

## 습도에 따른 DLC 코팅의 마찰 거동

조경만<sup>\*,\*\*</sup> · 인효석<sup>†</sup> · 김대은<sup>\*\*\*</sup>

(2002년 1월 3일 접수, 2002년 5월 27일 심사완료)

### Tribological Behavior of DLC Coatings at Various Humidities

Kyoung Man Cho, Hyo-Sok Ahn and Dae Eun Kim

**Key Words :** DLC Coatings(다이아몬드상 카본 코팅), Friction(마찰), Relative Humidity(상대습도) AFM(원자현미경), Phase Contrast Image(위상차영상), Raman Spectroscopy(라만분광도)

#### Abstract

Although DLC coatings have good tribological properties, these are dependant on the deposition method, the property of contact surface, and test condition. Humidity, which has little influence on tribological behavior in macro scale, is an important factor of tribological behavior in small devices like MEMS. The objective of this study is to investigate the tribological behavior of DLC coatings with particular attention to their wettability at various humidities. DLC coatings were deposited on Si substrates and tested using a reciprocating friction tester against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> balls at various humidities. The results showed that the tribological behavior of DLC coatings was dependant on relative humidity and wettability of DLC coatings. Friction coefficient at high relative humidity was higher than that at low relative humidity. The tungsten-containing DLC coatings had a good wear resistance at low relative humidity whereas DLC coatings derived from argon(Ar)+cesium(Cs) gases showed a good wear resistance at high relative humidity.

#### 1. 서론

DLC(diamond-like carbon) 코팅은 지난 20 여년 동안 많은 연구가 이루어져 왔다. DLC 코팅은 다이아몬드와 비슷한 기계적, 물리적 특성을 가지고 있으나 특정한 결정 격자 구조를 가지지 않는 비정질 탄소(amorphous carbon)로 CVD(chemical vapor deposition) 혹은 PVD(physical vapor deposition) 등의 여러가지 방법을 사용하여 다양한 모재 위에 증착한다. DLC 코팅의 구조와 특성은 코팅에 함유된 수소의 함유량과 sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup>의 구성 비율 등에 따라 달라지는데, 일반적으로 높은 경도와 탄성계수를 가지며 마찰계수가 낮고 마멸에 대해 우수한 특성

을 가지고 있다. 광투과도가 높고 산, 염기성 물질과 반응하지 않는 화학적 특성을 가지고 있어 높은 정밀도를 요구하는 베어링, 기어, 절삭공구 등 기계부품의 표면 보호막으로 쓰이고 있다. 또 마이크로 두께 이하의 얇은 코팅으로도 낮은 마찰계수를 유지하고 표면의 파손을 막는 탁월한 마찰 특성으로 인해 정보 저장 장치인 VCR의 헤드 드럼이나 하드 디스크 드라이브의 디스크 표면 보호막으로 쓰이고 있으며, 최근에는 미소전기장 장치(MEMS, microelectromechanical systems) 분야 적용에 대한 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1-3)</sup>

지금까지 DLC 코팅에 대하여 연구된 내용을 살펴보면 크게 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 DLC 코팅의 종류에 따른 마찰 특성 실험으로 증착방법과 증착시 사용한 가스에 따라 다른 종류의 DLC 코팅이 형성되고 그 특성도 변하게 된다.<sup>(4)</sup> 또 수소이외에 크롬이나 실리콘<sup>(5)</sup> 등을 첨가하여 DLC 코팅의 구조와 화학적 성질을 개선하여 좋은 마찰 특성을 얻으려는 연구가 이루어져 왔다. 두 번째는 서로 다른 실험 조건(하중, 속도,

