

반도체 검사 장비의 진동 분석

Vibration Analysis of Inspection Equipment for a Semiconductor

임경화†·안채헌*·오정배**·이혁**·노준호**

Kyung-Hwa Rim, Chae-Hun An, Jung-Bae Oh, Hyouk Lee and Joon-Ho Roh

Key Words : 반도체 장비(Equipment for semiconductor), 진동해석(Vibration analysis), 모드 시험(Modal test), 볼스크류(Ball-screw)

ABSTRACT

Nowadays, the equipment for a semiconductor process is required to raise accuracy and productivity. Therefore, the natural frequency of the equipment has been lowered because it has been precise, rapid, large, and light. In order to improve the efficiency of production, it is necessary for the equipment to increase the operation speed, which causes inevitable vibration problems. In this paper, influence analysis of ball-screw in the equipment and evaluation method for the vibration on the base are presented based on the analyses of dynamic characteristics for the mechanical structure through the modal test.

기 호 설 명

f_{rev}	볼 스크류의 회전 주파수 (Hz)
v	스테이지의 구동 속도 (mm/sec)
l	볼스크류의 리드 길이 (mm)

1. 서 론

현재 양산되고 있는 반도체의 집적도는 급격히 향상되고¹⁾ 있으면서 높은 공정의 생산성을 요구하고 있다. 따라서 이에 대응하는 반도체 장비 개발 분야에서도 고정밀화와 더불어 고속화, 대형화, 경량화가 지속적으로 진행되고 있다. 그러나 대형화, 경량화된 기계 시스템은 고유진동수의 저하가 필연적으로 발생되며 이 시스템이 수율 향상을 위해 고속으로 운영될 경우 운전 주파수가 시스템의 공진 영역으로 접근함으로써 큰 진동이 발생하는 문제가 대두된다. 따라서 고정밀도를 요하는 공정 구동이 불가능하게 되며, 정착 시

간 증가로 수율 향상에 큰 저해 요소로 작용하게 된다. 또한 장비 내부의 진동뿐만 아니라 장비를 지지하는 지반으로 전달되는 외부 진동도 정밀도에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 반도체 장비의 설치 장소와 방법에서 세심한 주의가 요구된다. 박상규²⁾는 반도체 공장에서 발생하는 진동원인을 분석하여 그 대책을 제시 하였으며, 이흥기 등^{3,4)}과 손성완 등⁵⁾은 LCD와 반도체 공장에 사용되는 장비의 진동 특성과 제진시스템을 평가하였으며 진동 저감을 위한 구조물의 동적 설계 방법을 제시하였다. 한편, 임경화 등⁶⁾은 고속 표면 마운트 장치 시스템의 진동 문제를 분석하고 구조설계 변경을 통하여 진동 저감 효과를 확인하였고 구동기의 가속 형태에 따른 진동응답 특성을 분석하였다. 본 논문에서는 기존 장비의 성능 개선 및 향후 제품 개발에 필요한 기계 시스템 구조의 동특성 해석을 기초로 진동 저감을 고려한 기구 설계 기법과 시스템 운영 기법에 필요한 기본 자료를 확보하였으며 그리고 모드 시험(modal test)을 통한 문제 분석 및 이를 이용한 해결 방안 모색에 대한 연구 자료를 제시하였다.

2. 시스템의 구조와 분석 방법

2.1 시스템의 구조

본 반도체용 검사장비는 복잡한 기계 구조물과 구동장치로 구성된 시스템으로 그 기본 구조는 Fig. 1과 같다. 지지대(support)에 의해 유지되고 있는 기계구조물 내부에 4자유도계(x, y, z, θ 축 방향)의 스테이지(stage)가 설치되어

† 교신저자; 한국기술교육대학교

E-mail : rim@kut.ac.kr

Tel : (041) 560-1147, Fax: (041) 560-1253

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 대학원

** 세크론(주)

있고, 볼스크류(ball-screw)로 구동되는 스테이지는 웨이퍼 탈착용 척(chuck)을 지지하면서 정밀 이송하는 역할을 하게 된다. 또한 기계구조물에 연결된 브리지(bridge)는 공압 구동기로 이송되면서 웨이퍼 위치에 대한 비전 검사용 카메라가 부착되어 있다.

