

<논 문>

초정밀 측정/가공 장비의 외부진동에 대한 상대변위의 추출과 진동성능 평가에 관한 연구

A Study on the Vibrational Reduction Evaluation and the Relative Displacement in the External Vibration of Precision Measuring System

전 종 균[†] · 엄 호 성* · 김 강 부** · 원 영 재***

Chong-Keun Chun, Ho-Sung Aum, Kang-Boo Kim and Young-Jae Won

(2001년 10월 8일 접수 : 2001년 11월 28일 심사완료)

Key Words : Clean Room(청정실), PDP(plasma display panel), Relative Displacement(상대변위), Precision Measuring System(초정밀 측정 장비)

ABSTRACT

Generally, there are laser operating equipments(aligner, stepper) and electronic microscope(SEM, TEM) as a high precision manufacturing and inspection equipment in semiconductor production companies, precision examination and measuring laboratories. Mostly, these equipments are characterized by projection and target part. The relative displacements between projection and target part are dominant roles in vibrational problem in these precision equipments. These relative displacements are determined by the position of incoming vibration and the difference of vibration response in projection and target part. In this study, the allowable vibrational limits are suggested and the vibrational reduction plans are proposed by measurement and analysis of vibration phenomenon in the Clean Room in PDP(plasma display panel) production building. The vibration performance is evaluated by comparison relative displacements between projection and target part before/after the vibration isolation plan.

1. 서 론

TFT-LCD 및 PDP(plasma display panel) 제조산업은 가공 glass 크기의 증가로 제조 공정에서 발생하는 내외부의 유체의 교란이나 진동에 대하여 민감하게 거동하기 때문에 가공과 검사공정에 진동허용규제

치를 명확히 할 필요가 있다. 그리고 glass의 가공 크기에 따른 진동허용규제치의 결정에 대한 명확한 데이터를 확보함으로써 진동으로 기인하는 문제를 설계 단계에서부터 대책을 강구할 필요가 있다. 일반적으로 반도체 공장과 정밀검사, 측정실험실에 사용되는 고정밀 생산장비는 레이저가공 장비(aligner, stepper)가 있고, 전자현미경(SEM, TEM)등과 같은 검사, 측정 장비가 있다. 기타 분야에는 고용량 HDD 및 생산설비, 고밀도의 CD-driver 및 CD생산설비, 정밀세포이식 및 수술, 검사 의료장비가 있다. 이러한 장비의 구조적 특성은 대부분 프로젝션부(projection part, optical column)와 타겟부(target part, image stage)로 이루어져 있다. 이들 장비의 진동허용규제를 결정

[†] 책임저자, 정회원, 선문대학교 기계 및 제어공학부
E-mail : ckchun@sunmoon.ac.kr

Tel : (041) 530-2331, Fax : (041) 530-2981

* 정회원, 선문대학교 기계 및 제어공학부

** RMS Technology CO., LTD.

*** 금오공과대학교 대학원, LG-건설 LCD P3

하는 방법은 이러한 구조의 정밀장비에서 진동 문제는 프로젝션부와 타겟부의 상대변위에 의하여 지배되며, 상대변위의 특성은 장비 구조의 유연 진동모드(flexible mode)에 의하여 결정된다. 그리고 프로젝션부와 타겟부 사이에서 진동으로 기인하는 상대진동변위(relative displacement of vibration)는 입력 진동 위치와 프로젝션부, 타겟부 두 위치 사이의 진동응답의 차에 의하여 결정된다.⁽¹⁾ 문제는 방진시스템 상부에 위치한 프로젝션부와 타겟부에 진동을 측정할 경우, 이것이 장비의 성능에 미치는 유연 진동 모드와 장비 전체를 진동시키는 전체 진동모드(global mode)를 분리해야하는 과제가 제기된다. 이것은 장비의 측정 및 가공성과 진동을 직접 측정할 데이터 상에서 불일치문제가 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 실제 전체의 진동상태는 개선되지 않았으면서도 불구하고 장비의 측정 및 가공성이 급격하게 향상되는 원인이 여기에 있다. 이러한 문제를 정량적으로 접근하기 위해서는 프로젝션부와 타겟부에서 동시에 측정할 시간 신호에 대한 차를 구함으로써 상대변위의 크기를 구할 수 있으며, 주파수 영역에서는 위상정보를 고려하여 개개의 주파수에 대한 벡터 합을 구함으로써 진동상대변위가 결정된다. 어떠한 경우에도 동시에 측정할 두 개의 신호가 필요하다는 점을 고려해야 한다.

