

백색광주사간섭계에서 편광을 고려한 반사시 위상 변화에 대한 연구

김영식 · 김승우[†]

한국과학기술원 기계공학과 BUPE연구단
⊕ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2004년 3월 22일 받음, 2004년 5월 14일 수정본 받음)

백색광주사간섭계는 금속 물질의 반사시 발생하는 위상 변화에 의해 금속의 두께 측정에서 수십 나노미터(nm)의 오차를 갖는다. 실제로 반도체 공정이나 초 정밀가공 부품에 많이 쓰이는 금, 은, 알루미늄, 크롬 등의 금속은 약 10~30 nm의 측정 오차를 야기시킨다. 본 논문에서는 수치 해석을 통해 백색광의 편광을 고려한 반사시 위상 변화에 의해서 간섭무늬의 두 정점, 위상 정점과 가시도 정점이 이동함을 보인다. 또한 백색광의 두 편광성분, 수직 편광성분과 수평 편광성분에 의해 재구성된 간섭 무늬식을 제안한다.

주제어 : polarization, phase change on reflection, fringe peak, envelope peak, virtual white-light scanning interferometer.

I. 서 론

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 생성되므로 정점의 위치가 분명해진다. 이로 인하여 2π-모호성(ambiguity)의 문제점으로부터 자유롭게 된다. 또한 수 밀리미터(mm)의 크기의 형상도 나노미터(nm)의 수직 분해능으로 측정할 뿐만 아니라 측정 속도도 접촉식 측정기에 비해 빠르기 때문에, 최근 초 정밀 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 정점, 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 측정점의 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 상대적으로 큰 오차를 야기시키고 있다. 실제로 반도체 공정이나 초정밀 가공부품에 많이 쓰이는 금, 은, 알루미늄, 크롬 등의 금속은 약 10~30 nm의 측정 오차를 유발한다.^[9,10]

본 논문에서는 기존의 백색광간섭무늬식과 비교하여 새로운 방법으로 백색광간섭무늬 식을 제안한다. 본 간섭무늬식은 백색광의 편광을 고려한 반사시 위상변화율과 간섭 대물

렌즈의 영향, 그리고 백색광의 주파수 특성에 의한 영향을 복합적으로 고려하여 재구성하고자 한다.

II. 백색광 간섭 무늬식

백색광주사간섭은 마이켈슨(Michelson), 미라우(Mirau), 리닉(Linnik)등 여러 형태의 간섭광학계를 통해 얻어지는데 일반적으로 저배율(1배~5배)에서는 마이켈슨(Mickelson) 간섭계가, 중배율(10배~50배)에서는 미라우(Mirau)간섭계가, 그리고 고배율(100배 이상)에서는 리닉(Linnik)간섭계가 주로 쓰인다. 백색광주사간섭계의 원리는 백색광원에 서 나온 조명광을 광 분할기에 의해 측정광과 기준광으로 분리하고 이를 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 3차원 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 간섭 무늬의 가시도, $\Delta\alpha$ 그리고 ((는 기준면과 측정면의 반사계수에 의한 위상차, k 는 사용하는 광원의 전파 상수, h 는 기준면에서 측정점까지의 거리, z 는 광축 방향을 z 축으로 설정했을 때 스캐닝하는 구동부의 위치 값을 나타낸다. 식 (1)에서 입사광을 백색광이라 가정을 하여 광원의 대역폭에 의한 영향^[11]과 대물렌즈의 영향^[1]을 고려해 주면 식 (2)와 같이 백색광에 대한 간섭 무늬식을 나타낼 수 있다.

[†] E-mail: swk@kaist.ac.kr

$$I(x, y, z)^{N, A, \Delta k} = I_0 \int_{k_c - \frac{\Delta k}{2}}^{k_c + \frac{\Delta k}{2}} F(k) \int_0^{\theta_0} P(\theta) \{1 + \gamma \cos(2k(h-z) \cos \theta + \Delta \alpha(\theta, k))\} \cos \theta d\theta dk \quad (2)$$

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

식 (2)의 적분식 내에서 $d\theta$ 앞의 $\cos \theta$ 항목은 대물렌즈의 기하학적인 관계식에서 유도되는데, 기존의 연구에서도 이 부분은 불명확한 부분으로, 해석하는 방법에 따라 $\sin \theta$ 또는 $\sin \theta \cos \theta$ 로 대체하기도 한다.^[1,12]

