



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 2월
석사학위 논문

파면 분석을 위한 편광 격자 기반 층밀립 간섭계 연구

조선대학교 대학원

광기술훈공학과

정효빈

파면 분석을 위한 편광 격자 기반 층밀림 간섭계 연구

Lateral shearing interferometry based on polarization
gratings for wavefront sensing

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

정 효 빈

파면 분석을 위한 편광 격자 기반 층밀립 간섭계 연구

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

정 호 빈

정호빈의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김진태 (인)

위원 조선대학교 교수 박종락 (인)

위원 조선대학교 교수 주기남 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 현황	4
제3절 연구 목표	8
제2장 파면 분석을 위한 층밀립 간섭계	9
제1절 층밀립 간섭계	9
1. 층밀립 간섭계의 이론	9
2. 층밀립 간섭계의 종류	12
3. 층밀립 간섭계의 파면 복원 원리	18
제2절 편광 격자 기반 층밀립 간섭계	20
1. 편광 격자의 원리	20
2. 편광 격자 기반 층밀립 간섭계	23
제3장 실험 결과 및 분석	33
제1절 편광 격자 기초 실험	34
1. 편광 격자의 입사 편광에 따른 회절 방향 확인	37

2. 편광 격자의 회절 각도 확인	39
제2절 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계	41
1. 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 구성	41
2. 구면 측정 결과 분석	44
제3절 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계	48
1. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 구성	48
2. 구면 측정 결과 분석	50
3. 비구면 및 자유 곡면 측정 결과 분석	59
4. 층밀립량 변화에 따른 파면 측정 및 분석	68
제4장 고찰 및 논의	72
제5장 결론	76
[참고문헌]	78

그림 목차

그림 1-1. 비구면 및 자유 곡면 광학계의 활용 분야	1
그림 1-2. 삭-하트만 파면 센서의 측정 원리	5
그림 1-3. 광학 간섭계의 광학 구성도	6
그림 1-4. 층밀립 간섭계의 광학 구성도	7
그림 2-1. (a) 방사밀립, (b) 회전밀립, (c) 층밀립의 원리	9
그림 2-2. 층밀립 간섭계의 층밀립부를 통한 층밀립 파면 생성 방법	11
그림 2-3. (a) 평면판 및 (b) 쉐기판 기반의 층밀립 생성 방법	13
그림 2-4. (a) 광 분할기 및 기준 시편을 이용한 층밀립 간섭계와 (b) 프리즘을 이용한 층밀립 간섭계	14
그림 2-5. 회절 격자 기반 층밀립 생성 방법	15
그림 2-6. 복굴절 물질 기반 층밀립 생성 방법	17
그림 2-7. 층밀립 간섭계의 파면 복원 방법	19
그림 2-8. 편광 격자의 구조	20
그림 2-9. 입사 편광 상태에 따른 편광 격자의 회절 및 위상 지연 특성	20
그림 2-10. 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 광학 구성도	23
그림 2-11. 이중 편광 격자 기반 층밀립 생성 원리	24
그림 2-12. 이중 편광 격자 사이의 거리에 따른 층밀립량 변화 ($d_1 > d_2$)	24
그림 2-13. 단일 편광 격자 기반 층밀립 생성 원리	26
그림 2-14. 편광 카메라의 내부 구조	27
그림 2-15. 공간 위상 천이를 통해 획득된 4장의 간섭무늬의 위상 추출 과정	29

그림 3-1. (a) 기초 실험의 광학 구성 사진 및 (b) 편광 격자 모습 34

그림 3-2. 실험에 사용된 (a) 광원과 스펙트럼, (b) 대역 필터와 투과 스펙트럼 36

그림 3-3. 입사하는 빛의 편광에 따른 영상 및 광량 분포 그래프 38

그림 3-4. CCD 카메라와 편광 격자 사이의 거리에 따라 (a) 획득된 영상과 (b) 이때 회절되는 두 빛의 중심 변위 그래프 40

그림 3-5. 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 (a) 광학 구성도와 (b) 실제 사진 42

그림 3-6. NKT Photonics 사의 SuperK compact laser 43

그림 3-7. LUCID 사의 Polarization-pixelated CMOS camera 43

그림 3-8. 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계로 획득한 오목 거울의 (a) 간섭무늬와 (b) 위상, (c) 파면 복원 결과 44

그림 3-9. 획득된 간섭무늬의 공간 필터링 (a) 전과 (b) 후 45

그림 3-10. 공간 필터링 후 (a) 간섭무늬와 (b) 위상, (c) 오목 거울의 파면 복원 결과 (d) 시뮬레이션된 파면과 측정 결과의 잔차 47

그림 3-11. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 (a) 광학 구성도와 (b) 실제 사진 49

그림 3-12. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 오목 거울 (R=38 mm) x, y 방향 (a) 간섭무늬와 (b) 추출된 위상, (c) 측정 결과 52

그림 3-13. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 오목 거울 측정 결과 53

그림 3-14. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계와 Form Talysurf S5K의 오목 거울 측정 결과 비교 53

그림 3-15. 압전 변형 거울과 입력 전압에 따른 표면 변화 55

그림 3-16. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 압전 변형 거울 전압 변화에 따른 파면 측정 결과 56

그림 3-17. 삭-하트만 파면 센서의 압전 변형 거울 전압 변화에 따른 파면 측정 결과 57

그림 3-18. 압전 변형 거울의 전압 변화에 따른 파면의 곡률 반경 이론값과 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계 및 삭-하트만 파면 센서의 측정 결과 비교 그래프 58

그림 3-19. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 각각의 비구면 렌즈 (a) 측정 결과와 (b) 시뮬레이션 파면과의 잔차 60

그림 3-20. Thorlabs 사의 원통형 렌즈 61

그림 3-21. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 원통형 렌즈 측정 결과 62

그림 3-22. 원통형 렌즈의 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계 및 Form Talysurf S5K로 측정한 결과의 비교 그래프 63

그림 3-23. Shimadzu 사의 원환형 거울 64

그림 3-24. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 원환형 거울 (a) 측정 결과와 (b) 수직 및 수평 방향의 line profile 65

그림 3-25. 원환형 거울의 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 비교 그래프 및 두 결과의 잔차 그래프 66

그림 3-26. 편광 격자와 평면 거울 사이의 거리에 따른 층밀립량의 변화 69

그림 3-27. 층밀립량 변화에 따른 오목 거울 (R=2000 mm)의 (a) x 방향 및 (b) y 방향일 때의 간섭무늬 주기 변화와 위상 추출 결과 70

그림 3-28. 층밀림량에 따른 오목 거울의 파면 복원 결과 및 이론 파면과
 의 잔차 71
 그림 4-1. 실시간 파면 측정을 위한 편광 격자 기반 층밀림 간섭계 75

표 목차

표 2-1. Jones Matrix 및 특징 22
 표 2-2. Zernike polynomial 32
 표 3-1. Shack-Hartmann wavefront sensor의 성능 48
 표 3-2. 오목 거울의 설계값 및 실험 결과 53
 표 3-3. 비구면 렌즈의 설계 사양 59
 표 3-4. 비구면과 자유 곡면의 설계값 및 실험 결과 67

ABSTRACT

Lateral shearing interferometry based on polarization gratings for wavefront sensing

Jeong Hyo Bin

Advisor : Prof. Ki-Nam Joo, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

The importance of wavefront sensing has significantly increased in applications of adaptive optics for astronomy and EUV lithography. Wavefront sensors are also widely used to test optical components of smartphone cameras, as well as virtual reality (VR) and augmented reality (AR) devices. Two conventional methods of measuring wavefront shapes are with a Shack-Hartmann or a pyramid wavefront sensing technique. These sensors have a high sensitivity and robust response, but lack in lateral resolution and dynamic range. Alternative to wavefront metrology, an optical interferometer can be used to improve the lateral resolution of measurements. Several interferometric principles have been proposed and experimentally verified such as point diffraction interferometry, digital holography, lateral shearing interferometry, and radial shearing interferometry.

Optical interferometry has been traditionally used in wavefront sensing, and especially shearing interferometers were adopted to reconstruct the wavefront of light with the advantage of no reference light. A lateral shearing interferometer (LSI) can reconstruct the wavefront using so called, x - and y -sheared

interferograms with the aid of zonal and modal reconstruction algorithms. Compared to radial shearing interferometry (RSI), LSI does not have to confirm concentricity between two sheared wavefronts, which restricts the measurement of wavefronts without rotational symmetry.

One of the main considerations in LSI is the phase extraction from the interferograms because two laterally sheared wavefronts are typically generated by a fixed shear plate. Even though the spatial carrier technique can be used, the additional calculations with two-dimensional Fourier transformation and spatial filtering deteriorate the phase. In order to apply the phase shifting technique, a grating pair was used and the phase shifted interferograms were obtained by the movement of the grating. Recently, a polarization-pixelated camera and a birefringent plate have been adopted for a single shot LSI based on spatial phase shifting technique. On the other hand, another issue in LSI is the capability of the lateral shear adjustment according to the various target shapes. For the steep wavefronts, the lateral shear should be small while it is vice versa in plane-like shapes. However, the lateral shear is almost fixed in typical LSI because of the fixed shearing devices, and the system can be bulky when the shearing is implemented by the additional interferometric configurations.

In this investigation, we propose a simple and effective lateral shearing interferometer based on polarization gratings. The proposed LSI consists of a polarization grating (PG), a flat mirror (M) and a polarization-pixelated CMOS camera (PCMOS). As an optical source, a LED with 550 nm center wavelength is used with 10 nm band-pass filter (BPF), and the reflected beam from the specimen is incident to the lateral shearing device. In the lateral shearing device, the incident beam is split into two beams by the PG, and the returning beams can be laterally shifted after reflecting off the flat mirror and passing through the PG again. These two beams are not only laterally shifted, but also their polarization states are orthogonal to each other as circular polarizations. Then, the PCMOS, where a polarizer array with 0° , 45° , 90° and 135° transmission axes is put on the imaging sensor, can obtain four phase-shifted interferograms at once to calculate the phase map based on the spatial phase shifting technique. With a single image obtained by

the PCMOS, 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 the 90° rotation of the shearing device. Then, the original wavefront can be reconstructed by the wavefront reconstruction algorithms. As the experimental results, wavefronts generated by a toroidal mirror and cylindrical lenses including concave mirrors and aspheric lenses were successfully measured, and the deviations from the reference shapes were less than 100 nm.

One of the benefits in the proposed LSI is to conveniently adjust the lateral shear distance according to the wavefronts. In case of measuring plane like shapes, the lateral shear distance should be enough large for increasing the signal-to-noise ratio (SNR) to reduce the distortion of the wavefront by experimental noises such as diffraction, speckle and unexpected reflection.

제1장 서론

제1절 연구 배경

최근, 과학 및 산업 분야에서 광학 센서의 중요성이 높아지고 있다. 이 중에서 빛의 파면 측정 센서 (wavefront sensor)는 천문학 및 물리학 분야에서 별의 관측을 위한 천체 망원경 설계, 제작, 평가에 있어 필수적으로 사용되고 있다. 또한, 반도체 및 디스플레이 분야에서 제품을 생산하기 위한 리소그래피 (lithography) 공정에서는 마스크의 패턴을 정밀하게 결상하기 위해, 적응 광학 (adaptive optics)을 통해 실시간으로 파면을 측정, 보정하고 있으며, 이러한 적응 광학에서 파면 측정 센서의 중요성은 계속적으로 증가하고 있다.



그림 1-1. 비구면 및 자유 곡면 광학계의 활용 분야

한편, 그림 1-1과 같이 스마트폰 (smartphone), 자동차 헤드업 디스플레이 (head-up-display), VR (virtual reality), AR (augmented reality), 웨어러블 디바이스 (wearable device) 등에 사용되는 광학 부품은 기존의 구면 거울이나 렌즈에서 벗어나 형상이 비구면으로 설계, 제조되고 있으며, 경우에 따라서는 자유 곡면의 형태를 가진

다. 제품의 광학적 성능은 내부의 광학 부품에 의해 결정되기 때문에, 이러한 광학 부품의 형상은 정밀하게 측정되어야 하며, 이를 위해서는 표면 형상을 측정하기 위한 기술이 개발되어야 한다. 파면 측정 기술은 시편에서 반사한 파면을 통해 시편의 표면 형상을 신속하고 정확하게 측정할 수 있기 때문에, 학계 및 산업계에서 크게 주목받고 있다. 특히, 파면 측정 기술은 빛을 이용한 비접촉식 (non-contact) 측정 방법이기 때문에, 시편의 손상 없이 측정이 가능한 장점이 있고, 시편의 재질이나 면적에 제한받지 않는 특징이 있다.

현재 산업계에서 널리 사용되는 파면 측정기로는 샡-하트만 파면 센서 (Shack-Hartmann wavefront sensor)와 광학 간섭계 (optical interferometry)가 있다. 샡-하트만 센서는 단일 영상 소자 (imaging sensor)와 마이크로 렌즈 배열 (micro lens array)로 구성되어 있으며, 입사 파면에 대하여 렌즈 배열을 통한 초점 (focal point)들의 위치 변화를 통해 파면을 측정한다. 하지만 각각의 렌즈에 대한 초점 위치 변화를 다수의 영상 화소 (pixel)들을 이용하여 측정하기 때문에, 측정 결과의 횡방향 분해능이 비교적 낮으며, 이를 개선하기 위해서는 더 많은 수의 렌즈 배열 및 고화질의 대면적 영상 소자가 필요하다는 한계가 있다.

한편, 광학 간섭계는 하나의 빛을 분할하여 각각을 기준 파면과 측정 파면으로 생성 시키고, 두 파면을 서로 중첩시켜 생성된 간섭무늬를 통해서 측정 파면을 복원한다. 광학 간섭계는 간섭무늬를 획득하는 영상 소자에 의해 높은 횡방향 분해능을 가지며, 빛의 파장을 기준으로 높은 위상 분해능을 가진다. 또한, 고속 측정이 가능한 장점이 있지만, 다양한 파면에 대해 간섭무늬 획득을 위한 기준 파면의 생성이 어렵고, 파면의 분할로 인하여 환경 변화에 민감하며, 간섭무늬의 위상을 추출하기 위한 추가적인 구동부 등이 필요한 단점이 있다.

그러나 광학 간섭계 중에서 층밀림 간섭계 (lateral shearing interferometry)는 시편에서 반사된 측정 파면의 일부를 횡방향 (lateral direction)으로 이동시켜 중첩된 영역에서 간섭무늬를 획득하고, 이를 통해 파면을 복원하기 때문에, 파면 측정에 있어 일반적인 광학 간섭계의 한계를 극복할 수 있다. 또한, 층밀림 간섭계에서는 별도의 기준 파면이 필요 없기 때문에, 임의의 다양한 파면을 측정하기에 적합하며, 측정 파면으로부터 분할된 두 파면이 거의 동일한 광경로를 지나기 때문에, 외부 환경 변화에 둔감

하여 안정적인 간섭무늬 획득이 가능한 장점이 있다. 하지만 일반적으로 사용되는 층밀림 간섭계는 구성이 복잡하고, 정렬이 어려운 동시에 위상 추출 방법이 제한적이다. 그래서 이러한 층밀림 간섭계를 파면 측정 센서에 응용하기 위해서는 간단하고 안정적인 구성의 간섭계 설계 및 실시간 위상 추출 및 고속 파면 복원 기술이 연구되어야 한다.

제2절 연구 현황

1. 삭-하트만 파면 센서 (Shack-Hartmann wavefront sensor)

삭-하트만 파면 센서는 그림 1-2와 같이, 영상 소자와 마이크로 렌즈 배열로 구성된 파면 측정기이다 [1-3]. 마이크로 렌즈 배열은 동일한 초점 거리를 가지는 마이크로 크기의 작은 렌즈들의 조합으로, 입사한 파면의 각 부분 파면들을 영상 소자에 결상시키는 역할을 한다. 이때, 각 렌즈에 의한 초점의 위치는 파면의 모양에 따라 변화하며, 다수의 영상 소자 화소들로부터 측정되어 입사 파면이 복원된다. 삭-하트만 파면 센서는 실시간으로 입사 파면에 해당하는 초점들의 위치 측정 및 파면 복원이 가능한 장점이 있다.

하지만 삭-하트만 파면 센서는 마이크로 렌즈 배열의 각 렌즈에 의한 초점 위치를 검출하기 위해 많은 수의 영상 화소들이 필요하기 때문에, 고화질의 영상 소자가 필요하다. 이와 더불어, 횡방향의 분해능은 마이크로 렌즈 배열의 렌즈 개수에 의해 결정되므로, 측정 원리상, 측정 결과의 횡방향 분해능이 매우 낮은 단점이 있다. 그래서 이러한 단점을 개선하기 위한 마이크로 렌즈의 소형화 및 고화질의 대면적 영상 소자 기술이 개발되었으나, 여전히 비용적인 문제 및 기술적인 한계를 극복하기 못하고 있다. 한편, 하나의 파면을 일정 영역으로 나누어 각각을 측정하고, 그 결과들을 조합하여 전체 파면을 복원하는 파면 정합 측정 (sub-aperture wavefront stitching) 기술 [4-5]이 제안되었으나, 이러한 기술은 하나의 파면에 대해 여러 번의 측정을 수행하기 때문에 오랜 측정 시간이 필요하다. 또한, 정합을 위해 측정 파면들의 일정 영역은 서로 중첩되어야 하기 때문에, 광학계의 정렬이 복잡하고 이로 인한 파면 왜곡이 발생할 수 있는 한계를 가진다.

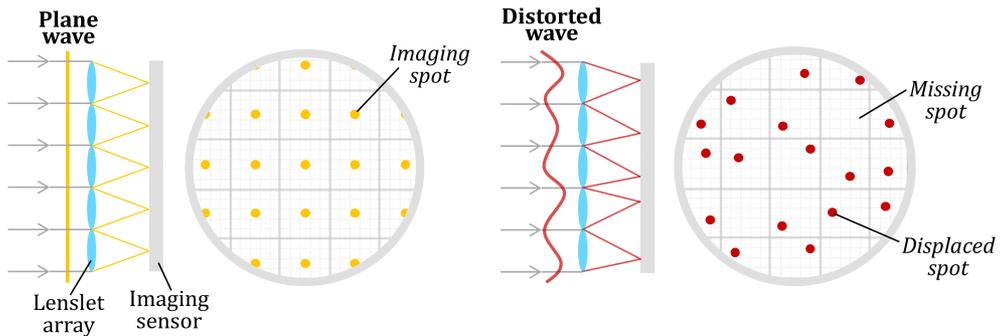


그림 1-2. 샵-하트만 파면 센서의 측정 원리

2. 광학 간섭계 (Optical interferometry)

광학 간섭계는 그림 1-3과 같이, 빛을 광 분할기를 통해 분할하여, 각각 기준면에 의한 기준 파면과 시편에 해당하는 측정 파면을 생성시킨 뒤, 두 파면의 중첩을 통해 생성되는 간섭무늬를 해석하여 측정 파면을 복원하는 방법이다. 광학 간섭계는 일반적으로 획득된 간섭무늬의 위상을 추출하는 방법에 따라 주사 간섭계 (scanning interferometer)와 위상 천이 간섭계 (phase shifting interferometer)로 구분할 수 있다 [6-11].

주사 간섭계는 가간섭 거리 (coherence length)가 짧은, 넓은 파장 대역의 광원 (broadband light)을 사용하여, 광경로 차이가 0에 가까울 때에만 획득되는 간섭무늬로부터 파면을 복원한다. 그래서 주사 간섭계는 일반적으로 광경로 차이를 변화시키기 위한 기계적 구동부가 필요하며, 기계적 구동부의 주사를 통해 위치별 간섭 신호를 획득하면, 간섭 신호의 가시도 (visibility)와 위상 (phase)의 정점 (peak)을 검출하여 3차원 파면을 측정할 수 있다. 그러나 파면의 깊이 및 다양한 모양에 따라 오랜 측정 시간이 요구되며, 획득되는 데이터의 수가 증가하는 한계가 있다. 반면, 위상 천이 간섭계는 단파장의 광원을 이용하여 획득되는 간섭무늬로부터 파면을 복원한다. 광원의 가간섭성이 우수하기 때문에, 파면의 깊이에 상관없이 간섭무늬 획득이 가능한 장점이 있다. 그러나 간섭무늬로부터 위상을 추출하기 위해서는 광경로 차이를 미세하게 변화시키면서 위상 천이된 간섭무늬들을 획득해야 하며, 이를 통해 3-bucket, 4-bucket,

5-bucket 등의 위상 천이 알고리즘으로 파면이 복원된다. 이러한 위상 천이 간섭계는 주사 간섭계보다 좁은 기계적 구동 범위에서 파면 복원이 가능하기 때문에, 측정 속도가 빠른 장점이 있으나, 2π -위상 모호성 (2π -ambiguity)으로 인해 $\pm\lambda/4$ 이상의 급격한 파면 변화는 측정할 수 없는 한계가 있다.

한편, 일반적인 광학 간섭계는 광학 구성의 특성상, 그림 1-3과 같이 분할된 두 파면이 서로 다른 광경로를 진행하기 때문에 외부 환경 변화에 영향을 많이 받는 단점이 있다. 그리고 간섭 신호를 획득하기 위해 사용되는 기계적 구동기는 측정 시간을 지연시킬 뿐만 아니라, 구동 시 진동으로 인한 오차를 발생시킨다. 또한, 다양한 종류의 파면에 대한 간섭무늬를 획득하기 위해서는 각 측정 파면과 유사한 기준 파면이 생성되어야 하는 동시에 시스템이 복잡해지기 때문에, 파면 측정 센서로 활용하기에 한계가 있다.

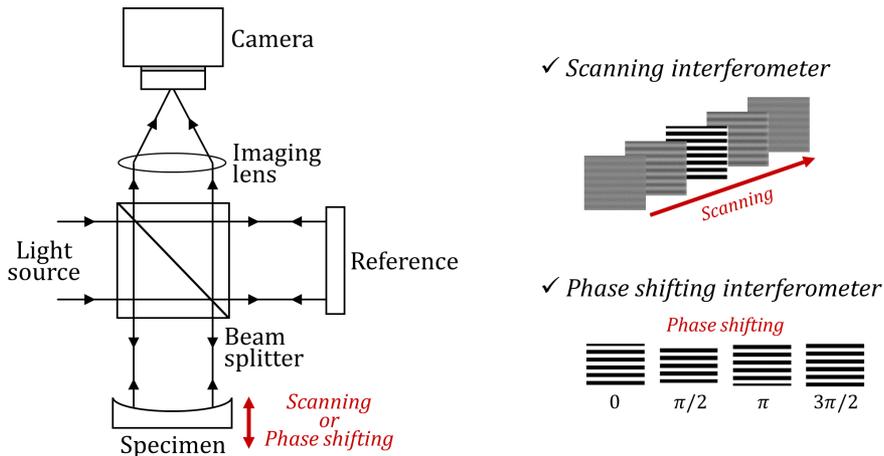


그림 1-3. 광학 간섭계의 광학 구성도

3. 층밀림 간섭계 (Lateral shearing interferometry)

층밀림 간섭계는 그림 1-4와 같이 층밀림부 (lateral shearing part)를 이용하여 측정 파면과 미세하게 횡방향으로 이동한 층밀림 파면을 생성시킨다 [12-16]. 이때, 원래

의 측정 파면과 층밀림 파면 사이의 중첩된 영역에서는 간섭무늬가 생성되고, 이로부터 파면의 기울기에 해당하는 위상을 추출할 수 있다. 그리고 이러한 파면의 기울기를 이용하면, 원래의 측정 파면을 복원할 수 있다. 층밀림 간섭계는 기존의 일반적인 광학 간섭계들과 달리, 기준 파면이 필요 없기 때문에 파면 센서로의 활용이 용이하며, 또한 3차원 형상 측정 및 광학 수차 분석에 널리 활용되고 있다. 그리고 층밀림부에서는 분할된 두 파면의 광경로가 거의 동일하기 때문에, 측정 시 외부 환경 변화에 둔감한 장점이 있다.

한편, 층밀림 간섭계에서 획득된 간섭무늬는 두 파면 사이의 층밀림량 (shearing amount)에 따라 주기 (period) 및 개수가 달라지게 된다. 이때, 간섭무늬의 주기 및 개수는 파면의 기울기에 비례하기 때문에, 평면과 같이 기울기가 작은 파면일 경우, 간섭무늬에 의한 광량 변화가 회절과 같은 광학 잡음 등으로 인한 광량 변화와 비슷해지며, 이로 인해 추출된 파면 기울기에 오차의 영향이 커지게 된다. 이는 복원된 파면에서 측정 오차로 발생하며, 결국 파면의 왜곡을 유발한다. 이를 해결하기 위해서는 간섭계의 층밀림량을 파면에 따라 적절히 조절하여 간섭무늬의 주기 및 개수를 변화시켜서 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)를 증가시켜야 한다. 그러나 일반적인 층밀림 간섭계는 층밀림 파면을 생성하기 위해 유리판이나, 복굴절 물질 등을 고정된 광학 소자들을 이용하기 때문에, 층밀림량이 고정되어 있으며 이를 조절하기 위해서는 복잡한 광학 구성이 필요하다. 이와 동시에, 측정된 간섭무늬로부터 위상을 추출하기 위한 시스템 및 계산 과정이 복잡하기 때문에, 파면 측정 센서로 활용하기에 한계가 있다.

