

초고밀도 디스크 드라이브를 위한 반 진공 작동 환경에서 서보 트랙 기록 방법에 의한 RRO 저감에 대한 연구

Repeatable Run-out Reduction by Servo Track Writing in Semi-vacuum Condition for Ultra-high TPI Disk Drive

한 윤 식* · 김 철 순† · 강 성 우**

Yun-Sik Han, Cheol-Soon Kim and Seong-Woo Kang

(2004년 7월 24일 접수 : 2004년 10월 15일 심사완료)

Key Words : HDD(하드 디스크 드라이브), TMR(트랙 추종 오차), Disk Vibration(디스크 진동), STW(서보 트랙 기록), Semi-vacuum(반 진공), PES(위치 오차 신호), RRO(반복적인 런아웃)

ABSTRACT

In high-capacity disk drives with ever-growing track density, the allowable level of position error signal(PES) is becoming smaller and smaller. In order to achieve the high TPI(track per inch) disk drive, it is necessary to improve the writing accuracy during the servo track writing(STW) process through the reduction of track mis-registration sources. Among the main contributors of the non-repeatable runout(NRRO) PES, the disk vibration and the head-stack assembly vibration is considered to be one of the most significant factors. Also the most contributors of repeatable runout(RRO) come from the contributors of NRRO which is written-in at the time of STW process. In this paper, the effect of NRRO on servo written-in RRO is investigated by experimentally, and the experimental result shows that the written-in RRO can be effectively reduced through a STW process under low dense medium condition such as semi-vacuum.

1. 서 론

최근 디지털 멀티미디어 기술이 급속히 발달하면서 이에 따른 대용량 미디어 파일 저장을 위한 저장 매체 역시 대용량화, 고속화 과정을 지나고 있다. 현재 사용되고 있는 저장 매체는 트랜지스터 IC기술과 실리콘 가공 기술에 기초한 플래시 메모리, 광 기술과 정밀 회전 기계 기술에 기초한 광 디스크 드라이브

(ODD, optical disk drive), 자기 기술과 정밀 회전 기계 기술에 기초한 하드 디스크 드라이브(HDD, hard disk drive)가 주요 매체로 볼 수 있으며, 각 기술 분야가 그 용량과 속도에서 급속히 발전하고 있다. 21세기 현재 현존하고 있는 저장 매체 중 대용량 디지털 멀티미디어 데이터 저장 목적으로 볼 때, 가격대 저장용량 입장에서 HDD 매체가 단연 선두의 위치에 있으며, 이러한 현실적인 수요의 급속한 증가로 인해 HDD 기술은 최근 수년간 가격은 꾸준히 하락하였음에도 그 저장 용량은 디스크(disk) 당 수십에서 수백 기가 바이트(GB, 10억 byte)로 몇 십 배 증가하는 개발 추이를 보이고 있다.^(1~3)

HDD 분야의 데이터 고밀도화를 달성하기 위한 노력은 크게 두 방향으로의 연구가 현재 병행적으로 활발히 진행되고 있다. 첫째로는, 데이터가 기록되는 디

† 책임저자 : 정희원, 삼성종합기술원

E-mail : kimcs@samsung.com

Tel : (031) 280-8229, Fax : (031) 280-6955

* Samsung Information Systems America.

