

탄성 유체 윤활에서의 유막 두께 측정에 관한 정성적 분석

(Qualitative Analysis of Film Thickness in Elastohydrodynamic Lubrication)

최 언 진 (Un Jin Choi), 장 시 열 (Siyoul Jang)
국민대학교 기계자동차 공학부

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 easy 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 film shape of EHL film from the monochromatic incident light with the image processing method, which uses phase shift method, and obtained the image analysis method for gray level image in order to qualitatively evaluate film shapes.

key words: EHL, image processing, optical interferometer, film thickness, monochromatic incident light, fringes, phase shift

서 론

유막 두께를 측정하는 방법에는 전기적 방법 (캐패시턴스 센서), X-Ray 를 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 되

어지기 때문에 탄성 유체 윤활의 유막 두께의 측정에는 적합하지 못하다.

탄성 유체 윤활 영역에서의 윤활 유막의 두께는 $0.01\mu m$ 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 투사하는 빛의 종류인데 단색광 (nonchromatic)과 백색광 (chromatic)이 사용된다. 단색 투사광에 의한 간섭 무늬는 백색 투사광에 비하여 상대적으로 강하게 대비되는 무늬 (fringes)를 발생시키며 단색광의 특성상 수 μm 정도 까지 유막 두께 측정이 가능하다. 반면에 백색 투사광은 해상도가 뛰어나서 얇은 유막 두께 ($\sim 0.9 \mu\text{m}$) 측정에 주로 많이 사용 된다. 특별한 경우에는 ($\sim 0.01 \mu\text{m}$) 정도의 유막 두께 까지, Spikes [1991] 측정이 가능하다.

측정된 유막 두께는 명암과 색의 차이에 의한 띠무늬 상(image)으로 나타나는 데 관찰자의 판단과 주관에 따라 해석이 달라 진다. 이러한 객관성의 결여는 띠무늬의 상 분석을 컴퓨터의 일관된 신호 처리로 객관적 評가할 수 있게 된다. 최근의 image processing 기법의 도움으로 접촉 형태를 측정하였는데 Bassani [1997]의 경우 단색광을 이용하여 흑백 레벨(gray scale)의 상으로 탄성 유체 윤활 유막의 두께를 측정 하였다. 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 각각 다른 해석 기법이 필요하다. 지금까지 주로 연구되어진 유막

두께 계산에서 있어서 최소 유막 두께 또는 접촉 영역 중앙 부분에서와 같이 특정한 지점에서의 유막 두께 계산의 경우와 달리 접촉 영역 전체에 걸친 유막 형태 (film shape)의 계산은 만족스럽지 못할 경우가 많다. 특히 단색광의 경우는 띠무늬의 명암은 육안으로 쉽게 구분할 수 있어도 선정된 측정점 부근의 구간별 명암의 최대점과 최소점 선정에는 오히려 백색광에 의한 띠무늬 해석 보다 어려움이 있다.

탄성 유체 윤활에서 유막 두께 측정의 궁극적 목적은 고압과 고전단 변형률 속도의 환경에서 윤활유의 특성을 알고자 하는데 있다. 이론적 해석에서의 윤활의 거동은 압력과 상대 미끄럼 속도에 따른 점도의 변화, 압력에 따른 유체의 밀도 변화 특성에 따라 유막 압력과 유막 두께 형상을 구함으로써 알 수 있다. 이러한 이론적 결과를 토대로 유막 두께를 측정한다면 윤활유의 특성을 보다 정확하게 알 수 있다.

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) 기법으로 정성적으로 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 구축

할 수 있는 장점을 갖게 해준다.

실험 방법 및 상 분석 (Experiment and Image Analysis)

