

주파수 응답함수를 이용한 정밀장비의 진동허용규제치에 관한 연구

○ 이홍기*, 박해동*, 최현*, 김두훈*

A Study on the Vibration Criteria for Precision Equipment using FRF

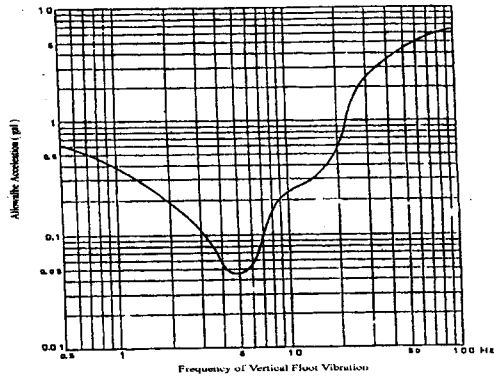
(Lee Hong Ki, Park Hae Dong, Choi Hyun, Kim Doo Hoon)

1. 서론

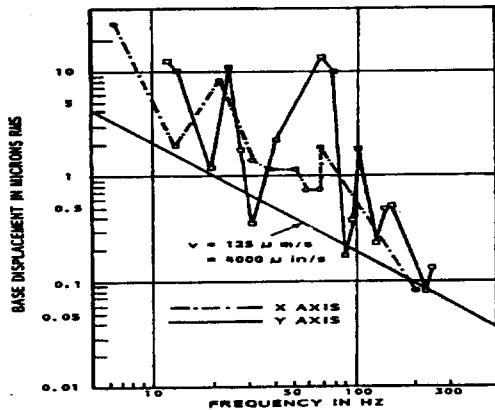
최근 정밀 산업의 핵심을 이루고 있는 반도체 산업은 메모리 칩의 직접도 향상에 따라 고정밀의 가공/검사 장비를 요구하고 있다. 이미 256M DRAM의 메모리칩에 대한 양산을 앞두고 있으며 Giga급 DRAM의 개발이 완료된 단계이다. 이러한 고집적 메모리칩을 구성하고 있는 회로의 선폭은 0.1~0.25 μm 이하 수준을 요구하고 있으며, 이들 생산 제품을 가공/검사하기 위해서는 그 이하의 분해 성능을 가진 고정밀도의 장비가 필요하게 되었다. 고정밀 가공/검사 장비의 정밀도 향상과 더불어 장비 설치 위치의 진동환경에 대한 요구조건도 강화되고 있다. Giga급 DRAM의 양산공장 건립시 반도체 웨이퍼 가공 공정 중 포-토(Photo, Aligner, Stepper, Mask Machine) 장비류가 설치되는 크린룸의 진동허용규제치(vibration criteria)가 0.1 μm 이하 수준을 요구할 것으로 예상되고 있으며 이러한 진동값은 건물 구조체에서 무진동 상태를 요구하고 있는 것과 마찬가지로 극한적으로 낮은 수준이다. 이러한 관점에서 정밀 가공, 생산/검사 공장을 건설하는 과정을 살펴보면 크게 두 가지로 대별되는 분야에 의하여 이루어지고 있다. 즉 건물 구조물의 설계/시공 부분과 이 구조물을 사용하여 생산 공정을 이루고 있는 생산/검사의 프로세스 부분이다. 진동 제어 측면에서 본다면 두부분은 서로 이해관계가 상충되는 특성이 있다. 건물 구조를 설계하는 엔지니어는 방진(防振) 및 내진성(耐振性)이 우수한 생산/검사 장비를 요구하고 있는 반면 장