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지 연구센터

E-mail : hsahn@kist.re.kr

TEL : (02)958-5653 FAX : (02)958-5659

\* 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

\*\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 회원, 연세대학교 기계전자공학부

상대시편 재료, 온도, 환경) 하에서의 마찰 특성 실험으로 최근에는 마이크로 나노 트라이볼로지에 관한 관심이 높아지면서 하중의 범위를 작게 하기 위하여 AFM/FFM 등과 같은 장비를 개조하여 미소하중을 가하면서 DLC 코팅의 마찰 특성을 평가하는 연구가 이루어지고 있다.<sup>(6-10)</sup> 이전의 연구 결과를 종합해 보면 DLC 코팅이 마찰학적으로 많은 장점을 가지고 있지만 미소 분야로 갈수록 그 마찰특성이 코팅의 증착방법, 접촉표면특성, 상대시편재료, 실험조건 등에 따라 다르게 나타난 것을 볼 수 있다. 또한 이들 대부분의 연구는 작용하는 하중의 범위가 큰 거시적인 부분에 초점이 맞추어져 있고 주위 환경의 영향에 대한 연구가 미비하다. MEMS와 같은 아주 작은 기계요소에서는 이전 연구에서 사용된 DLC 코팅보다 얇은 두께를 가진 코팅이 적용되고 작용하는 하중의 범위와 부품간의 상대속도 등도 매우 작기 때문에 거시적인 관점에서 크게 영향을 미치지 않았던 주위환경(상대습도)의 변화나 DLC 코팅의 젖음성(wettability) 특성이 마찰 특성에 중요한 변수로 작용한다. 따라서 거시적 관점에서 수행되어 온 DLC 코팅에 대한 기존의 연구 결과들로는 저하중 하에서의 습도에 의한 DLC 코팅의 마찰 특성을 설명하기에는 무리가 따른다.

본 연구에서는 표면의 젖음성 특성이 다른 DLC 코팅들에 대해서 상대습도의 변화에 의한 마찰 특성을 평가하고자 한다. 습도의 변화가 미치는 주요 영향은 접촉면에 발생하는 주된 표면력인 모세관력(capillary force)을 변화시키는 것이므로 그 영향을 관찰하기 위해 저하중하의 마찰실험을 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구는 습도의 변화에 따른 마찰 특성을 관찰하는 것으로 주어진 실험 조건이외에 마찰에 영향을 주는 다른 요소들을 배제하기 위한 실험장치가 요구된다. 그러므로 일정한 습도를 유지할 수 있는 항습 챔버 내부에 마찰 실험장치가 구축되었으며 항습 챔버 밑에는 방진 시설이 설치되어 저하중에서는 치명적인 외부로부터의 교란을 차단할 수 있도록 하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 구성을 개략적으로 설명하고 있다. 마찰 실험장치로부터 측정된 데이터 신호는 외부로 출력되어 증폭기(amplifier)를 통해서 증폭된 후에 A/D(analog to digital) 보드를 통해서 컴퓨터에

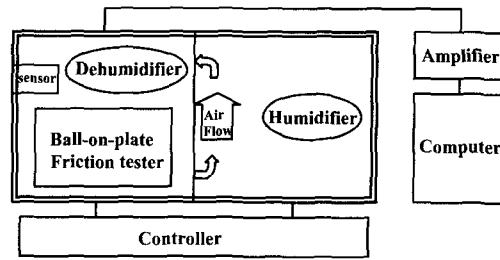


Fig. 1 The schematic diagram of experimental set-up

Table 1 The characteristics of investigated DLC coatings

Specimen	Roughness (Ra,nm)	Contact angle	Microhardness (GPa)
DLC: Ar+Cs280°C	2.8	96.1°	11
DLC: W13.5%	3.4	54.5	10.5

입력되며, 마찰 실험 작동 조건과 습도는 제어기(controller)를 통하여 조절 할 수 있도록 제작되었다.

사용된 실험장치는 볼(ball) 형태의 표준 시편과 플레이트(plate) 형태의 상대 시편 사이에 왕복미끄럼마찰을 발생시켜 시편 재질간의 마찰 특성을 살펴볼 수 있는 왕복동형 실험장치이다.

### 2.2 실험시편

본 연구에 사용된 시편은 DLC 코팅을 스퍼터링(sputtering) 방법으로 300 nm 두께로 증착한 실리콘 웨이퍼(wafer)이고 상대재료는 직경 3 mm의 탄화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 볼(ball)을 사용하였다. DLC 코팅은 두 종류로 나뉘어지는데 증착시 알곤(Ar)과 세슘(Cs)가스를 사용하여 만든 DLC 코팅과 텅스텐 타겟(poison target)을 이용하여 DLC 코팅에 텅스텐(W)을 함유시킨 DLC 코팅이다. 증착시 알곤에 세슘 가스를 추가하는 방법은 코팅층 표면의 거칠기를 낮히기 위해 사용되는 방법으로 하드디스크의 DLC 코팅에 시도되는 방법이다. DLC 코팅에 텅스텐을 함유시키는 주된 목적은 코팅층의 접합력을 크게 하기 위한 것이며 부수적으로 코팅의 구조와 화학적 성질을 개선하기 위한 목적으로 시도되고 있다.

