

백색광 주사 간섭계에서 편광을 고려한 반사시 위상 변화

김영식*(한국과학기술원 기계공학과), 김승우(한국과학기술원 기계공학과)

Phase change on reflection considered of the polarization in white-light interferometer

Young Sik, Ghim(Mechanical Eng Dept. KAIST), Seung Woo. Kim(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

The phase change upon reflection from target surfaces in white-light interferometer induces measurement errors when target surfaces are composed of dissimilar materials. We prove that this phase change on reflection considered of the polarization of the white-light causes the shift of both envelope peak position and fringe peak position of several tens of nanometer. In addition, we propose a new equation of white-light interference fringe pertinent to the polarization of source.

Key Words : phase change upon reflection (반사시 위상 변화), polarization (편광)

1. 서론

백색광주사간섭계(White-light Scanning Interferometer)는 백색광의 광범위한 주파수 영역으로 인한 짧은 시간간섭거리(temporal coherence length)를 활용해 미세정밀부품의 삼차원 형상측정에 널리 응용되고 있다.^[1] 단색의 레이저 광원에 비해 시간간섭거리가 수 마이크로미터(μm)로 한정되어 있어서 짧은 영역에서만 간섭 무늬가 생성되어 정점의 위치가 분명해 2π -모호성(ambiguity)의 문제점으로부터 자유롭게 된다. 또한 수 밀리미터의(mm)의 크기의 형상도 나노미터(nm)의 수직 분해능으로 측정할 뿐만 아니라 측정 속도도 접촉식 측정기에 비해 빠르기 때문에, 최근 초정밀 형상측정에서 각광을 받고 있다. 백색광주사간섭계의 기본원리는 다음과 같다. 광축방향으로 측정 물체의 표면을 주사 이동시키면서 물체의 각 점에 대한 간섭 무늬를 얻는다. 그리고 얻은 간섭 무늬의 정점인 가시도 정점이나 위상 정점^[2-6]을 찾아 측정 물체에 대한 삼차원 정보를 얻어낸다. 보통 간섭 무늬의 정점의 위치는 광 경로차(OPD : Optical Path Difference)에 의해서만 결정된다고 가정을 하여 측정 점의 형상 정보를 얻어내는데 측정 물체의 재질이 금속이고 단차가 매우 작은 경우에는 반사시 발생하는 위상 변화에 의한 오차^[7,8]를 무시할 수 없게 되어 수십에서 수백 나노미터의 초정밀 부품의 형상 측정에 있어 오차를 야기시키고 있다. 실제로 반도체 공정이나 초정밀 가공부품에 많이 쓰이는 금, 은, 알루미늄, 크롬

등의 금속은 약 10~30 nm 의 측정 오차를 유발한다.^[9,10]

본 논문에서는 기존의 백색광간섭무늬식과 비교하여 새로운 방법으로 백색광간섭무늬 식을 제안한다. 본 간섭무늬식은 백색광의 편광을 고려한 반사시 위상변화율과 간섭 대물렌즈의 영향, 그리고 백색광의 주파수 특성에 의한 영향을 복합적으로 고려하여 재구성된다.

2. 백색광 간섭 무늬식

백색광주사간섭계의 원리는 백색광원에서 나온 조명광을 광 분할기에 의해 측정광과 기준광으로 분리하고 이를 각각 측정면과 기준면에 조사한다. 그런 다음 각 면에서 반사되어 되돌아 오는 광들이 서로 같은 광 경로(OPD)를 거치도록 하여 간섭신호를 형성하고 이를 분석함으로써 기준면에 대한 측정면의 3 차원 표면형상을 측정할 수 있게 된다. 입사광이 단색광이라고 가정하면 기준면과 측정면에서 반사되어 나온 두 광에 의한 간섭 무늬식은 다음과 같다.

