 동적 해석

초기 설계안의 청정실 구조물의 동적 특성 평가하기 위해 청정실 구조를 대표할 수 있으며 최대 취약 구조 부위를 선정하고 이 위치에서 주파수별 단위하중에 대한 응답(조화해석: Harmonic Analysis)을 수행하였다. 초기 설계안의 전체 구조를 살펴보면 주기동의 간격이 아래의 Fig. 1과 같이 7m×8.7m와 8m×8.7m로 구분된다. 격자보의 수직응답에 대한 동적 특성중 1차 굽힘 모드에 대해 가장 취약한 부분인 중앙지점에서의 응답

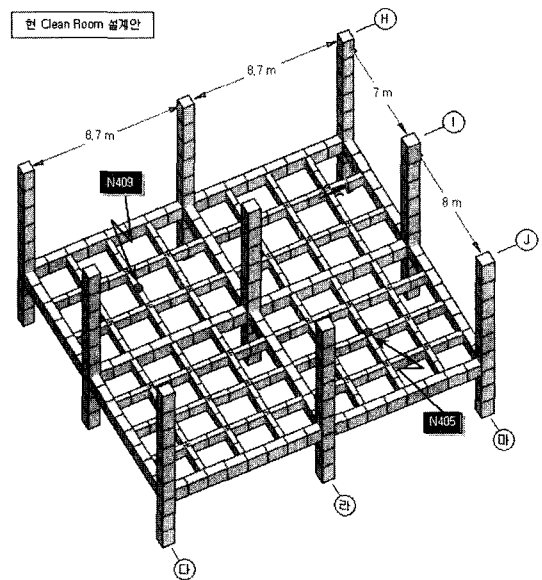


Fig. 1. Basic Design Modeling for Analysis before counter-measure

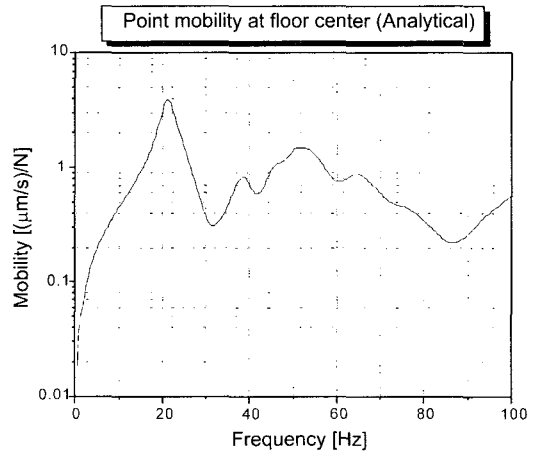


Fig. 2. Point Mobility at Floor Center

을 계산하였다.

조화해석(Harmonic Analysis)을 수행한 결과로 ‘라~마’, ‘H~G’ Area에 위치한 격자보의 중앙지점(N405)에서 단위하중에 대한 진동응답(Point Mobility)을 구하였으며 1차 굽힘모드의 탁월주파수가 20 Hz 부근에서 나타났으며, 이때의 Point Mobility는 약 3.85[$\mu\text{m/s/N}$]으로 예측되었다(Fig. 2 참고). 이는 동적설계목표치를 초과하고 있는 수준이다.

3.2. 동적 실험

실험적으로 직접 청정실 구조물의 동강성을 얻기 위하여 ‘라~마’, ‘H~G’ 영역에 위치한 격자보에서 동특성 실험을 수행하였으며, 실험방법은 Ch 1(Driving Point)을 No 07에 고정시켜 Impact Hammer(충격해머)를 옮겨가며 충격력을 가하였으며, Ch 2을 No 01~20에 가속도 센서를 옮겨가며 Ch 1, 2 신호를 동시 측정하여 Frequency Response Function(FRF)을 구하였다.

실험시 신호 분석환경은 아래와 같다.

