

파면 분석을 위한 편광 격자 기반 총밀림 간섭계

Lateral Shearing Interferometry based on a Polarization Grating for Wavefront Sensing

정호빈¹, 박호미¹, 주기남^{1,*}
Hyo Bin Jeong¹, Hyo Mi Park¹, and Ki-Nam Joo^{1,*}

¹ 조선대학교 광기술공학과 (Department of Photonic Engineering, Chosun University)
* Corresponding Author / E-mail: knjoo@chosun.ac.kr, TEL: +82-62-230-7235
ORCID: 0000-0001-9484-2644

KEYWORDS: Lateral shearing interferometry (총밀림 간섭계), Polarization grating (편광 격자), Wavefront sensing (파면 측정)

In this investigation, we propose a simple and effective lateral shearing interferometer based on a polarization grating. In the lateral shearing device, an incident beam is split into two beams by a polarization grating, and the returning beams can be laterally shifted after reflecting off a flat mirror and passing through the polarization grating again. These two beams are not only laterally shifted, but also their polarization states are orthogonal to each other as circular polarizations. With a single image obtained by a pixelated polarization CMOS camera, the proposed LSI can obtain the phase map corresponding to the x-sheared interferogram, and the other phase map can be calculated from another single image obtained by 90° rotation of the shearing device. Then, the original wavefront corresponding to the surface figure of the specimen can be reconstructed by wavefront reconstruction algorithms. In the experiments, various wavefronts generated by concave mirrors and a deformable mirror were measured and compared with those of a commercial Shack-Hartmann sensor.

Manuscript received: January 11, 2022 / Revised: February 11, 2022 / Accepted: February 15, 2022

NOMENCLATURE

θ	=	Diffraction Angle of a Polarization Grating
d	=	Distance between a Polarization Grating and a Flat Mirror
Δx	=	Shearing Amount in X-Direction
Δy	=	Shearing Amount in Y-Direction
ΔW_x	=	Phase (Wavefront) Difference of Two Wavefronts in the X-Direction
A	=	Background Mean Intensity of the Wavefront
γ	=	Visibility of Interference Fringe
$F(x, y)$	=	Basis function

1. 서론

일반적으로 파면 측정(Wavefront Sensing)은 천문학 및 물리학 분야에서 보다 선명하게 별을 관측하기 위한 적응 광학(Adaptive Optics)의 필수 요소이다. 또한, 반도체 및 디스플레이 분야의 리소그래피(Lithography) 공정에서 파면 측정은 열 및 온도 변화로 인한 파면 왜곡을 실시간으로 보상하기 위한 기술로 활용되고 있으며, 그 중요성은 계속적으로 증가하고 있다.

현재 산업계에서 널리 사용되는 대표적인 파면 측정기는 Shack-Hartmann 파면 센서(Shack-Hartmann Wavefront Sensor)와 광학 간섭계(Optical Interferometry)가 나뉘어진다. Shack-Hartmann 파면 센서는 단일 영상 소자(Imaging Sensor)와 마이크로 렌즈 배열(Micro-Lens Array)로 구성되어 있으며, 파면이 입사하는 경우 마이크로 렌즈 배열에 의해 초점(Focal Point)들이 횡방향으로

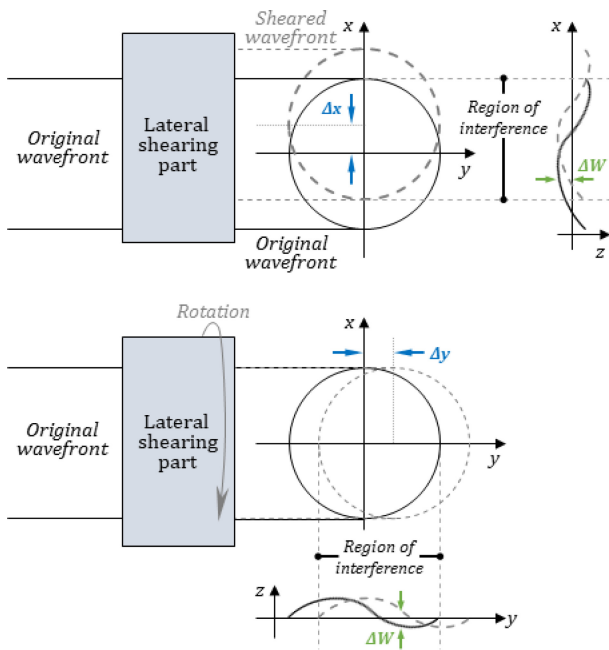


Fig. 1 Laterally sheared wavefronts to obtain the interference corresponding to the slope of the original wavefront

위치 변화가 발생하고, 이를 검출하여 파면을 측정한다[1,2]. 하지만 각 마이크로 렌즈의 초점 위치 변화는 영상 소자의 화소 (Pixel)들을 통해 측정되기 때문에 측정된 파면은 횡방향으로 분해능이 비교적 낮으며, 이를 개선하기 위해서는 더 많은 수의 렌즈 배열 및 고화질의 대면적 영상 소자가 필요하다.

