

가상의 백색광 주사 간섭계의 개발

Virtual White-light Scanning Interferometer

김영식*, 김승우

한국과학기술원 기계공학과 정밀측정 연구실

*gauss@kaist.ac.kr

산업이 고도로 발달함에 따라 생산 부품의 소형화와 정밀도가 크게 요구되고 있다. 특히 최첨단 제품인 반도체와 광통신 부품, 그리고 광학 부품 등에 있어 이러한 추세가 두드러지게 나타나고 있다. 이에 따라 이들 부품들에 대한 제조 공정 못지 않게 초정밀 측정에 대한 관심도 꾸준히 늘고 있다. 뿐만 아니라 요즘 새롭게 부각되고 있는 생명 공학 기술(Bio-Technology)과 나노기술(Nano-Technology)을 이용한 바이오 센서나 칩, 그리고 타소 나노 튜브 등을 제작하거나 검사를 할 때도 초정밀 측정을 필요로 하게 된다. 따라서, 현재의 기술 발전의 추세로 보면 초정밀 측정에 대한 수요는 수 년안에 산업 곳곳에서 많이 필요로 하게 될 것이다. 초정밀 측정 기술 중에서도 백색광을 이용한 백색광 주사 간섭 법^(1,2)은 나노미터(nm)의 수직 분해능으로 수 밀리미터(mm) 크기의 형상까지도 측정할 수 있을 뿐만 아니라 측정 속도도 빠르기 때문에, 최근 초정밀 형상 측정에 각광을 받고 있다. 백색광 주사 간섭계는 측정면의 위치를 광축 방향으로 압전 구동기(piezoelectric actuator)와 같은 정밀 구동기를 이용해 주사 이동시키면서, 얻어진 간섭 무늬의 정점을 검출함으로써 해당 측정 점의 높이를 구하게 된다. 백색광 주사 간섭계에서 측정 점의 높이를 구하는 방식이 간섭 무늬의 정점을 찾아 구하기 때문에 간섭 무늬의 정점의 위치가 중요하게 된다. 보통 간섭 무늬의 정점의 위치는 광 경로차(OPD : Optical Path Difference)에 의해서만 결정된다고 생각을 하여 측정 점의 높이를 구하고 있는데 측정 물체의 재질이 금속이고 단차가 매우 작을 경우에는 반사시 발생하는 위상 변화에 의한 오차^(3,4)를 무시할 수 없게 되어 수십에서 수백 나노미터의 초정밀 부품의 측정에 있어 측정 오차를 야기시키고 있다. 실제로 반도체 공정이나 초정밀 가공 부품에 많이 쓰이는 금, 은, 알루미늄, 크롬등의 금속은 약 10 ~ 30 nm의 측정 오차를 유발한다. 또한 측정 물체가 기울어지게 되면⁽⁴⁾ 측정 광속과 기준 광속이 지나는 광 경로가 달라져 이로 인해 오차가 발생하게 된다. 이렇듯 백색광 주사 간섭계에서 발생하는 있는 금속 단차 시편에 대한 문제나 기울어진 시편에 문제 등은 아직도 많은 연구를 필요로 하고 있다. 또한 위와 같은 여러 가지 문제점들을 실험을 통해 알아내기에는 많은 어려움과 노력이 든다. 그래서 실제 백색광 주사 간섭계와 동일한 시뮬레이션 프로그램인 가상의 백색광 주사 간섭계를 만들어 앞에서 언급한 문제점들에 대한 해결책을 제시해 보려고 한다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 백색광 주사 간섭계에서 간섭무늬에 영향을 미치는 주요 변수들만을 모델링하여 실제 실험 조건과 같은 상황을 주었을 때 간섭무늬가 백색광 주사 간섭계와 동일하게 나오는 가상의 백색광 주사 간섭계(Virtual-WSI)를 제안하고자 한다. 가상의 백색광 주사 간섭계는 실제 실험 상황에서와 같은 동일한 조건을 프로그램 상에서 시뮬레이션 할 수 있도록 구성되어 있고, 뿐만 아니라 실험에서 하기 힘든 실험들을 대신 수행하여 어떤 결과가 나오는 지를 예측할 수 있도록 하였다. 백색광 주사 간섭계에서 간섭무늬는 백색광의 넓은 주파수 폭과 간섭 렌즈에 입사되는 빛의 각도에 따라 영향을 받아 식 1처럼 주어진다.

$$I(z)^{N.A., \Delta k} = I_0 \int_{k_c - \frac{\Delta k}{2}}^{k_c + \frac{\Delta k}{2}} F(k) \int_0^{\theta_0} P(\theta) [1 + \gamma \cos(2k(h-z) \cos \theta + a(\theta, k))] \sin \theta d\theta dk \quad \text{식 1}$$

여기서, k 는 전파 상수, k_c 는 중심 전파 상수, Δk 는 주파수 대역폭, θ 는 입사각, γ 는 가시도, h 는 측정 표면의 형상, z 는 측정물의 광축 방향 위치, I_0 는 빛의 평균 강도, $F(k)$ 는 광원의 주파수 분포함수, $P(\theta)$ 는 입사각에 따른 조명 특성 함수이다. 식 1에서 보듯이 간섭무늬 형성에 영향을 미치는 주요 변수로는 대

