

점접촉 탄성 유체 윤활에서의 띠 무늬 강도에 의한 유막 두께 측정

(Measurement of Film Thickness by Fringe Intensity Analysis in Point Contact Elastohydrodynamic Lubrication)

장 시 열 (Siyoul Jang), 최 언 진 (Unjin Choi)

국민대학교 기계자동차 공학부

School of Mechanical and Automotive Engineering
Kookmin University

ABSTRACT

Point contact film thickness in elastohydrodynamic lubrication (EHL) is analyzed by the image processing method for the monochromatic incident light. Interference between the reflected lights both on Cr coating of glass disk and on super finished ball makes circular fringes, which are regarded as film thickness together with numbering of fringe order. In this study, we developed technology to measure the film thickness by analyzing dark and bright intensity waves which results from monochrome green light. Two typical fringe patterns only with intensity values are examined for the measurement of point contact EHL film thickness. We expect that this technology will give valuable clue to improve color image processing analysis for high resolution of EHL film thickness with white incident light.

Key Words : elastohydrodynamic lubrication (EHL), gray scale image, monochromatic, image processing, elliptical circle, optical interferometer, phase change

서 론

탄성 유체 윤활에서 유막 두께의 결정은 윤활 접촉에 대한 가장 중요한 측정값 중의 하나이다. 그 이유는 유막 두께의 형태는 기하학적 접촉 형태가 일정하다면 윤활유의 특성에 따라 다르게 나타나며, 따라서 유막 두께의 형태로 윤활유의 특성을 파악할 수 있기 때문이다. 유막 두께를 얻기 위한 실험적 방법들에는 전기적 방법, 기계적 방법 그리고 광학적 방법 등이 있다. 그 중에서 광학적인 방법은 $0.01\mu\text{m}$ 에서 수 μm 까지의 범위를 가지고 있는 탄성 유체 윤활에 대해 국부적인 최소 유막 두

께 뿐만 아니라 접촉면 전체와 그 주변의 부분까지 높은 정밀도를 갖고 유막 두께를 측정할 수 있어 가장 널리 사용된다. 그러나 이 방법은 윤활 접촉을 형성하는 두 표면 중 한쪽이 광학 유리나 사파이어(sapphire)로 만들어져야 하기 때문에 실제 기계 시스템에 적용하기가 쉽지 않은 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 광학적인 방법(interferometry)을 선호하는 이유는 탄성 유체 윤활의 접촉부에서의 현상과 정보를 그 밖의 어떤 방법보다도 많이 포함하고 있기 때문이다.

광학적인 방법에 의해 얻은 데이터는 단색 상 (monochromatic image)과 컬러상(chromatic image)의 두 가지가 있으며 측정된 상의 특성 상 각각 다른 해석 방법을 개발 해야 한다. 그러나 컬러 상 분석은 단색 상 분석에 비해 많은 정보를 포함 하고 있으므로 해석의 방법은 어렵지 않지만 제한 된 범위의 유막 두께만이 해석 가능 하다.[5] 이에 반하여 단색광 분석은 컬러 상 분석에서 얻을 수 없는 범위의 유막 두께를 얻을 수 있다. 그러나 컬러 상에 비해 가지고 있는 정보는 단지 빛의 강도 (intensity)에 의한 흑백 색상 밖에 없으므로 해석하는데 다소 어려움이 있다. 정량적인 유막 두께를 얻기 위해서는 부가적인 실험을 수행하거나 수치해석에 의한 최소 높이 값을 사용하기도 한다.[3,4] 또한 이 단색광 분석 기술은 컬러 이미지 분석에 기본이 되는 기술이며 컬러 상 분석에서 얻을 수 없는 두꺼운 유막 분석에 필수적인 기술이므로 최대한 관찰자의 주관적인 부분을 배제한 상태에서 일관된 데이터를 얻을 수 있는 것이 관건이다. 본 연구에서는 위와 같은 목표를 갖고 최대한 연구자의 주관을 배제하여 단색광 분석 기술을 개발하고자 하였다.