한편, 광학 간섭계는 하나의 광을 분할하여 기준 파면과 측정 파면을 생성하고, 두 파면의 중첩으로 생성되는 간섭 무늬를 해석하여 측정 파면을 복원한다[3,4]. 이러한 광학 간섭계는 2D-파면 센서와는 달리 높은 횡방향 분해능을 가지며, 위상 측정을 통한 정밀한 파면 복원이 가능하다. 그러나 다양한 파면에 대해 간섭 무늬 획득을 위한 기준 파면의 생성이 어렵고, 공간적인 파면의 분할로 인하여 외부 환경 변화에 민감하다. 또한, 간섭 무늬의 위상을 추출하기 위한 위상 천이(Phase Shifting)로 인하여 추가적인 구동부 등이 필요한 단점이 있다.

이러한 광학 간섭계 중에서 층밀림 간섭계(Lateral Shearing Interferometry)는 Fig. 1과 같이 시편에서 반사된 측정 파면을 횡방향으로 이동시켜 자체적으로 두 파면을 생성하고, 이들의 중첩을 통해 간섭 무늬를 획득한다. 일반적인 형상 측정 광학 간섭계에서는 기준면과 비교하여 측정면의 형상에 따른 위상 차이에 해당하는 간섭 무늬를 획득하는 것과는 달리 층밀림 간섭계에서는 측정 파면의 기울기에 해당하는 간섭 무늬가 획득되기 때문에 별도의 기준 파면이 필요없고, 이로 인해 일반적인 광학 간섭계의 한계를 극복할 수 있다[5,6]. 그래서 층밀림 간섭계는 임의의 다양한 파면을 측정하기에 적합하며, 측정 파면으로부터 분할된 두 파면이 거의 동일한 광경로를 지나기 때문에, 외부 환경 변화에 둔감하여 안정적인 간섭 무늬 획득이 가능하다. 하지만 기존의 층밀림 간섭계는 위상 추출 등으로 인하여

구성이 비교적 복잡하고, 정렬이 어려운 동시에 전체 시스템의 크기가 큰 한계가 있다. 그래서 이러한 층밀림 간섭계를 파면 측정 센서로 응용하기 위해서는 보다 간단하고 안정적인 구성의 간섭계 설계와 실시간 위상 추출 및 고속 파면 복원 기술이 연구되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 기존 파면 측정 기술들의 한계를 개선한 간단하고 안정적인 편광 격자(Polarization Grating) 기반 층밀림 간섭계(Lateral Shearing Interferometry based on a Polarization Grating, PG-LSD)를 제안한다. 제안하는 시스템은 편광 격자와 평면 거울을 이용한 소형의 층밀림부(Shearing Part)를 통해 간섭 무늬를 생성시키며, 편광 격자와 평면 거울 사이의 거리 조절을 통해 간단하게 층밀림량(Shearing Amount)을 변화시켜 높은 측정 민감도로 다양한 파면을 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한, 편광 격자 기반 층밀림 간섭계는 편광 카메라(Polarization-Pixelated Camera)를 이용하여 위상 천이된 4장의 간섭 무늬를 한 번에 획득할 수 있어 단일 영상을 통한 안정적인 간섭 무늬 획득이 가능하다.

2. 편광 격자 기반 층밀림 간섭계

2.1 편광 격자

편광 격자는 Fig. 2(a)와 같이 얇은 유리판 위에 액정(Liquid Crystal)이 일정한 주기 간격으로 배열되어 있는 메타 표면(Meta-Surface)을 가지고 있다[7,8]. 그래서 편광 격자에서는 액정의 복굴절성(Birefringence)에 의한 위상 지연(Phase Retardation)과 격자 구조의 배열로 인한 회절(Diffraction), 편광 광분할(Polarizing Beam Splitting)이 복합적으로 나타난다. 그래서 편광 격자를 통과한 광은 입사할 때의 편광 상태에 따라 +1차 혹은 -1차로 회절 차수가 결정된다. 또한, 액정의 z축 정렬 방향에 의해 $\lambda/2$ 위상 지연판(Half-Wave Plate)과 같이 입사하는 광의 원 편광(Circular Polarization) 상태를 이와 수직인 원 편광 상태로 변화시킨다. 그래서 이러한 편광 격자에 좌원 편광(Left Handed Circular Polarization, LHCP)의 광이 입사하면, +1차로 회절되는 우원 편광(Right Handed Circular Polarization, RHCP)의 광이 되고, 우원 편광의 광은 -1차로 회절되는 좌원 편광의 광이 된다. 결과적으로 선 편광(Linear Polarization)의 광은 이러한 우원 및 좌원 편광을 가지는 광들의 조합으로 생각할 수 있기 때문에, 편광 격자에 입사한 선 편광의 광은 Fig. 2(b)와 같이 +1차와 -1차로 회절되어, +0와 -0의 방향으로 진행되는 두 광으로 분리된다.

