

하드디스크의 진동특성 및 디스크 발란싱에 의한 불평형진동 보정방법

최 현*, 이 재원*, 박 노철**, 박 영필**

The characteristics of the HDD vibration and the unbalance vibration control by disk balancing

Hyun Choi*, Jaewon Lee*, NoCheol Park**, Young-Pil Park **

Key Words : HDD, vibration, unbalance, mobility, acceleration orbit

Abstract

With the rotational speed of the hard disk drive (HDD) increased, the low frequency structural vibration induced by the unbalance force gives rise to the structure borne noise of the personal computer, and finally degrades the noise quality. As the unbalance of the hard disk drive is decided by the mechanical assembly allowance between clamping and platter disk, there is limit to control this unbalance by the improved assembly method. To improve the noise and vibration performance of PC, basically the unbalance of HDD needs to be measured absolutely and reduced during the stage of the disk assembly. This study introduces the HDD unbalance measurement methods of the absolute magnitude based on the mobility concept, and the unbalance location information with the acceleration orbit.

1. 서론

오늘날 대표적 기록저장장치인 하드디스크 드라이브를 비롯하여 CD, DVD 등의 다양한 기록저장 장치의 저장용량 및 정보처리 속도가 날로 증가하는 추세에 있다. 특히, 하드디스크는 인터넷의 보급, 오디오, 비디오 등의 전송기술 발달과 새로운 응용분야의 확대 등으로 그 기능과 성능에서 괄목할 만한 성장을 이루고 있으며, 기존의 데스크탑용 3.5인치 디스크를 기본으로 노트북용 2.5인치 및 1인치 디스크를 장착한 하드디스크도 생산되고 있다.

하드디스크가 장착되는 개인용 컴퓨터를 비롯한 노트북 및 가전기기 등의 경량화 추세와 소비자의 소음 및 진동품질에 대한 인식이 점차 향상됨에 따라서 기록저장장치의 진동 및 소음품질에 대한

엄격한 제한이 요구되는 실정이다. 이에 대응하기 위하여 관련 업계와 학계에서는 하드디스크의 대표적 진동원인 스피들 모터의 구조 변경을 통한 진동저감에 대한 연구, 하드디스크에서 발생된 진동이 샤프트 등으로 전달되는 것을 절연하는 진동경로대책에 대한 연구, 구조물의 동특성 변경을 통한 진동제어에 대한 연구 및 유체베어링(FDB, Fluid dynamic bearing) 등 노이즈를 발생시키는 주요 부품에 대한 연구 등 다양한 연구를 통하여 하드디스크의 소음 및 진동저감 성능을 개선시키려는 노력이 시도되고 있다.

하드디스크는 빠른 정보의 입출력을 위하여 정격회전속도가 점차 빨라지는 추세에 있으며, 이때 디스크와 스피들 모터 사이에 존재하는 기계적 불평형에 의하여 하드디스크의 정격회전주파수성분에 해당하는 90Hz 또는 120Hz 등 비교적 낮은 주파수의 구조진동이 발생하고, 이는 2차적으로 구조기인소음이 유발함으로써 궁극적으로 하드디스크가 장착된 제품의 노이즈품질을 저하시키게 된다.

* 시그널링크(주) chyun@signallink.co.kr

**연세대학교정보저장기기 연구센터

본 논문은 하드디스크에서 발생하는 미세한 불평형 진동을 측정하고, 이를 모빌리티 개념에 적용하여 하드디스크의 절대 불평형질량을 측정할 수 있는 방법을 제시한다. 또한 진동가속도 계측과 보정원점을 동시에 측정함으로써 하드디스크와 같이 보정질량의 크기, 수량 및 보정위치가 제한된 조건하에서 불평형질량을 효과적으로 보정할 수 있도록 함으로써 궁극적으로 고속화 추세에 있는 하드디스크의 불평형 진동에 의한 진동 및 구조기 인소음을 저감시킬 수 있는 방법을 제시한다.

2. 하드디스크의 불평형 진동특성

하드디스크에서 중요하게 고려되는 런아웃에는 불 베어링의 결함, 공기유동 등의 원인으로 발생하는 불규칙한 운동에 의한 NRRO(Non-repeatable run out)와 디스크와 스피들 모터 사이의 부품 또는 조립 불균형에 의한 RRO(Repeatable run out)로 구분된다.^[1] RRO는 규칙적인 운동으로서 NRRO에 비하여 상대적으로 정보를 읽고 쓰는 성능에는 큰 영향을 주지 않지만, 하드디스크에 큰 진동을 유발하는 힘을 발생시킴으로써 하드디스크의 고강성화, 제진과 방진이 필요하게 하며 더 나아가 하드디스크가 부품으로써 조립되는 완성제품의 진동 및 소음특성을 악화시킨다.

