한국소음진동공학회 2004년도 춘계학술대회논문집, pp. 736~741.

초고밀도 디스크 드라이브를 위한 저 밀도 작동 환경에서 서보 트랙 기록 방법에 대한 연구

Servo Track Writing for Ultra-High TPI Disk Drive in Low Density Medium Condition

한윤식* · 김철순* · 강성우**

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

Key Words : HDD(hard disk drive), TMR(Track Mis-Registration), Disk Vibration, STW (servo track writing), Semi-vacuum, PES(position error signal)

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 disk drive, it is necessary to improve the writing accuracy during the STW(servo track writing) process through the reduction of TMR sources. Among the main contributors of the NRRO(Non-Repeatable Run-out) PES, the disk vibration and the HSA(head-stack assembly) vibration is considered to be one of the most significant factors. Also the most contributors of RRO(Repeatable Run-out) come from the contributors of NRRO which is written-in at the time of STW(servo track writing) process. In this paper, the experimental test result shows that the effect of NRRO on servo written-in RRO effectively can be reduced through a STW process under low dense medium condition such as semi-vacuum.

1. 서 론

최근 디지털 멀티미디어 분야가 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 '반도체 칩,' 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 저장율 입장에서 'HDD' 매체가 단연 선두의 위치에 있으며, 이러한 현실적인 수요의 급속한 증가로 인해 HDD 기술은 최근 수년간 가격은 꾸준히 하락하였음에도 그 저장 용량은 Disk당 수십 Giga Byte에서 수백 Giga Byte로 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 Disk Media의 원주방향으로의 저장 밀도 증대를 위한 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 장식을 유지하면서 반경 방향으로의 저장 밀도를 증대 시키는 연구로서 TPI(Tracks Per Inch) 증가 기술이 또 한가지 방향이라 할 수 있다[4]. 전술한 두 방향의 기록 밀도 증가 기술에서 공통적으로 Disk와 Head 사이의 기계적인 진동(Mechanical Vibration)의 그 상대적인 레벨이 매우 중요한 인자로 작용하게 된다. 특히 TPI 증가 기술 측면에서는 헤드와 디스크 데이터 트랙 사이의 Vibration-Induced Positioning Error(PES: position error signal)에 의한 TMR(Track Misregistration)을 줄이는 설계 부문이 HDD Platform 설계의 핵심을 이루고 있다. 최근의 TPI 증가에 따른

*삼성종합기술원 Storage Lab.
(yshan@sisa.samsung.com)
**: Western Digital Corporation

허용 가능한 TMR(Track Misregistration)은 10 Nano-scale 영역 이하로 현저히 줄어 들고 있다. 특히 데이터 Track-following 조건에서 TMR에 영향을 미치는 요인들 중에서 스핀들-디스크/액츄에이터 시스템 진동이 가장 중요한 TMR 기여도를 나타내 주는 것으로 알려져 있다[5].

PES 신호는 스핀들 시스템의 회전수에 동기 되어 나타나는 RRO(repeatable runout)와 회전수에 비 동기 되어 나타나는 NRRO(non-repeatable runout) 성분으로 나눌 수 있다. Random한 광 대역 주파수 특성을 가진 HDD 내부 공기 유동은 디스크 진동과 액츄에이터 진동의 가진 원으로 작용하며[6,7], 측정된 PES의 대부분의 NRRO 성분으로 나타나게 된다.

한편 HDD 제어 시스템이 동작하여 실제 PES를 얻기 위해서는 위치 정보가 전혀 없는 초기 Disk 위에 일정한 간격의 트랙과 섹터를 나누어 서보 패턴을 기록하는 STW(Servo Track Writing) 과정을 거치게 된다. 최근 들어서 TPI 증가에 따라 고정밀한 STW이 필요하게 되고 있지만, 상대적으로 보다 많은 시간이 필요하게 되어 Patterned Media나 Full/Hybrid/Semi-Self Servo Writing 기술과 같이 고밀도 HDD 개발에 따른 직접적인 제품 양산과 관련된 기술이 더욱 중요하게 대두 되고 있다[8].

