초정밀 시스템의 내구성 향상을 위한 다이아몬드상 탄소 박막의 마멸특성에 관한 연구

박관우*(연세대 대학원 기계공학과), 나종주(한국기계연구원), 김대은(연세대 기계공학부)

Wear Characteristics of Diamond-Like Carbon Thin Film for Durability Enhancement of Ultra-precision Systems

K. W. Park(Graduate School, Yonsei Univ.), J. J. Rha(Korea Institute of Machinery & Materials), D. E. Kim(School of Mech. Eng., Yonsei Univ.)

ABSTRACT

Diamond-Like Carbon (DLC) thin film is a semiconductor with high mechanical hardness, low friction coefficient, high chemical inertness, and optical transparency. DLC thin films have widespread applications as protective coatings and solid lubricant coatings in areas such as Hard Disk Drive (HDD) and Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS). In this work, the wear characteristics of DLC thin films deposited on silicon substrates using a DC-magnetron sputtering system were analyzed. The wear tracks were measured with an Atomic Force Microscope (AFM). To identify the sp^2 and sp^3 hybridization of carbon bonds and other bonds Raman spectroscopy was used. The structural information of DLC thin films was obtained with Fourier transform infrared spectroscopy and wear tests were conducted by using a micro-pin-on-reciprocator tester. Results showed that the wear characteristics were dependent on the sputtering conditions. The wear rate could be correlated with the bonding state of the DLC thin film.

Key Words : Atomic force microscope(원자현미경), DC-magnetron sputtering(직류 마그네트론 스퍼터링), Diamond-Like Carbon(다이아몬드상 탄소), Fourier transform infrared spectroscopy(퓨리에 변환 적외선 분광기), Micro pin-on-reciprocator tester(정밀왕복마찰시험기), Raman spectroscopy(라만 분광기), Wear(마멸)

1. 서론

다이아몬드상 탄소(Diamond-Like Carbon, DLC) 박막은 지난 수십 년간 많은 연구가 이루어졌고, 현재에도 지속적으로 연구가 이루어지고 있다. 이러한 끊임없는 연구의 배경에는 DLC 박막의 우수한 물성과 광범위한 유용성이 있다. DLC 박막의 우수한 물성으로는 높은 경도, 내마모성, 낮은 마찰계수, 화학적 안정성 그리고 적외선(IR) 영역에서의 높은 투과율 등이 있다[1,2]. 한편 DLC 박막은 앞서 언급된 물성들의 장점을 부각시켜 산업분야에서 광범위하게 적용되고 있다.

특히 트라이볼로지(Tribology) 측면에서 볼 때, DLC 박막은 내마멸성과 우수한 마찰특성을 함께 지니고 있어 구동부의 표면보호층 및 윤활층으로 사용되고 있다[3].

본 연구에서는 Hard Disk Drive(HDD)[4,5] 및 Micro-Electro-Mechanical-Systems(MEMS)[6] 등과 같은 초정밀 시스템의 동적 접촉부위에 DLC 박막을 보호층 및 윤활층로 적용하기 위해 접촉부위에서 발생하는 DLC 박막의 마멸특성에 대한 연구를 하였다. 실험에 사용된 DLC 박막은 직류 마그네트론 스퍼터링(DC-magnetron sputtering)을 이용하여 형성하였다. 주요 고찰 내용은 증착조건에 따른 마멸특성을 규명하는 것이었다. DLC 시편의 물성분석기기로는 화학적 결합특성을 알아보기 위한 라만 분광기(Raman spectroscopy) 및 퓨리에 변환 적외선 분광기(Fourier transform infrared spectroscopy)와 마멸트랙의 형상을 관찰하기 위해 원자현미경(Atomic

force microscope)이 사용되었다. 마멸(Wear)실험은 정밀왕복마찰시험기(Micro-pin-on-reciprocator tester)를 사용하였다.

2. 실험

2.1 다이아몬드상 탄소 박막

DLC 박막은 직류 마그네트론 스퍼터링을 사용하여 형성하였다. 기판은 실리콘 웨이퍼를 사용하였고 증착 전에 RCA cleaning process로 기판을 세척하였다. 초기진공은 약 1.0 × 10^{-6} Torr를 유지하였고 작업압력은 약 3 mTorr를 유지하였다. 그 외 증착조건을 Table 1 에 정리하였고 엘립소미터로 측정한 필름의 두께는 Table 2 에 정리하였다.

