

100kTPI급 하드 디스크 드라이브 TMR 설계를 위한 SUSPENSION에 관한 연구

A TMR Budget Design for 100kTPI Hard Disk Drives Using a Head Gimbal Assembly with Radial Motion Capability

⁰오동호*, 강성우**, 한윤식**, 김영훈***, 고정석**, 황태연**

⁰Dong-Ho Oh*, Seong-Woo Kang**, Yun-Sik Han**, Young-Hoon Kim***, Jeong-Seok Koh**, Tae-Yeon Hwang

Key Words : Hard Disk Drive, Position Error Signal(PES), Track Misregistration(TMR), Head Gimbal Assembly(HGA)

ABSTRACT

In high-capacity disk drives with ever-growing track density, the allowable level of position error signal (PES) is becoming smaller and smaller. A substantial portion of the PES is caused by disk vibration. This can be reduced by using a head gimbal assemblies (HGAs) that do not confine the slider movement to the vertical direction to disks, but allow movement to the radial direction of disks with respect to disk vibration. Several types of HGAs are proposed for such radial motion of the slider. Experimental results show that the PES levels are reduced by the proposed HGA-design concepts.

1. 서론

고도로 정보화 되고 있는 오늘날 컴퓨터의 기억 장치로 쓰이고 있는 하드 디스크 드라이브(HDD)의 중요성과 효율성은 날로 증대되어 가고 있다. 특히 개인용 컴퓨터의 HDD는 사용 소프트웨어의 대형화 및 고속 처리 요구에 부응하여 급속히 대용량화 및 고속화 되고 있다. HDD의 데이터 고밀도화를 달성하기 위해 크게 두 방향의 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 첫째로는, 데이터가 기록되는 디스크 미디어 원주 방향으로의 저장밀도 증대를 위한 BPI(Bits Per Inch) 증가기술이 그 한 방향으로 수직 자기 기록(Perpendicular Magnetic Recording) 방식에 대한 연구[1]가 그 한 예라 할 수 있다. 둘째로는, 반경 방향으로의 저장 밀도를 증대 시키는 연구 방향[2,3]으로서 TPI(Tracks Per Inch) 증가 기술이 또 한가지 방향이라 할 수 있다. 기술한 두 방향의 기록밀도 증가 기술에서 디스크와 헤드 사이의

상대적인 기계적 진동 크기는 공통적으로 중요한 인자로 작용하게 된다. 특히 TPI 증가기술 측면에서 진동에 의한 헤드와 디스크 트랙 사이의 위치 오차(PES: Position error signal)와 TMR(Track Misregistration)에 대한 설계부분은 HDD 플랫폼 설계의 핵심을 이루고 있다.

디스크 드라이브에서 스핀들-디스크 시스템은 가장 큰 진동원으로써 디스크의 축 방향, 반경 방향 진동 모두 헤드를 오프-트랙 시킬 수 있다. 하지만 드라이브에서 디스크의 축 방향 진동이 반경 방향 진동에 비해 상당히 크므로 디스크의 축 방향 진동이 TMR에 큰 기여를 한다. 이에 대한 연구는 Bouchard[4], Seo[5], McAllister[6], 그리고 Imai[7] 등이 하여 왔고, Oh[8] 등에 의한 특허가 몇 개 있다.

본 논문에서는 디스크 한 장당 40GB 이상인 100kTPI급 3.5인치 HDD 시스템을 설계하는 데 있어, 스핀들-디스크 시스템과 HGA-HSA(Head-Stack Assembly) 시스템의 진동특성과 기구적 특성을 활용하여 디스크의 축 방향 진동에 의한 헤드의 오프-트랙을 줄일 수 있는 방법과 이를 구현한 것을 제시하고, 샘플에 대한 PES 측정 결과 비교로 TMR 기여도를 보이고자 한다.

