

# 반도체 크린룸 구조물의 하중 측정 시스템을 이용한 동특성 개선에 관한 연구

°백재호\*, 이홍기\*, 손성완\*

## A Study on the Structural Dynamic Modification of sub-structure of Clean Room using VSD System

Jae-Ho Baek, Hong-Ki Lee, Sung-Wan Son

### ABSTRACT

진동에 민감한 각종 정밀장비를 갖추고 있는 공장구조물은 설립하는 설계 초기단계에서부터 정밀장비가 정상 운영을 위하여 공장구조물의 진동허용규제치 및 동특성허용규제치를 결정해야 한다. 이를 만족할 수 있도록 공장구조물 설계시 진동측면에 대하여 동적(動的) 특성을 검토해야만 한다. 이때 반드시 필요한 자료로 정밀장비 Maker에게서 제공되는 진동허용규제치 및 구조물의 동특성허용규제치등 설치시방의 상세한 자료를 제공받아야 한다. 이러한 설계조건을 만족시켜주기 위한 방안으로 외부에서 정밀장비로 유입되는 진동에 대한 진동절연을 위하여 진동전달률 이론을 적용하여 방진효율 산출하는 방법과 정밀장비에서 발생하는 동하중을 고려하여 공장구조물에 대한 동적설계를 수행하는 것으로, 구조물 동특성을 요구되는 만큼 구조물 동특성 변경 SDM(Structural Dynamic Modifacation)방법이 주로 활용된다. 이에 본 연구에서는 앞서 언급한 구조물의 동적설계시 후자조건인 구조물의 동특성을 변경하고자 하는 경우에 실구조물에 하중을 정량적으로 조절하며 가할 수 있는 VSD 시스템을 이용하여 구조물의 동특성을 변화시키는 것을 동적해석으로 예측하였고, 현장에서 실제 동적실험으로 구한 결과를 동적설계 목표치와 비교하여 유용성에 대하여 확인하였다.

### 1. 서 론

진동에 민감한 정밀생산 및 정밀측정/검사장비(이하 '정밀장비'라 함)를 갖추고 있는 공장구조물을 설립하는 경우에는 공장구조물의 설계 초기단계에서부터 공정에 사용되는 각종 정밀장비가 정상 운영을 위한 가장 우선적인 기초조건으로 공장구조물의 진동허용규제치를 확보해야만 한다. 이를 만족할 수 있도록 공장내 청정실(Clean Room : C/R) 구조물의 진동측면에 대한 최적의 환경을 구현할 수 있도록 동적(動的) 특성을 검토해야만 한다. 이는 정밀장비 제작자에게서 제공되는 정밀장비 개개에 대한 진동허용규제치 및 구조물 동특성허용규제치등의 진동측면에 대한 설치시방의 상세한 자료를 제공받아야 한다. 이를 기준으로 공장구조물 설계 초기단계에서 공장구조물에서 구현해 주어야할 진동수준 및 동특성을 결정하여야만 한다. 이러한 설계조건을 만족시켜주기 위하여 두가지 방법으로 나뉘어 진다.

첫 번째로 정밀장비의 외부로부터 유입되는 진동에 대한 진동절연을 위하여 진동전달률 이론을 적용하여 방진효율의 산출로 진동저감대책을 수행하는 것이다. 두 번째로 정밀장비에서 발생하는 동하중에 대한 공장구조물에 대한 동적설계를 수행하는데에 최적의 구조물 동특성을 구현해 주기 위하여 구조물 동특성 변경 SDM(Structural Dynamic Modifacation)방법이 주로 활용된다.

이에, 본 연구에서는 TFT-LCD를 생산하기 위해 필요한 가장 중요한 핵심 부품인 Photo Mask를 생산하는 공장구조물의 설립하는 초기에 공장내 생산공정에 사용되는 각종 정밀장비에 대한 진동허용규제치를 확보하여 신속되어질 공장구조물내 청정실에서 구현해 주어야 할 진동수준을 평가하여 최적의 진동허용규제치를 결정하고, 이를 만족할 수 있는 저감대책을 실험을 통한 자료를 확보와 이를 기초로 한 준경험적 기법을 이용한 FEM을 통하여 VSD를 이용하여 구조물의 가해지는 하중을 정량적인 방법으로 구조물의 동특성 변경을 통한 최적의 동특성 허용규제치를 만족할 수 있는 저감대책을 제안하였다.