비 제작자는 장비가 설치되는 건물 구조에 대하여 무진동 상태를 요구하고 있는 실정이다. 일반적으로 정밀 장비는 가공이나 검사 과정에 따라 청정 구역(clean room)의 일정한 위치에 설치되어 운영된다. 이러한 청정 구역은 공기의 흐름을 원활히 하기 위하여 진동에 취약한 콘크리트 격자보 형태의 구조를 취하고 있는 반면, 내외부의 대형공조기나 유틸리티 등에서 발생하는 다양한 진동에 노출되어 있다. 건물 기초, 주구조, 격자보의 구조를 방진 및 내진성능이 우수하면서도 경제적인 구조로 설계하기 위해서는 구조물의 진동을 정량적으로 정밀하게 예측, 평가할 수 있는 진동제어 프로시저(Procedure)를 확보하는 문제가 반도체 공장의 구조해석 분야에서 하나의 과제로 대두되어 있다. 그리고 반도체 생산/검사 장비는 극한적으로 정밀한 가공정도 및 분해능이 요구되므로 현재 사용되고 있는 장비 자체의 방진 및 내진설계 기술로는 모든 진동 환경에 대해 정상적으로 가동할 수 있는 장비를 제작하는 일은 거의 불가능하다. 그것은 장비가 설치 운영되는 진동허용규제치가 엄격하여 진다는 것을 의미하며 장비 제작사가 장비의 성능을 보장하기 위해 사용자에게 장비가 설치되는 장소의 정숙한 진동환경을 요구하기에 이르렀다. 이러한 문제점으로 인하여 건물 구조 설계자나 사용자는 설계 초기단계에서 부터 엄밀한 진동허용규제치를 장비 제작자에게 요구함으로써 건물 구조의 방진대책과 장비 제작자의 과도한 진동환경의 요구에 대한 신뢰성을 확보하고자하는 경향을 보이고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 장비제작사는 여러 가지 노력을 하고 있지만 구조설계 엔지니어 입장에서 보면 여러 가지 불충분한 점이 있는 실정이다.

* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소



(a) 반도체 Mask장비의 진동허용규제치



(b) 반도체 Aligner장비의 진동허용규제치

Fig. 1 정밀반도체 생산장비의 바닥 진동허용규제치의 예

정밀 생산/검사 장비에 대한 진동허용규제치를 구조설계자나 사용자에게 제시하는 것은 장비에 대한 신뢰성(reliability) 문제뿐만 아니라 건설 및 생산 공정 전체의 초기 설계 과정에서 진동허용규제치를 경제적으로 결정하고 제품 생산 가능성을 분석 평가하는 기본 자료가 되며 진동허용규제치에 따른 건물의 형태와 크린룸의 구조를 어떠한 방식으로 설계할 것인가를 결정하는 문제에도 반드시 필요하다. 이러한 장비의 진동허용규제치는 근래에 들어 제작사가 사용자에게 반드시 제출되어야 하는 하나의 사양으로 정착되고 있다. 그러나 정밀 가공/검사 장비에 있어서 진동허용규제치는 무엇을 의미하며 어떠한 양식으로 표현되어야 하는가? 라는 의문을 장비 사용자나 설치 엔지니어들은 갖게 된다. 실제, Fig.1과 같은 양식의 진동허용규제치를 장비 제작사에 요구하지만, 구조설계 엔지니어 입장에서 보면 여러 가지 불충분한 점이 있는 데이터를 제시하고 있는 실정이다. 전반적으로

이 에 대하여 규격화된 작업이 이루어져 있지 않다는 것을 의미하고 있다. 다른 관점에서 본다면 Fig. 1과 같은 진동허용규제치를 결정하여 장비 사용자에게 제시하는 것이 어려운 작업이라는 원인에서도 그 하나의 이유를 찾을 수 있다. 그것은 전형적인 Fig. 2와 같은 정밀 장비의 구조에 대하여 동적 특성을 모델링하고 진동허용규제치를 해석적으로 결정하기에는 구조가 복잡하고 다양한 형태를 갖고 있다. 그리고 다루어야 할 동적응답이 극한적으로 작은 값이기 때문에 신뢰성 있는 데이터를 확보하기에는 많은 노력과 시간이 필요하다. 그래서 일반적으로 제시되는 반도체 생산, 가공/검사를 위한 정밀 장비나 기타 고정도의 생산검사설비들에 있어서 진동허용규제치는 진동성능시험을 통하여 결정하고 있지만 이러한 진동성능시험을 통하여 장비의 진동허용규제치를 도출하는 문제도 그렇게 용이하지 않다는 것을 의미하고 있다. 일단, 완제품 시험이 이루어져야 된다는 점과 Fig. 2와 같은 전형적인 정밀 장비들은 수 많은 복잡하고 다양한 부품으로 조립된 구조인 반면 동적으로 미세한 응답을 다루고 있기 때문에 동일한 형식의 장비라도 장비개개의 진동허용규제치가 다를 수 있으므로 고가의 장비에 대하여 전량 진동성능시험을 수행해야 하는 어려움이 있다.

