

비대칭 펄스 DC 반응성 스퍼터링 법에 의한 CNx 박막의 기계적 특성에 관한 연구

김준호 · 김대욱 · 차병철 · 김선광 · 이병석 · 전신희* · 김대일 · 유용주[†]
울산대학교 첨단소재공학부
*원정제관(주) 연구소

A Study on the Mechanical Properties of CNx Thin Films Deposited by Asymmetric Bipolar Pulsed D. C. Sputtering

J. H. Kim, D. W. Kim, B. C. Cha, S. K. Kim, B. S. Lee, S. H. Jeon*, D. I. Kim, Y. Z. You[†]
School of Material Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea
*R&D Center, ONE JUNG CAN MANUFACTURING Co.,Ltd, Ulsan, 680-749, Korea

Abstract In case of using Asymmetric Bipolar Pulsed DC (ABPD) power generator, thin film is efficiently deposited as ions are getting higher energy by suppressing target poisoning and electric arc. In this article, the mechanical properties of CNx thin films deposited on the STS 316L were compared with DC and ABPD power generators. The CNx thin films deposited with ABPD clearly improved wear resistance by higher ratio of sp³C-N as compared with DC. Nb interlayer affected to increase the value of 10N of adhesion between CNx thin films and substrate. But, CNx thin films deposited with ABPD couldn't endure to wear load and decreased wear resistance as the films were too thinner than substrate. Nevertheless the higher substrate bias energy applied to perform the dense films, it wasn't shown benefits about the wear properties from DC sputtering. But, in case of using ABPD sputtering, the wear resistance was largely improved without changing morphology despite of thin films.

(Received August 7, 2009; Revised August 12, 2009; Accepted August 17, 2009)

Key words: CNx, Carbon Nitride, Asymmetric Bipolar Pulsed D.C, Sputtering, 탄질화물

1. 서 론

DC전원장치를 사용한 반응성 스퍼터링은 질화물, 산화물 그리고 탄화물을 포함하는 박막을 증착하는데 매우 유용하게 사용되어 왔다. 반응가스와 공정조건을 조절해 미세구조를 변화시킬 수 있으며 화합물 박막을 증착하는 것이 가능하다. 그러나 금속타겟을 반응성 스퍼터링을 하는 동안 챔버 내의 반응성 가스가 타겟에서 발생하는 이온과 반응하여 타겟의 표면에 반응물이 형성됨으로 타겟오염이 발생한다. 질화물과 산화물은 절연체에 가까워 낮은 에너지의 이온이 타겟표면에 모이게 되고, 이 현상이 계속되면 점점 충돌할 수 있는 가스 이온에너지가 감소하게 되어 스퍼터링이 멈추게 된다. 또는 절연파괴가 발생하며 아킹을 일으켜 거대입자를 기판에 남게 되는

문제가 발생하였다. 비대칭 펄스 DC(APBD: Asymmetric Bipolar Pulsed DC) 전원장치는 금속 타겟 표면에 생성되는 절연박막의 문제를 해결할 수 있는 방법 중 가장 편하고 효율성이 큰 방법이다 [1]. ABPD구동에 의한 반응성 스퍼터링시 양극에 전원이 인가되면 타겟표면에 양극으로 대전된 이온으로 존재하는 유전체 질화물 및 산화물들과 양극전압의 영향으로 이온들은 즉시 역행하게 되고, 음극이 인가되는 동안 절연막과 타겟사이에서 존재했던 상대적인 양극이 음전위를 띄게 된다. 펄스주기가 지나 다시 음전위가 타겟에 인가되면 금속타겟에는 금속의 높은 전기전도도로 인해 인가된 전압극성 변화에 대응할 수 있지만 타겟 앞에 형성된 절연막은 빠른 극성변화에 반응하지 못해 더 큰 전위차이가 형성됨으로써 절연막이 먼저 스퍼터링되어 타겟오염을 방지

[†]E-mail : zyyou@mail.ulsan.ac.kr

할 수 있다. 이 공정은 아킹을 제어할 수 있고 박막의 거칠기, 균일성을 상승시킬 수 있다[1].