** Western Digital Corporation

스크의 원주방향으로의 저장 밀도 증대를 위한 선 기록밀도(BPI, bits per inch) 증가 기술이 그 한 방향으로 수직 자기 기록(perpendicular magnetic recording) 방식에 대한 연구가 그 한 예라 할 수 있다. 둘째로는, 기존의 수평 자기 기록 방식을 유지하면서 반경 방향으로의 트랙기록 밀도(TPI, tracks per inch)를 증대 시키는 기술이 다른 방향이라 할 수 있다.⁽⁴⁾ 전술한 두 방향의 기록 밀도 증가 기술에서 공통적으로 데이터가 저장된 디스크와 헤드(head) 사이의 기계적인 진동의 그 상대적인 레벨이 매우 중요한 인자로 작용하게 된다. 특히 TPI 증가 기술 측면에서는 헤드와 디스크 데이터 트랙 사이의 진동에 기인한 헤드의 트랙 추종 오차(TMR, track mis-registration)를 줄이는 설계 기술이 HDD 설계의 핵심을 이루고 있다. 최근의 TPI 증가에 따른 허용 가능한 TMR은 10 나노미터 이하로 현저히 줄어 들고 있다. 특히 데이터 트랙 추종(track-following) 조건에서 TMR에 영향을 미치는 요인들 중에서 스핀들-디스크 및 액추에이터(actuator) 시스템의 진동이 가장 크게 TMR 기여도를 나타내는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾

헤드의 위치 오차 신호(PES, position error signal)는 스핀들 시스템의 회전수에 동기 되어 나타나는 반복적인 런아웃(RRO, repeatable runout)과 회전수에 비 동기 되어 나타나는 비반복적 런아웃(NRRO, non-repeatable runout) 성분으로 나눌 수 있다. 여기서 광 대역 주파수 특성을 가지는 HDD 내부 공기 유동은 디스크 진동과 액추에이터 진동의 가진 원으로 작용하며,^(6, 7) 이는 측정된 PES의 대부분의 NRRO 성분으로 나타나게 된다.

한편 HDD 제어 시스템이 동작하여 헤드의 위치 오차 신호(PES)를 얻기 위해서는, 위치 정보가 전혀 없는 초기 디스크 위에 일정한 간격의 트랙(track)과 섹터(sector)를 나누어 서보 신호 정보를 기록하는 서보 트랙 기록(STW, servo track writing) 과정을 거치게 된다. 최근 들어서 TPI의 증가에 따라 고 정밀 STW이 필요하게 되고 있지만, 상대적으로 보다 많은 기록 시간이 필요하게 되어 미디어 레벨 서보 기록(media STW)이나 드라이브가 스스로 패턴을 기록하는 방식(self servo writing) 기술과 같이 고밀도 HDD 개발에 따른 직접적인 제품 양산과 관련된 기술이 더욱 중요하게 대두 되고 있다.⁽⁸⁾

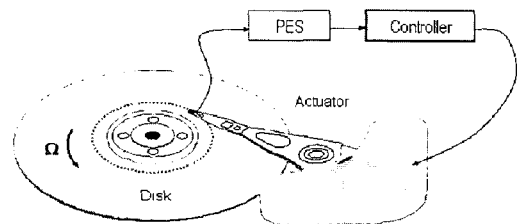
빠르게 회전하고 있는 드라이브 내부의 공기 유동에 의해 진동을 발생시키는 에너지원으로써 동압력(dynamic pressure)은 매체의 밀도와 속도의 제곱에 비례하여 커지게 된다.

$$\text{Dynamic pressure} \propto \frac{1}{2} \cdot \text{Density} \cdot (\text{Velocity})^2 \cdot (\text{Area})$$

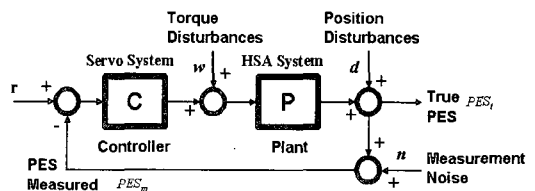
따라서 이 논문에서는 매체의 밀도를 조정할 수 있도록 반진공(semi-vacuum) 조건 즉 저 밀도 조건에서 드라이브를 동작시키면서 유동에 의한 가진 에너지 저감에 따른 디스크 진동과 액추에이터 진동이 변화를 실험적으로 고찰하고자 한다. 또한 이 기술을 실제 제품 개발에 적용하기 위한 접근 방법으로 STW 과정 중에 적용하여 디스크에 기록된(written-in) RRO 성분이 크게 저감 된 결과를 보이고자 한다.

