산업계 수요에 따른 3D 형상 광계측 기술 연구

DOI: 10.3938/PhiT.27.018

주 기 남

Optical Measurement Technologies Based on Industrial Demands

Ki-Nam JOO

Recently, the trend in optical measurement technologies has been to focus on industrial demands for technologies to measure various measurement quantities and to improve the performances while not much effort has been spent to develop novel fundamental principles. In this article, the specific 3D optical surface profile measurement technologies used in industry will be introduced, and some strategies for satisfying industrial demands will be provided. Moreover, relevant research works will be explained and discussed.

들어가면서

최근 4차 산업 시대(Industry 4.0)가 도래하면서 산업계에서는 무인화(unmanned) 및 인공지능화(artificial intelligence)가 진행되고 있다. 4차 산업은 비단 IT 기술(information technology)이 접목된 산업 분야만을 의미하는 것이 아니라, 전체 산업 전반에 걸쳐 효율성이 높고 안정성이 높은 방향으로 기술이 진보되고 있음을 나타내며, 기존의 제조 산업 분야에 있어서도 제조 공정의 자동화(automation)를 넘어서 제품의 품질을 보장하고 이에 대한 대처가 가능한 시스템화를 추구한다. 이러한 산업적 변화의 흐름에서 광계측 기술(optical measurement technology)은 산업계의 무인화, 지능화를 위한 정밀 센서 및 제품의 검사, 측정 기술의 일환으로 과거부터 매우 중요하게 활용되어 왔으며, 기존의 2차원 이미징을 통한 검사 측정 기술

에서 현재에는 3차원 이미징 기술이 산업계에 널리 보급되어 있고 이에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다.

본 글에서는 현재 산업계에서 검사, 측정 기술로 널리 활용되고 있는 광계측 기술과 이러한 광계측 기술의 한계를 보완하기 위한 연구를 소개하도록 한다. 산업계에서 활용되고 있는 광계측 기술은 기술 측면이나 응용 측면에서 범주가 너무 넓기 때문에, 본 글에서는 표면 형상 측정 분야에 대해 응용되고 있는 미세 광계측 기술에 대해 한정하고 산업계 수요에 따른 각 기술들의 개선 연구에 대해 언급한다. 또한, 실제로 미세 광계측 기술 분야에서도 다양한 원리의 기술들이 존재하기 때문에, 본 글에서는 이들 중에 특정 기술에 대한 내용만을 포함함을 미리 밝힌다.

3차원 미세 표면 형상 측정 기술

현재 산업계에서 널리 활용되고 있는 3차원 미세 표면 형상 측정 기술로는 대표적으로 백색광 주사 간섭계(white light scanning interferometry)와 공초점 주사 현미경(confocal scanning microscopy)을 들 수 있다. 이들 방법은 측정 시편의 3차원 형상을 측정함에 있어 광축 방향의 주사(scanning) 방식을 취함으로써, 기존의 단파장 광원 기반의 간섭계가 가지는 모호성(ambiguity)을 해결할 수 있는 장점을 가지기 때문에 표면의 단차 및 다양한 패턴을 측정할 수 있다. 백색광 주사 간섭계는 광원의 저간섭성(low coherence)을 이용하여 간섭 신호(interference signal)를 획득하고, 측정된 간섭 신호의 가시도(visibility)의 크기 및 위상(phase)을 통해 3차원 형상을 측정한다. 한편, 공초점 주사 현미경은 시편의 위치가 대물렌즈의 초점(focus)에 도달할 때 반사되는 광의 공초점(confocal) 위치에서 광량을 획득하여 시편의 높이 정보를 획득하며, 3차원 측정을 위해 마이크로 렌즈 어레이(micro-lens array)나 핀홀 어레이(pinhole array, Nipkow disk)와 같은 장치를 이용한다. 그러나 이러한 장치들은 개발 및 제조에 있어 고가이기 때문에 전체 시스템 비용이 증가하는 한계가 있다. 본 글에서는 앞서 설명한 3차원 및 표면 형상 측정 기술 중의 하나인 백색광 주사 간섭계의 성능 개선에 대한 산업적 수요와 고가

저자약력

주기남 교수는 한국과학기술원에서 광계측 전공으로 기계공학 박사를 취득하였으며, 네덜란드 델프트 공대에서 박사후 연구원 과정, Mitutoyo RCE(유럽연구소)에서 연구원을 거친 후, 2011년부터 조선대학교 광기술공학과에 재직 중이다.(knjoo@chosun.ac.kr)

Fig. 1. Various types of the substrate and their development trend.

의 공초점 주사 현미경을 대체하기 위한 새로운 측정 방식의 패턴조사 현미경에 대해 설명한다.

1. 백색광 주사 현미경의 개선

백색광 주사 간섭계는 현재 3차원 형상 측정 분야에 널리 활용되고 있으며, 최근 들어 그림 1과 같이 실리콘 웨이퍼(silicon wafer) 및 사파이어 웨이퍼(sapphire wafer), 플렉서블 필름(flexible film)과 같은 반도체, 디스플레이 분야의 기저판(substrate)의 형상 및 두께 측정에 응용되고 있다. 이는 광원의 저간섭성을 이용하여 기저판의 윗면과 아랫면에서 발생하는 간섭 신호를 분리할 수 있기 때문이며, 백색광 주사 간섭계는 측정되는 신호들의 가시도 및 위상 정점(peak)을 검출하여 기저판의 3차원 형상 및 광학적 두께를 측정할 수 있는 장점을 가진다.

이때, 산업계에 응용되고 있는 기저판의 측정 및 검사에 있어 중요한 요소는 기본적인 3차원 형상 측정에 더하여 **기저판 전체 면적에 대한 측정의 가능성, 기저판의 3차원 형상 및 두께, 물질의 균일도**이다. 또한, 이와 더불어 **광계측 시스템의 측정 속도 개선**에 대한 수요가 지속적으로 제기되고 있다.

