

모빌리티 측정을 통한 하드디스크의 Unbalance 검출 및 보정방법

최 현*, 김 인웅*, 이 재원*, 정 용구**, 최 정현**

Measurement of Absolute Magnitude and Position of HDD Unbalance
based on Mobility

Hyun Choi*, InWoong Kim*, Jaewon Lee*, Yongkoo Jeong**, Junghun Choi**

Key Words : HDD, unbalance, mobility, acceleration orbit

Abstract : The HDD unbalance, with higher rotational speed, is directly influenced by the mechanical assembly allowance between clamping disk and platter disk. The low frequency structural vibration induced by the unbalance force finally gives rise to the structure borne noise of the personal computer. To meet the noise and vibration requirements, the absolute unbalance mass of HDD needs to be measured and adjusted in the disk assembling stage. This study introduces the measurement methods of the absolute magnitude and position of the unbalance mass of HDD based on the mobility and acceleration orbit. The absolute unbalance mass can be obtained by the acceleration responses and the mobility of the mechanical part, while the position of the unbalance mass can be obtained by the rotation acceleration orbit.

1. 서 론

오늘 날 대표적 기록저장장치인 하드디스크 드라이브를 비롯하여 CD, DVD 등의 다양한 기록저장장치의 저장용량 및 정보처리 속도가 날로 정밀화와 고속화 추세에 있다. 특히, 하드디스크 드라이브는 오디오, 비디오 등의 전송기술 발달과 인터넷의 보급으로 매우 다양해진 PC의 용도에 따라서 기능과 성능에서 괄목할 만한 성장을 이루어왔으며, 이에 따라 디스크 상의 헤드위치제어 반복 정밀도(repeatability)는 0.05 μ m 수준까지 요구되고 있다. 이러한 헤드의 위치제어 정밀도를 향상시키기 위해서는 서보제어 기능의 향상과 스피들 모터 회

전축계의 진동 저감이 필요하다. 특히 기록저장장치가 장착되는 PC를 포함한 가전기기의 세트의 경량화 추세에 따라서, 점차 기록저장장치의 가진원(source)에 대한 세부적 제한이 요구되는 실정이다. 이에 대응하기 위하여 관련 업계와 학계에서는 하드디스크의 대표적 진동원인 스피들 모터의 구조 변경을 통한 진동저감에 대한 연구, 하드디스크 드라이브에서 진동을 절연하려는 진동경로대책에 대한 연구, 구조물의 동특성 변경을 통한 진동제어에 대한 연구, 및 유체베어링(FDB, Fluid dynamic bearing) 등의 부품에 대한 연구 등 다양한 연구를 통하여 하드디스크 드라이브의 소음 및 진동저감 성능을 개선시키려는 노력이 시도되고 있다.

본 논문은 대표적 기록저장장치인 하드디스크를 대상으로 고속 회전하는 하드디스크에서 발생하는 불평형 가진력에 의한 미세한 진동신호를 계측함으로써, 하드디스크의 부품 및 디스크 조립공차에

* 정화원, 시그널링크(주)

Email: chyun@signallink.co.kr

Tel: 031-273-5082/5083

**삼성전자(주) 스토리지사업부

크게 기인하는 절대 불평형량을 측정하고, 이를 보정하는 방법을 보이고자 한다.

2. 하드디스크의 절대 발란싱

Fig.1은 5400rpm으로 회전하는 1장의 플래터 디스크로 구성된 하드디스크에서 측정된 불평형 진동에 의한 가속도 진동신호 및 그 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 정격회전수, 5400rpm에 해당하는 90Hz진동성분의 불평형 진동이 가장 우세한 진동임을 알 수 있다.

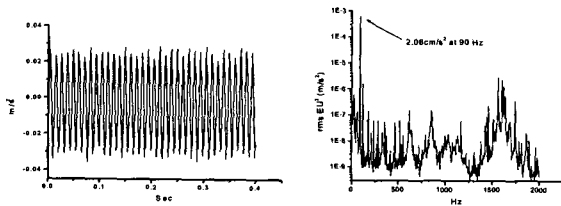


Fig.1 Time signal and power spectrum of the 하드디스크 unbalance vibration

Fig.2는 하드디스크의 구성을 나타내며, 스피들 모터가 고속 회전함에 따라서 불평형 질량의 크기와 회전중심까지의 거리에 각각 비례하고, 회전속도의 제곱에 비례하는 식(1)과 같이 표현되는 불평형력이 발생한다. 여기서 불평형 질량은 디스크 자체의 품질 불균일에 따른 제조공차, 스피들 모터의 축, 베어링 등의 공차, 클램핑 디스크에 의한 디스크의 조립공차 등 다양한 원인이 있을 수 있으며, 자체적 실험에 의하면 조립공차에 의한 불평형이 가장 큰 영향을 준다.