- ① Trigger Mode: Level
- ② No of Average: 5
- ③ Time Span: 4 sec(2048)
- ④ Frequency Span: 200 Hz(801)
- ⑤ Average Method: Linear
- ⑥ Windows: Force/Exp
- ⑦ Overlap: Retrigger

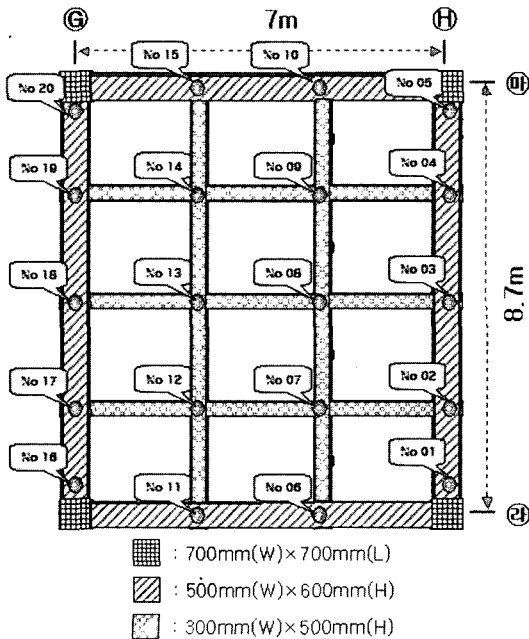


Fig. 3. Dynamic test area & dimension of sub-structure

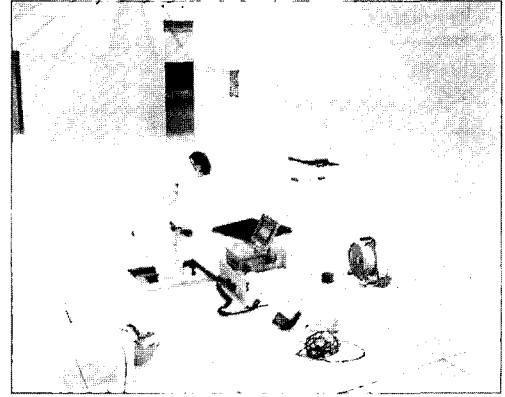


Fig. 4. View of dynamic test of sub-structure

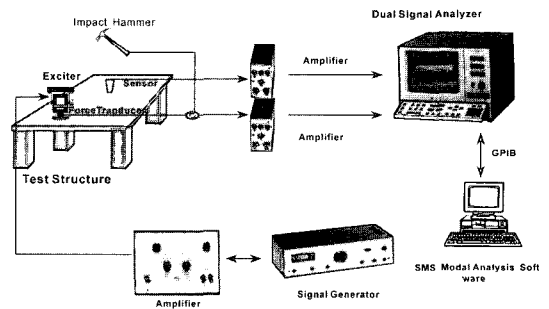


Fig. 5. Schematic diagram of dynamic test

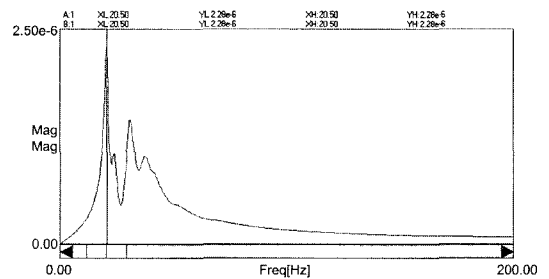


Fig. 6. Point Mobility at Max. response point of sub-structure(Unit : $\mu\text{m/s/N}$)

실험을 수행하여 구한 동특성 데이터를 Star System 상용프로그램을 이용하여 Modal Parameters를 산출하였으며, 격자보에서 최대응답지점(동적해석과 동일지점)에서 Point Mobility를 Fig. 6에 나타내었다.

3.3. 동적해석과 실험의 비교

동적해석과 동적실험의 상관성 및 동특성 개선대책 수립시의 활용을 위하여 실구조물의 동특성 해석과 실험한 동특성 실험 결과를 최대응답 예상지점에서 비교하였다.

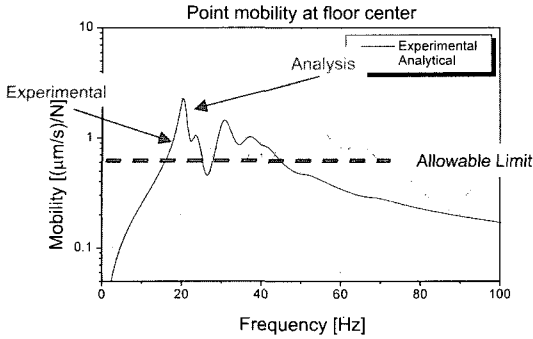


Fig. 7. Comparison of dynamic stiffness between experimental and analysis before modification

Fig. 7에서 알 수 있듯이 해석과 실험결과 모두에서 제시된 동강성 허용치를 초과하고 있는 것으로 나타나고 있으며 특히 격자보의 1차 굽힘 모드 주파수에서 가장 응답이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 해석과 실험결과는 주요 주파수에서 일치되는 피크와 경향을 보여주고 있으며 모빌리티의 진폭은 해석이 실험값 보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. VSD 구성 및 특성

동적 해석 및 실험을 토대로 현재 건설중인 청정실의 격자보의 굽힘 강성을 용이하고 효율적으로 보강하는 개선대책을 수립하기 위하여 구조물에 부가하는 하중 측정 및 조절이 가능한 VSD 시스템을 이용하여 구조물 동특성을 개선하였다.

