

논문 2015-52-5-21

# DLC 박막을 통한 전자광학추적장비 신뢰성 개선

## (Reliability Improvement of the Electro Optical Tracking System by using DLC Films)

심보현\*, 조희진\*\*, 김장은\*

(Bo-hyun Shim<sup>Ⓢ</sup>, Hee-jin Jo, and Jang-eun Kim)

### 요약

합성용 전자광학추적장비 열영상센서부 전면창의 신뢰성 및 성능 개선을 위해 플라즈마 화학기상증착법을 통해 제작되는 DLC 박막을 제안하였다. DLC 박막은 현재 사용되고 있는 실리콘 박막과 비교하여 뛰어난 강도와 낮은 마찰, 화학적 안정성이 우수하며 이로 인해 해상 환경에서 필연적으로 발생하는 열영상센서 전면창의 표면 박리를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 본 실험을 통해, DLC 박막이 갖는 물리적 특성을 바탕으로 다양한 전자광학장비에 적용이 가능함을 확인하였다.

### Abstract

The Diamond Like Carbon(DLC) films for the Electro Optical Tracking System(EOTS) by using Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition(PECVD) method is presented. We achieve that the DLC films can reduce the surface delamination of thermal observation sensor front window due to the high hardness, low friction and chemical inertness which is comparable to a Si film. According to our experiment results, DLC films can be used for various electro optical systems to eliminate surface delamination.

**Keywords :** Electro Optical Tracking System, Reliability, Surface Delamination, Acoustic Emission

## I. 서론

합성에 탑재되는 전자광학추적장비의 전자광학 센서부는 열영상 센서와 주간영상카메라, 레이더거리측정기 등의 센서를 내장한 센서구동장치와 외부로부터의 충격 및 진동을 완화하기 위한 센서 장착대 조립체로 구성되어 있고 전장 감시를 지원하고 대공 및 대함 표적에 대

한 위치 정보를 제공하기 위해서 합성의 마스트 위에 장착되어 운용된다. 이로 인해, 센서구동장치의 전면창은 해수에 장시간 노출되어 표면 박리가 빈번하게 발생하게 된다. 이 문제점을 보완하기 위해 전면창에 염수에 강한 재료로의 표면처리 기술이 제시되고 있다. 그중 최근에는 표면처리방법 중 환경오염을 거의 일으키지 않으며 원하는 물질만으로 표면코팅이 가능한 진공방법 등이 많이 적용되고 있으며, 특히 탄소 물질로 구성된 DLC(Diamond Like Carbon) 코팅방법이 주목받고 있다. 단결정 천연 다이아몬드와 유사한 성질을 갖는 DLC 박막은 강도가 높고, 마찰계수가 작으며, 가시광선과 적외선에 대해서 투과성을 가지고, 전기적 비저항이  $10^{12} \Omega\text{-cm}$  이상으로 저온 저압에서 기상 합성된

\* 정회원, 국방기술품질원 대구센터 3팀  
(Defense Agency for Technology and Quality)

\*\* 정회원, 국방기술품질원 분석평가부 기술분석팀  
(Defense Agency for Technology and Quality)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: sbh85@dtaq.re.kr)

Received ; January 8, 2015    Revised ; April 2, 2015

Accepted ; April 21, 2015

탄소 박막을 말한다<sup>[1~4]</sup>. DLC 박막은 다이아몬드와 유사한 특성을 갖는 비정질 재료로 화학적으로 안정되어 있고, 광투과율, 경도, 열전도도, 내화학성이 높은 동시에 마찰계수가 낮은 특성을 가지고 있으므로 다양한 분야에서 응용이 기대되고 있다<sup>[5~6]</sup>. 특히 기계적 강도가 요구되는 공구, 베어링 등의 내마모성 코팅용은 물론 광학재료의 보호 및 무반사 코팅재료, 반도체 소자의 열 방사 코팅재료, 평판 표시소자의 전계방출 tip 재료 등으로 활용하기 위한 연구 등이 활발히 진행되고 있다<sup>[7~8]</sup>.

본 논문에서는 합성용 전자광학추적장비의 열영상센서부 전면창에서 필연적으로 발생하는 표면 박리 현상을 해결하기 위해 실리콘 박막의 표면 박리에 직접적으로 영향을 미치는 요소가 염수임을 확인하고 이에 대한 개선 방안으로 DLC 박막을 제시하였으며 시험을 통해 표면 박리 현상이 최소화됨을 확인하였다. 또한 전자광학추적장비의 전면창에 적용함으로써 박막 물질로써의 가능성을 제시하였다.

## II. 이론적 배경

DLC 박막은 비정질의 고상 카본박막을 말하며 다이아몬드와 유사한 높은 기계적 경도, 화학적 안정성, 광학적 특성, 윤활성, 내마모성, 전기절연성을 가지고 있는 재료이다. 다이아몬드와 그 특성이 유사하다는 점을 강조하여 DLC로 많이 불리고 있으나, 합성에 사용되는 활성화된 이온이 박막의 구조나 특성을 결정하는 중요한 역할을 한다는 관점에서 i-carbon이라고 불리기도 한다. DLC 박막은 수 nm의 결정질이 박막 내에서 관찰되기도 하지만 대부분이 비정질 구조를 가지며, 다이아몬드나 흑연과는 달리  $sp^2$ 와  $sp^3$  탄소 결합이 혼합되어 있는 복합적인 구조를 갖는다.

