한국정밀공학회지 제 31 권 7 호 pp. 605-613 July 2014 / 605
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 7, pp. 605-613 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.7.605
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

자유 곡면 형상 측정을 위한 백색광 주사 간섭계의 정확도 향상 및 시스템 오차 분석

Accuracy Improvement and Systematic Bias Analysis of Scanning White Light Interferometry for Free-form Surfaces Measurements

김영식 [1], Angela Davies[2], 이혁교 [1,✉]
Young-Sik Ghim[1], Angela Davies[2], and Hyug-Gyo Rhee[1,✉]

1 한국표준과학연구원 우주광학센터 (Center for Space Optics, Korea Research Institute of Standards and Science)
2 노스캐롤라이나 대학교 물리/광과학과 (Department of Physics and Optical Science, University of North Carolina at Charlotte)
✉ Corresponding author: hrhee@kriss.re.kr, Tel: +82-42-868-5814

Manuscript received: 2014.1.20 / Revised: 2014.2.18 / Accepted: 2014.5.8

Scanning white-light interferometry is an important measurement option for many surfaces. However, serious profile measurement errors can be present when measuring free-form surfaces being highly curved or tilted. When the object surface slope is not zero, the object and reference rays are no longer common path and optical aberrations impact the measurement. Aberrations mainly occur at the beam splitter in the interference objective and from misalignment in the optical system. Both effects distort the white-light interference signal when the surface slope is not zero. In this paper, we describe a modified version of white-light interferometry for eliminating these measurement errors and improving the accuracy of white-light interferometry. Moreover, we report systematic errors that are caused by optical aberrations when the object is not flat, and compare our proposed method with the conventional processing algorithm using the random ball test.

Key Words: Scanning White Light Interferometry (백색광 주사 간섭계), Free-form Surface (자유곡면), Frequency Domain Analysis (주파수 영역 분석법), Self-calibration Method (자가 보정 법), System Bias Analysis (시스템 오차 분석)

1. 서론

휴대폰, 디지털 카메라, 인공 위성, 광통신, 평판 디스플레이 등의 최첨단 산업에서 정밀광학부품은 핵심부품으로 널리 사용되고 있다. 특히 고성능과 다기능이 동시에 요구됨에 따라 이러한 광학부품의 형상은 나날이 복잡해 지고 있다. 한 예로 제조 기술의 발달로 인해 등장한 비구면 렌즈는 기존 구면 렌즈의 단점을 보완함과 동시에 여러 장의 구면 렌즈들을 한 장으로 대체하는 효과를 가져와 광학계의 소형화 및 경량화를 가능하게 해 주었다. 이러한 제조 기술의 발달은 뒷받침 해주는 측정 기술과 함께 더불어 성장해 왔다. 현재 측정 기술은 최종 생산품을 비롯하여 제조 과정 중 각 단계마다의 중간 생산품에 이르기까지 전 공정에 걸쳐 광범위하게 활용됨으로써 생산 공정의 비용과 시간, 그리고 효율을 높이는 효과를 가져오고 있다.

삼차원 표면형상 측정기술로는 삼차원 측정기 (three-dimensional coordinate measuring machine), 원자

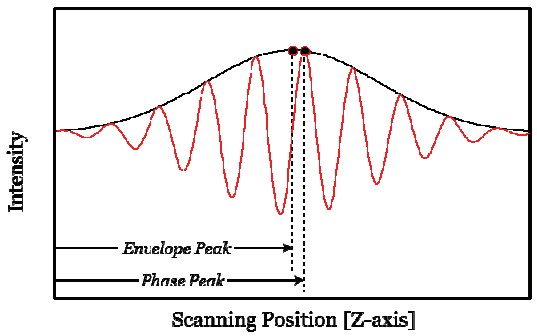


Fig. 1 White-light interferogram (red line) at a single pixel and its corresponding envelope signal (black line)

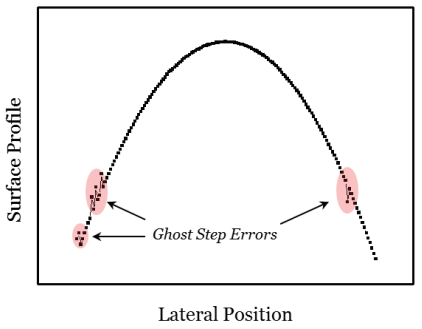


Fig. 2 Profile measurement errors called ghost step errors in white-light interferometry when measuring a steel ball

