

HDD에서 상대습도, 디스크 가속도, 정지시간이 슬라이더-디스크 인터페이스의 마찰대전 발생에 미치는 영향

이대영 · 이재호* · 좌성훈** · 황정호†

연세대학교 기계공학과, *삼성전자 디지털프린팅사업부, **삼성종합기술원 MEMS Lab.

Effect of Relative Humidity, Disk Acceleration, and Rest Time on Tribocharge Build-up at a Slider-Disk Interface of HDD

D.Y. Lee, J. Lee*, S.H. Choa** and J. Hwang†

Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

**Digital Printing Division, Samsung Electronics*

***Samsung Advanced Institute of Technology, MEMS Lab.*

Abstract – In hard disk drives as the head to disk spacing continues to decrease to facilitate recording densities, slider disk interactions have become much more severe due to direct contact of head and disk surfaces in both start/stop and flying cases. The slider disk interaction in CSS (contact-start-stop) mode is an important source of particle generation and tribocharge build-up. The tribocharge build-up in the slider disk interface can cause ESD (electrostatic discharge) damage. In turn, ESD can cause severe melting damage to MR or GMR heads. The spindle speed of typical hard disk drives has increased in recent years from 5400 rpm to 15000 rpm and even higher speeds are anticipated in the near future. And the increasing disk velocity leads to increasing disk acceleration and this might affect the tribocharging phenomena of the slider/disk interface. We investigated the tribocurrent/voltage build-up generated in HDD, operating at increasing disk accelerations. In addition, we examined the effects with relative humidity conditions and rest time. We found that the tribocurrent/voltage was generated during pico-slider/disk interaction and its level was about 3~16 pA and 0.1~0.3 V, respectively. Tribocurrent/voltage build-up was reduced with increasing disk acceleration. Higher humidity conditions (75~80%) produced lower levels of tribovoltage/current. Therefore, a higher tribocharge is expected at a lower disk acceleration and lower relative humidity condition. Rest time affected the charge build-up at the slider-disk interface. The degree of tribocharge build-up increased with increasing rest time.

Key words – tribocharge, slider disk interface, hard disk drive, disk acceleration, rest time, relative humidity.

1. 서 론

하드 디스크 드라이브(HDD: hard disk drive)에서 저장 기록 밀도를 높이기 위해서는 헤드-디스크의 간극(spacing or flying height)을 줄이거나, 헤드 자기 소자의 감도를 향상 시켜야 한다. 한편 헤드-디스크의 간극이 감소하면 헤드가 디스크 위를 부상하는 동안 또는 부상을 멈추는 과정에서 헤드가 디스크 면에 접촉할 가

능성이 많아지고, 그만큼 헤드의 손상을 초래할 수 있다. 하드 디스크 드라이브의 성능, 즉 읽고 쓰는 속도를 증가시키기 위해서는 스피들 모터의 속도를 증가시켜야 하며 최근 스피들 모터의 속도는 5400 rpm에서 15000 rpm 또는 그 이상의 속도가 요구되고 있다[1]. 디스크 속도의 증가는 디스크 가속도의 증가를 초래한다. Fig. 1에서 보듯이 슬라이더-디스크 상호간의 작용은 많은 오염 입자를 발생시킬 수 있으며, 슬라이더-디스크 사이에서는 마찰대전(tribocharging) 현상이 발생한다[2]. 마찰대전은 고체와 고체 또는 고체와 유체간의

†주저자 · 책임저자 : hwangjh@yonsei.ac.kr

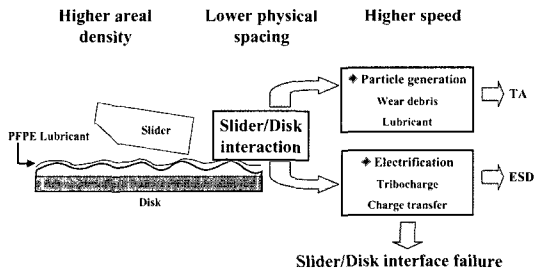


Fig. 1. Slider-disk interaction in HDD.

접촉 후에 표면에 존재하던 전하(charge)에 의해 발생하는 현상이다. 마찰대전에 의한 최종 전하량은 두 과정에 의해 결정되는데 첫 번째는 대전(charge transfer)으로서 슬라이더가 표면과의 접촉하고 미끄러지는 동안 발생하며 방전(discharge)은 접촉되어 있던 물질들이 떨어질 때 발생한다.

