

탐침형 정보저장 기술을 위한 실리콘 탐침의 나노 마멸 특성에 관한 연구

이용하*(연세대 대학원 기계공학부), 정구현(연세대 대학원 기계공학부),
김대은 (연세대 기계공학부), 유진규(삼성종합기술원), 홍승범(삼성종합기술원)

Nano-wear Characteristics of Silicon Probe Tip for Probe Based Data Storage Technology

Y. H. Lee(Graduate School, Yonsei Univ.), K. H. Chung(Graduate School, Yonsei Univ.),
D. E. Kim(School of Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.), J. G. Yoo(Samsung Advanced Institute of Technology),
S. B. Hong(Samsung Advanced Institute of Technology)

ABSTRACT

The reliability issue of the probe tip/recording media interface is one of the most crucial concerns in the Atomic Force Microscope (AFM)-based recording technology. In this work, the tribological characteristics of the probe/media interface were investigated by performing wear tests using an AFM. The ranges of applied normal load and sliding velocity for the wear test were 10 to 50nN and 2 to 20 μ m/s respectively. The damage of the probe tip was quantitatively as well as qualitatively characterized by Field Emission Scanning Probe Microscope (FESEM) analysis and calculated based on Archard's wear equation. It was shown that the wear coefficient of the probe tip was in the order of $10^{-4} \sim 10^{-3}$, and significant contamination at the end of the probe tip was observed. Thus in order to implement the AFM-based recording technology, tribological optimization of the probe/media interface must be achieved.

Key Words: Atomic force microscopy(원자 현미경), Nano-wear(나노 마멸), Silicon probe tip(실리콘 탐침)

1. 서론

21 세기 정보화시대에 미디어의 발전은 고저장 밀도를 요구하는 정보저장 장치의 개발을 필요로 하게 되었고, 현재 정보저장 장치의 주류를 이루는 자기기록방식에 의한 Hard Disk Drive (HDD)는 지난 몇 년 사이에 수직자기기록 기술¹ 및 도안된 미디어 기술² 등을 이용하여 약 100 Gbit/in²에 이르는 정보저장 밀도를 구현할 수 있게 되었다. 그러나 향후 초자성한계 (super paramagnetic limit)라는 물리적 현상에 직면할 것으로 여겨진다³. 따라서 보다 높은 저장 밀도를 가지는 차세대 정보저장 장치로 제시되고 있는 여러 기술 중 Atomic Force Microscope (AFM)을 이용한 차세대 탐침형 정보저장 기술은 전도된 미세탐침과 강유전체 (ferroelectric) 물질인 Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ (PZT) 미디어의 상호 작용을 이용하여

미디어의 도매인을 분극시키고 전도된 미세탐침의 저항차이에 의해 미디어의 분극 방향을 구분함으로써 정보를 기록/재생하는 기술로 수십 nm 크기의 bit를 형성하여 1 Tbit/in² 이상의 높은 저장밀도를 가질 수 있다^{4,5}. 그러나 탐침형 정보저장 장치에서 PZT미디어와 미세 탐침의 상호 작용에 의한 탐침의 마멸은 PZT 미디어의 bit 크기 뿐만 아니라 정보를 기록/재생 수행 시에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 탐침형 정보저장 장치 기술의 실현을 위한 기초 연구로써 나노 스케일에서의 탐침 파손에 대한 체계적인 분석과 이해가 요구된다.

본 연구에서는 현재 탐침형 정보 저장장치의 미디어로 제시되고 있는 PZT 미디어^{6,7} 와 기록/재생을 위한 미세탐침의 상호 작용에 의한 마멸 특성을 분석하고자 한다. 기록매체인 미디어 시편의 형상은 상용AFM을 이용하여 표면 거칠기를 측정하였

고, 실험은 상용화된 실리콘 AFM 탐침을 이용하여 하중 및 속도에 따른 마멸 실험을 수행하였다. 마멸 실험 전 후의 미세탐침은 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)으로 관찰하여 마멸 정도를 Archard마멸 공식을 이용하여 정성적/정량적으로 비교하였다.

