

# 광 간섭 현상을 이용한 나노 스케일의 유막두께 측정

윤영선†· 전필수\*· 김현정\*\*· 유재석\*\*

## The measurement of Nano Scale film thickness using optical interferometry

Youngsun Yun, Pilsoo Jeon, Hyunjung Kim, Jaisuk Yoo

**Key Words :** Optical interferometry(광 간섭), lubricant film thickness(유막 두께)

### Abstract

The interferometer method with nano-scale spatial resolution has been developed in this study. To enhance the accuracy of the previous developed method, the 14 bit cooled CCD camera with 1280 by 980 spatial resolution was applied to the measurement. And optical alignment has been carried out on the highly accurate position sensors with 500nm resolution so as to be able to calibrate the detected interference image with the field of view. Also the measurements were applied to the ultra thin oil film between the Al coated cylinder mirror with 38.1mm radius and 0.5mm cover glass to verify the developed method. The measured result showed the good agreement with the used cylinder curvature with  $\pm 5.18\text{nm}$  uncertainty.

### 기호설명

- E : 광파  
I : 광 강도 (intensity)  
t : time(sec)  
k : 전파상수  
 $\delta$  : 위상차  
 $\lambda$  : 파장  
 $\omega$  : 진동수 ( $\lambda/s$ )  
r : 구면파의 반지름  
 $\delta$  : 합성위상차  
n : 굴절율  
 $\theta$  : 유막 내부 반사각(rad)  
d : 유막두께(nm)

### 1. 서론

나노급 정밀도를 갖는 측정 기술의 개발은 반도체, LCD 측정장비 분야에서 꾸준히 요구되어 왔으며 점차 더 정밀한 분해능을 갖는 측정 기술을 요구하고 있다. 현재 원자현미경(AFM), 탄소나노튜브 등이 개발 및 일부 상용화 되어 있으며 본 연구에서 다룰 광 간섭(optical interferometry) 장비 또한 많은 부분 상용화 되어있다.

광 간섭 현상의 유막 두께측정에 대한 적용은 1960 년 Cameron 에 의해 연구되었다<sup>(1)</sup>. 유막의 매우 얇은 두께와 점성 등의 특성으로 인한 측정의 어려움이 따르므로 광간섭을 이용한 비 접촉식 측정 방법이 매우 적합하다고 할 수 있다.

EHL(elastohydrodynamic lubrication)은 미소 두께의 측정을 목표로 지속적인 기술발전을 이뤄 오고 있으며, 측정 간섭 영상의 해석 방법 또한 multi-beam, two-beam, ROI theory 등<sup>(2)</sup> 다양한 방법들이 제시되어 왔다.

광 간섭계에 쓰이는 광원은 백색광(White-light)과 단색광(Monochromatic-light)이 사용되며, 본 연구의 특성상 백색광 간섭계에 비해서 보

---

† 아주대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : vulcan11@ajou.ac.kr  
TEL : (031)219-2350 FAX : (031)219-2353

\* 아주대학교 대학원 기계공학과

\*\* 아주대학교 기계공학부

---

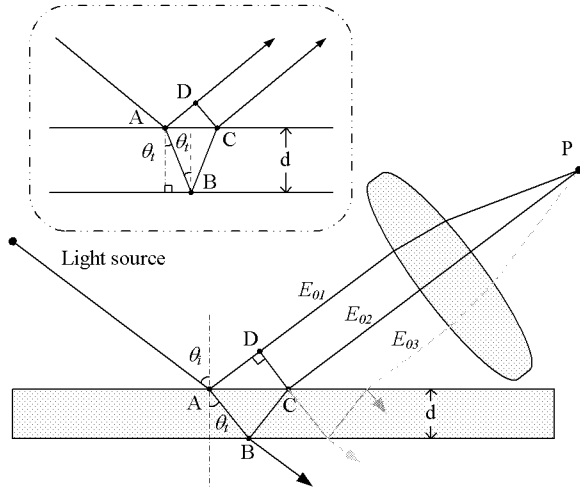


Fig. 1 Light pass in thin film.

다 선명한 간섭 영상을 얻을 수 있는 단색광 레이저의 사용이 적절하므로 488nm 파장을 가지는 단색광 레이저를 사용하였다. 더불어 측정 장비의 성능을 향상 시키고 기존의 간섭 이론을 비교적 간단하게 적용하였다. 이를 통하여 실험 시간을 단축 시키고 동시에 높은 분해능을 가지는 결과를 얻어낼 수 있었다.