* 삼성종합기술원 Storage Lab., 정희원 (dhoh@sait.samsung.co.kr)

** 삼성종합기술원 Storage Lab., 정희원

*** 삼성종합기술원 Storage Lab.

2. 디스크 진동에 의한 헤드 오프-트랙

2.1 모델링

기존의 서스펜션은 Fig. 1, 2와 같이 디스크 진동에 대해 상하 운동을 하여 정지 상태에서의 헤드 위치(A_0)와 이에 대한 디스크 기록면의 위치(B_0)가 회전 동작 상태에서의 디스크 반경 방향 굽힘 진동에 대해 각각 A_1 , B_1 으로 상대적 움직임을 가진다. 디스크 진동에 대한 상대적 움직임, 즉 오프-트랙 간격 δ 는 하드 디스크 드라이브의 동작 중 위치 오차를 유발하여 고밀도용 TMR 설계를 제한 한다.

Fig. 1은 디스크가 회전 동작 상태에서 굽힘 진동을 하여 아래 방향 굽힘 모양일 때 오프-트랙을 모델링 한 것이고, Fig. 2는 디스크가 회전 동작 상태에서 굽힘 진동을 하여 위쪽 방향 굽힘 모양일 때 오프-트랙을 모델링 한 것이다.

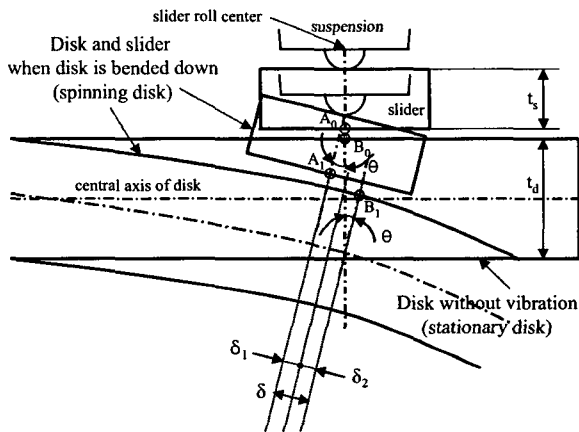


Fig. 1 Off-track of a conventional suspension due to disk vibration. (when disk is bended down)

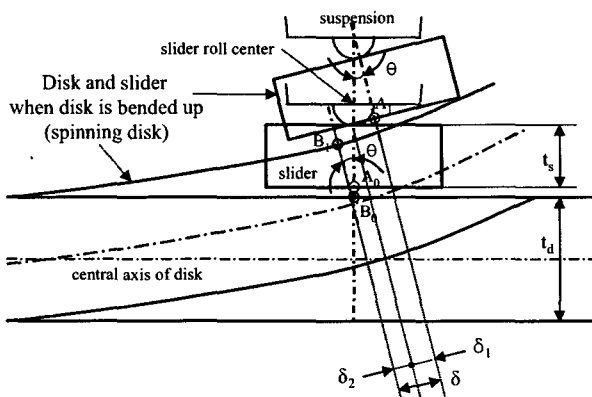


Fig. 2 Off-track of a conventional suspension due to disk vibration. (when disk is bended up)

여기서 t_s 는 슬라이더의 두께, t_d 는 디스크의 두께, θ 는 디스크의 굽힘 각도, δ_1 는 디스크 기록면 위에서의 변위, δ_2 는 헤드의 변위, 그리고 δ 는 헤드의 오프-트랙이다.

2.2 바이어스 각도에 의한 헤드 오프셋 영향

기존의 서스펜션은 Fig. 1, 2와 같이 디스크 진동에 대해 상하 운동만을 하여 디스크 진동에 대해 오프-트랙 간격 δ 를 유발하였다. 이에 대해 만약 헤드가 디스크 진동에 대해 반경 방향 운동을 할 수 있도록 서스펜션을 설계한다면 디스크 진동에 대한 오프-트랙을 줄일 수 있다.

