

유체동압베어링을 사용하는 하드디스크 드라이브 스피들 시스템에서 발생하는 정전기 방전에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Electrostatic Discharge in the HDD Spindle System Using Fluid Dynamic Bearings

강 민 구* · 장 건 희†

Mingu Kang and Gunhee Jang

(2005년 10월 6일 접수 ; 2005년 12월 26일 심사완료)

Key Words : HDD(하드디스크 드라이브), FDB(유체 동압 베어링), Break Down Voltage(저항 파괴 전압), ESD(정전기 방전), Giant Magneto-resistive Head(GMR헤드)

ABSTRACT

This paper introduces the mechanism of the ESD(electrostatic discharge) in the HDD spindle system using FDBs(fluid dynamic bearings). When a HDD(hard disk drive) spindle system is rotating, triboelectric charging occurs in the FDBs through the friction between the lubricant and the rotating shaft or between the lubricant and stationary sleeve. And this electrostatic charge is accumulated in the rotating parts of the HDD spindle system because they are insulated from the ground by the lubricant. This research shows experimentally that the behavior of electric charge and discharge in the FDB spindle system is the same as that of a capacitor. It also measures the electrostatic voltage difference between the rotating and stationary parts in the FDB spindle system due to the change of humidity, supporting load and motor speed. This research shows that the control of ESD is required in the HDD spindle system using FDBs, because the electrostatic charge accumulated in the FDB spindle system may cause the breakdown damage of the GMR head and data loss consequently.

1. 서 론

HDD(하드디스크 드라이브)용 스피들 모터에 많이 사용되고 있는 FDB(유체동압베어링)는 윤활유체를 이용하여 회전축을 지지하는 기계요소로서 회전부와 고정부 사이가 얇은 유막에 의해 분리되어 있어 저소음, 저진동의 장점을 가지고 있다. 그러나 스피들 모터의 구동 시 회전부가 스러스트 베어링에 의해 발생

하는 압력과 회전부의 하중이 일치하는 평형위치로 부상하면서 윤활 유체에 의해서 고정부와 절연된 상태가 된다. 이 때 오일과 베어링의 마찰에 의해 발생한 정전기가 절연된 회전부에 축적되어 HDD 내부에 정전기 방전의 위험성이 있다. Fig. 1는 FDB가 사용된 120 Gbyte 저장용량과 정격속도 7200 RPM을 가진 HDD내부이다.

HDD 내에서 정전기 방전에 가장 민감한 장치는 디스크로부터 정보를 읽고 쓰는 헤드이다. 현재 많이 사용되는 GMR(giant magneto-resistive)헤드는 자기 저항효과 중에서도 거대 자기저항효과(giant magneto resistive effect) 현상을 이용한다. GMR헤드는 1997년부터 대부분의 제품에 탑재되기 시작하면

† 책임저자 : 정희원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0431, Fax : (02) 2292-3406

* 정희원, 한양대학교 기계공학부

서 HDD의 저장밀도를 18개월마다 100% 이상 높여 왔다.⁽¹⁾

Fig. 2는 GMR 헤드의 구조를 나타내며 Fig. 3는 정전기 방전에 의해 저항파괴(breakdown damage)가 발생한 GMR헤드를 나타낸다.⁽²⁾ GMR헤드는 디스크 표면으로부터 자기력선속을 감지하는 매우 민감한 장치로 저항파괴전압(breakdown voltage)이 1V⁽³⁾ 정도로 매우 낮고 차세대 헤드인 TMR(tunneling

magneto-resistive) 헤드는 더욱 낮은 저항파괴전압을 가지고 있다.⁽⁴⁾ 매년 HDD의 데이터 저장 밀도는 점차 증가하고 있으며 이에 따라 헤드에 쓰이는 센서의 크기도 점차 작아지고 있다. 그러나 센서의 크기가 작아질수록 헤드의 저항파괴전압은 낮아지고 이로 인해 헤드가 정전기에 더욱 민감해지게 된다. 따라서 정전기 방전에 의해 헤드의 저항파괴가 발생할 위험성이 높아지고 있으며 이에 관한 연구의 필요성도 높아지고 있다.⁽⁵⁾