2.2 편광 격자 기반 층밀림 간섭계

Fig. 3은 본 연구에서 제안하는 편광 격자 기반 층밀림 간섭계를 나타낸다. 광원의 광은 45° 회절된 편광기(Polarizer, P)를 통해 편광 상태가 선 편광으로 정의되어 시편(S)에 입사된다. 시편에서 반사된 광은 편광 격자(PG)와 평면 거울(M)을 통해

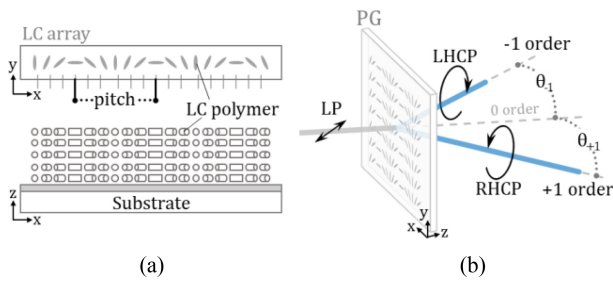


Fig. 2 (a) The structure of the polarization grating, and (b) Polarization and diffraction characteristics of the transmitted light by the polarization grating for the incident light with the linear polarization

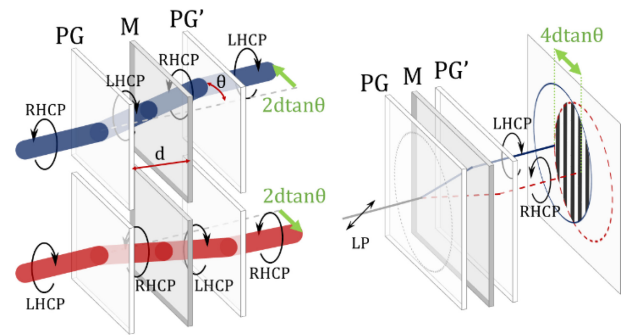


Fig. 4 Principle of laterally sheared wavefronts based on a polarization grating

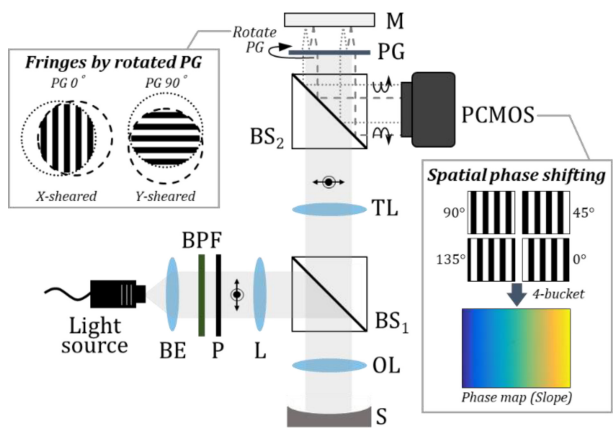


Fig. 3 Optical configuration of the lateral shearing interferometry based on a polarization grating (PG-LSI); BE: Beam expander; BPF: Band-Pass filter; P: Polarizer; L: Lens; BS: Beam splitter; OL: Objective lens; S: Specimen; TL: Tube lens; PG: Polarization grating; M: Flat mirror; PCMOS: Polarization-Pixelated CMOS camera

구성된 층밀림부에서 2개의 층밀림된 파면으로 분할되며, 이후 편광 카메라(PCMOS)에서 획득된다. 그리고 편광 카메라에서는 서로 수직인 원 편광 상태의 두 층밀림된 파면으로부터 4개의 공간 위상 천이된 간섭 무늬들이 획득된다. 이때, 층밀림 간섭계는 파면 복원을 위해 x 방향과 y 방향에 해당하는 각각의 파면 기울기를 획득해야 하며, 이를 위해 제안하는 간섭계는 층밀림부를 0 혹은 90°로 회전하여 각 층밀림 방향의 간섭 무늬를 획득한다. 이러한 간섭 무늬들을 통해 추출된 위상(Phase)은 층밀림 방향에 따른 파면의 기울기(Slope) 정보를 포함하므로, 이를 이용하면 측정 파면을 복원할 수 있다. 한편, 제안하는 층밀림 간섭계에서 광원의 파면에 해당하는 위상 오차를 제거하기 위해 실험 전에 평면 거울을 측정하였고 이를 통해 실험 결과를 보상하였다.

2.3 편광 격자 기반 층밀림 파면 생성 원리

Fig. 4는 편광 격자와 평면 거울로 구성되는 층밀림부의 층밀림 파면 생성 원리를 나타내며, PG는 측정광이 처음 입사하는

편광 격자, M은 평면 거울 그리고 PG는 거울에 반사된 광이 다시 되돌아올 때의 편광 격자를 의미한다. 먼저, PG에 수직으로 입사된 우원 편광의 광은 편광 격자의 회절 특성에 의해 $-\theta$ 의 방향으로 회절되며, 동시에 좌원 편광의 광이 된다. 이후 M에서 반사된 광은 우원 편광 상태가 되고, 이 광은 다시 PG를 투과하면서 좌원 편광의 광이 되는 동시에 편광 격자 면에 수직인 방향으로 출사한다. 동일한 원리로 층밀림부에 입사한 좌원 편광의 광은 우원 편광의 광으로 편광 상태가 변하는 동시에 편광 격자 면에 수직인 방향으로 출사하게 된다. 이때, 편광 격자의 회절 각도(Diffraction Angle) θ 와 평면 거울과의 거리 d 에 의해 층밀림부를 통과한 원 편광 상태의 두 광은 입사광보다 각각 $\pm 2 d \tan \theta$ 만큼 층밀림된다. 결과적으로 층밀림부에서 출사하는 두 광은 다음과 같은 층밀림량을 가진다.