실험 장치 및 방법 (Experimental Apparatus and method)

광학적인 방법을 사용한 탄성 유체 운할 유막 측정장치는 Figure 1에 나타난 것과 같이 광학

적인 부분과 기계적인 부분으로 나누어진다. 광학적인 부분은 광원과 현미경, 카메라로 구성되어 있고, 기계적인 부분은 간섭을 일으키는 구형 금속 볼(super finished steel ball)과 금속 코팅(Cr coating)의 접촉부와 스텝모터와 기어박스의 구동부 그리고 컨트롤 박스로 구성되어 있다. 광원으로는 백색광의 할로젠 (Hallogen) 램프를 사용하였고 램프로부터 나온 빛은 Green Light Filter(G533)를 통과하여 자연 빛과 가까운 빛으로 optic fiber를 통과한다. 이후 빛은 현미경의 collimator를 거쳐 평행광으로 바뀐 후 beam splitter에서 직각 방향의 접촉 점으로 투사된다. 다시 빛은 대물 렌즈를 거쳐 코팅면에서 1차로 25% 반사 한 후 나머지 투과된 빛은 오일을 지나 금속 볼에서 2차 반사를 한다.(Figure 2) 금속 볼에서 반사된 빛은 1차 반사된 빛과 합해져 유막 두께만큼의 경로차를 일으키며 띠 무늬의 상 형태로 필름에 저장 된다. 필름 형태로 얻어진 상 (image)의 데이터를 분석하기 위해서는 아날로그 상 데이터를 높은 해상도로 디지털화 시킴으로써 사람의 눈으로는 감지 할 수 없는 세밀한 정보까지 얻을 수 있다.

실험 과정 전체에 걸쳐서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 보다 선명한 상을 얻기 위하여 상에 잡음(noise)로 작용할 수 있는 모든 요소를 제거하는 것이다. 광학 유리나 현미경 렌즈의 청결과 금속 볼의 표면상태 등이 상의 왜곡에 중요한 요소로 작용하기 때문이다. 단색 상 분석법은 상의 강도 값을 가지고 계산을 수

행 하기 때문에 상이 가지고 있는 잡음(noise)에 상당히 민감하다. 그러므로 특히 주의를 요한다.

단색 상 분석법 및 결과 (Monochromatic Image Analysis and Results)

상 분석에 필요한 단색 상을 얻는 방법에는 광원으로 단색광을 사용하는 방법과 단색 필터를 사용하여 백색광이 가지고 있는 다른 빛들을 차단하는 방법, 실험에서 얻은 단색광에 의한 흑백 상(gray scale image)은 Figure 3 과 같다. 분석법 개발의 방향은 인간이 감지 할 수 있는 영역으로부터 시작하여 보다 객관적인 의미 있는 점들을 찾아 나감으로써 결국에는 최대한 관찰자의 주관에 배제하는 분석법을 개발하는데 초점을 맞추었다.

먼저 단색 상에서 관찰자의 감각에 의해 상의 중앙을 정한다. 관찰자의 주관적 판단을 최대한 줄이기 위해 Figure 4 와 같은 상하 좌우의 각각 두 개씩 8 개의 점(a~h)을 선정하여 각각의 두 점을 연결하는 선상의 최소값을 찾아내는 방법으로 띠 무늬 타원의 중심점(pixel) O 을 선정한다. 이렇게 선정된 점에 의해 중앙 점을 결정한 후 중앙 점을 중심으로 다시 중앙 점 결정에 필요한 두 개의 가상의 타원을 사용하여 두 타원의 마주 하는 선상의 최소값들을 이용하여 상에서 정확한 접촉부 중심을 찾아낸다. 이렇게 하여 찾아낸 중앙 점을 중심으로 실제 접촉부 분석에 필요한 가상의 타원 B_1, B_2

을 생성한다.

