

## Dichromatic 투사광선에 따른 나노 미터 해상도의 점접촉 유막 두께 측정 연구

공현상(국민대학교 자동차 공학 전문대학원), 장시열\*(국민대학교)

### Study on the Measurement Technology of Fluid Film Thickness with Nanometer Scale by Dichromatic Incident Light

Hyunsang Kong (GSAEK, KMU), Siyoul Jang (Dept. of Mechanical Engineering, KMU)

#### ABSTRACT

Many technologies are applied to the measurement of elastohydrodynamic lubrication (EHL) film thickness. In particular, optical in-situ interferometric method has many advantages in making the actual contact behaviors realized with the experimental apparatus. Careful selection of incident lights greatly enhances the fringe resolution up to nanometer scale by using image processing technology. In this work, it is found that dichromatic incident light can provide much finer resolution of EHL film thickness than monochromatic incident light, because it has much more variables of color components to be discriminated among the wavelengths of colors according the variations of EHL film thickness. Some simulated interferometric images are shown how the film thickness is resolutionized in nanometer scale.

**Key Words** : dichromatic incident light (이중 투사광선), monochromatic incident light (단색 투사광선), fringe intensity (띠무늬 강도), Hertzian contact (헤르츠 접촉), elastohydrodynamic lubrication (EHL, 탄성유체윤활), in-situ EHL interferometer

#### 1. 서론

탄성 유체 윤활 유막 두께를 측정 하는 방법은 여러 기술로 개발되어왔다. 그러나 측정 지점의 제한적 크기는 윤활유의 특성을 규명하는데 상당한 제약적 조건이 되어왔다. 광학적 간섭법 (optical interferometric method)에 의한 유막 두께 측정법은 실제 접촉을 일으키는 재료의 경우가 아니더라도 접촉물체의 기하학적 조건과 접촉 재료의 탄성 특성에 대한 등가 변환을 이용하여 탄성 유체 윤활 접촉 현상의 많은 경우를 대변할 수 있는 장점을 갖고 있다.

탄성 유체 윤활 현상을 갖고 있는 최근의 고정밀, 고부하 조건의 접촉 기계요소에 대하여 내구성 과 성능을 유지하기 위한 지능형 윤활유의 개발이 상당히 요구되고 있다. 이러한 조건에서는 유막 두께의 크기는 대개 100nm 이하의 경우가 많은데, 이때 사용되는 윤활유의 적절한 접촉 현상 규명은 나노 스케일의 해상도를 갖는 유막 두께 측정 기술의 확립이 선행되어야 한다.

점접촉 현상을 발생시켜 광학간섭효과를 이용한 유막 두께 측정 기술 (in-situ interferometer of EHL contact)의 가장 큰 장점은 점접촉 현상을 실험 기구에서 실현시켜 접촉 부분의 가시화를 통한 마찰 및 윤활 현상을 규명할 수 있는데 있다. 특히 정밀기기에서 작동하는 고하중 (1.0 GPa 이상) 조건에서 접촉 성능을 결정하는 윤활유 특성을 규명할 수 있는 많은 정보를 제공한다. 또한 이러한 측정 기술은 고정밀 기기의 접촉 현상에서 원활한 마찰 제어 위한 윤활유 기유 (base oil) 및 첨가제 (additives) 등의 분자적 특징이 마찰과 마멸 현상에 미치는 현상을 규명할 수 있도록 한다.

본 연구는 탄성유체윤활의 유막 두께 측정 기술에서 지금까지 비교적 두꺼운 유막 두께 (~1 $\mu$ m) 측정에 사용되어온 단색 투사광선 (green light  $\lambda=540nm$ )의 띠무늬 (fringe) 특성을 개선하여 이중 투사 광선에 의한 (dichromatic fringe image, red light  $\lambda=640nm$ , green light  $\lambda=540nm$ )를 발생시켜 유막 두께 이미지의 해상도를 높일 수 있는 기술의 타당성을 연구 하였다.

