



<연구논문>

한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 46, No. 2, 2013.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2013.46.2.068>

초경합금에 나노결정질 다이아몬드 코팅 시 금속 중간층의 효과

나봉권, 강찬형*

한국산업기술대학교 신소재공학과

Effect of Metal Interlayers on Nanocrystalline Diamond Coating over WC-Co Substrate

Bong-Kwon Na, Chan Hyoung Kang*

Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University,
Kyonggi-Do 429-793, Korea

(Received February 27, 2013 ; revised April 8, 2013 ; accepted April 15, 2013)

Abstract

For the coating of diamond films on WC-Co tools, a buffer interlayer is needed because Co catalyzes diamond into graphite. W and Ti were chosen as candidate interlayer materials to prevent the diffusion of Co during diamond deposition. W or Ti interlayer of 1 μm thickness was deposited on WC-Co substrate under Ar in a DC magnetron sputter. After seeding treatment of the interlayer-deposited specimens in an ultrasonic bath containing nanometer diamond powders, 2 μm thick nanocrystalline diamond (NCD) films were deposited at 600°C over the metal layers in a 2.45 GHz microwave plasma CVD system. The cross-sectional morphology of films was observed by FESEM. X-ray diffraction and visual Raman spectroscopy were used to confirm the NCD crystal structure. Micro hardness was measured by nano-indenter. The coefficient of friction (COF) was measured by tribology test using ball on disk method. After tribology test, wear tracks were examined by optical microscope and alpha step profiler. Rockwell C indentation test was performed to characterize the adhesion between films and substrate. Ti and W were found good interlayer materials to act as Co diffusion barriers and diamond nucleation layers. The COFs on NCD films with W or Ti interlayer were measured as less than 0.1 whereas that on bare WC-Co was 0.6~1.0. However, W interlayer exhibited better results than Ti in terms of the adhesion to WC-Co substrate and to NCD film. This result is believed to be due to smaller difference in the coefficients of thermal expansion of the related films in the case of W interlayer than Ti one. By varying the thickness of W interlayer as 1, 2, and 4 μm with a fixed 2 μm thick NCD film, no difference in COF and wear behavior but a significant change in adhesion was observed. It was shown that the thicker the interlayer, the stronger the adhesion. It is suggested that thicker W interlayer is more effective in relieving the residual stress of NCD film during cooling after deposition and results in stronger adhesion.

Keywords: Nanocrystalline diamond, Microwave plasma CVD, Coefficient of friction, Adhesion

1. 서 론

공업용 합성 다이아몬드는 공구, 광학, 반도체 등 다양한 산업에 적용이 가능하다. 자연에서의 다이아몬드 형성 과정을 모방한 고온고압법은 공정 조건이 가혹하고 분말 형태로 생성되며 박막 형태로

제작이 어렵다는 단점이 있다.

화학기상증착법(Cheical Vapor Deposition)을 이용해 성장시킨 마이크로결정질 다이아몬드(Microcrystalline Diamond; MCD) 박막은 표면이 거칠어 코팅 후 사용 전에 표면을 연마해야 하는 단점이 있다. 그리고 공정온도가 높아 반도체나 MEMS 제조공정에 적용하기가 어렵다. 이의 해결 방안으로 나노결정질 다이아몬드(Nanocrystalline Diamond;

*Corresponding author. E-mail : chkang@kpu.ac.kr

NCD) 박막에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다¹⁻⁶⁾. NCD는 MCD와 달리 표면이 매끄럽고 증착 온도가 낮다는 장점을 가지고 있다. 따라서 다양한 형태의 기판에 적용이 가능하며 비철금속 가공에 사용되는 초경합금(WC-Co) 공구에 적용하면 많은 이점을 얻을 수 있다.

비철금속 가공 시, 마찰에 의한 열 발생을 줄이기 위해 윤활유를 사용한다. 최근 비용절감이나 인체 유해 품목 제재, 환경보호 측면에서 윤활유를 사용하지 않는 공정에 관심을 갖고 있다. 기존에 사용되는 공구 재료를 oil free 조건에서 사용하게 되면 마찰에 의해 고온의 열이 발생한다. 그리고 가공 도중 발생하는 부산물들이 공구에 들러붙어 가공성과 공구 수명을 저하시키게 된다. DLC(Diamond Like Carbon) 코팅이 주목을 받았으나 고온(200~400°C)에서 불안정하다는 단점이 있어 결과가 그리 성공적이지 못했다⁷⁾.

