

80GB/PLATTER 하드 디스크 드라이브 설계를 위한 스핀들-디스크 시스템 진동의 TMR 기여도 분석

TMR Contribution Analysis of Spindle-Disk System Vibration for the High-Density Hard Disk Drive of 80GB/Platter

⁰강성우*, 한윤식**, 오동호**, 황태연**, Dan Blick***, 김명업***

⁰Seong-Woo Kang*, Yun-Sik Han*, Dong-Ho Oh*, Tae-Yeon Hwang*, Dan Blick**, Myeong-Eop Kim**

Key Words : HDD, Disk, Spindle Motor, Vibration, TMR, PES

ABSTRACT

An investigation of the TMR(Track Misregistration) requirements to achieve the capacity of 80GBytes/Platter in 7200rpm disk drive system is reported. This paper also gives an overview of the PES(Position Error Signal) characteristics in the 57,500TPI disk drive to estimate the required 95,000TPI-system PES. The TMR measured by PES are presented and decomposed in order to identify the portions and their contributions of the spindle-disk system vibration and HSA(Head-Stack-Assembly) system vibration respectively. A comprehensive review on the servo system is also presented to provide the practical limits of the modern servo architecture into TMR budget design. The decomposed PES energy distribution shows that the spindle-disk pack vibration is one of the top-ranking sources of the total TMR budget and its percentage contribution is about 50% considering all the other TMR sources.

1. 서론

HDD(Hard Disk Drive) 분야의 데이터 고밀도화를 달성하기 위한 노력은 크게 두 방향으로의 연구가 현재 병행적으로 활발히 진행되고 있다. 첫째로는, 데이터가 기록되는 Disk Media의 원주방향으로의 저장밀도 증대를 위한 BPI(Bits Per Inch) 증가기술이 그 한 방향으로 수직자기기록(Perpendicular Magnetic Recording) 방식에 대한 연구[1]가 그 한 예라 할 수 있다. 둘째로는, 기존의 수평자기기록장식을 유지하면서 반경방향으로의 저장밀도를 증대시키는 연구방향[2,3]으로서 TPI(Tracks Per Inch) 증가기술이 또 한가지 방향이라 할 수 있다. 전술한 두 방향의 기록밀도 증가기술에서 공통적으로 Disk와 Head 사이의 Mechanical Vibration의 그 상대적인 레벨은 매우 중요한 인자로 작용하게 된다. 특히 TPI증가기술 측면에서는 헤드와 디스크의 Data Track사이의

Vibration-Induced Positioning Error에 의한 TMR(Track Misregistration)에 대한 설계부문은 HDD Platform 설계의 핵심을 이루고 있다.

본 논문에서는 3.5" HDD에 있어서 Platter당 80GigaByte의 디스크 드라이브 시스템을 설계하는데 있어, 스핀들-디스크 시스템과 HSA(Head-Stack Assembly) 시스템 진동특성을 서로 시스템 특성과 연계분석하여 스핀들-디스크 시스템 진동의 TMR 기여도를 보이고자 한다.

2. TPI 설계조건 및 TMR 설계 Budget

표 1은 7200rpm 회전속도를 갖는 3.5" Disk Drive에 있어서의 40GB/Platter 시스템 기록밀도 설계변수들을 기초로, 80GB/Platter 시스템의 설계변수들을 예측한 결과를 보여주고 있다. 자기헤드와 기록미디어의 발전기술에 크게 의존되는 BPI 변수는, 현재 진행되는 기술의 동향을 반영하여 약 26% 기록밀도 향상을 예상, 약 650kBPI로 선정하였다. 이러한 BPI를 가정할 때, 80GB/Platter를 달성하기 위한 TPI는 약 95,000TPI로서 40GB/Platter 시스템의 57,500TPI에

* 삼성종합기술원 Storage Lab. (swkang@ieee.org)

** 삼성종합기술원 Storage Lab.

*** Samsung Information Systems America

비하여 65%의 증가가 필요함을 알 수 있다. 만약, 위에서 가정한 26% 정도의 BPI의 향상정도가 달성되지 못할 경우, 상대적으로 TPI는 65% 이상의 TPI밀도기술을 확보하여야만 원하는 80GB/Platter의 용량을 달성함을 쉽게 예측할 수 있다.

Table 1. Design Parameters of 80GB/Platter Disk Drive System and Required TMR Budget.