슬라이더 디스크 인터페이스 내의 마찰대전현상에는 슬라이더 밑면에 전하가 축적되어 디스크 표면과 전위차가 발생하는 정전기적(electrostatic) 특성과 슬라이더에 축적된 전하가 이동하여 미세전류를 발생시키는 전기적(electrodynamic) 특성이 있다. 마찰대전 현상에 의하여 발생된 전하의 크기는 자기 헤드가 ESD(electrostatic discharge) 현상에 의하여 손상을 받을 수 있는 한계점 보다는 작기 때문에 실제로 큰 문제가 되지 않았다. 그러나 최근 헤드-디스크의 부상 높이가 감소하고, 또한 헤드의 감도가 높아지면서 헤드가 ESD에 의하여 손상 받을 수 있는 가능성이 점점 높아지고 있다 [5]. Wallash[6]는 HDD의 GMR/MR 헤드가 손상을 받을 수 있는 ESD의 크기는 IC DRAM이 손상을 받을 수 있는 ESD의 크기 보다 수백 배 작다는 것을 발견하였다. 또한 헤드-디스크의 간극이 감소하면 헤드의 ESD 손상 전압이 감소할 수 있다는 것을 예측하였다.

이미 헤드-디스크의 트라이볼로지 및 신뢰성 관점에서 마찰대전에 대한 중요성은 여러 연구에서 언급이 되었다. 자기 헤드에서 발생하는 마찰대전 효과는 디스크 표면의 윤활막을 열화 시키며[7,8] 또는 헤드-디스크 인터페이스의 오염을 가속화 한다[9]. Nakayama와 Ikeda[10]는 헤드-디스크 인터페이스에서의 접촉 거동을 묘사하는 마찰대전/방전(emission) 실험을 수행하였다. Nakayama[11]는 음극 또는 양극으로 대전된 입자의 마찰방전의 크기와 고체 표면의 저항과의 관계를 연구하였다. Brezoczky와 Seki[12]는 슬라이더 표면에 2.35 V의 마찰대전이 발생하면 슬라이더와 회전하는 디

스크 사이에 인력(attraction force)이 발생할 수 있다고 주장하였다. 이러한 주장은 가변 캐피터 모델을 사용하여 얻어진 마찰대전 밀도의 계산에 의한 것이었다. Feng 등[13]은 디스크 표면 위를 슬라이더가 부상하고 있을 때의 마찰대전/방전의 크기를 직접 측정하였다. 그들에 의하면 마찰대전/방전은 슬라이더-디스크의 접촉 정도에 관련이 있으며, 습도가 많은 환경 조건 하에서는 약 2 V의 전압이 발생된다고 하였다. 또한 마찰대전/마찰전류(tribocurrent)는 슬라이더-디스크의 접촉 정도에 매우 밀접한 관련이 있으며, 디스크 표면의 윤활유 또는 슬라이더-디스크 저항 등에는 별로 관계가 없음을 밝혀내었다.

Park 등[9]은 전기적으로 대전된 슬라이더-디스크 인터페이스에서 오염 입자의 거동 특성을 계산하였다. 그 결과에 의하면 슬라이더와 접지된 디스크 표면 사이에 1 V의 전기적 포텐셜이 발생한다면 슬라이더-디스크 인터페이스에서는 상당한 입자 오염이 발생할 수 있다. 또한 포텐셜 차이의 유지 시간이 입자 오염에 매우 중요한 인자로 작용한다. 습도 및 정지시간(rest time)이 마찰, 점착(stiction) 및 그 밖의 헤드-디스크 인터페이스의 신뢰성에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되었다[14,15,16]. Zhao와 Bhushan[17]에 의하면 윤활유가 있는 디스크의 경우 습도가 적은 상황에서는 습도의 존재가 마찰/점착(stiction) 및 내구성에 좋은 효과를 발휘한다. 그러나 습도가 많은 경우 윤활유의 내구성이 감소되기 때문에 오히려 마찰 및 점착 현상이 증가한다. 한편 습도 및 정지시간이 마찰대전 발생(tribocharge build-up)에 미치는 영향에 대해서는 연구 결과가 거의 없는 실정이다. 슬라이더-디스크 인터페이스에서의 마찰대전의 크기는 주로 관련된 물질의 전하 용량(electric capacity)과 슬라이더와 디스크 사이의 상대 속도에 의존한다. 이전에 수행된 연구[18]에서는 일정 속도로 회전하는 상태에서 슬라이더에 발생하는 마찰대전 현상을 실험적으로 연구하였고, 마찰대전 효과가 슬라이더-디스크 인터페이스 사이의 오염 입자의 거동 궤적에 미치는 효과를 수치적으로 연구하였다.