탄성 유체 윤활에서의 접촉점에 대한 유막 두께 측정은 Figure 1에 나타난 것과 같이 광학적인 부분과 기계적인 부분으로 구성된 장치에서 이루어진다. 광학적인 부분은 투사광에 대한 간섭 무늬의 효율을 높이기 위한 수직 투사에 중요성을 두며 기계적인 부분에서는 구형 금속 볼 (steel ball)과 금속 코팅(100Å Cr 두께)한 유리면과의 접촉성에 중요성이 있다. 광원으로는 백색광을 구사할 수 있는 할로젠(Halogen)램프를 사용하였고, 램프로부터 나온 빛은 optical fiber를 통하여 collimator를 거쳐 평행 광선으로 변형시킨 후 beam splitter에서 직각 방향으로 접촉점으로 투사 된다. 대물 렌즈를 통과한 빛은 유리 밑면에 있는 금속 코팅면에서 약 25% 반사되며, 나머지는 유막을 통과하여 금속 볼에서 다시 반사되어 유막 두께 만큼의 경로차에 의한 위상 변환(phase shift)를 금속 도금면에서 반사된 빛과 일으켜 띠무늬 이미지를 발생 시킨다. 이러한 띠무늬는 대안 렌즈를 통하여 관찰할 수 있다, Figure 2. 유막 두께에 따라 발생하는 반사광들의 위상차는 여러 가지 색깔의 명암이 순차적으로 나타나는 띠무늬 형태로 나타나게 된다. 백색광 투사 시 유막 두께는 띠무늬의 명암 순서 N , 유리의

굴절 계수 n^* , 측정된 광선의 파장 λ 에 의하여 다음의 식으로 계산된다.

어두운 띠무늬일 때:

$$h = \frac{1}{n^*} \left(0.1 + \frac{N}{2} \right) \lambda \quad (1)$$

밝은 띠무늬일 때:

$$h = \frac{1}{n^*} \left(0.35 + \frac{N}{2} \right) \lambda \quad (2)$$

이며 n^* 는 굴절 계수(refractive index)이다.

일반적으로 가시광선의 파장은 Table 1에서 나타난 것과 같으며, 파장의 크기를 적절히 이용하면 탄성 유체 윤활 영역에서도 비교적 작은 유막 두께 (0.1~1.5 μm)를 측정할 수 있다. 경우에 따라서는 수 nm 크기의 유막 두께도 측정하는데, Cann[1996] 이를 위하여 광학 점도계에서 보다 정밀한 기계적 접촉 장치와 이미지 분석법(image analysis)이 요구되고 있다.

본 연구에서는 단색광 투사시 발생 하는 명암(black and white) 차이에 의한 띠무늬에 해석을 위하여 백색광에 의해 관찰된 색채 이미지를 흑백 무늬로 변환 시켰다. 변환된 띠무늬에 대한 간섭 현상 해석은 상 변환 방법 (phase shift method), Born [1997], Lee[1995]에 의하여 구해질 수 있다. 즉, 투사광과 반사광이 경로차에 의하여 Figure 3에서와 같이 위상차 r 이 발생하면 명암의 띠무늬를 형성한다. 유리의 크롬 도금면에서 반사되는 반사광과 금속 볼에서 반사되는 반사광의 파동들은

다음의 식들로 표현할 수 있다.

$$E_1 = A_1 \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(z-vt)\right] \quad (3)$$

$$E_2 = A_2 \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(z-vt-r)\right] \quad (4)$$

이 두개의 파동 방정식을 조합하면 하나의 파동 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$E = 2A \cos\frac{\pi r}{\lambda} \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(z-vt-\frac{r}{2}\right)\right] \quad (5)$$

식(5)을 보면 파동 E 의 크기 I_s 는 위상 차이 r 에 따라 다음과 같이 변화한다.

$$I_s = 4A^2 \cos^2 \frac{\pi r}{\lambda} \quad (6)$$

따라서 단색 투사광일 때 떠 무늬의 강도는 위상 차에 따라 어두운 부분과 밝은 부분으로 나타난다. 따라서 위상차에 의한 떠무늬는 명암과의 상관 함수이다. 측정된 유막 두께 이미지(Figure 3)를 이미지 연산에 통하여 명암 값을 얻어낸다. 접촉점을 중심으로 수직과 수평 방향으로의 밝기 변화를 계산하면 국부적인 파장을 갖는 곡선 형태를 얻는다(Figure 4, 5). 떠무늬는 이러한 국부적 파장의 최대점 또는 최소점이며(Figure 6), 파동의 선단들(wavefront)을 연결한 폐곡선으로 간주될 수 있다. 파동

선단 주위의 최대점과 최소점을 밝기에 관한 식 (6)를 통하여 위상 차(phase shift) r 을 구한다, Born[1997], Moller[1988], Lee[1995]. 접촉 영역 (Hertzian contact area) 전반에 걸친 위상차의 형상은 Figure 7과 같으며 이러한 위상차를 이용하여 유막 두께를 나타내는 경로차를 계산한다. 유막 두께 계산의 기본적인 방법으로는 입력된 이미지 데이터에서 떠무늬의 순서와 밝기의 최대점과 최소점을 관찰자의 판단에 따라 선정(digitization), Bassani [1997]하는 것인데 많은 수의 이미지 데이터를 처리할 수 없다. 위상 변화에 의한 경로차를 나타내기 위하여 광학 연구 분야, Born[1997]에서 많이 사용하는 Zernike Polynomial, 식(7)를 이용하여 유막 두께의 정성적 분포를 계산할 수 있다.

