

MEMS 소자의 고체윤활박막으로 활용하기 위한 다이아몬드상 카본 박막의 트라이볼로지 특성 분석

A Study on Tribological Properties of Diamond-like Carbon Thin Film for the Application to Solid Lubricant of MEMS Devices

최원석¹, 홍병유^{1,2,a}

(Won Seok Choi¹ and Byungyou Hong^{1,2,a})

Abstract

Hydrogenated Diamond-like carbon (DLC) films were prepared by the radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (RF PECVD) method on silicon substrates using methane (CH₄) and hydrogen (H₂) gas for the application to solid lubricant of MEMS devices. We have checked the influence of varying RF power on tribological properties of DLC film. We have checked their performance as two kinds of method such as FFM (Friction Force Microscope) and BOD (Ball-on-Disk) measurement. The friction coefficients and the contact number of cycles to steady state decreased as the increase of RF power with FFM and BOD measurement, respectively.

Key Words : DLC(Diamond-like carbon), PECVD(Plasma enhanced vapor deposition), BOD(Ball-on disk), MEMS(Micro electro mechanical system), FFM(Friction force microscope)

1. 서론

DLC (Diamond-like Carbon) 박막은 높은 내마모성과 낮은 마찰 계수, 화학적 안정성 및 적외선 영역에서의 높은 투과율과 낮은 광 반사도, 높은 전기저항과 낮은 유전율, 전계방출특성 등 여러 가지 장점을 가진 물질이다[1]. 최근에는 DLC 박막의 여러 장점들과 산과 염기 유기용매에 대한 화학적 안정성으로 인하여 인조관절에서 인공심장의 판막에 이르기까지 의공학 관련 부품소재로 응용되고 있으며 내구성과 안정성에 있어서 탁월한 성능을 보여주고 있다[2]. 또한 DLC 박막의 높은 경도와 낮은 마찰 계수, 부드러운 박막 표면 (수nm의 RMS 거칠기)의 장점을 살려 마그네틱 미디어와 하드디스크의 슬라이딩 표면에 사용되어지고

[3], MEMS (Micro-Electro Mechanical System) 소자와 MMAs (Moving Mechanical Assemblies)의 고체윤활코팅으로 활용하여 미세기계의 내구성과 성능 향상을 도모할 수 있다[4]. 이와 같이 DLC 박막은 다양한 분야에 응용되고 있으며, 박막이 지닌 여러 가지 장점들로 인하여 더 많은 분야에 응용될 가능성을 지닌 물질이다. 그러나 수 μm 이상의 두께에서 박막이 높은 잔류응력 (residual stress)을 가지고, 열에 취약하여 이의 개선에 관한 연구들이 진행되어지고 있다[5,6]. 따라서 사용되는 목적에 따라 용도에 맞는 양질의 DLC 박막을 합성하기 위해선 합성 장치의 개발과 다양한 실험을 통한 최적의 합성조건 도출 등의 노력이 요구된다. 또한 DLC 박막 합성시의 여러 가지 증착 방법에 따른 박막 물성에 대한 재현성 확보 및 박막 증착에 관한 명확한 메커니즘 규명이 아직까지는 불분명하여 이에 관한 연구가 시급하다.

따라서 본 연구에서는 MEMS 소자와 MMAs의 고체윤활코팅으로 사용가능한 DLC 박막을 RF PECVD (Plasma Enhanced Vapor Deposition) 방

1. 성균관대학교 플라즈마 응용 표면기술 연구센터
(경기도 수원시 장안구 천천동 300)
2. 성균관대학교 정보통신공학부
a. Corresponding Author : byhong@skku.edu
접수일자 : 2006. 9. 28
심사완료 : 2006. 10. 12

식으로 합성하고 합성 RF 전력에 따른 MEMS 운 활박막으로서의 DLC 박막의 트라이볼로지 특성 변화를 박막에 훼손을 주지 않는 FFM 방식과 기존의 방식으로 박막에 훼손을 주는 BOD 방식을 사용하여 비교 관찰하였다.

