

정밀장비의 미진동제어 기술에 관한 연구(HDD CELL 진동제어)

○이홍기*, 박해동*, 최현**, 배기선**, 김두훈*

A Study on the Micro-Vibration Control of a Precision Equipment(HDD CELL Vibration Control)

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

1. 서 론

근래에 들어 산업제품의 고성능화, 고집적화됨에 따라 첨단기술분야에서 정밀장비의 이용률이 점차 증대되고 있다. 반도체 공정에서 사용되는 생산, 검사 장비인 aligner, stepper, SEM, TEM 등과 레이저 가공, giga급의 고용량 HDD, 정밀수술장비, 세포이식장비등 각 분야에 사용되는 서브 마이크로에서 나노메타에 이르는 가공, 검사장비들에 의하여 다양한 핵심 기술들이 성취되고 있다. 이러한 정밀장비들은 광학, 제어등 각분야의 요소기술과 응용기술들의 복잡하고 다양한 조합에 의하여 필요한 기능과 성능을 얻게 된다. 장비를 구성하고 있는 각 요소들은 필연적으로 지지구조물에 의하여 종합적으로 설계되고 조립되어진다(Fig.1 참조). 일반적으로 정밀장비는 가공이나 검사 공정에 따라 청정구역(clean room)에 설치되어 운영되며 청정구역의 access floor라는 구조물에 의하여 지지되고 있으며 외부의 공조기나 유틸리티 등에서 발생하는 진동에 노출되어 있다. 콘크리트 구조물과 access floor의 진동환경을 개선하기 위하여 복잡하고 다양한 방진기술이 사용되고 있지만 근본적으로 무진동상태를 구현하는 것은 불가능하다. 특히 우리 나라에서 지대한 관심을 갖고 있는 반도체 생산공장에서 64M~giga급 DRAM 생산을 위해서 요구되는 구조물의 진동조건은 극한적인 환경을 요구하고 있다(Table 1 참조). 이러한 반도체 생산공장과 정밀가공, 실험, 검사를 수행하는 구조물의 진동환경조건의 규제는 이곳에 설치되는 정

밀장비의 진동허용 규제치와 직접적인 관계를 갖고 있다. 그리고 정밀장비의 진동허용규제치는 가공이나 검사의 정밀도와 구조의 형태에 따라 복잡하고 다양한 양상으로 나타나기 때문에 동적 특성을 해석적인 방법으로 구하는 것은 어려운 일이며 일반적으로 진동환경실험을 통하여 진동허용규제치를 결정하고 있다. 정밀장비에서 내진 설계의 필요성은 여러 가지 측면에서 유용하다. 장비의 동적 특성이 명확히 알려지기 때문에 최대성능을 발휘할 수 있는 진동환경의 구현에 대하여 탄력적으로 대응할 수 있다는 것과 장비가 설치되는 건축구조물의 동적 설계와 진동원에 대한 진동제어가 용이하기 때문에 경제적, 시간적으로 유리하다. 본 논문에서는 정밀장비의 일반적인 내진 설계를 위한 procedure를 제시하고 이를 Hard Disk Driver 자동 servo-writing하는 HDD CELL 정밀장비에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

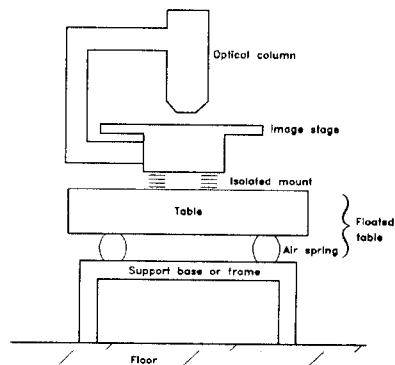


Fig.1 Typical piece of optical equipment

* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

** 삼성전자(주) 생산기술센터 자동화연구소

Table.1 Vibration criteria of semi-conductor factory

D램	웨이퍼 (inch)	칩크기 (mm ²)	선폭 (μm)	진동규제치 (μm)
64K	4	20	수십 ~ 수 μm	
256K	5	40	"	
1M	6	50	"	
4M	6	90	"	
16M	8	130	about 2 μm	about 2 μm
64M	8	190	about 1.5 μm	about 0.5~1 μm
256M	8	285	about 0.25 μm	about 0.2~0.5 μm