$$\Delta x = \Delta y = 4 d \tan \theta \tag{1}$$

여기서 Δx 와 Δy 는 x 방향과 y 방향의 층밀림량을 나타낸다. 식(1)에서 알 수 있듯이 d 가 증가할수록 층밀림량은 증가하기 때문에 평면에 근접한 파면을 측정할 때, 신호대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 높일 수 있다. 즉, 제안하는 간섭계는 편광 격자와 평면 거울 사이의 거리를 적절히 조절하여 층밀림량을 제어할 수 있기 때문에, 다양한 파면에 대해 신호대 잡음비를 증가시켜 측정 민감도를 개선할 수 있는 장점이 있다. 층밀림량이 작은 경우 평면에 근사한 파면을 측정하면 간섭 무늬의 광량 변화량이 적기 때문에, 간섭 무늬는 Null과 같은 형태가 되며, 이때 가간섭 잡음(Coherent Noise)이나 광량 변화(Intensity Fluctuation)는 측정 결과에 영향을 미친다. 그래서 평면에 근접한 파면을 측정하는 경우 층밀림량을 증가시켜 신호대 잡음비를 증가시킬 수 있다.

참고로 층밀림량은 회절 각도의 조절을 통해서도 변화가 가능하나 일반적으로 회절 각도는 편광 격자의 액정 배열 주기에 따라 결정되기 때문에, 제품의 사양에 따라 고정된다.

2.4 편광 격자 기반 층밀림 간섭계의 측정 원리

본 논문에서 제안하는 편광 격자 기반 층밀림 간섭계는 편광 카메라를 이용하여 4개의 위상 천이된 간섭 무늬를 한 번에 획득

한다. 편광 카메라는 영상 소자의 각 화소마다 투과축이 0, 45, 90, 135°로 회전된 각각의 편광기가 배열되어 있다[9]. 그래서 편광 카메라로 획득된 한 장의 영상에서 인접한 각 화소는 서로 다른 편광 상태를 가지며, 이를 동일한 편광 화소별로 재조합하면 4장의 서로 다른 편광 영상들을 획득할 수 있다. 그리고 이러한 편광 카메라에 입사하는 두 광이 서로 수직인 원 편광 상태의 광일 경우 4개의 위상 천이된 간섭 무늬들이 획득된다[9].

본 연구에서는 4장의 위상 천이된 간섭 무늬들로부터 위상을 추출하기 위해 4-Bucket 알고리즘을 이용한다[10]. 먼저, 편광 카메라에서 획득된 x 방향의 층밀립 파면에 대한 간섭 무늬들을 수학적으로 나타내면 다음 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} I_{x0} &= A[1 + \gamma \sin(\Delta W_x)] \\ I_{x45} &= A[1 + \gamma \cos(\Delta W_x)] \\ I_{x90} &= A[1 - \gamma \sin(\Delta W_x)] \\ I_{x135} &= A[1 - \gamma \cos(\Delta W_x)] \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 I_{x0} , I_{x45} , I_{x90} , I_{x135} 는 편광 카메라에서 획득된 공간 위상 천이된 4개의 간섭 무늬들을 나타내며, A는 배경광의 평균 광강도이다. γ 는 간섭 무늬의 가시도, ΔW_x 는 x 방향에 대한 두 파면의 위상차이다. 참고로 식(2)의 모든 항목들은 편광 카메라의 각 픽셀 위치(x, y)에서의 값을 의미하며, 식을 간단히 하기 위해 이를 생략하였다. 식(2)를 통해 파면의 위상차 ΔW_x 는 다음 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta W_x = \tan^{-1} \left(\frac{I_{x0} - I_{x90}}{I_{x45} - I_{x135}} \right) \tag{3}$$

이때, 식(3)에 의해 계산된 ΔW_x 는 $-\pi$ 와 $+\pi$ 사이의 값을 가지기 때문에, 추출된 위상은 접혀진(Wrapped) 형태를 보이게 되므로, 최종적으로 위상 펼침(Unwrapping) 과정을 통해 ΔW_x 가 추출된다. 또한, 이와 동일한 과정을 통해 ΔW_y 도 추출되며, 이들 위상차는 각각 층밀립 방향에 해당하는 파면의 1차 기울기를 의미하며, 이를 이용하여 측정 파면을 복원한다.

추출된 파면의 기울기로부터 원래의 파면을 복원하기 위한 Modal 파면 복원(Modal Wavefront Reconstruction) 방법은 측정 파면 $W(x, y)$ 을 식(4)와 같이 일반적으로 잘 알려진 기저 함수(Basis Function) $F_i(x, y)$ 와 기저 함수의 계수이자 가중치(Weight)인 a_i 의 조합으로 정의한다[11,12].

