

탄성 유체 윤활에서의 유막 두께 측정에 관한 정성적 분석

최언진 · 박경근* · 장시열*

삼성전자(주) 중앙연구소
*국민대학교 기계자동차 공학부

Qualitative Analysis of Film Thickness in Elastohydrodynamic Lubrication

Unjin Choi, Kyoung Kuhn Park* and Siyoul Jang*

Samsung Electronics co.

*School of Mechanical and Automotive Engineering Kookmin University

Abstract – The film thickness and shape of elastohydrodynamic lubrication is measured by optical interferometer, which is the most precise method for EHL film measurement. However, the interpretation of the image pattern from optical viscometer is not simple for two-dimensional shape. A newly developed method of image processing makes it possible to evaluate the film thickness and shape in every point of contact region with two dimensional aspects. In this study, we captured the film shape of EHL film by the monochromatic incident light and analyzed the film thickness with the image processing method, which uses phase shift method. From the values of intensity in fringes, the qualitative feature of film thickness in the contact area are obtained by using Zernike polynomial

Key words – EHL, image processing, optical interferometer, film thickness, monochromatic incident light, fringes, phase shift, Zernike polynomial.

1. 서 론

정밀한 유막 두께의 측정은 실제 접촉 환경하에서 윤활유의 정확한 하중 지지력 특성을 규명할 수 있다. 이러한 하중 지지력은 작용하중의 형태, 상대 운동 속도, 윤활유의 밀도 및 점도 특성 등 접촉 환경에 따라 다르게 나타낸다. 따라서 접촉면의 기하학적 조건과 작용하중의 형태를 파악하고 있으면 측정된 유막 두께의 정보를 이용하여 접촉 상태에서 윤활유의 점도 특성을 규명할 수 있다. 원형의 점 접촉면을 갖는 탄성 유체 윤활 현상은 비교적 그 현상을 발생 시키기 쉬우며 또한 유막 두께를 측정하기가 쉬운 기하학적 형태를 갖고 있다. 실제 기계부품에서는 이러한 점 접촉을 일으켜 작동하는 부품이 많으며 다른 형태의 기하학적 접촉면에도 그 적용이 수월하다.

유막 두께를 측정하는 방법에는 전기적 방법 (캐패

시턴스 센서), X-Ray를 이용하는 방법, 기계적인 방법(스트레인 게이지) 또는 광학적 방법 (빛의 간섭, 회절, 형광성) 등이 있다. 그러나 캐패시턴스 센서를 이용한 방법은 접촉 부위에서의 미세한 유막 두께 변화를 측정하지 못하고 평균적인 유막 두께만을 측정한다. X-ray 투과 광선에 의한 방법은 접촉 물체의 광선 투과 여부에 따라 사용 여부가 결정 되어지기 때문에 탄성 유체 윤활의 유막 두께의 측정에는 적합하지 못하다.

탄성 유체 윤활 영역에서의 윤활 유막의 두께는 0.01 μm 에서 수 μm 정도이다. 이러한 두께를 측정하는 방법으로는 빛의 간섭 현상을 이용한 광학적 방법이 많이 사용되는데 그 이유는 탄성 유체 윤활 영역에서 일어나는 접촉 환경을 쉽게 재현할 수 있고, 접촉 영역의 전반적 부분에 대하여 비교적 정확하고 상세하게 유막 두께를 측정할 수 있기 때문이다.

빛의 간섭 (interference) 효과를 유발 시키는데 중요한 요소는 투사광의 종류인데 단색광(monochromatic)과 백색광(white light)이 사용된다. 단색 투사광에 의한 간섭 무늬는 백색 투사광에 비하여 상대적으로 강하게 대비되는 무늬 (fringes)를 발생시키며 단색광에 의한 띠무늬 특성상 수 μm 정도 까지 유막 두께 측정이 가능하다. 반면에 백색 투사광은 가시광선의 분해능을 이용함으로써 얇은 유막 두께 ($\sim 0.9 \mu\text{m}$ 이하) 측정에 주로 많이 사용 된다. 특별한 경우에는 $\sim 0.01 \mu\text{m}$ 정도의 유막 두께까지, Spikes [1991] 측정이 가능하다.