## 2. 탄성유체윤활의 유막 두께

### 2.1 Hertz 접촉 두께

부적합 접촉 (non conformal contact) 형상을 갖는 두 물체의 접촉 변형은 Hertz 접촉 이론으로 설명된다. 반경  $R_1$  과  $R_2$ , 탄성 변형률  $E_1$  과  $E_2$ , 포아송비  $\nu_1$  과  $\nu_2$  를 갖는 두 물체의 접촉 반경과 접촉 반경의 중심으로부터 거리  $r$  만큼 떨어진 지점에서의 틈새 거리는 작용 하중의 크기가  $F$  일 때 다음의 식으로 표현할 수 있다.

등가 곡률 반경은

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1)$$

로 표현되며, 등가 탄성 변형률은

$$E' = \frac{2}{3} \frac{E_1 E_2}{E_1 \nu_2 + E_2 \nu_1} \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. Hertz 접촉 최대 압력은

$$p_H = 1.5F / \pi a^2 \quad (3)$$

이며, 접촉 반경은

$$a = \sqrt[3]{1.5FR / E'} \quad (4)$$

이다. 이때 접촉 영역에서의 압력 분포는

$$p(x, y) = p_H \sqrt{1 - x^2 - y^2} \quad (5)$$

이며, 접촉 틈새 거리는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$h(x, y) = h_0 \left[ 1 - \frac{x^2}{2R_x} - \frac{y^2}{2R_y} - \frac{2}{3E'} \int_0^x \int_0^y \frac{p(x', y') dx' dy'}{\sqrt{2x^2 - x'^2 - y'^2 - y''^2}} \right] \quad (6)$$

Hertz 접촉 이론 해석과 실험에서 얻은 정지상 띠무늬의 색상 분석에 의하여 틈새 거리에 따른 색상 구성요소 성분의 데이터 베이스화 할 수 있다.

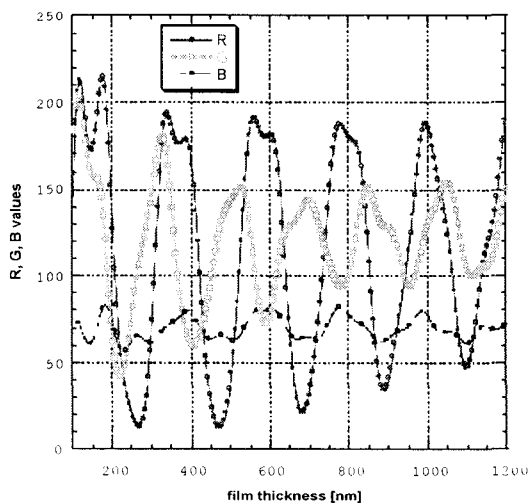


Fig. 1 Color components of RGB according to the separation distance of contacting two surfaces from 100 to 1200 nm

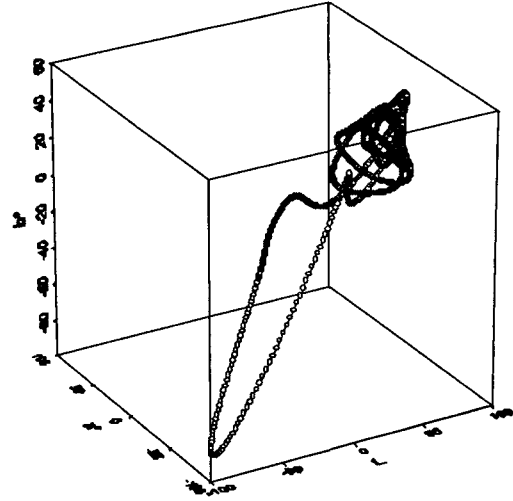


Fig. 2 Color components of Lab from the data of RGB (Fig. 1) according to the separation distance of contacting two surfaces from 100 to 1200 nm

### 2.2 색상 분석 (Image Processing Method)

이중 투사 광선에 의한 광학 간섭 이미지의 접촉 거리에 따른 띠무늬 색상 성분의 분석의 결과는 Fig. 1 에 나타나 있다. 측정된 띠무늬 이미지에서 접촉 거리에 따른 색상 구성 요소를 분해하여 데이터 베이스화 한다. CIE 1976  $L^*a^*b^*$  의 색상 분석 기준에 의하여 접촉 거리에 따른 RGB 의 각각의 성분을 Fig. 2 와 같은 데이터 베이스를 얻을 수 있다.

