

Ir-RE 코팅 대비 자장여과필터방식을 이용한 비구면 유리 렌즈용 초경합금(WC)표면의 ta-C 박막 코팅 성능 개선 연구

정경서, 김승희*
한국기술교육대학교 IT융합SW공학과

A Study on the Performance Improvement of ta-C Thin Films Coating on Tungsten Carbide(WC) Surface for Aspherical Glass Lens by FCVA Method Compared with Ir-Re coating

Kyung-Seo Jung, Seung-Hee Kim*
Dept. of IT Convergence Software Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 작은 굴절률 및 높은 굴절률을 갖는 저 분산 렌즈에 대한 요구가 증가함에 따라, 높은 내열성 및 내마모성을 갖는 이형성 보호 필름에 대한 필요성이 증가하고 있다. 그러나 광학 산업은 비구면 유리 렌즈 성형에 사용되는 이형 보호 필름의 제조 공정 및 품질 표준에 대한 명확한 표준을 아직 확립하지 못했다. 이 기술은 광학 렌즈를 제조하는 각 회사의 노하우로 취급된다. 본 연구에서는 FCVA (Filtered Cathode Vacuum Arc) 기반 ta-C 박막 코팅의 이온 에칭, 각 소스 및 필터부의 마그네트론 및 아크 전류, 바이어스 전압의 최적화에 관한 실험을 수행하였다. 그 결과, 코팅 성능 측면에서, 이리듐- 레늄 합금 박막 스퍼터링 제품 대비 필름 두께가 약 50% 얇고, 경도는 약 20%, 박막의 접착 강도는 약 40 % 개선된 것으로 측정되었다.

본 연구의 박막 코팅 공정 결과는 금형 이형 박막층의 최소 기계적 특성 및 품질 확립을 위한 유리 렌즈의 개발 및 활용에 크게 기여할 것으로 사료된다.

Abstract The demand for a low dispersion lens with a small refractive index and a high refractive index is increasing, and accordingly, there is an increasing need for a releasable protective film with high heat resistance and abrasion resistance. On the other hand, the optical industry has not yet established a clear standard for the manufacturing process and quality standards for mold-releasing protective films used in aspheric glass lens molding. Optical lens manufacturers treat this technology as proprietary information. In this study, an experiment was conducted regarding the optimization of ion etching, magnetron, and arc current at each source and filter part, and bias voltage in FCVA (filtered cathode vacuum arc)-based Ta-C thin film coatings. This study found that compared to iridium-rhenium alloy thin film sputtering products, the coating conditions were improved by approximately 50%, 20%, and 40% in terms of thickness, hardness, and adhesive strength of the film, respectively. The thin-film coating process proposed in this study is expected to contribute significantly to the development and utilization of glass lenses, which will help enhance the minimum mechanical properties and quality of the mold-release thin film layer required for glass mold surface forming technology.

Keywords : Glass Mold Press, Ta-C, FCVA, Aspherical Glass Lens, Tungsten Carbide

*Corresponding Author : Seung-Hee Kim(Korea Univ. of Education and Technology)

email: sh.kim@koreatech.ac.kr

Received September 23, 2019

Accepted December 6, 2019

Revised November , 2019

Published December 31, 2019

1. 서론

일반적인 광학기기의 카메라용 렌즈는 유리 몰드 프레스 성형법(GMP, glass mold press)을 이용하여 제조한다. 이 기술을 이용하면 연삭, 연마 공정을 크게 줄일 수 있으며, 비구면 렌즈를 쉽게 만들 수 있다. 비구면 렌즈는 구면 렌즈에서 나타나는 구면 수차(spherical aberration) 문제를 비구면 렌즈 하나만으로 극복이 가능하다[1].

유리 몰드 성형법은 경면으로 마무리된 유리 재료를 비산화 상태에서 유리의 연화온도까지 가열하여 가압하는 기술이다[1]. 이 때 사용되는 금형 코어(core)에는 고온과 고압의 충격에도 견딜 수 있는 초경합금(WC, tungsten carbide) 또는 탄화규소(B-SiC)가 사용된다. 그러나 유리의 종류에 따라 금형 코어와 융착되기 쉽기 때문에 금형 표면에 유리와 이형성이 좋은 보호막이 필요하게 된다[1-2].

이형성 보호막에는 백금(Pt), 이리듐(Ir), 레늄(Re)등의 귀금속 및 전이금속 박막과 DLC (diamond like carbon)와 같은 카본 박막이 있다. 특히 산소 플라즈마(plasma)에 의해 제막 및 재코팅이 가능하고 고경도로 흡집에 강하며, 평활성이 뛰어난 DLC가 널리 사용되고 있다. 이와 같은 이형성 보호막은 렌즈의 열룩, 파손, 성형불량(sink mark)등 성형 시 발생될 수 있는 여러 가지 문제를 억제하는 기능을 한다.

광학계는 점차 소형화됨에 따라 저분산, 고굴절율의 새로운 렌즈를 필요로 하게 되며, 이에 따라 유리 소재의 다양한 성분이 첨가됨에 따라 성형온도가 높아짐으로 보다 높은 내열성을 가진 이형성 보호막을 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 기존 스퍼터링 방식 대비 기계적 특성 향상 및 공정시간 단축을 통하여 생산성을 향상시킬 수 있으며, 다양한 이형성 보호막 중에 DLC의 한 분야인 높은 내열성과 내마모성을 가지는 그래파이트(graphite)원료를 이용하는 음극 필터 진공 아크(FCVA, filtered cathode vacuum arc)방식의 ta-C(tetrahedral amorphous carbon)박막 코팅 제조 공정 기법을 제안한다.

