



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](#)

2024년 2월
석사학위 논문

기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서

조선대학교 대학원

광기술훈학과

송민관

기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서

Controllable chromatic confocal sensor based on
geometric phase lenses

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

송 민 관

기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

송 민 관

송민관의 석사학위논문을 인준함

위원장 안 태 정 (인)

위 원 김 현 수 (인)

위 원 주 기 남 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 현황	4
제3절 연구 목표	6
제2장 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절	7
제1절 색공초점 센서	7
제2절 기하 위상 렌즈	10
제3절 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서	12
1. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서	12
2. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서의 분산량 조절	15
제3장 실험 결과 및 분석	19
제1절 기하 위상 렌즈 기초 실험	20
제2절 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서	23
1. 기하 위상 렌즈 분산량 시뮬레이션	23
2. 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서 구성 및 기초 실험	28
3. 파장 신호의 정점 검출 방법	31
4. 계통 오차 추출 및 보정	33

제3절 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서의 분산량 조절	35
1. 분산량 조절 색공초점 센서 검증을 위한 CODE V 시뮬레 이션	35
2. 분산량 조절 색공초점 센서 구성 및 기초 실험	40
제4장 논의	46
제5장 결론	50
[참고문헌]	51

표 목차

표 2-1. BK7으로 만들어진 렌즈 재료에 대한 Sellmeier 방정식 계수 ..	9
표 3-1. 기하 위상 렌즈 초점 거리에 따른 분산량 결과	23
표 3-2. 편광과 기하 위상 렌즈 사이의 거리에 따른 광선추적법, 시뮬레이션, 실험 결과	42

그림 목차

그림 1-1. 반도체 및 디스플레이 제조 분야와 정밀 기계 분야의 시장 규모 증가 추이	1
그림 1-2. 반도체, 디스플레이, 정밀 산업 분야의 다양한 부품들	2
그림 1-3. 글로벌 산업 계측 시장 규모 및 전망	3
그림 1-4. 공초점 주사 현미경	4
그림 1-5. 색공초점 센서	5
그림 2-1. 일반적인 색공초점 센서의 광학 구성	7
그림 2-2. (a) 기하 위상 렌즈의 편광특성 (b) 기하 위상 렌즈의 구조	11
그림 2-3. 기하 위상 렌즈를 이용한 광선추적	12
그림 2-4. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서 광학 구성도	13
그림 2-5. 분산량 조절을 위한 색공초점 센서 광학 구성도	15
그림 2-6. 입사하는 광의 편광이 우원 편광으로 정의된 경우의 광선추적	16
그림 2-7. 입사하는 광의 편광이 좌원 편광으로 정의된 경우의 광선추적	17
그림 3-1. 기하 위상 렌즈 특성 실험 구성 사진	20
그림 3-2. 실험에 사용된 광원과 스펙트럼	20
그림 3-3. 입사하는 빛의 편광 상태에 따른 렌즈 효과, (a) 우원 편광 (RHP), (b) 좌원 편광 (LHP), (c) 선형 편광 (LP)	21
그림 3-4. 회절 특성을 가지는 기하 위상 렌즈의 색 분산 (a) 스크린이 가까운 경우, (b) 스크린이 멀리 떨어진 경우에 맺힌 초점 모습	22
그림 3-5. 기하 위상 렌즈의 초점 거리 (f)에 따른 분산량 시뮬레이션 (a) f=100 mm (b) f=75 mm (c) f=50 mm (d) f=45 mm	27

그림 3-6. 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서 광학 구성	29
그림 3-7. 광 서클레이터 보정 결과 (a) 광 서클레이터 광원의 진행 방향과 광학 구성도 (b) 보정 전 (c) 배경광 (d) 보정 후	29
그림 3-8. (a) 스테이지 이동에 따른 파장 변화 (b) 파장 변화를 거리로 변환한 결과	30
그림 3-9. 무게 중심법으로 파장 신호의 정점을 검출한 경우의 비선형 오차	32
그림 3-10. 가우스 함수 곡선 맞춤 기반 파장 신호의 정점 검출을 이용한 경우의 비선형 오차	32
그림 3-11. (a) 10회 반복 측정된 비선형 오차 (b) 비선형 오차 보정 결과	34
그림 3-12. 광원의 편광 상태가 우원 편광으로 기하 위상 렌즈에 입사할 경우 (a) d_1 이 55 mm일 경우 (b) d_1 이 45 mm일 경우	36
그림 3-13. 광원의 편광 상태가 좌원 편광으로 기하 위상 렌즈에 입사할 경우 (a) d_1 이 18 mm일 경우 (b) d_1 이 1 mm일 경우	38
그림 3-14. 기하 위상 렌즈 기반 분산량 조절 색공초점 센서 광학 구성	40
그림 3-15. 분산량에 따른 측정 영역 및 선형성 확인 (a) 분산량 5.4 mm일 때 스테이지 이동에 따른 파장 변화 (b) 분산량 2.4 mm일 때 스테이지 이동에 따른 파장 변화 (c) 분산량 1.2 mm일 때 스테이지 이동에 따른 파장 변화	41
그림 3-16. 분산량 5.4 mm일 경우 (a) 200 μm 단차 시편 측정 결과 (b) 1200 μm 단차 시편 측정 결과	43
그림 3-17. 분산량 2.4 mm일 경우 (a) 200 μm 단차 시편 측정 결과 (b) 1200 μm 단차 시편 측정 결과	44

그림 3-18. 분산량 1.2 mm일 경우 (a) 50 μm 단차 시편 측정 결과 (b)
 200 μm 단차 시편 측정 결과 45

그림 4-1. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서 광학 구성도 47

그림 4-2. 색공초점 센서를 이용한 투명 시편에 입사되는 빛의 경로
 49

ABSTRACT

Controllable chromatic confocal sensor based on geometric phase lenses

By Min Kwan Song

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

This thesis introduces a novel approach to chromatic confocal sensing by employing the control of chromatic dispersion through geometric phase lenses. Our method significantly improves the traditionally complex lens structures of chromatic confocal sensors, enabling a simple and efficient system. By adjusting the chromatic dispersion, we simulate and demonstrate the capability of our sensor to measure a diverse range of specimens with varying heights and surfaces. The key innovation lies in the precise control of polarization components and the manipulation of the lens distance, allowing for a fine-tuned adjustment of the dispersion quantity. This advancement not only simplifies the sensor design but also enhances its versatility and accuracy in measuring different types of specimens. This research provides the way for more efficient and versatile chromatic confocal sensors, capable of accurately measuring a wide range of specimen heights, thereby broadening the scope of applications in various fields of optical measurement.

Key words : chromatic confocal sensor, geometric phase lens, chromatic dispersion

제1장 서론

제1절 연구 배경

최근 산업계에서는 4차 산업의 중요성과 더불어 그림 1-1과 같이 반도체 및 디스플레이, 정밀 기계 산업 분야의 시장 규모가 급격히 증가하고 있다 [1-3]. 이는 스마트폰 (Smartphone)의 이용 증가 및 가상 현실 (Virtual reality, VR), 증강 현실 (Augmented reality, AR) 장비들의 개발, 인공지능 (Artificial intelligence, AI) 활용 등에 따른 기술적 수요가 반영된 것으로, 향후 이러한 첨단 분야의 시장 규모는 더욱 확대될 것으로 기대하고 있다. 그래서 첨단 분야의 기업들은 이러한 기술적 수요에 맞추어 새로운 제품의 개발과 더불어, 제품 생산의 공정 안정성 및 생산성 향상을 위해 끊임없이 노력하고 있다.

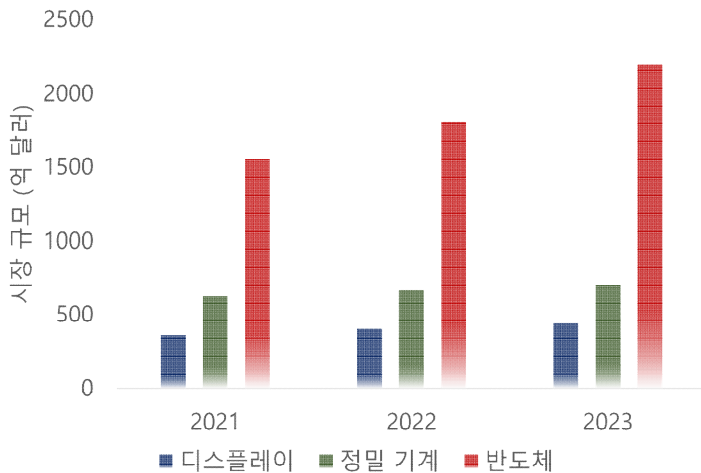


그림 1-1. 반도체 및 디스플레이 제조 분야와 정밀 기계 분야의 시장 규모 증가 추이

특히, 이러한 첨단 분야의 제품들은 고성능, 고집적화를 위해 다양한 부품들의 개발을 필요로 한다. 그림 1-2와 같이 반도체 기업들은 시스템 메모리 (System memory) 및 HBM (High bandwidth memory)의 개발을 위해 수 μm 에서 수백 μm 의 크기를 가지는 부품들을 개발하고 있으며, 이들의 2D, 3D 구조를 통해 제품을 생산한다. 또한, 디스플레이 분야의 경우 OLED (Organic light emitting diode) 및

QLED (Quantum dot light emitting diode)의 개발을 위해 다양한 전극 및 박막 부품들이 이용되고 있고, MEMS (Micro electro mechanical systems)와 같은 정밀 기계 분야에서도 제품의 고성능을 위해 미세 구동부 및 미세 센서들이 지속적으로 개발되고 있다 [4-7]. 이와 같이 비록 첨단 분야에서 개발되는 제품이나 부품들은 서로 다른 특성 및 성능, 크기를 가지지만, 공통적으로 모두 설계 사양에 맞추어 제조되어야 한다는 점에서 검사 및 측정 기술을 필요로 한다. 이에 따라 그림 1-3과 같이 계측 시장은 전 세계적으로 크게 증가하고 있고, 개발되는 계측 장비들은 각 부품의 치수, 재질 특성, 기능적 성능 등을 정밀하게 측정하고 검사한다 [8-10]. 그러나 기존의 계측 장비들은 특정 부품을 검사하기 위한 용도로 개발되어 측정 성능이 고정되어 있으며, 보다 다양한 부품들에 적용할 때 한계를 가진다.

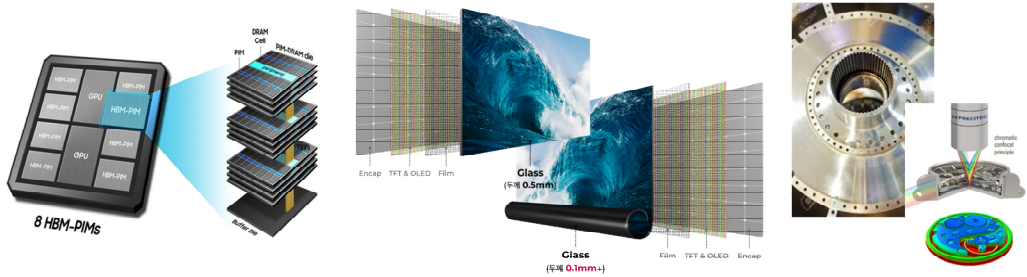


그림 1-2. 반도체, 디스플레이, 정밀 산업 분야의 다양한 부품들

한편, 산업계의 계측 시장에서 높이 및 두께, 길이 등 제품의 물리적인 치수는 가장 기본적인 측정 항목인 동시에 필수적인 요소이다. 반도체 제조 분야의 성능과 품질은 실리콘 웨이퍼 (Silicon wafer)의 두께 및 평탄도, 박막 구조물의 두께 균일성과 패턴의 정밀도로 결정되며, 다양한 디스플레이 제품의 해상도 및 화면 선명도, 성능을 최적화하기 위해서는 픽셀 크기 및 박막 구조물들의 두께 분석이 중요하다. 또한, 정밀 기계 제품의 원활한 조립 및 구동을 위해 정확한 길이 및 공차 관리는 필수적이다. 이러한 산업계의 수요에 의해 개발된 1D 측정 기술은 높은 정밀도와 반복능으로 해당되는 부품을 빠른 속도로 검사 및 측정하여, 제품의 생산성을 향상시키고 있다. 그러나 다른 계측 장비와 마찬가지로 측정 분야에서 개발되는 장비들은 측정 영역과 분해능이 고정되어 있어, 다양한 크기의 부품들을 동시에 측정할 수 없으며, 이를 위해 여러 대의 측정 장비들이 필요한 실정이다.

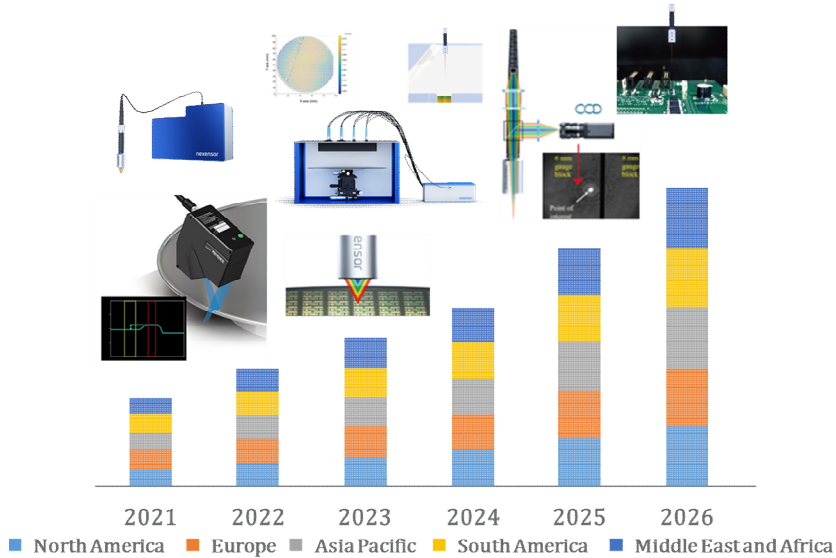


그림 1-3. 글로벌 산업 계측 시장 규모 및 전망

현재 산업계에서는 제품 및 부품의 치수 검사/측정을 위해 주로 백색광 간섭계와 공초점 현미경이 널리 사용된다. 백색광 간섭계는 빛의 간섭을 이용하여 치수를 매우 정밀하게 측정할 수 있는 장점이 있으나, 백색광 주사 간섭계의 경우에는 광축 방향 주사가 필요한 단점이 있다 [11]. 또한, 분산 간섭계는 간섭계의 구조로 인하여 광학 소자에서 발생하는 분산의 영향으로 간섭 신호의 왜곡이 발생할 수 있어 오차 보정 과정이 필요하다 [12].

이에 반해, 공초점 현미경은 시편의 표면에서 반사되는 광의 강도를 이용해 높이를 측정하는 광학 시스템으로, 간단한 구성과 높은 정밀도로 인해 다양한 분야에서 활용된다. 그러나 고정된 초점 거리의 대물 렌즈로 인해 다양한 높이와 치수를 가진 시편을 측정하는 데 한계가 있다 [13]. 이러한 한계를 극복하기 위해 개발된 색공초점 센서는 파장에 따라 초점이 달라지는 색수차 특성을 활용하여 시편의 다양한 높이와 광학적 특성을 보다 효율적으로 측정할 수 있기 때문에, 많은 연구가 활발히 진행되고 있다 [14-16]. 그러나 기존의 색공초점 센서는 특정 사양에 따라 설계, 제작되기 때문에 다양한 부품 및 제품의 측정시 한계를 가지고 있으며, 이를 극복하기 위해서는 측정 영역 및 분해능 등 성능이 변경 가능한 유연한 색공초점 센서의 개발이 필요하다.