## 2. 이론

### 2.1 두께 측정의 원리

Fig. 1 에서 측정 표면의 두께 (d)를 통과하는 두 광파  $\overline{E_1}$  과  $\overline{E_2}$  의 광 경로차는 다음의 식(1)과 같이 주어진다.

$$\Lambda = n_f \left[ (\overline{AB}) + (\overline{BC}) \right] - n_1 (\overline{AD}) \quad (1)$$

여기서  $\overline{AB} = \overline{BC} = d / \cos \theta_i$  이므로 식(1)은 식(2)로 표현할 수 있고

$$\Lambda = \frac{2n_f d}{\cos \theta_i} - n_1 (\overline{AD}) \quad (2)$$

여기서  $\overline{AD}$  는 스넬의 법칙(Snell's law)에 의해서 식(3)으로 다시 쓸 수 있다.

$$(\overline{AD}) = (\overline{AC}) \frac{n_f}{n_1} \sin \theta_i \quad (3)$$

여기서  $(\overline{AC}) = 2d \tan \theta_i$  이므로 광경로차  $\Lambda$  는 식(4)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{2n_f d}{\cos \theta_i} (1 - \sin^2 \theta_i) \\ &= 2n_f d \cos \theta_i \end{aligned} \quad (4)$$

광 경로차에 대응하는 위상차는 자유공간에서 빛의 전파상수  $k_0$  에  $\Lambda$  를 곱한 값이며 입사각이  $30^\circ$  이하인 경우 입사각의 편광에 무관하게 내부 및 외부 반사파 사이에  $\pi$  rad 만큼의 상대적 위상차가 발생하므로 총 위상차는 식(5)와 같이 되며

$$\delta = k_0 \Lambda \pm \pi \quad (5)$$

식(4)의  $\Lambda$  값을 대입하면 다음의 식(6)과 같이 나타내어진다<sup>(3)</sup>.

$$\delta = \frac{4\pi n_f}{\lambda_0} d \cos \theta_i \pm \pi \quad (6)$$

앞서 언급하였듯이 간섭무늬가 최대 밝은 점(최대 보강간섭)이 되는 조건은  $\delta = 2m\pi$ , 즉 위상차가  $\pi$ 의 짝수배가 되는 때 그리고 최소 어두운 점(완전 상쇄간섭)이 되는 조건은  $\delta = (2m+1)\pi$  와 같이  $\pi$ 의 홀수배일 경우이다.

측정 박막의 두께와 최대 보강간섭, 완전 상쇄간섭 무늬와의 관계는 다음의 식(7)을 통하여 나타내었으며 이를 통하여 사용되는 광원 파장의 1/4 지점마다 간섭 무늬가 나타나는 것을 확인 할 수 있다<sup>(4)</sup>.

$$\begin{aligned} d &= \frac{(2m+1) \lambda_f}{4 \cos \theta} \quad \text{bright fringe} \\ d &= \frac{2m \lambda_f}{4 \cos \theta} \quad \text{dark fringe} \end{aligned} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

본 연구에서 수행하는 유리 와 곡면 거울 사이에서 측정된 유막 두께의 경우 Fig. 2 와 같이 유막을 통과하는 반사광이 거울면과 유리면에서

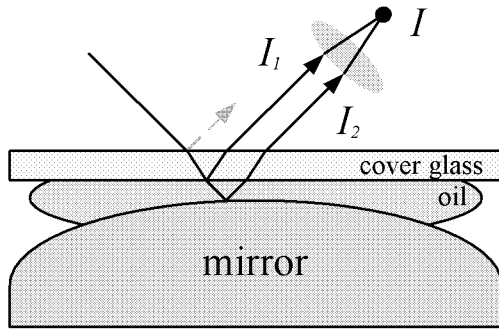


Fig. 2 Test film.