2. 실험

DLC 박막은 메탄 (CH_4)과 수소 (H_2)를 반응가스로 RF PECVD 장비를 사용하여 합성하였다. P-type Si (100) 기판을 사용하였으며, TCE, 아세톤, 메탄올, D.I. water에서 각각 10분간 초음파 세척 후 D.I. water와 10:1의 비율로 희석된 HF용액에서 45초간 처리하여 Si 기판표면의 자연 산화막을 제거하였다. 준비된 기판을 반응기에 넣고 펌프를 사용하여 2 mTorr 이하까지 배기 후에 반응기 내 플라즈마의 안정화와 기판표면의 불순물제거를 위하여 5분간 1 Torr 분위기에서 80 sccm의 수소를 사용하여 표면 전처리를 하였다. DLC 박막의 합성시엔 반응기를 1 Torr로 유지시킨 상태에서 메탄과 수소 가스를 각각 20 sccm과 80 sccm 씩 유입시켰다. 모든 실험은 상온에서 실시하였다. 합성된 DLC 박막의 트라이볼로지 특성은 FFM (Friction Force Microscope: Seiko, SPA-400) 장비와 BOD (Ball-on Disk: hand made) 장비를 사용하여 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

DLC 박막의 마찰 계수를 SPM 장비의 FFM 모드를 통해 측정하였다. 마찰 계수를 분석하는데 있어 일반적으로 사용되는 기술은 금속 볼과 박막사이의 마찰 특성을 측정하여 마찰 계수를 얻는 방법인 BOD 방식이 주로 이용되고 있지만, 박막에 손상을 주지 않으며 cantilever 팁(tip)과 박막 표면 원자 사이의 인력과 척력을 이용한 SPM의 FFM 모드를 통해 마찰 계수를 측정하는 연구가 최근 이루어지고 있다[7]. FFM은 AFM 접촉 모드(contact mode) 측정법의 한 가지 방법으로서 마찰력의 분포를 동시에 측정하는 SPM 측정 모드를 일종으로 측정 중 cantilever의 틀어짐으로 변화된 레이저를 측정하여 cantilever의 틀어지는 변위(FFM 신호)의 정도를 화상화하여 마찰력의 차이를 얻는 원리로 동작된다. 이렇게 측정된 100 W의 RF 전력으로 합성한 DLC 박막의 FFM 신호를 그림 1에 정리하였다. 측정시 인가한 부하는 2, 4, 8, 16 nN이다. 이 그림으로부터 각각의 부하에 해당

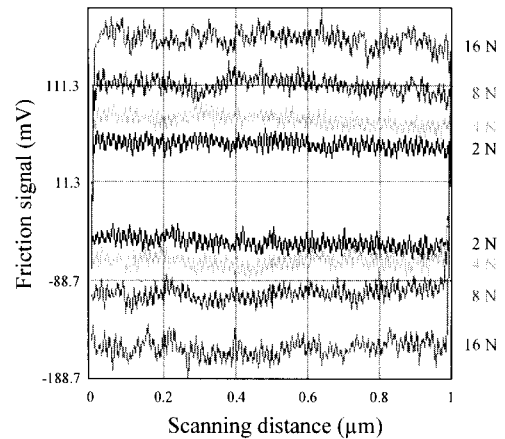


그림 1. 100 W의 RF 전력에서 합성된 DLC 박막의 FFM 분석을 통해 얻어진 마찰 신호.

Fig. 1. Friction signal of DLC thin film synthesized 100 W RF power obtained from the FFM measurement.

하는 변수 (FFM) 값을 구해서 식 (1)에 대입하여 마찰력 F_t (Friction force)를 구할 수 있다[8].

$$F_t = \frac{0.4 \times \left(\frac{d}{L}\right) \times C_t \times FFM \text{ (mV)}}{S_{dif}} \quad (1)$$

C_t , S_{dif} : cantilever 팁의 탄성계수 (483.3 N/m)와 감도 (400 mV/nm)

DLC 박막의 RF 인가 전력에 따른 FFM 측정 후 측정된 값을 식 (1)에 의해 계산된, 인가한 부하에 따른 마찰력 값들을 그림 2(a)에 정리하였다. 이 그림에서 인가한 부하에 따른 마찰력의 기울기 값이 각각의 마찰 계수 (friction coefficient)에 해당하며 이들 기울기를 통해 계산된 마찰 계수를 그림 2(b)에 정리하였다. RF 인가 전력이 50 W에서 175 W로 증가할수록 박막의 마찰 계수는 0.236에서 0.162로 감소하였다. FFM 분석은 마찰 계수를 구하는 일반적인 BOD 분석처럼 박막을 손상시키지 않고 박막 표면으로부터 마찰 계수를 구하는 방법이기때 박막 자체의 점성, 표면 에너지, 표면 거칠기, 표면 전하의 분포, 표면의 조성의 변화에 따른 박막과 측정에 사용된 cantilever 팁 사이의 Van der Waals 힘의 변화 등과 같은 박막 자체의 표면상태가 마찰 계수에 큰 영향을 미친다. 따라서 RF 인가 전력이 증가함에 따라 기판에 충돌하는 이온들의 가속과 기판의 온도상승의 영향으로 인