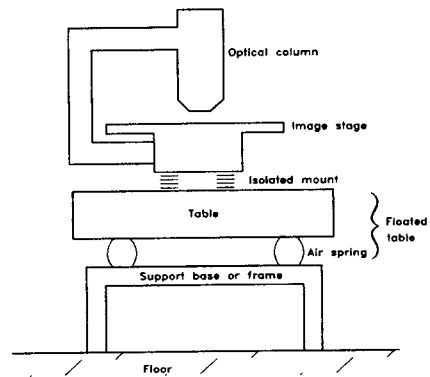


Fig. 2 Typical piece of optical equipment

본 논문에서는 정밀 장비에 대한 전반적인 진동성능시험에 대하여 개설하고 주파수응답함수를 이용한 정밀 장비의 진동허용규제치를 결정할 수 있는 새로운 간편한 방법을 모색하고자 한다. 그리고 이러한 방법을 HDD(Hard Disk Driver)의 진동허용규제치를 결정하는 것에 적용하여 그 유용성을 확인하고자 한다.

2. 본론

2.1 진동허용규제치의 결정

진동성능시험을 통하여 정밀 장비의 진동허용규제치를 결정하도록 엄밀하게 규정된 바는 없지만 일반적으로 ISO, JIS, KS에서 규정하는 진동환경시험에 사용되는 진동 발생장치 및 측정, 분석 시스템등 하드웨어 측면에서는 대동소이하지만 가진(加振)방법이나 진동허용규제치를 결정하는 방법에서는 아래와 같은 차이가 있다.

- 진동환경시험 : 설치 위치의 진동 환경 제시, 사용자 위주의 관점, 진동 환경이 열악, 결과는 장비이상 유무만 결정.
- 진동성능시험 : 장비의 진동 환경 제시, 제작자 위주의 관점, 장비가 진동에 취약, 정밀 장비, 결과는 장비의 진동허용규제치 결정.

진동환경시험은 선박, 자동차, 항공기등과 같이 진동환경이 열악한 곳에 탑재되는 장비에 대하여 실시하는 반면 진동성능시험은 반도체 생산/검사등과 같은 정밀장비에 대하여 수행하는 것이 일반적이다. 아래에 고정밀장비의 진동허용규제치를 결정하는 실험적인 방법에 관하여 정리하고 전달함수법(FRF)을 이용하여 효율적인 진동허용규제치를 결정할 수 있는 방법에 관하여 논의하였다. 그리고 이러한 방법을 HDD에 적용하여 진동허용규제치를 구하였고 실험적 결과와 비교 검토하였다.

2.1.1 진동성능시험

진동성능시험을 통하여 정밀 장비의 진동허용규제치를 결정하는 방법에는 진동환경시험에서 사용하는 가진, 측정/분석 시스템과 동일하지만 진동환경시험에서는 가진 조건을 결정하고 이때 시험대상장비의 정상 가동 유무를 확인하는 반면 진동성능시험은 장비가 이상이 발생하는 진동 크기와 주파수를 결정한다는 점에서 그 차이가 있다. 일반적인 진동성능시험에 사용되는 가진기 및 측정/분석 시스템의 구성도는 Fig. 3에 진동성능시험의 절차서는 Fig. 4에 정리하였다.