탄소는  $sp^1$ ,  $sp^2$ ,  $sp^3$ 의 세 가지 혼성궤도를 가지고 있다.  $sp^3$  혼성 결합구조는 시그마 결합 4개로 단일결합을 하며  $sp^2$  혼성 결합구조는 시그마 결합 3개와 파이결합한 개로 1개만 이중결합이고 나머지 결합은 단일결합을 한다.  $sp^1$  혼성 결합구조는 시그마 결합 2개와 파이결합 2개로 1개가 삼중결합에서 파이결합이 두개고 나머지 결합에서 시그마 결합이 2개로 이루어져 있다.  $sp^3$  다이아몬드와  $sp^2$  흑연의 결정 구조를 통해서 알 수 있듯이  $sp^3$  혼성 결합 구조에서는 4개의 전자 서로가 강한 시

그마 결합을 형성한다.

흑연은 탄소의 가장 안정적인 결합 상태로 층간 결합 구조가 삼각 방향으로 시그마 결합을 형성하고 4번째 전자는 약한 파이 결합을 하면서 금속성질을 나타내고, 다이아몬드는 wide band gap을 가지는  $sp^3$  결합 형태의 반도체성질을 나타낸다.

DLC 박막의 경도는 합성조건에 따라 크게 차이가 있지만 대체로 탄화규소(SiC)나 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )와 비슷한 수준의 높은 값을 가지고 있으며, 윤활 특성은 다른 박막들보다 우수하며, 특히 습도가 낮은 조건에서도 윤활 특성이 뛰어나 우주산업용 기계부품의 윤활 코팅으로 적합하다고 보고되었다. 광학적 특성과 전기적 특성은 흑연보다는 다이아몬드에 유사하며, 적외선 영역에서의 투과성과 굴절률은 적외선 광학재료의 무반사 코팅용으로 적절하다.

물질의 특성을 결정하는 구조에 대해 알아보면, 탄소를 포함하는 다이아몬드, DLC, 흑연 중에서 탄소로부터 합성되는 다이아몬드와 흑연은 동일한 결정구조를 가지지만, DLC 박막은 아몰퍼스(amorphous)인 점에서 차이가 난다. 또한 다이아몬드는 결정이  $sp^3$  결합을 하고 흑연은 결정이  $sp^2$  결합을 하는데 반하여 DLC 박막은  $sp^3$ 와  $sp^2$ 가 같이 혼합적으로 존재한다는 것을 알 수 있다. 이러한 DLC 박막은 내부 탄소원자의 결합상태인  $sp^3$ 와  $sp^2$ 의 비를 조절하여 원하는 물성을 제어할 수 있다. 주로 DLC 박막이 높은 경도와 내마모성 등은 주로 시그마 결합만을 형성하는  $sp^3$  결합에 기인하며, 다양한 범위의 광학적, 전기적 특성은 시그마 결합과 파이 결합을 동시에 형성하는  $sp^2$  결합에 기인한다고 보고되고 있다. DLC 박막은 밀도, 경도에서는 다이아몬드에 비해 떨어지지만, 내부 탄소원자의 결합상태인  $sp^3$ 와  $sp^2$  비를 조절하여 광학뿐만 아니라 다양한 분야에서 사용되고 있다.

## III. 실험 방법

기판은 실리콘 4 inch 웨이퍼이며 1 cm x 1 cm의 크기로 절단하여 사용하였다. 기판은 RCA 세척을 하고 TCE(trichloro-ethylene), 아세톤, 메탄올에서 각각 10분간 초음파 세척 후 D.I. water에서 5분간 초음파 세척을 하였다. 기판은 반응성 스퍼터링 장치에 있는 반응관의 하부 전극에 올려놓고 반응관을 닫고 로터리 펌프를 사

용하여 10분 동안 0.8 Pa 이하까지 중진공으로 배기하였다. 반응관을 고진공으로 하기위하여 확산펌프를 이용하였으며 30분 이상 가열한 뒤 메인 밸브를 열어  $6.6 \times 10^{-4}$  Pa이하까지 배기하였다. 반응관내 플라즈마를 안정화 시킨 후, 기판 표면의 불순물제거를 위하여 10분간 6.7 Pa분위기에서 10 sccm의 아르곤가스를 사용하여 표면을 전단계 처리하였다. 연구를 위해 사용된 장치의 반응관 부분을 포함한 장치 개략도를 Figure 1에 나타내었다.

DLC 박막 증착을 위하여 plasma assisted PVD/CVD와 스퍼터링(sputtering) 기술이 혼합된 장비를 사용하였으며, 주로 메탄( $CH_4$ )과 실란( $SiH_4$ (5 % in Ar)) 혼합 가스의 분해와 아르곤을 사용한 99.99 %의 높은 순도를 가지는 흑연 타겟에 RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하였다.