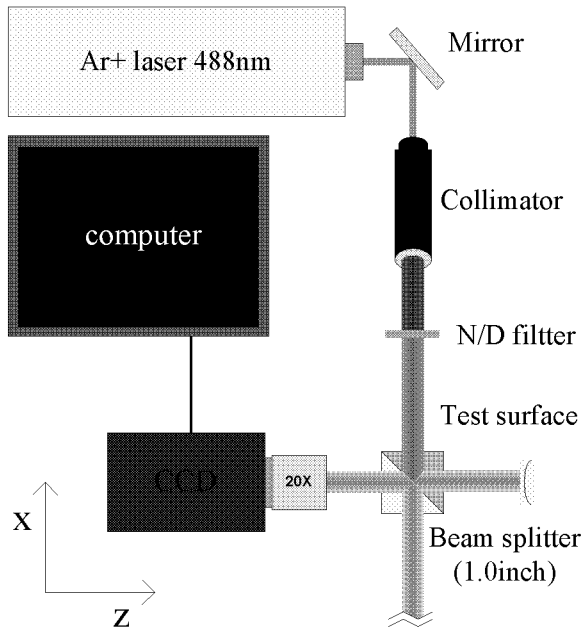


Fig. 3 The thin film measurement apparatus.

각각 한 번씩 위상이  $\pi$  만큼 변하게 되므로 결국  $\theta = 0$  이 된다. 따라서 이 경우 식(7)은 식(8)과 같이 쓰여질 수 있다.

$$d = (2m+1) \frac{\lambda_f}{4} \quad \text{bright fringe}$$

$$d = 2m \frac{\lambda_f}{4} \quad \text{dark fringe}$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

중심부의 유리와 곡면거울이 이상적으로 맞닿아 있다면  $d = 0$  이 되므로 중심부의 간섭은 완전 상쇄간섭(dark fringe)이 나타나게 된다.

### 3. 장치구성 및 측정

#### 3.1 실험장치 구성

##### 3.1.1 광학 시스템 구축

사용된 광원은 나노 스케일의 정밀 측정을 위하여 비교적 짧은 파장대( $\lambda=488\text{nm}$ )인 아르곤이온 레이저(Ar+ laser)이며,  $1600 \times 1200$  픽셀(pixel)의 분해능을 가지는 14bit PCO 1600 CCD 카메라를 사용하였다. 간섭무늬의 확대 측정을 위한 대물렌즈(object lens)는 Nikon 사(社)의 20 배율(W.D. 26.1mm)렌즈를 사용하였으며 레이저를 측정 표면에 주사하고 반사되어 나오는 간섭을 CCD 카메라로 보내기 위하여 1inch 크기의 광 분할기(beam splitter)를 사용하였다. CCD 카메라와의 정렬 및 정밀 이송을 위하여 측정 표면은  $0.5\mu\text{m}$ 의 정밀도를 가지는 3축 정밀이송장치와, 1축 회전이송장치 상부에 고정되었다.

##### 3.1.2 유막 형성

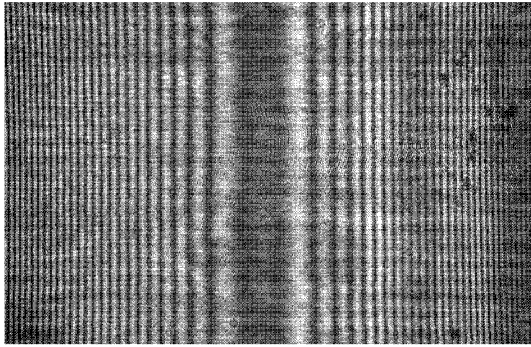
나노 스케일의 두께 측정을 위한 유막 구성을 위하여 Fig. 2와 같이 평평한 유리판과 실린더 형상의 곡면 거울을 사용하여 중앙부를 중심으로 유막이 점점 두꺼워지는 시스템을 구성하였다. 사용된 유리판의 두께는  $0.5\text{mm}$ 이며 곡면거울의 반지름은  $38.1\text{mm}$ 이다.

간섭 영상은 간섭을 형성하는 두 빛( $I_1, I_2$ )의 세기가 비슷할수록 선명하게 얻어지므로, 이를 위하여 곡면 거울은 알루미늄 코팅 처리로 중앙부(측정부)에서 80%의 반사율을 갖도록 제작되었다.