NCD는 위에서 언급한 대로 우수한 특성을 가지며 고온에서 안정하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 초경합금에 NCD 코팅을 적용하는 데에는 제약이 있다. CVD로 다이아몬드가 증착되는 온도(600~1,000°C)에서 Co의 탄소 고용도는 0.1~0.3 wt%이다⁸⁾. 다이아몬드 증착공정 초기에 초경합금 표면에 노출되어 있는 Co 바인더 지역으로 탄소가 빠르게 확산되어 포화된다. Co 원소는 포화된 탄소들이 다이아몬드 대신 흑연을 형성하는 촉매 역할을 한다. 따라서 Co는 다이아몬드 핵생성을 억지하며 이른바 흑연화를 유발한다⁹⁾.

이러한 문제점을 개선하기 위해 화학적 에칭을 이용한 방법¹⁰⁾이 제기되었다. Murakami 용액과 Caro 용액으로 표면의 Co를 일정 부분 제거하면 Co에 의한 탄소의 흑연화를 최소화하는 데 효과적이지만 사용되는 용액이 유해하다는 단점이 있다. 또한 Co가 제거되면서 초경합금이 취성을 나타낸다는 문제점이 있다. 따라서 Co의 확산 방지를 위해 제 3의 물질을 중간층으로 사용하는 방법이 제안되었다. 선행된 연구들¹¹⁻¹⁶⁾에서 다양한 중간층 위에 다이아몬드의 핵생성과 박막의 기계적 특성에 관해 연구가 이루어졌지만 연구방법들이 상이하기 때문에 결과들을 비교평가하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 다이아몬드 핵생성이 가능하다고 알려진 물질 중에서 Ti와 W를 중간층으로 선택하였다. WC-Co 기판 위에 W와 Ti 중간층을 형성하고 그 위에 NCD 박막을 코팅하여 기계적 특성을 비교하고, 그 결과를 통해 최적의 공정조건을 제안하고자 하였다.

2. 실험방법

Co가 10 wt% 포함된 초경합금(WC-Co)을 기판으로 사용하였다. 직경 40 mm, 두께 3 mm의 디스크 형태로 제작하고 한쪽 면을 경면 연마하였다. 기판 표면의 불순물 제거를 위해 아세톤, 메탄올, 탈이온수(DI water) 순으로 각 3분간 초음파 세정을 실시하였다.

W, Ti 중간층은 DC magnetron sputter를 이용해 초경합금 기판 위에 증착하였다. 직경 3인치 크기의 W, Ti 타겟을 사용하였다. 초기 진공 2.0×10^{-5} torr에서 Ar 가스를 유입하여 공정 압력을 4.5×10^{-3} torr로 유지하였으며 공정 도중 기판은 가열하지 않았다. 각 중간층 두께는 증착시간으로 제어하였다.

중간층 증착 후 표면에 다이아몬드 핵생성 자리를 만들기(seeding) 위해 다이아몬드 분말이 분산된 에탄올 용액에서 1시간 동안 초음파 처리를 하였다. 그리고 기판 표면에 남아 있는 분말과 불순물을 제거하기 위해 메탄올을 이용하여 1시간 동안 초음파 세척을 하였다. 각 전처리 공정마다 기판은 질소(99.9%) 가스를 사용하여 건조하였다.

Seeding 처리 후 MPCVD(Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition) 시스템을 이용하여 NCD 박막을 코팅하였다. 초기진공 1.0×10^{-3} torr에서 Ar와 CH₄ 가스를 200/2 SCCM의 비율로 주입하고 공정압력 110 torr를 유지하였으며 microwave power는 1.2 kW를 인가하였다. Graphite heater를 이용해 기판의 온도를 600°C로 유지하였다. 기판온도 측정은 Mo로 만들어진 기판지지대와 heater 사이에 위치한 K형 열전대로 이루어졌다. 코팅된 박막의 두께는 공정 시간으로 제어하였고 공정 도중 기판에 바이어스는 인가하지 않았다.

시편의 표면과 단면의 형상 및 미세구조를 관찰하고 다이아몬드 입자의 크기 및 박막의 두께를 관찰하기 위하여 전계방사주사전자현미경(Hitachi, S-4700)을 사용하였다. 박막의 결정성을 평가하기 위해 Raman spectroscopy(Jobin-Yvon, LabRamHR)와 X-선 회절분석기(Rigaku, D/Max-220PC)를 사용하였다. 박막의 미소경도를 nano-indenter(MTS, XP)에서 500 mN의 하중을 가해 측정하였으며, Rockwell C 경도계에 150 kg의 하중을 인가하여 생긴 압흔의 모양으로 박막의 접합력을 평가하였다.

Tribology tester(J&L Tech, Tribometer)로 박막의 마찰계수를 측정하였다. 마모 상대재료로 볼 형태의 ZrO₂를 사용하였고 5 N의 힘으로 누르고 선속도 120 mm/s, 측정거리 1,000 m로 하였다. 측정도

중, 어떠한 액체도 사용되지 않았으며 온도의 변화도 주지 않았다. Tribology test 후 표면의 마모 트랙을 알파스텝 단차측정기(alpha step profiler)로 관찰하여 각 시편의 내마모성을 비교하였다.

