

## ◆ 특집 ◆ 광학부품 제조기술

## 비구면 유리렌즈 성형용 SiC 코어의 DLC 코팅에 관한 연구

## A Research on DLC Thin Film Coating of a SiC Core for Aspheric Glass Lens Molding

박순섭<sup>1,✉</sup>, 원종호<sup>2</sup>  
Soon Sub Park<sup>1,✉</sup> and Jong Ho Won<sup>2</sup>

1 한국생산기술연구원 호남권기술지원본부 (Honam Technology Division, Korea Institute of Industrial Technology)

2 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

✉ Corresponding author: pss4633@kitech.re.kr, Tel: 062-600-6250

Manuscript received: 2010.9.20 / Accepted: 2010.10.22

*Technical demands for aspheric glass lens formed in market increases its application from simple camera lens module to fiber optics connection module in optical engineering. WC is often used as a metal core of the aspheric glass lens, but the long life time is issued because it fabricated in high temperature and high pressure environment. High hard thin film coating of lens core increases the core life time critically. Diamond Like Carbon(DLC) thin film coating shows very high hardness and low surface roughness, i.e. low friction between a glass lens and a metal core, and thus draw interests from an optical manufacturing industry. In addition, DLC thin film coating can removed by etching process and deposit the film again, which makes the core renewable. In this study, DLC films were deposited on the SiC ceramic core. The process variable in FVA(Filtered Vacuum Arc) method was the substrate bias-voltage. Deposited thin film was evaluated by raman spectroscopy, AFM and nano indenter and measured its crystal structure, surface roughness, and hardness. After applying optimum thin film condition, the life time and crystal structure transition of DLC thin film was monitored.*

Key Words: Filtered Vacuum Arc (FVA; 여과 진공 아크), Diamond-like Carbon (DLC), Aspheric Glass Lens (비구면 유리 렌즈), Silicon Carbide (실리콘 카바이드)

## 1. 서론

Diamond-like carbon(DLC) 박막은 다이아몬드와 유사한 높은 경도, 내마모성 그리고 화학적 안정성 등 매우 우수한 물리화학적 특성을 갖고 있는 박막재료이다. 또한 DLC 박막은 우수한 표면 조도에 따른 낮은 마찰계수를 가지고 있어 유리렌즈 성형용 금형의 이형성 박막으로 관심을 끌고 있다.<sup>1,2</sup>

일반적으로 DLC 박막의 합성기술은 합성에 사용되는 탄소의 형태에 따라 혹은 이온의 생성가속

방법에 따라 몇 가지의 분류방법이 있을 수 있다. 이온의 생성 및 가속 방법에 따라 이온 빔 증착, 플라즈마 증착, 스퍼터링, Plasma assisted chemical vapor deposition(PACVD), FVA 등으로 나뉜다. 이중 FVA 증착법은 다른 물리적 증착방법에 비해 이온 에너지가 높고, 이온 flux 가 높은 특성을 갖기 때문에 증착율이 비교적 높고, 밀착력이 뛰어나며, 치밀한 박막의 합성이 가능하다.<sup>3,4</sup>

하지만 FVA 증착법에서 가장 큰 문제는 금속 이온과 함께 발생하는 수  $\mu\text{m}$ 크기의 거대입자의 생성이다. 이 거대 입자는 증착물질의 물성을 그대로

로 가지고 있어 증착된 박막의 물성을 저하시키며, 증착된 박막의 표면조도 또한 나쁘게 하는 결과를 낳는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자기장의 효율적인 배치와 덕트의 설계로 불필요한 거대 입자를 플라즈마 경로로부터 효과적으로 제거한다.<sup>5</sup>

이러한 FVA 증착법을 이용한 DLC 박막은 고상의 carbon 타겟을 이용하므로 수소의 함유를 원칙적으로 피할 수가 있고 여타의 공정에 비하여 우수한 특성을 지닌 DLC 박막을 얻을 수가 있다. 이는 높은  $sp^3/sp^2$  분율에 기인한다. 즉 다이아몬드 형성을 위한 카본의 사면체 결합(tetrahedral bonding)  $sp^3$  분율이 높기 때문으로 알려져 있다. 이러한 높은  $sp^3$  분율을 가지고 있는 DLC 박막은 고온 안정성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>6,7</sup> 높은  $sp^3$  분율에 의한 우수한 고온안정성은 유리렌즈 성형용 금형의 이형성 박막으로써 DLC 박막의 활용 범위를 넓힐 수 있다.