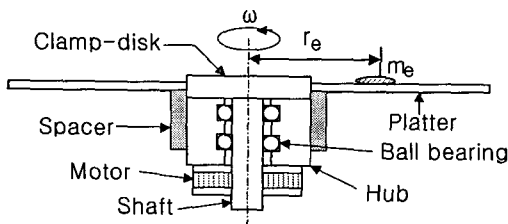


Fig.2 Schematics of HDD

Fig. 3는 하드디스크의 단순화된 1자유도계 진동 모델을 나타내며, 식 (1)과 같이 표현되는 불평형 질량에 의한 가진력은 하드디스크의 자체 질량을 포함하여 하드디스크를 고정시키고, 회전시키는 기구부의 질량(m_t)과 기구부의 질량을 지지하는 탄

성지지체의 강성에 의하여 식(2)와 같이 단순화된 1자유도 운동방정식이 형성되며, 이때 진동계에 작용하는 외력은 하드디스크 자체의 불평형 질량에 의한 가진력이다.

$$m_e r_e \omega(t)^2 = f_e(t) \tag{1}$$

$$m_t \ddot{x}(t) + k_d^* x(t) = f_e(t) \tag{2}$$

여기서, $m_t = m_p + m_d + m_a$ 이다.

일반적으로 탄성지지체를 고무와 같은 점탄성 재료(viscoelastic material)를 사용하는 경우, 재료의 탄성과 점성에 의한 강성영향이 복소수 형태의 동강성(dynamic stiffness)으로 표현되며, 이때 동강성은 식(3)과 같다. 기구부의 질량에서 발생한 진동 가속도는 직접적으로 진동계를 가진시키는 불평형 질량의 크기와 연관되며, 따라서 이를 측정하여 하드디스크의 불평형 질량의 크기를 계산할 수 있다.

$$k_d^* = k_d + j\omega c_d \tag{3}$$

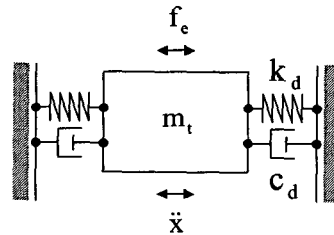


Fig.3 HDD 1 DOF vibrational model

빠른 응답성의 광 스위치(fiber switch)를 사용하여 고속으로 회전하는 클램프 디스크 위에 표시된 인덱스를 검출하고, 동시에 하드디스크의 불평형 질량에 의하여 발생된 기구부의 수평 및 수직 진동가속도를 서로 직각으로 설치된 수평 및 수직축 가속도계를 이용하여 측정한다. 이때, 하드디스크가 장착된 기구는 하드디스크의 불평형 가진력에 의하여 진동할 수 있어야 하므로, 탄성지지체에 의하여 지지되어 있으며, 해머 테스트 등과 같이 기구의 동특성을 평가할 수 있는 시험방법을 통하여 기구물의 질량과 탄성지지체의 강성에 의하여 결정된 기구의 모빌리티(mobility)를 측정한다. 동시에 계측된 인덱스 신호와 수평 및 수직 가속도 진동신호를 이용하여 하드디스크의 절대 불평형 질량의 크기 및 최적의 보정정보를 계산된다.

가속도계(accelerometer)에 의하여 측정된 기구부의 진동가속도를 신호처리(signal processing)한 후, 하드디스크의 정격회전수에 해당하는 주파수 성분에서의 진동 크기를 계산하여 기구부에서 측정된 모빌리티 값과 수치연산을 통하여 하드디스크의 절대 불평형 질량의 크기를 계산할 수 있다. 여기서, 절대 불평형 질량의 크기를 계산하는 방법은 시간영역(time domain)에서의 진동이 아닌 주파수영역(frequency domain)에서의 계산방법을 사용함으로써, 정격 회전수 이외의 주파수에서 발생하는 외부 잡음(noise)에 의한 영향을 최소화함으로써, 측정정도를 향상시킬 수 있다.