2. 관련 연구

2.1 이론적 배경

탄소는 매우 다양한 구조를 가지고 있다. 기본적으로

탄소의 결정구조는 탄소가 서로 3차원적으로 결합되어 사면체 구조를 이루고 있는 다이아몬드(Diamond)와 2차원 평면구조를 갖는 그래핀(Graphene), 그리고 2차원 탄소층들이 층상구조를 이루고 있는 흑연(Graphite)으로 구분된다[3]. 1950년대에 처음으로 탄소 박막에 대한 연구가 시작되었으며, 인조 다이아몬드 박막의 연구와 함께 DLC 박막에 대한 연구가 시작되었다. DLC 박막의 경도, 마모도, 화학적 저항력, 광학적 특성 등이 다이아몬드와 비슷한 특성을 가지고 있었다 때문에 초기에는 작은 다이아몬드 결정으로 이루어졌다고 여겨졌다. 향후 DLC 박막이 비정질이고, 복합적인 탄소 결합구조로 이루어졌다는 것이 밝혀졌다[3].

DLC는 여러 가지 면으로 매우 특이한 물성을 가지고 있으며, 탄소의 결합 형태에 따라 기계적인 특성이 다르고, 수소의 함량에 따라 마찰 및 마모의 특성도 변하게 된다.

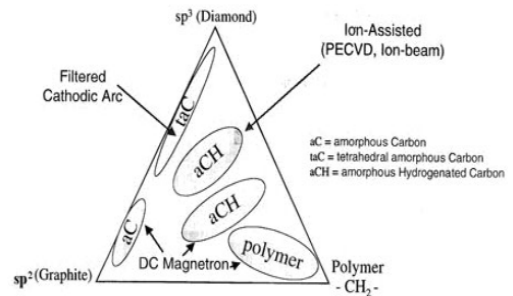


Fig. 1. Type of DLC thin film

Fig. 1은 DLC 박막의 종류를 나타내고 있으며, 그 구조에 따라 DLC 박막은 대표적으로 sp^2 성분을 많이 포함한 a-C (amorphous carbon)와 sp^3 성분이 많이 포함된 ta-C (tetrahedral amorphous carbon)와 수소(H)를 포함한 a-C:H (amorphous hydrogenated carbon)와 ta-C:H(tetrahedral amorphous hydrogenated carbon) 4가지 종류가 있다. 그 중에서 PECVD 및 Ion beam을 통한 대면적, 대량 코팅이 가능한 a-C:H를 일반적인 DLC 박막으로 널리 사용되고 있다.

위와 같이 다양한 DLC 박막을 얻기 위해 여러 가지 코팅기법이 개발되었으며 대표적으로 Atsuo Kawana에 의한 분류에 의하면, 이온원을 이용한 이온화 증착법, 플라즈마 CVD법, CAIP(Cathodic Arc Ion Plating)법이 있다. 플라즈마 CVD법과 이온화 증착법은 탄화수소

(C₆H₆: 벤젠 등)을 사용하여 플라즈마 중에서 C와 H를 분해하여 DLC를 합성한다. CAIP법에서는 탄소 그 자체를 증발원으로 사용한다[4]. Table 1은 대표적인 DLC 박막코팅 프로세스를 나타낸 것이다. DLC는 합성법, 공정조건 및 박막 중에 잔류하는 H의 함유 비율에 의해 그 특성이 크게 달라진다. 예를 들면 박막 경도는 플라즈마 CVD법에 의한 DLC가 1000~2500Hv 정도이며, 방법에 따라서 1000Hv 이하의 DLC도 성막할 수 있다. 또한 이온화 증착법에 의한 DLC로서 1500~2500Hv가 된다. UBM 스퍼터 방식에서는 수소프리의 DLC의 성막이 가능하다. 아울러 H의 잔류하지 않는 CAIP방식의 DLC는 실제로 2000~4000 Hv를 나타낸다[4]. 또한 CAIP 방식은 FCVA와 유사하게 고체 타겟 및 수소에 영향을 받지 않은 점이 있지만 고체 타겟의 이온화 시 발생하는 거대 입자(droplet)를 걸러주는 자장여과필터가 없으며, 상온에서 성막이 가능한 FCVA 방식과 다르게 공정 중 기판을 가열하여 성막하기 때문에 기판의 냉각이 필요하다.

Table 1. Type of DLC deposition Process[4]

Classification	Ion Source	Cathodic Arc	Plasma CVD	UBM Sputter
Source	C6H6	Solid carbon	C2H2/CH4	Solid carbon/CH4
temperature (°C)	200 ~ 300	Under 200	Under 200	Under 250
composition	Hydrogen	Hydrogen Free	Hydrogen Metal	Hydrogen Free Hydrogen Metal
Buffer Layer	Metal or Non-Metal	No	Metal or Carbon	Metal
Coefficient of Friction	0.1 ~ 0.2	Under 0.1	0.1 ~ 0.2	0.1 ~ 0.2
NHT Hardness (HV)	1,500 ~ 2,500	2,000 ~ 4,000	1,000 ~ 2,500	1,000 ~ 2,000
Surface Roughness	○	△	◎	○
Adhesion	◎	○	○	◎
massive production	○	△	◎	◎
Other features	PVD ion plating.	Jig cooling Filterd Arc film	RF methode Plastic, Ceramic Coating	the other material (MoS2) Mixing