### 3. 투사 광선 종류에 따른 띠무늬 형태

단색 투사광선에 의한 띠무늬 간섭 이미지는 띠무늬 강도 (fringe intensity)에 의한 색상-접촉거리의 관계만을 갖게 된다. 그러나 두 가지 파장의 투사광선에 의한 띠무늬는 색상 스펙트럼의 다양성 때문에 측정 분해능을 향상시킬 수 있기 때문이다. Hertz 접촉 이론으로 계산된 접촉 두께에 따라 단색 투사 광선의 광학 간섭에 의한 띠무늬 형태(Fig. 3)를 모사하였으며, 이중 투사광선의 경우(Fig. 4)와 비교하였다. 단색광의 경우 굵은 형태의 띠무늬가 그 밝기의 함수 (fringe intensity) 로만 나타나지만, 이중 투사 광선(dichromatic)의 경우 접촉 두께에 따른 색상 스펙트럼은 다양하게 나타나고 있다. 두 그림은 이러한 차이점을 잘 보여 주고 있으며, 접촉 마찰면의 상대 운동에 따른 탄성 유체 윤활 유막의 경우에도 이중 투사 광선의 경우가 단색광에

의한 유막 두께의 간섭 이미지보다 고해상도의 띠무늬 형태를 나타낼 수 있음을 충분히 예상할 수 있다.

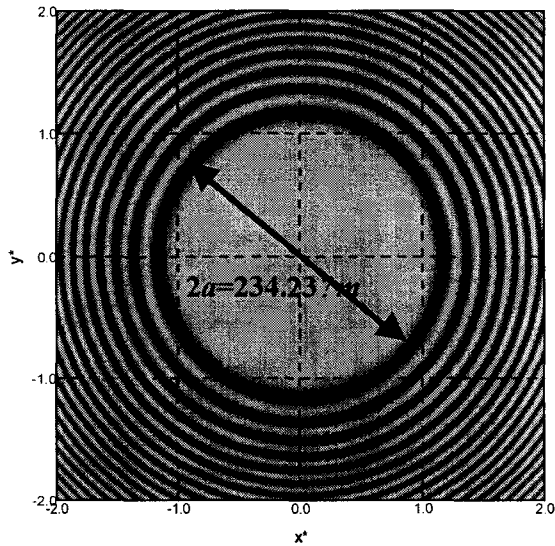


Fig.3 Simulated interferometric fringe pattern by green incident light ( $\lambda=540nm$ ) under  $10N$  static load between steel ball ( $D=25.4 mm$ ) and glass,  $E_b=207 \cdot 10^9 N/m^2$ ,  $\nu_b=0.30$ ,  $E_d=76 \cdot 10^9 N/m^2$ ,  $\nu_d=0.25$ , respectively.

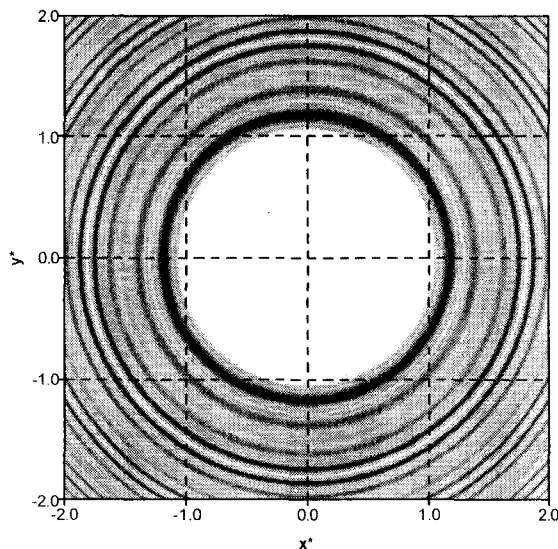


Fig.4 Simulated interferometric fringe pattern by dichromatic incident light (red light  $\lambda=640nm$ , green light  $\lambda=540nm$ ) under  $10N$  static load between steel ball ( $D=25.4 mm$ ) and glass.  $E_b=207 \cdot 10^9 N/m^2$ ,  $\nu_b=0.30$ ,  $E_d=76 \cdot 10^9 N/m^2$ ,  $\nu_d=0.25$ , respectively.