\*. RMS TECHNOLOGY CO., LTD.

## 2. 청정실내 구조물 동적 설계 목표치

공장 청정실 구조물의 진동허용규제치를 결정하기 위해서는 가장 최우선으로 해야 할 것이 생산 및 검사공정에 설치되는 각종 생산·검사장비 진체 장비에 대한 진동허용규제치 및 동특성허용규제치를 수집·정리하고 이에 대한 비교·검토, 분석 및 평가를 하여 설립하고자 하는 공장구조물의 동적 설계 목표치를 결정한다. 보다 정확하고 합리적인 목표치의 결정은 설비의 진동을 제어하기 위한 기본자료가 될 뿐만 아니라 초기설계 단계에서부터 진동문제에 대하여 사전예방과 과다한 방진설계 및 구조적인 동적 설계의 비효율적인 측면을 배제할 수 있다.

이에, 청정실내에 설치되어 운용되어지는 주요정밀장비에 대한 진동허용규제치 및 동특성허용규제치를 정밀장비 Maker로부터 확보하였으며 이에 대한 내용은 표 2.1과 같다. 이를 기초로 설립되어질 청정실내 구조물에서 유지되어야 할 진동허용규제치 및 동특성허용규제치에 대한 설계목표치를 결정하였으며 표 2.2, 2.3과 같다.

표 2.1 정밀장비의 진동 및 동특성 허용규제치

Item	Description	Vibration criteria & Dynamic Stiffness
Maskwrite 1100		<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 0.1cm/s<sup>2</sup> (~8Hz)</li> <li>&lt; 25μm/s (8Hz ~)</li> </ul>
Inspection system (51MD73HS)		<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 0.1cm/s<sup>2</sup> (~8Hz)</li> <li>&lt; 25μm/s (8Hz ~)</li> </ul>
Repair (KUBOTEC)		<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 0.03cm/s<sup>2</sup> (~8Hz)</li> <li>&lt; 6μm/s (8Hz ~)</li> </ul>
Registration		<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 0.1cm/s<sup>2</sup> (~8Hz)</li> <li>&lt; 25μm/s (8Hz ~)</li> </ul>
COATER		<ul style="list-style-type: none"> <li>수직진동: 3.18gal(rms)</li> <li>수평진동: 1.06gal(rms)</li> <li>동강성허용규제치: 1.5×10e-5 %g/N(10Hz) 1.0×10e-3 %g/N(100Hz)</li> </ul>

주) 1. 상기 데이터는 Maker에서 제시됨.  
2. Coater 장비는 진동을 발생시키는 장비로서 동적 강성 보강과 제진대 및 방진대책이 필요.

표 2.2 청정실내 진동허용규제치 동특성허용규제치

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

표 2.3 청정실내 동특성 허용규제치

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

## 3. 청정실 구조 특성 및 동적설계 방향

### 3.1 청정실 구조 특성

본 연구에서 동적설계를 수행한 청정실 격자보 및 주요 정밀장비 제진대의 개념구성은 그림 3.1.1과 같다. 격자보 형태는 '8.7[m]×8[m]'가 하나의 영역으로 구분되며, 종방향 ㉔~㉞열, ㉔~㉞행의 형태로 되어 있다.

청정실 영역내에 설치되는 정밀장비는 Writer 2대, Inspection 1대, Repair 1대, Regi 1대가 설치예정이며 청정실 내 위치는 그림 3.1.3와 같고, 각각의 제진대 초기 설계안에 따른 형태는 그림 3.1.2과 같다.

