

# 精密裝備의 振動許容規制値에 미치는 因子에 관한 研究

°이홍기\*, 장강석\*, 김두훈\*, 김사수\*\*

## A Study on the Effected Factor for Vibration Criteria of Sensitive Equipment

Hong-Ki Lee, Kang-Seok Jang, Doo-Hoon Kim, Sa-Soo Kim

### ABSTRACT

In the production of semiconductor wafer, optical and electron microscopes, ion-beam, laser device must maintain their alignments within a sub-micrometer. This equipment requires a vibration free environment to provide its proper function. Especially, lithography and inspection devices, which have sub-nanometer class high accuracy and resolution, have come to necessity for producing more improved giga and tera class semiconductor wafers. This high technology equipments require very strict environmental vibration standard, vibration criteria, in proportion to the accuracy of the manufacturing, inspecting devices. The vibration criteria of high sensitive equipment should be represented in the form of exactness and accuracy, because this is used as basic data for the design of building structure and structural dynamics of equipment. The study on the evaluation of the factors affecting the permissible vibration criteria is required to design the efficient isolation system of the semiconductor manufacturing of equipment. This paper deals with the properties of the effected factor for vibration criteria of high sensitive equipment.

### 1. 서론

나노 메터(nano meter) 수준의 초정밀 가공, 검사장비는 반도체 생산 공정과 실험실에서 많이 사용되고 있다. 특히, 반도체 생산공정 중 진동에 가장 민감한 부분은 회로 패턴이 인쇄된 유리판 마스크(mask)를 웨이퍼(wafer, 집적회로의 기판이 되는 단 결정 실리콘 박판)에 단 파장 광선을 조사(照射)시키는 노광(exposure process)과정이다. 노광장비(lithography)에 사용되는 광선의 파장은 회로 기판의 선 폭에 따라 E-Beam, X-ray, Ion-Beam 등이 사용되고 있다.

이러한 노광장비의 성능은 해상도(resolution) 및 초점 깊이(depth of focus)와 관련된 상(像)의 겹침(overlay error)에 의하여 결정된다. Table 1에서와 같이 해상도와 상의 겹침 문제를 발생시키는 원인 중에서도 외부 환경 적인 요인으로는 진동 문제이다. 기가급의 초 집적회로에서는 0.1 $\mu$ m 내외 수준으로 가공 선폭이 이루어질 것으로 예상하고 있다. 이 경우 선 폭이 줄어들 뿐만 아니라 두 회로선 사이의 간격도 이러한 수준으로 줄어들기 때문에 웨이퍼와 마스크 및 광원장치(photodiode array) 사이의 상대허용변위가 극한적으로 엄밀할 것으로 예상된다.

\* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

\*\* 부산대학교 조선해양공학과

Table 1. Error sources of a lithographic exposure tool(Semiconductor Equipment)

Resolution	Overlay Accuracy
Defocus	Automatic Alignment Repeatability
Optical Aberrations	Automatic Alignment Offsets
Fast Vibration	Magnification
Image Flare	Optical Distortions
Astigmatism	Scanning Distortions
Illumination Uniformity	Slow Vibration

정밀 가공장비로는 레이저 장비(aligner, stepper)가 있고, 전자현미경(SEM, TEM)등과 같은 검사, 측정장비가 있다. 기타 분야에는 고용량 HDD 및 생산설비, 고밀도의 CD-Driver 및 CD생산설비, 정밀세포이식 및 수술, 검사 의료장비가 있다. 이들 장비의 구조적 특성은 대부분 Fig.1과 같이 프로젝션부(projection part, optical column)와 타겟부(target part, image stage)로 이루어져 있다.<sup>(7),(8)</sup> 이러한 구조의 정밀장비에서 진동 문제는 프로젝션부와 타겟부의 상대진동변위(relative displacement of vibration)에 의하여 지배된다. 진동허용규제치에 영향을 주는 인자(factor)로는 장비의 분해능, 정밀도, 확대율 등으로 결정되는 상대허용변위(permissible relative displacement)와 광학 장비에서 나타나는 노출시간, 외부 입력 진동 주파수 및 크기, 장비 개개의 가공 정밀도와 분해능, 확대율 등이 있다. 예로서 전자현미경에서 0.1  $\mu\text{m}$ 의 분해능을 가지고 있을 경우, 프로젝션부와 타겟부의 상대진동 피크 변위가 0.05  $\mu\text{m}$ (위상차 180°) 이상이면 인접하는 패턴이 겹쳐져 보인다. 여기에서 인간이 관찰하는 눈의 잔상, 대상을 촬영할 경우에는 카메라의 노출시간과 진동 주파수, 진폭의 상호관계를 분석하여 상대허용변위를 결정한다. 컴퓨터 HDD와 CD-Driver의 경우는 데이터를 저장하는 미디어(media)부의 트랙 간격과 헤드