본 논문에서는 실제 STW 과정 중에 디스크에 Written-in 되는 RRO 성분을 줄일 수 있는 방법으로 대기 압력보다 낮은 Semi-vacuum 조건(저 밀도 조건)에서 디스크 진동과 액츄에이터 진동이 크게 줄어드는 것을 확인하고, 현재 양산 중인 HDD 헤드가 안정적으로 부상 가능한 범위 내에서 Semi-vacuum 조건에서 STW를 수행하고, RRO PES 저감된 결과를 보이고자 한다.

2. 120kTPI TMR 설계 Budget 조건

2004년 개발 중인 7200rpm 회전 속도를 갖는 3.5 inch 120GB/Platter HDD 시스템의 설계 변수들 중에서 TPI(Tracks Per Inch) 관련 TMR 설계 사양을 살펴보면, 주어진 Track Pitch에 대한 Head와 디스크 Track 사이의 TMR 정도는 HDD Industry에서 보편적으로 사용하는 9%의 3 sigma 설계 예산을 주면 1 sigma TMR 설계 Budget을 얻을 수 있다. 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, 최종적으로 달성해야 하는 위치 제어 정밀도는 대략 6nm 1 sigma TMR 설계 Budget이 된다.

3. HDD Servo-Mechanical Coupled System

측정되는 PES는 Fig. 1과 같이 Plant, Controller, 및 Disturbances로 표시되는 하나의 SISO Block Diagram으로 나타낼 수 있다[5]. Feedback 제어 루프는 제어기(C), 플랜트(P)로 구성되며, 외란은 크게 Input Torque Disturbance(w), Output Displacement Disturbance(d) 및 Measurement Noise(n)로 대변 할 수 있다. 따라서 비교적 영향이 적은 Broad-Band Noise를 무시($N(f)=0$) 하면, PES 신호는 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

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

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

이때 주파수 영역에서의 PES 신호는 HSA 진동인 $P(f)W(f)$ 항과 디스크 스핀들 시스템의 진동 $D(f)$ 항의 합에 의한 외란 에너지에 서보 제어기의 Error Sensitivity Function($S(f)$)을 곱하여 얻어짐을 알 수 있다[5].

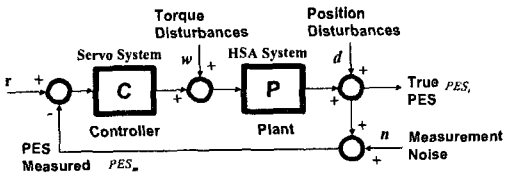


Fig. 1 Block Diagram of HDD Servo-Mechanical Coupled System

4. 유체 베어링 지지 스핀들-디스크 Dynamics

2003년 이후 양산되고 있는 HDD용 스핀들 모타의 베어링은 기존의 볼 베어링에서 FDB(Fluid Dynamic Bearing)가 대부분을 차지할 것으로 예측하고 있다. Fig. 2은 1.27mm(50mil) 두께의 알루미늄 디스크 두 장으로 구성되는 스핀들 시스템으로 Top Disk의 OD(Outer Diameter) 위치에서 LDV(Laser Doppler Vibrometer)로 측정한 Transverse (Axial) Vibration 스펙트럼을 보여주고 있다. 설계에 사용된 스핀들 모터는 반경 방향 지지에는 Herringbone Groove의 저널 베어링을 축의 상부와 하부에 두었고, 축 방향 하중 지지에는 Herringbone Groove를 사용하는 원판 구조의 트러스트 베어링을 채용하였다. Fig. 2에서 나타낸 mF(or B) (m: 정수)의 진동 모우드들은 각각 (m,0)개의 (Nodal Diameter, Nodal Circle)을 갖는