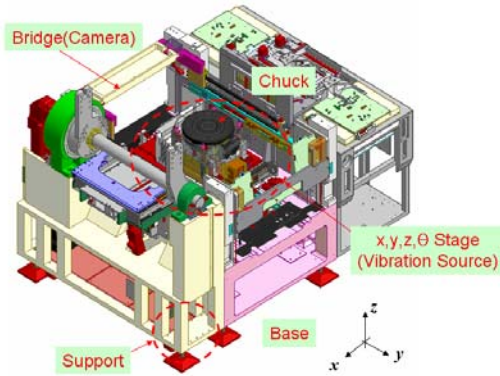


Fig. 1 Inspection equipment

2.2 실험 및 해석 방법

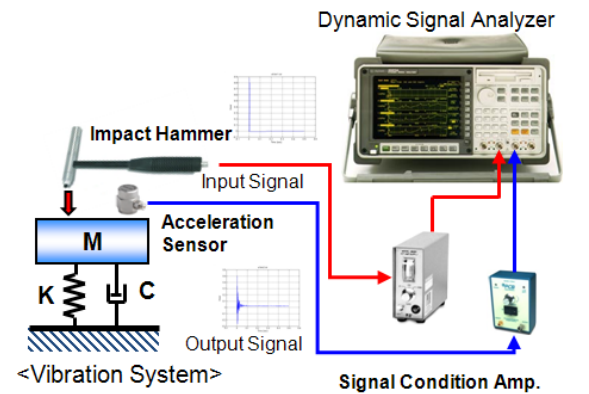
(1) 시스템의 구조 분석

공정 수행 시 주요 부품인 척은 스테이지에 의해 마이크로미터(μm) 수준의 정밀도를 가지고 고속 구동되는 부품으로 장비 전체 성능에 결정적인 역할을 하게 된다. 따라서 척의 각 부위에서 고유진동수를 측정하고 모드형상을 분석하여 이의 동특성과 적합성 여부를 검증한다. 또한 스테이지는 척의 고속, 고정밀 이송을 위하여 반드시 필요한 부품이지만 진동 관점에서 주요 진동원(vibration source)이다. 스테이지 구동기구인 볼스크류의 회전 시 마찰로 인해 많은 진동이 발생될 것으로 예상되므로 진동량과 주파수를 측정하여 다른 부품에 주는 영향성을 평가할 필요가 있다. 따라서 진동가속도 센서를 척에 부착한 후 x, y, z 방향으로 표준 속도와 최고 속도로 구동 시를 나누어 그 진동량을 측정하고, 이때 브리지와 지지대에 미치는 전달비(Transmissibility)를 측정한다. 또한 브리지는 비전 카메라가 동작할 때는 정지되어 있지만 스테이지의 구동 시 진동이 전달되면 비전 시스템의 정밀도나 수율에 영향을 받게 되므로 브리지의 고유진동수와 모드형상을 분석하여 검증한다. 한편 지지대와 척간의 전달비를 진동 가속도 관점에서 측정하여 장비 설치 시 지반으로부터 전달되는 진동과의 상관관계를 분석한다.

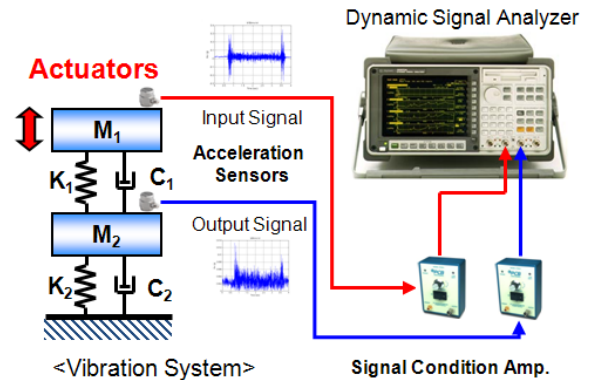
(2) 실험 및 해석 방법

시스템의 진동을 주파수 응답 관점에서 측정하기 위해 주로 사용되는 모드 시험은 Fig. 2의 (a)와 같이 시스템을 충격 해머(impact hammer)로 충격(impulse) 가진하고, 이의 응답을 가속도 센서(acceleration sensor)로 측정하는 방법이다. 대부분의 시스템은 복잡한 다자유도계 시스템이므로