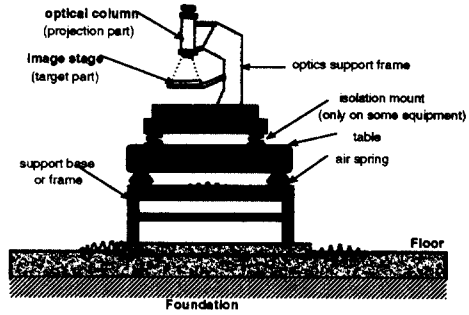


Fig. 1 Typical piece of optical vibration sensitive equipment

(head)부의 신호 입출력 특성에 의하여 상대허용 변위가 결정된다. 이러한 진동허용규제치에 미치는 인자들의 상호관계를 규명함으로써 초정밀장비의 방진(防振) 및 내진(耐振)설계를 위한 기본 데이터로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 이론적 배경

일반적으로 진동은 위치에 대한 시간함수의 형태로 표현되며, 장비가 강한 공진에 노출되어 있지 않는 이상 많은 주파수 성분에 의하여 진동 상태가 결정된다. 두 개 이상의 주파수 성분을 가진 진동이 입사할 경우 관찰 대상물체의 위치는 각각의 진동 크기(amplitude)와 위상(phase)에 의하여 결정된다. 이러한 두 개의 변수에 의하여 이루어지는 진동 양상이 매우 복잡하기 때문에 어떠한 위치에 물체가 진동하고 있는가를 일목 요연하게 표현하기가 어렵다. 이러한 어려움을 대처하는 하나의 방법으로 진동 위치에 대한 체류시간( $\Delta t$ )을 전체 시간(T)에 대한 비율 확률밀도함수(probability density function)로 표현하여 진동하는 물체가 임의 변위에 대한 체류확률을 정의 할 수 있다. 단일 주파수의 정현파  $x(t) = X_0 \sin(2\pi ft)$  가 입사할 경우 진동에 의한 위치(position)의 체류시간율(dwell time ratio)은 확률밀도함수를 적분함으로써 구할 수 있다. 확률분포함수는 식(1)과 같이 정의되고 이에 대한 확률밀도함수는 식(2)과 같다.

$$P(x) = \text{Prob}[x(k) \leq x] \quad (1)$$

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[ \frac{\text{Prob}[x < x(k) \leq x + \Delta x]}{\Delta x} \right] \quad (2)$$

정현파에 대한 확률밀도함수는 식 (3)이 되며 Fig. 2의 정현파 진동에서 주기 T동안 임의의 구간 Δx내에 체류할 시간율은 2Δt/T이며 이를 확률분포함수 P(Δx)로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$p(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{X_0^2 - x^2}}$$

(3)

$$P(\Delta x) = \text{Prob}[x < x(k) \leq x + \Delta x]$$

$$= \frac{1}{\pi \sqrt{X_0^2 - x^2}} \Delta x$$

(4)

랜덤 진동에서도 진동의 수학, 수치적인 형태만 주어지면 체류확률을 구할 수 있다. 랜덤 진동은 대부분 정규분포를 가지며 Fig. 3은 정현파의 확률 밀도함수, Fig. 4는 백색잡음에 대한 시간이력을 수치적으로 구한 확률 밀도함수이다. 랜덤 신호의 평균값이 0, 유효값이 X인 정규확률밀도함수(Normal probability density function)는 식 (5)와 같으며 sampling time  $T_s$ 동안 랜덤 신호에 대한 체류시간을  $P(\Delta x)$ 는 식(6)과 같다.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}X} \exp\left[-\frac{x^2}{2X^2}\right] \quad (5)$$

$$P(\Delta x) = \frac{\sum \Delta t_i}{T_s} = p(x)\Delta x \quad (6)$$

이러한 표현은 진동으로 인하여 임의의 범위에 관찰 대상이 존재하는 확률 문제와 정밀장비의 상대허용변위에 미치는 영향성은 손쉽게 평가할 수 있을 뿐만 아니라 진동허용규제치의 신뢰성 해석도 이용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 진동허용규제치가 어떠한 외부 진동과 시간에서도 만족해야 하는 것이라면 확률이나 신뢰성 해석은 필요하지 않다. 그러나 일반적으로 정밀장비에서 진동허용규제치(vibration criteria)가 장비의 상대허용변위(permissible relative displacement)에서 직접적으로 구해지지 않고 장비의 노출시간 혹은 가

공 시간과 같은 동작 특성과 구조의 동적 특성에 의하여 결정되기 때문에 이를 고려한 신뢰성 평가 및 확률 해석은 실용적인 측면에서 필요하다.

