

RF PCVD에 의한 DLC 박막합성과 Tribology 특성평가

김성영 · 이상현* · 신승용 · 고명완

생산기술연구원 생산기반기술개발센터

*한양대학교 공과대학 금속재료공학과

Tribological Characteristics and Synthesis of DLC Thin Film by using a RF PCVD

S.Y. Kim, S.H. Lee*, S.Y. Sin and M.W. Ko

Material Process Technology R&D Center, KITECH

*Dept. of Metallurgy & Materials Science, Hanyang University, 425-791

(1997년 8월 22일 받음, 1997년 10월 20일 최종수정본 받음)

초 록 DLC(diamond-like carbon) 박막을 RF PCVD법으로 증착하여 일반적인 증착특성과 마찰·마모특성사이의 관계를 알아보기 위해, 증착속도, 박막경도, 내부압축응력 및 박막내의 수소량 측정을 통해 일반적인 증착특성을 조사하였다. 그리고 증착된 박막의 C-H 결합구조와 물질특성 분석을 위해 각각 FTIR 및 Raman 분광분석을 행하였다. 박막의 마찰계수와 내마모특성은 Pin-on-disk형 마찰시험기를 이용하여 상기의 증착조건과의 상관관계를 조사하였다.

DC self-bias, 즉 충돌에너지가 커지면 박막의 증착속도와 경도는 대체로 증가하고, 박막내의 압축응력은 최대값을 가지다가 다시 감소됨을 알 수 있었다. 또한 박막내의 수소량은 급격히 감소하다가 포화됨을 알 수 있었다. 얻어진 박막의 마찰계수는 최소 0.08로 분위기가 dry일 때 더 작으며 내마모성은 이온의 충돌에너지와 밀접한 관계를 가지며 모재인 Si-wafer보다 훨씬 큼을 알 수 있었다.

Abstract DLC thin film was deposited by RF plasma chemical vapor deposition method. The purpose of this study was examined closely a relationship between deposition and tribological characteristics. The growth rate, hardness, internal compressive stress, and hydrogen content of film as a general deposition characteristics were measured. The C-H structures and material characteristics were analysed by FTIR and Raman spectroscopy, respectively. The friction coefficient and wear resistance were measured by pin-on-disk type tribometer.

The growth rate and hardness were increased with ion bombardment energy (DC self-bias). Ion bombardment during deposition seems to create high compressive stress. The higher stress is observed in films in the diamond-like properties region, and they decrease towards the graphite-like region. And the hydrogen content of film was deeply decreased and saturated with energy. The minimum coefficient of friction was 0.08. The friction coefficient obtained in wet air atmosphere was larger than that obtained in dry air. The wear resistance was strongly dependent on ion bombardment energy, and higher compared to that of Si substrate.

1. 서 론

DLC(Diamond-like Carbon) 박막은 높은 경도와 전기 절연성, 광투명성 및 저마찰·내마모특성 등 다이아몬드와 유사한 성질을 갖고 있어, 최근 많은 관심과 활발한 연구가 이루어지고 있다^{1~5)}. DLC 박막은 비정질상으로 저온에서도 기판의 제한 없이 종이나 플라스틱 등에도 증착이 가능하며, 여러 가지 증착방법에 의해 합성되고 있다^{6~10)}. 특히 DLC 박막은 증착방법이나 각 공정의 증착조건에 따라 밀도, 굴절율, E_{sp} , 전기저항 및 유전상수 같은 물성이 결정되는 특징을 갖고 있다.

일반적으로 DLC 박막 증착에는 장치가 간단하고 증착면적과 속도를 크게 할 수 있는 PCVD법이 가장 널리 이용되고 있다. PCVD에 의한 DLC 박막의 형성과정은, 탄화수소 가스가 글로우 방전에 의해 탄화수소 이온으로 해리되고, 플라즈마내의 이온과 전자의 이동도 차에 의해 음극에

큰 전압강하가 형성된다¹¹⁾. 이렇게 형성된 DC self-bias (V_B) 때문에 해리된 탄화수소 이온들이 음극상으로 가속되어 기판에서 응축됨으로서 박막이 형성된다고 알려져 있다. 특히 DLC 박막의 성장속도와 물성들은 V_B 와 반응가스압력에 의존한다. 즉 이온의 충돌에너지 크기는 V_B 와 평균자유경로를 결정하는 반응가스압력에 따라 변하므로, 이들 두 변수가 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 DLC 박막의 형성과정을 연구하기 위한 방법으로 PCVD를 이용하여 박막을 증착하였고, DLC 박막형성에 미치는 V_B 와 반응가스압력의 영향을 조사하였고, 또한 이들이 기판으로 가속되는 탄화수소 이온들의 충돌에너지와는 어떤 상관관계가 있는가를 알아보았다. 이를 위해 V_B 변화에 따른 박막의 증착속도, 내부응력, 경도 및 박막내의 수소량을 측정하였으며, DLC 박막의 구조와 물질특성을 알아보기 위해 FTIR분광 및 Raman분광분석을 행하였다.