탄질화물(CNx: Carbon nitride) 박막은 Diamond Like Carbon(DLC)의 우수한 내마모성과 경도값이 유사하며 500°C 이상에서 급격히 저하되는 열적안정성을 보완할 수 있는 물질이다. CNx는 낮은 압축성을 가지며 주로 β -C₃N₄로 존재하고 고온의 전기전도도와 높은 탄성계수를 가지고 있다는 보고가 있다[2]. DC스퍼터링으로 증착된 CNx박막은 질소함량, 경도, 공정온도 그리고 바이어스 전압이 증가할수록 마찰계수가 낮아지는 경향을 나타내고 있다[3, 4]. 밀착력을 증가시키기 위해서는 모재와 박막간의 부결합을 줄여 계면의 에너지를 낮추거나 내부 잔류응력을 줄이는 방법이 있고 박막의 성질을 개량해 기판과 강력한 화학적 결합을 이루는 방법이 있다. 일반적으로 원하는 박막과 모재 사이에 Ti, Cr과 같은 금속을 얇게 증착하여 밀착력을 증가시키는데 이는 이 금속들이 산화물과 같은 표면오염물을 분해시키고 모재와 박막간의 기계적 물성 차이를 줄여 잔류응력을 줄이기 때문이다[5]. Nb는 낮은 기계적 물성을 가지고 있지만 중간층으로 사용하여 스크래치 시험과 록크웰 압입시험을 통한 밀착력을 측정하였을 때 둘 다 일반적으로 사용되는 중간층인 Ti, Cr보다 근소하게 더 좋은 밀착력을 나타내었다[6].

본 연구에서는 ABPD 전원장치를 사용하여 DC전원장치의 단점을 극복하고 우수한 기계적 특성을 가지는 CNx박막을 증착하였으며 내마모성의 향상을 위한 질소가스 비율의 변화, 중간층의 유무 그리고 바이어스 전압변화에 따른 박막물성의 변화에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 박막의 증착

본 실험에 사용된 재료는 스테인리스 316 L (STS316L)로서 직경 22 mm, 두께 6 mm의 디스크로 제작하여 연마지 #180-#2000까지 연마한 후 1 μ m, 0.3 μ m 그리고 0.05 μ m의 알루미늄(Al₂O₃)분말을 단계별로 사용하여 경면연마를 하였으며, 연마된 시편은 아세톤과 에탄올을 사용하여 초음파세척기로 세척하였다. 본 실험에 사용한 스퍼터링 장치는 스퍼

터 건이 기판의 중심으로 향하고 있으며 60 mm의 간격으로 상하배열 시켰다. 타겟으로는 76.2 mm, 두께 6.25 mm인 디스크모양의 카본(C, 4N8)과 니오븀(Nb, 4N)을 사용하였다. 불순물에 의한 오염을 최소화 하기 위하여 로드락(loadlock)을 이용하여 시편을 장입 하였으며 로타리펌프와 터보분자펌프를 사용해 초기진공도를 5×10^{-7} Torr로 하였다. CNx박막을 증착하기 위해 DC와 ABPD 스퍼터링에 사용된 전력은 600 W였고 가스(Ar, N₂)의 총량은 10 SCCM으로 고정하고 N₂/(Ar+N₂)의 비율을 0.3 또는 0.6으로 변화시켰고, 3×10^{-3} Torr에서 1시간 동안 증착을 진행하였다. ABPD는 선행실험을 통해 듀티 사이클, 진동수, 양극기전압의 변화에 따른 박막의 물성을 조사하여 본 실험의 조건으로 설정하였다. 중간층으로 사용된 니오븀층은 DC스퍼터링을 통하여 3×10^{-3} Torr에서 100 W로 150 nm를 증착하였다.

2.2 박막특성분석

증착된 CNx박막의 XPS(Thermo Scientific, k-alpha) 분석을 통해 원소의 함량, C-C와 C-N결합의 비율, 그리고 C-N결합물 내에서의 sp² 및 sp³의 비율을 측정하였다. XPS분석을 위한 조건은 초기 진공도: 10⁻⁷ Torr, 작업 진공도: 10⁻⁹ Torr, 방사 소스: Al K α , 공정전압: 12000 V, 음극 빔의 전류: 1.16 mA, 필라멘트 전류: 1.457 A이다. 상 분석은 XRD를 이용하여 CuK α ₁(1.54056 Å)을 타겟으로 사용하고 2 θ 를 10~70°, 스캔속도를 2°/min, 스캔간격을 0.02로 측정하였다. 기계적 물성을 평가하기 위해 잔류응력, 경도, 스크래치 시험 그리고 마모시험을 시행하였다. 잔류응력을 측정하기 위해 Profilometer (Veeco, DekTak 150)를 사용하여 500 μ m 두께의 Si(100) 웨이퍼에 박막증착 후 웨이퍼가 박막의 응력으로 인해 휘어지는 정도를 통해 측정하였으며, 경도는 누프 경도시험기(Mitutoyo HM-128)를 사용하여 2 gf/ μ m²의 하중으로 10초간 압입하여 측정하였다. 박막의 밀착력은 스크래치 시험기(CSM, Revetest)를 사용하여 최대 하중을 50 N까지 가한 후 ASTM C1624으로 측정하였다. 마모시험은 3N의 하중으로 100 mm/sec, 500 m를 시험한 후 마모흔의 폭과 깊이를 Profilometer로 측정하여 마모면적 및 소착면적을 통해 상대 비교하였다.