Fig.2는 5,400rpm으로 회전하는 1장의 3.5인치 디스크로 구성된 하드디스크에서 측정된 가속도 진동신호의 파워스펙트럼을 나타낸다. 수백 Hz 대역에는 Fig.1에서와 같이 디스크의 유연진동모드(flexible modes)의 진동이 발생하며^[2], 하드디스크의 정격회전수, 5,400rpm에 해당하는 90Hz에는 불평형 진동이 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

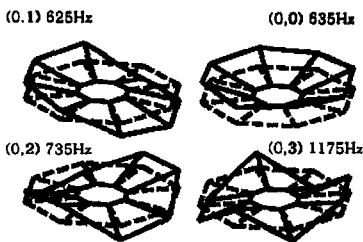


Fig.1 Flexible vibration modes of the HDD disk

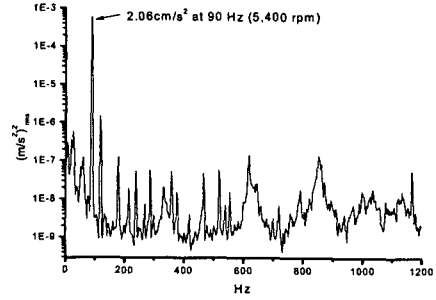


Fig.2 Spectrum of the HDD unbalance vibration

2.1 하드디스크 발란싱

Fig.3은 하드디스크의 구성을 간략하게 나타내며, 스피들 모터가 고속으로 회전함에 따라서 불평형 질량의 크기와 회전중심까지의 거리에 각각 비례하고, 회전속도의 제곱에 비례하는 식(1)과 같이 표현되는 불평형력이 발생한다.

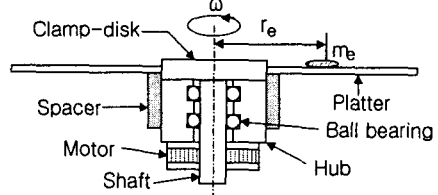


Fig.3 Schematics of HDD

하드디스크의 불평형질량에 의한 가진력은 식(1)과 같은 크기이며, 식(2)와 같이 하드디스크 자체 질량을 포함하여 하드디스크를 고정하는 기구부의 질량, m_i 와 기구부를 지지하는 방진고무의 동강성, k_d^* 으로 이루어진 단순화된 1자유도계 운동방정식으로 표현될 수 있다. 이때 진동계에 작용하는 외력, $f_e(t)$ 는 하드디스크가 회전하면서 불평형질량에 의하여 발생하는 불평형 가진력이다.

$$m_e r_e \omega(t)^2 = f_e(t) \quad (1)$$

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

따라서 기구부에 설치된 가속도계에서 측정된 가속도 진동의 크기는 직접적으로 하드디스크의 불평형질량 크기와 연관되며, 이를 정확하게 측정함으로써 하드디스크의 불평형질량의 크기를 얻을 수 있다.

2.2 하드디스크의 불평형 진동 측정 및 보정방법

하드디스크 위에 불평형 질량이 존재하는 위치는 식(3)과 같이 표시될 수 있으며, 변위신호의 시간에 대한 1차 미분 및 2차 미분은 각각 속도 및 가속도로 변환된다.

$$x = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$\dot{x} = \omega A \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$x = -(1/\omega^2) \ddot{x} \quad (6)$$

측정된 가속도 신호와 180° 위상차를 갖는 위치에 불평형 질량이 존재함을 의미하며, 반대로 가속도 신호는 불평형 질량을 보정할 위치를 나타낸다. 가속도계에 의하여 측정된 기구부의 진동가속도를 신호처리한 후, 하드디스크의 정격회전수에 해당하는 주파수 성분에서의 진동크기를 계산하여 식(7)과 같이 기구부에서 측정된 모빌리티 값과 수치연산을 통하여 하드디스크의 절대 불평형 질량의 크기를 계산할 수 있다.^[3] 절대 불평형 질량의 크기를 시간영역에서의 진동이 아닌 주파수 영역에서의 계산함으로써, 정격 회전수 이외의 주파수에서 발생하는 외부잡음(noise)에 의한 영향을 최소화함으로써, 측정정도를 향상시킬 수 있다.

