

기판 Etching 기법을 이용한 DLC 필름의 탄성특성 평가

조성진* · 이광렬 · 은광용 · 한준희** · 고대홍*

한국과학기술연구원 박막기술연구센터

*연세대학교 세라믹공학과

**한국표준과학연구원 소재특성평가센터

(1998년 4월 29일 접수)

Evaluation of Elastic Properties of DLC Films Using Substrate Etching Techniques

Sung-Jin Cho*, Kwang-Ryeol Lee, Kwang-Yong Eun,
Jun Hee Hahn** and Dae-Hong Ko*

Thin Film Technology Reserch Center, Korea Institute of Science and
Technology, Seoul 130-650, Korea

*Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

**Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standards and
Science, Taejon 305-600, Korea

(Received April 29, 1998)

요 약

Si 기판위에 증착된 다이아몬드상 카본(DLC) 필름의 탄성률과 포아송비를 독립적으로 측정할 수 있는 새로운 측정방법을 제시하였다. Si의 이방식각기술을 이용하여 시편 모서리의 Si 기판을 제거하므로써, 기판의 제한으로부터 relief된 DLC 필름의 freehang을 제작할 수 있었다. DLC 필름은 화학적으로 매우 안정하여, 이러한 식각액에 의한 필름의 손상은 일어나지 않았다. 제작된 DLC freehang의 단면은 싸인곡선의 형태를 가지고 있었으며, 단면 곡선의 폭과 주기로부터 필름이 기판에 부착되기 위해 필요한 변형률을 구할 수 있다. 필름의 잔류응력은 필름/기판 복합체의 곡률측정을 통해 독립적으로 결정할 수 있으므로, 막막의 응력-변형률 관계식으로부터 biaxial elastic modulus, $E/(1-\nu)$ 를 구할 수 있다. 한편, nano-indentation에 의해 측정된 plane strain modulus, $E/(1-\nu^2)$ 값과 biaxial elastic modulus로부터 탄성률 E 와 포아송비 ν 를 독립적으로 구할 수 있었다. 이 평가방법을 이용하여 벤젠 개스의 rf 글로우 방전을 이용한 플라즈마 CVD에 의해 증착된 DLC 필름의 기계적 특성을 평가하였다. 탄성률은 V_f/\sqrt{P} 가 127에서 221 V/mTorr^{1/2}까지 증가함에 따라 94에서 169 GPa로 단조 증가하였으며, 포아송비는 0.16~0.22 구간의 값을 가지고 있었다. 그러나, V_f/\sqrt{P} 가 127 V/mTorr^{1/2} 미만인 경우에는 기판식각에 의해 소성영역의 변형이 발생할 가능성이 있어서 본 평가방법을 적용할 수 없었다.

ABSTRACT

A simple method to measure the elastic modulus, E and Poisson's ratio, ν of diamond-like carbon (DLC) films deposited on Si wafer was suggested. Using the anisotropic etching technique of Si, we could make the edge of DLC overhang free from constraint of Si substrate. DLC film is chemically so inert that we could not observe any surface damage after the etching process. The edge of DLC overhang free from constraint of Si substrate exhibited periodic sinusoidal shape. By measuring the amplitude and the wavelength of the sinusoidal edge, we could determine the strain of the film required to adhere to the substrate. Since the residual stress of film can be determined independently by measurement of the curvature of film-substrate composite, we could calculated the biaxial elastic modulus, $E/(1-\nu)$ using stress-strain relation of thin films. By comparing the biaxial elastic modulus with the plane-strain modulus, $E/(1-\nu^2)$, measured by nano-indentation, we could further determine the elastic modulus and Poisson's ratio, independently. This method was employed to measure the mechanical properties of DLC films deposited by C_6H_6 rf glow discharge. The elastic modulus, E , increased from 94 to 169 GPa as the V_f/\sqrt{P} increased from 127 to 221 V/mTorr^{1/2}.

Poisson's ratio was estimated to be about 0.16~0.22 in this V_p/\sqrt{P} range. For the V_p/\sqrt{P} less than 127 V/mTorr^{1/2} where the plastic deformation can occur by the substrate etching process, however, the present method could not be applied.