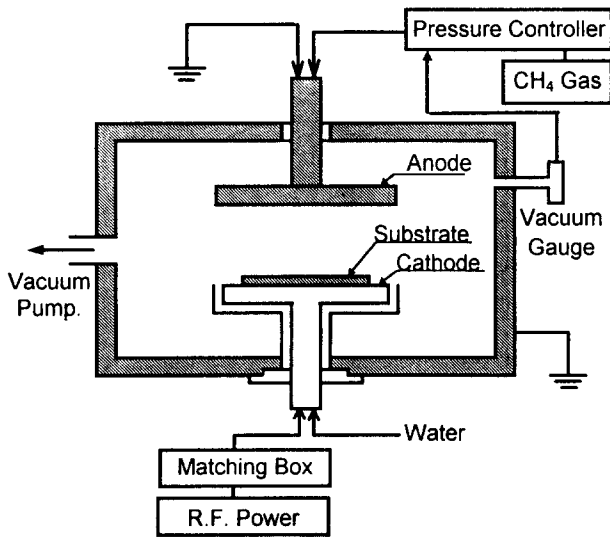


Fig. 1. Schematic diagram of RF PCVD system.

Table 1. Deposition conditions by RF PCVD.

Substrate	Si(100), Thick: 500 μ m Cover glass, Thick: 100 μ m		
Pressure (CH ₄)	10, 50, 85mTorr		
Self-bias(V)	100, 400, 700, 1000		
Depo. Time (min)	15~420	Anode	ϕ 210
Flow Rate (sccm)	10~15	Cathode	ϕ 130
RF Power (W)	10~500	Electrode distance	d = 40 mm

한편 일반적으로 DLC 박막의 저마찰·내마모특성은 매우 뛰어나다고 알려져 있다. 그러나 마찰계수와 내마모특성이 증착변수와 어떤 상관관계를 갖는지에 대해서는 연구 보고된 것이 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 pin-on-disk 법¹²⁾을 이용하여 증착된 DLC 박막의 tribology 특성 중 마찰계수와 과단하중이 충돌에너지를 변화시키는 V_b와 반응가스압력에는 어떤 관계가 있으며, 습도 분위기에는 어떤 상관관계가 있는가를 조사하였다. 또한 왕복동 내마모시험기를 이용하여 박막의 내마모특성을 조사하여 역시 충돌에너지와의 관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 박막증착을 위한 기판재료로 4인치 크기의 Si(100) 웨이퍼를 사용하였고, 내부응력을 측정하기 위한 기판재료는 크기가 12×50mm 이고 두께가 100 μ m인 cover glass를 사용하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 RF PCVD장치를 보여주고 있다. 박막증착을 위한 RF 전력은 13.56MHz의 방전주파수를 가진 전원으로 공급되고, V_b 크기는 RF 전력을 변화시켜 조절되고, matching 회로의 LPF(low pass filter : choke)에 연결된 직류전압계를 통해 측정하였다.

증착조건을 표 1에 나타내었듯이 반응가스로는 순도 99.6%의 CH₄가스를 사용하였고, 기판세정용 가스로는 Ar를 사용하였다. 먼저 박막을 증착하기 전에 기판표면의 세정을 위해 그림 1에 나타나있는 수냉되고 있는 음극 상에 기판을 놓은 후 반응실의 초기진공을 10⁻⁵ Torr까지 배출시킨다. 그 후 Ar 가스를 20 sccm 흘려준 후 압력을 50 mTorr로 고정시키고, V_b가 500V 되도록 RF 전력을 조절하여 기판을 15분간 스퍼터 세정처리하였다. 이렇게 처리된 기판 상에 CH₄ 가스를 60 sccm으로 흘려준 후 반응실에 부착된 밸브를 조정하여 압력을 10, 50, 85 mTorr의 세 가지 경우로 일정하게 유지시킨 후, RF 전력을 변화시켜 V_b를 100, 400, 700, 1000V의 4단계로 변화시켜가면서 박막증착 실험을 행하였다.

증착된 박막의 두께는 surface profilometer로 mask의 단차를 측정하는 방법으로 구하였고, 박막의 내부응력은 역시 surface profilometer를 이용하여 내부응력에 의한 기판의 변형정도를 측정하여 Stoney 식¹⁵⁾에 대입하여 환산하는 방법으로 구하였다. 증착박막의 미소경도는 최소 하중이 0.1 mg인 Dynamic ultra-micro hardness tester를 이용하여 1g의 하중하에서 측정하였다. 그리고 증착된 박막내의 수소량은 ERDA(elastic recoil detection analysis) 법으로 측정하였다. 또한 증착박막의 탄화수소 결합농도와 구조변화를 조사하기 위하여 FTIR(측정범위 : 400~4000cm⁻¹) 분석을 하였고, 박막의 물질특성을 조사하기 위해 Raman(측정범위 : 100~1700cm⁻¹) 분광분석을 행하였다.