힘 현미경(atomic force microscope), 위상천이간섭계(phase-shifting interferometry), 공초점 주사 현미경(confocal scanning microscope), 그리고 백색광 간섭계(white-light interferometry) 등이 있다. 이러한 삼차원 표면형상 측정기술은 측정 방법에 따라 크게 접촉식 측정법과 비접촉식 측정법으로 나눌 수 있다. 비접촉식 측정법은 빛을 이용한 광학적 측정방법으로 접촉식 측정법에 비해 시편에 물리적 손상을 주지 않으면서도 빠른 속도로 측정이 가능하여 산업 전반에 걸쳐 널리 활용되고 있다. 이중 백색광 간섭계는 지난 수십 년간 정밀미세부품의 삼차원 표면형상 측정을 비롯하여 박막두께측정에 이르기까지 광범위하게 활용되어 왔다.[1-6] 백색광 간섭계는 간섭무늬를 획득하는 방식에 따라 PZT나 모터와 같은 기계적인 이송구동장치를 이용해 간섭무늬를 얻는 백색광 주사 간섭계(scanning white-light interferometry)[1-3]와 회절격자나 프리즘과 같은 광 분산장치를 이용해 간섭무늬를 분광시켜 얻는 분산 백색광 간섭계(dispersive white-light interferometry)[4-7]로 나눌 수 있다. 분산 백색광 간섭계는 백색광의 넓은 분광대역폭을 이용해 측정물체와 기준면과의 광 경로 차(optical path difference)에 의해 생기는 간섭무늬를 파장 별로 분광시켜 실시간 측정이 가능하고 외부 진동이나 환경에 둔감한 장점이 있다. 하지만 아직 관련 연구가 미미하여 백색광 주사 간섭계에 비해 상용화가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 이미 국내외의 많은 회사들에 의해 상용화가 되어 널리 쓰이고 있는 백색광 주사 간섭계는 백색광의 낮은 결맞음성(coherence)으로 인한 국부화된 간섭무늬를 획득하고 분석하여 위상 모호성(2π-ambiguity) 없이 수 밀리미터(mm) 이상의 큰 단차도 나노미터(nm) 이하의 높은 수직 분해능으로 표면형상을 정확하게 측정할 수 있다.

측정 원리는 Fig. 1에서 보듯이 획득된 백색광 간섭무늬의 가시도 정점(envelope peak) 또는 위상 정점(phase peak)의 위치를 분석함으로써 측정물체의 삼차원 높이 정보를 얻게 된다.

2. 자유곡면형상 측정 시 발생하는 백색광 주사 간섭계의 측정 오차 분석

백색광 주사 간섭계의 알고리즘은 간섭무늬를 분석하는 방법에 따라 크게 가시도 정점 추출법(envelope peak detection method)[8-10]과 위상 정점 추출법(phase peak detection method)이 있다. 고속 측정을 위해 가시도 정점 추출법이 위상 정점 추출법에 비해 많이 사용되고 있지만 백색광원의 결맞음 길이(coherence length)보다 낮은 단차를 측정할 경우 모서리 부근에서 배트윙 효과(batwing effect)[11]가 발생하고 수직 분해능이 상대적으로 떨어지는 단점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하고자 위상 정점 추출법을 가시도 정점 추출법에 적용한 연구가 진행되어 왔다.[12,13] 하지만 자유곡면과 같이 측정 물체의 국부 기울기가 심할 경우 위상 정점의 절대 차수 계산시 오차가 발생할 뿐만 아니라 광학 수차도 증가하여 Fig. 2와 같이 심각한 측정오차를 유발하게 된다.[14,15]

이는 Fig. 3에서 보듯이 측정 물체의 국부 기울기(α)가 심할 경우 측정 물체로부터 반사되어 오는 파면(W_{obj})과 기준면으로부터 반사되어 오는 파면(W_{ref})이 광학계를 통과하는 광 경로에 있어 심

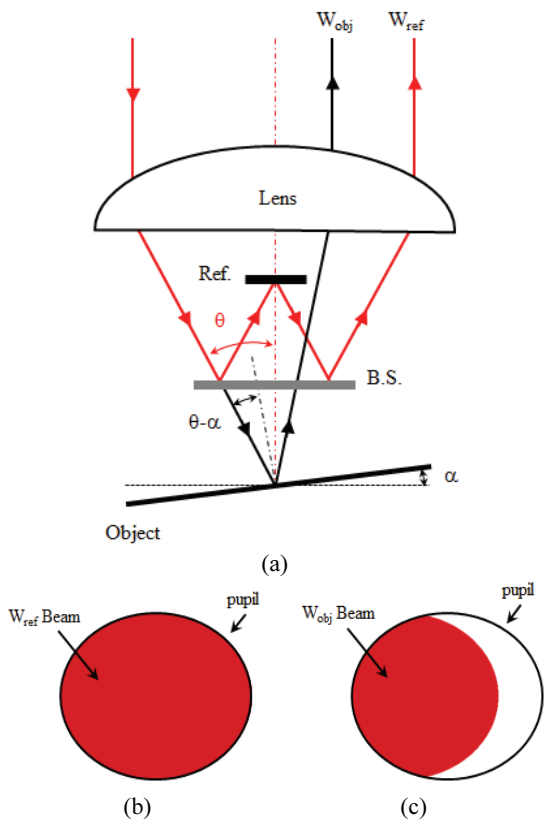
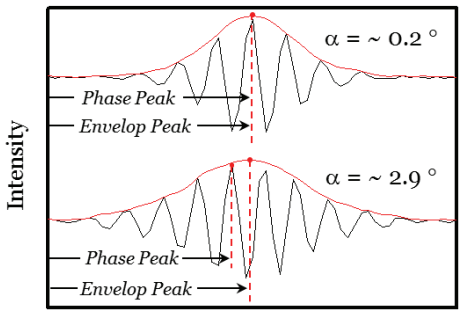
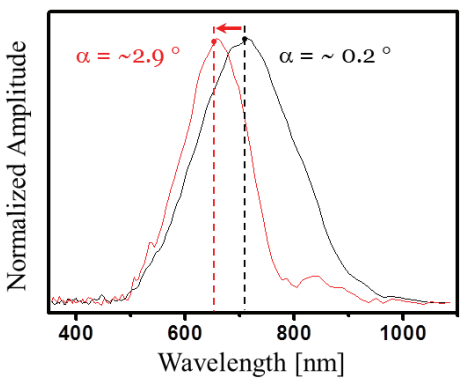