3. 실험결과

3.1 W과 Ti 중간층 비교 결과

초경합금 위에 W과 Ti을 각각 1 μm의 두께로 증착하고 그 위에 MPCVD를 이용하여 600°C에서 2 μm의 두께로 NCD 박막을 코팅하였다. 중간층에 따라 박막의 성장속도에 차이가 있었다. 즉 2 μm 두께의 NCD 박막을 코팅하는 데, W 중간층의 경우 2.75시간, Ti 중간층의 경우 8시간이 소요되었다. 각 시편의 단면 SEM 사진을 그림 1에 나타내었다. 중간층과 NCD 사이의 계면 형상을 비교할 때, W 중간층 위의 NCD 박막(사진 A)이 Ti 중간층 위의 NCD 박막(사진 B)보다 더 치밀하다.

그림 2는 제작한 시편들의 XRD 분석 결과로서 WC-Co 관련 피크들 사이에 44°에서 (111) 다이아몬드 피크를 확인할 수 있다.

그림 3은 Raman spectroscopy 측정 결과이다. Raman shift 값 1150, 1345, 1480, 1560 cm⁻¹에서 네 피크가 얻어졌다. 1150 cm⁻¹ 피크는 NCD의 지문 같은 것으로 NCD 입체면의 trans-polyacetylene

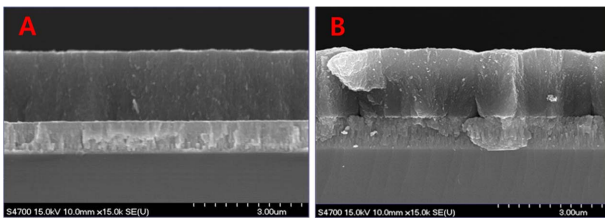


Fig. 1. Cross sectional SEM images of the NCD films with different interlayer metals on WC-Co substrate (A: NCD/W/WC-Co, B: NCD/Ti/WC-Co).

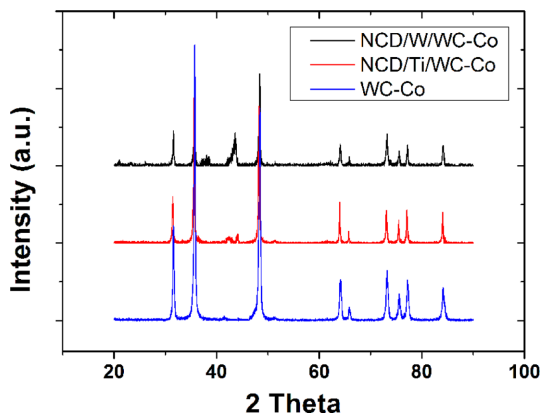


Fig. 2. XRD data of three different samples.

상태라고 알려진 1480 cm⁻¹ 피크와 함께 나타나고, 1345 cm⁻¹과 1560 cm⁻¹ 피크는 각각 통상의 D밴드와 G밴드에 해당된다¹⁷⁾. 이를 통해 W, Ti 각 중간층이 Co의 확산을 충분히 방지하여 NCD 핵생성과 박막 성장이 이루어진 것으로 볼 수 있다.

한편 nano-indenter를 이용해 두 시편의 경도를 측정된 결과를 그림 4에 기판인 WC-Co의 경도와 비교하여 나타내었다. W과 Ti 중간층에 코팅된 NCD 박막 모두 50 GPa의 높은 경도를 보였다.

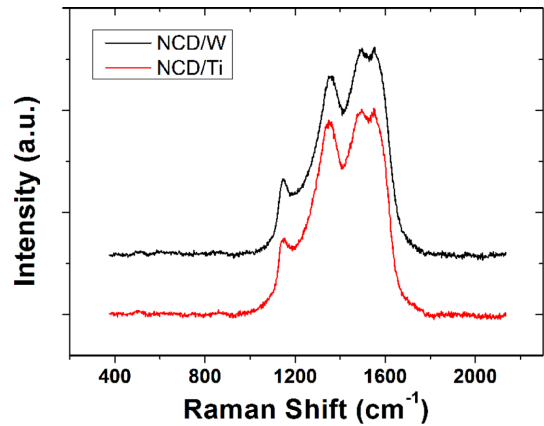


Fig. 3. Raman spectroscopy data of diamond films on different interlayer metals.