#### 4. 탄성유체윤활 조건에서의 간섭이미지 모사

상대 운동하는 두 접촉 표면이  $10N$ 의 하중으로 구름 접촉하는 경우 탄성유체윤활 해석을 하였다. 이때 단색 투사 광선 (monochromatic green light  $\lambda=540nm$ )에 의한 유막 두께의 간섭 이미지는 Fig. 5 와 같이 나타난다. 이중 투사광선(dichromatic fringe image, red light  $\lambda=640nm$ , green light  $\lambda=540nm$ )에 의한 유막 두께의 간섭 이미지는 Fig. 6 에 나타나 있다. 두께의 이미지를 자세히 살펴 보면 앞에서 보여준 정지상에서의 띠무늬 형태에서의 색상 분석 스펙트럼의 다양성의 결과가 그대로 반영됨을 알 수 있다. 즉, 단색 투사광선에 따른 유막 두께 이미지는 비교적 두꺼운 띠무늬 형태를 보여주지만 이중 투사광선의 경우 유막 두께에 따른 띠무늬는 세밀한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 특히 접촉 영역 (Hertz 접촉 반경 이내)에서는 이러한 세밀한 변화가 측정 결과의 해상도와 직접적 관계를 갖는데, 세밀하게 구분할수록 그 해상도는 더욱 높아진다. 이중 투사 광선의 경우 색상-접촉 거리의 데이터 베이스 인 Fig.1 에서 보여 주듯이 유막 두께에 따른 색상 성분의 구분 정도는 유막 두께  $1nm$  까지 충분히 구별할 수 있다.

위에서 보여준 유막 두께에 대한 광학적 간섭 이미지의 유막 두께와 접촉 압력은 Fig. 7 과 8 에 나타나 있으며  $270nm$ 의 최소 유막 두께 값과  $0.35GPa$ 의 최대 접촉 압력값을 갖고 있다.

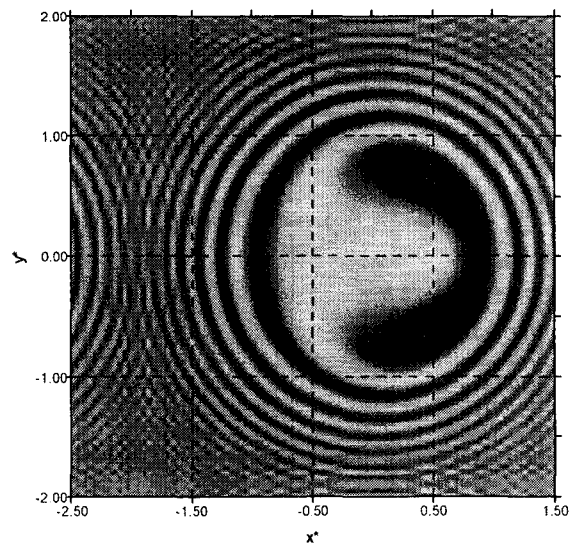


Fig.5 Simulated interferometric fringe pattern of EHL film thickness by green incident light ( $\lambda=540nm$ ) under the load of  $10N$  ( $W^*=5.228 \cdot 10^{-5}$ ,  $U^*=5.0 \cdot 10^{-9}$ ), Hertzian contact radius  $117 \mu m$ ,  $p_{11}=0.348GPa$ ,  $\nu=0.0411Pas$ ,  $\nu=2.18 \cdot 10^{-9}$ .

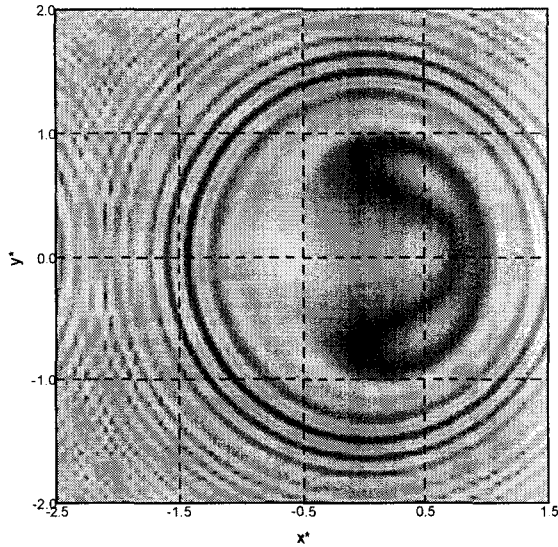


Fig.6 Simulated interferometric fringe pattern by dichromatic incident light (red light  $\lambda=640nm$ , green light  $\lambda=540nm$ ) under  $10N$  ( $W^*=5.228 \times 10^{-5}$ ,  $U^*=5.0 \times 10^{-9}$ ), Hertzian contact radius  $117 \mu m$ ,  $p_H=0.348 GPa$ ,  $\eta=0.0411 Pa \cdot s$ ,  $\rho=2.18 \times 10^9$ .