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^i c_{ij} x^i y^{i-j} \quad (7)$$

식(7)에서 계산된 경로차와 유막 두께와의 상관 관계는 투사 광선의 파장과 첫번째 떠무늬를 선정함으로써 정량적으로 계산할 수 있다.

결 과

본 연구에서 사용한 윤활유는 점도가 0.04 Pas 이며 온도는 상온 20°C 이다. 작용 하중은 15N, 굴림 상대 속도는

0.04m/s 이다. 금속 불과 유리의 탄성 변형 계수는 각각 $E_b = 207 \times 10^9 N/m^2$, $E_d = 76 \times 10^9 N/m^2$ 이며, 포아송 비는 $\nu_b = 0.30$, $\nu_d = 0.25$ 이다. Cr 코팅은 100\AA 으로 균일하게 sputtering 으로 도금하였으며 금속 불은 유막 두께의 형성에 방해가 없도록 충분히 고른 표면을 갖고 있다. 측정된 유막 형상에 대한 위상 변화는 Figure 7 에서와 같이 나타나며 이에 따른 경로차를 Zernike Polynomial 로 나타내면 Figure 8 과 같은 형태를 얻을 수 있다. 여기서 투사광선의 파장과 첫번째 띠 무늬의 명암의 종류에 따라 접촉 영역에서의 유막 두께 분포를 계산할 수 있다.

결론

탄성 유체 윤활영역에서의 유막 두께 측정 기술은 1960 년대부터 시작 되어 왔다. 그러나 Hertzian 접촉 영역에서도 최소 유막 두께 지점 또는 접촉 부위의 중앙 지점 에서의 유막 두께뿐만 측정 되고 접촉 영역 전체에 걸친 유막 두께 형상에 대한 데이터 처리는 Image Processing 의 발달로 최근 들어 가능해졌다. 본 연구는 우선 투사 광선이 단색 광선일 때 접촉 영역에 나타나는 띠무늬를 위상차 해석을 통하여 쉽고 빠른 방법을 개발 하였다. 이로써 정성적으로 구한 유막 두께 형상은

정량적 계산으로 곧바로 발전시킬 수 있으며 투사 광선이 백색광일 때 이미지 분석을 위한 토대가 될 수 있게 하였다.

Acknowledgement

본 연구는 한국학술진흥재단의 신진교수연구지원 사업 (과제번호 98-12-021) 으로 이루어진 연구로 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 이미지 데이터 처리에 도움을 주신 인하대학교 이승걸 교수님께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Gustafsaon, L., Hoglund, E., and Marklund, O., " Measuring Lubricant Film Thickness with Image Analysis," Journal of Engineering Tribology, Vol. 204, pp199-205,
2. Cann, P. M., Spikes, H., Hutchingson, J., "The Development 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*, 1994, McGraw-Hill
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, 1997, Elsevier, Amsterdam
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

Table 1 Wavelengths of various visible lights

color	Wavelength λ (μm)
purple	0.40
blue	0.48
green	0.53
yellow	0.60
orange	0.67
red	0.78