한편 증착된 박막의 tribology 특성평가에 대해서는 여러 가지 실험방법이 있으나, 본 연구에서는 실험의 재현성과 데이터의 신뢰성이 뛰어난 pin-on-disk 장치(Fig. 2)를 이용하였고, 사용된 pin측의 시험편은 직경이 3/16"인 질화규소 ball이다. Tribology 특성평가 실험조건을 표 2에 나타내었다. 마찰계수는 그림 2의 7번인 마찰력 sensor를 이용하여 측정하였고, 과단하중은 그림 2의 6번인 부하 sensor로 측정하였다. 이때 습도분위기는 습도 sensor로 측정하면서 상대습도를 최대 85%까지 변화시켰다. 또한 박막의 내마모특성은 설계·제작된 왕복동 내마모시험기를 이용하여 측정하였다. 이때 마모용 압자는 수직하중이 20g

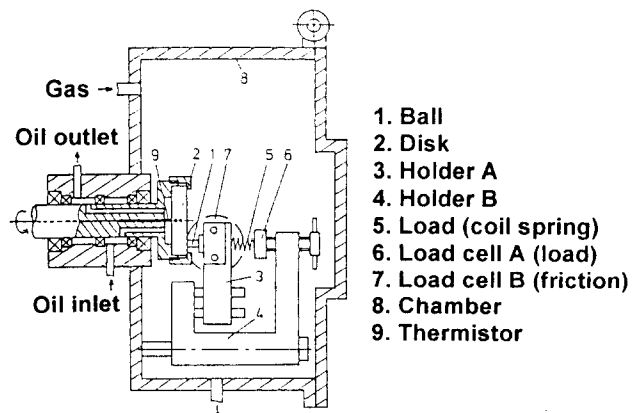


Fig. 2. Schematic diagram of pin-on-disk tribometer.

Table 2. Tribological characterization conditions.

Atmosp.	Lab. Air Rel. Hum.:45~55% Dry Air Rel. Hum.:<6% Wet Air Rel. Hum.:>85%
Load	2~46(N)
Sliding velocity	14.9cm/s (300r.p.m)
Temp.	Room Temp.

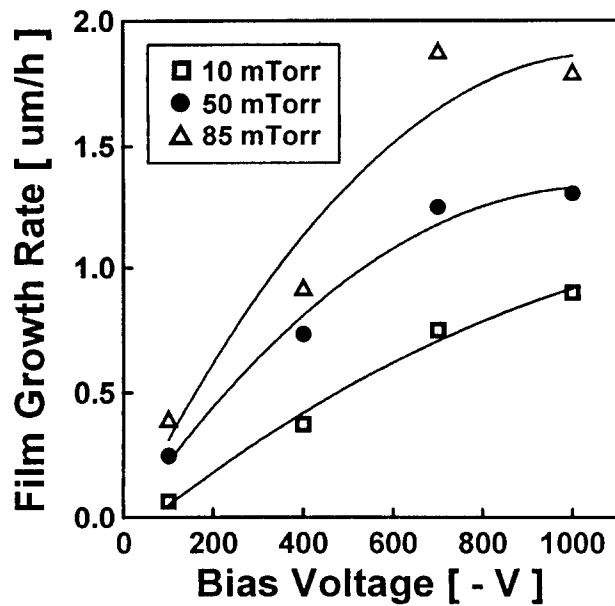


Fig. 3. Deposition rate of the deposited film at the various conditions.

인 다이아몬드 압자($\theta=120^\circ$, 0.2R)를 사용하였다. 왕복동 주기에 따른 박막의 마모깊이를 역시 surface profilometer로 측정하여 마모된 최대깊이를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 세 가지의 반응가스 압력조건에서 V_B 에 따른 박막의 증착속도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 박막의 증착속도는 V_B 와 반응가스 압력에 비례하는 양상을 보였다. 이는 반응가스 압력이 크면 증착에 기여하는 반응성 이온이나 반응활성종의 수가 증가하기 때문이고, V_B 가 증가하면 반응성 이온이나 반응활성종들이 음극의 기관으로 가속되는 구동력을 증가시키므로, 결국 반응에 참여하는 수가 역시 증가하기 때문이다. 한편 V_B 가 700V 이상에서는 증착속도가 둔화되는 경향을 보이는데, 이는 이미 증착된 박막이 증착도중에 입자들의 충돌에너지 증가로 인해 증착에 기여하기보다는 back sputter 현상이 심해지기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 증착속도의 둔화가 10 mTorr인 조건보다 85 mTorr인 조건에서 더욱 더 심하게 나타났는데, 이는 압력의 증가로 인한 증착막의 표면온도상

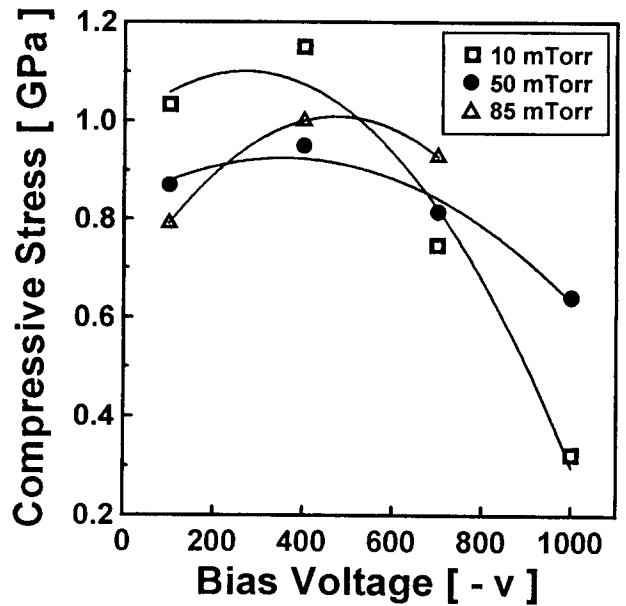


Fig. 4. Compressive stress of deposited film at the various conditions.