시스템의 형태는 크게 상부받침대, 회전나사부, 하부받침대, 압력게이지등으로 구성되어 있으며 Fig. 8과 같다.

작동원리는 상부 받침대를 격자보 하부에 직접 설치하거나 격자보 하부에 가로지르는 H-Beam에 밀착시

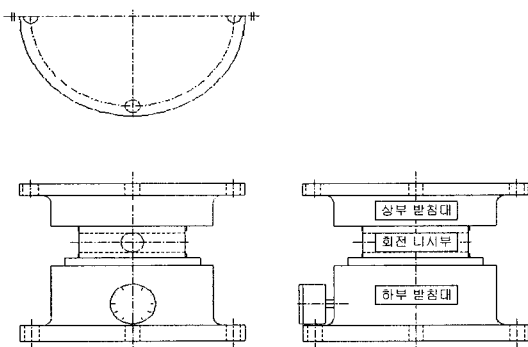


Fig. 8. Composition drawing of VSD

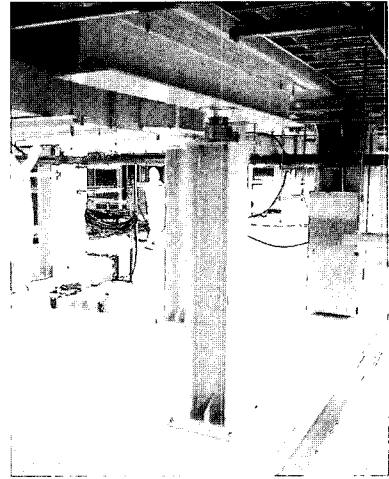


Fig. 9. View of VSD Set Up

키고, 하부 받침대를 지지보강 H-Beam에 고정시킨다. 이후 회전나사부를 돌려 작동시키면 VSD가 상·하로 벌어지면서 상·하부 받침대 상·하단부 각각에 하중을 받는다. 이때 발생하는 압축력에 의하여 유압피스톤 형태로 되어있는 VSD 내부에 유압유가 압축되어 VSD가 받고 있는 힘에 대하여 해당 압력만큼의 유압 게이지에 표시되어 나타나게 된다.

즉, VSD의 회전나사부를 돌려 VSD에 가해지는 하중에 대하여 압력게이지를 이용하여 정량적인 값을 확인하며 조절할 수 있는 장치로 구조물에 정량적으로 가해지는 하중을 조절하여 동특성 변화를 모색하기 위한 장치이다.

5. 구조물 동적 개선을 위한 해석 및 실험 (대책 후)

5.1. 동적개선을 위한 동적 해석

구조물의 동적 성능 개선을 위하여 현장여건상 VSD를 설치하여 실험과 해석을 병행할 수 있는 영역인 '㉠~㉡', '㉢~㉣' 영역의 격자보내 Inspection 정밀장비가 설치되는 부근을 선정하여 VSD를 Set-up한 대표지점(N603)에서 주파수별 단위하중에 대한 응답(조화해석: Harmonic Analysis)을 수행하였다(Fig. 10 참고). 초기 설계안에서 Point Mobility 값이 동적 설계기준치를 만족하지 못하는 상황에서 Fig. 10과 같이 체진대가 설치될 주요영역에 VSD를 사용하여 하부보강을 실시하였다.