2. 실험시편 및 실험방법

2.1 실험시편 및 AFM 탐침

실험에서 사용된 시편은 강유전체 물질인 PZT 미디어로서 Pt(150nm)/Ti(10nm)/SiO₂(300nm)/Si 기판 위에 sol-gel 방법으로 550℃에서 30 분간 열처리를 하여 Zr/Ti 조성비가 40/60 인 시편을 100nm두께로 제작하였고 (INOSTEK Inc.), 열처리 이후의 PZT 미디어의 표면 형상은 끝단 반경이 약 15 nm인 상용 Si₃N₄ AFM 탐침을 이용하여 하중 1 nN, 속도 5 μm/s에서 5 x 5 μm² 영역을 측정하였다(Fig. 1). 측정 결과 PZT 미디어의 평균 표면 거칠기는 3.0±0.1 nm 이고 grain 크기는 430 nm 로 다소 거친 표면과 큰 grain 을 가지고 있음을 관찰 할 수 있었다. PZT 미디어와 상대 접촉을 하는 탐침은 상용 실리콘 AFM 탐침으로 캔틸레버의 스프링 상수는 0.1 ~ 0.2 N/m 이고 탐침의 끝단 반경은 약 5 ~ 8 nm 인 사각 캔틸레버를 사용하였다. Fig. 2 는 실험 전 FESEM으로 관찰한 실리콘 AFM 탐침으로 탐침의 끝단 반경은 약 6 nm로 뾰족함을 알 수 있다.

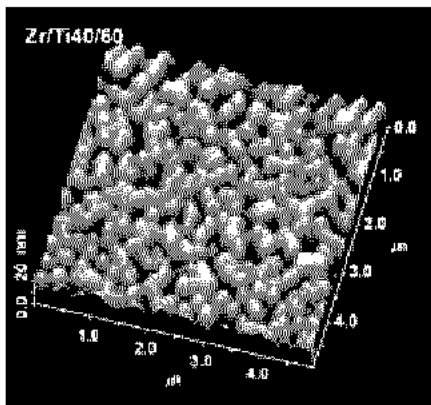


Fig. 1 3-D AFM image of PZT media with Zr/Ti ratio of 40/60.

2.2 실험방법

Fig. 3 은 미세 탐침의 마멸실험 과정을 도식화 한 것으로 상용 AFM 을 이용하였으며, 하중은 탐침이 붙어있는 캔틸레버의 굽힘을 이용하여 Zr/Ti(40/60) 시편에 대하여 10 ~ 50 nN 의 하중을 적

용하고 미끄럼 속도 2, 10, 20 μm/s 로 증가시켜 실험을 하였고 이때의 전체 마멸실험 미끄럼 거리는 각 하중 별로 4.61 cm 수행하였다. 또한 PZT 미디어에 대하여 Hertz 접촉모델을 적용하여 탐침과 미디어의 접촉압력을 계산 하였다. 그 결과 초기 최대 접촉압력은 하중 10 nN 에서 약 4.7 GPa, 50 nN 에서 약 8.0 GPa 로 계산되었다.

마멸 실험 전 후의 미세탐침은 FESEM 으로 관찰한 후 Archard 마멸 공식을 이용하여 정성적/정량적으로 분석하였다.

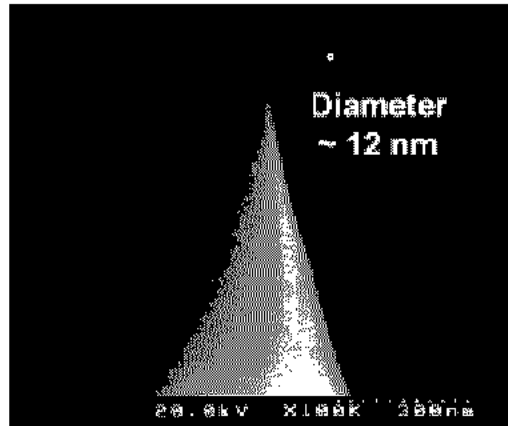


Fig. 2 FESEM image of silicon probe tip before experiment.

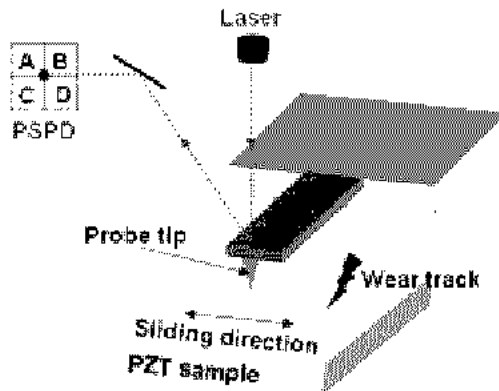


Fig. 3 Schematic of nano-wear experiment using the AFM silicon probe tip.

3. 실험결과

탐침형 정보저장 장치에서 PZT 미디어와 탐침의 상호 작용에 의한 탐침의 마멸은 PZT 미디어의 bit

크기 뿐만 아니라 정보를 기록/재생 수행 시에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 기계적인 상호작용에 의한 미세 탐침의 마멸 특성을 이해 하기 위해 본 실험에서는 10~50 nN 하중에서 2~20 $\mu\text{m/s}$ 로 미끄럼 속도를 증가시켜 미세 탐침의 마멸 정도를 정성적/정량적으로 분석하였다.