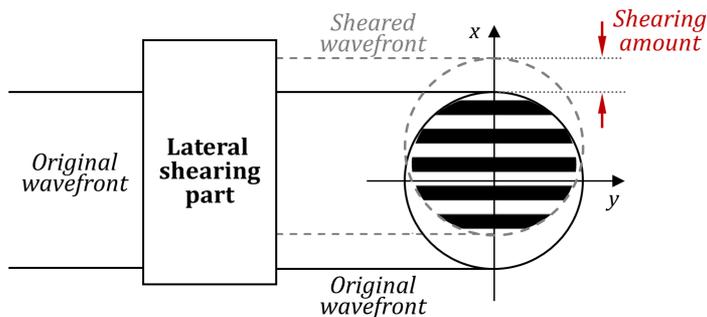


그림 1-4. 층밀림 간섭계의 광학 구성도

제3절 연구 목표

본 논문에서는 다양한 파면을 분석하기 위한 편광 격자 기반 층밀립 간섭계를 제안한다. 제안하는 간섭계는 편광 격자를 이용하여 소형의 층밀립부를 구성하며, 편광 카메라를 통해 공간 위상 천이된 간섭무늬를 한 번에 획득한다. 또한, 제안하는 간섭계는 비교적 간단하게 층밀립량의 변화를 통해 높은 측정 민감도로 다양한 파면을 측정할 수 있다. 본 논문에서는 편광 격자 기반의 두 가지 층밀립 기술을 제안하며, 제안하는 층밀립 간섭계의 원리를 이론적으로 규명하고, 실험을 통해 검증하는 것을 연구 목표로 한다.

본 연구의 목표 달성을 위한 세부적인 연구 내용은 다음과 같다.

- 편광 격자 기반의 층밀립 파면 생성 방법에 관한 연구
- 이중 편광 격자 기반의 층밀립 간섭계 연구
- 단일 편광 격자 기반의 층밀립 간섭계 연구

위와 같은 목표를 달성하기 위해 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 제2장에서는 기존 층밀립 간섭계의 이론과 시스템 구성, 그리고 위상 추출 및 파면을 복원하는 방법에 대해 소개한다. 또한, 편광 격자를 이용한 두 가지의 층밀립 파면 생성 방법을 제안하고, 원리에 대해 설명한다. 그리고 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 위상 추출 방법 및 파면 복원 원리에 대해 설명한다. 제3장에서는 편광 격자 기반의 층밀립 간섭계의 실험 내용으로, 먼저 편광 격자의 원리 및 성능을 확인하기 위한 기초 실험과 제안하는 층밀립 간섭계의 구성, 원리 검증 및 다양한 파면에 대한 실험 결과를 분석한다. 제4장에서는 제안하는 시스템의 오차 요인과 실시간 측정을 위한 방법에 대해 논의하며, 마지막으로 제5장 결론에서는 연구 내용을 전반적으로 요약하며 마무리한다.

제2장 파면 분석을 위한 층밀림 간섭계

제1절 층밀림 간섭계

1. 층밀림 간섭계의 이론

밀림 간섭계 (shearing interferometry)는 파면 밀림부 (wavefront shearing part)를 통해 시편에서 반사된 측정 파면을 기준 파면과 밀림 파면으로 분할시키고, 이들 파면들로부터 밀림 간섭무늬 (shearing interferogram)을 생성한다. 이때, 획득되는 간섭무늬의 위상에는 파면 밀림 방식에 따른 측정 파면의 1차 미분 성분 (기울기)이 포함되어 있으며, 밀림 간섭계는 측정된 위상에 적분 및 수학적 모델을 적용하여 측정 파면을 복원한다.

일반적으로 밀림 간섭계는 측정 파면을 분할하는 방식에 따라 방사밀림 (radial shearing), 회전밀림 (rotational shearing) 그리고 층밀림 (lateral shearing) 간섭계로 구분할 수 있다.

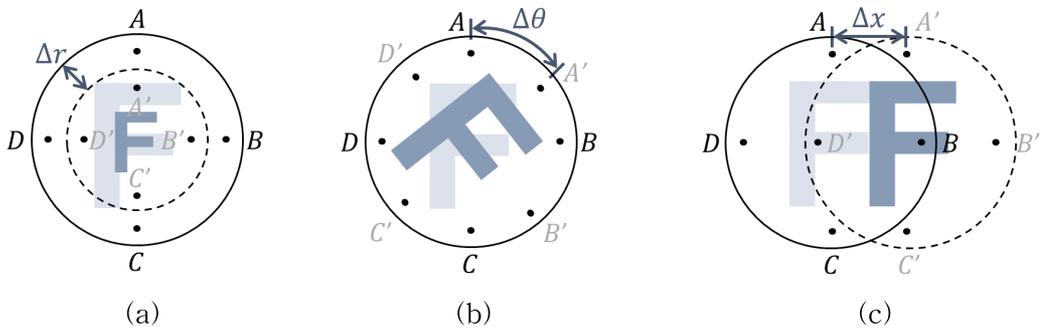


그림 2-1. (a) 방사밀림, (b) 회전밀림, (c) 층밀림의 원리

그림 2-1은 파면 밀림부의 방식에 따른 밀림 간섭계들의 측정 파면과 밀림 파면을 나타낸다. 방사밀림 간섭계는 그림 2-1(a)와 같이 방사형 방향으로 각각 Δr 만큼 축소

또는 확장시켜 측정 파면을 두 개의 파면으로 분할한다 [17]. 이때, 획득되는 두 파면은 파면의 중심을 기준으로 서로 다른 크기를 가진다. 또한, 회전밀립 간섭계에서는 측정 파면이 광축을 중심으로 $\Delta\theta$ 만큼 회전되어 그림 2-1(b)와 같이 두 개의 파면이 형성되므로 두 파면은 크기가 동일하고 파면의 중심이 일치한다 [18]. 즉, 방사밀립 및 회전밀립 간섭계에서 생성되는 두 파면은 광축을 기준으로 중심이 일치하기 때문에, 회전 대칭성이 없는 자유 곡면을 측정하는 경우에 파면 중심의 불일치 등으로 인해 정확한 파면을 복원하는데 한계가 있다. 반면 층밀립 간섭계는 그림 2-1(c)와 같이 측정 파면을 분할하여 x 방향으로 Δx 만큼, 그리고 y 방향으로 Δy 만큼 각각 변위시켜 두 개의 층밀립 파면을 생성하며, 각각의 층밀립된 파면들과 원래 파면으로부터 각 방향에 해당하는 2장의 층밀립 간섭무늬를 획득한다. 그래서 층밀립 간섭계는 광축이 일치하는 두 파면을 생성시키는 다른 밀립 간섭계들과는 달리, 회전 대칭성의 제한 없이 자유 곡면의 파면까지 정확하게 복원할 수 있는 장점이 있다.

층밀립 간섭계의 파면 밀립부인 층밀립부 (lateral shearing part)는 그림 2-2와 같이 측정 파면을 횡방향과 종방향으로 분할하여 층밀립 파면을 생성시키는 역할을 한다. 이때, 측정 파면 $W(x,y)$ 은 층밀립량 (shearing amount) Δx 와 Δy 만큼 변위된 층밀립 파면 $W(x+\Delta x,y)$, $W(x,y+\Delta y)$ 와 서로 중첩되어 각각의 방향에 따른 층밀립 간섭무늬를 생성하며, 이로부터 획득되는 위상은 층밀립 파면과 원래 파면의 차이 (ΔW)를 나타낸다.

$$\phi_x = W(x+\Delta x,y) - W(x,y) = \Delta W_x(x,y) \quad (2-1-1)$$

$$\Delta W_x \simeq \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right) \Delta x \quad (2-1-2)$$

$$\phi_y = W(x,y+\Delta y) - W(x,y) = \Delta W_y(x,y) \quad (2-2-1)$$

$$\Delta W_y \simeq \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right) \Delta y \quad (2-2-2)$$

여기서 ϕ_x 와 ϕ_y 는 각각 x , y 방향의 층밀립 간섭무늬로부터 획득한 위상을 나타낸다.

식 (2-1-2)와 식 (2-2-2)에서 알 수 있듯이, 측정된 위상은 층밀립 방향에 해당하는 파면의 1차 기울기를 의미하며, 각각의 간섭무늬로부터 추출된 위상을 각 방향으로 적분하면 측정 파면을 복원할 수 있다.

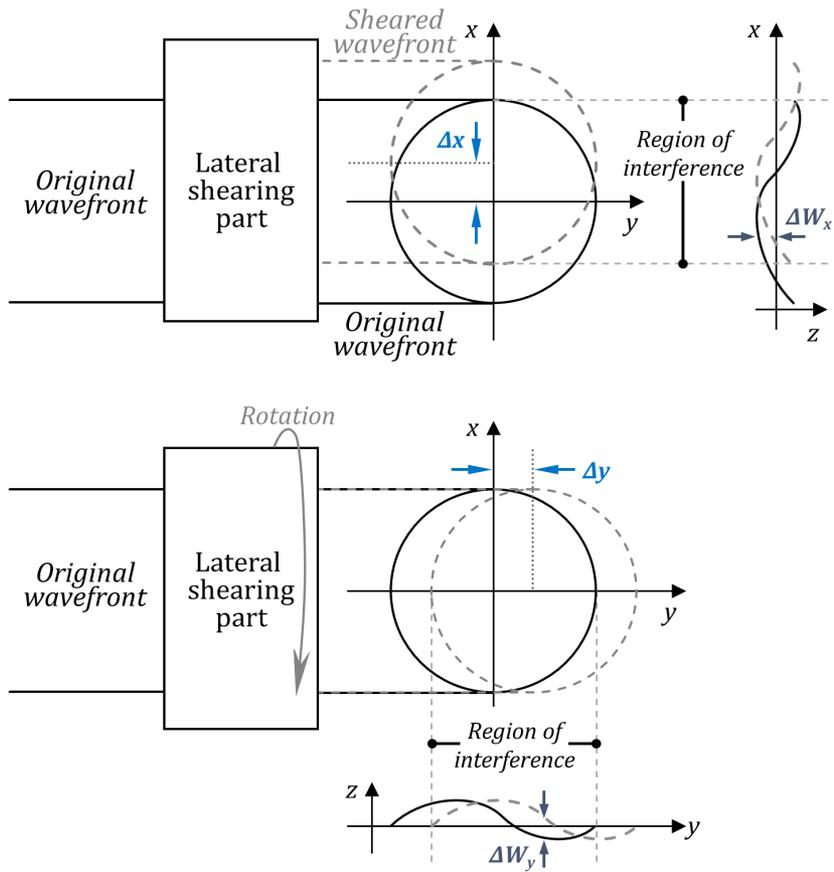


그림 2-2. 층밀립 간섭계의 층밀립부를 통한 층밀립 파면 생성 방법

2. 층밀립 간섭계의 종류

층밀립 간섭계는 층밀립 파면을 생성시키는 방법에 따라 다양한 연구가 진행되고 있으며 [19-22], 주로 평행판을 이용한 측정 파면 분할 및 간섭계 방식의 광학 구성을 이용하고 있다. 최근 들어, 시스템을 소형화하기 위해 회절 격자와 복굴절 물질을 이용한 층밀립 간섭계가 제안되었으며, 위상 추출을 위해 공간 주파수 변조 방법 (spatial carrier frequency method) 및 위상 천이 방법 (phase shifting technique)이 응용되고 있다 [23-25].

가. 평행판 기반의 층밀립 간섭계

그림 2-3과 같이 평행판에 각도 θ 로 입사된 파면은 평행판의 앞면에서 반사하는 파면과 평행판을 투과하여 평행판의 뒷면에서 반사하는 파면으로 나뉘게 되며, 이를 통해 층밀립된 2개의 파면이 생성된다. 평행판을 투과한 파면은 평행판의 두께와 굴절률에 의해 평행판의 앞면에서 반사하는 파면보다 광경로가 더 길어지고, 또한 파면은 횡 방향으로 이동한다. 이때, 두 파면이 서로 중첩되는 영역에서 층밀립 간섭무늬가 생성되고, 이를 통해 측정 파면의 위상 정보를 추출할 수 있다. 이때 층밀립량 (ΔL)은 평행판의 두께 t 와 굴절률 n , 입사각 θ 와 굴절각 θ' 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta L = 2 \frac{t}{\cos\theta} \sin\theta' \cos\theta = \frac{t \sin 2\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (2-3)$$

평행판 기반의 층밀립 간섭계는 비교적 간단하게 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있으나, 평면파와 같이 측정 파면이 비교적 변화가 작은 경우, 간섭무늬를 관찰하기 어렵다는 단점이 있다. 또한, 층밀립량이 고정되어 있기 때문에 측정 파면에 따라 이를 조절하는 것이 불가능하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 썸기판 (wedge plate)과 평행판 교체 등의 방법이 이용될 수 있으나, 이러한 방법들은 전체적으로 측정 시스템을 복잡하게 만들고 안정성을 저하시키는 요인이 된다.

한편, 평행판을 이용하여 층밀립 간섭계를 구성하는 경우, 획득되는 간섭무늬의 위상

은 주로 공간 주파수 변조 방법으로 추출한다. 이는 평행판의 두께가 고정되어 있어서 위상 천이된 간섭무늬들의 획득이 어렵기 때문이며, 공간 주파수 변조 방법은 단일 간섭무늬로부터 위상을 추출할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 그러나 푸리에 변환 (Fourier transform) 기반의 공간 주파수 변조 방법은 신호 처리 과정에서 위상의 왜곡을 유발할 수 있으며, 특히 신호 필터링 과정에서 계산상의 오차로 인해 복원된 파면이 왜곡되는 문제가 발생한다.

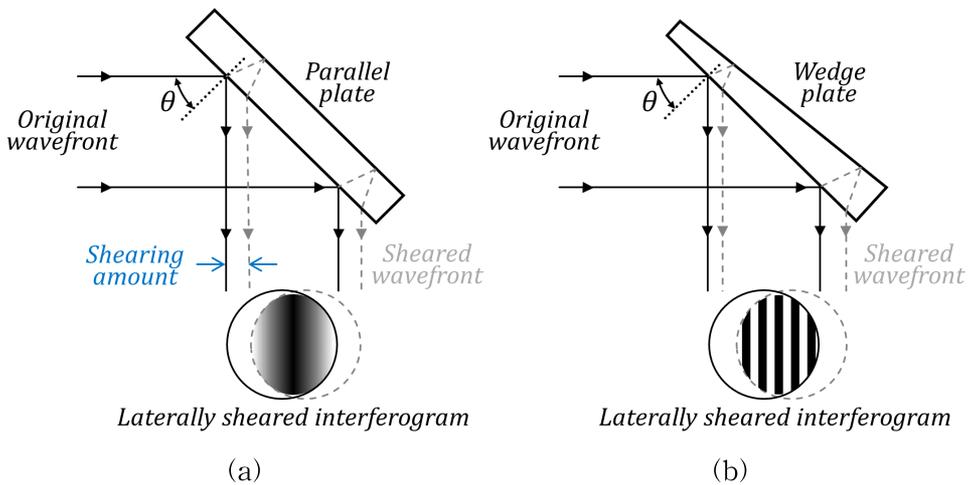


그림 2-3. (a) 평행판 및 (b) 췌기판 기반의 층밀림 생성 방법

나. 간섭계 방식의 층밀립 간섭계

간섭계 방식의 층밀립 간섭계는 그림 2-4와 같이 입사하는 측정 파면에 대해 일반적인 진폭 분할 간섭계의 구성으로 파면을 나누고, 그 중 하나의 파면을 층밀립시키는 방법을 이용한다 [26-27]. 이때, 광 분할기 혹은 프리즘에 의해 나뉘어진 각각의 파면은 독립적으로 조절이 가능하기 때문에, 층밀립량 조절 및 위상 천이된 간섭무늬들을 획득할 수 있는 장점이 있다. 그러나 일반적인 간섭계 방식의 층밀립 간섭계는 두 파면이 서로 다른 경로로 진행하기 때문에, 외부 환경 변화에 민감하고, 위상 천이 및 층밀립량 조절을 위한 기계적 구동부로 인해 측정 시간이 오래 걸린다. 또한, 전체적인 시스템이 복잡하며 부피가 큰 한계를 가진다.

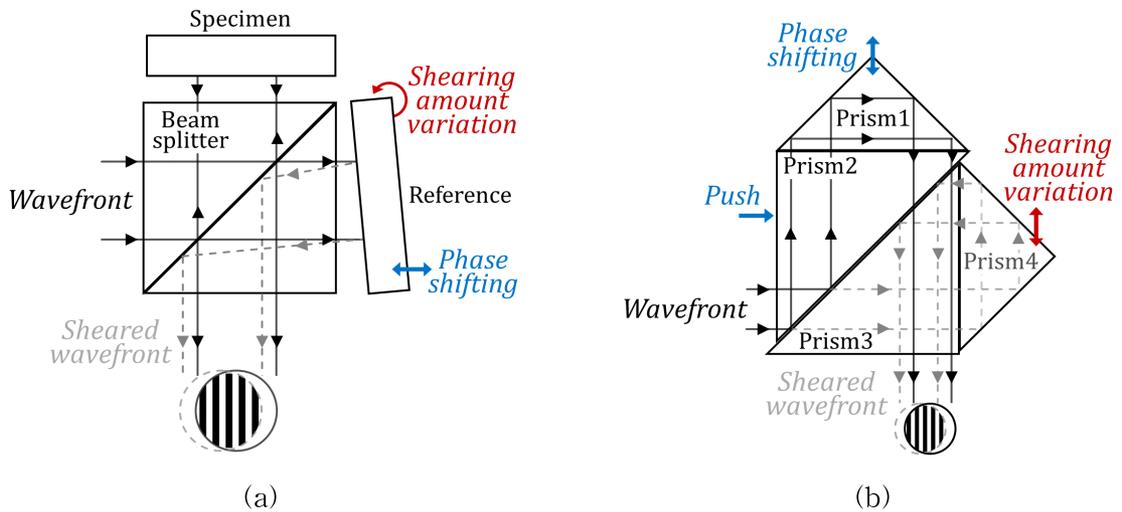


그림 2-4. (a) 광 분할기 및 기준 시편을 이용한 층밀립 간섭계와 (b) 프리즘을 이용한 층밀립 간섭계

다. 회절 격자 기반의 층밀립 간섭계

회절 격자 기반의 층밀립 간섭계는 두 개의 회절 격자를 이용하여 측정 파면을 회절시켜 파면을 차수에 따라 분할하고, 썸미판(Shutter)을 통해 각 파면들의 층밀립 파면을 생성 및 중첩시켜 위상 천이된 간섭무늬들을 획득한다. 그림 2-5는 3-bucket 위상 천이 알고리즘을 통해 위상을 추출하는 회절 격자 기반의 층밀립 간섭계를 나타낸다. 두 개의 서로 평행한 회절 격자에 입사된 파면은 회절의 영향을 받지 않고 투과하는 0차 파면과 회절되는 ± 1 차 파면으로 분할된다. 이러한 3개의 파면들은 썸미판에 입사하고, 썸미판의 앞면 및 뒷면에서 반사되어 층밀립 파면들을 생성시킨다. 이때, 각 차수별로 생성되는 간섭무늬는 썸미판의 두께 변화에 의해 서로 위상이 천이되기 때문에, 공간 위상 천이 방법 (spatial phase shifting technique)으로 간섭무늬의 위상을 고속으로 추출할 수 있는 장점이 있다 [28-29]. 하지만 3개 이상의 간섭무늬들을 단일 영상 장치에서 한 번에 획득하기 때문에 공간 분해능이 낮은 동시에, 전체적인 시스템의 부피가 크고 복잡해지며, 정렬이 어려운 단점이 있다.

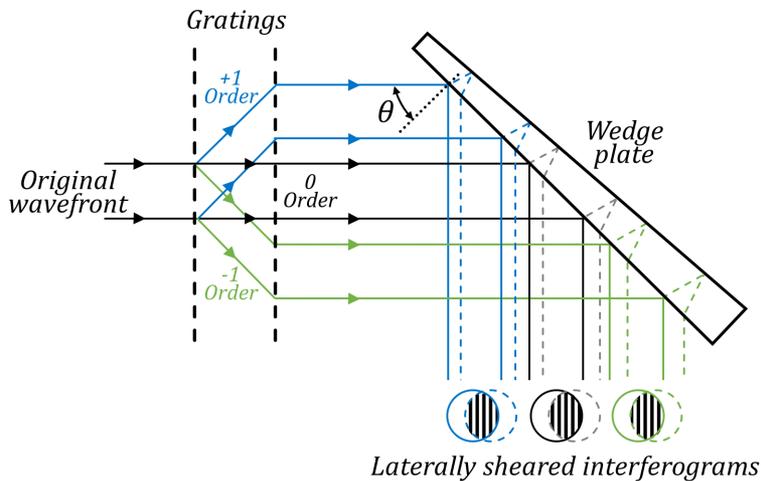


그림 2-5. 회절 격자 기반 층밀립 생성 방법

라. 복굴절 물질 기반의 층밀립 간섭계

무편광 상태의 파면은 복굴절 물질에 입사되어 투과할 때, 편광 상태에 따라 서로 다른 굴절률을 겪으며 진행하기 때문에 이로 인한 광경로 차이가 발생하게 되며, 이를 이용하면 그림 2-6과 같은 복굴절 물질 기반의 층밀립 간섭계를 구성할 수 있다. 입사된 파면은 광축에 수직인 방향으로 편광된 정상광선 (ordinary ray)의 파면과 광축에 수평인 방향으로 편광된 이상광선 (extraordinary ray)의 파면으로 분할된다. 이때, 복굴절 물질에 의한 파면의 층밀립량은 식 (2-4)와 같이 두 굴절률의 차이로 정의되며, 복굴절 물질의 굴절률 차이가 커질수록 두 파면의 광경로 차이가 증가하여 층밀립량 (ΔL)도 커진다.

$$\Delta L = t(\tan\theta_o - \tan\theta_e)\cos\theta \quad (2-4)$$

여기서 t 는 복굴절 물질의 두께, θ_o 와 θ_e 는 각각 입사각 θ 에 따른 정상광선과 이상광선의 굴절각을 의미한다.

한편, 복굴절 물질 기반의 층밀립 간섭계는 두 파면의 편광 상태가 서로 수직이라는 특징을 이용하여 편광 카메라 (polarization-pixelated camera)를 이용하여 공간적으로 위상 천이된 4개의 간섭무늬를 한 번에 획득할 수 있다. 이를 통해 공간 위상 천이 방법으로 간섭무늬의 위상을 고속으로 추출할 수 있다. 그러나 복굴절 물질 기반의 층밀립 간섭계는 두 굴절률 차이로 인해 발생하는 광경로 차이로 인하여 저간섭성 광원을 활용하지 못하는 한계가 있으며, 여러 편광 소자들을 사용해야 하는 단점이 있다.

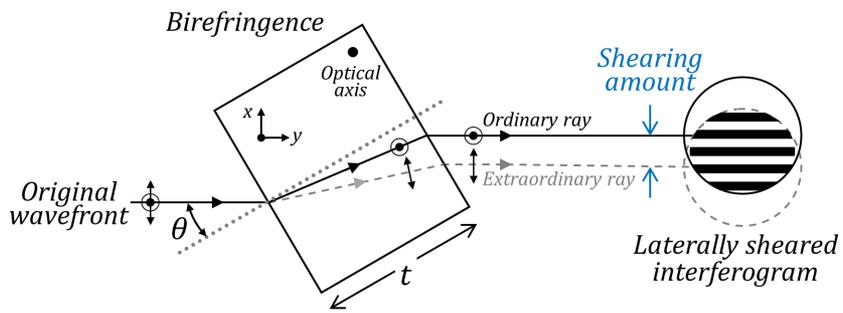


그림 2-6. 복굴절 물질 기반 층밀림 생성 방법

3. 층밀립 간섭계의 파면 복원 원리

층밀립 간섭계에서 간섭무늬를 통해 추출된 기울기 위상으로부터 파면을 복원하는 방법은 복원 원리에 따라 그림 2-7처럼 크게 Zonal 복원 방법과 Modal 복원 방법으로 분류할 수 있다. 먼저, Zonal 복원 방법은 임의의 영역 (zone) 내에서 한 점과 이웃 점들 사이의 파면 기울기를 수학적으로 모델링하고, 측정된 기울기 위상값을 통해 파면을 계산한다 [30-32]. 측정된 위상만으로 파면을 복원하기 때문에 자유 곡면과 같은 임의의 파면까지 복원할 수 있는 장점이 있다. 하지만 측정 시 부분적으로 발생한 위상 오차가 파면 계산 과정에서 전체 파면으로 전파하기 때문에, 복원된 파면이 크게 왜곡될 수 있다. 그리고 전체 영역에서 간섭무늬의 각 측정점별로 계산이 진행되기 때문에, 측정점이 많아질수록 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

한편, 파면은 수학적으로 서로 직교하는 2차원 공간 함수들 ($f(x,y)$)의 조합으로 나타낼 수 있고, 이를 이용하면 파면의 기울기는 이러한 공간 함수들의 기울기 조합으로 나타낼 수 있다. 그래서 측정 파면의 기울기 위상으로부터 각 2차원 공간 함수들의 기울기에 해당하는 계수들을 결정하면, 측정 파면을 복원할 수 있으며 이를 Modal 복원 방법이라고 한다 [33-38]. Modal 복원 방법은 수학적으로 정의된 공간 함수들을 사용하여 파면을 복원하기 때문에, 파면 복원 계산이 빠르며 이웃 점들의 오차로 인한 왜곡이 발생하지 않는다. 특히, 일반적인 수차 (aberration)로 구성된 파면을 측정할 때 복원 파면의 정확도가 높은 특징이 있다. 그러나 파면 복원에 사용하는 공간 함수들의 개수에 따라 복원할 수 있는 파면의 모양이 제한적인 한계가 있다.