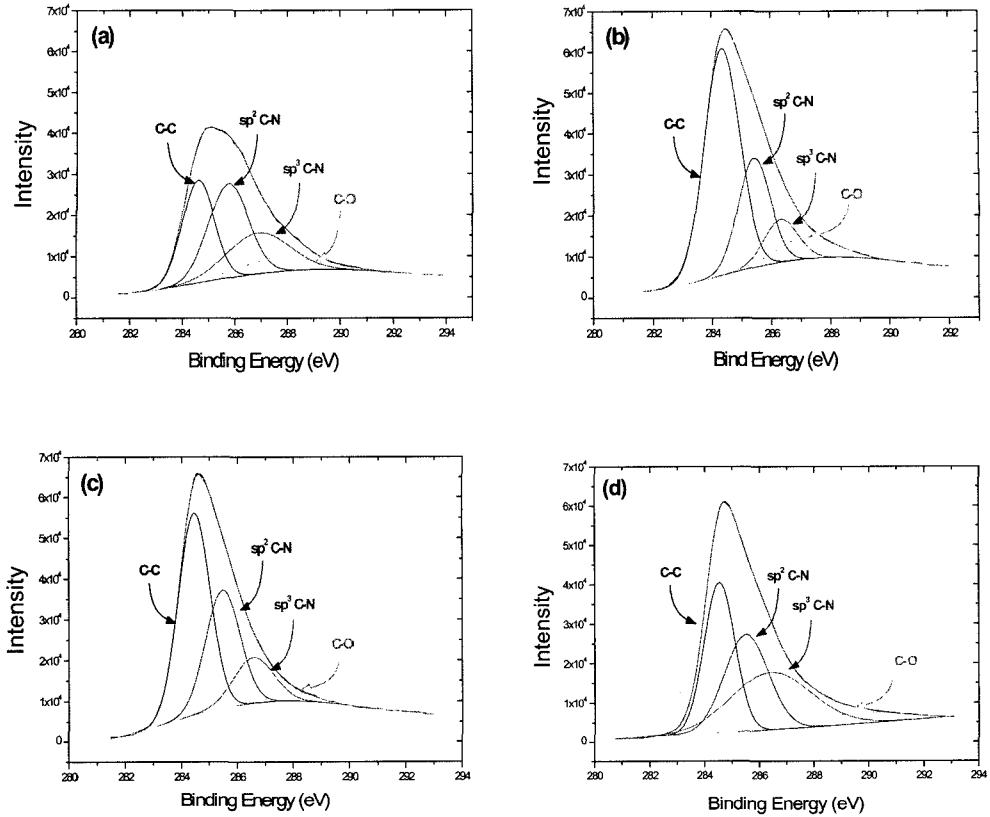


Fig. 1. XPS spectra by various N₂ partial pressure; (a) DC, N₂ 30%, (b) DC, N₂ 60%, (c) ABPD, N₂ 30% and (d) ABPD, N₂ 60%.

Table 1. The ratio of phases by various parameters

Ratio of nitrogen	Phases	DC	ABPD
0.3	C-C(284.5eV)	30.76%	42.79%
	sp ² C-N(285.5eV)	35.41%	26.62%
	sp ³ C-N(286.5eV)	23.73%	27.42%
0.6	C-C(284.5eV)	50.79%	32.42%
	sp ² C-N(285.5eV)	32.15%	29.65%
	sp ³ C-N(286.5eV)	14.3%	31.99%

3. 결과 및 고찰

3.1 질소가스 비율 영향

반응가스인 N₂의 주입량에 따라 CN_x박막 특성의 변화를 알아보기 위하여 증착 시 사용되는 전원장치와 챔버 내부에 주입되는 Ar과 N₂의 비율{N₂/(Ar+N₂)}을 변화시켜 CN_x박막을 증착하였다.

Fig. 1과 Table 1에 XPS의 스펙트럼, Table 2는

질소비율에 따른 CN_x박막의 경도 변화를 나타내었다. XPS분석에서 C1s의 스펙트럼은 총 4개의 peak로 분할되며 결합에너지가 낮은 순서로 C-C(284.3 eV), sp² C-N(285.5 eV), sp³ C-N(286.5 eV), 그리고 마지막으로 C-O결합으로 분류할 수 있다[7]. Table 2에서 보는 바와 같이 CN_x박막의 경도는 질소비율이 증가할수록 증가하는 경향을 보인다.

