

다층 다이아몬드상 카본 필름의 윤활 및 마모 거동

김명근 · 이광렬 · 은광용

한국과학기술연구원, 박막기술연구센터
(1997년 10월 22일 접수)

Tribological behavior of multi-layered diamond-like carbon films

Myoung-Geun Kim, Kwang-Ryeol Lee and Kwang-Yong Eun

Thin Film Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, P.O. Box 131,
Cheongryang, Seoul 130-650
(Received October 22, 1997)

요 약 - 13.56 MHz를 사용하는 r.f. PACVD(Plasma assisted chemical vapor deposition) 방법으로 다층 다이아몬드상 카본(DLC) 필름을 Si wafer 기판 위에 합성하였다. 다층 DLC 필름은 2.5 μm 두께의 순수한 DLC 필름과 0.2 μm 두께의 Si이 함유된 Si-DLC 필름으로 구성되었으며, ball on disk type의 tribometer를 이용하여 대기 중에서 다층 DLC 필름의 마모거동을 고찰하였다. 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 $2.5 \times 10^{-8} \sim 1.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ 과 $7.1 \times 10^{-9} \sim 1.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ 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.

Abstract - Multi-layer diamond-like carbon (DLC) films were deposited by 13.56 MHz r.f. PACVD method. Multi-layer DLC film was composed of 2.5 μm thick pure DLC film and 0.2 μm thick Si incorporated DLC (Si-DLC) film as a surface layer. Tribological behaviors of the multi-layer DLC film were investigated with a ball-on-disk type tribometer in ambient atmosphere using AISI 52100 steel ball. Low friction coefficient (<0.1) period increased with increasing the Si content in the surface Si-DLC film. The wear rate after 44,000 cycles and 158,400 cycles were the $2.5 \times 10^{-8} \sim 1.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ and $7.1 \times 10^{-9} \sim 1.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{rev.}$, respectively. The wear rate of the multi-layer DLC film after 158,400 cycles was about 2 times smaller than that of pure DLC films of 2.7 μm thickness. This high wear resistance and low friction coefficient was caused by the formation of Si oxide layer on the wear scar surface, as confirmed by the debris composition analysis. It was further shown that this Si oxide debris layer on the wear scar surface is formed again even after removing the debris of the steel ball, which maintain the low friction coefficient between multi-layer DLC films and steel ball.

1. 서 론

Diamond-like Carbon(DLC) 필름은 다이아몬드와 유사한 높은 경도, 내마모성 그리고 화학적 안정성등 매우 우수한 물리화학적 특성을 갖고 있는 박막재료이다. 또한 DLC 필름은 smooth한 합성 표면, 낮은 마찰계수 및

우수한 내마모 특성을 갖고 있어 고체 윤활 박막으로의 응용을 위한 활발한 연구가 진행 중이다. 이러한 응용 예로는 hard disk나 VCR head drum의 보호막, 혹은 우주항공기의 bearing 재료 코팅 등을 들 수 있다[1-2].

그러나 DLC 필름의 마찰계수는 상대습도에 크게 의존한다는 것이 잘 알려져 있다. 진공 중에서 DLC 필름

과 steel ball 사이의 마찰계수는 0.05의 낮은 마찰계수를 보이지만, 상대습도가 증가함에 따라 마찰계수는 0.2~0.3까지 크게 증가한다[3-4]. 따라서 DLC 필름에 금속이나 Si 등 제 3의 물질을 첨가하여 마찰계수의 주위환경 의존성을 감소시켜 광범위한 환경에서 낮고 안정된 마찰계수를 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[5-7]. 또한, Si가 첨가된 DLC 필름에서 관찰되는 마찰계수의 낮은 상대습도 의존성의 원인에 관한 연구 결과들도 함께 발표되었는데[7-9], 상대재료의 scar 표면에 흡착된 Si oxide나 hydroxide 상이 수분과 혼합된 silica-sol 상을 형성, 필름과 상대재료의 계면에서 윤활 작용을 하여 대기 중에서도 낮은 마찰계수를 나타낸다는 설명이 가장 유력하다[7,9].