Fig. 3 (a) Optical path of the object and reference waves when measuring highly curved surfaces, (b) illumination area of wave reflected from reference, and (c) illumination area of wave reflected from object (θ is the half angle of the numerical aperture of the objective and α is the surface slope angle with respect to the reference surface)



(a) White-light interference signals when α is 0.2° (in the upper) and 2.9° (in the lower)



(b) Spectral distributions of effective wavelength corresponding to white-light interference signals of (a)

Fig. 4 White-light interference signal and its spectral distribution when a 0.4 N.A. objective (θ=23.6°) is used

한 불일치가 발생하여 측정 파면(W_{obj})과 기준 파면(W_{ref})이 공통 경로를 겪지 않아 수차가 서로 상쇄되는 효과가 없어지기 때문이다.[16]

따라서, 광학 수차에 더욱 민감하게 반응하여 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 표면의 국부 기울기(α)가 커질수록 백색광 간섭무늬의 왜곡으로 인하여 간섭무늬의 비대칭성이 커지고 간섭무늬의 길이가 길어지게 된다. 이와 같은 현상은 표면의 국부 기울기의 증가로 인해 유효 개구수(effective numerical aperture)가 작아지게 되어 Fig. 4(b)에서 보듯이 광원의 중심 주파수가 짧은 파장 쪽으로 이동하고 광원의 폭이 좁아지게 되어 나타난다.

이로 인하여 자유곡면과 같은 표면의 국부 기울기가 심한 측정 물체의 경우에는 백색광 간섭무늬의 가시도 정점과 위상 정점의 불일치가 심하고 광학 수차도 많이 발생되어 Fig. 2에서 보듯이 ghost step error와 같은 심각한 측정 오차가 유발된다. 이는 위상 정점의 절대 차수가 가시도 정점과의 위치를 기준으로 계산되는데 측정 물체의 국부 기울기가 커짐에 따라 이러한 두 정점의 불일치가 커져 위상 정점의 차수가 잘못 계산되기 때문이다.

본 논문에서는 측정물체의 국부기울기가 심한 자유곡면과 같은 형상을 측정할 경우 발생하는 측정 오차를 줄이기 위해 새로운 측정 알고리즘을 제안하고 자가 보정 방법 중의 하나인 Random Ball Test (RBT)를 이용해 시스템 오차를 분석하고자 한다.

3. 주파수 영역 분석법을 이용한 백색광 주사 간섭계의 정확도 향상

P. de Groot와 L. Deck에 의해 제안된 주파수 영역 분석법 (frequency domain analysis)을 통해 위상 값과 해당하는 위상 정점의 절대 차수를 계산하여 측정 물체의 높이를 구하면 식(1)과 같다.[17,18]

$$h = \frac{\lambda_0}{4\pi}\phi_0 + \frac{\lambda_0}{2}m,\ m = \mathrm{Int}\left[\frac{\phi_0}{2\pi} - \frac{1}{\lambda_0}\frac{d\phi}{dk}\right] \quad (1)$$

여기서, λ_0 는 중심 파장, ϕ_0 는 중심 파장에 해당하는 위상 값, k 는 파수, m 은 위상 정점의 절대 차수, 그리고 Int[]는 함수 안의 인자 값과 가장 가까운 정수 값을 도출해 낸다. 광학 수차로 인해 m 이 부정확하게 계산되면 이로 인해 ghost step error가 유발된다. 따라서 이를 해결하고자 많은 연구가 진행되어 왔고[19-21] 본 논문에서는 m 의 부정확성을 주파수 영역 분석법과 두 파장 위상 측정법을 이용하여 해결하고자 한다.[22] 본 방법의 기본 아이디어는 백색광의 넓은 대역에 걸친 파장의 위상 정보를 푸리에 변환(Fourier transform)을 거쳐 획득한 후 이중 임의의 두 개 파장을 선택한다. 그리고 선택된 파장을 기준으로 주파수 영역 분석법(frequency domain analysis)을 이용해 높이를 각각 계산한 후 계산된 높이 값을 서로 비교 분석함으로써 ghost step error를 제거하는 것이다. 획득된 백색광 간섭무늬를 푸리에 변환을 하게 되면 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 백색광원의 모든 파장과 그에 해당하는 위상 값을 얻을 수 있다. 그리고 위상 정점의 절대 차수를 결정하기 위해 파수(k)에 따른 위상 기울기를 구하면 Fig. 5(b)와 같다. 따라서 임의의 선택된 두 개의 다른 파장인 λ_1 과 λ_2 를 기준으로 식(1)을 이용해 측정 물체의 높이를 각각 구하면 식(2)와 같이 표현된다.