실험 전 DLC 코팅의 젖음성 특성을 알아보기 위하여 DLC 코팅위에 10 μ의 물방울을 떨어뜨린 후 고배율 CCD 카메라를 이용하여 물방울의 수직단면 영상을 획득하고 물방울 단면의 폭과 높이를 측정하여 접촉각을 계산하였다(10 회 반복 실시하여 평균값을 구함). Table 1은 각각의 시편이 가지는 표면특성을 나타내고 있는데 표에서 보는 바와 같이 알곤과 세슘가스를 사용하여 만든 DLC

코팅면은 소수성이 매우 큰 반면에 텅스텐(W)이 함유된 DLC 코팅면은 친수성을 띄고 있다. DLC 코팅면의 표면영상(topography image)과 표면 거칠기는 원자력현미경(AFM, atomic force microscopy)를 사용하여 측정하였다. 코팅층의 미소경도는 미소경도계를 사용해 측정하였다. 두 코팅면의 젖음성은 매우 상이하였으나 표면거칠기와 미소경도는 Table 1에 보인 바와 같이 비슷한 범위에 있어, 두 DLC 코팅 시편에 대한 실험결과를 비교할 때 표면거칠기와 경도의 차이에 의한 영향을 배제할 수 있음을 알 수 있다. 상대재로 사용된 탄화규소볼의 표면거칠기와 접촉각은 각각 14.7 nm Ra와 27°이다.

### 2.3 실험방법

표면의 젖음 특성이 다른 2 종류의 DLC 코팅과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 볼과의 미끄럼 마찰 실험을 실시하여 마찰계수를 측정하였다. 실험에 사용된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 볼은 아세톤으로 5 분간 초음파 세척을 실시하고 완전히 건조 시킨 후 사용하였다. 마찰력에 미치는 습도의 영향을 파악하기 위해 두 가지 방법의 실험을 실시하였다. 첫번째 실험은 실험장치가 들어있는 챔버 내부의 상대습도를 초저습도인 2.5%, 중습도인 50%와 고습도인 90% 세 가지 경우를 선택해 습도의 영향을 파악코자 하였으며 각 실험 중에는 습도를 일정하게 유지시키며 실험을 실시하였다. 두번째 실험에서는 먼저 습도 50%의 조건에서 실험을 실시하다가 2000 회와 5000 회가 되었을 때 각각 저습과 고습으로 습도를 변화시켜 실험을 계속함으로써 동일 실험 중에, 습도가 변화할 때 발생하는 마찰 거동의 변화를 파악코자 하였다. 실험조건으로는 낮은 하중인 1.8 N, 미끄럼 속도는 4.44 mm/s의 저속을 모든 실험에 적용하여 마찰열에 의한 영향을 배제하였다. 실험 결과의 신뢰도를 고려하여 각 조건에 대해 실험은 3 회를 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 마찰 및 마멸 특성

Fig. 2는 습도를 일정하게 유지시키며 실험을 했을 경우에서의 상대습도별 안정상태(steady state) 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 두 시편 모두 저습도인 2.5% 조건에서는 낮은 마찰계수를 나타냈으나 상대습도 50%, 90% 조건에서는 2.5% 조건보다 높은 마찰계수를 보였으며 그 차이는 친수성의 특성을 보인 W13.5% 시편이 크게 나타났다. 본 연구에 적용한 실험조건에 비해 비교적 높은

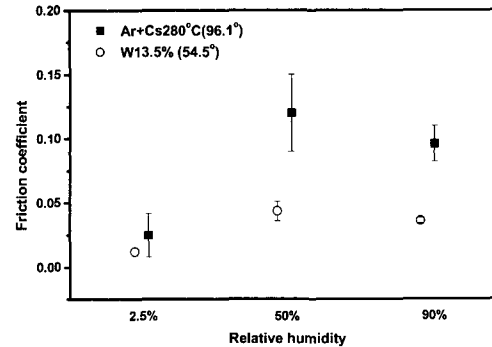


Fig. 2 The friction coefficient of Ar+Cs280°C and W13.5% as a function of relative humidity

하중과 미끄럼 속도에서 행해진 DLC 코팅에 대한 이전의 연구결과에서도 습도가 높아짐에 따라 마찰계수가 증가하는 같은 경향을 보였다.<sup>(11,12)</sup>