2.2 관련 연구

최근 여러 가지 환경 및 조건에서 다양한 기능을 발휘할 수 있는 소재에 대한 중요성이 대두되면서, 여러 산업

분야에 적용할 수 있는 고경도, 내마모성 및 윤활성 등 다양한 표면 기능을 가지는 DLC 박막코팅에 대한 연구가 진행되고 있다. 장영준 등[5]은 유리렌즈 몰드성형공정을 위한 ta-C 코팅막과 WC 금형의 경도에 따른 tribo-test 특성 및 GMP 적용을 위한 코팅막과 WC 금형몰드 선정에 대한 방향성을 검토한 연구를 발표하여 ta-C 코팅막의 두께 및 밀착력과의 관계, 고온 환경에서의 마찰 시험 시 ta-C 코팅막과 경도가 낮은 초경합금과의 coupling 조건이 고온에서 저마찰, 내구성 특성에 유리함을 확인하였다. 김종국 등[6]은 자동차 엔진의 연료 사용 효율 및 내구성 향상을 위한 파워셀 부품의 내마모, 저마찰 코팅을 위한 수소가 포함되지 않은 DLC 막을 자장 여과 아크법으로 수 μm 증착한 결과를 발표하였으며, 자장 여과 진공 아크법으로 증착되는 수소 없는 DLC 막의 양산을 위한 코팅 공정 연구[7]를 통해 비철소재 가공용 공구의 이형성 향상 코팅 및 자동차 부품의 고온 환경에서 사용할 수 있는 코팅으로 처리폭 350 mm, 직경 450 mm 8축 공작전 치구에서 400 nm/h의 증착률과 최대 경도 65 GPa을 가지는 수소가 없는 DLC 막을 양산할 수 있는 시스템을 개발하였다. 또한 오승근 등[8]은 FVA(Filterd Vacuum Arc)공정을 이용하여 Substrate bias voltage 조절을 통한 박막의 결합 양상을 체계적으로 제어하여 Sp³ 분율이 87%인 ta-C 박막을 제조, 실제 유리렌즈 성형 공정에 적용하여 고온 안정성이 우수한 것을 확인하였다. 이들 중 장영준[5]과 김종국[6]이 사용한 증착방법은 본 연구와 동일한 FCVA 방식의 T자형을 사용하였으나, 본 연구에서는 더블밴드방식(이중급힘)의 자장여과필터 방식을 사용하였다.

이와 같이 DLC 박막코팅은 유리렌즈 몰드 성형공정 뿐만이 아닌 자동차 부품 및 다양한 산업분야에서 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 기 연구된 자료를 바탕으로 비구면 유리 성형용 금형 표면에 적합한 박막코팅의 기초적인 공정도를 제시하고 나아가 최적화된 DLC 박막 품질 개선에 이바지 하고자 한다.

3. 실험 방법

3.1 장비 구성 및 초기 세팅

본 연구에 사용된 ta-C 박막 코팅 장비는 그림 2와 같은 구조로 되어 있으며, 초경 시편 및 금형의 건식 세정을 위한 ion gun과 음극 진공 아크(FCVA, filtered

cathode vacuum arc)로 구성되어 있다.

타겟(target)은 밑면이 62.8 mm, 윗면이 46 mm의 사다리꼴 모양으로 입자 크기는 4 μm , 탄성강도는 1,110 kg/cm², 압축강도는 1,615 kg/cm², 쇼와 경도는 76인 poco사의 EDM-4 고체 흑연 타겟을 사용하였다. 챔버(chamber)의 초기 진공도는 약 3.0×10^{-5} m Torr 이하, 챔버 온도는 상온(R.T, room temperature)으로 설정하였다.

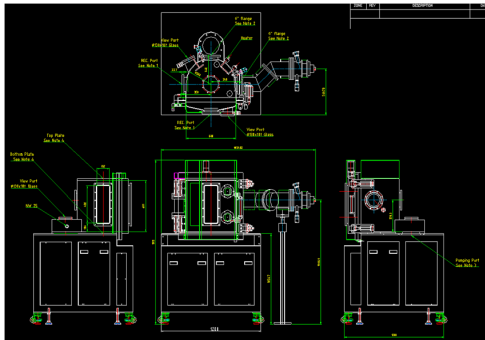


Fig. 2. Schematic hybrid DLC deposition system

3.2 초경 시편 준비 및 세정

본 연구에 사용된 초경합금은 기존 금형 제품으로 사용되고 있는 일본 DIJET사의 WC (tungsten carbide) FB01로 그 합금조성은 94W-5C-1Co(Wt%)이다. 그림 3은 본 연구에 사용된 초경합금 표면 형상을 나타내었으며, 입자 크기는 약 1.0 μm 이다. 박막 코팅을 위한 시편은 FB01 WC 봉재($\phi 10$)를 diamond cutting machine을 이용하여 3 mm 두께로 절단하였다. 이후 시편의 표면에 존재하는 잔류 유기물 및 불순물 제거를 위하여 아세톤과 알코올로 각각 10분씩 초음파 세척 및 건조하여 실험을 진행하였다.

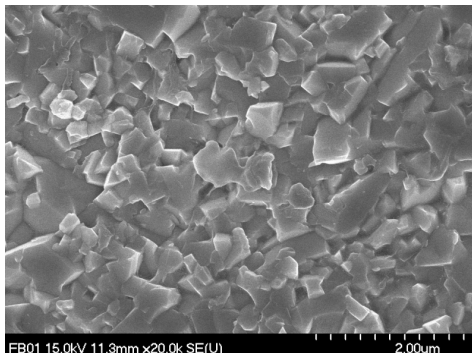


Fig. 3. SEM surface morphology of WC substrate

3.3 이온 건식 세정

시편의 표면 잔류응력 및 Co rich 현상을 제거하기 위해 Ar gas를 이용한 Ion bombardment dry etching을 약 3분간 실시한 후에 ta-C 박막을 코팅하였다.