본 논문에서는 PDP 생산동 빌딩의 C/R(clean room) 내외부에 대한 구조물 및 유틸리티 진동의 현황을 측정/분석하여 정밀측정장비의 진동허용규제치를 결정하고, 진동저감대책을 제안하였다. 또한, 진동저감대책 전(全)/후(後)에 대한 프로젝션부와 타겟부에서의 상대변위를 정량적으로 추출하여 진동영향을 평가하였다.

2. 구조물 동특성 실험 및 해석

2.1 이론적 배경^(2,3)

Fig. 1에서 바닥부 o점에서 p, 바닥부 o점에서 q 점 사이의 동적 전달함수(transfer function)는 바닥부 o점의 입력 가진원에 대한 p, q점의 출력응답(vibration response)을 측정함으로써 실험적으로 구할 수 있으며 여기서 구해진 전달함수를 이용하여 동적 상대 변위를 구할 수 있다. Fig. 1을 2차원 좌표계를 사용하여 나타내면 Fig. 2와 같이 놓을 수 있다.

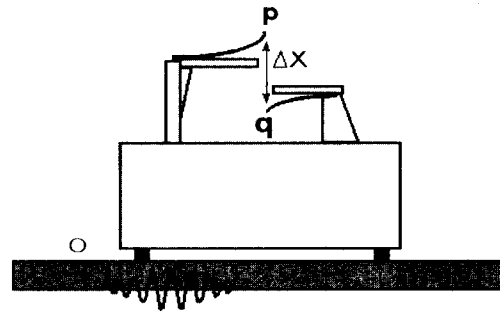


Fig. 1 Schematic diagram of the relative displacement of vibration

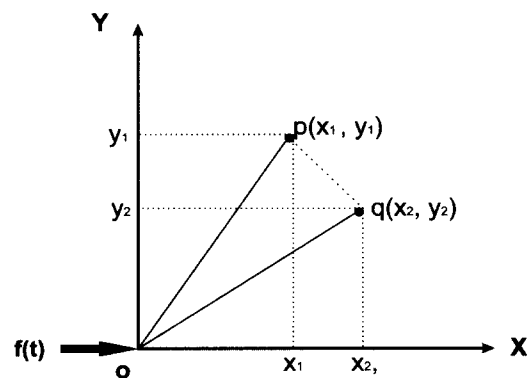


Fig. 2 Geometry of relative displacement

만일 바닥부에서 가진력이 입력되지 않으면 두 점 사이의 정적 상대변위 $|pq|$ 는 식 (1)과 같이된다. 여기서 $\Delta x_s = x_2 - x_1$ 이고 $\Delta y_s = y_2 - y_1$ 이며, 이는 각각 x, y 방향 정적 상대변위 성분이다.

$$|pq| = (\Delta x_s^2 + \Delta y_s^2)^{1/2} \quad (1)$$

점 p와 q가 동일한 연속 구조의 진동계를 구성하고 있고 바닥부로부터 $f(t) = F_0 \cos \omega t$ 가 입력될 경우 점 p와 q는 정지 상태의 위치를 중심으로 구조의 동적 특성에 따라 진동을 하게된다.

이때의 초기 정적(靜的) 상대변위 $\Delta x_s, \Delta y_s$ 와 외부 가진력 주파수 ω 에 대하여 진동상대변위 $\Delta x_v(\omega), \Delta y_v(\omega)$ (relative displacement of vibration)을 고려한 전체 상대변위(total relative displacement)를 $\Delta x_t(\omega), \Delta y_t(\omega)$ 라 하면 아래 식과 같이 되고

$$\begin{aligned} \Delta x_t(\omega) &= \Delta x_s + \Delta x_v \\ \Delta y_t(\omega) &= \Delta y_s + \Delta y_v \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 진동으로 기인하는 x, y 방향 진동상대변위는 p 와 q 점의 차에 의하여 $\Delta x_p(\omega) = x_p(\omega) - x_q(\omega)$, $\Delta y_p(\omega) = y_p(\omega) - y_q(\omega)$ 와 같이 주어진다. 이를 위의 식에 대입하면 식 (3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta x_i(\omega) &= \Delta x_s + \{x_p(\omega) - x_q(\omega)\} \\ \Delta y_i(\omega) &= \Delta y_s + \{y_p(\omega) - y_q(\omega)\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $x_p(\omega)$, $x_q(\omega)$, $y_p(\omega)$, $y_q(\omega)$ 는 각각 점 o 의 입력 $F(t)$ 에 대한 점 p 와 q 의 x 및 y 방향 진동 성분이고 $\{x_p(\omega) - x_q(\omega)\}$, $\{y_p(\omega) - y_q(\omega)\}$ 는 순수 진동으로만 기인하는 점 p 와 q 사이의 x, y 방향 각각에 대한 진동상대변위이다.