적용 예로써 Fig. 3, 4와 같이 슬라이더의 롤(Roll) 센터가 디스크 진동에 대해 반경 방향 운동을 할 수 있도록 서스펜션에 바이어스 각도 ϕ 를 주어 설계 하였을 때 헤드의 오프-트랙을 줄이거나 제거할 수 있다.

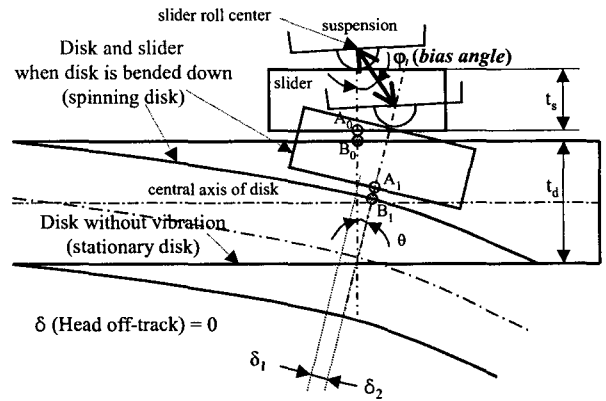


Fig. 3 Off-track of a roll center movable suspension due to disk vibration. (when disk is bended down)

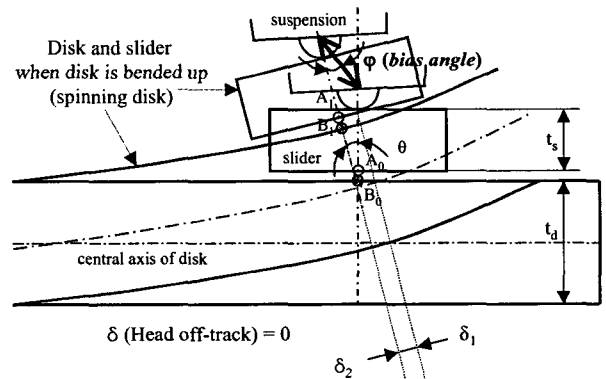


Fig. 4 Off-track of a roll center movable suspension due to disk vibration. (when disk is bended up)

Fig. 3은 디스크 회전 동작 중 아래 방향 굽힘 모양 진동을 할 때 적당한 바이어스 각도로 롤 센터가 움직이도록 하면 헤드의 오프-트랙이 제거됨을 나타낸 것이고, Fig. 4는 디스크 회전 동작 중 위쪽 방향 굽힘 모양 진동을 할 때 적당한 바이어스 각도로 롤 센터가 움직이도록 하면 헤드 오프-트랙이 제거됨을 나타낸 것이다. 이와 같이 헤드의 오프-트랙이 없다면 디스크 기록면 위에서의 변위 δ_1 와 헤드의 변위 δ_2 는 같다.

3. 바이어스 각도 구현을 위한 서스펜션 설계

바이어스 각도에 따라 헤드의 오프-트랙은 작아질 수 있지만, 반대로 커질 수도 있다. Fig. 3과 4와 같은 다운 형태(down type)의 서스펜션은 양의 방향 바이어스 각도이어야 헤드의 오프-트랙을 줄일 수 있다. 반면 업 형태(up type)의 서스펜션은 음의 방향 바이어스 각도를 가져야 헤드의 오프-트랙을 줄일 수 있다.

3.1 바이어스 각도의 최적 값

디스크 진동에 대해 헤드의 오프-트랙이 발생하지 않는 이상적인 최적 바이어스 각도는 디스크의 동역학적 특성 값과 HGA의 기구학적 특성 값과 관련된 변수에 의해 결정 할 수 있다. 디스크의 동역학적 특성 값으로는 디스크의 모드 형상, 디스크의 축 방향 진동 크기, 디스크의 두께가 있고 HGA의 기구학적 특성 값으로는 스피들 중심 축으로부터 대상 트랙까지의 반경, 슬라이더 두께, 슬라이더의 하중 점(dimple) 롤 센터 반지름이 있다.