III. 편광을 고려한 반사시 위상 변화

앞서 설명한 백색광주사간섭계의 간섭무늬는 입사광인 백색광의 편광에 대한 고려가 없다. 측정 물체에 경사지게 입사하는 전기장(입사광)은 입사면에 수직하게 진동하는 전기장과 입사면에 평행하게 진동하는 전기장의 두 성분으로 분해할 수가 있는데, 입사면에 수직인 성분의 전기장을 s-편광파 또는 횡전기(transverse electric, TE)파라 하고, 입사면에 놓여 있는 전기장을 p-편광파 또는 횡자기(transverse magnetic, TM)파라 부른다.

그림 1에서 보듯이 굴절률이 N_i 인 매질에서 N_t 인 매질로 빛이 진행을 할 때 경계면의 법선에 대해 θ_i 로 입사하는 빛의 반사와 투과는 경계면의 평행한 성분의 전기장과 자기장에 의해 결정된다. 매질의 굴절률은 일반적으로 식 (3)과 같이 복소수로 나타낼 수 있는데 여기서 n 은 k 굴절률, (n 는 감쇄 계수를 뜻한다.^[11])

$$N = n + ik \quad (3)$$

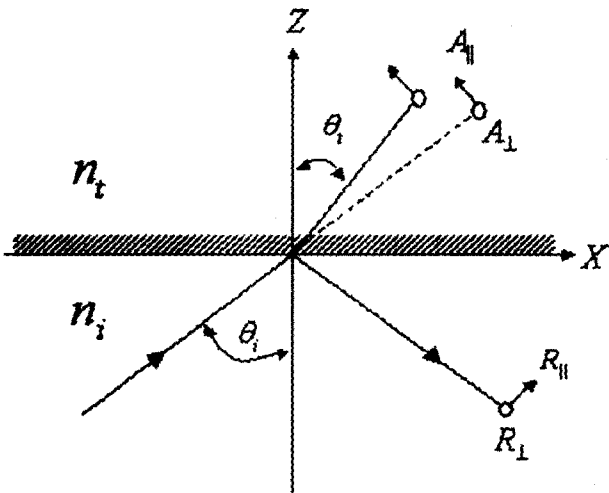


그림 1. The propagation of an electromagnetic wave.

따라서 굴절률 N_i 인 매질에서 굴절률 N_t 인 매질로 입사각 θ_i 로 빛이 입사하게 되면 굴절각 θ_t 는 스넬의 법칙(snell's law)에 의해 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.^[11]

$$\sin \theta_t = \frac{N_i}{N_t} \sin \theta_i = \frac{n_i n_t + \kappa_i \kappa_t}{n_t^2 + \kappa_t^2} \sin \theta_i + i \frac{n_i \kappa_t - n_t \kappa_i}{n_t^2 + \kappa_t^2} \sin \theta_i \quad (4)$$

$$(N_i = n_i + i\kappa_i, N_t = n_t + i\kappa_t)$$

프레넬식(Fresnel formula)을 이용하여 s-편광파와 p-편광파에 대한 반사계수를 구하면 식 (5)와 같다.

$$R_{||} = \frac{N_t \cos \theta_i - N_i \cos \theta_t}{N_t \cos \theta_i + N_i \cos \theta_t} A_{||} \quad (5)$$

$$R_{\perp} = \frac{N_i \cos \theta_i - N_t \cos \theta_t}{N_i \cos \theta_i + N_t \cos \theta_t} A_{\perp}$$

여기서 $R_{||}, R_{\perp}$ 는 각각 반사된 광속의 p-편광파와 s-편광파에 전기장이고 $A_{||}, A_{\perp}$ 는 원래 광속의 p-편광파와 s-편광파에 대한 전기장이다.