Key words : DLC films, Elastic modulus, Poisson's ratio, Nano-indentation

1. 서 론

비정질 카본필름의 하나인 다이아몬드상 카본(Diamond-like Carbon, DLC) 필름은 다이아몬드와 유사한 기계적 특성과 광학적 특성을 가지고 있으면서도, 표면 평활도가 높고 합성온도가 낮다는 장점으로 인해 고체 윤활막이나 표면 보호막 등 많은 분야에서의 응용이 연구되고 있는 재료이다. 또한, 이 재료는 높은 수소 함량으로 인해 밀도에 대한 탄성계수의 비가 높을 것으로 기대되어 고속의 음향파 속도를 필요로 하는 분야에서의 적용에도 적합한 것으로 판단된다. 이러한 예로는 진동특성의 향상을 위한 스피커 트위터의 overcoating이나 surface acoustic wave(SAW) device 주파수 특성을 조절하기 위한 코팅 등을 들 수 있을 것이다.^{1,2)} 이러한 응용을 위해서는 DLC 필름의 탄성특성을 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다. 더구나, DLC 필름은 증착 조건에 따라 그 물성이 매우 광범위하게 변하기 때문에, 각 증착조건에 따른 탄성특성의 평가는 중요한 관심사가 되어 왔다.³⁾

박막의 탄성률은 박막내부의 결합이나 texture 구조로 인해 일반적으로 같은 재료의 bulk 상과는 다른 값을 가지고 있으므로, 박막의 경우 bulk 상의 일반적인 탄성계수 값을 사용하는 것은 불가능하다. 더구나, DLC 필름처럼 bulk 상이 존재하지 않는 재료의 경우에는 박막 자체의 탄성계수를 측정하는 것이 더욱 필수적이다. 현재까지 박막의 탄성률 측정을 위해서 nano-indentation,⁴⁾ Brillouin light scattering measurement,⁵⁾ ultrasonic surface wave measurement,⁶⁾ bulge test,⁷⁾ vibration membrane method⁸⁾ 등 많은 방법들이 제시되어 왔다. 이러한 방법들은 박막의 탄성률 등 기계적 특성을 평가하는데 매우 효과적인 것으로 판단되지만, 고가의 장비나 난해한 해석기술 또는 고도의 micro-machining 기술이 요구되는 것들이다.

본 연구에서는 간단한 Si 기판의 이방식각기술을 활용하여 박막의 탄성률을 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. DLC 필름은 합성중에 높은 에너지의 이온충돌을 수반하기 때문에 일반적으로 수 GPa에 이르는 높은 압축잔류응력을 가지고 있다. 이러한 높은 잔류응력은 필름의 접착력을 저하시키는 중요한 요인중의 하나이다. 그러나, 잔류응력을 유발하는 기판의 제한을 기판 식

각에 의해 제거하므로써, 잔류응력이 없어진 필름의 overhang을 만들어 주어 필름이 기판에 접합하기 위해 필요한 변형률을 측정할 수 있었다. 필름의 잔류응력은 필름의 코팅에 의해 일어나는 필름/기판 복합체의 곡률 변화를 측정하므로써 독립적으로 구할 수 있으므로,⁹⁾ 탄성적으로 등방성인 비정질이나 다결정 박막에 적용되는 간단한 응력-변형 관계식으로부터 biaxial elastic modulus를 구할 수 있었다. 이와 유사한 기술은 Si wafer 기판위에 합성된 SiO₂나 다결정 Si 필름의 잔류응력을 구하기 위해서 사용된 바 있으나,^{10,11)} bulk상의 biaxial elastic modulus를 그대로 필름의 값으로 가정하고 잔류응력을 계산하는 오류로 인해 일반적인 필름의 잔류응력 평가방법으로는 사용되지 못하였다. 한편, 측정된 biaxial elastic modulus와 nano-indentation의 unloading curve로부터 얻어진 plane-strain modulus 값을 비교하므로써, 탄성률과 포아송비를 독립적으로 측정할 수 있었다.