먼저 디스크의 반지름에 대한 단위 축 방향 진동 변위당 모드 형상의 굽힘 각도는 Fig. 5와 같다.

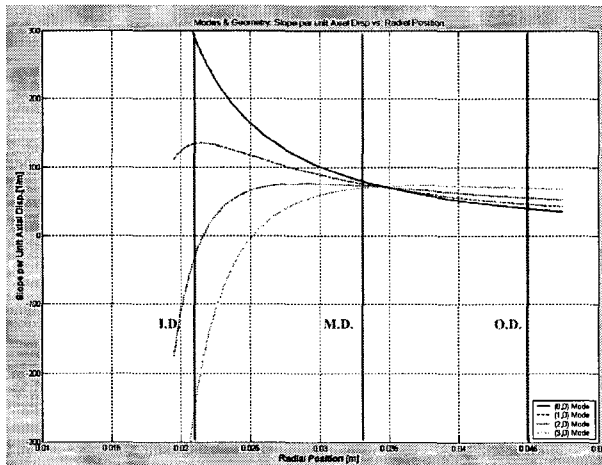


Fig. 5 Modes and geometric slope per unit axial vibration vs. Radial position

디스크의 축 방향 진동 크기를 구하기 위해 2장 디스크와 FDB(Fluid Dynamic Bearing) 스피들을 가진 장당 40GB HDD 샘플의 축 방향 변위를 특정 반지름 OD(외경), MD(중경), ID(내경)에서 측정하였다. 이 중 OD에서의 측정 값은 Fig. 6과 같다. 각각의 디스크 모드에 대한 진동 변위는 각 모드의 주파수 영역에서 윈도우의 영향을 고려한 가중 적분으로 구할 수 있다. Fig. 6에서는 예로 디스크 (3,0) Forward 모드에 대한 주파수 영역을 표시하였다.

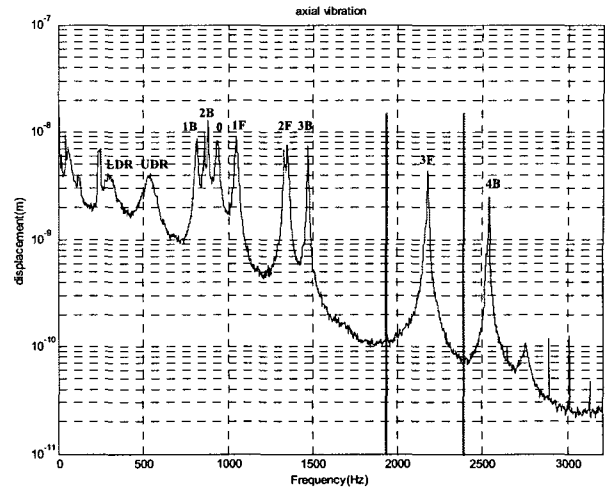


Fig. 6 Disk axial displacement at OD

디스크의 굽힘 각도는 위의 디스크의 반지름에 대한 단위 축 방향 진동 변위당 모드 형상의 굽힘 각도와 축 방향 변위로부터 실험적으로 구하였다.

이로부터 바이어스 각도의 최적 값은 Fig. 3과 4의 기하학적 관계로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varphi_{dn} = \cos^{-1}\left(\frac{a - b \cos \theta}{c}\right) \text{ for bended down,} \quad (3-1)$$

$$\varphi_{up} = \cos^{-1}\left(\frac{b \cos \theta - d}{c}\right) \text{ for bended up.} \quad (3-2)$$

여기서, φ_{dn} 는 디스크가 아래 방향으로 굽힘 진동을 할 때 최적 바이어스 각도이고, φ_{up} 은 디스크가 위쪽 방향으로 굽힘 진동을 할 때 최적 바이어스 각도이다. 그리고 $a = R_d + T_s + T_d / 2 + r \cdot \tan \theta$,

$$b = R_d + T_s + T_d / 2,$$

$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \theta}$ 이고, R_d 는 슬라이더의 하중 점 롤 센터 반지름, r 은 스피들 중심 축으로부터 대상 트랙까지의 반지름이다.