측정된 유막 두께는 단색 투사광의 경우는 띠무늬 명암의 차이와 백색 투사광의 경우는 색의 차이에 따라 나타나는데 관찰자의 경험과 주관에 따라 해석이 달라 진다. 이러한 띠무늬에 대한 관찰자의 주관적 판단에 따른 객관성의 결여는 컴퓨터의 일관된 신호 처리를 이용함으로써 객관적으로 평가할 수 있게 된다. 최근의 상분석(image processing)기법의 도움으로 접촉 형태를 측정하는데 Bassani [1997]의 경우 단색광을 이용하여 흑백 레벨(gray scale)의 상으로 탄성 유체 윤활 유막의 두께를 측정하였다. 백색 투사광으로는 Krupka, *et al* [1997], Cann *et al* [1996], Gustahasson [1994] 등이 컴퓨터 상의 색채 분석을 통하여 유막 두께를 측정하였다. 두가지 경우 모두 측정점 선정(digitization)과 유막 두께의 영점 조정(calibration) 및 보정 계산(conversion evaluation)에 있어서 상당한 노력과 각기 다른 해석 기법이 필요하다. 지금까지 주로 연구되어진 유막 두께 측정은 최소 유막 두께 또는 Hertz접촉 영역 중앙 부분 같은 특정한 지점에서의 일차원 유막 두께 측정이었다. 그러나 접촉 조건에 따라 다르게 나타나는 접촉 영역 전체에 걸친 유막 형태(film shape)의 계산은 만족스럽지 못한 경우가 많다. 특히 단색광의 경우는 띠무늬의 명암은 육안으로 쉽게 구분할 수 있어도 선정된 측정점 부근의 구간별 명암의 최대점과 최소점 선정에는 명암 강도(intensity)의 모호성 때문에 오히려 백색광에 의한 띠무늬 해석 보다 어려움이 있다.

탄성 유체 윤활에서 유막 두께 측정의 궁극적 목적은 고압과 고전단 변형을 속도의 환경에서 윤활유의 특성을 알고자하는데 있다. 이론적 해석에서의 윤활의 거동은 작용 압력과 접촉면의 상대 미끄럼 속도에 따른 점도의 변화, 압력에 따른 유체의 밀도 변화 특성에 따라 유막 압력과 유막 두께 크기를 구함

으로써 알 수 있다. 이러한 이론적 해석 결과와 정밀한 유막 두께 측정은 윤활유의 성능 특성을 보다 정확하게 규명할 수 있다.

점접촉의 탄성 유체 윤활은 원형 또는 타원형의 접촉면에서 윤활유의 종류(점도, 밀도)와 접촉하중(동하중, 정하중) 및 상대 미끄럼속도(굴림, 미끄럼)에 따라 각각의 특이한 형태를 보여준다. 비록 정량적 수치제시가 아니더라도 접촉 영역 전체에 걸쳐 이러한 형태를 객관적이고 반복성 있게 분석할 수 있다면 이전까지의 주관적 판단에 의한 일차원 분석보다는 향상된 기법이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 탄성 유체 윤활 조건에서 유막 두께를 단색 투사광으로 측정할 때 상 분석을 통하여 접촉 영역 전체에 대하여 유막 형태를 상 분석(image analysis) 기법을 이용하여 정성적으로 빠르게 해석 (qualitative analysis) 할 수 있는 발판을 제시하고자 한다. 이 방법은 앞으로 연구될 유막 두께의 정량적 보정 계산(quantitative analysis)에 필수적 전단계(pre-processor stage)이며, 관찰자의 주관적 판단을 제거한 일관성 있는 측정 데이터 베이스(data base)를 구축할 수 있는 장점을 갖게 해준다.