하드디스크의 불평형 질량 크기는 식(7)과 같이 계산된 진동가속도와 모빌리티의 역수를 곱하여 가진력을 계산하며, 불평형 질량은 식(7)에서 계산된 가진력을 식(8)과 같이 하드디스크의 회전속도의 제곱과 등가회전중심의 곱으로 나눔으로써 얻어진다.

$$\ddot{x} \times \left(\frac{F}{\ddot{x}} \right) = F \quad (7)$$

$$m_e = \frac{F}{r_e \omega^2} \quad (8)$$

Fig.4의 (b)에서와 같이 불평형질량을 $\vec{m}_{e,1}$ 보정하기 위하여 정해진 크기와 위치의 보정질량의 조합을 식(9)에서와 같이 연속적으로 계산함으로써 최적의 보정질량 및 보정위치를 구할 수 있다. 특히, 최소의 보정질량수로서 최고의 보정효과를 얻을 수 있도록 각 질량조합에 따른 보정결과를 연

산한다.

$$x_i = \vec{m}_{e,1} \cos \theta_e + \sum_{i=1}^n \vec{m}_{j,i} \cos \theta_j \quad (9)$$

$$\therefore y_i = \vec{m}_{e,1} \sin \theta_e + \sum_{i=1}^n \vec{m}_{j,i} \sin \theta_j$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, (\text{질량갯수}+1)^4 = \text{index}$ 와의 각도

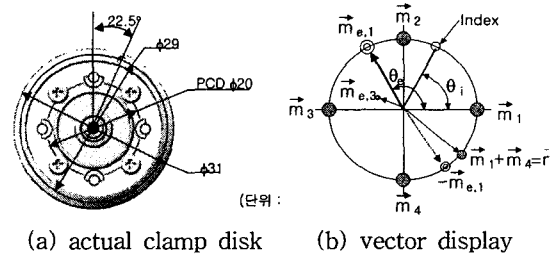


Fig.4 Vector calculation of balancing mass under the limited balancing conditions (number of balancing mass, balancing location)

광 스위치에 의한 인덱스가 검출과 가속도계에 의한 불평형진동 측정에는 서로 다른 회로에 의한 검출지연이 있을 수 있으며, 이는 고속으로 회전하는 하드디스크의 정밀 발란싱 작업을 고려할 때 보정성능을 크게 저하시킬 수 있는 요소이다. 따라서 인덱스 검출에서부터 측정된 가속도 신호 사이에 있을 수 있는 시간지연에 대한 옵션을 식(10)의 평면좌표 변환식을 이용하여 보정위치에 대한 좌표변환을 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

Fig.5는 하드디스크의 불평형 진동의 발생 원인 중 가장 큰 영향을 미치는 디스크와 스피들 모터와의 조립공차에 의한 불평형 질량의 변화를 측정 한 실험결과이다. 디스크를 스피들모터와 클램핑 디스크를 이용하여 50회 조립과 분해를 반복하여 불평형 질량을 측정 한 결과, 최소 1.78mg에서 최대 112.4mg까지 큰 편차가 있는 것이 확인되었다. 실제로는 디바이싱이라는 일종의 디스크 센터링 작업을 통하여 디스크 불평형을 개선시키나 이러한 노력도 엄격해지는 노이즈 품질기준을 만족시키는 데에는 한계가 있다.

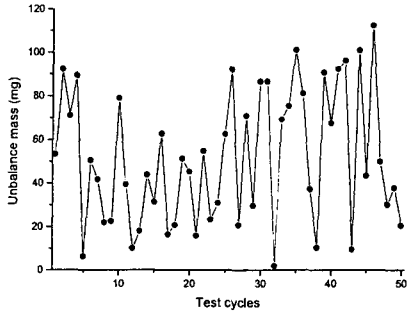


Fig.5 Fluctuation of the unbalance mass during the repeated 50 times disk assembly test

3.1 발란싱 주파수 성분의 진동신호 추출

하드디스크에서 측정되는 진동신호에는 Fig.1에 서와 같이 다수의 디스크 유연진동모드를 포함하여 기구부의 공진에 기인한 측정노이즈 등이 포함되어 있으므로, 90Hz, 또는 120Hz의 발란싱 주파수 성분만을 추출하기 위해서 저대역 통과필터를 설계하여 진동가속도에 포함된 노이즈 성분을 제거하였다.