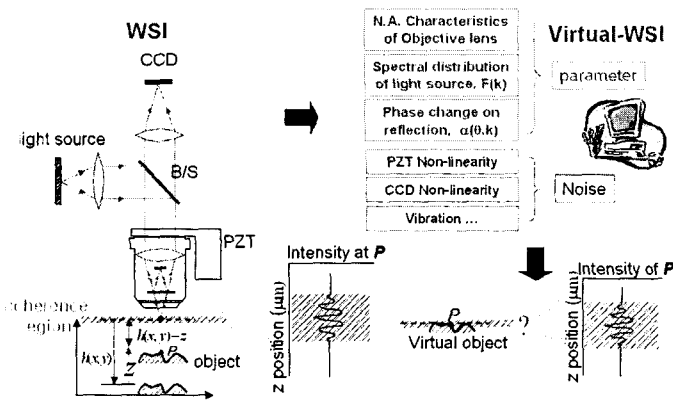


그림 1 가상의 백색광 주사 간섭계의 제안

와 같이 된다.

물렌즈의 N.A. 특성 (θ)과 광원의 주파수 특성 ($F(k)$), 그리고 측정 물체에서 생기는 반사시 위상 변화 ($\alpha(\theta, k)$)가 있다. 각 변수에 대한 모델링은 다음과 같다. 대물렌즈의 N.A. 특성은 $N.A. = n_0 \sin \theta_0$ 에서 매질이 공기 중이라고 가정을 하여 ($n_0 = 1$) 각 렌즈의 N.A.는 입사각 θ_0 의 함수로 모델링 된다. 그리고 $P(\theta)$ 는 입사각에 상관없이 일정하다는 가정을 하여 모델링을 하였다. 그리고 광원의 주파수 분포 함수 $F(k)$ 는 식 1에서 렌즈의 N.A.가 작다고 가정을 하면 입사각에 대한 적분식이 무시되어 식 2

$$I(z)^{\Delta k} = I_0 \int_{k_c - \frac{\Delta k}{2}}^{k_c + \frac{\Delta k}{2}} F(k) dk + I_0 \gamma \int_{k_c - \frac{\Delta k}{2}}^{k_c + \frac{\Delta k}{2}} F(k) \cos(2k(h-z) \cos \theta + \alpha(k)) dk \quad \text{식 2}$$

(a) (b)

따라서 식 2에서 배경광 성분(a)을 없애고 간섭 성분(b)만 따로 뽑아내 이를 FFT(Fourier Fast Transform)를 하게 되면 $F(k)$ 를 구할 수 있다. 따라서 N.A.가 작은 간섭 렌즈를 통해 간섭무늬를 얻고 이를 분석해 실험적으로 $F(k)$ 에 대한 모델링을 하였다. 그리고 반사시 위상 변화 $\alpha(\theta, k)$ 는 빛의 편광 성분⁽⁵⁾에 따라 고려를 하여 모델링을 하였다. 그 결과 간섭 무늬식이 식 1에서 식 3처럼 바뀌게 된다.

$$I(z)^{N.A., \Delta k} = I_0 \int_{k_c - \frac{\Delta k}{2}}^{k_c + \frac{\Delta k}{2}} F(k) \int_0^{\theta_0} P(\theta) \left[1 + \frac{\alpha_p \beta_p}{\alpha_p^2 + \beta_p^2 + \alpha_s^2 + \beta_s^2} \cos(2k(h-z) \cos \theta - (\phi_p - \varphi_p)) + \frac{\alpha_s \beta_s}{\alpha_p^2 + \beta_p^2 + \alpha_s^2 + \beta_s^2} \cos(2k(h-z) \cos \theta - (\phi_s - \varphi_s)) \right] \sin \theta d\theta dk \quad \text{식 3}$$

여기서, α_p, β_p 는 측정 면과 기준 면에서의 p파의 반사율, ϕ_p, φ_p 는 측정 면과 기준 면에서의 p파의 반사시 위상 변화, α_s, β_s 는 측정 면과 기준 면에서의 s파의 반사율, ϕ_s, φ_s 는 측정 면과 기준 면에서의 s파의 반사시 위상 변화가 된다. 즉 위와 같이 각 변수에 대해 모델링을 한 후 시뮬레이션 프로그램인 가상의 백색광 주사 간섭계(Virtual White-light Scanning Interferometer)를 개발하였다.

참고문헌

- [1] P. de Groot and L. Deck, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain," J. Mod. Opt., vol. 42, no. 2, pp. 389-401.(1995)
- [2] 강민구, "백색광 주사 간섭계를 이용한 표면 형상 측정 알고리즘에 관한 연구", 박사 학위 논문, 한국과학기술원 기계공학과
- [3] 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.(May.2001)
- [4] 박민철, "백색광 주사 간섭계의 측정정밀도 개선에 대한 연구", 박사 학위 논문, 한국과학기술원 기계공학과
- [5] 김기홍, "백색광 주사 간섭법을 이용한 박막의 두께 형상 측정," 박사 학위 논문, 한국과학기술원 기계공학과