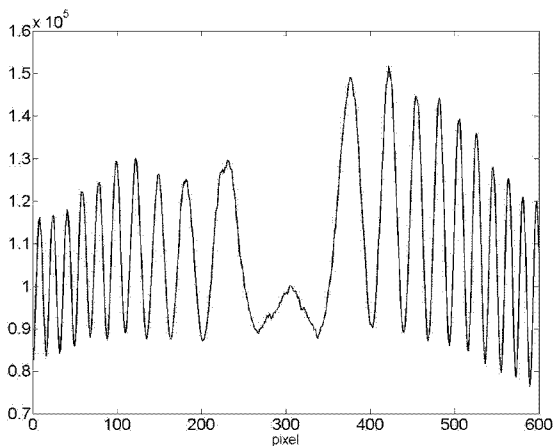
##### 3.1.3 측정과정

Fig. 3의 실험장치와 같이 측정 광원이 시준기(collimator)에 의해 확장되고, N/D filter를 통해 CCD에서 안정적으로 인식할 수 있도록 광량을 감소시킨다. 광원은 광분할기(Beam splitter)를 통하여 측정 표면으로 입사되어 유막의 표면에서 반사되는 빛( $I_1$ )과 유막을 지나 위상이 지연되어 반사되는 빛( $I_2$ )으로 나누어지며 이 두 반사광이 대물렌즈(object lens)를 통하여 만나 식(9)에서의  $I$ 항은 Fig. 2와 같이 CCD 화소에 맞춰 간섭 무늬를 나타내게 된다.

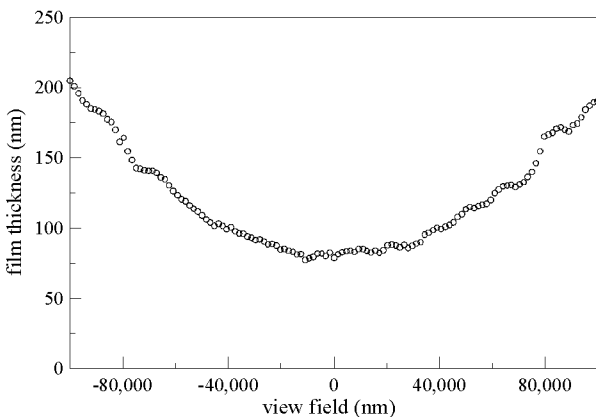
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (9)$$



**Fig. 4** Fringe pattern from 0.5mm cover glass and R38.1 cylinder mirror.



**Fig. 5** Intensity profile from interference image.



**Fig. 6** Absolute film thickness from interference.

## 3.2 실험방법

### 3.2.1 View field

앞 절에서 언급한 순서에 의해 얻어진 간섭무늬를 Fig. 4 에 나타내었다. 획득한 간섭 영상을 통해 두께를 산출하기 위해서는 해당 영상의 실제 반경을 알고 있어야 한다. 그러나 획득한 간섭 이미지는 특정 형태에서 나오는 이미지가 아니며 거

울의 곡률과 오일, 유리표면을 통과하며 발생하는 굴절로 인하여 부채꼴 형태로 분산된 광원들의 조합이므로 렌즈의 배율과 초점거리 계산을 통한 반경 환산법은 적합하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 최초 이미지를 획득한 지점을 기준점으로 정하고  $0.5\mu\text{m}$  정밀도를 가지는 이송장치를 통하여 일정 길이를 이송시킨 후 이송한 지점에서 획득한 두 번째 간섭무늬와 이동한 픽셀(pixel)수를 비교하여 픽셀(pixel)당 실제 길이를 산출하였다. 또한 이송장치의 오차율을 고려하여 수 차례 반복 실험을 하였다<sup>(5)</sup>.

### 3.2.2 두께산출

획득한 간섭 사진은 좌우 대칭이며, 수직 라인들이 평행하므로 각각의 가로축 방향 데이터들을 평균하여 Fig. 5 와 같은 결과 그래프를 얻었다. 이 그래프에서 각각 완전보강간섭 완전상쇄간섭을 이루는 점들의 두께는 사용하는 레이저 파장의 1/4 배마다 나타나게 되므로 각각의 최대, 최소 점들은 중앙에서부터  $122\text{nm}$  의  $n$  배가 되며 Fig. 5 의 기울기가 변하는 각각의 최대, 최소 점들이 이에 해당한다. 또한 앞서 계산한 결과로 한 픽셀(pixel) 당 실제 반경을 알고 있으므로 이를 통하여 해당 두께에 대한 가로반경의 위치 또한 나타낼 수 있다<sup>(6)</sup>.

