

## 미소 인장시험을 통한 다이아몬드상 카본 박막의 안정성 및 접합력 평가

최현웅<sup>\*,\*\*</sup> · 이광렬<sup>\*\*\*†</sup> · Rizhi Wang<sup>\*\*\*</sup> · 오규환<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>서울대학교 재료공학부, 서울시 관악구 신림동 산 56-1

<sup>\*\*</sup>한국과학기술연구원 미래기술연구본부, 서울시 청량리 우체국 사서함 131

<sup>\*\*\*</sup>Department of Metals and Materials Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, V6T 1Z4, Canada  
(논문접수일 : 2004년 10월 14일)

### Stability and Adhesion of Diamond-like Carbon Film under Micro-tensile Test Condition

Heon Woong Choi<sup>\*,\*\*</sup>, Kwang-Ryeol Lee<sup>\*\*\*†</sup>, Rizhi Wang<sup>\*\*\*</sup>, Kyu Hwan Oh<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>School of Materials Sciences and Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, KOREA

<sup>\*\*</sup>Future Technology Research Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 130-650, KOREA

<sup>\*\*\*</sup>Department of Metals and Materials Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, V6T 1Z4, Canada  
(Received October 14, 2004)

#### 요 약

미소인장시험을 통해 304 스테인리스 스틸 판재 위에 증착된 DLC 박막의 안정성을 평가하였다. 모재의 소성 변형과 함께 코팅 층의 손상이 발생하기 시작하는데, 작은 규모의 모재 변형 시에는 인장축의 수직방향으로 박막의 균열이 발생하지만, 모재의 슬립변형이 발생하기 시작하면 인장 축과 45°의 각도를 갖는 슬립 면을 따라 필름의 박리가 발생하였다. DLC 박막의 박리면적으로부터 필름의 접착력을 평가할 수 있었으며, 필름의 합성 전에 실시하는 Ar 플라즈마 스퍼터링 세척시간이 길수록 그리고 세척시 기판에 인가되는 전압이 높을수록 필름의 접착력은 향상되었다. 이러한 변화는 스테인리스 스틸 모재와 Si 접합 층간의 계면특성이 향상되면, 필름의 전체 접착력을 증진시킬 수 있음을 보여주고 있다.

주제어 : 다이아몬드상 카본 (DLC), 필름안정성, 접착력, 인장시험, 생체재료

#### Abstract

We investigated the stability of the DLC film coated on 304 stainless steel substrate by Radio frequency assisted chemical vapor deposition method. Fracture and spallation behaviour of the coating was observed during micro-tensile test of the film/substrate composite. As the tensile deformation progressed, the cracks of the film were observed in the perpendicular direction to the tensile axis. Further deformation resulted in the plastic deformation with 45° slip bands on the substrate surface. Spallation of the film occurred with the plastic deformation, which was initiated at the cracks of the film and was aligned along the slip directions. We found that both the cracking and the spallation behaviors are strongly dependent on the pre-treatment condition, such as Ar plasma pre-treatment. The spallation of the film was

considerably suppressed in an optimized condition of the substrate cleaning by Ar glow discharge. We observed the improved stability with increasing duration of Ar plasma pre-treatment.