본 논문에서는 rf-PACVD법으로 합성된 DLC 필름의 탄성률 변화거동을 조사하였다. DLC 필름의 합성시 필름의 표면에 충돌하는 활성종의 에너지에 따라 필름내의 원자결합구조와 수소함량이 중요한 영향을 받는다는 것이 잘 알려져 있다.^{12,13)} 따라서, DLC 필름의 물리화학적 특성은 합성에 사용되는 활성종의 에너지와 밀접한 관계를 가지고 있다. Enke 등은 13.56 MHz의 rf-PACVD에서 활성종의 에너지는 V_p/\sqrt{P} 에 비례한다고 보고하였다(여기서 V_p 는 음의 self bias 전압이며 P 는 합성압력이다).¹⁴⁻¹⁶⁾ Lee 등은 합성에 사용되는 precursor gas의 종류에 관계없이 필름의 물성은 V_p/\sqrt{P} 값이 증가함에 따라 polymeric에서 diamond-like를 거쳐 graphitic해지는 정성적 변화거동을 확인한 바 있다.^{12,13)} 따라서, 본 연구에서는 V_p/\sqrt{P} 값의 변화에 따른 탄성특성의 변화를 관찰하였다.

2. 실험방법

벤젠(C₆H₆) 가스의 rf 글로우 방전을 이용한 플라즈마 CVD에 의해 DLC 필름을 합성하였다. 사용된 합성장비와 증착조건에 관해서는 참고문헌¹³⁾에 자세히 기술되어 있다. 기판의 바이아스 음전압은 인가전력을 조절하여 100에서 700 V까지 변화시켰으며, 합성압력은 베기벨브

의 conduction을 조절하여 10 mTorr로 유지하였다. 증착기판으로는 600 μm 두께의 (100) Si wafer를 사용하였으며, 필름의 잔류응력을 측정하기 위해 210±10 μm 두께의 얇은 (100) Si wafer를 5×50 mm² 크기로 절단하여 사용하였다. 필름의 두께는 1 μm가 되도록 합성시간을 조절하였다. 필름의 압축 잔류응력에 의해 발생한 필름/기판 복합체의 곡률은 레이저 반사법을 이용하여 측정하였으며, 이 결과를 Brenner 등에 의해 유도된 bending plate의 평형방정식에 적용하여 잔류응력을 계산하였다.⁹⁾ 필름의 경도와 plane strain modulus는 nano-indentation에 의해 얻어진 하중-변위곡선을 Oliver와 Pharr에 의해 제시된 방법에 의해 해석하여 결정하였다.⁴⁾ 이때 최대압입하중은 Si 기판의 영향을 최소화하기 위해 최대 압입깊이가 필름두께의 10% 이내가 되도록 1 mN을 사용하였다.

모서리를 따라 기판의 식각 깊이를 일정하게 하기 위하여, DLC 필름이 증착된 Si(100) wafer를 <011> 방향을 따라 절단하였다. 준비된 시편들은 70°C의 KOH 수용액(5.6 mol/l)로 Si 기판을 식각하였다. 균일한 식각 조건을 위해 식각공정중 식각액을 지속적으로 교반하였다. Fig. 1은 식각된 전형적인 시편의 주사전자현미경(SEM) 사진이다. 이 사진은 기판의 제한이 사라진 모서리쪽의 필름은 싸인과 형태의 변형을 하고 있음을 보여주고 있다. 또한, KOH 수용액의 이방식각특성으로 인해 모서리를 따라 균일한 깊이의 기판 식각이 일어났음을 알 수 있다. DLC 필름은 식각전후에 동일한 두께를 가지고 있었으며, 표면의 손상도 관찰되지 않았다. 따라서, 화학적으로 매우 안정한 DLC 필름은 KOH 식각액에 의해 전혀 손상을 받지 않았음을 알 수 있다. 식각된 시편들은 기판의 제한으로부터 분리된 필름의 손상을 최소화하기 위해 증류수와 에탄올 그리고 아세톤의 순으로 습식세척하여 대기중에서 건조시켰다. 준비된 시