DESIGN PARAMETERS	40GB/P	80G/P
Disk Speed (rpm)	7200	7200
Capacity (GBytes/Platter)	38.2	80.5
Areal Density (Gbits/sq.in.)	29.7	61.8
TPI (TPI)	57,500	95,000
BPI (kBPI)	517	650
Bit Aspect Ratio (BPI/TPI)	9.0	6.8
Track Pitch (um)	0.44	0.27
TMR Budget (3sigma, %)	9	9
TMR Budget (1sigma, count)	15	15
TMR Budget (1sigma, nm)	13.3	8.0

전술한 TPI설계조건과 더불어 필요한 TMR설계사양을 결정하기 위하여, 주어진 Track Pitch에 대한 Head와 디스크 Track 사이의 TMR정도를 HDD Industry에서 보편적으로 사용하는 9%의 3sigma 설계예산을 주면 이론적으로 약 8nm/15count의 1sigma TMR 설계 Budget을 얻을 수 있다. 그러나, 실제제품을 설계하는 입장에서 필요한 생산공차, 부품별 특성차이 및 제품생산 수율 등을 고려하여 안전계수 0.9의 설계마진을 줄 경우, 최종적으로 7.2nm/13.5count의 1sigma TMR 설계 Budget을 얻을 수 있다.

3. 주요 시스템 Dynamics

본 연구에서 목표값으로 하고 있는 95,000TPI 시스템설계를 하기 위하여는, 우선 57,500TPI 시스템의 특성을 95,000TPI입장에서, 어느 부분의 설계에 집중할 지를 결정하기 위하여 재고찰할 필요가 있다. 본 연구에서는 Track-Following 상태의 TMR 특성을 주요대상으로 하므로 모든 시스템들의 정상상태를 다루도록 한다. 또한 한 장의 디스크로 구성되는 1ch./2ch. 드라이브보다는 두 장의 디스크 드라이브 시스템(3ch./4ch.)이 일반적으로 기계적인 불안정 요인이 크므로 본 연구에서는 두 장의 Disk Pack을 갖는 시스템을 기본으로 고찰하기로 한다.

3.1. 스피들-디스크 시스템 Dynamics

스피들-디스크 시스템의 Track-Following PES(Position Error Signal)에의 영향요인은 최종적으로 Disk의 Vibration으로 나타나게 된다. 특히, 디스크의 진동레벨이 가장 큰 OD(Outer Diameter)에서의 최종진동 특성을 보게 되면 전체 스피들-디스크 시스템의 특성을 쉽게 파악할 수 있다. Fig. 1은 1.27mm(50mil) 두께의 알루미늄 디스크 두 장의 Disk Pack으로 구성되는 7200rpm 디스크 드라이브를 상온조건에서 구동시킨 후, Top Disk의 OD 위치에서 LDV로 측정된 Transverse (Axial) Vibration 스펙트럼을 보여주고 있다. 설계에 사용된 스피들 모터는 볼베어링을 기본으로 하고 있으며, 그 기본적인 Parameter들은 다음과 같다.

- Ball Diameter: 1,5875mm
- Number of Ball: 10
- Pitch diameter: 8.9mm
- Contact Angle: 25.26deg
- Radial Clearance: 0.013-0.020 um
- Bearing Span: 8.2mm

또한, 사용된 스피들 모터는 8 pole/12 slot의 3상 모터로서, 120Hz의 회전주파수 정보와 연계하여 스피들 모터의 전자기적 가진원 성분을 쉽게 얻을 수 있다. 이러한 전자기적 가진성분과 위 베어링 설계 Parameter들에 의한 베어링 가진성분을 고려하여 스피들 시스템의 가진주파수 배열을 결정하였고, 스피들 모터 Dynamics와 연계되어 나타나는 디스크 모드들을 배열설계하였다. 위 과정을 거쳐 얻은 스피들-디스크 시스템의 경우에서, Fig. 1에서와 같이 383Hz, 623Hz의 ORD(Outer-Race Defects), 585Hz, 725Hz의 BD(Ball Defects)와 696Hz의 IRD(Inner-Race Defects)가 중요한 가진성분들로 나타났다.

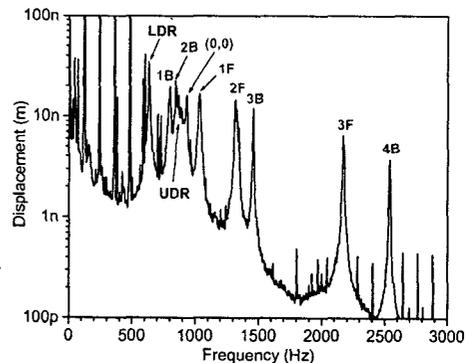


Fig. 1. Disk Vibration Spectrum of 7200rpm Disk Drive Measured on the OD of Top Disk.