Figure 5 와 같이 Hertzian contact 부위 다음의 밝은 띠 무늬와 접촉부의 말굽형상 부분에 가상의 타원을 생성한다. 가상의 타원(B_1, B_2)은 밝은 띠 무늬 부분의 4 개의 점을 선정하여 결정되며 이 가상의 타원은 Hertzian 접촉 부위에서 말굽 모양의 1차 밝은 띠 무늬의 경계 점을 찾는데 이용 한다. 이를 위하여 다음으로 말굽형상의 범위를 결정하기 위해서 내부 타원의 반쪽 부분에서 최소값을 얻고 다른 반쪽 부분에서 최소값을 얻어 범위(N_1, N_2)를 결정하고, 이 범위내의 이미 결정된 중앙 점과 내부 타원을 연결한 선상의 최소값(D_1)을 구한다. 또한 말굽형상 범위 내의 내부 타원과 외부 타원을 각각 연결하는 선상의 최소값(D_2)을 Figure 6 와 같이 구한다. 이렇게 구해진 최소값들은 말굽형상의 띠 무늬의 경계를 결정하게 되며 이 내 외부의 경계 점을 서로 연결하는 선상의 픽셀들이 가지고 있는 강도(intensity)를 유막 두께로 환산하여 각각의 픽셀에 값을 부여한다.(Figure 7) 유막 두께를 결정하기 위해서 단색상 전체에서 최대값과 최소값을 얻어 이 값을 기준으로 강도에 대한 높이 값을 부여한다. 높이 값을 부여하기 위해서는 다음의 광학 식을 사용한다.

어두운 띠 무늬 :

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

밝은 띠 무늬 :

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

여기서

h : 오일 막 두께

K : 띠 무늬 번호

ψ : 위상 변화(Phase change)

λ : 투사되는 빛의 파장

n : 오일의 굴절률

이다.

위의 두 식으로부터 밝은 띠 무늬와 어두운 띠 무늬 사이에는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\Delta h = \frac{\lambda}{4n} \quad (3)$$

이 식과 위에서 구한 최대 최소의 강도(intensity)값을 사용하여 빛의 강도와 유막 두께의 선형적인 비례가 성립한다.

$$h = \left(\frac{\Delta h}{I_{max} - I_{min}} \right) I, \quad (I_{min} < I < I_{max}) \quad (4)$$

여기서

I_{max} : 최대 강도값

I_{min} : 최소 강도값

이다.

말굽형상의 유막 두께를 얻은 후 다시 접촉영역 내부의 유막 두께를 얻기 위해서 Figure 7 과 같이 접촉영역 전체의 특성을 충분히 표현할 수 있도록 고르게 픽셀들을 선정하여 유막 두께 값을 부여한다. 이 픽셀은 초기에 가정한 가상의 타원과 앞에서 선정한 말굽형상의 경계 점들로부터 파생되어지는 점들로서 초기에 가상의 타원을 결정하면 자동적으로 결정되어지도록 프로그래밍 된 점들이다.

접촉 영역 밖의 띠 무늬(fringe)의 높이 값 결정은 추가적인 가상의 타원을 사용하여 결정된 최대값과 최소값(동일 띠 무늬상에 원주 방향으로 약 72 개의 점을 선정)에 높이 값을 부여함으로써 접촉영역 밖의 유막 두께를 Figure 8 과 같이 결정 할 수 있다. 이렇게 해서 Figure 3 의 흑백 상을 분석했지만 다른 경향을 가지고 있는 상에 대해서도 가상의 타원을 사용한 방법이 적용될 수 있는가를 증명하기 위해서 Figure 9 과 같은 상에 대해서 다시 위의 절차를 반복한다. 물론 위의 절차를 그대로 반복한다면 Figure 9 과 같은 상은 정확하게 상이 가지고 있는 높이 값을 표현하기가 어렵다. 그러나 상의 특성을 알기 위한 선행 작업으로 Figure 9 에서 말굽형상 영역에서의 연결부(L)가 단지 하나의 차수의 띠 무늬로 되어 있는 것을 확인 해야 한다. 그러나 눈으로 확인 하기에는 사람의 감각이 주관적이기 때문에 결정을 내리기가 힘들다. 그러므로 첫번째 내부 타원이 가지고 있는 점들에서 빛의 강도(intensity)를 관찰 함으로서 원하는 정보를 얻을 수 있다. Figure 9 상의 말굽형상의 연결부에서 관찰자는 Figure 10 과 같이 다른 차수의 띠 무늬가 시작 되는 것을 관찰 하였다. 그러므로 다시 가상의 타원 법을 사용하기 위해서 말굽 형상의 아래부분 좌우에서 내부 타원의 최소값을 구하는 기능을 추가적으로 부여하면 Figure 9 의 상의 유막 두께를 Figure 11 과 같은 점들을 선정하여 유막 두께의 2 차원 정보를(Figure 12) 얻을 수 있다.