일반적으로 3.5인치 HDD의 디스크 굽힘 각도는 매우 작아 φ_{dn} 과 φ_{up} 이 같다. 실험에 사용한 HDD 샘플의 경우는 φ_{dn} 과 φ_{up} 모두 1~2도 정도이다.

3.2 바이어스 각도를 가지는 서스펜션 설계

헤드의 오프-트랙을 줄이기 위한 바이어스를 구현하기 위해 Fig. 7과 같이 서스펜션을 수정 설계하였다. Fig. 7에서 서스펜션은 동역학적 특성 향상을 위해 11mm 서스펜션을 14.5mm처럼 사용하기 위해 확장 베이스 플레이트(Extended base plate)를 액츄에이터 암과 로드 빔 사이에 부착하였는데, 이를 굽힘 영역(Bent region)에서 경사지게 하여 바이어스 각도로 한다.

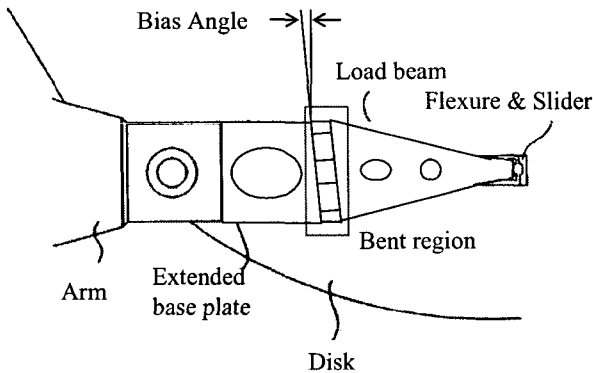


Fig. 7 A suspension with slant bias angle

디스크의 진동에 의해 Fig. 7의 서스펜션은 바이어스 각도를 가지고 상하 운동과 동시에 디스크 반경 방향 운동을 할 수 있고, 이는 헤드의 오프-트랙을 줄인다. 이밖에도 여러 구현 방법이 있을 수 있고, 몇 가지 예가 Oh[8]에 있다.

4. 결과

이상의 결과를 기본으로 1도와 2도 바이어스 각도를 가지는 샘플을 제작하여 HDD 샘플에서 트랙 추종 제어시 위치 오차로 성능을 확인하였다. 사용한 HDD는 디스크 2장, 4채널 헤드, FDB 모터, 93000 TPI, 장당 40GB 용량 드라이브이다.

Fig. 8과 9는 각각 1도와 2도의 바이어스 각도를 가진 드라이브에 대해 OD에서 헤드 3번(가장 위에 있는 헤드)의 NRRO PES를 정상 드라이브 OD에서 헤드 3번의 NRRO PES와 주파수 영역에서 비교한 것이다. 주요 디스크 모드 관련 피크들이 모두 2가지 바이어스 각에 의해 감소하였다.

Fig. 10은 바이어스 각이 없는 정상 드라이브의 OD에서 헤드 3번의 PES로 각각 섹터에 대한 평균, 최대, 최소값과 전체 PES의 스펙트럼, RRO(Repeatable run-out) PES 스펙트럼, 그리고 NRRO (Non-repeatable run-out) PES 스펙트럼 결과이다. 이와 비교하여 바이어스 각 1도 드라이브에 대한 결과는 Fig. 11에 그리고 바이어스 각 2도 드라이브에 대한 결과는 Fig. 12에 있다. 바이어스 각 1도와 2도 모두 PES를 감소 시킴을 알 수 있고, 특히 디스크 모드가 지배적인 600Hz~2000Hz 대역에서 NRRO PES는 물론 RRO PES도 함께 감소하였다. RRO PES의 감소는 서보 트랙을 쓰는 과정에서 디스크 모드 관련 NRRO PES의 감소로 인해 Written-in RRO PES도 줄어들기 때문이다.