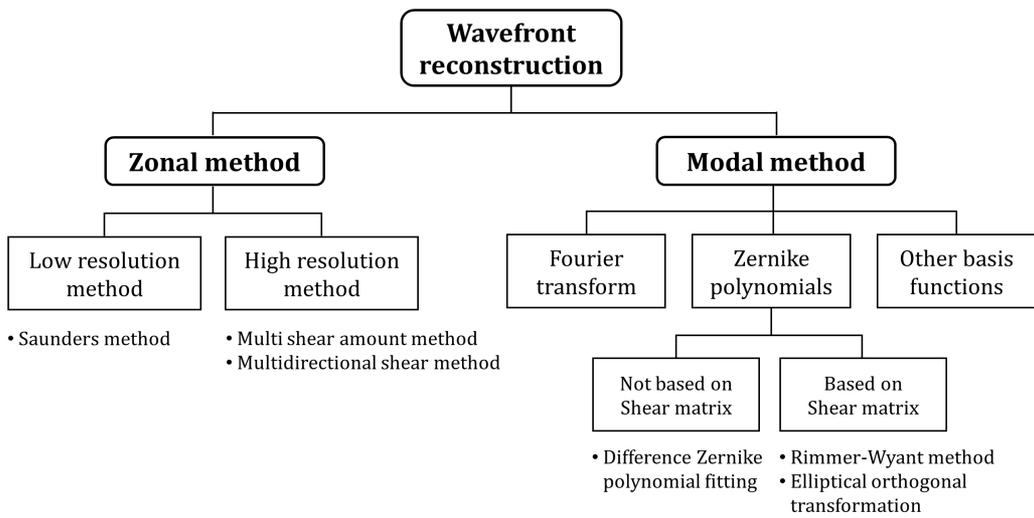


그림 2-7. 층밀립 간섭계의 파면 복원 방법

제2절 편광 격자 기반 층밀립 간섭계

1. 편광 격자의 원리

편광 격자는 그림 2-8과 같이 얇은 유리판 위에 액정 (liquid crystal)을 일정 주기 간격으로 반복하여 배열한 메타 표면 (metasurface) 소자로, 액정에 의한 복굴절성과 격자 구조로 인하여 편광에 따른 회절 격자 및 위상 지연 소자의 기능이 복합적으로 나타난다 [39-41].

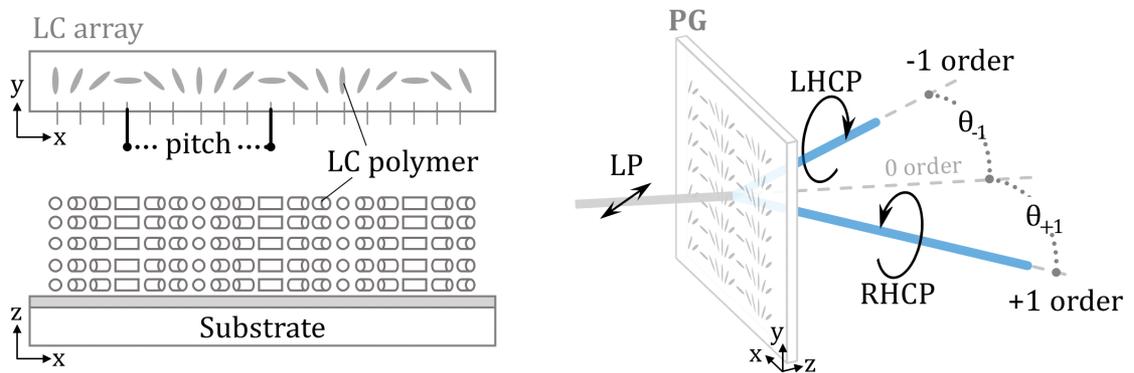


그림 2-8. 편광 격자의 구조

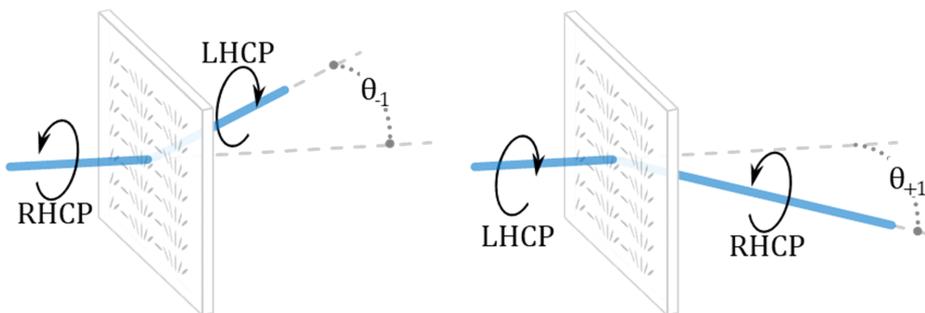


그림 2-9. 입사 편광 상태에 따른 편광 격자의 회절 및 위상 지연 특성

이러한 편광 격자는 입사된 빛을 여러 차수로 회절시키는 일반적인 회절 격자와는 달리, ± 1 차로만 회절시키는 특징이 있으며, 회절되는 빛은 편광 상태에 따라 +1차 혹은 -1차로 회절 방향이 결정된다. 또한, 편광 격자는 액정의 z 축 방향 분포에 의해 $\lambda/2$ 위상 지연판 (half-wave plate)과 같이 입사하는 빛의 원편광 상태를 수직인 원편광 상태로 변화시킨다.

편광 격자를 투과한 빛의 편광 상태를 표 2-1과 같은 존스 행렬 (Jones matrix)을 이용하여 수학적으로 나타내면 식 (2-5)와 같다 [42].

$$\begin{aligned}
 \overline{LP}_{out} &= \overline{R[-\beta]} \cdot \overline{PG} \cdot \overline{R[\beta]} \cdot \overline{LP}_{in} & (2-5) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos 2\beta & \sin 2\beta \\ \sin 2\beta & -\cos 2\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 \\ \mp i \end{bmatrix} \frac{e^{\pm 2i\beta}}{\sqrt{2}}
 \end{aligned}$$

식 (2-5)에서 알 수 있듯이, 편광 격자의 존스 행렬은 $\lambda/2$ 위상 지연판과 동일하기 때문에, 편광 격자에 입사하는 원편광 상태의 빛은 이와 수직인 원편광 상태의 빛으로 출사하게 된다. 이를 통해 그림 2-9와 같이 편광 격자를 투과한 빛은 입사할 때의 편광 상태에 따라, 좌원편광의 빛은 $+\theta$ 로 회절되는 우원편광이 되고, 우원편광의 빛은 $-\theta$ 로 회절되는 좌원편광이 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 편광 격자를 통해 투과하는 빛은 회절함과 동시에 입사할 때의 편광 상태에서 수직한 상태의 원편광으로 위상이 지연되며, $\pm\theta$ 방향으로 회절되는 두 빛은 서로 수직한 원편광 상태이다.

표 2-1. Jones Matrix 및 특징

Name	Jones Matrix
linear polarization	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix}$
right handler circled polarization	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$
left handler circled polarization	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$
polarization grating (=half-wave plate)	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
rotation matrix $[\beta]$	$\begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix}$

2. 편광 격자 기반 층밀립 간섭계

그림 2-10은 본 논문에서 제안하는 편광 격자 기반의 층밀립 간섭계를 나타낸다. 광원의 빛은 45° 회전된 편광기 (polarizer)를 통해 편광 상태가 선편광으로 정의되어 시편에 입사된다. 시편에서 반사된 빛은 층밀립부에서 2개의 층밀립된 파면으로 분할되며, 이후 편광 카메라에서 획득된다. 그리고 편광 카메라에서는 서로 수직한 원편광 상태의 두 파면으로부터 4개의 위상 천이된 간섭무늬들이 획득된다. 여기서 층밀립부는 구성에 따라, 편광 격자 두 개를 나란히 배열하여 층밀립을 발생시키는 이중 편광 격자 기반 층밀립부와 하나의 편광 격자와 평면 거울을 이용하여 층밀립을 발생시키는 단일 편광 격자 기반의 층밀립부로 생각할 수 있다.

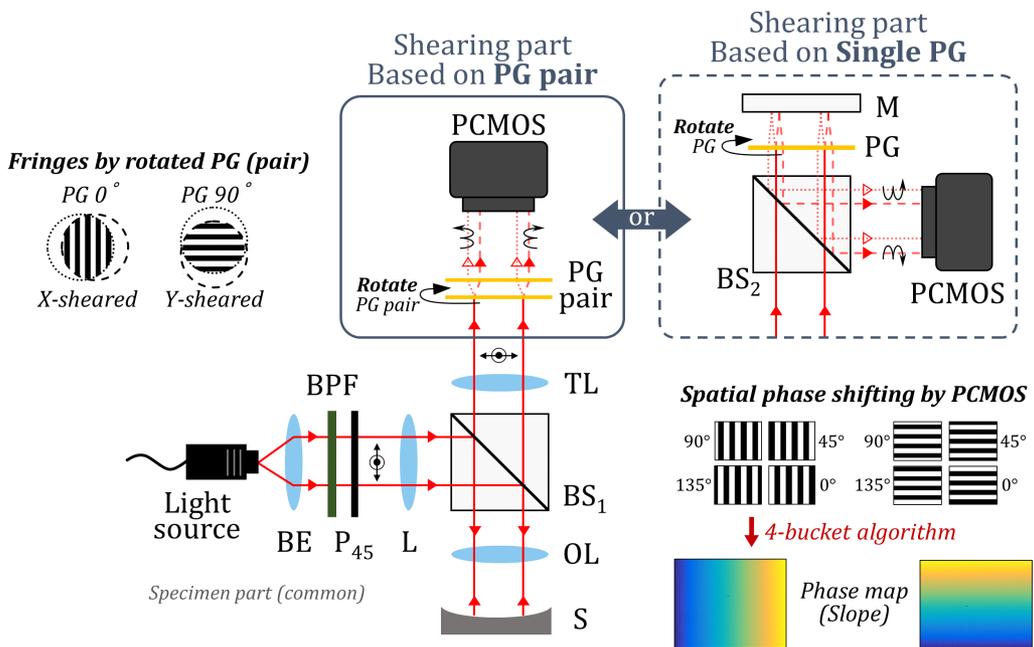


그림 2-10. 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 광학 구성도

(BE, beam expander; BPF, band-pass filter; P₄₅, 45° rotated polarizer; L, lens; BS_{1&2}, beam splitter; OL, objective lens; S, specimen; TL, tube lens; PG, polarization grating; M, flat mirror; PCMOS, polarization-pixelated CMOS camera)

가. 이중 편광 격자 기반의 층밀림 간섭계

편광 격자에서 입사하는 좌원편광의 빛은 $+\theta$ 로 회절되는 우원편광의 빛이 되고, 우원편광의 빛은 $-\theta$ 로 회절되는 좌원편광의 빛이 된다. 그래서 이러한 편광 격자를 그림 2-11과 같이 나란히 배치시키는 경우, 2개의 층밀림된 파면들을 생성시킬 수 있다.

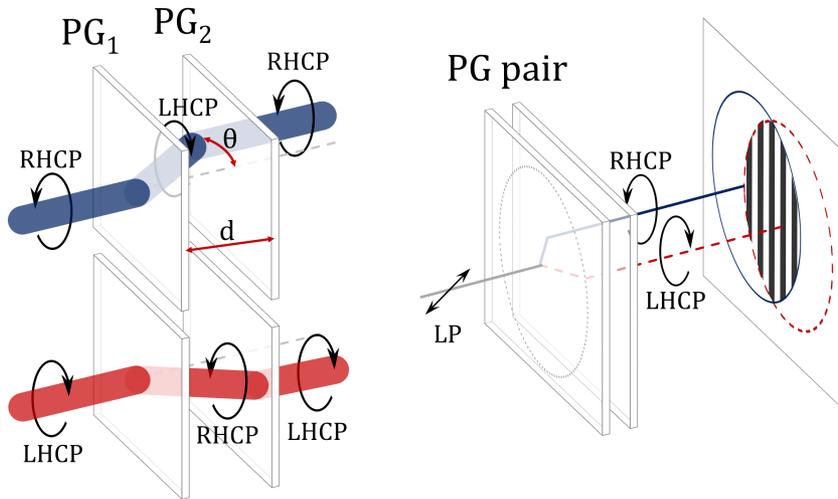


그림 2-11. 이중 편광 격자 기반 층밀림 생성 원리

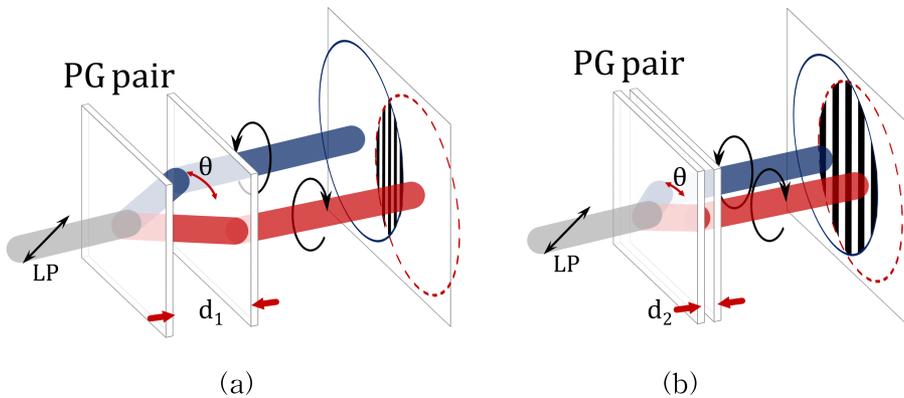


그림 2-12. 이중 편광 격자 사이의 거리에 따른 층밀림량 변화 ($d_1 > d_2$)

먼저 첫 번째 편광 격자에 수직 입사한 선편광 상태의 빛은 서로 다른 방향으로 회절하는 2개의 원편광의 빛으로 생각할 수 있기 때문에, 두 빛은 각각 편광이 수직인 상태의 원편광으로 변하는 동시에 $\pm\theta$ 의 각도로 회절된다. 이후 두 번째 편광 격자에서 두 빛은 편광 격자의 편광 특성에 의해 $\mp\theta$ 로 회절하면서 다시 편광 격자에 수직 방향으로 출사한다. 이때, 첫 번째와 두 번째 회절 격자 사이의 거리 동안 두 빛은 서로 다른 방향으로 진행하기 때문에, 이중 편광 격자를 통과한 두 빛의 파면들은 층밀림이 발생한다. 결국 이중 편광 격자 기반 층밀림 간섭계에서의 층밀림량 Δx 와 Δy 는 편광 격자의 회절 각도 (θ)와 두 편광 격자의 사이의 거리 (d)에 따라 식 (2-6)과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta x = \Delta y = 2d \tan\theta \quad (2-6)$$

편광 격자의 회절 각도는 편광 격자의 액정 배열에 따라 결정되기 때문에, 각 제품의 사양에 따라 고정되어 있다. 그래서 이중 편광 격자 기반 층밀림 간섭계는 두 편광 격자 사이의 거리를 조절하여 층밀림량을 조절할 수 있다. 식 (2-6)에서 알 수 있듯이, 두 편광 격자의 거리가 멀어질수록 층밀림량이 증가하기 때문에 이로 인하여 일반적으로 두 파면의 중첩 영역은 줄어들고, 간섭무늬의 개수가 많아지는 현상이 발생한다. 또한, 반대의 경우에는 두 파면의 중첩 영역은 커지는 동시에 간섭무늬의 개수는 줄어들게 된다. 그림 2-12는 이중 편광 격자 사이의 거리에 따른 파면 중첩 영역과 간섭무늬의 변화를 나타낸다.

나. 단일 편광 격자 기반의 층밀림 간섭계

한편, 단일 편광 격자와 평면 거울을 조합하면, 이중 편광 격자 기반의 층밀림 간섭계와 결과적으로 동일한 층밀림부를 구성할 수 있다. 그림 2-13은 층밀림 원리를 설명하기 위해, 반사형 구조의 편광 격자 및 평면 거울 기반 층밀림부를 펼쳐서 표현한 전개도를 나타낸다. 먼저, 편광 격자에 수직으로 입사된 우원편광의 빛은 편광 격자의 회절 특성에 의해 $-\theta$ 의 방향으로 회절되며 좌원편광의 빛이 된다. 이 후, 평면 거울에서

반사된 빛은 다시 우원편광 상태가 되고, 다시 편광 격자를 투과하면서 좌원편광의 빛이 되는 것과 동시에 편광 격자 면에 수직한 방향으로 출사한다. 또한, 편광 격자에 입사한 좌원편광의 빛은 동일한 원리로 우원편광의 빛으로 편광 상태가 변화는 동시에 편광 격자 면에 수직한 방향으로 출사하게 된다. 이때, 편광 격자의 회절 각도 θ 와 평면 거울을 왕복하는 거리 $2d$ 에 의해 층밀림부를 통과한 파면은 각각 입사 파면보다 $2d \tan \theta$ 만큼 층밀림된다. 그래서 단일 편광 격자 기반의 층밀림 간섭계에서는 이중 편광 격자 기반의 층밀림 간섭계와는 달리, 빛이 편광 격자와 평면 거울 사이를 두 번 왕복하기 때문에, 층밀림량 Δx 와 Δy 는 식 (2-7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta x = \Delta y = 4d \tan \theta \quad (2-7)$$

단일 편광 격자 기반 층밀림 간섭계는 이중 편광 격자 기반의 층밀림 간섭계와 동일하게 식 (2-7)과 같이, 편광 격자와 평면 거울 사이의 거리를 변화시켜 층밀림량을 조절할 수 있다.

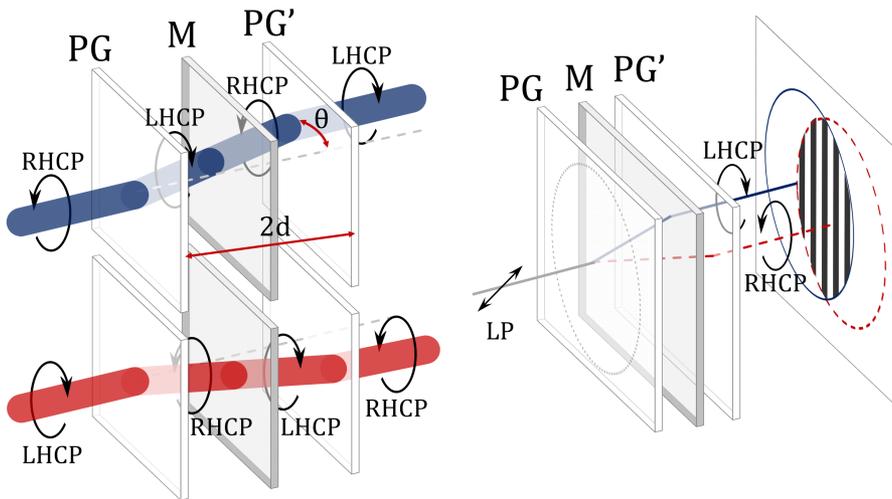


그림 2-13. 단일 편광 격자 기반 층밀림 생성 원리

다. 편광 카메라 기반의 위상 추출 방법

본 논문에서 제안하는 편광 격자 기반 층밀림 간섭계에서는 편광 카메라를 이용하여 4개의 위상 천이된 간섭무늬를 획득한다. 편광 카메라는 그림 2-14와 같이, 영상 소자 (imaging sensor)의 각 화소 (pixel)마다 투과축이 0°, 45°, 90°, 135°로 회전된 각각의 편광기들이 배열의 형태로 설치되어 있다. 그래서 편광 카메라로 획득된 영상에서 인접한 각 화소는 서로 다른 편광 상태를 가지며, 한 번에 서로 다른 편광 각도의 영상 4장을 획득할 수 있다. 그리고 이러한 편광 카메라에 입사하는 두 빛이 서로 수직한 상태의 원편광 빛일 경우, 4개의 위상 천이된 간섭무늬들이 획득된다.

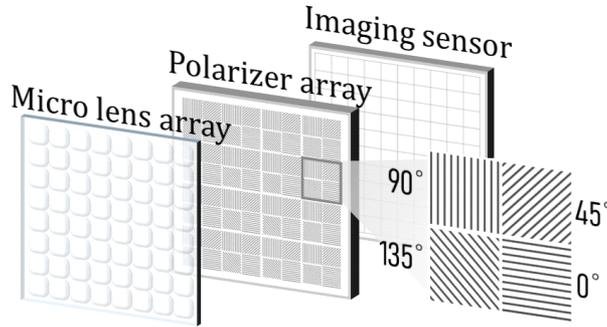


그림 2-14. 편광 카메라의 내부 구조

한편, 획득된 4장의 위상 천이된 간섭무늬들로부터 위상을 추출하기 위해서는 위상 천이 알고리즘 중의 하나인 4-bucket 알고리즘을 이용하며, 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다 [43].

$$I_{x0} = A [1 + \gamma \sin (\Delta W_x)] \quad (2-8-1)$$

$$I_{x45} = A [1 + \gamma \cos (\Delta W_x)] \quad (2-8-2)$$

$$I_{x90} = A [1 - \gamma \sin (\Delta W_x)] \quad (2-8-3)$$

$$I_{x135} = A [1 - \gamma \cos (\Delta W_x)] \quad (2-8-4)$$

여기서 I_{x0} , I_{x45} , I_{x90} , I_{x135} 는 편광 카메라에서 획득된 위상 천이된 4개의 간섭무늬들을 나타내며, A 는 파면의 배경광의 평균 광강도 (background mean intensity)이다. γ 는 간섭무늬의 가시도 (visibility), ΔW_x 는 두 파면의 위상차이다. 식 (2-8-1) - (2-8-4)를 통해, 파면의 위상차 ΔW_x 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{I_{x0} - I_{x90}}{I_{x45} - I_{x135}} = \frac{\sin(\Delta W_x)}{\cos(\Delta W_x)} = \tan(\Delta W_x) \quad (2-9)$$

$$\Delta W_x = \tan^{-1}\left(\frac{I_{x0} - I_{x90}}{I_{x45} - I_{x135}}\right) \quad (2-10)$$

이때, 식 (2-10)에 의해 계산된 ΔW_x 는 $-\pi$ 와 π 사이의 값을 가지기 때문에, 추출된 위상은 접혀진 (wrapped) 형태를 보이게 되므로, 최종적으로 위상 펼침 (unwrapping) 과정을 통해 ΔW_x 이 추출된다. 층밀림 간섭계는 원리적으로 파면 복원을 위해 x 방향과 y 방향에 해당하는 각각의 파면 기울기를 획득해야 하며, 이를 위해 층밀림부를 90° 회전하며 2번의 측정 과정으로 ΔW_x , ΔW_y 를 추출한다.

이러한 편광 카메라를 이용한 공간 위상 천이 방법은 시스템 구성이 간단하며, 한 장의 영상만 촬영하기 때문에 외부 환경 변화의 영향을 받지 않으며 고속 측정이 가능한 장점이 있다.

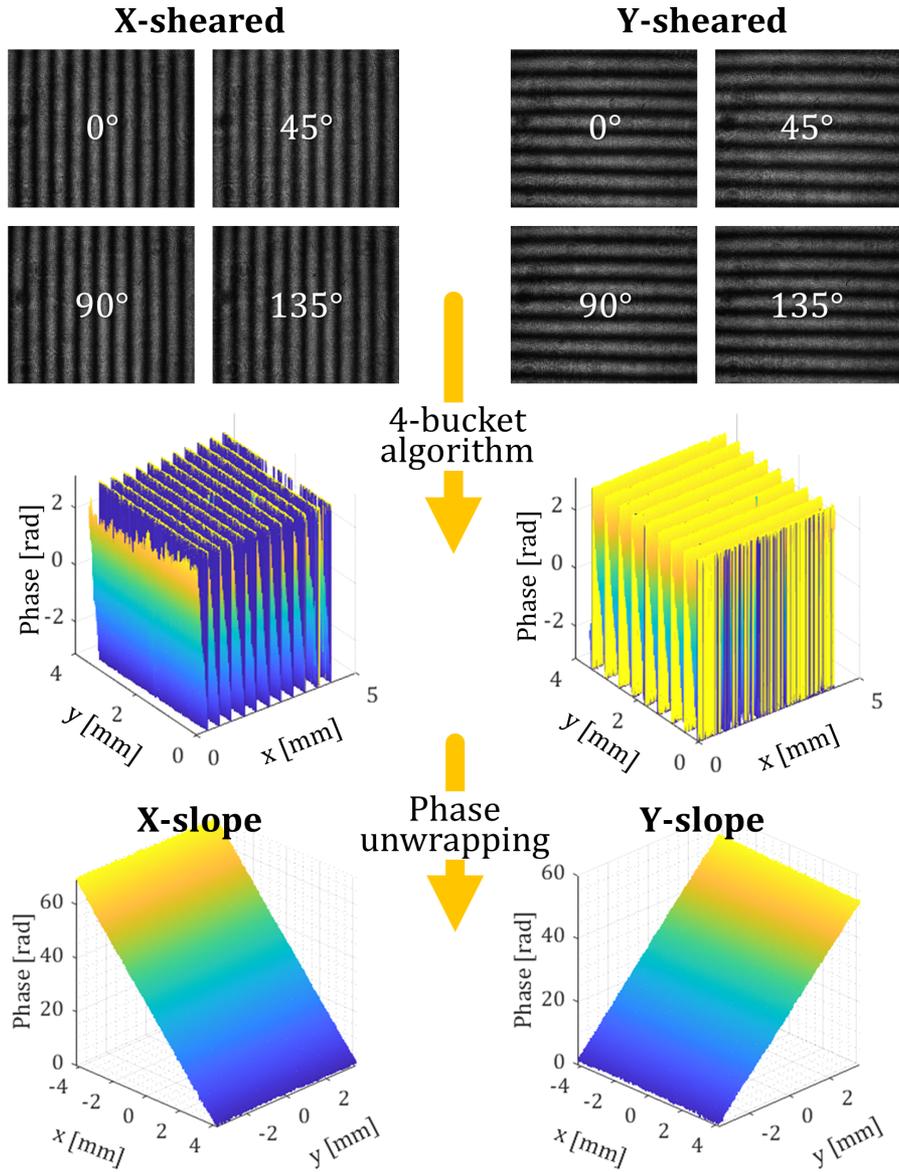


그림 2-15. 공간 위상 천이를 통해 획득된 4장의 간섭무늬의 위상 추출 과정

라. Modal 복원 방법을 통한 파면 복원

파면의 1차 기울기로부터 파면을 복원하기 위한 Modal 복원 방법은 파면을 식 (2-11)과 같이 일반적으로 잘 알려진 수학적 직교성을 가진 기저 함수 (basis function) $F_i(x,y)$ 의 조합으로 정의한다.

$$W(x,y) = \sum_{i=1}^J a_i F_i(x,y) \quad (2-11)$$

여기서 a 는 기저 함수의 계수인 동시에 가중치 (weight)를 의미한다. 층밀림 간섭계에서는 파면의 x, y 방향 기울기를 측정하기 때문에, 이를 식 (2-11)을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} \right|_l = \sum_{i=1}^J a_i \left. \frac{\partial F_i(x,y)}{\partial x} \right|_l \quad (2-12-1)$$

$$\left. \frac{\partial W(x,y)}{\partial y} \right|_l = \sum_{i=1}^J a_i \left. \frac{\partial F_i(x,y)}{\partial y} \right|_l \quad (2-12-2)$$

또한, J 개의 $F_i(x,y)$ 에 대한 x, y 방향의 도함수들과 이에 해당하는 a_i 로 측정된 파면 기울기는 식 (2-13)과 같이 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\bar{S} = \bar{E} \bar{a} \quad (2-13)$$

여기서 \bar{S} 는 측정된 x, y 방향의 파면 기울기 행렬을 나타내며, \bar{E} 는 기저 함수인 $F_i(x,y)$ 의 기울기 행렬 (gradient matrix)로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x,y)_1}{\partial x} & \frac{\partial F_2(x,y)_1}{\partial x} & \dots & \frac{\partial F_J(x,y)_1}{\partial x} \\ \frac{\partial F_1(x,y)_1}{\partial y} & \frac{\partial F_2(x,y)_1}{\partial y} & \dots & \frac{\partial F_J(x,y)_1}{\partial y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_1(x,y)_k}{\partial x} & \frac{\partial F_2(x,y)_k}{\partial x} & \dots & \frac{\partial F_J(x,y)_k}{\partial x} \\ \frac{\partial F_1(x,y)_k}{\partial y} & \frac{\partial F_2(x,y)_k}{\partial y} & \dots & \frac{\partial F_J(x,y)_k}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

한편, 식 (2-13)으로부터 \bar{a} 를 결정하기 위해서는 \bar{E} 의 역행렬이 정의되어야 하지만, 만약 \bar{E} 내부에 특이값 (singular value)이 존재하는 경우, \bar{E} 의 역행렬을 계산할 수 없는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해서는 특이값 분해 (singular value decomposition) 과정을 통해 $\bar{E} = \bar{U} \bar{D} \bar{V}^T$ 가 되도록 설정하고, 식 (2-15)를 이용하여 \bar{a} 를 계산한다.

$$a = VD^{-1}U^T s \quad (2-15)$$

여기서 \bar{U} 는 $\bar{E} \bar{E}^T$ 를 고유값 분해 (eigen decomposition)하여 얻어진 직교행렬 (orthogonal matrix)로, 이러한 \bar{U} 의 열벡터들은 \bar{E} 의 좌측 특이 벡터 (left singular vector)를 의미한다. 또한, \bar{V} 는 $\bar{E}^T \bar{E}$ 를 고유값 분해하여 얻어진 직교 행렬로서 \bar{V} 의 열벡터들은 \bar{E} 의 우측 특이 벡터 (right singular vector)이다. 이후 결정된 \bar{a} 를 식 (2-11)에 대입하면, 층밀립 간섭계에서 측정 파면이 복원된다. Modal 복원 방법에 가장 대표적으로 사용되는 기저 함수는 표 2-2와 같이 광학적 수차를 효과적으로 표현할 수 있는 Zernike 다항식 (polynomial)이 널리 사용되고 있다.