Table 2는 이온 건식 에칭 공정 조건이며, Ar gas를 약 38 sccm 주입하고, 전원을 300 W, 기판의 바이어스 전압 600 V, 기판 회전속도는 약 20 Hz로 설정하여 진행하였다.

Table 2. Parameter of ion bombardment dry etching condition.

Classification	Unit	Value
Ar gas	sccm	38
Ion gun power	W	300
Sub' bias voltage	V	600
Sub' rotation speed	Hz	20

3.4 ta-C 박막 코팅 공정

ta-C 박막 코팅을 위해서 먼저 아크 플라즈마 빔의 인출 조건을 설정해야 한다. 그 후에 보다 넓은 영역에 균일한 박막 코팅을 위해 RM (raster magnetron)의 X축과 Y축의 Position, Frequency, Amplifier 값을 설정해야 한다.

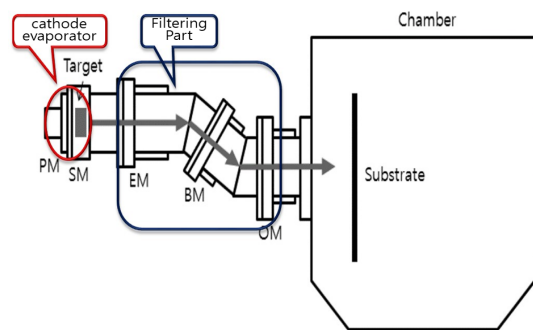


Fig. 4. Schematic of FCVA diagram[8]

Fig. 4.는 자장여과필터방식의 음극 진공 아크 장치의 개략도이다. 왼쪽의 자장여과필터 덕트(duct)는 음극증발부와 필터링부로 구성되어 있으며, 각각의 전기장으로 둘러싸여 플라즈마 빔의 인출을 오른쪽 챔버(chamber)의 기판(substrate)으로 유도한다. 먼저 음극증발부에는

타겟(target)이 설치되는 cathode와 Anode가 있으며, SM (start magnetron)으로 플라즈마 빔을 유도한다. 필터링부는 타겟(target)이 이온화되어 기판에 박막으로 코팅되지 못하는 거대 입자(droplet)을 걸러주는 베플(Baffle)과 플라즈마 빔을 유도하는 EM (emission magnetron), BM (bond magnetron), OM (output magnetron)으로 둘러싸여 있어 플라즈마 빔을 챔버 내의 기판으로 유도하게 된다. 따라서 최대한 많은 양의 플라즈마 빔의 인출을 위해서는 각각의 자장의 배열에 대한 조건을 설정해야 한다. Table 3은 각각의 자장의 배열 조건이며, 전압 값은 15 V로 고정하였으며, 전류값의 변경 실험을 통하여 도출된 결과이다. 이 때 방전 전류 값은 55 A, 덕트(duct) 전압 값은 +23 V로 고정하였다.

Table 3. Parameter of magnetron condition

Classification	Unit	Value
SM (start magnetron)	A	5.0
EM (emission magnetron)	A	4.5
BM (bond magnetron)	A	5.0
OM (output magnetron)	A	5.0

Table 4. Parameter of RM X axis condition

Classification	Unit	Value
Position	V	-5.5
Frequency	Hz	0.5
Amplifier	V	3.5

Table 5. Parameter of RM Y axis condition

Classification	Unit	Value
Position	V	-4.5
Frequency	Hz	0.5
Amplifier	V	0

Table 4와 5는 실험을 통하여 박막의 균일도를 얻기 위한 RM (raster magnetron)의 공정 조건이다. 상기 조건에 따라 그림 5와 같이 직경 약 100 mm 이내에서 20 mm/min의 코팅을 및 ±5%의 균일도를 도출하였다.

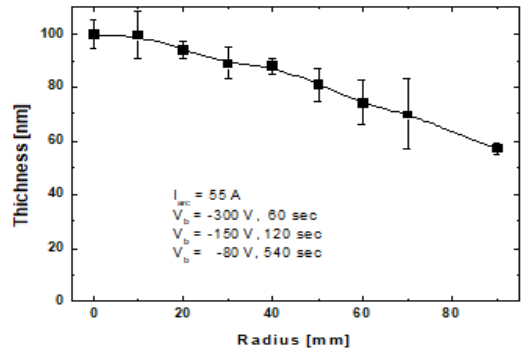


Fig. 5. Uniformity graph by RM condition

다음으로는 초경합금(WC)의 표면에 박막의 코팅을 위해서 박막 코팅의 공정 시간 및 기판의 바이어스 전압 설정을 통한 박막의 물성 조성해야 한다.

Table 6. Parameter of substrate bias voltage

Classification	Unit	Value
Step 1 bias voltage	V	600
Step 2 bias voltage	V	300
Step 3 bias voltage	V	150

Table 6은 기판의 바이어스 전압에 대한 설정 값이다. Step 1에서는 박막 코팅 첫 단계로 초경합금(WC)와 박막의 접착력을 향상시키기 위해 바이어스 전압 값을 높게 설정하여 표면 에너지를 상승시키는 효과를 주었지만, Step 2 ~ 3에서는 바이어스 전압 값을 하향 조정하여 Step 1에서 코팅된 박막 층의 손상을 줄이고 적층이 쉽게 이루어지게 하였다.

Table 7. Parameter of thin file coating time.