그리고 Fig. 1과 Table 1에 나타낸 바와 같이 스

Table 2. Properties of CNx thin films with various parameters

	Ratio of nitrogen	Film thickness (nm)	Hardness (HK _{0.002})	Adhesion (Lc1, N)	Area of wear (mm ²)	Area of burning (mm ²)
DC	0.3	525	853	5.23	447.24	1133.04
	0.6	1275	1322	0.1	435.88	116.18
ABPD	0.3	384	1326	6.06	153.41	372.28
	0.6	595	885	0.2	17.69	193.5

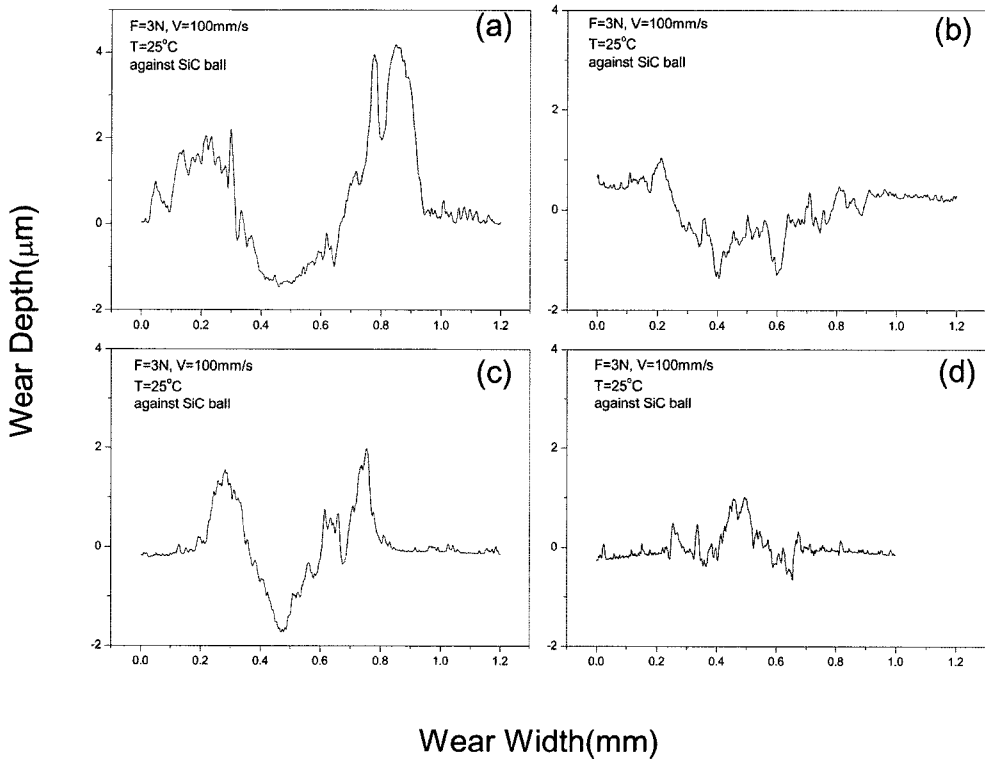


Fig. 2. The profiling of wear track by various N₂ partial pressure; (a) DC, N₂ 30%, (b) DC, N₂ 60%, (c) ABPD, N₂ 30% and (d) ABPD, N₂ 60%.

퍼터링에서는 질소비율이 0.3일 때 C-C결합에 비해 C-N(sp²+sp³)결합의 비율이 크고, 질소비율이 증가하여 0.6일 때는 반대로 C-C 결합이 C-N결합보다 비율이 크다. 질소비율이 0.6일 경우가 질소비율 0.3인 경우에 비해 질량이 큰 Ar에 의해 스퍼터링된 탄소이온 종의 에너지가 낮아 질소이온과 충분히 반응하지 못하고 결합에너지가 낮은 C-C 결합이 생성되는 것으로 생각된다.

ABPD 스퍼터링의 경우에는 ABPD고유의 특성인 높은 전력밀도로 인해 스퍼터링 효율과 이온종의 에너지가 높아져 질소비율 0.3에서 경도가 높아졌다.

ABPD의 경우 높은 전력밀도에도 불구하고 C-N결합이 적은 이유는 DC에 비해 증가된 에너지를 가진 탄소이온종들이 반응할 질소가 적기 때문이다. 이러한 이유로 XPS분석결과 ABPD에서 C-N결합의 강도는 거의 비슷하지만 C-C결합의 강도가 2배정도 증가했다. 질소비율 0.6에서는 증가된 전원밀도를 충분히 사용할 정도의 N₂를 포함하고 있어 반응이 활발해 지기 때문에 sp³ C-N결합이 주를 차지하게 된다. 하지만, 경도는 sp³ C-N결합이 아닌 C-C결합에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 질소비율의 변화와 전원에 따라 증착된

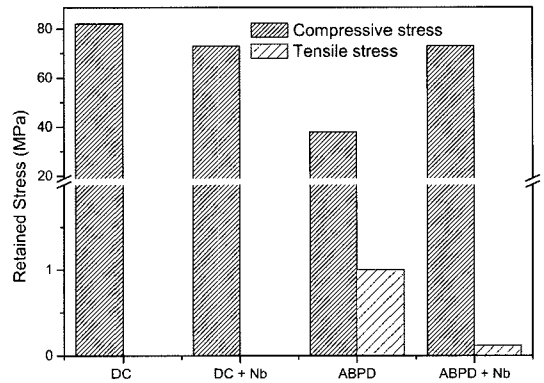
Table 3. Hardness and critical load comparison by existence of interlayer