Fig.6은 제작된 저대역 통과필터의 주파수응답특 성과 밴드 폭이 169Hz인 저대역 통과필터를 통과 하기 전후의 가속도 궤적을 각각 나타낸다.

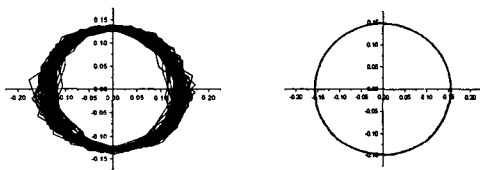
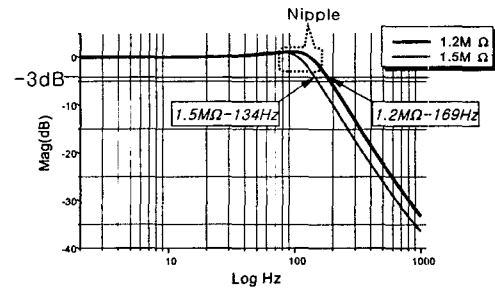


Fig.6 Frequency response function of the designed low pass filter and measured acceleration orbit without and with LPF

3.2 기구부의 모빌리티 측정 및 디스크 원점검출

하드디스크의 절대 불평형 질량을 측정하기 위해서는 식(7)에서와 같이 하드디스크가 장착되는 기구부의 모빌리티값이 필요하며, 이를 임팩트 테스트를 통하여 얻은 하드디스크 정격회전수에서 모빌리티값은 Table 1과 같다. 하드디스크의 불평형에 의하여 기구부에 발생된 가속도 진동과 측정된 모빌리티값을 식(8)에 대입함으로써 하드디스크의 불평형 질량의 크기를 구할 수 있게 된다.

광 스위치가 검출대상을 인식하기 위해서는 검출대상을 인식하고 있어야 하는 최소시간이 필요하며, 따라서 검출대상의 크기와 회전속도가 중요하다. Fig.4에서와 같이 PCD20mm 크기의 원주상에 원형으로 가공된 인덱스가 5,400rpm으로 회전하는 경우 인덱스의 선속도는 8.19m/s이며, 7,200rpm의 경우 10.93m/s이다.

고속으로 회전하는 하드디스크의 인덱스를 광 스위치를 이용하여 측정하기 위해서는 충분히 빠른 응답성능(response time)을 갖는 광 스위치가 필요하다. 향후 더욱 빠르게 회전하는 하드디스크의 인덱스를 검출하기 위해서는 인덱스의 위치를 회전중심축 가까이 이동시켜 인덱스의 선속도를 낮추거나 인덱스 형상을 크게 함으로써 광 스위치가 인덱스를 검출하는 데 필요한 시간을 확보할 수 있도록 하여야 한다.

Table 1 Mobility value measured at the HDD rotational speed

Speed (rpm)	Frequency (Hz)	Accelerance FRF [$(\text{m/s}^2)/\text{N}$]	
		x axis	y axis
5,400	90	0.288	0.211
7,200	120	0.270	0.185

Fig.7은 인덱스가 가공된 클램핑디스크 상부에 가공된 인덱스를 검출하기 위하여 설치된 광 스위치의 모습과 정격회전수 5,400rpm인 하드디스크에서 광 스위치에 의하여 검출된 인덱스 검출신호를 각각 나타낸다. 광 스위치가 수직으로 설치된 경우 인덱스 검출에 필요한 충분한 감도 차이가 발생하지 않음으로서 인덱스를 검출하지 못하는 경우가 발생하므로 광 스위치를 경사지게 설치함으로써 정확한 인덱스검출이 가능하였다. 광 스위치는 인덱스를 감지하는 순간 5V 피크의 펄스전압을 출력하며, 펄스 사이의 간격은 하드디스크의 정격회전수에 해당하는 11.1msec 즉 $(1/90\text{Hz})$ 이다.