Fig.1에서 나타낸 mF(or B) (m: 정수)의 Vibration Mode들은 각각 (m,0)개의 (Nodal Diameter, Nodal Circle)을 갖는 디스크 모드들을 표현하고 있으며, LDR과 UDR은 스피들 모터와 Disk의 강한 연성에 의해 형성되는 Lower Rocking Mode와 Upper Rocking Mode를 각각 나타내고 있다. Fig. 1에서 볼 때, 스피들-디스크 시스템의 편심 및 불균일성 등에 의해 발생하는 회전주파수의 Harmonics들을 제외하면, 대부분의 디스크 모드 에너지들이 500Hz-1.5kHz 사이에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 또 한가지 디스크-스피들 설계시 고려할 사항은, 장시간 드라이브를 구동한 상태를 묘사하는 고온조건(예. 60도)에서 디스크 모드들이 저주파수 대역으로 약 20-40Hz Shift하는 현상으로, 전술한 볼베어링 관련 주파수들과의 공진이 일어나지 않도록 하는 정교한 설계가 필요하게 된다.

3.2. HSA(Head-Stack-Assembly) Dynamics

스피들-디스크 시스템과 더불어 디스크 드라이브의 또 하나의 중요한 부분인 HSA 시스템의 TMR 기여도를 파악하기 위하여, Actuator-Suspension-Head 시스템의 특성을 파악할 필요가 있다. Fig. 2는 VCM 드라이브 신호를 입력으로 하고 LDV를 사용하여 측정된 HSA Top Head의 횡방향 진동신호(Radial Vibration)를 출력으로 하는 시스템 전달함수를 보여주고 있다. 제조공차에 의한 샘플별 차이를 감안하기 위하여 10개의 HSA에 대하여 측정하였고 Fig.2는 3개의 샘플결과를 보여주고 있다.

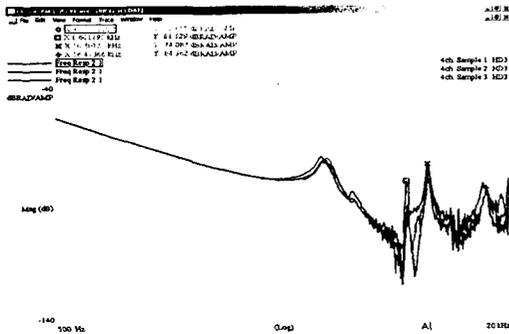


Fig. 2. Measured Transfer Function of HSA (Head-Stack-Assembly) System.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 4.3-4.6kHz 대역에 Pivot 베어링, Fantail, Arm Blade와의 연성에 의해 발생하는 Actuator의 Sway Mode가 있음을 알 수 있으며, 8kHz이상의 고주파수 대역에서 Actuator와

Suspension의 독립모우드 및 연성모우드들이 다수 존재함을 알 수 있다.

일반적으로 HSA 시스템은 위와 같이 여러형태의 진동모우드들을 가지고 있음이 잘 알려져 있으나, 본 논문에서는 TMR과의 연계분석이 주목적이고 다음 장에서 보일 TMR 기여도입장에서 HSA 시스템 모드들의 Track-Following PES 기여도가 스피들-디스크 시스템에 비하여 상대적으로 적음을 보이고 있어 여기에서는 상세히 다루지 않도록 한다.

3.3. Servo Dynamics

전술한 스피들-디스크 시스템, HSA 시스템과 더불어 디스크 드라이브의 최종 TMR성능을 지배하는 또 하나의 시스템이 서보 시스템이라 할 수 있다. 서보 시스템은 스피들-디스크 시스템으로부터의 Disturbance Energy와 HSA 시스템 Energy의 Controllability 사이에서, Mechanical Vibration Energy 분포를 PES입장에서 최소화시킬 수 있도록 에너지 분포를 조정하는 일종의 중재자 역할을 한다고 볼 수 있다. 이러한 입장에서 최근의 57,500TPI 이상의 High-TPI 설계를 위하여는 서보시스템의 근본적인 부분을 다시 한번 살펴볼 필요가 있다.

Fig. 3은 본 연구에 사용된 서보시스템의 Error Sensitivity Function을 보여주고 있다. 서보시스템의 Error Sensitivity Function은 디스크 진동의 Disturbance에 대한 PES의 Sensitivity를 나타내며, Track-Following PES와 가장 관련이 깊다.