		Hardness (Hk _{0.002})	Adhesion (Lc1, N)
DC	No Interlayer	1322	6.06
	Nb 150 nm	490	16
ABPD	No Interlayer	885	0.2
	Nb 150 nm	391	8.2

박막을 마모시험 후 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 시편에서 증착된 박막은 마모되어 기지에 마모가 발생하였다. DC 스퍼터링의 경우 Table 2에 나타낸 바와 같이 3N의 마찰하중을 견딜 수 있는 최소한의 밀착력을 가지고 있음에도 불구하고 마모트랙이 ABPD에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. 박막이 충분하지 못한 두께를 가짐으로 인해 마모시험 중 기관의 변형으로 인한 응력이 발생하게 되어 코팅의 파괴가 발생하고 모재가 노출되어 마모와 기관의 변형이 가속화된 것으로 판단된다. 반면에 ABPD 스퍼터링으로 증착한 CNx 코팅층은 DC에 비해 박막의 두께가 더 얇고 약한 밀착력으로 인해 마모시험의 시작과 동시에 코팅층의 파괴가 발생하지만 데브리(Debris) 입자가 로드를 운반할 만큼 충분한 경도를 갖고 있고 우수한 내마모성을 가진 sp³상의 분율증가로 인해 롤러역할을 하여 마찰을 줄여준 것으로 판단된다[8]. 경한 코팅층의 두께가 두꺼우면 상대적으로 연한 기관에 가해지는 하중의 부담을 줄여주고 기관변형을 방지하여 마찰과 접촉면적을 감소시키기 때문에 sp³분율이 가장 적은 DC전원을 사용한 질소비율 0.6의 마모깊이가 적다. 또한 Fig. 2(d)는 약 600 nm 정도로 코팅층이 얇지만 마모깊이가 코팅층의 두께와 비슷하다. 이것은 마모에 의해 코팅층이 파괴되어 데브리를 만들지만 데브리에 함유되어 있는 sp³상의 우수한 내마모성으로 인해 기관의 마모가 거의 발생하지 않은 것으로 생각된다.

3.2 중간층 및 바이어스 전압 변화에 따른 기계적 특성

Table 3에 중간층의 유무에 따른 경도와 임계하중을 나타내었다. CNx박막과 모재와의 밀착력은 DC와 ABPD 스퍼터링의 경우 임계하중이 각각 6.06 N과 0.20 N이다. 두가지 증착방법 모두 모재와의 부족한 밀착력을 보이고 있어 밀착력의 증가가 필요하

**Fig. 3.** The change in residual stress interlayer by existence of interlayer.

다. 일반적으로 박막과 모재사이에 천이금속을 얇게 증착하면 천이금속의 반응성으로 인해 표면오염물을 분해시키고 모재와 박막간의 격자불일치를 줄여 잔류응력을 줄여줌으로써 밀착력을 증가시킨다. 따라서 본 연구에서는 CNx 박막의 밀착력을 증가시키기 위한 중간층으로서 Nb를 150 nm 증착하였다. Nb막 위에 CNx를 증착 시켰을 경우 DC와 ABPD 공히 중간층을 사용하지 않은 경우에 비해 임계하중이 8 N에서 10 N의 상승이 있었다. 그러나 Table 3에서 보는 바와 같이 Nb의 연한 기계적 특성으로 인하여 DC의 경우는 HK = 1322에서 HK = 490으로, ABPD의 경우 HK = 885에서 HK = 390으로 큰 폭의 경도감소를 나타내었다. Fig. 3은 중간층의 유무에 따른 잔류응력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Nb 중간층이 없는 ABPD스퍼터링에 의해 증착된 CNx박막은 DC나 중간층이 존재하는 경우와 비교하면 상대적으로 낮은 압축잔류응력을 갖고 있다. 그러나 ABPD 스퍼터링으로 증착된 CNx박막은 추가적으로 인장응력이 존재하기 때문에 밀착력이 낮은 것으로 생각된다. Fig. 4는 Nb 중간층이 존재할 때 DC와 ABPD 스퍼터링 법으로 증착된 CNx

박막의 마모트랙을 나타내었다. 동일한 CNx 증착조건을 가지는 Fig. 2의 결과와 비교할 때 중간층의 유무에 따라 마모트랙의 큰 변화를 보이고 있다. 일반적으로 중간층은 박막에 가해지는 하중의 영향과 잔류응력을 줄이며 크랙의 전달방지 및 밀착력을 상승시켜 마찰특성을 개선시킨다. 그러나 ABPD 스퍼터링법으로 증착된 CNx박막은 두께가 Nb 중간층의 두께와 비슷하여 연질의 Nb보다 충분한 두께를 가지지 못해 하중을 전달시켜 Nb 중간층이 변형되어 마모특성에 악영향을 끼치게 된다.