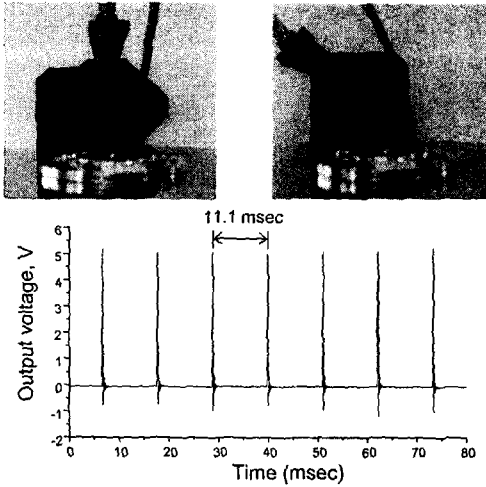


Fig.7 Setting of the photo switch to measure the index hole on the clamping disk and the measured index pulses (5,400rpm)

3.3 실험결과

하드디스크 발란싱 실험에 사용된 하드디스크는 두께 50mil의 3.5 인치 디스크 1장을 장착한 삼성 제품의 하드디스크이다. 서로 다른 불평형질량을 갖는 5,400rpm와 7,200rpm의 두 종류의 하드디스크에 대하여 본 방식에 의한 절대적 불평형질량 및 불평형질량이 존재하는 위상을 각각 측정된 반복정밀도(measurement repeatability) 측정결과는 Fig.8과 같다.

측정된 데이터를 식(11)과 같이 30개 미만의 작은 표본에 대한 95% 신뢰구간을 구하는 스튜던트 t-분포식을 이용하여 절대불평형 질량 및 보정 위치에 대한 반복측정정밀도를 각각 계산한 결과는 Table 2와 같다.^[4]

$$\bar{x} - 2.093 \frac{S_x}{\sqrt{20}} < \mu < \bar{x} + 2.093 \frac{S_x}{\sqrt{20}} \quad \text{식 (11)}$$

여기서, \bar{x} 는 평균, S_x 는 표준편차를 나타낸다.

반복정밀도 측정결과에 의하면 5,400rpm 및 7,200rpm의 두 종류 하드디스크 모두 불평형 질량 크기는 0.2mg 이내, 위치는 0.25° 이내에서 정밀한 측정이 이루어지는 것을 알 수 있다.

5,400rpm와 7,200rpm 하드디스크 시료 각각 20개를 대상으로 발란싱 보정효과를 측정된 결과는 Fig.9와 Table 3과 같다.

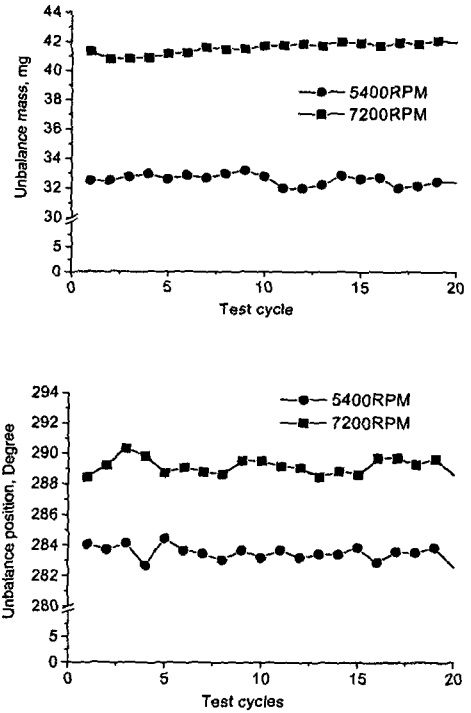


Fig.8 Measurement repeatability test of the magnitude and position of the unbalance mass

Table 2 Confidence interval using Student's t-distribution

RPM	95% Confidence interval	
	mass (mg)	location (°)
5,400	±0.16	±0.22
7,200	±0.19	±0.25

Table 3에서 알 수 있듯이 하드디스크의 정격회전수, 불평형 질량의 크기와 위치 등에 상관없이 본 방식은 하드디스크에 존재하는 불평형질량을 70% 이상 저감시킬 수 있는 실험결과를 얻을 수 있었으며, 백터연산을 통하여 본 장비에서 예측된 기대보정치와 매우 근사한 보정결과를 얻을 수 있었다. 또한 추가실험을 통하여 보정성능 실험결과와 백터연산에 의하여 예측된 기대보정치와의 오차는 실험에 사용된 보정질량(24mg, 54mg)이 플라스틱 사출물로서 보정질량 사이에 질량편차, 무게중심의 위치편차에 의한 영향이 작용했음을 알 수 있었다.