**Key Words** : Diamond-like Carbon, Adhesion, Tensile test, Spallation

## 1. 서 론

다이아몬드 상 카본필름(Diamond-like Carbon : DLC)은 뛰어난 화학적 안정성과 생체적합성 그리고 우수한 기계적 물성을 가지고 있어서 다양한 생체의학적 보철물체의 응용 가능성이 높은 재료이다. 예를 들면, 고 관절 및 무릎관절 그리고 인공 척추의 마모를 억제하기 위한 보호 코팅 막으로 응용하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 심장밸브나 혈관 스텐트(Stent)의 혈전을 억제하기 위해 혹은 비혈관 스텐트에서 단백질의 흡착에 의한 재협착을 방지하기 위한 코팅재로서 많은 연구가 진행되고 있다 [1-3]. DLC 필름은 생체의학 보철물에서 요구되는 표면 특성, 즉 인체 내에서 감염이나 돌연 세포성장을 방지하고, 인체와의 적합성이 우수하며, 마찰 마모로 인한 debris의 형성을 억제해야 한다는 조건을 만족시킬 수 있어서 생체의학 보철물의 수명을 연장시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나, DLC 코팅의 생의학적 응용을 위해서는 생체의학 보철물에서의 코팅 안정성이 반드시 해결되어야 할 문제이다. DLC 필름은 높은 잔류응력과 급속 기판과의 접착력이 나빠서 그 응용에 많은 제약을 받고 있다. 특히, 생체 체액 내에서 필름의 박리가 발생하는 불안정성이 보고되고 있으며, 이는 궁극적으로 DLC 코팅 보철물의 수명을 현저히 감소시키게 된다 [4]. 특히, 스텐트의 경우에는 DLC 코팅층이 니켈 또는 크롬의 용리를 방지하는 부식 방지막으로서의 역할이 필요한데, 기판의 소성 변형 하에서도 코팅 층에 결함이 발생하지 말아야 그 효과가 제대로 유지될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기판의 소성 변형 하에서 발생하는 DLC 필름의 파괴거동을 조사하기 위해, 0.1 mm 두께의 304 스테인리스 스틸 박판으로 제작된 인장 시험편의 표면에 DLC 필름을 증착 하여 인장시험을 실시하였다. Agrawal과 Raj가 인장시험을 통하여 연성의 기판 위에 증착된 박막의 접착강도를 평가할

수 있다고 제안한 이래 [5], 이 분야는 이론적인발견과 함께 활발한 실험적 연구가 진행되고 있다 [6-11]. 이 방법은 기판이 심하게 변형되어 스크래치(Scratch) 시험법으로는 계면의 접착강도를 평가하기 어려운 부드러운 기판 위에 증착된 단단한 코팅 물질의 접착력을 평가하는데 특히 유용하다. Chen 등은 이 방법을 더욱 발전시켜 잔류응력의 영향을 고려한 수정된 이론적 모델을 가지고 TiN 박막의 접착강도를 평가하였다 [9]. Ohmura 등은 이 방법에 의한 접착강도와 나노 인덴테이션(Nanoindentation)을 가지고 측정된 접착강도를 비교하면서, 이 방법의 유용성을 보고한 바 있다 [10]. 또한 Bordet 등은 다양한 표면 거칠기를 가지는 Al 합금기판에 증착된 SiO<sub>2</sub> 박막의 갈라짐 거동을 연구하였다 [11].

필름의 인장강도와 탄성계수가 정확히 알려져 있고 필름의 접착력이 양호하여 인장시험 중 필름의 박리가 일어나기 전에 필름의 균열이 충분히 발생할 수 있다면, 이 방법은 박막과 기판 계면의 접착강도를 정량적으로 평가할 수 있는 우수한 방법이다. 그러나, DLC 필름과 같이 기계적 물성이 합성 조건에 따라 변하는 경우에는 이 방법을 이용한 접착력 평가가 어려워진다. 더욱이, 필름의 접착성이 나쁜 경우에는 변형 축에 수직으로 발생하는 전형적인 크랙(Crack) 외에 코팅 층의 박리가 일어나는데, 이런 박리가 발생하면 crack 주변의 응력환경을 변화시키므로 새로운 이론적 접근이 필요하게 된다. 따라서, 이러한 요소들은 포화 크랙 간의 거리로부터 계면 접착강도를 측정하는 인장 시험법에서 주의 깊게 고려하여야 한다.

본 연구에서는 스테인리스 스틸 기판에 DLC 필름을 코팅하고 기판에 10%까지의 인장소성변형을 가했을 때 발생하는 필름의 파괴거동을 조사하였다. 이 실험은 혈관 스텐트가 팽창할 때 코팅 층의 파괴거동을 이해하기 위해 실시하였다. 스테인리스 스틸 기판 위에 안정적인 DLC 박막의 코팅을 위해서는 계면 접착력을 향상시키기 위한 전처리 공정

이 필요하다. 전처리 조건의 효과를 관찰하기 위해 Ar 플라즈마를 이용한 기판세척 공정의 효과를 조사하였다. 본 연구를 통해 DLC 박막의 박리가 인장 시험편의 슬립밴드(Slipband) 방향을 따라 발생되며, Ar 플라즈마 세척에 따른 박막의 계면접착력과 매우 민감하게 연관되어 있음을 관찰할 수 있었다.