2.2 초정밀 장비의 초기 상태 진동측정/분석

PDP는 대화면 및 벽걸이형 TV display에 사용된다. 현재 운용중인 2.5차원 정밀측정장비는 Fig. 3과 같이 하부 구조물 위에 설치되어 있으며, 하부 구조물의 진동 특성에 의하여 비정상적으로 가동된다. 2.5차원 정밀측정장비의 주요 구성은 PDP의 표면 상태를 검사하기 위한 정밀측정장비로써 측정카메라 부분 (projection part)과 PDP가 놓이는 glass table(target part)로 구분된다.

Fig. 4는 청정구역에 설치되어 있는 2.5차원 정밀측

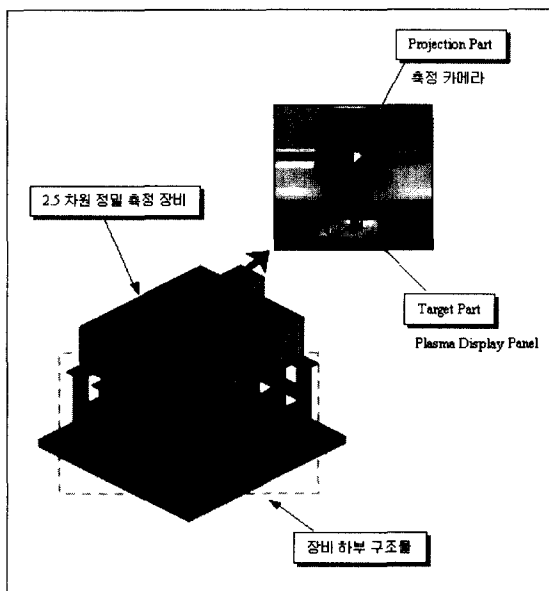


Fig. 3 Schematic diagram of precision measuring system and sub-structure

정장비의 외형 모습이며, Fig. 5는 대책 전 상태에서 2.5차원 정밀측정장비의 하부 구조물 전경이다.

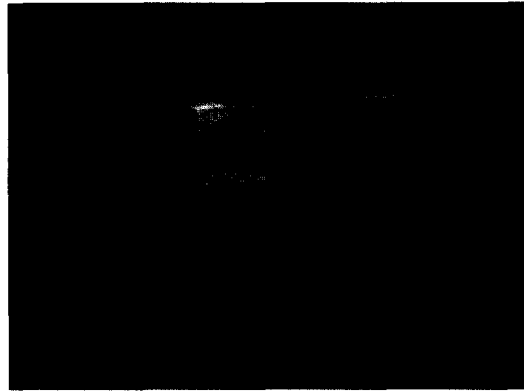


Fig. 4 2.5-dimension precision measuring system



Fig. 5 Sub-structures

2.3 측정방법 및 위치

현재 2.5차원 정밀 측정 장비는 외부진동으로 인하여 정상가동이 이루어지고 있지 않은 상태이다. 이러한 구조물의 현재 진동상태 및 동특성을 확인하기 위하여 다음과 같은 시스템을 구성하여 진동 데이터를 측정하였다. 측정방법⁽⁴⁾은 하나의 가속도계(ch.1)를 고정하고, 다른 가속도계(ch.2)를 옮겨가면서 측정하였다. 저장된 데이터를 FFT 분석기를 통하여 2.5차원 정밀측정장비 및 하부 구조물의 전달함수를 산출하였다. Fig. 6은 하부 구조물에서 2.5 차원 정밀측정장비의 진동상태를 확인하기 위하여 선정한 측정점을 나타내고 있으며, 23번과 25번에서는 동시 측정함으로써 장비의 진동특성이 결정되는 프로젝션부와 타겟부의 상대변위를 확인하였다.