측정된 이미지의 같은 때 무늬 선상에서 명백히 선정될 수 있는 최대 최소점의 선정으로부터 체계적 계산에 의한 객관적 때 무늬 형상을 찾는 가상 타원 법은 상의 특성에 따라 추가적인 기능만을 덧붙임으로써 어떠한 상이라도 일관성 있는 유막 두께에 대한 2차원 정보를 얻어낼 수 있다. 가상 타원 법은 관찰자의 아이디어에 따라서 변형된 형태로 사용될 수 있다. 그러나 초기의 기본적인 개념에서 단지 절차만이 변형 되었을 뿐 그 본래의 의도와 목적은 변하지 않음을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 윤활유는 점도가 0.04 Pas 이며 온도는 상온 20°C 이다. 작용 하중은 10N에 굴림 상대 속도는 1.01 m/s 과 1.20m/s 의 두 가지 경우에 대해 실험하였다. 금속 볼과 유리의 탄성 변형 계수와 포아송의 비는 각각 $E_b = 207 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $E_d = 76 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $\nu_b = 0.30$, $\nu_d = 0.25$ 이다. Cr 코팅은 10nm 으로 균일하게 도금 하였으며 금속 볼은 유막 두께 형성에 방해가 없도록 충분히 고른 표면을 갖고 있다.

결 론

탄성 유체 윤활을 실험적으로 관찰 하기 위해서 광학적인 원리를 이용한 빛의 간섭 무늬를 생성하여 접촉 영역 전체를 관찰 하였다.

단색광에 의한 유막 두께 분석은 비교적 유막의 두께가 두꺼운(수 μm) 경우까지 측정될 수 있으므로 분석 기술의 확립은 유용하게 쓰일 것이다. 또한 백색광에 의한 유막 두께 측정

에도 본 연구에서 개발한 방법이 사용될 수 있어 그 효과는 상당히 크다.

감사의 글

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

참고문헌

1. G.J.Johnston, R.Wayte and H.A.Spikes "The Measurement and Study of Very Thin Lubricant Films in Concentrated Contact." Tribology Transactions, Vol. 34, pp187-194,1991
2. Hamrock, B. J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, 1994, McGraw-Hill
3. Bassani, R. and Ciulli, E., " Lubricant Film Thickness and Shape Using Interferometry and Image Processing," Elastohydrodynamics-96 Fundamentals and Application in Lubrication and Traction, 1996, Elsevier, Amsterdam
4. M. AKEI and K. MIZUHARA, "The Elastohydrodynamic properties of Lubricants in Refrigerant Environments", STLE Tribology transactions, Vol. 40, pp1-10, 1997
5. Krupka, M. Hartl, J. ermák and Liška," Elastohydrodynamic lubrication film shape – comparison between experimental and theoretical results" Tribology for Energy Conservation, 1997, Elsevier, Amsterdam