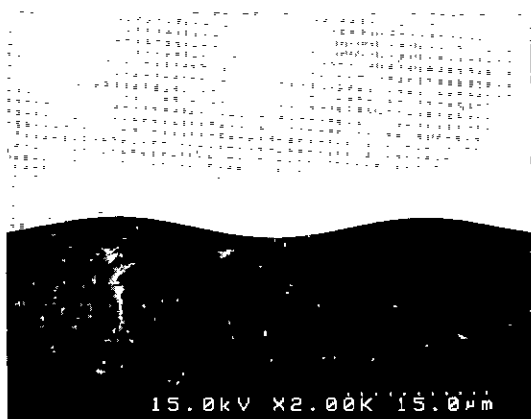


Fig. 1. SEM microstructure of typical DLC freehang.

편의 미세구조는 SEM을 이용하여 그 변형 단면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)와 (b)는 각각 V_0/\sqrt{P} 에 따른 필름의 압축잔류응력과 plane strain modulus의 변화들을 보여주고 있다. 두 가지 물성은 V_0/\sqrt{P} 에 대해 동일한 변화거동을 보이고 있는데, V_0/\sqrt{P} 값이 32에서 221 V/mTorr^{1/2}로 증가함에 따라 필름의 잔류응력은 0.4에서 1.8 GPa로 증가하며, plane strain modulus 역시 20에서 181 GPa로 단조 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 거동은 벤젠을 이용한 비슷한 합성조건에서 활성종의 에너지가 증가함에 따라 수소를 다량으로 함유하는 polymeric 특성의 필름에서 수소함량이 적은 치밀한 구조의 다이아

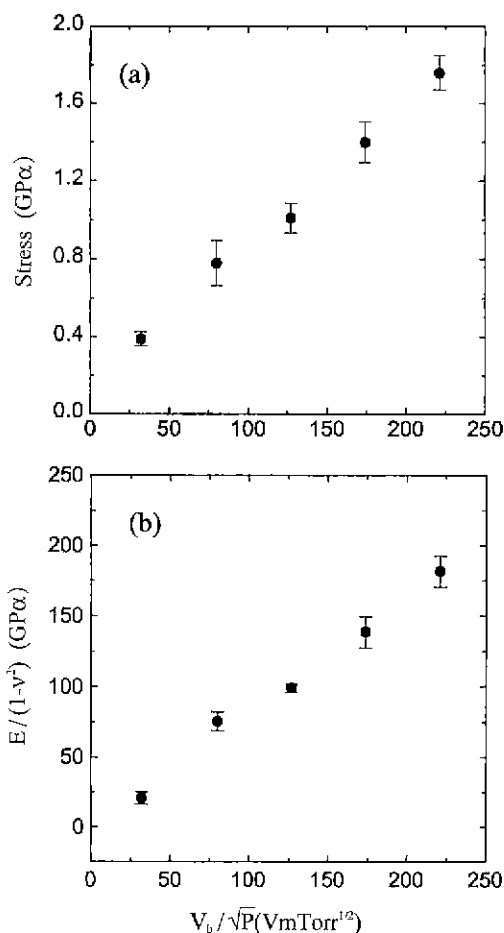


Fig. 2. Dependence of compressive residual stress (a) plane-strain modulus ($E/(1-\nu^2)$) and (b) on the parameter, V_0/\sqrt{P}

몬드성 필름으로 변화하는 것과 일치하는 것이다.¹³⁾ 즉, 이온의 에너지가 증가함에 따라, 필름내의 수소함량은 감소하면서 원자결합상의 3차원적 interlink가 증가하므로, Fig. 2와 같이 높은 기계적 물성을 나타내게 된다. Nano-indentation에 의해 측정된 필름의 경도값 역시 범위의 V_f/\sqrt{P} 구간에서 2.3에서 19.7 GPa로 증가하여 다른 물성과 동일한 거동을 보이고 있다. 그러나, 이러한 3차원적 interlink가 증가함에 따라, 비정질의 공유 결합물질의 경우에는 원자결합의 거리와 각도를 변형시키므로 잔류응력도 증가하게 된다.