먼저, 기판은 세정을 하여 준비하였고, 챔버의 낮은 쪽 전극에 위치하게 하였다. DLC 박막 증착 전 반응관의 진공 상태는  $6.6 \times 10^{-4}$  Pa 이하로 유지 하였고, 우선적으로 아르곤 플라즈마를 이용하여 기판을 세척하였다. 이후 RF를 이용하여 발생시킨 메탄/실란 플라즈마를 사용하여 흑연 타겟을 스퍼터링하여 기판에 DLC 박막을 증착하였다. 실험에 사용된 사용 압력과 스퍼터 전원은 각각 10 pa과 150 W로 유지하였다.

박막에 포함된 실리콘 함유 농도는 아르곤에 포함된 실란의 비율을 조정에 조절하였다. DLC 박막의 실리콘 함량은 실란과 아르곤의 가스 비에 의하여 조절 및 제어 되었으며, 아르곤과 메탄가스가 혼합된 상태에서 0에서 4vol %를 가지는 실란의 유량에 따라 조절하였다. 이때, 실란의 vol. %는 식 (1)을 통해 구하였으며 모든

실험조건에 메탄의 가스 유량은 1 sccm으로 일정하게 유지되었다.

$$SiH_4 \text{ fraction (vol. \%)} = \frac{SiH_4 (sccm)}{[SiH_4 (sccm) + CH_4 (sccm) + Ar (sccm)]} \quad (1)$$

#### IV. 신뢰성 분석 결과

함정에 탑재되는 전자광학추적장비는 표적의 추적 및 식별 임무를 수행하기 위해 센서구동장치의 주기적인 관리가 필수적이다. 이를 위해 센서부에 내장된 열영상센서와 주간영상카메라, 레이저거리측정기에는 외부로부터 주요 구성품을 보호하기 위한 보호용 창이 사용되고 있다. 함정 마운트에 탑재되는 전자광학추적장비의 전면창 광학 재질은 실리콘을 사용하고 있는데 실리콘은 근적외선 영역에서 굴절률이 3.42를 유지하며 비교적 투명하고 비용이 저렴하며 유리에 부착력이 뛰어나 제작이 용이하다는 장점을 가지고 있다.

전자광학추적장비가 탑재되는 함정은 주로 해상 환경에서 활용되어짐에 따라 외부에 장기간 노출될 수 있다. 따라서 해상 환경에서 직면하게 되는 해수 및 온도차, 습도 등 장비 운용에 직접적으로 영향을 미치는 위험요소를 식별하여 사전에 최소화할 수 있도록 조사 및 연구 활동이 이루어져야 한다. Table 1은 수개월 동안 전자광학추적장비를 해상 환경에 노출시킴에 따라 전면창 표면에서 발생한 주요 현상의 내역을 정리해 본 자료이다.

표 1. 전자광학추적장비 전면창 품질 상태 및 조치현황

Table 1. Quality details and action status of EOTS front window.

번호	현상	조치	비고
1	표면 박리	교체	재발생
2	-	-	-
3	표면 부식	교체	재발생
4	표면 부식	교체	재발생
5	표면 박리	교체	재발생
6	표면 박리	교체	-

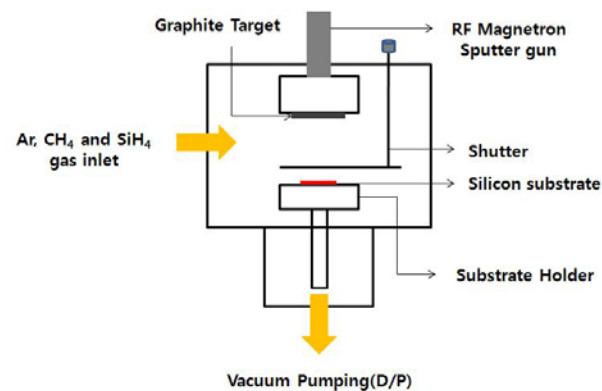


그림 1. 시험장비의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of the equipments.

표 2. 실리콘 박막 내구성 시험 항목  
Table 2. Durability list of Si film.

순번	시험 항목	소요 기간
1	접착력 시험	1일
2	문지름 시험	4일
3	온-습도 시험	5일
4	염수 시험	10일
5	용해성 시험	10일
6	소금물 시험	1일
7	열충격 시험	1일

표 3. 실리콘 박막 내구성 시험 방법  
Table 3. Durability test method of Si film.

시험 항목	시험 방법
접착력 시험	L-T-90 Type 1
문지름 시험	40 strokes, 2.0 ~ 2.5 pounds
온-습도 시험	고온 : 71 °C (95 % RH 적용) 저온 : - 53 °C
염수 시험	5 % 염수
용해성 시험	실온 침수
소금물 시험	100 °C, 5 % 소금
열충격 시험	고온 : 70 °C, 저온 : - 55 °C 유지

전자광학추적장비 전면창에서 발생하는 박리 및 부식 현상을 해결하기 위해 실리콘 박막의 표면 박리에 직접적으로 영향을 미치는 요소들을 군사규격을 토대로 선정하여 내구성 시험을 실시하였다. 내구성 시험을 위해 선정된 항목은 총 9개 항목으로 접착력, 강한 문지름, 온-습도, 염수분무 #1, 염수분무 #2, 증류수 용해성, 열 충격, 끓는 소금물 시험이며 군사규격에서 요구하는 조건을 기준으로 시험 환경을 구성하였다. Table 2와 3은 실리콘 박막의 내구성 시험 항목 및 시험 방법에 대해 나열한 자료이다.