Figures

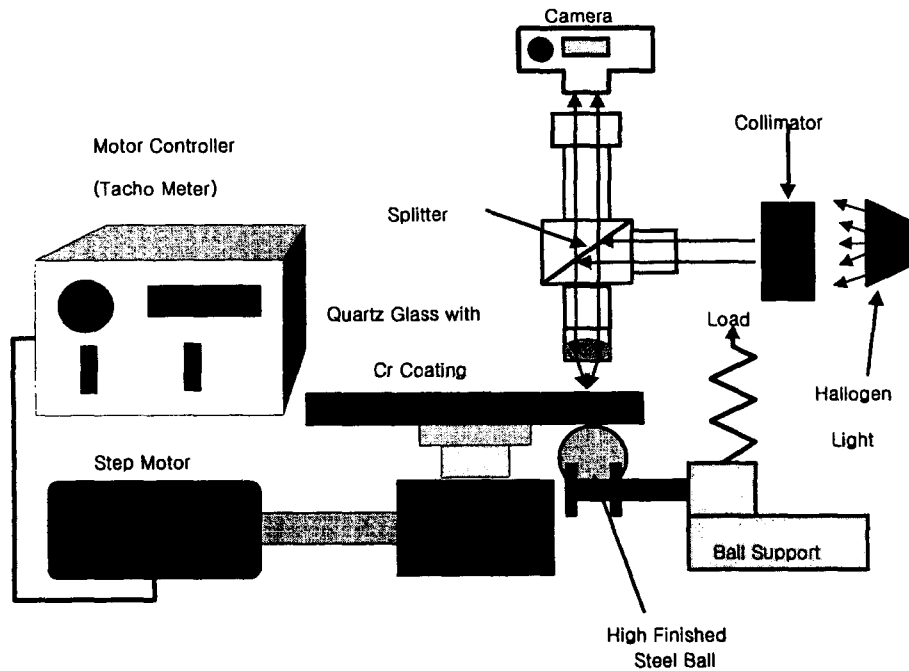


Figure 1 Schematic diagram of EHD film measurement

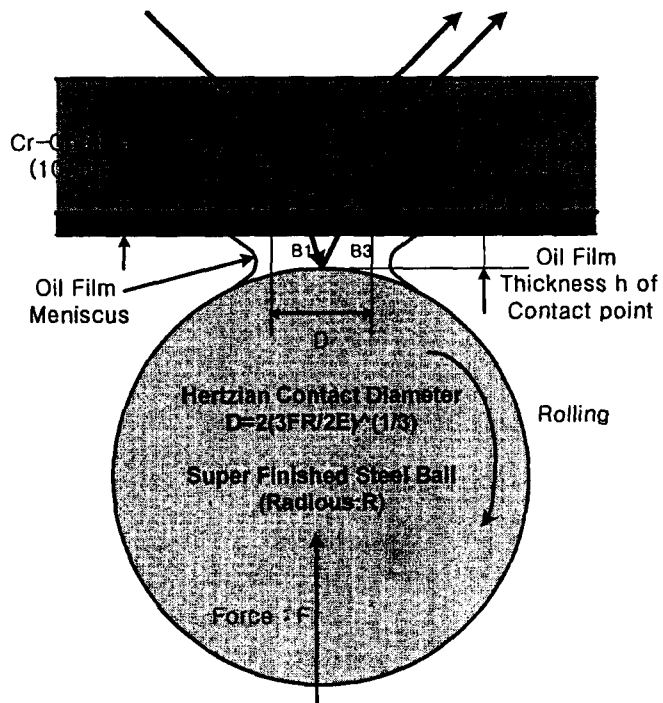


Figure 2 Reflected beams on Cr coating surface and steel ball



Figure 3 EHD monochromatic interferogram

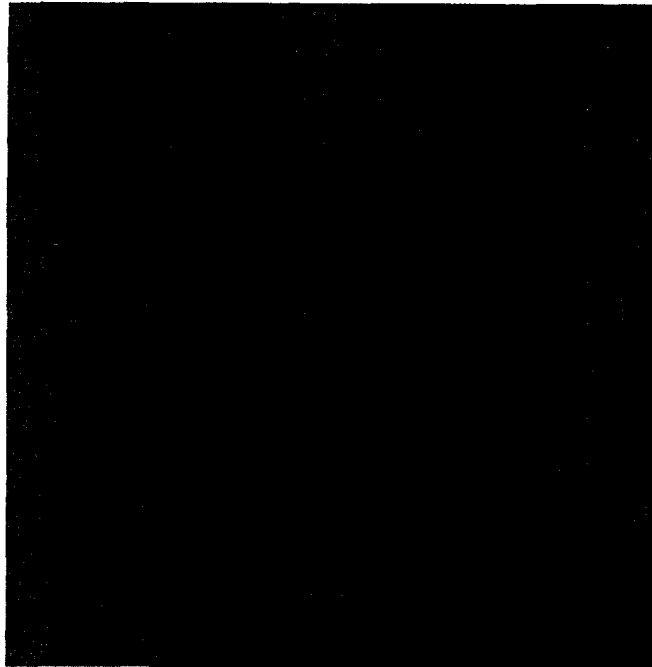
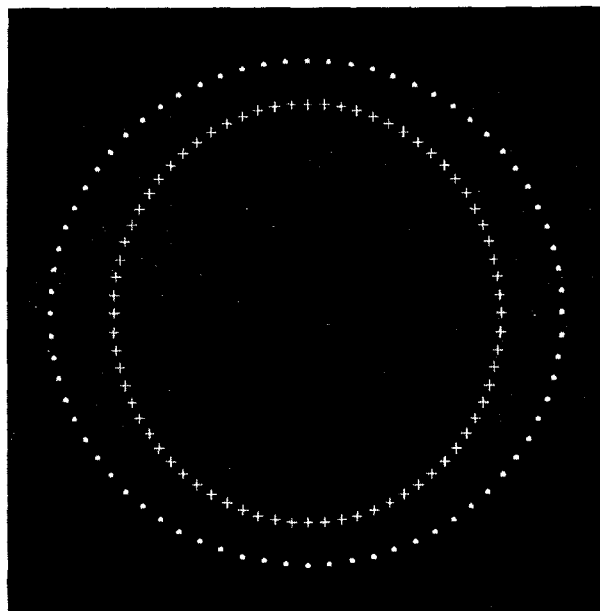


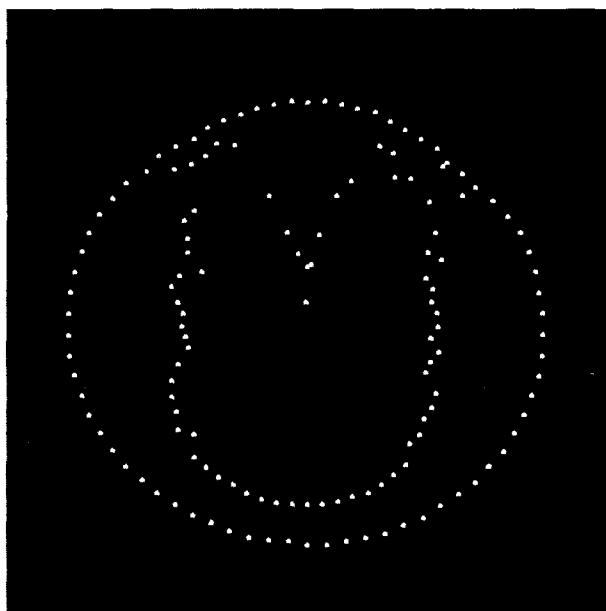