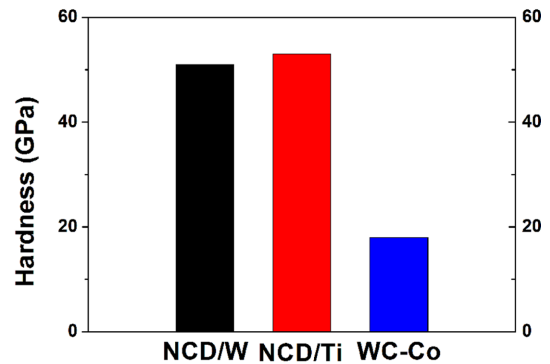


Fig. 4. Hardness test data using nano-indenter.

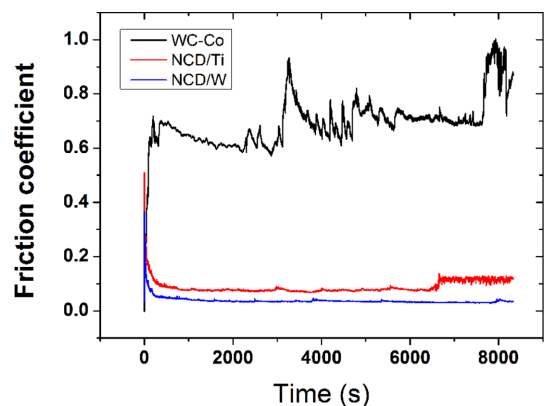


Fig. 5. Tribology test data of different samples.

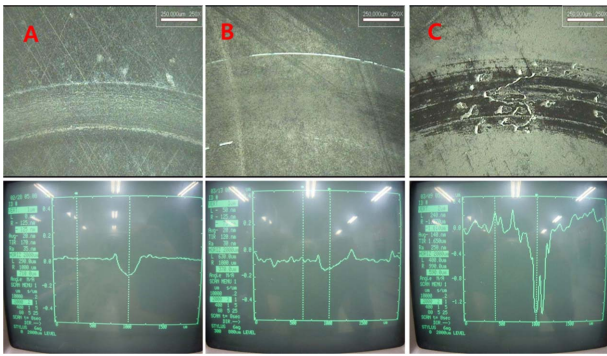


Fig. 6. Optical micrographs and depth profiles of wear tracks for WC-Co(A), NCD/W(B), and NCD/Ti(C). Scale bar: 250 μ m.

Table 1. The dimension of wear tracks in Fig. 6

Sample	A (WC-Co)	B (NCD/W)	C (NCD/Ti)
Width (nm)	274	622	484
Depth (nm)	212	153	1,420

Tribology test를 통해 각 중간층에 NCD 코팅된 박막의 마찰계수를 측정하여 그림 5에 나타내었다. 모재인 초경합금의 경우 마찰계수가 0.6~1.0인데 비하여, W 또는 Ti 위에 코팅된 NCD 박막의 경우 둘 다 0.1 이하의 낮은 마찰계수를 보였다.

마찰계수 측정 후 시편의 마모 트랙을 광학현미경과 알파스텝을 이용해 관찰한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 사진으로부터 각 시편의 마모 트랙의 폭과 깊이를 측정하여 표 1에 표시하였다. 시편에 따라 마모 트랙의 폭이 차이는 것은 시편과 ZrO₂ 볼과의 마모 차이에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 즉, WC-Co의 경우 볼보다 시편이 잘 닳아 트랙 폭이 작고 깊이가 깊으며, NCD/W 시편의 경우 볼이 더 잘 닳아 트랙 폭이 상대적으로 넓으나 깊이는 얇은 것으로 보인다. NCD/Ti 코팅 시편의 경우 1.4 μ m 이상 깊게 마모되었고 광학현미경 상에서 박막 층이 파괴된 것이 관찰된다. 그림 5에서 NCD/Ti 시편의 경우 마찰계수 값이 6,000초를 지나면서 약간 증가하는 것이 보이는데, 이는 마모시험 도중 Ti 중간층이 붕괴되고 NCD 박막이 파괴되어 마찰계수의 변화로 이어진 것으로 여겨진다.

박막의 밀착력을 비교하기 위해 Rockwell C indentation test를 실시하여 압흔의 형상을 광학현미경으로 관찰한 결과를 그림 7에 나타내었다. 압흔 주변의 깨진 형상과 크기를 통해 박막의 밀착력을 비교할 수 있는데, NCD/W의 경우가 밀착력이 우수하다고 판단할 수 있다. NCD/Ti의 경우 압흔 주변으로 넓은 면적에서 박리현상이 발생하였다.