특히, 최근 비구면 유리 렌즈 성형분야에서 실리콘카바이드(SiC) 코어면의 DLC 코팅은 성형공정 시 유리 렌즈와 성형용 코어와의 이형성 향상 및 성형용 코어 수명향상을 위해 주목받고 있는 기술 분야이다. SiC 금형 소재의 경우 WC 금형 소재보다 DLC와 친화력이 우수하다.

따라서 본 연구에서는 FVA 증착법에 의한 DLC 박막의  $sp^3$  분율에 따른 DLC 박막의 특성 및 유리렌즈 성형용 금형(SiC)의 실장 테스트를 통한  $sp^3$  분율 향상에 따른 불량 감소와 금형의 성형 수명 향상에 대하여 연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 SiC 시편 준비

본 연구에 사용된 SiC는 일본 Kyocera사의 SC1000(SiC)를 사용하였으며, SiC 입자크기는 약 1 ~ 5.0  $\mu\text{m}$  이었다. 코팅을 위한 시편은 SiC 봉재( $\varnothing 10$ )를 Wire cutting으로 시편을 3mm 두께로 제작하였다.

SiC 시편은 경도가 높아 입도별로 제작된 비트리파이드 본드 다이아몬드 스톨을 사용하여 #400부터 #12,000까지 습식연삭을 실시하였다.<sup>13</sup>

이와 같이 제조된 시편은 정삭연마를 위해 다이아몬드 페이스트를 사용하여 1.0  $\mu\text{m}$ 에서 0.3  $\mu\text{m}$ 까지 순차적으로 연마하였다. 이후 시편표면에 존재하는 잔류 유기물 및 불순물 제거를 위해 아세톤 10분과 알코올 15분씩 초음파 세척하고 증류

수로 세척한 후 박막의 접착력을 향상시키기 위해 건식 플라즈마 세정 10분 공정을 수행한 후 2차적인 오염을 방지하기 위해 진공 데시게이터에 보관하였다.

### 2.2 DLC 코팅

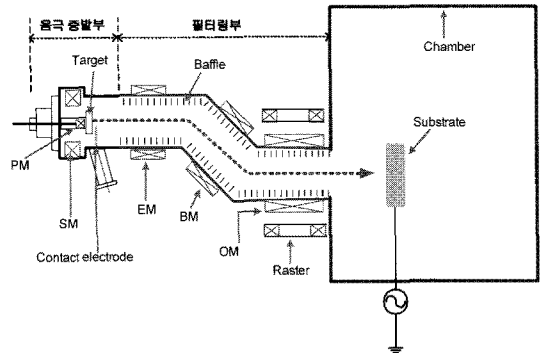


Fig. 1 Schematic of Filtered Vacuum Arc

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 DLC 박막 증착장비의 모식도이다. FVA 시스템은 아크 발생부, 증발 제어를 위한 음극 증발부, 발생한 플라즈마의 수송 및 거대 입자를 제거하기 위한 필터링부와 전원 및 기체 공급부 등 3 부분으로 나뉘어진다. 아크 발생 및 증발 제어를 위한 음극 증발부는 타겟 물질인 음극 및 수냉 가능한 음극 홀더, 타겟 표면의 아크를 조정하는 영구자석, 표면 아크의 움직임을 자장의 변화로 제어 가능하도록 하는 소스 전자석(Source magnet: SM), 그리고 발생된 전자 및 이온과 반응하도록 하여 원하는 박막을 형성하도록 하는 활성기체를 공급하는 기체 분배구 및 음극 표면에서 아크를 발생시키도록 도와주는 기계적으로 작동하는 촉발전극으로 구성되어 있다.