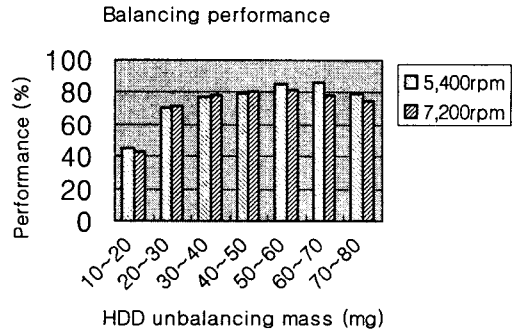
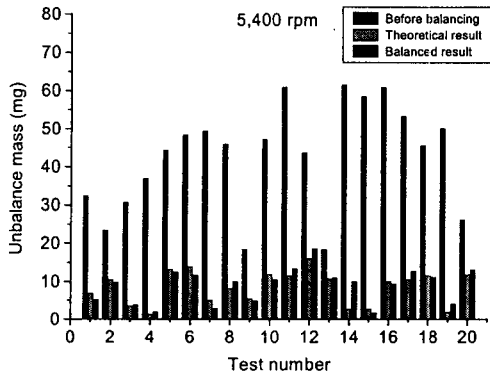


Fig.11 Balancing performance depending on the magnitude of unbalance

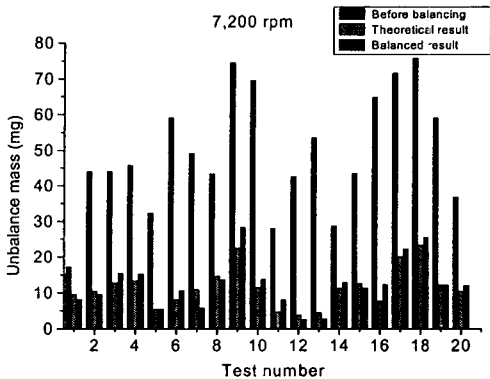


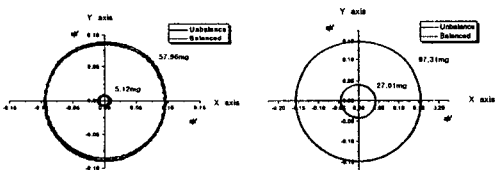
Fig.9 Balancing performance test using 20 specimens (5,400rpm and 7,200rpm)

Table 3 Result of the balancing performance

Balancing performance (reduced percent)		
Rotational speed	5,400rpm	7,200rpm
Test result	76.51% (↓)	73.88% (↓)
Calculation	77.22% (↓)	75.29% (↓)

4. 결론

- 1) 고주파수 응답특성이 우수한 가속도계와 기구의 진동특성을 나타내는 모빌리티를 이용하여 하드디스크에 존재하는 불평형질량의 절대값을 측정할 수 있다.
- 2) 하드디스크의 불평형질량이 존재하는 위치정보를 측정하기 위하여 90° 위상을 갖도록 설치된 두개의 가속도계 출력을 이용한 진동계적과 인덱스 신호를 이용하여 불평형질량의 위치를 정확하게 측정할 수 있다.
- 3) 측정된 불평형질량을 보정할 수 있는 불평형질량의 크기, 위치, 수량 등이 제한된 조건에서 벡터 연산 및 순차적 조합연산을 통하여 최적의 보정효과를 기대할 수 있다.
- 4) 본 연구결과에 의한 방식으로 하드디스크 불평형질량의 약 70% 이상을 줄일 수 있는 실험결과를 얻을 수 있었으며, 이는 향후 저진동 및 저소음 세트에 적합한 하드디스크 생산이 가능함을 의미한다.



(a) NG (57.96mg)

(b) Reject part (97.31mg)

Fig.10 Unbalanced and balanced orbits (5,400rpm)

References

1. 고 정석, 김 철순, "HDD 디스크-스핀들 시스템에서의 마이크로 진동", 2002, 한국소음진동공학회, 제 12권 제 4호, p. 267 - 271.
2. Young-Bae Chang, Dae-Kyong Park, "Vibration analysis of a rotating disk in HDD"
3. Singiresu S. Rao, 1984, "Mechanical vibrations", p. 136 - 138.
4. Bechwith, Marangoni, Lienhard, 1993, "Mechanical Measurements" p. 77 - 83.