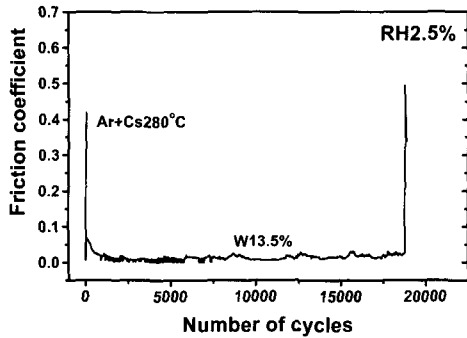
상대습도가 90%일 때 50% 조건에서 보다 마찰계수가 증가하지 않고 오히려 약간 감소하는 현상은, 상대습도가 90%로 증가함에 따라 접촉면 내부의 표면돌기들에 형성되는 메니스커스(meniscus)의 수와 크기는 증가할 것으로 예상되나, 메니스커스에 작용하는 라플라스 압력(Laplace pressure)은 메니스커스의 켈빈반경(Kelvin radius)의 증가로 인해 감소하기 때문에<sup>(13)</sup> 모세관 면적과 라플라스 압력의 함수인 모세관력은 오히려 감소할 수도 있는데 본 실험의 결과가 이 경우에 해당하는 것으로 보인다.

Fig. 3은 서로 다른 상대습도 조건 하에서 각 시편의 마찰 거동과 수명을 나타낸 그래프이다. 각 상대습도 조건에서의 두 DLC 코팅의 마찰거동은 Fig. 2에서 보인 바와 같이 표면에너지가 작은 Ar+Cs280°C 시편이 표면에너지가 큰 W13.5% 시편보다 작은 마찰계수를 보임을 알 수 있다. 상대습도 2.5% 조건에서 Ar+Cs280°C 시편은 30 회 이내에서 코팅이 파손되었으나 W13.5% 시편은 약 18,000 회에서 파손되는 결과를 나타내었다. 하지만 상대습도 50%와 90% 조건에서는 Ar+Cs280°C 시편은 모두 15,000 회 이상에서 파손되었고 W13.5% 코팅은 상대습도 50%에서는 20,000 회 정도의 수명을 보였으나 상대습도 90%에서는 5,000 회 부근에서 코팅이 파손되는 결과를 보였다. 즉, 표면에너지가 작은 Ar+Cs280°C 시편은 저습도인 2.5% 조건보다 고습도인 50%와 90% 조건에서 좋은 마멸 특성을 보인 반면, 표면에너지가 큰 W13.5% 시편은 저습도인 2.5% 나 중습도인 50% 조건에서 좋은 마멸 특성을 보인 반면에 상대습도가 90%인 높은 습도 조건에서는 마멸 특성이 나

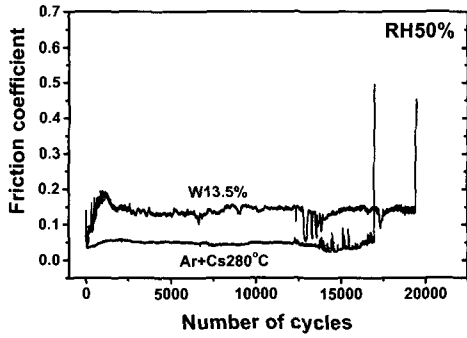
빠지는 것으로 나타났다.

Fig. 4 는 두 시편에 대하여 상대습도를 변화시키면서 마찰 실험한 결과이다. 표면에너지가 작은 Ar+Cs280°C 시편은 상대습도 50% 조건에서 0.05 정도의 안정된 마찰계수를 보이다가 상대습도를 6.5%로 감소시킴에 따라 마찰계수도 같이 낮아지

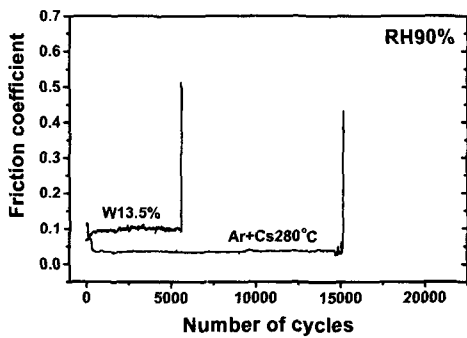
는 현상을 보였으나 800회 정도 지나 코팅이 파손되었다. 이것은 앞에서 상대습도 별로 실험한 결과와 비슷한 경향을 보이는 것으로 Ar+Cs280°C 이 상대습도 2.5% 조건에서 50% 조건일 때보다 낮은 마찰계수를 가지지만 코팅면의 파손이 금방 일어난 것과 일치하는 현상이다. 즉 상대습도의 변화에 따라 마찰계수가 상당히 민감하게 반응을 하며 마멸 특성에도 큰 영향을 미치는 것을 나타내는 결과로, 접촉면 내부에 형성되는 메니스커스가 마찰력을 증가 시키지만 마멸에는 우호적으로 작용한 것으로 보인다. 표면에너지가 큰 W13.5% 시편은 2,000 회까지 상대습도 50% 조건에서는 마찰계수가 0.1 정도로 안정된 결과를 보였으나 습도를 2.5%로 낮추어 감에 따라 마찰계수가 심하게 변하면서 떨어지기 시작하여 상대습도 2.5% 조건에서 0.04 이하의 낮은 마찰계수를 보였다. 상대습도를 90%로 높이는 과정에서는 마찰계수가 갑자기 증가하여 0.12 정도를 유지 하였다. 습도를 변화시키는 과정에서의 마찰계수 변화를 살펴보면, 먼저 습도를 낮추는 과정에서는 앞의 Ar+Cs280°C 시편