Fig. 3은 기판의 식각에 의해 형성된 DLC freehang의 단면들의 SEM 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 응력을 받지 않는 상태로 회복된 freehang의 단면들은 싸인 곡선의 형태를 가지고 있음을 알 수 있으며, 잔류응력과 필름의 특성에 따라 그 주기와 진폭이 변화하고 있음을 알 수 있다. 대부분의 경우 freehang의 싸인곡선은 손상없이 10주기 이상 유지되었다. 따라서, 필름 모서리의 접선방향에 대한 식각 깊이의 비율은 10^{-2} 정도로서 DLC freehang의 변형을 접선방향의 1차원 변형으로 단순화시킬 수 있다.

Fig. 3에서 관찰되는 DLC freehang의 변형은 $y=A_0 \sin(2\pi x/\lambda)$ 와 같이 싸인곡선에 의해 표현되었다. 여기에서 A_0 는 폭(amplitude)이고 λ 는 주기(period)이다. 싸인곡선의 폭이 주기보다 훨씬 작을 때($A_0 \ll \lambda$), 응력을 받지 않는 상태로 회복된 한 주기에 대한 길이(l_0)는 다음과 같이 표현되며,^{10,11)}

$$l_0 \approx \lambda \left[1 + \left(\frac{\pi A_0}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (1)$$

일반적으로 변형률은 응력에 대한 길이 변화 비율에 의해 주어진다. 따라서, 한 주기에 대한 변형률(ε)은 다음과 같이 주어진다.^{10,11)}

$$\varepsilon = - \frac{\lambda - l_0}{l_0} \approx \left(\frac{\pi A_0}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

한편, 비정질이나 다결정 박막에서 각방향에 대한 응력과 변형률의 관계는 필름표면에 필름의 모서리와 평행한 방향을 x 축으로 하는 xy 면이 놓이는 수직좌표계에서

$$\sigma_x = 0, \quad \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon, \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma \quad (3)$$

과 같이 주어진다. 여기서 σ_x 는 x 방향의 응력이며, ε_x 는 x 방향의 변형률이다. 따라서, 응력 변형률간의 관계는 식

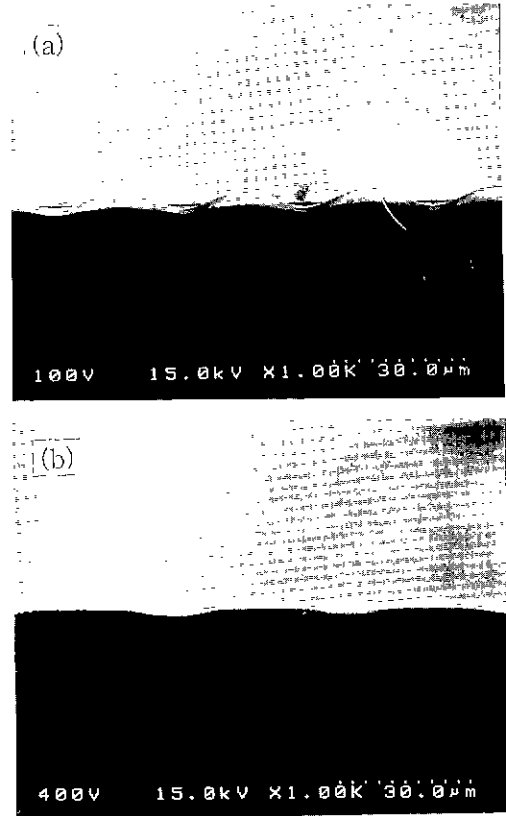


Fig. 3. SEM end on view of etched sample for various values of V_f/\sqrt{P} . (a) $V_f/\sqrt{P} = 32$ V/mTorr^{1/2} and (b) $V_f/\sqrt{P} = 127$ V/mTorr^{1/2}

(4)와 같이 주어진다.