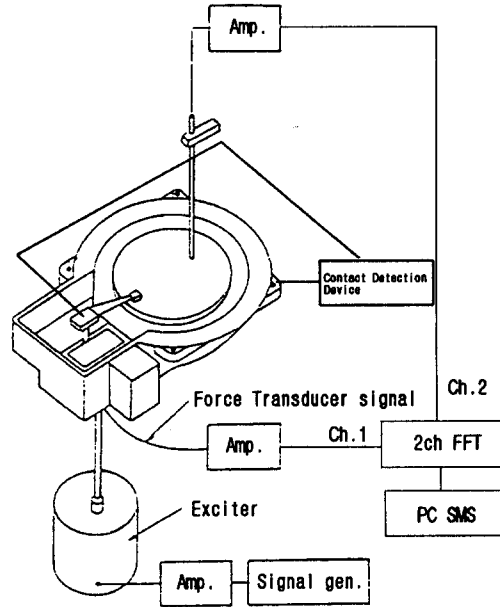


Fig. 3 정밀 장비의 진동성능시험 구성도

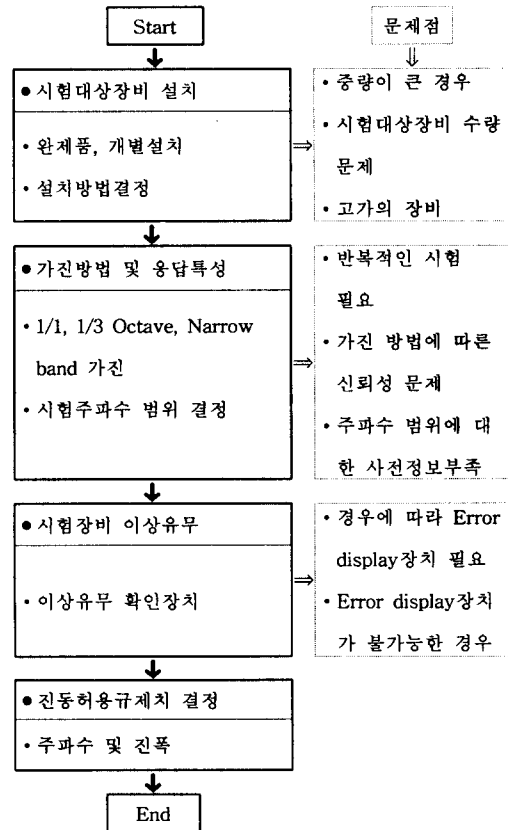


Fig. 4 진동성능시험 절차서 및 절차별 문제점

2.1.2 FRF법을 이용하는 방법

일반적으로 정밀장비로는 반도체 공장에 사용되는 고정밀 생산/검사 장비는 Aligner, Stepper, SEM, TEM 등과 레이저 가공 장비가 있고, 기타 분야에는 고용량 HDD 및 생산설비, 고밀도의 CD Driver 및 CD생산설비, 정밀세포이식 및 수술, 검사 의료장비등이 있다. 이들 장비의 구조적 특성은 Fig. 2와 같이 Projection part(optical column)와 Target part(image stage)로 이루어져 있다. 이러한 구조에서 진동허용규제치는 Projection part와 Target part의 상대진동변위에 의하여 지배되며 이러한 상대진동변위는 두 위치의 Point Mobility(FRF)에 의하여 결정할 수 있다는 발상에서 시작된다. 물론 두 위치를 구성하고 있는 구조체는 장비의 전체 동적특성과 관련 되어 있기 때문에 두 위치에 대한 구조물의 Point Mobility는 실험적으로 구하게 된다. Fig.6에서 p, q점의 상대변위는 진동시스템 전체가 거동하는 강체운동 성분을 제외한 전체 진동계의 유연한 모드(flexible mode)에 의하여 결정된다. 진동허용규제치는 Target부와 Projection부로 분리되는 p점과 q점 사이의 상대진동변위에 의하여 결정된다. 즉 이러한 상대진동변위는 가공/검사의 정밀도에 의하여 제한된다. 전자현미경인 SEM 이나 TEM의 경우 분해능과 확대율에 의하여 결정된다. $0.1\ \mu\text{m}$ 의 분해능을 가지고 만배의 확대율을 가진 현미경에서 상대진동변위의 제한치는 $0.1\ \mu\text{m}$ 이하 일 때 관찰 대상사이의 영상을 구별할 수 있다. 즉 Target부와 Projection부의 상대진동변위가 $0.05\ \mu\text{m}$ 이상이면 인접하는 물체가 구별되지 않고 겹쳐져 보인다는 것을 의미한다. 여기서 인간이 관찰하는 눈의 잔상, 또는 대상을 촬영한다면 카메라의 셔터 시간과 진동 주파수의 상호관계를 분석하여 진동 허용치를 결정한다. HDD와 같은 경우는 데이터를 저장하는 미디어(media)부와 데이터를 입출력하는 헤드(head)부의 상대진동변위에 의하여 HDD의 진동허용규제치가 지배적으로 제한된다. Fig. 5에는 FRF법을 이용하여 진동허용규제치를 결정하는 절차서를 나타내었다.