Figure 4 Points used to determine the center of contact regime



B1

B2

Figure 5 Imaginary elliptical circle used in order to determine the boundary points of horseshoe shaped area



N1

N2

D1

D2

Figure 6 Boundary points of horseshoe shaped area

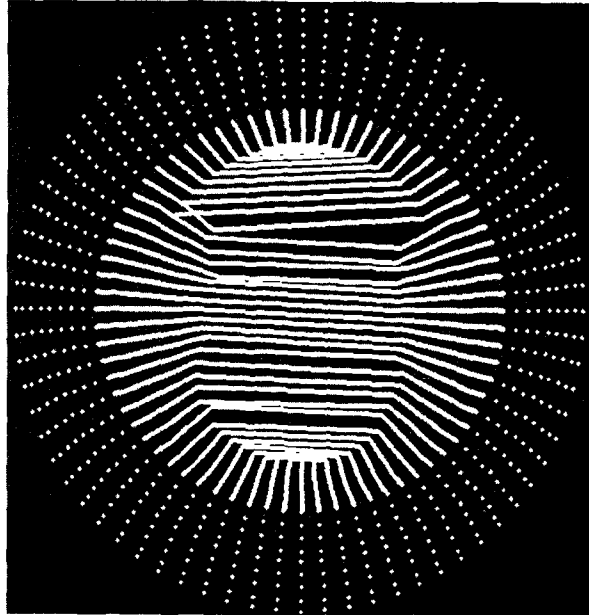


Figure 7 Interferogram with determined points for the calculation of film thickness