표 2-2. Zernike polynomial

i	n	m	Zernike polynomials	Name	Pattern 
0	0	0	1	Piston	
1	1	-1	$2\rho \sin\theta$	Vertical Tilt	
2	1	1	$2\rho \cos\theta$	Horizontal Tilt	
3	2	-2	$\sqrt{6}\rho^2 \sin 2\theta$	Oblique Astigmatism	
4	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Defocus	
5	2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos 2\theta$	Vertical Astigmatism	
6	3	-3	$\sqrt{8}\rho^3 \sin 3\theta$	Oblique Trefoil	
7	3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin\theta$	Vertical Coma	
8	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos\theta$	Horizontal Coma	
9	3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\theta$	Horizontal Trefoil	
10	4	-4	$\sqrt{10}\rho^4 \sin 4\theta$	Oblique Quatrefoil	
11	4	-2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin 2\theta$	Oblique 2 nd Astigmatism	
12	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Primary Spherical	
13	4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos 2\theta$	Vertical 2 nd Astigmatism	
14	4	4	$\sqrt{10}\rho^4 \cos 4\theta$	Vertical Quatrefoil	

제3장 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 편광 격자와 편광 카메라를 이용한 간단한 구성의 층밀림 간섭계를 제안한다. 앞선 제2장에서는 기존 층밀림 간섭계들의 측정 원리 및 한계를 설명하였으며, 이를 개선하기 위한 편광 격자 기반의 층밀림 방법들과 편광 카메라를 이용한 공간 위상 천이 방법 및 위상 추출, 파면 복원 원리를 설명하였다. 제3장에서는 제안하는 편광 격자 기반 층밀림 간섭계의 측정 원리를 검증하기 위해, 다음과 같은 실험을 수행하였다.

1. 편광 격자 기초 실험

- 편광 격자의 입사 편광에 따른 회절 방향 확인
- 편광 격자의 회절 각도 확인

2. 이중 편광 격자 기반의 층밀림 간섭계 실험

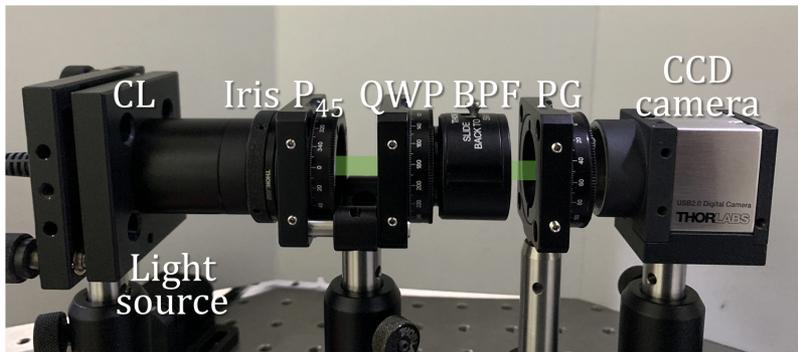
- 구면 측정 결과 분석

3. 단일 편광 격자 기반의 층밀림 간섭계 실험

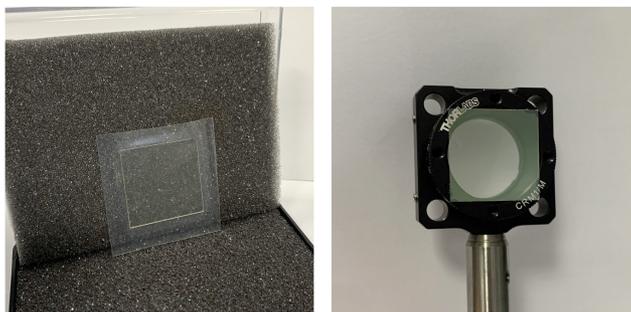
- 구면 측정 결과 분석
- 비구면 및 자유 곡면 측정 결과 분석
- 층밀림량 변화에 따른 파면 측정 및 분석

제1절 편광 격자 기초 실험

제안하는 층밀림 간섭계에서 편광 격자는 측정 파면을 두 층밀림 파면으로 분할하여 간섭무늬를 생성하는 역할을 한다. 또한, 층밀림된 두 파면의 편광 상태를 서로 수직인 원편광 상태로 만들며, 편광 카메라를 통해 공간 위상 천이된 간섭무늬를 생성시킨다. 이러한 편광 격자의 회절 방향과 회절 각도를 검증하기 위해 그림 3-1(a)와 같이 편광 격자와 $\lambda/4$ 위상 지연판 (quarter-wave plate), 선형 편광기 및 CCD 카메라를 이용하여 기초 실험을 수행하였다.



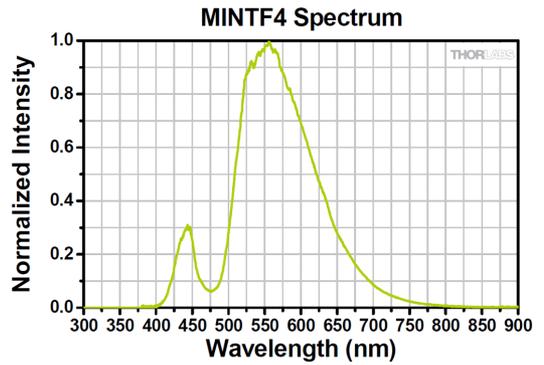
(a)



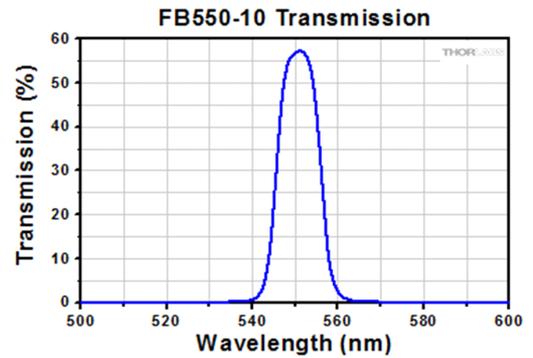
(b)

그림 3-1. (a) 기초 실험의 광학 구성 사진 및 (b) 편광 격자 모습
 (CL, collimating lens; P_{45} , 45° rotated polarizer; QWP, quarter-wave plate; BPF, band-pass filter; PG, polarization grating)

실험에 사용된 편광 격자는 그림 3-1(b)와 같은 Edmund Optics 사의 #12-677 제품을 이용하였다. #12-677 편광 격자는 가시광 영역에서 사용할 수 있는 광학 부품으로 159 grooves/mm의 피치 (pitch)를 가지고 있으며, 550 nm 파장 대역에서 회절 각도가 $\pm 5^\circ$ 가 되도록 설계되어 있다. 광원으로는 중심 파장이 554 nm인 Fiber-coupled LED (MINTF4, Thorlabs)를 사용하였으며, 광원의 빛은 코어 크기가 105 μm 인 다중 모드 광섬유 (multi-mode fiber)를 통해 전달되어, 시준 렌즈 (collimating lens)와 조리개를 통해 약 0.8 mm의 직경을 갖도록 조절되었다. 또한, 실험에 사용된 광원은 편광 상태가 정의되어 있지 않기 때문에, 선형 편광기 (linear polarizer)를 사용하여 편광 격자에 입사하는 광의 편광이 45° 회전된 선편광이 되도록 정의하였다. 이와 더불어 빛의 편광 상태를 각각 우원편광 및 선편광, 좌원편광으로 변화시켜주기 위해 $\lambda/4$ 위상 지연판을 이용하였다. 이후, 550 nm의 중심파장에서 10 nm의 반치폭 (full width at half maximum, FWHM)을 가지는 파장 대역 필터 (band-pass filter, FB550-10, Thorlabs)를 이용하여 파장 대역을 편광 격자의 설계 파장에 맞추었다. 한편, 편광 격자를 투과한 빛은 4.65 μm 의 화소 크기 및 (1280 \times 1024) 화소를 가지는 CCD 카메라 (DCU224M, Thorlabs)에서 검출되었다.



(a)

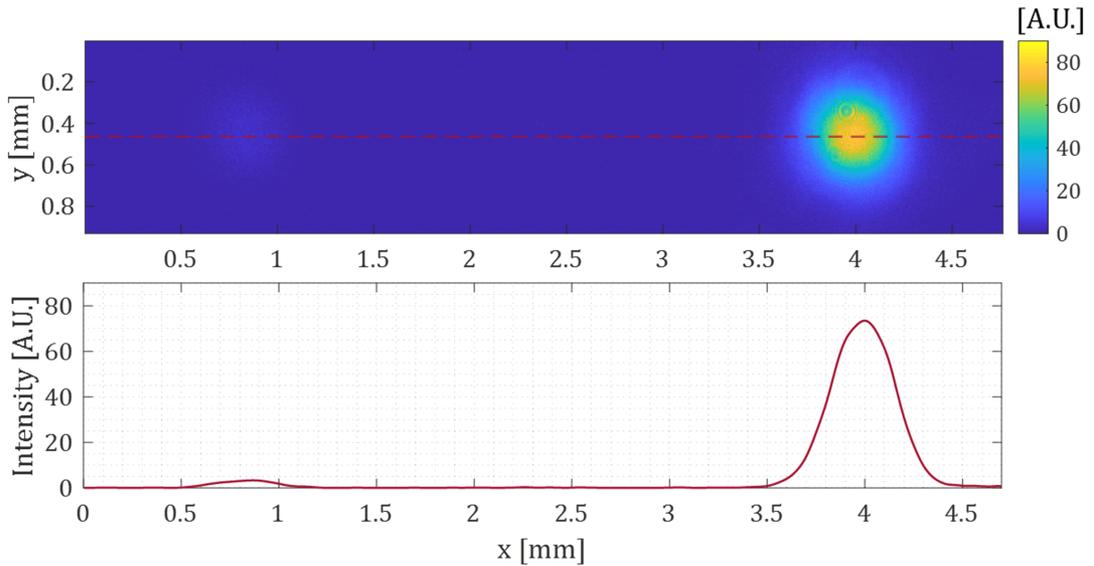


(b)

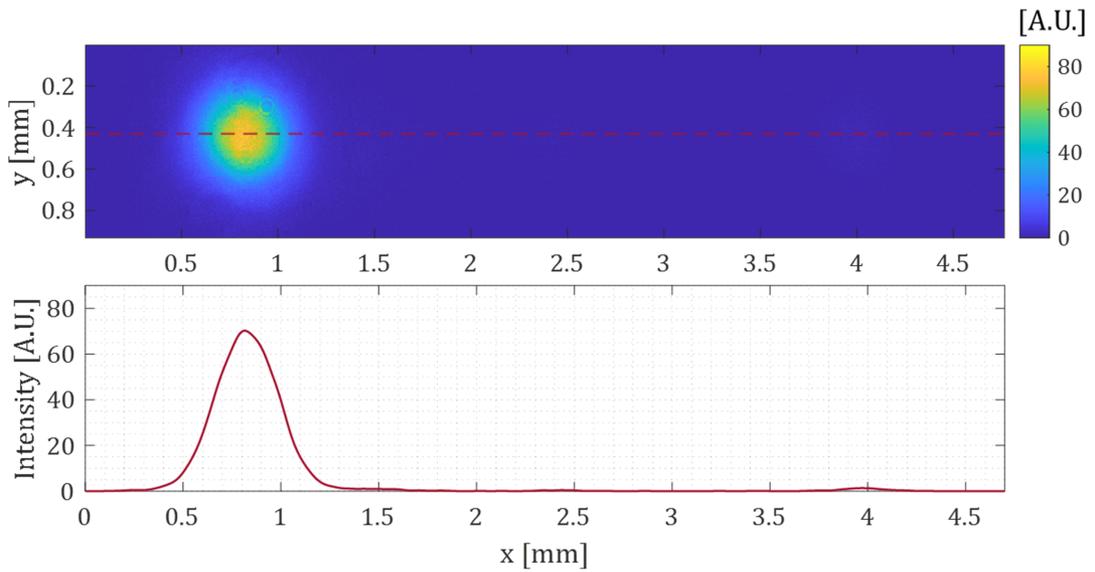
그림 3-2. 실험에 사용된 (a) 광원과 스펙트럼, (b) 대역 필터와 투과 스펙트럼

1. 편광 격자의 입사 편광에 따른 회절 방향 확인

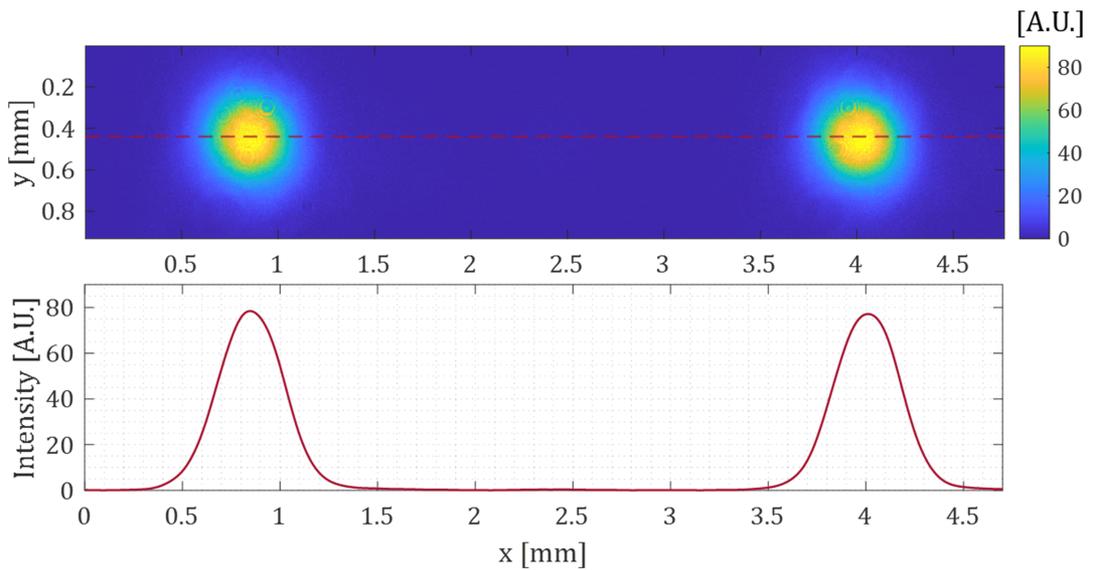
편광 격자의 입사광의 편광에 따른 편광 격자의 회절 방향을 확인하기 위해, $\lambda/4$ 위상 지연판의 투과축을 회전시키면서, 입사하는 빛의 편광이 우원편광 및 선편광, 좌원편광 상태일 때에 따른 편광 격자의 투과광을 확인하였다. 실험 결과, 그림 3-3과 같이 입사하는 빛의 편광상태에 따라, 좌원편광일 경우 $+\theta$ 로, 우원편광의 경우 $-\theta$ 로 회절되었다. 또한, 선편광 상태에서는 $+\theta$ 및 $-\theta$ 두 방향으로 빛이 회절 및 분할되는 것을 확인하였다. 이는 선편광 상태가 좌원편광과 우원편광 상태의 조합으로 표현할 수 있기 때문에, 각각의 편광 상태의 빛이 회절된 결과로 이해할 수 있다. 그리고 이러한 실험 결과는 앞서 제2장에서 편광 격자를 투과한 빛의 편광 상태에 따른 광의 회절 이론과 일치함을 확인하였다.



(a) 좌원편광된 빛의 입사



(b) 우원편광된 빛의 입사



(c) 선편광된 빛의 입사

그림 3-3. 입사하는 빛의 편광에 따른 영상 및 광량 분포 그래프

2. 편광 격자의 회절 각도 확인

제안하는 편광 격자 기반 층밀림 간섭계의 층밀림량은 편광 격자의 회절 각도에 따라 식 (2-6) 및 (2-7)과 같이 결정된다. 그래서 이론적인 층밀림량을 계산하기 위해, 편광 격자의 실제 회절 각도를 측정하였다. 실험 구성은 그림 3-1(a)와 동일하며, 편광 격자에 입사되는 빛은 선편광 상태로 정의하였다. 그리고 카메라의 위치를 변화시키면서 회절된 두 빛 사이의 거리를 측정하였다. 이때, 카메라가 편광 격자로부터 멀어질수록 회절된 두 빛 사이의 거리는 더욱 멀어지게 되므로, 카메라의 이동 거리 변화량 (Δz)과 두 빛 사이의 거리 (Δx)를 이용하여 다음과 같이 회절 각도 (θ_m)를 계산할 수 있다.

$$\theta_m = \tan^{-1}(\Delta x / \Delta z) \quad (3-1)$$

여기서 Δx 는 획득된 영상 속 회절된 두 빛의 중심 위치를 카메라의 화소 크기 및 개수를 통해 계산된다.

실험을 위해 카메라는 20 μm 간격으로 총 5 mm까지 이동하며 영상을 획득하였고, 그림 3-4(a)와 같이 두 개의 회절된 빛이 점차 멀어지고 있음을 확인하였다. 실험 결과, 그림 3-4(b)와 같이 CCD 카메라의 이동 거리 (카메라와 편광 격자 사이의 거리) 변화에 따른 회절된 2개의 빛 사이의 거리 그래프를 획득하였다. 식 (3-1)을 이용하여 회절 각도를 계산한 결과, 각각의 빛은 $\pm 5.008^\circ$ 로 회절되고 있음을 확인하였다. 이러한 측정 결과는 편광 격자의 설계 회절 각도인 $\pm 5^\circ$ 와 약 0.16%의 차이를 보이며, 실험에 사용된 편광 격자의 회절 성능이 제조사에서 제공한 설계 회절 성능과 매우 근접함을 확인하였다.

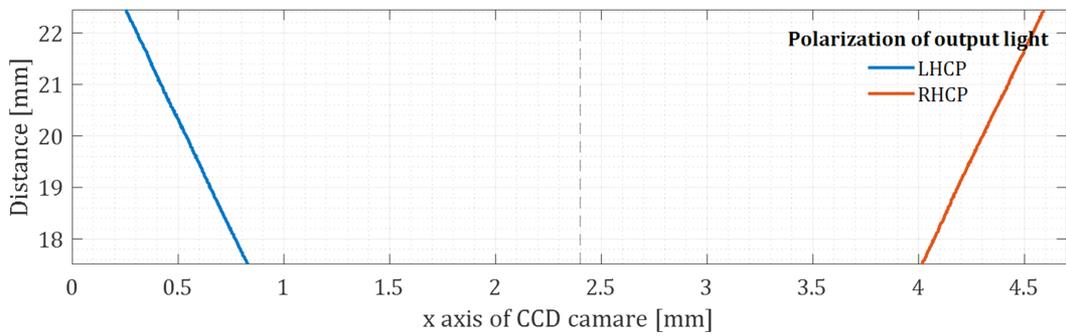
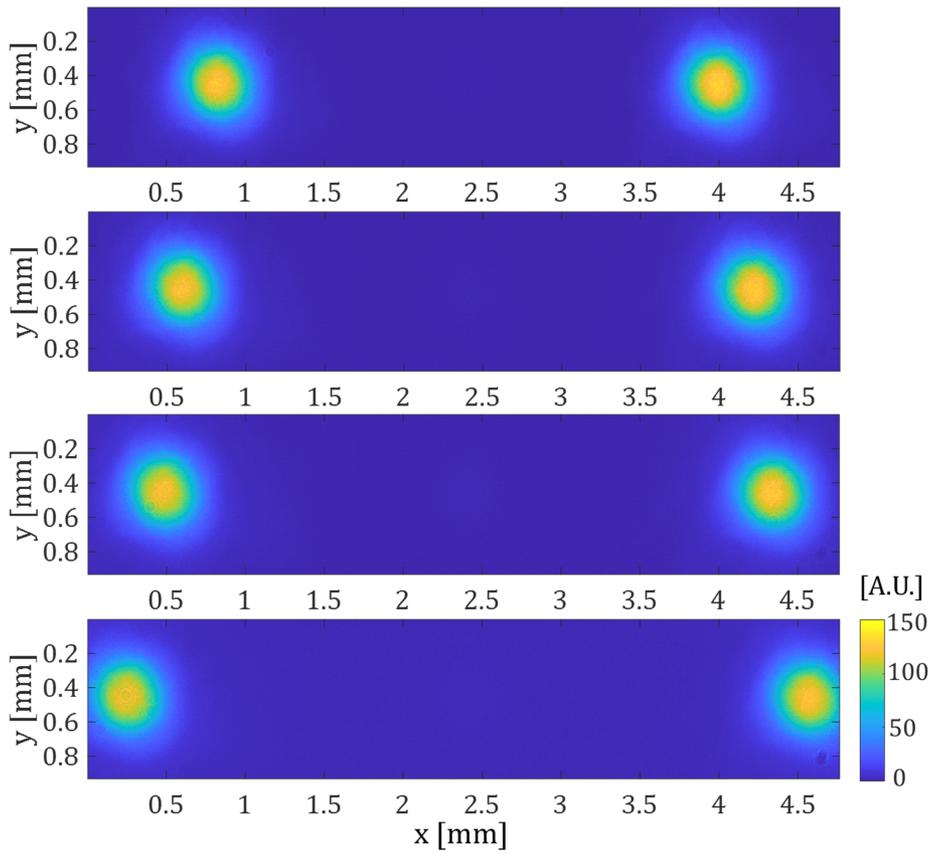


그림 3-4. CCD 카메라와 편광 격자 사이의 거리에 따라 (a) 획득된 영상과
 (b) 이때 회절되는 두 빛의 중심 변위 그래프

제2절 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계

1. 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 구성

이중 편광 격자 기반의 층밀립 간섭계는 그림 3-5와 같이 구성된다. 광원은 그림 3-6과 같이 450-2400 nm의 넓은 파장 대역을 가지는 NKT Photonics 사의 SuperK compact laser을 사용하였다. 또한, 중심 파장이 550 nm이고 반치폭 10 nm인 파장 대역 필터를 이용하여 광원의 중심 파장을 편광 격자의 설계 파장에 맞추었다. 광원의 빛의 직경은 1.5 mm이기 때문에, 이를 확대하기 위해 15배 빔확장기 (beam expander)를 사용하였으며, 조리개를 통해 빛의 직경을 대략 20 mm의 크기로 조절하였다. 또한, 입사하는 빛의 편광 상태는 선형 편광기를 사용하여 45° 회전된 선편광 상태로 정의해주었다. 간섭계 구조는 현미경 광학계로 설계, 제작하였으며, 현미경의 대물렌즈로는 Mitutoyo 사의 M Plan Apo series의 2x 렌즈를 사용하였다. 한편, 층밀립 파면을 생성하기 위한 이중 편광 격자 (PG pair)는 두 편광 격자를 최대한 밀착시켜 구성하였다. 검출부에는 그림 3-7과 같은 LUCID 사의 편광 카메라 PHX050S-P 제품을 사용하였으며, 이를 통해 4장의 공간 위상 천이된 간섭무늬 영상을 한 번에 획득하였다. 참고로, PHX050S-P는 (2448 × 2048)의 화소 분해능을 가지며 화소 크기는 3.45 μm 이고 24 fps의 영상 획득 속도 (frame rate)를 갖는다.