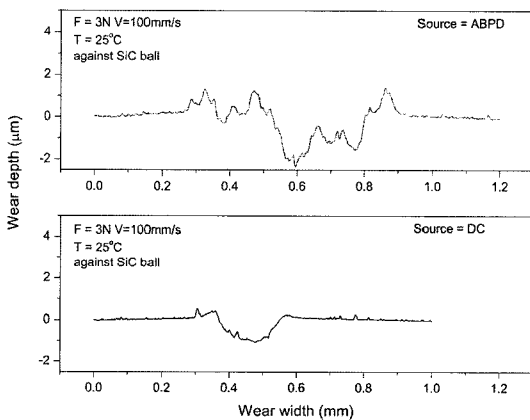


Fig. 4. The profiling of wear track with interlayer.

Fig. 5 (a)~(c)은 DC로 증착한 CNx 박막의 단면 조직으로 CNx박막의 두께는 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이 결과는 기판에 바이어스 전압을 인가하면 결정립이 조밀해지고 void가 감소하며 resputtering 현상이 발생해 주상정 조직의 성장이 억제되고 두께는 선형적으로 감소된다는 보고와 일치한다[10]. 그러나 본 실험에서는 바이어스 전압을 -400 V 이상 인가 함에 따라 박막 두께가 감소하고 치밀한 구조로 성장하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5 (d)~(f)에 나타낸 ABPD의 단면조직의 경우, 인가된 바이어스 전압의 증가에 따른 구조의 변화가 없고 두께의 변화가 관찰되었으나 DC 스퍼터링과 달리 큰 폭의 박막 두께 감소는 없다. 이것은 ABPD의 극성변화로 인해 발생하는 현상으로, 음전위 영역일 때 타겟으로부터 떨어져 나와 가속된 이온들과 바이어스 전압 때문에 resputtering 되어 나온 이온들이 타겟에 인가되는 전위가 양 전위영역으로 변화할 때, 음전위를 갖는 바이어스 전압이 일부 상쇄되기 때문이다[11]. 바이어스 전압을 인가했을 때 박막의 두께가 바이어스 전압을 인가하지 않은 박막의 두께 보다 낮아지는 현상은 전압효과의 상쇄를 나타내 주는 것이다. 따라서 바이어스 전압을 인가하지 않은 박막의 증착률이 더 높은 것으로 확인할 수

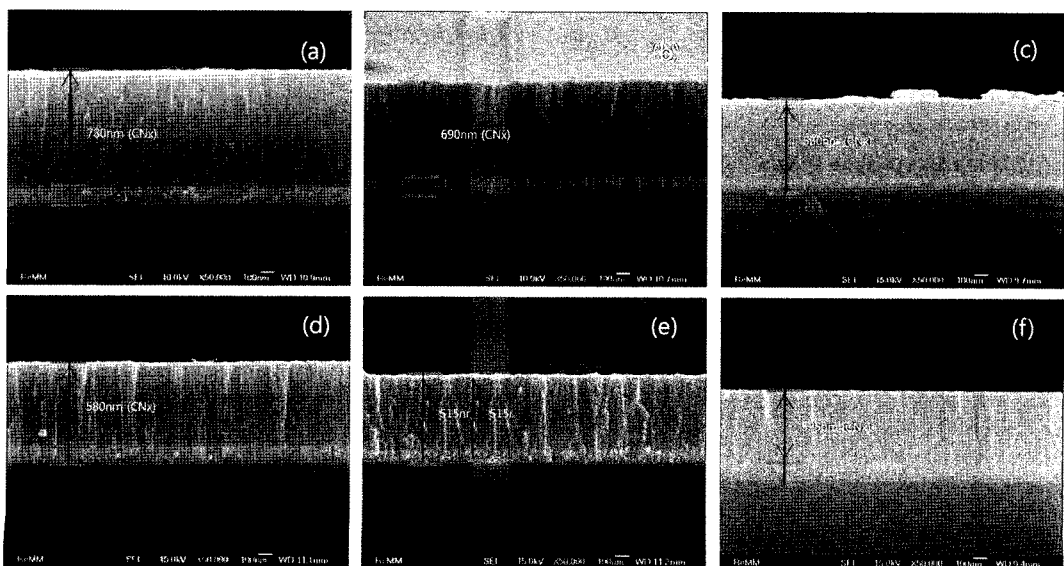


Fig. 5. FE-SEM images of cross-section of CNx thin films deposited at various bias; (a) DC 0 V, (b) DC -200 V, (c) DC -400 V, (d) ABPD 0 V, (e) ABPD -400 V and (f) ABPD -800 V.