2. 본 론

2.1 HDD CELL의 구조

HDD CELL은 HDD(Hard Disk Driver)의 정보를 저장하는 미디어부에 트랙과 섹터의 초기정보를 자동적으로 기록하는 정밀장비로서, HDD를 이송 탈착시키는 로봇과 초기화정보를 입력시키는 Servo-Writer로 구성되어 있다. 이장비가 정상적으로 가동중 진동에 가장 민감한 영향을 받는 부분은 HDD가 로봇에 의하여 Servo-Writer에 장착되어 HDD의 미디어부에 초기화정보를 입력하는 과정에서 발생한다. 이것은 HDD에서 정보를 입출력시키는 헤드부와 정보를 저장하는 미디어부가 회전 중에 약 0.3 μm 의 간격을 유지하여 동작하고 있기에 외부의 미세한 진동이 원인이 되어 초기 정보입력 상태의 에러가 발생하거나, 심한 경우 물리적 접촉에 따른 HDD의 손상 원인이 되기도 한다. HDD CELL의 개략적인 구성도는 Fig. 2와 같다.

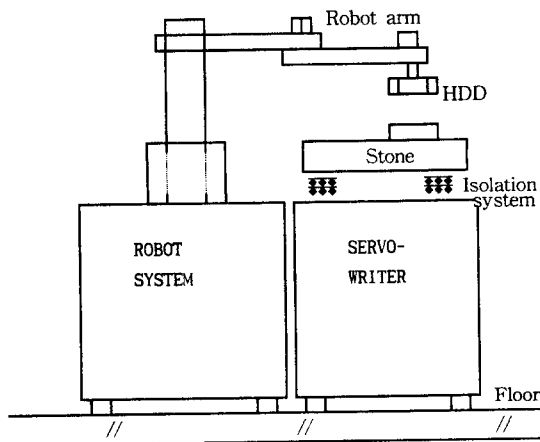


Fig. 2 HDD CELL의 개략 구성도

2.2 HDD CELL의 동적 특성

HDD CELL의 내진 설계를 수행하기 위해서는 기본적으로 두 가지의 설계인자를 결정해야 한다. 첫째로 HDD CELL이 설치되는 위치, 즉 access floor의 건물에 대한 진동설계 목표치가 필요하고 둘째로 HDD의 초기정보 설정을 정상적으로 수행하기 위한 HDD 자체의 진동 허용규제치가 결정되어야 한다. 일반적으로 건물 진동설계목표치는 건물 구조의 동적 특성과 주변 진동원에 대한 종합적인 가진(加振) 특성에 의하여 결정되지만 무진동 환경을 성취하는 것은 경제적으로나 기술적으로 매우 어려운 일이다. 따라서 일반적으로 정밀가공이나 생산공정에 따라 초기 구조물 설계시 진동설계 목표치를 설정하여 구조물의 동적 설계 및 진동제어를 위한 total engineering을 수행하게 된다. 그리고 HDD자체의 진동허용규제치는 HDD의 중요한 구성요소인 헤드(head)와 미디어(media)의 동적 특성에 의하여 결정된다. HDD에서 헤드와 미디어는 동적으로 복잡한 지지구조물과 회전구동부로 이루어져있기 때문에 해석적인 방법으로 모델링하여 신뢰성 있는 진동 전달특성과 허용규제치를 추정하는 일에는 많은 노력과 시간이 요구된다. 여기서는 실험적 모우드해석을 이용하여 HDD의 헤드부와 미디어부의 주파수응답함수(FRF)를 구하고 이를 이용하여 진동 허용규제치를 추정하였다. 이와 같이 두 가지 내진 설계인자가 결정되면 HDD CELL이 설치되는 바닥의 진동이 servo-writer상의 HDD의 진동 허용 규제치를 만족하도록 지지구조물이나 방진시스템을 설계함으로써 내진 및 방진설계가 끝나게 된다. Fig.3 및 Fig.4에는 정밀장비의 내진 설계조건과 정밀장비의 내진 설계를 위한 일반적인 procedure를 나타내었고 이를 HDD CELL의 내진 설계에 적용하였다. 여기서, 건물진동 설계목표치는 4M DRAM 반도체 생산공장의 진동설계목표치 수준인 2 μm (16Hz 미만), 2gal(16Hz 이상)로 정하였으며 HDD의 진동 허용 규제치는 헤드와 미디어 사이의 부상간격의 1/3수준인 0.1 μm 로 결정하였다. 실제 중요한 것은 헤드와 미디어의 상대진동변위이며 정상작동 중 물리적 접촉이 발생하는 경우는 HDD 헤드의 부상간격인 0.3 μm 보다 더 큰 상대진동변위가 나타날 때이다. 그러나 이때, 헤드는 미디어와의 최대 이격거리가 0.6 μm 가 되어 자기신호 입출력에 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 상대 진동변위를 최소화하도록 0.1 μm 이하로 제한하였다.