발생된 플라즈마의 수송 및 거대입자를 제거하기 위한 필터링부는 음극에서 발생된 증발물질(전자, 이온, 중성입자 및 증발물질의 미소입자)을 기판까지 대량으로 수송하기 위한 자장을 공급하는 인출 전자석(Emission magnet: EM), 하전입자를 기판까지 유도하는 굽힘 전자석(Bending magnet: BM), 그리고 하전입자의 기판에서 분포 및 방향을 조절하는 출구 전자석(Output magnet: OM)으로 구성되어 있다. 플라즈마 덕트는 증발물질을 수송하기 위해 진공을 잡아주며, 음극 증발부와 챔버 사이에서 전기적으로 절연되어 있으며, 바이어스 전압의 인가가 가능하도록 하였으며, 덕트 내부에는

거대입자의 반사를 막아주는 배플이 있고 외부에는 각종 전자석이 부착되어있다. 그 밖의 장치로 raster 는 아크 플라즈마 제트를 균일하게 흔들어 줌으로써 대면적-균일 증착을 가능하게 했으며, 시편홀더는 250kHz 주파수를 갖는 바이어스 전압을 인가 할 수 있도록 챔버와 절연시켰다.

sp<sup>3</sup> 분율의 공정변수로는 substrate bias voltage 를 변화시켜 DLC 박막을 증착 하였으며, DLC 박막의 모재로는 SiC 소재를 이용하였다.

sp<sup>3</sup> 분율에 따른 SiC 금형의 성형 수명은 GMP(Glass Molding Pressure) system 을 이용한 유리 렌즈 생산 라인에 적용하여 실장테스트를 하였다. 광학유리는 일반적으로 480℃~680℃에서 전이특성을 갖는다. 따라서 고온상의 소성변형공정을 거치게 되는데 여기에 관계되는 주공정변수로는 진공실 내부의 온도와 금형의 성형과정에서 나타나는 속도조건 및 압력조건이다. 부분적으로는 속도조건과 압력조건은 종속적인 관계를 유지하지만, 소재의 열변형에 따른 압력관계에 따라 독립적인 변화를 나타내기도 한다.

본 연구에서는 600, 630℃의 N<sub>2</sub> 분위기에서 상측 금형에 일정한 하중을 아래쪽 방향으로 가하여 성형하였다. 사이클타임(cycle time)은 15 분 정도 소요된다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2 에 기관 바이어스 전압(substrate bias voltage)에 따른 DLC 박막의 sp<sup>3</sup> 분율을 표시하였다. DLC 박막의 라만(Raman)스펙트럼은 G-peak(1355 cm<sup>-1</sup>), D-peak(1580 cm<sup>-1</sup>) 두 개의 가우시안 피크(Gaussian peak)로 분리된다.<sup>8</sup> 기관 바이어스 전압 값이 -60V 에서 sp<sup>3</sup> 분율은 가장 높게 나타났으며, 바이어스 전압이 증가함에 따라 점차 감소하였다.

Fig. 3 은 나노압입법(Nano-indentation)에 의해 측정된 바이어스 전압에 따른 박막의 경도 변화이다. 박막의 경도는 바이어스 전압이 증가함에 따라 -70V 근처에서 66GPa 의 가장 높은 경도 값을 보이며, 다시 경도 값이 감소하는 경향을 보인다. 이는 RF PACVD 나 이온 빔 증착법으로 합성된 DLC 박막의 경도에 비해 3~5 배 큰 값이다.<sup>9</sup> 위 실험 결과로부터 기관 바이어스 전압에 따른 DLC 박막의 물성 크게 변화함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 FVA 증착법에서 기관의 바

이어스 전압인가에 의해 기관에 도달하는 탄소 이온의 에너지를 효과적으로 제어할 수 있음을 보여 주고 있는데, 이는 95%가 넘는 높은 이온화율 때문이다.<sup>10</sup>