(a)

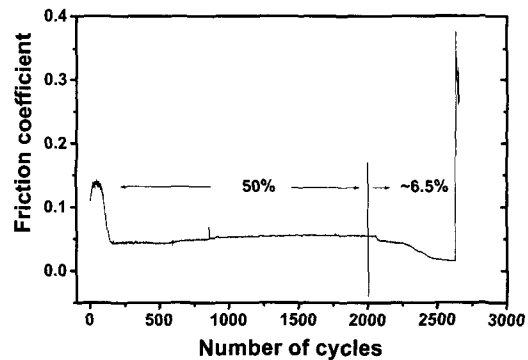


(b)

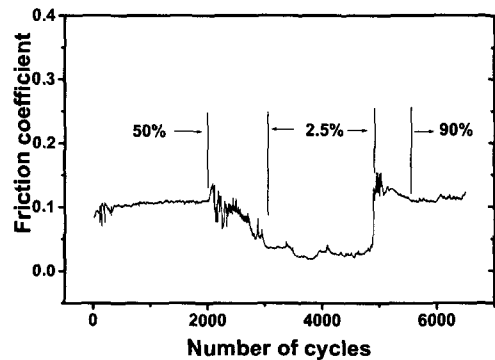


(c)

Fig. 3 The friction coefficient and life of DLC coatings as a function of sliding cycles at various relative humidities ; (a)RH2.5% (b)RH50% (c)RH90%



(a)



(b)

Fig. 4 The evolution of the friction coefficient of DLC coatings with the variation of relative humidity; (a)Ar+Cs280° (b) W13.5%

이 같은 조건에서 안정적으로 마찰계수가 떨어진 것과 달리 W13.5% 시편은 스틱-슬립(stick-slip) 현상에 의해 마찰계수가 심하게 요동하면서 떨어졌고 습도를 높이는 과정에서는 마찰계수가 갑자기 급격히 증가하였다. 즉 친수성인 W13.5% 시편이 소수성인 Ar+Cs280°C 시편보다 습도변화에 더 큰 영향을 받는 것을 나타내는데, 이것은 W13.5% 시편이 Ar+Cs280°C 시편보다 높은 표면에너지를 갖는 것에 기인하는 것으로 보인다. 상대습도 50% 조건에서 W13.5% 시편의 표면에 붙어 있던 물입자가 높은 표면에너지로 인해 쉽게 떨어지지 못하는 과정에서 부분적으로 붙어 있는 물입자로 인하여 마찰계수의 변화를 가져오고, 반대로 습도를 높이는 과정에서는 높은 표면에너지로 인해 물입자가 표면에 쉽게 붙어 마찰계수의 급격한 증가를 가져온 것으로 생각된다.