제2절 연구 현황

1. 공초점 주사 현미경 (Confocal scanning microscopy)

공초점 주사 현미경은 시편의 표면에서 반사된 광의 강도를 획득하여 높이를 측정하는 간단하고 정밀한 광학 시스템이며, 이러한 특성으로 인해 반도체, 디스플레이, 정밀 기계 등 다양한 분야에서 측정 장비로 사용된다 [17-19]. 그림 1-4는 공초점 주사 현미경의 광학 구성을 나타내며, 일반적으로 레이저 광원을 사용한다. 광원이 핀홀 (Pinhole, PH)을 통과한 다음, 대물 렌즈 (Objective lens, OL)를 통해 시편에 조사되고, 반사된 빛은 광검출기 (Charge coupled device, CCD)에서 측정되며, 시편의 표면이 대물 렌즈의 초점면과 정확하게 일치할 때, 광검출기는 최대 광강도를 감지하여 시편의 높이를 측정한다. 또한, 그 이외의 위치에서 반사된 빛은 핀홀에 의해 차단된다. 하지만 광강도의 최고점을 찾기 위해서는 시편과 현미경을 광축 방향으로 정밀하게 주사 (Scanning)해야 하므로 측정 시간이 오래 걸린다는 한계점을 가지며, 대물 렌즈의 초점 거리가 고정되어 있어 다양한 높이와 크기를 가진 시편들에 대한 측정이 제한적이다.

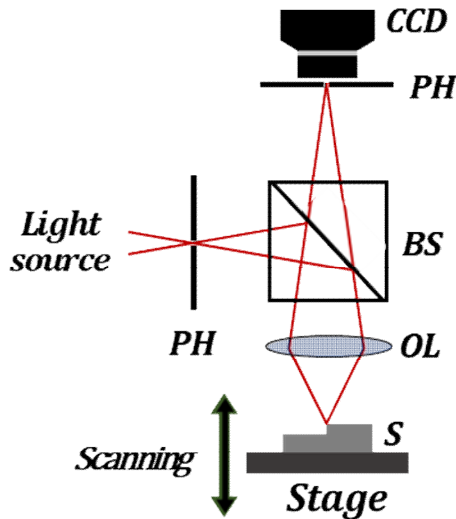


그림 1-4. 공초점 주사 현미경 (PH; Pinhole, BS; Beam splitter, OL; Objective lens, S; Specimen, CCD; Charge coupled device)

2. 색공초점 센서 (Chromatic confocal sensor)

색공초점 센서는 광학계에서 발생하는 색수차 (Chromatic aberration)를 이용하여 시편의 높이 정보를 얻는 기술로, 다수의 렌즈를 조합한 대물 렌즈를 통해 색수차를 발생시킨다 [20]. 이 센서의 구조는 그림 1-5와 같이 시편의 표면 위치에 따라서 다른 파장의 빛이 초점을 맺는 원리를 사용한다. 특정 파장의 빛의 초점이 맺힐 때 그 파장의 빛을 광검출기 (Spectrometer)로 감지해 시편의 표면과의 거리를 정밀하게 측정한다. 추가적으로 색공초점 센서는 백색 광원을 이용해 종방향으로 색 분산을 일으키고, 반사된 빛의 파장을 검출해 높이 정보로 환산 (Conversion)하는 원리를 바탕으로 한다. 이 과정에서 여러 렌즈를 조합해 색 분산량을 조절함으로써, 고정된 초점 거리의 대물 렌즈가 가지던 다양한 높이와 치수를 가진 시편 측정의 한계를 극복하였다. 그러나 대물 렌즈에서 발생하는 색수차의 정도가 측정 영역과 분해능을 결정하는 만큼, 대물 렌즈의 정밀한 설계가 필수적이며, 높은 정도의 색수차를 얻기 위해 여러 렌즈를 조합하는 과정이 복잡하다는 한계가 있다.

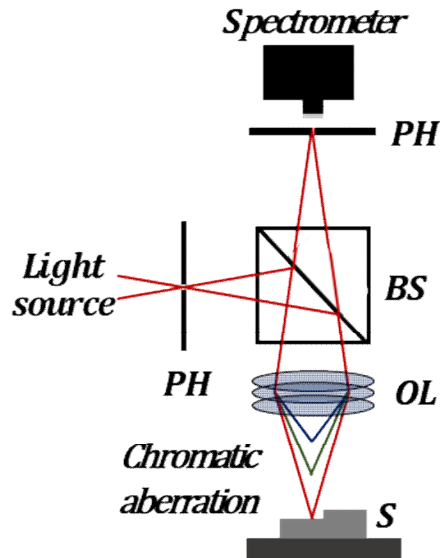


그림 1-5. 색공초점 센서 (PH; Pinhole, BS; Beam splitter, OL; Objective lens, S; Specimen)

제3절 연구 목표

본 연구에서는 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서를 제안한다. 제안하는 센서는 기존의 색공초점 센서가 가지는 광학 구성의 한계를 극복하기 위해 기하 위상 렌즈를 이용하며, 기존의 색공초점에 비해 비교적 간단한 구성을 가진다. 그래서 제안하는 센서는 간단한 구성을 통해 분산량을 조절함으로써 다양한 분야의 측정 및 검사 장비에 적용할 수 있다.

본 논문에서는 기하 위상 렌즈를 이용하여 간단한 구조를 가지는 색공초점 센서의 원리와 보정 방법 등을 설명하고, 분산량 조절에 대한 이론적인 내용을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

본 연구의 연구 목표를 달성하기 위한 세부 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 기하 위상 렌즈의 편광에 따른 렌즈 효과와 색 분산 원리
- 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서 구성
- 분산량 조절 색공초점 센서

위와 같은 목표 달성을 위해 본 논문은 제2장에서 기존 색공초점 센서의 이론과 시스템 구성에 대해 설명한다. 그리고 기하 위상 렌즈의 편광특성과 색 분산 원리에 대해 설명하고 분산량 조절을 위한 색 분산에 대한 수식적 이론에 대해 설명한다. 이후 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서의 원리 및 보정 방법에 대해 설명한다. 더 나아가 분산량 조절 색공초점 센서의 분산량 조절하기 위한 수식적 이론에 대해 설명한다. 제3장은 제안하는 색공초점 센서에 대한 시뮬레이션 결과와 기본 구성에 대한 분석 방법을 제안하고 분산량 조절을 하기 위한 색 분산량 조절 시뮬레이션 결과와 구성에 대한 분석 방법을 제시한다. 제4장은 편광 효과를 모두 사용하여 영상 색공초점 센서의 구성, 원리 검증 및 다양한 시편에 대한 실험 결과를 분석한다. 또한, 제시한 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 들의 투명한 시편을 측정하기 위한 원리 및 다양한 실험 결과를 제시한다. 마지막으로 제5장 결론에서는 연구 내용을 전반적으로 요약하며 마무리한다.

제2장 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절

제1절 색공초점 센서

색공초점 센서는 광학계에서 발생하는 색수차 현상을 이용하며 [21], 서로 다른 파장의 광이 광학계를 통과하면서 각각 서로 다른 위치에 초점을 맺는 원리로 거리를 측정한다. 이때, 색수차는 파장에 따른 광학 소자의 굴절률 차이에 의해 발생하며, 특히 짧은 파장의 빛이 더 큰 굴절률을 가진다. 즉, 색공초점 센서는 대물 렌즈에서 발생하는 색수차를 이용하여 시편의 높이를 측정하는 원리로, 시편의 표면 위치에 따라 반사하는 광의 파장을 검출하여 이를 높이로 환산한다. 식 (1)은 일반적인 색공초점 센서에서의 분산에 의한 초점 길이 차이를 나타낸다. Δf 는 두 파장 λ_1 과 λ_2 사이의 초점 길이 차이, f 는 중심파장 λ_0 에서의 초점 거리, n_1 , n_2 , n_0 는 각각 파장 λ_1 , λ_2 , λ_0 에서의 굴절률이다.

$$\Delta f = f \times \frac{n_1 - n_2}{n_0 - 1} \quad (1)$$

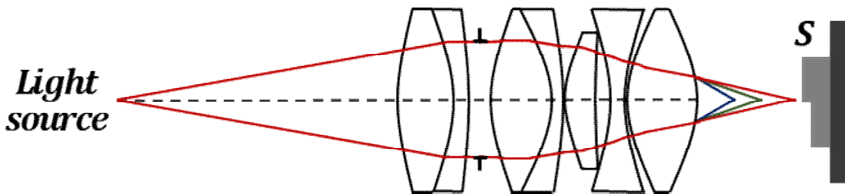


그림 2-1. 일반적인 색공초점 센서의 광학 구성

그림 2-1은 색수차를 형성하기 위한 색공초점 센서의 광학 구성을 보여준다. 이러한 센서를 설계하기 위해서는 렌즈의 굴절 특성과 파장에 따른 재료의 굴절률을 고려해야 하며, 이를 위해 광선추적법을 사용한다. 일반적으로 색공초점 센서에서는 ABCD 행렬 또는 광선 전달 행렬 (Ray transfer matrix) 기반의 광선추적법을 사용하여 광학 요소 간의 광선 경로를 계산한다 [22]. ABCD 행렬은 광학계 내에서 광선의 전파를 나타내는 2×2 행렬로 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} x' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 A, B, C, D는 광학 요소의 특성에 따른 행렬의 요소이다. x, θ 는 광선의 상태 벡터이며, x는 광선의 수직 변위(높이), θ 는 광선의 기울기(각도)이다. 또한, x', θ' 은 광학 요소를 통과한 후의 광선의 상태이다.

$$\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)은 광학계 내부에서 진행되는 광선의 경로를 계산하는 데 사용된다. 빛이 매질 내를 거리 d만큼 이동할 때, 해당 이동에 대한 ABCD 행렬을 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \pm \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

식 (4)는 초점 또는 렌즈를 통과하는 광선의 경로를 나타내는 행렬식이다. f는 렌즈의 초점 거리를 나타내며, $\pm \frac{1}{f}$ 는 렌즈의 굴절 정도를 나타낸다. 이러한 광선 전달 행렬들을 이용하면, 다양한 파장의 빛이 렌즈를 통과하고 반사될 때 발생하는 색 분산 현상을 이론적으로 모델링할 수 있으며, 렌즈의 구성에 따라 분산량 Δf 가 어떻게 변하는지를 이해할 수 있다.

한편, 렌즈의 굴절률은 재료의 고유 특성으로 식 (5)의 Sellmeier 방정식을 사용하여 모델링 한다 [23]. Sellmeier 방정식은 광학 물질의 굴절률을 파장에 대한 함수로 표현하는데 사용되는 방정식으로, 해당 물질의 광학적 특성을 파악할 때 주로 활용된다. 방정식의 매개 변수들은 렌즈의 재료 특성에 따라 달라진다 [24].

$$n^2 - 1 = \frac{b_1 \lambda^2}{\lambda^2 - c_1} + \frac{b_2 \lambda^2}{\lambda^2 - c_2} + \frac{b_3 \lambda^2}{\lambda^2 - c_3} \quad (5)$$

식 (5)에서 $b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 는 렌즈 재료의 굴절률을 결정짓는 계수이다. 예를

들어, BK7의 경우 이러한 계수들은 표 2-1와 같이 나타남을 알 수 있다 [25]. 그리고 이러한 데이터를 이용하면 렌즈의 굴절률, 분산 특성을 적용하여 색공초점 센서의 초점 거리 변화를 예측할 수 있다.

표 2-1. BK7으로 만들어진 렌즈 재료에 대한 Sellmeier 방정식 계수

Coefficient	BK7
b_1	1.03961212
b_2	0.231792344
b_3	1.01046945
c_1	$6.00069867 \times 10^{-3} \mu m^2$
c_2	$2.00179144 \times 10^{-2} \mu m^2$
c_3	$1.03560653 \times 10^2 \mu m^2$

제2절 기하 위상 렌즈

제안하는 색공초점 센서에서 색 분산은 회절 소자 (Diffractive optic component)의 특징을 가지는 기하 위상 렌즈 (Geometric phase lens)에 의해 발생한다 [26]. 기하 위상 렌즈는 내부 액정 (Liquid crystal)이 위상 존 플레이트 (Phase zone plate)의 3차원 구조로 배열된 광학 부품으로, 입사하는 광의 편광에 따라 서로 다른 렌즈 특성을 가지는 소자이다 [27]. 그림 2-2(a)와 같이 입사하는 광이 우원 편광 (Right-handed polarization)을 가지는 경우, 기하 위상 렌즈는 볼록 렌즈 (Convex lens)의 역할을 하게 되어 광은 초점에서 집속되며, 좌원 편광 (Left-handed polarization)의 광은 기하 위상 렌즈의 오목 렌즈 (Concave lens) 효과로 인하여 발산하게 된다. 또한, 기하 위상 렌즈는 그림 2-2(b)와 같은 구조를 가지며, 윤대의 반경과 폭에 의해 색 분산이 발생한다 [28].

$$f = \frac{2r_N \Delta r_N}{\lambda} \quad (6)$$

식 (6)은 기하 위상 렌즈의 구조에 따른 초점 거리 f_0 를 수학적으로 나타낸다. 여기서 r_N 은 N번째 윤대의 반경, Δr_N 은 인접한 윤대들 사이의 폭 차이, λ 는 사용되는 빛의 파장을 나타낸다. 위 수식을 통해 렌즈의 초점 거리 변화 Δf 와 입사하는 빛의 파장 λ 는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다 [29].

$$\frac{\Delta f}{f} = - \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (7)$$

여기서 $\Delta \lambda$ 는 파장 변화량을 의미한다. 식 (7)에서 알 수 있듯이, 입사하는 광의 파장이 변화하는 경우 기하 위상 렌즈의 초점 거리가 변화하며, 그 변화량은 서로 반전된다. 예를 들어, 550 nm의 파장을 가지는 광원의 경우, 기하 위상 렌즈가 50 mm의 초점 거리를 가지도록 설계되었다면, 500 nm 파장의 광의 초점 거리는 4.55 mm 길어지며, 600 nm 파장의 광의 초점 거리는 4.55 mm 짧아지게 된다. 이러한 기하 위상 렌즈의 색 분산 발생 결과는 일반적인 볼록 렌즈 등에서 발생하는 색수차 결과와 서로 상이한 특징이 있다.