## 2. 실험방법

본 연구에 사용된 인장시험편은 두께 0.1 mm 의 304 스테인리스 스틸 판재로부터 제작되었으며, 시험편의 형상은 그림 1 과 같다. 시험편의 표면은 rms 거칠기 0.1  $\mu\text{m}$  미만이 되도록 전해연마 하였다. DLC 필름은 벤젠을 합성가스로사용하는 13.56 MHz의 radio frequency plasma assisted chemical vapordeposition (r.f.-PACVD) 방법을 이용하여 코팅하였다. DLC 박막의 기계적 물성과 잔류응력은 증착된 탄소 원자들의 운동에너지에 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이는 합성 시 기판의 self bias 전압, 증착 압력 그리고 합성가스의 분자 종류에 의존한다 [12-13]. 본 연구에서는 필름과 모재의 계면특성을 조사하기 위해 동일한 물성과 동일한 두께의 DLC 필름이 코팅된 시험편들을 준비하였는데, DLC 필름의 합성 시 증착 압력은 1.33Pa, 그리고 기판의 바이어스 전압은 -400 V로 일정하게 하였다. 합성된 DLC 박막의 잔류 압축응력은  $0.9 \pm 0.2 \text{ G Pa}$ , 경도는  $10.0 \pm 1.0 \text{ G Pa}$  로 측정되었으며, 필름의 두께는  $1.0 \pm 0.1 \mu\text{m}$  였다.

스테인리스 스틸 기판 위에 안정된 DLC 필름을 합성하기 위해서는 박막 증착에 앞서 기판을 Ar 플라즈마로 스퍼터링(Sputtering)하여 세척하고, 접착력 증진을 위한 Si 접착층을 사용하여야 한다. 본 실험에서는 Si 접착층의 합성조건을 동일하게 유지 하면서 Ar 플라즈마 스퍼터링 시간과 스퍼터링시

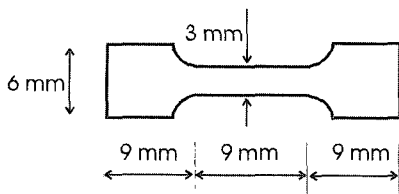


Fig. 1. 실험에 사용된 인장시험편의 크기 및 모양 (두께 0.1mm)

기판에 인가되는 바이어스 전압의 변화에 따른 파괴거동을 조사하였다. Ar 플라즈마 스퍼터링시 압력은 0.5 Pa로 유지하였으며, 바이어스 전압은 -200 V 에서 -900 V까지 변화시키고, 스퍼터링 시간은 15 분에서 60분까지 변화시켰다. Ar 스퍼터링 후, 수소로 희석된  $\text{SiH}_4$  가스를 이용하여 증착 압력 2.66 Pa, 바이어스 전압 -200 V의 조건에서 Si 접착 층을 2분 30초 동안 증착 하였다. 이때, Si 접착 층의 두께는 19 nm였다. 한편 코팅 층의 열적 안정성을 평가하기 위해 코팅된 시험편을 급속열처리장치 (rapid thermal processor)을 이용하여 수소분위기의  $200^\circ\text{C}$  혹은  $400^\circ\text{C}$ 에서 20분간 열처리하였다.

DLC 필름이 증착된 시험편의 인장시험에는 Rheometric Scientific사의 미소 인장시험기 (MINIMAT 2000)가 사용되었다 [14]. 변형률은 0.2 mm/min였으며, 최대 변형률 12%까지 인장한 후 시험편의 표면을 광학 현미경으로 관찰하였다. 본 실험에서 사용된 시험편의 전형적인 인장 곡선은 그림 2와 같은데, 코팅 층의 두께가 시험편의 두께에 비해 매우 작기 때문에 코팅되지 않은 스테인레스 스틸의 인장곡선과 동일 하였다. 인장 시험 동안 시험편의 표면을 고배율 비디오 카메라를 이용하여 실시간 관찰하였으며, Scanning Auger Spectroscopy를 이용하여 파손된 시험편의 표면을 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 3은 인장변형의 증가에 따른 코팅 층 표면의 파괴거동으로서, 변형률 2, 4, 6, 8 % (그림 2의 화살