그러나, Si 함유 DLC(Si-DLC) 필름의 내마모 특성은 DLC 필름에 비해 크게 저하된다는 단점을 가지고 있다[8,10]. 따라서, Meneve 등은 높은 내마모 특성을 갖는 a-C:H 과 대기 중에서 낮고 안정한 마찰계수를 보이는 a-Si_{0.07}C_{0.93} 필름을 혼합한 다층 DLC 필름을 성장시켜 0.1 이하의 마찰계수와 DLC 필름에 버금가는 내마모 특성을 갖는 필름을 제작하였다고 보고하였다[11]. 그들은 0.1 이하의 낮은 마찰계수를 얻기 위해서 표면 층에 Si-DLC 필름 층을 위치시켜야 하고, DLC 필름과 Si-DLC 필름의 두께와 각 층의 두께 비등이 낮은 마찰계수와 우수한 내마모 특성을 갖는 필름 제작에 중요한 인자라고 보고하였다[11]. 이와 같이 다층 필름의 조성이나 두께 등을 변화시켜 얻은 우수한 결과가 보고되고 있지만, 합성된 다층 DLC 필름의 마모 현상에 대한 깊이있는 연구는 이루어져 있지 않은 상태이다.

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 형성거동과 필름의 마모율에 대하여 조사하였다. 이와 함께 상대재료의 교체로 일어나는 다층 DLC 필름의 마모현상도 고찰하였다.

2. 실험방법

다층 DLC 필름은 13.56 MHz를 사용하는 r.f. PACVD 장치를 사용하여 600 μm 두께의(100) 방향의 Si wafer 시편 위에 합성되었다. 준비된 시편들은 일반적인 세척공정을 거친 후, Ar 플라즈마를 이용하여 3.5 mTorr의 압력과 bias 전압 -400 V에서 15분 동안 기관 표면을 dry 세척하였다. 필름 합성에 사용된 합성가스로는 벤젠(C₆H₆)과 수소로 희석된 silane(SiH₄:H₂=10:90)를 사용하였으며, 이들의 혼합가스를 이용하여 다층 DLC 필름의 각 층을 합성하였다. 챔버로 유입되는 혼합가스의 양은 8 sccm으로 고정시켰으며, 합성 압력은 10 mTorr 였다. 합성시 bias 전압은 -400 V 이었으며 필름조성에 따라 합성시간을 조절하여 다층 DLC 필름을 성장시켰다.

다층 DLC 필름은 Si-DLC 와 순수한 DLC 두 층으로 구성되었다. 그림 1은 다층 DLC 필름의 모식도이다. 순수한 DLC 층은 장시간의 마모실험을 수행하기 위해 2.5 μm 두께로 성장시켰으며, 그 위에 0.2 μm 두께의 Si-DLC 필름의 표면층을 성장시켰다. 표면층의 Si 함량은 혼합가스내의 희석 silane 분율을 조절하여 2.2~21 at.% 까지 변화시켰다. 이러한 배치는 필름 층의 전환에 따른 다층 DLC 필름의 마찰거동의 변화를 관찰하기 위함이다. 다층막과 단층막의 마모 거동을 비교하기 위하여, 단층 DLC 필름과 Si 함량이 12 at.% 인 Si-DLC 단층 필름을 2.7 μm의 두께로 합성하였다. AFM으로 측정된 합성 필름의 표면 rms roughness는 표층 Si-DLC 필름의 조성에 관계없이 22-29 Å 이었다.

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 동

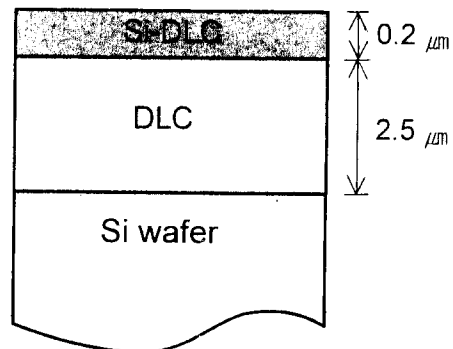


그림 1. 다층 DLC 필름을 구성하고 있는 필름층의 단면 모식도.