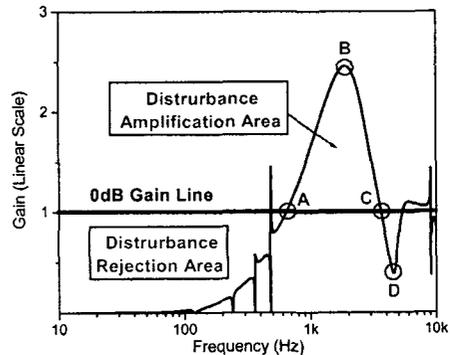


Fig. 3. Error Sensitivity Function of Servo System which has the Bandwidth of 950Hz.

Fig 3에서 500Hz 이하의 네개의 주파수에서의 Dip은 4차까지의 회전주파수 Harmonics와 관련된 RRO(Repeatable Runout)를 제거하기 위한 부분이고, D(4.5kHz) 부분의 Dip은 전술한 의 4.5kHz 대역의 Actuator 공진을 표현하기 위한 2차

시스템 모델을, 서보의 Actuator 모델의 기본적인 형태인 Rigid-Body Inertia 모델에 추가적으로 넣음으로서 발생된 것이라고 볼 수 있다. 그러나, Error Sensitivity Function의 개념상(PES/Disk Disturbance), Fig. 3의 Sensitivity Curve의 4.5kHz대역 Dip에 의하여 Actuator의 4.5kHz 공진이 PES에서 Rejection될 것으로 볼 수는 없다고 할 수 있다. 단지, Disk Vibration 에너지에 이 주파수대역 성분이 크게 존재하는 경우 서보 시스템이 효과적으로 이 대역을 감소시킬 수 있음을 의미하게 된다.

Fig. 3의 Error Sensitivity 커브로부터 알 수 있는 가장 중요한 사실은, 어떠한 서보 시스템을 설계하더라도 일정주파수 A(644Hz) 이하의 저주파수 대역은 효과적으로 디스크 진동에너지 외란을 Rejection 시킬 수 있는 반면, 반드시 A(644Hz)와 C(3.642kHz) 지점과 같이 Gain 0dB를 Crossing하는 주파수가 존재하게 되며 이 주파수대역에 대하여는 디스크 진동에너지를 최대지점 B(1.898kHz)를 중심으로 하여 오히려 증폭시켜 PES에 포함시키게 된다는 사실이다. 위 사실은 Control Theory 입장에서 오래 전부터 잘 알려진 사실로서, 1940년대 Bode에 의해 설명된 Bode's Integral Theorem[4]으로도 쉽게 이해될 수 있다. 즉, 임의의 Closed-loop Control System의 Disturbance Sensitivity Function은 다음식을 만족한다.

$$\int_0^{\infty} \log |S(\omega)| d\omega = c \quad (1)$$

여기에서 S는 Sensitivity Function을 의미하며, c는 Open-loop System의 Unstable Poles과 Non-minimum Phase Zeros에만 결정되는 임의의 Positive Constant이다. 즉, 선형주파수 영역에서 Disturbance-amplification 면적은 Disturbance-rejection 면적보다 반드시 큼을 알 수 있다.

이 점이 바로 최근의 디스크 드라이브 설계에 있어서 TPI 기록밀도 향상을 가로막는 가장 큰 이유 중 하나로 볼 수 있으며, 그 주된 이유는 3.1절에서 전술한 Fig. 1 과 같은 주요 디스크 진동 에너지 대역과 본 절의 Fig. 3과 같은 대부분의 디스크 드라이브 시스템에서 사용되는 서보의 외란증폭대역이 상당히 중복되어 있고 그 양을 더 이상 무시하기 어려운 TPI 수준이 현실적으로 필요하기 때문으로 볼 수 있다.

3.4. Servo 교정된 스핀들-디스크 Dynamics

3.1절에서 전술한 스핀들-디스크 시스템은 순수한 Mechanical Vibration 특성을 나타내고 있으며, 실제 TMR 입장에서는 3.3절의 서보 시스템 Error Sensitivity Function으로 교정된 상태의 스핀들-디스크 시스템이 TMR과 보다 직접적인 관련을 갖는다고 할 수 있다. 이러한 이유로 스핀들-디스크 시스템의 상세한 분석을