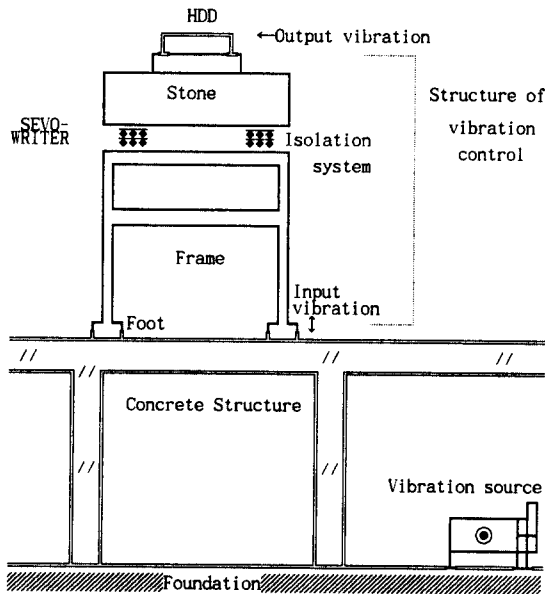


Fig.3 Vibration control factor of servo-writer of HDD CELL

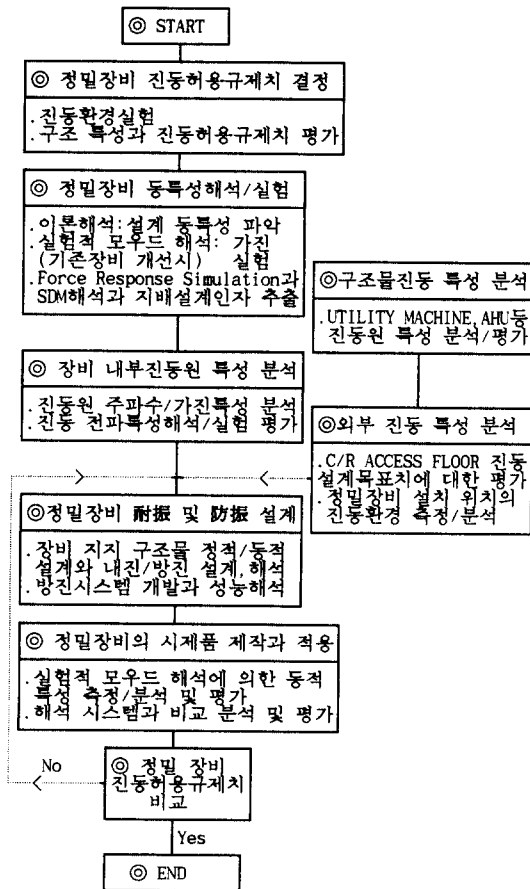


Fig. 4 Vibration control procedure of HDD CELL

2.3 HDD CELL의 진동원 특성

HDD CELL 가동시 HDD에 영향을 미칠 수 있는 진동원으로는 다음과 같다.

① 내부진동원

- 로봇트 아암의 운동에 기인하는 진동
- HDD 이송 장치, motor, air tool 등 파워 공급 장치 관련 진동

② 외부진동

- clean room 내의 access floor 진동
- 기타 외부 진동(walking, 제품이송 등)

일반적으로 clean room 내부에 설치되는 정밀장비는 제진대를 사용하여 access floor와는 완전히 절연되고 하부구조콘크리트 구조물에 의하여 지지가 이루어지기 때문에 access floor상에서 발생하는 외부의 과도진동으로 인하여 문제를 발생시키는 예는 드물다. 그러나 상시적으로 발생하는 access floor의 하부 구조물로부터 전달되는 진동에 대해서는 충분한 고려가 필요하다. HDD CELL의 로봇트 아암에서 발생하는 가진력은 진동계를 선형 모델로 가정할 경우 아래 식에 의하여 구해진다.