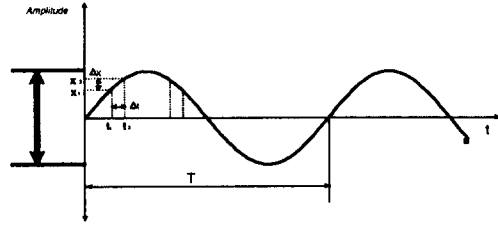


Fig. 2 The single-frequency sinusoidal vibration

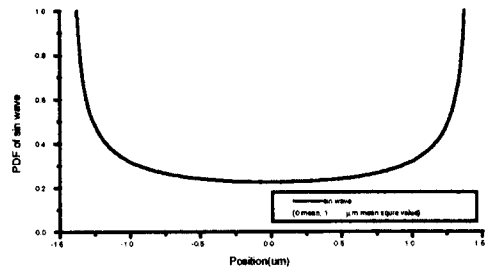


Fig. 3 Probability density function of sinusoidal vibration

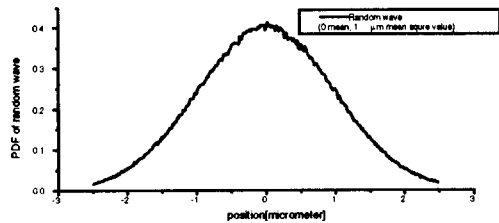
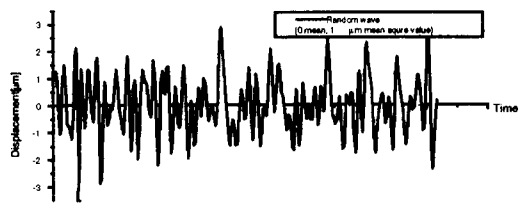


Fig. 4 Time history and its probability density function of random vibration

공학적 측면에서 레이저와 광학 장비에서 진동 문제를 연구한다는 것은 분해능(resolution), 가공 및 검사 선평의 제어(linewidth control), 노출과 초

점의 교란(exposure and focus tolerances), 근접 조건(proximity condition), 조도의 기여도(illumination coherence)의 함수로 나타나는 진동 허용규제치를 정량적으로 결정하는 것이 목적이다. 본 연구에서는 진동이 관찰용으로 사용되고 있는 고배율 광학 및 전자현미경에서 나타날 수 있는 분해능 문제와 E-Beam, X-ray, Ion-Beam등을 이용하여 웨이퍼에 광선을 조사(照射)시키는 노광(exposure process) 가공 과정 등에서 나타날 수 있는 선 폭 교란 문제에 대하여 정리하였다. 전자현미경에서는 주사(走査, scanning) 샘플링 시간과 사진 촬영시 나타날 수 있는 노출시간이 분해능을 결정하는 인자로 작용한다. 여기서는 노출시간(예, stepper 조사시간  $\Delta t_e$ ), 입력 진동주파수( $f$ ), 상대허용변위(permissible relative displacement,  $C_r$ )가 진동허용규제치(vibration criteria,  $C_v$ )에 미치는 영향성을 정립할 필요가 있다. 만일, 단일 정현파 진동이 입력될 경우에 정밀 장비가 동작하기 위한 노출시간( $\Delta t_e$ ) 동안 이동하는 상대진동 변위를 구하는 것으로 정리된다. 즉 노출시간 동안 진동 이동거리가 상대허용변위를 초과하지 않으면 진동으로 인한 문제는 발생하지 않을 것이다. Fig. 2에서 노출시간동안 진동에 의하여 이동한 거리는 식(7)에 의하여 결정된다.

$$\text{이동한 거리 } \Delta x = |x(t_2) - x(t_1)| \quad (7)$$

$$\text{노출시간 : } \Delta t_e = t_2 - t_1$$

상기 정현파는  $x = X_0 \sin \omega t = X_0 \sin 2\pi f t$  여기서,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ 는 입력진동주파수이다. 이를 식(7)에 대입하면 식(8)과 같이 된다.

$$\Delta x = |X_0(\sin 2\pi f t_2 - \sin 2\pi f t_1)| \quad (8)$$

$t_2 = \Delta t_e + t_1$  을 식(7)에 대입하면 노출시간 동안 이동하는 거리는 식(9)와 같이 된다.