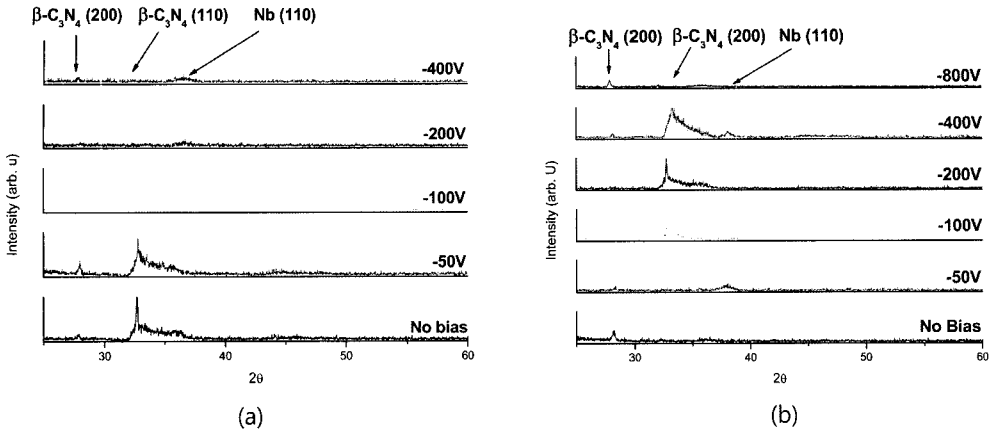


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of CNx films deposited at various bias; (a) DC and (b) ABPD.

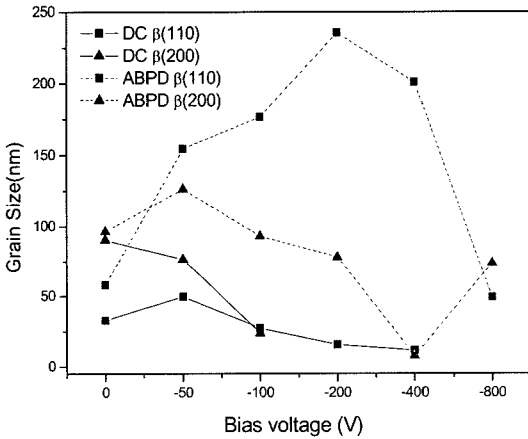


Fig. 7. Change in grain size with various bias voltage.

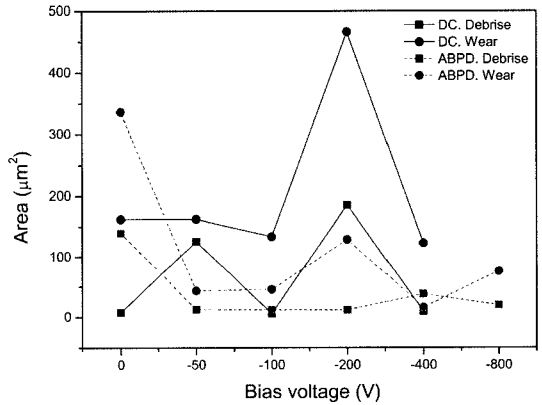


Fig. 8. Change in area of wear and debris with various bias voltage.

있다. Fig. 6 (a), (b)에 나타난 XRD 패턴을 보면 DC 스퍼터링의 0~-100 V까지 전압을 인가한 성장 방향과 ABPD 스퍼터링의 -200 V 이상에서의 패턴이 거의 흡사함에서 알 수 있다. 또한 Fig. 7은 Scherrer formula($t = 0.9 \lambda / (B \cos \theta)$)를 이용해 계산한 결정립 크기를 나타내고 있다. t 는 결정립 크기, λ 는 입사파장 그리고 B 는 반가폭이다. 그림에서 보는 바와 같이 결정립 크기의 증감 형태를 보면 DC로 증착된 CNx박막의 조직성장 억제제는 인가전압 -50 V부터 시작되지만 ABPD는 그보다 -100~-200 V 더 큰 인가전위에서 성장억제가 시작된다. 부분적으로 성장한 조직의 peak가 거의 없을 정도로 낮지만 정량이 아닌 정성적인 측면에서만 볼

때 이들 결과는 ABPD에서 바이어스 전압을 인가하게 되면 에너지 상쇄가 발생하는 것을 뒷받침 할 수 있는 뚜렷한 증거가 되며 ABPD에서 좀 더 치밀한 박막을 성장시키기 위해서는 더 높은 전압을 인가해 상쇄되는 에너지에 대한 보강이 필요할 것으로 판단된다. Fig. 8은 인가된 바이어스 전압의 변화에 따른 마모트랙을 나타내었다. DC로 증착된 CNx박막의 마모특성은 바이어스 전압유무에 상관없이 변화를 보이지 않았으나 ABPD를 사용한 CNx박막은 바이어스 전압을 인가하면 박막특성의 개질로 인해 데브리가 존재하지 않고 박막이 충분한 마모하중을 견디게 되어 내마모성이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다.