$$F(\omega) = \frac{X(\omega)}{H(\omega)}$$

여기서, $F(\omega)$: 주파수별 가진력

$X(\omega)$: 진동계의 응답

$H(\omega)$: 전달함수

전달함수 $H(\omega)$ 는 로봇트 아암의 중단부에서 point mobility를 구함으로써 결정되고 응답은 동일한 위치에서 로봇트 아암을 운전속도로 가동하여 진동을 측정하므로서 구할 수 있다. 이때 최대 가진력은 15Hz에서 1.7N으로 평가되었다. 그러나 내부 진동원이 되는 로봇트와 HDD가 정착되는 servo-writer는 직접적으로 접촉하지 않도록 절연되어 있기 때문에 진동 전달경로는 로봇트의 다리에서 access floor를 통하여 HDD가 설치된 servo-writer로 전달된다. 그러나 일반적으로 건설되는 access floor의 point mobility가 $10^{-2} \sim 10^{-5} \mu\text{m}/\text{N}$ 수준이기 때문에 건물 설계기준인 $2\mu\text{m}$ 에 기여하는 진동은 매우 작은 것으로 평가되었다.

2.4 HDD의 진동허용 규제치

servo-writer상에 설치되는 HDD의 진동허용 규제치는 정보 입출력시 헤드와 미디어 사이가 회전 중에 부상(부상)간격이 $0.3\mu\text{m}$ 를 유지하여야 한다는 조건에서 정할 수 있다. 정상가동시 헤드와 미디어 사이에는 물리적 접촉이 일어나지 않아야 하며 자기신호 입출력이 정상적으로 이루어지는 최대 외부진동을 알아냄으로서 결정할 수 있다. 헤드와 미디어 사이의 최대 상대진폭이 $0.4\mu\text{m}$ 이하 수준이면 HDD의 정보 입출력에 문제가 없는 것으로 가정하였다. 이 경우 외부에서 전달되는 진동 수준이 얼마일 때 비정상적인 기능이 발생하는가를 결정하기 위해서는 규정에 정하는 바에 따라 진동 환경 실험(Vibration Environment Test)을 수행하는 것이 일반적인 일이다. 이러한 실험을 통하여 진동허용 규제치를 구하기 위해서는 진동 가진 시스템과 측정,분석 장비가 필요하며, 특히 실험 대상물의 중량이 큰 경우는 여러 가지 문제점이 발생한다. 그리고 진동에 의한 실험 대상물의 오작동 여부를 즉시 확인할 수 있는 시스템이 필요하다. HDD를 진동환경시험을 수행할 경우 문제가 되는 것은 어떻게 헤드와 미디어의 물리적 접촉이나 입출력되는 자기신호의 이상 유무를 알 수 있는가 하는 것이다. 이것은 기술적으로 난해한 문제로서 특별한 확인 장치를 별도로 고안하여야 하는 어려움이 있다. 이를 해결할 수 있는 방법으로는 HDD의 헤드와 미디어를 구성하고 있는 구조물을 미소변위가 발생하는 경우에는 선형성을 유지하는 것으로 가정하고 실험적 모우드 해석법을 이용하여 HDD 단독에 대하여 모우드 실험을 통하여 각각의 전달함수(FRF)를 구하고 헤드와 미디어 사이 최대 상대진폭이 $0.1\mu\text{m}$ 되는 진동 허용가진력 규제치를 구하여 이를 내진 및 방진 설계에 이용하며, 또한 HDD CELL의 진동허용 규제치를 유도할 수 있다면 여러 가지 측면에서 유용할 것이다. 다음은 이러한 활용 방안을 정리하였다. 아래의 Fig.5에는 HDD의 실험적 모우드해석을 위한 측정/분석 시스템의 구성도를 나타내었고, Fig.6에는 HDD 헤드 중단부의 모빌리티 데이터, Fig.7에는 HDD 미디어의 원판 중단부의 모빌리티 데이터를 나타내었다. Fig.8에는 HDD 헤드와 미디어의 주요 모우드형상을 나타내었고 Fig.9는 단위 가진력에 대한 HDD전체 질량(280g)의 주파수 별 진동응답을 나타내는 것이다.