$$I(x, y, z) = I_0 [1 + \gamma \cos(2k(h - z) + \Delta\alpha)] \quad (1)$$

여기서 I_0 는 빛의 평균 강도, γ 는 단일 파장에서의

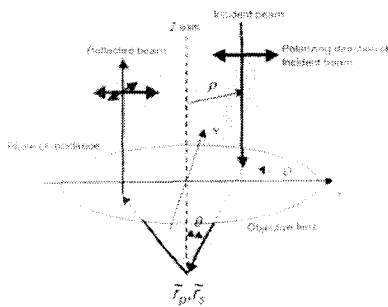
간섭무늬의 가시도, 그리고 $\Delta\alpha$ 는 측정면의 기준면의 반사계수에 의한 위상차를 나타낸다. 식 (1)에서 입사광을 백색광이라 가정을 하여 광원의 대역폭에 의한 영향^[11]과 대물렌즈의 영향^[11]을 고려해 주면 식 (2)와 같이 백색광에 대한 간섭 무늬식을 나타낼 수 있다.

$$I(x, y, z)^{x, y, z} = \int_{-\frac{\Delta k}{2}}^{\frac{\Delta k}{2}} k^2 F(k) \int_0^{\rho} P(\theta)(1 + \gamma \cos(2k(h-z)\cos\theta + \Delta\alpha(\theta, k))) \sin\theta d\theta dk \quad (2)$$

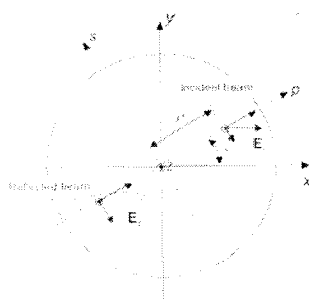
여기서, k_c 는 중심파수, Δk 는 광원의 대역폭, $F(k)$ 는 광원의 주파수 분포함수, $P(\theta)$ 는 입사각에 따른 광원의 조명함수가 된다.

3. 편광을 고려한 반사시 위상 변화

앞서 설명한 백색광주사간섭계의 간섭무늬는 입사광인 백색광의 편광에 대한 고려가 없다. 그리고 편광 상태에 따른 반사를 고려할 때, 대물렌즈를 이용하는 광학계에서는 입사광이 선형 편광 되어 있다고 하여도 측정면에 조사되는 광이 대물렌즈에 의하여 입사각이 변할 뿐만 아니라, 조사되는 광의 위치에 따른 입사면(plane of incidence)도 달라지므로 반사광의 편광은 복잡한 형태로 기술된다.^[12]



(a) Over View



(b) Top View

Fig. 1 change of polarization due to the objective lens^[12]

Fig.1 (a)는 대물렌즈에 입사되는 빛의 방향에 따라 편광 성분이 달라지는 것을 보여 주고 있다. 대물렌즈를 Fig.1 (a)와 같이 얇은 렌즈(thin lens)로 모델링을 하고 x,y,z 좌표계를 설정한 다음 광축에서 거리가 ρ , x 축에서 원주 방향으로 각도 ϕ 지점을 통과하는 광선(ray)이 입사각(θ)에 따라 측정면에 조사된다고 생각하자.

이때, 입사면에 따라 편광성분이 달라질 수 있기 때문에 이를 Fig.1 (b)와 같이 모델링하여 입사면에 따른 수평 성분(p-편광파)과 수직 성분(s-편광파)으로 분류를 해 준다. 렌즈에 입사되는 빛의 편광을 Fig.2 (b)에서 잡은 x,y 좌표계를 기준으로 우선은 x 축 방향으로만 편광된 빛(E_i)이 입사하였다고 가정을 한다. 그리고 광축에서 ρ , 원주 방향으로 ϕ 위치에서 x 축 방향으로 선형 편광된 입사광 E_i 는 입사면에 평행한 p 축과 수직인 s 축 방향을 따라 식 (6)과 같이 수평 성분(p-편광파)과 수직 성분(s-편광파)로 성분으로 나누어 생각할 수 있다.

$$E_i = \begin{pmatrix} E_i \cos\phi \\ -E_i \sin\phi \end{pmatrix}_{p,s} \quad (6)$$

식 (6)의 두 성분을 x,y 좌표계의 성분으로 나타내어 주고 이를 삼각 함수를 써서 정리하면 식 (7)과 같다.