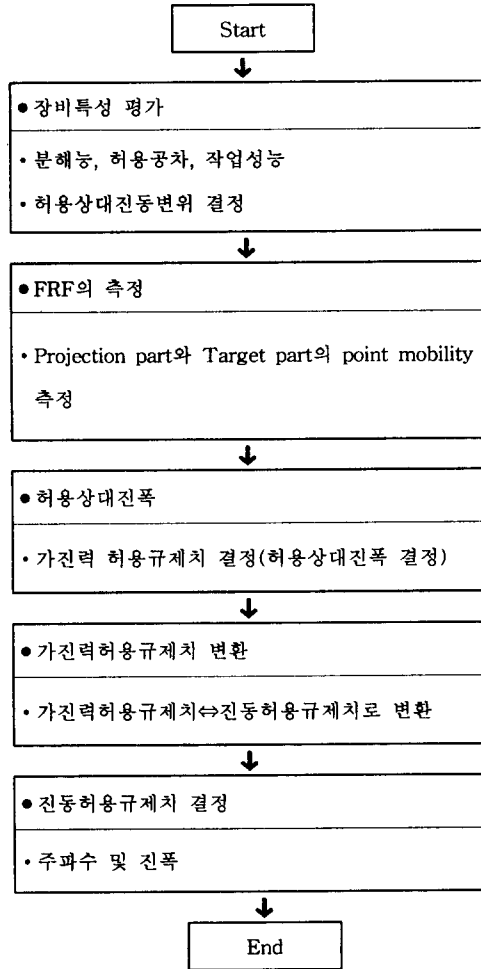


Fig. 5 FRF법을 이용한 진동허용규제치 결정 절차서

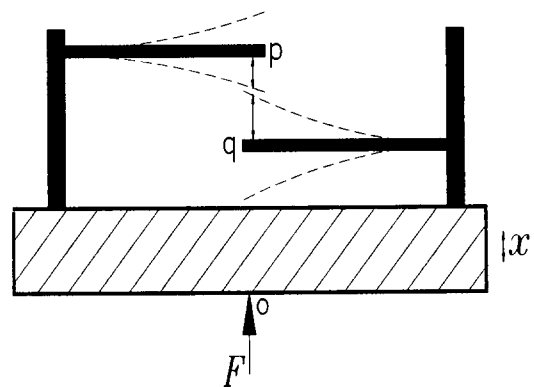


Fig. 6 상대진동변위 특성 개념도

2.2 HDD 적용 시험

HDD에 대하여 진동성능시험을 통한 방법과 FRF법을 이용한 방법을 이용하여 진동허용규제치를 결정하는 것에 대하여 비교 검토하였다. 본 논문에서는 실제 HDD의 진동허용규제치를 찾는 것이 목적이 아니라 진동 허용 규제치를 결정하는 두 가지 방법에 대한 비교, 평가하는 것에 주안점을 두었다. 실제 HDD가 정상적으로 동작할 때는 미디어부가 고속으로 회전하고, 헤드부는 약 0.3 - 0.5 μm 부상한 상태로 미디어에 저장된 데이터를 입출력 한다. HDD에서 상하 방향으로 진동허용 상대변위가 헤드와 미디어 사이의 물리적 접촉이 일어나지 않게 하는 것이 목적일 경우 그 상대 값은 0.3 μm 가 되지만 데이터 입출력의 이상 유무의 관점에서는 더 작은 값이 될 수도 있지만 본 연구에서는 목적을 위하여 헤드부와 미디어부가 물리적 접촉을 확인할 수 있도록 전기적 장치를 고안하여 설치하였고 HDD가 정지 상태에서, 그리고 미디어와 헤드의 부상 간격도 임의로 조정하게 설치하였으며 실험에 사용된 간격은 98 μm 이다. Fig.7에는 HDD의 진동 동성능시험을 통하여 구한 진동허용규제치와 FRF법을 이용하여 구한 값을 비교하였다. 진동성능시험을 수행할 경우 가진 방법을 어떻게 할 것인가가 문제가 된다. 협대역으로 관심의 전 주파수 영역에 대하여 진동 성능 시험을 할 경우 많은 반복 시험이 필요하지만 1/3옥타브 밴드로 가진할 경우 진동성능시험시 가진 회수를 줄일 수 있다. 그러나 진동허용규제치가 과대 평가되는 문제로 인하여 신뢰성이 떨어진다. FRF법에 의한 방법은 간단히 헤드와 미디어의 접점 위치에서 각각의 Point Mobility를 구하고 몇 가지 계산 과정을 통하여 결정된다. 헤드와 미디어 사이의 상대 진동변위는 헤드와 미디어의 Flexible Mode에 의하여 결정되기 때문에 가진기 시험일 경우 FRF에서 강제진동 모우드성분은 제거하여야 하며 상호 위상이 180° 차이가 날 경우 FRF를 합하는 것으로 나타난다. 물론 위상차가 0° 일 경우 FRF를 상호 제하여 절대값을 취하는 것으로 상대 진동 변위를 고려한 FRF를 구할 수 있다. 여기서는 가장 엄격한 180° 위상차가 나는 경우에 대하여 정리하였다. 그 과정을 Fig.7, 8, 9, 10, 11에 나타내었다.