Fig.4에서와 같이 수평 및 수직방향으로 설치된 가속도계의 출력을 이용하여 x, y축으로 진동궤적을 그리면, 궤적의 반경은 불평형진동의 크기정보를 나타내며, 인덱스 신호가 검출되는 순간의 궤적 위치는 불평형 질량의 보정위치를 각각 나타낸다.

하드디스크 위에 불평형 질량이 존재하는 위치는 식(4)와 같이 표시될 수 있으며, 변위신호의 시간에 대한 1차 미분 및 2차 미분은 각각 속도 및 가속도로 변환될 수 있다. 측정된 가속도 신호와 180° 위상차를 갖는 위치에 불평형 질량이 존재함을 의미하며, 반대로 가속도 신호는 불평형 질량을 보정할 위치를 나타낸다.

$$x = A \sin(\omega t) \tag{4}$$

$$\dot{x} = \omega A \cos(\omega t) \tag{5}$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t) \tag{6}$$

$$x = -(1/\omega^2) \ddot{x} \tag{7}$$

Fig.5에서와 같이 계산된 불평형 질량이 존재하는 위치, $\vec{m}_{e,1}$ 은 불평형 질량을 보정하기 위하여 불평형 질량 보정위치에 적용되는 보정질량들과 벡터 합을 계산하여 그 결과가 최소가 되도록, 즉 질량보정 이후 불평형 질량이 최소가 되도록 계산된다.

$$\ddot{x} \times \left(\frac{F}{\ddot{x}} \right) = F \tag{8}$$

따라서 하드디스크의 불평형 질량 크기는 식 (10)과 같이 계산된 진동가속도와 모빌리티의 역수를

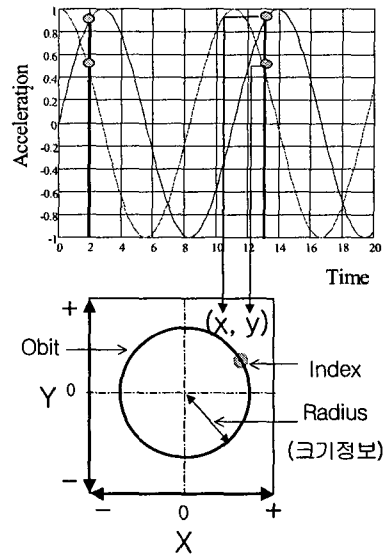


Fig.4 Orbit를 이용한 불평형 질량의 크기 및 위치

값을 이용하여 계산된 가진력을 식(9)과 같이 하드디스크의 회전속도의 제곱과 등가회전중심의 곱으로 나눈으로써 구할 수 있다.

$$m_e = F_e / r_e \omega^2 \tag{9}$$

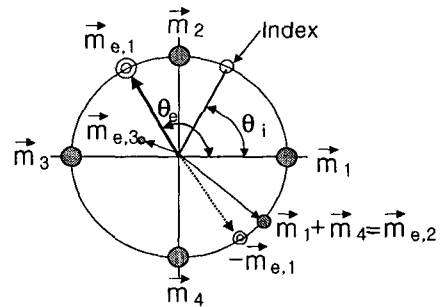


Fig.5 불평형량과 보정질량의 벡터 합

불평형 질량의 벡터합 계산은 기준점으로부터 θ_i 의 각도 위치에 있는 보정용 원점 인덱스가 광 스 위치에 의하여 감지되는 순간을 기준으로, 기준점으로부터 θ_e 의 각도를 갖는 불평형 질량의 크기, $\vec{m}_{e,1}$ 에 대하여 정반대 방향으로 보정 질량의 위치 $-\vec{m}_{e,1}$ 을 설정하여야 하나 하드디스크의 조립 및 보정위치가 정해져 있으므로 서로 90° 위치에 있는 보정질량 $\vec{m}_1, \vec{m}_2, \vec{m}_3, \vec{m}_4$ 위치에서 보정질량

의 크기를 기준으로 보정 이후 최종 불평형 질량의 크기, $\vec{m}_{e,3}$ 가 최소화되도록 벡터 합이 계산된다. 인덱스가 검출되는 순간과 불평형 질량이 존재하는 위치와는 서로 다른 스위치 및 센서에 의하여 검출되며, 고속으로 회전하는 하드디스크를 고려할 때 짧은 시간 지연도 보정위상연산에 큰 오차를 발생시킬 수 있으며, 따라서 인덱스 검출에서부터 측정된 가속도 신호 사이에 있을 수 있는 시간 지연(time delay)에 대한 오프셋(offset) 좌표보정을 식 (10)을 이용하여 행한다.