3.1 실리콘 AFM 탐침의 마멸 특성

Fig. 4는 마멸 실험 이후의 대표적인 FESEM 이미지로 마멸 실험 전의 FESEM 이미지(Fig. 2)와 비교해서 탐침의 끝단 반경이 약 29 nm 로 심각하게 마멸되었음을 관찰 할 수 있었고 실험 후 탐침의 끝단을 Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) 로 분석하였다. 그 결과 탐침의 끝단에 Pb, Zr, Ti 원소가 검출 되었는데 이는 미세 탐침 끝단에 PZT 미디어의 마멸 입자가 포함되어 있음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 전체 미끄럼 거리 4.61 cm에서 2, 10, 20 $\mu\text{m/s}$ 의 미끄럼 속도로 10, 20, 30, 50 nN의 하중을 적용하여 실험한 결과로써, Fig. 5(a),(b),(c),(d)에서는 미끄럼 거리가 증가 할수록 마멸 체적은 증가하며, 마멸계수는 감소 함을 알 수 있다. 이는 미끄럼 거리가 증가 함으로써 미세 탐침의 끝단 반경은 무너지고 접촉압력은 감소함으로써 마멸계수는 감소한다고 논 할 수 있다. 실제 Hertz 접촉모델 계산결과 30 nN의 하중에서 접촉압력은 6.7 ~ 3.0 GPa로 감소함을 알 수 있었다. 또한 하중과 미끄럼 속도가 증가 할수록 마멸계수는 증가함을 알 수 있었는데, 이는 미끄럼 속도가 증가 할수록 미디어의 asperity와 미세 탐침간의 충격에 의해 마멸률이 증가 한다고 논 할 수 있다(Fig. 6). 이상 하중 및 속도에 따른 실험결과 상용 실리콘 AFM탐침의 마멸계수는 Archard 마멸 공식을 이용하여 정량적으로 계산한 결과 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 의 범위를 값을 나타냈었다.

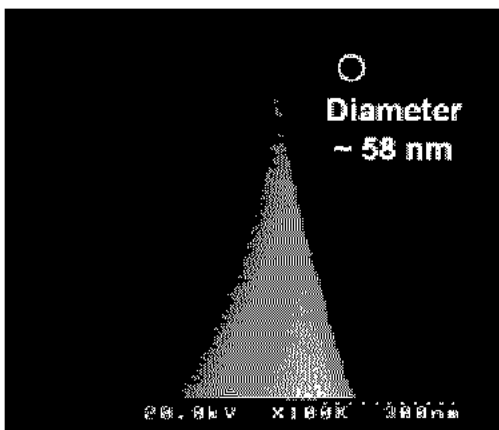
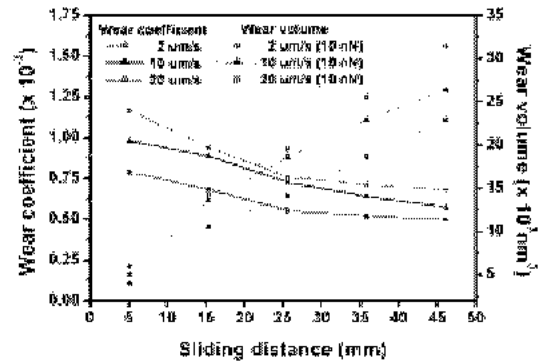
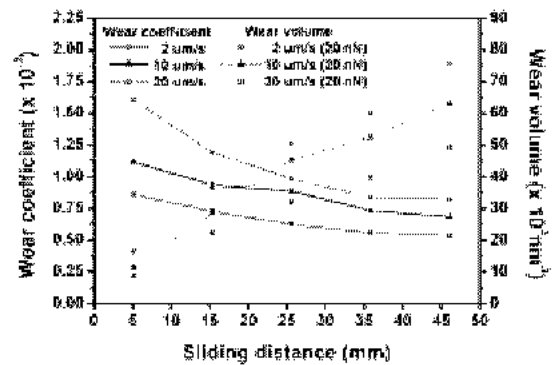


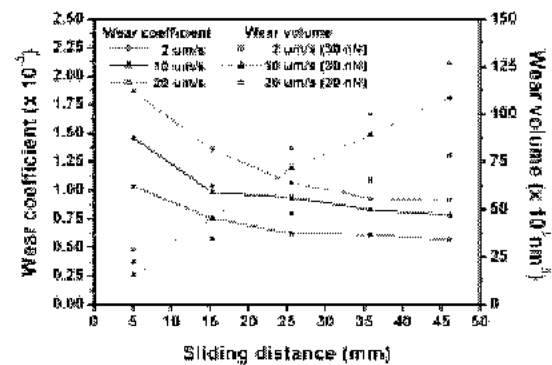
Fig. 4 FESEM image of silicon probe tip after experiment under 30 nN normal load at 10 $\mu\text{m/s}$ sliding speed after 4.61 cm sliding distance.