Table 1 Deposition conditions of DLC thin films

No.	Temp.	Power	Time	Bias
DLC specimen 1	300 ℃	400 W	70 min	0 V
DLC specimen 2	300 ℃	400 W	70 min	200 V
DLC specimen 3	200 ℃	400 W	70 min	200 V
DLC specimen 4	300 ℃	500 W	70 min	200 V

Table 2 Thicknesses of DLC thin films

Specimen	DLC 1	DLC 2	DLC 3	DLC 4
Thickness (nm)	212	183	153	146

2.2 마멸실험

마멸 실험은 정밀왕복마찰시험기를 사용하였다. 적용하중은 10 �mN 과 20 ㎜N 이고 이는 초정밀 시스템의 작동부에 가해지는 하중이 수십 ㎜N 이하임을 고려한 것이다. 그 밖의 실험조건으로 팬은 다이아몬드 팁(반경 50 ㎛)을 사용하였고 선속도는 4 ㎜/s 로 정했다. 미끄럼거리는 1 ㎜ 이고, 대기환경의 무 윤활조건에서 실험이 수행되었다.

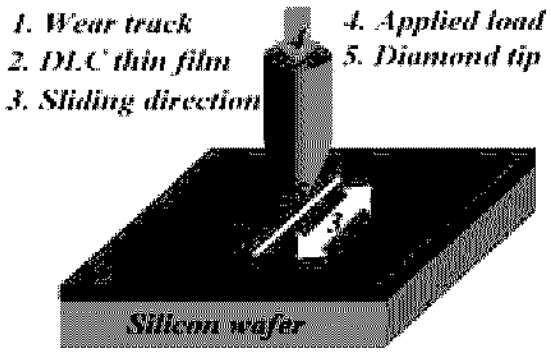

Fig. 1 Schematic of wear test

3. 결과

3.1 라만 분석

DLC 박막의 라만 분석 결과, Fig. 2 에서와 같이 D band와 G band가 각각 약 1380 cm^{-1}과 약 1580 cm^{-1}에서 관찰되었다. G band가 약 1580 cm^{-1}에서 관찰된 것으로 미루어 볼 때, 모든 시편은 Graphite에 가까울 것으로 판단된다.

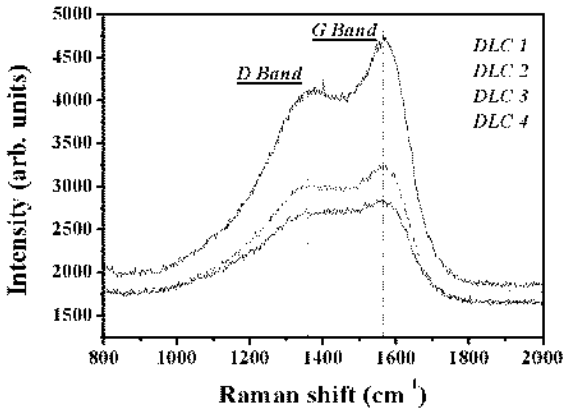

Fig.2 Raman spectra of DLC thin films

한편, 하중에 따른 I_D / I_G와 시편의 경도를 Fig. 3 에 도시하였다.

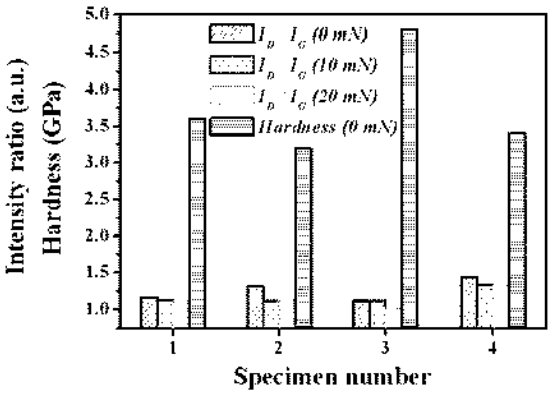

Fig. 3 Intensity ratio / Hardness of DLC thin films

Fig. 3 에서 마멸실험 전 시편(0 mN)의 I_D / I_G 와 경도를 비교해보면 반비례함을 알 수 있다. 실험하중(10 mN, 20 mN)에 의해 변형된 마멸트랙의 I_D / I_G는 높은 실험하중을 받을 수록 작아지는 경향을 보였다. I_D / I_G 가 감소하면 경도가 증가하는 경향에 따라, 마멸트랙은 트랙 외 부분보다 더 경해진 것으로 판단되고 20 mN 하에서 마멸실험을 한 시편 3 의 트랙이 가장 경할 것으로 판단된다.