HDD 실험적 모우드해석 결과 특이한 것은 HDD의 미디어부는 235Hz에서 회전 지지부를 중심으로 하는 피칭

모우드가 가장 크게 나타나고 있다. 원판 형상인 미디어의 1차 밴딩모우드는 658Hz이고 이 모우드의 진동변위 기여도는 피칭모우드의 2% 수준으로 나타났다. 그리고 HDD의 진동허용 규제치는 고려할 수 있는 가장 극한적인 상황에서도 정상적으로 동작하여야 하기 때문에 미디어와 헤드의 상대진동변위는 강제진동 성분을 제거하고 상호 위상이 180° 차이가 날 때는 전달함수를 합하는 것으로 나타난다.

Fig.10은 HDD의 헤드와 미디어 사이의 상대진폭 $0.1\mu\text{m}$ 를 발생시키는 진동허용가진력 규제치를 가장 가혹한 경우에 대하여 Fig.6, 7, 9를 이용하여 구한 것을 나타낸 것이다.

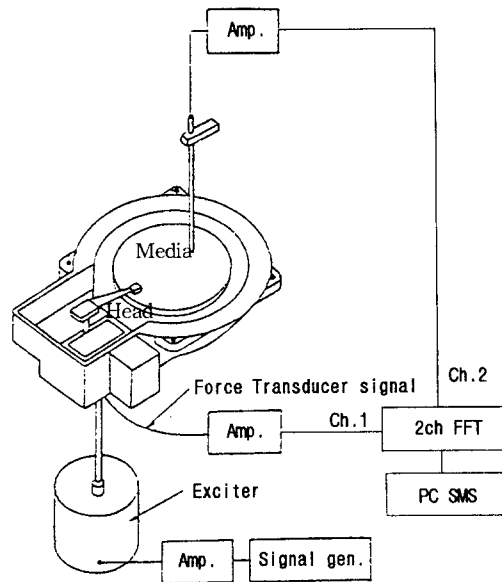


Fig.5 Measurement and analysis system of FRF

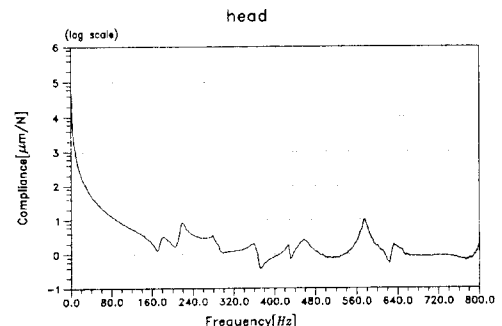


Fig.6 Mobility data of HDD head part

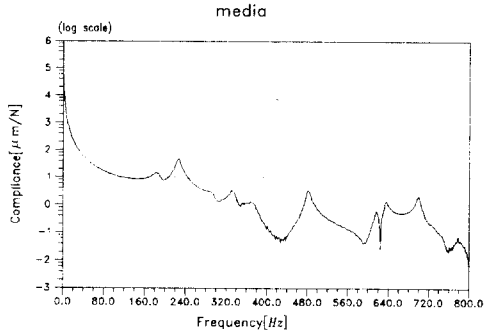
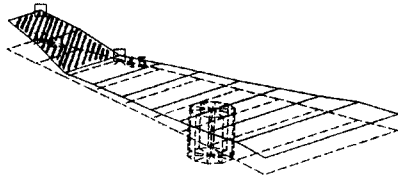


Fig.7 Mobility data of HDD media part

Project : hddhead
 Trace A : Mode#1 182.23 Hz
 Mode # : 1
 Frequency : 182.23 Hz
 Damping : 2.72 %



Project : hddmedia
 Trace A : Mode#1 235.15 Hz
 Mode # : 1
 Frequency : 235.15 Hz
 Damping : 1.36 %