실리콘 박막의 표면 박리 및 부식현상의 주요 원인을 도출하기 위해 실험을 실시한 결과, 염수에 의한 표면 박리가 가장 두드러지게 나타남을 확인할 수 있다. Figure 2는 염수분무 시험과 염수 용해성 시험을 실시한 실리콘 박막 자료이며 표면 전체적으로 부식 및 박리 현상이 나타남을 알 수 있다. 또한 염수분무 시험에 비해 염수용해성 시험을 실시한 실리콘 박막에서 표면 벗겨짐이 상대적으로 많이 발생하며 염수용해성 시험을 실시하는 시간이 길어질수록 박막 현상이 가속화됨을



그림 2. 염수 시험에 따른 실리콘 박막의 표면 박리  
Fig. 2. Surface delamination of Si film by the salt water solubility tests.

확인할 수 있다. 반면 접착력, 문지름 온-습도 시험 등 염수와 관련이 없는 시험의 경우 표면 박리에 직접적인 영향이 가해지지 않음을 알 수 있다. 이를 통해 전자광학추적장비의 전면창으로 사용되는 실리콘 박막은 염수에 의해 표면 박리 및 부식 현상이 발생하게 됨을 확인하였다.

전자광학추적장비 전면창 실리콘 박막에 대한 다양한 시험 군을 통해 박막 표면 박리의 주요 원인은 염수에 의한 것임을 확인하였다. 염수는 전해질로서 염소이온과 산소의 양이 많고 합정의 주요 운용지인 해상 환경을 고려했을 때, 파도 및 해류 등으로 인한 질량 이동 속도 또한 증가하여 합정을 구성하는 외부 구조용 금속들뿐만 아니라 전자광학장비 전면창에도 직접적인 영향을 미치게 된다.

실리콘 박막에 염수의 영향성을 분석하기 위해 재료 특성을 관찰, 평가하는 비파괴 검사 방법인 음향 방출법(Acoustic Emission, AE)을 실시하였다. 음향 방출법은 고체 내에 국부적으로 형성되었던 변형에너지가 급격히 방출되어질 때 발생하는 탄성파를 측정하는 기법으로 고체 내에서 전위의 이동이나 미소균열의 생성 및 성장 등이 대표적인 발생원이 된다. 전위의 이동과 같이 일반적인 경우에는 연속적인 신호를 나타내지만 표면에서 균열이나 부식, 박리 현상이 나타나게 되면 돌발적인 형태의 신호가 나타남으로서 응력이 증가하게 됨을 알 수 있다. 음향 방출법은 일반적으로 널리 알려진 초음파탐상검사(Ultrasonic test, UT)와 큰 차이가 있다. 초음파 탐상검사의 경우, 센서에 의해 초음파를 발견하여 검사 대상 시험편 내부로 진행한 후 반사/투과되어 돌아오게 되는 신호를 수집하여 평가한다. 음향 방출법은 앞서 설명한 바와 같이 고체 내부의 변화에

의해 검사 대상체 변형에 의해 동반되어 발생하는 초음파 신호를 수집하여 평가하는 방법이다. 특히, 음향 방출법에 의해 계측된 신호는 고체 내부 변화에 의해 발생되어 변화에 관련된 정보를 갖고 있으며, 따라서 이러한 신호 분석을 통한 다양한 평가가 가능하다.

과단, 균열 발생, 부식, 누설 등과 같은 음향방출의 원인이 되는 고체 내부의 변화를 음향방출 발생원이라 한다. 이 때 종파, 횡파, 레일리표면파, 판파 등 다양한 종류의 탄성파가 발생되며, 이러한 탄성파에는 수 kHz의 가청 주파수 영역을 갖는 강도가 약한 음파 또는 수십 kHz ~ 수 MHz 영역의 주파수를 갖는 초음파가 있다. 고체 내부의 변화 즉, 발생원에 의해 발생된 탄성파는 본질적으로 탄성 매체가 되는 고체 내에서 모든 방향으로 진동하며 퍼져나가며, 탄성매체인 검사체 표면에 부착한 음향방출 센서를 통해 최종적으로 검출되게 된다.

Figure 3은 음향 방출법을 통해 염수의 농도를 조절함에 따라 실리콘 박막의 박리 발생 정도를 확인한 자료이다. 각각의 박막에 대해 AE sensor의 사이에 AE 신호 감쇠를 최소화하기 위해 점성이 높은 그리스를 접촉매질로써 사용하였으며, 사용 중 발생하는 열화손상에 의해 동반 발생된 탄성파의 안정적 계측을 위해 지그를 사용하여 압착 고정하였다. AE sensor를 통해 얻어진 AE 신호는 높은 S/N비를 위해 Pre-amplifier를 통해 40 dB 증폭되었으며, 데이터 수집 및 저장을 위해 사용하였다.