제안하는 시스템의 원리를 검증하기 위해, 측정 시편으로는 곡률 반경 (radius of curvature)이 150 mm인 오목 거울 (CM254-075-G01, Thorlabs)을 이용하였다. 또한, 층밀립 간섭계의 원리로 형상을 복원하기 위해, 이중 편광 격자를 각각 0°와 90°로 회전시켜 두 번의 측정을 수행하였다.

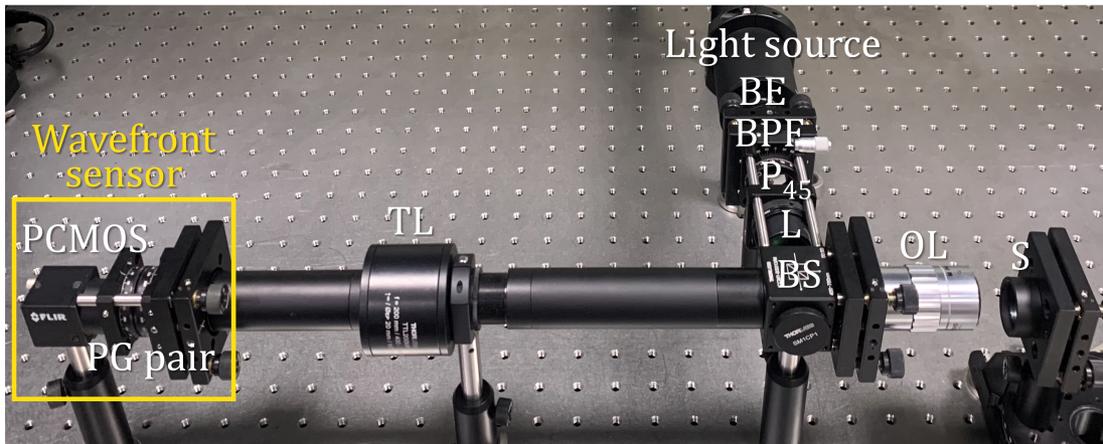
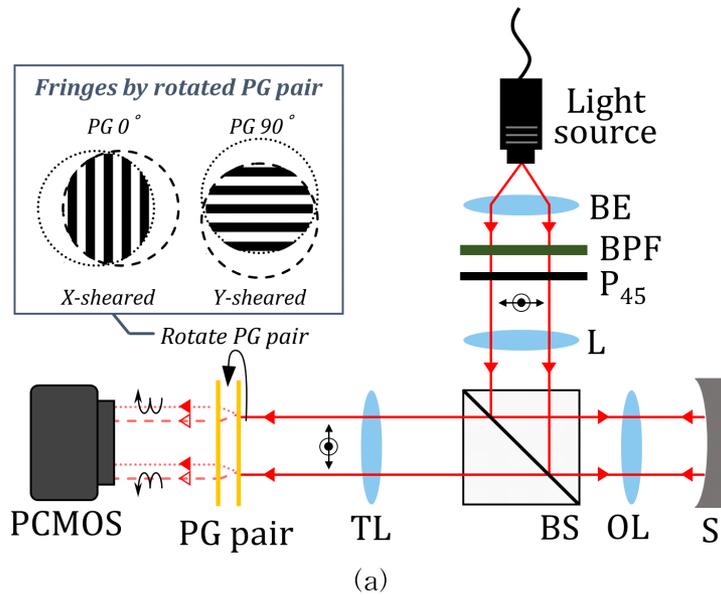


그림 3-5. 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 (a) 광학 구성도와 (b) 실제 사진 (BE, 15x beam expander; BPF, band-pass filter; P_{45} , 45° rotated polarizer; L, lens; BS, beam splitter; OL, 2x objective lens; S, specimen; TL, tube lens; PG pair, polarization grating pair; PCMOS, polarization-pixelated CMOS camera)

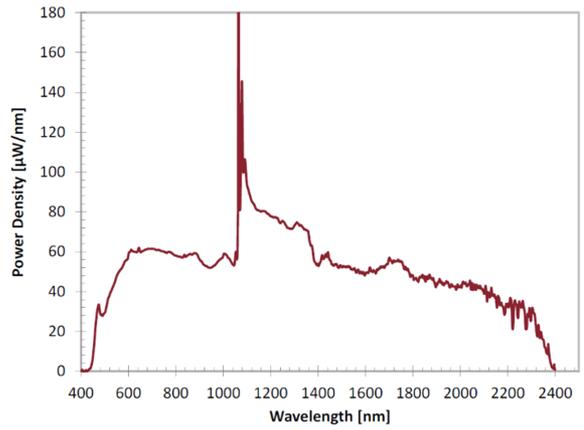


그림 3-6. NKT Photonics 사의 SuperK compact laser

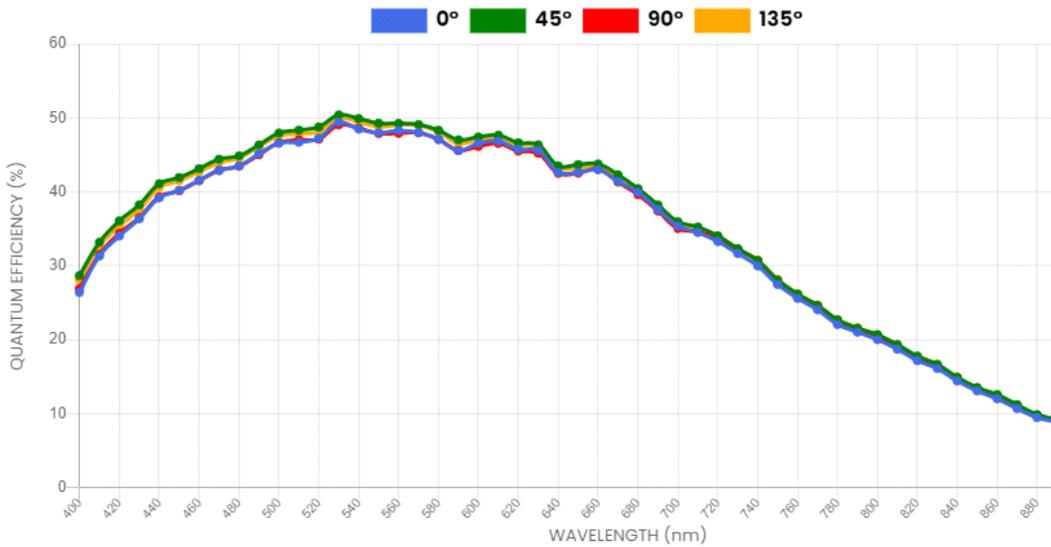


그림 3-7. LUCID 사의 Polarization-pixelated CMOS camera

2. 구면 측정 결과 분석

그림 3-8(a)는 이중 편광 격자 기반 층밀림 간섭계로 획득한 오목 거울의 공간 위상 천이된 간섭무늬 영상을 나타낸다. 이론적으로 오목 거울을 층밀림 간섭계로 측정하는 경우, 간섭무늬는 거의 직선 형태를 보이는데 반해, 측정된 영상에서의 간섭무늬는 크게 왜곡된 모습을 보였다. 이는 두 편광 격자가 동일한 사양을 가지고 있기는 하나, 정확히 일치하지 않기 때문에 발생하는 현상으로 Moiré 간섭무늬가 발생했기 때문이다. 그리고 이러한 Moiré 간섭무늬는 실제 시편의 형상에 의해 발생하는 것이 아니기 때문에, 그림 3-8(b)과 같이 간섭무늬의 위상이 왜곡되며 최종적으로 복원되는 파면 역시 그림 3-8(c)와 같이 크게 왜곡되는 문제가 발생하였다.

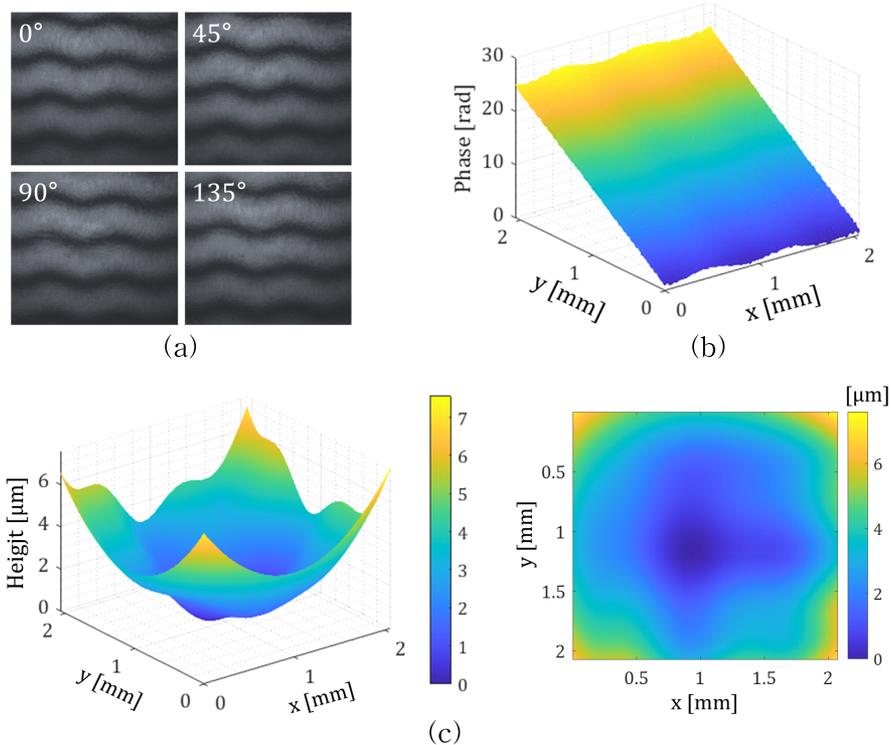


그림 3-8. 이중 편광 격자 기반 층밀림 간섭계로 획득한 오목 거울의 (a) 간섭무늬와 (b) 위상, (c) 파면 복원 결과

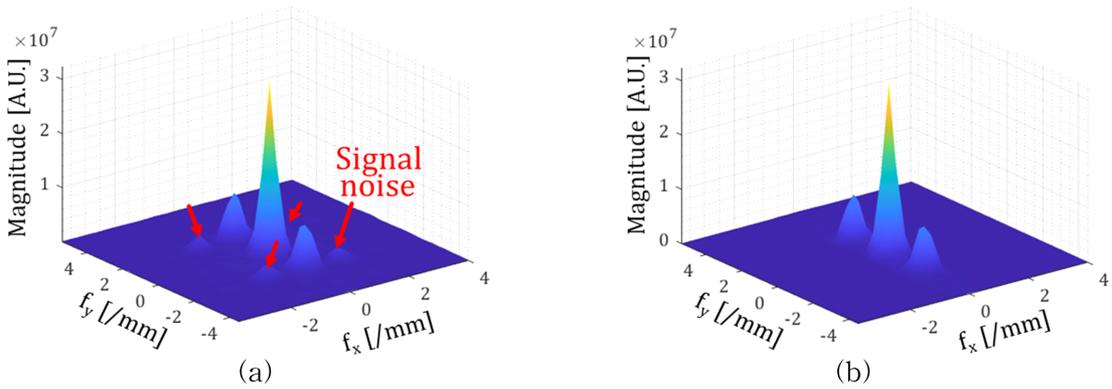
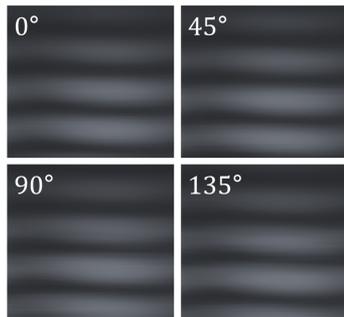


그림 3-9. 획득된 간섭무늬의 공간 필터링 (a) 전과 (b) 후

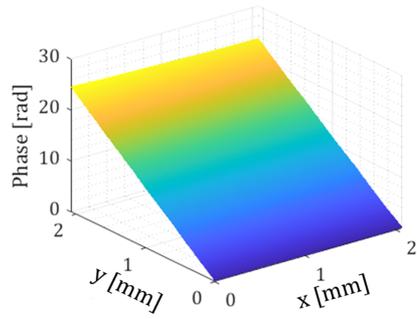
본 연구에서는 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 이러한 문제를 해결하기 위해, 공간 필터링 (spatial filtering) 기법을 이용하였다. 공간 필터링 기법은 획득된 영상을 2차원 푸리에 변환 (2D Fourier transform)을 이용하여 공간 주파수 성분으로 변환하고, 푸리에 영역에서 신호에 해당하는 성분만 추출하여 다시 영상을 복원하는 방법으로, 이를 이용하면 간섭무늬에서 다른 주기를 가지고 있는 Moiré 간섭무늬를 제거할 수 있다. 그림 3-9(a)는 본 실험에서 측정된 간섭무늬의 공간 주파수 성분을 나타낸다. 그림 3-9(a)에서 알 수 있듯이, 간섭무늬의 공간 주파수 성분은 많은 종류의 신호들이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 그림 3-9(b)와 같이 공간 필터링 과정을 통해 간섭무늬에 해당하는 공간 주파수 성분만을 추출한 결과, 그림 3-10(a)와 같이 Moiré 간섭무늬가 완전히 제거된 간섭무늬를 획득할 수 있었다. 또한, 이를 통해 계산된 위상과 파면도 그림 3-10(b)와 그림 3-10(c)와 같이 왜곡 없이 복원됨을 확인하였다. 측정된 파면의 곡률 반경을 계산한 결과 150.01 mm의 값을 얻었으며, 측정 결과를 오목 거울의 제조사가 제공한 설계 사양과 비교했을 때, 약 0.067%의 오차가 발생하였다. 한편, 150 mm의 곡률 반경을 통해 가상으로 생성한 오목 거울 파면과 측정 결과의 잔차 (residual)는 수십 nm 수준임을 확인하였다.

그러나 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계는 두 편광 격자의 미세한 차이로 인하여 발생하는 Moiré 간섭무늬를 근본적으로 제거할 수 없는 한계를 가진다. 비록 실험 결

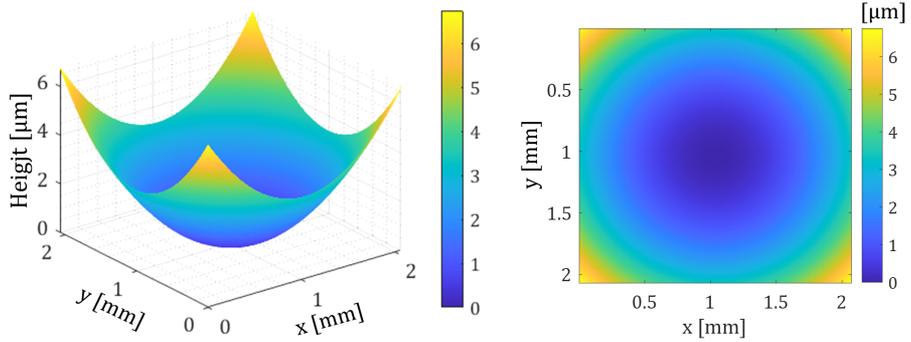
과에서와 같이 공간 필터링 기법으로 이러한 문제를 어느 정도 해소할 수는 있으나, 시편에 따라 Moiré 간섭무늬의 방향이 변화할 수 있으며, 측정 파면의 간섭무늬가 Moiré 간섭무늬와 비슷해지는 경우 공간 필터링 기법은 오히려 측정된 간섭무늬를 더욱 왜곡시키게 된다.



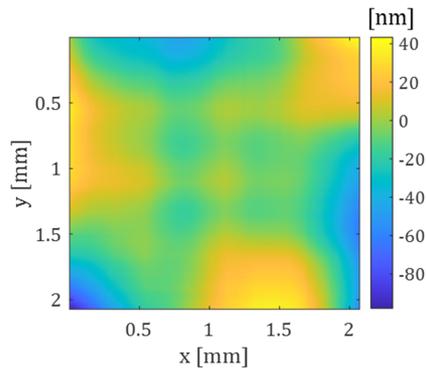
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3-10. 공간 필터링 후 (a) 간섭무늬와 (b) 위상, (c) 오목 거울의 파면 복원 결과
 (d) 시뮬레이션된 파면과 측정 결과의 잔차

제3절 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계

1. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 구성

단일 편광 격자를 이용한 층밀립 간섭계의 구성은 그림 3-11과 같다. 앞서 실험한 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계와 광원부 및 시편부는 동일하며, 층밀립 파면을 생성하기 위한 층밀립부의 구성에서 다소 차이가 있다. 단일 편광 격자 기반의 층밀립 간섭계에서는 하나의 편광 격자와 평면 거울을 사용하여 층밀립 파면을 생성한다. 이러한 층밀립 방법은 하나의 편광 격자만을 사용하기 때문에, 앞서 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계에서 두 편광 격자의 미세한 차이로 인하여 발생하는 Moiré 간섭무늬를 근본적으로 제거할 수 있다. 층밀립부의 편광 격자는 앞서 실험에서와 동일한 제품을 사용하였으며, 평면 거울은 Thorlabs 사의 PF10-03-G01 제품을 사용하였다. 또한, 제안하는 간섭계의 측정 결과를 기존 파면 센서로 측정한 결과와 비교 및 검증하기 위해, 편광 카메라의 결상 위치와 동일한 위치에 삭-하트만 파면 센서 (Shack-Hartmann wavefront sensor)를 설치하였다. 표 3-1은 실험에서 사용된 삭-하트만 파면 센서의 성능을 정리한 표이다.

표 3-1. Shack-Hartmann wavefront sensor의 성능

Name	Resolution	Size	Sensitivity area
Shack-Hartmann wavefront sensor (WFS30-7AR, Thorlabs)	1024 × 1024 [pixel]	Pixel size 5.83 × 5.83 [μm]	5.97 × 5.97 [mm]
	Lens array 39 × 39 [ea]	Lenslet pitch Ø150 [μm]	

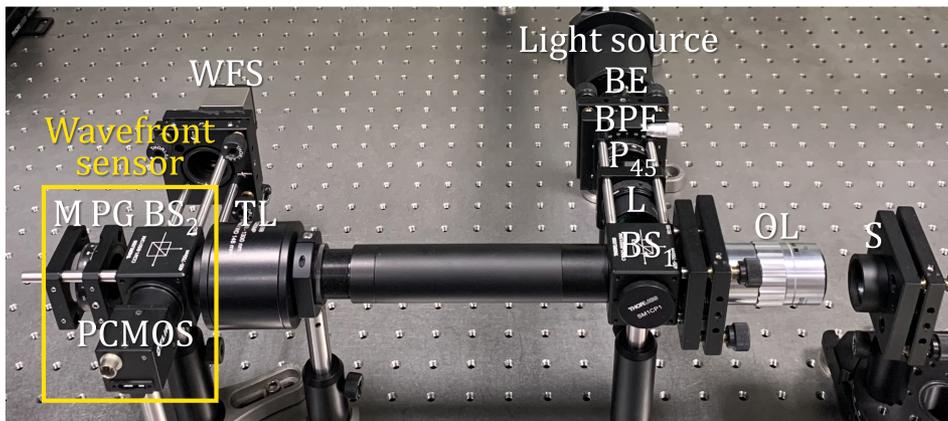
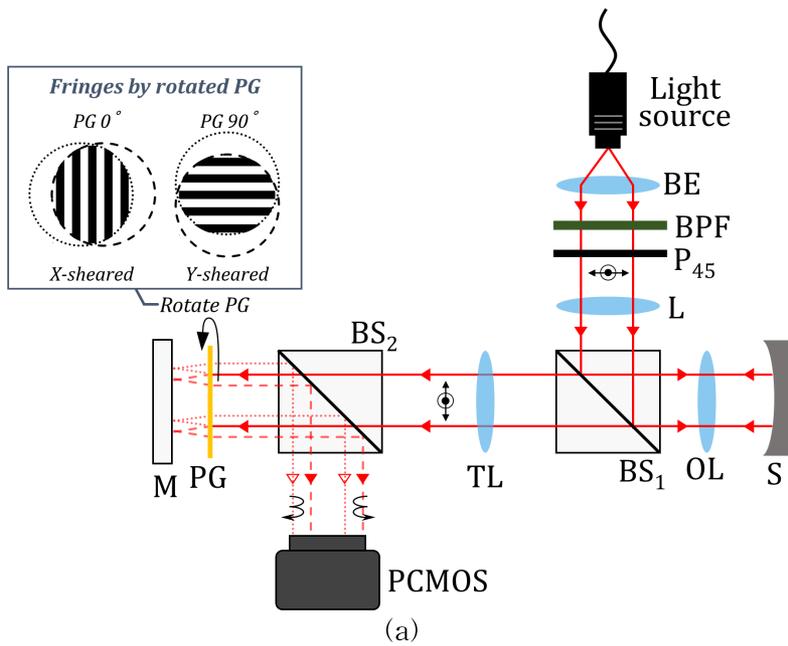


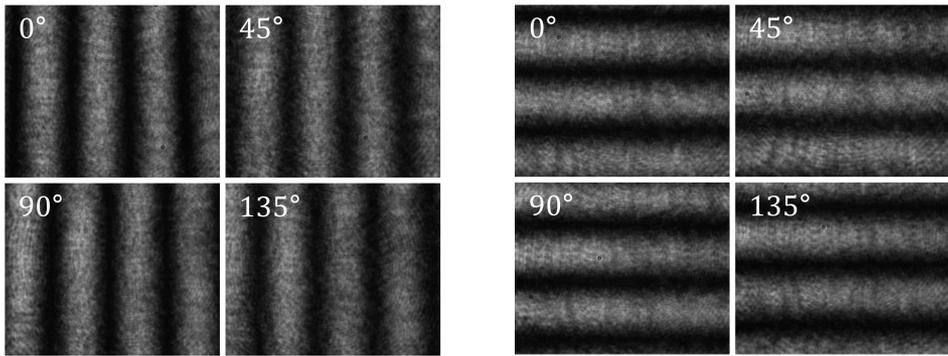
그림 3-11. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 (a) 광학 구성도와 (b) 실제 사진 (BE, 15x beam expander; BPF, band-pass filter; P_{45} , 45° rotated polarizer; L, lens; $BS_{1\&2}$, beam splitter; OL, 2x objective lens; TL, tube lens; PG, polarization grating; M, flat mirror; PCMOS, polarization-pixelated CMOS camera; WFS, Shack-Hartmann wavefront sensor)

2. 구면 측정 결과 분석

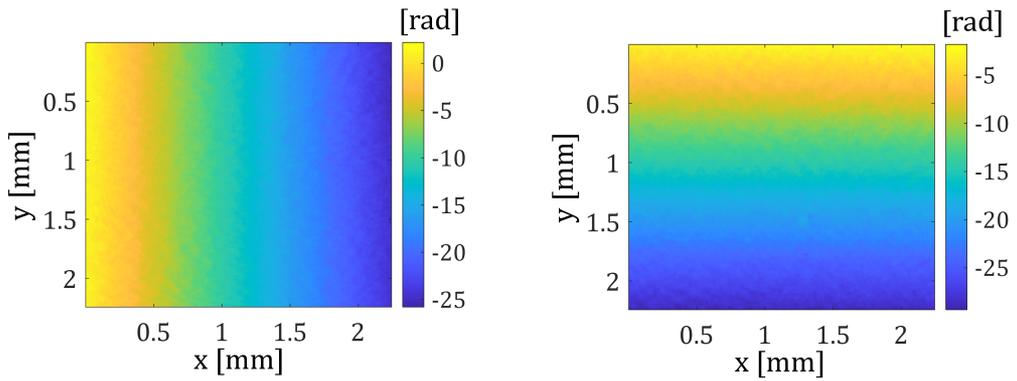
가. 오목 거울 측정 결과 분석

본 논문에서 제안하는 단일 편광 격자 기반 증밀립 간섭계의 측정 원리를 검증하기 위해 Thorlabs 사의 곡률 반경이 각각 38 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm, 1000 mm, 1500 mm, 2000 mm인 11개의 오목 거울들을 이용하여 파면을 생성하고 이를 측정하였다. 그림 3-12는 측정 과정의 예로, 곡률 반경이 38 mm인 오목 거울의 x , y 방향의 간섭무늬와 이로부터 추출된 위상, 그리고 복원된 파면을 나타낸다. 이때, 복원된 파면의 곡률 반경은 38.51 mm로 계산되었으며, 제조사에서 제공하는 설계 곡률 반경과 비교한 결과 0.013%의 오차율을 보임을 확인하였다. 다른 오목 거울들도 이와 동일한 과정을 통해 파면을 복원하였으며, 그 결과는 그림 3-13에 정리하였다.