본 연구에서는 디스크의 속도를 증가시키면서 마찰대전 현상에 의하여 발생하는 전압과 전류의 변화량에 대하여 연구하였다. 시험은 전기적으로 절연된 챔버 내에서 수행되었으며 헤드의 충돌 및 접촉 거동을 측정하기 위하여 PZT 센서를 이용한 acoustic emission(AE) 신호를 동시에 측정하였다. 또한 습도 및 정지시간의 변화에 따른 마찰전압 및 전류(tribovoltage/current)의

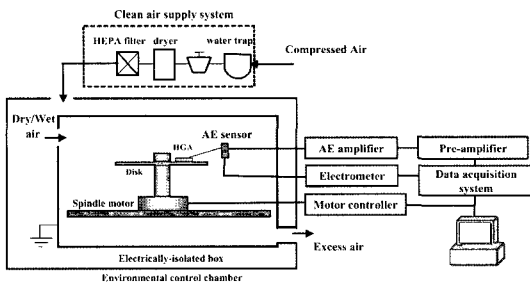


Fig. 2. Schematics of experimental setup.

발생량에 대해서 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 슬라이더-디스크의 상호 접촉에 의하여 발생한 마찰대전/마찰전류 신호와 AE 신호를 동시에 측정하였다. 본 연구에서 사용된 실험 장치가 Fig. 2에 나타나 있다. 실험 장치는 청정공기공급기, 슬라이더-디스크 어셈블리(assembly) 및 측정 시스템으로 구성되어 있다. 슬라이더-디스크 어셈블리는 전기적으로 절연된 상자 내에 위치하고 있다. 상자는 스테인레스강으로 만들어졌으며, 전기적 노이즈 및 오염을 방지하기 위하여 전기적으로 접지시켰다. 상자는 청정도가 100인 환경조절 챔버 내에 위치시켰다. 모든 실험에서 상자의 온도는 25°C로 항상 유지시켰으며, 상대습도는 저습도 환경인 경우 20~25%의 상대습도, 고습도 환경에서는 75~80%의 상대습도로 고정하였다. 상자 내에 이미 존재하는 입자의 수를 최소화하기 위하여 우선 공기를 수분제거기(water trap), 확산건조기(diffusion drier)와 HEPA 필터를 통과시킨 후 건조한 청정 공기를 불어 넣었다. 모든 실험에서 환경 조건의 오염도는 응축핵 계수기(condensational particle counter, CPC)를 사용하여 모니터링 하였으며, 그 수준은 1000 particles/m³ 이하였다. 시험이 종료된 후에는 슬라이더의 air bearing surface(ABS) 표면의 상태를 현미경으로 관찰함으로써 슬라이더의 손상 및 오염의 여부를 확인하였다. 실험 중에 슬라이더의 심각한 손상이나 오염의 흔적은 발견되지 않았다.

실험에 사용된 디스크는 95 mm의 Al-Mg 기판으로 만들어졌으며, 디스크 랜딩존(landing zone)에는 laser zone texture(LZT)가 형성이 되어 있고, 표면은 7.5 nm의 DLC(diamond-like carbon) 코팅과 그 위에는 1.4 nm 두께의 윤활막(Z-dol)이 도포되어 있다. LZT 범프

(bump)는 crater 타입이며 높이는 16.5 nm이다. 따라서 슬라이더가 부상할 때 LZT 영역에서는 마찰 접촉이 발생한다.

기록영역(data zone)에서의 표면 조도(Ra)는 0.8 nm이다. 실험에 사용된 슬라이더는 Al₂O₃-TiC의 재료로 만들어진 30% 슬라이더(pico-slider)였으며, 슬라이더의 ABS 표면에는 DLC 막이 코팅되어 있다. 슬라이더의 크기는 1 mm × 1.235 mm × 0.3 mm이며, ABS는 0.2 μm의 shallow depth와 2 μm의 cavity를 갖는 형상이다.