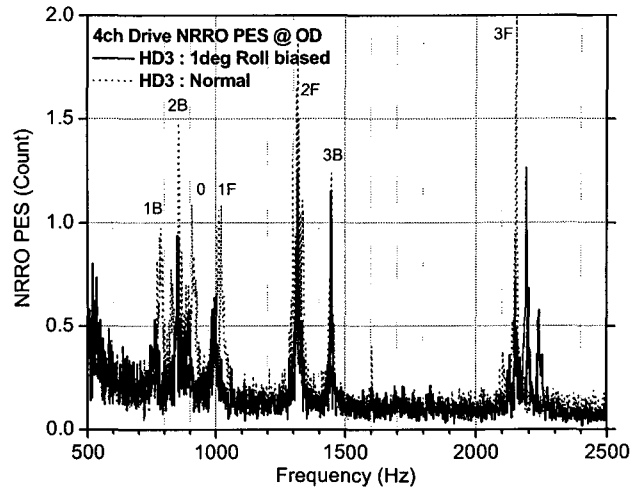


Fig. 8 NRRO PES comparison of head #3 at OD (normal and bias angle 1deg.)

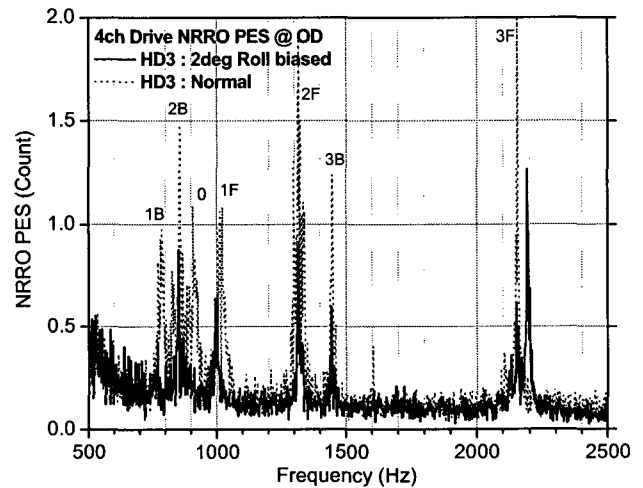


Fig. 9 NRRO PES comparison of head #3 at OD (normal and bias angle 2deg.)

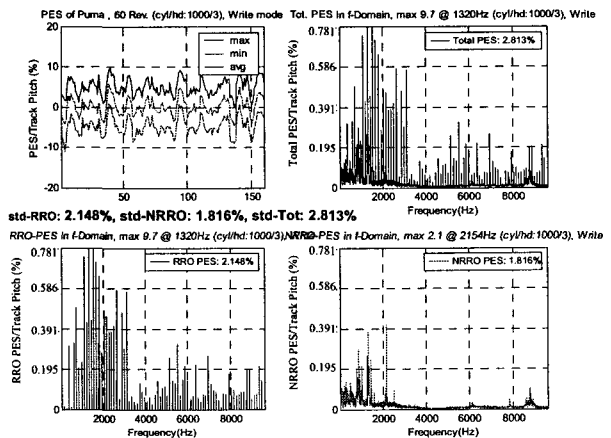


Fig. 10 PES result of head #3 at OD (normal)