디스크 모우드들을 표현하고 있으며, LDR과 UDR은 스핀들 모터와 디스크의 강한 연성에 의해 형성되는 Lower Rocking Mode와 Upper Rocking Mode를 각각 나타내고 있고, 유체 베어링의 매우 큰 감쇠 특성으로 인해 Rocking 모드의 절대적인 크기가 볼 베어링 지지 스핀들에 비해 매우 작은 수준을 보여준다. 스핀들-디스크 시스템의 편심 및 회전 주파수의 Harmonics들을 제외하면, 대부분이 디스크 모드와 관련된 에너지들이며, 700Hz-1.5kHz 사이에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 디스크 진동은 HDD 내부의 공기 유동에 의한 외란(Disturbance)이 주된 가진원이며[6], 이러한 외란을 저감하기 위한 실험적/이론적 방법을 통한 유동 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[9].

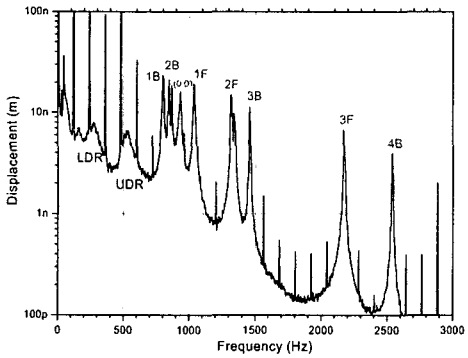


Fig. 2 Disk Vibration Spectrum of 7200rpm HDD Measured on the OD of Top Disk

5. HSA(Head-Stack-Assembly) Dynamics

스핀들-디스크 시스템과 더불어 디스크 드라이브의 중요한 부분인 HSA 시스템의 동 특성을 파악하기 위하여, Fig. 3는 VCM 드라이브 신호를 입력으로 하고 LDV를 사용하여 측정한 HSA Top Head의 횡 방향 진동 신호(Radial Vibration)를 출력으로 하는 시스템 전달 함수를 보여 주고 있다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 4.3-4.6kHz 대역에 Pivot 베어링, Fantail, Arm Blade와의 연성에 의해 발생되는 Actuator의 Butterfly Mode가 있음을 알 수 있으며, 8kHz이상의 고 주파수 대역에서 Actuator와 Suspension의 독립 모우드 및 연성 모우드들이 다수 존재함을 알 수 있다. 특히 Butterfly Mode는 서보 시스템의 대역폭을 높이는데 장애 요인이며, 이를 개선하기 위한 강성이 높은 HSA 구조, VCM, 액츄에이터 구조 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

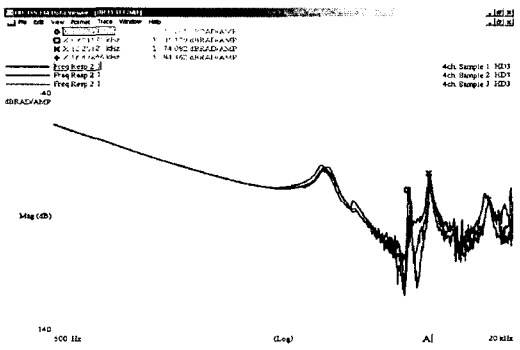


Fig. 3 Measured Transfer Function of HSA System

6. Mechanical Vibration on Semi-vacuum Condition

Semi-vacuum 조건에서 디스크와 HSA 진동 저감을 확인하기 위해서 Fig. 4의 진동 Chamber를 제작하였다. 진동 Chamber는 윗면과 옆면의 창을 통해 LDV 측정이 가능하다.