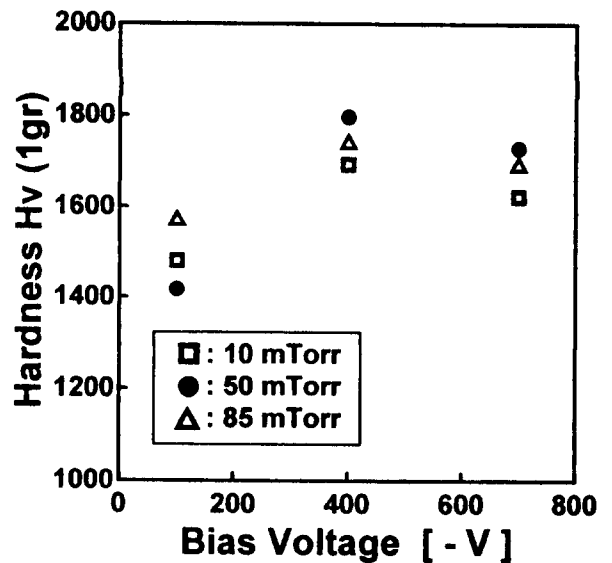


Fig. 5. Hardness (Hv: 1g) of the deposited film at the various conditions.

승에 기인한 것으로 생각된다¹³⁾.

일반적으로 박막/기관 복합재에서 내부응력의 발생은 박막/기관의 결합력을 저하시키는 요인으로 증착막의 응력에 있어서 안정성과 내구성에 심각한 영향을 미친다¹⁴⁾. 저온에서 이온의 충돌과정에 의해 생성되는 박막의 전형적인 잔류응력의 형태는 압축응력이다. 따라서 본 연구에서는 V_B 에 의해 반응성 이온이나 반응활성종들이 기관으로 가속되는 과정을 거쳐 DLC 박막이 증착된다고 생각되어 이온의 충돌에너지와 증착막의 잔류응력과의 관계를 정확히 규명하고자 하였다. 그림 4는 박막이 증착된 glass 기관이 압축응력에 의해 변형된 곡률을 측정하여 Stoney¹⁵⁾ 식에 의해 계

산된 내부 압축응력 값을 각각의 반응가스압력과 V_B 의 크기에 따라 정리한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 내부 압축응력은 가스압력에는 뚜렷한 변화가 없으나, V_B 에 따라서는 400V를 전후로 감소하는 경향을 보였다. 평균 이온 충돌에너지는 RF PCVD 실험을 통하여 $E \sim V_B/P^{1/2}$ 와 같이 표현될 수 있다고 보고한 Bubenzer¹³⁾에 따르면, 본 연구에서 얻어진 내부 압축응력 측정결과 이온충돌에너지가 가장 큰 조건인 1000V, 10 mTorr, 가장 작은 조건100V, 85 mTorr에 일치되는 것으로 보아 박막의 내부 압축잔류 응력은 이온의 충돌에너지와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

그림 5는 각 조건에서 증착된 박막의 마이크로 비커스 경도(Hv : 1g)를 측정된 결과로 반응가스압력에는 뚜렷한 경향을 보이지 않으나, V_B 가 커짐에 따라 박막의 경도가 증가하다가 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 앞에서도 언급하였듯이 경도는 내부 압축응력과 밀접한 관계를 가지고 있음을 입증하는 결과이다. 이는 충돌에너지가 증가할수록 박막내에 존재하는 탄화수소의 결합형태가 달라지면서 박막의 특성이 polymer-like 성질에서 diamond-like 성질을 거쳐 graphite-like 성질로 변화되기 때문이라고 생각된다.

그림 6은 각 조건에서 증착된 박막내의 수소량을 ERDA 법으로 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 반응가스압력의 변화에 따라 수소량의 변화는 큰 차이를 보이지 않지만 V_B 의 증가에 따라 수소량이 50 %에서 35 %로 감소되고 있다. 이와 같이 박막내의 수소량이 감소되는 이유는 V_B 의 증가에 따른 충돌에너지의 증가 때문에 C-C결합(결합에너지 : 607 KJ/mol)보다 약한 결합을 하고 있는 C-H결합(결합에너지 : 337.2 KJ/mol)이 파괴되거나 결합을 하고 있지 않은 수소원자가 박막내로부터 분해되어 박막내의 탄소원자의 cross-linking 정도를 변화시켜, 결국 박막의 경도나 밀도에 영향을 미치기 때문이다. 앞에서 언급한 경도와 압축응력의 결과로부터 알 수 있는 것은 박막내의 수소량이 감소할수록 박막의 경도를 증가시킨다는 Koidle¹⁴⁾의 결과와 잘 일치된다. 또한 이 결과는 그림 7의 FTIR 분광분석결과로부터 잘 입증된다.