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (10)$$

3 실험

하드디스크 발란싱 시스템은 불평형량을 측정하기 위하여 하드웨어 기구부(mechanical port)와 계측된 센서의 출력에 대한 신호처리 및 불평형 질량 및 위치정보의 계산, 최적 보정결과와 연산 등 소프트웨어로 구성되어 있으며, 전체 시스템의 구성은 Fig.6과 같다.

하드웨어 기구부에 있어서 하드디스크의 미세진동을 측정하기 위해 고감도 가속도계(accelerometer)를 수평(x축), 수직(y축)방향으로 각각 2개를 설치함으로써 불평형량에 의한 가속도 진동 궤적(orbit)을 그릴 수 있도록 하였으며, 빠른 응답시간(response time)을 가진 광 스위치(fiber switch)를 사용하여 고속으로 회전하는 클램프 디스크위의 인덱스 신호를 검출하였다.

3.1 모빌리티 측정 및 인덱스 검출

하드디스크의 절대 불평형량을 측정하기 위하여 하드디스크가 장착되는 기구시스템(mechanical port)의 동특성을 측정하여야 하며, 임팩트 헤머를 이용하여 액셀러런스(accelerance) 형태의 주파수 응답함수를 측정한 결과, 하드디스크의 정격회전수에서 측정된 모빌리티는 Table 1과 같다. 가속도 측정 신호와 모빌리티 측정값을 식 (10)에 대입함으로써 불평형량의 크기를 구할 수 있다.

광 스위치가 고속 회전하는 하드디스크에서 인덱스를 감지하고 정확한 출력을 내기 위해서는 충분한 빠른 응답성능을 가져야하며 센서의 설치 방

법과 인덱스의 크기, 형상에 따라서 검출성능이 달라진다. 7,200rpm의 하드디스크 인덱스를 검출하기 위해서는 5,400rpm의 경우보다 더욱 빠른 응답성능의 광 스위치가 요구되며, 이를 위해서 인덱스를 회전중심 가까이로 이동시켜 선속도를 낮추거나 인덱스를 크게 함으로써 광 스위치가 인덱스를 검출하는 데 필요한 최소시간이상을 인덱스를 검출하도록 하여야 한다.

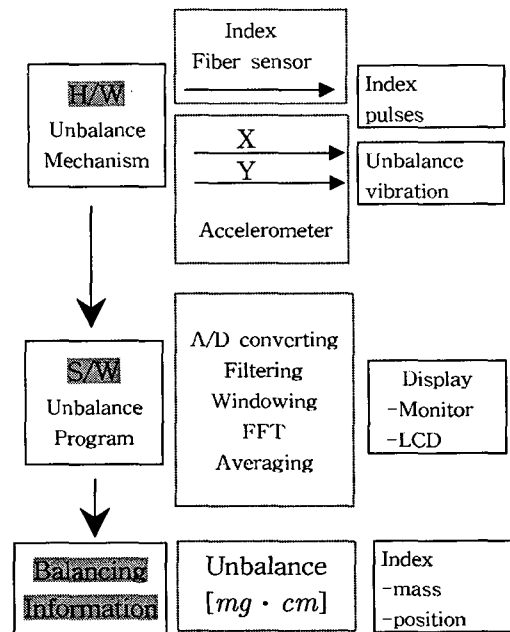


Fig.6 Process of HDD balancing

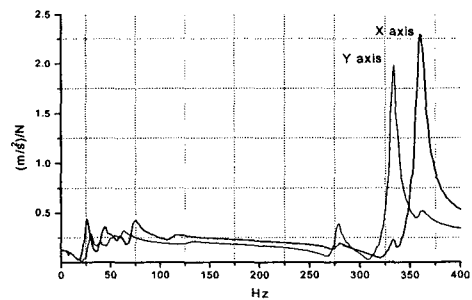


Fig.7 FRF of the mechanical port

Table 1 Mobility values at the HDD rotational speeds

Speed (rpm)	Frequency (Hz)	Accelerance FRF [(m/s²)/N]	
		x axis	y axis
5400	90	0.288	0.211
7200	120	0.270	0.185

Fig.8은 5,400rpm로 정격 회전하는 하드디스크에서 인덱스가 검출될 때 광 스위치에서 출력되는 펄스신호이다. 이 신호는 오픈 콜렉터(open collector) 방식으로 인덱스를 감지하는 순간 5V의 펄스를 출력시키며, 주기는 1/90Hz에 해당하는 11.1msec이고, 이때 인덱스의 선속도는 약 8.19m/s이다.