### 3.2 마찰면 고찰

Fig. 5는 Ar+Cs280°C 시편의 상대습도 50%에 대한 실험 전의 표면(Fig. 5(a)), 코팅이 파손되지 않은 마찰면(Fig. 5(b))과 코팅이 파손된 마찰면(Fig. 5(c))에 대한 원자력현미경의 표면형상(topography) 및 위상차 영상(phase contrast image)을 나타내고 있다. 세 표면의 거칠기는 각각 2.8, 0.6, 66.6 nm Ra로 코팅이 파손되기 전의 안정상태의 마찰계수를 보이는 표면은 실험전의 표면보다 더욱 매끈해졌으나 코팅층이 파손되는 상태에 와서는 상대적으로 표면이 거칠어짐을 보여 마찰계수의 변화와 표면 거칠기의 변화 경향이 일치함을 알 수 있다. 이러한 경향은 W13.5% 코팅에서도 공통적으로 나타나고 있다. Fig. 5(a)에 의하면 실험 전 표면에는 클러스터(cluster structure) 구조가 표면에 불균일하게 형성되었음을 알 수 있는데 이는 스퍼터링 과정에서 미세한 기체상 탄소입자가 실리콘 웨이퍼에 증착되는 과정에 서로 뭉쳐 클러스터(cluster)를 형성한 것으로 보이나 코팅층 구조 자체는 비정질로 확인되었다. 이러한 클러스터는 위상차 영상에서 더욱 뚜렷하게 관측이 되고 있다. 위상차 영상에서 검은 스케일(gray scale)로 표현되는 부분은 강성도(stiffness)가 밝은 부분에 비해 상대적으로 낮은 부분이나 클러스터 경계를 의미한다.<sup>(14-17)</sup> 마찰 실험 후 코팅층이 파손된 상태의 위상차 영상(Fig. 7(b))를 살펴 보면 실험 전의 표면에서 관찰되던 클러스터는 볼 수 없고 작은 명도범위(gray scale level)이지만 명암의 차이를 보이고 있어 미소적인 관점에서 볼 때 표면의 강성도가 균일하지 않아, 강성도가 낮은 트리보필름(tribofilm)이 표면에

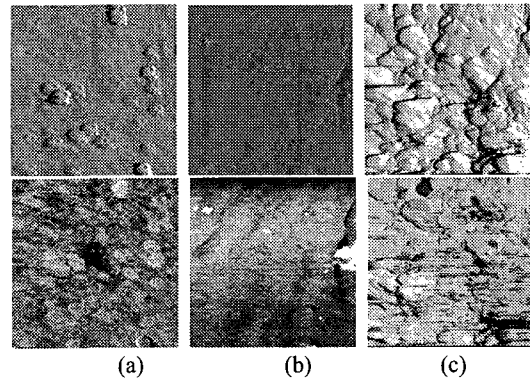


Fig. 5 Topography (upper row) and phase contrast (lower row) images of Ar+Cs280°C DLC coating; (a) original surface (11.8x11.8  $\mu\text{m}^2$ ), (b) wear track without coating failure (4.9x4.9  $\mu\text{m}^2$ ) and (c) failed surface (11x11  $\mu\text{m}^2$ )

일부 생성되었을 가능성을 시사하고 있다. 그러나 실험이 계속 진행되어 코팅층이 파손된 마찰면의 표면형상과 위상차 영상을 보면 실험 전이나 코팅이 파손되지 않은 경우의 표면과는 완전히 다른 형상을 띄고 있는데 마찰면에서 소성변형이 심하게 진행되었음을 알 수 있다. DLC 코팅의 마찰면에 대해 AFM의 위상차 영상을 이용한 이전의 연구결과에서는 10 nm 이하의 두께를 가진 트리보필름이 마찰면에 불균일하게 분포되어 있음을 보인 바 있다.<sup>(14,15)</sup> 그러나 본 연구에 이용된 하중과 미끄럼 속도가 이전의 연구에 비해 매우 낮기 때문에 트리보필름이 비슷한 두께를 가지고 넓게 생성되었을 가능성은 크지 않을 것으로 보인다.

강성도가 낮은 트리보필름이 마찰면에 일부 생성되었을 가능성을 확인하기 위해 마찰면의 코팅층의 조직에 대한 분석을 실시하였다. Fig. 6은 Ar+Cs280°C 시편의 실험 전후의 마찰면에 대한 마이크로 라만 스펙트럼 분석결과이다. 실험 전 초기 표면의 라만 스펙트럼을 보면 1350  $\text{cm}^{-1}$  (D-band)와 1580  $\text{cm}^{-1}$  (G-band) 부분에서 두 개의 피크 값을 가지고 있다. 하지만 마찰 실험 후 D-band와 G-band 부분에서의 피크 값은 크게 감소하고 521  $\text{cm}^{-1}$ 와 970  $\text{cm}^{-1}$  부분에서도 피크가 생긴 것을 볼 수 있었다. 새로 나타난 두 피크는 실리콘 피크<sup>(18,19)</sup>로 마찰 실험으로 마멸되어 코팅 두께가 라만 장비에 쓰인 Ar-ion 레이저의 투과 깊이보다 얇아 DLC 코팅 밑의 실리콘 웨이퍼에 의한 피크가 검출된 것으로 보인다. 실험 전후의 D-band와 G-band에서의 피크값 비율  $I_D/I_G$ 를 비교해 보면 0.92에서 0.96으로 증가하였다. 이것은 실험이