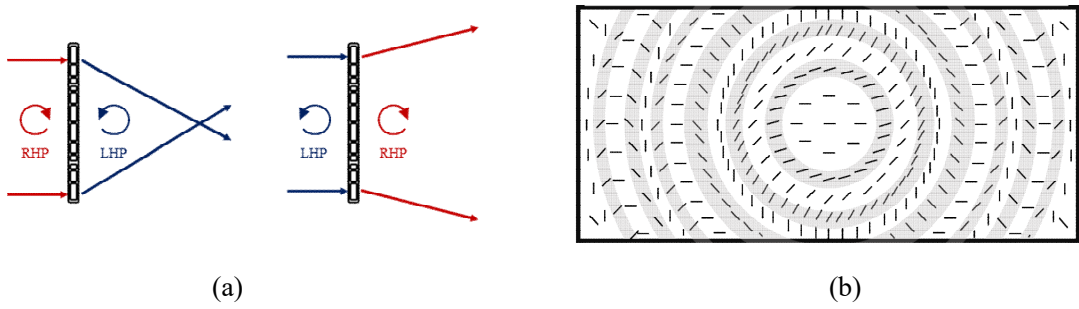


그림 2-2. (a) 기하 위상 렌즈의 편광특성 (b) 기하 위상 렌즈의 구조 (LHP; Left-handed circular polarization, RHP; Right-handed circular polarization, GPL; Geometric phase lens)

제3절 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서

1. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서

그림 2-3은 기하 위상 렌즈의 분산량을 나타내기 위한 광선추적 과정을 보여주며, 입사하는 빛의 편광 상태는 우원 편광으로 가정하였다. 이 경우, 기하 위상 렌즈는 볼록 렌즈의 역할을 하며, 초점에서 빛이 집속되는 동시에, 운대의 반경과 폭에 의해 색 분산이 발생한다 [30,31]. 아래 그림에서 x 는 광선의 수직 변위(높이)를 나타내며, f 는 기하 위상 렌즈의 초점 거리를, d 는 빛이 기하 위상 렌즈를 통과한 후 이동한 거리를 나타낸다.

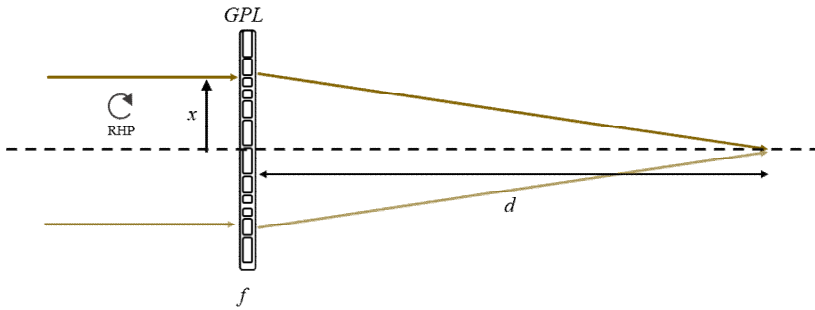


그림 2-3. 기하 위상 렌즈 이용한 광선추적

식 (8)은 평행광이 기하 위상 렌즈에 입사하는 경우, ABCD 행렬을 통한 광선추적을 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} x' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

이때, 위의 수식에서 기하 위상 렌즈를 통과한 빛이 초점에 맺히는 경우 ($x'=0$), d 는 f 와 동일해지며, 이때 파장에 따른 분산량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta d = f_1 - f_2 = \frac{f_0 \times \lambda_0}{\lambda_1} - \frac{f_0 \times \lambda_0}{\lambda_2} \quad (9)$$

식 (9)에서 Δd 는 색공초점 센서의 분산량을 나타내고, f_0 는 중심파장 λ_0 에서의 렌즈의 초점 거리를 의미한다. λ_1 과 λ_2 는 색공초점 센서에서 측정되는 가장 짧은 파장과 긴 파장을 나타내며, f_1 , f_2 는 각각의 경우에서의 초점 거리를 나타낸다. 식 (9)를 이용하면, 색공초점 센서에 이용되는 기하 위상 렌즈의 분산 효과를 정량적으로 계산할 수 있다. 예를 들어 초점 거리가 100 mm인 기하 위상 렌즈를 사용하고, 파장 대역을 459 nm에서 656 nm로 설정하면, 색 분산량은 35.98 mm로 계산되며, 이는 색공초점 센서의 측정 영역이 된다.

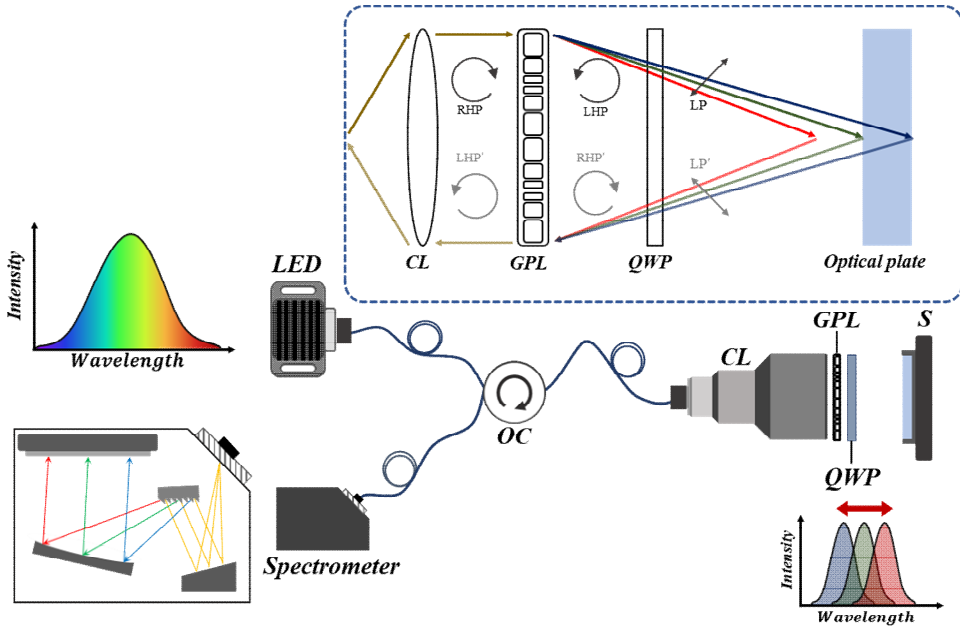


그림 2-4. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서 광학 구성도 (OC; Optical circulator, CL; Collimator lens, GPL; Geometric phase lens, QWP; Quarter wave plate, S; Specimen)

그림 2-4는 본 연구에서 개발한 기하 위상 렌즈 기반의 색공초점 센서의 광학 구성을 보여준다. 넓은 주파수 분포를 가진 백색광 LED를 광원으로 사용하며, 여기서 방출된 빛은 다중 모드 광 서클레이터 (Multi-mode optical circulator, OC)를 거쳐 색공초점 센서의 프로브 (Probe)로 전달된다. 광섬유를 통해 방출된 빛은 광 시준기 (Collimator lens)에 의해 평행광으로 조정되고, 이 평행광은 기하 위상 렌즈 (Geometric phase lens, GPL)를 통과해 시편 (Specimen, S)에 도달한다. 기하 위상 렌

즈 앞에는 $\lambda/4$ 위상 지연판 (Quarter wave plate, QWP)이 설치되어 있어, 시편에서 반사된 빛이 기하 위상 렌즈를 다시 지날 때 평행광으로 유지되고 광섬유로 집속되어, 광 서큘레이터를 통과한 후 분광기에서 해당 파장이 검출된다. 이 과정을 통해 시편에서 초점을 맺은 빛이 광섬유로 정확하게 집속되므로 공초점 센서의 원리를 활용해 시편의 높이를 정밀하게 측정할 수 있다.

2. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서의 분산량 조절

그림 2-5는 본 연구에서 제안하는 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서의 광학 구성을 나타낸다. 광원으로 넓은 주파수 분포를 가진 백색광 LED를 사용하고, 기존의 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서와 유사한 구성을 가지고 있으나, 분산량을 조절하기 위해 추가적인 기하 위상 렌즈가 포함되어 있다. 제안하는 센서는 입사 광의 편광 상태와 광학 소자들 간의 거리를 변화시킴으로써 측정 영역 및 분해능을 변화시킬 수 있다.

제안하는 센서에서 분산량을 조절하기 위해 먼저 입사하는 빔의 편광 상태를 정의해야 하며, 이를 위해 편광기 (Polarizer, P)와 $\lambda/4$ 위상 지연판을 사용하여 입사광의 편광 상태를 우원 편광 혹은 좌원 편광으로 설정할 수 있다. 이후 기하 위상 렌즈들 사이의 거리를 조절하여 분산량을 조절할 수 있으며, 이러한 방식은 센서의 측정 범위를 다양한 광학적 요구 사항에 맞춰 조절할 수 있는 유연성을 제공한다. 이는 센서의 응용 범위를 넓히고 정밀한 측정을 가능하게 하는 중요한 요소로 작용한다.

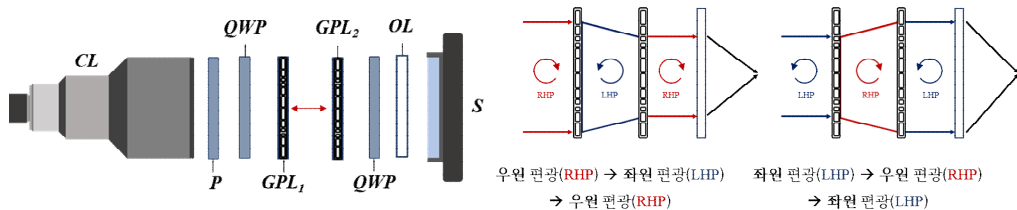


그림 2-5. 분산량 조절을 위한 색공초점 센서 광학 구성도 (CL; Collimator lens, P; Polarizer, GPL_{1,2}; Geometric phase lens, QWP; Quarter wave plate, OL; Objective Lens, S; Specimen)

그림 2-6은 입사하는 광의 편광 상태를 우원 편광으로 설정한 경우의 광선추적을 나타낸다. 첫 번째 기하 위상 렌즈 (GPL₁)를 통과한 후 광은 좌원 편광으로 수렴하고, 이후 좌원 편광으로 정의된 광은 이어서 두 번째 기하 위상 렌즈 (GPL₂)를 통과하면서 발산한다. 이후 대물 렌즈 (OL)을 통해 광은 시편에 조사된다.

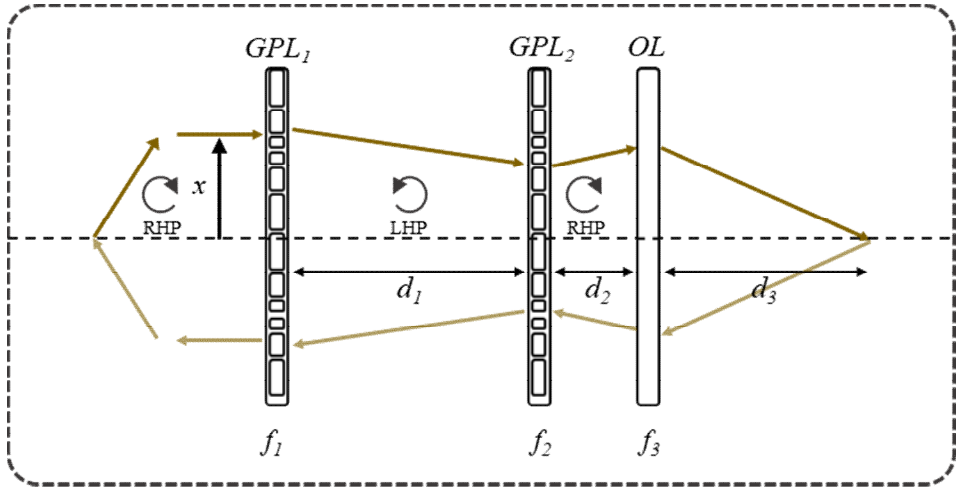


그림 2-6. 입사하는 광의 편광이 우원 편광으로 정의된 경우의 광선추적 (RHP; Right-handed circular polarization, LHP; Left-handed circular polarization, GPL_{1,2}; Geometric phase lens, OL; Objective Lens)

이 경우, 광선추적 과정을 ABCD 행렬을 통해 나타내면 식 (10)와 같으며, 이때 빛은 평행광으로 입사한다고 가정하였다. x 는 광선의 수직 변위를 나타내고, θ 는 광선의 기울기 각도를 의미한다. d_1 은 기하 위상 렌즈 간의 거리, d_2 는 렌즈까지의 거리를 나타내며, d_3 는 센서의 작동 거리 (Working distance)을 의미한다. 또한, f_1 은 GPL₁의 초점 거리, f_2 는 GPL₂의 초점 거리, f_3 는 대물 렌즈 (Objective lens, OL)의 초점 거리를 나타낸다. 이때, 우원 편광으로 입사하는 빛은 볼록 렌즈 효과로 인해 f_1 에 음의 부호를 가지고, 두 번째 기하 위상 렌즈에 입사하는 빛은 좌원 편광으로 오목 렌즈 효과를 나타내어 f_2 에 양의 부호를 가진다.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (10)을 통해 색공초점 센서의 작동 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_3 = \frac{\left(\frac{d_2 \times \frac{a_1}{f_1}}{a_2} - \frac{\frac{a_1}{f_1} \times \left(d_2 + d_1 \times \left(\frac{d_2 \times \frac{a_1}{f_1}}{a_2} + 1 \right) \right)}{a_1} + 1 \right)}{\left(\frac{1}{f_3} + \frac{\left(\frac{a_1}{f_1} \times \left(\frac{d_2}{f_3} - 1 \right) \right)}{a_2} - \frac{\frac{a_1}{f_1} \times \left(d_1 \times \left(\frac{1}{f_3} + \frac{\left(\frac{a_1}{f_1} \times \left(\frac{d_2}{f_3} - 1 \right) \right)}{a_2} \right) \right)}{a_1} \right)} \right)} \quad (11)$$

여기서 a_1 과 a_2 는 기하 위상 렌즈의 성능에 관계된 값으로 각각 초점거리와 중심파장의 곱 ($f_0\lambda_0$)으로 표현된다.

한편, 그림 2-7은 그림 2-6과 반대로, 첫 번째 기하 위상 렌즈에 입사하는 빛의 편광이 좌원 편광인 경우의 광선추적을 나타낸다. 이때, 첫 번째 기하 위상 렌즈를 통과한 광은 우원 편광으로 변하면서 발산하고, 두 번째 기하 위상 렌즈를 통과하면서 수렴하며, 최종적으로 대물 렌즈를 통해 초점에 맺히게 된다.