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu} \varepsilon \quad (4)$$

여기서 E 는 탄성률이며 ν 는 포아송비이다. 따라서, 식 (2)를 식 (4)에 대입하고 재배열하면, biaxial elastic modulus $E/(1-\nu)$ 는

$$\frac{E}{1-\nu} = \left(\frac{\lambda}{\pi A_0} \right)^2 \sigma \quad (5)$$

로 표현할 수 있다. 식 (5)는 DLC freehang 단면 곡선의 폭과 주기를 측정하면, 독립적으로 측정된 필름의 잔류응력으로부터 필름의 biaxial elastic modulus를 결정할 수 있음을 보여주고 있다.

식 (5)는 변형거동이 탄성영역내에 있을 때 유도된 관계식이다. 일반적으로 재료의 항복강도와 탄성률을 안다면, 식 (5)에 의해 변형률을 결정할 수 있는 λ/A_0 값의 한계를 결정할 수 있을 것이다. 그러나, DLC 필름의 경

우에는 항복강도와 탄성률이 알려져 있지 않으므로 식 (5)를 적용할 수 있는 λ/A_0 값의 한계를 결정할 수는 없었다. 다만, nano-indentation 방법에 의해 측정된 plane strain modulus와의 비교에 의해 얻어진 포아송비의 물리적 타당성으로부터 이 방법의 적용한계를 결정할 수 있었다. 한편, freehang의 변형에 미치는 기판의 영향을 조사하기 위해 위 방법으로 측정된 biaxial elastic modulus 값에 미치는 식각 깊이의 영향을 조사한 결과, 식각 깊이가 10 μm 이상이 되면 식각 깊이에 따른 영향은 없었다.¹⁷⁾ 필름의 두께에 증가함에 따라 freehang 단면 곡선의 주기와 폭은 증가하였으나, 그 비율은 필름의 두께가 0.2 μm 이상인 경우에는 일정하게 유지되었다.¹⁷⁾ 따라서, 본 연구에서는 식각 깊이와 필름의 두께를 각각 10 μm 와 0.2 μm 이상이 되도록 하였다.

Fig. 4는 V_b/\sqrt{P} 에 대한 biaxial elastic modulus 변화를 보여주는 그림이다. Biaxial elastic modulus는 V_b/\sqrt{P} 가 32에서 221 $\text{V/mTorr}^{1/2}$ 으로 증가함에 따라 10에서 208 GPa로 단조 증가하였다. 이는 합성중에 필름표면에 도달하는 활성종의 에너지가 증가함에 따라, 필름내의 3차원적 interlink가 증가하면서 필름의 구조가 점점 치밀해지기 때문이다.^{12,13)} 이러한 경향은 Fig. 2의 기계적 특성의 변화와 일치하고 있다. Table 1은 Fig. 4의 biaxial elastic modulus와 Fig. 2(b)의 plane strain modulus의 비로부터 계산된 포아송비 ν 와 탄성률 E 값들을 정리한 것이다. 탄성률 E 는 V_b/\sqrt{P} 값이 증가함에 따라 16에서 169 GPa로 증가하고 있다. 그러나, 포아송비는 V_b/\sqrt{P} 가 80 $\text{V/mTorr}^{1/2}$ 이하의 영역에서는 물리적으로 불가능한 음의 값을 나타내고 있다. 따라서, 이 영역에서 얻어진 탄성률, E 는 실제보다 과대 평가된 것

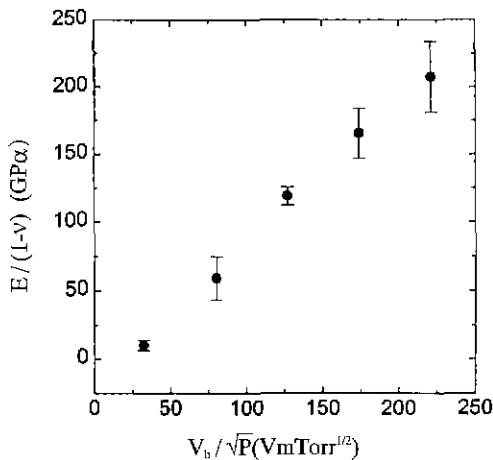


Fig. 4. Dependence of bizxial elastic modulus ($E/(1-\nu)$) on the parameter V_b/\sqrt{P} .