Classification	Unit	Value
Step 1	min	3
Step 2	min	7
Step 3	min	15

Table 7은 각 Step의 박막 코팅 시간을 설정한 값이다. Table 6, 7과 같이 박막 코팅의 바이어스 전압 및 시

간을 세분화하여 초경합금(WC)의 표면 에너지를 제어함으로써 박막의 손상을 억제하고 향후 유리 렌즈 성형 시에 금형 코어 표면에 가해지는 고온과 높은 압력에 대한 스트레스 완화 및 성형 수명 향상에 기여할 것으로 기대된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 박막의 상태 및 두께

앞서 실험방법을 통하여 도출된 공정 조건으로 초경합금(WC) 시편 및 금형 코어(core)에 코팅된 박막의 표면 상태 및 두께를 FTS (form taly surface) 및 SEM (scanning electron microscopy)을 통하여 측정 및 분석을 하였다.

Fig. 6은 FTS (form taly surface) 장비로 측정된 ta-C 박막의 두께 그래프이며, 박막의 두께는 약 120 nm로 측정되었다. Fig. 7은 SEM (scanning electron microscopy)로 측정된 박막층의 사진이며, 박막의 두께

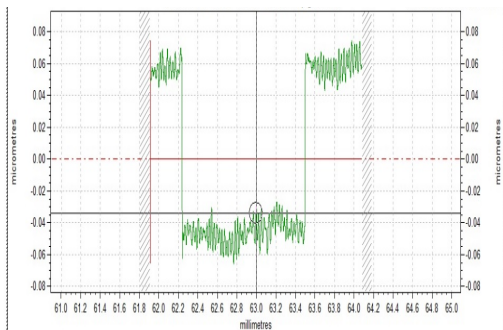


Fig. 6. Thickness of ta-C thin film (FTS)

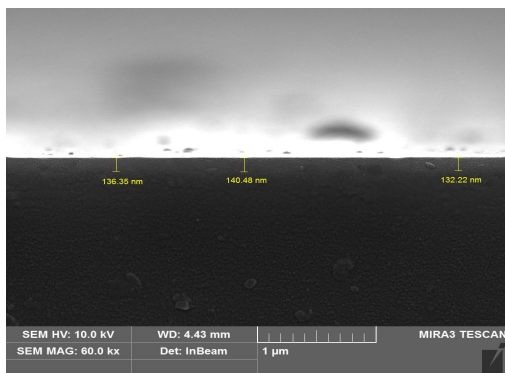


Fig. 7. Thickness of ta-C thin film (SEM)

는 약 130 nm로 측정되어, FTS (Form Taly surface)과 SEM (Scanning Electron Microscopy)에서 유사한 결과를 얻었다.

4.2 박막의 경도

박막의 경도는 Nano indenter 장비(모델명 : FISCHERSCOPE HM2000, Helmut Fischer GmbH)를 통하여 측정하였다.

Fig. 8은 Nano indenter 장비를 통하여 측정된 박막의 경도를 요약한 그래프이다. X축은 측정의 횟수를 나타내는 값이며 오른쪽 hc축은 측정 팁의 압입의 깊이를 나타내며, 왼쪽 hardness축은 깊이에 따른 경도 측정값으로 10회 측정 결과 ta-C 박막은 약 60GPa의 경도를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

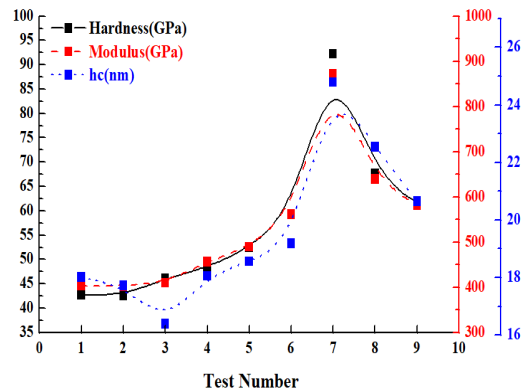


Fig. 8. Hardness graph of ta-C thin film.

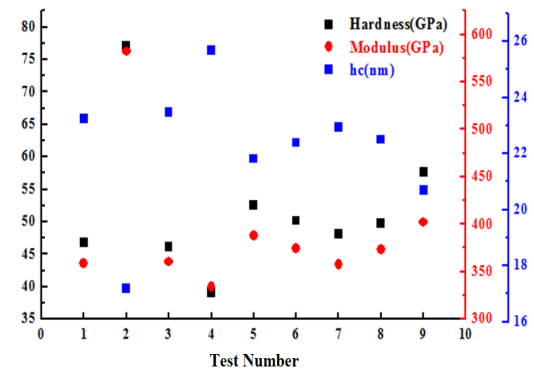


Fig. 9. Hardness graph of Ir-Re thin film

Fig. 9는 기존의 스퍼터링 방식을 통한 Ir-Re(이리듐-레늄) 합금 박막의 경도를 동일한 장비와 조건으로 10회

측정한 결과로 약 50GPa의 경도를 가지는 것으로 확인되었다. 하지만 박막층의 시편 경도를 측정할 경우에 측정 팁의 압자에 의한 소성영역이 기관까지 확장되어 경도값에 영향을 줄 수 있어 박막 경도만을 측정하기 위해서는 박막의 두께와 측정 팁의 압입 깊이 사이의 비율이 일정 값을 가져야 한다.[8] 하지만 본 연구에서의 박막층의 두께는 약 130nm 로 매우 얇은 박막층으로 측정된 경도값에 모재의 영향을 받은 것으로 측정된 경도값은 상대적인 의미로만 보면 될 것으로 보이며 이와 비교할 때 ta-C 박막은 상대적으로 약 20% 향상된 경도를 나타내는 것으로 확인되었다.