조화해석(Harmonic Analysis)을 수행한 결과로 '㉠~㉡', '㉢~㉣' Area 격자보에서 VSD 장치를 Set-up한 대표지점(N603)에서 단위하중에 대한 진동응답(Point

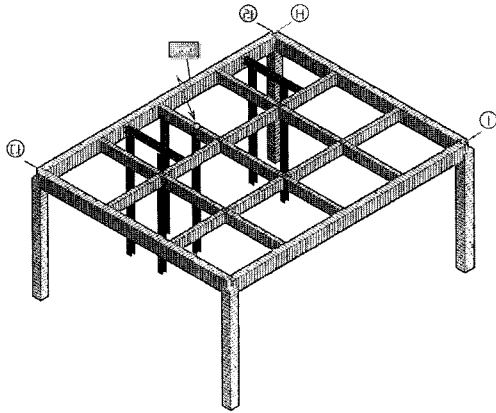


Fig. 10. Basic Design Modeling for Analysis

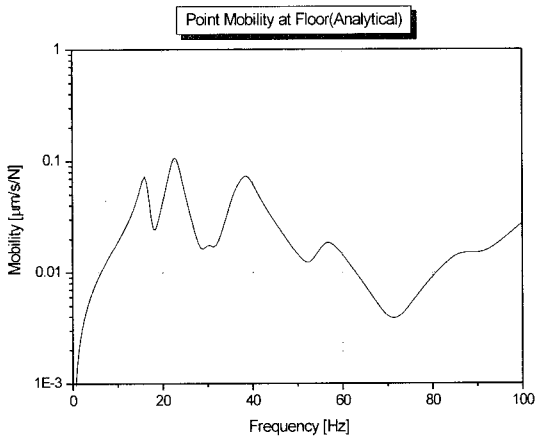


Fig. 11. Analysis Point Mobility at Floor

Mobility)을 구하였으며 Fig. 6.1.2과 같이 20 Hz 부근 전 · 후로 탁월한 Mobility 특성으로 나타났다. 이때의 최대의 Point Mobility는 약 $[0.8 \mu\text{m/s/N}]$ 으로 예측되어 대책전의 동적 해석 및 실험 결과를 고려하면 상기와 같은 대책이 수립될 경우 구조물의 동특성 규제치를 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

5.2. VSD를 이용한 대책 후의 동적 실험

VSD를 이용한 동특성 개선 대책이 시공 된 후 구조물의 동특성 규제치의 만족 여부를 평가 하기 위하여 정밀장비가 설치예정인 영역에서 동특성 실험을 수행하였다. 실험방법은 '㉠-㉡', '㉢-㉣' 영역의 격자보에서 Inspection 정밀장비가 설치예정인 영역에서 VSD-System을 시공후 동특성 실험을 수행하였다. 실험방법은 Ch 1(Driving Point)을 No 01에 고정시켜 Impact Hammer(충격해머)로 충격력을 가하였으며, Ch 2을 No 01에 가속도 센서를 고정하여 Ch 1, 2 신호를 동시

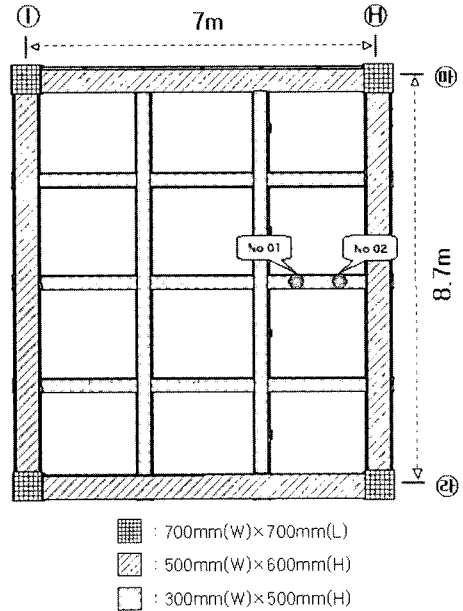


Fig. 12. Dynamic test area & dimension of sub-structure

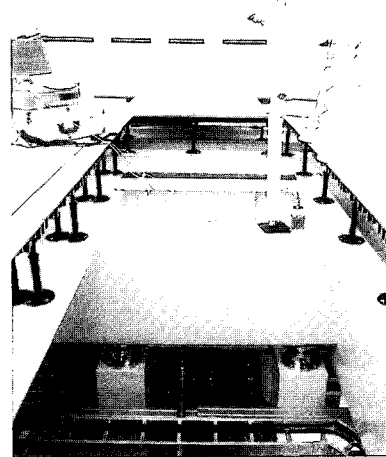


Fig. 13. View of dynamic test for sub-structure

측정하여 Frequency Response Function(FRF: Point Mobility)을 구하였다. No 02에도 No 01과 동일하게 수행하였다.

실험장치는 대책 전과 동일하며 현장전경은 VSD 시스템 설치 전 · 후에 대하여 나타내었다. 본 연구에서는 구조물 상부에 설치되는 장비의 하중을 고려하여 약 5 Ton의 하중을 가하였으며 유압게이지가 25 kg/cm^2 으로 설정된 것으로 확인 할 수 있다(Fig. 14 참고).