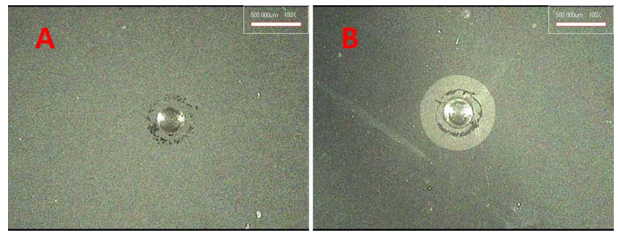


Fig. 7. Optical micrographs of the Rockwell C indentations for NCD/W(A) and NCD/Ti(B) film structures. Scale bar: 360 μ m.

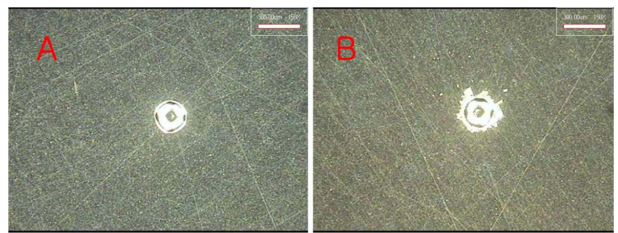


Fig. 8. Micrographs of Rockwell C indentations for NCD/W films before(A) and after(B) heat treatment. Scale bar: 360 μ m.

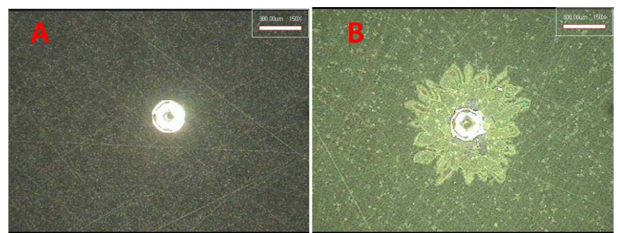


Fig. 9. Micrographs of Rockwell C indentations for NCD/Ti films before (A) and after (B) heat treatment. Scale bar: 360 μ m.

한편 초경합금 기판 위에 1 μ m 두께의 W 및 Ti 중간층만 증착 후 Rockwell C indentation test를 실시하여 밀착력을 비교하였다. 그리고 동일한 시편들을 600°C, Ar 분위기에서 3시간 열처리한 후 밀착력을 다시 비교하였다. 그 결과를 중간층 별로 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 열처리 전에는 W 및 Ti 중간층 모두 밀착력이 우수한 것으로 나타났으나 열처리 후 확연하게 밀착력 차이를 보였다. Ti 중간층의 경우 압흔 주변으로 넓은 면적에서 박리되었고 이에 비해 W 중간층은 박리된 면적이 아주 작았다.

3.2 W 중간층 두께의 효과

초경합금 기판에 W 중간층을 1, 2, 4 μ m 두께로 증착하고 그 위에 NCD 박막을 2 μ m 두께로 코팅한 시편들의 단면을 그림 10에 나타내었다.

세 가지 시편에 대하여 tribology test를 실시하여

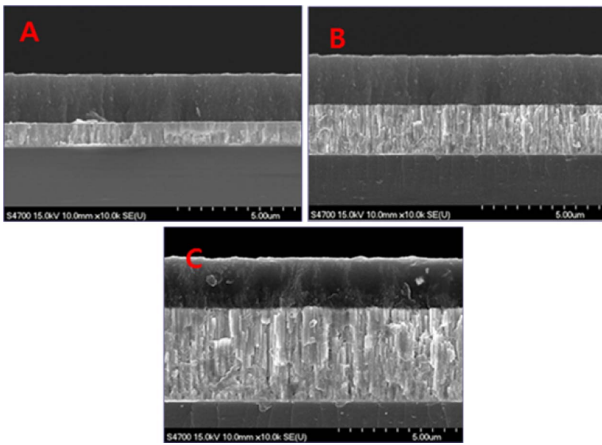


Fig. 10. Cross sectional SEM images of the samples with different W interlayer thickness (A: 1 μm , B: 2 μm , C: 4 μm).

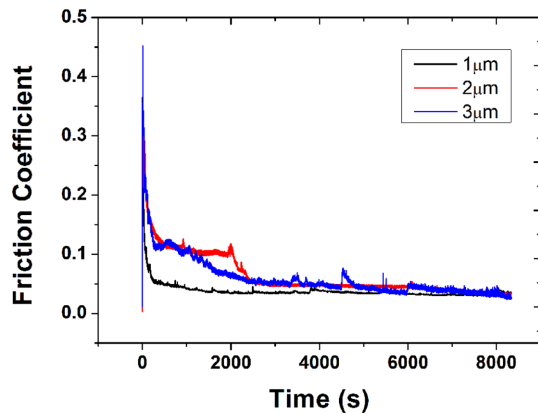


Fig. 11. Tribology test data of the samples with different W interlayer thickness.