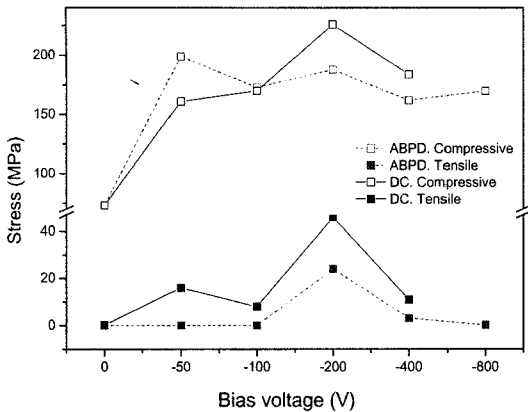


Fig. 9. Change in residual stress with various bias voltage.

DC와 ABPD 모두 바이어스 전압 -200 V 에서 내마모성이 하락한 이유는 -200 V 에서만 나타난 높은 인장응력이 마모시험 중 마찰에 의해 필연적으로 발생하는 인장력의 영향으로 더욱 박막의 파괴가 가속된 것으로 판단된다. Fig. 9에 나타난 박막의 잔류응력 변화와 Fig. 8의 마모트랙을 비교해보면 압축응력이 상대적으로 높아도 마모에는 큰 영향을 주지 않았지만 DC와 ABPD 둘다 인장응력이 높을 때 내마모성이 떨어지는 것으로 확인할 수 있다.

4. 결 론

DC와 비대칭 펄스 DC 반응성 스퍼터링을 통한 Carbon-nitride(CNx)박막의 질소비율, 중간층의 존재 유무 그리고 바이어스 전압인가에 따른 상변화 및 기계적 물성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 질소비율이 증가할수록 $\text{sp}^3\text{C-N}$ 결합의 비율이 증가하였고 ABPD 스퍼터링으로 생성된 CNx박막은 DC 스퍼터링으로 생성된 CNx박막보다 더 많은 $\text{sp}^3\text{C-N}$ 결합구조를 함유하며, 이는 ABPD 스퍼터링 중 발생하는 이온종이 더 높은 이온에너지를 가지고 있기 때문이다.

2. Nb 중간층을 CNx박막과 기판 사이에 증착하면 박막과 기판 사이의 격자불일치를 줄이고 기판의 표면불순물을 분해하여 임계하중(Lc1)이 약 10 N 정도 증가하였다. 하지만 ABPD로 증착된 CNx 박막의 두께가 기판에 비해 얇아 마모하중을 견디지 못하고

연질인 Nb 중간층의 영향을 받아 마모저항이 떨어진다.

3. ABPD스퍼터링은 공정 중에 발생하는 양극효과로 인해 바이어스 전압으로 인가된 음전위가 상쇄되며 -200 V 이상이 되었을 때 Scherrer formula를 통해 조직의 성장이 억제되기 시작하는 것을 확인할 수 있다.

4. 높은 이온화에너지를 가지는 ABPD스퍼터링으로 증착된 CNx박막은 대부분 DC스퍼터링에 비해 우수한 내마모성을 나타내었다. DC스퍼터링과 ABPD스퍼터링 모두 시편에 -200 V 의 전압이 인가되었을 때 내마모성이 가장 저하되었는데 이는 박막에 잔류인장응력이 존재해 마모시험 중 발생하는 인장력으로 인한 박막파괴를 유발하였기 때문이다.

후 기

본 연구는 울산대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. J. Sella : Surf. Coat. Technol, **98** (1998) 1245-1250.
2. A. Y. Liu and M. L. Cohen : Science, **245** (1989) 841.
3. E. Broitman, N. Hellgren, O. Wnstrand, M. P. Johansson, T. Berling, H. Sjstrm, J. -E. Sundgren, M. Larsson and L. Hultman : Wear, **248** (2001) 55-64.
4. Stephen Muhl and Juan Manuel Méndez : Diamond Relat. Mater, **8** (1999) 1809-1830.
5. A. M. Jones, A. R. McCabe, S. J. Bull and G. Dearnaley : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B80/81** (1993) 1397-1407.
6. J. Gerth and U. Wiklund : Wear, **264** (2008) 885-892.
7. Hae-Suk Jung and Hyung-Ho Park : Thin Solid Films, **377-378** (2000) 320-325.
8. D. Dowson : Coating Tribology (Tribology series 28).
9. H-M. Tung : Materials Science and Engineering A, **500** (2009) 104-108.
10. T. Shinmitsu, J. Shi and M. Hashimoto : Surf. Coat. Technol, **151-152** (2002) 55-58.
11. H. Bartzsch, P. Frach and K. Goedicke : Surf. Coat. Technol, **132** (2000) 244-250.