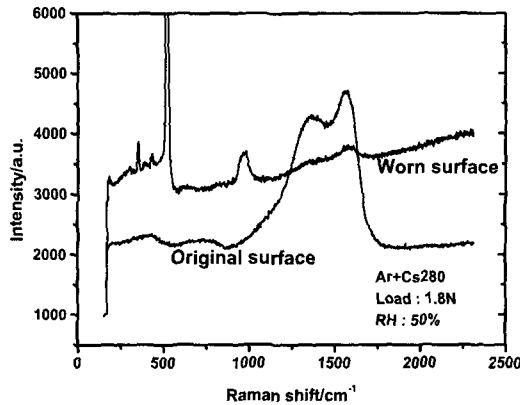


Fig. 6 The Raman spectrum of Ar+Cs280°C DLC coating prior to and after the wear test

진행되는 동안 DLC의  $sp^3$  조직의 일부가  $sp^2$ 로 변하면서 흑연(graphite)상이 증가하여 D-band에서의 피크값을 증가시킨 것으로 보인다. 같은 습도 조건에서 실험한 W13.5% 코팅의 마찰면에서도  $I_D/I_G$ 가 실험 전의 0.73에서 0.75로 증가하여 앞에 설명한 것과 마찬가지로  $sp^3$  조직의 일부가  $sp^2$ 로 변하는 과정이 진행되었음을 알 수 있다. Ar+Cs280°C 시편의 경우에는 상대습도 50%에 대한 표면 분석만이 실시되었으나 W13.5% DLC 코팅에 대해서는 모든 상대습도 조건에 대해 마이크로 라만 스펙트럼 분석을 실시하였으며 상대습도가 2.5%와 90%일 때  $I_D/I_G$ 가 실험 전의 0.73에서 각각 0.76과 0.80으로 증가하여 모든 상대습도 조건에서 마찰면의 코팅층의 조직 변화가 일부 진행됨이 확인되었다. AFM 결과와 마이크로 라만 스펙트럼의 결과를 종합해 볼 때 DLC 코팅의 표면은 상대재인 볼 시편으로부터 받는 압력과 마찰로 인해 초기와 다른 형상으로 변하며 그 조직은  $sp^3$  조직이 많은 다이아몬드 상 구조에서  $sp^2$  조직이 많은 흑연 조직으로의 전이가 일부 발생하는 것으로 보인다. 마찰면에 형성되는 비정질 탄소의 다결정 흑연화가 가속되어 표면에 충분한 두께(수 nm)의 트리보필름이 형성될 경우 마찰을 감소시키는 효과가 있음이 여러 문헌에 보고된 바 있다. (15,16,20,21)

#### 4. 결론

본 연구에서는 다른 표면 특성을 가지는 DLC 코팅에 대하여 상대습도 변화에 따른 마찰, 마멸 특성을 고찰하여 상대습도와 표면 특성이 마찰계수에 중요하게 작용함을 알 수 있었다. 본 연구를

통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 마찰계수는 상대습도의 영향을 받으며 저습도인 2.5% 조건에서보다 고습도인 50%, 90% 조건에서 높은 값을 나타내었고 그 차이는 표면이 친수성의 특성을 가질수록 상대습도 변화에 큰 영향을 받는다.

(2) 마멸특성은 DLC 코팅의 종류에 따라 다른 결과를 나타내었는데 텅스텐이 함유된 DLC 코팅은 저습도에서, 알콘과 세습가스를 사용하여 증착한 DLC 코팅은 고습도에서 마멸에 대하여 좋은 특성을 나타내었다.