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^J a_i F_i(x, y) \tag{4}$$

여기서 i 는 기저 함수의 차수를 의미하고, J는 전체 기저 함수의 개수를 나타낸다. 그러면 측정된 ΔW_x 와 ΔW_y 는 각각의 방향에 대한 $F(x, y)$ 의 기울기(Gradient) 함수로 표현되며, 이를 전체(x, y)에 대해 나타내면 다음 식(5)와 같은 행렬로 표현할 수 있다.

$$\vec{S} = \vec{E} \vec{a} \tag{5}$$

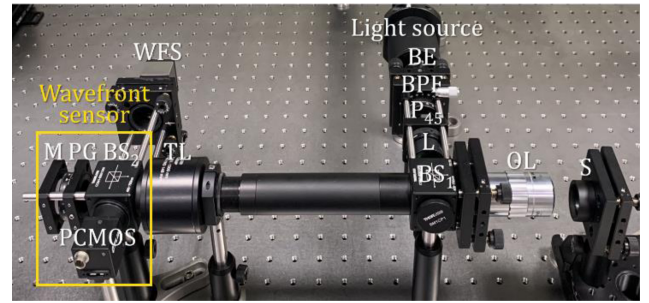


Fig. 5 Photograph of lateral shearing interferometry based on a polarization grating; BE: Beam expander; BPF: Band-Pass filter; P₄₅: 45° Rotated polarizer; L: Lens; BS: Beam splitter; OL: 2x Objective lens; TL: Tube lens; PG: Polarization grating; M: Flat mirror; PCMO5: Polarization-pixelated CMOS camera; WFS: Shack-Hartmann wavefront sensor

여기서 \vec{S} 는 측정된 ΔW_x 와 ΔW_y 의 행렬을 나타내며, \vec{E} 와 \vec{a} 는 각각 기저 함수의 기울기 행렬(Gradient Matrix)과 가중치 행렬을 의미한다. 식(5)를 이용하면 \vec{a} 를 계산할 수 있으며, 이를 식(4)에 대입하면 원래의 파면이 복원된다. 이러한 Modal 복원 방법은 수학적으로 잘 정의된 공간 함수들을 사용하여 파면을 복원하기 때문에 계산이 빠르다. 특히, 일반적인 수차(Aberration)로 구성된 파면을 측정할 때, 복원 파면의 정확도가 높은 특징이 있다. 기저 함수로는 광학적 수차를 효과적으로 표현할 수 있는 Zernike 다항식(Polynomial)을 주로 사용한다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 구성

Fig. 5는 본 연구에서 제안하는 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 실제 구성 사진을 나타낸다. 광원은 550 nm 중심의 반치폭이 50 nm인 LED를 사용하였다. 또한, 중심 파장이 550이고, 반치폭 10 nm인 파장 대역 필터(Band-Pass Filter, BPF)를 이용하여 광원의 파장 대역을 편광 격자의 설계 파장 대역에 맞추었다. 입사광의 직경을 확대하기 위해 빔확장기(Beam Expander)를 사용하였고, 광의 편광 상태는 선형 편광기를 사용하여 45° 회전된 선 편광 상태로 정의해주었다. 결상 광학계는 현미경 구조로 설계, 제작하였으며, 대물렌즈로는 Mitutoyo사의 M Plan Apo Series의 2x 렌즈를 사용하였다. 층밀립부의 편광 격자는 159 grooves/mm의 피치(Pitch)를 가지고 있으며, 550 nm 파장 대역에서 회절 각도가 ±5°가 되도록 설계된 Edmund Optics사의 #12-677 제품을 이용하였다. 편광 카메라는 (2,448 × 2,048)의 화소 분해능을 가지며 화소 크기는 3.45 μm이고, 24 fps의 영상 획득 속도(Frame Rate)를 갖는 LUCID사의 PHX050S-P를 사용하였으며, 이를 통해 4장의 공간 위상 천이된 간섭 무늬 영상을 한 번에 획득하였다. 또한, 제안하는 간섭계의 측정 결과를 검증하기 위해 편광 카메라의 결상 위치와 동일한 위치에