식 (5)를 이용하여 백색광에서 편광 성분에 따른 간섭 무늬식을 유도하면 식 (6)과 같이 백색광에 대한 간섭 무늬식을 재구성하여 나타낼 수 있다.

$$I(x, y, z)^{N, A, \Delta k} = I_0 \int_{k_c - \frac{\Delta k}{2}}^{k_c + \frac{\Delta k}{2}} F(k) \int_0^{\theta_0} \{ [\alpha_{||} \beta_{||} \cos\{2k(h-z) \cos \theta - (\phi_{||} - \varphi_{||})\} + \alpha_{\perp} \beta_{\perp} \cos\{2k(h-z) \cos \theta - (\phi_{\perp} - \varphi_{\perp})\} + \alpha_{||}^2 + \alpha_{\perp}^2 + \beta_{||}^2 + \beta_{\perp}^2] P(\theta) \cos \theta d\theta dk \quad (6)$$

여기서, 측정 면에 대한 p-편광 파와 s-편광 파의 입사광과 반사광의 전기장의 비를 $r_{obj||}, r_{obj\perp}$ 라 하고, 기준면에 대한 p-편광 파와 s-편광 파의 입사광과 반사광의 비를 $r_{ref||}, r_{ref\perp}$ 이라고 했을 때, $r_{obj||} = \alpha_{||} e^{i\phi_{||}}, r_{obj\perp} = \alpha_{\perp} e^{i\phi_{\perp}}, r_{ref||} = \beta_{||} e^{i\varphi_{||}}, r_{ref\perp} = \beta_{\perp} e^{i\varphi_{\perp}}$ 가 된다.

식 (6)은 백색광 간섭 무늬에서 편광성분을 고려한 측정 물체의 반사시 위상 변화에 대한 적분식이다. 따라서 위의 식을 수치 적분을 해 줌으로써 편광 성분에 따른 반사시 위상 변화에 대한 변화를 정확히 고려해 줄 수 있다.

IV. 반사시 위상 변화에 의한 백색광 간섭 무늬의 두 정점의 이동

백색광 간섭무늬의 정점은 그림 2와 같이 가시도 함수의 최고점인 가시도 정점(envelope peak)과 간섭무늬가 최대값

을 갖는 위상 정점(fringe peak)으로 나뉜다. 식 (6)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. 이는 수십에서 수백 나노 미터(nm)의 초 정밀 가공 부품의 측정에 있어 중대한 단점으로 작용하고 있고, 반도체 공정이나 초 정밀 가공 부품에 많이 쓰이고 있는 금, 은, 알루미늄, 크롬 등의 금속은 약 10~30 nm의 측정오차를 유발한다. 이는 백색광 주사 간섭계가 광축 방향으로 물체의 표면을 주사(Scanning)하면서 측정 표면의 각 점에 대해 얻은 간섭 무늬의 정점을 찾아냄으로써 물체의 3차원 형상 정보를 얻어내는데, 초 정밀 가공 부품과 같은 미세 단차를 측정할 경우에는 금속 물질의 반사시 위상 변화로 인한 간섭 무늬의 변화가 큰 측정 오차를 유발하게 되는 것이다. 따라서 이러한 반사시 위상 변화에 대한 영향을 충분히 알게 된다면 이를 통해 측정 물체에 대한 보상을 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 금속 물질의 반사시 위상 변화로 인한 간섭 무늬의 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(fringe peak)의 변화를 식 (6)을 수치 해석적으로 계산해 봄으로써 알아보았다. 즉, 가상의 백색광 주사 간섭계(Virtual White-light Scanning Interferometer : VWSI)^[13]라는 시뮬레이션 프로그램을 만들어 금속 물질의 반사시 위상 변화에 따른 간섭 무늬의 변화를 알아보았다. 이때, 사용한 각 금속의 파장별 굴절률의 값은 기존에 나와있는 참고 문헌^[14]을 이용해 구하였다. 식 (6)에서 보면 알 수 있듯이 간섭 무늬를 계산할 때, 편광 상태에 따라 반사시 위상 변화를 따로 계산을 해 주어야 하기 때문에 편광에 따른 반사시 위상 변화만을 알아볼 필요가 있다. 우선은 600 nm 파장의 빛에 대해서 s-편광과 p-편광에 대해 입사각에 따른 반사시 위상 변화와 반사율을 금속별로 시뮬레이션을 해 보았다. 결과는 그림 3과 그림 4와 같다.