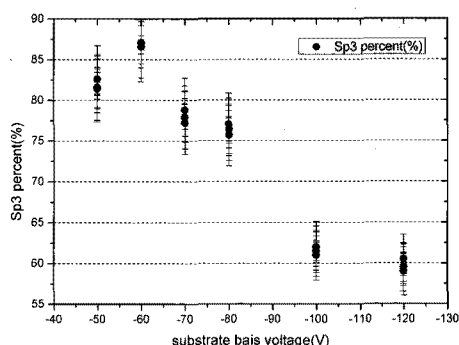


Fig. 2 Sp<sup>3</sup> fraction versus substrate bias voltage

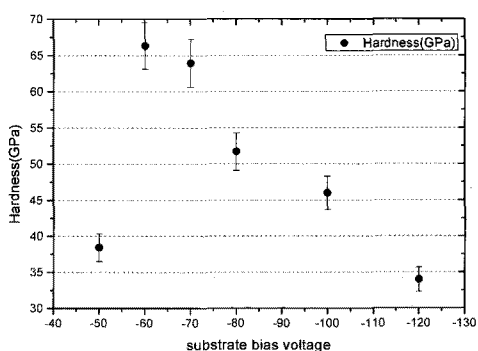


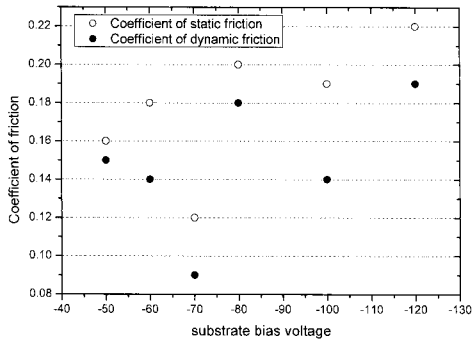
Fig. 3 Hardness of DLC films

Table 1 의 결과에서와 같이 기관 바이어스 전압에 따른 DLC 박막의 표면 거칠기는 기관 바이어스 전압이 -70V 일 때 가장 낮게 나타났다.

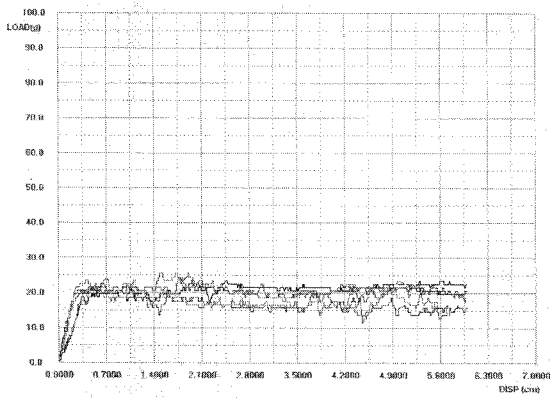
Table 1 Surface roughness of DLC film

Surface Roughness(Ra, μm)						
Substrate bias voltage	-50	-60	-70	-80	-100	-120
Ra	0.214	0.257	0.170	0.548	0.358	0.450

또한 DLC 박막의 표면 마찰계수는 표면 거칠기 값에 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. Fig. 4 와 같이 기관 바이어스 전압이 -70V 일 때 정마찰계수는 0.12, 동마찰계수는 0.09 로 가장 우수한 표면 마찰계수 값을 보였다.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Coefficient of friction versus substrate bias voltage, (b) Static friction coefficient data via -70V substrate bias voltage

Fig. 5 에 기관 바이어스 전압에 따른 DLC 박막의 성형수명을 나타내었다. 기관 바이어스 전압이 -100, -120V 일 경우 600, 630°C 두 온도 조건에서 모두 성형이 불가능 하였으며, 기관 바이어스 전압이 -60V 일 때 3,000 shot 이상의 성형수명을 보였다. 같은 조건의 박막일 경우 성형 온도가 낮을 수록 높은 성형 수명을 보였다. 이와 같은 결과는 증착 된 DLC 박막이 수소를 함유하고 있지 않고, 높은  $sp^3$  분율에 기인한 것으로 보고되고 있다. CVD 등의 방법으로 만들어진 수소를 함유한 DLC 나 PVD 등의 방법으로 만들어진 DLC 에 비해 FVA 방법으로 증착된 DLC 의 경우 월등히 높은  $sp^3$  분율을 가지고 있어 열적 안정성이 아주 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>6,7</sup>

또한 성형 후 DLC 박막의 물성 변화를 관찰하기 위해 100, 2,500, 3,000shot 의 성형 후 라만분석을 하였다. Fig. 6 처럼 성형을 할수록  $sp^2$  분율 높아져 DLC 고유의 라만스펙트럼을 관찰할 수 없었다.