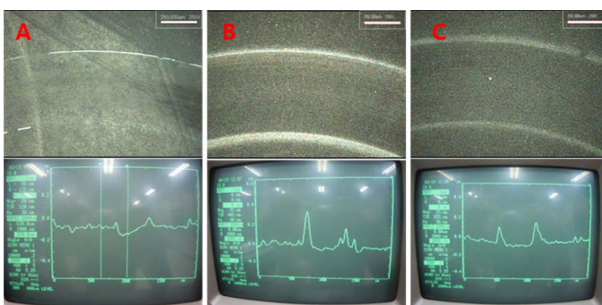


Fig. 12. Optical micrographs and depth profiles of wear tracks for three samples in Fig. 10. Scale bar: 250 μm .

마찰계수를 측정하고 마모 트랙의 형상을 관찰하였다. 마찰계수 측정 결과를 그림 11에 나타내었는데, 마찰계수는 모두 0.1 이하였다. 마모 트랙 관찰 결과를 그림 12에 나타내었고, 각 시편의 마모실험 후 생긴 트랙의 폭과 깊이를 측정하여 표 2에 표시하였다. 여기서 광학현미경으로 관찰된 트랙의 폭

Table 2. Dimensions of wear tracks in Fig. 12

Sample	A (1 μm)	B (2 μm)	C (4 μm)
Width (nm)	622	651	682
Depth (nm)	153	45	10

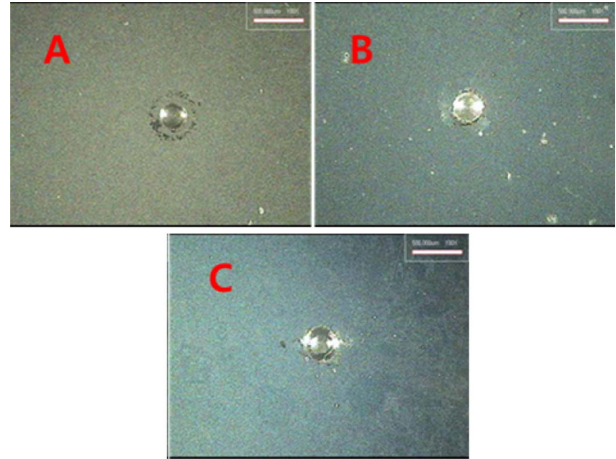


Fig. 13. Micrographs of Rockwell C indentations for three samples in Fig. 10. Scale bar: 360 μm .

과 알파스텝 측정으로 관찰된 트랙의 폭이 유사하고 시편별로 큰 차이가 없었다. W 중간층 두께가 증가하면서 NCD 박막의 마모 깊이가 미세하나마 감소하였고, 중간층의 두께가 4 μm 인 경우 박막의 마모는 거의 관찰되지 않았다.

한편 그림 6과 그림 12의 광학현미경 사진에서 트랙의 측면 양 끝에 보이는 흰 줄이나 알파스텝 측정 사진에서 보이는 중앙의 두 피크는 ZrO_2 ball이 마모되어 트랙 밖에 퇴적되어 생긴 것으로 판단된다. 시편을 초음파 세척한 후 이 피크들이 관찰되지 않음을 알파스텝 측정을 통해 확인하였다.

Rockwell C indentation test를 통해 W 중간층 두께에 따른 박막의 밀착력의 차이를 비교한 결과를 그림 13에 나타내었다. 1 μm 중간층 두께 시편보다 2 μm 중간층 두께 시편에서 압흔 주변의 박리 현상이 현저히 줄어들었으며, 4 μm 중간층 두께 시편의 경우 압흔 주변에서 박리현상이 거의 관찰되지 않았다. 즉 W 중간층 두께의 증가가 W/NCD 박막의 밀착력 향상에 효과가 있다고 볼 수 있다.

4. 고 찰

일반적으로 박막과 모재의 밀착력은 두 계면의 잔류응력과 관계가 있다고 보고 있다. 잔류응력은 발생 원인에 따라 내부응력(intrinsic stress)과 외부응력(extrinsic stress)으로 구분할 수 있다. 내부응력 발생 요인은 박막 형성 시 기관 표면에 남아있는

Table 3. Coefficient of thermal expansion(CTE) values of concerned materials

Materials	CTEs ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Diamond ¹⁴⁾	1.0
W ¹⁹⁾	4.5
Ti ¹⁹⁾	8.6
WC-Co ¹⁴⁾	4.0

Table 4. Thermal stress values calculated for different film structures

Structures	Thermal Stress (GPa)
W on WC-Co	-0.16
Ti on WC-Co	-0.45
Diamond on W	2.2
Diamond on Ti	4.8
Diamond on WC-Co	1.9

불순물, 격자불일치나 전위, 박막이 성장 시 탄화물 석출과 같은 상변태나 결정립 성장에 의한 팽창이나 수축 등이 있다. 외부적 요인은 박막과 기판과의 상호작용에 의해 발생하는데 대표적인 것이 박막과 기판의 열팽창계수의 차이로 인해 발생하는 열응력이다.