가진과 측정의 위치를 적절히 변경해가며 실험을 수행하여 수집된 데이터를 종합적으로 분석하게 된다. 또한 Fig. 2의 (b)와 같이 구동기(actuator)에서 발생하는 진동이 다른 부품으로 전달되는 경우 진동원과 측정을 원하는 부위에 각각 가속도 센서를 부착하여 전달비를 주파수 관점에서 분석할 수 있으며 각각의 채널에 파워스펙트럼(power spectrum)을 구함으로써 진동원과 응답의 특징 및 동특성을 분석한다. 또한 유한요소법(finite element method)를 이용하여 시스템의 선형 진동해석을 수행하고 검증함으로써 향후 성능 향상을 위한 구조 변경 시 유용한 실험적 모델링을 확보하였다.



(a) Modal test method



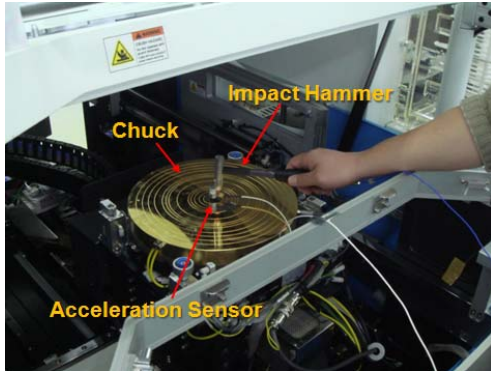
(b) Measurement of acceleration transmissibility

Fig 2. Schematic diagram of experimental setup

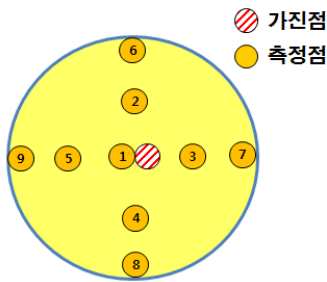
3. 실험 내용 및 결과

3.1 척의 모드 실험

척(chuck)의 고유진동수와 모드 형상을 파악하기 위하여 Fig. 3과 같이 척의 중심부를 충격 해머를 이용하여 수직방향(z방향)으로 가진하고 척의 9개 위치에 번갈아 가며 가속도 센서를 부착하여 응답을 각각 측정하였다. Fig. 4는 모드 실험 결과 중 위치 ⑤에서 측정한 결과를 나타낸 것으로



(a) A picture of modal test

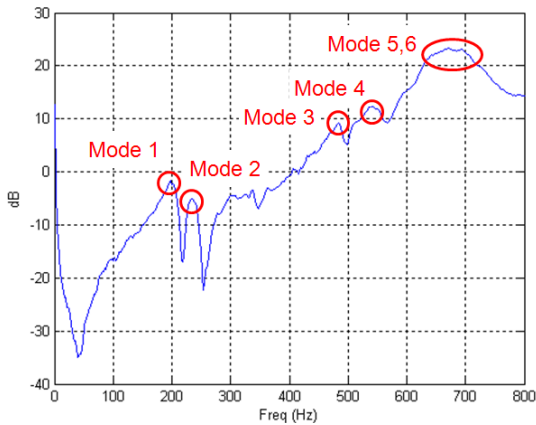


(b) Measurement point of a chuck (z/z)