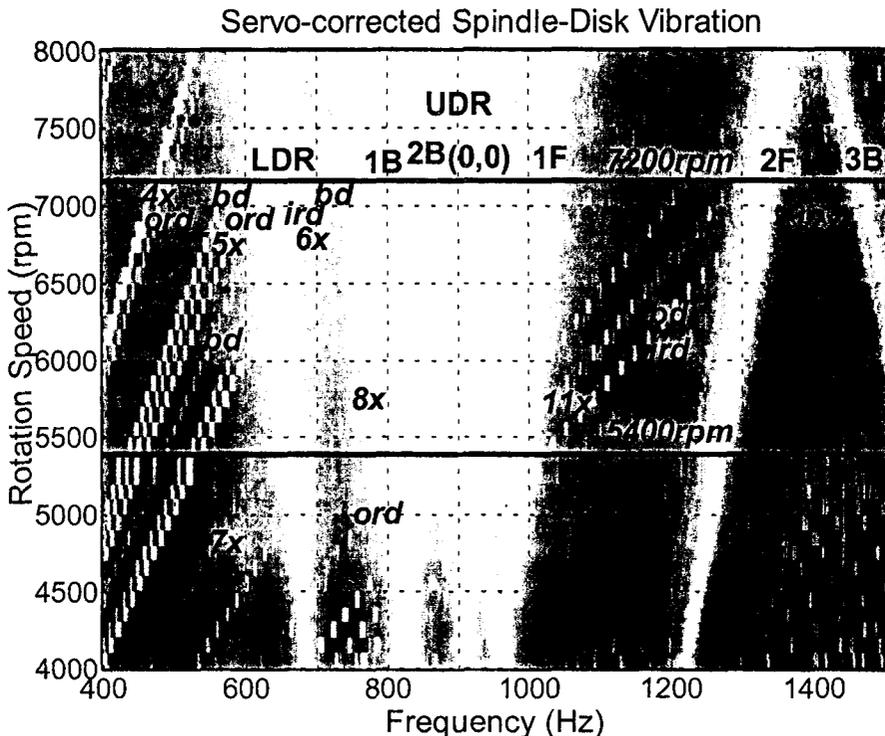


Fig. 4. Waterfall Plots of the Servo Corrected Spindle-Disk Vibration vs. Rotation Speed

위하여, 100rpm 간격으로 회전주파수를 Sweeping하면서 LDV에 의해 디스크 OD의 진동을 측정 후 각 주파수들에 대하여 서보의 Error Sensitivity 특성값들로 교정하여 Fig. 4와 같은 Waterfall Plot을 얻었다.

Fig. 4로부터, 4000-8000rpm 회전조건에서 주요주파수대역 400-1.5kHz 사이에 8개의 Disk-Pack Vibration 모우드들이 집중됨을 알 수 있으며, 베어링 관련 가진주파수들과 디스크 모우드들과의 간섭은 주로 LDR, 1B 및 2F 근방의 대역에서 가능성이 가장 높으며 전술한 바와 같이 상온과 고온에서의 디스크 모우드들과의 Matching을 최소화시키도록 베어링 주파수들과 디스크 모우드들에 대한 반복 실험분석을 통하여 배치설계하였다.

또한, Fig. 4로부터 회전속도 증가에 따라 베어링 관련 가진에너지들의 상승률보다 디스크 모우드의 진동에너지 상승률이 더 가파름을 알 수 있다. 서보 시스템 특성 교정 이전의 순수 진동 측정 데이터를 이용하여 회전주파수별 전체 진동 에너지를 분석하여 본 결과, 디스크의 축방향 NRRO(Non-Repeatable Runout) 진동 변위레벨(rms scale)은 회전주파수(rpm)에 대하여 약 1.6배의 비례관계를 보이고 있음을 알 수 있었다. 즉, Fig. 4의 5400rpm line과 7200rpm line에서의 순수진동에너지는 약 1.6배의 차이를 보이고 있으며, 이는 서보 시스템 특성을 감안한 경우에도 유사한 경향을 보이고 있다. 위 관계로부터 10000rpm 상황을 추론하면 7200rpm에 비하여 약 1.7배의 스피들-디스크 시스템의 진동레벨 증가를 기대할 수 있다.

4. Resultant PES 에너지 분포

3절의 Dynamics들을 사용하여 57,500TPI의 실제 드라이브로부터 연속 PES(Position Error Signal)신호를 측정하여 주파수분석을 한 결과 Fig. 5와 같은 PES 스펙트럼을 얻었다. 본 연구에서 다른 드라이브의 Servo Sector는 원주당 160개의 Sector로 구성되어 있으며, 이 경우 7200rpm(120Hz) 디스크 회전으로 인한 Servo Sampling 주파수는 19.2kHz이므로, 충분한 주파수 Resolution(2Hz)을 얻기 위하여 60회전동안의 PES Sequence를 분석하였다. 또한, 연속 PES 신호는 드라이브 내 활용가능한 버퍼메모리와 Serial Communication Line을 사용하여 출력될 수 있도록 하였다. 본 연구에서 다른 95,000TPI의 PES는 Table.1 에서 보인 기록밀도를 고려, 환산하여 추론하였다.