(1) 기저판 전체 면적에 대한 3차원 형상, 두께 측정 - 6 자유도 정합 간섭계의 도입

일반적으로 기저판의 형상 및 두께는 횡방향 구동이 가능한 점측정 프로브를 통해 측정이 가능하다. 그러나 이 경우, 공간 분해능(spatial resolution)이 낮을 뿐더러 측정 시간이 길어지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 3차원 형상 측정을 위한 광간섭계(optical interferometry)의 도입은 필수적이지만, 기저판의 크기가 커짐에 따라 광간섭계의 크기도 커져야 하는 문제가 발생한다. 또한 전체 면적을 한 번에 측정하는 경우, 공간 분해능을 개선하는 것 역시 물리적으로 한계를 가진다. 이러한 기존 방법의 한계를 극복하기 위해 제안된 방법이 정합

간섭계(stitching interferometry)로, 정합 간섭계는 기저판의 임의의 위치에서 비교적 작은 시야각(field of view, FOV)으로 형상과 두께를 측정하며, 횡방향의 구동을 통해 측정된 결과들을 정합하여 전체 기저판의 형상 및 두께를 복원한다. 정합 간섭계는 기존의 측정 방식에 비해 비용적인 측면이나 측정 정밀도, 공간 분해능 측면에서 매우 효율적이지만 성공적인 정합을 위해서는 측정된 영역들 상의 기하학적 관계가 정확해야 하므로, 기본적인 정합 이론과 더불어 측정 영역들 사이에서 발생할 수 있는 정렬 오차들을 보정해야 할 필요가 있다. 최근 이러한 정합 간섭계에서 정렬 오차를 보정하기 위한 6 자유도(degree of freedom) 정합 알고리즘이 보고되었고, 이를 통해 실리콘 웨이퍼의 3차원 형상, 두께를 측정한 결과가 제시되었다. 측정 원리로는 백색광 주사 간섭계를 이용하였고 대 영역 실리콘 웨이퍼의 3차원 형상 및 두께 측정을 수행하기 위해 근적외선 광원이 활용되었다.^[1,2]

그림 2는 근적외선을 이용한 백색광 주사 정합 간섭계의 광학 구성과 이를 통한 측정 결과를 나타낸다. 간섭계는 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer) 타입으로, 광원으로는 실리콘 웨이퍼에 투과 특성을 보이는 1 μm 대역의 근적외선(near infrared, NIR) 광원이 사용되고, 종축 방향과 횡축 방향의 구동을 위해 3축 모터 구동 스테이지가 장착되어 있다. 구성된 간섭계에서는 성공적인 정합을 위해 횡방향 구동에 따라 측정된 결과들이 일정 부분 겹침 영역이 발생하도록 측정이 수행되며, 이들 결과들을 정합하여 전체 웨이퍼의 형상을 복원하게 된다.

정합(stitching)은 작은 개구로 측정한 형상 데이터들의 서로 겹치는 영역을 동일하게 맞춤으로써 전체적인 3차원 형상 데이터를 생성시키는 기술로, 일반적으로 3차원 형상 정합 방법에는 겹침 영역에 포함되는 몇 개의 높이값을 추출하여 이러한 특징점들을 일치시키는 방법과, 겹침 영역의 평면(plane) 정보를 가지고 두 데이터 간의 차이를 최소로 만드는 방법이 있다.^[2] 이 중에서 형상 오차로부터 비교적 둔감한 겹침 영역의 평면 정보로 3차원 형상을 정합하는 방법이 비교적 보편적으로 이용되며, 기본적인 3 자유도 정합 방법과 더불어 횡방향 구동 오차를 보정하기 위한 XY 위치오차 및 광축(Z) 기준 회전오차까지 보정하는 6 자유도 정합을 통해 보다 정밀한 측정이 가능해진다.

먼저, 3 자유도 정합 방법에서는 그림 3(a)와 같이 측정된 3차원 형상 데이터들을 평면으로 가정하고 이로부터 X축 기울기

REFERENCES

- [1] M. S. Choi, H. M. Park and K. N. Joo, Rev. Scient. Instrum. **87**, 046106 (2016).
- [2] H. M. Park, M. S. Choi and K. N. Joo, J. Korean Soc. Precis. Eng. **34**, 107 (2017).

Fig. 2. Stitching white light scanning interferometry and its measurement result.

Fig. 3. (a) 3 DOF stitching and (b) compensation of position and rotation errors for 6 DOF stitching.

(X-tilt), Y축 기울기(Y-tilt), 높이 방향 옅셋(Z-piston)인 3개의 변수값을 추출한다. 그리고 인접한 3차원 형상 데이터들과의 겹침 영역에서 추출된 이러한 3개의 변수값들을 서로 동일하게 맞추므로써 정합을 수행한다. 일반적으로 간섭계에서 측정된 형상 데이터(Z)는 평면으로 간주되어 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = aX + bY + c \quad (1)$$

여기서 a , b , c 는 각각 X축 기울기, Y축 기울기, 높이 방향 옅셋을 나타낸다. 그러면 서로 근접하여 겹쳐져 있는 임의의 m 평면(Z_m)과 n 평면(Z_n)은 다음과 같은 수식으로 각각 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_m &= a_m X + b_m Y + c_m \\ Z_n &= a_n X + b_n Y + c_n \end{aligned} \quad (2)$$

이때, 두 평면의 겹치는 영역은 Z_m 과 Z_n 에서 각각 $Z_{m,n}$ 과

$Z_{n,m}$ 으로 나타낼 수 있고, 이들 역시 식 (1)과 같은 방법으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{m,n} &= a_{m,n} X + b_{m,n} Y + c_{m,n} \\ Z_{n,m} &= a_{n,m} X + b_{n,m} Y + c_{n,m} \end{aligned} \quad (3)$$

정합 과정에서는 두 평면 상의 겹침 영역이 서로 같은 평면이 되도록 식 (3)에서의 기울기와 옅셋이 동일하게 되도록 조정되고, 그때 발생하는 기울기 변화와 옅셋 변화는 식 (2)에서 표현한 전체 평면의 기울기와 옅셋에 적용되어 결국 정합을 위한 두 평면의 방정식(Z_m , Z_n)은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z'_m &= a'_m X + b'_m Y + c'_m \\ Z'_n &= a'_n X + b'_n Y + c'_n \end{aligned} \quad (4)$$

그러면 겹치는 영역의 임의의 한 점에 대하여 식 (2)-(4)에서 정의한 정합 이전 및 이후의 평면의 기울기들과 옅셋들 간에는 식 (5)와 같은 관계를 만족한다. 실제 측정된 3차원 형상 데이터에서 식 (2)와 (3)에서 표현되는 기울기들과 옅셋은 평면 맞춤(plane fitting)을 통해 추출할 수 있기 때문에, 겹침 영역에서의 측정점