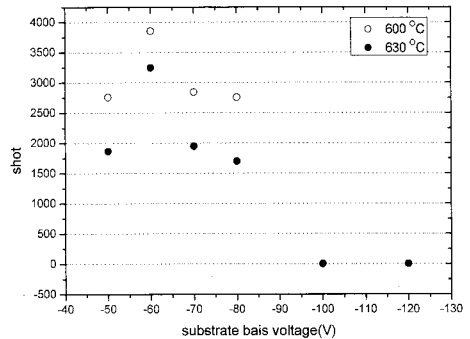


Fig. 5 Number of molding shot versus substrate bias voltage

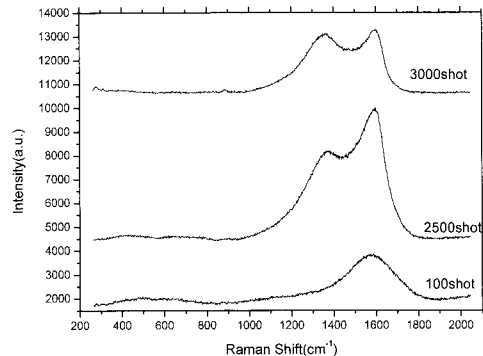


Fig. 6 Raman spectra of DLC films

Fig. 7 은  $sp^3$  분율 또한 급격히 감소하는 경향을 보였다. Anders 등에 의하면, 공기 중에서 수소를 함유한 DLC 의 경우 150°C에서 분해되어 열화되는 반면, FVA 방법을 이용하여 증착한 DLC 의 경우 700°C, 진공 중에서 1 시간 시효 시에도 열화가 관찰되지 않았다.<sup>11</sup> 열적 안정성은 화학적 결합상과 밀접하게 연관되어 있는 것으로 사료된다. Neuville 등에 의하면 수소를 함유한 DLC 의 경우 통상적으로 300~400°C에서 분해가 일어나고, FVA 방법으로 증착한 높은  $sp^3$  분율을 갖는 DLC 의 경우 700~800°C에서 분해가 일어나는 것으로 알려져 있다.<sup>12</sup>  $sp^3$  분율이 100%가 될 경우, 불활성 분위기에서는 1300°C에서 분해가, 산화 분위기에서는 600~700°C에서 산화가 일어날 것으로 예측하였다. 이처럼 FVA 방법으로 증착한 DLC 의 경우 수소, 질소 등의 불순물을 함유하지 않으므로 C-H, C-N 등의 약한 결합이 존재하지 않아, 높은 열적 안정성을 가지는 것으로 사료된다. 유리렌즈 금형에 DLC 박막의 적용은 우수한 내마모 특성과 윤활 특성을 활용한 것임을 감안할 때, 높은 열적 안정성은 그 활용도를 크게 높여 줄 것으로 판단된다.