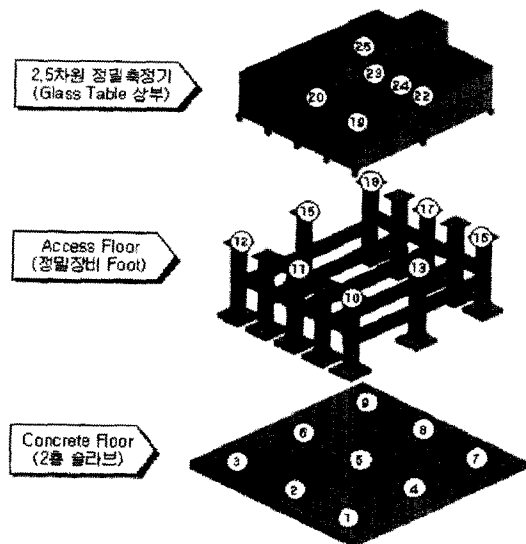


Fig. 6 Schematic diagram of measurement point

2.4 정밀 미진동 측정/분석 결과

2.5차원 측정기가 설치되어 있는 구역에서의 진동 상태를 측정/분석한 결과를 확인해 보면 다음과 같다. Fig. 7과 같이 정밀장비의 glass table 중앙(측정위치 : No. 23)에서 time peak $10 \mu\text{m}$ (0-peak)의 진동 변위가 발생하고 있다.

또한, 장비 foot에서 입력된 진동은 glass 상부에서 4배의 진동 증폭이 발생하고 있으며, 현재 설치되어 있는 하부 구조물에서는 약 7배의 진동 증폭현상이 발생하는 것으로 평가되었다.

Fig. 8에서는 바닥 슬라브에서 전달되는 진동이 2.5차원 측정장비의 glass 상부에서 증폭을 보여준다. 특히, 주파수 10~12 Hz 성분에서 약 30배 정도의 진동 증폭현상이 발생하고 있다.

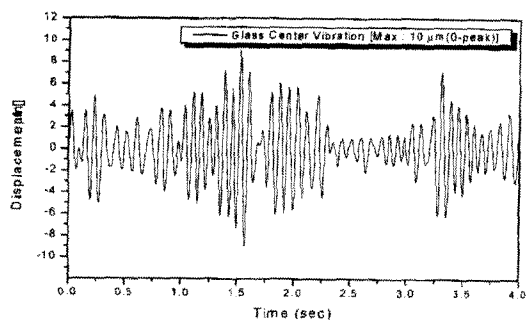


Fig. 7 Time history data on the glass table center (before the vibration isolation)

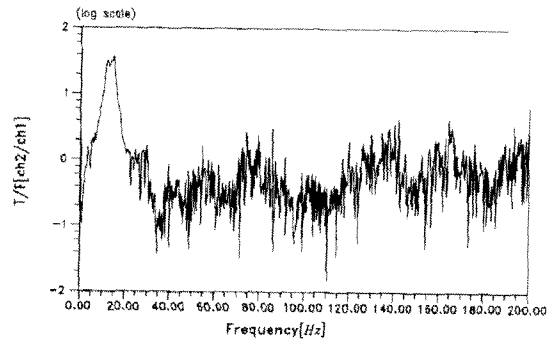


Fig. 8 Transfer function between glass table center and slab (before the vibration isolation)

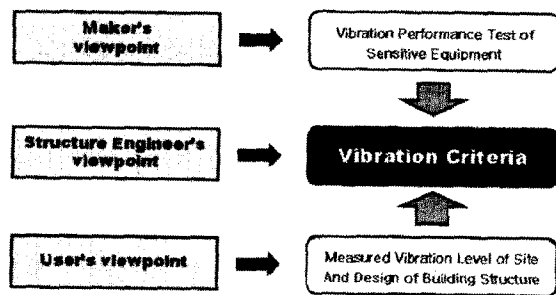
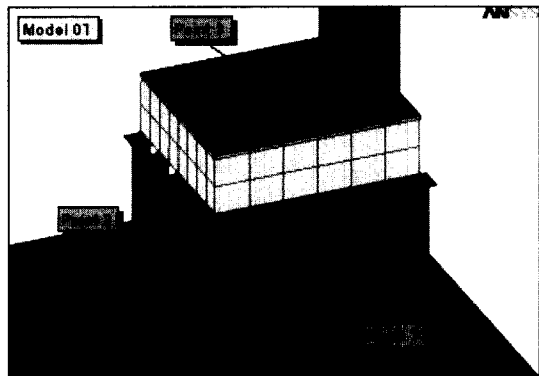