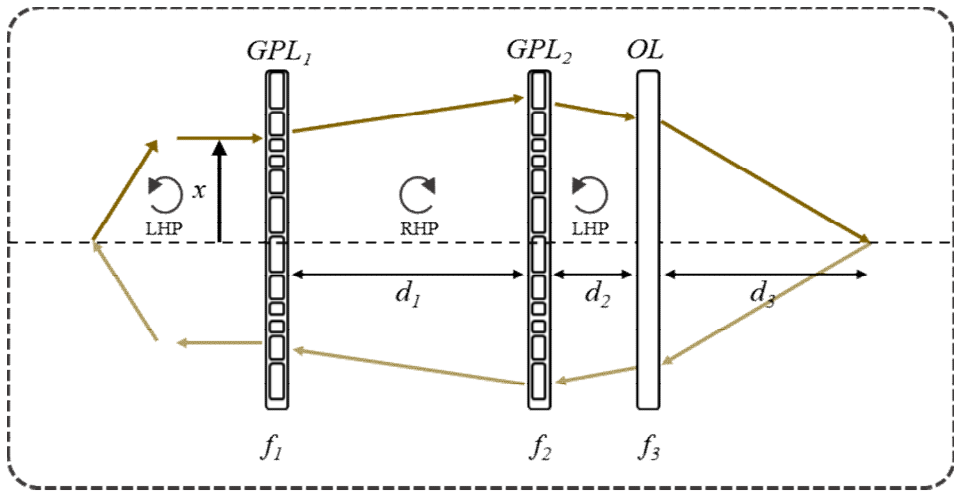


그림 2-7. 입사하는 광의 편광이 좌원 편광으로 정의된 경우의 광선추적 (LHP; Left-handed circular polarization, RHP; Right-handed circular polarization, GPL_{1,2}; Geometric phase lens, OL; Objective lens)

식 (12)는 식 (10)과 유사하지만, 입사하는 광의 편광이 좌원 편광이기 때문에 f_1 에 양의 부호를 대입하고, 두 번째 기하 위상 렌즈에 입사하는 빛의 편광이 우원 편광

이므로 f_2 에 음의 부호를 대입한다.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

식 (12)에서 d_3 는 식 (13)와 같이 정의된다.

$$d_3 = \frac{\left(\frac{\frac{a_1}{f_1} \times \left(d_2 - d_1 \times \left(\frac{d_2 \times \frac{a_1}{f_1}}{a_2} - 1 \right) \right)}{a_1} - \frac{\left(d_2 \times \frac{a_1}{f_1} \right)}{a_2} + 1 \right)}{\left(\frac{1}{f_3} - \frac{\left(\frac{a_1}{f_1} \times \left(\frac{d_2}{f_3} - 1 \right) \right)}{a_2} + \frac{\left(\frac{a_1}{f_1} \times \left(d_1 \times \left(\frac{1}{f_3} - \frac{\left(\frac{a_1}{f_1} \times \left(\frac{d_2}{f_3} - 1 \right) \right) \right)}{a_2} \right) \right)}{a_1} \right)} \right)} \quad (13)$$

식 (11)과 식 (13)을 이용하면, 제안하는 색공초점 센서의 분산량 및 분산량 변화를 예측할 수 있다. 예를 들어, 측정하려는 파장 범위를 561 nm에서 651 nm로 설정하고, 입사하는 편광을 우원 편광으로 가정한다면, d_1 이 55 mm인 경우 식 (11)을 통해 계산된 d_3 는 6.6 mm가 되고, d_1 이 44 mm일 때는 d_3 가 3.6 mm로 계산된다. 반면, 입사하는 편광이 좌원 편광일 경우 d_1 이 18 mm일 때 식 (13)을 사용하면 d_3 는 0.2 mm가 되고, d_1 이 1 mm일 때는 d_3 가 2 mm가 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 입사하는 편광의 상태에 따라 측정 영역을 선택할 수 있음을 보여주며, 기하 위상 렌즈들 사이의 거리인 d_1 을 조절함으로써 분산량의 조절이 가능함을 보여준다.

제3장 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 기하 위상 렌즈를 이용한 간단한 구성의 분산량 조절 색공초점 센서를 제안한다. 앞선 제2장에서는 기존 색공초점 센서의 측정 원리 및 한계를 설명하였다. 제3장에서는 비교적 간단한 구성을 가지는 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서를 구성하여 기초 실험 및 보정 방법과 분산량 조절 색공초점 센서의 측정 원리를 검증하기 위해, 다음과 같은 실험을 수행하였다.

1. 기하 위상 렌즈 기초 실험

- 기하 위상 렌즈의 입사 편광에 따른 렌즈 효과 확인
- 기하 위상 렌즈의 회절 효과를 이용한 색 분산 확인

2. 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서

- 기하 위상 렌즈 분산량 시뮬레이션
- 구성 및 기초 실험
- 파장 신호의 정점 검출 방법
- 계통 오차 추출 및 보정

3. 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서

- 분산량 조절을 위한 시뮬레이션
- 구성 및 기초 실험

제1절 기하 위상 렌즈 기초 실험

제안하는 색공초점 센서에서 기하 위상 렌즈는 입사하는 광의 편광에 따라 서로 다른 렌즈 역할을 하며, 회절 소자의 특징을 가지고 있어 색 분산을 유발한다. 이러한 기하 위상 렌즈의 편광에 따른 렌즈 효과와 색 분산을 검증하기 위해 그림 3-1과 같이 선형 편광기와 $\lambda/4$ 위상 지연판, 기하 위상 렌즈 및 스크린을 이용하여 기초 실험을 수행하였다.

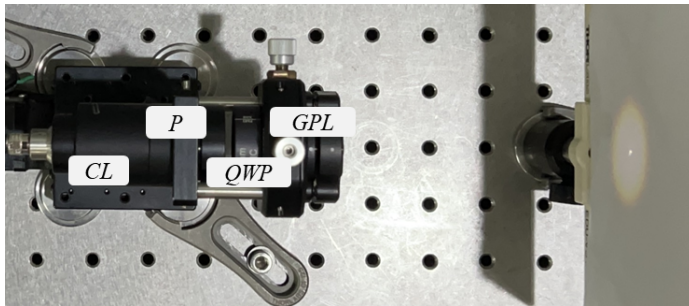


그림 3-1. 기하 위상 렌즈 특성 실험 구성 사진 (CL; Collimating lens, P; Polarizer, QWP; Quarter wave plate, GPL; Geometric phase lens)

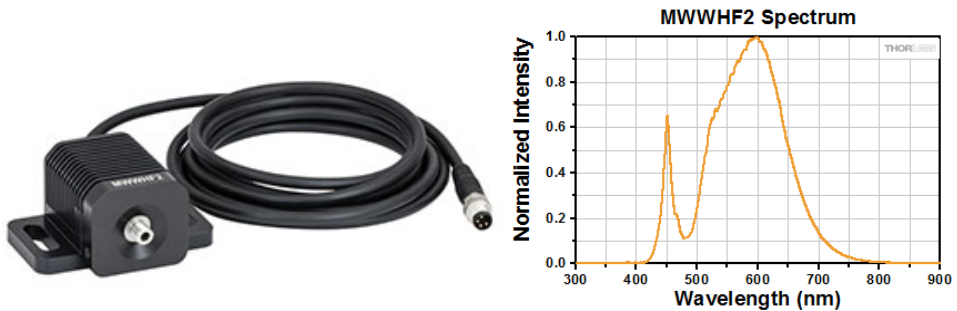


그림 3-2. 실험에 사용된 광원과 스펙트럼

실험에 사용된 광원으로는 그림 3-2와 같은 400 nm - 750 nm 대역을 가지는 백색 광 LED (MWWHF2, Thorlabs)를 사용하였다. 광원에서 나온 광은 코어 크기가 105 μm 인 다중 모드 광섬유 (M15L01, Thorlabs)를 통해 전달되어 굴절형 광 시준기 (LB20R, Silicon Lightwave Technology)에 의해 빔의 직경이 19 mm가 된다. 또한, 실

험에 사용된 광원은 편광 상태가 정의되어 있지 않은 무편광 상태이기 때문에, 선형 편광기 (WP25M-VIS, Thorlabs)를 사용하여 입사하는 광의 편광이 45° 회전된 선형 편광이 되도록 정의하였다. 또한, 초점 거리 100 mm인 기하 위상 렌즈 (33-466, Edmund)와 우원 편광 및 좌원 편광으로 변화시켜 주기 위해 광대역 $\lambda/4$ 위상 지연판 (AQWP10M-580, Thorlabs)을 사용하였으며, 기하 위상 렌즈를 통과한 빛을 관찰하기 위해 기하 위상 렌즈의 초점 부근에 스크린 (EDU-VS1/M, Thorlabs)을 설치하였다.

그림 3-3(a)와 같이 입사하는 광의 편광이 우원 편광인 경우, 스크린에서 빛은 초점으로 수렴하는 것을 확인하였으며, 그림 3-3(b)와 같이 입사하는 광의 편광이 좌원 편광인 경우 빛이 발산하였다. 이는 우원 편광의 빛이 기하 위상 렌즈에 입사하는 경우 기하 위상 렌즈는 볼록 렌즈의 효과를, 좌원 편광의 경우에는 오목 렌즈의 효과를 보이는 것으로, 앞서 기하 위상 렌즈의 동작 원리와 동일함을 알 수 있다. 또한, 그림 3-3(c)와 같이 입사하는 광의 편광이 선형 편광인 경우에는 우원 편광과 좌원 편광을 가지는 빛이 각각 수렴과 발산을 하여 동시에 나타남을 확인하였다.

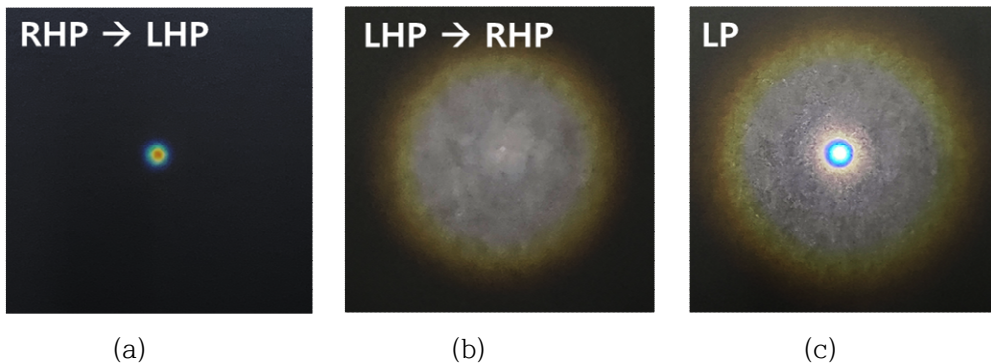
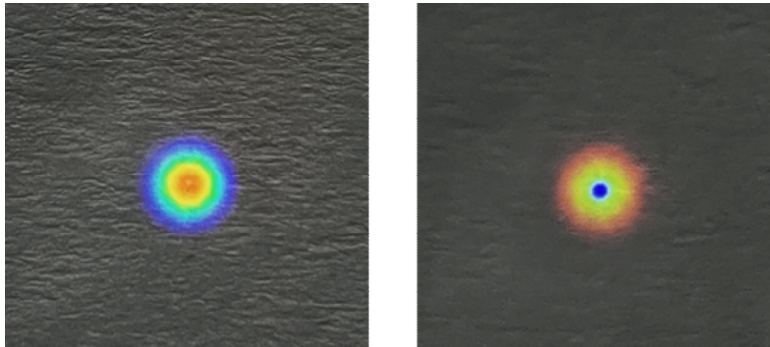


그림 3-3. 입사하는 빛의 편광 상태에 따른 렌즈 효과, (a) 우원 편광 (RHP), (b) 좌원 편광 (LHP), (c) 선형 편광 (LP)

한편, 기하 위상 렌즈의 색 분산 특성을 확인하기 위해 그림 3-3(a)와 같이 입사하는 광의 편광을 우원 편광으로 설정하여 스크린에 빛을 수렴하게 한 이후, 스크린의 위치를 변화시키면서 빛을 관찰하였다. 그 결과, 스크린이 기하 위상 렌즈와 가까운 경우에는 그림 3-4(a)와 같이 파장이 큰 빨간색의 빛이 초점으로 맺혔으며, 거리가 멀어짐에 따라 점점 파장이 짧은 녹색, 그리고 이후에는 그림 3-4(b)와 같이

파란색의 빛이 초점으로 맺혔다. 이는 앞서 2장에서 설명한 기하 위상 렌즈의 회절 특성에 의한 것으로, 본 기초 실험 결과, 기하 위상 렌즈는 입사하는 광의 편광 상태에 따라 서로 다른 렌즈의 효과가 있는 동시에, 색 분산을 확인하였다.



(a)

(b)

그림 3-4. 회절 특성을 가지는 기하 위상 렌즈의 색 분산 (a) 스크린이 가까운 경우, (b) 스크린이 멀리 떨어진 경우에 맺힌 초점 모습

제2절 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서

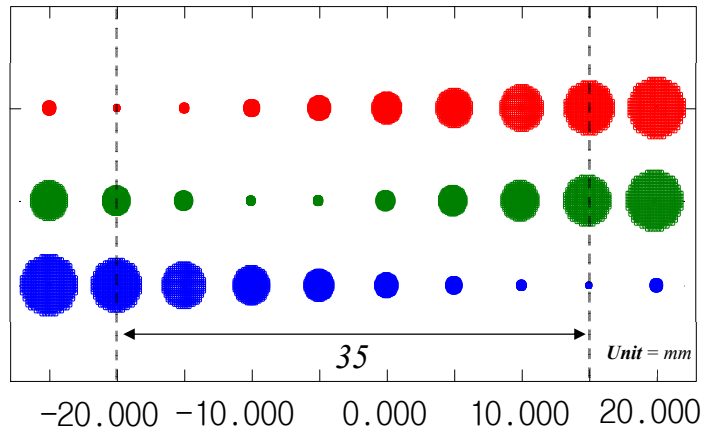
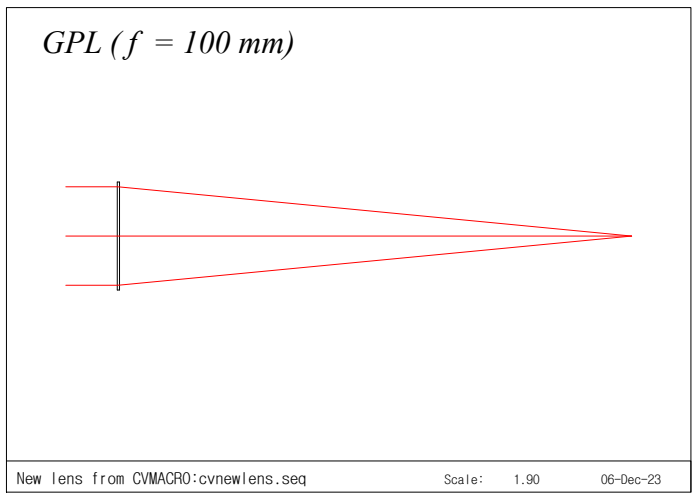
1. 기하 위상 렌즈 분산량 시뮬레이션

앞선 기초 실험에 더하여 기하 위상 렌즈의 분산량을 보다 정량적으로 검증하기 위해 CODE V를 통한 시뮬레이션을 수행하였다. 실제 실험 조건과 동일하게 입사하는 빛의 직경은 광 시준기에 의해 19 mm로 설정하였으며, 기하 위상 렌즈의 두께는 0.45 mm로 설계하였다. 또한, 기하 위상 렌즈에 회절 속성을 부여하기 위해, 키노폼 (Kinofom) 및 이산 (Binary) 위상 회절 면을 이용하였으며, 회전 대칭형으로 구성하여 위상 존 플레이트와 같이 렌즈의 역할을 수행할 수 있음을 확인하였다. 이때, 설계한 기하 위상 렌즈는 전체 4종류로, 중심파장 550 nm에서 초점 거리가 각각 100 mm, 75 mm, 50 mm, 45 mm를 가지도록 설계되었으며, 재질은 N-BK7 (SCHOTT)으로 가정하였다.