2. 실험 방법 및 상 분석 (Experiment and Image Analysis)

탄성 유체 윤활에서의 접촉점에 대한 유막 두께 측정은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 광학적인 부분과 기계적인 부분으로 구성된 장치에서 이루어진다. 광학적인 부분은 투사광에 대한 간섭 무늬의 효율을 높이기 위하여 정확한 수직 투사를 하며 기계적인 부분에서는 연마가 잘된 구형 금속 볼(steel ball)과 금속 코팅($100 \text{ \AA} \text{ Cr}$ 두께)한 유리면과의 접촉을 일으킨다. 광원으로는 백색광을 구사할 수 있는 할로젠(Halogen)램프를 사용하였고, 램프로부터 나온 빛은 optical fiber를 통하여 collimator를 거쳐 평행 광선으로 변형 시킨 후 beam splitter에서 직각 방향으로 접촉점으로 투사 된다(Fig. 2). 대물 렌즈를 통과한 빛은 유리 밀면에 있는 금속 코팅면에서 약 25% 반사되고, 나머지는 유막을 통과하여 금속 볼에서 다시 반사되어 유막 두께 만큼의 경로차를 발생시켜 금속 도금면에서 반사된 빛과 간섭을 일으켜 띠무늬 이미지를 발생 시킨다. 이러한 띠무늬는 대안 렌즈를 통하여 Fig. 2와 같이 관찰할 수 있다. 유막 두께

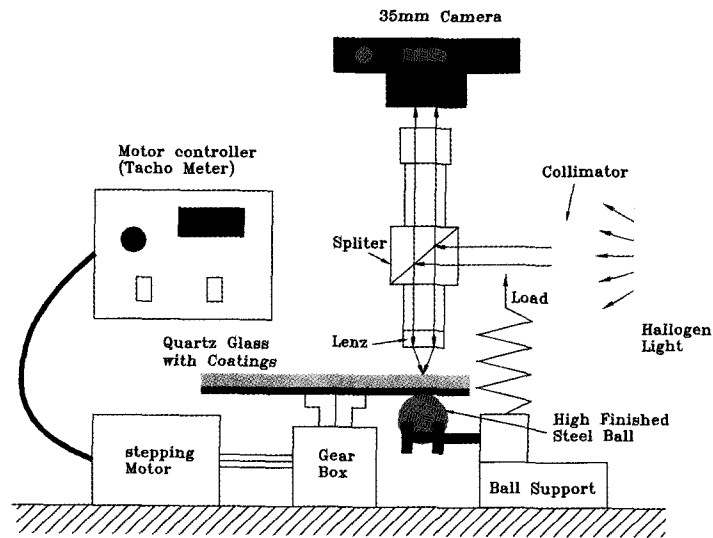


Fig. 1. Schematic diagram of EHL film measurement.

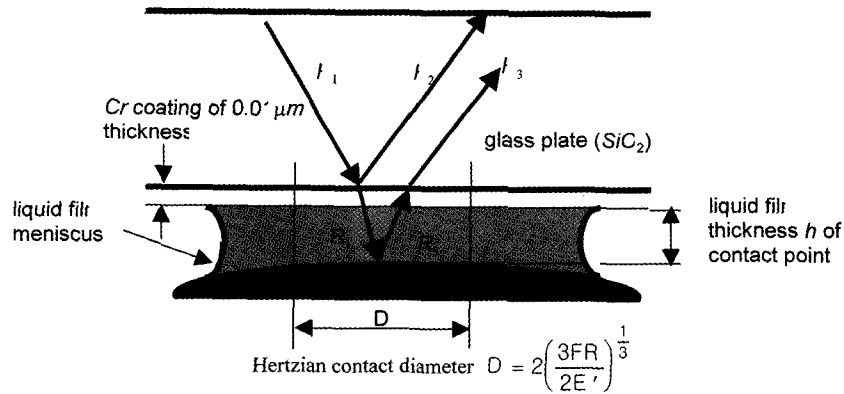


Fig. 2. Reflected beams on Cr coating surface and steel ball.

에 따라 발생되는 반사광들의 위상차는 여러 가지 색깔의 명암이 순차적으로 나타나는 띠무늬 형태로 나타나게 된다. 백색광 투사시 유막 두께는 띠무늬의 명암 순서 K , 유리의 굴절 계수 n^* , 측정된 광선의 파장 λ 에 의하여 다음의 식으로 계산된다.