그림 7은 각 조건에서 증착된 박막의 FTIR 분광분석결과이다. 그림에 나타난 피크는 전형적인 DLC 박막에 대한 피크로서 2900 cm^{-1} 에서 C-H 피크를 관찰할 수 있었다. 이 피크의 면적이 이온의 충돌에너지가 증가할수록 감소되는 것으로 보아 정량적이지는 않지만 박막내의 수소량이 감소되고 있음을 간접적으로 알 수 있다.

그림 8은 일정한 반응가스압력(50 mTorr)에서 V_B 의 증가에 따른 Raman 분광 분석을 행한 결과이다. 그림에서 보면 V_B 가 증가함에 따라 "G"(graphite-like) 피크의 위치가 1600 cm^{-1} 로 이동하고, "D"(disordered) 피크의 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 V_B 가 증가할수록 증착박막내부에 있는 흑연 미세결정이 성장하여 I_D/I_G 비율을 증가시킨다는 sp^2 구조변화모델을 제시한 Tamer¹⁵⁾에 의해 설명되었다. Fig. 8을 이온충돌에너지($E \sim V_B/P^{1/2}$)

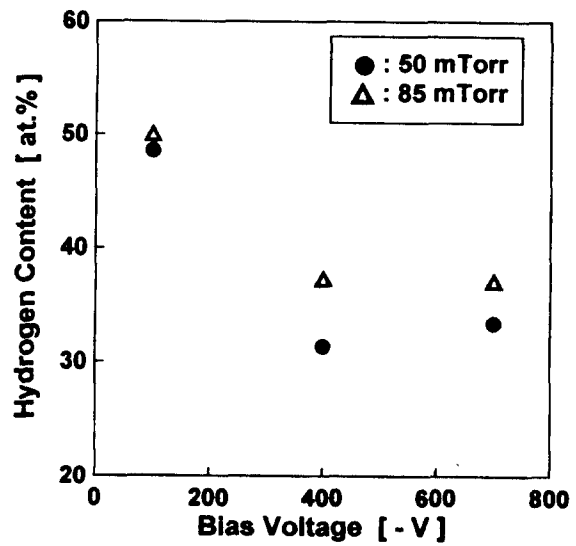


Fig. 6. Hydrogen content of the deposited the various conditions.

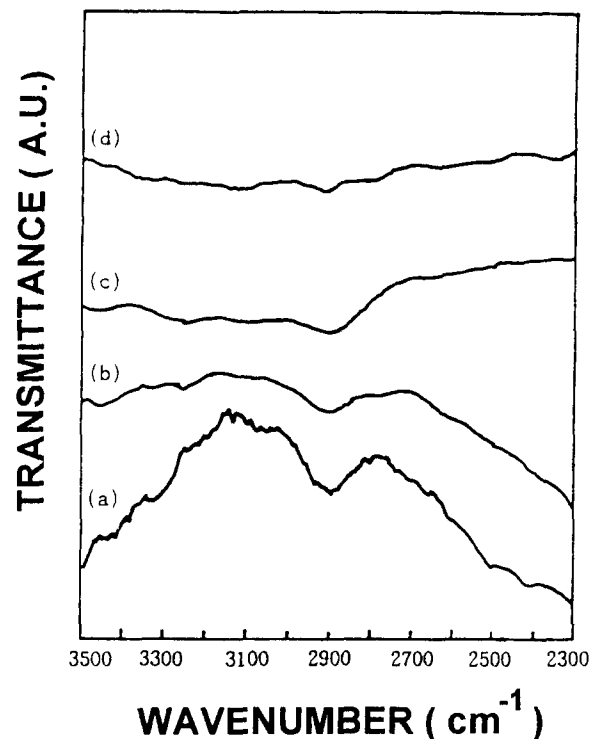


Fig. 7. FTIR spectra of the deposited film. (a) 85 mTorr, 100V (b) 85 mTorr, 400V (c) 10 mTorr, 400V (d) 10 mTorr, 1000V

변화에 따라 분석하면 일정한 반응가스압력에서 V_B 가 증가함에 따라 탄화수소 이온이나 탄화수소 활성종들이 기판과 충돌하는 충돌에너지가 증가하므로, 증착 중에 증착막의 국부적인 표면온도상승을 야기하고, 또한 sputtering 현상이 심해져 결국 증착막의 온도상승으로 인한 박막의 graphite-like화가 진행되기 때문으로 생각된다.