지금까지의 정전기 방전에 관한 연구는 주로 HDD를 제작 시 헤드를 조립(assembly)하거나 취급(handling)하는 과정에서 발생하는 정전기 방전 문제에 관한 연구가 많았다.⁽⁶⁾ 그러나 헤드가 완전히 조립된 후에 작동 중인 HDD에서 발생할 수 있는 정전기 방전에 관한 연구는 아직 보고되지 않았다.

이 논문에서는 HDD용 FDB 스피들 시스템에서의 정전기 발생과 축적을 수식적으로 설명하였으며 실험으로 확인하였다. 또한 지지하중 및 회전속도 그리고 상대습도와 같은 작동환경에 따른 정전기 발생량의 변화에 대한 실험적인 연구를 수행하였다.

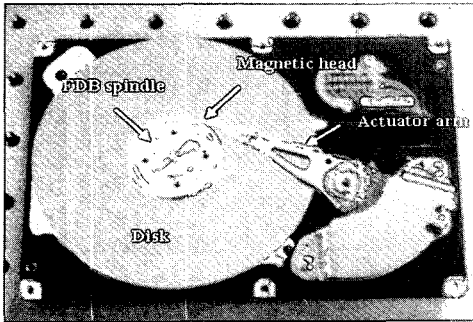


Fig. 1 Inside of the HDD

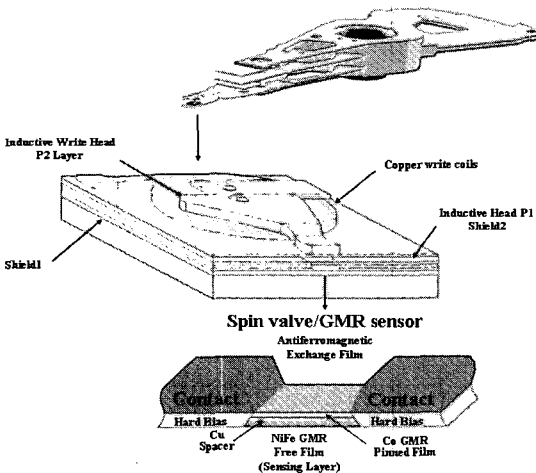


Fig. 2 Schematic of the physical structure of the GMR sensor

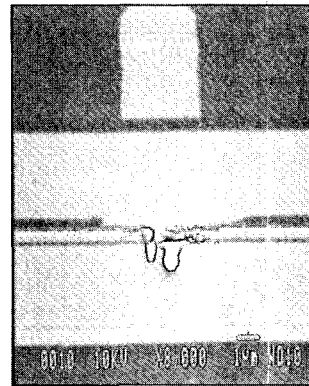


Fig. 3 Melted magnetoresistive stripe after large ESD current transient across the sensor