Fig. 9 A point of view of vibration criteria

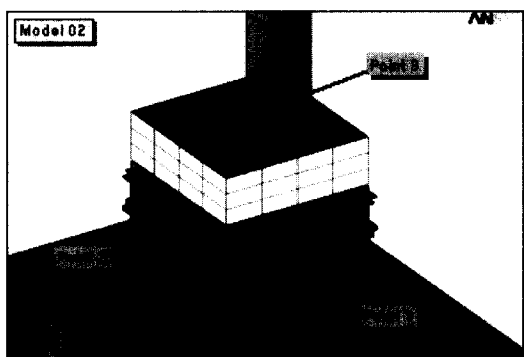
2.5 진동허용규제치 결정

정밀장비에 있어서 진동허용규제치라는 것은 장비가 외부에서 입력되는 진동에 의하여 장비 본래의 성능을 최대한 발휘하지 못하는 진동 크기를 의미한다. 진동허용규제치는 정밀장비의 측정범위와 장비사양에 의하여 결정되지만, 어떠한 사양으로 표현할 것인가는 장비 제작사나 사용자의 요구에 의하여 결정되고 있다. 그러나, 장비 제작사가 명확한 규제치를 제시하지 못하는 경우가 많으며, 이런 경우 장비의 측정범위를 고려하여 유사장비 및 장비 성능에 따른 일반적인 규제치(BBN-criteria)를 적용하고 있다.⁽⁵⁾ 그러나, 우선적으로 고려되는 것은 장비를 사용하는 사용자와 구조설계 엔지니어의 입장에서 결정해야 한다.

장비 제작사에서 제공되는 2.5차원 정밀측정장비의 측정 정밀도가 $2 \mu\text{m}$ 로 정의되어 있다. 따라서 2.5차원정밀측정장비의 정상가동을 위한 프로젝트부와 타겟부 사이의 상대 진동변위를 $2 \mu\text{m}$ (0-peak, time-peak) 이하가 되도록 진동허용규제치를 결정하였다.



(a) Before vibration isolation



(b) After vibration isolation

Fig. 10 Analysis model of dynamic response

2.6 장비 및 구조물 동특성 해석 결과

Fig. 10과 같이 현재 사용중인 구조물에 대한 평가를 해석적으로 검토하고 대책설계 방안을 해석모델에 적용하여 진동 영향성을 비교하였다.⁽⁶⁾ 제시된 진동저감대책 방안이 2.5차원 정밀측정장비가 정상 가동하기 위한 조건을 만족하는지를 해석적으로 검토하였다. 해석결과를 근거로 하여 2.5차원 정밀측정장비의 프로젝션부와 타겟부 사이의 상대진동변위가 $2\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak)이하가 되는 설계 방안을 결정하여 이를 실 구조물에 적용하였다.

Fig. 11은 진동저감대책 전(前)/후(後)의 슬라브 바닥에서 2.5차원 정밀측정장비의 glass table center 사이의 전달함수를 나타내고 있다. 진동저감대책 전(前) 최대 진동은 11 Hz에서 약 30배 정도가 증폭되고 있으며, 진동저감대책을 적용한 상태에서는 진동 증폭현상이 1/3로 저감되었다. 또한, 5 Hz에서는 진동저감대책 후(後)가 오히려 5배 증폭되고 있으나, 이는 장비 전체가(global mode) 거동하는 것으로 2.5

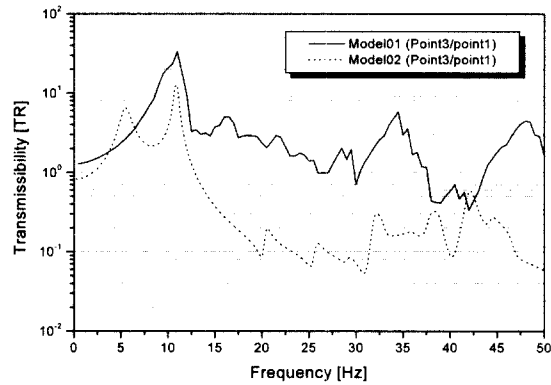


Fig. 11 Comparison of transfer function before/after the vibration isolation system

- 진동저감대책 : 고유진동수 5 Hz 방진시스템

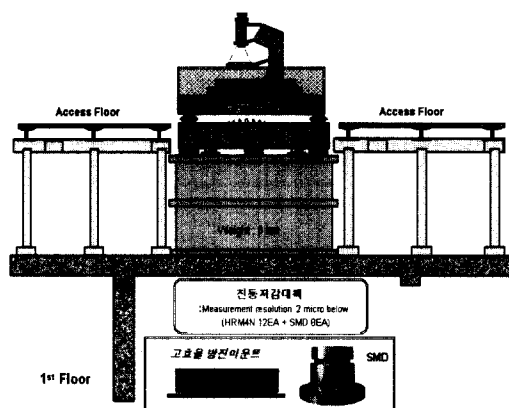


Fig. 12 Schematic diagram of the vibration isolation system

차원 정밀측정장비의 프로젝션부와 타겟부에는 영향을 미치지 못할 것으로 예상된다.