박막의 열응력은 다음과 같은 식¹⁸⁾으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_f(T) = \frac{(\alpha_s - \alpha_f)\Delta T \cdot Y_f}{1 - \nu_f}$$

여기서 α_s 와 α_f 는 각각 기판과 박막의 열팽창계수(coefficient of thermal expansion; CTE)로서 표 3에 그 값들을 표시하였고, ΔT 는 상온(25°C)과 공정온도(600°C)의 차이이다. Y_f 는 박막의 Young's modulus로써 다이아몬드는 1,000 GPa, W은 411 GPa, Ti은 116 GPa이며, ν_f 는 Poisson's ratio로써 다이아몬드는 0.09, W은 0.28, Ti은 0.32이다^{14,19)}. 위 식에 재료별로 해당되는 값을 넣어 각 박막 구조 별로 계산한 열응력 값을 표 4에 나타내었다.

표 4에서 중간층/모재(WC-Co) 간의 응력은 W과 Ti 모두 음(-)의 값으로 나왔는데, 이는 압축응력을 의미한다. 한편 다이아몬드/중간층 복합박막의 열응력 값은 W과 Ti 모두 양(+)의 값으로 나왔는데 이는 인장응력을 의미한다. 압축응력이 박막의 밀착력 측면에서 인장응력보다 유리하다고 하나 과도한 압축응력이나 인장응력 모두 박막의 모재 접착에 해롭다. 표 4에서 중간층/모재의 응력이 다이아몬드/중간층의 응력에 비해서 1/10 정도 작다. 이로서 중간층 박막이 모재 위에 잘 접착되어 있다고 볼 수 있다. 모재에 W과 Ti 박막을 각각 증착한 후

Rockwell C indentation test를 실시했을 때 박리가 일어나지 않은 것을 보여주는 그림 8과 그림 9의 각각의 사진 A가 이를 입증한다. 이들 시편을 600°C에서 3시간 열처리한 후 Rockwell C indentation test를 실시했을 때 그림 8과 그림 9의 각각의 사진 B에서 W 박막의 경우 미세한 박리가 관찰되나 Ti 박막의 경우 큰 박리가 관찰된 점은 표 4에 보이듯이 두 경우 모두 압축응력이 존재하나 Ti 박막의 경우가 W 박막보다 약 3배 크게 예측된 것과 일치한다.

표 4에서 다이아몬드/Ti 간의 인장응력이 다이아몬드/W의 그것보다 2배 이상 큰 것으로 나왔다. 즉 NCD/Ti 복합박막이 NCD/W 복합박막보다 잔류응력이 더 높은 것으로 볼 수 있다. 이는 그림 7에서 Rockwell C indentation test 후 압흔 주변의 박리가 NCD/Ti 복합박막이 NCD/W 복합박막보다 더 현저한 것과 잘 일치한다. 열 잔류응력이 큰 것이 밀착력 저하의 원인이 된다고 판단된다. 그림 6의 마모 시험 결과에서 NCD/Ti 복합박막의 마모량이 많은 것은 이 시편의 잔류응력이 높고 밀착력이 낮기 때문으로 보인다. 따라서 초경합금 기판에 NCD 박막 코팅 시 중간층으로서 W이 Ti보다 우수한 것으로 판단된다.

다이아몬드/금속 계면의 밀착력을 탄화물 형성 여부와 계면에너지 크기에 연관시킨 연구가 있어 왔다. Guo 등²⁰⁾은 Cu, Al, Ti 세 가지 금속 중간층을 대상으로 이론적 계산(density functional theory)을 통해 금속의 탄화물 형성 엔탈피가 작을수록(Ti < Al < Cu), 중간층과 다이아몬드와의 계면에너지가 클수록(Ti > Cu > Al) 중간층 위에서 다이아몬드 핵생성이 촉진되고 다이아몬드/중간층 간의 밀착력이 커진다고 보고하였다. 실제 Al이나 W 기판 위에 다이아몬드 박막 성장에 관한 실험보고는 없다. W에 대한 이론적 계산 결과가 없어서 현재로서는 W과 Ti을 이와 같은 방법으로 비교할 수 없다. 더 명확한 원인 규명을 위해서는 다양한 내부적, 외부적 요인들에 대하여 검토해 보는 것이 필요하다. 본 연구에서는 열팽창계수 차이에 의한 열응력의 관점에서 밀착력에 대해서 고찰하였다.