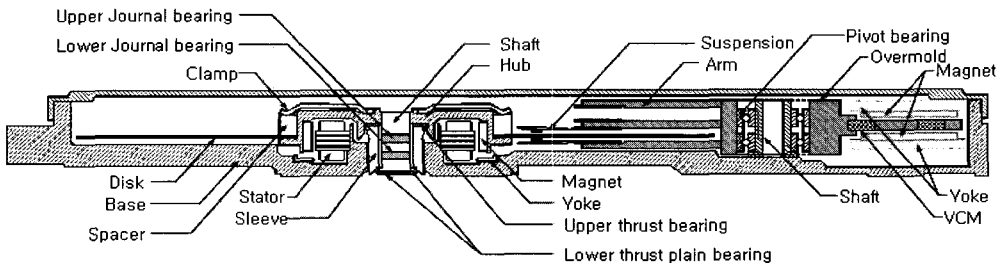


Fig. 4 Mechanical structure of a HDD

2. 정전기 대전 메커니즘

2.1 HDD용 FDB스핀들 모터의 구조

Fig. 4는 HDD 내부구조를 나타낸다. 그림에서와 같이 일반적인 FDB는 2개의 저널베어링, 2개의 스테이스트 베어링으로 구성되어지며 베어링의 간극은 저널 베어링의 경우 수 μm 이고 스테이스트 베어링의 경우 수십 μm 이다. 스피들 모터의 내부는 크게 회전부, 고정부, 윤활유체로 나누어지는데 회전부는 샤프트와 허브등의 회전하는 부분을 고정부는 스테이터와 슬리브 등의 회전하지 않는 부분을 윤활유체는 베어링 사이의 오일을 의미한다. 구조적으로 회전부와 고정부가 윤활유체에 의해 분리되어 있어 두 개의 도체판을 작은 간격으로 평행하게 놓고 절연체에 의해 절연되어 있는 커패시터와 기계적으로 비슷한 구조라 할 수 있다.

2.2 HDD용 FDB스핀들 모터의 대전

정전기는 물체와 물체의 접촉 및 분리과정을 거쳐 생성이 되며 거의 모든 물체에서 이런 현상이 발생한다. 마찰에 의해 발생한 정전기는 모두 축적이 되지 않고 전기의 흐름에 의한 누설을 뺀 나머지가 축적이 된다. 물체가 부도체인 경우 저항률(resistivity)이 크기 때문에 누설이 작아서 발생한 정전기의 대부분이 축적이 되지만 도체인 경우 전류가 흐르기 쉽기 때문에 발생한 정전기의 대부분이 누설되어 대전량이 작아진다. 그러나 도체의 경우에도 절연되어 있으면 발생한 정전기가 누설되지 않기 때문에 대전(electrification) 될 수 있다.⁽⁷⁾ HDD용 FDB에서는 유체와 베어링 금속부와의 마찰이 생기므로 전하를 잃기 쉬운 도체인 회전부와 고정부는 양의 전하로 유체는 음의 전하로 대전이 될 것이다. 그러나 고정부는 접지가 되어 있으므로 전하가 거의 누설이 되어 회전 디스크와 헤드 사이에 전위차가 발생한다.

이를 수식으로 나타내면 대전된 도체는 등가적으로 정전 용량과 저항의 직렬회로가 되어 다음과 같은 식이 된다.

$$Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = V \quad (1)$$

여기서 C 와 R 은 각각 대전 물체의 정전용량과 대전 물체와 대기 사이의 저항을 나타낸다. 식 (1)을 풀면 다음과 같이 표현된다.

$$Q = Q_0 \exp\left[-\frac{t}{RC}\right] \quad (2)$$

여기서 Q_0 는 대전된 전하량을 나타낸다.

대전한 전하량이 37%가 될 때의 시간을 시상수라 하며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = CR \quad (3)$$

이 식에서 고정부 도체의 저항은 수 Ω 이고 정전용량은 거의 0 pF이므로 누설 시간은 거의 0초로 대전이 되더라도 금방 방전이 되기 때문에 충전이 되지 못한다.

유체의 정전기 이완식은 다음과 같은 지수 함수 식으로 표현이 된다.

$$Q = Q_0 \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \quad (4)$$

$$\tau = \epsilon\rho = \epsilon/k \quad (5)$$

여기서 ϵ , ρ , K 는 각각 유전율[F/m], 저항률[$\Omega \cdot \text{m}$], 도전율[S/m]을 나타낸다.