Table 1. Elastic moduli and Poisson's Ratios for Various Values of the Parameter, V_b/\sqrt{P}

V_b/\sqrt{P} ($\text{VmTorr}^{1/2}$)	Elastic modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, ν
32	16 \pm 9	-0.45 \pm 0.29
80	68 \pm 14	-0.19 \pm 0.28
127	94 \pm 7	0.21 \pm 0.11
174	126 \pm 24	0.22 \pm 0.24
221	169 \pm 22	0.16 \pm 0.22

으로 판단된다. 이 영역에서 합성된 DLC 필름은 soft한 폴리머 특성을 가지고 있는 것이 알려져 있다.^{12,13)} 따라서, 이들 필름의 잔류응력은 필름의 항복강도보다 커서 필름의 변형이 탄성영역을 벗어났을 가능성이 있다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 이들 필름의 변형이 매우 큰 것을 알 수 있는데, 비록 필름의 항복강도를 알 수는 없으나 이러한 변형이 소성변형의 영역에 있을 수 있음을 보여주고 있다. 본 연구에서 제시된 biaxial elastic modulus 측정방법은 잔류 응력에 대한 필름의 변형이 탄성영역에서 일어난다는 것을 가정하고 있다. 따라서, soft한 폴리머성 필름의 경우에는 이 측정방법을 적용할 수 없을 것으로 판단된다.

한편, V_b/\sqrt{P} 값이 127 $\text{V/mTorr}^{1/2}$ 이상인 영역에서는 양의 포아송비를 얻을 수 있었다. 이는 합성에 사용되는 활성종의 에너지가 높아짐에 따라 필름의 구조가 치밀한 다이아몬드성 카본필름이 얻어지므로, 필름의 잔류 응력에 대한 변형이 탄성역내에 있기 때문으로 생각된다. 이 영역에서 얻어진 필름의 탄성률과 포아송비는 다른 방법에 의해 측정된 DLC 필름의 기계적 특성 보고치들과 일치하고 있다. PACVD 방법에 의해 증착된 DLC 필름의 기계적 특성은 합성조건에 따라 탄성률과 포아송비가 각각 90~220 GPa과 0.22~0.39 구간의 값을 갖는 것으로 보고되고 있다.^{16,19)}

4. 결 론

간단한 Si 이방식각기술을 활용하여 DLC 필름의 탄성률을 평가할 수 있었다. 시편의 모서리 부분에서 Si 기판의 제한으로부터 relief된 freehang DLC 필름은 화학적으로 안정하여, 사용된 식각액에 의한 필름의 손상은 일어나지 않았다. 제작된 DLC freehang의 단면은 싸인 곡선의 형태를 가지고 있었으며, 단면 곡선의 주기와 폭으로부터 필름이 기판에 부착되기 위해 필요한 변형률을 구할 수 있었다. 필름의 잔류응력은 필름/기판 복합체의 곡률측정을 통해 독립적으로 결정할 수 있으므로, 박막의 응력-변형을 관계식으로부터 biaxial elastic

modulus, $E/(1-\nu)$ 를 구할 수 있었다. 한편, nano-indentation에 의해 측정된 plane-strain modulus, $E/(1-\nu^2)$ 값과 biaxial elastic modulus로부터 탄성률 E 와 포아송비 ν 를 독립적으로 구할 수 있었다. 이 평가방법을 이용하여 벤젠 가스의 rf 글로우 방전을 이용한 플라즈마 CVD에 의해 증착된 DLC 필름의 기계적 특성을 평가하였다. 탄성률은 V_s/\sqrt{P} 가 127에서 221 V/mTorr^{1/2} 까지 증가함에 따라 94에서 169 GPa로 단조증가하였으며, 포아송비는 0.16~0.22 구간의 값을 가지고 있었다. 그러나, V_s/\sqrt{P} 가 127 V/mTorr^{1/2} 미만인 경우에는 기관식각에 의해 소성영역의 변형이 발생할 가능성이 있어서 본 평가방법을 적용할 수 없었다.