어두운 띠무늬일 때:

$$h = \left(K + \frac{1}{2} + \frac{\psi}{2\pi} \right) \frac{\lambda}{2n^*}, \quad (K = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

밝은 띠무늬일 때:

$$h = \left(K + \frac{\psi}{2\pi} \right) \frac{\lambda}{2n^*}, \quad (K = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

이때 n^* 는 굴절 계수(refractive index)이다.

Table 1. Wavelengths of various visible lights

color	Wavelength $\lambda(\mu\text{m})$
purple	0.40
blue	0.48
green	0.53
yellow	0.60
orange	0.67
red	0.78

일반적으로 가시광선의 파장은 Table 1에서 나타난 것과 같으며, 파장의 크기와 유리면의 두께를 적절히 이용하면 탄성 유체 윤활 영역에서도 비교적 작은 유막 두께 ($0.1 \sim 1.5 \mu\text{m}$)를 측정할 수 있다. 경우에 따라서는 수 nm 크기의 유막 두께도 측정할 수

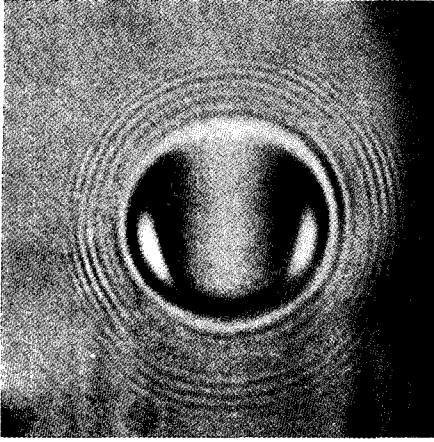


Fig. 3. Image pattern of EHL film form optical interferometer, applied load 15 N, rolling velocity 0.04 m/s, $E_b = 207 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $E_d = 76 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\nu_b = 0.30$, $\nu_d = 0.25$.

있는데, Cann[1996] 이를 위하여 광학 점도계에서 보다 정밀한 기계적 접촉 장치와 이미지 분석법(image analysis)이 요구되고 있다.

본 연구에서는 단색광 투사시 발생하는 명암(black and white) 차이에 의한 띠무늬 해석을 위하여 관찰된 이미지를 컴퓨터상에서 흑백 무늬로 인식할 수 있도록 디지털화 하였다. 변환된 띠무늬에 대한 간섭 현상 해석은 상 변환 방법(phase shift method), Born [1997], Lee[1995]에 의하여 구한다. 즉, 투사광과 반사광이 경로차에 의하여 위상차 ψ 가 발생하며 Fig. 3에서와 같이 명암의 띠무늬를 형성한다. 유리의 크롬 도금면에서 반사되는 반사광과 금속 볼에서 반사되는 반사광의 파동들은 다음의 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega x + \alpha_1), \quad E_2 = E_{02} \sin(\omega x + \alpha_2) \quad (3)$$

이들 파동에서의 위상차는 다음과 같다.

$$\alpha_1 = kx_1 + \varepsilon_1, \quad \alpha_2 = kx_2 + \varepsilon_2 \quad (4)$$

파동 E_{01} 과 E_{02} 를 합성하면 다음과 같이 표현할 수 있는데 합성파 E 의 진폭과 위상은 변하지만 그 주파수는 변하지 않는다.

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= E_{01}(\sin \omega x \cos \alpha_1 + \cos \omega x \sin \alpha_1) \\ &\quad + E_{02}(\sin \omega x \cos \alpha_2 + \cos \omega x \sin \alpha_2) \\ &= E_0 \sin(\omega x + \alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$$\tan \alpha = \frac{E_{01} \sin \alpha_1 + E_{02} \sin \alpha_2}{E_{01} \cos \alpha_1 + E_{02} \cos \alpha_2} \quad (6)$$

이다.

그리고 합성파의 강도(밝기, flux density or intensity) E_0^2 는 $(\alpha_2 - \alpha_1)$ 의 크기에 의하여 결정된다.

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (7)$$

여기서 α_1 , α_2 는 각 파형에서의 위상이다.