4.3 박막의 접착강도

박막의 접착강도를 Scratch tester (JNL사)장비로 측정하였다. 인텐터 팁은 Rockwell C Diamond scratch indenter, R=0.2 mm(RST-C-AA-2006)을 사용하였다. 측정 조건은 스크래치 길이는 5 mm, 속도는 약 0.5 mm/s, 수직하중은 0.1 N ~ 90 N까지 측정하였다. Fig. 10과 같이 박막의 접착강도를 측정하였을 때, 약 77.5N의 접

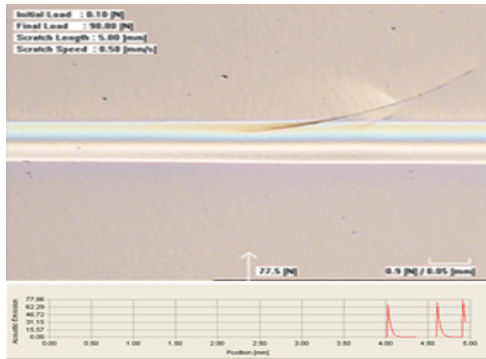


Fig. 10. Adhesion of ta-C thin film

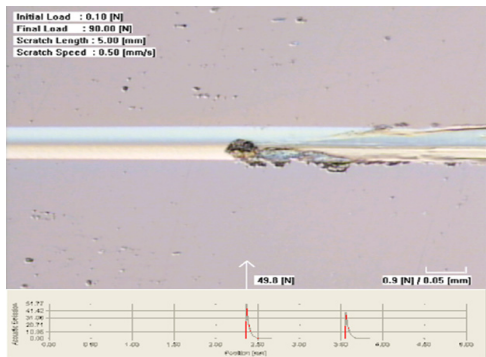


Fig. 11. Adhesion of Ir-Re thin film

착강도를 갖는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 스퍼터링 방식을 통한 Ir-Re(이리듐-레늄) 합금 박막의 접착강도를 측정한 결과이며, 약 49.8의 접착력을 가져 ta-C 박막은 약 40% 이상의 향상된 접착강도를 가지는 것으로 확인되었다.

4.4 유리 렌즈 성형

본 실험에서 도출된 박막 코팅 공정 조건을 실제 렌즈 성형에 적용하여 렌즈를 제작 및 측정을 하였다. Fig. 12는 프로젝션용 렌즈를 성형하기 위한 금형 코어 설계도면이다.

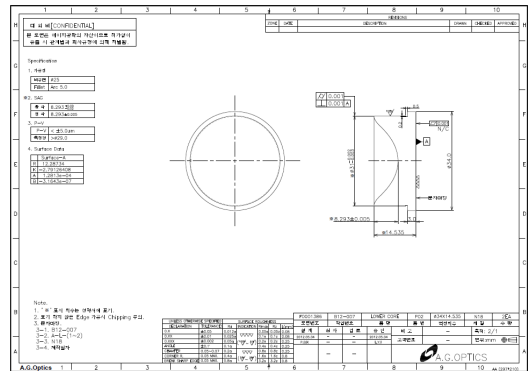


Fig. 12. Design of Glass mold core for Projection

설계도면에는 금형 코어의 크기 및 형상값 등 가공을 위한 정보가 기재되어 있다. Fig. 12 설계도면은 직경 31 mm, sag 8.293 mm로 프로젝션용 렌즈 금형 코어이다. 렌즈를 성형하기 전에 설계도면과 같이 금형 코어가 제작이 되었는지 측정을 통해 검증하였다.

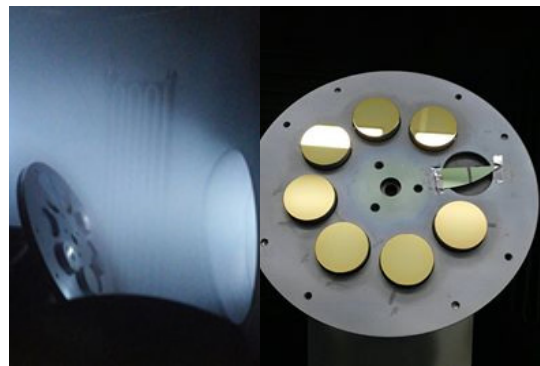


Fig. 13. Glass mold core ta-C thin film coating.

Fig. 13은 실험을 통하여 도출된 박막 코팅 공정 조건으로 금형 코어에 박막 코팅한 결과이다.

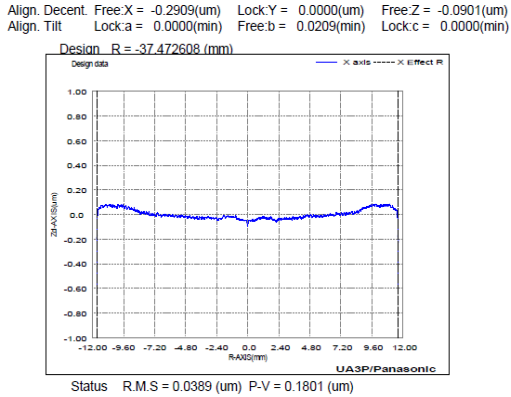


Fig. 14. ta-C thin film P-V graph on mold core (UA3P)

Fig. 14는 박막이 코팅된 금형 코어의 형상 정밀도를 UA3P (Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer, panasonic사) 측정 장비를 사용하였으며, UA3P 측정 장비는 다양한 렌즈 및 금형의 측정 장비로 최대 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 까지 측정 가능한 분해능을 가지고 있으며, 측정된 결과로, P-V 값이 $0.1801 \mu\text{m}$ 로 그림 12의 금형 코어 설계도면 기준 P-V 값 $0.5 \mu\text{m}$ 이내로 만족하는 결과를 얻었다. 이후 렌즈의 성형은 GMP (glass mold press) 방식 중에서 순차적 렌즈 성형 방식(Progressive type)으로 진행하였으며, 사용된 유리의 소재는 DZK2-L이며, 성형 온도는 약 575°C , Cycle time은 약 200초이다.