(3) 마찰 실험하는 동안 DLC 코팅의 표면은 볼 시편으로부터 받는 압력과 마찰로 인해 다이아몬드 상 구조에서 흑연구조로의 전이가 발생하는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 국가지정연구실사업으로 지원되어 수행하였습니다. 본 논문에 사용된 DLC 코팅 시편을 제공해주신 KIST의 신경호 박사과 이광렬 박사에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Bhushan, B., 2000, Modern Tribology Handbook, CRC Press.
- (2) Holmberg, K. and Mattews, A., 1994, Coatings Tribology, Elsevier Press.
- (3) Bhushan, B., 1999, Handbook of Micro/Nano tribology, CRC Press.
- (4) Ronkainen, H., Varjus, S., Koskinen, J. and Holmberg, K., 2001, "Differentiating the Tribological Performance of Hydrogenated and Hydrogen-Free DLC Coatings," *Wear*, Vol. 249, pp. 260-266.
- (5) Wu, W. -J., Pai, T. -M. and Hon, M. -H., 1998, "Wear Behavior of Silicon-Containing Diamond-Like Carbon Coatings," *Diamond and Related Materials*, Vol. 7, pp. 1478-1484.
- (6) Jiang, J. and Arnell, R. D., 2000, "The Effect of Substrate Surface Roughness on the Wear of DLC Coatings," *Wear*, Vol. 239, pp. 1-9.
- (7) Liu, H., Tanaka, A. and Kumagai, T., 1999, "Influence of Sliding Mating Materials on the Tribological Behavior of Diamond-Like Carbon Films," *Thin Solid Films*, Vol. 352, pp. 145-150.
- (8) Liu, H., Tanaka, A. and Umeda, K., 1999, "The tribological Characteristics of Diamond-Like Carbon Films at Elevated Temperatures," *Thin Solid Films*, Vol. 346, pp. 162-168.

- (9) Delplancke-Ogletree, M. P. and Monteiro, O. R., 1998, "Wear Behavior of Diamond-Like Carbon/Metal Carbide Multilayers," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 108~109, pp. 484~488.
- (10) Voevodin, A. A., Phelps, A. W., Zabinski, J. S. and Donley, M. S., 1996, "Friction Induced Phase Transformation of Pulsed Laser Deposited Diamond-Like Carbon," *Diamond and Related Materials*, Vol. 5, pp. 1264~1269.
- (11) Gilmore, R. and Hauert, R., 2000, "Comparative Study of the Tribological Moisture Sensitivity of Si-Free and Si-Containing Diamond-Like Carbon Films," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 133~134, pp. 437~442.
- (12) Ozmen, Y., Tanaka, A. and Sumiya, T., 2000, "The Effect of Humidity on the Tribological Behavior of Diamond-Like Carbon Film Coated on WC-Co By Physical Vapor Deposition Method," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 133~134, pp. 455~459.
- (13) Adamson, A.W., 1990, *Physical Chemistry of Surfaces*, 5th edition, Wiley.
- (14) Ahn, H. -S., Chizhik, S. A. and Dubravin, A. M., 1999, "Atomic Force Microscopy of Friction Surface of TiN," *Friction and Wear*, Vol. 20, pp. 613~622 (in Russian).
- (15) Ahn, H. -S., Chizhik, S. A., Dubravin, A. M., Kazachenko, V. P. and Popov, V. V., 2001, "Application of Phase Contrast Imaging Atomic Force Microscopy to Tribofilms on DLC Coatings," *Wear*, Vol. 249, pp. 617~625.
- (16) Zhao, J. F., Liu, Z. H. and McLaughlin, J., 1999, "The Wear Effect on Microstructure of DLC Films of PECVD-Deposited on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:TiC Substrates - A Confocal Micro-Raman Study," *Thin Solid Films*, Vol. 357, pp. 159~165.
- (17) Neuhaeuser, M., Hilgers, H., Joeris, P., White, R. and Windeln, J., 2000, "Raman Spectroscopy Measurements of DC-Magnetron Sputtered Carbon Nitride(A-C:N) Thin Films for Magnetic Hard Disk Coatings," *Diamond and Related Materials*, Vol. 9, pp. 1500~1505.
- (18) Baranauskas, V., Li, B. B., Tosin, M. C., Zhao, J. G., Ceragioli, H. J., Peterlevitz, A. C. and Durrant, S. F., 2000, "Structural and Photoluminescent Properties of Porous Silicon with Deep Pores Obtained by Laser-Assisted Electrochemistry," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 133~134, pp. 325~330.
- (19) Sheeja, D., Tay, B. K., Lau, S. P., Shi, X., 2001, "Tribological Properties and Adhesive Strength of DLC Coatings Prepared under Different Substrate Bias Voltages," *Wear*, Vol. 249, pp. 433~439.
- (20) Yeh, T. A., Lin, C. -L., Sivertsen, J. M., Judy, J. H. and Chen, G. -L., 1993, "Characterization of Change of Carbon Bonding due to Sliding Wear Damage by Scanning Auger Microscopy," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, pp. 3939~3941.
- (21) Liu, Y., Erdermir, A. and Meletis, E. I., 1996 "A Study of the Wear Mechanism of Diamond-Like Carbon Films," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 82, pp. 48~56.