즉, 간섭무늬는 $2E_{01}E_{02} \cos(\alpha_2 - \alpha_1)$ 의 값에 의하여 결정되는데 $\delta = (\alpha_2 - \alpha_1)$ 의 크기는 다음과 같다.

$$\delta = (kx_1 + \varepsilon_1) - (kx_2 + \varepsilon_2) \quad (8)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} = (x_1 - x_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

여기서 x_1 , x_2 는 각 광원에서 관찰자까지의 거리이다.

광원에서 방출되는 빛이 방출순간에 같은 위상을 갖는다면 경로차는 띠무늬 순서 K 에 따라 $K(x_2 - x_1)$ 가 된다. 각각의 pixel에서의 측정된 유막 두께(Fig. 3)에 대하여 이미지 연산을 함으로써 명암 값을 얻어낸다. 접촉점을 중심으로 수직과 수평 방향으로의 밝기 변화를 계산하면 각각의 방향에 대하여 곡부적인 파장을 갖는 곡선 형태를 얻는다(Fig. 4, 5). 띠무늬는 이러한 파동의(Fig. 6) 선단들(wavefront)을 연결한 폐곡선으로 간주될 수 있다. 파동 선단 주위의

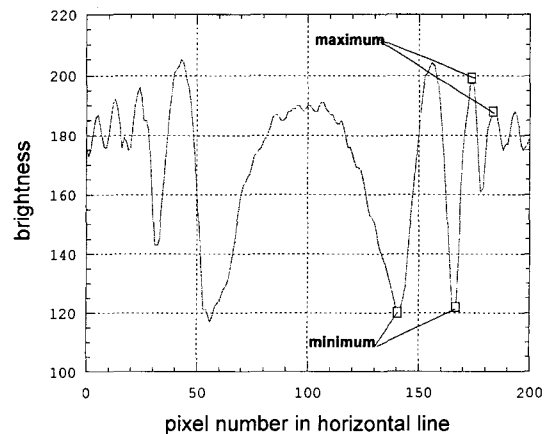


Fig. 4. Intensity of brightness in each fringe on the horizontal line of contact area.

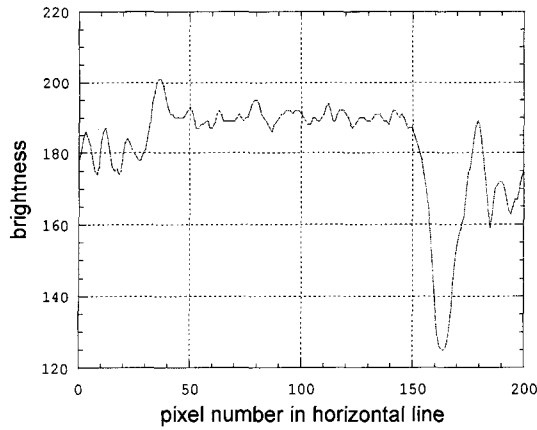


Fig. 5. Intensity of brightness in each fringe on the vertical line of contact area.

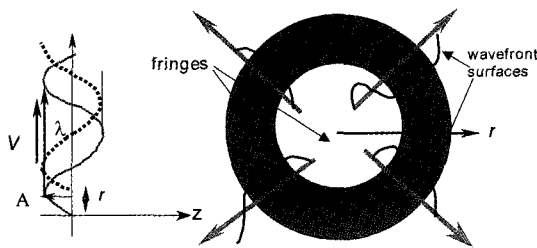


Fig. 6. Wavefront generation by the difference of phases.

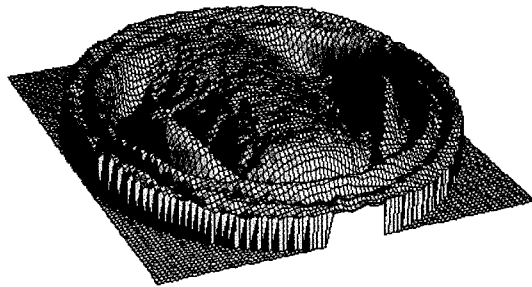


Fig. 7. Phase change shape in Hertzian contact region of figure 3.