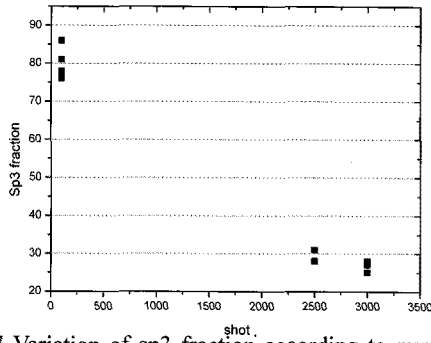


Fig. 7 Variation of sp3 fraction according to number of molding shot

#### 4. 결론

본 연구에서는 FVA 공정을 이용하여 기관 바이어스 전압 조절을 통해 이온의 운동에너지를 효과적으로 변화시킬 수 있으며, 이에 따라 박막의 화학적 결합 양상을 체계적으로 제어할 수 있음을 보여주었다. 이는 이온화율이 높지만 좁은 이온 에너지 분포를 갖는 FVA 공정의 단점을 극복할 수 있는 방법으로서, 광범위한 물성의 DLC 박막을 합성할 수 있다는 의미를 갖는다. 기관 바이어스 전압을 인가함에 따라 sp<sup>3</sup> 분율은 증가하고 이에 따라 경도 값도 증가하는 경향을 보였다. 또한 유리렌즈 성형에 중요한 표면 거칠기 및 마찰계수 값도 sp<sup>3</sup> 분율 변화 양상과 비슷한 경향을 보였다. 가장 이상적인 기관 바이어스 전압 값은 -60V 로 분석되었으며, 이때 SiC 금형의 성형 수명이 가장 높게 관찰 되었다. 성형 횟수가 증가함에 따라 sp<sup>3</sup> 분율은 감소함을 알 수 있었으며, 이에 따라 고온 환경에서 DLC 박막의 성형 수명을 늘리기 위해서는 sp<sup>3</sup> 분율을 높이는 연구가 필요할 것으로 사료 된다.

#### 참고문헌

1. Lee, K. R. and Eun, K. Y., "Diamond-like Carbon Film," Bull. of the Korean Inst. of Mat. & Mater., Vol. 6, No. 4, pp. 345-361, 1993.
2. Cui, F. Z. and Li, D. J., "A review of investigations on biocompatibility of diamondlike carbon and carbon nitride films," Surf. Coat. Technol., Vol. 131, No. 1-3, pp. 481-487, 2000.
3. Baldwin, D. A. and Fallabella, S., "Deposition processes utilizing a new filtered cathodic arc

source," Proc. of the 38th Annual Techn. Conf., Society of Vacuum Coaters, pp. 309-316, 1995.

4. Anders, A., Anders, S. and Brown, I. G., "Effect of duct bias on transport of vacuum arc plasmas through curved magnetic filters," J. Appl. Phys., Vol. 75, No. 10, pp. 4900-4905, 1994.
5. Aksenov, I. I., Belous, V. A., Padalka, V. G. and Khoroshikh, V. M., "Transport of plasma streams in a curvilinear plasma-optics system," Sov. J. Plasma Phys., Vol. 4, No. 4, pp. 425-428, 1978.
6. Anders, S., Diaz, J., Ager, J. W. III, Lo, R. Y. and Bogy, D. B., "Thermal stability of amorphous hard carbon films produced by cathodic arc deposition," Appl. Phys. Lett., Vol. 71, No. 23, pp. 3367-3369, 1997.
7. Anders, S., Ager, J. W. III, Pharr, G. M., Tsui, T. Y. and Brown, I. G., "Heat treatment of cathodic arc deposited amorphous hard carbon films," Thin Solid Films, Vol. 308-309, pp. 186-190, 1997.
8. Yoshikawa, M., Katagiri, G., Ishida, H. and Akamatsu, T., "Raman spectra of diamondlike amorphous carbon films," J. Appl. Phys., Vol. 64, No. 11, pp. 6464-6468, 1988.
9. Savvides, N. and Bell, T. J., "Microhardness and Young's modulus of diamond and diamondlike carbon films," J. Appl. Phys. Vol. 72, No. 7, pp. 2791, 1992.
10. Lee, C., Shin, J., Kim, J., Lee, K. and Yoon, K., "The control of the structure and properties of tetrahedral amorphous carbon films prepared by Filters Vacuum Arc," Journal of the Korean Vacuum Society, Vol. 11, No. 1, pp. 8-15, 2002.
11. McKenzie, D. R., Yin, Y., Marks, N. A., Davis, C. A., Kravtchinskaja, E., Pailthorpe, B. A. and Amarutunga, G. A. J., "Tetrahedral amorphous carbon properties and applications," J. Non-cryst. Solids, Vol. 164-166, Part 2, pp. 1101-1106, 1993.
12. Neuville, S. and Matthews, A., "Hard Carbon Coatings: The Way Forward," Materials Research Society Bulletin, pp. 22-26, 1997.
13. Park, S. S. and Won, J. H., "Research on ultra-precision Grinding Work of silicon carbide," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 9, pp. 58-63, 2009.