실험하중이 라만 분광스펙트럼의 G peak 위치에 미치는 영향은 Fig. 4 에서와 같이 비례함을 알 수 있었다. 이는 기존의 연구에서[7] 보고되었고 이로서 마멸트랙의 내부는 시편의 다른 부분보다 높은 잔류응력을 지님을 알 수 있었다.

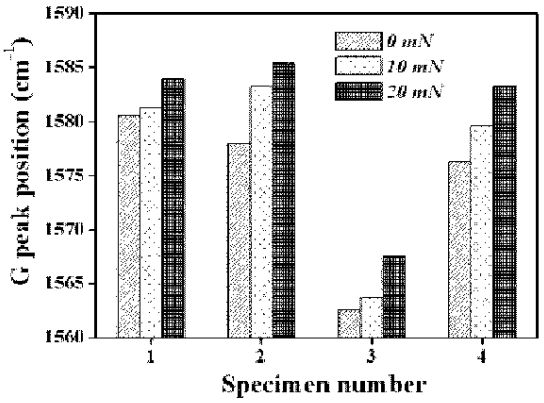

Fig. 4 G peak positions of DLC thin films

3.2 적외선 분석

FT-IR정성분석을 통한 흡수피크의 위치로부터 시편의 구조를 알아보았다[8]. 분석결과 Fig. 5 에서와 같이 여러 개의 흡수 피크를 확인할 수 있었다. 이 중 본 연구에서 사용된 수소가 적게 포함된 DLC 박막과 관련하여 생각할 수 있는 피크는 관찰되지 않았다. 이는 박막에 흑연성분이 많이 존재하여 적외선의 투과가 적었기 때문으로 추정된다. 표시된 피크들은 기판인 실리콘과 공기중의 수증기나 이산화탄소 등이 관련되어 있는 진동모드로 여겨진다.

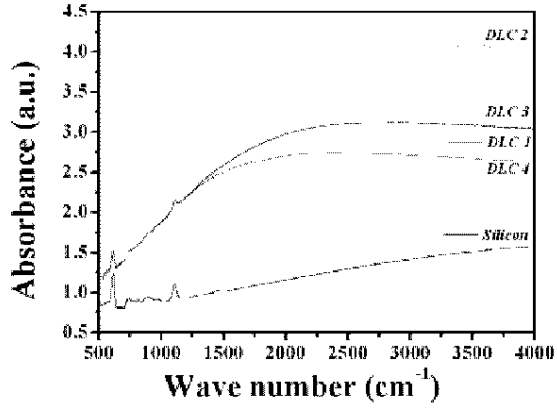

Fig. 5 FT-IR spectra of DLC thin films

3.3 마멸 특성

실험에 사용된 DLC 박막 시편의 하중에 따른 마멸률을 Fig. 6 에서 보여주고 있다. 마멸률은 마멸트랙의 장축 중앙부를 기준으로 측정한 단면에 트랙의 길이를 곱하여 얻은 마멸부피를 가지고 계산하였다. 20 mN의 실험하중을 받은 시편 3 이 가장 낮은 6.5 × 10^{-6} mm^3/N m 의 마멸률을 보였고, 10 mN의 실험하중을 받은 시편 4 가 가장 높은 2.0 × 10^{-5} mm^3/N m 의 마멸률을 보였다. 시편 3 과 시편 4 의 마멸트랙에 대한 AFM 이미지를 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 시편 3 은 측면에 Burr가 발생한 것을 확인 할 수 있고, 시편 4 의 경우는 Burr가 없이 부드럽게 트랙이 형성된 것을 알 수 있다.