안 마모실험을 수행하였다. 윤활 특성 평가를 위한 상대 재료로는 AISI 52100(직경 6 mm) bearing ball을 사용하였으며 생성된 필름 트랙 반경은 8.7 mm였다. 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 α -step으로 측정하였다. 필름의 트랙을 α -step으로 측정된 단면의 원으로 가정하여 필름의 총 마모량을 계산하고, 산출된 마모량을 회전수로 나눠 합성된 필름의 마모율(wear rate, mm^3/rev)로 나타내었으며 이를 마모량 평가의 기준으로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 마모회전수에 따른 다층 DLC 필름과 steel ball 사이의 마찰계수 변화로서, Si-DLC 표면층내의 Si 함량에 따른 변화를 보여주고 있다. 그림 2a에서 볼 수 있듯이 표면층의 Si 조성이 매우 작을 때에는 초기에 0.1 이하의 마찰계수를 보이다가, 마모 회전수가 증가함에 따라 마찰계수 또한 증가하여 순수한 DLC 필름의 마찰계수와 유사한 윤활거동을 나타낸다. 44,000 회전의 마모실험이 끝난 후, 다층 DLC 필름의 트랙 단면을 α -step으로 측정한 결과 마모된 트랙의 깊이는 $0.3 \mu\text{m}$ 이었다. 따라서, 30,000 cycle을 전후한 다층 DLC 필름의 마찰계수 변화는 $0.2 \mu\text{m}$ 두께로 표면에 합성된 Si-DLC 필름을 마모시킨 steel ball이 $2.5 \mu\text{m}$ 두께의 DLC 필름층과 접촉하게 됨에 따른 결과로 생각할 수 있다. 그러나, Si-DLC 표면층 내의 Si 함량이 증가함에 따라,

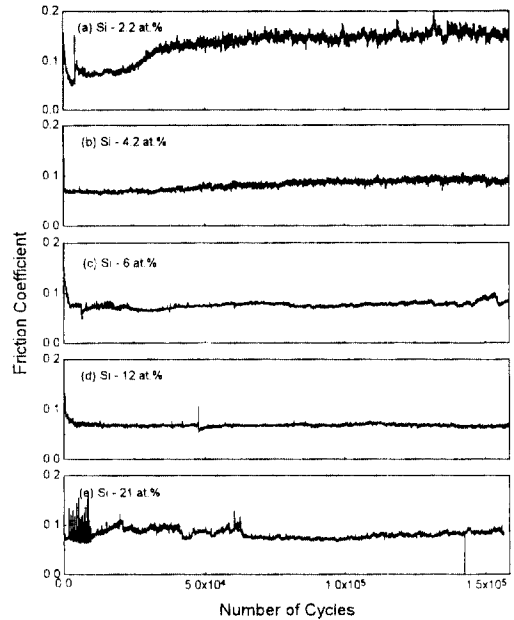


그림 2. 표면층으로 합성된 Si-DLC 필름내의 Si 함량에 따른 다층 DLC 필름과 steel ball 사이의 마찰계수.

그림 2b-d에서 볼 수 있는 바와 같이 이러한 경향은 감소하며, 5 at.% 이상인 경우에는 40,000 cycle 이후에도 0.1 미만의 낮고 안정된 마찰계수를 유지하고 있었다(그림 2d). 한편, 15 at.% 보다 많은 Si를 함유한 Si-DLC 필름을 표면층으로 사용한 경우에도 0.1이하의 낮은 마찰계수를 유지하였지만, 초기에 불안정한 마찰계수 구간이 관찰되고 있다(그림 2e). 이는 Si 함량의 증가에 따라 표면층의 극심한 마모가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 3은 158,400 cycle의 마모시험 후 steel ball의