$$E_i = \frac{E_i}{2} \begin{pmatrix} r_p + r_s + (r_p - r_s) \cos 2\phi \\ (r_p - r_s) \sin 2\phi \end{pmatrix}_{x,y} = \frac{E_i}{2} \begin{pmatrix} r_+ + r_- \cos 2\phi \\ r_- \sin 2\phi \end{pmatrix}_{x,y} \quad (식 7)$$

$(r_+ = r_p + r_s, r_- = r_p - r_s)$

따라서 측정면에서 반사되는 광을 E_{r1} , 기준면에서 반사되는 광을 E_{r2} , 분광기에서 기준면까지의 거리를 l_1 , 분광기에서 측정면까지의 거리를 l_2 , 측정면에서의 p-편광파와 s-편광파의 Fresnel 반사계수의 조합을 R_+, R_- , 기준면에서의 p-편광파와 s-편광파의 Fresnel 반사계수의 조합을 r_+, r_- 라 하면 E_{r1} 과 E_{r2} 는 식 (8)과 같이 표현할 수가 있다.

$$E_{r1} = \frac{E_i}{2} e^{-i\omega t} \begin{pmatrix} (R_+ + R_- \cos 2\phi)_r \\ (R_- \sin 2\phi)_s \end{pmatrix}_{x,y}$$

$$E_{r,2} = \frac{E_i}{2} e^{-2\mu} \begin{pmatrix} (r_+ + r_- \cos 2\varphi)_p \\ (r_- \sin 2\varphi)_s \end{pmatrix}_{x,s}$$

$$(R_+ = R_p + R_s, R_- = R_p - R_s, r_+ = r_p + r_s, r_- = r_p - r_s)$$
(8)

따라서, $E_{r,1}$ 과 $E_{r,2}$ 에 의해 얻어지는 간섭 신호식은 식 (9)와 같이 된다.

$$I_{p,\varphi} = (E_{r,1} + E_{r,2})^* (E_{r,1} + E_{r,2})$$
(9)

여기서, +는 Hermitian 행렬을 의미하고, $I_{p,\varphi}$ 는 광축에서 ρ , 원주방향으로 각도 φ 지점을 통과하는 한 개의 광선에 의한 간섭 신호를 나타내는 것이다. 따라서 편광에 따른 광선의 간섭 신호를 나타내 주면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(I_p)_{\rho,s} = \frac{E_i^2 \pi}{2} \left\{ e^{-2\mu} e^{-i,1} (R_+^* r_+^* + R_-^* r_-^*) + e^{2\mu} e^{-i,1} (R_+^* r_+ + R_-^* r_-) \right\}$$

$$+ \frac{E_i^2 \pi}{2} \left\{ |R_+|^2 + |r_+|^2 + |R_-|^2 + |r_-|^2 \right\}$$
(10)

결국, 간섭무늬를 얻기 위해 수치적분을 통해 계산을 하게 되는 식은 식 (10)을 각각 ρ 와 k 에 대해 이중 적분을 해주게 되는 것이다. 식 (10)을 통해 최종적으로 얻게 되는 간섭 무늬식은 식 (11)이 된다.

$$E_i^2 \pi \int_0^k F(k) \int_0^{\rho} (\alpha, \beta)_s \left\{ \cos[2k(h-z)\cos\theta - (\phi_p - \varphi_s)] P(\theta) \cos\theta d\theta dk \right.$$

$$+ E_i^2 \pi \int_0^k F(k) \int_0^{\rho} (\alpha, \beta)_s \left\{ \cos[2k(h-z)\cos\theta - (\phi_s - \varphi_p)] P(\theta) \cos\theta d\theta dk \right.$$

$$(이때, R_p = \alpha_p e^{i\mu}, R_s = \alpha_s e^{i\mu}, r_p = \beta_p e^{i\mu}, r_s = \beta_s e^{i\mu},$$

$$l_1 - l_2 \equiv (h-z)\cos\theta)$$
(11)

식 (11)을 계산하게 되면 간섭 신호에 대해 편광성분을 고려해 측정 물체의 반사시 위상 변화가 고려된 적분식이라고 할 수 있다. 따라서 위의 식들을 가상의 백색광 주사 간섭계를 통해 수치 적분을 해 줌으로써 편광 성분에 따른 반사시 위상변화에 대한 변화 등을 고려해 줄 수 있는 것이다.