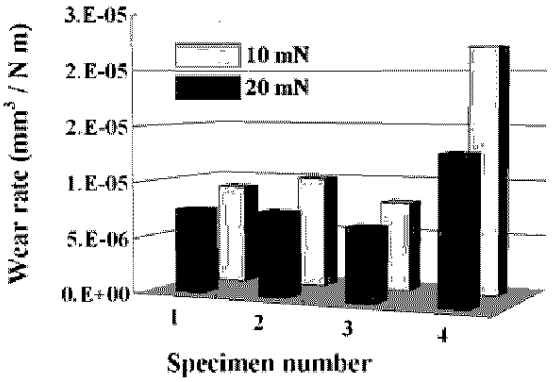

Fig. 6 Wear rates of DLC thin films

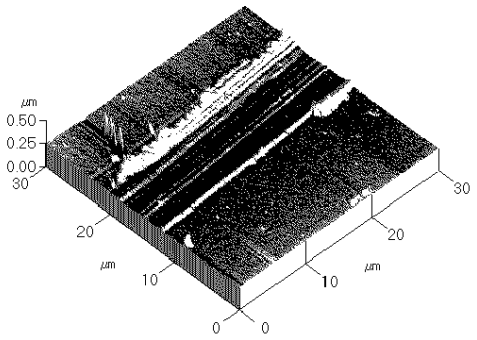

Fig. 7 Wear track of DLC 3

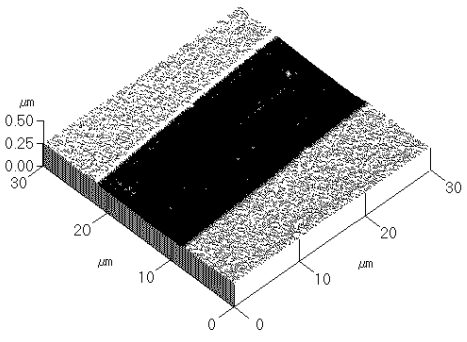

Fig. 8 Wear track of DLC 4

4. 결론

본 연구에서는 다양한 측정 및 정밀왕복마찰시험기를 이용하여 직류 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 DLC 박막의 마멸특성에 대하여 고찰하였다.

1) 라만 분석을 통하여, 모든 시편은 Graphite 성분이 많이 포함되어 있는 것을 알게 되었다. 또한 모든 시편에서 마멸실험 후 발생된 마멸트랙은 박막의 다른 부분보다 경도가 높게 나오는 결과를 얻었다.

2) 가장 높은 경도를 지닌 시편 3 은 20 mN 하에서 마멸실험을 실시하였을 때, 가장 낮은 마멸률(6.5×10^{-6} ㎟/N m)을 보인 반면 마멸트랙에 Burr가 생성됨을 확인 할 수 있었다.

3) 가장 높은 마멸률을 가지는 시편 4 는 트랙에 Burr 가 생성되지 않았고, 이는 다른 시편에 비해 상대적으로 Graphite 성분이 많아 접촉면에서 층 밀리기 현상이 지배적인 영향으로 작용하였기 때문으로 판단된다. 즉 가장 낮은 마멸률을 지닌 시편 3 에 비해 시편 4 는 자기 회생적 윤활현상이 보다 더 발현된 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 한국기계연구원 재료기술연구소와 2004 년도 산업자원부 산업기술개발사업(과제번호: 10003359)의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Robertson, J., "Diamond-like amorphous carbon," Materials Science and Engineering, Vol. 37, pp. 129 - 281, 2002.
2. Robertson, J., "Properties of Diamond-like carbon," Surface and Coating Technology, Vol. 50, pp. 185 - 203, 1992.
3. Singer, I. L., Dvorak, S. D., Wahl, K. J., and Scharf, T. W., "Role of third bodies in friction and wear of protective coatings," Vol. 21, pp. 232 - 240, 2003.
4. Bhushan, B., "Chemical, mechanical and tribological characterization of ultra-thin and hard amorphous carbon coatings as thin as 3.5 nm: recent developments," Diamond and Related Materials, Vol. 8, pp. 1985 - 2015, 1999.
5. Machcha, A. R., Talke, F. E., and Azarian, M. H., "An investigation of nano-wear during contact recording," Wear, Vol. 197, pp. 211 - 220, 1996.
6. Bandorf, R, Lüthje, H., and Staedler, T., "Influencing factors on microtribology of DLC films for MEMS and microactuators," Diamond and Related Materials, 2004.
7. Shin, J.-K., Lee, C. S., Lee, K.-R., and Eun, K. Y., "Effect of residual stress on the Raman-spectrum analysis of tetrahedral amorphous carbon films," Appl. Phys. Lett., Vol. 78, pp. 631-633, 2001.
8. Maas, J. H. van der, "Basic infrared spectroscopy," Heyden & Son, 1972.