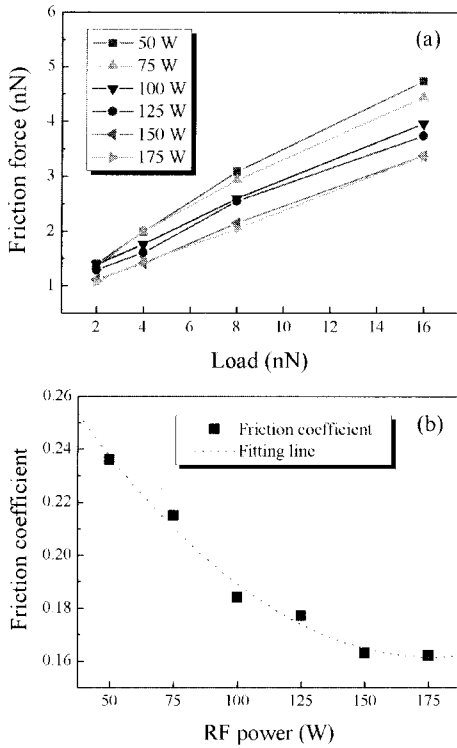


그림 2. SPM의 FFM 모드에서 측정된 DLC 박막의 마찰 특성, (a) 인가한 부하에 따른 마찰력, (b) RF 인가 전력에 따른 DLC 박막의 마찰 계수.

Fig. 2. Friction characteristics of DLC thin film from FFM mode of SPM measurement, (a) friction force according to the enhanced load, (b) friction coefficient according to the RF power.

하여 DLC 박막이 graphite-like 구조로 조밀하게 합성되어 마찰 계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 FFM 분석을 통한 마찰 특성은 표면 거칠기와 밀접한 관계를 나타내고 있으며 RF 인가 전력에 따른 정확한 마찰 특성을 확인하기 위하여 BOD 분석을 수행하였다.

BOD 방식의 마찰 특성 측정은 일정한 힘과 속도가 주어진 금속 볼과 DLC 박막과의 접촉에 의해 이루어지므로, 박막의 표면 거칠기 외에도 박막과 기판과의 접착력, 잔류응력, 경도 등의 박막의 물성과 계면상태의 영향을 받는다. 그림 3은 본 실험에 사용한 BOD 분석 장비의 개략도이다. 60 rpm으로 회전하는 판위에 놓인 시편의 표면에 접촉되는 핀(pin)에 설치된 금속 볼을 통하여 1 Hz

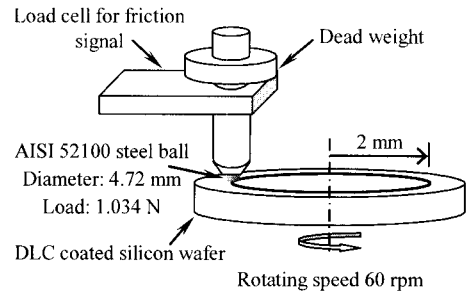


그림 3. BOD 장비의 개략도.
Fig. 3. Schematic of BOD measurement.

마다 측정된 데이터는 아날로그/디지털 (A/D) 컨버터를 통하여 컴퓨터로 저장된다. 저장된 데이터는 신호처리 프로그램을 통해 COF (Coefficient of Friction) 신호로 처리되었다. BOD 측정은 대기 중 상온 (25 °C)에서 이루어졌으며 측정시의 상대습도는 30 %였다.

그림 4는 BOD 방법으로 얻어진 COF 신호의 한 예를 보여준다. 측정된 DLC 박막은 175 W의 RF 전력에서 합성되었으며 BOD 방법으로 얻어진 COF 신호는 두 범위로 구분된다. 초기단계의 높은 마찰 영역 (high friction region)과 그 이후의 정상상태 (steady state) 영역으로 구분될 수 있으며, 이 시편의 경우 일정한 COF 값을 갖는 정상상태 영역이 850 사이클에서 시작됨을 알 수 있다. 850 사이클 이후 3,600 사이클 (1시간 측정) 사이의 마찰 계수는 0.07 ± 0.02 의 낮은 값으로 안정하게 유지

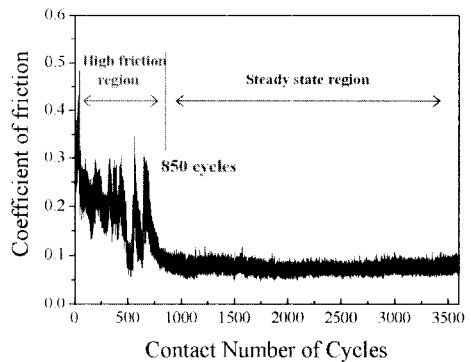


그림 4. 175 W에서 합성한 DLC 박막의 측정 회전수에 따른 마찰 특성.