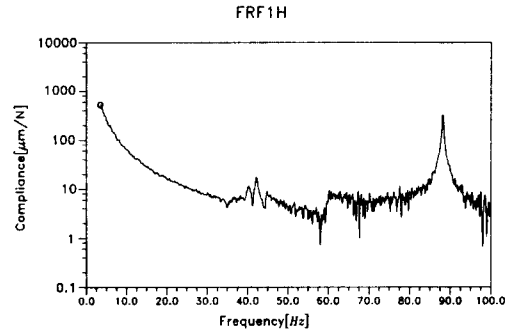


Fig. 7 Mobility data of HDD Head Part

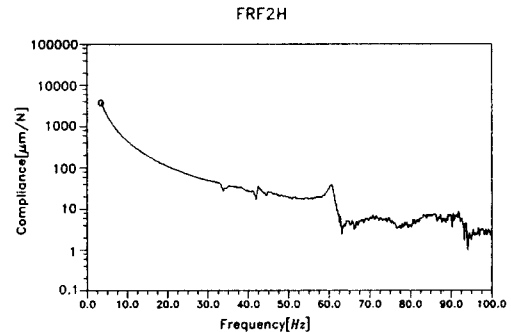


Fig. 8 Mobility data of HDD Media Part

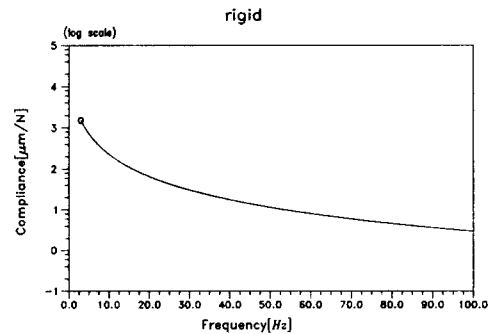


Fig. 9 Mobility data of HDD Rigid Part

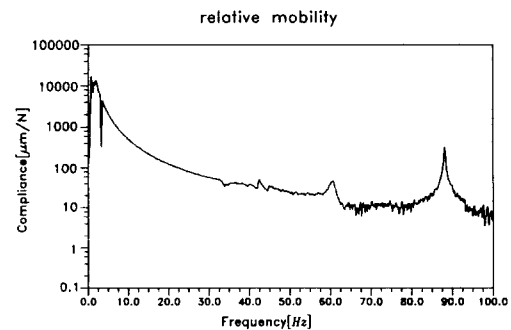


Fig. 10 Relative Mobility data of HDD Head and Media part

가진력허용규제치를 진동허용규제치로 변환시킬 경우 아래의 식을 이용하여야한다. Fig. 11은 진동 성능 시험의 동적 특성을 모델링하여 식을 유도하였다.

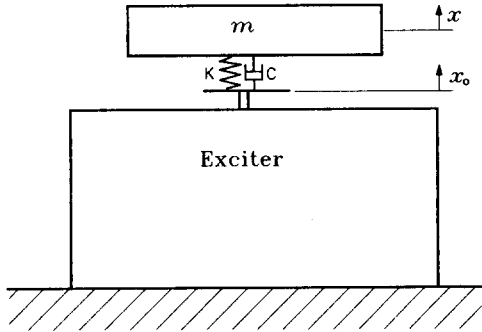


Fig. 11 진동 성능 시험의 진동모델링

가진기에 의하여 HDD를 가진시킬 경우 가진기의 입력에 대한 HDD의 응답은 Fig.11과 같이 진동 모델링 될 경우 다음과 같이 전달 함수에 의하여 결정된다.

$$T_r(\omega) = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta \frac{\omega_e}{\omega_n})^2}{(1 - \frac{\omega_e^2}{\omega_n^2})^2 + (2\zeta \frac{\omega_e}{\omega_n})^2}} \quad (1)$$

where,