$$h_1 = \frac{\lambda_1}{4\pi}\phi_1 + \frac{\lambda_1}{2}m_1,\ h_2 = \frac{\lambda_2}{4\pi}\phi_2 + \frac{\lambda_2}{2}m_2 \quad (2)$$

여기서, ϕ_1 과 ϕ_2 는 λ_1 과 λ_2 에 각각 대응하는 위상 값이다. 그리고 m_1 과 m_2 는 계산된 위상 정점의 절대 차수 값이 된다. 만약 측정 값에 오차가 없다고 가정을 하면 식(2)를 통해 구한 h_1 과 h_2 는 이론적으로 동일한 값을 가져야 한다. 하지만 자유곡면과 같이 국부 기울기가 급한 면을 측정할

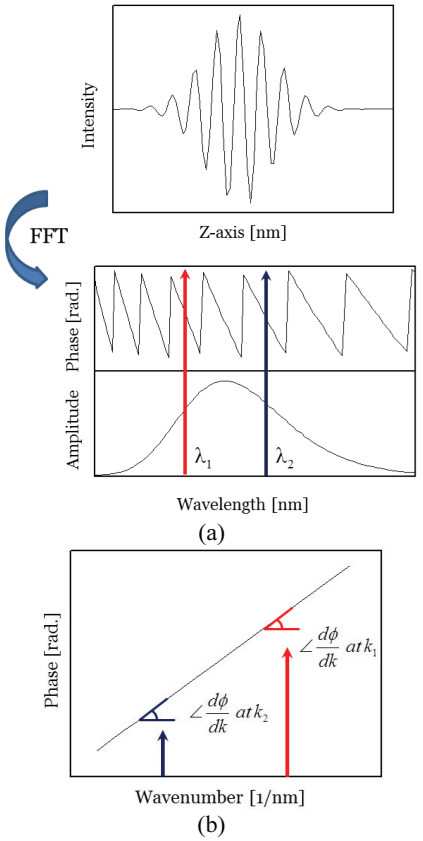


Fig. 5 (a) White-light interference signal and its corresponding Fourier transformed signal and (b) unwrapped phase information of white-light interferogram and phase slope at k_1 (=2π/λ_1) and k_2 (=2π/λ_2)

경우 광학 수차로 인해 h_1 과 h_2 는 상당히 틀린 값을 가지게 되고 이 두 높이 값의 차이는 식(3)으로 표현된다.

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{\lambda_1 m_1 - \lambda_2 m_2}{2} + \delta \quad (3)$$

이때 δ 는 일반적으로 작은 값으로 $(\lambda_1\phi_1/4\pi - \lambda_2\phi_2/4\pi)$ 로 주어지고 각 파장 (λ_1, λ_2) 과 그에 대응하는 위상 값 (ϕ_1, ϕ_2) 을 알기 때문에 미리 계산할 수 있다. 따라서 이를 반영한 $\Delta h'$ 는 식(4)와 같이 표현된다.

$$\Delta h' = \Delta h - \delta = \frac{\lambda_1 m_1 - \lambda_2 m_2}{2} \quad (4)$$

Table 1 Fringe order determination to remove ghost step errors ($l = 0, \pm1, \pm2, \ldots$)

	$\Delta h'$	Fringe Order	New Height h'_1
0	$\pm(\lambda_2/2)l$	$m_1 \rightarrow m_1$	$h'_1 = h_1$
1	$\lambda_1/2 \pm (\lambda_2/2)l$	$m_1 \rightarrow m_1 - 1$	$h'_1 = h_1 - \lambda_1/2$
	$-[\lambda_1/2 \pm (\lambda_2/2)l]$	$m_1 \rightarrow m_1 + 1$	$h'_1 = h_1 + \lambda_1/2$
2	$2\lambda_1/2 \pm (\lambda_2/2)l$	$m_1 \rightarrow m_1 - 2$	$h'_1 = h_1 - 2\lambda_1/2$
	$-[2\lambda_1/2 \pm (\lambda_2/2)l]$	$m_1 \rightarrow m_1 + 2$	$h'_1 = h_1 + 2\lambda_1/2$
γ	$\gamma\lambda_1/2 \pm (\lambda_2/2)l$	$m_1 \rightarrow m_1 - \gamma$	$h'_1 = h_1 - \gamma\lambda_1/2$
	$-[\gamma\lambda_1/2 \pm (\lambda_2/2)l]$	$m_1 \rightarrow m_1 + \gamma$	$h'_1 = h_1 + \gamma\lambda_1/2$