유체는 절연체이므로 보통 1012 Ωm 이상의 저항률을 가지고 비유전율(relative dielectric constant)이 2 이상이므로 시상수는 수십 초로 누설시간이 길어 충전이 될 수 있다.⁽⁷⁾ 그러나 윤활유체는 접지된 고정부와 접하고 있어 항복전압(breakdown voltage)에 의한 절연 파괴(dielectric breakdown)시 접지로 전하가 흐르기 때문에 정전기 방전의 위험성을 고려하지 않아도 된다. 그러나 대전된 회전부는 윤활유체로 인해 방전이 되지 않으므로 고정부와 전위차를 발생시켜 디스크와 헤드 사이로 정전기 방전을 일으킬 수 있다.

3. 실험 및 고찰

3.1 HDD 스피들 시스템의 총방전 거동 측정

Fig. 5는 총·방전 거동 측정 실험을 위한 장치 개략도이다. 전원공급기로 2.5초 동안 0.6 V를 스피들 모터의 회전부에공급하고 이후 xyz테이블에 고정된 오실로스코프 전압프로브에 가는 전선을 연결한 후 총·방전 시 회전부와 고정부 사이에 전위차 변화를 측정하였다.

또한 같은 방법으로 볼베어링을 사용한 HDD 스피들 시스템과 커패시터의 충·방전 거동도 측정하여 FDB를 사용한 HDD 스피들 시스템과 비교분석하였다.

Fig. 6은 FDB를 사용한 HDD스핀들 시스템이 7200

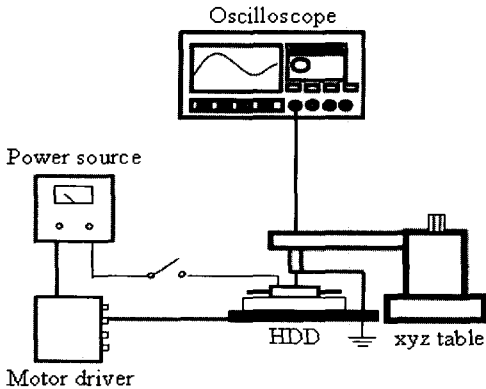


Fig. 5 Schematic drawing of experimental setup

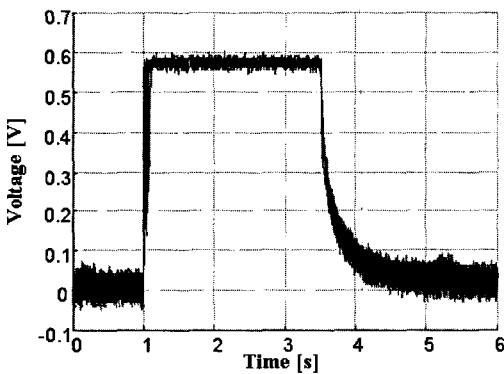


Fig. 6 Behavior of electric charge and discharge in a FDB spindle system rotating at 7200 rpm

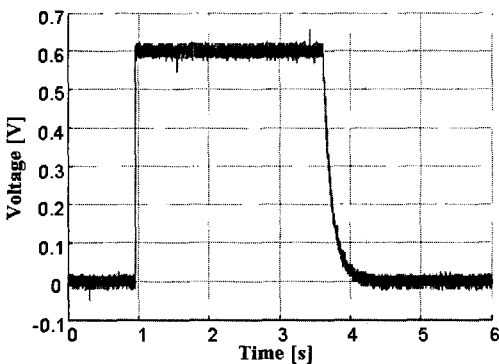


Fig. 7 Behavior of electric charge and discharge of a capacitor with 10nF

rpm회전 할 때의 충·방전 거동으로 10 nF의 정전용량을 가진 커패시터의 거동인 Fig. 7과 같은 거동을 보인다. 스피들 모터가 정지 시 회전부가 고정부에 접촉하거나 분리된다. 분리 시에는 커패시터와 같은 거동을 보이며 접촉 시에는 Fig. 8과 같은 거동을 보여 커패시터 기능을 하지 못한다. 위의 결과로 유체베어링 시스템은 회전 시 커패시터와 같이 전하를 축적할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 볼베어링 시스템의 충·방전 거동을 나타낸다. 충·방전 거동이 FDB를 사용하는 HDD스핀들 시스템보다 미약한 이유는 볼베어링을 사용하는 HDD 스피들 시스템의 경우 볼과 내외륧 사이에 미량의 윤활유가 있어 회전부를 절연시키지만 볼베어링과 윤활유체의 접촉 면적이 적어 식 (6)에서 정전용량(C) 값이 낮기 때문이다.