T_r : transmissibility

ω_n : natural frequency of anti-vibration system

ω_e : exciting frequency

ζ : damping ratio

정현과 입력에 대하여 HDD의 x 는 식(2)에 의하여 결정된다.

$$x = T_r \cdot x_0$$

$$\ddot{x} = \omega_e^2 \cdot T_r \cdot x_0 \quad (2)$$

이때, HDD(mass: m)는 자체의 질량만큼의 관성력(F_m)을 받게 된다.

$$F_m = m \cdot \ddot{x} \quad (3)$$

식(2), (3)을 정리하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$T_r = \frac{F_m}{m\omega_e^2 x_0} \quad (4)$$

이때 가진기와 장비 사이에 설치된 연결부가 충분한 강성을 가지고 있다면 전달율 T_r 은 1이 되며 식 (4)는 식 (5)와 같이 된다.

$$F_m = m\omega_e^2 x \quad (5)$$

F_m 에 가진력허용규제치값을 대입하고 질량 m 에 855g을 대입하면 Fig. 12와 같은 주파수에 대한 진동허용규제치를 결정할 수 있다.

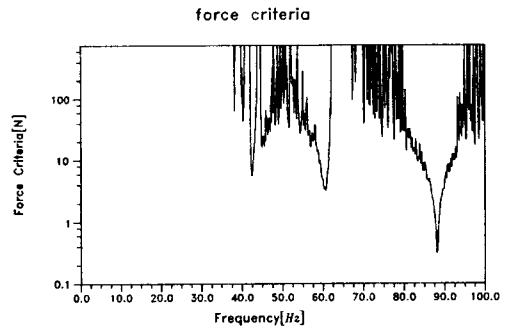


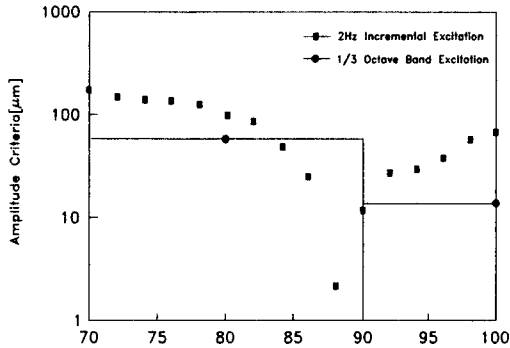
Fig. 12 Vibration Criteria of the Exciting Force
Causing Relative Motion 98 μ m