$$\Delta x = |X_0\{\sin 2\pi f(t_1 + \Delta t_e) - \sin 2\pi f t_1\}| \quad (9)$$

식(9)에서 이동거리는 입력 주파수  $f$ , 노출시간

$\Delta t_e$ , 그리고 초기치  $t_1$ 에 의하여 결정되며,  $t_2$ 와  $t_1$ 사이의 진동에 의한 변위 이력(displacement history)에 대한 정보보다는 진동 변위 크기만 필요하기 때문에 절대치를 붙인 것이다. 즉 노출시간  $\Delta t_e$  사이에 발생하는 최대 진동과 최소 진동 사이의 차가 상대허용변위를 만족하는가에 따라서 진동허용규제치가 결정된다. 임의의 시간 구간  $t_1 \leq t \leq t_2$  사이에 이동한 거리를 평가하기 위해서는 입력 진동의 주기에 따라서 아래 세 가지의 경우에 대하여 정리하였다.

### Case 1]

노출시간이 입력 진동 주기에 대하여  $0 \leq \Delta t_e < \frac{T}{2}$  or  $0 \leq t_2 - t_1 < \frac{T}{2}$  일 경우, 노출시간 동안 진동평균값을 기준으로 이동하는 최대 진동 변화량  $\Delta x$ 는 주기 내에서  $T = t_1 + t_2$  (단  $t_1 \leq t_2$ ) 일 때 발생한다. 즉  $x_1 = -x_2$ 가 될 경우에 최대의 이동거리가 발생한다.

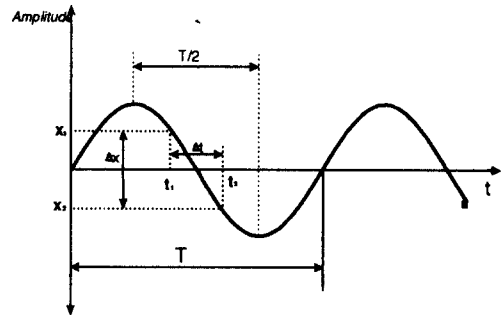


Fig. 6 Maximum distance at sinusoidal vibration ( $0 \leq \Delta t_e < \frac{T}{2}$ )

$$\begin{aligned} \text{Max } \Delta x &= |x(t_1) - x(t_2)| = |2x(t_1)| \\ &= \left| 2A_0 \sin \frac{\Delta t_e}{T} \pi \right| \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

$$\Delta t_e = t_2 - t_1, \quad T = t_1 + t_2 = \frac{1}{f}, \quad t_1 = \frac{T - \Delta t_e}{2}$$

이다.

**Case 2]**

노출시간이 입력 진동 주기에 대하여  $\frac{T}{2} \leq \Delta t_e < T$  일 경우, 노출시간 동안 이동하는 최대 진동 변화량  $\Delta x$ 는  $T = t_1 + t_2$  ( $t_1 \leq t_2$ ) 조건을 만족하면 항상 입력 진동의 최대와 최소치를 경유하게 된다. 즉  $\frac{T}{2} \leq \Delta t_e$  일 때  $\text{Max } \Delta x = 2X_0$  가 되고 노출진폭비  $E_a$ 는 1이 된다.

**Case 3]**

노출이나 가공시간이 입력 진동의 주기 보다 큰  $\Delta t_e \geq T$  인 경우, Fig. 2에서와 같이  $t_2 - t_1 \geq T$  상태이기 때문에 입력 진동의 최대와 최소 영역을 노출시간 동안 모두 통과하게 된다. 그러므로 노출시간 동안 최대 이동거리는  $\text{Max } \Delta x = 2X_0$  ( $\because -X_0 \leq x \leq X_0$ ) 가 되고 노출진폭비  $E_a$ 는 1이 된다. 상대허용변위가  $2X_0$ 보다 작아야 진동 문제가 발생하지 않는다.

정현파의 진동은 Fig. 2, 3에서와 같이 최대진폭은 임의의 시간영역  $\Delta t_e$ 에서 진동평균치를 기준으로 채류할 확률이 적다. 이는 진동평균값 근처에서 진동변화율이 크므로 이때에 최대변화율을 가지나, 랜덤 진동은 Fig. 4에서 정현파의 진동특성과는 반대의 개념으로 진동평균값 근처에 채류할 확률이 가장 높다. 따라서 평균값 근처에서 노출진폭비  $\Delta x$ 는 정현파의 경우는 최대값이나 랜덤파는 그렇지 못하게 된다.