이론상 간섭 영상의 중심부는 완전 상쇄간섭이어야 하나 미세하게 밝은 무늬가 관찰되는데 이것은 유리나 거울이 중심점에서 완벽하게 맞닿아있지 않음을 의미한다. 이 같은 문제를 해결하기 위하여 해당 영역의 간섭 무늬가 변하지 않는 시점까지 충분한 하중을 가하여 유막의 두께가  $600\text{nm}$  이하로 생성되도록 조절하고, 상쇄간섭의 최소 광강도 값과 보강 간섭의 최대 광 강도 값을 이용하여 중심부의 유막 두께를 산출하였다<sup>(7)</sup>.

앞서 언급한 실험 과정에 따라 최종적으로 산출된 유막의 두께를 Fig. 6 에 나타내었다.

### 3.2.3 결과 검증

측정 결과를 검증하기 위하여 결과 데이터의 최소두께 즉 거울과 유리면 사이의 유막 두께가 가장 얇은 지점, 즉 거울의 중앙점이라고 할 수 있는 위치의 두께 값을 측정한 데이터 값에서 빼주고 다시 음수로 변환하면 유막의 절대 두께는 유리판의 가로축을 0 으로 보았을 때 곡면 거울의 형상과 이상적으로 일치해야 하며 이를 검증하기 위하여 두 값을 비교한 그래프를 Fig. 7 에 나타내었다<sup>(7)</sup>.

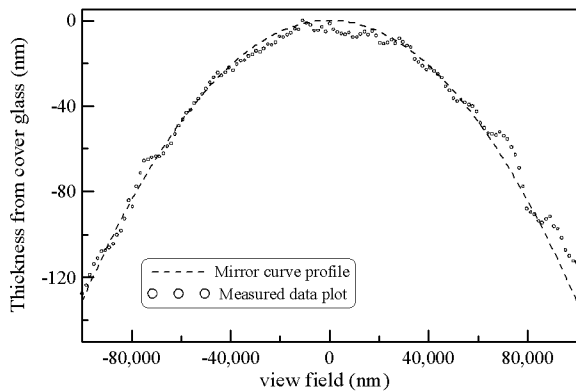


Fig. 7 Compare with mirror shape profile and measured data.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수십 나노의 정밀도를 가지는 두께 측정을 시도하였다. 측정 결과의 검증을 위하여 두께가 정해진 유리판과 반지름을 알고 있는 실린더형 곡면 거울 사이에 유막을 형성시켜 두께 측정을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 수십 나노 스케일의 정밀도를 갖는 유막 측정에 성공하였다.
- [2] 측정 결과 해당 영역은 실험값과 이론 값이 상대적으로 평균 5.18nm의 정밀도를 보였다.
- [3] 측정 표면에서 반사되는 빔의 반사 각이 수직에서 벗어나는 정도가 커지는 거울의 바깥 영역일수록 오차율이 증가하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 지역대학 우수과 학자 지원사업(R05-2004-000-11406)과 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-11264-0(2006))의 지원으로 진행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Gohar, R., Cameron, A., 1963, "Optical measurement of oil film thickness under elastohydrodynamic lubrication," *Nature*, Vol. 200, pp. 458~459
- (2) Wong, P. L., Guo, F., 2002, "A multi-beam intensity-based approach for lubricant film measurement in non-conformal contacts," *Engineering Tribology*, Vol. 216, Part. J, pp. 281~291.
- (3) Hariharan, P., 1992, "Basis of interferometry," *Academic Press*, New York, pp. 3~13.
- (4) Hecht, Eugene., 2002, "OPTICS," *Addison Wesley*, New York, pp. 386~388.
- (5) Ehret, P., Summers, J. L., 2003, "New Experimental Results of a Single Ridge Passing Through an EHL Conjunction," *Transactions of ASME*, Vol. 125, pp. 252~259.
- (6) Hitzengerger, C.K., Baumgatner, A., Fercher, A.F., 1998, "Dispersion induced multiple signal peak splitting in partial coherence interferometry," *Optics Communications*, Vol. 154, pp. 179~185
- (7) Wong, P. L., Guo, F., 2004, "A Wide Range Measuring System for Thin Lubricating Film From Nano to Micro Thickness," *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 3, pp. 521~531.
- (8) Glovena, R.P., Forrest, A.K., Oliver, A. V., Spikes, H.A., 2003, "Measurement of sub-nanometer lubricant films using ultra-thin film interferometry," *Tribology Letters*, Vol. 15, No. 3, pp. 217~230.