슬라이더와 디스크를 상용 제품인 tribotester(TTi Inc., T1000)에 장착하였다. AE 센서는 밴드폭이 50 KHz~5.0 MHz로서 슬라이더-디스크 인터페이스의 기계적 접촉 및 상호작용을 모니터링 하기 위하여 사용되었다. AE 센서는 HGA(head gimbal assembly)에 부착되며 pre-amplifier를 통하여 PC에 연결된다. 슬라이더와 디스크 사이에서 발생하는 전류와 전압은 전압전류계(electrometer) (Keithley 6517A)를 이용하여 측정하였다. 전압전류계는 HGA에 연결하였는데, 슬라이더의 마찰대전/마찰전류 신호를 감지하기 위하여 다른 부품들과는 전기적으로 절연시켰다.

스핀들 모터 컨트롤러를 이용하여 디스크의 회전 속도를 5400 rpm에서 9600 rpm까지 변화시켰다. 스핀들 모터는 10,000 rpm까지 가속할 수 있다. 슬라이더-디스크 인터페이스의 불필요한 손상을 최소화하기 위해서 슬라이더는 초기에 디스크의 중심으로부터 30 mm 떨어진 랜딩존 부근에 위치시켰다. 슬라이더-디스크 인터페이스에서 발생한 AE 신호 및 마찰전압/전류 신호는 스핀들 모터가 동작한 후 20초가 될 때까지 동시에 측정하였다. 또한 디스크가 초기 회전하여 최대 속도가 되기까지의 시간을 각각 3초, 5초, 7초로 변화시키면서 시험하였다. 디스크의 최대속도는 각각 5400, 7200, 9600 rpm으로 변화시켰다. 디스크는 초기 시동에서 일정하게 가속된다고 가정을 하면, 디스크 가속도의 크기는 2.42~10.05 m/s²의 범위였다.

3. 실험 결과 및 토론

슬라이더-디스크 인터페이스에서 마찰전압/전류 발생에 대한 상대습도, 디스크 가속도 및 정지시간(rest time)의 영향을 관찰하였다. AE 신호는 낮은 상대습도와 정지시간이 낮은 1초 미만 조건에서 얻어졌다. 정지시간이 슬라이더-디스크 인터페이스에서 발생한 마찰전

압에 미치는 영향에 대해서는 낮은 상대습도 조건 하에서 관찰하였다. 각각의 실험은 3번씩 반복하였고, 얻어진 값들을 평균하였다.

3-1. 디스크 가속도의 변화에 따른 AE 신호

Fig. 3은 디스크 가속도의 변화에 따른 AE 신호의 시간적 변화를 보여주고 있다. 일단 모터가 구동되면

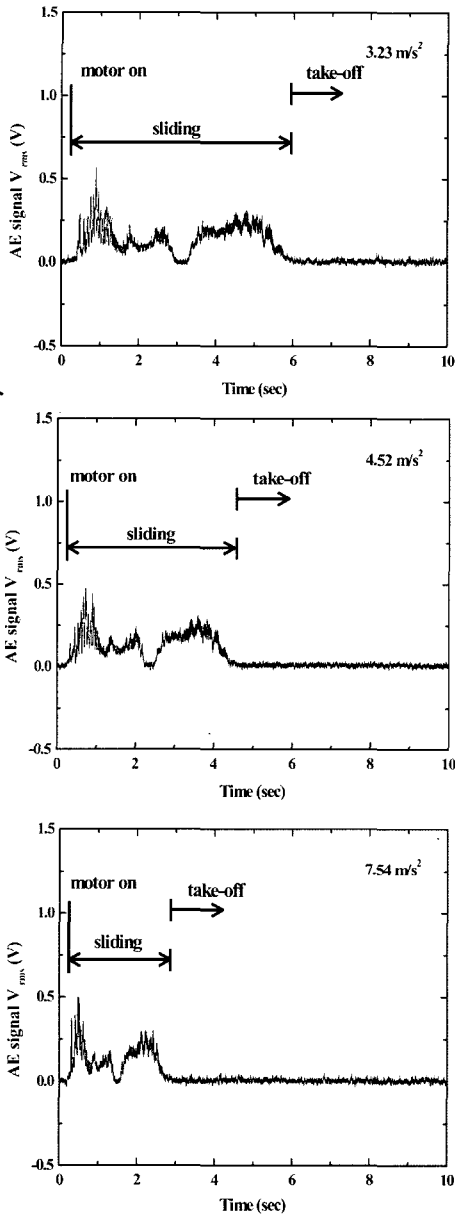


Fig. 3. Temporal distributions of AE signals with disk acceleration.