들을 통해 행렬을 이용하여 식 (5)에서 정합을 위한 기울기 변화 및 옅셋 변화를 계산할 수 있고, 이를 통해 식 (4)의 정합을 위한 기울기 및 옅셋을 추출하여 정합이 수행된다.

$$\begin{aligned} (a'_m - a'_n)X_{sj} + (b'_m - b'_n)Y_{sj} + (c'_m - c'_n) \\ = (a_{n,m} - a_{m,n} + a_m - a_n)X_{sj} \\ + (b_{n,m} - b_{m,n} + b_m - b_n)Y_{sj} \\ + (c_{n,m} - c_{m,n} + c_m - c_n) \\ = \delta_{m,n}^a X_{sj} + \delta_{m,n}^b Y_{sj} + \delta_{m,n}^c \end{aligned} \quad (5)$$

그러나 이러한 3 자유도 정합 방법은 기본적으로 횡방향의 좌표가 비교적 정확하다는 가정에서 진행되기 때문에, 작은 개구로 측정되는 형상들 간의 횡방향 구동 오차가 포함되는 경우 정합이 수행될 수 없다. 또한 측정시 시편의 광축 방향 회

Fig. 4. (a) 3 DOF stitching result and (b) 6 DOF stitching result.

전이 발생하는 경우에도 정합 수행이 오차를 유발하게 된다. 이를 극복하기 위해 정밀한 횡방향 구동 스테이지가 필요하나 이는 시스템 비용을 증가시키는 요인이다. 효율적이고 정밀한 3차원 형상 정합을 위해 횡방향 구동 오차 및 회전 오차를 보상한 6 자유도 정합법은 그림 3(b)와 같이 횡방향 위치 및 회전에 따른 근접한 평면들 각각의 겹침 영역들 간의 차이가 최소가 되는 최적의 횡방향 위치와 회전 각도를 추출한다. 이때, 초기에 겹치는 2개의 평면은 주어진 XY 좌표를 바탕으로 겹침 영역이 설정되고, 겹침 영역에 해당하는 2개의 평면상의 데이터들의 높이 차이는 식 (6)과 같이 RMS(root mean square) 값으로 계산되고 최소화된다. 이때, 각각의 평면들의 XY 기울기와 Z축 오프셋은 제거된다. 식 (6)에서 $F(X, Y, \theta_z)$ 는 XY 위치 오차 및 Z축 회전 오차를 보상하기 위한 목적 함수로 이용되어, 구동기의 사양에 따라 오차의 범위가 결정되면, 그 오차 범위 내에서 값이 최소가 되도록 최적화가 이루어지고 이를 통해 각 평면의 횡방향 좌표가 재설정된다. 그러면 겹치는 영역의 좌표가 일치하는 경우 $F(X, Y, \theta_z)$ 가 최소가 되기 때문에 XY 위치 오차와 Z축 회전 오차를 보상할 수 있다.

$$F(X, Y, \theta_z) = \Sigma (Z'_{m,n} - Z'_{n,m})^2 \quad (6)$$

Table 1. Summary of the measurement quantities of wafer measurements shown in Fig. 4.

Profile	Combination of measurement quantities
Front surface, L2	P2
Optical thickness, Nt	P3-P2
Geometrical thickness, t	L1-L2-L3 = P1-P2-(P4-P3)
Group refractive index, N	$Nt/(L1-L2-L3)$ $=(P3-P2)/[P1-P2-(P4-P3)]$
Rear surface	$L2+t=P1-(P4-P3)$

여기서 $Z'_{m,n}$ 과 $Z'_{n,m}$ 는 m과 n 평면의 겹침 영역($Z_{m,n}$ 과 $Z_{n,m}$)에서 X, Y 기울기와 Z축 오프셋을 각각 제거한 평면을 나타낸다. 각 평면들의 횡방향 좌표가 결정되면, 이후에 3 자유도 정합이 수행되고 이를 통해 전체 형상을 복원할 수 있다. 그림 4는 백색광 주사 간섭계 기반 3자유도 정합 및 6 자유도 정합을 이용한 실리콘 웨이퍼의 측정 결과를 나타낸다. 100 mm 직경의 실리콘 기저판 앞면에 대해 측정된 100개(10×10)의 단일 개구(18 mm 직경) 형상 데이터에 대해 그림 4(a)는 횡축 방향 구동기의 좌표를 바탕으로 3 자유도 정합을 수행한 결과를 보여준다. 그러나 구성한 정합 간섭계에 사용된 횡축 방향 구동기는 정밀 제어를 수행하지 않았기 때문에 횡방향 구동 오차를 포함하고 있고 이로 인해 정합 시 웨이퍼의 가장자리 부분이 부드럽게 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 횡방향 구동기의 횡방향 오차를 보상하기 위해 6 자유도 정합 방법을 적용하면, 그림 5(b)와 같이 기저판의 전체 영역에 대한 양면의 3차원 형상 및 두께를 정밀하게 측정할 수 있다.

(2) 기저판 물질 균일도 측정 - 백색광 주사 간섭계를 이용한 측정 원리

일반적으로 백색광 주사 간섭계는 공간섭을 이용하여 기하학적인 길이(geometrical length)가 아닌 물질의 굴절률(refractive index)을 고려한 광학적 길이(optical length)를 측정하기 때문에, 간섭계에서 측정된 결과에서 기하학적 길이를 도출하기 위해서는 물질의 굴절률을 미리 알아야 한다. 그래서 측정하는 기저판의 물질 정보를 모르는 상황에서는 기저판의 기하학적 두께를 측정하는 것이 불가능하며, 일반적인 굴절률을 알고 있더라도 제조상에 발생하는 굴절률 변화로 인하여 기저판 전체에서 물질의 균일도는 확보하기 어렵다. 그리고 이로 인해 기저판의 두께 분포 역시 정밀하게 측정하는 것에 한계를 가진다.