각각의 샘플에 대한 응력지수 그래프를 통해 염수의 농도가 높은 조건일수록 변화량이 증가함을 알 수 있는데, 이를 통해 염수에 의해서 실리콘 박막의 표면에서

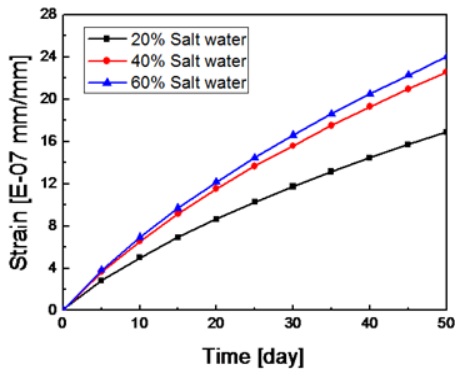


그림 3. 음향 방출법에 따른 실리콘 박막 표면 박리 결과

Fig. 3. Surface delamination result of Si film by the acoustic emission.

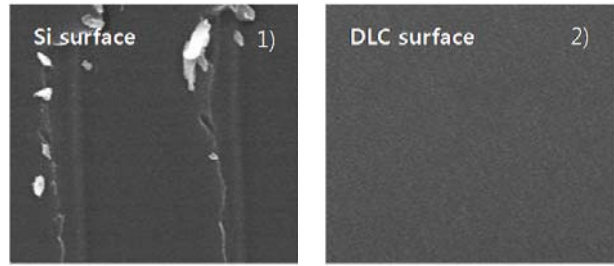


그림 4. 염수 분무 조건에 따른 실리콘과 DLC 박막의 표면 변화 비교

Fig. 4. SEM images of the Si and DLC films by the salt water spray.

크고 작은 균열 및 박리가 발생하였고 박막의 스트레스 수치 또한 증가하였음을 예측할 수 있다.

Figure 4는 실리콘 박막과 DLC 박막을 이용하여 일정 기간 동안 염수를 분무한 후, 표면 변화를 주사전자 현미경을 통해 관찰한 자료이다. 동일한 두께로 증착되어진 실리콘과 DLC 박막에 대해 실버 코팅을 실시하였고 배율은 10만 배로 확대하였다. SEM 장비로 관찰한 결과, 실리콘 박막은 염수에 의해 표면 균열이 발생하며 불규칙적으로 표면이 벗겨지는 현상을 확인하였다. 이를 통해 실리콘 박막이 염수에 장기간 노출될 수 있는 해상 환경에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 반면 DLC 박막의 경우, 지속적인 염수분무에도 불구하고 표면 박리 및 균열 없이 일정한 상태를 유지함을 확인할 수 있다.

Figure 5는 염수 시험 후, 실리콘 박막과 DLC 박막의 표면 거칠기에 대해 원자간력현미경을 통해 비교한 자료이다. 동일한 두께로 증착되어진 실리콘과 DLC 박막에 대해 AFM 장비를 contact mode로 조절하고  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  범위에서 표면 거칠기를 측정하였다. 각각의 샘플에 대해 측정을 3회씩 수행하였고 평균 거칠기 값을

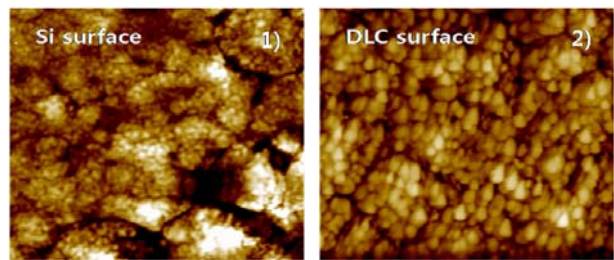


그림 5. 염수 분무 조건에 따른 실리콘과 DLC 박막의 표면 거칠기 비교

Fig. 5. AFM images of the Si and DLC films by the salt water spray.



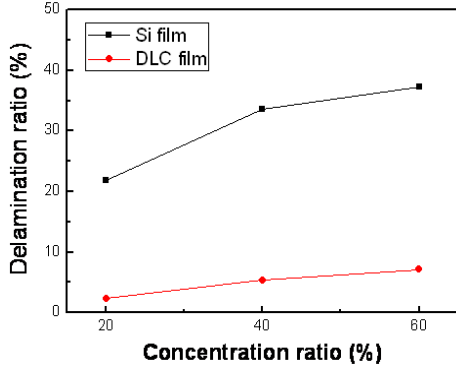


그림 6. 음향 방출법에 따른 실리콘과 DLC 박막의 표면 박리 비교

Fig. 6. Surface delamination test of Si and DLC films by the acoustic emission.

비교하였다. 실리콘 박막은 염수에 의해 표면 박리 및 핀홀 현상이 발생하여 위치에 따른 표면의 높이가 일정하지 않으며 표면 거칠기(Surface Roughness, SR) 또한 82.5 nm로 상당히 높은 값을 나타냄을 확인하였다. 반면 DLC 박막은 표면 거칠기가 10.7 nm로 입자간의 간격이 비교적 일정하여 나타나며 이를 통해 염수에 의한 표면 박리 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다.