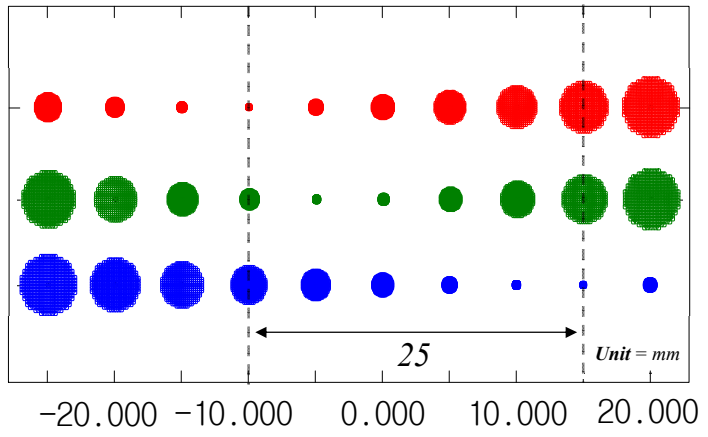
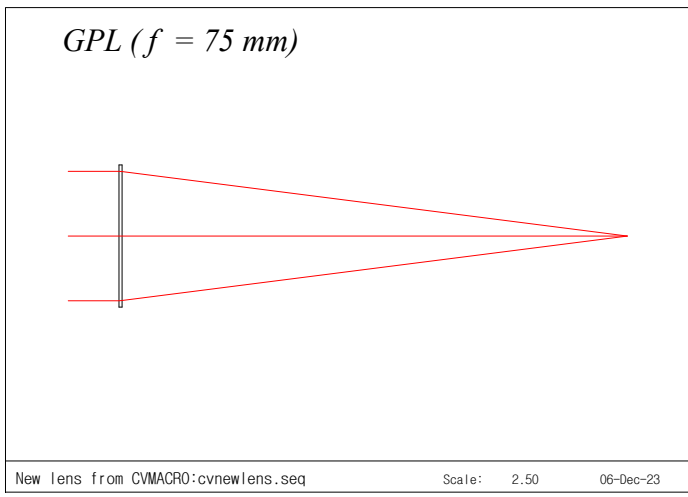
그림 3-5는 분산량을 검증하기 위해, 기하 위상 렌즈가 볼록 렌즈의 역할을 하는 경우를 나타낸다. 광원의 파장은 459 nm, 550 nm, 656 nm로 설정하였으며, 459 nm와 656 nm의 빛의 초점 거리의 차이를 분산량으로 정의하였다. 그 결과, 그림 3-5(a)와 같이 기하 위상 렌즈의 초점 거리가 100 mm인 경우, 분산량은 35 mm로 확인되었으며. 그림 3-5(b)-(d)를 통해 초점 거리가 75 mm, 50 mm, 45 mm의 기하 위상 렌즈에 대해서는 분산량이 각각 25 mm, 20 mm, 15 mm임을 확인하였다. 이때, 앞선 제2장에서 제시한 기하 위상 렌즈의 색 분산 이론인 식 (9)에 의해 계산된 분산량은 각각 35 mm, 26 mm, 18 mm, 16 mm였으며, 표 3-1과 같이 시뮬레이션 결과가 이론 결과와 매우 유사함을 알 수 있었다.

표 3-1. 기하 위상 렌즈 초점 거리에 따른 분산량 결과

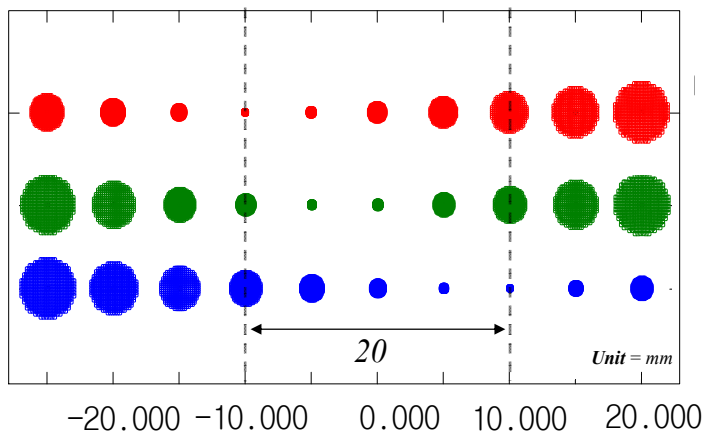
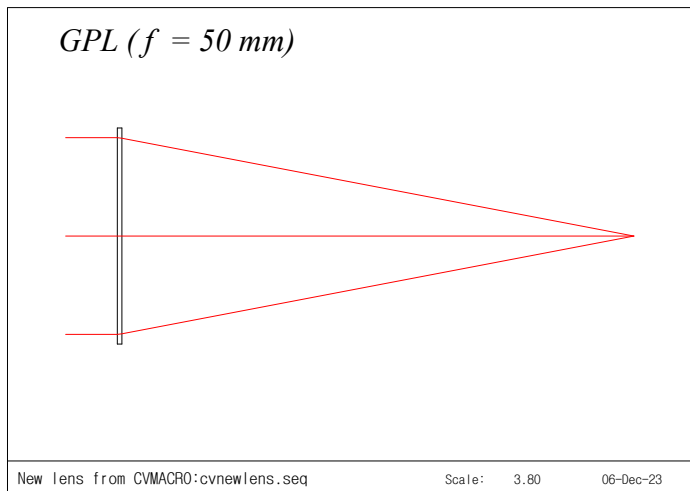
기하 위상 렌즈 초점 거리	분산량 시뮬레이션 결과	분산량 이론 결과
100 mm	35 mm	35 mm
75 mm	25 mm	26 mm
50 mm	20 mm	18 mm
45 mm	15 mm	16 mm



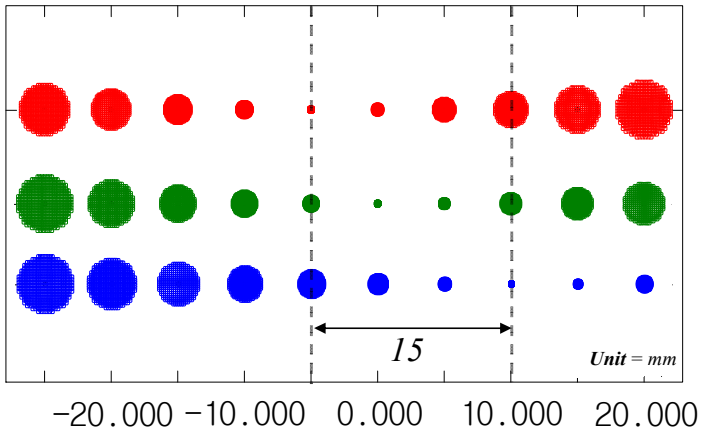
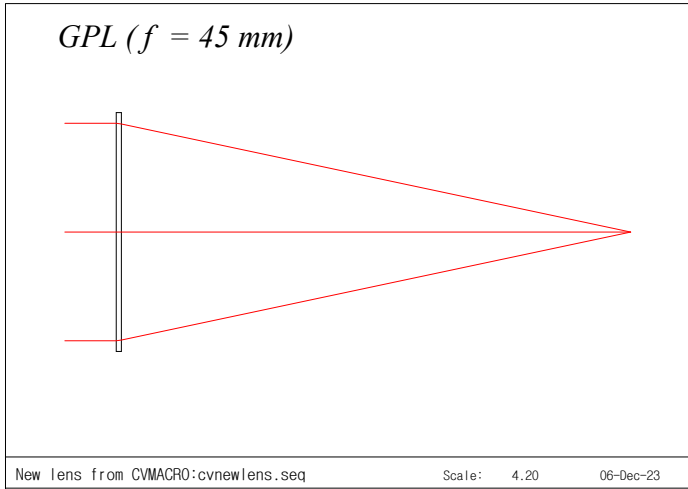
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3-5. 기하 위상 렌즈의 초점 거리 (f)에 따른 분산량 시뮬레이션 (a) $f=100$ mm (b) $f=75$ mm (c) $f=50$ mm (d) $f=45$ mm

2. 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서 구성 및 기초 실험

그림 3-6은 본 연구에서 제안하는 색공초점 센서의 실제 광학 구성을 보여준다. 광원으로 사용된 백색광 LED (MWWHF2, Thorlabs)는 400 nm - 750 nm의 광대역을 가지며, 코어 크기가 50 μm 인 다중 모드 광섬유 기반의 광 서큘레이터 (WMC1H1S, Thorlabs)를 통해 전달된 광은 굴절형 광 시준기 (LB20R, Silicon Lightwave Technology)를 통해 19 mm의 직경을 가지는 시준광이 된다. 이후 초점 거리가 45 mm인 기하 위상 렌즈 (33-463, Edmund)와 광대역 $\lambda/4$ 위상 지연판 (WPQ05ME-546, Thorlabs)을 이용하여 시편에서 반사한 광이 다시 센서로 되돌아와 광 서큘레이터를 통해 분광기에서 검출된다. 본 실험에서는 파장 검출을 위해 0.75 nm 분해능을 가지는 분광기 (HR4000, OceanOptics)를 사용하였다.

색공초점 센서를 구성한 이후, 성능을 검증하기 위해 평면거울을 사용하여 측정 영역 및 분해능 측정을 위한 기초 실험을 수행하였다. 마이크로 스텝핑 모터 스테이지 (Micro-stepping motorized stage)에 거울을 부착하여 50 μm 의 간격으로 이동시켰으며, 이때 각 거울의 위치에서 반사된 광을 분광기를 통해 검출하였다. 그러나 실제 분광기에서 측정된 신호에서는 그림 3-7(a)와 같이 광 서큘레이터에서 발생하는 Port 1에서 Port 3으로 진행되는 누출광 (Leakage)으로 인하여 그림 3-7(b)와 같이 임의의 거리에 따른 신호 이외에 광원의 전체 스펙트럼이 동시에 검출되고 있음을 확인하였다. 이를 해결하기 위해 거울이 없는 상태에서 그림 3-7(c)와 같은 광 서큘레이터에 의해 발생하는 누출광의 신호를 획득한 이후, 이를 측정되는 신호에서 보정해줌으로써 그림 3-7(d)와 같이 거울에서 반사되는 광에 해당하는 파장 신호만을 정확하게 분리하여 측정하였다.

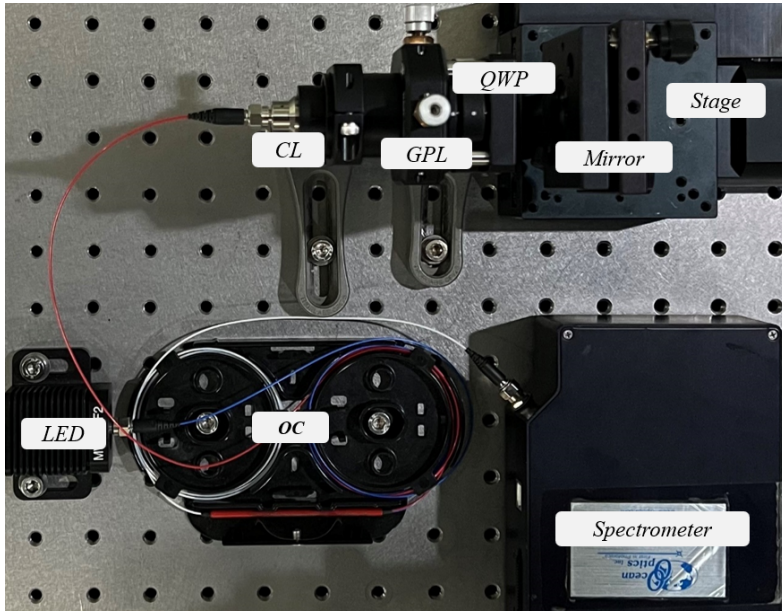


그림 3-6. 기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서 광학 구성 (OC; Optical circulator, CL; Collimating lens, GPL; Geometric phase lens, QWP; Quarter wave plate)

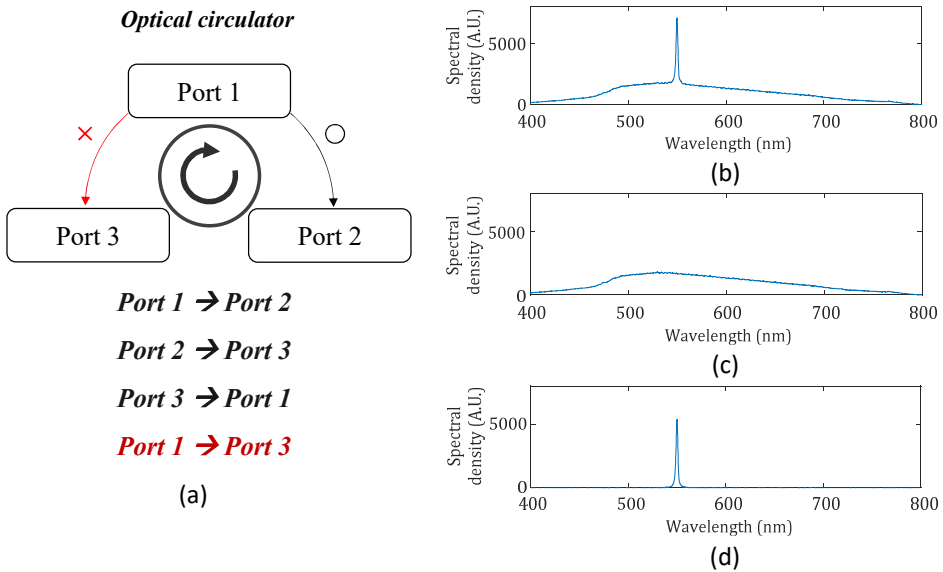
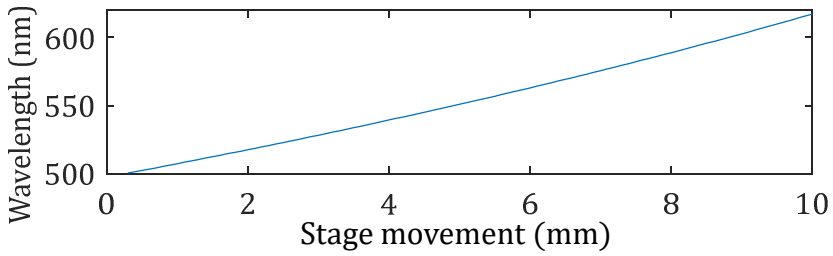
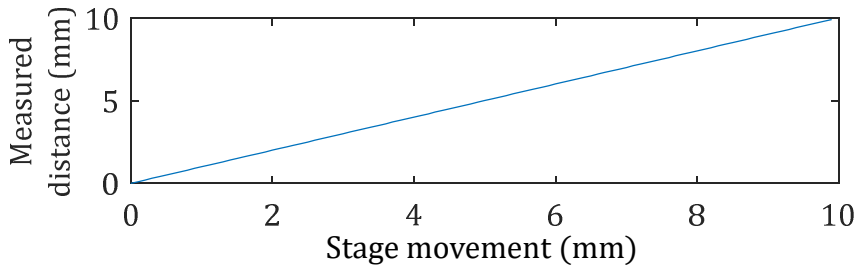


그림 3-7. 광 서큘레이터 보정 결과 (a) 광 서큘레이터 광원의 진행 방향과 광학 구성도 (b) 보정 전 (c) 배경광 (d) 보정 후

이후, 거울의 위치마다 각각 측정되는 파장 신호의 첨두를 무게 중심법 (Center of gravity)으로 계산하였으며, 그 결과 그림 3-8(a)와 같이 거리에 따른 파장 변화 그래프를 획득할 수 있었다. 이에 대해 9차 다항식 곡선 맞춤 (9th polynomial curve fitting)을 적용하여 거리에 따른 파장 변화에 대한 환산 계수를 결정하였으며, 이를 이용하여 그림 3-8(b)와 같이 거울의 이동 거리에 대한 측정 거리 결과를 확인하였다.