슬라이더는 약간의 요동과 함께 슬라이딩을 시작하고, 곧 부상한다. 슬라이더가 완전히 부상하는 시간, 즉 부상 시간 또는 슬라이딩 시간(take-off time)은 디스크의 가속도가 증가함에 따라 감소하였다. 유사한 결과가 Ravikiran 등[19]에 의하여 관찰된 바 있다. 슬라이딩의 거리 L 은 다음과 같은 수식에 의하여 계산될 수 있다.

$$L = \frac{1}{2}at^2 \tag{1}$$

여기서 a 와 t 는 디스크의 가속도와 슬라이딩 시간을 각각 나타내고 있다. Fig. 4는 슬라이딩 거리는 디스크의 가속도를 증가함에 따라 감소됨을 보여주고 있다.

3-2. 디스크 가속도, 상대습도, 정지시간에 따른 마찰 전류/전압의 발생

Fig. 5는 비교적 낮은 20~25%의 상대습도 조건 하

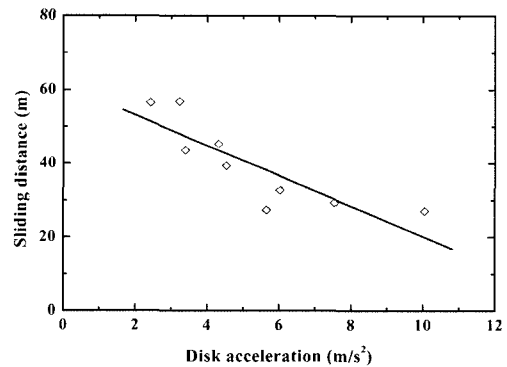


Fig. 4. Sliding distance with variation of disk acceleration.

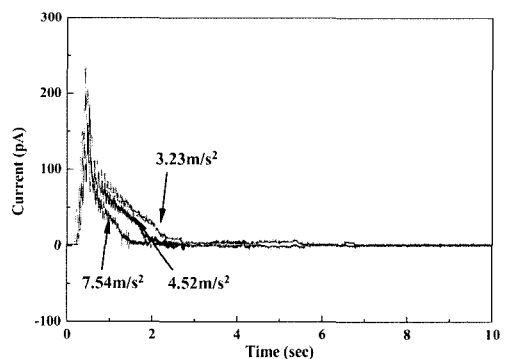


Fig. 5. Temporal distributions of tribocurrent with disk acceleration (Low humidity).

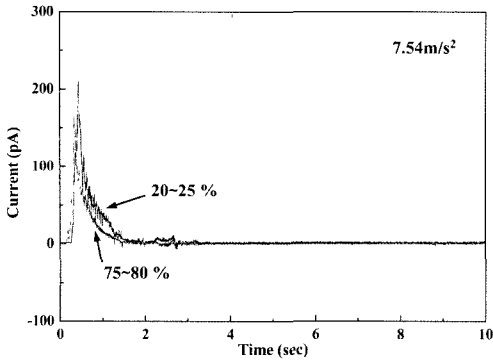


Fig. 6. Temporal distributions of tribocurrent with low and high relative humidity.

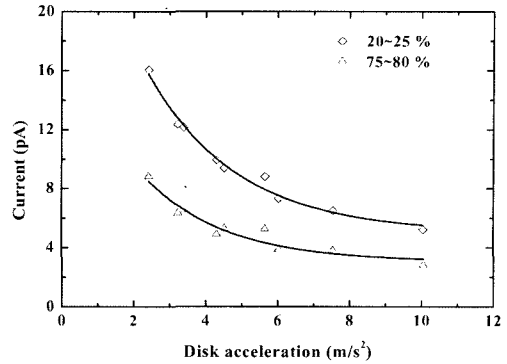


Fig. 7. Averaged tribocurrent with disk acceleration and relative humidity.