음향 방출법 발생 및 전파하는 파동은 탄성파동의 기초 식을 만족해야 하며, 탄성 파동방정식을 유도하기 위해서는, 식 (2)와 같은 동적 평형방정식을 고려해야 한다.

$$\rho U_j = \frac{\alpha^2 U_j}{\alpha t^2} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 재료의 밀도이고,  $U$ 는 변위를 나타낸다. 또한 덧셈 규약에 의해 식 (2)를 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = \sigma_{1j,1} + \sigma_{2j,2} + \sigma_{3j,3} \quad (3)$$

한편 변형률-변위 관계를 Hooke 법칙에 적용하면 다음과 같은 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \lambda U_{kk} \delta_{ij} + \mu (U_{i,j} + U_{j,i}) \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+v)}$$

식 (4)를 식 (2)와 같이 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = \lambda U_{k,ki} + \mu U_{i,ji} + \mu U_{j,ii} \quad (5)$$

따라서 식 (2)에 식 (5)를 대입하면, 아래 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 3차원 탄성 파동방정식을 나타낸다.

$$\rho U_j = (\lambda + \mu) U_{k,kj} + \mu U_{j,ii} \quad (6)$$

식 (6)의 탄성 파동방정식은 P와 S파 뿐만 아니라 세 개의 변위성분이 포함되어 있는 편미분방정식이다. 변위에 대한 일반해를 얻기 위해 벡터 기호로 표현하면 식 (7)과 같이 기술된다.

$$\rho U_j = (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot U + \mu \nabla^2 U \quad (7)$$

$$\nabla = i \frac{\alpha}{\alpha x_1} + j \frac{\alpha}{\alpha x_2} + k \frac{\alpha}{\alpha x_3}$$

$$\nabla \cdot U = \frac{\alpha U_1}{\alpha x_1} + \frac{\alpha U_2}{\alpha x_2} + k \frac{\alpha U_3}{\alpha x_3}$$

$$\nabla^2 U = U_{,kk} = \frac{\alpha^2 U}{\alpha x_1^2} + \frac{\alpha^2 U}{\alpha x_2^2} + k \frac{\alpha^2 U}{\alpha x_3^2}$$

파동방정식의 일반해는 식 (8)을 만족하는 두 개의 함수로 구성되어 있다고 가정한다.

$$U = \nabla \phi + \nabla \times \Psi \quad (8)$$

$\nabla \times \Phi$ 는 벡터장의 회전이며, 계산결과는 벡터로 나타난다. 식 (8)을 식 (7)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 (\nabla \phi + \nabla \times \Psi) \cdot (\nabla \phi + \nabla \times \Psi) \\ = \rho \frac{\alpha^2}{\alpha t^2} (\nabla \phi + \nabla \times \Psi) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)의 항등식이 만족하기 위해서는 각각의 항이 0이어야 한다. 따라서 식 (10)과 (11)의 관계가 성립하게 되면 변위  $U$ 는 파동방정식을 만족하게 된다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{C_1^2} \phi \quad (10)$$

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{C_2^2} \Psi \quad (11)$$

$$C_1^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, \quad C_2^2 = \frac{\mu}{\rho}$$

또한 C1은 종파(P파), C2는 횡파(S파)로 알려져 있으며, 종파와 횡파의 파속의 비는 포아슨 비에 의해 결정되고, 종파의 속도가 횡파의 속도에 비해 2배 정도 빠르다.

파동방정식의 중요한 특성은 만약 탄성체 내에서 변위 성분이 파의 속도를 갖는 파동방정식을 만족한다면, 변위성분, 응력성분 그리고 가속도 성분 또한 방정식에서 동일한 파의 속도에서 만족하게 된다는 점이다. 즉, 탄성체내에서 변형률, 응력, 가속도 그리고 변위는 동일한 경로와 동일 속도로 진전하게 된다. 따라서 재료 내에 음향 방출파가 발생하면 탄성 파동방정식의 형태로 전파 및 진전하여 재료에 부착한 탐침기에서 검출하게 되며, 공학에서 일반적으로 다루는 가속도 측정과 유사한 형태로 음향 방출파를 검출하게 된다.

Figure 6은 음향방출법을 통해 실리콘 박막과 DLC 박막의 표면 박리 정도를 수치로 나열한 자료이다. 동일한 시간 동안 염수의 농도를 점차 증가시킨 조건에서 각각의 박막을 시험해 본 결과, 염수의 농도가 증가함에 따라 각각의 박막 표면 또한 박리 현상이 증가함을 확인할 수 있다. 실리콘 박막의 경우 최초 염수 시험에서 전체 표면 대비 약 21.8 %의 표면 박리를 나타냈으나, 염수의 농도를 증가시킨 재시험에서는 약 37.2 %의 표면 박리가 나타났다. 반면 DLC 박막은 최초 시험에서 2.3 %의 표면 박리를 나타냈으며, 염수 농도를 증가시킨 시험에서도 7.1 %로 큰 변화가 없음을 확인하였다.