(a)



(b)

그림 3-8. (a) 스테이지 이동에 따른 파장 변화 (b) 파장 변화를 거리로 변환한 결과

3. 파장 신호의 정점 검출 방법

기하 위상 렌즈 기반 색공초점 센서의 기초 실험을 수행한 이후, 성능을 평가하기 위해 거울을 부착한 스테이지를 등간격으로 구동하여 측정 결과 및 선형성을 평가하였다. 그 결과, 그림 3-9에서와 같이 $\pm 5 \mu\text{m}$ 의 비선형 오차와 10회 반복 측정에 대한 표준 편차로 정의한 반복능은 $0.72 \mu\text{m}$ 였다.

이러한 비선형 오차와 반복능의 원인을 분석한 결과, 파장 신호의 정점 검출 시 사용하는 무게 중심법의 부정확성과 시스템 자체에서 발생하는 계통 오차 (Systematic error)가 주요 요인으로 확인되었다. 일반적으로 파장 신호에서의 정점 위치는 주로 무게 중심법과 곡선 맞춤 (Curve fitting)을 이용하여 계산할 수 있다. 그림 3-9의 결과는 신호의 정점을 무게 중심법으로 계산한 결과이며, 무게 중심법은 비교적 직관적이고 간단한 계산으로 신호의 중심 위치를 알아낼 수 있는 장점이 있지만, 측정 신호에 잡음 (Noise)이 포함되는 경우, 잡음의 크기에 따라 신호의 중심 위치가 크게 달라진다. 이를 개선하기 위해, 본 연구에서는 곡선 맞춤을 통한 첨두 검출 방법을 이용하여 비선형 오차를 감소하였다. 곡선 맞춤 방법은 신호의 모양이 대칭적이거나 사용하는 곡선과 유사한 경우에 정밀도가 높은 특징이 있다. 제안하는 센서에서 측정되는 파장 신호를 분석한 결과, 신호는 가우시안 함수 (Gaussian function)와 유사한 형태를 가지고 있음을 확인하였으며, 이를 바탕으로 파장 신호의 첨두 위치 검출을 무게 중심법에서 가우시안 함수 곡선 맞춤 방법으로 변경하였다. 그 결과, 그림 3-10에서와 같이 $\pm 2 \mu\text{m}$ 의 비선형 오차가 발생함을 확인하였으며, 기존에 무게 중심법으로 평가한 그림 3-9의 $\pm 5 \mu\text{m}$ 의 비선형 오차와 비교할 때 2배 이상 감소한 결과를 얻었다.

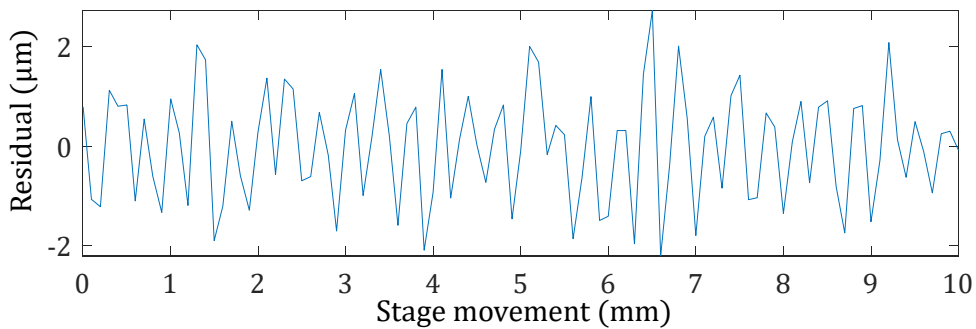


그림 3-9. 무게 중심법으로 파장 신호의 정점을 검출한 경우의 비선형 오차

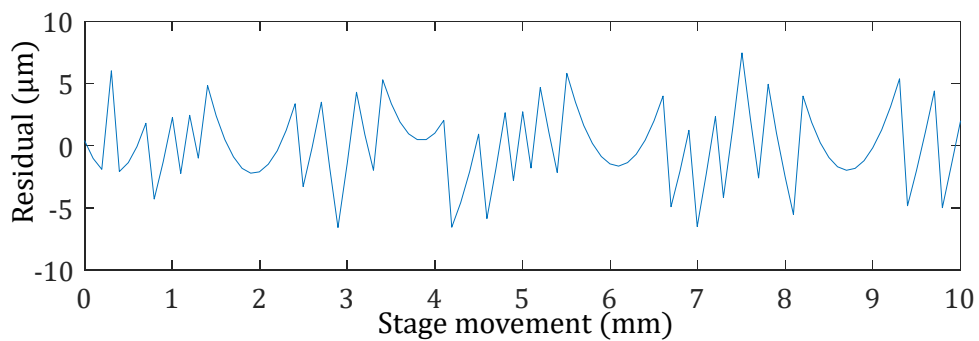
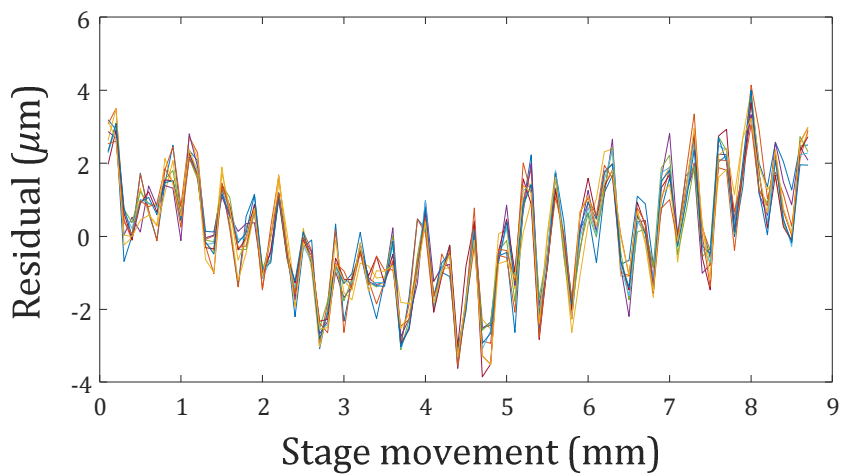


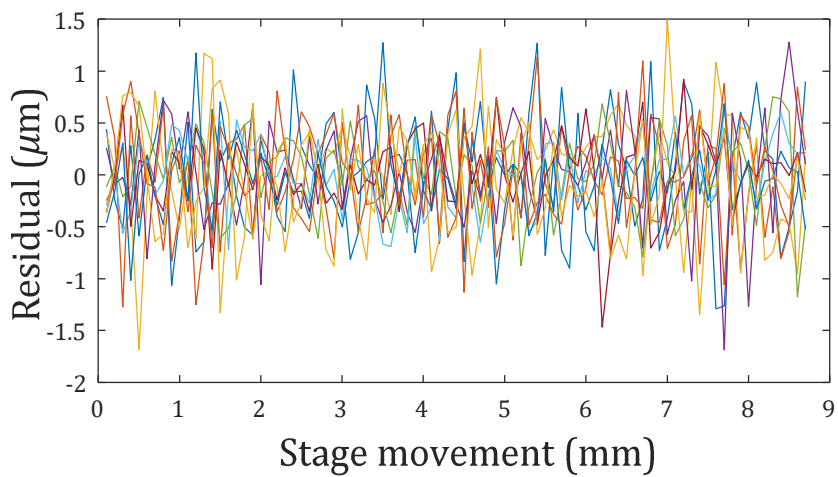
그림 3-10. 가우스 함수 곡선 맞춤 기반 파장 신호의 정점 검출을 이용한 경우의 비선형 오차

4. 계통 오차 추출 및 보정

과장 신호의 침투 검출 방법을 개선한 이후, $\pm 2 \mu\text{m}$ 의 잔여 비선형 오차를 줄이기 위해, 시스템의 계통 오차를 추출하고 이를 측정 결과에서 보정하였다. 이를 위해, 센서의 전체 측정 영역에서 10회 반복 측정으로 그림 3-11(a)와 같이 비선형 오차를 측정하였으며, 그 결과 $\pm 2 \mu\text{m}$ 의 비선형 오차는 전체 시스템에서 공통적으로 발생하는 계통 오차임을 확인하였다. 그래서 10회 반복 측정으로 획득한 비선형 오차의 평균을 계산하여 이를 측정 결과에서 빼줌으로써 시스템의 계통 오차를 보정하였다. 그 결과, 그림 3-11(b)와 같이 센서의 비선형 오차는 $\pm 0.505 \mu\text{m}$ 였고, 반복능은 $0.41 \mu\text{m}$ 임을 확인하였다.



(a)



(b)

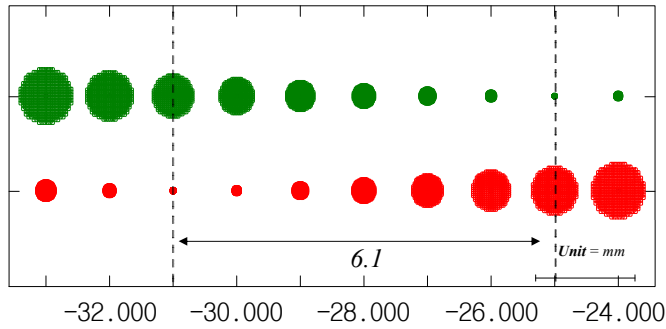
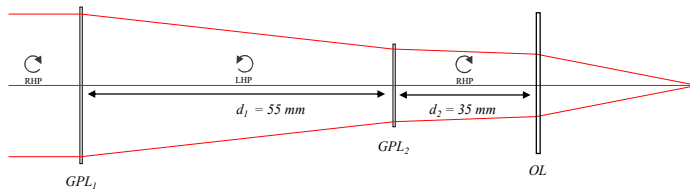
그림 3-11. (a) 10회 반복 측정된 비선형 오차 (b) 비선형 오차 보정 결과

제3절. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서의 분산량 조절

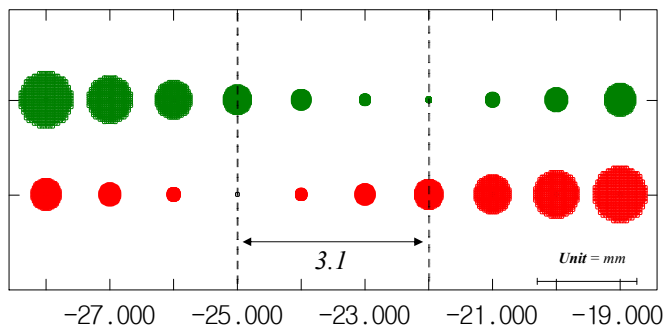
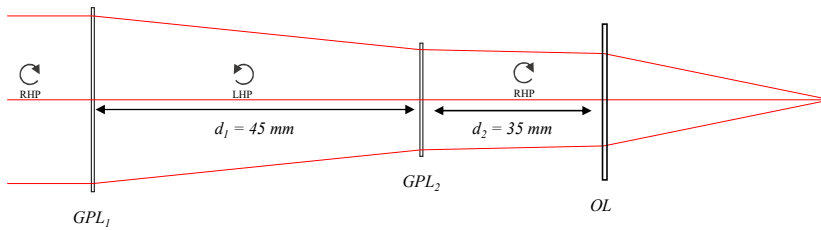
1. 분산량 조절 색공초점 센서 검증을 위한 CODE V 시뮬레이션

본 연구에서 제안하는 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서를 검증하기 위해 CODE V를 통해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3-12는 입사하는 빔의 편광을 우원 편광으로 정의하여 시뮬레이션한 결과이며, 첫 번째 기하 위상 렌즈 GPL_1 과 두 번째 기하 위상 렌즈 GPL_2 각각의 초점 거리, 두 기하 위상 렌즈 간의 거리 d_1 , 두 번째 기하 위상 렌즈와 대물 렌즈 OL 간의 거리 d_2 를 변수로 설정하였다.

그림 3-12(a)는 GPL_1 과 GPL_2 의 초점 거리를 100 mm, 75 mm, OL의 초점 거리는 35 mm, d_1 는 55 mm, d_2 는 25 mm일 때의 시뮬레이션 결과를 나타내며, 이 경우 분산량은 6.1 mm였다. 이때 같은 구성에서 d_1 을 45 mm로 변경하는 경우, 분산량이 3.1 mm로 변화함을 확인하였다.



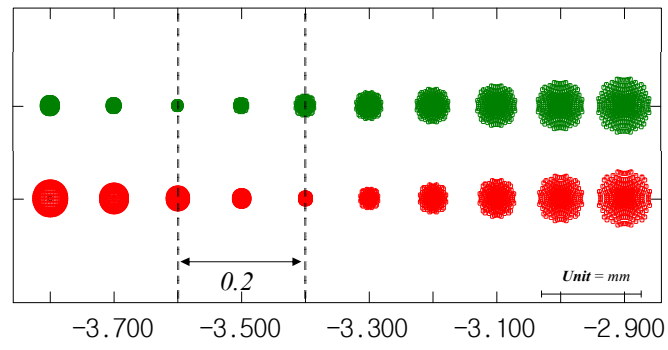
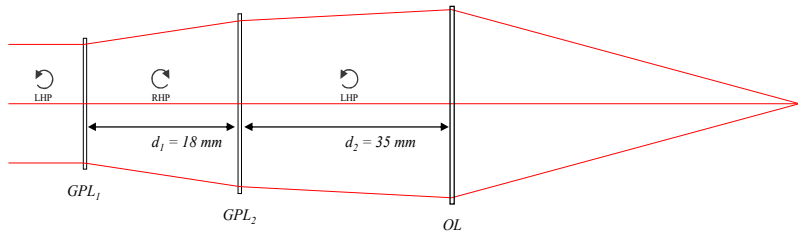
(a)



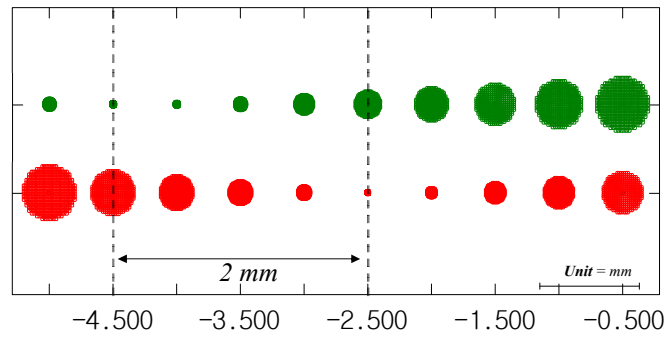
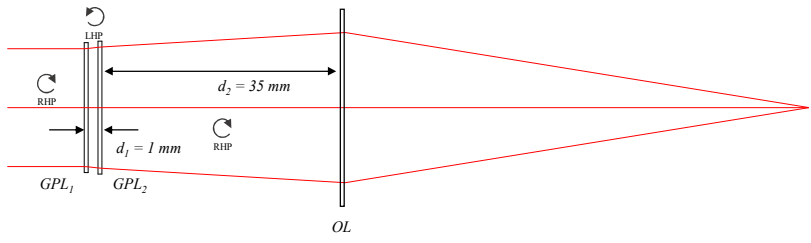
(b)

그림 3-12. 광원의 편광 상태가 우원 편광으로 기하 위상 렌즈에 입사할 경우 (a) d_1 이 55 mm일 경우 (b) d_1 이 45 mm일 경우

한편, 입사하는 빔의 편광을 좌원 편광으로 정의하고, GPL_1 의 초점 거리와 GPL_2 의 초점 거리는 45 mm, 100 mm, L의 초점 거리는 35 mm, d_1 은 18 mm, d_2 는 25 mm로 설계하였을 경우, 그림 3-13(a)와 같이 분산량은 0.2 mm였다. 이때, 동일한 광학 구성에서 d_1 을 1 mm로 변경하는 경우 그림 3-13(b)와 같이 분산량이 2 mm로 변화하였다.