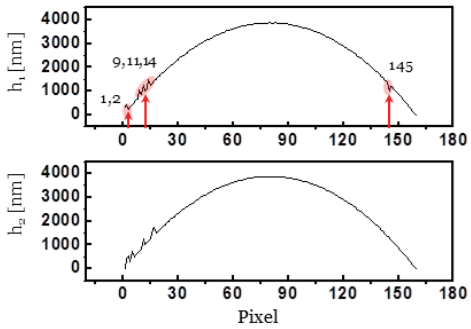
따라서 식(4)로 표현된 $\Delta h'$의 값을 기준으로 측정된 높이 값 h_1 또는 h_2에 측정 오차가 존재하는 지를 파악할 뿐만 아니라 보상해 줄 수도 있게 된다.

이는 Table 1에서 보듯이 측정된 높이 값 h_1을 $\Delta h'$의 값을 기준으로 위상 정점의 차수를 정확히 계산하여 새로운 측정값인 h'_1을 도출하게 된다. 예를 들어 임의의 두 개의 파장인 λ_1과 λ_2를 각각 604 nm와 680 nm로 선택을 하여 구의 형상을 측정하게 $h_1 = \frac{\lambda_1}{4\pi}\phi_1 + \frac{\lambda_1}{2}m_1$, $h_2 = \frac{\lambda_2}{4\pi}\phi_2 + \frac{\lambda_2}{2}m_2$ 되면 Fig. 6(a)와 같이 h_1과 h_2를 얻게 된다. 이때, h_1에서 ghost step error가 발생하는 위치의 $\Delta h'$를 기준으로 분석해 보면 Table 2와 같이 총 6군데에서 발생하게 된다.

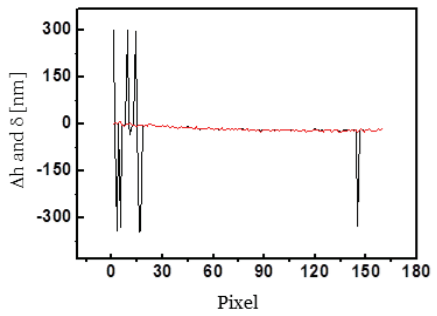
따라서 위의 정보를 바탕으로 ghost step error가 발생하는 곳에 간섭 무늬의 차수(fringe order)를 다시 계산하여 보상 값을 적용하면 Fig. 6(d)와 같은 ghost step error가 없는 새로운 높이 측정값인 h'_1을 구할 수 있게 된다.

4. 자가 보정 법(Self-calibration Method)을 이용한 백색광 간섭계의 시스템 오차 분석

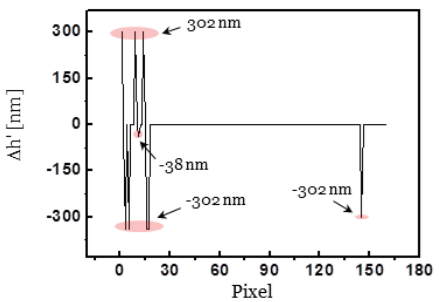
시스템 오차를 분석할 때 많이 쓰이는 자가 보정 방법 중의 하나인 Random Ball Test (RBT)[23-25]를 이용하여 제안된 측정 알고리즘의 성능을 분석해 보았다. RBT는 시스템의 오차를 평가 및 분석하기 위해 가장 널리 쓰이는 방법 중의 하나로 임의로 회전된 구의 표면을 측정한 다음 또 다시 구를 임의로 회전 시켜 구의 표면을 측정하는 작업을 반복 수행하는 방법이다. 이때 반복 수행하여 얻은 측정 값의 평균치를 구하게 되면 구면 수차와 시



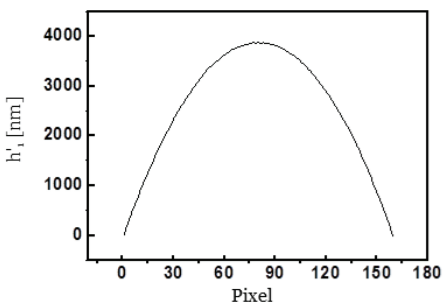
(a) Surface profiles, h_1 and h_2 calculated by Eq. (2)



(b) Height difference, Δh (h_1 -h_2) (black line) determined with Eq. (3) and its phase difference Δδ (red line)



(c) New height difference, Δh′ determined with Eq. (4)



(d) Final measurement result h′$_1$ after ghost step errors correction of h_1

Fig. 6 A series of signal procedures of our proposed method

Table 2 Ghost step errors and their corresponding compensation values

Pixel No.	$\Delta h'$ (nm)	h_1 (nm)	h'_1 (nm)
1	302	318	16
2	-38	424	122
9	302	1071	769
11	-38	1250	948
14	302	1491	1189
145	-302	987	1289

스템 오차 성분만이 남게 된다. 따라서 구면 수차 제거하게 되면 시스템 오차 성분만을 쉽게 구할 수 있게 된다. 예를 들어 구를 임의로 회전시킨 다음 구의 표면을 측정하는 작업을 N번 반복하게 되면 식(5)와 같이 각 측정값이 표현된다.