3. 편광을 고려한 반사시 위상 변화

백색광 간섭무늬의 정점은 가시도 함수의 최고점인 가시도 정점(envelope peak)과 간섭무늬가 최대값을 갖는 위상 정점(fringe

peak)으로 나뉜다. 식 (11)을 살펴보면 백색광주사간섭무늬의 최고정점은 주사 거리 z 가 물체거리 h 와 일치할 때, 즉 $z=h(x,y)$ 인 경우 발생된다. 그러므로 측정표면의 각 점에서 발생된 각각의 정점이 위치하는 z 값을 검출해 물체거리 h 를 얻고 이를 측정표면의 모든 점에 대해 재구성하면 삼차원 형상측정이 이루어진다. 하지만 서로 다른 금속 재질로 이루어진 단차가 있는 시편을 백색광주사간섭계로 측정을 하게 되면 금속 물질의 반사시 발생하는 위상 변화로 인해 측정 표면 높이가 영향을 받게 된다. 이로 인해 백색광주사 간섭계로 초 정밀 가공 부품과 같은 미세 단차를 측정할 경우에는 금속 물질의 반사시 위상 변화로 인한 간섭 무늬의 변화가 측정 오차를 유발하게 된다. 따라서 이러한 반사시 위상 변화에 대한 영향을 충분히 알게 된다면 이를 통해 측정 물체에 대한 보상을 할 수 있다. 본 논문에서는 금속 물질의 반사시 위상 변화로 인한 간섭 무늬의 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(fringe peak)의 변화를 식 (11)을 수치 해석적으로 계산해 봄으로써 알아보았다. 간섭무늬의 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(phase peak)이 금속별로 반사시 위상 변화에 의해 얼마나 변화는 지를 시뮬레이션을 해 보았다. 반사시 위상 변화가 일어나지 않는다면 광 경로차가 0이 되는 지점이 가시도 정점(envelope peak)이 되지만, 반사시 위상 변화가 일어나면 광 경로차가 0이 되는 지점과 가시도 정점(envelope peak)이 되는 점이 서로 달라지게 된다. 뿐만 아니라 위상 정점(fringe peak)도 달라지게 된다.

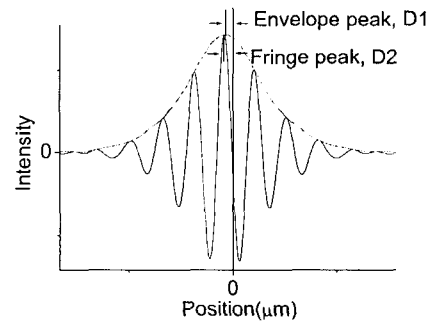


Fig. 2 Movement of envelope peak & fringe peak due to phase change on reflection

따라서 이러한 영향이 금속마다 어느 정도인지를 알아 보기 위해 Fig.2에서 보는 바와 같이 광 경로차가 0이 되는 지점에서부터 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(fringe peak)까지의 거리를 각각 D1, D2라고 놓고, 이를 수치 해석적으로 계산해 보았다. 참고로, 기준 미러의 재질은 알루미늄(Al)이라고 가정하고 금속

별로 반사시 위상 변화에 대한 간섭무늬의 변화를 알아보았다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

Material	D1	D2	D1-D2
Ni	3.88 nm	7.73 nm	3.85 nm
Cu	6.47 nm	15.32 nm	8.85 nm
Au	14.39 nm	16.33 nm	1.94 nm
Ag	21.13 nm	12.94 nm	8.19 nm
Pt	1.35 nm	4.96 nm	3.61nm
Molybdenum	9.57 nm	0.44nm	10.01 nm