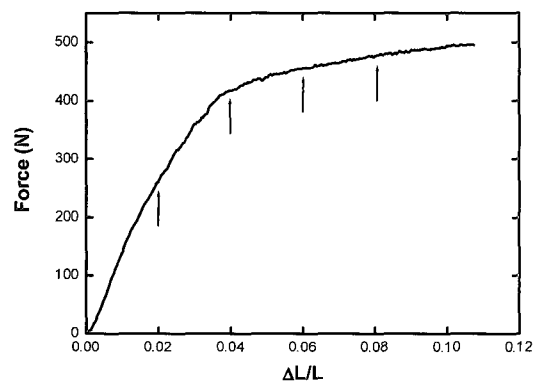


Fig. 2. 실험의 전형적 인장-변형 곡선.

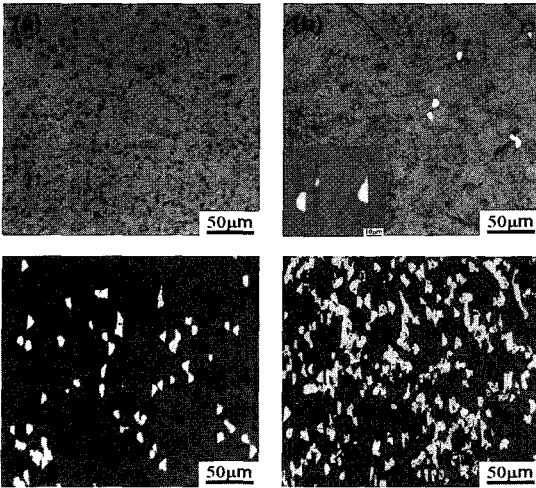


Fig. 3. 다양한 변형율을적용한 인장시험후의 시편 표면 미세구조 변화모습  
(a) 2%, (b) 4%,(c) 6% and (d) 8%.

표 위치)에서의 표면 미세조직을 보여주고 있다. 그림의 가로축이 인장 축이며, 이 시편의 Ar 스퍼터링 세척시 기판의 바이어스 전압은 -600 V, 시간은 15분이었다. 그림 3 (a)에서 보는 바와 같이 스트레인(Strain)이 2% 미만에서는 필름의 균열이나 박리 현상이 거의 관찰되지 않았다. 표면의 반점들은 기판의 소성변형이 일어남에 따라 생성된 것으로 국부적인 슬립현상에기인하는 것으로 생각된다. 이 결과는 DLC 코팅이 혈관 스텐트에 가해지는 최대 2%까지의 변형 하에서는 코팅 층의 손상이 발생하지 않는다는 것을 보여주고 있다.

그러나, 4%의 소성변형이 모재에 가해지면 그림

3 (b)와 같이 국부적인 균열과박리가 발생한다. 그림 3 (b)에 포함된 확대사진은 필름의 박리가 균열이 일어난 부분에서 발생하는 것을 잘 보여주고 있다. 다른 박막의 경우와 마찬가지로 DLC 필름의 균열 역시 인장 축에 수직으로 발생한다. 그러나, DLC 필름의 경우에는 균열과 함께 필름의 박리도 함께 일어나기 때문에, Agrawal 등이 제안한 균열간격을 이용한 접촉력 평가가 대단히 어렵다. DLC 필름의 경우처럼 균열과 함께 필름의 박리가 일어나면 균열주위의 응력상태가 현저히 변하기 때문에 균열의 발생 자체에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 따라서, Agrawal 등의 방법은 TiN 등 기판과의 접촉력이 양호한 경우에만 적용 가능할 것으로 생각된다. 소성 변형이 더욱 증가하면, 필름의 균열과 박리가 더 넓은 영역에 걸쳐 일어나며 균열간 간격의 감소와 함께 박리 부위의 증가가 함께 일어나고 있다(그림 3 (c), (d)).