그러나 백색광 주사 간섭계의 측정 원리를 이용하여 그림 5와 같은 광학 구성과 측정 원리를 도입하면, 기저판의 3차원 형상, 기하학적인 두께와 더불어 물질의 굴절률 분포를 측정할

Fig. 5. Simultaneous measurement of 3D surface, geometrical thickness and group refractive index profile by using white light scanning interferometry.

Fig. 6. (a) Reconstruction of 3D surface profile of the Si wafer and the measurement mirror, (b) the front surface, (c) rear surface of the wafer, (d) measurement mirror through the wafer in the region of B, (e) the surface profile of the measurement mirror in the region of A, (f) the optical thickness, (g) the geometrical thickness and (h) the group refractive index of the wafer.

수 있다.^[3] 간섭계는 마이켈슨 간섭계로 구성되며, 측정 부분은 기저판과 측정 거울의 조합으로 이루어져 있다. 이때 측정 영역은 그림 5와 같이 기저판이 없는 A 영역과 기저판이 삽입되어 있는 B 영역으로 나눌 수 있으며, 각각의 영역에서 측정되는 간섭 신호를 해석하여 기저판의 두께와 균굴절률을 측정할 수 있다. A 영역에서는 측정 거울의 위치에 해당하는 1개의 간섭 신호가 획득되며, B 영역에서는 기저판의 앞, 뒷면과 측정 거울의 위치에 따른 총 3개의 간섭 신호가 획득된다. 그러면 측정되는 이들 신호는 표 1과 같은 기하학적인 관계를 가

지고 있음을 알 수 있으며, 이들 관계를 통해 기저판의 기하학적 두께와 더불어 물질의 균굴절률 분포를 측정할 수 있다. 그림 6은 NIR 영역의 광원을 이용하여 실리콘 기저층을 측정한 결과를 나타낸다.

(3) 백색광 주사 간섭계의 속도 개선-서브샘플링

백색광 주사 간섭계는 기본적으로 광축 방향의 주사를 통해 간섭 신호를 획득하기 때문에, 이에 따른 측정 속도에 한계를 가진다. 이는 광축 방향의 주사를 통해 간섭 신호를 획득해야 한다는 조건으로 샘플링 이론(sampling theory)에 의해 측정 속도가 크게 제한되기 때문이다. 그러나 최근에는 각 측정 대상물의 특징에 따라 시스템을 최적화하는 연구를 통해 이러한 한계를 극복하고 있다. 특히, 측정 대상이 적층형 웨이퍼(stacked wafer)인 경우, 수십 mm에 해당하는 각 층별 볼(ball)과 범프(bump) 등의 높이, 형상 검사와 웨이퍼의 패턴 측정을 실시간으로 수행하기 위해, 고속 CMOS 카메라의 도입과 GPU 등을 활용한 실시간 측정 알고리즘 구현 연구가 진행되었다.^[4] 또한, 측정 신호의 한 주기 내에 두 점 이상을 샘플링해야 원래의 신호를 복원할 수 있다는 Nyquist 샘플링 조건을 벗어난 서브 샘플링 기법(sub-sampling technique)을 활용하여, 측정 속도를 개선하는 연구가 진행되었다.^[5,6]

서브 샘플링 방법은 백색광 주사 간섭계에서 Nyquist 샘플링 이론에 근거한 최대 측정 간격보다 더 큰 간격으로 간섭 신호를 획득한다. 이 경우, 획득한 간섭 신호

는 원래의 간섭 신호와 비교하여 왜곡되는 현상이 발생하지만, 물리적으로 광경로 차이가 0에 해당하는 위치는 변화하지 않기 때문에 포락선 점두 검출 방법과 위상 정점 검출 방법 등을 이

REFERENCES

- [3] H. J. Lee and K. N. Joo, Meas. Sci. Tech. **25**, 075202 (2014).
- [4] J. You, Y. J. Kim and S. W. Kim, Int. J. Nanomanuf. **8**, 31 (2012).
- [5] P. de Groot and L. Deck, Opt. Lett. **18**, 1462 (1993).
- [6] K. N. Joo, Appl. Opt. **52**, 8644 (2013).

용하여 측정 대상물의 높이 정보를 추출할 수 있는 가능성을 가진다. 게다가 같은 조건에서 서브 샘플링 방법을 이용하여 측정 간격을 증가시키면 측정 시간을 단축할 수 있다.

백색광 주사 간섭계에서 서브 샘플링 방법의 적용 여부는 측정 알고리즘에 따라 결정된다. 일반적으로 백색광 주사 간섭계의 측정 알고리즘인 포락선 침투 검출 방법과 위상 정점 검출 방법은 무게 중심(center of gravity), 위상 천이(phase shifting), 푸리에 변환(Fourier transformation) 등을 이용하여 구현되고 있는데,^[6] 이 중에서 무게 중심과 위상 천이를 이용한 방법은 서브 샘플링 기법을 적용하기에 무리가 따른다. 우선, 무게 중심을 이용한 방법은 간섭 신호의 포락선 침투 검출 방법에 응용이 되는데, 획득한 간섭 신호의 위치에 따른 간섭 신호의 크기를 적분하여 간섭 신호가 가장 크게 나타나는 위치를 찾아내는 방법이다. 그러나 무게 중심을 이용하기 위해서는 측정된 간섭 신호가 원래의 간섭 신호와 비슷한 모양을 유지해야 한다. 서브 샘플링에 의해 획득한 간섭 신호가 심하게 왜곡될 경우, 무게 중심에 의해 계산되는 포락선 침투 위치는 심한 경우 mm 이상의 오차를 유발한다. 한편, 위상 천이 방법은 백색광 주사 간섭계의 간섭 신호를 기존의 위상 천이 방법과 같이 정해진 위상 변화에 따라 획득하여 높이를 추출하는 방법으로 위상 정점 검출 방법에 이용된다. 그러나 위상 천이 방법은 정해진 위상 천이에 따라 간섭 신호를 획득하기 때문에 측정 간격이 제한된다. 즉, 서브 샘플링을 적용할 경우, 정해진 측정 간격 이외에는 알고리즘 적용이 불가능하다. 이에 반해, 푸리에 영역 해석(Fourier domain analysis, FDA) 방법과 푸리에-역푸리에 변환(Fourier-inverse Fourier transformation)으로 구분되는 푸리에 변환에 근거한 측정 방법은 위의 두 방법에 비해 서브 샘플링 기법을 적용하기에 유연성을 가지고 있다.^[6]