Tabel 1. Distance of envelope peak & fringe peak from the position where OPD is 0 due to phase change on reflection

4. 결론

본 논문에서는 백색광주사간섭계에서 백색광의 두 편광성분인 수직 편광성분과 수평 편광성분을 고려한 간섭무늬 식을 제안하고, 이를 이용해 금속 물질의 반사시 발생하는 위상변화에 의한 영향을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 시뮬레이션 결과 반사시 발생하는 위상 변화로 인하여 각 금속별로 간섭무늬의 가시도 정점과 위상 정점이 이동함을 알았다. 특히, 은의 경우에는 반사시 위상변화로 인해 가시도 정점이 21.13 nm, 위상 정점이 12.94 nm 움직였다.

그리고, 시뮬레이션의 결과를 검증하기 위한 방법으로 백금 시편과 은 시편의 경우, 반사시 위상 변화에 의한 간섭무늬정점의 위치 변화를 간단히 알아 보았다. 실험을 통해 얻은 간섭 무늬로는 광 경로차(OPD)가 0 인 지점을 정확히 알 수가 없기 때문에 간섭 무늬의 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(fringe peak)이 반사시 위상 변화로 인해 어느 정도 이동하였는지를 알아보았다. 그 결과 가시도 정점과 위상 정점의 위치 차이가 백금 시편 일 경우 3.24 nm, 은 시편일 경우 7.66 nm 로 시뮬레이션을 통해 얻은 결과인 3.61 nm, 8.19 nm 와 거의 비슷함을 알았다.

백색광주사간섭계는 간섭무늬의 가시도 정점이나 위상 정점을 이용해 측정 시편의 높이 정보를 얻게 되는데 금속 시편을 측정할 경우에는 금속 시편의 형상 뿐만 아니라 반사시 발생하는 위상 변화에 의한 영향으로도 간섭무늬의 정점이 움직이게 된다. 그래서 같은 형상이라도 재질에 따라 간섭 무늬의 정점의 위치가 틀려져 측정결과가 달라지게 된다. 따라서 현재 백색광주사간섭계에서 금속시편을 측정할 경우 반사시 발생하는 위상 변화에 대한 영향을 미리 고려해 보상을 해 줘야 한다.

참고문헌

1. G. Kino and S. Chim, "The Mirau correlation microscope," *Applied Optics*, vol. 29, no. 26, pp. 3775-3783, 1990
2. K. Creath, "Sampling requirements for white light interferometry," *Proc. Fringe '97, Academic Verlag*, pp. 52-59, 1997
3. P. Groot and L. Deck, "Three-dimensional image by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 1462-1464, 1993.
4. P. D. Groot and L. Deck, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency," *Journal of Modern Optics*, vol. 42, no. 2, pp. 389-401, 1995.
5. K. Larkin, "Efficient nonlinear algorithm for envelop detection in white light interferometry," *J. of Optical Society of America A*, vol. 13, no. 4, pp. 832-843, 1996
6. M. C. Park and S. W. Kim, "Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms," *Opt. Eng.*, vol. 39, pp. 952-957, 2000
7. Akkiko Harasaki, Joanna Schmit, and James C. Wyant, "Offset of coherent envelope position due to phase change on reflection," *Applied Optics*, vol. 40, no. 13, pp. 2102-2106, 2001
8. M. C. Park and S. W. Kim, "Compensation of phase change on reflection in white-light interferometry for step height," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 7, pp. 420-422, 2001
9. J. F. Biegen, "Calibration requirements for Mirau and Linnik microscope interferometers," *Applied Optics*, vol. 28, no. 11, pp. 1972-1974, 1989
10. T. Doi, K. Toyoda, Y. Tanimura, "Effects of phase changes on reflection and their wavelength dependence in optical profilometry," *Applied Optics*, vol. 36, no. 28, pp. 7157-7161, 1997
11. M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics," Pergamon Press, Sixth edition, 316-323, 1985
12. Gee-Hong Kim, "Thin-Film Thickness Profile measurement using White-Light Scanning Interferometry", Doctoral thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2000