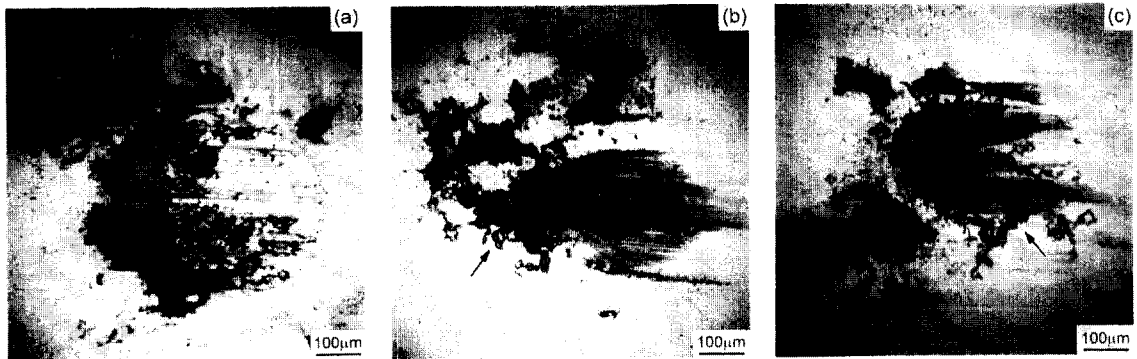


그림 3. 표면층으로 합성된 Si-DLC 필름내의 Si 함량에 따른 steel ball의 wear scar 형태. (a) 표면층의 Si 조성 2.2 at.% (b) 표면층의 Si 조성 12 at.% (c) 표면층의 Si 조성 21 at.%

wear scar 사진들로서, 표면층의 Si 함량이 증가함에 따라 wear scar의 반경은 감소하고, scar 표면을 덮고 있는 층의 면적은 증가됨을 알 수 있다. 이와 함께 표면층의 Si 조성이 10 at.% 이상에서는 wear scar 표면에 형성된 debris층 외에 넝쿨가지 모양의 debris들이 존재하고 있는 것을 관찰할 수 있었다(그림 3b와 3c의 화살표). 그림 4a-e는 158,400 회전의 마모 실험을 실시한 steel ball의 wear scar 표면에 형성된 debris 층 성분을 Si-DLC 필름의 Si 함량에 대하여 나타낸 것이다. 상대적인 조성변화를 관찰하기 위해 모든 스펙트럼들은 산소 peak에 대해 normalize하였으며, 각 스펙트럼을 위로 이동시켰다. 그림 4a에서 볼 수 있는 바와 같이, 표면층의 Si 조성이 2.2 at.%인 경우에는 wear scar 표면에 형성된 debris 층이 소량의 탄소와 Fe oxide로 이루어져 있음을 알 수 있다. 그러나, 표면층의 Si 조성이 증가함에 따라, debris내의 Fe 함량은 줄어들고 Si이 증가하고 있다. 특히, Si 조성이 6 at.% 이상인 경우에는 wear scar 표면의 debris 층이 Si oxide 만으로 이뤄진 것을 알 수 있다(그림 4c-e). 그림 4f는 넝쿨가지 모양의 debris의 Auger 스펙트럼으로서, 극소량의 탄소와 Fe oxide로 되어 있음을 알 수 있다. 넝쿨모양의 debris는 Si-DLC 표면층의 마모가 대부분인 44,000 cycle 까지는 관찰되지 않는다. 따라서, 이 debris들은 44,000 cycle 이후, steel ball이 다층 DLC 필름내의 순수한 DLC 필름과 접촉하면서 생성된 debris임을 알 수 있다.

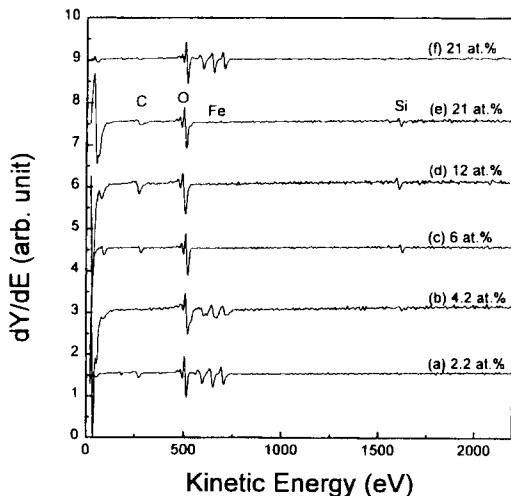


그림 4. 표면층으로 합성된 Si-DLC 필름내의 Si 함량에 따른 steel ball wear scar 표면에 형성된 debris 층(a-e)과 넝쿨가지 모양의 debris (f)의 Auger 스펙트럼.