이상의 결과로부터 증착막의 경도, 내부응력 및 박막내의 수소량과 박막의 탄화수소 구조는 글로우 방전에 의해 해리된 탄화수소이온이나 반응활성종의 충돌에너지에 크게 의

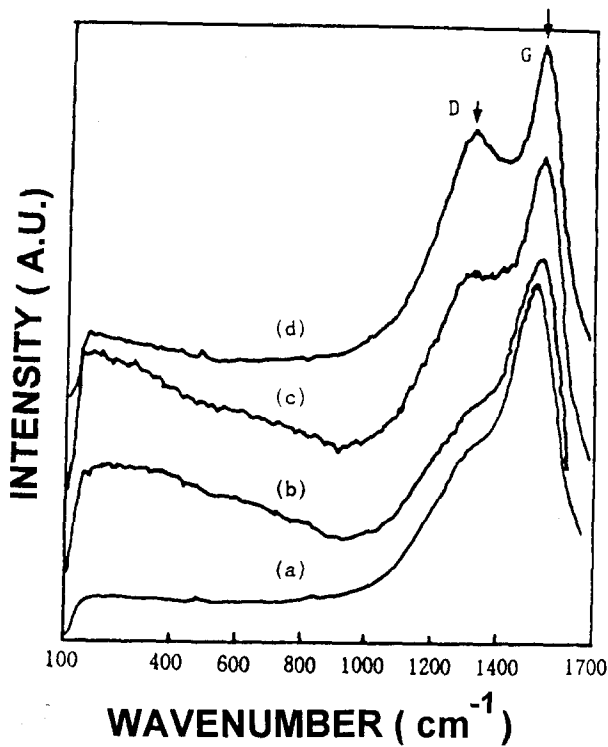


Fig. 8. Raman spectra of the deposited film at 50mTorr. (a) 400V (b)700V (c)1000V (d)1200V

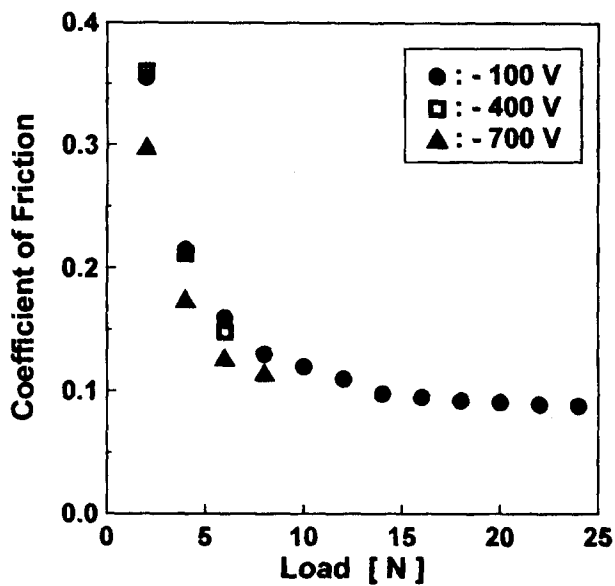


Fig. 9. Relation between friction coefficient and load of the deposited film at the constant gas pressure (50 mTorr) and sliding velocity (14.9m/sec).

존함을 알았다.

지금까지의 결과를 토대로 각각의 증착조건에서 얻어진 박막에 대한 마찰계수와 파단이 일어나는 파단하중 및 마모량을 측정하여 DLC 박막에 대한 tribology 특성과 충돌에너지와의 상관관계에 대해서 검토하기로 하였다.

그림 9는 일정한 반응가스압력(50 mTorr)에서 V_B 에 따라 증착된 박막의 마찰계수와 부하하중의 관계를 측정

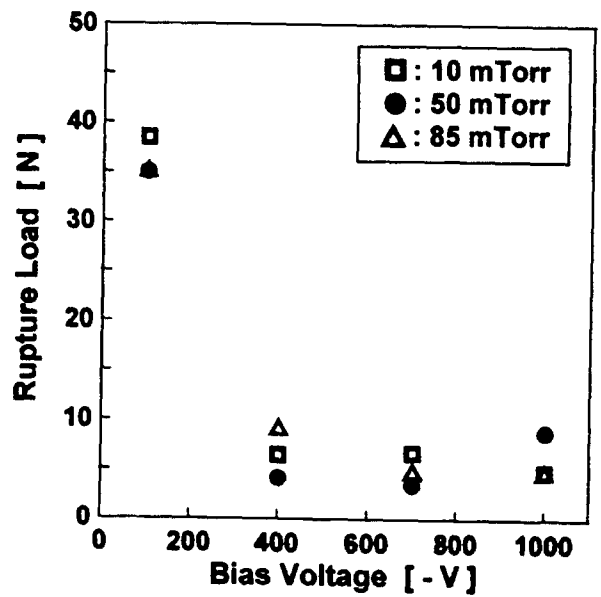


Fig. 10. Rupture load of the deposited film (Si₃N₄ ball was used).