최대점과 최소점을 밝기에 관한 식 (7)를 통하여, Born [1997], Moller[1988], Lee[1995] 위상 차(phase shift) δ 을 구한다. 접촉 영역 (Hertzian contact area) 전반에 걸친 Fig. 3의 위상차의 형상은 Fig. 7과 같으며 이러한 위상차를 이용하여 유막 두께를 나타내는 경로차 $K(x_2 - x_1)$ 를 계산한다. 유막 두께 계산의 기본적인 방법으로는 입력된 이미지 데이터에서 띠무늬의 순서와 밝기의 최대점과 최소점을 관찰자의 판단

에 따라 선정(digitization), Bassani [1997]하는 것인데 관찰자의 판단으로 처리할 수 있는 데이터의 크기는 한정되어있다. Fig. 3의 이미지를 위에서 계산된 위상 변화(phase shift)에 대한 값은 Fig. 7에 나타나며 이는 띠무늬의 형태 그대로 표현한다. 이러한 위상 변화 값에 대한 빛의 경로차 계산은 2차원 평면 적합법 (two-dimensional surface fitting)으로 서술할 수 있다. 이러한 서술은 광학 연구 분야에서 많이 사용되는데 일반적으로 다음의 Zernike polynomial, Born [1997]로 표현한다.

$$W(x,y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^i c_{ij} x^i y^{i-j} \tag{9}$$

$$= A(x^2+y^2)^2 + By(x^2+y^2) + C(x^2+3y^2) + D(x^2+y^2) + Ey + Fx + G$$

여기서 x 와 y 는 측정 이미지에서의 각 pixel의 위치이다.

Hertz 접촉 영역에서의 유막 두께는 각 pixel에서의 유막 두께 값이 정확하게 계산 되어져야 하나 실제로 폐곡선의 띠무늬 순서 인식에 상당한 어려움이 있다. 접촉 조건에 따른 유막 두께의 값도 다르지만 그 형상도 각각의 고유한 형태를 나타내므로 접촉 영역에서의 형상 분석도 매우 중요하다. Zernike polynomial은 형상 분석이 빠른 속도로 이루어질 수 있어 이러한 목적에 부합된다.

3. 결 과

본 연구에서 사용한 윤활유는 점도가 0.0401 Pas이며 온도는 상온 20°C이다. 작용 하중은 15 N, 굴림 상대 속도는 0.04 m/s 과 0.10 m/s 이다. 금속 볼과 유리의 탄성 변형 계수는 각각 $E_b = 207 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $E_a = 76 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 이며, 포아송 비는 $\nu_b = 0.30$, $\nu_a = 0.25$ 이다. Cr 코팅은 100 Å으로 균일하게 sputtering으로 도금하였으며 금속 볼은 유막 두께의 형성에 방해가 없도록 충분히 고른 표면을 갖고 있다. Fig. 3과 같이 측정된 유막 형상에 대한 위상 변화는 Fig. 7에서와 같이 나타나며 이에 따른 경로차를 Zernike Polynomial로 나타내면 Fig. 8과 같은 형태를 얻을 수 있다. Fig. 9와 같이 측정된 유막 두께의 위상 변화 값은 Fig. 10이며 이를 Zernike polynomial로 표현하면 Fig. 11과 같다. 두개의 측정 결과에서 보듯이 단순

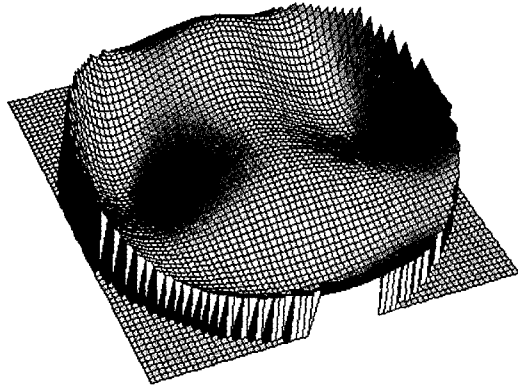


Fig. 8. Qualitative feature of film thickness in Hertzian contact region of figure 3.