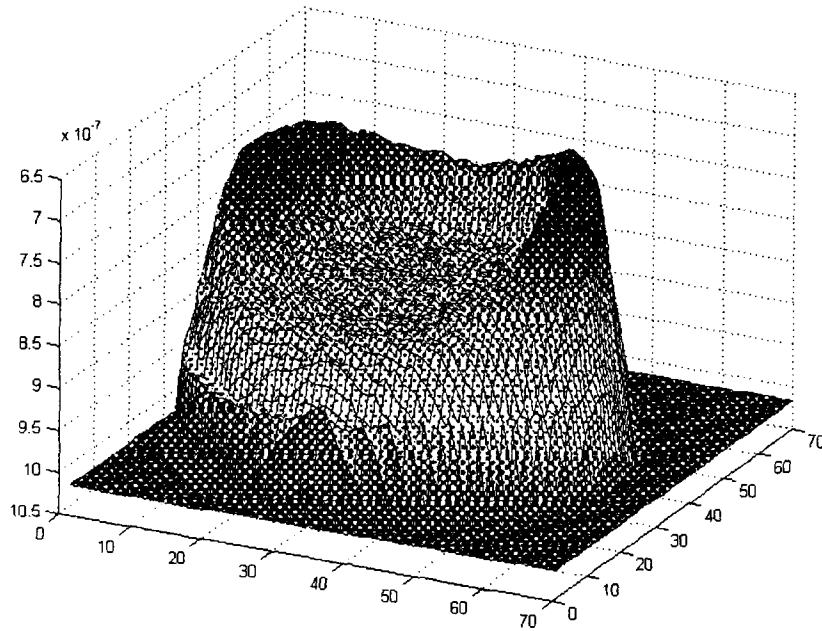


Figure 8 3-D mesh surface plots of film thickness for dynamic condition, $10N$, 1.01 m/s . $E_b = 207 \times 10^9\text{ N/m}^2$, $E_d = 76 \times 10^9\text{ N/m}^2$, $\nu_b = 0.30$, $\nu_d = 0.25$