필름의 박리는 모재의 슬립변형과 밀접한 관계를 가지고 있다. 그림 4 (a)는 인장시험 중에 관찰되는 표면의 형상을 보여주는 고배율 비디오 촬영상이다. 인장시험이 진행됨에 따라 인장축의 45° 방향으로 밝은 줄들이 발생하고, 그 숫자가 증가하면서 점차로 넓은 면적에 걸쳐 밝은 부분이 확대되어 가는 것을 알 수 있다. 그림 4 (b)의 고배율 표면사진에서 보는 바와 같이 밝은 부분은 필름의 박리가 발생한 부분으로, 필름의 박리가 모재의 슬립 방향을 따라 줄지어 발생하고 있음을 보여준다. 이 결과는 필름의 박리는모재의 슬립에 따른 전단변형이 필름에 추가적인 응력을 발생시켜 모재와의 박리와

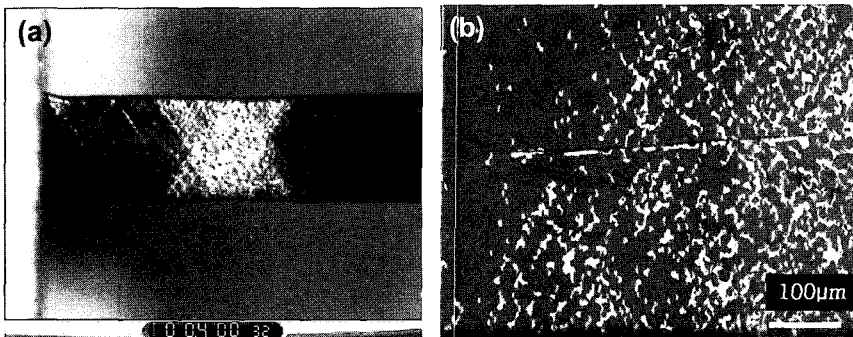


Fig. 4. (a) 고 배율 비디오에 의한 실시간 인장시험 기간의 시편표면 모습사진  
(b) 슬립밴드를 따라 필름의 박리가 발생된 시편표면 구조의 미세변화 모습.

필름의 파괴를 유발하고 있음을 보여준다.

기존의 연구들처럼 필름의 접착력이 양호한 코팅의 경우에는 인장 시험 중 박리가 거의 일어나지 않기 때문에 포화된 균열의 최대간격으로부터 접착력을 평가할 수 있다 [6,8]. 그러나, DLC 코팅에서는 박리로 인한 응력상태의 변화 때문에 균열간격과 접착력과의 관계를 이론적으로 도출하기가 매우 어려우며, 오히려 필름의 박리거동으로 필름의 접착력을 평가하는 것이 더 타당할 것이다. 슬립밴드 내에서 슬립방향을 따라 동일한 전단소성변형이 발생한다고 가정하면, 슬립밴드 내에서의 필름 박리는 동일한 양의 전단력에 의해 발생하는 것임으로 박리 양으로부터 필름의 접착력을 정성적으로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 접착력의 변화에 큰 영향을 미치는 Ar 스퍼터링 세척조건에 따른 박리거동을 비교함으로써 그 가능성을 조사하고자 하였다.

그림 5는 Ar 스퍼터링 세척시간의 변화에 따른 DLC 코팅 층의 박리현상을 비교한 것이다. 이 실험에서 Ar 스퍼터링 세척시 바이어스 전압은 -600 V로 일정하게 하였다. 그림 5 (a)에서 보는 바와 같이 15분간 세척한 시편에서는 필름의 박리가 심하게 일어났으며, 균열의 거리가 먼 것으로 보아 균열 발생 초기에 필름의 박리도 함께 발생한 것을 알 수 있다. 세척시간이 30분으로 증가하면 (그림 5 (b)), 필름의 박리가 현저히 감소하며 균열의 밀도는 크게 증가하였다. 이 조건에서는 필름의 접착력이 향상되어 인장시험이 진행됨에 따라 균열의 중첩은 발생하지만 필름의 박리는 일어나지 않았음을 알 수 있다. Ar 스퍼터링 세척 시간을 15분에서 30분으로 증가하였을 경우 필름의 박리면적은 41.7%에