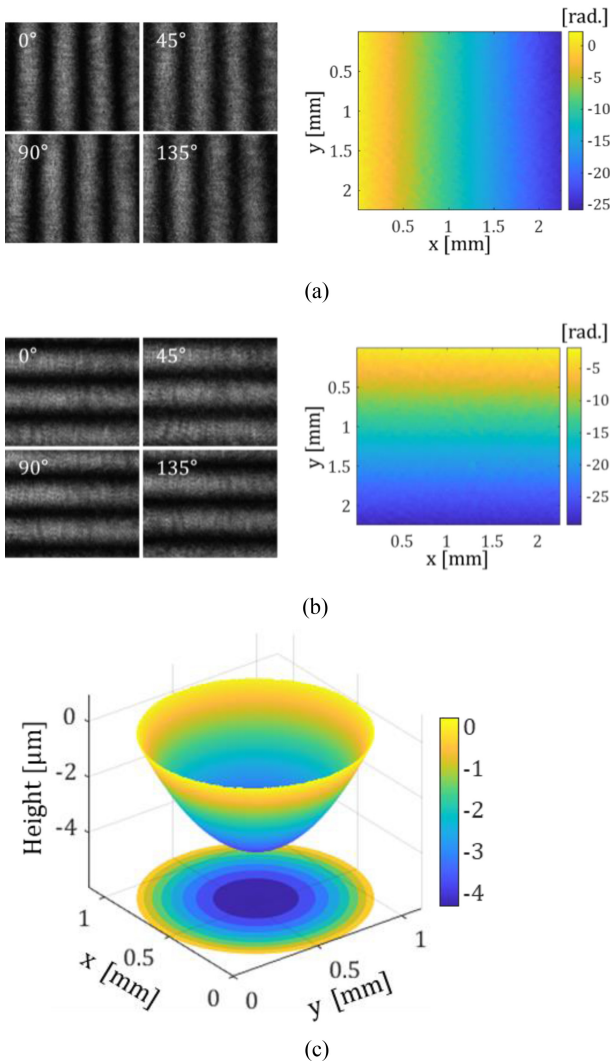


Fig. 6 4 Phase- shifted interferograms and phase maps along (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) The reconstructed wavefront

Thorlabs사의 삭-하트만 파면 센서(WFS30-7AR)를 설치하여 측정 결과를 비교하였다.

3.2 오목 거울 측정 및 결과

제안하는 시스템의 원리를 검증하기 위해, 곡률 반경(Radius of Curvature)이 각각 38, 100, 300, 400 mm인 오목 거울을 측정하였다. Fig. 6은 곡률 반경이 38 mm인 오목 거울에 대한 x, y 방향의 간섭 무늬와 이로부터 추출된 위상 그리고 복원된 파면을 나타낸다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 측정된 간섭 무늬들로부터 오목 거울에 해당하는 파면이 잘 복원되었으며, 복원된 파면의 곡률 반경은 38.51 mm로 계산되었다. 이는 제조사에서 제공하는 설계 곡률 반경과 1.4%의 오차를 보였다. 또한, 제안하는 시스템의 측정 결과들을 검증하기 위해 Taylor Hobson사의 접촉식 측정기인 Form Talysurf S5K로 동일한 오목 거울들을 측정하였으며, 그 결과 곡률 반경의 차이가 1.5% 이내임을 확인하였다. 다른 오목 거울들에 대한 측정 결과는 Table 1로 정리하였다.

Table 1 Summary of concave mirror measurement results

Designed radius of curvature [mm]	Form Talysurf S5K result [mm]	PG-LSI result [mm]
38	37.98	38.51
100	100.08	101.52
300	301.89	303.08
400	398.68	397.27

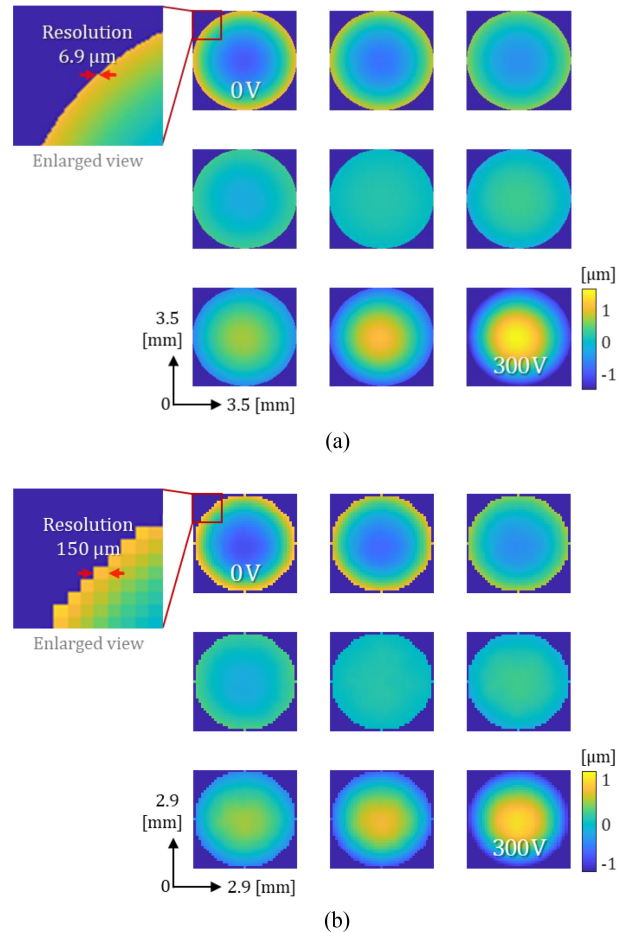


Fig. 7 Measurement results of piezoelectric deformable mirror by (a) Lateral shearing interferometry based on a polarization grating, and (b) Shack- Hartmann wavefront sensor