$$C = \epsilon \frac{S}{D} \tag{6}$$

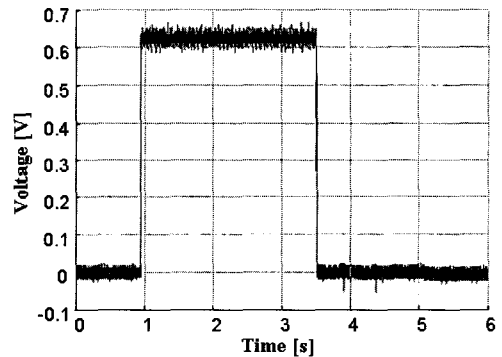


Fig. 8 Behavior of electric charge and discharge in a stationary FDB spindle system

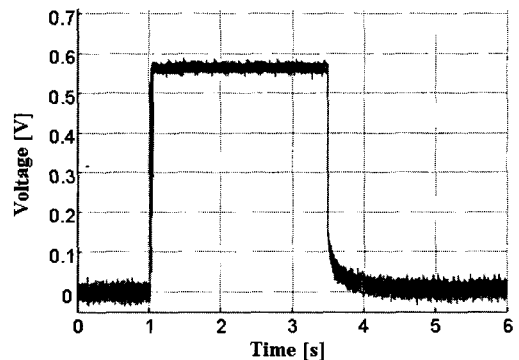


Fig. 9 Behavior of electric charge and discharge of a ball bearing spindle system rotating at 7200rpm

여기서 D , S , ϵ 는 각각 전극 사이 거리[M], 전극사이 접촉 면적[M²], 유전율[F/M]을 나타낸다.

3.2 FDB를 사용하는 HDD스핀들 시스템의 정전용량 계산

3.1절에서 구한 FDB를 사용하는 HDD스핀들시스템의 충·방전 거동이 커패시터와 동일하므로 시상식을 이용하여 FDB를 사용하는 HDD스핀들 시스템의 정전용량을 계산하였다. Fig. 10은 3.1절의 실험장치의 등가 회로이며 모터의 내부 저항 R_M 은 전압 프로브의 저항보다 훨씬 작기 때문에 고려하지 않는다.

$$\tau = C_b R_p \quad (7)$$

여기서 C_b , R_p , τ 는 각각 유체베어링의 정전용량, 오실로스코프 전압 프로브의 저항, 시상수이다.

회전부에 전원공급기로 2.5초간 0.6V를 공급하고 이후 충·방전 거동을 오실로스코프로 구한 그래프를 나타내며 전위가 37%로 내려 갔을 때까지 걸린 시간인 시상수와 프로브 저항값을 식 (7)에 대입해서 FDB 시스템의 정전용량을 계산 할 수 있다.