푸리에 영역 해석법^[5]은 P. de Groot가 개발한 백색광 주사 간섭계의 간섭 신호 해석법으로 간섭 신호를 푸리에 변환하여 얻은 푸리에 위상(Fourier phase)에서 공간 주파수(spatial frequency)에 대한 위상의 기울기를 통해 간섭 신호의 포락선 침투를 추출한다. 이와 더불어, 공간 주파수 상의 위상 정보를 이용하여 위상 정점도 검출할 수 있기 때문에 백색광 주사 간섭계에서 널리 사용되고 있다. 식 (7)의 백색광 주사 간섭계의 간섭 신호를 푸리에 변환하게 되면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i(z) = i_0 + g(h-z)\cos[2k_c(h-z)] \quad (7)$$

$$I(u) = i_0\delta(u) + \frac{1}{2}G(u+u_0)\exp[-j2\pi h(u+u_0)] + \frac{1}{2}G(u-u_0)\exp[-j2\pi h(u-u_0)] \quad (8)$$

여기서 i_0 는 배경광의 광강도(background intensity)를 나타내

며, h 는 측정 대상의 높이, k_c 는 광원의 중심 파장에서의 파수(wave number)를 나타내며 중심파장(λ_c)을 이용하여 $(2\pi/\lambda_c)$ 로 나타낼 수 있다. z 는 백색광 주사 간섭계에서 광축 방향으로의 이동량을 나타내며, $g(h-z)$ 는 이때 획득되는 간섭 신호의 포락선 함수(envelope function)를 의미한다. 한편, u 는 푸리에 변환을 통한 공간 주파수를 의미하며, u_0 는 코사인 함수의 공간 주파수인 $(2k_c/2\pi)$ 를 나타낸다. $G(u)$ 는 $g(z)$ 의 푸리에 변환 결과이다. 이때 식 (8)에서 의미있는 부분은 오른쪽의 세 번째 수식으로, 이 부분만을 필터링해서 살펴보면, 높이 h 는 u_0 근처의 위상 정보로부터 u 에 대한 위상기울기를 계산하고, 이를 -2π 로 나누면 얻어진다(포락선 침투 검출 방법). 또한, u_0 를 알고 있기 때문에 u_0 에서의 위상을 얻은 후, 이로부터 마찬가지로 h 를 계산할 수 있다.(위상 정점 검출 방법) 이때, 간섭 신호가 그림 7과 같이 서브 샘플링을 통해 획득되면, 푸리에 영역에서 간섭 신호의 공간 주파수가 달라지는 현상이 발생하여 알고리즘 적용이 어려워질 것으로 생각되지만, 실제로 공간 주파수에 따른 위상 기울기는 달라지지 않을 뿐만 아니라 u_0 에서의 위상 역시 달라지지 않는다. 그 이유는 측정 간격 변화에 따른 공간 주파수의 변화량과 위상의 변화량이 정확히 일치하기 때문이다.^[5] 이로 인하여 푸리에 영역 해석법에서는 서브 샘플링과 관계없이 측정 알고리즘 적용이 가능하다. 또한 이러한 원리는 푸리에-역푸리에 방법에서도 적용이 가능하며, 측정되는 위상의 논리적인 변환을 통해 서브 샘플링된 간섭 신호의 해석이 가능해진다.^[6] 그림 7은 서브 샘플링을 적용하여 평면거울의 표면을 측정한 결과를 나타낸다. 광원은 650 nm 대역의 적색 LED로 가간섭 거리는 12 mm이며, 중심 파장을 통해 계산한 간섭계의 최대 측정 간격은 $650/4=162.5$ nm이다. 그림 10에서 알 수 있듯이 측정 시간은 20 μ m의 구동 거리에서 412 nm, 540 nm, 720 nm의 샘플링 간격으로 측정하는 경우, 각각 5.6초(20 μ m/60 nm/60 fps)에서 서브 샘플링을 통해 각각 0.8초, 0.6초, 0.5초로 백색광 주사 간섭계의 측정 속도가 개선됨을 확인할 수 있다. 이와 더불어, 형상을 계산하는 소프트웨어의 계산 속도도 측정 데이터의 감소로 인해 향상됨을 확인하였다.

서브 샘플링 기법을 이용하면 기존의 백색광 주사 간섭계에서 간섭 신호를 획득하는 시간과 계산 시간을 단축할 수 있기 때문에 측정 속도를 향상시킬 수 있지만, 그에 반해 측정 정밀도는 나빠지는 현상이 발생한다. 또한, 서브 샘플링 기법은 기본적으로 가간섭 거리가 긴 광원을 사용해야 하기 때문에, 측정 시편의 형상 및 단차가 비교적 큰 경우에 장점이 있다. 이는 일반적으로 백색광 주사 간섭계에서 안정적이고 성공적인 측정을 위해 가간섭 거리만큼의 거리를 주사 거리에 포함시키기 때문이다. 그래서 광원의 가간섭 거리보다 작은 형상 차이

Fig. 7. Sub-sampled correlogram compared to the typical correlogram and 3D surface measurement results of a plane mirror by sub-sampling.

Fig. 8. Principle of dual low coherence scanning interferometry.

를 보이는 시편의 경우에는 서브 샘플링 기법을 적용하는 것이 오히려 측정 속도를 저해할 수 있다.^[6]

(4) 백색광 주사 간섭계의 속도 개선 - 이중 저간섭성 간섭계
백색광 주사 간섭계는 측정시 광경로차를 조절해야 하기 때문에 광학 구성에서 기준 거울 또는 측정 시편을 광축 방향으로 주사해야 하며 주사 길이는 측정 시편의 단차나 두께에 따라 결정된다. 비록 서브 샘플링을 이용하면 측정 시간 및 계산 시간을 줄일 수 있으나, 기저판 측정과 같은 경우에는 기저판

의 앞, 뒷면 사이의 두께만큼의 구동이 수반되어야 한다. 이로 인해 측정 시간도 길어질 뿐만 아니라 불필요한 데이터 획득 및 측정 오차가 발생한다. 이러한 백색광 주사 간섭계의 한계를 극복하기 위해 최근에 이중 저간섭성 주사 간섭계(dual low coherence scanning interferometer)가 제안되었다.^[7,8]