3. 고찰 및 결론

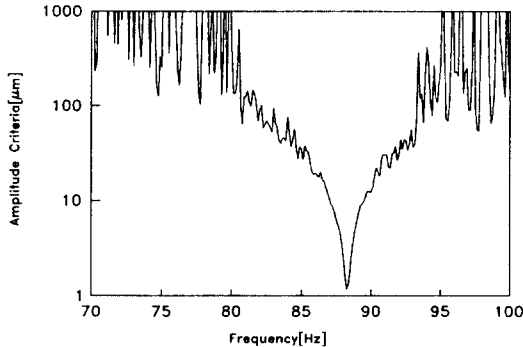
정밀 장비의 진동허용규제치를 기존의 진동성능시험과 FRF를 이용하여 구하는 방법을 비교·검토하였다. 진동성능시험을 통하여 진동허용규제치를 구하는 방법은 많은 시간과 노력이 필요한 시험으로 장비 제작자의 입장에서 본다면 번거롭고 까다로운 작업이며, 사용자는 이로 인한 장비의 가격상승요인의 부담을 갖게 되지만 여기서 제시한 FRF를 이용한 방법은 기존의 진동성능시험과 동일한 수준의 신뢰성 있는 진동허용규제치를 비교적 간단한 실험을 통하여 얻을 수 있어 여러 측면에서 유용하다. Fig. 13은 기존의 진동성능시험방법과 여기서 제시한 방법의 결과를 서로 비교하였다. Fig. 13(a)은 진동성능시험에 의하여 진동허용규제치를 구한 것으로 가진 방법 따라 1/3옥타브 밴드와 2Hz 간격으로 가진 주파수를 증가시키면서 측정된 진동허용규제치를 나타내고 있다.

Fig. 13(b)은 FRF에 의하여 구한 진동허용규제치를 나타낸 것으로 주파수 분해능 측면에서나 시험 방법 및 시간과 경비등 기존의 방법에 비하여 매우 효율적이다. 그러나, 이러한 FRF법에 의한 진동허용규제치를 실용화하기 위해서는 보다 다양한 분야에 대해 신뢰성 실험 및 검증을 통한 체계적인 시험절차서를 구성하는 연구가 요구된다.

5. 이흥기, 권형오, 구조물의 실험적 진동예측기술에 관한 연구, '92 추계학술대회 논문집
6. Sang Kyu Park, Hong Ki Lee and Hyeong Oh Kweon, Vibration Control of Synchrotron Right Source Building Using Experimental Modal Analysis, ASIA-Pacific Vibration Conference '93. November 1993, Session: Control & Measurement in Mechanical Systems.
7. Eric E. Ungar, Designing Sensitive Equipment and Facilities, Mechanical Engineering, December 1985.
8. Eric E. Ungar, Vibration Control Design of High Technology Facilities, Sound and Vibration, July 1990.



(a) 진동성능실험을 이용한 HDD의 진동허용규제치



(b) FRF법을 이용한 HDD의 진동허용규제치

Fig. 13 진동허용규제치의 비교

참고문헌

1. 이흥기, 박해동, 최현, 배기선, 김두훈. 정밀장비의 미진동 제어 기술에 관한 연구(HDD CELL진동제어), '95 추계학술대회 논문집
2. SMS STAR Theory and Application, Issue A:25 January 1990.
3. D. J. Ewins, Modal Testing; Theory and Practice, Research Studies Press.
4. ANSI S2.32 - 1982, Methods for the Experimental Determination of Mechanical Mobility, Part II.