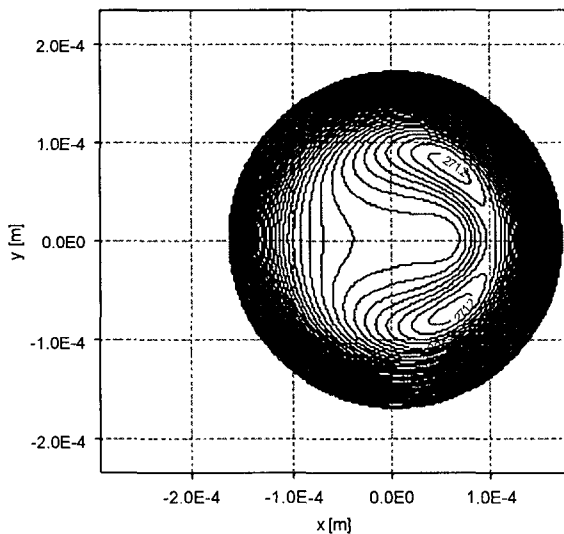


Fig.7 Numerically computed EHL film thickness under the contact condition of  $W^*=5.228 \times 10^{-5}$ ,  $U^*=5.0 \times 10^{-9}$  with minimum film thickness of  $271 nm$ .

#### 4. 결론

본 연구는 이중 투사 광선에 의한 나노미터 해상도를 갖는 유막 두께 측정 기술을 개발하였다. 이 측정 기술은 고정밀 접촉 기계 요소의 설계 기술과 윤활유 제조 설계 기술에 직접적 응용이 가능하다.

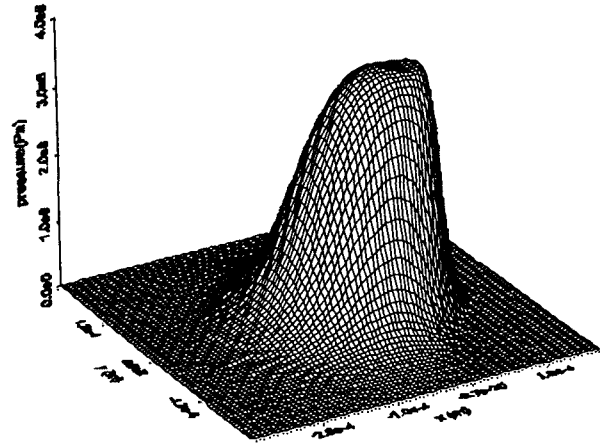


Fig.8 Numerically computed EHL film pressure under the contact condition of  $W^*=5.228 \times 10^{-5}$ ,  $U^*=5.0 \times 10^{-9}$  with maximum pressure of  $350 kPa$ .

이러한 기술 개발의 바탕은 색상-접촉거리의 데이터 베이스의 고분해능 기술이 가능하였기 때문이며, 본 연구에서는 CIE 1976 Lab 색상 분해법을 이용하여 개발하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구사업 (과제번호 2000-1-30400-005-3)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Krupka, M., et al., "Elastohydrodynamic Lubrication Film Shape – Comparison Between Experimental and Theoretical Results," *Tribology for Energy Conservation*, Elsevier, Amsterdam, 1997.
2. Hamrock, B. J., *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill, 1994.
3. Gustafsson, L., Hoglund, E. and Marklund, O., "Measuring Lubricant Film Thickness with Image Analysis," *Journal of Engineering Tribology*, Vol. 204, pp199-205, 1997
4. Bassani, R. and Ciulli, E., "Lubricant Film Thickness and Shape Using Interferometry and Image Processing," *Elastohydrodynamics-96 Fundamentals and Application in Lubrication and Traction*, Elsevier, Amsterdam, 1996.