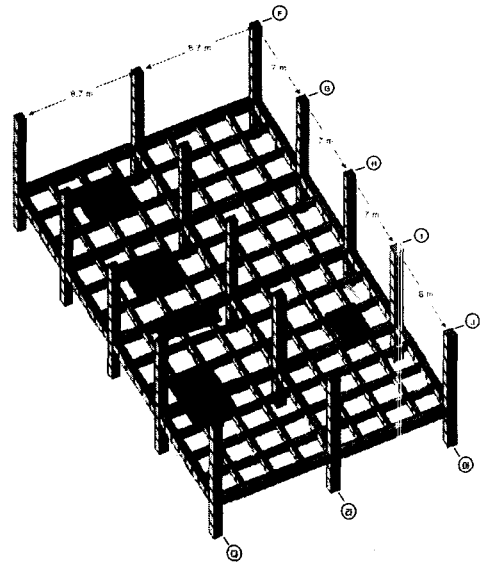


Fig 3.1.1 Basic design model of sub-structure and concrete pad in clean room

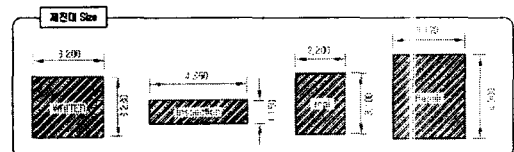


Fig 3.1.2 Dimension of Concrete Pad in clean room



(2) 해석 결과 : 조화해석(Harmonic Analysis)을 수행한 결과로 '라~마', 'H~G' Area에 위치한 격자보의 중앙지점(N405)에서 단위하중에 대한 진동 응답(Point Mobility)을 구하였으며 1차 굽힘모드의 탁월주파수가 20Hz 부근에서 나타났으며, 이때의 Point Mobility는 약  $3.85[\mu\text{m/s/N}]$ 으로 예측되었다.(그림 4.1.2 참고) 이는 동적설계목표치를 초과하고 있는 수준이다.

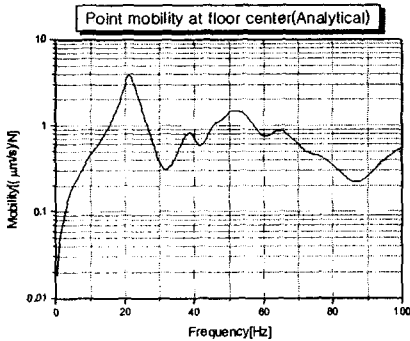


Fig 4.1.2 Point Mobility at Floor Center

#### 4.2 동적 실험

(1) 실험방법 : '㉔~㉖', '㉑~㉓' 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.

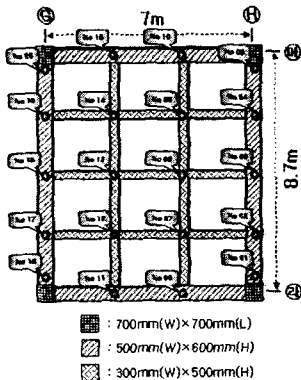


Fig 4.2.2 Dynamic test area & dimension of sub-structure

(2) 동특성 실험 장치 구성도 및 현장진경

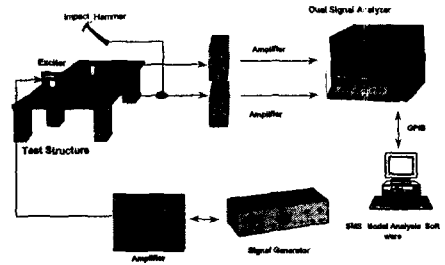


Fig 4.2.4 Schematic diagram of dynamic test

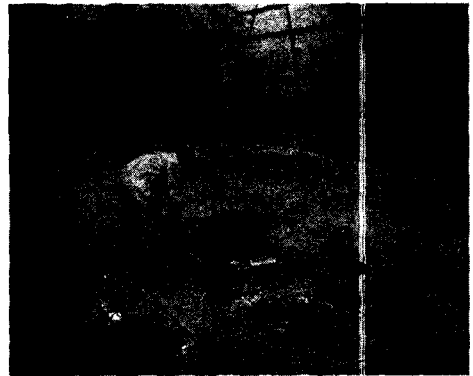


Fig 4.2.5 View of dynamic test of sub-structure

(3) 동특성 실험 분석 환경 :

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

(4) 동특성 실험 결과 : 실험을 수행하여 구한 동특성 데이터를 Star System 상용프로그램을 이용하여 Modal Parameters를 산출하였으며, 결과는 다음과 같다. 그리고, 격자보에서 최대응답지점(동적해석과 동일지점)에서 Point Mobility를 산출하였다.