에서 디스크 가속도의 변화에 따른 마찰전류의 시간적 변화를 보여주고 있다. 모터가 구동되면 마찰전류가 발생함을 알 수 있다. 유사한 결과가 Feng 등[13]에 의하여 얻어졌는데, 그 연구 결과에 의하면 마찰전류의 발생은 슬라이딩 접촉 또는 슬라이더-디스크 사이의 접촉 또는 충돌 강도와 연관이 있다고 주장하였다. 또한 Fig. 5는 디스크 가속도가 증가함에 따라 마찰전류는 더 빠르게 소멸됨을 보여주고 있다. Fig. 6은 7.54 m/s²의 디스크 가속도 하에서 상대습도에 대한 마찰전류의 영향을 나타내고 있다. 상대습도가 증가함에 따라 마찰전류는 감소한다. Fig. 7에 2.42~10.05 m/s²의 디스크 가속도 범위에서 마찰전류의 평균 값들을 요약하였다. 마찰전류는 약 3~16 pA의 수준으로, 이 결과는 Kiely 등[5]이 관찰한 50 pA의 값과 유사한 수준이며, 마찰전류는 디스크의 가속도가 증가함에 따라 감소되었다. Fig. 4에서와 같이 디스크가속도가 증가되면 슬라이딩 거리가 감소하고, 슬라이딩 거리, 즉 슬라이더-디스크 접촉의 강도가 감소하면 마찰전류도 감소하게 된다. Fig. 7은 상대습도에 따른 마찰전류의 평균값을 보여주고 있다. 상대습도가 올라가면 마찰전류는 감소하였다. 슬라이더-디스크 인터페이스에서 마찰대전의 발생에 대한 디스크 가속도의 영향을 살펴보기 위하여 여러 디스크 가속도 하에서 슬라이더에 유도된 전압을 측정하였다. Fig. 8에서와 같이 마찰전압은 모터가 구동 되는 즉시 증가하였으며, 곧 최대값에 도달하였다. 그리고 최대값에 도달하는 시간은 가속도가 빠를수록 빨랐다. 전압의 크기는 전류가 소멸되는 것만큼 빠르게 감소되지는 않았다. 슬라이더에 축적된 전하들은 절연되어 있는 헤드 암(arm) 부분으로는 이동할 수가 없으며, 대신 마찰대전은 공기나 또는 디스크 표면으로

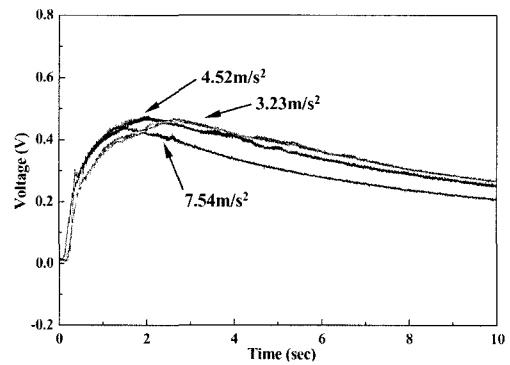


Fig. 8. Temporal distributions of tribovoltage with disk acceleration (Low humidity).

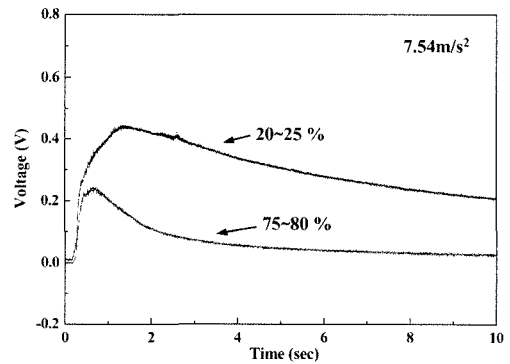


Fig. 9. Temporal distributions of tribovoltage with low and high relative humidity.

서서히 방전된다[18]. 디스크 가속도가 7.54 m/s²인 하에서 마찰전압에 대한 상대습도의 영향이 Fig. 9에 나타나 있다. 마찰전압은 상대습도가 증가함에 따라 감소하고 있다. Fig. 10은 디스크 가속도가 2.42~10.05 m/s²인

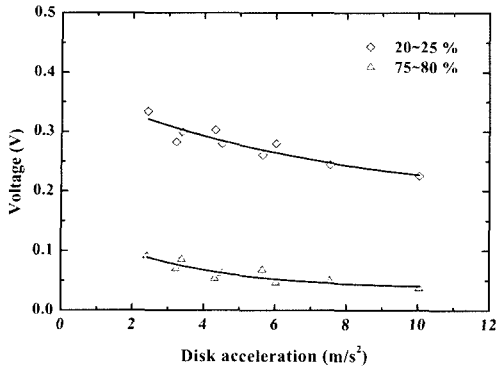


Fig. 10. Averaged tribovoltage with disk acceleration and relative humidity.