이중 저간섭성 주사 간섭계는 그림 8과 같이 전체적으로 광원부와 측정부로 나누어진다. 먼저 광원부에 이중 저간섭성을 발생하기 위한 간섭계를 추가하여 광경로가 서로 다른 2개의 광을 생성시킨다. 광원부의 간섭계에서 설정한 광경로차(ΔL)는 이후 측정부의 측정 시편 높이(H)에 따라 임의로 조절이 가능하며, 분광기(spectrometer)에서 분산 간섭계(spectrally resolved interferometer, SRI)의 원리를 이용하여 실시간으로 측정되는 특징이 있다. 한편, 광원부의 2개의 광은 백색광 주사 간섭계로 구성된 측정부에 입사하면, 측정 시편이 평면거울인 경우 기존과는 다르게 그림 12와 같이 총 3개의 간섭 신호를 발생시킨다. 중심에 위치한 간섭 신호는 백색광 주사 간섭계의 광경로가 일치하는 경우 발생하며, 양쪽 2개의 간섭 신호는 중심의 간섭 신호에서 광원부에서 설정한 ΔL 만큼 위치한 곳에서 발생한다. 이러한 이중 저간섭성 주사 간섭계의 특징은 높은 단차를 가지는 시편이나 기저판의 두께를 측정할 때 구동 거리를 현저히 줄일 수 있는 장점이 된다. 그림 8과 같이 단차를 가지는 시편을 측정하는 경우, 일반적인 백색광 주사 간섭계는 단차

의 높이 h 만큼 구동을 해야 하지만, 이중 저간섭성 주사 간섭계에서는 $(H - \Delta L)$ 만큼의 구동을 통해 측정이 가능해진다.^[7]

그림 9는 이중저간섭성 주사 간섭계로 1-2 mm 단차를 가지는 시편을 측정할 결과를 나타낸다. 이때, 주사 거리는

REFERENCES

- [7] H. M. Park, H. W. Jung and K. N. Joo, Opt. Express **24**, 28625 (2016).
- [8] H. M. Park and K. N. Joo, Appl. Opt. **56**, 8592 (2017).

Fig. 9. Experimental results of a gauge block specimen by dual low coherence scanning interferometry.

Fig. 10. Experimental results of a Si wafer specimen by dual low coherence scanning interferometry.

100 μm 이내로 시편의 모든 간섭 신호가 획득됨을 확인할 수 있으며, 분산 간섭계의 원리로 측정되는 ΔL 을 적용하여 실제 단차 시편의 3차원 형상을 복원할 수 있다. 한편, 이러한 이중저간섭성 주사 간섭계는 이와 같은 원리로 그림 10과 같이 기저판의 두께 측정에서도 측정 시간을 현저히 줄일 수 있으며, 기저판의 두께가 두꺼워지더라도 짧은 구동을 통해 형상 및 두께를 측정할 수 있다.

2. 3차원 형상 측정을 위한 패턴조사 현미경

최근, 패턴 조사(structured illumination)는 현미경에서 공간 분해능(spatial resolution)을 향상시키는 기법으로 널리 이용되고 있으나,^[9] 이와 동시에 위상 천이(phase shifting)를 이용한 패턴 조사 현미경(structured illumination microscopy)은 종축 방향의 구동을 통해 반도체 및 미세 제품의 3차원 형

상 측정을 가능하게 한다.^[10] 위상 천이 패턴 조사 현미경은 3차원 형상을 측정하기 위해, 임의의 종축 위치에서 조명의 패턴을 위상 천이하여 가시도 정보를 추출한다. 이후, 종축 방향으로 구동하면서 이러한 과정을 반복하여, 가시도가 정점이 되는 위치인 최적의 초점 위치를 결정하고 이로부터 물체의 높이를 측정한다. 이러한 패턴 조사 현미경은 현재 산업계에서 널리 사용되고 있는, 공초점 주사 현미경과 원리적인 측면에서 유사한 점을 가지지만, 공초점 주사 현미경에 비해 렌즈 어레이나 핀홀 배열판 등의 고가의 장치 없이 저비용의 장치로 비교적 빠른 시간에 3차원 형상 정보를 획득할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그림 11은 패턴조사 현미경의 광학 구성 및 원리를 나타낸다. 광원에서 나온 빛은 사인파(sinusoidal amplitude pattern)와 같은 일정한 공간 투과 분포를 가지는 패턴에 입사한 후 패턴 조명이 되며, 현미경 광학계에 입사하여 측정 대상에서 반사한 후, 결상 광학계(imaging optical system)를 통해 CCD 카메라에서 결상된다. 이때, 광원부의 공간적인 사인파 패턴과 측정 대상체의 표면 그리고 CCD 카메라의 촬상면은 광학적으로 공액(conjugate) 관

계에 놓이게 되며, 측정 대상의 표면에 초점이 맺히는 경우, CCD 카메라에서는 사인파 형태의 광분포와 함께 측정 대상체의 표면 영상이 선명하게 나타나게 된다. 그래서 이러한 특징을 이용하면 선명한 사인파 패턴의 가시도를 이용하여 측정 대상체의 3차원 형상을 측정할 수 있다. 또한, 패턴 조사 현미경에서 패턴 조명은 측정 대상의 표면을 국지적으로 제한하는 특징으로, 초점이 맺지 않은 곳에서 반사되는 빛을 차단할 수 있는 장점을 가진다.

패턴 조사 현미경의 측정 원리는 다음과 같은 수식을 통해 보다 명확하게 이해될 수 있다.^[10] 앞서 설명한 것과 같이, 광

REFERENCES

- [9] M. G. L. Gustafsson, J. Microscopy **198**, 82 (2000).
- [10] M. A. Neil, J. Rimas and T. Wilson. Opt. Lett. **22**, 1905 (1997).

Fig. 11. Optical configuration of structured illumination microscopy and its operating principle.