3.3 압전 변형 거울의 파면 측정 및 결과

제안하는 간섭계의 민감도를 확인하기 위해 압전 변형 거울 (Piezoelectric Deformable Mirror)을 사용하여 미세하게 변화하는 파면을 측정하였다. 실험에 사용된 압전 변형 거울은 Thorlabs사의 DMH40/M-P01 제품으로 은으로 코팅된 총 40개의 단일 조각(Segment)들이 하나의 거울을 형성하고 있으며, 각 조각들의 높이는 후면에 연결된 압전 소자(Piezoelectric Transducer)에 가해지는 전압에 의해 개별적으로 제어된다. 이러한 거울 조각들은 0-300 V의 전압 범위 내에서 높이가 자유롭게 제어되며, Defocus 구동의 경우 입력 전압이 150 V일 때 평면, 150 V

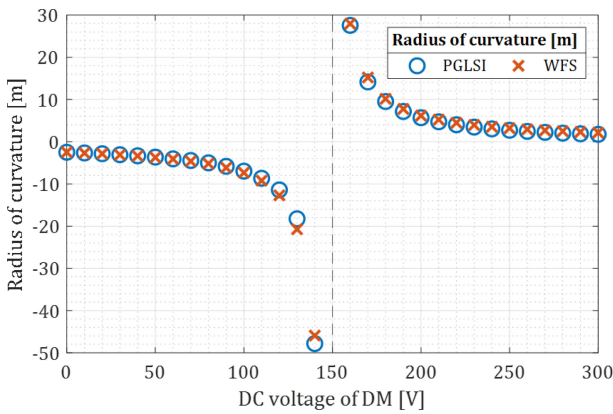


Fig. 8 Radius of curvature of piezoelectric deformable mirror defocus

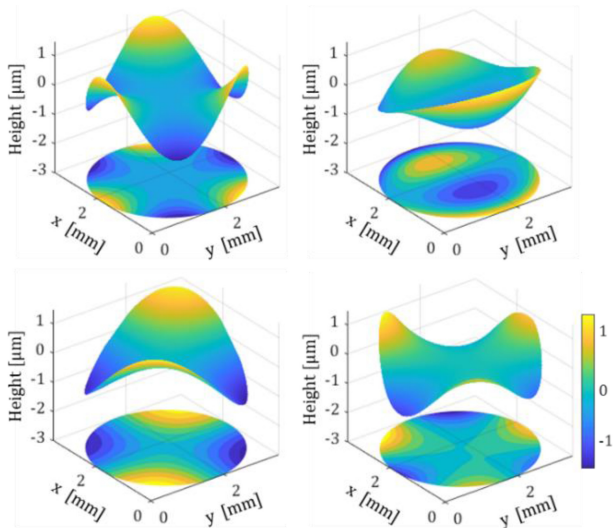


Fig. 9 Measurement result of an arbitrary wavefront of a piezoelectric deformable mirror

미만이면 오목면, 150 V 이상일 때는 볼록면이 된다. 이때 압전 변형 거울의 중앙부 높이는 150 V를 기준으로 전압의 크기와 비례하여 증가 및 감소한다.

Fig. 7은 압전 변형 거울의 Defocus 구동 시 측정된 파면을 나타낸다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 제안하는 간섭계의 측정 결과가 샵-하트만 파면 센서와 매우 유사함을 확인하였으며, 측정 결과를 정량적으로 비교하기 위해 Fig. 8과 같이 각 측정 결과들의 곡률 반경을 계산한 결과, 차이가 2.67% 이내임을 확인하였다. 한편, 복원된 파면을 살펴보면, 제안한 시스템의 측정 결과가 샵-하트만 파면 센서보다 더 높은 분해능으로 측정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 분해능이 편광 카메라에 화소 크기의 2배인 6.9 μm로 결정되는 것에 비해 샵-하트만 파면 센서의 분해능은 내부에 배열된 렌즈의 직경과 초점의 위치를 측정하기 위한 화소 개수에 의해 150 μm로 제한되기 때문이다.

이와 더불어 압전 변형 거울을 통해 2nd Astigmatism, Trefoil, Coma와 같이 다양한 형태의 파면을 생성하였으며, 제안하는

시스템으로 Fig. 9와 같이 파면을 복원하였다.

4. 논의

제안하는 편광 격자 기반 층밀립 간섭계에 사용되는 편광 격자는 이론적으로 입사하는 광의 편광에 따라 ±1차로만 회절되어야 하나, 실제 편광 격자는 이러한 회절광 외에 0차로 투과하는 누출광(Leakage Light)이 발생하였다. 이러한 0차 누출광은 ±1차 광에 의해 생성되는 간섭 무늬와 중첩되어 미세한 간섭 무늬를 생성하였으며, 이는 위상 추출 시 잡음을 발생시켰다. 이러한 0차 누출광을 최소화하기 위해서는 편광 격자의 설계 및 제작에 따른 사양에 맞추어 층밀립 간섭계가 구성되어야 한다. 수학적으로 편광 격자의 0차 누출광 효율(η₀)은 아래 식(6)과 같이 정의할 수 있다[13,14].

$$\eta_0 = \cos^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right) \tag{6}$$