Figures

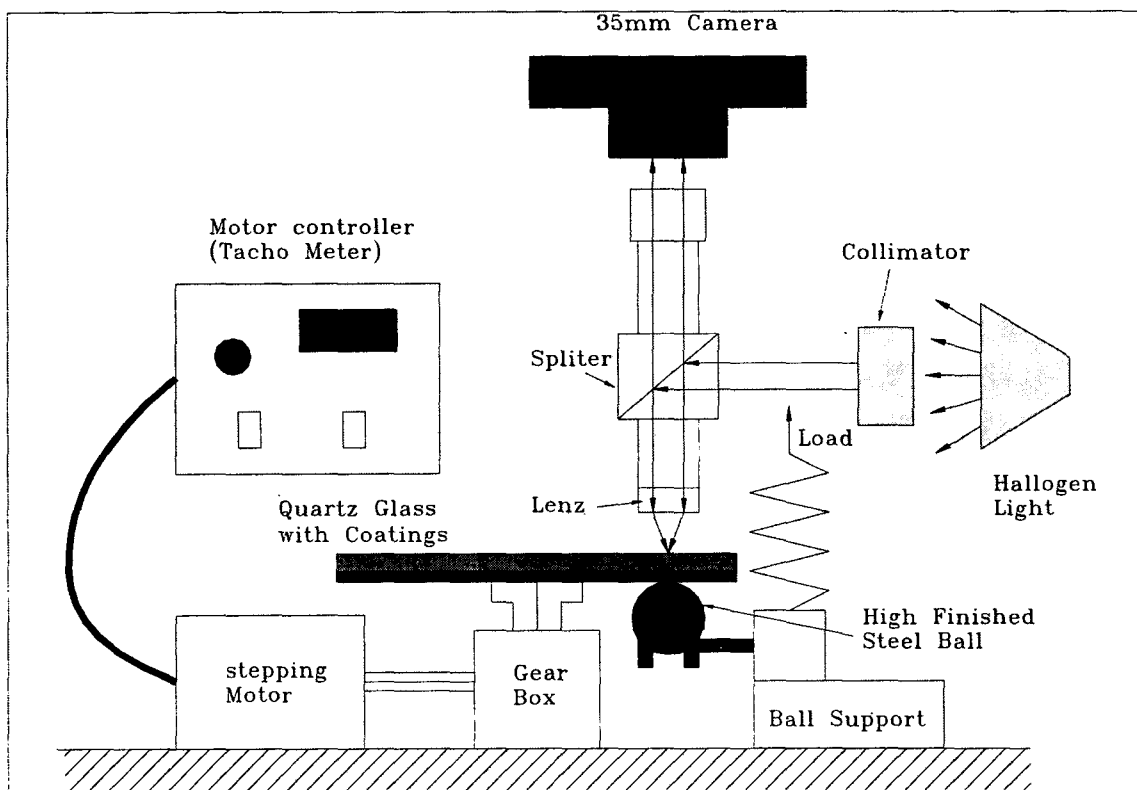


Figure 1 Schematic diagram of EHL film measurement

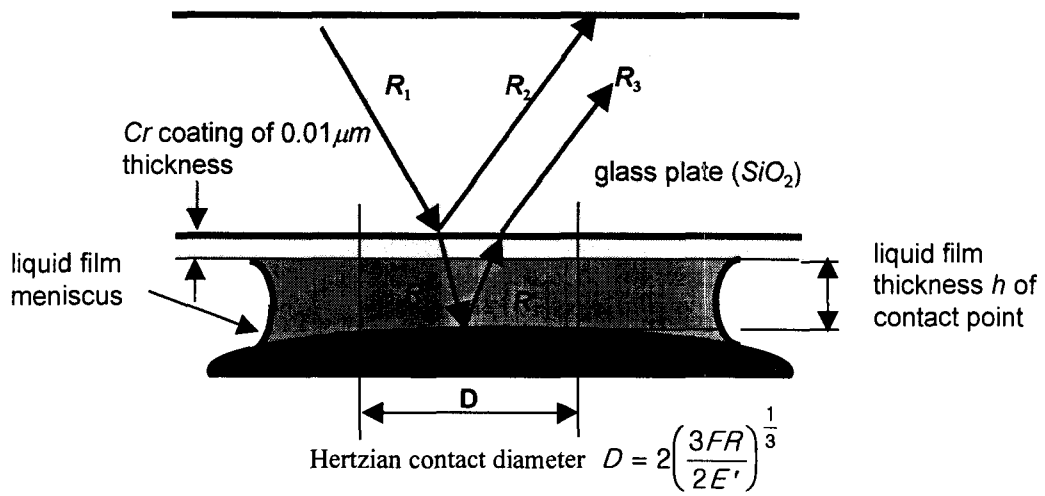


Figure 2 Reflected beams on Cr coating surface and steel ball

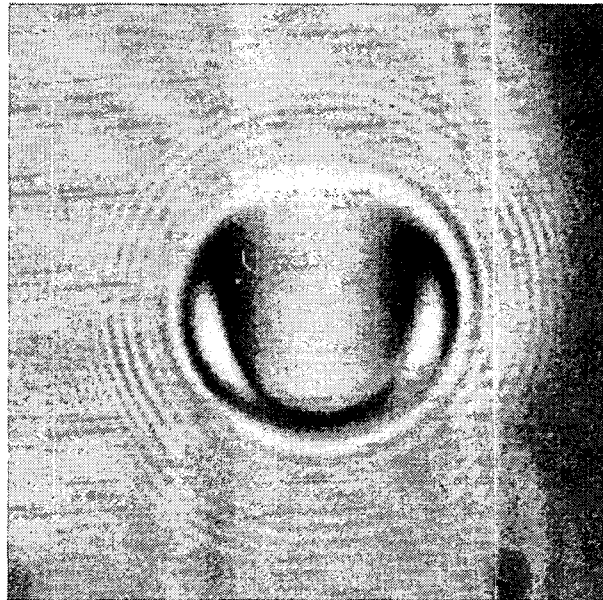


Figure 3 Image pattern of EHL film form optical interferometer, applied load 15 N, rolling velocity 0.04m/s, $E_b = 207 \times 10^9\ \text{N/m}^2$, $E_d = 76 \times 10^9\ \text{N/m}^2$, $\nu_b = 0.30$, $\nu_d = 0.25$

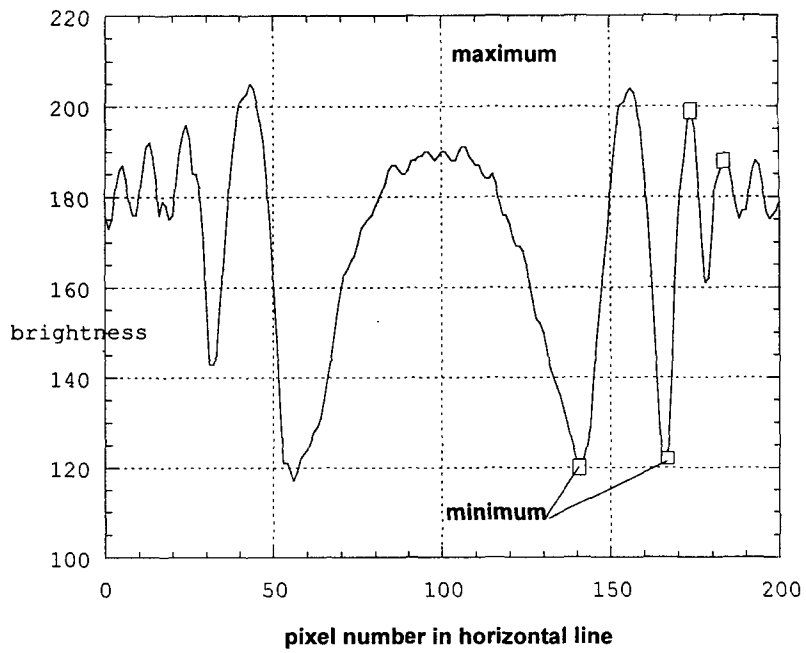


Figure 4 Intensity of brightness in each fringe on the horizontal line of contact area

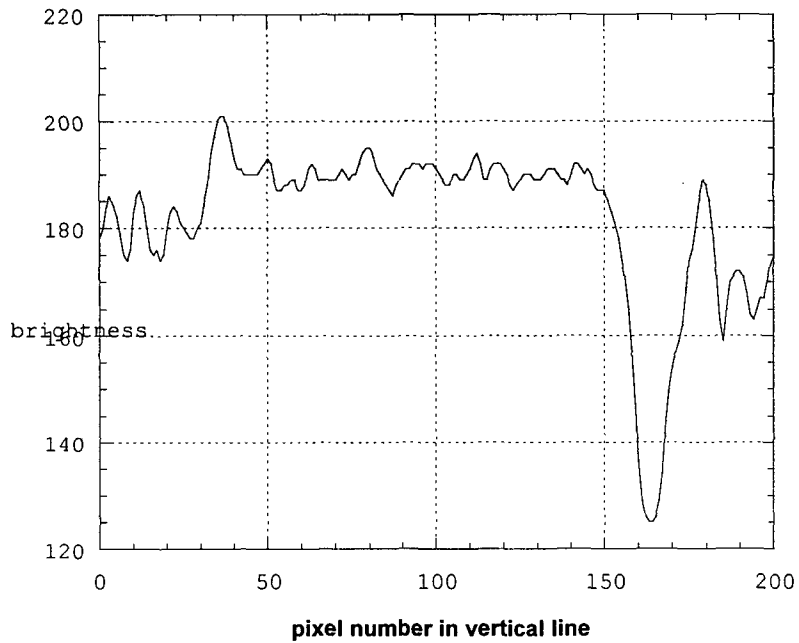


Figure 5 Intensity of brightness in each fringe on the vertical line of contact area