대기압력은 Barometer로 29.9 in-Hg Abs이며, 해수면 위로 매 1000 feet 상승 시 1 inHg씩 감소하게 된다. Altitude 시험 관련 HDD의 경우에는 10000 feet 높이에서도 정상적인 동작이 가능하다. Fig. 5와 Table 1은 7200rpm으로 회전하고 있는 HDD를 사용하여 대기 압력과 여러 단계의 Semi-vacuum 조건에 따른 디스크 Axial 방향의 스펙트럼이며, 전체 진동의 총합을 RMS (root mean suquare) 레벨로 표시한 것이다. 스핀들 디스크 모우드와 관련된 에너지들은 압력이 줄어들수록 진동 레벨이 크게 줄어든다는 것을 알 수 있다. 특히, 3 in HgA 조건에서는 대기 압력에서 측정된 경우에 비해 93% 감소를 보여 주며, 이는 디스크 진동의 가진원이 스핀들 모타의 회전에 의한 HDD 내부의 공기 유동이 주요 원인임을 확인해 준다. 한편 회전과 동기 되어 있는 하모닉 성분들의 레벨은 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 댐핑 효과가 줄어들었기 때문이다. Fig. 6은 액츄에이터 헤드의 반경 방향에서 700Hz이하 진동 스펙트럼이다. Semi-vacuum 조건, 즉 저밀도 작동 조건에서 유동 가진 입력이 감소하게 되고, 결국 HSA 진동이 저감됨을 확인 할 수 있다. 이는 HDD 내부의 유동장 변화, 즉 Shroud 설계나 Aerodynamic HSA 설계 등의 방법으로 700Hz이하의 NRRO PES를 줄일 수 있다는 것을 보여준다.

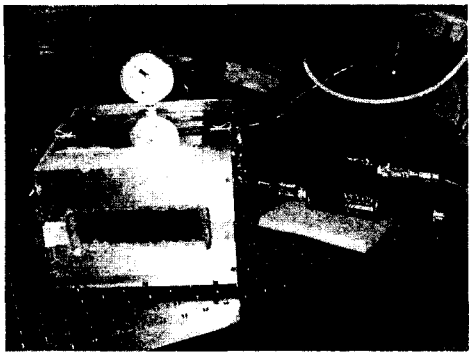


Fig. 4 Vacuum Chamber Set-up

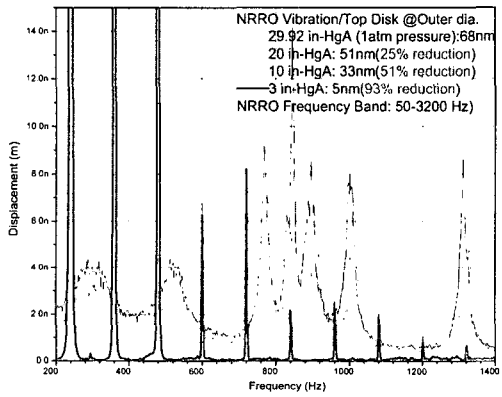
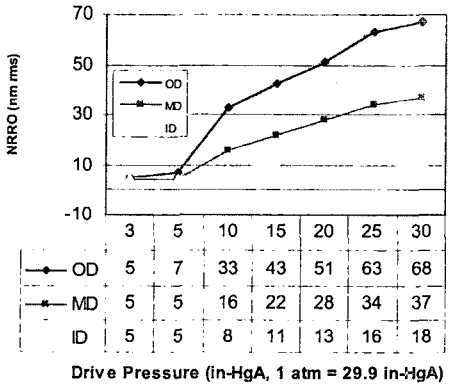


Fig. 5 Disk Vibration Spectrum of 7200rpm HDD in the Semi-vacuum condition.