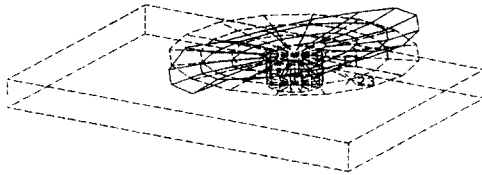


Fig.8 Mode shape of head and media part

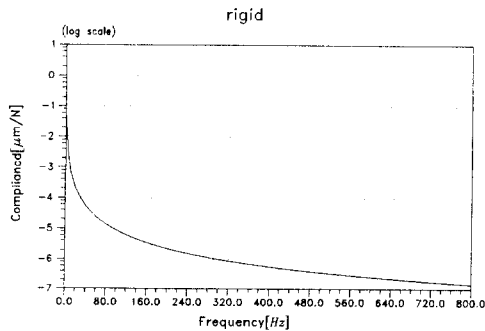


Fig.9 Mobility data of HDD rigid motion

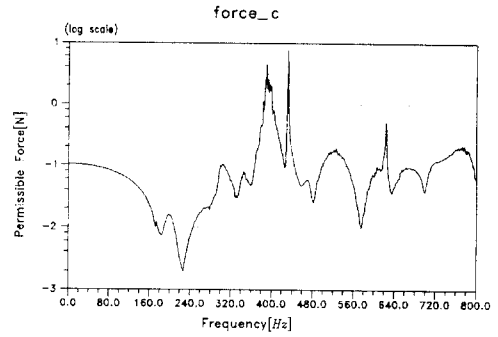
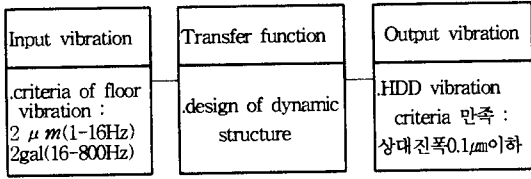


Fig.10 Permissible exciting force of relative motion 0.1 μ m

진동환경시험을 통하여 얻어지는 진동 허용규제치는 진동변위나 가속도로 구해지지는 것이 일반적이지만, 위에 나타난 Fig.10은 전달함수(FRF)를 이용하여 진동 가진력을 허용규제치로 나타낸 것이다. 진동환경 시험에 의한 진동허용규제치를 구하는 경우 장비를 구성하고 있는 동적 인자가 하나만 변하여도 재 실험을 수행하여야 하며, 또한 실험 중에도 장비가 진동에 의한 오작동 여부를 확인할 수 있는 시스템이 필요하다. 전달함수를 이용하는 방법은 진동제어 목표물 자체(여기서는 HDD)의 동적 특성을 변화시키는 문제가 발생하지 않는 이상 장비의 방진 설계나 진동허용 규제치를 실험을 통하지 않고도 구할 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 진동 제어가 필요한 목표물의 정밀도가, 예로서 HDD의 헤드와 미디어의 부상 간격, 광학장비나 전자현미경 등의 분해능이나 배율, 결정되면, Fig.1에서는 optical column의 중단부와 image stage의 전달함수 만으로도 진동 규제치 뿐만 아니라 진동제어 시스템을 설계할 수 있다는 것을 의미한다.

2.5 HDD CELL의 耐振設計

HDD CELL의 내진 설계는 HDD가 장착되는 servo-writer의 구조물을 HDD CELL이 설치되는 바닥의 입력 진동에 대하여 Fig.10에 나타낸 진동 가진력허용규제치를 만족할 수 있도록 구조물과 방진시스템을 구성하는 것이다.



바닥에서 servo-writer에 입력되는 진동은 건물 진동 설계 목표치 2 μm (1-16Hz) 2gal(16-800Hz)를 그림으로 나타내면 Fig.11과 같다.

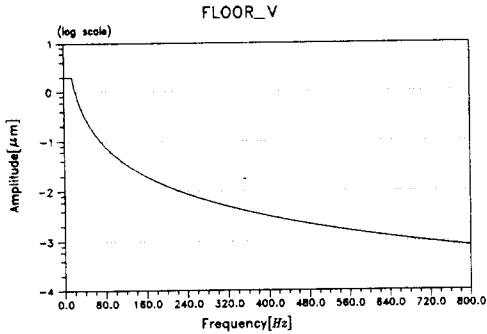


Fig.11 Input vibration of servo-writer of HDD CELL

Servo-writer의 개략적인 구조는 Fig.3과 같이 하부 프레임과 HDD가 설치되는 상부의 석정반으로 이루어져 있으며 이들 구조는 일반적으로 유의 진동 주파수에 대하여 강체진동을 하도록 충분한 강성을 가지도록 설계한다. 이때, 입력되는 진동이 상부구조물에 감쇠없이 전달되는 것으로 가정할 수 있으며, 상부 HDD에 전달되는 진동이 HDD의 진동허용규제치를 만족하는지 여부를 평가하여 과대 진동이 입력될 때에는 적당한 진동 전달율을 가진 방진시스템을 설계하여 servo-writer 구조물 사이에 삽입하여야 한다. 방진 시스템에 의한 전달함수는 아래 식으로 정의된다.