한편 3.2절의 실험결과에 의하면 W 중간층 두께의 증가가 박막의 밀착력 향상에 효과가 있다. 박막의 응력은 박막에 작용하는 힘을 박막 두께와 너비의 곱으로 나눈 값이다. 벌크 형태의 재료와 동일하게 박막의 응력은 작용하는 힘에 비례하며 두께에 반비례한다. 즉 중간층 두께가 증가함에 따라 작용하는 힘이 분산되어 잔류응력이 완화되고 밀착력이 향상되는 것으로 판단된다.

5. 결 론

초경합금 기판 위에 1 μm 두께의 W과 Ti 중간층을 각각 증착하고 2 μm 두께의 NCD 박막을 코팅하여 중간층에 따른 기계적 특성을 비교하였다. 마찰계수는 두 경우 모두 0.1 이하를 보여 중간층의 종류에 따라 차이가 나타나지 않았다. 내마모 특성 평가 결과, 마모 트랙의 깊이가 Ti 중간층의 경우 컷으나 W 중간층의 경우 작았다. Rockwell C indentation test를 통해 밀착력을 비교한 결과, W 중간층이 Ti 중간층에 비해 NCD 박막에의 밀착력이 우수한 것으로 나타났다. 초경합금 시편에 중간층만 증착 후 밀착력을 비교한 결과 W에 비하여 Ti의 밀착력이 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 종합할 때 초경합금에 NCD 박막 코팅 시 W이 중간층으로서 우수하며 이는 열팽창계수 차이가 작아 박막의 잔류응력이 적고 밀착력이 크기 때문이라고 판단된다. W 중간층의 두께를 1, 2, 4 μm 로 변화를 주고 그 위에 NCD 박막을 코팅했을 때 마찰계수에서는 차이를 보이지 않았으나 중간층의 두께가 증가하면서 내마모 특성 및 밀착력이 향상되는 것으로 나타났다. 이는 박막의 두께가 증가하면 작용하는 힘을 분산시켜 잔류응력을 완화하고 밀착력이 향상되는 것으로 해석된다. NCD/W/WC-Co 복합박막 시스템을 설계할 때 NCD 두께 2 μm , W 중간층 두께 4 μm 일 경우 내마모 특성과 밀착력 개선을 극대화할 수 있는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부 ‘소재원천기술개발사업’의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. D. M. Gruen, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 29 (1999) 211.
2. S. H. Choi, C. H. Kang, *MRS Proc.* 1035E-L05-16 (2007).
3. D. Y. Jung, C. H. Kang, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 42 (2009) 216.
4. D. Y. Jung, C. H. Kang, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 44 (2011) 131.
5. I.-S. Kim, C. H. Kang, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 46 (2013) 29.
6. J. E. Butler, A. V. Sumant, *Chem. Vap. Deposition*, 14 (2008) 145.
7. J. M. Dasch, C. C. Ang, C. A. Wong, Y. T. Cheng, A. M. Weiner, L. C. Lev, E. Konca, *Surf. Coat. Technol.*, 200 (2006) 2970.
8. T. B. Massalski (Ed.), *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd ed., vol. 1, ASM International, Metals Park, OH, USA, (1997) 835.
9. B. S. Park, Y.-J. Baik, K.-R. Lee, K. Y. Eun, D. H. Kim, *Diamond Relat. Mater.*, 2 (1993) 910.
10. M. G. Peters, R. H. Cummings, *European Patent* 0519587 (1992) A1.
11. V. G. Ralchenko, A. A. Smolin, V. G. Pereverzev, E. D. Obratsova, K. G. Korotoushenko, V. I. Konov, Y. V. Lakhotkin, E. N. Loubnin, *Diamond Relat. Mater.*, 4 (1995) 754.
12. Q. H. Fan, A. Fernandes, J. Gracio, *Diamond Relat. Mater.*, 7 (1998) 603.
13. R. Polini, *Thin Solid Films*, 515 (2006) 4.
14. X. Xiao, B. W. Sheldon, E. Konca, L. C. Lev, M. J. Lukitsch, *Diamond Relat. Mater.*, 18 (2009) 1114.
15. R. Polini, M. Barletta, G. Cristofallini, *Thin Solid Films*, 519 (2010) 1629.
16. Y. Tang, Y. S. Li, Q. Yang, A. Hirose, *Diamond Relat. Mater.*, 19 (2010) 496.
17. P. K. Chu, L. Li, *Mater. Chem. Phys.*, 96 (2006) 253.
18. M. Ohring, *Materials Science of Thin Films : Deposition & Structure*, 2nd ed., Academic Press, San Diego, CA, USA, (2002) 732.
19. David R. Lide (Ed.), *Handbook of Chemistry and Physics*, 88th ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, (2008).
20. H. Guo, Y. Qi, X. Li, *J. Appl. Phys.*, 107 (2010) 033722.