2. HDD Servo-mechanical System

하드 디스크 드라이브에서 측정되는 헤드의 PES는 Fig. 1과 같이 헤드 구동계(plant)인 HSA(head stack assembly), 제어기 및 외란(disturbance)로 표시되는 하나의 블록 다이어그램(block diagram)으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾ Fig. 1의 귀환 제어 루프는 제어기(C), 플랜트(P)로 구성되며, 시스템의 외란은 크게 Torque Disturbance(w), Position Disturbance(d) 및 Measurement Noise(n)로 대변 할 수 있다. 따라



(a) Schematic view



(b) Servo block diagram

Fig. 1 HDD servo-mechanical system

서 비교적 영향이 적은 광대역 측정잡음(n)을 무시하면, PES 신호는 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$PES_r(f) = PES_m(f) = S(f)\{P(f)W(f)+D(f)\} \quad (1)$$

$$S(f) = \frac{1}{1+P(f)C(f)} \quad (2)$$

이 때 주파수 영역에서의 PES 신호는 HSA 진동인 $P(f)W(f)$ 항과 디스크 스피들 시스템의 진동 $D(f)$ 항의 합에 의한 외란 에너지에 서보 제어기의 Error Sensitivity Function, $S(f)$ 를 곱하여 얻어짐을 알 수 있다.⁽⁵⁾ $D(f)$ 항은 크게 STW시에 기록된 외란과 출력 변위 외란의 두 가지로 분류 할 수 있다. 여기서 전자는 STW 과정 중에 STW Mechanics나 디스크/액추에이터 진동에 의한 디스크에 영구적으로 불완전하게 쓰여진 트랙을 말하며, 이는 최종적으로 디스크 회전수에 동기되어 나타나는 RRO 성분으로 나타나게 된다.

HDD 시스템의 설계 변수들 중에서 TPI 관련 TMR 설계 사양을 살펴보면, 헤드와 디스크 상의 트랙 사이의 TMR 정도는 HDD 업계에서 보편적으로 주어진 트랙 폭(track pitch)에 대한 9%의 3 sigma 설계 기준을 사용하며, 이로부터 1 sigma TMR 설계 마진을 할당한다. 그러나, 실제 제품을 설계하는 입장에서 필요한 생산 공차, 부품 별 특성 차이 및 제품 생산 수율 등을 고려하여 안전 계수 0.95의 설계 마진을 줄 경우, 7200 rpm 회전 속도를 갖는 3.5 inch

120 GB/Platter HDD의 경우 최종적으로 달성해야 하는 위치 제어 정밀도는 대략 6 nm@1 sigma TMR 설계 Budget이 된다.

3. HDD 스피들-디스크 계의 동 특성

2003년 이후 생산되고 있는 HDD용 스피들 모터의 베어링은 기존의 볼 베어링에서 유체 동압 베어링(fluid dynamic bearing)이 대부분을 차지하고 있다. 설계에 사용된 스피들 모터는 반경 방향 지지에 Herringbone Groove의 저널 베어링을 축의 상부와 하부에 두었고, 축 방향 하중 지지에는 Herringbone Groove를 사용하는 원판 구조의 트러스트 베어링을 채용하였다.

Fig. 2는 1.27 mm 두께의 3.5" 알루미늄 디스크 두 장으로 구성되는 스피들 시스템에서 상부 디스크의 외측 직경(OD, D=90 mm) 위치에서 레이저 도플러 변위계(laser Doppler vibrometer)로 측정된 축방향(axial) 진동 스펙트럼을 보여주고 있다. Fig. 2에서 나타낸 mF 및 mB의 진동 모드들은 각각 디스크의 m차 전방향(forward) 및 후방향(backward) 절직경(nodal diameter)을 갖는 디스크 모드들을 표현하고 있으며, LDR(lower dynamic rocking)과 UDR(upper dynamic rocking)은 스피들 모터의 베어링 강성과 디스크의 1차 절직경 모드의 강한 연성에 의해 형성되는 전방향 및 후방향 Rocking 모드를 각각 나타낸다. LDR과 UDR 모드는 유체 베어링의 매우 큰 감쇠 특성으로 인해 진동의 절대적인 크기가 볼 베어링 지지 스피들에 비해 매우 작은 수준을 보여준다.