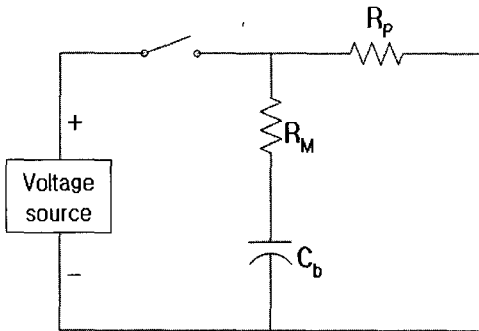


Fig. 10 Equivalent circuit of experimental setup

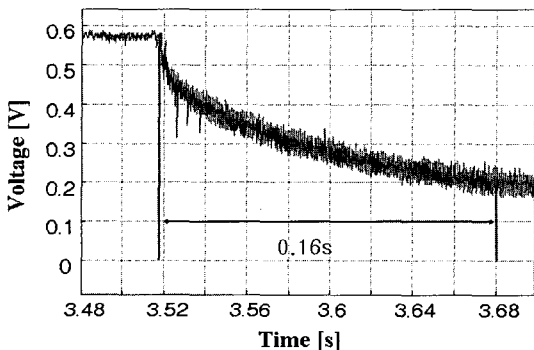


Fig. 11 Behavior of electric discharge in a FDB spindle system rotating at 7200 rpm

Fig. 11에서 전압이 37%로 내려 갔을 때의 시간이 0.16초이고 오실로스코프의 저항이 10 M Ω 이므로 이 값들을 시상식에 대입해서 계산하면 약 16 nF의 정전용량을 가짐을 알 수 있다.

3.3 작동 환경 변화에 따른 정전기 측정

Fig. 12에서 보는 바와 같이 열챔버를 이용하여 주위 환경을 변화시켜 회전부와 고정부 사이에 발생된 전위차를 측정하였다. 열챔버는 주위 온도를 높임으로써 포화수증기량을 증가 시켜 상대 습도를 낮추기 위한 장치이다. 상대 습도가 높으면 물체 표면의 도전성이 증가하여 전하가 누설되기 쉬워지기 때문에 측정되는 정전위 수준이 낮아진다. 또한 지지 하중과 회전속도가 증가하면 유체의 압력 증가로 마찰이 커져 정전기 발생량이 증가 할 것으로 예상되므로 디스크 숫자와 회전속도를 변화시켰다. Fig. 13은 회전속도 7200 rpm, 상대습도 15% 상태에서 3시간의 작동 시간 후 전위차 측정을 하였을 때의 전위변화를 나타낸다.

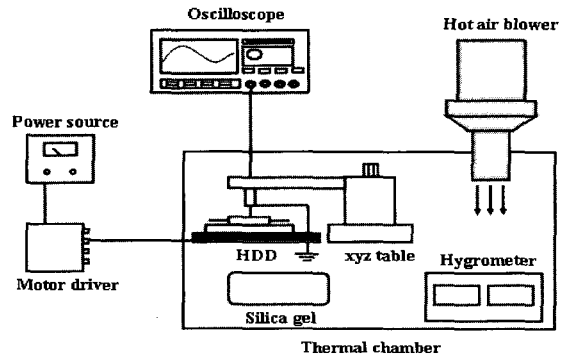


Fig. 12 Schematic drawing of experimental setup

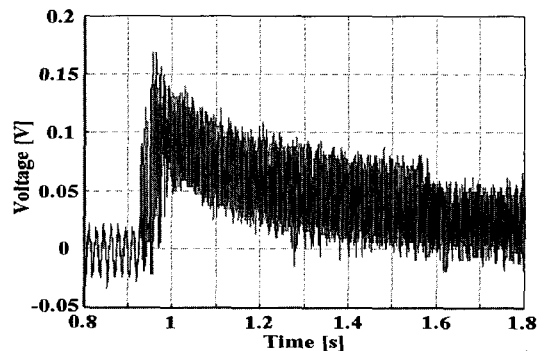


Fig. 13 Measurement of voltage difference in a FDB spindle system rotating at 7200 rpm with 2 disks

Table 1은 회전속도를 7200 rpm으로 고정하고 디스크를 장착하지 않았을 때 상대습도를 변화시켜 회전부와 고정부의 사이의 전위차 측정결과를 나타낸다. 상대습도가 낮아질수록 전위차가 크게 발생하며 습도가 약 15 %에서는 작동시간이 2시간 후 100 mV의 전위차를 나타내며 50 % 이상에서는 25 mV로 발생량이 적다.