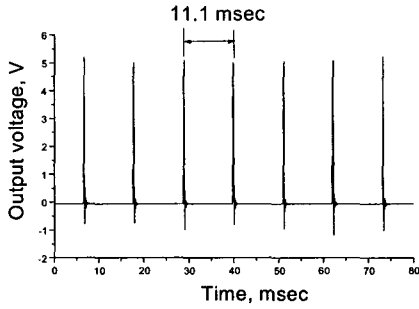


Fig.8 Index Pulses measured on HDD (5,400rpm)

3.2 실험결과

본 실험에서 사용된 하드디스크는 3.5 인치 크기의 두께 50mil의 알루미늄 디스크 1장을 장착한 하드디스크이다. 또한, 7,200 rpm의 2장의 디스크를 장착한 모델에 대해서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

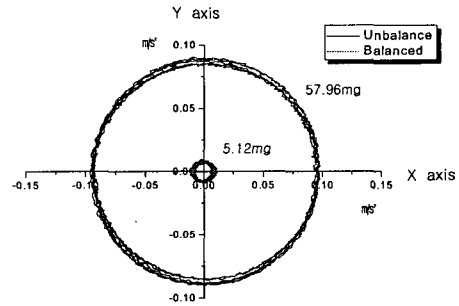
Fig. 9는 검사기준이 35mg인 경우, 검사기준 이내로 불평형 질량의 보정이 가능한 경우(a)와 주어진 보정조건에서는 검사기준 이내로 보정이 불가능한 정도로 불평형 질량이 과도한 경우(b) 각각에 대하여 보정성능을 측정 한 결과이다.

Table 2 Balance performance test

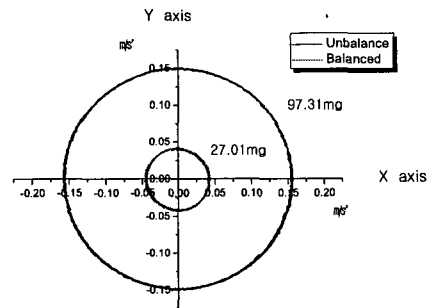
Balance Information	Unbalanced		Balanced	
	Measured	Expected		
(a)	mass	57.96mg	4.35mg	5.12mg
	phase	141.56°	220.34°	221.08°
(b)	mass	97.31mg	30.27mg	27.01mg
	phase	170.23°	202.59°	203.31°

Table 2의 정리된 결과에서 알 수 있듯이 불평형 질량의 크기와 위치에 상관없이 예측된 결과와 매우 근사한 보정결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 반복된 성능실험을 통하여, 실제 존재하는 보정오차 또한 두 종류 보정질량(24mg와 54mg)에 존재하는 질량오차, 무게중심 위치오차에 의한 영향이며, 본 실험장치 및 보정알고리즘은 완벽하게

고속으로 회전하는 하드디스크의 불평형을 보정할 수 있는 성능을 나타내었다.



(a) NG Part (57.96mg)



(b) Reject Part (97.31mg)

Fig.9 Unbalanced and balanced orbits (5,400rpm)

4. 결론

- 1) 고주파수 응답특성이 우수한 가속도계와 기구적 특성을 나타내는 모빌리티를 이용하는 발란싱 방법은 고속 회전하는 하드디스크의 절대적 불평형 질량을 측정하는 적합한 방법이다.
- 2) 직각으로 설치된 가속도계를 이용한 가속도 진동계적과 인덱스 신호를 이용하여 불평형 질량의 위치 및 보정위치를 정확하게 계측할 수 있다.
- 3) 다양한 기록저장장치의 소음 및 진동품질검사시스템으로 활용가능하다.

References

1. R. Gasch, H.Pfutzner, "Rotor dynamics"
2. Singiresu S. Rao, 1984, "Mechanical vibrations", p. 136-138.