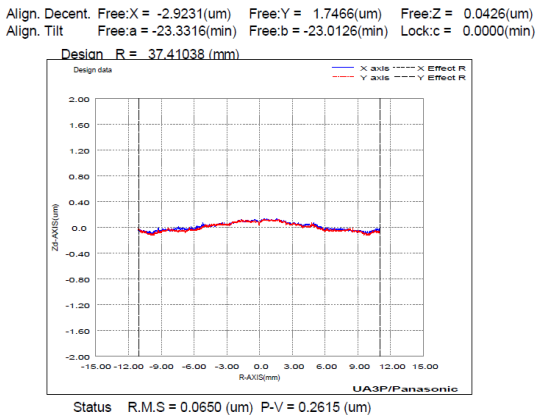


Fig. 15. Glass lens P-V graph(UA3P)

Fig. 15은 성형 후 추출된 렌즈의 형상정밀도를 UA3P 장비로 측정된 결과이다. 측정된 형상정밀도는 $0.2615 \mu\text{m}$ 로 렌즈 설계 기준 $20 \mu\text{m}$ 이내에 만족하는 결과가 도출되어 양품의 렌즈가 제작되었음을 확인하였다. 또한 최초 성형 후 ta-C 박막의 물성 변화를 관찰하기 위해 100, 1,000, 1,500 shot 등 누적 성형 후 관찰한 결과, 약 1,000 shot까지는 박막의 표면에 큰 변화가 없이 양질의 렌즈가 생산되었다. 이는 양산된 렌즈가, 유리 렌즈 성형 후 코팅면과 렌즈 소재와의 화학적 반응에 의해 용착이 발생하지 않는 양품의 렌즈로서, 고품질의 이형성 평가 기준을 만족했음을 알 수 있는 결과이다.

DLC 박막의 물성은 Anders 등에 의하면, 공기 중에서 수소를 함유한 DLC의 경우 150°C 에서 분해되어 열화가 되는 반면, FCVA 방법을 이용하여 증착한 ta-C 박막의 경우 700°C , 진공 중에서 1 시간 노출 시에도 열화가 관찰되지 않았다[9,10]. 이에 따라 열적 안정성은 화학적 결합양상과 밀접하게 연관되어 있는 것으로 예상된다. 또한 Neuville 등에 의하면 수소를 함유한 DLC의 경우 통상적으로 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 에서 분해가 일어나고, FCVA 방법으로 증착한 높은 sp^3 분율을 갖는 ta-C의 경우 $700 \sim 800^\circ\text{C}$ 에서 분해가 일어나는 것으로 알려져 있다. sp^3 분율이 100%가 될 경우, 불활성 분위기에서는 1300°C 에서 분해가, 산화 분위기에서는 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 에서 산화가 일어날 것으로 예측하였다[9-11]. 따라서 본 연구에서 진행된 FCVA 방법으로 증착한 ta-C의 경우 수소 및 질소 등의 불순물을 함유하지 않으므로 C-H, C-N 등의 약한 결합이 존재하지 않아, 성형온도 575°C 에서도 높은 Sp^3 분율 및 열적 안정성을 가지는 것으로 판단되며 본 실험에서 비구면 유리렌즈 금형 표면에 적합한 ta-C 박막코팅 공정이 적용된 것으로 사료된다. 또한 본 연구의 실험을 통하여 도출된 각 자장(SM, EM, BM, OM 및 Raster Magnetron)의 공정 조건으로 ta-C 박막 코팅의 플라즈마 인출 빔과 균일도의 개선 효과로써, 약 130 mm의 얇은 박막층 제조 공정시간은 약 30분 이내로 단축, 타겟 소모의 최소화 등을 통하여 생산성 향상과 공정비용 절감의 효과를 거둘 수 있을 것으로 예상된다. 또한 렌즈의 성형과 관련하여 박막의 두께에 영향을 받지 않은 정밀한 형상정밀도 구현 뿐만 아니라 수명 연장에 근접한 금형 코어 재생 시 박막의 에칭 공정 시간 단축 및 금형 코어의 재사용성이 향상될 것으로 기대된다. 또한 실제 유리렌즈의 성형 과정에서 성형온도 및 성형수명 실험을 통해 박막의 고온 안정성도 확보 가능할 것으로 예측된다. 마지막으로 본 연구의 바이어스

전압 변화의 실험 결과에 기초하여 향후 보다 세밀한 박막의 물성 조성으로 다양한 유리 소재와 금형 소재에 따른 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

광학계에서는 작고 굴절율이 높은 저분산 렌즈에 대한 요구가 증가되고 있으며, 이에 따라 높은 내열성과 내마모성을 가진 이형성 보호막의 필요성이 높아지고 있다. 하지만 아직 국내외 광학 산업계에는 비구면 유리 렌즈 성형에 적용되는 금형의 이형성 보호막에 대한 제조 공정 및 품질 표준에 대한 명확한 기준이 아직 마련되어 있지 않으며, 광학 렌즈를 제작하는 각 기업의 자산 및 노하우(know-how)로 잘 알려지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 유리 몰드 성형기법(GMP, glass mold press)을 이용한 렌즈를 제작 시 초경합금(WC) 금형 코어(core)의 표면에 필요로 하는 이형성 보호막 중에서 FCVA(filtered cathode vacuum arc)법으로 제조된 ta-C 박막 코팅의 공정 조건을 도출하였으며, ta-C 박막의 기계적 특성 분석 결과, 박막의 두께는 약 120 ~ 130 nm, 박막의 경도는 평균 60 GPa, 박막의 접착력은 70 N 이상의 기계적 특성을 갖는 박막을 얻을 수 있었다.