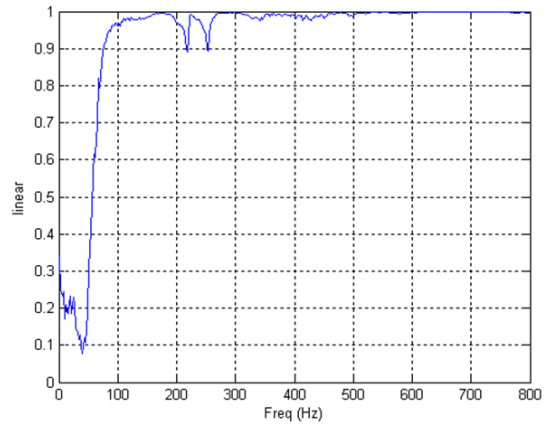
Fig. 3 Modal test of chuck

Fig. 4 (a)의 주파수 응답 함수와 같이 다양한 고유진동수들이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 척의 복잡한 형상과 척을 지지하고 있는 구조물들의 특성에 기인한다. Fig. 4 (b)의 기여도(coherence)함수를 통하여 실험의 측정 신뢰도가 매우 우수한 것임을 알 수 있다.

또한 Fig. 5는 유한요소법을 이용하여 선형 진동 해석을 수행한 결과를 나타낸 것으로 고유진동수와 실험과 거의 유사하게 일치하는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 척의 z방향 모드 형상을 관찰하기 위하여 각각의 측정점에서 주파수 응답 함수의 허수부를 각각의 모드 별로 정규화하여 도식적

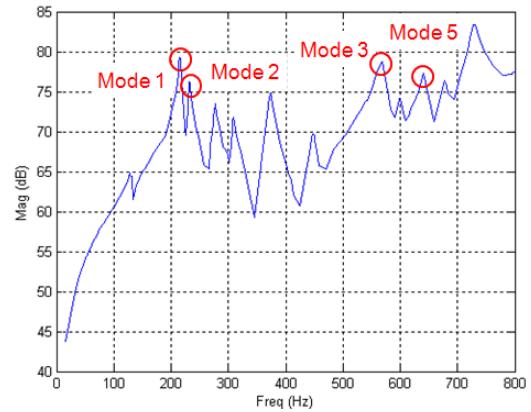


(a) Frequency response function

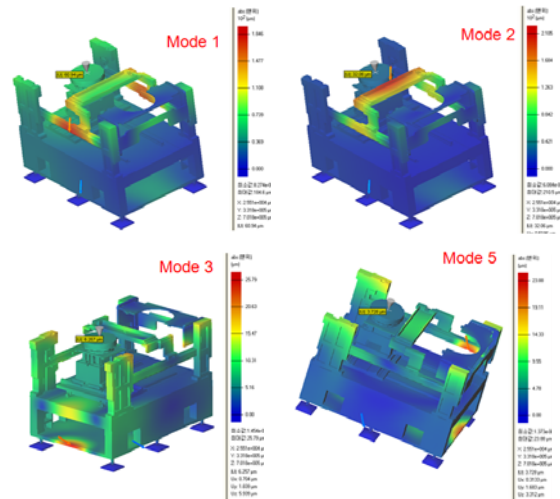


(b) Coherence function

Fig. 4 Response of chuck (experiment, z/z)



(a) Frequency response function



(b) Mode shapes

Fig. 5 Response of chuck (Analysis, z/z)

으로 Fig. 6에 나타내었다. 보는 바와 같이 두 번째 모드를 제외한 모든 모드들이 같은 방향의 형상으로 고유진동을 일으키는 것을 확인할 수 있으며, 저차 모드인 1,2번 모드에

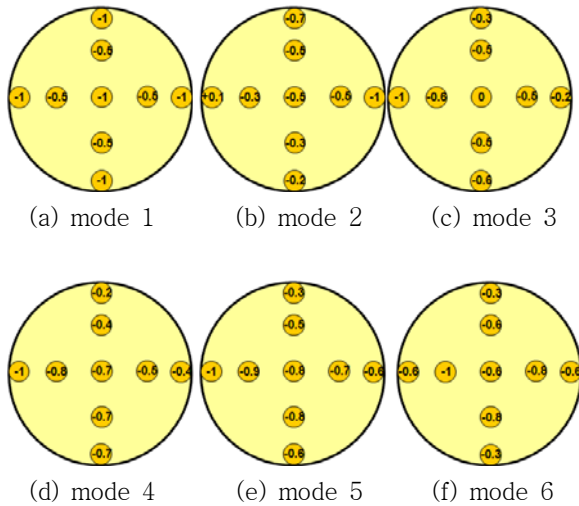


Fig 6. Mode shapes of a chuck (z/z)

서는 척의 중심부인 측정점 ①과 외각에 위치한 측정점 ⑥ ⑦⑧이 중심과 외경의 중간 부위보다 큰 크기로 동작하는 것을 확인할 수 있다. 원형 형상인 척이 대칭적인 동적 특성을 보이지 않는 것은 척 주변에 비대칭적으로 부착된 다른 부품들의 영향과 뒷부분에 척을 고정하는 구조물의 특성이 반영된 것으로 추측된다.