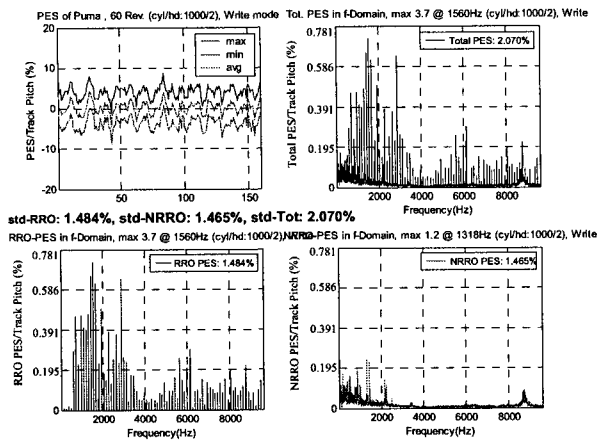


Fig. 11 PES result of head#3 at OD (bias angle:1degree)

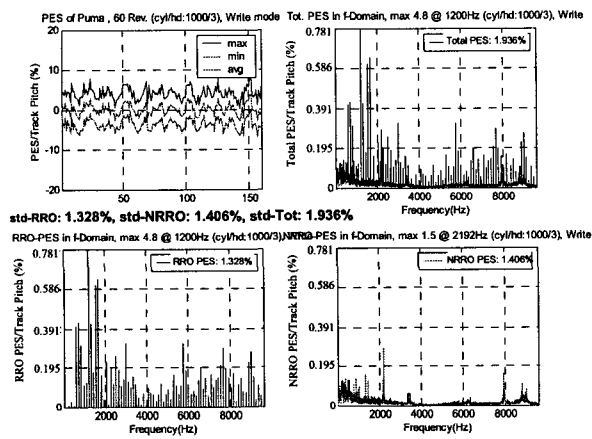


Fig. 12 PES result of head#3 at OD (bias angle:2degree)

Table 1은 바이어스 각 1도 드라이브와 정상 드라이브의 PES를 트랙 피치에 대한 1σ로 통계적 정량화하여 비교한 것으로, 예측대로 NRRO PES 뿐 아니라 RRO PES도 감소하였고 MD에서 보다 OD에서 큰 폭으로 감소하였다. Table 2는 바이어스 각 2도 드라이브와 정상 드라이브의 PES를 비교한 것으로, 바이어스 각 1도 드라이브에서와 마찬가지로 NRRO PES 뿐 아니라 RRO PES도 감소하였고 MD에서 보다 OD에서 큰 폭으로 감소하였다. 단, 바이어스 각 1도 드라이브 보다 PES가 조금 큰 폭으로 감소하였다.

Spindle Motor		FDB Motor					
HGA		Normal			1 Degree biased		
HD	Zone	RRO	NRRO	Tot	RRO	NRRO	Tot
		(1 Sigma of PES/Track pitch, %)			(1 Sigma of PES/Track pitch, %)		
hd #1	OD	1.9	1.7	2.5	1.4	1.5	2.1
	MD	1.5	1.3	2.0	1.3	1.2	1.7
hd #2	OD	1.5	1.6	2.2	1.6	1.3	2.1
	MD	1.2	1.5	1.9	1.3	1.1	1.7
hd #3	OD	2.1	1.8	2.8	1.5	1.5	2.1
	MD	1.5	1.3	2.0	1.1	1.2	1.7
Head Avg.	OD	1.8	1.7	2.5	1.5	1.4	2.1
	MD	1.4	1.4	2.0	1.2	1.1	1.7
PES Reduction	OD	-0.3	-0.3	-0.4			
	MD	-0.2	-0.2	-0.3			

Table 1 PES comparison between normal drive and drive with bias angle 1degree

Spindle Motor		FDB Motor					
HGA		Normal			2 Degree biased		
HD	Zone	RRO	NRRO	Tot	RRO	NRRO	Tot
		(1 Sigma of PES/Track pitch, %)			(1 Sigma of PES/Track pitch, %)		
hd #0	OD	1.6	1.6	2.3	1.1	1.3	1.7
	MD	1.2	1.2	1.7	1.0	1.0	1.4
hd #1	OD	1.9	1.7	2.5	1.4	1.3	1.9
	MD	1.5	1.3	2.0	1.2	1.1	1.6
hd #2	OD	1.5	1.6	2.2	1.2	1.3	1.6
	MD	1.2	1.5	1.9	0.8	1.3	1.5
hd #3	OD	2.1	1.8	2.8	1.3	1.4	1.9
	MD	1.5	1.3	2.0	1.1	1.1	1.5
Head Avg.	OD	1.8	1.7	2.5	1.2	1.3	1.8
	MD	1.3	1.3	1.9	1.0	1.1	1.5
PES Reduction	OD	-0.5	-0.3	-0.6			
	MD	-0.3	-0.2	-0.4			