Debris 형성 거동과 조성 분석의 결과들로 부터, 높은 Si 조성을 가지는 Si-DLC 표면층이 존재할 때에는 표면층이 마모되는 동안 Si oxide 형태의 debris가 wear scar에 치밀하게 부착되어 debris층을 이루고 있음을 알 수 있다. 마모가 계속되어 steel ball이 하층의 순수한 DLC 층을 만나도 이 debris 층은 제거되지 않고 ball과 필름 사이에 존재하면서 윤활작용을하여 낮은 마찰계수를 유지하는 역할을 한다. 한편, 장시간 마모시험시 발생하는 Fe oxide 넝쿨형태의 debris는 Si oxide type의 debris층이 완전히 scar 표면을 덮지 않아서(그림 3b, 3c) 부분적으로 노출된 scar 표면과 하층의 순수한 DLC film 간의 반응에 의해 형성된다고 생각된다. 이러한 결과는 순수한 DLC 필름과 steel ball 사이에 형성되는 debris는 주로 Fe 산화물이라는 결과와도 일치하는 것이다[9]. 그림 2e의 마찰계수가 0.1 근처의 값을 가지고 있는 것은 이러한 넝쿨형태의 debris 형성이 많아지는 것과 관련이 있으며, 따라서 최적의 윤활특성을 가지는 표면층의 Si 조성 범위가 있음을 의미한다.

이러한 윤활거동은 단층박막들의 마찰 및 debris 형성 거동과도 잘 일치하고 있다. 그림 5는 2.7 μm 두께의 단층 박막에서 관찰되는 contact cycle에 따른 윤활거동들이고, 그림 6은 158,400 cycle의 마모시험후 관찰된 wear scar 표면의 사진들이다. 그림 5a에서 보는 바와 같이, 단층 DLC 박막의 마찰계수는 초기에 transition period가 나타난 뒤 최소값인 0.1로 감소하였다가 회전수가 증가함에 따라 0.2 이상으로 증가하는 전형적인 거

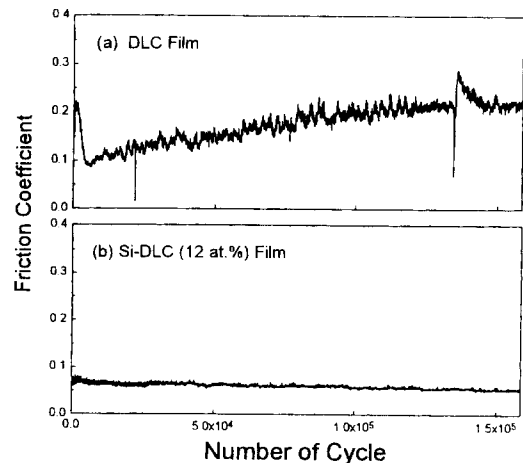


그림 5. 2.7 μm 두께로 합성된 단층 순수 DLC 필름과 Si-DLC 필름의 마모 회전수에 따른 마찰계수.

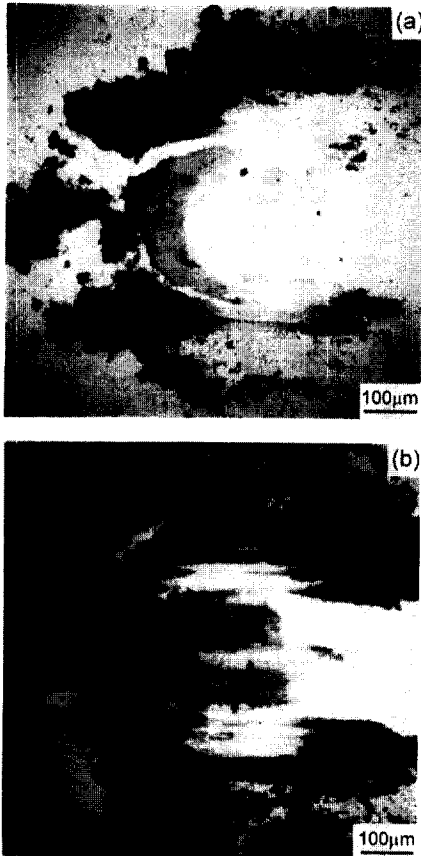


그림 6. 158,400 cycle의 마모 실험을 마친 steel ball의 wear scar 현미경사진. (a) DLC 필름 (b) Si 함량이 12 at.%인 Si-DLC 필름.