또한 척의 x, y 방향 운동 특성을 고려하기 위하여 Fig. 7과 같이 수직방향(z방향)으로 가진하고 측면에 수평 방향(x,y 방향)에 가속도 센서를 부착하여 그 응답을 측정하였고 그 결과 중 측정점 ②에서의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 또한 수직방향과 동일한 방법으로 모드형상을 구하여 Fig. 9에 나타내었다.

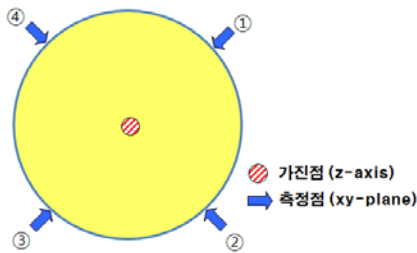


Fig 7. Measurement point of a chuck (xy-plane/z)

3.2 척의 구동 실험

척의 구동 시 시스템 내에 가진원으로 작용하게 되는 스테이지가 동작하게 되므로 동작 시 가진 주파수와 그 크기를 측정하기 위하여 척의 x, y, z 방향으로 진동가속도 센서를 부착하고 일반적인 공정 동작에서 사용되는 표준 속도(normal speed)와 장비가 허용하는 최고 속도(high speed)로 운행하고 이때의 시간응답을 측정하였고, 이때의 파워스펙트럼을 관찰하여 구동 시 가진 되는 주파수의 범위를 측

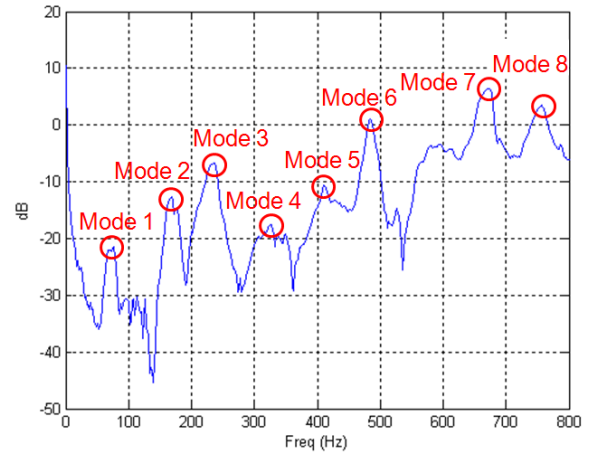


Fig. 8 Response of chuck (xy-plane/z)

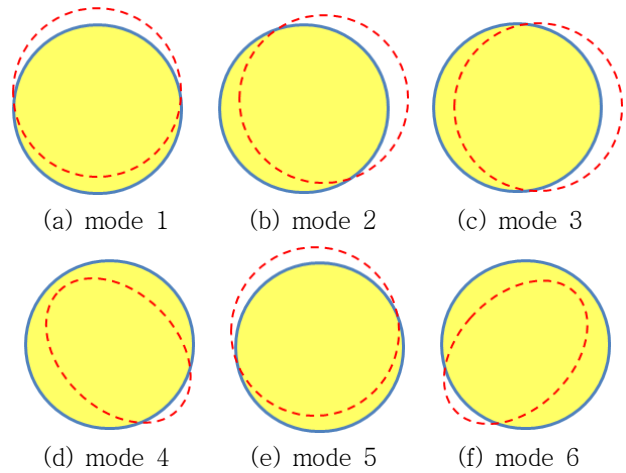
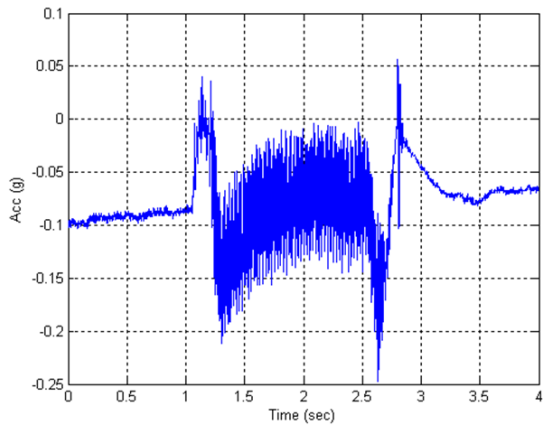