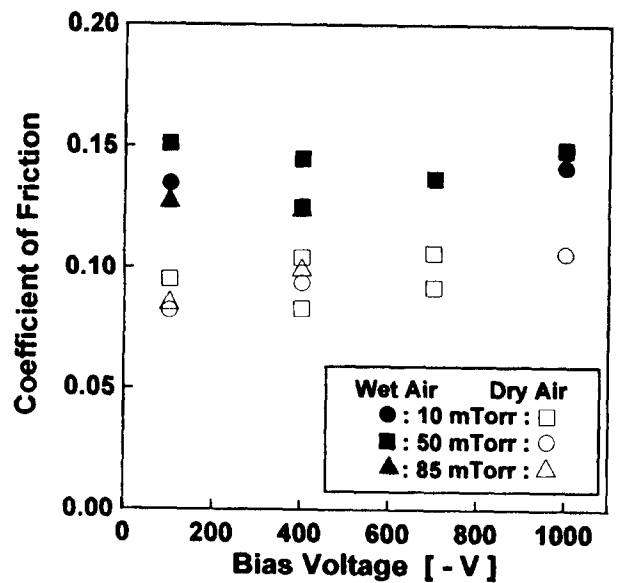


Fig. 11. Coefficient of friction in wet and dry air of the deposited film at the various conditions.

결과이다. 그림에서 마찰계수는 V_B 가 700V인 경우에 약간 작게 나타나고 있다. 경하중인 경우에는 하중증가에 따라 마찰계수가 급격하게 감소되지만, 하중이 큰 경우에는 대체로 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다. 본 연구에 의해 증착된 박막의 마찰계수는 매우 작은 값(0.08~0.15)을 가짐을 알았다.

그림 10은 각각의 증착조건에서 얻어진 박막의 파단하중을 측정된 결과이다. 이 결과에서 보면 V_B 가 낮을수록 박막의 파단하중이 현격히 크게 나타나고 있다. 이는 V_B 가 100V에서 얻어진 박막은 앞의 결과들을 토대로 볼 때 충돌에너지가 작아 내부응력이 작고, 박막내의 수소량이 많아 (50%) 박막의 성질이 polymer-like에 가깝기 때문에, 결

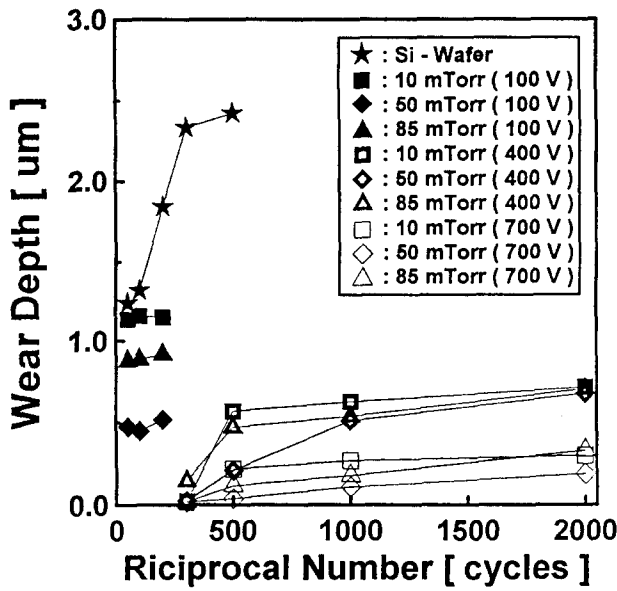


Fig. 12. Relation between wear depth and reciprocal number of the deposited film at the various conditions.

국 박막의 과단을 지연시킨 것으로 생각된다.

증착된 박막의 마찰계수가 마찰이 일어나는 습도분위기에 따라 어떠한 특성을 나타내는가를 알아보기 위한 실험결과 그림 11과 같은 결과를 얻었다. 이 결과는 각각의 반응가스압력에서 V_B 를 변화시켜 가면서 증착된 박막의 습도분위기에 대한 마찰계수변화를 관찰한 것이다. 그림에서 보면 wet air 분위기에서 얻어진 마찰계수가 dry air에서 얻어진 값보다 크다. 이는 Miyake 등¹⁵⁾이 지적하였듯이 증착된 DLC 박막의 극표면이 마찰마모에 의해 일부 손상을 받으면 수분이 침투되어 표면반응에 의해 산화물이 형성되기 때문이라고 생각된다.

그림 12는 DLC 박막의 내마모특성을 평가한 결과이다. 그림에서 본 연구에 의해 증착된 박막의 내마모성은 모재인 Si 웨이퍼보다 훨씬 큼을 알 수 있고, 반응가스에 의한 영향보다는 V_B 에 의한 영향이 더욱 더 지배적임을 알 수 있다. 또한 V_B 가 100V인 경우에 얻어진 박막의 마모량은 400V, 700V인 경우에 얻어진 박막의 마모량보다 크게 나타났다. 즉 V_B 가 증가할수록 내마모성은 향상되고 있다. 이는 V_B 가 증가함에 따라 박막내의 수소량이 감소됨과 아울러 박막의 경도도 증가한다는 Koide의 결과¹⁶⁾와 마모량은 경도에 역비례한다는¹²⁾ 식에 따르면, 본 연구의 결과도 V_B 가 증가할수록 박막내의 수소는 감소, 경도는 증가하는 것으로 보아 박막의 내마모성은 충돌에너지가 증가할수록 증가하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

RF PCVD에 의한 DLC 박막합성과 박막의 tribology 특성에 미치는 충돌에너지의 영향을 규명하고자 행한 연구 결과를 종합하여 보면,

1) RF PCVD에 의해 합성된 박막에 대한 분광분석(FTIR, Raman)과 경도 측정결과 최대 1800 Hv(1g)의

경도를 갖는 전형적인 DLC 박막임이 입증되었다.