동을 보이고 있다. 한편, Si 함량이 12 at.%인 단층 Si-DLC 필름의 마찰계수는 마모시험동안 0.06 정도의 낮고 안정된 마찰계수를 보였다(그림 5b). 그림 6의 wear scar 사진에서도 두 시편 사이에 큰 차이를 관찰할 수 있는데, 순수한 DLC 필름의 경우에는 wear scar가 크고 뚜렷하게 나타난 반면, Si-DLC 필름의 경우에는 윤곽이 뚜렷하지 않은 wear scar 표면에 두껍게 덮여 있는 debris 층이 존재하고 있었다. 이러한 debris 형성거동은 표면층의 Si 함량이 많을 때(그림 3b, 3c)에 다층막의 마모시험결과와 잘 일치하고 있다. 단, Si-DLC 단층막으로만 시험한 경우에는 필름의 마모량이 많기 때문에 더 많은 debris가 wear scar 주위에 형성되어 있다.

그림 7은 44,000 cycle과 158,400 cycle의 마모시험후 다층막 시편의 track 마모율과 표면층의 Si 조성과의 관

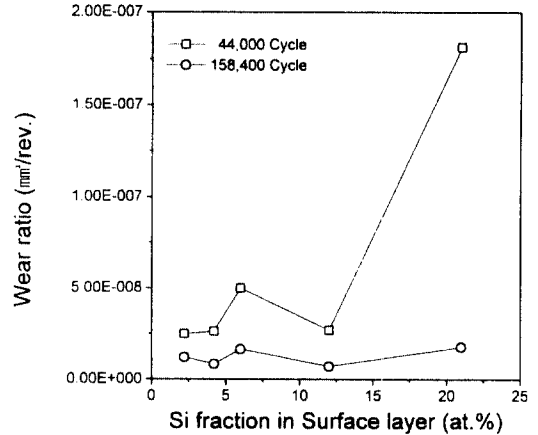


그림 7. 표면층으로 합성된 Si-DLC 필름내의 Si 함량에 따른 다층 DLC 필름의 마모율.

계를 보여주는 그림이다. 44,000 cycle의 마모시험을 행한 경우, $2.5 \times 10^{-8} \sim 1.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ 의 마모율을 보였으며 표면층의 Si 조성이 증가함에 따라 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 158,400 cycle 후에는 이보다 낮은 $7.1 \times 10^{-9} \sim 1.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ 로 나타났으며, 표면층의 조성에 따른 마모율의 변화를 거의 관찰할 수 없었다. 따라서, 표면층의 마모이후에 순수한 DLC 필름과 접촉하면서 필름의 마모율이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 한편, 표면층 없이 2.7 µm 두께의 순수한 DLC 필름만으로 구성된 단층 필름의 마모율은 44,000 cycle과 158,400 cycle 후 각각 $2.16 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ 과 $3.3 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ 로 나타났으며, 마모 회전수가 증가하여도 거의 비슷한 마모율을 유지하고 있었다. 이 결과는 다층막 시편의 내마모성이 순수한 DLC 단층막보다도 2배 정도 향상되었음을 보여준다. 한편, 2.7 µm 두께의 단층 Si-DLC 필름의 마모율은 $1.24 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ (44,000 회전)에서 $5.24 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{rev.}$ (158,400 회전)으로 마모 회전수가 증가함에 따라 단조 감소하는데, 이는 마모에 의해 형성된 Si oxide debris층이 ball과 필름사이에서 보호층으로 작용하기 때문으로 생각된다.