디스크 진동에서 스피들-디스크 시스템의 회전 주파수의 하모닉(harmonics)들을 제외하면, 대부분이 디스크 모드와 관련된 에너지들이며 700 Hz~1500 Hz 사이에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 디스크 진동은 고속으로 회전하는 디스크에 의한 HDD 내부의 공기 유동에 의해 발생하는 가진이 주된 원인이며,⁽⁶⁾ 이러한 내부 유동에 의한 가진을 저감하기 위한 실험적/이론적 방법을 통한 유동 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁹⁾

4. 반 진공 작동 조건에서 HDD의 진동

내부 유동에 의한 디스크 및 HSA의 가진을 저감

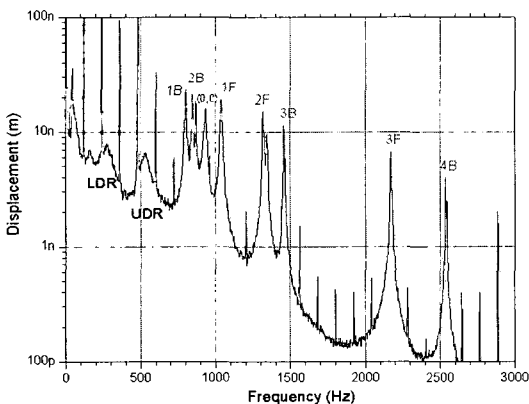


Fig. 2 Disk vibration spectrum of a 7200 rpm HDD measured at OD(D=90 mm) of top disk

하기 위한 방법의 하나인 반 진공(semi-vacuum) 조건에서 디스크와 HSA 진동 저감을 실험적으로 확인하기 위해서 Fig. 3과 같은 소형 진공 실(chamber)을 제작하였다. 진공 실은 윗면과 옆면의 창을 통해 LDV로 디스크 및 HSA의 진동을 측정할 수 있다. 대기압력은 수은주로 29.9 in-Hg Abs이며, 해수면 위로 매 1000 피트(feet) 상승 시 1 in-HgA씩 감소하게 된다. HDD의 고도(altitude) 시험 관련 규격으로는 10,000 피트 높이에서도 정상적인 동작이 가능하도록 설계되어 있다.

Fig. 4는 7200 rpm으로 회전하고 있는 HDD를 사용하여 대기 압력과 여러 단계의 반 진공 조건에 따른 디스크의 축 방향 변위의 스펙트럼이며, Table 1은 각각의 경우에서 전체 진동의 총합을 RMS(root mean square) 레벨로 표시한 것이다. Fig. 4에서 스피들 디스크 모드와 관련된 에너지들은 내부 압력이 줄어들수록 진동 레벨이 크게 줄어든다는 것을 알 수 있다. 특히, 3 in HgA 압력 조건에서 OD의 진동은 대기 압력에서 측정된 경우에 비해 93 % 감소함