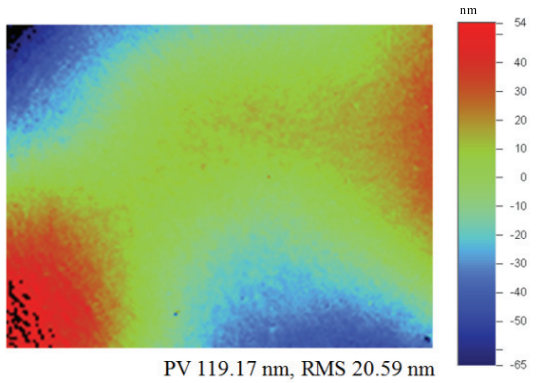
$$\begin{aligned} W_1 &= W_{ball_spherical} + W_{ball,error_1} + W_{sys_bias} \\ &\vdots \\ W_i &= W_{ball_spherical} + W_{ball,error_i} + W_{sys_bias} \\ &\vdots \\ W_N &= W_{ball_spherical} + W_{ball,error_N} + W_{sys_bias} \\ \sum_{i=1}^{N} W_i &= N \times W_{ball_spherical} + \sum_{i=1}^{N} W_{ball,error_i} + N \times W_{sys_bias} \end{aligned} \quad (5)$$

이때 W_i 는 i번째 측정된 구의 표면 형상 값, $W_{ball_spherical}$ 은 구의 구면 수차 값, $W_{ball,error_i}$ 는 이상적인 구의 형상으로부터 벗어난 i번째 구의 표면 형상 오차 값, 그리고 W_{sys_bias} 는 측정 시 발생하는 시스템 오차 값이다. 구의 표면 형상 오차는 반복 측정하여 평균 값을 구하게 되면 형상 오차 값들이 백색잡음(white noise)과 같이 서로 상쇄되어 없어지기 때문에 $\sum W_{ball,error_i} = 0$ 이 된다. 따라서 시스템 오차는 아래 식과 같이 표현된다.

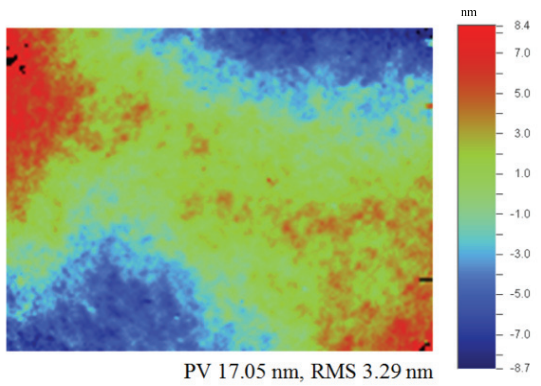
$$W_{sys_bias} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} W_i - W_{ball_spherical} \quad (6)$$

본 실험에서는 직경 6.35 mm의 구를 이용해 총 65번의 측정을 수행하였다. 그리고 측정된 값의 평균 값을 구한 후 구면 수차 값을 계산하여 제거하게 되면 식(6)과 같이 시스템의 오차 값만 남게 된다.

Fig. 7은 본 논문에서 제안한 측정 알고리즘을 이용해 구의 표면을 측정한 후 RBT를 통해 시스템 오차 값을 얻은 결과이다. 기존의 가시도 정점



(a) Systematic bias error map with a conventional coherence peak detection method



(b) Systematic bias error map with the proposed method

Fig. 7 The RBT measurement results

추출법과 비교를 한 결과 본 논문에서 제시된 방법을 이용할 경우 시스템 오차가 PV(Peak to Valley)로는 17.05 nm, RMS(Root Mean Square)로는 3.29 nm가 나왔다. 이는 기존의 측정 방법보다 시스템 오차의 크기가 1/6이하로 작음이 확인되었다. 이는 구의 경우 측정 점의 위치에 따라 표면의 국부 기울기가 틀리기 때문에 측정영역에 걸쳐 서로 다른 유효 개구수를 가지게 되어 광원의 중심 파장이 위치에 따라 달라지게 된다.

이로 인해 Fig. 8(a)에서 보듯이 측정 점이 구의 중심 점(1번위치)에서 가장자리(2번 위치)로 갈수록 표면의 국부 기울기가 증가하고 이로 인해 광원의 중심 파장이 짧은 쪽으로 이동을 하게 된다. 즉, Fig. 8(b)에서 보듯이 광원의 중심 파장이 짧아짐과 동시에 광원의 폭이 점차 좁아지게 되어 위치에 따라 간섭무늬의 왜곡 정도가 달라지게 된다. 따라서 측정 알고리즘의 민감도에 따라 측정 오차