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

where,

T_r : transmissibility

ω_n : natural frequency of anti-vibration system

ω_e : exciting frequency

ζ : damping ratio

정밀장비를 설계조건에 만족되는 방진시스템을 구성하기 위해서는 진동 전달율과 HDD의 진동 허용가진력규제치 사이의 관계식을 유도해야 한다. 입력 진동은 진동 변위이고 Fig.10에 나타나는 진동 허용 가진력규제치는 힘에 대한 값이기 때문에 직접 사용할 수는 없다. Fig.12는 servo-writer를 수동형 방진시스템으로 모델링한 것이다.

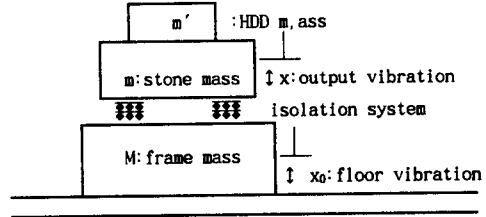


Fig.12 Passive type modeling of servo-writer of HDD

Servo-writer의 프레임은 입력 바닥 진동을 방진시스템의 전달율에 의하여 상부 석정반(stone)에 전달하여 응답이 결정된다.

$$x = T_r \cdot x_0$$

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

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

$$F_m = m' \cdot x_0 \quad (3)$$

식(2), (3)을 정리하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

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

여기서, F_m 에 Fig.10의 진동 허용가진력 규제치를 대입하면 진동 허용가진력 규제치를 만족하는 방진시스템의 전달율이 결정되고 여기서 구한 전달율을 식(2)에 대입하면 HDD CELL의 진동 가속도로 표현되는 진동 허용규제치를 구할 수 있다. Fig.14는 진동 허용규제치를 만족하는 방진시스템 구성을 위해 필요한 전달율 그래프를 나타내며 230Hz 부근에서 전달율이 1보다 작게 나타나고 있기 때문에 방진시스템을 servo-writer의 구조물

사이에 삽입하지 않을 경우 HDD를 servo-writing 작업 시 진동 문제를 야기시킬 수 있다는 것을 의미한다.

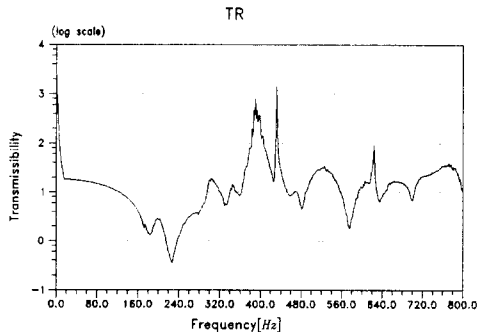


Fig.14 Transmissibility of isolation system

3. 고찰 및 결론

정밀장비의 내진 및 방진설계에 대한 일반적인 procedure를 제시하고 이를 정밀제어 장비인 HDD CELL에 적용하였다. 정밀장비의 내진 설계를 위해서는 정확한 진동 허용규제치와 정밀장비가 설치되는 구조물의 진동 환경에 대한 데이터를 확보하는 것이 우선적으로 해야할 일이다. 구조물의 진동은 직접 측정을 하거나 설계 자료를 이용하는 것이 가능하지만 진동 허용규제치는 장비 제작사에서 진동환경시험을 통하여 얻어진 자료를 사용자에게 제시하는 것이 일반적인 과정이다. 그러나 고도의 정밀성을 요하는 장비 전체를 가진 테이블에 설치하여 진동환경시험을 수행하는 일은 시간과 경제적인 측면에서 유의하지 못하다. 그러한 면에서 본 논문에 제시한 진동 허용가진력 규제치를 이용한 정밀장비의 내진 및 방진의 정량적인 설계뿐만 아니라 진동 허용규제치를 손쉽게 구할 수 있다는 점에서 유의하다하겠다.

참고문헌

1. SMS STAR Theory and Application, Issue A:25 January 1990.
2. D. J. Ewins, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press.
3. ANSI S2.32 - 1982, Methods for the Experimental Determination of Mechanical Mobility, Part II.
4. 이흥기, 권형오, 구조물의 실험적 진동예측기술에 관한 연구, '92 추계학술대회 논문집

5. 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.
6. Eric E. Ungar, Designing Sensitive Equipment and Facilities, Mechanical Engineering, December 1985.
7. Eric E. Ungar, Vibration Control Design of High Technology Facilities, Sound and Vibration, July 1990.