범위에서 측정된 마찰전압의 평균값을 보여주고 있다. 슬라이더 표면에서 전하 레벨은 약 0.1~0.3 V였으며, 이 결과는 Kiely등[5]이 측정한 값(0.2~0.4 V)과 유사하다. MR/GMR 헤드를 파괴할 수 있는 일반적인 파손 전압은 약 3 V이기 때문에[6], 본 연구에서 측정된 전압 레벨이 ESD 손상을 초래하지는 않는다고 생각된다. 그러나 만약 헤드와 디스크가 고 저항의 카본 코팅으로 도포되어 있다면, 매우 높은 레벨의 전하들이 헤드-디스크에 국부적으로 축적될 수 있으며, 결과적으로 ESD 손상을 초래할 수 있다[13].

Fig. 10은 상대습도에 대한 마찰전압의 평균값을 보여주고 있다. Fig. 7의 마찰전류의 경우와 유사하게 상대습도가 증가하면 마찰전압은 감소한다. 본 실험에서 마찰전압/전류 측정 결과에 대한 상대습도의 명확한 영향은 높은 상대습도로 인하여 슬라이더 표면에 형성된 수분 자국들로 설명할 수가 있다. 즉 헤드 또는 디스크 표면에 형성된 수분 응축은 헤드-디스크 인터페이스를 대전시키는데 도움을 주지 못한다. 왜냐하면 습도가 증가하면 물질의 저항은 감소하기 때문이다[20]. 따라서 마찰대전은 디스크의 가속도가 낮고, 상대습도가 낮은 경우에 높아진다.

정지시간(rest time)이 마찰대전의 축적에 미치는 영향을 조사하였다. 정지시간 또는 rest time(또는 dwell time)은 모터가 정지된 동안의 시간으로 정의된다. Zhao와 Talke[1]는 laser textured 디스크와 mechanical textured 디스크를 각각 이용하여 정지시간에 따른 슬라이더와 디스크 사이의 점착력(stiction force)의 변화를 연구하였다. 그들의 연구에 의하면 일반적으로 12시간의 정지 후에 측정된 점착은 정지가 없었던 경우의 점착에 비하여 매우 높은 값을 보였다. 본 실험에

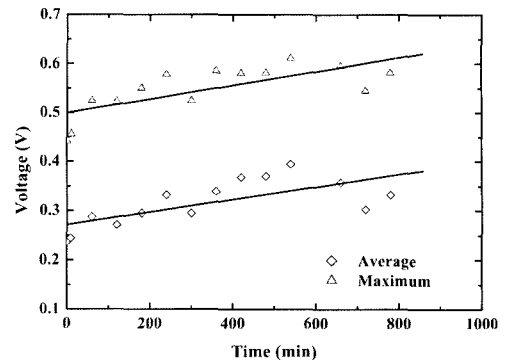


Fig. 11. Average and maximum values of charge build-up with rest time (humidity: 20~25%).

서 슬라이더-디스크 인터페이스에서 발생된 전하 축적 양은 약 11시간의 정지시간을 갖은 후에 측정한 것이다. 챔버 내의 습도와 디스크 초기 가속도는 각각 20~25%와 5.65 m/s²로 유지시켰다. Fig. 11은 정지시간에 따른 마찰대전 축적의 평균과 최대 값을 보여주고 있다. 이 결과에서 보듯이 정지시간은 마찰대전 축적에 영향을 미친다. 정지시간은 슬라이더-디스크의 점착에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 슬라이더-디스크 인터페이스의 점착의 증가로 인하여 마찰대전의 축적이 증가되었을 것으로 추론된다.

4. 결 론

슬라이더-디스크 인터페이스에서 발생된 마찰전류/전압의 축적을 전압전류계를 이용하여 측정하였으며, 디스크 가속도, 상대습도 및 정지시간이 마찰대전 축적에 미치는 영향을 관찰하였다.

(1) 마찰전류/전압은 슬라이더-디스크의 상호작용에 의하여 발생되며, 그 값들은 각각 약 3~16 pA와 0.1~0.3 V였다. 본 실험에서 측정된 전압 수준이 헤드의 ESD 손상을 초래하지는 않는다.

(2) 마찰전류/전압은 디스크의 가속도가 증가함에 따라 감소하였다. 따라서 디스크의 가속도를 증가시킴으로써 슬라이더-디스크 인터페이스에서 발생하는 마찰대전의 크기를 감소시킬 수 있다. 또한 높은 습도의 조건 하에서 마찰전압/전류의 크기는 감소한다. 따라서 마찰대전이 높은 경우는 디스크의 가속도가 낮고, 낮은 상대습도의 조건이다.