랜덤 신호의 노출진폭비는 식(6)을 이용하여 구할 수 있다. 먼저 정현파의 경우 식 (4)의 확률밀도함수를 이용하여 구한 결과가 식(11)이다. 이 결과는 식(10)과 같으며 랜덤 신호에 대한 노출진폭비는 식(12)과 같다.

$$\frac{2\Delta t_e}{T} = \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} p(x) dx = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{\Delta x}{2X_0} \quad (11)$$

$$\frac{\sum \Delta t_i}{T_s} = \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} p(x) dx = \text{erf} \left\{ \frac{\Delta x}{2X_0} \right\} \quad (12)$$

여기서 erf는 error function이며 진폭  $X_0$ 은 랜덤 신호의 유효진폭  $X$ 의  $\sqrt{2}$ 배이다.

식(11), (12)에서  $2X_0/\Delta x$ 를 노출진폭비( $E_a$ , exposure-amplitude ratio)라하고 이를 채류시간을  $\sum \Delta t_i/T_s$ 에 대해 도식한 것이 Fig. 6이다.

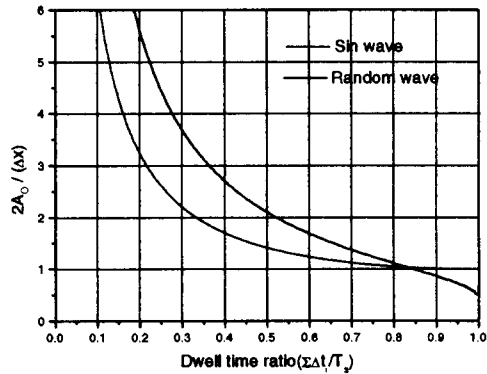


Fig. 6 The comparison of exposure-amplitude ratio between sinusoidal and random wave

Fig.6에서 각 곡선의 아래부분에 노출시간과 진폭에 대해 진동문제가 발생하지 않는 영역으로, 정현파에서 노출진폭비  $E_a$ 가 1 이하는 주파수와 관계 없이 진동문제가 발생하지 않는 조건이지만, 랜덤파에서 채류시간율에 따라 유효진폭이상의 진동도 고려한 결과를 나타낸다. 만일, 노출 시간을 고려하지 않는다면 곡선은 1을 지나는 직선이 될 것이다. 상대허용변위가 비록 입력 진동의 진폭 보다 작더라도 노출 시간이 짧을 경우, 저주파수에서는 진동 문제가 발생하지 않는다. 그리고 노출 시간이 제로에 접근하면 진동 크기에 관계없이 정상적으로 장비의 작동이 가능하다는 것을 의미한다. 예로서 입력 진동이 5Hz, 노출 시간  $\Delta t_e = 0.02\text{sec}$ 인 레이저 가공장비의 경우, 상대허용변위  $c_p$ 가 약 3배 정도 커진다. 물론, 상대허용변위와 함께 진동허용 규제치도 커지게 된다.

### 3. 결론

본 논문에서 제시된 노출시간과 진동 주파수 사이의 상관 관계를 진동허용규제치에 직접적인 영향을 주는 상대진동허용변위와 관련시켜 Fig.6과 같은 관계를 유도하였다. 이는 진동허용규제치를 해석적으로 결정할 경우 주파수에 대한 가중함수 (weighting function)로 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 실제, 반도체공장에 설치된 광학현미경, 전자현미경, 노광장비 등이 장비 제작사에서 제출된 진동허용규제치 이상의 진동 상태에서도 정상적으로 가동이 이루어지고 있는 많은 경우에 대한 원인의 하나로 추정되고 있다. 그러나 본 논문에서 제시된 가중치함수는 HDD와 같은 일정한 위치에 정보를 읽고 쓰는 절대 좌표계의 개념이 필요한 장비에는 적용할 수 없다. 단지, 노광 과정과 같은 상대적인 좌표의 개념이 요구되는 정밀 가공과 검사 수행 할 경우, 저주파의 외부 진동에 대하여 불합리하게 진동허용규제치가 가혹해지는 문제를 사전에 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Vibration Tolerance in Optical Imaging, IBM General Technology Division Essex Junction, VT 05452, B. J. Lin, SPIE Vol. 1088, 1989.
2. Random Data, Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, J.S Bendat, A.G. Piersol.
3. 주파수응답함수를 이용한 고정밀장비의 진동허용규제치 결정기법에 관한 연구, 1997, 부산대학교 조선해양공학과, 이흥기.