원에서 나온 빛은 사인과 분포를 가지는 패턴인 $S(t_0, w_0)$ 에 조사된 후, $\tau(t_1, w_1)$ 의 반사율을 가지는 측정 대상 표면에서 반사되어 CCD 카메라의 이미지 평면 (t, w) 에서 검출된다. 이때 획득되는 영상, $I(t, w)$ 는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$I(t, w) = \iint S(t_0, w_0) \left| \iint h_1(t_0 + t_1, w_0 + w_1) \times \tau(t_1, w_1) h_2(t_1 + t, w_1 + w) dt_1 dw_1 \right|^2 dt_0 dw_0 \quad (9)$$

여기서 $h_{1,2}$ 는 각각 공간 패턴과 측정 대상체, 측정 대상체와 CCD 카메라 사이에 위치하고 결상 렌즈들의 점 확산 함수(point spread function)를 나타낸다. 한편, 패턴 조사 현미경에서 $S(t_0, w_0)$ 는 1차원적 격자로 가정할 수 있고, 이를 수식적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t_0, w_0) = 1 + m \cos(\tilde{\nu} t_0 + \phi_0) \quad (10)$$

여기서 m 는 공간 패턴에서의 변조 깊이를, ϕ_0 는 초기 공간 위상을, $\tilde{\nu}$ 는 패턴의 정규화된 공간 주파수를 나타낸다. 이 경우, 식 (10)을 식 (9)에 대입하여 간단히 정리하면

$$I(t, w) = I_0 + I_c \cos \phi_0 + I_s \sin \phi_0 \quad (11)$$

로 표현할 수 있으며, 여기서 I_0 은 $S=1$ 의 경우 식 (9)에 의한 계산되는 광강도이고, I_c 와 I_s 는 각각 식 (10)의 패턴에 해당하는 $m \cos(\tilde{\nu} t_0)$ 와 $m \sin(\tilde{\nu} t_0)$ 에 의한 광강도를 나타낸다. 패턴 조사 현미경은 측정 대상을 종축으로 구동하면서 획득한 이미지들 중에서 패턴의 가시도가 가장 높을 때의 위치를 검출하

여 3차원 형상을 측정하기 때문에, 식 (11)에서 가시도 $I_p = (I_c^2 + I_s^2)^{1/2}$ 를 추출해야 한다. 이를 위해, 패턴 조사 현미경은 간섭계에서 널리 이용되는 위상 천이 방법을 이용하여, 식 (11)의 공간 위상, ϕ_0 를 0, $2\pi/3$, $4\pi/3$ 만큼 변화시키면서 획득되는 3개의 이미지 I_1, I_2, I_3 를 이용하면 식 (12)와 같이 I_p 를 계산할 수 있다.

$$I_p = [(I_1 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_3)^2]^{1/2} \quad (12)$$

또한, 식 (12)는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$I_p = \left| I_1 + I_2 \exp j \frac{2\pi}{3} + I_3 \exp \frac{4\pi}{3} \right| \quad (13)$$

패턴 조사 현미경은 측정 대상이 종축으로 구동하면서 식 (12)와 (13)을 이용하여 매 위치에 따른 픽셀별 가시도를 추출하고, 각 픽셀별로 획득된 가시도의 정점을 결정하여 3차원 높이 정보를 획득한다.

그러나 기존의 패턴 조사 현미경은 각 픽셀별 가시도의 정점을 추출하는 것으로 3차원 형상 측정이 가능하지만, 가시도 함수를 획득하기 위해 측정 대상의 종축 위치마다 위상 천이를 위한 여러 장의 이미지를 획득해야 하는 한계를 가진다. 이로 인해, 패턴 조사 현미경은 연속적인(continuous) 측정이 아닌 정지 및 측정(stop-and-measure) 방식으로 데이터를 수집하며, 측정 시 오랜 시간을 필요로 한다. 최근 들어, 이러한 패턴 조사 현미경의 단점을 보완하기 위한 새로운 구동 방식의 패턴 조사 현미경의 연구가 진행되었으며,^[11] 그림 12와 같이 측정 속도를 개선하기 위한 연속 주사형 패턴 조사 현미경(continuously scanning structured illumination microscopy)은 위상 천이와 측정 대상의 종축 구동을 동기화(synchronization)하여, 기존의 패턴 조사 현미경의 정지 및 측정 방식이 아닌 연속 측정 방식으로 데이터를 획득하여 측정 속도를 현저히 개선한다. 연속 주사형 패턴 조사 현미경의 광학 구성은 기존의 패턴 조사 현미경과 크게 차이가 없으며, 단지 구동부가 서로 동기화되어 있는 부분만이 차이점으로, 이로 인해 기존의 위상 천이 알고리즘을 적용하는 기존의 패턴 조사 현미경과는 달리 푸리에 변환 기반 분석 방법으로 측정 대상의 3차원 형상을 측정한다.

REFERENCES

- [11] K. N. Joo, Meas. Sci. Tech. 23, 057002 (2012).

Fig. 12. Continuously scanning structured illumination microscopy (CSSIM) and its operating principle.

<Plane mirror>

Peak to valley : $1.4 \mu\text{m}$

Sa (arithmetical mean height of the surface) : $0.19 \mu\text{m}$

<Micro-lens array>

S : $0.93 \mu\text{m}$
P : $155 \mu\text{m}$

Fig. 13. Measurement results of continuously scanning structured illumination microscopy.

연속 주사형 패턴 조사 현미경에서는 위상 천이와 측정 대상의 종축 구동이 동시에 이루어지기 때문에, 매 종축 위치에서는 단일 이미지만을 획득하며 이러한 이미지들을 통해 각 픽셀에서 획득되는 광강도 신호(CSSIM 신호)는 그림 12와 같은 형태를 보인다. 이러한 CSSIM 신호는 크게 포락선(envelope)과 변조(modulation)로 구분되며, 이때 변조 신호는 연속 주사형 패턴 조사 현미경에서의 위상 천이를 위한 패턴의 횡축 구동에 의해 형성된다. 한편, 포락선은 기존의 패턴 조사 현미경의 경우와 같이 측정 대상에 대한 초점 심도를 나타내며, 이를 통해 패턴의 가시도가 결정된다. 결과적으로 연속 주사형 패턴 조사 현미경에서 획득되는 각 픽셀별 신호의 포락선은 기존의 패턴 조사 현미경의 가시도와 동일하며, 카메라의

모든 픽셀들의 포락선의 정점의 위치로부터 측정 대상의 3차원 형상 측정이 가능해진다.