2.7 진동 저감 대책 설계 및 적용

진동저감대책은 2.5차원 장비의 측정정밀도를 고려하여 $2\mu\text{m}$ (0-peak)에 대한 측정 정도를 유지할 수 있는 진동저감대책의 개념설계를 Fig. 12와 같이 제안하였다.

2.8 진동저감대책에 따른 측정/분석 결과

진동저감 대책 후 정밀 측정 장비의 진동 상태를 측정하기 위하여 시공 전 위치와 동일한 지점을 측정하였다. Fig. 13은 진동저감 대책 후 진동을 측정하는 전경이다.

Fig. 14는 진동저감 대책 후(後) 정밀 측정 장비 glass table 중앙의 시간이력 그래프를 나타내고 있으며, 최대 변위는 $4\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak)로 저감되었다. (대책 전 최대 변위 $10\mu\text{m}$, Fig. 7 참조)

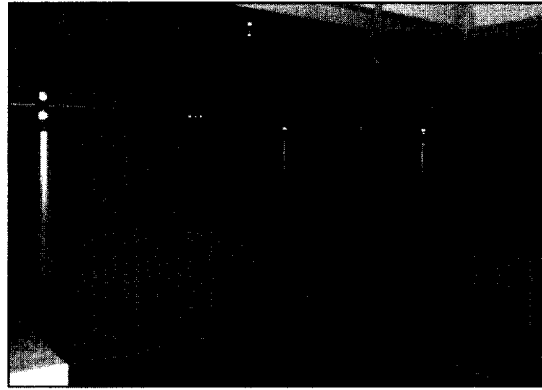


Fig. 13 Vibration isolation system

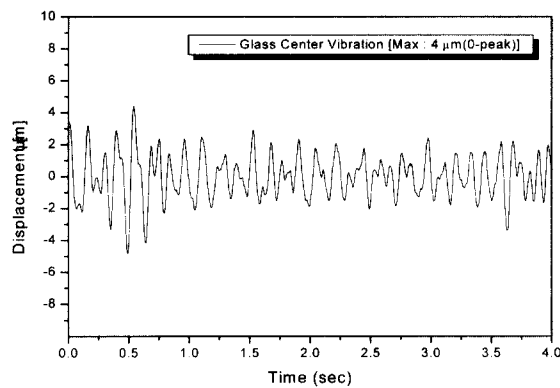


Fig. 14 Time history data on the glass table center(after the vibration isolation)

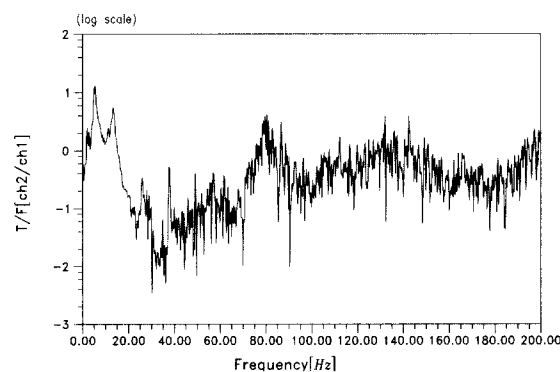


Fig. 15 Transfer function between glass table center and slab(after the vibration isolation)

Fig. 15는 슬라브 바닥과 2.5차원 정밀측정장비의 glass table 중앙 상부 사이의 전달함수 데이터이며, 약 10배 정도의 진동 증폭현상이 나타나고 있다.

3. 진동 저감대책 前/後 결과 및 평가

본 연구에서는 비정상 가동되고 있는 2.5차원 정밀 측정장비에 대한 진동저감대책을 설계하기 위하여 광 센서형 정밀측정장비의 중요 진동 특성인 프로젝션부와 타겟부에서의 상대변위를 정량적으로 추출하여 진동 영향성을 평가하였다.

2.5차원 정밀 측정 장비는 프로젝션부(렌즈 접안부)와 타겟부(glass 상부) 사이의 동적 특성을 규명하고 이에 대하여 진동 영향성을 분석함으로써 정밀 장비의 내(耐) 진동 성능을 향상시킬 수 있다. 이것은 주변 진동 환경에서도 정상적으로 정밀장비에서의 PDP glass 측정이 가능하다는 것이다. 2.5차원 정밀 측정 장비에서 중요한 진동은 프로젝션부와 타겟부 사이의 상대 진동 변위이다. 따라서, 실험적 모드 해석법(experimental modal analysis)을 이용하여 정밀 장비의 전체 구조에 대하여 동적 특성을 확인하여야 한다.