Table 1 Total RMS summation of NRRO Disk Vibration



	3	5	10	15	20	25	30
OD	5	7	33	43	51	63	68
MD	5	5	16	22	28	34	37
ID	5	5	8	11	13	16	18

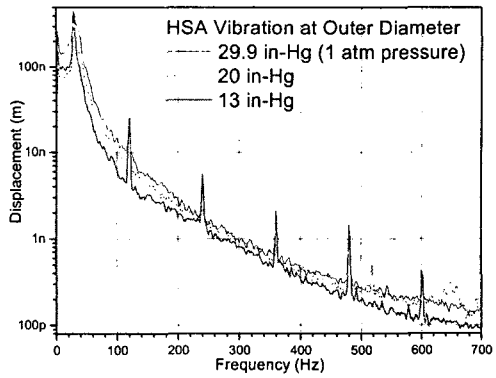


Fig. 6 Radial Vibration Spectrum of 7200rpm HDD in the Semi-Vacuum Condition

7. NRRO PES on Semi-vacuum Condition

Semi-vacuum 조건에서 적절한 HDI(Head Disk Interface)를 유지하면서 PES 측정이 가능한지 살펴보기 위해서 대기 압력에서 STW를 수행 한 HDD를 Semi-vacuum 조건에서 동작 시키면서 측정한 NRRO PES를 비교하였다. Fig. 7과 Fig. 8는 20 in HgA 조건에서 동작 중 측정한 NRRO 스펙트럼이다. Fig. 7의 저 주파수 영역을 살펴보면, Mechanical 진동 측정에서 보여 준 것처럼 700Hz 이하 Torque disturbance가 주 영향인 대역과 디스크 모우드 관련된 700-1500 Hz 영역의 PES 저감을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 8의 고 주파수 영역에서 Windage에 의한 서스펜션 관련 모우드의 PES 저감을 보여준다.

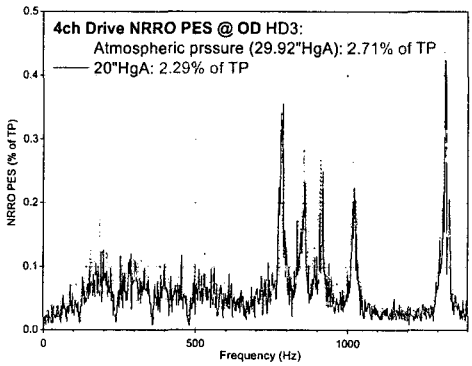


Fig.7 NRRO PES Spectra(0-1.4kHz) in the Atmosphere Pressure and 20 in HgA condition

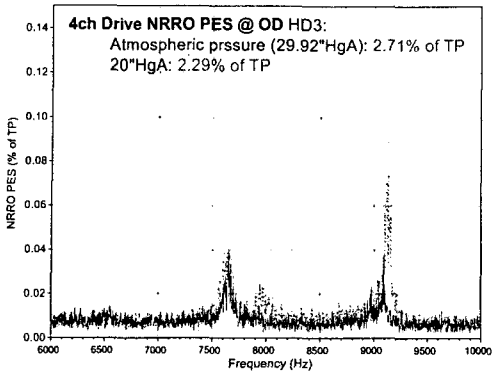
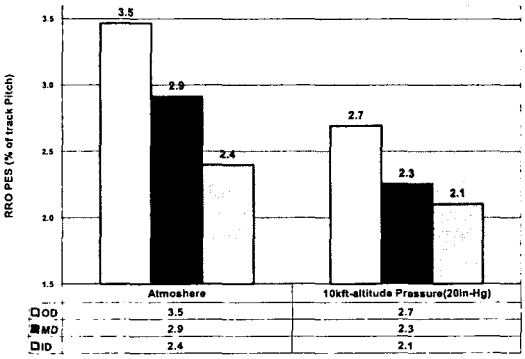


Fig. 8 NRRO PES spectra(6-10kHz) in the Atmosphere Pressure and 20 in HgA condition