Fig. 5로부터 상당부분의 PES 에너지가 3kHz 이내의 대역에 집중되어 있으며, 회전주파수의

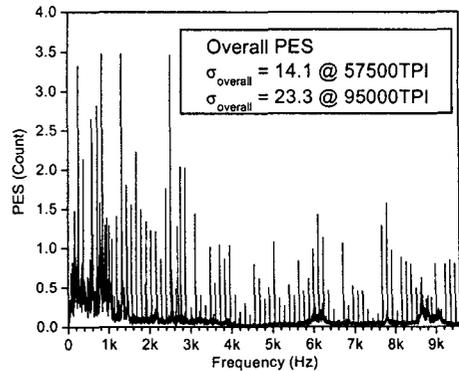


Fig. 5. Overall PES (Position Error Signal) Spectrum Measured from 7200rpm Hard Disk Drive.

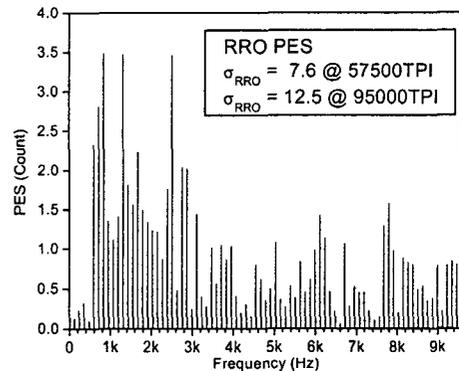


Fig. 6. Decomposed RRO(Repeatable Run-Out) PES Spectrum.

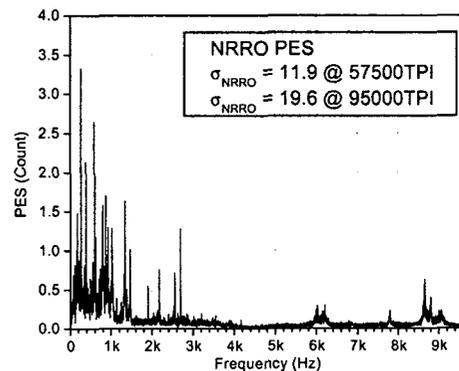


Fig. 7. Decomposed NRRO(Non-Repeatable Run-Out) PES Spectrum.

Harmonics로 나타나는 RRO(Repeatable Runout) 성분과 RRO를 제외한 Random-Phase를 갖는 NRRO(Non-Repeatable Runout) 성분들이 중첩되어 나타남을 볼 수 있다. 이 성분들을 분해하기 위하여 Time Domain에서의 동일 PES 신호를 각 Servo Sector별 Average 과정에 의하여, RRO PES와 NRRO PES를 분해하였으며 Figs. 6, 7는 그 주파수 해석결과를 각각 보여주고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7로부터 알 수 있듯이 RRO PES성분의 전체에너지는 NRRO PES의 에너지에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보임을 알 수 있다. 또한 서보 시스템의 제어 입장에서 일정한 위상을 가지고 발생하는 RRO 성분은 추가적인 노력에 의해 Controllability를 추가 향상시킬 수 있는 여지가 있는 반면, 잘 알려진 바와 같이 Stochastic Random Signal 형태를 갖는 NRRO 성분은 그 자체의 원인을 줄이지 않고는 쉽게 서보에서 줄이기 어려운 성분에 해당한다. 또한, Fig. 7의 PES NRRO 스펙트럼을 볼 때, 약 3kHz를 중심으로 고주파수 대역 Peak 에너지들은 3.2절의 HSA Dynamics 성분들이 직접적으로 영향을 끼치거나 서보 Sampling 주파수(19.2kHz)의 Nyquist 주파수(9.6kHz)에 의해 Aliasing 효과에 의해 Folding 된 성분들이 주된 성분임을 알 수 있다. 반면, 3kHz 이하의 NRRO PES 스펙트럼에서의 대부분의 Peak들은 전술한 3.1절, 3.4절의 스피indle-디스크 Dynamics의 공진주파수들과 일치하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 8은 이와 같은 3kHz 이하 대역의 NRRO PES 스펙트럼을 보여주고 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 이 주파수 대역에서의 대부분의 Peak들은 스피indle-디스크 시스템 Dynamics와 일치하나, 258Hz 근처의 강한 Peak는 Actuator를 중심으로 발생한 Vortex-Induced Vibration 성분임을 실험적으로 확인하였다.

