

## 다층 다이아몬드상 카본 필름의 윤활 및 마모 거동

김명근 · 이광철 · 은광용

한국과학기술연구원, 박막기술연구센터

### 서 론

Diamond-like Carbon (DLC) 필름은 다이아몬드와 유사한 높은 경도, 내마모성 그리고 화학적 안정성등 매우 우수한 물리화학적 특성을 갖고 있는 박막재료이다. 그러나 DLC 필름의 마찰계수는 상대습도에 크게 의존한다는 것이 잘 알려져 있다. 따라서 DLC 필름에 금속이나 Si 등 제 3의 물질을 첨가하여 마찰계수의 주위환경 의존성을 감소시켜 광범위한 환경에서 낮고 안정된 마찰거동을 얻기 위한 연구들이 많이 시도되고 있다. 특히 Okuri, Miyake 등은 DLC 필름에 Si를 첨가하여 상대습도에 영향을 받지 않으며 진공중에서와 유사한 마찰계수를 보이는 실험 결과들을 보고하고 있다. 그러나, Si 함유 DLC (Si-DLC) 필름의 내마모 특성은 DLC 필름에 비해 크게 저하된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 DLC 필름 위에 Si-DLC 필름을 코팅한 2층 구조의 다층박막을 성장시킨 뒤, 장시간 행하여지는 마모에 의해 각 층과 steel ball 사이에서 발생하는 마모거동 및 tribochemical reaction을 조사하였다. 특히, 다층 DLC 필름에서 Si-DLC/DLC 필름층의 전환에 따른 마찰계수 변화, steel ball scar 표면에 생성된 debris의 형성 거동과 필름의 마모율에 대하여 조사하였다. 이와 함께 상대재료의 교체로 일어나는 다층 DLC 필름의 마모현상도 고찰하였다.

### 실험방법

다층 DLC 필름은 13.56 MHz를 사용하는 r.f. PACVD 장치를 사용하여 600  $\mu\text{m}$  두께의 (100) 방향의 Si wafer 시편 위에 합성되었다. 다층 DLC 필름은 Si-DLC 와 순수한 DLC 두층으로 구성되었다. 순수한 DLC 층은 장시간의 마모실험을 수행하기 위해 2.5  $\mu\text{m}$  두께로 성장시켰으며, 그 위에 0.2  $\mu\text{m}$  두께의 Si-DLC 필름의 표면층을 성장시켰다. 표면층의 Si 함량은 혼합가스내의 회석 silane 분율을 조절하여 2.2~21 at.% 까지 변화시켰다. 다층 DLC 필름의 마찰계수는 ball on disk type의 tribometer를 사용하여 대기 중에서 측정하였다. 상대습도 50 ~ 70 % 사이에서 600 gf의 normal load와 0.2 m/sec. 의 회전속도를 유지하며, 44,000 cycle과 158,000 cycle 동안 마모 실험을 수행하였다. 윤활 특성 평가를 위한 상대재료로는 AISI 52100 (직경 6mm) bearing ball을 사용하였으며 생성된 필름 트랙 반경은 8.7 mm 였다. 마모실험 후 steel ball의 wear scar 표면에 생성된 층과 debris의 성분을 AES (Auger Electron Spectroscopy) 로 조사하였으며, 이들의 모양은 SEM과 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 필름의 마모량을 산출하기 위하여 표면에 생성된

트랙의 단면을  $\alpha$ -step으로 측정하였다.

## 결과 및 고찰

표면층으로 합성된 Si-DLC 필름내의 Si 함량이 증가함에 따라 다층 DLC 필름과 AISI 52100 steel ball 사이에 0.1 이하의 낮은 마찰계수를 유지하는 기간이 증가하였다. 44,000 cycle과 158,400 cycle의 마모실험 후 측정된 다층 DLC 필름의 마모율은 각각  $2.5 \times 10^{-8} \sim 1.8 \times 10^{-7}$  mm/rev. 과  $7.1 \times 10^{-9} \sim 1.8 \times 10^{-8}$  mm/rev. 로 나타났다. 158,400 cycle의 마모실험 후 측정된 마모율은 내마모 특성이 우수한 DLC 필름보다도 2배 정도 우수한 것으로 나타났다. 마모시험에 의해 형성된 debris의 조성을 분석한 결과, 이런 낮은 마찰계수와 우수한 내마모 특성은 steel ball의 wear scar 표면을 덮고 있는 Si oxide debris 층의 형성에 따른 결과로 판단되었다. 또한, 이러한 steel ball의 wear scar 표면에 형성된 debris 층을 제거하여도, 새로운 Si oxide debris 층이 wear scar 표면에 다시 생성되어 낮은 마찰계수를 유지하고 있었다.

## 결론

내마모특성이 뛰어난 순수한 DLC 필름 위에 대기 중에서 뛰어난 윤활 특성을 보이는 Si 함유 DLC (Si-DLC) 필름을 합성하므로써, 우수한 내마모특성과 윤활특성을 가지는 복합막의 형성이 가능하였다. 복합막의 내마모특성은 순수한 DLC 단층막의 경우보다도 2배 정도 향상되었으며, 습도 50-70%의 대기중에서 마찰계수는 0.1 미만을 유지하고 있었다. 이러한 우수한 내마모 윤활특성은 표면 Si-DLC층의 마모에 따른 Si oxide 형태의 debris가 wear scar에 치밀하게 부착되어 윤활막으로 작용하면서, 필름의 마모 또한 억제하기 때문임을 알 수 있었다. Wear scar에 존재하는 debris층의 형성거동과 조성은 표면층의 Si 조성에 민감하게 변화하였다. 표면층의 Si 함량이 적을 때에는 장시간 마모에 따라 Si oxide 형태의 debris층이 사라지고 다시 Fe oxide 형태의 debris층이 형성되면서 마찰계수가 다시 증가하는 경향을 보이고 있었다. 그러나, Si 함량이 증가하면서 scar 표면의 Si oxide 형태의 debris층은 안정되게 유지되면서 0.1 미만의 낮은 마찰계수가 계속 유지되었다. 그러나, 표면층의 Si 조성이 15 at.%를 넘으면, Ningkol 형태의 Fe oxide debris가 형성되면서 마찰계수가 증가하고 불안정해 지는 경향이 관찰되었다.