Fig. 16은 진동저감 전(前)/후(後)에 측정된 2.5차원 정밀측정장비의 프로젝션부와 타겟부의 전달함수를 나타내고 있다. 최대 진동은 진동저감 전(前)/후(後) 11 Hz에서 약 5배가 감소하였으며, 5 Hz에서는 9배가 증폭하였다. 그러나, 5 Hz에서의 증폭 현상은 장비 전체가 거동하는 것으로 2.5차원 정밀측정장비의 프로젝션부와 타겟부에는 영향을 미치지 못한다.

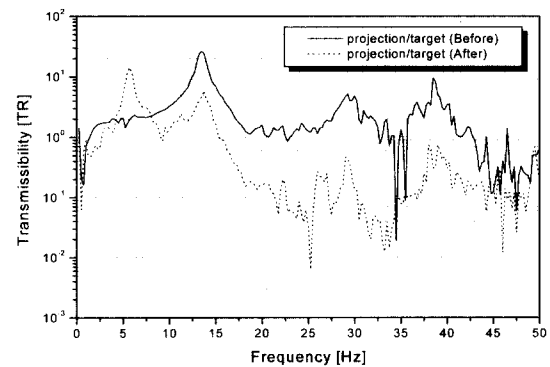
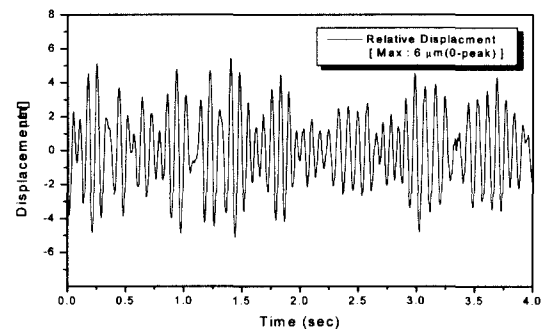


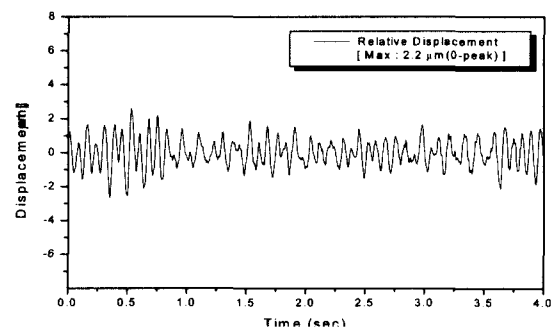
Fig. 16 Comparison of transfer function between projection and target part(before/after the vibration isolaton)

2.5 차원 정밀측정장비의 측정 정밀도($2\mu\text{m}$)를 근거로 프로젝션부와 타겟부의 상대 변위를 $2\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak)이하로 낮추는 것으로 결정하였다. 따라서, 2.5차원 정밀측정장비가 정상가동하기 위한 조건은 프로젝션부와 타겟부의 상대변위가 $2\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak) 이내로 나타나야 한다.

Fig. 17에서 프로젝션부(렌즈 접안부)와 타겟부(glass center)의 상대 변위(relative displacement)를



(a) Before the vibration isolation



(b) After the vibration isolation

Fig. 17 Comparison relative displacement between projection and target part

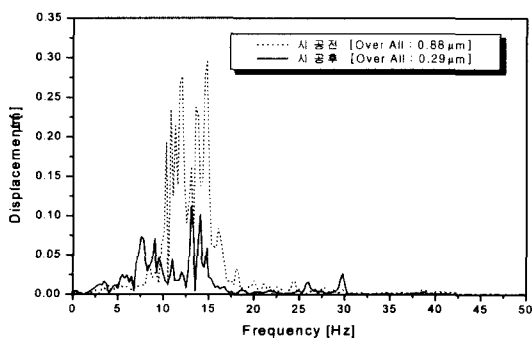


Fig. 18 Comparison of frequency analysis of relative displacement between projection and target part

진동저감 전(前)/후(後)로 검토해보면, 저감 전 상대 Fig. 17에서 프로젝션부(렌즈 접안부)와 타겟부의 상대 변위를 진동저감 전(前)/후(後)로 검토해보면, 저감 전 상대변위는 최대변위가 $6\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak)로 나타나고 있으며, 이는 프로젝션부와 타겟부의 진동허용규제치인 $2\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak)를 초과하고 있다. 또한, 시공 후 프로젝션부와 타겟부의 상대 변위가 $2.2\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak)로 저감되었다.