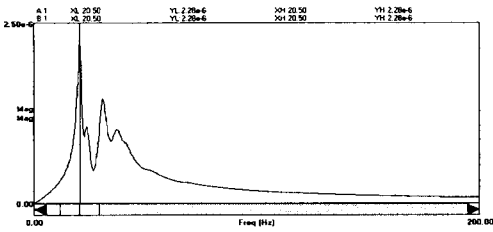


Fig 4.2.5 Point Mobility at Max. response point of sub-structure(Unit :  $\mu\text{m/s/N}$ )

### 4.3 동적 해석 및 실험의 비교

동적해석을 통한 결과가 실구조물 동특성 결과의 신뢰성 확인을 위하여 실제 실험한 동특성 실험 결과를 최대응답 예상지점에서 비교하였다. 결과는 아래 그림 4.3.1과 같이 Point Mobility로 나타내었으며 주요주파수에서 유사한 형태로 나타났다. 이는 동적설계 목표치를 만족하지 못하는 수준으로 구조물에 동특성 변경이 필요하다.

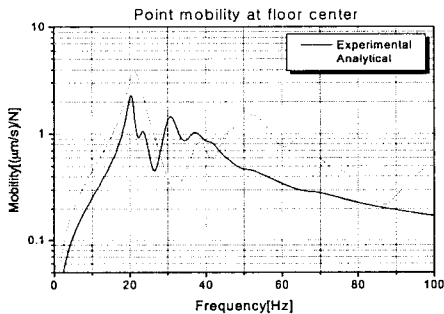


Fig 4.3.1 Compare between experimental and analytical response before VSD set-up

## 5. VSD 구성 및 특성

VSD 형태는 크게 상부 받침대, 회전나사부, 하부 받침대, 압력게이지등으로 구성되어 있으며 그림 5.1과 같다.

작동원리는 상부 받침대를 격자보 하부에 직접 설치하거나 격자보 하부에 가로지르는 H-Beam에 밀착시키고, 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 압력만큼이 유압게이지에 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. VSD에 가해지는 하중과 유압게이지 정량적 관계는 하중·변위 교정기에서 교정을 하여 하중에 따른 압력의 교정데이터를 확보한다.

VSD 현장설치에 대한 이해를 돕기위해 설치도면 및 현장설치 전경사진을 그림 5.2, 5.3에 나타내었다.

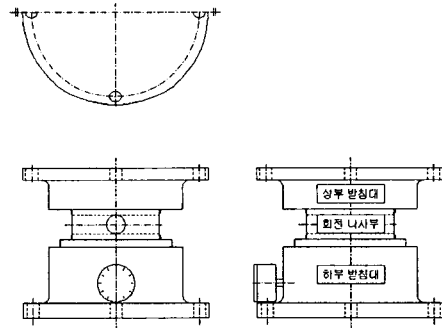


Fig 5.1 Composition drawing of VSD

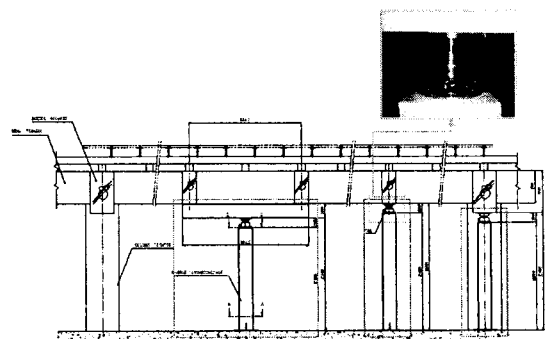


Fig 5.2 Drawing of VSD set-up for sub-structure

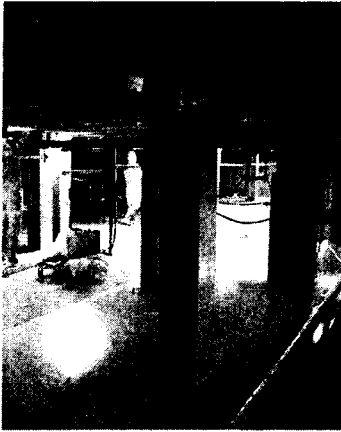


Fig 5.3 View of VSD set-up for sub-structure

## 6. 구조물 동적 해석 및 실험Ⅱ(대책 후)

### 6.1 동적 해석

(1) 모델링 및 해석 방법 : 현장여건상 VSD를 설치하여 실험과 해석을 병행할 수 있는 영역인 '㉔~㉔', '㉕~㉕' 영역의 격자보내 Inspection 정밀장비가 설치되는 부근을 선정하여 VSD를 Set-up한 대표지점(N603)에서 주파수별 단위하중에 대한 응답(조화해석 : Harmonic Analysis)을 수행하였다.(그림 6.1.1 참고)