REFERENCES

1. N. Fujimori, "Application of Diamond and Diamond-like Carbon Coatings to Speaker Diaphragm," *New Diamond*, **3**, 20-25 (1987).
2. T. Imai, H. Nankahata and N. Fujimori, "Surface acoustic wave detector," U. S. Patent, 4,952,832 (1990).
3. J. C. Angus, P. Koidl and S. Domitz, in *Plasma Deposited Thin Films*, edited by J. Mort and F. Jansen (CRC, Boca Raton, FL, 1986), 89-127.
4. W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," *J. Mater. Res.*, **7**, 1564-1583 (1992).
5. J. R. Sandercook, in *Light Scattering in Solids*, edited by M. Cardona and G. G. Ntherodt, Topics in Applied Physics Vol. 51 (Springer, Berlin, 1982).
6. D. Scheider, H.-J. Scheibe, Th. Schwarz and P. Hess, "Characterization of Thin Diamond-like Carbon Films by Ultrasonic Surface Waves," *Diamond Relat. Mater.*, **2**, 1396-1401 (1992).
7. M. A. El Khakani, M. Chaker, A. Jean, S. Boily, J. C. Kieffer, M. E. O'Hern, M. F. Ravet and F. Rousseau. "Hardness and Young's Modulus of Amorphous a-SiC Thin Films Determined by Nanoindentation and Bulge Tests," *J. Mater. Res.*, **9**, 96-103 (1994).
8. B. S. Berry, W. C. Pritchel, J. J. Cuomo, C. R. Guarneri and S. J. Whitchair, "Internal Stress and Elasticity of Synthetic Diamond Films," *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 302-303 (1990).
9. K.-R. Lee, Y.-J. Baik and K. Y. Eun, in *Thin Films: Stresses and Mechanical Properties IV*, edited by P. H. Townsend, T. P. Weihs, J. E. Sanchez, Jr., and P. Borgeesen (Mater. Res. Soc. Proc. 308, Pittsburgh, PA 1193), 101-106.
10. P. G. Borden. "A Simple Technique for Determining the Stress at the Si/SiO₂ Interface," *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 829-831 (1980).
11. R. T. Howe and R. S. Muller, "Stress in Polycrystalline and Amorphous Silicon Thin Films," *J. Appl. Phys.*, **54**, 4674-4675 (1983).
12. 이광렬, 은광용, "다이아몬드상 카본 필름," *대한금속학회회보*, **6**, 345-361 (1993).
13. K.-R. Lee, Y.-J. Baik and K. Y. Eun. "Precursor Gas Effect on the Structure and Properties of Diamond-like Carbon Films," *Dia. Rel. Mater.*, **3**, 1230-1234 (1994).
14. K. Enke, "Some New Results on the Fabrication of and the Mechanical, Electrical and Optical Properties of i-Carbon Layers," *Thin Solid Films*, **80**, 227-234 (1981).
15. J. W. Zou, K. Reichelt, K. Schmidt and B. Dischler, "The Deposition and Study of Hard Carbon Films," *J. Appl. Phys.*, **65**, 3914-3918 (1989).
16. X. Jiang, J. W. Zou, K. Reichelt and P. Grunberg, "The Study of Mechanical Properties of a-C:H Films by Brillouin Scattering and Ultralow Load Indentation", *J. Appl. Phys.*, **66**, 4729-4735 (1989).
17. S.-J. Cho, K.-R. Lee, K. Y. Eun, J. H. Hahn and D.-H. Ko, "Determination of Elastic Modulus and Poisson's Ratio of Diamond-like Carbon Films", submitted to *Thin Solid Films* (1997).
18. X. Jiang, K. Reichelt and B. Stritzker, "Mechanical Properties of a-C:H Films Prepared by Plasma Decomposition of C₂H₂", *J. Appl. Phys.*, **68**, 1018-1022 (1990).
19. J. C. Pivin, "Difficulties in Estimating the Rheological Properties of Diamond-like Films by Means of Nanoindentation Tests", *Thin Solid Films*, **229**, 83-92 (1993).