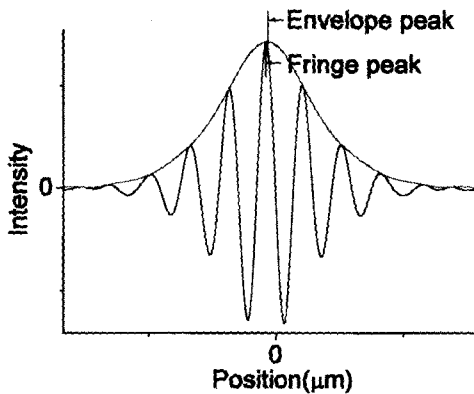
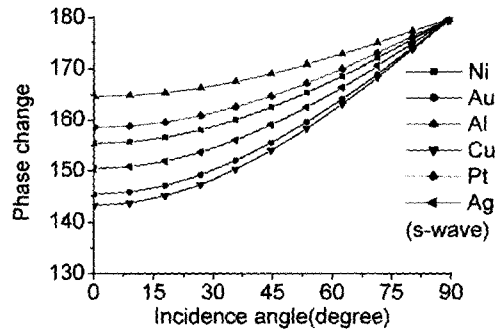
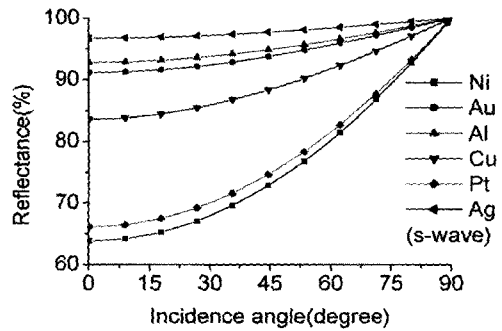


그림 2. Envelope peak and fringe peak of the interference fringe.

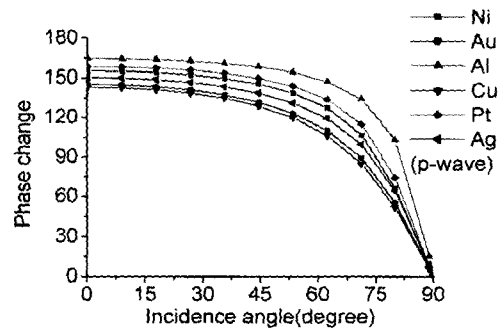


(a) Phase change(degree)

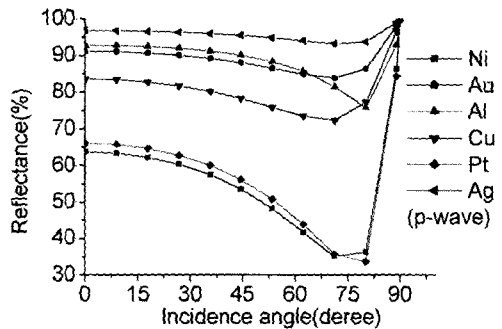


(b) Reflectance(%)

그림 3. Phase change of s-wave on reflection according to the incidence angle (when wavelength is 600 nm).



(a) Phase change(degree)



(b) Reflectance(%)

그림 4. Reflectance of p-wave on reflection according to incidence angle (when wavelength is 600 nm).

또한 입사각이 0°(Normal incident angle)일 때 파장에 따른 반사시 위상 변화와 반사율을 금속별로 시뮬레이션 해 본 결과 그림 5와 같다.

그림 3~그림 5에서 보듯이 금속별로 편광 성분에 따라 반사시 위상 변화가 달라짐을 알 수 있다. 이번에는 간섭무늬의 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(phase peak)이 금속별로 반사시 위상 변화에 의해 얼마나 변하는지를 가상의 백색광주사간섭 계(VWSI)를 이용해 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.

따라서 이러한 영향이 금속마다 어느 정도인지를 알아보기 위해 그림 6에서 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.