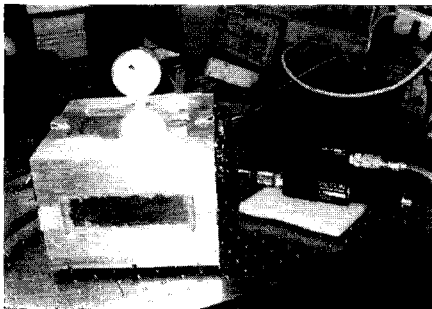


Fig. 3 Experimental set-up for vacuum chamber

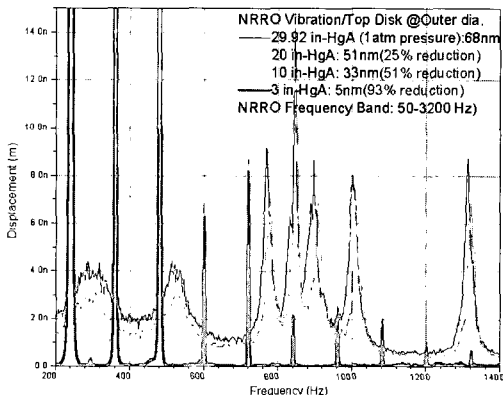
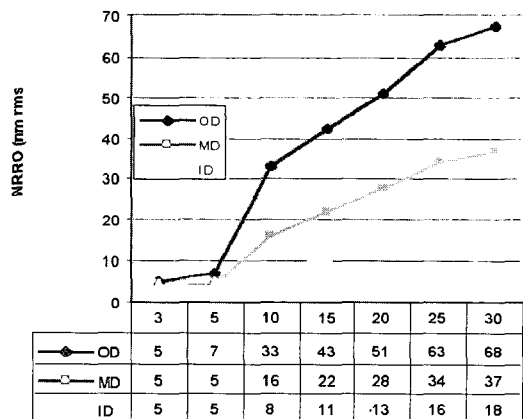


Fig. 4 Axial disk vibration spectrum of 7200 rpm HDD in the semi-vacuum condition

을 보여 주며, 이는 디스크 진동의 가진원(d)가 스피들-디스크의 회전에 의한 HDD 내부의 공기 유동이 주요 원인을 확인해 준다. 한편 회전과 동기 되어 있는 하모닉 성분들의 크기는 거의 차이가 없으며, 이러한 성분들의 가진원은 유동과 관계가 없음을 알 수 있다. 또한 디스크 모드 Peak의 위치가 조금씩 위로 이동 하였는데, 이는 유동이 디스크에 영향을 주는 댄핑 효과가 줄어들었기 때문이다.

Fig. 5는 액추에이터(actuator) 헤드의 반경 방향에서 700 Hz이하의 반경방향 진동 스펙트럼이다. 반 진공 조건, 즉 저밀도 작동 조건에서는 내부 유동에 의한 가진 입력(w)이 감소하게 되고, 결국 HSA 진동이 저감됨을 확인 할 수 있다. 이는 HDD 내부의 Shroud 설계나 공기역학적 HSA 설계 등의 방법으로 내부의 유동장을 적절히 변화시키면 700 Hz이하의

Table 1 Total RMS summation of NRRO disk vibration



Drive Pressure (in-HgA, 1 atm = 29.9 in-HgA)

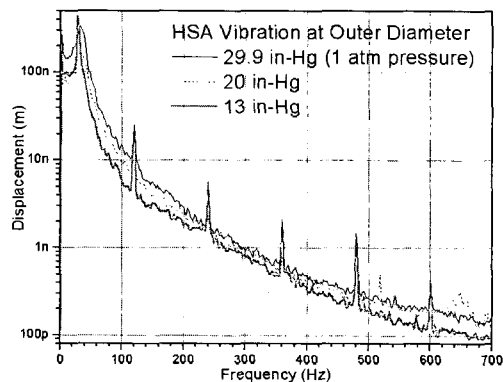


Fig. 5 Radial HSA vibration spectrum of 7200 rpm HDD in the semi-vacuum condition

NRRO PES를 줄일 수 있는 가능성을 보여준다.

5. 반 진공 작동 조건에서 HDD의 NRRO PES

반 진공 작동 조건에서 적절한 헤드-디스크 간극(head disk interface)을 유지하면서, 디스크 및 HSA의 진동 저감에 따른 헤드의 PES 변화를 고찰하기 위하여 HDD를 진공 실에 장착하여 동작 시키면서 NRRO PES를 측정하여 비교하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 대기 압력에서 STW를 수행한 HDD를 20 in-HgA 압력(2/3 기압) 조건에서 동작시키며 측정한 NRRO PES 스펙트럼이다. Fig. 6에서 저 주파수 영역을 살펴보면, Fig. 4 및 Fig. 5의 진동 측정 결과에서 각각 보여 준 것처럼 디스크 모드 관

련된 700-1500 Hz 영역의 position disturbance(d)와 700 Hz 이하 torque disturbance(w)가 주 영향인 대역의 PES 저감을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 7의 6-10 kHz 주파수 영역에서는 20 in-HgA 압력조건에서 서스펜션(suspension) 모드와 관련된 PES 저감을 보여준다.