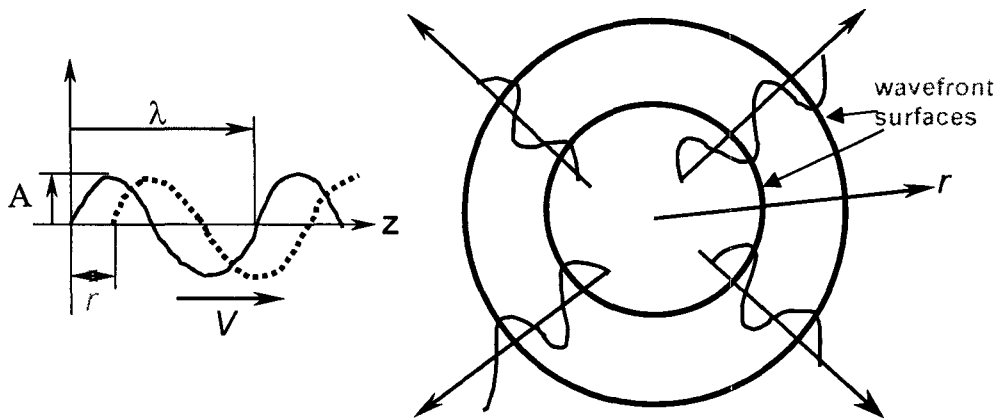


Figure 6 Wavefront generation by the difference of phases

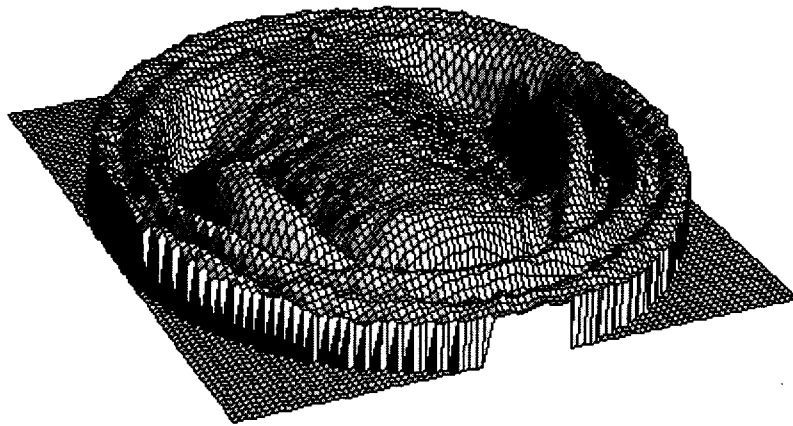


Figure 7 Phase change shape in Hertzian contact region of figure 3

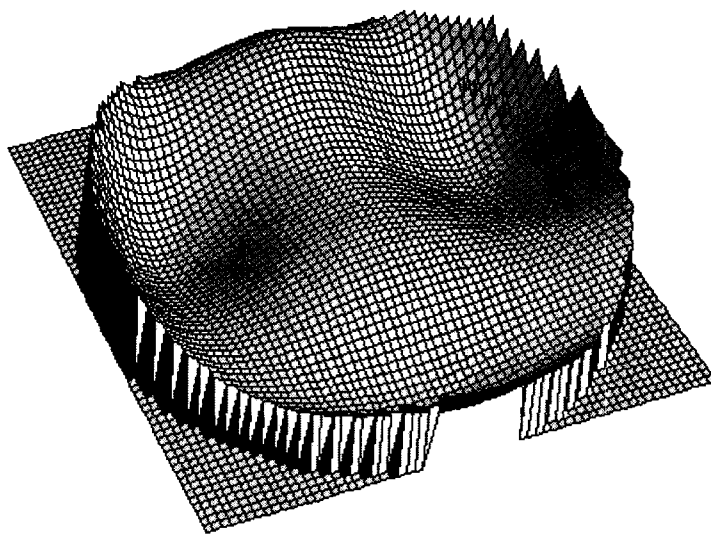


Figure 8 Qualitative feature of film thickness in Hertzian contact region of figure 3