표 1에서 보는 바와 같이 각 금속마다 반사시 위상 변화로

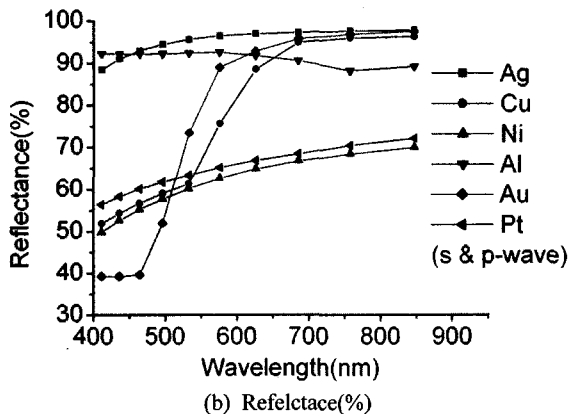
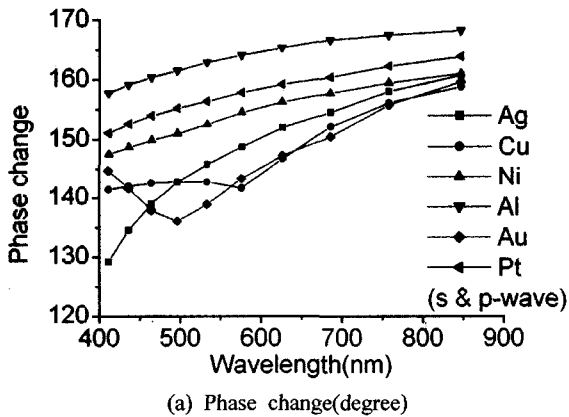


그림 5. Phase change of s & p-wave on reflection according to the wavelength (when the incidence angle is 0°).

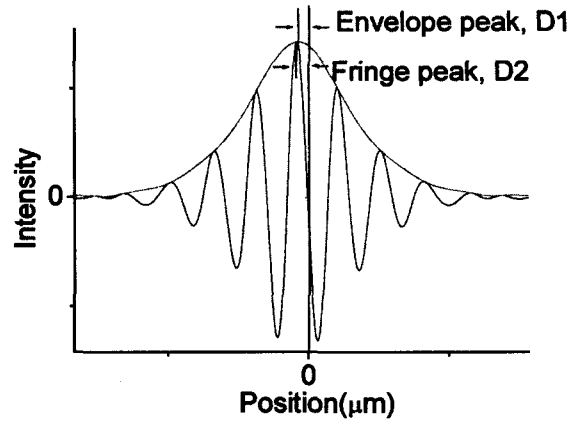


그림 6. Movement of envelope peak & fringe peak due to phase change on reflection.

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

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	3.61 nm
Molybdenum	9.57 nm	0.44 nm	10.01 nm

인하여 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(fringe peak)이 이동함을 볼 수 있다.

V. 검증 실험

몇 가지 금속 시편에 대해 백색광간섭무늬를 얻어 봤을 때 반사시 위상 변화로 인해 간섭무늬의 모양이 실제로 어떻게 바뀌었는지를 알아 보았다. 사용한 시편은 E-Beam Evaporator를 사용해 금속을 약 800 nm 정도 증착하여 만들었다. 재질은 백금(Pt)과 은(Ag)이었다. 실험을 통해 얻은 간섭 무늬로는 광 경로차(OPD)가 0인 지점을 알 수는 없기 때문에 간섭 무늬의 가시도 정점(envelope peak)과 위상 정점(fringe peak)이 반사시 위상 변화로 인해 어느 정도 이동하였는지를 알아 보았다.

실험 결과, 그림 7에서 보듯이 가시도 정점(Envelope peak)과 위상 정점(Fringe peak)의 차이 D가 백금(Pt)시편의 경우에는 3.24 nm 정도의 차이가 나고 은(Ag) 시편일 경우에는 7.66 nm 정도의 차이가 남을 확인 할 수 있었다.

이를 시뮬레이션 결과와 비교해 보면 표 2와 같다. 표 2에서 보듯이 실험결과와 시뮬레이션 결과가 어느 정도 일치함을 확인할 수 있었다.