(3) 정지시간은 슬라이더-디스크 인터페이스의 전하 축적에 영향을 미치며, 정지시간이 증가할 수록 마찰

대전 의 축적은 증가하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기 연구센터의 지원(과제번호: R11-1997-042-12001-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자에게 감사 드립니다.

참고 문헌

- Zhao, Q. and Talke, F. E., "Experimental Investigation of the Effect of Disk Acceleration and Velocity on the Tribology of the Head/Disk Interface," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.35, pp.2406-2408, 1999.
- Lee, D. Y., Hwang, J. and Bae, G. N., "Effect of Disk Rotational Speed on Contamination Particles Generated in a Hard Disk Drive," *Microsyst. Technol.*, Vol.10, pp.103-108, 2004.
- Greason, W. D., "Electrostatic Discharge in Electronics," Jon Willey & Sons Inc., 1992.
- Harper, W. R., "Contact and Frictional Electrification," Clarendon Press, Oxford, 1967.
- Kiely, J. D. and Hsia, Y. T., "Tribocharging of the Magnetics Hard Disk Drive Head-Disk Interface," *J. Appl. Phys.*, Vol.91, pp.4631-4636, 2002.
- Wallash, A., "ESD Challenges in Magnetic Recording: Past, Present and Future," *IEEE 41st Annual International Reliability Physics Sym Dallas Texas*, pp.222-228, 2003.
- Sivertsen, J. M., Wang, G., Chen, G. L. and Judy, J. H., "Evaluation of Amorphous Diamond-Like Carbon-Nitrogen Films as Wear Protective Coating on Thin Film Media and Thin Film Head Sliders," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.33, pp.926-931, 1997.
- Huang, L. J., Hung, Y. and Chage, S., "Surface and Lubricant/Overcoat Interface Properties of the Rigid Disks after Corrosion," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.33, pp.3154-3156, 1997.
- Park, H. S., Hwang, J. and Choa S. H., "Numerical Investigations of Contamination Particles Trajectory in a Slider Disk Interface," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.36, pp.2739-2741, 2000.
- Nakayama, K. and Ikeda, H., "Triboemission Characteristics of Electrons during Wear of Amorphous Carbon and Hydrogenated Amorphous Carbon Films in a Dry Air Atmosphere," *Wear*, Vol.198, pp.71-76, 1996.
- Nakayama, K., "Triboemission of Charged Particles and Resistivity of Solids," *Tribol. Lett.*, Vol.6, pp.37-40, 1999.
- Brezoczky, B. and Seki, H., "Triboattraction: Friction under Negative Load," *Langmuir*, Vol.6, pp.1141-1145, 1990.
- Feng, Z., Shih, C., Gubbi, V. and Poon, F., "A Study of Tribo-Charge/Emission at the Head-Disk Interface," *J. Appl. Phys.*, Vol.85, pp.5615-5617, 1999.
- Bhushan, B. and Dugger, M. T., "Liquid-Mediated Adhesion at the Thin-Film Magnetic Disk/Slider Interface," *Trans. ASME J. Tribology*, Vol.112, pp.217-223, 1990.
- Li, Y., Trauner, D. and Talke, F. E., "Effect of Humidity on Stiction and Friction of the Head/Disk Interface," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.26, pp.2487-2489, 1990.
- Tian, H. and Matsudaira, T., "The Role of Relative Humidity, Surface Roughness and Liquid Build-up on Static Friction Behavior of the Head/Disk Interface," *Trans. ASME J. Tribology*, Vol.115, pp.28-35, 1993.
- Zhao, Z. and Bhushan, B., "Effect of Environmental Humidity on the Friction/Stiction and Durability of Lubricated Magnetic Thin-Film Disks," *J. Engineering Tribology-Part I*, Vol.211, pp.295-301, 1997.
- Park, H. S., Hwang, J. and Choa, S. H., "Tribocharge Build-up and Decay at a Slider-Disk Interface," *Microsyst. Technol.*, Vol. 10, pp.109-114, 2004.
- Ravikiran, A., Liew, T. and Low, T. S., "Effect of Disk Acceleration on the Generation of Acoustic Emission Signal at the Head-Disk Interface," *J. Appl. Phys.*, Vol.85, pp.5612-5614, 1999.
- Paasi, J., Nurimi, S., Vuorinen, R., Strengell, S. and Majjala, P., "Performance of ESD Protective Materials at Low Relative Humidity," *J. Electrostat.*, Vol.51-52, pp.429-434, 2001.