진동저감대책 시공 후 프로젝션부와 타겟부의 상대 변위 진동허용규제치인 $2\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak)를 $0.2\mu\text{m}$ 초과하고 있다. 그러나, 진동 저감 대책 후 2.5차원 정밀 측정 장비는 정상 가동되고 있으며, $0.2\mu\text{m}$ 의 상대 변위 차는 측정 정밀도에 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

Fig. 18은 시공 전/후의 상대 변위 주파수 분석 데이터를 보면 $0.59\mu\text{m}$ (over all)의 차를 보이고 있으며, 최대 변위는 $0.3\mu\text{m}$ (0-peak)에서 $0.1\mu\text{m}$ (0-peak)로 상대 변위가 저감된 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 2.5차원 정밀측정장비의 상대 변위의 진동허용규제치는 시간 영역에서 결정하였으며, 주파수 영역에 대한 상대 변위 진동허용규제치는 결정하지 않았다. 진동 저감 대책 시공 후 2.5차원 정밀 측정 장비는 시간영역에 대한 프로젝션부와 타겟부의 상대변위 진동허용규제치인 $2\mu\text{m}$ (0-peak, time-peak)를 만족하고 있으며, 정상 가동되고 있다.

4. 결론 및 고찰

고정밀장비 진동허용규제치 결정에 있어서 시간영역과 주파수영역에 나타나는 불일치의 문제가 나타난다. 정밀장비의 진동허용규제치를 결정하기 위하여 이론적인 방법이 간혹 활용되지만, 일반적으로 정밀장비의 복잡한 동특성으로 인하여 진동성능시험(vibration test)이라는 실험적인 방법을 이용하여 결정하고 있다. 그러나 진동성능시험을 이용할 경우 장비 중량의 제한, 실험절차의 문제, 예러검출장치의 제작과 같은 여러 가지 문제점을 가지고 있기 때문에 실용적인 측면에서 여러 가지 제한이 있다.⁽⁷⁾ 최근에 이러한 문제점을 개선할 수 있는 새로운 방법이 국내에서 연구되고 있지만, 실질적인 응용을 위해서는 많은 검증이 필요한 단계이다. 어떠한 방법

을 이용하여 진동허용규제치를 결정하더라도 실험과 이론의 절차가 주파수 영역(frequency domain)에서 이루어진다(BBN criterion). 그러나 장비가 설치 운영되는 건물의 입력 진동은 시간 영역(time domain)에서 측정된 신호를 주파수 영역으로 변환하여 주어진 진동허용규제치와 비교하기 때문에 두 개의 데이터 사이에서 불합치(mis-matching)의 문제점을 가지고 있다. 진동성능실험을 이용하여 결정된 진동허용규제치는 개개의 주파수 사이의 상관 관계를 정확히 정의할 수 없으며 이러한 문제가 실제 진동허용규제치에 어떠한 영향을 미치는 것인지, 그리고 시간 영역과 주파수 영역 사이의 상호 변환 시 손실되는 정보는 무엇이며, 이러한 정보가 어떠한 영향을 줄 수 있는가를 반드시 분석할 필요가 있다. 그러나 이러한 문제를 정량적으로 접근할 수 있는 방법론이 국내외적으로 정립되어 있지 않다는 것이 평가의 한계가 있다. 향후 이에 관한 학문적인 연구가 지속적으로 요망되고 있다.

후 기

본 연구는 2001년도 선문대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Lin, B. J., 1989, "Vibration Tolerance in Optical Imaging," SPIE, Vol. 1088, Optical/Laser Lithography II, pp. 106~114.
- (2) 박상규, 이흥기, 권형오, 1993, "실험적 모드해석을 이용한 방사광 가속기 건물의 진동제어," 한국소음진동공학회, '93 추계학술대회논문집 pp. 157~161.
- (3) 김석홍, 김준호, 이흥기, 1992, "전달함수법을 이용한 장비 가진력과 바닥 진동예측의 예측," 한국소음진동공학회, '92 춘계학술대회논문집 pp. 49~53.
- (4) Ewins, D. J., 1995, "Modal Testing : Theory and Practice," Research Studies Press Ltd..
- (5) Eric E. Ungar, 1990, "Vibration Control Design of High Technology Facilities," J. Sound and Vibration.
- (6) Swanson Analysis System Inc., 1993, "Ansys Dynamic User's Guide for Revision 5.0".
- (7) PERKIN-ELMER Semiconductor Equipment Group, 1989, Micralign M500 Sensitivity to Floor Vibration and Acoustic Disturbances, MLD 0036.