여기서 λ는 입사광의 파장이며, Δn은 액정의 복굴절성에 따른 굴절률 차이 그리고 d는 편광 격자의 두께이다. 일반적인 편광 격자는 Δnd = λ/2가 되어 특정 파장일 때 0차 광의 효율이 0이 되도록 설계되어 있다. 그러나 입사하는 광의 파장이 이와 다른 경우 편광 격자에서는 0차 누출광이 발생한다. 이러한 이유로 편광 격자로 시스템을 구성하기 전에 편광 격자의 설계 파장을 확인하여 광원의 파장을 이와 일치시켜야 한다. 본 연구에서는 0차 누출광에 의해 발생하는 간섭 무늬의 오차를 최소화하기 위해 편광 격자의 설계 파장과 광원의 파장이 일치하도록 파장 대역 필터를 사용하였으나, 파장 대역 필터의 선폭으로 인해 미량의 0차 누출광이 발생하였다. 이러한 0차 누출광의 발생은 보다 선폭이 좁은 파장 대역 필터를 사용하여 최소화할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 파면 분석을 위한 편광 격자 기반 층밀립 간섭계를 제안하였다. 제안하는 시스템은 편광 격자를 이용하여 구성이 간단하고, 안정적인 간섭 무늬를 생성할 수 있다. 그리고 편광 카메라를 통해 한 번에 공간 위상 천이된 간섭 무늬를 획득하여, 고속 위상 추출 및 파면 복원이 가능하다. 제안하는 시스템의 측정 원리를 검증하기 위해 오목 거울 및 압전 변형 거울의 다양한 파면을 측정하였다.

REFERENCES

1. Pathak, B., Boruah, B. R., (2014), Improved wavefront reconstruction algorithm for shack-hartmann type wavefront

sensors, *Journal of Optics*, 16(5), 055403. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/5/055403>

2. Jiang, W., Li, H., (1990), Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm, *Adaptive Optics and Optical Structures*, 1271, 82-93. <https://doi.org/10.1117/12.20396>
3. Deck, L., Groot, P. D., (1994), High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry, *Applied Optics*, 33(31), 7334-7338. <https://doi.org/10.1364/AO.33.007334>
4. Kinnstaetter, K., Lohmann, A. W., Schwider, J., Streibl, N., (1988), Accuracy of phase shifting interferometry, *Applied Optics*, 27(24), 5082-5089. <https://doi.org/10.1364/AO.27.005082>
5. Gu, L., Liu, L., Hu, S., Zeng, A., Huang, H., (2017), Polarization phase-shifting lateral shearing interferometer with two polarization beam splitter plates, *Optical Review*, 24(4), 600-604. <https://doi.org/10.1007/s10043-017-0351-x>
6. Ghim, Y.-S., Rhee, H.-G., Davies, A., Yang, H.-S., Lee, Y.-W., (2014), 3D surface mapping of freeform optics using wavelength scanning lateral shearing interferometry, *Optics Express*, 22(5), 5098-5105. <https://doi.org/10.1364/OE.22.005098>
7. Oh, C., Escuti, M. J., (2008), Achromatic diffraction from polarization gratings with high efficiency, *Optics Letters*, 33(20), 2287-2289. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002287>
8. Kim, J., Li, Y., Miskiewicz, M. N., Oh, C., Kudenov, M. W., Escuti, M. J., (2015), Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts, *Optica*, 2(11), 958-964. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000958>
9. Brock, N., Hayes, J., Kimbrough, B., Millerd, J., North-Morris, M., Wyant, J. C., (2005), Dynamic interferometry, *Novel Optical Systems Design and Optimization VIII*, 5875F, 101-110. <https://doi.org/10.1117/12.621245>
10. Creath, K., (1988), V phase-measurement interferometry techniques, *Progress in Optics*, 26, 349-393. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70178-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70178-1)
11. Dai, F., Tang, F., Wang, X., Sasaki, O., Feng, P., (2012), Modal wavefront reconstruction based on zernike polynomials for lateral shearing interferometry: comparisons of existing algorithms, *Applied Optics*, 51(21), 5028-5037. <https://doi.org/10.1364/AO.51.005028>
12. Mochi, I., Goldberg, K. A., (2015), Modal wavefront reconstruction from its gradient, *Applied Optics*, 54(12), 3780-3785. <https://doi.org/10.1364/AO.54.003780>
13. Kim, J., Oh, C., Escuti, M. J., Hosting, L., Serati, S., (2008), Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings, *Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications VI*, 7093, <https://doi.org/10.1117/12.795752>
14. Oh, C., Escuti, M. J., (2007), Numerical analysis of polarization gratings using the finite-difference time-domain method. *Physical Review A*, 76(4), 043815. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.76.043815>



Hyo Bin Jeong

M.Sc. in the Department of Photonic Engineering, Chosun University. Her research interest is optical metrology.
E-mail: hbin0106@naver.com



Hyo Mi Park

Ph. D candidate in the Department of Photonic Engineering, Chosun University. Her research interest is optical metrology.
E-mail: hypmi0425@gmail.com



Ki-Nam Joo

Professor in the Department of Photonic Engineering, Chosun University. His research interest is optical metrology.
E-mail: knjoo@chosun.ac.kr