Fig 9. Mode shapes of a chuck (xy-plane/z)

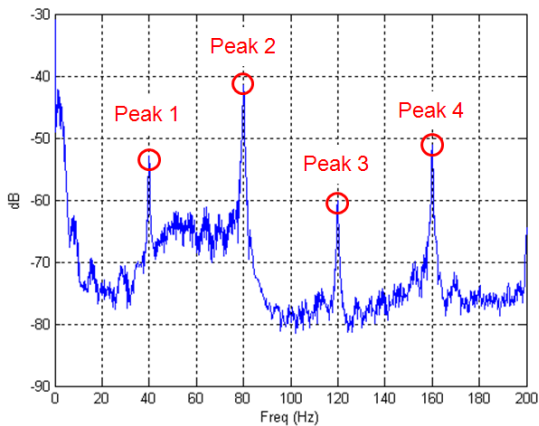
정하였다. 또한 척이 구동될 때 지지대에 미치는 영향을 파악하기 위하여 x, y, z 방향으로 지지대에 가속도 센서를 부착하여 시간응답을 측정하고 파워스펙트럼을 구하였으며 그 중 x방향의 응답을 Fig. 10~11에 나타내었다.

$$f_{rev} = \frac{v(mm/sec)}{l(mm)} (Hz) \quad (1)$$

한편 식(1)을 이용하여 스테이지 구동에 사용되는 볼스크류의 리드 길이(lead length)와 구동 속도를 이용하여 구한 볼스크류의 회전 주파수와 정확히 일치하는 것을 알 수 있다. 그러므로 x, y축에 대하여 척에서 측정되는 진동의 피크 주파수는 볼스크류의 회전 주파수의 배수 배와 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 가진의 주요 원인은 볼스크류의 마찰에 기인하는 것을 알 수 있다. 또한 회전주파수의 2배수에 해당되는 주파수에서 가장 큰 크기로 가진된다. z축의 경우 가진 주파수와와의 특별한 상관관계는 보이지 않으나 고속 기동 시에는 피크가 명확히 나타난다. 이는



(a) Time response



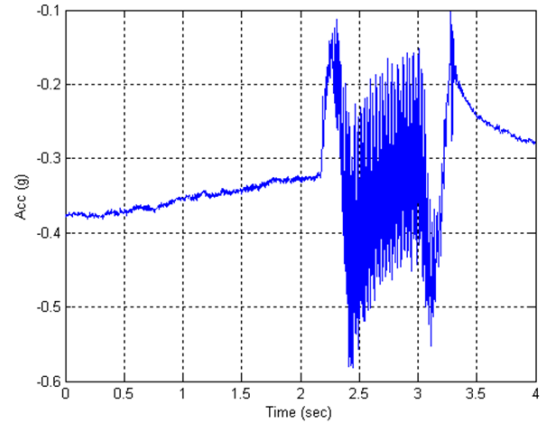
(b) Power spectrum

Fig 10. Acceleration of chuck
(x-axis, normal speed)