(a)



(b)



(c)

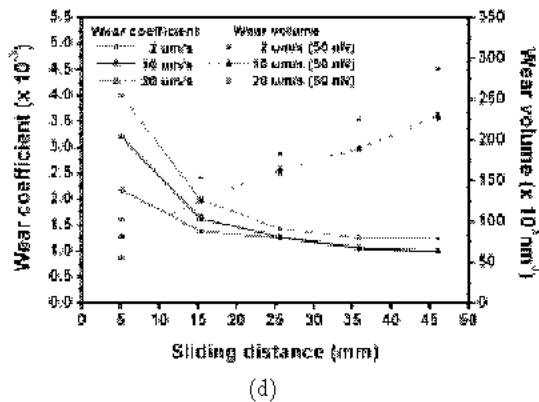


Fig. 5 Wear coefficient and wear volume of silicon probe tip under (a) 10 nN, (b) 20nN, (c) 30nN, (d) 50nN normal load at variations sliding speeds after 4.61 cm of sliding distance.

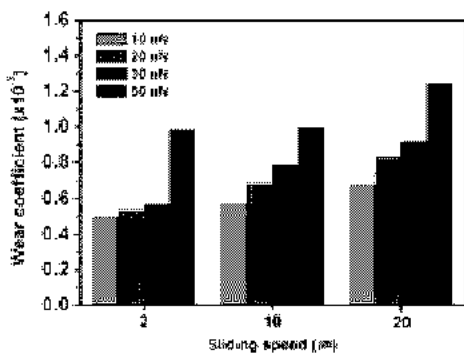


Fig. 6 Wear coefficient of silicon probe tip with respect to sliding speed after 4.61 cm sliding distance.

4. 결론

본 연구에서는 강유전체 PZT 미디어와 미세 탐침의 기계적인 상호작용에 의한 마멸 특성을 이해하기 위해 10 ~ 50 nN의 하중 범위 및 2 ~ 20 $\mu\text{m/s}$ 의 미끄럼 속도를 변화하여 탐침의 미세 마멸 정도를 정성적/정량적으로 분석하였으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상용 실리콘 AFM탐침의 마멸계수는 Archard 마멸 공식을 이용하여 정량적으로 계산한 결과 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 의 범위를 값을 나타냈다.
- 2) 총 미끄럼 거리 4.61 cm에 대하여 하중 및 미끄럼 속도가 증가 할수록 마멸계수는 증가한다.

- 3) 전체 미끄럼 거리에 대한 미세 탐침의 마멸계수는 PZT 미디어와 탐침의 상대 운동에 의하여 탐침의 끝단 반경이 무더지고 이로 인한 접촉압력의 감소로 마멸계수는 감소한다고 논할 수 있다.

후 기

이 논문은 삼성종합기술원과 한국과학재단 지정 연세대학교 정보저장기기 연구센터 (과제번호: R11-1997-042-12001-0)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Judy, J. H., "Past, present, and future of perpendicular magnetic recording," J. Mag. Magn. Mater., Vol. 235, pp. 235-240, 2001.
2. White, R. L., R. M. H. New, and R. F. W. Pease, "Patterned media: a viable route to 50 Gbit/in² and up to for magnetic recording?" IEEE Trans. Magn., Vol. 33, pp. 990-995, 1997.
3. Naberhuis, S., "Probe-based Recording Technology," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 249, pp. 447-451, 2002.
4. Park, H. S., Jung, J. H., Min, D. K., Kim, S. D., Hong, S. B., and Shin, H. J., "Scanning resistive probe microscopy: Imaging ferroelectric domains," Appl. Phys. Lett., Vol. 84, pp. 1734-1736, 2004.
5. Hong, S. B., Woo, J. W., Shin, H. J., Pak, Y. E., Colla, E. L., Setter, N., Kim, E. A. and No, K. S., "Principle of ferroelectric domain imaging using atomic force microscope," J. of Appl. Phys., Vol. 89, No. 2, pp. 1377-1386, 2001.
6. 이용하, 정구현, 김대은, 유진규, 홍승범, "PZT 박막의 나노마멸특성 연구, 한국정밀공학회지 춘계학술대회 논문집, pp. 611-614, 2004.
7. Chung, K. H., Lee, Y. H., Kim, D. E., Yoo, J. G., and Hong, S. B., "Tribological characteristics of probe tip and PZT media for AFM-based recording technology," IEEE Trans. Magn., APMRC, 2004.