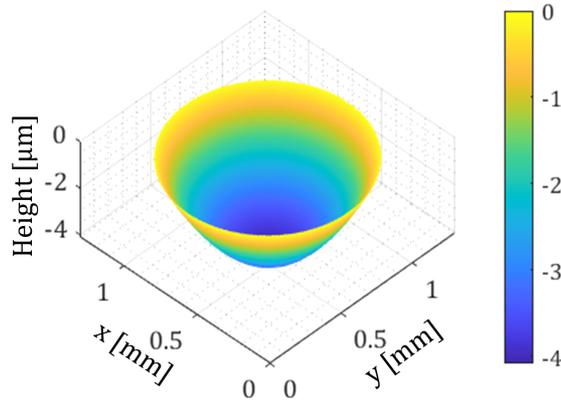
또한, 제안하는 시스템의 측정 결과들을 검증하기 위해, Taylor Hobson 사의 접촉식 측정기인 Form Talysurf S5K로 동일한 오목 거울들을 측정하였다. 제안하는 시스템과 Form Talysurf S5K를 통해 측정한 결과는 그림 3-14를 통해 비교하였으며, 각각의 거울들에 대한 곡률 반경 계산 결과들은 표 3-2로 정리하였다. 그림 3-14의 그래프를 통해 두 시스템의 측정 결과가 수십 nm 이내로 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 곡률 반경 역시 0.015% 내로 일치함을 확인하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 3-12. 단일 편광 격자 기반 층밀리프 간섭계의 오목 거울 ($R=38$ mm) x, y 방향
 (a) 간섭무늬와 (b) 추출된 위상, (c) 측정 결과

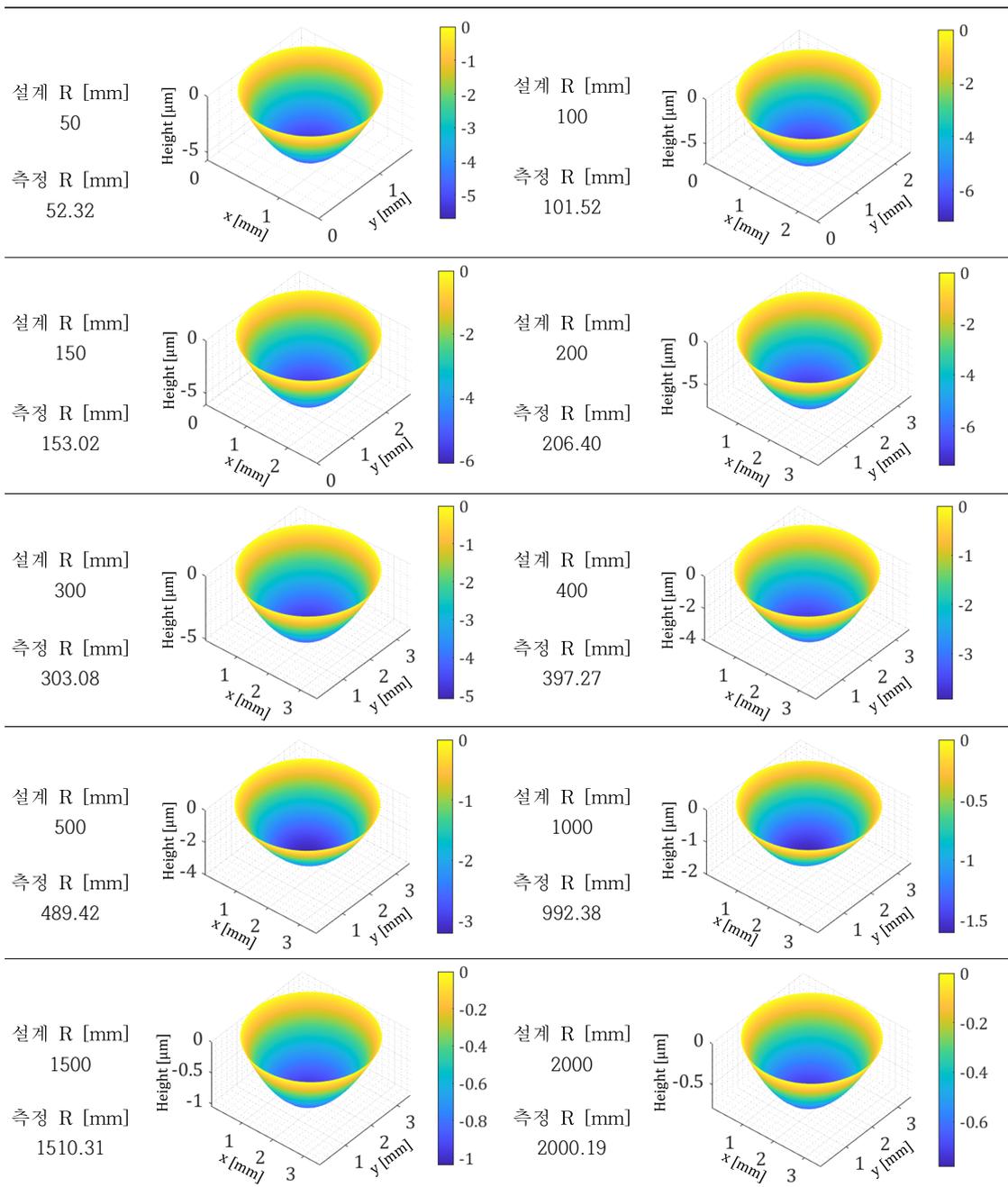


그림 3-13. 단일 편광 격자 기반 층밀림 간섭계의 오목 거울 측정 결과

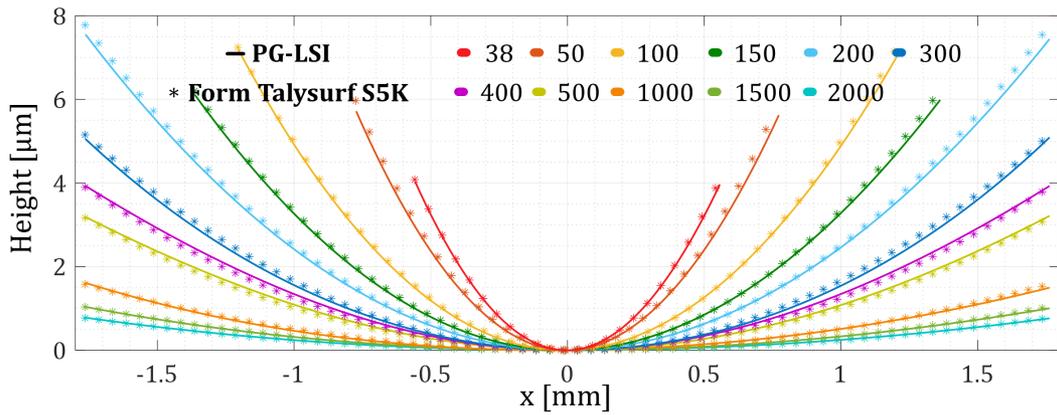


그림 3-14. 단일 편광 격자 기반 층밀림 간섭계와 Form Talysurf S5K의 오목 거울 측정 결과 비교

표 3-2. 오목 거울의 설계값 및 실험 결과

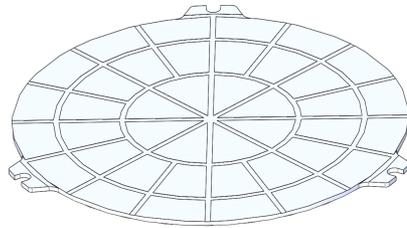
unit : [mm]

품명	설계 곡률 반경	Form Talysurf S5K 결과	PG-LSI 결과
CM254-019-G01	38	37.98	38.51
CM254-025-G01	50	50.01	52.32
CM254-050-G01	100	100.08	101.52
CM254-075-G01	150	149.85	153.02
CM254-100-G01	200	200.07	206.40
CM254-150-G01	300	301.89	303.08
CM254-200-G01	400	398.68	397.27
CM254-250-G01	500	491.24	489.42
CM254-500-G01	1000	983.39	992.38
CM254-750-G01	1500	1485.11	1510.31
CM254-1000-G01	2000	2007.97	2000.19

나. 압전 변형 거울을 이용한 구면 측정 결과 분석

두 번째로, 구면 거울 측정과 더불어 압전 변형 거울 (piezoelectric deformable mirror)을 사용하여, 미세하게 변화하는 파면을 측정하였다. 실험에 사용된 압전 변형 거울은 그림 3-15와 같은 Thorlabs 사의 DMH40/M-P01 제품으로, 은으로 코팅된 총 40개의 단일 조각 (segment)들이 하나의 거울이 형성하고 있으며, 각각의 조각들의 형상은 후면에 연결된 압전 소자 (piezoelectric transducer)에 가해지는 전압에 의해 개별적으로 제어된다. 각각의 거울 조각들은 0~300 V의 전압 범위 내에서 높이가 자유롭게 제어되며, 그림 3-15와 같은 Defocus 구동의 경우, 입력 전압이 150 V일 때 평면, 150 V 미만이면 오목면, 150 V 이상일 때는 볼록면이 된다. 이때, 압전 변형 거울의 중앙부 높이는 150 V를 기준으로 전압의 크기와 비례하여 증가 및 감소하며, 최대 17.6 μm 부터 최소 -17.6 μm 까지 변화한다.

본 실험에서는 제안하는 압전 변형 거울에 전압을 0 V부터 10 V 간격으로 최대 300 V까지 증가시키며 이에 따른 파면 변화를 측정하였으며, 측정 결과를 검증하기 위해 동일한 파면을 삭-하트만 파면 센서로 측정하였다.



40-Actuator Array

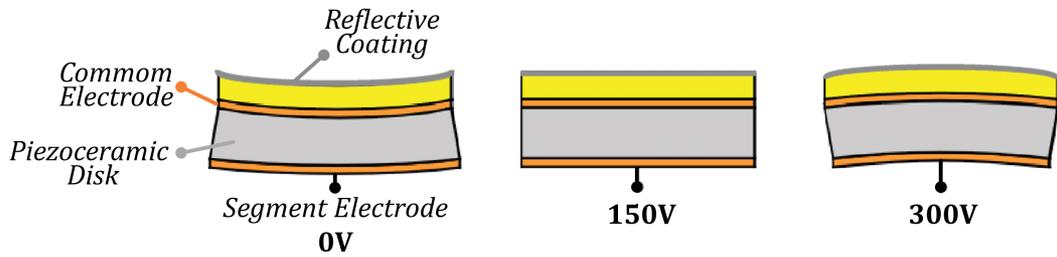


그림 3-15. 압전 변형 거울과 입력 전압에 따른 표면 변화

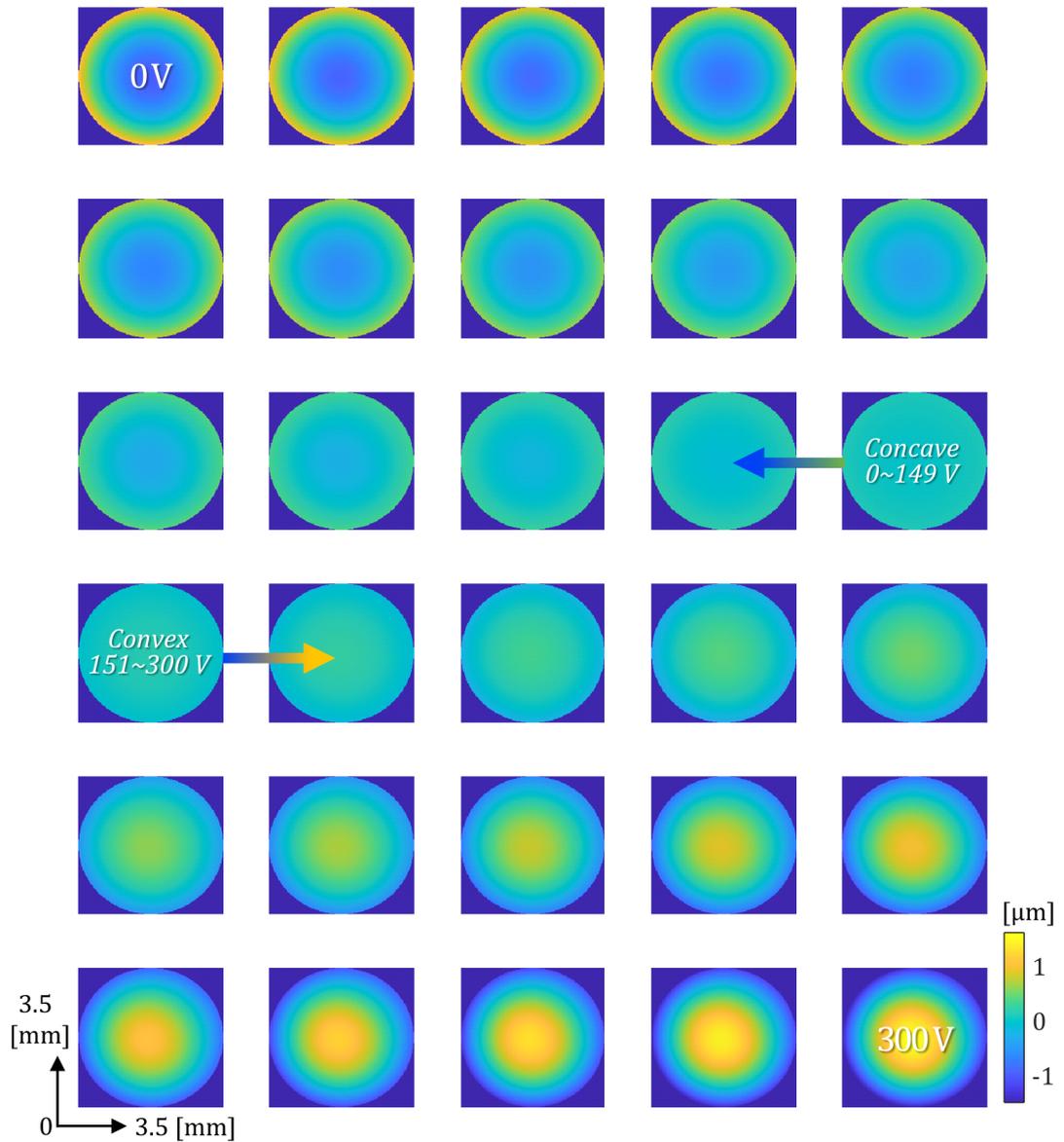


그림 3-16. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 압전 변형 거울 전압 변화에 따른 파면 측정 결과

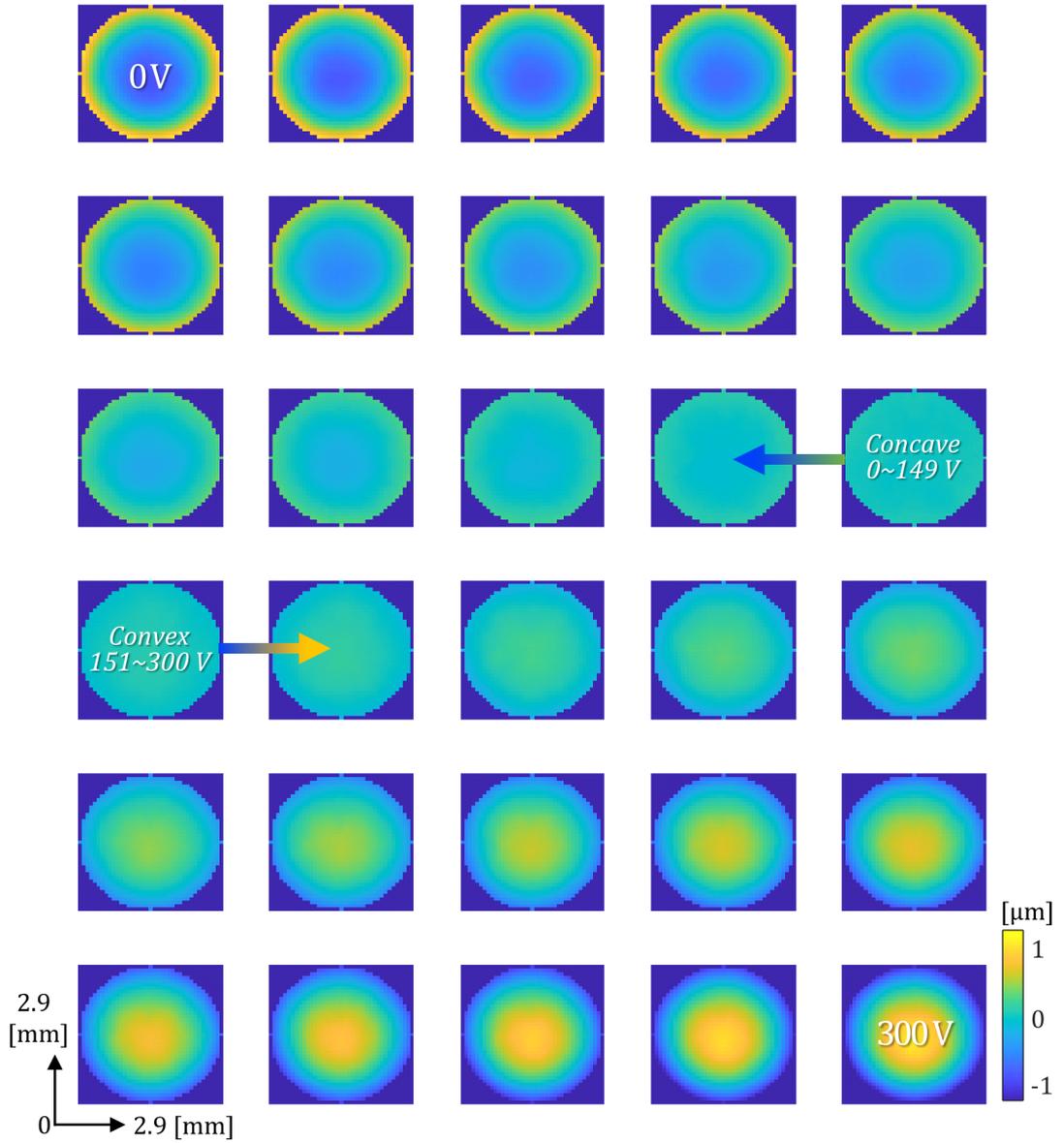


그림 3-17. 삭-하트만 파면 센서의 압전 변형 거울 전압 변화에 따른 파면 측정 결과

그림 3-16은 제안하는 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계로 압전 변형 거울의 전압 변화에 따른 파면 변화를 측정된 결과를, 그림 3-17은 이와 동일한 파면을 삭-하트만 파면 센서로 측정된 결과를 나타낸다. 그림 3-16과 그림 3-17에서 알 수 있듯이, 제안하는 시스템으로 상용화된 파면 센서와 비슷하게 미세한 파면의 변화를 측정할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 정량적으로 두 측정 결과를 비교하기 위해, 파면들에 대한 곡률 반경을 그림 3-18과 같이 각각 계산하였으며, 그 결과 전체적인 곡률 반경 결과가 제조사에서 제공하는 압전 변형 거울의 설계값에 의한 곡률 반경과 유사함을 알 수 있었으며, 삭-하트만 파면 센서의 결과와 2.67% 이내의 차이를 보임을 확인하였다.

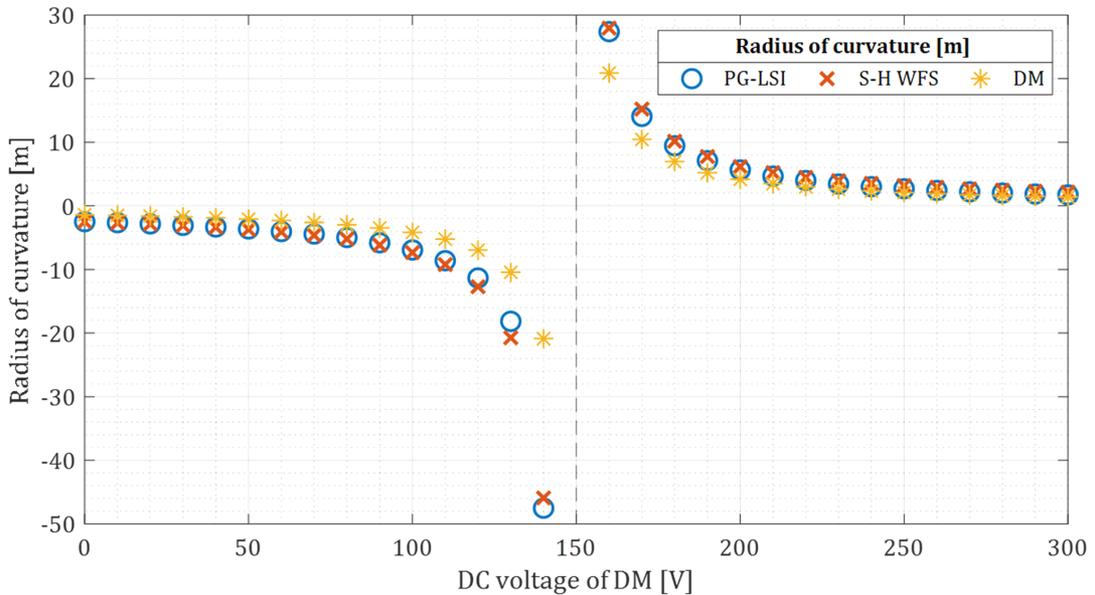


그림 3-18. 압전 변형 거울의 전압 변화에 따른 파면의 곡률 반경 이론값과 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계 및 삭-하트만 파면 센서의 측정 결과 비교 그래프

3. 비구면 및 자유 곡면 측정 결과 분석

가. 비구면 렌즈 측정 결과 분석

제안하는 시스템으로 보다 다양한 파면을 측정하기 위해 비구면 렌즈 (aspherical lens)의 표면을 측정하였다. 사용한 비구면 렌즈는 Thorlabs 사의 ASL10142M-780과 A375TM-B 제품으로 비구면 렌즈의 표면 형상 방정식은 식 (3-2)와 같으며, 각각의 설계 사양은 표 3-3과 같다.

$$z = \frac{Y^2}{R \left(1 + \sqrt{1 - (1+k) \frac{Y^2}{R^2}} \right)} + A_2 Y^2 + A_4 Y^4 + \dots + A_n Y^n \quad (3-2)$$

여기서 R 은 곡률 반경이며, k 는 원추 상수 (conic constant), A_n 은 n 번째 비구면 계수 (n^{th} order aspheric coefficient)를 의미한다.

표 3-3. 비구면 렌즈의 설계 사양

품명	R [mm]	k	A_2	A_4	A_6	A_8
ASL10142M-780	35.83	-0.6291	0	1.4398×10^{-7}	0	0
A375TM-B	5.15	0	0	5.0699×10^{-4}	1.0137×10^{-5}	8.5233×10^{-7}

그림 3-19는 제안하는 시스템을 통해 비구면 렌즈의 표면 형상에 해당하는 파면을 측정 및 복원한 결과를 나타낸다. 복원된 파면의 곡률 반경을 계산한 결과 ASL10142M-780 제품은 35.51 mm, A375TM-B 제품은 5.09 mm로 계산되었으며, 이러한 값은 제조사에서 제공하는 설계 곡률 반경과 매우 근접하고 있음을 알 수 있다. 그리고 식 (3-2) 및 표 3-3의 이론값을 통해 생성된 가상의 파면과 측정 결과를 비교한 결과, 두 결과의 잔차가 수백 nm 내임을 확인하였다.

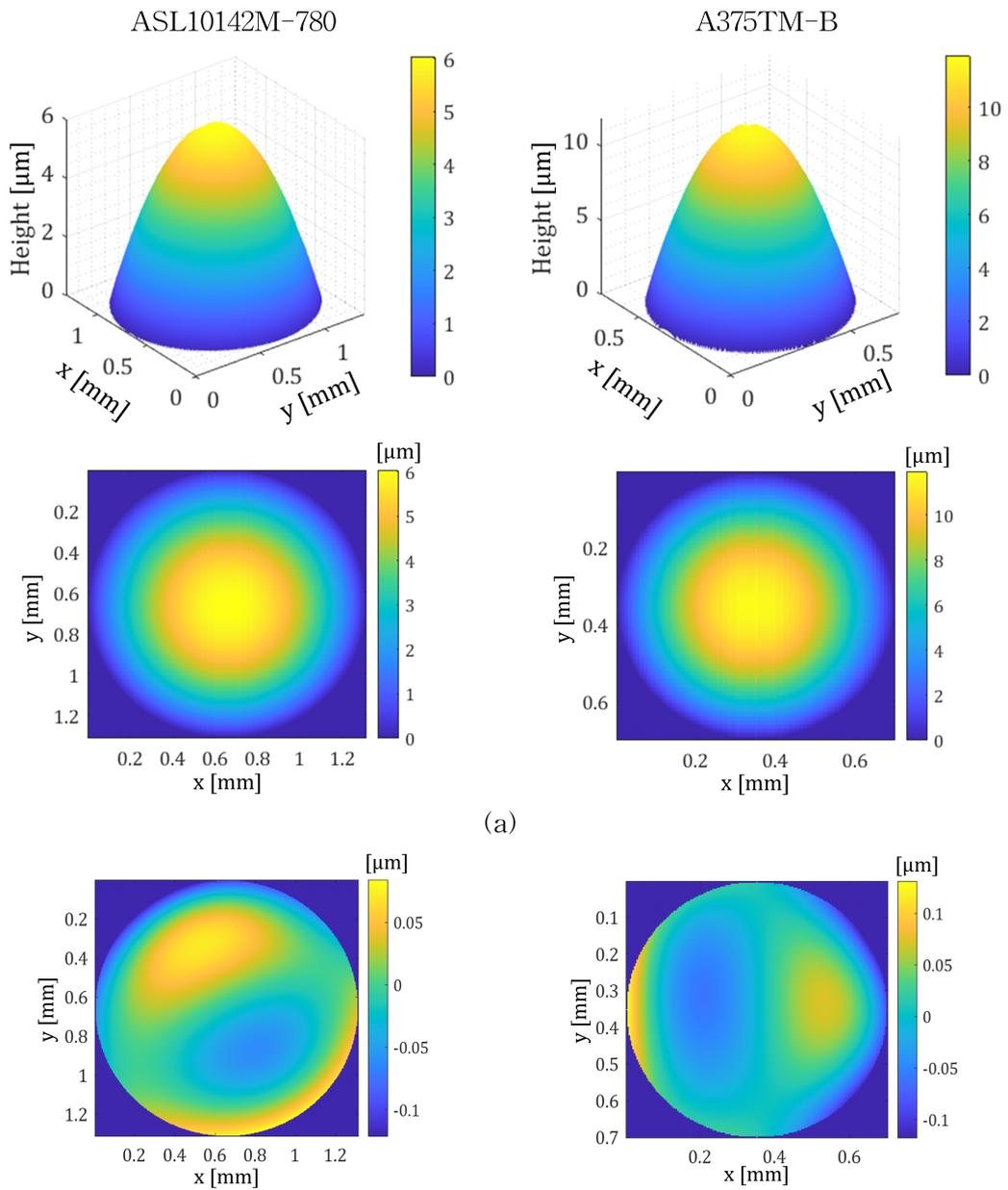


그림 3-19. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 각각의 비구면 렌즈
 (a) 측정 결과와 (b) 시뮬레이션 파면과의 잔차

나. 원통형 렌즈 측정 결과 분석

원통형 렌즈 (cylindrical lens)는 횡방향으로 한쪽 축에 대해서만 곡률 반경을 가지며, 이와 직교하는 축으로는 거의 평면에 가까운 특징을 가지는 광학 소자이다. 본 실험에는 이러한 원통형 렌즈의 표면에 해당하는 파면을 측정하여 제안하는 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 측정 가능성을 검증하였다. 실험에 사용된 원통형 렌즈는 그림 3-20과 같은 Thorlabs 사의 ACY254-050-B 제품으로, ACY254-050-B는 두 장의 렌즈로 구성되어 있으며, 전체 3개의 면에 대해 각각의 곡률 반경을 가지고 있다. 본 실험에서는 원통형 렌즈의 앞면과 뒷면에 해당하는 파면을 측정하였으며, 이를 통해 각각의 면의 곡률 반경인 R_1 과 R_3 를 계산하였다.