이상의 결과는 순수한 DLC 필름의 상단에 Si-DLC 층을 코팅하므로써, 순수한 DLC 필름보다도 우수한 내마모특성과 Si-DLC 필름에 버금가는 상대습도 50-70%의 대기중에서 0.1 미만의 낮은 마찰계수를 가지는 코팅층의 형성이 가능하다는 것을 보여주고 있다. 이러한 우수한 내마모 윤활 특성은 표면층 Si-DLC 필름의 마모에 의해 wear scar의 표면에 형성되는 Si oxide 형태의

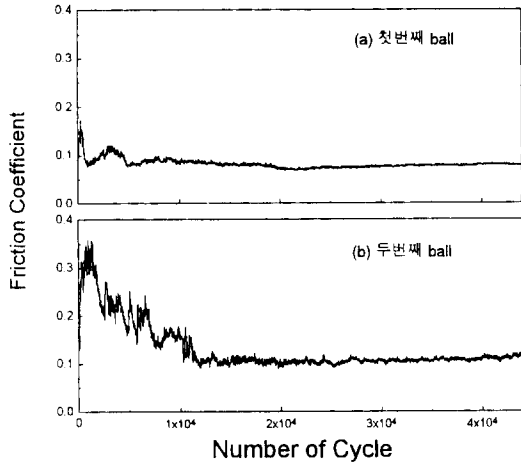


그림 8. Steel ball 교체에 따른 다층 DLC 필름의 마찰계수의 변화. (a) 첫 번째 steel ball (b) 두 번째 steel ball

debris 층에 기인하는 것으로 생각된다. Wear scar에 형성되는 debris의 역할을 확인하기 위해, 44,000 cycle의 마모시험후, ball을 교체하여 다시 44,000 cycle의 마모 시험을 수행하면서, 마찰계수의 변화와 wear scar에 형성되는 debris들을 관찰하였다. 이 실험에서는 4.2 at.%의 Si이 함유된 Si-DLC 필름을 표면층으로 사용하였다.

그림 8a는 첫 번째 마모시험의 결과로서, 초기에 transition period가 나타난 후 0.1 이하의 낮고 안정된 마찰계수를 보이고 있다. 그림 8b는 새로운 steel ball을 그림 8a의 마찰계수를 얻은 동일한 필름 트랙 위에 위치시킨 후 다시 측정한 마찰계수이다. 마모시험 초기에 높고 불안정한 마찰계수를 보이나, 10,000 cycle 후에는 안정되어 0.1 정도의 마찰계수를 보였다. 앞에서 언급한 바와 같이 44,000 회전의 마모로 인한 다층막 track의 wear 깊이는 $0.3 \mu\text{m}$ 로서, 두 번째 ball은 순수한 DLC 필름 층과 마모시험 초기부터 접촉하게 된다. 따라서, 시험 초기에 관찰되는 높은 마찰계수는 wear scar에 Si oxide debris 층이 존재하지 않기 때문임을 알 수 있다. 이 결과는 표면층 Si-DLC 필름의 마모로 인해 wear scar에 형성된 debris층이 다층막의 우수한 윤활특성에 매우 중요한 역할을 하고 있음을 보여준다. 한편, 10,000 cycle 이후에 다시 0.1 정도의 낮은 마찰계수를 유지하는 것은 순수한 DLC 단층으로 코팅된 경우인 그림 5a와 현저히 다른 경향이다.

그림 9a는 첫 번째 44,000 cycle의 마모 시험에 사용된 ball의 wear scar이며, 그림 9b는 두 번째 44,000 회전

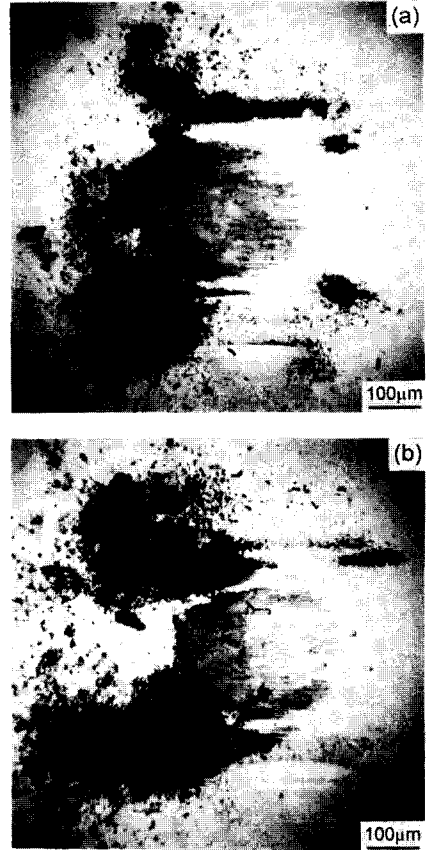


그림 9. Steel ball 교체 실험에 사용된 ball의 wear scar 현미경 사진. (a) 첫 번째 steel ball (b) 두 번째 steel ball