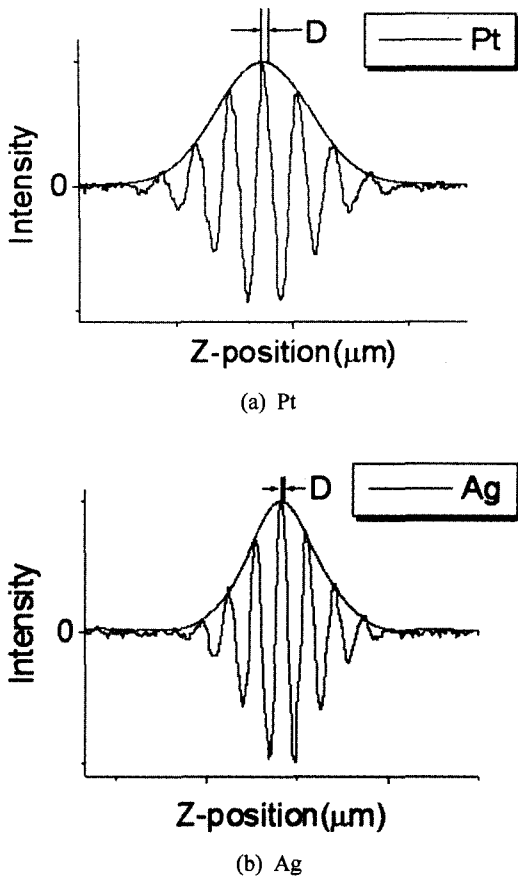


그림 7. The interference fringe when PZT step length is 1 nm.

표 2. Comparison of experiment and simulation of coherent envelope position shift due to phase change on reflection

Material	Theoretical result(D1-D2)	Experimental result(D)
Pt	3.61 nm	3.24 nm
Ag	8.19 nm	7.66 nm

VI. 결 론

본 논문에서는 백색광주사간섭계에서 백색광의 두 편광성분, 수직 편광성분과 수평 편광성분을 고려한 간섭 무늬식을 제안하고, 이를 이용해 금속 물질의 반사시 발생하는 위상 변화에 의한 영향을 가상의 백색광주사간섭계(VWSI)로 시뮬레이션을 했다. 시뮬레이션 결과 금속 물질의 반사시 발생하는 위상 변화로 인하여 간섭무늬의 가시도 정점과 위상 정점이 이동함을 알았다. 각 금속별로 가시도 정점과 위상 정점이 이동하는 정도가 달랐다. 특히, 은의 경우에는 반사시 위상 변화로 인하여 가시도 정점이 21.17 nm, 위상 정점이 12.95 nm 움직였다. 시뮬레이션의 결과를 검증하기 위한 방법으로 백금 시편과 은 시편의 경우 반사시 위상 변화에 의한 간섭 무늬정점의 위치 변화를 알아보았다. 그 결과 가시도 정점과 위상 정점의 위치 차이가 백금 시편일 경우 3.24 nm, 은 시

편일 경우 7.66 nm로 시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 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 간섭무늬의 정점의 위치가 틀려져 측정결과가 달라지게 된다. 따라서 현재 백색광주사간섭계에서 금속시편을 측정할 경우 반사시 발생하는 위상 변화에 대한 영향을 미리 고려해 보상을 해 주어야 한다. 금속 시편의 높이를 측정했을 경우 실제 시편의 높이가 h 임에도 불구하고 얻게 되는 측정값은 $h + \Delta h$ 가 된다. 이때 Δh 는 주로 앞에서 설명한 반사시 발생하는 위상 변화로 인해 생기는 오차 값이 되는 것이다. 따라서 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 Δh 를 미리 알고 보상해주게 되면 실제 시편의 높이 h 에 가까운 값을 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] G. Kino and S. Chim, "The Mirau correlation microscope," *Appl. Opt.*, 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 envelope 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," *Appl. Opt.*, 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," *Appl. Opt.*, 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," *Appl. Opt.*, 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] J. F. Biegen, "Determination of the phase change on reflection from two-beam interference," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 21, pp. 1690-1692, 1994.
- [13] Young-sik Ghim, "Virtual White-light Scanning Interferometer," Master's thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2003.
- [14] Michael Bass, Eric W. Van Stryland, David R. Williams, William L. Wolfe, "HANDBOOK OF OPTICS," McGRAW-HILL, INC., SECOND EDITION, VOLUME II, 35.13-35.20, 1995.

Phase change on reflection in a white-light interferometer as polarization is changes

Young-Sik Ghim and Seung-Woo Kim[†]

*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
Science Town, Daejeon, 305-701, KOREA*

[†]*E-mail: swk@kaist.ac.kr*

(Received March 22, 2004, Revised manuscript May 14, 2004)

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

OCIS Codes : 120.5700, 160.4760, 180.5810, 180.6900, 350.5030.