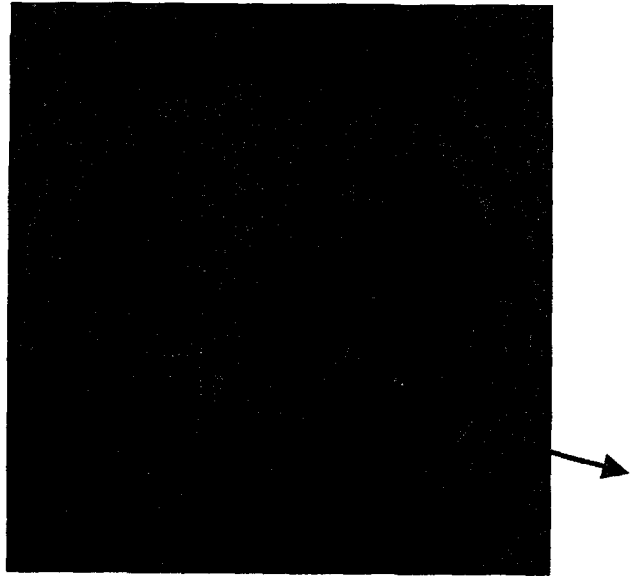


Figure 9 EHD monochromatic interferogram

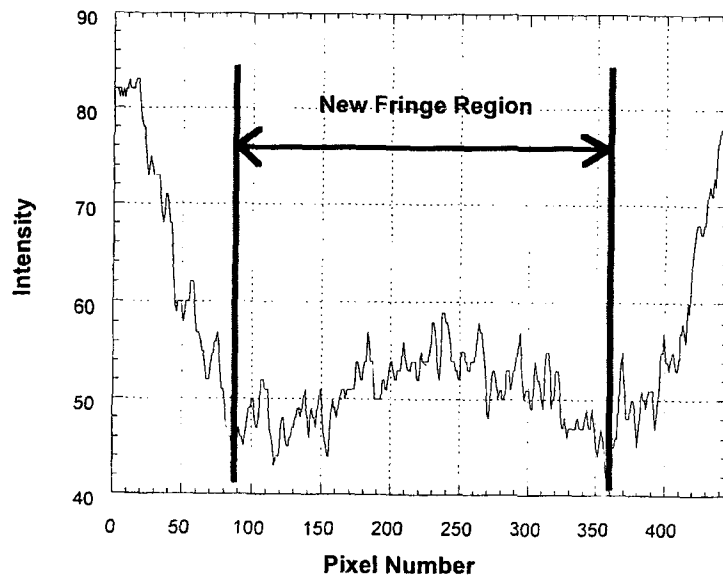


Figure 10 Intensity of figure 9 solid line (new fringe region)

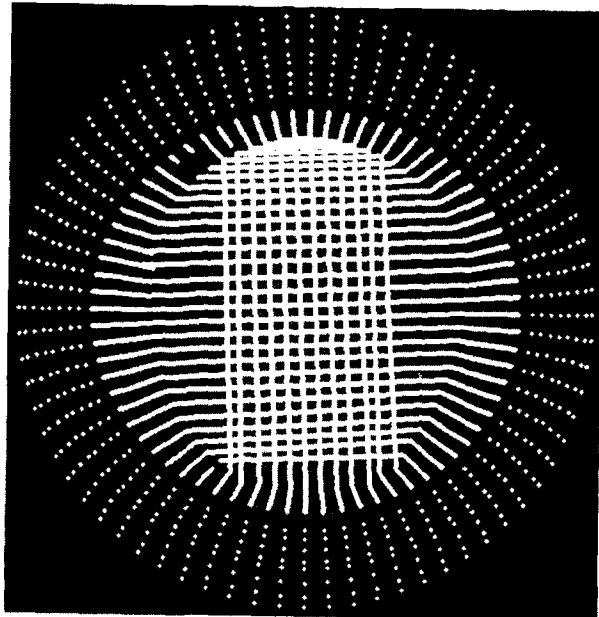


Figure 11 Interferogram with determined points for calculation of heights

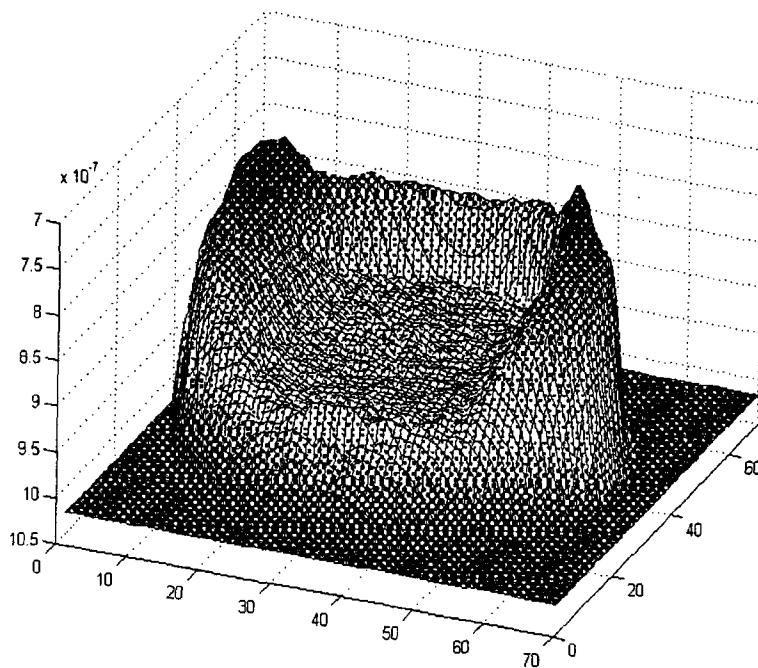


Figure 12 3-D mesh surface plots of film thickness for dynamic condition, $10N$, 1.20 m/s . $E_b = 207 \times 10^9\text{ N/m}^2$, $E_d = 76 \times 10^9\text{ N/m}^2$, $\nu_b = 0.30$, $\nu_d = 0.25$