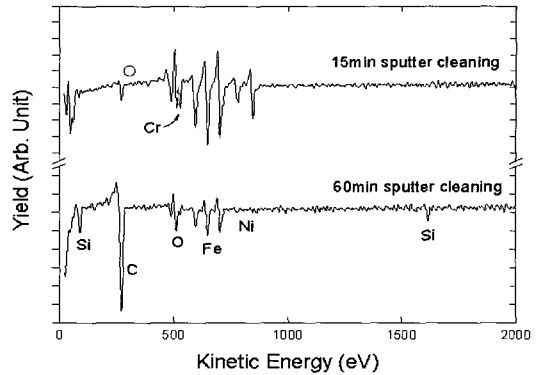


Fig. 6. 그림 5(a)와 5(c)의 박리된 필름의 Auger spectra

서 4.0%로 현저히 감소하였다. 또한, Ar 스퍼터링 세척시간이 60분으로 증가하면, 필름의 균열간격이 증가하고 필름의 박리도 현저히 줄어들어 박리면적이 0.3%에 불과하였다. 이 결과는 Ar 스퍼터링 세척의 시간이 증가함에 따라 필름의 접착력이 현저히 향상되고 있음을 정성적으로 보여준다.

그림 6은 그림 5 (a)와 (c)의 박리된 표면의 Auger spectrum을 보여주고 있다. Auger 분석 전에 시편의 표면오염을 제거하기 위해 분석 챔버 내에서 Ar 이온 빔을 이용하여 표면 층 2nm 정도를 제거하였다. 비교를 쉽게 하기 위해 스펙트럼들을 수직 이동시켰다. 15분 동안스퍼터 세척을 한 그림 5 (a) 시편의 박리 면에서는 Fe, Cr, 그리고 Ni이 주성분으로 확인되어 스테인리스 스틸의 표면이 노출되었음을 알 수 있다. 이는 필름의 박리가 기판과 Si 접착 층의 계면을 따라 발생했음을 보여준다. 한편, 스퍼터링 세척시간이 60분인 경우에는 박리표면에서 Fe, Cr,



Fig. 5. 다양한 Ar sputtering 전처리 시간공정 (Bias voltage는 -600V로 고정)에 따른 10% 인장 변형시험후의 시편표면 미세구조 변화모습 (a) 15 min, (b) 30 min, 및 (c) 60 min.

Ni의 양은 현저히 줄어든 반면 다량의 탄소와 Si이 관찰되는데, 이 결과로부터 필름의 박리가 상당부분 Si 접착 층 혹은 DLC 층에서 일어났음을 알 수 있다. 즉, Ar 스퍼터링 세척시간이 증가함에 따라 스테인리스 스틸과 Si 접착 층의 계면특성이 현저히 향상되고 이에 따라 필름의 전체적인 접착력이 향상되었음을 보여준다. 필름의 접착력은 Ar 스퍼터링 세척시 기판의 바이어스 전압이 증가함에 따라도 현저히 증가하였다.

그림 7은 Ar 스퍼터링 세척시 기판의 바이어스 전압의 변화에 따른 필름의 박리거동을 보여주고 있다. 이 실험에서 Ar 스퍼터링 세척 시간은 15분으로 일정하게하고, 기판의 바이어스 전압을 -200V에서 -900V까지 증가시켰다. 그림에서 보는 바와 같이 기판의 바이어스 전압이 -200V에서 -600V까지 증가함에 따라 필름의 박리 면적은 66.2%에서 49.7%로 서서히 감소하지만, -900 V에서 1% 미만으로 급격히 감소하고 있다. r.f.-PACVD 에서 높은 바이어스 전압은 Ar 이온의 운동에너지를 증가시켜줄 뿐만 아니라, 인가하는 r.f power의 증가가 수반되므로 플라즈마밀도를 증가시키는 효과를 동시에 가지고 있다. 그러므로 높은 바이어스 전압을 사용하는 것은 Ar 스퍼터링 세척시간의 증가 효과와 표면 세척 효율의 증가를 동시에 만들어 준다.