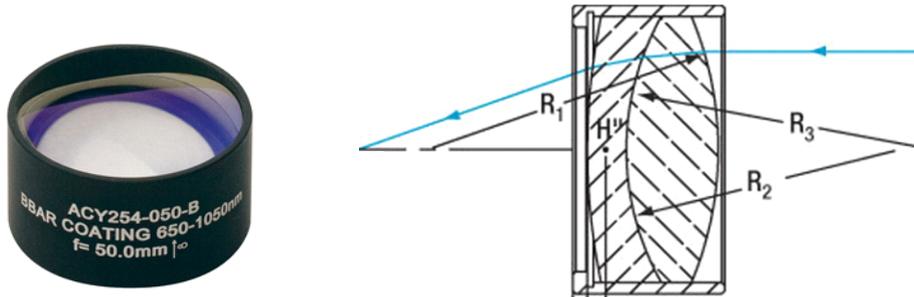
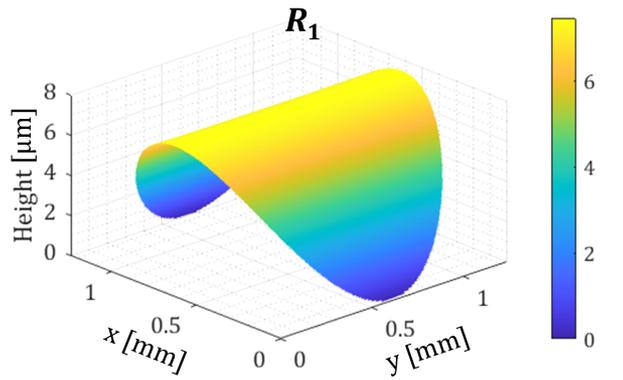
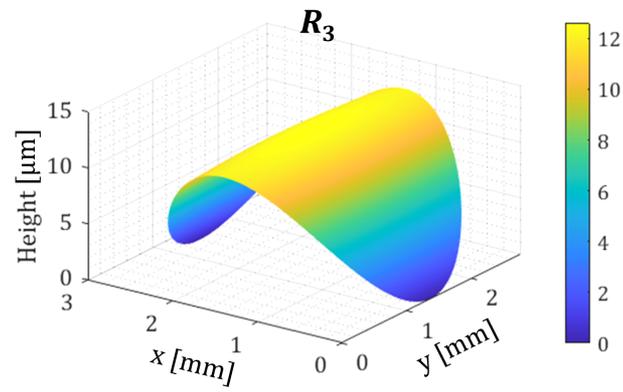


그림 3-20. Thorlabs 사의 원통형 렌즈

그림 3-21(a)는 R_1 면과 R_3 면에 해당하는 파면을 복원한 결과를 보여주고 있으며, 이때 계산된 곡률 반경은 각각 25.73 mm와 75.01 mm로, 원통형 렌즈의 설계값인 26 mm 및 72.6 mm와 매우 근접하고 있음을 확인하였다. 또한, 측정 결과를 보다 검증하기 위해, 동일한 시편을 Form Talysurf S5K로 측정하여 그림 3-22와 같이 단면 형상을 비교하였으며, 두 측정 결과의 잔차는 수십 nm 내인 것을 확인하였다.

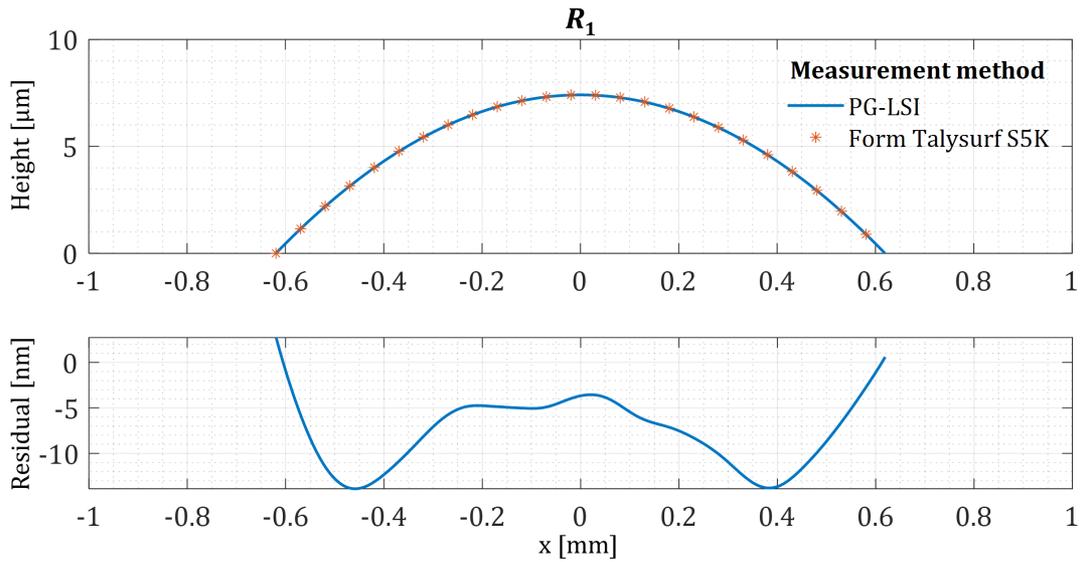


(a)

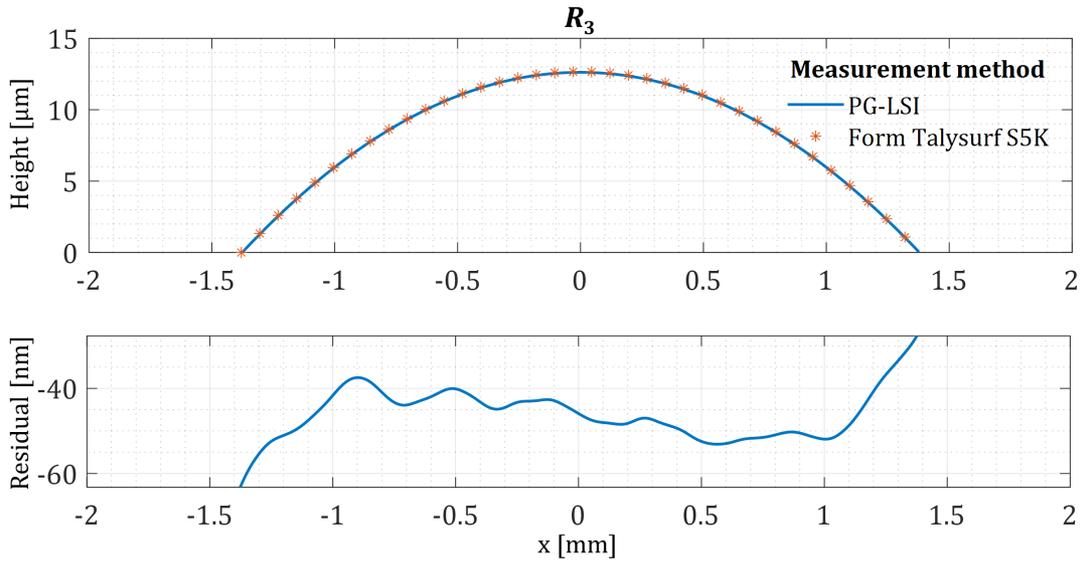


(b)

그림 3-21. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 원통형 렌즈 측정 결과



(a)



(b)

그림 3-22. 원통형 렌즈의 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계 및 Form Talysurf S5K로 측정된 결과의 비교 그래프

다. 원환형 거울 측정 결과 분석

마지막으로 자유 곡면에 해당하는 파면을 측정하기 위해 그림 3-23과 같이 수직축과 수평축의 곡률 반경이 서로 다른 원환형 거울 (toroidal mirror)을 측정하였다. 원환형 거울로는 수직축 곡률 반경 (R_v)이 208.25 mm, 수평축 곡률 반경 (R_h)이 234.19 mm를 가지는 Shimadzu 사의 TR234-19A3035 제품을 이용하였다. 그림 3-24(a)는 제안하는 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계를 통해 측정된 원환형 거울의 파면을 나타낸다. 측정 결과, 복원된 파면은 그림 3-24(b)와 같이 수직, 수평축의 곡률 반경이 달랐으며, 이때 각각의 곡률 반경은 210.25 mm와 230.74 mm로 계산되었다. 측정된 결과를 검증하기 위해 이론값 기반의 파면을 생성하여 비교하였으며, 두 결과의 잔차는 그림 3-25과 같이 수백 nm 수준인 것을 확인하였다. 본 실험을 통해, 제안하는 시스템은 자유 곡면 파면의 경우에도 복원이 가능함을 검증하였다.

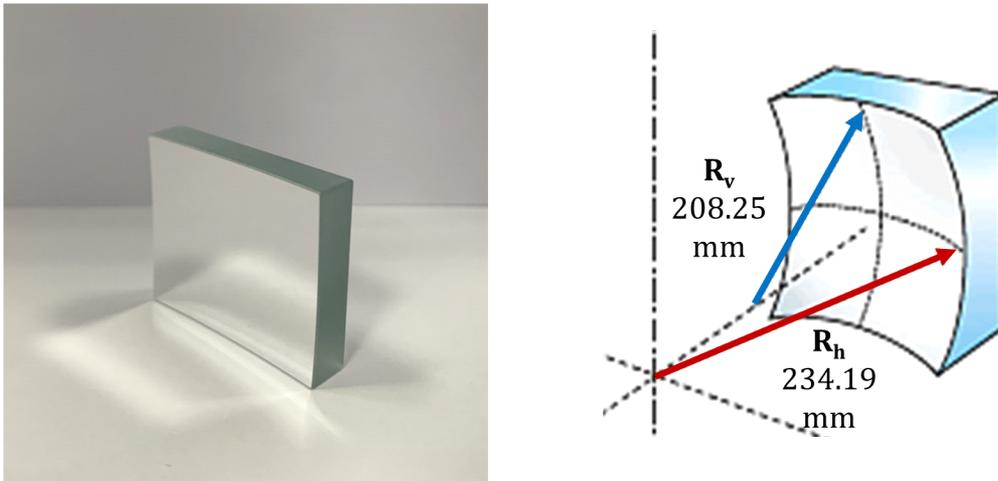


그림 3-23. Shimadzu 사의 원환형 거울

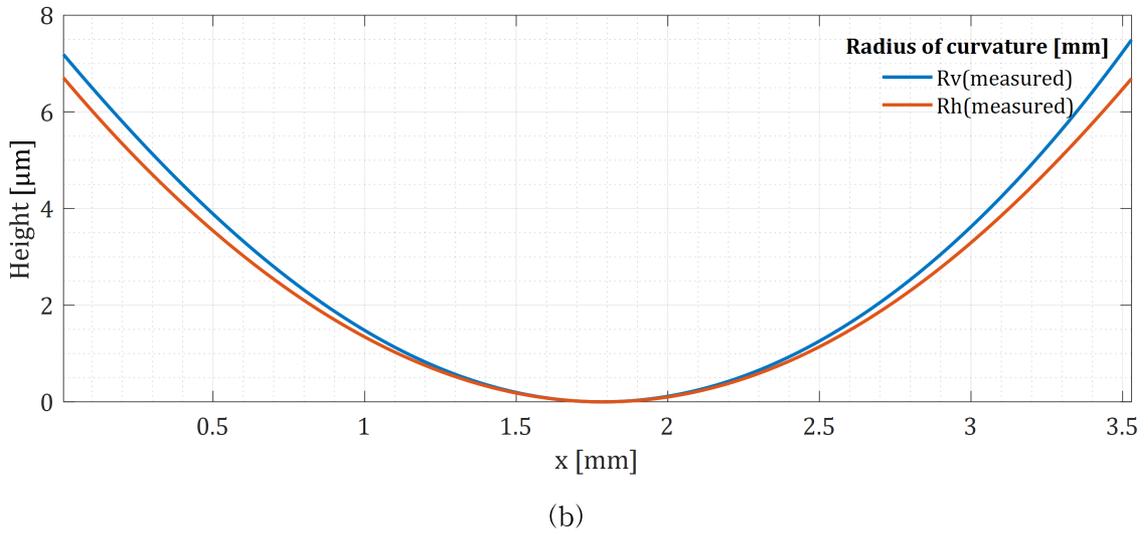
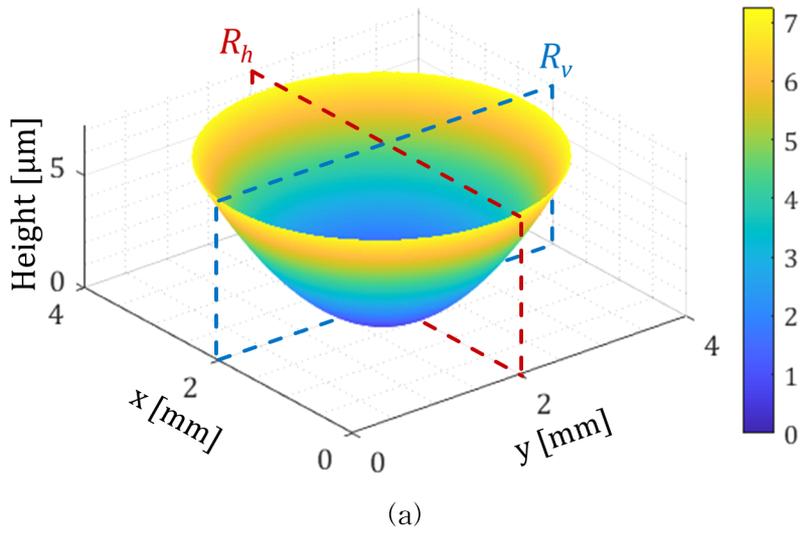
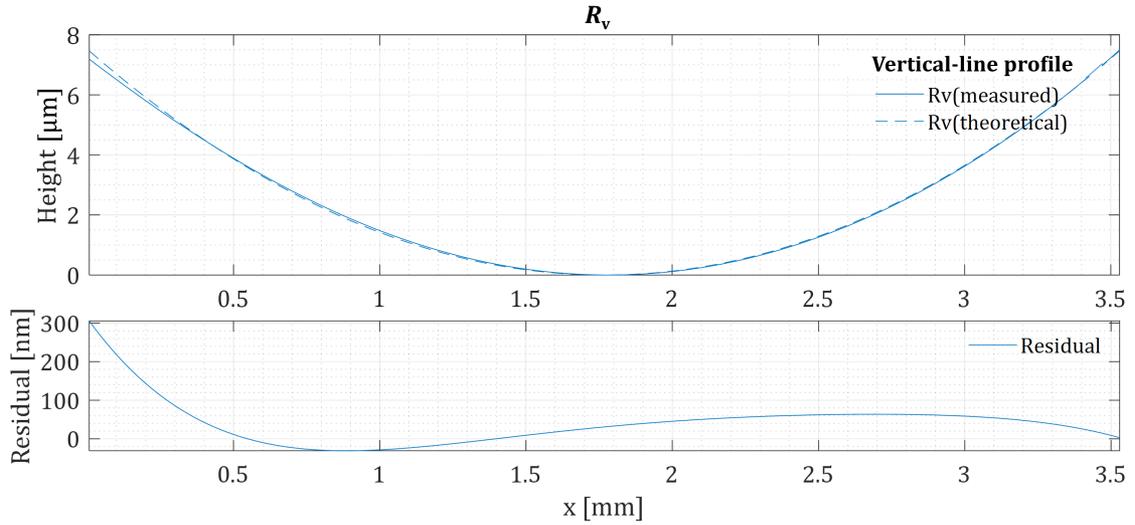
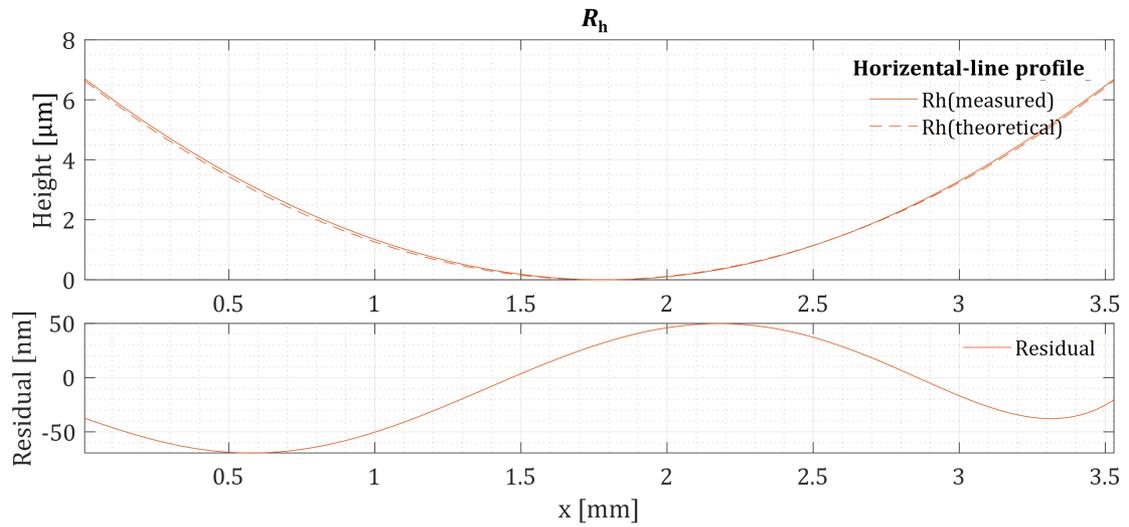


그림 3-24. 단일 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 원환형 거울 (a) 측정 결과와
 (b) 수직 및 수평 방향의 line profile



(a)



(b)

그림 3-25. 원환형 거울의 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 비교 그래프 및 두 결과의 잔차 그래프

표 3-4. 비구면과 자유 곡면의 설계값 및 실험 결과

unit : [mm]

품명		설계 곡률 반경	Form Talysurf S5K 결과	PG-LSI 결과
Aspherical lens	ASL10142M-780	35.83	36.18	35.51
	A375TM-B	5.15	5.11	5.09
Cylindrical lens	R_1	26.0	25.91	25.73
	R_3	72.6	75.20	75.01
Toroidal mirror	Horizontal	234.19	233.74	230.74
	Vertical	208.25	208.35	210.25

4. 층밀림량 변화에 따른 파면 측정 및 분석

층밀림 간섭계는 일반적으로 층밀림량이 작고, 측정 파면이 평면파에 가까울수록 간섭무늬를 관찰하기 어렵다. 하지만 제안하는 편광 격자 기반 층밀림 간섭계는 평면 거울과 편광 격자 사이의 거리 조절을 통해 층밀림량을 자유롭게 변화시킬 수 있기 때문에, 시편에 따라 간섭무늬의 개수를 적절히 조절할 수 있는 장점이 있다. 이를 검증하기 위해, 본 시스템에서 층밀림량을 변화시키면서, 곡률 반경 2000 mm의 비교적 평면에 가까운 오목 거울의 형상을 측정하였다. 거울과 편광 격자 간의 거리를 변화시키면서 식 (2-7)을 이용하여 층밀림량을 계산하였으며, 그림 3-26과 같이 층밀림량은 편광 격자와 평면 거울 사이의 거리가 멀어짐에 따라 선형적으로 증가하였다.

본 실험에서는 층밀림량을 각각 110 μm , 460 μm , 810 μm , 1160 μm 로 조절하면서 파면을 측정하였다. 측정 결과, 그림 3-27과 같이 층밀림량이 증가할수록 간섭무늬의 주기가 짧아지며, 추출되는 위상의 기울기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 이러한 위상을 통해 복원된 파면은 그림 3-28과 같으며, 위상의 기울기에 따라 복원된 파면과 이론적인 파면의 차이가 달라지는 것을 알 수 있었다. 이는 평면에 가까운 파면을 측정하는 경우, 층밀림량이 작으면 획득되는 영상에서 간섭무늬의 전체 광량 변화가 회절 등과 같은 잡음에 의한 광량 변화와 비슷해지기 때문이며, 이로 인해 신호 대비 잡음비가 나빠져서 측정 오차가 크게 유발된 결과이다. 반면, 층밀림량이 너무 커지게 되면, 간섭되는 파면의 중첩 영역이 서로 매우 다르게 되기 때문에 이로 인한 오차가 발생하게 된다. 본 실험의 결과에서는 층밀림량이 460 μm 일 때, 1999.2 mm로 가장 설계 곡률 반경과 비슷한 결과값이 나오는 동시에 잔차가 가장 작은 것을 확인하였다.

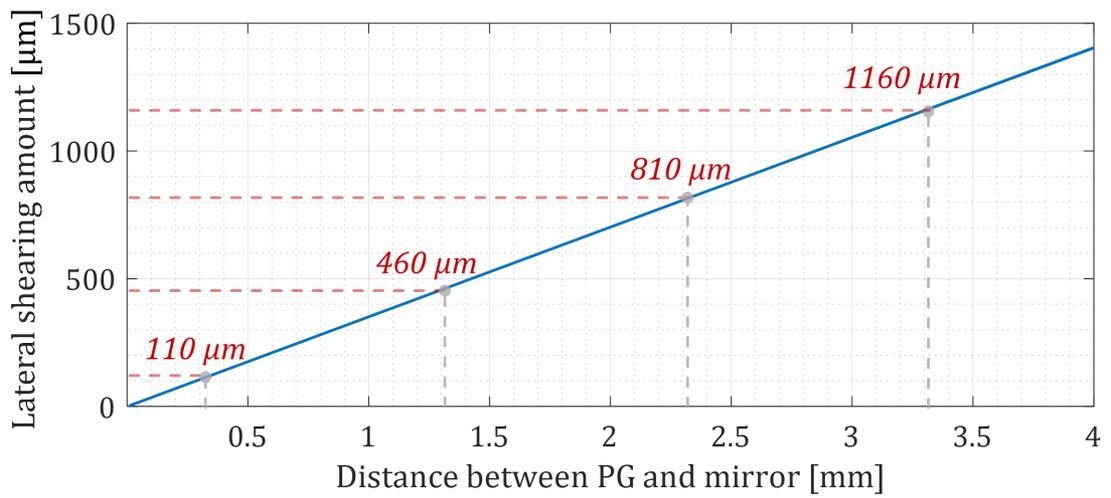
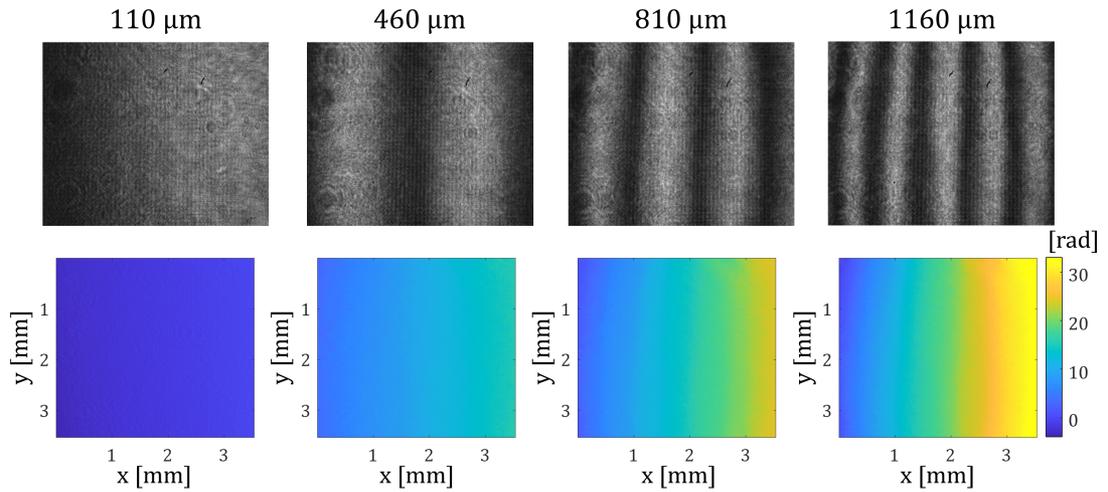
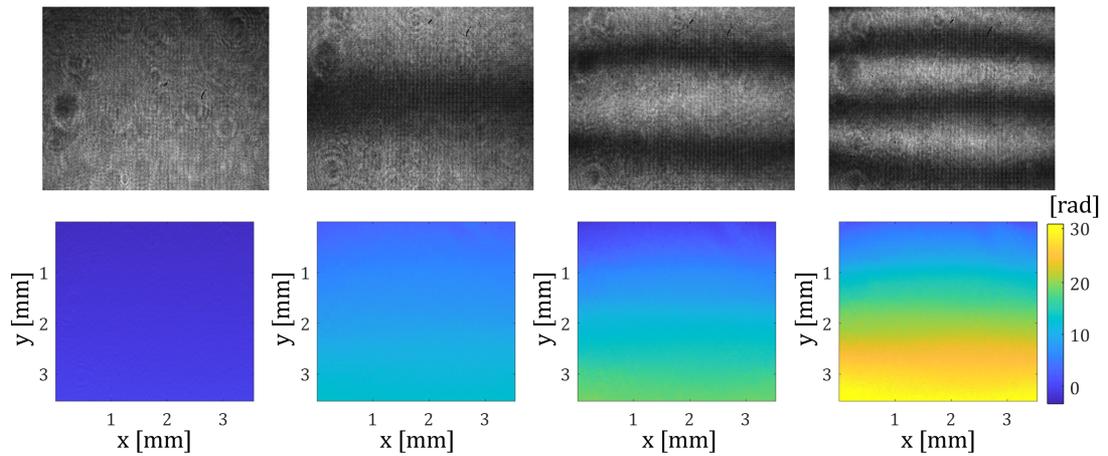