각각의 박막에 대한 표면 구조 및 거칠기, 박리 발생 정도를 분석한 결과, 실리콘 박막에 비해 DLC 박막이 염수에 대해 우수한 내구성을 나타냄을 확인하였다. 이에 대한 검증을 위해 통제단계에서는 Figure 7과 같이 동일한 조건에서 제작된 실리콘 박막과 DLC 박막을 함정에 탑재되는 전자광학추적장비에 장착하여 해상 환경에서 염수에 대한 내구성 시험을 실시하였다. 5 %의 염수에 동일한 두께로 증착되어진 실리콘과 DLC 박막을 넣고 약 6개월 동안 표면에서 발생하는 박리현상을 육안으로 관찰하였다. 시험온도는 상온에서 수행하였고, 용액의 농도를 조절하기 위해 5일마다 농도를 확인하였다.

약 6개월 동안 박막에 나타나는 박리 현상을 확인해 본 결과, 실리콘 박막은 측정단계와 동일하게 표면에서 박리 및 핀홀 현상이 발생하여 전면창으로서 활용이 불

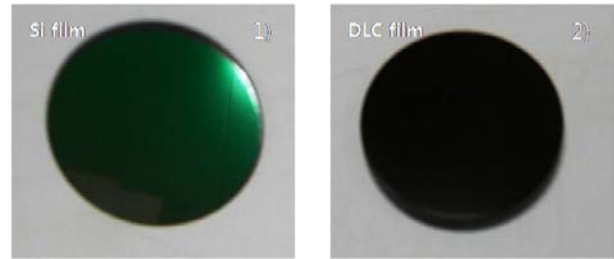


그림 7. 실리콘과 DLC 박막의 표면  
Fig. 7. Si and DLC films surface.

가하였다. 이를 통해 표적에서 발생하는 열을 감지하는 센서의 전면창에 미세한 표면 박리가 발생함에 따라 전자광학추적장비의 표적 식별 및 추적 기능 또한 저하되리라 추측할 수 있다. 반면 실리콘 박막과 동시에 시험을 진행하였던 DLC 박막은 개선단계에서 검증되었던 결과와 유사하게 표면에서는 미세한 박막조차 확인되지 않았다.

## V. 광학적 특성 분석 결과

두 가지 다른 종류의 박막을 광학분석장비를 활용하여 입사하는 빛에 대한 투과율을 Figure 8과 같이 확인할 수 있다. 적외선 영역에서 실리콘 박막의 경우, 평균 투과율이 약 97 %를 유지하는 반면, DLC 코팅 박막은 약 96 %로 약 1 % 하락함을 알 수 있다. 박막에 따른 평균 투과율 감소는 열상 검출기에 도달하는 적외선 에너지의 양을 감소시키므로 장비의 성능에 직접적인 영향을 미친다.

이는 최소분해가능 온도차를 통해 확인할 수 있다.

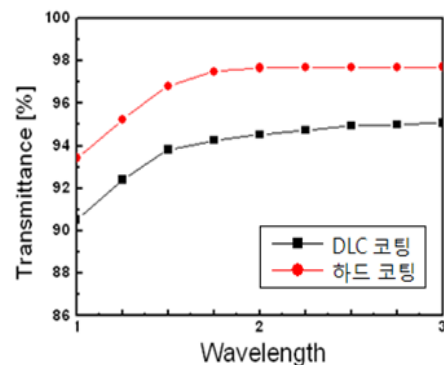


그림 8. 실리콘과 DLC 박막의 투과도 측정  
Fig. 8. Transmittance measurements of Si and DLC films.



그림 9. 최소분해가능온도차 측정 시험  
Fig. 9. MRTD measurement tests.

최소분해가능 온도차(minimum resolvable temperature difference)란 열상 전용검사장비에서 시준 되는 4개의 막대 표적이 분해되는 최소 온도차 값을 측정하는 것으로 정해진 규격의 막대 크기와 온도에서 패턴이 식별가능한지를 확인하는 것이다. 이때 최소 분해가능 온도차는 높은 흑체 온도에서 측정한 분해가능 온도차에서 낮은 흑체 온도에서 측정한 분해가능 온도차를 뺀 값에 1/2를 곱한 값이다. 따라서 코팅 박막에 따른 평균 투과율 감소가 시스템 성능을 표현하는 최소분해가능 온도차에 어떤 영향을 미치는 지는 직접 확인해 보기 위해, 전자광학추적장비를 준비한 후 실리콘 박막과 DLC 박막이 각각 적용된 열영상센서부 전면창을 장착하였다. 또한 시험에 영향을 미칠 수 있는 환경적 요소를 동일 시하고 전자광학추적장비를 최소분해가능 온도차 전용 시험장비에 고정하여 전면창이 시험치구(빛 전달)와 일치될 수 있도록 하였다. 다음으로 4개의 막대 표적이 화면에 전시되면 육안을 통해 분해되는 정도를 Figure 9와 같이 분석하였다.