그림 8은 코팅 시편의 열처리에 따른 코팅 층의 박리거동을 비교한 것이다. 이 실험에 사용된 시편은 바이어스 전압 -900 V에서 15분간 Ar 스퍼터링 세척을 실시한 것으로서, 그림 7 (d)와 동일한 DLC 필름의 접착력이 우수한 시편이다. 시편들은 수소

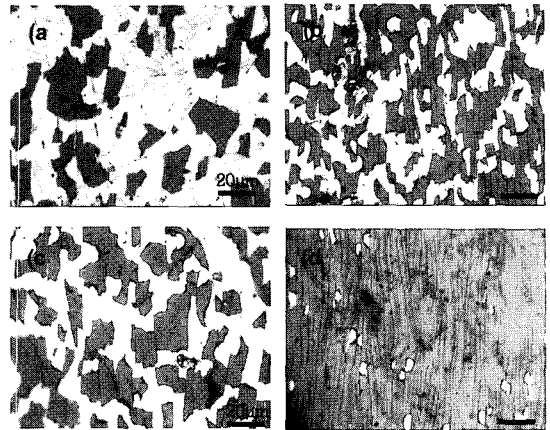


Fig. 7. 다양한 Ar sputtering bias voltage를 적용한 전 처리공정 ( sputtering시간: 15분 고정)에 따른 10% 인장 변형시험후의 시편표면 미세구조 변화모습 (a) -200 V, (b) -400 V, (c) -600 V, 및(d) -900 V.

분위기에서 200℃ 혹은 400℃에서 20분간 열처리를 실시하였다. 그림 8 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이, 200℃에서 열처리한 시편의 박리거동은 열처리를 하지 않은 시편과 거의 동일하다. 그러나, 400℃에서 열처리하면 코팅 층의 박리가 매우 심해지고 있다. 그러나, 파면의 Auger 분석결과로부터 파면에서의 조성변화는 거의 관찰되지 않았다. 이 결과는 접착력의 저하가 열처리에 따른 계면특성의 변화에 기인하기 보다는 열처리에 따른 필름의 물성변화가 계면의 응력상태를 변화시키기 때문인 것으로 추정된다. 최근 우리는 Si 기판 위에 r.f.-PACVD에 의해 코팅된 DLC 필름의 접착력에 미치는 열처리의 영

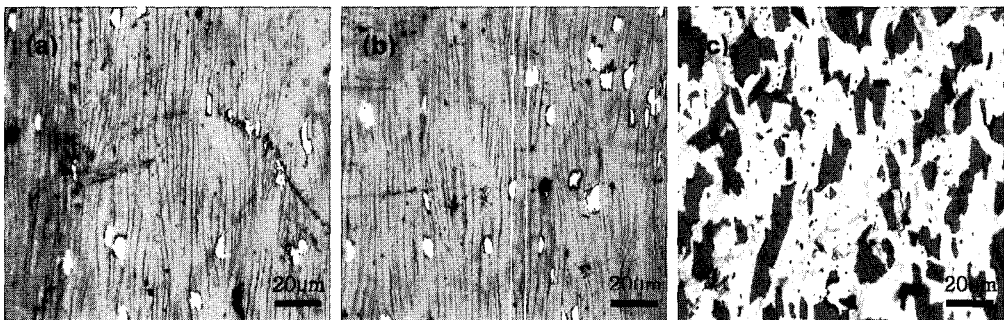


Fig. 8. 다양한 열처리 온도를 적용한 시편( Ar sputter 시간: 15 분, bias voltage: -900 V고정)의 10% 인장변형 시험후의 시편표면 미세구조 변화모습. (a) 상온 (b) 200℃ 열처리 (c)400℃ 열처리.