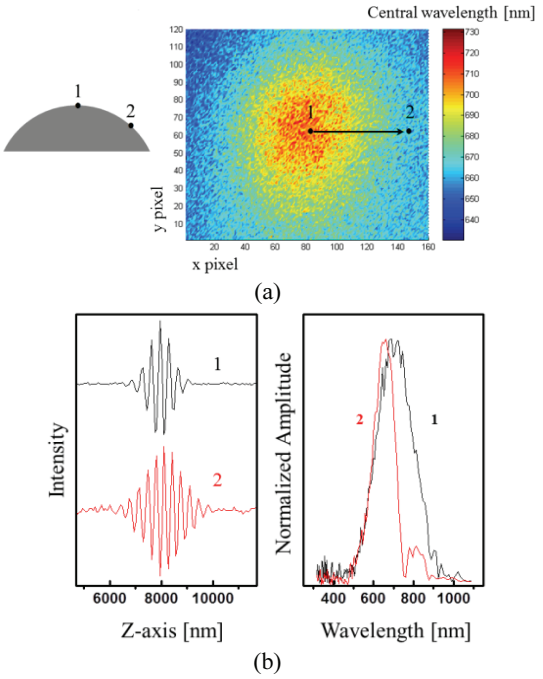


Fig. 8 (a) Spectral distribution of effective central wavelength according to the field of view when measuring a sphere and (b) white-light interference signals and their corresponding spectral distributions of position 1 and 2 of (a)

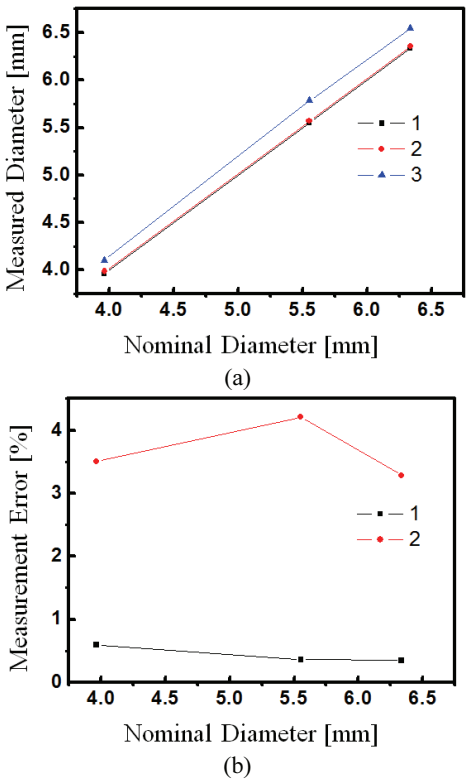


Fig. 9 (a) Measurement results when measuring three different steel balls with a diameter of 3.996 mm, 5.556 mm, and 6.35 mm using three different techniques (1: micrometer, 2: our method, 3: conventional method), and (b) measurement error of our method and conventional method when the micrometer is the reference

의 정도가 틀려지게 된다. 본 논문에서 제안된 알고리즘의 정확도를 좀더 정확히 분석하기 위해 지름이 각각 3.996 mm, 5.556 mm, 6.35 mm인 구의 직경을 마이크로 미터를 이용해 비교 측정을 해 보았다.