그림 3-26. 편광 격자와 평면 거울 사이의 거리에 따른 층밀립량의 변화



(a)



(b)

그림 3-27. 층밀립량 변화에 따른 오목 거울 ($R=2000$ mm)의
 (a) x 방향 및 (b) y 방향일 때의 간섭무늬 주기 변화와 위상 추출 결과

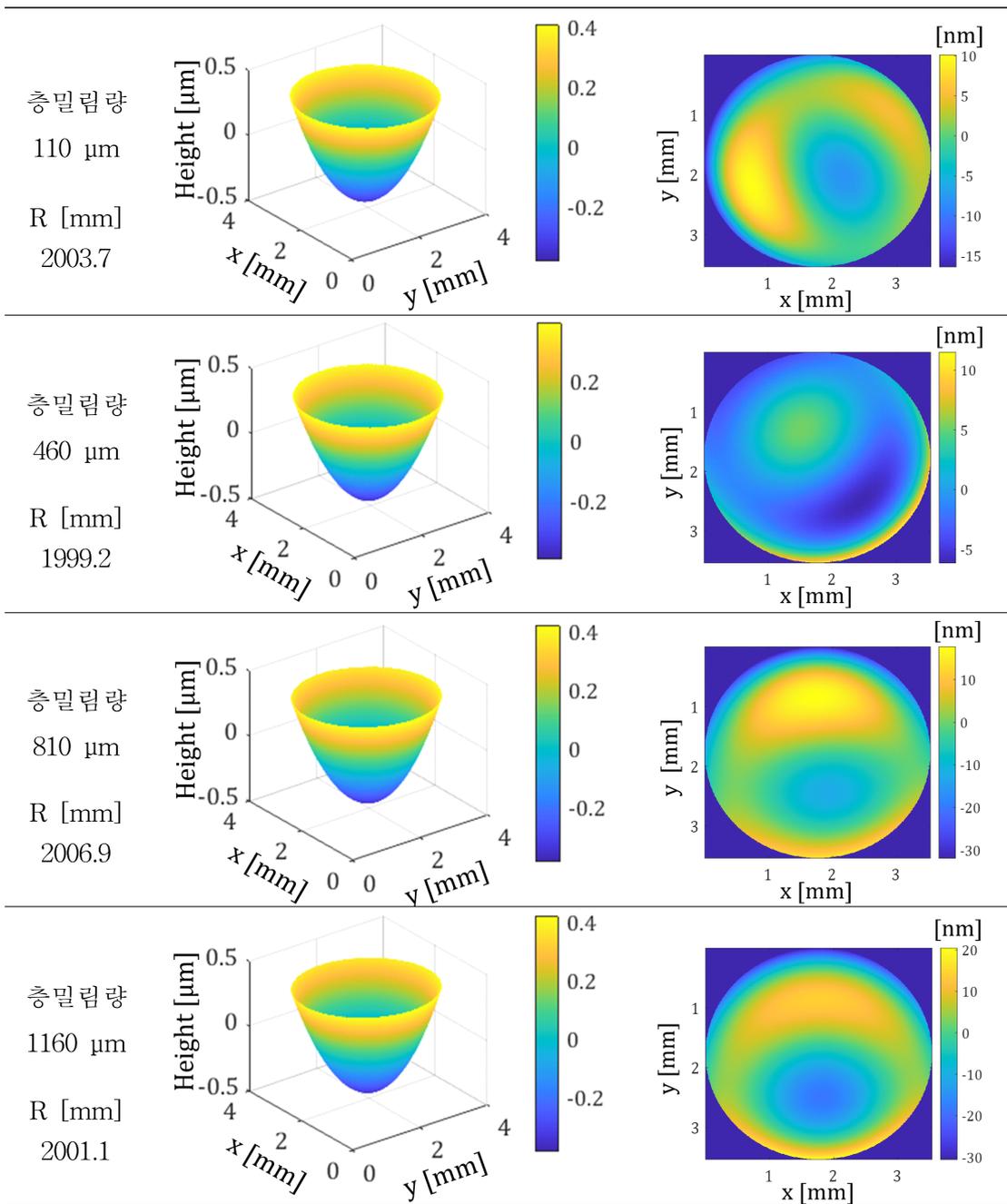


그림 3-28. 층밀립량에 따른 오목 거울의 파면 복원 결과 및 이론 파면과의 잔차

제4장 고찰 및 논의

본 연구에서는 파면 분석을 위한 편광 격자 기반 층밀립 간섭계를 제안하고, 이를 이론적 및 실험적으로 검증하였다. 그리고 제안하는 간섭계로 파면을 10번 반복 측정 한 결과, 1 nm의 반복능으로 파면을 복원할 수 있음을 확인하였다. 하지만 제안하는 간섭계를 파면 측정 센서로 활용하기 위해서는 시스템의 오차 분석을 통한 성능 개선이 필요하며, 실시간 파면 측정을 위한 방법이 논의되어야 한다.

1. 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 오차 요인 분석

본 연구에서 제안하는 편광 격자 기반 층밀립 간섭계의 오차 요인은 크게 다음과 같다.

- 편광 격자의 누출광에 의한 간섭
- 편광 카메라의 구조적 한계

가. 편광 격자의 누출광에 의한 간섭

제안하는 편광 격자 기반 층밀립 간섭계에 사용되는 편광 격자는 이론적으로 입사하는 빛의 편광에 따라 ± 1 차로만 회절되어야 하나, 실제 편광 격자는 이러한 회절되는 빛 외에 0차로 투과하는 누출광 (leakage light)이 발생하였다. 이러한 0차 누출광은 ± 1 차 빛에 의해 생성되는 간섭무늬와 중첩되어 미세한 간섭무늬를 생성하였으며, 이는 위상 추출 시 잡음을 발생시켰다. 그래서 이러한 0차 누출광을 최소화하기 위해서는 편광 격자의 설계 및 제작에 따른 사양에 맞추어 층밀립 간섭계가 구성되어야 한다. 수학적으로 편광 격자의 0차 누출광 효율은 아래와 같이 정의할 수 있다 [44-45].

$$\eta_0 = \cos^2\left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda}\right) \quad (4-1)$$

여기서 λ 는 입사광의 파장이며, Δn 은 액정의 복굴절성에 따른 굴절률 차이, 그리고 d 는 편광 격자의 두께이다. 일반적인 편광 격자는 $\Delta nd = \lambda/2$ 가 되어 특정 파장일 때 0차 빛의 효율이 0이 되도록 설계되어 있다. 그러나 입사하는 빛의 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 간섭무늬의 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.

나. 편광 카메라의 구조적 한계

편광 카메라는 영상 소자의 앞단에 서로 다른 투과축을 가지는 4개의 편광기가 (2×2) 각 화소별로 배열되어 있으며, 한 장의 영상을 통해 4장의 편광별 영상을 한 번에 획득할 수 있는 장점이 있다. 하지만 영상 분할 과정에서 각 영상들은 편광 카메라의 구조상 서로 이웃하는 화소들로부터 획득되기 때문에, 정확하게 위치가 동일하지 않은 한계가 있다. 이로 인해 획득된 편광별 영상들은 서로 인접한 화소 사이의 광량값이 누락되어, 횡방향 분해능이 2배 낮아진다. 이와 동시에, 동일한 위치에서 획득되지 않은 위상 천이 간섭무늬로 인하여 위상 측정 오차가 발생한다. 이러한 한계를 개선하기 위해, 편광 카메라의 내부에 핀홀 (pin hole) 혹은 회절 소자를 사용하여 각각의 이웃하는 화소들에 입사하는 빛을 동일하게 조절할 수 있다.

또한, 편광 카메라는 내부 편광기들의 투과축 정렬 및 편광 소광률 (polarization extinction ratio)에 의한 오차를 유발한다. 이러한 오차는 편광별 영상을 통해 위상을 복원하는 과정에서 편광도 (degree of polarization)를 정의할 수 없는 문제를 발생시키기 때문에, 공간 위상 천이 방법을 적용할 때 위상을 왜곡시킨다. 그러나 이러한 편광 오차는 실험 전 투과축이 잘 정의된 기준 편광기를 이용하여 편광 카메라의 편광축과 편광도 오차값 및 편광 소광률을 측정하고, 실험 후 이를 보정하는 방법을 통해 최소화할 수 있다.

2. 실시간 파면 측정을 위한 편광 격자 기반 층밀립 간섭계

본 논문에서 제안하는 시스템은 파면 복원을 위해 종방향과 횡방향의 간섭무늬를 획득해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 이중 편광 격자 혹은 단일 편광 격자를 0° 와 90° 로 회전하여 각각의 간섭무늬를 획득하였다. 하지만 이러한 방법은 측정 시간을 지연시키고, 두 방향의 영상을 획득하는 동안 발생하는 외부 환경 변화로 인하여 실시간 파면 측정에 한계가 있다. 이를 해결하기 위해, 그림 4-1과 같은 실시간 파면 측정을 위한 편광 격자 기반 층밀립 간섭계를 구성할 수 있다. 전체적인 시스템은 기존과 동일하나, 편광 카메라 앞단에 위치하는 BS_2 의 반사 및 투과 방향으로 각각 0° 와 90° 로 회전된 편광 격자를 배치하여 실시간으로 종방향과 횡방향의 간섭무늬를 동시에 획득할 수 있는 특징이 있다. 이때, 종방향과 횡방향의 간섭무늬가 중첩된 영상을 한 번에 획득하고, 공간 필터링 기법을 통해 각각의 간섭무늬를 추출하여 위상을 측정할 수 있다. 또한, 각각의 편광 격자와 BS_2 사이에 광 개폐기 (optical shutter)를 설치하여, 순차적인 2장의 간섭무늬 획득 및 위상 추출을 통해 고속으로 파면을 복원할 수 있다.

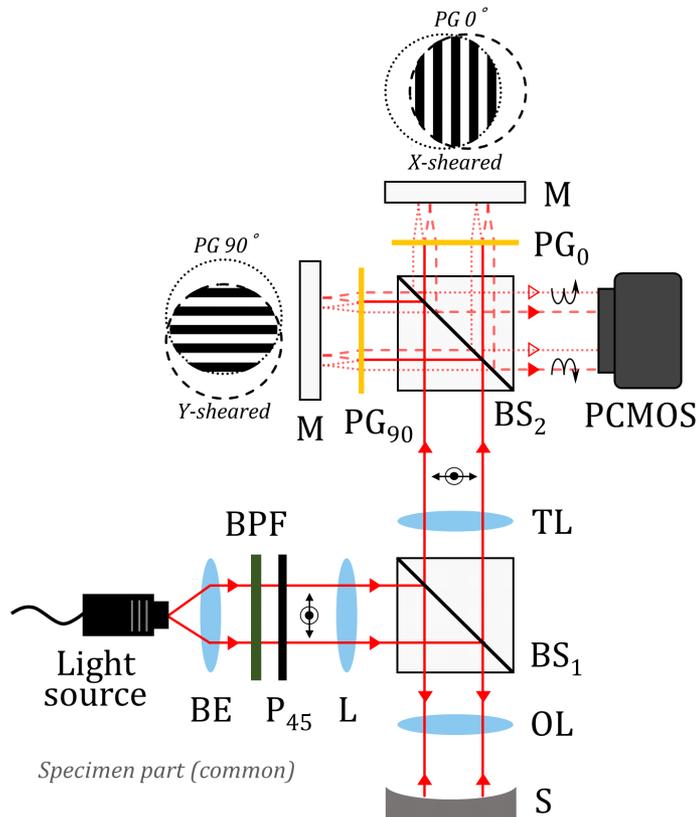


그림 4-1. 실시간 파면 측정을 위한 편광 격자 기반 층밀림 간섭계
 (BE, 15x beam expander; BPF, band-pass filter; P₄₅, 45° rotated polarizer; L, lens; BS_{1&2}, beam splitter; OL, 2x objective lens; TL, tube lens; PG_{0&90}, 0°, 90° rotated polarization grating; M, flat mirror; PCMOS, polarization-pixelated CMOS camera)

제5장 결론

본 논문에서는 파면 분석을 위한 편광 격자 기반 층밀립 간섭계를 제안하고, 측정 원리를 이론적으로 정리하였다. 그리고 다양한 파면 측정을 통해 제안하는 시스템의 원리를 검증하고, 기존 측정 시스템의 실험 결과와 비교 분석하였다.

본 연구에서 제안하는 간섭계는 회절 격자와 편광 광 분할기, 위상 지연 소자의 기능을 동시에 가진 편광 격자를 이용하여, 측정 파면을 층밀립된 두 개의 파면으로 분할 및 중첩시킨다. 이때 중첩된 두 파면은 편광 격자에 의해 서로 수직한 원편광 상태이며, 이를 편광 카메라를 통해 4장의 간섭무늬로 획득할 수 있다. 편광 카메라는 내부에 서로 다른 투과축의 편광기가 화소별로 배열되어 있기 때문에, 한 번의 측정만으로 4장의 간섭무늬를 획득할 수 있는 특징이 있다. 층밀립 간섭계는 정확한 파면 복원을 위해 횡방향 및 종방향의 간섭무늬를 획득해야 하며, 이러한 간섭무늬들을 통해 각 방향의 위상을 추출할 수 있다. 이때 추출된 위상에는 시편의 기울기 정보가 포함되어 있으며, Modal 파면 복원 방법을 통해 측정된 파면을 복원할 수 있다.

시스템을 구성하기에 앞서, 편광 격자의 편광 방향과 회절 각도를 확인하는 실험을 진행하였다. 실험을 진행한 결과, 편광 격자에 입사된 파면의 편광 상태에 따라 투과된 파면의 회절 방향이 결정되었으며, 이는 제2장에서 이론적으로 정리한 내용과 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 편광 격자의 회절 각도를 확인하기 위한 실험을 진행하였으며, 측정된 회절 각도는 $\pm 5.008^\circ$ 로 설계 회절 각도인 $\pm 5^\circ$ 와 약 0.16%의 차이로 매우 근접한 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 층밀립 간섭계는 층밀립부에 사용되는 편광 격자의 개수에 따라 두 가지 시스템으로 구분된다. 먼저 동일한 사양의 두 편광 격자를 나란히 배치하여 구성한 이중 편광 격자 기반 층밀립 간섭계를 제안하였으며, 시스템의 원리를 검증하기 위해 오목 거울 ($R=150\text{ mm}$)을 측정하였다. 그러나 두 편광 격자 사이의 미세한 차이로 인해, Moiré 간섭무늬가 발생하여 측정된 간섭무늬가 크게 왜곡되는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 공간 필터링 기법을 이용하여 측정 신호에 해당하는 부분만 추출하여 Moiré 간섭무늬가 제거된 간섭무늬를 다시 획득하였다. 이를 통해 복원

된 파면의 곡률 반경을 계산한 결과 150.01 mm의 값을 얻었으며, 측정 결과를 오목 거울의 제조사가 제공한 설계 사양과 비교했을 때, 약 0.067%의 오차가 발생하였다. 또한, 150 mm의 곡률 반경을 통해 가상으로 생성한 오목 거울 파면과 측정 결과의 간차는 수십 nm 수준임을 확인하였다.

한편, 이중 편광 격자 시스템의 Moiré 간섭무늬를 근본적으로 제거하기 위해, 하나의 편광 격자와 평면 거울을 이용한 단일 편광 격자 기반 층밀림 간섭계를 제안하였다. 편광 격자를 통과한 파면은 평면 거울을 통해 다시 반사되어 동일한 편광 격자를 총 두 번 지나기 때문에, 두 편광 격자 사이의 차이로 인한 Moiré 간섭무늬가 발생하지 않는다. 제안하는 시스템의 측정 원리를 검증하기 위해 다양한 곡률 반경의 오목 거울들과 DM, 비구면 및 자유 곡면의 시편을 측정하였다. 측정 결과를 검증하기 위해 기존 파면 센서인 삭-하트만 파면 센서와 접촉식 측정기인 Form Taylor S5K를 통해 측정된 결과와 비교, 분석하였다. 이를 통해, 제안하는 시스템으로 측정된 결과 모두 기존 시스템의 측정 결과와 수십 nm 이내로 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 제안하는 시스템은 편광 격자와 평면 거울 사이의 거리를 변화시켜 간단하게 층밀림량을 변화시킬 수 있다. 이를 검증하기 위해 층밀림량을 변화시키면서 곡률 반경이 2000 mm인 오목 거울을 측정하였다. 층밀림량이 증가할수록 간섭무늬의 주기는 짧아지고, 위상의 기울기는 증가하는 것을 확인하였다. 그리고 측정 결과의 곡률 반경 계산을 통해 층밀림량에 따라 측정 결과가 개선될 수 있음을 확인하였다.

또한, 층밀림 간섭계는 측정 파면이 평면파에 가까울수록 간섭무늬를 관찰하기 어렵고, 층밀림량이 적을수록 잡음에 의한 측정 오차가 발생한다. 이러한 오차는 층밀림량을 임의로 조절하여 위상의 기울기를 증가시키는 방법을 통해 개선할 수 있으며, 제안하는 시스템의 층밀림량은 편광 격자를 통해 용이하게 조절 가능하다.

본 논문에서 제안하는 두 종류의 편광 격자 기반 층밀림 간섭계는 매우 간단한 구성으로 편광 격자를 이용하여 안정적인 간섭무늬를 생성할 수 있다. 그리고 편광 카메라를 통해 고속으로 공간 위상 천이된 간섭무늬 획득, 위상 추출 및 파면 복원이 가능하다. 본 연구에서 제안하는 편광 격자 기반 층밀림 간섭계는 기존 파면 측정 센서의 성능을 개선할 수 있기 때문에 다양한 분야에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] Pathak, Biswajit, and Bosanta R. Boruah. "Improved wavefront reconstruction algorithm for Shack - Hartmann type wavefront sensors." *Journal of Optics* 16.5 (2014): 055403.
- [2] Roddier, Francois, Claude Roddier, and Nicolas Roddier. "Curvature sensing: a new wavefront sensing method." *Statistical Optics*. Vol. 976. International Society for Optics and Photonics, 1988.
- [3] Jiang, Wenhan, and Huagui Li. "Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm." *Adaptive Optics and Optical Structures*. Vol. 1271. International Society for Optics and Photonics, 1990.
- [4] Pant, Kamal K., et al. "Subaperture stitching for measurement of freeform wavefront." *Applied optics* 54.34 (2015): 10022-10028.
- [5] Murphy, Paul, et al. "Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres." *Interferometry XIII: Applications*. Vol. 6293. International Society for Optics and Photonics, 2006.
- [6] Deck, Leslie, and Peter De Groot. "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry." *Applied optics* 33.31 (1994): 7334-7338.
- [7] De Groot, Peter, and Leslie Deck. "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain." *Journal of modern optics* 42.2 (1995): 389-401.

- [8] Hitzenger, Christoph K., et al. "Differential phase measurements in low-coherence interferometry without 2π ambiguity." *Optics Letters* 26.23 (2001): 1864-1866.
- [9] Schmit, Joanna, and Artur Olszak. "High-precision shape measurement by white-light interferometry with real-time scanner error correction." *Applied optics* 41.28 (2002): 5943-5950.
- [10] Kinnstaetter, K., et al. "Accuracy of phase shifting interferometry." *Applied optics* 27.24 (1988): 5082-5089.
- [11] Lai, Guanming, and Toyohiko Yatagai. "Generalized phase-shifting interferometry." *JOSA A* 8.5 (1991): 822-827.
- [12] Ghim, Young-Sik, et al. "3D surface mapping of freeform optics using wavelength scanning lateral shearing interferometry." *Optics express* 22.5 (2014): 5098-5105.
- [13] Gu, Liyuan, et al. "Polarization phase-shifting lateral shearing interferometer with two polarization beam splitter plates." *Optical Review* 24.4 (2017): 600-604.
- [14] Ling, Tong, et al. "Common-path and compact wavefront diagnosis system based on cross grating lateral shearing interferometer." *Applied optics* 53.30 (2014): 7144-7152.
- [15] Ghim, Young-Sik, et al. "3D surface mapping of freeform optics using wavelength scanning lateral shearing interferometry." *Optics express* 22.5

- (2014): 5098-5105.
- [16] Rhee, Hyug-Gyo, et al. "Correction of rotational inaccuracy in lateral shearing interferometry for freeform measurement." *Optics express* 21.21 (2013): 24799-24808.
- [17] Murty, M. V. R. K., and E. C. Hagerott. "Rotational - Shearing Interferometry." *Applied optics* 5.4 (1966): 615-619.
- [18] Bravo-Medina, Beethoven, et al. "Rotational-Shearing-Interferometer Response for a Star-Planet System without Star Cancellation." *Applied Sciences* 11.8 (2021): 3322.
- [19] Song, Jae Bong, Yun Woo Lee, and Ho Soon Yang. "Instantaneous phase-shifting lateral-shearing interferometer." *Journal of the Korean Physical Society* 52.4 (2008): 1004-1009.
- [20] Falldorf, Claas, et al. "Shearing interferometer based on the birefringent properties of a spatial light modulator." *Optics letters* 34.18 (2009): 2727-2729.
- [21] Wyant, J. C. "Double frequency grating lateral shear interferometer." *Applied optics* 12.9 (1973): 2057-2060.
- [22] Lee, Hyun-Ho, Jang-Hoon You, and Seung-Han Park. "Phase-shifting lateral shearing interferometer with two pairs of wedge plates." *Optics letters* 28.22 (2003): 2243-2245.
- [23] Deck, Leslie L. "Fourier-transform phase-shifting interferometry." *Applied*

- Optics 42.13 (2003): 2354-2365.
- [24] Kinnstaetter, K., et al. "Accuracy of phase shifting interferometry." *Applied optics* 27.24 (1988): 5082-5089.
- [25] Lai, Guanming, and Toyohiko Yatagai. "Generalized phase-shifting interferometry." *JOSA A* 8.5 (1991): 822-827.
- [26] Sickinger, Horst, et al. "Characterization of microlenses using a phase-shifting shearing interferometer." *Optical Engineering* 33.8 (1994): 2680-2686.
- [27] Cho, Woo-Jong, and Seung-Woo Kim. "Stable lateral-shearing interferometer for production-line inspection of lenses." *Optical Engineering* 36.3 (1997): 896-900.
- [28] Chen, T. Y., and C. H. Chen. "An instantaneous phase shifting ESPI system for dynamic deformation measurement." *Optical Measurements, Modeling, and Metrology, Volume 5*. Springer, New York, NY, 2011. 279-283.
- [29] Servin, Manuel, and F. J. Cuevas. "A novel technique for spatial phase-shifting interferometry." *Journal of Modern Optics* 42.9 (1995): 1853-1862.
- [30] Rimmer, M. P. "Method for evaluating lateral shearing interferograms." *Applied Optics* 13.3 (1974): 623-629.
- [31] Fried, David L. "Least-square fitting a wave-front distortion estimate to an array of phase-difference measurements." *JOSA* 67.3 (1977): 370-375.
- [32] Dai, Fengzhao, et al. "Generalized zonal wavefront reconstruction for high

- spatial resolution in lateral shearing interferometry." JOSA A 29.9 (2012): 2038-2047.
- [33] Dai, Guang-ming. "Modal wave-front reconstruction with Zernike polynomials and Karhunen - Loève functions." JOSA A 13.6 (1996): 1218-1225.
- [34] Dai, Fengzhao, et al. "Modal wavefront reconstruction based on Zernike polynomials for lateral shearing interferometry: comparisons of existing algorithms." Applied Optics 51.21 (2012): 5028-5037.
- [35] Mochi, Iacopo, and Kenneth A. Goldberg. "Modal wavefront reconstruction from its gradient." Applied Optics 54.12 (2015): 3780-3785.
- [36] Dai, Guang-ming. "Modal wave-front reconstruction with Zernike polynomials and Karhunen - Loève functions." JOSA A 13.6 (1996): 1218-1225.
- [37] Shen, Wei, Ming-wen Chang, and Der-Shen Wan. "Zernike polynomial fitting of lateral shearing interferometry." Optical Engineering 36 (1997): 905-913.
- [38] Dai, Fengzhao, et al. "Use of numerical orthogonal transformation for the Zernike analysis of lateral shearing interferograms." Optics express 20.2 (2012): 1530-1544.
- [39] Oh, Chulwoo, and Michael J. Escuti. "Achromatic diffraction from polarization gratings with high efficiency." Optics letters 33.20 (2008): 2287-2289.
- [40] Oh, Chulwoo, and Michael J. Escuti. "Numerical analysis of polarization gratings using the finite-difference time-domain method." Physical review A

76.4 (2007): 043815.

- [41] Kim, Jihwan, et al. "Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts." *Optica* 2.11 (2015): 958-964.
- [42] Arteaga Barriel, Oriol, and Hana Bendada. "Geometrical Phase Optical Components: Measuring Geometric Phase without Interferometry." *Crystals*, 2020, vol. 10, num. 10, p. 880 (2020).
- [43] Creath, Katherine. "V phase-measurement interferometry techniques." *Progress in optics*. Vol. 26. Elsevier, 1988. 349-393.
- [44] Kim, Jihwan, et al. "Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings." *Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications VI*. Vol. 7093. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [45] Oh, Chulwoo, and Michael J. Escuti. "Numerical analysis of polarization gratings using the finite-difference time-domain method." *Physical review A* 76.4 (2007): 043815.