(a)



(b)

그림 3-13. 광원의 편광 상태가 좌원 편광으로 기하 위상 렌즈에 입사할 경우 (a) d_1 이 18 mm일 경우 (b) d_1 이 1 mm일 경우

시스템에서 변경할 수 있는 4개의 변수 및 편광 효과 등으로 인해 제안하는 시스템은 매우 다양한 조합으로 시스템의 성능 변경이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 다양한 조합 중에서, 실제 현실적으로 실험 가능한 4가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 결과적으로, 4개의 시스템에서 분산량은 각각 6.1 mm, 3.1 mm, 2 mm, 0.2 mm로 측정되었다.

2. 분산량 조절 색공초점 센서 구성 및 기초 실험

분산량 조절 색공초점 센서의 실험적 검증을 위해 그림 3-14와 같이 광학 시스템을 구성하였다. 실험에서 사용된 광원부는 앞서 실험 구성과 동일하나, 선형 편광기 이후에 우원 및 좌원 편광으로 편광 상태를 변화시켜 주기 위해 광대역 $\lambda/4$ 위상 지연판 (AQWP05M-580, Thorlabs)을 설치하여, 0° , 90° 를 회전시켰다. 앞서 시뮬레이션의 경우와 같이, 초점 거리가 100 mm, 75 mm, 45 mm인 기하 위상 렌즈와 초점 거리가 35 mm인 대물 렌즈를 사용하였으며, 4가지의 조건 중에서 분산량이 2 mm인 경우를 제외한 3가지 경우에 대해 실험을 수행하였다.

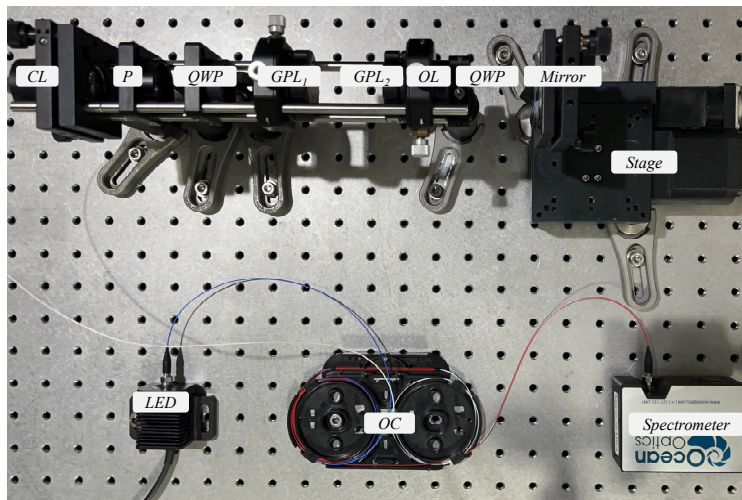
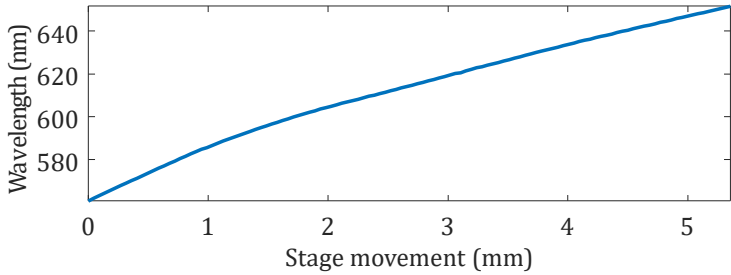


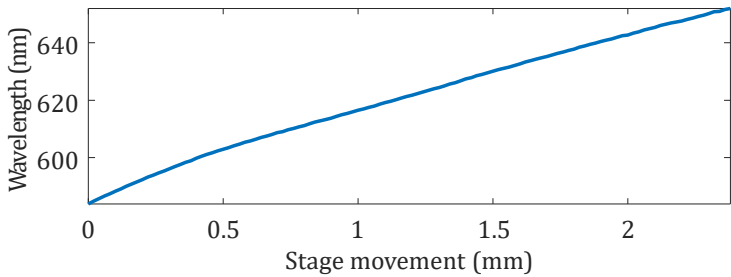
그림 3-14. 기하 위상 렌즈 기반 분산량 조절 색공초점 센서 광학 구성 (OC; Optical circulator, CL; Collimator lens, P; Polarizer, GPL_{1,2}; Geometric phase lens, QWP; Quarter wave plate, OL; Objective Lens)

분산량 조절 색공초점 센서를 구성한 이후 성능을 검증하기 위해, 마이크로 스테핑 모터 스테이지에 거울을 부착하여 각각 45 μm , 20 μm , 400 nm의 간격으로 이동시켰다. 이때 각 거울의 위치에 따라 각각 측정되는 파장 신호의 침투를 가우시안 함수 곡선 맞춤 방법으로 계산하였으며, 그 결과 그림 3-15과 거울의 위치에 따른 파장 결과를 획득하였다. 이때, 색공초점 센서의 측정 범위는 그림 3-15(a)와 같이 561 nm - 651 nm의 파장 대역에 대해 분산량이 5.4 mm가 측정되었고, 그림 3-15(b)의 경우, 580 nm - 652 nm의 파장 대역에 대해 분산량이 2.4 mm가 측정되

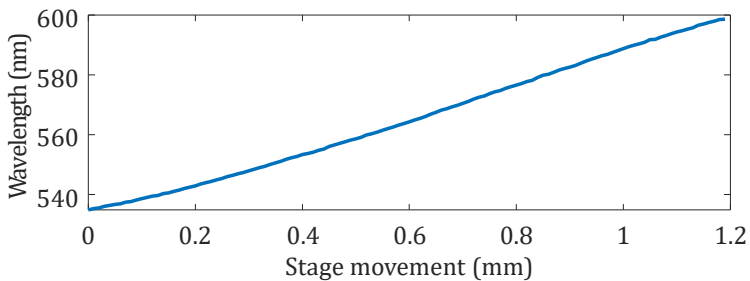
었다. 한편, 그림 3-15(c)에서는 530 nm - 600 nm의 파장 대역에 대해 분산량이 1.2 mm가 측정되었다. 또한, 각각의 비선형 오차는 각각 $\pm 10 \mu\text{m}$, $\pm 8 \mu\text{m}$, $\pm 5 \mu\text{m}$ 로 확인되었다.



(a)



(b)



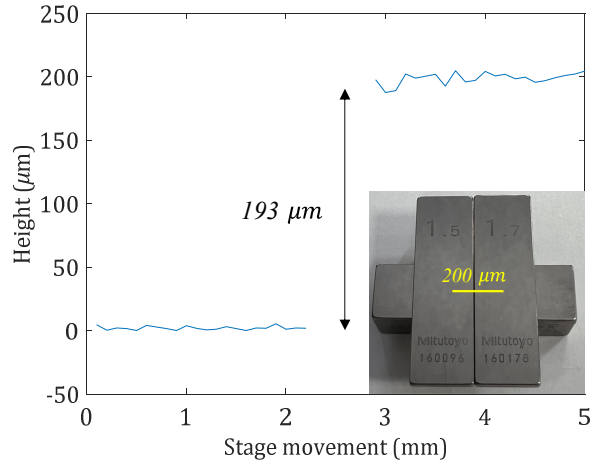
(c)

그림 3-15. 분산량에 따른 측정 영역 및 선형성 확인 (a) 분산량 5.4 mm일 때 스테이지 이동에 따른 파장 변화 (b) 분산량 2.4 mm일 때 스테이지 이동에 따른 파장 변화 (c) 분산량 1.2 mm일 때 스테이지 이동에 따른 파장 변화

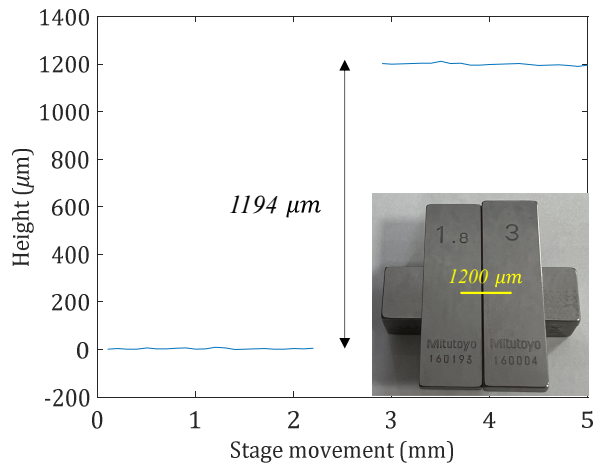
표 3-2. 편광과 기하 위상 렌즈 사이의 거리에 따른 광선추적법, 시뮬레이션, 실험 결과

편광, 거리 결과	우원 편광 $d_1 = 55 \text{ mm}$	우원 편광 $d_1 = 45 \text{ mm}$	좌원 편광 $d_1 = 18 \text{ mm}$
광선추적법 결과	6.6 mm	3.6 mm	0.2 mm
시뮬레이션 결과	6.1 mm	3.1 mm	0.2 mm
실험 결과	5.4 mm	2.4 mm	1.2 mm

그림 3-16은 제안하는 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서를 이용하여 단차 시편 (Grade 2, Mitutoyo)을 측정 한 결과를 나타낸다. 그림 3-16(a)는 분산량이 비교적 넓은 5.4 mm일 때의 시스템 구성으로 200 μm 차이가 나는 단차 시편을 측정 한 결과로 단차 시편의 높이는 193 μm 로, 평탄도 오차는 $\pm 6 \mu\text{m}$ 로 나타난 반면, 그림 3-16(b)의 경우와 같이 1200 μm 차이가 단차 시편을 측정 한 결과 높이는 1194 μm 로, 평탄도 오차는 $\pm 2 \mu\text{m}$ 로 측정되었다.



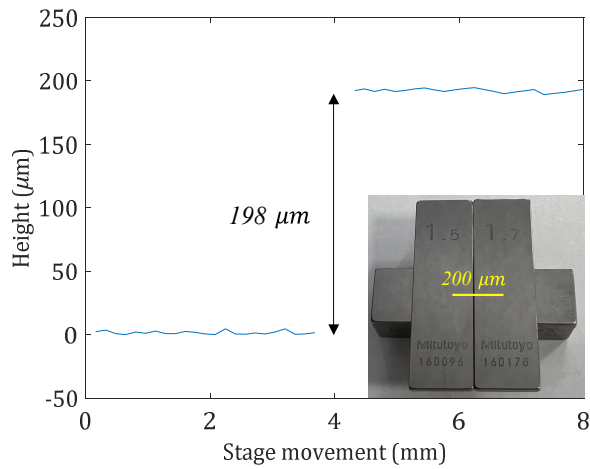
(a)



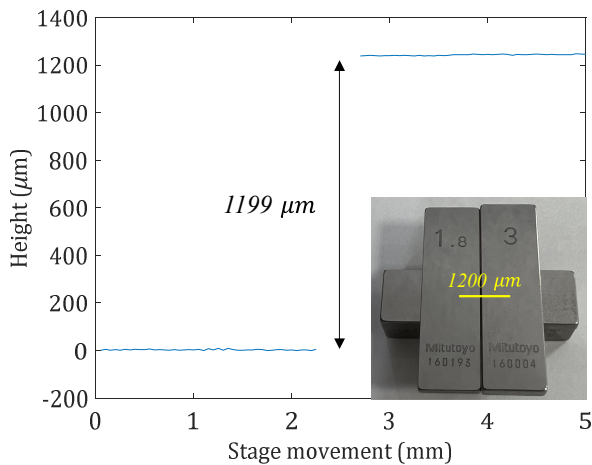
(b)

그림 3-16. 분산량 5.4 mm일 경우 (a) 200 μm 단차 시편 측정 결과 (b) 1200 μm 단차 시편 측정 결과

그림 3-17은 분산량이 2.4 mm일 때의 광학 구성으로 측정된 결과를 나타내고 있으며, 그림 3-17(a)는 200 μm 차이 나는 단차 시편에 대한 결과로, 높이와 평탄도 오차는 각각 198 μm 와 $\pm 2 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 그림 3-17(b)와 같이 1200 μm 의 단차 시편을 측정된 결과, 각각 1199 μm 와 $\pm 2 \mu\text{m}$ 로 측정되었다.



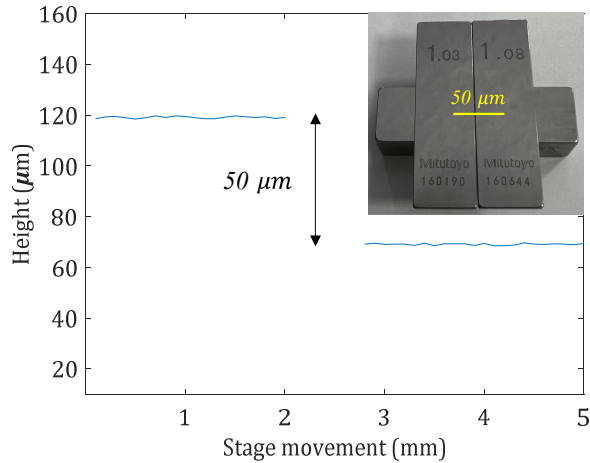
(a)



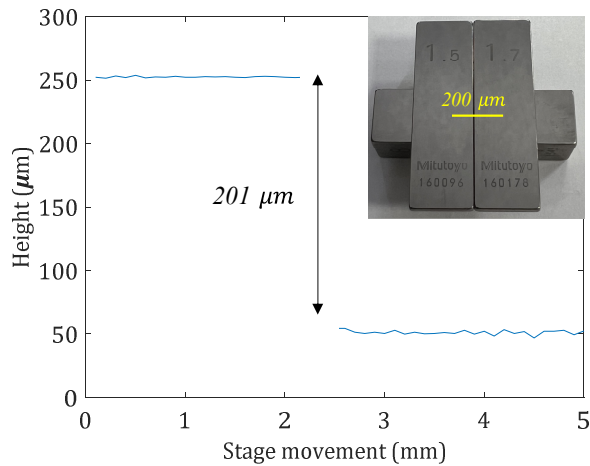
(b)

그림 3-17. 분산량 2.4 mm일 경우 (a) 200 μm 단차 시편 측정 결과 (b) 1200 μm 단차 시편 측정 결과

그림 3-18은 분산량이 비교적 짧은 1.2 mm일 경우의 광학 구성으로 단차 시편을 측정 한 결과를 나타내고 있으며, 그림 3-18(a)는 50 μm 차이 나는 단차 시편에 대한 측정 결과를 나타낸다. 측정 결과 높이는 50 μm 로 나타났으며, 단차 시편의 평탄도 오차는 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 로 확인되었다. 또한, 3-18(b)와 같이 200 μm 의 단차 시편을 측정 한 결과, 높이와 평탄도 오차는 각각 201 μm 와 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 나타났다.