Fig. 4. Friction characteristics of DLC thin film synthesized 175 W RF power according to the contact number of cycles.

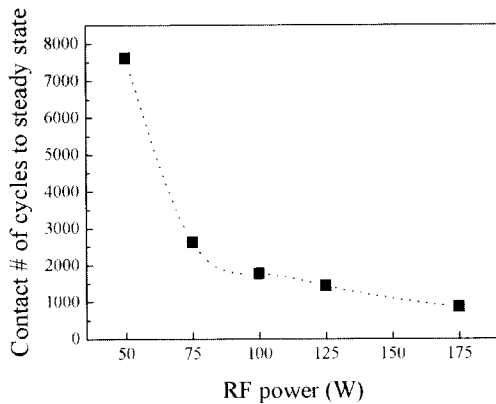


그림 5. RF 인가 전력에 따른 정상상태 도달 회 전수.

Fig. 5. Contact number of cycles to steady state according to the RF power.

되는 것을 알 수 있다. 이렇게 측정된 정상상태 영역의 시작점들을 그림 5에 정리하였다. 박막의 기계적 특성 혹은 마찰 특성의 관점에서 낮은 마찰 계수와 긴 수명을 가지는 것 이외에도 빠른 시간 안에 정상상태에 도달하는 것 또한 중요한 마찰 특성 중의 하나이다. DLC 박막의 경우 측정 도중 발생하는 많은 작은 조각들이 마찰을 일으키는 (측정 중 트랙 주위에 의해 만들어지는) 파인 부분들을 배워주는 자체윤활 기능을 통해서 평탄하고 부드러운 표면이 얻어지며 마찰 계수가 감소하는 역할을 한다[9]. 그림 5를 통해서 알 수 있듯이 합성 RF 전력이 증가할수록 정상상태의 도달시간이 짧아지며 마찰 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 MEMS 소자와 MMAs의 고체윤활코팅으로 사용가능한 DLC 박막을 RF PECVD 방식으로 합성하고 합성 RF 전력에 따른 윤활박막으로서의 DLC 박막의 트라이볼로지 특성변화를 관찰·분석하였다. DLC 박막의 합성엔 13.56 MHz RF PECVD 방식으로 메탄과 수소를 반응가스로 사용하여 Si 기판위에 합성하였다. 박막 합성시 DLC 박막의 구조적 특성변화에 민감한 합성 RF 전력의 변화를 (50, 75, 100, 125, 150, 175 W) 주어 합성하였다. 박막에 손상을 가하지 않는 SPM의 FFM 모드를 통한 관찰과 BOD 슬라이딩 방식

의 두 가지 방법을 사용하여 RF 전력에 따라 합성된 DLC 박막의 고체윤활박막으로서의 특성을 관찰하였다. 합성시 인가한 RF 전력이 증가함에 따라 DLC 박막이 graphite-like 구조로 조밀하게 합성되어 마찰 계수가 감소하는 경향을 나타내는 것을 FFM 분석을 통하여 확인할 수 있었으며, 정상상태의 도달시간이 짧아지며 마찰 특성이 향상되는 것을 BOD 분석을 통해 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단 우수연구센터사업 (센터번호: R-11-2000-086-000-0)과 2006년도 성균관대학교 Post-Doc. 연수지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] A. Grill, "Diamond-like carbon: state of the art", *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 8, p. 428, 1999.
- [2] R. Hauert, "A review of modified DLC coatings for biological applications", *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 12, p. 583, 2003.
- [3] M. Schlatter, "DLC-based wear protection on magnetic storage media", *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 11, p. 1781, 2002.
- [4] W. I. Milne, "Electronic devices from diamond-like carbon", *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 18, p. S81, 2003.
- [5] 전영숙, 최원석, 홍병유, "PECVD로 증착된 금속층을 포함하는 DLC 박막의 기계적 특성 분석", *전기전자재료학회논문지*, 19권, 7호, p. 631, 2006.
- [6] W. S. Choi, "Tribological properties of annealed diamond-like carbon film synthesized by RF PECVD method", *Trans. EEM*, Vol. 7, No. 3, p. 118, 2006.
- [7] B. Bhushan, "Nanotribology and Nanomechanics", Springer, 2005.
- [8] SEIKO SPA400 FFM mode guide book.
- [9] H. Y. Ueng and C. T. Guo, "Diamond-like carbon coatings on microdrill using an ECR-CVD system", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 249, p. 246 2005.