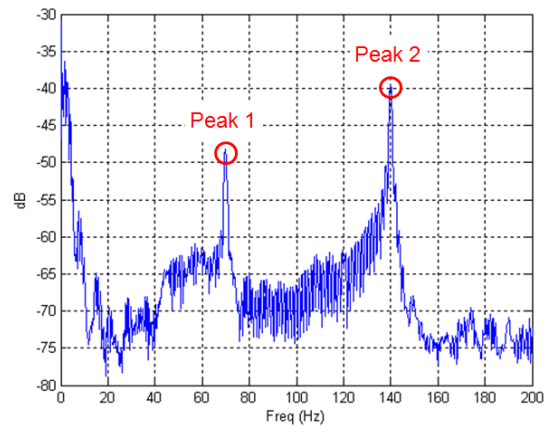
z축 구동용으로 사용된 구동용 전동기는 구동 시 큰 진동을 유발한다고 알려진 스텝핑 모터(steping motor)이므로 제어용 스텝 펄스에 관계된 구동 주파수의 영향으로 추정된다. 그러므로 향후 목표로 하는 구동 속도는 볼스크류의 리드 길이를 고려하여 척과 브리지 등 주요 부품의 고유진동수를 회피하도록 설정할 전략을 세울 수 있다. 반대로 목표 구동 속도가 주요 부품의 고유진동수에 근접 시 부품들의 고유진동수를 증가시키는 설계 변경의 지표로 설정 할 수 있다. 그 밖의 가진원 은 스테이지의 가감속에 의한 충격량의 영향으로 예상된다. 또한 지지대로 전달되는 진동의 피크 주파수 또한 척의 가진 주파수와 일치하는 것을 알 수 있다. 한편 브리지와 지지대에 가속도 센서를 부착하고 동일한 실험을 수행하여 각각의 위치에서의 전달비를 구할 수 있었고, 가진원과 동일한 피크 주파수를 가짐을 확인하였다.

3.3 척과 지반의 전달비 측정 실험

장비가 설치된 지반 가진에 대한 척의 영향을 관찰하



(a) Time response



(b) Power spectrum

Fig 11. Acceleration of chuck
(x-axis, high speed)

기 위한 실험은 척과 지반부에 각각 센서를 부착하고 지반을 가진하여 실험을 수행해야 한다. 그러나 장비 전체의 질량을 포함하는 이 실험과 같이 큰 질량을 가지는 시스템의 응답을 얻기 위해서는 매우 큰 힘의 가진이 필요하게 된다.

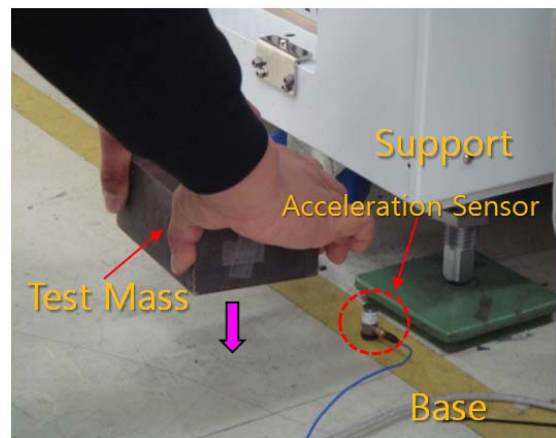
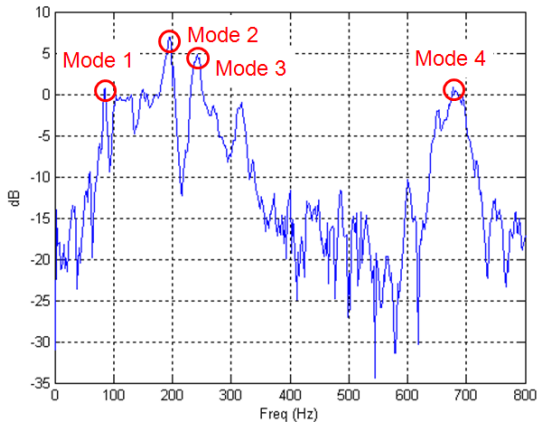
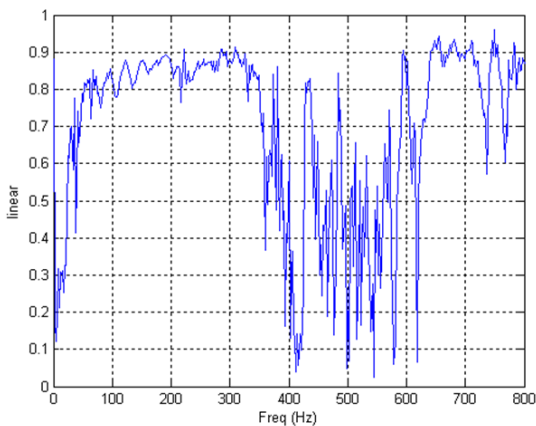