또한 3.1절과 3.4절에서 보인 축방향(Axial) 디스크 진동 스펙트럼을 디스크와 Slider 사이의 간단한 기하학적 특성을 이용하여 횡방향(Radial) 진동량으로 변환하고 서보 특성을 교정한 경우, 500Hz-3kHz의 주요대역에서 축방향 진동 모드들의 약 3.0%가 Fig. 8의 NRRO PES 스펙트럼 Peak들의 크기 및 형태와 유사한 경향을 보임을 알 수 있었고 이는 P. Srikrishna *et al.* [3]에 의한 최근의 연구결과와도 유사한 결과를 보이고 있다. 즉, 이 사실은 디스크의 축방향 진동 특성으로부터 대략적으로 그로 인한 PES 특성을 유추할 수 있다고 할 수 있다.

엄밀한 의미에서 Figs. 7, 8과 같은 NRRO PES 스펙트럼을 구성하는 성분들은, 스피indle-디스크 시스템 Dynamics 뿐 아니라 Actuator/Suspension/Flow-Induced Vibration 효과, Operation 외부로부터의 충격/진동, ADC/DAC Quantization Noise, Media Noise, Magnetic Field

Sensing과 Electrical Demodulation Noise, Power Amplifier Noise 등의 다양한 요인들이 존재하게 된다. 이러한 각 성분들에 대한 정밀한 Decomposition 방법들에 대한 연구[5,6]가 현재 학계 및 업계에서 현재 상당히 활발히 진행 중이나, 아직 일반성을 갖춘 체계적인 방법론은 미흡한 실정이며 분석자의 다소 주관적인 판단요소가 필요한 실정이다. 이러한 이유로 인하여 본 연구에서는 Mechanical Engineering 입장에서 PES에 가장 지배적인 영향을 주는 두 Dynamics만을 기초로, 거시적으로 Fig. 7의 PES 스펙트럼에서 3kHz를 기준으로 저주파수 대역을 스피indle-디스크 시스템 영역, 고주파수 대역을 HSA Dynamics으로 구분, 분석하였다.

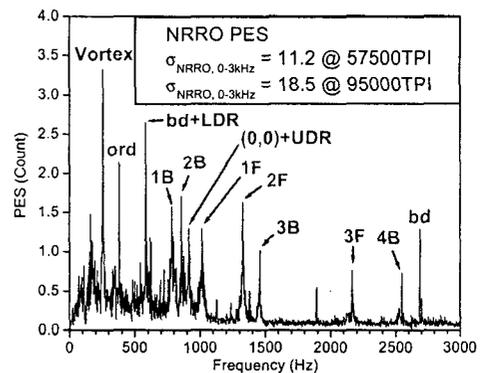


Fig. 8. Decomposed Narrow-Band NRRO(Non-Repeatable Run-Out) PES Spectrum.

Table 2는 Fig. 3의 Servo Bandwidth를 증가시키 가면서 실험한 PES 데이터를 이용하여, 각 주파수 영역에 대한 NRRO PES의 Percentage Energy를 계산한 값들을 보여주고 있다.

Table 2. Percentage Energy Contribution to NRRO PES Energy

Servo Bandwidth	Overall NRRO PES (0 < f < 9.6kHz)	Spindle-Disk Dynamics Range (f < 3kHz)	HSA Dynamics Range (f > 3kHz)
Hz	1sigma count	%	%
950	11.9	90	10
1200	10.9	87	13
1500	11.6	85	15

Table 2에서 볼 수 있듯이, Servo Bandwidth의 단순한 증대만으로는 PES의 감소를 크게 기대할 수 없음을 알 수 있다. 이는 Servo Bandwidth를 증가시켜 스피indle-디스크 진동주파수 대역을

충분히 Rejection하고자 할 경우, 현실적으로 HSA 시스템의 첫번째 횡방향 진동모우드(3.2절의 4.5kHz) 존재로 인하여 서보 시스템의 Stability 설계 Margin에 한계가 발생하게 되어 원하는 만큼 그 Bandwidth를 올릴 수 없기 때문이다. 또한, 위 HSA 진동모우드를 그대로 둔 채 단순히 서보 Bandwidth를 조금씩 올릴 경우, 3.3절에서 언급한 Bode's Integral Theorem에 의해 Disturbance-Amplification 영역의 크기(Fig. 3의 A-B-C 면적)가 급격히 증가하기 때문으로 볼 수 있다. 이러한 서보 Bandwidth를 충분히 높은 주파수로 올릴 수 있는 대안으로서 DSA(Dual-Stage Actuator)에 대한 연구 역시 상당히 진행되어 왔으나, 최근 이 기술을 실제제품에 현실화시키는 데 있어 Piezo Actuator Material의 Outgasing 문제와 취약한 내충격성 등 Reliability 면에서의 어려움으로 인하여 관련업체들의 연구개발내용이 상당히 회의적인 상태이다.