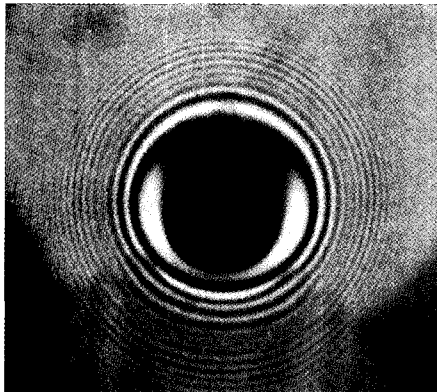


Fig. 9. Image pattern of EHL film form optical interferometer, applied load 10 N, rolling velocity 0.10 m/s, $E_b = 207 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $E_d = 76 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\nu_b = 0.30$, $\nu_d = 0.25$.

히 상대 미끄럼 속도가 달라져도 그 접촉 형태는 전혀 다른 형태로 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

탄성 유체 윤활영역에서의 유막 두께 측정 기술은 1960년대부터 시작 되어 왔다. 그러나 Hertzian 접촉 영역에서도 최소 유막 두께 지점 또는 접촉 부위의 중앙지점 에서의 유막 두께뿐만 측정 되었을 뿐이다. 윤활유의 하중지지력에 관한 특성은 접촉 영역 전체에 걸쳐 그 분석이 이루어져야 하나 그 해석에는 상당한 수고와 관찰자의 주관적 판단등에 의해 이루어지고 있다. 본 연구는 유막 두께 형상에 대한 데이터 처리를 최근 들어 발달한 Image Processing을 적용하여 접촉 영역전반에 걸쳐 정성적으로 분석하

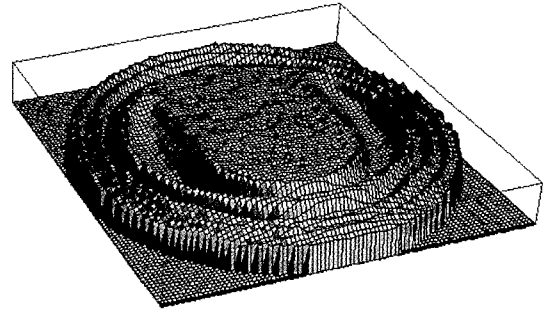


Fig. 10. Phase change shape in Hertzian contact region of figure 9.

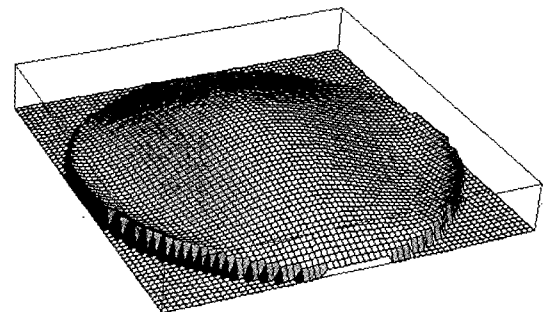


Fig. 11. Qualitative feature of film thickness in Hertzian contact region of figure 9.

였다. 우선 투사 광선이 단색 광선일 때 접촉 영역에 나타나는 띠무늬를 위상차 해석을 통하여 쉽고 빠르게 처리할 수 있는 Zernike polynomial로 처리하는 방법을 개발하였다. 이로써 정성적으로 구한 유막 두께 형상은 정량적 계산으로 곧바로 발전시킬 수 있으며 투사 광선이 백색광일 때 이미지 분석을 위한 토대가 될 수 있게 하였다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 신진교수연구지원 사업 (과제번호 98-12-021) 으로 이루어진 연구로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Gustafsaon, L., Hoglund, E., and Marklund, O., "Measuring Lubricant Film Thickness with Image Analysis," *Journal of Engineering Tribology*, Vol. 204, pp199-205, 1995.
2. Cann, P. M., Spikes, H., Hutchinson, J., "The Deve-

- lopment of a Space layer Imaging Method (SLIM) for Mapping Elastohydrodynamic Contacts,” *Tribology Transactions*, Vol. 39, pp915-921, 1996.
3. Hamrock, B. J., *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill, 1994.
 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, 1997.
 5. Born M. and Wolf, E., *Principles of Optics*, Cambridge University Press, 1997.
 6. Moller, K. D., *Optics*, University Science Books, 1988.
 7. Lee, S., *Fringe Analyzer in Window*, 1995.