Fig. 12 Impulse input using dropping test mass on the base

따라서 현실적으로 실험을 수행하기가 매우 어렵기 때문에 Fig. 12와 같이 실험질량(test mass)를 자유낙하 시켜 지반에 z방향으로 순간적으로 충격 입력을 가하고, 지반과 척에 같은 방향으로 가속도 센서를 부착하여 그 가속도 전달비를 측정하여 Fig. 13에 나타내었다. 실험 결과 특정 구간에서 기여도 함수의 0.8 이상의 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 구간 내 측정된 지반과 척간의 가속도 전달비는 오차 범위 내에서 신뢰할 수 있다. 또한 척의 모드 시험 결과와 비교하면 첫 번째 모드는 척의 z방향(z/z)에서는 기여도 함수의 취약으로 나타나지 못하였으며, 측면방향(xy/z)에서는 첫 번째 모드와 동일한 주파수를 보인다. 한편 두 번째 모드는 z방향의 첫 번째 모드와 신호분석기의 주파수 분해능 범위 내에서 거의 일치하며, 세 번째, 네 번째 모드 또한 척의 모드와 일치하는 특징을 보인다. 한편 실험 결과를 이용하여 수직방향 척의 구동 주파수 범위와 강성이 약한 지반에 설치 가능 여부를 검증할 수 있다.



(a) Acceleration transmissibility



(b) Coherence function

Fig. 13 Frequency response between base and chuck

4. 결 론

시스템의 성능에 결정적인 영향을 미치는 주요 부품인 척과 브리지의 모드 시험을 수행하여 고유진동수와 모드 형상을 구하여 공진을 일으킬 수 있는 정밀도를 해칠 수 있는 주파수를 제시하였으며, 유한 요소 모델 해석을 통하여 검증하였다. 또한 척을 이송하는 스테이지의 구동 실험을 통하여 수직(z축), 수평 방향(x, y축) 별 시스템에 가진되는 주파수를 측정하여 볼스크류와 가진 주파수와의 상관관계를 밝혔으며 향후 동특성을 고려한 성능개선에 필요한 자료로 활용될 수 있다. 지반 가진에 대하여 지반과 장비의 주요 부위간의 전달비를 측정하기 위하여 지반에 실험질량을 낙하하여 충격을 가하는 방식을 이용하여 측정하였다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, D. H. and Hwang, K. H., 2005, "Recent trends in manufacturing device and process for a semiconductor", iCASE, Vol 11, No. 1, pp.54~60.
- (2) Park, S. G., 1994, "The cause and countermeasure of vibration for semiconductor factory", Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Vol. 4, No. 1, pp.12~22.
- (3) Lee, H. K., Son, S. W., Park, H. D., Kim, K. P. and Pak, J. H., 2003, "A study on vibration reduction for exposure machine of 6,7 generation TFT-LCD factory", Proceedings of the Korean Society of Semiconductor & Display Equipment Technology Annual Autumn Conference, pp. 68~77.
- (4) Lee, H. K., Pak, J. H., Park, H. D. and Kim, D. H., 1999, "A study on the structural dynamic design for sub-micro vibration control in high class semiconductor factory by semi-empirical method", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 89~95.
- (5) Son, S. W., Lee, H. K. Park, S. G. and Jeon, J. G., 2005, "The Evaluation for vibration criteria and vibration reduction of precision inspection equipment for TFT-LCD using experimental method", Proceedings of the Korean Society of Semiconductor & Display Equipment Technology Annual Autumn Conference, pp. 49~54.
- (6) Rim, K. H. and Jang, H. T., 2001, "Vibration reduction of chip-mount system", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Vol. 11, No. 8, pp.331~337.