Table 2 PES comparison between normal drive and drive with bias angle 2degree

5. 결론

디스크 드라이브의 트랙밀도가 높아짐에 따라 기계적 진동의 TMR에 대한 기여는 보다 커지고 있다. 특히 스프링-디스크 시스템은 진동의 주요 원인으로, 이 중 디스크의 축 방향 진동이 반경 방향 진동에 비해 상당히 크고 헤드 오프-트랙의 주요인이다.

기존의 서스펜션은 디스크 (축 방향) 진동에 대해 상하 운동만을 하여 헤드의 오프-트랙이 필연적으로 발생 하지만, 본 연구에서는 서스펜션이 디스크 진동에 대해 상하 운동과 동시에 디스크 반경 방향 운동을 할 수 있도록 서스펜션에 바이어스 각을 주어 헤드의 오프-트랙에 대한 PES를 감소 시켰다. 특히 디스크 모드가 지배적인 600Hz~2000Hz 대역에서 NRRO PES는 물론 RRO PES도 함께 감소하였는데, 이는 서보 트랙을 쓰는 과정에서 디스크 모드 관련 NRRO PES의 감소로 인해 Written-in RRO PES도 줄어 들기 때문이다.

본 연구결과로부터, 현재 생산에 보다 효과적인 설계와 실험이 진행 중에 있다. 그리고 향후 보다 빠른 데이터 입/출력 속도를 위한 고속 HDD 설계와 높은 기록밀도를 갖는 High-TPI HDD 설계에 있어 HSA-HGA 시스템과 제어 시스템의 밀접한 연관성은 그 중요성이 더욱 증가할 것으로 예측되어 진다.

6. 감사의 글

연구비를 지원해 주신 삼성전자 스토리지 사업부 관계자 여러분과, 제품 개발에 필요한 각종 정보, 및 기술적 조언을 아끼지 않은 Tho Pham 이하 동료 Engineer와 디스크 진동 측정과 PES 분석 실험을 도와준 김명업 박사, 박철훈씨에게도 감사 드립니다.

7. 참고문헌

[1] Eunsik Kim et al., "Head Design Scheme for Perpendicular Recording with Single Layered Media", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, Issue 4, Part 1, Jul 2001, pp. 1382-1385.

- [2] T. Yamaguchi et al., "Modeling and TMR Budget Design for Head-positioning of High Track-Density Drives", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35 No. 2, 1999, 892-897.
- [3] P. Srikrishna and K. Kasetty, "Predicting Track Misregistration (TMR) from Disk Vibration of Alternate Substrate Materials", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 36 No. 1, 2000, 171-176.
- [4] G. Bouchard et al., "Non-repeatable flutter of magnetic recording disks", IEEE Trans. on Magnetics, Sep. 1986.
- [5] Seo et al., "Analysis of head positioning error caused by disk surface flutter", Integrated national convention of the Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan, 1984.
- [6] J. S. McAllister, "The effect of disk platter resonances on track misregistration in 3.5 inch disk drives", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, No. 3, 1996, pp. 1762~1766.
- [7] K. Imai, "A study on disk fluttering of a magnetic disk device", Doctorial dissertation, Tokyo Inst. of Tech, 2001.
- [8] D.-H. Oh et al., "Disk Drive Apparatus for Reduction of Off-Track Head Motion Due To Disk Vibration", U.S. Patent pending, 2002.