의 마모 시험에 사용된 새로운 ball의 wear scar이다. 첫 번째 ball의 wear scar 표면에는 debris 층이 치밀하게 형성되어 있었으며, 조성분석 결과 debris는 약간의 탄소가 함유된 Si oxide 형태였다(이 debris의 조성은 158, 400 cycle-후에 관찰되는 debris의 조성(그림 3b)과 다르다. 이는 44,000 cycle까지는 주로 Si-DLC 표면층의 마모에 의해 debris가 형성되고, 44,000 cycle 이후에는 순수한 DLC층과의 마모에 의해 debris의 조성이 Fe oxide 형태로 변화되기 때문이다. 이러한 debris 조성변화로 인해 그림 2b에서 보는 바와 같이, 40,000 cycle 이후에는 윤활계수가 서서히 증가한다.). 한편, 두 번째 ball의 wear scar도 첫 번째 ball과 크게 다르지 않았으며, 첫 번째 ball의 경우와 같은 조성의 debris 층이 scar 주위에 형성되어 있었다(그림 9b). 이러한 결과로부터, 두 번째 ball의 경우 시험 초기에는 순수한 DLC 층과 접촉하면

서 높은 마찰계수를 나타내었지만, 마모가 계속됨에 따라 wear scar 표면에 다시 Si oxide debris층을 형성하여 낮은 마찰계수를 나타내게 되는 것임을 알 수 있다. 새로이 형성되는 debris층의 발생원인으로는 track 주위에 형성되었던 Si oxide 형태의 debris들이 scar 표면으로 이동하였거나, 또는 새로운 ball의 표면과 track 주위의 Si-DLC 층 사이에 마모가 발생하면서 Si oxide debris가 발생하여 scar 표면으로 이동했기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결 론

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 내마모 특성은 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 10 at.%를 넘으면, 닳쿨 형태의

Fe oxide debris가 형성되면서 마찰계수가 증가하고 불안정해 지는 경향이 관찰되었다.

참고문헌

1. Kwang-Ryeol Lee, Kwang-Yong Eun, *Materials Science and Engineering*, **A209**, 264 (1996).
2. B.L. Vlcek, B.L. Sargent and J.L. Lauer, *Wear*, **170**, 173 (1993).
3. R. Mening and H.J. Tolle, *Thin Solid Films*, **143**, 31 (1986).
4. K. Enke, H. Dimigen and H. Hübsch, *Appl. Phys. Lett.* **36**(4), 15, 291 (1980).
5. K. Okuri and T. Arai, *J. Mater. Res.*, **5**(11), 2567 (1990).
6. K. Oguri and T. Arai, *Surface and Coatings Technology*, **47**, 710 (1991).
7. I. Sugimoto and S. Miyake, *Appl. Phys. Lett.* **56**(19), 7 1868 (1990).
8. K. Okuri and T. Arai, *J. Mater. Res.*, **7**(6), 1313 (1992).
9. M.-G. Kim, K.-R. Lee and K. Y. Eun, *Thin Solid Films*, submitted (1997).
10. J. Meneve, E. Dekempeneer and J. Smeets, *Diamond Films and Technology*, **4**(1), 23 (1994).
11. J. Meneve, E. Dekempeneer, W. Wegener, J. Smeets, *Surface and Coatings Technology*, **86-87**, 617 (1996).
12. A. Erdemir, C. Bindal, J. Pagan, P. Wilbur, *Surface and Coatings Technology*, **76-77**, 559 (1995).
13. Y. Liu, A. Erdemir, E.I. Meletis, *Surface and Coatings Technology*, **82**, 48 (1996).
14. J. Koskinen, J.-P. Hirvonen, J. Levoska, P. Torri, *Diamond and Related Materials*, **5**, 669 (1996).
15. H. Ronkainen, J. Likonen, J. Koskinen, S. Varjus, *Surface and Coatings Technology*, **79**, 87 (1996).