2) 증착된 박막의 내부 압축응력은 충돌에너지가 증가함에 따라 증가하다가 감소되는 경향을 보였다. 이와같이 충돌에너지가 큰 경우에 내부응력이 감소되는 이유는 박막의 표면온도의 상승으로 인한 박막의 구조변화에 기인함을 분광분석결과로부터 알 수 있었다.

3) 박막내의 수소량을 측정된 결과 박막내에는 충돌에너지에 따라 32~50%의 수소가 내재되어 있음이 밝혀졌다. 그리고 충돌에너지가 증가되면 박막내의 수소가 감소되는 이유는 증착 중 박막표면의 back sputtering 현상때문에 약하게 결합하고 있는 박막내의 C-H 결합이 파괴되거나, 결합을 하고 있지 않은 수소가 분해되기 때문이다.

4) DLC 박막의 마찰계수는 반응가스압력과 V_B 에 따라 크게 변화되지 않으며, 측정된 최소 마찰계수는 0.08이었다. 증착된 박막의 마찰계수는 습도분위기가 wet air일 때 보다 dry air일 때 더 작게 얻어졌다. 이 이유는 마찰시험시 증착막의 극표면이 일부 손상되면 그 손상부위로 습기가 침투해서 박막의 결합력을 약화시키기 때문이다. 또한 가장 높은 과단하중은 V_B 가 가장 낮은 100V일때 증착된 박막에서 얻어졌다. 이 이유는 100V에서 증착된 박막의 내부응력이 가장 작고, 박막의 특성이 polymer-like에 가깝기 때문이다.

5) 본 연구에 의해 증착된 박막의 내마모성은 모재인 Si 웨이퍼보다 훨씬 큼을 알 수 있고, 반응가스에 의한 영향보다는 V_B 에 의한 영향이 더욱 더 지배적임을 알 수 있었다. 이는 이온의 충돌에너지와 매우 밀접한 관계가 있음을 알려 주는 결과라고 생각된다.

참 고 문 헌

1. S. Praver, R. Kalish, M. Adel, and V. Richter, J. Appl. Phys., **61** (1987) 4492
2. V.J. Kooper, M. J. Mirtich, and B.A. Banks, J. Vac. Sci. Tech., **A4** (1986) 1013
3. T. Datta, J. A. Woolam, and W. Notohamiprodjo, Appl. Phys. Commu., **5** (1985) 263
4. A. Grill, B.S. Meyerson, and V.V. Patel, IBM J. Res. Develop., **34** (1990) 849
5. J. Wagner and P. Lautenschlager, J. Appl. Phys., **59** (1986) 2044
6. S. Matsumoto, M. Hino, and T. Kobayashi, Appl. Phys. Lett., **51** (1987) 737
7. M. Rubin, C. B. Hopper, N-H. Cho, and B. Bhushan, J. Mat. Res., **5** (1990) 2538
8. S. C. Kuo, E. E. Kunhardt, and A. R. Srivatsa, J. Appl. Phys., **61** (1987) 4492
9. S. S. Wagel, E. M. Juengerman, and C. B. Collins, Appl. Phys. Lett., **53** (1988) 187
10. G. W. Tyndall and N. P. Hacker, Diamond, Silicon Carbide and Related Wide Bandgap Semiconductors, edited by J. T. Glass, R. Messier and N.

- Fujimori, Mat. Res. Soc. Sympo. Proc., Vol.162, 173 (1989), Boston, Massachusetts, U.S.A.
11. P. Couderc and Y. Catherrine, Thin Solid Films, **146** (1987) 93
 12. B. Bhushan and B. K. Gupta, in Handbook of Tribology: materials, coatings, and surface treatments, McGraw-Hill, Inc., New York, 1991. p.1562.
 13. A. Bubenzer, B. Dishler, G. Grandt, and P. Koidl, J. Appl. Phys., **54** (1983) 4590
 14. R. W. Wagner, A. K. Sinha, T. T. Sheng, J. Vac. Sci. Tech., **11** (1974) 582
 15. C. Weissmental and K. Bewilogua, Thin Solid Films, **86** (1982) 31
 16. S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, in Theory of Plates and Shells McGraw-Hill, Inc., New York, 1959, p.42.
 17. P. Koidl, Ch. Wild, B. Dishler, J. Wagner, and M. Ramsteiner, Materials Science Forum **52/53** (1989) 41
 18. M. A. Tamer and C. H. Wu, and K. C. Hass, J. Appl. Phys., **67**(2) (1989) 9
 19. S. Miyake, S. Takahashi, I. Watanabe, and H. Yoshihara, ASLE Transaction, **30**(1) (1990) 121