6. 반 진공 작동 조건에서 Self STW

이 연구에서 사용된 STW 방법은 서보 패턴(servo pattern)의 일부를 청정실에 설치된 전용 Servo Writer에서 기록 후 청정실 밖에서 HDD 스스로 전체 서보 패턴을 기록하는 semi-self STW 방식이다.

Self STW 과정에서 HDD 진동이 written-in 되어 최종적으로 RRO PES로 나타나는 효과를 살펴 보기

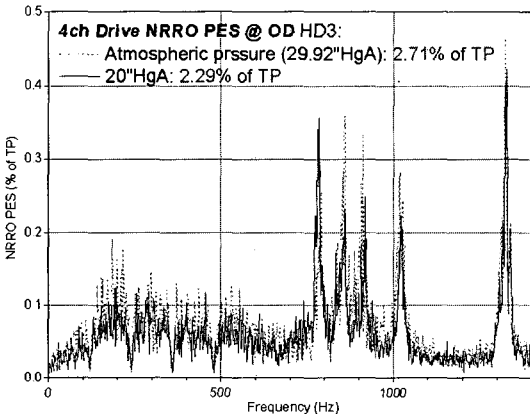


Fig. 6 NRRO PES spectra(0~1.4 kHz) in the atmosphere pressure and 20 in-HgA condition

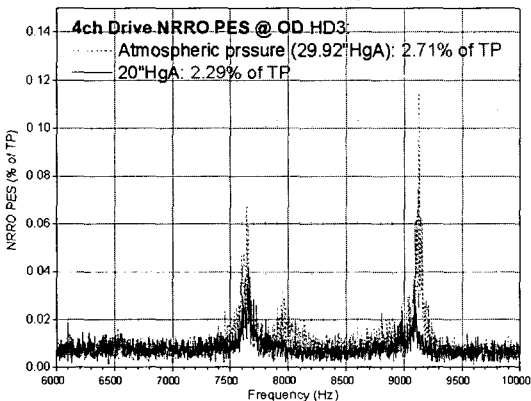


Fig. 7 NRRO PES spectra(6~10 kHz) in the atmosphere pressure and 20 in-HgA condition

Table 2 Total RRO RMS summation in the atmosphere pressure and 20 in-HgA condition

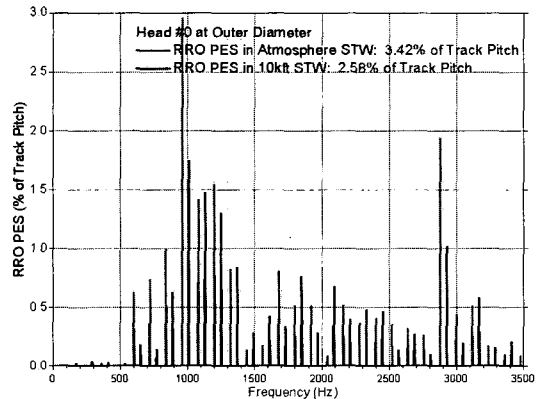
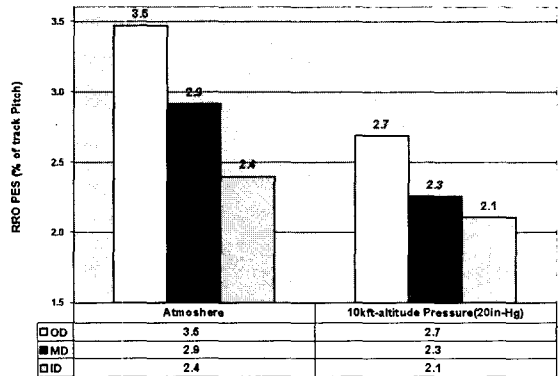


Fig. 8 RRO PES spectra in the atmosphere pressure and 20 in HgA condition

위하여 HDD 스스로 STW를 수행하는 공정을 20 in-HgA 수준의 진공실 안에서 수행하도록 하였다.