향을 조사하였다 [15]. Si 기판 상에서도 열처리 온도가 증가함에 따라 필름의 접착력이 저하되는 현상이 관찰되었으며, 이는 필름의 물성변화에 따라 현저해 지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 Si 계면과 DLC 사이의 계면특성이 열처리에 의해 개선되지 않으며, 오히려 필름의 구조변화에 따라 계면접착력이 저하되고 있음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 스테인레스 기판상의 Si 계면 층을 사용하는 본 연구의 경우에도 동일하게 나타나고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 DLC 코팅 스테인리스 스틸 판재의 인장시험을 통해 기판의 소성 변형시 DLC 코팅 층의 안정성을 평가할 수 있음을 보여 주었다. 스테인레스 스틸 모재의 소성변형이 진행되면 DLC 코팅 층에 인장 축과 수직으로 균열이 발생하며, 접착력이 나쁜 경우에는 균열과 동시에 필름의 박리가 관찰된다. 필름의 박리는 기판의 슬립 면을 따라 발생하는 데, 이는 필름의 박리가 모재의 전단변형에 의해 가속되는 것을 의미한다. 소성변형이 더욱 진행되면 필름의 박리와 균열의 발생이 중첩되면서 박리면적이 증가하였다. 따라서, 일정량의 소성변형이 가해졌을 때 관찰되는 필름의 박리면적으로부터 DLC 코팅 층의 접착력을 상대적으로 평가할 수 있다.

스테인레스 스틸 기판에서 DLC 코팅 층의 접착력은 기판의 전처리 조건에 따라 민감하게 변하였는데, 특히 Ar 플라즈마 스퍼터링 세척시간과 기판 바이어스 전압에 따라 큰 차이를 보였다. 접착력은 스퍼터링 세척 시간이 길수록 그리고 세척시 인가되는 기판 바이어스 전압이 증가할수록 증가하였다. 기판의 전처리 조건을 제어함으로써, 2%의 기판소성 변형 시에도 필름의 손상이 거의 관찰되지 않는 조건을 만들 수 있었다. 이는 혈관 스텐트에의 응용시 스텐트의 팽창 후에도 코팅의 효과를 유지할 수 있음을 의미한다. 코팅된 필름은 200℃의 열처리에 의해서도 안정성이 저하되지 않았으나, 400℃에서의 열처리에 의해 접착력이 급격히 저하되는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 과학기술국제화 사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V.-M. Tiainen, *Diam. Rel. Mater.* **10**, 153 (2001).
- [2] A. Grill, *Diam. Rel. Mater.* **12**, 166(2003); R. Hauert, *Diam. Rel. Mater.* **12**,583 (2003).
- [3] H. S. Tran, C. W. Hewitt, D. B. Soll, S. W. Marra, V. A. Simonetti, J. H. Cilley, and A. J. Del Rossi, *J. Investigative Surgery* **12**, 133 (1999).
- [4] G. Taeger, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* **34**, 1094 (2003).
- [5] D. C. Agrawal and R. Raj, *Acta Metall.* **37**, 1265 (1989).
- [6] M. S. Hu and A. G. Evans, *Acta Metal.* **37**, 917 (1989).
- [7] T. Ye, Z. Suo, and A. G. Evans, *Int. J. Solid. Struct.* **29**, 2639 (1992).
- [8] A. A. Ogwu, T. Coyle, T. I. T. Okpalugo, P. Kearney, P. D. Maguire, and J. A. D. McLaughlin, *Acta Mater.* **51**, 3455 (2003).
- [9] B. F. Chen, J. Hwang, G. P. Yu, and J. H. Huang, *Thin Solid Films* **352**, 173 (1999).
- [10] T. Ohmura and S. Matsuoka, *Surf. Coat. Technol.*, **169-170**, 728 (2003).
- [11] H. Bordet, M. Ignat, and M. Dupeux, *Thin Solid Films*, **315**, 207 (1998).
- [12] K. R. Lee, Y.-J. Baik, and K. Y. Eun, *Diam. Rel. Mater.* **2**, 910 (1993).
- [13] K. R. Lee, Y.-J. Baik, and K. Y. Eun, *Diam. Rel. Mater.* **3**, 1230 (1994).
- [14] *Minimat 2000 Reference Manual*, Rheometric Scientific Inc., Piscataway, NJ, USA (2001).
- [15] H. W. Choi, M.-W. Moon, T.-Y. Kim, K.-R. Lee, and K. H. Oh, *Materials Science Forum.* **475- 479**, In Press.