Table 2에서는 회전속도와 상대습도를 각각 7200 rpm과 25 %로 고정한 후 지지 하중을 증가시켰을 때의 전위차를 나타내며 여기서 지지 하중이 증가하면 정전기의 발생이 증가함을 알 수 있다.

Table 3에서는 상대습도와 디스크 장수를 각각 8 %와 2장으로 고정한 후 회전속도를 증가시켰을 때의 전위차를 나타내며 여기서 회전속도가 증가하면 정전기의 발생이 증가함을 알 수 있다.

커패시터 및 볼베어링을 사용한 HDD스핀들 시스템의 충·방전거동과 비교·분석하였다. 그리고 작동환경에 따른 축적되는 전위차의 변화를 알아보기 위해 여러 가지 조건을 설정하여 시간에 따른 회전부와 고정부사이의 전위차를 측정하였다. 실험 결과에 의하면 스핀들 모터 회전 시 충·방전 거동은 커패시터와 같으며 유체와 회전부의 마찰에 의해 발생하는 전하가 스핀들의 회전부에 충전 될 수 있음을 보여 준다. 또한, 스핀들의 회전속도, 지지하중, 상대습도 각각에 따라 발생하는 전위차를 비교·분석하였다. 유체베어링을 장착한 스핀들 시스템은 구조적으로 커패시터와 유사하므로 정전기의 축적으로 헤드에서 정전기 방전의 위험이 있으며 FDB시스템에서 발생하는 정전기 저감 및 ESD제어에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

이 논문은 HDD용 FDB스핀들 모터가 회전할 때 전압을 가해서 충·방전 거동을 측정한 후 그 결과를

참 고 문 헌

- (1) Lee, H. J., 2003, "Understanding of HDD", Electronics Times, Seoul, in Korea, pp. 70~94.
- (2) Jenny Himle, 2002, "Electrostatic Discharge Considerations for GMR Heads," Magazine articles, <http://www.wallash.com/jenny.htm>
- (3) Albert Wallash., 2004, "Electrostatic Discharge and Electrical Breakdown Study of the Head-Disk Interface in a Hard Disk Drive," IEEE Trans. on Magn., Vol. 40, pp. 5157~5159.
- (4) Lydia Baril, Mark Nichols, and Albert Wallash., 2002, "Degradation of GMR and TMR Recording Heads Using Very-short-duration ESD Transients," IEEE Trans. on Magn., Vol. 38, pp. 1751~1755.
- (5) Albert Wallash., 2003, "ESD Challenges in Magnetic Recording: Past, Present and Future," 41st Annual International Reliability Physics Symposium, Dallas, Texas
- (6) Albert Wallash, 2002, "Understanding ESD Damage to Magnetoresistive (MR) Recording Heads," Magazine Articles, <http://www.wallash.com/understa.htm>.
- (7) Lee, D. C. and Jung, J. H., 1996, "Prevention of Electrostatic Disaster and Obstacle to the Whole Industry," Sungandang, Seoul, in Korea, pp. 2~3, 34~45.

Table 1 Voltage due to the variation of the relative humidity

Operating tim[min]		Rotating speed : 7200 rpm Disk : no disk				
		10	30	60	120	180
R.H. [%]	15	50	65	75	100	100
	25	50	60	70	75	75
	55	18	21	25	25	25

Table 2 Voltage due to the variation of the supporting load

Operating tim[min]		Rotating speed : 7200 rpm Relative humidity : 25 %				
		10	30	60	120	180
Disk	No disk	50	60	70	75	75
	2 disks	60	70	85	120	120

Table 3 Voltage due to the variation of the rotating speed

Operating tim[min]		Disk : 2 disks, Relative humidity: 8 %				
		10	30	60	120	180
Rotating speed[rpm]	7200	80	100	115	160	175
	15000	100	125	140	160	200