초기 설계안에서 Point Mobility 값이 동적 설계 기준치를 만족하지 못하는 상황에서 그림 6.1.1과 같이 제진대가 설치될 주요영역에 VSD를 설치하였다.

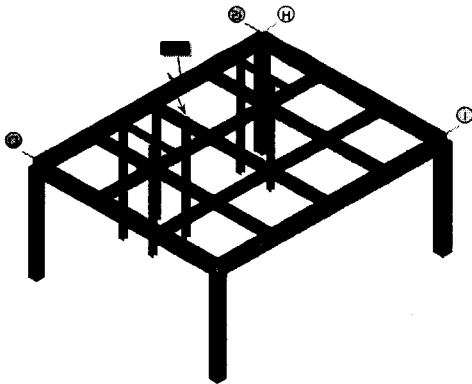


Fig 6.1.1 Basic Design Modeling for Analysis

(2) 해석 결과 : 조화해석(Harmonic Analysis)을 수행한 결과로 '㉔~㉔', '㉕~㉕' Area 격자보에서 VSD 장치를 Set-up한 대표지점(N603)에서 단위하중에 대한 진동응답(Point Mobility)을 구하였으며 그림 6.1.2과 같이 20Hz 부근 전·후로 탁월한 Mobility 특성으로 나타났다. 이때의 최대의 Point Mobility는 약  $[0.8\mu\text{m/s/N}]$ 으로 예측되었다.

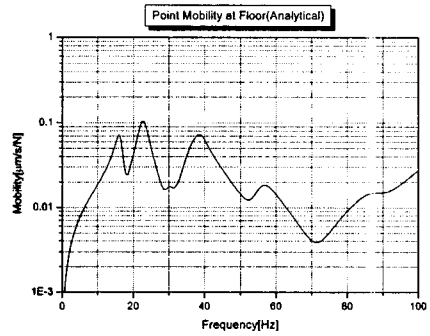


Fig 6.1.2 Point Mobility at Floor

### 6.2 동적 실험

(1) 실험방법 : '㉔~㉔', '㉕~㉕' 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 측정하여 Frequency Response Function(FRF : Point Mobility)을 구하였다. No 02에도 No 01과 동일하게 수행하였다.

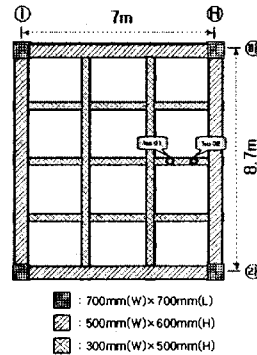


Fig 6.2.1 Dynamic test area & dimension of sub-structure

(2) 동특성 실험 장치 구성도 및 현장전경 : 실험장치는 대책 전과 동일하며 현장전경은 VSD 시스템 설치 전·후에 대하여 나타내었다. 본 연구에서는 약 5Ton의 하중을 가하였으며 유압게이지가  $25\text{kg/cm}^2$  으로 설정된 것으로 확인 할 수 있다.(Fig 6.2.5 참고)