CSSIM 신호는 변조 신호라는 특징을 이용하면, 푸리에 변환과 같은 주파수 해석법을 이용하여 포락선(가시도)만을 추출할 수 있다. 실제로 CSSIM 신호는 산업계에서 널리 활용되고 있는 백색광 주사 간섭계의 간섭 신호와 유사함을 보인다. 비록, 백색광 주사 간섭계의 변조 신호는 사용하는 광원의 중심 파장에 따른 간섭을, 포락선은 광원의 파장 분포에 따른 정보를 포함하고 있는 점에서 연속 주사형 패턴 조사 현미경과 큰 차이를 보이지만, 획득한 신호에서 포락선의 정점의 위치를 추출해야 한다는 점에서 분석 원리는 동일하다.

그림 13은 연속 주사형 패턴 조사 현미경을 이용하여 평면거울 및 마이크로 렌즈 배열을 측정한 결과를 보여준다. 그림 13(a)는 측정 시편의 임의의 한 점에 대한 SIM 신호를 나타내며, 가시도 변화 및 변조 신호를 확인할 수 있다. 이때, 전체 영상에서 획득한 SIM 신호들을 푸리에 분석을 통해 분석하면 3차원 형상을 추출할 수 있으며, 그 결과 그림 13(b), (c)와 같이 평면거울과 마이크로 렌즈 배열의 3차원 형상이 제조사에서 제공하는 사양과 비교하였을 때 오차 범위 내에서 복원되는 것을 알 수 있다.

한편, 패턴 조사 현미경 원리는 3차원 내시경으로도 응용이 가능하여 초소형의 3차원 내시경을 가능하게 한다.^[12] 광학 구성은 그림 14와 같이 내시경 광학계와 3차원 측정을 위한 연속 주사형 패턴 조사 현미경이 결합되며, 내시경 광학계를 통해 전송된 조명의 패턴과 시편의 영상을 통해 시편이 3차원 형상 측정이 가능하다. 이 경우, 제안하는 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경에서는 그림 14와 같은 전체 5개의 공액 이미지 평면을 갖는다. 먼저 광원에서 패턴 격자 표면과 대물렌즈를 통과하여 이미징 광섬유 번들 근부가 공액 관계에 놓이게 되며, 이미징 광섬유의 근부와 원부 사이,

REFERENCES

- [12] H. M. Park and K. N. Joo, Curr. Opt. Phot. 2, 172 (2018).

Fig. 14. 3D endoscopy based on continuously scanning structured illumination microscopy.

Fig. 15. Miniaturized 3D endoscopy based on continuously scanning structured illumination microscopy and its measurement results.

원부와 측정 시편의 표면 역시 공액 관계이다. 마지막으로 이러한 공액 관계에 있는 면들은 CCD 카메라의 촬상면과 공액 관계에 놓여 있다. 그래서 측정 대상의 표면이 최적의 초점 위치에 있을 때, 조명의 공간적 패턴은 시편에 선명하게 투영될 수 있고, 전체적인 공액 관계를 통해 CCD 카메라에서 선명하게 관찰된다. 반면, 시편이 초점 위치로부터 광축 방향으로 이동하게 되면, 패턴 및 시편 이미지 모두 흐려지는 현상이 발생한다. 결국, 제한하는 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경에서는 이러한 원리를 이용하여 카메라의 각 픽셀에서 검출되는 공간 조명 패턴의 가장 높은 가시도를 검출하여 측정 대상의 3차원 형상을 복원할 수 있다.

이때, 그림 14에서의 편광 광분할기(polarizing beam splitter, PBS)는 이미징 광섬유의 근부에서 반사되는 공간 조명 광을 제거하기 위한 용도로 도입되었다. 이미징 광섬유에 광을 조사하는 경우, 정렬 등의 실험 조건에 따라 투과 효율이 달라지는 하나 일반적으로 투과율은 30% 이내이며, 그 이외의 광은 이미징 광섬유의 끝단에서 반사된다. 그리고 이러한 이미징 광

섬유의 끝단 반사광은 결국 시편에서 반사되어 되돌아오는 광과 함께 CCD 카메라에서 검출되기 때문에, 측정 대상의 초점 위치와 상관없는 선명한 공간 패턴이 이미지에 나타난다. 이는 CSSIM 신호를 해석함에 있어 신호대 잡음비(signal-to noise ratio, SNR)를 저하하는 요인으로 작용한다. 이를 방지하기 위해 PBS는 이미징 광섬유의 근부에서 반사하는 광은 편광으로 제거하는 역할을 한다. 한편, 이미징 광섬유를 통과한 광의 경우에는 이미징 광섬유의 미세한 복굴절성(birefringence) 및 편광 회전(polarization rotation)으로 편광 광분할기에서 모두 제거되지 않고 CCD 카메라로 전달된다. 그래서 편광 광분할기를 사용하지 않는 경우의 광학 구성에 비해 SNR을 높일 수 있다.

그림 15는 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경으로 단차를 가지는 게이지 블록과 동전에 대한 측정 결과를 나타낸다. 측정된 시편의 단차는 게이지 블록의 불확도(uncertainty) 이내로 측정되고, 동전 또한 3차원 형상 측정 결과를 확인할 수 있다. 내시경 광학계는 수 mm 정도의 크기를 가지도록 설계할 수 있기 때문에 패턴 조사 현미경 기반 3차원 내시경은 의

료뿐만 아니라 자동차 엔진 내부 검사, 소형 배관, 기기 내부 등 좁은 곳의 측정 및 검사를 위한 산업 분야에서도 널리 활용될 수 있다.

마치면서

본 글에서는 산업계에서 응용되고 있는 3차원 광계측 기술에 대한 산업적 수요 및 개선하기 위한 연구 사례들을 소개하였다. 비록 산업계 전반에 활용되고 있는 모든 광계측 기술에 대해 소개하지 못한 부분이 있으나, 본 글은 미세 형상 측정 분야에서 널리 활용되고 있는 백색광 주사 간섭계와 현미경 광학계에 대한 내용에 초점을 맞추어 작성되었고, 기존의 방법들에 대한 고찰과 산업계의 수요에 맞추어 이를 개선하기 위한 내용을 담으려고 노력하였다. 본 글에서 소개되는 기술들 및 응용 등을 통해 3차원 미세 형상 측정 분야뿐 아니라 산업 전반에 걸친 기술들에 도움이 되기를 바란다.