Fig. 9(a)는 구의 직경을 삼차원 형상을 측정한 다음 best-fitting하여 유추한 결과로, 기존의 알고리즘과 개발된 알고리즘의 정확도를 비교한 결과이다. 측정 결과에서 보듯이 본 논문에서 제시된 알고리즘의 성능이 기존의 방법보다 마이크로 미터로 측정한 결과와 상당히 유사함을 알 수 있었다. Fig. 9(b)에서 보듯이 기존의 방법이 3% 이상의 측정 오차를 보인 반면에 개발된 알고리즘은 1% 이하의 측정 오차를 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 백색광 주사 간섭계를 이용하여 자유곡면과 같이 표면의 국부 형상 기울기가 큰 측정 물체에서 발생하는 측정 오차에 대해서 알아보았다. 또한 주파수 영역 분석법을 응용한 두 파장 위상 측정법을 이용하여 백색광 주사 간섭계에서 논란이 되어왔던 ghost step error와 같은 측정 오차를 효과적으로 제거하였고 자가 보정 방법중의 하나인 RBT를 이용해 시스템 오차도 분석해 보았다. 분석 결과 본 논문에서 제안한 방법의 시스템 오차(17.05 nm PV, 3.29 nm RMS)는 기존의 가시도 정점 추출법의 시스템 오차(119.17 PV, 20.59 RMS)보다 1/6이하로 줄어 들었고 측정 오차도 3%에서 1%이하로 3배 이상 향상됨을 확인하였다. 본 연구 결과는 백색광 간섭계의 성능을 크게 향상시켜 향후 자유 곡면과 같은 복잡한 형상 측정에 널리 활용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Flournoy, P., McClure, R., and Wyntjes, G., "White-light Interferometric Thickness Gauge," Applied Optics, Vol. 11, No. 9, pp. 1907-1915, 1972.
2. Dresel, T., Häusler, G., and Venzke, H., "Three-dimensional Sensing of Rough Surfaces by Coherence Radar," Applied Optics, Vol. 31, No. 7, pp. 919-925, 1992.
3. Kim, S.-W. and Kim, G.-H., "Thickness-profile Measurement of Transparent Thin-film Layers by White-light Scanning Interferometry," Applied Optics, Vol. 38, No. 28, pp. 5968-5973, 1999.
4. Ghim, Y.-S. and Kim, S.-W., "Thin-film Thickness Profile and Its Refractive Index Measurements by Dispersive White-light Interferometry," Optics Express, Vol. 14, No. 24, pp. 11885-11891, 2006.
5. Ghim, Y.-S. and Kim, S.-W., "Fast, Precise, Tomographic Measurements of Thin Films," Applied Physics Letters, Vol. 91, No. 9, Paper No. 091903, 2007.
6. Ghim, Y.-S. and Kim, S.-W., "Spectrally Resolved White-light Interferometry for 3D Inspection of a Thin-film Layer Structure," Applied Optics, Vol. 48, No. 4, pp. 799-803, 2009.
7. Schwider, J. and Zhou, L., "Dispersive Interferometric Profilometer," Optics Letters, Vol. 19, No. 13, pp. 995-997, 1994.
8. Kino, G. S. and Chim, S. S., "Mirau Correlation Microscope," Applied Optics, Vol. 29, No. 26, pp. 3775-3783, 1990.
9. Caber, P. J., "Interferometric Profiler for Rough Surfaces," Applied Optics, Vol. 32, No. 19, pp. 3438-3441, 1993.
10. Larkin, K. G., "Efficient Nonlinear Algorithm for Envelope Detection in White Light Interferometry," JOSA A, Vol. 13, No. 4, pp. 832-843, 1996.
11. Harasaki, A. and Wyant, J. C., "Fringe Modulation Skewing Effect in White-light Vertical Scanning Interferometry," Applied Optics, Vol. 39, No. 13, pp. 2101-2106, 2000.
12. Sandoz, P., Devillers, R., and Plata, A., "Unambiguous Profilometry by Fringe-order Identification in White-light Phase-shifting Interferometry," Journal of Modern Optics, Vol. 44, No. 3, pp. 519-534, 1997.
13. Harasaki, A., Schmit, J., and Wyant, J. C., "Improved Vertical-scanning Interferometry," Applied Optics, Vol. 39, No. 13, pp. 2107-2115, 2000.
14. Lehmann, P., "Systematic Effects in Coherence Peak and Phase Evaluation of Signals Obtained with a Vertical Scanning White-light Mirau Interferometer," Proc. of the SPIE on Optical Micro- and Nanometrology in Microsystems Technology, Vol. 6188, Paper No. 11, 2006.
15. Berger, R., Sure, T., and Osten, W., "Measurement Errors of Mirrorlike, Tilted Objects in White Light Interferometry," Proc. of the SPIE on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, Vol. 6616, Paper No. 2E, 2007.
16. Park, M.-C., Kim, S.-W., and Yim, N. B., "Aberration Effects on White Light Interferometry," Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 12, No. 5, pp. 362-370, 2001.
17. De Groot, P. and Deck, L., "Three-dimensional Imaging by Sub-nyquist Sampling of White-light Interferograms," Optics Letters, Vol. 18, No. 17, pp. 1462-1464, 1993.
18. De Groot, P. and Deck, L., "Surface Profiling by Analysis of White-light Interferograms in the Spatial Frequency Domain," Journal of Modern Optics, Vol. 42, No. 2, pp. 389-401, 1995.
19. Niehues, J. and Lehmann, P., "Dual-wavelength Vertical Scanning Low-coherence Interference Microscope," Proc. of the SPIE on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, Vol. 6616, Paper No. 6, 2007.
20. Niehues, J., Lehmann, P., and Bobey, K., "Dual-wavelength Vertical Scanning Low-coherence Interferometric Microscope," Applied Optics, Vol. 46, No. 29, pp. 7141-7148, 2007.
21. De Groot, P., Colonna de Lega, X., Kramer, J., and Turzhitsky, M., "Determination of Fringe Order in White-light Interference Microscopy," Applied Optics, Vol. 41, No. 22, pp. 4571-4578, 2002.
22. Ghim, Y.-S. and Davies, A., "Complete Fringe Order Determination in Scanning White-light Interferometry using a Fourier-based Technique," Applied Optics, Vol. 51, No. 12, pp. 1922-1928, 2012.
23. Gardner, N. and Davies, A., "Self-calibration for Microrefractive Lens Measurements," Optical Engineering, Vol. 45, No. 3, pp. 033603-1-033603-5, 2006.

24. Bergner, B. C. and Davies, A., “Self-calibration for Transmitted Wavefront Measurements,” Applied Optics, Vol. 46, No. 1, pp. 18-24, 2007.
25. Zhou, Y., Ghim, Y.-S., Fard, A., and Davies, A., “Application of the Random Ball Test for Calibrating Slope-dependent Errors in Profilometry Measurements,” Applied Optics, Vol. 52, No. 24, pp. 5925-5931, 2013.