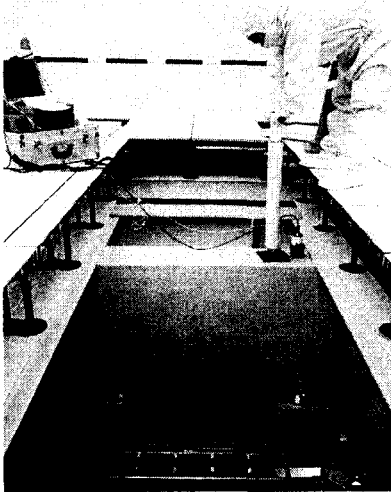


Fig 6.2.2 View of dynamic test for sub-structure

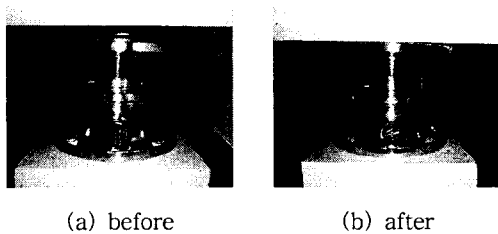


Fig 6.2.3 View of before & after VSD set-up

(3) 동특성 실험 분석 환경 : 분석환경 또한 대책 전과 동일하게 수행하였다.

(4) 동특성 실험 결과 : 동특성 실험을 VSD를 설치한 격자보 상부에서 VSD Set-Up후 Point Mobility를 구하였다.

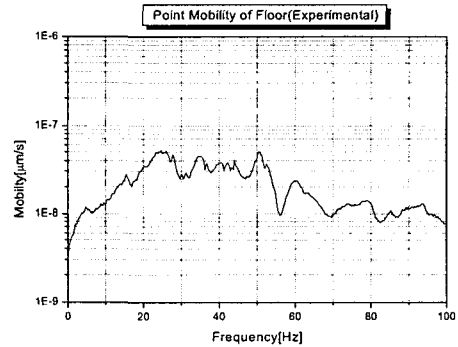


Fig 6.2.4 Point Mobility after VSD set-up

### 6.3 동적 해석 및 실험의 비교

실구조물에 VSD를 Set-up한 후에 구조물의 동특성을 해석과 실험결과에 대하여 비교하였다.(그림 6.3.1 참고) VSD를 설치한 지점이 실구조물 경계부(Boundary) 부근으로 실험결과에는 모드특성을 나타내는 형상이 명확히 나타나지는 않았으나 해석결과로 확인할 수 있다. 저주파수(10~50Hz) 부근에서 Mobility 양상을 실험과 해석적 결과를 비교하여 보면 유사한 형태이다. 동적설계 목표치를 해석적 결과로는 초과하고 있지만, 실험적인 결과로는 동적설계 목표치를 만족하고 있는 것을 알 수 있다.

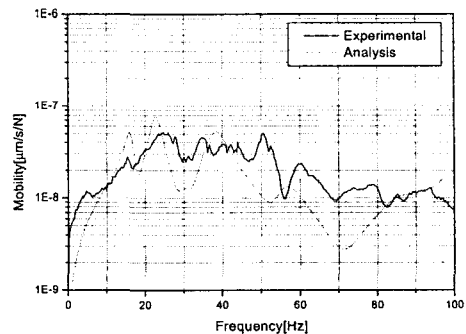


Fig 6.3 Compare between experimental and analytical response after VSD set-up

## 7. 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 만족하기 못하고 있어 구조물의 동특성을 개선시키기 위하여 초기 설계안 구조에서 얻어진 해석 및 실험데이터를 이용하여 구조물의 동특성을 개선시킬 수 있는 대책을 제시하였다. 이는 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 동적실험을 수행하여 하중측정 시스템을 이용한 구조물 동적 설계치를 만족시키는 개선효과가 나타났으며 상기내용의 대책에 대한 유용성을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) Hal Amick and Ahmad Bayat, 1998, "Dynamics of Stiff Floors for Advanced Technology Facilities", Proceedings of 12th ASCE Engineering Mechanics , pp. 318~321.
- (2) Hal Amick, Steve Hardash, Paul Gillett, and Ronald J. Reaveley, 1998, "Design of Stiff, Low-vibration Floor Structures", Proceedings of International Society for Optical Engineering, pp. 180~191.
- (3) Colin G. Gordon, 1996, "Vibration prediction and Control in Microelectronics Facilities" , Proceedings of Internoise 96, pp. 149~154.
- (4) D. J. Ewins, 1995, "Modal Testing : Theory and Practice", John Wiley & Sons INC.
- (5) Spectral Dynamics, 1994, "Star System Reference Manual", Spectral Dynamics, INC.
- (6) 백재호, 이흥기, 서항석, 2001, "체진대의 진동허용규제치에 기준한 동특성 규명에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 869~874.