VSD를 이용하여 구조물의 동특성 개선 대책을 시공 한 후 정밀장비가 설치될 격자보 상부에서 VSD Set-

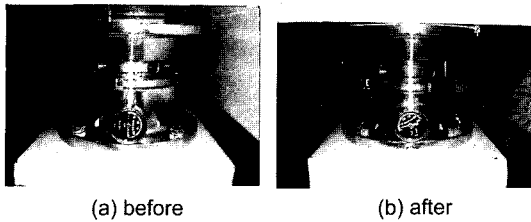


Fig. 14. Pressure Condition before & after VSD set-up

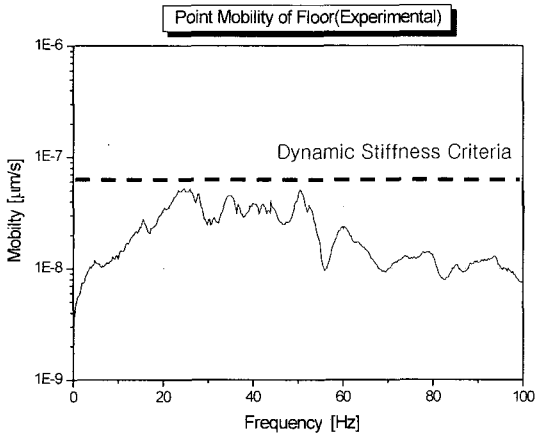


Fig. 15. Dynamic Test Result of Sub-Structure after modification work

Up 후 Point Mobility를 구하였다.

동특성 실험을 VSD를 설치한 격자보 상부에서 VSD Set-Up 후 Point Mobility를 구하였으며 아래와 같이 해석결과와 비교하여 나타내었다. 대책전에 지배적으로 굽힘 1차 모드가 큰 지점을 VSD를 설치하므로써 설치지점이 구조물의 경계부(Boundary)를 이루게 되어 실험결과에는 뚜렷한 모드특성이 명확히 나타나고 있지 않음을 볼 수 있다. 저주파수(10~50 Hz) 부근에서 Mobility 양상을 실험과 해석적 결과를 비교하여 보면 유사한 형태를 이루며 동적 실험 결과 예견한 대로 동적설계 목표치를 만족하고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 정밀장비가 설치예정인 청정실 구조물에 대하여 정밀장비 Maker에서 제시하는 동적설계 기준치의 만족여부를 파악하기 위하여 동적해석 및 실험을 통하여 구조물의 동특성을 파악하였다. 결과로 초기 설계안의 구조물에서는 동적설계 기준치를 만족하지 못하고 있어 구조물의 동특성을 개선시키기 위하여 초기 설계안 구조에서 얻어진 해석 및 실험데이터를 이용하여 구조물의 동특성을 개선시킬 수 있는 대책을 제시하였다. 설치된 구조물의 동특성 개선을 위해 청정실 격자보 하부의 지지강성의 전달을 효과적이고 실용적으로 보강하기 위하여 지지구조가 가해지는 하중을 측정하고 변경시킬 수 있는 VSD 장치를 사용하였다.

뿐만 아니라 대책이 수행되고 난 후 구조물의 동적 실험을 통하여 하중측정 시스템을 이용한 구조물 동적 개선 대책이 허용치를 만족하고 있음을 증명함으로써 상기내용의 대책에 대한 유용성을 확인하였다.

참고문헌

1. Amick, H., and Bayat, A. "Dynamics of Stiff Floors for Advanced Technology Facilities", Proceedings of 12th ASCE Engineering Mechanics, pp. 318-321 (1988).
2. Amick, H., Hardash, S., Gillett, P., and Reaveley, R.J., "Design of Stiff, Low-vibration Floor Structures", Proceedings of International Society for Optical Engineering, pp. 180-191 (1988).
3. Gordon, C.G. "Vibration prediction and Control in Microelectronics Facilities", Proceedings of Inter-noise 96, pp. 149-154 (1996).
4. Ewins, D.J. "Modal Testing: Theory and Practice", John Wiley & Sons INC (1995).
5. Dynamics, S. "Star System Reference Manual", Spectral Dynamics, INC (1994).
6. 백재호, 이흥기, 서항식, "제진대의 진동허용규제치에 기준한 동특성 규명에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 869-874 (2001).