(a)



(b)

그림 3-18. 분산량 1.2 mm일 경우 (a) 50 μm 단차 시편 측정 결과 (b) 200 μm 단차 시편 측정 결과

제4장 논의

1. 제안하는 색공초점 센서의 오차

본 연구에서는 기하 위상 렌즈를 활용한 분산량 조절 색공초점 센서를 제안하였다. 제안하는 센서는 기존의 복잡한 렌즈 구조 대신 기하 위상 렌즈를 사용함으로써 시스템이 상대적으로 간단해졌다. 또한, 성능 개선을 위해 파장 신호의 침두 위치를 측정하는 방법과 시스템 계통 오차를 보정하는 방법을 도입하였다. 또한, 입사하는 광의 편광 상태와 렌즈 간 거리를 조절하여 분산량을 조절함으로써 다양한 높이의 시편을 측정할 수 있었다. 하지만 측정 결과에서 발생하는 비선형성에 해당하는 시스템 계통 오차의 주된 원인은 사용된 광섬유 부품에서 발생하는 미세한 누출 광과 광학 부품에서 발생하는 미세한 반사광 때문으로 나타났다. 이와 함께 시편에서 발생하는 파장별 반사율 등의 효과를 고려하지 못해 추가적인 오차가 발생했다. 시스템 성능을 보정하는 과정에서 사용된 스테이지의 구동 오차도 시스템 계통 오차에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

2. 기하 위상 렌즈 기반 영상 색공초점

제안하는 기하 위상 렌즈 기반의 색공초점 센서는 입사광의 편광 상태를 선형 편광으로 설정하면, 기존의 색공초점 센서와 시편을 관찰하기 위한 시스템을 동시에 구성할 수 있다. 그림 4-1은 이러한 기하 위상 렌즈의 편광특성을 이용한 새로운 영상 색공초점 센서를 보여준다. 이 시스템은 렌즈의 초점에 모이거나 발산하는 광선을 이용하여 색공초점 센서 (Chromatic confocal sensor)와 비전 시스템 (Vision system)로 각각 활용한다. 이를 통해 비전 시스템에서는 색공초점 센서의 측정 위치를 정밀하게 확인할 수 있다.

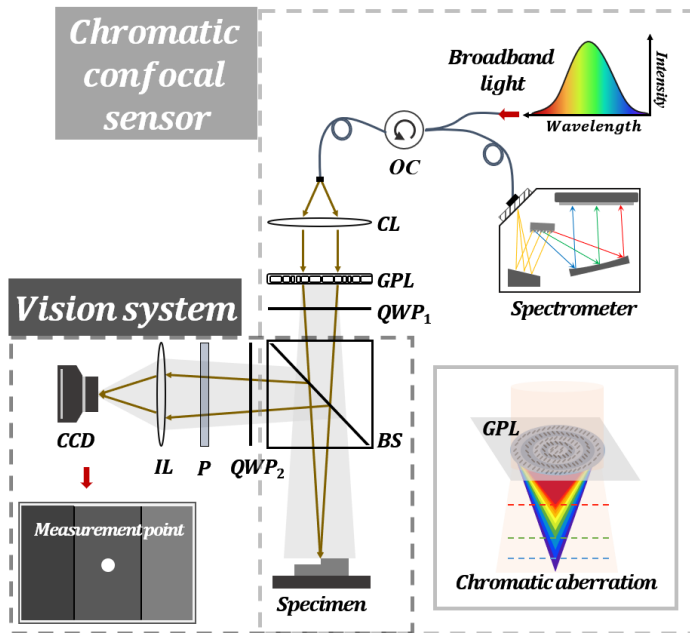


그림 4-1. 기하 위상 렌즈를 이용한 색공초점 센서 광학 구성도 (OC; Optical circulator, CL; Collimator lens, GPL; Geometric phase lens, QWP_{1,2}; Quarter wave plate, B; Beam splitter, P; Polarizer, IL; Imaging lens, CCD; Charge coupled device camera)

3. 색공초점 센서를 이용한 투명 물질 광학 두께 측정

본 연구에서 구성한 색공초점 센서를 이용하면 임의의 투명한 물질의 윗면과 아랫면에서 반사하는 광의 파장으로부터 시편의 두께를 광축 방향의 주사 없이 측정할 수 있다. 그림 4-2는 기하 위상 렌즈를 통해 투명한 시편에 광이 입사한 경우를 나타낸다. 그림 4-2에서 알 수 있듯이, 시편의 윗면과 아랫면에서는 각각 λ_1 과 λ_2 파장의 광이 초점을 맺으며, ($\lambda_1 > \lambda_2$)의 관계를 만족한다. 이때, λ_1 의 광은 시편의 윗면에서 반사하기 때문에 시편 물질에 의한 굴절이 일어나지 않는 반면, λ_2 의 광은 시편에 입사하면서 스넬의 법칙 (Snell's law)에 따라 굴절이 발생한다. 기하 위상 렌즈에 입사하는 광의 직경을 D , 두 광의 초점 거리를 각각 h_1 과 h_2 로 나타내면, 그림 4-2의 기하학적 관계를 통해 다음 식을 만족한다.

$$(h_2 - h_1)\tan\theta = (h' - h_1)\tan\theta' \quad (14)$$

그리고 시편의 두께 t 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t = (h' - h) = (h_2 - h_1) \frac{\tan\theta}{\tan\theta'} \quad (15)$$

여기서 h' 은 파장의 광이 굴절 이후에 시편의 아랫면에 초점을 맺히는 경우에서의 높이를 나타내고, θ 는 입사하는 광의 직경과 h_2 에 의한 λ_2 파장의 광이 시편에 입사하는 각도를 의미한다. θ' 은 스넬의 법칙에 따른 굴절각을 나타낸다. 식 (15)를 살펴보면, h_1 과 h_2 는 제안하는 색공초점 센서에서 측정되는 각각의 파장으로부터 식 (6)을 이용하여 결정될 수 있으며, θ 는 D 와 h_2 를 측정하여 계산할 수 있다. 결국, 측정하는 물질의 굴절률을 알고 있다는 가정하에, 식 (15)을 이용하면 제안하는 색공초점 센서로 투명 시편의 두께를 측정할 수 있다.

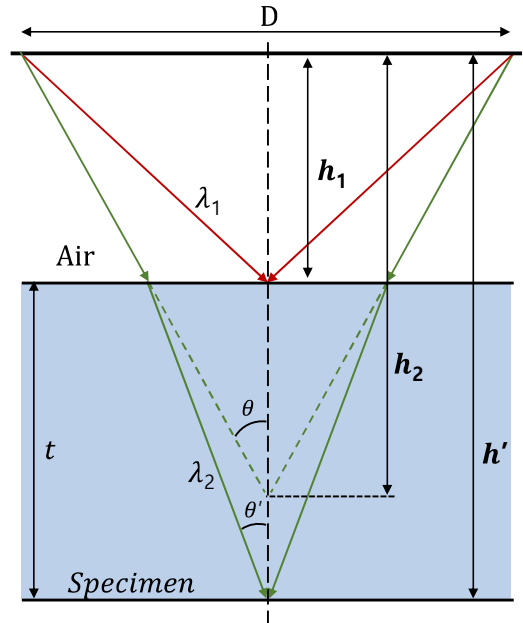


그림 4-2. 색공초점 센서를 이용하여 투명 시편에 입사되는 빛의 경로

제5장 결론

본 논문에서는 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서를 제안하고, 측정 원리를 이론적으로 정리하였다. 그리고 다양한 높이를 가진 시편 측정을 통해 제안하는 시스템의 원리를 검증하고, 이론 및 CODE V 시뮬레이션을 통해, 측정 시스템의 실험 결과를 비교 분석하였다.

본 연구에서 제안하는 색공초점 센서는 기하 위상 렌즈의 편광 및 회절 소자 특징을 이용하였으며, 시스템을 구성하기 전에 기하 위상 렌즈의 분산량을 보다 정확하게 검증하기 위해 CODE V를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 기하 위상 렌즈에 회절 속성을 부여하기 위해 키노폼 및 이산 위상 회절 면을 이용했고, 이를 통해 회절 대칭형 구조로 구성된 위상 존 플레이트가 렌즈 역할을 수행할 수 있음을 확인했다. 초점 거리는 각각 100 mm, 75 mm, 50 mm, 45 mm로 설계되었으며, 이에 따른 분산량은 이론적인 값과 유사하게 각각 35 mm, 25 mm, 20 mm, 15 mm로 나타났다. 이러한 결과는 기하 위상 렌즈를 이용한 시스템의 설계와 구현에 있어 중요한 기준을 제공한다. 기본적인 구조의 색공초점 센서의 성능을 검증하기 위해 평면거울을 사용한 기초 실험을 수행하였으며, 이후 센서의 성능과 비선형 오차, 반복능을 평가하기 위한 실험을 수행했다. 측정되는 파장 점두 신호를 보다 정밀하게 추출하기 위해 가우시안 곡선 맞춤 방법을 도입하였으며, 계통 오차를 보정하기 위한 방법을 제시하였다.

또한, 기하 위상 렌즈를 이용한 분산량 조절 색공초점 센서의 검증을 위해 CODE V를 사용한 시뮬레이션을 수행했으며, 이를 실험적으로 검증하였다. 그 결과, 제안하는 색공초점 센서의 측정 범위는 입사광의 편광 상태 및 광학 부품들 간의 거리 조절을 통해 561 nm - 651 nm에서 분산량이 5.4 mm, 580 nm - 652 nm에서 분산량이 2.4 mm, 530 nm - 600 nm에서 분산량이 1.2 mm로 측정되었다. 이를 통해, 제안하는 색공초점 센서가 측정 영역 및 분해능 조절이 가능한 유연한 시스템을 확인하였다. 또한, 다양한 단차 시편을 통해 각각의 측정 영역에서 측정 성능의 조절을 통해 보다 정밀한 측정이 가능함을 확인하였다.

[참고문헌]

- [1] <https://news.lgdisplay.com>
- [2] <https://m.segye.com/view/20191204513245>
- [3] <https://www.sedaily.com/NewsView/22MG4KW3IA>
- [4] <https://semiconductor.samsung.com/kr/news-events/tech-blog/hbm-pim-cutting-edge-memory-technology-to-accelerate-next-generation-ai/>
- [5] <https://www.oledspace.com/kr/products/rollable-oled/>
- [6] <https://www.precitec.com/kr/optical-3d-metrology/technology/chromatic-confocal-sensors/>
- [7] https://kr.123rf.com/photo_29123066.html
- [8] <http://www.nexensor.com/>
- [9] <https://www.giikorea.co.kr/report/moi1333807>
- [10] <https://w4.kirs.or.kr/download/research/230706.pdf>
- [11] Deck, L., & De Groot, P. (1994). High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry. *Applied optics*, 33(31), 7334-7338.
- [12] Yun, Y. H., Seo, Y. B., & Joo, K. N. (2016). Elimination of the direction ambiguity and the dead zone in spectrally resolved interferometry. *Measurement Science and Technology*, 27(3), 035004.
- [13] Tiziani, H. J., Wegner, M., & Steudle, D. (2000). Confocal principle for macro-and microscopic surface and defect analysis. *Optical Engineering*, 39(1), 32-39.
- [14] Tiziani, H. J., & Uhde, H. M. (1994). Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy. *Applied optics*, 33(10), 1838-1843.
- [15] Mijs, A., Novak, J., & Novak, P. (2010). Analysis of method for measuring thickness of plane-parallel plates and lenses using chromatic confocal sensor. *Applied optics*, 49(17), 3259-3264.
- [16] Hillenbrand, M., Mitschunas, B., Wenzel, C., Grewe, A., Ma, X., Feßer, P., ... & Sinzinger, S. (2012). Hybrid hyperchromats for chromatic

- confocal sensor systems. *Advanced Optical Technologies*, 1(3), 187-194.
- [17] Davidovits, P., & Egger, M. D. (1971). Scanning laser microscope for biological investigations. *Applied optics*, 10(7), 1615-1619.
- [18] Chen, C., Wang, J., Liu, X., Lu, W., Zhu, H., & Jiang, X. J. (2018). Influence of sample surface height for evaluation of peak extraction algorithms in confocal microscopy. *Applied Optics*, 57(22), 6516-6526.
- [19] Hausotte, T., Gröschl, A., & Schaude, J. (2018). High-speed focal-distance-modulated fiber-coupled confocal sensor for coordinate measuring systems. *Applied Optics*, 57(14), 3907-3914.
- [20] Olsovsky, C., Shelton, R., Carrasco-Zevallos, O., Applegate, B. E., & Maitland, K. C. (2013). Chromatic confocal microscopy for multi-depth imaging of epithelial tissue. *Biomedical optics express*, 4(5), 732-740.
- [21] Leach, R. (Ed.). (2011). *Optical measurement of surface topography* (Vol. 8). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [22] Jenkins, F. A., & White, H. E. (1957). *Fundamentals of optics*. *Indian Journal of Physics*, 25, 265-266.
- [23] Sellmeier, W. (1872). Ueber die durch die Aetherschwingungen erregten Mitschwingungen der Körpertheilchen und deren Rückwirkung auf die ersteren, besonders zur Erklärung der Dispersion und ihrer Anomalien. *Annalen der Physik*, 223(12), 525-554.
- [24] Hoffmann, H. J., Jochs, W. W., & Westenberger, G. (1993, April). Use of the Sellmeier dispersion formula for optical glasses and practical implications. In *Lens and Optical Systems Design* (Vol. 1780, pp. 202-213). SPIE.
- [25] Ghosh, G. (1997). Sellmeier coefficients and dispersion of thermo-optic coefficients for some optical glasses. *Applied optics*, 36(7), 1540-1546.
- [26] Deck, L., & De Groot, P. (1994). High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry. *Applied optics*, 33(31), 7334-7338.

- [27] Jisha, C. P., Nolte, S., & Alberucci, A. (2021). Geometric phase in optics: from wavefront manipulation to waveguiding. *Laser & Photonics Reviews*, 15(10), 2100003.
- [28] Alemán-Castaneda, L. A., Piccirillo, B., Santamato, E., Marrucci, L., & Alonso, M. A. (2019). Shearing interferometry via geometric phase. *Optica*, 6(4), 396-399.
- [29] Furlan, W. D., Saavedra, G., & Monsoriu, J. A. (2007). White-light imaging with fractal zone plates. *Optics Letters*, 32(15), 2109-2111.
- [30] Mehta, P. C., Rao, K. S. S., & Hradaynath, R. (1982). Higher order aberrations in holographic lenses. *Applied Optics*, 21(24), 4553-4558.
- [31] Zhang, Y., An, H., Zhang, D., Cui, G., & Ruan, X. (2014). Diffraction theory of high numerical aperture subwavelength circular binary phase Fresnel zone plate. *Optics express*, 22(22), 27425-27436.