Table 4는 실리콘 박막과 DLC 박막의 최소분해가능 온도차에 대한 측정 결과이다. 실리콘 박막의 경우 평균 검출기 도달 에너지양이 약 84.2로 나타나는 반면, DLC 박막은 약 83.3의 수치가 확인되었다. 이는 최소분해가능 온도차의 측정이 검출기에 도달하는 빛에너지의 양에 비례하는 점을 고려하였을 때, 실리콘 박막이 1.5 ~ 3 μm 적외선 파장 영역에서 가지는 평균 투과율이 약 1% 높게 확보됨에 따라 상대적으로 높은 나타나는 결과임을 알 수 있다.

$$MRTD = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{hc}{\lambda} \left[ \frac{(F/\chi)\sqrt{\Delta f}\sqrt{L}}{(\alpha L/\alpha T)\sqrt{A}\sqrt{\eta}} \right] \quad (12)$$

여기서 F/x는 광학계의 f-number이고, Δf는 적외선

표 4. 최소분해가능온도차 측정 결과  
Table 4. MRTD measurement results.

표적 크기 (cycles/mrad)	Si 박막	DLC 박막	비고
4.0 ± 0.4	0.03	0.04	MRTD 규격 충족
8.0 ± 0.8	0.06	0.07	
12.0 ± 1.2	0.20	0.20	

감지기의 주파수 대역폭이다. 또한 L은 radiance를 의미하고, A는 적외선 감지 소자의 단위 픽셀 면적을 나타낸다. 최소분해가능 온도차는 rms 노이즈가 대역폭의 제곱근에 비례하고 광학계의 F/x에 비례하게 되는데, 이것은 낮은 F/x일수록 많은 광을 집속시킬 수 있기 때문이다.

따라서 높은 투과율을 확보할 경우, 최소분해가능 온도차는 향상되는 결과를 얻을 수 있게 된다.

실리콘 박막과 DLC 박막 각각의 평균 투과율이 약 1% 감소하는 데에 비하여, 최소분해가능 온도차 값은 약 0.9 감소하였으나 전자광학추적장비로 활용함에 있어 큰 문제는 없는 것으로 보아, DLC 박막이 열영상센서부 전면창의 코팅 물질로써 충분히 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 함정용 전자광학추적장비의 전면창에 주로 사용되는 실리콘 박막의 표면 박리 문제를 해결하기 위해 군사규격을 바탕으로 주요 원인을 식별하고 DLC 박막을 대체 재질로 제안하였다. 또한 DLC 박막의 내구성을 검증하기 위해 전자주사현미경과 원자간력현미경을 통해 표면을 분석하였고 음향방출법을 활용하여 표면 박리 정도를 분석하였다. 이를 통해 DLC 박막이 전자광학추적장비의 전면창 재질로서 적합성을 확인하였다.

## REFERENCES

[1] X. He, W. Li, and H. Li, "Diamond-like carbon film synthesized by ion beam assisted deposition and its tribological properties", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 14, pp. 2039-2047, 1996.  
[2] A.A. Voevodin, S.J.P. Laube, S.D. Walck, J.S.



- Solomon, M.S. Donley, and J.S. Zabimski, "Pulsed laser deposition of diamond-like amorphous carbon films from graphite and polycarbonate targets", J. Appl. Phys. Vol. 78, pp. 4123-4130, 1995.
- [3] Q. Zhang, S.F. Yoon, Rusli, J. Ahn, H. Yang and D. Bahr, "Study of hydrogenated diamond-like carbon films using x-ray reflectivity", J. Appl. Phys. Vol. 86, pp. 289-296, 1999.
- [4] Y. Konishi, S. Ogura, N. Ikuchi, D. Imai, T. Nishihara and M. Shimhara, "Measurement of hydrogen content in ultrathin diamond-like carbon films using low-energy elastic recoil detection analysis", Diam. Relat. Mater. Vol. 9, pp. 746-751, 2000.
- [5] C.V. Deshpandey and R.F. Bunshah, "Diamond and diamondlike films: Deposition processes and properties", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 7, pp. 2294-2302, 1989.
- [6] M. Hakovirta, X.M. He, and M. Nastasi, "Optical properties of fluorinated diamond-like carbon films produced by pulsed glow discharge plasma immersion ion processing", J. Appl. Phys. Vol. 88, pp. 1456-1459, 2000.
- [7] N. Savvides and B. Window, "Diamond like amorphous carbon films prepared by magnetron sputtering of graphite", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 3, pp. 2386-2390, 1985.
- [8] T. Mikami, H. Nakazawa, M. Kudo, and M. Mashita, "Effects of hydrogen on film properties of diamond-like carbon films prepared by reactive radio-frequency magnetron sputtering using hydrogen gas", Thin Solid Films Vol. 488, pp. 87-92, 2005.

— 저 자 소 개 —



심 보 현(정회원)  
2011년 한국해양대학교 나노반도체학과 학사 졸업  
2013년 광주과학기술원 광공학응용물리학과 석사 졸업  
2013년~국방기술품질원 연구원  
<주관심분야 : 전자공학, 광학>



조 희 진(정회원)  
2011년 전북대학교 반도체과학기술학과 학사 졸업  
2013년 광주과학기술원 신소재공학과 석사 졸업  
2014년~국방기술품질원 연구원  
<주관심분야 : 신소재공학>



김 장 은(정회원)  
2011년 숭실대학교 정보통신전자공학과 학사 졸업  
2013년 숭실대학교 정보통신공학과 석사 졸업  
2015년~경북대학교 전자공학박사과정

<주관심분야 : 정보통신공학>