Table 2의 실험결과로부터 알 수 있는 가장 중요한 사실은, 현재의 Mechanical Platform 형태에서 3kHz 이상의 HSA 시스템 진동의 TMR기여도는 10-15%를 보이는 반면, 3kHz 이내의 스핀들-디스크 시스템 진동에 의한 TMR 기여도는 약 85-90%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 위 결과는 유체베어링을 사용하여 베어링 가진 주파수성분들을 근본적으로 제거시킨 경우[7]에도 약 76-81%의 기여도를 가짐을 실험적으로 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 80Gbytes/Platter의 고밀도 HDD를 설계하기 위한 BPI 및 TPI 수준을 예측하였고, 이를 통하여 얻은 95,000TPI의 기록밀도를 얻기 위한 스핀들-디스크 시스템 진동의 TMR기여도를 분석하였다. 분석결과, HSA 시스템의 진동의 TMR기여도는 10-15%를 보이는 반면, 스핀들-디스크 시스템 진동의 영향은 약 85-90%의 기여도를 보이고 있으며 이 기여도는 현재의 서보 시스템 구조상 Loop Bandwidth를 증가시키더라도 그 기여도의 변화가 크지 않음을 확인하였다.

본 연구에서 중점적으로 고찰한 3kHz 이하의 주파수 대역 PES에너지의 모두가 스핀들-디스크 시스템 진동에 의한 것은 아니나, Baseline Noise Floor를 포함한 다른 영향요소들의 기여도를 최대한 약 40%로 설정하더라도 스핀들-디스크 시스템의 TMR기여도는 약 45-50%에 달하여 전체 TMR의 약 1/2의 에너지를 가진다고 볼 수 있다.

본 연구결과로부터, 향후 보다 빠른 데이터 입/출력 속도를 위한 고속 HDD 설계와 높은 기록밀도를 갖는 High-TPI HDD 설계에 있어 스핀들-디스크 시스템 진동제어부문은 더욱 그 중요성이 증가할 것으로 예측되어진다.

감사의 글

최근 HDD업계의 TMR기술동향 정보와 80GB/Platter TMR Budget 예측을 도와준 SISA (Samsung Information Systems America)의 VP. Debasis Baral과, PES 분석실험 Data에 대하여 많은 Comment를 하여 준 Tho Pham, Frank Morris에게 감사드립니다. 본 연구의 실험을 위하여 PES 직렬통신회로 및 Setup을 도와준 박철훈씨와 Son Hong에게도 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Eunsik Kim, Y. H. Im, Yongsu Kim, K. J. Lee, Kyongmi Lee, and N. Y. Park, "Head Design Scheme for Perpendicular Recording with Single Layered Media," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 37, Issue 4, Part 1, Jul 2001, 1382-1385
- [2] T. Yamaguchi, K. Usui, H. Hirai, F. Tomiyama, H. Numasato, Y. Hamada, and K. Shishida, "Modeling and TMR(Track Misregistration) Budget Design for Head-positioning of High Track-Density Drives," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 35 No. 2, 1999, 892-897
- [3] P. Srikrishna and K. Kasetty, "Predicting Track Misregistration (TMR) from Disk Vibration of Alternate Substrate Materials," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 36 No. 1, 2000, 171-176
- [4] H. W. Bode, *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*, New York: Van Nostrand, 1945.
- [5] L. Guo, H.S.Lee, A. Hudson, and S. Chen, "A Comprehensive Time Domain Simulation Tool for Hard Disk Drive TPI Prediction and Mechanical/Servo Enhancement," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 35 No. 2, 1999, 879-884
- [6] R. Ehrlich and D. Curran, "Major HDD TMR Sources and Projected Scaling with TPI," *Magnetics, IEEE Trans. on*, Vol. 35 No. 2, 1999, 885-891
- [7] 손영, 황태연, 한윤식, 강성우, Frank Morris, "고성능 하드 디스크 드라이브 개발을 위한 유체베어링 스핀들 모터의 특성분석", 소음진동공학회, 2001년도 춘계학술대회 논문집, 2001.