이는 기존의 스퍼터링 방식을 통한 Ir-Re(이리듐-레늄)박막 코팅 공정이 300 ~ 450°C의 고온에서 진행하여 기관의 가열 및 냉각 시간이 필요한 긴 공정시간을 갖는 것에 대비하여 FCVA (Filtered Cathode Vacuum Arc) 방식의 ta-C 박막 코팅은 상온(R.T)에서 공정이 가능하여 공정시간이 1/5로 단축되어 생산성이 향상되었으며, 향후 성형 후에도 ta-C 박막의 손상 시 박막만 제거할 수 있는 에칭 공정을 거쳐 ta-C 박막 재코팅을 통해 다시 재생산이 가능한 두께는 50% 얇으면서도 박막의 경도는 약 20%, 접착 강도를 40% 이상 향상시킨 결과이다.

또한 나아가 실제 금형 코어의 표면에 본 연구에서 진행된 실험을 통하여 도출된 박막 코팅 공정을 적용하여 렌즈를 성형한 결과, ta-C 박막 코팅 후 금형 코어의 형상정밀도는 0.1801 μm , 성형 후 렌즈의 형상정밀도는 0.2615 μm 로 금형 코어 및 렌즈의 설계도면 모두 만족하는 양질의 렌즈를 제작할 수 있음을 확인함으로써 유리 몰드 성형기법에서 필요로 하는 금형의 이형성 보호막의 최소한의 기계적 특성 및 품질을 확인할 수 있었다.

본 연구는 유리 몰드 성형기법의 금형에서 필요로 하는 다양한 이형성 보호막의 연구와 표준 공정 조건 확보를 통해 품질 기준을 확립하는데 기여할 것으로 사료된다.

References

- [1] Y. H. Kim, "DLC application to release film of lens manufacturing mold", Korea Institute of Science and Technology Information, pp. 1-6, 2015
- [2] H. S. Lee, B. C. Im, M. T. Kim, B. S. Lee and S. H. Park, "A Study on the Flow Analysis for KP505 Propeller Open Water Test", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 20, no. 8, pp. 22-28, 2019
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.8.23>
- [3] Vetter, J. "60 years of DLC coatings: historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications", *Surface and Coatings Technology*, vol. 257, pp. 213-240, Oct. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.017>
- [4] K. Atsuo et al, "The Hard Ceramics Coating by PVD and the Industrial Application", *JOURNAL-SURFACE FINISHING SOCIETY OF JAPAN*, vol. 58, no. 8, pp. 440-441, Aug. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.4139/sfi.58.440>
- [5] Y. J. Jang, J. H. Choi, J. H. Kim, H. J. Kim, "The effect of ta-C coating on hardness of WC mold for glass molding process", *Proceedings of the Korean Society Of Tribologists And Lubrication Engineers*, pp. 43-44, Apr. 2015
- [6] J. K. Kim, K. T. Kim, B. M. Jeon, S. H. Lee, S. H. Lee, "Study of several micro meter thickness tetra-amorphous Carbon (ta-C) films by Filter Cathodic Vacuum Arc Deposition", *Proceedings of the J. Kor Inst. Surf. Eng.*, pp. 37-37, May. 2014.
- [7] J. K. Kim, K. T. Kim, D. S. Kim, Y. J. Kang, S. H. Lee, "Study of coating process for mass production of non-hydrogen Diamond like carbon films using filtered vacuum arc method", *Proceedings of the J. Kor Inst. Surf. Eng.*, pp. 72-72, May. 2015.
- [8] S. K. Oh & Y. M. Kim, "Processing of ta-C Protective Films on Mold for Glass Lens", *J. Kor Inst. Surf. Eng.*, vol. 44, no. 5, pp. 213-219, Oct. 2011
DOI: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2011.44.5.213>
- [9] S. S. Park, J. H. Won, "A Reaearch on DLN Thin Film Coating of a SiC Core for Aspheric Glass Lens Molding", *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, vol. 27, no. 12, pp. 28-32, Dec. 2010.
- [10] McKenzie, D. R., et al. "Tetrahedral amorphous

carbon properties and applications”, *Journal of non-crystalline solids*, vol. 164, no. 9, pp.1101-1106, Nov. 1993.

DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(93\)91191-5](https://doi.org/10.1016/0022-3093(93)91191-5)

- [11] S. Neuville and M. Allan, “Hard carbon coatings: the way forward” *MRS bulletin*, vol. 22, no. 9, pp. 22-26, Nov. 1997.

DOI: <https://doi.org/10.1557/S0883769400033960>

정 경 서(Kyung-Seo Jung)

[준회원]



- 2010년 8월 : 강원대학교 전기전자공학과 (석사)
- 2019년 8월 : 한국기술교육대학교 IT융합SW공학과 (석사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : ㈜에이지광학 광기술부설연구소 선임연구원

<관심분야>

기계, 재료

김 승 희(Seung-Hee Kim)

[정회원]



- 2005년 8월 : 연세대학교 산업정보경영 (석사)
- 2014년 2월 : 서울과학기술대학교 산업정보시스템 (박사)
- 1993년 10월 ~ 2015년 2월 : LG 전자, LG-CNS, LH 재직
- 2016년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 IT융합SW공학과 조교수

<관심분야>

SW 품질공학, 최적화, IT 프로젝트 관리