8. Hybrid-self Servo Writing on Semi-vacuum condition

본 연구에서 사용된 STW 방법은 서보 패턴의 일부를 Clean Room에 놓여져 있는 전용 Writer에서 기록 후 Clean Room 밖에서 나머지 부분을 HDD 스스로 기록하는 방식이다. 압력은 20in HgA 수준에서 Chamber 안에서 HDD 스스로 STW를 수행하도록 하여 Written-in 되어 최종적으로 RRO로 나타날 때의 저감 효과를 살펴 보았다. Table 2와 Fig. 9은 대기 압력과 20in HgA 조건에서STW 후에 측정된 PES에서 RRO 성분 만을 분리 한 결과이다. 최종적으로 OD 위치에서 대략 23% 저감을 얻을 수 있음을 보여준다. RRO 스펙트럼은 디스크 모우드와 관련된 700-1500Hz 영역의 PES 저감을 보여주며, 모타 내부의 Electromagnetic 소스에 의한 RRO 성분인 2880Hz 성분의 피크는 앞서 언급한 것처럼 유동 가진원 저감에 따른 영향을 받지 않음을 보여 준다.

Table 2 Total RRO RMS Summation in the Atmosphere Pressure and 20 in HgA condition



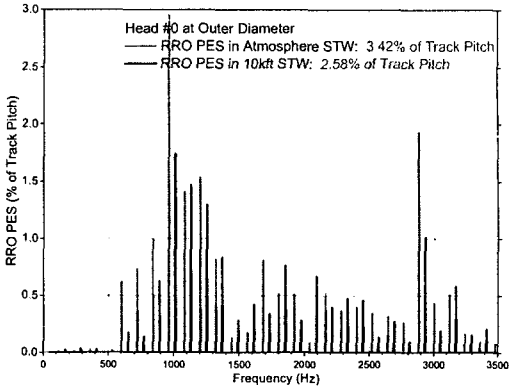


Fig. 9 RRO PES spectra in the Atmosphere Pressure and 20 in HgA condition

9. 결 론

본 연구에서는 초고밀도 디스크 드라이브를 위한 TMR 연구의 한 방향으로 저 밀도 작동 환경에서 서보 트랙 기록 과정을 수행 하였고, PES 측정 결과 RRO 저감을 확인 할 수 있었다. 추가적으로 좀 더 큰 효과를 얻기 위해서 저 밀도 하에서도 동작 가능한 HDI에 연구가 동시에 수행되어야 할 것이다. 또한 실제 공정 중에 적용하기 위해서 Sealing 과 같은 어려운 문제점을 극복할 수 있도록 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 SISA(Samsung Information System America) 동료 Engineer 들에게 감사 드립니다.

참고문헌

[1] 이호성, "하드 디스크 드라이브 개발에 관련된 기계기술의 현황", 소음 진동 공학회지 제7권 제3호, 1997, pp. 354-361.

[2] 정정주, 이승희, 추상훈, "디스크 드라이브의 기술 동향과 제어 기술",제어 자동화 시스템 공학회지, 제5호, 1998, pp. 15-21.

[3] 이호성, "하드 디스크 드라이브 서보 제어기의 설계",제어 자동화 시스템 공학회지, 제5호, 1998, pp. 22-28.

[4] 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

[5] 고정석, 강성우, 한윤식, 김영훈, 황태연, " High-TPI HDD 구현을 위한 PES Estimation에 관한 연구," 소음 진동 공학회, 2002년도 추계 학술 대회 논문집, 2002.

[6] J. McAllister," Disk Flutter: Causes and Potential cures," Data Storage, May/June, 1997.

[7] T. Hirano, K. Satoh," Disk Drive with Controlled Reduced Internal Pressure," US Patent 6560064.

[8] K. Takaishi, Y. Uematsu, T. Yamada, etc, "A HDD Servo Technology for Media-Level Servo Track Writing," Magnetics, IEEE Trans. on, Vol. 39 No. 2, 2003, 851-856.

[9] N. Tsuda, H. Kubotera, M. Tatewaki, S. Noda, etc, "Unsteady Analysis and Experimental Verification of the Aerodynamic Vibration Mechanism of HDD Arms," Magnetics, IEEE Trans. on, Vol. 39 No. 2, 2003, 819-825.