Table 2와 Fig. 8은 대기 압력과 20 in-HgA 조건에서 self STW 후에 측정된 PES에서 RRO 성분 만을 분리 한 결과이다. 최종적으로 OD 위치에서 RRO PES는 트랙폭의 3.5 %에서 2.7 %로 감소하여 23 %의 RRO 저감을 얻을 수 있음을 보여준다. Fig. 8의 RRO 스펙트럼은 주로 디스크 모드와 관련된 700~1500 Hz 영역의 PES 저감이 두드러짐을 보여준다.

7. 결론

이 연구에서는 초고밀도 디스크 드라이브를 위한 TMR 저감 연구의 한 방향으로 저 진공 작동 환경에서 디스크 및 액추에이터의 진동저감과 최종 PES의 저감을 실험적으로 보였다. 2/3기압에서 실험을 수행한 결과, 디스크-스핀들의 진동은 대기압에 비해 25 %의 저감을 보였으며, HDD의 서보 트랙 기록 과정을 수행한 결과 23 %의 RRO PES의 저감을 확인할 수 있었다.

이를 통하여 저 진공 작동 환경에서 서보 트랙을 기록함으로써 HDD의 기록밀도를 크게 높일 수 있는 가능성을 제시하였다. 이를 실제 HDD 생산 공정에 적용 하기 위해서 HDD의 밀봉 조건을 유지할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

연구비를 지원해 주신 삼성전자 스토리지 사업부 관계자 여러분과, 실제 제품 개발에 필요한 각종 정보 및 기술적 조언을 아끼지 않은 Tho Pham 이하 Samsung Information Systems America 동료 Engineer 들에게 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 이호성, 1997, "하드 디스크 드라이브 개발에 관련된 기계기술의 현황", 한국소음진동공학회논문집, 제 7 권, 제 3 호, pp. 354~361.
- (2) 정정주, 이승희, 추상훈, 1998, "디스크 드라이브의 기술 동향과 제어 기술", 제어자동화시스템 공학회지, 제 5 호, pp. 15~21.
- (3) 이호성, 1998, "하드 디스크 드라이브 서보 제어기의 설계", 제어자동화시스템공학회지, 제 5 호, pp. 22~28.
- (4) Guo, L., Lee, H.S., Hudson, A. and Chen, S., 1999, "A Comprehensive Time Domain Simulation Tool for Hard Disk Drive TPI Prediction and Mechanical/Servo Enhancement," IEEE Trans. on, Magnetics, Vol. 35, No. 2, 879-884.
- (5) 고정석, 강성우, 한운식, 김영훈, 황태연, 2002, "High-TPI HDD 구현을 위한 PES Estimation에 관한 연구," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집.
- (6) McAllister, J., 1997, "Disk Flutter: Causes and Potential cures," Data Storage, May/June.
- (7) Hirano, T., Satoh, K., "Disk Drive with Controlled Reduced Internal Pressure," US Patent 6560064.
- (8) Takaishi, K., Uematsu, Y., Yamada, T., etc, 2003, "A HDD Servo Technology for Media-Level Servo Track Writing," IEEE Trans. on, Magnetics, Vol. 39, No. 2, 851~856.
- (9) Tsuda, N., Kubotera, H., Tatewaki, M., Noda, S., etc, 2003, "Unsteady Analysis and Experimental Verification of the Aerodynamic Vibration Mechanism of HDD Arms," IEEE Trans. on, Magnetics, Vol. 39, No. 2, 819~825.